

人工トレーサーを利用した熱水系の 化学的調査・評価手法(3)

茂野 博 (地殻熱部)

Hiroshi SHIGENO

6. 熱水系における人工トレーサーテストの実施例

ここでは 熱水系における人工トレーサー手法の実施例として(1)日本各地 (2)世界各地の例を簡単にまとめ特に(3)ニュージーランドの Wairakei および Broadlands 地域における放射性核種トレーサーの利用の例 (4)アメリカ合衆国の Fenton Hill 地域の高温岩体中に開発された人工熱水系における放射性核種トレーサーの利用の例と熱反応性トレーサーの開発について紹介する。

6.1 日本各地における人工トレーサー手法の実施例

日本においては 人工トレーサーテストは1975年頃に大沼地域で実施された(伊東ほか 1977 1978)のを始め 森 松川 葛根田 大岳 (HAYASHI *et al.* 1978) 八丁原 (HAYASHI *et al.* 1978; INOUE and SHIMADA 1985) など大部分の地熱発電実施地域において規模の違いはあるものの試みられており またいくつかの地熱発電計画地域においても行われている。これらのテストの方法とその結果については 藤井 (1982) HORNE (1982 1986) などによってその概要がまとめられている。

第1表に示したように 日本の地熱地域における人工トレーサーテストでは多くの場合 KI の水溶液の形でヨウ素がトレーサー物質として用いられているが 異なる

還元井にそれぞれ人工トレーサーとしてヨウ素 臭素 リチウムを同時に注入して観測の効率化・体系化を図っている例(藤井 1982)や 有機化合物を試用している例もある。トレーサーテストデータの解析では 5.1. の直接的方法のほか逆解析法や数値シミュレーション法も試みられている。

日本各地および世界各地の地熱貯留層において人工トレーサーテストによって得られた地熱流体の流れの速さと再湧出率の計算値 (5.1. 参照) をそれぞれ第3表と第4表に示す (HORNE 1986)。これらの表に示されるように 多くの開発された地熱貯留層において観測される数 m/h以上の速いトレーサーの流速および短期間で10%以上に達する高いトレーサーの再湧出率は 地熱貯留層においては断裂を通じた地熱流体の流動が顕著であることを示している。

ここでは 日本の開発された地熱地域のうち 特に秋田県大沼地域と大分県大岳地域における人工トレーサーテストの実施例を簡単に紹介する。

大沼地域については 人工トレーサーテストの実施方法 得られたデータおよび直接的方法によるその解析結果が 伊東ほか (1977 1978) によって詳しく報告されている。人工トレーサーテストは 1975-1976年の間の異なった時期に4本の還元井(深度750~1200m)にそれぞれ250~500kgのKIの水溶液をパルス状—スラッグ状に

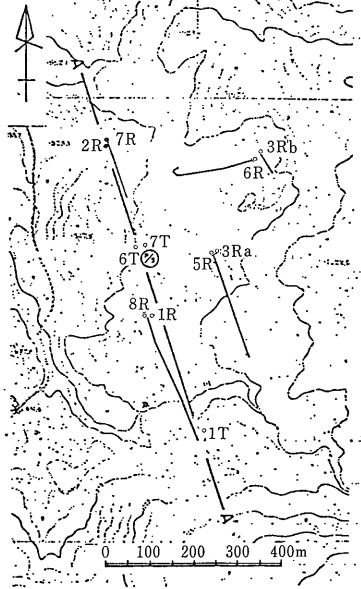
第3表 日本および世界各地の地熱貯留層において人工トレーサーテストによって測定された地熱流体の最大流速 (HORNE, 1986)

Field	Country	Speed	Reference
Wairakei	New Zealand	22 m/hr	McCabe, Barry, Manning (1983)
Broadlands	New Zealand	1.2 m/hr	McCabe, Barry, Manning (1983)
Ahuachapan	El Salvador	8 m/hr	Einarsson, Vides and Cuellar (1975)
Tongonan	The Philippines	57 m/hr	PNOC (1981)
Hatchobaru	Japan	78 m/hr	Horne (1982)
Otake	Japan	0.3 m/hr	Hayashi, Mimura, and Yamasaki (1978)
Onuma	Japan	4 m/hr	Ito, Kubota and Kurosawa (1977)

第4表 日本および世界各地の地熱貯留層における人工トレーサーテストによって測定された最大再湧出率 (HORNE, 1986)

Field	Fractional Recovery f	Reference
Wairakei, New Zealand	0.06	McCabe, Barry and Manning (1983)
Broadlands, New Zealand	0.12	McCabe, Barry and Manning (1983)
Geysers, California	0.18	Gulati, Lipman and Strobel (1978)
Palinpinon, Philippines	0.30	Harper and Jordan (1985)
Svartsengi, Iceland	>0.16	Gudmundsson, Hauksson et al (1984)
Hatchobaru, Japan	0.63	Inoue and Shimada (1985)
Tongonan, Philippines	0.12	PNOC (1981)

第16図
大沼地域における
孔井の配置 (伊東
ほか 1977; 秋林
1982)



投入し 5本の生産井 (深度1500~1750m) で熱水を採取してその I 濃度を測定する方法により実施された。テストに使用された孔井の位置を第16図に示す。還元井 7T 7R 1R 2Rにそれぞれ投入されたトレーサーの各生産井における濃度測定結果を第17図に示す。またトレーサーの各還元井への投入から各生産井において検出されるまでに要した時間 各還元井より投入されたトレーサーの再湧出率 各生産井より噴出する熱水・蒸気中における還元熱水の混入率をそれぞれ第5表 第6

表 第7表にまとめて示す (伊東ほか 1977 1978; 秋林 1982)。

前述したように場合によっては数 m/h 程度に達する速いトレーサーの流れとトレーサーが検出される投入井一観測井の組合せの不規則性などから 地熱貯留層の透水性分布に不均一性が存在し一部の還元熱水が断層を通じて流動していることが明らかである。トレーサーの再湧出率および還元熱水の混入率は 熱水の還元量が大きい7R井からの熱水が生産井5Rに与える影響が顕著であることを示している。人工トレーサーテストの開始より長期間の後に自然状態より高くなったI濃度のバックグラウンド値を用いて 5.1.(3)の方法により大沼地域で開発された地熱貯留層中の熱水の総量は500~800万と見積もられた。また 5.1.(4)の方法により各還元井とt程度である生産井間の貯留層の平均の透水係数は数~数10ダルシーであると計算された。なお各生産井におけるI濃度のバックグラウンド値はケーシングのセメンティングの深さとの相関性を示しており セメンティングの浅い孔井ではその周囲でI濃度の低い浅部の低温の熱水が混入していると推定された。

一方 大岳地域については 人工トレーサーテストは1976年に4本の還元井のうちの1本であるR-2井 (深度約500m) より 800kgのKIの水溶液をパルス状一スラッグ状に投入し 3本の生産井 (深度500m) で熱水を採取してそのI濃度を測定する方法により実施された。これにより得られたデータについて 湯原・秋林 (1978) YUHARA and AKIBAYASHI (1983) は 5.6. で述べた数値シミュレーション法による順解析を試みた (秋林 1982)。

Well	3Ra	3Rb	5R	6R
Date	0.5ppm	1.0ppm	0.5ppm	1.0ppm
75 1				
2				
3				
4				
5				
6				

Well	3Ra	3Rb	5R	6R
Date	0.5ppm	1.0ppm	0.5ppm	1.0ppm
76 5				
6				
7				
8				
9				
10				

Well	3Ra	3Rb	5R	6R
Date	0.5ppm	1.0ppm	0.5ppm	1.0ppm
75 6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

Well	3Ra	3Rb	5R	6R	8R
Date	0.5ppm	0.5ppm	0.5ppm	0.5ppm	0.5ppm
76 9	1.0ppm	1.0ppm	1.0ppm	1.0ppm	1.0ppm
10					
11					
12					
77 1					
2					

第17図 大沼地域における各還元井から投入されたIトレーサーの各生産井での観測データ (伊東ほか 1977; 秋林 1982)

左上は還元井7Tより1975年3月10日 左下は7Rより1975年7月1日 右上は1Rより1976年6月30日 右下は2Rより1976年11月2日にそれぞれ投入されたIトレーサーの生産井3Ra 3Rb 5R 6Rおよび8Rにおける観測データを示す。

第5表 大沼地域においてIトレーサーが各還元井から投入後各生産井で観測されるまでに要した時間 (伊東ほか 1977; 秋林 1982)

	投入孔井	再湧出状況	3Ra	3Rb	5R	6R	8R
第1回	7T	再湧出開始時 再湧出最大値時	27時間 77時間	— —	10日 21日	— —	ND
第2回	7R	再湧出開始時 再湧出最大値時 再湧出副最大値時	4日 19日 35日	4日 19日 —	7日 55日 18日	68時間 12日 —	ND
第3回	1R	再湧出開始時 再湧出最大値時	48時間 186時間	13日 36日	43時間 169時間	— —	ND
第4回	2R	再湧出開始時 再湧出最大値時	73時間 8日	93時間 9日	— —	42時間 114日間	— —

第6表 大沼地域において各還元井から投入されたIトレーサーの各生産井における再湧出率および合計再湧出率 (伊東ほか 1977; 秋林 1982)

蒸気井		再湧出	3Ra	3Rb	5R	6R	計
第1回	7T	再湧出量	40.6kg	0	tr.	0	40.6kg
		再湧出率	10.6%	0	tr.	0	10.6%
第2回	7R	再湧出量	29.9kg	19.1kg	53.0kg	28.8kg	130.8kg
		再湧出率	7.8%	5.0%	13.9%	7.5%	34.2%
第3回	1R	再湧出量	3.5kg	11.0kg	13.6kg	0	28.1kg
		再湧出率	1.8%	5.8%	7.1%	0	14.7%
第4回	2R	再湧出量	28.0kg	6.4kg	0	33.3kg	67.7kg
		再湧出率	14.7%	3.4%	0	17.4%	35.4%

第7表 大沼地域において各還元井から投入されたIトレーサーの再湧出率から計算された各生産井における還元熱水の混入率および合計混入率 (伊東ほか 1977; 秋林 1982)

蒸気井	3Ra	3Rb	5R	6R	8R
第1回 7T	8.0%	0	Tr.	0	ND
第2回 7R	8.7%	8.5%	24.9%	8.7%	ND
第3回 1R	1.0%	4.4%	6.3%	0	ND
第4回 2R	5.9%	1.8%	0	7.6%	0
計	23.6%	14.7%	31.2%	16.3%	

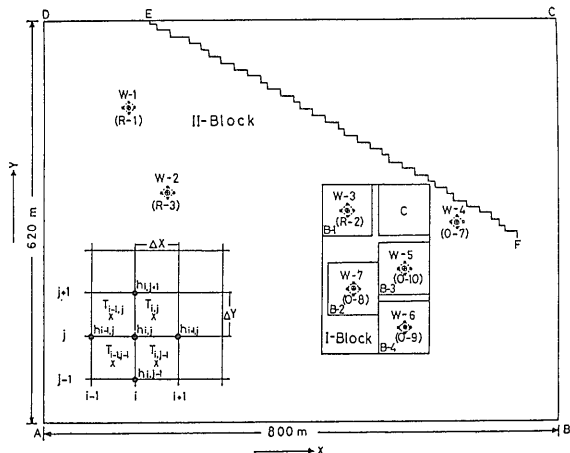
解析結果を平面2次元の貯留層モデル図 等水頭ポテンシャル線一流線分布図 透水量係数の分布図およびR-2井から投入されたトレーサーの各生産井への到達時間の観測値と理論値との差異の表として それぞれ第18図 第19図 第20図 第8表に示す。

なお 大岳地域においては還元井—生産井間のトレー

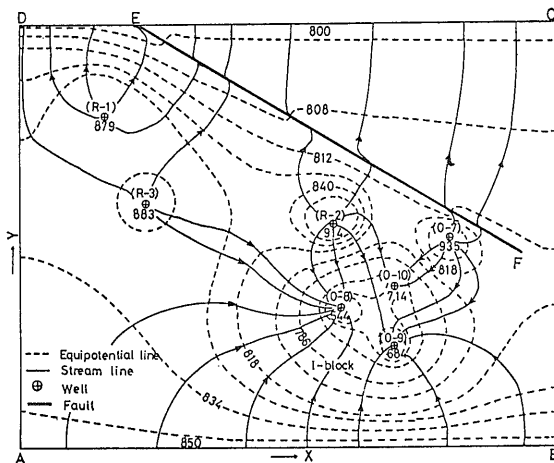
サーの移動速度は0.3m/h程度と遅く また第21図に示すように観測されるトレーサーデータは明瞭なピークを示さないことから 還元熱水は多孔質媒体や小規模な断裂系を通じて流動している可能性が高いと考えられる (HORNE 1982)。

6.2. 世界各地における人工トレーサー手法の実施例

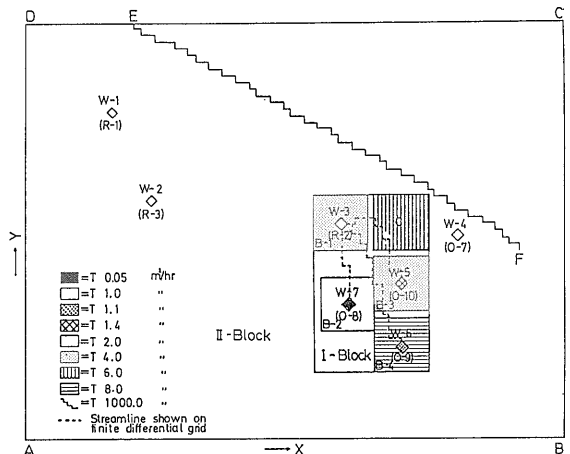
人工トレーサーテストは ニュージーランドの Wairakei Broadlands (McCABE *et al.* 1983) アメリカ合衆国カリフォルニア州の The Geysers (GULATI *et al.* 1978) East Mesa (ADAMS 1985) オレゴン州の Klamath Falls (GUDMUNDSSON *et al.* 1983) ニューメキシコ州の Fenton Hill (ROBINSON and TESTER 1984; ROBINSON 1986; ROBINSON *et al.* 1987) メキシコの Cerro Prieto (FLORES *et al.* 1982) エルサルバドルの Ahuachapan (EINARSSON *et al.* 1975) アイスランドの Svartsengi (GUDMUNDSSON *et al.* 1984) イギリスの Cornwall (BATCHELOR 1986) などの開発された熱水系あるいは高温岩体中に試験的に造成された人工



第18図 大岳地域の地熱貯留層において人工トレーサーテストデータを含めた分布パラメーターモデルに基づく数値シミュレーション(差分法)が行われた範囲と用いられたブロック(YUHARA and AKIBAYASHI 1983)
A-B C-D E-F はともに透水性の大きな断層で W-1 W-2 W-3 W-4は還元井 W-5 W-6 W-7は生産井である。



第19図 大岳地域の地熱貯留層において人工トレーサーテストデータを含めた分布パラメーターモデルに基づく数値シミュレーションによって得られた等水頭ポテンシャル線と流線の分布図(YUHARA and AKIBAYASHI 1983)



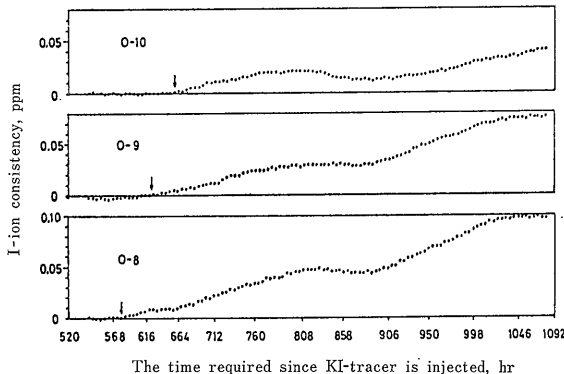
第20図 大岳地域の地熱貯留層において人工トレーサーテストデータを含めた分布パラメーターモデルに基づく数値シミュレーションによって得られた透水量係数の分布図(YUHARA and AKIBAYASHI 1983)

熱水系において実施の報告があり フィリピンの Tongonan Palimpinon アメリカ合衆国アイダホ州の Raft River メキシコの Los Azufres などの開発された熱水系などにおいても実施されている (HORNE, 1985 1986).

これらの地熱地域では 有機化合物 ハロゲン元素のほか 各種の放射性核種もトレーサー物質として使用されている(第1表 第2表参照)。またトレーサーテストデータの解析についても各種の方法が試みられている。日本以外の国では生産した熱水を還元井を通じて地下に還元していない場合が多く 人工トレーサーは活動を停

第8表 大岳地域の人工トレーサーテストにおける還元井から投入されたトレーサーの各生産井への到着時間の観測値と解析によって得られた計算値との比較(YUHARA and AKIBAYASHI 1983)

Well	Measured arrival time	Calculated arrival time	Difference
R-2 to O-8	580(hr)	542(hr)	38(hr)
R-2 to O-9	620(hr)	675(hr)	-55(hr)
R-2 to O-10	650(hr)	616(hr)	34(hr)



The time required since KI-tracer is injected, hr
第21図 大岳地域における KI を用いた人工トレーサーの観測データ(YUHARA and AKIBAYASHI 1983)

還元井R-2から投入されたトレーサーの生産井O-10 O-9 O-8における投入後の時間に従った観測データである。

止している孔井等を通じた一時的な熱水の地下注入によってパルス状—スラッグ状に投入される場合が少なくない。しかし 開発された地熱地域において多くの場合

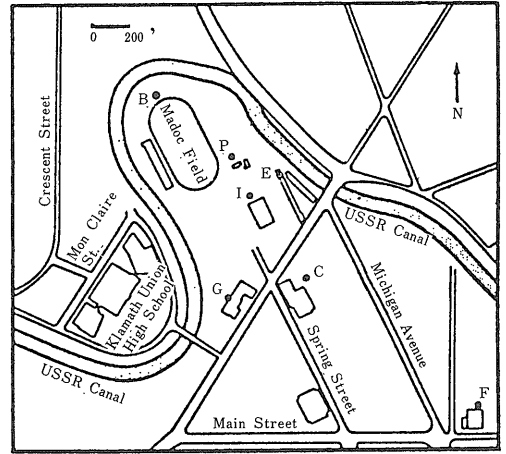
日本の例と同様にトレーサーの速い移動と高い再湧出率が観測されており 断裂を通じた地熱流体の流動を示唆している。

ここでは 特にアメリカ合衆国の Klamath Falls 地域と The Geysers 地域における人工トレーサーテストの実施例について それぞれ GUDMUNDSSON *et al.* (1983) GULATI *et al.* (1978) の報告に基づいて簡単に紹介する。

オレゴン州の Klamath Falls 地域においては 深度 600m 程度までの孔井 500 本以上によって温度が 140°C 程度までの熱水が多量に採取されており 広く多目的に利用されている。人工トレーサーテストは 開発地域の西部に位置する約 80m 離れたダウンホールポンプを用いた生産井と還元井 1 本ずつの組合せによる熱交換式のヒーティングシステムを中心に行われた (第 22 図)。孔井の深度は共に約 80m で 生産熱水 還元熱水の温度はそれぞれ約 71°C 約 67°C 生産—還元量は 70t/h 程度である。トレーサー物質としては KI (230kg) フルオレセイン (450 g) およびローダミン WT (450 g) が選ばれ同時に還元井より水溶液がスラッグ状に投入された。熱水試料の採取には 採取時間が自由に選択できる自動サンプラーが使用された。

投入された各トレーサーは 第 10 図に示すように約 2 時間 45 分後に生産井において観測され始めた。この結果は 地熱貯留層において多孔質媒体中を放射線状あるいは双極線状に還元熱水が流動し広がっていく (第 12 図 第 14 図参照) と仮定した単純なモデル計算結果よりも数 10 倍早く 熱水が断裂を通じて流動していることを示している。この還元井と生産井は Klamath Falls 地域において断裂系が発達する NW-SE 方向の線上に配列しており 周囲の孔井の中でもこの線の延長上に位置する 2 本の孔井 (第 22 図 B および C) においてのみトレーサーが検出されたことから 同方向の断裂系が地熱流体の通路として重要であると考えられる。フルオレセインおよびローダミン WT は KI に比較して時間の経過に伴う観測値の減少が著しく 熱によって部分分解していると考えられる。しかし 両者ともにその投入・観測の容易さと高い経済性から 短時間でできる定性的なトレーサーテストには非常に有効であると判断される。

カリフォルニア州の The Geysers 地域の熱水系は 蒸気卓越系として知られており (第 1 図参照) 大規模な開発が進められているが 1969 年頃よりこの地域においても蒸気凝縮水等の一部は孔井を通じて地下に還元されている。1975 年 8 月 20 日に還元井の 1 つである Sulfur Bank #1 (SB-1) を用いて約 24 時間をかけて合計 20Ci のトリチウムトレーサーを含む水が地熱貯留層に投入され 周辺の蒸気生産井で 1977 年 12 月まで蒸気凝縮水試料の採



第 22 図 Klamath Falls 地域における人工トレーサーテストに使用された孔井の配置 (GUDMUNDSSON *et al.* 1983)
 (I)還元井 (P)生産井 (B)Balsiger (C)Creamery
 (E)Eccles (F)Friesen (G)Garrison

第 9 表 The Geysers 地域の SB-1 井から 1975 年 8 月 20 日に投入されたトリチウムトレーサーの各生産井における検出開始・終了時期と検出量 (GULATI *et al.* 1978)

WELL	DATE TRITIUM		TRITIUM PRODUCED CURIES
	STARTED	STOPPED	
SB-3	10/18/75	2/14/77	0.3808
SB-6	10/20/75	11/14/77	0.1954
SB-7	10/17/75	12/28/77	0.5650
SB-8	1/16/76	7/16/76	0.1298
SB-9	12/05/75	7/07/76	0.3931
SB-10	12/12/75	7/03/76	0.1604
SB-11	12/12/75	6/26/76	0.2455
SB-12	10/22/75	6/26/76	0.1397
SB-13	8/27/75	7/03/76	0.5304
SB-14	2/13/76	6/26/76	0.0245
SB-15	12/05/75	6/26/76	0.2143
SB-16	2/20/76	6/26/76	0.0719
SB-17	2/20/76	6/26/76	0.0927
SB-18	9/24/75	10/25/75	0.0085
SB-19	2/20/76	6/26/76	0.0315
SB-20	3/20/76	6/25/76	0.2938
SB-21	5/07/76	6/25/76	0.0599
SB-22	6/11/76	6/25/76	0.0108
SB-23	6/11/76	7/03/76	0.0169
HJ-6	11/14/75	7/03/76	0.0265

Total tritium produced at 20 wells=3.5914 Curies.
 ≈ 3.6 Curies

取が行われた。

バックグラウンド値よりも明瞭に高いトリチウム濃度は 早くも 8月27日にSB-13井で観測されたのを始め SB-1井から見て約80°の角度に広がる周辺の20本の蒸気生産井で観測され トレーサーの再湧出率は約18%に達している (第9表)。この結果は地下に還元された熱水が急速に気化し蒸気として生産井から再噴出していることを直接的に証明するとともに 人工トレーサー手法が蒸気卓越系においても様々な目的に有効である可能性を示している。

6.3. Wairakei および Broadlands 地域の熱水系における人工放射性核種トレーサー手法の実施例

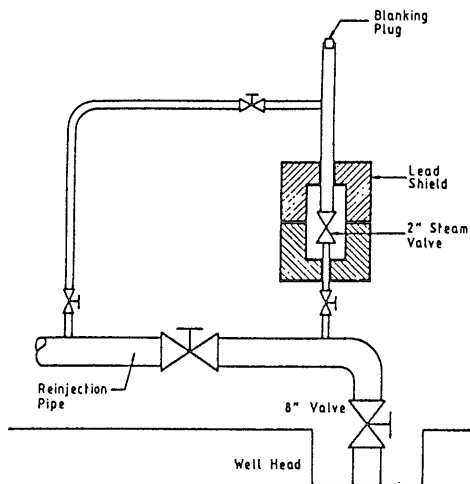
McCABE *et al.* (1983) は 1974-1980年の間ニュージーランドの Wairakei および Broadlands 両地熱地域の孔井群について 放射性核種である ^{131}I および ^{82}Br を用いた人工トレーサーテストを繰返し行い 地熱貯留層における地熱流体の流動の早さや方向を解析した結果を報告している。

放射性核種トレーサー (水溶液) の孔井内への投入は 1) トレーサーを入れたガラス製容器 (容量10ml) を孔井内サンプラー (Klyen 型) を用いて所定の深度へ下し ガラス製容器を破壊する方法 あるいは2) 前述のトレーサーを入れたガラス製容器を第23図に示す還元井の孔口に作られた熱水パイプ管に入れ 鉛で覆ったバルブを用いてガラス容器を破壊し その内容を還元熱水とともに地下に注入する方法により行われた。

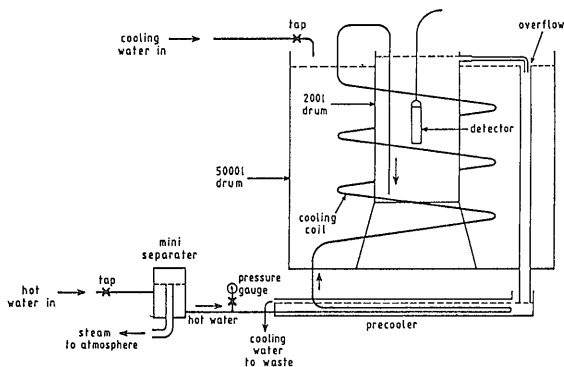
孔井から噴出する熱水中の放射性核種トレーサーの濃度測定は 第24図に示すようにパイプ中を流れる熱水を外部からの放射線のしゃへいを兼ねる容量 5kl のドラムかんを用いて冷却した後 内側の容量200l の容器に入れてこの中につるされた NaI(Tl) 結晶シンチレーターを用いて現場で連続的に γ 線を計測する方法により行われた。なお 放射線の検出では若干のバックグラウンド値の時間変化が認められ その補正の必要があった。

Broadlands においては 閉め切った各孔井の所定の深度に ^{131}I トレーサーを投入し 一定時間後に孔井内に残留する ^{131}I の量を計測することにより 地下の貯留層で生産あるいは還元を行っていない状態の各孔井を通して水平方向に流れている熱水の流速を計算する単独の孔井を用いる 人工トレーサーテストが実施された (なお放射線変化によって生じる ^{131}I 量の減少については時間補正が行われた)。

^{131}I (各回約 10MBq) の孔井内への投入は 孔井内サンプラーを用いる方法によって行われ 所定の時間後に孔井内に残留する ^{131}I の量は 1m³/h 程度の非常に遅い速



第23図 Wairakei および Broadlands 地域における還元井口からの放射性トレーサーの投入方法 (McCABE *et al.* 1983)

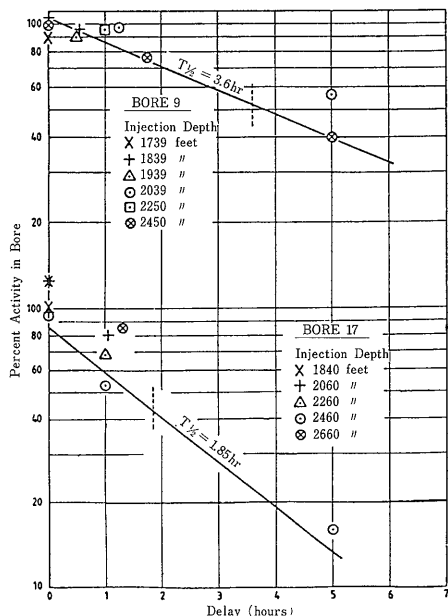


第24図 Wairakei および Broadlands 地域における熱水中の放射性トレーサーの連続測定装置 (McCABE *et al.* 1983)

度で孔口より熱水を流出させて ^{131}I 量を連続的に測定し トレーサーの出現からピークの到達までに測定された ^{131}I 量を 2 倍することによって求められた。孔井を通過する熱水の水平流速 V は簡単なモデルに基づいて(6)を用いて行われた。

$$V = \frac{\pi r}{2t} \ln \frac{C_0}{C} = \frac{0.693\pi r}{2t_{1/2}} \tag{6}$$

- ただし r : 所定の深度での孔井の半径
- t : トレーサーの投入後経過した時間
- $t_{1/2}$: 投入されたトレーサー量が熱水の水平流動により孔井内で半分になるまでに要した時間
- C : 時間 t における孔井内のトレーサー量



第25図 Broadlands 地域の2本の孔井における放射性トレーサーの投入後の時間と残留トレーサー量との関係 (McCABE *et al.* 1983)

C_0 : 投入直後の孔井内のトレーサー量

Broadlands 地域の5本の孔井について各孔井ごとに ^{131}I トレーサーテストを行った結果では、それぞれ0.02-0.8m/h程度の熱水の水平流速が得られた。第25図には2本の孔井において様々な深度に投入されたトレーサーの孔井内滞在時間と孔井内残留量との関係の例を示す。

Broadlands 地域では1974-1981年の間に ^{131}I トレーサー(各回50-270GBq)を用いて注入井を変えてその周辺の生産井を観測井とするトレーサーテストが10回行われこのうち約半数の場合には数時間-数日のうちに観測井にトレーサーが出現し、再湧出率は最大20%程度であった。

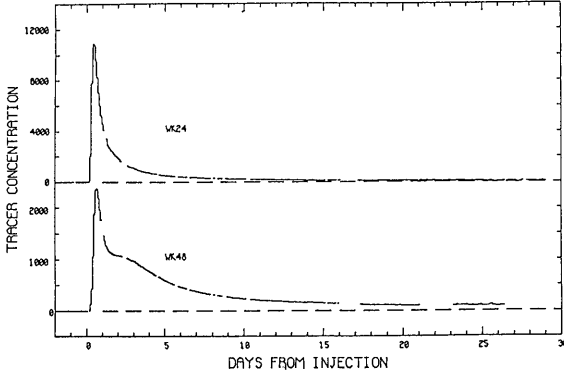
Wairakei 地域においては1978-1980年の間に低温となった3本の元生産井をトレーサーの投入井として、各回約10本づつの生産井を観測井とした人工トレーサーテストが5回実施された。これらのテストの総括表を第10表として示す。またWK107井を投入井とした第2回目のトレーサーテストにおける各観測井でのトレーサーの検出状況を第11表にまとめ、各観測井におけるトレーサー濃度の時間変化を第26図および第27図に示す。トレーサーの合計再湧出率は最大6%程度であった。

第10表 Wairakei 地域において1978-1980年の間放射性核種を用いて実施された人工トレーサーテストの総括表 (McCABE *et al.* 1983)

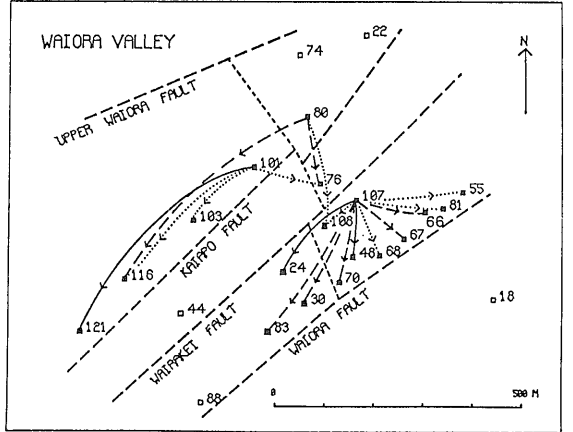
Date	Time	Injection well	Tracer		Injection depth (m)
			Nuclide	Quantity (GBq)	
2/12/78	1555	WK107	^{131}I	74	304
14/3/79	0920	WK107	^{131}I	152	334
29/6/79	1120	WK101	^{131}I	162	400
22/8/79	1044	WK107	^{82}Br	3.1	320
5/2/80	1534	WK80	^{131}I	155	397

第11表 Wairakei 地域のWK107井から1979年3月に投入された ^{131}I トレーサーの各観測井における検出状況 (McCABE *et al.* 1983)

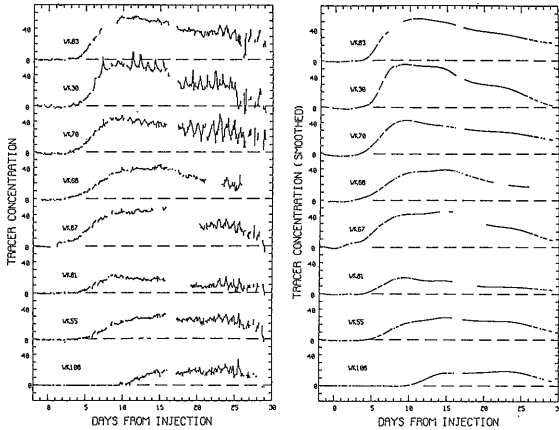
Bore	Days to 10% of peak	Days to peak arrival	Peak concn	Total % recovered	Days monitored
WK24	0.2	0.4	10,900	3.73	29
WK48	0.3	0.7	2,360	1.33	26
WK67	2.2	>10	46	0.32	29
WK70	4.0	9.5	43	0.25	29
WK68	4.0	>10	39	0.07	26
WK30	4.5	9.0	55	0.28	29
WK83	4.5	11.0	53	0.34	29
WK81	4.8	9.5	21	0.09	29
WK55	5.5	>10	29	0.18	29
WK108	10	>10	17	~0.1	29



第26図 Wairakei 地域における1975年3月の¹³¹Iを用いた人工トレーサーテストの各孔井における観測データー1 (McCABE *et al.* 1983)
トレーサーの投入井はWK107である。



第28図 Wairakei 地域における1978-1980年の人工トレーサーテストによって得られた投入井-観測井間のトレーサーの流動の検出結果 (McCABE *et al.* 1983)
実線 破線 点線はそれぞれトレーサーが検出されその再湧出率が1%以上 1%未満0.1%以上 0.1%未満であることを示す。



第27図 Wairakei 地域における1979年3月の¹³¹Iを用いた人工トレーサーテストの各孔井における観測データー2 (McCABE *et al.* 1983)
トレーサーの投入井はWK107である。右は平滑化したデータを示す。

これらの結果は 第28図に示すように地熱貯留層が不均質で 熱水の流動が大きな断裂に沿って ENE-WSW 方向に卓越する傾向を明らかに示している。特に前述した WK107 井をトレーサーの投入井とした第2回目のテストでは 断層に達していると考えられるやや深い2本の孔井においてトレーサーの再湧出率が高く 熱水の流速は 20m/h 程度に達している。WK107 井を注入井とし ⁸²Br を用いた第4回目のトレーサーテストの結果は 上述の2本の孔井について第2回目に ¹³¹I を用いて行った結果とよく一致しており トレーサーテストの再

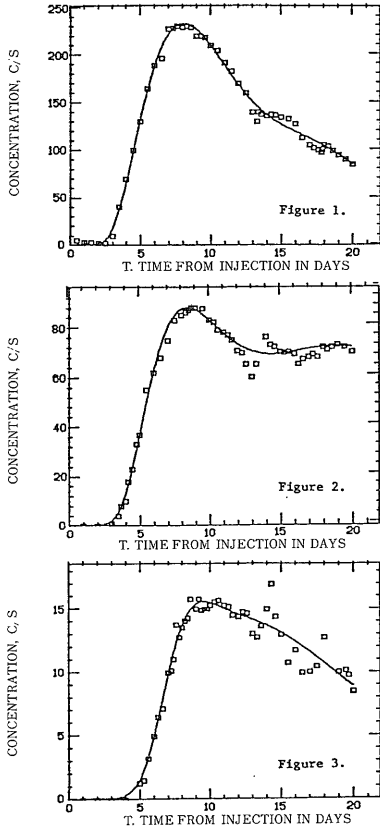
第12表 Wairakei 地域の WK80 井から1980年2月に投入された ¹³¹I トレーサーの各観測井における測定データの逆解析法による解析結果 (FOSSUM and HORNE 1982)

Well	Flow Fraction	\bar{t} Calculated (days)	Peclet Number	Inferred Aperture (mm)
WK116	.87	8.5	9.3	21
	.13	18.9	41.6	14
WK76	.42	21.5	15.80	25
	.58	8.6	13.15	18
WK108	.80	8.30	9.9	20
	.20	13.95	43.4	12

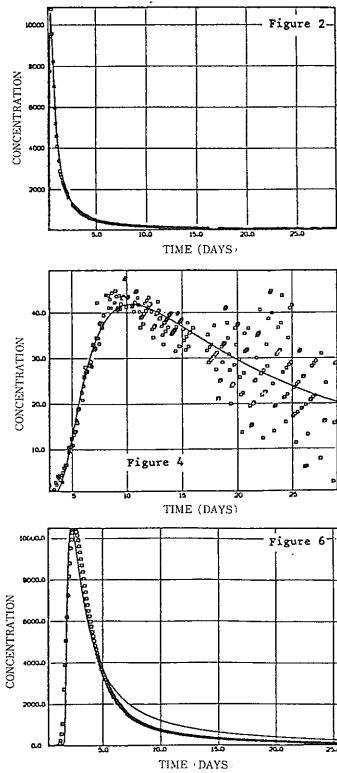
現性の高さとともに地熱貯留層における両放射性核種トレーサーの挙動の類似性を示している。

FOSSUM and HORNE (1982) は 上述した Wairakei 地域における ¹³¹I を用いた人工トレーサーテストデータのうち特に第5回目のWK80を投入井とした場合について 5.3. で述べた2つの断裂をトレーサーが流れるモデルに基づく逆解析法を試みており よい結果を得ている(第29図 第12表)。なお ペクレ数(16)からトレーラー分散を仮定して(5)を用いて計算された断裂の幅(b)については 通常考えられている値よりもかなり大きく トレーサーの分散はトレーラー分散以外の機構によって生じている可能性を強く示している。

その後 JENSEN and HORNE (1983) は 上述した Wairakei 地域におけるトレーサーテストデータのうち特に第2回目 第3回目の WK107 WK101を投入井と



第29図 Wairakei地域における人工トレーサーテストデータの逆解析法によるマッチング (FOSSUM and HORNE 1982)
上から下へ それぞれ WK80 をトレーサーの投入井として WK116 WK76 および WK108 における観測値 (四角) と逆解析法に基づく計算値 (実線) を示す。

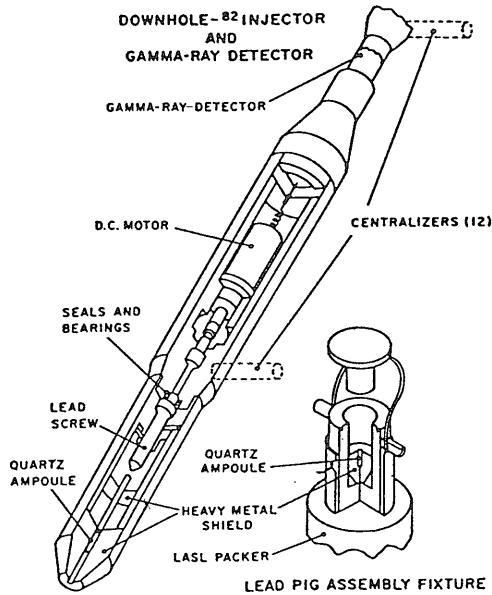


第30図 Wairakei 地域における人工トレーサーテストデータの逆解析法によるマッチング (JENSEN and HORNE 1983)
上から下へ WK107-WK24 WK107-WK70 WK101-WK121 のトレーサーの投入井-観測井の組合せによる観測値 (四角) と逆解析に基づく計算値 (実線) を示す。

第13表 Wairakei 地域において WK107 井から1979年3月におよび WK101 井から1979年6月に投入された ¹³¹I トレーサーの各観測井における測定データの逆解析法による解析結果 (JENSEN and HORNE 1983)

Production well	Injector-Producer Distance (meters)	Flow Fraction ϵ_j/E	Nonlinear Parameters		Minimum Flow Velocity (m/hr)	Fracture Width (mm)	
			α_1	$1/\alpha_2$ (days)		$\phi=1\%$	$\phi=5\%$
WK24	210	1.000	1.250	0.231	37.9	0.08	0.18
WK30	240	0.811	1.370	4.367	2.3	0.32	0.71
		0.189	1.270	3.212	3.1	0.29	0.66
WK48	120	0.450	1.393	0.293	17.1	0.08	0.18
		0.550	1.669	1.040	4.8	0.13	0.28
WK55	220	1.000	2.578	2.671	3.4	0.13	0.29
WK67	120	1.000	2.736	1.651	3.0	0.10	0.22
WK68	120	1.000	2.049	2.919	1.7	0.17	0.39
WK70	170	1.000	2.483	2.033	3.5	0.12	0.27
WK81	175	1.000	1.535	3.659	0	0.26	0.58
WK83	330	1.000	2.167	2.550	5.4	0.15	0.34
WK108	80	1.000	1.685	6.782	0.5	0.32	0.72
WK103	165	1.000	3.437	0.619	11.1	0.05	0.11
WK116	350	0.259	0.920	4.696	3.1	0.49	1.09
		0.741	3.844	0.626	23.4	0.04	0.10
WK121	490	1.000	0.916	1.451	14.1	0.27	0.61
		0.530	2.555	0.719	28.4	0.07	0.15
		-0.470	2.100	1.265	16.1	0.11	0.25

All production wells produce tracer injected at well WK107, except well WK103, 116, and 121 which produce tracer injected at WK101.



第31図 Fenton Hill 地域における放射性トレーサーの孔井内投入および測定装置 (TESTER *et al.* 1982)

した場合について 5.3. で述べた断裂から周辺岩石の孔隙中へのトレーサーの拡散と吸着の効果を含めたモデルに基づく逆解析法を試みており よい結果を得ている。その結果を第30図および第13表に示す。計算された断裂の幅も通常考えられている範囲の値となっている。

6.4. Fenton Hill 地域の高温岩体人工熱水系における人工放射性核種トレーサー手法の実施例

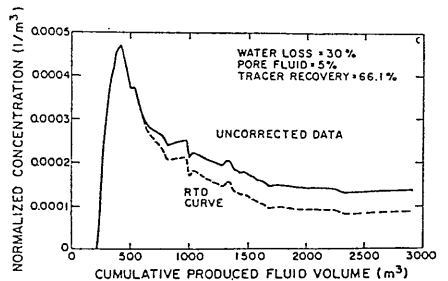
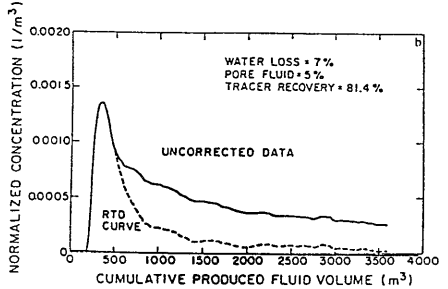
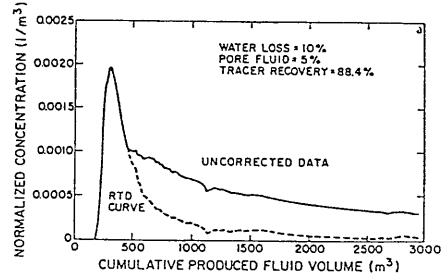
ROBINSON and TESTER (1984) は アメリカ合衆国ニューメキシコ州の Valles Caldera の西部に位置する Fenton Hill において 高温岩体 (HDR) 中に水圧破砕で生成した人工熱水系中の水の循環の様子を明らかにするために 主に ^{82}Br を用いて人工トレーサーテストを行った結果を報告している。これらの結果は Phase I と呼ばれる深度約3000mの2本の孔井 (EE-1 GT-2B)

第14表 Fenton Hill の高温岩体人工熱水系開発 Phase I において ^{82}Br を用いて実施された人工トレーサーテストの総括表 (ROBINSON and TESTER 1984)

Date	Experiment	GT-2B Elow Rate, $\text{m}^3/\text{s} \times 10^{-3}$	Water Loss, %	Tracer Recovery, %	Modal Volume \bar{V} , * m^3	Volumetric Width at 1/2 Height, m^3	Integral Mean Volume $\langle V \rangle$, † m^3
May 9, 1980	217-A2	5.9	10	88.4	161	227	1311
Sept. 3, 1980	217-A3	5.7	7	81.4	178	323	1845
Dec. 2, 1980	217-A4	5.1	40	...	187	303	...
Dec. 12, 1980	217-A5	8.1	30	66.1	266	479	2173

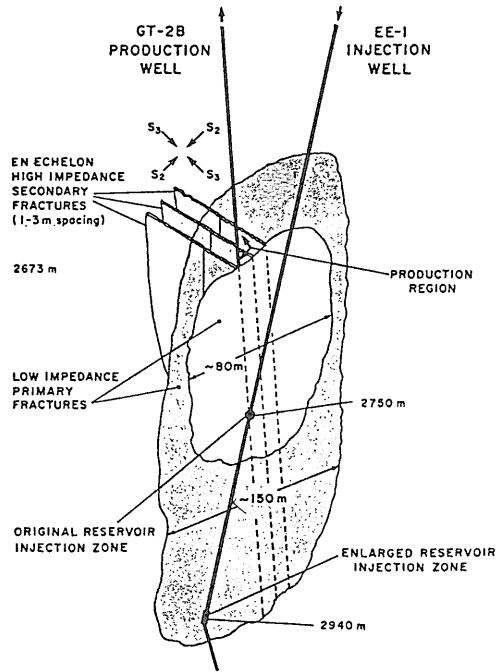
*Well bore plug flow delay volume of 161 m^3 subtracted from measured values.

†Calculated assuming an exponentially decaying tail (see Appendix B for details).

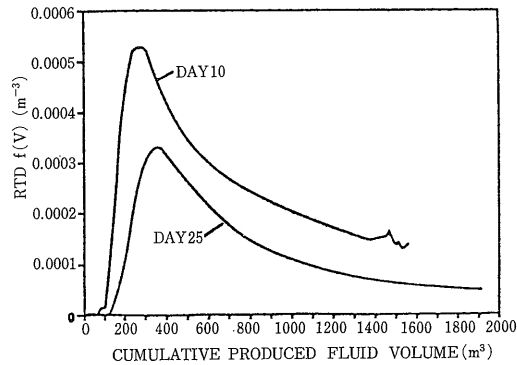


第32図 Fenton Hill 地域の高温岩体人工熱水系開発 Phase I の熱水循環テスト時 (1980) における ^{82}Br 人工トレーサーテストのRTD曲線 (ROBINSON and TESTER 1984) 上から下へ 実験217-A2 (5月9日) 実験217-A3 (9月3日) 実験217-A5 (12月12日) の結果を示す。RTD 曲線は再循環するトレーサーおよび孔井の内容積について補正が行われている。

を用いて比較的小規模の人工熱水系を造成し 1980年に熱水循環テストを実施した時に得られたものである。

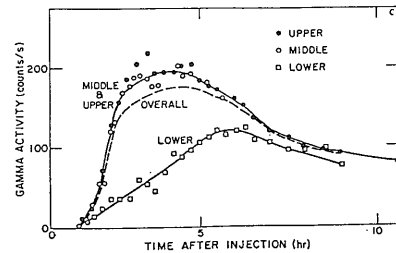
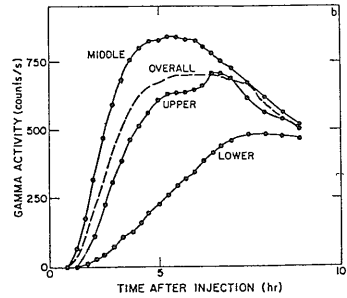
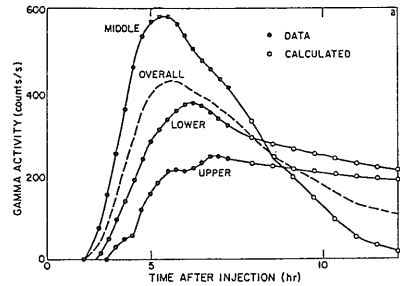


第33図 Fenton Hill 地域の高温岩体人工熱水系開発 Phase I の注水井 (EE-1) および生産井 (GT-2) の孔底周辺付近における断裂の発達状況の模式図 (TESTER *et al.* 1982; ROBINSON and TESTER 1984)



第35図 Fenton Hill 地域の高温岩体人工熱水開発 Phase II の熱水循環テスト時 (1986) における 2 回の ⁸²Br 人工トレーサーテストの RTD 曲線 (ROBINSON *et al.* 1987)

⁸²Br トレーサーは冷水の注水井 (EE-1) から地表設備を用いてあるいは孔井内検層器を利用して投入され、熱水生産井 (GT-2B) の孔口あるいは孔井内測定器で r 線を測定することにより循環する ⁸²Br 量が分析された (TESTER *et al.* 1982) (第31図)。なお生産された熱水は連続的に注水井より再注入されたため、トレーサー濃度の観測値についてはその補正が行われた。また、両

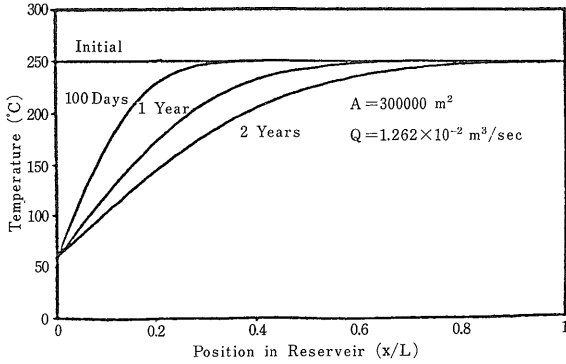


第34図 Fenton Hill 地域の高温岩体人工熱水系開発 Phase I の熱水循環テスト時 (1980) における孔井内測定装置を用いた生産井内の ⁸²Br の観測データ (ROBINSON and TESTER 1984)

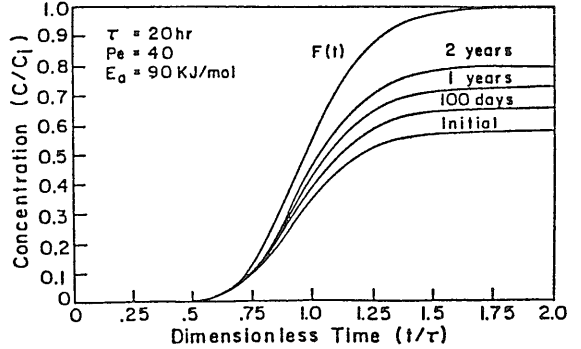
上から下へ 実験217-A2 (5月9日) 実験217-A4 (12月2日) 実験217-A5 (12月12日) の結果を示す。Lower Middle Upper は生産井孔底に近い 3 つの断裂に対応している。

孔井の内容積 (161m³) およびトレーサーの放射壊変についても補正が行われた。第14表には合計 4 回の実施された ⁸²Br を用いたトレーサーテストの総括表を示す。また、第32図にはこのうちの 3 回について各トレーサー投入後の累積熱水生産量と地表において測定された ⁸²Br トレーサー濃度との関係 (V-E(V) 曲線) を示す。

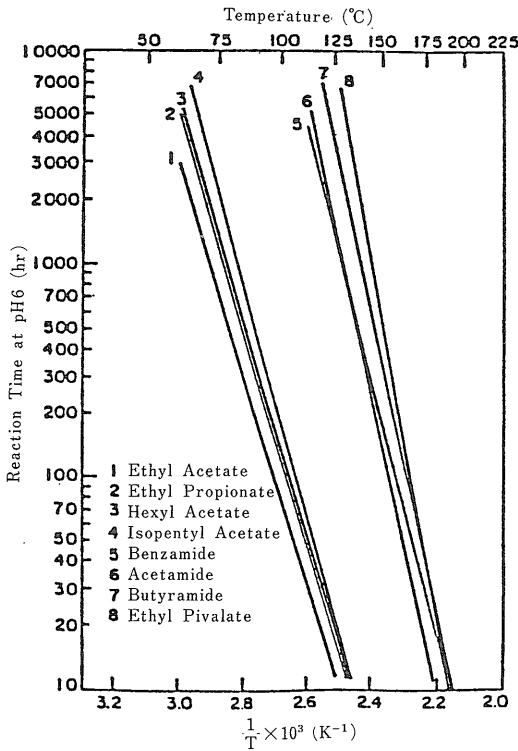
第32図に示されたトレーサーの V-E(V) 曲線 (5.2. 参照) は、熱水のかなりの部分は水圧破砕によって生成した高い透水性を持つ大規模な断裂を通じて直接速く流動しているけれども、一部はおそらく周辺の小規模な断裂系等を巡ってゆっくりと出現することを示している。5.2. で述べたモード容積 (\bar{V}) および累積平均容積 ($\langle V \rangle$) は、第14表に示されるように熱水循環テストの経過とともに明らかに増加しており、前述した大規模な



第36図 高温岩体人工熱水系における長期熱水循環に伴う温度低下のモデル計算 (TESTER *et al.* 1986)



第37図 高温岩体人工熱水系における長期的な水の循環に伴う温度低下によって上昇する熱反応性トレーサーの観測濃度のモデル計算 (TESTER *et al.* 1986)



第38図 熱反応性トレーサーとしての使用が期待できる有機化合物の加水分解反応の温度依存性の実験結果 (TESTER *et al.* 1986)

人工1次断層が時間の経過とともに拡大するとともにその周囲の熱水が流通する小規模な断層系あるいは熱応力によって生成する2次断層の体積も増大していることを明瞭に示している。同時に トレーサーの再湧出率はテストの回を追って低下しており 周囲の小規模な断層等を通じた注入水の漏出が増加していることを示して

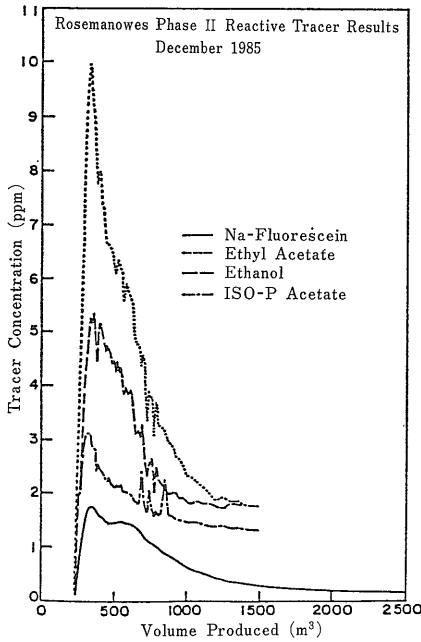
いる。

Phase I で開発された人工熱水系において 生産井である GT-2B の孔底付近では第33図に示されるように3つの断層を通じて熱水が孔井へ流入していると考えられ前述したように孔井内に複数のγ線検出器をつるしてトレーサー濃度を測定することにより熱水の流れが検討された(第34図)。この結果 熱水は生産井に最初3つの断層のうち主に中央と下方のものから流入していたけれども 熱水循環テストの経過とともに中央と上方のものから流入するように変化したことが示された。

その後 Fenton Hill において1980年に開始された Phase II では 人工トレーサーテストが深度約4,500mの2本の孔井 (EE-2 EE-3A) を用いて 1985年の水圧破碎テスト時に Naフルオレセイン NaBr NaNO₃ をトレーサーとして また1986年の熱水循環テスト時に2回⁸²Br (各約70mCi) をトレーサーとして実施され成功している (ROBINSON 1986; ROBINSON *et al.* 1987)。

この熱水循環テスト時の人工トレーサーテストにおいても 第35図に示すように第1回目 (DAY 10) に比較して第2回目 (DAY 25) の方がトレーサーピークの出現が遅くまたトレーサーの再湧出率が低いことから 時間の経過とともに人工熱水系の規模が拡大していることが推定された。計算された累積平均容積 (<V>) は 還元井と生産井を結ぶ断層-孔隙系の体積が DAY 10 の約2200m³ から DAY25 の約8400m³ に拡大しており Phase I の場合に比較して数倍大きくなっていることを示している。

本来のトレーサーの意味からは外れるが Fenton Hill で行われている高温岩体における人工熱水系造成の開発研究では 高温で分解する反応性物質をトレーサーとして他の非反応性・非分解性のトレーサー物質と併用して



第39図 Rosemanowes 地域の高温岩体人工熱水系開発 Phase II の熱水循環テスト時 (1985) における熱反応性トレーサーテストのETD曲線 (TESTER *et al.* 1986)

繰返し人工トレーサーテストを行うことにより その濃度の変化から地表において観測される熱水の温度低下よりも以前に人工熱水系の温度低下を定量的に検出する方法が検討されている (TESTER *et al.* 1986).

熱反応性トレーサーの熱分解反応として 1 次反応を仮定すれば(53)が成立する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -kC \quad (53)$$

ただし C : トレーサーの濃度

k : 反応速度定数

k についてはアレニウスの式(54)が成立すると考える。

$$k = A_r \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (54)$$

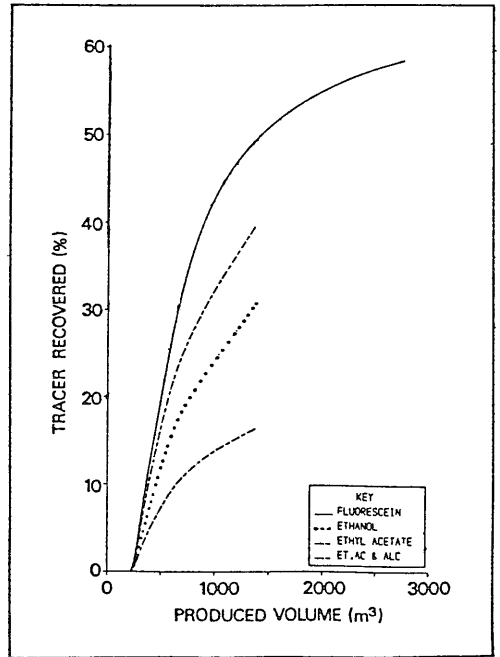
ただし A_r : 定数

E_a : 反応エネルギー

R : 気体定数

T : 絶対温度

高温岩体人工熱水系において使用される熱反応性トレーサーは その人工熱水系の温度での熱分解の半減期が人工熱水系における水の循環に要する時間と同じオーダーであることが必要である。熱反応性トレーサーの分解性は (54)に示されるように温度の低下に従って急激に



第40図 Rosemanowes地域の高温岩体人工熱水系開発 Phase II の熱水循環テスト時 (1985) におけるフルオレセインとともに熱反応性トレーサーとして酢酸エチルを用いた人工トレーサーテストの累積熱水生産量とトレーサーの再湧出率の関係 (BATCHELOR 1986)

減少するため 人工熱水系に投入された熱反応性トレーサーの観測濃度は 人工熱水系の温度が熱の抽出によって第36図に示されるように時間とともに低下するに従って第37図に示されるように増加することとなる。これを利用して逆に熱反応性トレーサーの観測データから 適当な人工熱水系の温度分布モデルに基づいて順解析的あるいは逆解析的に地下の人工熱水系の温度変化を推定することが可能である。

このような熱反応性トレーサーとしての使用が期待される岩石との反応性が小さいと考えられる有機化合物について その加水分解反応の温度依存性が室内実験により明らかにされた結果を第38図に示す (TESTER 1986)。なお より高温で熱反応性トレーサーとしての使用が有望な有機化合物の選択も進められている。熱反応性トレーサーの 野外実験は 1985年に Fenton Hill よりも低温のイギリスの Cornwall にある Rosemanowes 高温岩体実験場で酢酸エチルを用いて試みられた (TESTER *et al.* 1986; BATCHELOR 1986)。その結果を 第39図および第40図にそれぞれトレーサー投入後の累積熱水生産量とトレーサー濃度との関係および累積熱水生産量とトレ

ーサーの再湧出率の関係として示す。なお酢酸エチルはpHの変化に応じて分解しエチルアルコールになるため第40図では両者を合計した再湧出率も表示されている。フルオレセインはこの場合非熱反応性の基準トレーサーとして使用された。

7. おわりに

今回アメリカ合衆国に長期滞在した間に学会・ワークショップ等で見聞する機会が多かった熱水系における人工トレーサー手法について熱水系の化学的探査・評価等の手法の1分野としてその利用の現状を総論的に取りまとめることを試みた。

取りまとめを進めていく過程を通じて熱水系における人工トレーサー手法の分野では今後次のような研究・開発が特に重要であると感じられた。

(1) 高温の地熱貯留層においても人工トレーサーとして有効な新しいトレーサ物質(特に耐熱性・非反応性の高い有機化合物等)の選定のための室内実験や野外実験。

(2) 地熱貯留層における人工トレーサーの挙動を把握しこれを貯留層の特性の解析に利用するための室内実験 小規模野外実験および数学的モデル化。

(3) 地熱流体の生産—還元時のみならず孔井掘削 注入—噴出テスト時等における人工トレーサー手法の利用のための野外実験やデータ解析法の検討。

(4) 地熱開発開始時からの長期に渡る物理的・化学的モニタリングと平行した体系的な人工トレーサーテスト法(特に天然に存在しないトレーサー物質の還元熱水に対する長期一定濃度連続状投入—観測)の研究・開発。

(5) 地熱流体の質量保存式とエネルギー保存式に化学トレーサーの質量保存式を加えた分布パラメーターモデルに基づく総合的な地熱貯留層解析法の研究・開発。

今回の紹介の中では取り上げなかったけれどもアメリカ合衆国では上述したような地熱貯留層における人工トレーサー手法のより幅広く高度な利用を目標として様々な基礎的・応用的な研究が進められている。このような研究の例としては ADAMS *et al.* (1986) ADAMS (1985) CHRYSIKOPOULOS and KRUGER (1986) HORNE *et*

al. (1982 1985) HORNE and RODRIGUEZ (1983) KOCABAS and HORNE (1987) などが挙げられる。

アメリカ合衆国においては地熱貯留層における水と熱の移動と貯留について分布パラメーターモデルに基づく数値シミュレーションのために20種類以上の汎用シミュレーターが構築されており化学物質の移動と貯留を取り扱えるものもある(たとえば VAN DEL HEIJDE *et al.* 1985; WANG *et al.* 1982)。しかし人工トレーサーデータについては現在までに得られているデータが非常に短期的・局所的であるため地熱流体の質量およびエネルギーに関するデータと同時に体系的解析が試みられた例はないようである。

なお最近アメリカ合衆国でも産業廃棄物の貯留所から漏出した化学物質が引き起こす地下水系の汚染が大きな問題となっており将来の核廃棄物の地下貯蔵計画とも関連して精力的な研究・開発が進められている。この中ではトレーサーデータを含めた地熱貯留層の解析にも利用が可能な分布パラメーターモデルに基づいて質量 エネルギー 化学物質の移動と貯留を様々な地下条件下で同時に解析するための大規模な汎用の数値シミュレーターが構築されており今後もより大規模で総合的なものが制作されて行くと思われる(たとえば VAN DEL HEIJDE *et al.* 1985; EPRI 1984a 1984b 1986)。

以上のように今後もアメリカ合衆国を中心として熱水系・地熱貯留層における人工トレーサー技術およびこれに関連性の深い各種の技術が発展して行くことが期待されその知識・技術の吸収は引き続き日本の研究者・技術者にとって非常に重要であると思われる。

筆者は熱水系の実態を明らかにするための有力な化学的手法として1975年頃から人工トレーサー手法について大いに興味を持っていたもの そのデータ解析法については本説を取りまとめるまでほとんど馴染みがなかった。このような読者には JAVANDEL *et al.* (1984) KINZELBACH (1986) WANG and ANDERSON (1982) 等の教科書が例題も多くて分り易く参考になると思われる。最も基礎となる地下水文学の教科書としては FETTER (1980) 等が体系的に分り易く推薦できる。無論本説がより直接的に役立てば幸いである。