

地層処分環境下におけるオーバーパック材料の  
超長期試験研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2002年2月

株式会社 神戸製鋼所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ  
ください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

○ 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2002

地層処分環境下におけるオーバーパック材料の  
超長期試験研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2002年2月

株式会社 神戸製鋼所

## 地層処分環境下におけるオーバーパック材料の超長期試験研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

和田隆太郎\*、山口憲治\*、西村務\*、栗本宜孝\*、中西智明\*、竹内靖典\*  
藤原和雄\*\*、建石剛\*\*

### 要 旨

オーバーパックには長期健全性が期待されており、これまでオーバーパックの腐食挙動モデルが構築されてきた。そのモデルの妥当性、保守性を検証するために、本研究ではオーバーパック材料の数十年規模の超長期試験に関する研究を実施した。

- (1) 処分開始直後を想定した環境下でのオーバーパック候補材料である炭素鋼の腐食挙動と緩衝材中の環境を長期間モニタリング可能な試験装置の設計を行った。
- (2) 炭素鋼の長期浸漬試験を溶液交換等のメンテナンスなく実施出来る試験容器を検討し、試作した。
- (3) 今後の地層処分事業や安全規制に資する超長期試験(20年程度)を抽出した。
- (4) 超長期試験に関する記録を試験期間(20年)にわたり管理、保存する方法を調査した。

---

本報告書は、株式会社神戸製鋼所が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当課室：環境保全・研究開発センター処分研究部バリア性能研究グループ

\* 株式会社 神戸製鋼所

\*\* 株式会社 コベルコ科研

## Research on a Super-Long-Term Test of Overpack Materials in Geological Disposal Environment

(Document Prepared by other Institute, Based on the Trust Contract)

Ryutaro Wada\*, Kenji Yamaguchi\*, Tsutomu Nishimura\*,  
Yoshitaka Kurimoto\*, Tomoaki Nakanishi\*, Yasunori Takeuchi\*,  
Kazuo Fujiwara\*\*, Tsuyoshi Tateishi\*\*

### ABSTRACT

The overpack is expected to have long-term soundness, and corrosion behavior models of the overpack have been constructed.

To verify validity and maintainability of the models, this study conducted a research on a super-long-term test of overpack materials for several decades.

- (1) We designed a testing device that would allow long-term monitoring of the corrosion behavior of carbon steel, an overpack candidate material, and the condition in the buffer material in an environment corresponding to the environment immediately after disposal.
- (2) We examined and prototyped a test container that would allow long-term immersion tests of carbon steel without maintenance operations such as solution exchange.
- (3) We proposed super-long-term tests (about 20 years) that would contribute to future geological disposal projects and safety rules.
- (4) We investigated a method for managing and preserving the records of the super-long-term test for the test period (20 years).

---

This work was performed by Kobe Steel, Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

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

\* : Kobe Steel, Ltd.

\*\* : KOBELCO Research Institute, Inc.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 酸化性～還元性環境遷移期間での超長期試験の詳細検討 .....	2
3. 還元性環境での試験容器の設計および制作 .....	55
4. 超長期試験として実施すべき研究項目の検討 .....	68
5. 記録の管理、保存方法の検討 .....	87
6. おわりに .....	97
7. 参考文献 .....	98
添付資料-1 試験装置組立手順詳細	
添付資料-2 電極またはプローブの設置要領	
添付資料-3 試験装置 強度計算書	
添付資料-4 ヒーター容量計算書	

表目次

表 2.3-1 拡散による濃度比と距離の関係 .....	5
表 2.3-2 試験装置とモニタリング項目 .....	34
表 2.3-3 モニタリング項目と要領の関係 .....	35
表 3.1-1 内側試験容器に使用するふっ素樹脂：PFA の特性.....	56
表 3.1-2 長期試験用外側試験容器の材質選定 評価結果.....	58
表 3.1-3 ほうけい酸ガラスの各種特性.....	58
表 3.1-4 水素ガス発生量と試験容器の内圧上昇.....	61
表 4-1 研究項目の整理.....	69
表 4-2～18 地層処分技術開発 超長期試験計画.....	70～86
表 5-1 定期点検計画 .....	89
表 5-2 長期試験の情報管理事例調査.....	92～96

## 図目次

図 2.3-1	水との境界面からの距離と濃度費の関係 .....	5
図 2.3-2	ガラス電極の構造 .....	8
図 2.3-3	イオン濃度測定法 .....	10
図 2.3-4	pH 測定における飽和したベントナイトの影響 .....	13
図 2.3-5	熱電対の構成 .....	15
図 2.3-6	腐食電位測定構成図 .....	17
図 2.3-7	電気化学的水素透過法の原理 .....	19
図 2.3-8	透過水素測定構成図 .....	20
図 2.3-9	分極曲線の模式図 .....	22
図 2.3-10	分極抵抗法の測定模式図 .....	23
図 2.3-11	電極/溶液界面の等価回路 .....	24
図 2.3-12	印加した交流電圧に対する電流応答 .....	24
図 2.3-13	図中等価回路のインピーダンス特性－Bode 線図 .....	25
図 2.3-14	図中等価回路のインピーダンス特性－Nyquit 図 .....	26
図 2.3-15	交流インピーダンス測定のための 2 電極式セルと測定装置の例 .....	26
図 2.3-16	交流インピーダンス測定構成図 .....	27
図 2.3-17	誘電率方式の構造 .....	29
図 2.3-18	超長期試験装置 概念図 .....	38
図 2.4-1	超長期試験装置 1 計画図 (1 / 2) .....	41
図 2.4-1	超長期試験装置 1 計画図 (2 / 2) .....	42
図 2.4-2	超長期試験装置 2 計画図 (1 / 2) .....	43
図 2.4-2	超長期試験装置 2 計画図 (2 / 2) .....	44
図 2.4-3	超長期試験装置 3 計画図 (1 / 2) .....	45
図 2.4-3	超長期試験装置 3 計画図 (2 / 2) .....	46
図 2.4-4	超長期試験装置 4 計画図 .....	47



図 2.4-5 超長期試験装置 5 計画図 (1 / 2) .....	48
図 2.4-5 超長期試験装置 5 計画図 (2 / 2) .....	49
図 2.5-1 試験装置組立て要領 .....	50
図 2.5-2 試験開始要領 .....	51
図 3.1-1 炭素鋼と緩衝材を充填したカラム 概略 .....	56
図 3.1-2 長期試験容器の構成 .....	57
図 3.1-3 ガラス容器の密封方式 .....	59
図 3.1-4 溶着方式による外側試験容器概略図 .....	60
図 3.2-1 試験容器制作要領(1/3) .....	62
図 3.2-2 試験容器制作要領(2/3) .....	63
図 3.2-3 試験容器制作要領(3/3) .....	64
図 3.2-4 試験容器の密封溶着フロー .....	65
図 3.2-5 外側試験容器 蓋部溶着状況 .....	65
図 3.2-6 外側試験容器 蓋部-胴体部溶着後の状況 .....	66
図 3.2-7 外側試験容器 密封溶着後(完成品) .....	66
図 5-1 試験設備概要 .....	88

## 1. はじめに

核燃料サイクル開発機構では、地層処分研究開発の第2次取りまとめを進めてきた。

第2次取りまとめは、わが国における地層処分の技術的信頼性を示すとともに、2000年に設立された実施主体(原子力発電環境整備機構)が処分事業を進めるうえでの処分予定地の選定、安全基準の策定の技術的拠り所を与えるものであり、国の評価を経て2000年以降の研究開発を具体化するうえで重要なものと位置付けられている。

地層処分研究は数千年以上の現象を取り扱う必要のある研究であり、そのため長期的な試験評価を実施することの重要性が指摘されている。また実証性の観点からフィールド及び地下研究施設等における実規模の埋設試験が必要とされている。

カナダ(機関:AECL)、イギリス(機関:シェフィールド大学)、或いはドイツ(GfSU)では10年間以上におよぶ原位置試験を実施し、ガラスや地下坑道の長期安定性の確認を行っていることが報告されている。わが国でも模擬ガラス固化体による4年間の原位置試験等が行われているが長期試験数が不足しているのが現状である。

地層処分システムの性能評価に関わる超長期試験の概念検討(H9年度)では、わが国の地層処分システムに対応した室内及び原位置における超長期試験の概念検討を実施した。

人工バリアの一つであるオーバーパックには1000年間の長期健全性が期待されている。これまで最大数年程度の腐食試験によりオーバーパックの腐食挙動モデルが構築されてきており、今後そのモデルの妥当性、保守性をより長期の試験により確認することの必要性が指摘されている。

そこで、本研究ではオーバーパック材料の数十年規模の超長期試験に関する研究を中心に実施する。

### (1) 酸化性～還元性環境遷移期間での超長期試験の詳細検討

処分開始直後を想定した環境下でのオーバーパック候補材料である炭素鋼の腐食挙動と緩衝材中の環境を長期間モニタリング可能な試験装置の設計する。

### (2) 還元性環境での試験容器の設計および制作

炭素鋼の長期浸漬試験を溶液交換等なく実施出来る試験容器を検討し、制作する。

### (3) 超長期試験として実施すべき研究項目の検討

今後の地層処分事業や安全規制に資する超長期試験(20年程度)を抽出する。

### (4) 記録の管理、保存方法の検討

超長期試験に関する記録を試験期間(20年)にわたり管理、保存する方法を調査する。

## 2. 酸化性～還元性環境遷移期間での超長期試験の詳細検討

### 2.1 超長期試験装置の試験条件

処分開始後、オーバーパック周囲は掘削の際に地上から流入した空気中の酸素によって比較的酸化性環境がもたらされる。その後緩衝材中の鉄鉱物やオーバーパックの腐食によって地下深部本来の酸化性環境に戻ると考えられる。このような酸化性～還元性遷移に伴い、オーバーパックの腐食挙動の変化を超長期的にわたりモニタリング可能な試験装置を設計するにあたり、下記に示す試験条件を設定した。

#### (1) 緩衝材仕様

高レベル廃棄物に使用が予定されている緩衝材仕様に合わせ、けい砂 30%、Na型ベントナイト 70%の混合体とし、乾燥密度は  $1.6\text{g/cm}^3$  と選定した。緩衝材にはクミネ工業製クニゲル V1 を使用する。

#### (2) 試験金属材料

オーバーパック材料を想定し試験金属材料として炭素鋼を選定した。また、炭素鋼形状はモニタリングを考慮し設計を行った。

#### (3) 試験溶液

代表的な地下水組成として海水系が挙げられており、試験溶液として人工海水を選定した。

#### (4) 緩衝材厚さ

既存の水分拡散係数等を用いて適切な緩衝材厚さを検討し、緩衝材が溶液で飽和するまでの期間が10年程度となるよう設計を行った。

#### (5) 加熱方法

炭素鋼を最高  $100^\circ\text{C}$  まで加熱できる構造とした。また、モニタリングを考慮してヒーターの取付け方法等に注意して設計を行った。

#### (6) モニタリング項目

超長期間の腐食挙動モデルを確認するために必要と考えられるモニタリング項

目を以下のとおり設定し、これらの項目をモニタリングできるよう設計を行った。

- ・緩衝材中の酸化還元電位
- ・緩衝材中の pH
- ・緩衝材中の化学種濃度
- ・炭素鋼および緩衝材中の温度
- ・炭素鋼中の水素濃度
- ・炭素鋼の腐食深さ分布
- ・炭素鋼の平均腐食速度
- ・炭素鋼の腐食電位

#### (7) 試験期間

試験期間は 20 年とし、モニタリングのための電極、センサー等は 20 年間測定に支障が出るような劣化のないもの、または劣化しても交換可能で、交換により顕著に試験雰囲気に変化の生じない構造とした。ただし炭素鋼、緩衝材は試験期間中に交換する必要がないよう設計を行った。

#### 2.2 超長期間のモニタリング方法に関する考え方

20 年間という試験期間において、腐食挙動をモニタリングするために必要とされる測定精度を維持し続けることが必要である。

pH の測定精度は測定前に校正することにより担保されており、長期間のモニタリングにおいて校正を実施しない場合、その測定精度は疑問の残るものとなる。その他、校正が必要とされるモニタリング装置は、pH 測定、化学種濃度測定、電気伝導度測定である。

また、酸化還元電位においては、測定前に電極の状態を一定としておくこと（表面研磨）により測定精度が担保されており、長期のモニタリングにおいては電極のメンテナンスが必要である。その他、メンテナンスが必要とされるモニタリング装置は、酸化還元電位測定、pH 測定、電気伝導度測定、腐食電位測定、化学種濃度測定である。

一方、代表的な温度測定センサーである熱電対は、使用する熱電対の物性値によって温度に対する起電力は一定であり、特に校正やメンテナンスの必要はないが、

測定値の信頼性を確保するため、一般的には1年に1回程度は起電力の検定を実施されている。

以上より、pHや酸化還元電位等の校正やメンテナンスが必要なモニタリング項目については、常時モニタリングするのではなく、測定前に校正およびメンテナンスを実施し、緩衝材中に電極またはセンサーを挿入し、定期的にモニタリングするものとした。ただし、この時の挿入により顕著に試験雰囲気に変化を生じさせないよう設計および挿入要領に配慮する。

## 2.3 超長期試験装置の設計の考え方

### (1) 炭素鋼厚さ

炭素鋼厚さは腐食代10mmに必要強度厚さ20mmを加えた厚みとし30mmと設定した。必要強度厚さの設定については、添付資料-3「試験装置 強度計算書」に詳細を記載する。

### (2) 緩衝材の厚さ

2000年レポートに記載されている式より、温度80℃での水分拡散係数(Da)を下記のとおり算出した。

$$Da = 1.15 \times 10^{-9} \text{ [m}^2\text{/sec]}$$

次に、動燃技報(No.91.1994.9)に記載されている境界濃度一定の場合の拡散の式より、上記水分拡散係数を用いて水との境界面からの距離X[m]に対する濃度比C/C<sub>0</sub>の計算を行った結果を図2.3-1に示す。

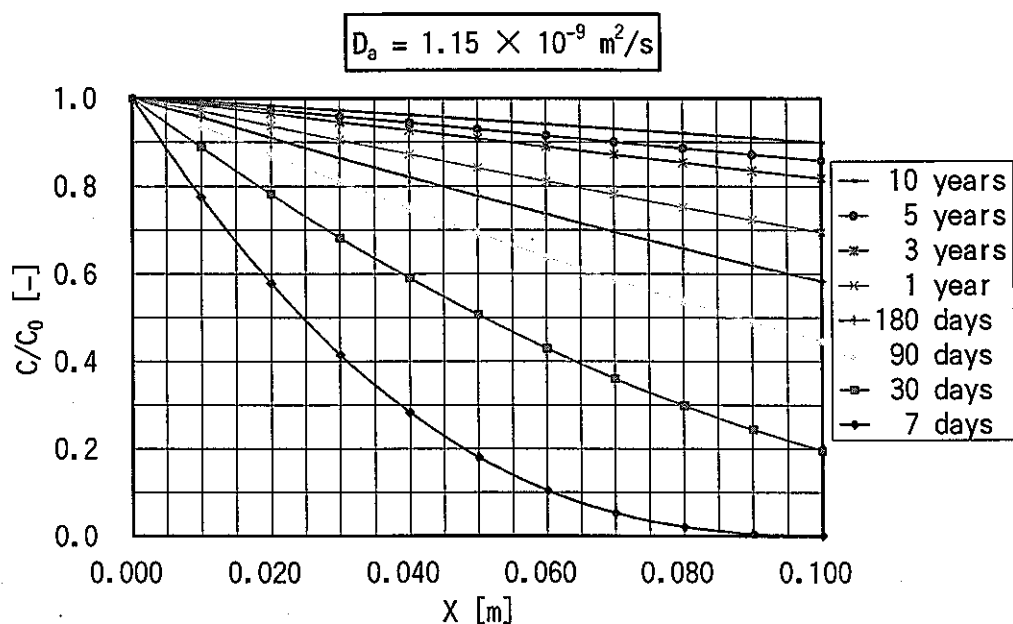


図2.3-1 水との境界面からの距離と濃度比の関係

時間とともに拡散の進む速度が落ちていくことがわかる。この計算より、拡散による10年後の濃度比と距離の関係を表2.3-1に示す。

表2.3-1 拡散による濃度比と距離の関係

濃度比	距離
99.5%	10 mm
95.0%	50 mm
90.0%	100 mm

以上の結果から、濃度比が90%以上であれば緩衝材は飽和していると考えて、緩衝材厚みを100mmと設定した。

(3) モニタリング装置の選定

超長期試験において必要と考えられるモニタリング項目の抽出と、モニタリング装置の選定を行う。

(a) 緩衝材中の酸化還元電位

(i) 測定の必要性

緩衝材中の酸化還元電位は、上部開放構造から圧縮緩衝材に酸素が侵入するかどうか、緩衝材中のパイライト：FeS 等による残留酸素の消費に関する情報を反映するほか、炭素鋼の腐食形態を判断するために重要である。

(ii) 測定原理

白金電極と参照電極を測定系内に挿入し、発生する電位をポテンショメーター、エレクトロメーターなどを用いて測定する。一般的に参照電極には銀-塩化銀電極が用いられる。参照電極を試験溶液内に直接浸漬すると塩化銀などが溶液中に溶出して溶液系を乱す事になるので、通常参照電極は試験セルの外側に配置し塩橋などで導通を取る事が多い。電位測定に際しては電極間に極めて小さな電流が流れるが、溶液の抵抗がエレクトロメーターの入力抵抗の2桁以下であれば電位は問題なく測定できるとされている。すなわち、入力抵抗が $10^{10}\Omega$ のエレクトロメーターを用いれば溶液抵抗は $10^8\Omega$ 程度まで許容され、通常如何なる溶液でも問題なく測定できる。

(iii) メンテナンスに関する検討

20年間の長期間モニターを前提とした場合、緩衝材溶存成分の析出等により白金電極表面に汚れが付着すれば正確な測定値が得られなくなると予想される。この場合、電極表面を研磨するメンテナンスが必要になる。また、塩橋のメンテナンスも必要となる。

固体電極はガラス電極と白金電極を組み合わせた構造で、緩衝材に固体電極を挿入することで酸化還元電位が測定でき、装置構成は上記白金電極法よりも単純となる。しかし、固体電極法でも白金電極を用いるために電極表面の研磨メンテナンスが必要である。さらに、ガラス電極構造のため、試験セルに固定したままでは緩衝材膨潤圧により破損することが懸念される。

白金電極法、固体電極法ともに試験セルに取りつけたまま、20年間にわたってメンテナンスフリーで酸化還元電位を連続的に測定することは測定精度的に困難で、定期的な測定で対応するべきだと考えられる。固体電極を用いればメンテナンス頻度の少ない装置構成が可能である。

(iv) 試験装置に適用する候補電極

固体電極 (ORP 電極) は、国内外の代表的な電極メーカー:thermo orion 社、

Denver Instrument 社 (以上、米国)、HANNA 社 (イタリア)、METROHM 社、METTLER-TOLEDO 社 (以上、スイス)、堀場製作所(株)、東亜電波工業(株)、旭テクノグラス(株)等から販売されており、各社製品で性能面に大差は認められない。

(v) ベントナイト中の測定に対する課題

センサーを挿入してからベントナイト間隙水が浸出し、測定するに十分な間隙水量となるまでの時間に数日を要することが想定され、この期間白金電極の表面が安定した状態を保てることが必要であり、センサーにベントナイトの膨潤圧に絶えうる機械的強度も要求される。

また、センサーの挿入時および除去時に雰囲気を乱す恐れがあるため、雰囲気を制御した環境でセンサーの挿入作業および除去作業を行うことが望ましい。

(vi) ベントナイト中の測定例

三輪ら<sup>1)</sup>はアクリル容器に炭素鋼と圧縮ベントナイト成型体を入れ、模擬地下水を自然吸水させ、その時の Eh の経時変化を測定している。測定方法としては、白金線を圧縮ベントナイト成型体に設置し 4000 時間の測定を行っており、このような長時間の測定では白金線の表面に汚れが付着する可能性が高いため注意が必要と思われる。

(b) 緩衝材中の pH

(i) 測定の必要性

緩衝材のベントナイトを透過する水の pH はモンモリロナイトのイオン交換反応、カルサイト： $\text{CaCO}_3$  の溶解によって上昇する。特に炭酸イオンの存在は炭素鋼の不働態化を促進させるため、緩衝材の pH は腐食挙動を把握するために極めて重要である。

(ii) 測定原理

pH の測定法には大別してイオン選択性電極を用いる方法と ISFET (イオン感应性電界効果型トランジスター) を用いる方法がある。

①イオン選択性電極法

水素イオンに選択性をもつ膜電極と試料溶液で化学電池をつくることにより、起電力が発生することを利用して pH の測定を行うものであり、水素イオン選択性電極の膜にはガラスやアンチモン、キンヒドロンなどがあるが、現在では特別な場



合を除いてガラス電極法が広く用いられる。

- ガラス電極：現在 pH 測定に最も広く用いられている電極である。ある種の組成を持つガラス薄膜で pH の異なる溶液を隔てると、この膜の両面に溶液の pH に比例した起電力が生じる現象を利用して pH を測定する。ガラス電極の構成は図 2.3-2 に示すようで、電池の構成は次のようになる。

内部照合電極 / 0.1M-HCL / ガラス膜 / 被検液 / 塩橋 / 外部照合電極

この電池の起電力  $E_g$  と溶液の pH の間には次の関係が成立する。

$$E_g = E_{g^0} + \alpha \times 2.3026RT / F \times \text{pH}$$

ここで、 $\alpha$  はガラスの組成、製造条件などにより異なる定数で、これが 1 であればガラス電極が水素電極と同じような挙動を取る事になるが、一般には多少 1 から偏った値となる。また、標準電位  $E_{g^0}$  も電極の製作条件、ガラスの組成などに依存する。同一の電極を使用しても日によって  $E_{g^0}$  の値が異なる事があるので、pH の測定に際しては常に標準液を用いて電極の検定を行う必要がある。

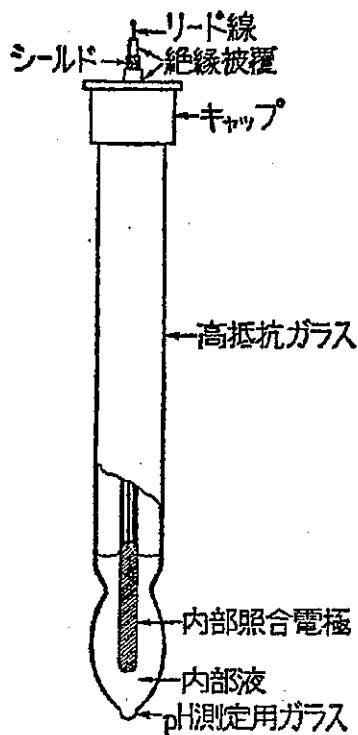
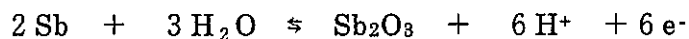


図 2.3-2 ガラス電極の構造

- アンチモン電極：空気中で鑄造した純粋なアンチモン棒を電極とする方法で電位は次の平衡に依存する。



この式から pH と起電力の関係が導かれるが実際との一致はあまりよくないとされている。そこで、ある溶液の pH を測定する場合にはそれと同一条件で適当な標準緩衝溶液を用いてアンチモン電極の検定を行う必要がある。アンチモン電極は次のように制約が多い。pH3 以下または 12 以上では使用できない。酸化剤または還元剤の存在、シュウ酸、酒石酸、クエン酸、メタ燐酸などのアンチモンと錯化合物を作るイオンの存在下では使用できない。また、溶液がアルカリ性になると溶存酸素が影響する。電極に用いるアンチモンの純度や製作条件にも影響される等の問題点がある。しかし、水素電極やキンヒドロロン電極の使用できないシアン化合物、亜硫酸塩溶液、またアルカロイド、ゼラチン、寒天の存在下でも使用でき、機械的強度もかなり大きい事から、工場における pH の連続測定や自動制御に適する場合がある。

## ② 半導体 (ISFET) 電極法

半導体表面の抵抗が表面に垂直な電界によって変化する電界効果を利用した新しいタイプの化学センサーを用いる方法である。

ISFET とは Ion Sensitive Field Effect Transistor (イオン感応性電界効果型トランジスタ) の略称であり、ISFET のゲート上のイオン感応膜 ( $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ ) に溶液が接すると、溶液のイオン活量に応じて界面電位が発生することを利用して pH の測定を行う。図 2.3-3 には従来のイオン選択性電極と ISFET による測定法の原理を比較して示している。図 2.3-3 (a) のイオン選択性電極ではイオン感応層と溶液の界面で生じる電位をイオン感応層を通して高入力抵抗の増幅器で測定する。一方、同図 (b) の ISFET では FET のゲート絶縁膜表面に特定のイオンのみに応答するイオン感応層を形成してあり、その表面と溶液の界面電位が液中の特定イオンの活量によって決まり、この界面電位の変化が電界効果による FET のドレイン電流 ( $I_d$ ) の変化として検出できる。ISFET では、絶縁物-溶液界面の電気二重層に由来する電界を直接検出する事になるため電気二重層の平衡状態を殆ど乱す事がない。また、ISFET は IC 技術で製作するため、その微細加工技術により超小型のイオンセンサーとしたり、各種のイオンセンサーを一体化したマルチイオンセンサーとしたりすることも出来るとされている。

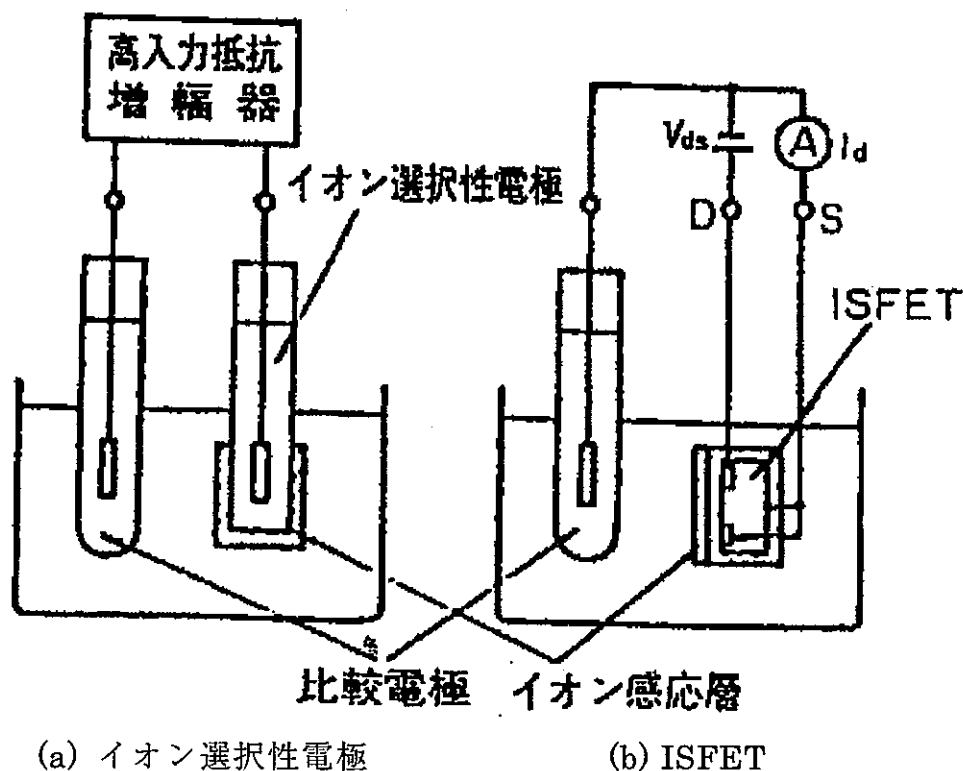


図 2.3-3 イオン濃度測定法

## (iii) メンテナンスに関する検討及び試験装置に適用する電極の選定

pH センサーには大別して、ガラス電極法、半導体 (ISFET) 電極法、金属 (アンチモン) 電極法がある。このうちガラス電極法が試験研究的にも工業的にも普及しており、電極形状が工夫されて幅広い試料状態に対して測定が可能である。フィールドでの土壌の pH 測定には突き刺し型 (ニードル型) の電極が薦められている。本研究のような湿潤緩衝材の pH 測定には、半固体試料の表面測定用フラット型電極が適していると考えられる。ガラス電極はガラス薄膜に発生する電位を pH に換算するため機械強度が弱く、本試験でガラス電極を装置に固定すると緩衝材膨潤圧を受けて破損する可能性が考えられる。また、定期的に pH 標準液による較正が必要なため、長期間の連続モニターは困難と考えられる。

半導体電極は機械強度が高く取り扱いが簡単で、突き刺し型の電極も販売されているが、メーカーによる使用温度の上限は  $60^{\circ}\text{C}$  に制限されているおり、市販品では本研究における炭素鋼加熱温度の  $80^{\circ}\text{C}$  付近での使用は困難と考えられる。また、ガラス電極と同様に定期的に pH 標準液による較正が必要なため、長期間

の連続モニターは困難と考えられる。

金属（アンチモン）電極は機械強度に優れるが、測定値のばらつき、再現性等精度が悪いため、特殊用途以外には使用されない。本研究での適用性は低いと考えられる。

以上のことから、温度条件を除けば半導体電極が適していると考えられ、80℃付近で使用できる半導体電極の開発が望まれる。

#### (iv) ベントナイト中の測定に対する課題

センサーを挿入してからベントナイト間隙水が浸出し、測定するに十分な間隙水量となるまでの時間に数日を要することが想定され、この期間センサーは事前に校正された状態を保てることが必要であり、センサーにベントナイトの膨潤圧に絶えうる機械的強度も要求される。

また、センサーの挿入時および除去時に雰囲気を乱す恐れがあるため、雰囲気を制御した環境でセンサーの挿入作業および除去作業を行うことが望ましい。

更に、土壌の pH 測定におけるサスペンション効果は次のように考えられており、ベントナイト中の pH 測定についても同様の影響があると考えられる。

土壌懸濁液の場合、溶液と土壌粒子の両者を含む不均一な系に電極を挿入することになる。測定時には懸濁液を攪拌すると pH メーターの針は不安定となる。これを避けるため懸濁液を静置すると、垂直方向に著しい粒子密度の差が生ずる。電極対（ガラス電極－カロメル比較電極）を上部の上澄部に入れ、続いて下部の沈降部まで挿入すると、pH の読みは普通高い値から低い値へと変化する。この pH 変化をサスペンション効果という。

サスペンション効果は、古くは、上澄液部の H イオン濃度に比較して沈降部 ( $R_{D,H} \gg 1$ ) の沈積物単位容当りの H イオン濃度が高いために生ずる変化として単純に説明されていた。たしかに、H イオン濃度は負荷電極表面に近づくにたがって急激に増加するが、局所的な濃度増加は常に局所的な電位の低下によってバランスされているので、平衡時における懸濁液では、すべての部位において H イオンの電気化学ポテンシャル  $\overline{G_{H^+}}$  は一定となっている。すなわち、

$$\overline{G_{H^+}} \equiv \overline{\mu_{H^+}} = \mu_{H^+} + F\psi = \text{一定}$$

である。したがって、ガラス電極は H イオンに対して可逆電極として作用し、ガラス電極の位置が上澄部あるいは沈降部のどこにあらうとも、比較電極の位置が一

定であれば一定の電位差が得られることになる。

懸濁液が平衡状態にあれば、ガラス電極の位置に関わりなく、カロメル比較電極を上澄液部から沈降部へと移動させるだけでサスペンション効果を観察することができる。カロメル電極のこういった特性は、電極内の濃厚 KCl 溶液と荷電表面をもつ沈降物中の溶液との間に生ずる拡散ポテンシャルによるものと説明されている。このことから、固体表面が負電荷をもつ場合には、一般に陽イオンの移動数が陰イオンの移動数より多い。その結果、カロメル電極を沈降部に接すると、イオンの移動数の違いによってカロメル電極の小孔部に拡散ポテンシャルが生じ、カロメル電極に対するガラス電極の電位が見かけ上高くなる効果が生ずる。カロメル電極を沈降部に挿入したときに生ずる pH の低下は、このような機構によるのである<sup>2)</sup>。

懸濁液における pH 測定では、参照電極が荷電表面をもつ沈降物の影響を受けないよう上澄液部に位置するよう挿入することが必要であるが、本試験系では高密度に圧縮されたベントナイトが飽和している状態であり、懸濁液が存在しないため参照電極が負の電荷を帯びたベントナイトの影響を受けるために正確な測定は困難と考えられる。ここで、本試験系の pH 測定における飽和したベントナイトの影響を模式的に図 2.3-4 を用いて考察する。飽和したベントナイトが負の電荷を帯びていることにより、液溶部で陽イオンと陰イオンの移動速度の差 ( $K^+$ が早く移動する) ができるため、ベントナイト中に挿入された標準電極内の KCl 溶液とベントナイトとの間に拡散ポテンシャルが生じ液溶部の界面で電位差が発生する。その結果、見かけ上標準電極の電位が低くなり、pH 電極と標準電極の電位差が大きくなるため、pH の指示値が本来の値よりも小さくなると考えられる。

従って、ベントナイト中ではなく、何らかの方法でベントナイト中の水分をサンプリングし pH 測定を実施することが考えられるが、乾燥密度  $1.6\text{g/cm}^3$  の透水係数を考慮すると水分がベントナイトから染み出してくる量は極僅かであり、これをサンプリングすることは現実的には不可能と思われる。そこで、石英ウールなどをベントナイトに接触させ、定期的に石英ウールを取り出し pH を測定といった手法の開発が必要と考える。また、この手法が可能であれば石英ウールに含まれるサンプル水を水で希釈しイオンクロマトで化学種の測定も可能となる。

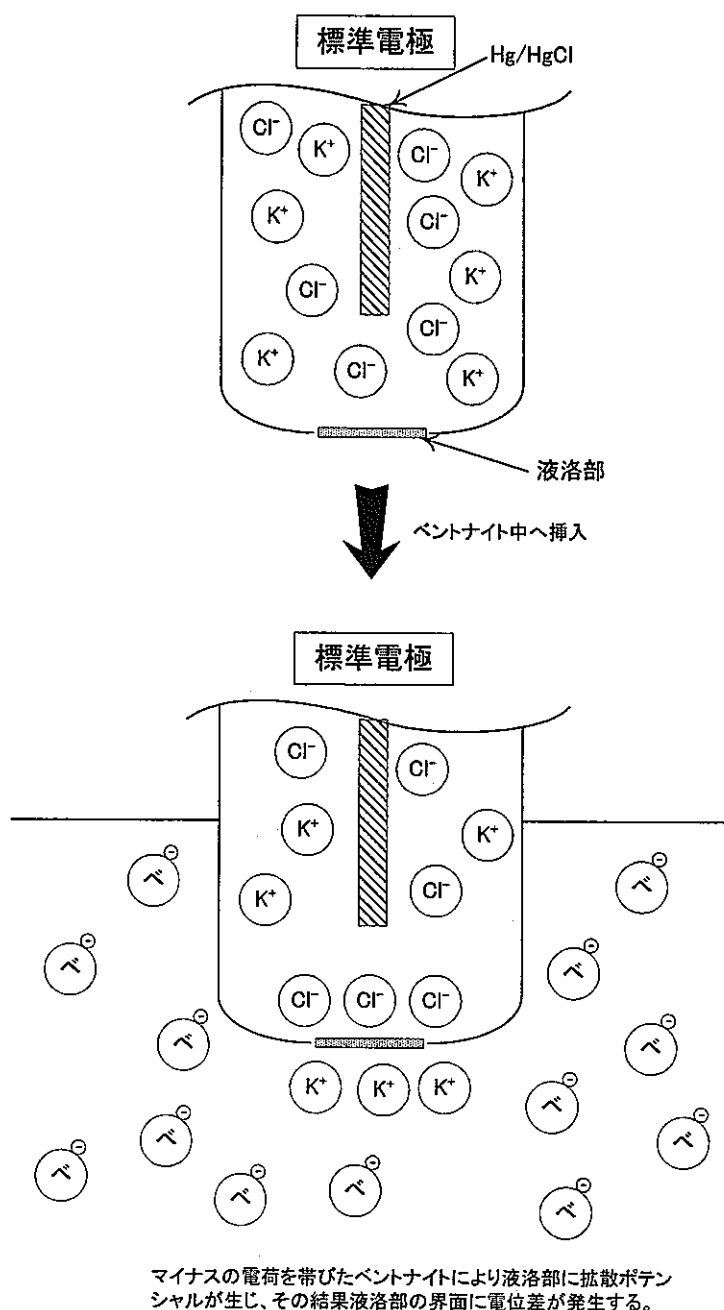


図 2.3-4 pH 測定における飽和したベントナイトの影響

(v) ベントナイト中の測定例

三輪ら<sup>1)</sup>はアクリル容器に炭素鋼と圧縮ベントナイト成型体を入れ、模擬地下水を自然吸水させて約 4500 時間放置後にベントナイト成型体をスライスし、その切断面の pH を簡易 pH 計で測定している。試験結果としては、地下水が浸透し腐食生成物が緩衝材中に拡散・吸着して移動する初期の段階では、ベントナイト自身が有する

pH 値より低下し、炭素鋼と接触する部分ではその pH は 6 付近となるとしている。  
また、スライス後の pH 測定について具体的な要領の記載はない。

(c) 緩衝材中の電気伝導度

(i) 測定の必要性

緩衝材の浸潤により溶存イオンが増加するに応じて電気伝導度が変化すると予想されるため、緩衝材が浸潤したかどうかの判断材料として電気伝導度を測定する。

(ii) 測定原理

電極を系内に挿入し電圧をかけ、そのときの電流値を測定することにより電気伝導度を得ることができる。単に電圧をかけると系内で電解が発生し組成変化を招く恐れがあるため、適当な周波数の交流で測定を行う。

(iii) メンテナンスに関する検討

一般に電気伝導度測定には、標準溶液を用いて較正を行う必要がある。また、電極表面の汚れを定期的に落とすメンテナンスの必要があるため、連続モニターでなく定期的な測定とする。

(iv) 試験装置に適用する装置の選定

thermo orion 社の Model61-75pHture Pentrode™ Probe で、電気伝導度測定が可能である。

(v) ベントナイト中の測定に対する課題

センサーを挿入してからベントナイト間隙水が浸出し、測定するに十分な間隙水量となるまでの時間に数日を要することが想定され、この期間センサーは事前に校正された状態を保てることが必要であり、センサーにベントナイトの膨潤圧に絶えうる機械的強度も要求される。

また、センサーの挿入時および除去時に雰囲気を乱す恐れがあるため、雰囲気を制御した環境でセンサーの挿入作業および除去作業を行うことが望ましい。

(d) 炭素鋼および緩衝材中の温度

(i) 測定の必要性

炭素鋼試験片や環境温度は、腐食形態、腐食速度に影響するため、温度をモニ

ターしておくことが重要である。測定方法は熱電対でモニターする。

### (ii) 測定原理

2種類の金属線の両端を電氣的に接続して、下図に示す閉回路を作り、その両端に温度差を与えると、その温度差に応じた電流が閉回路に流れる。この現象をゼーベック効果と呼び、熱電対の測定原理となっている。この発生する電流を熱起電力と呼び、熱起電力の大きさは、夫々の金属線の材質が均質であれば金属線の種類と両端の温度差だけで決まる。金属線の長さや太さの違い、それに両端部以外に与えられる温度は関係しないので、一端の温度を既知の一定温度(原則として0℃)に保った状態で熱起電力の大きさを測定すると、もう一端の温度が分る。

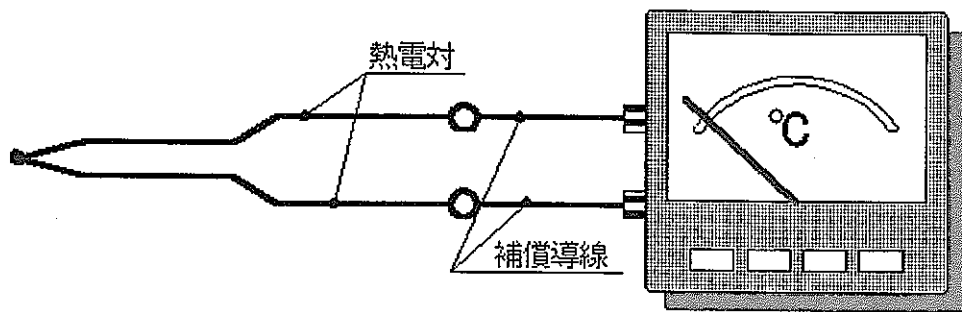


図 2.3-5 熱電対の構成

### (iii) メンテナンスに関する検討

熱電対のメンテナンスは特に不要で、センサー寿命的にも、測定精度的にも長期間の連続モニターが可能と考えられる。

### (iv) 試験装置に適用する装置の選定

測定する温度範囲が常温～100℃程度であることから、一般的に使用されているK型熱電対を使用するものとした。ただし、20年間のモニタリング期間を考慮して、交換が容易にできるよう保護管付きとした。保護管の材質は試験装置材質と同じとして、テフロンコーティングを施したチタン合金とする。

### (v) ベントナイト中の測定に対する課題

ベントナイトの膨潤圧に絶えうる機械的強度が必要であるが、保護管付きとすることにより対応可能である。

また、センサーの挿入時および除去時に雰囲気を乱す恐れがあるため、雰囲気を制御した環境でセンサーの挿入作業および除去作業を行うことが望ましいが、セン



サーの寿命は数年単位であり交換に関する影響はそれほど大きくないと思われる。

(e) 炭素鋼の腐食電位

(i) 測定の必要性

緩衝材を浸潤してきた試験溶液が炭素鋼に到達するとともに腐食現象が始まり、腐食電位が発生する。この腐食電位の変化は炭素鋼腐食形態、腐食速度の変化を反映するため、重要なデータである。

(ii) 測定原理

電極電位  $E$  とその電極における反応による自由エネルギーの減少  $\Delta G$  との間に

$-\Delta G = nEF$  の関係が成り立つためには、この電池が可逆的でなければならないが、電池の両極間に電流が生じればそれによって発熱その他の種々の作用が起こって反応は可逆的でなくなるため、 $E$  の測定は電流を流さないよう行わなければならない。これは、補償法を用いた電位差計を用いればよい。また、測定された  $E$  は目的の電極反応だけによるものであって、他の原因によるものが入ってきてはいけない。

ここで、電位差計とは電位差を抵抗線の長さに変換した電源部に、これと極性を逆にした測定部の起電力を組み合わせる両者の大きさが等しければ検流計が振れなくなることを利用した零位法 (null method) をいう。

(iii) ベントナイト中の測定に対する課題

炭素鋼と照合電極間の液抵抗が大きくなると予想されるため、液抵抗補正が必要になる。

照合電極をベントナイト中に埋め込むと、超長期の試験期間中でのメンテナンス性が悪く、またベントナイト膨潤圧での破壊が懸念される。この場合、塩橋を用いて照合電極をベントナイトセル外部に設置する。なお、この場合でも液抵抗補正が必要である。

(iv) 測定システムの構成図

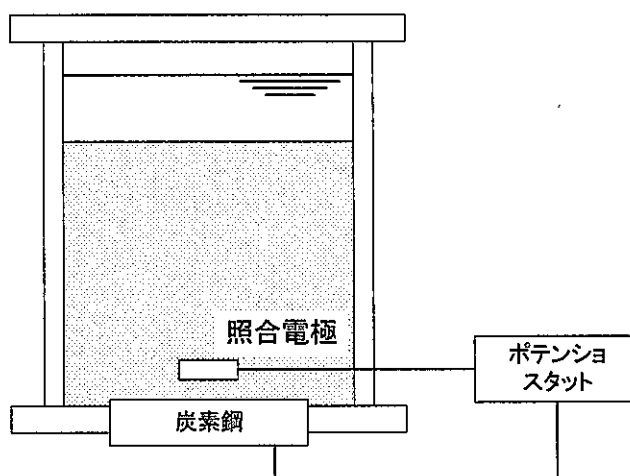


図 2.3-6 腐食電位測定構成図

(f) 緩衝材中の化学種濃度

(i) 測定の必要性

緩衝材が湿潤するとともに、緩衝材成分の電離が始まる。このイオン濃度を、イオン選択電極で定量できる。

各イオン種に対応するイオン選択電極が販売されているが、測定対象イオンとしてはナトリウム、カルシウム、塩化物イオンが挙げられる。いずれも、標準濃度溶液で較正が必要であるため、定期的な測定となる。

(ii) 測定原理

pH 測定と原理は同様であり、ナトリウム、カルシウムおよび塩化物のそれぞれに選択的に応答するイオン選択性膜を用いた電極（イオン電極）を用いることにより、試料溶液と電極間に起電力が発生することを利用して化学種濃度の測定を行う。イオン選択性膜は液体膜と固体膜に大別され、液体膜はイオン感应物質を高分子等の担体に保持させたものであり、固体膜はハロゲン化銀等の難溶性塩膜と pH 電極と同様のガラス膜がある。ハロゲン化銀等の難溶性塩膜を用いて測定できる化学種としては、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$ 、 $\text{CN}^-$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ag}^+$ 、 $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{F}^-$ 等がある。

(iii) 試験装置に適用する電極の選定

各電極メーカーからこれらのイオン選択電極が販売されており、仕様・検出感度に大差は認められないようである。一般に、カルシウム電極は使用温度の上限

が 40℃～50℃程度であるため、炭素鋼試験片の近傍での濃度測定は困難と考えられる。一例として、thermo orion 社の各種イオン選択電極の測定濃度範囲、温度範囲を以下にまとめた。

- ① ナトリウムイオン電極：0.02ppm～飽和濃度，0～100℃
- ② カルシウムイオン電極：0.02～40,100ppm，0～40℃
- ③ 塩化物イオン電極：1.8～35,500ppm，0～80℃

(iv) ベントナイト中の測定に対する課題

センサーを挿入してからベントナイト間隙水が浸出し、測定するに十分な間隙水量となるまでの時間に数日を要することが想定され、この期間センサーは事前に校正された状態を保てることが必要であり、センサーにベントナイトの膨潤圧に絶えうる機械的強度も要求される。

塩化銀等の難溶性塩を用いた電極では微量の塩化銀の溶出があり、長期間電極を挿入した状態で測定を行うとイオンの拡散が非常に遅いベントナイト中では溶出イオンによる誤差を生じる可能性がある。また、市販品の電極では比較電極がガラス製であり膨潤圧に耐えられないため、市販品をそのまま適用することは困難である。

センサーの挿入時および除去時に雰囲気を乱す恐れがあるため、雰囲気を制御した環境でセンサーの挿入作業および除去作業を行うことが望ましい。

(g) 炭素鋼の水素透過

(i) 測定の必要性

緩衝材共存下での炭素鋼腐食はごく初期には残留する酸素消費型で進展するが、残留酸素の消費とともに水素発生型の腐食に変化する。本試験ではこの水素発生型の腐食状況を電気化学的水素透過法による炭素鋼透過水素量でモニターする。

(ii) 測定原理

電気化学的水素透過法の原理を下図に示す。カソード分極によって鋼板の一つの面から水素を供給する。そして、他方の面を、鋼中を透過してきた水素をイオン化する ( $H \rightarrow H + e^-$ ) に十分なアノード電位に保持すると、アノード電位面での水素イオン化電流は、鋼中の水素透過速度に対応することになる。供給水素量を急激に増減すると、アノード面で非定常状態の透過電流の経時変化曲線が得られ、その曲線

と Fick の第 2 法則からあらかじめ計算した理論曲線との比較から、鋼中の水素の拡散係数  $D$  を精度高く求めることができる。定常状態での水素透過電流 ( $J_{\infty}$ ) は次式で表される。

$$C_0 = kJ_{\infty}L / (FDS)$$

ここで、 $C_0$ ：鋼表面から浸入する水素量、 $L$ ：鋼の厚さ、 $F$ ：ファラデー定数、 $S$ ：面積、 $k$ ：鋼の密度に関する定数である。

あらかじめ求めておいた  $D$  と  $J_{\infty}$  の値から、上式を用いて  $C_0$ 、すなわち浸入側表面の水素濃度を得ることができる。<sup>3)</sup>

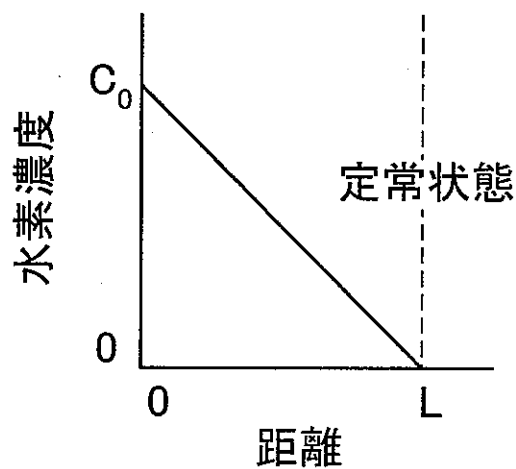
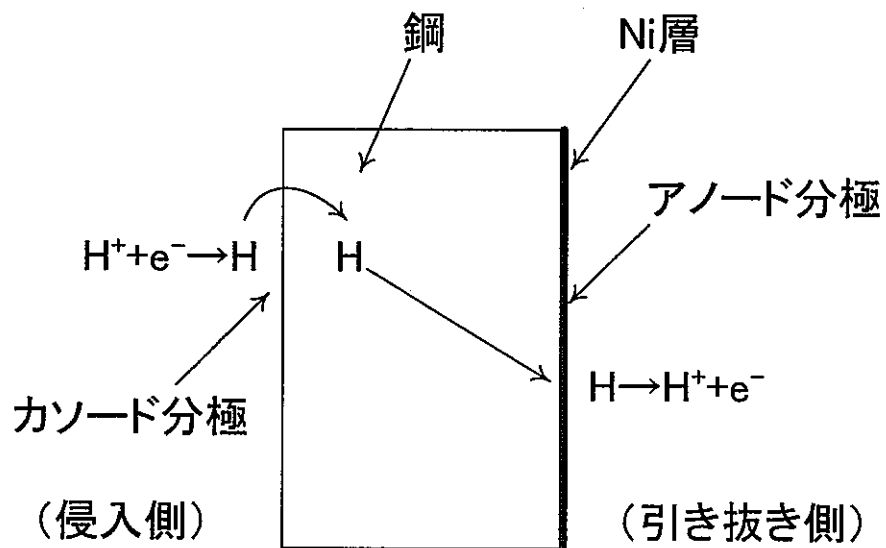


図 2.3-7 電気化学的水素透過法の原理

試験方法は炭素鋼試験片に、試験溶液を 1N 水酸化ナトリウム溶液とした電気化学セルを取付け、水素をイオン化するのに十分なアノード電位に炭素鋼に保持して、測定される水素イオン化電流（水素透過電流）量を水素濃度に換算する。

この方法では水素検出面での炭素鋼の溶解を抑制し、かつ検出感度を高めるため Ni めっきを行う必要があるため、他の試験装置とは独立した専用装置が必要となる。

試験装置的には、汎用の電気化学試験用のポテンシostatで測定が可能である。

### (iii) ペントナイト中の測定に対する課題

水素透過セルは試験装置の構造上、炭素鋼の底面に設置することになるが、ここには加熱用ヒーターが設置されるため、セルをコンパクトに設計する必要がある。また、一般的にセルには水酸化ナトリウム溶液を用いるが、試験温度が 100℃ 近い条件では炭素鋼と溶液間に気泡が発生し測定に支障が生じることが考えられる。数百度の条件では熔融塩を用いたセルが提案されているが、逆に本試験においては熔融塩を用いるには温度が低すぎ適応が困難である。温度条件が異なると水素発生量も異なるため、80～100℃ 程度の条件に適用可能なセルの検討が必要である。

### (iv) 測定システムの構成図

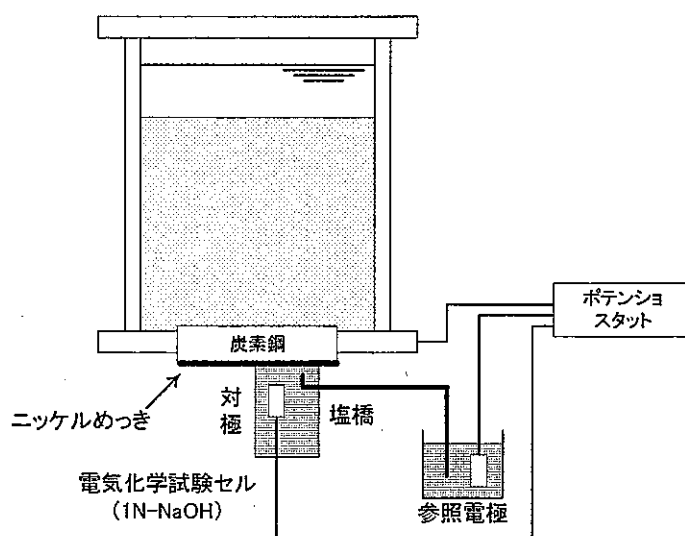


図 2.3-8 透過水素測定構成図

## (h) 炭素鋼の平均腐食速度

## (i) 測定の必要性

本検討では腐食挙動モデルを確認することが目的であり、炭素鋼の平均腐食速度をモニタリングすることは極めて重要である。

## (ii) 測定原理

炭素鋼の平均腐食速度は、分極抵抗法、交流インピーダンス法の電気化学試験法で評価する。

## ① 分極抵抗法

分極抵抗法は、腐食系を乱さない程度に微小分極したときの抵抗（分極抵抗）を、電位－電流変動を測定することにより求め、腐食速度を推定する方法である。その原理は以下の通りである。

腐食反応が電荷移動律速の場合（金属/水溶液界面での電荷移動速度が反応物や生成物の拡散速度に比較して遅い場合）、分極電位  $E$  における内部アノード電流  $i_a$  および内部カソード電流  $i_c$  は(1)式および(2)式で表される。

$$i_a = i_{\text{corr}} \left[ \exp \left\{ \alpha_a F (E - E_{\text{corr}}) / RT \right\} \right] \quad (1)$$

$$i_c = -i_{\text{corr}} \left[ \exp \left\{ -\alpha_c F (E - E_{\text{corr}}) / RT \right\} \right] \quad (2)$$

$i_{\text{corr}}$  : 腐食電流       $E_{\text{corr}}$  : 腐食電位

$F$  : ファラデー定数     $R$  : 気体定数     $T$  : 絶対温度

$\alpha_a, \alpha_c$  : アノード反応およびカソード反応の移動係数

したがって、分極時に測定される電流  $i$  と電位  $E$  の関係は、(3)式で与えられる。

$$\begin{aligned} i &= i_a + i_c \\ &= i_{\text{corr}} \left[ \exp \left\{ \alpha_a F (E - E_{\text{corr}}) / RT \right\} \right] - i_{\text{corr}} \left[ \exp \left\{ -\alpha_c F (E - E_{\text{corr}}) / RT \right\} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

上記分極曲線の模式図を図 2.3-9 に示す。

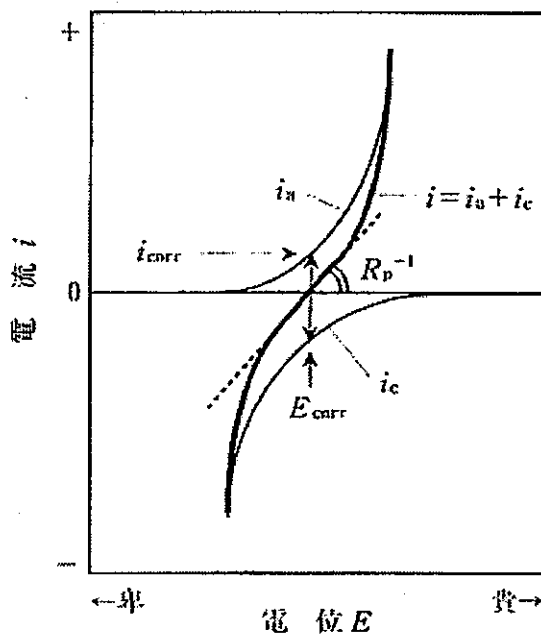


図 2.3-9 分極曲線の模式図

自然浸漬状態にある金属に微小電圧  $\Delta E$  を印加した場合における電流変化  $\Delta i$  は、あまり大きくない範囲では(3)式の指数項を展開し高次項を無視することにより(4)式が得られる。

$$\Delta i = i_{\text{corr}}(\alpha_a F/RT - \alpha_c F/RT) \Delta E \quad (4)$$

(4)式において  $\alpha_a$ 、 $\alpha_c$  は電極反応固有の係数であり、温度が決まれば定数となり、(4)式は一次関数となる。すなわち、腐食電位近傍の電位-電流曲線は直線関係にあることを示唆している。この直線の勾配  $R_p (= \Delta E / \Delta i)$  を分極抵抗と呼ぶ (図 2.3-9 参照)。

ここで  $k = RT / (\alpha_a - \alpha_c) F$  (定数) とおくと、 $i_{\text{corr}}$  と  $R_p$  の関係は次式のようにになる。

$$i_{\text{corr}} = k / R_p \quad (5)$$

(5)式は、Stern-Geary の式<sup>4)</sup>と呼ばれ、腐食電流と分極抵抗の逆数が比例関係にあることを意味する。 $k$  の値は別途測定した分極曲線のターフェル勾配より計算した  $i_{\text{corr}}$  あるいは重量減少量より求めた  $i_{\text{corr}}$  と測定した分極抵抗値より(5)式か

ら求まる。

測定方法としては、試料電極、対極、照合電極を用いた3電極法、照合電極を用いない2電極法があり、これらの測定模式図を図2.3-10に示す。3電極法は2電極法と比較し溶液抵抗の影響が少なく、特に抵抗の大きな溶液中では3電極法の精度が良い。

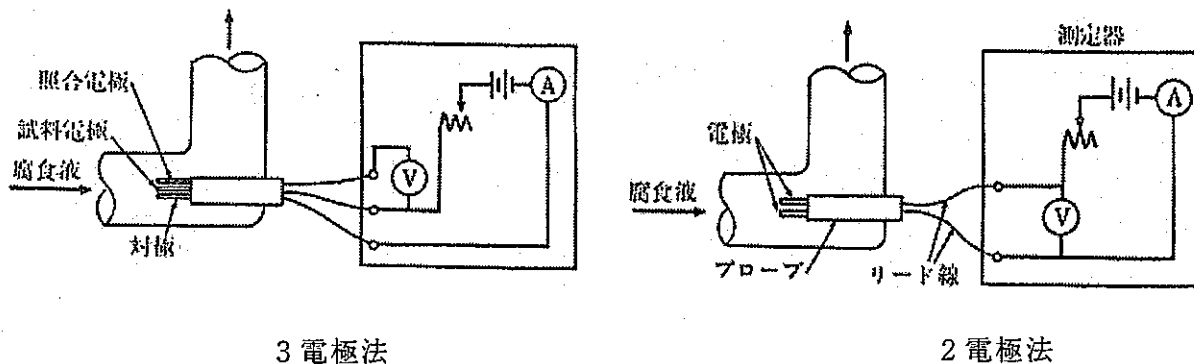


図 2.3-10 分極抵抗法の測定模式図

② 交流インピーダンス法

交流インピーダンス法による材料の腐食速度の推定方法は以下の通りである。試料電極/水溶液界面は、抵抗、コンデンサー、コイル等の電気回路素子の組合せ（等価回路）により表すことができる。

交流インピーダンス法による解析では、基本的には、試料電極/水溶液界面およびそこで起こる現象をすべて電気的回路に置き換えて考える。最も単純な腐食系の等価回路は分極抵抗  $R_p$  と電気二重層容量  $C_{dl}$  の並列回路に溶液抵抗  $R_s$  が直列に結合した回路（図2.3-11）により表される。

図2.3-11の等価回路により表される試料電極/水溶液界面に微小振幅（通常 $\leq 10\text{mV}$ ）の正弦波交流電圧（図2.3-12）が印加されたとき、界面にはコンデンサー（電気二重層）が存在するため、印加した電圧の周波数により異なる振幅および位相差（印加電圧と応答電流の位相の差、図2.3-12参照）をもつ電流応答が得られる。交流インピーダンス法では、測定系に種々の周波数の交流電圧を与えたときのインピーダンスの絶対値  $|Z|$  ( $= \Delta V / \Delta i$ ) と位相差  $\theta$  を測定する。図2.3-11の等価回路のインピーダンス  $Z$  は(6)式で与えられる。

$$Z = R_s + R_p / (1 + j \omega R_p C_{dl}) \quad (6)$$

ここで、 $\omega$  は角周波数 ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$ : 周波数) である。



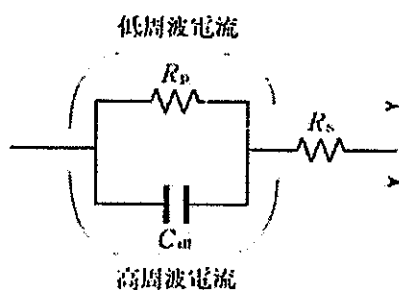


図 2.3-11 電極/溶液界面の等価回路

$R_p$  : 分極抵抗,  $R_s$  : 溶液抵抗,  $C_{dl}$  : 電気二重層容量

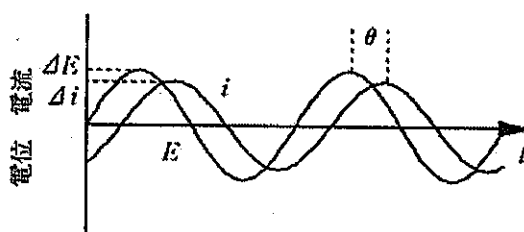


図 2.3-12 印加した交流電圧に対する電流応答

$\Delta E$  : 印加電圧の振幅,  $\Delta I$  : 応答電流の振幅,  $\theta$  : 位相差

高周波数 ( $\omega \rightarrow \infty$ ) では、コンデンサーのインピーダンスは  $1/\omega C_{dl} \rightarrow 0$  となることから電流は  $C_{dl}$  と  $R_s$  を通して流れ (図 2.3-11 参照)、結果として溶液抵抗  $R_s$  が測定される。一方、低周波数 ( $\omega \rightarrow 0$ ) ではコンデンサーのインピーダンスが無窮大となるため電流は  $R_p$  と  $R_s$  を通して流れ、 $(R_p + R_s)$  が測定される。したがって、低周波数のインピーダンスと高周波数のインピーダンスの差から分極抵抗  $R_p$  を求めることができる。 $R_p$  は定常分極曲線における電流-電位曲線の微小過電圧領域 ( $\leq 10\text{mV}$ ) における傾きに相当することから、交流インピーダンス法においては、 $\omega \rightarrow 0$  のときのインピーダンスとして定義することができる。直流分極法である分極抵抗法と異なる点は溶液抵抗を補正することができることである。交流インピーダンス法による  $R_p$  の測定は、特に、高溶液抵抗の環境で有効である。

インピーダンスの表示法としては、Bode 線図と Nyquist 図が用いられていることが多い。前者はインピーダンスの絶対値  $|Z|$  と位相差  $\theta$  を周波数の関数として表示するもので、後者はインピーダンスの複素平面表示で Cole-Cole プロットとも呼ばれる。次に図 2.3-11 の等価回路を例にとり、その Bode 線図および Nyquist

図の計算例を示す。

$R_p=1\text{k}\Omega$ 、 $R_s=10\Omega$ 、 $C_{d1}=10\mu\text{F}$  のときのインピーダンス計算結果を Bode 線図表示したのが図 2.3-13 である。前述したように、高周波数領域から  $R_s$ 、低周波数領域から  $R_p$  (正確には  $R_p+R_s$  であるが、この場合  $R_p$ )  $R_s$  であるため、 $R_s$  を無視できる) が得られることがわかる。図 2.3-14 は  $R_p=1\text{k}\Omega$ 、 $R_s=100\Omega$ 、 $C_{d1}=10\mu\text{F}$  のときの Nyquist 図である。これは、(6)式を実数部  $\text{Re}[Z]$  と虚数部  $\text{Im}[Z]$  に分け、各周波数でのそれぞれの値を計算しプロットしたものである。このように一つの時定数 ( $C_{d1}R_p$ ) に対して一つの半円が描ける。高周波で  $R_s$ 、低周波で ( $R_p+R_s$ ) となり、半円の半径から  $R_p$  を、また半円の頂点の周波数  $\omega (= 1/R_p C_{d1})$  から  $C_{d1}$  を決定できる。

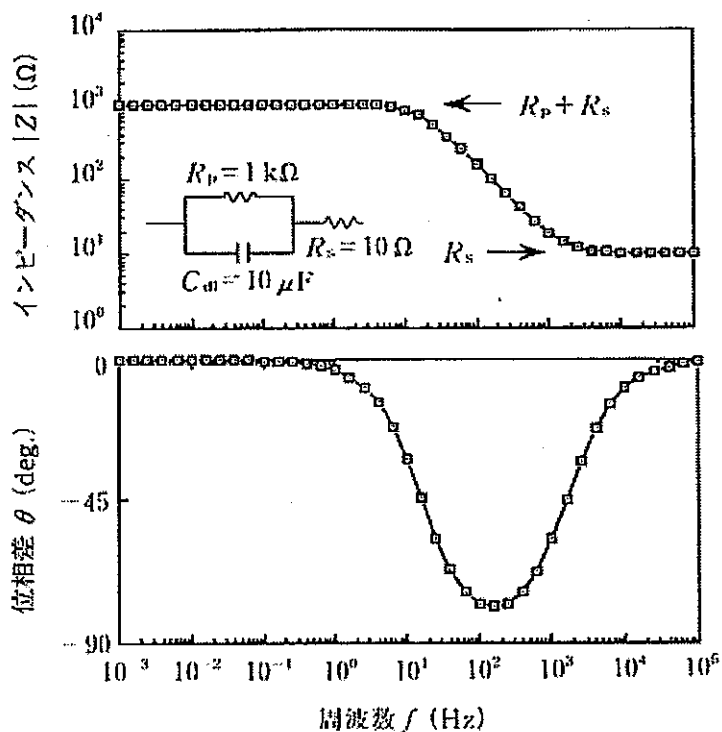


図 2.3-13 図中等価回路のインピーダンス特性—Bode 線図

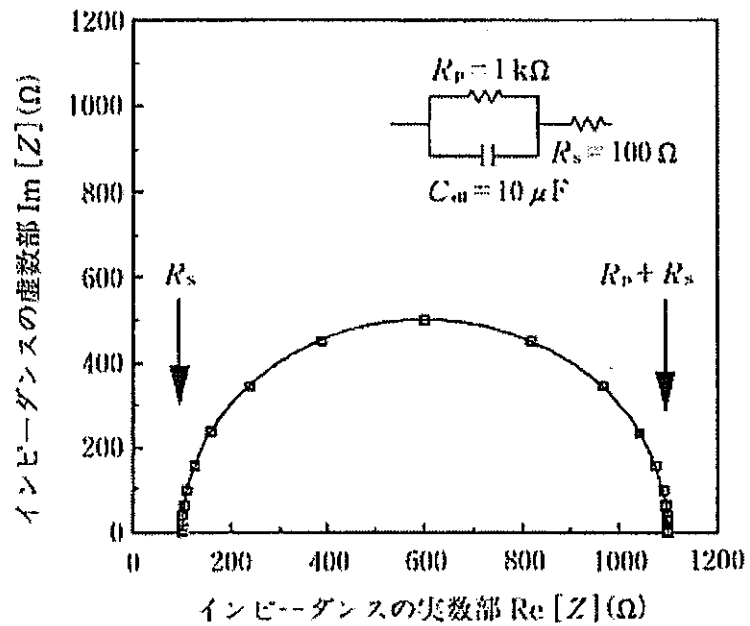


図 2.3-14 図中等価回路のインピーダンス特性-Nyquit 図

腐食系のインピーダンス測定において、印過電圧の振幅は 10mV 程度、周波数範囲は数十 kHz~10mHz 程度が用いられる。測定方式は、直流法と同様に 3 電極法と 2 電極法がある。図 2.3-15 に測定装置構成の一例を示す。

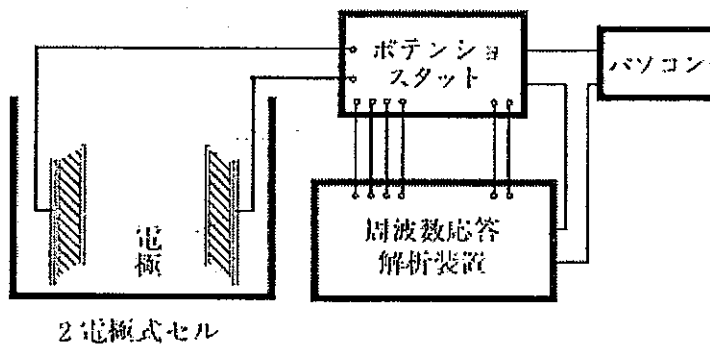


図 2.3-15 交流インピーダンス測定のための 2 電極式セルと測定装置の例

(iii) メンテナンスに関する検討

装置構成としては炭素鋼試験片 (試料極)、塩橋、照合電極の他、対極として緩衝材中に白金電極を位置させる必要があるため、平均腐食速度評価専用試験装置を独立させるべきであると考えられる。また、対極表面が塩の析出等で汚れ

ると正確な測定が困難になるため、定期的に表面研磨のメンテナンスが必要となる。したがって定期的に測定する。

(iv) ベントナイト中の測定に対する課題

直流電流を用いる分極抵抗法においては、全分極電圧の中に必ず分極電流によるIRドロップが入ってくるため、溶液抵抗が大きくなると予想されるベントナイト中の測定では誤差が大きくなり、液抵抗補正が必要になる。特に、2極法においては溶液抵抗の影響が大きい。

一方、交流電流を用いる交流インピーダンス法においては、液抵抗成分を高周波数側のインピーダンスから分離できるので、液抵抗補正は必要とされない。

(v) 測定システムの概念図

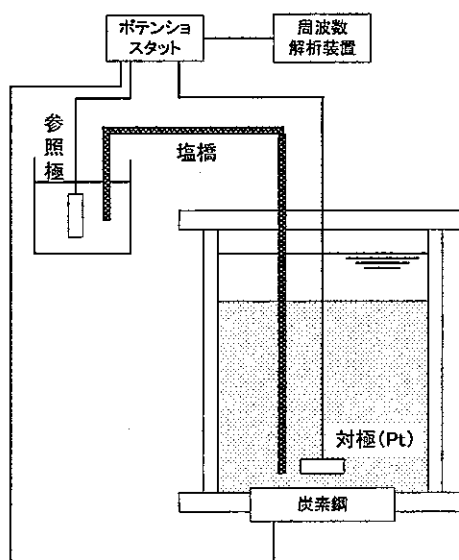


図 2.3-16 交流インピーダンス測定構成図

(vi) ベントナイト中の測定例

谷口ら<sup>5)</sup>は、定電流保時で腐食を加速して模擬腐食生成物を形成し、交流インピーダンス法により腐食速度を評価している。不動態化する pH 条件、日本国内における地下水条件から腐食形態は全面腐食と考察し、圧縮ベントナイト中の炭素鋼の平均腐食速度も求めている。

また、戸部ら<sup>6)</sup>は、ベントナイト粉末と溶液を混合したペーストにおいては分極曲線の測定およびインピーダンス測定を、圧縮ベントナイトにおいてはインピーダン

ス測定を実施している。圧縮ベントナイトにおけるインピーダンス測定では、チタン製セルおよびテフロン製セルで試験を実施しており、試験結果が異なっていることから、チタン製セルのインピーダンス特性が与える誤差について検討が必要としている。

(i) 緩衝材の膨潤圧

(i) 測定の必要性

超長期間の腐食挙動をモニタリングするうえで、緩衝材が飽和しているかを確認することは重要である。そこで、緩衝材の膨潤圧をモニタリングし、膨潤圧が一定となることにより緩衝材の飽和を確認する。膨潤圧の測定にはロードセルを使用し、連続的に膨潤圧の経時変化をモニタリングする。

(ii) 試験装置に適用する装置の選定

測定には一般的に緩衝材の圧密試験等に用いられているロードセルを適用し、定格容量は緩衝材の膨潤圧と形状から 50kN と設定した。

(j) 緩衝材中の水分率

(i) 測定の必要性

超長期間の腐食挙動をモニタリングするうえで、緩衝材中にどの程度溶液が浸潤しているかを確認することは重要である。そのため、緩衝材中の水分量を測定し腐食挙動との対応を確認する。

(ii) 測定原理

緩衝材の浸潤状況を直接的にモニターするため、土壤水分センサーで緩衝材中の水分量を測定する。測定方式としては、熱伝導率方式、誘電率方式、TDR (Time Domain Refractometry) 方式、RI 方式等がある。

① 熱伝導率方式

熱伝導率が土壤水分によって影響を受けることを使用した方式である。センサーのセラミック部の中心に埋め込まれたステンレスチューブの中に熱電対とヒーターが埋め込まれており、ヒーターを発熱させてその熱拡散状況を熱電対で計測することにより水分率を測定する。

② 誘電率方式

構造を下図で説明する。2つの電極板の内の試料により、その間の電圧が変化し、その変化を水分量として見ており、誘電率の水分計は必ず2つの電極と発振器を有している。

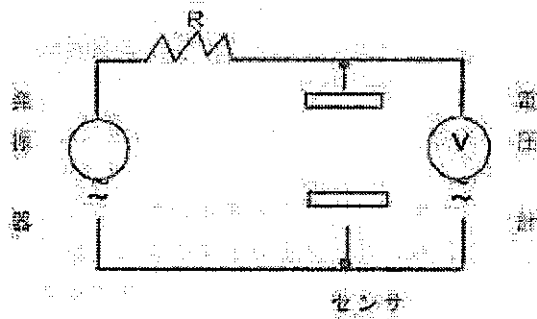


図 2.3-17 誘電率方式の構造

2つの電極板はいわゆるコンデンサーとして働き、直流電源ではその容量を（交流的抵抗）を測定できないため、電源は交流（発振器）を使用する。容量（C）は電極板の面積（S）に比例し、距離（d）に反比例するので真空中または空気中での容量は下式で表せる。

$$C = \frac{\epsilon_0}{d} \cdot S$$

ここで発生する  $\epsilon_0$  は真空中にしても空気中にしても一定の定数である。

電極間に試料を入れた時の容量は下式で表せる。

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{d} \cdot S$$

ここで発生する  $\epsilon_s$  は試料の固有の定数でそれを誘電率としている。

比誘電率  $\epsilon_s / \epsilon_0$  は 水の場合 : 約 80 20℃

ボール紙 : 3.2

ゴム : 2.4

ここで C の容量変化（電圧・変化）を見ることで水分の量を測定できる。ただし、この測定は試料自体の誘電率、試料の重量があるので相対的なものになる。

### ③ TDR (Time Domain Reflectometry) 方式

TDR デバイスで発生された高速立上がりパルスは、伝送ラインとして動作するプローブへ進行し、ロッドの先端で反射され同じ経路を通過して戻り、移動距離を  $2L$  とすると、伝送時間( $t$ )を測定することにより電磁波の速度( $C$ )を求めることができる。

$$C = \frac{2L}{t}$$

土壌や他の物質にとって水分量と誘電率の間には固有の相関関係があり、電磁波が物質中を進行する速度( $C$ )は次式のように誘電率( $\epsilon$ )に依存していることから、水分量を求めることができる。

### ④ RI 方式

水分測定には中性子線を使用する。線源から放出されるエネルギーの高い高速中性子は水分を形成する水素元素との衝突により熱中性子となるが、土中の線源から検出部に減速されず高速中性子のままで到達するものもあり、この量は水素密度に関係し、この関係を利用して水分測定を行う。

#### (iii) 試験装置に適用する装置の選定

このうち、熱伝導率式、誘電率式はメンテナンスも特に必要とせず、本試験で想定される緩衝材の水分率 20%での測定が可能であるため、本研究での適用性が高い。

その他、TDR 方式は、推薦される土壌の粘土成分が 30%以下の制限があり、センサーも 30cm の大きさとなるため、本研究での適用性は低いと考えられる。また、RI 式はフィールドでの測定に用いられ、含水量、湿潤密度、含水比、間隙比が測定できるが、測定範囲が本研究での試験装置に対して大きい。一例として、ソイルアンドロック社の挿入型 RI 水分計では測定範囲の約  $30 \times 60\text{cm } \phi$  である。

#### (iv) ベントナイト中の測定に対する課題

いずれの方式においても、試験開始当初はベントナイト中の水分は少ないため、どこまで浸潤しているかを把握するためには、測定下限を把握しておく必要がある。

RI 方式を除く熱伝導率方式、誘電率方式、TDR 方式はベントナイト中にセンサーを挿入するため、膨潤圧に耐えうる機械的強度が必要である。

RI 方式は試験カラムを通して水分測定を行うため、カラムの影響により測定感度

が低下する可能性があるが、中性子線を用いており 15mm 程度の厚さであればそれほど問題にならないと思われる。

(v) ベントナイト中の測定例

粘土中の水分量（含水比）は、水分計（熱電対サイクロメータ）および湿度計を用いて測定されるが、これらの出力はそれぞれ水分ポテンシャルと温度、相対湿度と温度であり、含水比を直接測定できない。そこで、千々松ら<sup>7)</sup>は室内試験によりこれらの出力値と含水比との関係式を算出している。

(k) 炭素鋼の腐食深さ

(i) 測定の必要性

本検討では腐食挙動モデルを確認することが目的であり、炭素鋼の腐食深さをモニタリングすることは極めて重要である。

(ii) 測定原理

炭素鋼の厚さを試験装置の外部より非破壊で測定できれば、試験系を乱すことなく経時的に腐食深さのデータを取得できる。非破壊での厚さ測定方法としては、X線、 $\gamma$ 線、超音波を用いたものがある。

① 超音波厚さ計

音のはね返ってくる時間（超音波パルスが往復する時間）を精密に測り、測定対象物の音速を演算して厚さを測定する。

② X線厚さ計および $\gamma$ 線厚さ計

厚さ計は、放射線が物質を透過する際、吸収・散乱で減衰する性質を利用し、被測定体の厚さを非接触で測定する装置であり、使用される線源核種は、その目的や用途によって異なるが、一般的に金属製品を測定する厚さ計には<sup>137</sup>Cs、または<sup>241</sup>Amのような透過力の強い $\gamma$ 線源が用いられ、検出器には電離箱、もしくはプラスチックシンチレータを用いる。紙・プラスチック等の測定には、<sup>85</sup>Krまたは<sup>147</sup>Pmのような弱いエネルギーの $\beta$ 線源が用いられ、検出器には電離箱を用いる。また、ゴムや比較的厚いプラスチックシートの測定には、<sup>90</sup>Srのような高いエネルギーの $\beta$ 線源が利用されている。

(iii) 試験装置に適用する装置の選定

X線、 $\gamma$ 線による厚さ分析は透過方式で、本試験での容器底部の炭素鋼試験片



の厚さ評価に適用できない。

一方、超音波厚さ計の測定精度は  $1.0\mu\text{m}$  であり、腐食深さに適用できる可能性はあるが、音波は温度の影響を大きく受け  $1^\circ\text{C}$  の温度変化で測定値が  $0.3\%$  変化してしまう。炭素鋼の必要強度厚さは  $20\text{mm}$  であり、 $1^\circ\text{C}$  の温度変化によって  $60\mu\text{m}$  測定値が変化するため、還元環境における腐食量を考慮すると超音波厚さ計を適用することは困難と思われる。

今回のように腐食量が小さい場合、上述のように腐食深さを非破壊で高精度に測定することは困難となる可能性が高く、そのため炭素鋼を試験装置から取出し重量法(腐食減量法)で測定する方法を中心に検討する。

#### (iv) ベントナイト中の測定に対する課題

X線、 $\gamma$ 線および超音波を用いる方式はどちらも外部より測定するため、ベントナイトに起因する問題点はないと思われる。ただし、X線および $\gamma$ 線を用いる方式は対象物を透過させて測定するため、試験装置の構造上適用は困難である。

### (4) 試験装置の種類

平均腐食速度の測定では交流インピーダンス法を用い、試験系に電圧を付加することにより測定を実施する。つまり、モニタリング項目によっては試験系に影響を及ぼす可能性のある測定方法を用いなければならないので、そのような可能性のあるモニタリング項目は個別に試験を行う必要があると考え、モニタリング項目により異なった試験装置を使用するものとした。下表にモニタリング項目と試験装置の対応を示す。ただし、酸化還元電位、pH、電気伝導度、化学種濃度、温度、腐食電位は試験系に影響を及ぼさないため、共通モニタリング項目として各試験装置においてモニタリングを実施するものとした。

また、各試験は形状および寸法による影響を排除しデータは相関が取れるよう、各試験装置の形状と寸法は同一とした。

#### (a) 装置 1：標準型

試験系に影響を及ぼさない基本的な項目をモニタリングすることを目的とする。

(b) 装置 2：水素透過ガスモニタリング用

試験系に影響を及ぼす可能性のある水素透過ガスをモニタリングすることを目的とし、共通項目も併せてモニタリングする。

(c) 装置 3：腐食速度モニタリング用

試験系に影響を及ぼす可能性のある腐食速度をモニタリングすることを目的とし、共通項目も併せてモニタリングする。

(d) 装置 4：膨潤圧モニタリング用

緩衝材が 10 年で飽和する厚みと設定しているが、浸潤状況を外部から確認することはできない。そのため、高さ方向に水分センサーを 2 ヶ設置し、更に膨潤圧をロードセルで測定することにより、溶液の浸潤状況を把握し、その浸潤状況と腐食電位等の相関を取ることを目的とする。

(e) 装置 5：腐食深さモニタリング用

上述したように、非破壊で  $1.0\mu\text{m}$  を測定することは技術上困難であるため、腐食深さの測定は専用の試験装置を数個製作しておき、数年毎に装置を開封して炭素鋼を取出し、直接腐食深さを測定するものとした。腐食深さ専用の試験装置であり、装置 1～3 よりも簡便な装置とし温度のみモニタリングするものとした。

表 2.3-2 試験装置とモニタリング項目

測定項目	装置 1 (標準型)	装置 2 (水素透過)	装置 3 (腐食速度)	装置 4 (膨潤圧)	装置 5 (腐食深さ)
酸化還元電位	○	○	○		
PH	○	○	○		
電気伝導度	○	○	○		
温度	○	○	○	○	○
腐食電位	○	○	○		
化学種濃度	○	○	○		
水素透過ガス		○			
平均腐食速度			○		
膨潤圧				○	
水分率				○	
腐食深さ					○

## (5) モニタリング装置の設置方法

モニタリング装置の特性により長期間常時モニタリングに適するものと、定期的にモニタリングするものとを下記のように設定した。なお、定期的にモニタリングする項目のうち緩衝材中に電極やプローブを挿入するものについては、モニタリング時以外はチタン製ダミーを挿入しておき、緩衝材が膨潤し電極やプローブが入りにくくなることを防止する構造としている。

表 2.3-3 モニタリング項目と要領の関係

モニタリング項目	モニタリング要領		
	常時	定期的	取出し
緩衝材中の酸化還元電位		○	
緩衝材中の pH		○	
緩衝材中の電気伝導度		○	
炭素鋼の温度	○		
緩衝材中の温度	○		
炭素鋼の腐食電位	○		
緩衝材中の化学種濃度		○	
炭素鋼の水素透過ガス		○	
炭素鋼の平均腐食速度		○	
緩衝材の膨潤圧	○		
緩衝材中の水分率	○		
炭素鋼の腐食深さ			○

## (6) モニタリングプローブ数

緩衝材温度、緩衝材中の酸化還元電位、緩衝材中の pH、緩衝材中の電気伝導度、緩衝材中の化学種濃度、緩衝材中の水分率については、緩衝材の厚み方向分布をモニタリングできるように、緩衝材の厚みとプローブ取付けに必要な寸法を考慮して緩衝材厚み方向に 2 ケづつ設置するものとした。

## (7) 塩橋

腐食電位を測定するために塩橋を設置するが、緩衝材上部の溶液部に設置すると液抵抗が大きく別途補正が必要であるが、塩橋を炭素鋼の近傍に設置し補正することなく腐食電位を測定できることが望ましい。ただし、炭素鋼近傍は温度が高く塩橋の寿命が短くなると思われるため、塩橋は測定前に設置し腐食電位の測定を行うものとした。従って、腐食電位のモニタリングは常時ではなく定期的に行う。

(8) 対極

平均腐食速度評価のため、緩衝材中で炭素鋼近くに対極を設置し、材質は白金とする。対極は頻繁にメンテナンスを実施することが必要であるため、緩衝材中への挿入および抜き出しが必要となる。一般的な対極は平板形をしているが、挿入および抜き出し作業を考慮して電極の形状を円柱形状とした。

(9) 装置材質

試験装置の材質には炭素鋼と比較して極めて腐食しにくいチタン合金を選定しているが、緩衝材中の酸素が消費されると水素発生型の腐食が起こる可能性がある。特に炭素鋼近傍で水素発生型の腐食が発生すると、炭素鋼の水素透過ガスを測定しており、この測定に影響を及ぼす可能性がある。そのため、チタン合金の僅かな腐食も起こらないよう、基本的にチタン合金の内面はテフロンコーティングを実施するものとした。

(10) 設計圧力

乾燥密度  $1.6\text{g/cm}^3$  のペントナイト膨潤圧に加えて、炭素鋼の腐食生成物による体積増加を考慮する必要がある。炭素鋼の腐食速度を  $1.0\mu\text{m/year}$  とし、炭素鋼の腐食による体積増加を 3 倍としてペントナイトの乾燥密度を換算すると約  $1.62\text{g/cm}^3$  となる。このときの乾燥密度の膨潤圧約  $1.0\text{MPa}$  に対し余裕をみて  $2.0\text{MPa}$  と設定し試験装置の設計を実施した。

(11) 設計温度

最高使用温度  $100^\circ\text{C}$  に対し  $20^\circ\text{C}$  の余裕をみて設計温度を  $120^\circ\text{C}$  と設定した。

(12) 加熱方法

炭素鋼の加熱は試験装置の構造から炭素鋼下部より行うが、水素ガスの透過量も炭素鋼下部より測定するために、加熱装置は容易に脱着可能な構造とする必要がある。そのため、ステンレスのブロックをカードリッジヒーターで加熱し、加熱されたステンレスブロックを炭素鋼に密着させることにより炭素鋼の加熱を行う構造とした。また、過昇温を防止するための安全機構を設置する。

(13) 絶縁

ガルバニック腐食および腐食電位測定を考慮して、試験材料である炭素鋼は構造材であるチタン合金と絶縁がとれる構造とする。

(14) 緩衝材の拘束

ベントナイトの膨潤により緩衝材の密度が変化しないよう、上部にベントナイトを拘束する治具を設置する。ただし、溶液が流通できるよう緩衝材と治具の境界には焼結体を設置する。

(15) 溶液レベル制御

溶液が緩衝材に浸潤していくことにより溶液レベルが低下するため、レベルスイッチとこれに連動したバルブを設置することにより、常に溶液レベルが一定となるよう設計を行った。また、溶液レベルを目視にて確認できるようレベル計も設置する。

(16) 溶液蒸発防止

炭素鋼を最高 100℃まで昇温することにより、緩衝材上部の溶液が蒸発し濃度変化が起こる可能性がある。そのため、試験装置上部に凝縮器を設置し溶液から蒸発した水分を凝縮させ、溶液濃度が変わらないよう対処する。

以上の検討を受けて超長期試験装置の設計を実施した。概念図を図 2.3-18 に示す。

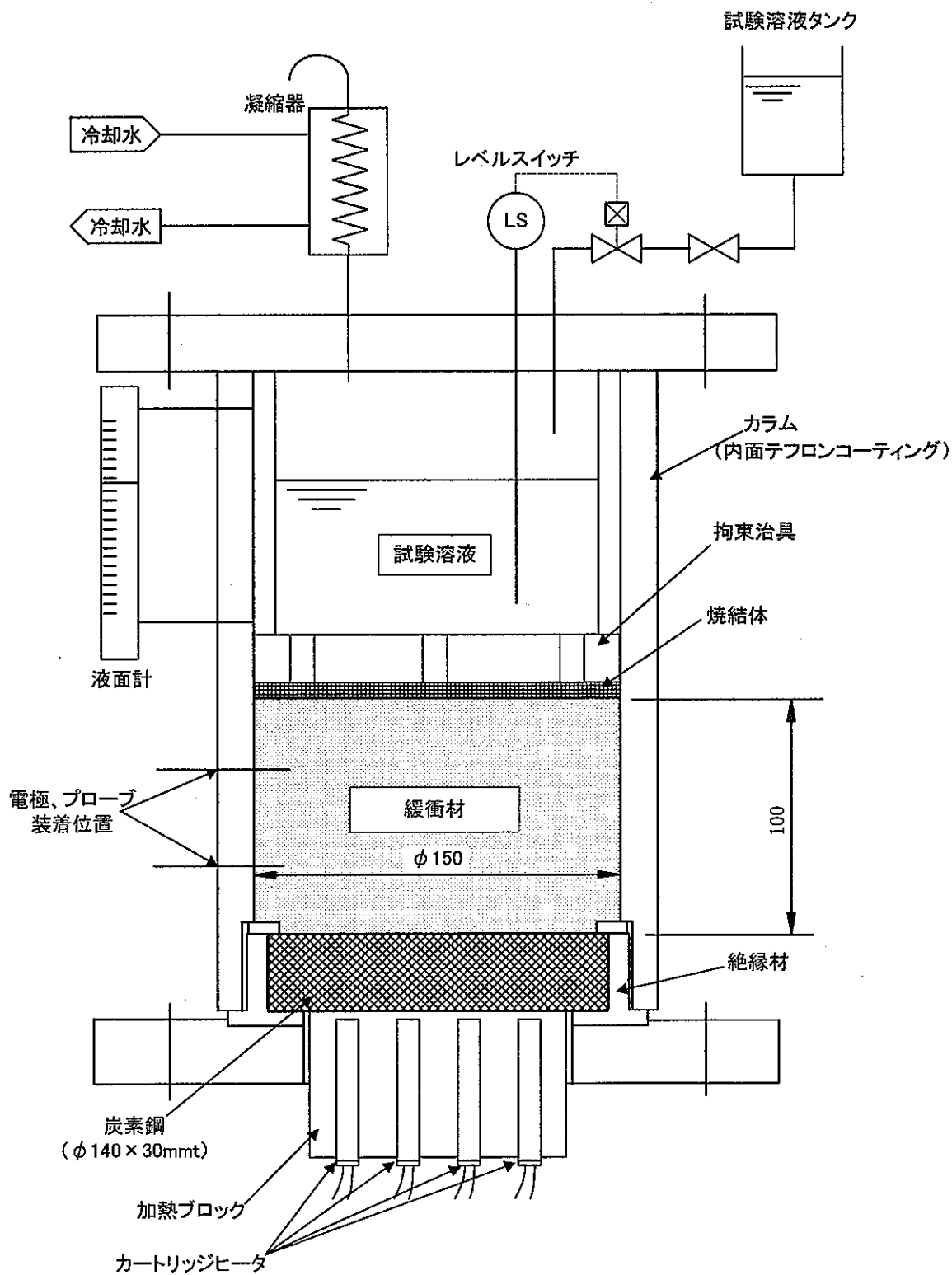


図 2.3-18 超長期試験装置 概念図

## 2.4 超長期試験装置の詳細仕様

### (1) 試験装置の基本仕様

- ① 主要材質 : チタン合金 (内面テフロンコーティング)
- ② 設計圧力 : 2.0MPa
- ③ 設計温度 : 120℃ (最高使用温度: 100℃)

### (2) 試験装置の基本構造

- ① 接液部 : 接液部は基本的にテフロンコーティングを施す。
- ② 絶縁 : 試験材料である炭素鋼は絶縁状態とする。
- ③ ベントナイトの拘束 : 上部に緩衝材を拘束する治具を設置する。

### (3) 試験装置数量

各試験装置の数量は下記の考え方で設定した。

- ・装置 1 : 試験条件に対して 3 台と設定した。
- ・装置 2 : 試験条件に対して 3 台と設定した。
- ・装置 3 : 試験条件に対して 3 台と設定した。
- ・装置 4 : 試験条件に対して 1 台と設定した。
- ・装置 5 : 2 年毎に試験装置を開封して炭素鋼を取出し、腐食深さを測定するものとし、試験条件に対して 10 台と設定した。

### (4) 試験装置の計画図

装置 1~5 の試験装置においてモニタリング項目以外の形状、寸法や付属機器等は共通として設計しているため、各試験装置の機器リストは同じものとなる。従って、各試験装置の機器リストを一括して以下に記載する。また、各試験装置の計画図を図 2.4-1~5 に示す。

#### (a) 試験装置本体

- ・炭素鋼寸法 :  $\phi 140 \times 30\text{mmH}$
- ・緩衝材寸法 :  $\phi 150 \times 100\text{mmH}$
- ・内寸法 :  $\phi 150 \times 250\text{mmH}$



- ・ 主要材質 : チタン合金 (内面テフロンコーティング)
- ・ 緩衝材拘束治具 : 焼結体付
- ・ 絶縁材質 : 3 フッ化エチレン

(b) 加熱装置

- ・ ヒーター形式 : カートリッジヒーター
- ・ ヒーター容量 : 200W
- ・ ヒーター数量 : 4 本
- ・ 断熱材材質 : ロックウール
- ・ 制御用熱電対 : K 型熱電対 (保護管付)
- ・ 加熱用ブロック : SUS316

(c) 付属品 (数量は試験装置 1 台あたり)

- ・ 液面計 : レベルゲージ式 1 台
- ・ レベルスイッチ : 電極式 1 台
- ・ 電磁弁 : ソレノイド式 1 個
- ・ 手動バルブ : ボールタイプ 1 個
- ・ 凝縮器 : 水冷式 1 台

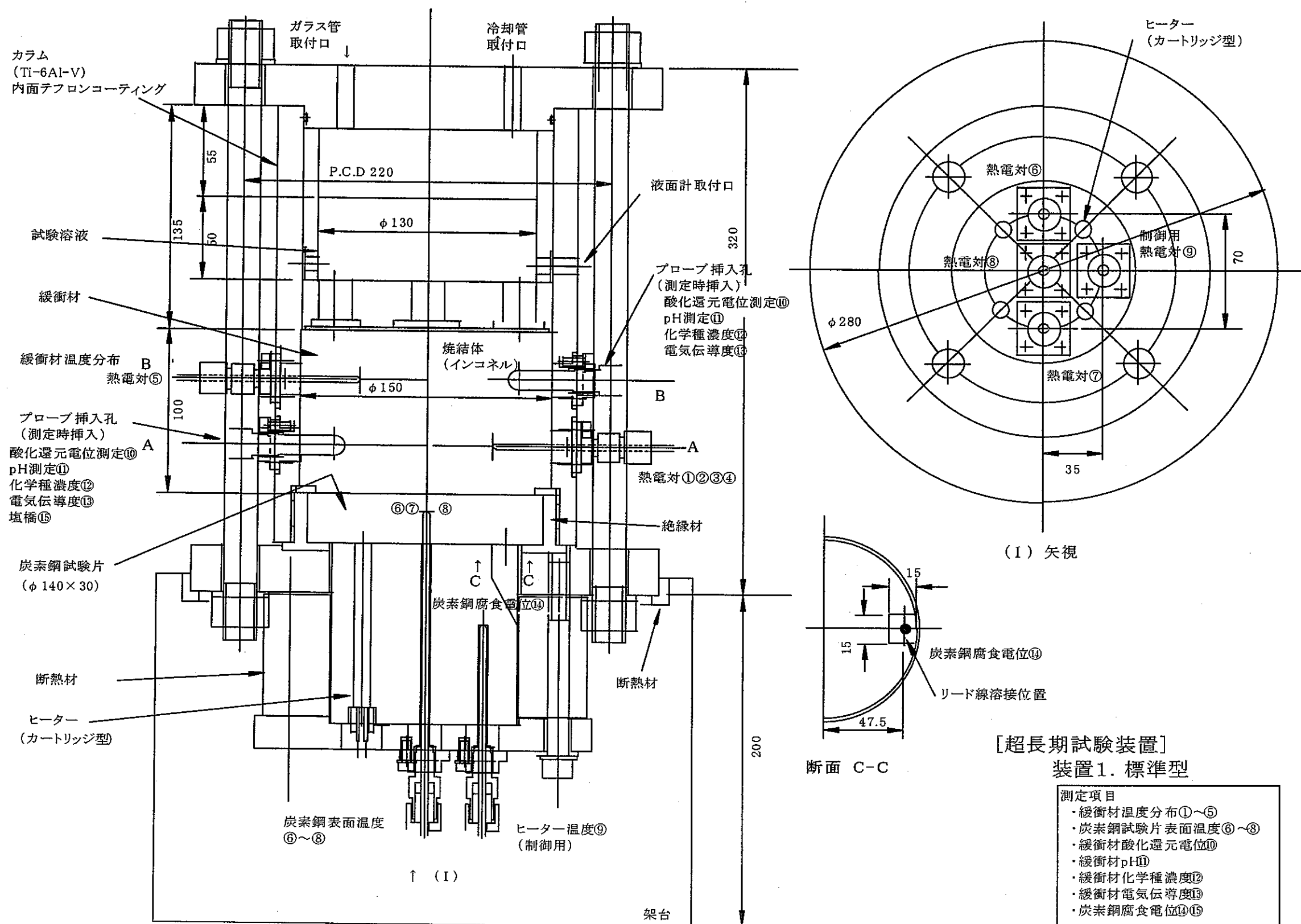


図 2.4-1 超長期試験装置 1 計画図 (1/2)

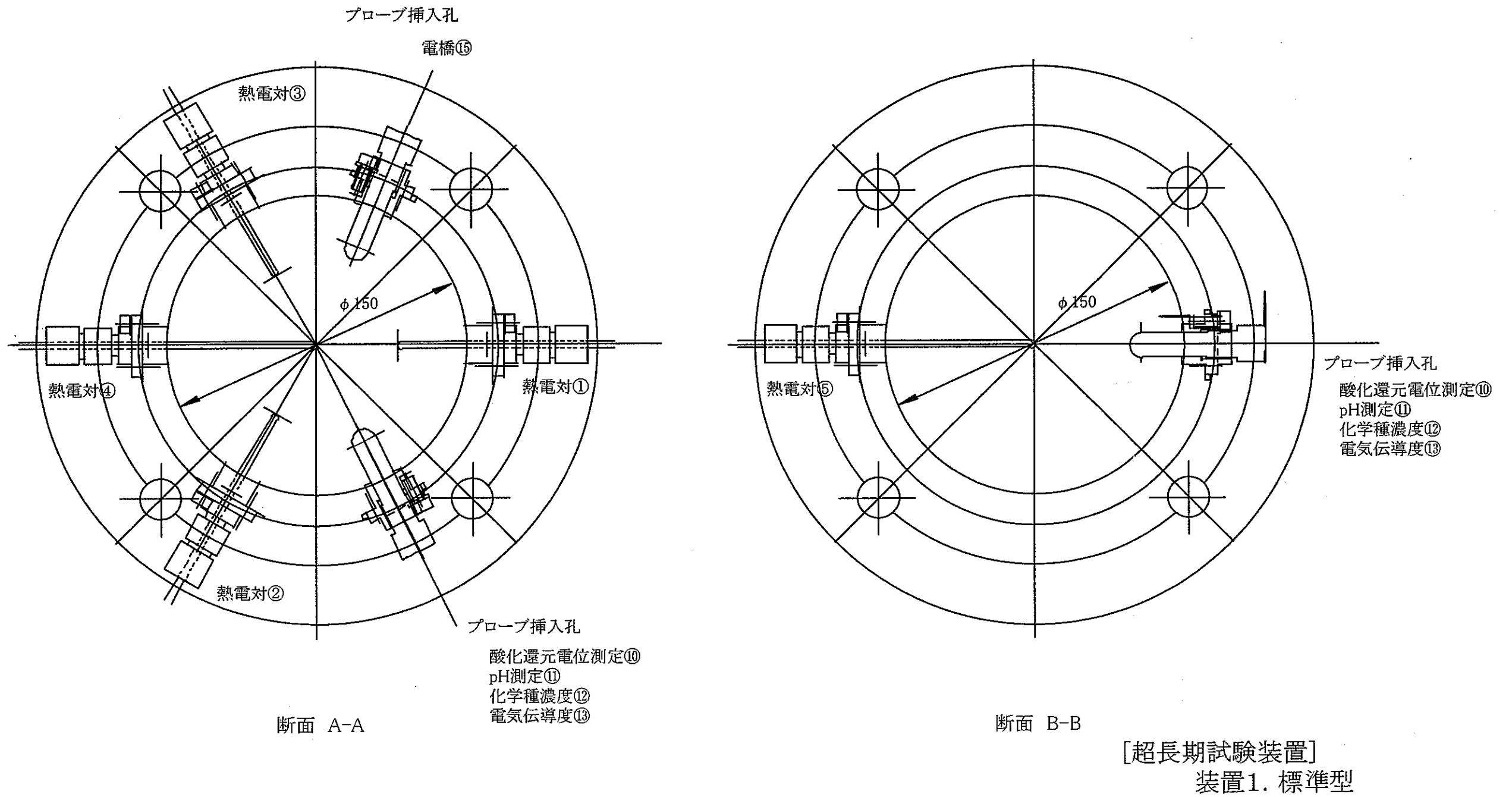


図 2.4-1 超長期試験装置 1 計画図 (2 / 2)

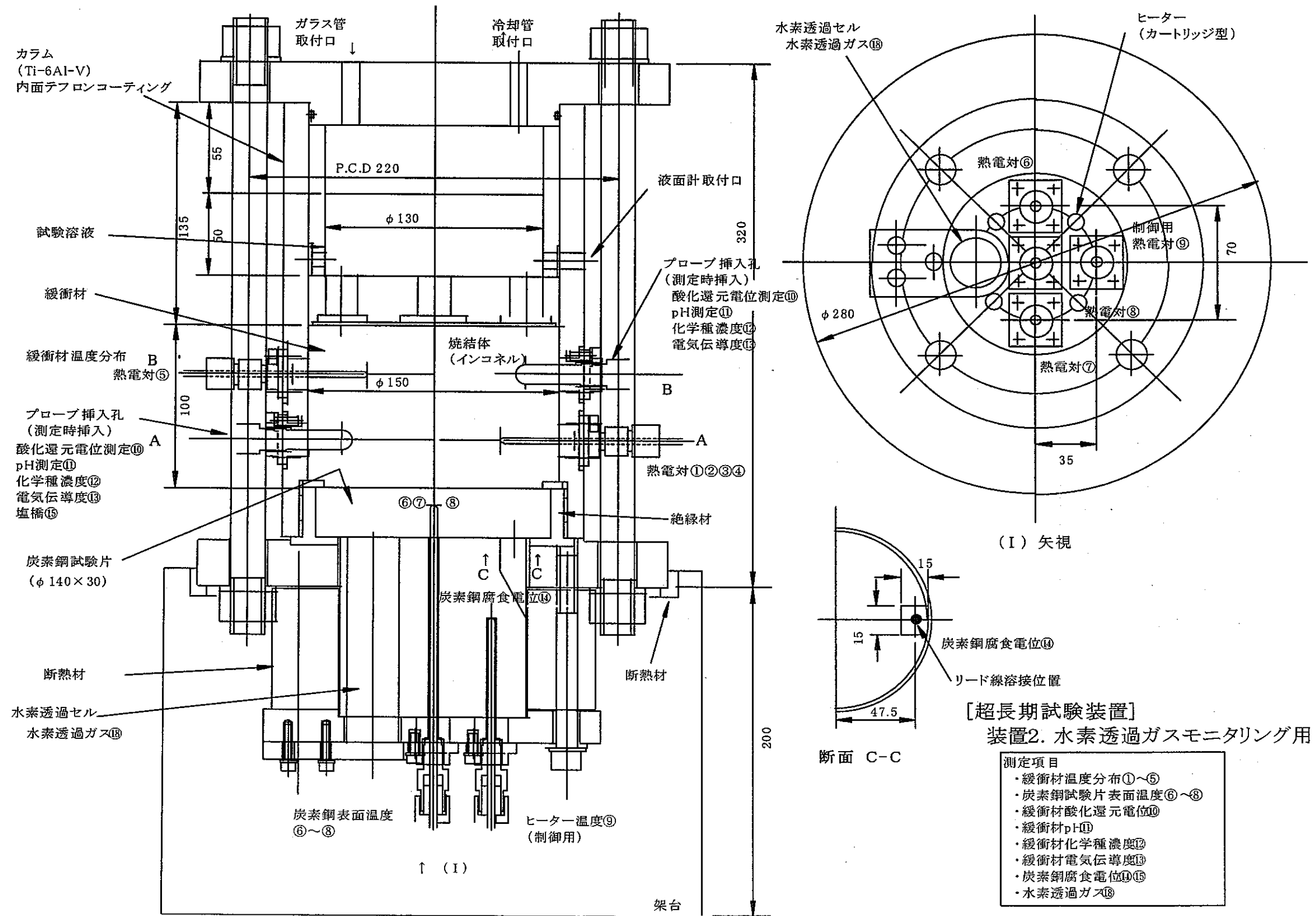
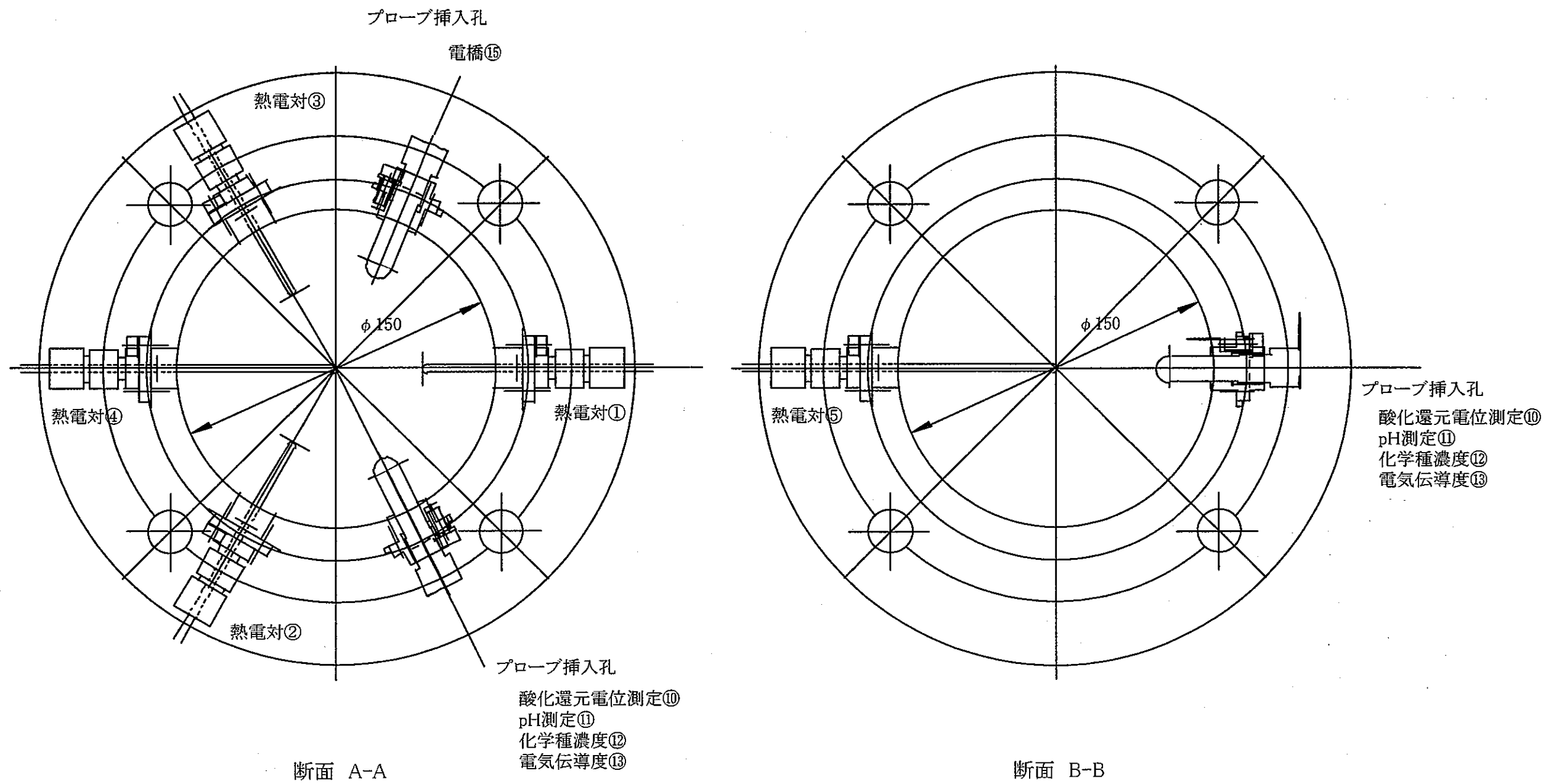


図 2.4-2 超長期試験装置 2 計画図 (1 / 2)



[超長期試験装置]  
装置2. 水素透過ガスモニタリング用

図 2.4-2 超長期試験装置 2 計画図 (2 / 2)

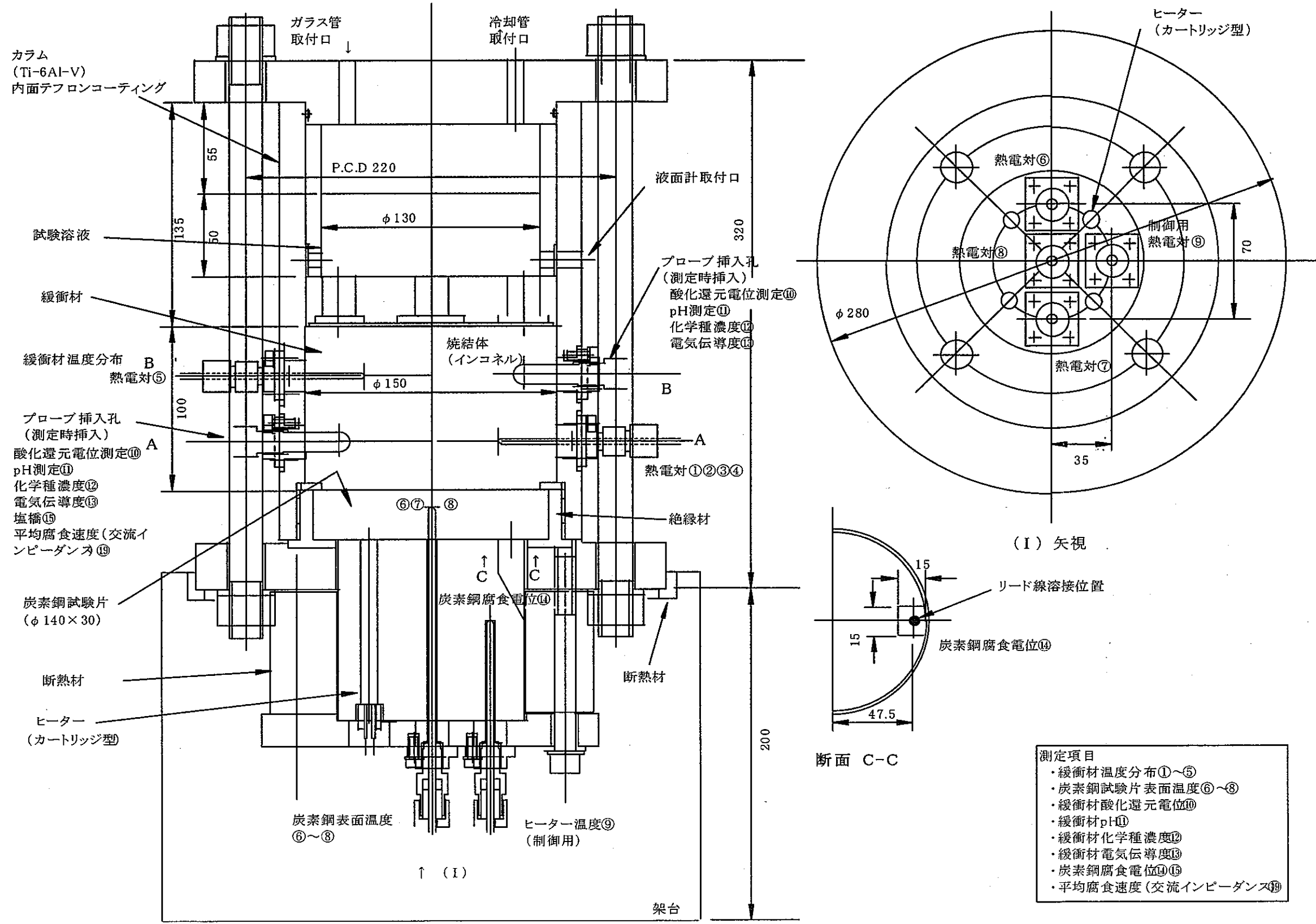
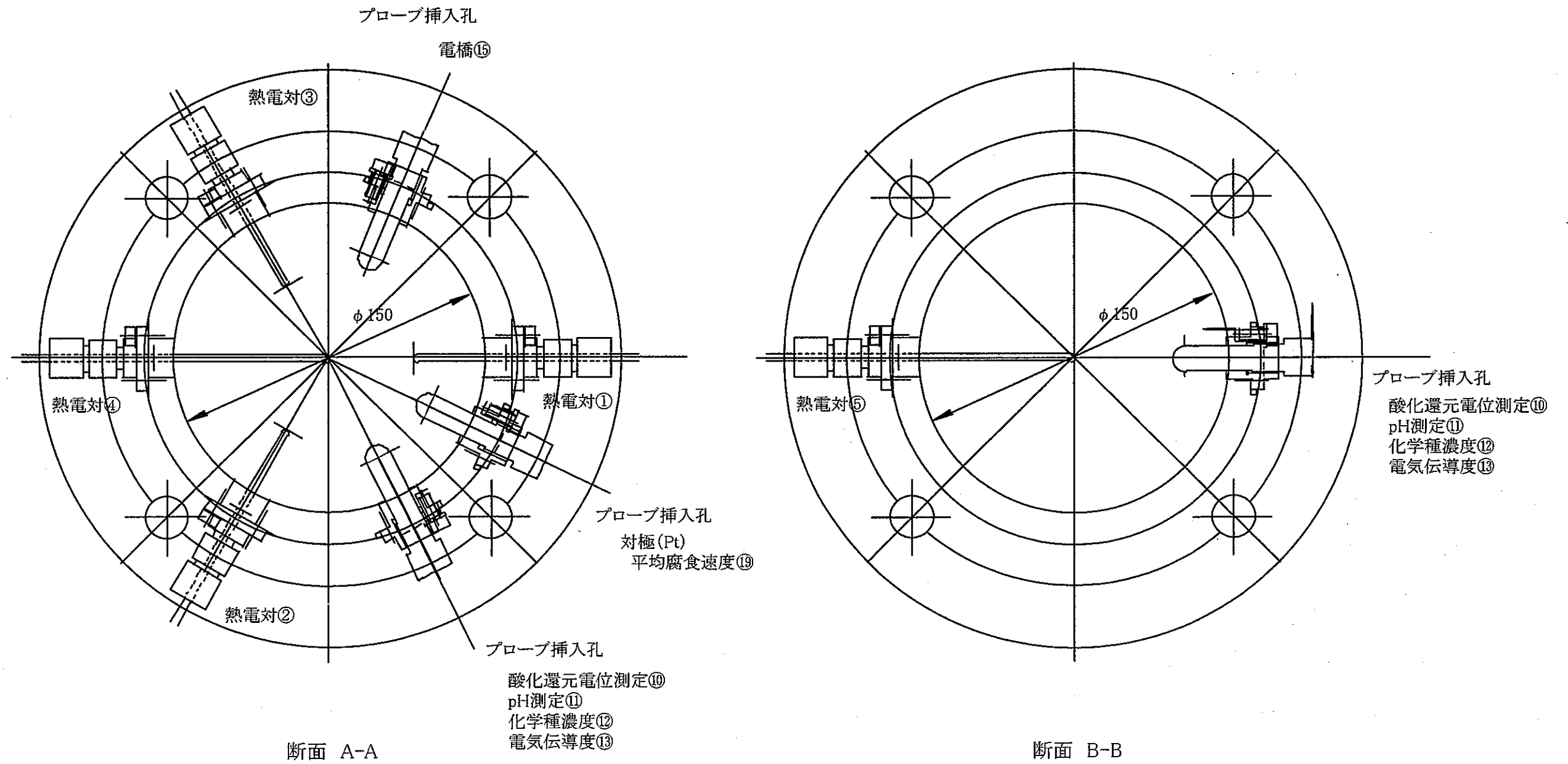


図 2.4-3 超長期試験装置 3 計画図 (1/2)



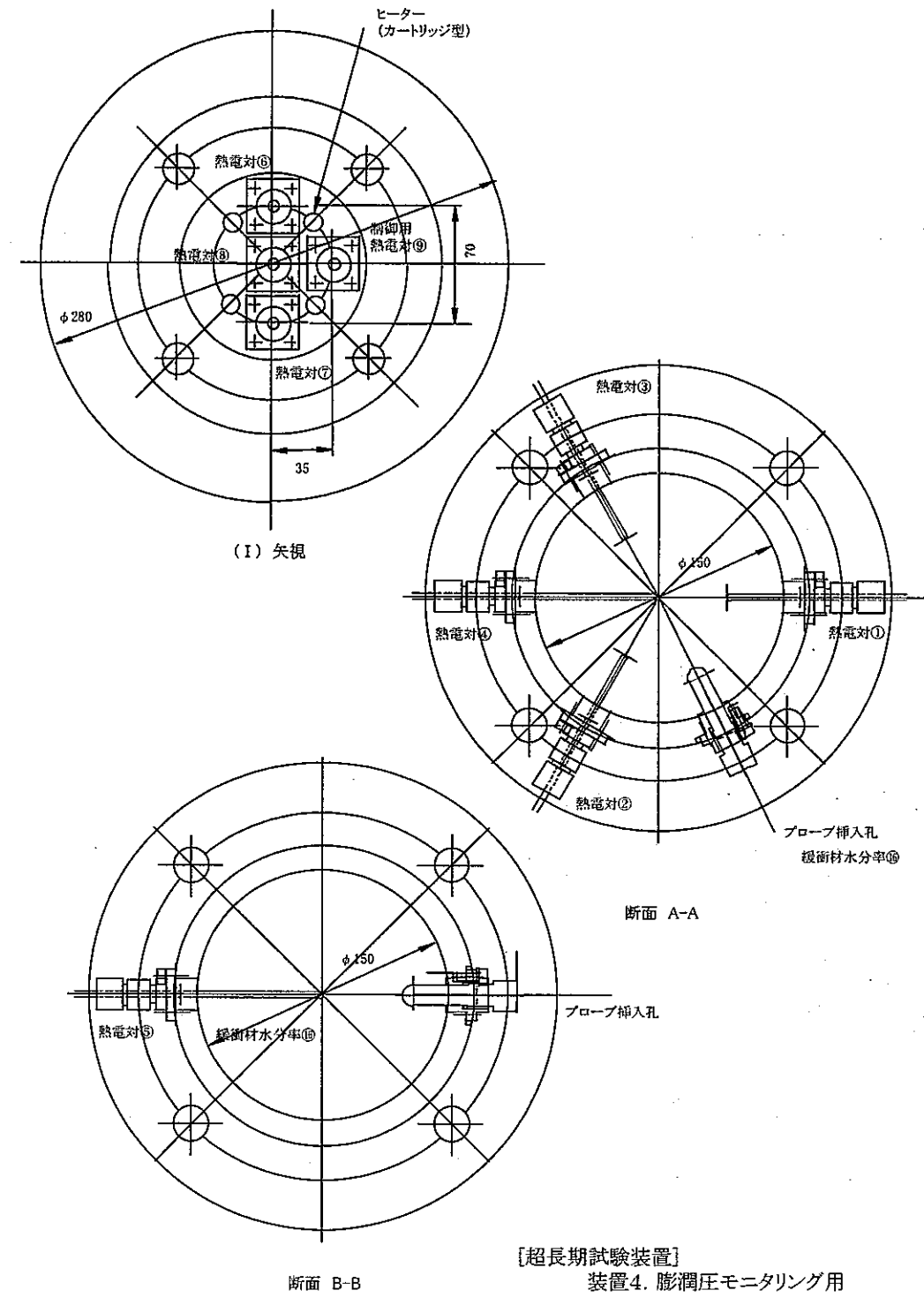
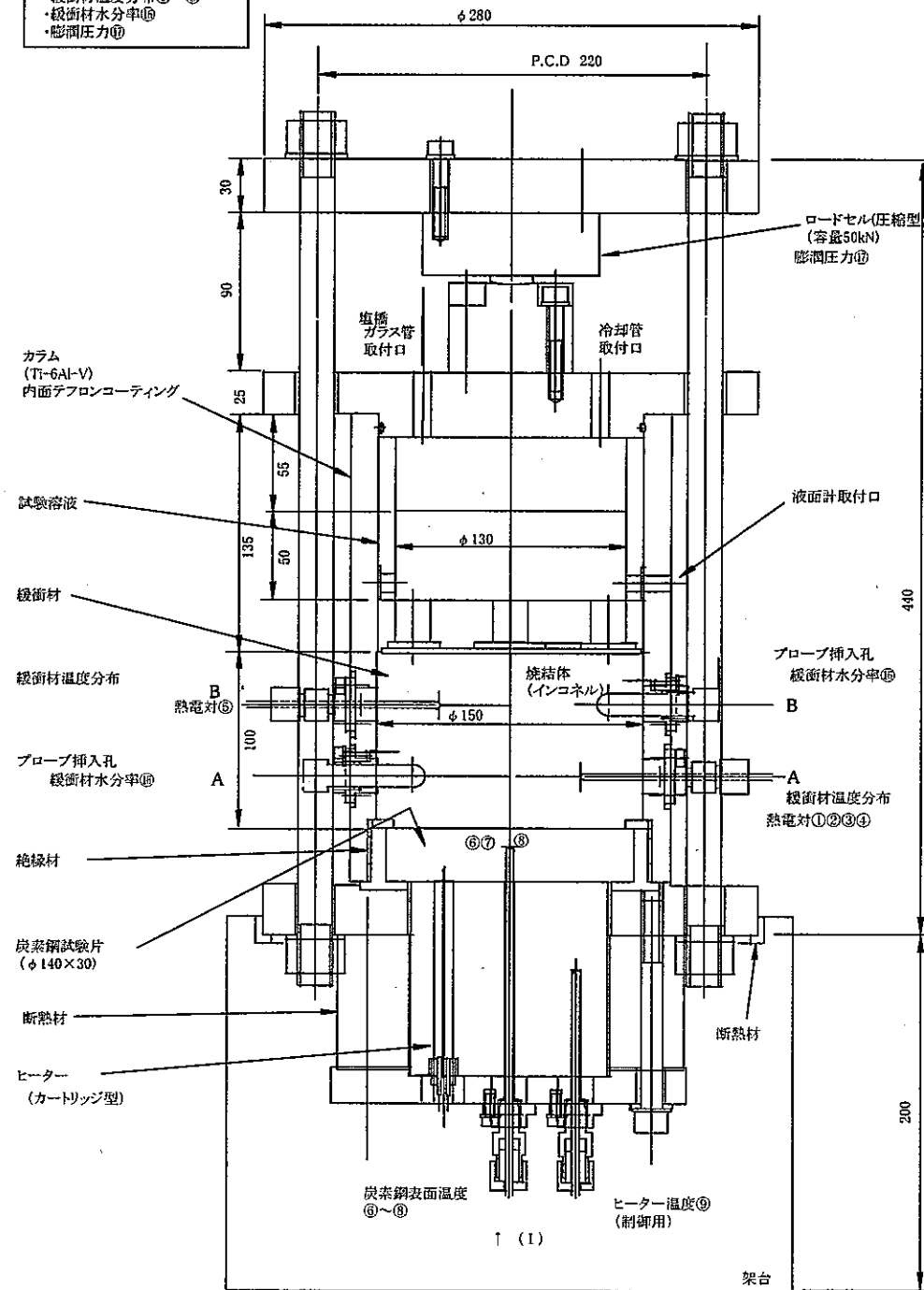
[超長期試験装置]  
 装置3. 平均腐食速度モニタリング用

図 2.4-3 超長期試験装置 3 計画図 (2 / 2)

[超長期試験装置]

装置4. 膨潤圧モニタリング用

- 測定項目  
 ・緩衝材温度分布①～⑤  
 ・緩衝材水分率⑥  
 ・膨潤圧力⑦



[超長期試験装置]  
装置4. 膨潤圧モニタリング用

図 2.4-4 超長期試験装置 4 計画図



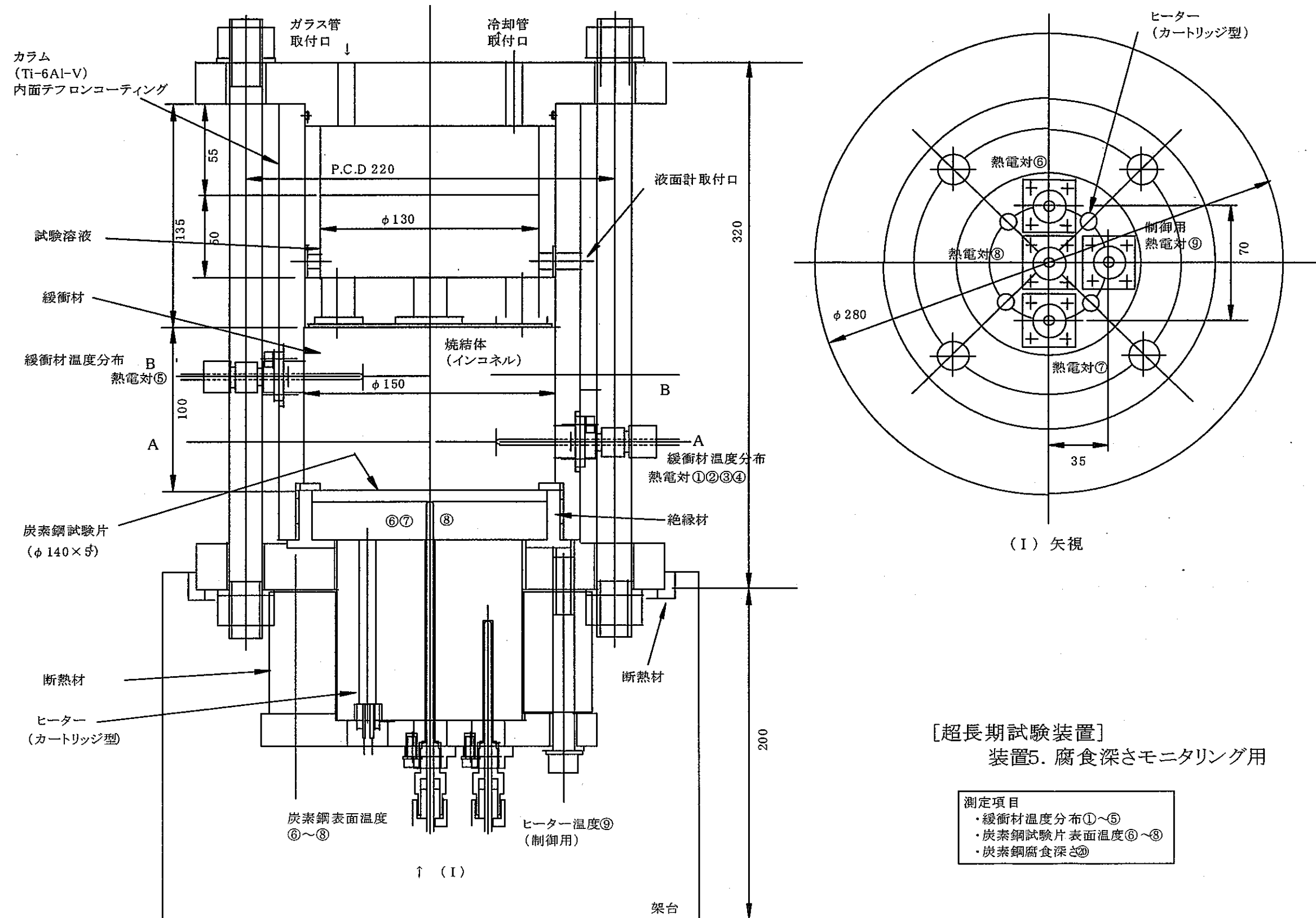
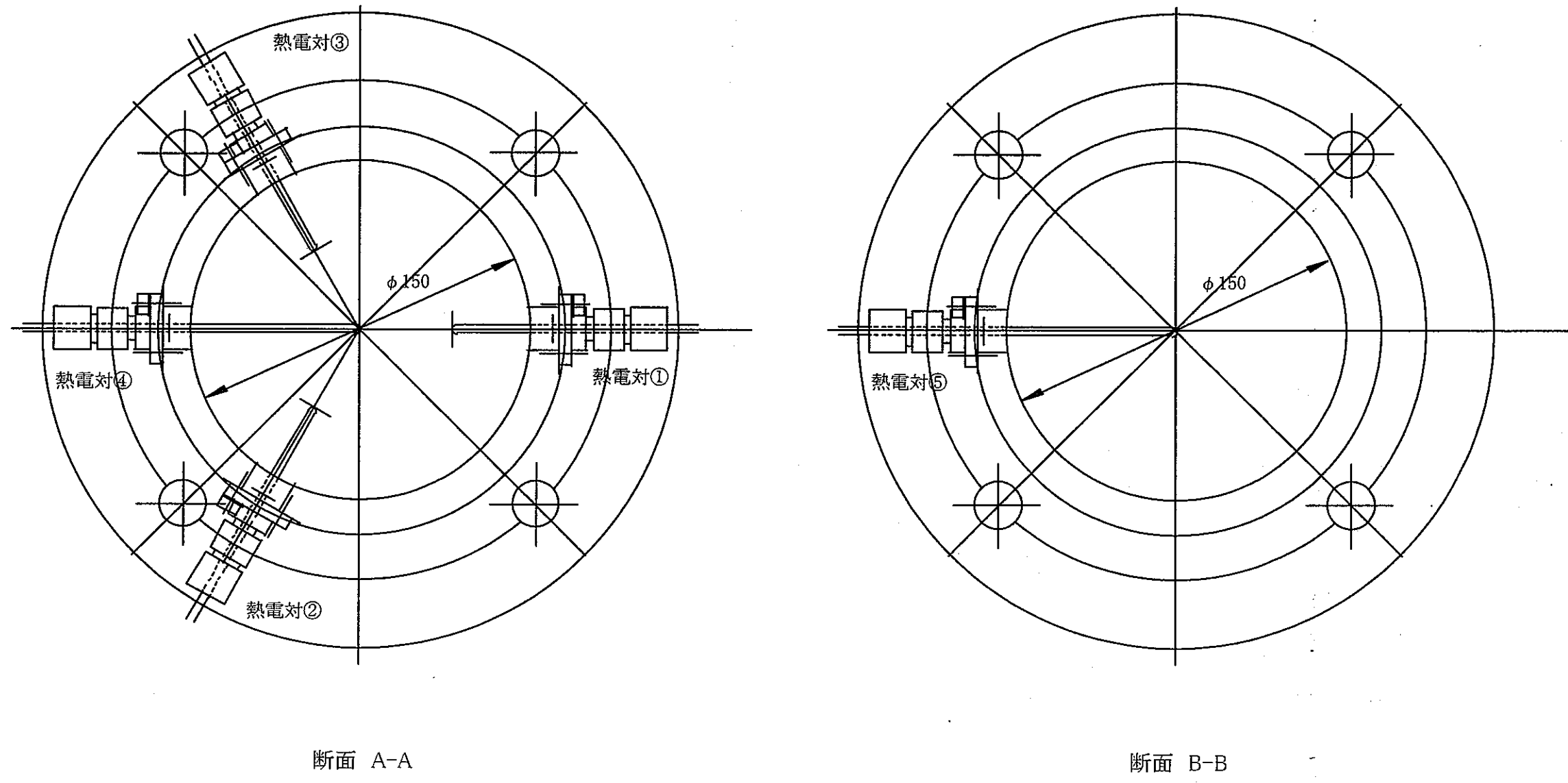


図 2.4-5 超長期試験装置 5 計画図 (1/2)



[超長期試験装置]  
装置5. 腐食深さモニタリング用

図 2.4-5 超長期試験装置 5 計画図 (2 / 2)

## 2.5 試験要領

### 2.5.1 試験装置の組立

試験装置の組立手順を以下に示す。超長期試験に使用する緩衝材を試験装置に設置する際の注意点の一つとして、緩衝材とカラム壁面との間に隙間ができることが挙げられ、そのため緩衝材とカラムとの密着性が重要視されることから、緩衝材の成型には注意が必要である。詳細手順については添付資料-1に記載する。

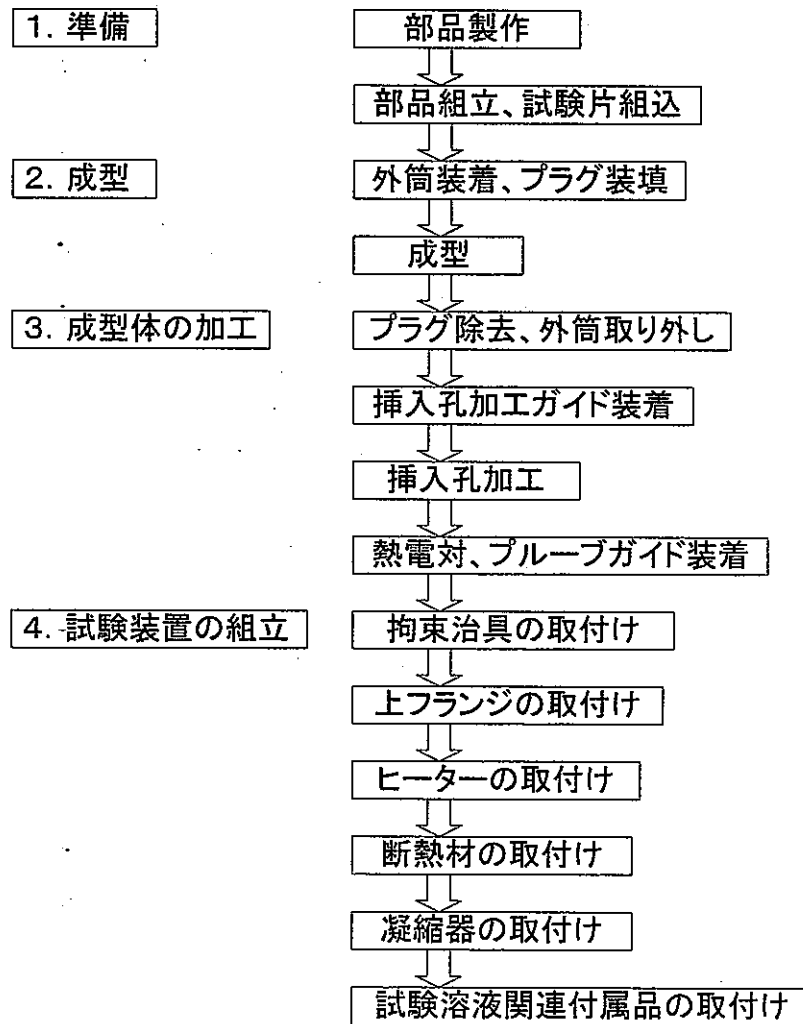


図 2.5-1 試験装置組立て要領

### 2.5.2 試験開始要領

装置を組立てた後、下記の要領にて超長期試験を開始する。

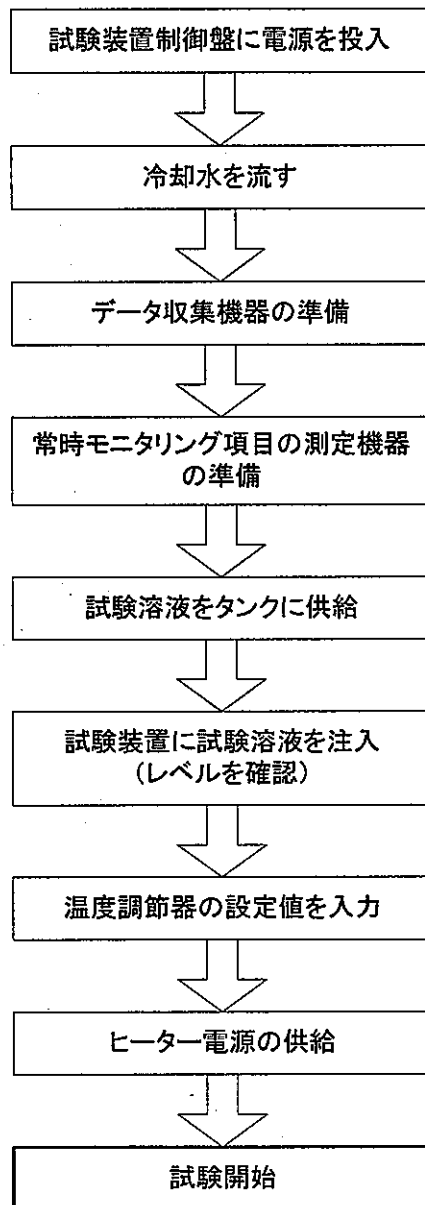


図 2.5-2 試験開始要領

### 2.5.3 試験期間中の作業

試験開始後の作業はモニタリングと点検の 2 点であり、以下にその項目について記載する。

#### (1) モニタリング

先に記載したように、モニタリングには常時行う項目と定期的に行う項目がある。

##### (a) 常時モニタリング

常時モニタリングする項目は、炭素鋼および緩衝材の温度、緩衝材の膨潤圧、緩衝材中の水分率であり、これらの測定データはデータロガーを通じてパーソナルコンピュータのハードディスク内に自動的に記録される。

##### (b) 定期モニタリング

定期的モニタリングする項目は、酸化還元電位、pH、電気伝導度、腐食電位、化学種濃度、水素透過ガス、平均腐食速度であり、これらの項目は緩衝材中に予め校正やメンテナンスを行った電極またはプローブを設置し測定を行い、測定終了後には電極またはプローブを引き抜く。測定データは常時モニタリングと同様にパーソナルコンピュータのハードディスク内に記録される。

電極またはプローブの設置要領は添付資料-2 に詳細を示す。

#### (2) 点検

試験期間中は正常に試験を実施できているか、下記の項目について日常点検を行うものとする。

- ・ 試験装置の外観を目視確認
- ・ 試験装置制御盤の異常表示の確認
- ・ カートリッジヒーターの電流値確認
- ・ 凝縮器の冷却水量確認
- ・ 炭素鋼温度の確認
- ・ 緩衝材温度の確認
- ・ 試験装置の液量確認
- ・ 試験溶液タンクの液量確認

## 2.6 今後の確認項目および課題

### (1) モニタリングに対する水分率の影響

酸化還元電位や pH 等のようにモニタリングに水分を必要とするものがある。一方、緩衝材のベントナイト乾燥密度  $1.6\text{g/cm}^3$  においては、水分が飽和した状態でもその水分率は約 25% であり、飽和に至る過程においては更に水分率が少ない。

従って、モニタリングに水分を必要とする項目に対して、必要とされる水分率をあらかじめ確認しておく必要がある。

### (2) 試験系に影響を及ぼす可能性のあるモニタリング項目に対する評価

平均腐食速度のモニタリング手法である交流インピーダンス法は、試験系に電圧を付加するため、試験に影響を及ぼす可能性があるとして別個の試験装置を用意することとしており、水素透過ガスについても同様である。しかしながら、モニタリングするデータの相関という意味では、一つの試験装置で必要なデータを全て取得できることが望ましい。

従って、平均腐食速度のモニタリングおよび水素透過ガスのモニタリングが腐食挙動に影響を与えるか確認を行い、一つの試験装置に可能な限りのモニタリング項目を設置することが重要と考える。

### (3) 腐食生成物の体積膨張

試験期間における腐食量と腐食生成物の体積膨張率が大きい場合には試験装置内の緩衝材が圧密されることにより、緩衝材の密度が大きく変化する可能性がある。一方、実処分環境では緩衝材の厚みが大きく、腐食による密度変化は試験装置よりもかなり緩やかであり、スケールの差を考慮して試験結果を評価しなければならない可能性がある。

ただし、腐食速度を  $1\mu\text{m}/\text{年}$ 、腐食生成物の体積膨張を 3 倍としても、緩衝材の厚み方向の変位は  $40\mu\text{m}$  ( $0.04\text{mm}$ ) となり、 $100\text{mm}$  厚さに対して 0.04% であることから、大きな影響はないと思われる。

### (4) 非破壊での腐食深さモニタリング方法の調査

本検討では、予想される腐食速度に対してモニタリング精度の関係から、非破壊

での腐食深さモニタリングは採用しなかったが、腐食深さを経時的にモニタリングすることは腐食挙動の変化を把握するためには重要である。従って、超長期試験に適用できる非破壊厚み測定技術に対する調査を今後も継続して行うことが必要と考える。

(5) 定期モニタリング時の大気の影響

定期的にモニタリングする項目においては、大気中で電極やプローブを出し入れするため、大気の影響が小さくなるよう配慮した構造と手順を検討はしているが、まったく影響がないとは言いきれない。従って、大気の影響を完全に排除するため、雰囲気制御グローブボックス内で電極やプローブの出し入れを行う、または電極やプローブの周りを還元雰囲気とした簡易フードで被った状態での出し入れすることの検討も必要である。

(6) pH 測定手法の開発

pH 測定で述べたとおり、現状の pH 測定では使用温度の問題はあるが半導体電極が適していると考えられる。しかしながら、ベントナイトが電荷を帯びている影響を参照電極が受け、本来の pH の値に対して指示値が低い値を示すことが考えられるため、ベントナイト中水分のサンプリング等の pH 測定手法を開発が必要である。

### 3. 還元性環境での試験容器の設計および制作

処分場が閉鎖され、緩衝材が飽和した段階においても坑道中には酸素が残留している可能性が考えられる。酸素が溶存した地下水が炭素鋼オーバーパックと接触した場合、還元環境下よりも腐食速度は早くなるとともに腐食挙動が変化する可能性がある。

しかしながら、オーバーパック外側には緩衝材の設置が計画されており、飽和した緩衝材には止水性をはじめ物質移動抑制能があるため炭素鋼オーバーパック表面にはほとんど酸素が供給されず、処分場閉鎖後初期段階に還元性環境が達成されることが考えられる。緩衝材の酸素移動抑制は非常に高いことが予想されるため、この現象を実験により確認するためには長期試験期間が必要であると考えられる。

そこで、溶液中で飽和した緩衝材中で炭素鋼の長期浸漬試験を行うための試験手法を検討する。試験は長期間行うことを想定し、溶液の交換、補給などメンテナンスの不要な試験容器を検討する。また実際に容器を制作し、浸漬を開始する。

#### 3.1 試験容器の材質、構成検討

##### (1) 試験容器構成の検討

溶液の交換、補給等のメンテナンスを不要にするには、試験容器は密封性の高い構造である必要がある。また、試験期間中に仮に密封容器が破損しても容器の交換により試験を継続出来るようにしておく必要がある。そのためには二重構造の容器であり、外側容器には長期密封性の維持が可能、また内側容器には溶液との接触でも劣化し難い耐久性の高い材質が良い。

外側容器の材質については 3.1(2)項で検討を実施する。

内側容器については長期浸漬試験で実績のある高分子材料：ふっ素樹脂(テトラフルオロエチレン・パーフルオロアルキルビニルエーテル共重合体(PFA))製の蓋付きの容器を使用することとする。内側容器内には緩衝材と供試材を充填したカラム( $\phi 60 \times H 34 \text{mm}$ ：図 3.1-1)全部を溶液に浸漬させた状態で試験を実施する必要があるため、外寸法： $\phi 9.5 \times H 94 \text{cm}$  の汎用品を使用することとする。ふっ素樹脂は耐酸性、耐アルカリ性に優れており、また吸水率が低いことから、長期試験に適していると考えられる。表 3.1-1 にふっ素樹脂：PFA の特性を示す。



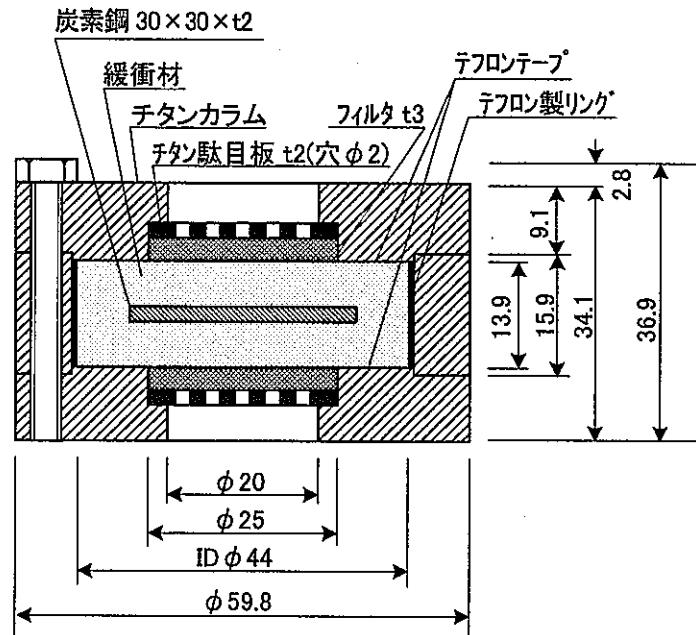


図 3.1-1 炭素鋼と緩衝材を充填したカラム 概略図

表 3.1-1 内側試験容器に使用するふっ素樹脂：PFA の特性

項目	測定値
引張強度(kg/cm <sup>2</sup> )(ASTM D-1708)	140
引張降伏点(kg/cm <sup>2</sup> )(ASTM D-1708) @23℃	280
曲げ弾性率(kg/cm <sup>2</sup> )(ASTM D-178) @23℃	6700
吸水率(%)(ASTM D-570)	0.03
線膨張率(ASTM D-696) @21~100℃	1.2×10 <sup>-5</sup>
連続使用最高温度(℃)	250

また、検討結果に基づく長期試験容器の構成を図 3.1-2 に示す。

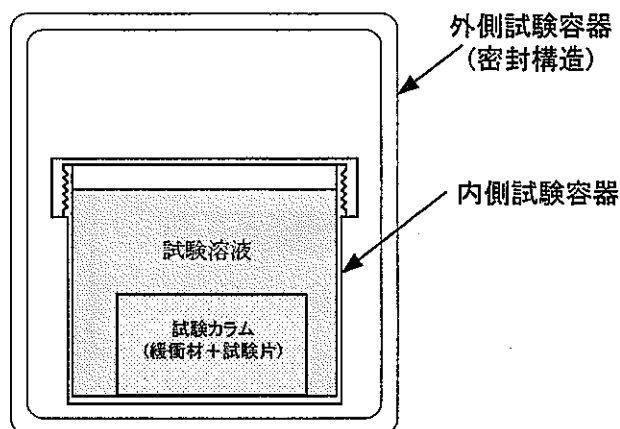


図 3.1-2 長期試験容器の構成

(2) 外側試験容器の材質検討

外側試験容器には上述のように密閉性の他に以下のような要件から材質を選定する。

- ① 容器の密閉性 : 試験期間中の溶液の蒸発による補給などのメンテナンスを不要にするためには試験期間中密封性を保持する必要がある。
- ② 試験状況の可視化 : 試験期間中溶液量変化や変色の有無を定期的に確認する必要がある。そのためには外側容器は透明性のある材質が好ましい。
- ③ 耐久性 : 最高試験温度が 80℃であるため、同温度で劣化が少なく密封性を保持出来る必要がある。
- ④ 容器の加工性 : 図 3.1-1 に示すように、内側容器を入れたあとで密封可能な加工性の高い材質である必要がある。

候補となる材質としては、ガラス、石英、金属(ステンレス鋼)、高分子材料(PTFE)等が考えられる。それぞれの材質の評価結果を表 3.1-2 に示す。

表 3.1-2 長期試験用外側試験容器の材質選定 評価結果

	ガラス (ほうけい酸ガラス)	石英	金属 (ステンレス鋼)	高分子材料 (PFA)
①容器の密閉性	○	○	○	△
②試験状況の可視化	○	○	×	△
③ 耐久性	○	○	○	○
④ 容器の加工性	△	×	△	△
総合評価	○	△	×	△

凡例)○：適応可能、△：適応困難、×：適応不可

表 3.1-2 の評価結果から、外側試験容器としてガラスを選定し、以降の検討を行う。使用するガラスは耐久性に優れたほうけい酸ガラス(ドイツ SCHOTT 社製の DURAN®)とする。

表 3.1-3 にほうけい酸ガラスの各種特性を示す。

表 3.1-3 ほうけい酸ガラスの各種特性

項目	特性
比重(g/cm <sup>3</sup> )	2.23
引張強度(kg/cm <sup>2</sup> )	40
圧縮強度(kg/cm <sup>2</sup> )	1000
弾性係数(kg/cm <sup>2</sup> )	6.3×10 <sup>5</sup>
線膨張係数(kg/cm <sup>2</sup> )	32.5×10 <sup>-7</sup>
熱伝導度(kcal/m.h.°C)	1000
軟化点(°C)	815

### (3) 外側試験容器形状の検討

外側試験容器の形状を決定するためには、①内側試験容器を設置可能であり、②容器の密封性について検討する必要がある。

先述したように、内側容器の外寸法はφ9.5×<sup>H</sup>94cmであることから容器胴部には外径110mmの中肉管(t2mm)を使用する。

容器の密封可能な構造としては図 3.1-3 に示すようにガラス溶着方式とセパラル方式が考えられる。

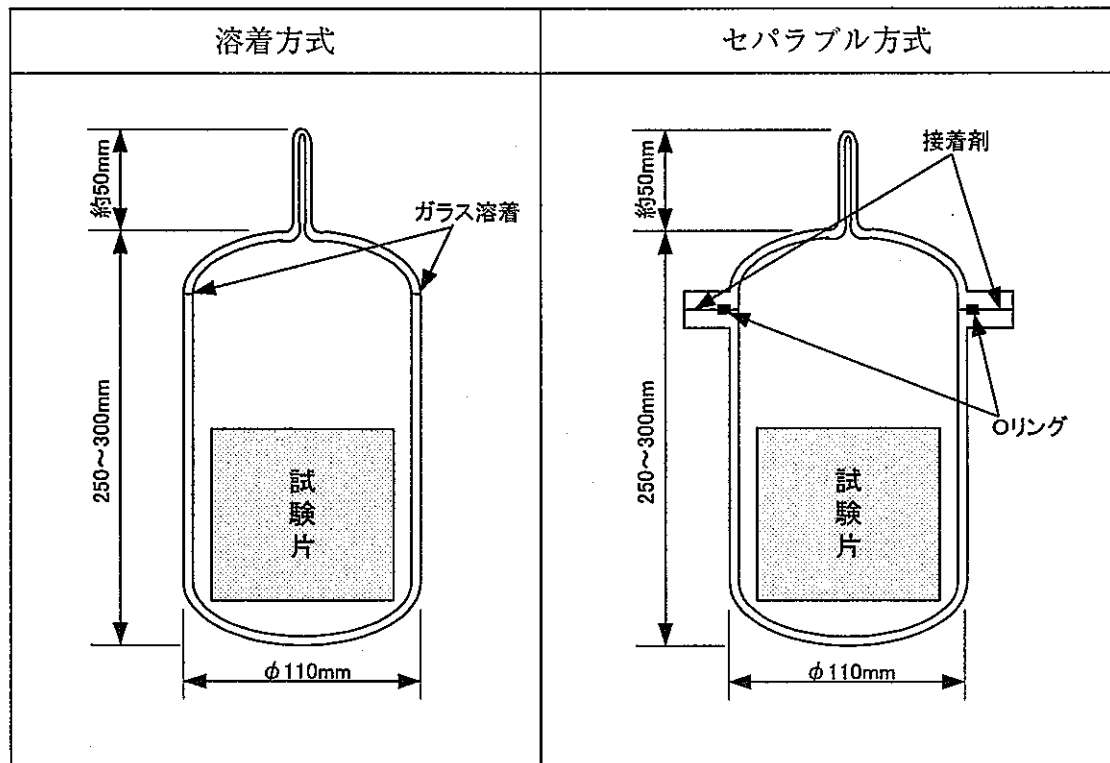


図 3.1-3 ガラス容器の密封方式

ガラス溶着方式は金属材料の長期浸漬試験等使用しており、2年程度の長期密封性に実績がある。また、ほうけい酸ガラスの線膨張係数は小さく温度変化への抵抗力が高いことから更に長期の密封性に期待出来る。一方、セパラル方式の場合、胴体部と蓋部を溶着しないため制作は容易であると考えられる。しかしながら、フランジ部分をOリングや接着剤により密封性を確保する必要があり、ガラスの加工精度或いはOリングや接着剤の20年の耐久性を保持することは困難であるとする。

そこで、今回はガラス溶着方式で外側試験容器を制作することとする。

溶着方式で制作した場合の形状概略図を図 3.1-4 に示す。

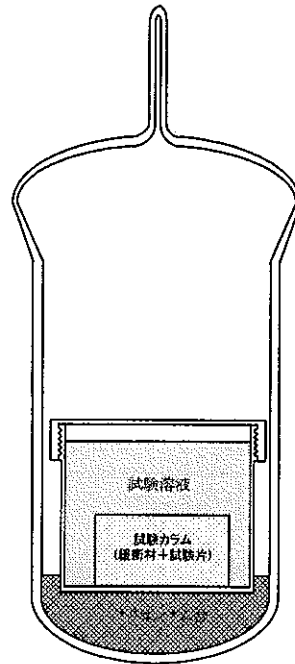


図 3.1-4 溶着方式による外側試験容器概略図

図に示すように内側試験容器上部と外側試験容器の胴体部と蓋部の溶着部には約100mmの距離を確保している。これは胴体部と蓋部の溶着時に内側試験容器が加熱されないためである。

また、内側試験容器と外側試験容器の間にはシリコンゴムを設置することにした。これは、内側試験容器の底部固定面積を大きくしクリーブ変形による内側試験容器の破壊を防止することと、試験容器を固定することが目的である。

#### (4) 試験容器初期内圧の検討

##### (a) 供試材の腐食に伴い発生する水素ガス圧検討

炭素鋼は還元環境下では腐食により水素ガスを発生する。今回は密封試験容器を用いて試験を実施するため、試験期間中に水素ガスによる内圧上昇で容器が破損ないように20年間で発生する水素ガス発生量とそれに伴う試験容器内圧上昇を検討する。

水素ガス発生量を算出する上での前提条件を以下に示す。

- ① 供試材形状：30×30×t2mm(表面積：20.4cm<sup>2</sup>)
- ② 腐食速度：1μm/y

③ 試験期間：20 年間

④ 腐食反応式： $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2 \uparrow$

①～④の前提条件から算出した水素ガス発生量と図 3.1-3 に示す外側試験容器内での内圧上昇を表 3.1-4 に示す。

表 3.1-4 水素ガス発生量と試験容器の内圧上昇

項目	算出値
水素ガス発生量(ml)	170
試験容器の内圧上昇(atm)*1)	0.1

\* 1)試験容器容積：1700(ml)

(b) 高温(最高 80℃)環境での試験による気体膨脹圧検討

今回の試験では、常温(25℃)で溶着後に試験容器を所定の温度に加温する計画である。そのため加温により試験容器の内圧は上昇する。

その時の内圧上昇率は 18%となる。

後述(3.2(1)(b)項)するように外側試験容器の溶着工程では容器内を減圧し溶着を行う。内圧上昇による容器の破損を防止するために、20 年後に加圧状態にならないよう溶着工程で減圧を行うこととする。

20 年後の加温時に減圧状態を維持するために上述(a)、(b)の検討結果から溶着工程では 0.75atm 以下に減圧することとする。

## 3.2 試験容器制作要領と試験条件

(1) 試験容器制作方法

(a) 試験容器制作要領

試験容器の制作要領を図 3.2-1～3 に示す。また、完成した試験容器の写真を図 3.2-7 に示す。

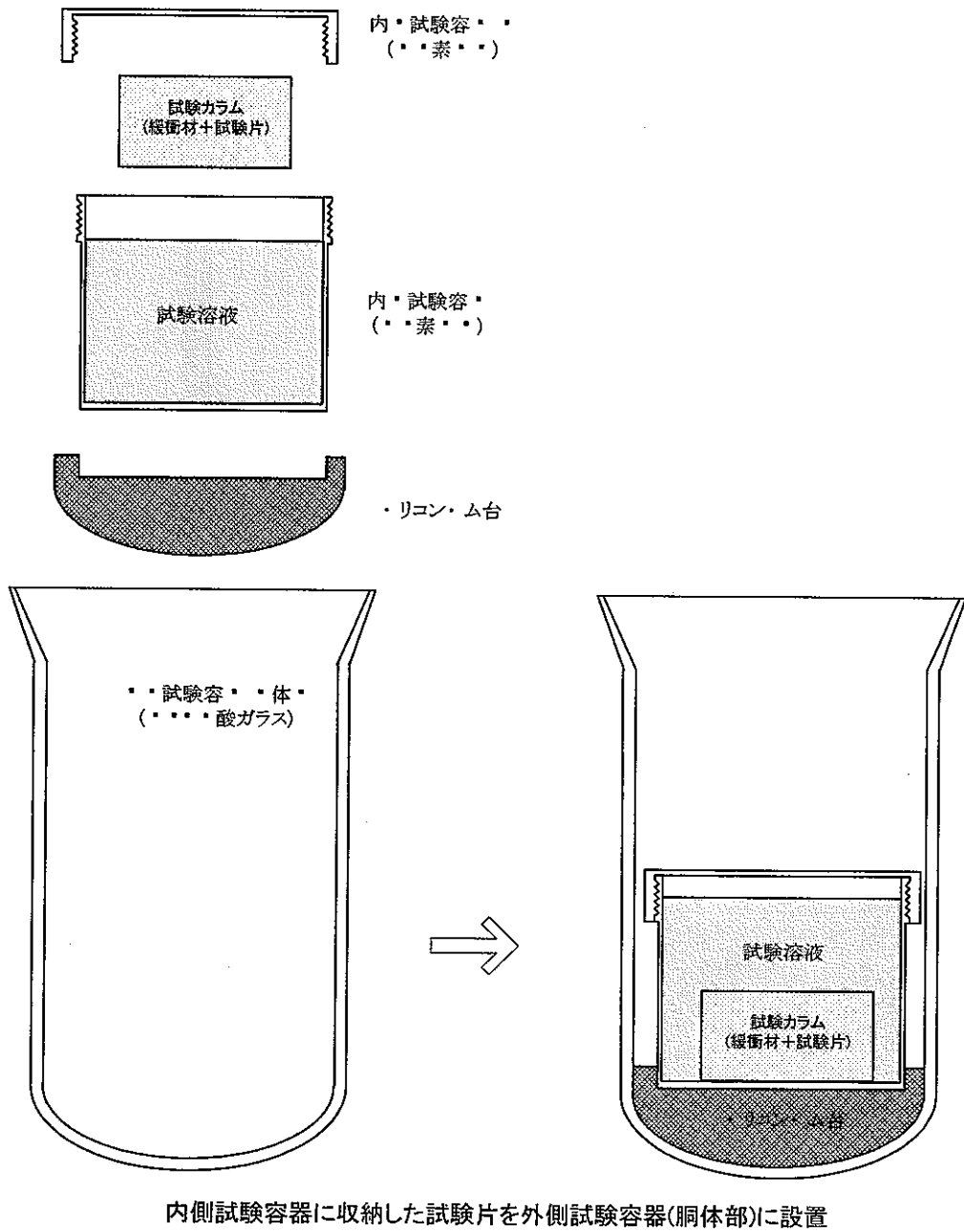
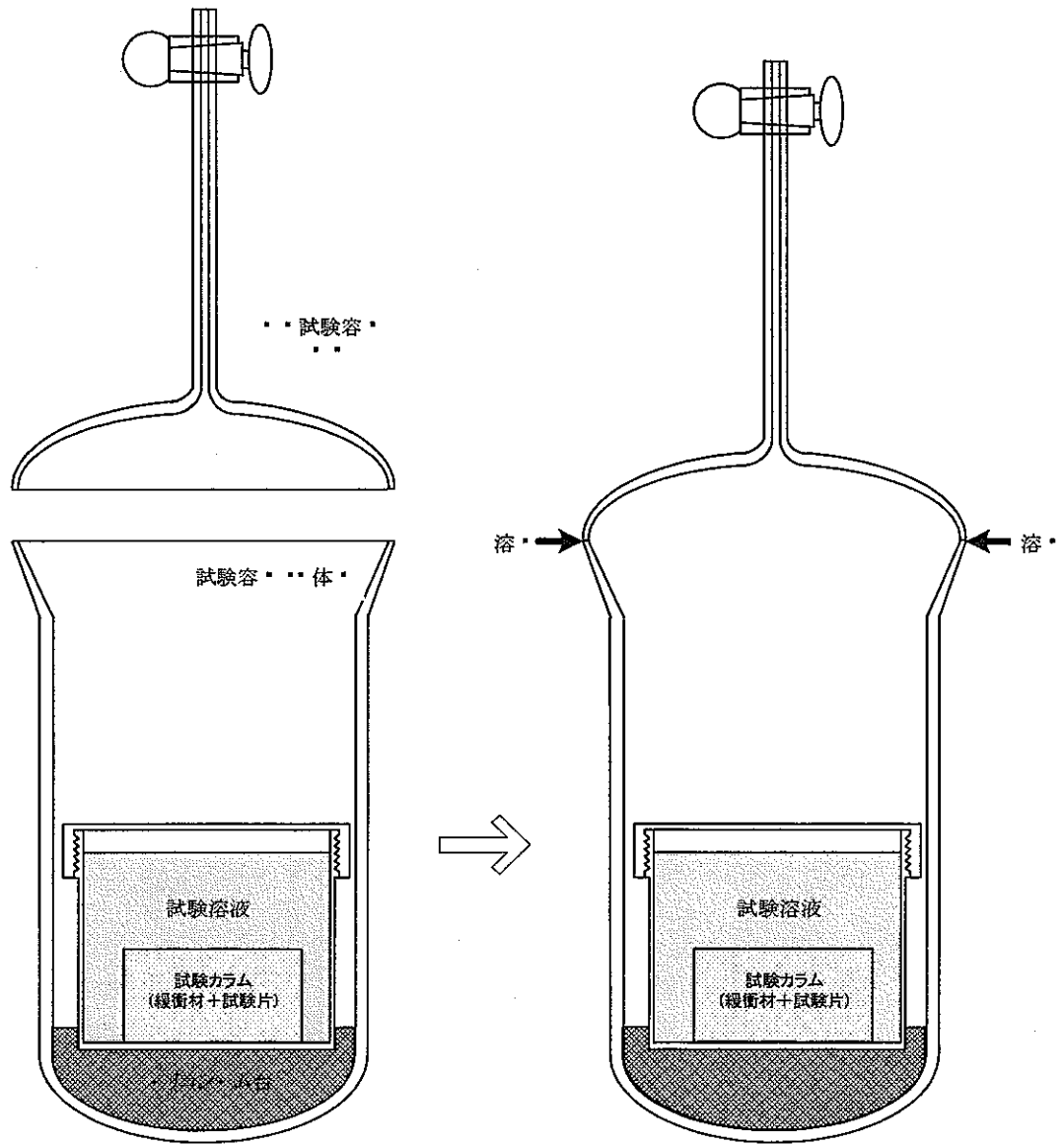


図 3.2-1 試験容器制作要領(1/3)



外側試験容器の溶着

図 3.2-2 試験容器制作要領(2/3)



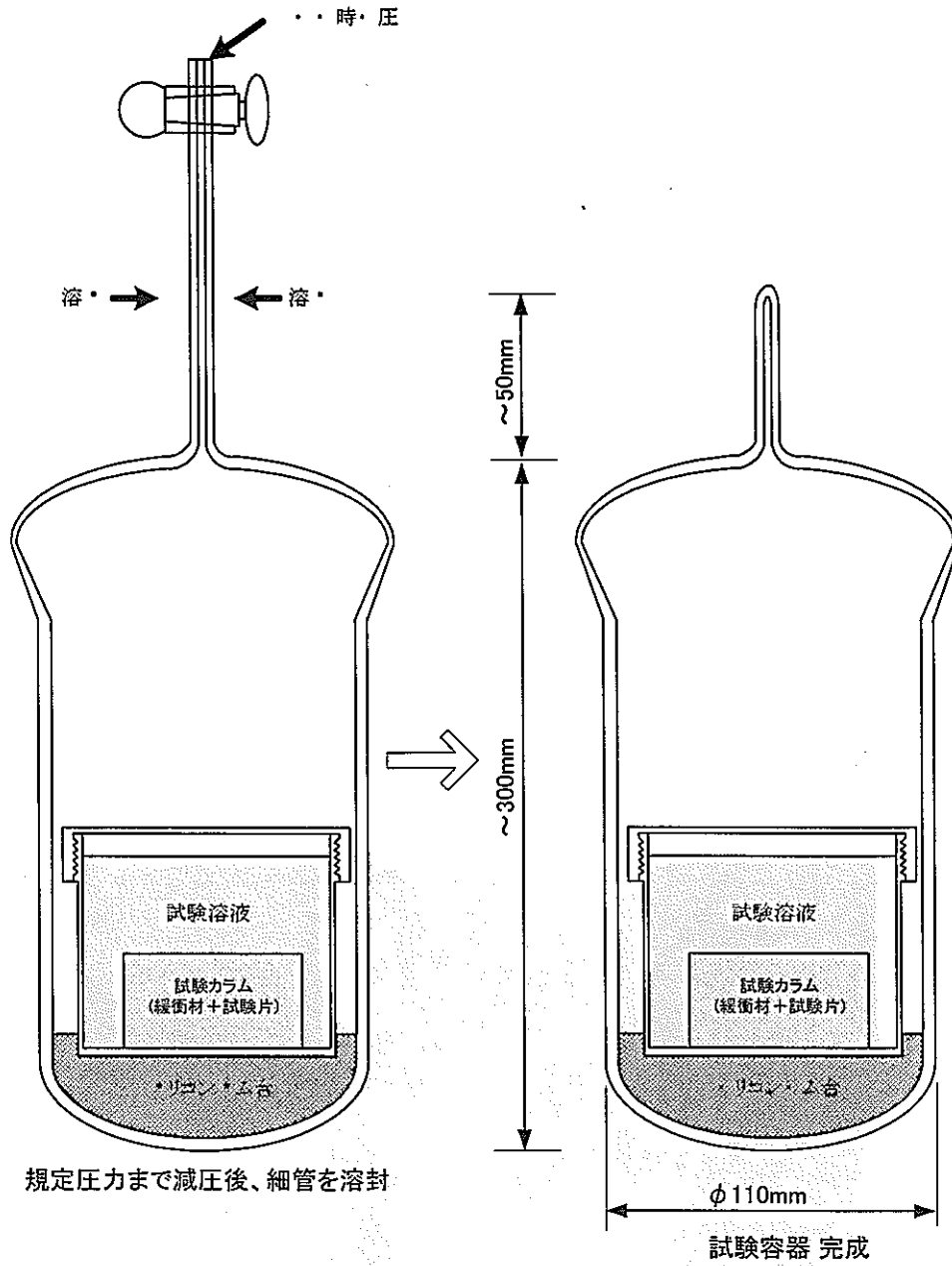


図 3.2-3 試験容器制作要領(3/3)

(b) 試験容器密封方法

外側試験容器の密封方法を図 3.2-4 に示す。また、外側試験容器の蓋部溶着状況写真と同溶着後の写真、及び密封溶着後(完成品)写真を図 3.2-5～7 にそれぞれ示す。

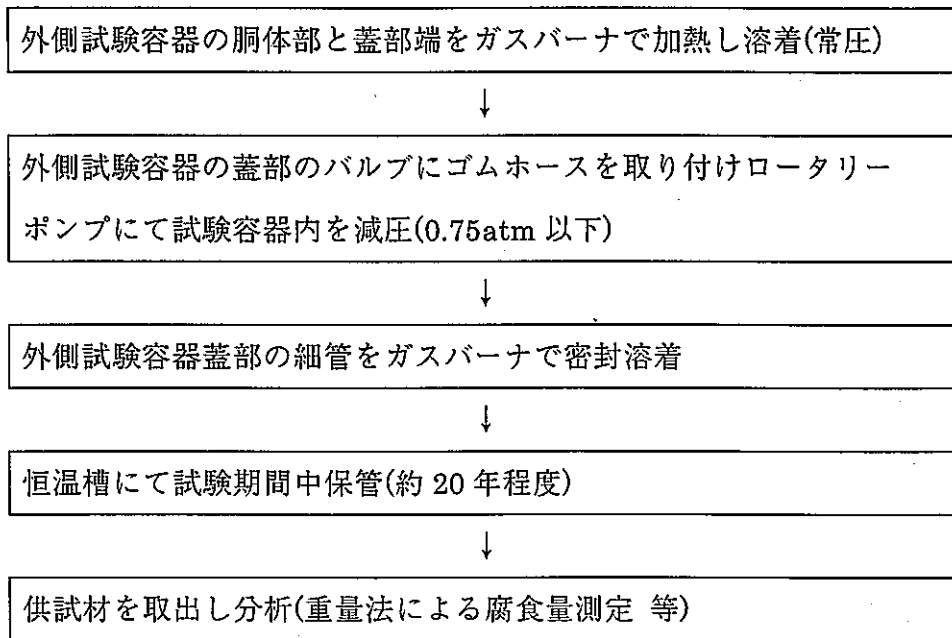


図 3.2-4 試験容器の密封溶着フロー

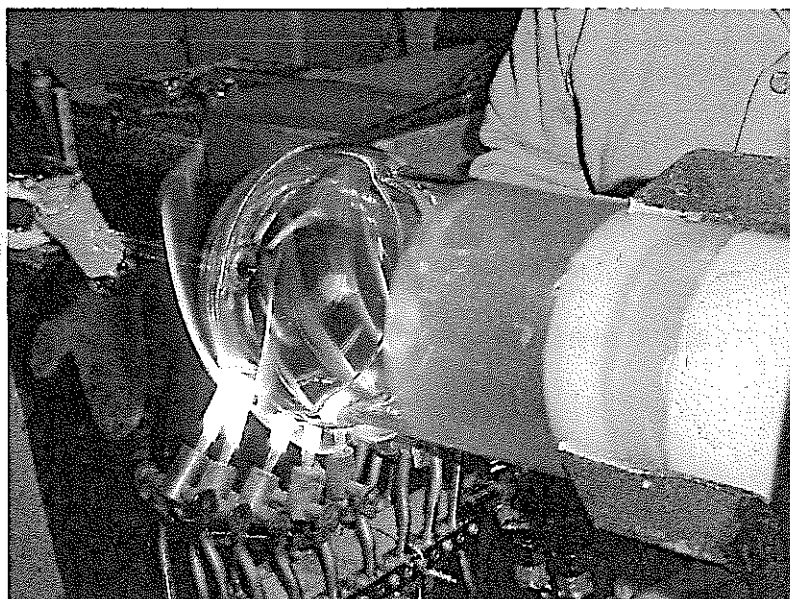


図 3.2-5 外側試験容器の蓋部溶着状況



図 3.2-6 外側試験容器 蓋部-胴体部溶着後の状況

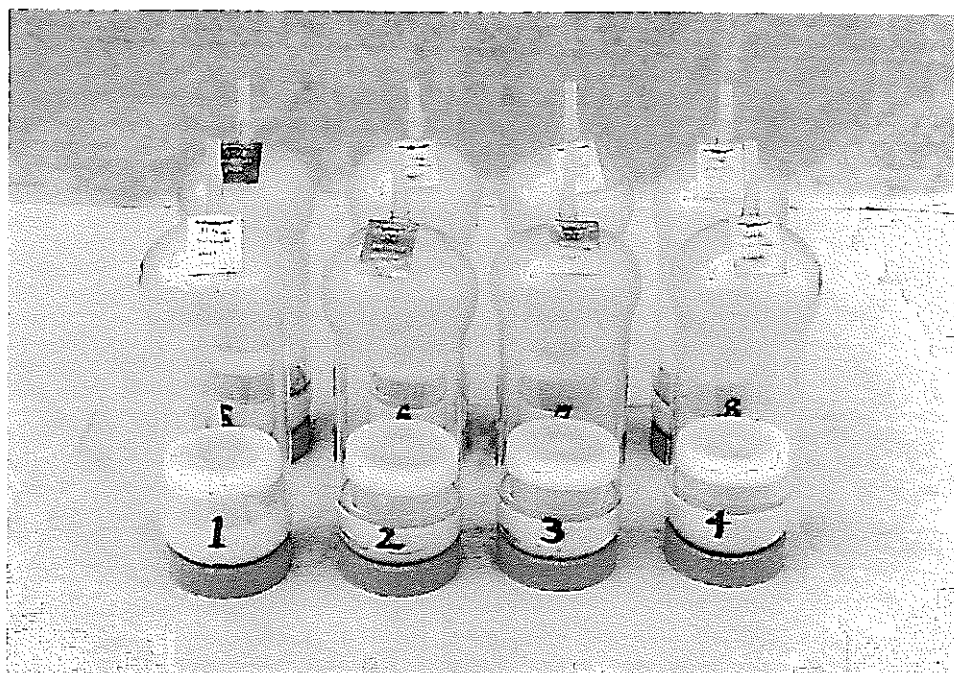


図 3.2-7 外側試験容器 密封溶着後(完成品)

(2) 試験条件

今回の試験に用いた試験条件を以下に示す。

- ① 供試材：炭素鋼(SM400B)
- ② 試験片表面仕上げ：エメリー# 800 仕上げ、アセトン脱脂
- ③ 試験片形状：カラム内壁に接触しない程度の大きさ：30×30×<sup>t</sup>2mm
- ④ 緩衝材：けい砂 30%+Na 型ベントナイト 70%とし、乾燥密度は 1.6g/cm<sup>3</sup>  
ベントナイトはクニミネ工業のクニゲル V1 を使用する。けい砂はクニミネ社製三河 5 号を使用する。
- ⑤ 溶液組成：人工海水(ASTM D-1141-52 に準ずる)

3.3 試験条件の管理方法

長期に渡る保管・管理が必要な試験装置については、部外者の立ち入りによるトラブルを防止するために、設置場所を隔離、施錠する。やむを得ず他の試験設備や機器類と同じ室内に設置される場合には、防止柵、立て札等により部外者の立ち入りを制限する。

また、各試験容器には、試験開始日時、試験目的、試験条件等が刻印された銘板を取り付けるものとする。詳細な内容が必要な場合には、記載書類を封印し、耐火金庫にて試験装置と共に保管する。

#### 4. 超長期試験として実施すべき研究項目の検討

超長期試験は、反応や移行速度の遅い現象に関する信頼性の高い“長期定量的データの取得”の観点と定常状態に到るまでに長期間を要する現象の遷移期間における“現象把握”の観点から重要であると考えられる。

そこで、平成9年度に実施した「地層処分システムの性能評価に関わる超長期試験の概念検討」を見直し、“長期定量データの取得”と“現象の把握”の観点から今後の地層処分事業化や安全規制に資するための超長期試験(20年程度)として実施すべき試験・研究を検討する。

「地層処分システムの性能評価に関わる超長期試験の概念検討」では長期試験が必要と考えられる物理的、化学的プロセスを以下のように分類した。

- A. 金属腐食(室内/原位置)
- B. ベントナイト変質(室内/原位置)
- C. ガラス溶解 (室内/原位置)
- D. 長期3相変化 (室内)
- E. 腐食生成物相互作用 (室内)
- F. ベントナイト中物質移行 (室内)
- G. 核種/岩石相互作用 (室内)
- H. コロイド形成・移行
- I. 天然有機物錯化・移行 (室内)
- J. 微生物影響・移行 (室内/原位置)
- K. ガス移行 (室内)
- L. 多孔体・岩盤水理 (原位置)
- M. 地下水化学 (原位置)
- N. 岩盤力学 (原位置)
- O. 施工技術 (原位置)
- P. シナリオ評価 (室内/原位置)
- Q. 総合評価 (室内/原位置)

今年度の研究項目を同様に整理したものを表 4-1 に示す。

表 4-1 研究項目の整理

	分類	試験名称
(1) 長期定量的 データの 取得	A. 金属腐食	① オーバーパック溶接部試験片の腐食試験 ② 金属腐食に伴い発生する水素ガス長期モニタリング ③ 超長期・埋設条件下での炭素鋼の腐食挙動および腐食生成物特性評価 ④ 透水腐食試験による炭素鋼の腐食挙動評価 ⑤ 圧縮ベントナイト中での微生物による炭素鋼腐食試験 ⑥ 腐植物質、および腐植物質放射線分解物が及ぼす炭素鋼腐食への影響評価&圧縮ベントナイト-腐植物質、および腐植物質放射線分解物共存下での炭素鋼腐食挙動評価 ⑦ チタンや銅などについての酸化性～還元性期間での超長期腐食試験 ⑧ 超長期試験による腐食生成物のin-situ(その場)分析 ⑨ 大型試験体による超長期腐食試験(室内) ⑩ 実規模埋設超長期試験(原位置)
	I. 天然有機物 錯化・移行	① 腐植物質のベントナイト透過特性試験&腐植物質放射線分解物のベントナイト透過特性試験
(2) 現象把握	B. ベントナイト中 物質移行	① 圧縮ベントナイト共存による溶液特性への影響評価
	O. 施工技術	① 緩衝材の施工時不均一性の影響評価
	P. シナリオ評価	① オーバーパックによる緩衝材の圧密沈下挙動試験 ② 飽和(脱ガス)現象・不飽和透水把握 ③ 圧密排水を伴う不飽和透水試験 ④ 密度低下特性(緩衝材の長期流出試験:割れ目流出・エロージョン)評価

さらに表 4-2～18 に各試験概念の検討結果表を共通フォーマットに示す。

表4-2 地層処分技術開発 超長期試験計画

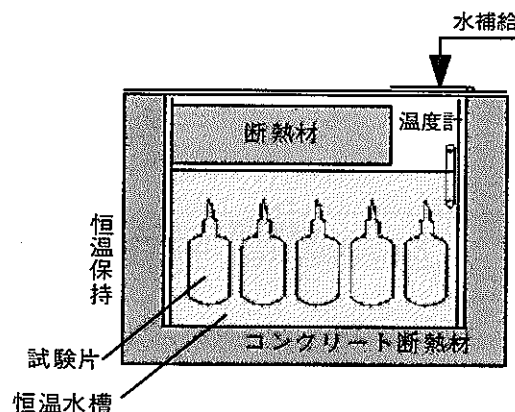
研究件名		オーバーパック腐食評価研究(室内)				試験 ／ 分析 手段 の 概 要 ・ ポ イ ン ト	試験手法 密閉容器による浸漬試験
分 類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. アンサイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. アンサイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)					分析方法 a) レーザラマン分光分析(LRS)による腐食皮膜in-situ連続分析 b) 密封アンブル開封後:GCIによる水素ガス分析 c) 試験片外部取り出し:SIMS,XRD等による皮膜解析 d) 試験片外部取出し:ICP,ICP-MS,IC,TOC,分光光度法による溶液分析
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料	<input type="checkbox"/> 核種移行	<input type="checkbox"/> 材料+核種移行			
	試料形態	<input type="checkbox"/> 複合系試料	<input checked="" type="checkbox"/> 単純系試料	<input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料			
	実施規模	<input checked="" type="checkbox"/> α.試験片規模	<input type="checkbox"/> β.実規模	<input type="checkbox"/> γ.その他( )			
実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I.室内(ENTRY,委託先)	<input type="checkbox"/> II.原位置(東濃鉱山等)	<input type="checkbox"/> III.その他( )				
研究期間	20年						観察頻度 <input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング
試験名称	オーバーパック溶接部試験片の腐食試験						モニタリング技術 <input type="checkbox"/> 新規技術 <input checked="" type="checkbox"/> 既存技術
目的 必要理由	オーバーパック候補材料である炭素鋼、チタン、或いは銅の胴体部を対象とした各種環境下での腐食試験では、長期健全性に関するデータが報告されている。一方、溶接部の長期健全性については十分に評価されていない。そこで、溶接部を含んだ試験片を用いて長期浸漬試験を実施する。				装置の 概略図		
装置・試験片	密閉式浸漬容器						
期待される効果	オーバーパックの長期健全性の信頼性を向上出来る。						

図 密封式 浸漬試験装置概略図

表4-3 地層処分技術開発 超長期試験計画

研究件名		オーバーパック腐食評価研究(室内)		試験／分析手段の概要・ポイント	試験手法 密閉容器による浸漬試験				
分類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ハンタイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ハンタイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)			分析方法 a) API-MSによる水素ガス連続モニタリング b) 試験片外部取り出し: SIMS, XRD等による皮膜解析 c) 試験片外部取出し: ICP, ICP-MS, IC, TOC, 分光光度法による溶液分析				
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料 <input type="checkbox"/> 核種移行 <input type="checkbox"/> 材料+核種移行							
	試料形態	<input type="checkbox"/> 複合系試料 <input checked="" type="checkbox"/> 単純系試料 <input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料							
	実施規模	<input checked="" type="checkbox"/> α. 試験片規模 <input type="checkbox"/> β. 実規模 <input type="checkbox"/> γ. その他( )							
	実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY, 委託先) <input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等) <input type="checkbox"/> III. その他( )							
研究期間	20年								
試験名称	金属腐食に伴い発生する水素ガス長期モニタリング		<table border="1"> <tr> <td>観察頻度</td> <td><input type="checkbox"/>単なる埋設</td> <td><input checked="" type="checkbox"/>定期的なモニタリング</td> </tr> <tr> <td>モニタリング技術</td> <td><input type="checkbox"/>新規技術</td> <td><input checked="" type="checkbox"/>既存技術</td> </tr> </table>	観察頻度	<input type="checkbox"/> 単なる埋設	<input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング	モニタリング技術	<input type="checkbox"/> 新規技術	<input checked="" type="checkbox"/> 既存技術
観察頻度	<input type="checkbox"/> 単なる埋設	<input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング							
モニタリング技術	<input type="checkbox"/> 新規技術	<input checked="" type="checkbox"/> 既存技術							
目的・必要理由	炭素鋼の数年度程度の低酸素環境下での腐食試験では保護皮膜形成により長期的には安定化する傾向にあることが報告されている。超長期的には保護皮膜が外的要因で破壊される可能性もあり、その後の再度皮膜形成までのプロセスを詳細測定することはガス蓄積型の腐食試験では困難であると考えられる。そこでガス流通型の腐食試験により長期的に水素ガスのモニタリングを実施する。		装置の概略図	<p>図 水素ガス発生量測定装置</p>					
装置・試験片	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験装置: ガス流通型腐食試験装置</li> <li>試験方法: 低ひずみ法</li> <li>試験片: Uバンド、Oリング、溶接残留応力付与試験片など</li> </ul>								
期待される効果	炭素鋼の長期健全性を向上できる。								

JNC Tj8400 2002-001



表4-4 地層処分技術開発 超長期試験計画

JNC T18400 2002-001

研究件名		オーバーバック腐食評価研究		試験 ／ 分析 手段 の 概 要 ・ ポ イ ン ト	「試験手法」 埋設条件を模擬したベントナイト中での炭素鋼試験片について、腐食電位およびEhを定期的にモニターしながら、長期の腐食試験を行う。					
分類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ベントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ベントナイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)			「分析手法」 a) ポテンシオメータによる腐食電位・腐食電流定期測定 b) 白金電極・照合電極によるベントナイト中溶液Eh定期測定 c) 試験片外部取り出し→腐食生成物組成、特性分析 d) 試験片外部取り出し→重量測定 e) 試験片外部取り出し→水素分析					
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料 <input type="checkbox"/> 核種移行 <input type="checkbox"/> 材料+核種移行								
	試料形態	<input type="checkbox"/> 複合系試料 <input type="checkbox"/> 単純系試料 <input checked="" type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料								
	実施規模	<input checked="" type="checkbox"/> α. 試験片規模 <input type="checkbox"/> β. 実規模 <input type="checkbox"/> γ. その他( )								
	実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY,委託先) <input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等) <input type="checkbox"/> III. その他( )								
研究期間	30年間		<table border="1"> <tr> <td>観察頻度</td> <td><input type="checkbox"/>単なる埋設</td> <td><input checked="" type="checkbox"/>定期的なモニタリング</td> </tr> <tr> <td>モニタリング技術</td> <td><input type="checkbox"/>新規技術</td> <td><input checked="" type="checkbox"/>既存技術</td> </tr> </table>		観察頻度	<input type="checkbox"/> 単なる埋設	<input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング	モニタリング技術	<input type="checkbox"/> 新規技術	<input checked="" type="checkbox"/> 既存技術
観察頻度	<input type="checkbox"/> 単なる埋設	<input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング								
モニタリング技術	<input type="checkbox"/> 新規技術	<input checked="" type="checkbox"/> 既存技術								
試験名称	超長期・埋設条件下での炭素鋼の腐食挙動および腐食生成物特性評価									
目的 必要理由	<p>時間の経過とともにオーバーバックの腐食が進むと人工バリア内に占める腐食生成物の影響は無視できなくなり、人工バリアの挙動解析のためには、腐食挙動と腐食生成物の特性を正確に評価することが必要である。</p> <p>一方、埋設条件下での超長期に渡る金属材料の腐食挙動については、ナチュラルアナログによる研究例が見られるが、埋設条件(環境条件)が明確でない。そのため、腐食速度等の腐食挙動の正確な評価は困難であり、腐食生成物の特性も埋設条件下とは異なる可能性がある。</p> <p>そこで、地層処分場を模擬した超長期の腐食試験を行い、炭素鋼の腐食挙動および腐食生成物の特性を明らかにする。</p>									
装置・試験片	電気加熱式腐食試験(板状試験片)		装置の概略図							
期待される効果	<p>超長期の腐食試験を行うことにより、現状の比較的短期間の室内試験結果をベースにした腐食進展モデルの有用性が確認できる。また、得られた腐食速度や腐食膨張量などの腐食生成物の特性データを活用すれば、オーバーバック～緩衝材の人工バリアのより現実的な解析が可能となる。</p>									

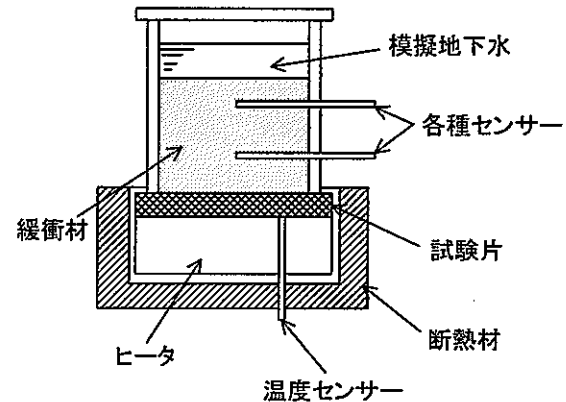


図 加熱式腐食試験装置 概要図

表4-5 地層処分技術開発 超長期試験計画

研究件名		オーバーバック腐食評価研究		試験／分析手段の概要・ポイント	「試験手法」 埋設条件を模擬したベントナイト中での炭素鋼試験片について、強制的に通水し、溶液を定期的に分析しながら、長期の腐食試験を行う。	
分類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行	<input type="checkbox"/> B. ベントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理		「分析手法」 a) 定期溶液分析 b) 試験片外部取り出し→腐食生成物組成、特性分析 c) 試験片外部取り出し→重量測定 d) 試験片外部取り出し→水素分析	観察頻度 <input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング モニタリング技術 <input type="checkbox"/> 新規技術 <input checked="" type="checkbox"/> 既存技術
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料 <input type="checkbox"/> 核種移行 <input type="checkbox"/> 材料+核種移行	<input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ベントナイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理			
	試験形態	<input type="checkbox"/> 複合系試料 <input type="checkbox"/> 単純系試料 <input checked="" type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料	<input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)			
	実施規模	<input checked="" type="checkbox"/> α. 試験片規模 <input type="checkbox"/> β. 実規模 <input type="checkbox"/> γ. その他( )				
実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY,委託先) <input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等) <input type="checkbox"/> III. その他( )					
研究期間	30年間					
試験名称	透水腐食試験による炭素鋼の腐食挙動評価					
目的必要理由	オーバーバックの腐食開始後、その腐食膨張により緩衝材の圧密が進行し、緩衝材密度変化が生じる。したが、オーバーバック近傍の挙動解析を行う場合には、この発縮膨張量および腐食生成物の特性を評価する必要がある。しかしながら、埋設条件下での腐食速度は非常に遅いことが予想され、通常の試験期間においては、ベントナイトが圧密されるまで腐食が進行することは困難であると思われる。そこで、高圧下にて高い動水勾配を設定し、腐食促進試験を行い、腐食生成物の特性評価を行う。					
装置・試験片	加圧式透水腐食試験(板状試験片)				装置の概略図	
期待される効果	本試験により腐食生成物の特性を評価することにより、酸素存在環境下での腐食挙動の解析が可能となる。また、埋設条件下の腐食試験と比較することにより、さらに長期間の腐食挙動の評価が可能となる。					

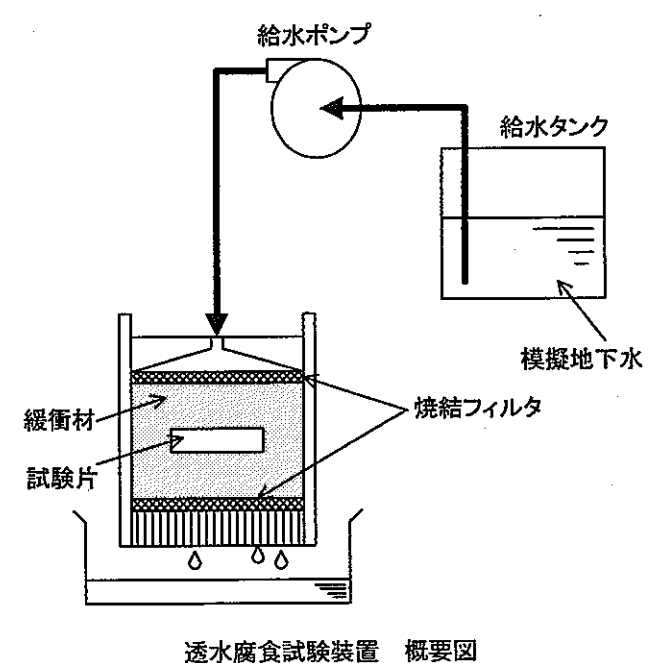


表4-6 地層処分技術開発 超長期試験計画

研究件名		オーバーパック腐食評価研究		試験 ／ 分析 手段 の 概 要 ・ ポ イ ン ト	試験手法 密閉容器による浸漬試験
分 類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ベントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ベントナイト中物質移行 <input checked="" type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)			分析方法 代謝物の評価: GC-MS, LC-MS, IR, NMR, ICP-MS, IC 腐食挙動: 重量法, XRD等
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料	<input type="checkbox"/> 核種移行		<input type="checkbox"/> 材料+核種移行
	試験形態	<input checked="" type="checkbox"/> 複合系試料	<input type="checkbox"/> 単純系試料		<input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料
	実施規模	<input checked="" type="checkbox"/> α. 試験片規模	<input type="checkbox"/> β. 実規模		<input type="checkbox"/> γ. その他( )
	実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY委託先)	<input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等)		<input type="checkbox"/> III. その他( )
研究期間	20年				
試験名称	圧縮ベントナイト中の微生物による炭素鋼腐食試験 長期試験				観察頻度 <input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング
目的 必要理由	<p>第二次とりまとめにおける微生物腐食の影響評価として、代表的な細菌二種で圧縮ベントナイト中の鉄の腐食挙動を調べているが、処分環境条件とその条件下で活動しうる細菌の種類組み合わせで評価されたとはいえない。本試験では処分環境条件下、ベントナイトの空隙で活動しうる鉄細菌による炭素鋼腐食の影響、あるいは鉄細菌以外の微生物を対象として、微生物活動による代謝物が炭素鋼腐食に及ぼす影響を調べる。</p> <p>これらの微生物活動の影響を定量的に評価するには、長期間での試験評価が必要である。</p>				モニタリング技術 <input type="checkbox"/> 新規技術 <input checked="" type="checkbox"/> 既存技術
装置・ 試験片	密閉式浸漬容器		装置の概略図		
期待される効果	<p>圧縮ベントナイトの擬似閉鎖系における、微生物の活動(生育)可能期間、増殖に関する知見が得られる。微生物の代謝活動による化学環境変化が及ぼす、炭素鋼腐食挙動が明らかとなる。鉄細菌による炭素鋼腐食形態、腐食速度が評価できる。</p>				

図 微生物共存系での炭素鋼腐食試験 概略図

表4-7 地層処分技術開発 超長期試験計画

研究件名		オーバーパッキング腐食評価研究		試験手法 (1)静的浸漬試験(溶封アンブル試験)により、簡便に長期の浸漬試験が実施でき、かつ腐食状況を目視確認できる。 (2)腐植物質を添加したベントナイト中に炭素鋼試験片をセットし、圧縮成型して浸漬試験を実施する。  分析手法 腐食過程での腐植物質の構造変化:GC-MS, LC-MS, FT-IR, NMR, IC等 腐食速度:重量法等 腐食生成物:XPS, XRD等	
分類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ベントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ベントナイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)			
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料	<input type="checkbox"/> 核種移行		<input type="checkbox"/> 材料+核種移行
	試料形態	<input type="checkbox"/> 複合系試料	<input type="checkbox"/> 単純系試料		<input checked="" type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料
	実施規模	<input checked="" type="checkbox"/> α. 試験片規模	<input type="checkbox"/> β. 実規模		<input type="checkbox"/> γ. その他( )
	実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY委託先)	<input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等)		<input type="checkbox"/> III. その他( )
研究期間	10年				
試験名称	(1) 腐植物質、および腐植物質放射線分解物が及ぼす炭素鋼腐食への影響評価 (2) 圧縮ベントナイト-腐植物質、および腐植物質放射線分解物共存下での炭素鋼腐食挙動評価				
目的必要理由	腐植物質(フミン酸、フルボ酸等)は土壌、地下水中に普遍的に存在し、放射性廃棄物処分研究では、その核種吸着能、錯形成挙動特性が調べられている。腐植物質の構造はアミノ基、カルボン酸、フェノール性水酸基の官能基をもつ高分子電解質であるため、炭素鋼表面に堆積して腐食挙動に影響を及ぼす可能性が考えられる。一方で、地下水中の腐植物質濃度は数ppmと低いことから、その影響を明確にするためには長期評価が必要と考えられる。 本試験では、低酸素雰囲気下での腐植物質溶液中での炭素鋼腐食挙動とともに、圧縮ベントナイト中で炭素鋼表面に腐植物質に濃集した系での炭素鋼の腐食挙動を長期浸漬試験で調べる。 また、腐植物質の放射線分解物についても同様に、炭素鋼腐食挙動に及ぼす影響を調べる。				
装置・試験片	(1) 腐植物質、および腐植物質放射線分解物が及ぼす炭素鋼腐食への影響評価 溶封アンブル試験 (2) 圧縮ベントナイト-腐植物質、および腐植物質放射線分解物共存下での炭素鋼腐食挙動評価 密閉式浸漬試験				
期待される効果	溶封アンブル試験では、長期にわたって腐植物質の堆積の影響、腐食状況、腐食特性が明らかとなる。 圧縮ベントナイト中での炭素鋼腐食挙動に及ぼす腐植物質の影響が明らかとなる。				
装置の概略図	<p>温度管理</p> <p>恒温層(80°C)</p> <p>溶封アンブル</p> <p>模擬地下水 + 腐食物質、分解物</p> <p>炭素鋼試験片</p> <p>密閉試験容器</p> <p>模擬地下水</p> <p>圧縮ベントナイト + 腐植物質、分解物</p>				

図 有機物腐植生成物による炭素鋼腐食への影響評価試験装置概略図

表4-8 地層処分技術開発 超長期試験計画

研究件名		オーバーパックの腐食評価研究(室内)	
分類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ヘンリット変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ヘンリット中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)	
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料	<input type="checkbox"/> 核種移行 <input type="checkbox"/> 材料+核種移行
	試験形態	<input checked="" type="checkbox"/> 複合系試料 <input type="checkbox"/> 単純系試料	<input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料
	実施規模	<input checked="" type="checkbox"/> α. 試験片規模 <input type="checkbox"/> β. 実規模	<input type="checkbox"/> γ. その他( )
	実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY,委託先) <input type="checkbox"/> II. 原位(東濃鉱山等)	<input type="checkbox"/> III. その他( )
研究期間	20年		
試験名称	チタンや銅などについての酸化性～還元性期間での超長期腐食試験		
目的必要理由	本研究における2項は炭素鋼を対照としたものであるが、この試験手法は平成9年度の成果をベースとした優れた手法であり、これらの手法をチタン、銅、耐食低合金鋼、マグネタイト付炭素鋼など炭素鋼以外の試験材に適用し超長期にわたる腐食挙動を比較・評価する。		
装置・試験片	試験装置：本研究の2項に対応する試験装置 試験材：チタン合金、銅、耐食低合金鋼、マグネタイト付炭素鋼 試験片：本研究の2項に対応する試験片		
期待される効果	炭素鋼との対比においてチタン、銅などの代替材料の超長期にわたる腐食挙動が明らかとなり、また炭素鋼の腐食挙動に及ぼすマグネタイト付与の影響が超長期的に明らかとなる。		
試験／分析手段の概要・ポイント			
モニタリング項目			
<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材中の酸化還元電位</li> <li>・緩衝材中の温度分布</li> <li>・緩衝材中の化学種分布(pHなど)</li> <li>・試験材の腐食電位</li> <li>・試験材の水素濃度</li> <li>・試験材の平均腐食速度</li> <li>・試験材の腐食深さ分布</li> </ul>			
試験終了後の評価			
<ul style="list-style-type: none"> <li>・腐食減量</li> <li>・腐食生成物の分析</li> </ul>			
観察頻度		<input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング	
モニタリング技術		<input type="checkbox"/> 新規技術 <input checked="" type="checkbox"/> 既存技術	
装置の概略図			
<p style="text-align: center;">図 オーバーパックの長期腐食試験装置</p>			

JNC Tj8400 2002-001

表4-9 地層処分技術開発 超長期試験計画

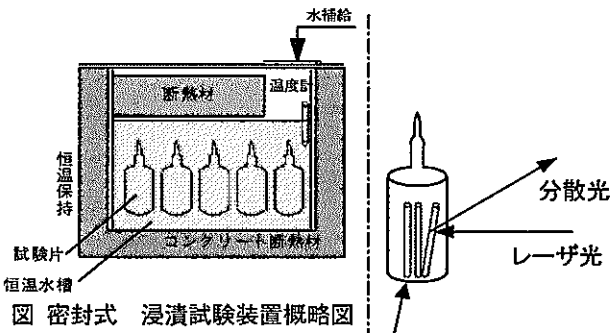
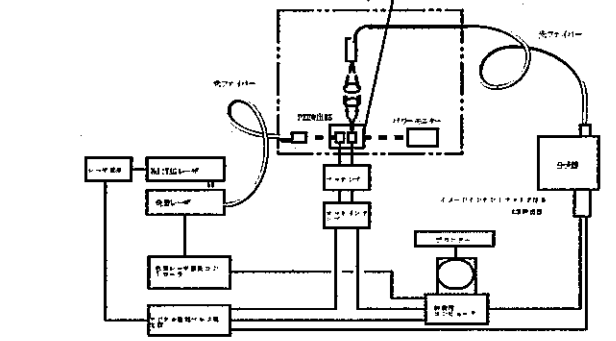
研究件名		オーバーパック腐食超長期試験(室内試験)		試験 ／ 分析 手段 の 概 要 ・ ポ イ ン ト	定期的モニタリング項目		
分類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ヘントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ヘントナイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)			・目視による金属表面の連続観察 ・レーザーラマン分光分析(LRS)による金属表面の連続分析 ・レーザー蛍光分析(TRLFS)による溶液の連続分析		
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料	<input type="checkbox"/> 核種移行		<input type="checkbox"/> 材料+核種移行	試験終了後の評価項目	
	試験形態	<input type="checkbox"/> 複合系試料	<input checked="" type="checkbox"/> 単純系試料		<input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料	・発生ガス量 ・試験片の表面分析: EXAFS, TFXRD, RBS/PIXEなど ・溶液の分析: ICP, ICP-MS, IC, TOC, 分光光度など	
	実施規模	<input checked="" type="checkbox"/> α. 試験片規模	<input type="checkbox"/> β. 実規模		<input type="checkbox"/> γ. その他( )	観察頻度 <input type="checkbox"/> 単なる埋 <input checked="" type="checkbox"/> 定期的モニタリング モニタリング技術 <input checked="" type="checkbox"/> 新規技術 <input type="checkbox"/> 既存技術	
実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY,委託先)	<input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等)	<input type="checkbox"/> III. その他( )				
研究期間	20年						
試験名称	超長期試験による腐食生成物のin-situ(その場)分析						
目的必要理由	<p>腐食環境における金属表面の可視化はPA上重要な意味を持つと考えられる。本研究の4・1項の試験は優れた手法ではあるが、緩衝材共存のため金属表面を観察・分析することが困難である。ここでは、溶液に浸漬した金属の表面を定期的に目視観察すると共に、腐食生成物(金属表面、溶液中)をレーザー光を利用してin-situ(その場)分析することにより、金属材料の耐食性に対する信頼性を高める。</p>				 <p>図 密封式 浸漬試験装置概略図</p>		
装置・試験片	<p>・試験装置: 基本的には本研究の4・2項で検討したガラスアンプルを用いる。</p> <p>・試験材: 炭素鋼、チタン、銅、耐食低合金鋼、マグネタイト付と炭素鋼。</p> <p>・試験片: 基本的には表面分析が容易な板状試験片とする。</p>				<p>装置の概略図</p>  <p>図 腐食生成物のin-situ 分析装置概略図</p>		
期待される効果	各種金属材料表面の著長期にわたる経時変化がin-situ(その場)観察・分析され、金属材料の耐食性に対する信頼感が高まる。						

表4-10 地層処分技術開発 超長期試験計画

JNC T38400 2002-001

研究件名		オーバーバック超長期腐食評価試験(室内)				試験 ／ 分析 手段 の 概 要 ・ ポ イ ン ト	試験方法	炭素鋼、チタン、銅などについて実規模オーバーバックを製作し、これを密閉環境下に設置して、腐食電位E <sub>H</sub> 等をモニターしながら長期間の腐食試験を行う。
分類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食	<input type="checkbox"/> D. 長期3相変化	<input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行	<input type="checkbox"/> K. ガス移行		モニタリング項目	・腐食電位(当該金属の自然浸漬電位) ・酸化還元電位(白金電極の自然浸漬電位)
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料	<input type="checkbox"/> 核種移行	<input type="checkbox"/> 材料+核種移行	<input type="checkbox"/> 材料+核種移行		試験終了後の評価項目	・表面減肉状況 ・表面皮膜解析、など
	試験形態	<input checked="" type="checkbox"/> 複合系試料	<input type="checkbox"/> 単純系試料	<input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料	<input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料		観察頻度	<input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング
	実施規模	<input type="checkbox"/> α. 試験片規模	<input checked="" type="checkbox"/> β. 実規模	<input type="checkbox"/> γ. その他( )	<input type="checkbox"/> γ. その他( )		モニタリング技術	<input type="checkbox"/> 新規技術 <input checked="" type="checkbox"/> 既存技術
実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY委託先)	<input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等)	<input type="checkbox"/> III. その他( )	<input type="checkbox"/> III. その他( )				
研究期間	20年							
試験名称	大型試験体による超長期腐食試験(室内)							
目的 必要理由	オーバーバック用金属材料の腐食評価試験はこれまで試験片レベルの小型試験体を用いることが大半であったが、実機オーバーバックのような大型構造物ではマクセル腐食の可能性も指摘されており、ここではデモンストレーションの意味も含めて実機レベルの大型試験体を用いて超長期にわたるループ式腐食試験を行い、金属材料の耐食性に対する国民の信頼感を高める。					装置 の 概 略 図		
装置・試験片	試験装置：ループ式試験装置(右図参照) 供試材料：炭素鋼、チタン、銅などのオーバーバック候補材料 試験体：実規模レベルの大型試験体(右図参照)(電気ヒーター内蔵)							
期待される効果	実規模オーバーバック容器による処分環境下における次の腐食挙動を明らかにすることにより、従来の評価手法の妥当性を確認すると共に、オーバーバックのバリア機能に対する信頼性を実証することが出来る。 (1) マクセル腐食による腐食の局在化の可能性の実証 (2) 腐食に作用する酸素の供給範囲・供給量							

表4-11 地層処分技術開発 超長期試験計画

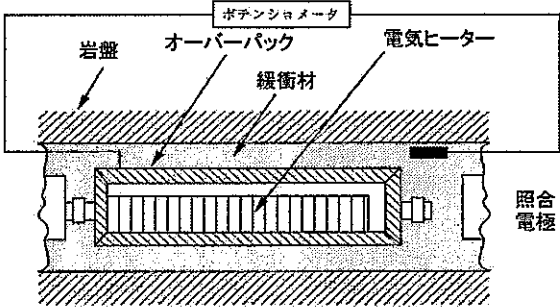
研究件名		オーバーバック腐食超長期試験(原位置)		試験／分析手段の概要・ポイント	試験手法 ・炭素鋼、チタン、銅などのオーバーバック候補材料について実規模大の大型試験体を製作し、これらを原位置に設置して、腐食電位、Ehなどをモニターしながら超長期の腐食試験を行う。
分類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ヘントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ヘントナイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)			モニタリング項目 ・腐食電位(当該金属の自然浸漬電位) ・酸化還元電位(白金電極の自然浸漬電位)
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料	<input type="checkbox"/> 核種移行		<input type="checkbox"/> 材料+核種移行
	試験形態	<input checked="" type="checkbox"/> 複合系試料	<input type="checkbox"/> 単純系試料		<input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料
	実施規模	<input type="checkbox"/> α. 試験片規模	<input checked="" type="checkbox"/> β. 実規模		<input type="checkbox"/> γ. その他( )
実施場所	<input type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY委託先)	<input checked="" type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等)	<input type="checkbox"/> III. その他( )	試験終了後の評価項目 ・腐食減肉量 ・表面皮膜解析、など	
研究期間			20年	観察頻度	<input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング
試験名称	実規模埋設超長期腐食試験 (原位置)			モニタリング技術	<input type="checkbox"/> 新規技術 <input checked="" type="checkbox"/> 既存技術
目的必要理由	HLWを対象とする腐食試験は従来小型試験片を用いた実験室的な要素試験が大半であり、少数少ない原位置試験でも試験片レベルの小型試験体がり用いられてきたが、実オーバーバックのような大型構造物ではマクロセル腐食の可能性も適されており、ここでは実規模レベルの大型試験体を用いて原位置で超長期試験を行うことによりオーバーバック容器的耐食性に対する国民の理解を得る。			装置の概略図	 <p>実規模埋設超長期腐食試験装置(原位置)の概念図</p>
装置・試験片	試験装置: 実規模埋設腐食試験装置(右図参照) 供試材料: 炭素鋼、チタン、銅などのオーバーバック候補材料 試験体: 実オーバーバックを模擬した大型試験体(右図参照)(電気ヒーター内蔵)				
期待される効果	実規模レベルの大型試験体による処分環境下における超長期試験により次のような腐食挙動が明らかになり、従来の評価手法の妥当性が確認されると共に、オーバーバックのバリア機能に対する信頼性について広く国民の理解を得ることが出来る。 ・マクロセル腐食による腐食の局在化の可能性の実証 ・地下水中の天然微生物の影響の有無				



表4-12 地層処分技術開発 超長期試験計画

研究件名		ベントナイト中物質移行	
分類	テーマ分類	<input type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ベントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input checked="" type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input checked="" type="checkbox"/> F. ベントナイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)	
	試験対象	<input type="checkbox"/> 材料	<input type="checkbox"/> 核種移行
	試料形態	<input type="checkbox"/> 複合系試料	<input type="checkbox"/> 単純系試料
	実施規模	<input checked="" type="checkbox"/> α. 試験片規模	<input type="checkbox"/> β. 実規模
	実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY委託先)	<input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等)
研究期間	10年		
試験名称	(1) 腐植物質のベントナイト透過特性試験 (2) 腐植物質放射線分解物のベントナイト透過特性試験		
目的必要理由	腐植物質(フミン酸、フルボ酸等)は土壌、地下水中に普遍的に存在し、放射性廃棄物処分研究では、その核種吸着能、錯形成挙動特性が調べられている。腐植物質の構造はアミノ基、カルボン酸、フェノール性水酸基の官能基をもつ高分子電解質で、炭素鋼の腐食挙動に影響を及ぼす可能性が考えられる。 本試験では、腐植物質の炭素鋼腐食挙動を評価する前提として、腐植物質が緩衝材(ベントナイト)を透過し炭素鋼オーバーパックに到達、蓄積するかどうかのベントナイト透過特性を長期間の溶液流通試験で評価する。 また、腐植物質が低分子量成分への放射線分解が起これば、これらの低分子量化合物のベントナイト透過特性が高まると推定されるので、この分解生成物の透過特性についても評価する。		
装置・試験片	(1) 腐植物質のベントナイト透過特性試験 ベントナイトカラムを用いた腐植物質溶液の流通試験 (2) 腐植物質放射線分解物のベントナイト透過特性試験 (事前評価として、放射線照射による腐植物質分解試験とその化合物組成分析が必要) ・ベントナイトカラムを用いた腐植物質の放射性分解物溶液の流通試験		
期待される効果	・長期試験とすることで、ベントナイト中の腐植物質透過量、速度についての知見が得られる。 ・腐植物質放射線分解物のベントナイト中での透過量、速度についての知見が得られる。		

試験/分析手段の概要・ポイント

試験手法	
(1)ベントナイトカラムを用いた溶液流通試験	
(2)腐植物質溶液の放射線分解試験	
分析手法	
腐植物質の構造変化:GC-MS, LC-MS, IR, NMR, IC等	
腐食速度:重量法等	
腐食生成物:XPS, XRD等	
観察頻度	<input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング
モニタリング技術	<input type="checkbox"/> 新規技術 <input checked="" type="checkbox"/> 既存技術

装置の概略図

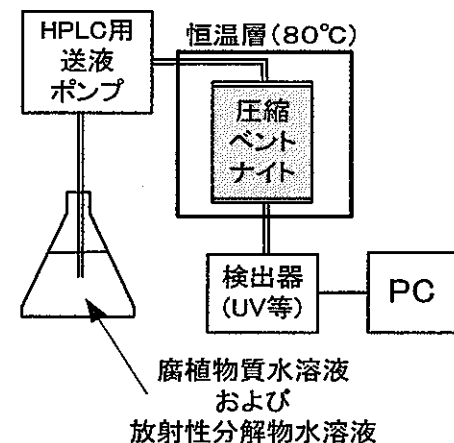


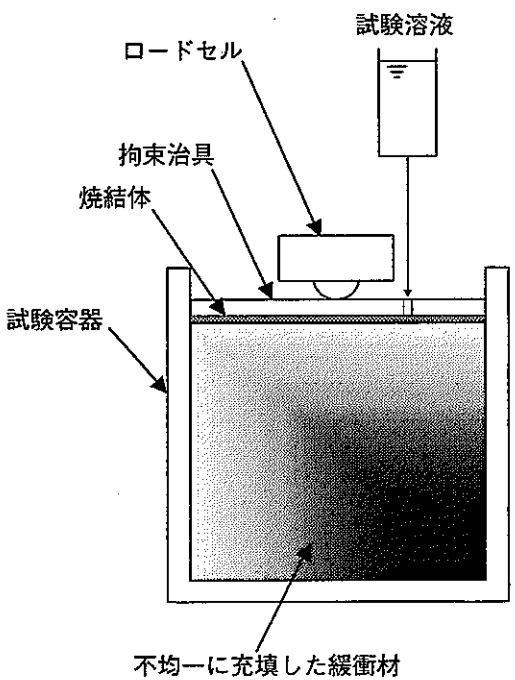
図 有機物腐植物質のベントナイト透過特性試験装置概略図

表4-13 地層処分技術開発 超長期試験計画

JNC Tj8400 2002-001

研究件名		ベントナイトの化学的緩衝効果確認試験(室内)		試験／分析手段の概要・ポイント	試験手法 密閉容器による浸漬試験
分類	テーマ分類	<input checked="" type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ベントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ベントナイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)			分析方法 a) Pt電極・照合電極によるEh/pH連続測定 b) GCIによる透水後側容器内の酸素濃度分析 c) 分光光度計による透水後溶液の溶存酸素分析
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料 <input type="checkbox"/> 核種移行 <input type="checkbox"/> 材料+核種移行			
	試験形態	<input type="checkbox"/> 複合系試料 <input checked="" type="checkbox"/> 単純系試料 <input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料			
	実施規模	<input checked="" type="checkbox"/> α. 試験片規模 <input type="checkbox"/> β. 実規模 <input type="checkbox"/> γ. その他( )			
	実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY委託先) <input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等) <input type="checkbox"/> III. その他( )			
研究期間	20年		観察頻度 <input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング モニタリング技術 <input type="checkbox"/> 新規技術 <input checked="" type="checkbox"/> 既存技術		
試験名称	圧密ベントナイト共存による溶液特性への影響評価				
目的必要理由	ベントナイトには止水性能をはじめとして、物質移行抑制機能が報告されている。また、ベントナイト中にはパイライト(FeS <sub>2</sub> )等の還元性物質が含まれていることから、埋め戻し直後の酸素を溶解した地下水はベントナイト中を透水することでオーバーバックと接触する時には脱酸素地下水に特性変化していることが考えられる。そこで、長期ベントナイト透水試験を実施し透水前後の溶液特性(酸化還元電位、溶存酸素等)変化をモニタリングする。				
装置・試験片	大型カラムによるベントナイト透水試験				
期待される効果	埋め戻し後初期にオーバーバックと接触する地下水の酸化還元特性を把握出来る。これにより炭素鋼オーバーバックの長期健全性を向上出来る。				
		装置の概略図		<p>図 緩衝材透過液の酸化還元状態測定試験装置</p>	

表4-14 地層処分技術開発 超長期試験計画

研究件名		坑道埋め戻し方法及び埋め戻し材の健全性の確認			
分類	テーマ分類	<input type="checkbox"/> A. 金属腐食	<input type="checkbox"/> D. 長期3相変化	<input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行	<input type="checkbox"/> K. ガス移行
		<input type="checkbox"/> B. ヘントナイト変質	<input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用	<input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行	<input type="checkbox"/> L. 多孔体水理
		<input type="checkbox"/> C. ガラス溶解	<input type="checkbox"/> F. ヘントナイト中物質移行	<input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行	<input type="checkbox"/> M. 岩盤水理
			<input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用		<input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)
	試験対象	■材料		<input type="checkbox"/> 核種移行	<input type="checkbox"/> 材料+核種移行
試験形態	<input type="checkbox"/> 複合系試料		■単純系試料		
実施規模	■α. 試験片規模		<input type="checkbox"/> β. 実規模	<input type="checkbox"/> γ. その他( )	
実施場所	■I. 室内(ENTRY,委託先)		<input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等)	<input type="checkbox"/> III. その他( )	
研究期間					
試験名称	緩衝材の施工時不均一性の影響評価				
目的必要理由	緩衝材の施工時において、充填された密度がある程度は不均一となることが想定されるが、地下水が浸潤していくとともに膨潤圧の発生に伴い自然と密度が均一化して傾向にあると考えられる。そこで、緩衝材を人為的に不均一に充填を行い、超長期的に密度をモニタリングすることにより、施工時における充填密度のばらつきが飽和時の密度に影響するかが確認でき、施工時の品質管理を検討する際の参考とできる。				
装置・試験片	膨潤容器 処分孔の緩衝材設置寸法を模擬した容器と、膨潤過程をモニタリングするためのロードセルより構成される装置。 人為的に容器内に緩衝材密度が不均一となるよう充填を行い、このままの状態では膨潤させる。膨潤することにより緩衝材の密度が均一に向かっていく過程を、一定期間ごとに測定する。				
期待される効果	緩衝材の充填における品質管理項目として、充填時の密度の均質性が挙げられるが、施工時における密度のばらつきに対する判定基準が必要である。 上記実験を行い均質性に対するデータを取得することにより、施工時のばらつきに対する知見を得ることができ、品質管理の基準値の参考とすることができる。				
		試験／分析手段の概要・ポイント			
		(試験) 試験容器内に緩衝材を人為的に密度が不均一となるよう充填を行い、地下水を模擬した試験溶液を供給し緩衝材を膨潤させる。密度が不均一な緩衝材は、膨潤することにより均一になるようとするが、どの程度の不均一であれば均一となることが可能か、更に均一となるまでの期間について確認を行う。  (分析手法) ・膨潤状態の観察 :ロードセル ・密度測定 :密度検層装置(非破壊) etc. 電子天秤(試験終了後に実施) ・試験溶液の浸潤量 :流量計			
		観察頻度 : <input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input checked="" type="checkbox"/> 定期的なモニタリング モニタリング技術 : <input type="checkbox"/> 新規技術 <input checked="" type="checkbox"/> 既存技術			
		装置の概略図  			
		図 緩衝材の施工時不均一性影響評価試験装置 概略図			

JNC-TJ8400 2002-001

表4-15 地層処分技術開発 超長期試験計画

研究件名		オーバーパックによる緩衝材の圧密沈下挙動試験		試験／分析手段の概要・ポイント	オーバーパックの発縮膨張、岩盤クリープ(地圧)、地下水圧は考慮しない。 緩衝材の密度・厚さ測定(非破壊測定)						
分類	テーマ分類	<input type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ヘンライト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ヘンライト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)									
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料	<input type="checkbox"/> 核種移行			<input type="checkbox"/> 材料+核種移行					
	試験形態	<input type="checkbox"/> 複合系試料	<input checked="" type="checkbox"/> 単純系試料			<input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料					
	実施規模	<input type="checkbox"/> α. 試験片規模	<input checked="" type="checkbox"/> β. 実規模	<input type="checkbox"/> γ. その他( )							
実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY委託先)		<input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等)	<input type="checkbox"/> III. その他( )							
研究期間	20年										
試験名称	オーバーパックによる緩衝材の圧密沈下挙動試験				<table border="1"> <tr> <td>観察頻度</td> <td><input type="checkbox"/>単なる埋設</td> <td><input type="checkbox"/>定期的なモニタリング</td> </tr> <tr> <td>モニタリング技術</td> <td><input type="checkbox"/>新規技術</td> <td><input type="checkbox"/>既存技術</td> </tr> </table>	観察頻度	<input type="checkbox"/> 単なる埋設	<input type="checkbox"/> 定期的なモニタリング	モニタリング技術	<input type="checkbox"/> 新規技術	<input type="checkbox"/> 既存技術
観察頻度	<input type="checkbox"/> 単なる埋設	<input type="checkbox"/> 定期的なモニタリング									
モニタリング技術	<input type="checkbox"/> 新規技術	<input type="checkbox"/> 既存技術									
目的必要理由	<p>オーバーパック等の重さにより緩衝材は圧密沈下することが考えられる。その圧密沈下により緩衝材層厚さが減少し、所期性能を保持できない可能性が示唆される。</p> <p>現在、一次元圧密試験、解析によって沈下量は性能評価上問題無い程度であるとされている。</p> <p>しかしながら、一次元圧密試験では周方向拘束された条件であり、緩衝材中にオーバーパックがあり、その下面部が圧密される処分場の環境を模擬出来ていない。処分場ではオーバーパック下面部がまず圧密(高密度化)されるが、時間経過とともに密度分散により周囲への緩衝材移動が考えられ、前者よりも大きな圧密量となる可能性がある。</p> <p>また解析においては緩衝材等のモデル化が難しいため、正確に把握できているかは確認を要する。</p> <p>以上より実規模試験にて確認する。</p>										
装置・試験片	<p>実処分場と同スケールの試験場(処分坑道1ピッチ分)を作製し、緩衝材、埋め戻し材を飽和させオーバーパック・緩衝材の挙動を把握する。</p> <p>&lt;試験装置構成&gt;</p> <p>飽和緩衝材埋め戻し材・オーバーパック模擬材から成り、水の出入りができるように焼結フィルター、拘束容器で周囲を構成する。変位に関してはオーバーパックの上下にセンサーを取り付けて測定する。</p>										
期待される効果	<p>オーバーパック等の重さに起因する圧密沈下による緩衝材層厚さの減少量、オーバーパック挙動を正確に把握できることにより、適切な緩衝材厚さ等が提示できる。</p>										
		装置の概略図									
				<p>図 オーバーパックによる緩衝材の圧密沈下挙動試験装置概略図</p>							

表4-16 地層処分技術開発 超長期試験計画

JNC T38400 2002-001

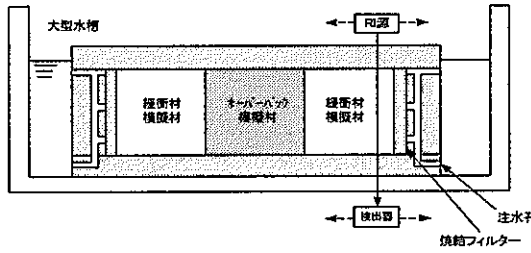
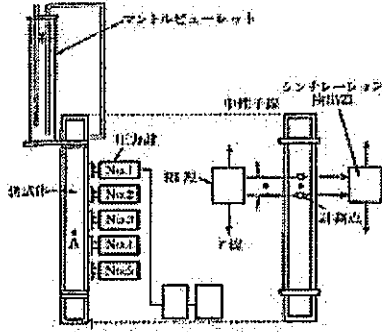
<b>研究件名</b> 緩衝材の飽和(脱ガス)現象・不飽和透水把握		<b>試験／分析手段の概要・ポイント</b>	緩衝材の吸水(脱ガス)現象確認試験 RIによる含水率の測定を実施し、水分移動挙動を把握する。	緩衝材の不飽和透水係数測定試験 体積含水率の分布をRIを用いて測定し、水圧変化を圧力変換機により電的に計測する。
<b>分類</b>	<b>テーマ分類</b> <input type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ベントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ベントナイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)			
	<b>試験対象</b> <input checked="" type="checkbox"/> 材料 <input type="checkbox"/> 核種移行 <input type="checkbox"/> 材料+核種移行			
	<b>試料形態</b> <input checked="" type="checkbox"/> 複合系試料 <input type="checkbox"/> 単純系試料 <input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料			
	<b>実施規模</b> <input type="checkbox"/> α. 試験片規模 <input type="checkbox"/> β. 実規模 <input checked="" type="checkbox"/> γ. その他(α+β)			
<b>実施場所</b> <input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY,委託先) <input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等) <input type="checkbox"/> III. その他( )				
<b>研究期間</b>				
<b>試験名称</b>	緩衝材の吸水(脱ガス)現象確認試験	緩衝材の不飽和透水係数測定試験		
<b>目的必要理由</b>	緩衝材(施工時)中の体積の約1/3が空気である。一般に浸潤特性、拡散は空気の抜け穴を作製し、吸水しやすい環境で実施している。しかしながら、処分場では明確な空気の抜け穴は存在せず、主に水の浸入する箇所から抜け出ると考えられる。そこで、外部との物質移行は水の通り道のための試験環境で(または処分場を模擬した形態)にて試験する。	左記のようにガスが抜けられず飽和期間までの時間がかかることや、処分場の酸素が使用された後に腐食により水が使用されることが考えられる。現状では飽和透水係数によって地下水流動を評価しているが、上記理由のためオーバーパックが腐食し、ガラス固化体からの核種溶出時に緩衝材が不飽和であることも考えられる。そのときに浸潤、拡散挙動とともに不飽和透水現象が起こると考えられる。一般に不飽和透水係数の測定は困難であるため、浸潤特性、拡散試験で代行させているが、本来の評価とは異なる。そのため不飽和透水係数の測定は必要である。		
	<b>装置・試験片</b>	緩衝材の吸水現象確認試験装置(その1) : 周方向の水分移動測定 緩衝材の吸水現象確認試験装置(その2) : 軸方向の水分移動測定	不飽和透水係数測定装置	
<b>期待される効果</b>	緩衝材の飽和するまでの期間が適切に評価できる。	緩衝材の飽和・不飽和状態に関する地下水移動に関する知見が得られる。		
		<b>装置の概略図</b>	 <p>緩衝材の吸水現象確認試験装置(その1)</p>	
		<b>装置の概略図</b>	 <p>不飽和透水係数測定試験装置</p>	

表4-17. 地層処分技術開発 超長期試験計画

JNC TJS400 2002-001

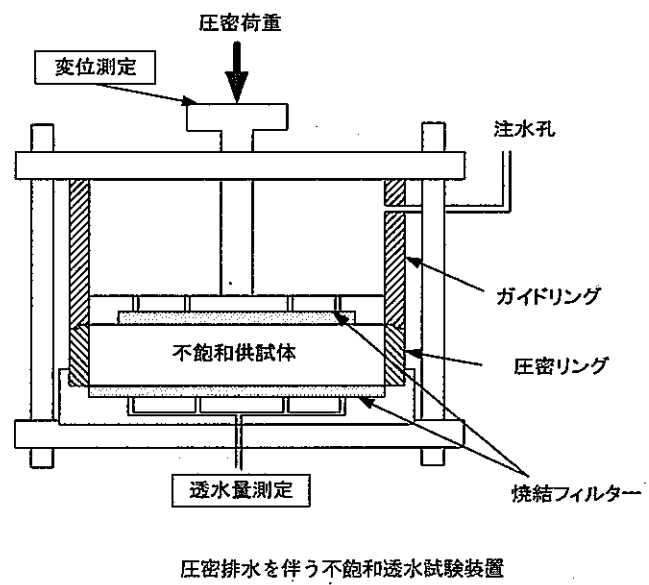
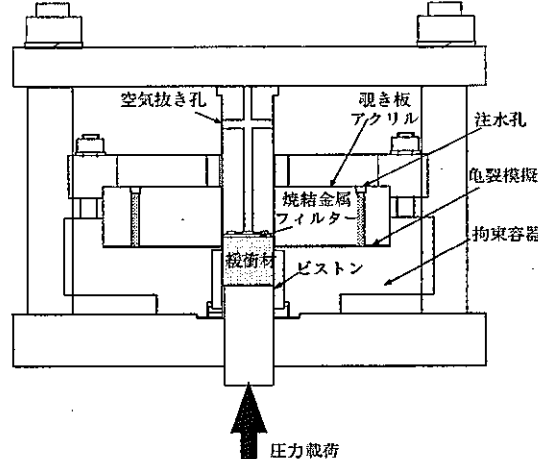
<b>研究件名</b> 圧密排水を伴う不飽和透水試験		<b>試験／分析手段の概要・ポイント</b> STEP1: 不飽和供試体の圧密試験 STEP2: 不飽和供試体の圧密排水を伴う透水試験  緩衝材初期状態 組成: ベントナイト100%、ベントナイト70%、ケイ砂30% 乾燥密度: 1.6g/cm <sup>3</sup> , 1.8g/cm <sup>3</sup> 含水比: 乾燥状態～飽和状態  圧密応力: ~40MPa  溶液組成: 降水系、海水系  動水勾配: ~5MPa  観察頻度 <input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input type="checkbox"/> 定期的なモニタリング モニタリング技術 <input type="checkbox"/> 新規技術 <input type="checkbox"/> 既存技術
<b>分類</b>	<b>テーマ分類</b> <input type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ベントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ベントナイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)	
	<b>試験対象</b> <input checked="" type="checkbox"/> 材料 <input type="checkbox"/> 核種移行 <input type="checkbox"/> 材料+核種移行	
	<b>試験形態</b> <input checked="" type="checkbox"/> 複合系試料 <input type="checkbox"/> 単純系試料 <input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料	
	<b>実施規模</b> <input type="checkbox"/> α. 試験片規模 <input type="checkbox"/> β. 実規模 <input checked="" type="checkbox"/> γ. その他(α+β)	
<b>実施場所</b> <input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY委託先) <input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等) <input type="checkbox"/> III. その他( )		
<b>研究期間</b>		
<b>試験名称</b>	圧密排水を伴う不飽和透水試験	
<b>目的必要理由</b>	「緩衝材の飽和(脱ガス)現象・不飽和透水把握」で記したように緩衝材が長期間、不飽和状態であることが考えられ得る。緩衝材は飽和状態時には(軟岩系)岩盤のクリープ、オーバーバックの腐食膨張により圧密排水されることが考えられるが、その現象が不飽和状態に関しても起こるかを確認する。 また、実際の処分場では圧密ともに透水現象も起こると考えられるため、複合系についても試験を実施し実処分場の環境を把握する。	
<b>装置・試験片</b>	圧密排水を伴う不飽和透水試験装置 (通常の圧密試験装置に加圧透水できる構造を追加する。)	
<b>期待される効果</b>	各要素試験では得られない処分場で起こる複合系の現象を把握することができる。  不飽和状態における緩衝材中の水の移動を把握できることにより、オーバーバックの腐食挙動、緩衝材中の核種移行挙動に関する予備的データが取得できる。	
		<b>装置の概略図</b> 

表4-18 地層処分技術開発 超長期試験計画

JNC-TJ8400 2002-001

研究件名		密度低下特性(緩衝材の長期流出試験:割れ目流出・エロージョン)評価		試験／分析手段の概要・ポイント	
分類	テーマ分類	<input type="checkbox"/> A. 金属腐食 <input type="checkbox"/> D. 長期3相変化 <input type="checkbox"/> H. コロイド形成・移行 <input type="checkbox"/> K. ガス移行 <input type="checkbox"/> B. ベントナイト変質 <input type="checkbox"/> E. 腐食生成物相互作用 <input type="checkbox"/> I. 天然有機物錯化・移行 <input type="checkbox"/> L. 多孔体水理 <input type="checkbox"/> C. ガラス溶解 <input type="checkbox"/> F. ベントナイト中物質移行 <input type="checkbox"/> J. 微生物影響・移行 <input type="checkbox"/> M. 岩盤水理 <input type="checkbox"/> G. 核種/岩石相互作用 <input type="checkbox"/> N. シナリオ評価(変動事象)			
	試験対象	<input checked="" type="checkbox"/> 材料	<input type="checkbox"/> 核種移行		<input type="checkbox"/> 材料+核種移行
	試験形態	<input checked="" type="checkbox"/> 複合系試料	<input type="checkbox"/> 単純系試料		<input type="checkbox"/> 複合系試料+単純系試料
	実施規模	<input type="checkbox"/> α. 試験片規模	<input type="checkbox"/> β. 実規模		<input checked="" type="checkbox"/> γ. その他(α+β)
	実施場所	<input checked="" type="checkbox"/> I. 室内(ENTRY,委託先)	<input type="checkbox"/> II. 原位置(東濃鉱山等)		<input type="checkbox"/> III. その他( )
研究期間					
試験名称	密度低下特性(緩衝材の長期流出試験:割れ目流出・エロージョン)評価				
目的必要理由	岩盤に割れがあるとベントナイトはその膨潤特性のためその間に入り込む。またベントナイト層からのモンモリロナイト等の粒子(コロイド)の剥離も起こる。現状試験データは限定された条件で取得されており、また期間も半年程度であり、長期挙動に関しては解析にて予想している。しかしながらデータ数が少ない条件での解析は正確な予測ができていないとは言えない。そこで、処分場での岩盤の割れ目等を調査し、それを適切に模擬した条件で、長期試験を実施する必要がある。 また、ベントナイトに地圧相当の圧力を加えることで、割れ目への流出特性を正當に把握する。				
装置・試験片	ベントナイト割れ目充填特性評価試験装置				
期待される効果	今まで、得られていなかった地圧による圧密を受ける環境での割れ目侵入に関するデータを入手することでより複合的な環境を把握できる。 従来試験で構築された緩衝材流出挙動評価モデルが妥當であるか評価できる。				
				<試験条件> ①緩衝材 組成:ベントナイト100%、ベントナイト70%、ケイ砂30% 乾燥密度:1.6g/cm <sup>3</sup> 、1.8g/cm <sup>3</sup> ②模擬亀裂幅:0.3mm~1.5mm ③圧密応力:~40MPa ④溶液組成:降水系、海水系 <評価項目> ①時間-侵入距離(流出距離) ②時間-膨潤応力 ③割れ目浸出による緩衝材密度減少、緩衝材層厚さ減少のための性能劣化 観察頻度 <input type="checkbox"/> 単なる埋設 <input type="checkbox"/> 定期的なモニタリング モニタリング技術 <input type="checkbox"/> 新規技術 <input type="checkbox"/> 既存技術	
				装置の概略図  <p>ベントナイト割れ目充填特性評価試験装置</p>	

## 5. 記録の管理、保存方法の検討

超長期試験は試験継続期間が長期に渡ることから、再試験が困難であり、試験装置および試験データを長期間維持管理することが非常に重要である。そこで、超長期試験における記録の管理、保存方法について、一般産業、情報システム管理、プラント制御システム管理、文献等の調査を行った。結果を表 5-2 に示す。

以下では、調査の結果から、試験の実施期間を 20 年とし、研究体制、試験設備、設備管理システムおよびデータ管理システムを提案する。

### 5.1 試験体制

#### 5.1.1 要員

試験統括担当： 1 名

試験主担当： 1 名 + 代替要員 1 名

設備管理担当： 1 名（常駐）+ 代替要員 1 名

設備管理者として 1 名を常駐させるものとし、各種測定、分析業務は試験主担当者により定期的に行う。不慮の事故等により各担当者による業務の実施が困難な場合を考慮し、業務要領書を準備するとともに、文書による伝達が困難な測定ノウハウ等の情報については、一定期間の経験を持った代替要員を常に確保することにより対応する。

#### 5.1.2 要員変更

長期の試験期間内には、様々な理由により各担当者に変更されることが考えられる。後任者としては、基本的には上記の代替要員が望ましいが、新規に任命する場合には、前任者と一定期間業務を共にすることにより円滑な情報の伝達を行う。また、新任者については、その後の試験継続期間を考慮した年齢差を設けることが望ましい。

#### 5.1.3 試験計画

長期試験においては、定期的な業務の時間間隔が長くなるため、測定・分析等の業務が確実に実施されない可能性が考えられる。そのため、試験統括者は、試験開始から試験完了までの詳細な全体試験計画を作成するとともに、定期的な見



直しを行う。研究主担当者には年度毎に年間試験計画書を試験統括者に提出すること、ならびに、各種測定・分析業務終了後は報告書を提出することを義務付ける。

## 5.2 試験設備

本超長期試験における試験設備は、主として試験片を含む試験容器、各種測定機器、データ記録用パーソナルコンピュータ(PC)および周辺機器から構成される。その概要を図5-1に示す。測定データは自動的にPCに記録・保管される。測定されたデータは定期的に外部記憶装置にバックアップを行う。また、非常用電源として、無停電電源装置(UPS)を設置する。

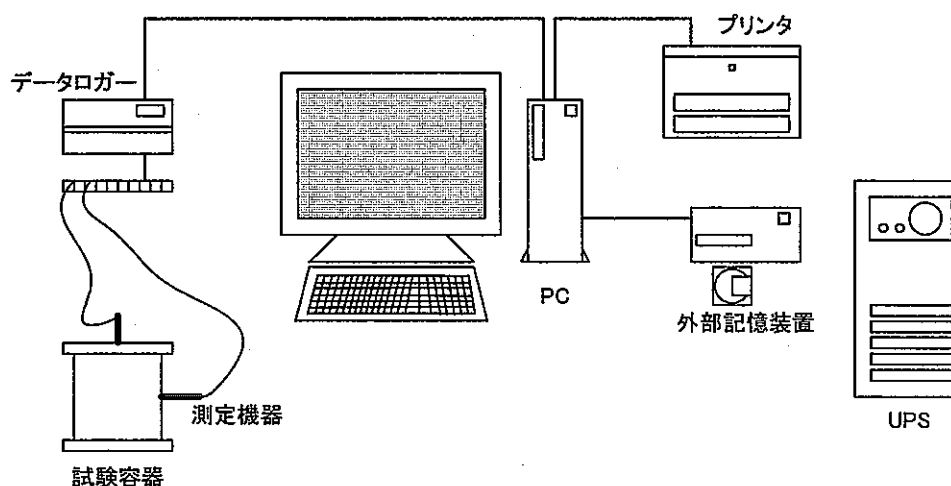


図 5-1 試験設備概要

## 5.3 設備管理システム

### 5.3.1 試験設備管理

長期に渡り保管が必要となる試験装置については、部外者の立ち入りによるトラブルを防止するために、設置場所を隔離、施錠する。やむを得ず他の試験設備や機器類と同じ室内に設置される場合には、防止柵、立て札等により部外者の立ち入りを制限する。また、データ記録用 PC はパスワードを用いて、アクセス制限を行う。

複数の試験装置が保管される場合には、長期間経過後の情報の混乱が予想され

る。したがって、各試験容器には、試験開始日時、試験目的、試験条件等が刻印された銘板を取り付けるものとする。

### 5.3.2 設備維持管理

超長期試験においては、試験片を除き、その他の設備、測定機器等は定期的な保守・清掃および交換作業が必要となる。PCについては、法定耐用年数は4年とされているが、実際にはそれ以上の使用が可能である。表5-1に主要機器の定期点検計画を示す。

表 5-1 定期点検計画

機器名称	交換周期 [年]	定期点検頻度 [回/年]																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
電気品	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PC	6	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1	①	1	1
プリンタ	6	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1	①	1	1
周辺機器	6	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1	①	1	1
UPS 本体	6	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1	①	1	1
バッテリー	6	1	1	①	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1	①	1	1	1	1	1

注：○印は交換を示す。

なお、各種の測定機器については、定期的な測定の際に校正を行い、適宜交換を行うものとする。

### 5.3.3 非常時対応

#### (1) 停電

停電時の対応としては、非常用発電装置が設置された施設内に試験設備を設置することが望ましい。瞬間的な停電や短時間の送電不良に対しては、UPSにより対応する。電源供給が途切れた場合には、自動的にUPSに切り替わり、電源供給を継続する。UPSによる電源供給時間を越えて停電が継続する場合には、各装置およびシステムを安全に停止させるとともに、警報装置により携帯電話回線を通じて関係者に連絡される。

## (2) 災害

火災、浸水、地震等の災害に対しては、設備建屋に防災システムを導入することが理想的である。既存の建屋内に試験設備を設置する場合には、設置場所を複数に分割する。停電時と同様に、災害発生により設備に異常が発生した場合には、警報装置により携帯電話回線を通じて関係者に連絡される。また、重要図書および測定データについては、耐火金庫内に保管するとともに複数拠点にて保管することを原則とする。

### 5.4 データ管理システム

#### 5.4.1 図書管理

長期間継続される業務においては、担当者の変更や版の更新により、複数の図書が存在し、混乱が生じる恐れがある。本超長期試験においては、業務要領書等の必要最低限の書類を除き、図書類は PC 内にデータファイルとして保管することを原則とする。要・不要図書を明確に区別し、必要図書の版管理を徹底することにより、不要図書の混在による業務トラブルを防止する。

#### 5.4.2 測定データ

常時モニターされる温度等の計測データは、データロガー装置およびソフトウェアにより定期的に PC 内のハードディスクに記録・保管される。試験担当者により定期的に測定されるデータは、随時 PC 内に取り込み、記録・保管される。データは一定期間毎に個別ファイルとして保存され、検索およびトレンド表示可能とする。

#### 5.4.3 バックアップシステム

PC 内部に記録・保管された測定データは、定期的に外部記憶装置にバックアップを行う。現在、バックアップ用のメディアとしては、以下のようなものが挙げられる。

- ① 光磁気ディスク(MO)
- ② 追記型コンパクトディスク(CD-R/RW)

③ 外部ハードディスク

④ 磁気テープ

コスト、データ容量、操作性等を考慮し、バックアップ用のメディアを選択する。

週に 1 度、自動的に測定データのバックアップを行い、バックアップ時の書き込みミスを防ぐため、データの世代管理を行う。また、月に 1 回のバックアップデータを複製し、データ分析に使用するとともに、複数拠点にて保管を行う。

さらに、6年に一度のシステム入れ換え時には、記憶メディアの見直しを行い、その時点で最適なメディアを採用するとともに、バックアップデータの変換を行う。

表 5-2 長期試験の情報管理事例調査 (1/5)

英文タイトル	The Development of an Earthquake Recorded Data Management System		
和文タイトル	地震記録管理システムの開発について		
著者	田守弘明	国名	日本
出典	中国電力株式会社 技研時報 No.92, Page.121-134	発行時期	1999
要約	<p>技術研究センターでは耐震研究の基礎資料とするため、当社管内 3 地点(大洲、来島ダム、鳥取市内)の各種地盤に地震計を設置して地震観測を継続しており、現在約 100 地震 500 記録程度の記録を保管している。本研究では、これらのうち利用頻度の高いと思われる地震記録を選出してデータベース化し、パソコン画面上で簡易操作により地震特性別検索、周波数解析、ダウンロード等を可能とした“地震記録管理システム”を開発し、今後の資料利用拡大および地震観測業務全般の効率化を図ることを目的とする。</p>		
知見	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 測定データ管理</li> <li>・ データベース化</li> </ul>		

表 5-2 長期試験の情報管理事例調査 (2/5)			
英文タイトル	Risk Management and GMP 18. Challenge to GMP and Document Management System Improvement.		
和文タイトル	GMP とドキュメント管理体制整備への取り組み		
著者	中沢俊一	国名	日本
出典	Pharm Tech Japan Vol.15, No.3 Page.395-398, 401-404	発行時期	1999
要約	ドキュメント管理体制作りの準備作業段階について解説した。部内作成文書・部外よりの流入文書および部外／社外収集文書類の保管状況実態調査、および部内作成・保管文書類の利用度・利用方法実態調査について述べた。前者の調査目的は文書類の作成と保管のスリム化の基礎データ収集であり、後者では有価情報有無選別、記録メディアの選別、ドキュメント・マネジメント・システム設計、およびその他の基礎データ収集である。		
知見	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ドキュメント管理体制</li> <li>・ データ管理</li> <li>・ 情報システム</li> </ul>		

表 5-2 長期試験の情報管理事例調査 (3/5)

英文タイトル	Mass Data Management System for PWB		
和文タイトル	PWB 用大容量データ保管管理システム		
著者	桐井博史	国名	日本
出典	NEC 技報 Vol.48 No.10 Page.67-71	発行時期	1995
要約	<p>プリント配線版(PWB)は、フルカスタム部品でありその製造データは多品種に及ぶとともに、社会の基盤を支える寿命の長い装置に使用されるため、長期に渡る供給体制が必要となる。したがって、大量の製造データを長期に保存する体制が必要となり、NECでは、あらゆる PWB 受注に即座に対応するために、10 年を越える期間のデータ保管体制を取っている。今回新たに、EWS を用いた PWB 製造データの保管管理システムを構築した。この管理システムでは、主キーとなる品名や管理履歴データは索引ファイルに入れ、座標値データやイメージデータなどはハードディスクや集合型光ディスクに入れるデータ管理をしている。これにより安価な EWS システムで人手を必要とせずに、大容量(78 GB)で長期間(10 年以上)の安定したデータ保管管理が可能となった。</p>		
知見	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ データ保管体制</li> <li>・ データベース管理システム</li> <li>・ ファイルシステム</li> </ul>		

表 5-2 長期試験の情報管理事例調査 (4/5)

英文タイトル	なし		
和文タイトル	放射性廃棄物処分の課題についての国際的取り組み 北欧5ヶ国		
著者	中村治人	国名	日本
出典	原環センタートピックス No.29, P1-5	発行時期	1994
要約	<p>北欧5ヶ国(デンマーク,フィンランド,アイスランド,ノルウェー,スウェーデン)で、1993年8月に出版された二つのレポート「情報の保存と検索」および「高レベル放射性廃棄物の処分—基本基準の検討」の内容を、長期保管に関する取り組み方を中心に紹介した。情報の保存では、放射性廃棄物の記録保管と情報伝達システムの重要性を解説した。中レベル放射性廃棄物については最初の500年間、使用済み燃料では1000年間は、情報の保管が必要としている。高レベル放射性廃棄物の処分では、制度的管理についての取り扱いおよび長期安全基準について解説した。</p>		
知見	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 情報の長期保管</li> <li>・ 制度的管理</li> </ul>		



表 5-2 長期試験の情報管理事例調査 (5/5)			
英文タイトル	In Situ Testing Data Management Plan		
和文タイトル	現地試験データ管理計画		
著者	Golder Associates	国名	アメリカ
出典	P0998A US DOE Report	発行時期	1987
要約	<p>大深度地下貯蔵施設でのデータ管理計画でのデータの取り扱いについて報告。現地で計測したデータを集め、データ管理要員がこれを試験要員の使い易い形に整理する。データ整理のための入力、データの受け入れ、保管、使用条件、管理組織、品質保証等の手順を示した。</p>		
知見	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ データ整理</li> <li>・ 管理組織</li> </ul>		

6. おわりに

本研究で得られた結果を以下に整理する。

(1) 溶液で飽和した緩衝材中で炭素鋼の長期浸漬試験を行うための試験手法について検討を行い、二重構造容器(外側試験容器材質：ほうけい酸ガラス、内側試験容器：ふっ素樹脂)を採用することとした。また外側試験容器は溶液の交換、補給などメンテナンス不要観点から密封構造容器とすることとした。

また、選定した試験容器の制作を行い、炭素鋼の浸漬試験を開始した。

(2) 処分開始直後の酸化性～還元性遷移期間での炭素鋼オーバパックの腐食挙動と環境変化を超長期にわたりモニタリング可能な装置の設計を実施した。

(3) 平成 9 年度に実施した「地層処分システムの性能評価に関わる超長期試験の概念検討」を見直し、「長期定量データの取得」と「現象の把握」の観点から今後の地層処分事業化や安全規制に資するための超長期試験(20 年程度)として実施すべき試験・研究項目を抽出した。

(4) 超長期試験は試験継続期間が長期に渡ることから、再試験が困難であり、試験装置および試験データを長期間維持管理することが非常に重要である。そこで、超長期試験における記録の管理、保存方法について、一般産業、情報システム管理、プラント制御システム管理、文献等の調査を行った。また、試験の実施期間を 20 年として、研究体制、試験設備、設備管理システムおよびデータ管理システムを提案した。

試験の実施にあたっては、実際の試験装置および測定データに最適な設備的管理(ハードウェア)を採用することに加え、人員配置、試験計画といった制度的管理(ソフトウェア)についても効率的なシステムを構築し、確実に運用していくことが必要である。

7. 参考文献

【2章】

- 1) 三輪敬一, 他 : “炭素鋼-圧縮ベントナイト腐食系の電位・pH分布”、腐食防食講演集、Vol.1993, p.59 (1993)
- 2) G.H.Bolt, M.G.M.Bruggenwert : 土壌の化学、学会出版センター、p.95 (1980)
- 3) 椿野晴繁、西村六郎 : “鋼中水素のモニタリングへの電気化学的水素透過法の適用”、材料と環境、Vol. 49, No.4, p.188 (2000)
- 4) M.Stern, A.L.Geary : J.Electrochem. Soc., Vol.104, No.1, p56 (1957)
- 5) 谷口直樹, 他 : “圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食形態と腐食速度の評価”、材料と環境討論会講演集、Vol.1999, p.213 (1999)
- 6) 戸部洋司, 他 : “炭素鋼のベントナイト中における腐食挙動のインピーダンス法による評価”、腐食防食講演集、Vol.1995, p.361 (1995)
- 7) 千々松正和, 他 : “釜石原位置試験場における粘土充填・熱負荷試験結果” , JNC TN 8400 99-024 , p175(1999)

## 試験装置組立手順詳細

(1)準備

(i)成型治具の製作

試験装置の構成部品以外に緩衝材の成型治具として以下の部品が必要である。

(但し※印部品は超長期試験装置流用部品を示す。)

[製作部品]

- ① カラム (※)
- ② 外筒
- ③ ピストン棒
- ④ ピストンヘッド
- ⑤ 炭素鋼試験片ホルダー (※)
- ⑥ プラグ
- ⑦ 挿入孔加工ガイド
- ⑧ 熱電対、各種プループガイド (※)
- ⑨ 下フランジ (※)

(ii)部品の組立、試験片組込み

図-1を参照して次の順序に成型治具を組立てる。

- ① 炭素鋼試験片を試験片ホルダーに入れ、カラム下部に装填、固定する。
- ② カラムに外筒を装着、カラムの熱電対及び各種プループの取付け金具挿入孔にプラグをカラム内側から装填、外筒外側にナットで固定する。(図-2)

(2) 成型

カラムにベントナイト粉末を充填し、ピストンヘッド、ピストン棒を介して載荷、成型体を製作する。なお、成型体の均質化のためにベントナイト粉末を少量ずつに分割、成型し、層状の成型体を積み重ねる方法で所定寸法の成型体を製作する。(図-1)

(3)成型体の加工

試験中に成型体の各種性状を把握するため、熱電対、各種プループを挿入する。熱電対、プループ挿入孔の加工を次の手順で行う。

(i) プラグの除去

- ① プラグ固定用のナットをはずし、固定ボルトを分離する。

- ② 外筒をカラムから分離する。
- ③ 固定ボルトを使用してカラムからプラグをカラム外面に引き抜く。

(ii) 挿入孔加工ガイドの装着

挿入孔加工ガイドをカラム外面から装填、カラム外面に固定する。(図-4)

(iii) 挿入孔加工

挿入孔加工ガイドを案内にカラム外側から所定寸法の熱電対挿入孔及び各種プルーフ挿入孔を加工する。(図-3)

(iv) 熱電対、プルーフガイドの取付け

挿入孔加工ガイドをカラムから分離し、所定の熱電対、プルーフガイドを装填する。なお、試験開始までは挿入孔の保護のためダミーを挿入しておく。

(4) 試験装置の組立

(i) 拘束治具の取付け

拘束治具に焼結体を設置しカラムに挿入する。

(ii) 上フランジの取付け

上フランジをカラムに設置しタイロッドにより緩衝材の拘束を行う。

(iii) ヒーターの取付け

加熱ブロックにカートリッジヒータを挿入した後、加熱ブロックを炭素鋼下面に設置する。次にカートリッジヒータのケーブルをジャンクションボックスに接続する。

(iv) 断熱材の取付け

加熱ブロック回りとカラム下部に断熱材を取付ける。

(v) 凝縮器の取付け

上フランジの取合い部に凝縮器の配管を接続する。次に凝縮器の取合い部に冷却水配管を接続する。

(vi) 試験溶液関連付属品の取付け

- ・液面計をカラムに設置する。
- ・上フランジ取合い部に試験溶液タンクからの配管を接続する。
- ・上フランジにレベルスイッチを取付け、信号ケーブルをジャンクションボックスに接続する。

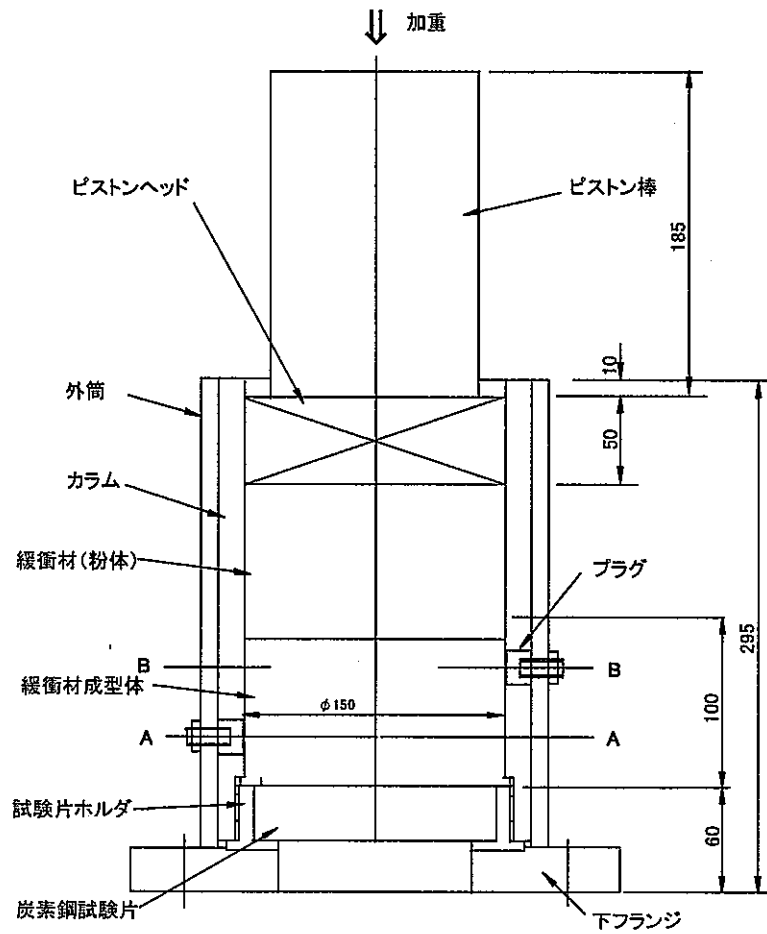


図-1 緩衝材成型治具組立状況

①:熱電対取付金具挿入孔 ②:プローブ取付金具挿入孔

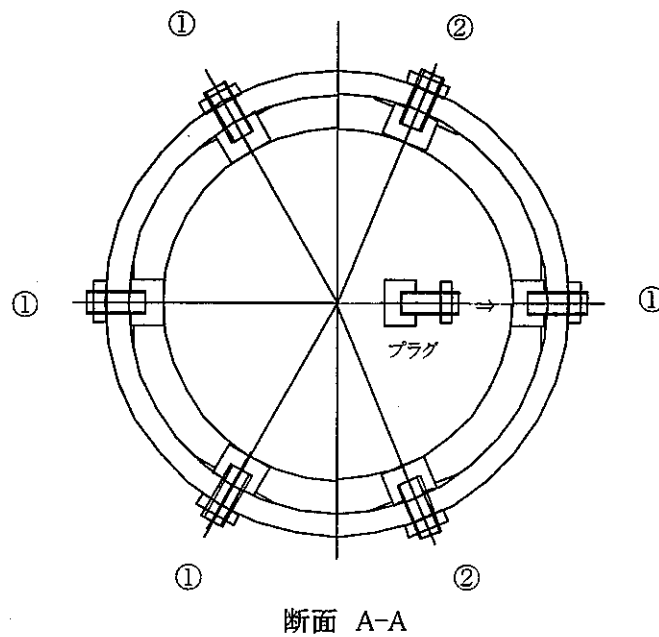


図-2 プラグ組込状況

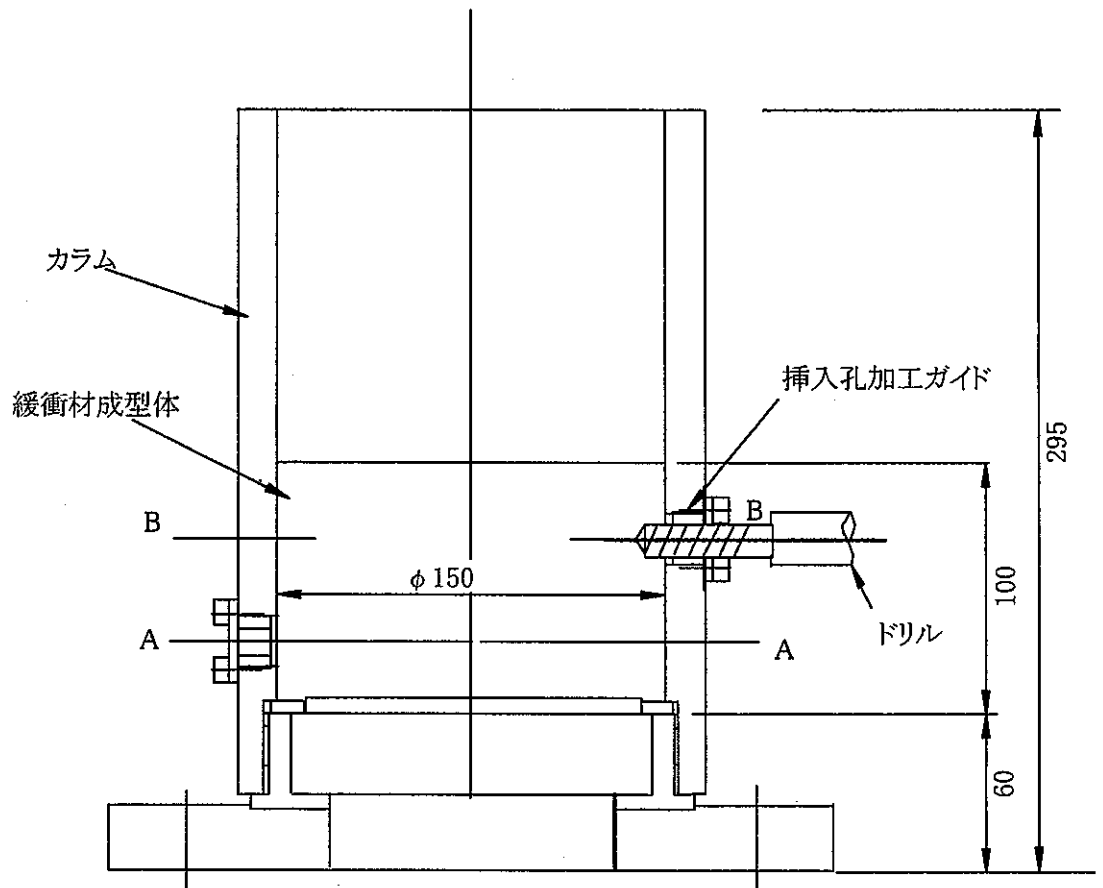


図-3 挿入加工ガイド組込、挿入加工状況

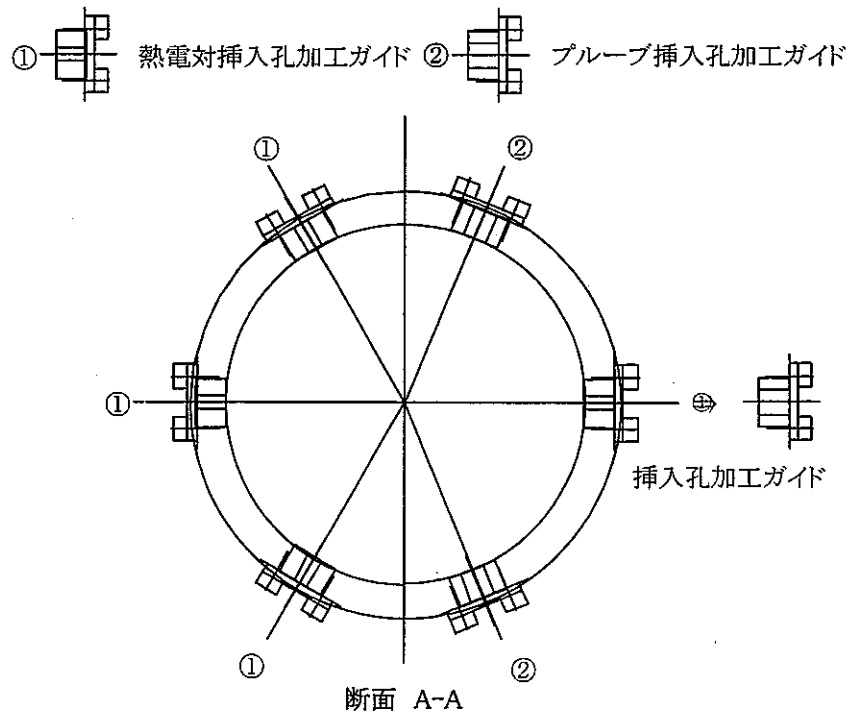


図-4 挿入孔加工ガイドの取付



## 電極またはプローブの設置要領

1. 適用

超長期試験装置において、定期的にモニタリングする項目の電極またはプローブの設置要領に適用する。

2. 電極またはプローブの設置要領

定期的にモニタリングする項目の電極またはプローブ設置場所には、緩衝材が膨潤し挿入する空間がなくなならないようチタン製ダミーが予め設置されている。従って、モニタリングする際にこのダミーを取外し、電極またはプローブを設置する。

これらの手順をフロー図として図-1に、イメージ図を図-2に示す。

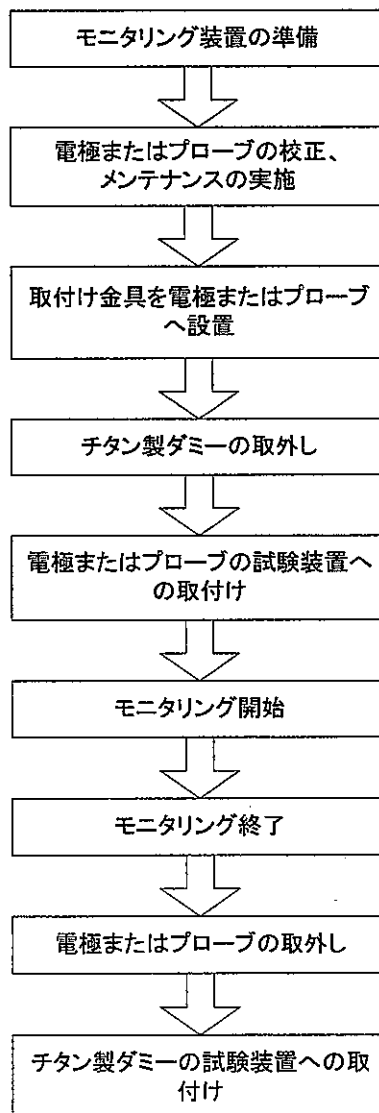


図-1 電極またはプローブの設置手順

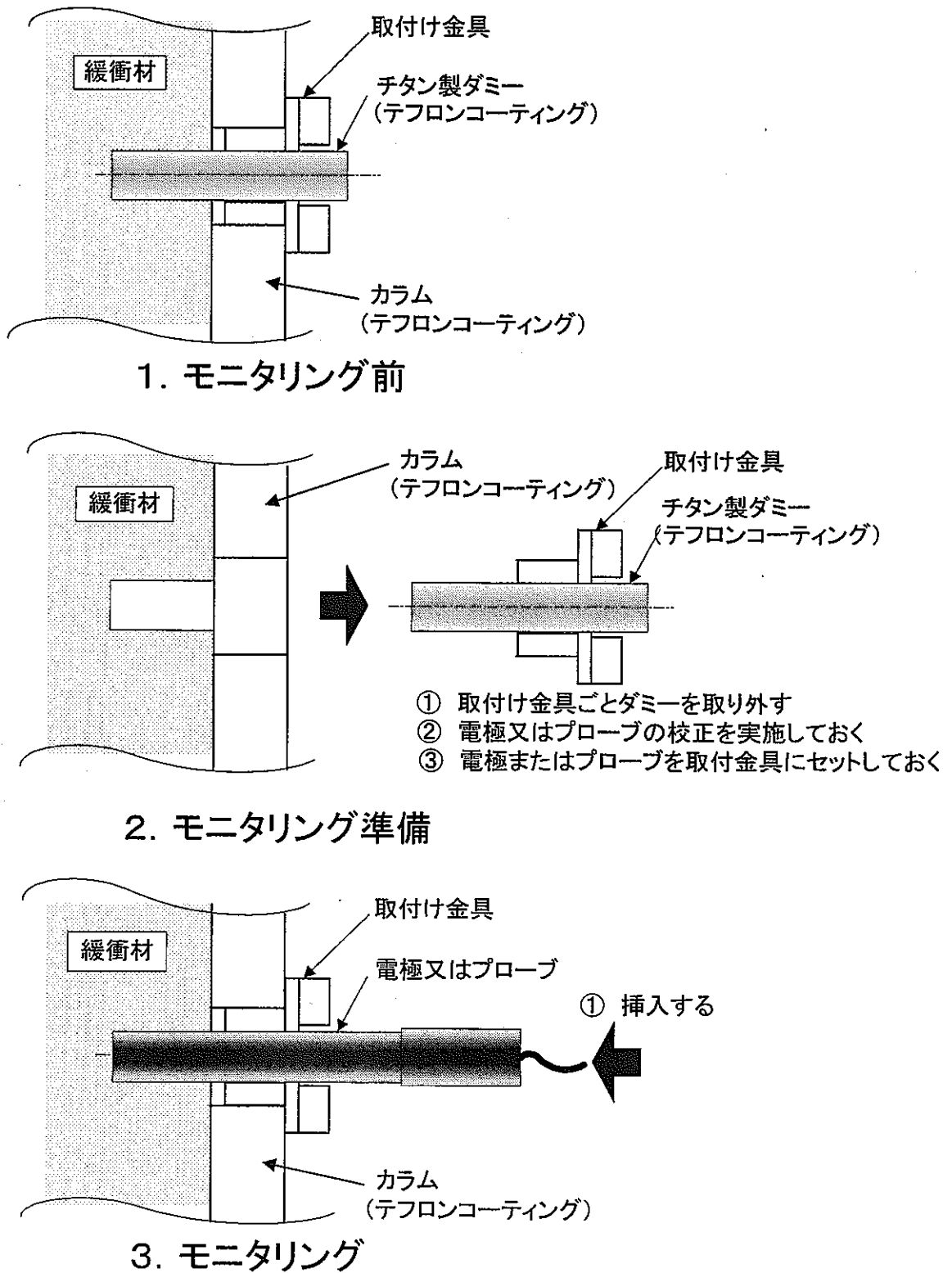
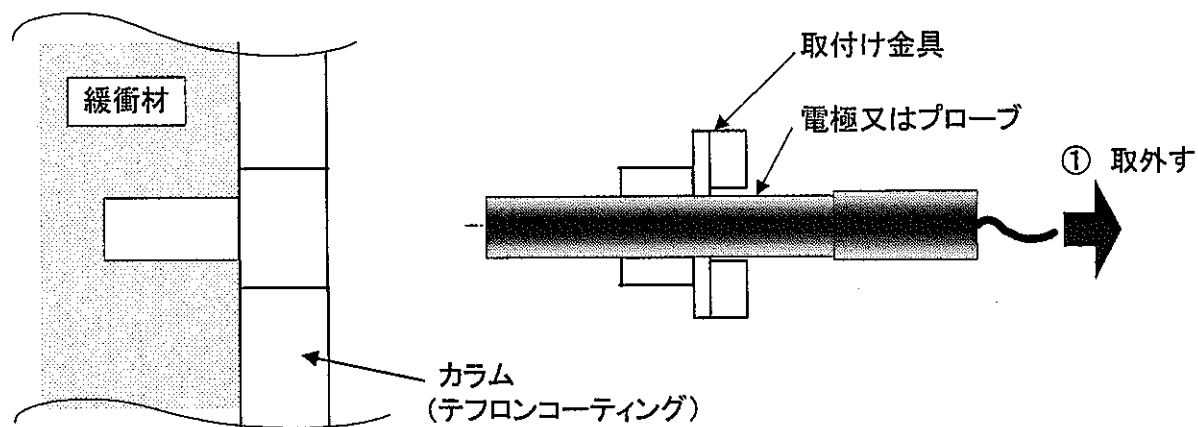
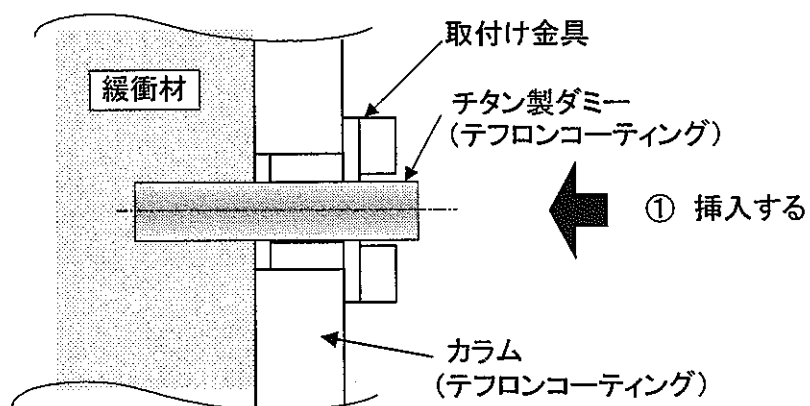


図-2 電極またはプローブ設置手順イメージ (1 / 2)



#### 4. モニタリング終了



#### 5. モニタリング後

図-2 電極またはプローブ設置手順イメージ (2 / 2)

# 試験装置 強度計算書

1. 標準型

1.1 カラム円筒

(1) 設計条件

設計圧力 p 膨潤圧力：2MPa ≒ 0.2kgf/mm<sup>2</sup>

緩衝材成型圧力：20MPa ≒ 2.04kgf/mm<sup>2</sup>

設計温度 T : 120℃

材料 : チタン合金 Ti-6Al-4V

材料強度 (120℃における強度) 引張り強さ  $\sigma_b = 90\text{kgf/mm}^2$  (882.6N/mm<sup>2</sup>)

耐力  $\sigma_y = 85\text{kgf/mm}^2$  (833.6N/mm<sup>2</sup>)

カラム内径 D : 150mm

(2) 肉厚

a. 最小肉厚

内圧を受ける薄肉円筒の応力式から必要肉厚を求める。

肉厚 t は次式から与えられる

$$t = D \cdot p / (2 \cdot \sigma_a) \dots \dots \dots (1)$$

ここで D : カラム内径 = 150mm

p : 円筒に作用する内圧

ここでは緩衝材の成型圧力を採用すると p = 2.04kgf/mm<sup>2</sup>

$\sigma_a$  : 許容引張り応力

ここでは安全率を 5 とすると  $\sigma_a = 18\text{kgf/mm}^2$

$$\therefore t = D \cdot p / (2 \cdot \sigma_a) = 150 \times 2.04 \div (2 \times 18) = 8.5\text{mm}$$

b. 実際肉厚

実際の肉厚は装置全体バランスを考慮して、最小肉厚 8.5mm 以上の肉厚として t = 15mm を採用するものとする。

(3) 円筒強度

(1)式からカラムに作用する引張り応力は次式で求められる。

$$\sigma_t = D \cdot p / (2 \cdot t) = 150 \times 2.04 \div (2 \times 15) = 10.2\text{kgf/mm}^2 \text{ (100N/mm}^2\text{)}$$

この値は材料の耐力、引張り強さを十分下回る値である。

1.2 上部フランジ

装置全体バランスより決定した肉厚についてフランジに作用する曲げ応力を求める。

(1) 設計条件

設計圧力 p 膨潤圧力：2MPa ≒ 0.2kgf/mm<sup>2</sup>

設計温度 T : 120℃

材料 : チタン合金 Ti-6Al-4V

材料強度 (120℃における強度) 引張り強さ  $\sigma_b = 90\text{kgf/mm}^2$  (882.6N/mm<sup>2</sup>)

耐力  $\sigma_y = 85\text{kgf/mm}^2$  (833.6N/mm<sup>2</sup>)

フランジ寸法 肉厚 h : 25mm

支点半径 a : 110mm

荷重半径 b : 65mm

荷重状態 円板、周辺単純支持、同心輪形荷重

(2)最大曲げ応力

最大曲げ応力はフランジ中心から同心輪形荷重位置までに発生して、その値は次式で与えられる。

$$\sigma_{\max} = \beta_7 \cdot P / h^2 \cdot \dots \cdot (2) \quad (\text{機械工学便覧 A4-55})$$

ここで P : フランジに作用する荷重 =  $0.785 \times 150^2 \times 0.2 = 3532.5 \text{kgf}$

h : フランジ肉厚 = 25mm

$\beta_7$  : 応力係数

ここで支点半径 a = 110mm、荷重半径 b = 65mm、半径比 b/a = 0.59

のとき  $\beta_7 \doteq 0.45$  (機械工学便覧 A4-58、図 82)

$$\therefore \sigma_{\max} = \beta_7 \cdot P / h^2 = 0.45 \times 3532.5 \div 25^2 = 2.54 \text{kg/mm}^2 \quad (24.9 \text{N/mm}^2)$$

この値は材料の耐力、引張り強さを十分下回る値である。

1.3 下部フランジ

装置全体バランスより決定した肉厚についてフランジに作用する曲げ応力を求める。

(1)設計条件

設計圧力 p 膨潤圧力 : 2MPa  $\doteq 0.2 \text{kgf/mm}^2$

設計温度 T : 120°C

材料 : チタン合金 Ti-6Al-4V

材料強度 (120°Cにおける強度) 引張り強さ  $\sigma_b = 90 \text{kgf/mm}^2$  (882.6N/mm<sup>2</sup>)

耐力  $\sigma_y = 85 \text{kgf/mm}^2$  (833.6N/mm<sup>2</sup>)

フランジ寸法 肉厚 h : 25mm

支点半径 a : 110mm

荷重半径 b : 57.5mm

荷重状態 円輪板、外周単純支持、内周に輪形荷重

(2)最大曲げ応力

最大曲げ応力はフランジ内周輪形荷重位置に発生し、その値は次式で与えられる。

$$\sigma_{\max} = \beta_9 \cdot P / h^2 \cdot \dots \cdot (3) \quad (\text{機械工学便覧 A4-55})$$

ここで P : フランジに作用する荷重 =  $0.785 \times 150^2 \times 0.2 = 3532.5 \text{kgf}$

h : フランジ肉厚 = 25mm

$\beta_9$  : 応力係数

ここで支点半径 a = 110mm、荷重半径 b = 57.5mm、半径比 b/a = 0.52

のとき  $\beta_9 \doteq 1.5$  (機械工学便覧 A4-58、図 84)

$$\therefore \sigma_{\max} = \beta_9 \cdot P / h^2 = 1.5 \times 3532.5 \div 25^2 = 8.5 \text{kg/mm}^2 \quad (83.4 \text{N/mm}^2)$$

この値は材料の耐力、引張り強さを十分下回る値である。

1.4 炭素鋼試験片

(1)設計条件

設計圧力 p 膨潤圧力 : 2MPa  $\doteq 0.2 \text{kgf/mm}^2$

設計温度 T : 120°C

材料 : 圧力容器用炭素鋼鍛鋼品 SFVC 1

材料強度 (120℃における強度)

温度増加に伴う使用材料の強度低下に対しては「超高圧円筒容器の設計指針 6.2.1 項、表 3」(日本高圧力技術協会)に示す設計温度に対する強度低下係数  $\gamma$  を適応するものとする。同指針に示す強度低下係数は次のとおり。

設計温度 $\theta$ °C	一般炭素鋼、低合金鋼、高張力鋼
$-50 < \theta \leq 50$	1
$50 < \theta \leq 150$	$1 - (\theta - 50)/1000$
$150 < \theta \leq 300$	0.9

圧力容器用炭素鋼鍛鋼品 SFVC 1 の常温強度は以下のとおり

引張り強さ  $\sigma_b = 41.8 \text{kgf/mm}^2 (410 \text{N/mm}^2)$

耐力  $\sigma_y = 20.9 \text{kgf/mm}^2 (205 \text{N/mm}^2)$

従って設計温度 120℃における材料強度は

引張り強さ  $\sigma_{bt} = 41.8 \times 0.93 = 38.8 \text{kgf/mm}^2 (380 \text{N/mm}^2)$

耐力  $\sigma_{yt} = 20.9 \times 0.93 = 19.4 \text{kgf/mm}^2 (190 \text{N/mm}^2)$

フランジ寸法 肉厚  $h$  (くさね代を除く) : 20mm

支点半径  $a$  : 70mm

荷重状態 円板、周辺単純支持、等分布荷重

(2)最大曲げ応力

最大曲げ応力は試験片中心位置に発生し、その値は次式で与えられる。

$$\sigma_{\max} = 1.24pa^2/h^2 \cdot \dots \cdot (4) \quad (\text{機械工学便覧 A4-53})$$

ここで  $p$  : 試験片に作用する等分布荷重 = 膨潤圧力  $2 \text{MPa} = 0.2 \text{kgf/mm}^2$

$h$  : 試験片肉厚 = 20mm

$$\therefore \sigma_{\max} = 1.24pa^2/h^2 = 1.24 \times 0.2 \times 70^2 \div 20^2 = 3.01 \text{kgf/mm}^2 (29.5 \text{N/mm}^2)$$

この値は材料の耐力、引張り強さを十分下回る値である。

1.5 焼結体ホルダー強度

(1)設計条件

設計圧力  $p$  膨潤圧力 :  $2 \text{MPa} = 0.2 \text{kgf/mm}^2$

設計温度  $T$  : 120℃

材料 : チタン合金 Ti-6Al-4V

材料強度 (120℃における強度) 引張り強さ  $\sigma_b = 90 \text{kgf/mm}^2 (882.6 \text{N/mm}^2)$

耐力  $\sigma_y = 85 \text{kgf/mm}^2 (833.6 \text{N/mm}^2)$

ホルダー寸法 肉厚  $h$  : 30mm

支点半径  $a$  : 75mm

荷重状態 円板、周辺単純支持、等分布荷重

(2)最大曲げ応力

最大曲げ応力はホルダー中央位置に発生し、その値は次式で与えられる。

$$\sigma_{\max} = 1.24pa^2/h^2 \cdot \dots \cdot (4) \quad (\text{機械工学便覧 A4-53})$$

ここで  $p$  : 試験片に作用する等分布荷重 = 膨潤圧力  $2 \text{MPa} = 0.2 \text{kgf/mm}^2$

$h$  : 試験片肉厚 = 20mm



$$\therefore \sigma_{\max} = 1.24 \text{pa}^2 / \text{h}^2 = 1.24 \times 0.2 \times 75^2 \div 30^2 = 1.55 \text{kgf/mm}^2 (15.2 \text{N/mm}^2)$$

この値は材料の耐力、引張り強さを十分下回る値である。

## 1.6 支柱ネジ

### (1) 設計条件

設計圧力 p	膨潤圧力 : 2MPa $\div$ 0.2kgf/mm <sup>2</sup>
設計温度 T	: 常温
材料	: SUS304
材料強度	引張り強さ $\sigma_b = 53 \text{kgf/mm}^2$ (520N/mm <sup>2</sup> )
耐力	$\sigma_y = 20.9 \text{kgf/mm}^2$ (205N/mm <sup>2</sup> )
支柱本数	: 4本
ネジ種類	: M20
荷重状態	上部フランジに作用する荷重を均等支持

### (2) ネジ強度

#### a. 接触面圧 Pm

ネジ山の接触面圧は次式で与えられる。

$$P_m = Q \cdot \{ \pi / 4 \cdot (d^2 - D_1^2) \cdot Z \} \dots \dots \dots (5)$$

(理工図書(株)「JISによる実用的な設計製図法」p151)

ここで Q : ネジに作用する軸荷重 =  $1/4 \times 0.785 \times 150^2 \times 0.2 = 883.1 \text{ kgf}$

d : おねじ外径 = 20mm

D<sub>1</sub> : めねじ内径 = 17.294mm

Z : 山数 = L ( : かみ合い長さ = 18mm )  $\div$  p ( : ピッチ = 2.5mm )

$$\begin{aligned} \therefore P_m &= Q \cdot \{ \pi / 4 \cdot (d^2 - D_1^2) \cdot Z \} = Q \cdot p / \{ \pi / 4 \cdot (d^2 - D_1^2) \cdot L \} \\ &= 883.1 \times 2.5 \div \{ 0.785 \times (20^2 - 17.294^2) \times 18 \} = 1.55 \text{kgf/mm}^2 (15.2 \text{N/mm}^2) \end{aligned}$$

この値は材料の耐力、引張り強さを十分下回る値である。

#### b. 曲げ応力 $\sigma_b$

軸荷重によるネジ山に作用する曲げモーメントは次式で与えられる。

$$\sigma_b = 6Q \cdot x / \pi d_1 Z (0.8p)^2 \dots \dots \dots (6)$$

(理工図書(株)「JISによる実用的な設計製図法」p151)

ここで Q : ネジに作用する軸荷重 =  $1/4 \times 0.785 \times 150^2 \times 0.2 = 883.1 \text{ kgf}$

d<sub>1</sub> : おねじ谷径 = 17.294mm

Z : 山数 = L ( : かみ合い長さ = 18mm )  $\div$  p ( : ピッチ = 2.5mm )

X : 片持梁における荷重点までの長さ = 0.325p (メートルネジ)

$$\begin{aligned} \therefore \sigma_b &= 6Q \cdot x / \{ \pi d_1 Z (0.8p)^2 \} = 6Q \cdot x \cdot p / \{ \pi d_1 L (0.8p)^2 \} \\ &= 6 \times 883.1 \times 0.325 \times 2.5^2 / (3.14 \times 17.294 \times 18 \times 0.8^2 \times 2.5^2) \\ &= 2.75 \text{kgf/mm}^2 (27 \text{N/mm}^2) \end{aligned}$$

この値は材料の耐力、引張り強さを十分下回る値である。

#### c. 平均せん断応力 $\tau_s$

ネジ山の平均せん断応力は次式で与えられる。

$$\tau_s = Q / \{ \pi d_1 Z (0.8p) \} \dots \dots \dots (7)$$



a : 支点半径 = 110mm、

$\nu$  : ポアソン比 = 0.3

$$\begin{aligned}\therefore \sigma_{\max} &= P/h^2[3/(2\pi) + (1 + \nu)\{0.485\ln(a/h) + 0.52\}] \\ &= 3532.5 \div 30^2 \times [3 \div (2 \times 3.14) + (1 + 0.3) \times \{0.485 \times \ln(110 \div 30) + 0.52\}] \\ &= 3532.5 \div 30^2 \times [3 \div (2 \times 3.14) + (1 + 0.3) \times \{0.485 \times 1.2993 + 0.52\}] \\ &= 3532.5 \div 30^2 \times [3 \div (2 \times 3.14) + (1 + 0.3) \times 1.1502] \\ &= 7.74 \text{kgf/mm}^2 (75.9 \text{N/mm}^2)\end{aligned}$$

この値は材料の耐力に対して 2.7 分の 1、引張り強さに対して 6.8 分の 1 の値であり十分安全な値である。

以上

# ヒーター容量計算書

1. 適用

超長期試験装置に用いるカートリッジヒーターの容量計算に適用する。

2. 計算条件

- ・形状 : 垂直円柱 ( $\phi 180 \times 320 \text{mmL}$ )
- ・外表面温度 :  $100^\circ\text{C}$
- ・周囲粒体 : 大気
- ・周囲温度 :  $20^\circ\text{C}$

3. 試験装置からの放熱量の計算

3.1 試験装置の側面からの放熱量

自然対流の程度を代表するグラスホフ数は下式で表される。

$$\text{Gr} = g \beta (T_w - T_\infty) l^3 / \nu^2$$

ここで、

- $g$  : 重力加速度 ( $9.807 \text{ m/s}^2$ )
- $\beta$  : 体膨張係数 ( $1/293 \text{ 1/K}$ )
- $T_w$  : 壁面温度 ( $373 \text{ K}$ )
- $T_\infty$  : 周囲流体温度 ( $293 \text{ K}$ )
- $l$  : 代表長さ ( $0.32 \text{ m}$ )
- $\nu$  : 動粘性係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $\text{Pr}$  : プラントル数 (-)
- $\lambda$  : 熱伝導率 ( $0.029 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$ )

代表温度は次式で与えられ、この温度より物性値を求める。

$$\begin{aligned} T_r &= T_w - 0.38 (T_w - T_\infty) \\ &= 373 - 0.38 \times (373 - 293) \\ &= 342.6 \text{ K} \end{aligned}$$

代表温度より、空気の物性値は  $\nu = 1.988 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $\text{Pr} = 0.718$  から  $\text{Gr} \cdot \text{Pr} = 2.22 \times 10^8$  であるので、層流である。

鉛直円柱における層流の局所熱伝達率は次式で与えられる。

$$(Nux)_c / (Nux)_p = 1 + K (x / r_0 / (Nux)_p)^{5/6}$$

ここで、同一温度条件であるので

$$K=0.43$$

$(Nux)_p$  : 鉛直平板のヌセルト数

ただし、鉛直平板のヌセルト数は

$$(Nux)_p = C_1 (\nu_\infty / \nu_w) 0.21 Ra_x^{1/4}$$

$$C_1 = 3/4 (Pr / (2.4 + 4.9 Pr^{0.5} + 5 Pr))^{1/4}$$

で与えられる。

また、熱伝達率の定義より

$$hx = \lambda Nux / x$$

$$= 0.029 \times 11.7 / 0.32$$

$$= 1.06 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

平均熱伝達率は

$$\bar{h} = (4/3) \times hx$$

$$= 1.42 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

また、熱伝達率の定義より熱流束  $q$  は

$$q = \bar{h} \times (T_w - T_\infty)$$

$$= 113.4 \text{ W} / \text{m}^2$$

試験装置サイズ  $\phi 180 \times 320 \text{ mmL}$  より、表面積  $0.18 \text{ m}^2$  であるので、側面からの放熱量  $Q_1$  は

$$Q_1 = 20.4 \text{ W}$$

### 3.2 試験装置上面からの放熱量

3.1 項と同様に計算する。代表長さ  $l=0.09\text{m}$  として  $Gr \cdot Pr = 4.94 \times 10^6$  であるので、層流である。

層流平板のヌセルト数は次式で与えられる。

$$Nu_x = C_1 (\nu_\infty / \nu_w) 0.21 Ra_x^{1/4}$$
$$C_1 = 3/4 (Pr / (2.4 + 4.9 Pr^{0.5} + 5 Pr))^{1/4}$$

よって、局所熱伝達率は

$$h_x = \lambda Nu_x / x$$
$$= 3.83 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

平均熱伝達率は

$$h = (4/3) \times h_x$$
$$= 5.11 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

以上より熱流束  $q$  は

$$q = \overline{h} \times (T_w - T_\infty)$$
$$= 408.7 \text{ W} / \text{m}^2$$

試験装置上面積は  $\phi 180\text{mm}$  より  $0.025\text{m}^2$  であるので、上面からの放熱量  $Q_2$  は

$$Q_2 = 10.2 \text{ W}$$

### 3.3 試験装置からの放熱量

以上の計算より、試験装置全体の放熱量  $Q$  は

$$Q = Q_1 + Q_2$$
$$= 20.4 + 10.2 = 30.6 \text{ W}$$

## 4. 試験装置の熱容量

### 4.1 試験装置の熱容量

#### (1) 上部フランジ

- ・形状 :  $\phi 280 \times 40 \text{ mmL}$
- ・材質 : チタン合金
- ・密度 :  $4420 \text{ kg/m}^3$
- ・比熱 :  $0.522 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

以上より熱容量 A1 は

$$A1 = \pi / 4 \times 0.28^2 \times 0.04 \times 4420 \times 0.522 \times (100 - 20) \\ = 455 \text{ kJ}$$

(2) カラム円筒

- ・形状 : O.D.180mm、I.D.150mm、270mmL
- ・材質 : チタン合金
- ・密度 :  $4420 \text{ kg/m}^3$
- ・比熱 :  $0.522 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

以上より熱容量 A2 は

$$A2 = \pi / 4 \times (0.18^2 - 0.15^2) \times 0.27 \times 4420 \times 0.522 \times (100 - 20) \\ = 387 \text{ kJ}$$

(3) 下部フランジ

- ・形状 :  $\phi 280 \times 30 \text{ mmL}$
- ・材質 : チタン合金
- ・密度 :  $4420 \text{ kg/m}^3$
- ・比熱 :  $0.522 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

以上より熱容量 A3 は

$$A3 = \pi / 4 \times 0.28^2 \times 0.03 \times 4420 \times 0.522 \times (100 - 20) \\ = 341 \text{ kJ}$$

(4) 炭素鋼

- ・形状 :  $\phi 140 \times 30 \text{ mmL}$
- ・材質 : 炭素鋼
- ・密度 :  $7850 \text{ kg/m}^3$



・比熱 : 0.47 kJ/kg·K

以上より熱容量 A4

$$\begin{aligned} A4 &= \pi / 4 \times 0.14^2 \times 0.03 \times 7850 \times 0.47 \times (100 - 20) \\ &= 136 \text{ kJ} \end{aligned}$$

#### (5) 試験装置の熱容量

以上の計算より試験装置の熱容量 A'は

$$\begin{aligned} A' &= A1 + A2 + A3 + A4 \\ &= 455 + 387 + 341 + 136 \\ &= 1319 \text{ kJ} \end{aligned}$$

#### 4.2 緩衝材の熱容量

・緩衝材寸法 :  $\phi 150 \times 100 \text{ mmL}$

・乾燥密度 : 1.6 g/cm<sup>3</sup>

・緩衝材比熱 : 0.4 kJ/kg·K (ベントナイト 70%、けい砂 30%、飽和条件)

以上より緩衝材の熱容量 A5 は

$$\begin{aligned} A5 &= \pi / 4 \times 0.15^2 \times 0.1 \times 1.6 \times 0.4 \times (100 - 20) \\ &= 0.09 \text{ kJ} \end{aligned}$$

#### 4.3 緩衝材を含んだ試験装置の熱容量

4.1 項と 4.2 項の計算結果より、緩衝材を含んだ試験装置の熱容量 A は

$$\begin{aligned} A &= 1319 + 0.09 \\ &= 1320 \text{ kJ} \approx 367 \text{ Wh} \end{aligned}$$

#### 5. ヒーター容量の検討

3.項の計算結果より、試験装置の放熱量は 30W 程度とわずかであり、放熱量を考慮してヒーター容量を決定する必要はない。従って、緩衝材を含んだ試験装置の熱容量から、昇温に必要な時間からヒーター容量を決定する。

表-1 ヒーター容量と試験装置昇温時間の関係

ヒーター容量	昇温時間
W	分
100	228
200	114
300	76
400	57
500	46

以上の計算より、昇温時間を1時間と設定するとヒーター容量は400Wであるが、2倍の余裕をみてヒーター容量を800Wとする。