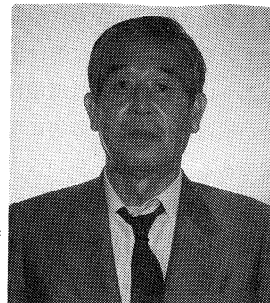


■ 展望・解説 ■

高温岩体からの熱抽出

Heat Extraction from Hot Dry Rock



堀 義 直*

Yoshinao Hori

1. はじめに

地球は「火の球」であることはまちがいの無い事実である。地球の大部分は岩石のドロドロに溶けた高温のマグマであり、我々はその薄い皮に相当する冷えた地殻の上で生活している。地球をタマゴに例えると、黄身は核、白身はマントル、表面のカラは地殻に相当し、地殻以外は2,000度から6,000度の高温のマグマである。まさに「火の球」が薄い皮を被っているにすぎない。地殻の実際の厚さは海底で5~10km、陸地では少し厚く30~60km程度である。しかも、その地殻の部分にもマグマが入り込み、所どころに熱いマグマ溜りが出来ている。最近、噴火している九州の雲仙普賢岳、フィリピンのピナツポ山などは、このマグマがプレートの圧力によって押し出され、地表に流れ出したものと考えられている。

日本は世界でも有数の火山国である。世界の活火山の約8%が、この狭い日本に分布しており、マグマ溜りが浅いところまで昇って来ている。このように大量で身近にあるエネルギーを利用しない手はない。現在、このエネルギーは温泉として主に利用されている。このほか、全国で9カ所の地熱発電所が建設されているが、1基の発電規模が最大でも5.5万kWと小さいため、全部合わせても約30万kWが電気として利用されているに過ぎない。

火山周辺の岩盤の熱エネルギーを有効に抽出し、発電に利用しようとする高温岩体発電(Hot Dry Rock=HDR)のアイデアが1970年代にアメリカで考え出され、世界各国で20年近く研究が進められている。近い将来、この研究が実を結び、地下に埋もれているエネルギーが安全にしかも経済的に電気として利用できるようになれば、21世紀のエネルギー問題に少しは役立つものと考えられる。

つものと考えられる。

2. 高温岩体からの熱抽出法

無駄のたとえに「焼石に水」という言い方がある。高温岩体からの熱抽出はこの言葉通りに地下の熱い焼石、すなわち高温岩体に水を注入して、出来た蒸気を取り出す方法である。熱抽出は図-1に示すように、まず水を注入するための坑井を掘削する。そして、その底の方の200度以上の高温の岩盤に水圧を利用して亀裂を何層にも作る。その後、注入井の周りに蒸気を取り出すための坑井を何本か掘削する。これで自然のボイラーが出来上がる。利用するときは真中の注入井から水を注入し、亀裂を通る内に「焼石に水」の原理で熱せられた蒸気を周りの生産井から取り出せばよい。取り出した蒸気は火力発電と同じような方法でタービンを廻して発電に利用する。利用した後の熱水は再び地下に注入して繰り返し使う人工の循環方式である。

この方式にはいくつかのメリットがある。まず、地熱は豊富な国産資源であり、中東の石油情勢とは無縁である。次に人工的に水を循環するため、設計により1基20万kW級の大規模な発電所も作ることができる。また、地球温暖化の原因物質として騒がれている炭酸

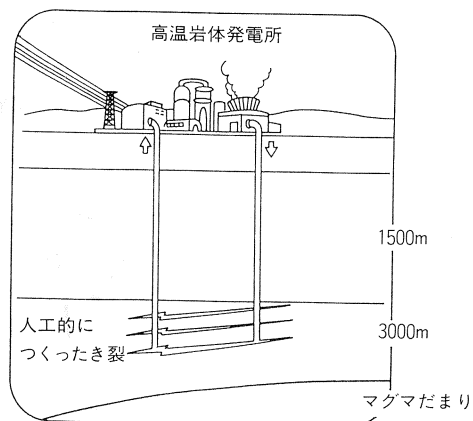


図-1 高温岩体発電の概念図

* 財電力中央研究所 我孫子研究所 参事
〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646

ガスを出さない。さらに短期間で水を循環するため、地下の岩盤から熱水に溶け出す化学成分も少ない。このように、この方式は環境にやさしく、また、化学成分が機器に付着して障害になることが少ない優れた方法である。しかし、良いことばかりではない。高温の岩盤を掘削する技術、大きな亀裂を複数作る技術、発電初期にはコストが高いなど実用化までに解決すべき難問も多くある。我々はこれらの難問を解決し、高温岩体からの熱抽出を実現し、発電に利用することによって、将来「焼石に水」の意味が逆になることを期待している。

3. 資源量の推定

資源量については、国の調査により図-2に示すように日本全国で22地域が比較的浅いところに熱源があり、その分布面積は約4300km²と報告されている。岩盤

温度300度の1立方kmの岩盤が保有する熱量の内、約10%を取り出し、それを15年間で利用するものとして発電量に換算すれば約4万kWとなる。例えば前述の22地域が1kmの掘削毎に120度程度上昇するような地域と仮定して、深さ3km掘削し、温度の高い深部の厚さ1km間を利用したとする。その場合の資源量は現在の日本全国の発電設備量とほぼ同じ約1億5千万kWとなる。更に深く4km（または岩盤温度400度C）まで掘削し、深部の2km間を利用した場合を想定すると約4億kWとなる。現在の掘削技術ではこの程度の温度が限度であるが、技術開発が進み、さらに高温のマグマの熱エネルギーが利用できるようになれば、資源は無尽蔵といっても過言ではない。しかし、これはあくまでも机上の計算による埋蔵資源量であり、開発可能量とは異なる。

開発可能量は当然のことながら技術上や国立公園と

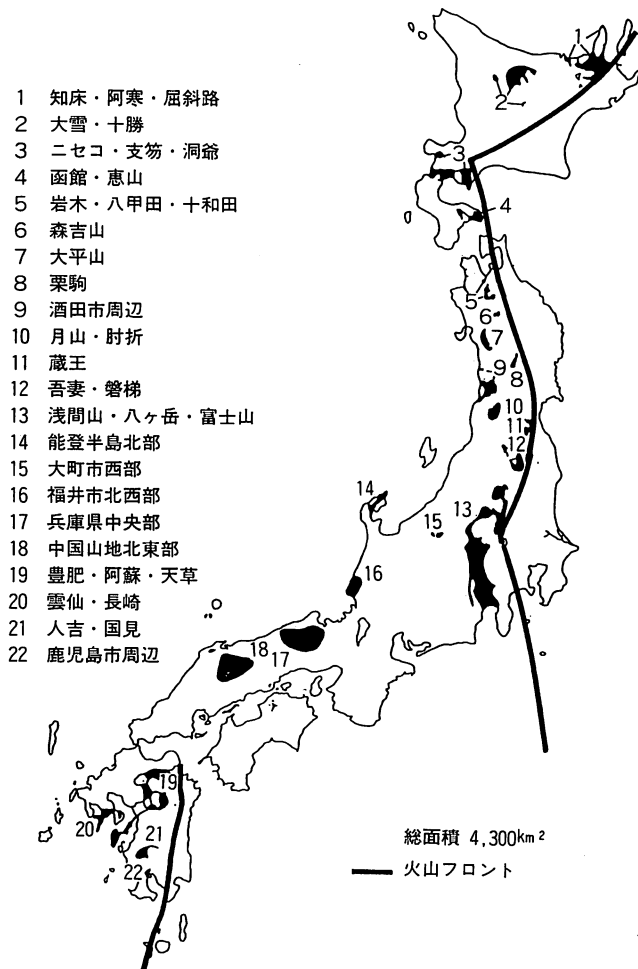


図-2 高温岩体発電の可能性地域の分布（地質調査所の資料）

の関係など立地上の制約、発電コストの高低などから少なくなる。当面は埋蔵資源量の1%程度が開発出来れば良いと考えている。

アメリカ、イギリス、フランス、ドイツなどの世界の先進国は資源量、将来の炭素税の導入問題などを早くも意識し、高温岩体発電の研究を積極的に進めている。アメリカのエネルギー省はアメリカ全土の高温岩体発電の資源量を調査し、深さ1km当りの温度上昇割合が70度C(日本は100度C)以上の有望地域が18万km²あり、この地域で深さ4kmまで利用するとした場合を計算し、資源量は54億kWと報告している。

4. 自然環境と発電コスト

高温岩体発電は地下の熱を利用するので炭酸ガスの排出量が図-3に示すように非常に少ない。また、地熱

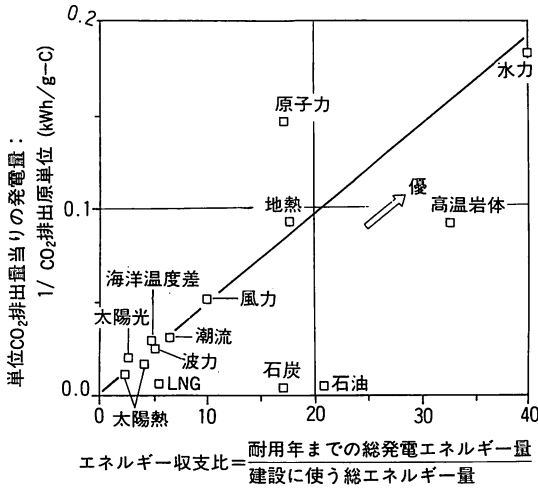


図-3 発電プラントのエネルギーとCO₂排出原単位 (内山 (1991) に一部追加)

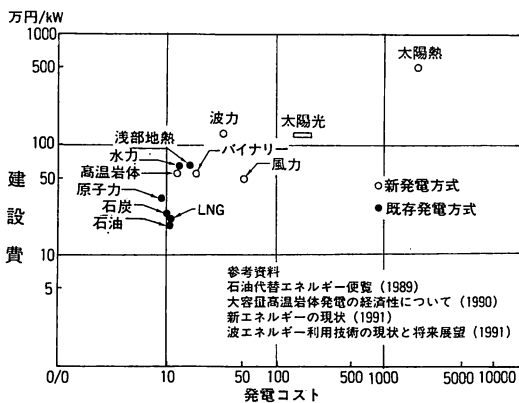


図-4 発電方式別のコスト比較

と天然の河川水を利用する方式であるため、地下を汚すこともない。地下に作る割れ目の厚さは、我々の坑壁の観察結果によれば1枚1枚は1ミリ程度と推定され、これが20枚程度集まって合計で2センチ程度と考えられ、地表が陥没するなどの心配はまったくない。このように高温岩体発電は地上、地下の自然を汚さない地球にやさしい発電方式である。

当所主催の委員会が行った多くの仮定を設けた試算によれば、高温岩体発電は2.5km²の広さで深さ4kmまで利用すれば出力約24万kWの発電所が設計でき、その場合の発電コストが1kWh当り12.7円となっている。既存の原子力や火力発電所は図-4に示すように1kWh当り9~11円であるので、これらより高いが水力発電所にはほぼ匹敵する値である。この結果、高温岩体発電を実用化するための技術が確立できれば21世紀の非常に有望な発電方式の1つになると期待している。

5. 技術開発の現状

高温岩体発電を実用化するためには数多くの技術を開発し、それが実際に使えることを実証しなければならない。その必要な技術の主なものをあげると、

- 何処に高温の岩盤が有るか地表から探査する技術、
- 高温の岩盤を経済的に掘削する技術、
- 岩盤中に人工の割れ目を複数効率よく作る技術、
- その割れ目分布を精密に調べる技術、
- 蒸気がどのくらい取り出せるか評価する技術

などである。

そのため、官・学・産が協力しながらそれぞれ得意とする分野の研究を進めている。官ではニューサンシャイン計画にもとづき新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)が山形県の肘折地点、学では東北大学が岩手県の八幡平地点、産では電力中央研究所が秋田県の雄勝地点でそれぞれ実験を行っている。高温岩体発電についての10年近いこれらの研究により多くの技術が開発され、実証実験が行われている。これら開発された技術は現在、国では産業技術審議会、または産では高温岩体発電技術検討会などにより、それぞれの立場で検討されている。今後さらに開発すべき技術課題やその進め方などが討議されるものと考えられるが、ここでは当所が開発した技術を中心に紹介する。

当所は約20名の研究者が4つのグループに分かれ、協力して研究を進めている。

その1つである探査グループでは高温の岩盤を調べ

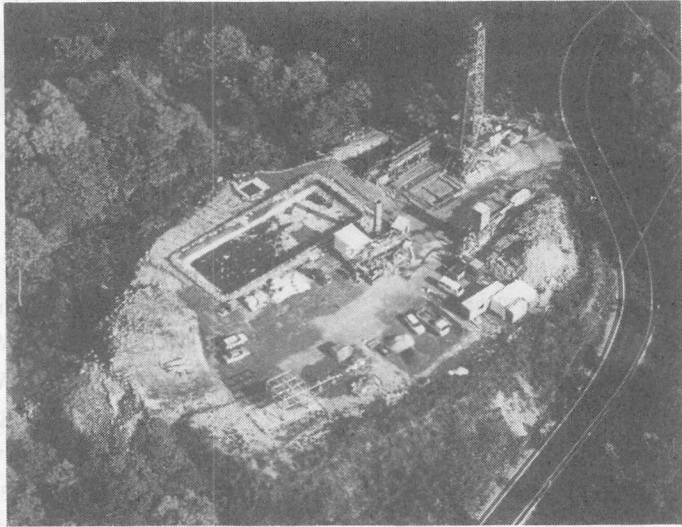


写真-1 雄勝実験場

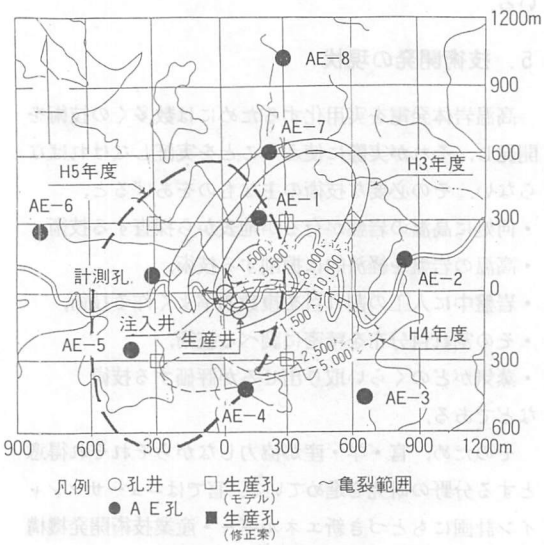


図-5 雄勝地点のAE法による亀裂分布

る新しい方法として、地中に電気を流し、深さ5kmまでの岩盤分布などを調査できるTDEM法と呼ばれる技術を開発した。そしてすでに開発した深さ2km程度までの探査能力のあるCSAMT法と組み合わせて解析を行っている。これらの探査技術の開発は京都大学、九州大学などと共同で行ったものである。今までに地下のデータがある熊本県や新潟県で実際に測定を行い、条件の良い地点では深さ6kmまで測定できることを確かめている。現在、その測定精度を高める研究をさらに進めている。

破砕グループでは地下の岩盤に複数の割れ目を造成

する方法の開発を目指して、1991年から2年間、秋田県にある当所のHDR雄勝実験場(写真-1参照)で深さ1km、坑底の温度230度の坑井を使って実際に実験を行った。この結果、世界で初めて深さを変えて、それぞれ東京ドーム8~10個分に相当する30~50万m²の広さの2層の割れ目を作ることに成功した。開発した複数亀裂の造成法とは、掘削した坑井にまず丈夫な鉄管(ケーシング)を埋め込み、亀裂を作りたい所の鉄管を特殊な装置で削って(リーマー)窓を開け、その窓の部分に水圧を掛けて割れ目を作ると言う簡単な方法である。この方法は下から順番に割れ目を作る方法であり、上の亀裂を作る際には、既に作った下の窓から逃げる水は砂を詰めて(サンドプラグ)抑えており、ケーシングリーマー・サンドプラグ(Casing Reamer and Sand Plug = CRSP)法と呼んでいる。もちろん、詰めた砂は全部の割れ目を作った後に洗い流して完成となる。

検層グループでは多重に作った割れ目の広がりや調べる方法について、割れ目が出来るときに発生する微少な破壊音(AE)を地表に設置した数カ所の観測点で測定する地表ネットAE法の開発を行い、図-5に示すようにその精度を確認している。そのほか、坑内の温度を1m毎に常時計測できる光ファイバー利用の温度計測法、胃カメラのように坑壁に出来た1ミリ程度の割れ目をTVで見ることが出来る高温用のボアホールスキャナー装置、レントゲンのように電気的な変化から水の通り道を写し出す比抵抗トモグラフィー法、回収した水に含まれる微量な化学物質から水の通路の

大きさを推定する地化学探査法などを開発している。

今後としては、直径10センチ程度の坑内の200度C以上の熱水の流速を多点で測るの必要があり、この測定方法の開発に苦慮しており、簡便な測定方法を教えて頂ければ幸いである。

評価グループではどのくらいの蒸気が取り出せるかについて、コンピューターを使った予測計算法を開発し、循環実験時の予測などを行っている。1992年に水を注入する予定の坑井から約80m離れた所に蒸気を循環するための深さ1.1kmの坑井（生産井）を掘削した。1993年秋には2本の坑井を使って22日間の熱抽出実験を実施し、量は少ないが生産井から蒸気を取り出せることを確認した。これらの結果はほぼ予測通りであった。

今後雄勝地点では、これらの成果を基に1994年は7月頃から約5カ月の熱抽出の実験を計画している。これらの実験により高温の岩体から取り出せる蒸気量、経時的な温度変化、岩体から溶け出す化学成分の種類や量などの評価方法、単位岩体当たりの想定発電量、発電コストなどの算出がより精度良く出来るものと思われる。これらの実験が順調に進んだ場合には、電力会社の協力を得て100kW程度のミニ発電を実現したいと考えている。もしこれができれば、これまで世界の先頭を走っていたアメリカの研究実績を上回り、世界最初の高温岩体発電の実験例になるものと大いに期待している。

6. ジオサーモピア構想

21世紀に建設される発電所は地域との共生がより求められる。高温岩体発電は使った熱水を循環して利用する方式であり、その循環される水の温度は100度近くある。そこで、高温岩体発電所を建設した地域の活性化を検討するための委員会を作り、地熱エネルギーを利用した理想郷を意味する「ジオサーモピア」と呼ばれるアイデアをまとめた。その一つが図-6に示す北国案であり、いくつかのエリアより構成されている。熱水を利用した温水プールや熱帯植物園などのレジャーエリア、温室農場などの生産エリア、リハビリセンターなどの医療エリアを発電所周辺に設置している。他にも南国案、離島案などを作った。経済性の検討は行っていないが、このような構想が実現できればエネルギー開発と地域振興を結び付けたものとして今後大いに期待される。スウェーデン、ロシアのカムチャッカ地方では地熱を利用した熱水利用が検討されており、

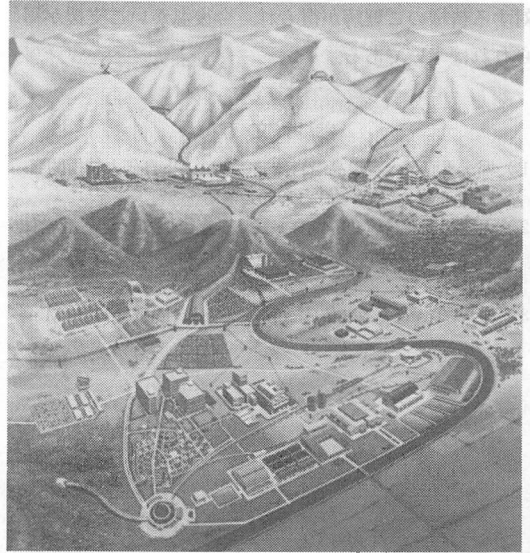


図-6 ジオサーモピア構想（イメージ図）

国としての施策が進められれば北国地域での実用化が早いものと期待している。

7. おわりに

高温岩体発電はこのように多くの利点をもっているため、アメリカはロスアラモス国立研究所がフエントンヒル地点で、イギリスはケンボーン鉱山大学がコンウォール地点で、フランスはエネルギー省がモンターニュ地点で、ドイツはエネルギー省がフランス、イギリスなどとの共同研究としてソルツ地点で実験や研究を競って進めている。このような研究の中で見いだされた困難な技術課題を各国が協力して解決するため、世界の研究者で作る国際HDRフォーラムが1991年にヨーロッパで初めて開催された。その会議での決定に基づき、1993年11月に山形市で第2回のフォーラムが海外9カ国の参加者22名を含め約80名の研究者により開催された。このフォーラムでは世界の実験結果と共に電中研の雄勝地点、NEDOの肘折地点など日本の研究開発状況が紹介され、現地で実験状況を見ながら多くの討議が行われた。第3回フォーラムは1995年にアメリカで開催される予定である。我々は世界の研究の発展のため、また、日本のエネルギー問題の解決のため、将来の夢を持って技術開発に努力するつもりである。

実用化までには国立公園内の立地、循環水の確保、地域との共存など技術以外にもまだまだ解決すべき難問が待ち構えている。この拙文により高温岩体発電に

対する皆様のご理解が得られ、今後温かいご支援が得られれば幸いです。

参考文献

- 1) 堀 義直：大容量高温岩体発電のコスト評価と技術開発、地熱, Vol. 27, No. 2 (1990)
- 2) 大容量高温岩体発電コスト試算研究会：大容量高温岩体発電の経済性について、電中研委員会報告：U90801 (1990)
- 3) J. W. Tester. et al. : Economic Prediction for Heat Mining : A Review and Analysis of Hot Dry Rock (HDR) Geothermal Energy Technology, MIT-EL90-001 (1990)
- 4) 堀 義直, 松永 烈：高温岩体地熱発電の研究開発, 火力原子力発電, Vol. 42, No. 10 (1991)
- 5) 北野 晃一 他：ジオサーモビア構想の概念設計—地熱を利用した理想郷の創出をめざして—, 電中研委員会報告：U92801 (1992)
- 6) 地熱調査会：わが国の地熱発電の動向 (1992)
- 7) 堀 義直：地球にエネルギーを求めて 一注目を集める高温岩体発電— 電気学会誌, 113巻7月号 (1993)

協賛行事ごあんない

「第11回太陽光発電システムシンポジウム」

〔主催〕 太陽光発電懇話会

〔後援(予定)〕 通産省, NEDO 他

〔協賛(予定)〕 日本太陽エネルギー学会 他

〔会期〕 1994年6月1日(水)～3日(金)

〔会場〕 発明会館(東京都港区虎ノ門2-9-14)

〔セッション内容〕

1. 太陽光発電の技術開発と導入施策
2. システム開発と実証研究
3. 評価技術の動向
4. 太陽電池開発の最新動向

5. 周辺機器技術の動向 6. 国際協力

7. システムの導入と実証Ⅰ

8. システムの導入と実証Ⅱ

9. システムの導入と実証Ⅲ

10. パネル討論「住宅用太陽光発電システム」

〔参加予定人員〕 220人

■問い合わせ先 太陽光発電懇話会

千葉県佐倉市大作1-4-3

京セラ(株)内

TEL 043-498-1231