

地熱発電所の利用率向上に貢献するスケール形成抑制技術

Scale Adhesion Suppression Method Contributing to Improvement of Operational Efficiency of Geothermal Power Plants

中込 宇宙 NAKAGOMI Hiroshi 高橋 優也 TAKAHASHI Yuya 古谷 健一郎 FURUYA Kenichiro

再生可能エネルギーとして注目される地熱発電では、地熱蒸気に含まれる成分の一部が蒸気タービン内の構造物表面（以下、タービン内部表面と呼ぶ）に付着・堆積し、スケールが形成されることで機器の劣化や発電出力の低下を引き起こすため、スケールの抑制で地熱発電所の利用率を向上させることが求められている。

そこで東芝エネルギーシステムズ（株）は、環境負荷が小さく、粒子分散性を持つ界面活性剤を蒸気中にスプレーすることで、タービン内部表面へのスケール量を低減できるスケール形成抑制技術を開発し、地熱蒸気を用いた実証試験によって有効性を確認した。この技術の適用で、地熱発電所の利用率向上と地熱発電の拡大に寄与すると期待される。

Geothermal energy has been attracting attention in recent years as one of the renewable energy sources for power generation. However, geothermal power plants are experiencing strong demand for improvement of operational efficiency by suppressing scale adhesion inside their steam turbines, which is caused by mineral particles contained in geothermal steam and results in decreased power output and the deterioration of turbine components.

With the aim of overcoming this issue, Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has developed a scale adhesion suppression method using a surfactant with excellent mineral particle dispersibility as well as a low environmental load. We have conducted experiments using demonstration test equipment installed at an actual geothermal power plant and verified that this method achieves a reduction in the amount of scale adhesion on the metal surfaces. The introduction of this method is expected to improve the operational efficiency of geothermal power plants and contribute to the expansion of geothermal power generation.

1. まえがき

カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みが推進されている中、再生可能エネルギーの重要性が増している。地熱発電は、地球内部の熱エネルギーを蒸気として地上に取り出し、この蒸気でタービンを回すことで発電を行う。また、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーと異なり、天候や昼夜を問わず発電ができるため、安定した発電量が見込める。更に、我が国は世界でも有数の地熱資源国であるため、安定供給が可能な国産再生エネルギーとして注目を浴びている。

地熱発電では、地中から高温の蒸気を取り出して利用するため、地殻由来の様々な成分（腐食成分を含む不凝縮性ガスやシリカなど）が蒸気中に含まれている。このため地熱発電所では、これらの成分の一部が蒸気タービン機器に付着・堆積して形成されるスケールが問題となっている（図1）。スケールが形成されると、発電出力の低下や機器故障につながるため、定期的なスケール除去が行われている。このスケール除去は、機器を分解して行われるため、その間は発電することができず地熱発電所の利用率が低下するという問

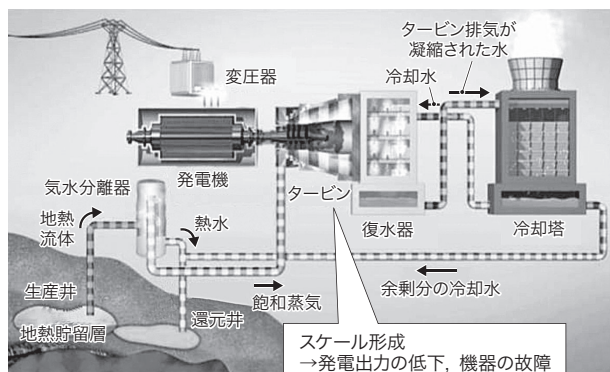


図1. 地熱発電システムの概要

地熱貯留層から地熱流体を取り込み、気水分離器で分離した飽和蒸気を、タービンを回転させて発電するために使用し、その後凝縮して冷却水として使用する。余剰分の冷却水と気水分離器で分離された熱水は、地下に戻す。

Outline of geothermal power generation system

題がある。地熱発電所によっては、形成したスケールを除去するためにタービンウォッシングスプレーが行われる⁽¹⁾。スケール形成による発電出力の低下が発生した際に、タービン洗浄装置を用いてスプレー水を噴霧することで、運転を

継続しながらスケールを除去することが可能になる。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、地熱発電所の利用率を更に向上させることを目的として、タービン内部表面へのスケール形成そのものを抑制する、薬剤を用いたスケール形成抑制技術を開発した。ここでは、今回開発した技術の概要、及び国内の地熱発電所において実際の地熱蒸気を用いて行った実証試験の結果について述べる。

2. 薬剤によるスケール形成抑制技術

地熱蒸気中に含まれる固形成分が、タービン内部表面で乾固して凝集・析出する結果、スケールが形成されると考えられている²⁾。当社は、このようなスケール形成のメカニズムを基に、分散作用及び浸透作用を持つ薬剤(界面活性剤)を蒸気中に噴霧し、タービン内部表面へのスケール形成そのものを抑制する技術を開発した。

各作用が持つスケール形成抑制効果を、図2を用いて説明する。

- (1) 分散作用 界面活性剤には分散作用があり、固形成分を凝集させることなく水中で分散させることができる。タービン内部表面付近の固形成分を界面活性剤で取り囲んでばらばらにすることにより、凝集・析出を防ぎながらスケール形成を抑制する。
- (2) 浸透作用 界面活性剤の添加により液体の表面張力が小さくなり、金属表面に対するぬれ性が向上する。ぬれ性が向上すると、タービン内部表面が水で覆われやすくなり固形成分を洗い流しやすくなる。また、

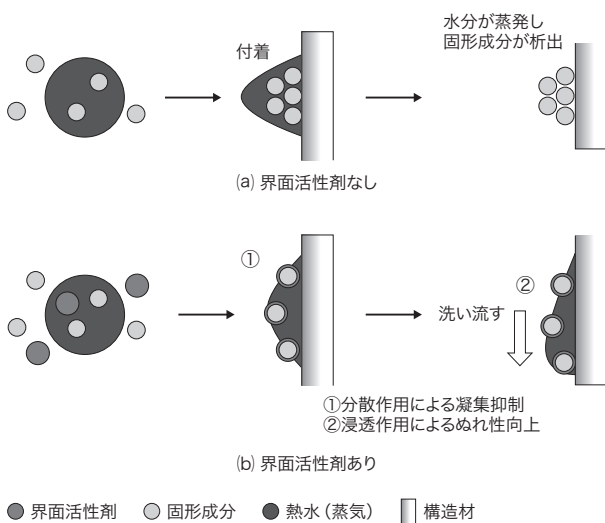


図2. 界面活性剤によるスケール形成抑制メカニズム

界面活性剤が持つ分散作用と浸透作用により、固形成分の凝集・析出を抑制する。

Mechanism of suppression of scale adhesion using surfactant

ぬれ性が向上して後述する接触角が小さくなると、金属表面への固形成分の付着力が弱くなる³⁾。

3. 界面活性剤によるスケール形成抑制効果の確認試験

3.1 界面活性剤選定

スケール形成を抑制するために蒸気中に噴霧する界面活性剤には、①高温地熱蒸気中で使用できる耐熱性(熱分解温度 > 蒸気温度)、②蒸気凝縮水への溶解性、が求められる。また、発電に用いられた地熱蒸気は、適切な処理を行った後に自然放流される。このため、蒸気中に噴霧する界面活性剤はスケール形成抑制効果が高いだけでなく、③環境負荷が小さいことが求められる。

当社は、これらの三つの条件を満たす界面活性剤として、ポリビニルピロリドン(PVP)を選定した。PVPは、非イオン性の水溶性高分子型界面活性剤であり、日用品から工業品まで多岐にわたって用いられている物質である。PVPを蒸気中に噴霧することで、固形成分の表面をPVPが取り囲み、立体障害・静電反発による斥力を発生させる分散作用により、粒子同士の凝縮を抑制することが期待される。

3.2 ラボにおけるスケール形成抑制試験

3.1節で述べた分散作用に加え、スケール形成抑制には、固形成分を含む溶液である地熱凝縮水に含まれる粒子のタービン内部表面への付着そのものを防ぐことが重要である。固体表面への粒子付着力を支配する要因として、pH(水素イオン指数)や粘度など様々な因子が考えられるが、これらの因子に応じて決定される“溶液の接触角”と“溶液と壁面との付着力”の間に正の相関関係(接触角 \propto 付着力)があることが報告されている(図3)³⁾。

このため、PVP添加時の金属板に対する地熱凝縮水の静的接触角の測定、及び金属板への固形成分付着量の確認試験を行った。静的接触角の測定では、PVPを含む地熱凝縮水、及びPVPを含まない地熱凝縮水を、室温で平

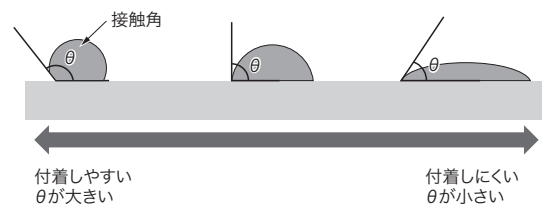


図3. 接触角と固体粒子の付着力との関係

溶液の接触角と、溶液と壁面との付着力には、正の相関がある。接触角が大きいほど付着力が強くなり、接触角が小さいほど付着力が弱くなる。

Relationship between contact angle and adhesiveness of particles

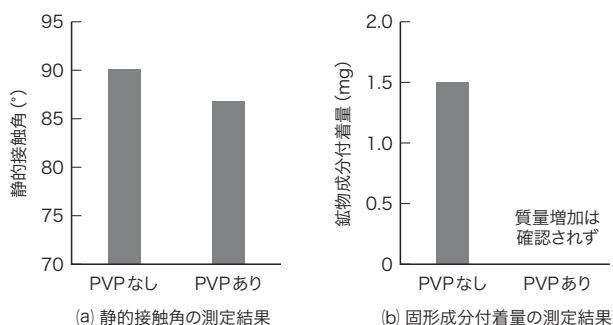


図4. 静的接触角と固形成分付着量の測定結果

地熱凝縮水に界面活性剤 (PVP) を添加することで接触角が小さくなり、金属板への固形成分付着が抑制される。

Results of measurements of contact angle and amount of scale adhesion

滑なステンレス (SUS304) 試験板に滴下し、着滴から5秒後の接触角を測定した。固形成分付着量の確認試験では、地熱凝縮水の組成を模擬した試験溶液にSUS304試験板を浸漬 (しんせき) させた後、試験板を120 °Cの恒温槽内で乾燥させた。この操作を複数回行った後、試験前後の試験板質量の測定を実施し、PVP添加の有無による試験板質量の変化を確認した。

静的接触角、及び固形成分付着量の測定結果を、図4に示す。静的接触角の測定では、PVPを添加しない条件に比べて、PVPを添加した溶液では接触角が小さくなっていることを確認した。また、固形成分付着量の測定においては、PVPを添加した溶液では質量変化を確認できなかったことから、PVP添加により試験板への固形成分付着を抑制できたと考えられる。

4. 地熱発電所におけるスケール形成抑制効果の実証試験

4.1 試験装置及び試験方法

3.2節に示したとおり、PVP添加により、金属板でのスケール形成抑制の可能性のあることを、ラボ試験にて確認した。そこで、実際の地熱蒸気でもスケール形成抑制効果があるかどうかを確認するため、国内の地熱発電所においてスケール形成抑制効果の実証試験を行った。

地熱発電所に設置した実証試験装置を、図5に示す。気水分離器の出口配管部から分岐させた地熱蒸気を実証試験装置に導入した後、図中の矢印に従って、蒸気の流量、圧力、及び温度を試験条件に調整した。予熱したPVP水溶液を、スプレータンク (タービンウォッシングスプレー) 内で蒸気に注入し、PVPを含む蒸気を試験体に暴露してスケール形成の有無を観察した。スケール形成抑制効果の有

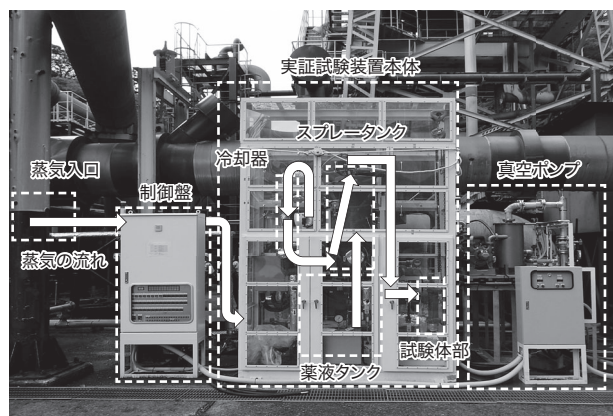


図5. 実証試験装置

気水分離器の出口配管部から分岐させた地熱蒸気を実証試験装置に導入して、圧力や温度を試験条件に調整する。予熱したPVP水溶液をスプレータンク内で蒸気に注入し、PVPを含む蒸気を試験体に暴露する。

Demonstration test equipment



図6. 試験体部

試験体の交換や試験途中でのスケール形成の観測をしやすくするため、アタッチメント式の試験体とした。

Sprayed area of test piece

無を確認するためには、蒸気中にPVP水溶液を散布し、かつ試験体部をタービン内部の蒸気条件に近づける必要がある。実証試験装置では制御盤の操作で、実機で最もスケールが形成される蒸気環境である温度70 °C、圧力31 kPaを、試験体部で模擬できる設計とした。

試験体部は、図6に示すようにアタッチメント方式とした。これにより、試験体の交換や、試験途中でのスケール形成の観測がしやすくなった。

試験は、表1に示す試験条件で実施し、PVP水溶液注入あり/なしの条件で試験体をそれぞれ約1週間暴露した後、試験体質量の測定を行って質量増加量を算出した。

4.2 試験結果

試験体の質量増加量を、図7に示す。PVP水溶液を添加しなかった条件では、約10 mgの質量増加を確認した。

表1. 実証試験条件

Conditions for experiments

項目	試験条件
設定蒸気温度	70℃
設定蒸気圧力	31 kPa
設定蒸気流量	30 kg/h
設定PVP水溶液流量	1.5 kg/h
設定PVP添加濃度	0 wt%, 0.001 wt%, 0.01 wt%
暴露時間	163 h (約1週間)

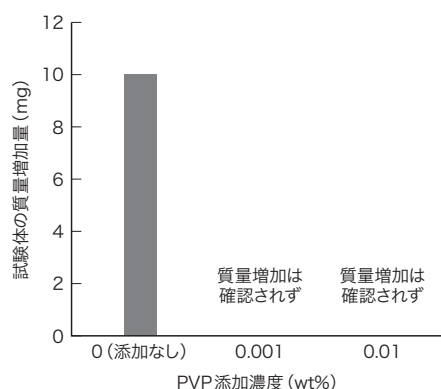


図7. 試験体の質量増加量

PVPを添加した場合（添加濃度0.001 wt%、0.01 wt%）は、スケールによる試験体の質量増加は確認されず、スケール形成の抑制効果を確認した。

Results of measurements of scale adhesion amount

一方、PVP水溶液を添加した条件では、PVP添加濃度0.001 wt%と0.01 wt%の両条件において質量増加は確認されず、PVP添加による試験体へのスケール形成抑制効果を確認できた。

今後の課題としては、スケール形成抑制効果と経済性のバランスが取れたPVP水溶液噴霧条件の探索や、蒸気組成の違いによるスケール形成抑制効果の違いの観測、タービン翼表面の流体力学的な条件を模擬した試験でのスケール形成抑制効果の確認などがあり、更なる技術開発が必要である。

5. あとがき

地熱発電所の利用率を向上させるために、界面活性剤を用いたスケール形成抑制技術を開発した。ラボ試験で、スケール形成の抑制を見込める界面活性剤としてPVPを選定し、地熱発電所において実際の地熱蒸気を用いたスケール形成抑制実証試験を行った。今回の実証装置を用いた条件において、PVP添加によるスケール生成抑制効果を確認できた。

今後、スケール形成抑制効果を確保しつつ経済的なバランスが取れたPVP水溶液噴霧条件を明らかにすることで、地熱発電所の更なる利用率向上と地熱発電の拡大に貢献できると考えられる。

この成果は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP13009) の成果として得られたものである。

文献

- (1) 田尻純一. 大容量から小容量までの地熱発電システムを実現する東芝の取組み. 東芝レビュー. 2013, **68**, 6, p.24-27.
- (2) 天笠俊介, ほか. 澄川地熱発電所 (50MW) 地熱蒸気タービンのスケール付着防止技術. 地熱. 1995, **32**, 2, p.108-132.
- (3) 豊田貴史. 無機微粒子スラリー内の粒子成長と壁面付着性に関する研究. 神戸大学 博士論文. 2014.



中込 宇宙 NAKAGOMI Hiroshi, Ph.D.
東芝エネルギーシステムズ (株)
エネルギーシステム技術開発センター 化学技術開発部
博士 (理学) 日本物理学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



高橋 優也 TAKAHASHI Yuya, D.Eng.
東芝エネルギーシステムズ (株) エネルギーシステム技術開発センター
企画・管理室 博士 (工学) 日本地熱学会・日本原子力学会・日本化学学会会員 技術士 (総合技術監理部門, 原子力・放射線部門)
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



古谷 健一郎 FURUYA Kenichiro
東芝エネルギーシステムズ (株)
パワーシステム事業部 ヒートサイクル計画・技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.