

小浜温泉における温泉バイナリ発電の現状

林秀千人*・高瀬徹*・馬越孝道**・藤野敏雄***・梶聖悟*・佐々木裕****

Study of Binary Cycle Power Generation of Obama Hot Springs

by

Hidetito HAYASHI*, Toru TAKASE*, Kodo UMAKOSHI**, Toshio FUJINO***,
Seigo KAJI* and Hiroshi SASAKI****

The power generation of Obama hot springs is applied to the binary cycle. We study the conformity and the issue of the system. It is pointed out that the high temperature of hot spring is improved the performance of the system. But the flow rate of it is little influenced to the system. The amount of the scale is large influenced to the performance of the heat exchange. The early cleaning is required to keep the performance. The amount of the scale is very large in Obama hot springs. The scale matter is mainly Si and the amount of it is a little varied with the materials

Key words : power generation, hot spring, binary cycle, scale

1. 緒言

昨今の再生可能エネルギーの利用を受けて、太陽光発電、風力発電、バイオマス発電、小水力発電、潮流発電、塩分濃度差発電など、様々な方式が提案され、実用化また実用化への研究が進められている。以前の化石燃料や原子力による大規模エネルギーにくらべ、再生可能エネルギーは多種多様なものがあり、エネルギー密度が低く、効率が低い。また、地域性があり全国に同じ条件で設定できるものではない。そのため、再生可能エネルギーの利用には地域性を十分考慮した取り組みが必要とされる。

その中で注目されているものに地熱エネルギーの利用がある。日本は火山国であり各地に温泉が点在する。この地熱のエネルギーを利用することは、地熱発電として以前から進められている⁽¹⁰⁾。新たに掘削して高温の蒸気を取り出し発電をするものであるが、火山地域の多くは国立公園に指定されていること、温泉の源泉への影響を懸念して地元の反対が多いことなどから、具体化が進まない状況にある。そこで、最近注目され

ているのが、温泉の泉源を利用する構想である(6)。温泉は50℃程度を利用するが、多くの泉源はそれより高温の温泉水と蒸気が混在して出ている。従来は、いったん貯めてお湯を冷ますか、あるいは冷却のために水を加えて温泉としていた。そのため温泉の熱エネルギーを無駄にしているばかりでなく、コスト面でも問題である。そこで泉源と温泉との温度差を発電に利用しようとするものが温泉発電である。長崎県は、島原半島に雲仙火山を有しており、島原半島世界ジオパークに認定されている。その中で雲仙や小浜などの温泉地は100℃を越す高温の泉源を有しており温泉発電に適している。

本報では、小浜温泉で未利用の温泉エネルギーを、温泉発電として利用する取組み^{(2)~(4)}について、これまでの経過と温泉発電の技術的な課題について報告する。

2. 地熱エネルギーによる発電

地熱を利用した発電としては、蒸気フラッシュ発電、バイナリ発電、ゼーベック発電の3種類が考えられて

平成25年12月20日受理

* システム科学部門 (Division of System Science)

** 水産・環境科学総合研究科 (Graduate School of Fisheries Science and Environmental Studies)

*** 株式会社エディット (Edit Co. Ltd.)

**** 一般社団法人小浜温泉エネルギー (Obama Onsen energy)

いる。蒸気フラッシュ発電とバイナリ発電は、熱エネルギーを気体の運動エネルギーに変換し、それを発電に利用するものである。図1に源泉の温度と発電種類の関係を模式的に示している。蒸気フラッシュ発電は、源泉温度が140℃以上の比較的高温・高圧の場合に蒸気流量が大きいと有効で、源泉から出てくる蒸気と熱水のうち、蒸気のみを利用してタービンを回すものである⁽¹⁾。大型の発電に向いており、装置が比較的簡単であり、温泉特有のスケールの問題が起りにくいなどのメリットがある。しかし、高圧蒸気が必要とするため、利用できる源泉に限られ、通常は新たに掘削が検討される。一方、源泉温度が低いまた圧力が低い場合には、フラッシュ発電に利用できる蒸気量が減少するため高温の温泉水を利用したバイナリ発電が利用される。バイナリ発電は、高温の温泉水と低温で沸騰するフロンなどの2次作動流体とで熱交換を行い、それが蒸発し膨張してタービンで発電するものである^{(5), (6)}。これは温泉水の熱のみを利用するため高圧で噴出する源泉の必要がなく、従来の源泉を利用できる。しかしながら、装置が複雑になる傾向にある。また、温泉水に含まれるスケールが析出して装置に付着することが懸念される。ゼーバック発電は、熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換するもので、熱電素子を利用している。可動部分がないなど構造が簡単であるが、効率が極めて低く、現状では実用的な電力量を得ることが難しい^{(7)~(9)}。

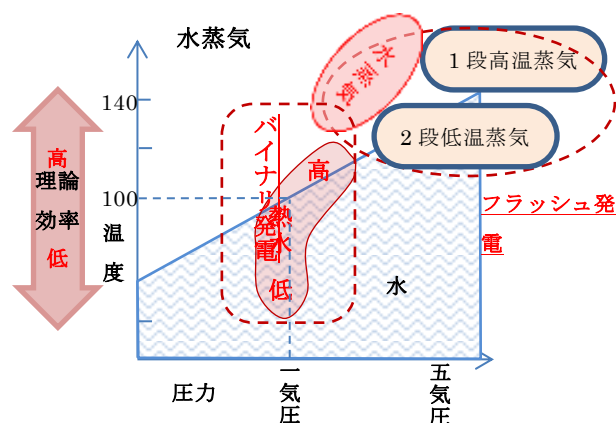


Fig.1 源泉温度と発電種類の関係

温泉熱発電を行う場合に、新たに掘削して新しい熱資源を得ることは現状では難しく、現在使用されている温泉源の高温熱を利用することが現実的である。この場合、100℃前後の温泉水を用いたバイナリ発電が主流となる。バイナリ発電には、二次流体として代替フロン(HFC245fa)、ブタンまたはCO₂を使用するランキ

ンサイクル⁽⁵⁾と、アンモニアと水の2成分流体を二次流体とするカーリーナサイクル⁽⁶⁾がある。現在、温泉発電では安全性の点からアンモニアの使用は懸念されているため、ランキンサイクルによるシステムが主となる。ランキンサイクルによるバイナリ発電の概略を図2に示す。熱交換器で高温側の1次作動流体とフロン等の2次作動流体とで熱の授受を行う。1次側の流体は熱交換をしたのち70℃程度で戻っていく。熱交換を行う2次作動流体は、蒸発してタービンに流れ込む。タービンでは膨張しながら減圧される流れによって発電を行う。タービンを出た2次流体は冷却水により熱を奪われ液化する。ポンプで加圧され再び高温側熱交換器に進む。このように、バイナリ発電は2つの流体を用いたシステムから構成されるため、複雑な構造となっている。小浜温泉における今回の温泉発電では、代替フロンを用いたランキンサイクルのバイナリ発電を行う。

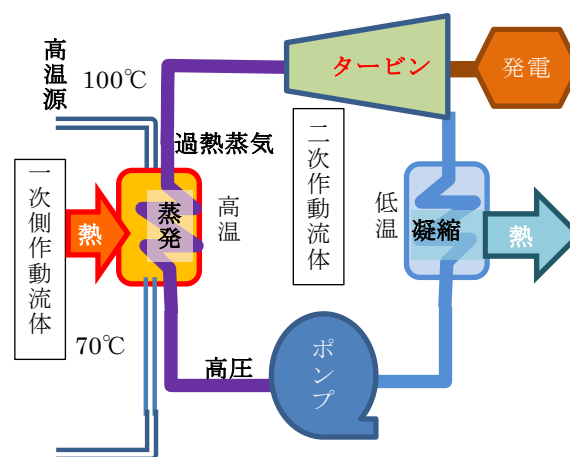


Fig.2 ランキンサイクルによるバイナリ発電ユニット

3. 小浜温泉における地熱資源活用の状況

小浜温泉では以前から温泉熱利用の取組がなされてきた。表1にこれまでの状況を示す。1983年から1989年にかけて、長崎大学と小浜町の湯元とで温泉発電の研究が行われた^{(10), (11)}。ここでは、それまでの長崎大学で行われた低温度差発電の成果を踏まえて、フロンを用いたバイナリ発電を行った。貯湯槽で96℃の温泉水を90l/min使用した実験で約5kW、効率3.7%の出力を得ている。当時はバイナリ発電に適したタービンやポンプ等で性能の良い機器がなく、実用化へは至らなかった⁽¹⁾。

その後、2003年から2005年にかけて企業が中心と

小浜温泉における温泉バイナリ発電の現状

なった小規模バイナリ発電の実用化事業への調査が行われた。利用できる温泉水の温度、量が少なく計画が断念された。同時期の2004年から2005年には、NEDOによる地熱開発促進調査が行われた。1500kW級の発電が計画された。温泉井を掘削することが考えられ、既存の温泉井への影響が懸念されたことから、地元の反対を受けて計画が断念された。

2009年からは、長崎大学が中心となって、再び未利用温泉水利用について地元協議を重ね2011年に小浜温泉エネルギー活用推進協議会が設立された。今回の温泉発電はこれを受けて行われるもので、新たな温泉井を掘削せずに既存の温泉エネルギーのうち未利用分を活用するものである。

今回の取組は、小浜温泉における未利用温泉水による発電ばかりでなく、発電事業をもとに、エコ温泉地として町の活性化へ結びつけるもので⁽¹²⁾、島原半島のジオパークも踏まえて環境学習の一環としての観光事業や地元産業を活性化させるものである^{(2)~(4)}。

の泉源温度は100℃ほどであるが⁽¹⁾、図4のように発電所からの距離が異なる。もっとも遠い小浜マリンパークからは300mほど、最も近い小浜町マリナはすぐ隣となっている。そのため、熱交換器に入るときの温度は大きく異なると予想される。

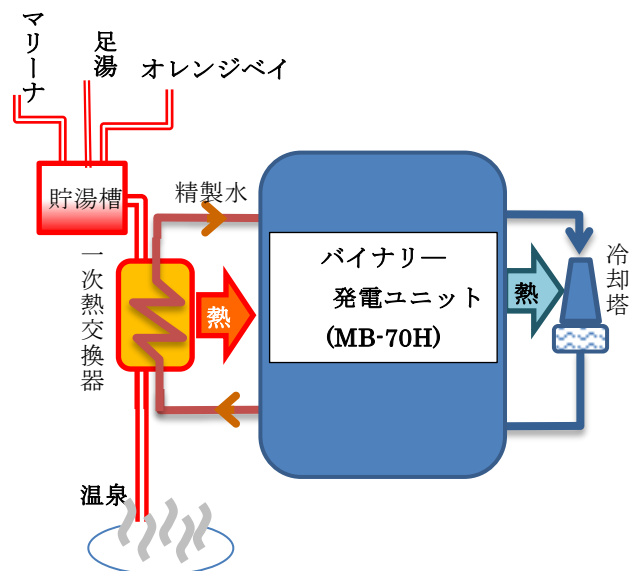


Fig. 3 小浜温泉バイナリ発電システム概略図

表1 小浜における温泉発電取組の状況

調査・実施内容	実施主体	時期
温泉バイナリ発電の開発	長崎大学	1983 -1989
小規模バイナリ実用化への調査	企業	2003 -2005
地熱開発促進調査	NEDO	2004 -2005
温泉バイナリ発電の事業化およびエネルギー活用	小浜温泉エネルギー, 企業, 長崎大学	2009 -現在

4. 小浜バイナリー温泉発電の概要

小浜バイナリー温泉発電のシステムを、図3に示す。今回の発電システムは、株式会社エディットによるもので、神戸製鋼社製の発電ユニット(MB-70H)⁽¹³⁾に、高温側へプレートタイプの熱交換器を追加している。温泉水を使用する場合はスケール付着の問題がある。定期的に除去を行うメンテナンスを考慮して、ユニットの前にさらに熱交換器を置き、温泉水とスケール等の発生がない精製水で熱交換を行い、高温の精製水でユニット内の熱交換を行う。冷却側は蒸発式の冷却として、冷却水の使用を減らしている。

小浜における温泉発電は、町内の3ヶ所から温泉水を引く。足湯ホットふっと105、小浜町マリナ、それにオレンジベイから源泉湯を取っている。それぞれ



Fig. 4 バイナリ発電に用いたい泉源位置

バイナリ発電ユニットの出力特性をもとに、湯量と湯温による出力への影響を図5に示す。図はバイナリ発電ユニットの熱水の湯量と温度による出力への影響を示している。

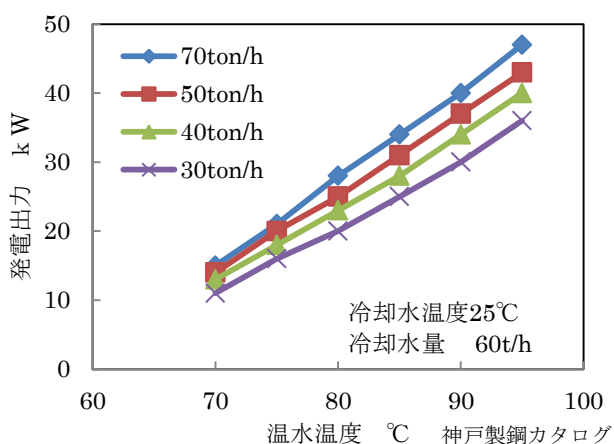


Fig. 5 発電出力の湯温と湯量による影響

湯温の上昇とともに、出力が増加していることがわかる。また、温水湯量も増加するにつれて、出力が増加している。どちらも直線的な増加傾向にあり、出力が温水の湯温 t と湯量 q の関数とすると、次式で出力の変化を考慮することができる。

$$\Delta E(t, q) = \frac{\partial E}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial E}{\partial q} \Delta q \quad (1)$$

ここで、 ΔE は出力の変化量、 Δt と Δq はそれぞれ温度と湯量の変化量を表している。また、 $\frac{\partial E}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial E}{\partial q}$ はそ

れぞれ、出力の温度および湯量による影響割合を表している。それぞれの影響割合は図5をもとに次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} &= 1.1 \text{ [kW/K]} & \text{at } 70^\circ\text{C} \sim 95^\circ\text{C} \\ \frac{\partial E}{\partial q} &= 0.22 \text{ [kW/(ton/h)]} & \text{at } 70^\circ\text{C} \sim 95^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2)$$

湯温の影響割合が湯量の影響割合の5倍も大きく、出力が湯温に大きく影響を受けることがわかる。

図6に隣接する高温の泉源に最も遠く温度の低下が懸念される泉源の湯を追加した場合の出力への影響を評価した。ここで、高温の温泉水温度をマリーナの95°C、最も遠い足湯ホットふつと105を85°Cに設定をした。横軸は、低い温泉水の湯量で、高温の温泉水に追加する湯量である。追加湯量を増加しても発電出力の増加はごくわずかであることがわかる。複数の泉源から温泉水を混合して使用する場合に、1つの高温の泉源に対して低温の湯量を追加することは、温水の温

度低下を招き、湯量の大幅な増加にもかかわらず出力は発電のメリットがほとんどないことがわかる。

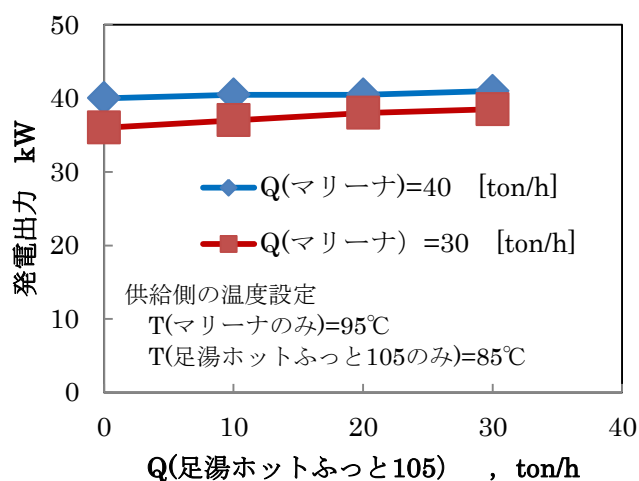


Fig. 6 温度が異なる泉源による発電出力への影響

5. 温泉バイナリー発電におけるスケール問題

5.1 スケールによる伝熱特性の評価 小浜温泉は温泉スケールが多く、配管や貯湯槽等にスケールが付着し、湯量の減少を招いてきた。熱交換器に付着した場合には、高温の温泉水からの熱の授受がうまく行われず発電量の大幅な減少を引き起こすことが考えられ、スケールの付着状況を把握することが重要である。金属母材にスケールが付着することによる熱通過率（熱伝達係数）の低下を次式により評価した。

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta_m}{k_m} + \frac{\delta_s}{k_s} + \frac{1}{h_2}} \quad (3)$$

ここで U は熱通過率で熱交換器の性能を表す。 h_1, h_2 はそれぞれ高温・低温側流体の熱伝達率、 δ_m は熱交換器厚み、 k_m は熱交換器板の熱伝導率である。スケール付着による影響は、分母の第3項であり、 δ_s がスケール厚み、 k_s がスケールの熱伝導率である。シリカスケールでは熱伝導率を0.3とした。

流体の熱伝達率は次式の乱流の熱伝達率を適用した()。

$$h_{1,2} = N_u \cdot \frac{\lambda}{l} = \left(0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \right) \cdot \frac{\lambda}{l} \quad (4)$$

ここで、流れの速度はこの種の熱交換器内の平均的な流速として、0.3m/sとしている。

図7はシリカスケールの付着による熱交換への影響を示す。スケールが非常に薄い状態においても、熱伝達係数が急激に低下することがわかる。このことから付着の初期特性と、スケールの成長を解析する重要性

小浜温泉における温泉バイナリ発電の現状

が、明らかとなった。

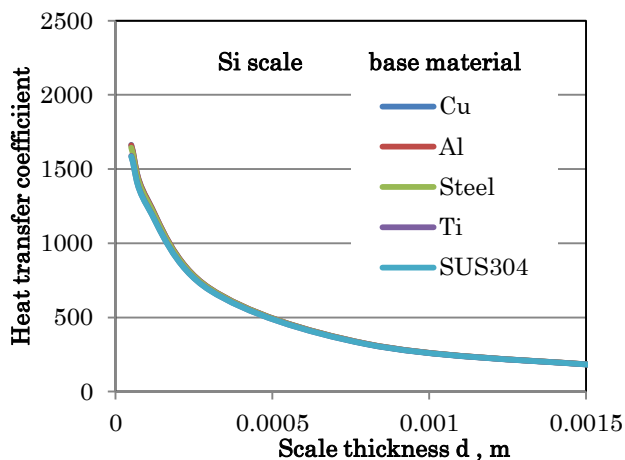
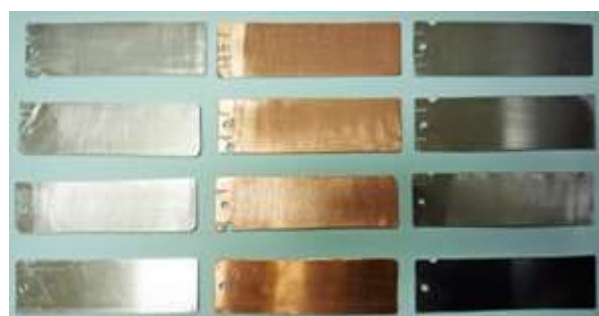


Fig. 7 スケール付着厚さによる伝熱特性への影響

5.2 温泉スケール付着試験 試験片の素材には、材質および表面粗さの違いによるスケールの付着状況を把握するために、アルミニウム (Al)、銅 (Cu) およびステンレス鋼 (SUS) を用いた。それぞれの素材を縦 100mm、横 30mm に切断し、表面粗さが購入状態のままの試験片に加え、3 種類の表面粗さを付与した試験片を準備した (図 8)。



(a) Al (b) Cu (c) SUS

Fig. 8 スケール付着試験用母材
(それぞれの材質に対し、表面粗さを変化させた)

スケール付着試験は、小浜温泉内の足湯ほっとふっと 105 の湯棚の貯湯槽内 (図 9) で行った。貯湯槽内の温泉水の温度は 94℃であった。試験片を貯湯槽内に 1 週間および 2 週間設置し、スケールの付着状況を観察した。

図 10 に Al 試験片の 1 週間および 2 週間後のスケール付着状況の観察結果を示す。ただし、試験片の表面粗さは購入状態のままである。スケールの付着状態は試験片の表面で一様ではなく、表面にスケールの核が生じ、そこから成長したような状態であることが観察さ

れる。その他の材料で製作した試験片においても同様な付着状況が観察された。

次に、それぞれの試験片に付着したスケールを収集・乾燥させた後に、その重量を計測した。1 週間後および 2 週間後のスケールの付着量を図 10 に示す。いずれの材料においても、スケールが付着し、設置期間が長くなるほど付着量も増加している。他の温泉で試験した結果、Cu にはスケールがほとんど付着しないという報告⁽¹⁴⁾があるが、小浜温泉における今回の試験では、スケール付着防止に対する Cu の有意性は認められなかった。一方、SUS へのスケールの付着量が若干少ないことがわかる。



Fig. 9 スケール付着試験場所
(ほっとふっと 105)

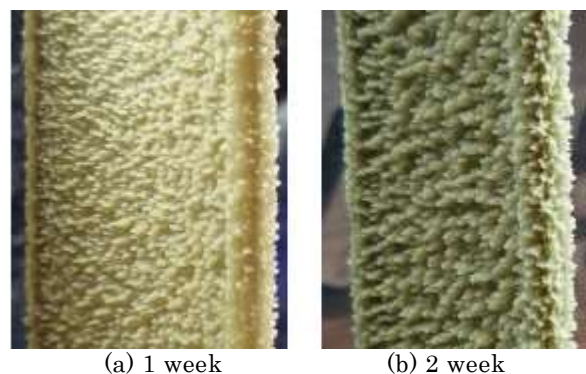


Fig. 10 アルミニウム母材へのスケール付着の状況

図 12 に表面粗さを付与した試験片のスケール付着量を示す。図からわかるように、それぞれの材料において表面粗さによるスケール付着量に大きな差は求められない。塩化ビニル管を用いた他の温泉での試験結果では、表面粗さ (中心平均粗さ) を変えると約 1/10 にスケールの付着を妨げることができたという報告⁽¹⁴⁾があるが、今回用いた金属材料では、表面粗さの影響

はほとんど認められなかった。なお、AlにDLC被膜をつけた試験片での試験結果では、スケールの付着量は1/5程度に抑えられた。つまり、表面が非常に滑らかな場合には、スケールの付着が抑制されるが、今回行った試験片のように表面粗さがある程度大きくなると、スケールの付着に対する粗さの影響が現れないと思われる。

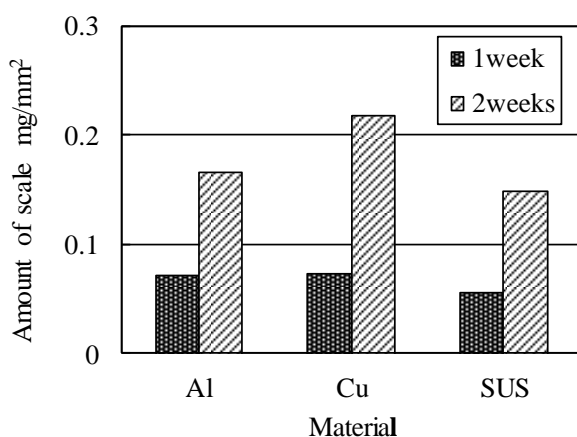


Fig. 1 1 母材によるスケール付着への影響

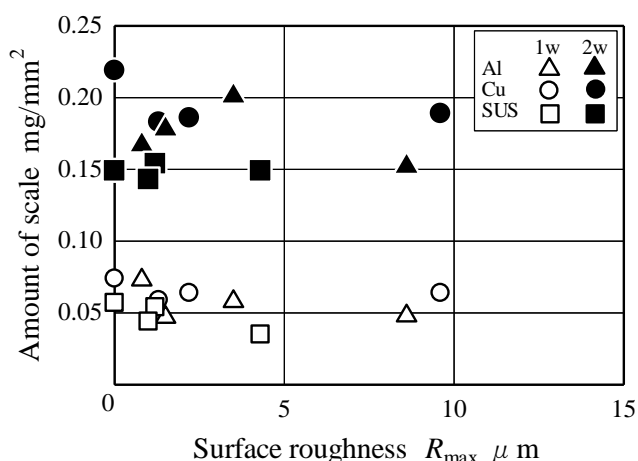


Fig. 1 2 表面粗さによるスケール付着への影響

6. まとめ

小浜温泉における温泉バイナリ発電の現状についてが説を行い、以下の状況が明らかとなった。

1. 小浜温泉は 100°C 程度の湯を多量に得ることができ、温泉バイナリ発電に適している。
2. 複数の泉源から熱水を取る場合に、それぞれの温度の違いを考慮する必要がある。低温の泉源からの取水は発電出力への効果がかなり小さい。
3. 小浜温泉では、スケール付着が著しく発電ユニットの前段に熱交換器が必要である。スケールの熱交換への影響はかなり大きいと予想される。
4. スケール付着の状況は、母材の材質による差異は

あまり大きくないが、SUS は若干付着量が少ない。一方、表面粗さによる付着量の違いは見られなかった。

参考文献

- 1) 谷口, 地熱発電システム, 環境と地球, No. 24pp15-16(2013)
- 2) 平成22年度雲仙市地域新エネルギー重点ビジョン, pp57(2011)
- 3) 平成 24 年度地域主導型再生可能エネルギー事業化検討委託業務報告書(長崎県雲仙市小浜町)(2013. 3)
- 4) 雲仙市地域新エネルギービジョン, 長崎県雲仙市, (2010. 2)
- 5) 平成 24 年度小規模地熱発電及び地熱水の多段階利用事業の導入課題調査 手引書, 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, (2013. 2)
- 6) 井坂, 低温排熱回収発電技術-カーナサイクル発電技術-, 紙パ技協誌, Vol. 53-11, pp51-57(1999)
- 7) 武藤, 熱海温泉での温度差発電, 日本熱電学会誌, 7-3, pp11-13(2013-3)
- 8) 新藤, 中谷, 大石, 未利用エネルギーを有効に活用する熱電発電システム, 東芝レビュー Vol.63-2,pp7-10(2008)
- 9) 小原 熱電変改技術の最近の動向と将来展望, 2013
- 10) 栗須ほか5名, 温泉・温度差発電(第1報小浜温泉の現地試験結果), 長崎大学工学部研究報告, 14-23pp99-106(1984)
- 11) 植木ほか2名, 温泉・温度差発電(第2報フロンタービンと性能予測), 長崎大学工学部研究報告, 14-23pp107-114(1984)
- 12) 那須温泉における温泉熱利用, 温泉熱利用導入モデルプラン(平成 23 年度とちぎ温泉熱エネルギーモデル事業), 栃木県那須町.
- 13) 神戸製鋼所ホームページ, <http://www.kobelco.co.jp/machinery/products/rotation/microbinary/>
- 14) 押切剛伸, 堤和司, 小林大, 兼子俊廣: 温泉スケールの特性と防止策の検討, 山形県立産業技術短期大学紀要, Vol.8, pp.46-51, 2002.