

韓国における地熱エネルギーの現状と将来

リー・テジョン, ソン・ユンホ(李 泰鍾, 宋 允鎬)

韓国地質資源研究院

要 旨

韓国での地熱利用は側近の10年間に著しい成長をとげた。中でも地中熱ヒートポンプ(GHP)が際立っており、それは主として、さまざまな補助金制度、研究開発への支出、公的機関への新エネルギー・再生可能エネルギー利用を義務づける法令、電力料金累進制の非適用等を含む、強力な政府支援によるものである。深部地熱資源に関しては、韓国は火山性の高エンタルピー資源を持たないものの、深部には莫大な量の地熱資源がある;EGS 技術を用いれば 6.5km までの深度に 19.6GWe の地熱発電ポテンシャルがあると評価されている。EGS による地熱発電のための最初の検証調査プロジェクトは、ポハンで 2010 年 12 月に開始した。EGS による地熱発電が5年間のうちに行われる予定である。国家の地熱技術ロードマップ(TRM)では、2030年までに200MWeの設備容量導入を達成する目標を定めている。国家の地熱 TRM に基づいた研究開発プログラムは、全国的な GHP システムと EGS システムの普及を技術的な裏付けによって支援していく。政府による助成金制度が続けられる限り、少なくともあと5年間は、急速な GHP の導入が続くと予想される。

キーワード: 地熱、資源、ポテンシャル、地中熱ヒートポンプ(GHP)、人工地熱システム(EGS)、技術ロードマップ(TRM)

1. はじめに

韓国は1000年以上に渡って活発な火山や地殻活動はなく、日本のように高エンタルピーの地熱資源を期待するは難しい。しかし、地球の深部を利用することで膨大な量の地熱資源を開発することができる。理論上は、地中熱ヒートポンプ(GHP)と人工地熱システム(EGS)により、いつでもどこでも場所を問わず地球からのエネルギーを利用することができる。

最初のGHPシステムがソウルの米国大使館に導入されたのが2000年であり、これは米国や欧州諸国に比べると非常に遅いが、それ以来、韓国の専門家は韓国の地質に適したGHP技術を開発する努力を続けてきた。岩盤および土壌の特性を把握し、韓国の人々と政府に地熱のことを伝えるなどした。その結果、政府が地熱を支援するようになった。深部地熱に関しては、韓国地質資源研究院(KIGAM)が'90年代初めから地熱資源の開発に従事していたが、ポハン(浦項)でのプロジェクト(Song et al, 2006; Song and Lee, 2008)が開始されるまでは、ほとんどのプロジェクトでは深部掘削の予算取得に失敗していた。このプロジェクトは、2km深以内で70℃以上の地熱水を開発し、地域暖房、温室効果、養殖に利用することを目指していた。2003～2008年までの6年間に対象地域の地質と地熱の構造を把握する目的で、4本の探査井が掘削された。国内の平均地温勾配は約25℃/kmだが、4本の探査井の検層結果は共通して地温勾配 30℃/kmより高かった(Lee and Song, 2008)。韓国の地熱資源評価(Lee et al., 2010)によれば、ポハン地域の5km深の温度は約180℃と

期待される。科学的結果に基いて、政府と業界は2010年12月、EGSによる発電のための概念実証プロジェクトを韓国で始動することを決定した。

本文では、まず韓国の地熱資源について要約し、韓国におけるGHPおよびEGSプロジェクトの現状および新たに作成された地熱技術ロードマップ2011について述べ、最後に韓国における地熱の未来に触れる。

2. 韓国の地熱資源

地熱データベースがKIGAMによって作成され、2010年7月に公開された(Kim et al., 2010; <http://kgris.kigam.re.kr>)。このデータベースには、韓国内の岩石のさまざまな地熱特性が含まれている。現在、2,163個の試料の熱伝導率、715本の坑井データから得られた地熱勾配、492の地殻熱流量データ、および 180の熱生産データが含まれる。また、対応する岩石特性、例えば密度、比熱、孔隙率なども含まれている(図1)。データベースのデータを利用して、韓国の深部における熱量と温度を理解する目的で、地熱資源評価が行われた(Lee et al., 2010; Song et al., 2011)。

図1. 地熱データベース上の熱特性及び物性分布:(a)密度、(b)比熱、(c)熱伝導率、(d)熱生産、(e)地殻熱流量、(f)地表温度 (Song et al., 2011)

Lee et al. (2010)は、深部の温度を推定し(図2)、韓国の地熱資源評価を実施した。そこでは、韓国の5kmまでの深度で、利用できる地熱資源は 1.01×10^{23} Jと議論されている。地熱エネルギーのわずか2%を開発すると仮定しても、約 484×10^8 TOEとなり、それは2006年の全国の一次エネルギー消費量(約 2.33×10^8 TOE)の200倍以上に相当する。図2より、ポハン盆地第三紀層が厚く地表を覆っている韓国南東部の深部では、高温が期待できる。

Song et al. (2011)は、国際機関によって最近提案され承認されたプロトコルに従って、韓国の地熱発電ポテンシャルを計算した。3km～10km深について理論的に推定されたポテンシャルは、6,975GWeに達し、これは2010年の韓国の総発電容量の92倍に相当する。技術的ポテンシャルを6.5km深までとした場合は、19.6GWeとなる。これは現在の技術的限界、土地のアクセス性、0.14の熱回収率14%、温度低下率10℃を考慮したものである。

図2. 韓国の異なる深度における推定温度分布(Lee et al, 2010). ポハンを含む朝鮮半島東南部で高温となっている。

3. 韓国における地熱の直接使用

韓国での地熱エネルギー使用は、古代より殆どが浴用や水泳用である。温泉は主として、花崗岩地域の深部で繋がっている亀裂に関連している。これまでに開発された最高温度は、プサンに近いプゴク(釜谷)温泉の76℃であり、そこでは温泉水の一部が暖房に利用されている。表1にまとめた通り、温泉水を利用した設備容量は2010年に43.6MWtを超え、2010年の利用熱量は593.7 TJ/年となっている。これは明らかに、韓国の地熱ポテンシャル 1.01×10^{23} Jに比べて非常に少ない。温泉水の浴用利用と水泳施設を除くと、2010年の直接利用の設備容量は約11MWtであり、86TJ/年のエネルギーが利用された。

地熱エネルギーの直接利用とは別に、GHPの設備容量と年間エネルギー使用量は、図3に示す通り、かなり急速に増加している。韓国のGHPシステムの総設備容量は2010年に約229.8MWtに達し、対応するエネルギー利用は900TJ/年に超え(表1)、世界最高の拡大となっている(Lund et al., 2010)。

韓国での急速なGHPシステムの増加に関しては、いくつかの理由が挙げられる。最も重要なものは、政府の強力な支援であり、以下のものが含まれる;

- 1) 新エネルギーおよび再生可能エネルギーの開発と使用に係る法令:
 - 政府は、普及補助金プログラム、地方普及プログラム、100万グリーンホーム・プログラム(2010年に17 百万米ドル)により、最大50%までGHPの導入コストを補助する。
 - 長期低金利適用プログラム
 - 研究開発支出 (2010年に10.75百万米ドル)
- 2) 2010年から5年間の温室効果への補助金プログラム(2010年に48百万米ドル): トータル導入コストの80%を補助
- 3) 公共施設の新エネルギーおよび再生可能エネルギー利用義務に係る法令: 3,000m²以上の公共施設の建設時には、総工費の最低5%を使用して再生可能エネルギー施設を導入しなければならない
- 4) GHPシステムへのフラット電気料金適用—それ以外の場合は累進制

したがって、少なくとも政府の補助金プログラムが継続する次の5年間は、明らかに急増が続くであろう。

表1. 2010年12月31日における韓国の地熱直接利用 (Song and Lee, 2011)

利用法	容量 (MWt)	年間エネルギー利用 (TJ/年=10 ¹² J/年)	利用率
個別暖房	8.66	53.43	0.20
地域暖房	2.21	31.28	0.45
温室の暖房	0.17	1.33	0.25
浴用およびプール	32.56	507.61	0.49
地中熱ヒートポンプ	229.8	903.24	0.23
合計	262.36	1,496.9	

図3. 韓国のGHP設備容量と年間利用エネルギーの増加. (Song and Lee, 2011)より

4. 地熱発電—韓国のEGSプロジェクト

地熱エネルギーの直接利用とは対照的に、これまでのところ韓国には、地熱発電所(GPP)はない。2章で既に述べたように、ポハンのある韓国南東部の深部では、高温が期待できる。この地域は、韓国ではかなり珍しいことに、厚い第三紀層で覆われており、これがキャップ・ロックの役割を果たす。ポハン地域での地熱探査は、KIGAM によって6年以上実施されており、4つの深部井が掘削されている。最も深い坑井(BH-4)は、2005年9月に掘削が開始され、2006年11月に2.385kmの深

度に達した。この坑井は垂直井で、口径16インチで始まり6.5インチで終了している。掘削時検層および坑井検層の結果は、さまざまな深度にフラクチャー・ゾーンが多数存在することを示している。2006年の掘削直後に得られた温度検層の結果では、BH-4の地温勾配は約31°C/kmであり、坑底温度は90°C以上と推定された(図4の左側)。温度プロファイルが、掘削によって妨げられていることは確かである。2010に測定した温度プロファイルでは、2km深度で91°Cを示し、坑底ではさらに高い温度が期待できる。

これを背景として、ポハンでのEGSによる地熱発電の最初の検証調査プロジェクトが、2010年12月に開始されている。このプロジェクトは、5年以内に5km深度までのサイトでMW規模の地熱発電所を建設することを目指している。Nexgeo株式会社は、筆頭請負業者として研究所(KIGAMおよび韓国建築技術研究所(KICT))、大学(ソウル国立大学(ソウル))、および産業界からの参加(パスコ、Inngeo Tech株式会社)と共に、プロジェクトをリードしている。プロジェクトの予算総額は43.8百万ドル、18.5百万ドルは政府から、25.3百万ドルと想定されている。

5年間のプロジェクトは、2つのフェーズに分かれている(図5)。第1フェーズ(2010~2012年)では、さまざまな地熱探査を行う。対象地域の地質/地球物理的な探査、1km及び3kmの2本の探査井、岩石とコアサンプルの熱特性測定、検層および応力場測定、掘削時の微小地震モニタリング、そして最終的にサイトの地熱資源評価を行う。第1フェーズの目標は、深度3kmで100°Cよりも高い温度を確認することと、このサイトの5km深度からEGSによって抽出できるエネルギー量を推定することである。すでに90°Cより高い高温を観測しているので、第1フェーズの目標達成は必ずしも難しいだろう。しかし、BH-4(2.383km)が、これまで韓国の掘削技術によって掘られた最も深い坑井であるため、3kmの掘削は慎重に行う必要がある。第2フェーズ(2012~2015年)は、5km深のダブルット・システムを完成させることに専念する予定で、深部掘削、水圧破碎、循環試験、そして最終的なMW規模のバイナリー発電所の建設が含まれる。

プロジェクトの最初の1年は、この地域内でEGSに適切なサイトを選択することに、ほとんどの時間を費やした。農業、緑地保護、宅地保護に関連した各種規制や制限のため、サイトの選択は容易ではない。困難ではあったが、地方政府からの支援のおかげで、首尾よくパイロット・サイトが決まった。

図4. 2つの坑井の地質柱状図、熱伝導率、温度検層ログ(2006年)およびBH-4の温度モニタリング(2010年)。2010年におけるBH-4の2km深の温度は約91°C。

図5. 韓国EGSプロジェクトのマスタープラン

コア掘削と応力測定の目的で探査井を掘削しており、微小地震のモニタリング井としても利用する予定である。微小地震モニタリング用の機器は、この5月までにサイトから約5km以内の範囲にインストールする。この夏に、3kmの坑井掘削を開始する。必要なすべての情報は、インターネット上の<http://www.kegs.kr>を介して、世界中の専門家に公開する予定である。韓国には、深部掘削及び5km深での坑井刺激に関しても、バイナリー発電についても十分な経験がないため、国際的な専門家のコメントおよび参加を高く評価しており、歓迎している。

5. 地熱の技術ロードマップ 2030

韓国の地熱技術ロードマップ (TRM) は、2011年の終わりにリリースされている。ロードマップは、2020年までに開発する4つの特定項目を定めている; GHPのための2項目と、深部地熱水の直接利用、もう一つは地熱発電所 (KETEP, 2011);

- 1) 大規模、高性能GHPシステム (>5MW_tで、APF>4.0)
- 2) その他の新エネルギーおよび再生可能エネルギー源とハイブリッド地熱システム
- 3) 50MW_tの地熱による地域暖房システム
- 4) 20MWeのEGSによる地熱発電所

世界のGHPシステムの研究開発では共通して、高いシステムパフォーマンス、大規模システム、多様なエネルギー源、持続可能な利用、環境への配慮を目指している。項目1)と2)は、この一般的な傾向に従っており、GHPに必要な全ての研究開発をカバーする。研究開発プログラムのほかに、補助金プログラムと導入義務を含む強力な政府の支援が継続する予定で、少なくとも次の5年間は、年間100MW_tの新しいGHPがインストールされると予想される。

項目3)と4)は、深部地熱システムの研究開発をカバーしている。特にEGSによる地熱発電では、現行のプロジェクトで2015年までに1.5MWeの地熱発電所を建設し、2020年までに同地域での設備容量を最大20MWeまで拡大するためのネットワーク技術を開発する。2030年までに、2章に記述した地熱ポテンシャルに従って20MWeのシステムが8~10か所に適用され、合計200MWeの地熱発電所導入が実現する予定である。

6. まとめ

韓国には火山起源の高エンタルピー地熱資源はないが、GHPとEGS技術を適用すれば、膨大な量の地熱資源がある。私たちの足の下では、6.5km深までにある技術的な地熱ポテンシャル19.6GWeが、開発と活用を待っている。そしてもちろん、より高い技術が開発されるほど、より多くの資源が確保される。

GHPシステムについては、最近10年間に非常に急速な導入と利用の増加が見られ、それは主として、政府の強力な支援によるものである。これには、各種補助金プログラム、研究開発資金、公共施設の新エネルギーおよび再生可能エネルギー利用義務に関する法令、フラット電気料金などが含まれる。政府の補助金プログラムが続く限り、少なくとも後5年間は、GHP導入の急速な増加が続くと期待される。全国地熱TRMに沿った研究開発プログラムは、GHPシステムの全国展開を技術的に支援する。

深部地熱資源については、5年間でEGS技術による地熱発電が実現する予定である。そうすれば、産業界も、韓国での地熱発電が夢ではないことを認識するだろう。彼らは、今年から発効した再生可能エネルギー・ポートフォリオ (RPS) システムにおける投資先として適当な再生可能エネルギー源を夢中で探しているので、国内や海外においても地熱開発に投資するようになる。表2に示される通り、容量500MW超の電力会社13社は、RPSに従って電力の特定割合を再生可能エネルギーで供給しなければならない。TRMに従った研究開発支出と、民間からのRPSシステムを考慮すると、「2030年200MWの地熱発電所」は叶わぬ夢ではない。

表2. 容量500MW超の電力会社に課される再生可能エネルギー比率

年	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
再生可能 エネルギー 比率(%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0

謝辞

この事業は、韓国知識経済省(MKE)による国家プロジェクト第 2010T100200494の一部であり、韓国エネルギー技術評価・計画研究所 (KETEP) を通じて行われている。

参考文献 (以下略)