マグマからの熱抽出をめざして —坑井内同軸熱交換器(DCHE)方式の開発—

盛田耕二*

Targeting Heat Extraction from Magma —Development of the Downhole Coaxial Heat Exchanger (DCHE) system—

Koji MORITA *

Abstract

The realization of heat extraction from magma has long been one of the dreams of mankind because of its huge potential as an energy source. However, current levels of technology, materials and understanding of magma seem to be far from the levels needed. On the other hand, several potential geothermal resources including Hot Wet Rock, Super Hot Rock and magma origin fluid systems lie on the way toward magma. These potential resources should provide suitable places for developing or improving technologies or materials, and for acquiring a deeper understanding of magma.

The author's strategy is to begin an R & D program with easier or shallower potential resources, and realizing power generation with them, progressing toward magma step by step. In order to achieve this strategy, the development of a closed system downhole heat exchanger is essential. The author has been proposing the Downhole Coaxial Heat Exchanger (DCHE) system and carrying out studies on it assuming Hot Wet Rock as the first target.

By means of an experiment carried out in Hawaii, it was proved that a highly efficient DCHE is technically feasible and works as predicted. Also, it was indicated by a feasibility study that the possibility of the practical use of the DCHE system is very high. The next step is to demonstrate the DCHE's ability to produce more than 5 MW / DCHE (the criterion for economical power generation from a middle to long term point of view) with a 3,000m long DCHE at Hot Wet Rock and at the same time to proceed with the development of technologies necessary for the realization of the practical use of the system.

On the other hand, there is another possible application of the DCHE. A combined DCHE-heat pump space heating system makes possible the utilization of generally distributed shallow and low quality geothermal resources. This system is applicable for wherever space heating is needed. Hence,

---

*資源環境技術総合研究所地殻工学部

National Institute for Resources and Environment, Mining and Geotechnology Dept.

huge amounts of thermal energy can also be supplied with the combined heating systems. The author intends to initiate studies regarding the space heating system.

Thus, the degree of contribution of the DCHE system in energy and environmental issues may be the greatest among the various heat extraction methods and conventional geothermal steam or brine extraction methods.

1. はじめに

地球の中心部の温度は約6,000℃と推定されているが、これは太陽の表面温度に等しい。また、地層の温度は深度が増すにつれて上昇するが、30～50km程度で1,000℃に達するものと考えられている。この深度は地球の半径6,400kmに比べて極めて小さい。いま仮に、芯の太さが0.5mmのシャープペンシルで直径13cmの円を描き、これを地球とみなすと、1,000℃未満の地殻の厚さは線の幅程度でしかない。「水の惑星」地球はまた、灼熱の「火の惑星」と言うこともできる。したがって、地球自体が包蔵する熱エネルギー量、すなわち地熱エネルギーのポテンシャルは極めて大きいといえる。

この地熱エネルギーはクリーンなエネルギーであることから、これに寄せられている期待は大きい。しかしながら、わが国の地熱発電設備容量は1992年現在で約28万kW(日本地熱調査会、1993)と、必ずしも大きくはないのが現状である。この理由として、原油価格の低値安定化、開発有望地域の多くが国立公園内にあること等の社会的制約の他に、既存の方式で開発可能な資源の種類が限られること、また、既存の方式が適用可能な浅部になるほど資源の賦存量が小さくなることが挙げられる。したがって、地熱のポテンシャルを活かすためには、未利用地熱資源、特に深部の高温地熱資源の開発を志向した技術開発を行う必要があると考えられる。

著者は、上記の観点から、既存の方式では開発困難な高温湿潤岩体(Hot Wet Rock)や深部の高温地熱資源、すなわち、マグマ近傍の超高温岩体やマグマの開発を目的に、坑井内同軸熱交換器(Downhole Coaxial Heat Exchanger, DCHE; 第1図参照)方式を提案し(Morita *et al.*, 1985; 盛田・松林、1986; 盛田、1991)、(ニュー)サンシャイン計画の中で研究を行ってきた。

この方式の研究の歴史は浅く、実用化の可能性や最終的な利用形態等については未だに漠としている

第1図 坑井内同軸熱交換器(DCHE)方式の概念

が、これまでの研究を通して、おぼろげながらこの方式の輪郭が浮かび上がっている。以下では、その輪郭を紹介する。

2. DCHE方式とは?

2.1 DCHE方式の特徴

DCHEは、高性能の断熱内管を用いること、逆循環方式(坑壁と内管の間の環状の隙間に水を注入し、内管を通して熱水を取り出す循環方法)を採用していること、また、完全なクローズドシステムであることを特徴とする同軸式坑井内熱交換器である。

第2図(盛田、1986; 盛田、1991)は、DCHEの場合の典型的な熱交換器内温度分布を示したものである。DCHEでは、坑壁と内管の間の環状の隙間(ア

第2図 DCHEの場合の典型的な熱交換器内温度分布

ニュラス)に注入された水は、地層との間で熱交換を行い、高温になって坑底に到達する。その後、断熱内管を通して、ほとんどそのままの温度で地上まで取り出される。

アニュラス内の水温は地層温度に比べてかなり低くなっているが、これは地層から限界近くまで熱を絞り取っていることを意味している。また、同じくアニュラス内の水温は熱交換器の全長にわたって地層温度よりも低くなっているが、これは熱交換器の全長にわたって熱抽出が行われていることを示している。このように、深部の高温の地層のみならず、浅部の低温の地層からも有効に熱抽出が行われるのがヒートパイプ等の他の方式と異なるこの方式の大きな特長であるが、これは逆循環方式と断熱内管併用による効果である。

さらに、アニュラス内の水温に比べ、断熱内管内の水温がかなり高くなっているが、これは、水の密度差により、DCHE内に水を循環する方向に圧力が発生することを示している。この図の例では、この圧力が圧力損失よりも大きく、ポンプで圧入しなくても水が循環することがシミュレーションにより確かめられている。このように、条件によっては、ポンプで圧入しなくても水が循環することもDCHEの特長である。

第3図(盛田、1986)は、DCHEの特徴の一つであ

第3図 断熱内管の使用による効果(逆循環方式の場合)

る断熱内管の使用による効果を示したものである。図より、内管の熱伝導率が小さくなるにつれて、すなわち断熱性能が良くなるにつれて、得られる熱水温度が高くなることがわかる。内管の熱伝導率が $0.01\text{W/m}\cdot\text{K}$ の場合には、それが $46.1\text{W/m}\cdot\text{K}$ の場合、すなわち銅管を用いる場合に比べ、熱水温度で 98°C 高くなっているが、純熱出力で比較すると10倍以上にもなる。断熱性能が優れた内管を使用することにより、熱出力が大幅に増大することがわかる。なお、第2図は、この図から、内管の熱伝導率が $0.01\text{W/m}\cdot\text{K}$ の場合を抜き出して示したものである。

以上に示したように、DCHEによれば、ほぼ理想的に熱抽出が行われる。このDCHEの特長としては、(1)単一の坑井を用いる熱抽出方法としては最も効率が良い方法であること、また、(2)システムがシンプルであり、システムの造成に伴う問題が少ないこと、(3)クローズドシステムであるため、技術的に適用可能な資源の範囲が広いこと、さらには、(4)極めてクリーンな熱エネルギーが得られること、等が挙げられる。

2.2 DCHEに適用可能な断熱管

DCHEは、高性能の断熱内管と逆循環方式を用いることにより、高効率の熱抽出を実現しようとするものである。したがって、DCHEに適用可能な断熱管の有無がこの方式の実用性に大きな影響を与え

る。

DCHE に適用する断熱管は、高度の断熱性能を有していなければならないが、深部まで吊り下げる必要があることから、大きな引張り強度を有していることも必要である。また、狭い坑井の中に挿入するので、熱交換器内における圧力損失を極力小さくするために、肉厚が小さいものでなければならない。

このような条件を満たす断熱管としては、現在、二種類のものがある。その一つは、著者が(株)クボタの協力を得て開発したもの(盛田、1989a; 1989b; 1990; 1992a)であるが、スペースシャトルのキャビン断熱するために考案された断熱方式を用いている。第4図に、その断熱管の接続部の構造を示す。基本的には真空二重管式の断熱管であるが、内側管と外側管の間の空隙が断熱層になっている。この断熱管の特徴は、この空隙に粉体を充填した上で、真空に引いている点にある。これにより、内側管に薄肉の管を使用することが可能になり、断熱管自体の厚さが限られた場合でも、断熱層の厚さを大きくとることができるようになる。また、比較的に低真空でも高度の断熱性能を達成することが可能になるが、これは、長期間の使用において、真空度の低下、すなわち断熱性能の低下が起こりにくいことを意味する。

もう一種類の断熱管は、Kawasaki Thermal Systems 社ならびに住友金属工業(株)で製造、販売しているものである(エンジニアリング振興協会、1990)。これらは、もともと宇宙用ロケットの燃料輸送管として開発されたものであるが、主に石油の二次回収法である蒸気攻法用の断熱管として用いられている。これらも二重管式の断熱管であるが、断

第4図 資源環境技術総合研究所で開発した断熱内管の接続部の構造

熱の方法としては各種のものがある。断熱性能が優れているものは、二重管の間隙を高真空にしたものである。

以上の断熱管は、温度350℃、深度3,000m 程度までの条件でDCHEに適用可能と考えられるが、さらに高温、あるいは、より大深度に適用するためには、今後、研究開発を行う必要があると考えられる。

3. ハワイにおける概念実証実験

次に、1991年に米国ハワイ州ハワイ島で行われたDCHE方式の概念実証実験(盛田、1992b; Morita *et al.*, 1992a; Morita *et al.*, 1992b; 盛田他、1993)について紹介する。これにより、高性能のDCHEを構築することが技術的に可能なこと、また、著者らが開発したシミュレータが十分な精度を有していることが確認されている。

この実験は、財団法人エンジニアリング振興協会と米国の Pacific International Center for High Technology Research (PICHTR)の国際共同プロジェクトとして行われたものであるが、日米の多数の研究機関や大学、民間会社等の参加あるいは協力により行われた(盛田、1992b)。また、この実験は、DCHE方式の最初のフィールド実験であるが、国産の地熱技術を海外で実施した最初のケースともなっている。

3.1 実験の概要

実験は、ハワイ島のキラウエアアイストリフトゾーンの中に位置しているHGP-A井を用いて行った(第5図参照)。HGP-A井のケーシングプロフィールと実験時における断熱内管の配置等を第6図に示す。この坑井の深度は1,962mであるが、実験は7in.のケーシングが施工されている877mまでの区間を用いて行った。また、DCHEを完全なクロードシステムにするために、実験に際し深度880mの位置にブリッジプラグをセットした。断熱内管としては、住友金属工業(株)、Kawasaki Thermal Systems 社および(株)クボタで製造した3.5in.の真空二重管式断熱管を合計74本用いた。

第7図にHGP-A井の実験区間における温度分布と国内の地熱地帯における温度分布の例を示す。実験区間下端における温度は110℃と、深度の割にはかなり低温であった。

第5図 ハワイ島と実験を行ったHGP-A井

第6図 HGP-A井のケーシングプロファイルとDCHE

第8図に実験システムのフローダイアグラムを示す。この実験システムは、DCHEを含めて、ほぼ完全なクローズドシステムになっている。また、自動制御により注水側の温度、圧力、流量を設定値に保持できるようになっている。

第7図 実験区間におけるHGP-A井の温度分布と国内における温度分布の例

実験は、1991年2月22日に開始され、3月1日まで7日間にわたって行われた。実験においては、流量を80l/min、注水温度を30℃、注水圧力を1.5kgf/cm²(ゲージ圧力)に設定した。

3.2 実験ならびに解析結果

解析は、著者らが開発したシミュレータ(盛田他、1984; 盛田・松林、1986)を用いて行った。解析の結果、断熱内管の等価熱伝導率は0.06W/m・K、地層内の伝熱機構はほぼ純粋な熱伝導、また、地層の熱伝導率は1.6W/m・Kと推定された。

次に、実験結果とシミュレーション結果を併せて紹介する。シミュレーション結果は、断熱内管の断熱性能と地層の熱伝導率が上記の値の場合についてのものである。

第9図に熱水温度の経時変化を示す。実線で示された実測の注水温度はシミュレーションの条件として与えたものである。この注水温度はほぼ一定になっており、実験中、制御システムが極めて良好に作動していたことがわかる。また、実験中に30分間の停電があり、この間は循環を停止したが、図から明らかなように、実測の熱水温度と計算値は、停電の直後を含めて極めて良く一致しており、その差を判別することが困難である。

第8図 実験システムのフローダイヤグラム

第9図 熱水温度の経時変化の比較

シミュレーションは地層中の伝熱機構として純粋な熱伝導を想定して行っているので、このような良い一致は、地層内の伝熱機構がほぼ純粋な熱伝導であったことを示している。なお、最高熱水温度は98℃、実験終了時点におけるそれは44℃であった。

第10図は、実験開始後93時間目におけるDCHE内の温度分布を示したものである。実測の温度分布と計算値は良く一致している。浅部において若干の差が認められるが、これは測定に用いたカスター温

第10図 DCHE内温度分布の比較

度計が環境温度と平衡するまでに至っていなかったためと考えられる。

なお、この時点の断熱内管内における温度低下は

1.2℃であったが、断熱内管の断熱性能は、この温度低下量から求めることができる。また、図より明らかに、地表から深度300m付近までの区間においては地層の初期温度とアニュラス内の水温との差が極めて小さくなっているが、これは、この区間が熱抽出にほとんど貢献していなかったことを示している。

第11図は、圧力の経時変化を示したものである。図における注水圧力は実測値であり、シミュレーションの条件として与えたものである。実測の出口圧力と計算値は良く一致しており、圧力の計算精度もかなり高いことがわかる。また、実験開始後5時間程度までの期間においては、注水圧力に比べて出口圧力の方が高くなっているが、これは、この期間においては、ポンプで圧入しなくても循環が可能であったことを示している。

なお、本実験における最大純熱出力は370kW、実験終了時点におけるそれは約80kWであった。この熱出力は大きなものではないが、地層温度が低かったことや岩質等を考慮すると、妥当な結果であったと考えられる。

第11図 熱水圧力の経時変化の比較

3.3 実験ならびに解析結果の評価

本実験に用いた断熱内管の等価熱伝導率は $0.06 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ と推定されたが、著者らのこれまでの検討により、等価熱伝導率で $0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 以下であれば、十分に高性能のDCHEを構築可能であることが明らかになっている(盛田・松林、1986; 盛田他、1993)。また、今回の実験における断熱内管内の温度低下量は1.2℃に過ぎなかった。これは、

仮に、完全熱絶縁体からなる断熱内管が入手可能であったとしても、熱水温度の向上は1.2℃程度しか期待できなかったことを示している。したがって、今回実験に用いた断熱管は、DCHEの内管としては、実用上十分な性能を有していると評価できる。すなわち、この実験により、実際に高性能のDCHEを構築することが可能であることを実証できたといえる。

また、推定された地層の伝熱機構と熱伝導率は、当該坑井の物理的条件、あるいはハワイの玄武岩の熱伝導率と調和的であることが確認されている(盛田他、1993)。加えて、これらを用いて行ったシミュレーション結果と実測値はほぼ完全に一致した。これらのことから、著者らが開発したシミュレータが、温度ならびに圧力計算において十分な精度を有していることが確認されたといえる。

なお、本実験において観測された地層中の伝熱機構はほぼ純粋な熱伝導であるが、これは、当該地熱貯留層の帽岩中で熱抽出が行われたためと考えられる(盛田他、1993)。

4. DCHE方式の実用化の可能性

以上に述べたように、ハワイにおける概念実証実験により、高性能のDCHEを構築可能であること、また、著者らが開発したシミュレータが十分な精度を有していることが確認されている。ここでは、この方式の実用化の可能性についての検討結果を紹介する。

4.1 DCHEの熱出力と発電コストの関係

実用化の可能性を検討するためには、まず、DCHEの熱出力と発電コストの関係を明らかにする必要がある。次に、実際に予想される熱出力を推定し、上記の関係から発電コストを見積もる必要がある。ここでは、まず、第1の点についての検討結果(盛田他、1989; 盛田他、1992)を紹介する。

第1表は、発電コストを計算するための基本前提条件を示したものである。DCHEの長さを3,000m、1発電所当たりのDCHEの数を15基と仮定した。発電方式としては、予備的に検討を行い、コストパフォーマンスが優れている二相タービン+シングルフラッシュ+蒸気タービン方式を選択した。また、二相タービンとしてはバイフェーズタービン(山岡、

第1表 検討の基本前提条件

Working Fluid	Water
Length of DCHE	3,000 m
Number of DCHE per Power Generation Plant	15
Power Generation System	Tow-Phase Turbine + Single Flash + Steam Turbine

1984)を想定した。第12図に発電システムのフローダイアグラムを示す。

第13図に、設計したDCHEの寸法諸元を示す。坑井の最終段の掘削径は81/2in.、ケーシング径は7in.である。高温部に設置する最終段のケーシングには耐蝕性に優れている二相ステンレス鋼を採用した。

第14図に、計算により求められた熱抽出開始後1年目の純熱出力と、現行補助制度の場合の平均発電コストの関係を示す。平均発電コストは、発電所の運転期間が15年の場合について求めたものである。純熱出力と発電コストの関係を見てみると、純熱出力が2 MW/DCHE 程度の場合には発電コストが80 円/kWh 程度になっている。純熱出力がこの程度の場合には、実用化が困難であることがわかる。しかしながら、純熱出力がこれよりも大きくなると発電コストは急激に減少する。純熱出力が5 MW/DCHE 程度の場合には30円/kWh 程度になるが、石油価格の上昇傾向や、炭酸ガス等の排出に伴うコスト等を考慮すると、中長期的にはこの発電コストでも実用化の可能性がでてくるものと考えられる。したがって、中長期的な観点からは、5 MW/DCHE 程度の

第13図 DCHEの設計諸元

第12図 発電システムのフローダイアグラム

第14図 熱抽出1年目における単一DCHE当たり純熱出力と15年平均の発電コスト

純熱出力が実用化の目安になると考えられる。

また、純熱出力が10MW/DCHEの場合には、発電コストが17円/kWh程度になるが、この場合には、近い将来に実用化が可能になると考えられる。したがって、短期的に見た場合、10MW/DCHEの純熱出力が本方式の実用化の目安になると考えられる。

4.2 実用化の可能性の検討

それでは、DCHEにより、どの程度の熱出力を期待できるものであろうか？また、果して実用化の可能性はあるのだろうか？

高温地層での熱抽出実験を行っておらず、また、原位置地層の伝熱特性に関するデータも乏しいのが現状であるが、ここでは、限られたデータを用いてDCHEの熱出力を見積もり、実用化の可能性を検討してみる。

a. 高温の地熱地域における実用化の可能性

高温の地熱地域における原位置地層の伝熱特性に関するデータはほとんど存在しない。このため、シミュレーションによりDCHEの熱出力を推定することは困難である。そこで、DCHEと構造が類似の掘削システムの熱出力について見てみる。掘削システムの熱抽出効率はDCHEよりも低いと考えられるが、入手可能なデータの中では、DCHEの熱出力を推定する上で、最も有効な手がかりになると考えられる。

第15図に、山形県肘折地区と北海道濁川地区において地熱井を掘削しているときに観測された純熱出力を示す。深度1,800mにおける純熱出力を見ると、肘折では1.5MW/well、濁川では2 MW/wellになっている。

肘折における高温乾燥岩体(Hot Dry Rock, HDR)発電の実験において、複数坑井と人工亀裂による熱抽出方法により、これまでに達成された熱出力は2 MW/well程度であるが、掘削システムによっても、同程度の熱出力を達成できることがわかる。

ところで、これらの場合の坑井深度は2,000m程度であり、それほど深くはない。また、坑底温度は240～250℃程度であり、それほど高温でもない。そこで、前節における検討と同じく坑井深度が3,000mで、地層がより高温の場合について掘削時の熱出力を推定してみた。推定は、第15図に示したデータを用いて行ったが、著者ら(盛田・松林,1988)

第15図 地熱井掘削時に観測された純熱出力

が提案している抽熱量評価指標(Heat Extractivity Index, HEI)という概念を用いれば、坑井の深度あるいは温度分布が異なる場合についても、熱出力を推定することが可能である。これまでの検討により、DCHEあるいは掘削システムの純熱出力は、この抽熱量評価指標にほぼ比例することが明らかになっている(盛田・松林, 1988; 盛田, 1991)。抽熱量評価指標は次式で与えられる。

$$\text{Heat Extractivity Index (Km } ^\circ\text{C)} = \int_0^d \{T(Z) - T_{in}\} dZ \quad (1)$$

上式中において、 d は坑井の深さ(km)、 T_{in} は注入水あるいは注入泥水の温度(℃)、 $T(Z)$ は深度 Z (km)における自然平衡状態の地層温度である^{a)}。

第16図に、検討に用いた温度分布のモデルを示すが、このモデルでは深度3,000mにおける温度は330℃になる。○印は、北海道豊羽地区に掘削された促進調査井で実測された温度を示している。ここで仮定した温度分布はかなり高温のものであるが、わが国においては、さらに高温の地域が存在することが既に確認されている。

なお、この温度分布は、浅部では熱伝導が卓越していること、また、深部においては対流が存在していることを示唆している。

第2表に、上記の温度分布の場合に予想される掘

第2表 坑井掘削時に予想される純熱出力

Depth of Well (m)	Static Bottom-hole Temp. (°C)	Heat Extractivity Index (km°C)	Estimated Net Thermal Output (MW / well)	
			Hijiori Type	Nigorikawa Type
3,000	330	671	4.7	6.3
4,000	336	954	6.6	8.9

第16図 仮定した温度分布

削時の純熱出力を示す。この推定においては、注入泥水温度を50°Cと仮定した。深度3,000mにおける掘削時の純熱出力は、地層の伝熱特性が肘折型の場合には4.7MW/well、濁川型の場合には6.3MW/wellと予想される。これより、DCHEの熱出力が掘削システムのそれと同じと仮定したとしても、中長期的には、いずれの場合にも実用化の可能性があること、また、本方式は研究開発を行うに十分値することがわかる。

a) この抽熱量評価指標はおおまかな指標である。より厳密には、(1)式において、注水温度のかわりに、その深度におけるアニュラス内の水温を用いて抽熱量評価指標を計算すべきである。しかしながら、坑井内の温度分布を簡便に推定することは困難なので、そのようにすれば、指標としての意義が極めて小さなものになると考えられる。そこで、ここでは注水温度を用いることとした。

なお、既存の熱抽出方法、すなわち複数坑井と人工亀裂による熱抽出方法により、これまでに達成された最大の熱出力は、米国フェントンヒルで達成されたもので、4.5MW/wellである(厨川, 1989)。フェントンヒルでは、深さ4,000m以上の坑井を用いているが、ここで予想された掘削時の純熱出力は、深度3,000mのものでありながら、いずれの場合もこれを上回っている。また、フェントンヒルと同程度の坑井深度が4,000mの場合について比較すると、地層の伝熱特性が濁川型の場合の掘削時の純熱出力は2倍にもなる。単一坑井による熱抽出方法によっても、かなり大きな熱出力が得られる可能性があることがわかる。

ところで、近い将来にDCHE方式を実用化するためには、10MW/DCHEを達成することが前提になるが、地層の伝熱特性が濁川型の場合でも、この熱出力の63%程度である。しかしながら、ここで注意する必要があるのは、ここで推定された熱出力が掘削時の熱出力であることと、あまり高温ではない地熱井のデータを基に推定した値であることである。

ここで仮定した温度分布は両地区の温度に比べてかなり高くなっているが、地層が高温の場合には、より強い地層内対流を期待できると考えられる。したがって、実際には掘削時の熱出力がさらに大きな値になる可能性がある。また、DCHEの場合には、掘削システムに比べてより大きい熱出力が得られると考えられる。加えて、わが国においては、ここで仮定した温度分布に比べてさらに高温の地熱地域が存在することが確認されている。

これらのことから、DCHEにより10MW/DCHE程度の純熱出力を達成できる可能性、すなわち、短期的に見た場合の実用化の可能性は十分にあると考えられる。

b. 火山性噴気地域における実用化の可能性

次に、火山性噴気地域における実用化の可能性を検討した結果(江原・盛田、1993)を紹介する。この検討においては、大分県九重火山・九重硫黄山の噴気地域の下に推定される火山熱貯留層をモデルとして選択したが、江原他(たとえば、江原、1990; 江原他、1990; 江原、1992)は、火山エネルギーの利用をめざして、ここで各種の調査を行っており、九重硫黄山は、この種の地熱資源の中ではデータが最も揃っている地域となっている。

ここでは、シミュレーションにより DCHE の純熱出力を推定したが、このために江原他の測定値あるいは推定値を用いた。また、DCHE のモデルとしては、4.1 節で発電コストの検討に用いたモデルをそのまま使い、坑井の深度も 3,000m と仮定した。

第17図に、検討に用いた地層の温度分布のモデルを示す。このモデルでは坑底温度が362℃になる。図中の●印で示した温度分布は、江原(1990)が各種のデータから、数値実験により推定した温度であるが、当該地域における地層内流動を考慮した沸騰曲線を示している。この温度分布モデルの場合、DCHE の全長にわたって地層流体が気液二相状態にあると考えられるが、これは、対流のみならず、凝縮による伝熱も期待できることを示唆している。

第18図に、江原による当該地域における地層の有効熱伝導率の測定結果を示す。有効熱伝導率は測定

条件の違いにより、38~62W/m・K となっているが、ここでは安全を見込み、40.7W/m・K (35.0kcal/mh℃)を仮定した。実測の有効熱伝導率は岩石の熱伝導率の10~50倍程度にもなっているが、これは、主として噴気の流れが極めて優勢なことによると考えられる。

第3表に、シミュレーションにより推定された熱抽出開始後1年目における熱水温度と純熱出力、ならびに、予想される発電コストを示す。発電コストは、第14図に示した単一 DCHE 当り純熱出力と平均発電コストの関係をここで推定された純熱出力に単純に当てはめて推定した。ここで、発電コストの検討(盛田他、1989)の場合とあまり異ならない熱水温度の場合について見てみると、純熱出力は 21.7MW/DCHE と 22.5MW/DCHE、発電コストは 7.3円/kWh と 6.8円/kWh となっている。

これより、当該地域における純熱出力は約 22MW/DCHE、発電コストは約 7円/kWh と見積もられる。この発電コストは、水力、火力、原子力発電等の中で最もコストが安い原子力発電の 9 円/kWh(資源エネルギー庁、1989)よりもかなり安くなっている。これは、坑井掘削費等が若干高くついたとしても、原子力発電と同等の発電コストを実現できる可能性が大きいことを示している。火山性の噴気地域においては、DCHE 方式の実用化の可能性が極めて大きいといえる。

参考のために、第19図に、シミュレーションにより推定された純熱出力の経時変化を示す。時間軸は対数で目盛っている。図より、純熱出力の低下速度

第17図 九重硫黄山の温度分布モデル

第18図 九重硫黄山噴気地域における地層の有効熱伝導率測定値

第3表 九重硫黄山で予想される熱水温度、純熱出力および発電コスト

Flow Rate (t/min/DCHE)	Hot Water Temp. (°C)	Net Thermal Output (MW/DCHE)	Power Generation Cost (¥/kWh)
1.4	259.2	18.5	9.3
1.6	247.7	19.7	8.5
1.8	237.6	20.8	7.8
2.0	228.7	21.7	7.3
2.2	220.7	22.5	6.8

第19図 DCHEの純熱出力の経時変化

は時間が経過するにつれてかなり小さくなることからわかる。熱抽出開始後15年目の純熱出力は、流量の違いにより16.7～19.6MW/DCHEとなっているが、図の傾向から、30年程度の熱抽出を行ったとしても、15年目の値とそれほど異ならないことがわかる。

5. DCHE方式の適用資源

以上に述べたように、DCHE方式の実用化の可能性は極めて大きいと考えられるが、実用化を図るためには、DCHEの特性に合致した資源にこれを適用しなければならない。ここでは、DCHE方式を適用する地熱資源が具備すべき条件について、著者の見解を述べる。

DCHE方式のような単一坑井による熱抽出方法では、地層中において熱が熱伝導のみにより伝えられる場合、すなわち高温乾燥岩体(Hot Dry Rock)や地熱貯留層の帽岩中では大きな熱出力を得ることは困

難であり、実用化の可能性も小さいと考えられる(盛田他、1989; 1992)。したがって、DCHEにより、大きな熱出力を得るため、あるいはその実用化の可能性を高めるためには、地層中に対流が存在する場合、あるいは熱抽出により対流が誘起される場合、さらには凝縮が生じるような場合にこれを適用する必要があると考えられる。また、DCHEの熱出力は地層と熱抽出媒体との温度差に比例する。したがって、この温度差を大きくとれる温度分布が望ましいと言える。

このようなことから、DCHE方式は、次のような要件の幾つかを備えている資源の場合に、その特長を発揮できると考えられる。

- (1) 地層中に割れ目があり、透水性が比較的に高いこと。
- (2) 地層中に、上方あるいは側方へ向かう対流が存在すること。
- (3) 抽熱量評価指標が大きな、上に凸の温度分布であること。この温度分布はまた、上向きの対流が存在すること、さらには深部における対流が活発なことも示している。
- (4) 技術的に許容できる範囲で地層温度が高温であること。これは、大きい抽熱量評価指標を得るためでもあるが、また、地層が十分に高温の場合には、熱抽出に伴って地層が冷却され、熱応力により地層中に破砕帯が形成される可能性もあるためである。高透水性の破砕帯が形成されれば、その中において対流が促進され、熱抽出量が増大する可能性がある。
- (5) 地層中に蒸気が存在すること。地層中に蒸気が存在する場合には凝縮による熱伝達も期待できる。

参考のために、第20図に、地熱資源の分類と DCHE 方式に適した地熱資源の種類を示す。DCHE 方式が対象とする高温湿潤岩体(低生産性対流型地層)や超高温岩体、さらにはマグマ等は、現在開発利用が行われている天然の地熱貯留層のバックグラウンドを形成しているものである。図より、DCHE 方式が対象とする潜在的資源量が、他の方式のそれに比し、遥かに大きいこと、また、地熱資源を有効に活用するためには DCHE 方式の開発が必須であることがわかる。

第20図 DCHE方式を考慮した地熱資源の分類と適用技術

なお、図では、高温乾燥岩体(Hot Dry Rock)を DCHE 方式の適用資源に含めていないが、地層の効率的な伝熱特性改善方法、すなわち透水性改善方法が開発されれば、その一部(高温の場合)は、DCHE 方式の適用資源に成り得ると考えられる。

また、超高温岩体を DCHE 方式の適用資源に含めたが、深部になるにつれて、一般に岩石の空隙率は小さくなる(矢野他、1989)ので、自然状態の超高温岩体では熱伝導が支配的な伝熱機構になると考えられる。にもかかわらず、これを DCHE 方式の適用資源に含めたのは、能動的な岩盤の冷却により、あるいは熱抽出に伴う岩盤の冷却により、岩盤中に

熱応力による破砕帯が形成される可能性が大きい(速水他、1977; 佐藤他、1990)ためである。超高温岩体中に高透水性の破砕帯が形成されれば、その中に強い対流が発生する可能性がある。また、温度・圧力条件によっては、ヒートパイプと同様な伝熱機構が岩盤中に形成される可能性がある。著者は、岩盤の能動的な熱応力破砕方法として、第21図に示す方法を検討しているが、この方法では断熱内管を用いて順循環方式で循環を行う。この方法によれば、比較的長い区間の岩盤に極めて大きな熱衝撃を与えることができるので、高温の地層の透水性改善方法としては、最も有効な方法と考えられる。

第21図 熱応力による地層の透水性改善方法

6. 今後の研究開発の方向

本研究の長期的な目標はマグマの開発にあるが、現在の材料や技術の水準と熔融マグマの開発が必要とされるそれとのギャップは極めて大きい。また、熔融マグマに関する知識も極めて乏しいのが現状である。一方、熔融マグマに至るまでの過程には、高温湿潤岩体や超高温岩体、さらにはマグマ性流体貯

留層(Magma Origin Fluid System, 第20図参照)等が存在する。これらは、知識や経験を蓄積し、また技術を向上させる上で極めて有用な場になると考えられる。したがって、先ず、より浅部の、より開発が容易な資源の実用化を図りながら、より過酷な資源に挑戦し、最終的にマグマに挑戦するのが望ましいと考えられる。

この観点から、著者らは当面のターゲットとして高温湿潤岩体を想定して研究を行っているが、既に1,000m級の熱抽出実験に成功していることから明らかに、この場合にはシステム造成上の問題は極めて少ないと考えられる。したがって、当面の主要な課題は、抽熱量予測技術の向上にあると考えられる。DCHEにより実際に得られる熱出力のレベルを明らかにするためには、原位置地層における対流の態様とそれがDCHEの熱抽出量に及ぼす影響を評価することが必要になる。現在、著者らは岩石や多孔質媒質の伝熱特性に関する実験室的検討や地層内の対流を考慮したシミュレータの開発、さらには原位置地層における有効熱伝導率の推定方法等の検討を進めているところであるが、今後は、原位置地層における対流そのものに関する検討が重要になると考えている。

なお、九州電力(株)は、DCHEと100kW級バイナリーサイクル発電システムを組み合わせる複合発電システムの調査研究を行っており、九州大学の江原幸雄教授が報告書(九州電力、1993)の取りまとめを行っている。この複合発電システムは、比較的浅部の地熱資源あるいは空井戸を対象とするものであるが、このシステムが実現すれば、DCHE方式の適用領域が浅部あるいは低温側にも広がることになる。現在は調査研究の段階にあるが、研究開発に着手することが望まれる。

また、本方式の研究は発電を主目的に行っているものであるが、DCHEは家庭用暖房等の熱の直接利用にも適用可能である。これとヒートポンプを組み合わせれば、普遍的に賦存している低品位の浅部地熱資源を暖房に利用することができる。わが国においては、坑井内熱交換器等の地中熱交換器とヒートポンプを結合した暖房システムの使用例は極めて少ないのが現状であるが、ヨーロッパでは、スウェーデン、デンマーク、スイス等を含めて、ヒートポンプの台数ベースで約8万基が設置されている(Mogensen, 1987; Rybach *et al.*, 1992)。また、米国

においては約10万基が用いられている(National Geothermal Association *et al.*, 1990)。これらのことから、現在世界中では20万基以上、設備容量的には200万KWt以上の在来型地中熱交換器を用いる暖房システムが使用されているものと推定される。このように、地中熱交換器を使用する多数の暖房システムが世界で用いられているが、これらのほとんどが、非地熱地帯で用いられているものである。わが国において、このような暖房システムが普及していない理由は不明であるが、経済的なシステムを構築することができれば、わが国においても広く普及する可能性があると考えられる。熱の直接利用へのDCHEの適用についても検討を行いたいと考えている。

7. おわりに

以上に、これまでの研究を通して浮かび上がったDCHE方式の輪郭を紹介した。DCHE方式の適用資源領域は極めて広く、本方式が対象とする潜在的な資源量は他の方式のそれに比べて遥かに大きいと予想される。また、本方式は発電のみならず熱の直接利用にも適用可能と考えられる。したがって、この方式を実用化することができれば、エネルギー問題と地球環境保全の両面で、国際的に大きな貢献をすることができると考えられる。

この方式の適用資源領域の広さ、また、多方面にわたる応用の可能性を考えると、本方式の研究は端緒についたばかりと言える。この方式の研究者は極めて少ないのが現状であるが、本方式の実用化を図るためには、多方面から総合的に研究を行う必要があると考えられる。今後、研究の輪が広がることを期待したい。

参 考 文 献

- Culver, G. G. (1990): DHE (著者注: Downhole Heat Exchangerの略語), Geo-Heat Center, Prepared for U. S. Department of Energy.
- エンジニアリング振興協会(1990): 断熱二重管を用いた同軸熱交換方式による地熱採取技術の開発に関する調査研究報告書、ENAA 1989-77.
- 江原幸雄(1990): 活動的な噴気地域下の熱過程と火山エネルギー抽出可能性の検討—九重硫黄山の例、日本地熱学会誌、Vol.12、No.1、49-61.
- 江原幸雄・尾藤晃彰・大井豊樹・笠井弘幸(1990): 活動的な噴気地域下の微小地震活動—九重硫黄山の例、日本地

- 熱学会誌、Vol.12、No.3、263-281.
- 江原幸雄(1992): 活火山下の熱過程の解明と火山エネルギー抽出の試み—九重火山・九重硫黄山地域におけるケーススタディー、九大地熱研究報告、No.1、17-24.
- 江原幸雄・盛田耕二(1993): 火山からの熱エネルギー抽出に関する研究—火山熱貯留層からの熱抽出量の推定(九重火山・九重硫黄山の場合)—、地熱、Vol.30、No.3、220-234.
- 速水博秀・小林秀男・松永 烈(1977): 冷却法による高温岩石の熱応力破壊に関する研究、日本鉱業会誌、Vol.93、No.1077、863-868.
- 厨川道雄(1989): 高温岩体発電の現状、サンシャインジャーナル、Vol.10、No.1、7-17.
- 九州電力(1993): 地熱エネルギーの効率的回収技術に関する開発研究—小規模地熱バイナリーサイクル発電に適した地熱資源とその回収法に関する調査研究—報告書、1-116.
- Mogensen, P. (1987): The European Market, Proceedings of the Workshop on Ground-Source Heat Pumps, IEA Heat Pump Center Report, No. HPC-WR-2, 27-34.
- 盛田耕二・山口 勉・唐澤広和・速水博秀(1984): 地熱井内温度解析プログラムの開発と検証—地熱井内外の温度挙動の解析(第1報)、日本鉱業会誌、Vol.100、No.1161、1045-1051.
- Morita, K., Matsubayashi, O. and Kusunoki, K. (1985): Down-Hole Coaxial Heat Exchanger Using Insulated Inner Pipe for Maximum Heat Extraction, Geothermal Resources Council Transactions, Vol.9, Part 1, 45-50.
- 盛田耕二・松林 修(1986): 坑井内同軸熱交換器の性能に及ぼす主要設計諸元の影響—坑井内同軸熱交換器に関する研究(第1報)、日本地熱学会誌、Vol.8、No.3、301-322.
- 盛田耕二・松林 修(1988): 坑井内同軸熱交換器の出力特性の検討—坑井内同軸熱交換器に関する研究(第2報)、日本地熱学会誌、Vol.10、No.2、109-129.
- 盛田耕二・杉本静哉・山田恭暉・藤田 勉・向井良一(1989): 坑井内同軸熱交換器を用いる地熱発電の予備的検討(I)—坑井内同軸熱交換器に関する研究(第3報)、日本地熱学会誌、Vol.11、No.4、319-338.
- 盛田耕二(1989a): 原形モデルの試作と断熱性能の評価—坑井内同軸熱交換方式用断熱内管の開発、資源、Vol.1、No.1、16-25.
- 盛田耕二(1989b): 管構成材料と溶接方法の検討(I)—坑井内同軸熱交換方式用断熱内管の開発(第2報)、資源、Vol.1、No.12、1-17.
- 盛田耕二(1990): 管構成材料と溶接方法の検討(II)—坑井内同軸熱交換方式用断熱内管の開発(第3報)、資源、Vol.2、No.1、2-14.
- 盛田耕二(1991): 地熱エネルギーの新しい採取方法—坑井内同軸熱交換器方式、地熱、Vol.28、No.1、61-78.
- 盛田耕二(1992a): 第二次試作と性能評価—坑井内同軸熱交換方式用断熱内管の開発(第4報)、資源、Vol.4、No.1、2-12.
- 盛田耕二(1992b): 坑井内同軸熱交換器方式の概念実証実験—ハワイにおける国際共同実験、地熱、Vol.29、No.1、52-69.
- 盛田耕二・藤田 勉・杉本静哉・山田恭暉・向井良一(1992): 坑井内同軸熱交換器を用いる地熱発電の予備的検討(II)—坑井内同軸熱交換器に関する研究(第4報)、日本地熱学会誌、Vol.14、No.1、29-45.
- Morita, K., Bollmeier, W. S. and Mizogami, H. (1992a): An Experiment to Prove the Concept of the Downhole Coaxial Heat Exchanger (DCHE) in Hawaii, Geothermal Resources Council Transactions, Vol.16, 9-16.
- Morita, K., Bollmeier, W. S. and Mizogami, H. (1992b): Analysis of the Results from the Downhole Coaxial Heat Exchanger (DCHE) Experiment in Hawaii, Geothermal Resources Council Transactions, Vol.16, 17-24.
- 盛田耕二・溝上芳史・Bollmeier, W. S. (1993): ハワイにおける概念実証実験結果の解析—坑井内同軸熱交換器に関する研究(第5報)、日本地熱学会誌、Vol.15、No.3、275-303.
- National Geothermal Association, Geothermal Resources Association and Earth Energy Association (1990): Geothermal Energy in the United States, Geothermal Resources Council Bulletin, Vol.19, No.10, 268-275.
- 日本地熱調査会(1993): わが国の地熱発電の動向、1993年版.
- Rybach, L., Eugster, W. J., Hopkirk, R. J., Kaelin, B. (1992): Borehole Heat Exchangers-Longterm Operational Characteristics of a Decentral Geothermal Heating System, Geothermics, Vol.21, No.5/6, 861-867.
- 佐藤嘉晃・山口 勉・厨川道雄(1990): 高温地層中への坑井掘削による坑井周辺の応力、資源・素材学会、研究・業績発表講演会講演要旨集、113-114.
- 資源エネルギー庁編(1989): 石油代替エネルギー便覧、通商産業調査会、平成元年度版.
- 山岡敬次郎(1984): バイフェーズ(トータルフロー)地熱発電システム、地熱、Vol.21、No.2、25-36.
- 矢野雄策・須田芳郎・玉入志郎(1989): 日本の地熱調査における坑井データ、その1コア測定データ、地調報告、No.271.
- (受付: 1993年9月30日、受理: 1994年3月2日)