

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

Trevor M. Hunt¹⁾ (訳: 玉生志郎²⁾)

1. はじめに

地熱エネルギーとは地球で見い出される天然の熱のことである。この熱により暖められた流体は発電、産業用、家庭暖房用として、多くの国で使われている。地熱エネルギーの最大の消費者は電力事業者で、その規模は数kWから120万kWに及ぶ。

地熱エネルギーは、特に化石燃料エネルギー源と比べた場合、一般に環境に優しいエネルギー源と見なされている。しかし、過去30年間の開発は、それが環境に悪影響を全然起こさないとはいえないことを示している。幸いなことに、大抵の小規模産業用や個人使用の場合は、その環境影響は小さく一時的なもので、容易に最小限度にとどめることができる。一方、高温地熱系(火山活動に関連した)を利用した地熱発電の場合、深刻な環境影響が起こる可能性が大きい。このような高温地熱系は日本、アイスランド、ニュージーランド、フィリピン、インドネシア、米国などに存在する。

2. 環境の重要性

「何故、われわれは環境を守らねばならないのか」という疑問に対する、説得力のある説明は以下の通りである(Hunt and Brown, 1996)。

・自尊心: 大抵の人間文明は彼らを取り巻く環境を価値あるものと見なし、間欠泉、温泉、シリカ・テラスのような希少でかつ美しい天然の地熱兆候を壊すことは受け入れ難いという認識がある。

- ・自衛本能: 殆どの高等生物はかれらの種としての生存を脅かすような著しい環境変化や破壊を好まない。
- ・遺産維持: 自然環境は先祖から引き継いだ遺産で、われわれはこれを次の世代に破壊することなく引き継ぐ責任がある。
- ・経済性: 環境を変えることは経済効果にマイナスである。地熱開発の場合、美しい自然地熱兆候を破壊したり改造することは、主な収入源、就職口である観光事業に悪い影響を及ぼすことになる。

多くの国では、地熱開発は管理機関の許可なくして着手することは出来ない。これは多くの場合、開発が環境に及ぼすかもしれない影響を評価・査定することを含んでいる(Hietter, 1995)。この許可手続きには公聴会と審問があり、環境に著しい影響を及ぼすようであれば許可を得ることは極めて難しい。

3. 自然の地熱兆候

未開発の自然のままの高温地熱地域では、地表に間欠泉、温泉、湯沼、泥湯沼、シンター・テラス、特徴的な植生などの地熱兆候が認められる。これらの兆候は地熱貯留層上部から沸騰した地熱流体が、冷たい地下水層を突き抜けて地表に漏出したものである。これらの地表兆候はしばしば重要な文化的意義を持つとともに、重要な観光資源である。

地熱資源はニュージーランドにおいては、マオリ

1) ニュージーランド地質・核科学研究所, ワイラケイ研究センター

2) 現 科学技術振興事業団, 元 地質調査所 地熱熱部

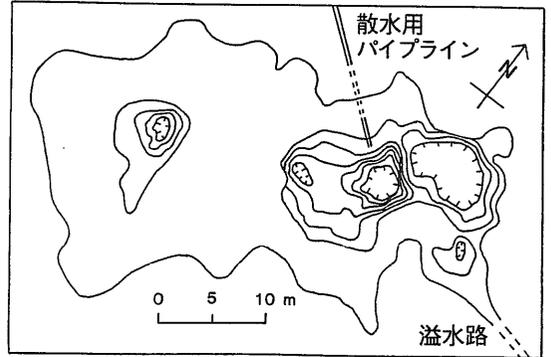
キーワード: 地熱開発, 環境影響, 緩和策, ニュージーランド, オ
ハーキ・プール



第1図 位置図.

(先住民)の伝統的資源の一つと見なされている。彼らにとって、地熱兆候は孤立した現象ではなく、地下資源の顔または目と見なされ、それらの形、温度、流出、間欠泉の特徴に応じてそれぞれの名前が付けられている。沸騰して溢れ出ているような大きな湯沼を、マオリ語でngawha(ナーファ)と言う。

ニュージーランドの高温地熱系において自然地熱兆候は、開発およびそれに引き続く初期段階の生産によって、しばしば激しく影響を受けたことが歴史的に証明されている。ワイラケイ地域ではワイオラ地区とガイザーバレー地区(20ヶ所以上の間欠泉を含む)のほとんど全ての地表兆候は死滅し、生き残ったものも著しく影響を受けている。このような地熱兆候の変化は通常、貯留層圧力の減少に起因することが、科学的に証明されている(Allis, 1981)。圧力が減少するにつれて地表に届く地熱流体の量も減少し、結果的に地表兆候は規模も激しさも減少することになる。もし、圧力が更に減少すると、兆候は死滅し、流れは逆転し冷たい地下水が貯留層に流れ込むことになる。このようなことがそこで起きてしまうと、兆候を復活させることは少なくとも人間の寿命の期間内では不可能である。



第2図 1989年時点でのオハーキ・プールの等深線図 (Glover et al, 1996)。等深線は2m間隔。

4. オハーキ・プール

オハーキ・プール(別称ナーファ)はしばしば沸騰し溢れ出している温泉湧出地で、オハーキ(ブロードランド)地域の最大の地熱兆候地である(第1図)。

このプールはナーティ・タフ族により数世紀にわたり調理用・浴用に使われてきたもので、彼らの日常生活に必要な不可欠なものである。溢れ出た熱水は蓋のない送水路で冷まされてから、浴槽に引き込まれている。それ故、彼らにとってはこれはタオンガ(宝)である。オハーキ・プールの近くにはナーティ・タフ族の本源としてのマラエ(集会所)がある。今世紀初頭にはマラエの周辺には30軒ほどの民家があり、土地は耕作されていた。しかしながら、現在では永住者はいない(最後の家は1970年初期に移転した)。これはマラエを放棄したと言うわけではなく、現在でも実際に集会、タンギハナ(葬儀)、社会的会合をそこで執り行っている。このようにプールとその周辺地域は非常に文化的に重要な場所である。

4.1 科学的記載

オハーキ・プールは昔の水蒸気爆発の火口跡で45×15mのほぼ長方形で、北東-南西方向に延びている。水位が低下した時期に調査した結果によると、プールは二つの不規則な漏斗型の凹地からなる(第2図)。北東部と南西部の凹地を境しているのは広い隆起部で、その高さは熱水が溢れ出している時は表面下1.5m以内にある。北東部の凹地にはいくつかの小孔ないし噴出孔があり、その最大のもは直径5m、深さ20mに及ぶ。南西部の凹地



写真1 1958年のオハーキ・プール(地熱開発以前)。

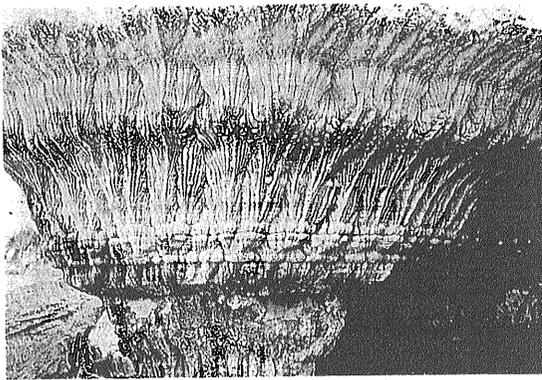
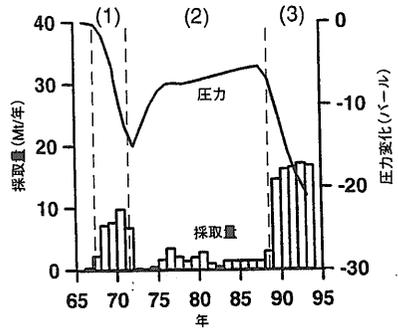


写真2 オハーキ・プール縁の柱状ストロマトライト。

は二つの噴出孔からなり、高い方からは、プールが空の時には活発な噴気を上げている。プールは二つの凹地の中心部の上方で、かつては自然状態で激しく沸騰していた。

4.2 ストロマトライト

このプールの周辺緩傾斜部は珪華沈殿物(厚さ不明)に覆われて、プールに近いところでは植生はほとんど認められない。プール際には珍しい渦巻き模様の珪華が凸凹に張り出している(写真1)。この縁は上方に伸びた薄板状の柱状ストロマトライトより構成されている(写真2)。ストロマトライトは主に好熱有機体藻類のような微生物が成長した結果生ずるもので、堆積物の落とし穴、接合部、沈殿物などの生物起源の堆積構造をつくる。オハーキ・プールのストロマトライトは最大径2cmで、構造のないオパール・シリカ(オパールA)の板状組織(最大厚さ $5\mu\text{m}$)から構成されている(Jones *et al*, 1997)。場所によって、円柱は葉理のある0.5cmほ



第3図 ブロードランド地区でのテスト中の年間放出量と圧力変化(Cloutworthy *et al*, 1995)。(1) 流体放出期間、(2) 回復期間、(3) 生産期間。

どの珪華によって覆われている。円柱状のストロマトライトの外面は一般に接着剤としての方解石によって上塗りされている。ある場合には、ストロマトライト円柱の間に元来存在していた隙間が、ストロマトライトの表面と垂直な長軸をもつ板状方解石によって埋められている。シリカ薄板に挟まっているものは最大厚さ1mmの微生物マットで、それらはゆるく絡み合った微生物(現在は死滅している)から出来ている。

4.3 地熱貯留層との関連

このプールと地熱貯留層の連結状態は十分判明していないが、後述するデータによれば、プールは貯留層圧力とすばやい応答があることが判っている。熱と物質の移動、および流体化学の研究によれば、隠れた大きな熱水流(30-40 kg/秒)がプール内で自然状態で起こっているとのことである(Hochstein and Henrys, 1988)。プールはオハーキ断層上に存在している。この断層はこの地域に発達する活発な、共役断層の一つで、流体の通路となっている。

5. 地域開発の歴史

調査井掘削は1965年に始まり、1971年までに25本の坑井が掘削された。その多くは調査地域の西側でオハーキ・プールの近くである(Cloutworthy *et al*, 1995)。1967年半ばから1971年後半までの間、噴気テストが実施され、年間の流体採取量は約10Mt/年に増大した(第3図)。この噴気テスト期

間中、全ての分離熱水は近くのワイカト川に放流された。引き続き16年間に更に18本の坑井が掘削されたが、それらは大規模な噴気テストはなされなかった。そのため、年間平均流体放出量はわずか1.5 Mt/年で、最大でも3.5 Mt/年を越えなかった(第3図)。この期間は“回復期間”と考えられる。オハーキ発電所の運転(設備容量116MWe)は1988年夏に開始され、1989年11月に完成した。流体採取量は1990年には16.2 Mt/年に上昇し、それ以降ほぼ同量を採取し続けている(第3図)。運転開始以降、ほとんどの分離熱水および凝縮水は生産ゾーンの周辺部に還元されている。採取量と還元量の差は現在約6 Mt/年である。プールに最も近い還元井BR12は北方約450mに位置し、また最も近い生産井は北西約150mに位置する。

深部流体圧力は噴気テスト期間中は約15バールも減少し、それに引き続き回復期間中には約10バールだけ回復し、そして生産が始まるとまた減少した。

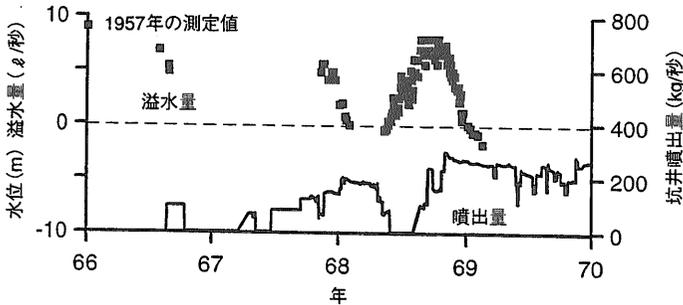
6. 開発による環境影響

オハーキ地熱発電事業の計画段階において、環境影響が起こることが予想され、環境影響報告書が準備された。その中で、化学物質、ガス放出、騒

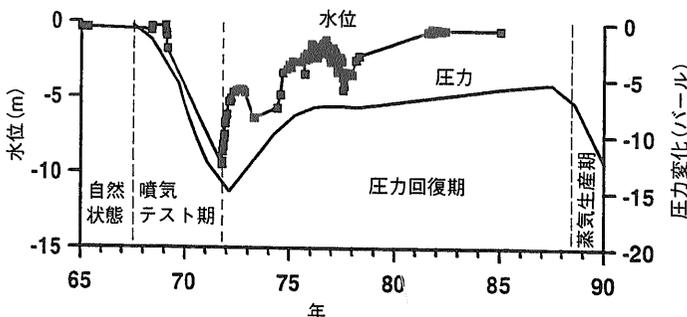
音、気候への熱公害、自然の河川系、動物相・植物相、地盤変動への影響が評価・査定され、影響緩和のための方策がとられた。しかしながら、ワイラケイでの開発で生じたような自然地熱兆候への影響については、この報告書の中では言及されていない。

プールの周りの広い珪華分布域は、この地域が長期間、流体を溢れ出させていたことを示している。噴気テスト期間以前の計測では、浴槽に流入している水路での流量は通常約9リットル/秒(第4図)であるが、突然、流量や水位が変化することが知られていた。

オハーキ・プールでの開発による主要な環境影響は、流量と水位の変化である(Glover *et al.*, 1996)。測定結果は流量が近くの坑井の作動に大きく影響されている事を示している(第4図)。噴気テスト期間中、近くの坑井を噴気させると、プールの流量は減少し溢水が止まり水位が低下した。1968年に噴気が減少し一時的に停止したとき、水位は上昇しプールから水が溢れだし、その流量は約8リットル/秒まで増加した。噴気が再開された直後には、安定していた流量は急激に減少し溢水は停止した。そして1969年2月には水位は流出口の1.8m下方まで低下した(第4図)。この頃、プー



第4図 噴気テスト期間の一時期のオハーキ・プールからの溢れ出る流量の変化(Glover *et al.*, 1996)。プール近傍の坑井を開放させると溢れる流量は減少し、閉鎖すると増大する。



第5図 オハーキ・プールの水位変化(Glover *et al.*, 1996)。

ル縁から張り出した何ヶ所かが崩壊した。これは水の浮力の喪失したこと、および、または空気にさらされた事に関連した熱応力による破壊によるものと思われる。水位低下に関するデータは、1971年10月に水位が9.5mまで低下するまで得られていない(第5図)。1971年の残りの期間中には水位は上昇し、1972年7月には最高4.5mまで回復した。しかし、1973年4月には再び6.4mまで低下した。これ以降、水位が5.7mになる1974年5月まで測定データは再び欠如している。その後、水位は急上昇し1974年11月には3.1mまで達したが、それ以降1976年中期までは緩やかに回復している(第5図)。1972年7月から1974年11月までの水位の一時的な降下の理由は不明である。なぜならば、この期間中、近くの坑井からの噴気は僅かであったからである。残りの回復期間中には、多くの噴気および干渉テストが行われ、そのためプールの水位は最大4mの変動を起こしている。これらの変動を除くと、水位は一般に上昇傾向で1981年10月には断続的に溢れ出し始めた。この水位の上昇は近くの坑井からの分離熱水の還元を手助けされたものである。それ以降、生産が始まる1988年8月までプールは断続的に溢れ出し、その流量は最大2リットル/秒であった。生産期間中はプールの水位は一般に溢水させるに十分なものであった。

7. 補修作業

地元のナーティ・タフの人々は噴気テスト期間中の水位変動によってプールが物理的被害を受けていることを知ったので、分離地熱流体でプールの水位を一定に維持する計画に開発側と合意した。その許可内容はプールに最大300t/時の流体を入れること、および最大36t/時(100℃で約10.4リットル/秒相当)の流量を溢れ出させることである。しかし、プールの容量は大きく、溢れ出させることは出来なかった。この問題を解決するため、プール底面のいくつかの噴出口を密封した。この作業は1989年に始まり、噴出口は600m³の巨礫と岩石によって埋められた。その表面近くは安定した作業ができるようサイズの小さいもので充填され、その上に軽量金網で補強されたコンクリート層が張られプールの側壁と密着された(写真3)。北東部の噴気孔

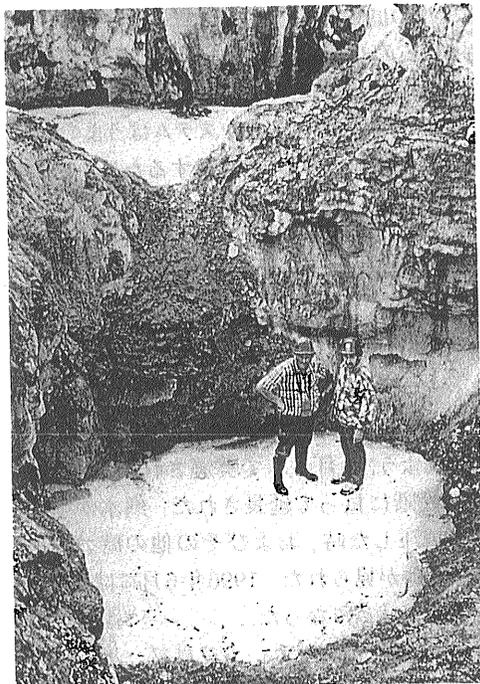


写真3 1989年9月に実施された、プール底の噴気孔を密封するためのコンクリート工事。

すべてと南西部の一部は完全に密封されたが、南西部の浅部噴気孔は密封されなかった。それは圧力が上がり水蒸気爆発を制御できなくなる危険性を軽減させるためである。

この補修作業が完了した後、数年間は、プールは坑井からの熱水で満たされ、開放水路を通して溢れ出していた。しかし、この状態では熱水は浴槽に届くまでに冷えてしまい、しばしば入浴するには冷たすぎる状況であった。また、低温下のため浴槽に灰色の非晶質シリカ沈殿物がたまり、不快であった。ナーティ・タフの人々はこの浴槽の状態に不満であった。更に、1993年11月に地震活動が記録された後、プールは再び急に空になってしまった。これは地震によりプール底面のコンクリート密閉に割れ目が入ったためと思われる。プールの噴気孔からの硫化水素(H₂S)がマラエ(集会所)に届き、これが更なる問題となった。これらの問題を解決するために、分離熱水(160℃)を直接プールへ供給することが提案された。これはまた、プール底面のひび割れを冷却に伴うシリカ沈殿物によって塞ぐことをも目的としたものである。

1994年6月に、近くの気水分離器から分離熱水

をプールの底面へ配給するための地下配管が設置された。このパイプラインの端末には熱水出口での浸食を軽減させるため、スプリンクラー形式の管口が取り付けられた。このシステムはうまく作動したが、振動によりパイプが損傷するため、1994年12月に管口を改造した。

1996年3月にはプールの北東部の凹地に新たな噴気孔(3×0.5m)が発生し、部分的な漏水を起こした。この噴気孔をコンクリートで埋める最初の試みは大量のガス放出のため失敗に終わったが、その後、ガス放出のための垂直パイプを設置して、塞ぐことができた。熱水の供給はプールが徐々に満たされるよう3ヵ月かけて実施され、ガス放出パイプは三段階に亘って延長された。熱水が噴気孔パイプを流下した時、およびその他の時、間欠泉のような活動が見られた。1996年6月にはプールは再び溢れ出すようになった。

地域開発者とナーティ・タフはプールの底が再び壊れる可能性があることに気づいているが、両者は両方が満足できる解決策を求めて努力している。

訳者あとがき

地熱開発に伴う環境問題は、原因を科学的に証明することがなかなか難しいため、また利害が複雑に絡むため、その詳細が公開される事は少ない。ニュージーランドは日本に比べると人口密度も土地利用度も低いので、環境問題はそれ程深刻ではないと考えていたが、実際こちらに滞在して以来、マオリの土地所有権および環境保全法との関連で開発に伴う種々の環境問題が発生していることを知った。ニュージーランドで2番目のオハーキ地熱発電所の開発では、最大の地表兆候であるオハーキ・プールがいろいろと影響を受けた。それを開発者と地元民とが相談して、紆余曲折しながらも解決を図ってきている。この詳細な顛末をトレーバー・ハント博士が科学的に記述し、興味深いレポートとしてまとめている。これは地熱開発による環境

影響がどんなものであるか、その一例を示すとともに、またその影響を如何に緩和できるか、その対応策をわれわれに示している。但し、ここで適用された方法がどこでもうまくいくとは限らないことを、充分認識しておく必要がある。また、オハーキ・プールには学術的に大変貴重なストロマトライトが形成されている。その写真は科学的に大変価値あるものと思われる。訳者はこのレポートを翻訳することは大変意義有ることと考え、ここに翻訳し紹介することとした。最後にこのレポートの翻訳を許可してくれたトレーバー・ハント博士に感謝の意を表す。

引用文献

- Allis, R.G. (1981) : Changes in heat flow associated with exploitation of Wairakei Geothermal Field, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 24, 1-19.
- Clotworthy, A., Lovelock, B. and Carey, B. (1995) : Operational history of the Ohaaki Geothermal Field, New Zealand. *Proceeding. World Geothermal. Congress 1995: 1797-1802.*
- Glover, R.B., Hunt, T.M. and Severne, C.M. (1996) : Ohaaki Ngawha; Ohaaki pool. *Proceedings 18th NZ Geothermal Workshop 1996: 77-84.*
- Hietter, L.C. (1995) : Introduction to geothermal development and regulatory requirements. In "Course on environmental aspects of geothermal development" (K.L. Brown, convener). International Geothermal Association.
- Hochstein, M.P. and Henrys, S. (1988) : Assessment of total heat and mass transfer of a large pool using the balance method (Ohaaki Pool, Broadlands-Ohaaki Geothermal Field, New Zealand). *Proceedings International Symposium on Geothermal Energy, 1988, Geothermal Research Society of Japan, Kumamoto and Beppu: 97-101.*
- Hunt, T.M. and Brown, K.L. (1996) : Environment effects of geothermal development and countermeasures. *Proceedings 1995/96 APEC Energy R&D and Technology Transfer and Renewable Energy Resource Assessment Seminar: 243-255.*
- Jones, B., Renaut, R.W. and Rosen, M.R. (1997) : Biogenicity of Silica precipitation around geysers and hot-spring vents, North Island, New Zealand. *J. Sedimentary Research*, 67: 88-104.
- Hunt, T. M. (transl.: TAMANYU Shiro)(1997) : Mitigating the impact of geothermal development : an example from New Zealand.

< 受付 : 1997年4月7日 >