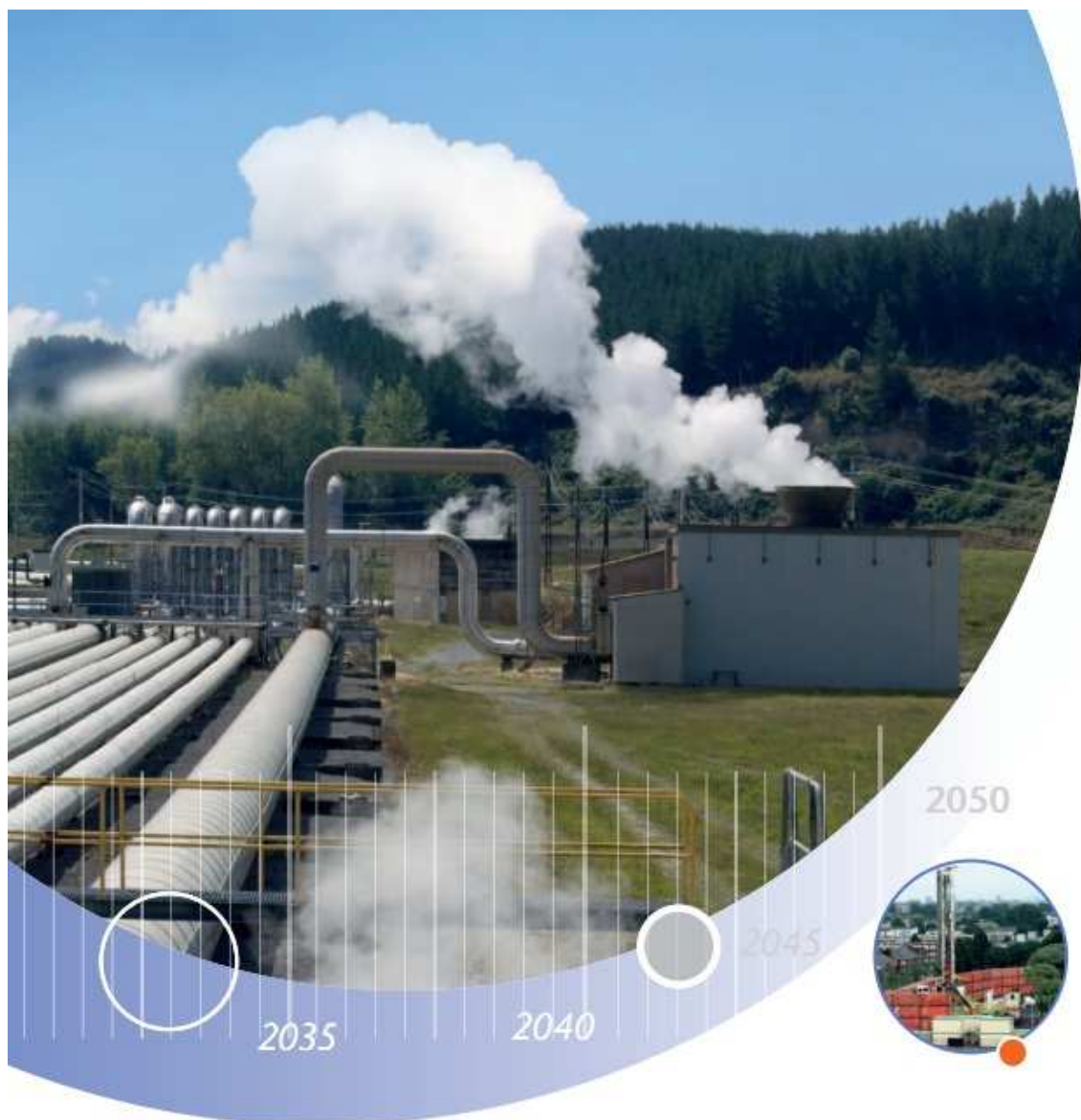


IEA の技術ロードマップ – 地熱と地熱発電



Technology Roadmap

Geothermal Heat and Power



目次

- Key Findings : 重要所見
- Introduction : はじめに
- Geothermal Energy Today : 地熱エネルギーの現状
- Vision for Deployment and CO₂ Abatement : 開発と CO₂ 削減ビジョン
- Technology Development—Actions and Milestones
: 技術開発—アクションとマイルストーン
- Policy Framework—Actions and Milestones : 政策—アクションとマイルストーン
- Conclusions and Role of Stakeholders : 結論およびステークホルダーの役割
- Appendix I. Assumptions for Production Cost Calculations
: 付録 I . コスト計算の前提
- Appendix II. Projected Contribution of Ground Source Heat Pumps
: 付録 II . 地中熱ヒートポンプ (GSHP) の予測
- Appendix III. Abbreviations, acronyms and units of measure
: 付録 III . 略語および測定単位

重要所見

地熱資源には、深部滞水層のような低・中温地熱、天然の高温高压蒸気のような高温地熱、更に、マグマ・高温岩体のような超高温地熱があり、低炭素のベースロード電源や熱供給に利用されてきた。本書では、以下の予測に従って、地熱と地熱発電の開発・展開ロードマップを作製した。

- 2050 年までに、地熱発電量は、1400TWh／年（全世界の発電量の約 3.5%）となり、800Mt／年の CO₂ 排出量削減が行われる。
- 2050 年までに、地熱は、5.8EJ／年（1600 TWh の熱エネルギー、全世界の熱供給量の 3.9%）を賄うようになる。
- 2030 年代にむけて、高温地熱が利用できるエリアでは、経済的に地熱利用が魅力的となり、従来型の地熱発電と熱利用が急拡大する。深部滞水層の低・中温地熱に関しても、高温地熱より広い範囲で利用できることと、熱電併給の観点から関心が高まり、利用が拡大する。
- 2050 年までに、地球上のどこでも利用できる超高温地熱の利用技術が発達し、新規に計画される地熱発電の半分以上は新地熱発電（Enhanced Geothermal Systems:EGS）になる。ただし、そのためには、2030 年までに EGS を商業ベースにのせる必要があり、しっかりした研究・開発・実証（Research development and demonstration : RD&D）が不可欠である。

- 資源の探査、採掘や利用、最新地熱技術開発に関わる障害を取り除くには、全体的な政策フレームワークが必要となる。更に、そのフレームワークは、経済面、規制、市場促進および RD&D 支援に関わる障害についても対処しなければならない。
- 政府、地方自治体および電力会社は、地熱資源とその応用がどれほど重要であるか、十分認識しなければならない。地熱は、温度によって、種々様々な用途に利用できる。
- 地熱エネルギー R&D においては、資源探査のスピード化、より良い採掘技術の開発、EGS 技術の改善、そして何より、健康・安全・環境（HSE）への配慮が重要である。
- 海底の熱源やマグマを含む超高温地熱を取り扱う先進技術が、今まで未利用だった巨大な地熱資源の利用を可能にする。石油やガスの井戸から出る熱湯も、今後利用できれば資産となり得る。

今後 10 年の主要措置

- 既に成熟した（あるいは、ほとんど成熟した）技術の普及促進に関する中期目標を設定するとともに、先進技術に関する長期目標を設定し、投資家の信頼を増すとともに、地熱および地熱発電の拡大を加速する
- この技術が他の技術と競合力を持つようになるまで、（現在あまり注目されていない）地熱と地熱発電の両方への経済的な優遇措置を採る。
- 専門知識を共有し、開発を促進するため、資源探査および運転後の地熱貯留層の管理を行うデータベース、データベースをアクセスするプロトコルおよびツールを開発する。
- 開発リードタイムを短縮するため、地熱開発の許認可手続きの合理化を図る。
- 今後 10 年間に少なくとも 50 の新規 EGS パイロット・プラントを計画・実施するため、継続してより高度な研究・開発・実証が可能な環境を用意する。
- EGS 技術についてのノウハウを広く普及させ、地熱発電の生産性、資源持続性、および健康・安全・環境管理能力を向上させる。
- 開発途上国では、地熱利用・地熱発電開発のしやすい地域が手つかずになっていることが多いので、開発を妨げている経済的および非経済的障壁を克服し、それらの国にとって利用可能な、最も魅力的な地熱資源開発を行う。

はじめに

今、クリーンエネルギーを提供し、気候変動を緩和して、持続可能な発展を遂げるといふ地球規模の難題に取り組むため、先端エネルギー技術の開発を加速する必要性が叫ばれている。

2008年6月、青森市で開催された主要8か国（G8）および中国、インド、韓国のエネルギー相会合では、IEA が革新的なエネルギー技術開発を促進するためのロードマップを準備することが決議された。そして、CO₂ の地下貯留（Carbon Capture and Storage : CCS）その他の先端エネルギー技術を含む革新的な技術のロードマップを作成する国際的なイニシアチブが開始されたのである。

地熱エネルギーの技術ロードマップは、そのような、IEA によって整備されたロードマップの1つである。

ロードマップの目標は、2050年までにエネルギー関連で排出するCO₂排出量を半減させるために、エネルギー技術が重大な役割を果たすことを実証することである。このロードマップでは、政府、産業界および金融関係者が、協調して実際的にとり得るステップを明らかにする。

地熱エネルギーに着目する理由

地熱技術は、再生可能エネルギーを使い、温室効果ガス（GHG）はほとんど排出しないで、発電・熱供給を行う技術である。この技術は、エネルギーセキュリティ、経済発展および気候変動の緩和を実現する上で重要な役割を担っている。

地熱エネルギーは、岩石や、地中に閉じ込められた水または塩水の蒸気あるいは液体として存在する。これらの地熱資源は、発電や熱供給（および冷房）に利用される。発電には、通常、100℃以上の地熱が利用される。暖房については、広範囲な温度の地熱資源が、室内暖房、地域暖房、温泉やスイミング・プールの加熱、温室や土の暖房、水産養殖池の暖房、工業プロセス加熱および融雪で利用できる。電気駆動の圧縮冷却器の代わりに、地熱で、熱駆動の吸着冷却器を運転し、冷房することもできる。

より浅い地層で見つかった適度の地熱でも、地中熱源ヒートポンプ（ground source heat pumps : GSHP）による熱交換で冷暖房に使用できる。GSHP は、特に寒冷地で、地熱エネルギーとして広く利用されているが、深い地層から得られる（高熱の）地熱とは異なる概念に従い、異なる市場向けの技術であるので、区別するために、このロードマップからは除外した。

全世界の地熱発電の能力は、45EJ／年（12500TWh、2008年の世界中の発電量の62%相当）と見積もられている（2009年 Krewitt 等）。また、同研究で、直接使用に適している地熱資源を1040 EJ／年（289000TWh）と見積もっている。

※2008年の全世界の最終熱エネルギー消費量は159.8EJ/44392 TWh である。（同上）

なお、上記の地熱資源の予測値には、先端地熱技術による、岩体や海底地熱、マグマ、地圧地熱資源の利用は含まれていない。

地熱エネルギーには大きな技術的可能性があるものの、エネルギーの需要地から遠く、コストがかかることが難点である。地熱発電は、他の再生可能エネルギー由来の発電に比べていくつかの点で、非常に優れている。その1つは、地熱エネルギーは、一般に天候や季節変動に左右されないので、非常に安定したベースロード電源に利用できることである。最新の地熱発電所の利用率は 95%に達する場合があります、その点からもベースロード電源に最適である。この地熱発電の持つベースロード電源としての特性は、出力変動の激しい発電しかできないその他の再生可能技術と一線を画している。すなわち、同じ再生可能エネルギー由来の発電を増加させた場合でも、地熱エネルギーなら、出力変動を補うためのロード・バランスingの心配が不要となる。理論的には、需要が落ちれば、地熱エネルギーを利用するポンプを調節して発電量を調節できるので、ピーク需要対応の電源としても使用できるが、実際には、負荷追従運転する地熱発電は、まだ開発されていない。地熱エネルギーは、集中型発電、分散型発電どちらでも利用することができ、また、熱電併給 (CHP) プラントとしても利用できる。これまでの地熱技術開発は、自然に出来上がった地下の熱水貯蔵層から蒸気あるいは熱水の形でエネルギーを取り出すことにとどまっていた。しかし、先端技術：EGS を使って超高温地熱エネルギーの利用が可能になれば、今後、地球上の広範な地域で地熱エネルギーを利用できるようになる可能性がある。

この IEA の地熱と地熱発電の技術ロードマップでは、IEA の[エネルギー技術展望 2010](#)の「Blue High-REN」シナリオに基づいて、2050 年に世界中で 1400TWh の電力量を地熱エネルギーが提供すると予測している。2050 年の地熱の熱利用は、5.8EJ/年と見積もっている。

本ロードマップの目的、プロセスおよび構造

大規模地熱資源を継続的に開拓し、先端地熱技術を開発すれば、地熱エネルギーは、全世界のエネルギー需要に著しい貢献をすることができる。そのためには、今後 20 年の間に、EGS の実証プラントで商用化のめどを立て、従来型の地熱資源開発も並行して実施していかなければならない。また、これまで利用されてこなかった深部帯水層中の中・低温地熱資源の使用を含め、より広いスケールで地熱エネルギーの熱としての活用も考えなければならない。

本ロードマップでは、地熱開発を全体的に加速するために取り組むべき主要アクションとタスクを洗い出した。いくつかの市場では、既にそのようなアクションが採られつつあるが、多くの国では、地熱エネルギーの利用を考え始めたばかりである。従って、マイルストーンの設定は、絶対的な時間ではなく、相対的な緊急度を示すものとした。

2010年4月8日パリで開催されたIEAの第1回地熱ロードマップ・ワークショップでは、技術開発に注目。2010年10月24日カリフォルニア州サクラメントで開催された第2回ワークショップでは、経済的および非経済的障壁を克服するために必要とされる政策フレームワークに注目した。2010年11月29日インドネシアのバンドンで開催された第3回3ワークショップでは、前2回のワークショップから結論を導き出し、インドネシアにおける地熱開発の事例研究を行った。

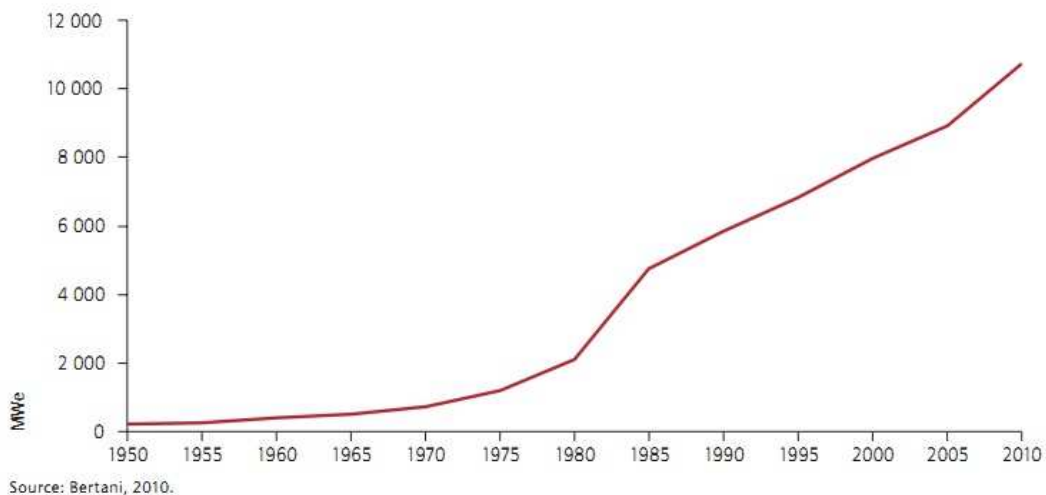
このロードマップは4部構成となっており、資源、地熱技術および経済性にフォーカスした今日の地熱エネルギーのステータスで始まる。次に、地熱発電および地熱の熱利用のビジョンを示す。その後、技術改良のマイルストーンを示し、経済的および非経済的障壁を克服し、かつRD&Dを支援するのに必要な政策フレームワークの議論で締めくくっている。

■ 地熱エネルギーの現状

地熱エネルギーの開発

地熱の温泉利用は古代以来良く知られているが、工業目的ではじめて地温探査が行われたのは 19 世紀の初めイタリアの Larderello で、地熱流体から硼酸を産出するために利用された。19 世紀の終わり、米国の Boise（アイダホ州）で地熱を利用した地域暖房システムが使われだし、それに続いてアイスランドでも 1920 年代に地熱の地域暖房システムが使われだしている。そして、20 世紀初め、再び、イタリア Larderello で地熱からの発電に成功。それ以来、地熱発電は、着実に伸び、2009 年には、世界中の地熱発電設備容量は 10.7GW。平均効率 6.3GWh/MW で、ほぼ 67.2TWh／年の電力を生み出している。（Bertani、2010 年）（Figure 1）

Figure 1: Global development installed capacity geothermal power (MW)



特に 1980 年から 1985 年まで著しく成長したのは、地熱開発に必要なノウハウとほぼ等しい専門知識を持っていた石油業界（主にユノカル社－現在は、シェブロンと合併）が地熱市場に注目したからである。地熱発電は、すでに電力供給において一定のシェアを持っており、アイスランド（25%）、エルサルバドル（22%）、ケニアおよびフィリピン（それぞれ 17%）およびコスタリカ（13%）では特に顕著である。

絶対量では、米国が 2009 年に最も地熱発電の電力量が多く、3093MW の設備容量で 16603GWh／年の電力供給を行っている。

2009 年のヒートポンプを除く地熱発電の合計設備容量は 15347MW で、223PJ（ペタジュール）／年の熱生産も行っている。中国は、地熱の熱利用（ヒートポンプ以外）が最も高く、2009 年の熱利用量は合計 46.3PJ／年に上っている（Lund、2010 年等）。

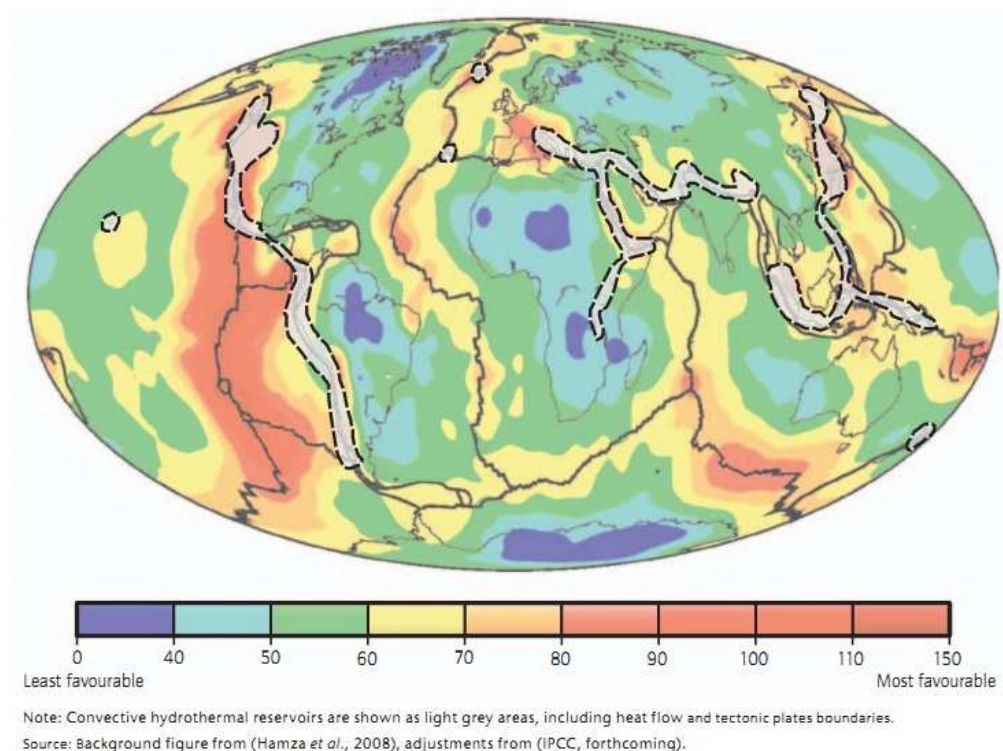
地熱資源

● 熱水資源

最近まで、地熱エネルギーの利用は、高熱温水が噴き出る井戸を掘り当てられるエリアに集中していた。熱源は、蒸気または 100～300℃以上の温水である。

高温地熱地域は、プレート境界の近くに多く、火山や地震活動でできた地層の隙間を通して高温熱源が、地表近くにできる。(Figure 2)

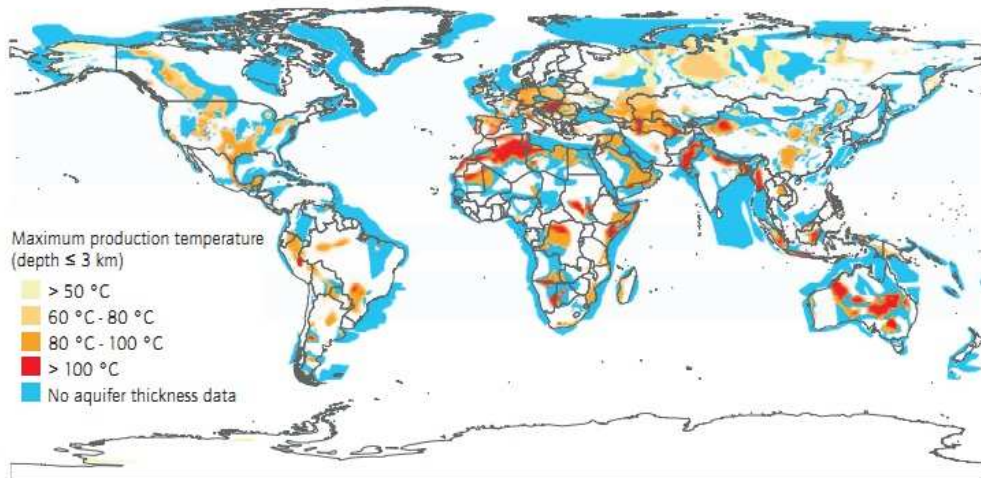
Figure 2: World resource map of convective hydrothermal reservoirs



ところで、ほとんどのプレート境界は海面下にある。これまで、67000km の中央海嶺の内、13000km が調査され、280 を超える地熱スポットが発見されており（2010 年、Hiriart 等）。そのうちいくつかは、60MW から 5GW 規模の地熱エネルギーがあると推測されている(1996 年、german 等)。

理論上、そのような地熱スポットは掘削する必要もなく、すぐにでも海底発電所としてその熱源を利用できる。しかし、陸地から遠く離れた地熱資源から電源を需要地まで届ける経済合理的な技術がないので、研究開発が必要となっている。また、地熱は深部帯水層系から抽出することもできる。地下 3km の深さには、60℃ を超す低・中温地熱地域が世界中に点在している。(Figure 3) しかし、それらの地熱貯留層が利用できるかどうかは、自然条件に強く依存する。貯留層の圧力は、多くの場合静水圧に等しいか若干上回る程度だからである。

Figure 3: World map of deep aquifer systems



Note: World map of deep aquifer systems modified from (Penwell, 1984). Overlain are expected average production temperatures for a depth interval starting at excess temperatures of 40°C relative to surface, and ranging to a maximum depth of 3 km. The map is based on heat flow data from Artemieva (2006) and sediment thickness information from Laske and Martens (1997). Local performance strongly depends on natural heat flow conditions and surface temperature.

Source: TNO, www.thermogis.nl/worldaquifer.

石油・ガス井で“副産物”として発生する廃温水も地熱資源として利用できる可能性がある。例えば、北米の古い油田では、1日当たり1億リットルにのぼる熱水を“生産”しているが、それらの廃温水は、バイナリー発電の出現により、新たな財産に生まれ変わるかもしれない。

● 高温岩体資源

これまで、地熱エネルギーの利用は、自然に熱水、蒸気が噴出するか、地熱貯留層として高温の透水性岩石が十分あるエリアに限られていた。

現在の掘削技術で経済的に掘削できる範囲では、透水性の低い岩の方が圧倒的に多いが、その中で、高温のものは、高温岩体と呼ばれる。高温岩体は世界中に存在するものの、南オーストラリアのような放射能汚染地域や、米国西部のような地殻変動の多い地域に多い。逆に、火山活動や地震のない安定した場所では、高温岩体が地下深くにあり、発電に利用しようとしても、経済的に見合わない。すなわち、エネルギーを高温岩体資源から取り出すことを可能にする技術はまだ実証段階にあり、商業ベースにのせるには、技術革新と経験が必要である。現在最もよく知られている高温岩体利用技術に EGS がある。

● EGS:Enhanced geothermal systems

EGS (Engineered geothermal systems の略とされることもある) は、蒸気や温水が出ず、透水性が低い高温岩体に先在する破砕帯を利用するか、人工的に水圧刺激を利用して地下深くの高温の岩石を断裂させて作り出した破砕帯の透水性を利用して高温岩体内に大きな熱交換エリアを作り出す技術である。第1の抗からその熱交換エリアに水などの熱媒体を注ぎ込み、第2の抗から熱せられた熱媒体を汲み上げて発電プラントに送り、利用されたものはもとの熱交換エリアにポンプで戻され、そのサイクルが繰り返される。

1970年代に開発された当初の EGS は、非常に透水性の低い高温岩体を使用したもので、高温岩体技術とも呼ばれている。現在世界中で運転中の EGS プロジェクトの中でも、フランスの Soult-sous-Forets (アルザス地方) にある科学実証サイトは最先端を行っており、最近 1.5MW 規模の発電所として運用を開始し、非常に貴重なデータを提供している。2011 年時点で、EU 圏内では、20 の EGS プロジェクトが進行中または検討中である。

米国は、復活した地熱活用プログラムの一環で、クリーンエネルギー・イニシアチブの 1 つとして大規模 EGS の RD&D を実施しており、オーストラリア政府でも、地熱開発・実証プロジェクトに約 2 億 500 万米ドルの支援を行っている。南オーストラリア州の Cooper Basin には、25MW の実証プラントを持つ世界最大の EGS プロジェクトが本格的な実験を実施している。

実証試験に携わっている Geodynamics 社は、Cooper Basin に 5~10GW の高温岩体発電のポテンシャルがあると評価している。

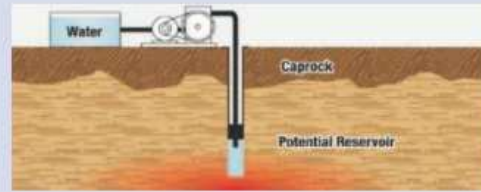
その他、中国でも 3 つの地方で EGS をテストする計画を持っている。インドは、高温岩体資源が国の至る所で利用可能と目されているが、現在のところ、地熱エネルギー開発には手が付けられていない (2010 年、Chandrasekharam および Chandrasekhar)。

Figure 4 に EGS の仕組みを図示する。

Figure 4: An enhanced geothermal system in pictures

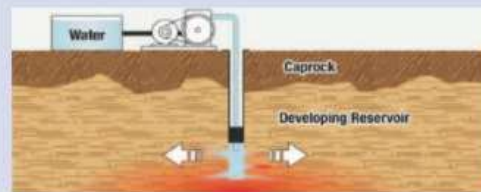
1. Injection well

An injection well is drilled into hot basement rock that has limited permeability and fluid content. All of this activity occurs considerably below water tables and at depths greater than 1.5 kilometre. This particular type of geothermal reservoir represents an enormous potential energy resource.



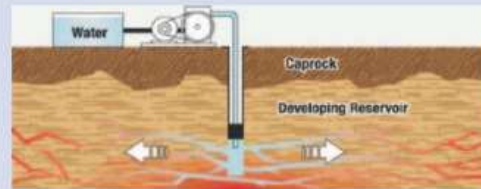
2. Injecting water

Water is injected at sufficient pressure to ensure fracturing or open existing fractures within the developing reservoir and hot basement rock.



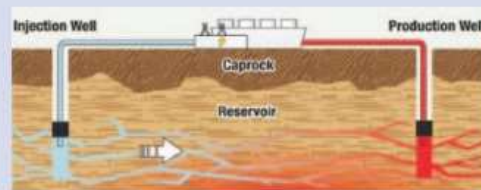
3. Hydro-fracture

Pumping of water is continued to extend fractures and reopen old fractures some distance from the injection wellbore and throughout the developing reservoir and hot basement rock. This is a crucial step in the EGS process.



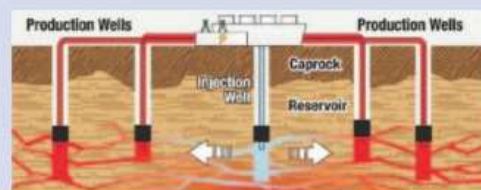
4. Production

A production well is drilled with the intent to intersect the stimulated fracture system created in the previous step and circulate water to extract the heat from the basement rock with improved permeability.



5. Additional production

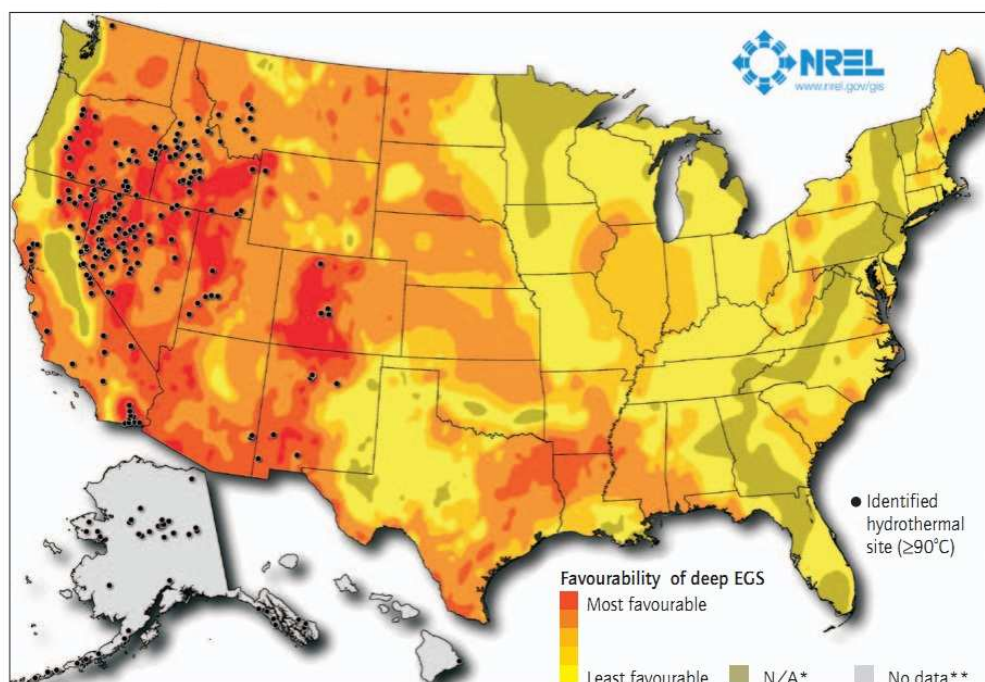
Additional production wells are drilled to extract heat from large volumes of hot basement rock to meet power generation requirements. Now a previously unused but large energy resource is available for clean, geothermal power generation.



Source: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), US Department of Energy.

高温岩体資源に関して、Figure 2、 Figure3 のようなワールドマップはまだ存在しない。Figure 5 は、EGS での利用可能性を示す米国内の高温岩体資源マップである。

Figure 5: Geothermal resources in the United States, including favourability of EGS



Source: NREL.

Map does not include shallow EGS resources located near hydrothermal sites or US Geological Survey assessment of undiscovered hydrothermal resources.

Source data for deep EGS includes temperature at depth from 3 to 10 km provided by Southern Methodist University Geothermal Laboratory and analyses (for regions with temperatures $\geq 150^{\circ}\text{C}$) performed by NREL.

Source data for identified hydrothermal sites from US Geological Survey assessment of Moderate- and High-temperature Geothermal Resources of the United States (2008).

N/A* regions have temperatures less than 150°C at 10 km depth and were not assessed for deep EGS potential.

No data**: Temperature at depth data for deep EGS in Alaska and Hawaii not available.

地熱技術の現状

● 地熱発電

電気を起こすために発電所で一番よく使われるのは蒸気である。

化石燃料を使う発電所では石炭、石油あるいはガスを炊いて水を沸騰させ、蒸気を得るが、地熱発電の場合は、地熱貯蔵層から得た蒸気に殆ど熱水が含まれなければ、簡単な湿分除去を行うのみで蒸気タービンに送って発電する。これをドライスチーム(dry steam)式と呼ぶ。

得られた蒸気に多くの熱水が含まれている場合、蒸気タービンに送る前に汽水分離器で蒸気のみを取り分けて利用する方式もあり、これはシングルフラッシュサイクルと呼ばれる。日本の地熱発電所では主流の方式である。

蒸気を分離した後の熱水を減圧すれば、更に蒸気を得られる。この蒸気をタービンに投入すれば、設備は複雑となるが、出力の向上及び地熱エネルギーの有効利用が可能となる。これをダブルフラッシュサイクルと呼ぶ。

更に、地下の温度や圧力が低く、熱水しか得られない場合でも、アンモニアなど

水よりも低沸点の媒体を、熱水で沸騰させタービンを回して発電させることができる場合がある。これをバイナリー発電と呼ぶ。

どのような発電方式を採用するかは、地熱貯蔵層の深さと温度、地熱資源全体の圧力その他の性質に依存する。

● 地熱の熱利用

地中熱源ヒートポンプ：GSHP（全地熱エネルギーの 49%）に次ぐ地熱利用は温泉やスイミング・プールの加熱（約 25%）である。例えば中国では、GSHP を除いた年間地熱エネルギー46.3PJ のうち、23.9PJ が温泉／スイミング・プールで利用されている。次に多い地熱の熱利用方法は地域暖房（約 12%）で、その他の利用は、合わせて 15%未満である。

今後は、地域暖房への地熱エネルギー利用が期待される。地熱発電で使用後の熱水に関しても、そのまま捨てずに地域暖房システムに使い、その後温室暖房に、更に水産養殖というように、地熱をカスケードして利用できる。ただし、熱輸送には制限があるので、地熱資源の近くに熱需要がないと、なかなか利用は難しい。地熱エネルギーの地域冷房への利用は進んでいないが、70℃以上の地熱があれば、吸着式冷凍機（Adsorption Chiller）用の冷却水を作ることができ、暖房用の配管を利用して地域冷房にも利用できる。最近では、60℃で作動可能な吸着冷却器もできており、電気に代えて、地熱エネルギーを利用した熱駆動圧縮冷凍機が使えるようになってきている。

● 地熱エネルギーの開発・利用促進要因

地熱資源を電気や熱利用するにあたって、資源評価や実用化のための技術検討が必要である。

● 資源評価

地熱資源は地下深くにあるので、資源探査と評価が必要である。資源探査では、科学手法や、実際に探査井を掘ることを通して、地熱資源の深度、地熱貯留層の厚さや、地下の温度、透水性、蒸気のみか熱水が含まれているかどうかを予測する。

探査井の掘削は、費用がかかる上に、あらかじめ結果が見えないので財政上非常にリスクが高い。地熱貯蔵層の形成は、地質学的に石油やガスと似ているので、石油・ガス田探索と同様の探査方法をとることができる。

一方、高温岩体の資源評価では、まだ技術的に課題が残っており、新しい革新的な解決策が待たれている。

地熱エネルギーへの投資を拡大するためには、革新的な地熱資源査定ツール、資源探査および地熱発電・熱利用開始後の地球物理学上のデータインベント

りの整備、および、科学的な探査方法の改善が必要である。

- 地熱資源の実用化

資源評価時同様、効率的な探索技術は、地熱資源を地熱エネルギーとして実
利用する上での基本である。

次に、地熱貯留層に生産井を接続するにも、高熱岩体に EGS 貯留層を作り出
すにも、熱源を刺激する技術が非常に重要である。高温岩体資源への刺激技
術には、流体の注入による水圧破碎と、岩石を溶かす酸その他を注入する化
学的な方法がある。

水圧破碎は、地下地盤の応力を発散させ透水性のある破碎帯を形成する技術
であるが、当該地盤の応力場 (stress field) の状況によっては、地表で揺れ
を感じるほどの地震を誘発するリスクがある。

地熱エネルギーの経済性

高温地熱資源が利用可能なところでは、多くの場合、地熱発電は、新たに従来型の火
力発電所を建設するのと経済的に同等である。バイナリー発電も、場合によっては、
従来型の発電と価格競争力を持つことがあるが、プラントのサイズ、中・低温地熱資
源の温度レベル、および地理的な位置に発電コストが相当依存する。EGS は、まだ技
術実証段階であり、発電コストに関して、正確な査定はできていない。

十分に高温の地熱資源が利用可能で、地熱エネルギーに対応した地域暖房システムが
適所（近く）にある場合、地熱エネルギーを利用した地域暖房は、競争力を持つもの
となる。また、温室のように、連続した高い熱需要があり、かつ、大規模な熱流通の
仕組みが不要な場合に地熱エネルギーの熱利用は有望である。

以上、現在でも場合によっては地熱資源の熱利用および地熱発電が、他のエネルギー
／発電方式と比べて競争力を持っているものの、新しい地熱技術に関しては LCOE (均
等化したエネルギーコスト) の低減が必要である。

- 投資コスト

地熱発電の開発投資コストには相当の幅がある。地熱資源の温度、圧力、地熱貯
留層の深さと透水性、地熱流体の化学組成、立地場所、採掘市場、開発規模、発
電プラントの数とタイプ（ドライスチーム／フラッシュ発電／バイナリー発電）
および未開発地域か既存プラントの拡張かによって電気開発費が相当変わるから
である。油、鉄およびセメントのような商品の値段にも開発費は強く影響される。
2008 年、未開発地域での地熱発電開発費は、フラッシュ発電で、\$2000～4000/kW、
バイナリー発電では、\$2400～\$5900/kW の幅があった（2010 年、IEA）。EGS 開
発費に関しては、まだデータがない。

地域暖房向けの投資コストは\$570～\$1570/kW とみられており、温室の地熱エネ

ルギー利用に関する投資コストは、\$500～\$1000/kW と見積もられている。(IPCC)

● 運用・維持コスト

地熱発電所では燃料が不要なので、地熱発電所の運用維持コストは、補充井の掘削コストを別にとすると、米ドルで\$9/MWh (ニュージーランドの大規模フラッシュ／バイナリー発電) ～\$25/MWh (米国内小型バイナリー発電) で済む (2010 年、IEA)。

補充井の掘削コストも運用維持コストの一部と考えた場合、全世界平均で\$19～\$24/MWh (IPCC)。ニュージーランドでは、補充井の掘削コストを含めても\$10～\$14/MWh と見積もられている (2009 年、Barnett and Quinlivan)

● 生産コスト

地熱発電所の均質化した発電コストは発電所によって大きく変わる。

熱水の高温フラッシュ発電コストは、平均\$50～\$80/MWh。

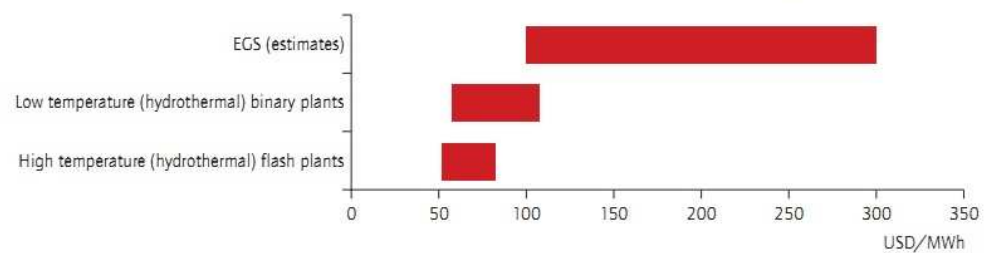
バイナリー発電コストは、平均で\$60～\$110/MWh である。

EGS の発電コストは、米国では\$100/MWh (4km 地下にある 300℃の地熱資源を利用した場合) ～\$190/MWh (5km 地下にある 150℃の地熱資源を利用した場合)、ヨーロッパでは、\$250～300/MWh と見積もられている。(2010 年、IEA)

地域暖房への地熱エネルギー利用コストは、使い方、地熱値言の温度および運用維持費および人件費によって変化するが、\$45～\$85/MWh。

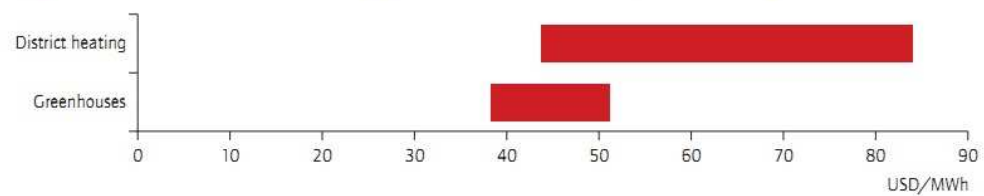
温室への地熱エネルギー利用コストは、\$40～\$50/MWh と見積もられている。

Figure 6: Production costs of geothermal electricity (USD/MWh_e)



Note: Assumptions calculation included in Appendix I.
Source for binary plants and flash plants: IEA analysis.
Sources for EGS estimates: MIT, 2006; and Huenges and Frick, 2010.

Figure 7: Production costs of geothermal heat use (USD/MWh_t)



Note: Assumptions calculation included in Appendix I.
Source: IEA analysis.

開発とCO2削減ビジョン

2050年に向けての地熱の展望

● 地熱発電

このロードマップ作成にあたっては、IEA の[エネルギー技術展望 2010](#) の「Blue High-REN」シナリオをベースとしている。このシナリオは、再生可能エネルギーが、2050年には全世界発電電力量の75%となることを仮定しており、地熱発電に関しては、2050年までに1400TWh/年（世界の年間発電電力量のおよそ3.5%相当）に達すると想定している。また、従来型の高温地熱資源だけでなく、深部滞水層の低・中温地熱開発も重要な役割を果たすと想定している。また、高度な高温岩体技術に関しては、2030年早々に商業ベースにのるとの仮定を置いている。アジアの開発途上国では、まだ手つかずの高温地熱資源が豊富に存在しており、更に、北米では、米国西部の高温地熱資源だけでなく EGS の開発に期待がかけられている。欧州でも、高温地熱資源に加えて、深部滞水層の低・中温地熱資源、EGS を組み合わせた地熱開発が行われると想定している。

Figure 8: Roadmap vision of geothermal power production by region (TWh/y)

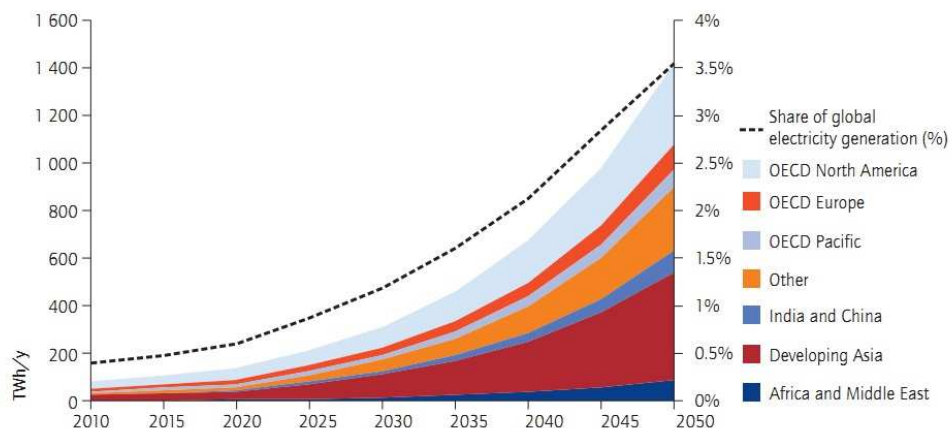
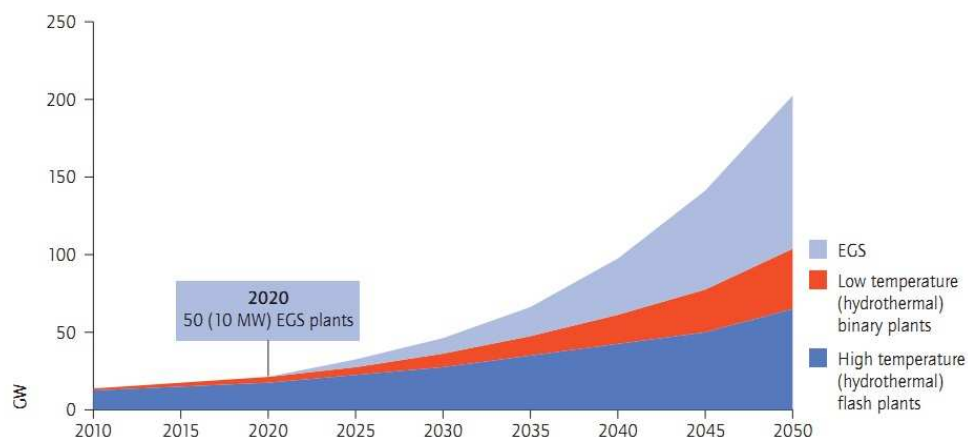


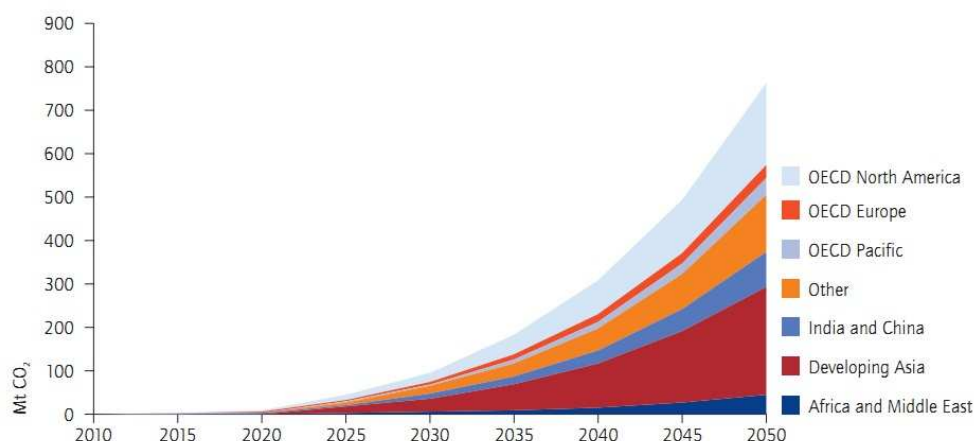
Figure 9 に示された地熱発電の展開を満たすためには、現在開発中の 10 の EGS プラントに加えて、今後 10 年で少なくとも 50 の 10MW 級 EGS プラントが必要となる

Figure 9: Growth of geothermal power capacities by technology (GW)



地熱発電が 2050 年までに 1400TWh／年に達することにより、Figure 10 に示すように、発電に伴う世界中の年間 CO₂ 排出量が 760Mt 軽減されると想定されている。

Figure 10: CO₂ emission reductions from geothermal electricity by 2050



● 地熱エネルギーの熱利用

地熱エネルギーの熱利用は、寒冷な気候の国々に適しているが、温暖な気候の国々でも、地熱は農業や産業に役立っている。また、60℃以上の温度があれば、吸着冷却器用の駆動エネルギーとして地域冷房に使うこともできる。

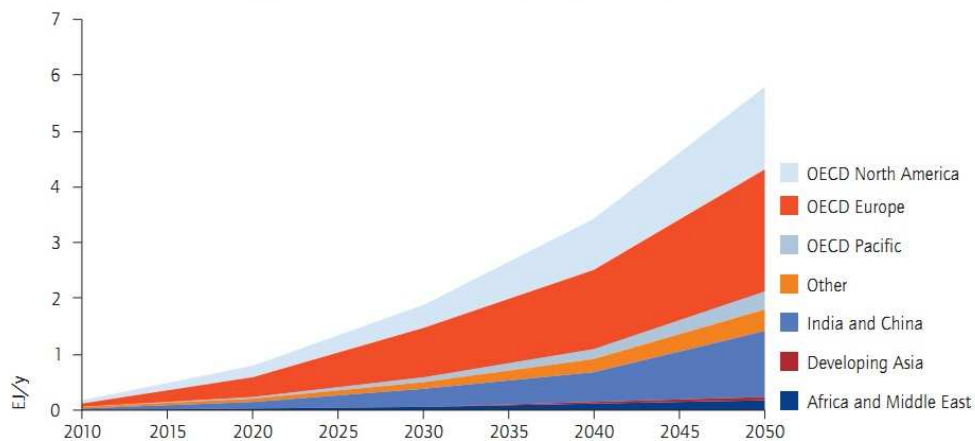
北欧では、地熱を利用した熱供給や CHP バイナリー発電が近年急増しており、地熱の直接利用への関心が高まっている。東欧諸国は、老朽化した地域暖房システ

ムの刷新が必要になっているが、深部滞水層の低・中温地熱の利用が検討されている。また、フィリピンやインドネシアのような熱帯諸国でさえ、地熱エネルギーの農業への適用に関心を持ち始めている。

Figure 11 は、2050 年までの地熱エネルギーの熱利用に関する、地域ごとの想定で、2050 年には、世界全体での地熱の直接利用は 5.8EJ（約 1600TWh の熱エネルギー）になると仮定している。この地熱の直接利用の数値は、IPCC の SSREN（[Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation](#)）の予測値をベースとしているが、地中熱源ヒートポンプ（ground source heat pumps : GSHP）分は除外している。

逆に、高温岩体技術が 2030 年早々に商業ベースにのると仮定しているので、EGS 技術を用いた CHP（熱電併給）の予測値を加味している。

Figure 11: Roadmap vision of direct use of geothermal heat by region, excluding ground source heat pumps (EJ/y)



経済性の展望とコスト削減

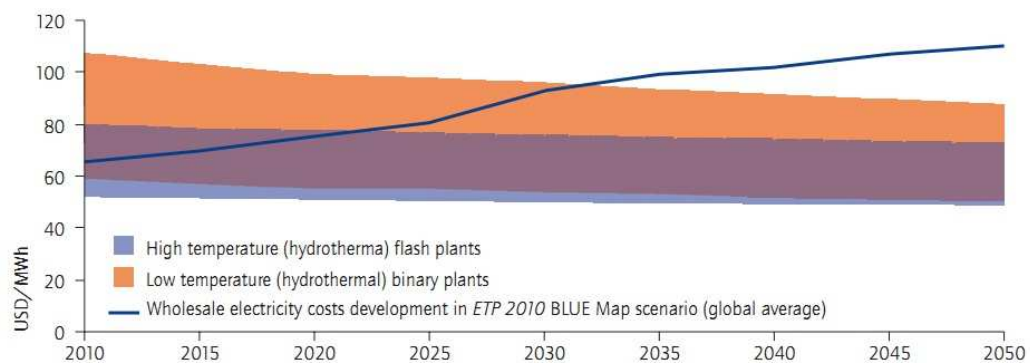
地熱エネルギーの生産コストは、条件によって相当ばらつきがある。

高温地熱資源を用いたフラッシュ発電はすでに平均学習率が 5%の実証済みの技術で、発電コストは、多くの場合、すでに他の発電方式と競合力をもち、2050 年に向けて、今後もコストダウンできると推測されている (Figure12)。卸電力価格が上昇している中で、地熱フラッシュ発電は、2020～2030 年の間に、完全な価格競争力を持つと想定している。

バイナリー発電も比較的成熟した技術である。まだ、発電容量が小さいが、容量が大きくなるにつれ、発電コストが下がり、2030 年以降は、他の発電方式と比べても価格競争力を持つようになると思われる。

EGS に関しては、まだ発電コストを予想できる段階に至っていない。石油・ガス井の廃熱水利用や、オフショアの海底地熱利用、マグマや地圧地熱資源の利用に関しても同様である。

Figure 12: Range of reduction of average levelised costs of electricity production in hydrothermal flash plants and binary plants



Note: Assumptions: interest rate 10%, technical lifetime 35 years, O&M costs 2.5%
Source: IEA analysis.

技術開発－アクションとマイルストーン

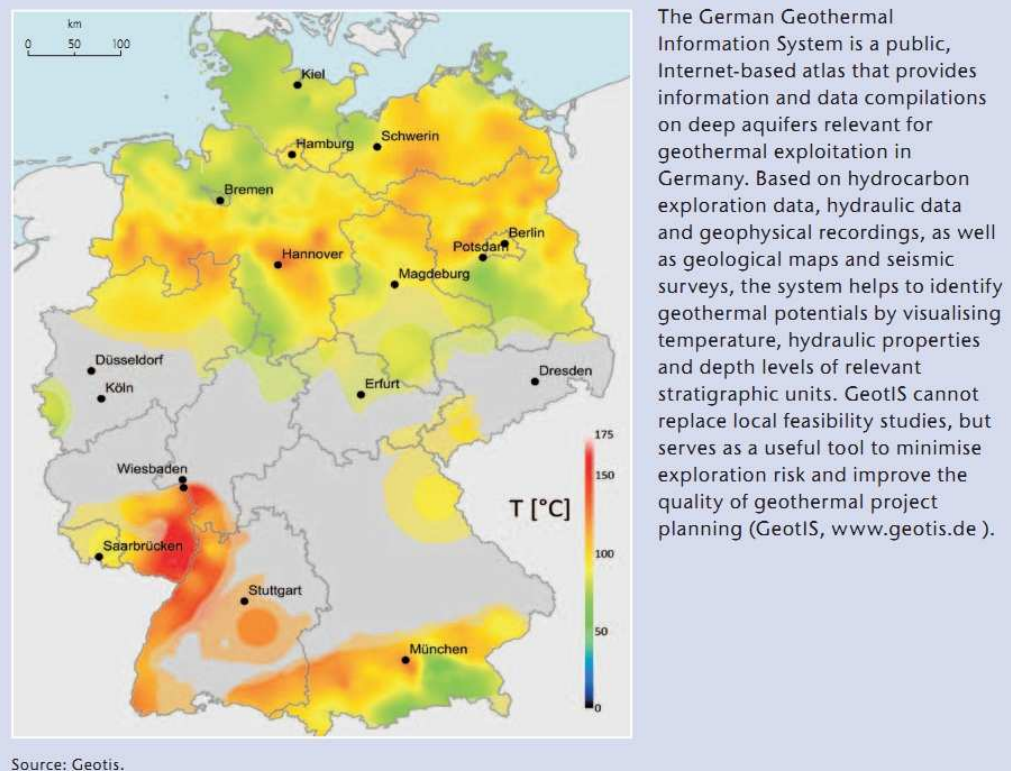
地熱エネルギー実用化において

地熱資源評価

推奨するアクション	マイルストーン	ステークホルダー
既存の地質学データベースを編集・結合し、地熱資源開発に役立つように地質学データを加えたデータインベントリを作成して一般公開する	2011-15年	政府、地熱関連産業、石油関連産業および研究所
高温岩体その他の地熱資源探索を行うための統合的な方法論と、探索で見つかった地熱資源の可能性評価方法を確立する	2011-20年	研究所および地熱関連産業
適切な高温岩体や隠された地熱サイトを識別するための地熱探索ツールおよび地下構造のモデルを開発する	2015-25年	研究所、石油関連産業および地熱関連産業

Figure 13 にドイツの地熱情報システムの例を示す。

Figure 13: Underground temperature in Germany at 2 500 m below sea level



資源の実用化

推奨するアクション	マイルストーン	ステークホルダー
地熱資源探査、資源評価および地熱貯留層からのエネルギー採取のための安価な掘削技術を開発するとともに、高度な掘削手法についても研究する	2011-25年	掘削産業、研究所、石油関連産業および地熱関連産業
高温岩体技術、および高温高圧掘削技術を改善する	2011-20年	掘削産業、研究所、石油関連産業および地熱関連産業
ダウンホール計測器および坑井モニタリングの改善	2011-20年	掘削産業、研究所、石油関連産業および地熱関連産業

● 地熱エネルギーの熱利用

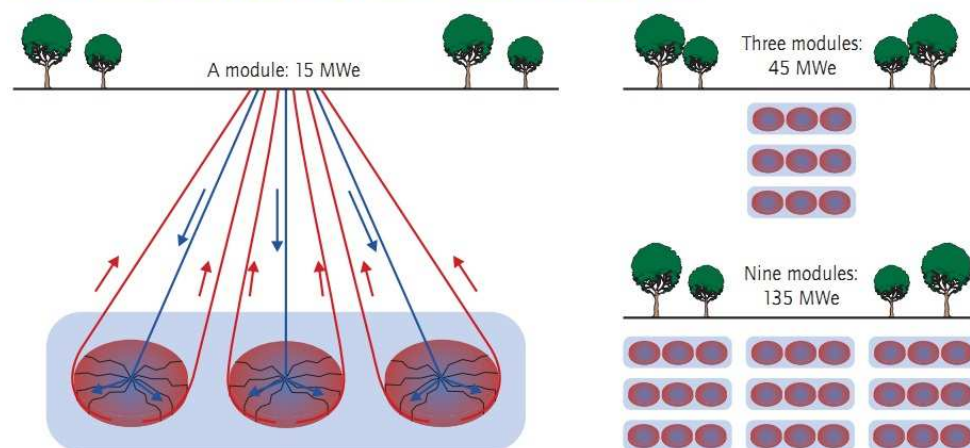
推奨するアクション	マイルストーン	ステークホルダー
再注入技術、(熱交換器の)汚れ防止技術や、ポンプ、熱交換器、ピーク対応／バックアップ装置、貯蔵タンクのようなコンポーネントを改良して熱電併給(CHP)の効率化を図る。また、地熱CHPで、熱および電力負荷のバランスを最適化する	2011-15年	地域冷暖房産業、研究所、地熱関連産業
地熱エネルギーのカスケード利用、屋内冷房や、高温岩体地熱を利用したCHPの新たな産業用用途を調査する	2015-25年	地域冷暖房産業、研究所、地熱関連産業

● 先端地熱技術:EGS

推奨するアクション	マイルストーン	ステークホルダー
石油・ガス田開発と共同で行うなど、従来とは異なる地熱環境にEGSパイロット・プラントを作り、技術の相互交流を図る	2011-20年	地熱関連産業、政府、研究所
EGSの生産性を向上させるために、標準化された化学・熱流体シミュレーション技術、および、新たな最適貯蔵モデリング決定ツールを開発する	2011-30年	地熱関連産業、政府、研究所
水圧破砕で誘発される地震のリスクを含め、EGS開発に伴う健康、安全、環境問題管理を改善する	2011-20年	地熱関連産業、政府、研究所
EGSの地熱貯留層を監視・管理して、長期間超高压地熱資源を利用する	2015-25年	地熱関連産業、政府、研究所
モジュールを直列／並列して、1つのEGSプラントを50MW、更に200MW超の規模に拡大する	2025年以降	地熱関連産業

表中の最後のアクションに挙げられている、EGS の発電容量をスケールアップする概念を Figure 14 に示す。

Figure 14: Conceptual model of an industrial EGS plant



Source: EGS Energy.

その他の先端地熱技術

推奨するアクション	マイルストーン	ステークホルダー
高温岩体資源を開発する代替手段のFS (Feasibility Study) を実施する	2011-25年	研究所、政府および地熱関連産業
超臨界流体 (Super Critical Fluid) や石油・ガス井の廃熱水など、代替地熱資源のFSを実施する	2011-20年	研究所、政府、地熱関連産業および石油関連産業
オフショアの海底地熱資源利用の代替手段のFSを実施する	2020-40年	研究所、政府および地熱関連産業

政策－アクションとマイルストーン

規制の枠組みとインセンティブ

推奨するアクション	マイルストーン	ステークホルダー
地熱発電および熱利用に関して、既に成熟した（あるいは、ほぼ成熟した）地熱技術の普及促進に関する中期目標を設定するとともに、先端地熱技術に関する長期目標を設定する。 これらの目標は、すべてのタイプの地熱資源の可能性調査に基づいて設定し、すべての政策フレームワークに含めるべきである	2011-15年	政府
それぞれの地熱技術の競合力のなさを埋めるための、透明性の高い、予測可能な規制フレームワークを検討し、FIT (feed-in tariff: 固定価格買い取り制度) やRPS (renewable portfolio standard: 電力会社が新エネルギーの導入を一定の割合で行わなければならないように義務づける目的で策定された法律) 等の経済的インセンティブを導入する	2011年から開始し、それらの地熱技術が競合力をつけるにしたがって、インセンティブを小さくする	政府
地熱の熱利用に関しても、(革新的な) 経済的インセンティブを導入する	2011年から開始し、それらの地熱技術が競合力をつけるにしたがって、インセンティブを小さくする	政府

市場拡大

推奨するアクション	マイルストーン	ステークホルダー
地熱開発のリードタイムを短縮するため、地熱プラントの許認可手続きの合理化を図る	2011-15年	政府
EGS技術導入に関して、(日本での原子力発電の立地施策同様) 地元住民の支援を受けるためのプロトコルを開発し、そのプロトコルに従うことで、水圧破砕が引き起こす微小地震について理解を得る	2011-20年	地熱/EGSデベロッパーおよび政府
地熱資源探査に伴う関与する財務リスクをカバーする政策導入を検討する。地熱開発の資源探査段階をカバーする金融商品を開発する	2011年以降	政府、開発銀行および民間金融機関
地熱のバリューチェーンに沿った、各フェーズの専門家を育成するための意識改革と、訓練・教育を実施するため、関連する専門団体を巻き込む	2011年以降	政府、地熱関連産業および研究所

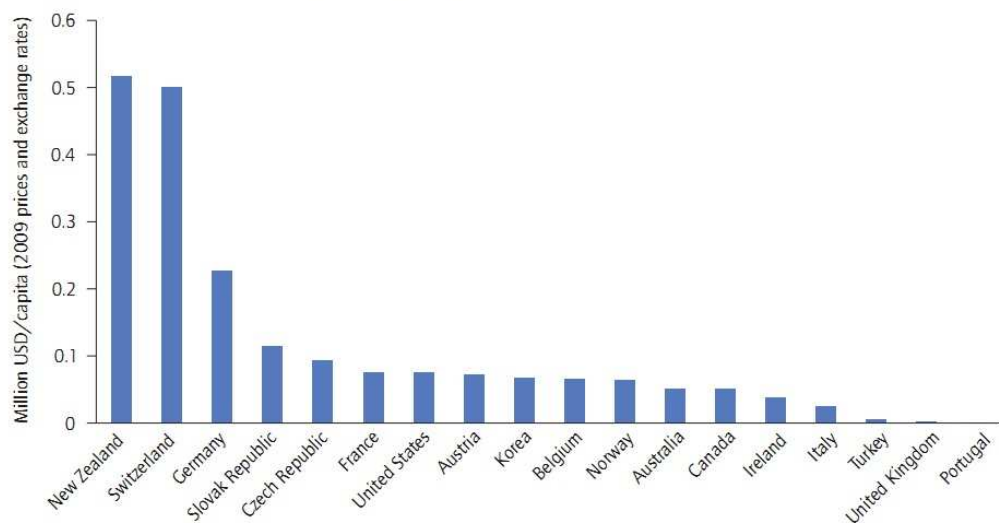
研究開発実証の支援

推奨するアクション	マイルストーン	ステークホルダー
地熱関連の研究・開発・実証 (RD&D) を支援するための公的資金を増やす	2011-20年	政府
長期にわたって、官民連携して地熱関連RD&Dの資金援助を行うことを保証する	2020-40年	政府および民間部門

IEA の所属する国の間でも、他の再生可能エネルギー技術と比較すると地熱エネルギーの RD&D 支援はそれほど多くなく、全 RD&D 投資の 10%以上を地熱エネルギーに向けているのは、ニュージーランドのみである。

Figure 15 は、国民一人あたりに換算した地熱エネルギー RD&D 予算であるが、RD&D 予算の絶対額が多いのは米国とドイツである。

Figure 15: Public RD&D budget for geothermal energy, 2006-09 average
(million USD per capita)



Note: Where available, 2010 estimates are also included. US Recovery Act Spending for geothermal energy in 2009 are not included. IEA countries without geothermal RD&D spending are not included in the graph.

Source: (www.iea.org/stats/rd.asp).

国際協調と開発途上国への地熱エネルギー展開支援

推奨するアクション	マイルストーン	ステークホルダー
各国の能力を最大限活用して、国際的な共同研究開発を実施する	2011年以降	研究所、大学、政府および地熱関連産業
開発途上国の、地熱開発への経済的・非経済的障害に取り組むメカニズムを開発する	2011年から開始し、地熱技術が競争力をつけるにしたがって、インセンティブを小さくする	開発銀行、NGO、政府
クリーンエネルギー開発援助対象を拡張する	2011年から開始し、地熱技術が競争力をつけるにしたがって、インセンティブを小さくする	開発銀行

結論およびステークホルダーの役割

本書を締めくくるにあたって、地熱技術にかかわるステークホルダーに必要とされるアクションを Table 1 にまとめた。

IEA は、政府、産業および NGO のステークホルダーとともに、今後も、このロードマップのビジョンが達成されていく過程を定期的に報告する。

ステークホルダー	アクション項目
政府	・一般にアクセスできる地熱資源データベースを構築・整備する ・地熱発電および地熱エネルギーの熱利用に関する長期目標を設定する ・地熱発電および地熱エネルギーの熱利用が競合力を持つようになるまで、経済的なインセンティブ・スキームを導入する ・開発リードタイム短縮のため、地熱開発の許認可手続きを合理化する ・地熱資源探査に伴う関与する財務リスクをカバーする政策導入を検討する ・地熱のバリューチェーンに沿った、各フェーズの専門家を育成するための意識改革と、訓練・教育を実施する ・地熱関連の研究・開発・実証 (RD&D) を支援するための公的資金を増やす ・長期にわたって、地熱関連 RD&D の資金援助を行うことを保証する ・各国の能力を最大限活用して、国際的な共同研究開発を実施する ・開発途上国の地熱開発を支援するメカニズムを開発する
研究所／大学	・一般にアクセスできる地熱資源データベースを構築・整備する ・EGS サイト候補探査において、石油・ガス田探査と合同で行うなど統合的なアプローチをとるようにする ・適切な高温岩体や隠された地熱サイトを識別するための地熱探索ツールおよび地下構造のモデルを開発する ・安価な掘削技術を開発するとともに、開発コストを減少させるため新たな掘削手法についても研究する ・高温岩体技術、および高温高压掘削技術を改善する ・高温岩体資源を開発する代替手段の FS (Feasibility Study) を実施する ・熱水資源開発のための代替技術の FS を実施する ・地熱のバリューチェーンに沿った、各フェーズの専門家を育成するための意識改革と、訓練・教育を実施する ・各国の能力を最大限活用して、国際的な共同研究開発を実施する
産業	
地熱関連産業	・EGS サイト候補探査において、石油・ガス田探査と合同で行うなど統合的なアプローチをとるようにする ・適切な高温岩体や隠された地熱サイトを識別するための地熱探索ツールおよび地下構造のモデルを開発する ・地熱エネルギーを利用した熱電併給 (CHP) の効率化を図る ・異なる地熱環境に EGS バイロッド・プラントを作る ・EGS の生産性、資源持続性を向上させる ・水圧破砕で誘発される地震のリスクを含め、EGS 開発に伴う健康、安全、環境問題管理を改善する ・モジュールを直列／並列して、1つの EGS プラントを 50MW、更に 200MW 超の規模に拡大する ・高温岩体資源を開発する代替手段の FS を実施する ・熱水資源開発のための代替技術の FS を実施する ・地元住民から EGS の支援を受けるためのプロトコルを開発し、そのプロトコルに従うことで、水圧破砕が引き起こす微小地震についても理解を得る ・各国の能力を最大限活用して、国際的な共同研究開発を実施する
掘削	・安価な掘削技術を開発するとともに、開発コストを減少させるため新たな掘削手法についても研究する ・安価な掘削技術を開発するとともに、開発コストを減少させるため新たな掘削手法についても研究する ・ダウンホール計測器、坑井モニタリングおよびロギングを改善する
地域暖房	・地熱エネルギーを利用した熱電併給 (CHP) の効率化を図る ・地熱エネルギーの熱利用の範囲を拡大できる可能性について調査する
石油関連産業	・石油・ガス井から出る排熱水等、熱水資源を開発するための代替技術の FS を実施する
金融機関	
民間金融機関	地熱資源探索を実施する際の投資リスクを回避するための金融商品を開発する
開発銀行	・開発途上国の地熱開発を支援するメカニズムを開発する ・クリーンエネルギー開発援助対象を拡張する

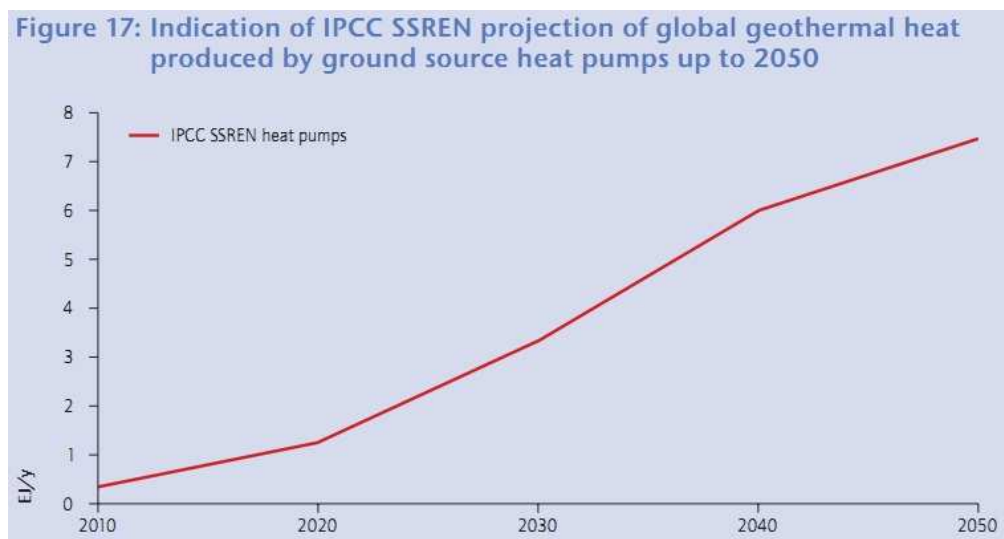
付録 I: コスト計算の前提

	フラッシュ発電	バイナリー発電	地域暖房	温室
投資コスト	\$2000～\$4000/kW	2400～5900/kW	571～1566/kW	500～1000/kW
利用率	85%	85%	50%	50%
利率	10%	10%	10%	10%
寿命(年)	35	35	25	20
運用保守費 (投資コストに対する比率)	2.5%	2.5%	2.0%	2.0%

付録 II: 地中熱源ヒートポンプ(GSHP)の予測

GSHP は、しばしば地熱エネルギーに分類されるが、本ロードマップでは、GSHP のエネルギー利用は、他の地熱利用と性格が異なるので対象外とした。

下図は、その際参考とした、IPCC SSREN による、2050 年までの GSHP によるエネルギー生産予測である。



付録 III: 略語および測定単位

略語

EGS	Enhanced or engineered geothermal systems または Engineered geothermal systems の略。蒸気や温水が出ず、透水性が低い高温岩体に先在する破砕帯を利用するか、人工的に水圧刺激を利用して地下深くの高温の岩石を断裂させて作り出した破砕帯の透水性を利用して高温岩体内に大きな熱交換エリアを作り出す技術。
GSHP	Ground Source Heat Pump の略。地中熱ヒートポンプ 地中熱とは地下の比較的浅い部分にある比較的低温の熱を意味する。ヒートポンプとは、熱を冷たい所から暖かい所に移動させる機械。GSHP は、地中熱とヒートポンプを組み合わせた集中冷暖房・給湯システム
HSE	健康、安全性および環境の略
R&D	研究開発
RD&D	研究、開発および実証
RDD&D	研究、開発、実証および展開

測定単位

kW	W (ワット) は電力の大きさ単位 (電力であることを明示するために We と表すことがある) kW = 1000W
MW	MW = 1000kW
GW	GW = 1000MW
TW	TW = 1000GW
kWh	Wh (ワット時) は電力量の単位で、電力と使った時間の積で表す kWh = 1000Wh
MWh	MWh = 1000kWh
GWh	GWh = 1000MWh
TWh	TWh = 1000GWh
TJ	J (ジュール) は、エネルギー、仕事、熱量、電力量の単位。 1 ジュールは、1 ボルトの電位差の中で 1 クーロンの電荷を動かすのに必要な仕事。 TJ = 10 ¹² J
PJ	PJ = 10 ¹⁵ J
EJ	EJ = 10 ¹⁸ J
Mt	二酸化炭素の排出量を炭素換算してメガトン (100 万トン) 単位で表したもの