高温・高圧下における生産性障害に関する実験的研究

田中 彰一*・宮沢 政*・岡田 徹**・西 浩介*

(昭和62年9月22日受付, 63年1月29日受理)

Laboratory Study on Formation Damage at High Temperatures and Pressures

By

Shoich TANAKA, Masashi MIYAZAWA, Toru OKADA and Kosuke NISHI

Abstract: Three Kinds of experiments on formation damage are carried out at simulated in-situ geothermal conditions. The most severe test conditions are of Temperature of 250°C and pressure of 8.1 MPa. Bentonite and sepiolite muds are used throughout the tests. The first test is measurement of mud properties at room conditions after aging for 24 hours. The second test is measurement of rheological properties by a capillary tube. Rapid gelation of both muds is observed above 200°C. The third test is measurement of permeability recoveries of models invaded by muds. As simulated formation models, slits packed with sand grains and Berea sandstone cores are used. Permeability impairment of the models are measured after aging for 24 hours. Formation damage appears above 150°C in some cases. Severe cases of permeability recoveries below 10% of original values are observed above 200°C.

はじめに

泥水等による生産性障害は石油技術者にとっても地熱技術者にとっても長年の懸案問題であり, その対策として種々な掘削・仕上流体が開発されてきている。地熱層は石油層よりも遥かに高温であり, 泥水等の高温による劣化も激しく大きな障害の発生が懸念される。生産性障害の大きさは地層の特性, 掘削・仕上流体の性質および掘削・仕上技術によって影響を受けるものであり, 実験室で再現することは困難である。しかし模擬地層に対する生産性障害の大きさの実験は実際の現象を考察する際の補完的なデータを提供するものと考えられる。模擬地層として割れ目型と多孔質型とを選び, 温度250°Cまでの範囲で実験を行った。これに関連して高温高圧下で浸透率を測定する手法も開発した。また高温高圧下で養生した泥水の性質, および毛管粘度計による高温高圧下での泥水の流動性の測定も行い, 生産性障害との関係を考

察した。

1. 実験装置

本実験は高温・高圧下における泥水の流動性の測定と模擬地層に対する生産性障害の程度を測定することを主たる目的とし, 補足的実験として高温養生による泥水の性質の変化を測定した。これらは基本的に同一の装置を使用しているが, 図1に示す生産性障害測定のための機器配置で概要を説明する。配管は内径2.2mmの鋼管である。電気炉に入る流体は5のリボンヒーターで予熱され, 電気炉内の長さ約4mまたは8mの予熱管で所定の温度にまで加熱されてコアホルダーに入る。電気炉より出てくる流体は6の水冷却器で室温まで下げられて2の水タンクに入る。高温下の水や泥水の沸騰を防ぐため, 水タンクの上部より測定温度における水の飽和圧力の2倍の圧力を3の窒素ボンベから背圧力として掛けておく。浸透率および毛管粘度計による流動性の測定の際には, 水タンクの圧力は流体の流入により上昇するが, 13のレギュレータバルブで一定に維持する。予熱管の長さは計

* 東京大学工学部資源開発工学科

** 現在出光石油開発株式会社 (元東京大学工学部大学院生)

図1 生産性障害実験装置概要。

1: コアホルダー, 2: 水タンク, 3: 窒素ボンベ, 4: 定流量ポンプ, 5: リボンヒーター, 6: 水冷却器, 7: 差圧計, 8: 圧力変換器, 9: 増幅器, 10: レコーダー, 11: 電気炉, 12: 温度計, 13: レギュレータバルブ。

算および温度測定により4 m ではぼ所定の温度に達してコアホルダーに入ることを確かめたが、実験後半では余裕を見て8 m とした。模擬地層はコアホルダーの中心に置かれているが、コアとゴムスリーブを密着させるため、あるいは上下の金具とのシールを保つために、コアホルダー外筒と模擬地層の間隙には背圧力に2 MPaを加えたものを封圧力として掛けた。

泥水流動性の測定の際には図1の1のコアホルダーを内径0.8mm、長さ2 mの毛管で置き換えた。また、2のタンク間の配管も次のように変更されている。この実験に使用した定流量ポンプは泥水用ではないので、水タンクの2本（仮にaとbとする）を送泥用とする。aのタンクには下部に四塩化炭素、上部には水を入れて置く。bのタンクには泥水を入れ、底部はaのタンクの底部とつながっている。aのタンクに定流量ポンプで水を送り、bのタンクの上部より泥水を送り出す方式とした。

泥水の高温養生実験ではコアホルダーを養生容器に置き換えて24時間養生し、室温まで冷却後API規格にしたがって性質を測定した。

生産性障害の程度の測定には割れ目型と多孔質型の二つの地層モデルを用いた。

割れ目型モデルは地層内の割れ目を想定して、鉄製のスリット内に砂粒を充填したものである。スリットの幅は34.4mm、長さは128mmである。高さは5 mm と3 mmの二種類がある。前者には平均粒径1.07mmの五色砂を用い、水浸透率の範囲は $1,190\text{--}1,650\text{ }\mu\text{m}^2$ で孔隙率は約40%である。後者には平均粒径0.59mmの

オタワ砂を用い、水浸透率の範囲は $160\text{--}230\text{ }\mu\text{m}^2$ で孔隙率は約40%である（表4と5参照）。スリット壁面を考慮した比表面積は次式で与えられる。

$$S = S_1 + 2 / \{(1 - \phi) b\}$$

$$S_1 = 6 / d_p$$

ここで、 S : スリット壁面を考慮した比表面積, $1/\text{m}$

S_1 : 平均粒径 d_p (m) の砂粒体積当たりの比表面積, $1/\text{m}$

b : スリットの高さ, m

ϕ : 孔隙率

スリット壁面の影響は5 mm スリットの場合には $S_1 = 5,607$, $S = S_1 + 666 = 5,273$ であり、3 mm スリットの場合には $S_1 = 10,169$, $S = S_1 + 1,111 = 11,280$ であり、比表面積については10%程度である。Kozeny-Carmanの式によれば浸透率は比表面積の -2 乗に比例する。したがってスリット壁面の浸透率に及ぼす影響は20%程度である。割れ目型モデルはこの程度壁面の影響を受けており、この点が多孔質型モデルと異なっていると言える。

多孔質型モデルはペレア砂岩の円筒形コアである。直径35mm長さ118mmである。粘土鉱物の影響を除くためコアを 800°C で6時間加熱処理する。コアの側面にシリコンラバーペーストを塗布してからゴムスリーブに挿入する。ゴムスリーブ表面にも同様にペーストを塗布する。コアの水浸透率の範囲は $0.83\text{--}2.5\text{ }\mu\text{m}^2$ で孔隙率の範囲は20–23%である（表6参照）。

流動実験においては流量は定流量ポンプの吸い込み口で計測する。電気炉内の測定部は高温・高圧に成ってい

表1 主要機器の仕様

Item/specifications
Electric furnace, max. temperature : 300°C, max. input : 4 kW
Measurement at room conditions Pump (2 sets), NP-D-321, 0.78-7.8cm ³ /min., 200kgf/cm ² Pressure transducer, PD-100GA max. pressure : 0.1kgf/cm ² , max. line pressure : 30kgf/cm ²
Measurement at high temperature and pressure Pump, NP-DX-16, 0.16-16cm ³ /min., 200kgf/cm ² Pressure transducer, for slit models, PDU-500GA max. pressure : 0.5kgf/cm ² , max. line pressure : 300kgf/cm ² Pressure transducer, for matrix models, PDU-2KA max. pressure : 2.0kgf/cm ² , max. line pressure : 300kgf/cm ²

Pump : Nihon Seimitsu Kagaku Co.

Pressure transducers : Kyowa Dengyo Co.

表2 泥水組成

Ingredients/Mud No.		M-11	M-12
Bentonite (VS),	%	4.0	1.0
Sepiolite (Thermogel),	%	—	3.0
Modified lignitic compound (Telnite BH),	%	1.0	—
Modified tannin compound (Telnite SMQ),	%	1.0	—
Modified polyacrylate (Hi-flow),	%	1.0	1.0
High temperature stable polymer (Hostadrill),	%	—	0.3
Caustic soda,	%	0.1	0.1

() : Product tradename

るから、密度 (ρ) が変化し、流量 (q) も異なるが、質量流量は一定として測定部における流量を求める。

$$\rho_1 * q_1 = \rho_2 * q_2$$

ここで、添字 1 と 2 はそれぞれ定流量ポンプ吸い込み口と電気炉内測定部を表す。水の密度は蒸気表から求めた。泥水の密度の温度による変化は水のそれに比例すると仮定した。

実験に使用した主な機器の仕様を表 1 に示す。

2. 高温・高圧下における泥水の性質

本実験においては表 2 に示す地熱用の標準組成の泥水二種類を用いた。一つはベントナイトを 4 % 含む泥水 (資料番号 M-11) であり、他はセピオライト 3 % とベントナイト 1 % とを含む泥水 (資料番号 M-12) である。泥水密度は 1,020–1,030kg/m³ である。

2.1 高温養生後の泥水の性質

高温養生条件と養生後室温において測定した泥水の性

図2 毛管粘度計と高温高圧 V-G メーターによる温度と泥水の見掛け粘度の関係。ベントナイト泥水 (M-11) 使用。

質を表 3 に示す。特徴的な点は以下のようなものである。

ベントナイト泥水 (泥水 M-11) : 養生温度が上がると粘度が増加する。特に 250°C では急増している。それと共に降伏値と 10 分ゲルストレングスも急増している。pH は中性値まで低下しているが、濾過水量はほとんど同じである。温度が 200°C を越えるとベントナイトが凝集し始めると考えられる。

セピオライト泥水 (泥水 M-12) : 泥水 M-11 とは異なった挙動を示している。養生温度が上がると粘度と降伏値は減少する傾向を示し、特に 250°C では顕著である。pH 値は低下しているがアルカリ性の範囲に留まっている。濾過水量は増加の傾向にあり、高温では粘土の凝縮が起こっていると考えられる。

2.2 毛管粘度計による高温・高圧下における流動性

生産性障害の実験において浸透率回復状態を測定する際には、泥水は地層モデル内を流動する。泥水の性質としては高温養生後のものの他に高温・高圧下での流動性

表3 24時間養生後の泥水の性質 (冷却後室温で測定)

M-11 mud (bentonite mud)

Items/Test No.	1	2	3	4
Aging temperature, °C	20	150	200	250
Aging backpressure, MPa	0.1	2.1	4.1	8.1
Mud density, kg/m ³	1034	1030	1034	1033
Apparent viscosity, mPa·s	4.8	6.8	8.5	16.0
Plastic viscosity, mPa·s	4.0	6.0	7.5	13.0
Flow behavior index	0.69	0.84	0.81	0.76
Consistency index, Pa·s ⁿ	0.04	0.02	0.03	0.09
Yield value, Pa	0.72	0.72	0.96	2.87
Gel strength, 0 min., Pa	0.48	0.48	0.48	0.57
Gel strength, 10 min., Pa	0.72	0.57	0.57	0.72
pH	10.6	8.2	7.0	7.1
Filtrate, cm ³	10.7	11.8	10.0	9.8
Filter cake thickness, mm	1.0	1.0	1.0	1.0

M-12 mud (sepiolite mud)

Items/Test No.	1	2	3	4
Aging temperature, °C	20	150	200	250
Aging backpressure, MPa	0.1	2.1	4.1	8.1
Mud density, kg/m ³	1024	1023	1021	1022
Apparent viscosity, mPa·s	7.0	6.1	6.0	3.5
Plastic viscosity, mPa·s	5.8	5.2	5.0	3.0
Flow behavior index	0.73	0.79	0.78	0.70
Consistency index, Pa·s ⁿ	0.05	0.03	0.03	0.03
Yield value, Pa	1.15	0.86	0.96	0.48
Gel strength, 0 min., Pa	0.48	0.38	0.38	0.38
Gel strength, 10 min., Pa	0.58	0.48	0.48	0.48
pH	11.6	9.6	9.5	9.2
Filtrate, cm ³	12.7	13.1	14.7	18.3
Filter cake thickness, mm	0.8	0.9	0.7	0.8

図3 毛管粘度計により測定された高温下で放置された泥水の流動開始時の挙動。放置時間20分, ペントナイト泥水 (M-11) 使用。

図4 毛管粘度計により測定された高温下で放置された泥水の流動開始時の挙動。放置時間24時間, ペントナイト泥水 (M-11) 使用。

図5 毛管粘度計により測定された高温下で放置された泥水の流動開始時の挙動。放置時間20分, セピオライト泥水 (M-12) 使用。

図6 毛管粘度計により測定された高温下で放置された泥水の流動開始時の挙動。放置時間24時間, セピオライト泥水 (M-12) 使用。

が必要である。ゆえに毛管粘度計を用いて高温・高圧下における流動性を測定した。

泥水粘度の温度による変化の概要を知ることと毛管粘度計の検定を兼ねて, 市販されている高温・高圧 V-G メーター (Funn model 50c) との比較を行った。ベ

ントナイト泥水（泥水 M-11）の両粘度計で測定した温度による見掛け粘度の変化を図2に示す。V-Gメーターのずり速度は $102.2s^{-1}$ ，毛管粘度計のそれは $1022s^{-1}$ と異なるので測定値は一致していないが，類似の傾向を示している。約200℃までは温度の上昇につれて粘度は低下する。それ以上の温度では粘度が急激に増加している。

毛管粘度計による測定手順は次のようである。所定の温度で静置されている毛管粘度計内の水を泥水で置換し，20分間あるいは24時間高温・高圧下に静置した後，流動を開始し，時間による圧力損失の変化を測定する。その例を図3から図6に示す。電気炉内で泥水は予熱管を経て毛管に入る。毛管2mの内容量は約 $1cm^3$ ，予熱管4mの内容量は約 $15.2cm^3$ ，8mの場合は約 $30.4cm^3$ である。図3の場合では予熱管の長さは4m，他は8mである。

図3の場合にはベントナイト泥水（M-11）を20分間静置した後の流動挙動である。静置することによるゲル化は200℃では明らかではないが，220℃では初期の立ち上がりにはゲル化の発生が示されている。250℃では予熱管内に在った泥水も含めてゲルが破壊され難いことが測定値の凹凸で示されている。測定に使用した流量では，温度250℃で予熱管内の泥水が出終わるまで約17分掛かる。それ以後の泥水は流動開始の時には電気炉外にあったものである。温度250℃では測定値が落ち着くまでに20分ぐらい要している。この安定している部分から連続的に流動している場合の粘度が求められる。

毛管内のずり応力（ τ , Pa），ずり速度（ v , s^{-1} ）および見掛け粘度（ μ_a , $mPa \cdot s$ ）は次式で表される。

$$\tau = r \Delta p / (2l)$$

$$v = 4q / (\pi r^3)$$

$$\mu_a = \tau / v$$

ここで， r ：内半径 m， l ：管の長さ m， q ：流量 m^3/s ， Δp ： l 間の圧力損失 Pa である。

図3の場合ずり速度は $v=233s^{-1}$ ，ずり応力は $\tau=10^{-4}\Delta p/2$ 見掛け粘度は $\mu_a=10^{-3}\Delta p/4.66$ ($mPa \cdot s$) で表される。各温度における流れの安定しているところの圧力損失は200℃から順に2kPa，3.5kPaおよび24kPaであり，見掛け粘度はそれぞれ0.43 $mPa \cdot s$ ，0.75 $mPa \cdot s$ および5.2 $mPa \cdot s$ であり，250℃では粘度が急激に増加していることが分かる。

図4はベントナイト泥水（M-11）を24時間静置した場合のものである。予熱管を4mから8mに長くしたので，予熱管も含めて電気炉内で養生された泥水が出終わるまでに43.6分要する。測定はこの時間に達する前に打ち切られている。温度200℃と220℃の圧力損失の大きさが逆に成っているが，定性的に次のことが言える。温

度220℃と250℃とでは形成されたゲルの破壊が困難である。それ以下の温度でもゲル化していると考えられるが，塊に成り流れを妨げる程ではなく，粘度が増加する程度に留まっていると考えられる。

図5はセピオライト泥水（M-12）を20分間静置した場合のものである。200℃までのものが示されているが，この範囲ではゲル化の兆候は見られず，温度の上昇につれて粘度は低下している。これ以上の温度では流動せずに測定は不可能であった。図6はセピオライト泥水を24時間静置した場合のものである。温度200℃以下ではゲル化の傾向ははっきりしていない。温度250℃ではベントナイト泥水同様にゲル化が発生している。

毛管粘度計によるベントナイト泥水（M-11）とセピオライト泥水（M-12）の各温度における流動曲線を図7と図8に示す。各泥水とも測定が可能であった温度までのデータを示している。温度の影響は先に図2で見たのと同様な傾向を示している。図7でも線が重なってははっきりしていないが，220℃の線は200℃の線より多少上にきている。セピオライト泥水も図8の温度範囲内では温度につれて粘性は低下している。これらの測定値を次式で近似し，パラメータ n と k を求めた。それを図9に示す。

$$\tau = k v^n$$

フローベイヤインデックス (n) は温度とともに大きくなる傾向がある。特にセピオライト泥水（M-12）ではその傾向は顕著であり，200℃では1に近い値に成っている（ニュートン流体は $n=1$ である）。ベントナイ

図7 ベントナイト泥水（M-11）の毛管粘度計によるフローカーブ。

図8 セピオライト泥水 (M-12) の毛管粘度計によるフローカーブ。

図9 ベントナイト泥水 (M-11) とセピオライト泥水 (M-12) の毛管粘度計により測定されたフローベヘイビアインデックス (n) とコンシステンシーインデックス (k)。

ト泥水 (M-11) の220°Cの値は低下しているが、これはゲル化による影響と考えられる。コンシステンシーインデックス (k) は温度とともに減少する傾向を示してお

り、セピオライト泥水 (M-12) の方が変化の割合が大きい。ベントナイト泥水 (M-11) の220°Cのk値は急に大きく成り、前記したゲル化の影響を示している。表3の高温養生後のデータと図9のそれらとを比較してみる。ベントナイト泥水 (M-11) については変化の傾向は高温養生後の室温での傾向と似ているが、コンシステンシーインデックス (k) の値は高温下の測定の方が小さくなっている。セピオライト泥水 (M-12) についてはフローベヘイビアインデックス (n) の挙動はかなり異なり流動性は良くなっている。

今回実験した二つの泥水はいずれも温度200°C付近までは温度とともに粘度が低下する通常見られる性質を示しているが、それ以上の温度では著しくゲル化する傾向を持っていることが指摘できる。これらのことは高温高圧下での毛管粘度計による測定で顕著に現れており、この種の実験の必要性を示している。

3. 高温・高圧下における生産性障害の実験

3.1 割れ目型モデル

生産性障害の実験には1章で記したように割れ目型モデルと多孔質型モデルとを使用した。両モデルの実験手順は同じであるが、モデルへの泥水圧入の仕方のみが異なっているだけであるので、割れ目型モデルの場合を例にして実験手順を説明する。泥水圧入の仕方については各々のモデル毎に説明する。

割れ目型モデルの写真を図10に示す。実験手順を図11に示す。ステージ1は初期水浸透率の測定、ステージ2は泥水の圧入過程である。泥水がモデル内の水と十分置換するまで圧入する。ステージ1と2の過程は室温で行う。モデルを電気炉 (図1参照) に設置する。モデルを2個設置できるように設計されているが、養生時の圧力の安定を図るため実験は1個ずつ行った。電気炉の温度を徐々に上げて行き、所定の値に達してから24時間の養生を行う (ステージ3)。温度を室温から250°Cまで上げるのに約6時間を掛けている。温度と圧力を維持したまま水を圧入して浸透率の測定を行う (ステージ4)。この際浸透率の測定は泥水の圧入方向とは逆の方向より水を送って行く。圧力損失が一定値に落ち着いた所で水の流量を増加する。モデルを通過する流量は1章に記したように密度に温度と圧力の補正を施す。浸透率の回復の程度は次の式で定義される浸透率回復率で表す。

$$\text{浸透率回復率} = \frac{(\text{ステージ4の浸透率測定値})}{(\text{ステージ1の初期水浸透率})}$$

割れ目型モデルの水浸透率の温度・圧力による変化を測定したが、ほとんどその影響は見られなかった。

この実験の制約となるものは流量、温度、および圧力

図10 割れ目型モデル (GS-2) の端面の写真。

図11 生産性障害実験手順の概略。

1: 初期水浸透率測定 (室温), 2: 泥水圧入 (室温), 3: 所定温度での養生 (高温高圧下), 4: 浸透率回復状態の測定 (高温高圧下)。

の制御である。流量を小さい所から大きい所まで脈動をなるべく起こさないように変化させることが要求される。モデルの浸透率が大きいと流量の小さい所では圧力損失が小さく圧力測定の精度が落ちることになる。モデルを出た水は図1のタンク2に入るが、このタンクの圧力はレギュレータバルブ13で一定に保つ必要がある。水の流量を増すとこのことが困難になり、その時点で実験を終了とした。また流量を大きくすると温度を一定に保つことが困難になる。

ステージ4の水累計圧入量と圧力損失の関係の一例を図12 (実験番号 OS-8) に示す。水の累計圧入量は孔隙容積 (PV) を単位に表されている。図12の圧力損失を水浸透率に換算したものを図13に示す。水の流量を増加して行くと浸透率は段々に回復してくる。先に記したように水の流量には測定上の制限があり、図13の例では110 PV で打ち切りとしている。最終水浸透率は $29 \mu\text{m}^2$ で

図12 割れ目型モデル (OS-8) の浸透率回復状態測定時における圧力損失と流量および累計圧入量との関係

図13 割れ目型モデル (OS-8) の浸透率回復状態測定時における浸透率回復状況と流量および累計圧入量との関係 (図12の圧力損失を浸透率に換算したもの)。

ある。ステージ1で測定した初期水浸透率は $170 \mu\text{m}^2$ であるから浸透率回復率は0.17である。

浸透率の回復に関係する要素としては流量、圧力損失および累計圧入量が考えられる。図12を見ると流量の小さい始めの頃は、流量を変えると圧力損失は急激に大きく成り、すぐに低下し、始めと終わりの圧力の差は大きい。これは詰まっていた固形分の一部分が排除され、流路が形成されて行く過程であると考えられる。累計圧入量が増してきた段階に成ると流量を変更した後の圧力は徐々に低下し、始めと終わりの圧力差も小さく成り、固形分が少しずつ排除されると考えられる。したがって、ある程度水を圧入すると浸透率の回復率は変化しなく成ると思われるが、この限界については今回の測定では明瞭にできなかった。

割れ目型モデル3 mm の浸透率回復経過の例を図14に示す。縦軸は浸透率回復率である。OS-8 は流量を上げればさらに回復が進みそうであるが、他はほぼ限界に

近付いていると考えられる。これらの最大測定流量における浸透率回復率と養生温度との関係を図15に3 mmモデルと5 mmモデルとを一緒に示す。それらのまとめを表4と表5に示す。温度が150℃以上では点はかなり散らばっており、浸透率回復率が数%のものもある。点の散らばりの範囲を点線で示す。150℃と200℃とで回

復率が1.0のものはOS-9とGS-2、およびOS-5とOS-7である。これらはベントナイト泥水（M-11）を用いたものである。ただし、OS-3は200℃でかなり悪い値である。セピオライト泥水（M-12）は比較的に悪い値となっている。250℃では両泥水ともに悪い値になっている。

実験範囲では温度が150℃を超えると生産性障害の発

図14 割れ目型モデルの流量による浸透率回復状況の例。

図15 割れ目型モデルの浸透率回復率と養生温度との関係。

表4 割れ目型モデル3 mm 高さ形式の浸透率回復率測定結果のまとめ。充填砂は平均粒径0.59mm のオタワ砂。

Items/Test No.	OS-1	OS-2	OS-9	OS-3	OS-5	OS-7	OS-4	OS-8
Mud No.	M-11	M-11	M-11	M-11	M-11	M-11	M-11	M-11
Initial permeability, μm^2	210	160	160	210	170	170	180	170
Aging temperature, $^{\circ}\text{C}$	20	150	150	200	200	200	250	250
Aging backpressure, MPa	0.1	2.1	2.1	4.1	4.1	4.1	8.1	8.1
Cumulative injected water, PV	110	81	79	79	106	50	73	110
Water flow rate, final, cm^3/s	0.43	0.30	0.30	0.19	0.25	0.30	0.26	0.24
Pressure loss, final, kPa	2.4	0.6	0.3	6.1	0.2	0.3	5.4	1.4
Recovered permeability, final, μm^2	200	130	160	6	170	170	8	29
Permeability recovery ratio, frac.	0.97	0.79	1.00	0.03	1.00	1.00	0.04	0.17

Items/Test No.	TS-1	TS-2	TS-3	TS-4
Mud No.	M-12	M-12	M-12	M-12
Initial permeability, μm^2	200	170	230	200
Aging temperature, $^{\circ}\text{C}$	20	150	200	250
Aging backpressure, MPa	0.1	2.1	4.1	8.1
Cumulative injected water, PV	146	236	167	242
Water flow rate, final, cm^3/s	0.17	0.28	0.33	0.32
Pressure loss, final, kPa	1.1	1.1	0.5	44.1
Recovered permeability, final, μm^2	80	60	120	1
Permeability recovery ratio, frac.	0.92	0.36	0.53	0.01

表5 割れ目型モデル5mm高さ形式の浸透率回復率測定結果のまとめ。充填砂は平均粒径1.07mm五色砂。

Items/Test No.	GS-1	GS-2	GS-3	GS-4
Mud No.	M-11	M-11	M-11	M-11
Initial permeability, μm^2	1200	1330	1190	1470
Aging temperature, $^{\circ}\text{C}$	20	150	200	250
Aging backpressure, MPa	0.1	2.1	4.1	8.1
Cumulative injected water, PV	49	27	6	21
Water flow rate, final, cm^3/s	0.22	0.30	0.29	0.29
Pressure loss, final, kPa	0.1	0.03	0.03	0.1
Recovered permeability, final, μm^2	1200	1330	850	240
Permeability recovery ratio, frac.	1.00	1.00	0.72	0.17

Items/Test No.	FS-1	FS-2	FS-3	FS-4
Mud No.	M-12	M-12	M-12	M-12
Initial permeability, μm^2	1340	1650	1350	1390
Aging temperature, $^{\circ}\text{C}$	20	150	200	250
Aging backpressure, MPa	0.1	2.1	4.1	8.1
Cumulative injected water, PV	109	7	28	108
Water flow rate, final, cm^3/s	0.24	0.33	0.27	0.27
Pressure loss, final, kPa	0.1	0.05	0.7	18.6
Recovered permeability, final, μm^2	1340	980	44	1
Permeability recovery ratio, frac.	1.00	0.59	0.03	0.001

生する可能性が考えられ、 250°C でははっきりとこのことが言える。回復率が1ということは圧入された泥水がほとんど水で押し出されることであり、この値が小さいほど泥水が残っていることになる。しかし初期浸透率が大いので、例えば OS-8 は回復率が17%であるが回復浸透率の値は $29\mu\text{m}^2$ 、GS-4では $240\mu\text{m}^2$ であり、障害が残っていても浸透率自体はかなり大きな値である。

(註： $1\mu\text{m}^2$ は約1 darcy である。)

3.2 多孔質型モデル

多孔質型モデルとしてベレア砂岩のコアを用いたので、温度と圧力の浸透率に及ぼす影響を測定した。図16にその結果を示す。同図左側の図は封圧力と浸透率の関係である。コア1は実験条件と同じ基準で温度と封圧力を上げていった場合のものであり、室温より温度を上げて行き、所定の温度で1時間放置して浸透率を測定した。コア2は温度は室温に固定し、封圧力のみ増加した場合である。実験条件と同じ基準とは、コア内に前記した値(測定温度の飽和圧力の2倍)で背圧力を掛け、ゴムスリーブの外側には背圧力に2MPaを加えた封圧力を掛けるものである。この封圧力条件は全実験を通じて同じである。室温条件下での浸透率に差があり、コアの個数も2個のみであるが、次の傾向が実験範囲内では見られる。コア2の封圧力のみ増加した場合には浸透率の低下は緩やかであるが、コア1のように温度と圧力を共に上昇させる場合には浸透率は急激に低下する。コア1のデータを、横軸に温度を取って書き換えたのが同図右側の図である。浸透率は温度上昇につれてほぼ直線的に低下している。割れ目型モデルについても同様の測定を行ったが、前記したように温度・圧力の影響はほとんど見られなかった。

割れ目型モデルでは泥水が孔隙全部を満たすまで圧入したが、多孔質型モデルでは条件を揃えるため次のようにした。泥水圧入によりコアから流出する水量がコア孔隙容積の約0.2になるまで行う。泥水圧入の経過の例を図17に示すが、低い圧力から段々と上げて行き、最高圧入圧力は0.7MPaとした。泥水圧入終了後コアとコアホルダーキャップの間および泥水圧入パイプには水を通して泥水を排除した。この際コア表面の泥壁は洗い流さな

図16 ベレア砂岩コアの浸透率に及ぼす圧力と温度との影響。

左：浸透率と封圧力との関係、右：浸透率と温度との関係。コア1：生産性障害実験と同じ条件で測定、コア2：室温下で封圧力のみ変えて測定。

表6 ベレア砂岩コアの性質と泥水圧入状況。

Core No.	Permeability, μm^2	Porosity, fraction	Pore volume, cm^3	Maximum injection pressure, MPa	Filtrate, cm^3	Filtrate Pore volume
BS-1	1.59	0.22	23.8	0.19	5.1	0.21
BS-2	0.90	0.20	22.7	0.7	5.1	0.22
BS-3	0.99	0.21	23.7	0.7	4.9	0.20
BS-4	2.06	0.23	25.3	0.7	5.4	0.21
SS-1	1.02	0.20	22.5	0.4	5.5	0.24
SS-2	1.03	0.21	23.0	0.7	5.3	0.23
SS-3	2.50	0.22	24.6	0.2	5.0	0.20
SS-4	1.01	0.21	22.9	0.7	3.4	0.15
SS-5	0.83	0.21	23.5	0.7	5.2	0.22

図17 多孔質型モデル（ベレア砂岩コア）への泥水圧入過程における圧入圧力とコア下端からの流出水量との関係。

図18 多孔質型モデル（ベレア砂岩コア）の流量による浸透率回復状況の例。

いように注意した。そのまとめを表6に示す。BS 番号のものはベントナイト泥水 (M-11) を、SS 番号のものはセピオライト泥水 (M-12) を使用している。圧入圧力が低かったのは BS-1、SS-1 および SS-3、置換水量が少なかったものは SS-4 であるが、浸透率の良かった SS-3 の圧入圧力が低かったものの他はその理由が不明である。

コアは一種の濾過材であるから、その表面には泥壁が形成されるが、その厚さは測定不可能である。泥水の一部はコア内部に浸入しているが、その深さも不明である。この圧入過程は室温で行われているので、表3の濾過試験結果を用いて泥水浸入深さを推定してみた。

室温における濾過試験結果（表3参照）：

濾過試験器の内径は7.55cm であり、濾過水量は約11 cm^3 であるから単位面積当たり2.5mm の深さになる。泥壁の厚さは約1 mm である。

室温におけるコアへの泥水圧入結果（表6参照）：

コア外径は3.5cm であるから、濾過試験器との面積比は4.6：1である。コアの孔隙率は約0.21であるから長さ1 cm 当たりの孔隙容積は約2 cm^3 である。濾過試験器による濾過水量約11 cm^3 はコア面積に換算すると2.4 cm^3 になる。泥水圧入によるコア内の水の置換量は約5 cm^3 である。この差2.6 cm^3 がコア内への泥水浸入量と仮定する。コア表面上に厚さ1mm の泥壁ができ、コア表面から内部に泥水浸入域があり、その先に濾過水が浸入していると考え。泥水の浸入深さは13mm となる。濾過水の浸入深さは12mm となる。以上はコアへの泥水圧入の際と濾過試験の際の泥壁とが同じ性質であるとの仮定に基づく推定である。

浸透率回復率と測定流量の関係を図18に示す。各コアとも回復の限界まで達していると考えられる。各コアの最大測定流量における浸透率回復率と養生温度との関係

を図19に示す。水と付記した実線は図16右図の水浸透率の温度による変化の線である。各コアの水浸透率の変化がこの線に従うという保証はないが、回復率判断の一助として入れてある。実験点が少ないので点の散らばりの範囲を波線で示してある。温度150℃が障害が発生する

図19 多孔質型モデル（ベレア砂岩コア）浸透率回復率と養生温度との関係。水と付記されている線は図16の右側の図の線と同じである。

かどうかの境のように思われる。この図から判断すると、150℃ではベントナイト泥水（M-11）と比べてセピオライト泥水（M-12）の方が回復率が良くないが、200℃以上では両泥水とも回復率は約0.1あるいはそれ以下の低い値となっている。

4. 考 察

地熱層に対する泥水による生産性障害の程度を検討する目的で割れ目型モデルと多孔型モデルについて温度250℃までの実験を行った。両モデルにおいて温度150℃が障害発生の境目であり、それ以上の温度では大きな障害の発生の可能性がある。温度の浸透率回復率に及ぼす影響はモデルにより、また泥水により多少の差異がある。実験回数は少ないので断定的なことは言えないが実験範囲内では次のようにまとめられる。

① 割れ目型モデル（図15、表4および表5参照）

ベントナイト泥水（M-11）：150–200℃では障害が現れることも現れないこともある。250℃では大きな障害が発生する。

セピオライト泥水（M-12）：150–200℃ではかなりの障害が現れる。250℃では大きな障害が発生する。

② 多孔質型モデル（図19および表7参照）

ベントナイト泥水（M-11）：150℃では障害は現れない。200–250℃では大きな障害が発生する。

表7 多孔質型モデル（ベレア砂岩コア）の浸透率回復率測定結果のまとめ。

Items/Test No.	BS-1	BS-2	BS-3	BS-4
Mud No.	M-11	M-11	M-11	M-11
Initial permeability, μm^2	1.59	0.90	0.99	2.06
Aging temperature, $^{\circ}\text{C}$	20	150	150	200
Aging backpressure, MPa	0.1	2.1	2.1	4.1
Cumulative injected water, PV	23.6	26.6	22.9	47.2
Water flow rate, final, cm^3/s	0.34	0.34	0.34	0.27
Pressure loss, final, kPa	26.1	17.8	13.2	36.2
Recovered permeability, final, μm^2	1.55	0.47	0.61	0.14
Permeability recovery ratio, frac.	0.97	0.52	0.62	0.07

Items/Test No.	SS-1	SS-2	SS-3	SS-4	SS-5
Mud No.	M-12	M-12	M-12	M-12	M-12
Initial permeability, μm^2	1.02	1.03	2.50	1.01	0.83
Aging temperature, $^{\circ}\text{C}$	20	150	200	200	250
Aging backpressure, MPa	0.1	2.1	4.1	4.1	8.1
Cumulative injected water, PV	45.1	41.2	33.0	37.2	96.0
Water flow rate, final, cm^3/s	0.24	0.21	0.27	0.26	0.32
Pressure loss, final, kPa	30	173	168	181	61
Recovered permeability, final, μm^2	0.97	0.03	0.03	0.03	0.09
Permeability recovery ratio, frac.	0.95	0.03	0.01	0.03	0.11

セピオライト泥水 (M-12) : 150–250℃で大きな障害が発生する。

障害発生の原因を考察するため毛管粘度計による泥水流動性の測定と高温養生後の泥水性質の測定結果をまとめると次のようになる。

③ 泥水の高温養生後の性質 (表3参照)

ベントナイト泥水 (M-11) :

粘度 : 250℃で急増する。

pH : 150℃で低下し、それ以後徐々に低下する。

濾過水量 : ほとんど変化しない。

セピオライト泥水 (M-12) :

粘度 : 250℃で半減する。

pH : 150℃で低下し、それ以後徐々に低下する。

濾過水量 : 増加気味で、250℃で急増する。

両泥水は粘度と濾過水量の挙動が異なり、高温においてはベントナイト泥水 (M-11) は粘土粒子が大きな塊に凝集してくるように思われる。セピオライト泥水 (M-12) は高温における安定性を期待していたが、粘土粒子が凝縮して小さい塊になって分散するに思われる。両泥水ともに高温では調泥剤の変質が起きていると思われる。

④ 毛管粘度計による流動性

ベントナイト泥水 (M-11) :

見掛け粘度 : 200℃までは低下し、それ以後増加する (図2および図7参照)。

高温下でのゲル化 : 220℃以上で発生している (図3および図4参照)。

セピオライト泥水 (M-12) :

見掛け粘度 : 200℃までは低下、それ以後は測定不可能まで増加する (図8参照)。

高温下でのゲル化 : 250℃では発生している (図5および図6参照)。

温度による泥水粘度の特異な挙動は液相の粘度の下がり続ける傾向と、固形分のゲル化による粘度増加の傾向の相克によるものと言われている。実験に使用した泥水では温度200℃以上ではゲル化の傾向が勝るものと考えられる。

以上のまとめより生産性障害の原因としては次のことが考えられる。砂粒子間の孔隙あるいはコアの孔隙の流路の大きさはこの実験で使用した毛管のそれより遥かに微少であり、粘土粒子あるいはゲル化した固形分が孔隙を閉塞する傾向は大きいと思われる。セピオライト泥水 (M-12) は粘土粒子が凝縮して小さい塊に分散しやすいので150℃の低い温度で障害が現れたと考えられる。

割れ目型モデルでは上記により障害発生の説明が付きそうである。多孔質型モデルでは前記のようにコア内へ

の泥水自体の浸入深さが10mm前後であるにもかかわらず大きな障害が発生していることは孔隙内の流路の形態の他に、泥水濾過水と岩石構成粒子との反応等も考えられるが、これらの点に関しては今回の実験では解明できなかった。

5. ま と め

地熱層の泥水による生産性障害について温度250℃まで実験を行った。それに関連するものとして泥水の高温養生後の性質の測定と毛管粘度計による流動性の測定を行った。泥水としてはベントナイト泥水 (M-11) とセピオライト泥水 (M-12) の二種類を用いた。地層モデルとしては割れ目型と多孔質型の二種類を用い、浸透率は高温高圧下で測定した。主な結果は次の通りである。

① 泥水の高温養生後の性質 : 200℃以上では急激に性質が悪化する。ベントナイト泥水 (M-11) は粘度が増加し、セピオライト泥水 (M-12) は粘度が低下し、濾過水量が増加する。

② 毛管粘度計による流動性 : 両泥水ともに放置しておくで200℃以上で、急激にゲル化が発生する。

③ 生産性障害 : 150℃以上では障害の発生する可能性がある。割れ目型モデルでは250℃付近より、多孔質型モデルでは200℃以上で大きな障害が発生する。

④ 泥水のゲル化と生産性障害とは関連しており、毛管粘度計によるゲル化の測定はコア試験より遥かに手軽に行える利点を持っている。

なおこの研究で用いた M-11 泥水をベントナイト泥水、M-12 泥水をセピオライト泥水と言う一般名称で呼んでいるが、これは両泥水を区別するための便宜上のものに過ぎず、現場で用いられている泥水の評価とは関係ないことを付記する。

謝 辞

この研究は文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究自然エネルギーの研究地熱班の課題の一つとして行った。実験の一部は東京大学工学部資源開発工学科の卒業研究として矢内正大君 (昭和60年卒、現アラビア石油^(株)) および船津邦浩君 (昭和61年卒、現日本オイルエンジニアリング^(株)) が担当された。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) BERGOSH, G.L., 1981: Mechanisms of Formation Damage in Matrix Permeability Geothermal Wells, SPE 10135.
- 2) CARNEY, L.L. and GUVEN, N., 1980: Investigation of Changes in the Structure of Clays

- During Hydrothermal Study of Drilling Fluids, *SPEJ*, October, 385-390.
- 3) TANAKA, S. *et al.*, 1986: Laboratory Study of Formation Damage under High Temperature and Pressure, *Proc. 8th NZ Geothermal Workshop*, 159-164.