

図 7-14 下部貯留層注入循環時の HDR-2a 坑井の PTS 検層温度プロファイル

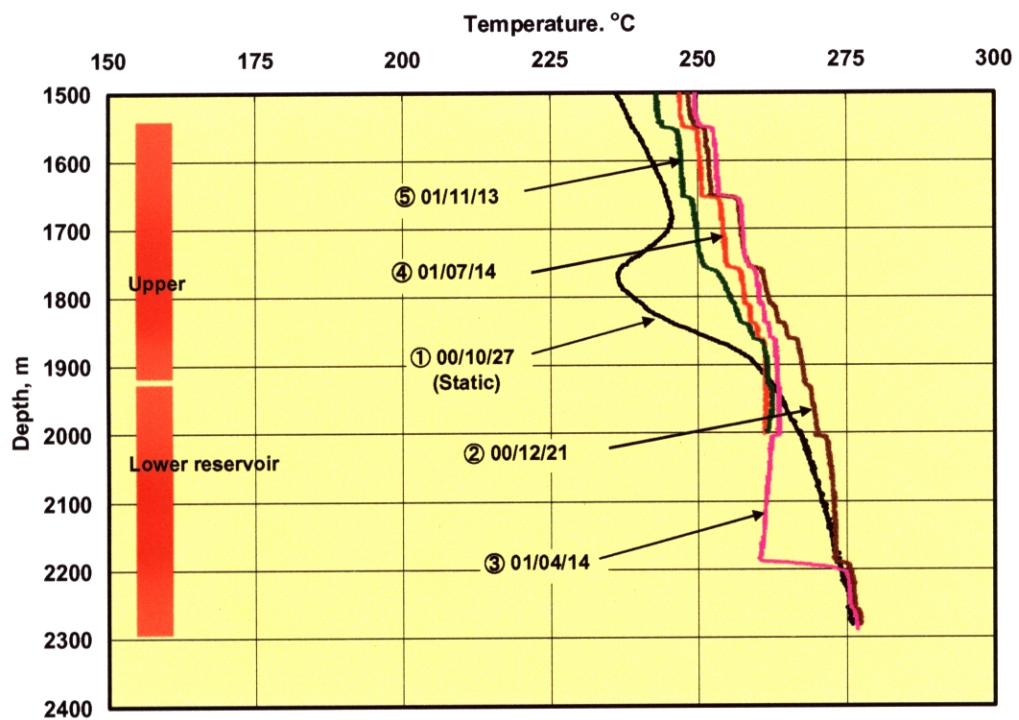


図 7-15 下部貯留層注入循環時の HDR-3 坑井の PTS 検層温度プロファイル

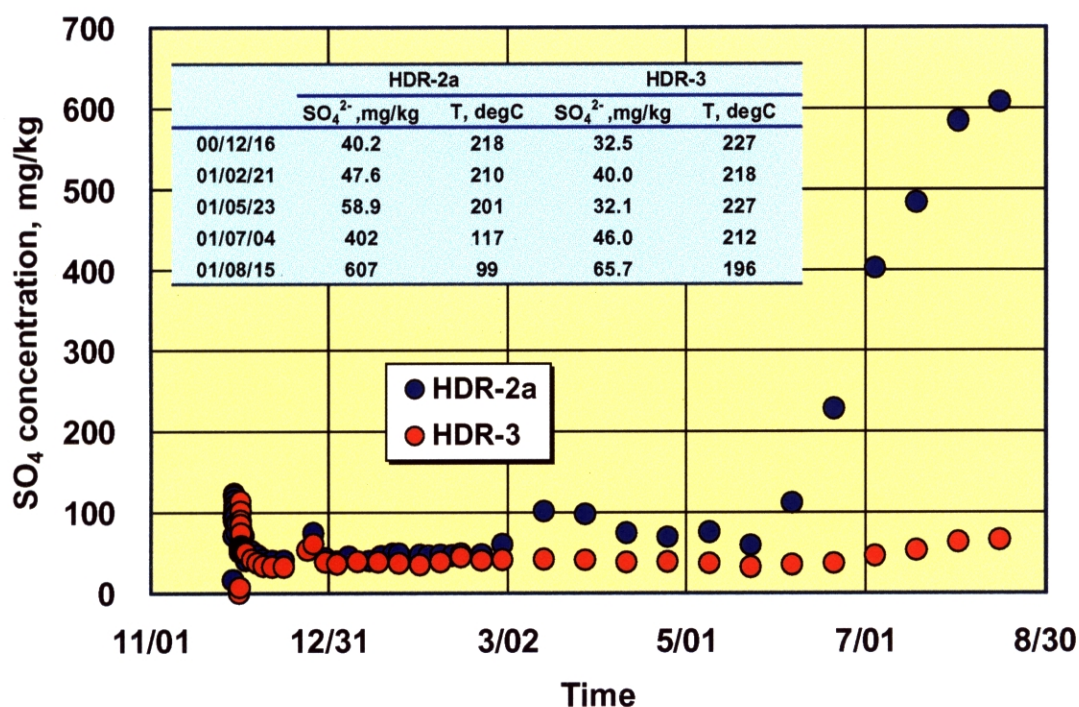


図 7-16 サーマルブレイクスルー前後の生産流体中の SO4 濃度変化と対応する硬石膏の飽和温度

以上述べたように、トレーサ試験の結果とともに PTS 検層や流体の地化学性状の変化を総合して判断することで、貯留層の流動状況の変化を定性的に判断できる。特に、トレーサ試験は PTS 検層のように坑井内の生産挙動への影響に配慮する必要がなく、また簡便に実施できるので、貯留層内の流動を定期的にモニタリングするのに最適な方法と思われる。

7-4-2 デュアル循環時の流動状況

図 7-7～図 7-9 に示したデュアル循環時のトレーサ応答曲線から、以下を指摘できる。

- 上部貯留層における HDR-2a と HDR-3 双方向への流動状況の異方性は、下部貯留層に比べて少ないものの、HDR-3 井方向の透水性は低い。
- 上部貯留層における HDR-2a 方向に比べ、HDR-3 方向への V_b の変動は小さい。
- 上部貯留層の応答は、上下貯留層への注水割合を変えた4月以降、複数のピークが重なり、半波幅が増加する傾向が認められる。
- HDR-2a 方向への上下貯留層における応答を比較すると、下部貯留層においても V_b の変動は認められるものの、ピーク値の変動は少なく、半波幅が大きい。

しかし、これら応答曲線は生産井坑口で得られたもので、上部貯留層へトレーサを注入した場合には下部貯留層からの、逆に下部貯留層へトレーサを注入した場合には上部貯留層から生産井へ流入する流体による生産量の増加とトレーサ濃度の希釈を補正する必要がある。このため、天満ら(2003)が数値シミュレーションによって求めた上部貯留層からの生産への寄与率(表 7-2)を用いて以下の手順により補正を行った。図 7-17、図 7-18 に HDR-2a 井のトレーサ応答について補正を行った結果を示す。

- 積算生産量からトレーサを注入しなかった貯留層から生産井へ流入する流量を差し引くとともに、この流入によるトレーサの希釈効果を補正する。
- 積算生産量から生産井内の容積量を差し引く。ただし、上部貯留層からのトレーサ応答を考える場合には上部と下部両方の貯留層からの生産が寄与するのに対し、下部貯留層からのトレーサ応答を考える場合には下部から上部貯留層までは下部からの生産だけが寄与し、上部貯留層から坑口までは上部下部両方の寄与があったものとした。
- 今回はデュアル循環試験中に上下の貯留層への注水比率を変化させたため、その影響を評価することが必要となる。このため、トレーサを注入井に注入し、上下それぞれの貯留層に流入するまでの時間の生産量を補正した。

表 7-2 トレーサ試験時の数値モデルにおける生産流量比

| | 期 間 | | 流量, kg/s | 浅部寄与, % |
|------|-----------|-----------|----------|---------|
| 第7回 | 2002/1/9 | 2002/1/15 | 6.43 | 69.0 |
| 第8回 | 2002/2/25 | 2002/3/3 | 7.72 | 71.5 |
| 第9回 | 2002/4/16 | 2002/4/20 | 5.22 | 34.7 |
| 第10回 | 2002/6/16 | 2002/6/20 | 7.74 | 26.3 |
| 第11回 | 2002/7/22 | 2002/7/25 | 5.99 | 17.5 |
| 第12回 | 2002/8/17 | 2002/8/22 | 6.19 | 18.2 |

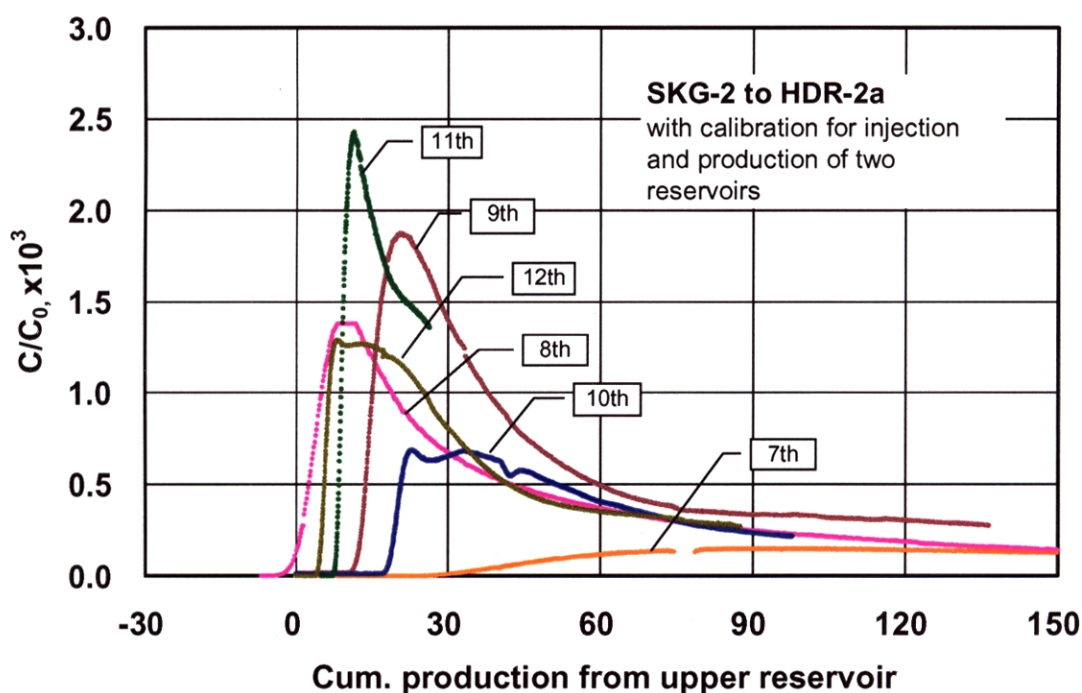


図 7-17 上部貯留層 (SKG-2 井) 注入に伴う HDR-2a 井でのトレーサ応答 (補正後)

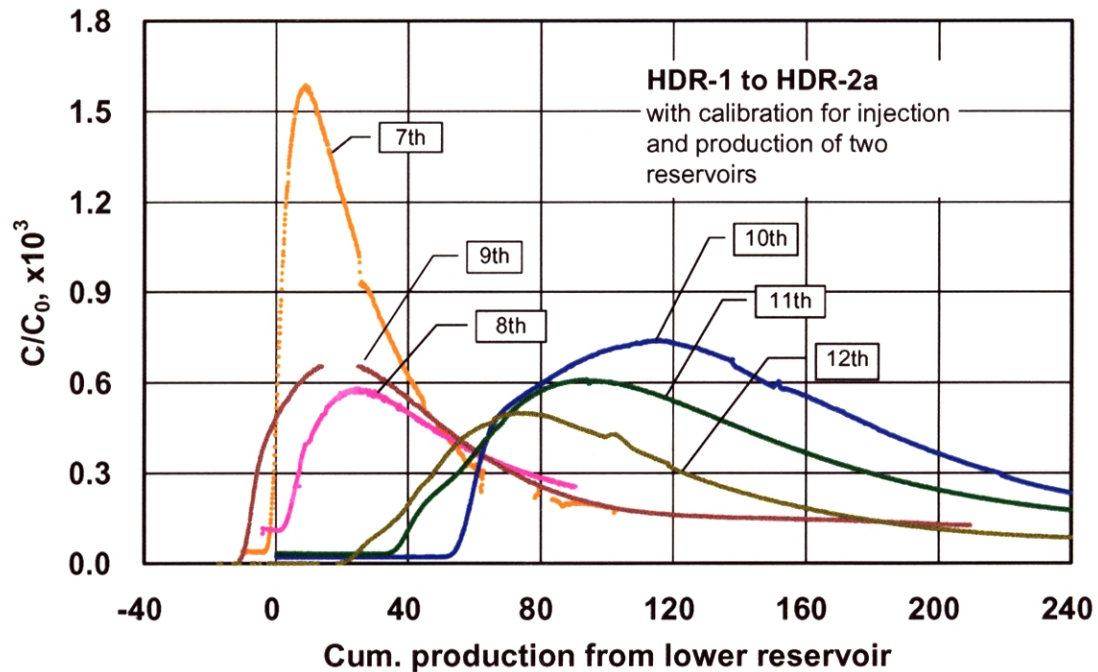


図 7-18 下部貯留層 (HDR-1 井) 注入に伴う HDR-2a 井でのトレーサ応答 (補正後)

図 7-10 と図 7-17 及び図 7-12 と図 7-18 を比較することにより、次のようなことが分かる。

- 2つの貯留層からなる循環系でトレーサ試験を行う場合、それぞれの貯留層から流れ出たトレーサを含む流体に、他の貯留層 (フラクチャ) から生産される流体が混合することによって、生産井坑口でのトレーサ応答曲線に大きな変化が生じる。
- 生産井の坑井内容積を補正した効果も加わり、全ての応答曲線で少なからず変化が生じる。
- しかし、上部と下部貯留層の生産流量差が大きい場合に、生産流量が少ないフラクチャを経由するトレーサの応答曲線の変化が大きくなり、 V_b やモード容積 (V_m) が大きく変動している。
- V_b の変化については上部貯留層に比べて下部貯留層で大きい。逆に、ピーク濃度の変化は上部貯留層で大きい。
- 下部貯留層の応答曲線は、バイナリー発電装置を設置するために循環を1ヶ月停止した時期を境に、大きく2つのグループに分けられるのに対し、上部貯留層ではそれほどの差異は認められない。

なお、一部の応答曲線で V_b がマイナスになっているが、坑井容積の算定にあたってのスケール発生、生産井内を流動する間の流体温度の変化による流体の比容積の変化、管内での2相流発生の影響などを考慮していないことや、上下貯留層からの寄与率にシミュレーションの結果をそのまま用いたことの誤差が原因と考えられる。

デュアル循環試験時のトレーサ試験はサーマルブレイクスルー発生後に行われており、坑井内の温度変化はそれほど大きくないため、生産流体量に対しての比容積変化の影響や2相流発生の影響は少なく、

応答曲線の相対的な位置関係や形状にはそれほど変化はないと考えられる。このため、図 7-17 と図 7-18 の応答曲線を比較することによって、デュアル循環試験中の上部貯留層 (SKG-2 井と HDR-2a 井間) 及び下部貯留層 (HDR-3 と HDR-2a 間) の流路の変化を評価可能である。

- デュアル循環開始直後のトレーサの応答は、上部貯留層で著しく悪く、特に V_m が非常に大きい。逆に下部貯留層での応答は最も良くなっている。デュアル循環の前に実施した下部注入循環中に、上部貯留層には下部貯留層から流出した流体が HDR-2a 井を経由して流れ込んでおり、この流体が相対的に高温だった上部貯留層内に流れ込むことによって、デュアル循環開始時には相当量の硬石膏スケールが発生しており、流路をブロックしていたものと考えられる。この現象は、デュアル循環開始以降 2 月上旬まで続き (図 7-19 において HDR-2a 坑口圧力にスパイク状の変動が見られる期間)、第 7 回トレーサ試験を実施中にもしばしば HDR-2a 井の生産流体中に綿状の硬石膏が認められたことから推察できる。
- 上部と下部の注入量比が 1:1 の期間中、上部貯留層では導通が大幅に短絡的になり、逆に下部貯留層では若干流れの分散化が発生している。上部の変化は硬石膏スケールの流出が終わり、流路が安定するとともに、直接的な流動状態になったためと考えられる。
- 注入流量比を 1:1 から 1:3 に変えた直後の第 9 回トレーサ試験では、上部貯留層で V_b とピーク濃度の増加が同時に起こっており、注入流量の変化により流路に大きな変動が起きたことを示唆している。一方、下部貯留層では V_b の減少が主な変化で、 V_m や半波値幅容積 ($V_{1/2}$) にはそれほど大きな変化は発生していない。注入流量の増加により卓越した流路の選択が進行したことを示唆するが、この程度の V_b の変化は上述した誤差要因を考えると、流路の変化はそれほど明瞭ではなかった可能性もある。
- バイナリー発電施設のために循環を一旦停止した後、最初に実施した第 10 回トレーサ試験では、下部貯留層ではトレーサの応答に大幅な遅れが見られる。また、応答曲線の面積が大きく増加していることから流体の回収率が向上したこと、また応答曲線の立ち上がり部分に応答ピークの重なりが見られることから、比較的導通性の良く、容積の大きな複数の流路 (フラクチャ) が導通に関与していることが分かる。一方、上部貯留層ではピーク濃度が大幅に低下し、複数のピークが重なった台形の応答を示しているのが特徴である。循環の停止期間に卓越したフラクチャの閉塞と貯留層から系外への流出が進み、循環再開後の貯留層のフィルアップが十分に進んでいない可能性がある。
- この影響は図 7-19 に示す坑口圧力の経時変化からも推定でき、HDR-1 に比較して SKG-2 の注入圧力は大幅に低く、HDR-2a の坑口圧力よりも低くなっており、上部貯留層内の流動状況は HDR-2a と HDR-3 との導通箇所 の圧力に支配されることを示唆している。
- バイナリー発電中に実施した第 10 回～第 12 回のトレーサ試験期間の変化は上下貯留層とも V_b が小さくなる傾向を示している。両貯留層ともに複数のフラクチャに関与し、しかもその流動に対する寄与の程度が変化したために生じた可能性が高い。しかし、図 7-3 の生産流量の変化から分かるように、この期間にバイナリー発電施設への蒸気供給を確保するために HDR-2a 井坑口で生産調整作業が行われたため HDR-2a 井の生産状況が大きく変化しており、HDR-2a 井裸坑部の圧力を加味して検討を行う必要がある。

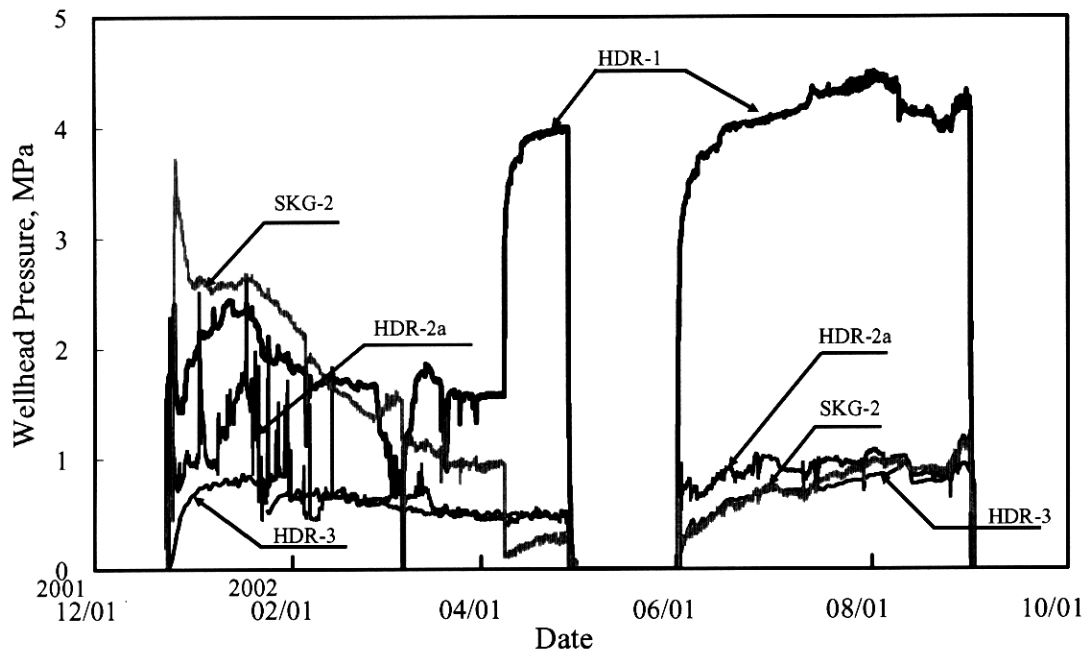


図 7-19 デュアル循環試験期間の注入井と生産井の坑口圧力の経時変化

PTS 検層結果があれば、トレーサ試験の応答曲線を基に貯留層（フラクチャ）内の流れを評価する際に、各流路の流量や圧力データを加味することでより正確で定量的な評価が可能となる。残念ながら、今回の一連の PTS 検層では、硬石膏スケールによる閉塞のため下部貯留層における温度、圧力、流量のデータが十分に得られていない。また、通常トレーサ試験が終了後、数日してから PTS 検層を実施したが、HDR-2a、HDR-3 両生産井の生産性が悪かったために PTS 検層を行うことによって生産が停止あるいは減少する現象が発生し、生産流量については不完全なデータとなっている。このため、PTS 検層の結果からはトレーサ試験を実施している際の上部と下部の生産流量や各フィードゾーンにおける坑内圧力を直接求めることは困難であった。従って、ここでは PTS 検層結果から上部貯留層と下部貯留層の注入井と生産井間の圧力差（即ち貯留層内での圧力低下）を求め、トレーサ応答曲線の変化との関係を考察する（図 7-20）。なお、上部貯留層については SKG-2 井 1,790m と HDR-2a 井 1,750m の圧力差を代表値として示した。下部貯留層については、HDR-1 井については注入深度を代表する 2,150m の圧力を用いたが、HDR-2a 井については時間とともに硬石膏スケールが発生して下部貯留層のフィードゾーンの測定が困難となったため、対象とした期間全般にわたり圧力データが得られた 1,900m の圧力を用い、両者の差を代表値として示してある。

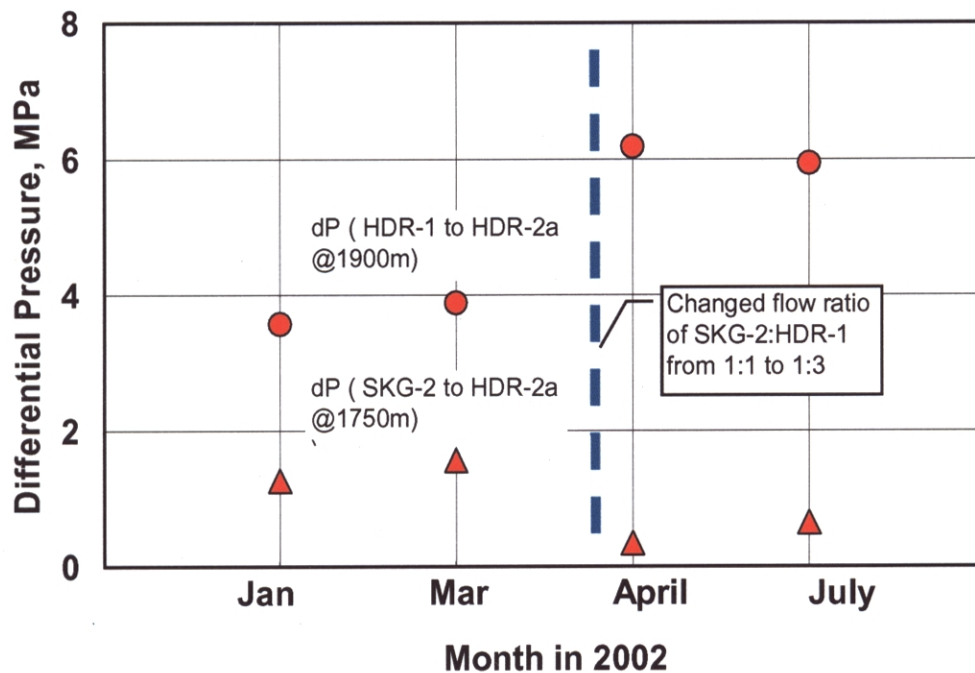


図 7-20 PTS 検層の圧力値から推定されるデュアル循環試験中の生産井 HDR-2a へ向かう上部及び下部貯留層内の圧力低下

図 7-20 から、SKG-2 井と HDR-1 井への注入流量比を 1:1 (それぞれ $8.33 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$) から 1:3 ($4.17 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$: $12.5 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$) へ変化させて、下部への注入を増やしたこととともなって、SKG-2 と HDR-2a 間の流動による圧力低下は減少しているのに対して、HDR-1→HDR-2a の圧力低下は逆に増加していることが分かる。このような圧力の変化に対して、HDR-2a 井への湧出箇所でのトレーサの応答は、図 7-18 から分かるように圧力変化が特に大きかった HDR-1→HDR-2a でそれほど変化を示しておらず、むしろ 1ヶ月余り循環を停止した後の変化がより顕著なことが分かる。この理由として、貯留層における圧力低下 (流動抵抗) は坑井周辺の状況を敏感に反映するのに対し、トレーサ試験の応答曲線は注入井と生産井間の比較的広範な流動状況の変化を反映していることが考えられる。

このように、貯留層内の流動を正確に評価するためには、トレーサ試験、PTS 検層、循環流体の地化学調査など、それぞれの結果を別個に評価するだけでは十分でなく、相互のデータを加味した総合的な評価が重要である。PTS 検層、流体の地化学調査、坑口の生産状況等のデータに、トレーサ試験の結果を加味することにより、長期循環試験の進行につれて貯留層内の流動がどのように変化したかを評価し、概念的に表すと図 7-21～図 7-25 のようになる。

HDR 貯留層からの熱抽出で最も問題となるサーマルブレイクスルーの予兆は、PTS 検層による温度変化だけでなく、今の所トレーサ試験によって得られる応答曲線の変化からも把握するのは難しい状況にある。貯留層内の温度変化を把握する、いわゆる反応性トレーサ (Robinson; 1985) の開発について、特に熱分解特性の異なる複数の蛍光染料トレーサを使ったマルチトレーサ試験の開発を進める必要がある。