奥飛騨温泉郷の高温源泉の廃熱と湧水を利用した温度差発電と源泉温度制御

独立行政法人国立高等専門学校

富山商船高専　八賀正司・百生 登・義岡秀晃

富山工業高専　寺西恒宣・西田均

岐阜工業高専　河村隆雄

１．研究背景と目的

高温源泉を所有する奥飛騨温泉郷では、90℃近い高温の源泉が湧出し、これを入浴に適した温度に下げた後、露天風呂などの浴槽に供給している。その手法としては、温泉水を湧水と混合する方法によって、源泉温度を下げている場合が多い。この場合、浴槽に供給するお湯が 100%源泉掛け流し場ではなくなるという問題が生じる。最近は、温泉愛好者が源泉 100%掛け流しを好むことから、源泉水と湧水との間で熱交換を行うことで、源泉温度を下げる例も増えている。しかし、いずれの方法においても、源泉温度が著しく高いため、その冷却に簡易水道が必要になるという問題がある。奥飛騨温泉では市町村合併の後、簡易水道料金が従来の 10 倍に跳ね上がったことから、その費用を他のサービスに振り向けたいとの要望がつよい。

この問題を解決するために、また、高温の源泉が持つ熱エネルギーを有効利用するという観点から、高温の源泉と低温の湧水を利用した温度差発電を行うことで、熱エネルギーを吸収し、これによって源泉温度を下げるという温度差発電と源泉温度制御の採用が考えられる。　温泉愛好者は源泉 100%掛け流しを好むことから温泉街が賑わうなど，この地域の活性化に繋がる。また，高温源泉の廃熱を活用した温度差発電の電気エネルギーは地域の家庭用電気，施設暖房，融雪など多目的利用が図れると期待される。

本研究は、上水を使用することなしに、高温源泉を適温にし、源泉 100%掛け流し温泉を提供するとともに、高温の源泉と（温度約 85℃）冷却熱源として湧水（約 17℃）を利用した温度差発電を行うことで、高温源泉を適温（約 43℃）に制御し、良質の温泉（源泉 100%掛け流し）を供給することを目的とする。本研究の特徴は、①化石燃料を使用せず，CO_2 を排出しない環境にやさしい発電方式であること、②上水を使用しないで，良質の温泉（適温＋源泉 100%掛け流し）を安価に供給できること、③地熱発電のように高温側の熱源を得るために再投入されるエネルギー及び設備が不要であること（地熱発電では、地下深くまで冷却水を供給して，熱を回収するため深層ボーリング及び駆動源などの大きな設備投資が必要となる）④熱交換された湧水は，冬場の融雪にも使用できるなどである。

これまでに奥飛騨温泉郷で、本研究のシステムの適用の可能性について現地調査を行ってきた。図１は本研究が実際に対象とする源泉施設と噴出の様相である。

図１　源泉施設と噴出の様相

２．試作システムの概要

高温源泉の持つ熱エネルギーを利用した温度差発電と温度制御の概念図を図２に示す。

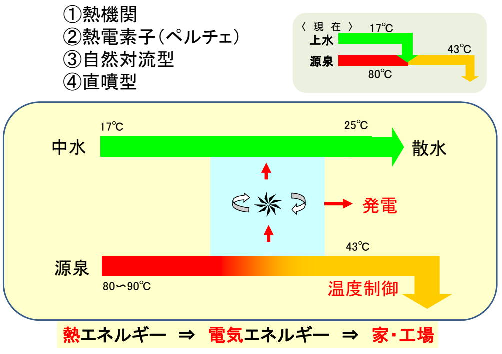

図２　温泉熱を利用した発電と温度制御

本研究では、温度差発電と源泉温度制御装置として以下の 4 つのシステムについて試作及び検討を行った。

１）温泉を熱源とする蒸気ランキンサイクル発電システム、２）源泉から噴出する蒸気の勢いを直接利用した直噴発電システム、３）高温源泉の熱を利用した自然対流による低温度差発電システム、４）熱電変換素子を用いた発電を伴う熱交換器の開発、ならびに発電する温度制御システムの解析と試作を行った。

３．四つの試作システムの実験と考察

１）温泉を熱源とする蒸気ランキンサイクル発電システム

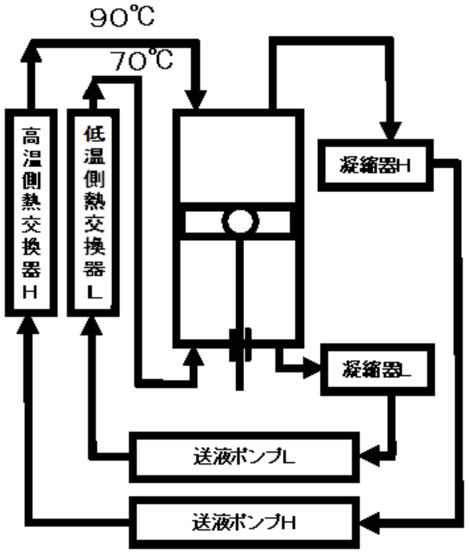

図３複圧型蒸気ランキンサイクル発電システム

ランキンサイクルは加熱及び冷却過程が等温過程となるため、本研究のように小さな温度差を取り扱う熱機関においても比較的高い熱効率が期待できる。ただし本研究のように、作動流体に熱を与えることによって熱源の温度を下げることを意図する場合、等温加熱を前提とするランキンサイクルの性能はあまり高くない。そこで、この問題を緩和するために図３に示す複圧型のランキンサイクルを検討した。この構成は原理的にはワットの蒸気機関を 2 台配置し、それらのボイラーを、源泉を熱源とする熱交換器に取り換えたものである。このサイクルでは、源泉はまず、高温側の蒸気サイクルに熱を与える。これによって源泉水の温度は低下するが、これを用いてさらに低温側の蒸気サイクルに熱を供給する。このようにして源泉水の温度を 50℃程度まで下げて、源泉の熱（エクセルギー）を精一杯利用することを意図している。図４に実験装置の概略図を示す

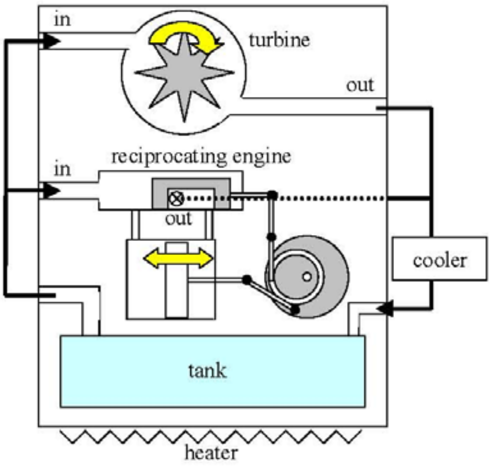

図４　ランキングサイクルエンジン発電モデル

装置は膨張機としてタービン式[1]、レシプロ式を併置し、それぞれの性能及び問題点を比較できるようにするとともに、多種多様な冷媒にも対応できるようにした。

ランキンサイクルの理論出力を求めた後，一体型の小型ランキンサイクル装置の設計製作を行っ

た。装置の完成にまでは至らなかったが設計、製作を通じて低温度差発電に関する有意義な知見を得た。

２）高温源泉から噴出する温泉水の勢いを直接利用した直噴発電システム

　中尾温泉地区[2]の源泉の噴出速度は非常に早く（20m/s)、流出量も豊富であることからこれを有効利用することに期待が高まっている。しかし、温泉成分による腐食問題やコストの面から、実用化に至っていないのが現状である。実験装置は、図５ に示すように、対流により温度の均一化を図る容器③と減圧容器⑤内における噴霧冷却システムからなり、それぞれ独立して製作した。実験装置では、高温源泉の代わりとなる高温水と蒸気を作るために電動ポットを使用し、それらはエアーポンプで容器③に送られる。アスピレータにより減圧される容器⑤では、高温水を噴霧状に流入されることにより冷却が促進されるように考案した。なお，容器③は、流体の流れをカメラにて撮影しコンピュータにて画像処理できるように、透明アクリルで製作した。さらに、容器内に温度センサーを設置し各箇所における温度の測定を行えるように考案した。容器⑤では、入口と容器内に温度センサーを設け噴霧冷却によりどれだけ温度を下

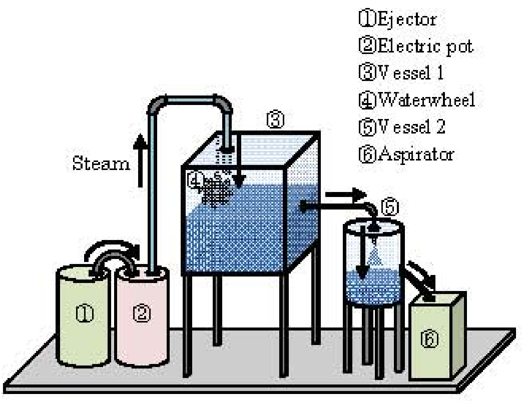

図５　直噴型発電システム

げられるか計測される容器③の流入部に水車を取り付け発電機モータと接続される。流体の勢いを活かすために、水車はメンテナンスが容易なペルトン水車を採用した。ペルトン水車はホースより噴出した水をバケットに水撃として当て回転させる。これは少流量に適しており、流量が変化しても効率があまり変わらないという特徴がある。

　高温源泉に地下水を混合せずに源泉 100%のまま冷却するほか、噴出する勢いを利用した発電システムを提案し、実用化に向けて重要となる基礎データを得ることができるモデル装置を製作した。本装置より、今後の研究課題である(1)容器⑤における噴霧冷却のデータ解析、(2) 容器③内における流体温度の均一化、(3)その他、湯の花に関する問題などについて容易に検討することができるようになった。

３）高温源泉の廃熱を利用した自然対流による低温度差発電システム

実験装置の概要図を図６に示す。装置は大別すると、加熱部、冷却部、発電用小型水車から構成され、鉛直に立てられた 2 本のガラス管の壁面を、それぞれ加熱および冷却することで、試験流体と

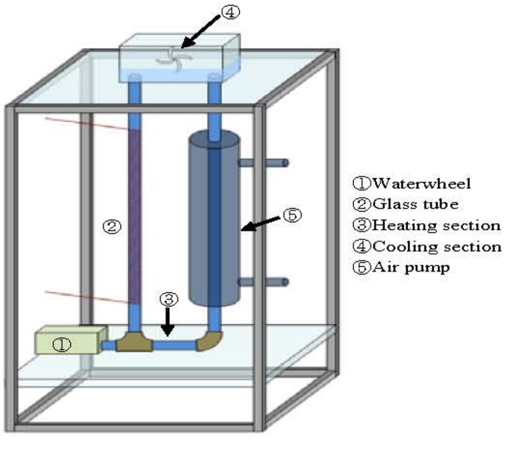

図６　自然対流による発電システムの概要図

して用いた水を自然対流させた。自然対流型発電装置の流動モデルを図７に示す。装置寸法は、高さ H=650mm×幅 B=120mm とし、外径 d=15mm（内径

12.6mm）のガラス管を使用した。加熱部および冷却部の長さは L=400mm とした。なお，これらの寸

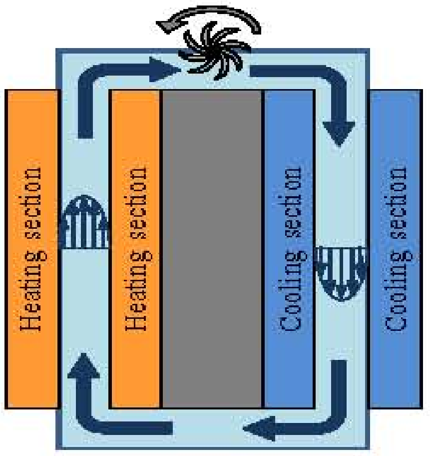

図７自然対流型発電装置の流動モデル

法は、熱･流体解析ソフトウェア CFD2000（株式会社 CAE ソリューションズ、開発元：米国アダプティブリサーチ）によってシミュレーションした結果を基に設計した。加熱部はガラス管に電熱線を巻き付け、冷却部は二重管のようにガラス管まわりを覆うように冷却管を取付け、冷水（約 293K）を流した。また、ガラス管内を流れる流体の速度を増加させるため、加熱部の下部に設置したエアーポンプより、気泡を流入し、その影響について追究を行った。

観測点は発電用小型水車を取り付ける水面から 3mm 下方の位置とした。その結果、気泡が無い場合、流速 V=0.011[m/s2] 、 3mm の気泡を流入した場 Vbubble=0.13[m/s2]という結果を得た。以上より、気泡を流入することで流速が大きく向上すると期待できる。

４）熱電変換素子を用いた発電を伴う熱交換器の開発と発電する温度制御システム

本制御の原理図を図８に示す。発電の原理は，ゼーベック効果である。ゼーベック効果を利用するペルチエ素子の長所は可動部分がないので耐久性が高い。このことから、壊れにくい寿命の長い装置を作製することができる。また，無音で発電することが可能なので発電場所の周囲の環境を気にしなくてすむ。短所は発電量が少ないことや比較的高価なことである。

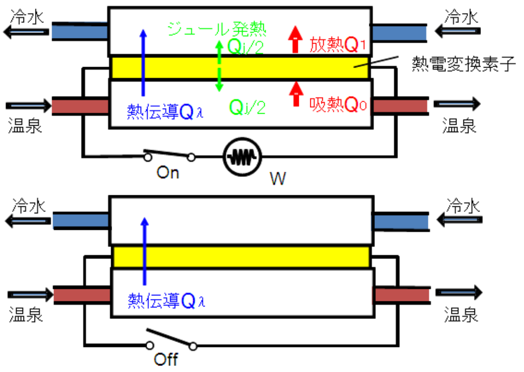

図８　発電モジュールの原理

図のスイッチが閉じているとゼーベック効果により、負荷に電流が流れる。その際、ペルチエ素子の高温側で吸熱、低温側で発熱反応が生じ、温泉から湧水へ熱が移動する。図のスイッチを解放すると、電流が流れないため、ゼーベック効果による電流が流れず温泉から湧水への熱移動は伝導のみになる。従って、スイッチの ON・OFF で熱の移動量を制御できる。モジュールを複数用いることによって、温泉の温度制御を可能とする。

4個の素子を筒状に配置した発電モジュールを図9のように組み立て、ペルチエ素子による熱移動を制御するスイッチを一つにまとめたものを一組として、これを16組つなげた実験装置を使用した。

組み立てたペルチエ素子の中に温水、周りに冷水を流すことで、ペルチエ素子に温度差をつくり，発電する。そして、ゼーベック効果により温水から冷水に熱の移動が発生し、温水の温度を下げることができる。そして、発電モジュールのスイッチをON･OFFすることで熱の移動量を制御することができる。結果として、温水の温度を制御することができる。16組つなげた発電モジュールの出口部分での温水の温度を測定して、目標温度との差が大きければ16組あるモジュールのスイ

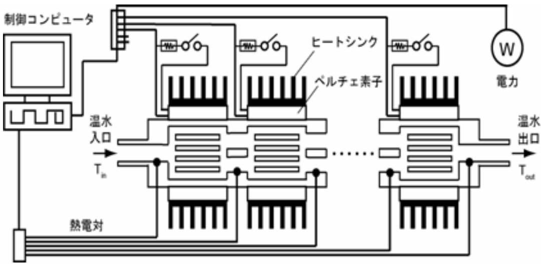

図9　発電する温度制御装置の概略図

ッチを多めにONにすることで熱の移動量を大きくする。逆に差が小さければスイッチをONにする数を減らすことや全てOFFにすることで熱の移動量を小さくし，目標温度に近づく温度制御を行う。

現在、それらの調査結果を踏まえ、構造に工夫を凝らした熱交換器、熱電変換素子、温度制御装置から構成される簡単なモデル機を製作し、加熱水道水を循環させて流量と温度差を変化させた実験を行い、温度制御装置の応答性、熱交換器の冷却能や熱電変換効率等に関する性能試験を鋭意進行中である。

「発電する温度調整システム」をコンセプトとした本システムの妥当性が概ね明らかにされている。しかしながら、現場における年間を通しての性能評価や発電の規模、効果的な電力の使用用途に関しては十分に明らかにされておらず、今後の課題となっている。

４．終りに

本研究で取り上げた奥飛騨温泉郷の高温の源泉と湧水を利用した温度差発電と源泉温度の制御に関する研究は、独立行政法人国立高等専門学校・富山商船高専・富山工業高専・岐阜工業高専の３高専の研究者が共同で取り組んで行った。この研究で取り扱ったシステムの特徴は、（１）化石燃料を使用せず、CO_2を排出しない環境にやさしい発電方式であり、(2) 上水を使用を使用することなく、良質の温泉（適温＋源泉 100%掛け流し）を安価に供給できること、(3)高温側の源泉と低温側の湧水を得るために再投入されるエネルギー及びそのための設備が不要であること（熱流体の存在する地下深くまで冷却水を供給して、回収するための駆動源)。（４）熱交換された湧水は、冬場の融雪に使用できるなど、本装置は、湯温調整を工夫する源泉湯宿に対して、還元系である温泉の本質を変えずに温度調整可能なシステムを、全く環境に優しい技術で提供するものである。

この研究は、熱エネルギーの有効利用、環境負荷低減に寄与したポータブル温度制御装置兼発電装置の開発である。温泉宿単位での小規模発電で、なおかつ温度制御装置も兼ねているので、温泉宿として、①宿の敷地内電灯くらいは発電で賄って、熱エネルギーの有効利用アピール、②水道水を混ぜずに温度制御出来る為、「源泉１００％の温泉」のうたい文句が発信出来、集客には最高の宣伝になると考えている。

これまでに奥飛騨温泉郷で、本システムの適用の可能性について現地調査を行ってきた。現在、これらの調査結果を踏まえ、構造、構成などに工夫を凝らした簡単なモデル機を製作し、実験を行い、性能、発電効率などの性能試験を行っており、その成果の一部を平成２０年度の卒業研究講演論文集で発表している [3-6]。

参考文献

（１）金丸，他３ 名：第 40 回伝熱シンポジウム(2003)

（２）中尾温泉 http://www.yakenoyu.com/index.htm.

（３）山下、富山工業高専　機械工学科　平成２０年度卒業研究講演論文集要旨集

（４）杵渕、富山工業高専　機械工学科　平成２０年度卒業研究講演論文集要旨集

（５）松田、富山工業高専　機械工学科　平成２０年度卒業研究講演論文集要旨集

（６）宇枝、富山商船高専　電子制御工学科　平成２０年度卒業研究発表予稿集