

中国の地熱直接利用

安川 香澄¹⁾

1. はじめに：地下の熱をめぐる用語解説

本題に入る前に、地熱、つまり地下の熱の利用をめぐる用語の説明をしておきたい。

まず、地熱エネルギー (geothermal energy) の利用法は、発電利用 (power generation) と熱の直接利用 (direct use) とに大別される。直接利用は通常、温泉水や地熱地帯の蒸気や熱水をそのまま使うか、水と熱交換して利用するもので、温室栽培や養殖漁業、暖房などに用いられる。

一方、近年になって地中熱利用という言葉が広まった。地下と地表の温度差を利用して、冷暖房や融雪、給湯などを行う方法であり(本誌2005年7月「地中熱特集号」参照)、地熱直接利用の一種に分類される。地下の温度は年中安定しているため、夏は地表より涼しく、冬は地表より暖かい。そのため、地中との熱交換を行うだけで、ある程度の冷暖房が可能である。しかし、任意の室温や給湯温度に設定するためには、ヒートポンプと組み合わせる必要があり、このシステムを地中熱ヒートポンプ (geothermal heat pump) と呼ぶ。

地中熱は、温泉や地熱地帯でない通常の地温の場所で使えることを特徴としているため、非地熱地帯での直接利用法と捉えられがちである。しかし、地中熱ヒートポンプは、地熱地帯でも使えるのである。例えば軽井沢の温泉リゾートでは、温泉水をヒートポンプで二次流体と熱交換し、源泉より高い温度のお湯を得て、暖房や給湯に利用している(松沢・新堀, 2003)。またヨーロッパでは、地温勾配が高い地域で2km程度の深い井戸を掘り、そこから得られた温水をヒートポンプに循環させて二次流体の温度を上げ、地域暖房に供している例もある。このように、高い地温を利

用したヒートポンプは、地中熱ヒートポンプというより地熱ヒートポンプと言ったほうがふさわしく、英語名 geothermal heat pump の訳語としても、地熱ヒートポンプのほうが自然である。

それではなぜ地熱ヒートポンプと呼ばず、地中熱ヒートポンプと呼ぶようになったのか。それはこのシステムを国内で普及させようとした人々の意図によるものである。日本での地熱開発が発電に傾倒していたため、ただでさえ地熱と言えば、地熱発電と受け取られる傾向がある。直接利用と理解してもらった場合も、今度は地熱イコール地熱・温泉地帯での話と受け取られてしまう。普通の地温の場所で利用でき、しかも家庭用にも使える身近なシステムということを強調するためには、ぜひとも新語を創作する必要があったのである。また、欧米では比較的寒冷地から地中熱ヒートポンプが普及しており、初期には暖房利用が中心であったので、geothermal という語の持つ「暖かい・熱い」イメージと共に普及しても何ら問題なかったが、日本では最初から冷房利用も視野に入れ、とくにヒートアイランド現象の緩和も地中熱冷房利用のメリットとして宣伝しているので、「熱い」イメージが強すぎるのは不都合であった。

前置きが長くなったが、これらのことを詳述したのは、中国での geothermal heat pump は、大半が温泉水の熱を利用したものであり、地中熱というより、地熱ヒートポンプと言ったほうが適切だからである。従って本文では、地熱・温泉地帯での高い地下温度を利用する場合には地熱ヒートポンプ、通常の地温の場所で地表との温度差を利用する場合には地中熱ヒートポンプと呼び、更に両者を総称するときは英語名で geothermal heat pump と記すことにする。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門
地下水環境研究部門

キーワード：中国、地熱、直接利用、温泉、ヒートポンプ、カスケード利用



第1図 中国の地図.

2. 中国の地熱資源と開発の歴史

中国の高温地熱資源、すなわち蒸気を使った従来型の地熱発電を行う可能性がある場所は、チベット自治区、雲南省、四川省などで、これまでの開発はチベット地域に限られている(台湾を除く)。チベット自治区の羊八井(Yangbajain)地熱地域では、1970年に1MWのテストプラントが導入されたのを皮切りに、2005年までに合計で25.18MWのプラントが建設されている(Zheng *et al.*, 2005)。このうち24MWは、2000～2005年のJICAのプロジェクトで開発が行われたものである。

中低温の地熱資源は中国全土に広く分布している。太古から浴用や民間療法に用いられてきたが、近代的な探査、開発が始まったのは、1970年代からである。当時の探査・開発は全て国家政府によって行われ、国家によって掘られた井戸は、その土地の所有者(工場、研究施設、自治体など)に無料で譲り渡された。そのため、温泉井の所有者は経済性を考える必要が無く、温泉水の利用法は概してごく単純な浴用利用や暖房利用に限られていた。1980年代に入

り、市場経済が普及していくと、こういった国家による開発は、下火になっていった。やがて1990年代になると、私企業の経営者たちが、温泉開発に非常に興味を持つようになる。彼らは競って深層熱水の掘削を行い、収益を増やすために、あらゆる利用法を取り入れようとした。これは、経済性が上がるばかりでなく、温泉熱資源の最大限の利用という観点からも、意味のある変化であった。

一方、環境規制により石炭暖房が縮小され、天津や北京を初めとした多くの地域で、地熱による地域暖房が行われ始めた。こうして1990年代に中国の地熱直接利用は急激に上昇し、2005年現在で、地中熱を除く地熱直接利用量としては世界一を誇るようになっている。Zheng *et al.* (2005)による中国の近況報告では、北京での多目的利用、天津での地域暖房、広東省の珠海(Zhuhai)市での日本式温泉(浴用)利用、黒龍江省の林甸(Lindian)郡での石油探査井の地域暖房への転用、銀川(Yinchuan)、南寧(Nanning)、大連(Dalian)、済南(Jinan)等での産業利用、西安(Xi'an)、任邱(Renqiu)、鶴壁(Hebi)、林甸(Lindian)での暖房利用、河北省、広東省、福建省での農業利

用が紹介されている (Zheng *et al.*, 2005).

1990年代に北京付近に開発された温泉地としては、小湯山 (Xiaotangshan) の龍月永温泉、九華 (Jiu Hua) 温泉などがあり、それぞれ、大小さまざまなプールや室内施設の暖房等に地熱を利用したレジャー施設である。また最近では世界地熱博覧園や、地熱科普展覧センターといった施設が作られている。これらの施設は科学の啓蒙を目的として作られ、さまざまな地熱直接利用法を紹介するショーケースとなっている。

ただし私企業による開発は、利用面では前向きの変化があったものの、資源量という方向からは技術的な配慮をせず、資金があればとにかく掘るという形だったため、過激な掘削競争の結果、水位が急激に下がって枯渇の危険が迫るといった結果に陥った。そのため、各地方政府では条例などを制定し、地熱開発の規制を行い始めた。

3. 還元的重要性

中国における地熱直接利用は、1990年代に飛躍的 (約7倍) に伸び、利用量は世界一の10,531GWh/年に達している (Liu and Zhu, 2005)。殆どの場合、井戸から温泉水を取り出して利用した後、排水として捨てている。しかしこの方法では、長年の利用で帯水層の水圧が下がって湧出しなくなったり、地盤沈下が起きる等の問題発生は必至である。

中国では、近年になってようやく貯留層評価 (地熱貯留層の性質を調べて持続的に採取可能な資源量を調べる) や還元 (貯留層内の流体が枯渇しないよう、熱交換後の地熱水や地表水を地下に涵養すること) の重要性が理解されるようになってきた。Liu and Wang (2006) によれば、北京周辺では1970年代から還元が試みられていたが、本格的に開始されたのは1990年代に入ってからようだ。

興味深いことに、2006年7月に中国の青島で開催されたアジア地熱シンポジウム (地圏資源環境環境研究部門主催) では、中国からの11件の発表のうち、3件が還元に関する内容であった。その中にはシミュレーション予測もあり (Wang, 2006)、貯留層の圧力低下や水位低下が深刻な問題となっていること、還元への関心が高まり始めたことが窺える。

これまで北京市では、合計300もの地熱井が掘られており、その深度は700~3,000mの幅を持つ (Pan,

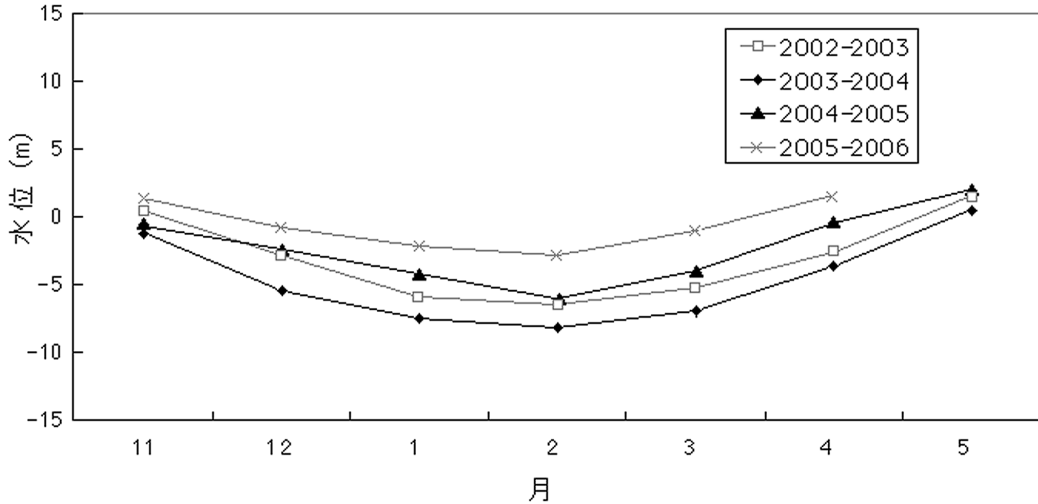
第1表 中国における地熱直接利用 (Zheng *et al.*, 2005).

用途	施設容量 (MWt)	年間熱利用量 (TJ/yr=10 ¹² J/yr)
地域暖房	550	6,391
温室	103	1,176
養殖漁業	174	1,921
農作物乾燥	80	1,007
工業加熱	139	2,603
浴用/プール	1,991	25,095
その他	19	611
合計	3,056	38,804

2006)。これらの地熱水の温度は37~89℃、1坑井あたりの生産量は1日あたり600~3,000m³、泉質はNaHCO₃タイプ、主な利用目的は、暖房、浴用、医療用、レジャー用、温室、養殖漁業用である。前出の小湯山温泉では、2002年から試験的に暖房利用後の温泉水を地下へ還元する試みが始まった。2006年には生産量の56.6%が還元されるようになっている (Pan, 2006)。その結果、水位低下は2004年2月をピークとして回復し、2006年の2月には、2004年の同時期より5m以上も水位が上昇している (第2図)。なお水位低下が著しいのは温泉水の需要が高まる冬期であり、2002年には冬期の水位が夏期より8mほど低かったが、2006年にはその差も半減している。

また天津市では、地熱による地域暖房が、900万m²もの床面積をカバーしている。これは中国全体の地熱暖房の約半分にあたる。天津ではこの他に、給湯、養殖漁業、温室栽培等に地熱が利用されている。天津の地熱貯留層は、深度約1,000~3,000mに賦存し、1坑井あたりの生産量は平均で毎時100~200m³、温度は79~103℃である (Liu and Wang, 2006)。天津での還元は、まず1980年代後半に第三系の砂層へ試験的に行われた。1996年からは泥炭層への還元が行われた後、再び2004年から砂層への還元が行われ、現在では総生産量の14% (3,600万m³) が還元されている (Liu and Wang, 2006)。

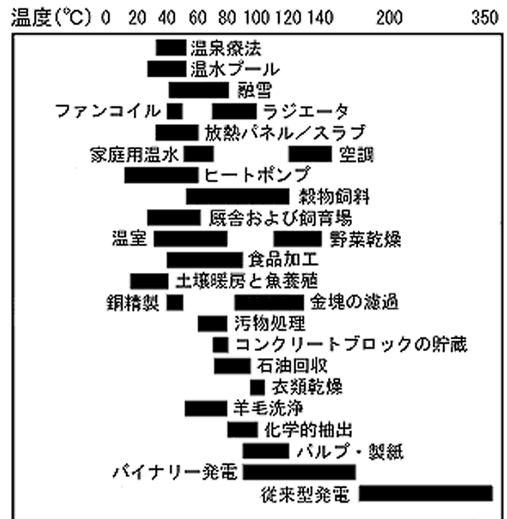
他の地域でも還元が試験的に行われているようだが、生産量に見合うオーダーの還元が本格的に行われているのは、今のところ北京市と天津市だけのようなのである。



第2図 小湯山温泉 (北京) の貯留層内の水位変化 (Pan, 2006).

4. カスケード利用と地熱ヒートポンプ

中低温地熱資源の最大限の利用を図るため、中国では、地熱エネルギーのカスケード利用が盛んに行われている。カスケード利用とは、温度の高いほうから低いほうへ、順番に熱を使いまわす方法で(第3図参照)、例えば北京市の地熱科学普及展覧センター(南宮村)では、5段階の利用が行われている(宮崎, 2006)。まず72℃の温水を住宅やホテル、地熱科学普及展覧センターの暖房に利用し、次に48℃に下がった温水をレジャーセンターと釣堀の床暖房に用い、更にその後の温水を食用魚と観賞魚の養殖に利用し、30℃未満に下がった温水をヒートポンプで加温後、最終的に温室(植物園)で利用する。利用回数が増えれば、それだけ経済性が高まるため、ここではヒートポンプで加温させる方法がとられている。これは中国ではよく見られるスタイルで、ヒートポンプの設備投資と運転コストを差し引いても、熱資源の利用回数を稼いだほうが、全体として経済性が上がり、省エネになるわけである。中国ではこういった地熱ヒートポンプ利用が盛んなため、2005年時点での Geothermal Heat Pump による熱利用量は世界第二位となっている(Lund *et al.*, 2005)。ただし、こういった地熱直接利用による豪華なレジャーセンターがあちこちに作られたものの、利用者数はあまり多くないようで、果たして経済性が良いかどうかは疑問という話も聞いた(宮崎, 2006)。



第3図 地熱エネルギーの温度別利用法 (Lindal, 1973より)。この高温側から低温側へ段階的に熱を利用する方法を、カスケード利用という。

なお、いわゆる地中熱ヒートポンプについては、一部で導入されて技術開発も行われているが(Xu and Rybach, 2005)、まだ本格的な普及には至っていないようである。都市部での地中熱ヒートポンプは、ヒートアイランド現象緩和の側面からも、促進されることが望ましい。中国でも日本と同様、都市部でのヒートア

イランド現象は深刻な問題となっており、北京市の年平均気温は、この20年間で約2K(世界平均では100年で約1K)上昇し、ヒートアイランド現象発生地域は、5.83km²/年の割合で拡大している(Svensson and Tarvainen, 2004)。

逆に極寒地での地中熱ヒートポンプの適用例として、日本のNEDOの事業により長春(Changchun)で実証試験が行われた(高杉ほか, 2001)。温室効果ガス、特にCO₂排出は世界的な問題であり、化石燃料による暖房はCO₂を多く排出することが知られている。また石炭暖房では、その他のガスによる大気汚染(NO_x, SO_x)も深刻である。長春では、雪の中に黒く堆積したSO_xの煤塵を観察することができるほど、SO_xによる大気汚染が深刻であるが、石炭に代わる安価な燃料がないのが現状である。また極寒地では通常のエアコンは運転不可(デフロスト運転が頻繁に必要で、暖房運転とならない)であるため、大気汚染対策は困難な状況である。地中熱ヒートポンプは、この問題を解決する切り札と考えることができ、現状の石炭暖房を全て地中熱ヒートポンプに置き換えれば、CO_xの削減率は62%(年間30t)、SO_xの削減率は99%(年間1.5t)と見積られている(高杉ほか, 2001)。

5. 済南の山東省地熱基地

ここまでの内容は、主に文献調査や聞き取り調査によるものだが、最後に、筆者が実際に訪れた山東省済南市にある地熱基地(正式名称は、山東地熱資源科研開発示範基地)を紹介する。この付近は、温泉水による地域暖房が盛んな地域であり、この施設もま



写真1 2005年6月当時の山東省地熱基地。モデルは内田洋平氏。

た地熱のさまざまな利用法を紹介し啓蒙するショーケースとして建設中である。1,601m深の坑井から、57℃の熱水が1日あたり3,000トン湧出しており、2003年11月の掘削当時は、6mもの高さまで熱水が噴出していたという。2005年6月にこの地を訪れた時は、井戸が1本掘られて熱水が自然湧出しているのみで、周囲は骨材の転がった工事現場だったが(写真1)、2006年7月に訪問したときは、既に宿泊施設や見学用の建物が建築され、周囲の芝生や道路もすっかり造成されて整っていた(写真2,3)。

2005年の訪問は黄河プロジェクトでの地下水サンプリングが目的だったが、2006年の訪問は、青島で開催された第7回アジア地熱シンポジウム(地圏資源環境研究部門主催)のエクスカージョンの一部だった。シン



写真2 2006年7月現在の山東省地熱基地の入口(写真提供:内田利弘氏)。



写真3 現在(2006年7月撮影)の山東省地熱基地のメインビルディング。手前に坑井がある。



写真4 地元記者のインタビューに答える、アジア地熱シンポジウム実行委員長の村岡洋文氏(写真提供:内田弘氏)。

ポジウム本体の会議のほうも、テレビのローカルニュースでトップに取り上げられたそうだが、エクスカッションのほうも地元では大きく取り上げられ、地熱センターにはテレビカメラを担いだ報道陣が集まり、国外からの参加者にインタビューを行っていた(写真4)。

6. まとめ

中国での地熱直接利用は、1970年代の政府主導の地熱開発から、1990年代からの私企業中心の開発に移行していった。その結果、あらゆる利用法を取り入れて経済性を高め、資源の利用率・回収率を高めるといった意味ではプラスの方向に進んだ一方、資源量調査や貯留層評価といった科学的裏づけなしに温泉資源の乱獲が進み、貯留総圧力・水位の低下による枯渇の危険性というマイナス面も目立った。そのため、地熱開発についての規制が進められた他、圧力低下を防ぐための還元注目が集まってきた。北京市、天津市では本格的な還元が行われている他、他の地域についても、還元のシミュレーション研究が進められている。

地熱資源の利用率・回収率を高めるための方法として、多目的利用、とくにカスケード利用が盛んに行われるようになり、その一環として、地熱ヒートポンプが多く利用されている。このような多目的利用は、プール、温泉、宿泊施設などを備えたレジャー施設で行われている場合が多く、市民に地熱の利用法を展示するショーケース的な意味合いが強いようである。そういう意

味では、実際の利用量はまだまだこれから伸びる可能性があり、今後の動向が気になる所である。

謝辞：本文は主として、Zheng *et al.* (2005)と宮崎(2006)を参考にまとめている。英文表記の地名を漢字に直して下さったKeyan Zheng教授と、快く資料提供して下さった宮崎眞一氏(日本重化学工業株式会社)に心から謝意を表す。また、黄河プロジェクトでお世話になった中国地質調査局を始めとする関係各位、アジア地熱シンポジウムの中国側関係各位に感謝の意を表したい。

引用文献

- Lindal, B. (1973) : Industrial and other applications of geothermal energy, In: Armstead, H.C.H., *ed.*, *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, pp.135-148. Liu and Zhu, 2005.
- Liu, J. and Wang, K. (2006) : Geothermal Reinjection in China. Proceedings, 7th Asian Geothermal Symposium, 59-65.
- Liu, S. and Zhu, H. (2005) : The Status and Trend Analysis of Geothermal Development and Utilization in China, Proceedings World Geothermal Congress 2005, 0304.
- Lund, J. W., Freeston, D. H. and L. Boyd, T. L. (2005) : Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review, *Geothermics*, 34, 691-727.
- 松沢隆志・新堀雄一(2003) : 星野リゾート地熱利用プロジェクトと400m地中熱交換井による採熱テストの概要, 日本地熱学会平成15年度学術講演会講演要旨集, p.46.
- 宮崎眞一(2006) : 中国における地熱・深層熱水開発. 平成17年度第3回地熱研究会(2006.4.21東京)講演資料.
- Pan, X. (2006) : Growth of geothermal reinjection in Beijing, China, Proceedings, 7th Asian Geothermal Symposium, 55-58.
- Svensson, D. and Tarvainen, L. (2004) : The past and present urban heat island of Beijing, B416 www.gvc.gu.se/BIBLIO/B-serin/B416.pdf
- 高杉真司・池内 研・桑野 恭(2001) : 中国長春市の地中熱利用ヒートポンプによる暖房試験 -極寒地への適用・普及調査-, 地熱エネルギー, 26, 427-438.
- Wang, G. (2006) : Research of geothermal reinjection in Xi'an geothermal system, west China, Proceedings, 7th Asian Geothermal Symposium, 45-54.
- Xu, S.H. and Rybach, L. (2005) : Developmetn and application of a new. powerful groundwater heat pump system for space heating and cooling, Proceedings World Geothermal Congress 2005, 1416.
- Zheng, K., Zhang, Z., Zhu, H. and Liu, S. (2005) : Process and Prospects of Industrialized Development of Geothermal Resources in China- Country Update Report for 2000-2004, Proceeding World Geothermal Congress 2005, 0111.

YASUKAWA Kasumi (2007) : Direct geothermal energy use in China.

<受付:2006年11月10日>