

## 海外での地熱利用の広がり

近藤 浩正 一般財団法人日本経済研究所 国際局 研究主幹  
 内山由紀子 一般財団法人日本経済研究所 国際局 研究員

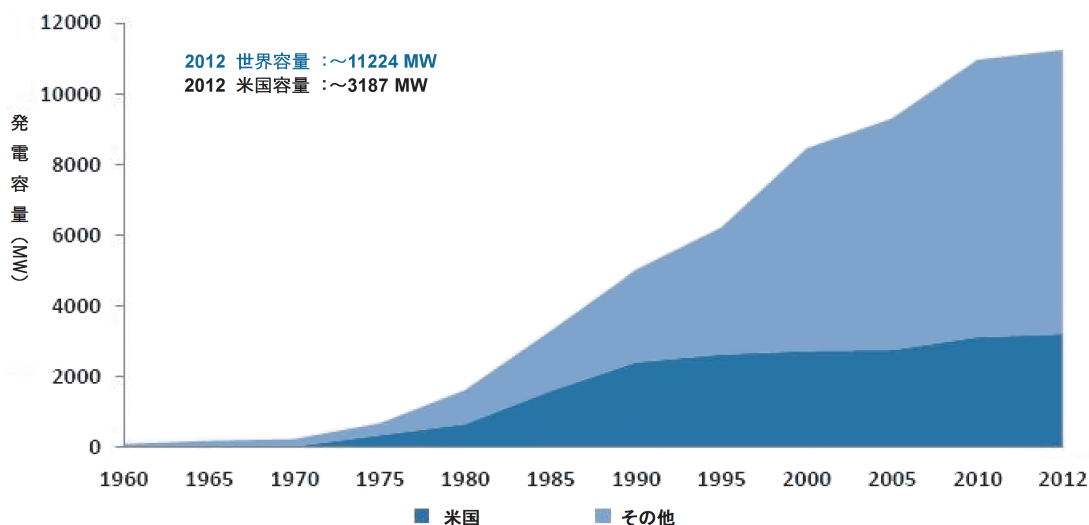
我が国が豊富に有する資源である地熱をどう利用すべきなのか、財団法人日本経済研究所では推進でも反対でもない中立の立場から6回に分けて考察している。第1回目は日本における地熱開発政策の変遷と地元自治体や温泉事業者の反応について概観し、発電能力が1万Kwを超える大規模地熱発電所が1996年11月以降新設されていない状況について述べた。第2回である今回は、拡大しつつある海外での地熱発電開発及び人口的に地熱貯留層を作り出す夢の技術 EGS 実用化への試みについて述べると同時に、日本が大きく立ち遅れる地熱の直接利用についても見てゆきたい。

### 1. 世界的な地熱発電の増加

世界全体の地熱発電能力は着実に、そして大きく増加している。図1は地熱開発が本格化した1960年代からの世界の地熱発電能力の総量だが、世界最大の地熱発電国である米国の伸びが1990年を境に微増に転じる一方、欧州やエマージングマーケット（アジア、アフリカや中南米など）での伸びが世界全体の発電能力を牽引していることが分かる。

1990年から2010年までの20年間における各国別の地熱発電能力は図2の通りであるが、設備拡張の時期が国毎に異なることが見て取れる。米国は1990年代後半には地熱発電能力を落としており、又、フィリピンやイタリアでも過去10年殆ど発電能力が増え

図1 世界の地熱発電能力の推移  
 Global Context of US Geothermal Installed Capacity 1960-2012



Source : GEA  
 (米国地熱エネルギー協会、国際市場概要より<sup>1)</sup>)

<sup>1</sup> Geothermal: International Market Overview Report, 2012年5月、GEA

ていない一方、インドネシアやアイスランドは開発を加速させつつある。背景には90年代後半に資源価格が低迷して代替電源のニーズが低下したことや、各国内における開発可能な蒸気溜まりの喪失等の理由が考えられる。2010年時点の地熱発電能力上位10カ国の1990年から5年毎の発電能力伸び率は、表1に示す。

グリーンエネルギー導入に熱心と言われる欧州では、伝統的に地熱発電を活用するイタリアで能力が微増するほか、既に高水準の発電能力を持つアイスランドも大幅な能力増強を図っている。2015年までに最も大きな拡張を計画するのがトルコであり、

又、伸び率では「脱原発」を宣言したドイツが大きい。ただし、発電用蒸気溜まりが多数存在するイタリア、アイスランド、トルコ以外の各国発電能力は低水準で、太陽光や風力など数あるクリーンエネルギーの中でも一部に過ぎない。又、欧州最大の地熱発電国イタリアでも総発電容量に占める割合は0.8%であり、「主要電源」には程遠い。日本のメディアで地熱大国として取り上げられるアイスランドでは地熱が総発電容量の2割以上を占めるが、これは人口が30万人の小国で総発電容量が小さい為である<sup>2</sup>。

アジア、アフリカや中南米などのエマージングマーケットでも、地熱開発が勢いを増している。経済成長に伴って電力需要が増していることが背景にあるが、これに加えて以下のような要因が指摘されている。

- 1) 今世紀に入ってからの石油価格の高騰による外貨繰り逼迫
- 2) 気候変動の影響による干ばつで水力発電量が不安定化
- 3) エマージング諸国による争奪戦で長期間的に資源価格が高騰する見込み

図2 各国別地熱発電能力の推移 (単位 MW)

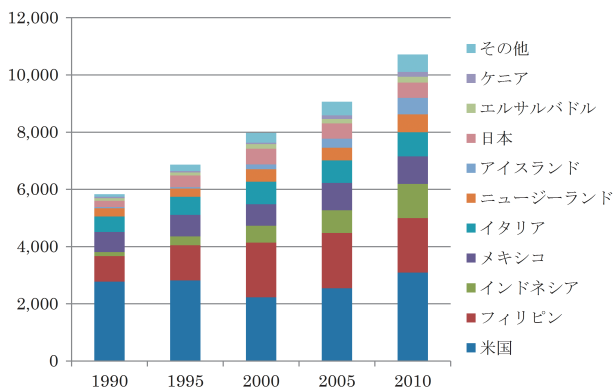
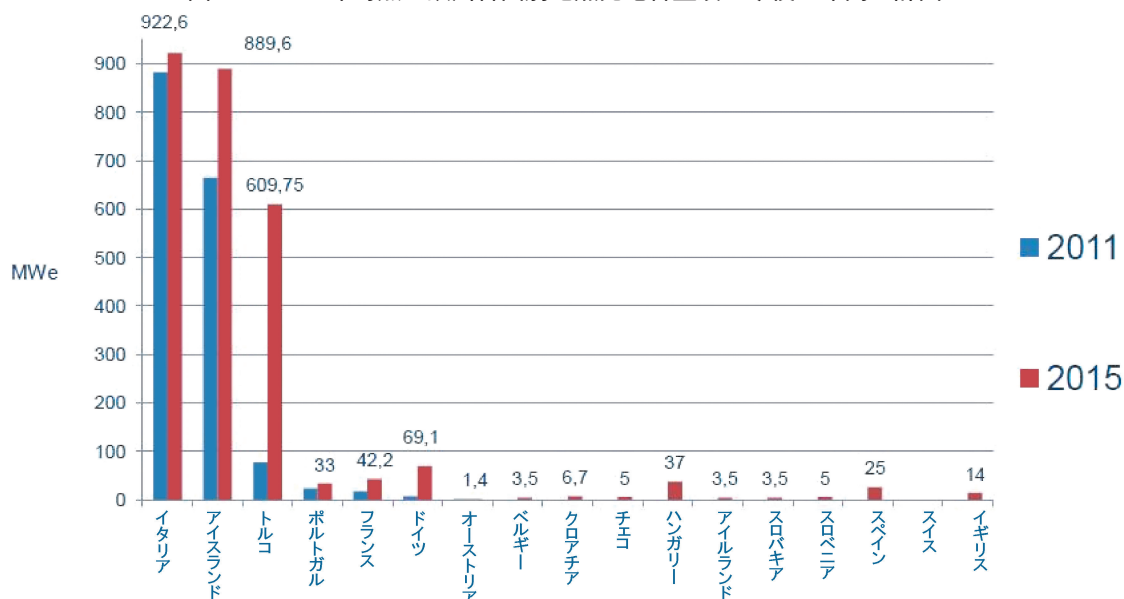


表1 地熱発電能力上位10カ国の発電能力増減 (1990年から5年毎)

2010年時点 発電能力順位	国名	'90-'95	'95-'00	'00-'05	'05-'10
1	米国	2%	-21%	14%	22%
2	フィリピン	38%	56%	1%	-1%
3	インドネシア	114%	90%	35%	50%
4	メキシコ	8%	0%	26%	1%
5	イタリア	16%	24%	1%	7%
6	ニュージーランド	1%	53%	0%	44%
7	アイスランド	12%	240%	89%	79%
8	日本	93%	32%	-2%	0%
9	エルサルバドル	11%	53%	-6%	35%
10	ケニア	0%	0%	182%	31%
	その他	144%	52%	38%	28%
	世界全体	18%	16%	14%	18%

<sup>2</sup> “地熱発電の現状と動向2010・2011年”、2012年3月、(社)火力原子力発電技術協会

図3 2011年時点の欧州各国別地熱発電容量及び今後5年間の計画



(欧州地熱エネルギー協議会資料より<sup>3)</sup>)

興味深いのは化石燃料を自国内で多く算出し、エネルギー資源を心配する必要性の少ないインドネシアが過去にもまして地熱開発に力を入れ始めていることである。インドネシアの地熱開発の背景と現状については、後述する。

## 2. 海外での地熱発電開発反対運動

日本の温泉事業者ほど組織化されていないものの、新たな地熱開発に際しては海外でも反対の声が上がる可能性がある。主な反対理由は森林破壊で米国のカリフォルニア州<sup>4</sup>やハワイ州<sup>5</sup>、インドネシアのバリ島などでの事例<sup>6</sup>が報道されている。

地熱直接利用のセクションでも述べるが、温泉を使った温浴が世界で広がる中、温泉事業者から懸念の声が上がることもある。温泉を利用したプールを中心としたリゾートのあるコロラド州プリンストン

山温泉付近の地熱開発では、景観と同時に温泉への影響を懸念する声によって3度にわたって許可が見送られている。連邦土地管理局は地熱開発許可の条件として「既存の水及び地熱資源の量、室、温度を著しく減少させないこと」を義務付け、又、ネバダやカリフォルニアの僻地にあるような大規模地熱発電所は建設されない（コロラド州の計画は日本国内に近い2万～5万kWとのこと）と説明しているが、静かな環境を重視する住民やリゾート事業者の懸念は容易には払拭出来ないようで<sup>7</sup>、2010年末に反対企業の1社が凍結目的で開発権を取得している<sup>8</sup>。

森林破壊にしても、温泉にしても、環境アセスメントや関係者との協議が必要なのは、洋の東西を問わないようである。

<sup>3</sup> <http://egec.info/wp-content/uploads/2011/12/Geo-Elec-Market-Report-2011-.pdf>

<sup>4</sup> “二つの地熱発電提案に反対”、1999年9月13日、サンフランシスコ・クロニクル

<sup>5</sup> “ミリアニトラスクからの手紙：地熱発電反対について”、2012年4月17日、ビッグアイランド・クロニクル

<sup>6</sup> “バリ当局が地熱発電所を再び拒否”、2011年12月28日、ジャカルタ・ポスト

<sup>7</sup> “温泉地域がコロラドの熱エネルギー開発と衝突”、2010年2月4日、ニューヨークタイムス

<sup>8</sup> “地熱開発論争終息”、2010年12月22日、プエブロ・チーフテン（南部コロラド地方紙）

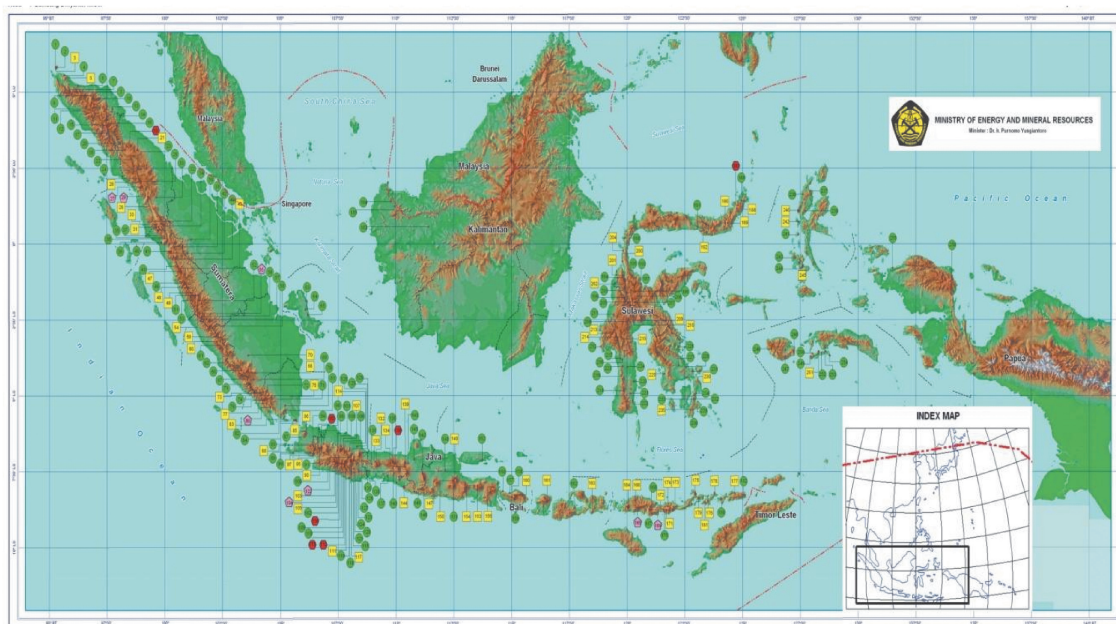
### 3. 化石燃料大国でありながら地熱発電にも注力し始めたインドネシア

インドネシアは化石燃料由来のエネルギー資源に恵まれている一方、地熱の資源量が豊富で世界で最も多い約29,038MW<sup>9</sup>の資源量があることでも知られている。

この資源を生かすべく、インドネシア政府は2003年に地熱法、さらに2010年に地熱発電所の建設も重視した第2次電源開発促進プログラム（Second Crash Program）を策定し、2014年末を目途に約4,900MW強<sup>10</sup>の地熱発電所を新たに開発することを目指している。他のエネルギー資源も豊富なインドネシアで政府が地熱に注力するには二酸化炭素排出量削減の国際的コミットメントと財政負担となっている燃料補助金削減という2つの理由がある。

まず、インドネシアは温暖化対策のため、大統領がG20ピッツバーグ・サミットとCOP15で二酸化炭素排出量を2020年までに26%削減することを表明している。これに伴い、インドネシア政府は再生可能エネルギーを全エネルギー使用量の25%まで引き上げることを目標としており、地熱は其中で重要な役割を果たすことが期待されている。さらに、財政的な理由としては、国内の化石燃料は購入時に補助金（「燃料補助金」）を供与されており、政府にとって大きな負担になっている。（2012年は燃料補助金の予算として137兆4000億ルピア（約1兆1205億円）が計上されていたが、上半期で既にその64.7%を支出している）地熱は自国内で生産できる資源でありつつ燃料費が不要であるため、政府は燃料補助金を削減するためにも積極的に地熱発電を促進していきたいと考えている。また、大規模火力発

図4 インドネシアの地熱資源分布



（出所：エネルギー・鉱物資源省、2008年）

黄緑：初期調査、黄色：詳細調査、ピンク：開発待ち、赤：設置済み

<sup>9</sup> Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia, インドネシアエネルギー・鉱物資源省

<sup>10</sup> 第2次電源開発促進プログラムの改正令（MEMR 令2012年1号）による。



電所を導入できない多くの東部の島嶼地域では、電力をディーゼル発電に頼っているが、ディーゼル発電は環境への負荷も大きい上コストが高いため、これを地熱で代替したいとの意向もある。

さらに、インドネシア政府はIPP事業者の参入を促進するために、様々な入札改善策を講じている。例えば、調査井掘削を伴う初期調査は、企業にとって不確実性も高い上、費用面での負担が大きい。政府は企業のこの費用負担を軽減するため、初期調査の掘削費用を政府が一時的に負担する地熱ファンドの費用を予算計上している。さらには Feed In Tariff の導入も開始されたと今年7月に報じられている<sup>11</sup>。

インドネシア政府の積極的な支援を受けて、日本企業も含め事業者による地熱発電案件への参画が盛り上がりを見せている。今年に入り2012年3月には、住友商事が地場のデベロッパ（PT. Supreme Energy）および GDF Suez とコンソーシアムを組んで、地場の国営電力会社 PLN と30年間の長期売電契約を締結して話題になった。これは、スマトラ島の2鉱区で地熱発電所を建設（2鉱区合計440MW）、PLN への電力販売を行うものであるが、これまで日本企業が関与してきた案件に比べ、最も初期の開発段階（蒸気生産井の掘削段階）から参画する点において新規性がある。さらに、2011年12月には丸紅と東芝がジャワ島のパトハ地熱発電所（55MW）に設備一式納入および建設工事を一括して請け負う契約を受注した。この東芝の他、富士電

機および三菱重工の3社が地熱発電機器メーカーとして世界の70%のシェア<sup>12</sup>を占めると言われているが、インドネシアにおいて富士電機は2012年7月調べで9台の納入実績<sup>13</sup>（時点が異なるが、総出力ベースとしては641.5MW<sup>14</sup>）、三菱重工の受注実績は総出力ベース386.3MW（2010年12月時点<sup>15</sup>）である。インドネシア全体の地熱発電の設備容量が1,189MW<sup>16</sup>であるから、インドネシア市場における日本企業の存在の大きさがみてとれる。

しかしながら、前述の通りインドネシアでも地熱開発に対して反対の声がある。例えば、バリ島でも、安定的な電力供給のために165MWの地熱発電所の建設が予定されているが、建設予定地が森林保護区にあり、また建設予定地の山が宗教上、神聖な山とされていることから、環境、宗教、社会的な観点から反対の声が挙がっている<sup>17</sup>。さらに、地熱発電所は熱源のある場所に建設することになるため、その建設予定地が森林保護区の中に位置していることもある。また、地熱の熱源は必ずしも電力の需要地に近接しておらず、それに伴い長距離の送電線を建設することになると、その区間が森林保護地域に重なることも多く、環境省は発電所・送電線の建設許可を与える判断に慎重である。

このような反対の声や慎重論もあるものの、インドネシア政府は地熱開発の促進に積極的な姿勢であることに変わりはなく、また資源国とはいえ、原油の輸出国から輸入国に転じている状況のなかで地熱資源の果たす役割は大きく、また日本企業にとっても

<sup>11</sup> ジャカルタ・ポスト 2012年7月18日。但し、現行の価格による入札制度との整理は不明。

<sup>12</sup> [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy\\_environment/energy\\_system/pdf/002\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/energy_system/pdf/002_03_00.pdf)

<sup>13</sup> 富士電機 アニュアルレポート2012 <http://www.fujielectric.co.jp/about/csr/other/box/doc/2012/1.pdf>

<sup>14</sup> [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy\\_environment/energy\\_system/pdf/002\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/energy_system/pdf/002_03_00.pdf)

<sup>15</sup> <http://www.mhi.co.jp/discover/graph/feature/no166.html>

<sup>16</sup> 2011年。Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2011, インドネシアエネルギー鉱物資源省

<sup>17</sup> "INDONESIAN GOVERNMENT URGES BALI TO RETHINK OPPOSITION TO GEOTHERMAL PLANS" Think Geoenergy 2012年9月4日 (<http://thinkgeoenergy.com/archives/12228>)

ビジネスチャンスのある分野であると言えるだろう。

#### 4. 海外で開発が進むが難航する EGS 開発

前回は紹介したが、EGSとは Enhanced（又は Engineered）Geothermal System の略で、地下深くにある高温の岩に人工的に空間を作り、水を流し込んで貯留層を形成する技術である。既存の地熱発電は自然に形成される蒸気溜まりの場所と大きさに立地と発電容量が既定されるが、EGSはこれを人工的に作り出すため、今まで地熱発電所が建設出来なかった場所に、より発電能力の大きな設備を建設することが出来る。

EGSは「エネルギー問題解決の切り札となる夢の技術」と世界各国で期待されており、2006年にマサチューセッツ工科大学を中心にまとめられた報告書「地熱エネルギーの未来」も「将来の米国における電力の重要な担い手になり得る」とEGS技術への投資を推奨している。ドイツやフランスなどの欧州でも研究がすすめられており、我が国でも「国内の有望地熱地帯29カ所で2900万kWの発電可能性がある」として山形県肘折で1～2kmの井戸を掘った注水・蒸気抽出実験を行っている。

但し、5000メートルという大深度のボーリングや、高圧の水を送り込むことのコスト、地中での水漏れなど<sup>18</sup>実用化に向けた技術的なハードルは高く、米国や豪州で行われるベンチャー企業による開発も計画から大幅に遅延している。オバマ政権のグリーンニューディールの流れを受け、2008年にグーグルやコースラベンチャーズなどの有力ベンチャーキャピタルからの出資を受け、さらに米国エネルギー省の支援の下で実証実験プロジェクト（カリ

フォルニア州ゲイサーズ）を開始したアルタ・ロック・エナジー社は、帽岩（キャップ・ロック）を貫通することに失敗して2009年に実験場を放棄した。同社はオレゴン州ニューベリー火山近くに場所を移して実証実験プロジェクトを継続しており、今年4月に開発許可を得たと報じられている<sup>19</sup>。

アルタ・ロック・エナジー社より5年早く、より大規模な開発を開始した豪州のジオダイナミクス社も、当初計画から大幅な遅延を余儀なくされている。同社は元々地熱発電が存在しない豪州においてEGS大規模発電を実現することを目的に、豪州のガス・電力会社やインド有数の財閥タタ・グループ、豪州政府の支援を得て設立され、株式を上場した上で2003年に開発に着手した。当初のビジネスプランでは2004年に実証実験、2007年に27万5千kWの商業運転開始を目指していたが、現在に至るまで実証実験すら成功していない。2009年の制御不能の蒸気噴出が発生した後に中断していた試掘は今年3月に再開されたが、2007年末に2豪ドルを超えていた株価は現在11セントと低迷している。

地中深くに人口的な亀裂を作り出す為には水圧による岩体破碎が必要であるが、これに伴って発生する地震で開発が中止された事例もスイスのバーゼルで報告されている。EGSの開発過程で発生する地震は、理論的には「人間がわずかに感じるほどに制御可能」とされるが、スイスのバーゼルで進められていたEGS開発では2006年12月にマグニチュード3.4の地震が発生し、「住民に恐怖を与え、建築物にひびが入る等の被害があった」と報じられている。同様の事例は、オーストリア、ドイツ、フランでも報告されているとのことである<sup>20</sup>。

一部のメディアで喧伝されるような「近年中の実

<sup>18</sup> “地熱エネルギー—地球からの贈りもの—”、2012年6月15日、江原幸雄、p.141

<sup>19</sup> <http://gigaom.com/cleantech/google-backed-altarock-moves-forward-with-geothermal-drilling-project/>

<sup>20</sup> “熱い岩と高い希望”、The Economist、2010年9月2日

現可能性」に疑問は残るが、上記の2社に加えて欧州でも実証実験は継続している。地震で中止されたスイス・バーゼルと同じライン川上流火山地域の独仏国境付近では、フランスのゾウルツ・ス・フォレで欧州全体のEGS研究プラント(2,100kW)が、ドイツのランダウでドイツ政府の研究プラント(3,000kW)が操業中で、小規模地震の報告はあるものの発電を続けている。これらの研究は、「数十年スパンで考えれば化石燃料の需給の逼迫や地球温暖化などでEGSが求められる時代が来る」との考え方に基づくものであり、今後もEGS開発の動向に注目してゆきたい。

## 5. 海外で進む地熱の直接利用

日本を除く世界で拡大しているのは地熱発電のみでなく、空調目的を中心とした地熱の直接利用も大きな伸びを見せている。従来からある暖房や農業用利用も微増しているものの、最大の伸びは地中熱

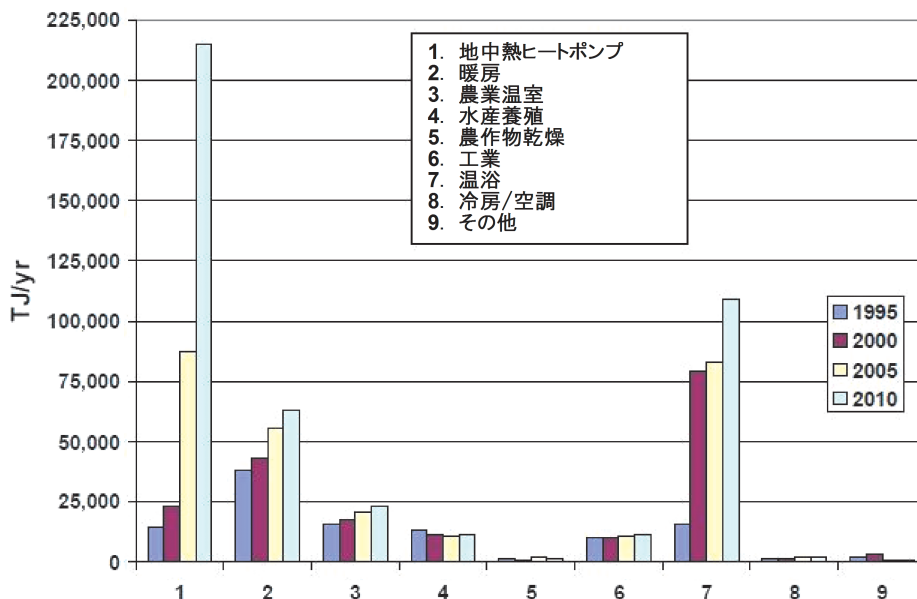
ヒートポンプであり、これに温浴が続いている。

地中熱ヒートポンプとは、年間を通して一定である地中の温度を利用して冷房及び暖房を行うシステムであり、欧米や中国を中心に過去10年で利用が急拡大している。

次に国別の地熱直接利用状況を見てみると、設備能力の上位10カ国が地熱発電能力のそれと大きく顔ぶれが異なり、中国、スウェーデン、ノルウェー、ドイツ、オランダ、フランスが顔を連ねる。地熱発電は発電用蒸気溜まりが形成される火山地帯を持つ国でしか開発できないが、地上と地中の温度差を利用するヒートポンプを中心とした地熱の直接利用は自然環境の制約が緩く、欧米や中国など資本力のある国が設備を増強することが出来る為である。

地熱直接利用容量の国際比較では、日本は地熱発電より2つ順位を上げた第6位となっている。ただ、他の先進国の用途がヒートポンプや暖房など空調利用で9割以上を占める一方、日本での冷暖房利

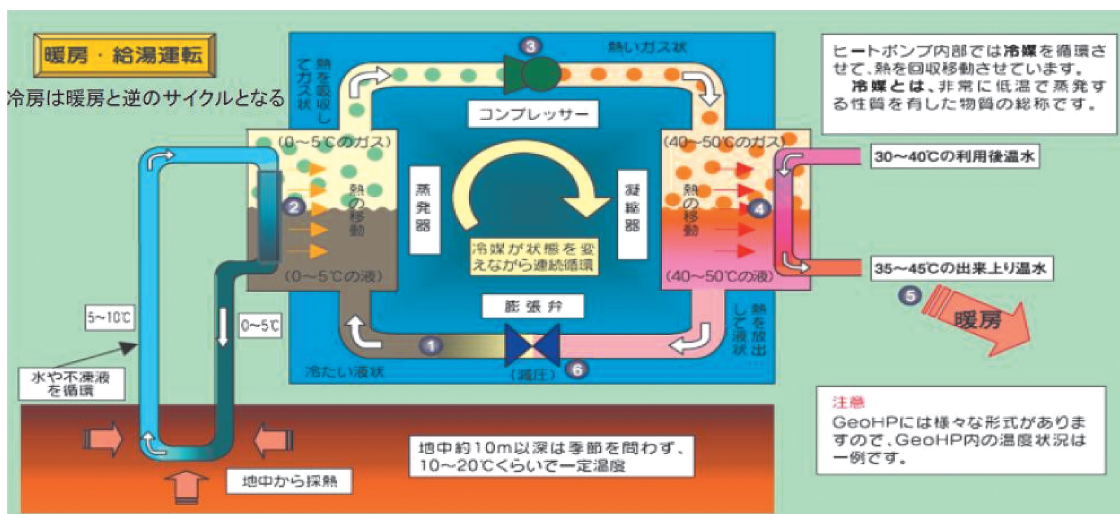
図5 用途別地熱利用量の推移



(「地熱エネルギーの直接利用」ジョン・ランド氏、2010年8月より<sup>21)</sup>)

<sup>21</sup> <http://geotermia.org.mx/geotermia/pdf/WorldUpdateDirect2010-Lund.pdf>

図6 地中熱ヒートポンプの仕組み

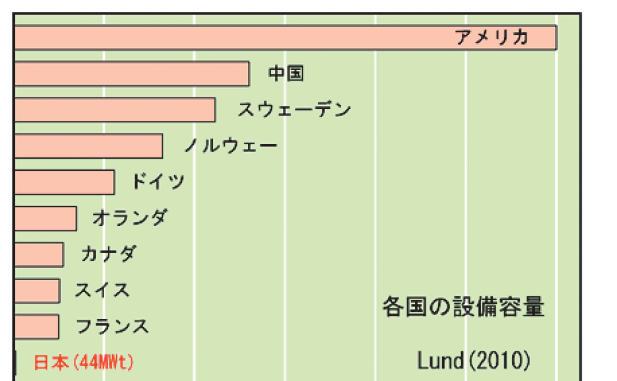


(経済産業省ウェブサイトより<sup>22)</sup>)

表2 地熱直接利用上位10カ国と用途別内訳

設備容量計 (MWt)		設備容量内訳			
		ヒートポンプ	暖房	温浴	その他
米国	12,612	95%	2%	1%	2% 養魚、温室
中国	8,898	59%	15%	21%	6% 農工業
スウェーデン	4,460	95%	3%	0%	2%
ノルウェー	3,300	100%	0%	0%	0%
ドイツ	2,485	90%	8%	2%	0%
日本	2,100	1%	4%	86%	9% 融雪、温室
トルコ	2,084	2%	49%	26%	23% 温室
アイスランド	1,826	0%	76%	4%	20% 融雪
オランダ	1,410	99%	0%	0%	1% 温室
フランス	1,345	74%	22%	1%	2% 養魚、温室

図7 地中熱ヒートポンプの国別設備容量



(地熱利用促進協会ウェブサイトより<sup>23)</sup>)

用は5%で温浴が86%を占めるという特異な利用形態になっている。これは日本人がいかに温泉好きかを物語るものである一方、省エネや電力消費ピークカットに結び付く地熱冷暖房利用の開発余地が大きいことを示唆する。特に、過去数年で飛躍的に拡大する地中熱ヒートポンプの日本での利用は図7の通り非常に低レベルに留まっており、地層が複雑なために熱交換井の掘削コストが高いことが原因として指摘されている。

<sup>22</sup> <http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90309c06j.pdf>

<sup>23</sup> <http://www.geohpaj.org/introduction/disadv.htm>



---

## 6. まとめ

欧州や発展途上国を中心に地熱発電の開発は拡大しており、資源価格の高騰に対する対応策としてこの傾向は継続するものと考えられる。自然環境保護の観点からの反対はあるものの、日本のように温泉が活用されていない地域もあるため、開発余地は大きいと思われる。

夢の技術である EGS については、米国、欧州、豪州で研究・開発が続いている。但し、実用化の目途が経つまでに時間は掛ると考えられ、当面のエネルギー問題を解決するための電源の一つとなり得るかは未知数である。

地熱の直接利用は、省エネルギーを背景にした地中熱ヒートポンプを中心に、我が国で拡大する余地が十分にあると思われる。