

オスロの地熱エネルギー利用 (33rd IGC巡検No.57報告)

玉生 志郎¹⁾・森下 祐一²⁾

1. はじめに

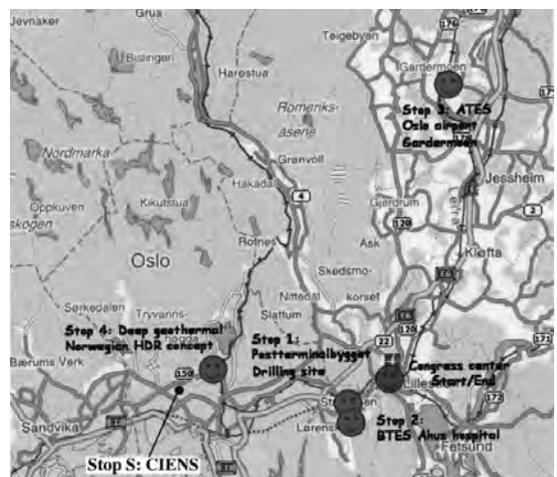
2008年8月にオスロで第33回 International Geological Congress (33rd IGC) (第33回国際地質会議)が開催された。その際、会議の中日にあたる8月10日(日)にジオ・エネルギー(大地のエネルギー)という地質巡検No.57が開催された。ここでジオサーマルと呼ばずにジオと称しているのは、高温の地熱ではなく低温の地熱を対象にしているためと思われる。今回、案内された地熱エネルギー利用施設は、いずれもバルト楕状地において古生代に形成されたオスロ・リフトに位置するものである。バルト楕状地の平均的な地殻熱流量は51mW/m²で、大陸の平均値(65 mW/m²)に比べても小さい。そのような冷たい場所で、どのように地下の熱が利用されているかは、大変興味深い。そこで、巡検で入手した情報を基に、その内容をここに紹介することとした。

巡検ガイドブックによると参加者は29名だが、著者の一人(森下)はこのグループに入らず別コースに参加したので、その内容を第4章の最後に記す。実はこの巡検No.57は当初8月7日に予定されていた。そのため、8月10日には別の巡検に申し込んでいたところ、IGCのスケジュール調整の結果、2つの巡検が同一日の8月10日になってしまった。巡検リーダーの Midttømme 博士にその旨の電子メールを出したところ、当初予定していた8月7日にも巡検を設けてもらえることになった。結果としてこの別コースの巡検は私一人のために実施してくれたので、申し訳ない気持ちと巡検リーダーの責任を感じた。しかしながら、「遠いガーデモエン空港(4.3)と深部地熱プロジェクト(4.4)は申し訳ないけど割愛させていただき、その代わりにあるところに行きます」と言われた。この代替

スポットが結構興味深かったので、4.5で紹介する。

2. 概要

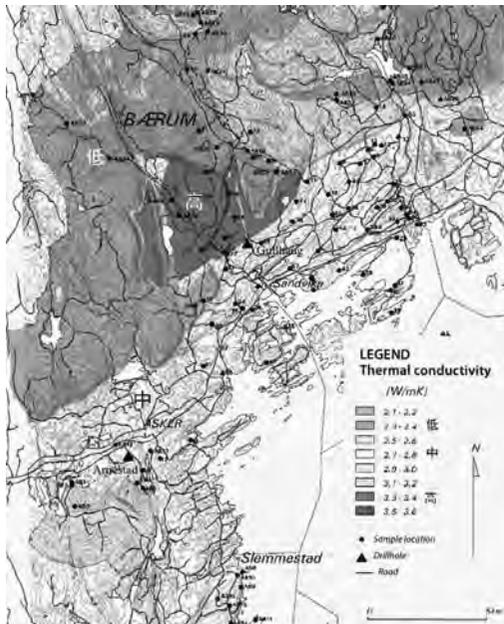
ノルウェーはバルト楕状地の一部に属し、基盤岩は先カンブリア系とノルウェーの南西から北方に延びる古生界カレドニア造山帯から構成されている。第四系は基盤岩の最上部に重なる地層で、氷河河川堆積物、河川堆積物、海成堆積物、氷成堆積物より構成される。リソスフェアは冷たく厚いため、地殻熱流量密度は大陸の平均値より小さい。にもかかわらず、北欧諸国は地熱の直接利用において、世界の先進的な国の一部となっている。アイスランドとスウェーデンは、地熱の直接熱利用で世界のトップ5位以内にある。その理由は、地盤熱源ヒートポンプ(ground-source heat pumps: 以下、GSHPと略記)を積極的に導入して、個人用と商業用の建物で冷暖房を行っているた



第1図 巡検での見学サイト位置図(NGI, 2008)。

1) 産総研 地質標本館
2) 産総研 地質情報研究部門

キーワード: オスロ, IGC巡検, 地熱エネルギー, 地中熱, 地盤熱, ヒートポンプ, 坑井熱交換装置, 地下熱エネルギー貯蔵施設

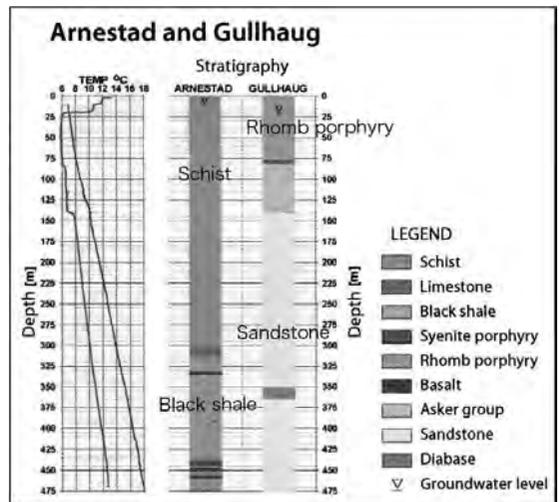


第2図 オスロ南西部の熱伝導率の分布図 (NGU, 2008).

めである。また、オスロ地区には大規模なGSHP設備が建設され稼働している。今回は、そのうち2ヶ所、Ahus (アヒュース)の大学病院 (第1図 stop 2)と Gardermoen (ガーデモエン) 空港 (第1図 stop 3)を訪れた。また、建設中の郵便ターミナルビルの坑内熱エネルギー貯蔵施設 (Borehole Thermal Energy Storage: 以下、BTESと略記) (第1図 stop 1)と、1999年に掘削された高温岩体開発用の5,000m坑井掘削地点 (第1図 stop 4)も訪れた。それぞれの詳細を第4章に記述する。

3. ノルウェー地質調査所の取り組み

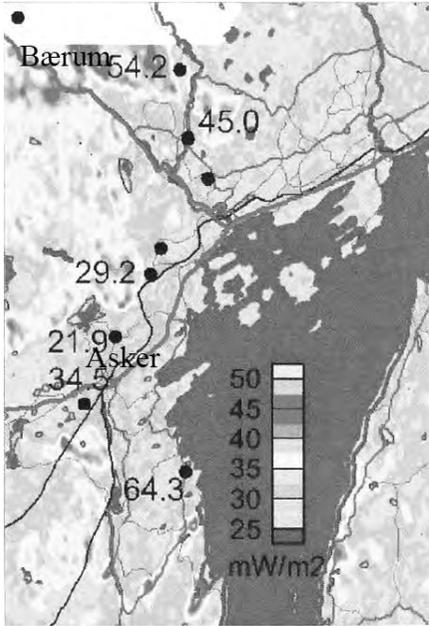
ノルウェー地質調査所 (以下、NGUと略記)は、大地からの熱エネルギー開発研究を、リーフレットの中で以下のように紹介している (NGU, 2008)。「エネルギーのコスト高と環境への配慮から、代替エネルギーへの関心が高まっている。そのような状況下で、地中の熱を熱源とするヒートポンプを使用した、大地からの熱エネルギー抽出がすすめられている。これらの試みの結果、適正な地質条件下であれば、十分経済的に代替できることが実証された。熱エネルギーは土壌中からも、粗粒の砂礫中の地下水からも、さらに基



第3図 オスロ南西部の坑井地下温度プロファイル (NGU, 2008).

盤岩中からも抽出できる。プロジェクトの成否の鍵は地域地質が握っている。NGUは表層被覆層のタイプと厚さ、岩盤の熱伝導率、地下の温度と地殻熱流量の変化について、その全体の概要を把握している。また、NGUは地方自治体やエネルギー供給会社などと協力して、上記のデータを公共用および私用として提供できるシステムを構築している。そして、データは新しいものを収集するよう心がけている」。

NGUはBærum (バールーム)とAsker (アスカール)において、岩盤からの熱抽出に焦点を合わせた先導調査を実施した。その結果、この地域の岩盤において熱伝導率、温度、地殻熱流量がどのように変化するかを明らかにした。第2図は熱伝導率の分布図である。それによるとBærumの中心部は3.3~3.4 W/mKと高いが、その周辺部は2.3~2.4 W/mKと低い。一方、Askerは2.7~2.8 W/mKと中程度である。第3図は深度475mの2本の坑井における地温勾配図を示している。第3図の右側の地質柱状図は、Bærum地域の南端部Gullhaugで掘削された坑井のもので、中下部は砂岩で、上部は菱長石斑岩より構成されている。地温勾配は相対的に高い。一方、第3図の左側の地質柱状図は、Asker地域のArnestadで掘削された坑井のもので、下部に黒色頁岩が挟まれている以外は全て片岩から構成されている。地温勾配は相対的に低い。この第2図と第3図から、以下のようなことが読み取れる。先カンブリア系の分布域で



第4図 オスロ南西部の地殻熱流量の分布図 (NGU, 2008).

は地温勾配は低いが、貫入岩の分布する地域では高くなる。また、古生界の分布域では中程度の地温勾配となる。第4図は地殻熱流量の分布図である。地殻熱流量は地球内部からの熱流量と地殻上部の放射性物質の崩壊熱に由来する熱流量との和に相当す

る。このデータは空中探査から求められたものである。BærumとAskerでは、ほぼ30mW/m²前後である。Bærumの北西部で45mW/m²前後と相対的に大きくなっている。

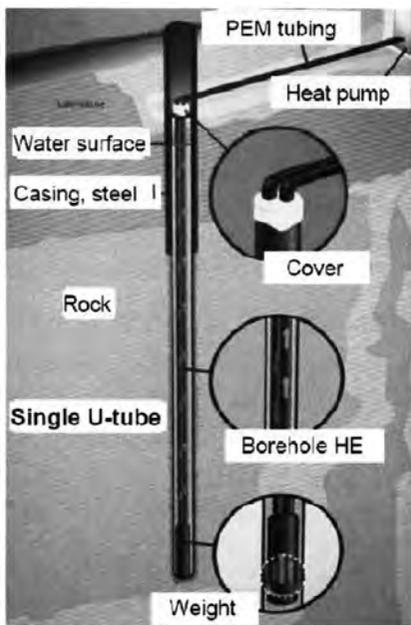
NGUは先導調査全体として、以下のような調査と測定を実施した。熱伝導率は87個の岩石試料で、自然放熱量は空中探査で、坑井温度は9個の掘削孔で、熱応答テストは8個の掘削孔で、それぞれ調査・測定された。これらのデータは、熱抽出にとって、どの程度の深さの坑井が適しているかを見極める資料として用いられている。

4. 見学地点の詳細

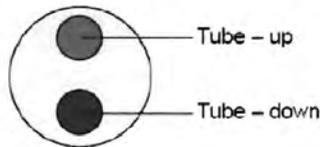
巡検で訪れた地点は第1図に示す通りである。以下、それぞれの見学地点の詳細を巡検案内書 (NGI, 2008) に基づいて紹介する。NGIとはノルウェー地質工学研究所のことである。

4.1 郵便ターミナルビルLorenskog (ローレンスコグ)でのBTES用掘削地点(第1図のstop 1)

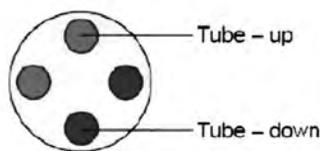
ノルウェーのGSHPシステムは1978年に最初のもので設置されたが、その後、急増して現在では15,000地点に達している。そのうち、300地点は大規模なGSHP(地盤熱源ヒートポンプ)とUnderground Ther-



Single U-tube – OD 40 mm



Double U-tube – OD 32 mm



第5図 坑井熱交換器としてのシングルおよびダブルU字管レイアウト (Stene, et al., 2008).



写真1 郵便ターミナルビルLorenskog (ローレンスコグ)のBTES建設状況。



写真3 郵便ターミナルビルLorenskog (ローレンスコグ)のBTES用シングルU字管。



写真2 郵便ターミナルビルLorenskog (ローレンスコグ)での坑井の掘削。

つの坑井で80W/m以上に達する。坑井が15本以上あるような大規模な施設においては、初期段階で熱応答試験 (TRT) を行って、岩石の熱伝導率や坑井の熱抵抗値を測定している。そして、坑井の範囲、深さ、本数、坑井間距離などを最適化している。

今回見学した郵便ターミナルビルは、ノルウェー南東部の Lorenskog (ローレンスコグ) に建設中の建物で、2010年完成を目指している (写真1)。完成すれば、従業員2,500人、床面積74,000m²となる。BTES方式の導入で、建物のエネルギー消費を60%節約できるとしている。工事中の現場では、数ヶ所で同時に坑井が掘削されており (写真2)、2ヶ月間で90坑井を掘削するペースである。掘削後に挿入されたシングルU字管は写真3に示す通りである。

mal Energy Storage (地下熱エネルギー貯蔵設備) のことで、以下、UTESと略記) である。ここで言う地盤とは表層被覆層とその下位の岩盤とを併せたものを呼んでいる。全体の90%以上は、熱源および熱貯蔵として結晶岩中に掘削された坑井を利用したU字管閉鎖循環方式の坑井熱交換装置 (第5図) である。スウェーデンは、すでに30万個以上のGSHPを設置して、この分野で世界をリードしている。エネルギー抽出のために結晶質岩で坑井掘削することに関しては、許可や行政指導を受ける必要はない。ノルウェーでの標準的な坑井熱交換装置は、深さ150-250m、直径140mm、シングルU字管 (孔径40mm) である。一つの坑井での平均的な熱抽出率は30-45W/mである。一方、より大規模なUTESでは、暖房と冷房の両方に用いる多くの坑井が掘削され、その熱抽出は一

4.2 Akershus (アークルスヒュース) 大学病院のBTES設備 (第1図のstop 2)

Ahus (アヒュース) に建設中の Akershus (アークルスヒュース) 大学病院のBTES設備は、2008年10月に操業開始予定である。この施設の総床面積は137,000m²である。この施設での年間の暖房は26GWhで、冷房は8GWhである。当該機関からの公式な発表では、この設備によって少なくとも全体使用量の40%程度を再生可能なエネルギーとして利用可能と見込んでいる。このBTES設備のために、すでに2006-2007年に深度200mの坑井が228本掘削された。そのため、この設備は2007年5月に操業を開始しているが、2009-2010年にフェーズIIの坑井掘削が計画されており、坑井を350本まで増やす計画も進行中である。そ



写真4 Akershus (アーケルスヒュース) 大学病院のBTES
設備用のエネルギーセンター。



写真6 Akershus (アーケルスヒュース) 大学病院のBTES
設備用の114坑井の集合管 (NGI, 2008) (Fortum
fjernvarme氏撮影)。



写真5 Akershus (アーケルスヒュース) 大学病院のBTES
用として設置されたデンマークSABROE社製圧
縮冷凍モジュール。



写真7 オスロGardermoen (ガーデモエン) 空港の全景
(NGI, 2008) (オスロ空港ASにより撮影)。

のエネルギー供給センターを写真4に示す。その中で稼働しているデンマークSABROE社の圧縮冷凍モジュールを写真5に示す。この地域の地表下5-40mは粘土層で覆われているが、その下は基盤岩の閃緑岩である。この粘土層が厚いほど、坑井掘削費はかさむ。ここではアンモニア冷却とヒートポンプを複合させた装置が設置されている。掘削坑井から多岐管への配管の様子は写真6に示す通りである。ここでのBTESとGSHPとの総工事費は19.5百万米ドルであった。ここでの掘削サイトは当初、病院の近くに計画されていたが、地震探査や試掘によって、粘土に充填された破碎帯が多く存在することが明らかとなった。そのため、300mほど離れた場所に移動となった。掘

削後、配管され、現在では坑井口元は完全に埋め戻されて、地表は元通り農地として利用されている。

4.3 オスロGardermoen (ガーデモエン) 空港 (第1図のstop 3)

以下の情報は、Eggen and Vangsnes (2005)に基づくものである。このGardermoen (ガーデモエン) 空港の地下には、ノルウェー最大の地下水貯留層が存在する(写真7)。1万年前の氷河性河川の三角州堆積物が帯水層となって地下水を涵養している。その地下水が、本空港の暖房と冷房に利用されているわけである。本空港の床面積は180,000m²で、建物は暖房、冷房のコストが高くなる巨大なガラス壁で覆われ

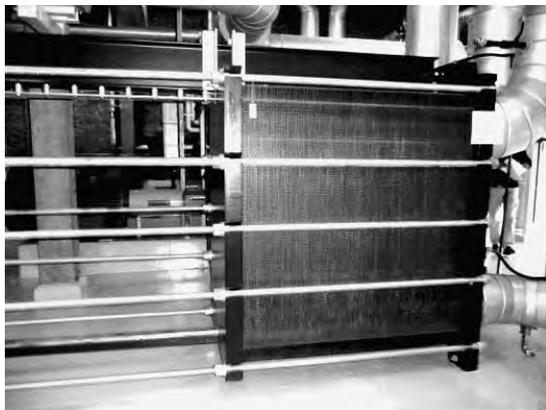


写真8 オスロ Gardermoen (ガーデモエン) 空港の熱交換器。

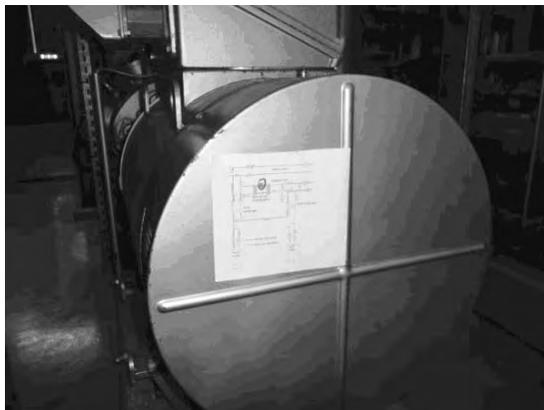


写真9 オスロ Gardermoen (ガーデモエン) 空港のヒートポンプ。

ている。

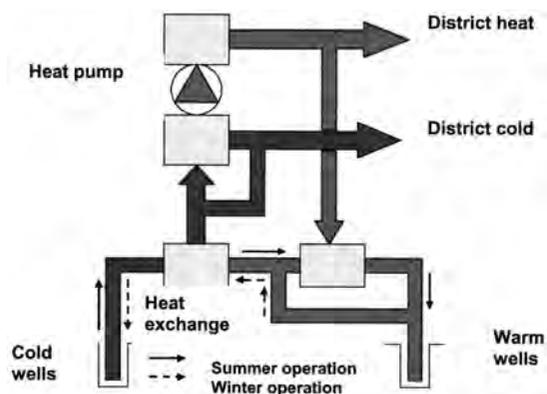
この空港の Aquifer Thermal Energy Storage (帯水層熱エネルギー貯蔵施設) のことで、以下、ATES と略記) では、9本の暖房用坑井と9本の冷房用坑井が使用され、いずれも直径450mm、深さ45mである。各坑井には、地下水ポンプと注入用のチューブが備わっている。そして、ヒートポンプと冷凍冷蔵庫システムに連結されている(写真8, 9)。夏季には冷たい井戸から冷房用に地下水が汲み上げられ、使用後の暖まった水は暖かい井戸に還元される。一方、冬季にはヒートポンプは逆向きに作動し、熱が地下水から抽出され、暖房用の流体に熱交換される。使用後の冷

水は冷たい井戸に戻される。その全体像を地下水流動概念図として示したものが第6図である。エネルギーセンターからの暖房と冷房は断熱された地域冷暖房パイプを通して、ターミナルビルやホテル、会議場などに送られる。また、熱は飛行場の融雪にも利用されている。熱は40,000m²の床面積の低温用暖房として、また、夏季の冷房用としても用いられている。

ヒートポンプの作動流体としては、アンモニアが用いられている。それは天然の物質であり環境に優しく、また、熱力学特性に優れているからである。一方、それは有毒であるため、エネルギー・プラントはターミナルビルから1km離れた場所に建設されている。

このATESシステムは空港の冷房必要量の全体をカバーする。そのうち25% (2.8GWh/年) は冷たい地下水の直接熱交換による冷房で、残り75% (8.5GWh/年) はヒートポンプを利用した能動的な冷房である。ヒートポンプからの追加的な熱供給は一般的には11GWhである。それらは4台の石油ボイラー (12GWh) を備えた熱エネルギーセンターおよびバイオ燃料 (17GWh) を備えた地域暖房プラントから供給される。

このATESシステムは1998年から運転している。坑井の管詰まりに関連した故障があったが、2004年には、18本中12本が作動した。そして、各坑井は計画上では1本あたり30m³/hの汲み上げとなっているが、実質、最大容量20-25m³/hで作動した。この結果、冷房能力は約50%減少した。空港は2-3年おきに各坑井の清掃を実施している。熱交換器は2年ごとに



第6図 オスロ Gardermoen (ガーデモエン) 空港の帯水層熱エネルギー貯蔵施設 (ATES) を利用したヒートポンプによる地下水流動概念図 (Eggen and Vangsnes, 2005)。

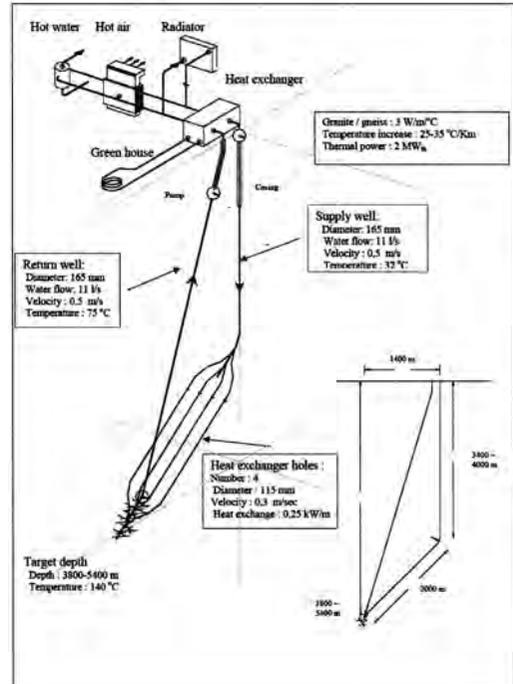


写真10 オスロでの高温岩体プロジェクトとして掘削された1,600m坑井の口元。

清掃している。ATEDシステムの総工事費は2.65百万米ドルで、従来の暖房・冷房システムよりも償還期間は4年以上短縮されると見込まれている。

4.4 深部地熱プロジェクト(第1図のstop 4)

ノルウェーでは、現在、地熱資源からの発電は行われていない。しかしながら、1999年には2MWの高温岩体のパイロットプラントがオスロの新州立病院で試みられた。その坑井の口元が写真10に映っている。タンクの左手の小さなパイプである。ここで言う「高温岩体」とは、日本で考えられているマグマ性のものではなく、地温勾配で温度が高くなった深部において熱交換を行って、100℃程度の熱水を得ることを目的としたものである。この掘削では、水力駆動の衝撃ハンマー技術やコイルチューブ技術が試験された。また、2本の垂直ないしは傾斜井を5,000mまで掘削して、それらを数本の水平な坑井で連結させる予定であった(第7図)。この地域の地質は原生代の片麻岩と、それに重なるカンブリア紀～シルル紀の堆積岩より構成されている。不幸なことに、本地域は片麻岩の上位に700m厚の硬いホルンフェルス層の発達する接触変成帯に位置していた。そのため、この掘削プロジェクトでは、深さ1,600mで掘進中に掘削用具を紛失するというトラブルに遭遇し、そこで断念せざるを得なかった。しかしながら、本プロジェクトによって、ノルウェーでの高温岩体の開発の可能性を確認することができた(Midttømme, 2005)。



第7図 オスロでの高温岩体プロジェクトの概念図(NGI, 2008)。

4.5 Norwegian Institute for Water Research (ノルウェー水圏研究所, 第1図のstop S, CIENS)

「はじめに」で経緯を書いたように、この施設は当初の巡検コースにはなかったが、森下のみ訪問した。朝9時に巡検リーダーのMidttømme博士がオスロ市内のホテルに来てくれ、ホンダのマニュアル車で30分程走るとノルウェー水圏研究所に着いた。

この研究所はCIENS (Center for Interdisciplinary Environmental and Social Research)という、オスロ大学の一部を含む8つの独立した研究機関の本部が集合している、オスロのリサーチパークの中にある。現在まだ整備中のため、CIENSのモダンな建物の周辺は土がむき出しの荒地で、その一角では巨大な研究棟(ナノテクノロジー分野)が建設中だった。ノルウェー水圏研究所はノルウェー語の研究所名からNIVAの略称で呼ばれ、日本では「ノルウェー水質研究所」などと紹介されているが、自ら定義するように水に関する幅広い研究を多数実施しており、文字通り「ノルウェー水研究所」と訳す方が適切かもしれない。



写真11 ノルウェー水圏研究所の談話室。

そのノルウェー水(圏)研究所に着くと、Midttømme博士の共同研究者であるプロジェクトエンジニアのSkarphagen氏が出迎え、研究の概要を説明してくれた。研究室の椅子は上質でリラックスできそうだ。また、大きな木製のコート収納棚があるのは北欧ならではのであろう。研究室のすぐ隣には、スマートな北欧デザインで統一した談話室があった(写真11)。

研究室では、パソコンで地盤熱源ヒートポンプ(GSHP)利用の計算をしているところだった。持続可能でエネルギー利用効率が高く、信頼性の高いGSHPシステムを構築するためには、プロジェクトの各段階(計画、設計、設置、運転、維持)において最適化を図る必要がある。坑井や坑井熱交換装置のモジュールを画面上で連結し、坑井の直径、長さ、水の流量などのパラメーターを入力すると、取り出せる熱量が計算される。これがGSHPプログラムである。この熱量は季節変動があり、その予測シミュレーションをしているところだった。CIENSの研究棟に設置した冷暖房用のシステムもこの研究室で担当したとのことで、早速施設を見学させてもらうことになった。

CIENSでは当初、閉鎖循環方式のBTESの設置が検討されたが、最初のボーリングにおいて、二畳紀の閃長岩質岩脈中を流れる地下水を捕捉したため、計画を変更した。即ち、多くの閉鎖循環方式の坑井を掘削する代わりに、岩脈を帯水層として少数の坑井を掘削する方が合理的だ、との判断である。この岩脈は適度に破碎しており、大きな熱交換領域となっている。結局、BTESではなく、9本のボーリングによるATESシステムが頁岩と石灰岩地層の中に構築され



写真12 坑井への注水と揚水は圧力計と流量計で管理する。バルブの切り替え操作で、同一の坑井で注水または揚水のために使うことができる。

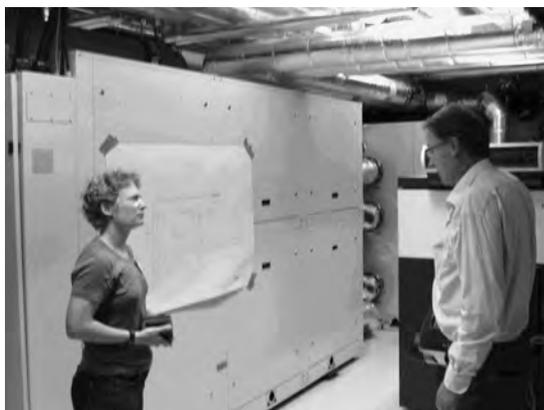


写真13 650kWのヒートポンプ本体の前には、巡検案内者のMidttømme博士(左)とSkarphagen氏。

た。ATESについては、4.3のガーデモエン空港のところで紹介したが、CIENSの建物は床面積が13,500m²で、空港より小規模である。

地下にある機械室には、様々な機器が詰め込まれていた。水を坑井に注入して、地中の熱を得てからポンプで水を汲み上げるが、圧力と流量がモニターされており(写真12)、熱交換器や循環系から空気を取り除く装置が設けられている。650kWのヒートポンプ本体もこの機械室に設置されている(写真13)。

屋外にはマンホールが並んでいるが、その下には掘削された坑井がある。坑井は直径140mmで深さ190-200m、7m間隔で直線上に並んでいる。4.1で紹介した郵便ターミナルビルでは平面的に坑井が配置

されていたが、ここでは閃長岩質岩脈(幅4-6m)の中だけを掘削したために、坑井が直線上に並ぶことになった。これにより、周囲の頁岩と一体となって、一種の熱貯留層となっている。システム設置後1年間の運転では、鉄やマンガンの沈着など管詰まりの徴候はなく、順調である。

5. おわりに

最初に書いたように、本稿で扱った地熱は低温の地盤熱であり、日本で一般的な沸騰温度の熱水によるものではない。ノルウェーで一般的な地下水の温度は10℃以下であり、4℃以下の地下水ですら熱源となり得る(Midttømme, 2005)。この温度でも十分に利用可能であり、コスト競争力もあるのだと言う。また、各地域の地質条件に応じて、熱抽出方法をきめ細かく変えて最適の方法を適用している。このような低温の地盤熱利用はまだ日本では広く普及していないが、今後、寒冷地などの公共施設や大規模建造物に、積

極的に導入を図っていくべきであろう。その場合、それぞれの地域に最適な熱抽出方法を適用することが肝要と思われる。

文 献

- Eggen, G. and Vangsnes, G. (2005) : Heat pump for district cooling and heating at Oslo Airport Gardermoen.
 Midttømme, K. (2005) : Norway's Geothermal Energy Situation. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey.
 NGI(Norwegian Geotechnical Institute) (2008) : Geoenergy. Field guide book for 33IGC Excursion 57, NGI report, 15p.
 NGU(Geological Survey of Norway) (2008) : Urban Geology: Thermal energy from the ground under your feet. Leaflet, 2P.
 Stene, J., Midttømme, K., Skarphagen, H. and borgnes B. G. (2008) : Design and operation of ground-source heat pump systems for heating and cooling of non-residential buildings. 9th International Heat Pump conference, May 2008, Zurich, Switzerland.

TAMANYU Shiro and MORISHITA Yuichi (2009) : Utilization of Geoenergy in Oslo - a report on the field trip #57 by 33rd IGC.

<受付：2009年1月9日>