

地熱発電のしくみと CO₂ 削減Process of Geothermal Power Plant
Contributing to Reduction of CO₂ Emission

福田 寿士*¹
Hisashi Fukuda

石黒 淳一*²
Junichi Ishiguro

齊藤 象二郎*³
Shojiro Saito

地熱発電は地上で燃料を燃焼させることがないため、CO₂ 排出量が極めて少なく環境に優しい発電方式である。当社は過熱蒸気型、フラッシュサイクル、及びバイナリーサイクルのいずれの地熱発電方式にも対応してきており、世界の地熱発電所の 25 % を供給してきた。今後は、経済性を高めて地熱発電の更なる普及を図り、地球温暖化防止に貢献していく。

1. 地熱発電のしくみ

1.1 地熱資源

地熱資源のモデルを図 1 に示す。雨水が数十年かけて地下 1000 m 以上の深部の断層周辺に存在する岩の割れ目に到達し滞留する。この近傍のマグマ溜まりにより過熱され、高温、高压の熱水層（貯留層）が形成される。この熱水が地熱発電のエネルギー源である。貯留層に向かって井戸を掘ると、熱水は減圧、フラッシュしながら噴出し、地上に達したときに過熱蒸気になる井戸を過熱蒸気型、気液 2 相流の状態であれば、

熱水卓越型の生産井と呼んでいる。

1.2 発電プラントサイクル

地熱発電に適用される典型的な発電サイクルの例を図 2 に示す。地熱蒸気を直接タービンに導入するフラッシュサイクルと、地熱流体を熱交換器に導き、二次作動流体である低沸点媒体に熱だけを回収させて、地熱流体は全量地下へ還元するバイナリーサイクルとがある。フラッシュサイクルにおいて、過熱蒸気型生産井を利用する場合は、蒸気を洗浄するなどの特別な例を除いて、自噴蒸気をそのままタービンに導入する。熱水卓越型の場合はセパレータで熱水と蒸気に分

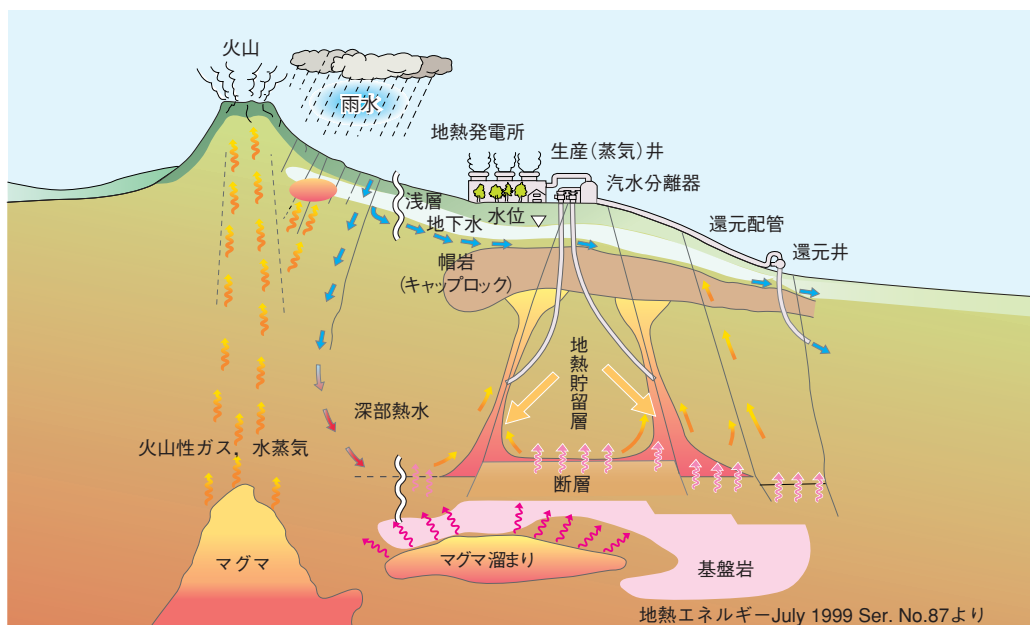


図 1 地下資源モデル
地熱エネルギーの起源を示すモデル。

*¹ 原動機事業本部蒸気タービン統括技術部次長

*² 原動機事業本部蒸気タービン統括技術部長崎タービン設計課長

*³ 原動機事業本部蒸気タービン統括技術部長崎タービン設計課主席

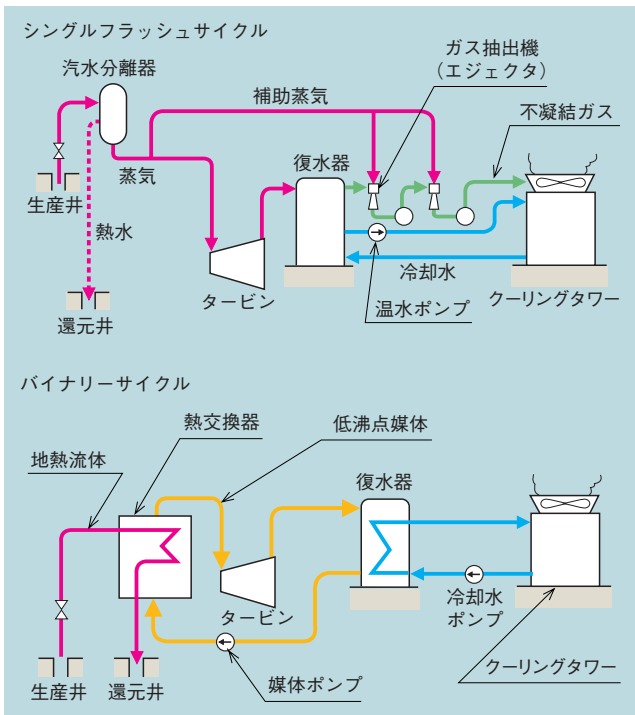


図2 サイクル系統図
典型的な地熱発電サイクルの系統図。

離し、分離した蒸気をタービンに導入して発電を行う。地熱流体には、火力発電プラントに比べると格段に高い濃度の不純物や不凝結ガスが含まれる。これらが引き起こす腐食に関する損傷、並びにスケールの析出が地熱発電固有の課題である。

1.3 地熱発電の特徴

地球内部の熱を発電に利用し、地上で燃料を燃焼させることがないので、地球温暖化の原因であるCO₂の大气排出量は原子力発電並みに少ない。地熱の起源は地球内部の熱の移動によるものや放射性物質の崩壊によるものであり、熱エネルギーの量は膨大である。世界最大規模の地熱発電が行われているカリフォルニア州ガイザース地熱地域において、30年間の発電で消費した熱量は同地域に存在する地下資源熱量の5%にしか達していないという報告もあり、地熱は枯渇しにくいエネルギーのひとつである。また、天候に左右されないため、自然エネルギーの中では稼働率は最も高く、火力発電所とほぼ肩を並べる。

2. 当社の取組み

2.1 開発の歴史

1904年、イタリアのラルデレロにおいて自噴する過熱蒸気を利用して3/4馬力の発電を行ったのが世界最初の地熱発電である。熱水卓越型の生産井を利用した地熱発電技術はニュージーランドで初めて開発され、1958年にワイラケイ地熱発電所に実適用された。この成功を受けて、当社は九州電力(株)と共同で、熱

水卓越型生産井を利用する地熱発電設備の開発に着手した。地熱流体の化学分析を行い、地熱蒸気雰囲気下でタービンなどの主要機器の材料試験を実施して、材料選定の基礎とした。また、セパレータ、直接接触式復水器、二相流輸送配管、ガス抽出機などの地熱発電所に必要な主要機器の特性に関する解析、並びに検証試験を行い、機器設計の基礎データを蓄積した。これらのデータを基に出力11MWの九州電力(株)大岳発電所は設計、建設され、1967年に、日本初の熱水卓越型地熱発電所として運転を開始した。その後、性能、経済性、並びに信頼性を向上させる様々な技術を開発、適用しながら、日本を含む世界13カ国に計96台、出力にして2780MWの地熱発電設備を供給してきた。これは、世界の総地熱発電容量の25%に相当する。

2.2 ラインアップ

地熱発電において、一般的に想定される機種を図3に示すが、当社はこのすべての機種を設計製作した実績を有している。フラッシュサイクルでは、100℃前後の熱水を0.06MPaの大気圧以下でフラッシュさせて作った蒸気で発電する0.2MWの発電設備から、1.68MPa、204℃の蒸気を約700ton/hr使って、1車室のタービンで121MW出力する発電設備まで広い出力レンジをカバーしている。

バイナリーサイクルについては、3種類の低沸点媒体(イソブタン、フロン、又はアンモニア+水の混合流体)を使い、それぞれ大分県の大岳地域、滝上地域、並びに当社長崎研究所においてプロトモデル発電設備として設計製作、試運転までを行い、その実用性を検証した。

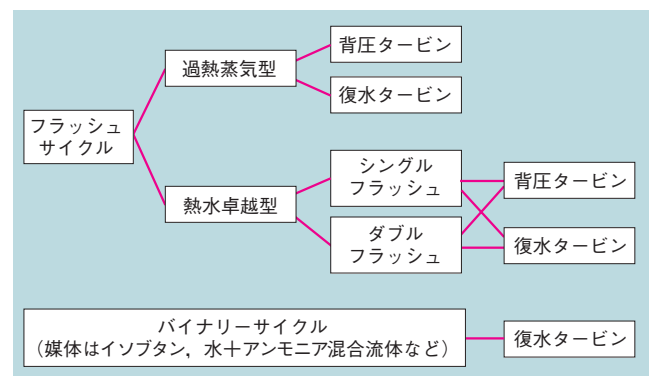


図3 機種の区分
一般的に想定される地熱発電設備の種類。

2.3 信頼性について

腐食性を有する不純物や不凝結ガスを含む地熱蒸気と遠心力に曝されるタービンの回転部の応力腐食割れ(SCC)や腐食疲労による損傷を回避する技術が信頼性確保のために不可欠である。タービンロータの

表1 当社地熱タービンロータ材の化学成分と機械的性質

材料コード	化学成分 (質量%)									機械的性質 (N/mm ²)	
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	0.2%耐力	引張強さ
10325 MGB	0.23~0.3	0.7~1.0	≤0.015	≤0.005	0.2~0.4	≤0.5	1.0~1.3	1.0~1.3	0.21~0.29	≥635	≥740
GSR1	≤0.06	≤1.0	≤0.015	≤0.005	≤0.30	5.0~5.5	11.5~12.5	0.8~1.2	≤0.1	≥635	≥740

SCC 対策としては、低応力設計を心掛けると同時に、SCC 感受性の低いロータ材を適用している。当社は地熱タービンロータ材として表1に示す2種類の材料を標準材として有している。材料コード 10325 MGB は不純物の硫黄の濃度を極めて低いレベルに制限することで SCC 感受性を低くしている。GSR1 は特に腐食雰囲気の厳しい地熱蒸気に適用可能な材料として開発された 12 % Cr- 5 Ni 材である。動翼の腐食疲労に対しては、腐食環境、及び翼長に応じて 12 Cr 鋼、17-4 PH 鋼、又はチタン合金を使い分けている。また、長翼にインテグラルシュラウド構造を適用し、隣り合う翼のシュラウド部での相互接触による高いダンピング効果によって振動応力を従来翼の 20 % 以下に抑えて腐食疲労を回避している。信頼性確保のための技術の一例を挙げたが、これらの技術の蓄積により回転部の損傷発生率は低減され、今日、発電設備としては火力機と同じレベルの稼働率に達している。

3. ま と め

地熱発電は以下の優れた特性を持つ発電方式である。

- CO₂ 排出量が低く、環境に優しい。
- 高稼働率
- 枯渇しにくいエネルギーの利用

ただし、蒸気条件が低く機器のサイズが大きくなるので火力機に比べて出力当りの建設費が高くなる傾向がある。経済性を高めることで地熱発電が更に普及するよう努力したい。



福田寿士



石黒淳一



齊藤象二郎