

温度勾配下での緩衝材の浸潤時における 間隙水化学に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2002 年 2 月

株式会社コベルコ科研

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

電話：029 - 282 - 1122（代表）

ファックス：029 - 282 - 7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and 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

2002 年 2 月

温度勾配下での緩衝材の浸潤時における間隙水化学に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

原直広 今北毅

要 旨

温度勾配のある不飽和緩衝材に地下水が浸潤した際の緩衝材間隙水水質等が時間空間でどのように変化するかを把握するために、試験装置を考案・設置したのち、浸潤実験を行なった。

試験に必要な装置は、ベントナイトの断熱性、浸潤時の計測センサー（pH、塩分濃度、水分濃度）を考慮して、設計・製作した。試験に用いるベントナイト層を 10cm とし、この両端に 80 と 100 の温度勾配を設定可能とした。また、送水はガス圧によるものとし、1MPa まで加圧可能とした。センサーとして、pH にはガラス電極を、塩分濃度は電導度センサーで代替し、水分濃度は低濃度域で湿度センサーを高濃度域で水分センサーを用いることとした。

設置した装置を用いて、温度勾配下における塩水によるベントナイトの浸潤試験を実施し、浸潤時の塩分濃度の変動を評価した。

センサー出力値は、高温、加圧下の測定データであるため、相対値として評価した。一部のセンサー、水分センサーなどでは温度影響等のため、十分なデータは得られなかった。

本報告書は、株式会社コベルコ科研が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター

処分研究部 処分バリア性能研究グループ

株式会社コベルコ科研

February, 2002

Study for the water penetration chemistry of bentonite
under temperature gradation environment
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

Naohiro Hara and Tsuyoshi Imakita

Abstract

This work have been studied for the water fluctuation in time and space in case of the ground water penetration into the unsaturated bentonite with development of the necessary test equipment.

The test equipment necessary for this test, was designed on consideration of the adiabatic condition, sensors for pH, salt and water measurement. The thickness of the bentonite specimen was set to 10cm and the temperature slope was enable to set between 80 and 100 at the both end of the specimen. The water for penetration was pushed by gas constant pressure up to 1MPa. The glass electrode for pH, electric conductivity for salinity and moisture sensor for lower water content and water sensor for higher were used as the sensors.

The fluctuation of salt and water in the ground water penetration test to bentonite was estimated.

The sensor data were treated as parametric data, because those data could not calibrated in those high temperature and under those high bentonite swollen pressure. For another development should be needed for water sensor.

This work was performed by Kobelco Research Institute,Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison:JNC Tokai Works, Waste Management and Fuel Cycle Research

Center, Waste Isolation Research Division, Barrier Performance Group

Kobelco Research Institute,Inc.

目 次

1. はじめに	1
2 試験装置の詳細設計および製作	1
2.1 装置仕様の選定	1
2.2 センサーの校正および調整	25
3 試験手順	29
3.1 ベントナイトと砂の混合	29
3.2 ケイ砂混合ベントナイト充填と試験及び試料の取り出し	29
3.3 分析	34
4. 試験および結果	37
4.1 送水試験（1回目）	37
4.2 送水試験（2回目）	59
4.3 試験結果のまとめと考察	84
5. おわりに	85
6. 参考文献	87
付 録 含水比測定データ	付(1)

図 目 次

図 2.1	湿度センサーの構造及び構成図	5
図 2.2	水分センサーの構造及び構成図	6
図 2.3	電導度センサーの構造及び構成図	7
図 2.4	pH センサーの構造及び構成図	8
図 2.5	全体配置図	12
図 2.6	計装盤盤面図	13
図 2.7	物性計測用圧密カラム	14
図 2.8	温度計測用圧密カラム	15
図 2.9	センサー配列平面図	16
図 2.10	フローシート	17
図 2.11	水シリンダー	18
図 2.12	金型図面	19
図 2.13	物性計測用圧密カラムの圧密カラム成形高さ確認図	20
図 2.14	温度計測用圧密カラムの圧密カラム成形高さ確認図	21
図 2.15	装置外観図	22
図 2.16	水系の流れ図	23
図 2.17	信号取り出し経路図	24
図 2.18 (1)	電導度センサー測定結果 (1 回目 ; 25)	27
図 2.18 (2)	電導度センサー測定結果 (1 回目 ; 85)	27
図 2.19	電導度センサー測定結果 (2 回目 ; 25)	28
図 3.1(1)	ケイ砂混合ベントナイト充填フロー	32
図 3.1(2)	試料取り出しフロー	33
図 3.2	分析フロー	36
図 4.1	分析試料採取位置	43
図 4.2 (1)	送水試験 (1 回目) 中の温度測定結果 (カラム A)	47
図 4.2 (2)	送水試験 (1 回目) 中の温度測定結果 (カラム B)	47
図 4.3 (1)	温度計測用カラム A の温度勾配	48
図 4.3 (2)	温度計測用カラム B の温度勾配	48

図 4.4	ヴァイサラ湿度センサーによる測定結果	49
図 4.5	土壌水分センサーによる測定結果（出力；電圧）	49
図 4.6	電導度センサーによる測定結果（出力；電圧）	50
図 4.7	pH センサーによる測定結果（上段設置センサー）	50
図 4.8 (1)	試料スライス片の含水率測定結果（カラム A）	51
図 4.8 (2)	試料スライス片の含水率測定結果（カラム B）	51
図 4.9	送水試験終了後の試料の外観	52
図 4.10	水頭圧試験状況	65
図 4.11	分析試料採取位置	67
図 4.12(1)	送水試験（2 回目）中の温度測定結果（カラム A）	75
図 4.12(2)	送水試験（2 回目）中の温度測定結果（カラム B）	75
図 4.12(3)	温度計測用カラム A の温度勾配	76
図 4.12(4)	温度計測用カラム B の温度勾配	76
図 4.13	湿度センサー（上段）による計測結果	77
図 4.14	土壌水分センサーによる測定結果	77
図 4.15	電導度センサーによる測定結果	78
図 4.16	pH センサーによる測定結果	78
図 4.17(1)	試料の含水比測定結果	79
図 4.17(2)	試料の含水比測定結果	79
図 4.17(3)	試料の含水比測定結果	79
図 4.18(1)	送水試験後のベントナイト中（固相）の Na 分析結果	80
図 4.18(2)	送水試験後のベントナイト中（固相）の Ca 分析結果	80
図 4.18(3)	送水試験後のベントナイト中（固相）の Cl ⁻ 分析結果	81
図 4.18(4)	送水試験後のベントナイト中（固相）の SO ₄ ²⁻ 分析結果	81
図 4.19(1)	送水試験後のベントナイト中（浸出）の Na 分析結果	82
図 4.19(2)	送水試験後のベントナイト中（浸出）の Ca 分析結果	82

表 目 次

表 2.1	温度センサー	4
表 2.2	湿度センサー	5
表 2.3	水分センサー	6
表 2.4	電導度センサー	7
表 2.5	pH センサー	8
表 2.6	断熱材として用いたセラミックスと樹脂の物性比較表.....	11
表 3.1	分析項目一覧表	35
表 4.1	圧密時の圧力（１回目）	40
表 4.2	試験条件.....	41
表 4.3	送水試験（１回目）作業結果	42
表 4.4	試験条件と実施結果	46
表 4.5	送水試験（１回目）後の試料の含水比および飽和度測定結果.....	46
表 4.6	改善方法の一覧	58
表 4.7	圧密時の圧力結果（２回目）	64
表 4.8	試験条件および実施結果	65
表 4.9	送水試験（２回目）作業結果	66
表 4.10(1)	送水試験（２回目）後のベントナイトの含水比および飽和度測定結果	73
表 4.10(2)	ベントナイトスライス片の中心部と外周部の含水率および飽和度測定結果	73
表 4.11	送水試験(2 回目)後のベントナイトの成分分析結果	74

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、緩衝材間隙水の水質は、オーバーパックスの腐食評価及び評価対象核種の溶液中濃度の評価等に非常に重要なパラメータである。従来、緩衝材と地下水の反応に関しては、そのほとんどが温度一定条件の下で、バッチ式の実験によるデータ取得と考察が行われてきている。しかしながら、現実の処分システムにおいては、緩衝材は初期には不飽和で外側から地下水が徐々に送水するとともに、緩衝材内側の廃棄体には発熱があるため、緩衝材領域には温度勾配があるなど、従来の実験条件とは異なる。したがって、より現実のシステムに近い条件での緩衝材間隙水水質の時間空間的な変化を把握し、腐食評価等に利用することが望ましい。

本研究では、温度勾配のある不飽和緩衝材に地下水と送水した際の緩衝材間隙水水質等が時間空間でどのように変化するかを把握するための実験を行ない、実験結果について考察した。

2. 試験装置の詳細設計及び製作

2.1 装置仕様の選定

研究の実施にあたり、研究目的を達成することが可能となるよう試験装置を設計し、製作した。試験装置は以下の機能を有することを目的として設計した。

圧縮ベントナイトの両端の温度制御を行い、ベントナイトに温度勾配を与え、片端から溶液を供給できるものとする。高温側の温度は最高温度を 100 とする。

試験中の試料には、温度、及び化学環境（pH、溶質濃度等）を測定するセンサーを挿入し、試験中のこれらの変化を計測し表示できるものとする。

(1) センサー

センサーとしては、pH、塩分（電気電導度）、水分濃度を測定できるよう考案した。本研究の目的に沿ってこれらの電極を調査し、設計に反映させた。これらセンサーの出力データは、データロガーで収集することとした。使用したセンサーは以下のとおりである。

a. 温度センサー

温度センサーには白金熱電対を使用した。温度センサーの仕様を、表 2.1 に示す。温度測定は、熱電対のほか pH 電極等に設置されている温度計によっても行ったが、これらはデータ出力用端子がないため、データロガーへは出力していない。

b. 水分センサー

水分センサーは、試験当初は低濃度で、送水が進むと 20% 程度の高濃度となるので、高濃度用と低濃度用の 2 水準のセンサーを使用することとした。低濃度用として、ヴァイサラ社製の湿度計を用いた。高濃度用としてサンケイ理化製の土壤水分センサーを用いた。仕様を、表 2.2 及び表 2.3 に、センサーの構造を図 2.1 及び図 2.2 に示す。

・湿度センサーの測定原理

ガラス基板とガラス基板上にエッチング法で形成された下部電極、浸漬法で下部電極に形成された高分子薄膜である感湿部と、感湿部薄膜上に蒸着法で形成された上部電極の 4 つの部分からなる。測定環境の水蒸気は上部電極を通り感湿部である 1 μ m 厚の高分子膜に吸脱される。そして高分子膜への水蒸気の吸脱による誘電率の変化を電極で捉える。

・水分センサーの測定原理

土壌中の水のポテンシャル（水分張力）と間隙水圧を、検水室中の脱気水を媒体として感圧センサーで感知し、電気信号として出力している。

c. 電導度センサー

塩分濃度そのものを直接センシングすることは困難であるため、電気電導度を測定することで塩分をモニターすることとした。用いた電導度センサーの仕様を表 2.4 に示す。

・電導度センサーの測定原理

外側の電流供給電極を流れる電流 e と内側の電圧測定電極間の電位差 V_2 との比 (e/V_2) を測定すると、この比は媒体の比抵抗に反比例し、電気電導度に比例する。この方法は測定電極にほとんど電流が流れないため、電源電極周囲の接触抵抗などの局所的な抵抗の影響を避けることができる。ただし、分極を避けるために、高周波の交流電流を電流電極に流す必要がある。電流供給電源を流れる電流 e は、回路内に既知の値の抵抗 R を入れて、その両端の電位差 V_1 を測定することによって、 $e=V_1/R$ の関係から求まる。つまり、参照抵抗 R にかかる電圧 V_1 と電圧測定電極の電圧 V_2 の比 (V_1/V_2) が媒体の電気電導度に比例する。

d. pH センサー

1MPa 程度の圧力下で、かつ 80 程度でも利用できる pH センサーとして、ケミカルプロセス用のインライン型電極のほか、ISFET (Ion Selection Field Emission Transistor) 型電極も利用できる可能性があったが、後者では、平型のみの形状で、カラムにセット可能な形状が入手困難であったため、インライン型電極を採用することとした。使用した pH センサーの仕様を表 2.5 に示す。

・pH センサーの測定原理

ガラス電極と比較電極の 2 本の電極と、電極から得られた出力電位を pH 値に変換する「変換器」から構成されている。ガラス電極は被検液の水素イオンの濃度によって生じる起電位 (E_g) を検知し、比較電極の電位 (E_{ref}) は液絡部を通じ、被検液と同じ電位のレベルになるように電氣的に接続してある。pH はこの 2 つの電位の差 (E_{el}) を変換器で読みとり、pH として表示する。

$$E_{el} = E_g - E_{ref}$$

表 2.1 温度センサー

温度測定用熱電対	株式会社シマデン：Kシース熱電対
外径	φ 3.2mm
精度	± 2.5
シース材質	SUS316
温度接点	非接地系
コネクタ	NDP-TO1-K

流路測定用熱電対 (カラム入口側)	株式会社 シマデン STD-IIS-016-M-200-U-00-K-1-H-1-300-0
外径	φ 1.6mm
精度	± 2.5
シース材質	SUS316
常用温度/最高温度	850 /950
温度接点	非接地系

流路測定用熱電対 (カラム出口側)	株式会社 シマデン STD-IIS-016-M-500-U-00-K-1-H-1-300-0
外径	φ 1.6mm
精度	± 2.5
シース材質	SUS316
常用温度/最高温度	850 /950
温度接点	非接地系

表 2.2 湿度センサー

ヴァイサラ株式会社 HMP234		
使 用 圧 力 範 囲	0～10MPa	
相対湿度		
セ ン サ ー	静電容量式 HUMICAP [®] センサー	
湿 度 測 定 範 囲	0～100%RH	
精		

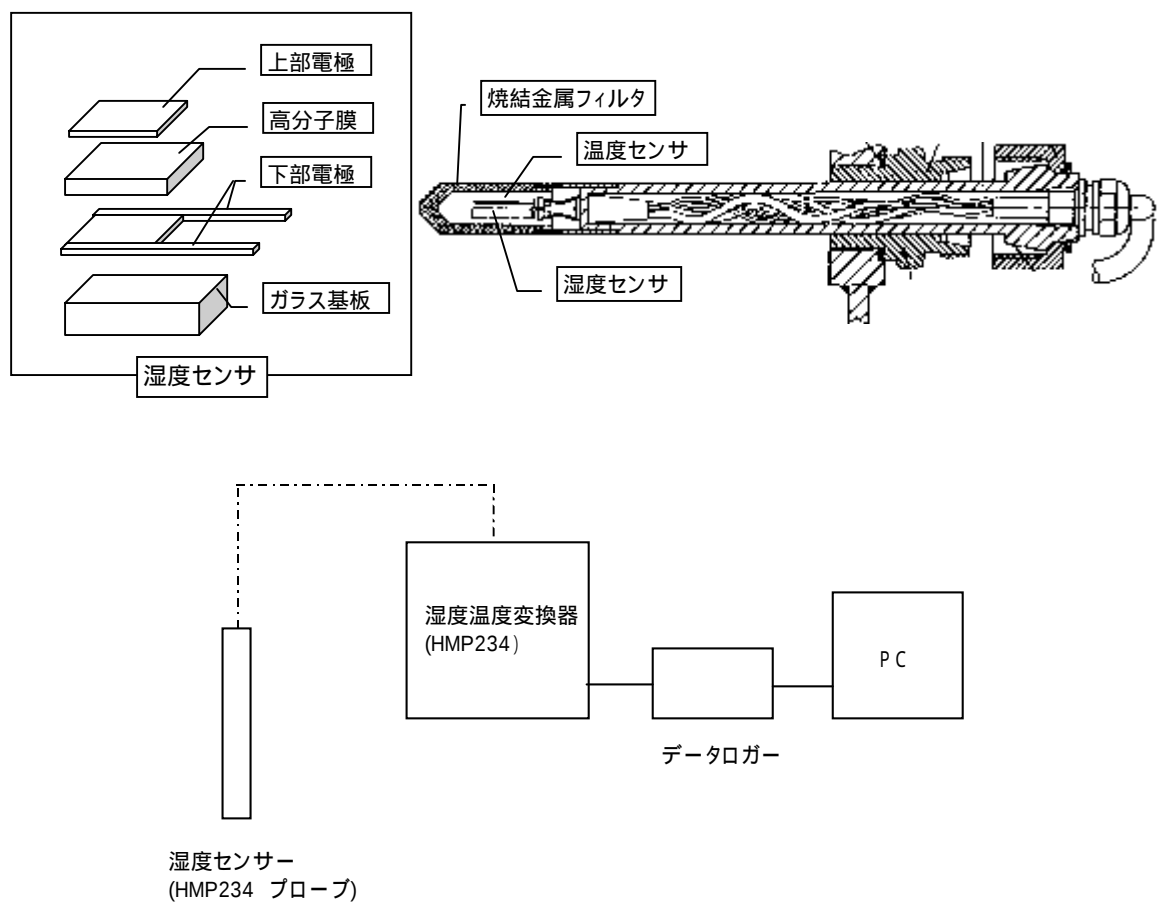


図 2.1 湿度センサーの構造及び構成図

表 2.3 水分センサー

サンケイ理化学株式会社 土壌水分自動測定器	
センサー部：マイクロテンシオメーターSK-5500-M6	
本 体：SK-5604D	
測 定 レ ン ジ	±1000cm/H ₂ O (間隙水圧 0 ~ p F3.0)
接 液 部 材 質	多孔質セラミックス
封 入 物	脱気水
電 圧 変 動 の 影 響	零点 1.5%FS/10 /V
温度ドリフトへの影響	零点感度 0.1%FS/10 /V
周 囲 温 度	センサー部： - 10 ~ 50 (但し凍結させない事) 本 体： 0 ~ 45 以内
直 線 性 誤 差	フルスパンの 0.5%以内
出 力 特 性	直線

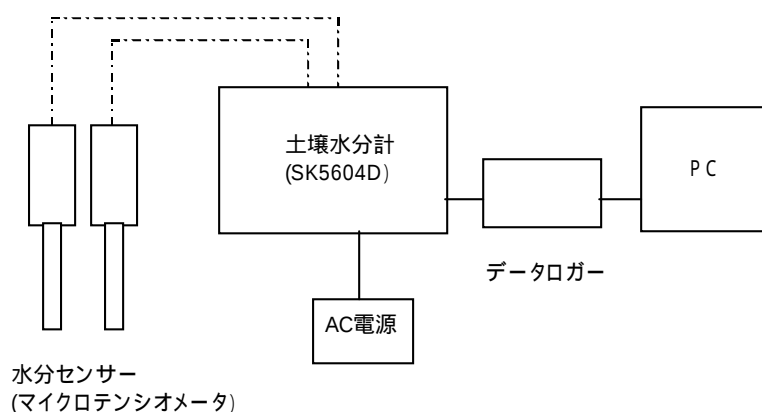
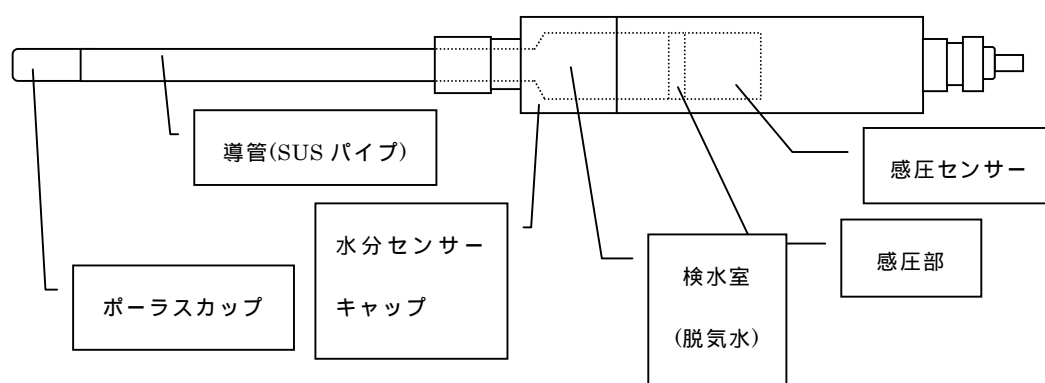


図 2.2 水分センサーの構造及び構成図

表 2.4 電導度センサー

サンケイ理化株式会社 四極式土中電導度計	
電 導 度 計 : SK3000D	
電導度計用切替器 : SK-3000	
セ ン サ ー の 形 状	棒状
電 極 部 材 質	ステンレス
セ ン サ ー の 標 準 寸 法	φ 6mm×L1000mm
検 出 方 法	交流高周波入力による電位差
測 定 範 囲	飽和～乾燥(土壌及び混合物質)
測 定 出 力	mV(電導度に比例する直流電圧出力)
精 度	± 2.5%
仕 様 温 度 範 囲	0～45
抵 抗 率 切 り 替 え	10Ω、100Ω、1kΩ

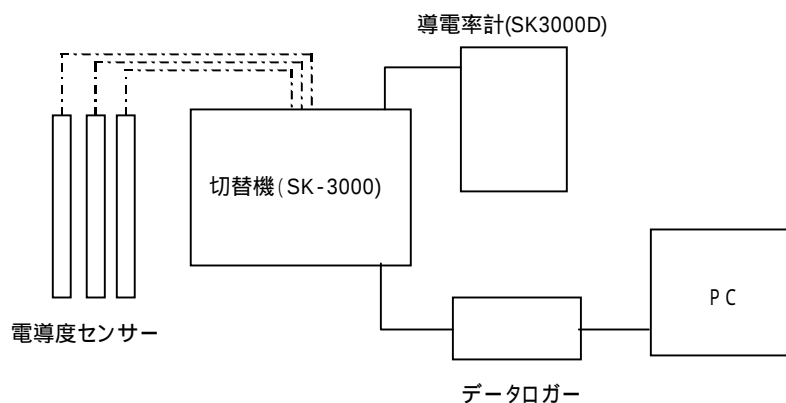
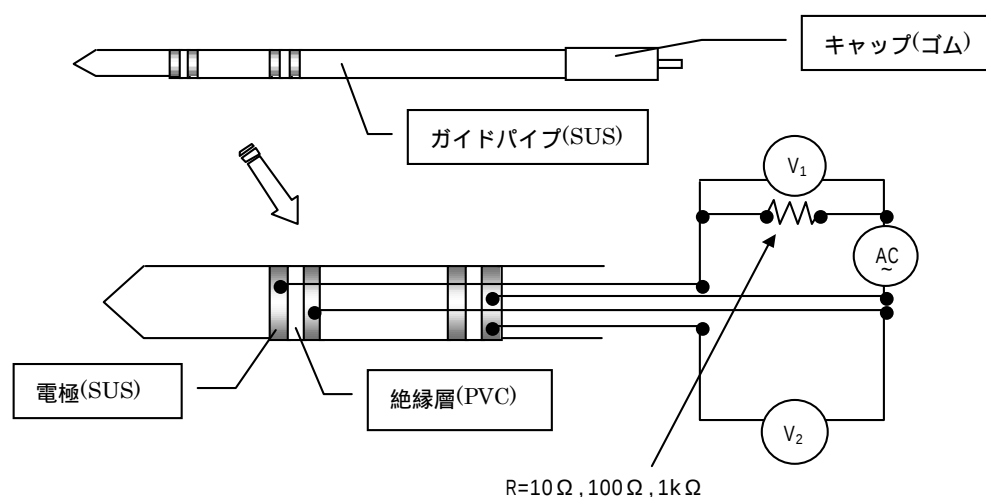


図 2.3 電導度センサーの構造及び構成図

表 2.5 pH センサー

メトラー・トレド株式会社	
pH 電 極：InPro4200/120/PT1000	
変 換 器：pH/ORP 変換器 2050 型	
pH 電極	
p H 測 定 範 囲	2 ~ 14
使 用 圧 力 範 囲	1600kPa(25),600kPa(100)
比 較 電 極	KCl を含む固体電解質
液 絡 部	開放型,2 箇所
シ ャ フ ト 材 質	ガラス
温 度 素 子	Pt 1000
使 用 温 度 範 囲	0 ~ 110
pH / ORP 変換器	
測 定 範 囲	0.00 ~ 14.00pH
測 定 最 小 表 示	0.01pH
測 定 精 度	± 0.02pH
温 度 測 定 範 囲	- 9.9 ~ 125
温 度 最 小 表 示 範 囲	0.1
温 度 測 定 精 度	± 0.5
温 度 補 償	自動 (ATC) /手動 (測定温度と校正温度を任意に設定)

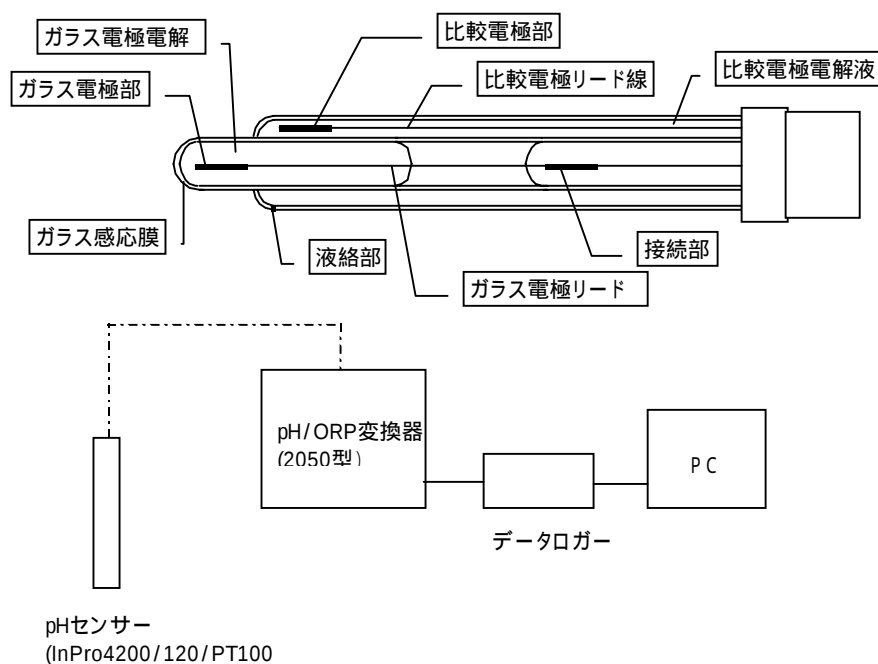


図 2.4 pH センサーの構造及び構成図

(2) 試験装置

a. 試験装置概要

圧力系、給水系、センサー系を組み合わせ、調整した試験装置の全体配置図を図 2.5 に、計装盤 盤面図を図 2.6 に示す。

b. 試験カラム

(a) カラム構造

ベントナイトの膨潤圧に耐えられるよう、1 MPa の耐圧構造とし、ケイ砂混合ベントナイトは 100mm 高さの円柱状となるよう設計した。カラムは各種センサーを挿入可能な物性測定用カラムと温度測定専用のカラムを設計した。

温度勾配設定のためにカラムは縦方向に、断熱を考慮して SUS 容器内部に断熱材を挿入した構造とした。

カラムは、全測定項目に対応するものを 1 体(以下、物性計測用と称す)、温度のみの測定で、解体分析用を 2 体(以下、温度計測用と称す)とした。物性計測用圧密カラムを図 2.7 に、温度計測用圧密カラムを図 2.8 に示す。また、センサー配列平面図を図 2.9 に示す。

試料加熱用ヒータは、漏電防止を目的として、水分との接触を避けるためにシースヒータを渦巻き状にして収めたヒータケースをフィルタ固定板に密着させ、焼結フィルタ固定板及び焼結フィルタを介して試料を加熱する構造とした。また、ヒータ温度測定・制御用の熱電対は、試料に通じる水路ができないようにするために焼結フィルタを貫通して試料と接触させる構造とせず、焼結フィルタに接触させて測温・制御する構造とした。

(b) カラム断熱材

カラムには温度勾配を設けるため、試料の温度制御の精度が試験結果に影響を及ぼすと考えられたため、断熱材を設けた。まず、1 回目の試験においてセラミックスを断熱材としたが、試験後解体すると、ケイ砂混合ベントナイト充填時の圧縮強度の不均衡に由来すると推定される割れが発生していた。よって、2 回目の試験では弾性の

ある材料として樹脂製断熱材に変更することとした。用いたセラミックスと樹脂の物性値を表 2.6 に示す。

c. 装置構成

図 2.10 に、装置全体のフローシートを示す。さらに給水系の水シリンダの構成を図 2.11 に、ベントナイト充填に用いる金型図面を図 2.12 に示す。物性計測用圧密カラムの圧密カラム成形高さ確認図を図 2.13 に、温度計測用圧密カラムの圧密カラム成形高さ確認図を図 2.14 に示す。組み上げた装置全体の外観を図 2.15 に示す。水系の流れ図を図 2.16 に、信号の取り出し経路を図 2.16 に示す。

表 2.6 断熱材として用いたセラミックスと樹脂の物性比較表

	セラミックス	樹脂
材 質	フッ素金雲母 (45%) アルミノケイ酸ガラス (55%)	ポリアセタール
吸 水 率	0 %	0.22 % (24 時間水浸漬)
比 熱	0.8 kJ/kg・K (RT)	0.35 cal/ ・g
熱 伝 導 率	1.6 W/m・K (RT)	5.5×10^{-4} cal/sec/ /cm
熱 膨 張 率	9.2×10^{-6} / (RT ~ 200)	9×10^{-5} cm/cm/
圧 縮 強 さ	430 MPa	1.270 kgf/cm ² (10%変形)

番 号	名 称	材 質	数	備 考
1	恒温槽		1	
2	制御盤		1	
3	水シリンダ	ガラス	3	
4	減圧弁	ALダイキャスト	3	
5	圧力計	SUS-304	3	
6	背圧弁	SUS-316	3	
7	冷却器	SUS-304	3	
8	補集ビン	ガラス	3	

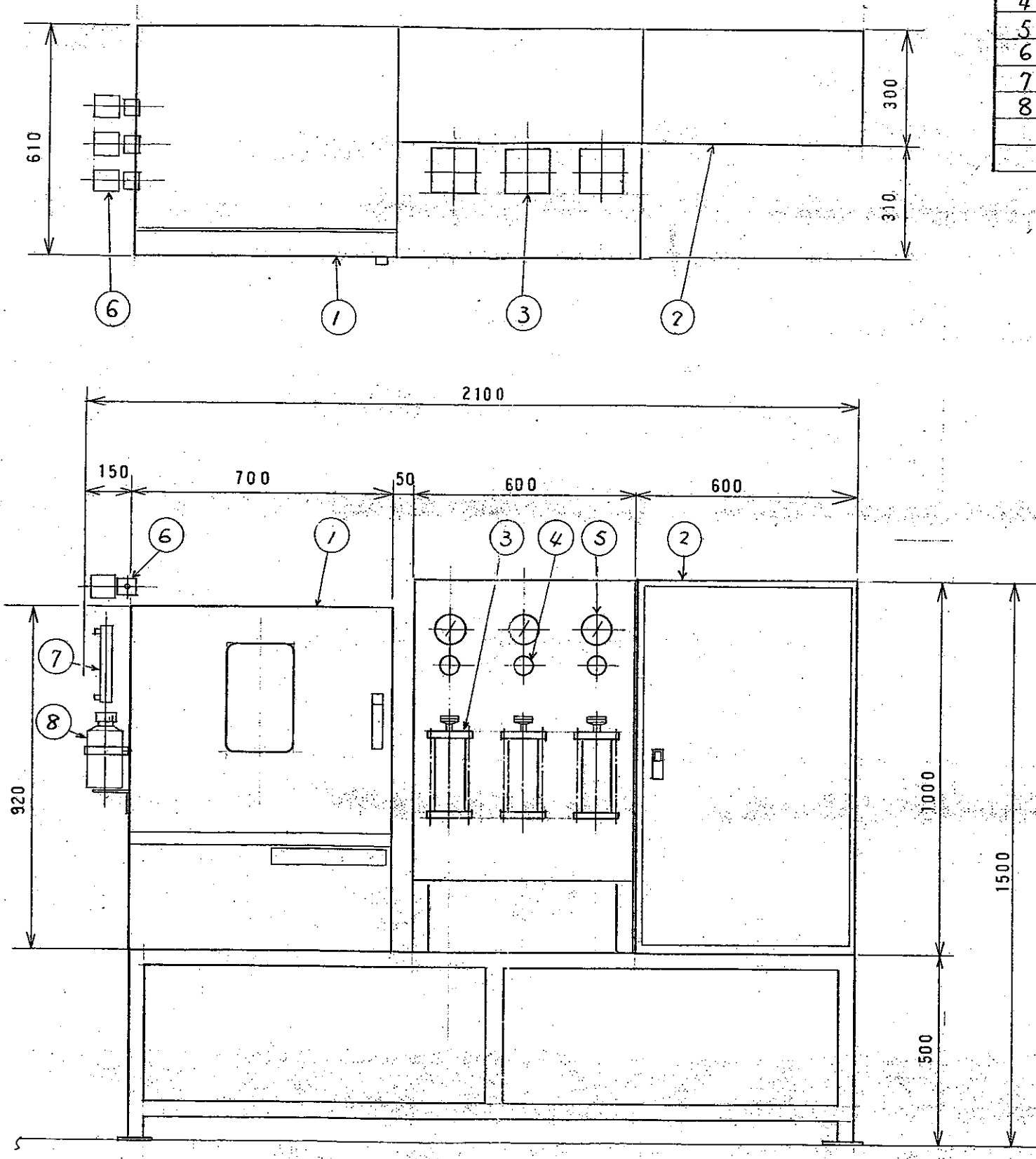
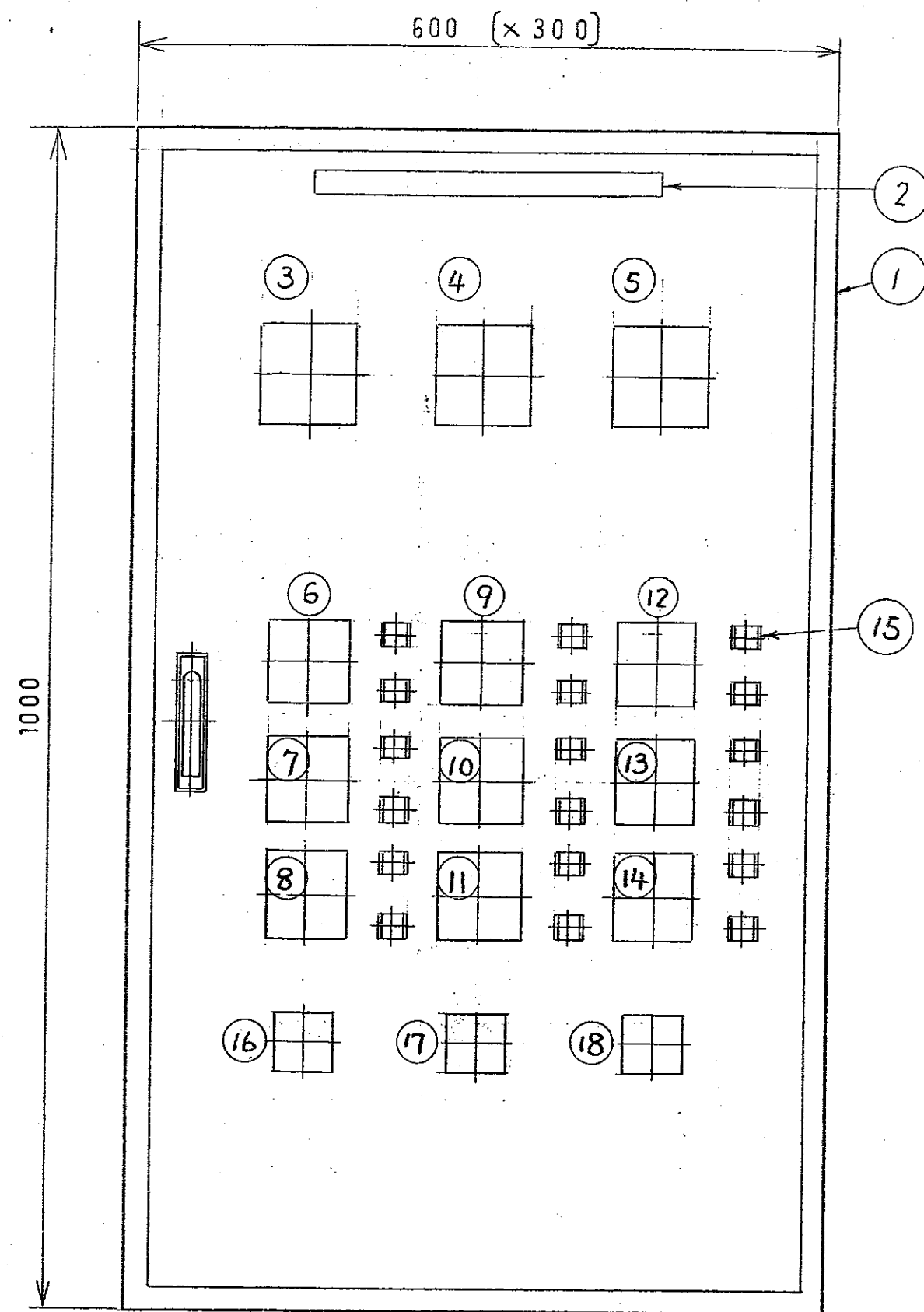


図.2.5 全体配置図

組立図面番号				材 質		製作数	
設 計		処 理		全体配置図			
製 図							
尺 度	1:10()						
日 付							
				図 面 番 号	10931-2002		



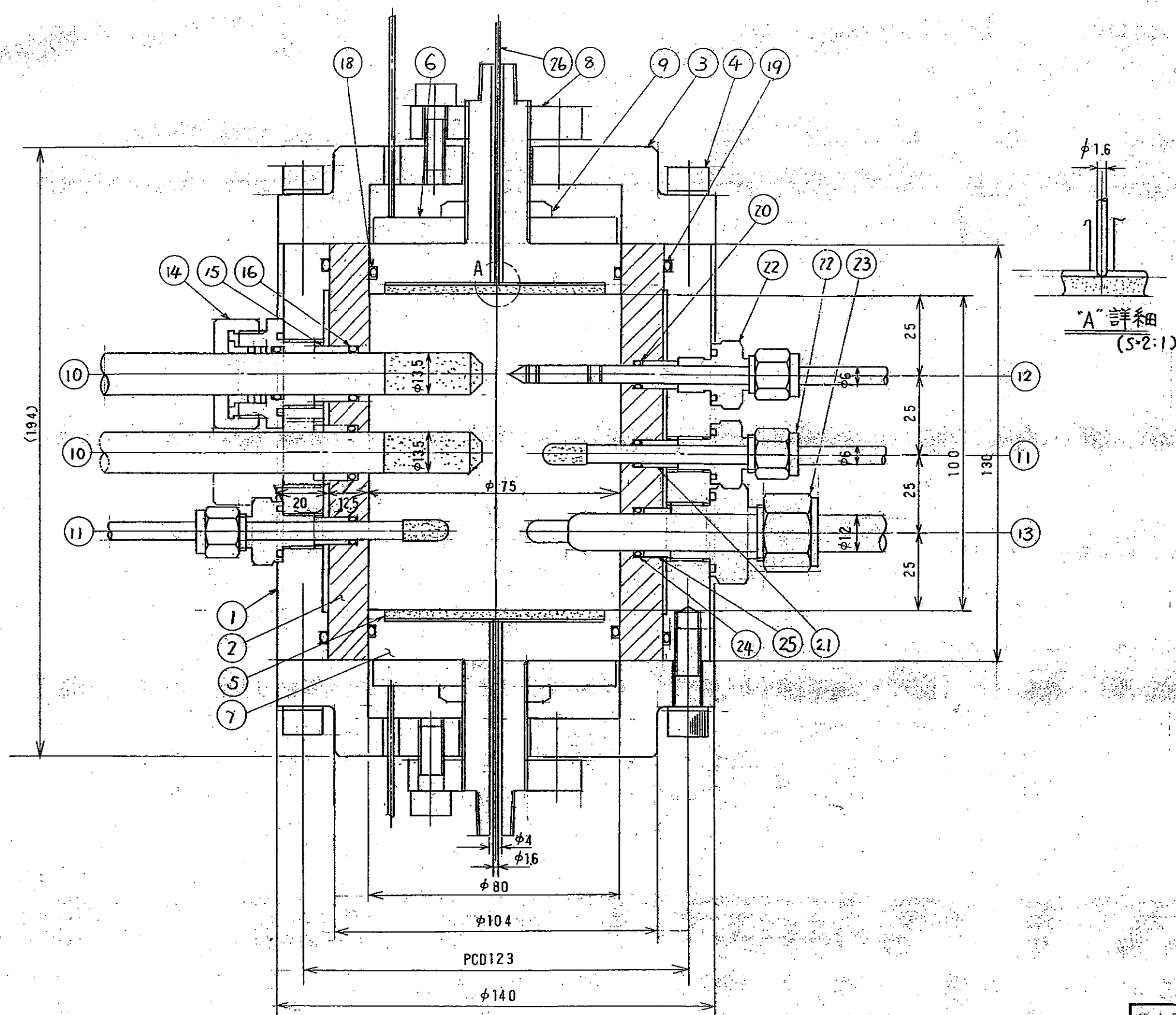
番号	名称	材質	数	備考
1	制御盤	SS-400	1	5Y $\frac{7}{8}$, SA30-610
2	X12 銘板		1	
3	PH指示計(下)		1	
4	" (中)		1	
5	" (上)		1	
6	圧密カラム(オ=系列)出口		1	0~400.0℃
7	↑ (") 入口		1	↑
8	(") 予熱		1	
9	(オ=系列) 出口		1	
10	(") 入口		1	
11	(") 予熱		1	
12	(オ=系列) 出口		1	
13	↓ (") 入口		1	↓
14	圧密カラム(") 予熱		1	0~400.0℃
15	押ボタン(ON),(OFF)		9セット	ON赤, OFF: 緑
16	圧密カラム(オ=系列)出口圧		1	0.0~1.000 MPa
17	↑ (オ= ") 出口圧		1	↑
18	圧密カラム(オ=系列)出口圧		1	0.1~1.000 MPa

図.2.6 計装盤 盤面図

記号	日付	訂正事項	訂正者
1	01.12.1	圧力指示・電導度指示 削除	

材質	製作数

設計	製図	尺度	日付	処	塗装色(マンセル)
		1:6 ()		理	5Y $\frac{7}{8}$
計装盤 盤面図					
図面番号 10931-3006					



番号	名称	材質	数	備考
1	本体 月同	SUS-304	1	
2	断熱材用インナ	セラミック	1	
3	フタ板	SUS-304	2	
4	締付ボルト	SUS-304	12×24	M8×30
5	焼結フィルタ	SUS-316	2	φ60×t3.10mm
6	ヒータ	SUS-304	2	AC100V×400W
7	フィルタ固定板	SUS-304	2	
8	上記固定リング	SUS-304	2	
9	ヒータ固定ナット	SUS-304	2	M20
10	湿度センサ(ゲイラ)		2	HMP234
11	湿度センサ(サンイ理化)		2	
12	電導度センサ(")		3	
13	PHセンサ(メトラード)		3	
14	湿度センサ用ホルダ	SUS-304	2	
15	Oリング 押え	SUS-304	2	
16	Oリング	バイトン	2	P-14
17	フタ板用 Oリング	バイトン	2	G-90
18	フィルタ固定用 Oリング	バイトン	2	G-70
19	ヒータ用 Oリング	バイトン	2	G-700
20	湿度センサ電導度センサ用ホルダ	バイトン	5	P-6
21	上記 押え	SUS-304	5	
22	上記 ホルダ	SUS-316	5	SS-400-10R/BT(7702)
23	PHセンサホルダ	SUS-316	3	SS-810-10R/BT(7702)
24	PHセンサ用 Oリング	バイトン	3	P-12
25	Oリング 押え	SUS-304	3	
26	熱電対	SUS-316	2	φ1.6×ℓ=250(K)

設計仕様		
流体名称	水	
設計圧力	3.0	MPa
常用圧力	1.0	MPa
設計温度	120	℃
常用温度	100	℃
耐圧試験圧力	4.5	MPa
気密試験圧力	3.0	MPa
内容積	500mℓ (ベントリト)	㎤
製作台数	1	台

図 2.7 物性計測用圧密カラム

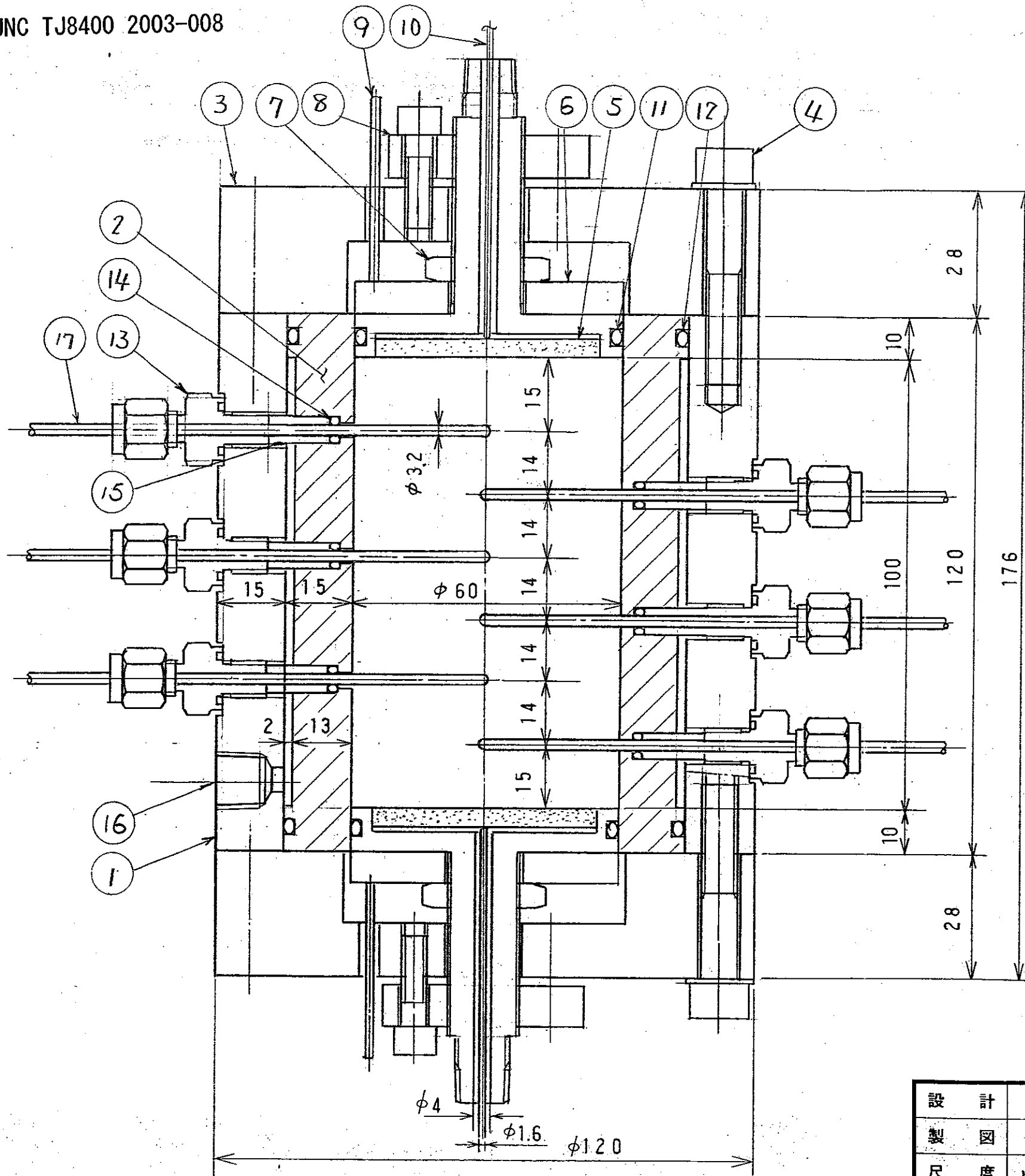
第三角法 削り加工寸法の普通許容差は14級(中級)とする。指示なき各機は糸面取のこと。

組立図面番号	設計	製図	尺 度	日 付	訂 正 事 項	訂 正 者
01.12.13	断熱材インナφ80→75		1:1 ()	01.11.24		
01.12.1	断熱材インナ長さ変更					

組立図面番号	設計	製図	尺 度	日 付	訂 正 事 項	訂 正 者
01.12.13	断熱材インナφ80→75		1:1 ()	01.11.24		
01.12.1	断熱材インナ長さ変更					

物性計測用圧密カラム

図面番号 10931-2003



番号	名 称	材 質	数	備 考
1	本体 胴	SUS-304	1	
2	断熱用インナ	セラミックス	1	
3	フタ 板	SUS-304	2	
4	締付ボルト	SUS-304	8×2=16	M8×40
5	焼結フィルタ	SUS-316	2	φ50×t3, 10μm
6	ヒータ	SUS-304	2	AC100V・400W
7	ヒータ固定ナット	SUS-304	2	M16
8	フィルタ固定リング	SUS-304	2	
9	マイクヒータ		2	φ1.6
10	温度調用熱電対	SUS-316	2	φ1.6×l=200(K)
11	ヒータケース用 O-リング	バイトン	2	G-55
12	インナ用 O-リング	バイトン	2	G-85
13	熱電対固定金具	SUS-316	6	SS-200-1-OR(フェルロハ ニウム)
14	熱電対シール O-リング	バイトン	6	P-3
15	O-リング 押え	SUS-316	6	φ6×φ3.5×(l=14)
16	真空 引口		1	Rc1/4
17	温度計測用熱電対	SUS-316	6	φ3.2×150(K)

設 計 仕 様	
流 体 名 称	水
設 計 圧 力	3.0 MPa
常 用 圧 力	1.0 MPa
設 計 温 度	120 ℃
常 用 温 度	100 ℃
耐圧試験圧力	4.5 MPa
気密試験圧力	3.0 MPa
内 容 積	283ml (バット付) 匹
製 作 台 数	2 台

図 2.8 温度計測用圧密カラム

設	計	処 理	塗装色(マンセル)	温度計測用圧密カラム	
製	図				
尺	度				1:1 ()
日	付				01.11.23
			図面番号	10931-3004	①

1	01.12.3	フィルタ固定方法変更
---	---------	------------

記号	日付	訂正事項	訂正者	材質	SUS316	製作数	2組
----	----	------	-----	----	--------	-----	----

第三角法

削り加工寸法の普通許容差は m (中級) とする。指示なき各稜は糸面取のこと。

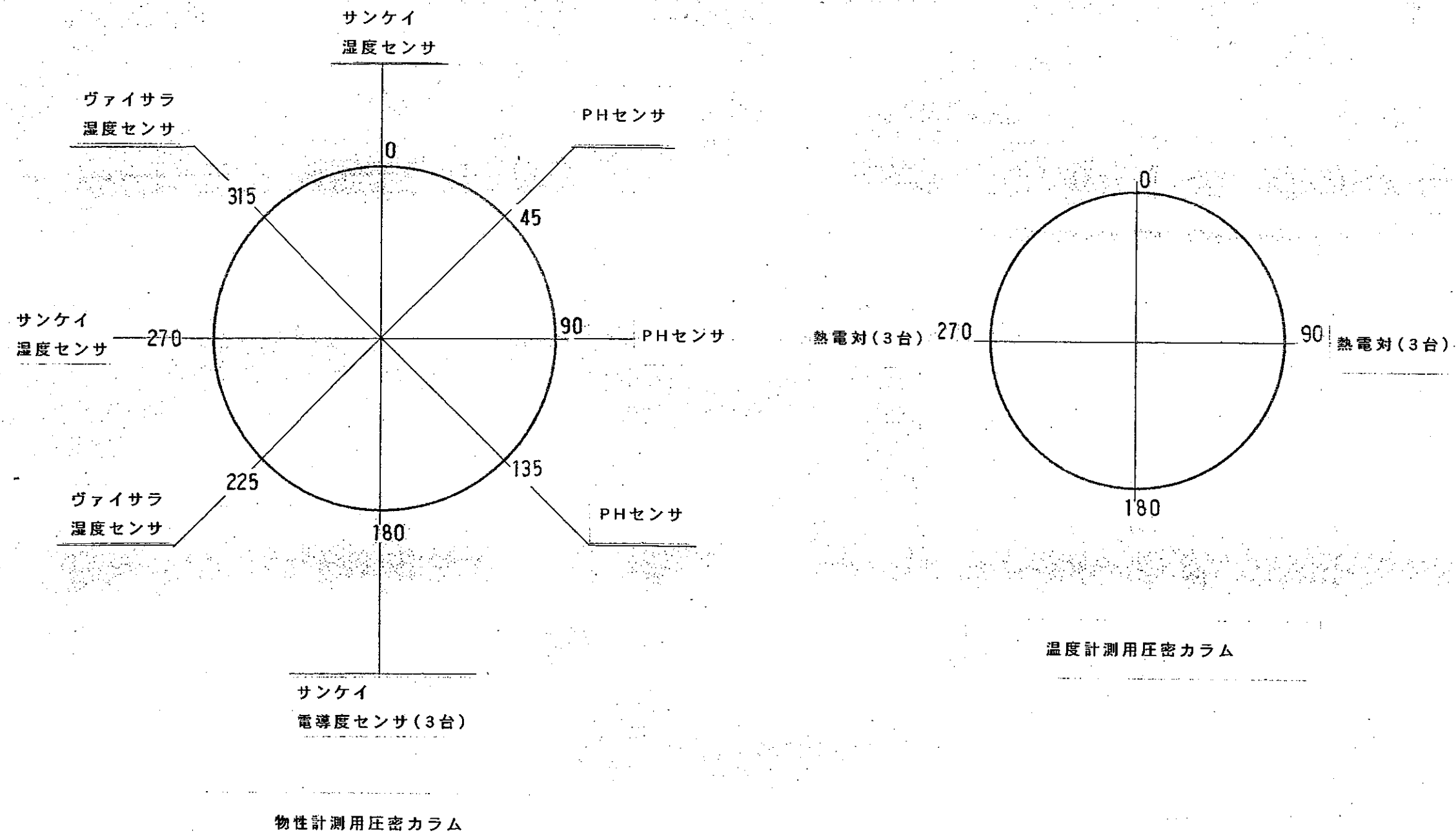


図 2.9 センサー配列平面図

記号	日付	訂正事項	訂正者	材質	製作数	設計	製図	尺度	日付	塗装色(マンセル)	処	理	物性計測用圧密カラム	温度計測用圧密カラム	センサー配列平面図	図面番号
第三角法																

削り加工寸法の普通許容差は m (中級) とする。指示なき各種は糸面取のこと。

番号	名称	材質	数	備考
タグNO	名称	型式	仕様	
TIC 1-9	温度指示調節形	SR 62	SSR 駆動 PID 調節形 0-400℃	
TI 7-18	温度センサー	(K) 熱電対	φ3.2×250	
CI 1-3	導電率計		サンケイ理化	
H2O 1-2	水分センサー		サンケイ理化	
H2O 3-3.1	湿度センサー	HMP 234	0-100% 0-180℃	
PI 1-3	圧力指示計	GC 67	0-1.0 MPa	
PH 1-3	PH 指示計	PH 2050 InPro 4200	メトラートレド	
BP 1-3	背圧弁	BP 3	0-1.7 MPa	
PV 1-3	精密減圧弁	モデル10	10272U 0-1.4 MPa	
PG 01-03	圧力計	AC 15-131	0-1.5 MPa	
空気増圧弁		VBA 1111	0-2.0 MPa	

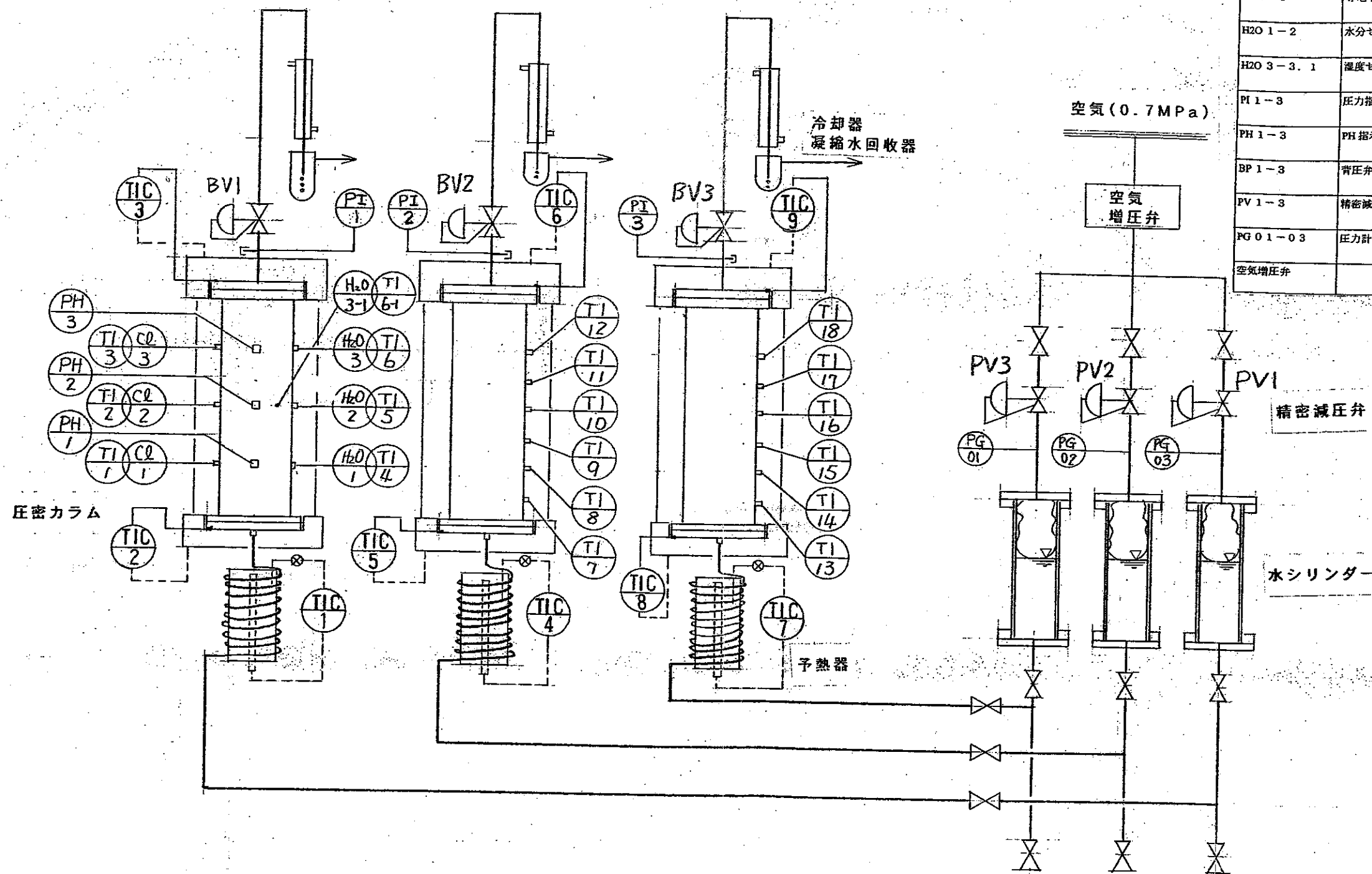


図.2.10 フローシート

2	01.12.1	カラムAPI削除	
1	01.10.22	水供給方法変更	
記号	日付	訂正事項	訂正者

材質 製作数

設計		処	塗装色(マンセル)	温度勾配下での緩衝材の浸潤時における 間隙水化学に関する研究装置
製図		理		
尺度	: ()			フローシート
日付				
図面番号				10931-3001 2

第三角法

削り加工寸法の普通許容差は m (中級) とする。指示なき各稜は糸面取のこと。

設計仕様		
流体名称	水	
設計圧力	1.5	MPa
常用圧力	1.0	MPa
設計温度	40	℃
常用温度	20	℃
耐圧試験圧力	2.25	MPa
気密試験圧力	1.5	MPa
内容積	830 ml	cc
製作台数	3	台

JNC TJ8400 2003-008

番号	名称	材質	数	備考
1	本体胴	ガラス管	1	
2	フタ板	SUS-304	1	
3	底板	SUS-304	1	
4	タイロッド	SUS-304	4	
5	O-リング	NBR	2	P-70
6	ゴムブラダ取付口	SUS-304	1	PC-25A
7	O-リング	NBR	1	G-25
8	液供給口&空気抜口	SUS-316	2	
9	ゴムブラダ			

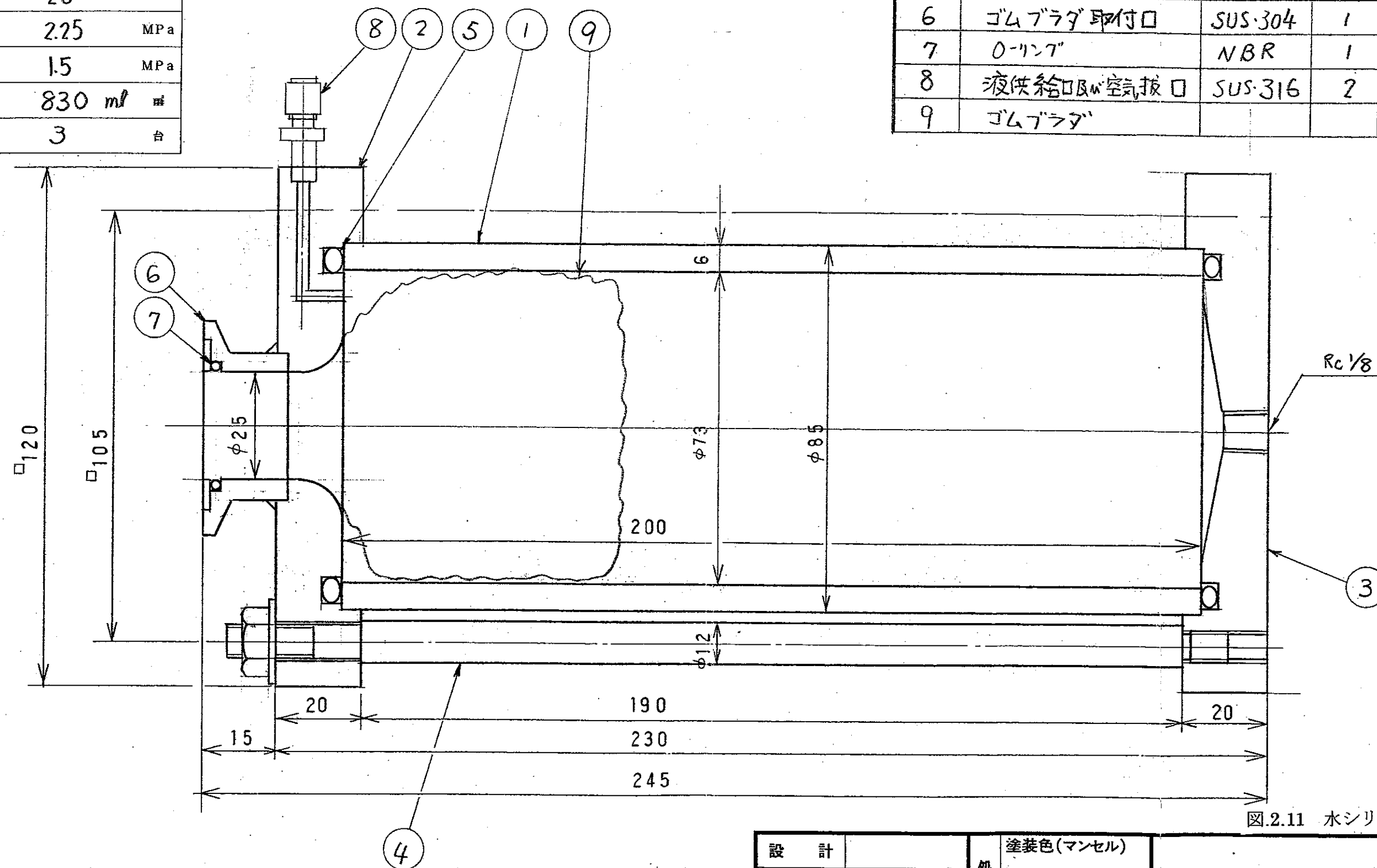


図.2.11 水シリンダー

記号	日付	訂正事項	訂正者

材質

製作数

設計	
製図	
尺度	1:1 ()
日付	

処	塗装色(マンセル)
理	

水シリンダー (容積: 830ml)

図面番号 10931-3004

番号	名 称	材 質	数	備 考
1	物性測定用 ヒースト	SUS-304	1	
2	“ 上フランジ	↑	1	
3	物性測定用 下フランジ	↑	1	
4	温度計測用 ヒースト	↓	1	
5	“ 上フランジ	↓	1	
6	温度計測用 下フランジ	SUS-304	1	

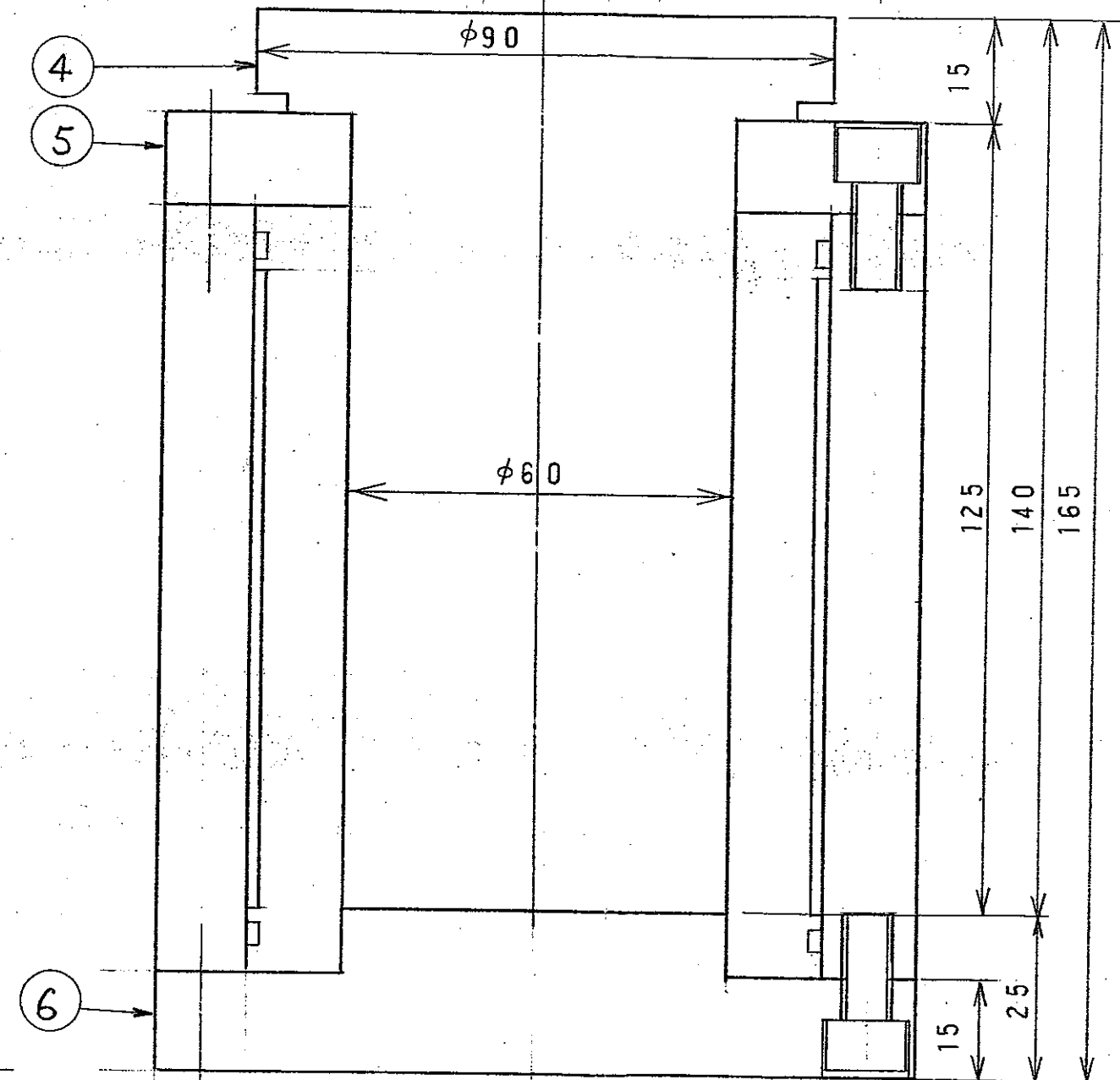
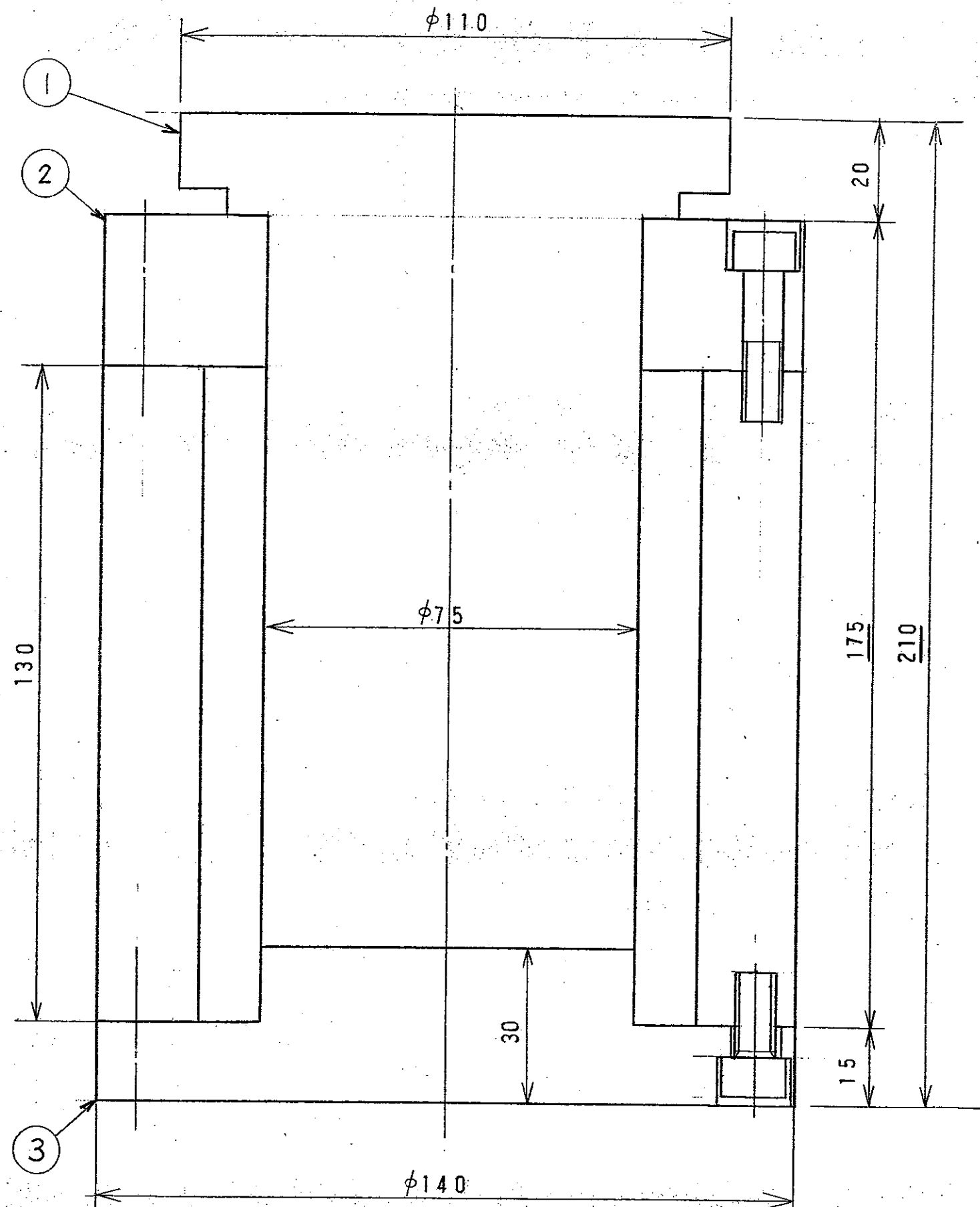


図.2.12 金型

記号	日付	訂正事項	訂正者
◇			

材質 製作数

設計		処	塗装色(マンセル)
製図		理	
尺度	1:1 ()		
日付			
金 型			
図面番号		10931-3005	

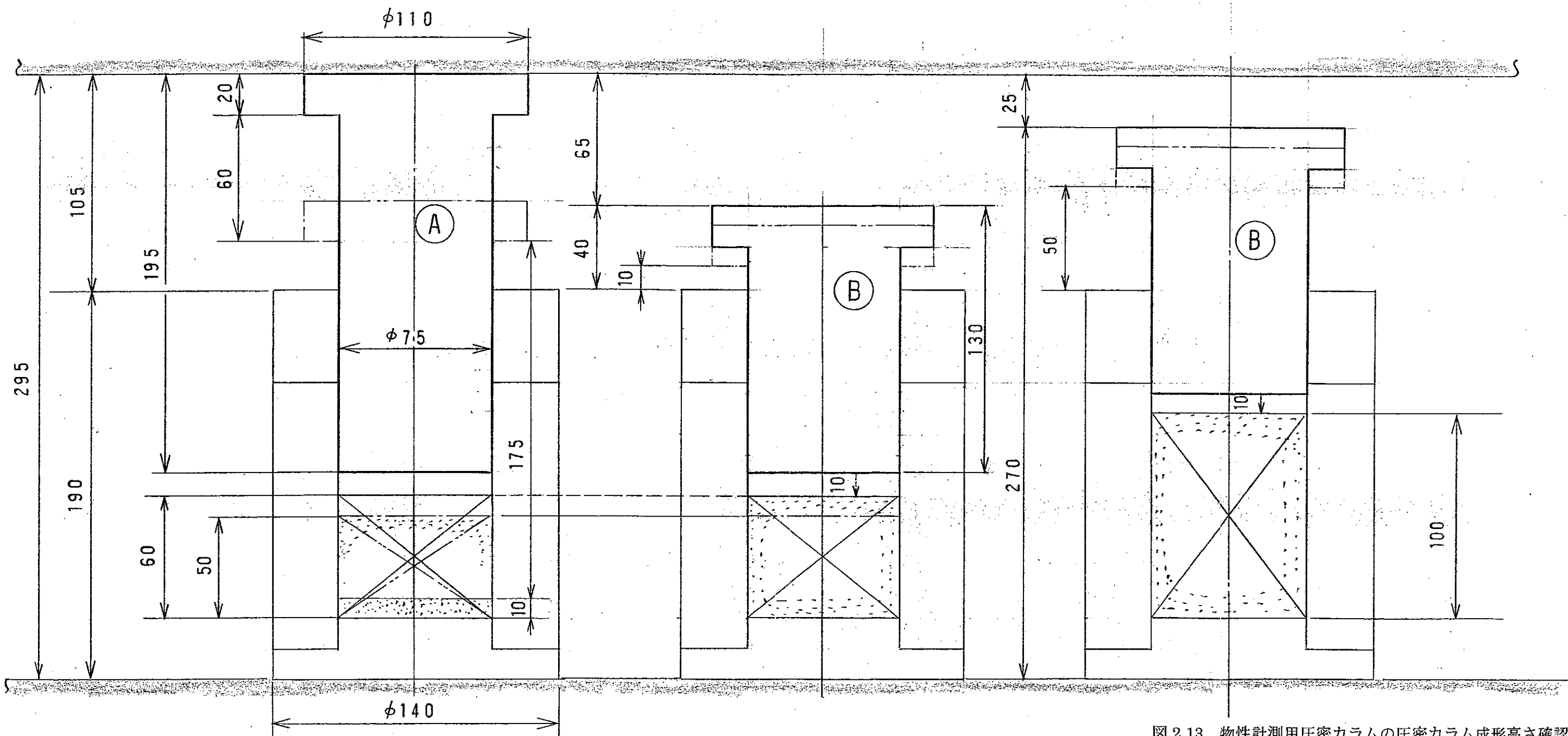


図 2.13 物性計測用圧密カラムの圧密カラム成形高さ確認図

[illegible]

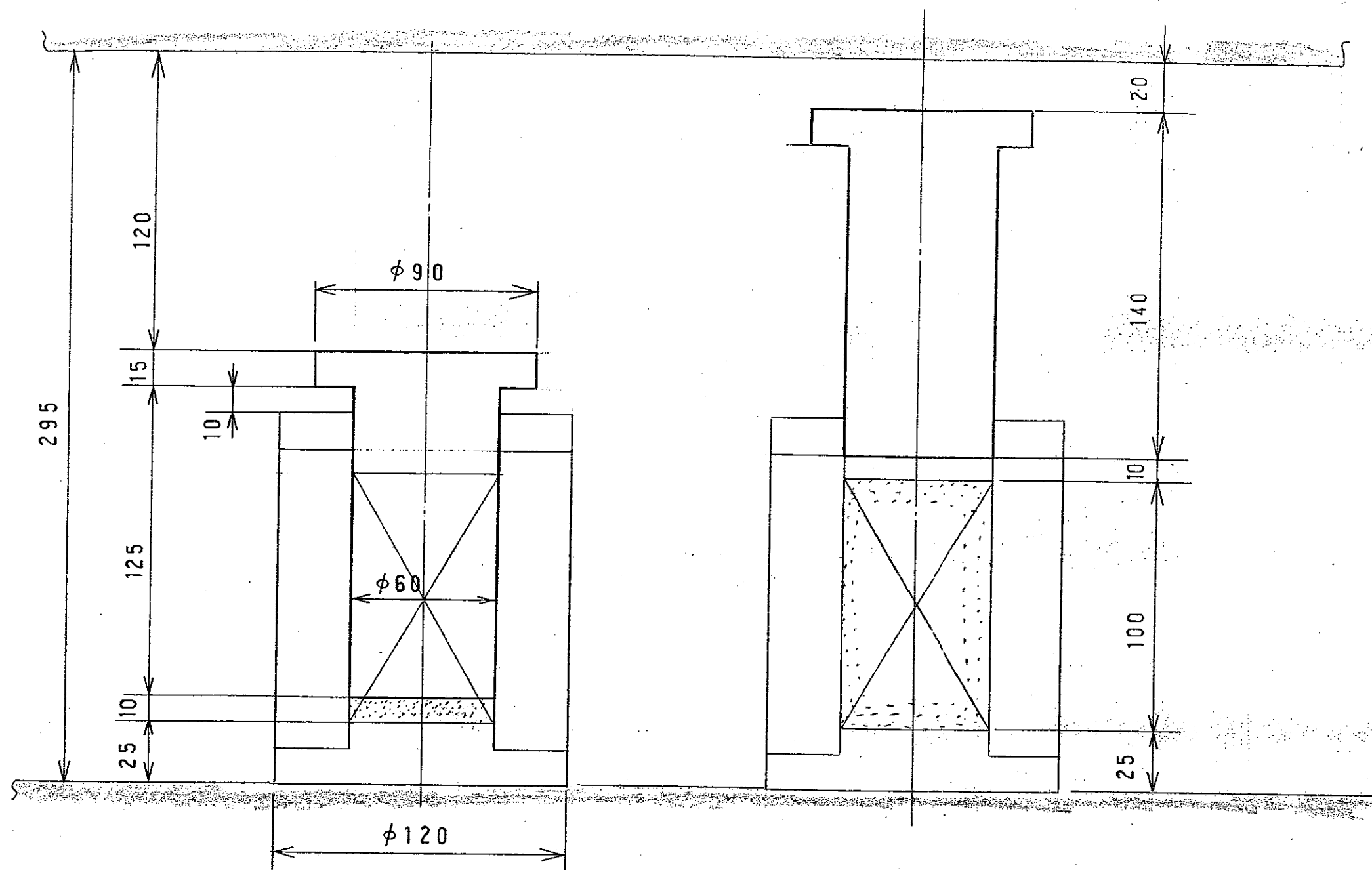


図 2.14 温度計測用圧密カラムの圧密カラム成形高さ確認図

記号	日付	訂正事項	訂正者	材質	製作数	設計	製図	尺度	日付	処	塗装色(マンセル)	温度測定カラム	圧密カラム成形～高さ確認図	図面番号	10931-3008
第三角法								1:2 ()	02.2.9	理					

削り加工寸法の普通許容差は m (中級) とする。指示なき各稜は糸面取のこと。



図 2.15 装置外観図

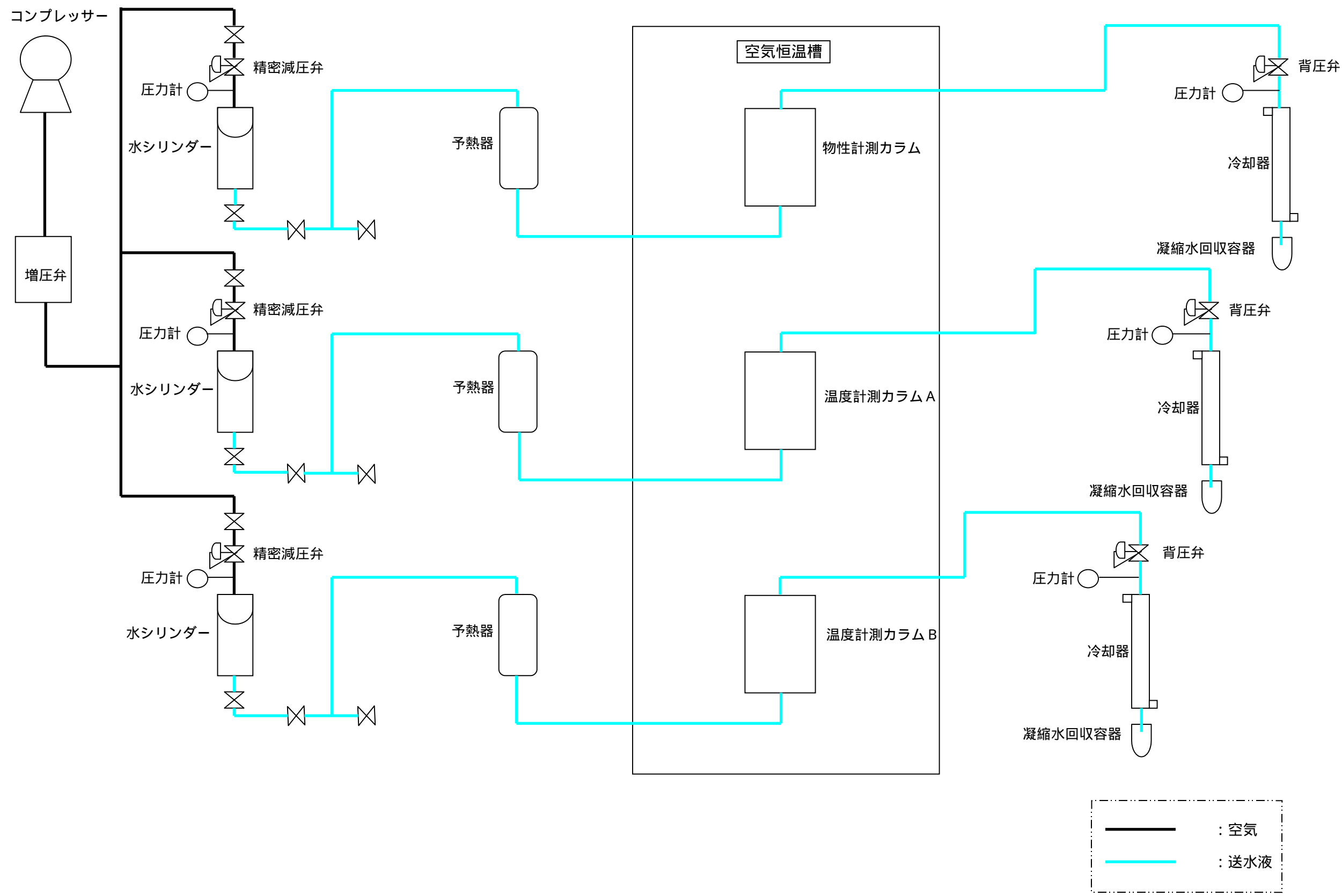


図2.16 水系の流れ図
-23-

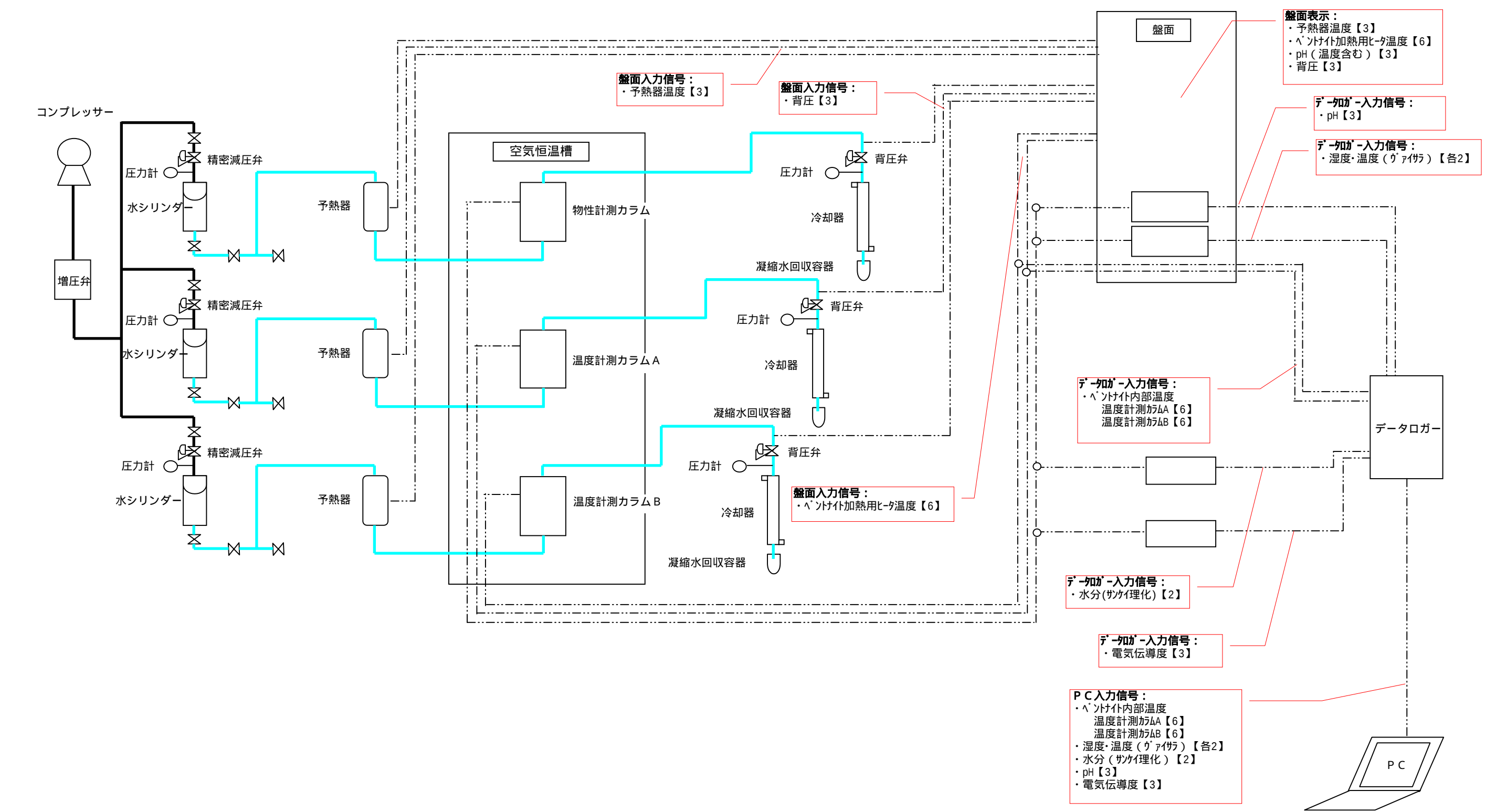


図2.17 信号取り出し経路図
-24-

2.2 センサーの校正及び調整

(1) pH センサー

pH センサーは、pH6.86（関東化学 中性リン酸塩 pH 標準液）及び pH4.01（同フタル酸塩 pH 標準液）の 2 種類の pH 標準液を用いて校正した。

なお、本センサーは測温機能を持ち、また、自動的に温度補正を行う機能を持つ機種であるため、pH の校正は室温でのみ行った。

(2) 湿度センサー

湿度センサーは、メーカーより出荷時に校正されているため、校正は行わなかった。

(3) 水分センサー（サンケイ理化）

a. 送水試験 1 回目

センサーを空気恒温槽内に水平に置き、槽内の温度を試験時と同じ 75 に設定し加熱した。続いて、計測器側面の 0 点調整トリマーで 0 点調整を行ったが、通常の使用温度域（10～+50）50 より高い温度であるため、0 に合わせることが出来なかった。よって、下段と中段の水分センサー 2 本の表示が同じとなるように調整した。

b. 送水試験 2 回目

1 回目の試験において、センサー内部の脱気水が、ベントナイトに染みこむ等して、正確な値が測定できないという問題があった。よって、あらかじめ脱気水を抜いた後、水分センサー 2 本の表示が同じとなるように計測器側面の 0 点調整トリマーで調整した。

(4) 電導度センサー

a. 送水試験 1 回目：

純水に塩化ナトリウム（関東化学 特級試薬）を加え、塩化ナトリウム濃度が 0, 0.2,

0.5, 1.0, 2.0mol/L の溶液を調製した。次に、これらの溶液にセンサーを入れ、塩化ナトリウム濃度と出力される電圧との関係を調査した。なお、測定時の液温は、室温（25℃）及び 85℃（送水試験時のベントナイトの温度を想定）で行った。図 2.18 に結果を示す。

b. 送水試験 2 回目：

1 回目の送水試験において、冠水による出力電圧の上昇が明確には認められなかった。これは、センサーの感度調整を水溶液で行ったことによるものと考えられたため、2 回目の調整には、塩化ナトリウム水溶液を含浸したベントナイトを用いた。

純水に塩化ナトリウムを加え、塩化ナトリウムの濃度が、0, 2.0, 4.0%の溶液を調製した。次に、これらの溶液とベントナイト（ケイ砂混合）粉末をビニール袋に移し入れて口を閉じ、手で 5 分間混練した。このとき、水溶液混合ベントナイト中の水分量は 33%（付着水と化合水の含量）となるようにした。続いて、ベントナイトにセンサーを挿入し、塩化ナトリウム濃度と出力される電圧との関係を調査した。なお、85℃まで加熱すると、ベントナイトから水分が蒸発して固くなり、センサーの挿入及び測定が困難になると考えられたため、測定は室温（25℃）のみとした。測定結果を図 2.19 に示す。

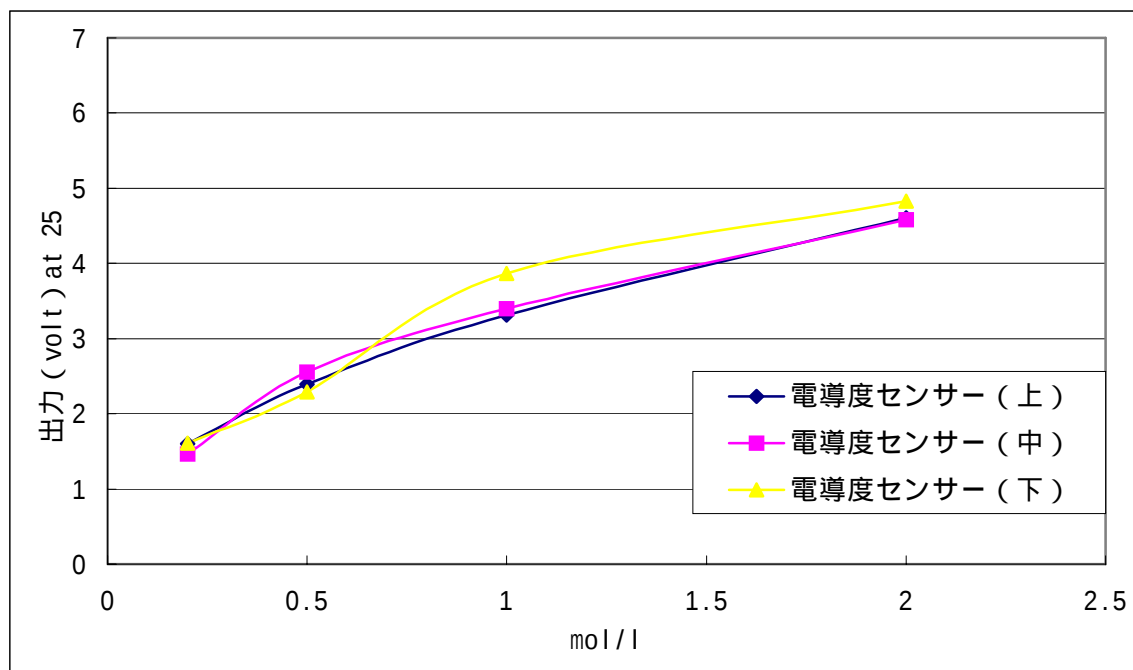


図 2.18(1) 電導度センサーによる測定結果（25 : 試験 1 回目）

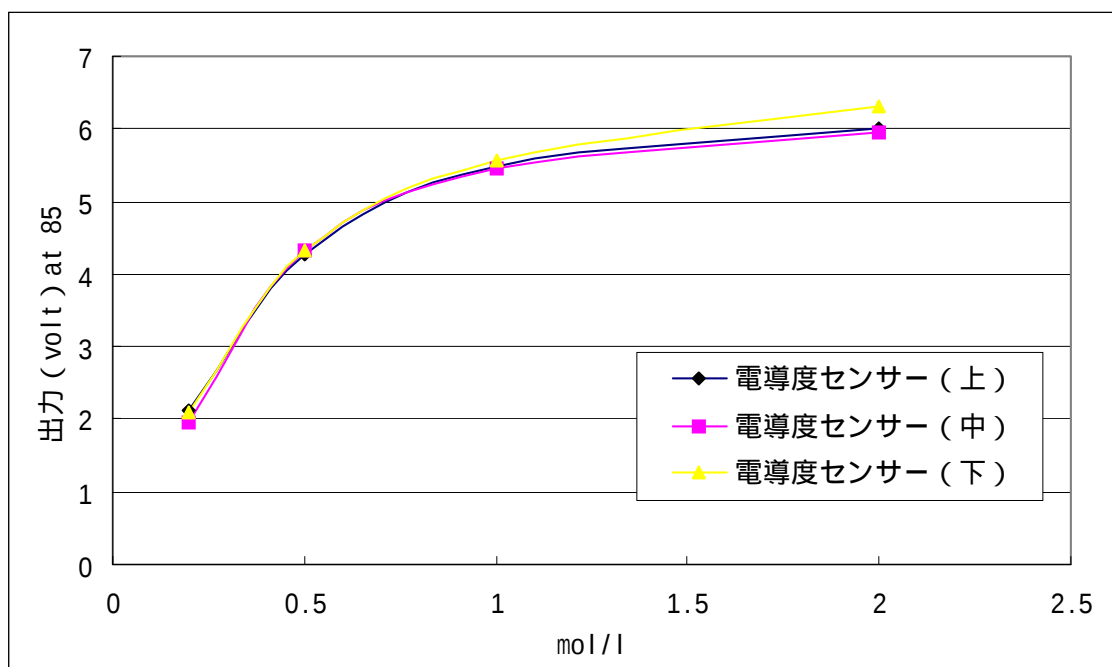


図 2.18(2) 電導度センサーによる測定結果（85 : 試験 1 回目）

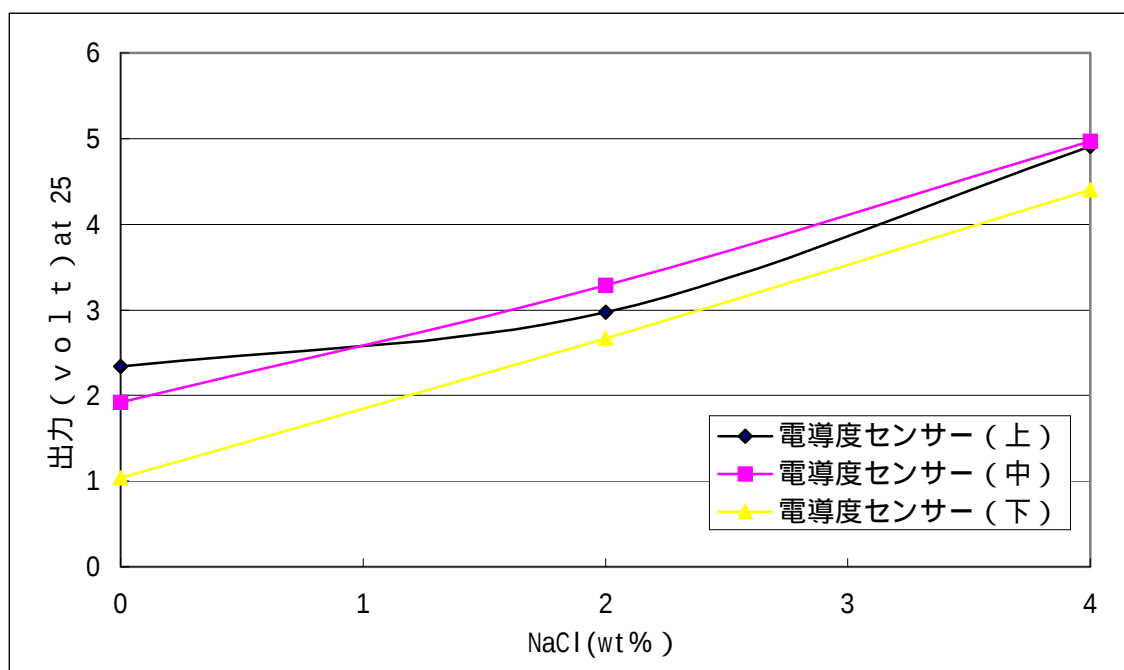


図 2.19 電導度センサー測定結果 (25 : 試験 2 回目)

3. 試験手順

ケイ砂混合ベントナイトの充填は図 3.1(1)の手順で行い、試験後の試料の取り出しは図 3.1(2)の手順で実施した。

3.1 ベントナイトと砂の混合

クニゲル V1 とケイ砂 3 号及びケイ砂 5 号に含まれている水分量をカールフィッシャー法にて測定する。次に、クニゲル V1 とケイ砂 3 号及びケイ砂 5 号が、乾燥状態で 70:15:15 になるように配合し、V 型混合機で混合する。

3.2 ケイ砂混合ベントナイト充填と試験及び試料の取り出し

(1) ケイ砂混合ベントナイトの充填

あらかじめ、圧密カラムの送水液入り側とセンサー挿入口に、それぞれブラインドフランジ、及びプラグを差し込み塞ぐ。次に、加圧成形後の充填密度が 1.6g/cm^3 (試料乾燥状態にて)、厚みが 10mm となる分量のケイ砂混合ベントナイトを秤取って移し入れ、一軸プレスにて 10mm の厚みとなるように圧密する。圧密した試料の上面は、上面から 1～3mm 程度を薬匙などで粗くし、次の層と境界無く充填されるようにする。この操作を繰り返し、10mm ずつ 10 回に分けて充填する。

試料の充填を終えた後、ブラインドフランジを外し、カラムの両端にセルロースフィルター及び蓋板を取り付ける。続いて、試料と焼結金属フィルターを密着させるために、フィルター固定板用固定ナットをボルト締めする。

(2) センサー埋め込み用穴の掘削及びセンサーの取り付け

カラム側面の充填用プラグを取り外した後、ドリルにてセンサー埋め込み用の穴を掘削する。次に、穴の中に残った掘削屑を取り除き、各センサーを取り付ける。また、金属ジャケットと断熱材の間の真空引きに使用するコックも取り付ける。

(3)空気恒温槽へのカラムの設置

各センサーを取り付けたカラム 3 体（温度計測用カラム 2 体、物性計測用カラム 1 体）を空気恒温槽内に移す。このとき、カラム同士が干渉しないようにするために、先ず温度計測用カラムを 1 体、次いで物性計測用カラム、最後に温度計測用カラムを移す。次に、ヒーター（6 カ所）、ヒーター温度調節用熱電対（6 カ所）、試料内部温度測定用熱電対（12 カ所）、pH センサー（3 カ所）の結線、及び、蒸気出側パイプの接続（3 カ所）を行う。なお、土壌水分センサー（3 カ所）と湿度センサー（2 カ所）はケーブルを切り離すことができない構造であるため、物性計測用カラムを空気恒温槽内に移す前にセンサーを挿入しておく。

(4)送水試験

水シリンダーに送水液を注入し、ゴムプラグを取り付ける。次に、緩やかに空気を送り込んで送水し、水シリンダーとカラムの間のパイプ内空気を抜いた後、送水パイプをカラムに接続する。続いて、水シリンダー中に残っている送水液を一旦全て抜き出し、改めて水シリンダーに送水液を注入する。このとき送水液の液量を控えておく。空気抜き用バルブを開放してゴムプラグ内に空気を緩やかに送り込み、送水液があふれ出ないように注意しながら水シリンダー内の空気を抜く。

各センサーでの測定を開始した後、送水液予備加熱器と試料加熱用ヒーター及び空気恒温槽を所定の温度となるように設定し、加熱を開始する。パソコン画面上に表示された温度測定値にて、試料の温度が安定したことを確認した後、金属ジャケットと断熱材の間の空間を真空引きする。再び、試料と空気恒温槽の温度が安定したことを確認した後、送水コックを開けて所定の圧力で送水を行う。試験終了後は、送水コックと減圧弁を閉じ、送水液予備加熱器と試料加熱用ヒーター及び空気恒温槽のスイッチを切る。

試料への送水量は、水シリンダー中に残った送水液を全て抜き出して液量を測定し、水シリンダーへの送水液注入量との差から求める。

(5)カラムの取り出し

送水液入り側パイプと蒸気出側パイプを外し、さらに各センサーとケーブルを繋ぐコネクタを外す。湿度センサーと水分センサー及び電導度センサーについては、センサーとケーブルを切り離すことが出来ないため、空気恒温槽内でカラムからセンサーを抜く。温度計測用カラム 2 体と物性計測用カラム 1 体を空気恒温槽から取り出し、カラムから各センサーを抜いた後、センサー挿入口にプラグを取り付ける。

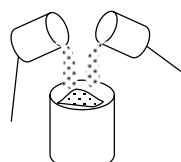
(6)ベントナイトのスライス

カラムの送水液入り側を下に向け、試料押し出し用治具に乗せた後、押し子を蒸気出側から挿入する。続いて、一軸プレスにて、試料を 10mm 押し出して切断する。この操作を繰り返して 10 枚のスライス片を得る。



圧密カラム側面のセンサ挿入口にブラインドボルトを取り付ける

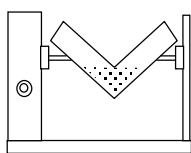
ベントナイト (70%)



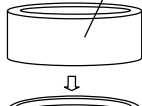
ケイ砂 (30%)
[3号:5号=1:1]

ベントナイトとケイ砂を所定量秤とる

V型レンダーで攪拌混合する



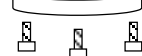
充填補助筒



圧密カラム

圧密カラムに充填補助筒とブラインドフランジを取り付け、ボルト締めする。

ブラインドフランジ



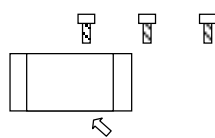
圧密カラムに混合粉末を入れる

加圧成形後の充填密度が
1.6gf/cm²、厚みが10mmに
なる分量を量り取る



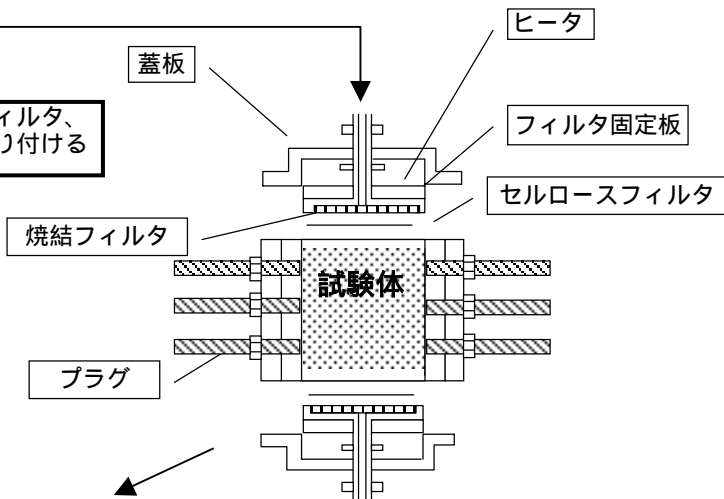
一軸圧縮し粉末を押し固める

充填は、1cm厚さ相当分を充填
→圧縮を繰り返して行う。



ボルトを外し、充填補助筒と
ブラインドフランジを取りはずす

セルロースフィルタ、
蓋板の順に取り付ける



ヒータ

フィルタ固定板

セルロースフィルタ

焼結フィルタ

試験体

プラグ



フィルター固定板用固定ナット

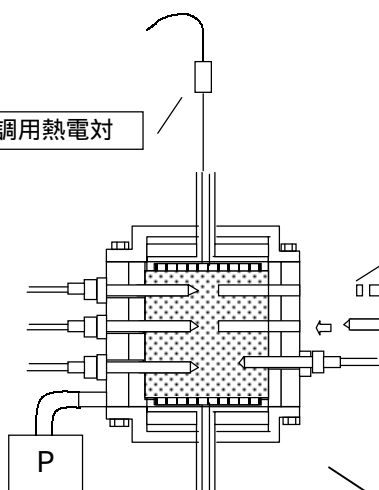
蓋板をボルトで締め、
フィルタ固定板用ナット
をボルト締めする

水準器

プラグを取り外し、センサ
挿入用の穴をあける
水準器を用いて水平を確認
するようにする



温調用熱電対



真空ポンプ

温調用熱電対

Oリング

Oリング押さえ

ホルダ

各種センサにホルダ、
Oリング押さえ、Oリング
を付け、圧密カラムに
取り付ける

真空ポンプを接続し、内側
断熱材と金属ジャケットの間
の空間を真空引きする



水シリンダーからカラム
までの配管のエアを抜く
ナットをゆるめ、緩やかに水
が染み出してきたら締める

図3.1(1)

ケイ砂混合ベントナイト充填フロー

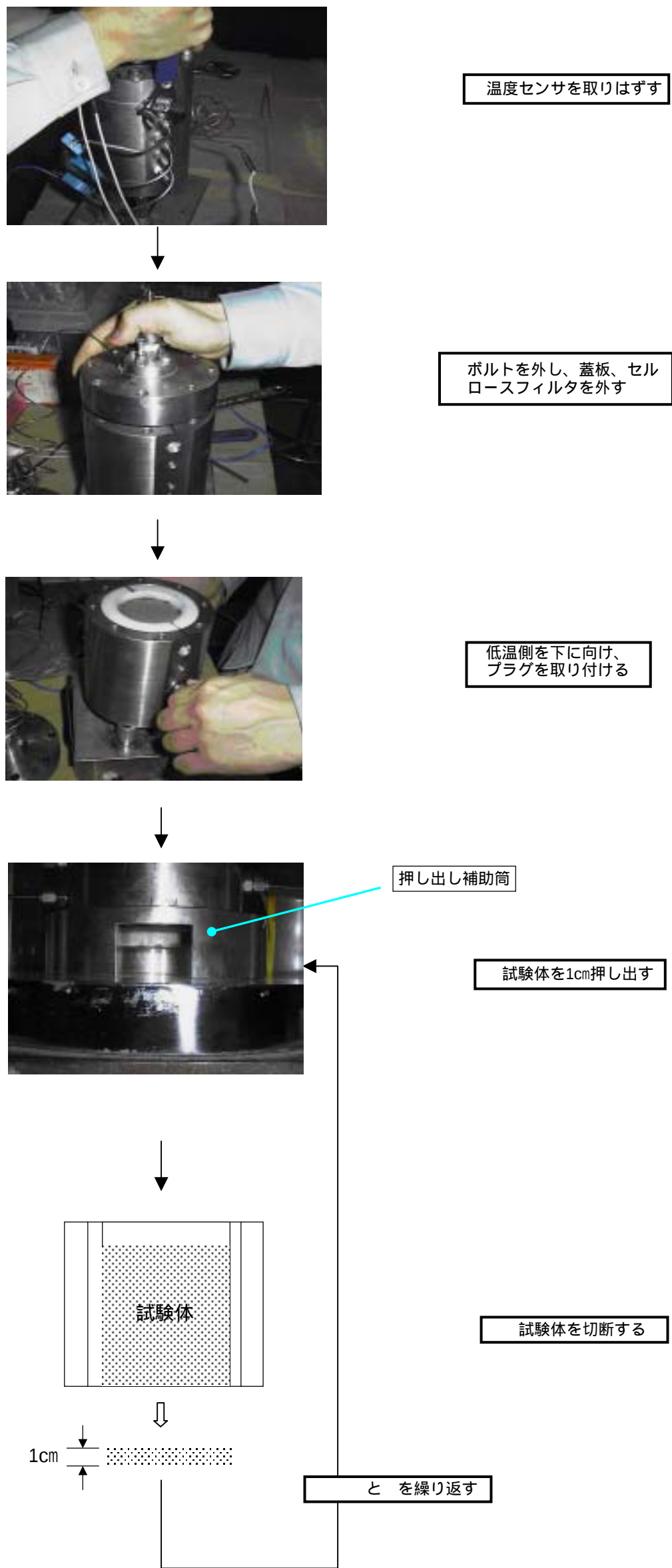


図3.1(2) 試料取り出しフロー
-33-

3.3 分析

分析は、各試験体を温度勾配方向に 10 等分に分割し、各試料に対し、含水比及び Na, Ca, SO_4^{2-} , Cl^- を分析する。いくつかの代表的試料に対し、浸出陽イオン (Na, Ca) 量分析を実施する。表 3.1 に分析項目一覧表を示す。また、図 3.2 に分析フローを示す。分析手順については、後に詳述する。

(1)含水比：重量法

105 乾燥前後の重量差から含水比を求める。

(2)陽イオン分析(Na, Ca)

陽イオンの分析はそれぞれ以下の方法で行う。

Na：酸抽出 - ろ過分離 - 原子吸光分析法

Ca：熔融 - 溶液化 - ICP 発光分析法

(3)陰イオン (SO_4^{2-} , Cl^-)

陰イオンの分析は以下の方法で行う。

温湯抽出 - イオンクロマトグラフ法

(4)浸出陽イオン (Na, Ca)

浸出陽イオンは以下の方法で行う。

SFSA 改良法 - 原子吸光分析法

表 3.1 分析項目一覧表

		水分	固相				浸出	
			Na	Ca	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na	Ca
送水試験 (1 回目)	温度計測用 カラム A	○ 10 点						
	温度計測用 カラム B	○ 10 点						
送水試験 (2 回目)	温度計測用 カラム A	○ 10 点	○ 10 点	○ 10 点	○ 10 点	○ 12 点	○ 20 点	○ 20 点
	温度計測用 カラム B	○ 10 点	○ 10 点	○ 10 点	○ 10 点	○ 12 点	○ 20 点	○ 20 点

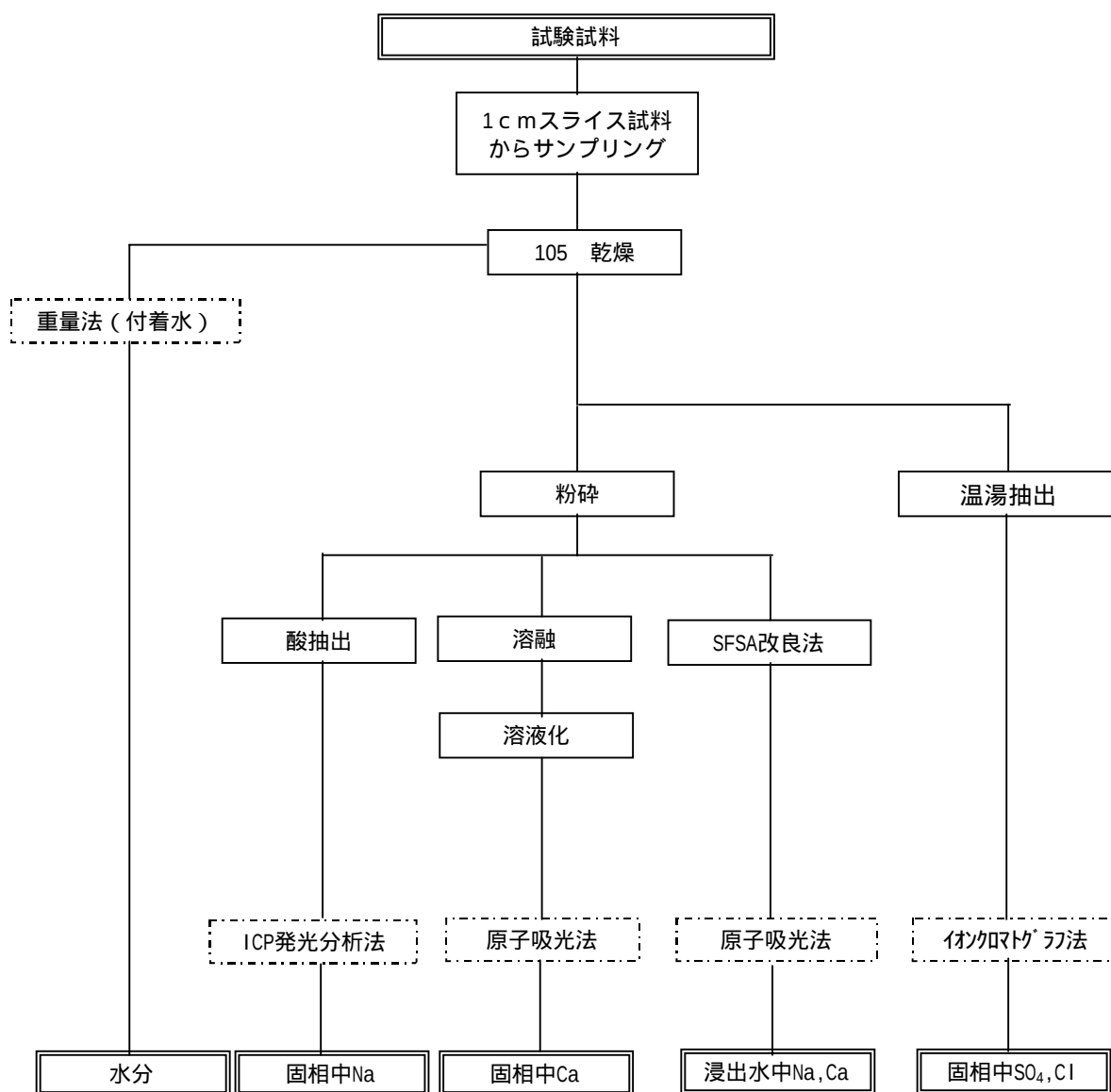


図 3.2 分析フロー

4. 試験および結果

4.1 送水試験（１回目）

(1) 試験方法

a. 試料の調整

クニゲル V1 とケイ砂 3 号及びケイ砂 5 号に含まれている水分量を測定した結果、クニゲル V1 は 10.2%、ケイ砂 3 号と 5 号は 0.1%以下であった。

乾燥状態で、クニゲル V1 とケイ砂 5 号及びケイ砂 3 号が、それぞれ 70 : 15 : 15 となるようにするために、クニゲル V1 を 4332g、ケイ砂 3 号と 5 号を各 834g 秤取り、(株)ダルトン製 V 型混合機で混合した。混合は、35r.p.m.の回転数で 30 分間行った。

b. 試料の充填

装置は、プレス機：TOYO HYDRAULIC EQUIPMENT 製 ESE - 489 - 00（最大荷重：20ton）を用いた。

圧密カラムの送水液入り側とセンサー挿入口に、それぞれブラインドフランジ、およびプラグを差し込み塞いだ。充填密度が $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ （試料乾燥状態にて。吸着水分込みでは $1.71\text{g}/\text{cm}^3$ ）、厚みが 10mm となる分量のケイ砂混合ベントナイトをはかり取り（カラム内径 $\phi 75\text{mm}$ ：75.7g、カラム内径 $\phi 60\text{mm}$ ：48.5g）、一軸プレスにて 10mm の厚みとなるように圧密した。プレスした上面 3mm 程度を薬匙で削り、次の層と境界なく充填されるようにした。このようにして、順次 10mm ずつ 10 回に分けて充填し、100mm 高さの試験体とした。表 4.1 に圧密時のプレス圧力を示す。

c. センサー挿入口の掘削

装置には、ドリル：(株)高儀製卓上ボール盤 DP-300（出力 200W、回転数 570r.p.m.）を使用した。

ケイ砂混合ベントナイトを充填し蓋を取り付けたカラムを、充填用プラグを外した側面を上に向けてドリルの架台に置いた。次に、側面に対して垂直に穴を開けるために、水準器を用いてカラムの位置を調節した後、ケイ砂混合ベントナイトにセンサー取り付け用の穴を掘削した。掘削後、カラムを傾けるなどして、穴の中に残った掘削屑を除いた。pH センサー挿入口については、当初、センサー先端の形状に合わせるために $\phi 12\text{mm}$ の穴を掘削後、

さらに、奥にφ6.3mmの穴を掘削する予定であったが、pHセンサーを取り付ける際に先端部が割れるため、φ12mmの穴のみとした。また、水分センサーについてもプローブ先端のポーラスカップが折れやすいため、φ6.3mmの穴を掘削した後ミクロスパーテル等を用いて僅かに穴を広げた。下記に、ケイ砂混合ベントナイトに掘削した穴の形状を示す。

湿度センサー(ヴァイサラ)	: φ13.5mm × 30mm(試料奥行き)	2カ所
土壤水分センサー(サンケイ理化)	: φ 6.3mm × 24mm(試料奥行き)	2カ所
電導度センサー(サンケイ理化)	: φ 6.3mm × 33mm(試料奥行き)	3カ所
pHセンサー(メトラー・トレド)	: φ12.0mm × 28mm(試料奥行き)	3カ所
試料温度計測用熱電対	: φ 3.0mm × 30mm(試料奥行き)	6カ所 (1体につき)

d. センサー取り付け

カラムの所定位置に各センサーを取り付けた。湿度センサーと水分センサーおよび電導度センサーは、センサー本体とケーブルを切り離すことが出来ないため、カラムを空気恒温槽の近くまで移して取り付けした。また、pHセンサーについては、先端部にテフロン製の熱収縮チューブを付けて保護し、カラムに取り付けた。

e. 送水試験

表 4.2 に試験条件を示す。また、送水試験作業の時系列を表 4.3 に示す。

試験開始から 19 時間後、試料の温度が平衡状態であることを確認したのち、送水を開始した。

試験開始から 41 時間後(送水開始から 22 時間後)、物性計測カラムの下段の pH センサーが抜けて破損し、送水液が漏れ出していたため、物性計測カラムのみ送水と加熱を停止した。下段の pH センサー挿入口にブラインドボルトを取り付けて試料の加熱および送水を開始したが、直後、中段の pH センサーが抜けて破損した。再び送水と加熱を停止し、中段の pH センサー挿入口にもブラインドボルトを取り付けたのち、加熱及び送水を再開した(試験開始から 94 時間後)。なお、物性計測カラムの送水停止時間は 53 時間であった。

温度計測カラム A、B は、物性計測カラムの総送水時間と同じくするために、送水を 53 時間(試験開始後 67 時間から 120 時間の間)停止した。

試験開始から 262 時間後、出口圧表示計に繋がるパイプ(テフロン)内に水分の侵入が確認されたため、温度計測カラム A を取り出して試料の送水状況(含水比)を確認した。カ

ラム A から取り出した試料の含水比は、ほぼ飽和状態であることが確認されたため、温度計測カラム B と物性計測カラムを取り出した（試験開始から 286 時間後）。

f. 試料のスライス片採取

試料を 10mm ずつ押し出せるように、あらかじめ目盛りを付けた押し子をカラムに挿入し、一軸プレスにて押し出した。10mm 押し出してカッターナイフで切断する操作を繰り返し、1 体の温度計測カラムから 10 枚のスライス片を得た。スライス片は、水分の蒸発を抑えるために、チャック付きのビニール袋に入れ、冷蔵庫内で保管した。なお、試料のスライス片採取作業は、空気恒温槽からカラムを取り出して約 5 時間空冷したのち実施した。

g. 分析

送水試験後の試料の分析試料採取位置を図 4.1 に示す。

採取した試料は直ちに重量を測定し、次いで、乾燥機を用いて 105℃ で恒量となるまで乾燥した。乾燥前後の重量差から、含水比を算出した。計算式は以下に示す。

$$\text{含水比(\%)} = (a - b) / b \times 100$$

105℃ 乾燥前のベントナイト重量(g) …… a

105℃ 乾燥後のベントナイト重量(g) …… b

表 4.1 圧密時の圧力（１回目）

試験 1 回目 試料充填時のプレス圧力（物性計測用カラム）

（セル内径 ϕ 75mm、充填密度 1.6g/cm³）

底面より	ケイ砂混合ベントナイト充填量(g)	プレス圧力 (ton/cm ²)
0mm - 10mm	75.7	0.109
10mm - 20mm	75.7	0.068
20mm - 30mm	75.7	0.063
30mm - 40mm	75.7	0.045
40mm - 50mm	75.7	0.050
50mm - 60mm	75.7	0.050
60mm - 70mm	75.7	0.048
70mm - 80mm	75.7	0.045
80mm - 90mm	75.7	0.045
90mm - 100mm	75.7	0.045

試験 1 回目 試料充填時のプレス圧力（温度計測用カラム A）

（セル内径 ϕ 60mm、充填密度 1.6g/cm³）

底面より	ケイ砂混合ベントナイト充填量(g)	プレス圧力 (ton/cm ²)
0mm - 10mm	48.5	0.088
10mm - 20mm	48.5	0.081
20mm - 30mm	48.5	0.057
30mm - 40mm	48.5	0.053
40mm - 50mm	48.5	0.053
50mm - 60mm	48.5	0.053
60mm - 70mm	48.5	0.053
70mm - 80mm	48.5	0.053
80mm - 90mm	48.5	0.053
90mm - 100mm	48.5	0.028

試験 1 回目 試料充填時のプレス圧力（温度計測用カラム B）

（セル内径 ϕ 60mm、充填密度 1.6g/cm³）

底面より	ケイ砂混合ベントナイト充填量(g)	プレス圧力 (ton/cm ²)
0mm - 10mm	48.5	0.085
10mm - 20mm	48.5	0.071
20mm - 30mm	48.5	0.060
30mm - 40mm	48.5	0.057
40mm - 50mm	48.5	0.053
50mm - 60mm	48.5	0.053
60mm - 70mm	48.5	0.057
70mm - 80mm	48.5	0.053
80mm - 90mm	48.5	0.053
90mm - 100mm	48.5	0.035

表 4.2 試験条件

	温度計測用カラム A	温度計測用カラム B	物性計測用カラム
試料乾燥密度	1.6g/cm ³		
送水液	3.5%NaCl 水溶液		
送水压	0.8MPa		
背圧	大気圧		
カラムトップ温度	100		
カラムボトム温度	80		
送水液 予備加熱器温度	80		

表 4.3 送水試験（１回目）作業結果

試験開始からの経過時間(h)	温度計測カラム A	温度計測カラム B	物性計測カラム	その他
0	試料加熱用ヒータの 送水液入側 80 設定 送水液出側 100 設定	試料加熱用ヒータの 送水液入側 80 設定 送水液出側 100 設定	試料加熱用ヒータの 送水液入側 80 設定 送水液出側 100 設定	・ 空気恒温槽の 75 設定 ・ 送水液予備加熱器の 80 設定 ・ テーザゲ-による計測データ取得開始
19	加圧送水開始 0.8MPa に設定	加圧送水開始 0.8MPa に設定	加圧送水開始 0.8MPa に設定	
41			pH センサが抜けたため送水と試料加熱用ヒータ停止	
67	物性計測カラムとの総送水時間を合わせるため、加圧送水停止	物性計測カラムとの総送水時間を合わせるため、加圧送水停止		データ保存のため、テーザゲ-による計測データ取得停止
72			・ pH センサ挿入口に「ライント」ホルタを取り付けた。 ・ 試料加熱用ヒータの 送水液入側 80 設定 送水液出側 100 設定	
94			物性計測用カラム中の試料の温度が平衡状態になったため（盤面の pH・温度表示部にて確認）、加圧送水開始 0.8MPa に設定	テーザゲ-による計測データ取得開始
120	送水開始	送水開始		
262	・ 蒸気出口圧表示計に繋がる「ポンパ イ」内に、水分の侵入が確認されたため加圧送水停止 ・ 試料加熱用ヒータの ・ カラムを取り出す			
286		・ 温度計測カラム A 中の試料が全体的に浸潤していることが確認されたため、加圧送水停止 ・ 試料加熱用ヒータの ・ カラムを取り出す	・ 温度計測カラム A 中の試料が全体的に浸潤していることが確認されたため、加圧送水停止 ・ 試料加熱用ヒータの ・ カラムを取り出す	・ テーザゲ-による計測データ取得停止 ・ 空気恒温槽停止 ・ 送水液予備加熱器停止

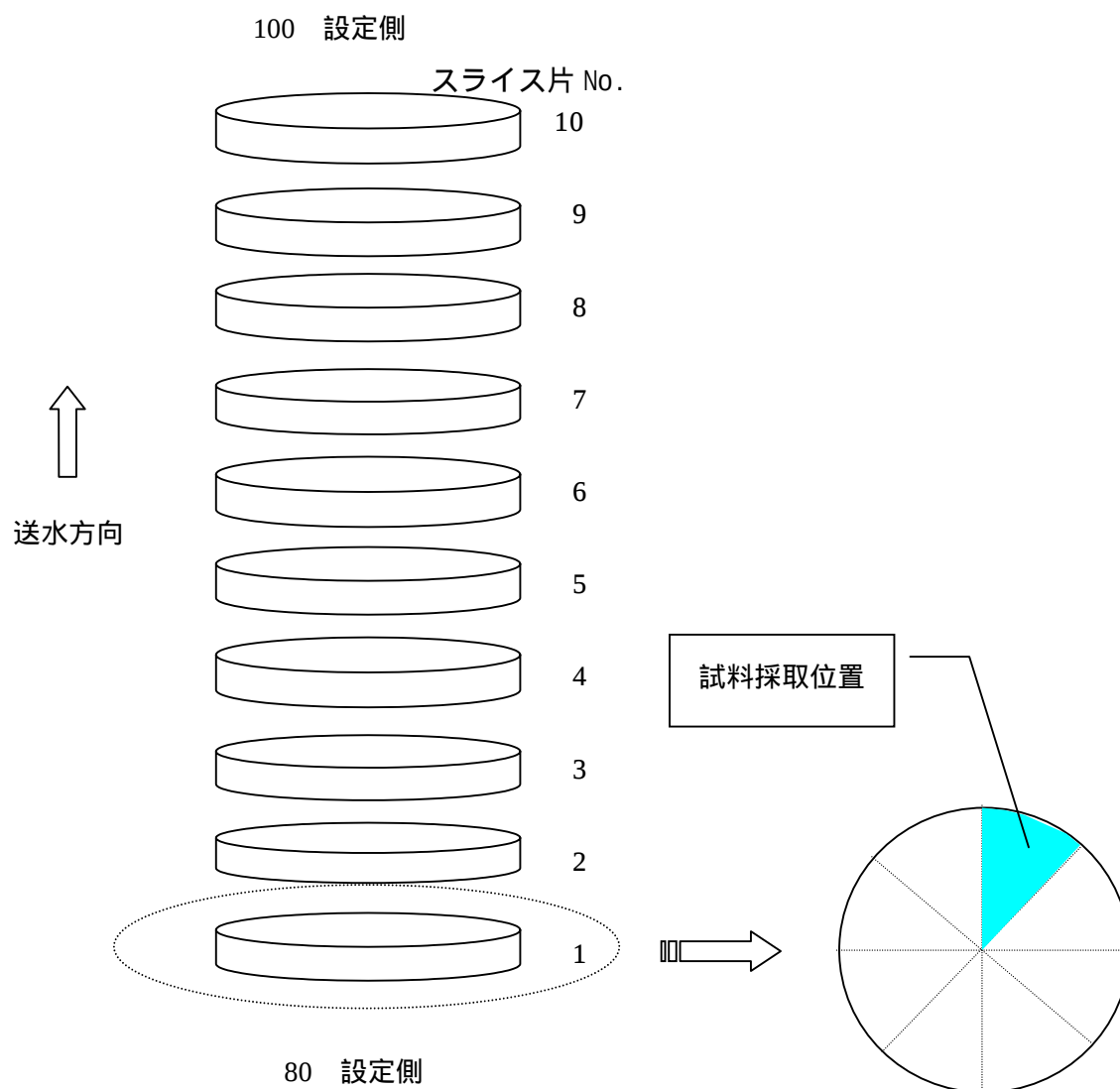


図 4.1 分析試料採取位置

(2) 結果

a. 温度測定結果

試験条件と実施結果を表 4.4 に示す。また、試験期間中の温度測定結果を図 4.2 に示す。加熱を開始してから約 5 時間後には試料の温度はほぼ平衡となり 19 時間後に送水を開始した。送水開始直後、試料の温度に顕著な変化は認められなかった。67 時間から 94 時間の間は、物性計測カラムから抜けた pH センサーの処理及びブラインドボルトの取り付け作業等ために試験を停止したことで、データが欠損している。

送水試験開始時および停止時の試料の温度勾配調査結果を図 4.3 に示す。加熱開始後、恒温槽 75 に対して、カラム内温度は、カラムボトム 80 からカラムトップ 100 にかけてゆるやかに上昇していた。ボトムからトップの間で、80 を下回る温度域は観察されなかったが、直線的な増加からはずれていた。

両端ヒータ温度制御の精度は、温度制御・測定用熱電対の精度が ± 2.5 以内であるため、この範囲内で温度をコントロールできていると考えられる。ただし、熱電対は焼結フィルターに接触させているため、ヒータ自体は、計装盤盤面に表示されている温度より若干高くなっていると考えられる。

b. 物性測定結果

物性測定結果を図 4.4 ~ 7 に示す。

湿度は、試験（加熱）開始直後に、試料から発生した水蒸気によるものと考えられる湿度上昇が上段の湿度センサーで観察されている。次いで、送水開始直後（試験開始から 19 時間後）に、中段のセンサーで湿度上昇が観察され、すぐに（約 1 時間後）異常データを示している。これは、プローブヘッド内部のセンサーに水分が付着した場合に得られるデータと考えられる（メーカーヒアリング結果）。また、120 時間以降は、中段と上段の両センサーにおいて測定不能となっているが、両センサーともに、ベントナイトを含んだ送水液と考えられる灰色の液の付着が確認されたことから、プローブヘッド（プローブヘッドは焼結金属製）内に侵入した水分により、センサーの素線の短絡が起こったと考えられる。

水分は、試験（加熱）開始直後に電圧が上昇し、送水前に低下している。土壌水分計は、水分の吸引圧を圧力媒体（脱気水）を介して圧力センサーで感知し、これを電気信号に変換する仕組みである（乾燥状態では圧が低下して出力値は下がり、浸潤状態では圧が上昇して出力値は上がる）ことから、空気恒温槽で加熱されたセンサー本体が膨張してセンサー内部

の圧力が上昇したと推測される。また、送水前（試料の予備加熱中）に、センサー本体内の圧力媒体（脱気水）中に気泡が確認されたことから、脱気水が試料に吸引されたためにセンサー内部の圧力が低下したと推測される。試験開始から 40 時間後（下段）および 68 時間後（中段）には電圧の上昇が観察されており、送水液の冠水が生じていると推定された。

電導度は、感度を送水液で調整したため、試料中の電導度の変化としては、明瞭ではないが、送水開始直後（試験開始から 19 時間後）に、下段と上段で冠水による電導度の上昇が認められた。96 時間以降、下段の電導度センサーは断線のためデータの取得ができなかった。

pH も、送水開始直後（試験開始から 19 時間後）に、冠水によるものと思われる僅かな変化が認められた。96 時間以降は pH1～2 となっているが、このような pH となることが考えにくいこと、及び試験終了後の pH 電極の外観を確認した結果、液絡部付近で電極内部の固体電解質が収縮してできた隙間が認められたことなどから、正確に測定できていないと考えられる。なお、下段と中段のセンサーは送水圧により抜けて破損したため、測定できなかった。

c. 含水比測定結果

含水比測定結果を表 4.5 と図 4.8 に示す。含水比は、送水液入り側（80 設定側）から送水液出側（100 設定側）にかけて低下すると予想された。しかし、実際にはカラム A と B の試料の含水比は、共に送水液入り側から 7cm（スライス片 No.7）付近までは低下する傾向が見られたが、送水液出側付近では含水比が高くなっており、予想と異なる結果が得られた。

試験終了後の試料（温度計測カラム A）の様子を図 4.9 に示す。送水液入り側面および送水液出側面は、外観上の差は見られなかった。カラムから蓋板を取り外した際、送水液入り側面と送水液出側面では、共に液溜まりが認められた。

表 4.4 試験条件と実施結果

	温度計測用カラム A	温度計測用カラム B	物性計測用カラム
試料乾燥圧密度	1.6g/cm ³		
送水液	3.5%NaCl 水溶液		
送水圧	0.8MPa		
背圧	大気圧		
送水時間	190 時間	214 時間	214 時間
送水液量	- 注 1	340ml	- 注 2
空気恒温槽 設定温度	75		

注 1 カラム A 取り出し後、カラム B の送水用コックを開ける際に、誤ってカラム A の送水用コックを開け、シリンダー中に残っていた NaCl 水溶液を流出させたため、送水液量を測定できなかった。

注 2 送水を開始してから 22 時間後、pH センサが抜けて送水液が漏れていたため、送水液量を確認できなかった。

表 4.5 送水試験（1 回目）後の試料の含水比および飽和度測定結果

カラム A			カラム B		
スライス片 No.	含水比(%)	飽和度(%)	スライス片 No.	含水比(%)	飽和度(%)
1	25.0	99	1	23.8	94
2	23.9	95	2	23.3	92
3	23.9	95	3	23.0	91
4	24.4	97	4	22.5	89
5	23.4	93	5	21.8	87
6	23.0	91	6	22.1	88
7	23.0	91	7	21.3	85
8	23.6	94	8	22.9	91
9	24.4	97	9	23.6	94
10	26.7	106	10	26.1	104

* 含水比は、105 蒸発水分量より算出。

* 飽和度は、ケイ砂混合ベントナイトの水分の飽和量（理論値）を 25.2%とし、これに対する含水比（測定値）の割合を示す。

ケイ砂混合ベントナイトの水分の飽和量（理論値）は、以下の計算により算出した。

カラム充填後の試料 1cm³ に占めるケイ砂とベントナイトの容量（cm³）

$$= (1.6/2.64 \times 3/10) + (1.6/2.7 \times 7/10) = 0.5966$$

カラム充填後の試料 1cm³ 中の間隙容量（cm³）

$$= 1 - 0.5966 = 0.4034$$

カラム充填後の試料 1cm³ に含有可能な水分量（g）

$$= 0.4034 \times 0.998206 = 4.027$$

カラム充填後の試料 1cm³ 中の水分の飽和量（理論値）（%）

$$= 4.027/1.6 \times 100 = 25.2$$

砂の真密度 . . . 2.64g/cm³

ベントナイトの真密度 . . . 2.7g/cm³

カラム充填後のケイ砂混合ベントナイトの乾燥密度 . . . 1.6g/cm³

ケイ砂とベントナイトの混合比 . . . 3:7

水の密度 . . . 0.998206g/cm³ (at 20)

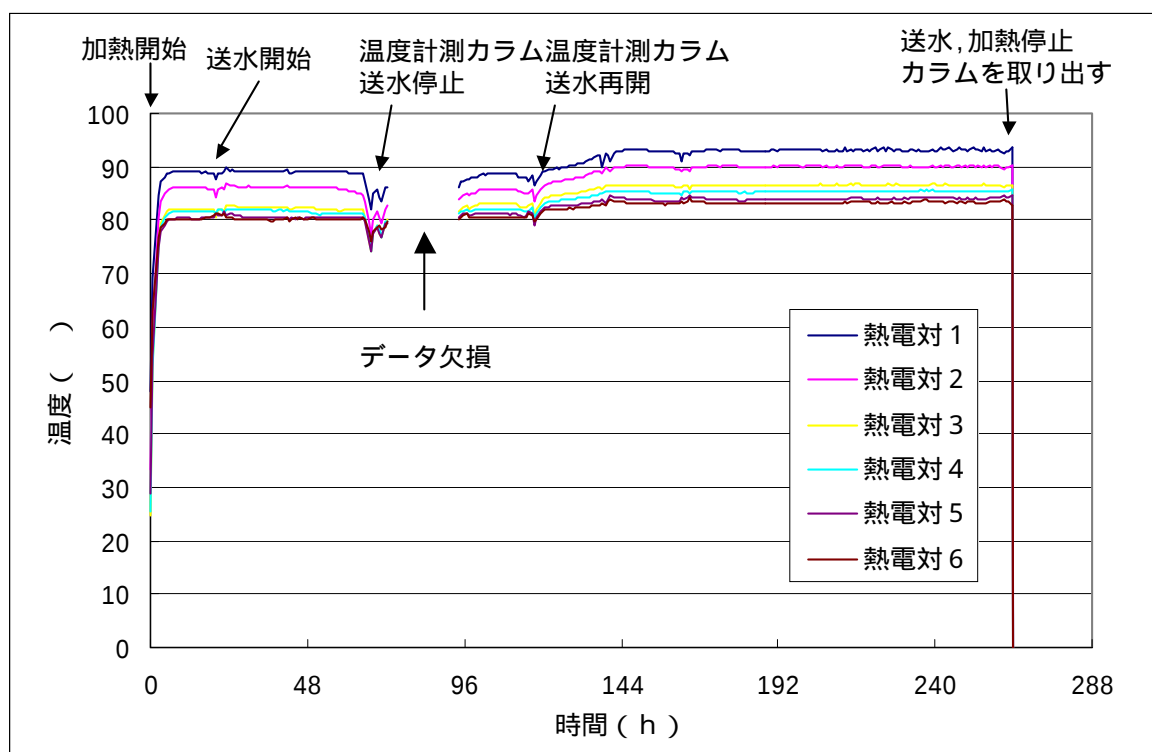


図 4.2(1) 送水試験 (1 回目) 中の温度測定結果 (カラム A)

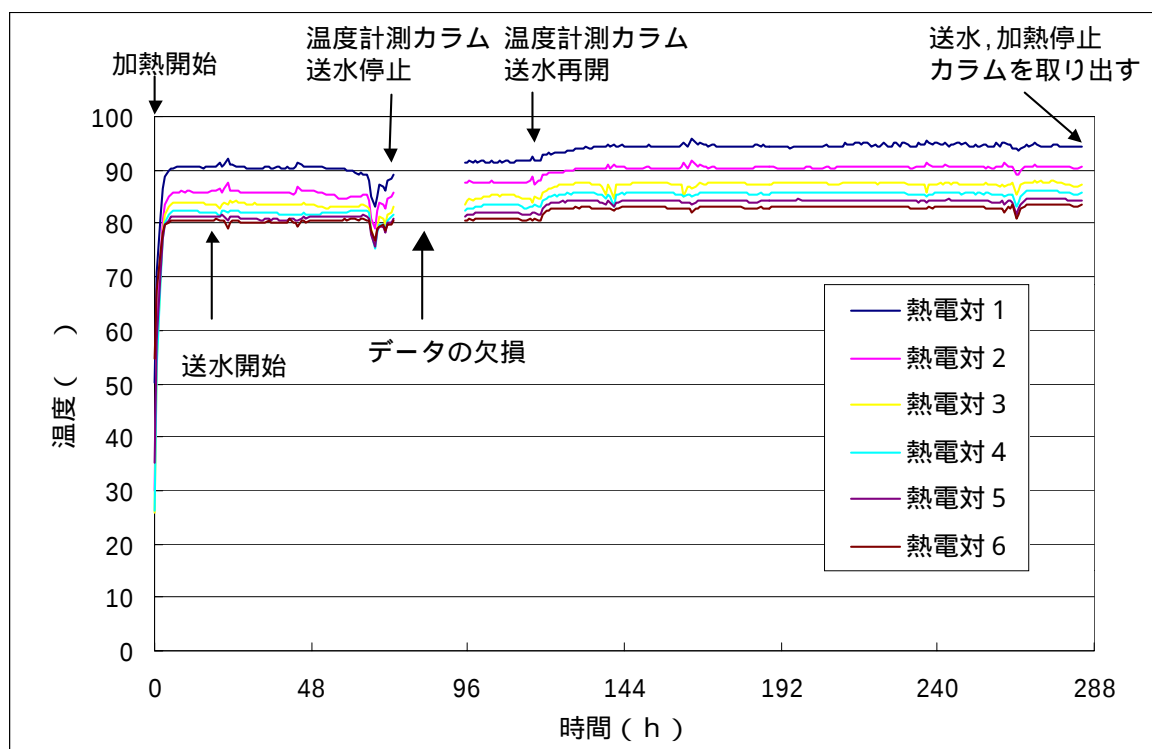


図 4.2(2) 送水試験 (1 回目) 中の温度測定結果 (カラム B)

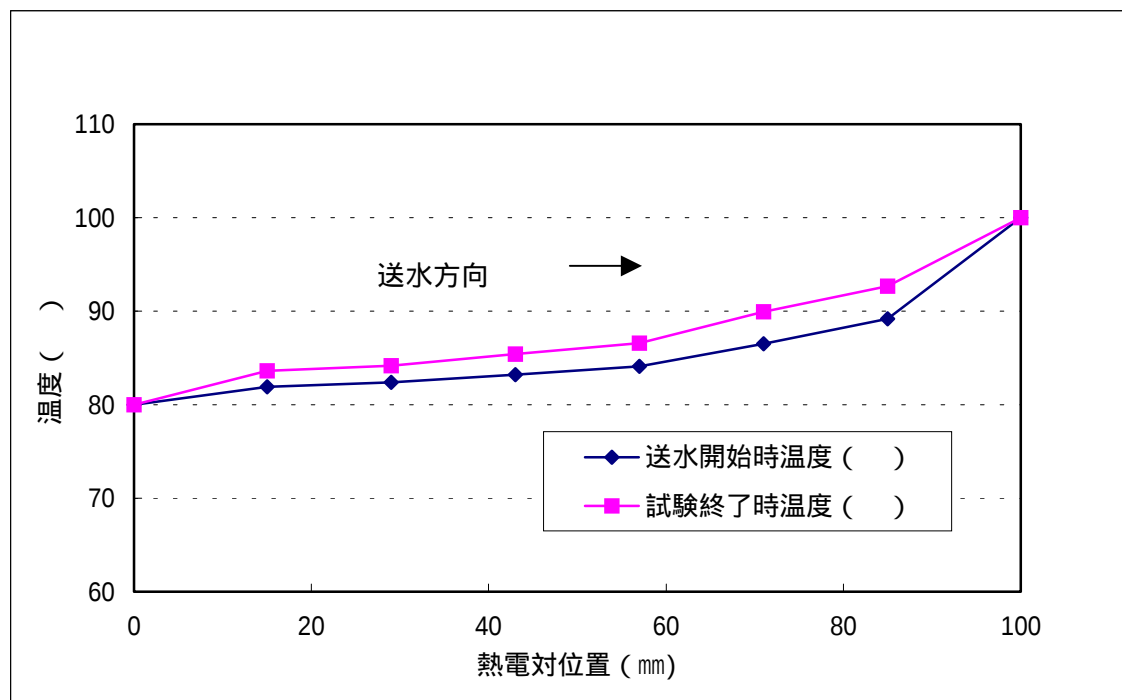


図 4.3(1) 温度測定用カラム A の温度勾配

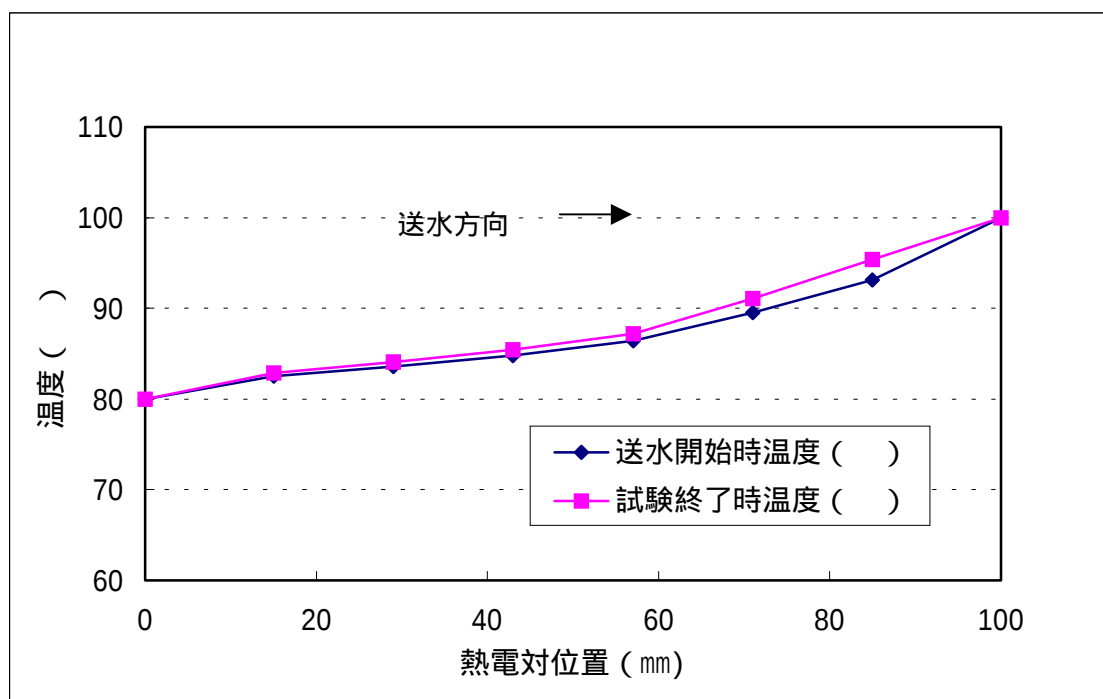


図 4.3(2) 温度測定用カラム B の温度勾配

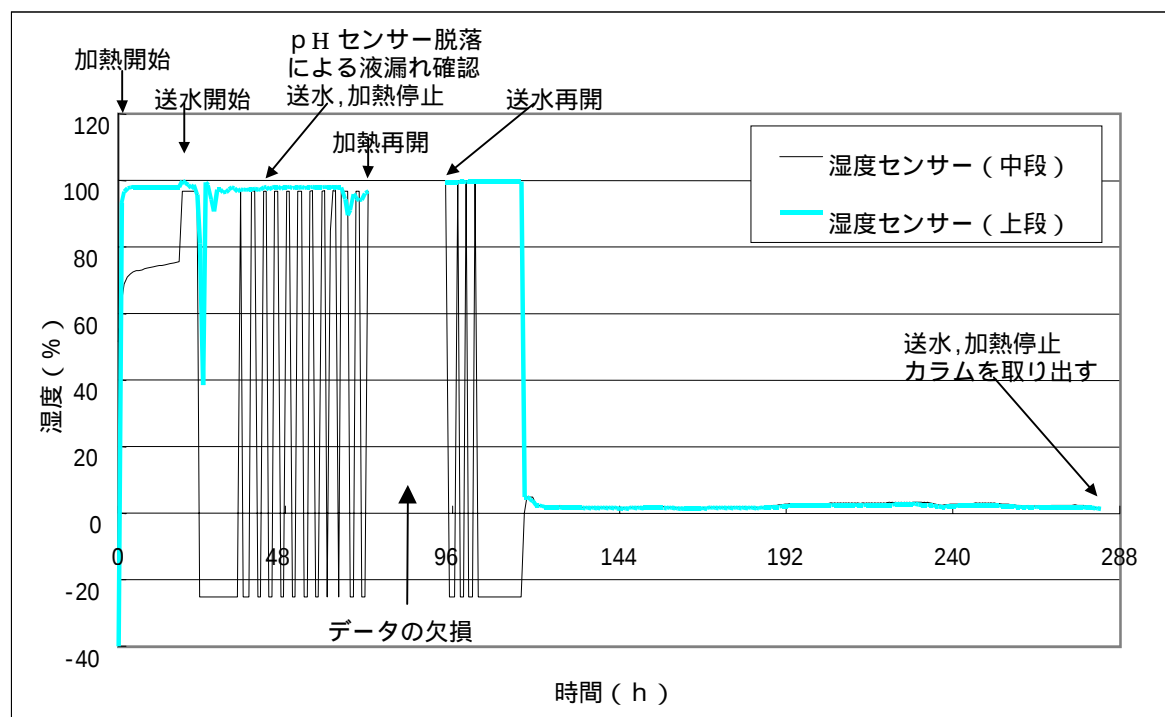


図 4.4 ヴァイサラ湿度センサーによる測定結果

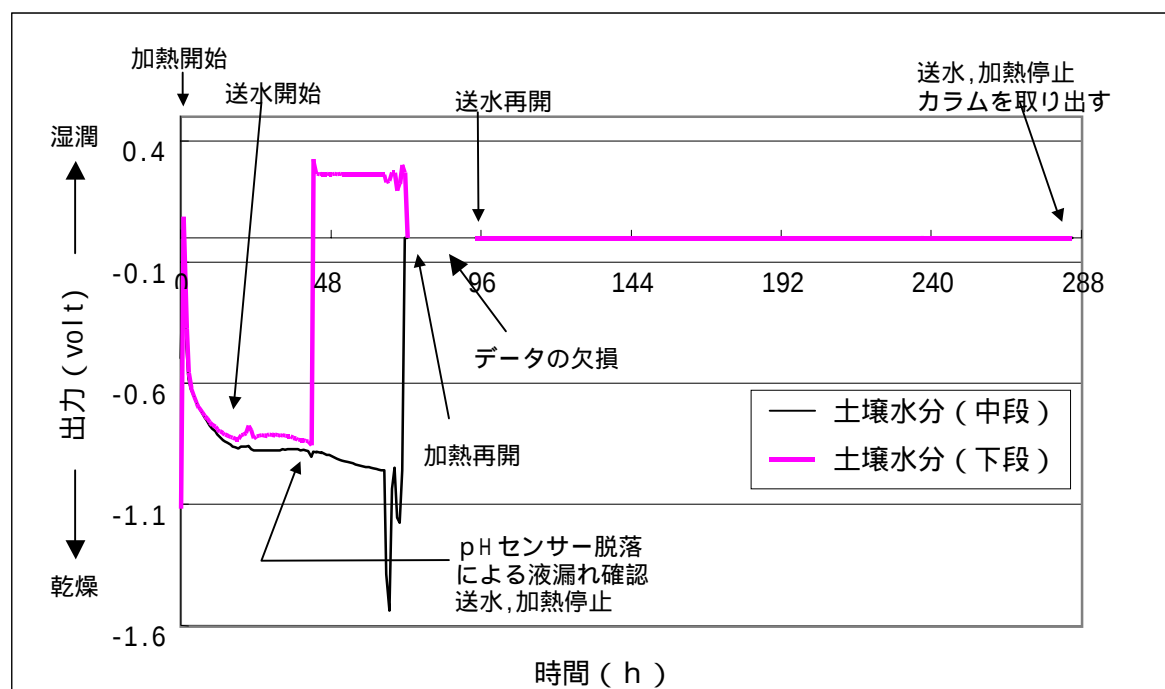


図 4.5 土壌水分センサーによる測定結果 (出力; 電圧)

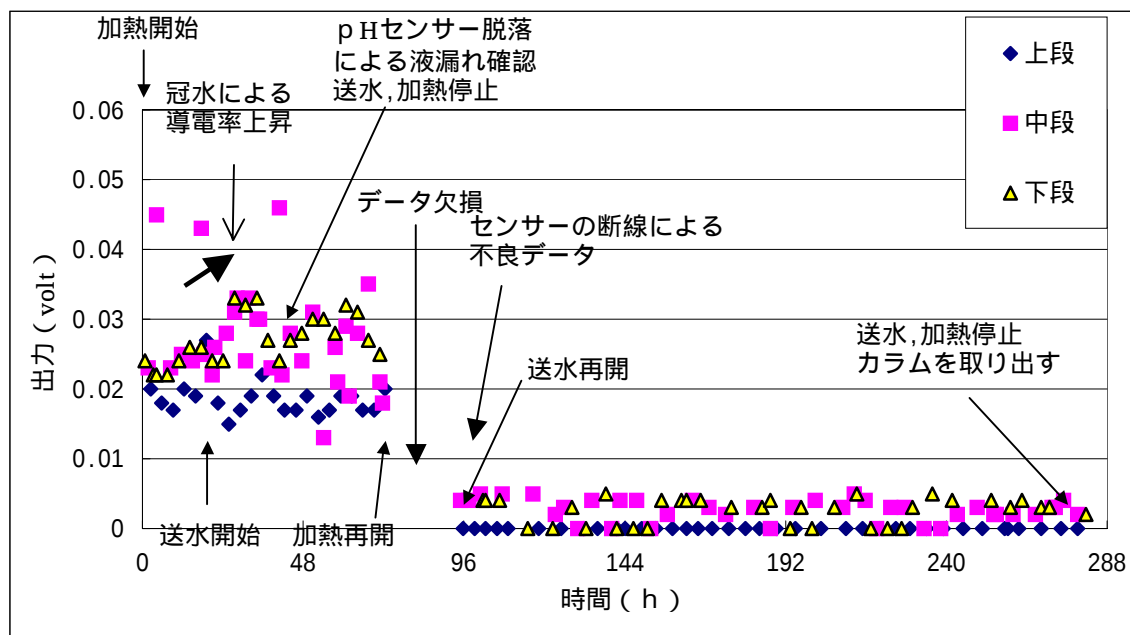


図 4.6 電導度センサーによる測定結果（出力；電圧）

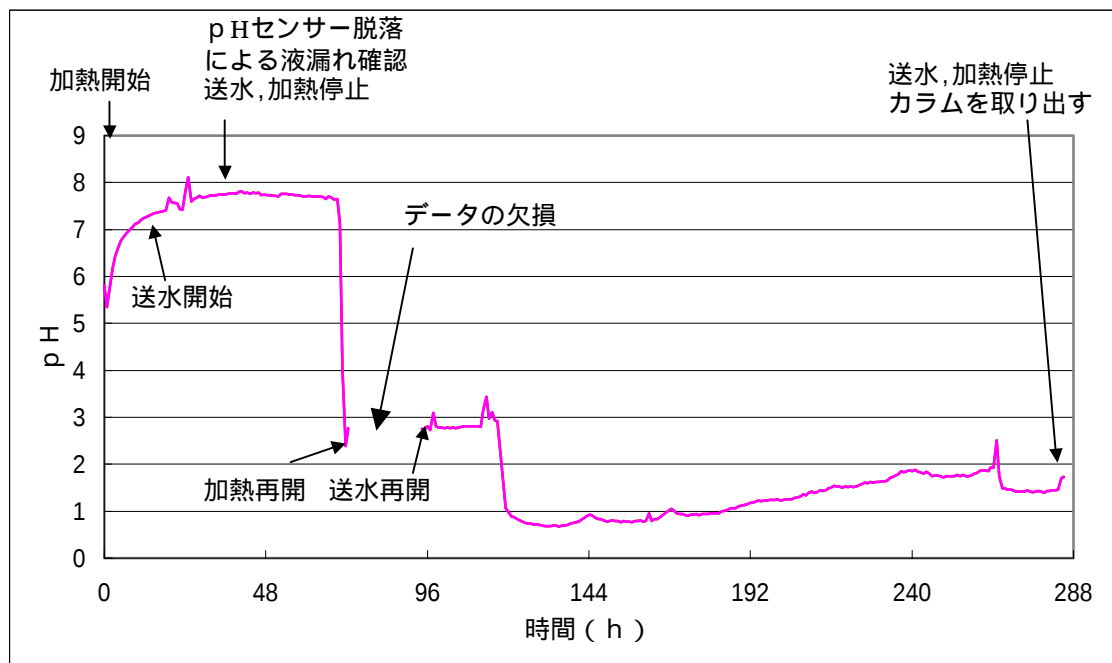


図 4.7 pH センサーによる測定結果（上段設置センサー）

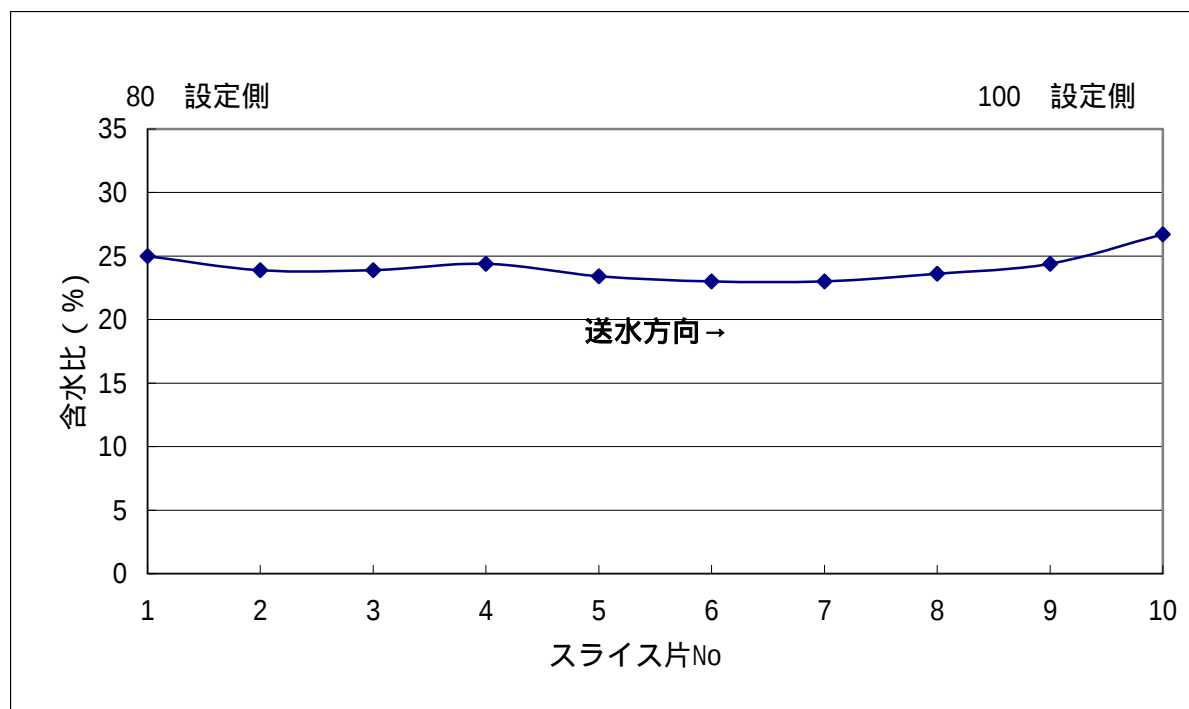


図 4.8(1) 試料スライス片の含水比測定結果 (カラム A)

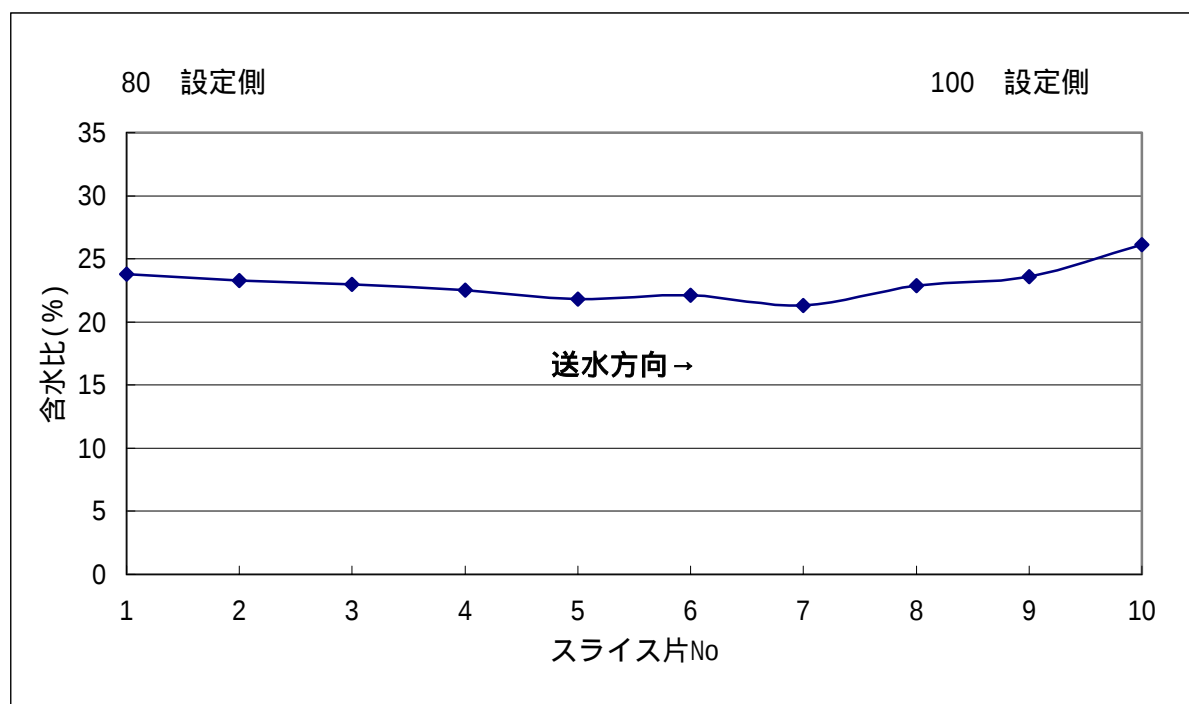
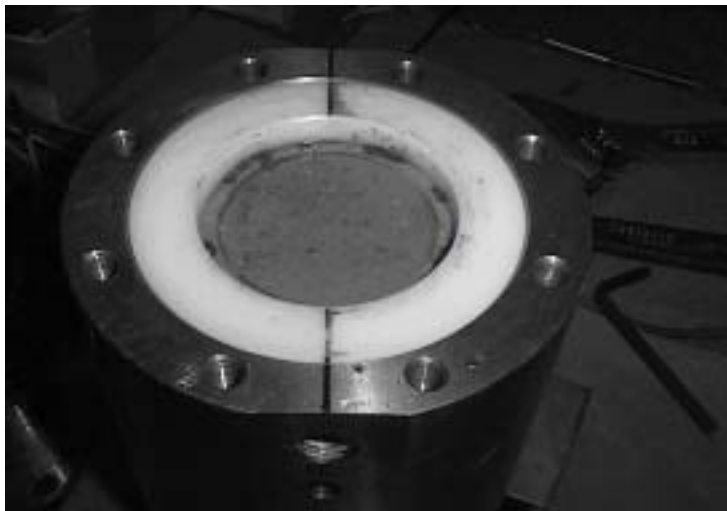
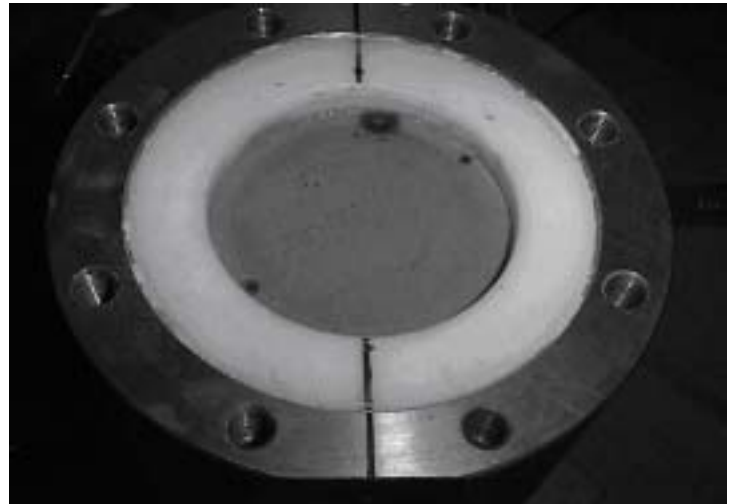


図 4.8(2) 試料スライス片の含水比測定結果 (カラム B)



送水液入り側



蒸気出側

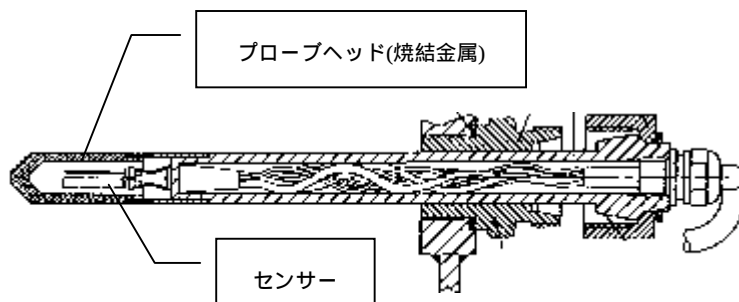
図 4.9 送水試験終了後の試料の外観（温度計測用カラム A）

d. 第 1 回試験の結果から抽出された課題

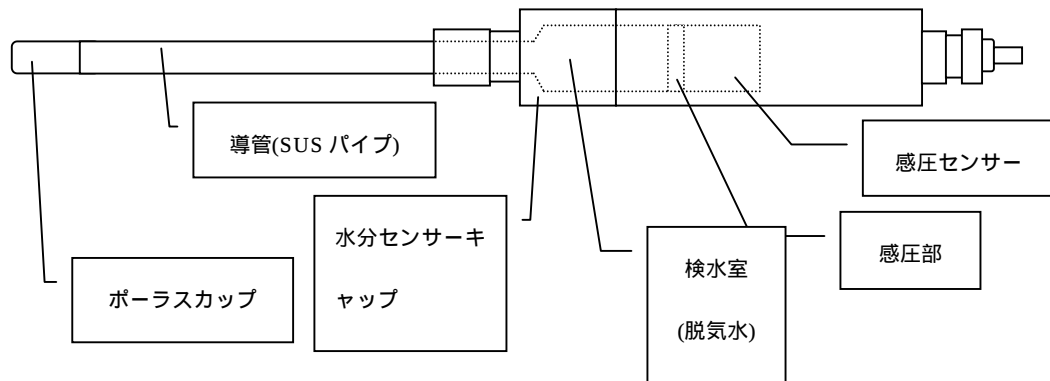
(a) センサー

・湿度センサー（ヴァイサラ）

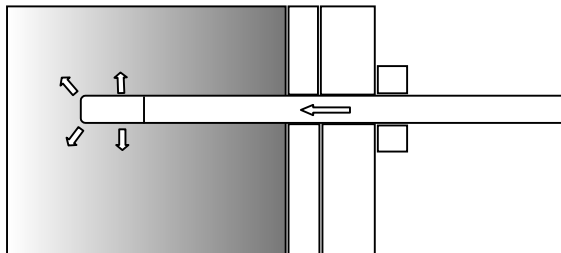
プローブヘッド（焼結金属）から液が入り込み、内部のセンサーに水分が付着した際に自動停止機能が働き、測定不能となる。



・水分センサー（サンケイ理化）



試料の予備加熱の際に、プローブ内の圧力媒体（脱気水）が試料に染みこむ。

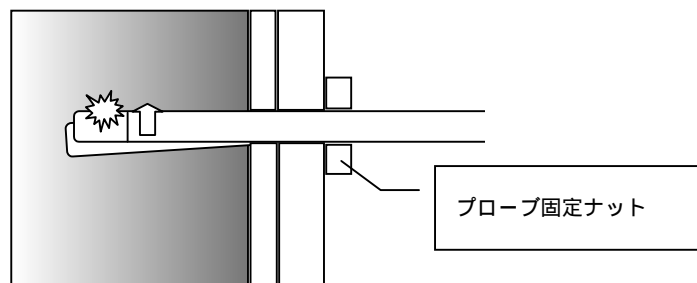


加圧送水すると、送水液がプローブ内に侵入し、センサー本体の継ぎ目（ネジ式）から染み出し（本体は塩ビ製）、正確な測定ができなくなる。



センサー本体の継ぎ目から液が漏れる。
塩が析出し、白くなっている。

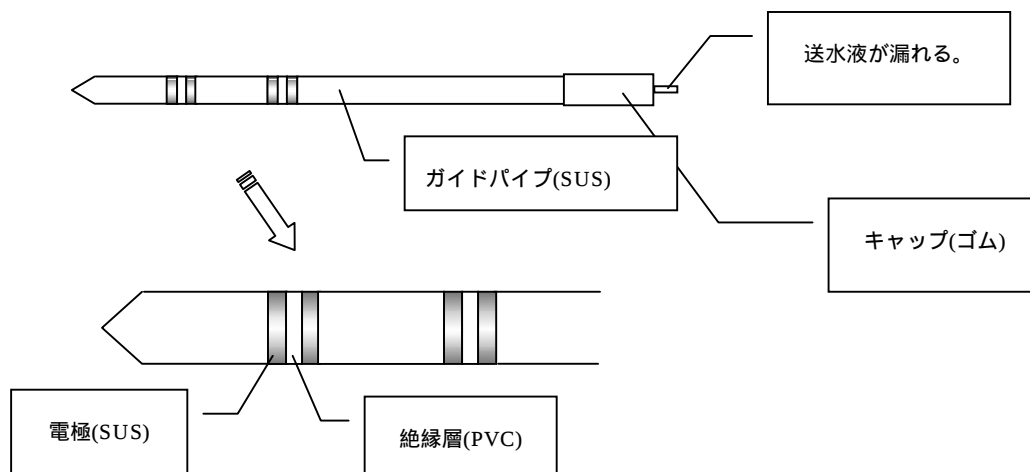
固定ナットでプローブを固定すると、強制的にカラムの側面に対して垂直方向に動かされるため、掘削穴がカラムの側面に対して垂直になっていない場合は、先端のポーラスカップが試料に当たり、ポーラスカップと導管の継ぎ目部分が折れる。



- ・ 電導度センサー

プローブの先端が塩ビ製であるため、熱により変形しやすい。

0.8MPa の圧力で送水すると、プローブ先端の電極と絶縁層との隙間から送水液が侵入し、ガイドパイプ内を通過してカラムの外に漏れる。

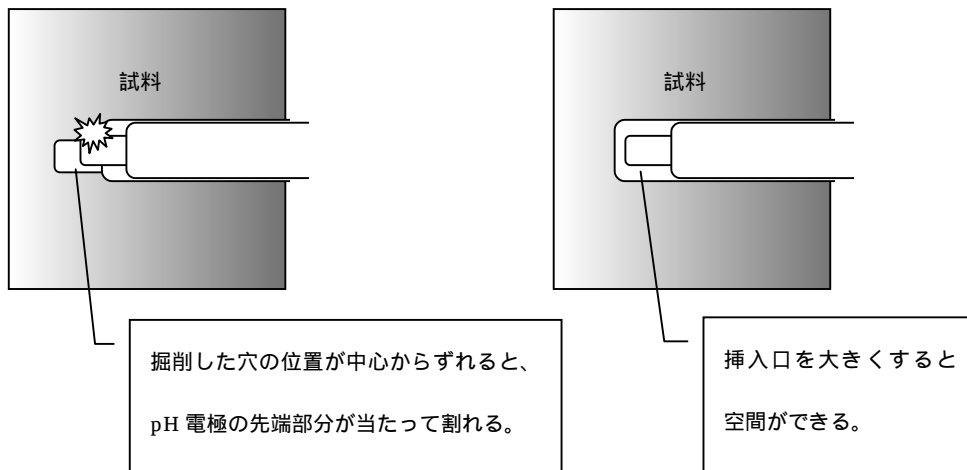


3.5%NaCl 水溶液の透水試験であるのに対して電極の材質が SUS 製であること、さらに測定の際の通電により、電極に錆が発生する。

・ pH センサー

一定圧力以上では、pH 電極がカラムから抜ける (0.8MPa の圧力で送水すると pH 電極が抜ける)。

pH 電極の先端が割れやすいため、挿入口を大きくする必要があった。その結果、試料内に空間ができる。



pH 電極を固定 (締め付け) する際に、力を掛けすぎると割れる。pH 電極は耐圧仕様であるが、局部的加重に弱い。



pH 電極を水平方向に取り付けた場合、ガラス感応膜 (pH 電極の先端部) 内部に気泡が溜まり、正確な値を測定できなくなる。

(b) 装置全体

・ センサーの数および配置

ロケーション的に短絡しやすい状態であるため、温度計測用カラムに比べて透水速度が速い。φ13mm のセンサーが 3 本挿入されているので、少なくとも $3 \times 13 = 39\text{mm}$ は実効距離が短いと考えられる。

・ 温度計測用カラム全体

0.8MPa では透水速度が速いため、送水液が蒸気とならずに排気用パイプ内に流れ込むことが判明した。背圧をかける必要があった。

(c) 試験方法

予備加熱の際に試料が収縮し、送水開始直後に、送水液が試料と断熱材との隙間を通った可能性がある。

e . 送水試験（2 回目）への改善

送水試験（2 回目）への改善内容を表 4.6 に示す。

表 4.6 改善方法の一覧

	問題点	改善方法
湿度センサー	送水液が侵入してセンサーに付着し、測定不能となる。	送水圧を 0.1MPa に下げ、送水液の侵入を抑える。 送水液が到達しにくいと考えられる上段にのみセンサーを取り付ける。
水分センサー	予備加熱の際に、圧力媒体（脱気水）が試料に染みこみ、気泡が入るため正確な値を測定できない。	圧力媒体（脱気水）を抜く。 センサーは送水の有無の判断にのみ使用する。
	加圧送水すると、送水液がプローブ内に侵入し、正確な値を測定できない。	送水圧を 0.1MPa に下げ、送水液の侵入を抑える。
	プローブ固定の際、ポラスカップが折れやすい。	挿入口を大きくする。 ポラスカップの長さを短くし(10mm→5mm)、固定時のポラスカップと導管継ぎ目への負荷を減らす。
電導度センサー	プローブ先端が熱により変形しやすい。	耐熱性の樹脂を使用する。
	電極が錆びる。	Pt などの錆びにくい材質を使用する。
	電極と絶縁層の隙間から送水液が侵入し、送水液がカラムの外に漏れる。	送水圧を 0.1MPa に下げ、送水液の侵入を抑える。
	センサーの感度が低く、冠水時の出力電圧の上昇が分かり難い。	試料に送水液を混和させて作成した標準列で校正する。
pH センサー	0.8MPa の送水圧では電極が抜ける。	送水圧を 0.1MPa に下げる。
	電極を固定する際に割れやすい。	送水圧を 0.1MPa に下げ、固定ナットの締め付けを抑える。
	電極の先端が割れやすい。	電極の挿入口を大きくする。
	pH 電極を水平方向に取り付けると、ガラス感応膜内部に空気が溜まり、正確な測定が出来なくなる。	pH 電極を傾けて（先端部を斜め下方向に向けて）取り付ける。
装置全体	ロケーション的に短絡しやすい状態であるため、透水速度が速い。	送水圧を 0.1MPa に下げ、送水液の侵入を抑える。 センサーの本数を減らす。
	0.8MPa では透水速度が速いため、送水液が蒸気とならずに排気用パイプに流れ込む。	送水圧を 0.1MPa に下げ、送水液の侵入を抑える。
試験方法	予備加熱の際に試料が収縮し、送水開始直後に、送水液が試料と断熱材との隙間を通った可能性がある。	水頭圧で予備送水する。

注) 赤文字で示す改善方法は、本研究では実施せず、今後の検討課題とした。

4.2 試験（２回目）

(1) 試験方法

a. 試料の調整

クニゲル V1 とケイ砂 3 号およびケイ砂 5 号に含まれている水分量を測定した結果、クニゲル V1 は 10.0%、ケイ砂 3 号は 0.1%、ケイ砂 5 号は 0.1%以下であった。

乾燥状態で、クニゲル V1 とケイ砂 5 号およびケイ砂 3 号が、それぞれ 70 : 15:15 となるようにするために、クニゲル V1 を 4500g、ケイ砂 3 号を 868.7g、ケイ砂 5 号を 867.9g 秤取り、混合した。混合は、1 回目の試験のときと同様に、35r.p.m.の回転数で 30 分間行った。

b. 試料の充填

充填密度が 1.6g/cm^3 (ケイ砂混合ベントナイト乾燥状態にて。実際サンプルでは 1.72g/cm^3)、厚みが 10mm となる分量のケイ砂混合ベントナイトをはかり取り (カラム内径 $\phi 75\text{mm}$: 76.2g、カラム内径 $\phi 60\text{mm}$: 48.8g)、一軸プレスにて 10mm の厚みとなるように圧密した。プレスした上面 3mm 程度を薬匙で削り、次の層と境界なく充填されるようにした。このようにして順次 10mm ずつ 10 回に分けて充填し、100mm 高さの試験体とした。表 4.7 に圧密時のプレス圧力を示す。

c. 水分センサー

4.1 試験（１回目）において、挿入用の穴を大きくして、プローブ先端のポーラスカップ（多孔質セラミックス製）が折れないようにすることを試みたが改善されなかった。そこで、プローブ固定時にポーラスカップと導管の継ぎ目部分に加わる負荷を軽減するため、ポーラスカップの長さを 5mm（加工前は 10mm）に加工して測定に使用した。また、試料の予備加熱の最中に、センサー内に注入してある圧力媒体（脱気水）中に気泡が入り込み正確な値を測定出来ないことが確認されたため、本試験では、センサー取り付け部分の試料が湿潤しているか否かの確認にのみ利用することとした（センサー内への送水液の侵入時の圧力により、湿潤の有無を感知する）。また、センサー内の脱気水に

よる試料の送水を避けるために、あらかじめ脱気水を抜いて使用した。

d. 水頭圧による送水

4.1 試験（1回目）において、予想に反して透水速度が早く、温度勾配方向での水分と陽イオン、及び陰イオンの分布が明確に現れなかった。原因の一つとして、加熱により試験体が収縮し、送水液が試料と断熱容器の隙間を移動したものと推測された。よって本試験では、加圧送水前に水頭圧による送水を行った。

水頭圧による送水状況を図 4.10 に示す。本装置は、水シリンダーの固定位置がカラムより下側にあり、水頭圧による送水操作が出来る構造ではなかった（水頭圧による送水操作は想定外であったため）。よって、水シリンダーの上部に分液ポート（容量 100ml）を取り付け、送水液の液面が試験体下面より高い位置となるようにした。

水シリンダー内とカラムまでの送水パイプ内、及び、液面が試料の下面より 20mm 程度高い位置となるように分液ポート内に送水液を注入した後、試験（水頭圧による送水と試料の加熱）を開始した。試験開始から 28 時間後、送水コックを閉じて水頭圧による送水のみ終了した。次いで、分液ポートを取り外して水シリンダー内の送水液の液量を調整（所定量の送水液を注入）し、ゴムプラグを取り付けて加圧送水に備えた。

送水液量は、水シリンダーから取り外した分液ポートに、送水前の液面の位置まで水を加え、送水後の液面の位置まで排出したときの水の量を計測することにより求めた。水頭圧により試料に送水したおよその液量は、温度計測カラム A では 15ml、温度計測カラム B では 12ml、物性計測カラムでは 34ml であった。これは、試料の高さ方向で、温度計測カラムでは約 2cm、物性計測カラムでは約 3cm 飽和させる量である。

e. 加圧送水試験

水頭圧による送水操作を終えた後（試験開始から 29 時間後）加圧送水を開始した。試験条件と実施結果を表 4.8 に示す。なお本試験では、透水速度を遅くし、温度勾配方向での塩分等の濃度分布を顕著にするために、送水圧を 0.1MPa とした。

送水試験作業の時系列を表 4.9 に示す。

試験（加熱）開始から 9 時間後、試料の温度は平衡状態となったが、1 回目の試験時に比べて 1～2 低い値を示した。そこで、試料の温度分布を前回と同等にするために、空気恒温槽の設定温度を 2 上げて 77 に設定した。

試験開始から 25 時間後、試料の温度は平衡状態となった。しかし、温度計測カラム A の 100 設定側の試料温度がカラム B より低かったため、カラム A の 100 設定側に保温材（セラミックファイバーテープ）を巻き付け、カラム B と同等の温度となるようにした。

試験開始から 28 時間後、試料の温度が平衡状態となったことを確認した後、水頭圧による送水を終了して加圧送水の準備を行った。

試験開始から 29 時間後、送水を開始した。

試験開始から 577 時間後、温度計測カラム B の凝縮水回収容器に液が溜まり始めたため、カラム B を取り出した。カラム B の試料の送水状況を確認するために含水比を測定した結果、試料全体がほぼ飽和状態となっていたため、温度計測カラム B と物性計測カラムを取り出した（試験開始から 625 時間後）。

f. 試料スライス片の採取

最初に取り出した温度計測カラム B の試料は、カラムの冷却の間に水分の拡散することを防ぐため、直ちに、試料のスライス片採取作業を行った。

なお、空気恒温槽からカラム B を取り出し、試料のスライス片採取作業を開始するまでの時間は約 40 分であった。採取したスライス片は、水分の蒸発を抑えるために、チャック付きビニール袋に入れ、冷蔵庫内で保管した。

温度計測カラム A は、試料のスライス片採取作業中に水分が蒸発することを防ぐため、氷嚢を用いて室温付近まで冷却した後、スライス片採取作業を行った。なお、空気恒温槽からカラムを取り出し、試料のスライス片採取作業を開始するまでの時間は、約 5 時間（内 冷却時間は約 4.5 時間）であった。採取したスライス片は、水分の蒸発を抑えるために、チャック付きビニール袋に入れ、冷蔵庫内で保管した。

g. 分析

試料のスライス片からの分析試料採取位置を図 4.11 に示す。

各スライス片の採取位置 ～ の部分を分析試料とした。採取位置 と は、径方向での付着水分量の差を確認するために選択した。また、採取位置 は、試料中に含まれる水分量と固相中の陽イオンおよび陰イオン、さらに浸出陽イオン量の温度勾配方向での差を確認するために選択した。

・含水比測定方法

採取位置 と の試料は、定温乾燥機（ヤマト DV-41）にて、105 で恒量になるまで乾燥し、乾燥前後の重量測定結果から含水比を求めた。計算式は以下に示す。

$$\text{含水比(\%)} = (a-b) / b \times 100$$

105 乾燥前のケイ砂混合ベントナイトの重量(g) a

105 乾燥後のケイ砂混合ベントナイトの重量(g) b

・固相中 Na の分析方法

採取位置 の 105 乾燥試料から一部採取し、分析試料とした。試料を粉碎後、0.1g を白金ルツボに秤取り、塩酸と過塩素酸およびフッ化水素酸を加えて加熱して Na を抽出した。続いて、抽出液を 100ml のメスフラスコに移して定容した後、原子吸光分析装置（ジャーレルアッシュ AA-890）にて抽出液中の Na 量を測定した。試料の秤取り量と測定結果および付着水量とから、固相中の Na 量（105 恒量ベース）を求めた。

・固相中 Ca の分析方法

採取位置 の 105 乾燥試料から一部採取し、分析試料とした。試料を粉碎後、0.1g を白金ルツボに秤取り、炭酸ナトリウムと硼砂の混合融剤（混合比 3:1）を加え、ガスバーナーで加熱して溶融した。続いて、塩酸と純水を加えて溶液化し、200ml のメスフラスコに移して定容した後、ICP 発光分析装置（島津製作所 ICPS-8000）にて Ca 量を測定した。試料の秤取り量と測定結果および付着水量とから、固相中の Ca 量（105 恒量ベース）を求めた。

・固相中 SO_4^{2-} と Cl^- の分析方法

採取位置 の 105 乾燥試料から一部採取し、分析試料とした。試料 0.1g を約 40ml の純水に浸漬し、80 ℃ に加温しながら 20 分間超音波振とうした。続いて、純水を加えて 50ml に定容し、一晚静置して沈殿物と上澄み液とに分離させた。上澄み液を 0.45 μm のフィルターで濾過した後、イオンクロマトグラフ分析装置（ダイオネックス DX-500）にて、濾液中の SO_4^{2-} と Cl^- の量を測定した。試料の秤取り量と測定結果結果および付着水量とから試料中に含まれる SO_4^{2-} と Cl^- の量（105 恒量ベース）を求めた。

・浸出 Na と Ca の分析方法

採取位置 の 105 乾燥試料から一部採取し、分析試料とした。浸出 Na と Ca 量の分析は SFSA 改良法に準じて行った。ベンジルトリメチルアンモニウム・クロライドは関東化学製の特級試薬を使用した。

試料を 0.5g（無水換算）秤取り、あらかじめ 6%ベンジルトリメチルアンモニウム・クロライド溶液 50ml 入れておいたコニカルビーカー（容量 200ml）に移した。次に、20 分間超音波分散した後 1 時間静置し、上澄み液を 0.45 μm のフィルターで濾過した。続いて、濾液から 2ml 分取して純水で 50ml に定容し、これを分析液とした。検量線は、Na および Ca の原子吸光用標準溶液（関東化学製）を用いて調製した。なお、SFSA 法で用いる試薬中には不純物として Na と Ca が含まれるため、分析液と同じ濃度となるように、検量線溶液にベンジルトリメチルアンモニウム・クロライド溶液を添加した。検量線溶液と分析液中の Na と Ca の測定には、原子吸光分析装置（ジャーレルアッシュ AA-890）を用いた。

試料の秤取り量と測定結果結果から、試料中に含まれる浸出 Na と Ca の量を求めた。

表 4.7 圧密時の圧力結果

試験 2 回目 試料充填時のプレス圧力 (物性計測用カラム)

(セル内径 ϕ 75mm、充填密度 1.6g/cm³)

底面より	ケイ砂混合ベントナイト充填量 (g)	プレス圧力 (ton/cm ²)
0mm - 10mm	76.18	0.106
10mm - 20mm	76.18	0.072
20mm - 30mm	76.18	0.059
30mm - 40mm	76.18	0.036
40mm - 50mm	76.18	0.041
50mm - 60mm	76.18	0.039
60mm - 70mm	76.18	0.041
70mm - 80mm	76.18	0.041
80mm - 90mm	76.18	0.041
90mm - 100mm	76.18	0.041

試験 2 回目 試料充填時のプレス圧力 (物性計測用カラム)

(セル内径 ϕ 60mm、充填密度 1.6g/cm³)

底面より	ケイ砂混合ベントナイト充填量 (g)	プレス圧力 (ton/cm ²)
0mm - 10mm	48.75	0.064
10mm - 20mm	48.75	0.053
20mm - 30mm	48.75	0.053
30mm - 40mm	48.75	0.053
40mm - 50mm	48.75	0.053
50mm - 60mm	48.75	0.053
60mm - 70mm	48.75	0.053
70mm - 80mm	48.75	0.053
80mm - 90mm	48.75	0.053
90mm - 100mm	48.75	0.053

試験 2 回目 試料充填時のプレス圧力 (物性計測用カラム)

(セル内径 ϕ 60mm、充填密度 1.6g/cm³)

底面より	ケイ砂混合ベントナイト充填量 (g)	プレス圧力 (ton/cm ²)
0mm - 10mm	48.75	0.064
10mm - 20mm	48.75	0.060
20mm - 30mm	48.75	0.050
30mm - 40mm	48.75	0.053
40mm - 50mm	48.75	0.053
50mm - 60mm	48.75	0.057
60mm - 70mm	48.75	0.057
70mm - 80mm	48.75	0.057
80mm - 90mm	48.75	0.057
90mm - 100mm	48.75	0.060

表 4.8 試験条件および実施結果

	温度測定カラム A	温度測定カラム B	物性測定カラム
試料乾燥密度	1.6g/cm ³		
送水液	3.5%NaCl 水溶液		
送水圧	0.1Mpa		
背圧	大気圧		
カラムトップ温度	100		
カラムボトム温度	80		
送水液予備加熱器温度	80		
送水時間	625 時間	577 時間	625 時間
総送水液量 ^{注 1}	148ml (15ml)	154ml (12ml)	319ml (34ml)
排水液量	38ml	50ml	112ml ^{注 2}
空気恒温槽 設定温度	77		

注 1 総送水液量は、水頭圧により送水した液量と加圧により送水した液量の合量である。水頭圧により送水した液量は（ ）内に示す。

注 2 真空断熱層用のコックから送水液が漏れていた。空気恒温槽の床に固着していた塩の重量から算出したおよその送水液量。



図 4.10 水頭圧試験状況

表 4.9 送水試験（2 回目）作業結果

試験開始からの経過時間(h)	温度計測カム A	温度計測カム B	物性計測カム	その他
0	・ 試料加熱用ヒータの送水液入側 80 設定 ・ 送水液出側 100 設定 ・ 水頭圧による送水開始	・ 試料加熱用ヒータの送水液入側 80 設定 ・ 送水液出側 100 設定 ・ 水頭圧による送水開始	・ 試料加熱用ヒータの送水液入側 80 設定 ・ 送水液出側 100 設定 ・ 水頭圧による送水開始	・ 空気恒温槽の 75 設定 ・ 送水液予備加熱器の 80 設定 ・ データロガーによる計測データ取得開始
9				送水試験（1 回目）と比較して、試料の温度が全体的に 2 程低かったため、空気恒温槽の設定温度を 77 に変更
25	温度計測カム B と比較して、100 設定側の試料の温度が低かったため、保温材（セラミックファイバテープ）を巻いた			
28	水頭圧による送水停止	水頭圧による送水停止	水頭圧による送水停止	分液ロートを外し、加圧送水準備を実施
29	加圧送水開始 0.1MPa に設定	加圧送水開始 0.1MPa に設定	加圧送水開始 0.1MPa に設定	
221				データ保存のため、データロガーによる計測データ取得を一時停止（約 40 分間）
364				データ保存のため、データロガーによる計測データ取得を一時停止（約 40 分間）
531				データ保存のため、データロガーによる計測データ取得停止（約 40 分間）
577		・ 凝縮水回収容器に液が溜まり始めたため、加圧送水停止 ・ 試料加熱用ヒータのカムを取り出す		
625	・ 温度計測カム B 中の試料が、全体的に浸潤していることが確認されたため、加圧送水停止 ・ 試料加熱用ヒータのカムを取り出す		・ 温度計測カム B 中の試料が、全体的に浸潤していることが確認されたため、加圧送水停止 ・ 試料加熱用ヒータのカムを取り出す	・ データロガーによる計測データ取得停止 ・ 空気恒温槽停止 ・ 送水液予備加熱器停止

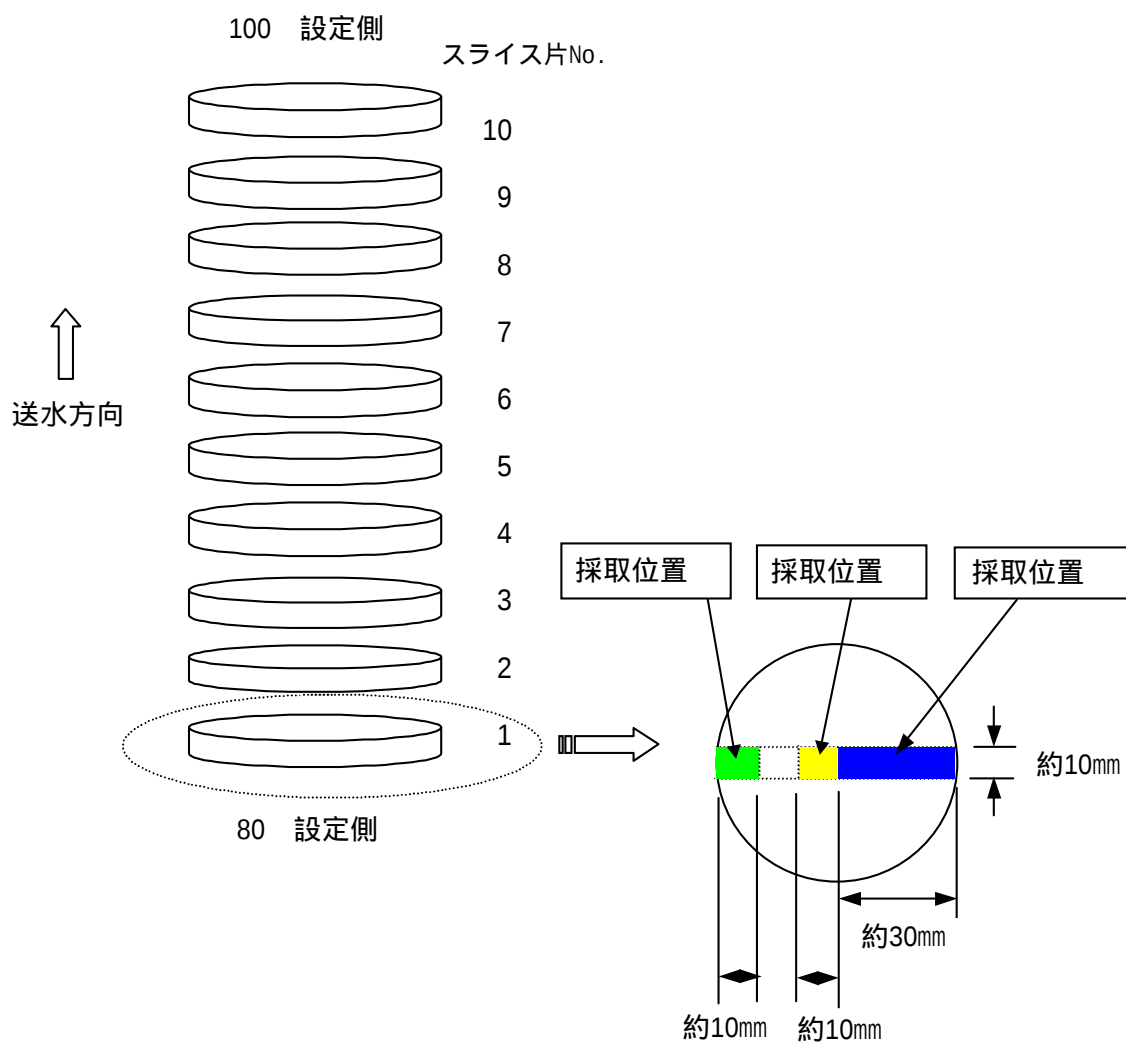


図4.11 分析用試料採取位置

(2) 結果

a . 温度測定結果

送水試験期間中の温度測定結果を図 4.12 に示す。図 4.12(3),(4)は、加圧送水開始から停止までの期間の初期、中期、停止時における試料の温度勾配状況を示す。

温度計測カラム A , B とともに、試料の温度が、約 180 時間から 360 時間にかけて 2 程度高温側に上昇していた。外気温の上昇の影響と推測される。

恒温槽 77 に対して、カラム内温度は、カラムボトム 80 からカラムトップ 100 にかけてゆるやかに上昇していた。周辺温度が低いことによる 80 を下回る温度低下は観察されなかったが、直線的な増加からはずれていた。

b . 物性測定結果

物性測定結果を図 4.13 ~ 16 に示す。

湿度は、試料の加熱直後に、湿度上昇が観察され、水頭圧による送水中（試験開始から約 20 時間後）に異常データを示しだしている。これは、センサーヘッドに水分が付着した場合に得られるデータと考えられ(メーカーヒアリング結果)、元々試料に含まれていた吸着水が加熱により水蒸気化し、これがセンサーヘッドに結露したものと推測される。また、プローブヘッド内に送水液の侵入が確認されたことから、送水圧を 0.1MPa まで下げた効果はなかった。本センサーは、加熱・加圧送水をとまなう試験には適さないことが分かった。

水分は、加熱開始直後から下段センサーで出力値（電圧）が上昇し、約 18 時間後には加熱開始時と同レベルになった。出力値の上昇は、下段センサー先端のポーラスカップにクニゲルが固着して目詰まりしていたために密封状態となり、加熱によりセンサー内圧が高くなったことで出力値が上昇したと推測される。また、その後の出力値の低下は、センサーの取り付け位置（試料の下面から 2.5cm）と、水頭圧で送水・飽和したと考えられるケイ砂混合ベントナイトの高さ（試験体の下面から 3cm まで）が一致することから、水頭圧による送水で、ポーラスカップに固着していたクニゲルが湿潤して柔らかくなり、センサー内の空気が抜けたものと推測される。下段と中段のセンサーで、180 時間から 360 時間の間に見られる出力値の上昇は、温度測定結果で見られた温度上昇の時期と重なることから、

空気恒温槽内温度の上昇による圧力上昇と考えられる。また、試験開始から 120 時間以降、時間の経過とともに、膨潤による水蒸気圧上昇と推定される緩やかな出力値の上昇が認められる。

下段及び中段のセンサーで 0.1 ~ 0.2V 程度の差が認められるが、センサー内の圧力媒体（脱気水）を抜き、また、通常の使用温度域（Max.60℃）を越えた 80℃付近で使用していることから、電圧の差はセンサーの個体差及び誤差によるものと推測される。本センサーでは、試料の湿潤の有無を確認する予定であったが、測定値に対する外気温度の影響及び個体差、誤差が大きく、明瞭な結果は得られなかった。

電導度は、加圧送水開始後、比較的短時間のうちに下段と中段のセンサーで出力値（電圧）の上昇が認められた。次いで、約 100 時間後に上段のセンサーの出力値上昇が認められた。試験開始から約 200 時間後、中段のセンサーで出力値の上昇が見られるが、送水・湿潤によるものと推定された。また、試験開始から約 420 時間以降、出力値が下がっているが、これは、センサー先端の金属電極部の錆の発生等による電極の劣化（電極は SUS 製）が原因で生じているものと推測される。

中段のセンサーでは下段に比べて ~ 2V 程度高い値を示しているが、校正曲線測定時の結果（図 2.14）を見ると、各センサー間で 0.5 ~ 1.5V 程度の差が認められることから、電圧の差はセンサーの個体差によるものと考えられる。

また、このセンサーの個体差は、電極間距離等の電極固有の形状あるいは電極表面の錆びの影響によるものと推測される。

本センサーでは、電導度を測定することにより試料中の塩濃度の分布を調べる予定であったが、電極表面に発生した錆等の影響により、正確な値を求めることが出来なかった。しかし、湿潤による電導度の変化は顕著であるため、湿潤した時期についての推定は可能であった。

pH は、加圧送水開始後、下段と中段の値が同等となり、試験終了まで差は認められなかった。また、下段及び中段で測定された pH は加圧送水を開始してから停止するまでの間は 7.5 ± 0.5 の範囲内にあり、顕著な変化は認められなかった。

本 pH センサーは 110℃までは使用できるようになっているが、先端のガラス感応膜及び液絡部が常に湿潤した状況での使用に限られ、乾燥状態での使用には

耐えない。したがって、センサーに送水液が到達するまでの間、センサーの先端が加熱により乾燥したベントナイトに囲まれているためセンサーそのものが乾燥している可能性が高く、測定された値の信頼性は低いと考えられる。

c．含水比測定結果

試験後の、試料の含水比測定結果を表 4.9 と図 4.17 に示す。

表 4.9 に示す含水比の測定結果から求められたカラム A および B の試料に含まれる水分量は、それぞれ 110.9ml と 105.5ml であった。また、総送水液量から排水液量を引いた値、すなわち、試料中に含まれる水分量は、それぞれ 110ml と 104ml であり、マスバランスはほぼ一致していた。

試料の含水比は、送水液入り側（80 設定側）から送水液出側（100 設定側）にかけて低下すると推測された。しかし、温度計測カラム A の試料では、送水液入り側から 7cm（スライス片 No.7）付近にかけて含水比の低下が認められたものの、送水液出側付近では高くなっていた。カラムから背圧調整バルブにかけて配管内に水が溜まっていたことから、試料から発生した蒸気が配管内を通過する際に冷却されて凝縮水となり、この凝縮水がカラム内に流れ込んだために、送水液出側付近の含水比が高くなった可能性がある。

温度計測カラム B の試料は、カラム A の試料に比べて含水比が全体的に低く、温度勾配方向での含水比の分布もほとんど差が認められなかった。カラム B では、十分に冷却しない状態でスライス片を採取していることから、試料からの水分の蒸発が影響していると考えられる。

カラム A と B の試料は、共に径方向での含水比の分布に顕著な差が認められなかったことから、送水液が試料と断熱材の隙間を移動するような特異な状況はなかったと考えられる。

d．成分分析結果

分析結果を表 4.11 と図 4.18～19 に示す。

固相中の Na,Ca および浸出 Na,Ca は、温度勾配方向に対して差は認められなかったが、固相中の Cl^- と SO_4^{2-} については、僅かに、高温側に行くほど濃度が

高くなる傾向が見られた。

クニゲル V 1 の陽イオン交換容量は、およそ 60meq/100g と測定されているが、本測定結果によれば、浸出 Na で 43～53meq/100g、浸出 Ca で 7～8meq/100g であり、30wt% ケイ砂混合ベントナイトに対しては、大きい値を示している。砂にイオン交換容量がないとすれば、 $60 \times 0.7 = 42 \text{ meq/100g}$ のイオン交換容量となり、得られた分析値は 120 % 程度のイオン交換容量を示している (50～60meq/100g)。想定される陽イオン交換容量より若干大きく、本測定結果は交換サイト以外のイオンの溶出が寄与しているものと推定される。クニゲル V 1 の既往の測定¹⁾では、浸出ナトリウム 50meq/100g、浸出カルシウム 40meq/100g で、そのモル比はほぼ 1:1 に対して、海水で湿潤された結果、9:1 の比となったものと考えられる。

塩素イオンは、送水させた海水から供給されるので、含水比 25% で海水が送水したとすると、塩素イオン濃度は、

$$25\% \times 3.5 / 100 \times 35.5 / (35.5 + 23) = 0.53\%$$

となるが、分析結果は、0.2～0.3% でおおよそ半分であった。

いっぽう、ナトリウムは、

$$25\% \times 3.5 / 100 \times 23 / (35.5 + 23) = 0.34\%$$

となる。これに対して、ナトリウム分析結果は、1.4～1.5% 程度で、うち置換型ナトリウムは、約 50meq/100g であるから、海水由来のナトリウムをその差とすると、

$$(1.4 \sim 1.5) - 50 \text{ meq/100g} \times 23 / 1000 = (1.4 \sim 1.5) - 1.15 = 0.25 \sim 0.35$$

となり、上記の海水由来のナトリウム濃度におおよそ一致する。

塩素イオンが海水由来として推定される濃度の半分程度であるのは、用いた分析法(温水 - 超音波抽出)では、抽出されにくい塩素イオンが存在している可能性があると考えられる。

e . 試験後の各センサーの状況

・ pH センサー

下段電極の固定(O リングによる固定)位置付近にヒビが認められた。また、中段のセンサーでは、ガラス電極内に充填してある塩化カリウム水溶液を含ま

せたポリマーが乾燥し収縮していた。

- ・電導度センサー

3本ともに固定(Oリングによる固定)位置付近に凹みが確認された。また、電極に錆が発生していた(電極は SUS 製)。

- ・湿度センサー

プローブヘッド内部に、クニゲルを含んだ送水液と考えられる灰色の液が侵入していた。

- ・水分センサー

下段，中段ともに、送水液の侵入が確認されたが、送水試験（1回目）で見られたような、センサー本体の継ぎ目（ネジ式）部分からの送水液の漏れは認められなかった。

表 4.10(1) 送水試験（２回目）後のベントナイトの含水比および飽和度測定結果

カラム A			カラム B		
スライス片 No.	含水比 (%)	飽和度 (%)	スライス片 No.	含水比 (%)	飽和度 (%)
1	27.1	108	1	24.1	96
2	27.7	110	2	22.4	89
3	25.2	100	3	22.9	91
4	23.0	91	4	24.1	96
5	23.0	91	5	23.6	94
6	23.0	91	6	21.8	87
7	22.9	91	7	23.0	91
8	23.0	91	8	23.8	94
9	24.1	96	9	22.9	91
10	25.8	102	10	24.2	96

表 4.10(2) ベントナイトスライス片中心部と外周部の含水比および飽和度測定結果

カラム A					カラム B				
スライス 片 No.	含水比 (%)		飽和度 (%)		スライス 片 No.	含水比 (%)		飽和度 (%)	
	中心部	外周部	中心部	外周部		中心部	外周部	中心部	外周部
1	25.2	25.8	100	102	1	21.7	23.5	86	93
3	23.5	25.0	93	99	3	22.1	24.2	88	96
5	22.1	22.9	88	91	5	21.4	21.5	85	85
7	24.7	23.3	98	93	7	22.5	23.3	89	93
9	24.5	24.8	97	98	9	23.3	22.6	93	90

* 含水比は、105 蒸発水分量より算出。

* 飽和度は、ベントナイトの水分の飽和量（理論値）を 25.2%とし、これに対する含水比（測定値）の割合を示す。

表4.11 送水試験（２回目）後の試料の成分分析結果

	スライス片 No.	固相 (単位：wt%)						浸出 (単位：meq/100g)					
		Na	Ca	Cl	Cl (n=2)	Cl (平均)	SO ₄	Na(n=1)	Na(n=2)	Na(平均)	Ca(n=1)	Ca(n=2)	Ca(平均)
温度計測 カラムA	1	1.51	1.01	0.22	-	-	0.038	53.9	43.9	48.9	7.5	8.5	8.0
	2	1.52	1.08	0.26	-	-	0.060	54.3	46.1	50.2	7.0	9.0	8.0
	3	1.47	1.03	0.24	-	-	0.065	48.3	42.6	45.5	7.0	9.5	8.3
	4	1.43	1.02	0.21	0.19	0.20	0.075	50.9	43.9	47.4	8.0	9.5	8.8
	5	1.35	1.03	0.26	-	-	0.081	51.7	45.7	48.7	7.5	10.0	8.8
	6	1.31	1.01	0.24	-	-	0.091	47.8	40.9	44.4	7.5	9.0	8.3
	7	1.33	1.01	0.24	-	-	0.084	52.6	41.3	47.0	8.0	10.0	9.0
	8	1.32	1.04	0.20	0.26	0.23	0.079	48.7	42.6	45.7	7.0	9.5	8.3
	9	1.37	1.01	0.26	-	-	0.090	43.0	40.5	41.8	6.0	10.0	8.0
	10	1.46	1.05	0.30	-	-	0.096	55.7	45.2	50.5	8.5	10.5	9.5
温度計測 カラムB	1	1.43	1.07	0.19	0.17	0.18	0.039	52.6	43.9	48.3	7.5	8.5	8.0
	2	1.39	1.06	0.22	-	-	0.054	47.4	37.8	42.6	7.5	9.5	8.5
	3	1.35	1.03	0.19	-	-	0.054	45.7	43.9	44.8	8.0	10.0	9.0
	4	1.41	1.06	0.21	-	-	0.052	45.7	42.2	44.0	7.0	10.0	8.5
	5	1.44	1.12	0.20	-	-	0.059	48.3	40.9	44.6	8.0	10.0	9.0
	6	1.36	1.07	0.19	-	-	0.051	49.1	37.0	43.1	8.5	10.0	9.3
	7	1.51	1.13	0.18	0.21	0.20	0.054	54.3	38.3	46.3	8.0	10.5	9.3
	8	1.53	1.11	0.27	-	-	0.072	51.3	41.8	46.6	7.0	10.0	8.5
	9	1.53	1.07	0.25	-	-	0.058	52.3	45.2	48.8	7.5	11.0	9.3
	10	1.47	1.08	0.41	-	-	0.089	54.3	44.8	49.6	8.0	9.5	8.8

* 全て105 恒量ベースでの値

* (n=2)：再分析結果

* -：分析せず

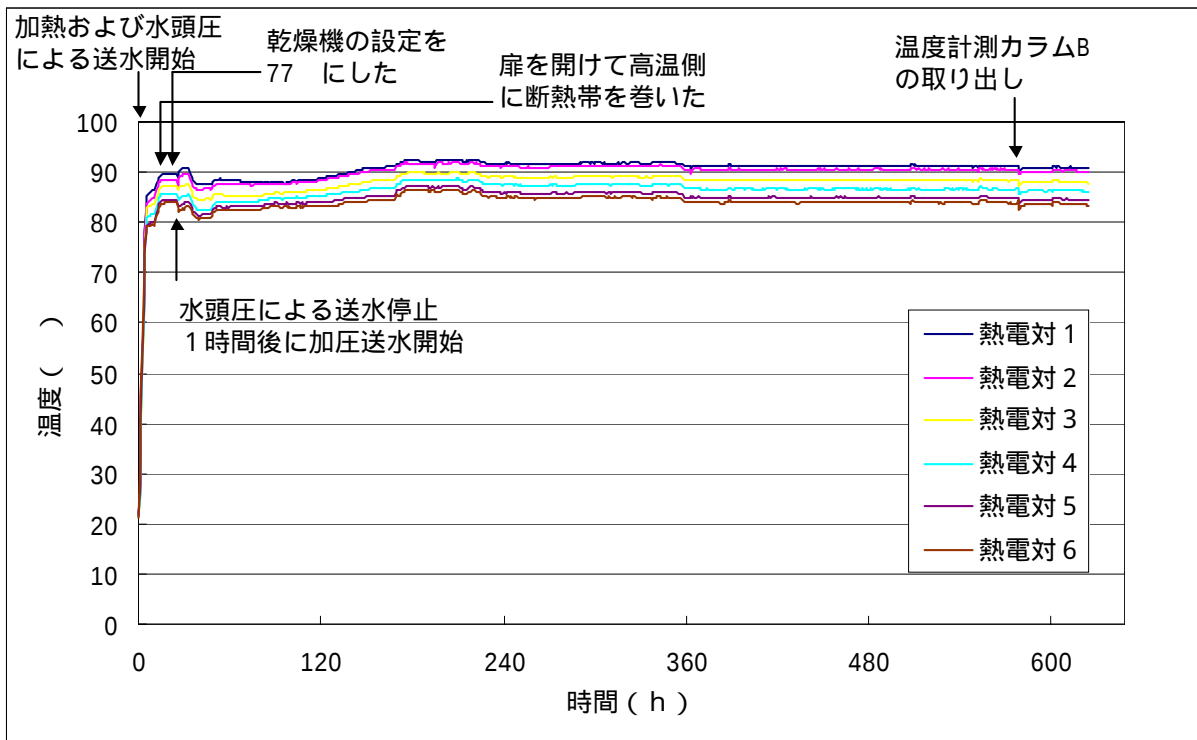


図 4.12(1) 送水試験(2回目)の温度測定結果(カラム A)

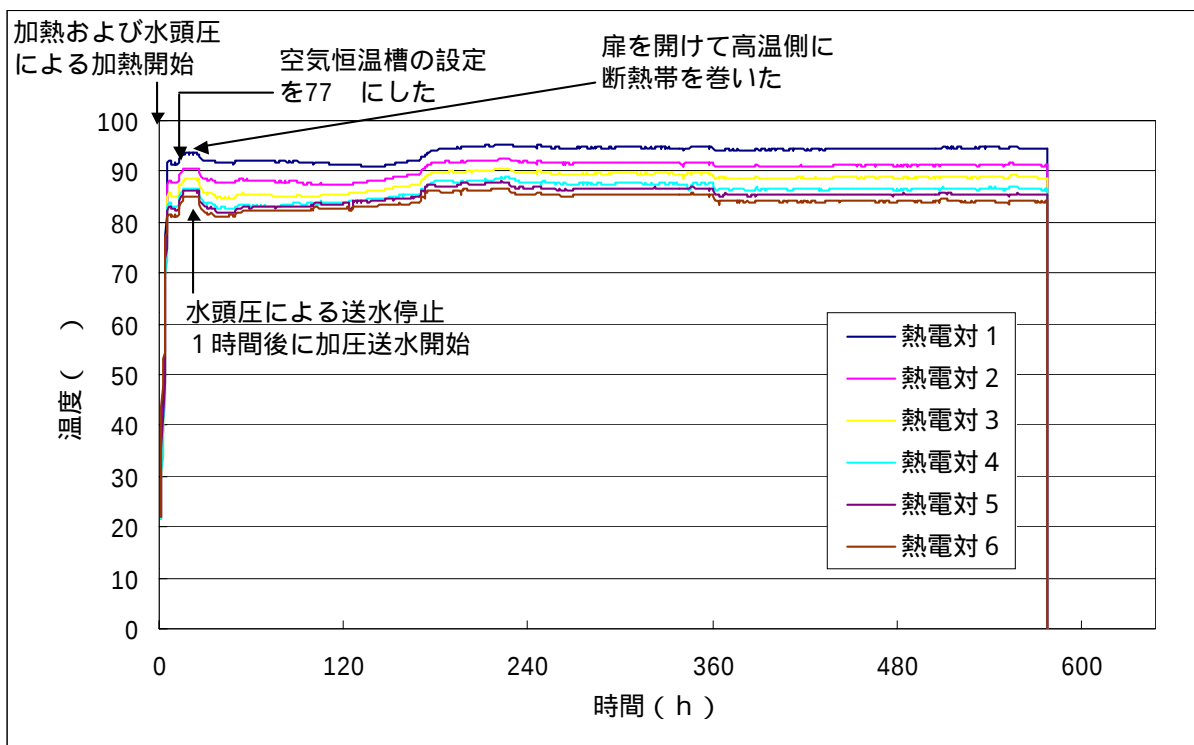


図 4.12(2) 送水試験(2回目)の温度測定結果(カラム B)

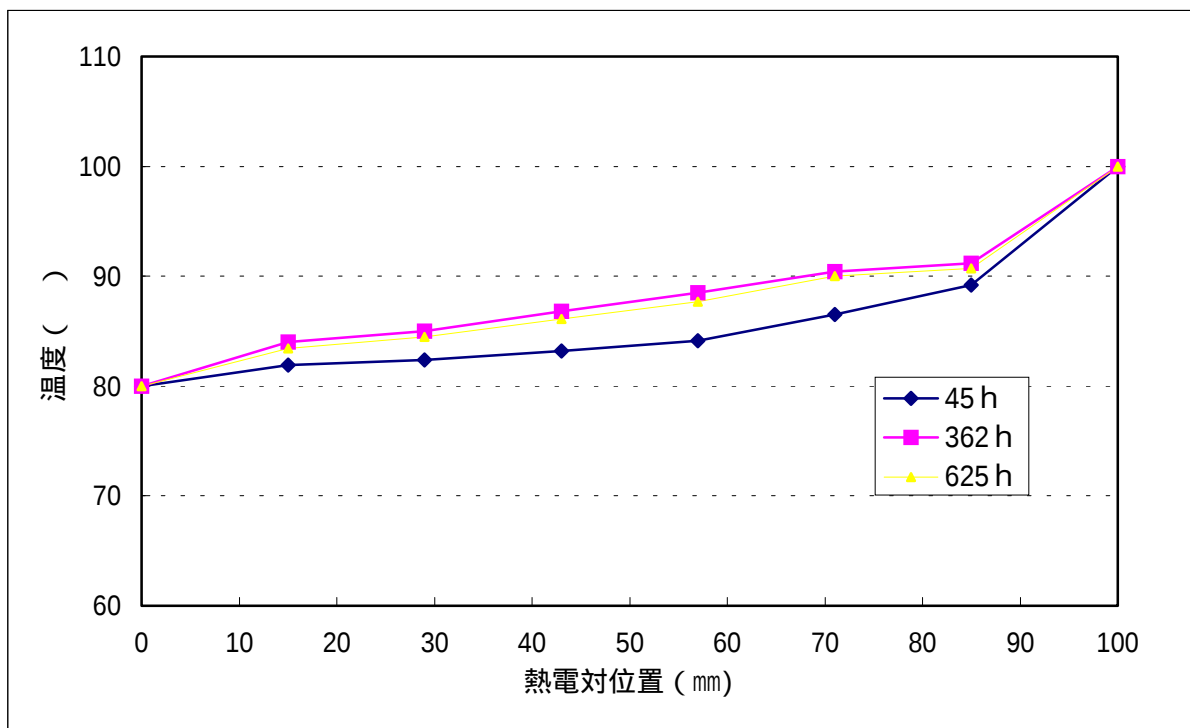


図 4.12(3) 温度計測用カラム A の温度勾配

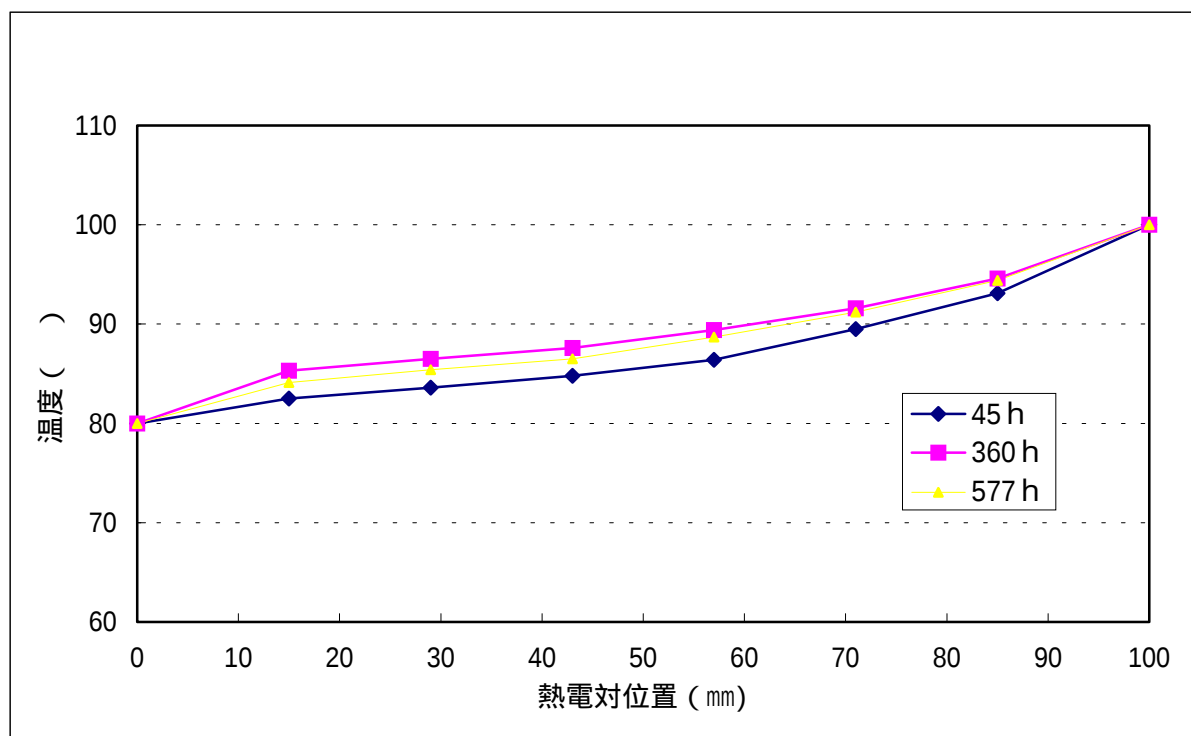


図 4.12(4) 温度計測用カラム B の温度勾配

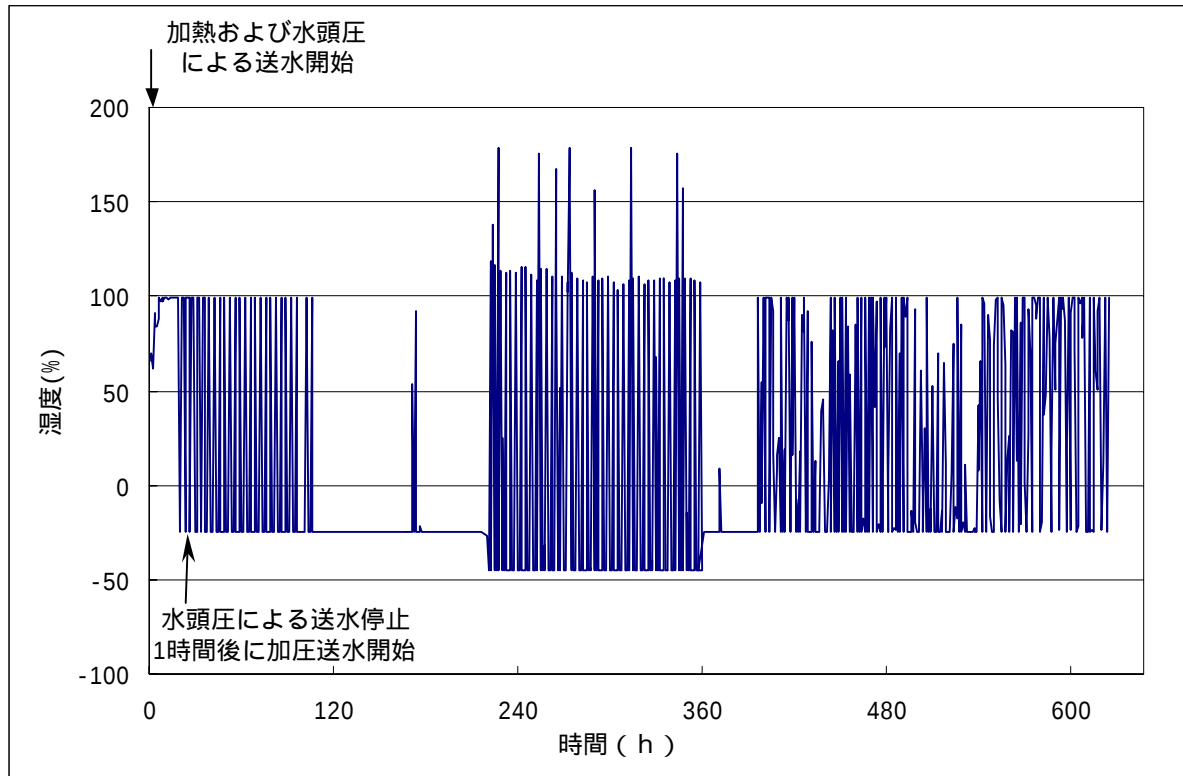


図 4.13 湿度センサー（上段）による測定結果

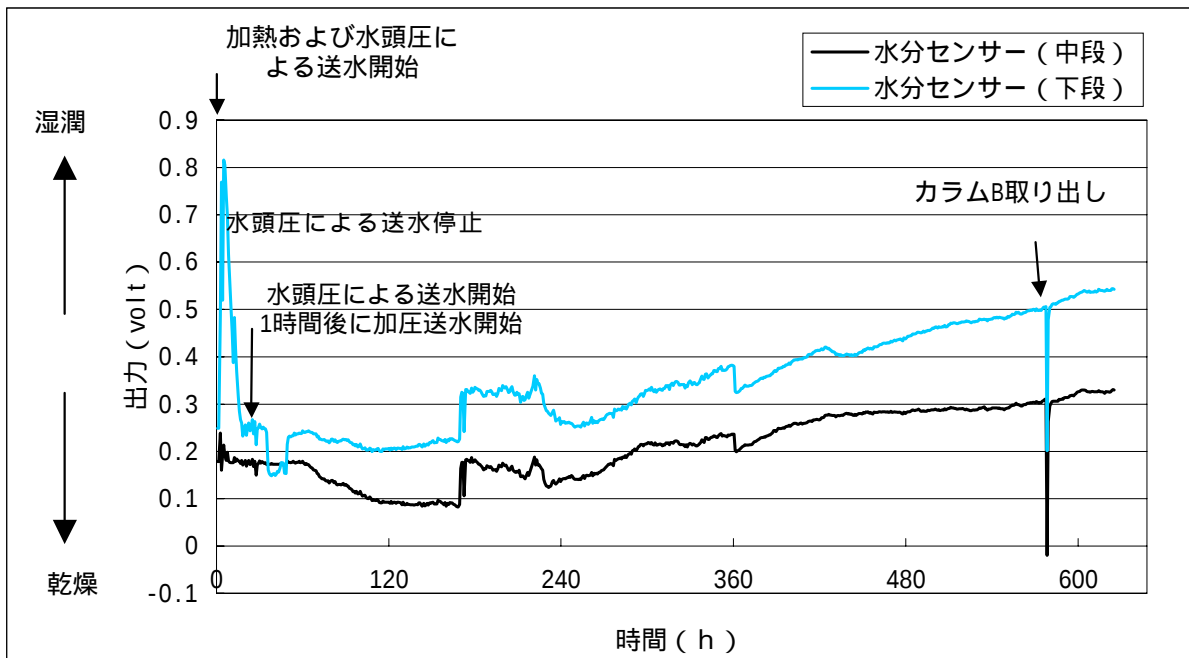


図 4.14 土壌水分センサーによる測定結果

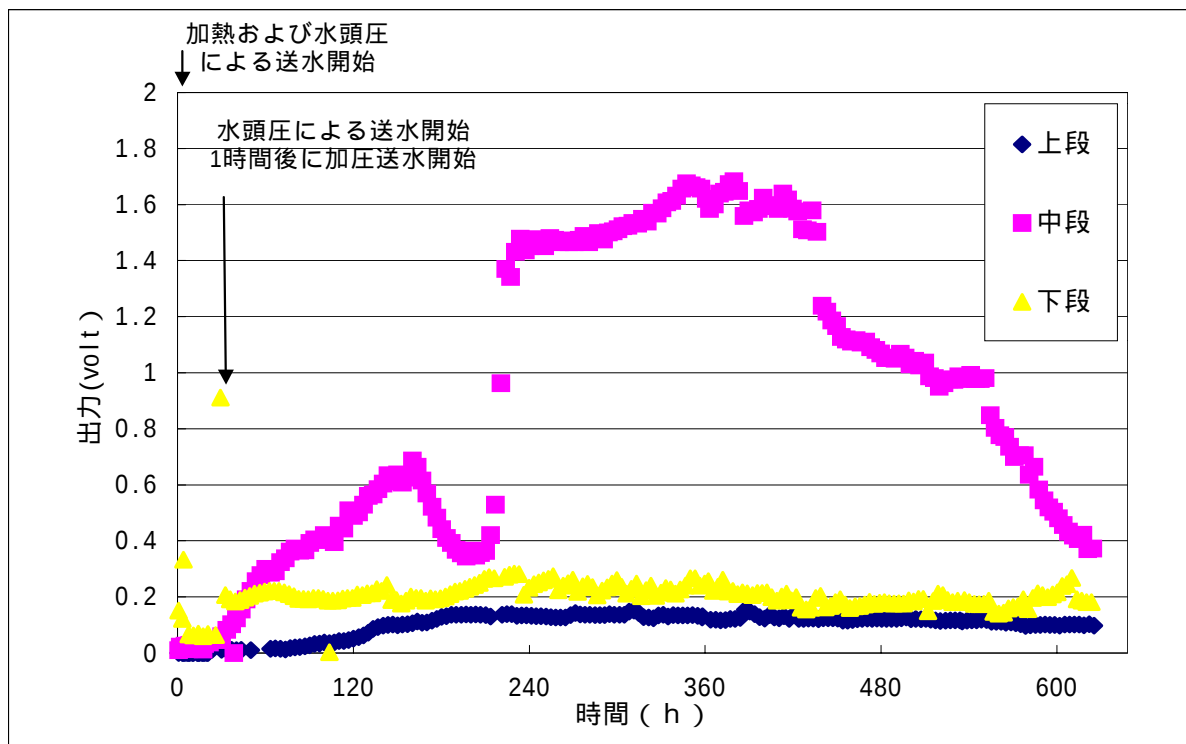


図 4.15 電導度センサーによる測定結果

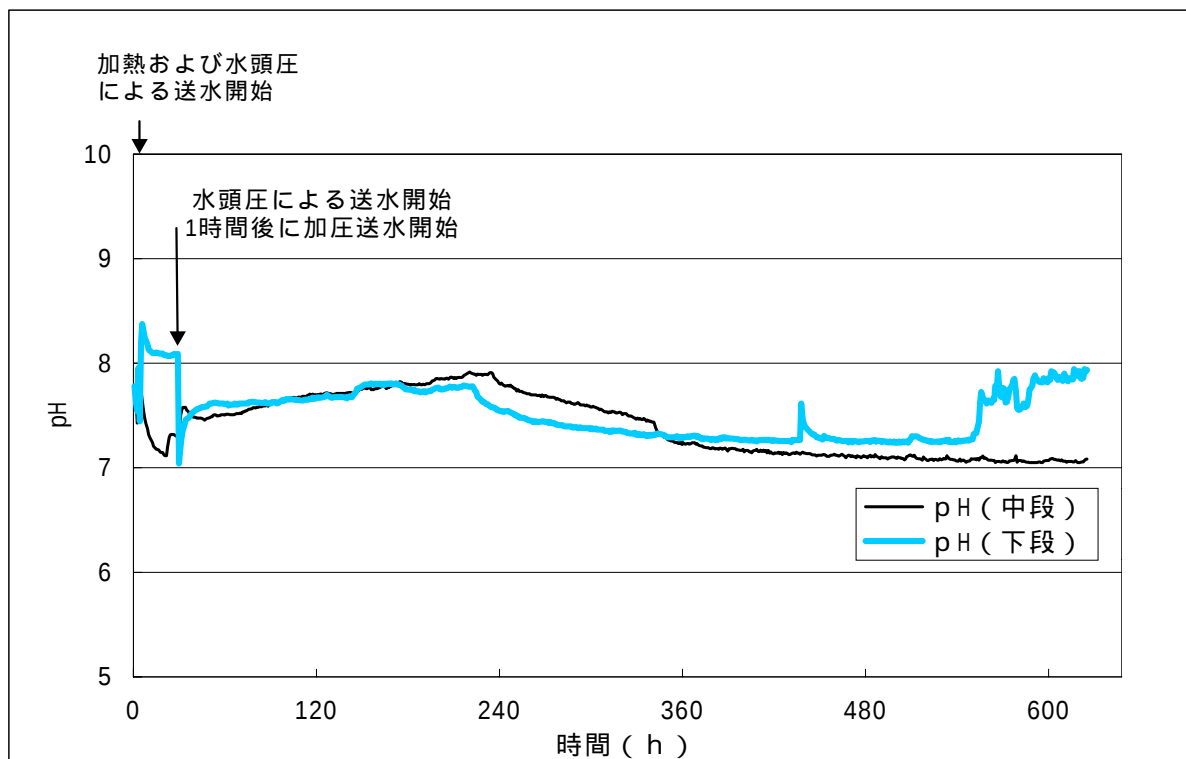


図 4.16 pH センサーによる測定結果

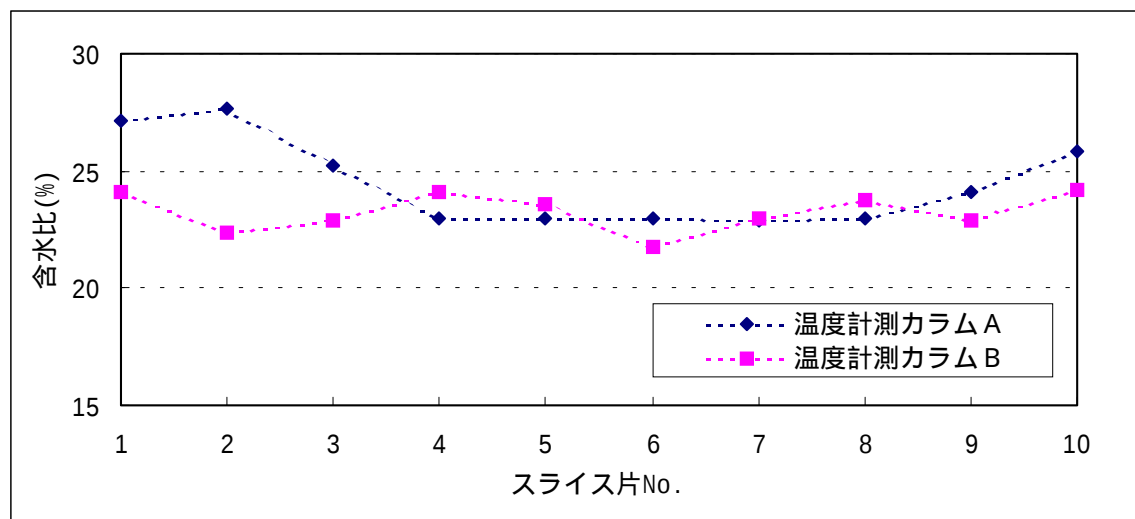


図 4.17(1) 試料の含水比測定結果

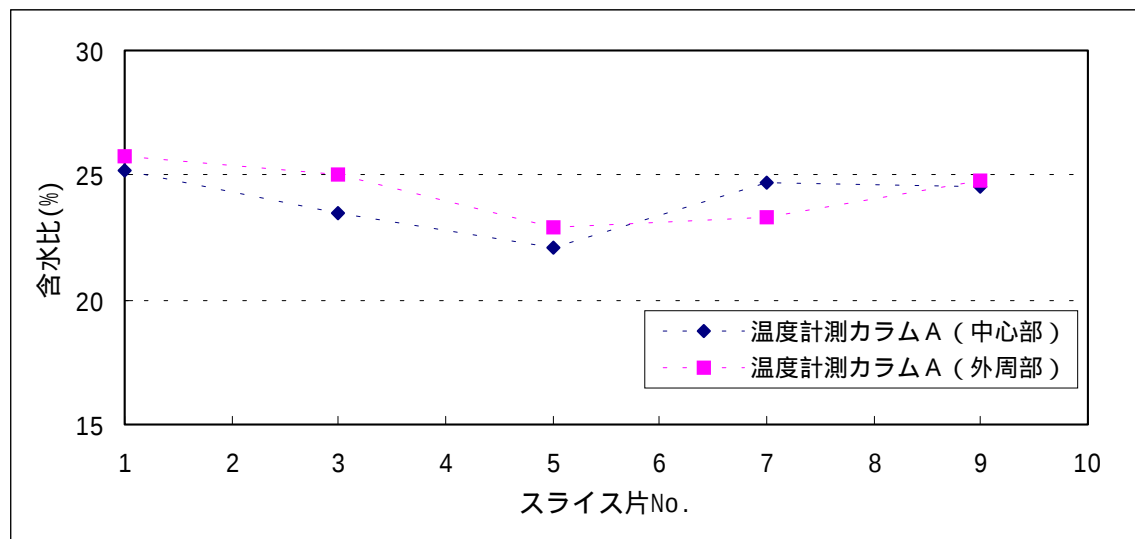


図 4.17(2) 試料の含水比測定結果

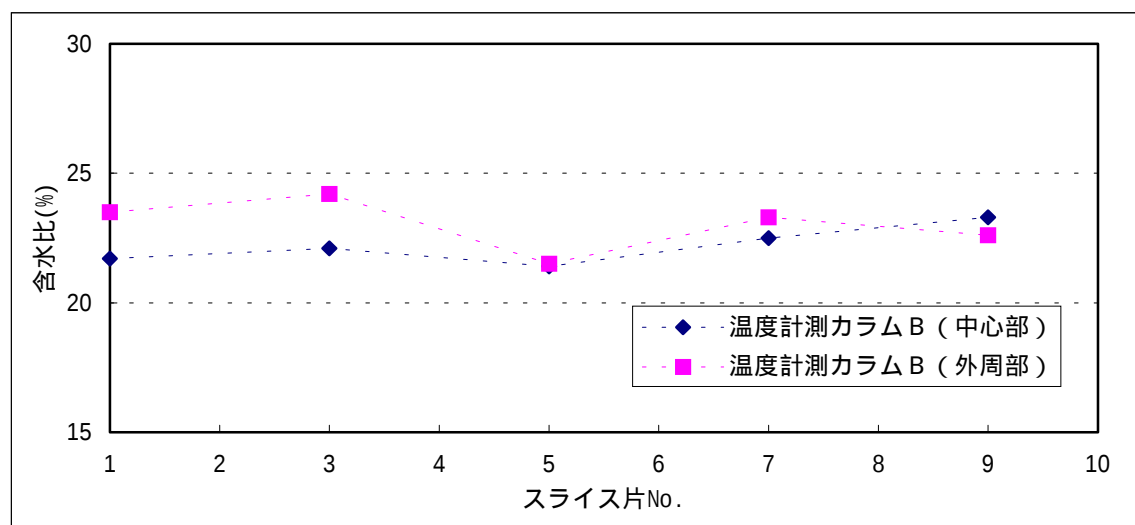


図 4.17(3) 試料の含水比測定結果

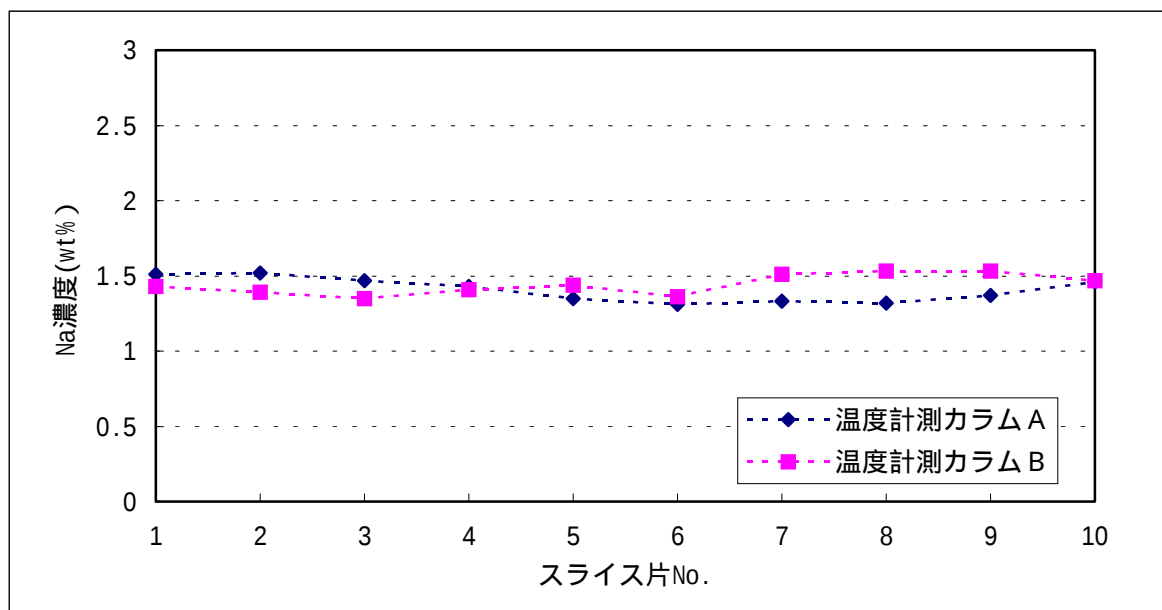


図 4.18(1) 送水試験後の試料中（固相）の Na 分析結果

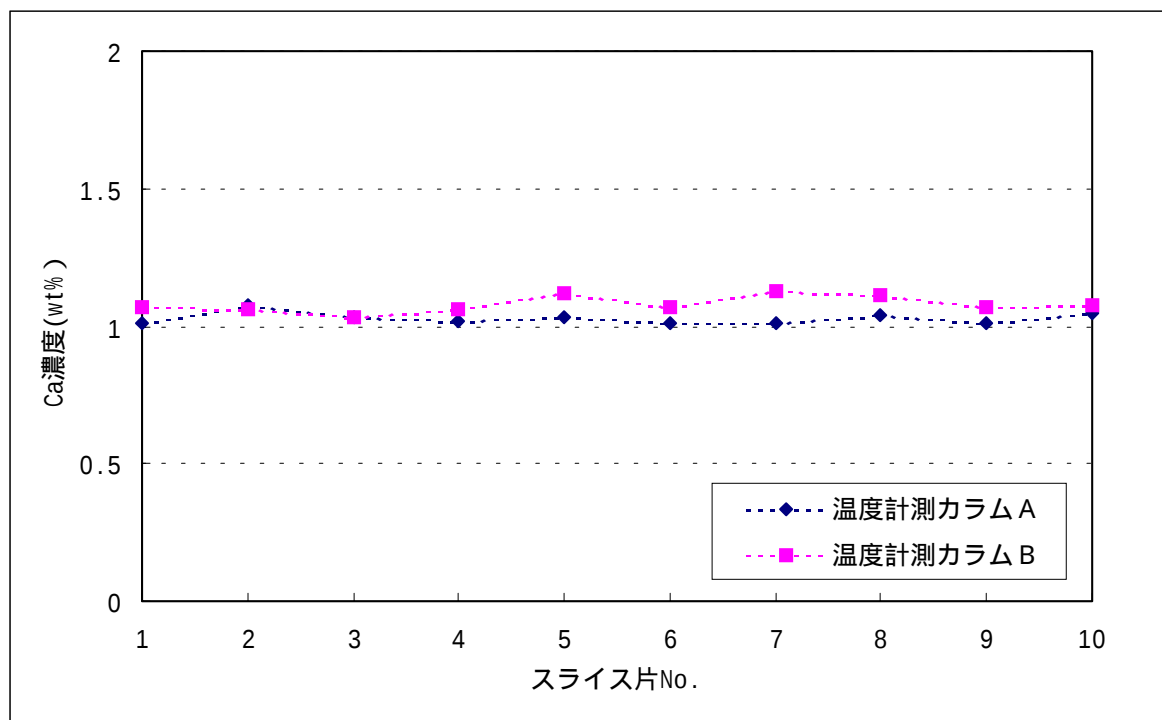


図 4.18(2) 送水試験後の試料中（固相）の Ca 分析結果

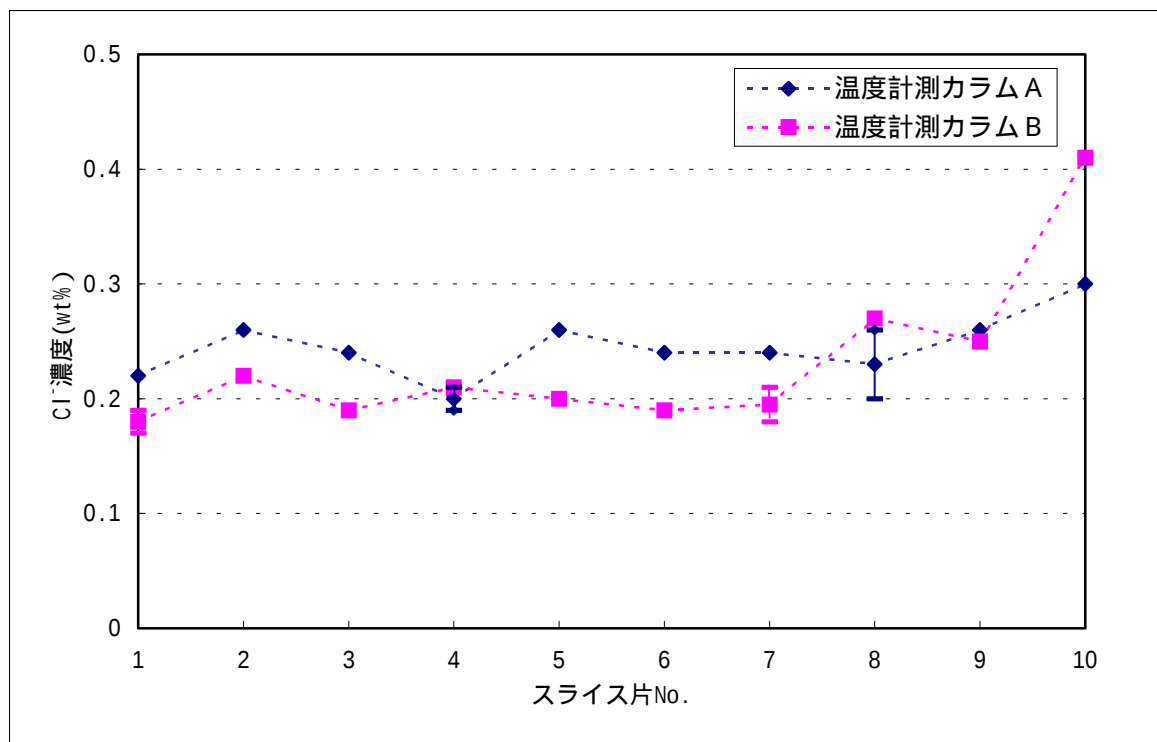


図 4.18(3) 送水試験後の試料中（固相）の Cl^- の分析結果

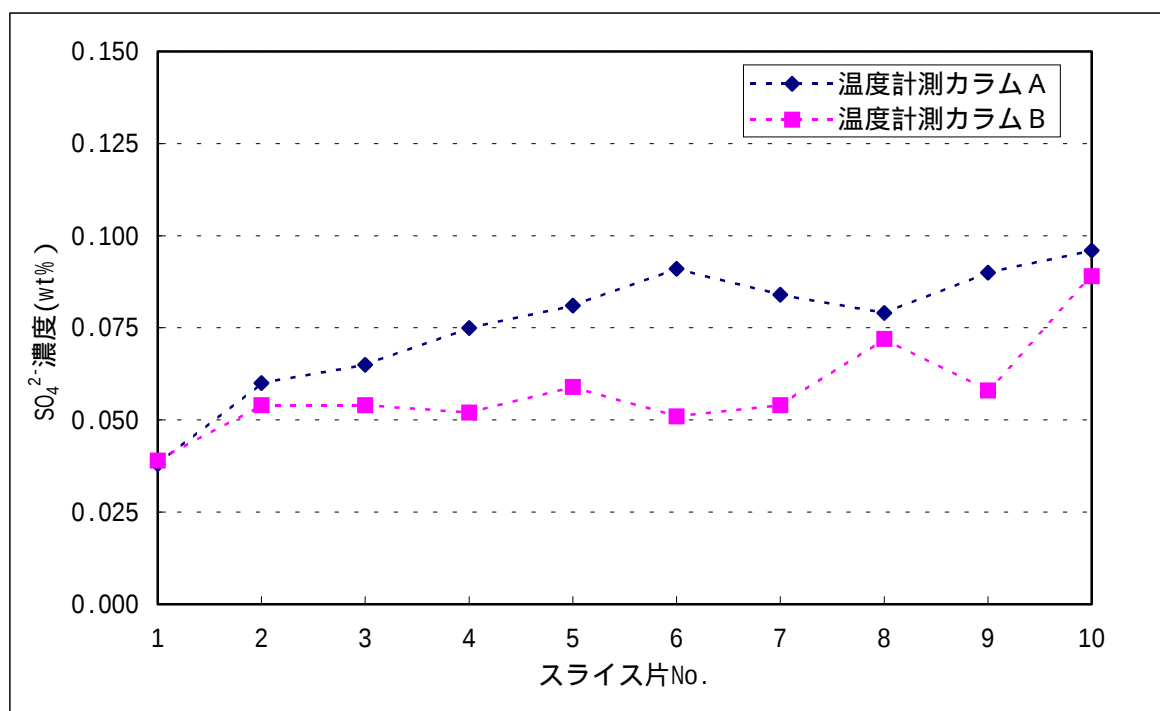


図 4.18(4) 送水試験後の試料中（固相）の SO_4^{2-} の分析結果

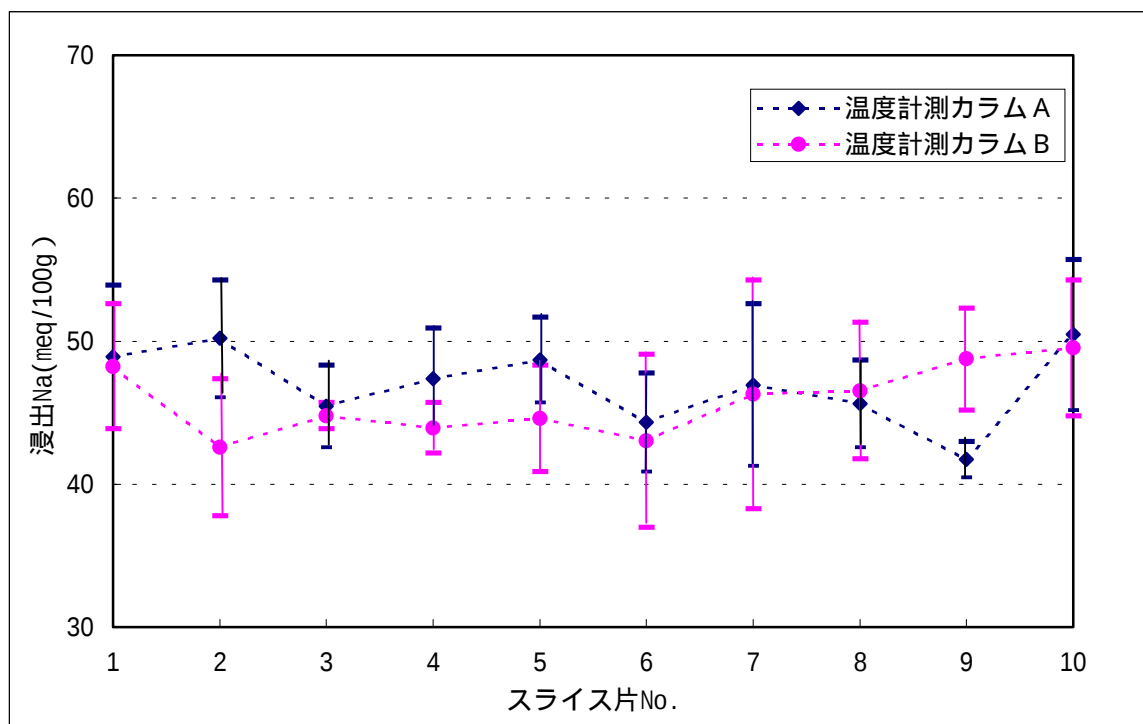


図 4.19(1) 送水試験後の試料の浸出 Na 分析結果

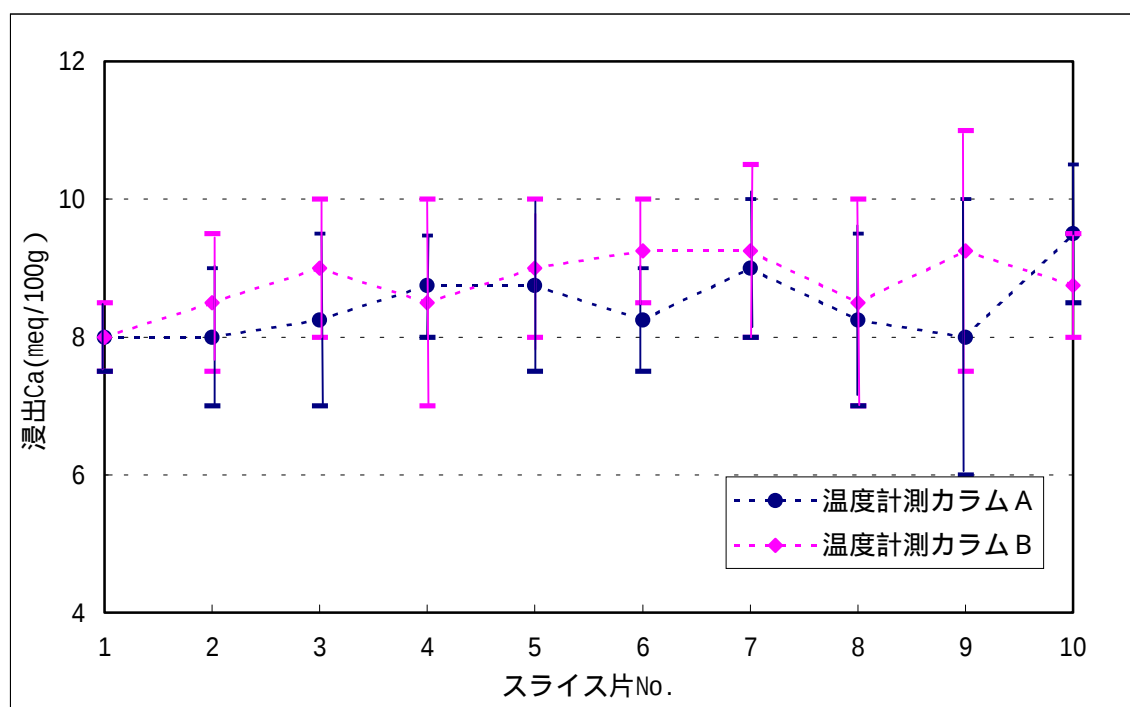


図 4.19(2) 送水試験後の試料の浸出 Ca 分析結果

f . 第 2 回試験から抽出された課題

(a) センサー

・湿度センサー

送水压を下げても、プローブヘッド内部への液の侵入を抑えられない。

・水分センサー

センサー内の圧力媒体（脱気水）を抜いているため、正確な水分量の計測が出来ない。

・電導度センサー

電極に錆が発生し、正確な値を測定できない（電極は SUS 製）。

・pH センサー

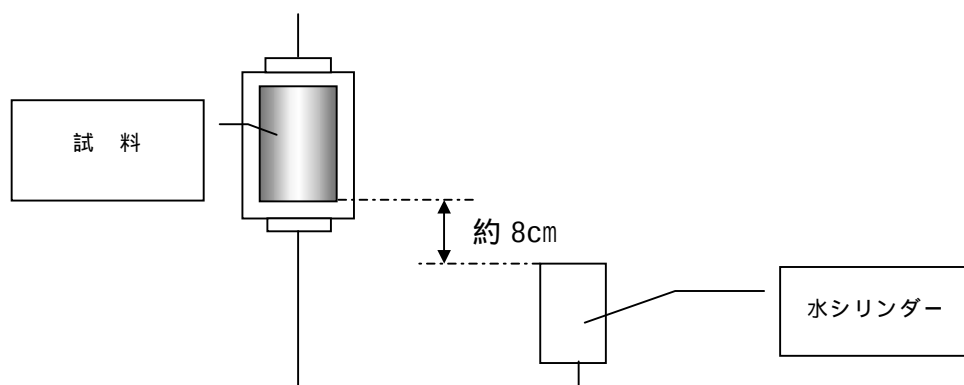
電極の固定（O リングによる固定）位置付近にヒビが入る

ガラス電極内に充填してある塩化カリウム水溶液を含ませたポリマーが乾燥し収縮するため、正確な値が測定出来ない可能性がある。

(b) 装置全体

・水シリンダー

水シリンダーが、カラムより低い位置にあるため、水頭圧による送水が出来ない（本試験では水シリンダーの上に分液ロートを取り付けて水位を上げ、送水を行った）。



・凝縮液回収部

蒸気出側のパイプは、断熱または加熱仕様ではないため、蒸気が冷却器に到達する前に凝縮しパイプ内に溜まる。凝縮液がカラムに流れ込んでいる可能性がある。

4.3 試験結果のまとめと考察

(1) 試験結果の考察

ケイ砂混合ベントナイトの送水を in situ でモニタリングしながら、ケイ砂混合ベントナイトを模擬海水で送水する試験を実施したが、in situ モニタリングでは以下の課題が判明した。

- ・ pH センサーは、高温の試料中で使用すると、センサー内部の水分が試料層へ逸脱するなどして、データが不安定であり、さらに透水圧をかけるとセンサー本体のガラス壁がすべりやすいため試料から押し出されやすいので、保持方法の改善が必要であった。
- ・ 湿度、水分のモニターは、センサー本来の使用環境を越えた条件での使用であったため、いずれのセンサーも満足できる状況ではないと判断された。試験初期には、センサー内部の水分が試料へ移行し、冠水してくると、センサー内部に水が送水するなど、幅広い湿度範囲での使用は困難であった。
- ・ 電導度は、感度調節を行えば、冠水による電導度の増加を検知可能と推定されたが、適用したセンサーには、漏水対策、材質の高温対策等の課題が見出された。これらの改善を施せば、海水を模擬した塩化ナトリウム溶液の送水の in situ モニターの目的にも適用可能であると判断された。

(2) 送水試験結果のまとめ

送水試験を 2 回実施したが、1 回目は、試料に急速に加圧送水したために隘路が発生するなどしたためと考えられる急速送水が生じた。このため 2 回目では、わずかな水頭圧で、まず試料底面を膨潤させ、その後 0.1MPa の低圧で送水させることとした。2 回目の試験においては 577 時間経過後に、冠水の兆候が見られており、この時点でベントナイトが湿潤しているものと推定された。既往の研究では、乾燥密度 $1.8\text{mg}/\text{cm}^3$ の 20mm 厚のベントナイトの拡散では 8 日(192h)経過では飽和に達していないこと、透水圧力 $8\text{kg}/\text{cm}^2$ で密度 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ の 10mm 厚さで定常透水に達するまでに 150 時間程度要していることを考慮すると、100mm 厚さで 600 時間

で冠水状態となっていることは常温に比較して、早い拡散、早い透水と考えられる結果であった。高温で、温度勾配をかけた試料に対する透水挙動を詳細に確認する必要があると考えられた。

In situ センサー測定結果では、pH センサーの結果が、およそ 500 時間後に海水の送水が進んだと示される結果であったため、解体して分析評価したが、実際には、すでに大半が膨潤していることを示す結果であった。

また、解体して塩分等を測定した結果では、当初想定した塩分のウォーターヘッドでの濃化を観察するには至らなかった。センサーの改良などとともに、温度勾配下における透水挙動を明らかにし、その結果に基づく一定の時間、送水させるなどして塩分挙動を評価するなどの対策が必要と考えられた。

5. おわりに

ケイ砂混合ベントナイトに温度勾配をかけた状態で、海水を送水させてその塩分移動・拡散・濃化を観察することを目的として試験を実施したが、ケイ砂混合ベントナイトの送水のモニターが十分ではなく、塩分の濃化を観察するには至らなかった。

モニターに適用したセンサー類の課題として、湿度センサーでは湿潤時の水浸入による異常、水分センサーでは湿潤までの乾燥状態での適用性の欠如、電導度センサーでは印加電圧と溶液塩分による腐食進展による測定値変動、pH センサーでは乾燥時のガラス隔膜からの水分逸失による不安定、等の問題が認められた。初期の高乾燥状態から湿潤状態までのはばひろい状態のモニターを意図したが、課題の提起にとどまった。湿度、水分については、水の物性を利用するのではなく、電導度変化などセンサーの変質を引き起こさないセンサーの開発・適用が必要と推定された。また、その電極についても塩濃度の変化を想定して耐塩水の貴金属材料等の適用も検討の対象と考えられる。

また高温で発生する水分の経路での凝縮が認められたことから、凝縮水の捕捉についても改善の余地が残されている。

以上のような課題から、塩分のベントナイト湿潤ウォーターヘッドにおける濃化現象を確認するためには、高温温度勾配下におけるケイ砂混合ベントナイトについて送水挙動をまず明らかにすること、高温・塩分共存下で適用できるようセンサーの改善をはかること、などの検討を重ねていく必要があった。

6. 参考文献

- 1) 三原守弘：“ナトリウム型ベントナイトのカルシウム型化に伴う透水係数及び核種の実効拡散係数の変化”，サイクル機構技報，No.6，p.61，2000．
- 2) Ola Karnland and Roland Pusch：“Cementation phenomena of importance for the performance of smectite buffers in HLW repositories”，Radioactive-Waste Management and Environmental Remediation,p.853，1995．
- 3) 柴田雅博，広瀬郁朗，鈴木英明，山形順二，寺門一馬：“緩衝材の特性試験(1)”，PNC TN8410 92-057，1992．
- 4) 柴田雅博，山形順二，鈴木英明：“緩衝材の特性試験(2)”，PNC TN8410 92-169，1992．

付 録

含水比測定データ

付表１ カラム A から取り出した試料の含水比測定データ [送水試験（１回目）]

スライス片 No.	乾燥前重量(g)	乾燥後重量(g)	吸着水重量(g)
1	7.825	6.260	1.565
2	8.217	6.631	1.586
3	8.584	6.927	1.657
4	7.861	6.322	1.539
5	8.182	6.631	1.552
6	8.130	6.610	1.520
7	8.062	6.552	1.510
8	7.690	6.222	1.467
9	7.964	6.401	1.563
10	8.082	6.379	1.703

付表２ カラム B から取り出した試料の含水比測定データ [送水試験（１回目）]

スライス片 No.	乾燥前重量(g)	乾燥後重量(g)	吸着水重量(g)
1	8.085	6.532	1.553
2	8.318	6.744	1.575
3	8.120	6.605	1.515
4	7.926	6.468	1.458
5	8.297	6.812	1.485
6	8.188	6.704	1.485
7	8.245	6.797	1.448
8	8.383	6.820	1.563
9	8.311	6.726	1.585
10	8.357	6.625	1.733

付表3 カラムAから取り出した試料の含水比測定データ [送水試験(2回目)]

スライス片 No.	乾燥前重量(g)	乾燥後重量(g)	吸着水重量(g)
1	5.007	3.939	1.067
2	5.927	4.642	1.285
3	6.165	4.925	1.241
4	5.972	4.856	1.116
5	6.039	4.910	1.129
6	7.002	5.694	1.309
7	7.965	6.482	1.483
8	5.231	4.254	0.977
9	7.611	6.134	1.477
10	7.218	5.738	1.479

付表4 カラムAから取り出した試料の含水比測定データ [送水試験(2回目)]

スライス片 No.	乾燥前重量(g)	乾燥後重量(g)	吸着水重量(g)
1 - 中心部	0.9604	0.7673	0.1931
3 - 中心部	1.9415	1.5724	0.3691
5 - 中心部	1.7082	1.3992	0.3090
7 - 中心部	1.8196	1.4590	0.3606
9 - 中心部	2.8663	2.3021	0.5642
1 - 外周部	1.4896	1.1839	0.3057
3 - 外周部	2.4166	1.9334	0.4832
5 - 外周部	1.6946	1.3787	0.3159
7 - 外周部	1.8038	1.4629	0.3409
9 - 外周部	2.3755	1.9041	0.4714

付表5 カラムBから取り出した試料の含水比測定データ [送水試験(2回目)]

スライス片 No.	乾燥前重量(g)	乾燥後重量(g)	吸着水重量(g)
1	4.506	3.632	0.874
2	6.015	4.916	1.099
3	5.986	4.871	1.115
4	5.212	4.201	1.011
5	6.858	5.549	1.309
6	6.682	5.487	1.195
7	6.902	5.612	1.290
8	5.170	4.177	0.993
9	6.919	5.631	1.288
10	5.985	4.819	1.165

付表6 カラムBから取り出した試料の含水比測定データ [送水試験(2回目)]

スライス片 No.	乾燥前重量(g)	乾燥後重量(g)	吸着水重量(g)
1 - 中心部	1.5676	1.2879	0.2797
3 - 中心部	1.8374	1.5051	0.3323
5 - 中心部	2.7167	2.2371	0.4796
7 - 中心部	2.2526	1.8385	0.4141
9 - 中心部	2.1855	1.7723	0.4132
1 - 外周部	2.0181	1.6338	0.3843
3 - 外周部	2.3157	1.8644	0.4513
5 - 外周部	2.2991	1.8919	0.4072
7 - 外周部	2.1063	1.7077	0.3986
9 - 外周部	1.8799	1.5331	0.3468