

NEDO

再生可能エネルギー 技術白書

第2版

再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 編
New Energy and Industrial Technology Development Organization

第1章 再生可能エネルギーの役割

第2章 太陽光発電

第3章 風力発電

第4章 バイオマスエネルギー

第5章 太陽熱発電・太陽熱利用

第6章 海洋エネルギー

第7章 地熱発電

第8章 中小水力発電

第9章 系統サポート技術

第10章 スマートコミュニティ



第7章 地熱発電

7.1	技術の概要.....	4
7.1.1	技術の俯瞰.....	4
	(1) 地熱発電技術の原理.....	4
	(2) 発電方式.....	4
	(1) 温泉熱発電.....	7
	(2) 温泉熱利用.....	8
7.1.2	システム価格, 発電コスト.....	9
	(1) 現状のコスト.....	9
	(2) 将来のコスト目標・見通し.....	11
7.2	導入ポテンシャル, 導入目標, 導入実績.....	12
7.2.1	導入ポテンシャル.....	12
	(1) 世界.....	12
	(2) 日本.....	13
	(3) 米国.....	14
	(4) 東南アジア.....	15
7.2.2	導入目標.....	16
	(1) 世界.....	16
	(2) 日本.....	17
	(3) 米国.....	17
	(4) 欧州.....	18
	(5) 東南アジア.....	18
7.2.3	導入実績.....	18
	(1) 世界.....	18
	(2) 日本.....	20
	(3) 米国.....	21
	(4) 欧州.....	24
	(5) 東南アジア.....	27
7.3	世界の市場動向.....	29
7.3.1	市場の現状および将来見通し.....	29
7.3.2	国別・企業別の生産シェア.....	30
	(1) 三菱重工業.....	30
	(2) 東芝.....	31
	(3) 富士電機.....	32
	(4) Ormat.....	33
	(5) その他関連企業の動向.....	33

7.4	各国の技術開発動向	34
7.4.1	各国の開発投資	34
(1)	世界.....	34
(2)	米国.....	34
(3)	欧州.....	35
(4)	日本.....	35
7.4.2	EGS（涵養地熱系）の開発・実験	35
7.4.3	利用可能範囲を拡大するための技術開発	36
(1)	低コスト化.....	37
(2)	高効率化 —貯留層管理—	38
(3)	高耐久化.....	38
(4)	利用可能資源の拡大.....	38
(5)	管理・運用	38
7.5	今後に向けた課題と克服方策	39
7.5.1	開発コストの低減.....	39
7.5.2	開発リスクの低減.....	39
7.5.3	自然環境との調和.....	39
7.5.4	温泉バイナリー発電システムの導入拡大	40
7.5.5	地熱発電と立地地域との共生.....	40
7.5.6	まとめ.....	41

第7章 地熱発電

7.1 技術の概要

7.1.1 技術の俯瞰

(1) 地熱発電技術の原理

火山帯の地下数 km～数十 km には「マグマ溜まり」があり、約 1,000℃の高温で周囲の岩石を熱している。地表からの雨水は、数十年かけて岩石の割れ目を通して浸透し、マグマ溜まりの熱によって高温、高圧の熱水となり、地熱貯留層が形成される。地熱発電は、この地熱貯留層まで生産井と呼ばれる井戸を掘り、熱水や蒸気を汲み出して利用する発電方式である。地熱発電は、天候に左右されることなく安定した電力供給が可能である。

(2) 発電方式

実用化されている地熱発電の方式には、広く用いられている「フラッシュ方式」と、比較的、最近実用化された「バイナリー方式」がある。また、実験段階にあるものとして「高温岩体発電方式 (HDR : hot dry rock)」があり、これに加えて地熱資源を活用する一連の技術も包含して、「涵養地熱系 (EGS : Enhanced Geothermal Systems)」とも表現される。

1) フラッシュ方式

フラッシュ方式 (蒸気発電方式) は、地熱貯留層から約 200～350℃の蒸気と熱水を取り出し、気水分離器で分離した後、その蒸気でタービンを回して発電する方式である。気水分離器で分離された熱水は、還元井と呼ばれる井戸を通して再び地下に戻される。日本の地熱発電所のほとんどが、シングルフラッシュ発電方式である (図 7-1)。その他、分離した熱水をフラッシャー (低圧気水分離器) に導いて再度、熱水と蒸気に分離して、蒸気を一次蒸気と一緒にタービンに送り、熱水を還元井へと送るダブルフラッシュ方式や、坑口から蒸気のみが噴出する生産井で、気水分離器が必要なく、そのままタービンを回すドライスチーム方式などがある。

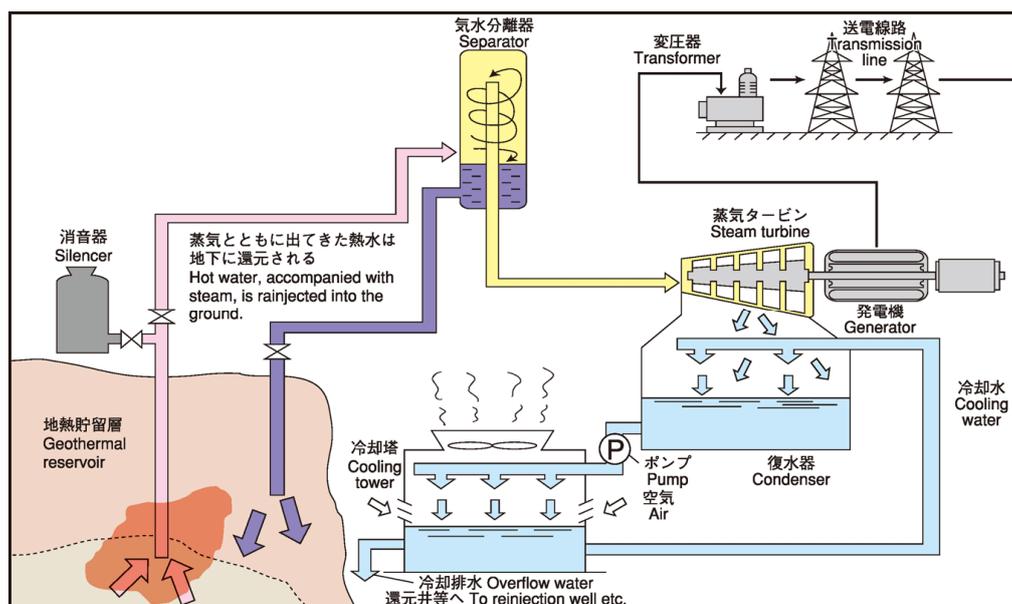


図 7-1 地熱発電 (シングルフラッシュ方式) の概念図

出典：「地熱開発の現状」(2008, NEDO)

国内の地熱発電所では、ダブルフラッシュ方式は八丁原発電所（九州電力）と森発電所（北海道電力）、ドライスチーム方式は松川発電所（東北水力地熱）で、それぞれ採用されている。

2) バイナリー方式

バイナリー方式は、一般的に 80～150℃の中高温熱水や蒸気を熱源として低沸点の媒体を加熱し、蒸発させてタービンを回して発電する方式である。媒体には、ペンタン（沸点 36.07℃）などの炭化水素や代替フロン、アンモニア（沸点-33.34℃）など、沸点が 100℃以下の液体が用いられ、タービンを回した後、凝縮器で液化されて反復使用される。このように、熱水と低沸点媒体がそれぞれ独立した 2つの熱循環サイクルを用いて発電することから、この方式をバイナリー方式と呼んでいる（図 7-2）。本方式によって、フラッシュ方式では利用できない低温の熱水や蒸気を活用することが可能となった。

日本では現在、新エネルギーとして定義されている地熱発電はバイナリー方式に限られており、九州電力の八丁原バイナリー発電施設が RPS 法¹の認定を受けている。海外では既に多くの実績があり、1980年代から運転が開始されている。

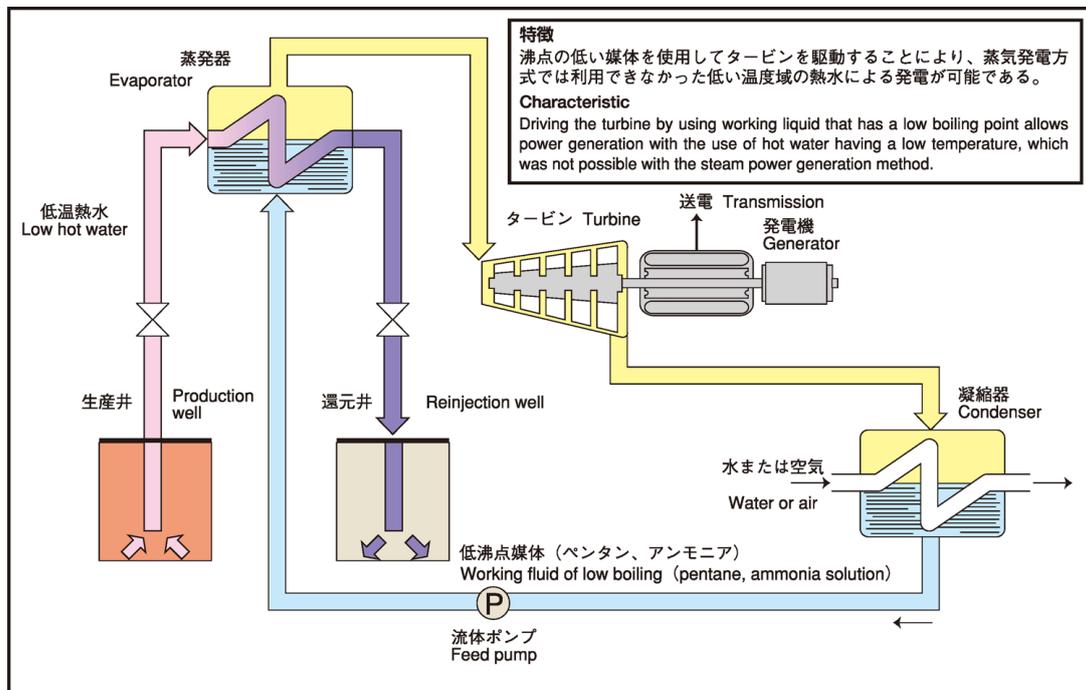


図 7-2 地熱発電（バイナリー方式）の概念図

出典：「地熱開発の現状」（2008, NEDO）

3) 高温岩体発電・涵養地熱系（EGS）

現在、地熱発電に使われているエネルギーは地熱源の一部であり、利用可能な熱源範囲を拡大するため、高温岩体発電技術が開発されてきた。

高温岩体発電とは、高温であるものの水分に乏しく、十分な熱水・蒸気が得られないような高

¹ 電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（Renewable Portfolio Standard）。電気事業者が新エネルギーを利用して得られる電気の一定量以上の利用を義務付ける法律。対象は、風力、太陽光、地熱、水力、バイオマス。

第7章 地熱発電

温岩体を地熱発電に活用する方式で、人工的に岩盤に割れ目（フラクチャ）を作って2本の坑井の一方から水を注入し、もう一方から高温蒸気を取り出して発電するものである（図7-3）。

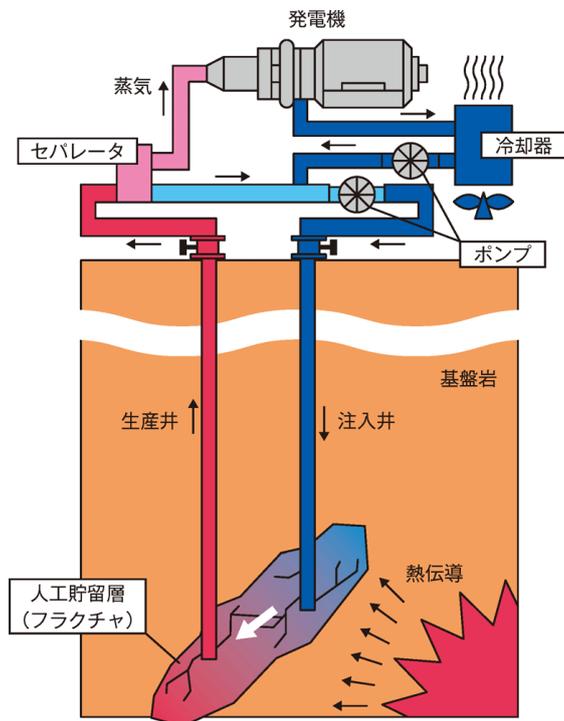


図7-3 地熱発電（高温岩体発電）の概念図

出典：NEDO 海外レポート NO.1023（2008.6.4）

従来の高温岩体発電を発展させた EGS も研究開発が進められている。EGS とは、人工的な水圧刺激を利用して地熱資源を活用するための一連の技術（既存の地熱貯留層の性能改善から高温岩体発電まで）であり、通常、地下深いところにある高温の地層で岩石を断裂させる技術を指す。EGS は、温水または水蒸気の新規地熱貯留層を創出するか、既存の地熱貯留層を拡大、強化するために利用される。EGS はまだ成熟しておらず、多くの点で検証を要するが、米国、ドイツ、フランス、オーストラリアなど、世界中でいくつかの開発プロジェクトが実施されている。

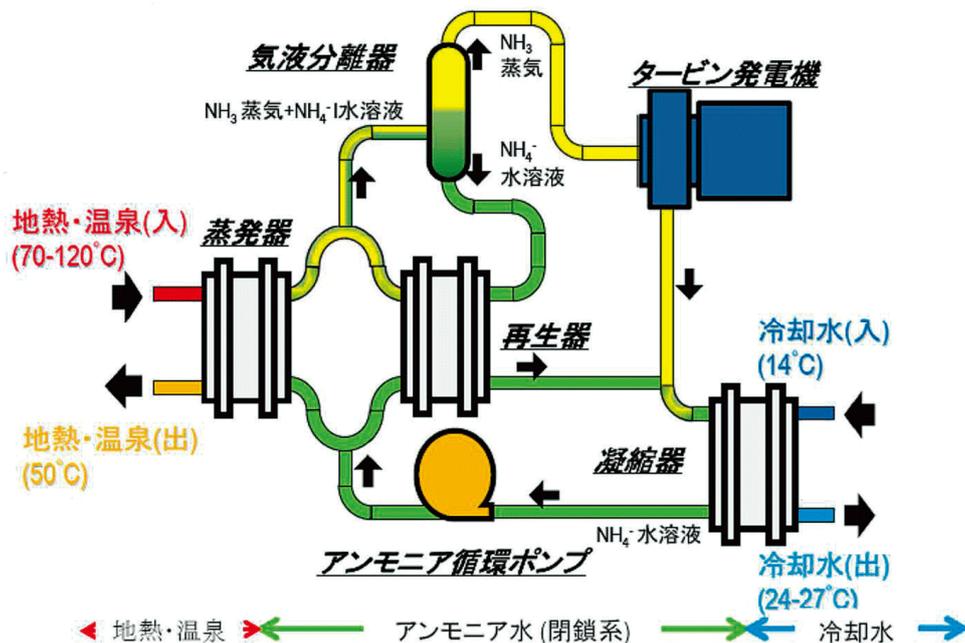
コラム：温泉熱の利用

温泉熱の利用方法には、大きくわけて発電に利用する方法と、熱として利用する方法がある。日本に多い 50～100℃の温泉は、そのままでは熱すぎて入浴には適さないため、長距離の配管や樋を巡らせて、湯を外気にさらすなどして、適温に冷ましてから使用されてきた。最近、この温泉未利用熱の有効利用が検討されている。

(1) 温泉熱発電

温泉熱を利用した発電の一つとして、カーリーナサイクルを用いた発電方式がある。

カーリーナサイクルでは、沸点 100℃以下のアンモニアと水の混合液を作動媒体として利用する。はじめに蒸発器（沸騰器ともいう）で、温泉水によってアンモニア水を熱して沸騰させる。沸騰したアンモニア水を気液分離器に導いて蒸気を分離し、この蒸気でタービンを回して発電する。一方、気液分離器で分離された液体のアンモニア水は、再生器で熱回収された後、タービン排気のアンモニア水蒸気を吸収し、さらに凝縮器で冷却される。冷却されたアンモニア水は、ポンプによって循環し、再度サイクル内をまわる。これがカーリーナサイクルの原理であり、低温熱を有効利用してタービンを駆動する方式である。既に実用化されているものもあるが、国内の多数の温泉へ導入するため、小型の発電システムの開発が進められている。



図表1 カーリーナサイクル発電

出典：「カーリーナサイクル方式を用いた地熱・温泉発電の原理」（2009，地熱技術開発）

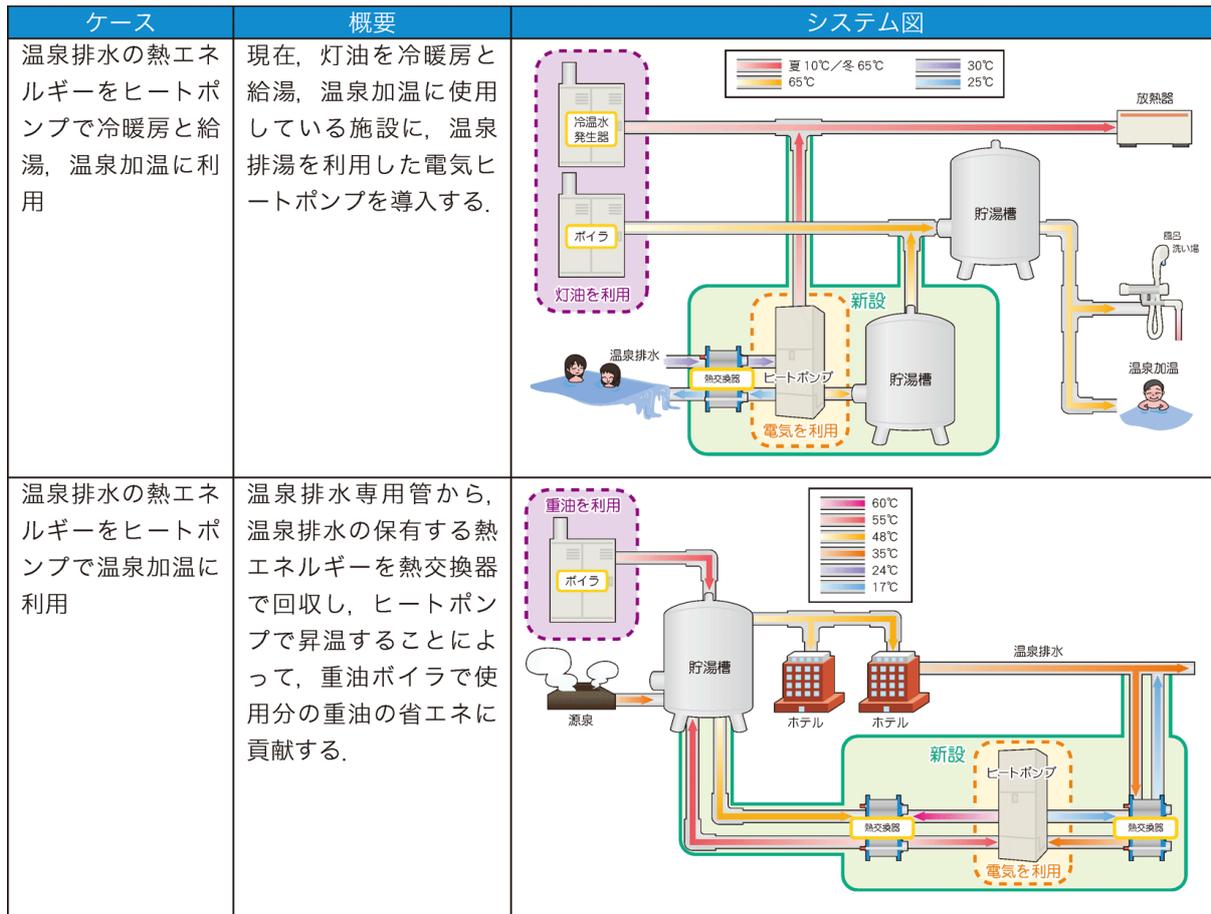
第7章 地熱発電

(2) 温泉熱利用

温泉熱を発電ではなく熱として利用するには、さまざまな機器の組み合わせによる方式が考えられる。温泉熱利用システムの例を図表2に示す。その他、イチゴなどの果実栽培や花卉栽培、融雪に利用されている。比較的、複雑なシステムを導入して積極的に利活用する以外にも、温泉熱をそのまま調理へ利用するなどの応用例も見られる。

図表2 温泉熱利用システム例

ケース	概要	システム図
<p>温泉水の熱エネルギーを熱交換器で給湯に利用</p>	<p>給湯に使用している井戸水の加温を、温泉の熱エネルギーで行うことによって、給湯ボイラに使用している灯油分の省エネに貢献する。</p>	
<p>温泉排水の熱エネルギーを熱交換器で冷暖房に利用</p>	<p>近隣ホテルからの温泉排湯を1カ所に集約し、その排湯から熱エネルギーを回収し、各ホテルに熱供給する。各ホテルでは冷暖房の熱源として利用する。</p>	
<p>温泉水・温泉排水の熱エネルギーを熱交換器とヒートポンプで冷暖房と給湯に利用</p>	<p>現在、重油を暖房・給湯に使用している施設に、熱交換器とヒートポンプを導入し、温泉水・温泉排湯の熱源として利用する。</p>	



※：温泉水 源泉から取り出した未利用の温泉水
 ※：温泉排水 入浴などに利用した後の温泉水
 出典：「温泉DEヒーポン！温泉ホテル省エネモデル集」（2008，経済産業省北海道経済産業局）

7.1.2 システム価格、発電コスト

(1) 現状のコスト

表 7-1 に、地熱発電の現状のコスト試算例を示す。建設コストには、かなり幅があることが分かる。これは生産井の深度や蒸気量、発電方式、開発地点の条件などに加え、石油や鉄、セメントなど建設資材コストの影響を受け、建設施設や時期によって変動するためである。地熱発電の開発コストの増加要因として、

- ・ 開発のリードタイムが通常 10 年以上と長く、この間の人件費、金利などが負担となる。
- ・ 調査・開発段階で多数の坑井を掘削する必要があるため、多額の費用を要する。
- ・ 基幹送電線から離れた場所で行われることの多い地熱発電所の建設に当たって、新規の送電線が必要な場合、多額の建設費用を要する。
- ・ 運転中にシリカスケールの付着などから、蒸気生産井や還元井の減衰などを招き、追加的に補充井の掘削が必要となる。

などの課題が挙げられる。さらに、規制緩和で規制区域外から規制区域内の地下の熱源に向けて斜め掘りする場合や、水平方向の距離が長くなる場合など、建設コストは増加することになる。なお、それぞれの試算について、初期投資コストとして大きい地熱資源量の調査費用は含まれていないと考えられる。

発電コストは、フラッシュ方式ではおおむね 4 円/kWh～10 円/kWh 程度、バイナリー方式で

第7章 地熱発電

は4円/kWh～12円/kWh程度、EGSでは8円/kWh～14円/kWh程度と試算されている。なお、日本では9.2～11.6円/kWhと、世界より比較的高く試算されている。発電コストについても、開発地点や規模などによって、プラントごとに幅が生じている。

表7-1 地熱発電の現状コスト試算例

資料 No.	前提	建設コスト	発電コスト	出典
1	フラッシュ 10～250 MW	2,000～4,000ドル/kW (16万～32万円/kW)	5～8セント/kWh (4.0～6.4円/kWh)	Technology Roadmap – Geothermal Heat and Power (2011, IEA) および Deploying Renewables – Best and Future Policy Practice (2011, IEA)
	バイナリー 12～20 MW	2,400～5,900ドル/kW (19.2万～47.2万円/kW)	6～11セント/kWh (4.8～8.8円/kWh)	
	新規サイト米国	–	12セント/kWh (9.6円/kWh)	
	新規サイト欧州	–	20セント/kWh (16.0円/kWh)	
	EGS 米国	–	10～19セント/kWh (8.0～15.2円/kWh)	
	欧州	–	25～30セント/kWh (20～24円/kWh)	
2	フラッシュ 50 MW, 米国	5,578ドル/kW (44.6万円/kW)	–	IEA Geothermal Energy Annual Report 2010 (2012, IEA)
	バイナリー 50 MW, 米国	4,141ドル/kW (33.1万円/kW)	–	
3	–	2,400～5,500ドル/kW (19.2万～44.0万円/kW)	–	Energy Technology Perspectives 2010 (2010, IEA)
4	フラッシュ	1,780～3,560ドル/kW (14.2万～28.5万円/kW)	3.1～13セント/kWh (2.5～10.4円/kWh)	Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation – Special Report of IPCC (Cambridge University Press, 2012)
	バイナリー	2,130～5,200ドル/kW (17.0万～41.6万円/kW)	3.3～17セント/kWh (2.6～13.6円/kWh)	
	EGS (250～330°C, 深度5 km)	–	10～17.5セント/kWh (8.0～14.0円/kWh)	
	EGS (125～165°C, 深度4 km, 欧州)	–	30～37セント/kWh (24.0～29.6円/kWh)	
5	フラッシュ30 MW	3,718ドル/kW (29.7万円/kW)	7.9～10.1セント/kWh (6.3～8.0円/kWh)	Comparative Costs of California Central Station Electricity Generation (2010, California Energy Commission)
	バイナリー15 MW	4,046ドル/kW (32.4万円/kW)	8.3～10.7セント/kWh (6.6～8.6円/kWh)	
6	30 MW	70万～90万円/kW	9.2～11.6円/kWh	コスト等検証委員会報告書 (2011, エネルギー・環境会議コスト等検証委員会)
7	15 MW 以上	79万円/kW	–	平成24年度調達価格及び調達期間に関する意見 (平成24年, 調達価格等算定委員会)
	15 MW 未満	123万円/kW	–	

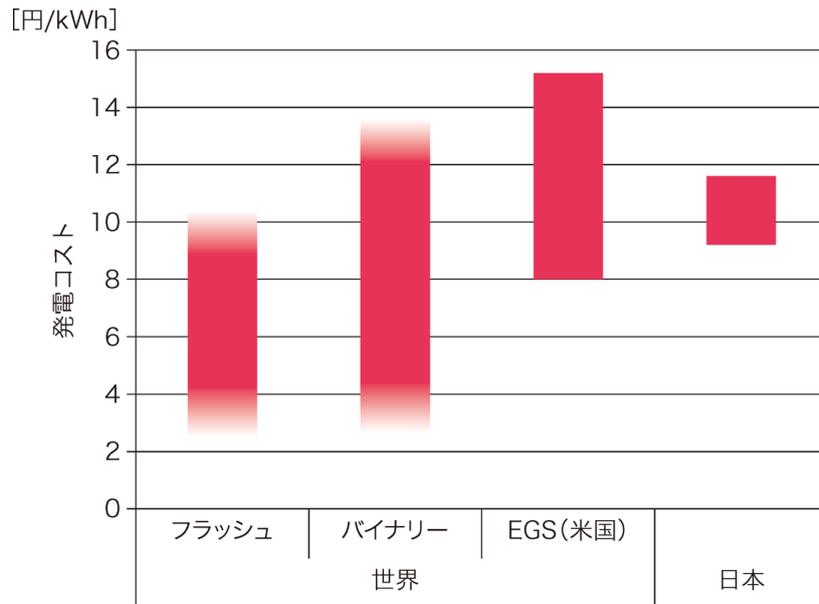


図 7-4 地熱発電の現状の発電コスト試算例

出典：表 7-1 より NEDO 作成

(2) 将来のコスト目標・見通し

図 7-5 に IEA による将来の発電コスト試算例を示す。

フラッシュ方式の発電コストは、既に競争力をもっている場合も多いが、2050 年に向けて緩やかに低減すると推定されている。バイナリー方式も同様に比較的、成熟した技術であるが、今後、設備容量の増加が、発電コストの低減に資すると考えられる。フラッシュ方式は、2020 年から 2030 年の間に、またバイナリー方式も 2030 年頃には競争力を持つとみられる。なお、EGS の将来コストの推定は困難として、記載されていない。

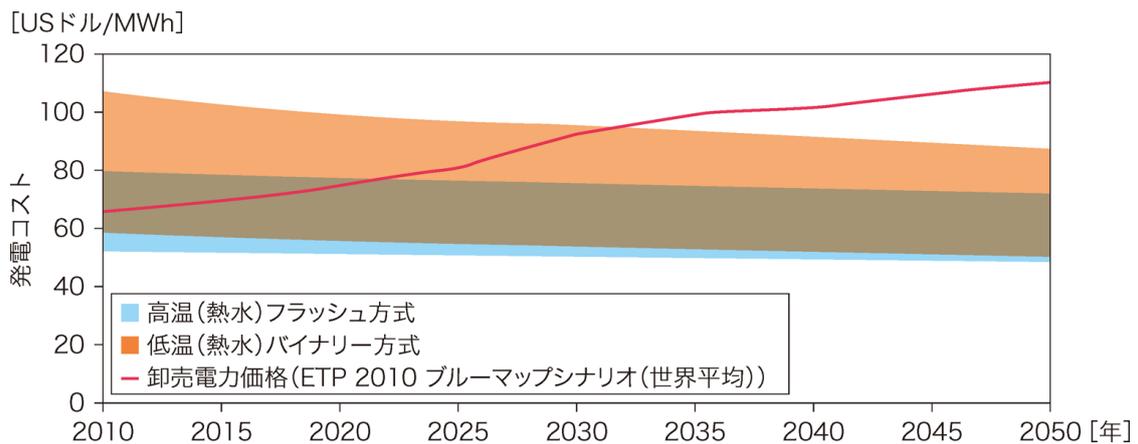


図 7-5 地熱発電（バイナリー・フラッシュ方式）の発電コストの見通し

出典：“Geothermal Roadmap” (2011, IEA) より NEDO 作成

7.2 導入ポテンシャル，導入目標，導入実績

7.2.1 導入ポテンシャル

(1) 世界

主要国の地熱資源量を表 7-2 に示す。世界では，米国とインドネシア，日本の3カ国が突出して多く，20,000MW を超える資源量を誇る。地熱資源量は，活火山数と強い相関があり，火山大国のポテンシャルが大きい（図 7-6）。

表 7-2 国別地熱資源量

国名	活火山数	地熱資源量 [MW]	地熱発電導入量（2010） [MW]
米国	160	30,000	3,093
インドネシア	146	27,790	1,197
日本	119	23,470	536
フィリピン	47	6,000	1,904
メキシコ	39	6,000	958
アイスランド	33	5,800	575
ニュージーランド	20	3,650	628
イタリア	13	3,270	843

出典：活火山数，地熱資源量「パラダイム転換としての地熱開発推進」（2009，産業技術総合研究所），地熱発電導入量 IGA ホームページより NEDO 作成

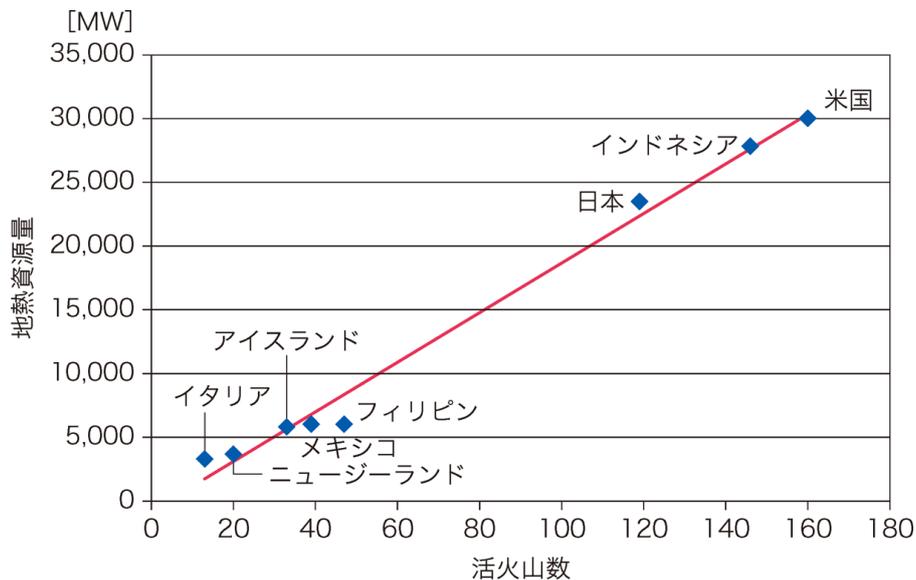


図 7-6 地熱資源量と活火山数の相関

出典：表 7-2 を基に作成

(2) 日本

日本は世界有数の火山国であり、地熱資源量は米国とインドネシアに次いで世界第3位に位置し、出力にして23,470MWのポテンシャルがある(表7-2)。しかし、日本では、図7-7に示すように、開発地点の多くが国立公園内であることなどの制約があり、設備容量では世界第8位にとどまっている。

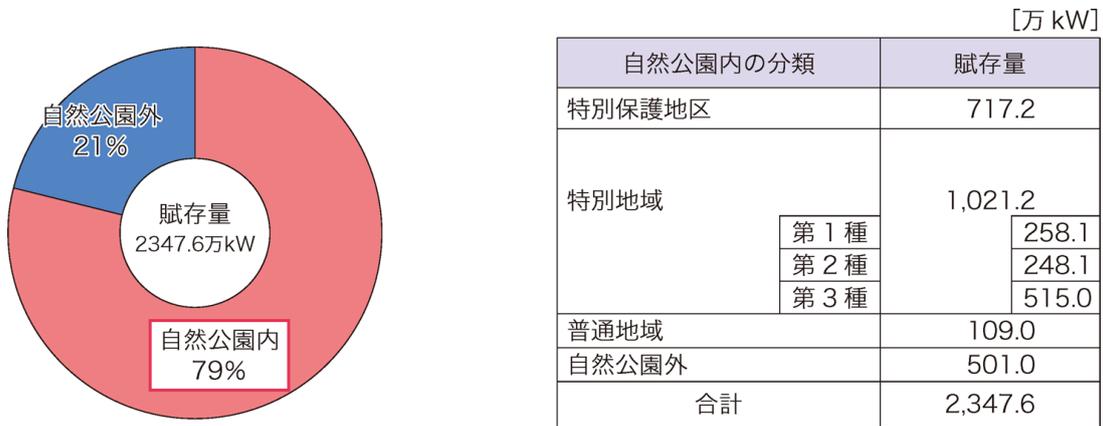


図7-7 自然公園内の地熱ポテンシャル

出典：「平成24年度調達価格及び調達期間に関する意見」(2012, 調達価格等算定委員会)よりNEDO作成

日本の地熱発電の追加開発可能量について「地熱発電に関する研究会中間報告」(2009年6月)が、表7-3のように発電原価別で試算している。それによると、2020年度の地熱発電の導入量は、発電原価12円/kWhのものまで建設できるとすると670MW、発電原価15円/kWhの場合は930MW、発電原価20円/kWhの場合は1,130MWとなっている。これらはそれぞれ、日本の地熱資源量の3.3%、4.5%、5.5%に当たる。

この試算は、開発リスクや開発コストの低減に向けた環境が整備され、地熱発電の開発に関する経済性が向上し、地元調整などを含めて10年以内に発電所を建設できることを前提としている。また、導入可能性のある地域は、実際にボーリングを行ったものだけが対象となっており、国立公園の普通地域のポテンシャルは含まれるが、特別地域分は含まれていない。

表7-3 地熱発電の2020年度導入量の試算

前提	導入容量	現在の発電量からの増加分
発電原価12円/kWhのものまで建設可能	670 MW	41億 kWh
発電原価15円/kWhのものまで建設可能	930 MW	57億 kWh
発電原価20円/kWhのものまで建設可能	1,130 MW	69億 kWh

注：温泉発電および既設地熱発電所の増加分240MW、15億kWhを含む。

注：発電電力量については、これまでの稼働率実績70%を用いて試算。

出典：「地熱発電に関する研究会 中間報告」(2009, 地熱発電に関する研究会)よりNEDO作成

また、環境省の再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査によると、熱水資源開発の賦存量は、温度区分150℃以上では2,357万kW、120℃～150℃では108万kW、53～120℃では849万kWであり、合計すると地熱発電全体の賦存量は3,314万kWと推計された。熱水資源開発の導入ポ

第7章 地熱発電

テンシャルは、温度区分 150℃以上では 636 万 kW、120℃～150℃では 33 万 kW、53～120℃では 751 万 kW であり、合計すると賦存量の約 43%に当たる 1,420 万 kW と推計されている（表 7-4、図 7-8）。

表 7-4 地熱発電の賦存量および導入ポテンシャル

区分	温度区分	賦存量 [万 kW]	導入ポテンシャル [万 kW]
熱水資源開発	150℃以上	2,357	636
	120～150℃	108	33
	53～120℃	849	751
	小計	3,314	1,420
温泉発電		(72)	(72)
合計		3,314	1,420

※：温泉発電は、53～120℃の低温域を活用したバイナリー発電の一部。

出典：再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書（2011，環境省）より NEDO 作成

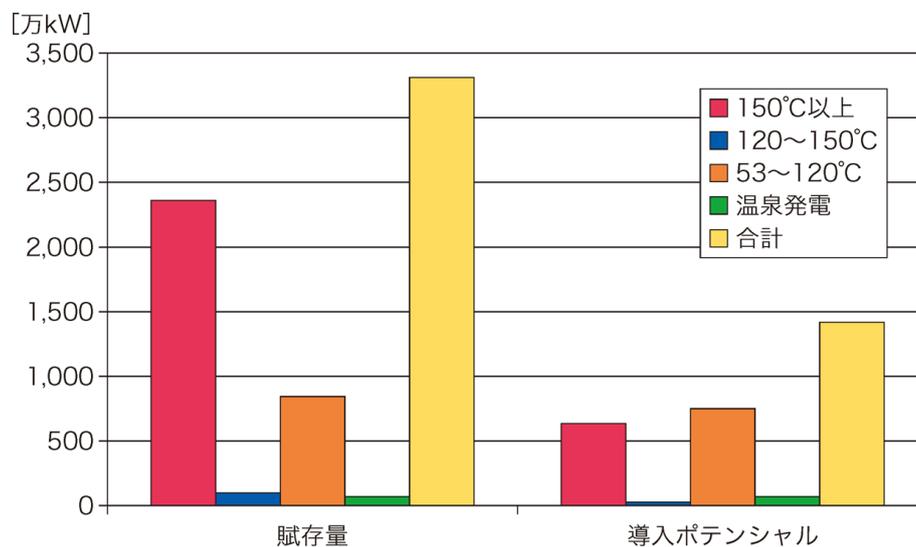


図 7-8 地熱発電の賦存量および導入ポテンシャル

出典：再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書（2011，環境省）より NEDO 作成

(3) 米国

米国のポテンシャルは世界 1 位であり、地熱資源量は 30,000MW である。

米国の地熱資源のポテンシャルマップを図 7-9 に示す。特に、西部に地熱資源が集中している。

また、USGS (U.S. Geological Survey) の 2009 年 9 月の評価報告書では、西部 13 州の地熱発電のポテンシャルを、次の 3 つのカテゴリに分け、表 7-5 のように示している。

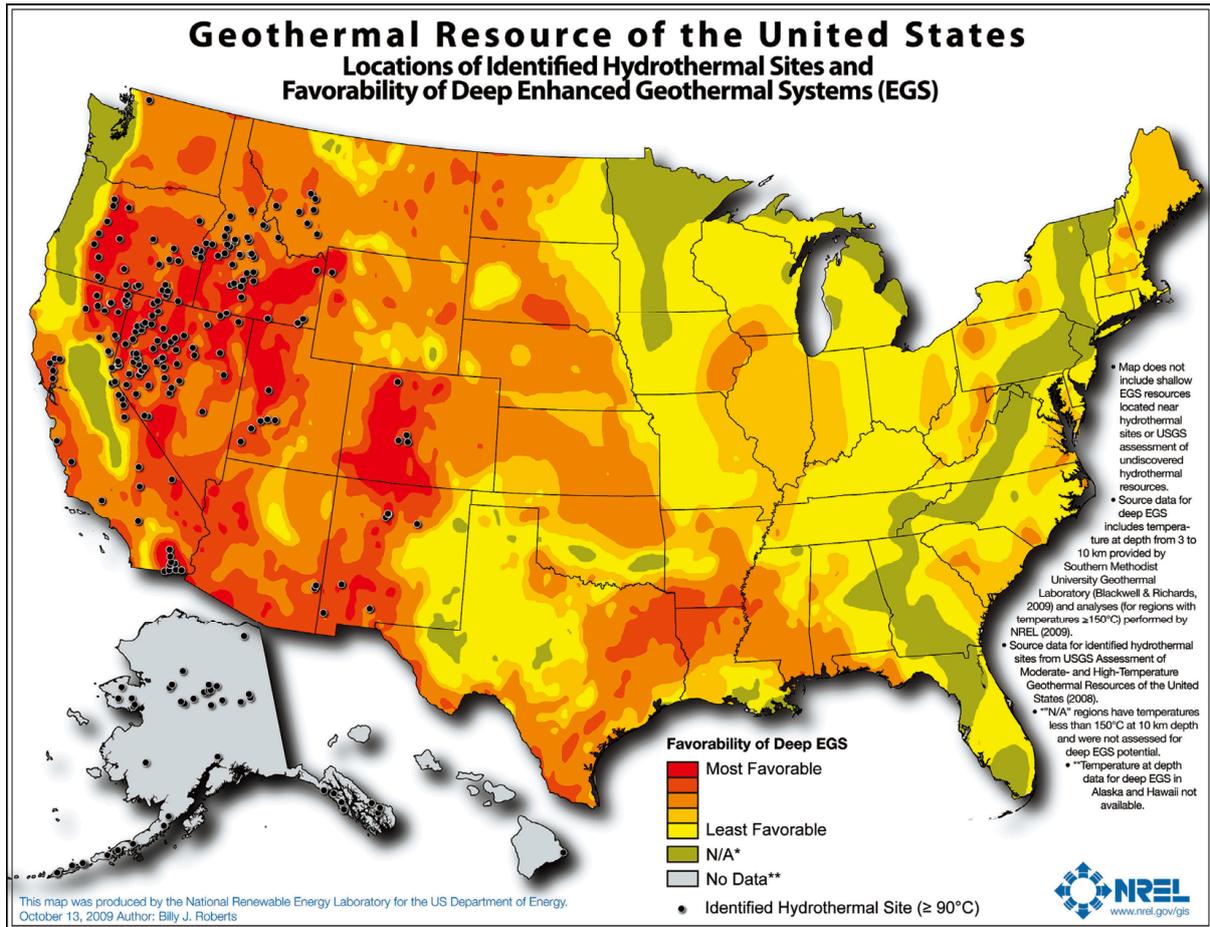


図 7-9 米国の地熱ポテンシャルマップ

出典：NREL (National Renewable Energy Laboratory)

表 7-5 米国における地熱資源のポテンシャル

確認済み地熱資源 (Identified Geothermal Systems)	3,675 MWe (95 % 確率) ~ 16,457 MWe (5 % 確率)
未確認の地熱資源 (Undiscovered Geothermal Systems)	7,917 MWe (95 % 確率) ~ 73,286 MWe (5 % 確率)
EGS	345,100 MWe (95 % 確率) ~ 727,900 MWe (5 % 確率)

出典：GEA ホームページより NEDO 作成

(4) 東南アジア

インドネシアの地熱資源量は世界 2 位を誇り、そのポテンシャルは 27,790MW~28,500MW と試算されている (図 7-10)。現在の設備容量は 1,197MW で、試算されたポテンシャルの約 4%にとどまっている。

第7章 地熱発電



図 7-10 インドネシアの地熱ポテンシャル

出典：“Geothermal Roadmap”（2011, IEA）

7.2.2 導入目標

(1) 世界

IEA のエネルギー技術展望 2010（Energy Technology Perspectives : ETP）でのブルーマップシナリオで、2050 年には、地熱発電による年間発電量が 1,400TWh に達するとされている（図 7-11）。

また、2050 年にはバイナリー方式とシングルフラッシュ方式、ダブルフラッシュ方式といった、既に実用化されている技術に加え、EGS の導入・活用が期待されており、設備容量は 200GW となると描かれている（図 7-12）。

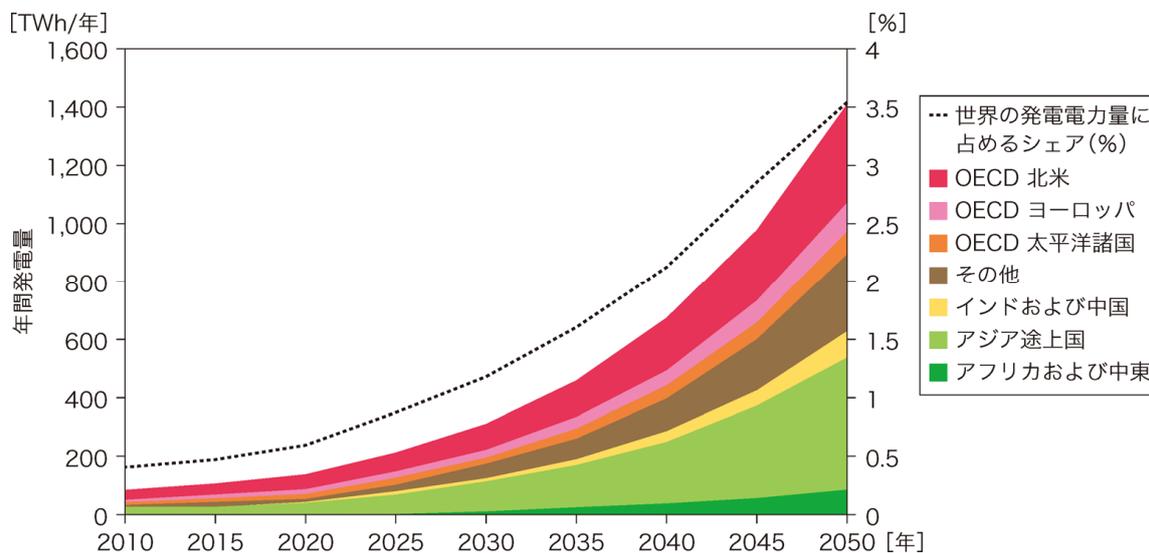


図 7-11 地域別の地熱発電による発電量のロードマップ

出典：“Geothermal Roadmap”（2011, IEA）より NEDO 作成

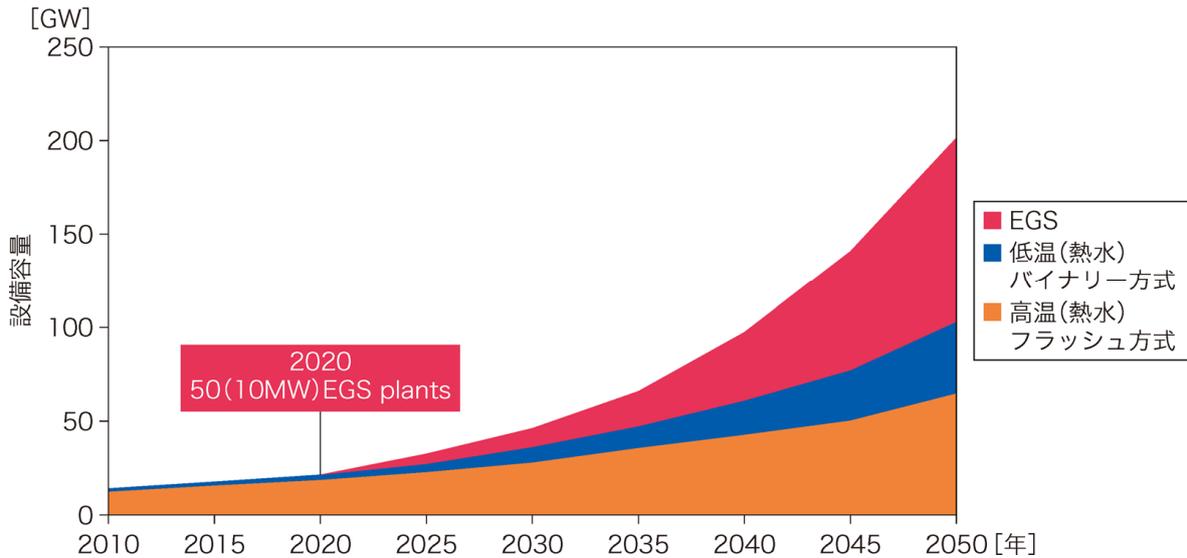


図 7-12 方式別の地熱発電の設備容量のロードマップ

出典：“Geothermal Roadmap”（2011, IEA）より NEDO 作成

(2) 日本

環境省の「低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化に向けた提言」では、2050年までの地熱発電の導入見込量を、表 7-6 のように取りまとめている。2050年には、2010年時点と比べて最大で 14.94 倍（739 万 kW）の地熱発電の増分が想定されている。

表 7-6 日本における地熱発電の導入見込量

2010年 [万 kW]	地熱発電の導入見込量[万 kW]										
	2020年				2030年				2050年		
	低位	中位	高位	エネ環	低位	中位	高位	エネ環	低位	中位	高位
53	80	80	80	107	199	208	221	312	743	757	792

注：低位ケース 東日本大震災以前に、2020年の見通しとして資源エネルギー庁が示している固定価格買取制度案に基づく支援方策により増加が見込まれる普及量を設定し、それ以降は同様のペースで導入が進むものと想定した。
 中位ケース 低位ケースと高位ケースの中間値程度の普及を想定した。
 高位ケース 2050年時点で環境省ポテンシャル調査にある導入ポテンシャル（エネルギーの採取・利用に関する種々の制約要因による設置の可否を考慮したエネルギー資源量）を最大限顕在化させることを目指して、施策を最大限強化する場合を想定した。
 エネ環 革新的エネルギー・環境戦略（エネルギー・環境会議，2012）に記載されている値。

出典：低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化に向けた提言（2013, 環境省）より NEDO 作成

(3) 米国

米国エネルギー省エネルギー効率および再生可能エネルギー局（EERE）では、GTP（The Geothermal Technologies Program）として、産学官のパートナーシップによって米国での地熱資源を開発する、革新的な地熱エネルギー技術を開発している。このプログラムでは、導入目標として「未知の地熱資源 30GW の開発加速」「2020年までに EGS 貯水槽についての実証実験を少なくとも 5MW 実施すること」などを掲げている。その他、発電コストを 2020年までに 6セント/kWh に低減すること（EGS については 2030年まで）も記されている。

また、マサチューセッツ工科大学（MIT）は、今後 50年間で、コスト競争力をもつ米国の EGS 発電設備容量は 100GW に上ると予測している。

第7章 地熱発電

(4) 欧州

ヨーロッパ再生可能エネルギー協議会 (European Renewable Energy Council: EREC) は 2010 年 4 月、「RE-thinking 2050」を発表し、表 7-7 に示す目標を打ち出している。

その中で、目標達成のための技術開発展望として、EGS プラントのコスト低減による競争力の拡大や、EU 外への技術提供などが示されている。

表 7-7 欧州全域の 2050 年までの目標値

Geothermal Electricity –EU-27	実績 2010 年	2020 年	2030 年	2050 年
従来方式 [MWe]	990	1,500	7,000	10,000
EGS [MWe]	10	4,500	15,000	90,000
合計設備容量 [MWe]	1,000	5,000	20,000	100,000
年間発電量 [TWh]	8	50	234	780

出典：“RE-thinking 2050” (2010, EREC) より NEDO 作成

(5) 東南アジア

地熱資源量の多いインドネシアやフィリピンなどでは、大規模な開発目標を掲げ、地熱発電の開発に積極的に取り組んでいる。

インドネシアでは、地熱法を制定し、明確な開発目標をロードマップとして定めており、2025 年には一次エネルギーの 5% に相当する 9,500MW を地熱発電で供給する目標を掲げていた。2010 年にはさらに、2025 年までに 12,300MW とその目標値を上方修正した。2010 年 1 月 27 日の政府規則では、国内の電力需要の急増を賄うために、2014 年までに 3,977MW の地熱発電を新規導入するとの短期目標を掲げている。なお、これらは税優遇措置によって支援するとしている。

表 7-8 東南アジアにおける主要地熱資源国の地熱発電開発目標

	実績 (2010 年)	目標
フィリピン	1,904 MW	3,000 MW (2030 年)
インドネシア	1,197 MW	12,300 MW (2025 年)

出典：実績値 IGA ホームページ，フィリピンの目標値 “the 2009-2030 Philippine Energy Plan”，インドネシアの目標値 “Geothermal Roadmap” (2011, IEA) より NEDO 作成

7.2.3 導入実績

(1) 世界

世界の地熱発電設備容量を図 7-13 に示す。世界の地熱発電設備容量は 1980 年以降、ほぼ同じペースで順調に伸びており、2009 年には 10.7GW に達している。また、設備容量の増加に伴い、年間総発電量も増えている。年間総発電量は 67.2 TWh、平均効率は 6.3 GWh/MW である。

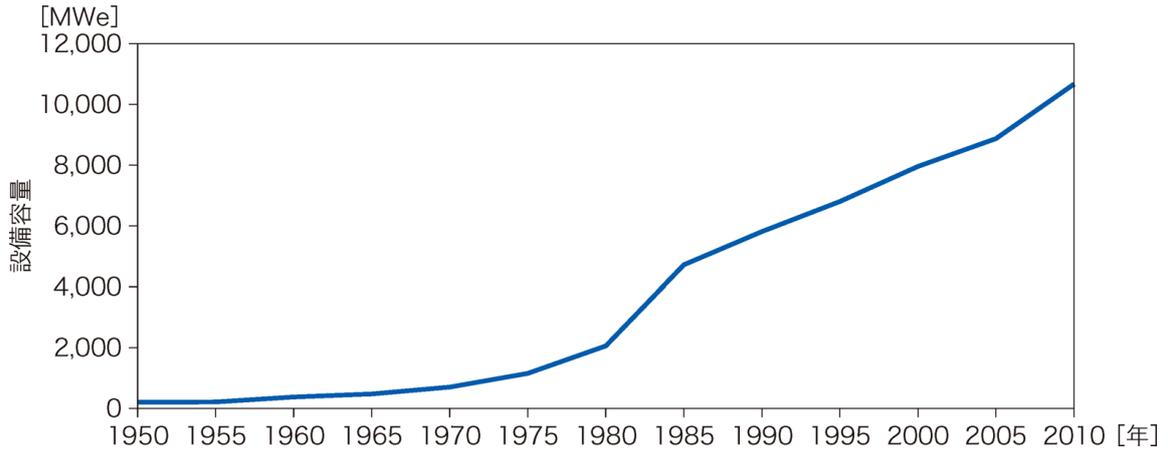


図 7-13 世界の地熱発電設備容量

出典：“Geothermal Roadmap” (2011, IEA)

主要地熱資源国の設備容量を図 7-14 に示す。米国が世界最大の設備力を持ち、フィリピンやインドネシア、メキシコ、イタリアが続く。過去 10 年で米国とインドネシアの容量は着実に増えている。また、総発電量に対する地熱発電の割合は、アイスランドが最も高く 25%であり、次いでエルサルバドル (22%)、ケニア (17%)、フィリピン (17%)、コスタリカ (13%) となっている。

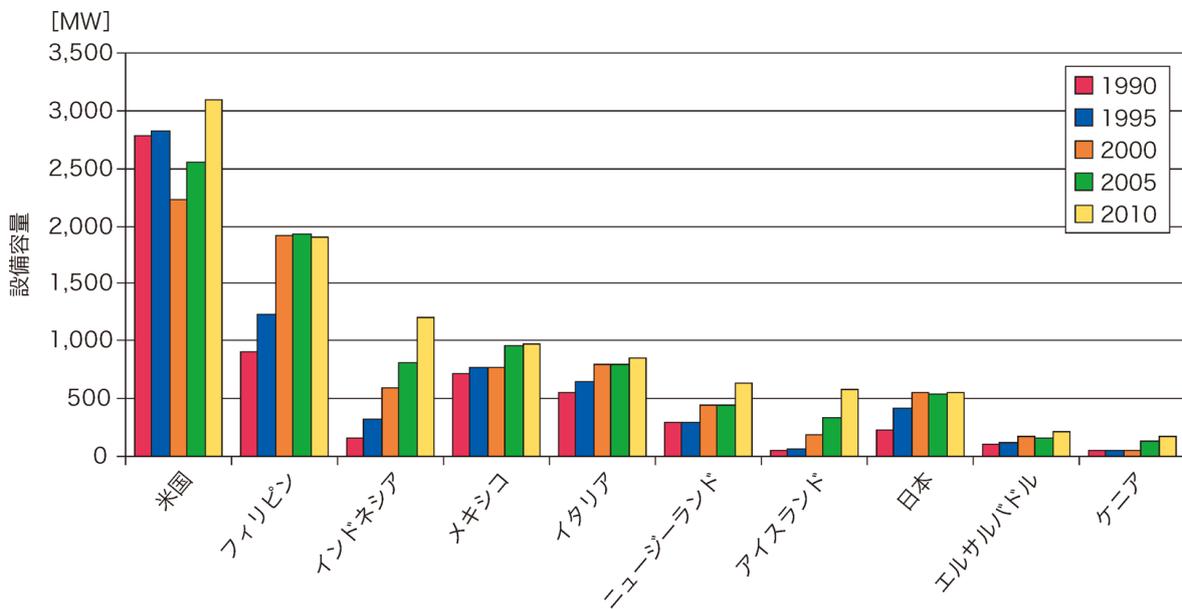


図 7-14 主要地熱資源国の設備容量

出典：IGA ホームページより NEDO 作成

第7章 地熱発電

(2) 日本

日本で現在、運転している地熱発電所は 17 ヶ所で、2013 年 6 月時点での認可出力合計は約 515MW である (表 7-9)。日本で最初の地熱発電所である松川発電所は、1966 年に運転を開始して以来、40 年以上、安定して運転されている。

石油危機以降の原油価格高騰期には、火力発電に対するコスト競争力をある程度もっていたため、本格的に調査され、東北・九州地域を中心に地熱開発が進められた。1990 年代には 9 基 (約 317MW) が導入されたが、1999 年の八丈島発電所の運転開始以降、新規立地がない状態が続いている (2006 年の八丁原バイナリーは除く)。

日本では、多くの発電所がフラッシュ方式であり、現在、運転しているバイナリー方式の地熱発電所は、九州電力の八丁原バイナリー発電設備 (2,000kW) のみである。なお、霧島国際ホテルは、地熱バイナリー発電 (220kW) の実証実験を 2006 年 9 月から 3 年間、実施したが、その後は蒸気フラッシュ方式 (100kW) に戻している。また、九州電力と川崎重工業は、山川発電所構内に小規模バイナリー発電設備 (定格出力 250kW) を設置し、実証試験を開始している。

近年、設備の寿命が近づいている地熱発電所があり、老朽化によってスケールが付着して井戸が使いなくなるケースが予想されている。近い場所に別井戸を掘り直すことで発電能力は増強できるが、資金確保が課題となっている。実際、ここ数年は、設備容量 (kW) は変わっていないが、発電量 (kWh) は減少する傾向が出現している (図 7-15)。

現在では、北海道豊羽地域や武佐岳地域など、数地域で地表調査段階を終えて探査段階に入った案件があり、開発に向けて検討されている (表 7-10)。

表 7-9 日本の地熱発電所 (2013 年 6 月現在)

発電所名		発電部門	蒸気供給部門	認可出力 [kW]	運転開始
電気事業用	松川	東北水力地熱	東北水力地熱	23,500	1966.10.8
	大岳	九州電力	九州電力	12,500	1967.8.12
	鬼首	電源開発	電源開発	15,000	1975.3.19
	八丁原 1 号, 2 号 (バイナリー含む)	九州電力	九州電力	55,000 (1 号)	1977.6.24
				55,000 (2 号)	1990.6.22
				2,000 (バイナリー)	2006.4.1
	葛根田 1 号, 2 号	東北電力	東北水力地熱	50,000 (1 号)	1978.5.26
				30,000 (2 号)	1996.3.1
	森	北海道電力	北海道電力	25,000	1982.11.26
	上の岱	東北電力	東北水力地熱	28,800	1994.3.4
	山川	九州電力	九州電力	30,000	1995.3.1
	澄川	東北電力	三菱マテリアル	50,000	1995.3.2
	柳津西山	東北電力	奥会津地熱	65,000	1995.5.25
大霧	九州電力	日鉄鹿児島地熱	30,000	1996.3.1	
滝上	九州電力	出光大分地熱	27,500	1996.11.1	
八丈島	東京電力	東京電力	3,300	1999.3.25	
自家用	大沼	三菱マテリアル	三菱マテリアル	9,500	1974.6.17
	杉乃井	杉乃井ホテル	杉乃井ホテル	1,900	2006.4.1
	霧島国際ホテル	大和紡観光	大和紡観光	100	2006.8.9
	岳の湯地熱 (廃止)	廣瀬商事	廣瀬商事	50	1991.10.19
	九重観光ホテル	九重観光ホテル	九重観光ホテル	990	2000.12.1

出典：「地熱発電事業に係る自然環境影響検討会」(2011/6/28, 環境省) (第 1 回) 資料 2 より NEDO 作成

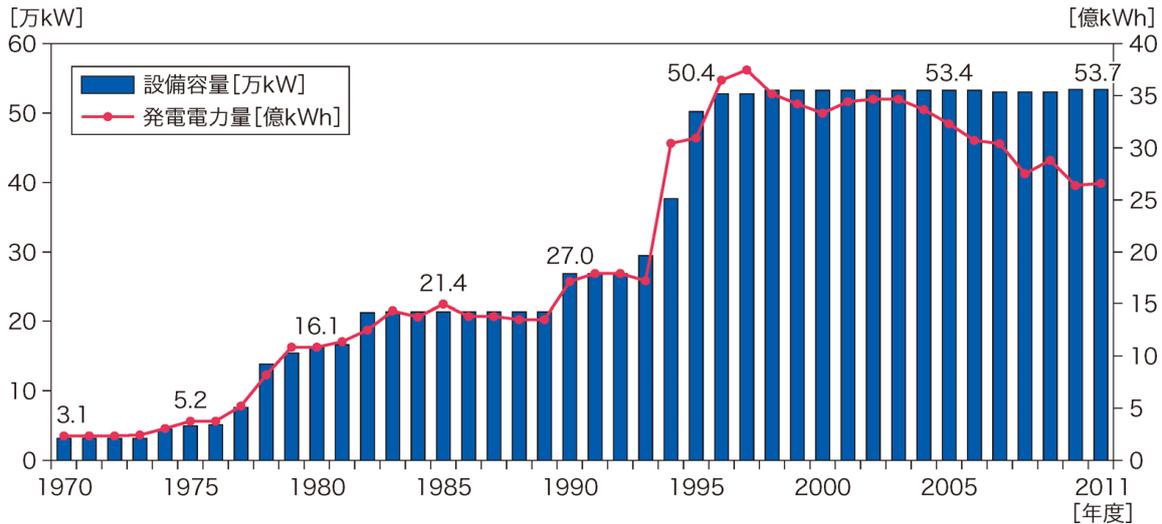


図 7-15 日本の地熱発電の認可出力と発電電力量の推移

出典：「エネルギー白書 2013」（2013，経済産業省）より NEDO 作成

特に、電源開発と三菱マテリアル、三菱ガス化学の3社による合弁会社である湯沢地熱は、秋田県の湯沢市山葵沢・秋ノ宮地域での地熱発電所の建設計画を策定し、建設に向けた環境影響評価（アセスメント）を進めている。今後、規制手続きに2～3年を要する見込みであるものの、2015年着工、2020年運転開始予定となっており、20年以上振りに新たに地熱発電所の運転が始まろうとしている。

この他にも、東日本大震災以降、福島県で複数の企業合同による開発が計画されるなど、各地で調査・検討などが進められている。

表 7-10 進捗が期待される案件

地域	事業者
豊羽（北海道）	JX 日鉱日石金属
武佐岳（北海道）	石油資源開発
松尾八幡平（岩手県）	JFE エンジニアリング、日本重化学工業、地熱エンジニアリング
安比（岩手県）	三菱マテリアル
山葵沢・秋ノ宮（秋田県）	湯沢地熱（電源開発、三菱マテリアル、三菱ガス化学による共同出資）
菰ノ森（秋田県）	三菱マテリアル
大霧（鹿児島県）	日鉄鉱業

出典：「資源・燃料政策に関する有識者との意見交換会 世界的な資源需要の高まりや災害等を踏まえた資源開発・確保」（2011，経済産業省）第1回資料 1-4 より NEDO 作成

(3) 米国

世界最大の設備力を持つ米国は、バイナリー方式の地熱発電の開発も積極的で、多くの商用プラントが稼働している。（表 7-11）

「2005年エネルギー政策法」によって、地熱発電が米国政府の再生可能エネルギー生産税控除を受けられるようになったため、地熱資源で発電される電力のコストが化石燃料による電力コストと等しくなるなど、経済情勢が追い風となり、地熱産業は急速に活性化している。

第7章 地熱発電

表 7-11 米国で稼働中の主な発電設備（2000 年以降運開設備）

位置 (州名)	サイト名	Owner	運開年	発電方式	設備容量 [MW]
アラスカ州	CHENA	Chena Power, LLC	2006	B	0.73
カリフォルニア州	BOTTLE ROCK	U.S. Renewables Group	2007	DS	55
	CE TURBO	CalEnergy Operating Corporation	2000	SF	10
	GOULD	Ormat	2006	B	10
	HEBER	Ormat	2008	B	14.5
	NORTH BRAWLEY	Ormat	2009	B	50
	SALTON SEA V	CalEnergy Operating Corporation	2000	DF	49
アイダホ州	RAFT RIVER	U.S. Geothermal	2008	B	15.8
ネバダ州	DESERT PEAK	Ormat	2006	B	
	FAULKNER	Nevada Geothermal Power	2009	B	50
	GALENA II	Ormat	2007	B	15
	GALENA III	Ormat	2008	B	30
	JERSEY VALLEY	Ormat	2010	-	15
	RICHARD BURDETT	Ormat	2005	B	27
	SALT WELLS	Enel Green Power	2009	B	18.06
	STILLWATER	Enel NA	2009	B	47.3
ニューメキシコ州	LIGHTNING DOCK	Raser Technologies	2008	B	0.24
ユタ州	OIT	Oregon Institute of Technology	2009	B	0.28
	BLUNDELL 2	PacifiCorp	2007	B	9
	THERMO HOT SPRING	Raser Technologies	2009	B	10
ワイオミング州	ROCKY MOUNTAIN OILFIELD TESTING CENTER	DOE	2009	B	0.25

注：発電方式 DS…ドライスチーム、SF…シングルフラッシュ、DF…ダブルフラッシュ、B…バイナリー
 出典：地熱エネルギー協会（GEA：Geothermal Energy Association）ホームページより NEDO 作成

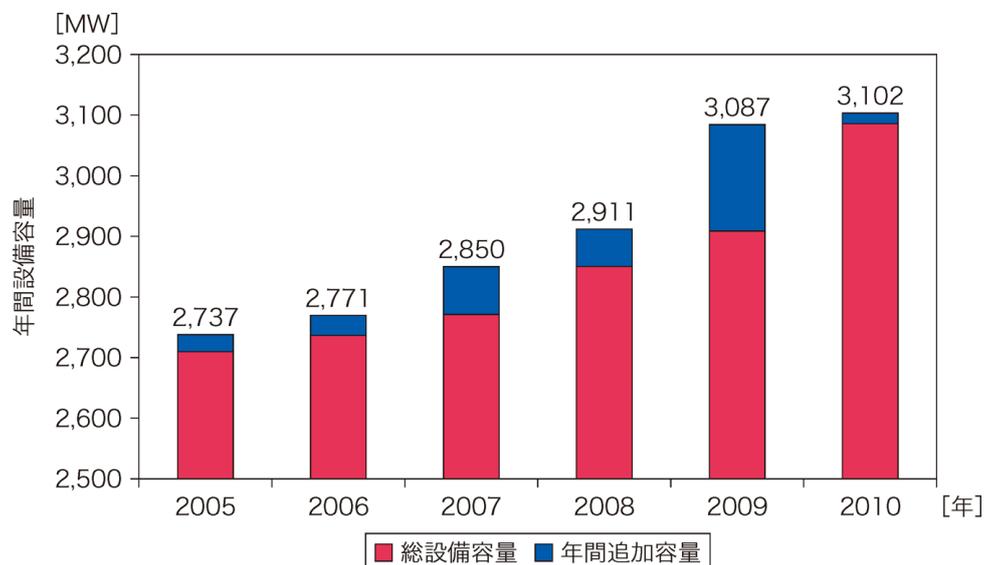


図 7-16 米国の地熱発電の設備容量の変化 (2005~2010)

出典：“Annual US Geothermal Power Production and Development Report” (GEA, 2011) より NEDO 作成

2008 年 8 月には、アイスランドとオーストラリアの 3 カ国間で地熱技術国際パートナーシップ (International Partnership for Geothermal Technology : IPGT) を締結しており、国際協力を通じて地熱発電の技術開発を加速させてきた。

第7章 地熱発電

米国の地熱発電容量は2011年3月時点、9つの州の合計で3,102MWに達している(図7-17)。中でもカリフォルニア州は群を抜いており、現在の設備容量は2,565MWを超えている。

現在は15の州で地熱発電の開発が積極的に進められており、2011年時点で123の開発プロジェクトが進められている。開発検討段階のものも含めるとその数は146に上り、設備容量は4,448~5,040 MWが見込まれている。その146の開発プロジェクトのうち、111プロジェクトが従来型地熱発電の新規開発と、多数を占めている(図7-16, 図7-18, 図7-19, 図7-20)。

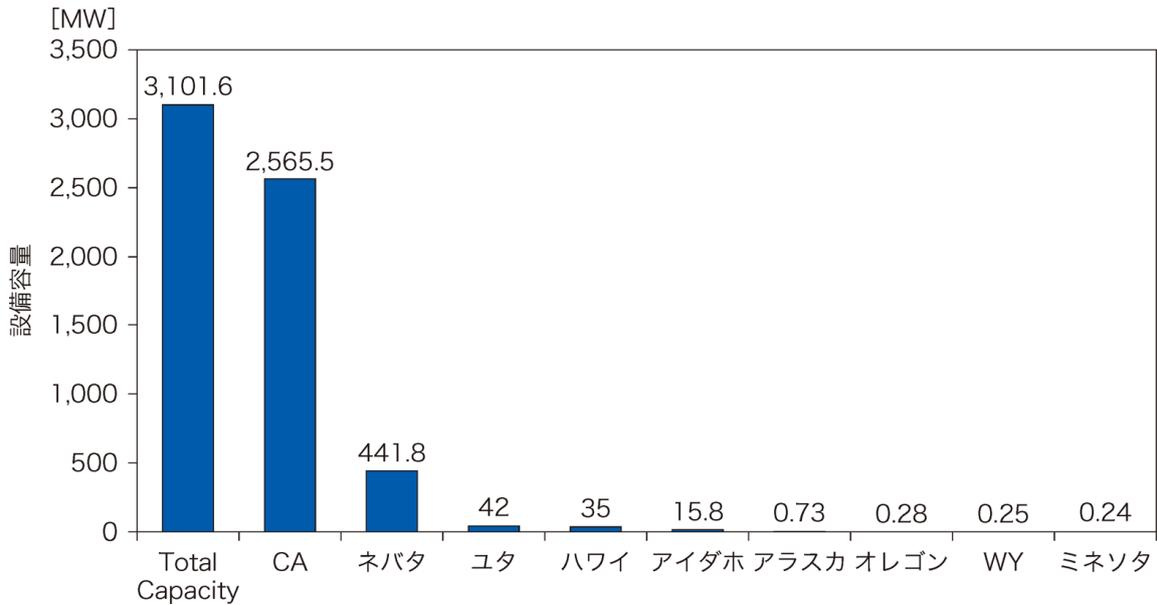


図7-17 米国の地熱発電の設備容量(2011年3月)

出典：“Annual US Geothermal Power Production and Development Report”(GEA, 2011)よりNEDO作成

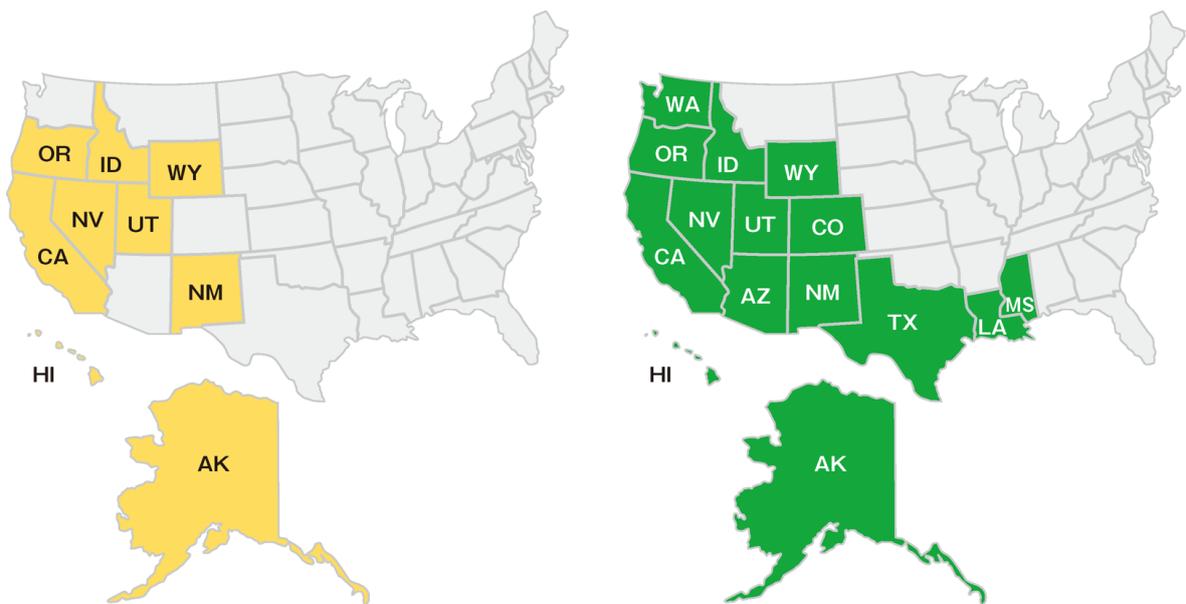


図7-18 地熱発電の開発状況(左：現在の開発, 右：開発中)

出典：“Annual US Geothermal Power Production and Development Report”(GEA, 2011)よりNEDO作成

第7章 地熱発電

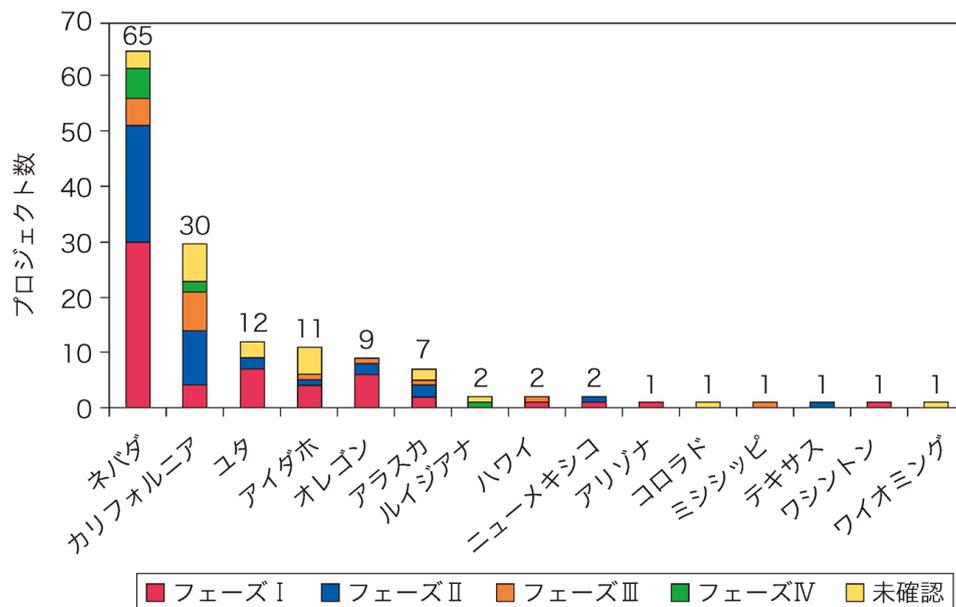


図 7-19 州別の地熱発電の開発プロジェクト数

出典：“Annual US Geothermal Power Production and Development Report” (GEA, 2011) より NEDO 作成

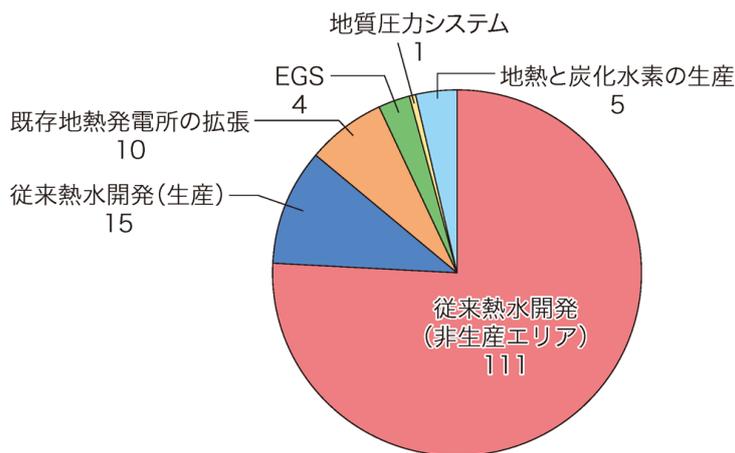


図 7-20 プロジェクトタイプ別の開発数

出典：“Annual US Geothermal Power Production and Development Report” (GEA, 2011) より NEDO 作成

(4) 欧州

2010 年時点で、欧州全体の地熱発電設備容量は 1.6GW、発電量は 10.9TWh であり、イタリアが欧州全体の設備容量の約 50%を占めている。近年では、トルコとアイルランドの地熱発電市場が活性化している。また、スペインやフランス、ポルトガルの大西洋の島々でも地熱発電の開発が活発となっており、合計で 400MW 規模のプロジェクトが進行している (図 7-21)。

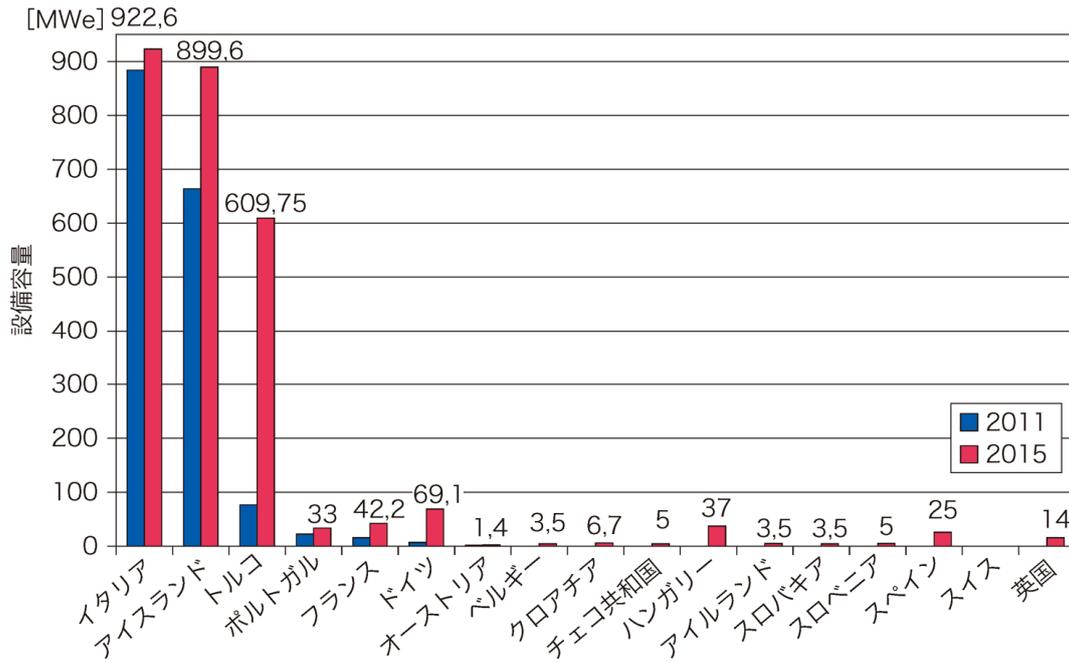


図 7-21 設備容量の国別比較 (2011~2015)

出典：“Geothermal Electricity Market in Europe” (2011, EGEC) より NEDO 作成



図 7-22 EGS プラントの開発地点

出典：“Geothermal Electricity Market in Europe” (2011, EGEC)

第7章 地熱発電

欧州で現在、稼動している地熱発電設備を表 7-12 に示す。特に、ドイツの設備容量はわずかに 8MW 程度であったが、2004 年に導入された固定価格買取制度の効果が現れはじめ、バイエルン州を中心に、バイナリー方式や EGS など、現在では 16 のプラントを開発している。

また現在、クロアチアやフランス、ドイツ、ハンガリー、イギリス、アイルランド、スロヴァキア、スロヴェニア、スペインといった多くの国々で、11 の EGS プロジェクトが運転・開発されている。ヨーロッパ地熱エネルギー協議会（European Geothermal Energy Council : EGEC）は、地熱発電に占める EGS の割合が増加し、現在約 2% である EGS プラントが提案段階のものも含めた場合、今後 43% 程度となると想定している（図 7-22）。

表 7-12 欧州で稼動中の主な地熱発電設備（2010 年 12 月時点）

国	地域	プラント名	設備容量 [MW]
オーストリア	Altheim	Altheim	1
	Bad Blumeau	Bad Blumeau	0.2
	Simbach/Braunau	Simbach/Braunau	0.2
フランス	Bouillante	Geothermie Bouillante 1	4
		Geothermie Bouillante 2	11
	Soultz-sous-Forêts	EGS Project	2.2
ドイツ	Bruschal	Bruschal	0.55
	Neustadt-Glewe	Neustadt-Glewe	0.23
	Landau	Landau (EGS)	3
	Unterhaching	Unterhaching	3.36
アイルランド	Krafla	Krafla	60
	Bjarnaflag	Bjarnaflag	3.2
	Svartsengi	Svartsengi	76.4
	Nesjavellir	Nesjavellir	120
	Reykjanes	Reykjanes	100
	Hellisheidi	Hellisheidi	213
イタリア	Larderello	Valle Secolo	120
		Farinello	60
		Nuova Larderello	20
		Nuova Gabbro	20
		Nuova Castelnuovo	14.5
		Nuova Serrazzano	60
		Nuova Sasso	20
		Le Prata	20
		Nuova Monterotondo	10
		Nuova San Martino	40
		Nuova Lago	10
		Lagoni Rossi 3	8
		Cornia 2	20
		Nuova Molinetto	20
		Carboli 1	20
		Carboli 2	20

国	地域	プラント名	設備容量 [MW]
イタリア	Larderello	Selva	20
		Monteverdi 1	20
		Monteverdi 2	20
		Sesta	20
	Travale/Radicondoli	Nuova Radicondoli	40
		Radicondoli2	20
		Pianacce	20
		Rancia	20
		Rancia2	20
		Travale3	20
		Travale4	40
	Mount Amiata	Bagnore 3	20
		Piancastagnaio 2	8
		Piancastagnaio 3	20
		Piancastagnaio 4	20
Piancastagnaio 5		20	
ポルトガル	Ribeira Grande	Unit 1 and 2	13
		Pico Vermelho	10
トルコ	Denizli	Kizildere (Saraykoy)	20
	Aydin	Salavatli Dora-1	7.5
	Denizli	Kizildere	6.85
	Canakkle	Tuzla	7.5
	Aydin	Guris/Gumat Gemencik	47.4

出典：“EGEC Statistical Report 2010”（2010, EGEC）より NEDO 作成

(5) 東南アジア

東南アジアでは、フィリピンとインドネシアがそれぞれ世界第2位、第3位の地熱発電設備導入量を誇る。フィリピンとインドネシアの地熱発電設備の導入推移を図7-23に示す。フィリピンは2000年以降の導入が停滞している一方、インドネシアでは着実に導入が進んでいる。

フィリピンの2010年の地熱発電設備容量は1.9GWで、総発電量の15%を占めている。フィリピンでは古くから地熱開発に積極的であり、1978年の地熱発電開発に関する大統領令（PD1442）によって税制優遇などの促進策が規定され、導入が進んだ。開発リスクの大きいサイトはPNOCエネルギー開発公社（現在は民営化）が担い、開発が進められた。また、BOT方式を用いた開発も促進されている。近年、フィリピンエネルギー省は、地熱開発可能性の高い地点を「Philippine Energy Contracting Round」として公表し、民間からの投資を促進している。

インドネシアの2010年の地熱発電設備容量は1.2GWで、総発電量の6%を占めている。インドネシアでは、2003年に地熱法が制定され、国営企業が担ってきた地熱開発に民間企業が参入できるようになり、2008年にはFITの買取価格基準が制定されている。電源開発計画では、2014年までに10,000MWの新規電源を開発するクラッシュプログラムIIの一環として、3,900MWの地熱発電が開発される計画である。開発を担うのは、国内では国営の Pertamina Geothermal Energy や電力公社（PLN）であるが、IPPへの民間投資も熱心に誘致している。2010年にバリ

第7章 地熱発電

島で開催された世界地熱会議で、ユドヨノ大統領が「世界一の地熱発電大国を目指す」と表明するなど、インドネシアは地熱開発に積極的な姿勢を見せている。

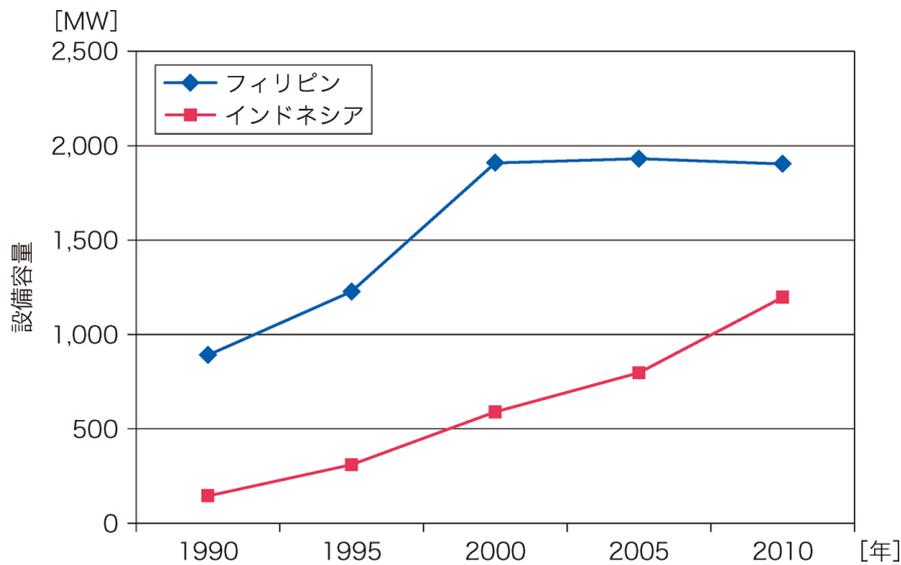


図 7-23 フィリピンおよびインドネシアの地熱発電設備導入推移

出典：IGA ホームページより NEDO 作成

表 7-13 フィリピンで稼働中の主な地熱発電設備

地域	プラント	所有者	運開年	契約種別	設備容量 [MW]
ルソン	MakBan 1~10	AP Renewable Inc.	1979,1980,1984, 1995,1996	-	443
	Bac Man I, II	Bac-Man Geothermal Inc.	1993,1994,1998	-	150
	Tiwi 1~6	AP Renewable Inc.	1979,1980,1981,1984	-	289
	MakBan Ormat	Ormat Inc. USA	1994	BTO	16
ビサヤス	Negros GPP1,2	Green Core Energy	1983,1995	-	193
	Tongonan II & III (Leyte A)	Energy Development Corporation	1996/1997	BOO-PPA	609
	Northern Negros GPP	Energy Development Corporation	2007		49
ミンダナオ	Mindanao I (Mt. Apo)	Marubeni Energy Services Corp.	1996	BOO-PPA	52
	Mindanao II (Mt. Apo)	Marubeni Energy Services Corp.	1999	BOO-PPA	51

注：

BTO (Build Transfer Operate)

民間事業者が施設等を建設し、施設完成直後に公共施設等の管理者等に所有権を移転し、民間事業者が維持・管理及び運営を行う事業方式

BOO (Build Own Operate)

民間事業者が施設等を建設し、維持・管理及び運営し、事業終了時点で民間事業者が施設を解体・撤去する等の事業方式。

PPA (power purchase agreement)

長期売電契約

出典：フィリピンエネルギー省ホームページより NEDO 作成

表 7-14 インドネシアで稼働中の主な地熱発電設備 (2011 年)

地域	プラント	所有者	運開年	設備容量 [MW]
ジャワ	Kamojang	Pertamina Geothermal Energy and PLN	1978,1982,1987,2007	200
	Salak	Chevron (transferred to PLN. 2012年 BOT 終了)	1994,1995,1997	377
	Darajat	Chevron (since 2006)	1994,2000,2008	270
	Wayang Windu	Star Energy (operate)	2000,2009	227
	Dieng	Geodipa	1998	60
ジャワ以外	Lahendong	Pertamina Geothermal Energy and PLN	2002,2008,2009,2011	80
	Sibayak	Pertamina Geothermal Energy	1996,2007	12

出典:インドネシアエネルギー鉱物資源省ホームページ および “Geothermal Power Generation in the World, 2005-2010 Update Report”, Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia. (Bertani, R., 2010.) より NEDO 作成

7.3 世界の市場動向

7.3.1 市場の現状および将来見通し

世界は地熱発電の建設ラッシュとなっている。特に、東南アジアやオセアニアの火山国で地熱発電所の新增設が加速しており、例えばインドネシアは、昨今の急速な経済発展に伴い電力需要が急増し、2004年より石油の純輸入国に転じていることから、石油資源への依存を減らしつつ、電力需給逼迫を解消することが急務となっている。電力需要の増加に対し約10GWの発電所建設計画を発表し、そのうち約40%を地熱発電により賄うとしている。さらに地熱発電の約80%は民間資本によるIPP²事業に割り当てる予定であり、海外企業のビジネスチャンスが拡大している³。

米国は地熱発電設備容量で世界トップであり、発電と成長の見通しは良好である。米国では、米国再興・再投資法 (American Reinvestment and Recovery Act : ARRA) から地熱エネルギー技術に対して、3億6,800万ドルを投資する⁴という政府の後押しもあり、148もの地熱発電の開発検討プロジェクトが積極的に進められてきた。この助成金は新しい地熱地帯の特定と開発に向けられたものであり、これらのプロジェクトにより、掘削、探査、プラント建設、地熱発電設備の運転等で、何千もの雇用を生み出している。

ニュージーランドは政策として再生可能エネルギーに力を入れており、現在の総発電量の57%を水力、11%を地熱、4.9%を風力で賄っている。同国は、地熱発電に対するRD&D投資も活発であり⁵、今後の更なる市場拡大が期待される。富士電機が、1基の発電能力としては世界最大の出力(140MW)となる地熱発電プラントをニュージーランドに納入・運転開始するなど、日本

² Independent Power Producer (独立系発電事業者)。電力会社に卸電力を供給する発電事業者を指す。

³ 住友商事は、インドネシアの地熱発電プロジェクトにおいて北スラウェシ州ラヘンドン地区など7件(約530MW)の受注実績があり、インドネシアにおける建設中・完工済み地熱総発電設備全体の約50%を占める(2010年3月現在)。タービン・発電機は富士電機システムズが納入している。

(出典:住友商事プレスリリース http://www.sumitomocorp.co.jp/news/2010/20100218_133020.html)

⁴ 7.4.1 (2) 参照

⁵ 7.4.1 (1) 参照

第7章 地熱発電

企業の進出も活発になっている。

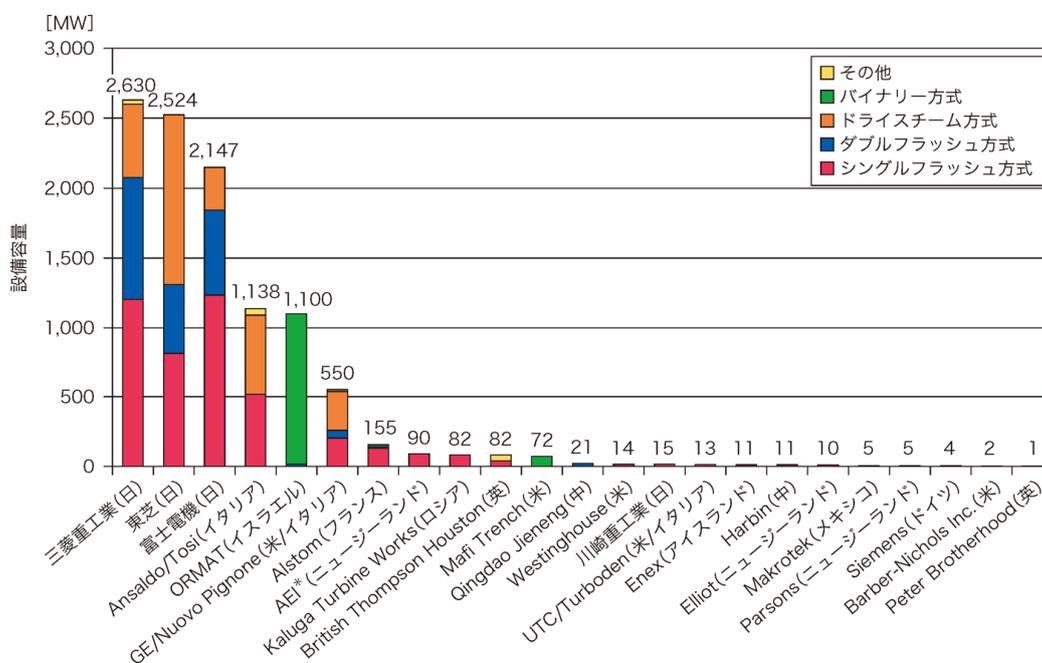
オーストラリアなどの地熱資源に乏しい国々までが、EGS を中心とした地熱開発に乗り出してきている。EGS は多くの国で開発プロジェクトが進められており、今後は EGS が市場の中心となると考えられる。

7.3.2 国別・企業別の生産シェア

日本国内では 10 年以上も新設されていない地熱発電であるが、日本メーカ 3 社（三菱重工業、東芝、富士電機）でフラッシュ方式のタービンの世界市場の約 7 割を占めている。

1980 年代には日本製のシェアが 90% であったが、バイナリーサイクル発電の割合が伸びたため、日本のシェアは減少しつつある。2000 年以降、バイナリーサイクルが地熱発電設備の 25% を占めているが、バイナリー方式については、イスラエルの Ormat が大半を占めている。

以下に、日本メーカ 3 社（三菱重工業、東芝、富士電機）、Ormat 等の動向を概観する。



* AEI : Associated Electrical Industries

図 7-24 地熱発電用タービンの市場動向

出典：“Geothermal Power Generation in the World, 2005-2010 Update Report”, Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia. (Bertani, R., 2010.) より NEDO 作成

(1) 三菱重工業

三菱重工業は、国内だけでなくアイスランド、インドネシア、米国、フィリピンで地熱発電設備の受注・納入実績がある。

2010 年には、アイスランドの電力会社最大手、レイキャビク・エナジー社と地熱発電で協業することに合意し、覚書に調印した。レイキャビク・エナジー社は地熱発電事業会社として、地熱エネルギーの開発を地球規模で進める計画を持ち、既にアフリカなどで開発に着手している。地熱発電設備で世界トップの三菱重工業と、世界有数の地熱発電国、アイスランドで開発ノウハウ

を持つレイキャビク・エナジー社が手を組み、世界規模で地熱エネルギービジネスを展開していくことが想定される。

これにより、アイスランド向け地熱発電設備の受注・納入累計は、同社向け 13 基を含め 15 基に達し、全世界での受注累計は 100 基超、出力で 270 万 kW に及んでいる。

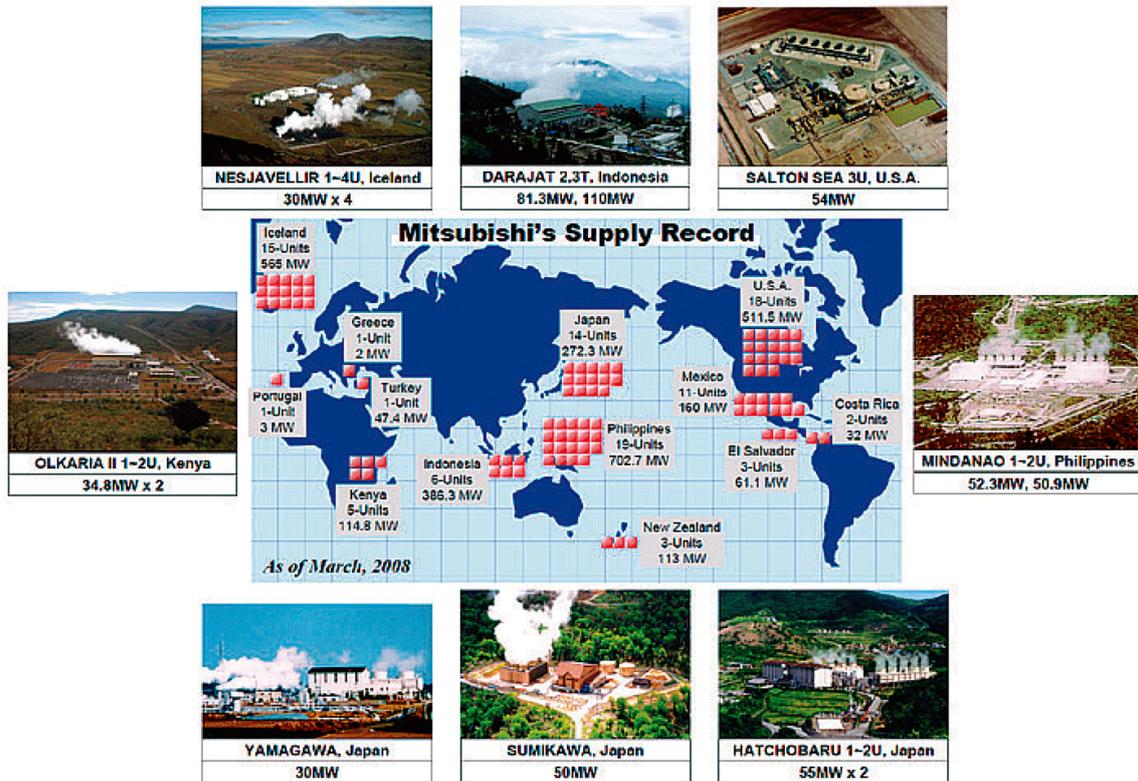


図 7-25 三菱重工業の納入実績

出典：三菱重工業ホームページ

(2) 東芝

東芝は、1966年に国内初となる岩手県松川地熱発電所に 20MW の地熱用タービン・発電機を納入して以来、北米、東南アジア、アイスランド等世界各国で 54 台の設備を納入しており、約 2,900MW の発電設備を納入し、世界で 24% のシェアを占めている。

2011年3月には、ニュージーランド・コンタクトエナジー社が建設を予定しているテミヒ地熱発電所のタービン、発電機、復水器を受注。2基の 83MW 級地熱タービン、発電電動機、復水器を 2012年に納入した。また同年に、ケニアオルカリア発電プロジェクト、インドネシアジャワ島西部バンドン郊外での地熱発電プロジェクトを受注するなど、積極的な受注活動を行っている。



図 7-26 東芝の納入実績

出典：東芝ホームページ

(3) 富士電機

富士電機は、1960年に日本で初めての地熱発電設備を箱根小涌園に納入。1970年代からインドネシア、フィリピン、ニュージーランド、アメリカ、アイスランドなど世界各地へ地熱発電設備を納入し、地熱用蒸気タービン発電機の製造・納入において、直近10年間で約40%以上のシェアを有する。これまで国内外で66台の地熱発電用タービンを納入している。

地熱用蒸気タービンに入ってくる蒸気には腐食成分を含む不純物やガスが非常に多く含まれており、通常の火力発電用タービンとは比べものにならないほど過酷である。現在、耐食性を向上させるコーティング技術を開発するなど継続的に技術開発を進め、地熱発電用タービンで世界シェア50%以上を目指している。

2010年に商業運転を開始したニュージーランド ロトカワ地区に、同社が納入した地熱発電プラント（ナ・アワ・プルア地熱発電所）は、1基としては140MWと世界最大出力を誇る。2011年には、トルコで1基（60MW）、フィリピンで1基（20MW）を受注している。今後さらなる売上拡大を目指しており、アフリカ、中南米諸国など新たな地域へも事業を拡大していく計画としている。

また、水より沸点の低い媒体を地熱エネルギーで蒸発させてタービンを回す「バイナリー発電」システムにも注力し、2MW標準機を商品化するなど、地熱バイナリー発電についての事業領域拡大を目指している。

(4) Ormat

Ormat グループは、地熱および廃熱回収発電設備の設計、製造、販売、現地施工、関連するサービスを行い、更に、その設備の所有、運転を世界各地で行っている唯一の地熱事業垂直統合企業グループである。

イスラエルが本社となる同社は 1966 年よりバイナリーサイクルの開発を始め、1980 年代後半より米国にてバイナリー方式の地熱発電所の建設、運転を行っている。近年では特に、グアテマラ、ケニア、ニュージーランド等の米国以外の地域においても地熱発電プラントを建設している。

現在までに 20 ヶ国以上 65 地点、合計 1,300MW 超のバイナリー地熱発電所および蒸気タービンとの複合発電所を建設。同社は、世界に先駆けて二次側の低沸点媒体に有機媒体（ペンタン、ブタンなど）を用いたバイナリー発電を商品化し、世界のバイナリー方式の地熱発電所をほぼ独占状態としている。

同社の、地熱バイナリー発電設備は、

- ・従来のフラッシュ式発電に必要な蒸気（200℃以上）に比較して、低温域（100℃以上）の蒸気・熱水を利用できる。
- ・高温蒸気を使用できる場合には、蒸気タービン発電とバイナリー発電の複合発電を行うことができる。
- ・地熱バイナリー発電設備としては世界最高クラスの発電効率と信頼性を誇り、最新の情報によると世界中に 1,200MW 以上の豊富な納入実績を有している。
- ・空冷コンデンサーを採用することで、地下から取り出した熱流体を全量地下に還元して資源循環できるので環境負荷が小さい。
- ・白煙の発生がなく、寒冷地においても周辺への着氷がない。
- ・単機出力 250kW から 15,000kW 級と、幅広い出力への対応が可能。

などの特長があり、競争力を有している。

なお、2010 年 6 月に JFE エンジニアリングと米国 Ormat International は、地熱バイナリー発電設備の日本国内での業務協定を締結し、日本で初めてバイナリー発電設備を含む生産井坑口から還元井坑口までの一貫地熱発電システムの提供が可能となった。

(5) その他関連企業の動向

その他の地熱発電関連企業として、国内企業では、地熱資源調査・掘削工事の地熱技術開発、地熱エンジニアリング、日鉄鉱業、西日本技術開発、日本重化学工業、出光興産、三菱マテリアルテクノ、帝石削井工業、エスケイエンジニアリング、掘削機械のワイビーエム、鉱研工業、蒸気生産設備の新日鉄エンジニアリング、プラント工事の太平電業、日揮などが挙げられる。特に、地熱発電用タービン、掘削機械の分野では、日本の高度な技術が世界をリードしている。

また、海外市場の活性化に伴い、これまでは国家レベルで推進されるケースが多かった地熱発電事業だが、近年、民間資金を活用した開発が活発に進められるようになってきている。さらに、初期リスクをどう軽減できるかが重要なポイントとなるため、IPP（独立系民間発電事業）を活用した開発も検討されている。そのため、住友商事によるインドネシア ムアララボ地熱発電所およびラジャバサ地熱発電所、伊藤忠商事によるサルーラ地熱発電所、丸紅によるインドネシア パトハ地熱発電所、豊田通商によるケニア オルカリア地熱発電所など、海外における地熱発電プロ

第7章 地熱発電

プロジェクトの受注が相次いでいる。

7.4 各国の技術開発動向

7.4.1 各国の開発投資

(1) 世界

各国における地熱発電への研究・開発・実証（RD&D）投資は少額であり，開発投資がなされていない国も少なくない。

人口当たりの投資額でみると，ニュージーランドが最も高く，地熱発電に対し全 RD&D の 10% 以上を投資している。また，2006 年から 2010 年の平均投資額では，米国（23.1 百万 US ドル）や，ドイツ（18.6 百万 US ドル）がトップとなっている。後述のように，米国では，米国再興・再投資法を通じて地熱エネルギー技術に対し巨額の R&D 投資が行われた。

(2) 米国

2009 年に設立された米国再興・再投資法（ARRA）から，再生可能エネルギー研究・開発・支援のため，エネルギー省エネルギー効率及び再生可能エネルギー局（EERE）へ 168 億ドル拠出されている。そのうち，地熱エネルギー技術については，GTP⁶ の 148 プロジェクトに対して総額 3 億 68 百万ドルが授与された。

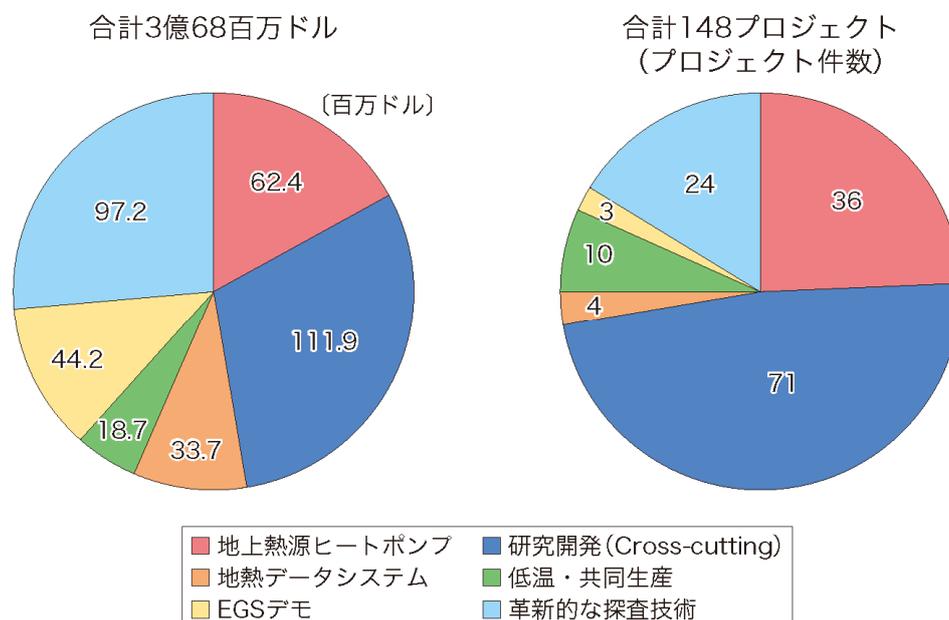


図 7-27 ARRA による GTP への助成額と件数

出典：EERE ホームページより NEDO 作成

⁶ 7.2.2 (3) 参照

(3) 欧州

イギリスでは、深部地熱チャレンジ基金が6つの実証プロジェクトを支援して2010年に510万英ポンドを授与した。2011年4月初頭には、再生可能エネルギー固定価格買取制度の拡大が地熱ヒートポンプなどの低炭素暖房技術のために計画されている。

なお、欧州では、欧州委員会が地熱資源による発電を常に戦略上の重要事項としており、EUは高温岩体(HDR)の研究開発で世界を主導している。フランスのBRGM(地質・鉱山研究所)、ドイツのBEO、英国のCSM Associatesなどは、この領域に関する豊富な専門知識を有している。

(4) 日本

日本ではNEDOにおいて、1980年度から2002年度まで地熱発電の技術開発を行ってきたが、それ以降、国による技術開発は行われていない。

しかしながら、東日本大震災以降、再生可能エネルギー導入拡大が望まれる中、世界第3位となる地熱資源を有する日本では、ベース電源として活用可能な地熱発電が大きな注目を集めている。そのような状況を踏まえ、2013年度から国による地熱の技術開発が再開されている。

7.4.2 EGS（涵養地熱系）の開発・実験

EGS技術はまだ成熟しておらず、多くの点で検証を要する。しかし、既に発電している、若しくは、近く発電を開始する予定であるプラントもあり、世界各地で実証等が行われている。

現在、米国DOEは、7つの実証サイトで、EGSの技術的実現可能性の実証を行っている（表7-15）。また、2030年までにEGSの発電コストを6セント/kWhまで低減させることも目的としている。

表 7-15 DOEによるEGS実証プロジェクト（2012年4月現在）

実施主体	実証サイト
AltaRock Energy, Inc.	Newberry Volcano (オレゴン州)
Geysers Power Company, LLC	The Geysers (カリフォルニア州)
Naknek Electric	Naknek (アラスカ州)
Ormat Technologies, Inc.	Brady Hot Springs (ネバダ州)
Ormat Technologies, Inc.	Desert Peak (ネバダ州)
TGP Development Co.	New York Canyon (ネバダ州)
University of Utah	Raft River (アイダホ州)

出典：“Annual US Geothermal Power Production and Development Report”（2012,4 GEA）より NEDO 作成

欧州でもEGS技術の開発及び持続可能性の立証に取り組んでいる。欧州では既に11のEGSプロジェクトが開発されており、Soultz-sous-Forts（フランス）及びLandau（ドイツ）は、既に発電を開始している（図7-22参照）。

第7章 地熱発電



図 7-28 Landau 地熱プラント

出典：geo x GmbH ホームページ

また、25MW という大規模な EGS 実証プロジェクトが、オーストラリアの Cooper Basin（クーパー盆地）で、開発中である。同サイトは、5 GWe から 10 GW の発電ポテンシャルがあると推定されている。さらに、オーストラリアでは Geodynamics 社が、Habanero プロジェクトにおいて、1MW のパイロットプラントを建設し、2013 年 5 月 2 日から発電を開始している。

7.4.3 利用可能範囲を拡大するための技術開発

地熱発電は、フラッシュ・バイナリー両方式のプラントが商用運転しており、技術的には確立されている。地熱のさらなる普及に向けては、地熱探査技術の向上や貯留層管理技術等が重要である。また、現在商用化されている技術に加え、さらに地熱の利用可能範囲を拡大するための技術開発が国内外で進められている（表 7-16）。

表 7-16 地熱発電の主な技術課題と解決の方向性

技術課題		解決策・要素技術
低コスト化	地熱探査技術の向上	<ul style="list-style-type: none"> ・地質調査 ・地化学調査 ・物理探査（温度、電気・電磁波、地震、重力、磁気）
	スケール対策	<ul style="list-style-type: none"> ・地熱熱水からのシリカ除去
高効率化	貯留層管理	<ul style="list-style-type: none"> ・プラント出力の適正化 ・EGS（涵養地熱系） ・蒸気条件変化への対応（タービン翼のフレキシビリティ）
高耐久化	耐食性	<ul style="list-style-type: none"> ・耐食性材料 ・コーティング
利用可能資源の拡大	未利用温度帯利用	<ul style="list-style-type: none"> ・バイナリー発電 ・高温岩体発電
管理・運用	有害物質対策	<ul style="list-style-type: none"> ・砒素等除去

出典：NEDO 作成資料

(1) 低コスト化

1) 地熱探査技術の向上

地熱発電の効率的な開発は、地質調査、地化学調査、物理探査等の地熱探査により、調査地域の地熱ポテンシャルをいかに正確に把握できるかが第一歩となる。地熱探査で有望と判断された場合、次にボーリング調査が実施されるが、ボーリング孔の掘削は1本数億円の費用が必要であり、莫大な投資が要求される。開発リスク低減の観点からも、開発初期段階の地熱探査技術の精度向上は非常に重要な課題であり、技術開発が継続的に行われている。

ボーリング調査では、ボーリングコアやカッティングス（掘削した削り屑）により地質構造を明らかにするとともに、ボーリング孔に測定器を下ろし、電気抵抗や温度を測定する物理検層を行い、地熱貯留層の位置を把握する。1本のボーリングで有望性が確認された場合、さらにボーリングを行い、貯留層の三次元的構造をより詳細に推定することで、地熱ポテンシャルの把握精度を高める。この時点までの精度が高ければ、次に行う生産井、還元井の掘削は比較的高い精度で行うことができる。

・地化学調査

地熱系のタイプ（蒸気卓越型、熱水卓越型など）を確認し、深部では最低限どの程度の温度が期待されるかを推定するとともに、供給される水の同質性評価により、深部流体の化学性状を推論し、熱水の供給源を決定する手法。物理探査などに比較して低コストで実施可能なため、他の探査に先行して実施される。

・物理探査

物理探査のパラメータには、**表 7-17** に示すようなものが含まれる。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、電気探査法や電磁探査法によって調べることが可能である。また、地震探査、重力探査、磁気探査等は、石油探査で採用されている手法であり、深部にある地熱貯留層を形成する地質構造の形状、規模、深度などの情報を収集することができる。

表 7-17 物理探査の種類

物理探査	探査項目・内容	
温度調査	温度測定・地温勾配・ 地殻熱流量	貯留層上面の温度推定値
電気探査法または電磁探査法	電気伝導度	地質構造中の地熱流体の有無
地震探査	弾性波の伝達速度	深部にある地熱貯留層を形成する地質構造の 形状、規模、深度等
重力探査	密度	
磁気探査	磁化強度	

出典:「地熱エネルギー入門」Mary H. Dickson, Mario Fanelli 著(2008, 日本地熱学会 IGA 専門部会)より NEDO 作成

2) スケール対策

スケールとは地熱流体から配管等への析出物で、シリカ、炭酸カルシウム、硫化鉱物などがある。流体温度や圧力が急速に変化したり、流体混合があつたり、溶存ガスの離脱により、溶存成分が過飽和になりスケールが発生する。スケールの付着は熱交換器における熱交換効率の低下や、配管閉塞等の問題を引き起こすため、定期的な除去作業、析出抑制剤の利用などの対策が必要と

第7章 地熱発電

なる。このスケール除去には多額の経費がかかり、ランニングコストを押し上げる要因となっているため、低コストスケール対策技術の開発が求められている。

(2) 高効率化 —貯留層管理—

地熱発電では、発見した貯留層の特徴を踏まえたプラント規模の決定、生産井や還元井の配置、および運転開始後の貯留層の観測・解析と、貯留層の状況に合わせたプラントの運転が非常に重要となる。例えば地熱貯留層のポテンシャルを超えるプラント出力は、貯留層の減衰を早める原因となる。また、貯留層内の水量が不足した場合もエネルギー取得が困難になる。地熱発電を効率的に運用するために、貯留層管理は非常に重要であり、欧米では EGS に重点を置いた技術開発を進めている。

EGS は、人工的な水圧刺激を利用して地熱資源を活用するための一連の技術である。通常、地下深いところにある高温の地層で岩石を断裂させる技術を指し、温水または水蒸気の新規地熱貯留層を創出するか、既存の地熱貯留層を拡大、強化するために利用される。EGS 技術はまだ成熟しておらず、多くの点で検証を要する。

(3) 高耐久化

地熱流体は塩化物や硫化物等の腐食性を有する物質や不純物を含む流体であるため、ケーシングタイプや地上配管設備、タービン等の材料の物理的、電気化学的減耗を生じさせる。材料の減耗は施設の耐用年数に影響するばかりではなく、信頼性にも大きく影響する。対策は耐食性に優れたステンレス材料の使用、タービンのブレード部等へのコーティング材料の溶射、地熱流体への腐食抑制剤の注入等が考えられる。しかし、地熱流体の含有成分、流速等の特性に応じて、最適となるステンレス材料は異なること、過度な対策はコスト上昇につながるなどから、地熱流体の特性に応じた対策が求められる。

(4) 利用可能資源の拡大

現在地熱発電に使われているエネルギーは地熱源の一部であり、利用可能な熱源範囲を拡大するために様々な技術開発が行われており、温泉熱を利用した小型のバイナリー発電システムなどが開発されている。

(5) 管理・運用

地熱発電において、セパレータにより蒸気と分離した後の熱水中には砒素などの有害物質が含まれている。全ての熱水は、地熱貯留層の圧力維持や地熱貯留層への水の補給、あるいは、排水による環境影響を防止するため、全量還元井から地下へ戻されている。したがって、現状では、砒素対策は考慮する必要はないが、将来的に有害物質を低コストで分離し、熱水のエネルギーや成分の有効利用への関心が高まれば、有害物質の適正な管理が必要となる。

7.5 今後に向けた課題と克服方策

7.5.1 開発コストの低減

地熱発電は、調査・開発段階で多数の坑井を掘削する必要があり、掘削費用は1本当たり数億円を要することに加えて、地熱発電所が山間部に建設されるため、送電線建設に多額の費用を要することから初期コストが高い。さらに、開発期間のみならず、運転開始後においてもスケールの問題から補充井の掘削が必要となる。

例えば、3万kWの地熱発電所の建設費内訳の試算では、調査・開発で約73億円、地上設備建設に183億円となっており、初期コストに多額の費用を要する結果となっている。

コストの問題については、全量買取制度やJOGMECによる地熱資源開発助成事業、地熱探査出資・開発債務保証に係る支援制度で大きく前進した。地熱発電はリードタイムが長いことから、今後も継続した支援が必要である。

7.5.2 開発リスクの低減

地熱発電は、現行の最新の探査技術等を用いても、坑井掘削位置の効率的な選定や運転後における地熱貯留層の管理等に関して不確かな部分が残る、開発の結果、計画どおりの蒸気量が確保できないなどの開発リスクを抱えている。こうした開発リスクの存在は、新規開発を妨げる要因となっている。

日本の地熱資源量の把握については、これまで多くの調査が行われてきたが、今後、地熱発電の具体的な開発に結びつけていくためには、より一層の精度、信頼性の高いデータを取得することが重要となる。さらに、地熱発電は資源調査から事業開始までに多大な時間を要することもリスク要因となっている。そのため、環境アセスメントの期間短縮等、リードタイムの短縮化に向けた取組も重要である。

7.5.3 自然環境との調和

我が国の場合、地熱資源の賦存する地域の多くが国立公園などのプラント開発が困難な地点にある。日本における150℃以上の地熱資源量は約20GWあるいはそれ以上と推定されるが、このうち約80%強が国立公園の特別保護地区・特別地域内にあり、開発できない状況にあった。

しかし、2011年の東日本大震災以降、エネルギーの安定供給やエネルギーシステムの歪み・脆弱性を是正の観点からも、再生可能エネルギーを大幅導入する必要性が一層高まったこと等を受け、行政刷新会議の規制・制度改革に関する分科会において、再生可能エネルギー導入の観点からの規制・制度のあり方が議論され、風力発電及び地熱発電について、自然公園法、温泉法等の許可の早期化・柔軟化が議論され、閣議決定がなされた(2010年6月18日)。この中で地熱発電については、「地熱発電に係る過去の通知を見直し、傾斜掘削について、個別に判断する際の考え方を明確にするとともに、国立・国定公園の地表部に影響のない方法による事業計画であれば許可できる旨新たに通知するための調査・検討に着手する」とされた。

さらに、第4回エネルギー・環境会議(2011年11月1日、内閣官房国家戦略室)にて「エネルギー規制・制度改革アクションプラン」が公表され、傾斜掘削による自然公園の地下開発であれば許可可能である旨通知すること、自然公園の区分や開発段階ごとに、許可が可能となる要

第7章 地熱発電

件や方法を検討し、明確化すること、具体的な案件を対象に関係者の合意形成・連携促進のための優良事例の形成を図ることとされている。

これらを受け、環境省で「地熱発電事業に係る自然環境影響検討会」が開催され、自然公園法等の関係法令の諸規制の緩和措置等について議論・検討がなされ、新たな「国立・国定公園内における地熱開発の取り扱い」が定められた。これにより、第2種特別地域及び第3種特別地域の地熱開発において、自然環境、風致景観等への影響が小さなものについては、個別に判断し自然環境の保全や公園利用に支障がないものは認めることとなった。

そのため、自然公園内の開発に向けた新たな実例作りが課題となることから、環境に配慮した機器開発が重要である。

7.5.4 温泉バイナリー発電システムの導入拡大

我が国では、温泉熱エネルギーが全国各地に分布し、温泉バイナリー発電の導入ポテンシャルは、カーナサイクル換算で約720MWと推計されている。また、温泉熱を発電に利用することで地域分散型の電源として活用できることから、バイナリー発電の導入拡大が期待される。

しかしながら、温泉バイナリー発電システムは稼働実績が少ないため、スケール防止、耐久性およびメンテナンス性等の検証と対策が今後重要となる。

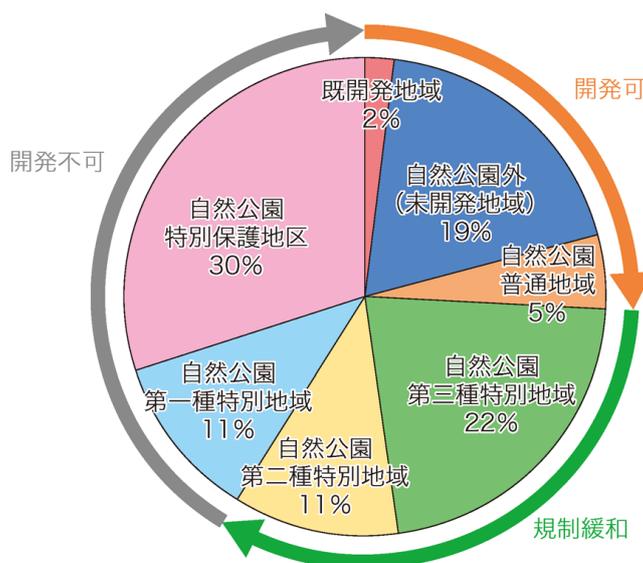


図 7-29 我が国の地熱資源量分布

出典：調達価格等算定委員会（経産省，2012）より NEDO 作成

7.5.5 地熱発電と立地地域との共生

地熱資源の多くが温泉地に近接していることから、地熱発電開発の必要性について、地域の理解を得るよう努力するとともに、双方の利益を損なわないよう、調整を図ることも重要である。

そのためには、周辺の温泉地の温泉資源に影響を及ぼしていないかどうかを確認するために、温泉事業者の協力を得て温泉源泉の湧出量、温度等のモニタリングを実施し、これらのデータを積極的に公開することにより、調査段階から、地域の信頼性と協力を得ることが、地熱発電の開発を円滑に進める上で重要である。

なお、環境省からは、温泉資源の保護を図りながら再生可能エネルギーの導入が促進されるよう「温泉資源の保護に関するガイドライン（地熱発電関係）」が、2012年3月に策定されている。

7.5.6 まとめ

NEDOでは、地熱資源の有効活用のための、環境配慮型高機能地熱発電システムに係る機器開発、現状未利用である低温域でのバイナリー発電システム開発、環境保全対策や環境アセスメント円滑化に資する技術開発等により、我が国の地熱発電の導入拡大を促進する。ポテンシャルの高い地域への地熱発電の導入拡大を目的とし、既存の発電設備よりも、小型化・高効率化の地熱発電システムの機器開発及び低温域の地熱資源を活用したバイナリー発電システムを開発すると共に、環境保全対策や環境アセスメント円滑化に資する取り組みを行う。

具体的には以下の取組を実施する。

- ・環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発
地熱発電システムの小型化に資する技術（冷却塔高さを10m以下に低減する技術、敷地面積を1割程度低減する技術、熱効率を20%以上に向上させる技術等）を確立する。
- ・低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発
未利用の温泉熱を利用した低温域のバイナリー発電について、熱効率7%以上に資するシステムを確立するとともに、スケール対策、腐食対策、二次媒体の高性能化に係る技術を確立する。
- ・発電所の環境保全対策技術開発
ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術等を確立する。

なお、日本では、過去10年間、地熱発電所の新規建設がなく、地熱発電開発に係る技術者の減少や海外への流出が想定されるため、今後の人材育成が期待される。

第7章 参考文献

- (1) カリーナサイクル方式を用いた地熱・温泉発電の原理, (2009, 地熱技術開発)
- (2) 地熱発電に関する研究会中間報告, (2009/6, 地熱発電に関する研究会)
- (3) 温泉D E ヒーポン! 温泉ホテル省エネモデル集, (2008, 経済産業省北海道経済産業局)
- (4) パラダイム転換としての地熱開発推進, (2009, 産業技術総合研究所)
- (5) 国際地熱協会 ((International Geothermal Association : IGA) ホームページ, <http://www.geothermal-energy.org/>)
- (6) 平成24年度調達価格及び調達期間に関する意見, (2012, 調達価格等算定委員会)
- (7) 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書, (2011, 環境省)
- (8) 地熱エネルギー協会 (Geothermal Energy Association : GEA) ホームページ, <http://www.geo-energy.org/>
- (9) Geothermal Roadmap, (2011, IEA)
- (10) 低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化に向けた提言, (2013, 環境省)
- (11) The Future of Geothermal Energy, (2006, Massachusetts Institute of Technology)
- (12) RE-thinking 2050, (2010, EREC)
- (13) Highlights of the 2009-2030 Philippine Energy Plan (フィリピンエネルギー省)
- (14) Clean Energy Progress Report, (2011, IEA)
- (15) 地熱発電事業に係る自然環境影響検討会資料, (2011/6/28, 環境省), 第1回会合資料2
- (16) エネルギー白書 2013, (2013, 資源エネルギー庁), <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2013/index.htm>
- (17) 資源・燃料政策に関する有識者との意見交換会 - 世界的な資源需要の高まりや災害等を踏まえた資源開発・確保 - 資料, (2011, 経済産業省) 第1回会合資料1-4
- (18) Annual US Geothermal Power Production and Development Report, (GEA, 2011)
- (19) Geothermal Electricity Market in Europe, (2011, EGEC)
- (20) Roadmap for a low carbon economy by 2050, (2010, EGEC)
- (21) EGEC Statistical Report 2010, (2010, EGEC)
- (22) Electricity Information, (2011, IEA)
- (23) インドネシアエネルギー鉱物資源省ホームページ, <http://www.esdm.go.id/>
- (24) Geothermal Power Generation in the World, 2005-2010 Update Report”, Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia (Bertani, R., 2010.)
- (25) 三菱重工プレスリリース, (2010/4/15, 三菱重工), 第4930号
- (26) 東芝ニュースリリース, (2011/12/13, 東芝), http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_12/pr_j1301.htm
- (27) 東芝ニュースリリース, (2011/4/5, 東芝), http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_04/pr_j0501.htm
- (28) 東芝ニュースリリース, (2011/11/7, 東芝), http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_11/pr_j0701.htm
- (29) 富士電機プレスリリース, (2010/5/17, 富士電機), <http://www.fujielectric.co.jp/about/news/10051702/index.html>
- (30) 富士電機プレスリリース, (2010/5/10, 富士電機), <http://www.fujielectric.co.jp/about/news/10051001/index.html>
- (31) JFE エンジニアリングプレスリリース, (2010/6/23, JFE エンジニアリング), http://www.jfe-eng.co.jp/release/news10/news_e10007.html
- (32) EERE ホームページ <http://www1.eere.energy.gov/recovery/>
- (33) Energy Technology Perspectives, (2010, IEA)
- (34) EERE ホームページ, <http://www1.eere.energy.gov/recovery/>
- (35) Annual US Geothermal Power Production and Development Report, (2012, GEA)
- (36) geox GmbH ホームページ, <http://www.geox-gmbh.de/default.htm>
- (37) Mary H. Dickson, Mario Fanelli, 地熱エネルギー入門, (2008, 日本地熱学会 IGA 専門部会)
- (38) 地熱発電に関する研究会資料 (2009, 地熱発電に関する研究会) 第4回会合資料
- (39) 調達価格等算定委員会資料, (2012, 資源エネルギー庁), http://www.meti.go.jp/committee/gizi_0000015.html
- (40) 国立・国定公園内における地熱開発の取扱いについて (環自国発第120327001号 各地方環境事務所長, 各都道府県知事宛 環境省自然環境局長通知), (2012/3/27, 環境省)