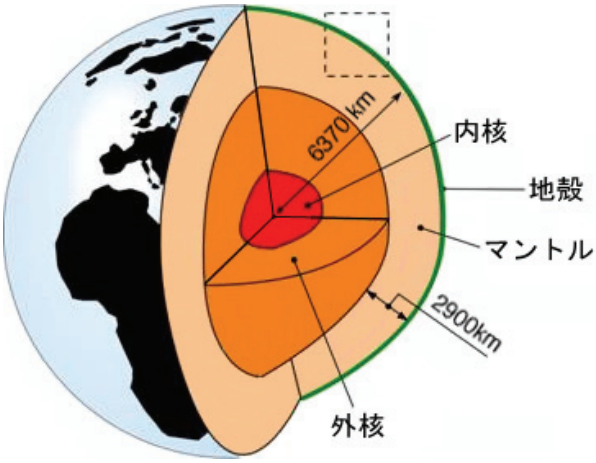
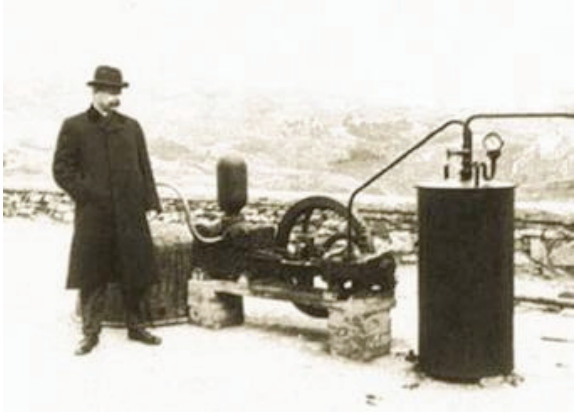
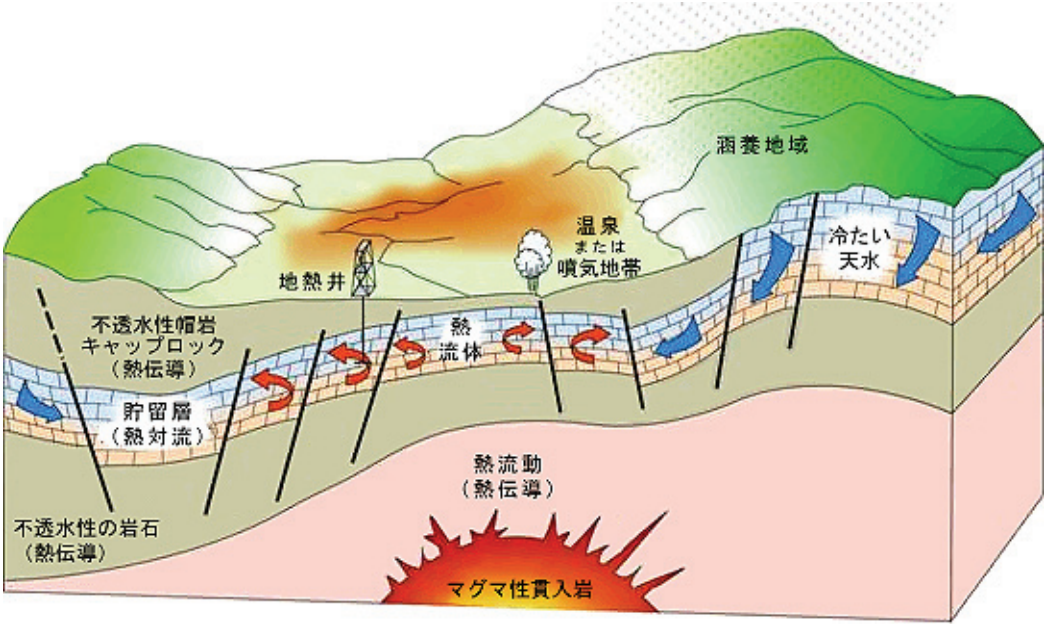
地熱エネルギー入門【第２版】

Mary H. Dickson, Mario Fanelli 著

日本地熱学会ＩＧＡ専門部会 訳・編







本書について

本書は，Dickson and Fanelli 著“What is Geothermal Energy?”（2004 年，英文）を日本地熱学会ＩＧＡ専門部会が翻訳したもので, IGA（International Geothermal Association, 国際地熱協会）の呼びかけに応じ，各国の地熱関係者が，各国語版を作成しました。日本語の他に，イタリア語，スペイン語，ギリシャ語，韓国語版が作成され，IGA のホームページで紹介されています。ご興味のある方は，http://www.geothermal-energy.org/ を御覧ください。

本書は2006年11月に第１版を出版しました。今回, 本文を一部改訂し，また，本文にあるいくつかの専門用語の解説と，世界の地熱利用統計の最新版を付録として添え，第２版として出版しました。付録の地熱用語集に掲載した用語は本文中で太字で示されていますので、参考にして下さい。

2008 年 8 月
日本地熱学会ＩＧＡ専門部会

“地熱エネルギー入門”　もくじ

1. 序章 ---------- 1

1.1 地熱利用の歴史 ---------- 1

1.2 地熱利用の現状 ---------- 4

2. 地熱資源の性質 ---------- 7

2.1 熱機関としての地球 ---------- 7

2.2 地熱系 ---------- 10

3. 地熱資源の定義と分類 ---------- 14

4. 探査 ---------- 18

4.1 探査の目標 ---------- 18

4.2 探査方法 ---------- 18

4.3 探査プログラム ---------- 20

5. 地熱資源の利用 ---------- 21

5.1 発電 ---------- 21

5.2 地熱の直接利用 ---------- 24

5.3 経済性の考察 ---------- 30

6. 環境影響 ---------- 33

7. 現状と将来 ---------- 36

参考文献 ---------- 37

付録 **A:** 世界の地熱利用の推移 ---------- 39

付録 **B:** 地熱用語集 ---------- 42

地熱エネルギー入門

Mary H. Dickson, Mario Fanelli 著
日本地熱学会ＩＧＡ専門部会 訳

1. 序章

熱エネルギーとはエネルギーの一形態であり，“**地熱エネルギー**”とは文字通り地球が内部に包含する熱エネルギーのことです。この熱エネルギーは全地球規模で地質学的現象を発生させています。しかし今日，“地熱エネルギー”という言葉は，地球内部の熱エネルギーのうち，人類が取り出したり利用したりできるエネルギーを指す場合が多く，本書では以下この意味で“地熱エネルギー”という言葉を用いることにします。

1.1 地熱利用の歴史

火山や温泉や噴気などの存在により，私たちの祖先は，地球の内部は高温であると思っていたに違いありません。しかし，地中深ければ深いほど温度が高くなることを，人類が身をもって感じたのは，16～17 世紀になって鉱山が 200～300 m の深さまで採掘されるようになってからのことでした。

1740 年には De Gensanne が，フランスのベルフォール近くにある鉱山で史上初とされる温度測定を行っています (Buffon, 1778)。その後，1870 年には近代科学的手法を用いた地球の熱構造の研究が行われました (Bullard, 1965)。しかし，地球の熱平衡や熱履歴などの事象について十分な理解がなされるのは 20 世紀になり，地球内部の**放射性元素の崩壊**が担う役割が発見されてからでした。最新の地球の熱モデルでは，地球内部に存在する半減期の長い放射性同位元素であるウラン (U^{238}, U^{235})，トリウム (Th^{232})，カリウム (K^{40}) の崩壊により持続的に熱が発生していることを前提にしています。このほか，惑星星間ガスの付加により地球が誕生したとき蓄積されたエネルギーなど，ほかのいくつかの原因による熱が一定割合含まれていると考えられています。1980 年代になると，地球内部の原子崩壊と地球から宇宙空間に放射されている熱は平衡状態にはなく，地球はゆっくりと冷えていることが明らかになり，現実的な地球の熱モデルが提示されるに至りました。それらの現象の詳細や定量的な説明は Stacey and Loper (1988) の**熱バランス**にゆずりますが，地球からの熱放出は伝導，対流，放射をあわせ，42×10^{12} W の熱流量であると推定されています。図 1 は地球の内部構造を示していますが，このうち地殻からの熱が 8×10^{12} W となっています。地殻は地球全体積の 2%を占めるにすぎないにもかかわらずこれだけの熱が放出されているのは，地殻には放射性元素が豊富に存在していることによります。また，全体積の 82%を占めるマントルからは 32.3×10^{12} W，全体積の 16 %を占め，放射性元素を含まないコアからは 1.7×10^{12} W の熱が放出されていると推定されています。マントルの放射性元素からの熱放出は 22×10^{12} W と推定されていますので，マントルの冷却率は 10.3×10^{12} W ということになります。

最近のより多くのデータに基づいた推定では，地球からの熱放出は Stacey and Loper (1988) によるものより，約 6%大きな値となっています。しかし，それだけの熱が放出されていても地球の冷却速度は大変遅いもので, 30 億年の間にマントル下面の温度は高々300～350℃冷えたにすぎず，現在も約 4,000℃を維持しています。地球全体が持っている熱エネルギーは，地表の平均温度が 15℃であると仮定すると 12.6 $\times 10^{24}$ MJ，そのうち地殻の持つ熱エネルギーは 5.4$\times 10^{21}$ MJ と推定されています (Armstead, 1983)。

このように地球の持つ熱エネルギーは膨大なものです。しかし，人類はそのほんの一部しか利用することはできません。従来，地熱エネルギーを利用できる地域は，地下深くに存在する熱エネルギーが水や蒸気によって地表へ伝達されるような地質的条件に恵まれた場所に限られていました。“地熱資源”と言われるのはこのためです。しかし近い将来技術革新により，地熱エネルギーの利用に新たな展望が開かれることでしょう。

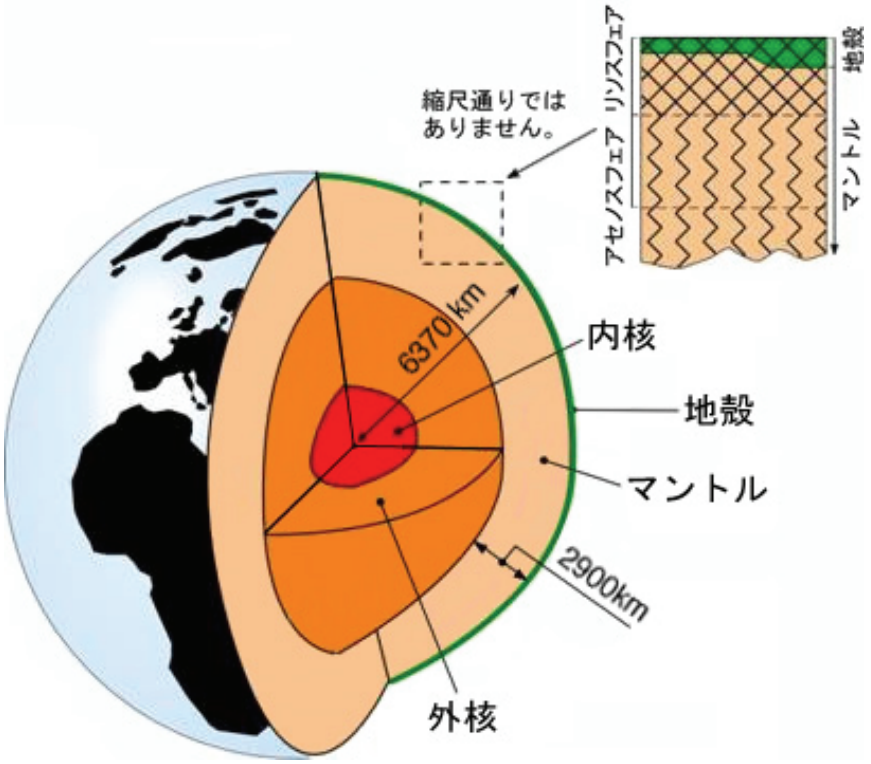


図 1：地球の内部構造。地球の内部は，コア，マントル，地殻からなっている。右上の図は，地殻からマントル上部にかけての断面図を表している。

私たちの身の回りには，科学的な研究や技術開発よりも実用が先行した事例がたくさんあります。地熱の利用はそのよい例です。19 世紀初頭には，地熱流体はすでにエネルギー源として利用されていたのです。その時代イタリアでは，現在のトスカーナ州ラルデレロのあたりに，ホウ酸を生産する化学事業が立ち上げられました。ホウ酸は，自然に湧き出てくるか，浅い坑井（=井戸）から取れる，ホウ素を含んだ熱水から抽出されていました。当初は，近隣の森で伐採した木々を燃料にして，鉄製のボイラーで熱水を蒸発させてホウ酸を抽出していましたが，1827 年に創業者の Francesco

Larderel は，急激に枯渇しつつあった森林資源のかわりに，地熱水の熱を蒸発過程に利用するシステムを開発しました。図 2 はその様子を示しています。

地熱蒸気が力学的エネルギーとして利用され始めたのも，ほぼ同時期のことでした。地熱蒸気は当初，流体をくみ上げるための原始的なガスリフトとして用いられましたが，その後，往復型や遠心型ポンプ，あるいはウィンチの動力として用いられ，これらの動力機はその地域の坑井掘りやホウ酸事業に利用されました。1850 年から 1875 年にわたり，ラルデレロにある工場は，ヨーロッパのホウ酸生産を独占していました。1910 年から 1940 年にかけて，トスカーナ州のこの地域では，低圧の地熱蒸気が工場，住宅，温室の暖房に使われるようになりました。一方，他の国々でも工業規模の地熱資源の開発が始まりました。1892 年にはアメリカ，アイダホ州のボイズで初めての地熱による地域暖房システムの運用が開始され，1928 年には地熱エネルギー利用におけるもう一つの草分け的存在であるアイスランドでも住宅暖房への地熱流体（主に熱水）の利用が始まりました。

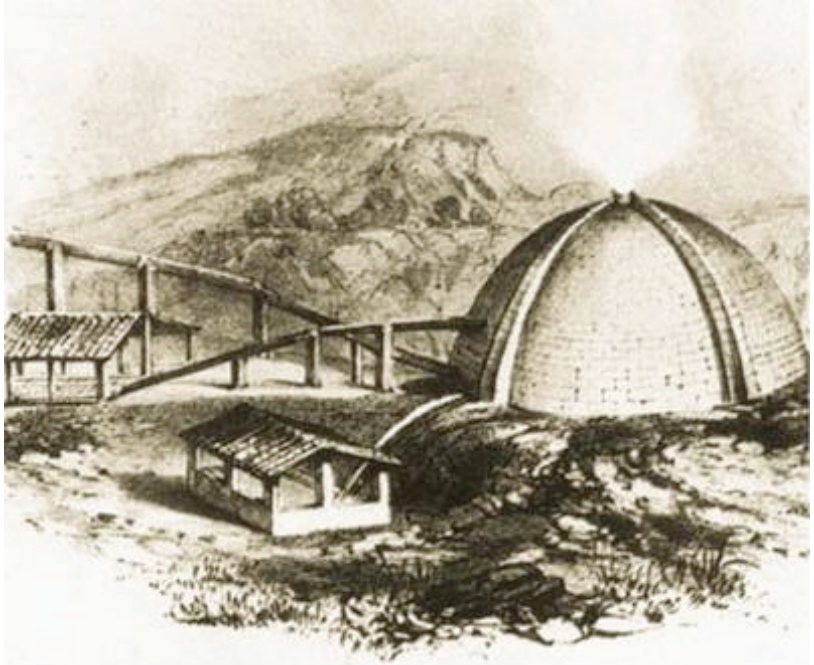


図 2：19 世紀前半にイタリアのラルデレロ地域で用いられた“地熱ドーム”。地熱徴候のある場所を覆って地熱蒸気を集め，ボイラーを加熱した。ボイラーではホウ酸を含んだ地熱水の水分を蒸発させ，ホウ素を取り出した。以前は木材を燃やしてボイラーを加熱していた。

地熱蒸気を用いた発電が世界で最初に試みられたのは，やはりラルデレロで，1904 年のことでした（図 3）。この実験は成功し，地熱エネルギーの工業的価値が世に示されました。これを契機に，世界の地熱の利用は急速に拡大していきました。ラルデレロの地熱発電は経済的にも成功をおさめ，1942 年までにこの地域の発電設備容量は 127,650 kWe に達しました。イタリアでの成功が引き金になり，他の国でも発電に対する動きが始まりました。1919 年に日本の別府でも最初の**地熱井**が掘削され，1925 年には 1.12 kWe の発電が行われました。また，アメリカ，カリフォルニア州のガイ

ザーズでは 1921 年に最初の地熱井の掘削が，1958 年にはニュージーランドで小規模な地熱発電が行われています。これに続いて，1959 年にメキシコで，1960 年にはアメリカで地熱発電が開始され，その後各国で続々と発電が開始されています。

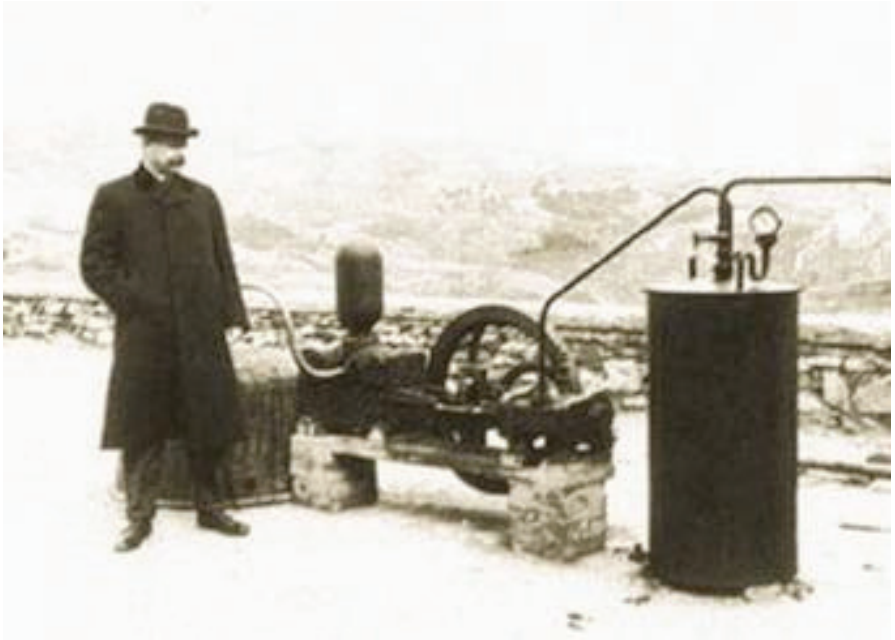


図 3：1904 年にラルデレロで行われた世界初の地熱発電実験の様子。
機器の前に立っているのは発明者の Prince Piero Ginori Conti。

1.2 地熱利用の現状

第 2 次世界大戦後，地熱エネルギーは多くの国々から注目を浴びました。他のエネルギーに比べ，経済的にも競争力があると考えられたからです。地熱エネルギーは他国から輸入する必要がなく，また，地域によってはそれがその地域で利用可能な唯一のエネルギー資源であることもありました。

表 1 に現在地熱発電を行っている国を示します。本表には各国の 1995 年と 2000 年の発電設備容量とその 5 年間の伸び (Huttrer, 2001)，さらに 2003 年における設備容量が示されています。全世界の発電設備容量は 1995 年には 6,833 MWe, 2000 年には 7,972 MWe となっています。このうち開発途上国における設備容量が 1995 年には全体の 38%，2000 年には 47%を占めています。

開発途上国における地熱利用の伸びは注目に値します。1975 年から 1979 年の 5 年間でこれらの国々での設備容量は 75 MWe から 462 MWe に，1984 年までの次の 5 年間では 1,495 MWe に達しています。伸び率に換算するとそれぞれ 500%と 223%になります (Dickson and Fanelli, 1988)。さらに 1984 年から 2000 年の 16 年間では 150%増加しています。地熱発電が電力供給の上で主要な役割を果している国もあります。例えば 2001 年において，フィリピンでは地熱発電量の国の全発電電力量に占める割合が 27%，ケニアでは 12.4%，コスタリカでは 11.4%，エルサルバドルでは 4.3%になっています。

表 1：世界の発電設備容量。1995 年から 2000 年のデータは Huttrer (2001) による。

国　名	1995 (MWe)	2000 (MWe)	1995-2000 増加分 (MWe)	1995-2000 増加率 (%)	2003 (MWe)
アルゼンチン	0.67	-	-	-	-
オーストラリア	0.15	0.15	-	-	0.15
オーストリア	-	-	-	-	1.25
中国	28.78	29.17	0.39	1.35	28.18
コスタリカ	55	142.5	87.5	159	162.5
エルサルバドル	105	161	56	53.3	161
エチオピア	-	7	7		7
フランス	4.2	4.2	-	-	15
ドイツ	-	-	-	-	0.23
グァテマラ	-	33.4	33.4	-	29
アイスランド	50	170	120	240	200
インドネシア	309.75	589.5	279.75	90.3	807
イタリア	631.7	785	153.3	24.3	790.5
日本	413.7	546.9	133.2	32.2	560.9
ケニア	45	45	-	-	121
メキシコ	753	755	2	0.3	953
ニュージーランド	286	437	151	52.8	421.3
ニカラグア	70	70	-	-	77.5
パプア・ニューギニア	-	-	-	-	6
フィリピン	1,227	1,909	682	55.8	1,931
ポルトガル	5	16	11	220	16
ロシア	11	23	12	109	73
タイ	0.3	0.3	-	-	0.3
トルコ	20.4	20.4	-	-	20.4
米国	2,816.7	2,228	-	-	2,020
合計	6,833.35	7,972.5	1,728.54	16.7	8,402.21

(参考) 2008 年までの文献の情報を含めた新しいデータを付録 A に示しました。

表 2 は，**地熱直接利用**の 2000 年における各国の設備容量とエネルギー量を示したものです。全世界ではそれぞれ 15,145 MWt, 190,699 TJ/yr となっています。本表は報告のあった 58 カ国について記載してありますが，1995 年には報告が 28 カ国，1985 年には 24 カ国であったことを考えると，地熱の直接利用を行っている国，設備容量，利用エネルギー量の全てが近年増加していることがわかります。

直接利用の利用形態を設備容量順に並べると，ヒートポンプ (34.80%)，浴用 (26.20%)，暖房 (21.62%)，温室 (8.22%)，水産 (3.93%)，工業 (3.13%) の順になりま

す (Lund and Freeston, 2001)。

表 2：2000 年における世界の地熱直接利用設備容量 (Lund and Freeston, 2001 より)。
設備容量は MWt，利用エネルギーは TJ/年で表す。

国　名	設備容量 (MWt)	エネルギー利用量 (TJ/yr)
アルジェリア	100	1,586
アルゼンチン	25.7	449
アルメニア	1	15
オーストラリア	34.4	351
オーストリア	255.3	1,609
ベルギー	3.9	107
ブルガリア	107.2	1,637
カナダ	377.6	1,023
カリブ諸島	0.1	1
チリ	0.4	7
中国	2,282	37,908
コロンビア	13.3	266
クロアチア	113.9	555
チェコ共和国	12.5	128
デンマーク	7.4	75
エジプト	1	15
フィンランド	80.5	484
フランス	326	4,895
グルジア	250	6,307
ドイツ	397	1,568
ギリシャ	57.1	385
グァテマラ	4.2	117
ホンジュラス	0.7	17
ハンガリー	472.7	4,086
アイスランド	1,469	20,170
インド	80	2,517
インドネシア	2.3	43
イスラエル	63.3	1,713
イタリア	325.8	3,774
日本*1	1,167	26,933
ヨルダン	153.3	1,540
ケニア	1.3	10
韓国	35.8	753
リトアニア	21	599
マケドニア	81.2	510
メキシコ	164.2	3,919
ネパール	1.1	22
オランダ	10.8	57
ニュージーランド	307.9	7,081
ノルウェー	6	32
ペルー	2.4	49
フィリピン	1	25
ポーランド	68.5	275
ポルトガル	5.5	35
ルーマニア	152.4	2,871
ロシア	308.2	6,144
セルビア	80	2,375
スロバキア	132.3	2,118
スロベニア	42	705
スウェーデン	377	4,128
スイス	547.3	2,386
タイ	0.7	15
チュニジア	23.1	201
トルコ	820	15,756
英国	2.9	21
米国	3,766	20,302
ベネズエラ	0.7	14
イエメン	1	15
合計	15,145	190,699

*1) 日本のデータには温泉（浴用）利用量の推定値が含まれています。
(参考) 2005 年の文献の情報を含めた新しいデータを付録 A に示しました。

2. 地熱資源の性質

2.1 熱機関としての地球

地温勾配は，地球内部において，深さが増すに従って温度が増加する割合を示します。現在の掘削技術で掘り進むことのできる深さ，すなわち，10,000 m を少し超える程度の深さまでの平均地温勾配は，約 2.5～3 ℃/100m です。たとえば，地下 2～3 m の深さまでの温度（それはほぼ大気の年平均気温に等しいのですが）を 15℃とすれば，2,000 m の深さでは 65～75℃，3,000 m 深では 90～105℃，そしてさらに 2,000～3,000 m 深くまでは同程度の勾配で温度が増加します。しかし，地温勾配がそのような平均値から大きく外れる地域があります。たとえば，深部の基盤岩が急速に沈降して形成される盆地が，地質学的に若い堆積岩で満たされるような地域では，地温勾配が 1 ℃/100m より小さくなることがあります。一方，**地熱地域**と言われる地域では，地温勾配が平均値の 10 倍以上になることがあります。

地下深部で高温，そして浅部で低温というように地下に温度差があると，温度を均質化しようとする作用のために，地下深部から浅部に向かう伝導的な熱の流れが生じます。しかし，他の自然界の現象でよくあるように，実際には温度の完全な均質化は実現されません。大陸および海洋の平均**地殻熱流量**はおのおの 65 mW/m^2 および 101 mW/m^2 であり，それぞれの面積を考慮して平均値を求めると，地球全体の平均値は 87 mW/m^2 となります (Pollack ほか, 1993)。これらの値は，地球の全表面積のおよそ 62%を占める範囲の 20,201 ヶ所で調べた, 24,774 個の測定値から求められたものです。地質図を参考にすると，測定値がない場所の地殻熱流量の値を経験的に推定することができます（注：地質年代と地殻熱流量の間には，よい正の相関があることが知られており，地質年代がわかれば，その地域のおおよその地殻熱流量を推定することができます）。Pollack ほか (1993) による地殻熱流量の統計的解析結果は，出版されたものとしてはもっとも新しいものです。アメリカのノースダコダ大学では，海洋地域と大陸地域の最新の地殻熱流量のデータをインターネットで公開しています。

地下深部に行くほど温度が上がることは，ある意味で，火山や間欠泉あるいは温泉と同様に，地球内部にある熱が見たり触ったりできる形となって現れたものと言えます。これらに比べると人間が認識することは難しいのですが，地球内部の熱は他にも，地球が巨大な“熱機関”にたとえられるに値する，大きな現象も引き起こします。本章では，ひとまとめにして**プレートテクトニクス**理論と呼ばれるこの現象について説明するとともに，地熱資源とプレートテクトニクスの関係を説明しようと思います。

私たちが暮らす惑星，地球は，大陸地域では 20～65 km の厚さ，海洋地域では 5～6 km の厚さの**地殻**，約 2,900 km の厚さの**マントル**，そして半径約 3,470 km の**核（コア）**から構成されています（図 1）。地殻，マントルおよび核の物理的・化学的性質は地球の表面から中心までの間で大きく異なります。地殻と上部マントルで構成される地球の一番外側の‘殻’のことを**リソスフェア**と言います。リソスフェアは剛体のように振舞い，その厚さは大陸地域では 200km 以上，海洋地域では 80 km 以下になること

もあり，場所によって異なります。リソスフェアの下には厚さ 200～300 km の**アセノスフェア**と呼ばれる部分があり，リソスフェアと比べて剛体的でなく，より塑性的な振舞いをします。言い換えると，アセノスフェアは何百万年という地質学的時間スケールでは，流体に極めて近い振舞いをすることがあるということです。

アセノスフェアでは場所によって温度が異なるために対流が起こり，いくつかの対流するセルが数億年前に形成されました。対流は年間 2～3 cm という極めて遅い速度ですが，放射性元素の崩壊熱と地球の最深部（核）からもたらされる熱によって維持されています。これらの動きに伴い，周囲に比べ，より熱く低密度で軽い深部の岩石は地表に向かって運ばれます。一方，より冷たく高密度で重い岩石は地表近くから沈み込んで行き，再加熱され，再び地表に上昇して来ます。これは，ポットややかんの中で沸騰する水に起こる現象にとてもよく似ています。

リソスフェアが薄いところ，特に海洋地域では，対流によってアセノスフェアから上昇してきた，非常に高温でかつ部分溶融している物質が，リソスフェアを上に押し上げ，破壊します。このメカニズムによって，海洋下に 60,000 km 以上にわたって伸びる**海嶺**が形成されてきましたし，現在も形成され続けています。海嶺には，アゾレス諸島やアイスランドのように海面上に顔を出している所や，紅海のように大陸の間に拡がっている所もあります。アセノスフェアから上昇してくる溶融物質の一部分は海嶺の頂上部分から放出され，海水と接触することによって固化し，新しい地殻を形成します。しかし，大部分の物質は 2 つの流れに分かれ，リソスフェアの下面に沿って互いに反対の方向に流れていきます。絶えることなく続く新しい地殻の生成と 2 つに分かれた溶融物質の反対方向への流動は，海嶺の両側の海底を年 2～3 cm の速さで遠ざけていきます。その結果，海底（海洋リソスフェア）の領域は増加していきます。海嶺は多数の断裂によって海嶺と直角の方向に切断されており，断裂の長さは場合によっては 2,000～3,000 km に達します。それらの断裂は**トランスフォーム断層**と呼ばれています。

これらの現象から，1 つの単純な所見が導き出されます。それは，地球の表面積が時間とともに増加することはないので，海嶺に沿う新しいリソスフェアの形成と海底の拡大は，地球上の他の部分における同程度のリソスフェアの縮小を伴っているはずだということです。この縮小がまさに発生しているのが，**沈み込み帯**です。その中でも最大級のものは，太平洋の西縁や南米大陸の西岸に沿って広がっているもののように，大規模な海溝によって，その存在が示されています。沈み込み帯では，リソスフェアは下向きに湾曲して，隣接するリソスフェアの下に潜り込み，そして非常に高温な深部に沈み込んでいきます。そこでリソスフェアはマントルに“飲み込まれ”，再び次のサイクルが始まります。沈み込んでいくリソスフェア物質の一部は溶融し，地殻の断裂を通して再び地表に上昇してきます。その結果，海溝と平行にたくさんの火山を持つ**火山弧**が，海嶺とは反対側に形成されます。西太平洋のように，海溝が海洋下に存在する場合，火山弧はひとつながりの火山島を形成しています。アンデス山脈のように，海溝が大陸の縁に沿って走る場合，火山弧は大陸に多くの火山を持った山

脈を形成します。図 4 は上述した現象を示しています。

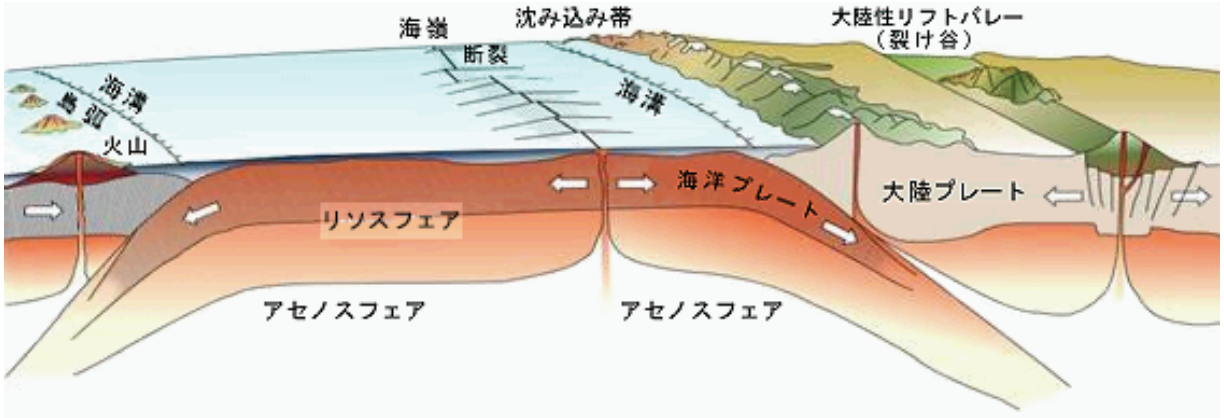


図 4：プレートテクトニクスの過程を説明する模式的な地下断面

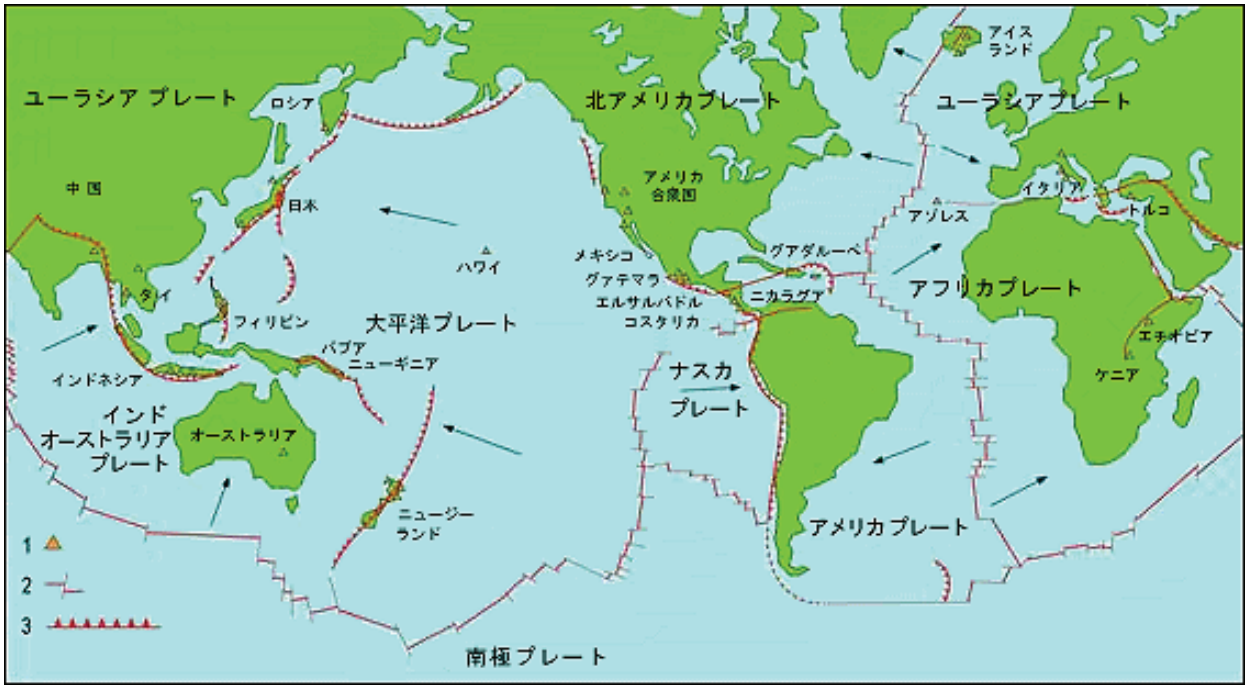


図 5：地球上のプレート，海嶺，海溝，沈み込み帯，および地熱地域の分布。矢印は沈み込み帯へ向かうプレートの移動方向を示す。 (1) 地熱発電を行っている地熱地域； (2) トランスフォーム断層（長い横ずれ断層）によって区切られた中央海嶺 ； (3) 沈み込み帯。そこでは沈み込むプレートは下方に湾曲し，アセノスフェアで溶融している。

拡大する海嶺，トランスフォーム断層そして沈み込み帯は，地球上に 6 個の巨大なリソスフェア（プレート）と他の数個の小さなリソスフェア（プレート）から構成される巨大なネットワークを形成しています（図 5)。地球の熱機関により生じた巨大な張力と，リソスフェア物質を生産したり消費したりする相反する営みにより，これらのプレートはお互いにぶつかり合うようにゆっくり移動し，絶えず位置を変えていきます。プレートの端は，弱くかつたくさんの断裂を持った地殻で構成されており，地

震活動度が高く，また，多くの火山が分布しています。そして，非常に高温な物質の上昇により，高い地殻熱流量を持つという特徴もあります。図 5 に示されるように，主要な地熱地域はプレートの端に位置しています。

2.2 地熱系

地熱系は，地温勾配が普通か，普通より高い地域に見られ，特に地温勾配が地球の平均値より一段と高いプレートの端の地域に多く見られます。前者の例では，地熱系の温度はあまり高くなく，多くの場合，経済的に利用できる深度内では 100℃より高くはありません。一方，後者の場合，地熱系の温度は低温から高温にわたり，400℃以上になる場合もあります。

地熱系とはどんなものであり，そこでは何が起こっているのでしょうか？　簡単に言えば，上部地殻内のある限られた領域において水が対流し，深部の熱源から地表（ヒートシンク）まで熱を運んでいる状態と言うことができます (Hochstein,1990)。地熱系は 3 つの主要な要素で構成されています。すなわち，**熱源，貯留層**および熱を運ぶ**流体**です。熱源は，比較的浅部 (5～10 km) にまで到達した，非常に高温のマグマ性貫入岩（600℃以上）か，低温地熱系における，すでに述べたような地下の平均地温勾配です。地熱貯留層は高温の透水性の岩石部分であり，循環する水が高温岩石から熱を抽出します。地熱貯留層は多くの場合，不透水性の帽岩（キャップロック）に覆われており，地表の涵養域とつながっています。そして，天水（雨水）が涵養域から地下に浸透し，温泉あるいは坑井からの流体生産によって地熱貯留層から流出する流体を，全面的あるいは部分的に置き換えています。地熱流体は水であり，その起源の大部分は天水です。その状態は温度・圧力に依存し，液体（熱水）の場合も気体（水蒸気）の場合もあります。水はいろいろな化学物質とともに，CO_2 や H_2S のようなガスも運びます。図 6 は非常に単純化して示した地熱系の模式図です。

地熱系で作用しているメカニズムは，主として**流体の対流**によるものです。図 7 は高温熱水系のメカニズムを模式的に示したものです。対流は，加熱とそれによる重力場中の流体の熱膨張により発生します。循環系の底部から供給される熱は，その熱水系を駆動するエネルギー源です。加熱された密度の小さい流体は上昇し，系の周辺からもたらされる密度の大きい，冷たい水と入れ替わります。対流は系の下部では温度を下げ，系の上部では温度を上昇させる性質があります (White, 1973)。

上述した現象は非常に簡単に見えますが，実際の地熱系を適切に表現する良いモデルを作ることは，決して容易なことではありません。そのためには，多くの知識とともに，多くの経験も必要です。特に高温の地熱系を扱う時にはそうです。地熱系はまた，種々の地質学的，物理学的そして化学的特性の複雑な組み合わせで構成されています。従って，いくつかの異なる地熱系が存在することになります。

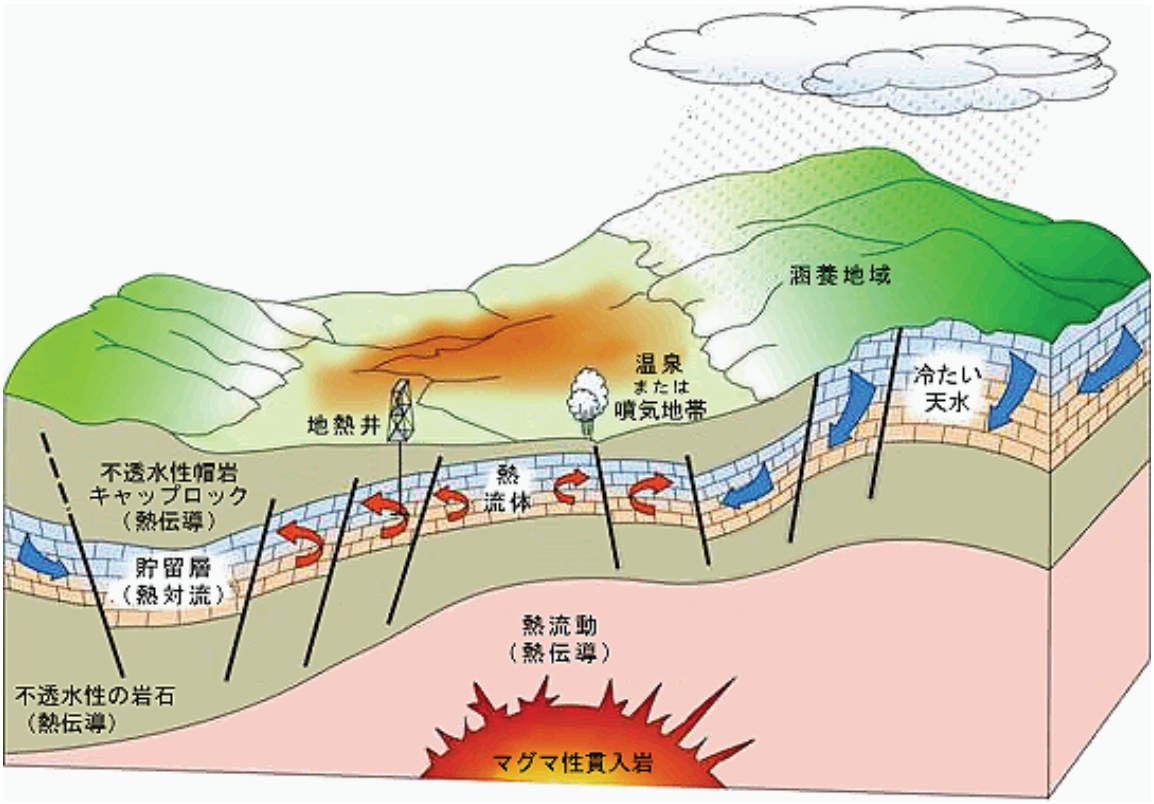


図 6：理想的な地熱系の模式図

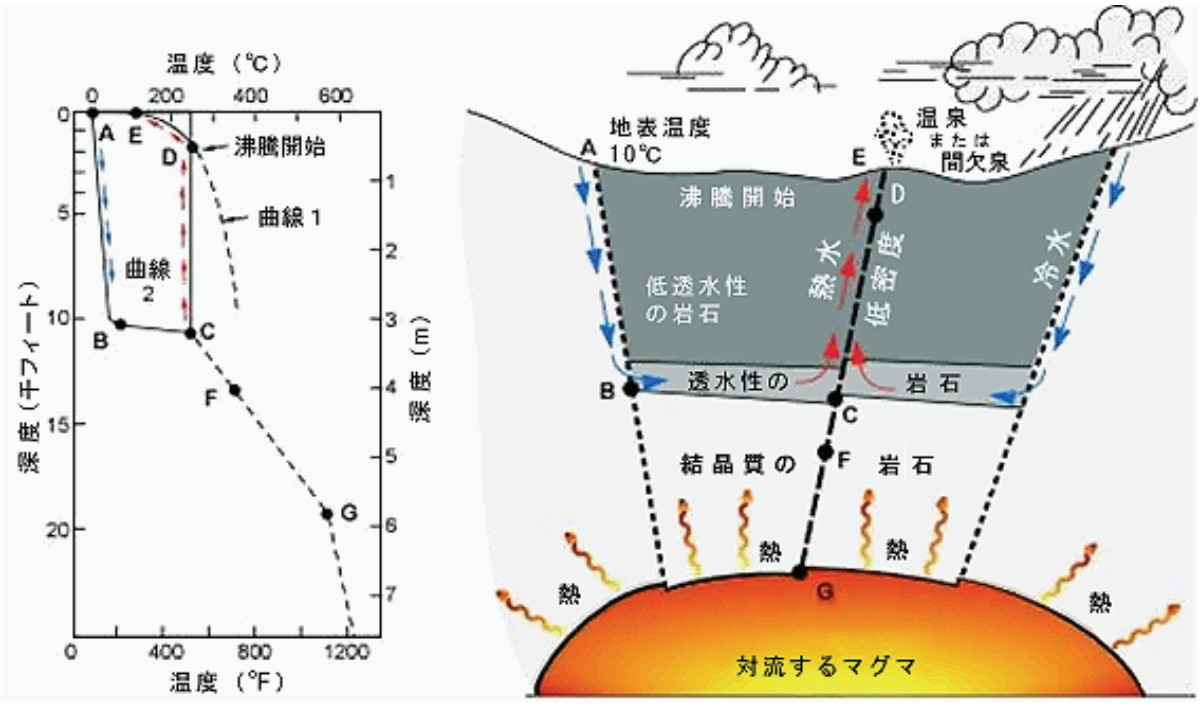


図 7：地熱系のモデル。曲線 1 は純水の沸点を示すもので，参考のために示している。曲線 2 は右の地熱系モデル図に対応した，Ａにおける流入からＥにおける流出までの，典型的な循環路に沿う温度プロファイル (White, 1973 から)。

地熱系の構成要素の中で，必ずなくてはならないものは熱源です。他の 2 つの要素は，“**人工的**に作られる”こともあります。たとえば，地熱発電所において，タービンを回すために地熱貯留層から取り出される地熱流体は，利用後，**還元井**を通じて，地熱貯留層に還元されます。この場合，貯留層への流体の涵養は人工的に行われることになります。地熱発電所の稼動に伴う環境への影響を大きく減らす方法として，世界の多くの地域で，長期間にわたって，熱水の還元が行われてきました。

還元井を通じての人工的な涵養は，古くなったあるいは使い尽くされた地熱地域の再生や維持に寄与します。たとえば，世界最大の地熱発電地域であるアメリカ・カリフォルニア州のガイザーズ地熱地域では，地熱流体の不足により，1980 年代の終わりに，蒸気生産量が大きく減少し始めました。そのため，人工的涵養の最初のプロジェクト（南東ガイザーズ生活排水リサイクルプロジェクト）が 1997 年に始められ，生活排水が地熱地域まで 48 km にわたって輸送されました。このプロジェクトにより，蒸気の不足によって休止していたいくつかの地熱発電所が復活しました。サンタローザ・ガイザーズ涵養プロジェクトと呼ばれる第 2 のプロジェクトでは，サンタローザおよび周辺の町の排水処理プラントから，66 km のパイプラインを用いて，1 日 41,500 トンの 3 次処理水を，ガイザーズ地域まで運ぶ予定です。そして，ガイザーズでは新たに掘削した坑井から涵養を行う計画です。

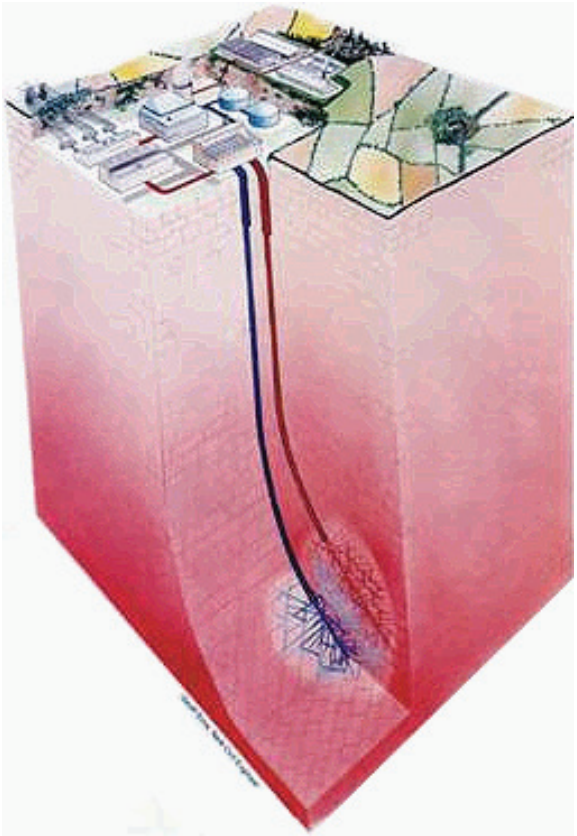


図 8：商用規模の高温岩体システムの模式図。青い坑井から水を注入し，人工貯留層で熱せられた水を赤い坑井から生産する。

1970 年に米国ニューメキシコ州ロスアラモスで最初に実験が始まった, いわゆる**高温岩体** (HDR) プロジェクトでは，流体も貯留層も人工的なものという地熱利用システムが実現されました。高温岩体システムでは，地下の高温かつ緻密な岩石に掘削された坑井を通じて水を圧入し，人工破砕帯を作ります。この作業を**水圧破砕**，造成された破砕帯を**人工貯留層**と言います。その後，この人工貯留層を貫くように，第 2 の坑井を掘削します。第 1 の坑井に水を注入すると，その水は人工貯留層を浸透し，周囲の岩体から熱を抽出して，天然の地熱貯留層のような役割を果たします。第 2 の坑井は，加熱された水を回収するのに用いられます。このように高温岩体システムは，(a) 冷水を注入するための坑井，(b) 人工貯留層，及び (c) 熱水を取り出すための坑井から構成されています。地表の熱利用プラントを含めた全システムは，閉鎖システムを構成することができます (Garnish, 1987)（図 8）。

ロスアラモスプロジェクトは，オーストラリア，フランス，ドイツ，日本，英国における他の同様なプロジェクトの先がけとなったものです。しばらくの間，それぞれのプロジェクトは独自に進められましたが，やがて，次のようなことが明らかになるにつれ新たな段階に入ることになりました。それは，深部の岩体はある程度自然の破砕帯を持っており，高温岩体プロジェクトで採用される方法と技術は，その地域の地質構造に依存するであろうということです。現在最も進んでいる高温岩体研究は，日本とフランスのアルザスで行われている欧州プロジェクトの研究です。日本では，国および企業から多額の資金が投入され, 1980 年代から数箇所でプロジェクトが行われました（肘折，雄勝，湯の森）。その結果，科学的にも技術的にも興味ある多くの成果が生み出されました。一方，ヨーロッパの高温岩体プロジェクトはいくつかのフェーズに分けて段階的に進められています。それらは，2 つの坑井の掘削を含み，その 1 つは深さ 5,060m に達しました。そこでは地球物理学的調査, 坑井間の導通試験から有望な結果が得られ，ヨーロッパのプロジェクトは現在もっとも成功しているように見えます (Tenzer, 2001)。

3. 地熱資源の定義と分類

地熱資源に関する国際標準的な定義・分類法があれば，地熱業界全体での相互理解を深めるのに役立つと思いますが，残念ながら，そういったものはありません。しかし，そんな中で，最もよく用いられていると思われるいくつかの定義と分類法を，以下に示します。

Muffler and Cataldi (1978) によれば，一般的に地熱資源と言う場合，通常私たちの念頭にあるのは，正確には**可採総資源量**と呼ばれるものです。それは，特定地域内で地球表面と地殻内特定深度までに賦存し，その場所の年間平均地表温度をもとに計算される全熱エネルギーのことを指します。可採総資源量には，**利用可能な可採総資源量**（＝資源量）が含まれ，それは将来のある特定期間（100 年以内）までに，経済的に法律に則って採取できるものを指します。このカテゴリーには，**確認経済的資源量**（＝**埋蔵量**）が含まれます。それは，他のエネルギー資源と市場競争力のある価格で，法律に則って採取可能であり，掘削，地化学，物理探査または地質学的な証拠から，その存在と特徴とが確認されている資源を指します。図 9 は，以上の内容および地熱専門家たちに使われている他の用語を，模式的に示しています。

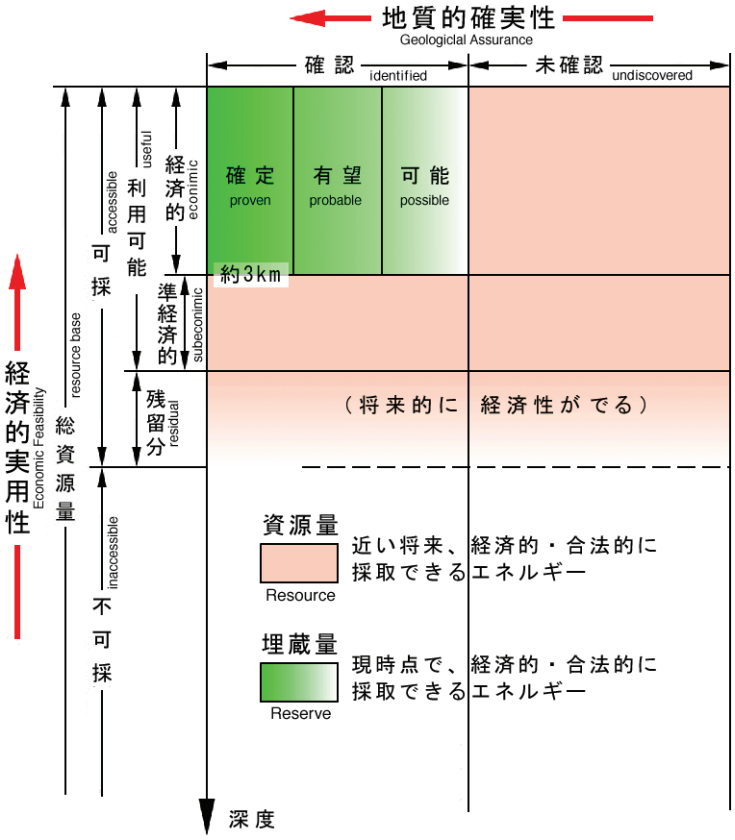


図 9：地熱資源のカテゴリー分類 (Muffler and Cataldi, 1978 より)。
縦軸は経済的実用可能性，横軸は地質的確実性を表す。

地熱資源の分類上，最もよく使われる基準は，深部の高温の岩石から地表まで熱を運ぶ役割を果たす地熱流体のエンタルピーに基づいています。**エンタルピー**は，ほぼ温度に比例していると考えて良いもので，流体中に含まれる熱量（熱エネルギー量）を表すのに用いられ，地熱資源の「価値」を大雑把に示しています。地熱資源は，流体の持つ熱量，ひいては利用形態の可能性に応じて，低エンタルピー，中エンタルピー，高エンタルピー（または温度）に分類されます。表 3 は，何人かの専門家たちによる分類です。専門用語による標準的な分類法があれば，混乱を避けられますが，そういうものが存在しない以上，低エンタルピー，中－，高－という語にはあまり意味が無く，誤解を招くことも度々ありますので，その都度，温度の値や範囲を示す必要があります。

表 3：**地熱資源の分類**（□）

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
低エンタルピー資源	＜ 90	＜125	＜100	≦150	≦190
中エンタルピー資源	90～150	125～225	100～200	－	－
高エンタルピー資源	＞150	＞225	＞200	＞150	＞190

出典: (a) Muffler and Cataldi (1978)
(b) Hochstein (1990)
(c) Benderitter and Cormy (1990)
(d) Nicholson (1993)
(e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)

熱水卓越型地熱系と，蒸気卓越型（または乾き蒸気）地熱系という分類が行われることがあります (White, 1973)。**熱水卓越型地熱系**では，圧力分布を支配する流体は液相の水で，液相の水が連続的に存在しています。多少の蒸気が存在していても，ほとんどが不連続な泡粒の状態です。こういった地熱系は，温度範囲がおよそ 125～225°C で，世界中に最も広く分布しています。このような地熱系からは，温度条件や圧力条件によって，熱水，熱水と蒸気の混合物，湿った（わずかな液相を含む）蒸気，そして場合によっては乾き蒸気が生産されます。一方，**蒸気卓越型地熱系**では通常，液体の水と蒸気が共存していますが，圧力分布を支配する相は蒸気で，蒸気が連続的に存在しています。このタイプの地熱系は，イタリアのラルデレロや米国カリフォルニアのガイザーズがよく知られていますが，比較的珍しい，高温のシステムです。このタイプでは通常，乾き蒸気か過熱蒸気が生産されます。

地熱関係者によく用いられる，**湿り蒸気**，**乾き蒸気**，**過熱蒸気**という用語は，エンジニアではない読者にとっては，説明が必要でしょう。では，できるだけ単純化して，液体の水で満たされた容器を例に，考えてみましょう。容器内の圧力は 1 気圧（1,013 ヘクトパスカル）に保たれています。これを加熱すると，温度が 100℃（圧力が 1 気圧の場合の水の沸点）になったとき，沸騰が始まり，液体から気体（蒸気）への相転換が起こります。ある程度時間が経過すると，容器内には，液体と気体の両方が存在

しています。液体と共に存在し，液相と熱平衡に達している蒸気は，湿り蒸気です。もし，容器を加熱し続け，圧力を 1 気圧に保つならば，液体は完全に気化し，容器内は蒸気だけとなります。これが，乾き蒸気と呼ばれるものです。湿り蒸気と乾き蒸気は共に，“飽和蒸気”と呼ばれます。最終的に，温度をたとえば 120℃まで上昇させ，圧力を 1 気圧に保っていると，20℃分過熱した過熱蒸気を得ることができます。言い換えると，飽和蒸気温度より 20℃高い蒸気です。こういった現象は，異なる温度-圧力のもとでも起こりますから，もちろん，地下でも発生します。数年前に，これを“天然のやかん”と名付けた人がいます。

地熱系を分類する別の方法としては，貯留層の平衡状態に基づいたがものあり，これは貯留層流体の循環と熱輸送メカニズムを考慮しています (Nicholson, 1993)。**動態系**では，貯留層には絶えず水が供給され，それが加熱された後，地表あるいは透水性の高い地層へと流れ出して行きます。熱は，系内の熱伝導と流体の循環によって輸送されます。このカテゴリーには，高温（150°C 以上）の系と低温（150°C 未満）の系が含まれます。**静止系**（停滞系，または貯蔵系とも呼ばれます）では，貯留層への流体の供給は全く無いか，あってもわずかで，熱は熱伝導によってのみ輸送されます。このカテゴリーには, 低温の系と, 異常高圧貯留層が含まれます。**異常高圧貯留層**は，巨大な堆積盆（たとえば米国のメキシコ湾）の深度 3～7 km に, 特徴的に見られます。異常高圧貯留層は，非透水性の（あるいは透水性の低い）地層中に挟まった透水性の高い堆積岩から成り，堆積層ができた時に閉じ込められた被圧地下水が熱水として存在しています。熱水の圧力は，静水圧を遥かに上回り，**静岩圧**に近くなっています。**被圧帯水層**の貯留層は，大量のメタンを含んでいることもあります。被圧帯水層からは，熱エネルギーおよび水理学的エネルギー（高圧の熱水）と，メタンガスを生産できる可能性があります。これらの資源は，大規模な調査が行われてきましたが，産業としての開発には至っていません。

地熱地域は，地理的な定義であり，通常は地表で地熱活動が見られる地域を示します。地表での活動がない場合には，地下に地熱貯留層がある場所に対応する地表を指して，この用語を使うことができます (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000)。

地熱エネルギーは通常，**再生可能**で**持続可能**と表現されますが，これらの用語を定義しておくことは，重要です。再生可能ということは，エネルギー資源の特徴を表している一方，持続可能ということは，資源がいかに利用されるかということを表しています。

地熱エネルギーを再生可能エネルギー源と位置付けることについて，一番問題視される要素は，貯留層へのエネルギー涵養量です。自然の地熱系の開発において，熱流体の移流によるエネルギー涵養は，貯留層からの生産と同じ時間スケールで行われます。このことから，地熱エネルギーを再生可能エネルギー源と分類することは正当と言えます。ところが，高温岩体や一部の堆積盆中の高温地下水については，エネルギー涵養が熱伝導だけによって行われますが，その速度が遅いため，高温岩体や堆積盆中の貯留層は，有限のエネルギー資源と考えるべきです (Stefansson, 2000)。

ある資源の**消費の持続性**は，最初にあった資源の量，再生成速度，そして消費速度に依存します。消費速度より速く資源が生成されている間は，消費を持続することができるのは明らかです。持続的開発という用語は，環境と開発に関する世界委員会 (World Commission on Environment and Development) により，「未来の世代のニーズを損ねることなく，現在の世代のニーズに適合するような」開発を表す語として，使われています。つまりこの中で“持続的開発”が意味するのは，“どのようなエネルギー資源についても，完全に持続可能な形で使う必要がある”ではなく，単に，“たとえある特定の資源が枯渇しても，未来の世代がやっていけるための代替資源が見つかればよい”ということです。このように，ある特定の地熱地域を持続可能な形で開発する必要はないかもしれません。おそらく，地熱の持続性について，私たちの研究が向かうべき方向は，発電と直接利用の両方に関して，国全体または地域全体での地熱生産総量を，ある期間，例えば 300 年間，一つの地熱系が枯渇した場合は別の新しい地熱系を利用することによって，一定値に保つことでしょう (Wright, 1998)。

4. 探査

4.1 探査の目標

地熱探査の目標として，次のような事項があげられます。

1. どのような地熱現象かの確認
2. 役に立つ地熱生産域の存在の確認
3. 資源規模（大きさ）の評価
4. 地熱地域のタイプの特定
5. 生産性の高い範囲の特定
6. 地熱地域の坑井から生産されるであろう流体の熱含有量の特定
7. 将来行うモニタリングの結果と比較できるような，主な基礎データのとりまとめ
8. 環境に対し敏感なパラメータについて，開発前の値を特定
9. 開発段階で問題を起こしうる，あらゆる特性についての情報収集

それぞれの目標の相対的な重要性は，さまざまな要因によって変わってきますが，ほとんどの要因は資源そのものに密接に関係しています。その中には，期待される利用量，利用可能な技術，経済性，そして状況や場所やタイミングといったものも含まれ，それらは全て，探査プログラムに影響します。例えば，**地熱徴候**の存在を調べる予備踏査は，未開発の遠隔地では重要な意味を持ちますが，それまでの研究で地熱徴候の存在がよく知られた地域では重要ではありません。また既に自然流出している熱量より明らかに少量ですむような小規模開発を考えている場合には，資源の規模を評価することは，あまり重要ではありません。熱エネルギーを地域暖房その他の低温施設で利用する場合には，高温流体はもはや重要な目標ではありません (Lumb, 1981)。

これらの目標に至るために，数多くの探査技術が利用されています。これらの手法のうちの多くは，他の研究分野で広く試され，現在も使われているものです。とは言え，鉱山や石油・ガス探査で有効だと証明されてきた技術や手法が，そのまま地熱でも最適な方法というわけではありません。逆に，石油探査ではあまり用いられなかった手法が，天然の熱を探す上では理想的な道具だとわかることもあります (Combs and Muffler, 1973)。

4.2 探査方法

どのような**探査プログラム**においても，最初に行われるのが**地質・水理学調査**です。その基本的な目的は，より詳細な調査を行うに値する地域の位置や拡がりを確かめ，その地域を開発するのに最も適切な方法を提案することです。地質・水理学調査は，それに続くあらゆる段階の地熱研究や，探査井および生産井の位置決定に至るまでの全ての段階で，非常に重要な役割を果たします。また，他の探査手法で得られたデータを解釈する上でも，さらには，地熱系の現実的なモデルを構築したり，資源量を査定したりする上で，重要な基礎データとなります。地質・水理学調査から得られた情

報はまた，貯留層エンジニアや生産エンジニアにとっても重要な情報として，生産段階で用いられます。適切な探査プログラムと効率的な研究の調整によって，探査の期間やコストは，大幅に削減することが可能です。

地化学調査（**同位体地化学**を含む）は，その地熱系が蒸気卓越型であるか熱水卓越型であるかを確認し，深部において最低限どの程度の温度が期待されるかを推定し，供給される水の同質性を評価し，深部流体の化学性状を推定し，熱水の供給源を決定する上で，有効な手法です。また，還元の段階やプラント管理において生じる諸問題（流体組成の変化，パイプやプラント設備の腐食や**スケール**の沈着，環境への影響など）を明らかにし，そういった問題の回避・対処方法についても，貴重な情報を与えてくれます。地化学調査は，調査地域内の地熱徴候地（温泉やガス孔）および坑井での水やガスのサンプリング，化学分析あるいは同位体分析で構成されます。地化学調査は，開発プログラムをたてる上で重要なデータを提供してくれますし，他の精巧な手法（例えば物理探査）に比べればコストも低い方なので，他の高費用の手法に進む前に，できる限り利用しておくべきでしょう。

物理探査は，地表または地表に近い深度から，深部の地層の物理パラメータを間接的に調べることを目的としています。こういった物理パラメータには，以下のものが含まれます。

・温度（温度調査）
・電気伝導度（**電気探査**または**電磁探査**）
・弾性波の伝播速度（**地震探査**）
・密度（**重力探査**）
・磁化強度（**磁気探査**）

このうち，例えば地震探査，重力探査，磁気探査などの方法は，もともと石油探査で採用されていた手法で，深部にある地熱貯留層を形成する地質構造の形状，規模，深度，その他の貴重な情報を与えてくれるものです。しかし，こういった地質構造に，調査の第一目的である流体が実際に含まれているかどうかについては，ほとんど，あるいは全く情報を与えてくれません。したがって，こういった手法は，探査の最終段階で，探査井の位置を決定する直前に，詳細な地質構造を検討する目的で用いるべきでしょう。地質構造中に地熱流体が存在しているかどうかについては，電気探査や電磁探査によって調べることができます。これらの探査法は，他の調査法と比較して，流体の存在や温度に対する感度が高いからです。これら 2 つの手法は，これまで広く適用され，満足な結果が得られて来ました。**マグネトテルリック法**（MT 法）は，太陽の磁気嵐によって起こる電磁波を利用した手法ですが，ここ数年で大きく改良され，現在では広範にわたる応用が可能になっています。ただし，この手法には高性能の装置が必要であり，都市部ではバックグラウンドノイズの影響を受けやすいという面があります。MT 法の主な利点は，電気探査や他の電磁探査技術に比べて，より深い部分の構造を明らかにすることができるということです。**コントロールドソース・オーディオマグネトテルリック法**（CSAMT 法）は，近年開発された方法で，天然の電磁

波の代わりに，人工的な誘導電磁波を利用します。この技術は，従来の MT 法に比べて探査深度は浅いのですが，早く，安く，ずっと詳細に調べることができます。

熱に関する探査技術（温度測定，地温勾配および地殻熱流量の決定）はしばしば，貯留層上面の温度についての，適切な推定値を提供してくれます。

多少の差こそあれ，物理探査法はどれも経費（コスト）が高額になります。また，どんな状況や条件でも無関係に使えるという物理探査法はありません。ある特定の地質状況については素晴らしい結果が得られた手法でも，他の状況では，全く不満足な結果しか得られないかもしれません。従って，探査コストを削減するためには，どの物理探査法を利用するかについて，物理探査の専門家が地質学者とよく協力しながら，慎重に選ぶことが重要です (Meidav, 1998)。

探査井の掘削は，いずれの地熱探査プログラムにおいても最終段階行われ，地熱貯留層の実際の特性を特定する唯一の方法です (Combs and Muffler, 1973)。探査井で得られたデータに基づいて，地表探査の結果から入念に作られたあらゆる仮説やモデルを実証したり，貯留層が生産的であるかどうか，つまり，意図した目的で用いる上で適切な性状の流体を充分に有するかどうかを，確かめることができます。ですから，探査井の位置を決めることは，非常に精巧性を求められる作業なのです。

4.3 探査プログラム

地熱探査プログラムを立てる前に，既存の全ての地質，物理探査，地化学のデータを集め，対象地域およびその周辺で過去に行われた地下水，鉱物，石油資源についての調査結果から利用できるあらゆるデータと一緒に，まとめあげる必要があります。これらの情報はしばしば，地熱探査プログラムの目標を決定する上で重要な役割を果たし，コストの大幅な削減につながるからです。

探査プログラムは通常，1 段階ずつ築かれていきます：**踏査**，**プレ・フィージビリティ調査**，**フィージビリティ調査**。これらの各段階において，あまり有望でない地域を徐々に除外し，最も有望な地域に集中させていきます。プログラムが進むに連れて，調査手法もより精巧で詳細なものへと，次第に変化します。プログラム全体の規模や予算は当然，目標や，期待される資源の重要性，そして予定される利用形態に応じて違います。探査プログラムは変更可能で，各段階の種々の調査結果によって再考されるべきですし，また地質-地熱モデルも同じように，最新の情報に応じて漸次改良されるべきです。こういったプログラムの再考をする度ごとに，各段階で得られた結果に応じて，もはや不要と考えられる作業を除外して別の手法を導入していくのが理想的でしょう。調査の数量や規模が縮小されれば，明らかにそれだけコストが下がる一方，誤りや失敗の危険はその分増すわけです。逆に，誤りの危険を下げるためには，全体のコストが上がります。地熱探査プログラムの経済的成功は，この 2 つの適切なバランスを見つけることに懸かっています。

5. 地熱資源の利用

発電は，高温地熱資源（＞150℃）の最も重要な活用方法です。中低温の地熱資源（＜150℃） は，多くの異なった形で利用されます。温度別に地熱流体の利用方法を示したリンダル線図 (Lindal, 1973) は，現在でも有効なものです。図 10 にバイナリー発電を追加したリンダル線図を紹介します。20℃以下の流体は利用の機会が少なく，特殊な条件またはヒートポンプでしか利用されません。リンダル線図から，地熱資源の利用に関し，(a) 各温度域での段階的な使用や複合的使用によって，地熱プロジェクトの実現性を高めることができる，(b) 地熱資源の温度によって利用方法が制限されるが，地熱流体利用上の熱サイクル設計が既存のものより改良されれば，地熱資源の適応範囲が広がる可能性がある，という 2 つの重要な点が読み取れます (Gudmundsson, 1988)。

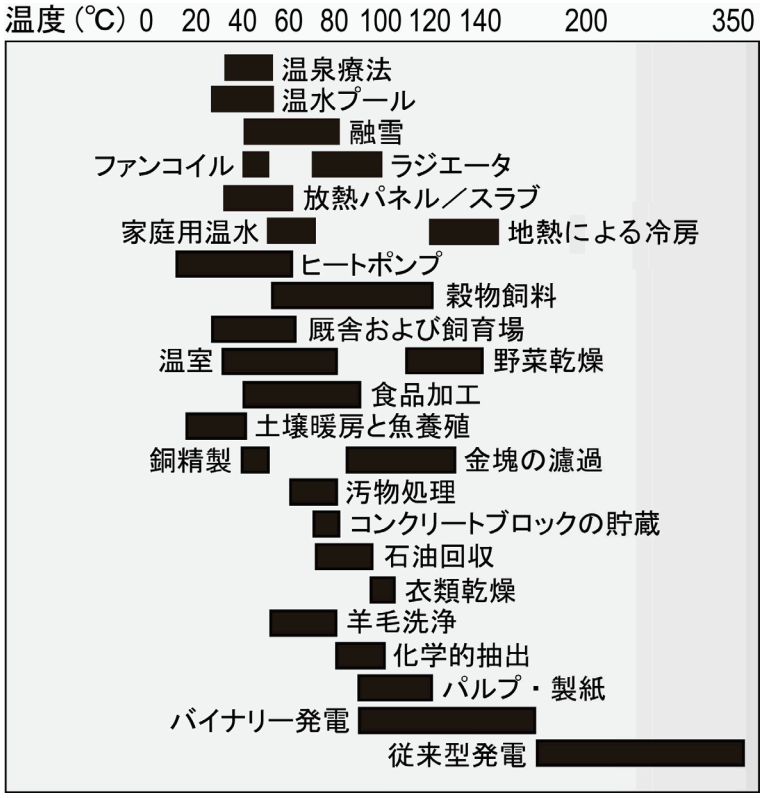


図 10：地熱流体の利用方法を示す図 (Lindal, 1973 より)

5.1 発電

発電は，地熱資源の特性により，主に従来式の**蒸気タービン**またはバイナリープラントによって行われます。

従来式の蒸気タービンは最低 150℃の流体が必要であり，大気開放（背圧式）または復水式のいずれも適用可能です。背圧式タービンは簡易で安価です。乾燥蒸気井からの蒸気が直接，または熱水卓越型坑井から気水分離された後の蒸気がタービンに入

り，大気へ放出されます（図 11）。この方式では，同一の蒸気圧力に対して単位電力量当りの蒸気消費量は復水式のほぼ 2 倍となります。しかし背圧式タービンは，試験プラント，予備プラント，蒸気が少ない孤立した生産井，または開発段階での試験井から発電する場合には，極めて有効です。また，蒸気内に非常に多くの**非凝縮ガス**を含んでいる場合（＞12％重量）にも用いられます。背圧式設備は短期間で製作，据付けされ，注文してから僅か 13～14 月足らずで運転に入ることができます。背圧式は主に 2.5～5 MWe の小容量設備に用いられます。

復水式は，多くの補機を必要とし，背圧式に比べて複雑で大きく，製作，据付けも 2 倍の期間を要します。しかし，復水式の蒸気消費率は背圧式の半分程度です。復水式は容量が 55～60 MWe のものが一般的であり，近年では 110 MWe の復水式プラントも建設されています（図 12）。

バイナリー発電技術の進歩により，中低温の地熱流体や熱水卓越型での気水分離器からの排熱水を利用した発電が非常に促進されました。**バイナリー発電**プラントでは，通常有機媒体（ノルマルペンタン等）が二次作動流体として使用されます。これらの媒体は蒸気と比べて沸点が低く，低温で蒸発します。二次流体は一般的な**有機ランキンサイクル** (ORC) によって利用されます。熱交換器によって，地熱流体から二次流体へ熱が伝わり，二次流体は加熱され蒸発します。生成された蒸気が通常の軸流タービンを駆動させ，冷却・凝縮された後，再び熱交換器に戻ります（図 13）。

バイナリー発電システムでは，適切な二次媒体を選ぶことによって 85～170℃の地熱流体を利用するように設計することができます。温度の上限は有機二次媒体の熱安定によって制限され，下限は技術的経済的な要因によって制限されます。この温度以下では，熱交換器の大きさによっては，プロジェクトの経済性が損なわれる恐れがあります。中低温の地熱流体（又は排熱体）を利用する場合に加えて，地熱媒体をフラッシュさせての利用を避けたい場合（坑井でのスケール付着を避ける等）にも，バイナリー発電システムが有効です。この場合には，坑内ポンプにより，流体を加圧された状態に維持し，バイナリーユニットにより流体からエネルギーを取り出すことができます。

バイナリー発電プラントは，通常数百 kWe から数 MWe の小型モジュール方式で建設されます。これらのユニットを複数連結させることによって，数十 MWe の発電プラントが構成されます。この場合のコストは，いくつかの要因に左右されますが，特に地下から生産される地熱流体の温度に依存します。地熱流体の温度が，タービンや熱交換器，冷却設備の大きさに影響を与えます。プラント全体の大きさは，標準モジュールユニットを連結することによって大容量化が可能ですので，コストにはさほど影響しません。

バイナリー発電は，コスト的に非常に優れており，170℃未満の熱水卓越型の地熱流体から取り出したエネルギーを利用して発電する技術です。

1990 年代には，水とアンモニアの混合物を作動流体として利用する新しいバイナリー発電システム，カリーナサイクルが開発されました。作動流体は，高圧タービン内

で過熱状態で膨張し，再加熱された後に低圧タービンに入ります。低圧タービンで二度目の膨張をした飽和蒸気は，再生ボイラーを通った後，水冷式凝縮器で凝縮されます。カリーナサイクルは，既存の ORC バイナリー発電システムよりも効果的ですが，より複雑な設計となります。

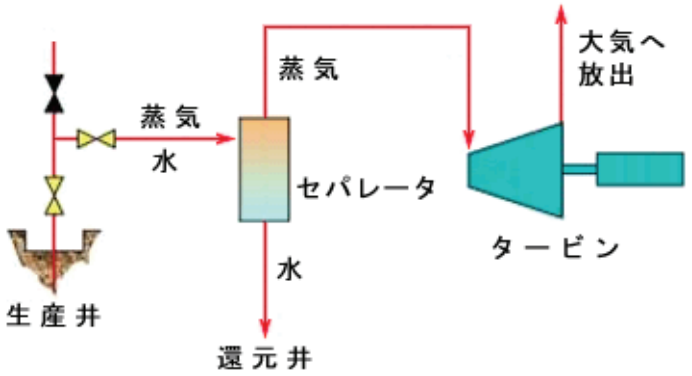


図 11：背圧式地熱発電設備の概略図。地熱流体は赤色で示す。

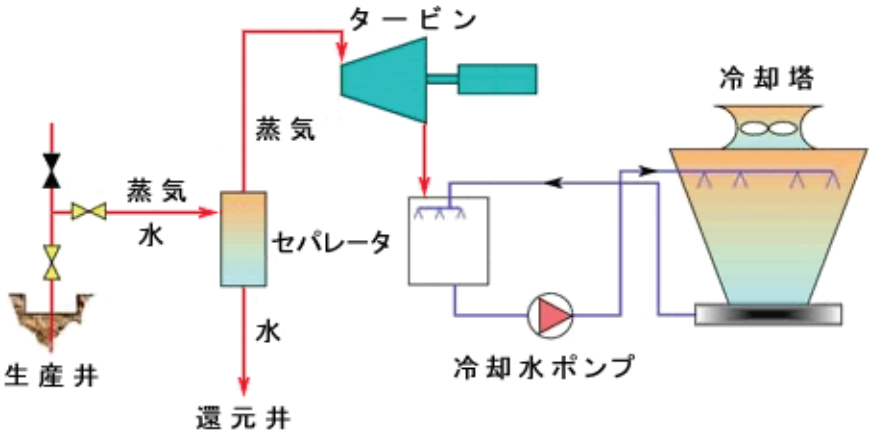


図 12：復水式地熱発電所の概略図。高温の流体を赤で，冷却水を青で示す。

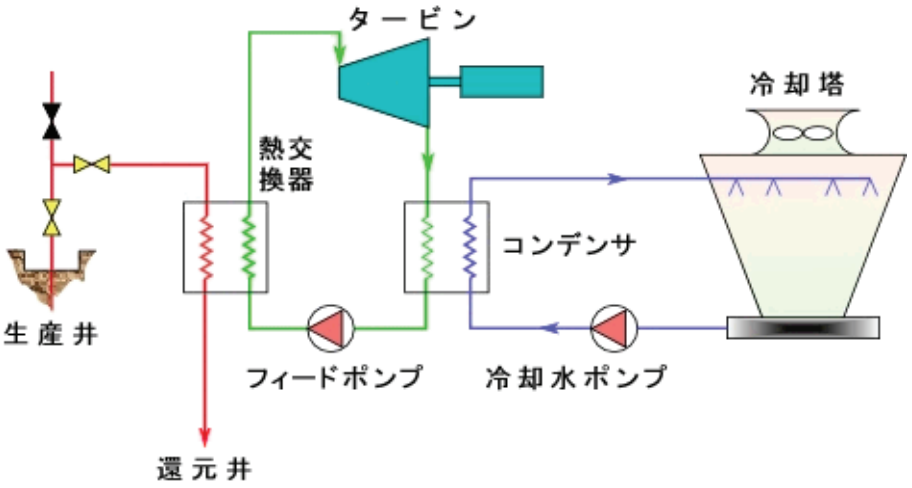


図 13：地熱バイナリー発電プラントの概略図。地熱流体は赤色，二次媒体は緑色，冷却水は青色で示す。

従来型，新型を問わず，小型発電プラントは，新坑井の掘削によるリスクを軽減させることだけでなく，さらに重要なことは，遠隔地のエネルギー需要に応えることができるという点です。地熱のようにその地域に存在するエネルギー資源を活用することができれば，多くの地域社会の生活水準を飛躍的に改善することができます。電気によって，灌漑用水を汲み上げたり，果物，野菜を冷凍して長期保存したりするといった，平凡ではあっても大変重要な多くのことが可能になるのです。

小型発電プラントの利点は，一般的な燃料の供給が困難な地域や，近くに高圧送電線があっても接続の経費が高過ぎるような地域において，明確に現れます。高圧送電線から電気を取り出すのに必要な降圧変圧器は 675,000 米ドル（約 7 千万円）以上であり, 木製の電柱を使い 11 kV で配電するという最も単純な配電形式を用いても, 1 km 当り 20,000 ドル（1994 年，約 2 百万円）はかかるため，小さな遠隔地に電力供給することは極めて困難です。それに比べ，バイナリー発電ユニットの建設価格（1998 年）は 1,500～2,500 ドル/kWe（約 15 万円～25 万円，掘削費は含まない）です。系統から隔絶された地域での**一人あたりの電力需要**は，途上地域で 0.2 kWe，先進地域では 1.0 kWe 以上ですから, 100 kWe の発電プラントで約 100～500 人の需要を賄うことができます。1,000 kWe の発電プラントでは 1,000 人から 5,000 人の需要を賄うことが可能です（Entingh ほか, 1994）。

5.2 地熱の直接利用

地熱の直接利用は，地熱エネルギー利用の中でも最も歴史が古く，多方面で広く用いられています（表 2）。浴用，室内暖房，地域暖房，農業利用，養殖，工業利用などは最もよく知られた直接利用ですが，現在では地中熱ヒートポンプが一番事例の多い利用方法になりました（2000 年には，全エネルギー利用の 12.5%を占めました）。このほかにも，きわめて小規模ながら，特殊な熱利用が多くみられます。

室内暖房と**地域暖房**は，アイスランドで広く普及しています。同国の地熱による地域暖房は 1999 年末までにおよそ 1,200 MWt にまで増えました（図 14）。東欧をはじめ，米国，中国，日本，フランスなどでも広く利用されています。

地熱による地域暖房には多額の投資が必要です。その主なものは, 生産井・還元井，坑内ポンプ，送水ポンプ，パイプライン，配管ネットワーク，監視制御機器，過負荷制御室，貯湯タンクなどの初期投資です。しかし，運転コストは従来の暖房より安価で，ポンプ動力，システム維持費，制御監視経費などがその主なものです。初期投資を決める重要な要素は，地域の面積に対してどの程度の熱需要があるかです。給湯配管システムは値段が高いだけに，狭い区域に大きな熱需要があれば，地域暖房計画の経済効率は良くなります。気候条件さえ合えば，冷暖房の双方を行うことで，幾らか経済的なメリットが得られることもあります。冷暖房であれば，暖房のみの場合より稼働率が高くなり，エネルギー単価が下がるという訳です (Gudmundsson, 1988)。

地熱による冷房は，吸収式冷凍装置の熱源に地熱を用いたものです。この技術は周知のもので，装置の入手は簡単です。吸収式冷凍サイクルでは，エネルギー源として

電気ではなく熱を使います。冷却過程は二つの流体を用いて行われます。一つは冷媒で，その循環の過程で蒸発・凝縮を繰り返します。もう一つは吸収溶液です。0℃以上の場合（主に部屋や工場の空調），循環サイクルには吸収溶液として臭化リチウムを用い，冷媒には水を用います。0℃以下の場合は，アンモニアと水の組み合わせで行います。アンモニアが冷媒で，水が吸収溶液です。地熱流体が再生器へのボイラー蒸気の代わりをします。そのため地熱流体の温度が 105℃以下になると，効率が落ちます。

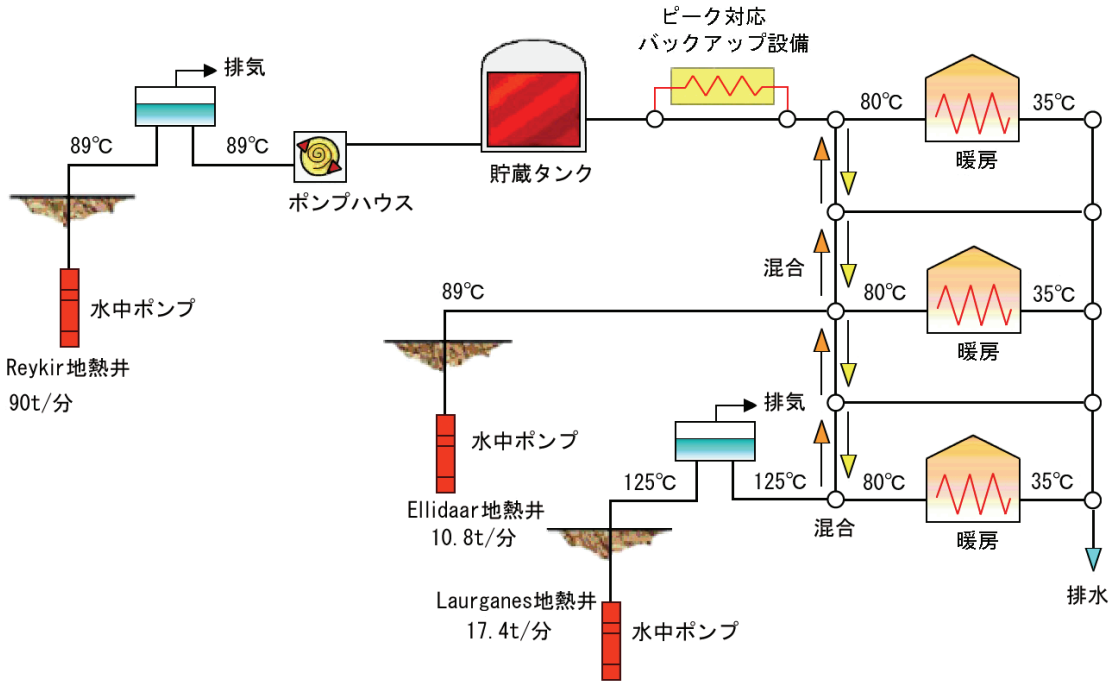


図 14：レイキャビックの地域暖房システムの概念図（Gudmundsson, 1988 より）

地熱による空調（暖房，冷房）は，**地中熱ヒートポンプ**の普及により 1980 年代に急速に成長しました。さまざまな地中熱ヒートポンプシステムの開発により，大地，浅い地下水層，池などの低温熱源の熱容量を引き出して経済的に活用することができます（Sanner ほか, 2003）（図 15）。

ヒートポンプというのは低温から高温へと自然の熱の流れに逆らって熱を動かす機械です。ですから冷蔵庫と何ら変わりありません（Rafferty, 1997）。冷却装置（室内のクーラー，冷蔵庫，冷凍庫など）はいずれも，ある空間から熱を運び去り，その熱をより高温で排出します。ヒートポンプと冷蔵庫の唯一の違いは，求められている効果です。つまり冷蔵庫の場合は冷やすことであり，ヒートポンプの場合は暖めるということです。多くのヒートポンプに見られる第二の特徴は，反対方向の運転が可能で，暖房も冷房もできるということです。地中熱ヒートポンプも当然ながら運転するのに電気エネルギーが必要です。しかし，気候条件と設計が適切であれば，抽出される熱エネルギーは，投入した電気エネルギーを大きく上回ります（図 16）。

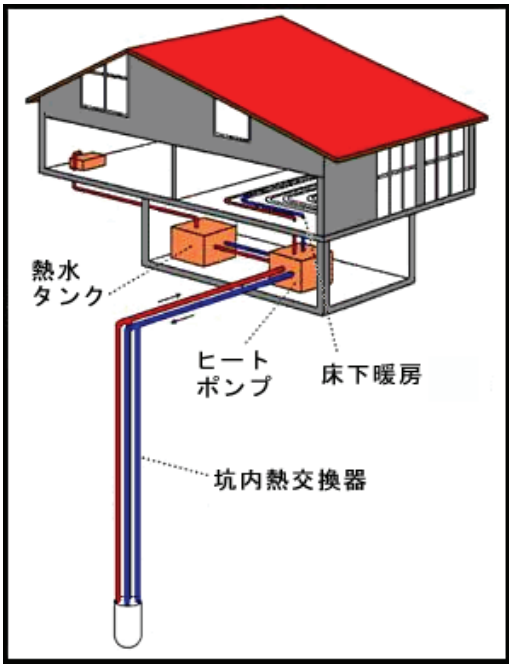


図 15：典型的な地中熱ヒートポンプ (Sanner ほか, 2003 より)

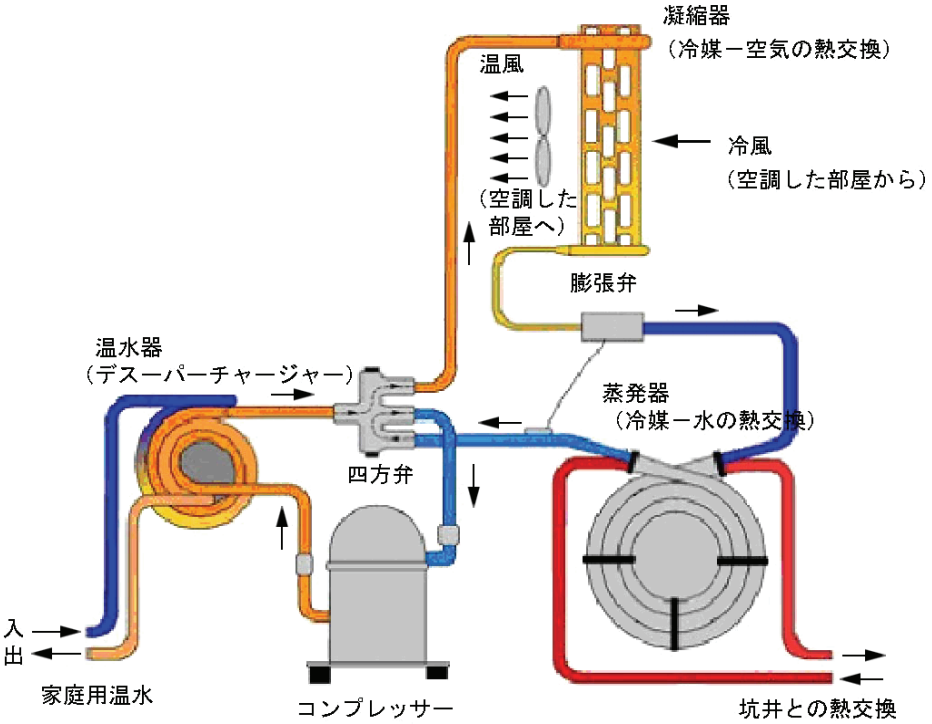


図 16：暖房運転中のヒートポンプの概念図
(米国オレゴン州クラマスフォールズ，ジオヒートセンター)

坑内熱交換型ヒートポンプシステム (図 15) と地下水利用型ヒートポンプシステムは，少なくとも 30 ヶ各国以上で使われており，その総熱容量は 9,500 MWt (2003 年)にも達します。その多くは米国であり，500,000 機，総熱容量 3,730 MWt です。スウェーデンは 200,000 機，2,000 MWt，ドイツは 40,000 機，560 MWt，カナダは 36,000

機，435 MWt，スイスは 25,000 機，440 MWt，オーストリアは 23,000 機，275 MWt です (Lund ほか, 2003)。これらのシステムで利用されるは地下水層や地層の温度は，5～30℃です。

農業利用

地熱流体の**農業利用**には，路地栽培と温室栽培とがあります。地熱水は，路地栽培では灌漑用または土の温度上昇に使われています。温水を利用して畑を灌漑する場合，大きな難点があります。それは温水の温度を作物に被害が出ない程度に低く抑えつつ，土壌の温度を効能が認められる範囲まで上昇させるためには，土地を水浸しにしてしまうほど大量の水が必要になることです。この解決策として，地中埋設配管による地温調整と灌漑を組み合わせる方法があります。灌漑はしないで地中埋設配管で土だけを暖める方法では，パイプ周囲の土の湿度が低下して断熱効果を示し，**熱伝導度**が下がってしまいます。従って最も良い方法は，パイプで土を暖めながら，灌漑を行う方法でしょう。その場合，潅漑に用いられる地熱流体の化学成分が植物に悪い影響を与えないよう, 慎重に監視する必要があります。路地栽培での温度制御の利点は，(a) 環境温度が低いことから生じる冷害の予防， (b) 生育期間の延長，生育の促進，収穫量の増加， (c) 土の殺菌効果，があげられます (Barbier and Fanelli, 1977)。

地熱エネルギーの最も一般的な農業利用は，やはり**温室利用**です。多くの国で大規模に実施されています。野菜や花卉の季節外の栽培，または，栽培地の気候とは異なる気候条件での栽培ができるのは，これまでに実験を重ねた技術の成果です。植物の成長に最適な温度（図 17)，光量，二酸化炭素濃度，土と空気の湿度，風量などから，最適生育条件を見つけることが可能になります。

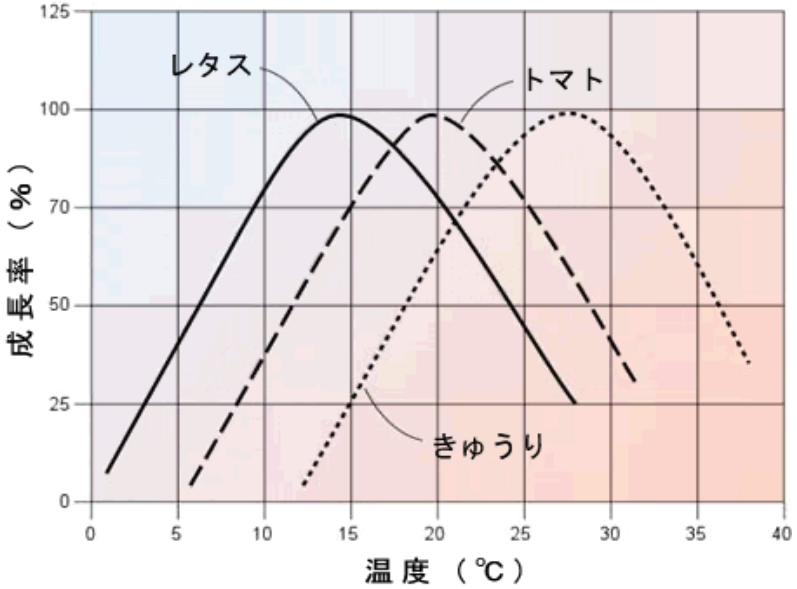


図 17：作物の生育曲線 (Beall and Samuels, 1971 より)

温室の壁には，ガラス，ファイバーガラス，硬化プラスチック板，ビニールシートなどが使われています。ガラスはプラスチックより透過性が良く，光がよく入ります。しかし，断熱効果は悪く，衝撃にも弱く，重くてプラスチック板よりは高価です。最も簡単な温室は，一枚のビニールシートで覆ったものですが，最近は，中間に空気を入れた二重のビニールシートもみられます。これを用いると，側面からの熱損失が 30～40%少なく，温室の全体的な効率を高めます。温室の暖房では，熱交換機で強制的に空気を循環させたり，熱水を地中や地面に設置したパイプやダクトで循環させたり，側面に沿ってあるいはベンチの下にフィン（ひれ）のついたパイプを配置して熱水を循環させたり，あるいはこれらを組み合わせて温室効果を高めています（図 18）。

野菜，花，鉢植え植物，樹木の苗栽培などでは，暖房費が生産コストの 35%にもなることがありますが，温室暖房に地熱を利用することによって，かなりのコスト削減ができます。

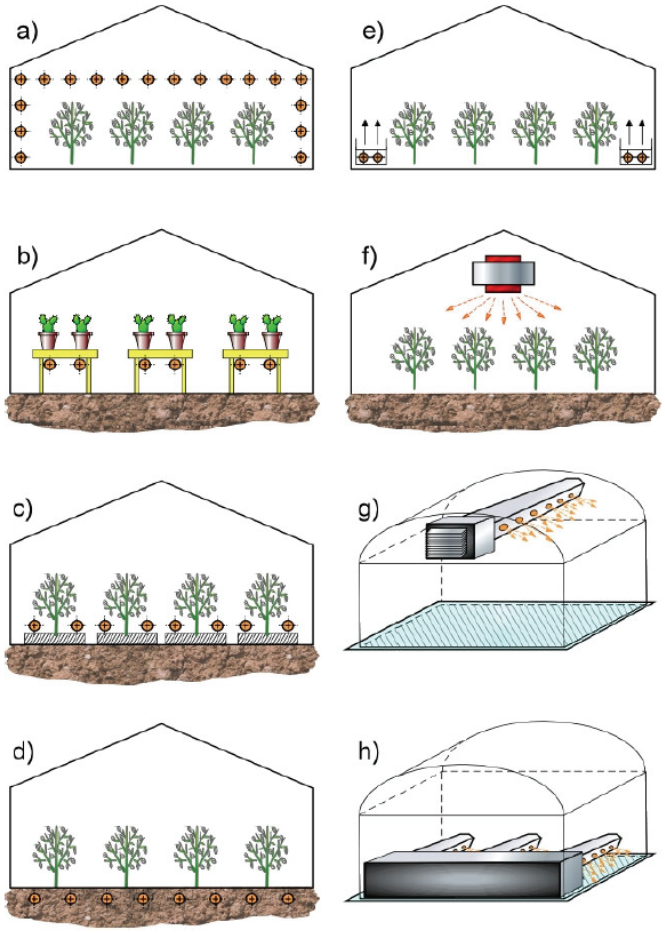


図 18：地熱利用温室（Von Zabeltitz, 1986 より）。自然の空気循環（自然対流）：(a)パイプ暖房，(b)ベンチ暖房，(c)低位置パイプ暖房，(d)土暖房。強制空気循環（強制対流）：(e)側方暖房，(f)扇風機，(g)上部配管，(h)下部配管。

畜産

野菜や植物と同様に，家畜飼育や魚類養殖も，環境温度条件の最適化によって量，質ともに生産を向上させることができます（図 19）。多くの場合，地熱水は**畜産**と温室の組み合わせで有効に利用されています。動物飼育施設の暖房に要するエネルギーは，同面積の温室に必要とされるエネルギーの約半分であるため，熱エネルギーの**カスケード利用**（段階利用）ができます。温度制御された環境での飼育は，動物の健康管理にも良く，高温の熱水は，動物小屋や排泄物の掃除，消毒，乾燥にも利用できます (Barbier and Fanelli, 1977)。

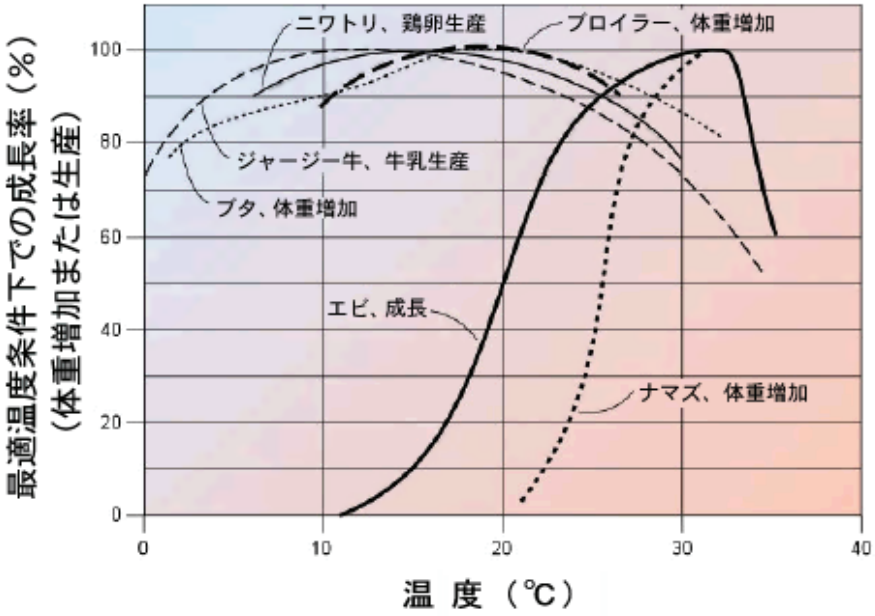


図 19：食用動物の成育・生産と環境温度との関係 (Beall and Samuels, 1971 より)

魚介類養殖

管理された環境で養殖魚類を育てることは，今日，需要の増加に伴って世界的に重要度を増してきています。図 19 に見られるように，陸の生き物と水中の生き物では成長曲線に違いがみられ，陸上の生き物より水中の生き物は温度管理が重要です。人工的に最適温度を維持することで，外来種を養殖したり，生産を増やしたり，時には倍増させることも可能です (Barbier and Fanelli, 1977)。

養殖される典型的なものは，コイ，ナマズ，バス，ティラピア，ボラ，ウナギ，サケ，チョウザメ，エビ，ロブスター，ザリガニ，カニ，カキ，ハマグリ，帆立貝，ムール貝，アワビです。

ワニも観光や皮革を目的にして養殖が行われています。これは儲かる商売かも知れません。米国の例では，ワニを 30℃の環境で飼育すれば 3 年で 2 m の大きさまで成長しますが，自然界では同じ期間で 1.2 m にしか成長しないことがわかりました。これら爬虫類の飼育はコロラド州やアイダホ州の農場でここ数年行われており，アイスラ

ンドでも計画があると言われています。

水槽飼育

水槽飼育の環境温度は普通 20～30℃の範囲です。設備の規模は，地熱流体の温度，水槽の飼育温度や熱損失により変わります。

螺旋藻の飼育も養殖の一種とされています。これは単細胞で，螺旋形をした青緑色の微小藻であり，スーパーフードとも呼ばれることもあります。というのは，栄養素が多く含まれているからです。これが普及すれば，世界の貧しい国々の飢餓問題を解決するとされていますが，まだ現在は栄養価の高いサプリメントとして市場に出ているだけです。螺旋藻は現在，熱帯・亜熱帯の国々の湖や人工的な池で，短時間の生育に理想的な条件（高温で二酸化炭素が多いアルカリ環境）での養殖が始まっています。既に温帯の国々では，通年に渡って螺旋藻の生育に必要とする熱を地熱エネルギーによって供給することに成功していいます。

その他利用

地熱流体は，蒸気であったり熱水であったりと，その温度幅が大きいため，**工業利用**も行われています（図 10，リンダル線図参照）。その利用形態はさまざまで，工業用製品加熱 (Industrial process heating)，蒸発，乾燥，蒸留，殺菌，洗浄，除氷，塩抽出などがあります。工業用製品加熱は 19 カ国で利用されています (Lund and Freeston, 2001)。装置は概して大型であり，エネルギーの消費は大きいのが特徴です。例としては，コンクリートの養生，水や炭酸水の瓶詰，製紙，自動車部品製造，石油の回収，牛乳の殺菌，皮革産業，化学的利用，二酸化炭素抽出，洗浄，**珪藻土**の乾燥，パルプ・紙の処理，ホウ酸・ホウ素生産などです。また，低温の地熱流体を滑走路の除雪，除氷や霧防止に利用しようとする計画もあります。日本ではある中小企業が，地熱熱水中の硫化水素の漂白能力を使って革新的な繊維をつくり，婦人用のきれいな織物をつくることに成功しています。同時に，軽量の「地熱材木」を試験的に製造し，ある種の建築に適することを実証しています。これは，材木を熱水中で処理する段階で，材木に含まれる多糖類が加水分解し，材質をより多孔質で軽量に変化させるものです。

5.3 経済性の考察

プラント建設費や運転のコストであれ，地熱エネルギーによる産物の価格であれ，コスト試算する際に考えなければならない要素は，他のエネルギー源に比べて，数も多く複雑です。それでも，プロジェクトを立ち上げる前には，それらすべての要素を念入りに評価しなければなりません。ここで触れる内容は，一般的な特性のほんの数例に過ぎませんが，現地状況の情報や，利用できる地熱流体の価値と共に，投資家が決断する際の助けにはなるでしょう。

地熱資源を利用したプラント（地熱動力を利用した施設）は，生産井，地熱流体輸送パイプライン，利用プラントによって構成され，それにしばしば還元井も加わりま

す。これらすべての要素の相互関係は，投資コストに強く影響しますので，注意深く分析しなければなりません。発電について例を挙げれば，背圧式プラントは最も簡易な手段であり，同じ容量の復水式と比べ安価ですが，復水式の約 2 倍の蒸気量を必要とし，2 倍の本数の生産井が必要となります。坑井は非常に高価ですから，結果的に，復水式発電プラントのほうが背圧式より安価となります。実際，復水式プラントは通常，経済性以外の理由で採用されます。

断熱されたパイプラインを用いれば，地熱流体はかなり長距離の輸送することが可能で，理想的な状態では，60 km もの長いパイプラインも可能です。とは言え，パイプラインにはポンプ，バルブ等の付属品や保守点検が必要ですし，パイプラインは非常に高価ですから，地熱プラントの初期建設コストと運転コストに重くのしかかってきます。従って，熱源と利用施設との距離は，できる限り短くすべきです。

通常，地熱プラントの**初期建設コスト**は，同容量の一般火力プラントに比べて高く，遥かに高いこともしばしばです。逆に，**運転コスト**は，一般火力プラントより遥かに安く，このコストは，プラントの地熱特有の部分（パイプライン，弁，ポンプや熱交換器等）の保守コストに相当しています。高い初期建設コストは，運転コストの節減分により回収が可能です。従って，プラントを設計する際は，初期投資額を償却するのに充分な耐久性があり，そして可能であれば，更に長く利用できるように設計すべきです。

高い稼働率を可能にする複合システム（例えば，冷暖房一体型）や，上流部からの排水を段階的に再利用するカスケードシステム（例えば，発電機→温室→酪農舎）等を採用することにより，かなりの節約を達成することができます（図 20）。

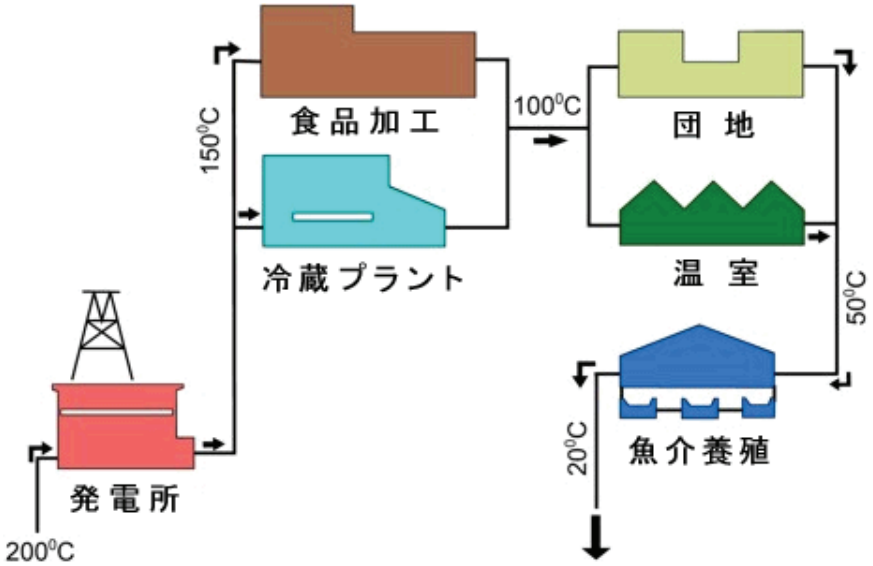


図 20：地熱エネルギーのカスケード利用（米国オレゴン州クラマスフォールズ，ジオヒートセンター）

プラントの停止時間を短縮し，メンテナンスコストを削減するためには，プラントに適用する技術レベルは地元のエンジニアが取り扱えるレベル，または専門家をすぐに要請できるレベルに留めるべきです。高度な専門技術をもつ技術者や製造者を必要とするのは，大規模な保守点検や分解の時だけにすべきです。

最後に，地熱プラントで消費材を生産する場合は，その生産を開始する前に，注意深く市場調査を行わなければなりません。最終的な生産物を生産地から消費地まで経済的に輸送するのに必要なインフラは，すでに整備されているか，または初期プロジェクトに含められるべきです。

これまで記した考察は，いかなる地熱エネルギーの利用形態にも現地の状態にも適用できる反面，定性的にしか過ぎません。投資とコストに関する定量的な考え方に関しては，UNDP, UN-DESA と World Energy Council が作成，2000 年出版の World Energy Assessment Report を推奨します。地熱エネルギーと他の新エネルギーとを比較した WEA のデータを，表 4 と表 5 に示します (Fridleifsson, 2001)。

表 4：再生可能エネルギーにより発電した活用した場合のエネルギーコストと投資コスト

	現行の発電単価 米セント/kWh	将来の発電単価 米セント/kWh	ターンキー投資費用 米ドル/kW
バイオマス	5～15	4～10	900～3,000
地熱	5～15	4～10	900～3,000
風力	2～10	1～8	800～3,000
太陽光発電	5～13	3～10	1,100～1,700
太陽光発電	25～125	5～25	5,000～10,000
潮力発電	12～18	4～10	3,000～4,000

表 5：再生可能エネルギーを直接熱利用したときの各エネルギーと費用 (Fridleifsson, 2001)

	発電原価	将来の発電原価	ターンキー投資費用
バイオマス (エタノールを含む)	1～5	1～5	250～750
地熱	0.5～5	0.5～5	200～2,000
風力	5～13	3～10	1,100～1,700
低温太陽熱	3～20	2～10	500～1,700

6. 環境影響

地球環境が今日のそれよりも健全であり，私たちがこの星を脅かす要因について今よりよく知らなかった1960年代においても，地熱エネルギーは”クリーンエネルギー”として認識されていました。現実問題として，私たちがエネルギーを利用するため，それを取り出したり運んだりする際，環境に直接，間接に全く影響を与えないということはあり得ません。例えば，木を燃やすことは古来の最も単純な熱エネルギーの獲得法ですが，それにあっても有害物質の放出や森林破壊を伴います。今深刻になっている人間活動の環境への影響は，すでに私たちの祖先が森の木を切って料理をしたり家を温めたりしたときから始まっているわけです。地熱エネルギーの利用においてもなんらかの環境影響を伴います。しかしその影響は他のエネルギー利用に比べ小さいものです。

一般に，地熱利用にともなう**環境影響**はその利用規模に比例して大きくなります(Lunis and Breckenridge, 1991)。表6は，地熱の直接利用における環境影響の可能性とその相対的度合いをまとめたものです。バイナリーサイクルによる発電も直接利用の場合とほぼ同等と考えられます。従来型の背圧式や復水式発電プラントの場合は，原理的に，主に大気への影響が大きくなりますが，許容範囲内に抑えることが可能です。

表6：**地熱直接利用において考えられる環境影響とその度合い**

環境影響	問題発生頻度	結果の重大性
空気の汚染	低	中
地表水汚染	中	中
地下汚染	低	中
地盤沈下	低	低～中
騒音公害	高	低～中
坑井の暴噴	低	低～中
文化・歴史遺産への悪影響	低～中	中～高
社会-経済的問題	低	低
化学的・熱的汚染	低	中～高
固体廃棄物	中	中～高

出典：Lunis and Breckenridge (1991)

何らかの開発を行う場合，それに伴う環境変化に十分配慮する必要があります。近年，各国で環境に関する規制や法律が厳しくなっていますが，それらに従うことはもとより，一見些細な環境変化が後の重大な環境変化の引き金になり得ることも十分認識しておく必要があります。例えば，温排水による河川・湖沼などの水温がわずか2，3 ℃だけ上昇したとしても，その地域の生態系に影響を及ぼすことがあります。すなわち，水温変化に最も影響を受けやすい水中植物や動物が次第に減少し，それによってそれらを餌にしていた魚も死んでしまいます。また水温の上昇が，ある種の魚の産卵に影響し，その魚の卵が食用になっていたとすると，その地域の漁業関係者にとっ

ては重大な問題となります。

地熱開発において環境影響が最初に顕在化するのは坑井の**掘削**時です。坑井は，地熱徴候や地温勾配を調査するための小坑径で浅いものから，深部の地熱貯留層の評価や地熱流体の生産のための大坑径で深いものまであります。坑井の掘削設備や関連機器を設置するために，取り付け道路の整備や敷地の造成が必要になります。通常，掘削深度が最大 300～700 m 級のトラックマウント型の掘削設備では 300～500 m^2 の敷地が，2000 m 級の中規模の掘削設備では 1200～1500 m^2 の敷地が必要になります。これらの道路の整備や敷地の造成は地形の変更や野生生物への影響を伴うことになります。

地熱井の掘削では地下が高温高圧であるため，坑井が**暴噴**し地表面の汚染を起こすことがあります。そのようなことが予想される場合には，あらかじめ掘削設備に暴噴防止装置を取り付けておく必要があります (Lunis and Breckenridge, 1991)。また，坑井の掘削あるいは試験中に好ましくないガスが大気に放出されることもあります。これら掘削に伴う環境影響は掘削が終了すれば終息します。

次に，地熱流体を運ぶパイプラインの敷設や**地熱利用プラント**の建設が地形変更や生態系への影響を与えます。これによってその地域の景観が変わることになりますが，ラルデレロのように，縦横に走るパイプラインや冷却塔などがその地域の田園風景とマッチしてパノラマを形成し，観光名所となっている場合もあります。

地熱利用プラントの運転中もいろいろな環境影響が生じ得ます。熱水や蒸気などの地熱流体は一般に，二酸化炭素 (CO_2)，硫化水素 (H_2S)，アンモニア (NH_3)，メタン (CH_4) 等の**ガス成分**を含み，また，温度によって溶解度が増すような**溶存化学成分**を含んでいます。例えば，塩化ナトリウム (NaCl)，ホウ素 (B)，砒素 (As)，水銀 (Hg) 等は，それが環境に放出された場合，公害の原因となります。アイスランドの地域暖房に利用されている地熱流体は真水に近いものですが，これは特殊な例です。また，地熱利用プラントからの排水の温度は周辺の水温よりも高い場合が多く，温排水公害の原因になり得ます。

従来型の地熱発電プラントでは大気汚染が問題となる場合があります。硫化水素は地熱利用による汚染物質の代表的なものの一つです。その臭気を感ずる濃度の下限は体積にして 5 ppb 程度，それよりやや高い濃度になると人体への影響が現れます (Weres, 1984)。しかし現在では，いろいろな方法により硫化水素の排出を抑制することが可能です。二酸化炭素も地熱流体に多少含まれており，従来型の地熱発電ではそれが大気に排出されます。しかしその量は，化石燃料による発電所からの排出量（石炭火力：1042 g/kWh，石油火力： 906 g/kWh，天然ガス火力： 453 g/kWh）に比べはるかに少なく，13～380 g/kWh 程度です(Fridleifsson, 2001)。バイナリーサイクル発電システムや直接利用システムにおいても多少のガス放出を伴うことがありますが，それらはクローズドシステムを採用することにより原理的になくすことができます。

地熱利用システムからの排水も水質汚染の原因となり得ます。利用された熱水が高濃度のホウ素，フッ素化合物，砒素等を含む場合は，それを処理したり地下に還元し

たりする必要があります。しかしほとんどの直接利用システムで用いられている中低温の熱水ではそれらの濃度は低く，排水が問題になることはあまりありません。**排水**を冷却することだけにより河川・湖沼への放流が可能になる場合もあります (Lunis and Breckenridge, 1991)。この場合，周辺の生態系への影響を無くするため，熱水は特別な貯留池か冷却タンクで冷却されます。

地下から大量の熱水を取り出すと，通常の地下水のくみ上げと同様に**地盤沈下**が起きることがあります。地盤沈下は比較的広い範囲でゆっくりと進行するもので，顕在化するまで数年かかります。その量はまちまちですが，ときには数 10 cm から数 m に達し，地熱プラントや付近の住宅が損傷を受ける場合もあります。このため，大量の熱水を取り出す場合には計画的に地盤沈下をモニタリングする必要があります。多くの場合，利用した熱水を地下に還元することによって地盤沈下を防いだり，抑制したりすることができます。

ある地域では熱水を取り出したり還元することが地震の原因となったり**地震**の発生頻度を高める可能性があります。しかしこれらの地震の規模は通常非常に小さく，高感度の地震計でしか検知できないようなものです。地熱利用が大規模な地震発生の引き金になることはないと考えられており，事実，これまでもそのような例はありません。

地熱発電所が発生する**ノイズ**が騒音公害の原因になることがあります。地熱流体を搬送するパイプラインからは高い周波数のノイズの発生が考えられ，また，たまに行われる噴気でもノイズが発生しますが，通常これらのノイズは許容できるレベルです。地熱発電所では冷却塔のファン，蒸気排出器，タービンなどが主なノイズ源です (Brown, 2000)。直接利用プラントにおいてはノイズが問題になることはほとんどありません。

7. 現状と将来

地下に存在する熱エネルギーは膨大なものです。専門家グループは，高温資源と低温資源に分けて, 大陸ごとに**地熱ポテンシャル**を評価しています (IGA, 2001)（表 7）。

表 7：世界の地熱ポテンシャル (IGA，2001)

	発電用高温資源		直接利用向け低温資源 熱量換算 百万 TJ/年 (最低値)
	従来技術 電力換算 TWhe/年	従来技術と バイナリー 電力換算 TWhe/年	
ヨーロッパ	1,830	3,700	> 370
アジア	2,970	5,900	> 320
アフリカ	1,220	2,400	> 240
北米	1,330	2,700	> 120
中南米	2,800	5,600	> 240
オセアニア	1,050	2,100	> 110
世界計	11,200	22,400	> 1,400

地熱エネルギーは，適切な開発と利用さえ行われれば，いくつかの国のエネルギー需給において，確実に重要な役割を果たすことができるでしょう。そしてまた多くの地域において，小規模な地熱資源であっても状況によっては問題解決に貢献できますし，遠隔地の小さな集落の生活レベルの向上にも貢献が期待されます。

Fredleifsson (2003) の報告したデータは，他の再生可能エネルギーと比較した時の，地熱エネルギーの果たす役割について示唆を与えてくれます。1998 年における世界の再生可能エネルギーによる総発電量は 2,826 TWh であり，その内訳は，水力 92%，バイオマス 5.5%，地熱 1.6%，風力 0.6%，太陽 0.05%，潮力 0.02%です。直接利用では利用されたエネルギーの 93%がバイオマス，そして地熱 5%，太陽熱 2%となっています。

参考文献

ARMSTEAD, H. C. H., 1983. *Geothermal Energy*. E. & F. N. Spon, London, 404 pp.

AXELSSON, G. and GUNNLAUGSSON, E., 2000. Background: Geothermal utilization, management and monitoring. In: *Long-term monitoring of high- and low-enthalpy fields under exploitation*, WGC 2000 Short Courses, Japan, 3-10.

BARBIER, E. and FANELLI, M., 1977. Non-electrical uses of geothermal energy. *Prog. Energy Combustion Sci*., **3**, 73-103.

BEALL, S. E, and SAMUELS, G., 1971. The use of warm water for heating and cooling plant and animal enclosures. *Oak Ridge National Laboratory,* ORNL-TM-3381, 56 pp.

BENDERITTER, Y. and CORMY, G., 1990. Possible approach to geothermal research and relative costs. In: Dickson, M. H. and Fanelli, M., *eds*., *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization,* UNITAR, New York, pp. 59-69.

BROWN, K. L., 2000. Impacts on the physical environment. In: Brown, K. L., *ed., Environmental Safety and Health Issues in Geothermal Development*, WGC 2000 Short Courses, Japan, 43-56.

BUFFON, G. L., 1778. Histoire naturelle, générale et particulière. Paris, Imprimerie Royale, 651 pp.

BULLARD, E. C., 1965. Historical introduction to terrestrial heat flow. In: Lee, W. H. K., *ed. Terrestrial Heat Flow*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., **8**, 1-6.

COMBS, J. and MUFFLER, L. P. J., 1973. Exploration for geothermal resources. In : Kruger, P. and Otte, C., *eds., Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, pp. 95-128.

ENTINGH, D. J., EASWARAN, E. and McLARTY, L., 1994. Small geothermal electric systems for remote powering. *U.S. DoE, Geothermal Division, Washington, D.C.*, 12 pp.

FRIDLEIFSSON, I. B., 2001. Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **5**, 299-312.

FRIDLEIFSSON, I. B., 2003. Status of geothermal energy amongst the world's energy sources. *IGA News*, No.52, 13-14.

GARNISH, J. D., *ed*., 1987. Proceedings of the First EEC/US Workshop on Geothermal Hot-Dry Rock Technology, *Geothermics,* **16**, 323-461.

GUDMUNDSSON, J. S., 1988. The elements of direct uses. *Geothermics*, **17**, 119-136.

HOCHSTEIN, M. P., 1990. Classification and assessment of geothermal resources. In: Dickson, M. H. and Fanelli, M., *eds*., *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, pp. 31-57.

HUTTRER, G. W., 2001. The status of world geothermal power generation 1995-2000. *Geothermics*, **30**, 7-27.

INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION, 2001. Report of the IGA to the UN Commission on Sustainable Development, Session 9 (CSD-9), New York, April.

LINDAL, B., 1973. Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H. C. H., *ed*., *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, pp.135-148.

LUBIMOVA, E. A., 1968. Thermal history of the Earth. In: *The Earth's Crust and Upper Mantle*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., **13**, 63-77.

LUMB, J. T., 1981. Prospecting for geothermal resources. In: Rybach, L. and Muffler, L. J. P., *eds*., *Geothermal Systems, Principles and Case Histories*, J. Wiley & Sons, New York, pp. 77-108.

LUND, J. W., SANNER, B., RYBACH, L., CURTIS, R., HELLSTROM, G., 2003. Ground-source heat pumps. *Renewable Energy World*, **6**, 4, 218-227.

LUND, J. W., 2003. The USA country update. *IGA News*, No. 53, 6-9.

LUND, J. W., and BOYD, T. L., 2001. Direct use of geothermal energy in the U.S. – 2001. *Geothermal Resources Council Transactions*, **25**, 57-60.

LUND, J. W., and FREESTON, D., 2001. World-wide direct uses of geothermal energy 2000. *Geothermics*, **30**, 29-68.

LUNIS, B. and BRECKENRIDGE, R., 1991. Environmental considerations. In: Lienau, P. J. and Lunis, B. C., *eds*., *Geothermal Direct Use, Engineering and Design Guidebook*, Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, pp.437-445.

MEIDAV, T., 1998. Progress in geothermal exploration technology. *Bulletin Geothermal Resources Council*, **27**, 6, 178-181.

MUFFLER, P. and CATALDI, R., 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, **7**, 53-89.

NICHOLSON, K., 1993. *Geothermal Fluids*. Springer Verlag, Berlin, XVIII, 264 pp.

POLLACK, H. N., HURTER, S. J. and JOHNSON, J. R.,1993. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys*. **31**, 267-280.

RAFFERTY, K., 1997. An information survival kit for the prospective residential geothermal heat pump owner. *Bull. Geo-Heat Center,* **18**, 2, 1-11.

SANNER, B., KARYTSAS, C., MENDRINOS, D. and RYBACH, L., 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage. *Geothermics*, **32**, 579-588.

STACEY, F. D. and LOPER, D. E., 1988. Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology. *Phys. Earth. Planet. Inter*. **53**, 167-174.

STEFANSSON, V., 2000. The renewability of geothermal energy. *Proc. World Geothermal Energy, Japan.* On CD-ROM

TENZER, H., 2001. Development of hot dry rock technology. *Bulletin Geo-Heat Center*, **32**, 4, 14-22.

WERES, O., 1984. Environmental protection and the chemistry of geothermal fluids. *Lawrence Berkeley Laboratory, Calif.,* LBL 14403*,* 44 pp.

WHITE, D. E., 1973. Characteristics of geothermal resources. In: Kruger, P. and Otte, C., *eds*., *Geothermal Energy,* Stanford University Press, Stanford, pp. 69-94.

WRIGHT, P. M., 1998. The sustainability of production from geothermal resources. *Bull. Geo-Heat Center,* **19**, 2, 9-12.

付録 A：世界の地熱利用の推移

表 A-1：世界の地熱発電設備容量の推移。1995 年から 2000 年のデータは Huttrer (2001), 2005 年から 2009 年は Bertani (2005, 2008) による。日本のデータは火力原子力発電技術協会 (2007) による。2009 年データは 2009 年末までに完成予定の建設中発電所を含む。

国　名	1995 年 (MWe)	2000 年 (MWe)	2005 年 (MWe)	2007 年 (MWe)	2009 年 予測 (MWe)	2009-2000 増加量 (MWe)
オーストラリア	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0
オーストリア			1.1	1.1	1.1	1.1
中国	28.8	29.2	27.8	27.8	27.8	-1.4
コスタリカ	55.0	142.5	163.0	162.5	162.5	20.0
エルサルバドル	105.0	161.0	151.0	204.2	204.2	43.2
エチオピア		7.3	7.3	7.3	7.3	0.0
フランス	4.2	4.2	14.7	14.7	16.2	12.0
ドイツ			0.2	8.4	8.4	8.4
グァテマラ		33.4	33.0	53.0	57.0	23.6
アイスランド	50.0	170.0	202.0	421.2	569.0	399.0
インドネシア	309.8	589.5	797.0	992.0	1,172.0	583.0
イタリア	631.7	785.0	791.0	810.5	810.5	25.5
日本	378.6	533.2	534.2	535.2	535.2	2.0
ケニア	45.0	45.0	129.0	128.8	169.0	124.0
メキシコ	753.0	755.0	953.0	953.0	958.0	203.0
ニュージーランド	286.0	437.0	435.0	471.6	635.0	198.0
ニカラグア	70.0	70.0	77.0	87.4	87.0	17.0
パプア・ニューギニア			6.0	56.0	56.0	50.0
フィリピン	1,227.0	1,909.0	1,930.0	1,969.7	1,970.0	61.0
ポルトガル	5.0	16.0	16.0	23.0	25.0	9.0
ルーマニア				0.2	0.2	0.2
ロシア	11.0	23.0	79.0	79.0	80.0	57.0
タイ	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0
トルコ	20.4	20.4	20.0	38.0	84.0	64.0
米国	2,816.7	2,228.0	2,564.0	2,687.0	2,987.0	759.0
合計	**6,833**	**7,973**	**8,933**	**9,732**	**10,587**	**2,614**

出典：

BERTANI, R., 2005, World geothermal power generation in the period 2001-2005, *Geothermics*, **34**, 651-690.
BERTANI, R., 2008, Geothermal power plants commissioned in the third millennium, *IGA News*, no. 72, 5-10.
HUTTRER, G. W., 2001, The status of world geothermal power generation 1995-2000, *Geothermics*, **30**, 7-27.
火力原子力発電技術協会, 2007, 地熱発電の現状と動向 2007 年, 99pp.

表 A-2：世界の地熱直接利用設備容量の推移。2000 年データは Lund and Freeston (2001), 2005 年データは Lund ほか (2005)による。設備容量は MWt, 利用エネルギーは TJ/年で表す。n/a は 2000 年時点でその国の情報がなかったことを意味する。

国　名	2000 年		2005 年	
	設備容量	エネルギー利用量	設備容量	エネルギー利用量
	(MWt)	(TJ/yr)	(MWt)	(TJ/yr)
アルバニア	n/a	n/a	9.6	8.5
アルジェリア	100.0	1,586.0	152.3	2,417.0
アルゼンチン	25.7	449.0	149.9	609.1
アルメニア	1.0	15.0	1.0	15.0
オーストラリア	34.4	351.0	109.5	2,968.0
オーストリア	255.3	1,609.0	352.0	2,229.9
ベラルーシ	n/a	n/a	2.0	13.3
ベルギー	3.9	107.0	63.9	431.2
ブラジル	n/a	n/a	360.1	6,622.4
ブルガリア	107.2	1,637.0	109.6	1,671.5
カナダ	377.6	1,023.0	461.0	2,546.0
カリブ諸島	0.1	1.0	0.1	2.8
チリ	0.4	7.0	8.7	131.1
中国	2,282.0	37,908.0	3,687.0	45,373.0
コロンビア	13.3	266.0	14.4	287.0
コスタリカ	n/a	n/a	1.0	21.0
クロアチア	113.9	555.0	114.0	681.7
チェコ共和国	12.5	128.0	204.5	1,220.0
デンマーク	7.4	75.0	330.0	4,400.0
エクアドル	n/a	n/a	5.2	102.4
エジプト	1.0	15.0	1.0	15.0
エチオピア	n/a	n/a	1.0	15.0
フィンランド	80.5	484.0	260.0	1,950.0
フランス	326.0	4,895.0	308.0	5,195.7
グルジア	250.0	6,307.0	250.0	6,307.0
ドイツ	397.0	1,568.0	504.6	2,909.8
ギリシャ	57.1	385.0	74.8	567.2
グァテマラ	4.2	117.0	2.1	52.5
ホンジュラス	0.7	17.0	0.7	17.0
ハンガリー	472.7	4,086.0	694.2	7,939.8
アイスランド	1,469.0	20,170.0	1,844.0	24,500.0
インド	80.0	2,517.0	203.0	1,606.3
インドネシア	2.3	43.0	2.3	42.6
イラン	n/a	n/a	30.1	752.3
アイルランド	n/a	n/a	20.0	104.1
イスラエル	63.3	1,713.0	82.4	2,193.0
イタリア	325.8	3,774.0	606.6	7,554.0
日本*	409.4	5,139.0	413.5	4,955.8
ヨルダン	153.3	1,540.0	153.3	1,540.0

国　名	2000 年		2005 年	
	設備容量	エネルギー利用量	設備容量	エネルギー利用量
	(MWt)	(TJ/yr)	(MWt)	(TJ/yr)
ケニア	1.3	10.0	10.0	79.1
韓国	35.8	753.0	16.9	175.2
ラトビア	n/a	n/a	1.6	31.8
リトアニア	21.0	599.0	21.3	458.0
マケドニア	81.2	510.0	62.3	598.6
メキシコ	164.2	3,919.0	164.7	1,931.8
モンゴル	n/a	n/a	6.8	213.2
ネパール	1.1	22.0	2.1	51.4
オランダ	10.8	57.0	253.5	685.0
ニュージーランド	307.9	7,081.0	308.1	7,086.0
ノルウェー	6.0	32.0	600.0	3,085.0
パプアニューギニア	n/a	n/a	0.1	1.0
ペルー	2.4	49.0	2.4	49.0
フィリピン	1.0	25.0	3.3	39.5
ポーランド	68.5	275.0	170.9	838.3
ポルトガル	5.5	35.0	30.6	385.3
ルーマニア	152.4	2,871.0	145.1	2,841.0
ロシア	308.2	6,144.0	308.2	6,143.5
セルビア	80.0	2,375.0	88.8	2,375.0
スロバキア	132.3	2,118.0	187.7	3,034.0
スロベニア	42.0	705.0	49.6	729.6
スペイン	n/a	n/a	22.3	347.2
スウェーデン	377.0	4,128.0	3,840.0	36,000.0
スイス	547.3	2,386.0	581.6	4,229.3
タイ	0.7	15.0	2.5	79.1
チュニジア	23.1	201.0	25.4	219.1
トルコ	820.0	15,756.0	1,495.0	24,839.9
ウクライナ	n/a	n/a	10.9	118.8
英国	2.9	21.0	10.2	45.6
米国	3,766.0	20,302.0	7,817.4	31,239.0
ベネズエラ	0.7	14.0	0.7	14.0
ベトナム	n/a	n/a	30.7	80.5
イエメン	1.0	15.0	1.0	15.0
合計	**15,145**	**190,699**	**28,268**	**273,372**

*日本のデータは温泉（浴用）の利用量を含まない (新エネルギー財団, 2007)。

出典：

LUND, J. W., and FREESTON, D., 2001, World-wide direct uses of geothermal energy 2000, *Geothermics*, **30**, 29-68.

LUND, J. W., FREESTON, D., and BOYD, L. T., 2005, Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review, *Geothermics*, **34**, 691-727.

新エネルギー財団, 2007, 日本の地熱直接利用の現状 2006 年度版, 29pp.

付録 B ： 地熱用語集

用語（日本語）	よみがな	（英語）	説明
アセノスフェア	あせのすふぇあ	asthenosphere	地球の上部マントルのうち、リソスフェア（プレート）を除いた部分で、岩流圏ともいう。上部マントルの大部分を占める。ゆっくりと変形する性質があり、プレートを乗せて動いている。プレートが移動して隙間ができると、アセノスフェアが上昇して隙間を埋める。上昇したアセノスフェアは時間とともに冷却されプレートになる。主要成分はかんらん岩。厚さは100～200km程度といわれる。
異常高圧貯留層	いじょうこうあつちょりゅうそう	geopressured system	不透水性の地層中に挟まった透水性の高い堆積岩から成り、堆積層ができた時に閉じ込められた被圧地下水が熱水として存在する地熱系。熱水の圧力は静岩圧に近付いており、静水圧を遥かに上回る。巨大な堆積盆（たとえば米国のメキシコ湾）の深度3～7kmに、特徴的に見られる。
MT法	えむ・てぃー ほう	MT method	→「マグネトテルリック法」の項を参照
エンタルピー	えんたるぴー	enthalpy	$H=U+pV$（Uは内部エネルギー、pは圧力、Vは体積）で定義される、熱力学特性関数の一種。流体中に含まれる熱量（熱エネルギー量）を表す。地熱資源のエンタルピーは、熱水についてはほぼ温度に比例しているが、蒸気については温度だけでなく圧力の上昇に伴って増加する。
温室利用	おんしつりよう	greenhouse heating	地熱流体の農業利用には、路地栽培と温室栽培とがあるが、温室利用のほうが一般的である。多くの国で大規模に実施されており、季節外栽培や異なる気候条件下での野菜や花卉の栽培が可能となっている。
海嶺	かいれい	spreading ridges	大規模な海底山脈のこと。海洋プレートが両側に引っ張られて割れ目が生じると、直下のマントル（固体）が上昇して割れ目を埋める。このとき、マントルの断熱上昇のために部分融解が起こりマグマが発生し、火山活動が起こり、新しいプレートと海洋地殻が生成される。
核（コア）	かく（こあ）	core	地球等の中心部にある金属成分からなる球状の構造物。地球の場合、直径約7,000kmで、地下2,900km以下に存在する。主に鉄とニッケルからできており、構造的には液体の外核（地下2,900km～5,100km）、固体の内核（地下5,100km～6,400km）からなると考えられる。中心温度は太陽の表面温度とほぼ等しい約6,000K。液体の外核が流動して誘導起電力が発生することでコア内に電流が流れ、地磁気が発生すると考えられている。
確認経済的資源量	かくにんけいざいてきしげんりょう	identified economic resource	可採資源量のうち、掘削、地化学、物理探査または地質学的な証拠から、存在と特徴が確認されている資源量。一般に「埋蔵量」と呼ばれるものは、これを指すことが多い。
可採総資源量	かさいそうしげんりょう	accessible resource base	ある地域内で、地殻内のある深度までに賦存する全熱エネルギー。
火山弧	かざんこ	magmatic arc, volcanic arc	火山島や火山を含む山々の連鎖。ある海洋プレートが別のプレートの下に沈み込んでマグマを生じる、一連のプレートテクトニクスにより、形成される。火山弧には海洋弧と大陸弧の2種類がある。
カスケード利用（段階利用）	かすけーどりよう（だんかいりよう）	cascade utilization	資源やエネルギーを、その質のレベルに応じて多段的に利用し、最大限に使用すること。例えば、地熱流体の場合、まず高温の地熱蒸気を発電に使い、次に工業利用、最後に給湯に使うなど、温度レベルに応じて順々に有効活用する。このような多段的利用方法を多段式の滝(cascade)になぞらえて、カスケード利用と呼ぶ。
ガス成分	がすせいぶん	gases	地熱流体中に含まれるガス成分は、火山性のものが多い。熱水系や地下環境を知る上で重要な情報である。有害物質もあるため、大気中にそのまま放出することができない場合もある。

過熱蒸気	かねつじょうき	superheated steam	圧力に対応する飽和温度以上に熱せられた状態にある蒸気。乾き蒸気がさらに熱せられると、過熱蒸気となる。
乾き蒸気	かわきじょうき	dry steam	湿分のない乾いた状態の蒸気。この蒸気は、液相と平衡した飽和状態にあるが、蒸気だけが存在している。
環境影響	かんきょうえいきょう	environmental impact	地熱開発、水資源開発、海洋開発、工業団地建設など、人間の活動によって自然環境に生じる何らかの変化のこと。地熱開発における環境影響の可能性として、空気の汚染、地盤沈下、騒音、生態系への影響などが挙げられるが、その防止に必要な設備の導入と適切な管理・モニタリングにより回避または軽減することができる。
還元井	かんげんせい	injection well	地下還元を行うための井戸。地熱流体の熱エネルギーを利用した後、液体分を地下の地層へ戻すことを地下還元という。地下還元は排水による環境への影響を防止するため、あるいは、貯留層の圧力維持と貯留層への水の補給のため行われる。また、貯留層の圧力維持と水補給（涵養）の目的で、他の水源から運んだ水を地下へ注入する場合（とくに、蒸気卓越型貯留層で、還元する熱水が得られない場合など）にも、この注水のことを還元と呼び、注水する井戸を還元井と呼んでいる。
掘削	くっさく	drilling	地下に細長い穴を掘ること。ボーリングと同義。穴の直径はふつう10cm～20cmくらい、深さは目的により数mから数km。地面からまっすぐ下に掘るほか、途中で曲げたり、トンネルの中などで水平に掘ることもできる。 地下の地質を調べる場合は試錐ともいい、地盤強度の調査や、石油・天然ガス・鉱物・熱水などを探すのに用いられる。 発見した石油・ガス・熱水を取り出すためにも、ボーリングを用いる。
珪藻土	けいそうど	diatomaceous earth	藻類のプランクトンが長年にわたり海底や湖底に堆積して、化石化した土。珪酸質（非結晶シリカ）を原料の主成分とし、焼成によって精製されたものを使用する方法が一般的。10μ～100μというミクロな独立糸細胞をなし、その表面は無数の微細な孔に覆われ、極めて広い表面積を持っている。
コア	こあ	core	→「核」の項を参照
高温岩体	こうおんがんたい	hot dry rock (HDR)	水系の存在しない、高温の岩体。通常の地熱発電は、天然の熱水系（地熱貯留層）を利用して行うが、高温岩体を破砕し、人工注水によって蒸気または熱水を取り出して発電に利用するシステムを、高温岩体発電という。現在はフランスのソルツ、オーストラリアのクーパー・ベーズンなどで実用化に向けた開発が進められている。なお近年は、既存地熱開発地域の涵養にも高温岩体開発の技術が応用されており、こういった技術を広義の高温岩体システム：Enhanced geothermal system (EGS)と呼ぶ。
工業利用	こうぎょうりよう	industrial applications	地熱流体は蒸気～熱水と温度幅が大きいため、工業にも利用されている。その利用形態は様々で、工業用製品加熱、蒸発、乾燥、蒸留、殺菌、洗浄、除氷、塩抽出などがある。装置は概して大型で、エネルギー消費は大きい。
坑内熱交換型ヒートポンプシステム	こうないねつこうかんがたひーとぽんぷしすてむ	ground-coupled heat pump system	地下にU字管または同軸二重管を埋設し、その中に熱媒体である流体を流して地下と熱交換を行う地中熱ヒートポンプシステム。地下水の有無に関わらず設置できるため、基本的にどこでも利用可能である。
コントロールドソース・オーディオマグネトテルリック法	こんとろーるどそーす・おーでぃおまぐねとてるりっくほう	controlled-source audio magnetotelluric investigation	電磁探査法の一種で、MT法の自然の電磁波の代わりに、人工的に誘導された電磁波を利用する方法。この技術は、従来のMT法に比べて探査深度は浅いが、早く、安く、ずっと詳細に調べることが可能。
再生可能	さいせいかのう	renewable	再生可能エネルギー　参照

再生可能エネルギー	さいせいかのうえねるぎー	renewable energy	石炭、石油など将来枯渇が予測される化石燃料に対し、太陽、風力、水力、地熱、海洋、バイオマスなど地球上で繰り返し生じる自然現象の中から得られるエネルギーの総称。これらのエネルギーは一般に広く分散した形で与えられ、これを大量に集中的なエネルギーとして利用するには、特定の条件と工学的工夫が必要である。現在人類が利用している総エネルギー供給の中に占めるシェアは小さいが、枯渇の心配がなく、エネルギー取り出しの際のCO2排出がなく、また大気汚染も起こさないエネルギー源として、期待されている。地熱系の開発では、熱流体の熱移流によるエネルギー供給は、資源からの生産と同じ時間スケールで行われるため、再生可能である一方、一部の堆積盆中の高温地下水については、エネルギー供給が熱伝導だけによって行われるため供給速度が遅く、有限のエネルギー資源といえる。
CSAMT法	しー・えす・えー・えむ・てぃー ほう	CSAMT method	→「コントロールドソース・オーディオマグネトテルリック法」の項を参照
磁気探査	じきたんさ	magnetic survey	大地の持つ磁力を測定し、その異常の分布・大きさ・変化率などを解析することにより、磁性体を中心とする岩体や構造を把握する。火山岩・変成岩の探査などに適している。
資源量	しげんりょう	resource	→「利用可能な可採総資源量」の項を参照
地震	じしん	seismic event	普段は固着している地下の岩盤が、一定の部分を境目にして、急にずれ動くこと。また、それによって引き起こされる地面の振動。人間活動が引き起こす地震もあり、大型ダムの貯水や、石油や天然ガスなどの採掘が、地震を誘発することがある。地熱利用においては、地熱水の生産と還元による地下における水圧の変化などに伴って、きわめて規模の小さい地震が発生することがある。
地震探査	じしんたんさ	seismic survey	人工的に地震を発生させ、その伝搬を測定・解析することにより、地下の地震波速度構造等を把握する手法。 起振させる地震波の種類により、いくつかの探査法がある。地熱開発時に行われる、生産・還元時の微小地震観測および坑井掘削時や水圧破砕時のAE（Acoustic Emission）観測のデータは、地震波速度構造を利用して解析され、微小割れ目の発達や、地熱流体の流路の検出に用いられる。
沈み込み帯	しずみこみたい	subduction zones	地球上の2つのプレートが出会い、下側のプレートが滑ってマントルに沈み込む（数cm/年）場所のこと。海嶺の逆。海洋プレートが大陸プレートの下に滑り込む場合が多く、こういった地域には通常、多くの火山があり、よく地震が起きる造山帯を形成している。沈み込みの発生原因は、リソスフェアとその下にあるアセノスフェアの密度の違いで、通常、大陸地殻（大陸直下のリソスフェア）、海洋地殻（海底下のリソスフェア）、アセノスフェアの順に密度が小さくなる。
持続可能	じぞくかのう	sustainable	持続可能な開発とは、未来の世代のニーズを損ねることなく、現在の世代のニーズに適合するように開発すること。地熱エネルギーの場合、ある地熱システムが枯渇した場合に別の新しい地熱システムを利用することによって、国全体または地域全体での地熱生産総量を、ある期間（例えば300年間）、発電と直接利用の両方に関して、一定値に保つことができること。
地熱-	じねつ-、ちねつ-		「ちねつ-」の項を参照。 ※「地熱」は、「ちねつ」とも「じねつ」とも読まれ、専門家の間でも意見が分かれるが、本書での読みがなは「ちねつ」で統一した。
地盤沈下	じばんちんか	subsidence	自然的・人為的な要因により、地表面が広い範囲にわたって徐々に沈んでいく現象。環境保全上問題となるのは、地下水の大量揚水や鉱物資源の採取などによる人為的要因による地盤沈下である。地熱利用においては、地下からの熱水の過剰揚水によるものが懸念される。
湿り蒸気	しめりじょうき	wet steam	湿分のある蒸気。この蒸気は液相と平衡した飽和状態にあり、相平衡のもと、気相と液相がある割合で存在している。

重力探査	じゅうりょくたんさ	gravity survey	重力測定時に算出される重力異常（特にブーゲー異常）を解析することにより、広域・深部の地質構造を把握する。重力異常の分布の微分・二次微分をとることにより、異常のもととなる岩体の位置・大きさといった特徴を推定する。
蒸気タービン	じょうきたーびん	steam turbine	水蒸気でタービン（羽根車）を回し、熱エネルギーを運動エネルギーへ変換する原動機。タービンが磁石となっている場合は、誘導起電力により発電を行う（電気エネルギーに変換する）ことができる（＝蒸気発電）。
蒸気卓越型地熱系	じょうきたくえつがたちょりゅうそう	vapor-dominated system	蒸気が連続的に存在する地熱系。圧力分布を支配する相は蒸気である。このタイプの地熱系としては、イタリアのラルデレロや米国カリフォルニアのガイザーズがよく知られているが、比較的珍しい。通常、乾き蒸気か過熱蒸気が生産される。
消費の持続性	しょうひのじぞくせい	sustainability in consumption	消費速度より速く資源が再生成されている期間には、消費を持続することができる。これを消費の持続性という。消費の持続性は、最初にあった資源量、再生成速度、そして消費速度に依存する。
初期コスト	しょきこすと	capital cost (initial cost)	プラント導入・建設の際にかかる費用。機器購入費、設置工事費、管理費などからなる。
人工貯留層	じんこうちょりゅうそう	artificial reservoir	高温岩体の熱エネルギーを開発利用するため、高温岩体中に造成される熱水・蒸気の貯留層のこと。造成法としては、一般に水圧破砕法により岩体に透水性をもたせ、地表から人工的に水を供給する。
人工的-	じんこうてき-	artificial	天然の熱水脈を含まない高温の岩体を対象に、地熱の抽出を実施する一方法として、高温岩体中に注入井、生産井を掘削し、その間を人工貯留層により連結したシステムが利用される。このシステムのことを人工熱水系とよぶ。熱抽出システムとよぶこともある。
水圧破砕	すいあつはさい	hydraulic fracturing	高温岩体の開発時に、人工貯留層を作る目的で、地層に人工的に流体圧力をかけて破砕面を形成すること。また、既存開発地域においても、さまざまな理由で生産井付近の浸透率が下がり、生産性が下がった場合に、それを改善する目的で水圧破砕が行われる。
スケール	すけーる	scale	地熱流体からの配管などへの析出物。シリカ、炭酸カルシウム、硫化鉱物などがある。地熱発電所や温泉で、流体温度や圧力が急速に変化したり、流体混合があったり、溶存ガスの離脱により、溶存成分が過飽和になるためにスケールの沈積が起こる。配管閉塞の問題を起こすため、定期的な除去作業、析出抑制剤の利用などの対策を要する。
静岩圧	せいがんあつ	lithostatic pressure	地下の地質体に対し、その上に載っている地質体（岩石）の重さがかかって生じる、周囲から均等に働く圧力のこと。
静止系	せいしけい	static system	貯留層への水の供給は全く無いか，あってもわずかで，熱は熱伝導によってのみ輸送される地熱系。静止系には，低温の系と，異常高圧貯留層が含まれる。停滞系，または貯蔵系とも呼ばれる。
段階利用	だんかいりよう	cascade utilization	→「カスケード利用」の項を参照
探査井	たんさせい	exploratory well	対象地域の貯留層の存在を確認したり、地温分布、地質分布を確認するために掘削される坑井。
探査プログラム	たんさぷろぐらむ	exploration program	地熱資源の探査を効率的に行うための手法。一般的には文献調査・地質調査・水理学調査などの概査で有望地域を絞り、地化学調査・物理探査を行った上で、掘削調査をするプログラムが多い。
地域暖房	ちいきだんぼう	district heating	ある地域内の住宅、公共施設あるいは産業施設に、熱源から配管を通じて熱水または蒸気を供給する暖房システム。全体としての熱効率、安全性などの点で個別暖房より優れている。地熱流体を利用した例としては、アイスランドの首都レイキャビクおよびその周辺に熱供給しているシステムが有名。

地温勾配	ちおんこうばい	geothermal gradient	一般に、地下岩盤の温度は深部ほど高く、100mにつき２～３℃程度上昇する。この温度上昇の傾きを地温勾配という。地下構造の特性により、同じ深度でも他の場所より岩盤温度が高い箇所が存在し、地温勾配が高くなっている。例えば、火山深部に存在するマグマだまりからの熱供給がある場所がその例で、このような所は、地熱エネルギー抽出の有望な候補地となる。
地化学調査	ちかがくちょうさ	geochemical survey	地熱流体の化学組成、同位体などを測定・解析することにより、流体の起源や貯留層での変遷プロセス、また配管の腐食やスケーリングへの影響などを求める研究。
地殻	ちかく	crust	地球科学的な観点から、地球を深さごとに分けたとき、最も外側にある部分。地殻の下に位置するマントルは、かんらん岩などの超塩基性岩から成るのに対し、地殻は花崗岩などの酸性岩・安山岩などの中性岩・玄武岩などの塩基性岩から成る。この違いから、地殻とマントルを分けている。
地殻熱流量	ちかくねつりゅうりょう	terrestrial heat flow	地熱は常に地球内部の熱源から地表に向かって流れており、マントルを通って地表に達する。この熱の地殻内での上昇流量を、地殻熱流量という。この熱の伝達には『マントルの対流』が大きく寄与している。マントルの最深部で核の外側と接する部分が、核の熱で暖められて温度が上昇し、熱膨張により比重が低下する。軽くなったマントルは上昇を始め、地表近くに達し、そこで地殻に熱を与え冷えて重くなり沈んでゆく。
地下水利用型ヒートポンプシステム	ちかすいりようがたひーとぽんぷしすてむ	ground-water heat pump system	地下水を汲上げて地表で熱交換する地中熱ヒートポンプシステム。熱交換効率が高く運転コストが低いため、大型施設に適している。ただし地下水層の深度が大きい場合や利用後の地下水の還元が難しい場合には導入コストが高くなり、また揚水規制がある場合には利用できない。
畜産	ちくさん	animal husbandry	地熱流体は畜産にも利用できる。温度制御された環境での飼育は、動物の健康管理にも良く、高温の熱水は、動物小屋や排泄物の掃除、消毒、乾燥にも利用できる。動物飼育施設の暖房に要するエネルギーは、同面積の温室に必要とされるエネルギーの約半分。
地質・水理学調査	ちしつ・すいりがくてきちょうさ	geological and hydrogeological survey	地表付近の地熱徴候（温泉分布や熱水変質帯）の調査や断層・フラクチャーの調査より、流体の流路を推定することによって、地熱有望地域を抽出する手法。
地中熱ヒートポンプ	ちちゅうねつひーとぽんぷ	geothermal heat pump	地下を熱源とするヒートポンプ。地下温度は年間を通して安定しており、夏は地表より涼しく冬は暖かいという地下と地表との温度差を利用するため、効率が高い。運転には電力が必要だが、気候条件と設計が適切であれば、抽出される熱エネルギーは、投入した電気エネルギーを大きく上回る。
地熱エネルギー	ちねつえねるぎー	geothermal energy	地中の熱をさし、大別して２つの意味に用いられている：(1)広く地球内部に保有される熱、(2)地殻中の特異な高温部の熱。(1)の究極的熱源としては、(a)地球の始源熱、(b)重力エネルギー、(c)自然放射性元素の崩壊による熱、が考えられる。一方、(2)の地熱地域で見られる地表近くの特異な熱は、マントル上部で発生するマグマが地殻へ上昇してもたらされると考えられる。火山活動、温泉、硫気孔などの熱源はいずれもマグマ活動であり、地熱発電、温水の多目的利用などは、(2)の利用を図るものである。
地熱系	ちねつけい	geothermal system	地熱地帯の地下および地表で起きている一連の地熱活動を、一つの系（システム）としてとらえた語。地熱系には、熱源（マグマ等）、貯留層（間隙が発達した地下部分）、流体（水）の３要素が不可欠であり、これにより、高温流体を蓄えた地熱貯留層が形成される。貯留層内の地熱流体が地表に達すると、噴気孔や温泉となる。地熱系は通常、地温勾配が高い地域に見られ、特に地温勾配が高いプレート端の地域に多く見られる。

地熱井	ちねつせい	geothermal well	地熱流体の採取、またはそれに関連して地熱地帯や高温岩体中に掘削される坑井。地熱流体を地下から取り出す（生産する）ための坑井を生産井とよび、使用後の低温水を地層中に返送する坑井を還元井とよぶ。
地熱探査	ちねつたんさ	geothermal exploration	地熱資源の有望地域を絞り込むための探査。広域の概査では、地表付近の温泉、変質帯など地熱資源に関する異常が見られる地域を抽出し、地下の熱水対流系が発達している場所を重力・比抵抗・弾性波などの手法で精査して特定する場合が多い。
地熱地域	ちねつちいき	geothermal areas geothermal field	地熱現象を有する地域のこと。具体的には、活火山・噴気孔・温泉などの地熱活動が見られたり、異常に高い地中温度や大きな熱流量などをもっている地域をさす。このような場所では通常、地温勾配が高くなっている。
地熱徴候	ちねつちょうこう	geothermal manifestations	地熱活動の影響が地表に現れたもの。温泉の湧出、噴気、地温異常、熱水変質帯などがあげられる。噴気とは高温の蒸気と熱水の噴き出し、熱水変質帯は熱水と岩石が化学反応して粘土化、ケイ化、溶脱などが起きた場所のことを指す。
地熱直接利用	ちねつちょくせつりよう	non-electric application (direct use) of geothermal energy	地熱流体の持つ熱をそのまま地域暖房、給湯、産業用熱源、道路融雪などに利用すること。地熱流体と熱交換した二次流体を同様の目的に利用する場合も含まれる。近年ではヒートポンプ等と組み合わせて昇温することにより、利用温度の範囲を広げる工夫も行われている。また、地下に埋設したパイプ中に流体を循環させて地下と熱交換を行い、冷暖房等に応用する地中熱ヒートポンプシステムは、地熱地域でない通常の地温勾配の場所での利用が可能であり、広義では地熱直接利用に含まれる。
地熱による空調	ちねつによるくうちょう	space conditioning	地熱流体の直接利用による暖房や、地熱流体を吸収溶液の加熱に利用した冷房もあるが、一般的には地中熱ヒートポンプを利用した空調システムのこと。
地熱による冷房	ちねつによるれいぼう	space cooling	冷却過程は一般に、冷媒（循環の過程で蒸発・凝縮を繰り返す）と吸収溶液の二つの流体のサイクルで行われる。地熱による冷却では、吸収溶液の加熱に地熱が利用され、地熱流体が再生器へのボイラー蒸気の代わりをする。そのため地熱流体の温度が105℃以下になると，効率が落ちる。
地熱発電	ちねつはつでん	geothermal energy to generate electricity geothermal power generation	天然の地下の熱源、つまり地熱エネルギーを利用して発電すること。熱を取り出す方法は、地下坑井を掘削して天然の地熱流体（蒸気、熱水）を取り出す方法と、人工涵養により地下に水を供給しつつ別の坑井から流体を取り出す高温岩体方式とがある。発電方式は、坑井より噴出した蒸気でタービンを駆動する蒸気発電方式、熱水と熱交換した低沸点媒体でタービンを回すバイナリーサイクル発電方式、蒸気および熱水を二相流のまま利用するトータルフロー発電方式などがある。
地熱ポテンシャル	ちねつぽてんしゃる	geothermal potential	地中から蒸気・熱水・熱などを地熱資源を取りだして利用することのできる総エネルギー量。現在は技術的・経済的に困難であっても、今後開発することができる資源も含まれる。
地熱利用プラント	ちねつりようぷらんと	utilization plant	地中からの蒸気や熱水および熱を利用するための、発電所・直接利用設備などのこと
貯留層	ちょりゅうそう	reservoir	ある程度の量の地熱流体が、まとまって含有される地層部分。堆積岩で代表されるような多孔質岩石中に含まれている場合と、割れ目中に含有されている場合とがある。貯留層の上部には、非透水性の帽岩（キャップロック）が存在し、地熱流体が貯留層内に閉じ込められた形になっている場合が多い。
貯留層の平衡状態	ちょりゅうそうのへいこうじょうたい	reservoir equilibrium state	貯留層と外部での間で、流体と熱の流入出がつり合い、貯留層のもつエネルギーが変化しない状態。

電気探査	でんきたんさ	electrical method	探査対象領域の電気物性(主に比抵抗)を利用して探査を行う手法。人工的に電気を大地に流して応答(通常電位)を測定・解析することにより、比抵抗構造を把握する。一般に高比抵抗のところは固い地盤が分布し、低比抵抗のところは軟弱地盤、破砕帯、粘土などが分布している。地熱貯留層は、高温・高含水率のため、低比抵抗異常として検出される場合が多い。
電磁探査	でんじたんさ	electromagnetic method	電磁波を利用して対象の電気物性(比抵抗や誘電率)を探査する方法。直流に近い低周波数から数～数十MHz程度までの電磁波を利用して、電場(電位)や磁場を測定・解析することにより対象の電気物性を求める。地熱貯留層は、高温・高含水率のため、低比抵抗異常として検出される場合が多く、MT法がよく用いられる。
同位体地化学	どういたいちかがく	isotope geochemistry	地熱流体あるいはスケール中の水素や酸素、炭素などの同位対比を測定することにより、流体の起源を推定する手法。流体起源のマグマの関与を考察するのに、よく使われる。
踏査	とうさ	reconnaissance	実際にその場にいって調べること。地熱探査では地熱徴候などの予備的調査を指す。
動態系	どうたいけい	dynamic system	貯留層に絶えず水が供給され、それが加熱された後、地表あるいは透水性の高い地層へと流れ出す地熱系。熱は、系内の熱伝導と流体の循環によって輸送される。動態系には、高温（150℃以上）の系と低温（150℃未満）の系が含まれる。
トランスフォーム断層	とらんすふぉーむだんそう	transform faults	プレート境界に交差して生成される横ずれ状の断層のこと。中央海嶺-中央海嶺(R-R;Ridge-Ridge)型、中央海嶺-海溝(R-T;Ridge-Trench)型、海溝-海溝(T-T)型の3種類が考えられているが、ほとんどのトランスフォーム断層はR-R型で、中央海嶺に交差して顕著に見られる。通常の横ずれ断層は、R-R型の場合、海嶺軸に関係なく単純に横ずれを起こすが、トランスフォーム断層は、海嶺軸に対して外側へ対称的にずれていくのが特徴である。
熱源	ねつげん	heat source	地熱エネルギーの熱源は、比較的浅部（5～10 km）にまで到達した非常に高温のマグマ性貫入岩（600℃以上）か、または低温地熱系においては、地下の平均地温勾配。
熱水対流	ねっすいたいりゅう	hydrothermal convection	岩体中の間隙や割れ目系の中で生じる、水の熱対流。岩体は、マグマだまりの熱などにより、より深部から加熱されるため、下方が高温となっている。一方、水は加熱され温度が上がると比重が小さくなるので、水の上昇流ができ、岩体中に熱水対流系が形成される。この熱水循環により浅部に熱エネルギーが運ばれるので、浅部の岩体温度は、熱伝導のみの場合に比べて高くなる。
熱水卓越型地熱系	ねっすいたくえつがたちょりゅうそう	water-dominated system	液相の水が、連続的に存在する地熱系。多少の蒸気が存在していても、だいたいは不連続な泡粒の状態であり、圧力分布を支配する流体は液相の水となっている。このタイプの地熱系は世界中に広く分布し、温度条件や圧力条件によって、熱水、熱水と蒸気の混合物、湿った（わずかな液相を含む）蒸気、場合によっては乾き蒸気が生産される。
熱伝導度	ねつでんどうど	heat conductivity (thermal conductivity)	物質内に温度差があるとき、温度の高い部分から低い部分へ熱移動が起こる。熱伝導率はこの熱移動の起こりやすさを示す係数で、単位長さ（厚み）あたり１（K）の温度差があるとき、単位時間に単位面積を移動する熱量で表される。熱伝導率は物質に固有の値で、一般的に温度に寄って変化する。
熱バランス	ねつばらんす	heat balance	地球内部の放射性元素の崩壊熱と地球から宇宙空間に放射されている熱とのバランス。この熱バランスは平衡状態にはなく、地球はゆっくりと冷えていることが1980年代に明らかになった。地球からの熱放出の熱流量は伝導、対流、放射をあわせて、42×10^{12} W と推定されている。
ノイズ	のいず	noise	騒音。坑井掘削時、プラント建設時、プラント運転時などに、機械設備等から出る、人にとって不快な音。人体に害を及ぼすこともあり、対策が必要である。

農業利用	のうぎょうりよう	agricultural applications	地熱流体の農業利用には、路地栽培と温室栽培とがある。路地栽培では、地熱水は灌漑用および土の温度上昇に利用される。温室では、温室内の暖房、土の温度上昇用、または灌漑用、あるいはそれらの組み合わせで温室効果を高めるのに利用される。
排水	はいすい	discharge of waste water	地熱利用プラントにて、利用され終えた地熱水。溶存成分や温度などが公害の原因となることもあるので、地中へ還元するか、処理や冷却を行ってからの放流が必要である。
バイナリー発電	ばいなりーはつでん	binary cycle	地下の温度・圧力が低く、中低温の熱水しか得られない場合に、この熱水をアンモニアやペンタンなど水よりも低沸点の媒体と熱交換し、低沸点媒体を沸騰させてタービンを回して発電させる発電方式。通常の蒸気発電を行っている地熱発電所で、蒸気と分離した排熱水などを利用して、追加的にバイナリー発電を行う場合もある。
非凝縮性ガス	ひあっしゅくせいがす	non-condensable gas	生産井から産出する水蒸気中に含まれるガス成分。一般的にはCO_2を主体とし、H_2S、Rガスを伴う。水蒸気中の非凝縮性ガスの割合、非凝縮性ガスの内訳については地点特性がある。地熱発電に伴うCO_2排出量は、この非凝縮性ガスの大気放出分が大半を占めている。
被圧帯水層	ひあつたいすいそう	confined aquifer	地下水のたまっている地層を帯水層という。帯水層の上に不透水層がある場合は被圧帯水層と呼ばれ、圧力が周囲より高くなっていることが多いため、そこに井戸を掘ると地下水が噴き出す。
ヒートポンプ	ひーとぽんぷ	heat pump	低温から高温へと自然の熱の流れに逆らって熱を動かす機械で、冷房や冷蔵庫などの冷却装置はいずれも、この応用。原理的に反対方向の運転が可能なので、空調に用いる場合、同じ機械で冷房も暖房もできる。運転には電力が必要だが、得られる熱エネルギーは投入した電気エネルギーを上回る。
一人あたりの電力需要	ひとりあたりのでんりょくじゅよう	demand for electric capacity per person	日本の場合、一般的な家庭の電力契約を100V・30Aとすると、100V×30A=3000W=3kWとなる。1世帯あたり3人とすれば、一人あたりの電力需要は「1kW/人」と算出される。
フィージビリティ	ふぃーじびりてぃ	feasibility	事業可能性の検証。事業化あるいは事業継続が可能かを探る調査。
物理探査	ぶつりたんさ	geophysical survey	大地が発する物理現象（地震、重力、電磁気）や、大地に対して人為的に発生させた物理現象の反応を測定し、これを解析することによって、地下の状況を探査する技術。
プレ・フィージビリティ	ぷれ・ふぃーじびりてぃ	pre-feasibility	フィージビリティの予備的な事前調査
プレートテクトニクス	ぷれーとてくとにくす	plate tectonics	1960年代後半以降に発展した地球科学の学説で、プレート理論ともいう。地球の表面が何枚かの固い岩板（プレートと呼ぶ）で構成されており、このプレートが対流するマントルに乗って互いに動いていると説明される。
放射性元素の崩壊	ほうしゃせいげんそのほうかい	radiogenic heat	主として地殻中に含まれる自然放射性元素の崩壊により、現在も地殻内で熱が生成されている。
暴噴	ぼうふん	blow-outs	地熱井の掘削中に、地層圧の高い帯水層に遭遇し、地層流体が坑井内に流入して坑口から噴き上げ、地表において制御不可能な状態になること。
埋蔵量	まいぞうりょう	reserve	→「確認経済的資源量」の項を参照
マグネトテルリック法（MT法）	まぐねとてるりっくほう（えむ・てぃー ほう）	magnetotelluric method	電磁探査法の一種で、太陽の磁気嵐によって起こる電磁波を利用する手法。現在では広範にわたる応用が可能で、主な利点は、電気探査や他の電磁探査技術に比べて、より深い部分の構造を明らかにできることである。高性能の装置を必要とする。

マントル	まんとる	mantle	地殻と核（コア）との間にある層。大陸地域で地表下約30～70kmから、また海洋地域では海底面下約7kmから、深度約2,900kmまでの範囲を指す。マントルは、かんらん岩を主成分とする岩石で構成されており、融点の異なる鉱物の混合物が、溶解を始める温度（ソリダス）を超えると、部分的に溶解する（部分融解、分別融解）。この溶解したものがマグマであり、溶解の度合いにより、組成の異なるマグマが形成される。
メンテナンスコスト	めんてなんすこすと	maintenance cost	プラントの維持管理にかかる費用。修繕費、人件費などからなる。
有機ランキンサイクル（ORC）	ゆうきらんきんさいくる（おー・あーる・しー）	Organic Rankine Cycle	ランキンサイクルとは、非可逆熱サイクルの一種で、蒸気タービンの理論サイクルであり、通常の蒸気タービンの動作を表すサイクルである。有機ランキンサイクルは、異なる熱力学的特性を持つ有機媒体が水の代わりに使用される。
溶存化学成分	ようぞんかがくせいぶん	dissolved chemicals	岩石との反応などにより、地熱流体中に溶出した化学成分。ガス成分と同様に、地熱系や地下環境を知る上で重要な情報源である。有害物質も含まれることがあり、そのまま環境中へ排出できないこともある。
螺旋藻	らせんそう	Spirulina	熱帯のアルカリ度の高い湖などに自生し、マイクロアルジェと呼ばれる小さな藍藻の一種。地球上に最初に出現した原始的な原核生物であるといわれ、その一つを顕微鏡で見ると、らせん状をしているので、ラテン語で「らせん」を意味するスピルリナと名付けられた。クロロフィルを持ち、光合成を行う。1970年代に紹介されて以来、その栄養面から注目を浴びた植物プランクトンであり、主にタンパク質やミネラルの優良な供給源として工業化されている。
ランニングコスト	らんにんぐこすと	energy cost (running cost)	プラント稼働時にかかる費用。修繕費、人件費、原材料費、燃料費などからなる（メンテナンスコストを別に計上する場合には、修繕に関わる費用を除く）。地熱利用の場合は、燃料費はほとんどかからない。
リソスフェア	りそすふぇあ	lithosphere	地球物理的な観点から、地球を深さ毎に分けたとき、最も外側にある部分で、プレートとほぼ同義。その内側のアセノスフェアと異なり、冷え固まった岩石でできている。地殻よりもリソスフェアのほうが若干厚く定義されており、大陸の地下ではおよそ100kmの深度まで。リソスフェアは、海底下では海嶺から遠くになるほど厚くなる（温度が下がって固まる岩石が増えるため）という特徴がある。
流体	りゅうたい	fluids	地熱エネルギーによって、高いエネルギーを獲得した高温の流体を地熱流体と称する。地熱流体は、主に天水を起源とする水である。貯留層中では主に気相または液相として存在し、前者を蒸気卓越型貯留層、後者を熱水卓越型貯留層とよぶ。
流体の対流	りゅうたいのたいりゅう	fluid convection	→「熱水対流」の項を参照
利用可能な可採総資源量	りようかのうなかさいそうしげんりょう	useful accessible resource base	総資源量のうち、将来のある特定期間（100年未満）までに、他のエネルギー源と市場競争力のある価格で、法律に則って取り出すことができる資源量。一般に「資源量」と呼ばれるものは、これを指すことが多い。

編集後記：

本書の翻訳は，日本地熱学会 IGA 専門部会の新妻弘明，江原幸雄，山田茂登，浜田眞之，安川香澄の各氏が担当しました。また，付録の地熱用語集の執筆は日本地熱学会広報委員会が担当し，その他の編集は IGA 専門部会が行いました。ここに謝意を表します。

（IGA 専門部会長　内田利弘）