

大深度掘削井の利用：温泉から地球科学の問題まで

北海道大学大学院理学研究科
池田 隆 司

Utilization of deep borehole : Challenges accompanying the hot spring development and the earth science

Ryuji IKEDA

Graduate School of Science, Hokkaido University

Abstract

With the advance in drilling technology, it has become possible to obtain information from the deep underground. However, drilling can only reach into the earth's crust at most 10 km deep from the surface. That said, we can ascertain some phenomena and processes which are being generated, even if only in the shallow crust. By utilizing the drilling technology for oil and gas, we can venture into unknown earth science problems such as earthquake occurrence and volcano eruption mechanisms. Additionally, indispensable resources for life such as hot springs and geothermal energy can be extracted. Here, the present state of hot spring drilling in Hokkaido is reviewed, and hot spring depletion problems caused by deep drilling are considered. Also, the deep drilling directly provides samples of rocks and fluids that contain an abundance of information from the earth's deeper crust. Experiment and long-term observation in boreholes will lead to a better understanding of dynamic changes, which are progressing in the crust at present. The effectiveness of the deep scientific drilling promoted by the International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) is also described in order to clarify the problems of earth science.

Key words : deep drilling, hot spring depletion, earth science, ICDP

キーワード：深層掘削，温泉の枯渇，地球科学，国際陸上科学掘削計画（ICDP）

1. はじめに

掘削技術の進歩にともない、我々は地下深部の情報を手に入れることができるようになってきた。地下深部といっても、我々の手が届くのは今のところせいぜい深さ 10 km 程度の地殻の上面に過ぎない。しかし、月や火星で探査機が活躍する時代に、我々の足下、特にこの地殻浅部で起こっている現象や過程についてはまだまだ分からないことが多い。石油やガスの採取を目的として進歩してきた掘削技術ではあるが、これをうまく利用することによって、地震や火山など地球科学的な

諸問題に関連する未知の世界に踏み込むことも、温泉や地熱などの生活に密着した資源を掘り起こすこともできよう。昨今の温泉開発は、温泉がより身近な、かつ生活に有効なものとして我々の生活に潤いを与えてきた。しかし、温泉が持続可能な資源であるとはいえ、源泉数の増加や深部からの揚湯ともない、その枯渇現象がより厳しい問題となってきていることも否めない。枯渇問題は今に始まったことではない。古くは、福富（1936）の著書「温泉の物理」の中で、「近年温泉の医療的効用や工業的利用が叫ばれる一面、温泉さく井の乱掘は次第に温泉の衰微を来し、その合理化が叫ばれるに至ったのであってこの際その方面の科学的研究が望ましいこと申すまでも無い」と記されており、日本全国の温泉総数が946カ所であった当時から、すでに温泉さく井の乱掘とか温泉の枯渇が懸念されていたことがわかる。当時の掘削深度はせいぜい200~300mであったことを考えると、今日の地下深部の温泉の問題点（例えば、西村，2004；大山，2004）とは質量ともに全く異なるが、時間的な変遷を辿ることは地球環境問題を考えることにもなる。ここでは、まず北海道の温泉掘削の現状から、深層掘削に伴う問題点を探る。一方、大深度掘削のもたらす情報が、地球科学の諸問題を解明するためにはならない情報であることも事実である。このような観点から地球科学掘削を取り巻く昨今の状況について紹介する。

2. 北海道の温泉掘削と枯渇問題

日本では、1950年頃から温泉開発ブームが起き、1952年から58年までの6年間に国内の源泉総数がほぼ倍増している。経済不況などにより一時減少したことはあるが、その後は源泉総数が増加し続け、1970年で約15,000、1980年で約20,000、1996年には全国で25,455（秋田，1999）にもなった。北海道も全国と同様の温泉開発の推移をたどり、環境省（2002）のデータによると、北海道の源泉数は2,200、総湧出量300,920 L/minであり、源泉総数では我が国の約8.3%、総湧出量でも約10.9%を占めている。これらには自然湧出と掘削井からの揚湯による両方が含まれている。自然湧出泉の湧出量は1974年時点までのデータによると、56,700 L/minとされており、これは大きく変わることはないと考えられるので、残り8割強が掘削井から湧出しているものと推定される（秋田，2002）。

Fig. 1に、北海道立地質研究所がまとめた2004年度までの959本の温泉掘削井深度の経年変化を示す。1970年ころから急激に掘削深度が増加し始め、1980年頃には深度2,000mを越えるような温泉掘削も行われるようになってきた。この温泉掘削井変遷図は、世の中の推移（社会的、政策的、経済的など）、地熱資源の活用、掘削・揚湯技術の進歩など、色々なことを物語っている。

これだけ掘削が多くなると枯渇問題が当然生じる。一例として、十勝平野の帯広市周辺では、1970年代の後半から深度1,000m~1,500mの温泉開発が行われ、これまでに50孔余りの源泉が掘削されている。1979年ころから水位低下が始まり、現在までに約50mも水位低下が引き起こされた（秋田，2005）。1988年に帯広市街中心部が保護地域に指定され、その周辺部も順次、準保護地域に指定されているが、依然として水位は低下傾向にある。札幌市でもここに来て、都市型の温泉、といっても公衆浴場の数が急激に増えており、深度1,000m以上の掘削も急増している。2002年度に道が実施した市内30数カ所の源泉調査において19カ所の源泉で明らかな温度の低下が見られた。このことから、2005年5月から札幌市内平野部を準保護地域として指定し、掘削が規制されることとなった。すなわち、既存源泉から半径500m以内の新規掘削を認めず、揚湯量も200 L/min以内に押さえるという内容である。どの程度の規制値を設定すべきかという議論については、それぞれの地域で異なるが、過去からの科学的データに基づいた時間的変化のシミュレーションにより考えていかなければならない。掘削深度に関しても、その地域の帯水層の特性や地下水そのもの

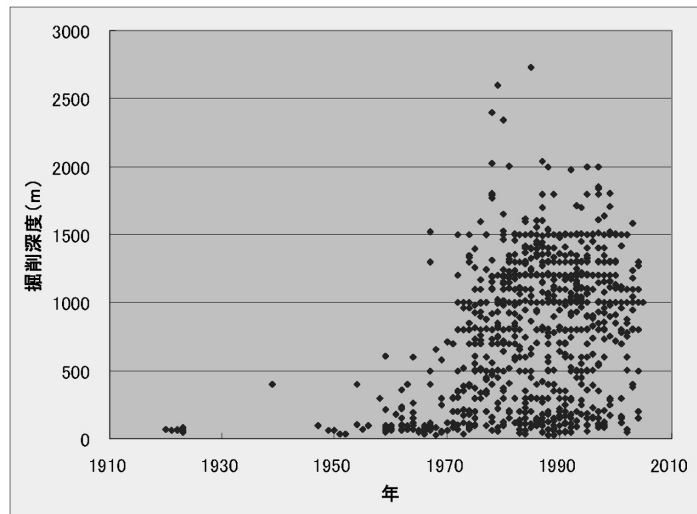


Fig. 1 Trace the history of drilling depth for hot springs in Hokkaido (personal communication with the Geological Survey of Hokkaido, 2005)

の起源を考慮した指針を示すことが必要であろう。

3. 深層掘削と国際陸上科学掘削計画 (ICDP)

大深度といってもどれくらいの深さなのか、目的によってかなり尺度が異なるようで、温泉掘削では深度 1,000 m を超すと大深度と呼ぶ場合もある (大山, 2004)。石油掘削では、日本の場合で掘削深度が 6,000 m、米国では 9,000 m を越えており、どこから大深度となるのか定かではない。また、科学的な目的の超深度掘削井として世界的に有名なものが、旧ソ連のコラ半島での 12,260 m と KTB (ドイツ大陸深部掘削計画) の 9,101 m の孔井がある。日本では防災科学技術研究所の岩槻地殻活動観測井が 3,510 m である。このように、資源、環境、災害をはじめとする多くの分野においてより深層への掘削が図られ、地殻深部の情報を得ることに努力が払われてきた。しかし、その数は決して多いとはいえ、深さ 10 km 程度の浅い部分ですら未知のことが多い。深層掘削およびそれを利用した孔内計測は、地殻内で進行中のプロセスを直接観測できる有力な手段であり、これと地表探査の組み合わせは多くの情報を我々に提供してくれる。まさに地殻の内部をのぞく「内視鏡」となる。これを用いて、以下のような地球科学の諸問題に取り組むことは、学問的のみならず社会的にも大きな意義のあることとなる。

- ・地震および火山噴火の物理化学過程とその災害を軽減する最適な方法
- ・最近の気候変動の機構とその原因
- ・巨大隕石衝突による気候や生物大量絶滅への影響
- ・深層生物圏の実態と、炭化水素の熟成や生命起源との関係
- ・放射性物質や他の有害物質の安全な処分法
- ・堆積盆地と炭化水素資源の生成と進化
- ・種々の地質学的な場における鉱床生成の理由
- ・プレートテクトニクスの基本的な物理と、地殻を通じての熱、物質、流体の移動

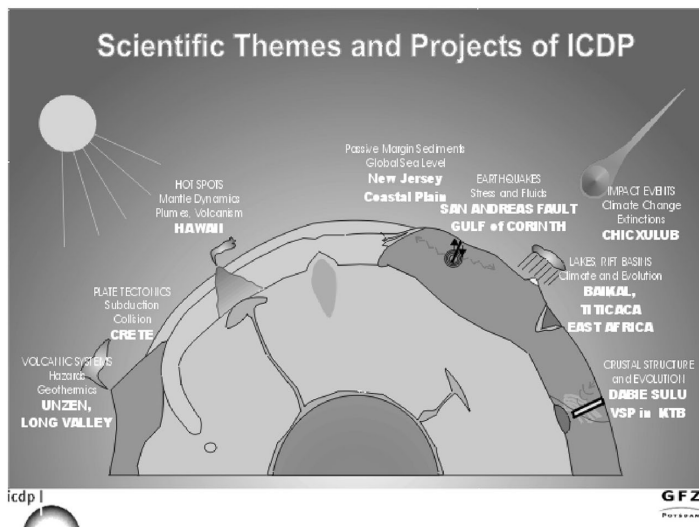


Fig. 2 Projects of the International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) (after Home page of GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany, 2005 ; [http : //www.icdp-online.org](http://www.icdp-online.org))

・地殻の構造と性質を決定するための地球物理学データのより良い解釈法

国際陸上科学掘削計画 (ICDP) は、国際的協力の枠組みでこれらの解明に取り組むことを目的として 1996 年に発足した。ドイツ、アメリカ、日本、中国、などが中心となって十数カ国の参加の下に活動している。これまで既に、ICDP のプロジェクトとして、ハワイ島の火山体掘削、メキシコのユカタン半島チクスルブ隕石孔掘削、中国ダビエスル高温高圧変成帯掘削、サンアンドレアス断層掘削、KTB 掘削井を用いた実験などがある (Fig. 2)。日本では、ICDP のサポートのもとに「雲仙火道科学掘削計画」が遂行された。

4. 活断層や火山での掘削

掘削井を以下のようにうまく利用して、活断層や震源域で進行中の地学的現象を観ることができると。 (1) 坑井内探査や検層によって地質構造や物性が直接あるいは極く間近で連続的に調べられる。 (2) 物質そのものをコアとして得ることができ基本的な岩石物性、力学特性、年代などが調べられる。 (3) 地殻応力測定や地震観測で現在の状態を知ることができる。日本では、根尾谷断層、野島断層、阿寺断層などで調査が行われてきた。さらに、1995 年兵庫県南部地震に伴い淡路島の地表に出現した野島断層では、断層を貫くような掘削 (最深 1,800 m) を行い、断層近傍の応力、間隙水圧、熱流量などを定量的に把握するとともに、採取した岩石コアによる断層破碎帯の変形・変質様式、構成物質などを分析・解析した (Ikeda, 2001 ; 池田・他, 2001)。

雲仙火山は 1990~1995 年の噴火以来多くの詳細な観測データが得られ、噴火・マグマ活動のモデル化の研究が世界中で最も進んだ火山のひとつである。ICDP と連携のもと、文部科学省振興調整費により「雲仙火山：科学掘削による噴火機構とマグマ活動解明のための国際協同研究」が 1999 年~2004 年に行われた。雲仙火山を対象として科学掘削を中心とした総合的な研究を実施し、火道の形成、脱ガス過程および地下水との相互作用の実証的な研究による噴火機構の解明、火山体内部

構造, 噴火成長・マグマ発達 の歴史, 広域的応力場と地殻変動などの解明を目的とした。2004 年にマグマの火道に達する 1,995 m の高傾斜 (鉛直面から最大 75°) 掘削が行われ, 地質構造が明らかになると共に, 古い火道と新しい火道が複数混在する雲仙火山の火道構造モデルに関する特性を見いだした (Nakada, *et al.*, 2005)。また, 火道掘削に先立つ 2 本の山体掘削井 (深度 750 m, 1,460 m) からは, 50 万年前に遡る雲仙火山体の構造が明らかにされた。

5. おわりに

最近, 地表からの物理探査, 同位体や岩石鉱物学的な研究により, 地殻深部にも相当量の水が存在し流動していることが推測されてきた。地殻内の流体は, 地震発生, 火山噴火, 地球温暖化や鉱床の形成に関連する物質循環などの地質現象を引き起こす大きな要因となっていると考えられる。これらを検証するには, 深層掘削が極めて有効である。地殻深部の情報を刻んでいる岩石や流体のサンプルを直接採取し, また孔井内での実験や長期観測を行うことによって, 地殻深部で現在進行中の変化や現象を捉えることができよう。日本列島は, 地殻内流体の循環が活発な沈み込み帯に位置し, 活動的な地熱・火山地域も多いことから, これらの現象と流体の関連を研究するのに最適である。その意味で, 温泉は地下深部からの貴重な情報を運んできてくれているといえよう。

文 献

- 秋田藤夫 (1999) : 北海道の温泉資源の変遷と現状, 一都道府県別温泉利用状況データに基づき一, 地下資源調査所報告, **70**, 27-49.
- 秋田藤夫 (2002) : 北海道の地熱・温泉資源の分布と特徴, 北海道における自然エネルギー利用技術 (浦野慎一監修), 日本農業気象学会北海道支部 50 周年記念発刊, 152-163.
- 秋田藤夫・柴田智郎 (2005) : 十勝川温泉の湧出機構, 第 58 回日本温泉科学会大会講演要旨集, 64.
- 福富孝治 (1936) : 温泉の物理, pp. 94, 岩波書店
- Ikeda, R. (2001) : Outline of the fault zone drilling project by NIED in the vicinity of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan, *The Island Arc*, **10**, 199-205.
- 池田隆司・小村健太郎・飯尾能久・新井崇史・小林健太・松田達生・島田耕史・田中秀実・富田倫明・平野 聡 (2001) : 1995 年兵庫県南部地震に伴う野島断層を貫くドリリング調査, 防災科学技術研究所報告, 第 61 号, 141-153.
- 西村 進 (2004) : 地下深部の温泉の問題点, 日本温泉科学会第 57 回大会 公開講演 2, 温泉科学, **54**, 103-106.
- Nakada, S., Uto, K., Sakuma, S., Eichelberger, J.C. and Shimizu, H. (2005) : Scientific results of conduit drilling in the Unzen Scientific Drilling Project (USD), *Scientific Drilling*, No. 1, 18-22.
- 大山正雄 (2004) : 大深度温泉井の水収支について, 日本温泉科学会第 57 回大会 公開講演 3, 温泉科学, **54**, 107.