

- ⑤ 1991 年の上部貯留層での3ヶ月間循環試験では主に KI や KBr をトレーサとして使用したが、長期循環試験では光ファイバーセンサー蛍光光度計による自動連続測定を行うため、フルオレセイン Na を主なトレーサとして使用した。また、蛍光染料のみでのマルチトレーサ試験を行うため、ユタ大学により現場使用が開始され始めた (Rose and McPherson. 1997; Rose, 1999; Rose et al., 2000) ナフタレンスルホン酸類の内、国内で入手が容易だった 1 ナフタレンスルホン酸、7 アミノ 1, 3 ナフタレンスルホン酸の2種類を使用した。

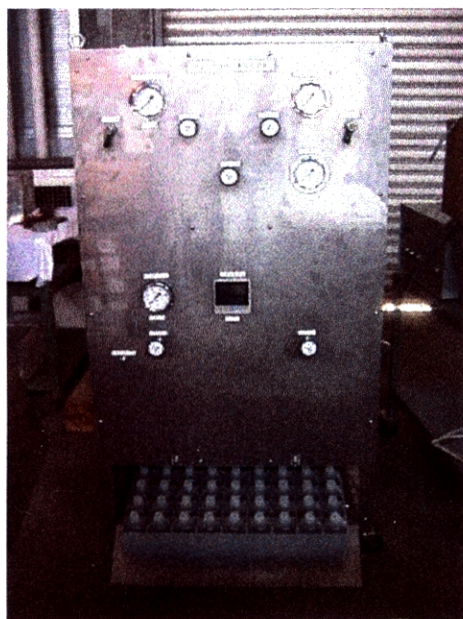


図 7-5 熱水流体の自動採取装置  
(パソコンの制御で下部開口部に見える  
50 本のポリ瓶に任意の時間に採取が可能)

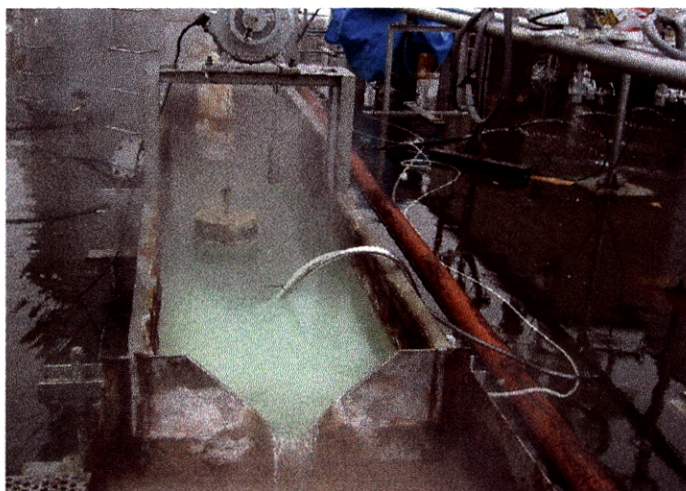


図 7-6 HDR-2a 熱水三角堰からのトレーサ流体の採取  
(シリコンホースにより流体の自動採取装置を設置した屋  
内まで小型ポンプで吸い込みを行った)

### 7-3-2 光ファイバー蛍光光度計による連続測定

肘折 HDR 実験場では注入井と生産井間の貯留層容積が非常に小さいため、循環試験中のトレーサの再湧出は、場合によっては半日以下と非常に早い。このため、それぞれの生産井から湧出する流体の流量から湧出時間を予想し、その時間の相当前から流体試料を採取する必要があった。しかし、上述した流体自動採取装置によって HDR-2a と HDR-3 両坑井からの生産流体を採取する場合、サンプル同士の汚染を防止するためには、採取時間間隔を最低 10 分以上に設定せざるを得ず、1996 年の予備循環試験ではトレーサ応答曲線の正確な立ち上がりや細かい変動を把握できない場合が生じた。このような状況を回避するため、長期循環試験ではトレーサの連続測定方法を検討した。イオンセンサーによる I や Br イオン濃度や電気伝導度の測定を行うことも検討したが、前者はセンサーの応答性、安定性、感度の点から、また後者も感度の点で実用的ではないと判断した。そのような中、国際トレーサ水理学協会

(ATC)のシンポジウム論文集で、地表水や地下水の原位置オンライン測定のために2種類の光ファイバー蛍光光度計が開発されたことが分かった(Barczewski and Marschall, 1992; Benischke and Leitner, 1992)。このため、1997 年に片方の装置を開発したオーストラリアのヨアニム研究所と、もう一方の装置を用い現場実験を行っていたシュツットガルト大学とカールスルーエ大学のグループの実験現場を訪問し、両者の使用状況や性能を調査、比較して、前者を導入することに決定した。

この装置は、図 7-7 に測定概念を示すように、発光ダイオード(LED)による発光を、光ファイバーを用いて測定対象に照射し、励起によって生じた蛍光を再び光ファイバーによって光電増倍管に導いてその強度を測定しようとするもので、励起側、発光側両方のフィルターを選択することにより、対象とするトレーサの蛍光強度を測定する。また図 7-8 に示すようにパソコンと組み合わせ制御とデータ取得を行うことにより、現地でトレーサの回帰状況を高感度(肘折で主に使用したフルオレセイン Na で最高 0.01ppb レベルまで)で、しかも最短1秒間隔で測定を行うことができる。このため、トレーサの流出状況を判断しながら流体の採取計画の適切な変更や、次のトレーサ試験開始の決定、更には必要な場合には再度同様のトレーサ試験を行うことも可能になり、現地でのトレーサ試験の作業性を大幅に向上することができた。

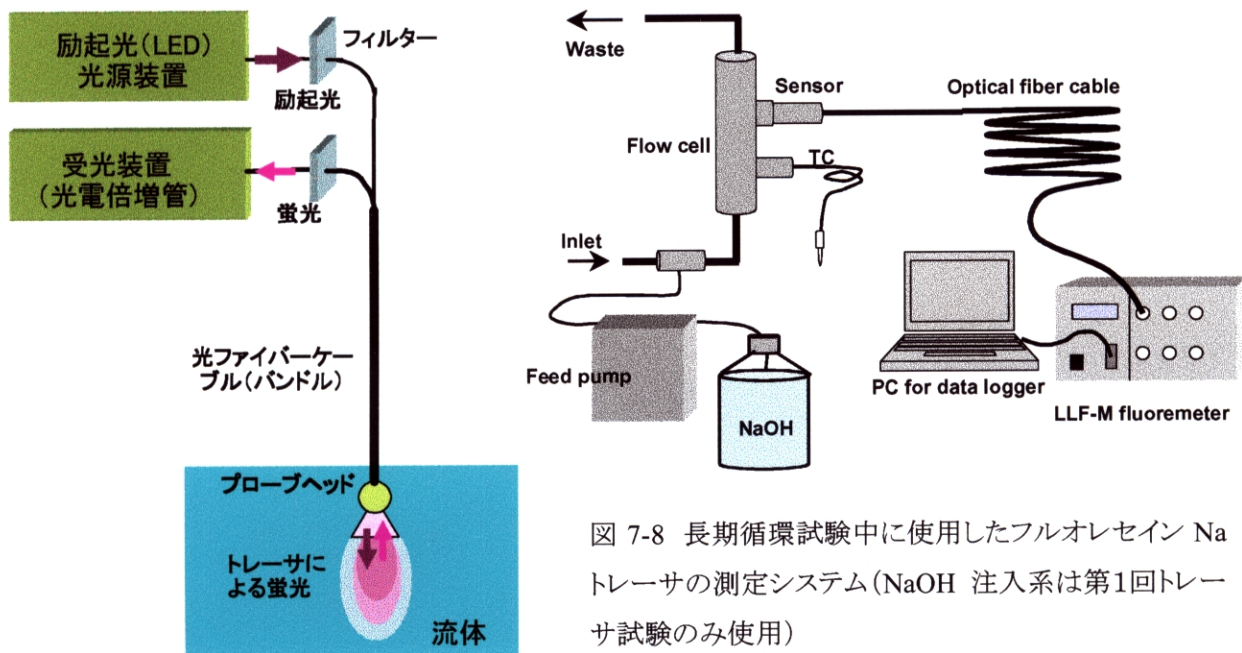


図 7-8 長期循環試験中に使用したフルオレセイン Na トレーサの測定システム(NaOH 注入系は第1回トレーサ試験のみ使用)

図 7-7 光ファイバー蛍光光度計の概念

### 7-3-3 試験結果

長期循環試験中、トレーサ試験は 12 回実施した。表 7-1 に示すように、最初の6回は HDR-1 井からの下部貯留層への単独注入試験中に実施し、残る6回は SKG-2 井からの上部貯留層へと、HDR-1 井からの下部貯留層へのデュアル循環試験時に実施した。それぞれの実験の目的や、使用したトレーサの種類を表 7-1 にまとめた。下部注入循環試験中のトレーサ試験については Matsunaga et al.(2001)に、またデュアル循環時の結果については Yanagisawa et al.(2003)に、詳しい結果が述べられている。

表 7-1 長期循環試験中に実施したトレーサ試験

No.	注入年月日	注入坑井	使用トレーサ					試験の目的
			FL	ANS	NS	KI	KBr	
1	2000/12/06	HDR-1	230g			14.5kg	14.3kg	下部注入初期状態把握
2	2001/03/07	HDR-1	230g		207g		20.0kg	下部注入経時変化把握
	2001/03/08	HDR-1	189g		220g	20.0kg		上記再確認
3	2001/05/23	HDR-1	252.3g	210g			20.0kg	下部注入経時変化把握
4	2001/06/28	HDR-1	188g	182g				サーマルブレークスルー状況確認
5	2001/08/15	HDR-1	294g	193g		20.0kg		下部注入経時変化把握
6	2001/11/02	HDR-1	206.8g					HDR-2aスケール除去の影響把握
	2001/11/06	HDR-1	133g		74.2g		20.0kg	
7	2002/01/09	SKG-2	153.2g				20.0kg	上下注入(流量比1:1)初期状況把握
	2002/01/11	HDR-1	158.7g	196.1g		15.7kg		
	2002/01/13	SKG-2+HDR-1	315.1g		204.7g	1.78kg		
8	2002/02/25	SKG-2	153.8g			20.0kg		上下注入(流量比1:1)経時変化把握
	2002/02/27	HDR-1	99g	300.2g				
	2002/03/01	SKG-2+HDR-1	199g					
9	2002/04/16	SKG-2	50.6g		137.1g	4.3kg		上下注入(流量比1:3)初期状況把握
	2002/04/18	HDR-1	401.7g	199.3g				
10	2002/06/16	SKG-2	101g		97.4g	10.0kg		上下注入(流量比1:3)再開後状況把握
	2002/06/18	HDR-1	100.3g	100.7g				
11	2002/07/22	SKG-2	25g					上下注入(流量比1:3)経時変化把握
	2002/07/23	HDR-1	50g					
12	2002/08/17	SKG-2	75g		150g			上下注入(流量比1:3)経時変化把握
	2002/08/20	HDR-1	50g		150g			

FL: フルオレセインNa(ウラニン)

ANS: 7アミノ1,3ナフタレンスルホン酸

NS: 1ナフタレンスルホン酸



下部貯留層の循環試験では、1995 年、1996 年の予備循環試験の時と同様に、HDR-2a 井のトレーサ湧出は HDR-3 井に比べて早く、また濃度も1桁高いことから確認できた。この現象は、HDR-3 側に比べて HDR-2a との導通性が格段によいことを示しており、HDR-1 井から同一のフラクチャに東西方向にほぼ同じ距離で導通する HDR-3 と HDR-2a で透水特性に異方性があることを示している。2001 年の6月下旬から7月にかけて、図 7-2 から分かるように、HDR-2a 井の生産流体温度が急激に低下しており、この時点で下部貯留層において HDR-2a 側にサーマルブレイクスルーが発生したと考えられる。この前後で、トレーサの応答にも大きな変化が生じており、図 7-9 に示すように第3回と第4回のトレーサ試験の応答を比較すると、ブレイクスルー容積 ( $V_b$ ) の急激な減少とピーク濃度の増加が認められる。

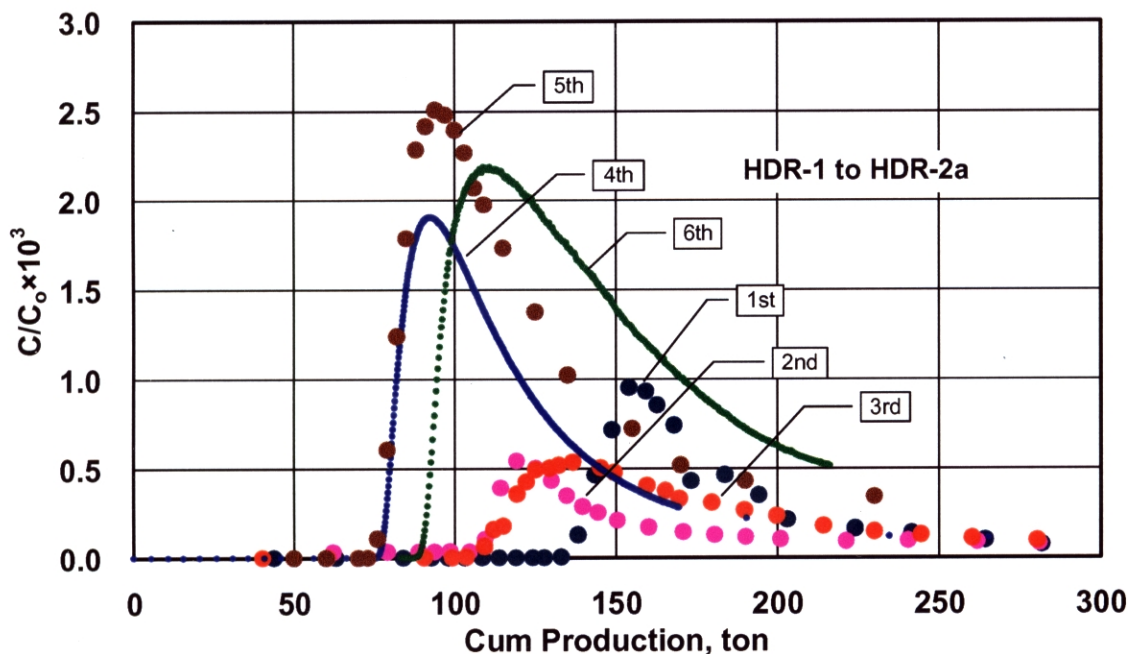


図 7-9 下部注入循環中の HDR-1 井から HDR-2a 井へのトレーサ応答曲線の経時変化

デュアル循環試験中のトレーサ試験については、SKG-2 井から上部貯留層を経由して HDR-2a 井及び HDR-3 井にいたる経路と、HDR-1 井から下部貯留層を経由して HDR-2a 井にいたる経路について、図 7-10～図 7-12 にそれぞれの応答曲線を示す。なお、HDR-1 井から HDR-3 井へいたる経路については導通性が悪く試験期間中に十分な応答曲線を得るのが困難だけでなく、HDR-2a 井から生産されたトレーサを含む流体の再循環による影響が現れ、トレーサの応答を正確に把握するのが難しかった。このため、ここには応答曲線を示していない。また、デュアル循環試験の最初の第7回トレーサ試験において、2002 年 1 月 13 日に実施した SKG-2 井と HDR-1 井へ同時投入で得られたトレーサ応答(濃度時間)曲線と、1 月 9 日と 1 月 11 日にそれぞれ SKG-2 井と HDR-1 井へ別々にトレーサを投入した応答を重ね合わせた曲線は良く一致した。注入井と生産井のそれぞれ間の流路をそれぞれ個別に評価することで多坑井2貯留層の流動状況は評価可能と考えられる。

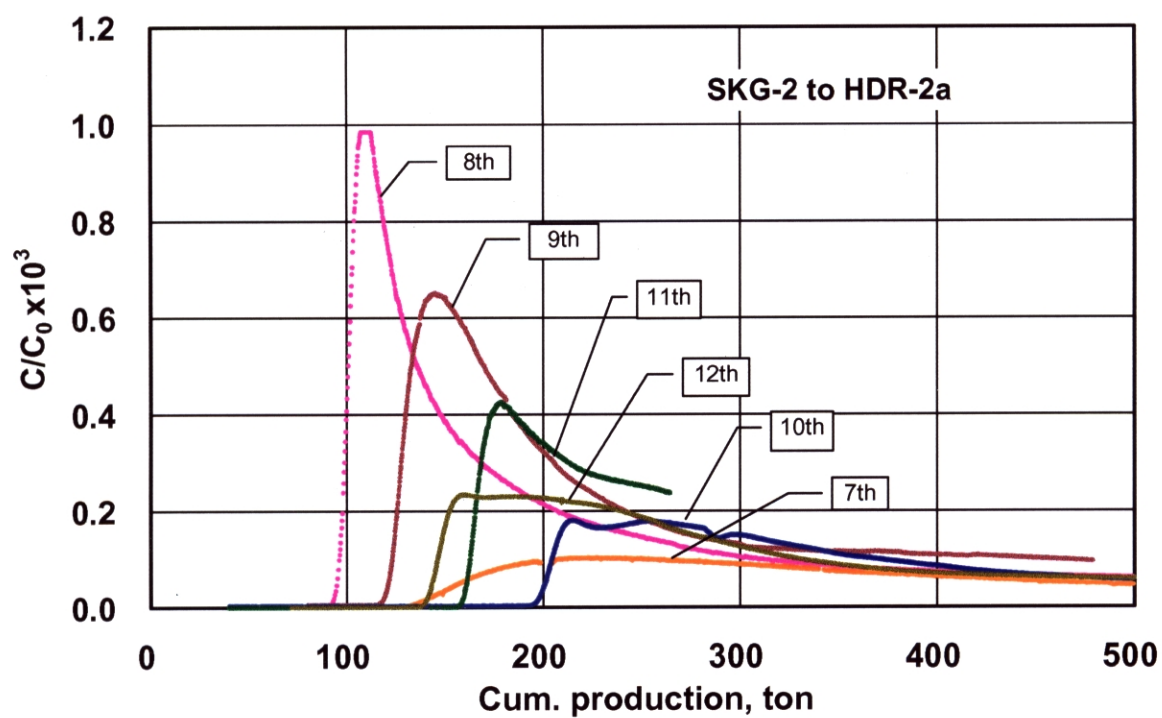


図 7-10 デュアル循環試験中、上部貯留層 (SKG-2 井) 注入に伴う HDR-2a 井でのトレーサ応答

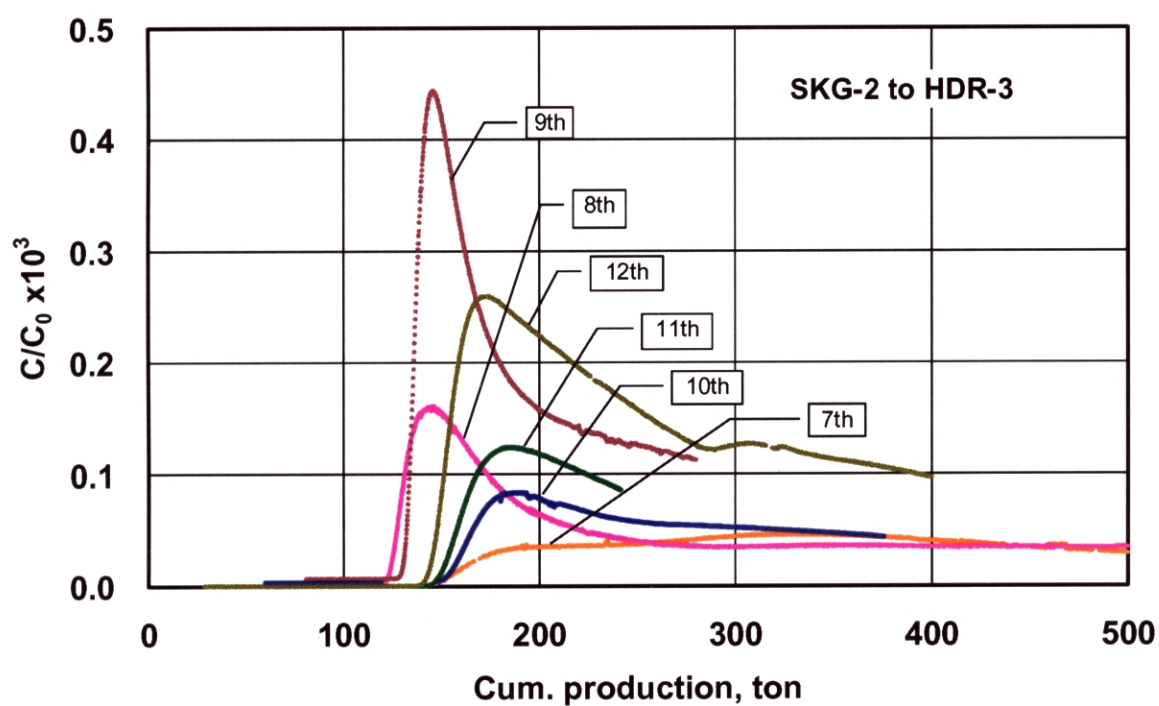


図 7-11 デュアル循環試験中、上部貯留層 (SKG-2 井) 注入に伴う HDR-3 井でのトレーサ応答

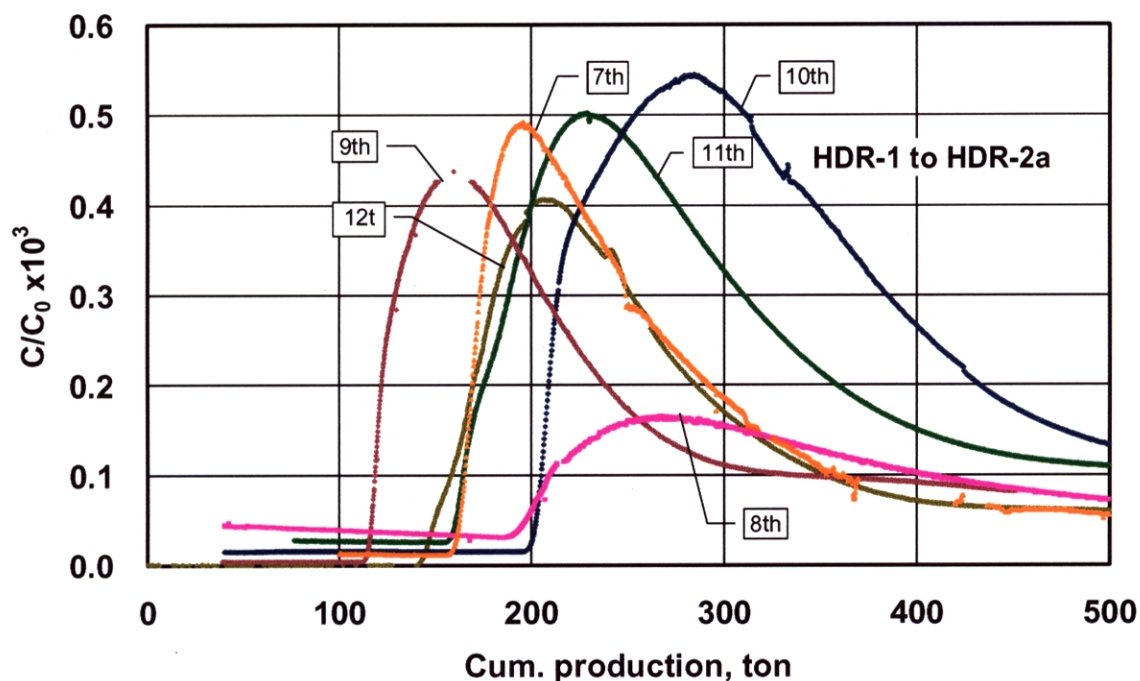


図 7-12 デュアル循環試験中、下部貯留層 (HDR-1 井) 注入に伴う HDR-2a 井でのトレーサ応答

#### 7-4 滞留時間分布法によるデュアル循環の流動評価

##### 7-4-1 下部貯留層への注入循環時の流動状況

下部貯留層注入時の循環試験では、貯留層に注入されて加熱された流体は生産井に達し、坑内を上昇して坑口から生産される。循環を開始すると、生産井坑内は循環流体によって加熱され、坑内の水頭圧は低下するので、流体の注入を行っていない上部貯留層からも生産井に向かって流体の流れ込みが発生する。このような状態でトレーサ試験を行うと、下部貯留層を経由して生産井に流入したトレーサを含む流体に、上部貯留層から流入するトレーサを含まない流体が負荷される。このため、生産井坑口でのトレーサの応答は、見かけ上  $V_b$  が増加し、濃度は低下する。図 7-9 に示した下部注入循環初期の HDR-2a 井におけるトレーサ応答曲線は、このような状態を示していると考えられる。上部貯留層への流体の供給は下部貯留層を形成する東西方向の主フラクチャと交差する副次的なフラクチャを通して行われるため、上部貯留層から生産井へ流入する流体量は減少する。このため、見かけ上の  $V_b$  は下部貯留層から上部貯留層へ流れ込む量と平衡するまで減少すると考えられる。

サーマルブレイクスルーに伴う  $V_b$  の大幅な減少とピーク濃度の増加は、PTS 検層によって求めた貯留層圧力と温度の経時変化(図 7-13)と対比することで説明ができる。即ち、サーマルブレイクスルーによって低温の熱水が HDR-2a に流入して坑内の温度が低下するので、貯留層深度の水頭圧が増加し、上部貯留層からの流体の流入が停止し、逆に上部貯留層への流入が発生したことに対応している。



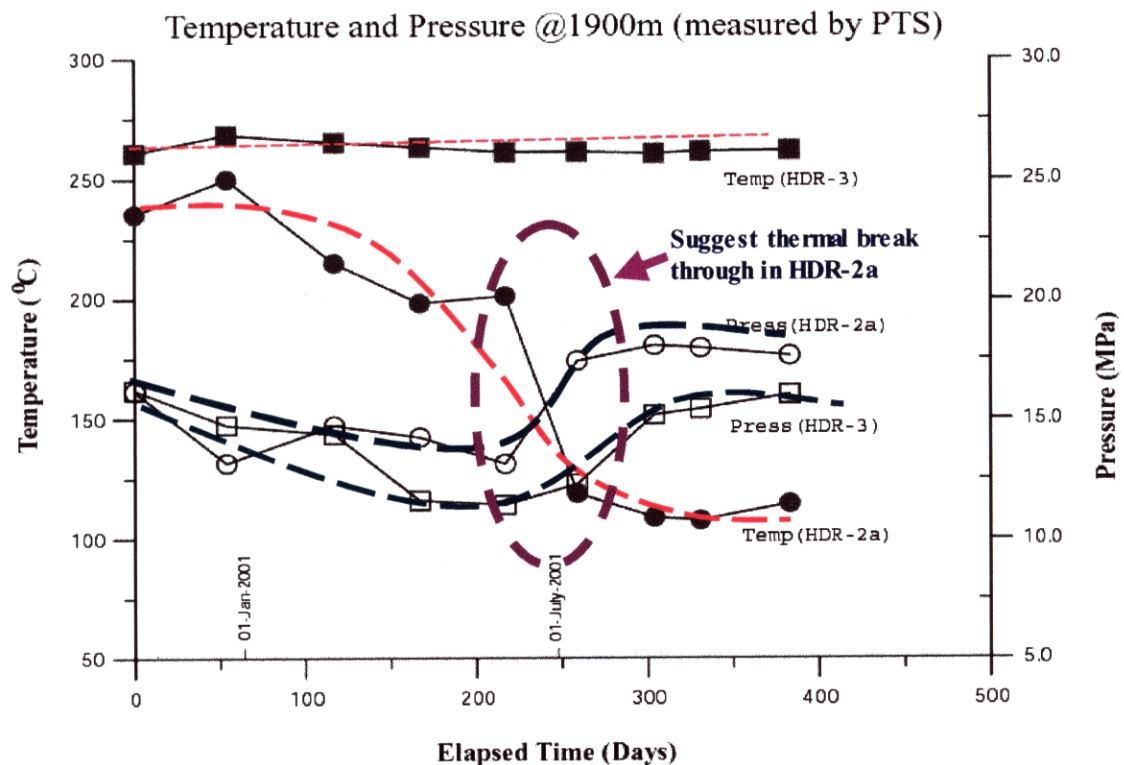


図 7-13 PTS 検層により求められた深度 1900m 付近のサーマルブレイクスルー前後の温度と圧力の経時変化

図 7-14 と図 7-15 に HDR-2a 及び HDR-3 の温度プロファイルの経時変化を示した。HDR-2a 井内では、サーマルブレイクスルーの発生に伴い、HDR-1 井から下部フラクチャを経由して HDR-2a 井内に流入する流体中の温度が急激に低下したことや、それ以前にも既に温度の低下が生じ、フィードゾーン F2a-7 の上部で温度逆転が発生していることが分かる。これに対して、HDR-3 井では温度の低下はそれほど大きくなく、深度方向の温度逆転も発生していないことが分かる。

肘折の貯留層を形成する花崗閃緑岩中には硬石膏が数%含まれるが、低温の方が硬石膏の溶解度は高く、しかも溶解度の変化も大きい。このため、温度の逆転が発生している HDR-2a 井では、図 7-16 に示すように注入井 HDR-1 近傍で硬石膏の溶解により取り込まれた高濃度の Ca 及び  $\text{SO}_4$  が HDR-2a 内に流入し、フィードゾーン F2a-7 の上部の温度逆転箇所流入する高温の熱水と混合して加熱され、坑井内で再び硬石膏スケールの沈殿がより進んだものと考えられる。サーマルブレイクスルー後に実施した 4 回目から 5 回目のトレーサ試験にかけて見かけ上の  $V_b$  が増加しているのは、このスケールによる閉塞が進むことにより下部貯留層の流動抵抗が増加し、流路の拡大が進んだことを示唆している。上部貯留層で実施した 3 ヶ月間循環試験においても、注入水と生産流体中の溶存成分を比較した結果、同様に硬石膏の溶解が生じたと考えられている (Matsunaga et al., 1995)。