

## 将来が地熱エネルギーにもたらすもの

ローランド・N・ホーン

米国スタンフォード大学 エネルギー資源工学部

### 要 旨

過去5年間に、地熱開発は大幅に変化した。2005 年以降の歴史的に高い石油価格のために、再生可能エネルギーが脚光を浴び、それは温室効果ガス削減にむけた地球規模の抱負にも支持された。地熱開発は、「従来型の」地熱資源に伝統的に興味を持つ国（ニュージーランド、インドネシア、米国等）と歴史的には地熱に関心の無かった国（オーストラリア、ドイツ等）の双方において、世界の多くの地域で加速した。火山地域にある従来型の熱水系を使ったおなじみの方法で新たな開発が進む一方、非火山地域における地熱増産システム(EGS)プロジェクトという新しい方向性も追求されてきた。技術力により、より低温の地域や、水のアクセスが悪い地域、地表の利用に制限がある地域においても、従来型の地熱資源開発が可能となった。EGS プロジェクトは、さまざまな方向性で、いろいろな地域で開始された（米国では現在6つの EGS プロジェクトが進行中）。

この流れでいくと、将来の地熱開発の拡大は、新しいフィールドでの探査と、既知だがまだ開発利用されていないフィールドでの技術的挑戦に賭かっている。世界の地熱業界で現在指摘されている2つの問題は、(1)「生産性のギャップ」:ダウンホールポンプを利用するには高温すぎるが、フラッシュサイクルを用いるには低温すぎるフィールドの開発、(2)信頼性の高い EGS 開発手順の開発:持続可能な流量を保証し、誘発地震活動は無害だと一般市民に保証するもの、である。

**キーワード:** 将来、坑井の生産性、EGS.

### 1. はじめに

過去 5 年間は地熱エネルギー開発が世界のブームとなり、多くの国で高い関心と活動が示されている。地熱エネルギーへの関心の復活したことは、一例として図 1に示す通り、地熱エネルギー協会（GEA）の年次米国地熱発電と開発報告書(2011年4月)からも明らかである。2008年-2009年の金融危機で増加速度が幾分鈍化しているものの、米国では着実にこの期間に導入容量が増えている。

さらに、この新しい開発は、落穂ひろい一つまり何年も前から計画されていた開発だけではなかったことが明らかである。図2に示すように、「未生産」と分類される地域での、相当数の新たな開発プロジェクトがある。「未生産」とは GEA（2011）により、以下のように定義されている；

「従来型熱水系（未生産資源）：天然の地熱貯留層の温度と流量のレベルが発電を行うのに十分だが、これまで地熱発電所を運営するほどの開発が行われていなかった地域での、地熱資源開発」。

従って、従来型未生産資源についての111のプロジェクトは、現在発電が行われていない地域での探査と開発の開発を表している。

**図1. 2005～2010年の米国の地熱発電設備容量、2011年 GEA 報告書(2011年4月)より**

**図2. 米国での総数 146 の開発 プロジェクトとそのカテゴリー(CH は従来型熱水系)、GEA 報告書(2011年4月)より**

このような拡大は、世界の他の多くの国で見られ、2005～2010の容量増加の合計は1,782 MWe (8,933 MWe から10,715 MWe)となっている(Bertani, 2010)。図3は、Bertani (2010)からの引用で、1950 年から2010年までの発電容量および発電量の増加と、2015年への投影を示す。2015年に18,500 MWeとの数値は投影に過ぎないが、開発中のプロジェクト数を考慮すれば(例えば図2に示されるように)、この数値にも信憑性がある。また、1980年代初頭の歴史的に高い原油価格も地熱設備容量拡大を大きく刺激したことにも注意する必要がある。

**図3. 2005～2010年の世界の地熱発電設備容量(MW) と発電量(GWh)、Bertani (2010)より**

この新たな関心は、世界経済と政治的な力(主に石油価格の高騰と、再生可能エネルギーの道徳的嗜好)と、地熱エネルギーへのアクセスをより容易にする技術の進歩(たとえば、発電効率向上と低温液体の利用)とが合わさった結果である。

利用技術の革新には、以下のものが含まれる：

1. 革新的発電プラントの増加。多くはフラッシュ・プラントの下流側にバイナリーを加えた形である。その結果として、資源の持つ熱エネルギーの回収率が上がった。
2. 洗練されたバイナリー・サイクルの発電プラントによる低温流体の利用。その結果、生産に利用できる資源が拡大した。アラスカのChena温泉で、非常に低温(74℃)の地熱資源から有機ランキン・サイクルで 250 kWの発電を行っている例は、注目に値する(Lund et al., 2010)。
3. 貯留層を人工的に強化する技術。地熱増産システム(EGS)による世界初の商業的発電所はドイツのランダウで 2008 年に運開した(Schellschmidt et al., 2010)。数多くのEGSプロジェクトが現在、世界で展開中であり、米国だけでも6つが進行中である。

この論文では、地熱エネルギー業界が今後、どこへ向かおうとしているのかを理解するための道しるべとして、以上の3つの問題について議論する。

## 2. 革新的なプラント

長年にわたり、地熱発電プラントは、初期開発の数少ないフラッシュ・プラントについてあてはまっていた導入戦略に基づくある種の均一な規格を保っていた。ガイザーズでの経験に基づき、米国では5万5千キロワットのプラントが「通常の」サイズとして受け入れられてきた。これは、世界の他の多くの地域でも適切なサイズであることが判った。当時の共通する貯留層温度に基づいて、タービン入口圧力を600 kPa程度とする傾向があった。

しかし近年になると、プラントの設計戦略にかなり大幅な変化が見られる。ニュージーランド・ロトカワのコンバインド・サイクル・プラントはその好例で(図4)、蒸気発電プラントの排熱を利用したバイナリー・サイクルの最初の開発例である。このプラントでは、非常に高い入口圧力 (2,550 kPa) を持つ背圧蒸気タービンの出口蒸気を、3つのバイナリープラントに送っている (Legmann and Sullivan, 2003)。このコンバインド・サイクル・ユニットでの蒸気消費量は約5kg/kW時であり、ガイザーズでの蒸気消費量約5kg/kW時 (Sanyal and Eneedy, 2011に示されたデータから計算) や、エルサルバドルのAhuachapánでの約9kg/kW時 (Handal et al., 2007) に比べて、非常に有利である。

バイナリーと蒸気プラントの組合せは、現在では他のいくつかのプロジェクトで見ることができる。

**図4. ロトカワ地熱発電所: 蒸気発電とバイナリー発電のコンバインド・サイクル (写真: Mighty River Power)**

技術革新は、既に、異なる地熱発電技術の組合せを超えて拡張している。過去数年には、地熱発電と他のエネルギー源との組合せへの興味が見られる。例えば、エルサルバドルのAhuachapánにおける地熱-太陽オペレーション (Handal et al., 2007, and Alvarenga et al., 2008) や、2011年8月に発表されたENELグリーンパワーによるネバダ州のスティルウォーター・プロジェクトがある (Greenhut et al., 2010を参照)。地熱と太陽熱エネルギーの組合せは、地熱流体の温度を上げ、日射の不安定性を補完する効果がある。

アイスランドでは一般的な電気と温水供給プロジェクトのような、エネルギーの組合せが将来的に革新を続けることは、確かである。

## 3. より低温の資源

バイナリー発電の普及に伴い、実用的に発電できる地熱資源の温度範囲が拡大している。まだ一般的ではないが、孤立した電力負荷を持つアラスカ州チェーナ温泉の例では、図5に示される通り非常に低温(74℃)の地熱資源から電力を生産している (Lund et al., 2010)。チェーナ温泉は最も近い送電網から100km以上離れており、地熱発電が無ければディーゼル発電に依存するしかない。実際、アラスカ州には送電網に連結されていない集落が数多く存在しており、遠隔地のため燃料の輸送コストが極端に高いので、ディーゼル燃料から地熱発電への置き換えによる利益は大き

い。同じような利点は、カリブ海のような島の集落でも得られる(Huttrer, 2010)。図6は、アラスカ、アリューシャン列島のアクタン島における掘削プログラムを示している(Kolker and Mann, 2011)。

図5. アラスカ・チェーナ温泉のバイナリー発電プラント。写真: Roland Horne, 2007

図6. アラスカ・アクタン島での掘削、Kolker and Mann(2011)より。写真: Amanda Kolker, 2010

低温での電力生産が実用化されると、副次的な流体からの地熱エネルギー回収、たとえば油田水と共に地表にもたらされた熱の回収といった、新たな可能性がでてくる。既にワイオミング州(Johnson and Walker, 2010)および中国の華北(Gong et al., 2011年)でパイロット・プロジェクトが行われている。図7は、Johnson and Walker(2010)によるもので、ワイオミング州で2008年9月から操業している有機ランキン・サイクル・プラントを示している。世界の石油産業は一日あたり3億バレル(540,000kg/秒)の水を生産しており、多くの場所で水温は実用の地熱発電所の範囲内にある。油田の操業には多くの電力を消費する場合が多いので、操業用にローカル発電を行うことは特に有益である。

図 7: ワイオミング州のロッキーマウンテン・オイルフィールド・テストセンター(RMOTC)の油田水からの熱回収によるバイナリープラント。Johnson and Walker(2010)より

地熱資源温度の重要性は、見かけより複雑である。単純に言えば熱いほど良いのは事実だが、資源のアクセシビリティの点で、「穴」が残る。というのは、自噴井は、一定範囲の温度以下になると急激に生産性が低下し、ダウンホールポンプは特定の温度までしか有効でないからである。この「穴」は、Sanyal et al.(2007)に非常に簡潔に図示されているので、図8として本文でも示す。図に示す通り、約 190~220°Cの間にギャップがあり、そこではポンプも自噴も有効に機能しない。

図8. 温度関数としての地熱井の正味発電容量(MW)。Sanyal et al.(2007)より

この資源温度のギャップは、地熱業界がこれから対処しようとしている技術的挑戦を示している。

#### 4. 地熱増産システム(EGS)

従来型地熱貯留層は、新たに発見され利用されているが、大型の従来型資源の発見可能性が低下しているのは事実である。世界的にも、ガイザーズのような資源が新たに見つかることはなさそうである。そうすると、地熱開発の大規模拡大は地熱増産システム(EGS)によることになる。

Tester et al.(2007)の「MIT報告書」は、米国でのEGSの将来性に関して広範な研究を示しており、この報告書は、政治的および投資上の優遇をEGSに向けるのに多大な影響力を発揮した。その後4年以内に、少なくとも6つのEGSプロジェクトが米国で開始されただけでなく、いくつかの他の国でも開始した。EGSの定義については議論が分かれるが、多くの定義において最初の商業的EGS開発と言えるものが、ドイツのランダウで2008年に操業開始した(Schellschmidt et al., 2010)。

高温岩体への刺激は、1970年代のニューメキシコのフェントン・ヒルでのプロジェクトにまでさかのぼり、多くのEGS研究プロジェクトで達成されている。しかし、プロジェクトの数が増えた後に初めて、EGSの作成と管理に関して、よりルーチン的な理解が進んできた。

2011年8月に、Doone WybornはEGS刺激に関する経験をまとめて発表した。これは、異なる環境下でのEGSプロジェクトを項目ごとに比較しており、非常に有用である。Wybornのいくつかの表を、許可を得て本文に転載する。成功事例と言えるのは、そのサイトにおける最小主応力未満の圧力下での水注入によって、相当数の微小地震が発生することだということを、理解しておこう。このプロセスは、既に良く知られている(Pine and Batchelor, 1984)。

表1は、Wybornのまとめで、刺激と生産の双方の成功事例として報告されたプロジェクトである。表2は、生産がない(または最小限の生産があった)刺激のプロジェクトである。

花崗岩でのプロジェクトと他の種類の岩石(通常砂岩または火山岩類)でのプロジェクトの比較も有益である。一般的に、花崗岩へのEGS刺激(これが最も一般的なされている)での経験は、砂岩や火山性凝灰岩への亀裂刺激とは異なる。

#### 表1. 刺激と生産が成功した EGS プロジェクト、Doone Wyborn (2011 年 8 月)より

#### 表2. 刺激が成功した EGS プロジェクト(生産は無報告)、Doone Wyborn (2011 年 8 月)より

Zimmermann et al. (2008) が報告しているドイツのグロース・シェーネベックでの刺激の報告は特に興味深い。砂岩層および別の火山岩層に、別々の独立した注水を行い、フラクチャリングを試みている。この場合の刺激操作はプロップアントを用いたフラクチャリングで、おそらく引っ張りである。花崗岩で一般的に造られる横滑りフラクチャリングがプロップアントを用いないのと異なっていた。Zimmermann et al. (2010) は結果を要約しており、それにはその後の酸処理が含まれる。坑井の生産性インデックスが刺激前の $2.4\text{m}^3/(\text{時MPa})$ から水圧破砕後の $10.1\text{m}^3/(\text{時MPa})$ に増加し、酸処理によって約 $15\text{m}^3/(\text{時MPa})$ に増加した(Zimmermann et al., 2010)。刺激によって、流量は約 $16\text{kg}/\text{秒}$ となった。

エルサルバドルのベルリンでの水圧刺激は、火山岩(花崗岩ではない)に対するもので、Rivas and Torres (2003) が報告している。注入率の改善は、 $0.67$ から $0.84\text{kg}/(\text{秒bar})$ へ( $0.30$ から $0.24\text{ m}^3/(\text{時MPa})$ へ)とわずかに上がった。微小地震は観察されたが、あまり活発ではなかった。

EGS開発は確かなものになり続けているが、いくつか技術の進歩が必要な部分が残っている。MIT レポート(Tester et al., 2007)は、他のものからの類推で坑井1本あたりの流量を約 $80\text{kg}/\text{秒}$ ( $1/\text{s}$ )と仮定してEGSの米国エネルギー・ミックスへの侵入を予測している。表1の検討では、ランダウでのEGS プロジェクトのみが、このような流量を達成している。坑井の生産性を改善するには、フラクチャリング・プロセスのコントロールを改善して貯留層内のコネクションを増やすこと、たとえば複数の

フラクチャーを生成するために方向を変える手法など (Petty et al., 2011) の活用に依存する。このような努力は、現在進行中である。

## **結論**

地熱エネルギーは過去10年間のルネッサンスを経て、多くの新しい技術、新しい国、業界が参入している。革新的なハイブリッド・プラント、低温資源とEGSにより、地熱エネルギーへのアクセスが大幅に拡大した。

## **謝辞**

著者は、本稿で研究結果および図写真の掲載を許可して下さった方々に謝意を表する。

## **参考文献 (以下略)**