

地中熱ヒートポンプにおける新たな開発 —スイスでのサクセス・ストーリーを交えて

ラディスラウス・リーバッハ

チューリッヒ工科大学 地球物理学研究所(スイス)

要 旨

世界の地中熱ヒートポンプ(GHP)システムの伸びは指数関数的であり、年間 20%の増加となっている。ここでは、普及の要因を指摘し議論する。GHP の技術は今なお開発されているが、今日すでに大規模集合建造物の冷暖房や給湯を供給しており、その数は増加している。GHP 利用を支持する諸条件の組合せにより、スイスにおける GHP 活用は国際的にも最高レベルとなっている。

キーワード:成長トレンド、普及の要因、技術開発、冷暖房、大規模集合建造物

1. 成長の動向、成功の要因

地中熱ヒートポンプ(GHP)は、世界で最も急成長している再生可能エネルギー利用法の一つであり、また導入国数の増加という意味で、地熱技術の中で間違いなく最も成長が著しい分野である。1995、2000、2005、2010年の世界地熱会議の機会に、John Lund 等は関連する統計をとっている。図1(片対数表示)が明確に示す通り、世界の年間成長率は 20%と指数的に成長している。

図1. 世界の地中熱ヒートポンプ(GHP)設備容量は年間成長率 20%の指数的増加。
Lund et al. (2010) より

GHP の導入数はますます増えているが、その進み具合は国によって大きく異なる。本文では、市場への浸透と拡大を導く成功要因を個々に取り上げ、議論する。表1に示す通り、地熱技術の他分野と比較すると、GHP の成功に必要な条件の数は絶対的に少ない。

表1. 各種地熱利用技術の成功要因の比較(成功の必要条件). Lund (2010) より

| 要 因 | 蒸気プラント | バイナリープラント | 直接利用 | GHP |
|---------------|--------|-----------|------|-----|
| 資源 | xxx | xx | x | 0 |
| 所有権 | xxx | xxx | xx | x |
| 許認可 | xxx | xxx | x | 0 |
| 環境 | xxx | xx | x | 0 |
| 資金 | x | xx | xxx | x |
| リスク | xxx | xx | x | 0 |
| 専門知識 | xxx | xxx | xx | x |
| 市場 | xxx | xxx | xxx | xx |
| ヒーロー・指導者 | xx | xx | xxx | x |
| トランスマッショーン | xxx | xx | x | 0 |
| パブリック・アクセプタンス | xxx | xx | x | 0 |

xxx: 重要、xx: やや重要、0: 無関係

所有権は全く問題ではなく、土地所有権が明らかな建物に GHP が導入される。重要なのは、建設者または所有者が、GHP 技術のメリット(コスト、環境配慮など)を認識していることである。地熱を直接使用する他の形態(地域暖房など)と異なり、地熱利用の意義を確信してあらゆる段階での障壁に立ち向かう“地元のヒーロー”は不要であり、GHP に必要なのは知識のある建築家、設計者、導入業者等だけである。以下に、個々の成功要因に関して詳細に述べる。

生産の持続可能性

GHP が広く受容されるための前提条件は、信頼性の高い長期的な運転である。GHP の持続可能性は、さまざまな熱源(水平および垂直方向の熱交換パイプ、地下水)に関する(Rybach and Mongillo, 2006)。GHP の長期信頼性を強固なものとするため、理論的研究や実証研究が行われてきた(Rybach et al., 1992; Rybach and Eugster, 1998; Eugster and Rybach, 2000; Signorelli et al., 2005)。適切に設計された GHP システムは、数十年に渡って全く問題なく作動することが経験的に示されている。

資金

資金は、もちろん重要な問題である。GHP はかなりの初期投資(一般的な化石燃料システムより高い)を必要とするが、全体的なパフォーマンスが有利である。導入コストが高いのは、地下工事(通常は掘削および坑井仕上げ)及び機材(ヒートポンプ、コネクション、分配設備)のためである。一方で、運転コストは一般的に低い(主にヒートポンプと循環ポンプの電力だけ)。

価格とコストは確かに最重要事項である。その意味で、GHP にとって2つの要素が重要である: 1)燃料の燃焼不要、2)補助金。つまり、GHP の運転コストは著しく低く、また環境面でのメリットから多くの国で補助金措置がなされている。GHP システムの経済性は、従来型化石燃料システムと比較した時に最もよく解る。比較のため、150 平米の一戸建て住宅で、7.5kW_t 容量の暖房システム(暖房ニーズ)がある場合を考えよう。1シーズンで 2,400 時間の暖房を仮定すると年間エネルギー需要は 65GJ。その場合のガスや灯油ヒーターとの比較を表2に示す(Auer, 2010)。

表 2. 暖房技術のコスト比較:1) GHP/BHE (GHP ヒーターと地中熱交換器)、2) ガス凝縮ヒーター、3) 灯油ヒーター。数字は Auer (2010) より

| コスト項目 | GHP/BHE | ガスヒーター | GHP/BHE* | オイル ヒーター |
|-----------------|------------|-----------|------------|------------|
| 投資コスト | 18,000 ユーロ | 8,800 ユーロ | 18,000 ユーロ | 12,500 ユーロ |
| 高い GHP 投資 | 9,200 ユーロ | | 5,500 ユーロ | |
| 年間の運転・メンテナンス 費用 | 680 ユーロ | 1,720 ユーロ | 680 ユーロ | 2,000 ユーロ |
| GHP 節約/年 | 1,040 ユーロ | | 1,320 ユーロ | |
| 原価償却期間 | | | | |
| ・金利払いなし | 9年間 | | | 5 年以内 |
| ・6%の金利で | 13年間 | | | 5 年以上 |

*BHE:地中熱交換器

もちろん、石油、ガス、電力の価格が将来どうなるかわからない。通常、電気料金は灯油・ガスの価格よりも大幅に遅れて増加すると考えられる。上記の比較では、CO₂排出量(すなわち CO₂税)は考慮されていない。暖房への CO₂税は、すでにいくつかのヨーロッパ諸国で導入されている。この傾向は続くと予測され、GHP システムの利点は増加するであろう。また、上記の比較は暖房についてのみ行ったものである。GHP システムの大きな利点は、同じ機器を夏の冷房にも利用できる点であり、地球が温暖化した場合の真の利点となる。

同様に重要なのは、電力供給事業者(これは多くの場合、自治体が所有している)によるヒートポンプシステムへの補助金である。投資段階での直接補助金や、家庭用および中小ビジネス用の電気料金を介しての間接的補助が一般的である。ヒートポンプシステムは、灯油暖房などに比べて多くの電力を使用するため、電力供給者が補助金を支払っても採算が合うのである。

専門知識

GHP システムの適切な設計については、上記で既に議論した。同様に、インストール段階での専門的基準が重要である。GHP の 3つの主な循環(熱源、ヒートポンプ、冷暖房ユニット)の考慮と最適化は、計画の段階に属している。ヒートポンプと冷暖房装置(水媒体またはファン・コイル・システム)は、商品棚からすぐに購入することができる一方、GHP 坑のインストール(掘削、坑井仕上げ)は高度な作業であり、品質保証が必要である。いくつかの国(アメリカ、カナダ、EU 加盟国)では、掘削とインストールの専門的基準が証明書に記載されている。ドイツの VDI 4640 またはスイスの SIA 384/6 のような工学規範によって、従うべき基準を定めている。

ライセンス、環境上の利点

一般に、GHP のインストールには許認可が必要である。ほとんどの国で、水保護機関(ローカル、地域、国家)が許認可を行っている。制度は国によって異なり、場合によっては同じ国内でも異なる。通常、いくつかの様式に記入し、提出する必要がある。通常、許可の手続きは単純で容易である。ただし、地下水が保護されている地域では、GHP システムのインストールが制限的であるか禁止されているのが一般的である。

燃焼プロセスが無いため、GHP はほとんどあるいは全く温室効果ガス(GHG)を排出せずに動作する。化石燃料による電力で動作する GHP は、化石燃料ボイラーに比べて少なくとも 50% の CO₂排出量を削減する。水力発電や地熱発電のような再生可能エネルギーによる電力で GHP が稼働する場合は、排出量削減は 100% にも達する。

CO₂排出量削減は、地球温暖化軽減のためのあらゆる対策中で、中心的な手段である。ここで、実際の排出量削減と、追加的排出の回避とに關し、明確な區別を行う必要がある：新しい GHP の導入は、追加的 CO₂排出を避けるだけで、実際の排出量削減にはならない。化石燃料システムを GHP に交換する場合には、実際に排出量が削減される。化石ベースの電力で動作するエアコンが GHP システムに置き換えられる場合も、明らかに排出量が削減される。

知識、アウトリーチ

GHP 開発の最も重要な原動力は、純粹に知識とノウハウである。さらに、さまざまな応用と幅広い理解、高度な品質保証と成功している実証設備が必要である。建築家、エンジニア、建築工学者らは今日、GHP システムの設計とインストールに、ますます精通してきている。掘削会社は、高速掘削の実現に必要な特殊機器を持っている。ヒートポンプ推進協会は広報キャンペーンを行い、新技術—多くの国では今なお新技術である—のメリットに関するニュースを発信する。これらすべて

の事項により、過去数年間に GHP 市場は壮大な拡大をとげた。特に、わずか数年前には導入事例が全く無かつた国での市場拡大が起きている。

2. 技術動向

現在、さまざまな分野で多くの新しい開発が行われている。ここでは、以下をカバーする：1)暖房用および冷房用として増加する GHP のアプリケーション(特に穏やかな気候で)、2)エネルギー・パイアル・システム(訳注:熱交換杭)のような革新的ソリューション、および3)の大規模導入を供給する傾向。

GHP による冷暖房

地下の巨大な再生可能貯留容量を利用すれば、熱貯蔵だけでなく、廃熱も可能である。穏やかな気候下での夏の地下約 15m 深は外気よりも大幅に冷たい。したがって、相当な熱量を地下で熱交換し、そのまま排熱することができる(夏には建物から抽出した熱を地下に貯蔵し、冬は地下から抽出した熱を建物に供給する)。システムの熱容量は、体積以外には、導入サイトの熱特性と水理特性に依存する。これらは、システムの規模を考える際に慎重に検討する必要がある。夏には、ほとんどの時間はヒートポンプをバイパスし、熱媒体となる流体を地下の BHE と屋内配熱装置(例えば床パネル)の間で循環させることができる(訳注:寒冷地を除き日本では通常、冷房時も常時ヒートポンプを使う)。この方法によって、熱が建物から集められて地下に貯蔵され、次の冬には抽出される(“自由冷却”)。自由冷却だけでは冷却が不十分なときは、通常(暖房)の動作と逆(冷却)のモードでヒートポンプを運転することができる。

エネルギー・パイアル・システム(基礎杭方式)のような革新的ソリューション

地中熱交換器(BHE;通常 GHP の地下熱源装置として最も頻繁に使用される)を、(新しい)建物の下に埋設する方法が、ますます一般的になっている。一方、エネルギー・パイアルは、熱交換器の配管を装備した基礎杭である。基礎杭は、軟弱地盤での建造物に導入される。エネルギー・パイアルでは、季節によって地下を熱源またはシンクとして使用する。システムには慎重な設計が必要であり、特にパイアルの間隔、地盤の熱特性、パイアル内温度変化による静的影響可能性を考慮する必要がある。図2は、エネルギー・パイアルの導入の様子とシステムの模式図を示している。

図2. 建物下の熱交換坑のスケッチ(左)、熱交換坑への熱交換管の挿入(右)

1. 熱交換坑、2. 接続部、3. 配熱装置、4. 基礎板、5. ヒートポンプ

エネルギー・パイアル・システムを取り入れた施設の代表例は、チューリッヒ空港ターミナル E である。工学的に良く設計されている。技術的なデータは以下の通りである：

建物とエネルギー：対象となる床面積は 8,200 平米、必要な温熱供給は 3,020MW 時/年、冷房は 1,170 MW 時/年。エネルギー・パイアル：合計 440 本の杭のうち 310 本を使用、杭の長さ 30 メートル、直径は 0.9~1.5m。ヒートポンプ：加熱能力は 630kW で季節成績係数 3.9、冷却能力は 470 kW で季節成績係数 2.7。図3は、そのターミナルを示している。

図3. スイス・チューリッヒ空港のターミナル E:熱交換坑とヒートポンプによる冷暖房

GHP 付の大規模集合建造物

GHP の開発初期の頃には、ほとんどが一戸建て住宅用であったが、最近は、学校、工場、ショッピングセンターなどの大規模ビルや集合建築物にGHPシステムが使用されるのが一般的になっている。加熱用と冷却用の BHE 用地は通常、空間的に分離されている。典型的な例は、スイスのチューリッヒ近郊にあるヴァリセレンでのリヒティ開発地域(図4)であり、250 本の BHE がある。

図4. リヒティ開発地域のモデル(現在建設中)

リヒティの技術的データと利用のデータ:建設サイズ 72,000m²、住民 1,200 人、勤務者 2,500 人、居住地 35%、商用地 10%、サービス 55%。暖房 5GW 時/年、冷房 5 GW 時/年。BHE250 本× B 深さ 200m(合計長 50km)。総コスト 500 百万スイスフラン(≈450 百万米ドル)。

4. スイスの GHP サクセス ストーリー (訳注:3. が抜けているが原文のまま)

Lund et al.(2010)による世界の地熱直接利用データの集計によると、スイスは先進的な国である。GHP の面積密度(地表面積あたりのユニット数)が世界最高である。国中に均一に設置されているわけではないが、2010 年には単位面積 km²あたり 2.5 以上のユニット(標準サイズ: 12 kW_h)が稼働している。2000~2010 年の期間の平均成長率は、年間約 20% である。今日では、多くの集合建造物で、数百本の 100 BHE が導入されている。

どうしてこのようになったか? 促進要因の多さが、このような開発につながった。まず、既に 1970 年代後半に、スイス連邦エネルギー局は、寛大にも理論と実験の両方の基礎研究を支援した。これにより、主な運転パラメータが確認され、長期的なシステム信頼性の前提条件が決定され、標準化と品質保証が確立された。また、有利な法的環境(ライセンス)とさまざまな資金源からの補助金(少なくとも 1997 年まで)が役立った。スイスの GHP 成功についての第1報は、Rybäch and Kohl (2003)を参照のこと。

主要な結果は、典型的な学習曲線つまり先行コスト(GHP システムをインストールする際の主な障壁)の減少である。図5は、著しい減少(24 年間で 100%以上)を示している。

図5. GHP システムの導入コストは時間と共に大幅に減少(典型的な1戸建用)

HP: ヒートポンプ <http://www.fws.ch> より

GHP-BHE システムの能力を左右する最も重要な特性の1つは、地下の熱伝導率である。必要なデータベースを保護するため、広範な測定キャンペーンが実施されている。その結果、スイスの人口が集中しているほとんどの地域(アルプスの北側)の任意の場所について、インターネット上のカタログから数値データを取得することができる(Leu et al., 1999)。市場普及のために最も重要なことは、顧客からの信頼である。GHP システムが長期的に高い信頼性の機能を発揮してきたことが、デモンストレーションされている。Rybäch et al. (1992) およびその後の Rybäch and Eugster (2010) は、基本的な調査研究により、適切な設計の GHP システムが長年に渡って完全に持続可能な形で動作することを明らかにした。

計画上の必要事項と、GHP システムのインストール・運転に関して、多くの文書が作成されている。工学的規範 SIA 384/6(2010)、エネルギー・パイロットブック SIA D0190(2005)、ライセンス・

アプリケーション・ガイドブック BAFU(2008)などである。これら及び他の多くの有益な参考資料(後者は www.geothermie.ch からダウンロード可能)は、すべてドイツ語である。

スイスのヒートポンプ推進協会による FWS (www.fws.ch) は、品質保証に役立つ。この協会は、ヒートポンプの品質ラベルの発行以外にも、BHE 掘削企業の認定を行っている。BHE の掘削長は、長年に渡って驚く速さ(年間 20%)で増加している(図6参照)。改修工事によるインストールの増加は、CO₂ 排出量を実際に削減するという意味で、特に有益である(新たな導入は、追加的な CO₂ 排出量を避けるだけで、実際に削減してはいない)。

最後になるが、EKZ(チューリッヒ州) や EWZ(チューリッヒ市)のような電力供給事業者の商業的役割は、特筆に値する。彼らは「エネルギー契約」(会社が加熱・冷却・温水用 GHP システムのインストールと運転を行い、消費者は毎月の電力料金を払うだけ)を提供している。機器は会社財産として残るが、通常は一定期間の使用後、建物の所有者が買い取ることができる。

図6. 2001 年以降のスイスでの熱交換井の掘削長(出典:www.fws.ch)。2010 年には 2500km まで増加。既存建物への GHP 導入用の掘削が増すことは、化石燃料システムを除去し、実際に CO₂ 排出量を削減するので、特に歓迎すべき。

5. まとめ

GHP はさまざまな国で、異なる速度で導入が進んでいる。いくつかの要因が導入スピードを上げる:これらの要因のほとんどについて本文で述べた。

GHP の技術は今なお開発されているが、今日すでに大規模集合建造物の冷暖房や給湯を供給しており、その数は増加している。

GHP 利用を支持する諸条件の組み合わせにより、スイスでの GHP 活用は国際的にも最高レベルとなっている。日本を含む多くの国々でも、同様の開発が進むことが望まれる。

謝辞

スイスでの国際的に高いランクの GHP 導入は、十年規模に渡る Swiss Federal Office of Energy(スイス連邦エネルギー局)の援助なしでは達成し得なかつたであろう。

参考文献(以下略)