

# 地熱熱水利用バイナリー発電システムにおけるシリカスケール対策技術

Technology to Counter Silica Scaling in Binary Power-Generating System Using Geothermal Hot Water

川原 義隆 KAWAHARA Yoshitaka

柴田 浩晃 SHIBATA Hiroaki

久保田 康幹 KUBOTA Kokan

フラッシュ式地熱発電システムの還元熱水を熱源とする地熱熱水利用バイナリー発電システムは、地熱流体から効率良く熱を取り出すことができるので、高い経済性が得られる。しかし、熱水温度の低下に伴い、シリカスケールが発電設備や井戸に付着する懸念がある。東北水力地熱株式会社 葛根田蒸気基地での現地試験により、シリカ濃度の低い熱水の場合は、シリカ重合反応が停止しているため、温度によってシリカスケール付着速度が変わらないことを明らかにし、このシステムの実用化のめどを立てた。また、アルカリ間欠注入法により、シリカスケールの抑制・溶解が行えることを実証した。

A geothermal hot water binary power-generating system that uses reinjected hot water from a flash geothermal power-generating system as the heat source is able to draw heat from geothermal fluid efficiently, achieving high economic efficiency. However, there are concerns that cooling of thermal water causes silica scaling to adhere to power-plant equipment and wells. Field tests at the steam production well base in Kakkonda geothermal power plant of Tohoku Hydropower & Geothermal Energy Co., Inc. have proven that in thermal water with low silica concentration the speed of silica scaling is not affected by water temperature, because the silica polymerization reaction is halted; thus, practical use of the system is just in sight. Field tests have also proved that intermittent alkaline injection can help to prevent and/or dissolve silica deposits.

## 1 まえがき

地熱発電は、蒸気や熱水からなる地熱流体を地下から取り出し、発電に用いる。地下では高温・高圧の状態であるため、多くの成分が地熱流体中に溶解しており、これらの成分が発電設備の腐食やスケール付着の原因となることがある。特に、地熱流体から熱を回収し流体の温度が低下すると、熱水からシリカが析出してスケールとなりやすい。そのスケール対策の費用は、地熱発電の経済性に大きな影響を与える。

富士電機は、地熱流体から効率良く熱を取り出して活用することを目的に、その際に課題となるシリカスケールの対策技術を開発してきた。本稿では、特に地熱熱水利用バイナリー発電システムにおけるシリカスケール付着速度評価技術とシリカスケール抑制・溶解技術について述べる。

## 2 地熱熱水利用バイナリー発電システム

地熱発電には大きく分けて、フラッシュ式とバイナリー式の2通りの方式がある。フラッシュ式は、井戸（生産井）から取り出した地下の地熱蒸気と熱水の混合流体から、セパレータにより蒸気だけを分離し、蒸気タービンへ送って発電する方式である。バイナリー式は、地熱流体を熱源として、水と比べて沸点の低い媒体と熱交換を行い、気化させた媒体をタービンへ送って発電する方式である。

富士電機がこれまで実績を積み重ねてきたフラッシュ式地熱発電は、高温・高圧の地熱蒸気が必要であり、発電可能な地熱資源の確保が課題の一つであった。

図1に、地熱流体の温度と出力による地熱発電システムの適用範囲の概念を示す。地熱流体温度が高く、出力が大きい場合にはフラッシュ式を、温度が低く、出力が小さい

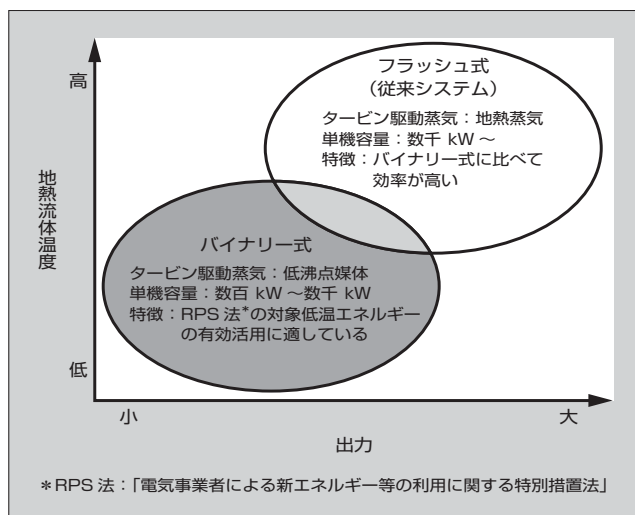


図1 地熱発電システムの適用範囲

場合にはバイナリー式を適用する。

富士電機は、地熱発電システムの品ぞろえを充実させるため、バイナリー発電システムの商品化開発を行ってきた。2006年8月から2009年10月まで、鹿児島県霧島市の大和紡観光株式会社 霧島国際ホテルの協力の下、定格出力150kW、最大出力220kWの地熱蒸気利用のバイナリー発電システムの実証試験を行い、計画どおり連続運転を達成した。そして、実証試験の結果を反映して商品化を完了した。

地熱発電の課題の一つとして、地熱熱源の確保が挙げられる。地熱発電の熱源となる地熱流体を地下から取り出すには、貯留層と呼ばれる高温・高圧の水がある場所を狙って生産井を掘る必要がある。生産井から十分な地熱流体が取り出せなかった場合には、あるいは取り出せる地熱流体の熱量や流量が減衰した場合には、生産井を追加すること

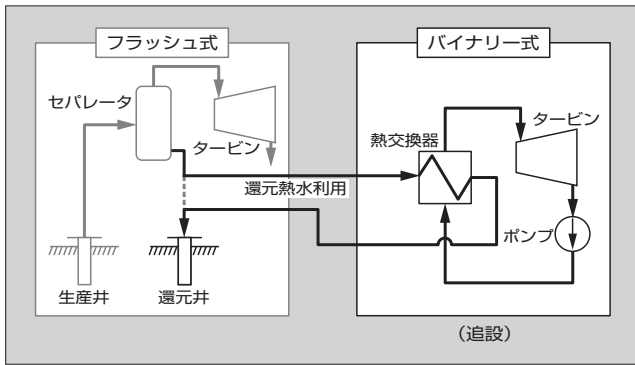


図2 地熱熱水利用バイナリー発電システムの概念図

となる。熱源としての地熱は一般に無尽蔵と捉えられているが、経済性の観点からは、地熱流体は有限の資源と考えることが必要である。

富士電機は、地熱流体を用いて効率良く発電するために、地熱熱水利用バイナリー発電システムを推進している。これは既存のフラッシュ式の地熱発電システムに、還元熱水を熱源としたバイナリー発電システムを追設するものでハイブリッド地熱発電と称している。これまで、地熱流体から蒸気を分離した後に残る還元熱水は、高温で未利用のまま井戸（還元井）へ戻していたが、本システムは、これを熱源として利用するものである。地熱熱水利用バイナリー発電システムの概念図を図2に示す。

地熱熱水利用バイナリー発電システムは、敷地、人員、送電線など既存のフラッシュ式地熱発電システムのインフラを活用できるため高い経済性がある。また、新たな生産井を掘ることもなく、“掘り当て”に失敗する事業性リスクも低い。しかし、還元熱水から熱を回収し、還元熱水の温度が低下することは、シリカスケールの付着を伴うことが多く、シリカスケール対策が検討課題として挙げられる。シリカは、地上の配管や弁類に付着することもあるが、最も大きな問題は、還元井内およびその周りの地層で付着し、還元井が閉塞（へいそく）することである。この場合は、還元井を浚渫（しゅんせつ）あるいは掘り直すことが必要となり、事業性を損なうことになる。

富士電機では、シリカスケールの問題が地熱熱水利用バイナリー発電システムを適用する際の大きなリスクになると考え、シリカスケール対策技術、具体的には、スケール付着速度評価技術および抑制・溶解技術の開発を行ってきた。

本開発は、東北水力地熱株式会社の協力の下、葛根田蒸気基地における地熱熱水利用バイナリー発電システムのフィージビリティスタディー（FS）の一つとして行ったものであり、東北水力地熱株式会社、地熱エンジニアリング株式会社、九州大学との共同研究によるものである。

### 3 シリカスケール付着速度評価技術

地熱流体は、地下で高温・高圧の状態が存在するため、多くの成分を溶解している。地上に取り出す際や地上で減

圧してフラッシュ（蒸発）させる際、熱水から熱回収を行う際などに、流体の濃縮および温度低下が起こる。このとき、特にシリカ成分は非晶質シリカに対して溶解度以上の濃度、すなわち過飽和の状態となり、濃縮するほど、また、温度が低下するほど、シリカが析出する可能性が高まる。地熱熱水利用バイナリー発電システムを追設することにより、還元井の閉塞速度が悪化するのかどうか、また、その度合いが許容できるレベルかどうかを、事前に定量的に評価する必要がある。

#### 3.1 シリカスケールの生成メカニズム

##### (1) 非晶質シリカの特徴

地熱熱水からシリカが析出する場合は、非晶質の状態での析出する。非晶質シリカは、過飽和となったシリカが重合反応を起こして成長し析出する。したがって、シリカ重合反応速度  $V$  が、シリカ析出速度を決める主要因となる。

シリカ重合反応速度  $V$  は、簡略化すると式(1)で表すことができ、反応速度定数  $K$  が大きいほど、非晶質シリカの溶解度  $C_e$  が小さいほど、大きくなる。

$$V = K(C - C_e)^n \dots \dots \dots (1)$$

- $V$  : シリカ重合反応速度
- $K$  : 反応速度定数
- $C$  : シリカ濃度
- $C_e$  : 非晶質シリカ溶解度
- $n$  : 定数 ( $n > 0$ )

$K$  と  $C_e$  は、温度が高いほど、pHが高いほど大きな値となる。したがって、 $V$  は温度と pH に関してあるところで極大値をとるような関係性を持つ。ただし、典型的な地熱熱水の場合、温度が低いほど、pHが高いほど、 $V$  が大きくなる。

これらのことから、一般的にシリカスケール対策として、還元温度を下げないことおよび硫酸を注入して pH を下げることが行われる。

##### (2) 地熱発電所におけるシリカスケールの生成メカニズム

シリカスケールの生成は重合反応速度のみで議論されることが多いが、地熱発電所内でのシリカスケールの生成を考える場合は、発電所内の各位置におけるシリカの形態を考慮する必要がある。

還元井は還元熱水が貯留層に影響を与えないように、生産井と離れた場所に掘る場合が多く、生産井から還元井まで熱水が流れるのに、数時間かかることも少なくない。この間に、重合反応がどの程度進行しているか、どの程度粒子として析出しているか、熱水中でシリカ重合反応は進行しているか、などを総合的に考慮して、還元井におけるシリカスケール付着速度の評価を行う必要がある。

#### 3.2 シリカスケール付着速度の評価方法

シリカスケールの付着が問題となるのは、還元井、中でも特に還元井近傍の地層である。このため、そこにおける閉塞速度を事前に評価する模擬地層試験装置を開発した。

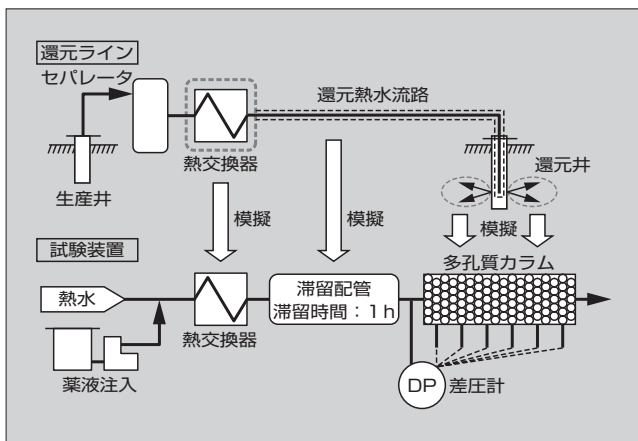


図3 模擬地層試験装置の概念図

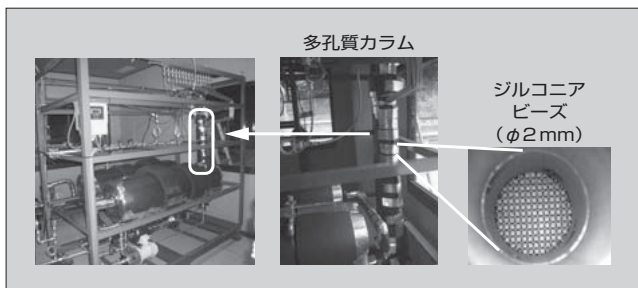


図4 模擬地層試験装置の外観

表1 バイナリー発電設備と模擬地層試験装置の対応

バイナリー発電設備	模擬地層試験装置
熱交換器	熱交換器
バイナリー発電設備設置場所から還元井近傍の地層までの還元熱水流路	滞留配管
還元井近傍の地層	セラミックビーズを充填した多孔質カラム

図3に試験装置の概念図を、図4に試験装置の外観を示す。

模擬地層試験装置は、地熱発電所内に設置し、熱水温度低下による還元井の閉塞速度の変化を評価するものである。バイナリー発電設備と模擬地層試験装置の対応を表1に示す。

多孔質カラム入口と多孔質内の各ポイント間の差圧をモニタリングすることで閉塞速度の評価を行う。また、滞留配管の各位置におけるシリカ濃度を測定することで、シリカ濃度の減少速度、すなわちシリカ重合反応速度を評価する。

### 3.3 葛根田蒸気基地におけるフィージビリティスタディー

2011年7～9月、東北水力地熱株式会社 葛根田蒸気基地において地熱熱水利用バイナリー発電システム設備の設置時におけるシリカスケール付着速度の事前評価を目的に、FSを実施した。

地熱熱水利用バイナリー発電システムに用いる予定の熱水を用い、模擬地層試験装置によってシリカスケール付着速度の評価を行った。熱水温度は120℃と95℃、全シリ

カ濃度は435ppmであり、120℃と95℃において1時間熱水を保持した場合に、シリカ重合が進行しないことを確認した。つまり、この1時間において、シリカ粒子が生成することや、既に生成したシリカ粒子が成長することはないといえる。なお、1時間とは、模擬地層試験の実施場所、すなわちバイナリー発電設備の設置予定箇所から還元井近傍の地層まで熱水が流れるのにかかる時間を模擬している。

3週間の模擬地層試験により、シリカスケール付着速度について次の知見が得られた。

- (a) 地層の閉塞に寄与しているのは、粒子凝集体の形状をしたスケールであり、スケール付着速度は温度に依存しない。
- (b) スケール付着速度が温度に依存しないのは、スケール付着の主メカニズムが粒子の付着であるためと考えられる。
- (c) 硫酸注入は、一般にシリカ重合速度を低下させることを目的としているが、粒子の付着防止にも効果があると考えられる。

試験結果とこれらの知見に至った根拠を次に示す。

#### (1) スケール付着速度の温度依存

図5に、3週間の試験が終了した後の多孔質カラムへのシリカ付着量を示す。硫酸注入なしと硫酸注入ありのそれぞれの条件において、熱水温度低下の前後(120℃と95℃)で、スケール付着量に差がないことが分かる。

また、硫酸注入なしの条件においては、カラム入口付近でスケール付着量が多くなった。図6に、多孔質カラムに付着したスケールの電子顕微鏡写真を示す。多孔質カラム全体にわたってビーズ表面にフィルム状のスケールが、カラム入口ではビーズ表面に粒子の凝集体が観察された。熱水中に含まれている粒子が、カラム入口で凝集してビーズに付着するため、カラム入口のスケール付着量が多くなっていると考えられる。さらに、多孔質カラムの透水性の測定結果からは、主にカラム入口において透水性が低下していることが分かった。地層の閉塞に寄与しているのは、粒子凝集体の形状をしたスケールであり、そのスケール付着速度は温度に依存しないといえる。

#### (2) スケール付着のメカニズム

熱水中でシリカ重合が進行していないことから、カラム

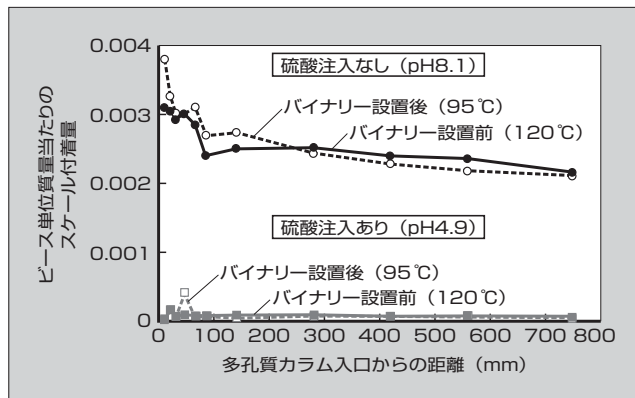


図5 模擬地層試験結果



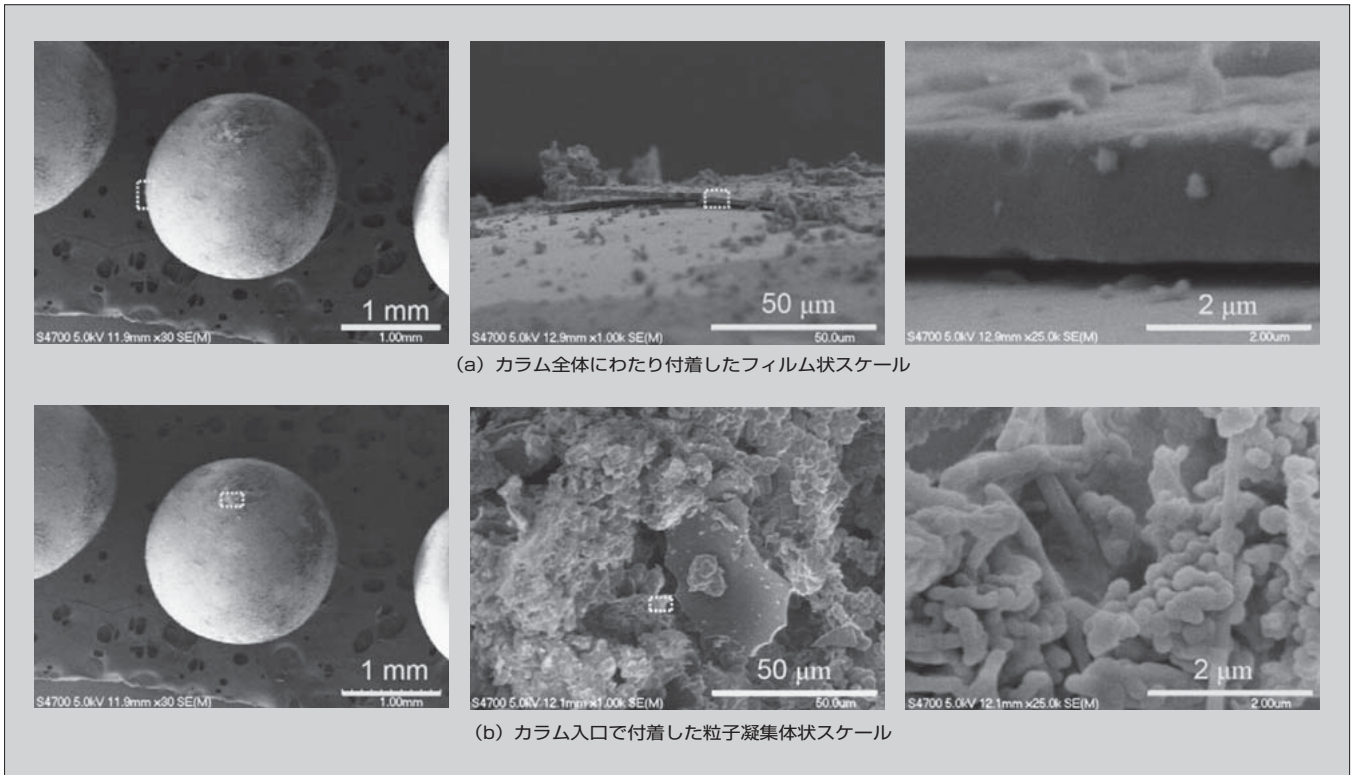


図6 ビーズに付着したスケールの電子顕微鏡写真

入口で付着した粒子は、フラッシュ時に局所的に熱水が濃縮して生成した粒子、あるいは生産井から飛来した粒子など、シリカ重合とは異なる要因で生成したものと考えられる。これらの粒子がカラム入口付近で付着したのがスケール付着の主要因であるため、スケール付着速度が熱水温度に依存しなかったと考えられる。

### (3) 硫酸注入による効果

図5に示すとおり、硫酸注入によってスケール付着速度が大きく低下している。一般に硫酸注入はシリカ重合速度を低下させることを目的として行われるが、粒子の付着防止にも効果があると考えられる。

### 3.4 還元熱水の可能性

葛根田蒸気基地におけるFSの結果は、地層の閉塞速度が温度に依存しない、すなわち地熱熱水利用バイナリー発電システム設置時に、シリカスケール付着が大きな問題とならないということを示している。地熱熱水利用バイナリー発電システムを適用する還元熱水には、元々シリカ濃度の低い熱水を用いることが多く、葛根田蒸気基地と同様の条件、すなわちシリカ重合が停止している場合が多い。したがって、この結果は、地熱熱水利用バイナリー発電システムを適用する場合において、一般性を持った結果になると考えられる。

これまで、還元熱水温度を低下させると還元井の閉塞速度が悪化すると考えられてきたが、シリカ重合が停止している温度範囲で、スケール付着の主メカニズムが粒子の付着である場合には、閉塞速度に変化がないことを明らかにした。

### ④ シリカスケール抑制・溶解技術

還元熱水の性状によっては、地熱熱水利用バイナリー発電システムの適用時に、還元井の閉塞速度が悪化する場合も想定される。そこで、新しい手法によるシリカスケール抑制・溶解技術を開発し、模擬地層試験装置により実証した。

3章で述べたとおり、熱水中に硫酸を注入してシリカスケールを抑制することが多いが、硫酸注入により配管類の腐食が懸念されるため、注入量には制約があり抑制の効果には限界がある。

他に、熱水を一定時間滞留して、シリカ粒子を成長させることで、シリカ粒子の付着性を低下させる滞留漕法（そうほう）や、スケール抑制剤の注入、熱水からのシリカ分の除去などの方法で、シリカスケールの抑制が試みられている。しかし、熱水性状によって効果が限定的である、経済的に見合わない、などの理由で一般的な技術として確立しているとは言えない。

そこで、シリカが高pHでは溶解度が高まることを利用して、シリカスケールを抑制・溶解するアルカリ注入法に着目した。これまでも、いくつかの機関でアルカリ注入法が検討されたことはあるが、主に次の理由で実用化されてこなかった。

- (a) カルシウムなどの金属成分とシリカが結合し、非晶質シリカ以外のスケールが生成する。
- (b) アルカリ剤のコストが硫酸と比較して高い。

これらの課題に対し、次の対策で解決を図り、実用化に

に向けた開発を行った。

(a) カルシウムなどの金属成分をマスクする薬剤を併用する。

(b) 薬剤の間欠注入により注入量を減らす。

図7に、アルカリ注入法を適用したときのスケールの抑制結果を示す。アルカリ剤だけを注入した場合は、何も注入しなかったときよりもスケール付着量が増えるのに対し、金属成分をマスクする薬剤を併用することで、スケールが抑制される。

図8に、模擬地層試験装置において薬剤（アルカリ剤と金属成分のマスク薬剤）の間欠注入を行った際の多孔質カラム内の差圧の経時変化を示す。アルカリ剤の間欠注入（図における①②③の期間）を行うことにより、スケール付着前の差圧に戻る、すなわち付着したスケールを溶解し、透水性を回復できる。



図7 アルカリ注入法によるシリカスケールの抑制結果

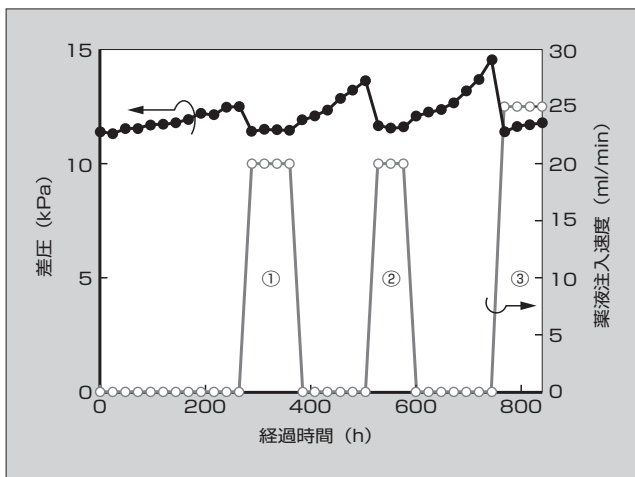


図8 間欠注入による多孔質カラム内の差圧の変化

## 5 あとがき

本稿では、地熱熱水利用バイナリー発電システムを適用する際の大きな課題であったシリカスケール対策について述べた。

シリカスケール付着速度評価技術、抑制・溶解技術を確立し、地熱熱水利用バイナリー発電システムの実用化にめどが立ったと考える。今後もこれらの技術を核に、地熱熱水利用バイナリー発電システム、さらには地熱発電全般のシリカスケール対策技術を確立し、地熱資源の有効な利用に貢献する所存である。

本開発においては、東北水力地熱株式会社殿に、フィールド提供などのご協力をいただいた。また、本開発は、東北水力地熱株式会社殿、地熱エンジニアリング株式会社殿、九州大学大学院工学研究院糸井教授、九州大学大学院理学研究院横山教授との共同研究によるものであり、貴重なアドバイスをいただいた。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- (1) 山田茂登ほか. 地熱発電システムの取組みと最新技術. 富士時報. 2010, vol.83, no.3, p.196-200.
- (2) Kawahara, Y. et al. Laboratory Experiments on Prevention and Dissolution of Silica Deposits in a Porous Column (1): Solid Deposition due to Silica Particle Aggregation and Inhibition by Acid Dosing. Geothermal Resources Council Transactions. 2012, vol.36, p.867-870.
- (3) Fukuda, D. et al. Laboratory Experiments on Inhibition of Silica Particulate Deposition in a Porous Column by Dosing of Chemical Reagents into Reinjection Water (2): Prevention and Dissolution of Silica Deposits by Alkali Dosing. Geothermal Resources Council Transactions. 2012, vol.36, p.851-854.



### 川原 義隆

発電プラントのエンジニアリングに従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部主任。日本地熱学会会員。



### 柴田 浩晃

火力、地熱発電プラントエンジニアリングに従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部発電プラント事業部火力・地熱プラント総合技術部主任。



### 久保田 康幹

りん酸形燃料電池発電システムの開発、ヒートポンプの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター熱応用研究部。化学工学会会員。



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。