ENAA GEC2011-P3

平成 23 年度
地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査研究
報 告 書

平成 24 年 3 月

一般財団法人 エンジニアリング協会

地 下 開 発 利 用 研 究 センター

日本が生んだ世界のスポーツ
KEIRIN

この事業は、競輪の補助を受けて実施しています。

http://ringring-keirin.jp

序

本報告書は、財団法人ＪＫＡより機械工業振興資金の補助を受け、一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センターが実施した平成２３年度「地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査研究」の成果を取りまとめたものであります。

平成２３年３月１１日に発生した東北地方を中心とする東日本大震災は、福島第一原子力発電所の被災事故を引き起こし、日本のエネルギー戦略に大きな衝撃を与えました。我が国の電力供給は、原子力発電のシェアが減少し、火力発電に委ねる事態へと大きく変化しました。

このような状況下において、エネルギーを安定的、かつ適切に供給するために、環境への負荷が少ない再生可能エネルギーに期待が高まっております。再生可能エネルギーとしては、太陽光、風力、水力などの他に地熱エネルギーがあり、火山帯に位置する我が国の地熱については、世界第３位の賦存量を有し、安定して利用できる純国産エネルギーとして注目されています。

しかしながら、地熱資源の開発においては、自然公園内での規制や既存温泉への影響懸念などの社会的要因に加え、初期開発コストが高いことなどから、地熱発電の新規立地が進んでいないことに見られるように、豊富な資源量があるにもかかわらず、普及が進んでいないのが現状です。

本調査研究では、自然公園法の規制がなく、既存の温泉への影響も少ない低温地熱地域においてモデル地域を選定し、地熱エネルギー利用の可能性の検討を行い、その資源量の評価を行うとともに、システム概念の構築、建設・運用コストの経済性検討および、環境影響評価検討を行ったものです。低温地熱発電は、国立公園など規制のない地域外であっても、発電と熱水利用を組み合わせた事業とすることで、地域の発展に資する技術として、広く社会に貢献できる成果を挙げることができました。

本調査研究は、地下開発利用研究センターの研究企画委員会の下で、学識経験者、関係官庁ならびに、企業の専門家からなる委員会（委員長 財団法人電力中央研究所 海江田秀志上席研究員）と作業部会を編成して実施したものであります。なお、本調査研究の取りまとめにあたっては、株式会社ダイヤコンサルタントが中心となって行いました。

本調査研究にご協力いただいた関係各位に対して心から謝意を表するとともに、本報告書の成果が各方面で有効かつ広範囲に活用されることを切望する次第です。

平成２４年３月

一般財団法人エンジニアリング協会
理事長　　久　保　田　　隆

はじめに

地球温暖化対策として再生可能エネルギーの利用拡大に関する国民の関心が高まりつつある中、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災および福島第一原子力発電所の事故により、さらに再生可能エネルギーの利用の重要性が認識されるようになっている。地熱資源も再生可能エネルギーとして位置づけられ、経済産業省では平成 24 年度概算要求に地熱資源調査のための補助金が計上されたり、環境省では国立公園内への地熱開発のアクセスや環境影響評価期間の短縮が検討されたり、国のサポートも大きくなっている。

地熱発電では地下深部から自然に噴き出す高温の熱水や蒸気により発電し、地上で燃焼という過程を経ないため、CO2 の排出が少なく燃料の補給も必要ない。しかし、蒸気の温度が低いため火力発電などと比べると発電効率が悪い。したがって、地熱資源は電気に変換して使うより、熱として利用した方がエネルギーを有効に使うことができる。最近地熱開発が積極的に進められているヨーロッパなどでは、地熱資源の利用として地下の熱水が注目され、需要の大きな都市部近郊で熱水を汲み上げ、地域暖房などへの供給が主体で、発電は余剰熱水の利用という開発が進められている。我が国では地熱資源に恵まれているために、これまでの地熱開発では発電を主体とした開発が中心となっていたが、ヨーロッパのように熱水の利用に観点を置くことにより、これまで温度が低いため注目されていなかった地域での地熱利用の可能性が期待される。

本報告書では、昨年度に引き続き、地熱資源が有望と見なされている（いわゆる地熱）地域から外れた比較的温度の低い（120℃程度以下の低温地熱）地域を対象とした地熱の利用についての検討が行われた。昨年度の調査の結果、都市近郊で大きな需要が見込まれる仙台南と､離島での地熱活用の例として隠岐島後の二地域がモデル地点として抽出され、これらの地域の地質・温度構造が既存資料に基づき検討され、地下構造モデルが構築された。また、国内の農業や漁業などにおける熱水の利用の調査が行われた。そして、ダウンホールポンプによる熱水の汲み上げ、バイナリー発電機による発電、発電後の熱水利用について事業性の検討が行われた。

本検討結果が今後地熱利用を進めようと考えておられる自治体や企業にとって参考になることを期待したい。

最後に、調査委員会を代表し、本委員会を設置された一般財団法人エンジニアリング協会および助成頂いた財団法人 JKA に謝意を表する。

平成 24 年 3 月

「地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査研究」委員会

委員長　海江田秀志

平成 23 年度

「地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査研究」

委員会名簿

（順不同　敬称略）

委員長	海江田秀志	電力中央研究所　地球工学研究所 地圏科学領域　上席研究員
委　員	登坂　博行	東京大学　工学系研究科　システム創成学専攻　教授
委　員	阪口　圭一	産業技術総合研究所　地圏資源環境研究部門 地熱資源グループ長
委　員	日下部　寧	㈱ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部　地圏環境センター 地盤水理グループマネージャー
委　員	中田　晴弥	地熱技術開発㈱　代表取締役社長
委　員	中西　繁隆	電源開発㈱　火力エンジニアリング部　部長代理
委　員	久保田康幹	富士電機ホールディングス㈱ 技術開発本部先端技術研究所 エネルギー・環境研究センター環境システム研究部 熱エネルギーグループマネージャー
委　員	西　　彰一	㈱大林組　技術本部　ビジネス・イノベーション室 プロジェクト２課長
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ	伊藤　隆庸	経済産業省　資源エネルギー庁　電力・ガス事業部 電力基盤整備課　電力需給・流通政策室　課長補佐
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ	松本　康男	経済産業省　産業施設課　課長補佐
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ	二口　克人	㈱ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部　地圏環境センター 地盤水理グループ　副技師長
ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ	大里　和己	地熱技術開発㈱　取締役 営業・事業開発部長　兼　技術部専門部長
事務局	奥村　忠彦	(一財) エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター　所長
事務局	和田　　弘	(一財) エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター　技術開発部　研究主幹
事務局	岡本　達也	(一財) エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター　技術開発部　主任研究員

平成 23 年度

「地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査研究」

作業部会名簿

（順不同　敬称略）

部会長	二口　克人	㈱ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部　地圏環境センター 地盤水理グループ　副技師長
部会員	日下部　寧	㈱ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部　地圏環境センター 地盤水理グループマネージャー
部会員	大里　和己	地熱技術開発㈱　取締役 営業・事業開発部長　兼　技術部専門部長
部会員	赤坂　千寿	電源開発㈱　火力エンジニアリング部 地熱技術グループ　課長
部会員	西　　彰一	㈱大林組　技術本部　ビジネス・イノベーション室 プロジェクト２課長
部会員	青柳　教之	清水建設㈱　営業企画部　受注戦略グループ 主査
事務局	和田　　弘	(一財) エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター　技術開発部　研究主幹
事務局	岡本　達也	(一財) エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター　技術開発部　主任研究員

平成 23 年度

「地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査研究」

報告書

目　　次

序

はじめに

・委員会名簿

・作業部会名簿

第１章 調査概要 …… 1

1.1　調査の背景と目的 …… 1

1.2　活動経緯 …… 2

1.2.1　委員会活動経過 …… 2

1.2.2　作業部会活動状況 …… 2

1.3　成果概要 …… 3

1.3.1　モデル地域の選定と地熱資源量の評価 …… 3

1.3.2　低温地熱発電システムおよび熱利用の検討 …… 3

1.3.3　地域開発に資する地熱利用の検討 …… 4

1.3.4　まとめと今後の課題 …… 4

第２章　平成 22 年度の調査結果 …… 7

2.1　低温地熱地域の調査 …… 7

2.2　低温地熱発電システムの検討 …… 15

2.3　地域開発に資する地熱利用の検討 …… 31

第３章　モデル地域の選定と地熱資源量の評価 …… 35

3.1　仙台南西部 …… 35

3.1.1　地温構造に関する検討 …… 35

3.1.2　水理特性値に関する検討 …… 36

3.2　隠岐島後 …… 37

3.2.1　地温構造に関する検討 …… 37

3.2.2　水理特性値に関する検討 …… 38

3.3　仙台南西部および隠岐島後の資源量の評価と課題 …… 38

第４章　低温地熱発電システムおよび熱利用の検討 ····· 41
4.1　モデル地域の環境条件の整理 ····· 41
4.2　システム設計と課題抽出 ····· 43
4.2.1　低温地熱資源の採取方法 ····· 43
4.2.2　低温地熱資源の発電方法 ····· 44
4.2.3　低温地熱資源の利用方法の検討 ····· 55
4.2.4　経済性の評価 ····· 62
4.2.5　低温地熱発電システムの課題 ····· 73

第５章　まとめと今後の課題 ····· 75
5.1　調査結果のまとめ ····· 75
5.1.1　低温地熱地域の調査と地熱資源量の評価 ····· 75
5.1.2　低温地熱発電システムおよび熱利用 ····· 75
5.1.3　地域開発に資する地熱利用 ····· 76
5.2　今後の課題 ····· 76

第１章　調査概要

1.1　調査の背景と目的

地球温暖化対策として温室効果ガスの排出量を 2050 年までに現状比 60～80%減とする長期目標が 2008 年 7 月に閣議決定され、さらに 2009 年には 2020 年までに 25%減（1990 年比）との目標が示されている。これらを受けて、温室効果ガス削減のための対策として太陽光発電や小水力などの非化石エネルギーの利用拡大が挙げられている。

一方､我が国は世界第三位の地熱資源国であり､膨大な潜在的エネルギーを抱えている。地熱は純国産の再生可能エネルギーであり、地熱発電は発電時の CO_2 排出量が少なく、太陽光発電のように天候に左右されないことから、温暖化対策の観点だけでなくエネルギーの安定供給の観点からもすぐれたエネルギーである。

ところが、従来の地熱発電は地域が自然公園と重なっていたり、温泉への影響の懸念などの社会的要因に加え、開発コストに比してリスクが高いことから新規の立地が進んでいない。

一方、産業技術総合研究所によると、我が国の温度 150℃以上の地熱資源量は 2,347 万 kW であり、このうち国立公園の規制を受けない地域は 425 万 kW と試算されている。さらに温度が 53℃～120℃の資源量は 833 万 kW で国土の約 22%が対象となり得ると試算されている（**図** 1.1-1)。

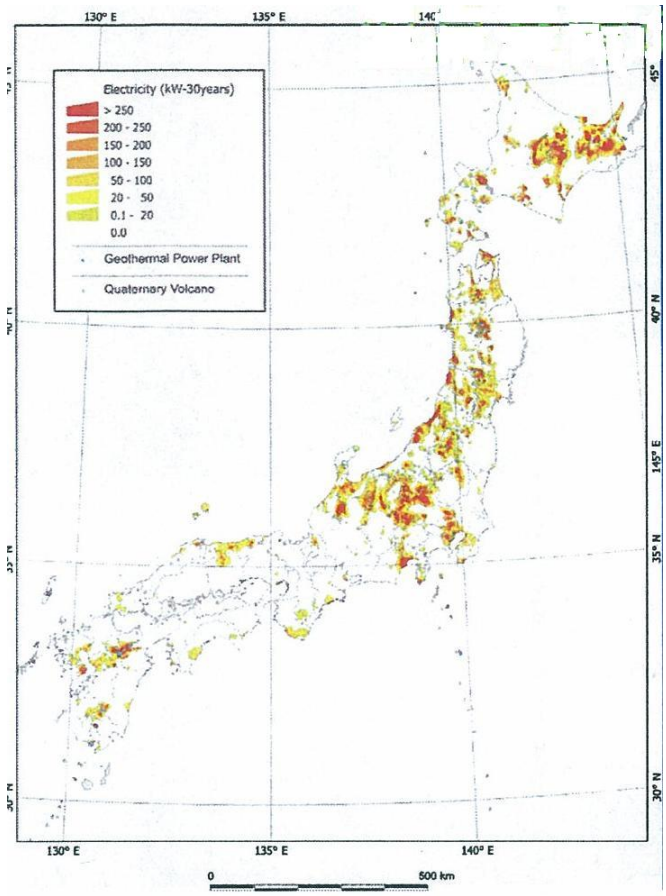


図 1.1-1 日本の 53℃以上の地熱資源量（出典：矢野、2008）[1)]

また、日本における火山地帯を除いた平均的な地温勾配は 0.025～0.03℃/m と言われており、地表の年平均気温を 15℃とすれば、0.025℃/m の地温勾配でも深度 2,000m では 65℃、3,000m では 90℃に達する。ここで、50℃～120℃程度の温度でも発電が可能となれば、地熱資源が利用可能な地域はさらに拡大する。

そこで、これまでに地熱地域として着目されていない地域、また、自然公園等の規制や既存の温泉への影響が少ない地域において、120℃以下の低温地熱の利用ができれば、地球温暖化対策だけでなく、エネルギーの安定供給にも貢献できる。このような観点から、本調査では、これまで地熱地域として着目されていなかった比較的低温の地熱地域における地熱エネルギー利用の可能性を検討し、低温地熱発電を想定した資源量の評価、低温地熱発電に係わる技術レベルの検討および今後の課題の抽出を行ったものである。

1.2 活動経緯

本調査は、調査方針・調査内容の審議を行う委員会、および具体的な調査・検討を実施する作業部会により実施した。委員会および作業部会の活動経緯は以下に示すとおりである。

1.2.1 委員会活動経過

回	開催日	審議事項
第 1 回	H23 年 8 月 5 日	・メンバー紹介 ・今年度研究実施計画について ・今後のスケジュールについて
第 2 回	H23 年 12 月 2 日	・現在までの検討結果についての中間報告 ・調査研究の目次（案）ついて ・今後のスケジュールについて
第 3 回	H24 年 2 月 23 日	・H23 年度報告書（案）の審議

1.2.2 作業部会活動状況

回	開催日	作業内容
第 1 回	H23 年 8 月 23 日	・第一回委員会の報告 ・今後のスケジュールについて
第 2 回	H23 年 10 月 18 日	・モデル候補地の選定について ・蔵王付近の温泉事例 ・今後のスケジュールについて ・報告書目次（案）について
第 3 回	H23 年 11 月 16 日	・報告書目次（案）および作業分担について ・候補地選定等について ・第 2 回委員会資料の確認と今後のスケジュールについて
調査出張	H23 年 12 月 19 日	・新潟県松之山温泉、温泉発電実証試験場視察

第４回	H24 年 1 月 25 日	・第２回委員会議事に対する対応について ・報告書目次（案）および作業分担について ・今後のスケジュール、報告書作成スケジュールについて
第５回	H24 年 2 月 15 日	・報告書原案の検討

1.3　成果概要

本研究では、これまで地熱地域として着目されていなかった地域を対象に、文献資料から地域の概略の水理地質構造を構築した上で、地熱の貯留層を推定し地熱資源量の評価を試みた。

また、120℃以下の温度、特に 100℃から 50℃の間でも発電が可能な発電方式の調査を行い、地熱の賦存状態に応じた適切な発電システムの検討あるいは実用化へ向けた課題の抽出を行った。

1.3.1　低温地熱地域の調査

国内の地熱資源の分布状況を概観し、比較的低温の地熱資源を期待できる地域を抽出した上で、その中から２地域を選んで詳細な検討を行った。検討対象地域の選定にあたっては、すでに「地熱地域」と称されている地域以外にも利用可能な地熱資源が存在し得ることを示すことを目的として、あえて既往の地熱発電所の近傍や地熱促進調査等が行われた地域を除外した。その上で、地熱ポテンシャルマップや温泉鉱泉データベースで活動度指数や地温の高い地域を抽出した。さらに、電力の需要や代替電源の必要性などの社会的要因を加味して、都市部に近い仙台南西部と離島である隠岐島後の２地域を選定した。

1.3.2　低温地熱発電システムの検討

120℃以上の高温の熱水を利用する地熱発電は、地上では熱水自体が沸騰しているためその蒸気をそのまま利用してタービンを回して発電している(図 1.3.2-1)。ところが、120℃以下の熱水からはタービンを回せるほどの蒸気が得られないため、低温で沸騰する有機媒体を二次作動流体として利用し、地下からくみ上げた熱水で二次作動流体を熱してタービンを回すバイナリー発電（図 1.3.2-2）が利用される。国内では九州電力の八丁原発電所で約 143℃の熱水を利用したバイナリー発電が実用化されており、また、国外においても 120℃から 160℃の熱水を利用したバイナリー発電が運用されている。このように、バイナリー発電は、低温の熱水を利用して発電を行うための有力な手法の一つである。

本研究では、バイナリー発電を中心に 120℃以下、特に 100℃を下回る熱水を利用した発電システムの現状の技術レベルを調査し、適用可能温度、付帯設備、作動媒体、流量と発電規模等の観点から整理し、低温地熱に利用可能な発電システムの検討を行った。

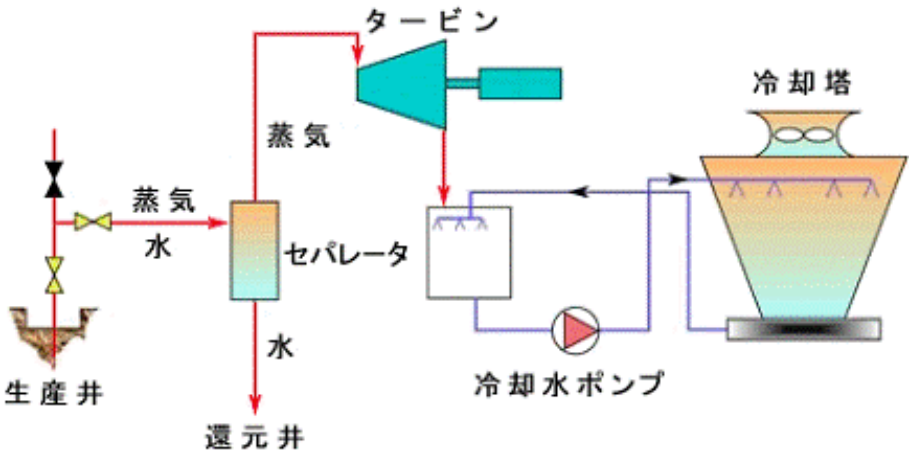


図 1.3.2-1　地熱発電のプラント概念図（出典：地熱学会ホームページ）[2)]

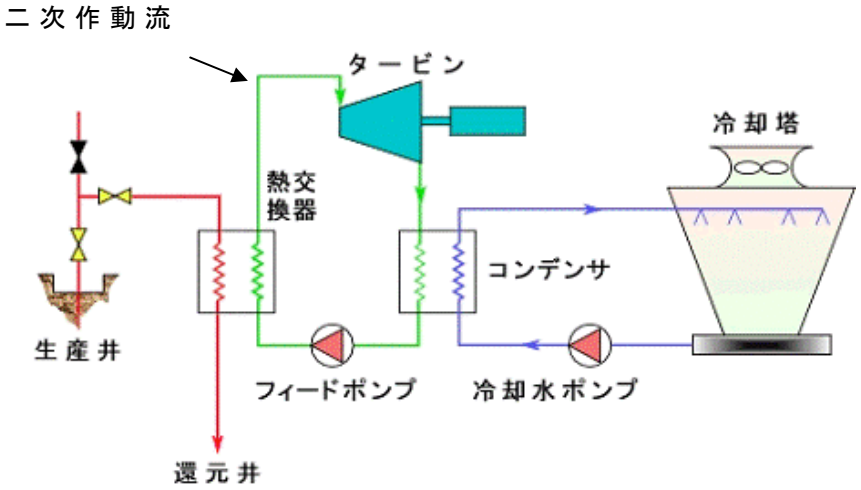


図 1.3.2-2 バイナリー発電プラントの概念図（出典：地熱学会ホームページ）[2)]

1.3.3　地域開発に資する地熱利用の検討

低温の地熱を利用した発電では大規模な電力を得ることは難しく、発電規模は比較的小規模とならざるを得ない。そこで、地熱を発電だけでなく他の用途にも利用し付加価値を高めることが必要となる。地域開発の観点から、地域に根ざした地熱利用の事例を調査し、発電と合わせた地熱利用の形態を検討した。

1.3.4　まとめと今後の課題

調査の結果、２地域の地熱賦存量の概算を行い、適用可能な発電システムとしてバイナリー発電システムを選定した。しかしながら、100℃前後の温度では大量の熱水が必要なことから、さらなる熱交換効率の向上が望まれるとともに、断層帯のような高透水性の地熱貯留層が存在すれば有利である。

今後の課題として、モデル地域を選定し、以下に示した項目の具体的な評価を行うことが望まれる。

・対象地熱貯留層の性状（温度、深度、透水性）
・生産井の仕様、コスト
・ポンプの仕様（揚湯量、温度、消費電力)、コスト
・発電機の仕様（出力、冷却方法)、コスト
・温水のカスケード利用（還元の要否)、経済効果
・その他（仮定条件、変動幅、電力単価、維持管理コスト）

参考文献

1)矢野雄策（2008）：地熱発電の開発可能性、第一回地熱発電に関する研究会資料、経産省
2)地熱学会ホームページ：http://wwwsoc.nii.ac.jp/grsj/intro/riyou.html

第２章　平成 22 年度の調査結果

本研究では、これまで地熱地域として着目されていなかった地域を対象に、文献資料から地域の概略の水理地質構造を構築した上で、地熱の貯留層を推定し地熱資源量の評価を試みた。また、120℃以下の温度、特に 100℃から 50℃の間でも発電が可能な発電方式の調査を行い、地熱の賦存状態に応じた適切な発電システムの検討あるいは実用化へ向けた課題の抽出を行った。また、発電とは別に温熱利用の事例についても調査を行った。

以下に平成 22 年度の調査研究結果の概要を記述する。

2.1　低温地熱地域の調査

国内の地熱資源の分布状況を概観し、比較的低温の地熱資源を期待できる地域を抽出した上で、その中から 2 地域を選んで詳細な検討を行った。検討対象地域の選定にあたっては、すでに「地熱地域」と称されている地域以外にも利用可能な地熱資源が存在し得ることを示すことを目的として、あえて既往の地熱発電所の近傍や地熱促進調査等が行われた地域を除外した。その上で、地熱ポテンシャルマップや温泉鉱泉データベースで活動度指数や地温の高い地域を抽出することとした。

まず、日本熱水アトラス [1)]に掲載の深度 500m 毎の地温分布を**図 2.1-1** に示し、日本全体の地温分布を俯瞰した。深度 500m～2000m までが図示されており、深度 2000m で 100℃以上を示す領域について注目すると、北海道北東部、東北日本から北陸、山陰、九州において地温が相対的に高いことが認められる。

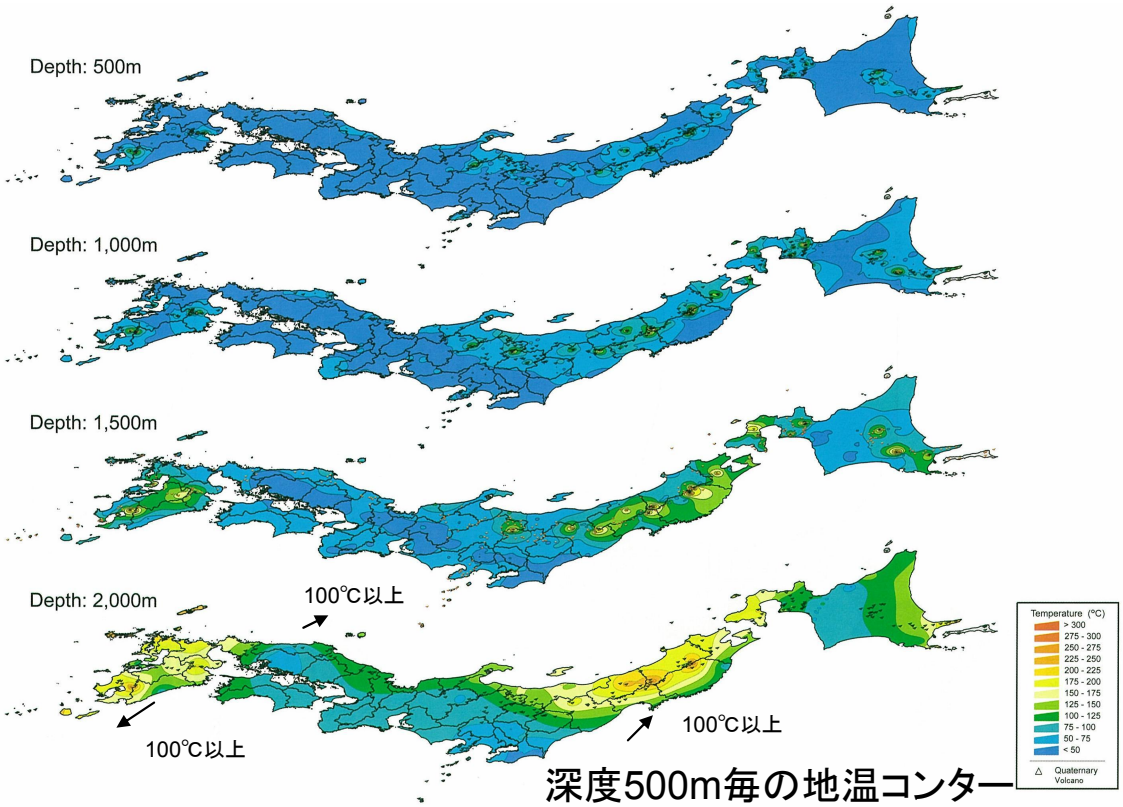


図 2.1-1　深度 500m 毎の地温コンター図（出典：村岡ほか，2007[1)] に加筆）

次に、地熱ポテンシャルマップ [2)]から地方別に作成した活動度指数分布図に既往地熱発電所地点や地熱開発促進調査や資源量評価が実施済みの位置を加筆したものを作成した。例として東北地方の例を**図 2.1-2** に示す。

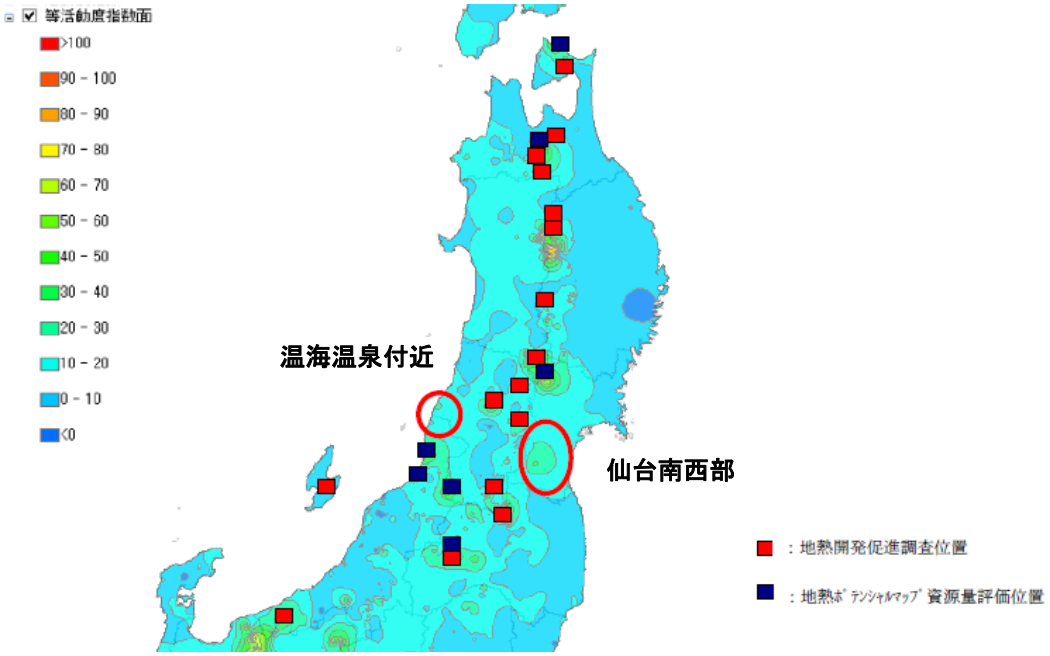


図 2.1-2　活動度指数コンターと既往地熱資源量算出位置など（東北地方）

これらの図の結果から、比較的活動度指数が高く、既往資源量評価のなされていない地域を整理すると、**表 2.1-1** に示した地域群がある。これらの地域についての地域性や特徴も整理して**表 2.1-1** に示す。

表 2.1-1　活動度指数が高く地熱資源量未評価地域の特徴

地域名	地域性	備　考
温海温泉付近	温泉近傍のみで狭い。	活動度指数の高い地域は温泉地に特化される。
仙台南西部	比較的広い。大都市近傍。	深層地下水的分布。
赤城山付近	火山近傍のみで狭い。	火山山体内のみ。活動度指数20以上の中で深度既知の温泉が無い。
美ヶ原付近	比較的広い。温泉地点在。	活動度指数20以上の中で深度既知の温泉が無い。
鳥取西部	温泉中心であるが、比較的広い。	活動度指数の高い地域は温泉地に特化される。
隠岐島後	離島。	深度1246mで孔底温度96℃が確認されている。
宮之城温泉付近	温泉近傍のみで狭い。	活動度指数の高い地域は温泉地に特化される。

さらに、電力の需要や代替電源の必要性などの社会的要因も踏まえて、都市部に近い仙台南西部と、離島である隠岐島後の 2 地域を選定した。

仙台南西部は、**図 2.1-3** に示すように西側に活火山の蔵王火山、第四紀火山の青麻火山があり、付近には比較的高温の遠刈田温泉や秋保温泉が分布している。この付近の深度 1,000m および 1,500m の地温分布を、地熱ポテンシャルマップ[2]を基に作図すると**図 2.1-4** および**図 2.1-5** のようになり、西部ほど地温が高い傾向にあることがわかる。

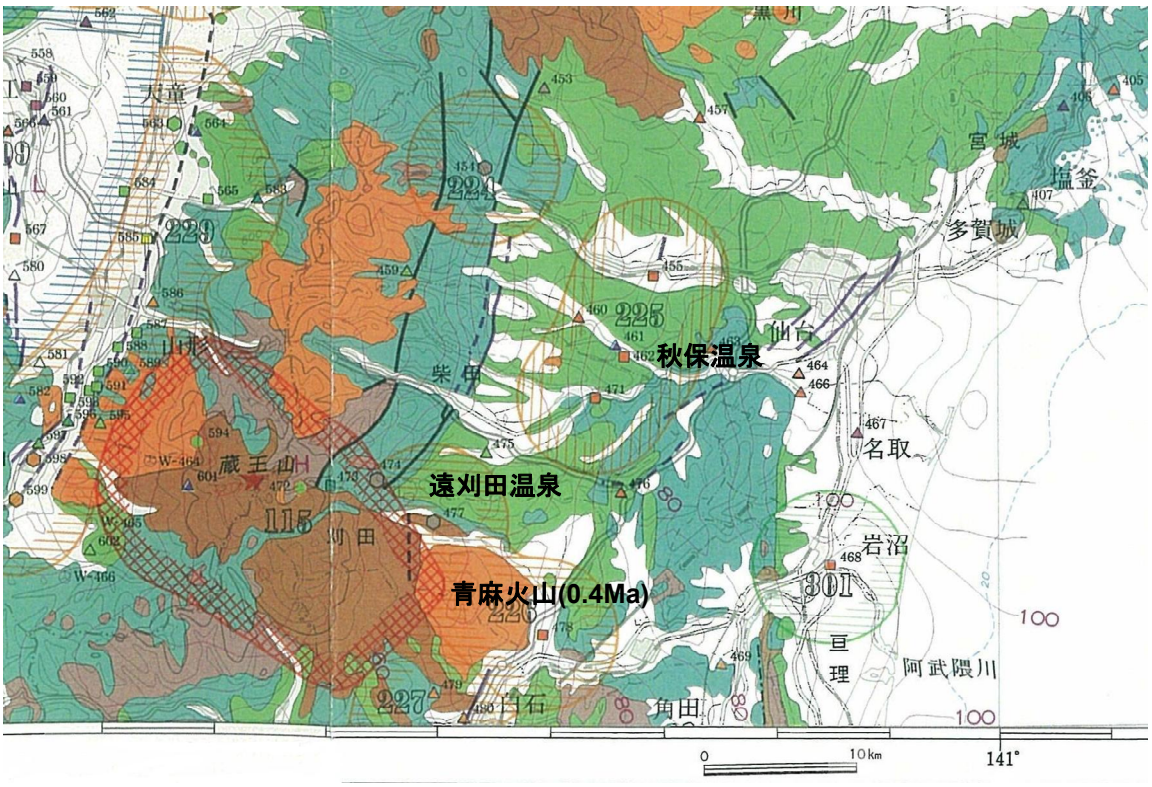


図 2.1-3　50 万分の 1 地熱資源図「秋田」の仙台南西部付近

（出典：高橋ほか，1996[3] に加筆）

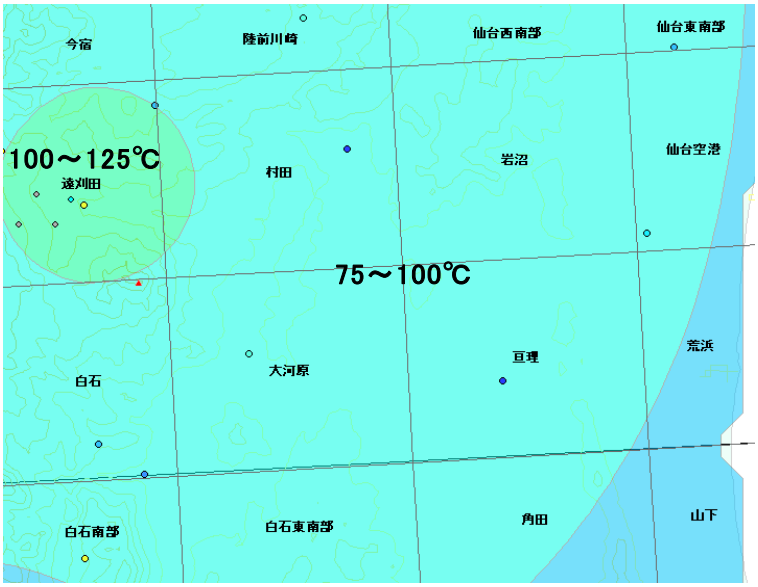


図 2.1-4　仙台南西部の深度 1,000m の地温分布

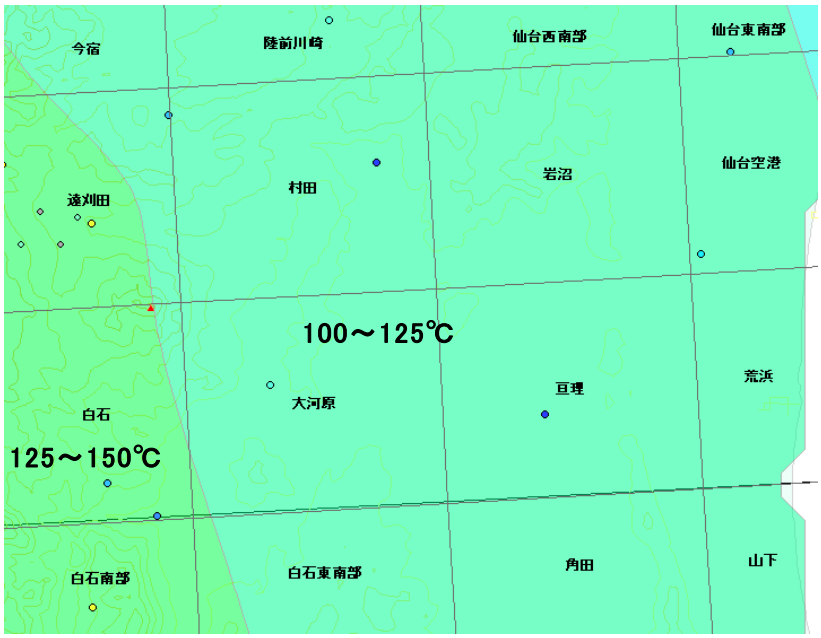


図 2.1-5　仙台南西部の深度 1,500m の地温分布

仙台南西部付近の地質構造については、村田町から蔵王町にかけてのほぼ東西方向の既往断面が描かれている（図 2.1-6 参照）。これによると、中央部の向斜部分で深度約 1,000m に層厚約 300m の凝灰角礫岩層が分布している。

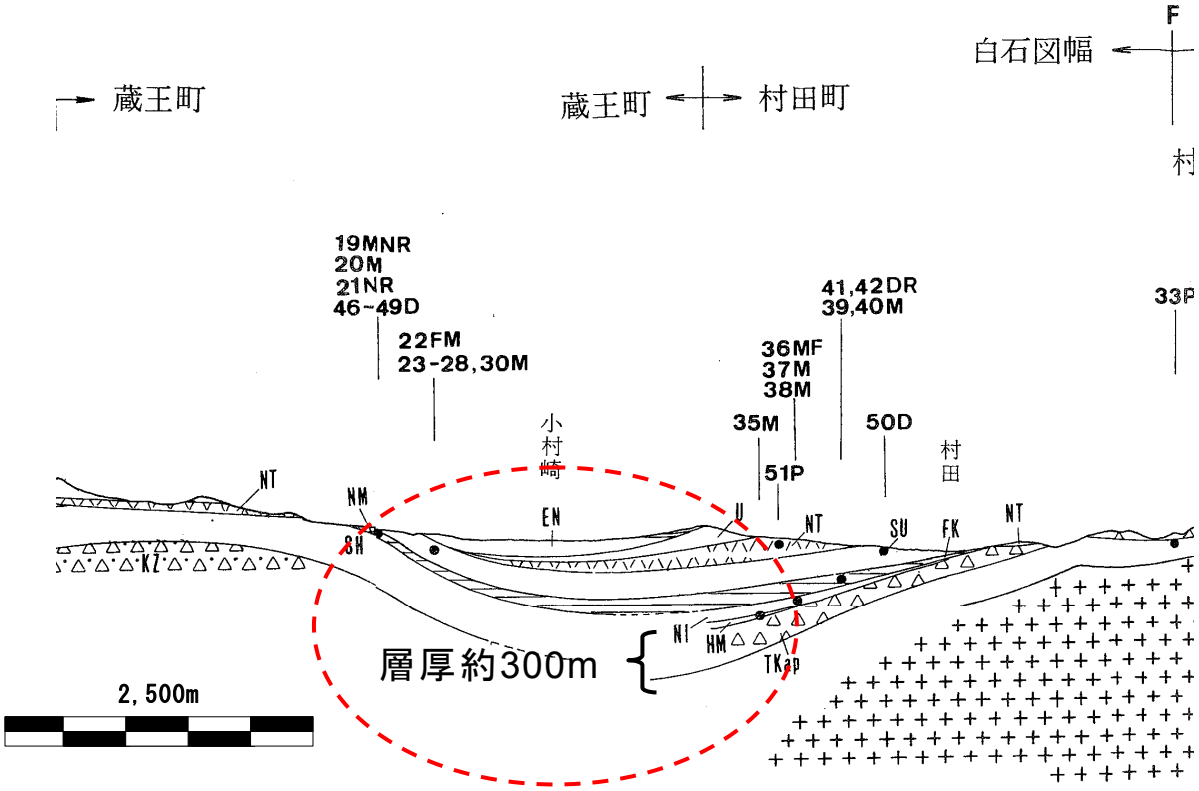


図 2.1-6 村田町付近拡大断面図（出典：北村（編），1986[4]に加筆）

一方、隠岐島後においては、山内ほか（2009)の５万分の１地質図「西郷」[5)]が隠岐島後の全島をカバーしている。また、隠岐島後北西部において、吉谷ほか(1995) [6)]は、温泉ボーリングによって得られた地質情報と地表地質を基に、温泉ボーリングを通る地質断面図を作成し、主として郡累層の概要を示している。**図 2.1-7** に、吉谷ほか(1995) [6)]の地質図および地質断面図を示す。

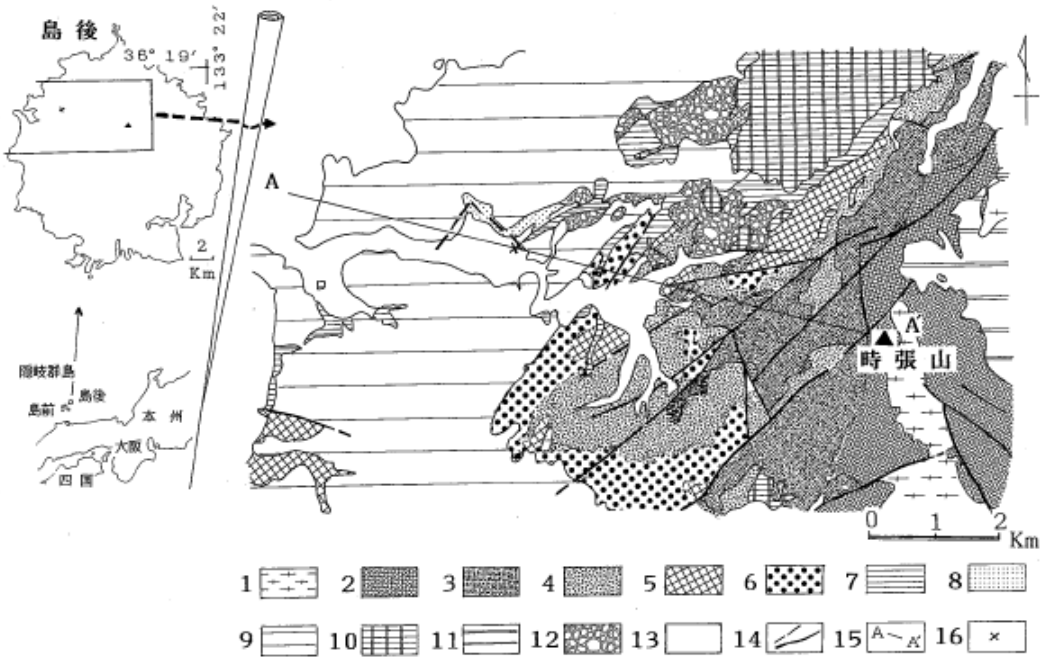


図１　調査地の位置および地質図（山崎：1992原図を簡略・一部修正）

1. 隠岐片麻岩類　2. 時張山累層下部層　3. 時張山累層上部層　4. 小路凝灰岩層
5. 東郷・郡玄武岩・那久火山岩層　6. 大津久礫岩層（4～6：郡累層）　7. 久見累層
8. 都万累層　9. 隠岐祖面岩・流紋岩　10. 大峯玄武岩　11. 葛尾流紋岩　12. 崖錐堆積物
13. 完新統　14. 断層（推定・確定）　15. 断面線　16. 試錐地点

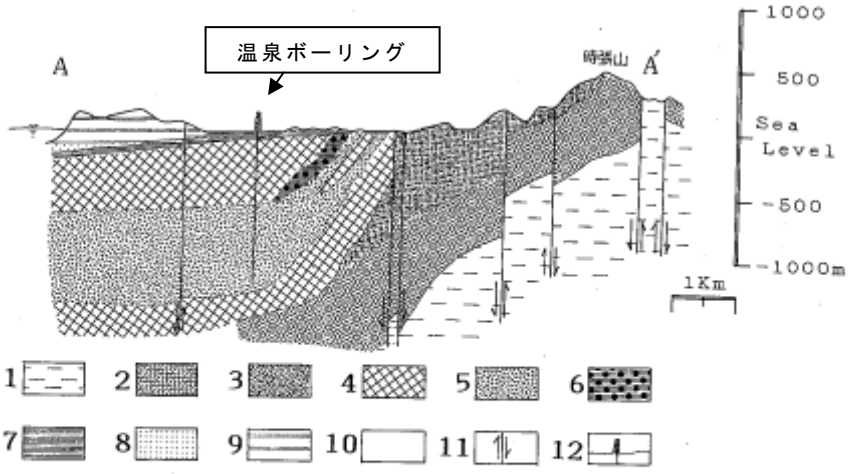
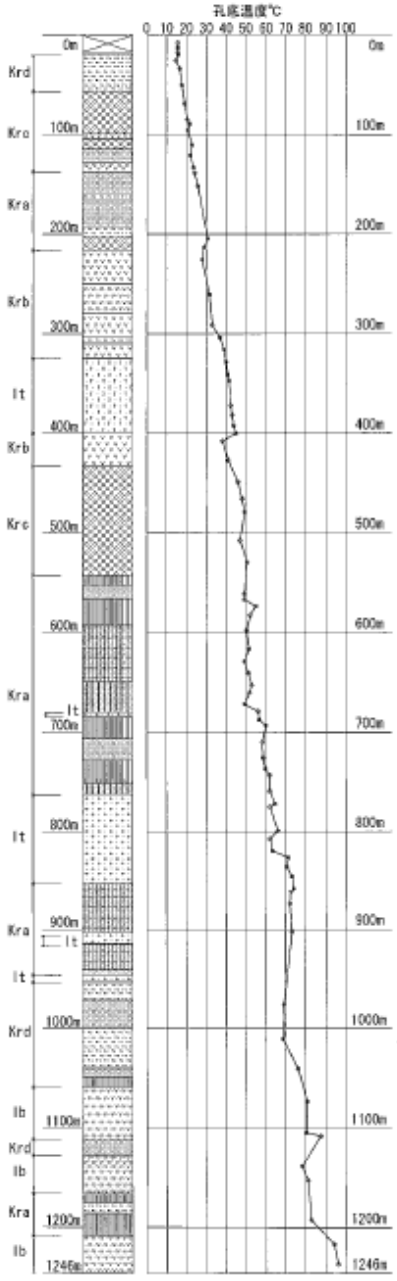


図２　地質断面図

1. 隠岐片麻岩類　2. 時張山累層下部層　3. 時張山累層上部層
4. 安山岩質～玄武岩質溶岩類　5. 安山岩質～デイサイト質火砕岩類　6. 礫岩
（4~6：郡累層）　7. 久見累層　8. 都万累層　9. 隠岐流紋岩　10. 完新統
11. 断層　12. 試錐地点および試錐孔

図 2.1-7　温泉ボーリングを含む地質図および地質断面図（出典：吉谷ほか，1995 [6)]）

吉谷ほか(1995)[6]および山内ほか(2009)[5]の温泉ボーリングの柱状図には、温度検層結果が併記されている。山内ほか(2009)[5]に示された温度検層結果を**図 2.1-8** に示す。これらの温度検層結果を見ると、孔底付近の地温は約 96℃に達している。また、地温の深度分布は大局的には一次直線状に深度上昇するパターンを示しており、地温が基本的に熱伝導によって支配されていると考えられる。したがって、深度に応じた地温を期待することが可能である。



第 12.1 図　五餘温泉第１温泉源の孔底温度
柱状図の凡例は第 5.8 図に従う.

図 2.1-8　温泉ボーリングの柱状図および温度検層結果（出典：山内ほか，2009[5]）

以上の既往データをもとに、それぞれの地域における地熱資源量（貯留層エネルギー）の試算を実施した。算定式は、Brook *et al.*（1979）[7]によって確立された貯留層エネルギーの計算方法で、以下のように表現される。

$$Qr = \rho c \int_{Z_b}^{Zr} \int_{S} \{T(x, y, z) - T_{ref}\} ds \cdot dz$$

ここで，

Qr：貯留層エネルギー（J）

ρc：（岩石＋水）の容積比熱

岩石容積比熱2.5 J/cm³/℃，貯留層孔隙率15％仮定して2.7 J/cm³/℃

$T(x, y, z)$：貯留層内の点(x, y, z)における温度（℃）

T_{ref}：基準温度

S：面積(x, y)

Z_b：重力基盤深度

Zr：温度150℃に対応する貯留層深度

このうち、ρｃについては孔隙率の代表値、温度については設定した貯留層範囲の代表温度を決めることによって簡便に算出することが可能となる。すなわち、

Qr＝ρｃ＊Ｖ＊Ｔ

ここに、Ｖ：貯留層体積

Ｔ：貯留層代表温度－基準温度

と書きかえることができる。

仙台南西部については、**図 2.1-9** に示す算出範囲を設定し、孔隙率が不明なため 15%の仮定値を代入した。試算結果を**表 2.1-2** に示す。

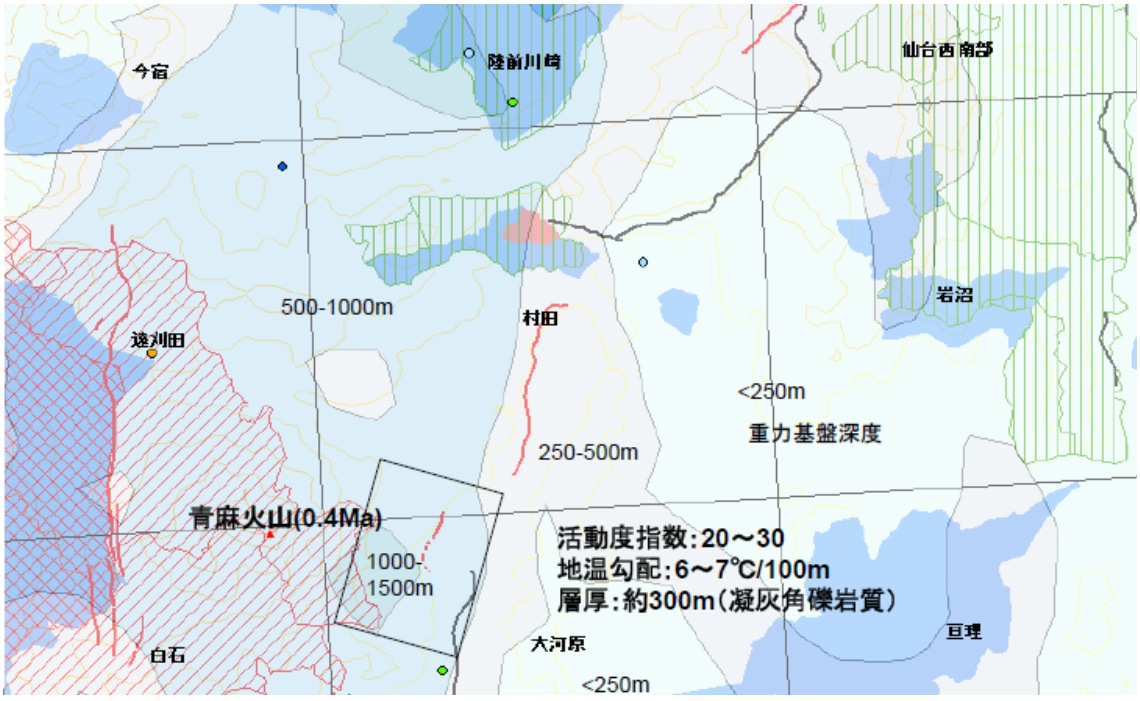


図 2.1-9　仙台南西部の地熱資源量算出範囲

表 2.1-2　仙台南西部の貯留層エネルギーの試算結果

地域名	貯留層比熱	面積	層厚	平均地温	基準温度	資源量
	ρc(J/cm3*℃)	a(cm2)	d(cm)	t(℃)	t-ref.(℃)	$Q_{R(J)}$
仙台南西部	2.70	6.00E+10	3.00E+04	80	15	3.16E+17

隠岐島後についても Brook *et al.*(1979)[7]によって確立された貯留層エネルギーの計算方法で試算を実施した。図 2.1-10 に示す算出範囲を設定し、孔隙率は中国地方日本海側の同時代の類似堆積層の文献値（表 2.1-3 参照）から保守的に 20%と見積もった。試算結果を表 2.1-4 に示す。

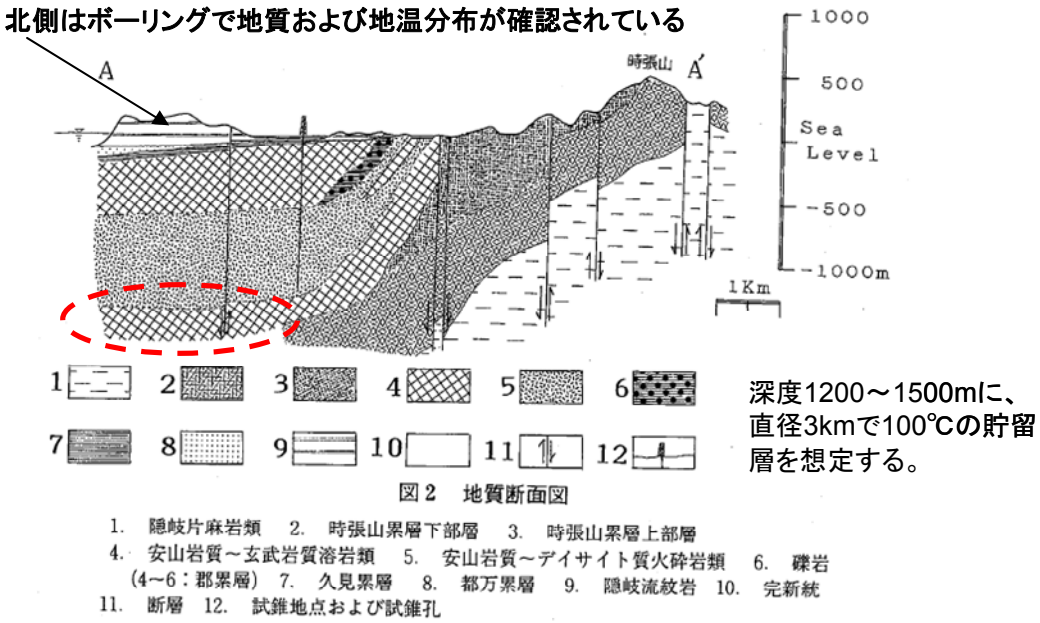


図 2　地質断面図

1. 隠岐片麻岩類　2. 時張山累層下部層　3. 時張山累層上部層
4. 安山岩質～玄武岩質溶岩類　5. 安山岩質～デイサイト質火砕岩類　6. 礫岩（4～6：郡累層）　7. 久見累層　8. 都万累層　9. 隠岐流紋岩　10. 完新統
11. 断層　12. 試錐地点および試錐孔

図 2.1-10　隠岐島後の貯留層の設定

表 2.1-3　隠岐島後の波多層の物性値（出典：星野ほか，2001[8]から抜粋）

試料		岩相	地層	地質年代	地名	孔隙率 (%)	密度(g/cm³)		
番号	記号						自然状態	乾燥状態	湿潤状態
SR0706	SMN	砂岩	波多層	N1	島根県隠岐郡五箇村都万路	21.19	2.07	2.06	2.22
SR0707	SMO	泥岩	波多層	N1	島根県隠岐郡西郷町元屋	23.25	1.94	1.91	2.09

表 2.1-4　隠岐島後の貯留層エネルギーの試算結果

地域名	貯留層比熱	面積	層厚	平均地温	基準温度	資源量
	ρc(J/cm3*℃)	a(cm2)	d(cm)	t(℃)	t-ref.(℃)	$Q_{R(J)}$
隠岐島後	2.84	7.07E+10	3.00E+04	100	15	5.12E+17

以上のように試算された低温地熱の資源量については、その計算の過程において設定した各数値には以下のような課題が含まれている。

- 貯留層の構造把握（3 次元的な形状、岩質など）
- 貯留層および周辺の熱構造把握

2.2　低温地熱発電システムの検討

120℃以上の高温の熱水を利用する地熱発電は、地上では熱水自体が沸騰しているためその蒸気をそのまま利用してタービンを回して発電している（**図 2.2-1**）。ところが、120℃以下の熱水からはタービンを回せるほどの蒸気が得られないため、低温で沸騰する有機媒体等を二次作動流体として利用し、地下からくみ上げた熱水で二次作動流体を熱してタービンを回すバイナリー発電（**図 2.2-2**）が利用される。国内では九州電力の八丁原発電所で約 143℃の熱水を利用したバイナリー発電が実用化されており、また、国外においても120℃から 160℃の熱水を利用したバイナリー発電が運用されている。このように、バイナリー発電は、低温の熱水を利用して発電を行うための有力な手法の一つである。

本研究では、バイナリー発電を中心に 120℃以下、特に 100℃を下回る熱水を利用した発電システムの現状の技術レベルを調査し、適用可能温度、付帯設備、作動媒体、流量と発電規模等の観点から整理し低温地熱に利用可能な発電システムの検討を行った。

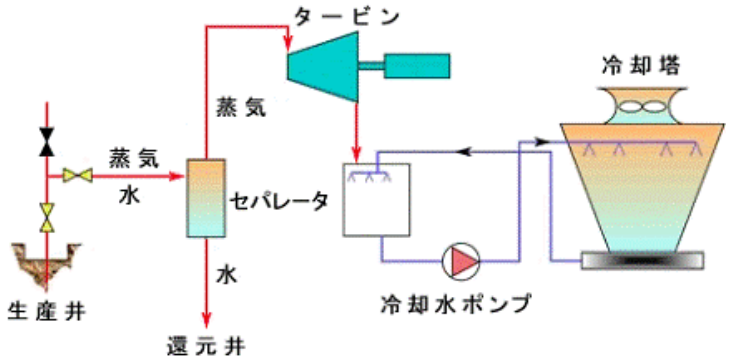


図 2.2-1　地熱発電のプラント概念図（出典：地熱学会ホームページ）[9)]

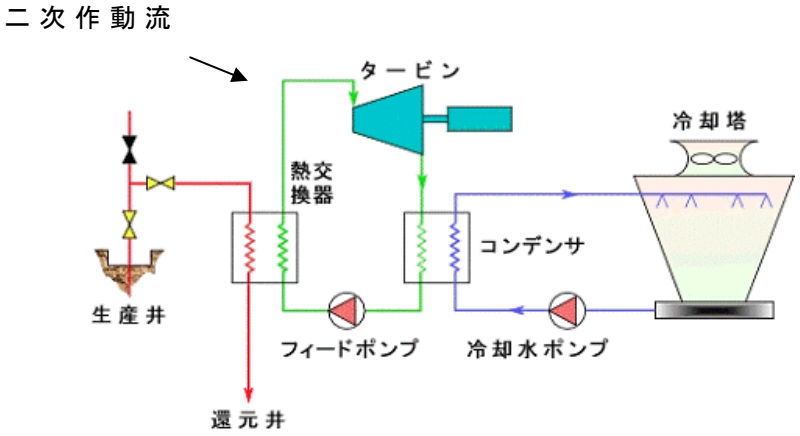


図 2.2-2 バイナリー発電プラントの概念図（出典：地熱学会ホームページ）[9)]

バイナリー発電は作動媒体からのエネルギー回収方法によってランキンサイクルとカリーナサイクルに区分される。また、ランキンサイクルには作動媒体にペンタンのような炭化水素系の媒体を用いるものと、代替フロン系の媒体を用いるものとが存在する。ここでは、炭化水素系ランキンサイクル、代替フロン系ランキンサイクルおよびカリーナサイク

ルの 3 つに分けて、現状技術レベルの概要をまとめた。

1) 炭化水素系ランキンサイクル

(1)八丁原バイナリー発電施設

八丁原バイナリー発電施設は、我が国最大の地熱発電所である九州電力八丁原地熱発電所内に併設されている発電施設で、我が国で唯一の商用バイナリー発電施設である。八丁原バイナリー発電施設の位置を**図 2.2-3** に示す。

図 2.2-3　八丁原バイナリー発電施設の位置

八丁原地熱発電所は 2 基の発電機で合計 16 本の蒸気井を利用しているが、一般に蒸気井の内圧は減衰していくため、タービンの設計値を満足しなくなった蒸気井はシステムからはずすこととなっている。このように蒸気圧が減衰してフラッシュ発電には対応できなくなった井戸の有効利用としてバイナリー発電が検討された。

平成 15 年からバイナリー発電の実証試験が行われ、平成 18 年から営業運転を始め、現在に到っている。**表 2.2-1** に八丁原バイナリー発電施設の概要を示す。

表 2.2-1　八丁原バイナリー発電所の設備概要

項　　目		仕　　様
メーカ		ORMAT社（イスラエル）
定格出力		2000kW（2230kVA，力率0.9）
媒体蒸気（ペンタン）	圧力／温度	1.09MPaG ／ 133.2℃
	蒸気流量	105.77t/h
蒸気・熱水	圧力／温度	0.304MPaG ／ 143.1℃
	蒸気流量	17.825t/h
	熱水流量	64.14t/h
タービン型式		衝動横置2段復水タービン
発電機型式		横置円筒回転界磁形同期発電機
復水器型式		空冷式
熱交換器型式		横置シェルアンドチューブ型
制御方式		中央制御方式による常時監視自動制御

（出典：八丁原発電所パンフレット）

発電設備は、イスラエルの ORMAT 社のものを採用しており、媒体蒸気に沸点が 36℃のペンタンを使用し、143℃の熱水を使用して出力は 2,000kW である。

(2)JFE エンジニアリング株式会社

JFE エンジニアリング株式会社では、米国の ORMAT International Inc.と業務提携しバイナリー発電事業の開拓を目指している。電力会社やデベロッパーを対象とした地熱発電分野でオーダーメイドのシステム販売を行っているが、250kW 級のパッケージ販売も行っている。熱源の温度は 100℃以上を対象とし、発電規模も kW 級ではなく MW 級を目指している。

(3)ランダウ（Landau）

ミュンヘンの西北西約 300km の南部ドイツのランダウでは、2007 年 11 月からランキンサイクルによるバイナリー発電所が操業を行っている。ランダウでは深度 3、300m の井戸から 252t／h の大量の熱水を汲み上げて 3.00MW の発電を行っている [2)]。熱水の温度は 160℃で発電に利用した熱水は河川水の加熱に利用され全量が地下に還元されている。加熱された河川水は地域に給湯されている（**図 2.2-4**）。

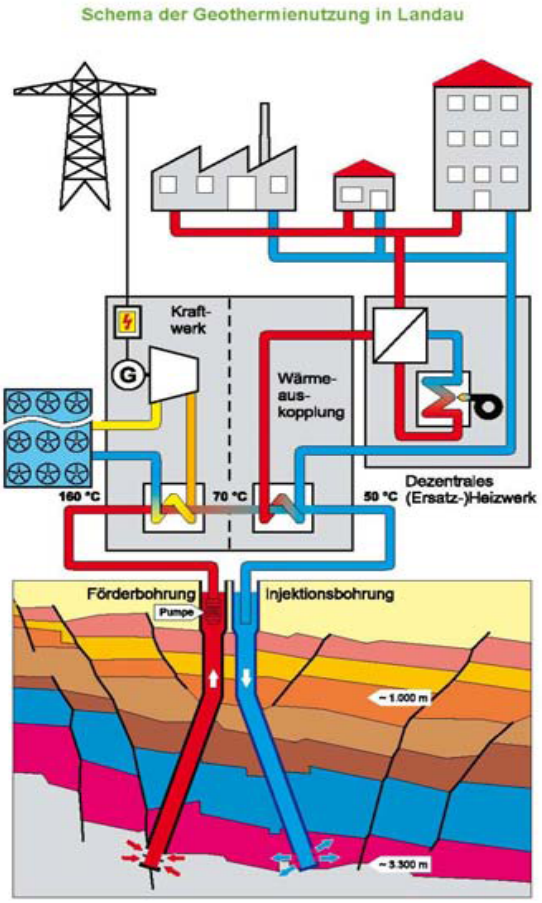


図 2.2-4　Landau における地熱発電
（出典：Schindler *et al.*2010）[10)]

ランダウはスイスのバーゼルからドイツのフランクフルトに至る長さ 300km、幅 40km のライン地溝帯に位置する（**図 2.2-5**）。ライン地溝帯は石炭紀の花崗岩または片麻岩を基盤とし、古第三紀から新第三紀の堆積物が厚く堆積している [3)]。地溝帯に沿って新第三紀の火山活動の形跡が認められ、地溝帯の方向とほぼ平行に断層が発達している。ランダウ周辺の深度 1,500m の温度分布を**図 2.2-6** に示す。温度の高い箇所はライン地溝帯の方向に沿って分布しており、ランダウ地熱発電所の熱源はライン地溝帯の形成に伴った構造性の熱源であると推定される。ランダウでは生産井と還元井それぞれ 1 本ずつが掘削され、生産井はこれらの断層帯を狙って掘削されている。252t／h にもおよぶ熱水の供給量はこのような断層の存在によるところが大きいものと思われる。

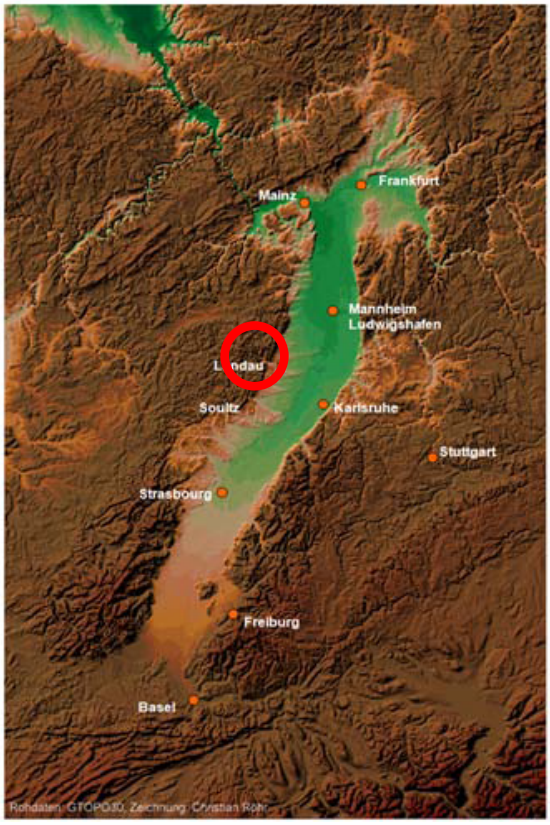


図 2.2-5　ライン地溝帯とランダウの位置
（出典：Schindler *et al.*,2010）[10)]

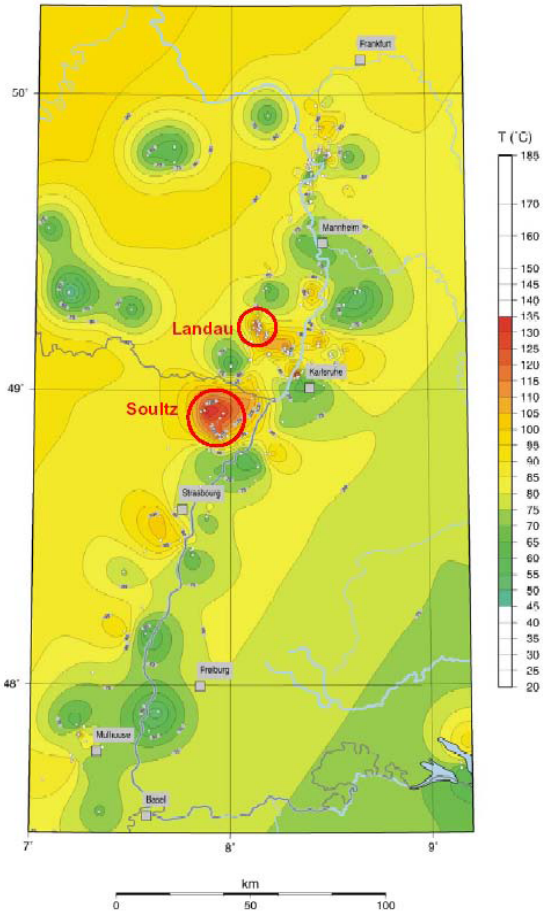


図 2.2-6　ランダウ周辺の
深度 1,500m の地温分布
（出典：Schindler *et al.*,2010）[10)]

2)代替フロン

代替フロンを利用したバイナリー発電機器の現状を調査し、低温地熱発電の事業化の際の課題を整理することを目的として、主要なメーカーへのヒヤリングを行った。ヒヤリング対象としたのは、最近の新聞記事において比較的低温に対応したバイナリー発電機器を開発したとされるメーカーを対象とした。

(1)川崎重工業株式会社

川崎重工株式会社では、80℃から 120℃の排温水を対象とした 250kW クラスのバイナリー発電設備のデモ運転を同社工場で行っている。発電出力は 100kW から 250kW である。出力は**図 2.2-7** に示すように、温水の温度と流量によって決まり、たとえば、250kW の出力を確保するには、温水の温度が 98℃の場合で 180t／hr の流量が必要となる。

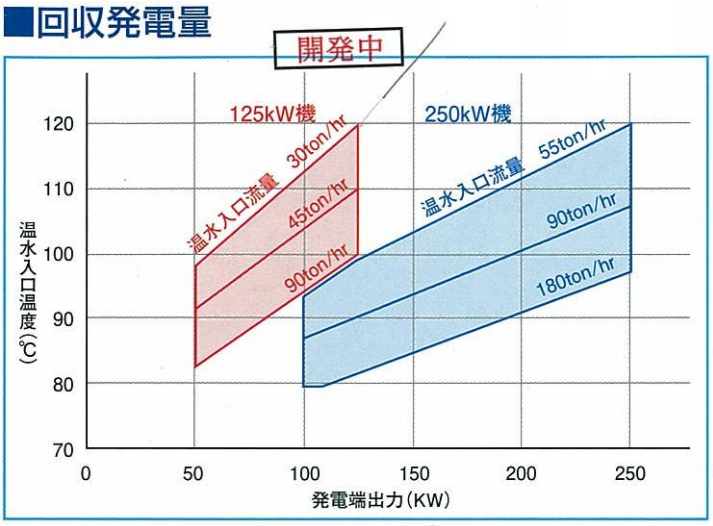


図 2.2-7　バイナリー発電機における出力と温度・流量との関係例

（出典：川崎重工業株式会社パンフレット）

作動媒体は代替フロン系の媒体を採用しているものと推察される。媒体の冷却は水冷方式であるが、空冷式も開発中である。また、250kW 機の実証機と平行して 125kW 機の開発を行っている。

(2)株式会社神戸製鋼所

70℃から 95℃の温排熱を対象とした 50kW 級および 100kW 級のバイナリー発電システムの開発を行っている。100kW の出力をするには、温水の温度が 90℃の場合で 120t／hr の流量が必要となる。

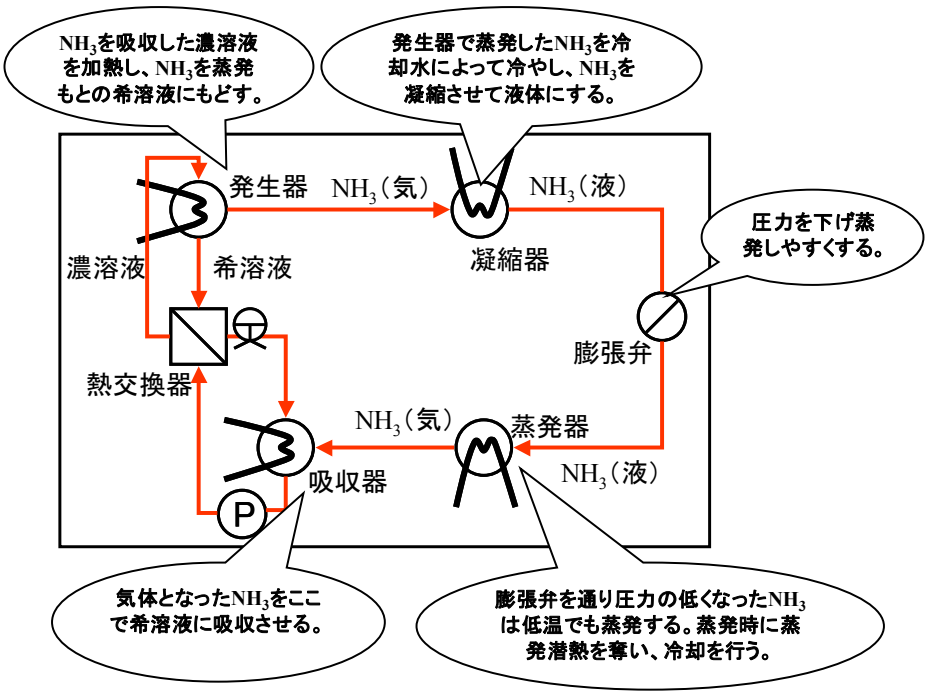
作動媒体は沸点が 15.3℃のフルオロカーボンの一種である R245fa を使用している。これば、オゾン層破壊係数はゼロであるが、地球温暖化係数は低いもののゼロではない。

プロトタイプ（50kW 機）の検証を H22 年 12 月から開始しており、50kW 級と 100kW 級のシステムを H23 年秋に市場に投入する予定との事である。

3)　カリーナサイクル

カリーナサイクルは、1985 年にロシア人のカリーナ博士によって発明された発電方式である。基本的には、アンモニア冷凍機の沸騰過程の下流側に蒸気タービン発電機が付加されたと考えればよい。**図 2.2-8** にアンモニア冷凍機の原理を示す。

アンモニア吸収冷凍機は、冷媒にアンモニア、吸収剤に水を使用した吸収冷凍サイクルを用いている。蒸発器で蒸発したアンモニアは、吸収器でアンモニア希溶液に吸収され、濃いアンモニア溶液になる。このアンモニア溶液は、溶液ポンプによって精留塔を経て高圧の発生器に送られ、加熱されてアンモニア蒸気を分離する。このアンモニア蒸気は水蒸気を含んでいるため、発生器内の気液分離器で精留され、高純度となったアンモニアガスは凝縮器で液化される。発生器からのアンモニア希溶液は、熱交換機で冷却され、吸収器で再び冷媒蒸気を吸収する。



第 2.2-8 図　アンモニア冷凍機の原理（出典：大里、 2005）[11)]

図 2.2-9 にカリーナサイクルの原理図を示す。カリーナサイクルでは発生器で発生させ、気液分離器で精留されて高濃度となったアンモニア蒸気を気液分離器タービン発電機に導き、タービンの回転力を電気に変換する過程が加わる。カリーナサイクルは、アンモニア－水混合冷熱媒が非共沸性を有しているため、単一冷熱媒よりも熱交換量が増大するといった利点を持っている。

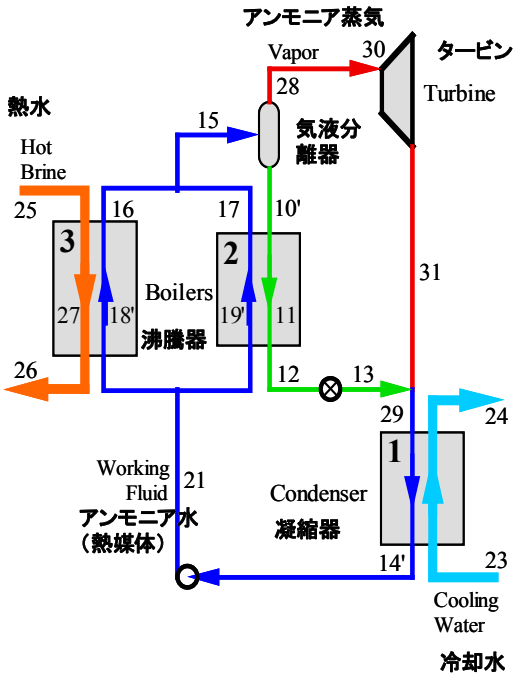


図 2.2-9　カリーナサイクルの原理（出典：大里、 2005）[11)]

このメカニズムを利用した動力回収機関がカリーナサイクルと呼ばれるものである。一方、アンモニアは常温では凝縮しないため、吸収メカニズムを利用して濃度の低いアンモニア水溶液にアンモニアー水の混合蒸気を吸収させ、常温での凝縮を可能としている。一般的にまとめられているアンモニアの利点・欠点は以下のとおりである。

（アンモニアの利点）

①地球環境汚染の心配がない
②価格が安い
③冷熱媒としてのＣＯＰが高い
④熱伝達率がよい
⑤臨界温度、圧力が高い
⑥漏洩時の探知が容易
⑦水に溶解するため膨張弁の詰まりがない
⑧冷凍（却）効果が大きい

（アンモニアの欠点）

①毒性がある。ただし、冷凍サイクルとしてすでに普及しており、漏洩に気をつければ問題ない
②可燃性がある。ただし、難燃性であり、爆燃の心配がない
③吐出温度が高い（冷凍機としての欠点）
④水に溶解し腐食性を生じる
⑤銅系統の合金材料を使えない
⑥油に溶解しない（低温側で問題）

また、発電技術としての特徴をまとめると以下のようになる。

①アンモニアー水の混合媒体は、炭化水素系冷熱媒体より低温で沸騰する（より低温での発電が可能）。
②二元混合物（アンモニア＋水）を使用することで、組成を制御して大気温の季節変動や地熱流体の変化に応じて発電効率を最適化できる。
③アンモニアと水は分子量 17.03:18.01 で類似しており、アンモニアー水の気体の挙動が蒸気と類似しており、タービンの金属シーリング等の僅かな変更で、標準の背圧式蒸気タービン部品を利用可能である。
④アンモニアは入手しやすく比較的安価である。
⑤アンモニアには温室効果がなく、自然界で容易に分解するため、炭化水素系冷熱媒体（CO_2の約 10 倍の温室効果）より環境への負荷が小さい。
⑥低温側での利用で、炭化水素系ランキンサイクル発電と比較して、発電効率が 20～40%程度向上する。
⑦よく知られたアンモニア吸熱冷却サイクルのノウハウが利用できるので、国内での部品調達や製作が容易である。

カリーナサイクル発電の効率を**図 2.2-10** に示した。この図は、横軸に熱源温度を、

縦軸に送電端出力(kW)当たりの熱水量をプロットしたものである。図中の▲は炭化水素系熱冷媒（ORC: Organic Rankin Cycle）ランキンサイクルの実績、■は再生器を付けて効率をあげた ORC ランキンサイクルの設計値、◆はカリーナサイクルの設計値をプロットしたものである。図から明らかなように、送電端出力で比較するとカリーナサイクルが一定量の熱源から得られる電力量で格段に優れていることが判る。

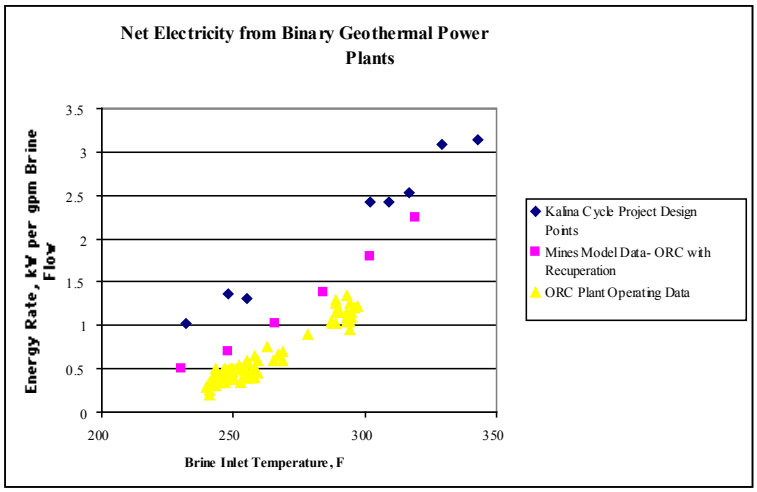


図 2.2-10　ランキンサイクルにおける熱源温度と送電端出力当たりの熱水量の関係

（出典：大里、 2005）[11)]

(2)　住友金属工業株式会社

国内では、住友金属株式会社鹿島製鉄所が、1999 年にそれまで未利用であった製鋼工場の転炉オフガスダクト冷却に使われた低温排水（98℃）を活用するため、カリーナサイクルによる発電システムを導入して実用化した(発電端出力 3,450kW、 送電端出力 3,100kW)。プラントの建設は、カリーナサイクルの特許権を有する米国 EXERGY 社からの単発ライセンス契約の元で荏原製作所が行った。

同プラントの建設工事は 1999 年 4 月に始まり、約 2 ヵ月の試験運転の後、8 月 31 日の使用前検査後、営業運転に入った。アンモニアは銅を腐食するため、本システムの熱交換器（再生器、蒸発器、凝縮器）の主要部に銅は用いることができないため、熱源温水およびアンモニア溶液との接触部には炭素鋼を、また海水と接触する凝縮器細管にはチタンを使用している。また、アンモニアの漏洩にも、細心の注意を払っている。世界で最初の低温発電設備であったため、立ち上げ時にはいくつかの困難があったとのことであるが、営業運転開始後は大きなトラブルもなく順調に稼動している。温水流量（計画性能 1,300t/h→運転実績 1,292t/h）・温度（計画性能、運転実績とも 98℃）ならびに海水温度（計画性能 18℃→運転実績 21℃）を補正したあとの実績（運転実績 3,268kW→補正後の運転実績 3,507kW）は計画性能(3,450kW)を満足しており、石油換算約 6,600kl/年のエネルギー消費を節減している。本プロジェクトへの総投資額は約 450 百万円で、その 1/3 の約 150 百万円は、前述の産業部門の省エネルギー推進のための政府補助金で賄われた。約 130 千円/kW の投資コストであり、本システムは競争力の高いコストで発電することができることが証明された。

(3) 地熱技術開発株式会社／産業技術総合研究所

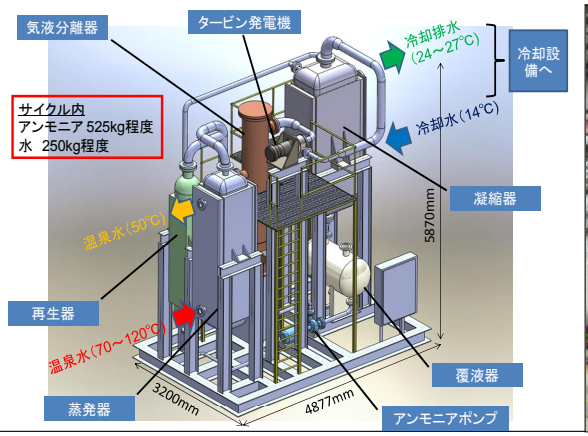
地熱技術開発株式会社と産業技術総合研究所は、2007 年から共同で温泉を利用した発電システムの実用化に取り組んでおり、2011 年から 50ｋW 級の温泉発電の実証を計画している。

a)温泉発電の原理

国内の多数の高温温泉では、浴用利用できない 50℃以上の熱エネルギーの多くが未利用のまま河川等に放流されている。温泉発電は、これらの未利用の熱エネルギーを利用して発電を行うシステムで、70～120℃の温泉水を浴用利用温度である 50℃まで下げる間の温度差エネルギーを回収して発電するものである。このシステムの利点としては、既存の高温温泉井を利用して発電を行うため開発リスクが少なく温泉の枯渇に結びつく懸念がないことがあげられる。また、発電と同時に、熱源温泉水の浴用適温化および冷却排温水（清水）による給湯・暖房熱を得ることができ、温泉施設や宿泊施設等の二酸化炭素の削減もできる。

b)NEDO/環境省プロジェクトの状況

NEDO/環境省の委託研究として、地熱技術開発株式会社と産業技術総合研究所が共同で開発中の温泉エコジェネシステムは、カリーナサイクル技術を利用して、70～120℃の温泉水を浴用利用温度 50℃まで下げる間の温度差エネルギーを回収して、二酸化炭素排出量の少ない 50kW 程度の発電を行い、50℃まで冷ました温泉水を浴用に供給できる発電システムである。**図 2.2-11** に温泉発電システムの開発状況を示す。



① 試作機（実証機）	地熱技術開発＋産総研
平成19～21年度	NEDO新エネルギーベンチャー技術革新事業 [機器製作、性能評価試験]
平成22～23年度	（継続研究）現在、工場での機器調整・性能評価試験継続
② 実用機	地熱技術開発＋産総研c＋弘前大 （協力：十日町市,新潟県）
平成22～24年度	環境省地球温暖化対策技術開発等事業（競争的資金）
（平成22年度）	許可申請・機器製作
（平成23年度）	機器組立・建設
	実証試験開始（年度後半、新潟県十日町市松之山温泉）
（平成24年度）	実証試験・とりまとめ

図 2.2-11 温泉発電システムの概要と開発状況

(4) フサビック(Husavikur)

地熱水を利用したカリーナサイクル発電における最初の事例は、アイスランドのフサビック地熱発電所（2000 年 7 月運開）である。成果に関しては、2002 年度の米国

地熱学会で報告されている。**図 2.2-12** に発電システムのフロー図を示し、以下に概要を記す。

・90kg/sec=324t/h の 121℃（設計は 124℃）熱水を利用
・所内率 6～7%程度（ただし、冷却水を使用）
・冷却水（5℃）は、25℃の温水として魚の養殖場に提供
・121℃の熱水は、熱交換後 80℃の温水として暖房利用・熱水直接利用に提供
・同じ熱源を用いた場合、従来型の炭化水素系熱冷媒を利用したランキンサイクルと比較して平均 20～40%の効率アップが可能
・設計出力どおりの性能を達成
・初年度より 96%以上の利用率で安定操業ができた
・アンモニアの漏出はほとんどなかった。(密閉したタービン建屋内で数 ppmv 未満)
・発電機建設費は、2MW で US$1,874,000（112 千円/kW）と報告されている。ただし、河川水冷却のため、空冷凝縮器や冷却塔等の設備が含まれない。

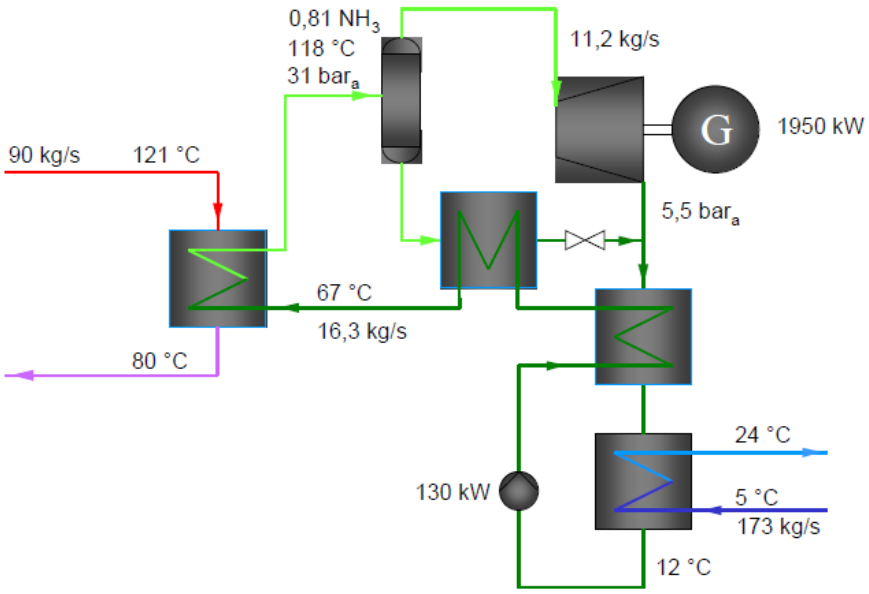


図 2.2-12　フサビック地熱発電所の発電フロー（出典：大里，　2005）[11)]

(5)　ウンテルハッキン（Unterhatching）

ドイツでは、シーメンス社がカリーナ発電方式による地熱発電所（3,360kW）をミュンヘン近郊のウンテルハッキンにおいて建設、2008 年 1 月に試験操業・2009 年 1 月に正式操業を開始した。ここでは、日本の地熱開発の常識を越えるような非常に小さな 40℃/km 程度の地温勾配を有する地域で、3.3km の深部掘削を行い、地層中に含まれる 122℃の非火山性の熱水を、ダウンホールポンプを用いて揚水してカリーナサイクルによる発電を行う事業を行っている。ドイツの場合、再生可能エネルギーの優先買い取り政策に基づく、20 ユーロセント/kWh（22 円/kWh）という高額の買い取り価格がこの事業を後押ししている。

南ドイツ、ミュンヘン近郊のウンテルハッキン区域の地下およそ 3,000m の深さの

多孔質石灰岩層は 100℃以上の熱水を大量に含んでいる（**図 2.2-13**、**図 2.2-14**）。この地熱源を発電利用ならびに熱利用するために、人口 21,000 人の地域コミュニティが 100%出資する Geothermie Unterhaching GmbH und Co.が設立され、同社からの一括請負発注契約によって、シーメンス社が 3.36 MW の地熱発電所の建設を行った。2008 年 1 月に試験操業が開始され、2009 年 1 月に引渡しが行われて正式操業が開始された。

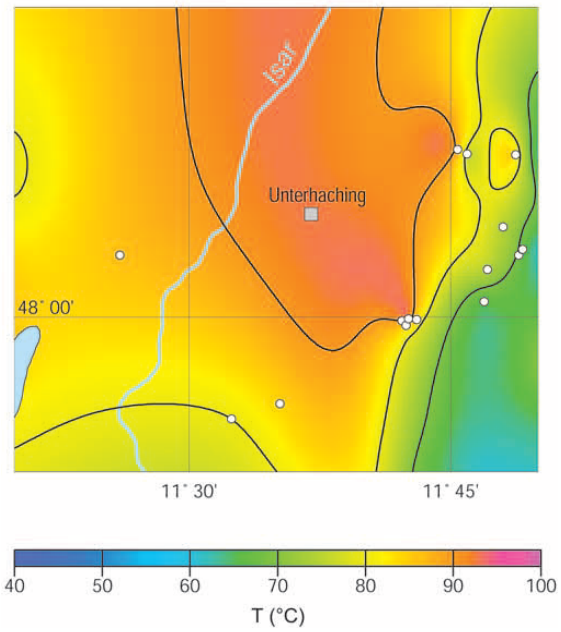


図 2.2-13　ウンテルハッキン地域周辺の地温分布（深度 2,500m、〇:坑井位置）
（出典：Schulz,*et al.*, 2005）[12)]

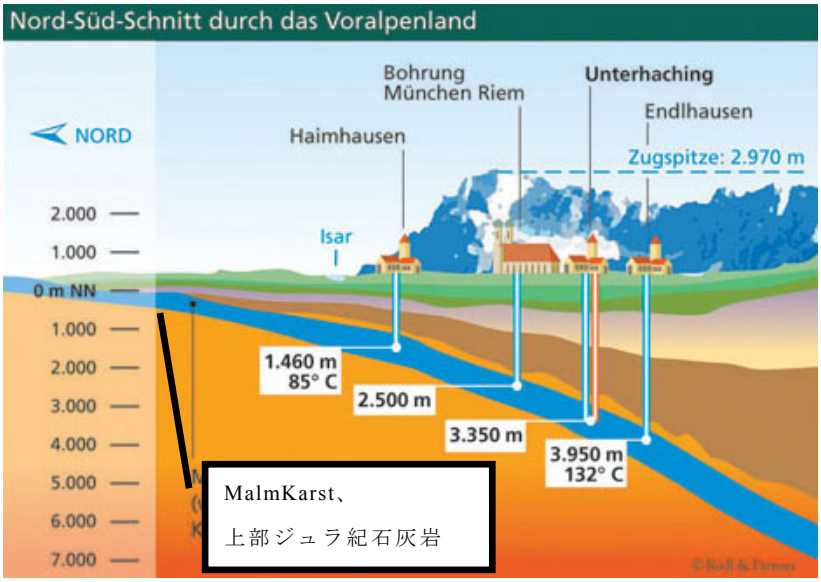


図 2.2-14 ウンテルハッキン周辺の地質構造
（出典：EGEC ホームページ）[13)]

2004 年夏に実施された地熱井掘削によって、掘削深度 3,300m で 122℃の熱水の生産が確認された。坑井はダウンホールポンプによって 150L/秒（540t/時）の熱水を生

産する。このうち、25L/秒は、地域暖房システムのための熱を発生させるために利用され、電気エネルギーの 3.36 MW を発生させるために残りの 125L/秒を利用する計画で実施された。

ウンテルハッキンでは、断層沿いに発達する高透水性領域をターゲットとしているが、生産時の透水性(1×10^{-11}[m^3]オーダー)が大きく、生産井 1 本、還元井 1 本のみによるいわゆる「EGS(Enhanced Geothermal System)」の概念に基づく開発を行っているが、より透水性の良好な断裂群に逢着することが重要な鍵となることが判る。

4) その他の発電システム

その他の発電システムとして、熱電発電素子、スターリングエンジン、そしてロータリー熱エンジンについて、最新の動向を調査した。いずれも開発途上であり、今後の動向が注目される。

以上の調査結果のまとめとして、**表 2.2-2** に低温地熱発電の事例を整理して示す。また、実用化レベルにあるバイナリー発電システムについて既往技術レベルのまとめとして**表 2.2-3** に示す。

表 2.2-2 の国内外の 5 箇所のバイナリー発電設備をまとめたが、これらのうち 3 箇所が 120℃程度以下の低温流体で発電が実現されている。

表 2.2-2　低温地熱発電の事例

地域	鹿島製鋼所	フサビック	八丁原	ランダウ	ウンテルハッキン
	日本（住友金属工業㈱）	アイスランド	日本（九州電力㈱）	ドイツ	ドイツ
運転開始年	1999年	2000年	2006年	2007年	2009年
発電方式	カリーナサイクル	カリーナサイクル	ランキンサイクル（ORMAT社）	ランキンサイクル	カリーナサイクル
発電量	3,507kW	2,000kW	2,000kW	3,000kW	3,360kW
使用流体	製鉄工場冷却水	地熱水	地熱蒸気	地熱水	地熱水
流量	129t/h	324t/h	17.83t/h	252t/h	540t/h
温度	98℃	121℃	143.1℃	160℃	122℃
冷却方法	水冷	水冷	空冷	空冷	
熱交換後の利用方法		冷却水（25℃）：魚の養殖場 熱水（80℃）：暖房、直接利用		発電後の熱水で河川水を加熱し地域に給湯	
その他			フラッシュ発電に使用できなくなった孔井を有効利用	ダウンホールポンプ仕様	ダウンホールポンプ使用 熱水540t/hのうち、90t/hは地域暖房、450t/hを発電利用

表 2.2-3　既往技術レベルのまとめ

メーカー		川崎重工業株式会社		株式会社神戸製鋼所	オーマット社	地熱技術開発株式会社	
名称		グリーンバイナリータービン		（バイナリー発電システム）		（カリーナサイクル発電システム）	
型式		KFR-1	KFR-2	－		KCS-34ｇ 既製ユニット	KCS-34g，KCS-11 オーダーメイド
作動媒体		代替フロン	代替フロン	R245fa HFC	ペンタン	アンモニア水	
媒体圧力／温度		0.312MPa/80℃	0.312MPa/80℃	未公表	1.09MPa/133.2℃(八丁原2MW)	2.0MPa未満/70～120℃	3.5MPa未満/70～180℃
媒体流量		未公表	未公表	未公表	2,538t/日(八丁原2MW)	155.5m3/日	
媒体保有量		未公表	未公表	未公表	9,000Ｌ（八丁原2MW)	525kg (NH3)+125kg(H2O)	
媒体の特徴	可燃性	不燃性		不燃性	引火性が強い（消火対策）	難燃性	
	毒性	無毒		無毒	無毒	有毒 （アンモニア吸収冷凍機と同等の安全対策）	
	地球温暖化係数(GWP)	未公表		900	20程度	0	
発電出力（ｋW）		50～125	100～250	50，100	（MWクラス）	50～100	500～（数MWクラス）
熱源温度（℃）		80～120	80～120	70～95	120～150	70～120	70～180℃
熱源流量（t/h）		90～30	180～55	120 ～140(100kW,90℃)	-	16 (50kW,98℃)	-
kw当りの必要流量 （t/h）		0.75* (98℃)	0.54* (98℃)	1.2 (90℃)	-	0.32	0.32
熱源の種類		温水**	温水**	排温水，温泉水，廃液，排蒸気，排ガス（熱源によっては間接熱交換器が必要）		温泉・地熱・排温水・排ガス等（水蒸気は不可）	
冷却方式		水冷	水冷	水冷	空・水冷	水冷・空冷	
開発状況		開発中	開発完了 デモ機運転中	開発中（2011年秋実用化予定）	実用化済み	工場実証試験中、2011年11月より温泉地での実証試験を予定	実用化済み

*カタログより読み取った数字
**蒸気，排ガス熱源対応については検討中

5)　低温発電システムの評価と課題

低温発電システムの適用可能温度について、最も発電効率が高いと考えられるカリーナサイクル（温泉発電）の例を**図 2.2-15** に示す。図は発電出力ごとに温泉の温度（熱源温度）と温泉の湧出量（必要流量）の関係についてグラフ化したものである。

高出力のシステムでは、低温流体を用いて発電を行う場合、必要流量は非常に多くなると考えられるが、温泉発電等で使用を検討している 50kW クラスの低出力のシステムでは、低温流体の場合でもそれほど大量の流体を必要としないことが分かる。これはカリーナサイクルの発電効率が高いためと考えられ、これにより適用可能温度の下限も比較的低く（70℃）設定されている。

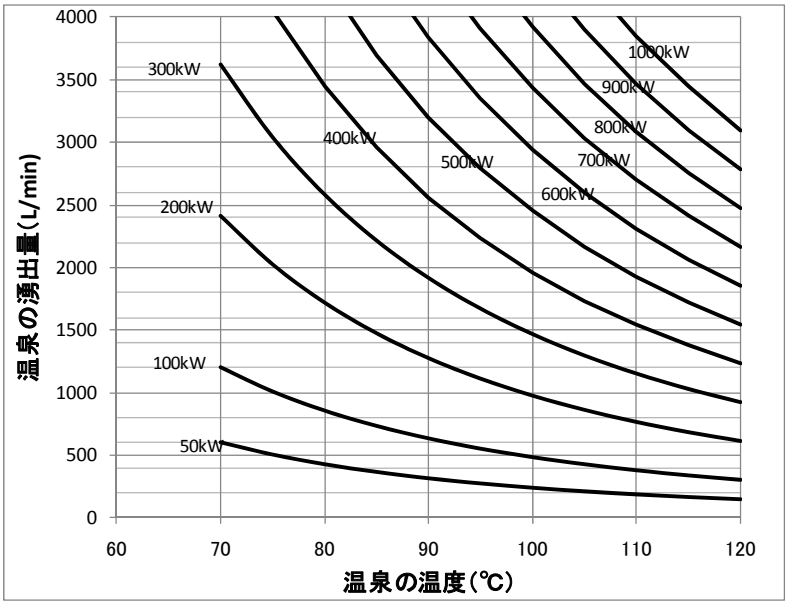


図 2.2-15　カリーナサイクル（温泉発電）における温度と湧出量の関係

低温地熱発電システムの重要な付帯設備として、孔内ポンプ（高温用 ESP）が挙げられる。

海外における高温用 ESP(Electric Submersible Pump) は、現在、オイルサンドにおける蒸気強制回収法である SAGD 攻法や地熱における EGS(Enhanced Geothermal System)を目的として、250℃あるいは 300℃を目標とした開発が進められており、低温地熱資源においては技術的な問題はまったくないと考えられる。

一方、これらの海外の ESP の連続運転実績は、現在では 1,000 日以上に達しており、低温領域であればさらに長時間の連続稼働が期待される。なお ESP の故障については、原因の 8 割以上がモーター、ポンプ・ケーブルにあり、故障時には部品等の交換が必要になる。

ここで、カリーナサイクルを前提に、貯留層の透水性、ポンプの揚水能力、そして葉電量について試算を行った。温度が 100℃と 120℃の場合で揚程（汲み上げ水頭差）を 100m と仮定した場合の、浸透率－層厚積と流量・発電量との関係を示すグラフを**図 2.2-16** に示す。この結果によれば、1,000kW の発電を行うには揚程 100m のポンプで

120℃の熱水を 200t/h 程度揚水する必要がある。この場合の貯留層の透水性（浸透率－層厚積）は、$2\times10^{-11}m^3$ 程度が必要となる。したがって、低温地熱発電においては、水位が高く、高透水の地層をターゲットにする必要がある。

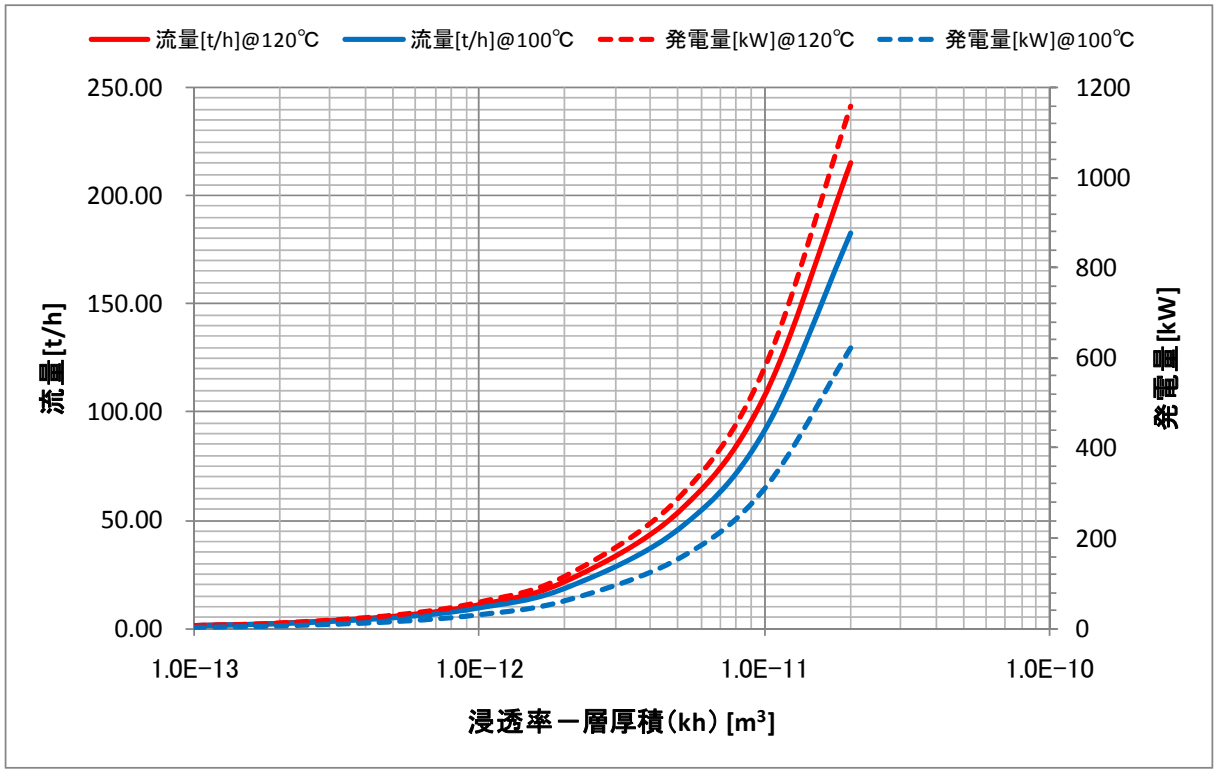


図 2.2-16　浸透率－層厚積（kh）と揚水量・発電量（送電端）の関係
（温度 100、 120℃、揚程（汲上水頭差）＝100m を仮定）
※発電量は、カリーナサイクルをベースに計算した。

2.3　地域開発に資する地熱利用の検討

低温の地熱を利用した発電では大規模な電力を得ることは難しく、発電規模は比較的小規模とならざるを得ない。そこで、地熱を発電だけでなく他の用途にも利用し付加価値を高めることが必要となる。地域開発の観点から、地域に根ざした地熱利用の事例を調査し、発電と合わせた地熱利用の形態を検討した。

発電以外での地熱の直接利用は**図 2.3-1** に示すように、利用可能な温度によって様々な用途が考えられる。本調査では 120℃以下の温度での発電を想定しているため、発電に利用した後の熱水の温度はおよそ 100℃以下と考えられ、この範囲の温度では**表 2.3-1** に示すような利用が想定される。

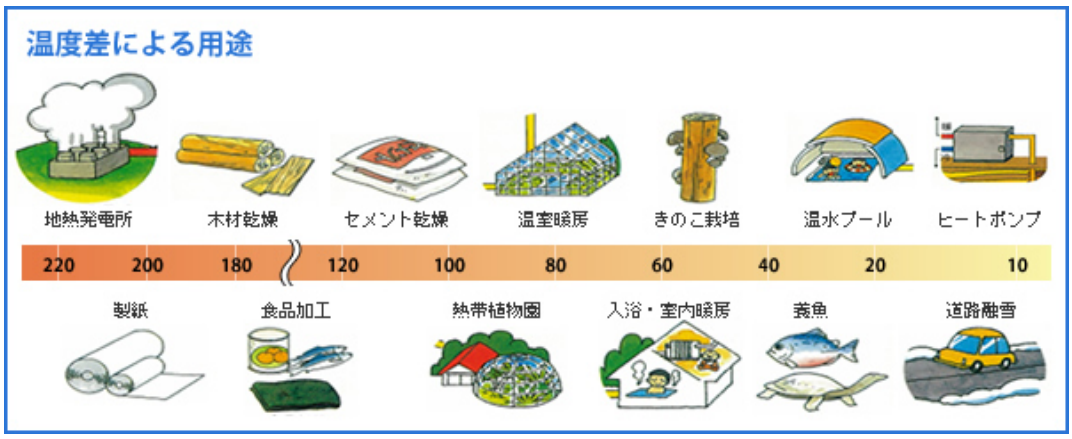


図 2.3-1　地熱の用途

（出展：地熱開発企業協議会ホームページ）[14)]

表 2.3-1　低温地熱の利用形態

温室への利用	温室による農産物または植物の栽培
温浴利用	地域センターや病院または個人住宅での温浴
温水プール	地域センター、学校、リハビリ施設等での利用
暖房利用	公共施設、医療施設などの暖房
畜産業への利用	牛舎や豚舎等の暖房
水産業への利用	温水を利用した陸上養殖漁業
道路への利用	冬期の道路融雪

実際の地域での利用事例として、大分県農林水産センター花き研究所（以下花き研究所）と北海道茅部郡森町の事例を調査した。

花き研究所は別府温泉の湧出地域内にあり、独自の泉源を所有しており、そこから発生する蒸気（2.5t/h、120℃）を所内の温室および本館の暖房に供するとともに、土壌等の消毒に利用している。なお、泉源の利用は蒸気のみであり、蒸気に伴う熱水は全量温泉組合に無償で配湯されている。

北海道茅部郡森町は、北海道電力森地熱発電所の余熱を利用して、トマトやキュウリのハウス栽培を行っている。ここでは、1970 年代から濁川温泉の熱を利用してきており、現

在では発電後の還元熱水で水道水を加温している。森町では発電所からの熱以外にも独自に泉源を所有するようになってきたが、泉源数の増大（200 以上）に伴い揚湯量が不安定になってきている。また、ハウスが泉源位置によって設置されているため、連作障害が生じている。一方で、熱水を利用した土壌消毒にも取り組んでおり、積極的な熱利用が行われているといえる。

以上記述してきた低温地熱利用を踏まえると、発電と温水の利用を併せた形での地域開発の概念が**図 2.3-2** のように描かれる。

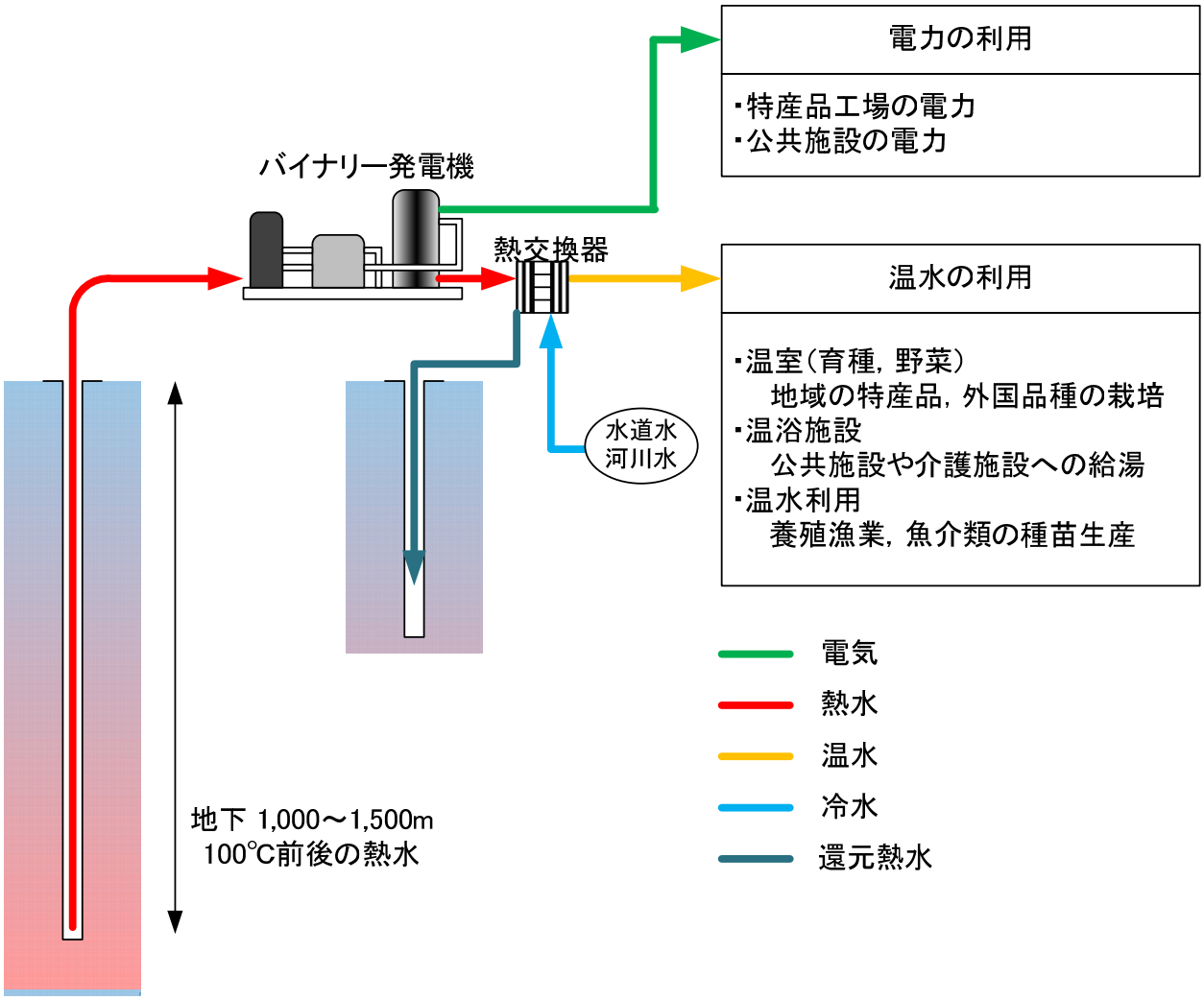


図 2.3-2　低温地熱を利用した地域開発の概念

2.4　まとめと今後の課題

調査の結果、2 地域の地熱賦存量の概算を行い、適用可能な発電システムとしてバイナリー発電システムを選定した。しかしながら、100℃前後の温度では大量の熱水が必要なことから、さらなる熱交換効率の向上が望まれるとともに、断層帯のような高透水性の地熱貯留層が存在すれば有利である。

今後の課題として、モデル地域を選定し、以下に示した項目の具体的な評価を行うことが望まれるとした。

・対象地熱貯留層の性状（温度、深度、透水性）
・生産井の仕様、コスト
・ポンプの仕様（揚湯量、温度、消費電力)、コスト
・発電機の仕様（出力、冷却方法)、コスト
・温水のカスケード利用（還元の要否)、経済効果
・その他（仮定条件、変動幅、電力単価、維持管理コスト）

参考文献

1) 村岡洋文ほか(2007)：日本の熱水系アトラス、産業技術総合研究所地質調査総合センター

2) 地質調査総合センター(2009)：全国地熱ポテンシャルマップ（CD-ROM 版)、数値地質図 GT-4、産業技術総合研究所地質調査総合センター

3) 高橋正明・駒澤正夫・村田泰章・玉生志郎(1996)：50 万分の 1 秋田地熱資源図、特殊地質図（31-2)、地質調査所

4) 北村 信（編）(1986)：島弧横断ルート№24、新生代東北本州弧地質資料集

5) 山内靖喜ほか(2009)：西郷地域の地質、地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅)、産業技術総合研究所地質調査総合センター

6) 吉谷昭彦・壇原 徹・村上 久(1995)：隠岐・島後に分布する島後層群郡累層のフィッション･トラック年代値について、鳥取大学教育学部研究報告（自然科学)、第 44 巻

7) Brook,C.A. *et al.*(1979) : Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures>90℃, *In Muffer,L.J.P.,ed.,Assessment of geothermal resources of the United States-1978*, U.S.Geol.Surv. Circular, No.790

8) 星野一男ほか(2001)：本邦産岩石の深部物性データ集、地質調査総合センター速報、№23、産業技術総合研究所地質調査総合センター

9) 地熱学会ホームページ：http://wwwsoc.nii.ac.jp/grsj/intro/riyou.html

10) M.Schindler、J.Baumgartner、TGandy、P.Hauffe、T.Hettkamp、H.Menzel、P.Penzkofer、D.Teza、T.Tischner、G.Wahl(2010) : Successful Hydraulic Stimulation Techniques for Electric PoweProduction in the Upper Rhine Graben、Cebtral Europe、Proc.、Worl Geothermal Congress 2010 Bari、Indonesia、25-29 April 2010

11) 大里和己(2005)：カリーナサイクルの地熱発電への適用条件について、 地熱技術、 Vol.30、 Nos.1&2 (Ser.No.66)、 p53-61

12) R. Schulz、 R. Jung、 R. Schellschmidt(2005)：Assessment of Probability of Success for Hydrogeothermal Wells、 Proc. World Geothermal Congress 2005 Antalya、 Turkey、 24-29 April 2005

13) EGEC ホームページ：
http://www.egec.org/target/strasbourg08/EGEC%20WS%20strasbourg%2006%20180608.pdf

14)地熱開発企業協議会ホームページ： http://www.chikaikyo.com/chinetsu/tamokuteki.html

第 3 章　モデル地域の選定と地熱資源量の評価

平成 22 年度に策定した二年間の調査計画においては、平成 22 年度調査で複数のモデル地域候補を選定し、平成 23 年度において 1 地域を選定し、低温地熱発電の事業化を想定した立地の可能性を検討することとしていた。

平成 23 年度第 1 回委員会（平成 23 年 8 月 5 日開催）において、「モデル地域としては仙台南西部を検討し、隠岐島後についても、ひとつのバリエーションとして入れ込み整理すること」との決定を受け、仙台南西部と隠岐島後の 2 地域をモデル地域として地熱資源量の評価などのケーススタディを実施することとした。

3.1　仙台南西部

3.1.1　地温構造に関する検討

図 3.1.1-1 に全国地熱ポテンシャルマップを基に昨年度作成した、仙台南西部付近の活動度指数分布および自然公園等の分布を示す。

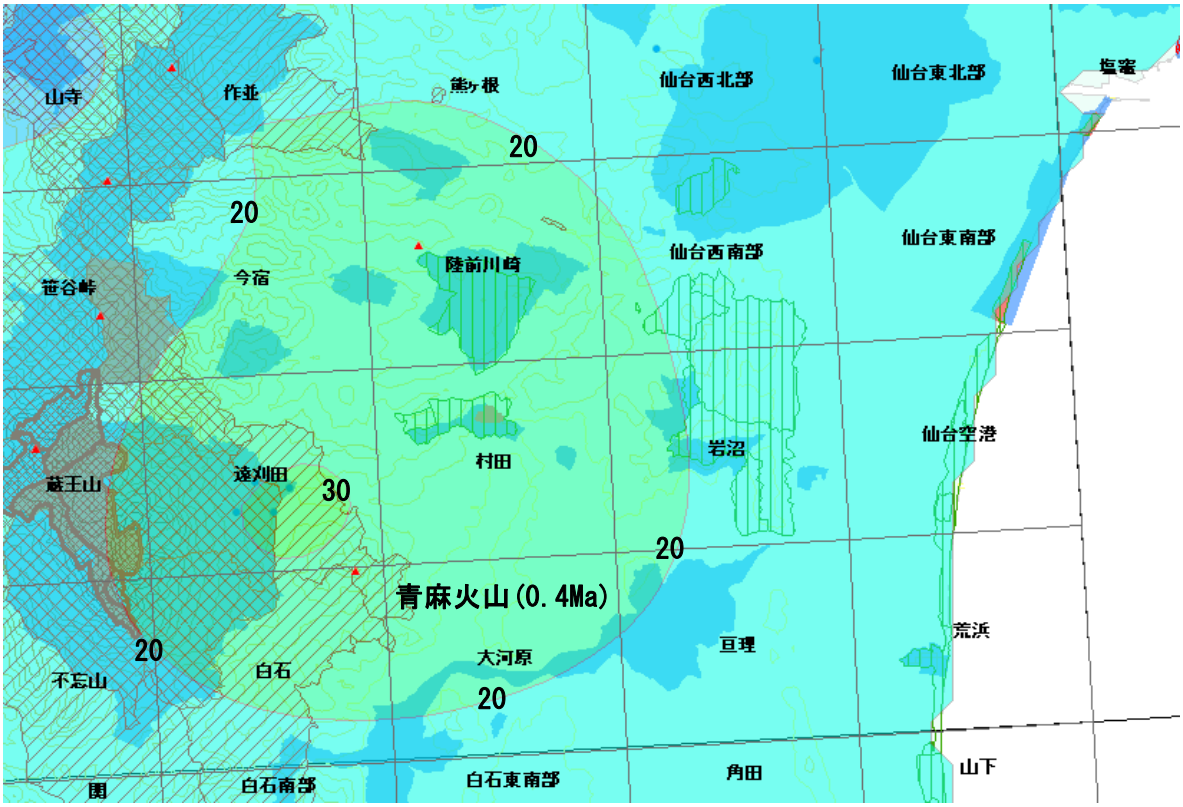
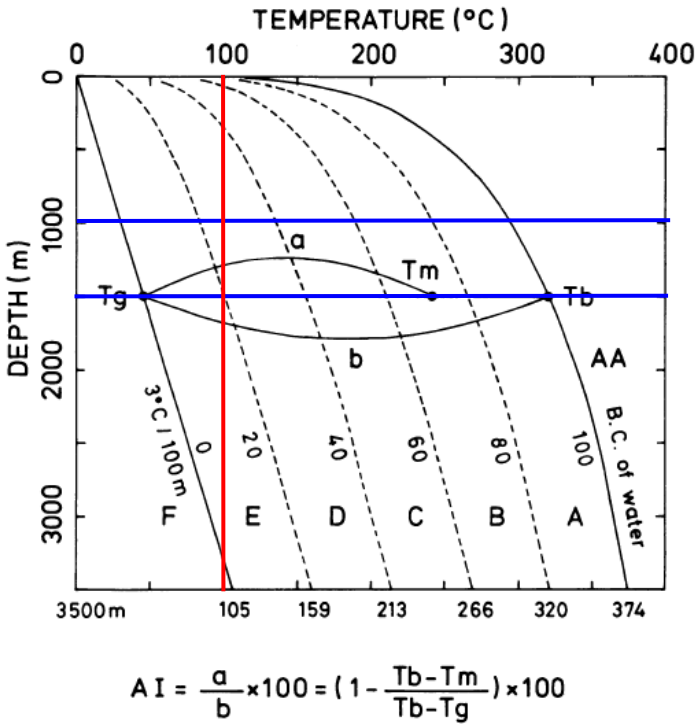


図 3.1.1-1　仙台南西部の活動度指数および自然公園などの分布
（地質調査総合センター(2009)の全国地熱ポテンシャルマップ [1] を基に作成）

図 3.1.1-1 によれば、青麻火山と遠刈田温泉との間に活動度指数 30 以上の領域があり、その外側に北側および東側に張り出す形状で活動度指数 20～30 の領域が分布している。このことから、地熱資源のポテンシャルの観点からは、青麻火山や遠刈田温泉に近いほど、高い地温が期待できると考えられる。

図 3.1.1-2 に林(1981)[2]の活動度指数の説明図を示す。**図 3.1.1-2** には、補助線として100℃のラインと深度 1,000m および 1,500m のラインを加筆した。**図 3.1.1-2** と補助線との関係から、活動度指数が 20 の場合に深度 1,500m で 100℃の温度が期待されることが解る。したがって、図 3.1-1 に示した仙台南西部の活動度指数分布から、青麻火山の東麓の平野部において、深度 1,000～1,500m で 100℃以上の地温が十分に期待できると考えられる。自治体としては、刈田郡蔵王町、柴田郡村田町、柴田郡大河原町が候補となり得る。

ただし、昨年度調査研究結果から、低温地熱資源の利用は発電のみだけでなく農業利用などを含むカスケード利用が重要であることから、高い活動度指数であっても地理的、社会的条件を吟味した上で、ケーススタディのモデル地域を選定する必要がある。この地熱資源以外の観点からの環境条件の整理と検討については、第 4 章において記述する。



$$AI = \frac{a}{b} \times 100 = \left(1 - \frac{Tb - Tm}{Tb - Tg}\right) \times 100$$

図 3.1.1-2　林(1981)による活動度指数 [2]

3.1.2　水理特性値に関する検討

地下に賦存する低温地熱資源を得る上で、開発可能なエネルギー量を検討するためにはどの程度の温度の熱水がどの程度の量を取得できるかを見積もる必要がある。熱水の回収量は開発対象地盤の透水性によって見積もることが可能であると考えられる。

3.1.1 でモデル地域の候補となり得る地域付近を通る大深度の地質断面図は、第 2 章の**図 2.1-6** に示したが、**図 2.1-6** によれば深度 1,000m 付近には中新世の凝灰角礫岩を主体とする地層が 300m 程度の層厚で分布している。

文献調査では、この付近で直接当該層の透水性データが認められないため、仙台南西部に比較的近い位置の同時代且つ類似した岩質の透水係数データを、動力炉・核燃料開発事業団(1996)[3]の「日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成」から抽出した。抽出されたデータ数は 5 点で、それらの概要を**表 3.1.2-1** に示す。

表 3.1.2-1　仙台南西部に比較的近い類似時代の類似堆積層の透水係数データ

（動力炉・核燃料開発事業団(1996)[3] から抜粋）

緯度	経度	地質時代	地層名	岩質	試験方法	透水係数(cm/s)			深度(m)	
						最大値	最小値	平均値	上限	下限
38° 52.4'	141° 07.5'	NT.M	厳美層	凝灰岩	不明	1.00E-04	5.00E-05	7.07E-05	5	40
37° 57.4'	140° 31.0'	NT.M	赤井畑層	凝灰岩類	ルジオン	6.65E-05	1.33E-05	6.65E-05	20	
38° 21.3'	140° 44.4'	NT.M		砂質凝灰岩				2.70E-05	30	30
38° 21.3'	140° 44.4'	NT.M	湯元層	凝灰岩、砂岩	ルジオン	2.66E-04	6.65E-05	1.33E-04	0	30
38° 21.3'	140° 44.4'	NT.M	湯元層	凝灰岩、砂岩	ルジオン	1.33E-04	1.33E-06	1.33E-05	20	60

表 3.1.2-1 に示されたデータの透水係数取得深度は数 10m 程度と浅いことに留意する必要があるが、得られた透水係数は 2.66E-4～1.33E-6cm/s（2.66E-6～1.33E-8m/s）の間に分布しており、単純に平均値をとると約 6E-5cm/s という値が得られる。

透水係数を設定し、孔井からの取水条件（孔径、区間長、発生させる水頭差）を与えると、その条件での流量を計算することができる。ここでは、ダルシー則が成立すると仮定して、ルイジオンテスト技術指針[4]に記載された次式で、以下のような条件での流量の見積を試行した。

- 透水係数：5E-5cm/s（5E-7m/s）
- 孔井からの取水条件：孔半径 10cm、区間長 100m、水頭差 100m）

$$k = \frac{Q}{2\pi HL}\log_e \frac{L}{r}$$

ここに、Q：流量
H：水頭差
L：区間長
r：孔半径

上記の条件での概略の流量は約 300ℓ/min,となる。なお、透水試験は常温で実施されるが、水温が高いと水の粘性が小さくなり、同一の取水条件での流量は大きくなる。15℃の水に対して 100℃の水の動粘度は 0.259 倍となり、その逆数、すなわち約 3.9 倍の流量が得られることになる。したがって、100℃程度の水温環境において上記の条件で取水すると、約 1,200ℓ/min の流量が得られることになる。

3.2　隠岐島後

3.2.1　地温構造に関する検討

平成 22 年度の調査結果において、隠岐島後北西部の深度 1,246m の温泉ボーリング（五箇温泉）における孔底温度は約 96℃に達しており[5]、深度に対してほぼ一次関数的に温度が単調に上昇することが把握された（**図 2.1-8** 参照）。

平成 23 年度の調査では、隠岐島後における地温に関する新たなデータは得ることができなかった。昨年度把握された温泉ボーリングの孔底深度と孔底温度を用いて、林（1982）[2]によって定義された活動度指数を計算すると、21.6 という値が得られ、仙台南西部と近い活動度指数を有していることが解る。

3.2.2　水理特性値に関する検討

平成 22 年度の調査では､五箇温泉のボーリング孔内のほとんどを占める郡累層の透水性に関する情報を得ることができず、密度および孔隙率に関する２データのみしか把握することができなかった（**表 2.1-3** 参照)。

そこで今年度は、現在営業中の五箇温泉に温泉の状況を問い合わせた。以下にその概要を記述する。

○問合せとその返答の概要

- 井戸は町村合併（平成 16 年）前の五箇村で掘削されており、当初のデータ、井戸構造等の詳細は不明である。
- 現在は、第二泉源と称している井戸を使用している。
- 以前（掘削当初から）は、深度 800m 位のところから揚湯していた。
- 町村合併前頃に揚湯ポンプが不調となり、メンテナンスを実施。
- その際に、揚湯深度も 600m 位に引き上げ、現在に至っている。現在は、ポンプの不調もなく、順調に稼働している。
- 運用は、揚湯した温水を容量３ton のタンク２基に溜め（計 6 ton)、それを利用。タンクの容量が一定以下になると、ポンプが起動し、利用した分の温水を補充するようになっている。
- 揚湯量（ポンプ能力）としては、６ton／時以上ある（タンク２基を満タンにするのに１時間かからない)。ただし、揚湯両は井戸に流量計等がないため、タンクの容量から判断。
- 現在の揚湯温度は、50℃程度（平成 21 年に成分分析を行っている)。

以上の結果から判明した重要な点は以下のとおりである。

- 現状、孔井の構造は不明
- ポンプは深度 600m 付近に設置して揚湯している
- 揚湯量は 6 t/h 以上ある（100ℓ/min.以上）

以上のことから、孔井構造や水頭差などが不明ではあるものの、100ℓ/min.オーダの揚湯量（流量）が実現していることが確認できた。この流量のオーダは、仙台南西部での条件付の試算結果と同オーダであり、孔径、揚湯の区間長、そして水温によっては、仙台南西部と同程度の揚湯量（流量）を期待することが可能と考えられる。

3.3　仙台南西部および隠岐島後の資源量の評価と課題

3.1 および 3.2 の検討結果から、仙台南西部および隠岐島後のそれぞれのモデル地域の地熱資源生産に関する情報や試算結果を整理して**表 3.3-1** に示す。

表 3.3-1　仙台南西部および隠岐島後の地熱資源生産に関する情報整理

モデル地域名	実測地温	活動度指数	透水係数(cm/s)	揚水量 (ℓ/min.)
仙台南西部	無し	20～30 (ﾎﾟﾃﾝｼｬﾙﾏｯﾌﾟ)	6E-5 (ﾃﾞｰﾀ平均値)	300 (常温試算値)
隠岐島後	深度 1,246m で 約 96℃	21.6 （計算値）	不明	100 以上

表 3.3-1 に示したように、仙台南西部と隠岐島後の 2 箇所のモデル地域は、活動度指数や試算値を含むが揚水量の観点から、同じようなレベルでの地熱資源の生産が可能であると推定される。

また、仙台南西部（**図 2.1-9** 参照）および隠岐島後（**図 2.1-10** 参照）において、いずれのモデル地域近傍においても断層構造が既往文献によって示されている。そのため、これらの断層による高透水構造が期待され､常温よりも高い地温による動粘度の低下を踏まえ、深度 1,500m 程度までの孔井から回収可能な地熱資源量を以下のように設定する。

・熱水温度：120℃
・揚水量：1,200ℓ/min.

以上のように、モデル地域におけるケーススタディの熱水温度と揚水量を想定したが、これらの設定値については以下のような問題がある。

- 仙台南西部においては深部地温の実測値が無い
- 仙台南西部の透水性は、比較的近傍の同時代の類似堆積層の浅部データである
- 隠岐島後においては、透水性に関するデータが無い

これらの問題点は、既往文献による調査の限界を示すものであり、本来は現地において実データを取得して評価すべき事項と考えられる。ただし繰り返しになるが、各ケースに与えた設定値については、部分的には既存データに基づいており、必ずしも非現実的なものでも無く、透水性に基づく揚水量の設定には、高透水構造の存在可能性と高水温における動粘度の効果が見込まれることから、比較的現実的あるいは保守的とみることも可能と判断される。

参考文献

1) 地質調査総合センター(2009)：全国地熱ポテンシャルマップ（CD-ROM 版）、数値地質図 GT-4、産業技術総合研究所地質調査総合センター
2) 林　正雄(1982)：深部高温地熱貯留層のターゲット、日本地熱学会誌、第 4 巻
3) 動力炉・核燃料開発事業団 (1996): 日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成、PNC TN 7450 96-002
4) 財団法人国土開発技術センター (1984)：ルジオンテスト技術指針　同解説
5) 山内靖喜ほか(2009)：西郷地域の地質、地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅）、産業技術総合研究所地質調査総合センター

第 4 章　低温地熱発電システムおよび熱利用の検討

4.1　モデル地域の環境条件の整理

モデル地域は仙台南西部と隠岐島後の地域性が異なる 2 箇所について検討することとなった。そこで、これらの両地域について、既往資料を元に低温地熱資源の賦存状況を整理した。その後、開発される資源量を設定し、発電以外の熱利用について地域の特性を踏まえながら先行事例を調査し、可能性を探ることとした。**表 4.1-1** にモデル地域の選定における条件の整理を示す。

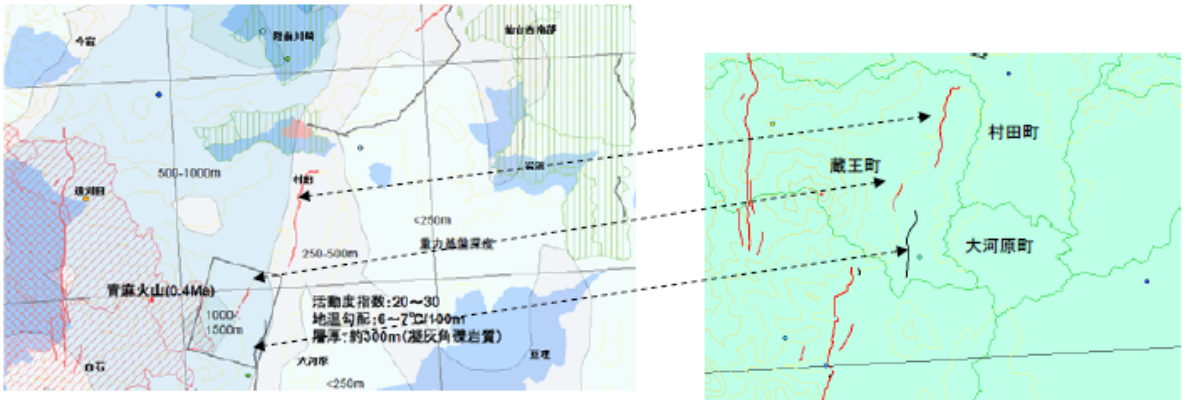
表 4.1-1　モデル地域（仙台南西部、隠岐島後）の地域特性

地域名	地理的位置づけ	地質・地質構造			
		既往地質図	断面図	大深度ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ	重力異常図
仙台南西部	大都市近傍（仙台市から約 20km）	1/20 万地質図「仙台」 1/50 万秋田地熱資源図	北村(編)(1986) 1/5 万,深度約 1,000m	なし	あり
隠岐島後	離島	1/5 万地質図「西郷」	左記図幅断面図 吉谷ほか(1995) 深度約 1500m	深度 1246m1 孔柱状図あり もう 1 孔源泉孔があるとされるが、水質以外は不明	あり

地域名	温度構造				
	温度検層	火山	温泉	活動度指数	地温勾配
仙台南西部	なし	蔵王（活火山） 青麻火山 (0.4Ma)	北北西 7.4km に遠刈田温泉(67℃湧出、3.5t/m) 南 3km に黄金川温泉(49℃湧出、150l/m)	20～30（地熱ポテンシャルマップ）	6～7℃/100m（地熱ポテンシャルマップ）
隠岐島後	あり（孔底で約 96℃）	更新世玄武岩類(1.3Ma　、　0.8～.4Ma)	地域中心に五箇温泉(第 2 泉源、51.2℃、第 1 泉源、32.9℃)	10～20（地熱ポテンシャルマップ） 21.6（温度検層結果から計算）	約 6.5℃/100m（温度検層結果）

地域名	地域の状況				
	人口	世帯数	温泉	近隣の発電所	震災等の影響等
仙台南西部	村田町：12,259 人（平成 22 年 3 月末） 蔵王町：13,124 人（平成 23 年 6 月末） 大河原町：23,559 人（平成 23 年 6 月末）	村田町：3,806 世帯（平成 22 年 3 月末） 蔵王町：4,258 世帯（平成 23 年 6 月末） 大河原町：8,939 世帯（平成 23 年 6 月末）	北北西 7.4km に遠刈田温泉(67℃湧出、3.5t/m) 南 3km に黄金川温泉（49 ℃湧出、150l/m)	新仙台火力：2 基で 95 万 kW 仙台火力：1 基 44.6 万 kW （いずれも震災停止中）	概ね東北自動車道から東側が津波被災している。
隠岐島後	隠岐の島町：15,663 人（平成 23 年 7 月 1 日）	隠岐の島町：7,290 世帯（平成 23 年 7 月 1 日）	地域中心に五箇温泉（第 2 泉源、51.2℃、第 1 泉源、32.9℃)	西郷発電所：2.532 万 kW（内燃力式、中国電力）	1983 年の日本海中部地震や、1993 年の北海道南西沖地震の際に津波到達（物損は生じた）

仙台南西部については、開発の可能性が高いと考えられた宮城県刈田郡蔵王町、柴田郡村田町、柴田郡大河原町から候補地を選定することとした。熱利用の観点では工場や住宅地が多い村田町、大河原町も有望な候補地であると考えられた。しかし、青麻火山が近傍に位置すること、重力基盤深度が深いこと、断層の存在が近傍に想定されていることから、低温地熱発電のポテンシャルが最も高い蔵王町を選定することが適切と考えた。蔵王町の中から候補地を選定するに際しては、熱利用を検討した場合に平野や耕作地が近傍に存在する遠刈田温泉近傍が最適と判断した(**図 4.1-1、4.1-2**)。



（破線の両矢印がそれぞれ対応する断層）

図 4.1-1　仙台南西部の行政区分対応図

図 4.1-2　仙台南西部のモデル地点付近の地形状況

隠岐島後については、地温が判明している既存のボーリング実施地点付近を選定した。島の南西部にも重力異常が類似している領域があるが、確実な温度データの存在を優先した（図 4.1-3）。

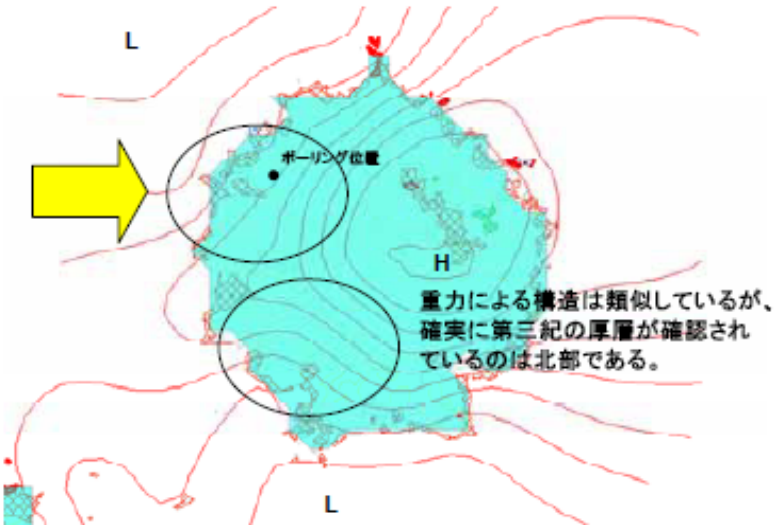


図 4.1-3　隠岐島後でののモデル地域選定

4.2　システム設計と課題抽出

4.2.1　低温地熱資源の採取方法

1) 坑内ポンプ(ESP)を用いた採取方法

昨年度報告書に記載したとおり、低温地熱資源は自噴能力がほとんどなく、坑内ポンプ(Electric Submersible Pump, ESP)を用いて、熱水の汲上げを行う必要がある(図 4.2.1-1)。

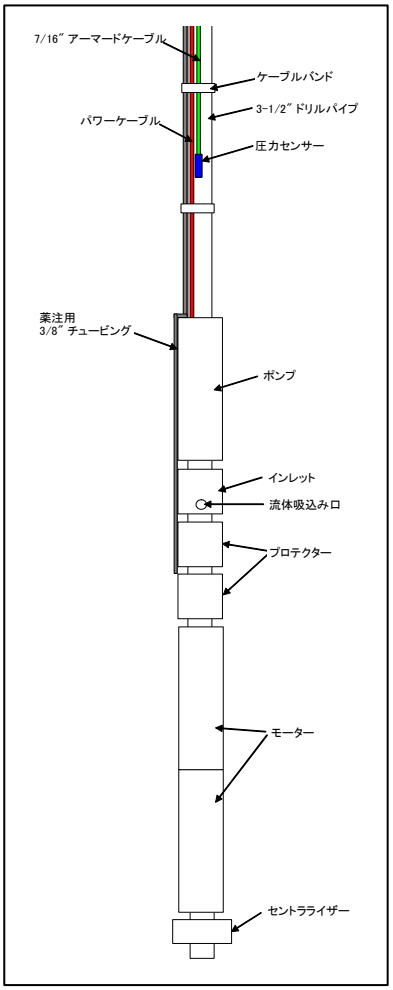


図 4.2.1-1　坑内ポンプ（ESP）の概念図

出典：地熱技術開発㈱、2010

(2) 坑内ポンプ(ESP)の寿命について

ESP の寿命は、全体の経済性に関わるため、実際の地熱井での ESP の寿命について米国 Nevada 州における実績を調査した。温度は、135℃～166℃の範囲で、出力が 500～1,200HP、揚水量が 227～636m³/h の場合の寿命を図 4.2.1-2 に示した。2005 年以降に ESP を設置した坑井で、2011 年 8 月末現在で、22 本の坑井のうち、12 本は稼働中で平均 696.9 日（約 1.9 年）、最長で 2,142 日（約 5.8 年、継続中）である。ESP を回収した坑井についても、ESP の破損が原因のものは 3 件(241 日～621 日)のみで、他の 7 件については、ESP の破損以外の理由となっているため、ESP の寿命は 3～5 年程度で見積もってもよいものと考えられる。また、低温地熱の場合には、120℃以下を対象とするため、135℃以上のこれらの地熱井での実績に比べて、寿命はさらに延びることも期待で

きる。

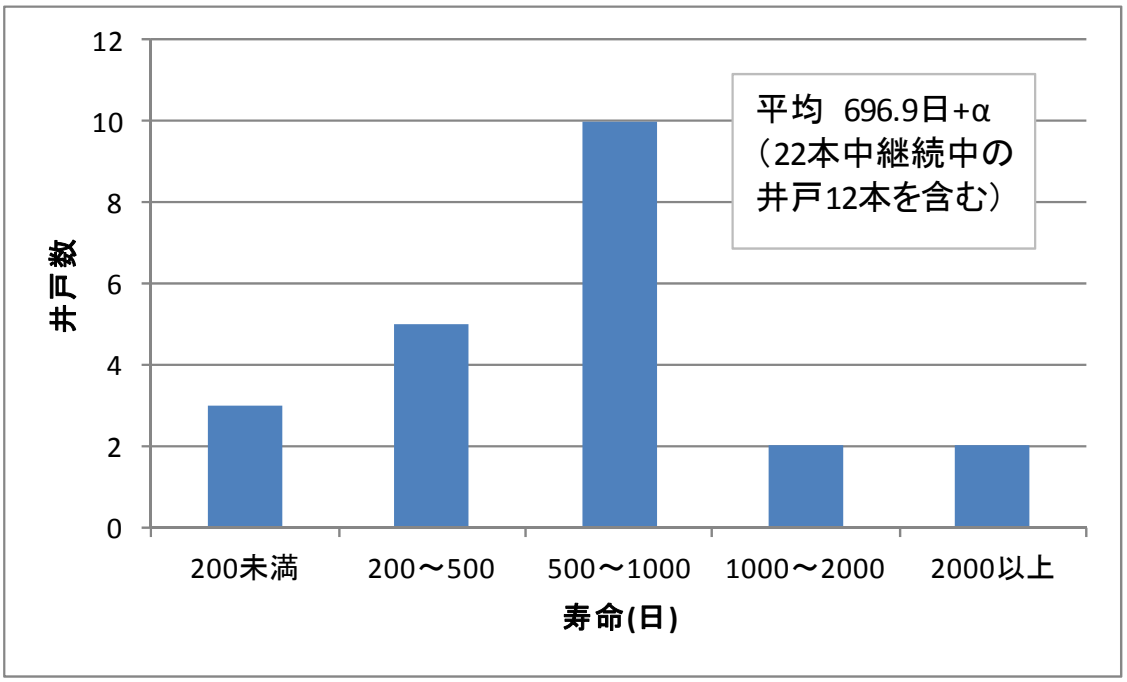


図 4.2.1-2　坑内ポンプ（ESP）の寿命（Nevada 州の地熱井，2011 年 8 月末現在）

4.2.2　低温地熱資源の発電方法

1）発電方式について

低温地熱資源からの発電に用いる一般的な方式は、バイナリーサイクル方式である。バイナリーサイクルは、加熱源（温泉）によって熱交換器で沸点の低い媒体を加熱・蒸発させて、その蒸気で蒸気タービンを回して発電を行う方式である。加熱源系統と媒体系統の２つの熱サイクルを利用して発電を行うことからバイナリーサイクルと呼ばれている。

一般的に地熱発電では、高温の地層では井戸を掘って出てきた蒸気を直接蒸気タービンに導いて発電を行う。井戸から蒸気が出てこない、あるいは弱い勢いの蒸気しか出てこない中高温の地層(120～200℃程度)では、井戸から噴出してくる弱い勢いの蒸気を用いるか、井戸の中に挿入した高温用の水中ポンプで熱水を組み上げてその熱を利用するバイナリー発電が行われている。この一般的な地熱発電で利用されるシステムと比較すると、低温地熱発電ではより低い温度（120℃程度以下）での運転を要求されるため、利用する低沸点媒体も、より沸点の低い媒体が利用される。代表的な媒体の種類としては、アンモニア水、炭化水素系ガス（例えば、ペンタンなど）、不活性ガス（代替フロンガス）があるが、それぞれ、アンモニアは毒性がある、炭化水素ガスは引火性がある、代替フロンガスは地球温暖化係数が大きい（二酸化炭素の数 100 倍から 1,000 倍程度）等の欠点を有しており、媒体が外部に漏洩しないための対策や万が一漏洩した場合の対策が必要であり、実際のそれぞれのシステムではそのための対策が図られている。**表 4.2.2-1** に媒体毎の特徴を示す。

表 4.2.2-1　地熱バイナリー発電の媒体（代表例）の特徴

熱媒体	長所	欠点	沸点（1 気圧）	地球温暖化係数
不活性ガス（代替フロンガス）	毒性・引火性がない。 ボイラータービン技術者選任不要。	地球温暖化係数が高い 媒体が高価。	15.3(R-245fa) -26.1(R-134a)	900(R-245fa) 1,300(R-134a)
炭化水素ガス	地球温暖化係数が比較的低い。 媒体が安価。 普及している。	引火性がある	-11.7～36.5	20 程度
アンモニア＋水	発電効率が高い。 地球温暖化係数がゼロ。 媒体が安価。	毒性がある	-33.34（NH_3）	0
CO_2（参考）	－	－	-78.5	1

一般的に、低温地熱発電で要求されるバイナリーサイクル発電の性能としては以下の条件が揚げられる。

①　1 つの井戸から坑内ポンプ（ESP）で熱水を汲み上げるには電力が必要であるため、より少ない熱水量でより多くの電力を発生できないと、ESP の電力に発生した電力の多くを費やしてしまう。また、熱水利用の場合、熱水を発電システムの熱交換器（蒸発器）に引き込む目的や、熱交換器で排熱回収後したあとの熱水を熱利用施設に供給する目的でポンプを利用する必要がある場合や、冷却のために冷却水を引き込む、冷却塔などで冷却水を循環するなどの目的でポンプを利用することも必要となる。この場合、多量の熱水を利用しても多くの発生電力量を得られないシステムでは、多量の熱水や冷却水を送るためにポンプの電力消費量が大きくなり、実際に利用出来る電力量が目減りしてしまうため、経済的に成り立たなくなるおそれがある。

②　温泉熱の回収を行う熱交換器（蒸発器）の材質が、地熱水に対して耐久性のあるものであることが必要となる。低温熱水程度の温度条件では、地下から採取する熱水の多くは、ほぼ中性で溶存酸素がほとんどないことが多いため、空気に触れることなく、熱交換器に導ければ、それほど高価な材料を使わなくても比較的腐食の可能性は低いといえる。ただし、火山の近傍の酸性の地熱水の場合は、耐腐食合金材料を利用する必要がある。

③　低温地熱の回収を行う熱交換器（蒸発器）に付着するスケールをメンテナンスの際に容易に洗浄できる構造であることが望ましい。熱交換器に付着したスケールの除去には、一般に高圧水洗浄が行われるが、スケールの付着する地熱水系統側が容易に露出できて、かつ熱媒体系統側は閉鎖したままで、高圧水によるスケールの洗浄が行えるような構造がメンテナンス上望ましいといえる。

2) 国内におけるバイナリーサイクル発電の現状について

(1) 株式会社神戸製鋼所：不活性ガス（代替フロン）

株式会社神戸製鋼所は、2011 年 9 月 8 日、地熱や工場排熱等を利用して発電する、高効率・小型バイナリー発電システム「マイクロバイナリー」（型番：MB－70H）を開発し、2011 年 10 月より販売を開始することを発表した。システムの最大発電端出力は 70kWで、100kW以下クラスでは、

国産初の商品となる。本体ユニット価格は 2,500 万円で、今後機種を拡充し、2015 年度迄に年間売上高 30 億円を目指している。システムは、加熱源により沸点の低い作動媒体を加熱・蒸発させてその蒸気でタービンを回し発電するシステムで、低位の産業排熱や地熱等を利用するものである。地球温暖化対策や東日本大震災後の電力需給問題から、再生可能エネルギーや未利用低位エネルギーの活用による省エネや発電のニーズが高まっており、さらに再生可能エネルギーの固定価格買取制度の導入が決定したことや、小型バイナリー発電設備の電気事業法に係る規制緩和が検討されていることにより、簡易型バイナリー発電装置の普及が期待されているとしている。

「マイクロバイナリー」は、この簡易型バイナリー発電装置を世界初の半密閉型スクリュタービン方式で商品化したもので、70～95℃の温水、もしくは温水に変換出来る廃液やガスなどの熱源から発電するオーガニックランキンサイクル方式のバイナリー発電システムである。このシステムにより、100℃以下の工場等の排温水に加え、温泉水や地熱資源、バイオマス由来の熱源、太陽熱などの、未利用の再生可能エネルギーを利用した小規模・分散型のグリーン電力発電システムの構築が可能である。また 70kW 発電ユニットを基本モジュールとして、熱源条件や設置環境に応じた最適なシステム設計が可能で、メンテンナンス時の稼動ロスを最小限に留めることが出来る。

性能面では、長年培われた世界有数の圧縮機、冷凍機の技術をベースに開発したスクリュタービンを採用しており、熱源変動に強く、高効率な発電性能を有している。また、スクリュタービンと同期発電機ロータとを一軸一体構造とすることで、軸シールのない半密閉スクリュタービン方式のバイナリー発電システムを世界で初めて実用化し、作動媒体や潤滑油が漏れない構造により、長期の安定運転が可能とのことである。

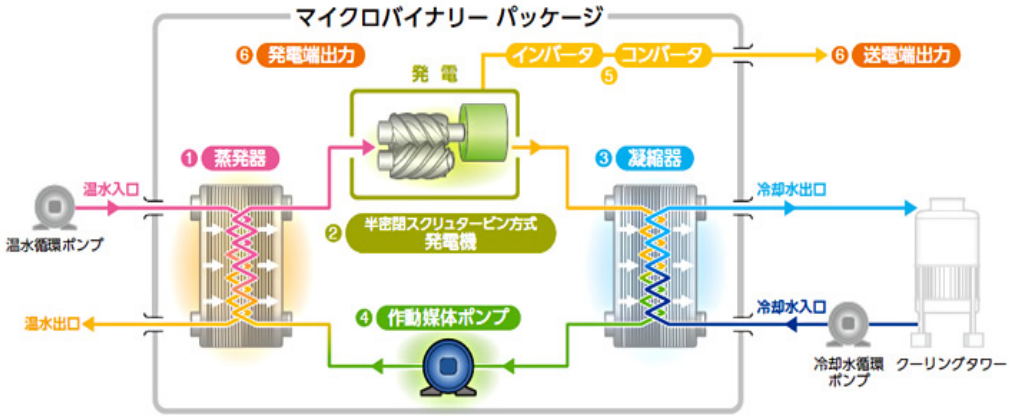


図 4.2.2-1　神戸製鋼所　マイクロバイナリー　MB－70H

(2) 川崎重工業株式会社：不活性ガス（代替フロン）

九州電力と川崎重工業は 2011 年 8 月 30 日、鹿児島県指宿市にある九電の山川地熱発電所で、地熱発電の一種で、比較的温度の低い温水などで発電が可能な地熱バイナリー発電の実証試験を開始すると発表した。実証試験の開始予定は 2012 年 4 月の予定である。

今回、設置する小規模バイナリー発電設備（出力 250 キロワット）は、川崎重工業が工場の排熱などの有効活用を目的に開発したグリーンバイナリータービン（**図 4.2.2-2**）を採用しており、地熱への適用が可能になれば、地熱資源が賦存する離島での適用や、温泉水などの熱の有効活用が期待できる。

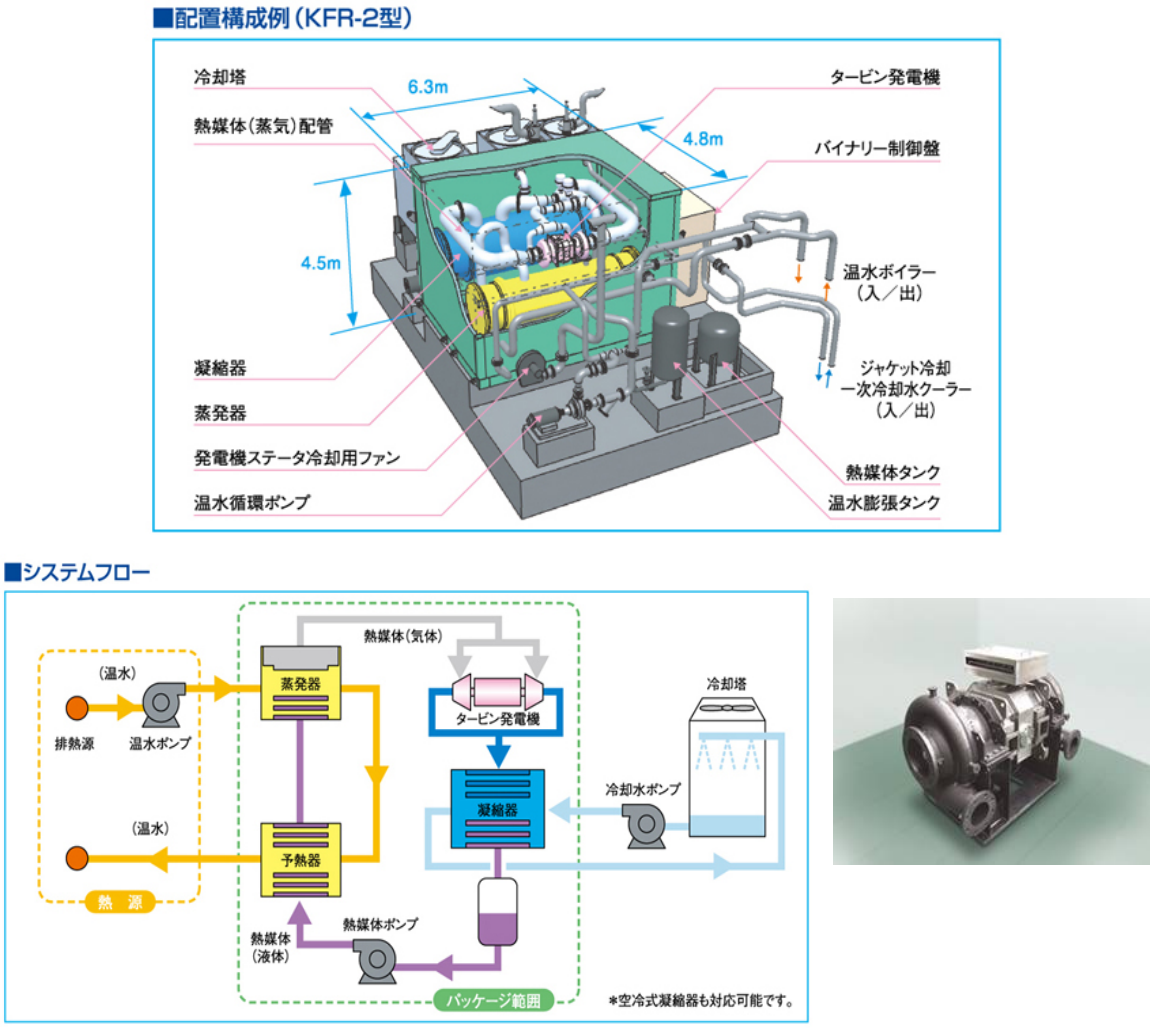


図 4.2.2-2　川崎重工業　150kW 級/250kW 級バイナリー KFR-1/2

(3) 第一実業株式会社：不活性ガス（代替フロン）

(3) 第一実業株式会社：不活性ガス（代替フロン）

2011 年 5 月 24 日～27 日に開催された「環境展」に第一実業が出展した不活性ガス（代替フロン）系媒体を用いたバイナリー発電装置（50kW）である。開発は、第一エンジニアリングとクリエ電機、タービンは海外製品を利用している。熱源の熱エネルギーを低沸点の不活性ガス冷媒に熱交換して発電するもので、温泉、工場温水、高温の排ガスなど 80～95℃程度の排温水、150℃以上の排ガスをエネルギー源とする発電装置である。

図 4.2.2-3　第一実業株式会社が開発したバイナリー発電装置(50kW)

(4) 富士電機株式会社：炭化水素ガス

富士電機は、二次媒体としてノルマルペンタンを採用した2,000kWの国産バイナリー発電設備を2010年度から市場投入した。

主な仕様は、熱源 135 ℃地熱蒸気＋地熱熱水、出力（設備容量）2,000 kW、作動媒体ノルマルペンタン（C5H12，沸点 36 ℃）、冷却方式：空気冷却式である。

図 4.2.2-4 にバイナリー発電のフロー図、**図 4.2.2-5** にバイナリー発電システムの概観を示す。

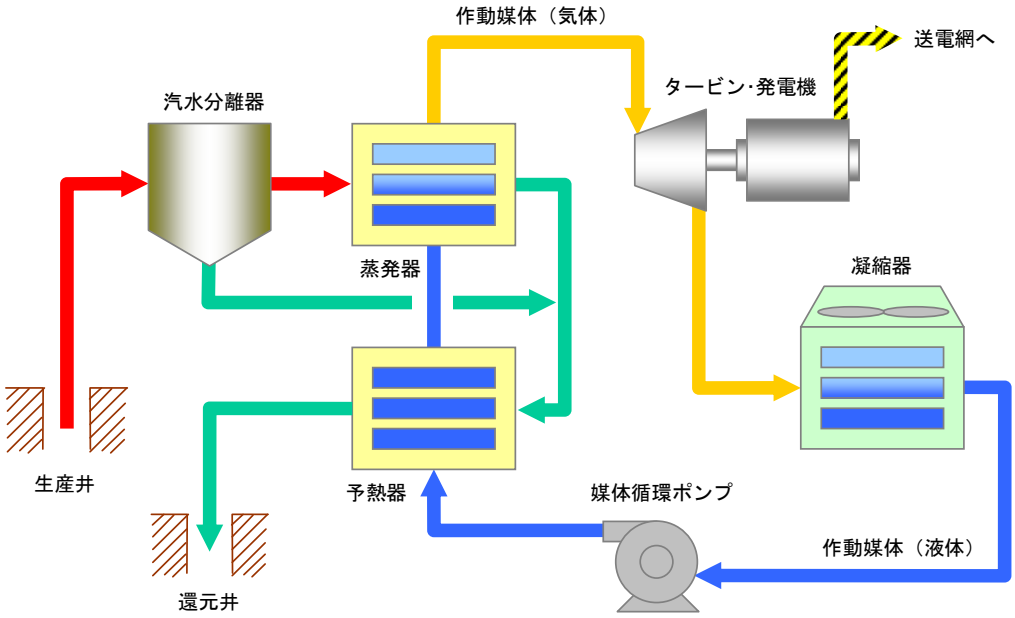


図4.2.2-4　バイナリー発電のフロー図

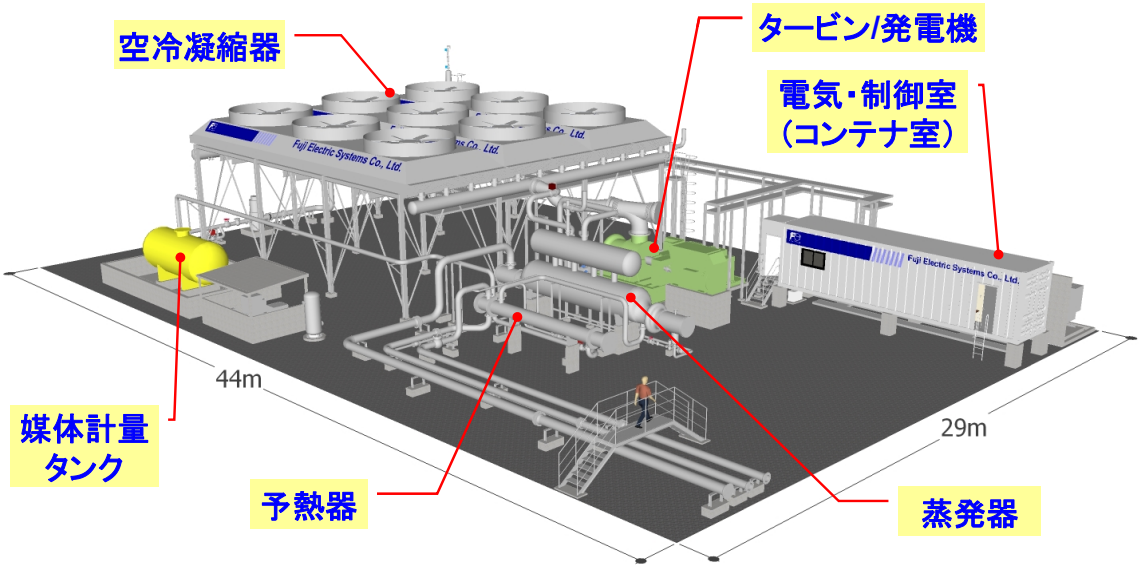


図4.2.2-5　バイナリー発電システムの概観(例)

(5) JEF エンジニアリング株式会社：炭化水素ガス

JFE エンジニアリング株式会社は、2010 年 6 月 23 日、オーマット・インターナショナル社(米国、以下オーマット社)※1 と地熱バイナリー発電設備の日本国内での業務協定の締結について発表した。同社は、日本において地熱バイナリー発電設備をターンキーで提供すると共に、バックアップサービスを行う。同社では、従来より地熱発電分野において、蒸気・熱水生産設備、熱水還元設備を広く提供していたが、今回の協定により、日本で初めてバイナリー発電設備を含む生産井坑口から還元井坑口までの一貫地熱発電システムを提供することをアナウンスした。

オーマット社のバイナリーシステムの概念図を**図 4.2.2-6** に示した。

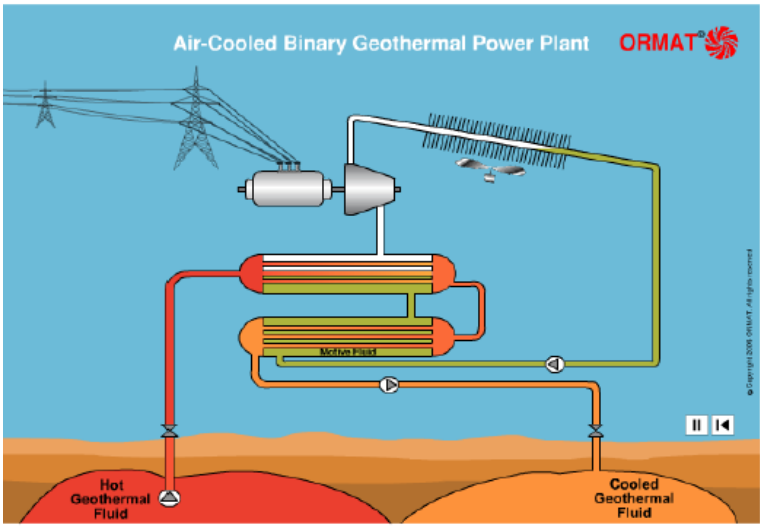


図 4.2.2-6　オーマット社のバイナリーシステムの概念図

※1 オーマット・インターナショナル社は、ニューヨーク証券取引所に上場しているオーマット・テクノロジーズ社（米国）の 100%子会社。本社＝米国ネバダ州。オーマットグループは、地熱および廃熱回収発電設備の設計、製造、販売、現地施工、関連するサービスを行い、更に、その設備の所有、運転を世界各地で行っている地熱事業垂直統合企業グループである。1966 年よりバイナリーサイクルの開発を始め、現在までに 65 地点、合計 1,200MW のバイナリー地熱発 電所および蒸気タービンとの複合発電所を建設している。伊藤忠商事株式会社が日本における営業代理店である。

以下に、オーマット社の最小型ユニットである 250kW 級ユニットの実績について記す。オーマット社では、250kW 級ユニット（空冷式）を用いて、2001 年にオーストリア Bad Blumau の Roger Hotel で温泉水による発電を行っている。この時の熱水温度は、100℃程度であった。新たに、米国エネルギー省とオーマット社の共同研究契約により米国ロッキーマウンテン石油フィールド試験センター（ワイオミング州）の石油井から排出される熱水で実施された試験では、同社の 250kW 級ユニット（空冷式）で熱水条件に合わせて特別に設計製作された発電設備が用いられた。図 4.2.2-7 に 250kW 級試験設備ユニットの写真を示す。ユニットは、３つのスキッドに分解されて現地に搬入、2008 年 8 月に設置され、2009 年 9 月まで、オーストリア Bad Blumau の Roger Hotel の 250kW 級ユニットよりも低い温度条件(91～92℃)にて発電試験が行われた。試験設備の設計点での仕様は、必要な熱水が流量 265m³/h、温度 77℃であり、その時の発電端出力 180kW・送電端出力 132kW であったが、実際の試験操業においての熱水の流量、温度等の条件、及び出力の結果は表 4.2.2-2 に示すものであった。(Johnson and Simon, 2009)

第 4.2.2-7 図 ORMAT 社の 250kW バイナリー発電システム（ロッキーマウンテン石油フィールド試験センター(RMOC)，米国ワイオミング州）

第 4.2.2-2 表　設計点と試験操業データ

	設計点	試験操業結果
熱水流量(m^3/h)	265	80～265
熱水入口温度(℃)	77	91～92
熱水出口温度(℃)	67	27～77
気温(℃)	10	-22～29
発電端出力(kW)	180	105～305
送電端出力(kW)	132	80～280

(6) 地熱技術開発株式会社：アンモニア水

地熱技術開発株式会社は、環境省の委託事業「地球温暖化対策技術開発事業」（以下、環境省事業）の中で、2010 年より 3 カ年の予定で、二次媒体にアンモニア水を用いるカリーナサイクル技術を用いた温泉発電システムの実用機の開発と実証を手がけている。環境省事業では、NEDO 委託事業「新エネルギーベンチャービジネス革新事業」（2007 年～2009 年）で開発した試作機をベースに、一般電力会社の高圧線に連携して、余剰電力売電を行えるように電気事業法に対応させた実用機の開発（最大出力 87kW, 熱水 97℃,400L/min の時）を行っている。共同研究者は、独立行政法人産業技術総合研究所（つくば市）と弘前大学新エネルギー開発研究所（青森市）で、新潟県、新潟県十日町市（源泉所有者）、松之山温泉協同組合（十日町市）の協力を得て、新潟県十日町市松之山温泉での実際の温泉を利用した実証試験を行っている。2011 年夏より工事に着手して、2011 年 12 月 16 日に開所式を行い、試験運転に入った。試験運転が安定した後、2012 年度まで、実証試験（連続運転）を行い、性能評価を実施する予定である。発電システムの図と写真を**図 4.2.2-8** に示す。

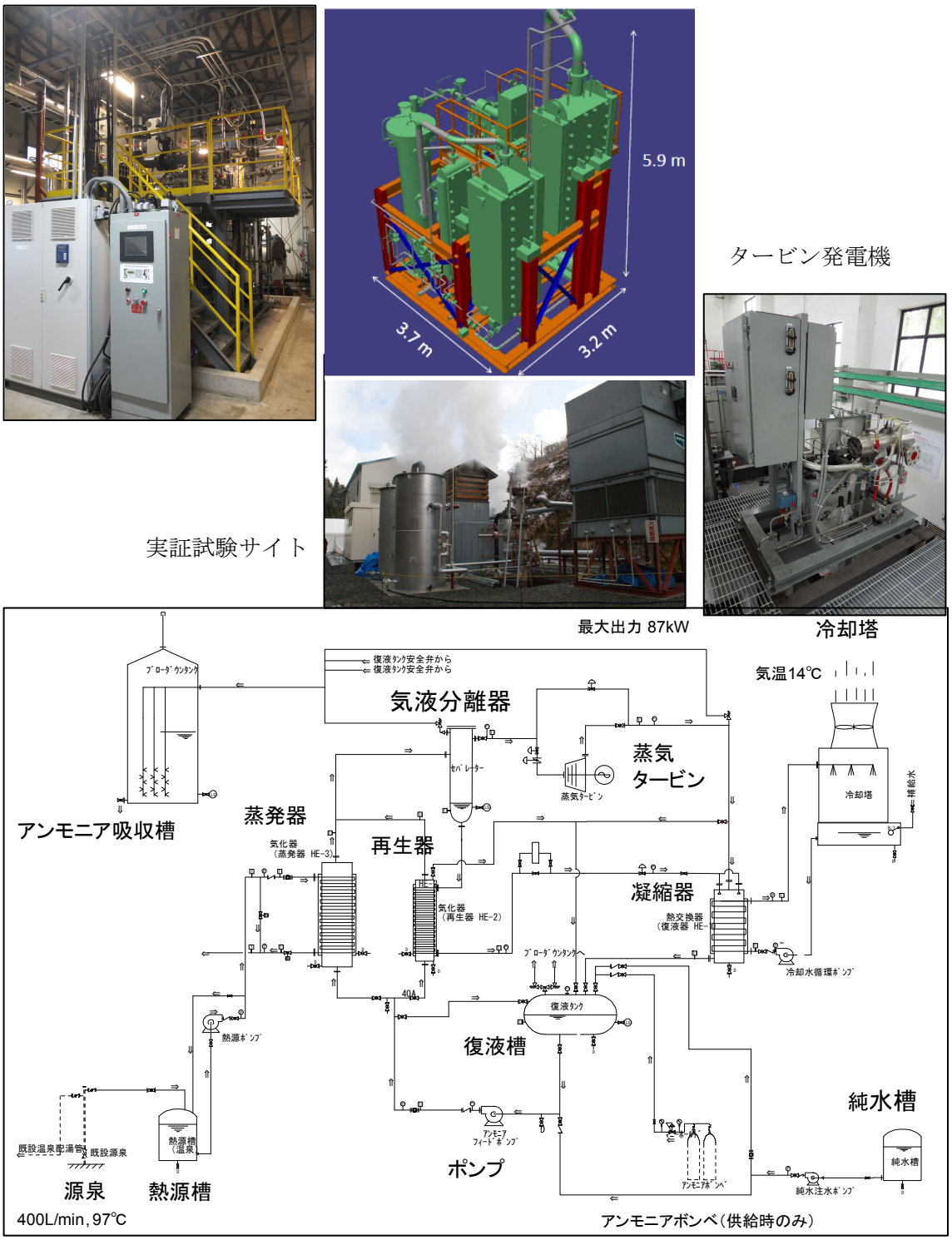


図 4.2.2-8　松之山温泉（新潟県）で実証試験中の温泉発電システム
（地熱技術開発株式会社）

3) 地熱バイナリー発電システムの性能比較

海外における地熱バイナリー発電システムの実績について**図 4.2.2-9** に示した。図は、横軸に熱源温度、縦軸に熱水の単位流量当たりの出力を示したもので、上側のものほど、一定量の熱水から

得られる発電量が大きいことを示している。また、媒体ごとに、炭化水素ガス・不活性ガス（代替フロン）・アンモニア水について図示した。また、温泉発電システム（地熱技術開発株式会社で開発中）の設計値（年間平均・夏季・冬季）を同じ図にプロットした。媒体によらず、冷却側の温度で性能は大きく変動している。また、炭化水素ガス・不活性ガス（代替フロン）のような単元物質を媒体とするシステムに比較して、アンモニア水によるシステムの方が、一定量の熱水から得られる発電量が大きくなる傾向にあることが判る。この図からみると、120℃以下の熱源では、アンモニア水を用いるシステムの出力性能は、炭化水素ガスや不活性ガス（代替フロン）を用いるシステムと比較して、同じ熱水量で１．５～２倍の出力が得られている。

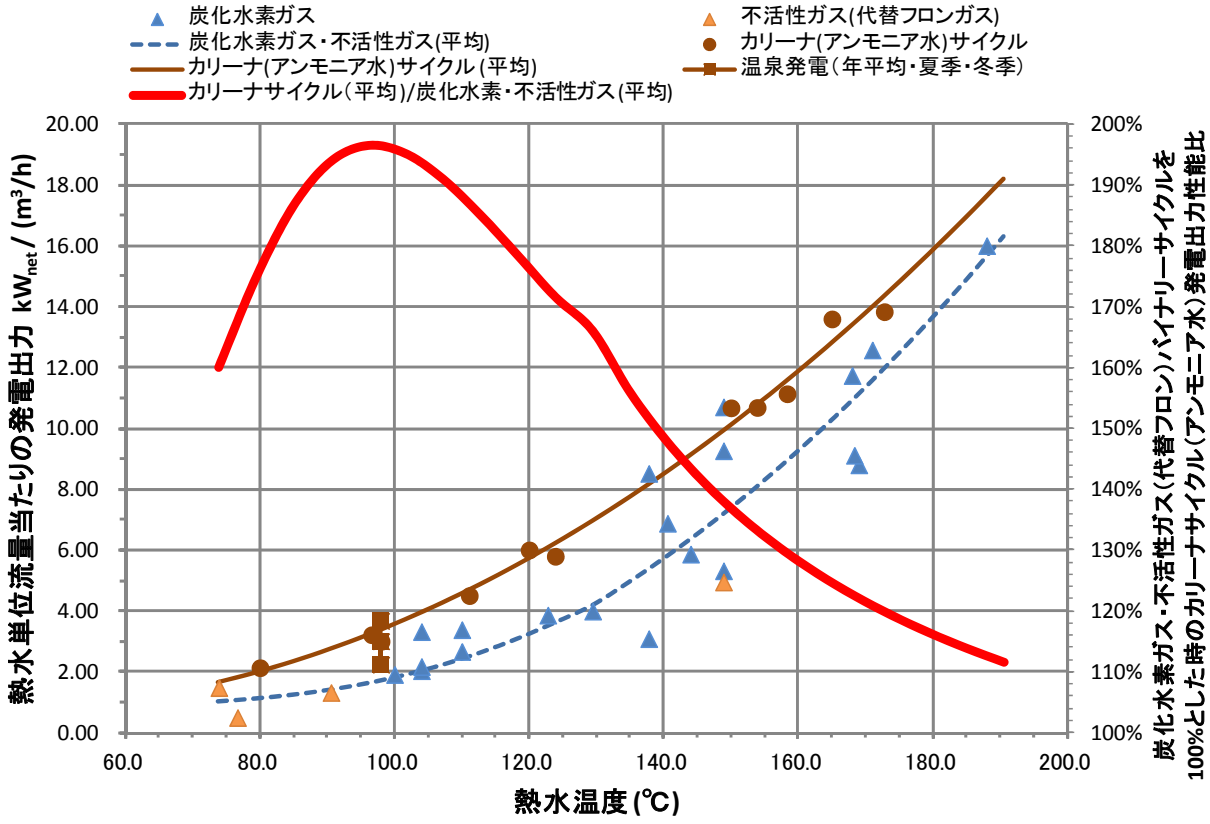


図 4.2.2-9 地熱バイナリー発電の熱水の単位流量当たりの発電出力の比較

参考文献

1) 尾上，地熱発電システムへの取組みと最新技術，化学工学，Vol.76，No.1，2012

2) 山田，地熱発電システムの取組みと最新技術，富士時報，Vol.83，No.3，2010

3) Johnson L. and Simon D.L., ELECTRICAL POWER FROM AN OIL PRODUCTION WASTE STREAM, PROCEEDEING, 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ., 2009.

4.2.3 低温地熱資源の利用方法の検討

今回の調査対象とする仙台南西部蔵王町遠刈田温泉近傍を対象に、低温地熱発電で発生する二次的なエネルギー利用方法について検討する。対象地は水田を中心とした農村地帯であり、民家もまばらな状況である。1ha 程度の土地を確保できたものと仮定して以下の利用方法を提案する。

1) 農業事業の実施

我が国における温泉熱を利用した農業事業の事例を**表 4.2.3.1** に示す。

全国的に温泉資源が豊富な地域で採用事例が多くなっている。ビニールハウスの内部で、温泉水を配管の内部に直接流すことで暖房効果を発揮させるケースや、ヒートポンプ、熱交換器を用いて暖房を実施するケースがある。

事例調査は、温泉熱を農業事業に利用した事例を文献や web で調査した後に、直接団体等の事業者に電話でヒアリングを実施した。結果を以下に記す。

- 野菜類では、トマト、アスパラ、葉もの、タラの芽等が認められた。
- 果樹類では、イチゴ、マンゴー、メロン、西瓜、バナナ等が認められた。
- 加工品では、生産した果樹類を用いたジェラート、茶、石鹸が認められた。
- 予想以上に多種の生産品が取り扱われ、歴史が古いものでは江戸時代からもやし栽培に利用されてきた弘前大鰐の例もある。
- 寒冷地に限らず、西日本でも事例が有り、また、高標高の場所でのバナナ栽培などの例も認められた。
- 古くから利用されている設備では、技術の伝承がなされておらず、熱利用の詳細について理解できている方がおられない設備も散見された。
- 温泉のスケールに起因する管理の煩雑さ、費用を要することから、熱利用に対して、疑問を持たれ現在は熱利用をされていない方も居られた。

近年、植物工場の実用化が進んできており、トマトや葉野菜を中心とした野菜類が栽培されている。植物工場は、無農薬あるいは低農薬で、新鮮、清潔、付加価値が高いなどの特徴を持っている。植物工場は、大きく完全人工光型と太陽光利用型の 2 形式に分けられ、植物の成長に必要な光の供給や、熱源供給が必要である。

低温地熱利用は何れの形式においても適用可能と考えられる。

表 4.2.3.1　　我が国における温泉利用農業事業の例（その１）

市町村名	団体等名称	温泉の利用形態				湯温	湯量	面積	生産品				備考
		形態	用途	配管	効果				野菜類	果樹類	その他	加工品	
北海道札幌市南区	小金湯温泉まつの湯	熱利用	ビニールハウス	把握出来ていない	把握出来ていない	源泉30℃	把握出来ていない	把握出来ていない	ハマボウフウ、ホワイトアスパラ	無し	エノキ茸	無し	遮光栽培、札幌市農業支援センターが協力
北海道弟子屈町	ピープルファーム	熱利用	ビニールハウス	把握出来ていない	室温30℃	源泉80℃	160ℓ/min（将来300ℓ/min）	現在540㎡（将来33,000㎡）	無し	マンゴー、イチジク	無し	無し	平成23年9月1日設立の太平洋鉱発グループ企業
北海道八雲町熊石	見市温泉旅館	熱利用	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	源泉60～70℃	70ℓ/min	把握出来ていない	トマト、アイスプラン、アスパラ	メロン、スイカ、イチゴ（ケーキ用）	無し	無し	見市温泉旅館ヒアリングでは、温泉熱利用は行っていないとの返答
北海道夕張市	北大北方生物圏フィールド科学センター建成産業、夕張リゾート	熱利用（温泉・ボイラーの廃熱利用）	ビニールハウス	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	約120m^{2}のハウス	グリーンアスパラガス	無し	無し	無し	CO_2削減は重油炊きの75%減。設備導入コストは通常の3.5倍。
北海道音更町	ノラワークスジャパン	熱利用	ビニールハウス	把握出来ていない	室温25℃以上	把握出来ていない	把握出来ていない	約60m^2	無し	マンゴー（アーウィン種）	無し	無し	試験栽培中（6月に試食会）
北海道弟子屈町	ドーコン（老人ホーム倖和園敷地内）	熱利用	ビニールハウス	把握出来ていない	室温30℃ 地温20℃	源泉80℃ 排湯50℃	ハウス利用12ℓ/min	80㎡	ホウレンソウ	メロン、イチゴ	無し	無し	2010年3月に経産省実証事業は終了 源泉からのお湯を一旦シイタケ栽培に利用し、その排湯をビニールハウスに利用
北海道茅部郡森町	JA渡島森・濁川温泉熱利用そ采生産組合	熱利用	ビニールハウス	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	トマト、キュウリ、タイナ	無し	無し	無し	土壌消毒も実施。
北海道壮瞥町	壮瞥オロフレ地熱利用野菜組合	熱利用	ビニールハウス	ポリエチレン管	真冬室温朝10℃ 昼25℃	源泉65℃ ハウス入口60℃	源泉1100ℓ/min（源泉4本） ハウス利用800ℓ/min	約23,600m^2	トマト、ホウレンソウ、、ミズナ	無し	シクラメン、カンパニュラ	無し	ハウス利用後の排湯と源泉300ℓ/minを混ぜて浴場・病院に供給
青森県青森市	(有)とれたてハウス	熱利用	ビニールハウス	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	1,300㎡	トマト、ピーマン、キュウリ、小松菜、春菊	無し	無し	無し	平成12年頃より温泉利用を行っている
青森県弘前市	大鰐もやし組合	熱利用	非公表	把握出来ていない	非公表	非公表	非公表	非公表	もやし、（夏菜、葉にら、志の葉、芹、ふきのとう、青菜）	無し	無し	無し	300年以上前から弘前藩で栽培されてきた

表 4.2.3.1　　我が国における温泉利用農業事業の例（その２）

市町村名	団体等名称	温泉の利用形態				湯温	湯量	面積	生産品				備考
		形態	用途	配管	効果				野菜類	果樹類	その他	加工品	
青森県弘前市	小堀松雄	熱利用	ビニールハウス	かん水用ビニールホースφ20　150～300mmピッチ	外気温より8℃ハウス内を上げている室温10℃	源泉51℃	把握出来ていない	26,000㎡	春菊、オータムポエム、サニーレタス、小松菜	メロン、スイカ苗	花弁苗	無し	地表面に15～30cm間隔で設置した2cmのパイプに温泉水を通水 ハウス循環後の温泉水は融雪に使用
青森県板柳町	グリーンファーム	熱利用	ビニールハウス	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	トマト	無し	無し	無し	
青森県五所川原市	阿部工務店	熱利用	ビニールハウス	ポリエチレン管	真冬室温朝13℃ 昼25℃	源泉63℃	源泉600ℓ/min（源泉1本）	1,000㎡	きぬさや、フルーツ白菜	メロン	無し	無し	源泉からの湯をハウス利用後、浴場に利用 源泉深度750m
青森県中泊町	大川造園	熱利用	ビニールハウス	把握出来ていない	把握出来ていない	源泉42℃	200ℓ/min	把握出来ていない	小松菜、ほうれん草、チンゲン菜	無し	花弁	無し	
青森県おいらせ町	アグリの里おいらせ	熱利用	鉄骨ハウス	鋼管	イチゴ室温5℃以上 バナナ・果樹室温10℃以上	源泉48℃ ハウス入口40℃	源泉600ℓ/min ハウス利用300ℓ/min	イチゴ4,000㎡ バナナ1,000㎡ 果樹　800㎡	無し	いちご、バナナ・パパイヤ等熱帯果樹	無し	無し	源泉からの湯の内、300ℓ/minは介護施設に供給 ハウス内に鋼管を2重に配管 薪ストーブも暖房に使用している ハウス利用後の排湯は、施設内に廃棄
栃木県さくら市	道の駅きつれがわ	熱利用	ビニールハウス	塩ビ管	室温12℃以上	源泉28℃ ハウス入口16℃	源泉1,300ℓ/min （全てハウス利用）	22,000㎡	ナス	無し	花弁	温泉パン（温泉は使用していない）	昭和59年より町の補助事業として開始。 ハウス栽培用に新規に源泉を掘削。
新潟県村上市	瀬波南国フルーツ園（開成、新潟県）	熱利用	ビニールハウス	把握出来ていない	把握出来ていない	源泉90℃ ハウス入口55℃	把握出来ていない	把握出来ていない	無し	パッションフルーツ、ドラゴンフルーツが主力	無し	各種ジェラート	他にマンゴー、スターフルーツ、カニステル、アテモヤ、ジャボチカバ、ライチ、アセロラ、ピタンガ等。 環境省　温室効果ガス排出削減・吸収クレジット創出支援事業。 熱源は、バイオガス利用を併用。
新潟県小谷村	小谷村しいたけ組合	熱利用	ビニールハウス	ポリエチレン管	室温10℃～15℃	源泉40℃	源泉200ℓ/min	150㎡	タラの芽	無し	菌床しいたけ	無し	平成17年頃からハウス利用をやめている （理由：温泉利用の効果があまり見られず、ボイラーを焚いていたため）

表 4.2.3.1　　我が国における温泉利用農業事業の例（その３）

市町村名	団体等名称	温泉の利用形態				湯温	湯量	面積	生産品				備考
		形態	用途	配管	効果				野菜類	果樹類	その他	加工品	
新潟県糸魚川市	㈱後藤組	熱利用、温泉水利用	ビニールハウス	塩ビ管	真冬室温18℃	源泉100℃（自噴） ハウス入口70℃	源泉1,500ℓ/min ハウス利用50ℓ/min	30㎡	タラの芽	無し	無し	タラの芽茶	未利用だった高温温泉水を、温熱用のみならず、一種の水耕栽培用の養生水として使用 ハウス下部のコンクリート内に塩ビ管を配管している。 源泉（自噴）の湯を池に落とし、70℃に冷ました湯をビニールハウスに利用している。 ハウス利用後の排湯は施設内に廃棄している。 源泉からの湯のほとんどは、ホテルで使用している。
岐阜県高山市栃尾	奥飛騨ファーム	熱利用	ビニールハウス	半割塩ビ管φ200	蒸気で室内を暖める 室温30℃	源泉65℃～70℃ ハウス入口60℃	ハウス利用10ℓ/min	180㎡	無し	バナナ、熱帯系果実	観葉植物、月下美人など	無し	ハウス内（三重構造とされる）に温泉を引湯し、温度と湯気で主にバナナを栽培。非常に多くの果樹類を試験的に栽培。
鹿児島県垂水市	財宝農場	熱利用	ビニールハウス	把握出来ていない	把握出来ていない	源泉55℃	把握出来ていない	把握出来ていない	無し	アセロラ、マンゴー、パパイヤ、ライチ、アテモヤ、ドラゴンフルーツ	無し	アセロラ石鹸	
鹿児島県指宿市	JAいぶすき農協	熱利用	ビニールハウス	鋼管、塩ビ管	室温20℃	源泉60℃	農家1軒180ℓ/min	農家1軒	ナス、キュウリ、トマト、ピーマン、ソラマメ	スイカ、ネットメロン、ビワ	観葉植物		戦前から営々とつづけられてきている。 製塩もかつては実施。 至る所で源泉の利用した観葉植物栽培を行っている。

2) 陸上養殖事業の実施

我が国における温泉熱を利用した陸上養殖事業の事例を**表 4.2.3.2** に示す。

全国的に利用がされており、トラフグ、アワビ、スッポンなどの高級食材を養殖している事例が多くなっている。栽培の結果発生する温排水の取り扱いなど、関係機関と協議することが必要な項目が多いが、低温地熱利用は適用可能と考えられる。

また、対象地の東南東に約 1ｋｍの区域には蔵王町役場、町立図書館、永野小学校を中心に集落が形成されている。今後の調査で熱エネルギーは蔵王町役場周辺でも今回の調査対象と同等のポテンシャルを有することが判明した場合には、この区域に掘削井戸を設置し、地熱資源活用が可能になる。具体的にはヒートポンプを活用した冷暖房システムの導入、冬季の道路凍結対策などが挙げられる。

表 4.2.3.2　　我が国における温泉利用陸上養殖事業の例（その１）

市町村名	団体等名称	熱、温泉の利用形態			湯温	湯量	面積あるいは容積	生産品	備考
		形態	用途	効果					
北海道弟子屈町	ホテルパークウェイ	温泉水直接利用	養殖用水槽	水温20～25℃ ミネラルで病気予防	源泉67℃	源泉400l/min 水槽利用100ℓ/min	水槽100t×3槽	ティラピア(2万匹)	食用（摩周鯛の名前で販売している） 薬品を使用せず、温泉100％で養殖 源泉PH7.8（地区の他の源泉はPH1.0）
北海道八雲町熊石	水産種苗生産センター	温泉熱利用 （熱交換にて海水を暖めている）	養殖用水槽	水温17℃	源泉90℃ 水槽入口50℃ （源泉から4km）	源泉1300ℓ/min （源泉3本） 水槽利用400ℓ/min	水槽5t×50槽 （かけ流し式34槽） （循環式16槽）	エゾアワビ	2,000t/dayの海洋深層水を使用 かけ流し式で使用した海水を、別のアワビ養殖施設で二次利用している
岩手県湯田郡西和賀町	㈱西和賀産業公社	温泉水直接利用	養殖用水槽	水温20℃ 冬も冬眠させないので、早く成長させ出荷できる 出荷まで1年半（通常3年）	源泉60℃ （加温ボイラー併用）	把握出来ていない	水槽8t×20槽	スッポン	減反地の有効利用
宮城県栗駒市	築館クリーンセンター・高森ファーム事業部	温水利用 （温泉水ではない）	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	水槽170t×4槽	トラフグ (12,000匹)	コンピュータ管理 ブロッコリー・スプラウト、ケーキ用イチゴも扱う 現在は養殖は行っていない
福島県郡山市	ふくしまリゾート㈱	温泉水直接利用	把握出来ていない	把握出来ていない		把握出来ていない	把握出来ていない	トラフグ	養殖開始の告示のみ
栃木県那珂川町	㈱夢創造	温泉水直接利用	養殖用水槽	水温20℃	源泉40～50℃	把握出来ていない (循環式の為、一回水槽に湯を貯めたら、それ以降は蒸発を補う程度の足し湯である)	第1プラント12t×5基 第2プラント12t×4基 第3プラント250t(研究用)	トラフグ	第1プラントは廃校を利用 第2プラントはビニールハウスを利用 第3プラントは温水プールを利用 同社は温泉トラフグ養殖に関するコンサルティングも行っている 人工海水を加えている

表 4.2.3.2　　我が国における温泉利用陸上養殖事業の例（その２）

市町村名	団体等名称	熱、温泉の利用形態			湯温	湯量	面積あるいは容積	生産品	備考
		形態	用途	効果					
群馬県前橋市	電力中央研究所赤城試験センター	温水利用（温泉水ではない）	養殖用水槽	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	φ4m×H1m	トラフグ（約1,000匹）	ヒラメも成功 5年前に研究を止めている
長野県飯田市	飯田市南信濃振興公社	温泉水直接利用	養殖用水槽	水温22℃	源泉42℃	源泉321ℓ/min 水槽は循環式の為、一回水槽に湯を貯めたら、それ以降は蒸発を補う程度の足し湯である	φ2m×2基	トラフグ(200匹)	市所有の源泉を使用している。
岐阜県高山市	神岡鉱業㈱	温泉水直接利用	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	（坑道内）	スッポン	事業終了
岐阜県高山市	焼岳すっぽん養殖場	温泉水直接利用	把握出来ていない	把握出来ていない	約30℃に維持	把握出来ていない	把握出来ていない	スッポン	フリーズドライによって粉末化したサプリも製造販売。
岐阜県高山市	㈱ナガセスッポン養殖場	温泉水直接利用	養殖用水槽	非公表	源泉54℃	源泉840ℓ/min	非公表	スッポン（40,000匹）	テラピアから転換した
静岡県袋井市	温泉とらふぐ研究所	温泉水直接利用	養殖用水槽	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	建屋250m^{2}内に5槽	トラフグ(2,000尾)	将来的には10,000尾飼育を目指す
福井県永平寺町	㈱WIN	温泉水利用と記載	養殖用水槽	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	把握出来ていない	トラフグ(2,500匹)	現在は養殖を行っていない
大分県湯布院町安心院	宝仙堂大分養殖場	温泉水直接利用（希釈）	非公表	非公表	約30℃に維持	非公表	稚亀用池20、成亀用池15	スッポン（約15,000匹）	医薬品、健康食品メーカ。
鹿児島県指宿市	ナカムラ養殖	温泉水直接利用（希釈）	養殖用水槽	把握出来ていない	70℃	把握出来ていない	把握出来ていない	鰻	塩分濃度2.3%の源泉を0.2～0.6%に調整して使用。

4.2.4　経済性の検討

1）検討した事業モデル

ここでは、仙台南西部地域を想定して、低温地熱発電を行い、発生した電力とエネルギー回収後の温排水熱を温熱ハウス・植物工場などの農業利用に供給する事業を仮定して、経済性の試算を行った。図 4.2.4-1 に事業モデルの概念図を示した。

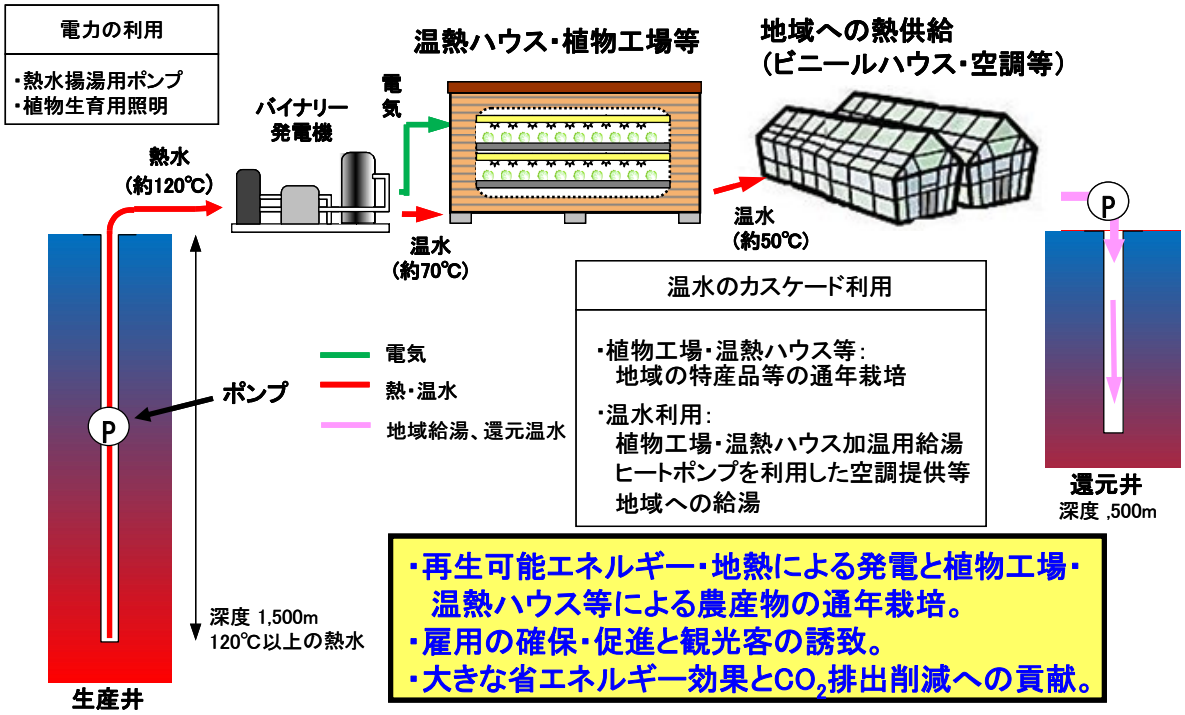


図 4.2.4-1　低温地熱資源を用いた温熱ハウス・植物工場事業の概念

2）設定条件

上記の事業モデルに対して、経済性の検討に当たって、以下の条件を設定した。

① 発電規模（発電端 350kW, 送電端 263kW, 利用率 80%, 年間発電量 1,839,600kW）

② 坑井（生産井 1,500m 級 1 本、還元井 500m 級 1 本）

生産井の透水性：kh=5.3×10^{-12} m^3（ポンプ揚程 100m の場合）

生産流体の温度:120℃

生産・還元量：75t/h

③ 熱水揚水用坑内ポンプ（１基、５年毎に交換）

④ 電力用途

ケース１：全量自家消費（植物工場での消費、グリーン電力証書による収入を仮定）

ケース２：固定買取制度による売電（売電価格 25 円/kW を仮定、植物工場での電力は買電を想定）

⑤ 発電方式：カリーナサイクル（媒体：アンモニア水）

発電機入口側　120℃・75t/h

発電機出口側　70℃（植物工場に供給）

⑥　植物工場（太陽光・人工光・地熱併用型）

入熱　70℃・75t/h（外気温-7℃で 30℃の保熱）

排熱　45℃（一部は地域のビニールハウスに供給、20 円/重油リットル換算）

植物工場　栽培実面積　9,000m²

植物工場　パイプハウス（耐雪仕様）＋補助人工光・空調＋地熱温熱

パイプハウス本体　50,600 千円/3,000m²

補助人工光・空調　100,000 千円/3,000m²（概算）

⑦　補助金（平成２４年度概算予算を参考にした。）

植物工場　農林水産省補助金　（補助率 1/2 以内）

「強い農業づくり交付金」

「産地活性化総合対策事業（産地の収益力向上への取組に対する支援)」

「生産環境総合対策事業（農業生産における地球温暖化対策の推進)」

「産地再生関連施設緊急整備事業」

「農山漁村活性化プロジェクト支援交付金」

「東日本大震災農業生産対策交付金」

植物工場　経済産業省補助金　（補助率　定額 2/3 以内）【参考】

「先端農業産業化システム実証事業」

発電設備　（全量自家消費の場合のみ）経済産業省補助金（補助率 1/3 以内※）

「独立型再生可能エネルギー発電システム等導入促進対策補助金」

「新エネルギー等導入加速化支援対策費補助金」

※地方公共団体や非営利民間団体の場合は、1/2 以内

図 4.2.4-2 に発電後の地熱水（70℃）および冷却温排水（24～27℃程度）の利用に関する設計の例を示す。ここでは、設計の都合上、熱交換器を介して真水を温めてポンプで循環する方式で熱量計算を行っているが、実際には、地熱水にスケールや腐食等の問題が少ない場合には、直接地熱水を利用するケース（例えば、壮瞥町における温泉水を利用した温室団地がこれに相当する）も考慮することが必要である。上記の事業モデルでは、熱交換器は使用しない場合について積算している。熱量的には、発電後の下流側で、植物工場に対して 2,000kW の熱供給ならびに、地域住民の経営するビニールハウスに対して、1,200kW（最大）の熱供給が可能である。さらに、この例では、給湯水(60℃,毎分 20 リットル)供給用として 100kW、屋根融雪用として 215kW の熱供給を想定した。

3) 植物工場の収入について

植物工場の収入は、供給先の安定確保等の課題があり、歩留まりや市場価格変動も含めて、想定が難しい。ここでは、農林水産省・経済産業省が取りまとめている「植物工場の事例集」（平成 21 年 11 月）の事例の中から、比較的に規模が大きく、収入・光熱費・雇用者数等のデータが整備されているものを抽出して、その数値を参考に、収入・光熱費・雇用者数（社員・パート）を設定した。**表 4.2.4-1** に結果を示す。９ケースについて抽出し、全体の合計・平均を No.10 に示した。それに基づき、No.11 に今回、経済性の評価のために設定したモデルを示す。

栽培実面積当りの年間売上は、９ケースの平均では、4.57 万円/m² になるが、完全人工光の事例が多いこと、今回はパイプハウスを利用することを考慮して、2 万円/m² で設定した。ちなみに、事例集の例では、植物工場の場合、1/2 程度の補助金を含めても、設備投資が高いこと、光熱費が高いこと（完全人工光のケースで売上の 30%程度）から、収支は、ほぼ均衡か、赤字のケースが多かった。今回の想定ケースでは、パイプハウスと地熱の併用でこの部分を抑えることが出来る可能性がある。

4) 経済性の試算

上記の条件で、電力の完全自家消費のケース（**表 4.2.4-2**）と固定買取制度による売電のケース（**表 4.2.4-3**）の２つのケースで、経済性の試算を行った。

それぞれのケースで、内部収益率（１５年）は、完全自家消費のケースで 12.5%, 固定買取制度のケースで 6%となり、事業性は確保できる結果となった。

【内部収益率】

内部収益率(Internal Rate of Return、IRR)法とは、投資によって得られると見込まれる利回りと、本来得るべき利回りを比較し、その大小により判断する手法のこと。IRR とは、投資プロジェクトの正味現在価値(NPV)がゼロとなる割引率のことをいう。

内部収益率は、正味現在価値と同様、プロジェクトが創出する全てのキャッシュ・フローの現在価値を考慮するという特徴を有している。内部収益率法はプロジェクトを利回りという率で表しているのに対し、正味現在価値法はプロジェクトを NPV という金額で表している。

（IRR の計算式）

$$C_0 + \frac{C_1}{(1+r)^1} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \frac{C_3}{(1+r)^3} + \cdots + \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0$$

※ ただし、投資をすることから C_0 は、必ず負の数値となる

内部収益率を用いた投資の意思決定は以下のように行う。

1) プロジェクトのハードル・レート(割引率)を決定
2) プロジェクトの創出するキャッシュ・フローを予想
3) プロジェクトの IRR を算出
4) 以下で判定

IRR > ハードル・レート → 投資する
IRR < ハードル・レート → 投資しない

表 4.2.4-1　植物工場の収入・光熱費・雇用者数について

	植物工場名	栽培実面積(m2)	生産品目	タイプ	歩留まり	生産回数	年間売上(万円)	m2当り売上	光熱費(万円)	光熱費比率	社員	パート
1	安全野菜工場	2,800	チマ・サンチュ	完全人工光	80%	8	8,000	2.86	2,160	27%	11	
2	ハイテック羽生	350	サラダ菜・リーフレタス	〃	90%	−	4,000	11.43	980	25%	9	
3	ラプランタ諏訪	3,000	リバーグリーン・フリンジグリーン・ノーチップ	〃	−	9	11,000	3.67	3,300	30%	3	25
4	ハイテクフォーム園部工場	360	サラダ菜・リーフレタス・フリルレタス	〃	90%	−	3,800	10.56	1,140	30%	10	
5	夢ファーム有漢	580	フリルアイス・リーフレタス	〃	80%	9.2	6,188	10.67	1,986	32%	11	
	完全人工光型　平均	1,418		完全人工光	85%		6,598	4.65	1,913	29%		
6	ベルクアース	454	トマト(主)・キュウリ・メロン・葉菜	太陽光・人工光	95%	−	8,100	17.84	1,400	17%	4	6
7	夢ファームやなだに	308	サラダ菜・リーフレタス・フリルアイス	〃	90%	11	3,500	11.36	805	23%	9	
8	三田・土浦グリーンハウス	15,000	サラダ菜・レタス	〃	−	28	80,000	5.33	10,400	13%	40	80
9	久住高原野菜工場	6,600	パセリ・バジル類	〃	−	10	10,000	1.52	2,000	20%	16	
	太陽光・人工光併用型平均	5,591		太陽光・人工光	92.5%	16.3	25,400	4.54	3,651	14%		
	全体　平均	3,272				13	14,954	4.57	26,085	18%		
	設定モデル	9,000		太陽光・人工光・地熱	80%	8	18,000	2.00	3,240	18%	3	75

※この例では、試算の便宜上、植物工場・ビニールハウスへの熱供給を熱交換器を介して行う設計としたが、熱水の成分によっては直接供給する可能性もある。

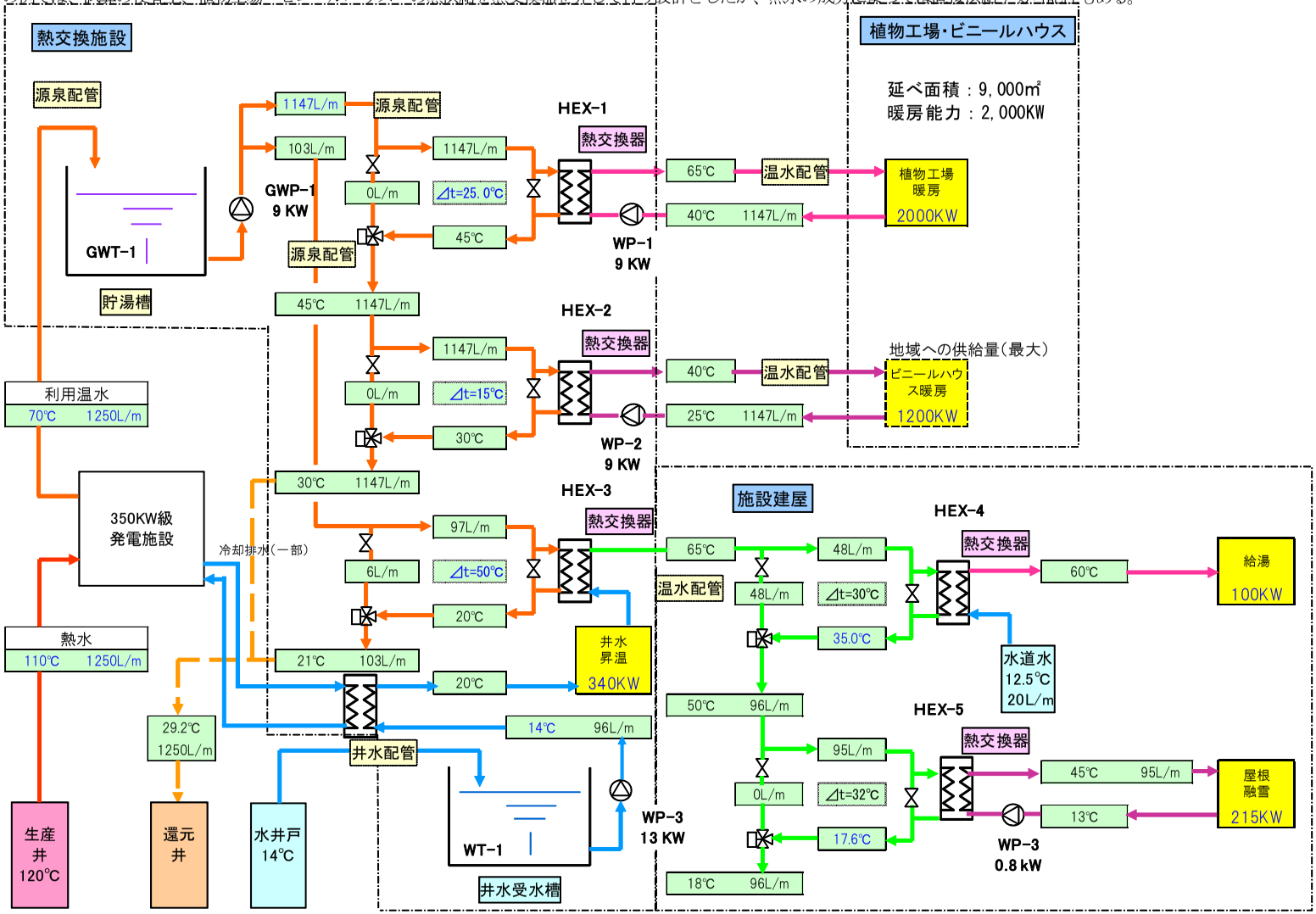


図 4.2.4-2 発電後の熱水および冷却温排水の利用に関する設計の例

表 4.2.4-2　電力完全自家消費の場合の経済性試算結果 (1)

発電端　350 kW　送電端　263 kW　利用率　80% 年間　1,839,600 kWh　　単位:千円

			立上げ時	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	合 計	15年平均
収支	収入	送電端総発電量	MWh	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	27,594	1,840
		発電収入(グリーン電力証書	3.00円/kW	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	4,763	71,447	4,763
		農業収入	20,000円/m2	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	2,700,000	180,000
		低温熱供給(ﾋﾞﾆｰﾙﾊｳｽ)	20円/重油L	0	0	4,000	8,000	12,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	184,000	12,267
		計		184,763	184,763	188,763	192,763	196,763	200,763	200,763	200,763	200,763	200,763	200,763	200,763	200,763	200,763	200,763	2,955,447	197,030
	支出	発電人件費(BT主任技術者)	1名(年1.5%増)	5,000	5,075	5,151	5,228	5,307	5,386	5,467	5,549	5,632	5,717	5,803	5,890	5,978	6,068	6,159	83,411	5,561
		発電人件費(電気主任技術者	委託費	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	9,000	600
		発電維持・補修費		4,534	5,836	7,138	8,440	9,742	11,045	12,347	13,649	14,469	14,469	14,469	14,469	14,469	14,469	14,469	174,014	11,601
		発電ユーテリティ		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	15,000	1,000
		発電原料その他購入費		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	15,000	1,000
		農業人件費		48,000	48,360	48,725	49,096	49,473	49,855	50,243	50,636	51,036	51,441	51,853	52,271	52,695	53,125	53,562	760,371	50,691
		農業経費		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	45,000	3,000
		農業維持・補修費		4,247	5,467	6,687	7,907	9,126	10,346	11,566	12,786	13,554	13,554	13,554	13,554	13,554	13,554	13,554	163,009	10,867
		火災保険料	設備取得額の0.3%	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	42,035	2,802
		公租公課	原価全体の5%	7,542	7,690	7,838	7,986	8,135	6,025	6,175	6,325	6,428	6,453	5,478	5,503	5,529	5,555	5,581	98,242	6,549
		発電プラント減価償却費	定額法15年	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	12,474	187,110	12,474
		井戸減価償却費	定額法10年	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000						200,000	31,393
		温熱ハウス・坑内ポンプ減価償却費	定額法5年	48,180	48,180	48,180	48,180	48,180	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	270,900	
		原価(支出計)		158,379	161,484	164,595	167,714	170,840	126,534	129,674	132,822	134,996	135,510	115,033	115,563	116,101	116,647	117,201	2,063,092	137,539
	収支			26,384	23,280	24,168	25,049	25,923	74,229	71,089	67,941	65,767	65,253	85,730	85,200	84,662	84,116	83,562	892,355	59,490
	一般管理費			1,250	1,269	1,288	1,307	1,327	1,347	1,367	1,387	1,408	1,429	1,451	1,472	1,495	1,517	1,540	20,853	1,390
	計			1,250	1,269	1,288	1,307	1,327	1,347	1,367	1,387	1,408	1,429	1,451	1,472	1,495	1,517	1,540	20,853	1,390
	営業外利益　運用益			0	29	56	84	112	126	138	149	157	165	157	222	287	351	416	2,448	163
	営業外費用　借入金金利		2.40%	13,800	13,800	13,800	13,800	13,800	13,800	13,800	13,800	13,800	13,800	0	0	0	0	0	138,002	9,200
	計			15,050	15,040	15,032	15,024	15,015	15,021	15,029	15,039	15,051	15,065	1,294	1,250	1,208	1,166	1,124	156,407	10,427
	経常利益			11,334	8,240	9,136	10,025	10,908	59,208	56,060	52,903	50,716	50,188	84,437	83,950	83,455	82,951	82,438	735,948	49,063
	税等収益関係税			4,534	3,296	3,654	4,010	4,363	23,683	22,424	21,161	20,286	20,075	33,775	33,580	33,382	33,180	32,975	294,379	19,625
	税引き後利益(当期損益)			6,801	4,944	5,481	6,015	6,545	35,525	33,636	31,742	30,430	30,113	50,662	50,370	50,073	49,770	49,463	441,569	29,438
	累積			6,801	11,744	17,226	23,241	29,786	65,311	98,947	130,688	161,118	191,231	241,893	292,263	342,336	392,106	441,569	441,569	29,438

表 4.2.4-2　電力完全自家消費の場合の経済性試算結果 (2)

		立上げ時	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	合 計	15年平均
資金調達	補助金(農業50%)	225,900																225,900	15,060
	補助金(発電30%)	80,190																80,190	5,346
	補助金(坑井掘削20%)	43,000																43,000	2,867
	長期借入金	575,010																575,010	38,334
	自己資本	10,000																10,000	667
	運転資金借入	0																0	0
	当期損益	0	6,801	4,944	5,481	6,015	6,545	35,525	33,636	31,742	30,430	30,113	50,662	50,370	50,073	49,770	49,463	441,569	29,438
	前期繰越金		0	28,954	56,050	83,685	111,853	125,551	138,049	148,658	157,372	164,775	156,861	221,997	286,841	351,388	415,632	415,632	27,709
	減価償却費		80,654	80,654	80,654	80,654	80,654	35,474	35,474	35,474	35,474	35,474	15,474	15,474	15,474	15,474	15,474	658,010	43,867
	調達計	934,100	87,455	114,551	142,186	170,354	199,052	196,550	207,159	215,873	223,276	230,362	222,997	287,841	352,388	416,632	480,569	480,569	32,038
資金支出	発電設備 機械装置(概算)	163,300																163,300	10,887
	敷地造成(概要)	5,000																5,000	333
	設備工事(概算)	80,000																80,000	5,333
	系統連携設備(概算)	15,000																15,000	1,000
	許認可費用(概算)	4,000																4,000	267
	生産井掘削費(概算)	150,000																150,000	10,000
	還元井掘削費(概算)	50,000																50,000	3,333
	坑内ポンプ(概算)	15,000					15,000					15,000						45,000	3,000
	植物工場建設費用(概算)	451,800																451,800	30,120
	借入金返済		57,501	57,501	57,501	57,501	57,501	57,501	57,501	57,501	57,501	57,501	0	0	0	0	0	575,010	38,334
	運転資金返済		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	配当	資本金の10%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	15,000	1,000
	資金支出計	934,100	58,501	58,501	58,501	58,501	73,501	58,501	58,501	58,501	58,501	73,501	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	620,010	41,334
資金バランス		0	28,954	56,050	83,685	111,853	125,551	138,049	148,658	157,372	164,775	156,861	221,997	286,841	351,388	415,632	**479,569**		

単位:千円

表 4.2.4-2　電力完全自家消費の場合の経済性試算結果（3）

キャッシュフロー

単位:千円

	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年	11年	12年	13年	14年	15年
(934,100)	28,954	56,050	83,685	111,853	125,551	138,049	148,658	157,372	164,775	156,861	221,997	286,841	351,388	415,632	479,569
IRR	−96.9%	−73.9%	−49.6%	−31.6%	−19.8%	−11.7%	−5.9%	−1.7%	1.4%	3.6%	5.9%	8.0%	9.8%	11.3%	12.5%

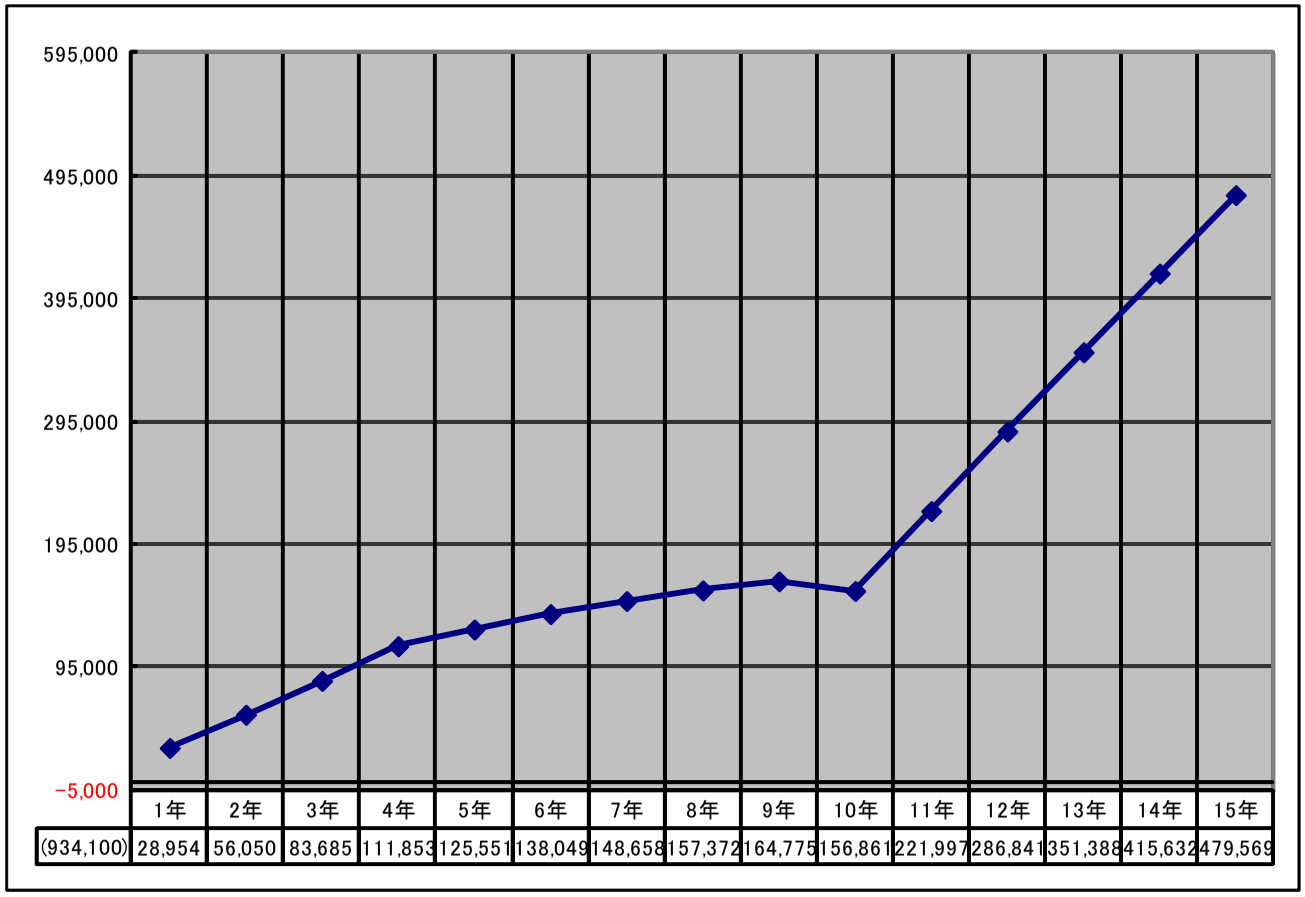


表 4.2.4-3　電力固定買取制度売電の場合の経済性試算結果(1)

発電端　350 kW　送電端　263 kW　利用率　80% 年間　1,839,600 kWh　　単位:千円

			立上げ時	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	合 計	15年平均
収支	収入	送電端総発電量	MWh	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	1,840	27,594	1,840
		発電収入(固定買取制度)	25.00円/kW	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	39,693	595,395	39,693
		農業収入	20,000円/m2	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	2,700,000	180,000
		低温熱供給(ﾋﾞﾆｰﾙﾊｳｽ)	20円/重油L	0	0	4,000	8,000	12,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	184,000	12,267
		計		219,693	219,693	223,693	227,693	231,693	235,693	235,693	235,693	235,693	235,693	235,693	235,693	235,693	235,693	235,693	3,479,395	231,960
	支出	発電人件費(BT主任技術者)	1名(年1.5%増)	5,000	5,075	5,151	5,228	5,307	5,386	5,467	5,549	5,632	5,717	5,803	5,890	5,978	6,068	6,159	83,411	5,561
		発電人件費(電気主任技術者	委託費	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	9,000	600
		発電維持・補修費		4,534	5,836	7,138	8,440	9,742	11,045	12,347	13,649	14,469	14,469	14,469	14,469	14,469	14,469	14,469	174,014	11,601
		発電ユーテリティ		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	15,000	1,000
		発電原料その他購入費		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	15,000	1,000
		農業人件費		48,000	48,360	48,725	49,096	49,473	49,855	50,243	50,636	51,036	51,441	51,853	52,271	52,695	53,125	53,562	760,371	50,691
		農業経費		35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	35,400	531,000	35,400
		農業維持・補修費		4,247	5,467	6,687	7,907	9,126	10,346	11,566	12,786	13,554	13,554	13,554	13,554	13,554	13,554	13,554	163,009	10,867
		火災保険料	設備取得額の0.3%	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	2,802	42,035	2,802
		公租公課	原価全体の5%	9,429	9,577	9,725	9,874	10,023	7,913	8,062	8,212	8,316	8,340	7,365	7,390	7,416	7,442	7,468	126,552	8,437
		発電プラント減価償却費	定額法15年	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	17,820	267,300	17,820
		井戸減価償却費	定額法10年	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000						200,000	31,393
		温熱ハウス・坑内ポンプ減価償却費	定額法5年	48,180	48,180	48,180	48,180	48,180	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	270,900	
		原価(支出計)		198,012	201,117	204,229	207,347	210,473	166,167	169,307	172,455	174,629	175,144	154,666	155,196	155,734	156,280	156,835	2,657,592	177,173
収支				21,681	18,576	19,464	20,346	21,220	69,526	66,386	63,238	61,064	60,549	81,027	80,497	79,959	79,413	78,858	821,803	54,787
一般管理費				1,250	1,269	1,288	1,307	1,327	1,347	1,367	1,387	1,408	1,429	1,451	1,472	1,495	1,517	1,540	20,853	1,390
計				1,250	1,269	1,288	1,307	1,327	1,347	1,367	1,387	1,408	1,429	1,451	1,472	1,495	1,517	1,540	20,853	1,390
営業外利益　運用益				0	17	33	49	66	68	69	68	65	60	41	108	176	243	309	1,371	91
営業外費用　借入金金利			2.40%	16,757	16,757	16,757	16,757	16,757	16,757	16,757	16,757	16,757	16,757	0	0	0	0	0	167,568	11,171
計				18,007	18,008	18,012	18,015	18,018	18,036	18,055	18,077	18,100	18,126	1,410	1,364	1,319	1,274	1,230	187,050	12,470
経常利益				3,674	568	1,453	2,331	3,202	51,490	48,331	45,161	42,963	42,424	79,617	79,133	78,640	78,139	77,628	634,753	42,317
税等収益関係税				1,470	227	581	932	1,281	20,596	19,332	18,065	17,185	16,969	31,847	31,653	31,456	31,255	31,051	253,901	16,927
税引き後利益(当期損益)				2,205	341	872	1,398	1,921	30,894	28,998	27,097	25,778	25,454	47,770	47,480	47,184	46,883	46,577	380,852	25,390
累積				2,205	2,545	3,417	4,815	6,736	37,630	66,629	93,726	119,504	144,958	192,728	240,208	287,392	334,275	380,852	380,852	25,390

表 4.2.4-3　電力固定買取制度売電の場合の経済性試算結果(2)

		立上げ時	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	合 計	15年平均
資金調達	補助金(農業50%)	225,900																225,900	15,060
	補助金(発電0%)	0																0	0
	補助金(坑井掘削0%)	0																0	0
	長期借入金	698,200																698,200	46,547
	自己資本	10,000																10,000	667
	運転資金借入	0																0	0
	当期損益	0	2,205	341	872	1,398	1,921	30,894	28,998	27,097	25,778	25,454	47,770	47,480	47,184	46,883	46,577	380,852	25,390
	前期繰越金		0	17,385	32,905	48,957	65,535	67,636	68,530	67,529	64,626	60,404	40,858	108,448	175,748	242,752	309,455	309,455	20,630
	減価償却費		86,000	86,000	86,000	86,000	86,000	40,820	40,820	40,820	40,820	40,820	20,820	20,820	20,820	20,820	20,820	738,200	49,213
	調達計	934,100	88,205	103,725	119,777	136,355	153,456	139,350	138,349	135,446	131,224	126,678	109,448	176,748	243,752	310,455	376,852	376,852	25,123
資金支出	発電設備 機械装置(概算)	163,300																163,300	10,887
	敷地造成(概要)	5,000																5,000	333
	設備工事(概算)	80,000																80,000	5,333
	系統連携設備(概算)	15,000																15,000	1,000
	許認可費用(概算)	4,000																4,000	267
	生産井掘削費(概算)	150,000																150,000	10,000
	還元井掘削費(概算)	50,000																50,000	3,333
	坑内ポンプ(概算)	15,000					15,000					15,000						45,000	3,000
	植物工場建設費用(概算)	451,800																0	0
	借入金返済		69,820	69,820	69,820	69,820	69,820	69,820	69,820	69,820	69,820	69,820	0	0	0	0	0	698,200	46,547
	運転資金返済		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	配当	資本金の10%	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	15,000	1,000
	資金支出計	934,100	70,820	70,820	70,820	70,820	85,820	70,820	70,820	70,820	70,820	85,820	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	743,200	49,547
資金バランス		0	17,385	32,905	48,957	65,535	67,636	68,530	67,529	64,626	60,404	40,858	108,448	175,748	242,752	309,455	**375,852**		

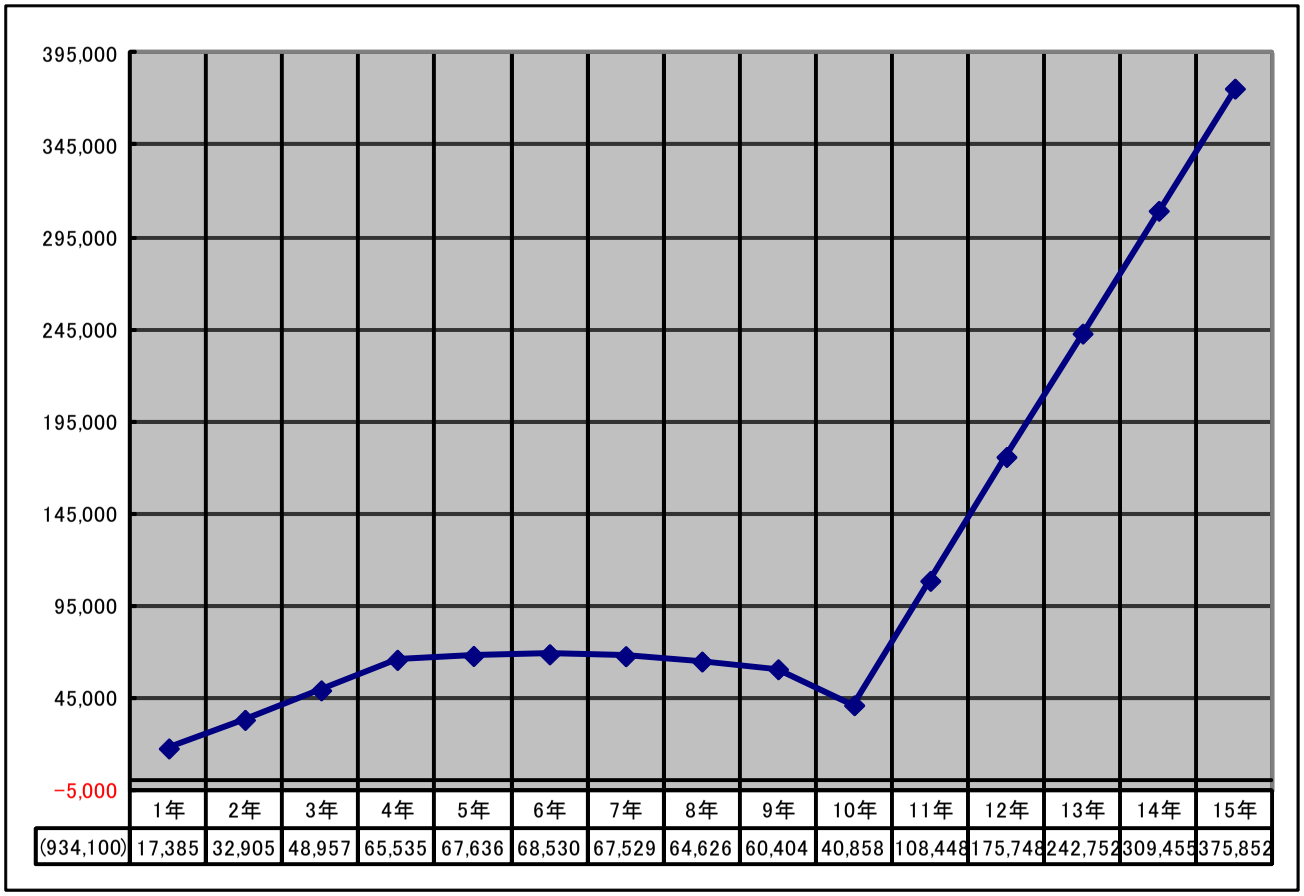
単位:千円

表 4.2.4-3　電力固定買取制度売電の場合の経済性試算結果(3)

キャッシュフロー

単位:千円

	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年	11年	12年	13年	14年	15年
(934,100)	17,385	32,905	48,957	65,535	67,636	68,530	67,529	64,626	60,404	40,858	108,448	175,748	242,752	309,455	375,852
IRR	−98.1%	−80.3%	−58.8%	−41.6%	−30.4%	−22.7%	−17.2%	−13.2%	−10.3%	−8.6%	−5.2%	−1.6%	1.4%	3.9%	6.0%



4.2.5　低温地熱発電システムの課題

1) 事業リスクに関わる課題について

経済性の試算結果では、事業性が確保できる事業モデルが提示できたが、試算には以下の点については考慮されていない点は留意が必要である。

①　完全自家消費では、全量消費を前提としているが、実際の需要では不足の場合の買電や余剰電力の売電が想定されるため、その場合、収益性は悪化する可能性がある。

②　生産井や還元井の補充井を想定していない。

③　2 万円/m² で仮定した植物工場の収益が、事業性に大きく寄与していることから、栽培品目や納入先などについて、綿密な調査・計画を事前に行う必要がある。（参考にした事例集でも、各植物工場の単位面積当りの収入には大きなばらつきがある。）

④　固定買取制度や各種補助金等については、政府のエネルギー政策が確定していないため、実際に運用可能かについて、さらに調査が必要である。

⑤　太陽光・人工光・地熱併用型の植物工場という事業モデルは、新しい発想に基づくもので、耐雪や施設の寿命も含めて、適切なシステム設計を行なっていく必要がある。

⑥　坑井掘削のリスクの評価

2)系統連係について

東北電力（蔵王町）中国電力（隠岐島後）、の２社に低温地熱発電の系統連係について、ヒアリングを行った。２社からは下記の回答を得た。

■質問時の前提条件

・現在、一般財団法人エンジニアリング協会では財団法人ＪＫＡより機械工業振興資金の補助を受け、「地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査研究」を行っている。
・事業は、平成２２年度から開始されており、低温地熱発電の可能性が高い地域として「仙台南西部」「隠岐島後」が有力地域と考え、現在、事業実行可能性調査を実施している。
・「仙台南西部」「隠岐島後」共に、最大出力 300kW の低温地熱発電の可能性がある。

■回答結果

●一概にこの位置で系統連係が可能とは言えない。

変電所からの距離、送電の方向、昇圧している地域との関係などの多くの項目から判断して系統連係が可能かを判断することになる。既存の電力網へ悪影響を与えないか、到達点の電圧を安定化させられるか、などの電力の品質を確保できるかが重要なポイントである。

●低温地熱発電機の詳細なデータが必要

パワコンの仕様、インバータの装置の仕様が判明するデータが検討に必要。発電後の整流したものを系統に流せるかの問題も考えられる。

⇒・低温地熱発電の系統連係実績が無いので（東北電力、中国電力)、できるだけ詳しい発電機の内容を知りたい。
・実績が無い発電機は電力会社としては、不安に思っている。
・電力会社と事業者間でやり取りが増える。
・他の電力会社への供給実績があれば、非常に参考になるので受領したい。

●検討費用

アクセス検討には、１件当たり、¥210,000 が必要。

検討期間は３カ月を要する。

第５章　まとめと今後の課題

5.1　調査結果のまとめ

5.1.1　低温地熱地域の調査と地熱資源量の評価

平成 22 年度は、国内の地熱資源の分布について文献調査を行い、これまで地熱地域として着目されていない地域で、かつ、比較的低温の地熱資源を期待できる地域において地熱資源賦存量の検討を行った。低温地熱地域の選定にあたっては、すでに着目されている地熱地域の他にも利用可能な地熱資源が存在し得ることを示すことを目的として、あえて既往の地熱発電所の近傍や地熱促進調査等が行われた地域を除外した。その上で、地熱ポテンシャルマップや温泉鉱泉データベースで活動度指数や地温の高い地域を抽出した。さらに、電力の需要や代替電源の必要性などの社会的要因を加味して、都市部に近い仙台南西部と、離島である隠岐島後の 2 地域を選定した。

調査の結果、仙台南西部では堆積岩と火山砕屑岩類からなる新第三紀の堆積盆中の深度 1,000～1,500m 付近に 75℃以上の地熱貯留層が推定された。貯留層の面積を 6km^2 と仮定した場合、資源量として 3.16×10^{17} ジュールの資源量が見込まれた。また、隠岐島後では、中新世の火山岩類中の深度 1,200～1,500m に 100℃程度の地熱貯留層が推定された。貯留層の範囲を直径 3km と仮定した場合の資源量として、5.12×10^{17} ジュールの資源量が見込まれた。

平成 23 年度は、モデル地域として選定された仙台南西部および隠岐島後について、さらに文献調査やヒアリングなどを実施し、両地域の地温、活動度指数、透水性、そして揚水量などについて検討を行い、両地域がほぼ同様の地温構造を有しており、透水性や揚水量についてもほぼ同様のオーダが得られることが確認された。そして、両地域共に文献断層近傍にあることによって高透水構造が期待されることと、高水温条件での動粘度の低下の効果を踏まえ、両モデル地域の回収可能な地熱資源量の見積に対し、同等の温度と揚湯量（流量）を設定した。

5.1.2　低温地熱発電システムおよび熱利用

平成 22 年度は、低温の地熱に対応した発電システムの現状での技術レベルの調査を行い、適用可能な発電システムの検討と課題の抽出を行った。調査の結果、低温地熱による発電システムとして、低沸点の作動媒体によりタービンを回すバイナリー発電システムが最も有力な候補として挙げられ、国内外の事例を得た。バイナリー発電システムは既にドイツにおいて地下 3,000m 以上の深度から 122～150℃の熱水を汲み上げて利用する発電が実用化しており、国内でも八丁原地熱発電所において 143℃の熱水を利用した発電が実用化している。また、120℃以下の温度で発電可能なものとしては、工場排熱の有効利用を目的として出力 50～100kW 級の小型の発電機が開発されつつあり、温泉熱を利用した 50kW 級の発電システムも実証段階を迎えている。

しかしながら、120℃以下に対応可能な発電システムでは、大量の温水が必要といった問題がある。温泉発電への適用を目指して実証試験中のカリーナサイクル発電システムが現状では最も発電に必要な温水の量が少ないが、それでも 98℃で 0.32t／h の流量が必要

である。これだけの流量を単一の井戸から供給することは、よほど対象貯留層の透水性が大きくない限り現実的ではなく、仮に流量を確保するために孔径を大きくしたり複数の井戸を掘削する等の措置を行うと経済的な観点から不利となる。この点で、低温地熱資源の評価に際しては透水性の高い断層破砕帯のような地質構造の分布に注目することが鍵となることが判明した。

一方、バイナリー発電システム以外の発電技術として、熱ロータリーエンジン、スターリングエンジンおよび熱電変換素子などを利用した発電システムが挙げられた。これらは、それぞれ小規模なプロトタイプが開発されているものの、低温地熱発電に適用するには課題が多く実用化には時間と費用がかかるものと思われる。しかしながら、将来的には選択肢となり得る技術であり、今後も情報の収集が望まれた。

そして、低温地熱資源の利用については、発電自体は小規模とならざるを得ず、積極的に温水の熱を利用する事業展開が望まれる。そこで、温水の利用方法について事例の調査と可能性の検討を行った。地域振興の観点から地熱利用の可能性を検討した結果、温室による地域特有の農産品の栽培、介護施設等の温浴や給湯、および養殖漁業などが候補として挙げられた。

平成 23 年度は、前年度に引き続き低温地熱発電システムの開発動向を調査すると共に、低温地熱資源の熱の有効利用の観点から、温熱ハウスや植物工場などの農業および陸上養殖に代表される漁業における熱の利用事例について調査した。

これらの農業や漁業における熱利用の事例を踏まえ、モデル地域における回収可能な地熱資源量（温度と揚湯量）とを併せ、一つのモデル事業イメージとして低温地熱発電と太陽光・人工光併用＋熱利用を前提とした植物工場を考え、ポンプの耐久性も考慮した事業モデルの経済性を試算した。その結果、多くの仮定条件を含むが事業性が確保できることが示された。

5.1.3　地域開発に資する地熱利用

地域開発の観点から、低温地熱の発電以外の多角的な熱利用を行う事業展開が望まれる。そこで、温水の利用方法について事例の調査と可能性の検討を行った。

平成 22 年度は、地域に根づいた地熱の利用事例として、大分県農林水産研究センター花き研究所と北海道森町濁川地域の事例を調査した。大分県の花き研究所では、120℃の地熱蒸気を利用して土壌および器具の消毒を行っている。また、濁川地域では地熱発電所の還元水で水道水を 90℃に加熱し、温室に利用し特産品のトマトやキュウリの栽培を行っている。

平成 23 年度は、これらの事例を含めて、地域振興の観点から地熱利用の可能性を検討した結果、温室による地域特有の農産品の栽培、介護施設等の温浴や給湯、および養殖漁業などが候補として挙げられた。そして、植物工場を想定することによって、事業性を見込むことが可能なモデルを提示することができた。

5.2　今後の課題

従来の地熱地域ではない「低温地熱地域」においても地熱貯留層が存在する可能性が示されたが、既往文献レベルでの調査であり精度が一様ではなく不確定な部分が多い。隠岐

島後地域には地温に関するデータが得られたものの、仙台南西部においては温度データが存在しないため地熱ポテンシャルマップから推定している。いくつかの仮定を行って回収可能な地熱賦存量の試算を行なったが、算出された値はこのような不確定要素を含んでいることを認識して利用する必要がある。

低温地熱に適用可能な発電システムとしてバイナリー発電システムが候補として挙げたが、多量の温水が必要であり、熱変換効率の向上が望まれる。

今年度の調査では､経済的な成立性を加味して､低温地熱発電の成立性を検討を行った。しかしながら、検討にはある程度具体的な数値が必要となるため、今後事業を具体的に想定する場合における成立性の机上に際しては、以下に示した項目を連携させて評価を行うことが望まれる。

・対象低温地熱胚胎層の性状（温度構造、透水性）
・生産井の仕様、コスト
・ポンプの仕様（揚湯量、消費電力、コスト、耐久性）
・発電機の仕様（出力、冷却方法、コスト）
・温水のカスケード利用（還元の要否)、経済効果（生産品の選択、流通）
・その他（条件設定、変動幅、電力単価、維持管理コスト、エネルギー政策・制度など）

書 名　平成 23 年度 地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査研究報告書
発 行　平成 24 年 3 月 31 日
一般財団法人　エンジニアリング協会
地下開発利用研究センター
（ＧＥＣ：Ｇeo-space Ｅngineering Ｃenter）
〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-18-19
TEL　03　(5405) 7203　FAX 03 (5405) 8201
印　刷　株式会社 ホクエツ印刷株式会社
禁無断転・掲載