

平成 22 年度地熱発電に係る環境影響審査手法調査業務（抜粋）

出典：「平成 22 年度地熱発電に係る環境影響審査手法調査業務報告書」

環境省

1. 影響発現事例（海外）

我が国の地熱発電所は、昭和 41 年（1966 年）に操業開始した松川地熱発電所が最初であり、40 年以上の実績がある。この間、これまでに地熱開発に伴う周辺温泉などへの影響が発現した事例はなく、順調な運転を続けている。しかし、海外では 100 年前からの開発実績があり、その間には大きな環境影響が発現したとされる事例もみられる。

文章中に明示した引用文献の一覧は p29 した。

表 5.2.1 地熱開発に伴う環境影響の発現事例

国	(1) ニュージーランド		(2) フィリピン		(3) イタリア	(4) 米国	(5) スイス
	ワイラケイ	オハーキ	ティウイ	トンゴナン	ラルデレロ	ガイザー	バーゼル
事例名	ワイラケイ	オハーキ	ティウイ	トンゴナン	ラルデレロ	ガイザー	バーゼル
発電規模 ¹	204 MW ²	104 MW (4 基)	330 MW (6 基)	723 MW (21 基)	543 MW (21 基)	1421MW (21 基)	(情報なし)
面積 ²	15 km ²	5-8 km ²	13 km ²	120-150 km ²	250 km ²	100 km ²	(情報なし)
生産井数	60 ²	24 ²	43 ^{1, 2}	81 ¹ (75 ²)	180 ^{1, 2}	424 ²	3
還元井数	(情報なし)	(情報なし)	16 ^{1, 2}	33 ¹ (26 ²)	23 ^{1, 2}	43 ²	1
地熱系 タイプ	熱水/蒸気	熱水	熱水	熱水	蒸気	蒸気	高温乾燥 岩体 (EGS 法)
本格的 発電開始年	1958 年～	1988-89 年～	1979 年～	1983 年～	1910 年～	1960 年～	2006 年～
環境影響	温泉水位・水温低下、温泉枯渇、間欠泉停止、塩化物含有量減少	温泉水位・水温低下	地震、水蒸気爆発、温泉枯渇	温泉流量低下、温泉枯渇または湧出停止、塩化物濃度低下	蒸気・ガス噴出停止	温泉流量低下、蒸気供給量低下、地震	地震
対策等	還元井の設置(1996 年頃～)	還元井の設置(試験運用中の 1980 年頃～)、分離熱水を温泉へ直接供給、温泉底部へのコンクリート施工	還元井の設置(1983 年～)、開発対象地の移動	還元井の設置 ⁷	還元井の設置(1980 年代前半～)	注水(1980 年半ば～) ⁷	開発停止
回復 (回復の程度)	回復なし	水位上昇(但し、分離熱水の直接供給により、水温変動、塩化物含有量増加が発生)	回復なし	塩化物濃度増加、流量増加	回復なし	生産量減少に歯止め(但し、注水量増加に伴い地震増加)	開発停止から 5 カ月後まで地震観測

1 (Bertani, 2005a)

2 (Bertani, 2005b)

このような影響事例は、日本の発電所に比べて相当大規模な発電所である場合や、還元井での資源管理が実施されていなかったものも多いことから、きめ細かな環境対策や管理が実施されている日本で同様の環境影響が起こるとは考えられないが、参考までに表 5.2.-1 に示す 7 カ所の事例を収集し、その概要を整理した。(ただし環境影響の内容等は原典に基づく記載のみである。)

(1) ニュージーランド

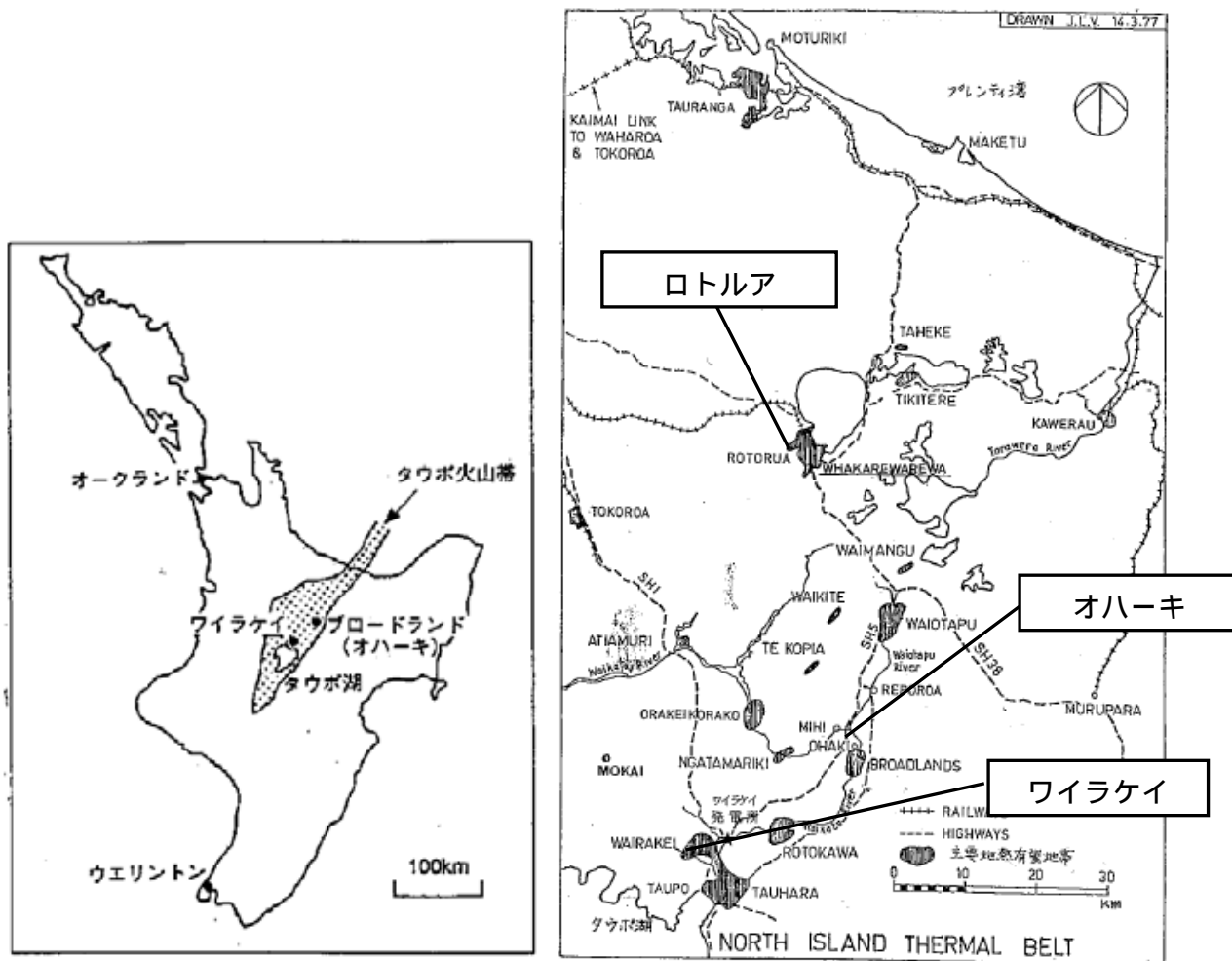


図 5.2.1 ニュージーランド（北島）における地熱帯位置図（本松、1982；玉生、1998）

ワイラケイ (Wairakei) (熱水卓越系/蒸気卓越系¹)

¹開発以前は一般に熱水卓越系であったが、開発に伴い蒸気卓越ゾーンが形成されるようになった（玉生、1998）

様々な間欠泉や温泉などの地熱徴候が見られ、旅行者に人気の場所で、レクリエーションの場所として利用されていた。ガイザーバレーには数々の間欠泉が見られ、ワイオラバレーには様々な色彩の温泉があった。(本松、1982)

イタリアのラルデレロに次いで、世界で二つ目の本格的地熱発電所。1949年調査開始、1950年から試錐孔が掘られ、1958年から本格的な電力生産開始。(馬場、1964; Hunt, 2001)

ガイザーバレー (Geyser Valley) は観光的価値が高いため開発対象から除外され、主にワイオラバレー (Waiora Valley) 周辺が開発された (図 5.2.-2、図 5.2.-3)。坑井の深度は浅い (200~1,500 m、平均 700 m 以下) (本松、1982)。

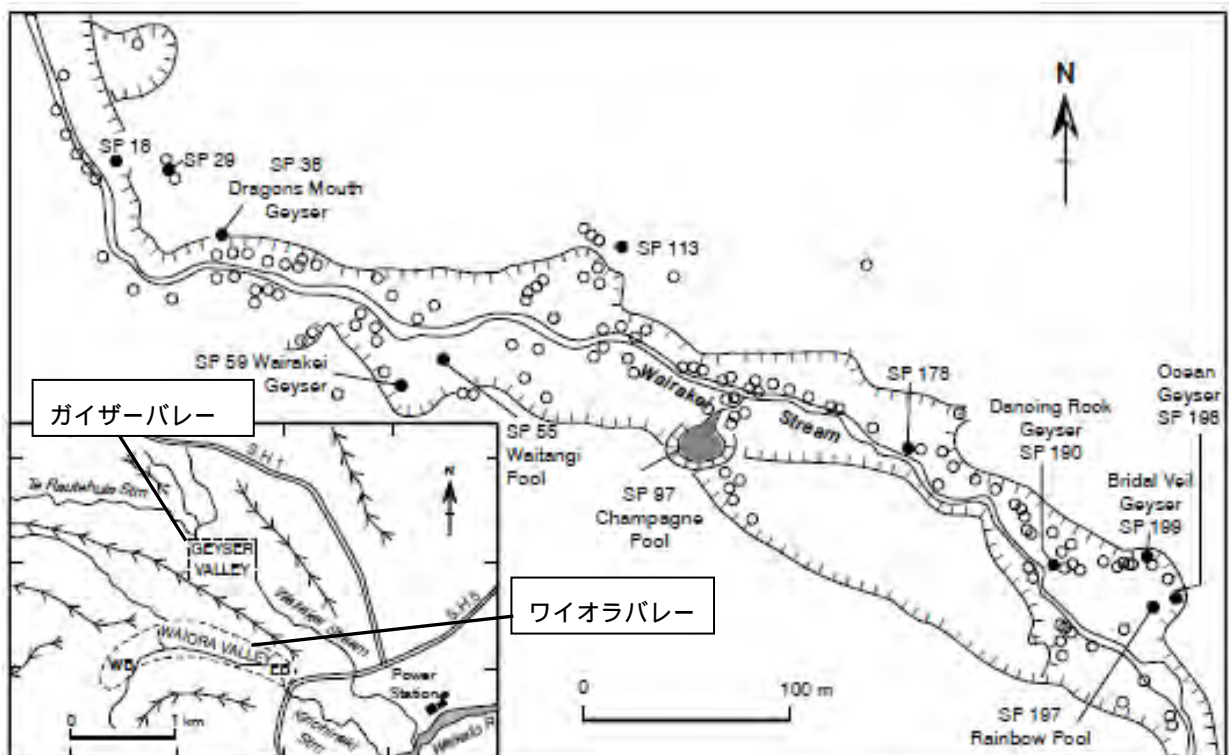


図 5.2.3 ガイザーバレーの温泉位置図（西掘削地（WB）・東掘削地（EB））(Hunt, 2001)

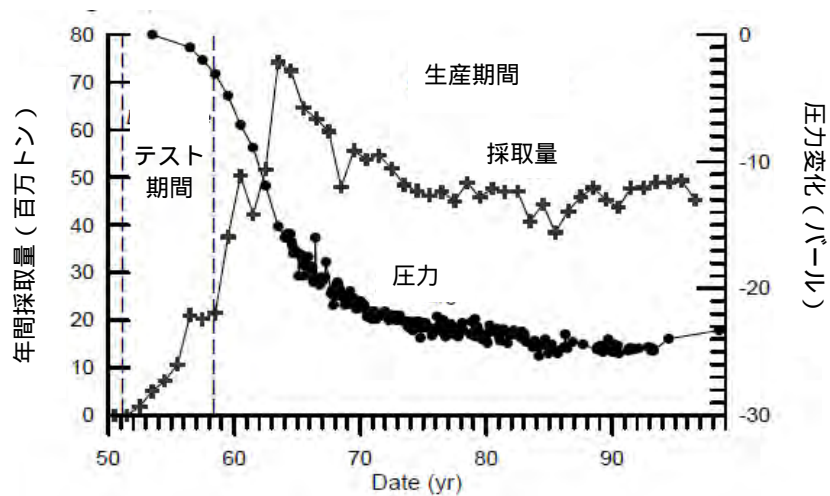


図 5.2.4 ワイラケイにおける採取量（流体²）及び圧力の変化

(Glover & Hunt, 1996; Hunt, 2001)

地熱開発に伴い、地域の温泉水位が低下し、ワイオラバレーおよびガイザーバレーの温泉は枯渇した (Ellis & Mahon, 1977; 大木、渡部, 1992; Hunt, 2001)。地熱開発開始から数年後には、ガイザーバレーの間欠泉、温泉、地獄は、蒸気噴出地とわずかな噴気孔を残すのみとなってしまった。特に、間欠泉の停止は、多くの人々に衝撃を与えた (玉生、1998)。

図 5.2.5 には溢水量・水位減少がみられたガイザーバレーの温泉の例が示されている。

さらに、多くの湧水地 (springs) で塩化物含有量が減少 (図 5.2.6)。温泉の温度は、30 度も下がった所もあれば、溢水量は減少したが水温には殆ど変化が見られなかった場所もあった (図 5.2.7)。

開発により完全に熱水で満たされていた熱水層の水位・圧力が低下し、上部に蒸気の層ができたことにより、蒸気の噴気活動は増大した一方、熱水の湧出は減少した (Hunt, 2001 は、圧力が 3 バール未満に落ちたことが原因としている)。

そして、ガイザーバレーに熱水を運んでいた断層から熱水層へ冷たい天水の侵入が起こり、井戸の塩分・エンタルピーが減少し、間欠泉等の活動が停止した (本松、1982)。1996 年頃から地下還元が実施されている (玉生、1998)。

カイザーバレーの開発は避けられたが、結果としては同一の地熱貯留層を開発したため、直接的な影響が短期間に現れた (本松、1982)。開発前には 10 箇所以上存在していた間欠泉 (ガイザー) がなくなってしまい、現在サーマルバレーと呼ばれている (玉生、1998)。

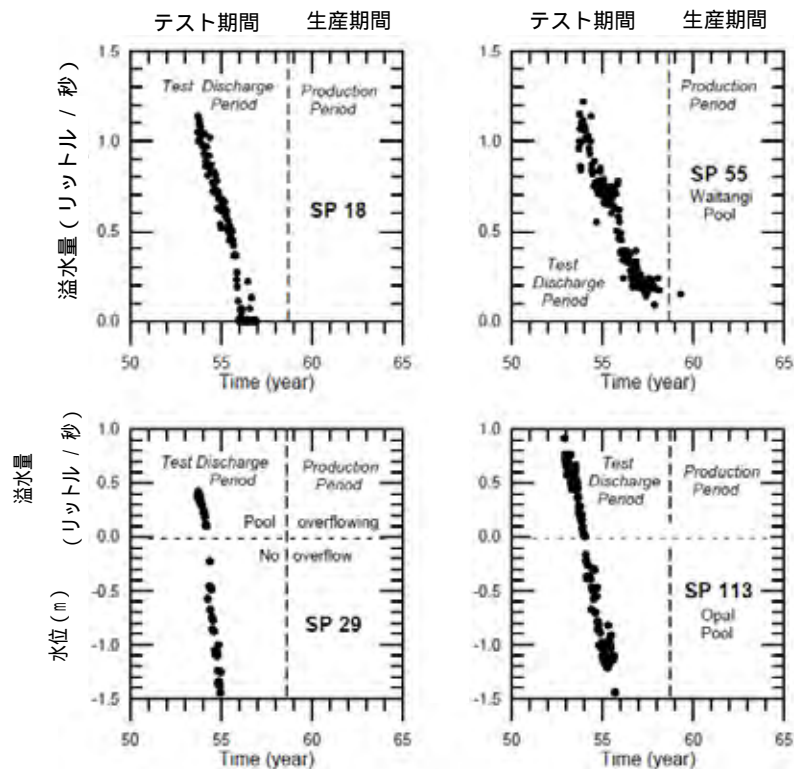


図 5.2.5 ワイラケイにおける地熱開発が原因とされる溢水量・水位変化の例

(Glover & Hunt, 1996; Hunt, 2001)

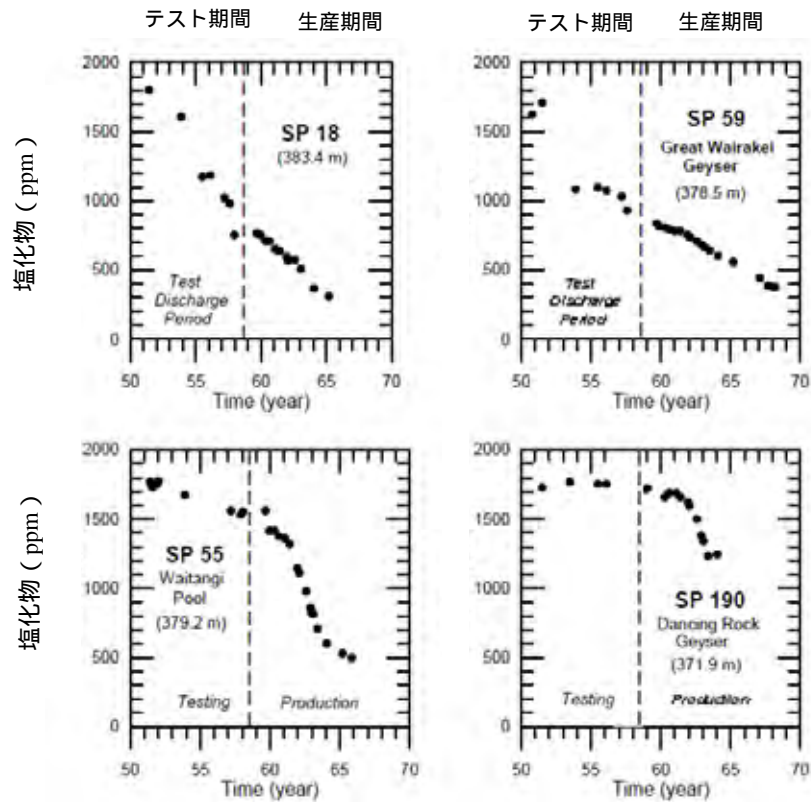


図 5.2.6 ワイラケイにおける地熱開発が原因とされる塩化物含有量の変化

(Glover & Hunt, 1996; Hunt, 2001)

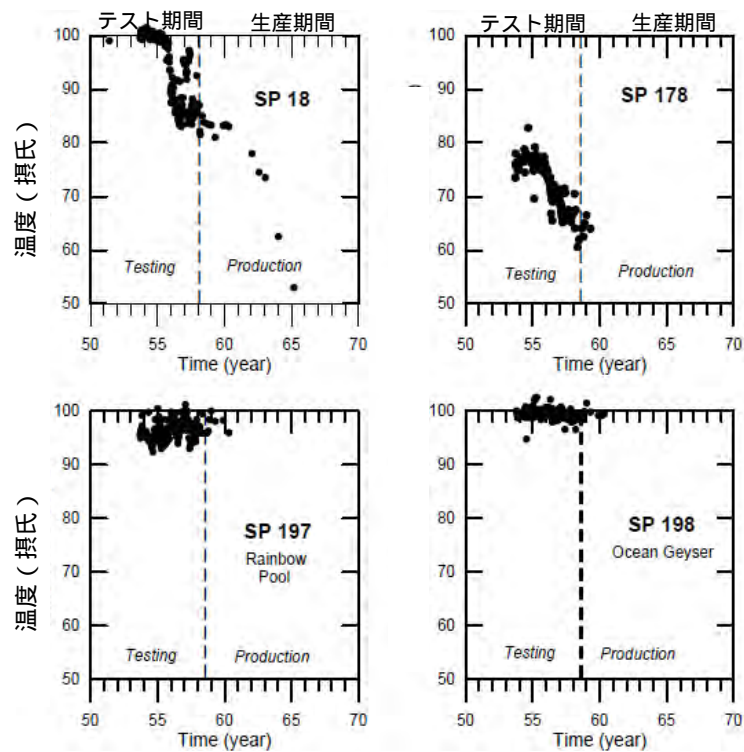


図 5.2.7 ワイラケイにおける地熱開発が原因とされる水温の変化

(Glover & Hunt, 1996; Hunt, 2001)

オハーキ (Ohaaki) (熱水卓越系)

1965年に掘削開始。1967年から試験的な採取が行われ、1970年の年間採取量は10Mtまで増加された事例(図8)。1972年以降、引き続き掘削は行われたが、大規模な試験は1988年まで行われなかった。

オハーキ地熱発電事業の計画段階において、環境影響報告書が準備されていたが、自然地熱兆候(thermal features)への影響については触れられていなかった。テスト期間中の分離熱水(排水)は近くの川に放流されていたが、1980年ごろから地下に還元されるようになった。1988年から1989年にかけて発電所の稼働開始。(Hunt, 1997)

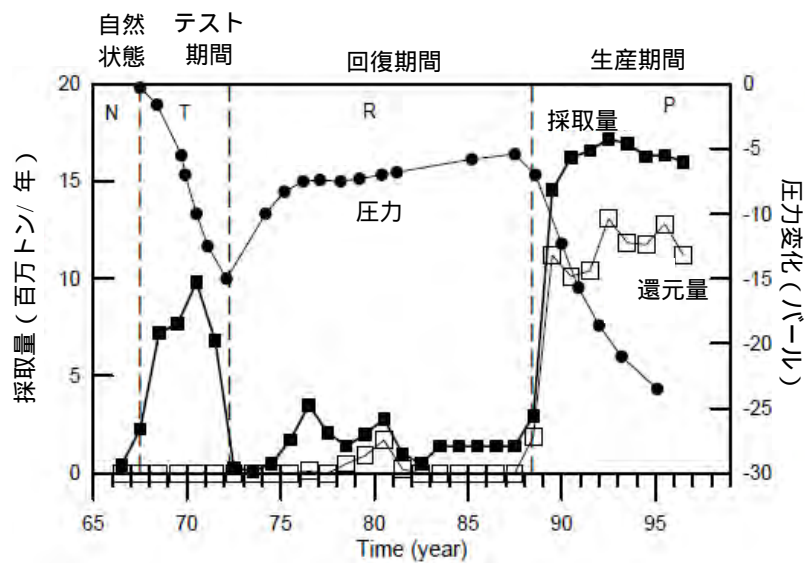


図 5.2.8 オハーキにおける採取量及び圧力の変化 (Hunt, 2001)

掘削および貯留層の調査が開始されて以来、ナーティ・タフ族により数世紀にわたり利用されてきた重要な温泉湧出地であるオハーキ温泉(図5.2.9)の水位・水温が低下(Hunt, 1997; Hunt, 2001)。近くの坑井を開放すると流量・水位が減少し、閉鎖すると増大した(図5.2.10)(Hunt, 2001)。

1971年には9.5 m下方まで低下したが、テスト期間が終了すると急速に上昇した(図5.2.11)。

1989年以降、オハーキ温泉の水位を保つために、分離熱水を温泉に供給し、漏れを防ぐために温泉の底にコンクリート層を張るなどの対策が取られている(Hunt, 1997; Lee & Bacon, 2000)。

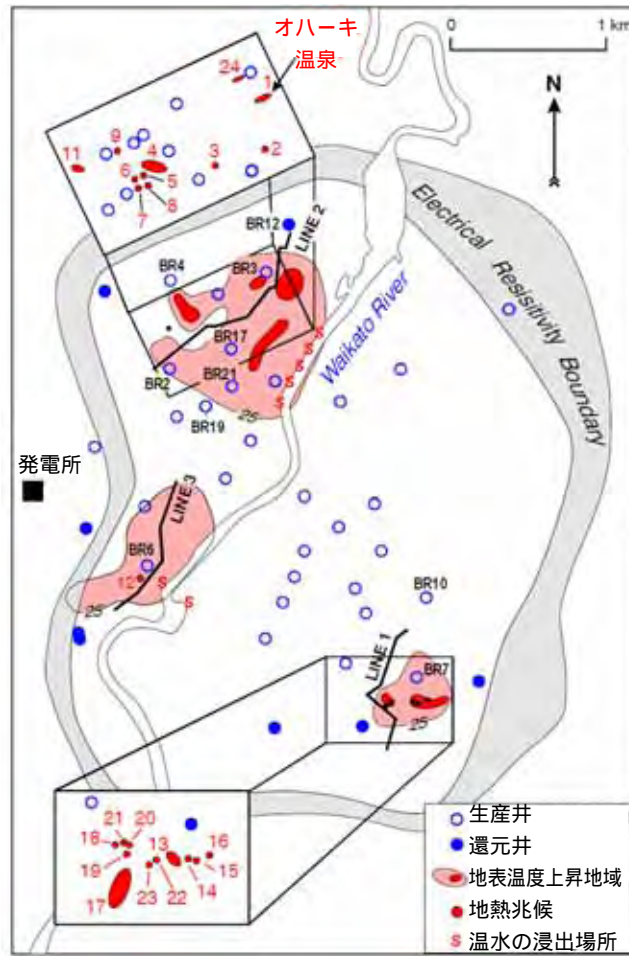


図 5.2.9 オハーキ地域の地熱兆候（温泉、間欠泉等）および坑井、還元井の位置図
 (Hunt & Bromley, 2000)

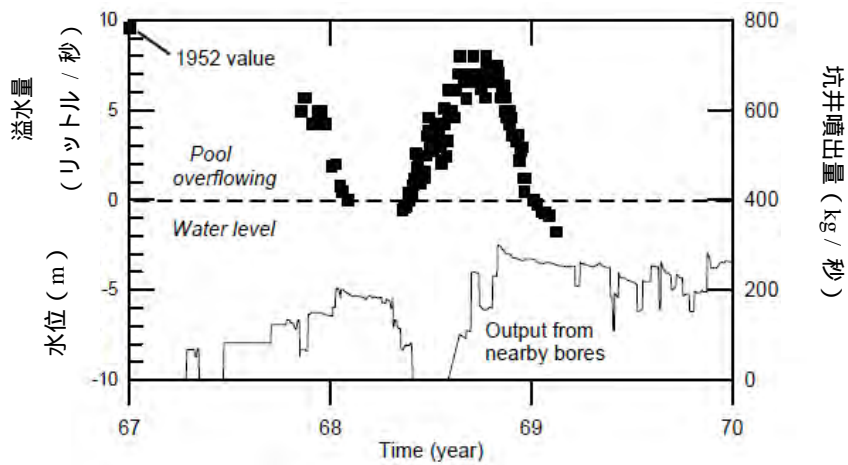


図 5.2.10 噴気テスト期間の一時期のオハーキ温泉の溢水量の変化 (Hunt, 2001)

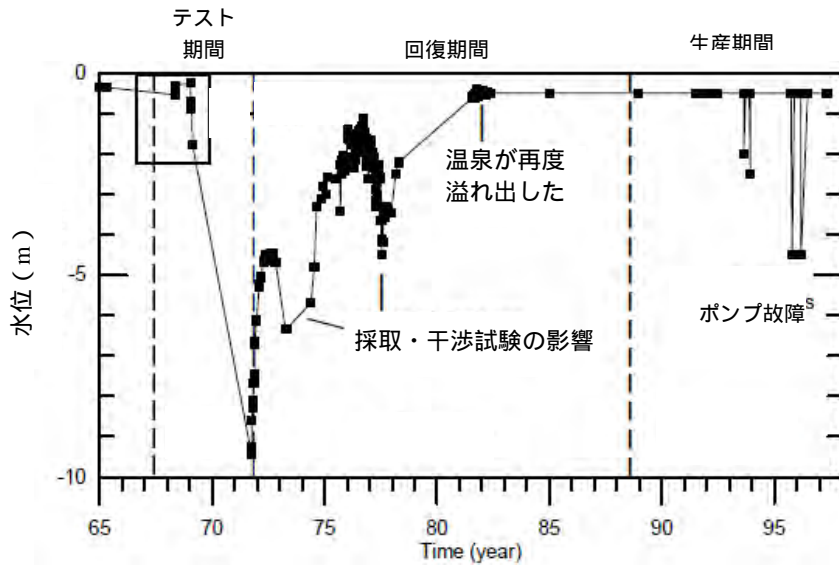


図 5.2.11 オハーキ温泉の水位変化 (Hunt, 2001)

開発前の温泉の表面温度は 85 度以上であったが、テスト期間中は 65~75 度に低下した (図 5.2.12)。「回復期間中」は 90 度を超えることが多かったが、生産期間の 1992 年には 30~50 度まで低下した。

現在は、坑井から温泉に注ぎこまれる排水 (熱水) の量により水温は変動している。坑井からの排水 (熱水) の塩化物含有量は高く、排水が温泉に注ぎこまれるようになってから温泉の塩化物含有量は増加した。(Hunt, 2001)

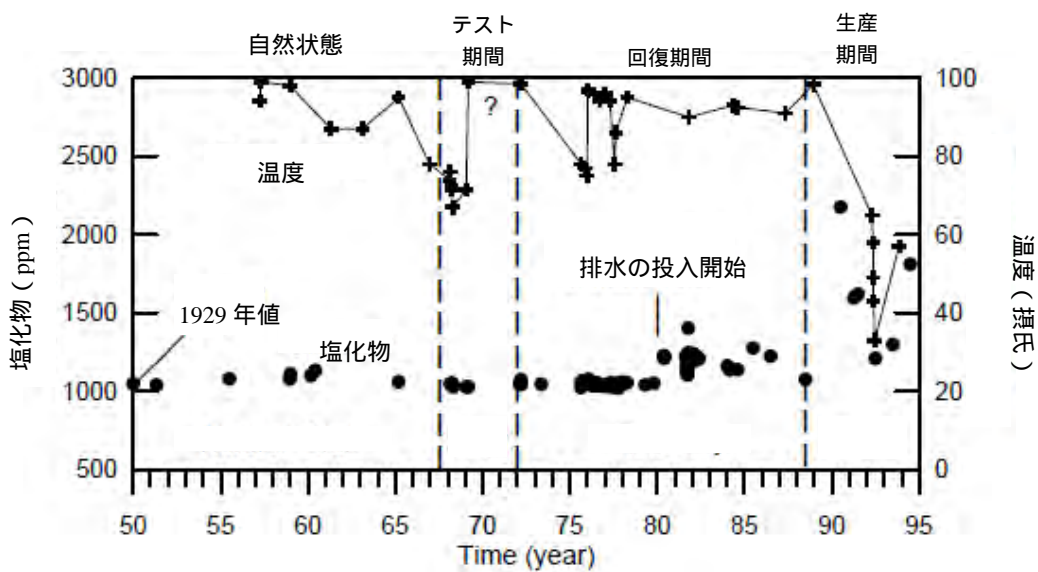


図 5.2.12 オハーキ温泉の温度、塩化物濃度の変化 (Hunt, 2001)

(2) フィリピン

ティウイ (Tiwi) (熱水卓越系)

噴気や温泉が湧出し観光地として有名であった温泉公園の直下で大規模な開発が行われた事例。1971年より本格的な掘削が開始された。

開発以前から、噴気活動が活発化していたが、1975年より活動はさらに活発化した。1980年7月6日に異常な微小地震が記録され、同年7月29日に最も噴湯の強かった温泉池で泥水の間欠的な噴出が観測され、その2時間後に水蒸気爆発が起こった。

一人が熱傷を被り、付近の休憩施設等が破損された(図 5.2.-16)。爆発が一段落すると、それまで湧出していたエメラルドグリーンの温泉(温度 85、直径 15 m、深さ 4.3 m)は次第に枯渇した(安藤、1984; 倉沢、1984)。

水蒸気爆発の原因は、熱水を還元しない大規模開発が温泉公園直下に近い所で行われたことと考えられている(倉沢、1984)。熱水還元を行わず海へ放流していたため水位が下がりそのため海水とのバランスが崩れ海水がリザーバー内に浸入したことにより Cl 濃度が上昇し、管内へスケール付着、また付近の地獄の噴気活動が停止したとされている(栗島、1984)。

一方、この水蒸気爆発をティウイの熱源と考えられるマリナオ火山の火山活動として紹介している文献もあり(安藤、1984) 図 5.2.-13 に示される様に、開発前より地熱活動が爆発現場方面へ移動していたという説もある。

初めに地熱開発が行われていた N 地区の坑井からの蒸気生産量が低下したため、N 地区の西側に位置する K 地区、M 地区、B 地区において新しい坑井が掘削され、1990 年代半ばには全ての生産が当該 3 地区にて行われるようになった(図 5.2.-14)。

1983 年より還元が開始され、1993 年には全ての排水が還元されるようになった。2008 年現在、約 200MW 容量相当で発電が行われている(Menzies et al., 2010)。

表 5.2.3 ティウイでの開発経緯

年	経緯
~ 1970 年	噴気活動活発化 ¹
1972 年	調査井の掘削開始 ²
1975 年 ~	噴気活動さらに活発化 ¹
1979 年	第 1 発電所稼動 (110MW) ²
1980 年 7 月	第 2 発電所稼動 (110MW) ²
7 月 6 日	異常な微小地震記録 ³
7 月 29 日	泥水の間欠的な噴出 ³ 、水蒸気爆発発生 ^{1 3}
1982 年	第 3 発電所稼動 (110MW) ² 合計出力 330MW、稼動生産井 85 本 ¹
1983 年	還元開始 ⁴
1993 年	排水全量の還元を開始 ⁴

1 (倉沢、1984); 2 (栗島、1984); 3 (安藤、1984); 4 (Menzies et al., 2010)

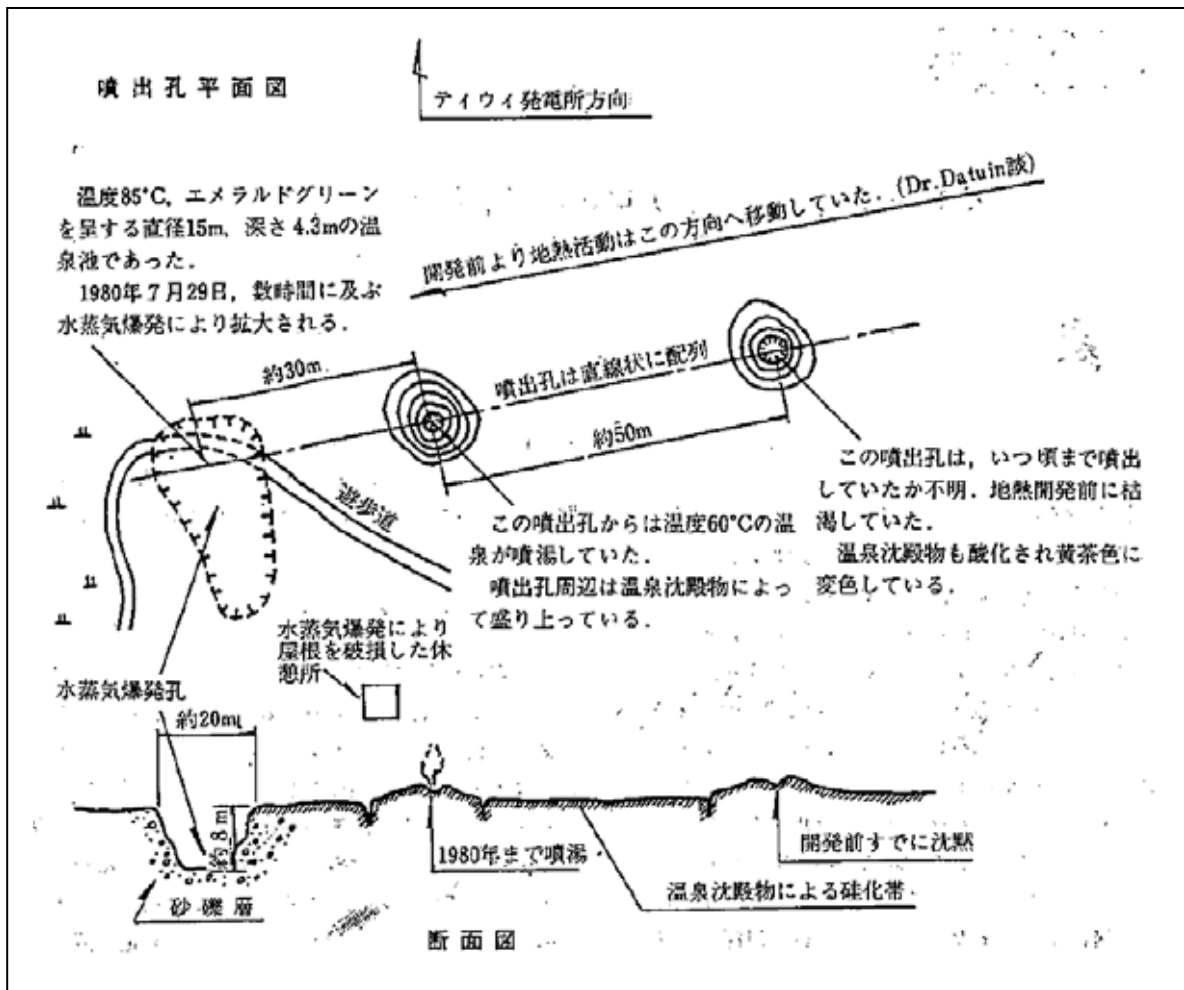


図 5.2.13 ティウィ温泉公園、水蒸気爆発孔周辺見取り図 (倉沢、1984)

表 5.2.4 マリナオ火山の噴火記録 (安藤、1984)

火山名	分類番号	位置		
		緯度	経度	地名
MALINAO (マリナオ)	7, 3-4	13°24' N	123°33' E	SE Luzon, Philippines
報告者	組織	住所		
O. PEÑA	Commission on Volcanology	5th Floor Hizon Bldg., Quezon Ave., Quezon City, Philippines		
概説				
前兆：観測による		○ ……中央火口で噴火		
噴火期間：1980.7.29~1980.7.29		○ ○ ……寄生噴火口での噴火		
噴火の連続性、場所及び性状		↑ ……硫気孔地域 蒸気		
		↑ ……水蒸気爆発 泥の噴出		
		(ℓ) ……噴出量が10,000m ³ 以下		
日時	場所	性状		
1980.7.29	マリナオ火山東斜面 Naglagbong温泉地域	○ ○ ↑ (ℓ)		

ティウイ発電所と温泉公園の水蒸気爆発について

< 抜粋 >

温泉公園の水蒸気爆発、温泉枯渇の原因は、これまでの文献や今回の調査から次のように解釈される。

- (1) ダトウィン博士の説明では、ティウイ地熱地帯の発電としてのキャパシティーは 220MW が限度であるが、これを 110MW も上回る大規模開発がなされた。
- (2) しかも、地下から取り出している地熱流体は、三つの発電所の合計出力が 330MW であるから蒸気量は 3,300 t/H、蒸気と熱水の比率を 1 : 2 とすると熱水量は 6,600 t/H、蒸気量と熱水量を合わせて 9,900 t/H といった膨大なものであった。
- (3) 上記のうち発電に使用しない熱水量 6,600 t/H は、全量地下還元されないで海へ放流されていた。
- (4) 地熱流体の採取深度は浅いもので 400 m、深いもので 2,800 m と非常にバラエティーに富んでいる。このことは、地質構造が浅部熱水系と深部熱水系とに分割されている構造ではないことを示しており、そのため開発が温泉公園の直下にまで及んだ。
- (5) したがって、熱水地帯から多量の地熱流体を採取したため温泉水位全体が低下し、これまで温度 85 で噴湯していた温泉は、水位低下とともに温度が上昇し蒸気化した。
- (6) 温泉公園の地表面は、硅化した温泉沈殿物によって厚く被覆されているため蒸気圧を更に高めた。
- (7) 高圧となった蒸気は、これまで勢いよく噴湯していた温泉池に捌け口を求めて爆発した。数時間に亘り間欠的に爆発を繰り返した後、蒸気圧は平衡となり、これまで噴湯していた温泉は次第に噴出水頭を失い枯渇した。

引用文献：倉沢辰巳（1984）ティウイ発電所と温泉公園の水蒸気爆発について。地熱、
21、196-197.

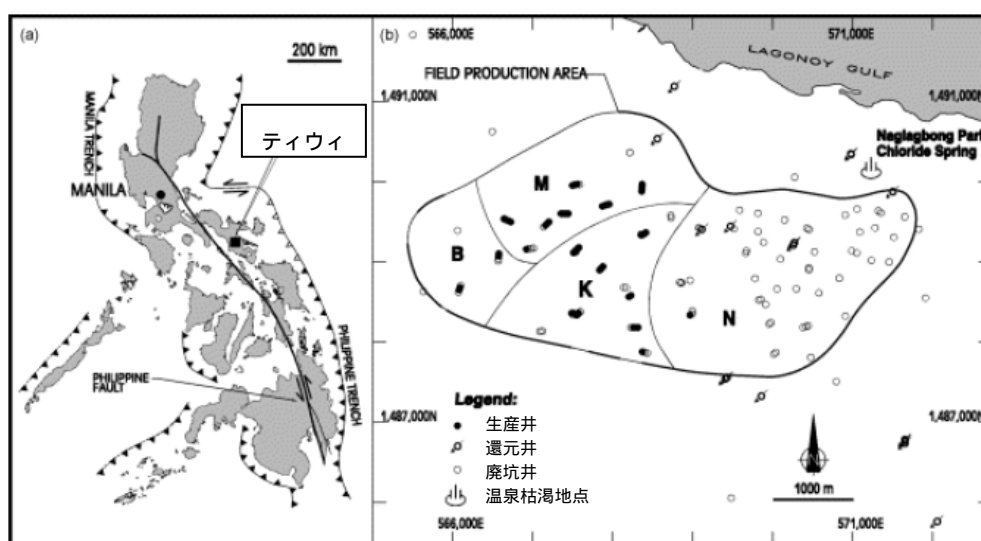


図 5.2.14 ティウイ地熱地帯の位置図 (Menzies et al., 2010)

(N 地区 : Naglagbong、K 地区 : Kapiihan、B 地区 : Bariis、M 地区 : Matalibong)

トンゴナン (Tongonan) (熱水卓越系)

バオ川 (Bao River) 沿いに温泉が分布。1973 年～1979 年に行われた掘削・採取テストの結果、温泉への明らかな影響は見つからなかったため、1983 年に地熱発電開始。

開発が始まると温泉活動が明らかに減少した。地域の温泉の流量が低下し、殆どの温泉が枯渇するか湧出しなくなった (図 5.2.15)。地域の温泉の塩化物濃度も、地熱開発が開始すると低下した (開発前 1981 年～1982 年は 2500～3500 mg/kg、開発後 1989 年は 500～1500 mg/kg) (図 5.2.16)。

これらは貯留層の圧力低下が原因とされる。塩水還元が行われると塩化物濃度が増加した。還元により流量の増加もみられた (図 5.2.17)。(Hunt, 2001)

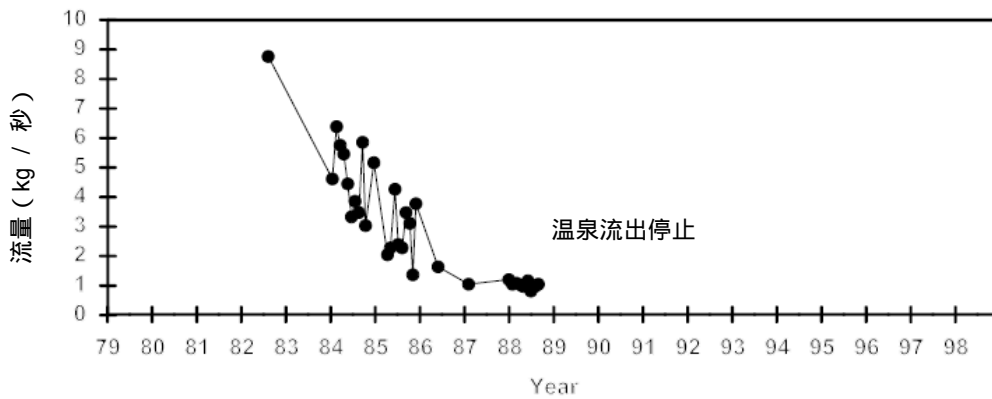


図 5.2.15 トンゴナンの第 16 号温泉における流量の変化 (Hunt, 2001)

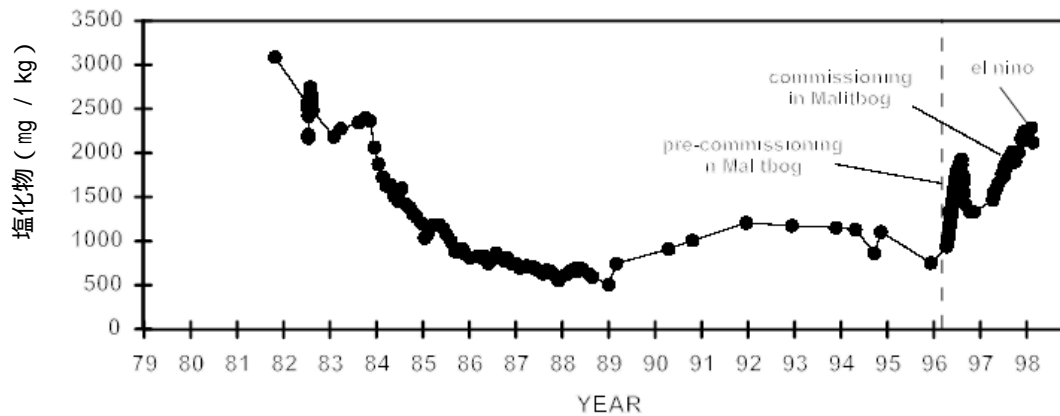


図 5.2.16 トンゴナンの第 1 号温泉における塩化物濃度の変化 (Hunt, 2001)

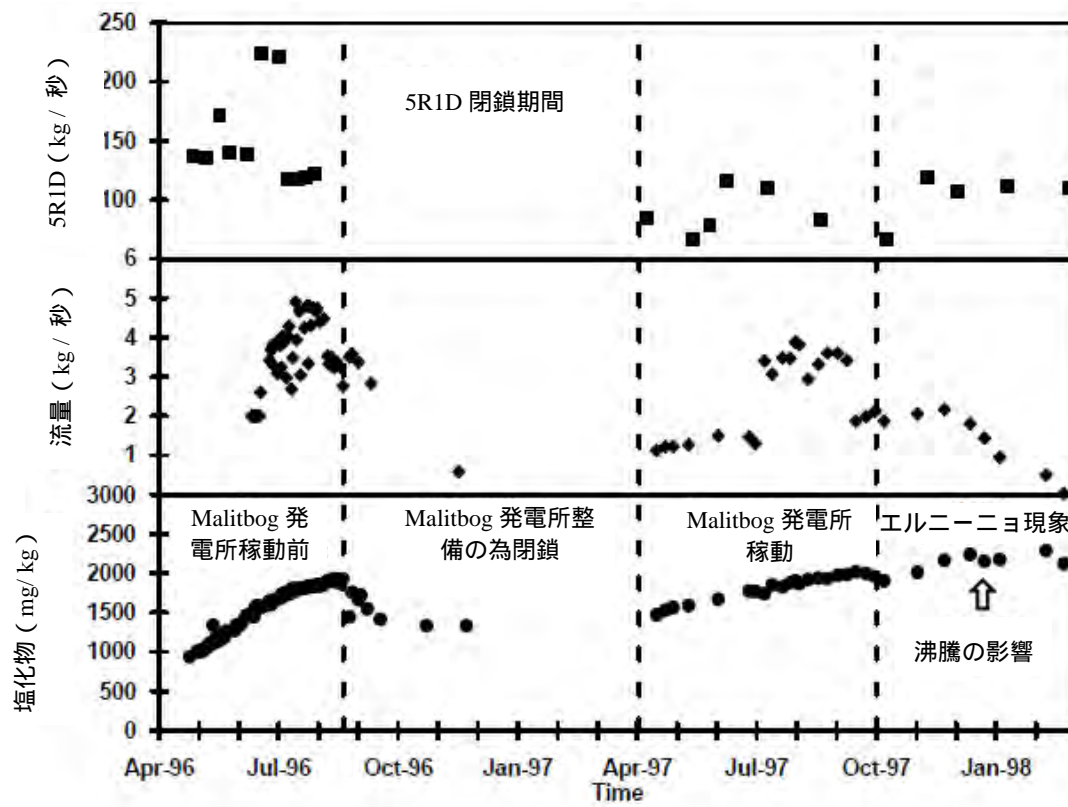


図 5.2.17 坑井 5R1D への熱水還元量と第 1 号温泉における流量・塩化物含有量の関係

(Hunt, 2001)

(3) イタリア

ラルデレロ (Larderello) (蒸気卓越系)

1904年に世界で初めて地熱発電が行われ、1910年代に約3,000キロワットの発電を開始。井戸は10～15年間程度維持できるが、新しい井戸の開発が必要であったため、次第に開発地域は拡大し(後藤、1986)、2000年より大規模修復作業が実施され、衰退した発電プラントに代わるより発電効率の良い新しいプラントが建設されている(DiPippo, 2008)。

当該地域において開発前は天然の蒸気やガス噴出が数多く見られていたが、開発により殆ど止まってしまった(Hunt, 2001)。1970年代初期頃に新たに導入された環境法に従い、発電所から排出される蒸気凝縮物の処理目的で還元が開始された(Cappetti et al., 1995)。

1980年代初期には、当該地域における貯留層の資源量低下を防ぐためには還元が不可欠と考えられるようになり(DiPippo, 2008)、1980年代半ばごろから排水還元は開発計画の中で重要な要素となった(Cappetti et al., 1995)。



図 5.2.18 ラルデレロ位置図 (Bertani, 2005a)

(4) 米国

ガイザー (The Geysers) (蒸気卓越系)

11MW の発電所として 1960 年に生産を開始、横方向の広がり (lateral extent) 及び発電量の面で世界最大規模の発電地である。

掘削を開始してから、温泉の流出量が減少し、1980 年代末期以来蒸気供給量も減少している (Hunt, 2001)。1980 年代半ばごろから注水が行われているが、1997 年にはレイク郡の排水および湖水を 46.4 km に及ぶパイプラインで引く大規模な注水プロジェクト (2,200 万リットル/日) が始まり、さらに 2003 年には 64 km のパイプラインを用いたサンタロサ市の排水の注水プロジェクト (3,000 万リットル/日) も開始 (Majer, 2007) され、生産量の減少には歯止めがかかったとされている (DiPippo, 2008)。

ただ、当該地域における地熱開発に伴い、地震発生頻度が増加し発生地域も拡大した。1965 年以降の地震観測記録 (図 5.2.20) に示されている通り、注水量の増加に伴い主にマグニチュード 3 未満の小規模な地震の発生件数が増加していることが分かる。サンタロサ市からの排水の注水が始まった 2003 年からの 2 年間にマグニチュード 4 以上の地震も頻発しており、地域住民は微小地震の頻発並びにマグニチュードの大きい地震の発生に対して不安を持っている。(Majer, 2007)

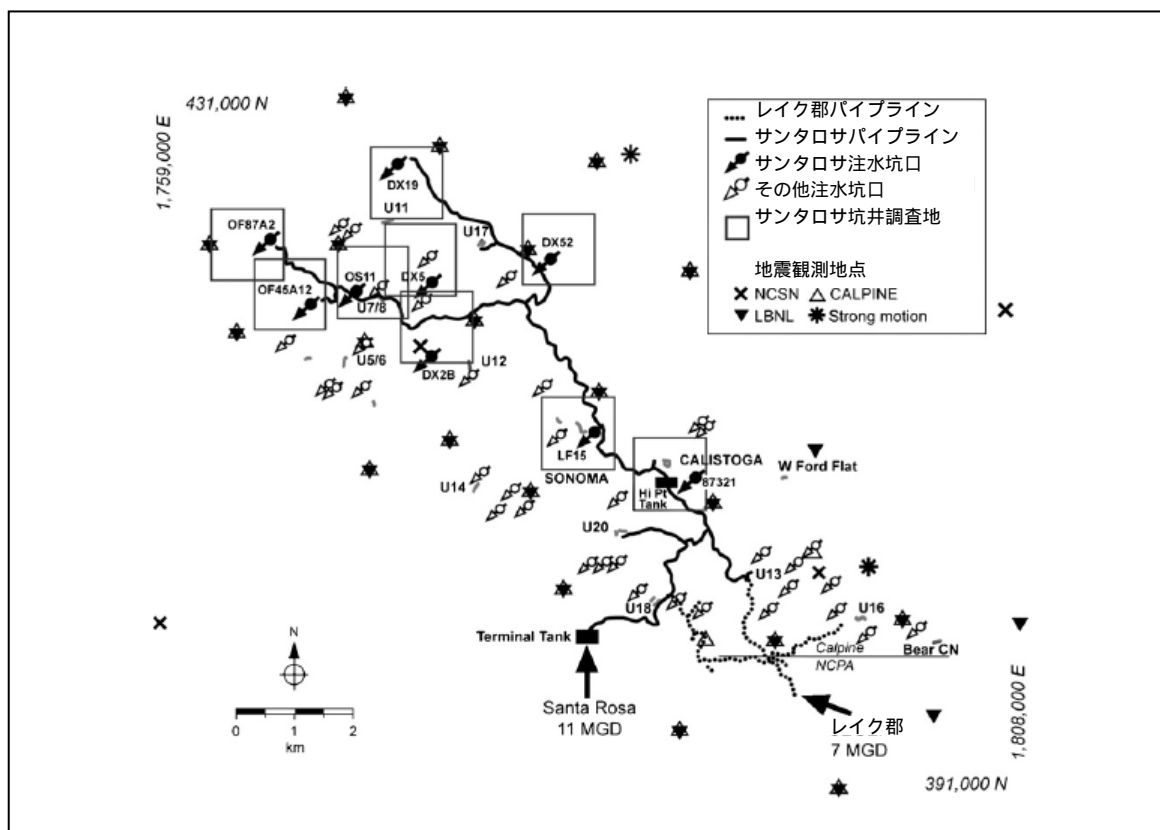
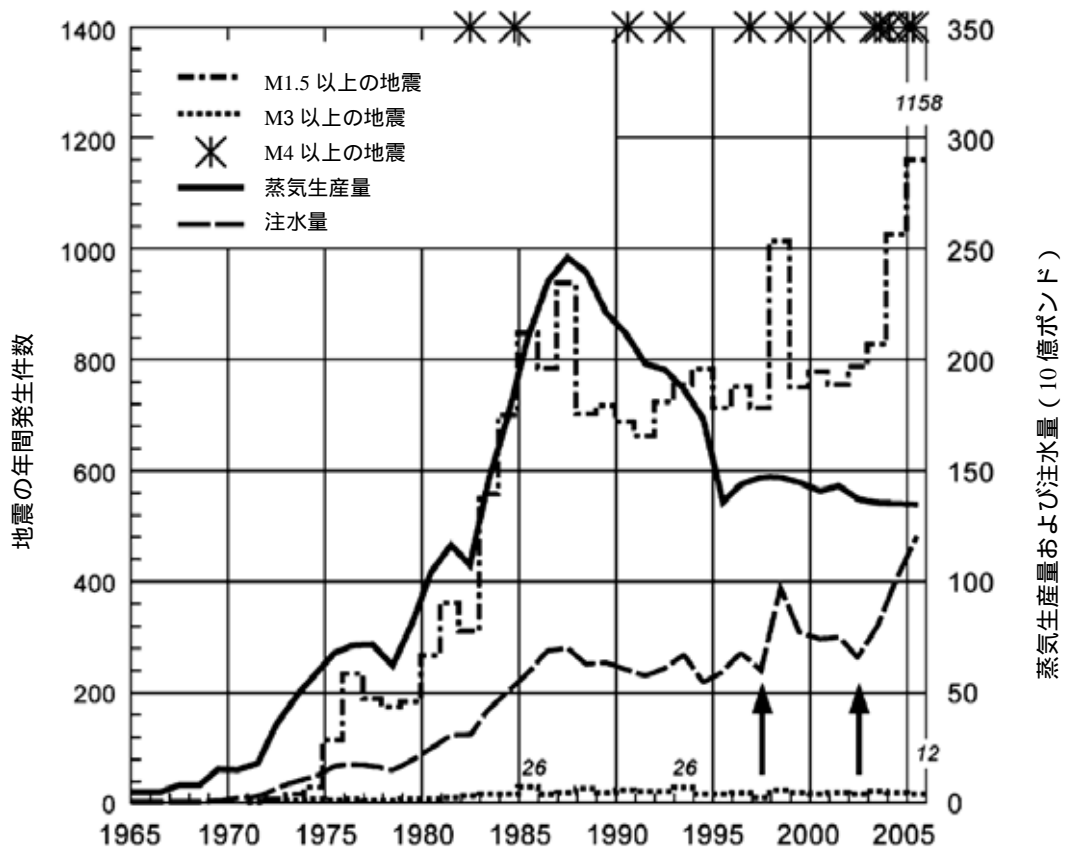


図 5.2.19 ガイザーにおける地震観測地点、パイプライン、注水井の位置 (Majer, 2007)



(矢印は、注水量が増加した1997年と2002年)

M: ローカルマグニチュード、10億ポンド: 約 454×10^6 トン (Majer, 2007)

図 5.2.20 1965 年から 2006 年 10 月までのガイザーにおける地震観測記録

(5) スイス

バーゼル (Basel) (高温乾燥岩体系)

バーゼルでは、社会的・政治的意欲 (willingness)、好適なインフラ (地域暖房網 (district heating grid)、河川冷却 (river cooling))、高い熱流量 (elevated heat flow) を考慮して、EGS 地熱発電のパイロット発電所候補地として選択された (Häring et al., 2007)。

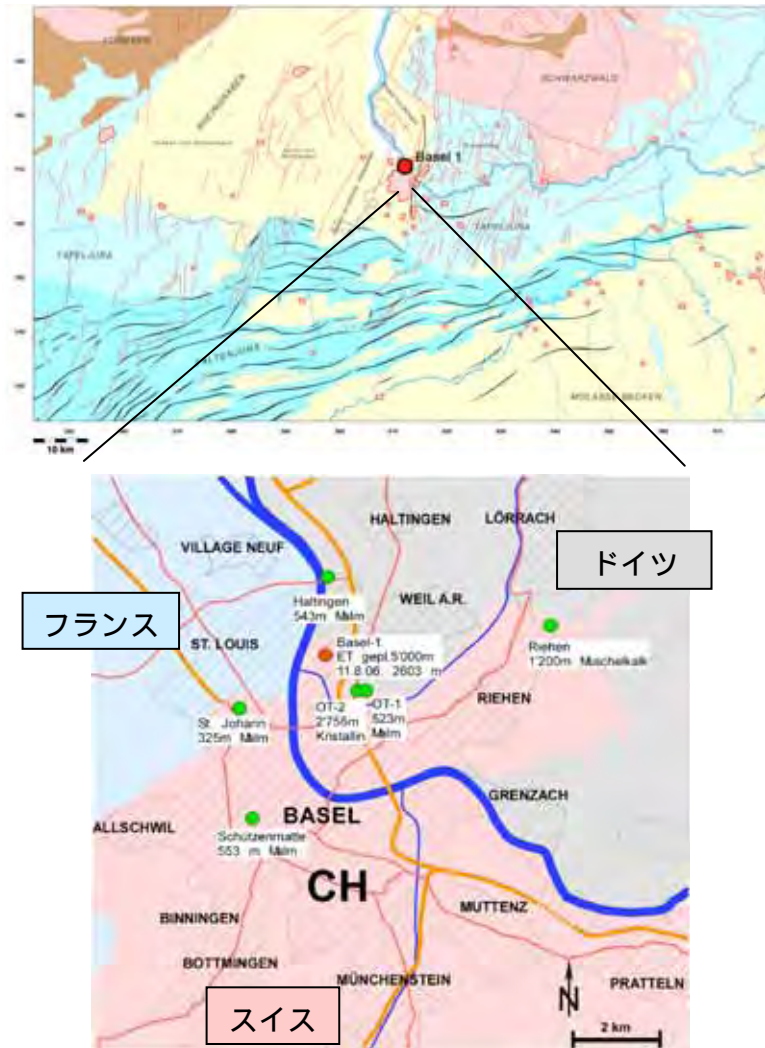


図 5.2.21 坑井 Basel 1 ()、モニタリング井 () の位置図 (Häring et al., 2007)

EGS (Enhanced Geothermal Systems) は、主に浸透性が低く熱水系が形成されていない高温岩体に対して人工的に注水井をつくり冷水を送り、熱水となったものを他の生産井より取り出し、地熱発電を行うシステムである (Majer et al., 2007)。

当該地域では、生産井 2 基、注水井 1 基を用い、加圧した大量の水を深さ約 5 km の坑井に注ぎ込む計画がなされた (Häring et al., 2007; Majer et al., 2007)。2006 年 12 月 2 日に本格的な注水が開始されたが、2006 年 12 月 8 日に、注水井の直ぐ近くでマグニチュード 3.4 (最大) の地震が発生したため、本プロジェクトは停止された (Häring et al., 2007; Majer et al., 2007)。しかし、プロジェクト停止後も、M3.1 (29 日後)、M3.2 (39 日後)、M3.3 (55 日後) が観測され、5 ヶ月後 (5 月 6 日) まで M2 以上の地震

が観測された (Häring et al, 2007)。

2 その他参考事例

地熱開発ではなく大規模な温泉開発での影響事例や、国立公園内での大規模な開発の例、バイナリー発電の例について、その概要を整理した。

ロトルア (Rotorua)

ニュージーランドで最も有名な地熱地帯の観光地であった (本松、1982)。

1960年代初め及び1970年代半ばに多くの坑井が掘削され、採取量が急速に増加するにつれて、間欠泉及び温泉が次第に枯渇。1982年にロトルア地熱モニタリングプログラム (Rotorua Geothermal Monitoring Programme) が設立され (24のモニタリング井戸設置)、1986年には中央政府による坑井閉鎖プログラム (bore closure programme) および懲罰的使用料賦課制度 (punitive royalty charging regime) (課税: tax) (Hunt, 2001) が開始された。

- ・1985年までに生産に利用されていた坑井の数は約500。
- ・1987～1988年：世界的に有名なポフツ間欠泉から半径1.5 km以内の106の坑井閉鎖。
- ・半径1.5 kmより外に位置する残りの全坑井に対して懲罰的使用料賦課制度が施行され、さらに120の坑井も結果的に閉鎖。

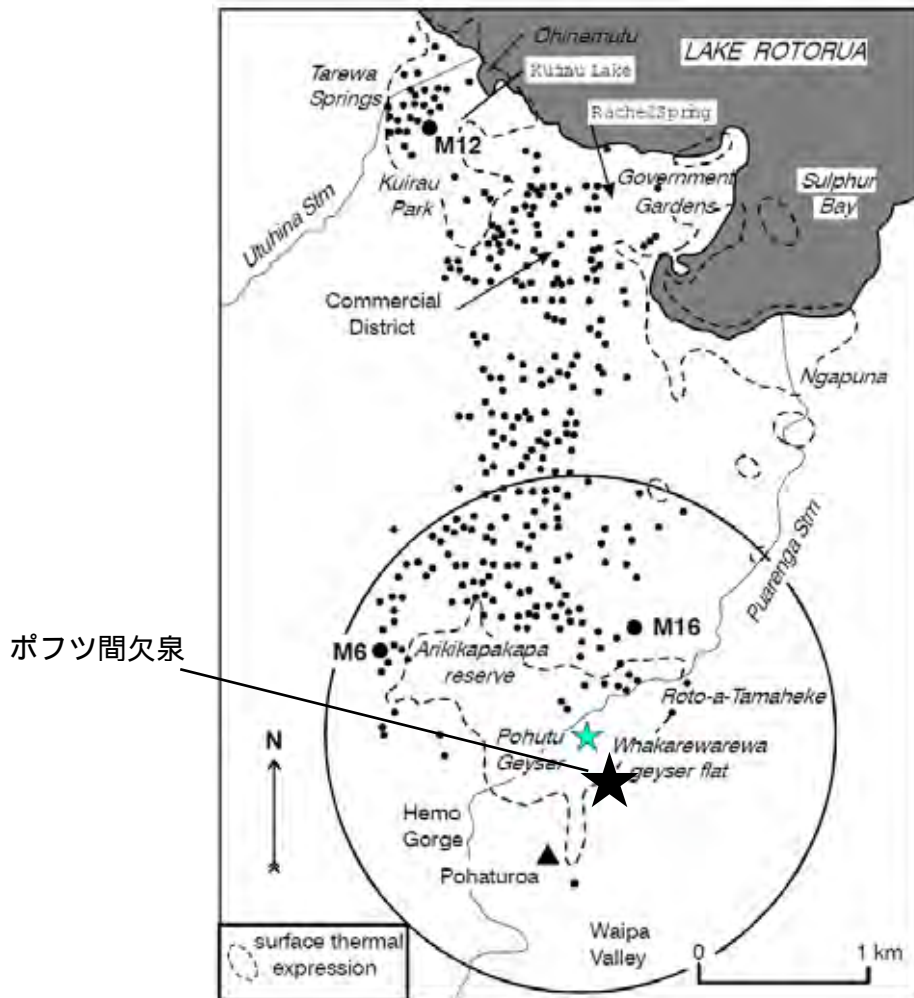


図 5.2.22 坑井の位置 (1985年) (●) モニタリング井戸 (M6、M12、M16)、地熱地帯 (thermal areas) (点線内)、全坑井閉鎖エリア (円内部) 位置図

坑井閉鎖と使用料賦課が始まると、採取量が減少し、還元量が増加した（図 5.2.23）。1987 年末には全てのモニタリング井戸において水位または圧力の急上昇がみられ（1~2 m 又は 0.1~0.2 パール）以来現在まで引き続き徐々に回復している（計 2~2.5 m）（図 5.2.24）。

- *Parekohoru Spring*: 1985~86 年冬に、初めて溢水が数日間停止。1988 年（坑井閉鎖）以降は停止していない。20 世紀初めに報告されていた様な大量の溢水を伴う湧出が 1995 年に復活し、現在まで続いている。
- *Rachel Spring*: 1967 年に湧出および沸騰が最後に記録されて以来止まり、1967 年から 1987 年の水位は、湧出レベルから 1.2~1.7 m 下で水温は 70~80 度だった。1988 年末（坑井閉鎖）からは絶えず沸騰・湧出しており、湧出が数日間止まることはあるが、水位は湧出レベルの 0.1 m 下より高く保たれている。（Hunt, 2001）

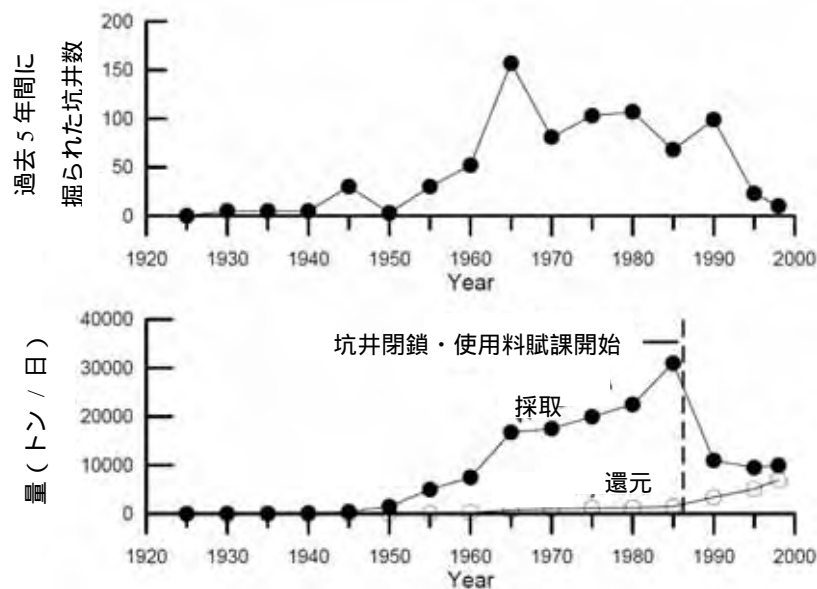


図 5.2.23 ロトルアにおける坑井掘削の歴史および流体採取量・還元量の変化

(Hunt, 2001)

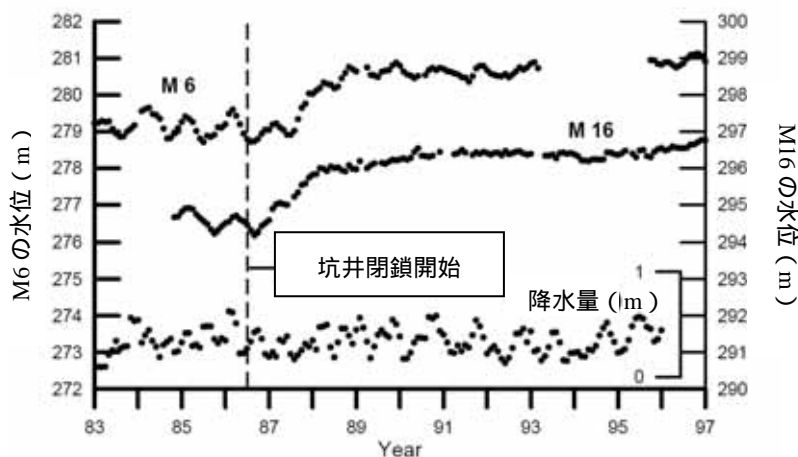


図 5.2.24 ロトルア市のモニタリング井戸（M6、M16）における水位変化（Hunt, 2001）

オルカリア (Olkaria) (熱水卓越系)

ケニアにおける国立公園内の地熱開発例を示す。

1979年に建設、1981年に第一発電所 (Olkaria I) が運転開始された。発電規模は130MW。面積は約80 km² (Muburu & Mwangi, 2006)、坑井数は98井 (2005年現在)である (Ofwana, 2006)。参考までに関係する連絡先を表5.2.-5に示す。

開発地の大部分が、1984年に設置されたヘルズ・ゲート国立公園 (Hell's-Gate National Park) 内部に位置する (Mwangi, 2006)。



図 5.2.25 オルカリア位置図 (Muburu & Mwangi, 2006)



図 5.2.26 ヘルズ・ゲート国立公園とオルカリアの位置図 (Google, 2010)

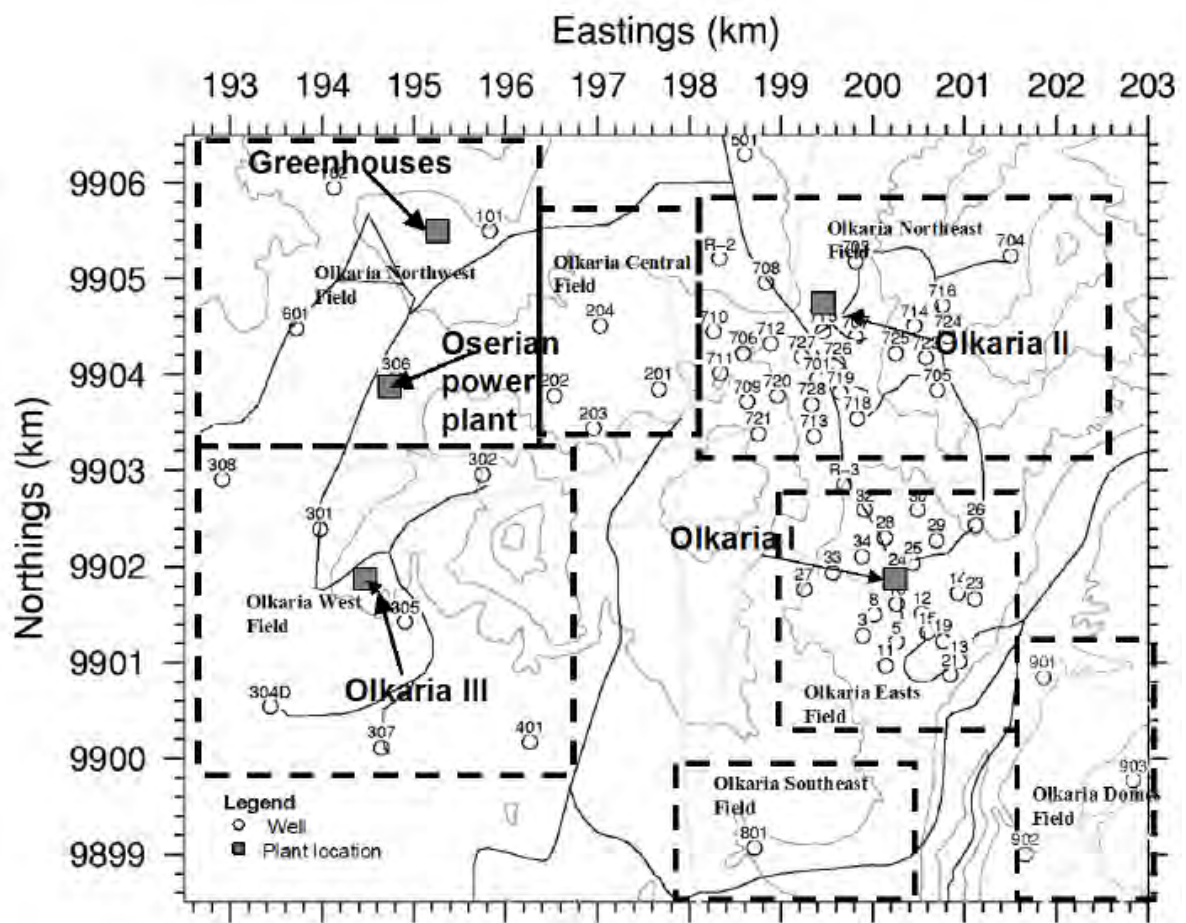


図 5.2.27 オルカリア地熱地域（7 地区）および発電所の位置図

(Muburu & Mwangi, 2006)

プナ (Puna) (熱水卓越系)

米国、ハワイ島における最新技術の例としてバイナリー発電の地熱発電所を示す。

バイナリー及びフラッシュのバイブリッドプラント (hybrid binary and flash plant) で、ハワイ島の電力の 25% 近くを供給している (EERE, 2004)。1976 年に掘削開始され、1993 年に生産開始された。発電規模は 30MW、面積は 1~2 km² (Bertani, 2005b) である。生産井は 5 本、還元井は 4 本である (Puna Geothermal Venture, 2008)。参考までに関係する連絡先を表 5.2.-6 に示す。



図 5.2.28 プナ地熱発電所位置図 (PGV, 2008)

海外事例に関する引用文献一覧

- Bertani, R. (2005a). World geothermal generation 2001-2005: state of the art. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 1-19.
- Bertani, R. (2005b). World geothermal power generation 2001-2005. International Geothermal Development, 89-111.
- Cappetti, G., Parisi, L., Ridolfi, A., Stefani, G. (1995). Proceeding of the World Geothermal Congress, Florence, Italy, 1009-2000.
- DiPippo, R. (2008). Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact (2nd ed.), Oxford: Elsevier.
- Ellis, A.J. & Mahon, W.A.J. (1977). Chemistry and geothermal systems. Academic Press, 324-375
- Glover, R.B. & Hunt, T.M. (1996) Precursory changes to natural thermal features during testing of the Wairakei and Broadlands-Ohaaki fields. Proceedings of the 18th New Zealand Geothermal Workshop, Geothermal Institute, Auckland, 69-76.
- Häring, M.O., Ladner, F., Schanz, U., and Spillmann, T. (2007). Deep Heat Mining Preliminary Results. Downloaded from Geothermal Explorers website on April 25, 2010: http://www.geothermal.ch/fileadmin/docs/downloads/dhm_egc300507.pdf
- Hunt, T.M. (1997). 地熱開発による環境への影響の緩和策 ニュージーランドの事例 (Mitigating the impact of Geothermal Development: an Example from New Zealand) (玉生志郎訳) 地質ニュース 516号, 37-42頁
- Hunt, T.M. & Bromley, C.J. (2000). Some environmental changes resulting from development of Ohaaki geothermal field, New Zealand. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, 621-626.
- Hunt, T.M. (2001). Five lectures on environmental effects of geothermal utilization. United Nations University, Geothermal Training Programme, Iceland
- Lee, S. & Bacon, L. (2000). Operational history of the Ohaaki geothermal field, New Zealand. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, 3211-3216.
- Majer, E.L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., Asanuma, H. (2007). Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems, Geothermics, 36, 185-222.
- Menzies, A.J., Villaseñor, L.B., Sunio, E.G. (2010). Tiwi Geothermal Field, Philippines: 30 Years of Commercial Operation. Proceeding World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 1-6.
- Thermal Systems, 2007; <http://me1065.wikidot.com/hot-dry-rock-geothermal-power-plants>, 7 December 2007 [updated], 26 November 2010 [accessed].
- Muburu, M. & Mwangi, M.N. (2006). Lecture 1: Update of geothermal development in Kenya and other African countries. In M.N. Mwangi (Ed.), Lectures on geothermal in Kenya and Africa, 1-14. United Nations University Geothermal Training Programme, 2005.
- Mwangi, M.N. (2006). Environmental and socio-economic issues of geothermal development in Kenya. Workshop for Decision Makers on Geothermal Projects in Central America, UNU-GTP and LaGeo, El Salvador.
- Ofwana, C. (2006). Lecture 3: Olkaria reservoir response to exploitation and future development. In M.N. Mwangi (Ed.), Lectures on geothermal in Kenya and Africa, 29-40. United Nations University Geothermal Training Programme, 2005.
- Bertani, R. (2005b). World geothermal power generation 2001-2005. International Geothermal Development, 89-111.
- Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), U.S. Department of Energy (2004). Geothermal Technologies Program: Tapping the Earth's energy to meet our heat and power needs. National Renewable Energy Laboratory
- Puna Geothermal Venture: What's happening at PGV; <http://www.punageothermalventure.com/News/55/hawaii-is-geothermal-story>, 16 September 2008 [updated], 29 October 2010 [accessed].
- 安藤斌 (1984) ティウイ周辺の最近の火山活動について. 地熱, 21, 194 - 195.
- 馬場健三 (1964) ニュージーランドワイラケイ地熱地域をたずねて, 地質ニュース, 116号, 実業広報社
- 大木靖衛, 渡部暉彦 (1992) 地熱と温泉. In 横山, 荒牧, 中村 (編), 火山, 第8章: 地熱と温泉, 215 - 246, 岩波書店
- 倉沢辰巳 (1984) ティウイ発電所と温泉公園の水蒸気爆発について. 地熱, 21, 196 - 197.
- 栗島敏 (1984) インドネシア・フィリピンの掘削状況について. 地熱, 21, 198 - 206.
- 後藤達夫 (1986) イタリアのラルデレロ地熱発電所および中部イタリアの温泉地について. 温泉, 54, 15-21.
- 玉生志郎 (1998) ワイラケイ地熱発電所での環境影響事例. 地熱, 35, 1 - 22.
- 本松利郎 (1982) ニュージーランドのワイラケイにおける地熱開発と地熱微候地域の変化に関する一考察. 地熱, 19, 192 - 207.

参考文献

日本地熱学会 (2010) 地熱発電と温泉利用との共生を目指して, 1 - 62.