

ニュージーランド

ワイラケイ地熱地域をたずねて

馬場 健三

ニュージーランドの首都ウェリントンから商都オークランド行きの長距離バスに乗って7時間 車窓にうつる平凡な牧場風景の連続にもすっかりあきたころ突然 ルアペフ ナウルホエ トンガリロの3つの火山が単調だったこれまでの景色にとつかわる。そしてニュージーランド北島のほぼ中央に位するタウボの湖がそれに続く。新しい町タウボから約10kmの所に地熱発電所有名なワイラケイ地熱地域がある。ワイラケイはまたこの国の主要な観光地の一つでもある。3火山の位置を南端にしてプレンティ湾(Bay of Plenty)に至る帯状の地帯がニュージーランドの火山帯である。プレンティ湾中にあるホワイトアイランドは海中に頭を出した非常に活動のはげしい活火山として 世界的に知られたものである。火山地帯の中心の街ロトルアはこの国唯一の温泉保養地であり かつそこにはニュージーランドの先住民族であるマオリ族が古くからたくさん住んでいる。そして火山と古い風俗にひかれて そこを訪れる観光客も多い。

活ばつな間けつ泉をはじめとして 地熱によって生み出される景観が昔から観光資源として扱われてきたことは ニュージーランドの地熱地域においても わが国における例と同じであった。なかでもホテル・ワイラケ

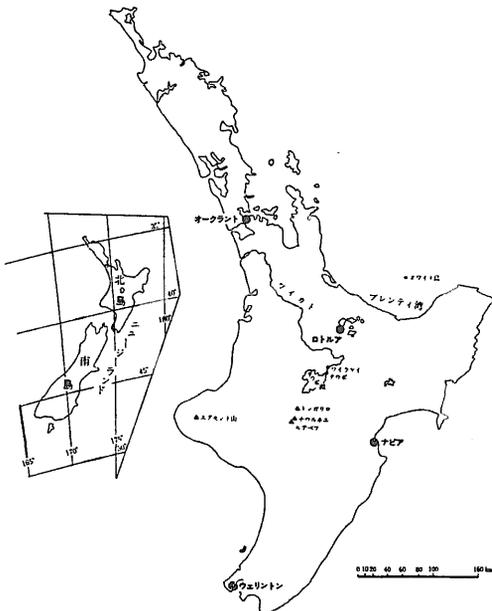
イはりっぱなゴルフコース 温泉プールなどとあわせて古くからこの国では有名であった。しかし現在のワイラケイは10年前のワイラケイとは全く違う。ここ10年ばかりの間にワイラケイはすばらしい名物を生み出した。大規模な地熱発電所がそれである。イタリアのラルデレロにある世界最初の地熱発電所について ニュージーランド人が作り上げた世界で2つ目の本格的な地熱発電所がここにある。1963年1月から約10年の間 筆者は科学技術庁の在外研究員制度の適用を受けてニュージーランドに滞在し 地熱エネルギー開発の様子を見る機会を得た。その見聞をもとに以下ワイラケイ地熱地域の概況をえがいてみたいと思う。

地熱発電とは

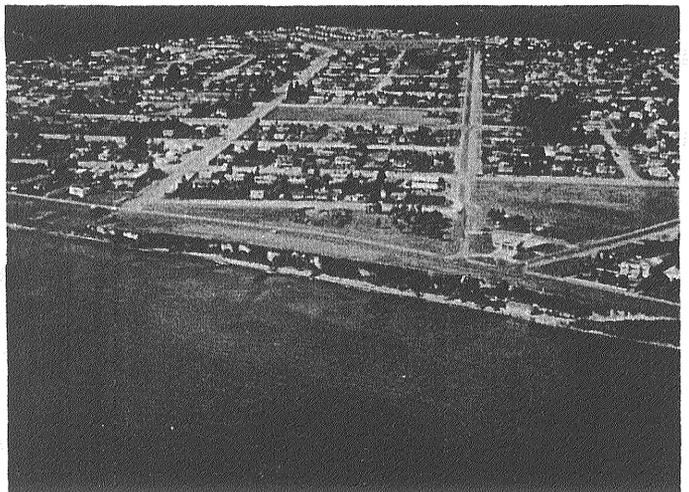
ワイラケイ地熱発電所について述べる前に まずいわゆる地熱発電について簡単に説明しよう。

水力および火力による発電が現在の発電方法の主たるものだが 地熱発電は原理的には火力発電である。火力発電とは石炭や石油を燃して作った蒸気によって蒸気タービンを回転させて発電する方法であるが 人工的に作り出す蒸気の代りに天然の蒸気を使って発電をしようというのがここでいう地熱発電である。

地球上における石油・石炭・天然ガスなどのいわゆる化石燃料の埋蔵量はいうまでもなく限られたものである。もちろん近代科学の発展はそれらの探査技術を高度なも



第1図 ニュージーランド北島位置図



空からタウボの湖と市街をながめる

のしつ々あるが それにもまして 急げきな人口の増加 文明の発達 それに伴う需要の増加は近い将来にわれわれの持つこれらのエネルギー資源が零になってしまうことを示している。このままいけば100年以内にこれらの資源はなくなってしまうともいわれている。原子力・太陽熱などと共に地熱がエネルギー資源として注目されねばならぬわけがここにある。

地下の熔融した岩石(マグマ)が比較的地表付近ある時には地表にまで上ってきている所 いうまでもなくこれが火山だが その熱エネルギーはばく大なものでありこれが利用できたらすばらしい事である。しかし現在のところこれら火山のもつ熱エネルギーの直接的利用の方法は見当らない。もちろんそれは地球にいとむ科学者の持つ大きな夢の一つである事にはまちがいないがともあれ現在のわれわれに考えられ 行なえるのは地下にうまい工合にたまっている天然の蒸気だまりを探しあて ポーリングしてパイプをさし込み そして地表上に導き出して発電に使うという方法である。一つのポーリング孔から得られる蒸気量が数気圧のもので 10トン/時間程度以上のものなら地熱孔井として使える。ところで地熱発電についての各国の関心であるが すでに発電所を持っているイタリア ニューゼーランド アメリカはもちろんそれ以外の国々でも相当なものである。1961年8月にローマで開かれた国連主催の新エネルギー開発に関する会議では 地熱エネルギー利用の問題が大きく取り上げられた。現在上記3国のもっている各地熱発電所の出力はイタリア 35万kW ニューゼーランド 15万kW アメリカ 1.25万kW である。そして準備中のものとしてソ連・アイスランド・メキシコ・エルサルバドル それに日本などがある。

わが国の地熱発電に関する歴史はきわめて古い。1923年別府において東京電燈会社が1.12kWの発電を行なったのはじまり 第2次大戦直後利根ポーリングKKが伊豆熱川で約20kWの発電を行なっている。1951年には商工省が別府で30kWの試験発電を行なったこともあるが 現在その設備はない。1960年藤田観光KKが箱根小涌谷の試験孔を利用して30kW発電をはじめ現在に至っているが これが現在わが国における唯一の地熱発電所である。地質調査所では1947年から地熱エネルギー開発のための調査研究をとり上げている。ことに1958年以来岩手県松川地域においては 東化工KKと共同研究の体制で調査を行ない その結果に基づき 昨年新技術開発事業団の出資で開発第1号井(約950m)を掘さくし これがみごとに成功して予期以上の量の蒸気の噴出を得た。続いて現在第2号井の掘さくにとり

かかっており 順調に行けば明年には 約5千kW程度の わが国はじめての 本格的な地熱発電所の建設が行なわれるであろう。

ニューゼーランド

ニューゼーランドは非常に若い国である。英国人による最初の組織的移民は1840年のことであり 英連邦内の自治領として独立の地位を確立したのは1907年である。国土の面積はわが国の約73%にあたり 大差はないが人口はわずか240万程度である。地下資源にはめぐまれていないが 農業・林業は盛んであり 完全な社会保障制度をもち 失業者も乞食もない豊かな国である。主題のワイラケイあるいは先に述べたマオリ族の街ロトルアは わが国でいえば 熱海・別府にがい当する観光地である。地熱のつくり出す景観に関する限り両者に大きな違いはないが 日本のいわゆる温泉地にみられるような享乐的な娯楽施設はどこを探しても見当らない。筆者のこの国に関する印象はまさに健康的な国ということばにつきる。わが国においては 地熱発電と従来からある いわゆる温泉とが 両立するかどうかということが大きな関心事となっている。

地熱発電に使った蒸気は最後に100°C近くのお湯として大量に放出されるので これですべての温泉浴場がまかなえるから 必ずしも利害相反するものでないという議論がなされる一方 現在温泉として開発された観光地に地熱発電所を作っても 観光でやしなえる人口より大きな人口をやしなうことはできないという意見もある。ここにわが国の地熱発電のむずかしさがあるわけだが 他方ニューゼーランドにはこういう問題が全くない。自然にわき出ているお湯を浴場用として使うことはニューゼーランドではまれなことであり そのまま放置されている温泉がほとんどである。大規模な地熱発電所のできたワイラケイではわずか2・3の温泉プールにわき出ているお湯が利用されているだけである。しかしロトルアには温泉水を引き込んだ公衆浴場が2・3あり かつ一般家庭でもかなり利用しているようだ。またキノコ栽培いや木材乾燥のためなどにも小規模に使用されているが いずれにせよわが国における温泉のような大規模な利用はなされていない。ニューゼーランドの地熱発電の急速な発展の背景には このようにわが国とは全く異なった事情があるのである。

ここでニューゼーランドのエネルギー資源について簡単に述べてみよう。この国は日本と同様山地が多く 低コストの水力発電に適しており これが最大のエネルギー資源といえる。1963年現在の発電所の総出力は

193.8万kWである。もちろんつい最近までの日本のように水主火従で水力によるものが80%をこえる。問題はこの水資源が人口の少ない南島に偏ってあることである。そこで北島のおう盛な電力需要に応ずるため北島の地熱エネルギー開発が水力開発と共に強力におしすすめられているのである。また南島の電力を海底ケーブルで北島に送る計画も実現されつつある。石油の産出はほとんどなく輸入に頼っている。石炭はニュージーランドの最も重要な鉱産物の一つであり1961年には約300万トンをとっている。参考までにニュージーランドの最近の鉱産物の採取量の表を次に掲げる。

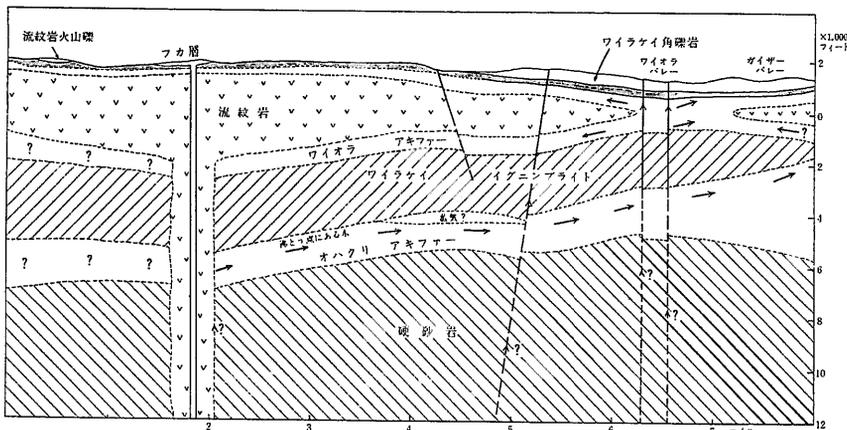
	1960年	1961年	単位
燃料			
石炭	3,012,043	2,924,725	トン
石油(原油)	191,800	153,650	ガロン
天然ガス	5,311,500	5,101,400	立方フィート
金属			
金	33,326	28,294	オンス
銀	1,353	805	オンス
鉄 鉱 石	1,999	1,745	トン
マンガン 鉱 石	120	—	"
タングステン 鉱 石	8	5	"
非金属			
石綿	284	333	トン
ペントナイト	2,165	1,661	"
粘土(レンガタイル用など)	322,742	411,577	"
粘土(陶器 充てん用)	6,043	4,629	"
珪藻土	6,243	3,536	"
建築用石材	28,162	16,129	"
ドロマイト	3,390	3,550	"
石灰岩(農業用)	885,949	895,122	"
石灰岩(工業用)	45,556	49,245	"
石灰岩・泥灰岩・珪砂など(セメント用)	1,090,983	1,212,569	"
菱苦土石	795	581	"
真珠岩	348	387	"
軽石	43,932	32,712	"
港湾用岩石	1,480,091	491,051	"
塩	17,020	5,017	"
砂・岩石・礫など(建築用)	3,367,942	3,523,836	"
砂・岩石・礫など(道路パラス用)	12,663,084	12,050,488	"
砂(工業用)	93,078	160,176	"
蛇紋岩	141,979	156,184	"
珪砂	62,536	55,235	"

1963年 ニュージーランド Official Year Book より引用

ワイラケイの地質構造

地下にある熱水の貯溜層となっていると考えられるのは 軽石角礫岩からなるワイオラ(Waiora)層である。この層は1500フィートから3000フィートの厚さを持つと考えられており そこに温度260°Cに達する熱水がたまっている。そしてこの貯溜層をいれものにたとえるならば そのふたにあたる滲透性に乏しい層が上をおおっている。これがフカ(Huka)層と呼ばれる泥岩の地層である。この層の厚さはだいたい200ないし500フィートと見積もられている。そしてこれが地表よりだいたい600ないし1000フィートの深さの所に分布している。その上に地表までつまり600ないし1000フィートの厚さで若い時代の軽石質火山砕屑物や堆積物がある。この地表にあらわれている堆積層をワイラケイ角礫岩と呼んでいる。

後述するようにワイラケイ地熱地域には100以上の試験孔(最浅563フィート 最深4004フィート)がありいずれもコアを採取しているためワイオラ層までのことは比較的よく確かめられている。ワイオラ層の下部にはこれまた水や蒸気をとおさないワイラケイ・イグニンプライトとよばれる層がある。イグニンプライトとはこの火山地帯に広く分布して高原を作っている無層理の軽石流堆積物および熔結凝灰岩に対してニュージーランドで古くから使われている呼名である。岩石学的にはその様な名前を使って特別扱いはする必要もないとする考えもあるが この国では昔から広く用いられてきているのでここではこの名前を使用する。ワイラケイ・イグニンプライトの厚さは少なくとも1700フィートはあると推定されている。そしてワイラケイ地熱地域の基盤をなすものは中生代の硬砂岩と考えられる。重力調査の結果 この基盤はワイラケイ付近で地表から約6000フィートの深さの所にあると推定された。一番深い試験孔でもイグニンプライトを抜いていないので 深度約4000フィートから6000フィートに至る約2000フィートの厚さにわたる地質については今のところ何もわかってい

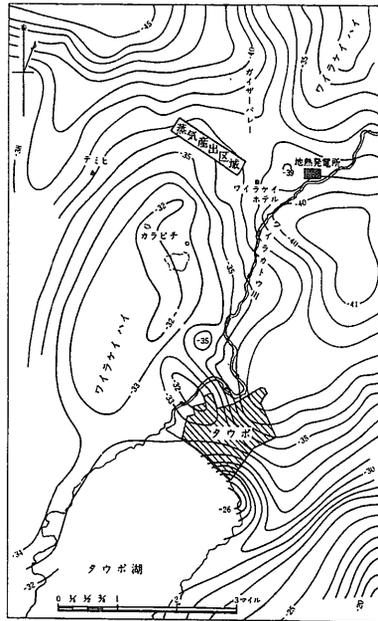


第2図
ワイラケイ地熱
地域の地下構造
推定図

ない訳である。さてここで第2図の地下構造推定図をみていただきたい。これはニュージーランド地質調査所のグリンドレイ氏が作った推定図である。ワイラケイ・イグニブライトは非滲透性で熱水蒸気を通さないが断層によっていくつかの割れ目ができておりこれがワイオラ層への熱水の供給路をなしていると考えられている。そして先に述べた未確認の2000フィートにわたる部分に軽石質火山砕屑物及び堆積物が想定されて（これは付近の露頭層序から推定されたもの）これがワイオラ貯溜層のさらにもとになる貯溜層をなしていると考えられる。これをオハクリ(Ohakuri)アキファー(Aquifer)と名付けている。またワイオラ貯溜層の中に流紋岩の貫入があるがこれは試錐や重力磁気調査からその存在がよく確かめられている。オハクリアキファーの存在の有無およびさらに根源的な熱水の供給源は何かという問題は今のところ全く想像の域を出ない。

ホワイトアイランドからルアペフなどの3火山にいたる火山帯は地質構造的にはニュージーランド北島の大きな地溝帯の中にある。重力調査の結果ワイラケイ地熱地域はその地溝帯の中でも比較的基盤が浅くなっている所にあることがわかった。すなわち一番浅い所で海面を基準にしてマイナス約4500フィートに中生界の上部が推定される一方その周辺ではそれが8500フィートと推定されている。

ワイラケイ・ハイ(Wairakei High)と呼ばれているこの構造は断層による地層構造と考えられているがこの構造を作った断層に沿って熱水がワイオラ層に上ってきてちょうどその上部にふたになる非滲透性の泥岩(フカ層)があるのでうまい工合に熱水貯溜層が形成されたのである。随所に見られる地表の地熱徴候は断層がフカ層をも切った所に沿って生じたものと考えられる。ここでワイラケイでこれまで行われてきた地下構造の



第3図 ワイラケイ タウポ地域の重力探査

(ニュージーランド科学技術庁 Bulletin 117の付図)

質構造をつかみそしてその結果に基づき精査する所がきめられ地質調査地表の温度分布の測定各種物理探査法(磁気・地震法最近では比抵抗法を始めている)の適用さらに試錐調査空中写真による地質構造線の調査それに地化学的方法も試みられている。今日ワイラケイにおける地熱孔井試錐の成功率は100%に近いものであるがこれは決して偶然ではなくこうして従来行なわれてきたそしてまた現在も行なわれつつある一連の総合調査のたまものと見るべきであろう。かかる総合調査の必要性はニュージーランドの例を見るまでもなくわが国ですでに広く認識されており現にそれに沿って調査も行なわれてきているが調査から開発に至るまで一貫して国が仕事をやっているニュージーランドの様な「調査のやりやすい体制」がとりにくいところにわが国の地熱開発が当面する悩みの一つがある。

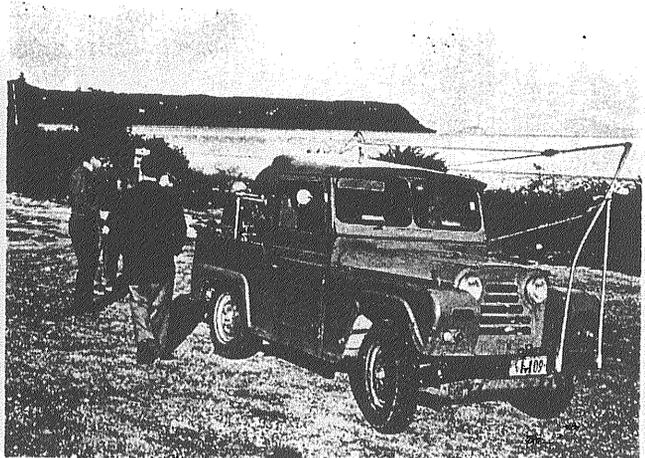
調査について述べる。

ワイラケイの地熱調査の歴史をみると地質地球物理地球化学など各観点に立つての検討いわば総合調査が行なわれてきたといえよう。いわゆる地質調査からはじめて重力および磁力(空中)図を作り地熱地域の

いわば大きな地



地質の露頭調査中のヒーリー(Healy)氏
先年来日したおなじみの地質学者である



比抵抗法による調査(タウポ湖畔にて)

ている。もちろん新しい作井は 現在どんどん発電所から遠く離れた所にすすめられているが これらの孔井を使う発電所は別に建てられねばならないだろう。発電過程で必要な冷却を行なうのにイタリアでは大きな冷却塔をたてて いわゆる空冷方式をとっているのに対し ニューゼーランドでは先述のとおり ワイカトウ川の水を利用した水冷方式である。しかしワイラケイでも新しく試掘が行なわれている所は ワイカトウ川からかなり離れたきたので 近い将来計画されるであろう第2の発電所は当然空冷方式となるう。

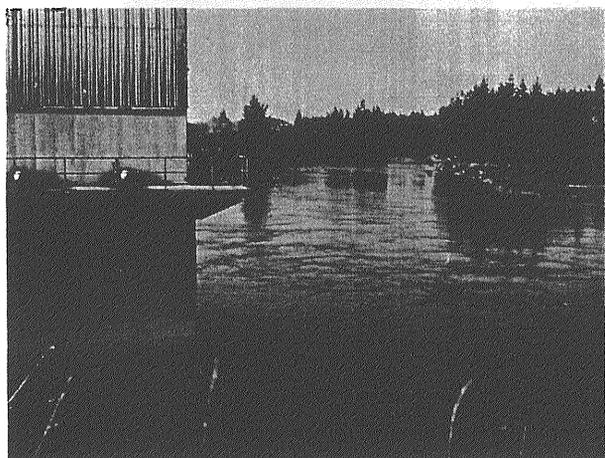
ワイラケイの地熱孔井は蒸気と熱水の混合物 すなわち湿った蒸気を噴出している。最近全く蒸気だけの乾いた蒸気を出す孔井も得られているが 現在使用中の孔井はすべて湿った蒸気を噴き続けている。その乾き度は重量にしてください20ないし30%である。そして蒸気と熱水を分離するため孔口に気水分離器（U字型およびサイクロン型）をつけ 分離した蒸気だけを発電所に送っている。

分離された熱水の一部はやはり管を通して発電所に送ら

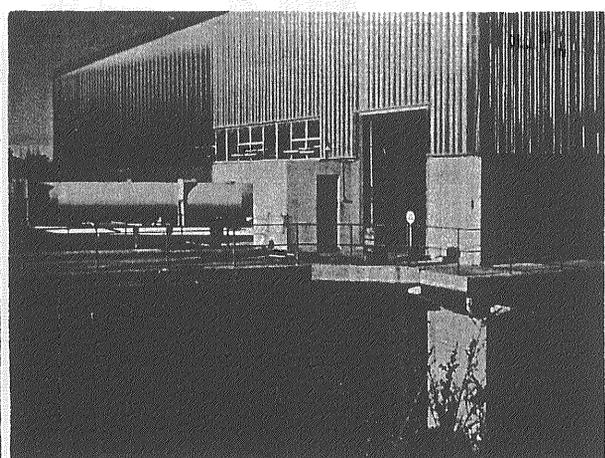
れている。もちろんこの熱水の圧力は大気圧より大きいので 大気圧付近の圧力まで減圧することによって蒸気化して発電に使用できる。しかし現在のところこれはまだ試験段階とのことであり 熱水の大部分は使用されずに捨てられている。

気水分離器で分離された熱水を大気圧下に導けばもうれつな勢いで気化する。かくして熱水の大部分を気化させることによって空中に捨ててしまう。これが煙突状のパイプ（サイレンサーすなわち消音器の役目をしてい）から空中にたちのぼっている白煙となってワイラケイの名物となっているのである。最後にお湯として残る分もあり これは溝をってワイカトウ川に流れこんでいる。最終的には熱水も全部発電に利用する計画なので 現在のようなもうれつに白煙を上げた景観もやがては見られなくなるだろう。

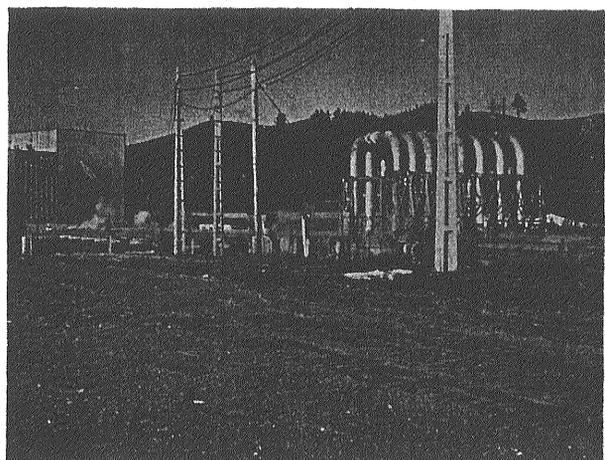
電力は22万ボルトで変電所に送られ北島の電力系統に組み入れられる。1962年度（1962年4月から1963年3月まで）の1年間の発電量は7億6千万kWhであった。これを同時期の北島の合計56億kWhと比較してみると約14%に近いものが地熱エネルギーによってまかなわれ



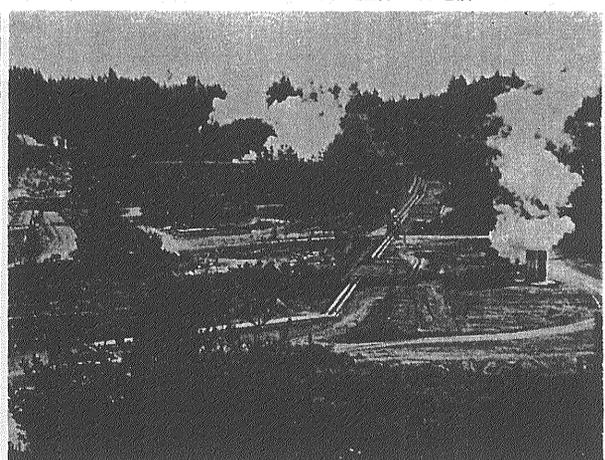
冷却水とり入れ口



冷却水汲み上げポンプとその建物 左方に発電所がある



蒸気を発電所に導くパイプ(発電所近く)



蒸気を発電所に導くパイプ 発電所より相当はなれた孔井

たという事になる。

ワイラケイ蒸気産出地域

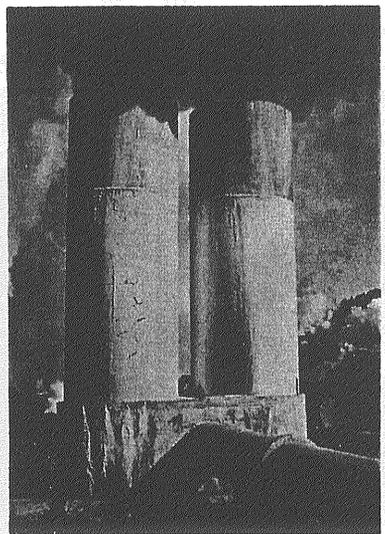
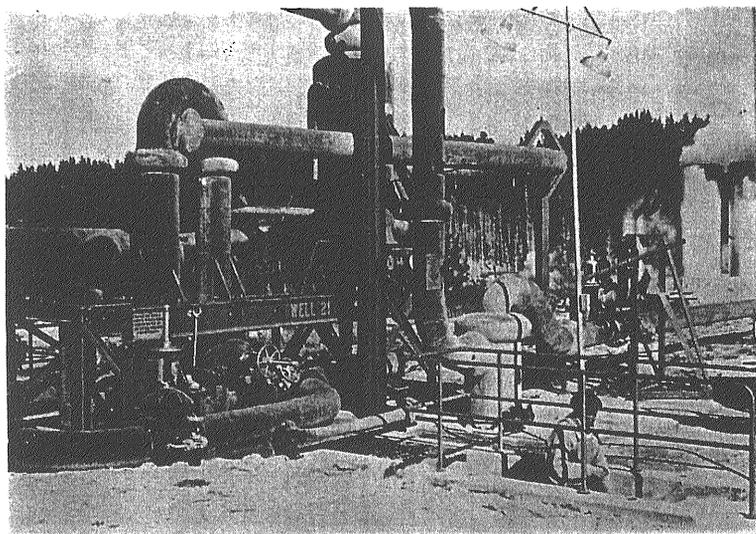
地熱孔井のたくさん作られた所は“Production Area”とよばれている。これを仮に「蒸気産出地域」と訳すことにする。ワイラケイにおける作井は研究のためのものと直接蒸気の取り出しを目的とするものとの2種類に区別して行なわれている（前者には200番台の番号を付し 後者には1からはじまる番号がつけられている）。しかし掘さく方法の点では両者の間に何の区別もない。現在ワイラケイ地熱地域約30km²中に112の孔井があることは先に述べたが 初期の孔井は4インチ口径で掘さくされ 現在では8インチが使用されている。深度はまちまちであるが平均650m位である。孔井の全長は約66kmに達する。各孔井はいずれもイグニブライト中の割れ目によって上昇している熱水の採取を目標に掘られている。イグニブライトの下に予想されているオハクリ層に達した孔井は前述のとおりまだない。

孔井は孔口における圧力の大きさによって大まかに2種類に分類できる。すなわち高圧井（大気圧下約180ポンド/平方インチ 12.9kg/cm²）と中圧井（同じく約70ポンド/平方インチ 4.9kg/cm²）とである。なお現在までに観測された最大噴出圧力は210.3kg/cm²（大気圧に対して）とのことである。また貯溜層中の圧力はだいたい450kg/cm²位と推定されている。一つの高圧井から噴出する蒸気量は 平均約55,000ポンド/時間であり中圧井の場合は約45,000ポンド/時間である。さて 現在ただちに利用できる蒸気量はといえ

高圧井32本から 1,726,000ポンド/時間
 中圧井26本から 1,277,000ポンド/時間 また熱水の量は
 16,900,000ポンド/時間 というぼう大な量になっている。なお1963年8月孔井の使用状況は 次表のようであった

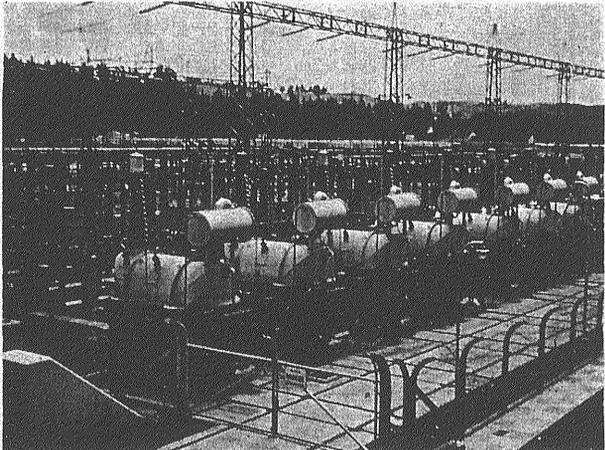
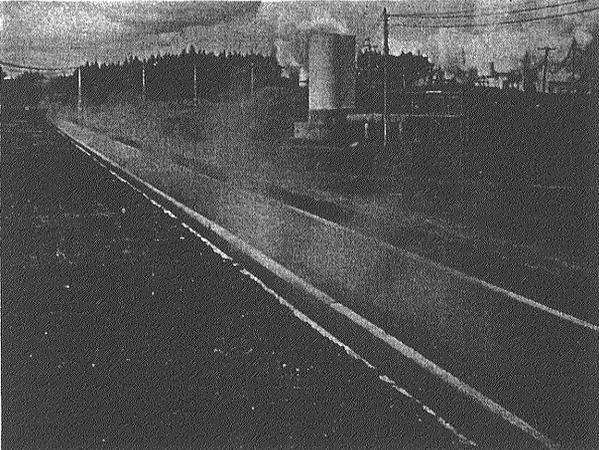
〔1〕 発電に使用された孔井

孔井の数		噴出量 キロポンド/時間	エネルギー換算 MW
高圧井	28	蒸気 1,542	114.3
		熱水 10,840	87.4



孔口施設 左方U字型中央サイクロン型の気水分離器 右後方にサイレンサーが見える

サイレンサー



使用しない熱水を川に導く 排水溝はシリカ沈着のためしばしば掃除が必要である そのため2つの溝が交互に使用される

発電所前にある送電施設

中庄井	16	蒸気	751	44.2
		熱水	2,080	6.9

もちろん以上のうち蒸気だけが利用された訳である

〔2〕 自噴のまま放置されていた孔井

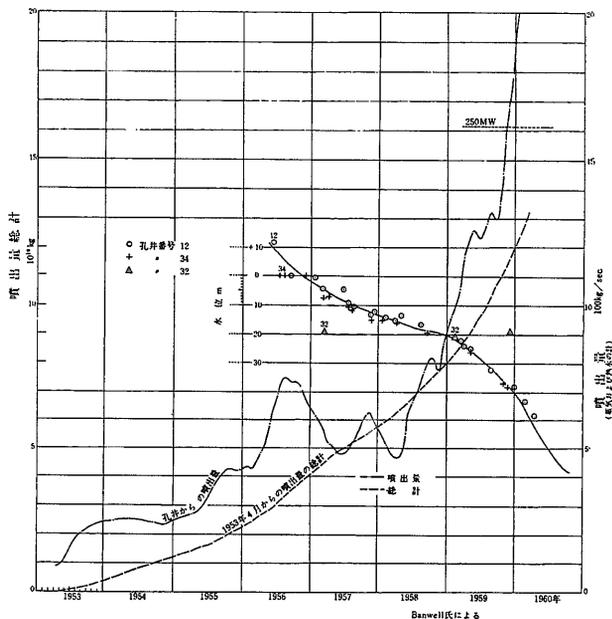
孔井の数		噴出量		エネルギー換算 MW
		キロポンド/時間		
高庄井	2	蒸気	24	1.8
		熱水	440	3.5
中庄井	7	蒸気	318	18.7
		熱水	1,430	4.8

〔3〕 熱水利用の発電方式に試験的に使用された孔井

孔井の数		噴出量		エネルギー換算 MW
		キロポンド/時間		
高庄井	2	熱水	520	4.2
中庄井	1	熱水	135	0.5

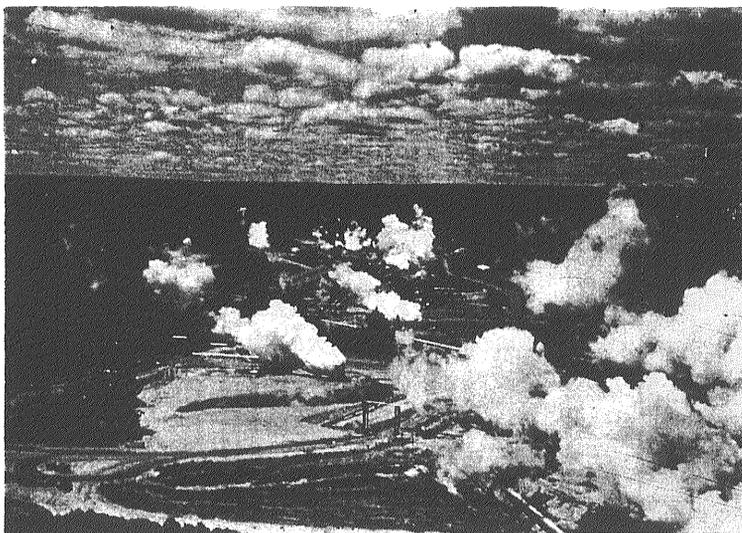
ここで地熱孔井の寿命について述べよう。貯溜層中における熱水のたくわえがなくなってしまうなくても孔井からの自噴量は孔井中に起こる沈着物(主としてシリカの沈着)のため熱水・蒸気の通路がふさがり年々減少することが予想される。イタリアにおける各地熱孔井の寿命はほぼ10年とされているのもこのように孔井の中に沈着物がたまり噴出がさまたげられてしまうからである。

しかし幸いにもワイラケイではこの問題はあまり深刻ではない。もちろんシリカの沈着は起こっているが孔井を一たん完全に閉じて再び急激に噴出させると孔井中につまっているシリカの掃除ができてしまう位のものである。ワイラケイ開発以来10年余たった訳だがその意味において死んだ孔井は一つもないとのことである。しかし噴出物に関する諸量は長い間一定というのではなくやはり各孔井に共通した若干の変化がみられる。著しい変化は孔底圧力の減少である。換言すれば噴出を止めた場合の孔井中の水柱の高さが減少していることである。孔底圧力の減少に伴って噴出物の乾き度は増

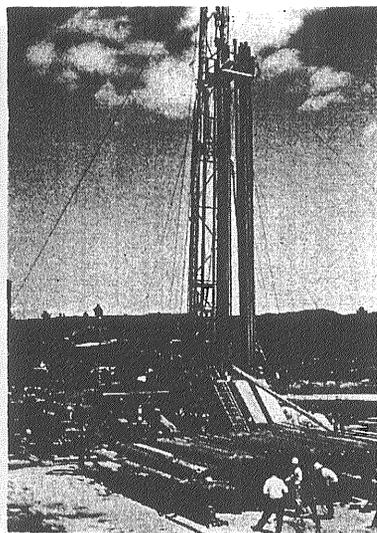


第5図 Grindrey氏による孔底圧力の変化

加しつつある。そして単位重量あたりのエンタルピーは増大することになる。一方噴出量としては減少しエンタルピーの増大とさし引きして熱出量からいえばあまり変化はない。孔底温度についてはこれまでのところ大きな変化を認めていない。統計によれば全噴出量の減少は8%/年 エンタルピーの増加量が2%/年となっている。また上記の傾向は高庄井 中庄井を問わず両者共通のものである。数コの孔井についての孔底圧力の変化の模様を第5図にかかせる。これはニュージーランド地球物理研究所のバンウェル氏の作った図面であるが変化は孔井中の水位の変化として表現されている。



ワイラケイ蒸気産出地域



地熱孔井の掘さく

図から熱水をとり出したことによりそしてその量が増すにつれ水位が急に下降していることがわかる。

ワイラケイ蒸気産出地域の地下では先に述べたようにワイオラ層はフカ層にふたをされた状態で熱水の貯溜層をなしている。熱水の温度は約260°Cと考えられているがフカ層による密閉のおかげで高い圧力状態にあり高温にかかわらず気化することなく熱水の状態を保っている。各孔井はこのフカ層をつき破っているからとじ込められていた熱水が噴き出しその際急な圧力の降下のため一部蒸気化する。しかしワイラケイ・イグニンプライト中の割れ目近くに達している孔井の場合はその割れ目を通ってくる熱水がほとんど直接に出てくると考えられる。

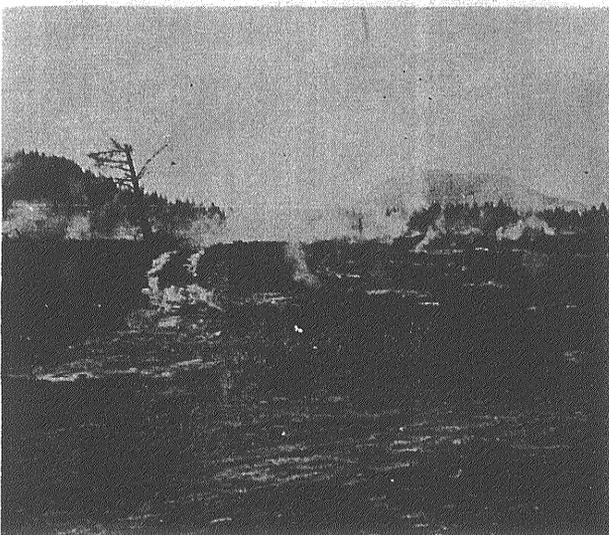
そして現在ワイラケイの地熱孔井から出ている蒸気・熱水は主としてこのイグニンプライト中の割れ目から直接的に出てきているものと推測されている。つまりワイオラ層に貯えられているものをとり出しているのではなくむしろワイオラ層の熱水の源から直接的に熱水をとっている訳である。もちろん孔井がイグニンプライトの割れ目近くに達していない場合はワイオラ貯溜層中の熱水が出てくる訳だしまた割れ目を通って上ってくる量が地上にとり出している量より少ない場合は当然ワイオラ貯溜層にたくわえられたいわば貯金をくいつぶしていることが起こっていることになる。大幅な貯金のくいつぶしが現実に起こっていないとしてもいずれにしろこれまで密閉状態にあった貯溜層にたくさんの孔井を作ったため今までそこで熱水が保ってきた高い圧力が幾分減少することは容易に想像できる。かくしてこれまで高い圧力のもとで熱水の状態にあったものも圧力降下によって一部が蒸気化することが考えられる。ワイラケイ蒸気産出地域より数 km 南西にカラピチ (Karapiti) とよばれる地熱の地表徴候のはげしい所があ

る。ここにある自然の噴気孔は最近の測定によれば 35,000ポンド/時間の量の 114°C の蒸気を噴出し続けている。マオリ族の言い伝えではほぼ 600 年以前からほとんどその噴出状態をかえていないとのことである。カラピチ噴気孔についてはそうであるがその周辺一帯の地表地熱徴候には最近かなりの変化が認められてきた。活動が非常に活ばつようになってきたのである。ちょうどカラピチでは熱水の貯溜層のふたになっているフカ層が地表または地表近くにあり風化などのため非透過の性質がじゅうぶんでなくここではふたの役割りを果たしていないと考えられる。そしてそれが地表の地熱徴候を作っている原因である。ワイラケイにおける開発の結果前述のようにしてフカ層の直下に新たに生じたと考えられる蒸気がカラピチにおいてはふたがないため容易に地表に出てくる。その結果近年地表徴候が活発になったと推測される。また最近の掘さくから得られた比較的乾いた蒸気も上述のようにして生じた蒸気だまりにその原因があるのかもしれない。一方ワイラケイ蒸気産出地域に隣接するワイラケイ谷に沿ってあるワイラケイ・ガイザーの活動状況は開発にともないむしろおとろえて行くようである。ここは川ぞいに沢山の熱水の自噴泉のある所であるがこちらの方の原因はカラピチの場合より容易に説明できそうである。

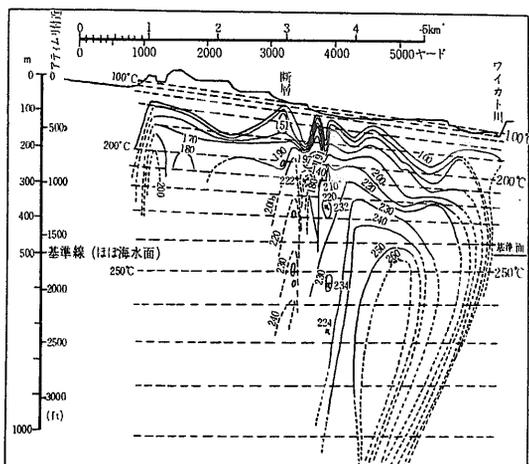
熱 源

地下深所から地表に熱を運ぶ機構としては熱伝導によるものと熱水・蒸気などの「もの」の移動に伴って行なわれるものとの2種類を考えればよい。他の地域とくらべると地熱地域では伝導による放熱量もけた違いに大きくなってくるがそれにもまして蒸気・熱水などの地表への噴出があればそれらによって運び出される熱量はばく大なものとなる。

ニュージーランドでは地熱エネルギー開発をはじめるにあたってまず各地熱地域の規模を見積もってかつ比較するのにこの自然の放熱量というものの利用を試みた。一つの地熱地域の自然の放熱量を知ることは非常にむずかしいことである。ことに温泉や噴気孔がある場合にこれらから出てくる熱量を正確に知ることはきわめて困難である。各地の測定結果の比較にあたっては伝導による熱流量よりも「もの」の噴出に伴うそれの方がけたはずれに大きいのであるから自然放熱量の大小が簡単に地熱地域の本質的な規模の大小にはつながらない。だからといってかかる測定が無意味だということではない。たとえば自然放熱量は掘さくによってとり出せるエネルギーの規模についてあらかじめ目安をつけるのにも役立つ。そしてまた開発に伴って自然の活動に変



カラピチ (KARAPITI) 地熱地域



第6図 地下温度分布図 (Banwell氏による)

化があることは容易に想像できることで その変化の様子は地下の熱のあり方を知る上に重要な手がかりともなるので その意味でも自然放熱量の測定は大切な仕事である。開発初期に測定されたニュージーランドのおもな地熱地域の自然放熱量を次に示す。あわせて日本の小浜で測定された例を付ける。

ワイラケイ	360×10^6 kcal/時間
ワイオタブ	780×10^6
ロトカワ	90×10^6
長崎県小浜温泉	190×10^6 (渡辺和衛氏による)

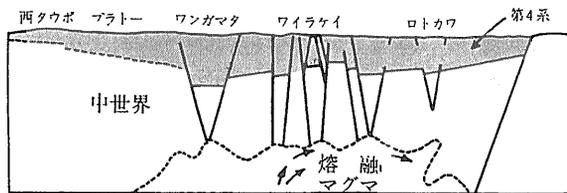
第6図に有名なワイラケイの地下温度分布図を掲げた。これはニュージーランド地球物理研究所のバンウェル氏が測定結果に基づきえがいたものであるが 一つの地熱地域についてこのような完全に近い地下温度分布図が作られているのは このワイラケイにおけるものを除いては世界にあまり例がない。この温度分布はいわゆるキノコ型を呈しており 周辺では地下深所にいくとかわって温度が低くなることを示している。これはまたワイオラ貯溜層中の熱水が対流現象を起こしていることを示すものでもある。ワイオラ層中の熱水がお釜の中の湯があたまる時の様に対流を起こしていることの可能性は 多孔質媒質中に起こる対流の問題として理論的にも実験的にも確かめられている。かくしてワイオラ貯溜層中の熱水の状態については きわめてはっきりわかっているが この熱水の起源については どう考えられているのだろうか。孔井から噴出し続けている噴出物の温度や化学成分には長い期間に至ってほとんど変化が認められていない。このことは熱水の溜りがかなり大きいものであることを示している。1953年4月から1961年1月までの約8年間にとり出した熱水の量は 16.8×10^{10} kg と見積もられている。すなわち 10^{11} kg 程度のものを取り出しても孔井の性質や噴出物の特性にさして変

化はおこっていないので たとえば 一応1マイル位の深さに1立方マイル位の規模で温度および化学成分共に一様な熱水源を考えてもよさそうだ。1立方マイルに含まれた熱水とは 10^{12} kg オーダーの量である。

このようなぼう大な量の水をマグマの分化によってまかなうには大量のマグマが必要で地質学的に不自然である。その上同位元素(重水素 三重水素 O^{18} など)による研究の結果からこれら熱水の起源が結局天水にありかつそれが少なくとも50年は大気との接触をたって地下に閉じ込められているものだという事がわかってきた。もちろん岩漿水の混入も考えられるが それは量的には全体の10%以下のものだろうと推定されている。流紋岩が固化する時に分離する岩漿水の温度は約800°Cである。この値を岩漿水の温度として採用し これが冷い地下水と1対9の割合いでまざったとすれば 最終的にはたかだか100°Cのお湯になるだけで ワイラケイの熱水のもつ300°C程度の温度にはとうてい達しない。そこで熱の供給源を別に考えなくてはならない。第7図に掲げたのは火山地帯の推定断面図である。ワイラケイ地域の地下10km位のところにドロドロにとけたマグマを考えこれが対流を起こして さらに深所の地熱を上部に運んでいると考えられる。そしてこのマグマの運ぶ熱が地表に出てきて現在の地熱地域を作っていると考える。つまり熱的には平衡状態にあるものとする。ワイラケイの自然放熱量は約 360×10^6 kcal/時間と見積もられている。さてそこでドロドロにとけたマグマの上にある堆積層をお釜にたとえるならば マグマの直上にお釜の底にあたるものを考えなくてはならぬ。この底の厚みが問題となる。

岩石はもともと熱伝導性に乏しいので あまり厚い釜底を考えると 360×10^6 kcal/時間 いうようなばく大な熱量を供給するためにはワイラケイ地熱地域の地表面積に比較して広すぎる底を考えなくてはならない。そしてあまり広い底を考えることはその様に大規模な熔融マグマが存在するかという疑問につきあたる。そこで釜底が完全でなく多少割れ目がある事を考えてみる。当然釜の中に貯えられている水は下に洩れ出るが 高温のマグマのため蒸気になって 別の割れ目からまた釜の中にもどるといふモデルが考えられる。先にも述べた様なものの移動に伴って起こる熱の移動は伝導に比べてははずれに効率がいい。結局地質学的にみてもありそうな熔融マグマの規模を考えかつ釜底の厚さもじゅうぶんにとりそれに割れ目がある程度考えれば 現在のワイラケイ地熱地域のぼう大な自然熱流量が説明できるのではないかと考えられている。

さて以上述べてきた論議とは別に熱源を熔融マグマに



第7図 地下断面図

求めず他のものとする説も出されている。岩石中のガラス質の部分が高温下において微細な細晶質構造もしくは石質構造に変わるいわゆる脱ガラス作用 (Devittrification) についてはよく知られているがその際熱が生成される。これを熱源として考えてはどうかというのである。たとえば次の様な仮説が出されている。10万年位前に火山活動によって大量のガラス質流紋岩質の火山灰礫が地溝帯の中に堆積した。次の火山活動の静かだった時代に周辺の地層の風化物によってこれが埋まってしまった。そしてこれらの一連の堆積層中で冷い地下水の循環が起こっていた。その後現在よりほぼ数万年前にその周辺で再び火山活動が盛んになり噴出した岩石がその上をおおってしまった。その結果最初の堆積物は深いところにとじ込められてしまいことにイグニブライトとよばれる岩石はじゅうぶんに非透過の性質をもっていたので下部にとじ込められた地層中の地下水は完全に他の地下水系との循環を絶たれたかっこうになってしまった。この火山活動の末期に地下水を含んでとじ込められたガラス質の岩石を含む地層に局部的にマグマの貫入がありその結果脱ガラス作用が起こり生成された熱により連鎖的に反応が進み結局その地層中に比較的短期間に300°C位の熱水ができたとするのである。この論議は仮説として出されているものでその是非は基礎的な研究の後でないと定められないものである。

たとえばガラス質流紋岩質の岩石 $20\text{km} \times 20\text{km} \times 1\text{km}$ が上記のような環境下にあったとすると現在のワイラケイにおける熱流量の1万年分を供給できるとのことである。一方先のマグマの熱によって熱水ができたという説をもとにしてバンウェル氏はワイラケイに貯えられてある熱エネルギーをいろいろに見積もっているのを紹介しよう。ワイラケイ ロトカワ その他のワイラケイを中心として周辺の地熱地域の自然熱流量の総計は $300,000\text{kcal/sec}$ と見積もられている。そのうちもちろんマグマからの遊離ガスが運ぶ熱もある程度考えられる。しかもこの量を見積もることはむずかしい一応これを $50,000\text{kcal/sec}$ 位に見る。差引 $250,000\text{kcal/sec}$ の熱が先に述べたようにして釜に伝えられかつ地表に出ている分と考える。

釜の中には熱水が貯えられておりこれが対流を起こすことにより温度は一様に300°Cに保たれているものとしかつマグマの温度を1300°Cとする。釜底の厚さを見積もるには釜底をあたためているマグマの上面の面積と底をなしている岩石の熱伝導率を見積もらなくてはならぬ。後者を 4×10^{-8} cgs と仮定する。マグマの上面までの深さを9kmとしてかつマグマの上面の面積を先の想像図からおして 227km^2 とすると釜底の厚さは363m位となる。これは底に割れ目を考えない時の数字である。さて釜の中の温度は主として熱水の対流によって維持されている訳だが全部を300°Cと仮定することはできない。すなわち冷くなった水の下降しているところは温度がうんと低くなっているし熱水が蒸気になる現象のおきているところもある。したがってある範囲にわたって一定の温度になっている事を仮定することは仲々むずかしいが一応マグマ上面の面積の1/4の面積を底面とする部分につき300°Cに保たれていると仮定してみてこの貯溜層の厚さを7.5kmとすると釜底の部分と釜自身にと貯えられている熱量は合計 $3.65 \times 10^6 \text{MW}$ 年となる。これは釜の底の厚さを少なく見積もったものでもしこれに割れ目を考えれば厚さは大きくなり熱量もさらに多くなる。詳細はすでにバンウェル氏が論文を出しているのそれにゆずるがこの数字はもちろん仮定のとり方によっていろいろになる。しかし結論的には現在ワイラケイでとり出している250MWの割合でいくと地下には熱エネルギーの面では数千年分はあるという勘定になる。地熱発電を行なうに本質的に必要なものは熱と水であるからいちがいにいえないが熱エネルギーの面だけからは以上のごとくほとんど半無限のものがワイラケイにはあると考えていい。ワイラケイ発電所は一応最低20年は運転をつづけることを目標に建設されたとのことであるがその目標はじゅうぶんすぎる位に達せられる見込みである。

ワイラケイの将来

以上述べたようにワイラケイの地熱エネルギーの開発はどんどん進みいわゆる地熱地域も広くなりつつある。蒸気産出地域はどんどん西の方に広がって行っている。

現在の発電所から遠すぎる孔井は新しい発電所の建設を待っている。近い将来にはワイラケイの西方の Te Mihi 付近に第2の発電所建設の計画も検討されるだろう。地熱エネルギーの供給能力からすればこの地域だけでさらに少なくとも10万kW発電所の建設は可能だろう。ワイラケイはどんどんラルデレロに迫っている。このところ開発のテンポのにぶっているイタリアに追いつきこれを追いこすことも夢ではないようだ。