

平成 24 年度廣川研究助成事業報告 (2)

スイスにおける地中熱システムの現状

吉岡真弓¹⁾

1. はじめに

地中熱利用ヒートポンプ (GHP) システムは、欧米を始めとして、世界中で普及拡大が進んでいる再生可能エネルギー利用法の 1 つである。CO₂ の削減や電力使用量の低減が各国で求められる昨今、高い省エネルギー性能が見込まれる GHP システムの普及は、日本においても喫緊の課題である。日本における GHP の導入数は、2011 年以降急速に増加しているが、未だ 1000 件程度である (環境省、2012)。

欧米や中国では、日本と比較し GHP システムの普及が進んでいる。特にスイスでは、GHP システムの面積密度が世界最高であり、また、2000 年から 10 年間の年間成長率は約 20% と GHP システム先進国であるといえる (Rybach, 2013)。なぜスイスはこれほど GHP システムが普及したのか？ また、日本において今後、GHP システムを普及させるためには何が必要で、どのような研究を進めるべきであるのか？ この疑問に対するヒントを探るため、2012 年 2 月に、GHP システム研究の権威であるチューリヒ工科大学 (ETH Zürich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich) の Ladislaus Rybach 教授のもとを訪問した。本稿では、この訪問によって知り得た、スイスにおける GHP システムの現状や、GHP システム導入のための制度などについて報告する。

2. スイスにおける地中熱システム導入に関する制度

Rybach 教授の案内で、スイスにおける GHP のパイオニアであり、キーパーソンでもある Walter J. Eugster 博士を訪問した (写真 1)。Eugster 博士は GHP システムの導入・施工に関する会社を経営しながら、連邦政府による GHP システム関連の仕事にも従事している。Eugster 博士には、彼自身が設計した、高速道路の陸橋に導入されたヒートポンプを使用しないタイプの融雪システム “SERSO” や、スイスでの GHP 管理システムについて話を聞くことがで

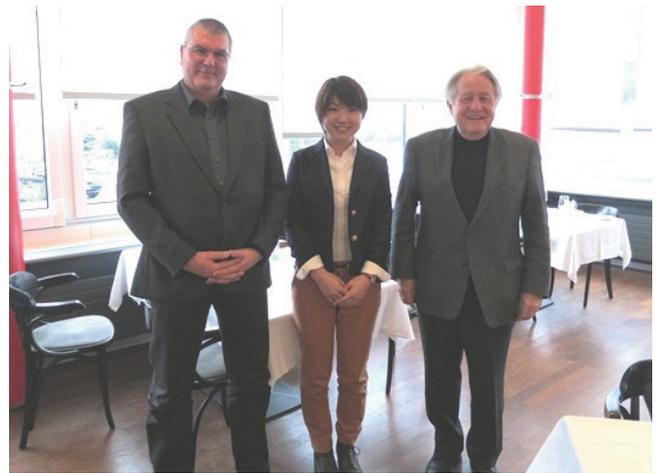


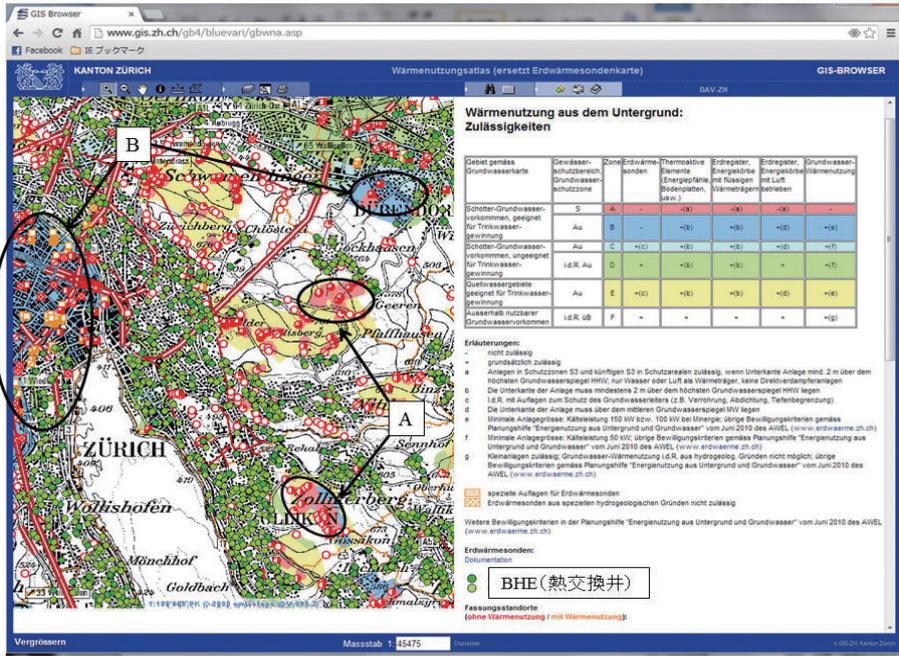
写真 1 今回の訪問でお世話になった Rybach 教授 (右) と Eugster 博士 (左)。中央は吉岡。

きた。ここでは、後者について詳しく報告する。

まず、Eugster 博士が見せてくれたのは、スイスにおける熱交換井 (BHE: Borehole Heat Exchanger) の設置位置を閲覧できる Web ページである (第 1 図)。第 1 図はチューリヒ周辺の BHE の設置分布を示したものである。この Web ページは、GIS をベースとして、既存の BHE の設置位置や地下水の保護地域を、誰でも見ることができる。飲料に適した地下水が利用できる地域 (図中、A、B で示した地域) では、基本的に BHE を設置することはできない。スイスでは、現在平均で 1 km² あたり 2 つの GHP システムが稼働しているという。なぜ、このようなマッピングを行うことができるのか？ それは、スイスでの厳しく細かな GHP システムの設置・管理に関する取り決めがあるためである。GHP システムの施工会社は、まず、国によって定められたライセンスを取得する必要がある。そして、BHE を設置する際には、SIA (スイスの建設・環境技術に関する協会) が取り決めている地中熱に関するマニュアル (Swiss Society of Engineers and Architect, 2010) に従わなければならない。SIA の地中熱利用に関するマニュアルは、ドイツの地中熱に関するマニュアルである VDI (Verein Deutscher Ingenieure, 2001) を参考に作成されている。その詳細なマニュアルに従うと共に、実際に施工する際には多

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード：廣川研究助成金、地中熱利用、スイス、データベース、熱交換井



第1図 スイスにおけるGHPシステムの導入状況を示すWebサイトの画面 (http://www.gis.zh.ch/gb4/bluevari/gbwna.asp 2013/06/19 確認) に加筆. チューリヒ周辺の熱交換井BHE分布(丸印)や地下水の保護地域を色分けして示している. 図中A, Bで示した地域等は飲料に適した帯水層がある地域を示している. 白色の地域は, 地下水が利用可能ではないため, GHPシステム設置が許可されている.

く書類を作成し、提出する必要がある。その書類は、スイス連邦局によって作成されており、施工方法や申請書の書き方などを含め、その内容は50ページにも亘っている。この中に14ページの申請書が含まれており、建物の持ち主や施工会社、設置位置、ボーリング柱状図などの情報を連邦局に提出しなければならない。この申請書による届け出を基に、第1図で示したBHEマップが作成されている。これらのGHP情報の管理組織は、スイス連邦局に属する地下水保全の部署の下に置かれている。このガイドラインと申請書の形式はEugster博士によって作成されたものである。

Rybach教授とEugster博士によると、GHPシステムの普及拡大には、詳細なマニュアルを決めることがカギになるという。マニュアルには、熱交換器や充填剤(熱交換井内で熱交換器と孔の間を充填するもの)の配合まで詳細に決められているため、それらの製造会社が安定して製品を製造・販売することができる。このようにマニュアルによりGHPシステムに関わる製品を規格化することはGHP市場を増強させ、価格の低減や普及拡大に繋がると強く話されていたことがとても印象に残っている。

3. チューリヒ周辺における地中熱利用システムの導入事例の見学

次に、スイスにおいて地中熱利用システムの設計を行っているGeowattという会社を訪問することができた。この会社は、Rybach教授の学生であったThomas Mège博士が10年ほど前に立ち上げた会社であり、現在は10数名の方が働いている。今回の訪問では、Mège博士とSarah Signorelli博士からGeowatt社で設計を行っている地中熱利用システムや地下熱物性データベースについて聞くことができた。

まず、Geowatt社が設計・管理しているいくつかの地中熱システムについて説明があった。1つは、BHEを利用した小規模融雪装置についてである。このシステムでは170mのBHEに循環ポンプのみを取り付け、ヒートポンプを使わず、地中との熱交換のみで、玄関のスロープの40m²を融雪している。循環用のポンプはマンホールの中に設置されており、見た目にもとてもシンプルなものであった。現在のスイスにおけるBHE掘削のためのコストは、1mあたり60ドル程度であるが、深度250m程度を境界にボーリングマシンが変わるため価格も変化する。250m以浅のBHEの場合、4m²程あれば掘削が可能なハンマー型の掘削機を使用できるため、既存の住宅であっても比較的容易にBHEを設置することができる。

次に、Signorelli博士が設計を担当している2つの現場を見学することができた。1つ目は、今年中に完成予定のオフィス用大型ビルディングである(写真2)。このビルでは、深さ150mのBHEを30本掘削し、ビル全体の冷暖房をGHPシステムで賄う設計になっている。写真3は地下の配管設備の一部である。30本のBHEからの循環液は、写真3の太いパイプで一括され、ヒートポンプに送られる。オフィスの冷暖房やサーバーームの冷房など、



写真2 GHPを導入する大型ビルディングの工事現場。オフィスとして使用される。

必要に応じて熱量を分配できるシステムになっており、ビル全体のトータルの抽出熱と排熱が年間で収支が取れるように設計されている。設計には、Geowatt社の開発したソフトウェアを使っており、1時間毎の熱収支の計算を15年間分言い、夏・冬のバランスが取れるようにデザインされている。スイスでは、事前にこのようなシミュレーションを利用した設計が一般的だそうだ。建物が完成した後のモニタリングは困難な場合が多いという。これは、モニタリングを行うには費用がかかること、また、建物の所有者が移る場合に契約などが面倒になるためクライアントの許可が出ないためらしい。

2つ目に見学したところは、チューリヒ市内の共同住宅である。この共同住宅は、居住者たちが共同で出資し購入したものだという。そのため、GHPシステムの利用についても、住民たちが自ら提案し、導入を決めたのである。その共同住宅ではGHPを設置する工事を行っている最中であり、合計で15本のBHEを掘削しているところであった(写真4)。住宅の周囲には、他の集合住宅などもあり、決して広々としたものではなく日本でも見られるような住宅集中地域であったが、この例のように新規のGHPシステムの導入が進められているのである。

見学の移動中に、Signorelli博士に「スイスにおける今後のGHPの課題は何か」と尋ねてみた。Signorelli博士は少し考えて、「BHEの施工会社を管理することではないか」と答えてくださった。もし私たちが家にGHPシステムを導入したいと思っても、どの会社を選べばよいかかわらず、値段だけで決めてしまうかもしれない。そんな場合でも、クオリティを維持できるようにGHPシステムに関連する会社をきちんと管理するシステムが必要だと言っていた。



写真3 写真2のビルディングの地下に設置されたGHPシステムの配管の一部。30本のBHEから集められた循環液がここで一つにまとめられ、ヒートポンプへ送られる。



写真4 共同住宅におけるBHEの掘削現場。周辺は住宅が密集している地域であるが小型の掘削機によって掘削が行われている。

スイスでもまだ課題は残されているようである。

4. 地中熱利用に関するデータベース

4.1 地下熱物性データベース「SwEWS」

Mégel博士には、スイスの地下熱物性データベース「SwEWS」(Leu *et al.*, 2006) について詳しく話を伺うこ

とができた。このソフトウェアでは、位置情報を入力すると、その地点の地質データから、平均的な地下熱物性を自動的に計算することができる。地質分類に関しては、3つの地質カテゴリに対し、5つの岩相がそれぞれ与えられており、合計 15 種類の分類があるという。このデータベースの中には、基本的には統計処理されたデータのみが収録されており、実際の測定データは参考値として閲覧することができる（後日、データベースの構築に関するキーパーソンである Ueli Schärli 博士に話を伺うことができたので、それについては後述する）。このデータベースでは、地下水に関する情報も入力するが、それは参考に過ぎないという。なぜなら、基本的に地下水が流れているようなところや地下水が豊富な地域は地下水保護地域に指定されており、GHP システムの設置ができないためである。スイスでは、地下水は貴重な水資源であり、地下水保護地域が定められているからこそ、安心して GHP システムの設置を行うことができるのである。

このデータベースは、誰もが使いやすく有益であるが、一番の問題は、何も考えなくても「答え (= 熱物性値)」が出てしまうところにあると Mégel 博士はいう。本来であれば、データベースによって得られた物性値が地質と整合しているかについて地質の専門家に相談することが必要である。これらのデータは、あくまで設計の際の参考値であることを認識しておかなければならないのである。

4.2 データベースのための熱物性の測定

地下熱物性データベースの基礎となるデータの収集や研究は、Schärli 博士と Thomas Kohl 博士が Rybach 教授の下で行ったものである。Rybach 教授の案内で Schärli 博士を訪問した。

オフィスには、様々な測定器や岩石が並べられていた。それらの岩石は、GHP システムに関連する会社などから測定を依頼されたものらしい。岩石試料は、ボーリングコアや辺長が数 10 cm の直方体状の塊、また掘削時に生じた碎石などである。写真 5 は熱伝導率の測定に使用されている測定装置である。この装置では、中央の円盤の下に岩石を置き、上部から熱を与えることで熱伝導率を測定する。Schärli 博士によると、岩石試料を 2 方向で測定することが重要であるという。これは、岩石の異方性により、熱伝導率が平均で 1.2 ~ 1.4 倍程度異なるためである。Schärli 博士は学生時代に、スイスの様々な地域に赴き、200 サンプル以上の岩石を持ち帰り、熱伝導率等の物性を測定し、それらの熱物性の測定方法や地質・岩



写真 5 熱伝導率測定装置。中央に岩石試料を挟み、上部から熱を与えることで熱伝導率を測定する。

相との関係についての研究に従事された（例えば、Leu *et al.*, 1999）。その後、Rybach 教授や Schärli 博士を中心とした ETH Zürich の Geothermics and Radiometrics 研究グループは、様々なボーリングコアのサンプル、石油開発のための坑道やトンネルのサンプルなど、2335 のサンプルから熱物性を中心としたデータを収集し、データベースを構築した。そのデータベースの中には、サンプルの採取場所、用途（ボーリング試料なのか、トンネルなのか、など）、標高、岩相、地質、乾燥状態の熱伝導率、湿潤状態の熱伝導率、異方性、密度、熱容量などが整理されている (Schärli and Kohl, 2002)。これらのデータを基に、前述したチューリヒおよびその近郊の熱物性データベースが構築されたのである。

5. おわりに

今回の訪問では、スイスにおける GHP システム普及のキーパーソンから直接 GHP システムについて話を聞くことができ、また、実際の施工現場を見学するなど、大変有意義な情報を得ることができた。さらに、様々な参考資料も提供していただいた。資料のほとんどはドイツ語であり翻訳には時間を要するが、これらは実際に現地へ赴くことで入手できた貴重な資料であると考えている。

スイスと日本では、地質や気候などの自然環境や電力供給方法などの社会システムが異なっているため、スイスにおける GHP システム普及のプロセスをそのまま日本に適用することはできない。しかし、そのエッセンスを学ぶことはできるであろう。Rybach 教授は、日本でも GHP システムのきちんとしたマニュアルを作り、GHP システム

に必要な材料や施工方法が規格化されていれば市場は拡大する、と強調されていた。また、日本の地質に適した地中熱のための地下熱物性データベースを構築することも、日本における GHP システム導入拡大のためには重要である。スイスで作られたデータベースも 1 つの参考にしながら、日本に合った地中熱データベースを構築する必要があると考えている。

訪問の最後に、Schärli 博士の案内で ETH Zürich のキャンパスとそこにある地球科学に関する博物館である“focusTerra – Erdwissenschaftliches Forschungs – und Informationszentrum der ETH Zürich”を見学することができた(写真 6)。博物館内には、スイスを中心とした周辺地域の岩石や地質図を始め、地震、火山などの地球科学に関する情報についても詳しく説明・展示がなされていた。この博物館では、研究者の居室・研究室と展示スペースが同じフロアに置かれており、研究者や学生と博物館への来訪者が顔を合わすことができる。このようなオープンな環境は、学生や来訪者にとっても、また、研究者にとっても刺激になるのではないかと感じた。ETH Zürich のキャンパスには他にも数種の博物館があり市民に開放されている。多くの店舗や商業施設が休みになる日曜日には、閑散とした市街地とは対照的に、大学キャンパス内の博物館は家族連れや小中学生で賑わっていたのが印象的であった。

謝辞：本訪問に際し、ETH Zürich の Ladislaus Rybach 教授には、事前の調整を始めとしてあらゆる面で大変お世話になりました。また、貴重な時間を割いて面会して下さった Eugster 博士、Mégel 博士、Signorelli 博士、Schärli 博士、および、誌面の都合上紹介できなかったが、太陽エネルギーと GHP のハイブリットシステムについて説明して下さった ETH Zürich の Hanasjurg Leibundgut 教授と学生の Jose Antonio Sanchez 氏に記して謝意を表します。また、Rybach 教授を紹介して下さり、渡航前にも様々なアドバイスをくださった地圏資源環境研究部門地圏環境評価研究グループの安川香澄グループ長に御礼申し上げます。

本調査は、地質調査総合センターの廣川研究助成の援助により実施することができました。このような機会を与えてくださった関係者のみなさまに深く御礼申し上げます。

文 献

環境省 (2012) 地中熱利用ヒートポンプシステムの設



写真 6 ETH Zürich にある地球科学に関する博物館“focusTerra”。

置状況調査の結果について、平成 24 年 11 月 13 日 環境省報道発表資料、<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15945> (2013/06/17 確認)。

Leu, W., Rybach, L., Schärli, U., Mégel, T. and Keller, B. (1999) New thermal property data base of the Swiss Molasse Basin sediments: integrating wireline logs, cores and cuttings. *European Geothermal Conference Basel '99 Proceedings*, 2, 213–220.

Leu, W., Mégel, T. and Schärli, U. (2006) PC-Programm für die Berechnung geothermischer Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0 – 500 m) Benutzerhandbuch zu Programm SwEWS (Version 2.0). *Bundesamtes für Energie*, 37.

Rybach, L. (日本地熱学会国際交流委員会訳) (2013) 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—. *日本地熱学会誌*, 35, no. 1, 35–40.

Schärli, U. and Kohl, T. (2002) Archivierung und Kompilation Geothermischer Daten der Schweiz und Angrenzender Gebiete. *Geophysik*, NR.36.134.

Swiss Society of Engineers and Architect (SIA) (2010) Erdwärmesonden. *SIA 546384/6*.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2001) Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. *VDI 4640*, 43.

YOSHIOKA Mayumi (2013) Report of the Hirokawa Research Fund in the 2012 fiscal year (2) : report of current situation of Ground Source Heat Pump System in Switzerland.

(受付: 2013 年 6 月 19 日)