

火山国・日本で期待される 地熱エネルギー利用

我が国は世界有数の火山国であり、豊富な地熱資源に恵まれている。しかしその多くはいまだ地下に眠っており、いっそうの有効利用が期待されている。原油価格の高騰により、石油代替エネルギーやクリーンエネルギーの開発に期待が高まるなか、クリーンな純国産エネルギーである地熱発電の可能性について探してみたい。



日本の地熱発電所で最大規模を誇る八丁原発所（大分県）
写真提供：九州電力（株）

地熱資源に恵まれた国

地球の中心部にある核は3000～5000℃にも達し、膨大な熱エネルギーを抱えている。しかしその熱が最終的に地表に到達する熱は小さく、そのため非常に深くまで掘削しなければ高温を得ることができない。通常の地温勾配は3℃/100m程度であるから、200℃の熱を得るためには6.6km以上掘削しなければならない。

しかし地中の比較的浅い部分で熱エネルギーを得られる地域がある。火山地域である。火山地域の地温勾配は10℃/100mを超えることも珍しくなく、2km程度の深度で200℃に達する。このような地域の地下深部には特別な熱源、すなわちマグマが存在していると考えられている。

マグマは地球のプレート運動に関連して生成されと考えられている。日本列島は、太平洋やフィリピン海の海洋プレートが大陸プレートに潜り込む位置に存在しており、潜り込みに関連してマグマが生成され、それが地下数km～数10km程度の場所まで上昇して滞留し、マグマ溜まりを形成する。

そのため地震や火山災害が多く発生するその一方で、地熱資源に恵まれた地域といえる。資源エネルギー庁の資料（1996年）によれば国内地熱資源賦存量・開発可能量は2470MWe*1と算

出されている。これは日本の総発電設備容量の0.9%にすぎないが、開発可能量として算出されたものであるため、実際の資源賦存量はこれをはるかに上回ると推測されている。しかし火山国・日本における地熱のエネルギー利用はごく一部に限られているのが現状である。我が国の地熱発電出力は534MWeで、国内地熱資源賦存量・開発可能量の22%にとどまっている。エネルギー輸入依存度が高い我が国において、地下にはまだまだ手つかずの純国産エネルギーが眠っているのである。

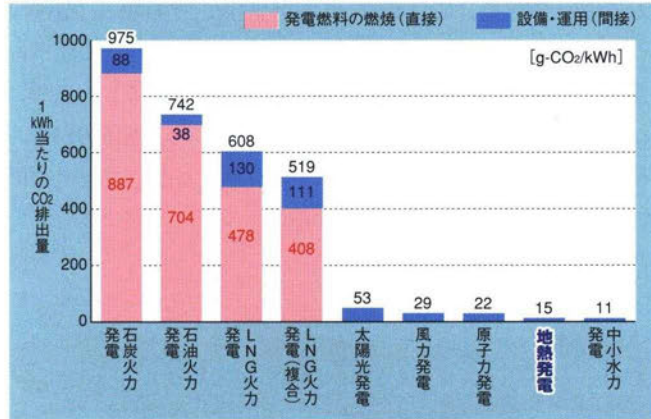
クリーンで、安定したエネルギーをつくる地熱発電

地熱発電は、CO₂をほとんど排出しないクリーンなエネルギーである。火力発電は化石燃料を燃やして蒸気をつくり、タービンを回して発電するが、地熱発電は地下からの蒸気でタービンを回すため、燃料を必要としない。しかも太陽光発電や風力発電などと異なり、天候や気候に左右されず、安定的にエネルギーを確保できるのが特徴で、高い設備稼働率を誇っている。また燃料を使用しないので燃料価格に左右されず、備蓄の必要もない。長期的にみればランニングコストが抑えられるという利点もある。

我が国の地熱発電は、火山地域の地下数100m～3km程度

*1: megawatt electrical, 電気出力メガワット

■発電別ライフサイクルCO₂排出量



電力中央研究所資料(平成13年)より作成

の範囲に存在する200～350℃の熱水、蒸気の溜まり(地熱貯留層)を利用している。地熱貯留層は、火山地域の地下数km～数10kmに発生したマグマ溜まり(1000℃程度)が周囲の岩石を熱し、この熱せられた岩石中に地表から雨水や地下水が到達することで形成されると考えられている。

地熱発電は、この地熱貯留層から生産井と呼ばれる井戸で蒸気を取り出し、その蒸気の手でタービンを回し発電する。蒸気タービンで使用された蒸気は復水器で冷却・凝縮され水となり、蒸気を冷す冷却水として再利用される。一部は還元井と呼ばれる井戸を通じて地中に戻される場合もある。

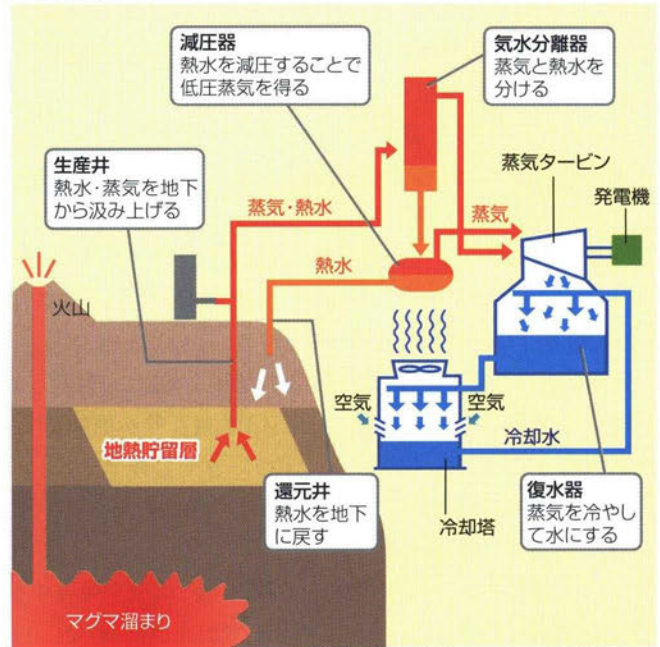
発電方式は幾つかあるが主なもの、生産井から蒸気だけが得られる場所では、これを蒸気タービンに導き発電する「蒸気発電」が行われる。また地下に蒸気と熱水の混合流体が存在する場所では、地下の流体が生産井を上昇することによって減圧沸騰(フラッシュ)し、地上で蒸気と熱水を得る「フラッシュ発電」が行われる。この方式では蒸気と熱水の2相流体をセパレータ(気水分離器)により分離し、蒸気だけをタービンに送り発電に使用する。我が国では分離された熱水は還元井により地下に戻されるが、依然として高温、高圧な状態のため、これをさらに減圧沸騰器に通すことで蒸気を得る「ダブルフラッシュ発電」方式もある。

また、地下に高温の岩体が存在するが、熱水や蒸気の溜まりが乏しい場合、高温の岩体に人工的に水を注入し蒸気を回収する「高温岩体発電」方式もある。この方式は豪州を中心に実証試験が行われるなど、開発が進められている。

地下に潜む熱を求めて、重要となる地熱探査

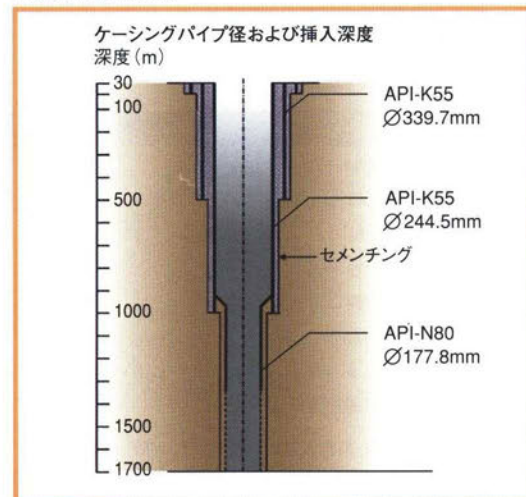
地熱の開発では、まずは探査が重要となる。地上から地下の温度や地熱流体の流れを直接知ることは難しい。地熱発電に必要な地質構造、温度、水、この3要素を地上から総合的に

■地熱発電のしくみ



経済産業省 資源エネルギー庁資料より作成

■坑井の概略(例)



写真提供: (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構

明らかにすることが求められる。探査方法としては、人工衛星あるいは航空機による広域的な調査の他に、地質調査や重力探査、電磁探査、付近の温泉や湧水等の化学分析などがある。主に行われる重力探査は、調査地域の重力値を測定し地下の密度分布を明らかにするもので、密度が急激に変化しているところは、大きな断層があることが推定でき、断層の近くには熱水を蓄える断層構造がある可能性がある。また電磁探査は、地下の比抵抗分布を明らかにするもので、地下に高温熱水が存在する場合、その影響を受け低比抵抗を示すことが多い。

地上における種々の探査の後、その結果を実際に確認し、また以後の調査の指針とするために小口径調査井が掘削され、地下の温度や圧力、水の流れなどのデータや岩体サンプルが採取される。そして地熱貯留層の存在の可能性が高まってくると、大口径調査井が掘削される。

大口径調査井は、ある深度まで掘削した後、坑壁を保護するケーシングパイプを挿入しセメントで固め、これを数回繰り返し掘り進める。掘削は、泥水を循環させながら行われるが、ある地点で泥水が地上に戻ってこなくなることがある。地熱貯留層

が存在する場合にこのような現象が見られ、その場合、掘削後、蒸気と熱水が噴出してくる。実際に噴出するかどうかは、事前調査である程度は予測できるが、やはり掘ってみないと正確にはわからないと言う。噴出試験後は、地下の熱と流体の流れを概念的にモデリングし、またどの程度の熱量がどの程度の期間にわたって採取可能かを評価するシミュレーションを行い、開発可能かが判断される。

過酷な環境で使用される地熱用材料

掘削や坑井、また発電設備など、地熱発電に使用される材料は高温、高圧の環境で、場所によっては腐食性物質を含む流体にさらされるため、部位ごとに十分な強度と耐食性を持つことが要求される。地熱発電には主に鉄鋼材料が使用されており、経済的な理由等から炭素鋼が多く使用されている。下表に部位ごとの材料例を示す。

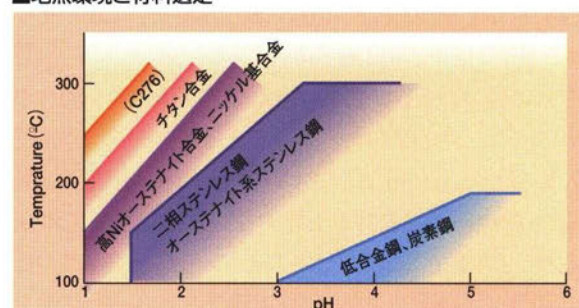
地熱流体の化学組成は、生産場所によって様々である。腐

■地熱用材料の例

設 備	材 料
掘削具	ドリルパイプ 低合金鋼 (G105, S135)
	ドリルカラー Cr-Mo鋼、Mn鋼、K-モネル
	スタビライザー=ボディ Cr-Mo鋼
	スタビライザー=ブレード 超硬合金 (WC)
	ツールジョイント Cr-Mo鋼
	ビットボディ Ni-Cr-Mo鋼
	ビット刃先 超硬合金 (WC)、工業用ダイヤモンド
坑井	防噴装置 高温高圧用鋼、Cr-Mo鋼、ステンレス鋼
	ケーシング 炭素鋼・低合金鋼 (J55, L80など)、ステンレス鋼 (13Cr-)、二相ステンレス鋼 (22Cr-, 25Cr-)
	(充てん材) セメント
	坑口装置 高温高圧用鋼、Cr-Mo鋼、ステンレス鋼
流送管	セパレータ 炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、ステンスクラッド鋼
	2相流管 炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、二相ステンレス鋼 (22Cr-, 25Cr-)
	蒸気管 炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼
	熱水管 炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、FRP
	ワイヤーロープ 高張力鋼、オーステナイト系ステンレス鋼
検層	アーマードケーブル オーステナイト系ステンレス鋼
	コイルチューブ 炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、高Niオーステナイト (In 825)
	測定器外装部 オーステナイト系ステンレス鋼
発電	タービンロータ Cr-Mo鋼、Cr-Mo-V鋼、Ni-Cr-Mo-V鋼
	タービンブレード 12Cr鋼、13Cr-Mo鋼 (ステライト盛り)
	ノズル 12Cr鋼、13Cr-Mo鋼
	復水器 炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼
	冷却塔 炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、コンクリート、木材、FRP

(独)産業技術総合研究所 基礎素材研究部門『調査研究地熱材料損傷の事例解析』2003.3より

■地熱環境と材料選定



(独)産業技術総合研究所 基礎素材研究部門『調査研究地熱材料損傷の事例解析』2003.3より



2相流パイプライン



セパレータ



生産井坑口



フラッシュタンク

写真提供:JFEエンジニアリング(株)

食性物質としては H^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 、 H_2S などがあり、これらにより全面腐食や局部腐食、エロージョン・コロージョンなど、様々な形態の腐食がおこる場合がある。

地下の高温流体を発電タービンまで導くのは、ケーシングパイプや流送管などであるが、流体が弱酸性($pH > 4.5$)からアルカリ性の熱水が主体の場合や、酸性ガスを含まない蒸気の場合などは、通常、炭素鋼、低合金鋼が使用される。一方、酸性熱水($pH < 4.5$)や酸性ガスを含む蒸気の場合はステンレス鋼等が使用される。稀に地熱流体が $pH 4$ 以下または $pH 3$ 以下の場合などは、FRP(繊維強化プラスチック)が流送管に使用される場合もある。

また、腐食性物質を含んだ流体がある流速をもって流れる場合、エロージョン・コロージョンが発生することがあり、問題となっている。対策として、流送管などはステンレス鋼(SUS316L、317L)等を部分的に使用するなどしている。

蒸気、熱水に含まれる成分によっては、配管内に多量のスケール(配管内面への流体からの析出物)が付着することがある。還元井などにシリカ(SiO_2)スケールや、生産井などにカルサイト($CaCO_3$)スケールが付着したり、あるいは流体が海水起源の場合には硫化物が付着するところもある。対策として洗浄による除去や坑内へのスケールインヒビターの注入、還元熱水の pH 調整などが行われている。

どのような材料を選定するかは、腐食性物質に十分配慮して選ばれるが、部位によって、塩濃度や pH などの流体の性状は異なる。そのため実環境に合わせた選定が肝要となる。例えばセパレータなどは、強度部材には腐食しを考慮した炭素鋼を使用し、強度部材を保護する内張りや内蔵物にはステンレス鋼を使用している。また、特に腐食が進行しやすい大気に放出する蒸気サイレンサやフラッシュタンク設備などは補修、交換が比較的容易なため炭素鋼を選定するなどしている。

期待があつまる地熱バイナリー発電

我が国の地熱発電は1966年に東北地方、1967年に九州地方で始まってから着実に増加し、現在では自家用を含めると国内地熱発電設備は18か所、総出力は約534MWeとなっている。しかし最近の10年間をみると出力量は微増となっている。

出力量が横ばいとなっている要因の一つに、開発候補となりうる火山地域が、国立公園や国定公園に指定されている場合が多いことが挙げられる。このような地域では、新しい開発や調査が認められておらず、そのため規制区域外の地熱資源に集中した調査開発が行われているのが現状である。さらには周囲の温泉業者の理解を得ることが難しかったり、掘削など初期投資に大き

本格稼働を始めた地熱バイナリー発電施設(大分県八丁原発電所内)。従来の地熱発電方式では利用できなかった温度域での発電が可能としている。
写真提供:九州電力(株)



なコストを要することなども開発の妨げとなっている。そのため従来は高温の蒸気だけを発電に利用してきたが、最近では中高温の熱源($150 \sim 200^\circ C$)を利用した、地熱バイナリー発電などへの取り組みが進められている。

バイナリー発電とは、沸点の低い作動媒体を熱交換器で加熱、蒸発させ、その媒体蒸気により発電させる方式で、中高温域での発電が可能となる。2006年に本格稼働を始めた大分県八丁原発電所内の地熱バイナリー発電は、長期使用で噴出勢力(温度と圧力)が減衰した蒸気井を熱源として利用している。作動媒体は沸点の低い($36^\circ C$)ペンタン(C_5H_{12})を使用し、地下から取り出した蒸気と熱水でペンタンを加熱し、気化したペンタンでタービンを回して発電する。ペンタンを利用した地熱バイナリー発電は、海外には実績があるが国内では初となる。この技術の確立によって、従来の地熱発電方式では利用できなかった温度域での発電が可能となることから、地熱発電の拡大につながるものと期待されている。

世界で進む地熱エネルギー利用

国内の開発の勢いが停滞する一方で、海外では地熱発電の開発が積極的に進められている。米国、メキシコ、イタリア、アイスランド、ニュージーランド、インドネシア、フィリピンなど、世界各国で地熱発電が行われている。なかでも米国は、世界で最も多くの地熱エネルギーを生産し、2005年の発電電力量は17,840GWh*2(国のエネルギー消費量の0.5%)に達している。

*2:出典: "World Geothermal Generation 2001-2005: State of the Art", Ruggero Bertani, Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005

地中熱利用の促進をめざした取り組み

地熱エネルギーは発電だけでなく、熱水利用や地中熱利用などの直接利用が可能である。発電と直接利用は分けて考えられる事も多いが、世界を見れば、地熱発電の先進国では直接利用も活発な取り組みが行なわれている。我が国では温泉をはじめとした熱水利用は行なわれているが、地中熱利用は初期投資が大きいこと等から他国に比べ普及が遅れている。

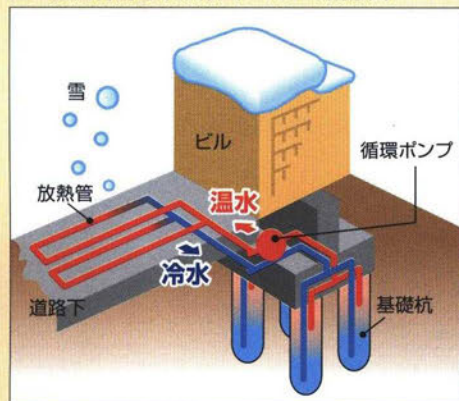
福井県では基礎杭を兼用し低コスト化を図った地中熱融雪システムが開発され、注目を集めている。このシステムは福井県雪対策・建設技術研究所、福井大学工学部を中心とした産官学の研究チームにより開発された。

北陸地域などでは、従来から地下水を利用した融雪が行なわれていたが、過剰揚水による地盤沈下が懸念され地中熱だけを利用した融雪が求められていた。また一般的に地中熱を利用した融雪は、

装置の設置費が高く普及の妨げとなっていた。このようなことから、同研究チームは建築物に使用される基礎杭を熱交換に兼用利用することを考えた。

このシステムは、基礎杭内空部に水や不凍液を溜めて地中熱で暖め、暖まった水を道路下に巡らすことにより融雪を行なう。道路下で放熱した水は再び杭底部に戻され、杭上部に上昇するうちに地中熱を吸収し再び暖まる。ヒートポンプを使用しないため大幅な低コスト化を実現し、また水の循環で融雪するため、地下水も不要である。既に県内の図書館や音楽堂などに採用され、利用者の高い評価を得ている。最近ではさらに、利用する熱交換杭の間隔を狭くすると、夏の蓄熱が拡散されずに冬まで高温保持できることが明らかとなり、この季節間蓄熱をシステムに取り入れることで、融雪能力向上を図っている。

■基礎杭利用地中熱融雪システム概念図



県立音楽堂の遊歩道の融雪



最近では杭の間隔を狭めることで、季節間蓄熱を実現している。写真は鋼床版橋と呼ばれる橋の放熱管設置の状況。この場所の地下では橋梁基礎杭の利用が難しかったため、熱交換専用杭を密に配置している

写真提供:福井県雪対策・建設技術研究所

米国の地熱発電は、カリフォルニア、ハワイ、ネバダ、ユタの4州で行われており、またその他の地域においても現在、新たな地熱発電プラントの建設が進められている。フィリピンにいたっては地熱エネルギーが、国のエネルギー消費量の19.1%^{*3}を占めており、地熱発電大国と言われている。地熱発電を実施している各国は今後、設備能力の向上を進める予定で、プラントの新設が次々と計画されている。

また欧米では地熱発電だけでなく、熱水利用や地中熱利用などの地熱直接利用も盛んに行われている。例えばアイスランドの首都レイキャビクではほぼ全家庭に室内暖房用の熱水を地熱利用により供給している。冬期は化石燃料を使用しないことから、「煙のない都市」とも称されている。初期投資が大きくなる地熱エネルギー利用であるが、大規模な導入によってコスト

低減が図られ、普及が進んだものと考えられる。

他国が国を挙げて地熱エネルギー利用を進めるなか、地熱資源に恵まれた我が国が、環境との調和などの理由から、その恩恵を十分活用できていないのは残念なことである。地球温暖化や資源の枯渇が大きな問題となるなか、いま再び、新たな視点と、大きな理解で、暖かい地下資源の有効利用が進むことを期待する。

*3:出典: "World Geothermal Generation 2001-2005: State of the Art", Ruggero Bertani, Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005

●取材協力 (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、
福井県雪対策・建設技術研究所、JFEエンジニアリング(株)
●取材・文 杉山 香里