

深部地熱資源の有効活用をめざして —坑井内同軸熱交換器(DCHE)方式の開発—

盛田 耕二¹⁾・田子 真¹⁾

1. はじめに

地球の中心部の温度は約6,000°C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、30~50 km程度で1,000°Cに達するものと考えられている。この深度は地球の半径6,400 kmに比べて極めて小さい。いま仮に、芯の太さが0.5 mmのシャープペンシルで直径13 cmの円を描き、これを地球とみなすと、1,000°C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。

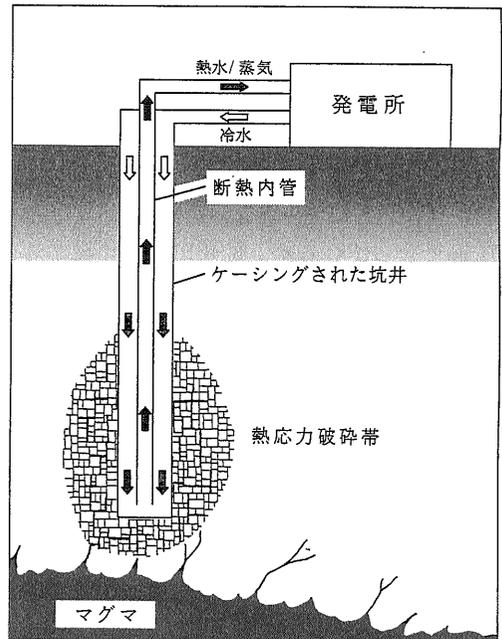
この地熱エネルギーはクリーンなエネルギーであることから、これに寄せられている期待は大きい。しかしながら、わが国の地熱発電設備容量は1992年現在で約29万kW(日本地熱調査会, 1993)と、必ずしも大きくはないのが現状である。この理由として、原油価格の低値安定化、開発有望地域の多くが国立公園内にあること等の社会的制約の他に、既存の方式で開発可能な資源の種類が限られること、また、既存の方式が適用可能な浅部になるほど資源の品位が低くなることが挙げられる。したがって、地熱のポテンシャルを活かすためには、未利用地熱資源、特に深部の高温地熱資源の開発を志向した技術開発を行う必要があると考えられる。

著者らは、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等を開発するための方法として、坑井内同軸熱交換器(Downhole

Coaxial Heat Exchanger, DCHE)方式を提案し、ニューサンシャイン計画の中で研究を行っている。本稿では、この方式の研究の概要を紹介する。

2. 坑井内同軸熱交換器(DCHE)の概念と適用資源

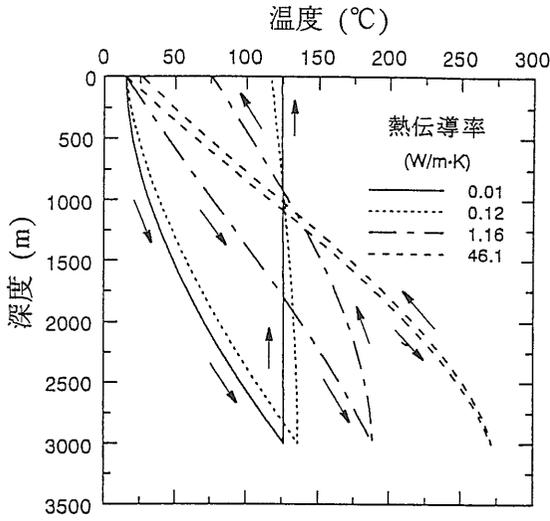
DCHE(第1図参照)は、逆循環方式(坑壁と内管の間の環状部の隙間に水を注入し、内管を通して熱水を取り出す循環方法)と高性能の断熱内管を用いること、また、完全なクローズシステムであることを特徴とする熱交換器である。著者らは、地熱井



第1図 坑井内同軸熱交換器(DCHE)方式の概念図

¹⁾ 資源環境技術総合研究所 地殻工学部：
〒305 つくば市小野川16-3

キーワード：坑井内同軸熱交換器, DCHE, 地熱エネルギー, 熱抽出, 地熱発電, 熱の直接利用, 高温湿潤岩体, 超高温岩体, マグマ, 発電コスト



第2図 断熱内管の使用による効果(逆循環方式)

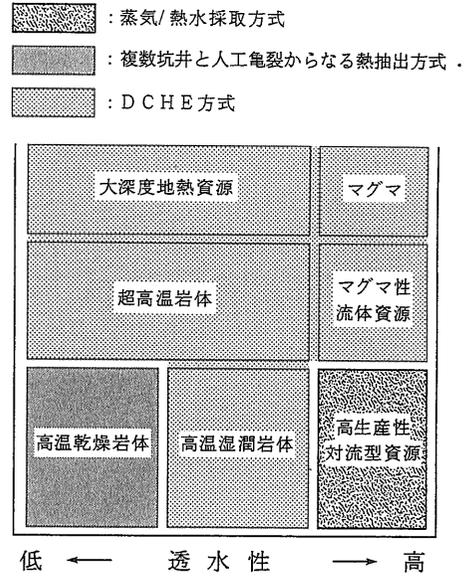
における温度ならびに圧力挙動の解析が可能なシミュレータを開発する(盛田他, 1984; 盛田・松林, 1986)とともに, このシミュレータを用いて検討を行い, DCHE によれば, ほぼ理想的に熱抽出が行われることを明らかにした(Morita et al., 1985; 盛田・松林, 1986).

第2図は, DCHE の特徴の一つであ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, 断熱内管の熱伝導率が小さくなるにつれて得られる熱水温度が高くなるのがわかる。内管の熱伝導率が 0.01 W/m·K の場合には, それが46.1 W/m·K の場合, すなわち鋼管の場合と比較して, 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倍以上にもなっている。断熱性能が優れた内管を使用すれば, 熱出力が大幅に増大することがわかる。

この DCHE 方式の特長としては,

- 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こと
- 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適用可能な資源の種類が多く, かつ対象とする資源量が大きいこと
- 4) 極めてクリーンなエネルギーが得られること等が挙げられる。

第3図に, 主として地熱エネルギー採取技術の観点から分類した地熱資源の種類と地熱エネルギー



第3図 地熱資源の分類

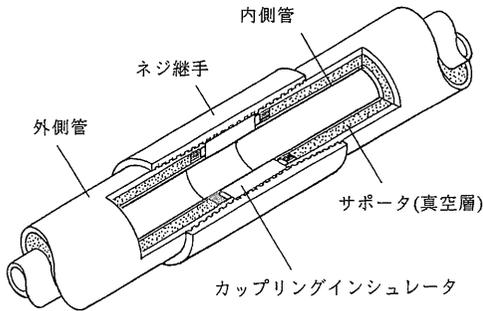
採取方法を示す。村岡(1993)は, 地熱資源の態様に着目し, 著者が提案した分類(盛田, 1991)をベースにして新たな分類を提案しているが, 第3図の分類は, この村岡(1993)の分類を参考にして, 以前の分類(盛田, 1991)に修正を加えたものである。すなわち, この分類では, マグマを透水性の高い側に置くとともに, 新たなカテゴリーとしてマグマ性流体資源を設けた。

第3図に示すように, DCHE 方式の対象資源としては, 高温湿潤岩体, マグマ性流体資源(火山熱貯留層, マグマ性流体貯留層), 超高温岩体, マグマ等が挙げられる。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。

3. 高性能断熱内管の開発

DCHE は, 地熱井内で使用可能な高性能の断熱管があってはじめて実現可能になる。そこで, DCHE に使用可能な断熱管の開発を行った(盛田, 1989a; 1989b; 1990a; 1992a)。これにより, 等価熱伝導率で0.018~0.023 W/m·K(盛田, 1992a)の極めて高性能の断熱管が開発された。

第4図に, 開発した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, ス



第4図 断熱内管の接続部の構造

ベースシャトルのキャビン断熱のために考案された断熱方式を採用している。この断熱管の特徴は、内側管と外側管の間隙部にサポータとして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制限された場合でも、断熱層の厚さを大きくとれるようになる。また、比較的到低真空で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。

本断熱管は、基本的に、温度350℃、深度3,000 m 程度までの条件でDCHEに使用可能と考えられる。

4. DCHE方式の実用化の可能性の検討

著者らは、また、DCHEの各種特性を明らかにする(盛田・松林, 1988)とともに、このDCHEを用いる発電の実用化の可能性を検討した。次に、実用化の可能性を検討した結果を紹介する。

4.1 DCHE方式が実用化可能になる熱出力レベルの検討

実用化の可能性を推定するために、まず、DCHEの熱出力と発電コストの関係を検討した(盛田他, 1989; 盛田他, 1992)。第1表に、発電コストを計算するための基本前提条件を示す。ここでは、DCHEの長さを3,000 mと仮定し、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。

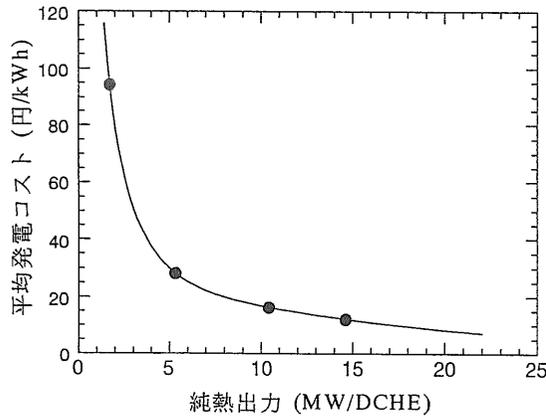
第5図に、計算により求められた熱抽出開始後1年目の純熱出力と、現行の補助制度の場合の平均発電コストの関係を示す。平均発電コストは、発電所の運転期間が15年の場合について求めたものである。図より、純熱出力が2 MW/DCHE程度の場合には発電コストが80円/kWh程度になるが、純熱出力がこれよりも大きくなると急激に減少し、5 MW/DCHE程度の場合には30円/kWh程度になることがわかる。

石油価格が上昇傾向にあることや、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30円/kWh程度でも実用化の可能性がでてくると予想されるので、中・長期的な観点からは、5 MW/DCHE程度の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10 MW/DCHE程度の場合には、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予想される。したがって、短期的に見た場合、10 MW/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。

第1表 検討の基本前提条件

作動流体	清水
DCHEの長さ	3,000 m
1発電所当たりのDCHEの数	15基
発電システム	二相タービン+シングルフラッシュ+蒸気タービン



第5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

4.2 実用化の可能性の検討

高温の地熱地域と火山性の噴気地域にDCHE方式を適用する場合について、それぞれ実用化の可能性を検討した。

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、ここでは、DCHEと構造が類似している掘削システムの熱出力について検討した。掘削システムの熱抽出効率もDCHEよりも劣ると考えられるが、DCHEの熱出力を推定する上で、有効な手がかりになると考えられる。

第2表に、深度3,000mと4,000mの坑井を掘削する場合に、それぞれ予想される純熱出力を示す(盛田, 1991)。この推定においては、北海道豊羽地区のN59-TH-2井で観測された実測の温度を基に定めた温度分布を仮定した。この場合の深度3,000mと4,000mにおける温度は、第2表に示したように、それぞれ330°Cと336°Cである。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4.7 MW/well、濁川型の場合には6.3 MW/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、10 MW/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

第2表 坑井掘削時に予想される純熱出力

坑井深度 (m)	自然平衡状態温度 (°C)	抽熱量評価指数 (km°C)	純熱出力 (MW/well)	
			肘折型	濁川型
3,000	330	671	4.7	6.3
4,000	336	954	6.6	8.9

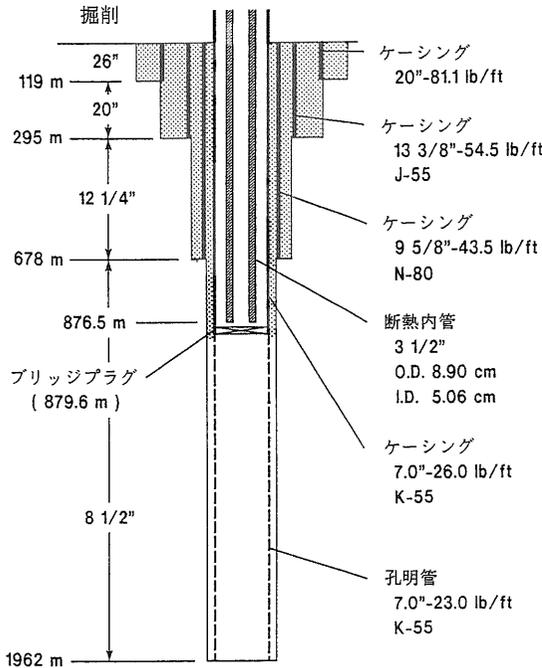
で注意する必要があるのは、ここで推定された熱出力が掘削時の熱出力であることと、あまり高温ではない地熱井のデータを基に推定した値であることである。

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10 MW/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。

なお、火山性の噴気地域における実用化の可能性の検討においては、大分県九重硫黄山の噴気地域をモデルに検討を行った(江原・盛田, 1993)。その結果、当該地域における純熱出力は約22 MW/DCHE、発電コストは約7円/kWhと見積もられた。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、火山性噴気地域においては、原子力発電と同等の発電コストをDCHE方式により実現できる可能性が大きいことを示している。

5. ハワイにおける概念実証実験

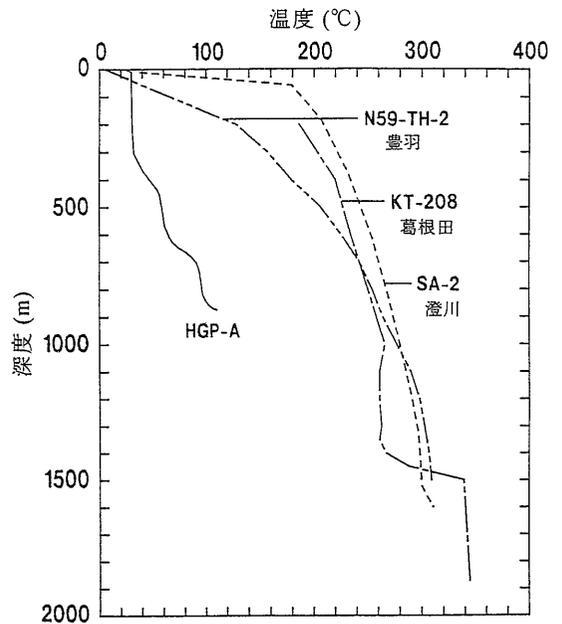


第6図 HGP-A 井のケーシングプロフィールと DCHE

DCHE 方式の概念を実証するために、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) の協力を得て、1991年にハワイ島において現場実験を行った (Morita et al., 1992a; Morita et al., 1992b; 盛田, 1992b; 盛田他, 1993)。ハワイ島は、世界有数の活動的な火山であるキラウエア山とマウナロア山がある島である。この実験は、DCHE 方式の最初の現場実験であるが、また、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。これにより、高性能の DCHE を構築可能であること、また、盛田他 (盛田他, 1984; 盛田・松林, 1986) 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た。以下にこの実験の概要を紹介する。

第6図に、実験に用いた HGP-A 井のケーシングプロフィールと断熱内管の配置等を示す。この坑井の深度は、1,962 m であるが、実験は7インチのケーシングが施工されている876.5 m までの区間を用いて行った。断熱内管としては、3.5インチの真空二重管式断熱管を用いた。

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地層内温度分布の例を



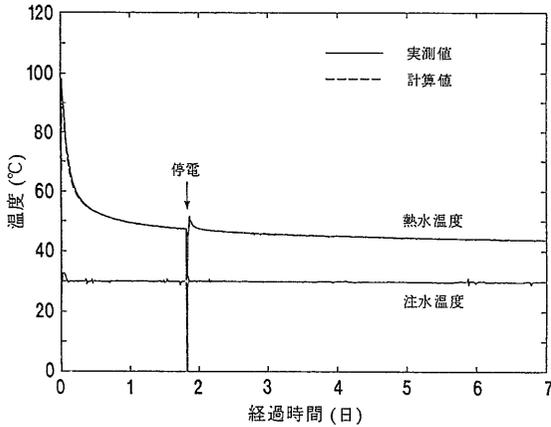
第7図 HGP-A 井の温度分布と国内における温度分布例

示す。実験区間の下端における温度は110°Cと、深度の割にはかなり低温であった。

実験は、1991年2月22日から3月1日まで7日間にわたって行った。本実験における最大純熱出力は370 kW、実験終了時点におけるそれは約80 kWであった。この熱出力はあまり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。

実験結果の解析は、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0.06 W/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1.6 W/m·K と推定された。

第8図に、熱水温度の経時変化について、実験結果とシミュレーション結果の比較を示す。シミュレーション結果は、上記の物性値の場合のものである。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、実測の熱水温度とシミュレーション結果は、停電の直後を含めて極めて良く一致しており、この図では、その差を判別することが困難である。シミュレーションは、地層内の伝熱機構として純粋な熱伝導を想定して行っているため、このような良い一致は、地



第 8 図 熱水温度の経時変化の比較

層内の伝熱メカニズムが、ほぼ純粋な熱伝導であったこと、すなわち熱抽出が帽岩中で行われたことを示唆している。この実験は、地熱貯留層の直上に存在する純熱伝導タイプの地層(帽岩)を伝熱メカニズムから確認した最初の例と考えられる。

なお、今回使用した断熱管の断熱性能が実用上十分な性能であること、また、推定された地層の伝熱機構と熱伝導率が、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、それぞれ調和的であることが確認されている(Morita et al., 1992b ; 盛田他, 1993)。

6. 熱抽出予測技術の研究

本研究では、本方式の実用化の可能性を高めるために、地層の伝熱特性改善方法、すなわち地層の透

水性改善方法の検討(例えば、盛田, 1990b)や DCHE の最適運転方法の検討(例えば、盛田, 1992c)等を進めているが、これらの検討と並行して、熱抽出予測技術の研究も行っている。

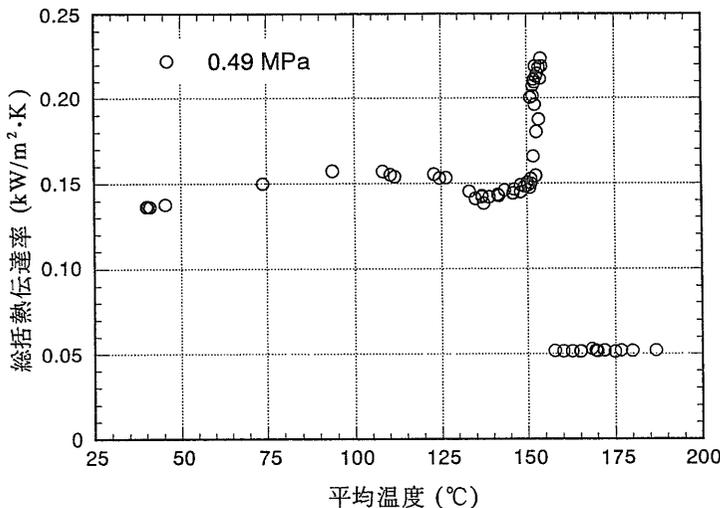
この研究では、これまで、高温・高圧・湿潤状態における熱伝導率の測定が可能な測定システムを開発するとともに、高温・含水状態における岩石の熱伝導率の測定や熱伝導率測定理論の検討を行った(例えば、盛田, 1989c ; 盛田・木村, 1992)。また、地層中における対流や凝縮が DCHE の熱出力に及ぼす影響や熱抽出に伴う対流の挙動を明らかにするための実験的検討、原位置地層の有効熱伝導率推定方法の検討、さらには地層内の対流を考慮したシミュレータの開発等を進めている。

ここでは、水で飽和した多孔質媒質中に置かれた垂直加熱円柱周りの熱伝達率の測定結果を紹介する。

第 9 図に絶対圧力 0.49 MPa において、水で飽和させたシリカサンド(透水係数 $3.4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$)を試料として得られた総括熱伝達率を示す。絶対圧力 0.49 MPa は 151°C における水の飽和蒸気圧である。

図において、150°C 付近から総括熱伝達率が急激に増大しているが、これは、ヒーター近傍への気相領域の形成、すなわち凝縮熱伝達の発生に伴うものである。凝縮熱伝達が発生すれば、ヒートパイプと同様の伝熱メカニズムが生じるが、これにより地層の伝熱特性が大幅に向上することがわかる。

なお、これらの測定データを用いて、DCHE の直径が 9 5/8 インチで全長が 3,000 m、また、無限



第 9 図 総括熱伝達率測定結果

遠地層と DCHE の外壁との温度差が 150°C の場合について熱抽出量を見積もると、気相領域が形成されておらず、自然対流と熱伝導のみにより熱が伝えられている状態における熱伝達率 $0.15\text{ kW/m}^2\text{K}$ の場合には約 52 MW/DCHE 、凝縮が生じている場合のピーク値である $0.23\text{ kW/m}^2\text{K}$ の場合には約 80 MW/DCHE と見積もられる。今、発電効率を 20% と仮定すると、これらの熱出力はそれぞれ 10 MW/DCHE と 16 MW/DCHE の電気出力に相当する。わが国における在来型地熱発電の電気出力が約 1.8 MW/well (還元井を含む)である(日本地熱調査会, 1993)ことを考慮すると、上記の熱抽出量は極めて大きいと言える。これより、地層の透水性が比較的に良く、かつ地層内に対流や凝縮熱伝達が生じる場合には、DCHEにより、極めて大きな熱抽出量が得られる可能性があることがわかる。

なお、現在、上記の実験結果の解析を行うとともに、水の臨界温度 374°C 付近における伝熱挙動を調べるために、 22.2 MPa の条件で測定を行っている。

7. おわりに

ここで紹介したように、ハワイにおける $1,000\text{ m}$ 級の概念実証実験により、高性能の DCHE を構築することが技術的に可能であることが既に確認されている。また、この方式の実用化の可能性が極めて大きいことも示されている。したがって、今後の主要な課題は、この方式の実用化の可能性を実地に追究することと、実用化のための研究開発を行うことであると考えられる。今後も、本方式の実用化をめざして研究を進めていきたいと考えている。

なお、本研究は、深部の高温地熱資源の開発、すなわち発電を主目的に行っているものであるが、DCHE 方式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、普遍的に賦存する浅部(深度数百 m 程度まで)の低温(低品位)の地熱資源を暖房あるいは冷房に利用することができる。現在、わが国では浅部の低温の地層は地熱資源と見做されていないが、諸外国では、これを熱源とする地中熱交換器とヒートポンプからなる暖房システムが広く用いられており、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 MW 程度の浅部低温地層を熱源とする暖房システムが使用されているものと推定される。

この暖房システムは、需要があれば、地熱地域、非地熱地域を問わず適用可能であり、わが国におけるこのシステムによる究極的な供給可能エネルギー量は数千万～数億 kWt にも達すると推定される。今後は、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。

参考文献

- Culver, G. G. (1990): DHE(注, Downhole Heat Exchanger の略), Geo-Heat Center, Prepared for U.S. Department of Energy.
- 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.
- Mogensen, P. (1987): The European Market, Proceedings of the Workshop on Ground-Source Heat Pumps, IEA Heat Pump Center Report, No. HPC-W R-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): Downhole Coaxial Heat Exchanger Using Insulated Inner Pipe for Maximum Heat Extraction, Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 9, Part I, 45-49.
- 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(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(1989c): 針状熱伝導率測定プローブの製造方法, 特願平1-2017.
- 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(1990a): 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(1990b): 単一坑井による熱抽出方法のための抽出熱量増大方法, 特開平4-92074.
- 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(1992c): 地熱利用システムに供給する作動流体あるいは地熱流体の温度調整方法, 特願平4-323681.
- 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 Result from the Downhole Coaxial Heat Exchanger (DCHE) Experiment in Hawaii, Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 16, 17-24.
- 盛田耕二・木村繁男(1992): 発熱体の熱容量が測定精度に及ぼす影響の検討—非定常線熱源法による熱伝導率測定法に関する研究(第1報), 資源・素材学会誌, Vol. 108, No. 1, 25-32.
- 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.
- 村岡洋文(1993): マグマを視座とした将来型地熱資源像の展望, 地熱, Vol. 30, No. 2, 26-52.
- National Geothermal Association, Geothermal Resources Association and Earth Energy Association (1990): Geothermal Energy in the United State, 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, 1-74.
- Rybach, L., Eugster, W. J., Hopkirk, R. J. and Kaelin, B. (1992): Borehole Heat Exchangers — Longterm Operational Characteristics of a Decentral Geothermal Heating System, Geothermics, Vol. 21, No. 5/6, 861-867.
- 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.
-
- MORITA Koji and TAGO Makoto (1994): Aiming at utilization of various deep geothermal resources —The development of the Downhole Coaxial Heat Exchanger (DCHE) system—
-
- 〈受付: 1993年11月29日〉