ENNA GEC2010－P6

# 平成 22 年度
# 地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査
# 報告書

平成 23 年3月

財団法人エンジニアリング振興協会

地下開発利用研究センター

KEIRIN

この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

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、財団法人エンジニアリング振興協会・地下開発利用研究センター（研究企画委員会）が、平成２２年度事業として行った「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。

２０１０年の世界経済は、ゆるやかな回復基調にあるものの、米国での不確実性の高まりや欧州の一部での信用不安を受けて、低迷が長引く結果となりました。我が国においても、歴史的な円高水準が継続しており、日中のＧＤＰが逆転し、日本が世界第３位になるなど、厳しい状況が続いています。

その中にあっても、中国、インド、ブラジルといった新興国において力強い成長が見られ、成長市場への投資機会の増加など明るい兆しも見えています。

また、エネルギー・環境分野への世界的な関心の高まりから、環境配慮型製品の需要の拡大やインフラ関連投資の活発化が大きな話題となるなど、この分野でのビジネスチャンスが拡大していることも事実です。

このように、世界環境が変化する中で、エンジニアリング業界は社会に対する役割と使命を認識し、自ら進むべき方向を示す必要があります。そのためには技術競争力の強化がますます重要となっています。

我が国は、世界第三位の地熱資源国でありながら、自然公園の規制や、既存温泉への影響の懸念等の社会的要因に加え、開発コストが高いことから地熱発電の新規の立地が進んでいないのが現状であります。

本調査研究では、従来の地熱発電に比べ、自然公園法の規制がなく、既存の温泉からも離れた、いわゆる低温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」に係る資源量の評価を行うとともに、モデル地域を選定し、システムの概念の構築、建設・運用コストの検討及び環境影響評価を行うものであります。

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、学識経験者および企業の専門家からなる委員会（委員長（財）電力中央研究所　海江田秀志上席研究員）並びに同作業部会を編成し、事業を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当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に活用されることを切望する次第です。

平成２３年３月

財団法人エンジニアリング振興協会
会　長　　増　田　信　行

# はじめに

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29日に閣議決定され、2009年には中期目標として2020年までに1990年比で25%減が設定されている。これらの目標達成のための方策として、非化石エネルギーとしての再生可能エネルギーの利用拡大が挙げられている。

わが国は、狭い国土でありながら火山を数多く有し、最近の霧島火山の新燃岳の噴火に見られるように地下には膨大な熱エネルギーが存在している。産業技術総合研究所によると火山に起因する熱水系の地熱資源量は2,347万kWと評価され、世界第3位である。さらに、基盤内の高温岩体資源なども含めると、資源量は桁違いに大きくなることが予想される。地熱は国産の再生可能エネルギーであり、地熱発電は発電時にほとんどCO2を排出せず、気象条件にも影響されない安定した電源である。しかし、わが国では有望な地熱資源のほとんどが開発規制の厳しい国立公園内や温泉地周辺にあるため、開発されているエネルギー量は極わずかである。

一方、地熱資源の少ない海外では、熱水を利用した発電やヒートポンプなどによる地中熱利用など、熱水や地下水を温度に応じて効率的に産業や民生で利用するカスケード利用が盛んに進められており、最近わが国でもこのような地熱利用が注目されている。

本報告書では、上記のような観点から既に地熱資源が有望と見なされている地域（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）地域について、発電の可能性と熱利用について調査がなされた。その結果、地熱地域以外においても熱水や温水の利用が可能な地域が抽出され、その中の二つのモデル地点において資源量が評価された。また、熱水を利用した発電システムについて検討がなされ、各種の二次媒体を用いたバイナリー発電などにより、70℃程度以上の温度があれば発電が可能なことが判ったが、必要な熱水の流量の確保や発電後の温水の利用方策など、実用化に際しての課題も抽出された。今後は、低温地熱発電システムの概念の構築、建築・運用コスト、温水利用の検討および環境への影響評価などについて、モデル地点などにおける検討が望まれる。

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

平成２３年３月

「地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査」委員会

委員長　海江田秀志

**平成 22 年度**

**「地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査」**

**委員会名簿**

（順不同　敬称略）

| | | |
|---|---|---|
| 委員長 | 海江田秀志 | (財)電力中央研究所　地球工学研究所<br>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 | (独)産業技術総合研究所　地圏資源環境研究部門<br>地熱資源グループ長 |
| 委　員 | 日下部　寧 | (株)ダイヤコンサルタント<br>ジオエンジニアリング事業本部　地圏環境センター<br>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(株)　代表取締役社長 |
| 委　員 | 中西　繁隆 | 電源開発(株)　　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(株)<br>技術開発本部先端技術研究所<br>エネルギー・環境研究センター環境システム研究部<br>熱エネルギーグループマネージャー |
| ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ | 小宮　康則 | 経済産業省　経済産業政策局　地域経済産業グループ<br>産業施設課　課長補佐 |
| ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ | 伊藤　早直 | 経済産業省　電力基盤整備課 資源エネルギー庁<br>電力・ガス事業部　課長補佐 |
| ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ | 萬上　俊孝 | 経済産業省　製造産業局国際プラント推進室/戦略輸出室<br>プラント貿易企画一係長 |
| ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ | 高木　明裕 | (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構<br>エネルギー対策推進部　地熱・水力グループ　主幹 |
| ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ | 高野　　仁 | (株)ダイヤコンサルタント<br>ジオエンジニアリング事業本部　地圏環境センター長 |
| ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ | 二口　克人 | (株)ダイヤコンサルタント<br>ジオエンジニアリング事業本部　地圏環境センター<br>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(株)　取締役<br>営業・事業開発部長　兼　技術部専門部長 |
| 事務局 | 奥村　忠彦 | (財)エンジニアリング振興協会<br>地下開発利用研究センター　　研究理事 |
| 事務局 | 青柳　教之 | (財)エンジニアリング振興協会<br>地下開発利用研究センター　技術開発第一部　　研究主幹 |

**平成 22 年度**

**「地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査」**

**作業部会名簿**

（順不同　敬称略）

| | | |
|---|---|---|
| 部会長 | 高野　　仁 | ㈱ダイヤコンサルタント<br>ジオエンジニアリング事業本部　　地圏環境センター長 |
| 部会員 | 日下部　寧 | ㈱ダイヤコンサルタント<br>ジオエンジニアリング事業本部　地圏環境センター<br>地盤水理グループマネージャー |
| 部会員 | 二口　克人 | ㈱ダイヤコンサルタント<br>ジオエンジニアリング事業本部　地圏環境センター<br>地盤水理グループ　副技師長 |
| 部会員 | 大里　和己 | 地熱技術開発㈱　取締役<br>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<br>地熱技術グループ　課長 |
| 事務局 | 青柳　教之 | (財)エンジニアリング振興協会<br>地下開発利用研究センター　技術開発第一部　研究主幹 |

# 平成 22 年度

## 「地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査」

## 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 …… 3

1.3　成果概要 …… 3

1.3.1　低温地熱地域の調査 …… 3

1.3.2　低温地熱発電システムの検討 …… 4

1.3.3　地域開発に資する地熱利用の検討 …… 5

1.3.4　まとめと今後の課題 …… 5

**第２章　低温地熱地域の調査** …… 7

2.1　国内地熱資源量の概要 …… 7

2.2　検討対象地域の選定 …… 18

2.3　地熱資源量の検討 …… 30

2.3.1　仙台南西部地域 …… 30

2.3.2　隠岐島後地域 …… 35

2.4　低温地熱地域の評価と課題 …… 41

2.4.1　仙台南西部地域 …… 41

2.4.2　隠岐島後地域 …… 41

2.4.3　資源量の評価と課題 …… 43

**第３章　低温地熱発電システムの検討** …… 47

3.1　既往技術レベルの概要 …… 47

3.1.1　バイナリー発電の事例 …… 47

3.1.2　その他の発電システム …… 64

3.1.3　既往技術のとりまとめ …… 68
3.2　低温発電システムの評価と課題 …… 72
3.2.1　適用可能温度 …… 72
3.2.2　付帯設備 …… 72
3.2.3　低温地熱資源の可採量と発電規模の検討 …… 74

**第４章　地域開発に資する地熱利用の検討** …… 79
4.1　地熱利用事例 …… 79
4.1.1　一般的な地熱利用の形態 …… 79
4.1.2　地域での利用事例 …… 80
4.2　地熱利用の可能性検討 …… 84

**第５章　まとめと今後の課題** …… 87
5.1　調査結果のまとめ …… 87
5.1.1　低温地熱地域の調査 …… 87
5.1.2　低温地熱発電システムの検討 …… 87
5.1.3　地域開発に資する地熱利用の検討 …… 88
5.2　資源量の試算 …… 88
5.3　今後の課題 …… 89

# 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 CO2 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)。

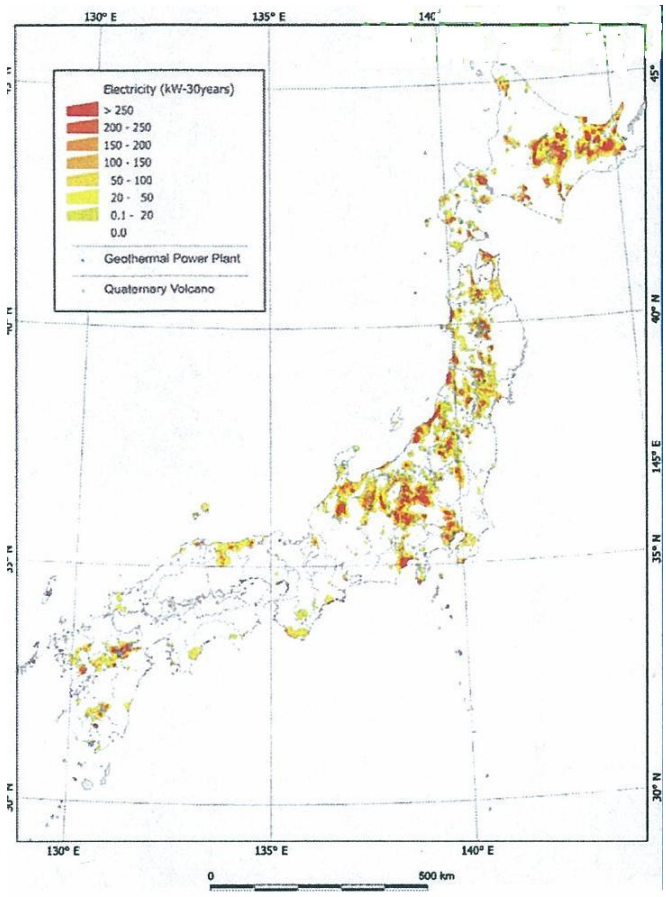



**図 1.1-1 日本の 53℃以上の地熱資源量**（出典：矢野、2008）[1)]

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 | H22 年 6 月 24 日 | ・メンバー紹介<br>・全国の地熱ポテンシャルについて<br>・中低温地熱資源の利用について<br>・地熱資源開発の課題と現状及び実施計画の背景<br>・今年度研究実施計画について |
| 第2回 | H22 年 11 月 9 日 | ・現在までの検討結果についての中間報告<br>・調査研究の今後のまとめの方向性について<br>・今後のスケジュールについて |
| 第3回 | H23 年 2 月 22 日 | ・H22 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 | H22年 7月 8日 | ・第一回委員会の報告<br>・今後の進め方および作業分担 |
| 調査出張 | H22年 9月 14日<br>H22年 9月 15日 | ・九州電力八丁原バイナリー発電所視察<br>・大分県農林水産研究センター花き研究所視察 |
| 第2回 | H22年 9月 28日 | ・現地視察結果報告<br>・地域選定の中間報告<br>・温泉発電の紹介と発電コスト |
| 第3回 | H22年 11月 2日 | ・候補地調査の中間報告<br>・低温発電システム検討中間報告<br>・第2回委員会資料の確認 |
| 第4回 | H22年 12月 14日 | ・貯留層候補地調査結果の検討<br>・低温発電システム調査結果の検討<br>・発電素子検討結果の報告<br>・報告書の構成について<br>・今後の工程 |
| 第5回 | H23年 1月 28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。

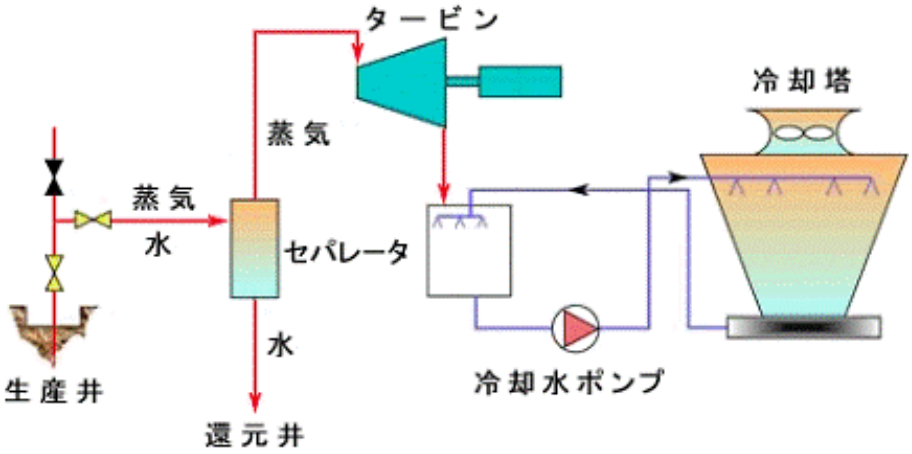



図 1.3.2-1　地熱発電のプラント概念図（出典：地熱学会ホームページ）[2)]

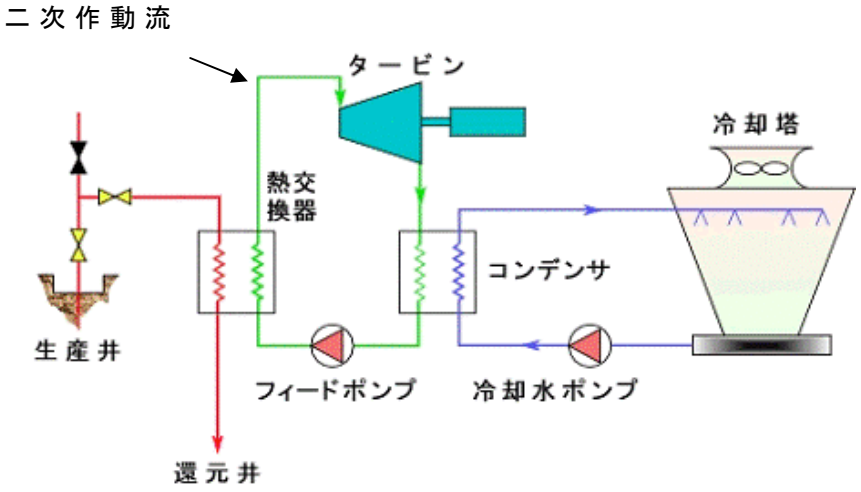



図 1.3.2-2 バイナリー発電プラントの概念図（出典：地熱学会ホームページ）[2)]

### 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　低温地熱地域の調査

## 2.1　国内地熱資源量の概要

村岡ほか(2007)[1)]によれば、我が国において全国的規模で地熱資源あるいは温泉などについて地図上にまとめられた最初の資料としては、地質調査所(1975)の 200 万分の 1 地質編集図、№8、日本温泉分布図[2)]とされている。

その後、全国規模で地熱資源量評価が宮崎ほか(1991)[3)]によって推計・公表された。宮崎ほか(1991)[3)]によれば全国の浅部地熱資源量は 2,054 万 kW、深部の地熱資源を含めると地熱資源量は 6,396kW と試算されている。宮崎ほか(1991)[3)]では、国内を**図 2.1-1** に示す 15 のブロックに分け、150℃以上で重力基盤よりも上位の部分を地熱貯留層と考えた浅部地熱資源量(**図 2.1-2** 参照)と、さらに基盤の厚さ 1km も加味した深部地熱資源量(**図 2.1-3** 参照）とについて容積法を基に計算している。

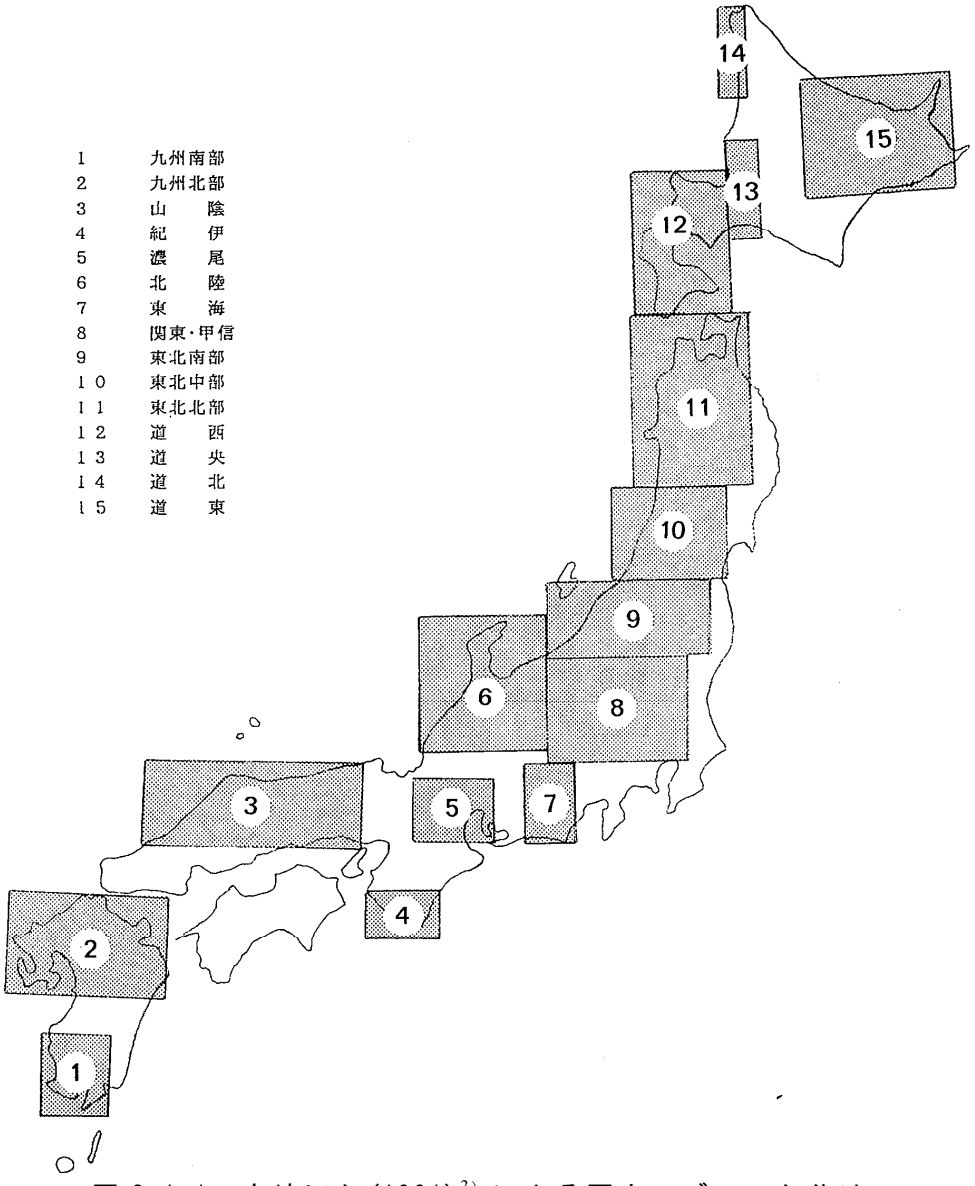



図 2.1-1　宮崎ほか(1991)[3)]による国内のブロック分け

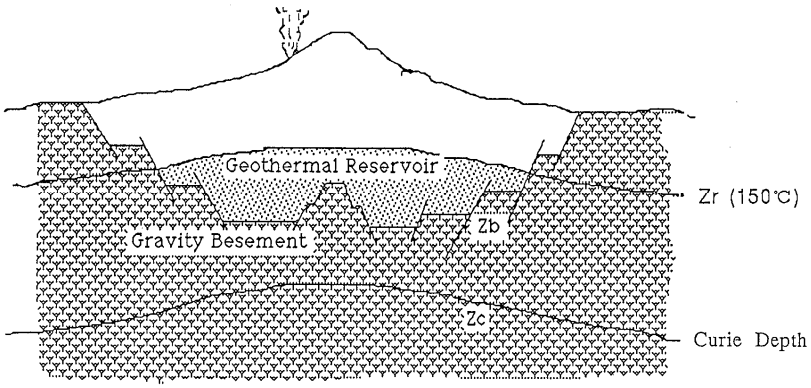



**図 2.1-2　浅部地熱資源量算出範囲の概念図**（出典：宮崎ほか，1991）[3)]

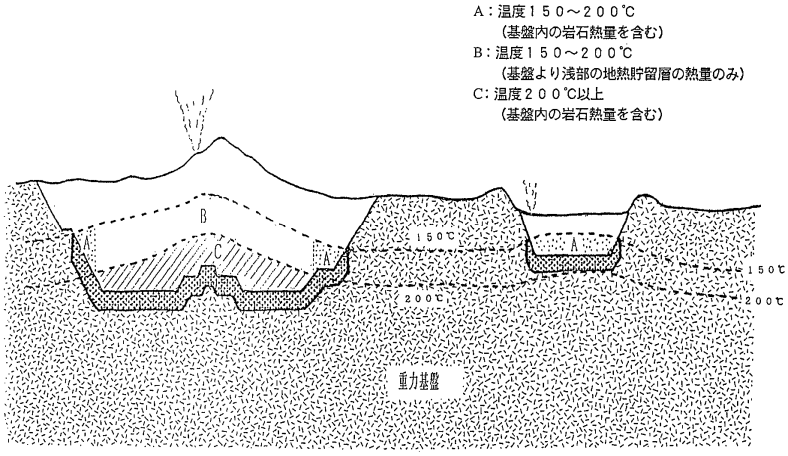



**図 2.1-3　深部地熱資源量算出範囲の概念図**（出典：宮崎ほか，1991）[3)]

宮崎ほか(1991)[3)]による浅部地熱資源量のブロック別算出結果を**表 2.1-1** に示し、深部地熱資源量の地域別算出結果を**表 2.1-2** に示す。

**表 2.1-1　浅部地熱資源量のブロック別算出結果**（出典：宮崎ほか，1991）[3)]

| ブロック番号 | ブロック名称 | 資源量 MW·30年 | 主な地域名 |
|---|---|---|---|
| 1 | 九州南部 | 680 | 阿多・姶良・霧島・鰻牟田・薩南 |
| 2 | 九州北部 | 2450 | 豊肥・雲仙 |
| 3 | 山陰 | 250 | 大山 |
| 4 | 紀伊 | 0 | |
| 5 | 濃尾 | 0 | |
| 6 | 北陸 | 0 | |
| 7 | 東海 | 0 | |
| 8 | 関東・甲信 | 2370 | 草津白根・浅間・日光・八ヶ岳・赤城・榛名 |
| 9 | 東北南部 | 1200 | 磐梯・吾妻・安達太良・那須 |
| 10 | 東北中部 | 1180 | 鳥海・月山・肘折・栗駒・船形・蔵王 |
| 11 | 東北北部 | 4810 | 八甲田・十和田・七時雨・八幡平・焼山・岩木山 |
| 12 | 道西 | 3320 | 駒ケ岳・濁川・八雲・登別・いぶり・雷電ニセコ |
| 13 | 道央 | 0 | |
| 14 | 道北 | 0 | |
| 15 | 道東 | 4280 | 斜里・摩周・屈斜路・阿寒・喜登牛 |
| | 合計 | 20540 | |

**表 2.1-2　深部地熱資源量の地域別算出結果**（出典：宮崎ほか，1991）[3)]

| 各地域別発電量　万kW(基盤熱厚さ1kmを含む) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | Total |
| 九州南部 | 130 | 22 | 53 | 205 |
| 九州北部 | 432 | 73 | 229 | 734 |
| 山　　陰 | 54 | 8 | 30 | 92 |
| 関東・甲信 | 765 | 56 | 131 | 952 |
| 東北南部 | 525 | 16 | 30 | 571 |
| 東北中部 | 209 | 40 | 104 | 353 |
| 東北北部 | 580 | 172 | 478 | 1230 |
| 道　　西 | 474 | 113 | 358 | 945 |
| 道　　東 | 842 | 94 | 378 | 1314 |
| 総　計 | 4011 | 594 | 1791 | 6396 |

しかしながら、当時は地下温度構造と地下基礎深度に関する空間分析の精度に制約があったため、地熱資源量を地域毎の地熱資源量分布として可視化できる段階には至っていなかった（環境省、2010）[4)]。

その後、地下温度構造については角（1975）[5)]における泉源データ数が2,237であったものが、次の金原（1992）[6)]において3,865に増加し、さらに金原（2005）[7)]において4,536とデータが充実してきたことと、駒沢（2003）[8)]の重力基盤深度図（**図 2.1-4**）の公表によって地下基礎深度（重力データ）のデータが飛躍的に向上したことを受けてGISベースでの情報が充実した。

これらの地下温度構造および地下基礎深度情報の充実を受けて、産総研によって2007年に日本の熱水系アトラス[1)]が公表された。日本の熱水系アトラスにおいては、最も基本的なデータである熱水湧出温度の分布以外にも、豊富な水質データを利用してpHの分布、主要陽イオン濃度や陰イオン濃度毎の分布、陰イオン濃度を用いたアニオンインデックス分布図、各種シリカ鉱物を用いた地質温度計による温度分布図など、さらには500mピッチの深度別孔井地温分布図を掲載している。そして、地温データの補間を目的とした各種地化学データ補間温度構造図を示すとともに、温度データの取得深度に依存しない地熱温度評価が可能な林（1982）[9)]の提案した活動度指数の分布図を示している。

この日本の熱水系アトラスの公表によって、様々な角度から我が国の地熱資源に関する俯瞰が可能になった。そして、これらのデータはGIS化され、村岡ほか（2008）によってGISベースによる150℃以上の地熱資源量2,347万kW、53～120℃の地熱資源量833万kWの推計値が公表されるに到った（**表 2.1-3** 参照）。

**表 2.1-3　地熱資源量推計に関する既存資料**（出典：環境省，2010）[4)]

| 出典 | 推計結果 | 概要 |
|---|---|---|
| 宮崎ら(1991) | 2,054万kW | ・深部地熱資源を含めると6,396万kWに達するとの試算あり。 |
| 村岡ら(2008a) | 2,347万kW<br>(150℃以上) | ・わが国初のGISによる地熱資源量評価。 |
| 村岡ら(2008b) | 833万kW<br>(53～120℃) | ・村岡ら(2008a)と同様の評価手法により評価。 |

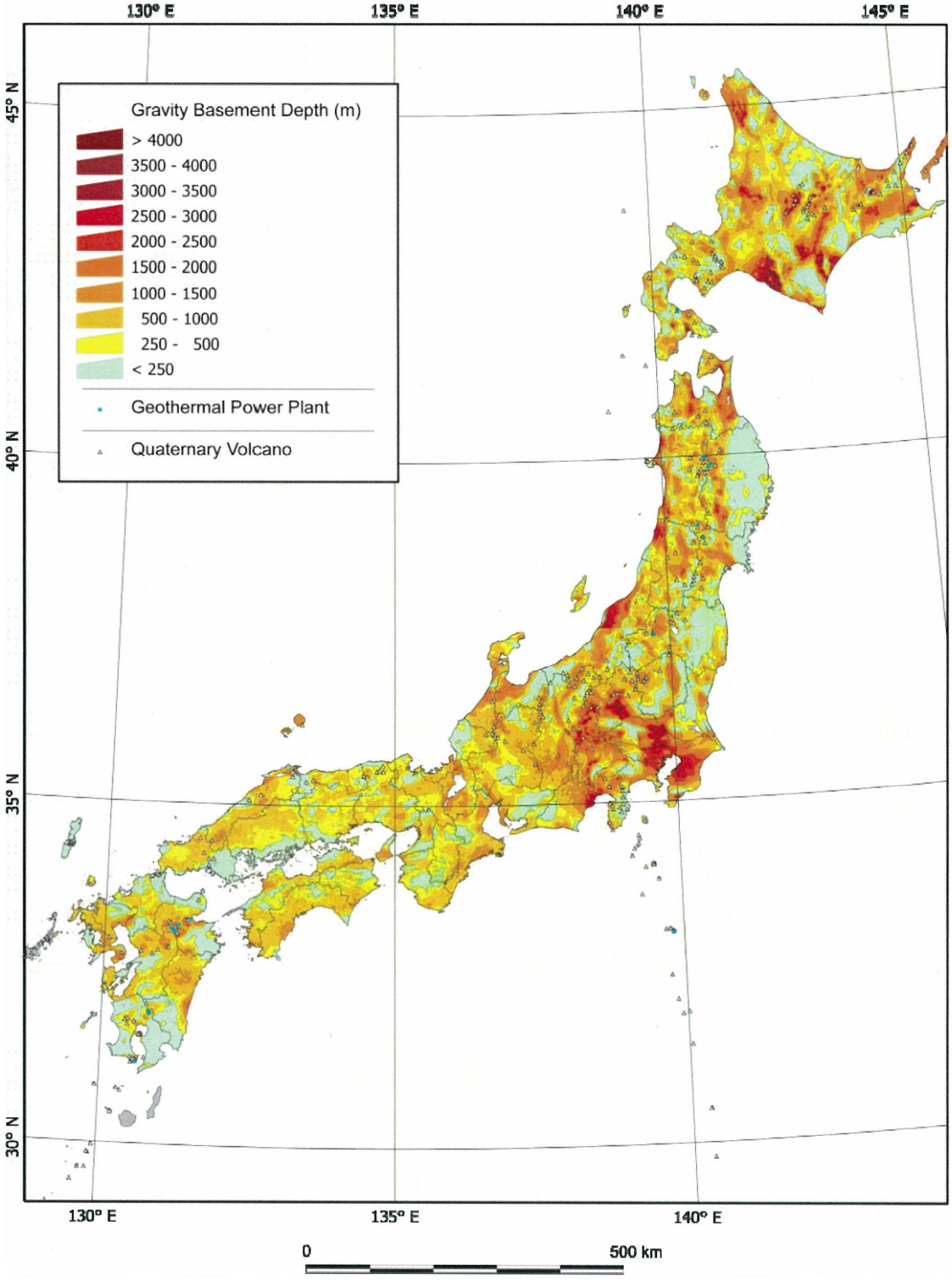



**図 2.1-4　重力基盤深度図**（出典：駒沢、2003[8]を環境省，2010[4] から転載）

村岡ほか（2008）では、150℃以上の地熱資源量と 53～120℃の地熱資源量について評価を行ったものの、それらの中間に相当する 120～150℃の地熱資源量についての評価が未実施であった。これを受けて環境省（2010）[4] では、新たに 120～150℃の地熱資源量についての評価を実施するとともに、**図 2.1-5** に示すフローに従って許容発電コストの異なる 3

つのシナリオを設定して、シナリオ別の導入ポテンシャルの算定を行った。

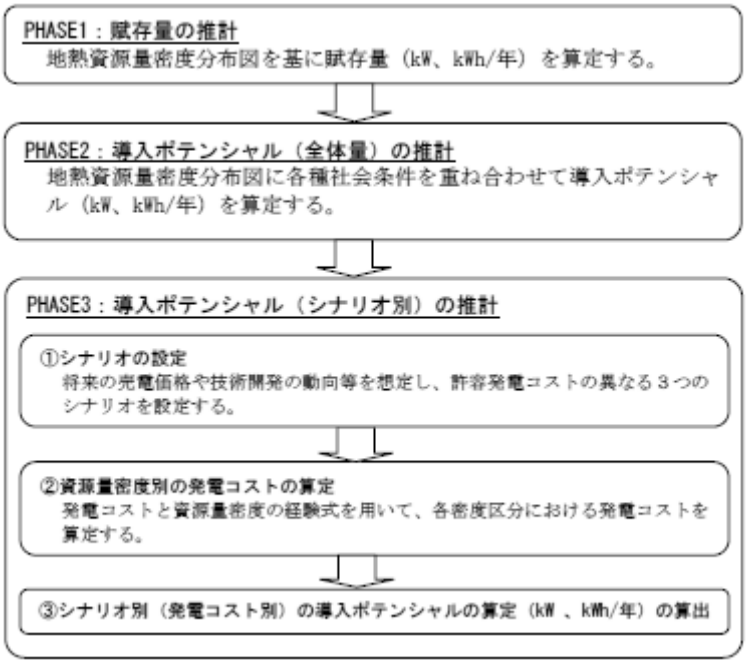



**図 2.1-5　シナリオ別の導入ポテンシャルの算定**（出典：環境省，2010）[4)]

許容発電コストの3つのシナリオについては、**表 2.1-4** に示したように設備稼働率を 70%と設定した上で、3 つの許容発電コストに対応する 2020 年度までの追加的開発可能量（設備容量および発電電力量）が設定されている。なお、ここでの設備耐用年数は、現行の補助制度などを前提として 15 年と設定されている。

**表 2.1-4　許容発電コストに対応する 2020 年度までの追加的開発可能量**

（出典：環境省，2010）[4)]

| 許容発電コスト | 追加的開発可能量 | |
|---|---|---|
| | 設備容量 | 発電電力量 |
| 12 円/kWh | 67 万 kW | 41 億 kWh |
| 15 円/kWh | 93 万 kW | 57 億 kWh |
| 20 円/kWh | 113 万 kW | 69 億 kWh |

※設備稼働率を 70%と設定。

地熱資源量の温度区分は、150℃以上については蒸気フラッシュ方式、120～150℃についてはランキンサイクル方式、そして 53～120℃についてはカリーナサイクル方式を仮定して設定されている。各温度区分における地熱資源量は 1km×1km ごとに地熱資源量密度として計算されている。それぞれの地熱資源量密度分布図から技術的に利用可能な密度部分を抽出して集計することによって、任意の範囲の地熱賦存量を求めることができる。環境省(2010）[4)] では、**表 2.1-5** に示す賦存量算出の境界条件を設定しており、これに基づく我が国における地熱発電賦存量の集計結果を温度区分別に得ている（**表 2.1-6** 参照)。

表 2.1-5　賦存量算出の境界条件（出典：環境省，2010）[4)]

| 温度区分 | 設定条件 | 備考 |
|---|---|---|
| 150℃以上 | 10kW/km$^2$以上 | 開発コスト 38.5 円/kWh 以上に相当 |
| 120～150℃ | 1kW/km$^2$以上 | 開発コスト 57.6 円/kWh 以上に相当 |
| 53～120℃ | 0.1kW/km$^2$以上 | 開発コスト 75.1 円/kWh 以上に相当 |

表 2.1-6　我が国における地熱発電賦存量の集計結果（出典：環境省，2010）[4)]

| 温度区分 | 賦存量（万 kW） | 面積（km²） |
|---|---|---|
| 150℃以上 | 2,357 | 3,124 |
| 120～150℃ | 108 | 5,692 |
| 53～120℃ | 849 | 84,487 |

なお、環境省（2010）[4)] によれば、蒸気フラッシュ方式に対応した 150℃以上の賦存量のうちの約 1,900 万 kW は国立・国定公園内にあり、全体の 83%に及んでいるとしている。

これらの地熱発電賦存量は、都道府県別や電力供給エリア別でも算出・検討されている。温度区分の高い順に電力供給エリア別のシナリオ別導入ポテンシャルを図 2.1-6～8 に示す。これらを見ると、蒸気フラッシュ方式では北海道、東北、九州がポテンシャルが大きく東京が九州に続き、そのほかのエリアではほとんどポテンシャルが認められない。ランキンサイクル方式では、上位 3 エリアは変わらないが、北陸が東京よりも大きくなっている。そしてカリーナサイクルでは北海道、東北の順位は変わらないが、次いで東京、中部、九州の順に変わり、さまざまな地域に分散的に潜在していることが分かる。

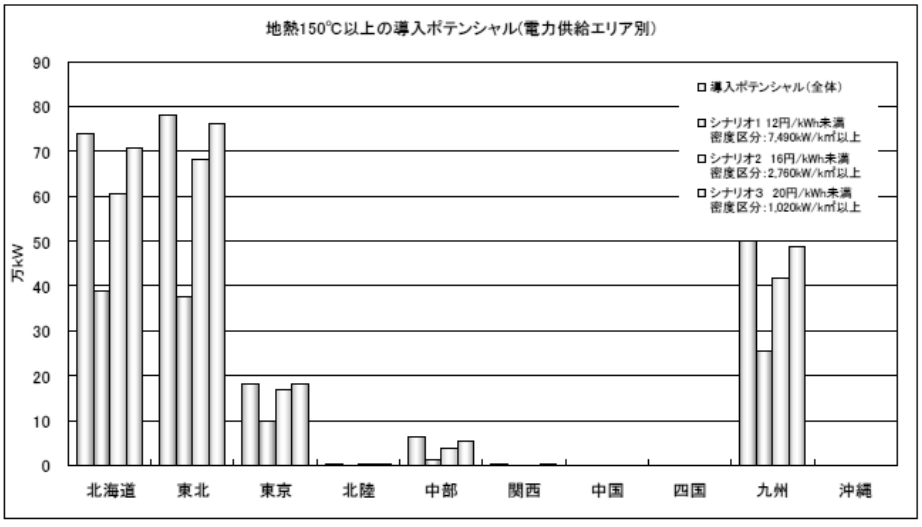



図 2.1-6　電力供給エリア別のシナリオ別導入ポテンシャル（150℃以上）[4)]

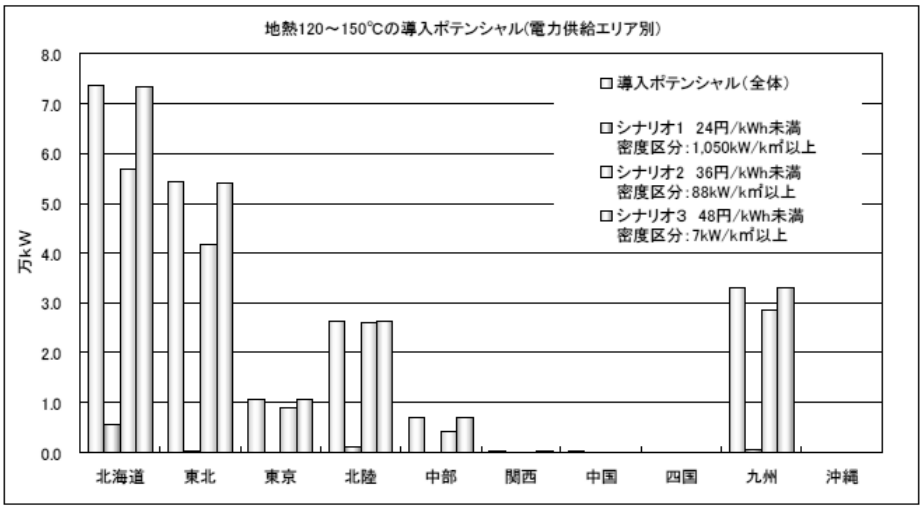



図 2.1-7　電力供給エリア別のシナリオ別導入ポテンシャル（120～150℃）[4)]

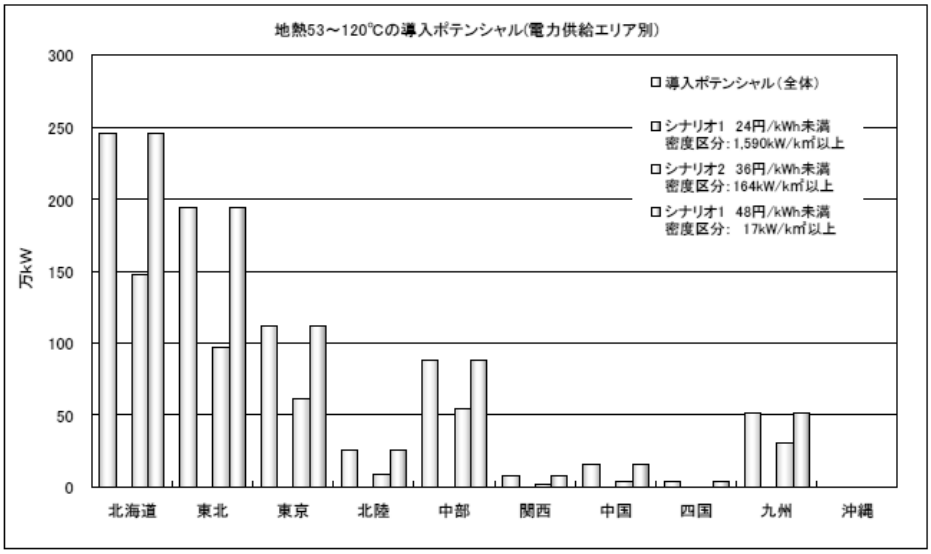



図 2.1-8　電力供給エリア別のシナリオ別導入ポテンシャル（53～120℃）[4)]

シナリオによらず、電力供給エリア別に地熱発電の賦存量を温度区分（資源区分）ごとに設備容量で整理したものを**表 2.1-7** および**図 2.1-9** に、面積で整理したものを**表 2.1-8** および**図 2.1-10** に示す。

表 2.1-7　電力供給エリア別地熱発電の賦存量（設備容量：万 kW）[4)]

| 資源区分 | 北海道 | 東北 | 東京 | 北陸 | 中部 | 関西 | 中国 | 四国 | 九州 | 沖縄 | 合計 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 150℃以上 | 1,674 | 252 | 39 | 220 | 37 | 2 | 0 | 0 | 134 | 0 | 2,357 |
| 120～150℃ | 70 | 16 | 2 | 7 | 3 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 108 |
| 53～120℃ | 272 | 216 | 128 | 37 | 107 | 8 | 17 | 4 | 60 | 0 | 849 |

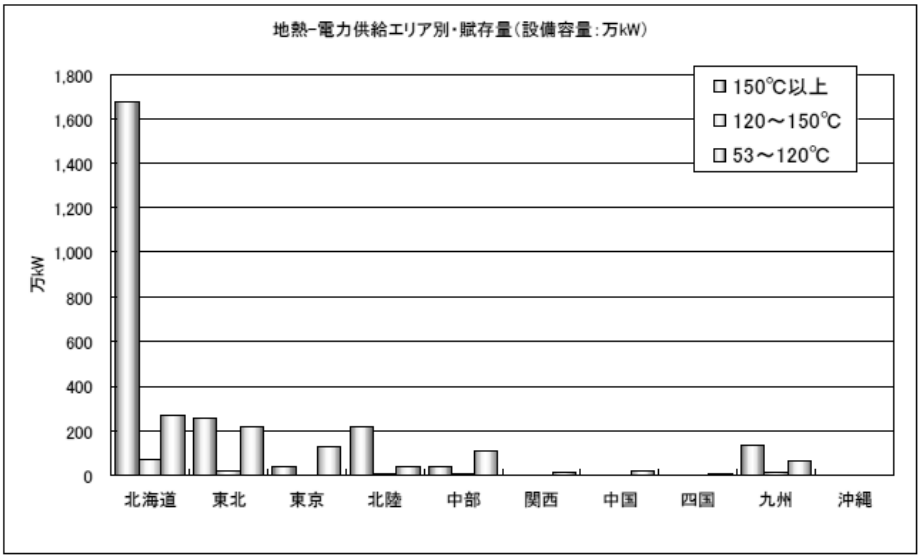



図 2.1-9　電力供給エリア別地熱発電の賦存量（設備容量：万 kW）[4)]

表 2.1-8　電力供給エリア別地熱発電の賦存量（面積：$km^3$）[4)]

| 資源区分 | 北海道 | 東北 | 東京 | 北陸 | 中部 | 関西 | 中国 | 四国 | 九州 | 沖縄 | 合計 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 150℃以上 | 1,620 | 528 | 79 | 442 | 130 | 9 | 0 | 0 | 315 | 0 | 3,124 |
| 120～150℃ | 2,481 | 1,233 | 237 | 507 | 456 | 31 | 12 | 0 | 735 | 0 | 5,692 |
| 53～120℃ | 22,679 | 24,249 | 11,194 | 4,566 | 8,755 | 2,198 | 3,474 | 1,117 | 6,254 | 0 | 84,487 |

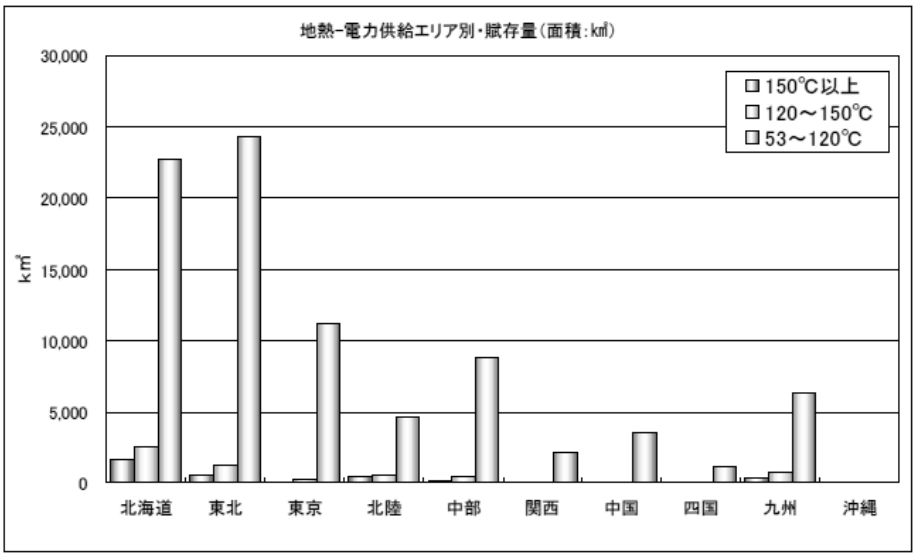



図 2.1-10　電力供給エリア別地熱発電の賦存量（面積：$km^3$）[4)]

**表 2.1-7～8** および**図 2.1-9～10** で明らかなように、蒸気フラッシュ方式あるいはランキンサイクル方式に対応する 120℃以上の地熱賦存量は北海道、東北、北陸、九州における偏在が明瞭であるが、カリーナサイクルに対応する 120℃以下の地熱賦存量は各電力供給エリアで発電容量では小さいものの、面積では広く分布していることが認められる。

以上は新規に地熱生産井などを新たに掘削して地熱を利用するいわゆる熱水資源利用の形態での地熱資源のポテンシャルに関する試算であるが、環境省（2010）[4] ではこの熱水資源利用型とは別に、既存の高温温泉を有効利用する温泉発電についてもポテンシャルの評価を行っている。

温泉発電においては比較的低温域で運転可能なカリーナサイクル方式が想定されるが、最大の特徴は新たな孔井の掘削費用がかからない点にある。比較的高温の温泉においては源泉温度が高すぎる場合は冷却してから使用され、使用後も熱を有したまま捨てられているのが現状であるため、このような温泉発電はいわゆる「未利用エネルギー」の有効利用として位置づけられる。環境省（2010）[4] では、金原(2005)[7]の温泉データを基礎データとして、熱源熱水温度とカリーナサイクル発電効率との関係（**図 2.1-11** 参照）を考慮して江原ほか(2008)[10]で推計された 72.2 万 kW を信頼性の高い温泉発電の導入ポテンシャルとして採用している。そして、熱水資源利用型と同じ発電コストに基づく 3 つのシナリオについて、シナリオ別に**表 2.1-9** に示した開発可能率を設定した上で、温泉発電の賦存量および導入ポテンシャルについて**表 2.1-10** および**図 2.1-12** にまとめている。

環境省（2010）[4] では、最後にまとめとして我が国の地熱発電（熱水資源利用型）および温泉発電の賦存量および導入ポテンシャルについて、**表 2.1-11** および**図 2.1-13** に整理されている。

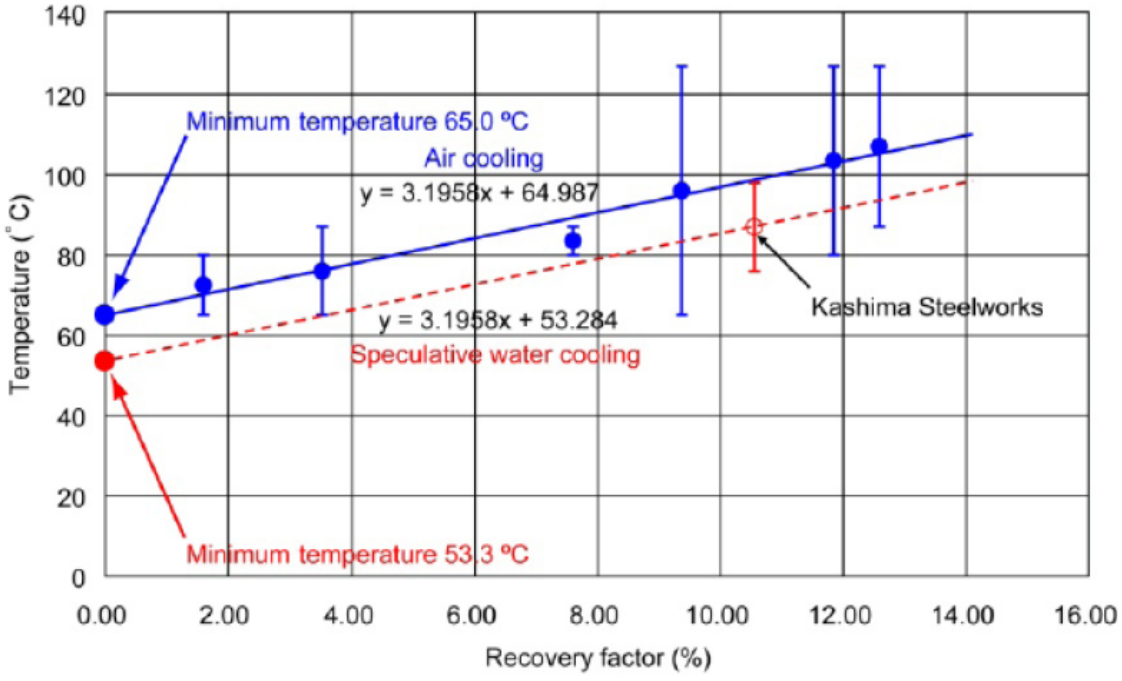



**図 2.1-11　熱源熱水温度とカリーナサイクル発電効率との関係**（出典：江原ほか，2008）[10]

表 2.1-9　シナリオ別の開発可能率 [4)]

| シナリオ | 発電コスト | 開発可能率 | シナリオの概要 |
|---|---|---|---|
| シナリオ1 | 24 円/kWh 未満 | 50% | ボイラータービン主任技術者の専任義務の有無を問わず、現状の発電コストは 22～30 円/kWh であり、許容発電コストが 24 円/kWh 未満でも全導入ポテンシャルの約半分で採算が取れ、開発が進むものとする。 |
| シナリオ2 | 36 円/kWh 未満 | 100% | 全導入ポテンシャルにおいて採算が取れるため、開発が進むものと考える。 |
| シナリオ3 | 48 円/kWh 未満 | 100% | 既開発および自然湧出の温泉発電だけでなく、掘削深度が 40m 程度の浅い地域でも温泉開発が進み、既開発および自然湧出における導入ポテンシャルの 1.5 倍まで開発が進む可能性がある。<br>（ただし、熱水資源でカウントされているため、ここでは増加分は計上しない） |

表 2.1-10　温泉発電の賦存量および導入ポテンシャル [4)]

| | 賦存量 | 導入ポテンシャル | | |
|---|---|---|---|---|
| | | シナリオ1<br>開発コスト 24 円/kWh | シナリオ2<br>開発コスト 36 円/kWh | シナリオ３<br>開発コスト 48 円/kWh |
| 設備容量 | 72 万 kW | 36 万 kW | 72 万 kW | 72 万 kW |
| 発電電力量 | 44 億 kWh | 22 億 kWh | 44 億 kWh | 44 億 kWh |

※発電電力量は設備利用率 70%で算定

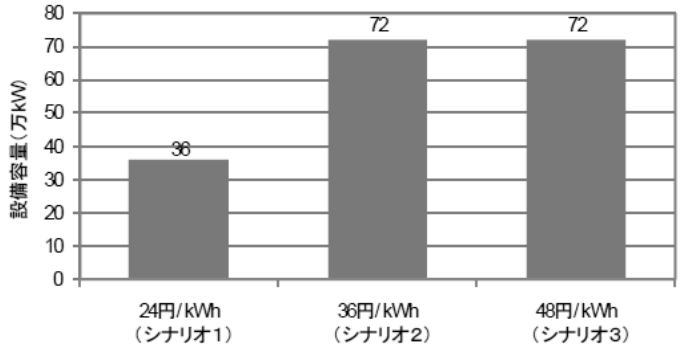



図 2.1-12　温泉発電の賦存量および導入ポテンシャル [4)]

表 2.1-11　我が国の地熱発電および温泉発電の賦存量および導入ポテンシャル [4)]

| | | 賦存量 | 導入ポテンシャル（設備容量） | | | 導入ポテンシャル（年間発電量） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | シナリオ 1 | シナリオ 2 | シナリオ 3 | シナリオ 1 | シナリオ 2 | シナリオ 3 |
| | | 万 kW | 万 kW | 万 kW | 万 kW | 億 kWh/年 | 億 kWh/年 | 億 kWh/年 |
| 地熱発電（熱水資源利用） | 150℃以上 | 2,400 | 110 | 190 | 220 | 69 | 117 | 135 |
| | 120～150℃ | 110 | 0.8 | 17 | 21 | 0.5 | 10 | 13 |
| | 53～120℃ | 850 | 0 | 400 | 740 | 0.0 | 248 | 455 |
| | 計 | 3,360 | 110 | 610 | 980 | 70 | 375 | 603 |
| 温泉発電 | | 72 | 36 | 72 | 72 | 22 | 44 | 44 |
| 合計 | | 3,400 | 150 | 680 | 1,050 | 92 | 420 | 650 |

※年間発電量は設備利用率 70%で算定

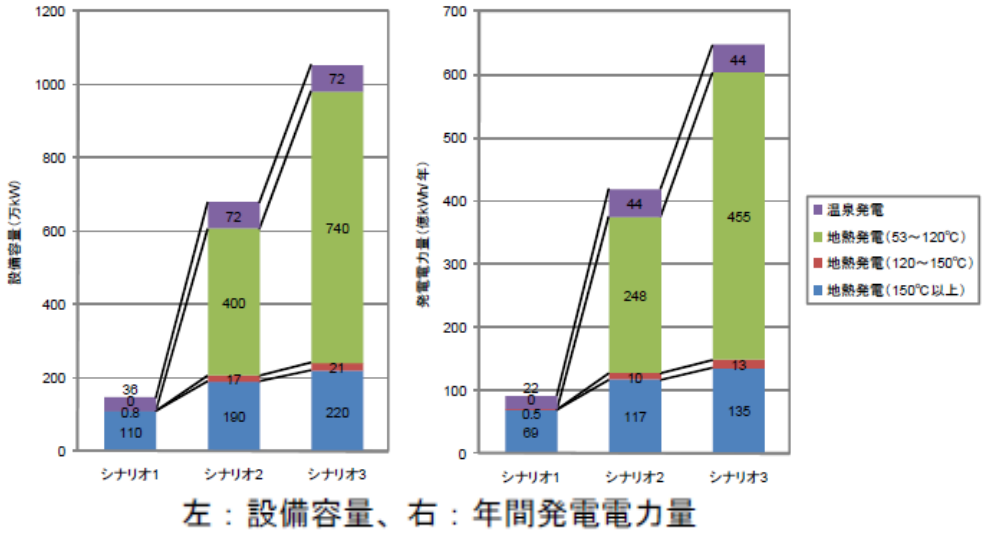



図 2.1-13　我が国の地熱発電および温泉発電の賦存量および導入ポテンシャル [4)]

2009 年には産業技術総合研究所地質調査総合センターから、全国地熱ポテンシャルマップ [11)]の CD-ROM が出版された。これは、地理情報システムビューワーを利用して、日本全国の地熱資源のポテンシャルおよび特性に関連する様々な基礎情報を、全国規模から縮尺 1/20 万程度の比較的大縮尺スケールまで、シームレスに重ね合わせて表示することができるツールである。

最も重要な基礎データは 7,203 個の温泉化学分析データと 3,066 個の孔井地温データである。これらのデータやそれらから算出された各種インデックスなどは、点マップやコンターマップとして描写が可能で、それらのほかにも地質図、火山、地熱発電所、活断層、重力、河川、行政境界、公園などといった、開発に関して必要となると考えられる項目についても網羅されている。

本研究においても、この全国地熱ポテンシャルマップを 2.3 の検討対象地域の選定に関して基本情報集として活用した。

## 2.2　検討対象地域の選定

標記の作業について、以下に列記する事項に着目して低温地熱調査候補地をスクリーニングした。

① 既往地熱発電所地点および近傍ではないこと。
② 発電ポテンシャル量の算出地域ではないこと。
③ 地熱ポテンシャルマップ[11]において林(1981)[9]の活動度指数が 20 以上見込まれること。
④ 温泉鉱泉データベースなどで、温度上限が 70℃以上あるいは活動度指数 20 以上の泉源が確認されること。
⑤ 可能であれば、需要の見込める都市近傍や代替電源の需要の見込める離島など。また、現在別種の「新エネルギー」開発が進行中の地域ははずす。

①については、すでに地熱発電を目的とした十分な調査が実施済みであることと、本調査において対象とする低温地熱地域では無いことから除外することとした。**図 2.2-1** に我が国の既往地熱発電所位置を示す。

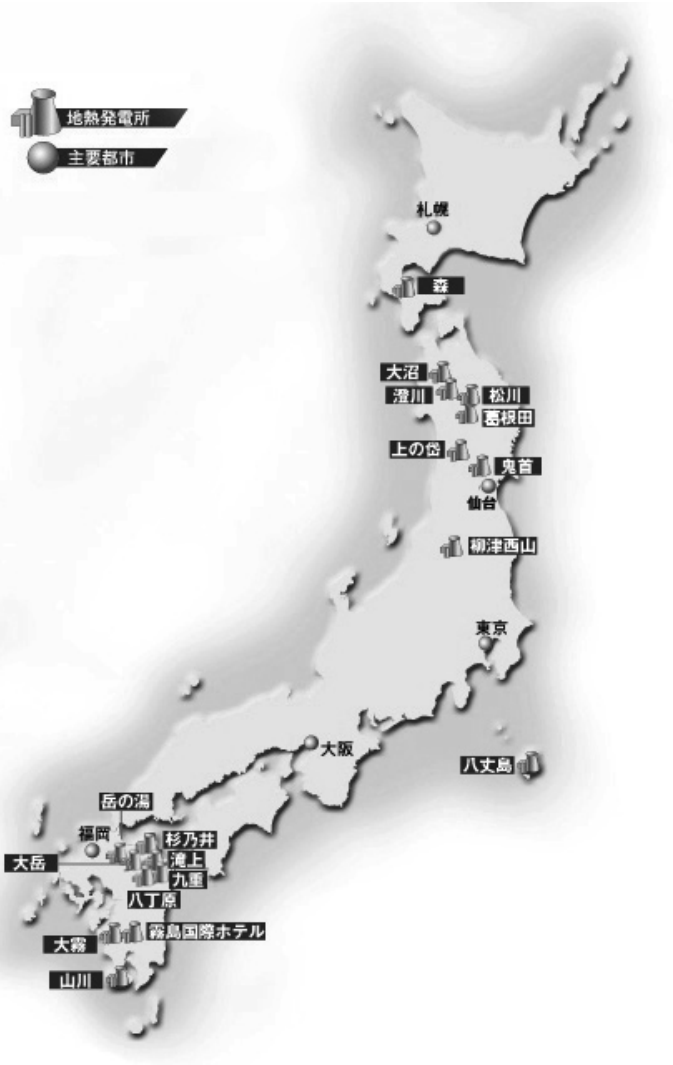



**図 2.2-1　既往地熱発電所位置図**（出典：日本地熱学会ホームページ）

②および③については地質調査総合センター(2009)全国地熱ポテンシャルマップ[11]および地熱開発促進調査位置図を参考に地域の絞り込みを行った。なお、③において地熱ポテンシャルの指標として林(1981)[9]の活動度指数を用いた理由は、泉源の深度などにとらわれず、同一の基準で地熱ポテンシャルを俯瞰できることによる（**図 2.2-2** 参照）。林(1981)[9]の活動度指数は、我が国の平均的な地温勾配を 3℃／100m とし、地温既知の深度における水の沸点を 100 とした場合に対して、当該深度地温の平均地温勾配から沸点に対する比を示している（**図 2.2-2** 参照）。

なお、しきい値を 20 としたのは、本検討では通常の蒸気フラッシュタイプを想定していないため 40 以上の値を必要とはしていないこと、それでも平均的な地温勾配地域よりは高温が見込める「低温地熱地域」を想定するために林(1981)[9]における E タイプ（0～20）よりは 1 ランク高い D タイプ（20～40）以上を抽出することを理由としている。

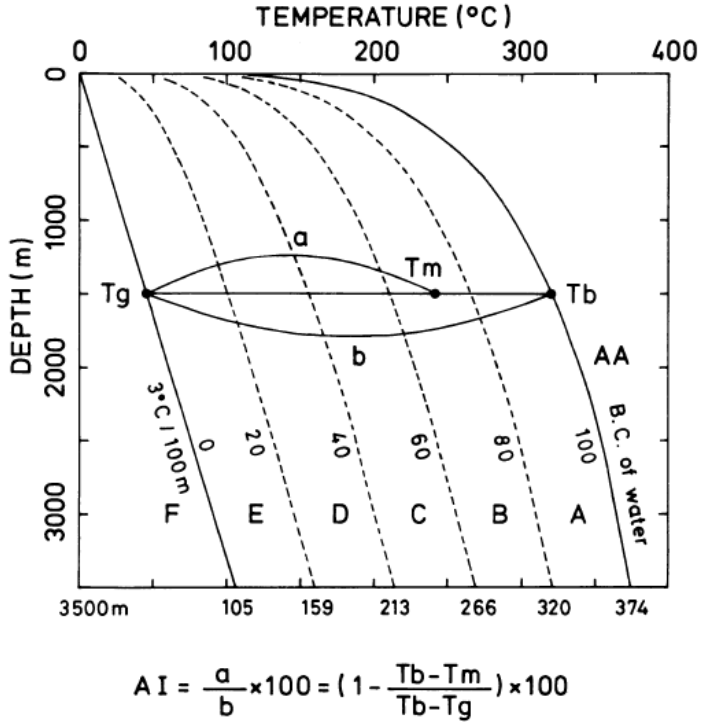



**図 2.2-2　林(1981)による活動度指数**[9]

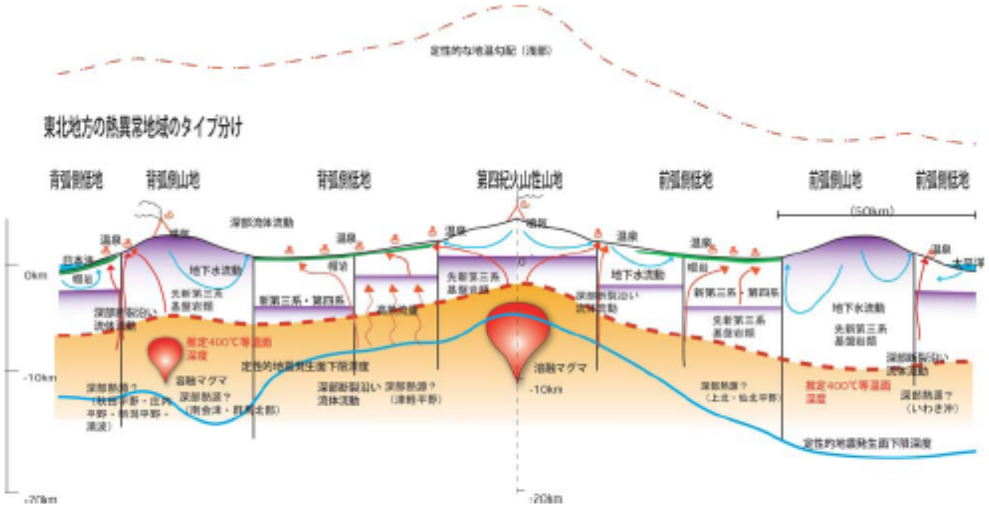
④については金原(2005)[7]日本温泉・鉱泉分布図及び一覧に収納されているデータベースを基本とし、必要に応じて他の文献などを参考とした。

⑤については、需要が見込まれやすいという観点から、地域開発に関連した条件として候補地選定の参考とした。

我が国の大局的な地熱構造のあらましについては、玉生(2008)[12]によってまとめられている（**図 2.2-3** 参照）。

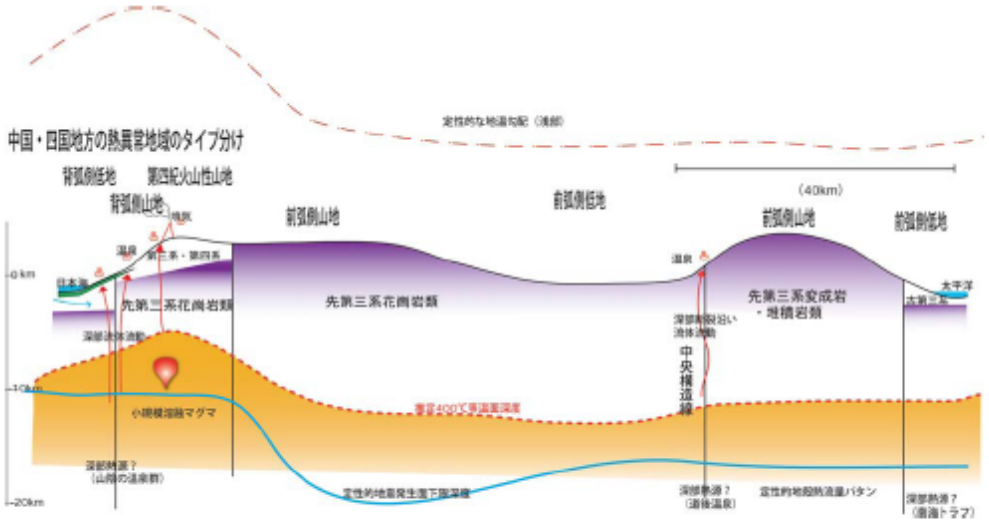
現在火山活動が活発な地域を離れた地域で、開発対象と目されるような温度を有する「熱水」の分布はやはり限られており、玉生(2008)[12]の総括に示されるように、東北日本であろうと中国地方・四国地方であろうと、背弧側山地から背弧側低地となる。

東北日本と中国地方・四国地方との違いは、マグマ活動の中心が前者の中央部第四紀火山性山地であるのに対し、後者にはそのような構造が無い。両者には共通して背弧側山地から低地に相対的に温度の高い領域が分布している。




第2図　東北地方の高温地区を含む広域地域のタイプ分け概念図（玉生，2008）.

Fig. 2　Conceptual model showing thermal and hydrothermal features of Tohoku district on classification of areas including temperature anomaly regions (Tamanyu, 2008).




第3図　中国・四国地方の高温地区を含む広域地域のタイプ分け概念図（玉生，2008）.

Fig. 3　Conceptual model showing thermal and hydrothermal features of Chugoku/Shikoku districts on classification of areas including temperature anomaly regions (Tamanyu, 2008).

**図 2.2-3　玉生（2009）における東北日本と中国・四国の地熱構造タイプ分け** [12)]

玉生(2009)[12)]が示した東北日本と中国・四国の地熱構造のタイプの相違については、丸山、大森、岩瀬(2004)[13)]が東北日本と西南日本とでの震源分布や火山（マグマの生成）の分布の相違を理解するために行った沈み込みに伴う対流現象の解析結果と合致している。**図 2.2-4** に東北日本と西南日本におけるウェッジマントル･コーナー対流の模式図を示す。丸山、大森、岩瀬(2004)[13)]は、基本的には両者の差異はプレートの沈み込みの角度の違い

によって、ウェッジマントル内の対流の規模に違いが生じたためとしている。**図 2.2-4** に示すように、マントルウェッジ内のコーナー対流は東北日本で小さく、西南日本で大きい。

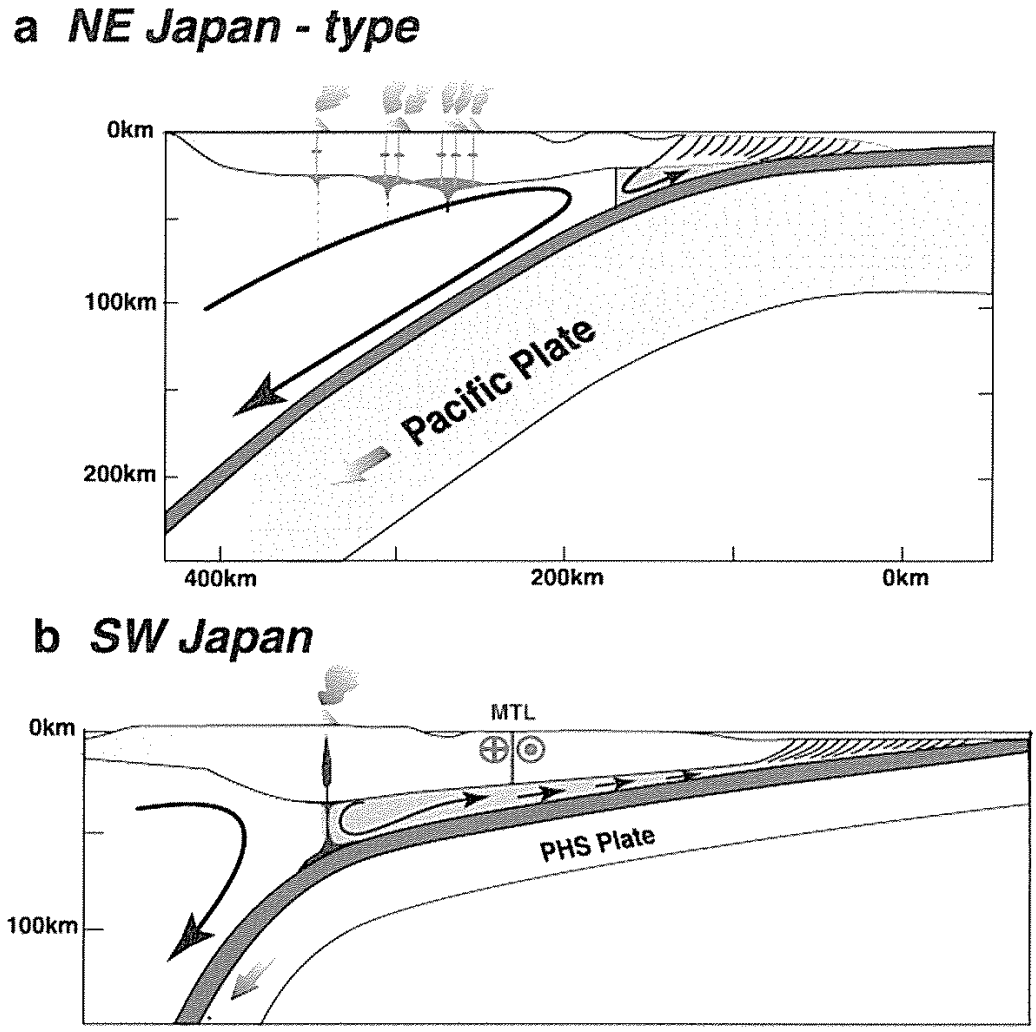



図　　東北日本（a）および西南日本（b）のウェッジマントル・コーナー対流の模式図.

Fig.　Schematic diagrams showing corner flow in mantle-wedge. a) NE-Japan and b) SW-Japan.

**図 2.2-4　東北日本と西南日本におけるウェッジマントル・コーナー対流の模式図**

（出典：丸山、大森、岩瀬，2004）[13)]

日本熱水アトラス [1)]に掲載の深度 500m 毎の地温分布を**図 2.2-5** に示す。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。

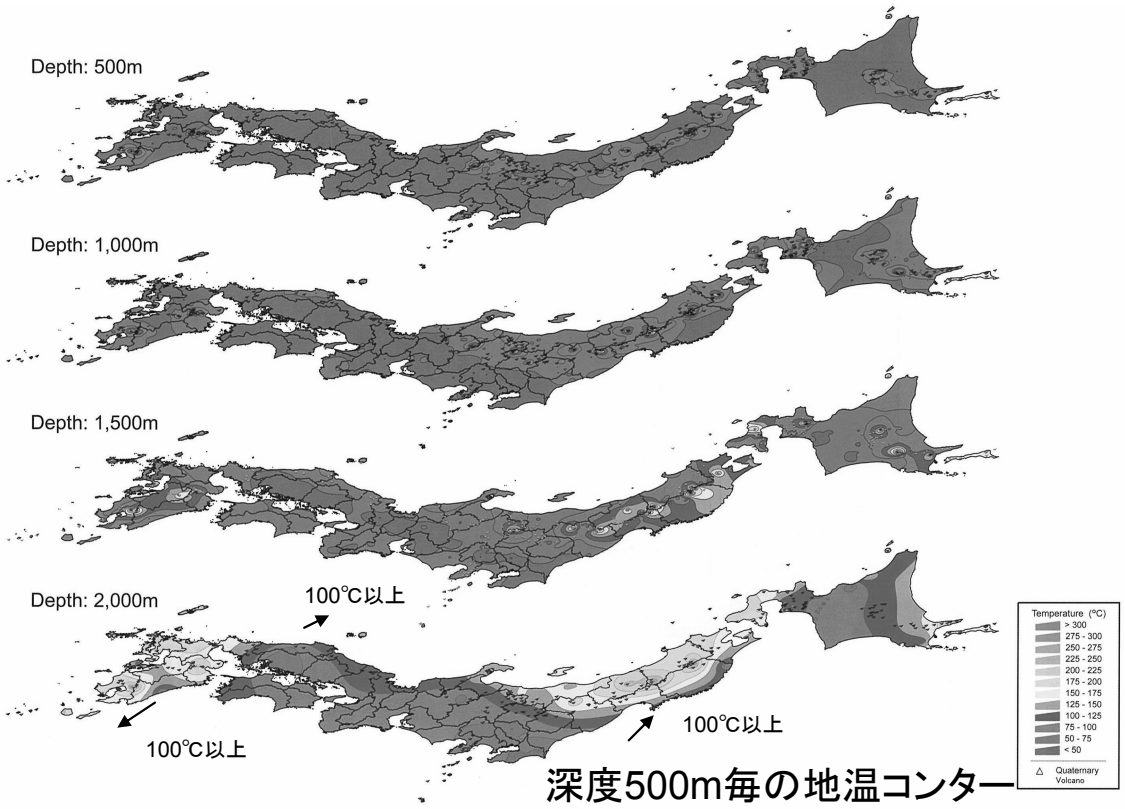



**図 2.2-5　深度 500m 毎の地温コンター図**（出典：村岡ほか，2007[1)] に加筆）

東北地方および九州地方の火山周辺については、すでに地熱ポテンシャル評価が進み、稼働中の地熱発電所も多く存在している。**図 2.2-6** に既往地熱開発促進調査が実施された箇所の位置および、地熱ポテンシャルマップにおいて地熱資源量の評価がなされている箇所の位置を示す。本研究では、従来の蒸気フラッシュ型の発電を意図しておらず、それよりも低温域での熱利用を想定しているため、既往地熱ポテンシャル評価地は十分に調査が行われていることから検討対象とはしないものとした。

**図 2.2-7～図 2.2-11** に、地熱ポテンシャルマップ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示す。これらの図から、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、以下の地域群がある。

- 温海温泉付近
- 仙台南西部
- 赤城山付近
- 美ヶ原付近
- 鳥取西部
- 宮之城温泉付近

これらの地域について、活動度指数分布図をさらに拡大したものを**図 2.2-12～図 2.2-16** に示す。

火山分布域で地熱ポテンシャル評価がなされていないのは、赤城山、美ヶ原や、九州地

方の宮之城温泉付近とさらに南方のトカラ列島である。これらのうちには最近の研究によって口之島や小宝島のように地下深部で 200℃を越えるような温度を有する熱水が賦存していると考えられている地点もある。ただし、平成 21 年度からトカラ列島の黒島、竹島、中之島、諏訪之瀬島、小宝島、宝島において離島マイクログリッドシステムの実証運転研究がはじまっていることと、これらの第四紀火山付近については、温度範囲が低温の領域というよりは、通常の蒸気フラッシュに対応する高温地熱地域と判断されるため、検討対象から除外することとした。

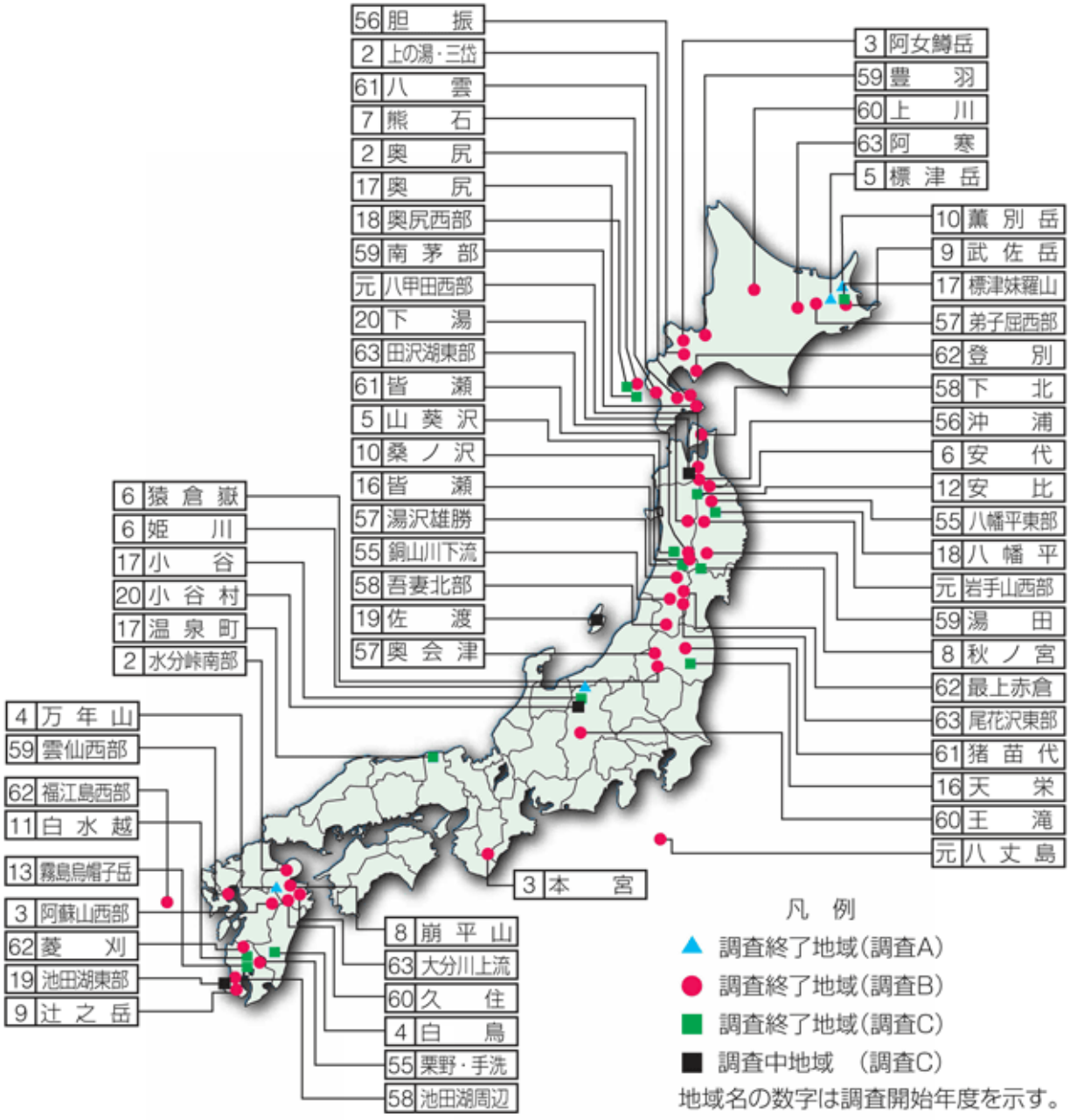



**図 2.2-6　地熱開発促進調査位置図**（出典：NEDO ホームページ）

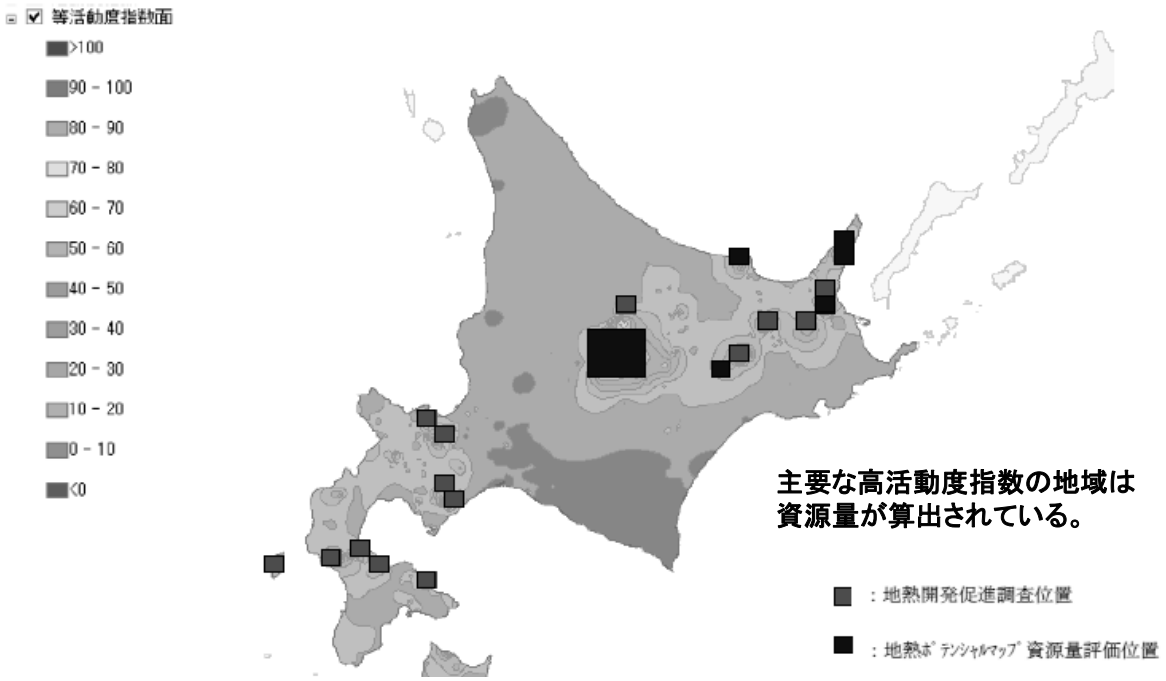



図 2.2-7　活動度指数コンターと既往地熱資源量算出位置など（北海道地方）

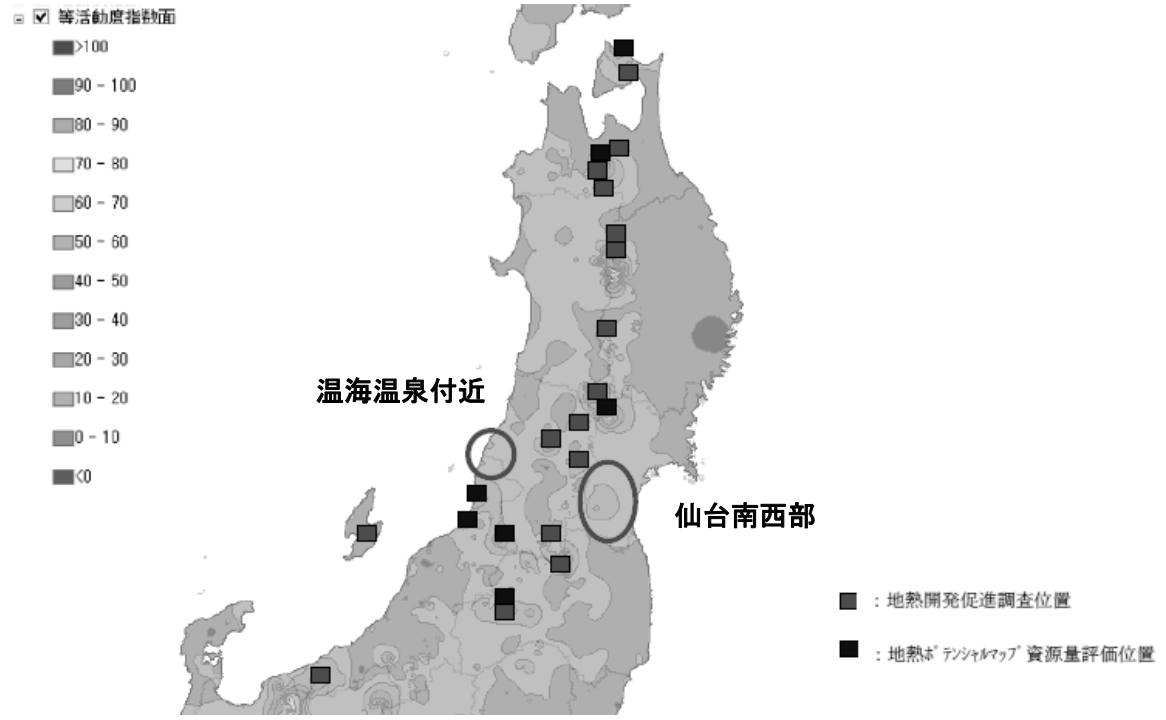



図 2.2-8　活動度指数コンターと既往地熱資源量算出位置など（東北地方）

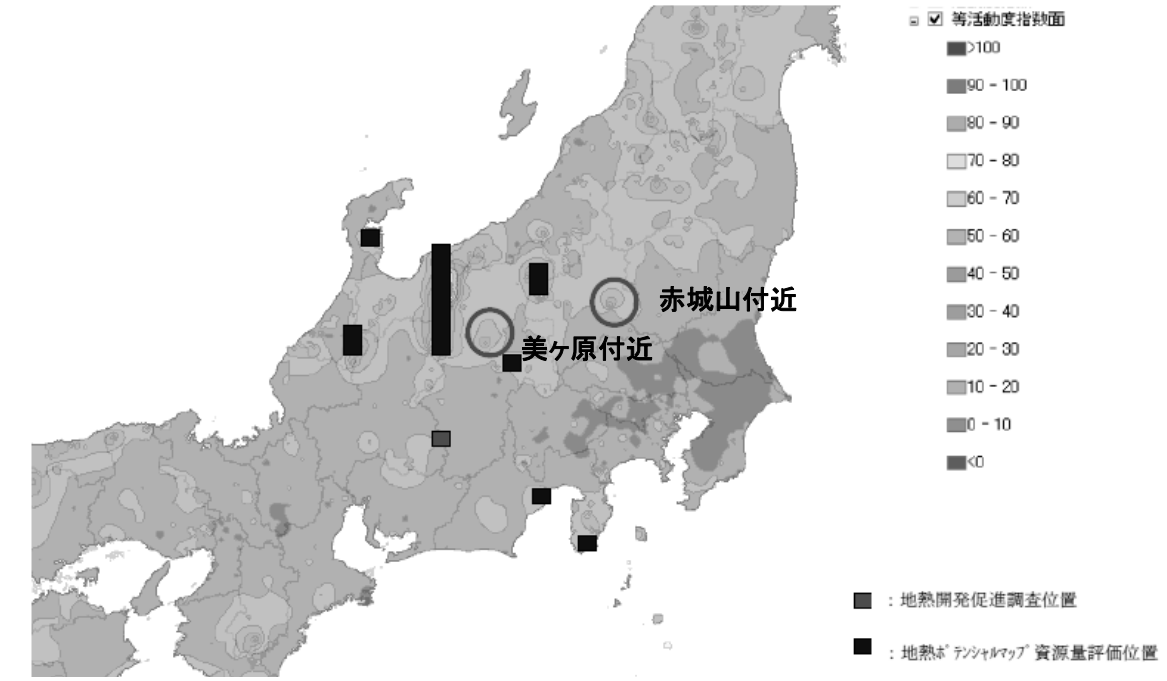



図 2.2-9　活動度指数コンターと既往地熱資源量算出位置など（関東・中部・北陸地方）

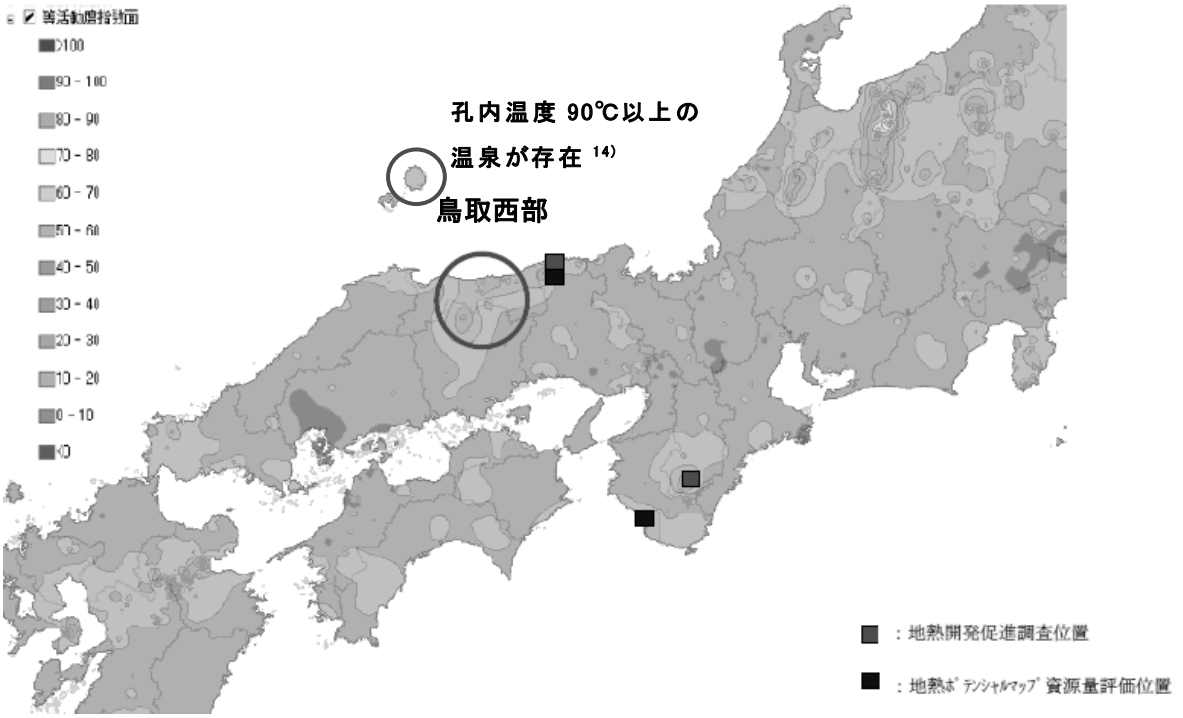



図 2.2-10　活動度指数コンターと既往地熱資源量算出位置など（近畿・中国・四国地方）

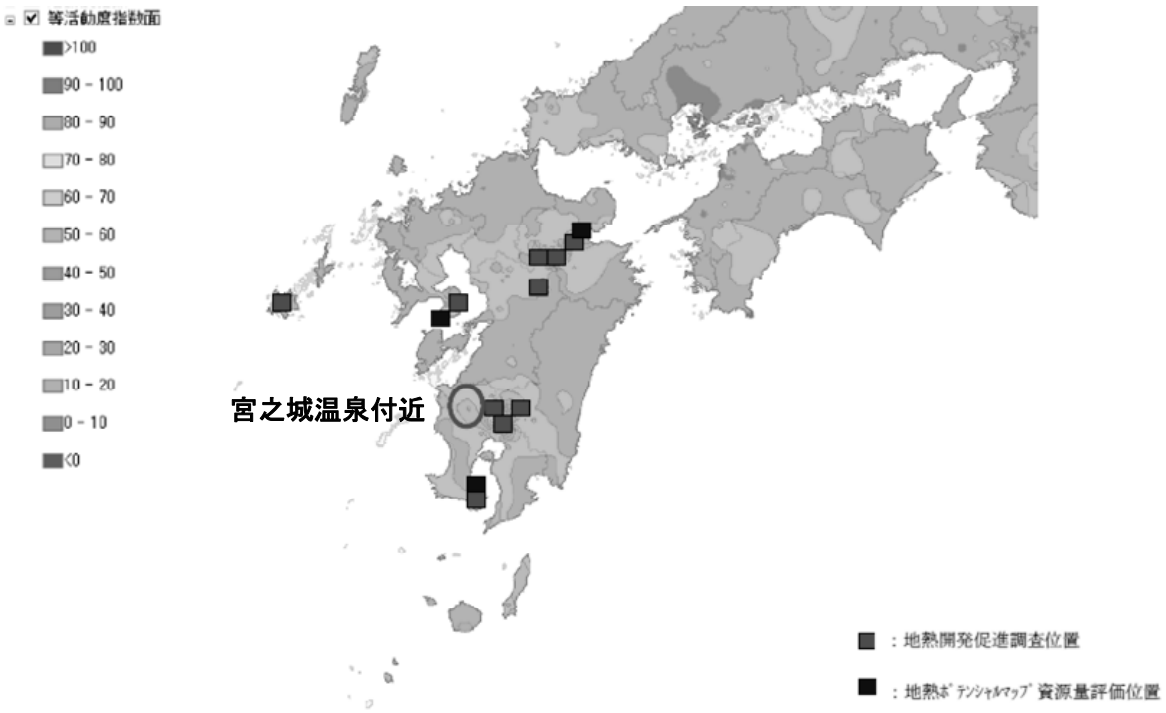



図 2.2-11　活動度指数コンターと既往地熱資源量算出位置など（九州地方）

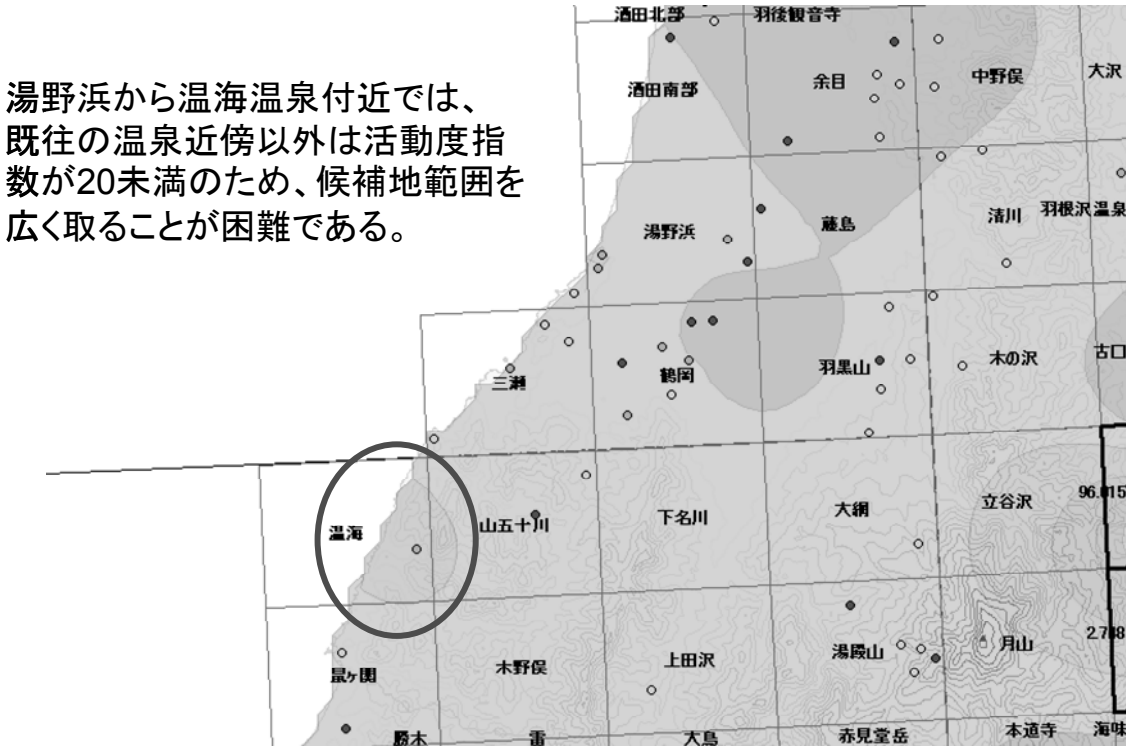



図 2.2-12　温海温泉付近の活動度指数および泉温分布

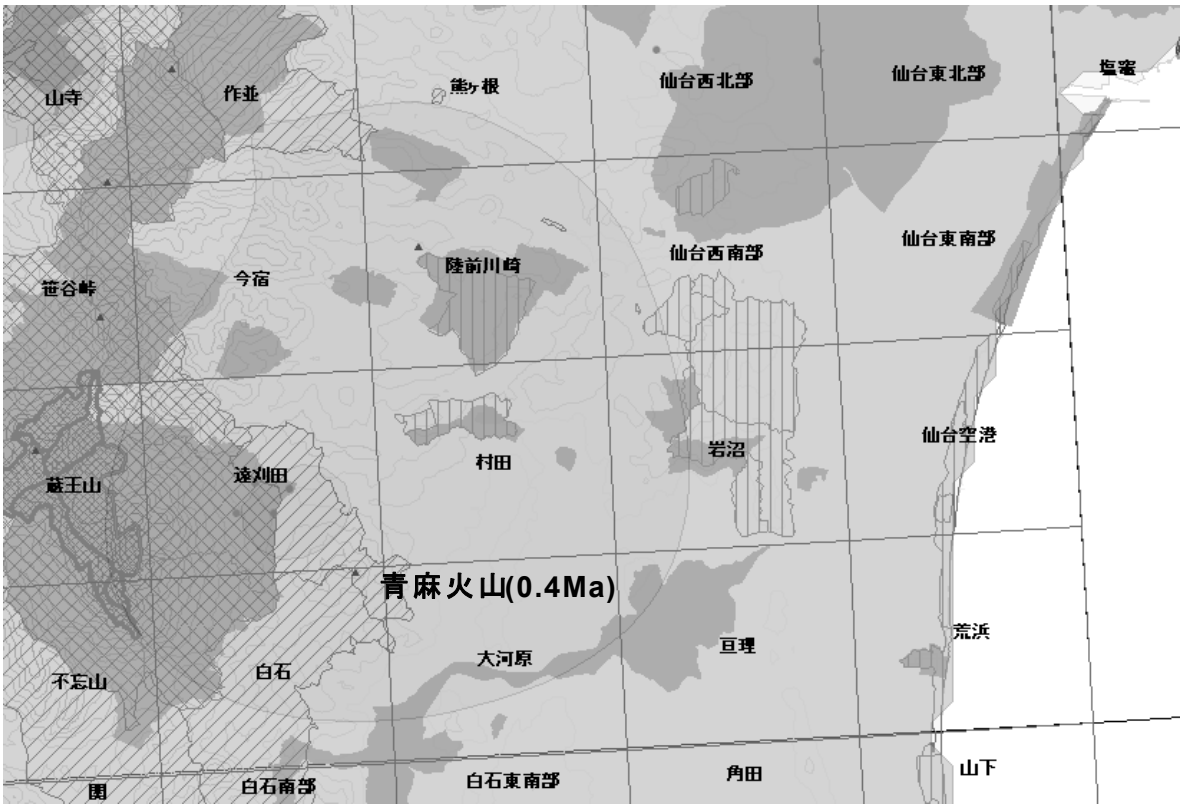
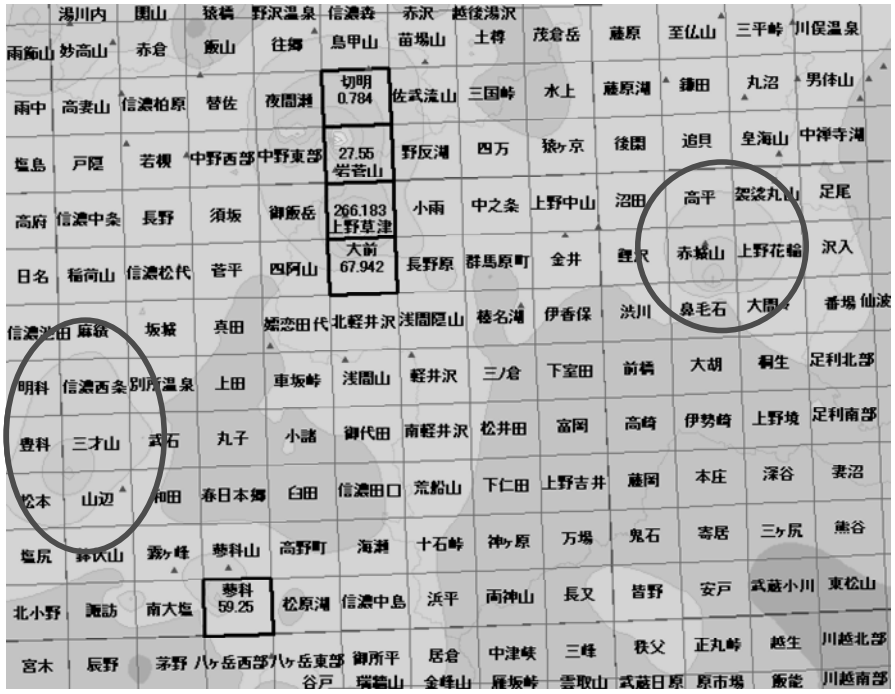



図 2.2-13　仙台南西部の活動度指数および自然公園などの分布




赤城山付近は、
火山の山体部の
み活動度指数が
高い。
美ヶ原付近は、
周辺に温泉地が
点在するが、深度
既知の温泉が無い。

図 2.2-14　赤城山および美ヶ原付近の活動度指数分布

鳥取西部付近（湯原、三朝、羽合温泉や松江・玉造温泉）においては、高温の泉源が点在しているが、活動度指数が20以上の領域は既往温泉付近に限られる。

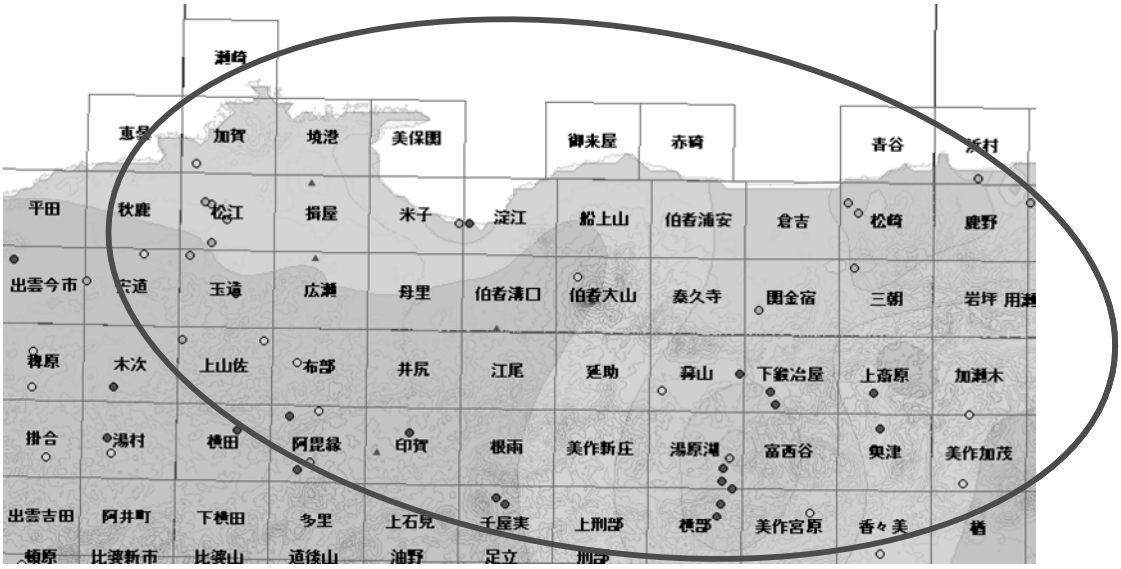
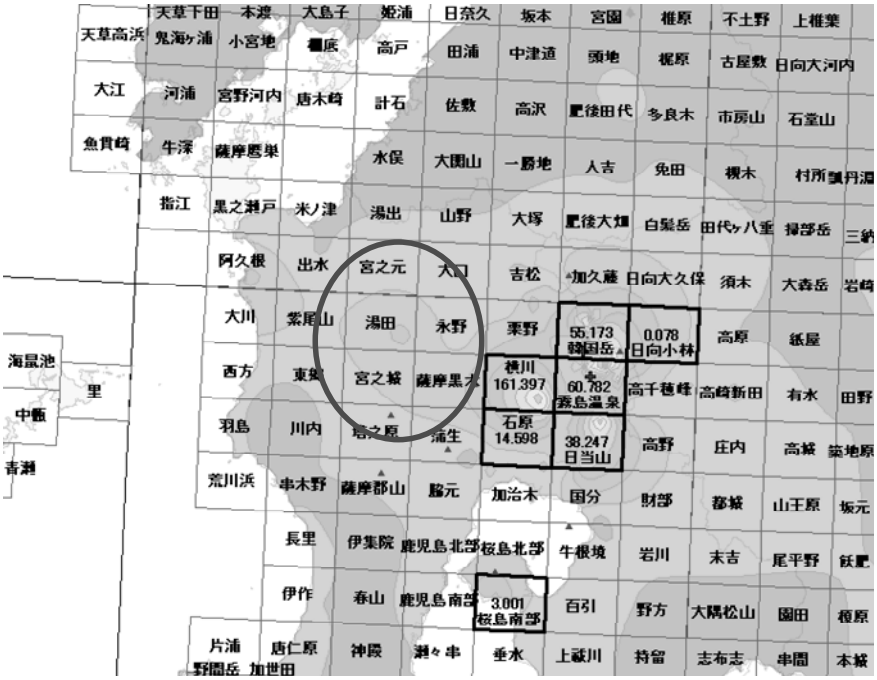



図 2.2-15　鳥取西部付近の活動度指数および泉温分布




霧島火山の西方に位置し、宮之城温泉（湯田）を中心としている。

図 2.2-16　宮之城温泉付近の活動度指数分布

図 2.2-12～図 2.2-16 における各地域の特徴を整理すると表 2.2-1 のようにまとめられる。この結果、活動度指数の観点からの調査候補地としては仙台南西部があげられる。仙台南西部はスクリーニング条件⑤の大都市近傍の候補地と位置づけられる。

表 2.2-1　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。 |

次に、スクリーニング条件の④、⑤の観点から離島の候補地について検討した。比較的大きな島嶼のうち、奥尻島、佐渡、五島（福江島）については地熱資源量評価が実施済みである。そのほかの島嶼の中で、隠岐島後では深度 1,246m の温泉掘削がなされており、温度検層の結果から 90℃以上の地温が観測されている[14)]。そこで、離島の候補地として隠岐島後を選定した。

## 2.3　地熱資源量の検討

### 2.3.1　仙台南西部地域

(1)　地質・地質構造

仙台南西部地域付近の既往地質図としては、地質調査所(1987)の 20 万分の 1 地質図「仙台」[15]や、高橋ほか(1996)の 50 万分の 1 地熱資源図「秋田」[16]がある。それぞれの仙台南西部付近を**図 2.3.1-1** および**図 2.3.1-2** に示す。

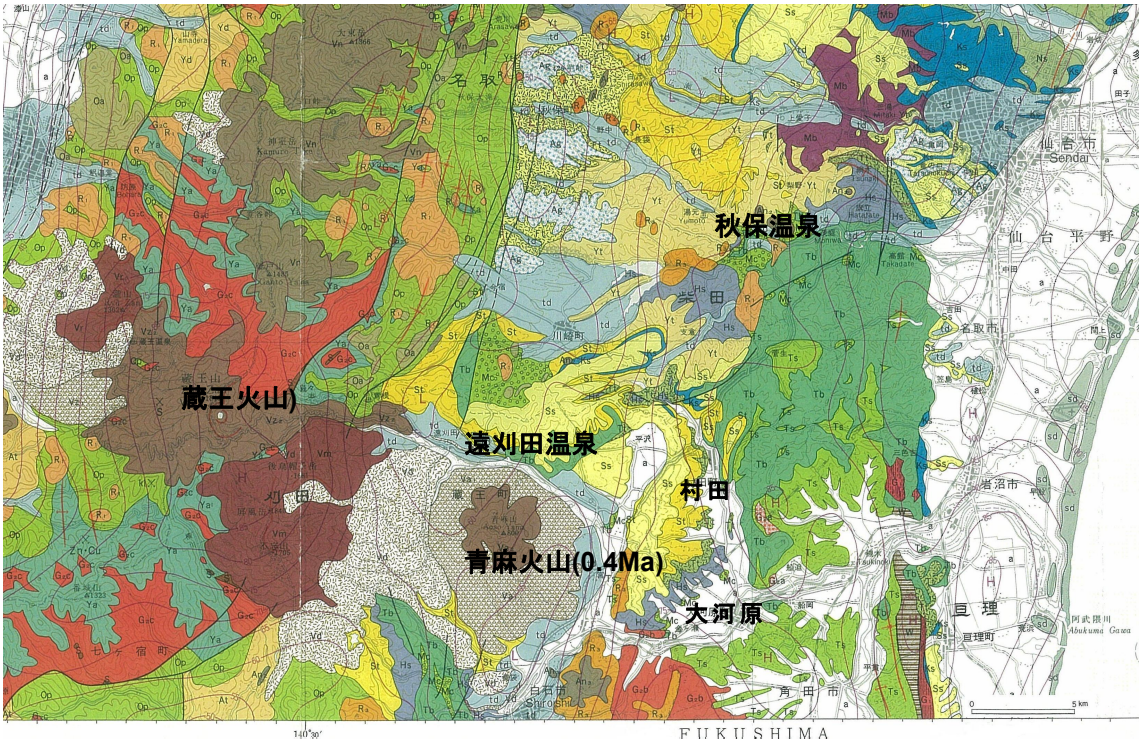



**図 2.3.1-1　20 万分の 1 地質図「仙台」の仙台南西部付近**（出典：地質調査所，1987[15]に加筆）

**図 2.3.1-1** には、地熱資源と関係の深い火山や温泉について主要な位置を加筆した。**図 2.3.2-1** において比較的広く活動度指数の高い領域が認められた村田、大河原近傍には、西に隣接して第四紀火山の青麻火山があり、さらに西方に活火山の蔵王火山がある。また、青麻火山の北麓には遠刈田温泉が、村田町の北方には秋保温泉がある。特に遠刈田温泉は、金原(2005)の日本温泉・鉱泉分布図及び一覧（第 2 版）[7]において、泉温約 85℃、湧出量約 3.5t/min.の非常に規模の大きい高温泉である。

村田から大河原付近は中新世から鮮新世の堆積岩類および火山砕屑岩類を主体としている。大河原の南方には基盤岩の花崗岩類が分布している。蔵王から青麻火山にかけては新期の火山岩類が、河川沿いおよび仙台平野には沖積層が分布している。

20 万分の 1 地質図「仙台」[15]には、仮定密度を 2.0g/cm$^3$ とした時の重力のブーゲー異常コンターが 5mgal 間隔でオーバーレイされている。この重力異常コンターの分布を見ると、村田から大河原を結ぶ南北方向に近い軸を持って、西側に負の異常すなわち新期の堆積岩類に代表されるような相対的に低密度の地層が厚くなる傾向が認められる。なお、蔵王などに代表される東北中軸部の山地では正の異常が分布している。

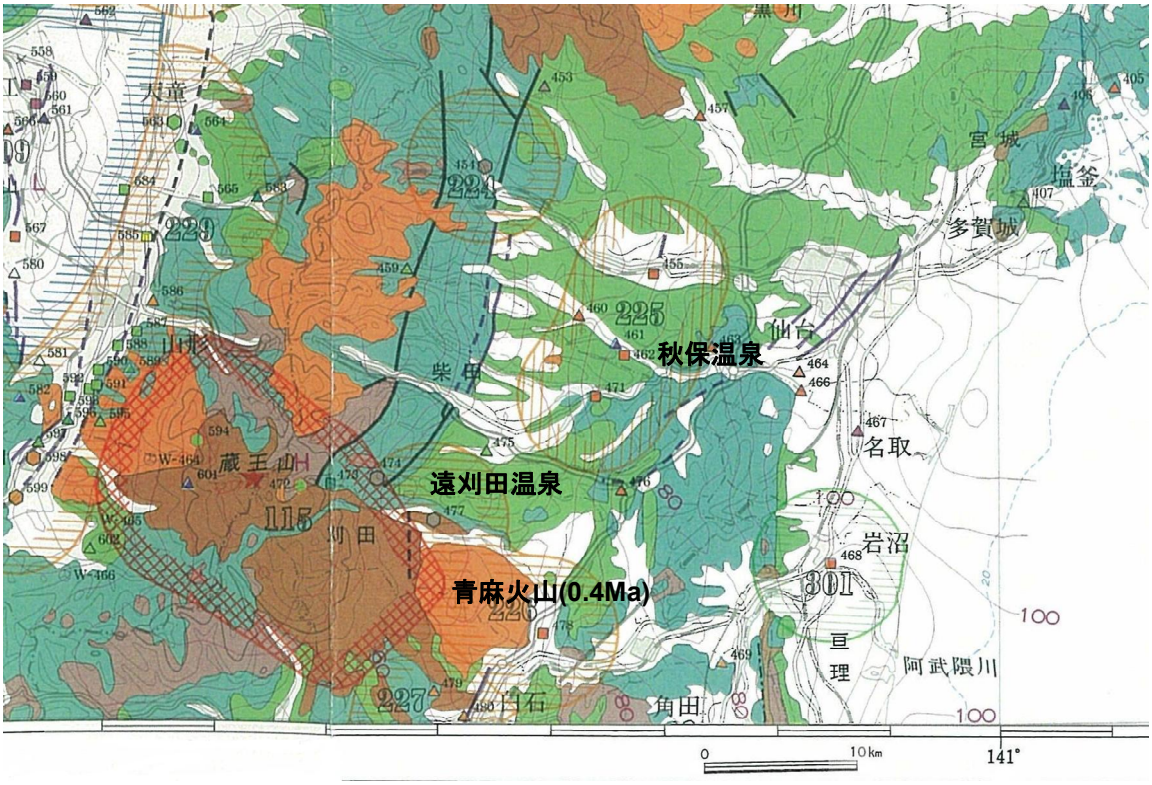



図 2.3.1-2　50 万分の 1 地熱資源図「秋田」の仙台南西部付近

（出典：高橋ほか，1996[16] に加筆）

図 2.3.1-2 には、概略の地質図および重力異常コンターのほかに、地熱資源分布域がタイプおよびランクに応じて区分して示されている。蔵王付近は№115 が付され、第四紀火山に関連した地熱資源賦存地域とされ、90℃以上の温泉が 1 箇所以上あるいは 70℃以上の地表地熱徴候などを有するランク A とされている。この東に隣接した№226 は遠刈田地域で第四紀火山に関連しない地熱資源賦存地域で火山フロント近傍かつ 42℃以上の温泉が 1 箇所以上あるタイプ A とされ、その北北東側の№225 の秋保地域もタイプ A に分類されている。村田から大河原付近は№226 の遠刈田地域にほぼ位置している。

青麻火山東方の太平洋に面する№301 の岩沼地域は、第四紀火山に関連しない地熱資源賦存地域とされ、火山の噴火中心から約 20km よりも東側で 42℃以上の温泉が 1 箇所以上あるタイプ B とされている。

図 2.3.1-3 に、地質調査総合センター(2004)[17]による仮定密度 2.67g/cm3 の重力異常図を示す。これによっても、村田から大河原を結ぶ南北方向に近い軸を持って、西側に負の異常すなわち新期の堆積岩類に代表されるような相対的に低密度の地層が厚くなる傾向が認められる。なお、蔵王などに代表される東北中軸部の山地では正の異常が分布している。

これらの既往地質図などにおいて、村田から大河原付近を通る地質断面図は示されていないが、北村（編）(1986)：新生代東北本州弧地質資料集№24[18]において村田町を通る大深度断面図が示されている（図 2.3.1-4 参照）。

図 2.3.1-4 の赤色の破線で示した領域には、中新世以降の堆積層の向斜構造が認めら

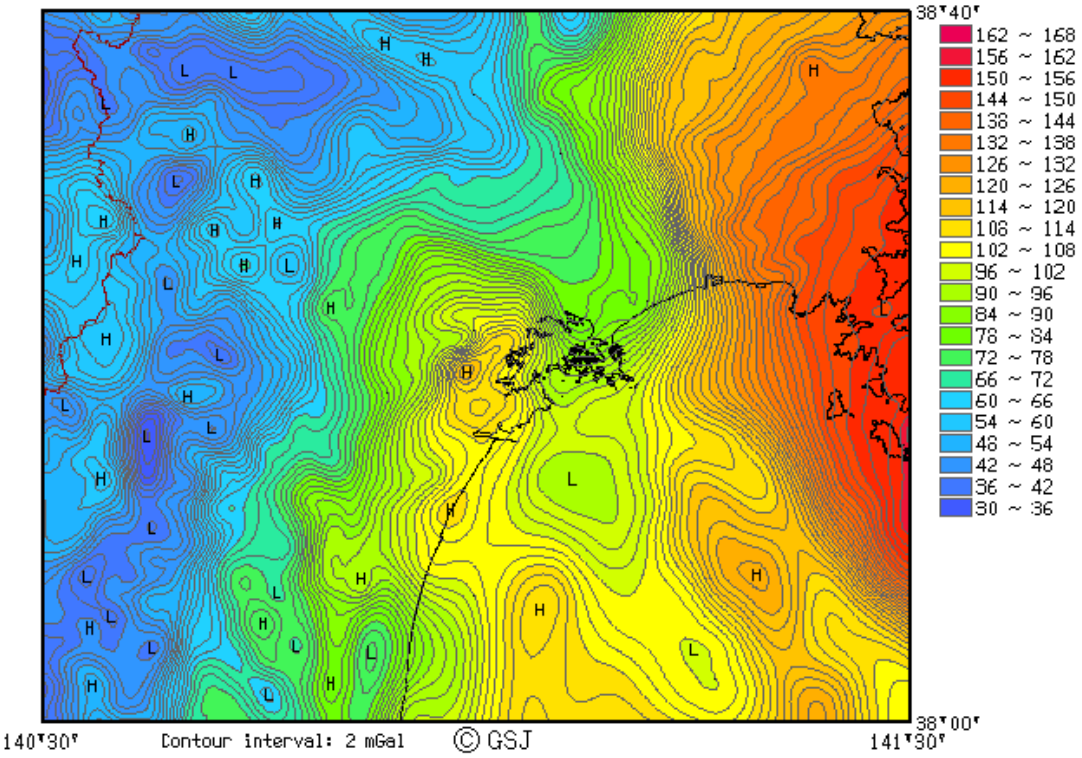



**図 2.3.1-3　仮定密度 2.67g/cm3 の重力異常図**（出典：地質調査総合センター，2004[17)]）

れる。この堆積盆の下限深度は明らかにはされていないが、基盤岩は花崗岩類と考えられている。この花崗岩類の基盤岩の盆地状部に中新世の火山角礫岩などの火山砕屑岩類が 300m 程度以上の層厚で堆積していると考えられている。

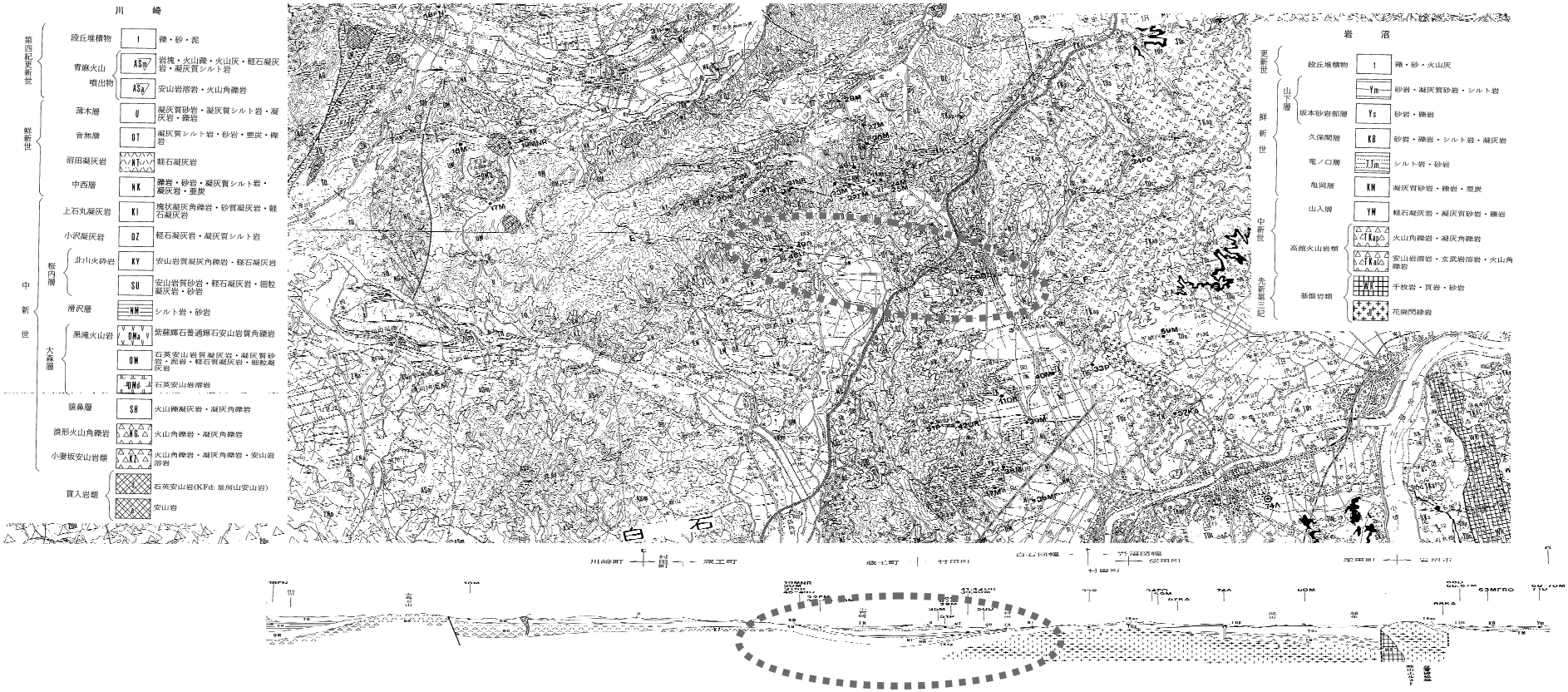



図 2.3.1-4　村田町付近の地質断面図（北村（編），1986 [18] に加筆）

(2)地温、物性データ

仙台南西部の村田から大河原付近における大深度孔データは認められない。また、中新世の火山砕屑岩類の物性に関する深部データも認められなかった。地温については、地熱ポテンシャルマップを基に作図を行い、**図 2.3.1-5** に深度 100m での地温分布を、**図 2.3.1-6** に深度 1,500m での地温分布を示す。

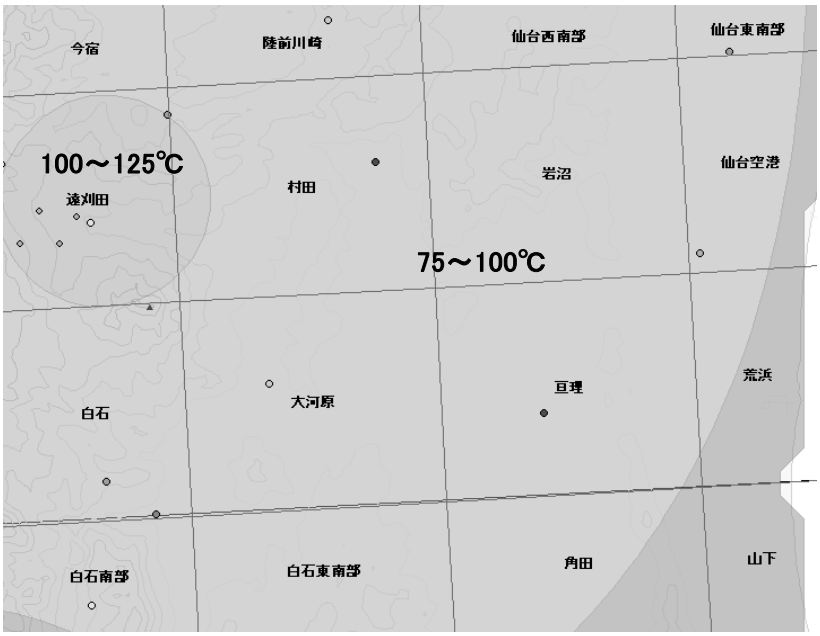



図 2.3.1-5　仙台南西部の深度 1,000m の地温分布

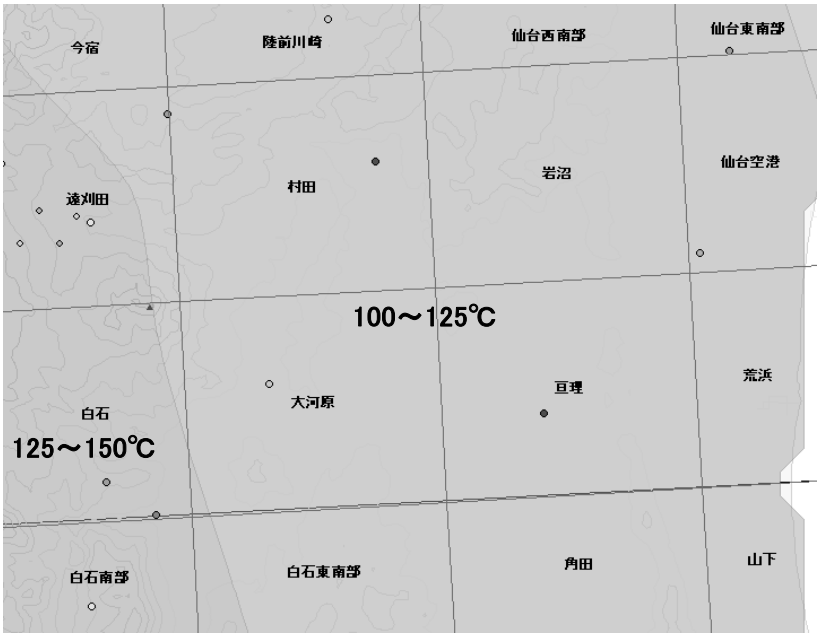



図 2.3.1-6　仙台南西部の深度 1,500m の地温分布

### 2.3.2　隠岐島後地域

(1)地質・地質構造

隠岐島後付近の既往地質図としては、山内ほか（2009）の 5 万分の 1 地質図「西郷」[14]が隠岐島後の全島をカバーしている。山内ほか（2009）[14] の地質図を**図 2.3.2-1** に示す。なお、隠岐島後北西部で実施された温泉ボーリング位置およびそれを通る地質断面図を加筆した。

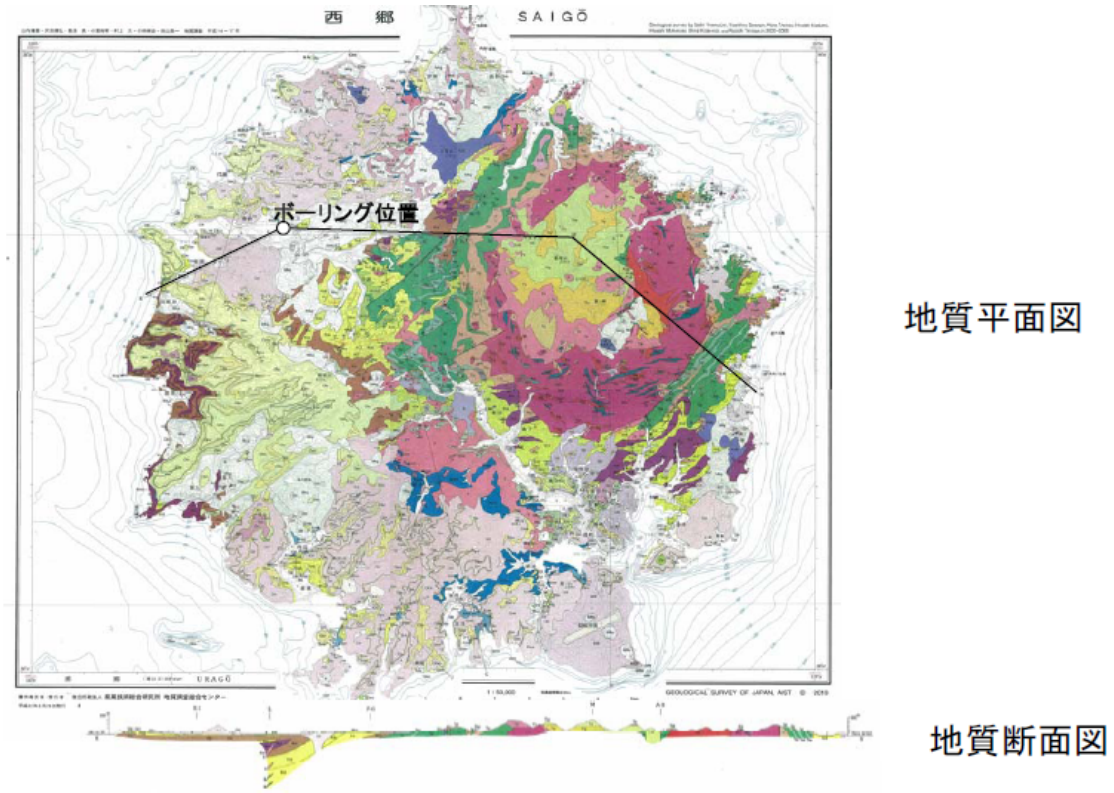



**図 2.3.2-1　隠岐島後の地質図および地質断面図**（出典：山内ほか，2009 [14] に加筆）

温泉ボーリングは深度 1,246m まで掘削され、吉谷ほか(1993)によってコアの地質記載が報告されている。それによると、深度 12.30m までが完新世の堆積層、深度 17.20m までが更新世の堆積層、深度 20.45m までが鮮新世の隠岐流紋岩類、深度 46.50m までが中新世のデイサイト質凝灰岩や堆積岩類からなる久見累層、そして孔底までが中新世の堆積岩類および火山岩類からなる郡累層とされている。**図 2.3.2-2** に、山内ほか（2009）[14] に掲載された温泉ボーリングの柱状図を示す。

吉谷ほか(1995)[19]は、この温泉ボーリングで得られたコアについて、3 深度から採取した郡累層のデイサイト質溶岩～凝灰岩を対象にジルコンを用いたフィッション・トラック年代測定を実施している。吉谷ほか(1995) [19]の試料採取位置およびフィッション・トラック年代値を併記した柱状図を**図 2.3.2-3** に示す。これによれば、試料の採取深度は745～1182mとレンジが広いが、郡累層の絶対年代は20～22Maの範囲であることから、中新世に比較的早い堆積速度で堆積した地層であることが確認されている。

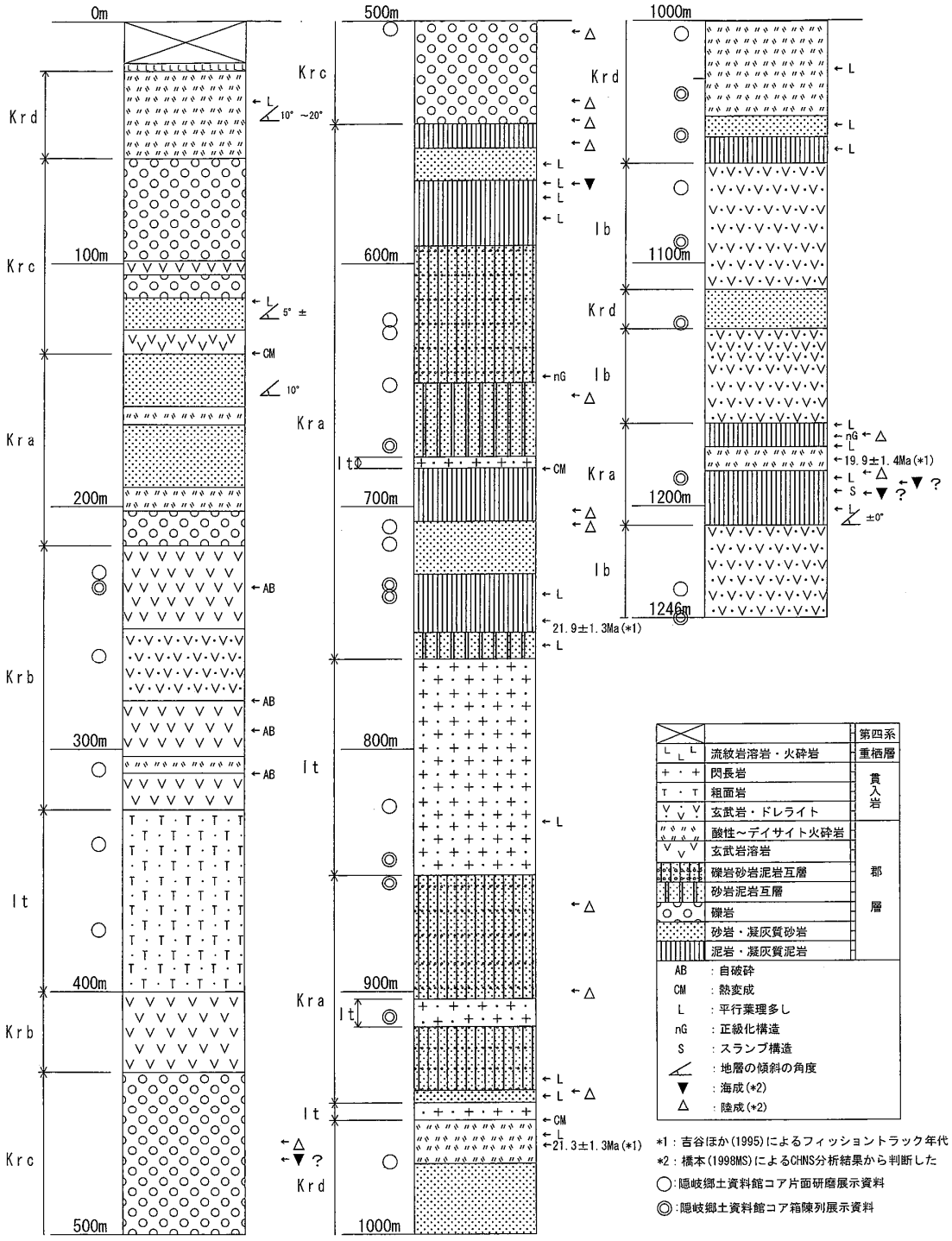



図　隠岐温泉第１温泉源のボーリング柱状図
泉源掘削地点は地質図中の L 地点.

図 2.3.2-2　**温泉ボーリングの柱状図**（出典：山内ほか，2009 [14]）

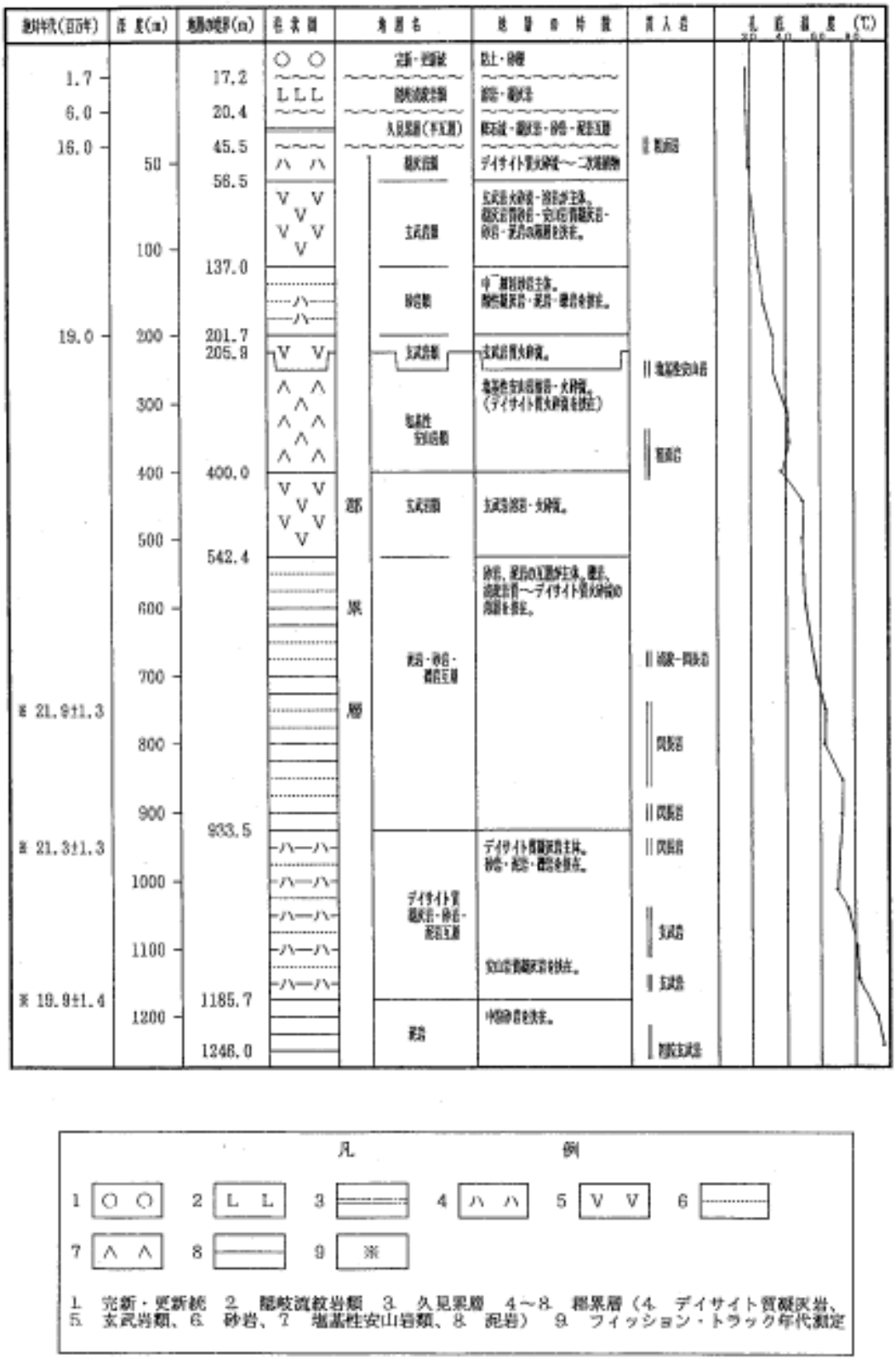



図 2.3.2-3　試料採取位置およびフィッション・トラック年代値（出典：吉谷ほか, 1995[19]）

吉谷ほか(1995)[19]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 2.3.2-4** に、吉谷ほか(1995)[19]の地質図および地質断面図を示す。

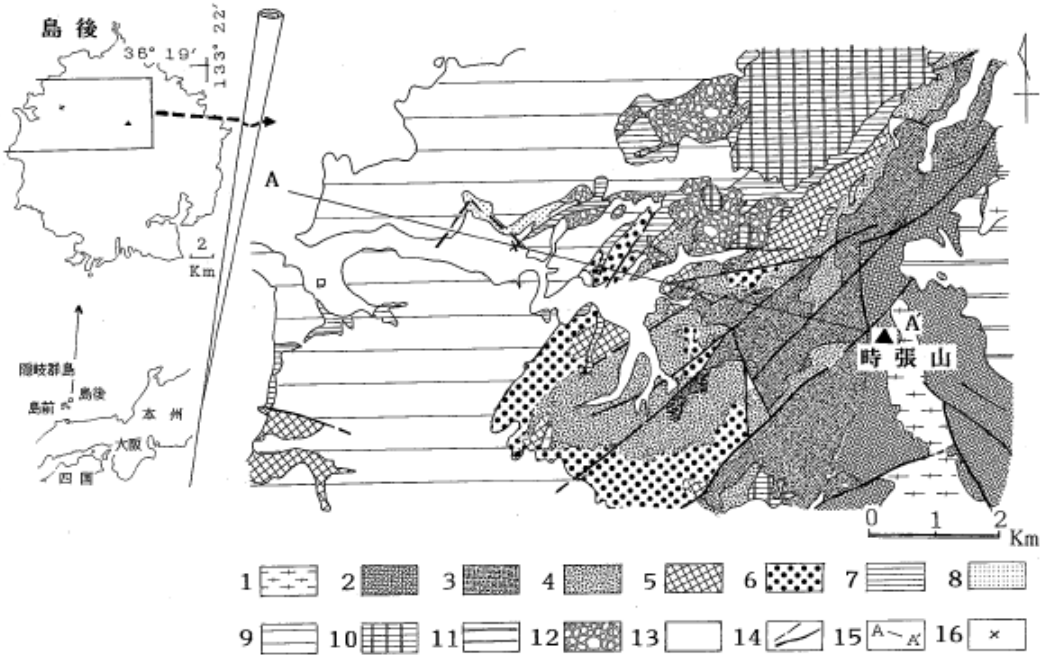



図1 調査地の位置および地質図（山崎：1992原図を簡略・一部修正）

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. 隠岐粗面岩・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

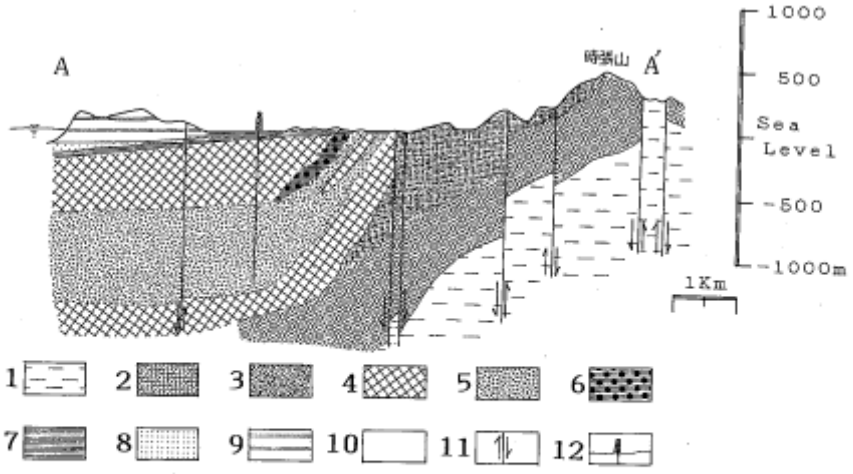



図2 地質断面図

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 2.3.2-4 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[19]）

**図 2.3.2-4** を見ると、ボーリング地点の東方にある時張山から西に向かって、郡累層の下位層である時張山層が断層で切られながら急速に深度を増すと共に、低地部で盆状

構造を埋めるように郡累層が厚く堆積しているとされている。郡累層は少なくとも1,200m 以上の層厚を有すると考えられている。

**図 2.3.2-5** に、地質調査総合センター(2004) [17] による仮定密度 2.67g/cm$^3$ の重力異常図を示す。これによると、隠岐島後の温泉ボーリング付近の南側に重力異常コンターの鞍部が認められ、**図 2.3.2-4** の温泉ボーリングの西側に推定されている断層が、基盤上限にまで変位を与えている可能性が考えられる。

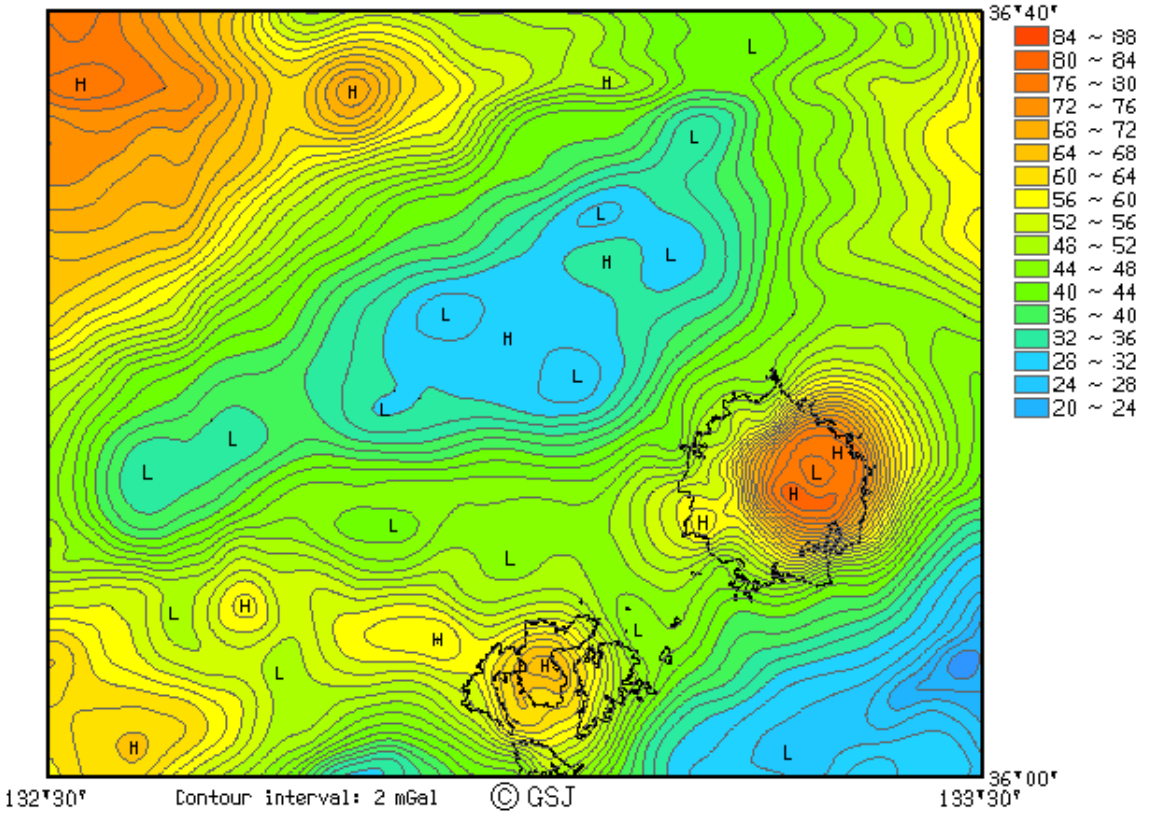
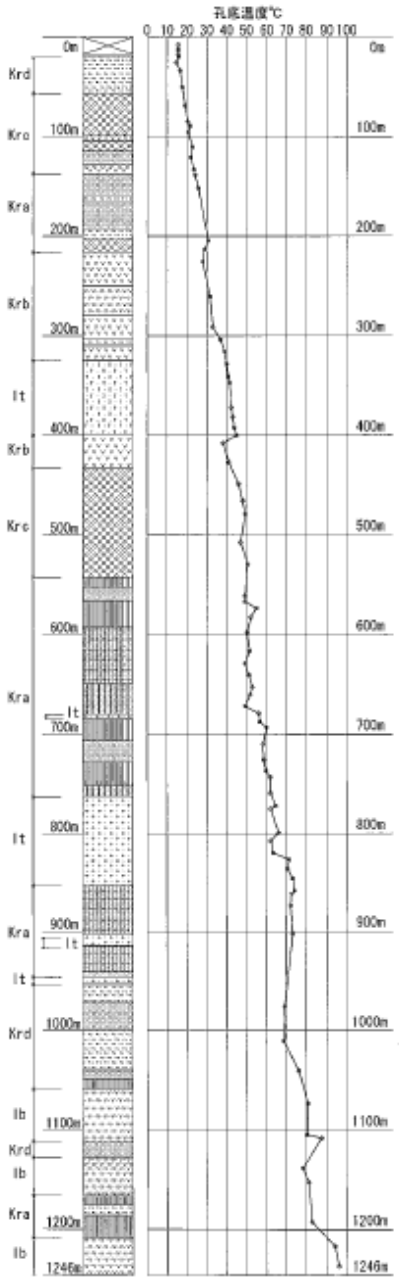



**図 2.3.2-5　仮定密度 2.67g/cm$^3$ の重力異常図**（出典：地質調査総合センター，2004 [17]）

(2) 地温、物性データ

吉谷ほか(1995) [19] および山内ほか(2009) [14] 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) [14] に示された温度検層結果を**図 2.3.2-6** 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。

郡累層の物性値については、星野ほか(2001)[20]に隠岐島後の波多層の砂岩および泥岩についての孔隙率や密度が報告されている。星野ほか(2001) [20]の採取位置図や地質年代から、これらの試料は郡累層に対比される。星野ほか(2001) [20]に示されている波多層の物性値を**表 2.3.2-1** に示す。孔隙率に注目すると、砂岩で約 21%、泥岩で約 23%であり、岩質によらず 20%程度の孔隙率を期待することができると考えられる。ただし、星野ほか(2001)の試料は地表試料のため、深度に関する依存性は不明である。




第 12.1 図　五箇温泉第１温泉源の孔底温度
柱状図の凡例は第 5.8 図に従う.

**図 2.3.2-6　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 [14]）

**表 2.3.2-1　隠岐島後の波多層の物性値**（出典：星野ほか，2001 [20]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 |

## 2.4 低温地熱地域の評価と課題

### 2.4.1 仙台南西部地域

2.3.1 で記述したように、仙台南西部の村田町から大河原町付近には、深度 1000m 以深に少なくとも 75℃以上の地熱資源を胚胎する堆積盆の存在が推定される。ここでは、現時点で得られている地熱資源に関する情報を基に開発対象範囲を仮定して地熱資源量（貯留層エネルギー）を計算した。

Brook *et al.*(1979)[21]によって確立された貯留層エネルギーの計算方法は、宮崎ほか(1991)[3]での計算方法と同じ考えに基づくもので、以下のように表現される。

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

ここで,

$Qr$：貯留層エネルギー（Ｊ）

$\rho c$：(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(℃)

$T_{\mathrm{ref}}$：基準温度

$S$：面積$(x,y)$

$Z_b$：重力基盤深度

$Z_r$：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、

$$Qr=\rho c*V*T$$

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。

そこで、**図 2.4.1-1** に示すような貯留層の範囲を設定した。**図 2.4.1-1** には、重力基盤深度と自然公園などの位置を示し、その中で比較的重力基盤深度の大きい領域として、平面的には 2km×3km の領域を設定した。また貯留層については、**図 2.4.1-2** に示した断面図から、基盤直上の中新世の凝灰角礫岩を主体とする地層を想定し、深度 1,000m～1,300m の層厚を 300m と設定することとした。なお、当該層の孔隙率が不明であるため、ここでは宮崎ほか(1991)[3]と同じ 15%を仮定した。そして、貯留層の代表温度を 80℃、発電のみならず可能な限りの熱エネルギーを利用するという観点から基準温度を 15℃として、貯留層エネルギーの計算を行った。貯留層エネルギーの試算結果を**表 2.4.1-1** に示す。

### 2.4.2 隠岐島後地域

2.3.2 で記述したように、隠岐島後には、温泉ボーリングによって深度 1,250m 付近までに少なくとも 96℃以上の地熱資源を胚胎する地層が確認され、このボーリングにおいては中新世堆積層の基盤岩にまでは達していない。ここでは仙台南西部と同様に、現時点で得られている地熱資源に関する情報を基に開発対象範囲を仮定して地熱資源量（貯留層エネルギー）を計算した。

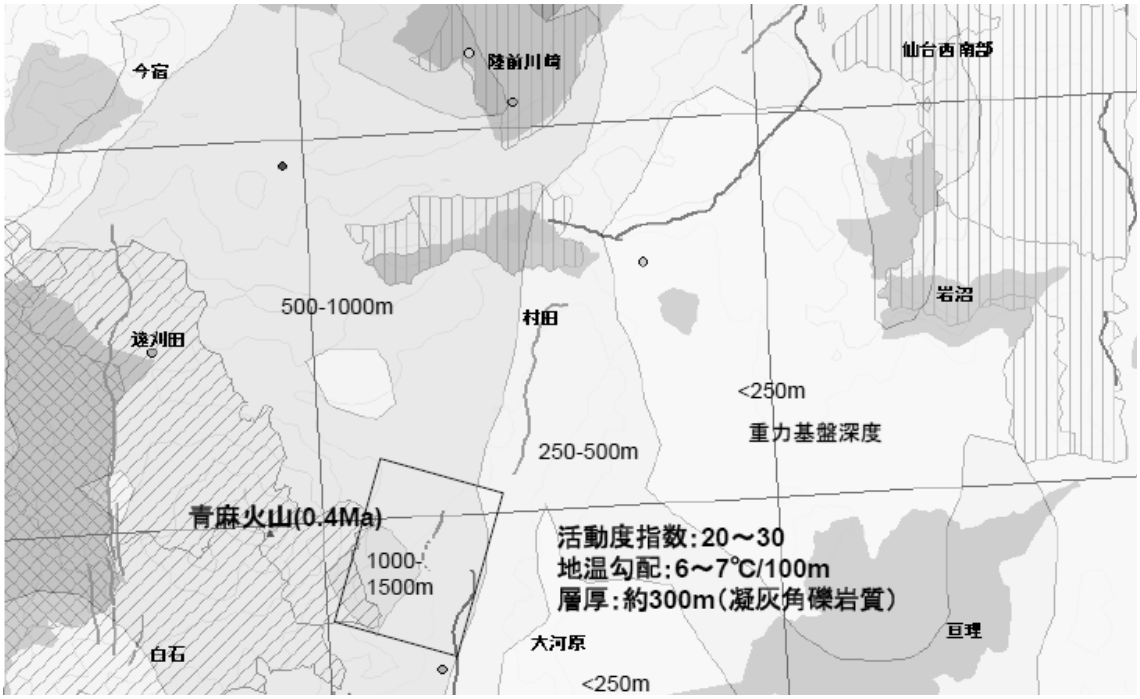



図 2.4.1-1　仙台南西部の地熱資源量算出範囲

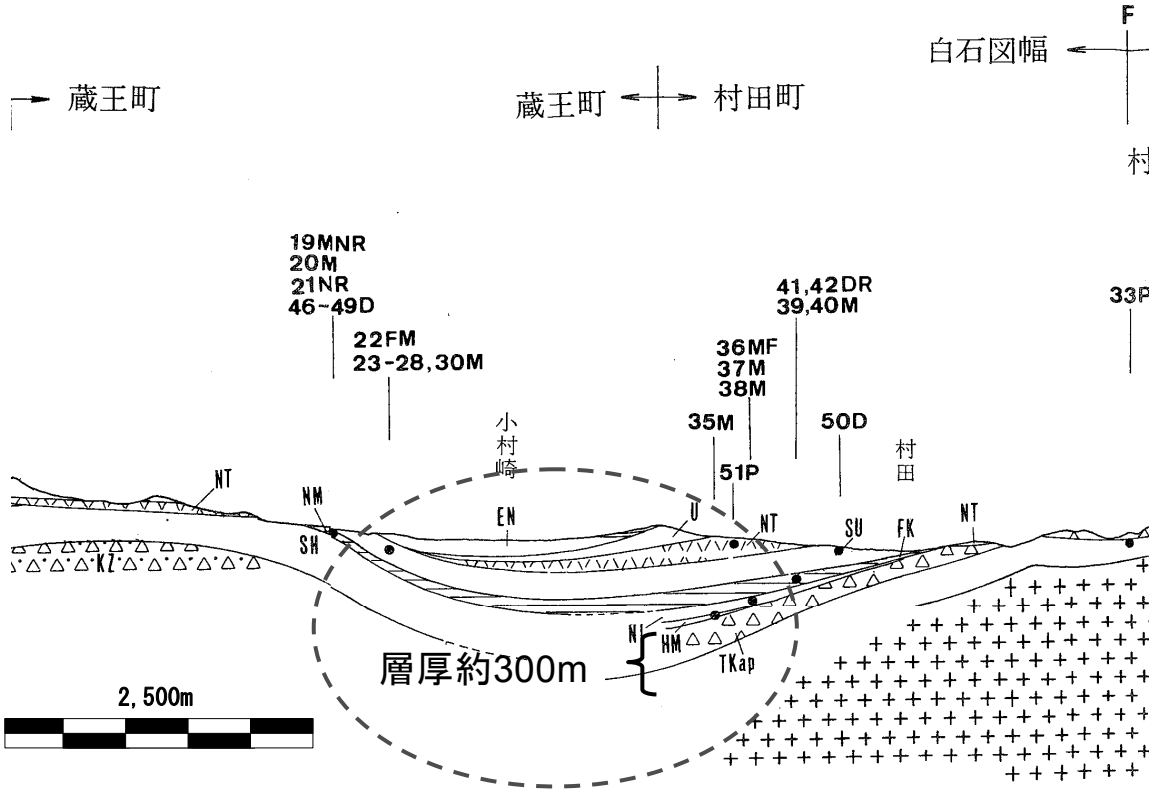



図 2.4.1-2 村田町付近拡大断面図（出典：北村（編），1986[18] に加筆）

表 2.4.1-1　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 |

隠岐島後においては、**図 2.4.2-1** に示すような貯留層の範囲を設定した。

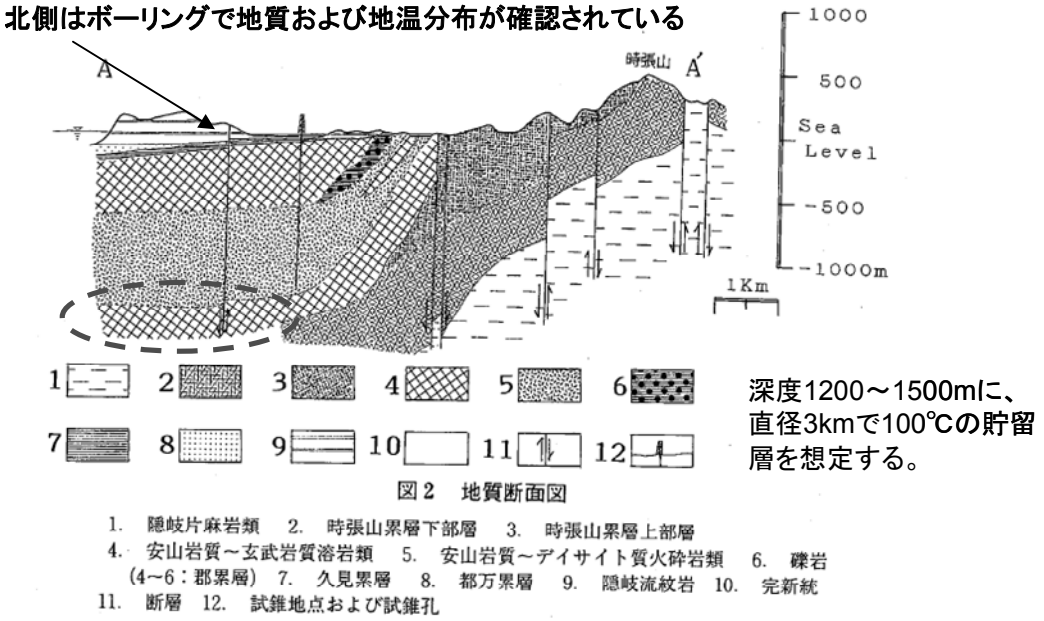



**図 2.4.2-1　隠岐島後の貯留層の設定**

**図 2.4.2-1** は温泉ボーリングを含む地質断面図であるが、西側に向かって堆積盆の深度が大きくなる傾向があることから、貯留層の深度範囲を 1,200～1,500m と仮定した。また、貯留層の平面的な広がりは、直径 3km の領域を設定した。なお、当該層の孔隙率については表 2.3.2-1 に示したデータが得られており、この文献値から 20%を設定した。そして、貯留層の代表温度を 100℃、発電のみならず可能な限りの熱エネルギーを利用するという観点から基準温度を 15℃として、貯留層エネルギーの計算を行った。貯留層エネルギーの試算結果を**表 2.4.2-1** に示す。

**表 2.4.2-1　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 |

### 2.4.3　資源量の評価と課題

仙台南西部の検討においては、貯留層位置を村田町から大河原町付近に設定した。近傍の大都市である仙台市までは約 20km 程度と比較的近い距離にある。また、仙台市のみならず、周辺の市町村についてもベース電源としての役割を期待することが可能と考えられる。

隠岐島後の検討においては、貯留層位置を温泉ボーリングのデータがある隠岐島後の北西部付近に設定した。隠岐島後は一島一町（隠岐の島町）の人口 15,838 人（2011,1,1 現在）の離島であり、現在島内の電力は南東部の隠岐空港近傍の西郷発電所の内燃力発電機 6 基による合計出力 2.532 万 kW によって賄われている（出典：中国電力株式会社ホームページ）。資源量の試算結果は、本検討での貯留層の設定にもよるが、仙台南西部と

は異なり、当該深度の地温の実データと孔隙率の文献値を基にしているという点で、現実性が相対的に高い。また得られた資源量は仙台南西部よりも大きな値を示し、島内のベース電源と燃料費低減策としての役割が期待されると考えられ、開発の重要性が大きいものと考えられる。

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。今後、資料の精査などを行ってさらに現実的な発電量に近付ける努力が必要と考えられる。

- 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

**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) 地質調査所(1975)：200 万分の 1 地質編集図、№8、日本温泉分布図
3) 宮崎芳徳ほか(1991)：全国規模地熱資源評価の研究、地質調査所報告、№275
4) 環境省(2010)：平成 21 年度　再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査　報告書
5) 角　清愛(1975)：日本温泉・鉱泉一覧、地質調査所
6) 金原啓司(1992)：日本温泉・鉱泉分布図及び一覧、地質調査所
7) 金原啓司(2005)：日本温泉・鉱泉分布図及び一覧（第 2 版、CD-ROM 版）、数値地質図 GT-2、産業技術総合研究所地質調査総合センター
8) 駒澤正夫(2003)：日本の重力探査事情－地下構造とのかかわり、石油技術協会誌、第 68 巻、第 1 号
9) 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
10) 江原幸雄ほか(2008)：2050 年自然エネルギービジョンにおける地熱エネルギーの貢献、日本地熱学会誌、第 30 巻、第 3 号
11) 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
12) 玉生志郎(2008)：地下温度分布から見た高温地区を含む広域地域のタイプ分け－東北地方と中国・四国地方の例－、地質調査研究報告、第 59 巻、1/2 号
13) 丸山茂徳・大森聡一・岩瀬康行(2004)：日本列島直下で現在進行中の広域変成作用、地学雑誌、第 113 巻、第 5 号
14) 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
15) 地質調査所(1987)：20 万分の 1 地質図　仙台、地質調査所
16) 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
17) 地質調査総合センター(2004)：日本重力（第 2 版）（CD-ROM 版）、数値地質図 P-2、産業技術総合研究所地質調査総合センター
18) 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
19) 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
20) 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
21) 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
22) 村岡洋文(1991)：八甲田地熱地域の地熱資源量評価、地質調査所報告、第 275 号

# 第３章　低温地熱発電システムの検討

## 3.1　既往技術レベルの概要

### 3.1.1　バイナリー発電の事例

一般的な地熱発電では、地下から取り出した蒸気をそのまま、あるいは水分を除いた状態でタービンに導入し発電を行う。これを蒸気フラッシュタイプの発電と呼んでいる。ところが、蒸気または熱水の温度が低く直接タービンを回せない場合に、熱交換器を介して低沸点の２次媒体を沸騰させタービンを回して発電を行う。これをバイナリータイプの発電と呼び、150℃以下の比較的低温の地熱でも発電が可能となる。

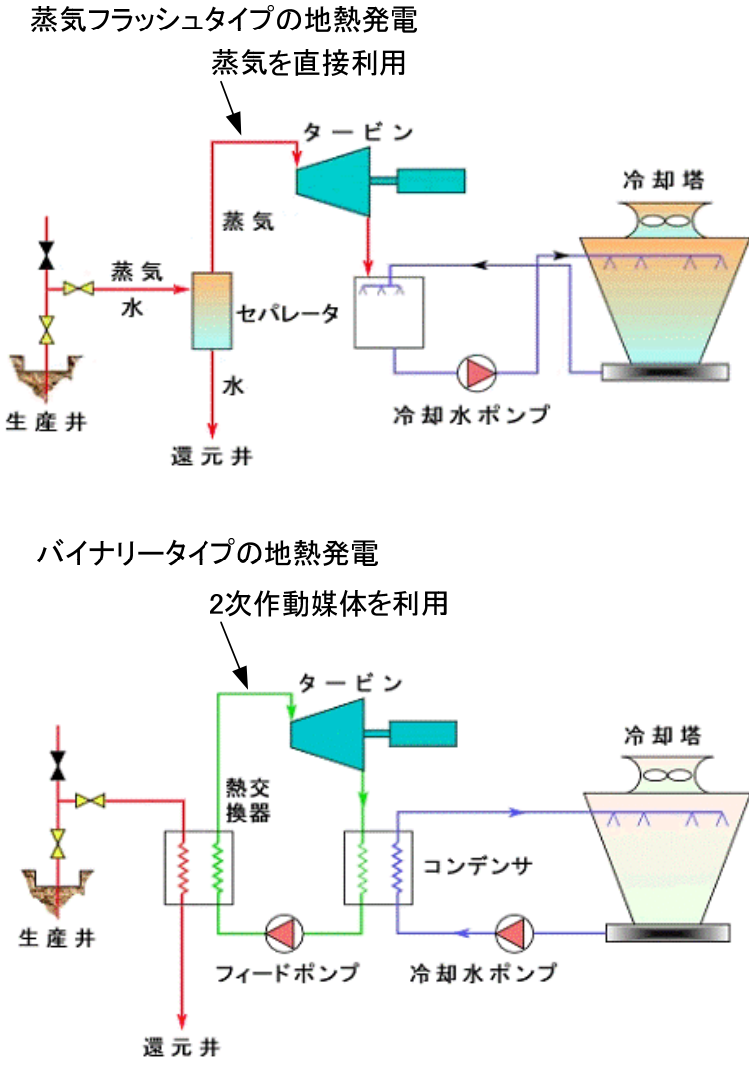



図 3.1.1-1　通常の地熱発電とバイナリータイプの地熱発電
（出典：地熱学会ホームページ）[1)]

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述べる。

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 3.1.1-2 に示す。

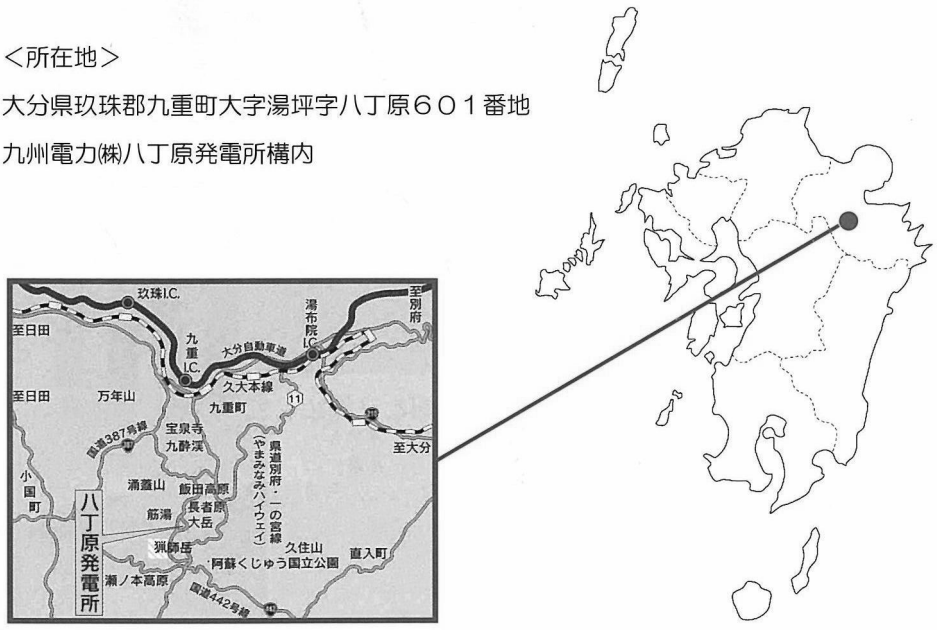



**図 3.1.1-2　八丁原バイナリー発電施設の位置**

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 3.1.1-1 に八丁原バイナリー発電施設の概要を示す。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。主管系統図を図 3.1.1-3 に、設備概観図を図 3.1.1-4 に、設備の全景を図 3.1.1-5 に示す。蒸気＋熱水の系統と媒体であるペンタンの系統とは完全に分離されているため、蒸気井から供給される蒸気と熱水が大気と接触しないことから運転時の二酸化炭素の発生がゼロである。

表 3.1.1-1　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）

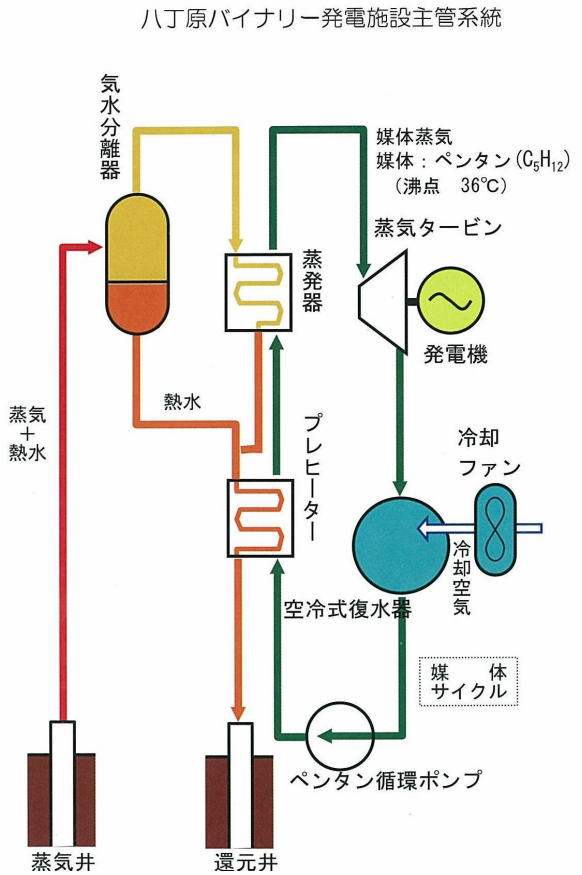



図 3.1.1-3　八丁原バイナリー発電の主管系統図

（出典：八丁原発電所パンフレット）

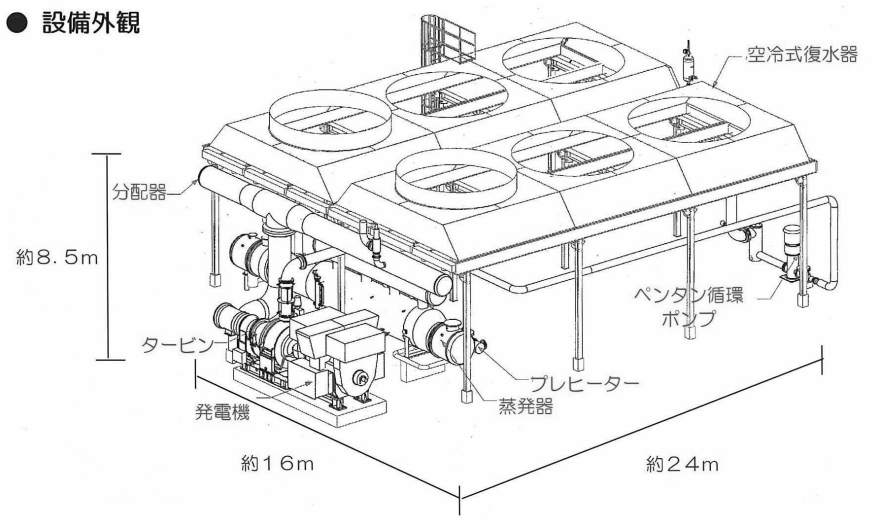



**図 3.1.1-4　設備概観図**

（出典：八丁原発電所パンフレット）

**図 3.1.1-5　設備全景**

ヒヤリングによれば、平成 21 年度の設備利用率は約 71%とのことであった。利用率を下げる要因としては、自主点検を除くと、空圧制御系の故障やＶベルトの切断などによるものと、落雷等による送電トラブルによるものが多いとのことであった。

バイナリー発電に対する課題としては、メンテナンスコスト（点検義務）が高いこと、タービンの管理技士が必要なこと、そして実機が高価格であることの３点が大きく、メンテナンスと管理技士については規制緩和が望まれるとのことであった。八丁原における特有のコストについては、以下のような事項が挙げられる。

(a)法定点検

タービンについては、蒸気フラッシュ発電と同様に 4 年に 1 回の法定点検があるが、媒体蒸気にペンタンを使用しているため、液化ガス取り扱い設備のために 2 年に 1 回の法定点検がある。なお、九州電力では 1 年に 1 回、循環系を対象に自主点検を実施している。

(b)脱スケール剤による腐食

ペンタン自体には腐食性は無いが、熱交換部分を熱水が通過するため、脱スケール剤として硫酸を添加しているため、液性が酸性となり腐食が生じる。また、同様の目的で還元水にも硫酸が添加されている。

(c)保守、交換部品の調達

システム全体が海外製品のため、予備品や交換部品の調達に長時間を要する。故障や点検等の機会に、可能な範囲で国産の部品への交換を進めている。

(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 3.1.1-6）。

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 3.1.1-7）。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 3.1.1-8 に示す。温度の高い箇所はライン地溝帯の方向に沿っ

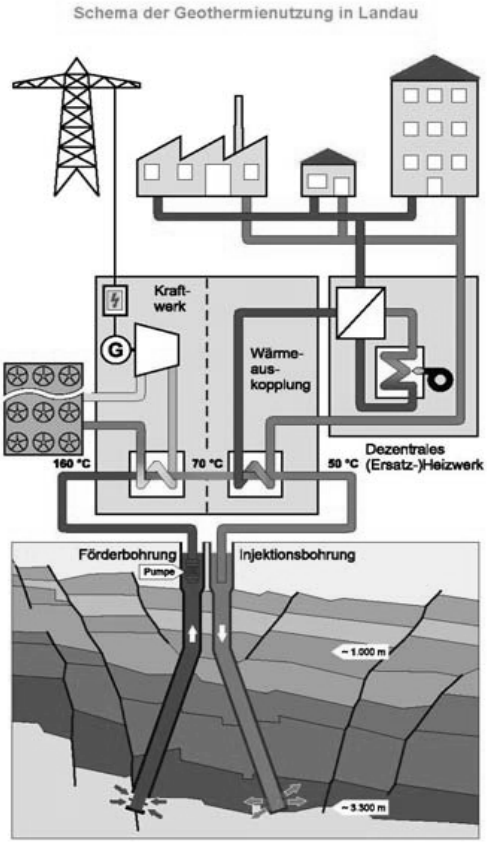



**図 3.1.1-6　Landau における地熱発電**
（出典：Schindler *et al.*2010）[3)]

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。

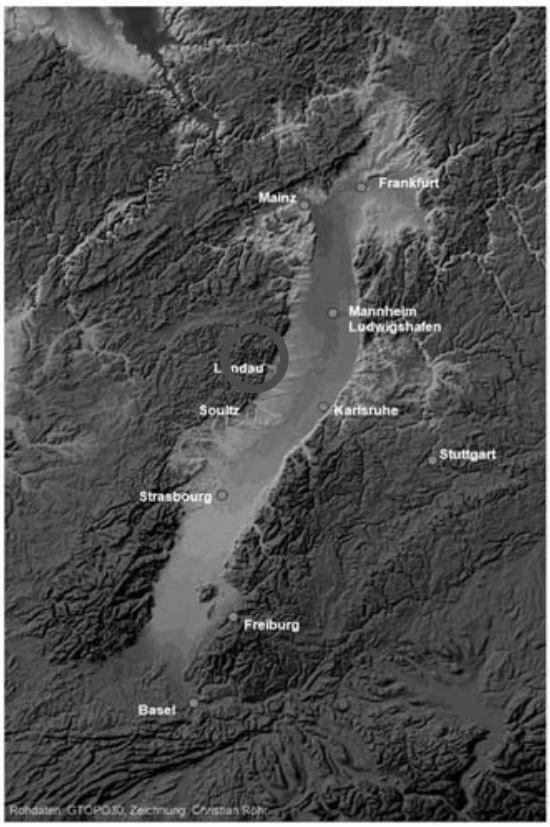



**図 3.1.1-7　ライン地溝帯とランダウの位置**
（出典：Schindler *et al.*,2010）[3)]

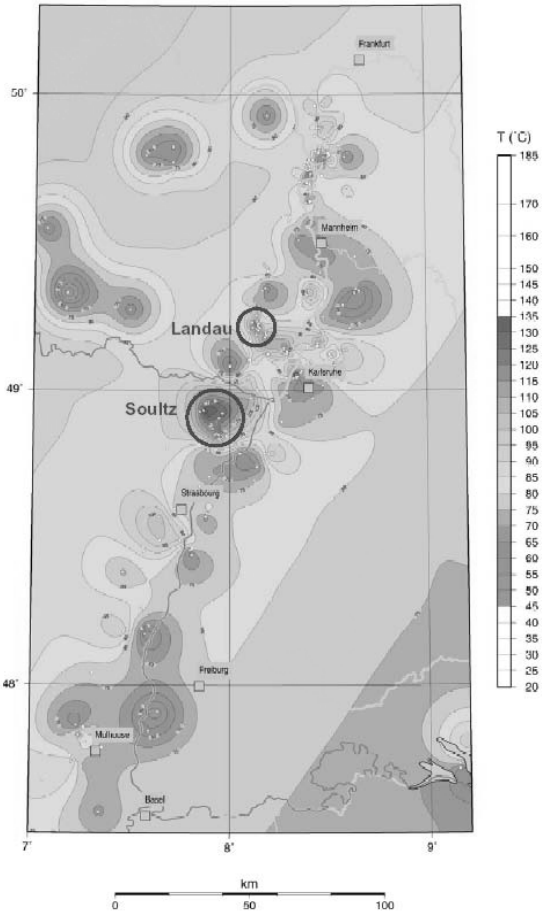



図 3.1.1-8　ランダウ周辺の
深度 1,500m の地温分布
（出典：Schindler *et al.*,2010）[3)]

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 3.1.1-9 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。

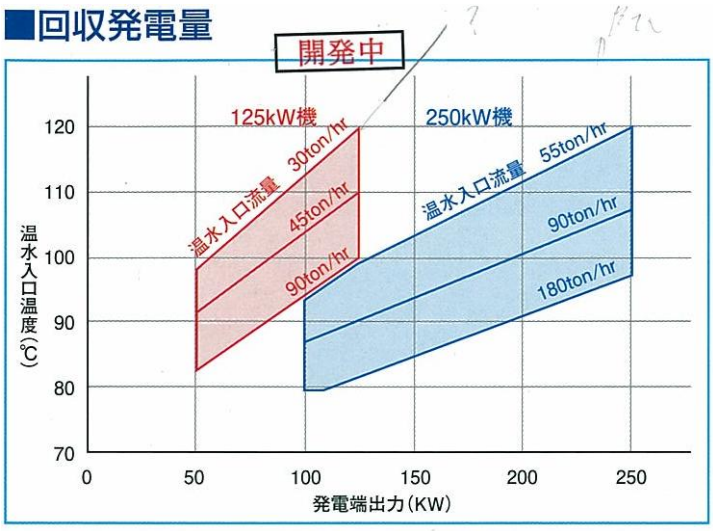



**図 3.1.1-9　バイナリー発電機における出力と温度・流量との関係例**

（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。

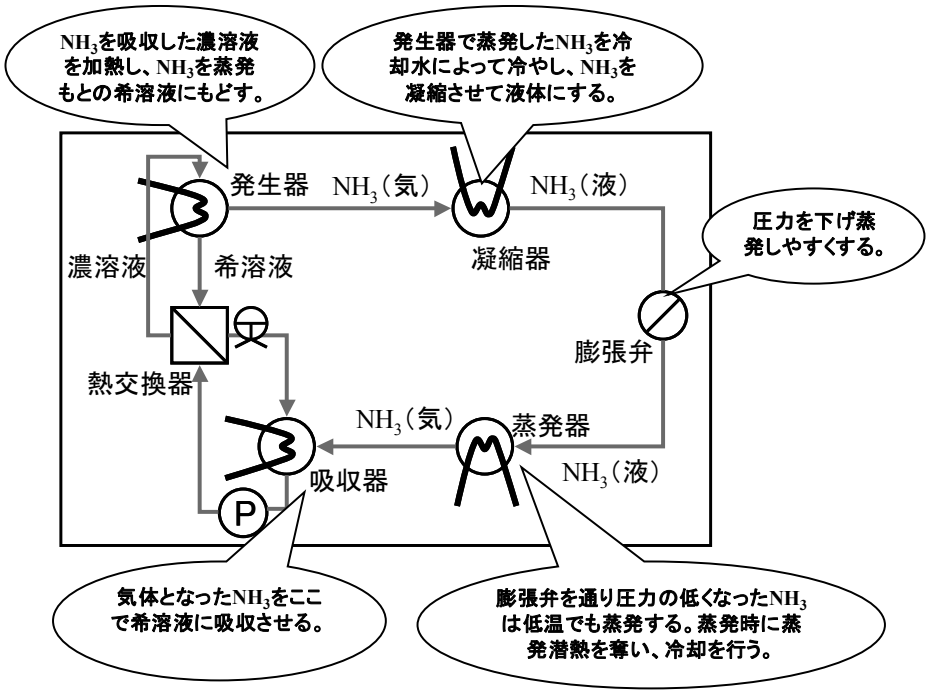
プロトタイプ(50kW 機)の検証を H22 年 12 月から開始しており、50kW 級と 100kW 級のシステムを H23 年秋に市場に投入する予定との事である。

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。アンモニア冷凍機は１００年以上の歴史を持つ冷凍方式で一時フロン冷凍機に置き換えられたが、近年フロン冷凍機の代替として注目されている。図 3.1.1-10 にアンモニア冷凍機の原理を示す。

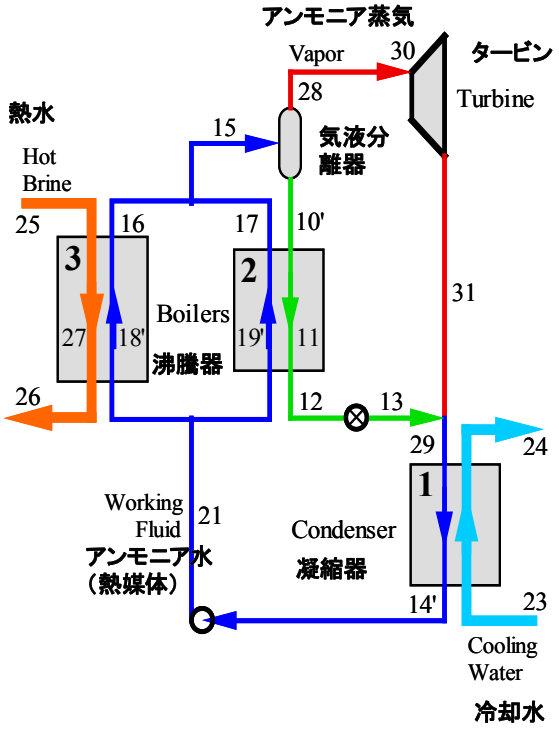
アンモニア吸収冷凍機は、冷媒にアンモニア、吸収剤に水を使用した吸収冷凍サイクルを用いている。蒸発器で蒸発したアンモニアは、吸収器でアンモニア希溶液に吸収され、濃いアンモニア溶液になる。このアンモニア溶液は、溶液ポンプによって精留塔を経て高圧の発生器に送られ、加熱されてアンモニア蒸気を分離する。このアンモニア蒸気は水蒸気を含んでいるため、発生器内の気液分離器で精留され、高純度となったアン

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 3.1.1-10 図　アンモニア冷凍機の原理（出典：大里、 2005）[4)]

図 3.1.1-11 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、アンモニアー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。




第 3.1.1-11 図　カリーナサイクルの原理（出典：大里、 2005）[4)]

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。一般的にアンモニア冷凍機で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（バイナリ）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 3.1.1-12 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。

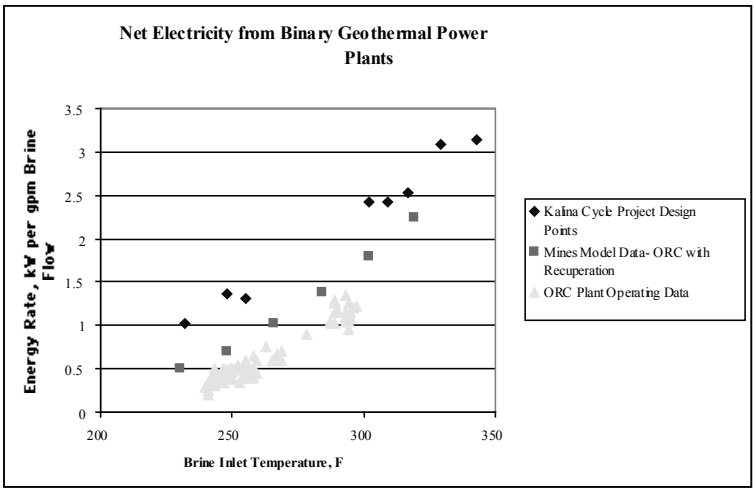



**図 3.1.1-12　ランキンサイクルにおける熱源温度と送電端出力当たりの熱水量の関係**

（出典：大里、 2005）[4)]

(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、この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)。図 3.1.1-13 にプラントの写真を示す。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。蒸発器において、濃度約 88%のアンモニア溶液を転炉オフガス冷却温排水（98℃）1,300t/h で加熱し、湿り蒸気にする。次にミストセパレータにおいて、湿り蒸気を高濃度のアンモニア蒸気と低濃度アンモニア水に分離する。高濃度アンモニア蒸気（3.16MPa、95℃）は、タービンを駆動して発電を行い、圧力を 0.74MPa に下げて凝縮器に入る。一方、低濃度アンモニア水は、再生器で熱交換をして、海水(計画性能 18℃)を冷却に利用した凝縮器に入り、アンモニア蒸気を吸収・凝縮させる。凝縮器底部のアンモニア溶液はポンプにより昇圧され、再生器を経て再び蒸発器に送られる。

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。たとえば、フランジの使用はメンテナンスのために必要な最小限の箇所にとどめ、他の接続箇所はすべて溶接された。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。以下にその後の経緯を示す。

・1999 年 8 月 30～31 日　通産省による試験前検査
・1999 年 10 月 21 日　3,297 kW の出力試験（修正保証値は 3,234 kW）
・2000 年 6 月 23 日　1999 年 8 月 1 日から試験期間を除く稼動実績 5,100 時間。この期間の稼働率は約 97.5%
・2001 年 6 月 2 日　1999 年 8 月 1 日～2001 年 4 月までの試験運転を除く運転時間合計約 11,000 時間
・2001 年 12 月 17 日　2000 年 11 月～2001 年 10 月までの運転時間合計 7,777 時間で、20,558MWh を発電
・2003 年 10 月 1 日　2002 年 11 月～2003 年 10 月までの運転時間合計 7,884 時間。この年の予定された製鋼所の停止時間は合計 864 時間で、これにより熱源の供給

が制限された。この期間のプラント稼働率は 99%超である。

**図 3.1.1-13　住友金属工業㈱鹿島製鋼所転炉**
**オフガス冷却水廃熱利用カリーナサイクル**

（出典：大里、 2005）[4)]

(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

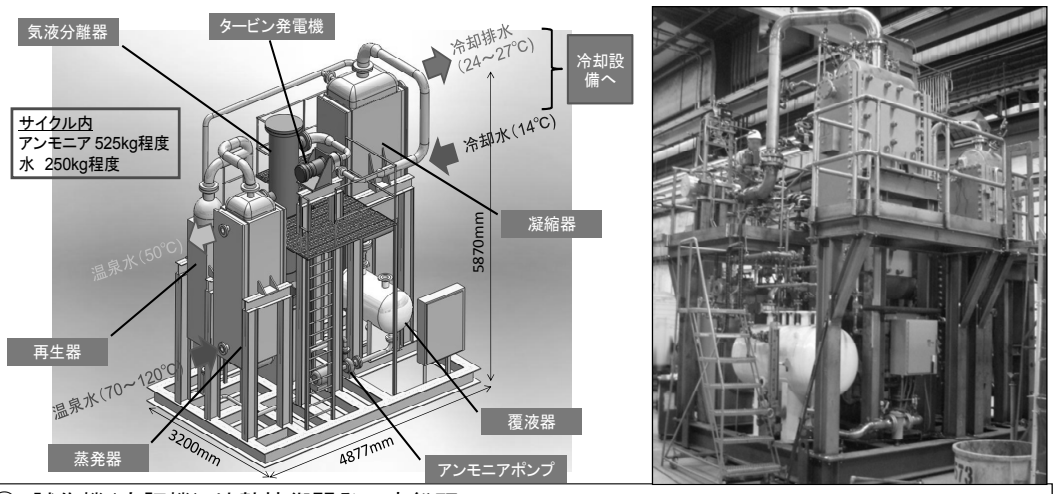
国内の多数の高温温泉では、温泉成分を薄めないまま浴用温度まで下げることに苦慮しており、浴用利用できない 50℃以上の熱エネルギーの多くが未利用のまま河川等に放流されている。産業技術総合研究所の試算では、全国の既存の温泉だけで 72.3 万 kW の発電可能な熱量があると評価されている。

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（アンモニア水）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 3.1.1-14 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 3.1.1-14　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 3.1.1-15 に発電所の景観を、図 3.1.1-16 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される
・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される
・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することができた
・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、空冷コンダンサーや冷却塔等の設備が含まれない。

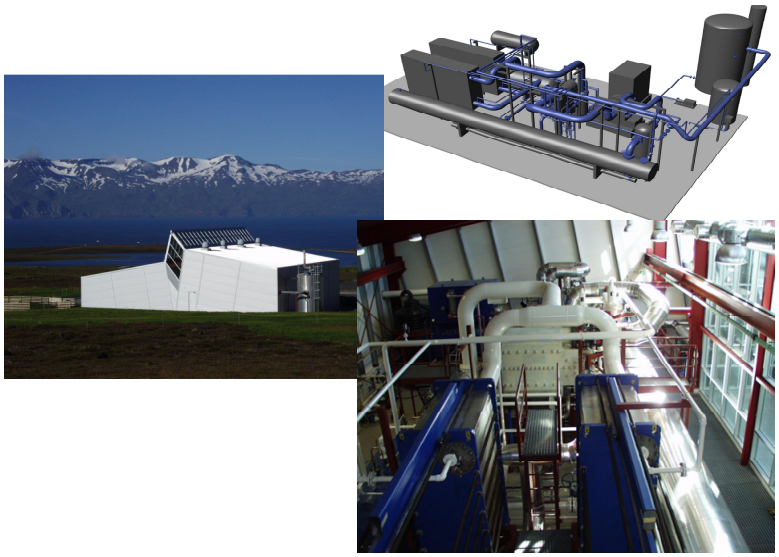


図 3.1.1-15　フサビック地熱発電所（アイスランド）

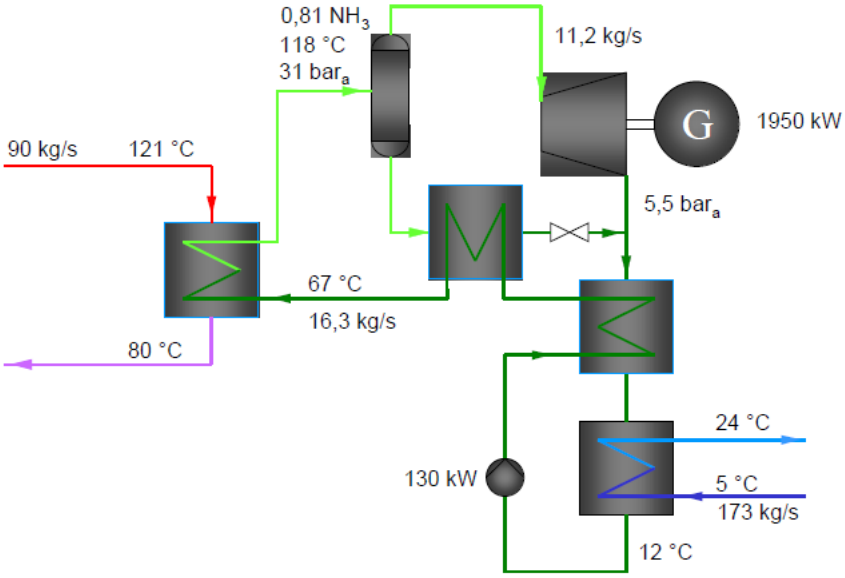



図 3.1.1-16　フサビック地熱発電所の発電フロー（出典：大里，　2005）[4)]

(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（図 3.1.1-17）。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。

図 3.1.1-17　ウンテルハッキンのカリーナサイクル地熱発電所の外観と内部
（出典：EGEC ホームページ）[5)]

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 3.1.1-18、図 3.1.1-19）。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.が設立された。同社より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。このプロジェクトでは、低温熱水からの発電で優れた発電効率が得られるカリーナサイクル発電の導入を決定し、シーメンス社が一括請負契約で受注した。シーメンス社の一括請負契約範囲は、騒音防止対策を施した事務所ならびに機械建屋の建設、ならびに操業開始から 10 年の発電所の保証を含む。契約額は US$18、890、000 であり、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。

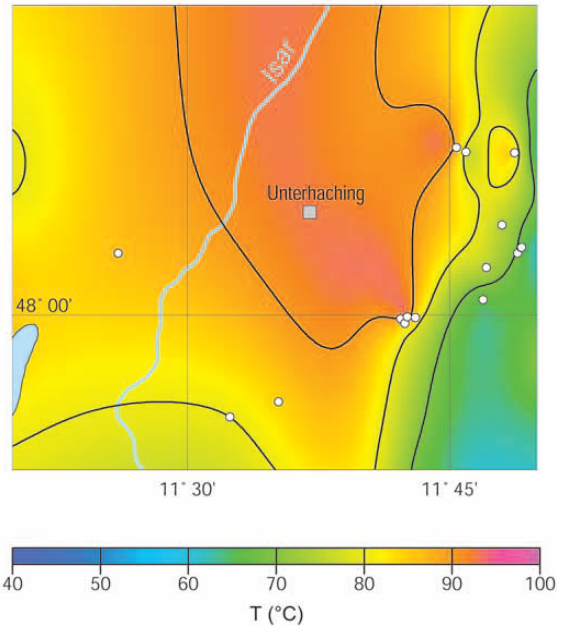



図 3.1.1-18　ウンテルハッキン地域周辺の地温分布（深度 2,500m、○:坑井位置）
（出典：Schulz,*et al.*, 2005）[6)]

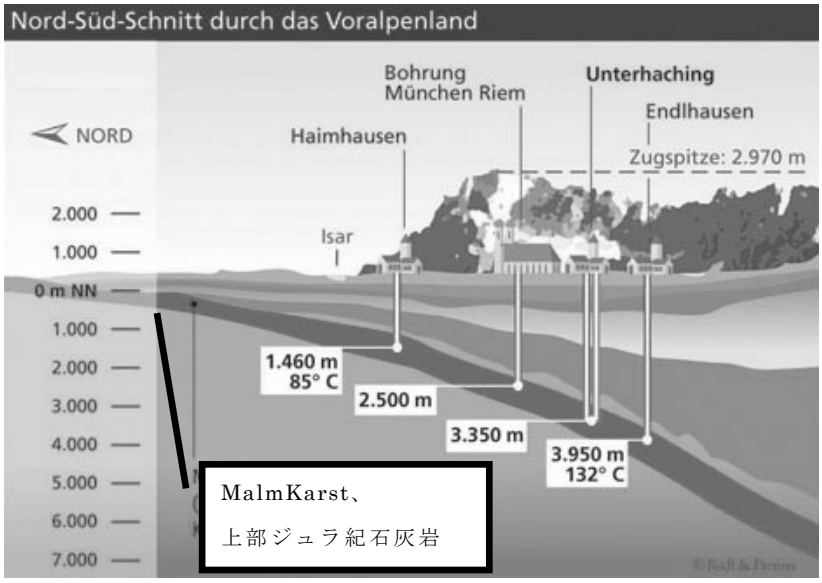



**図 3.1.1-19 ウンテルハッキン周辺の地質構造**

（出典：EGEC ホームページ）[5)]

2004 年夏に実施された地熱井掘削（図 3.1.1-20）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。

**図 3.1.1-20 ウンテルハッキンにおける掘削風景（左下）・生産試験風景（右下）・生産熱水（左上）・タービン発電機（右上）**

（出典：EGEC ホームページ）[5)]

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。

**表 3.1.1-2　非火山性地熱開発における海外先行例（ドイツ）**

| | |
|---|---|
| 地域名 | ウンテルハッキン（独）※ |
| 貯留岩 | モラッセ(マールや砂岩を含む第三紀層：造山サイクルにおいてフリッシュが堆積したあとに堆積する後造山期の砕屑物を主とする厚い堆積物であり、造山帯の最も外側を占める。一般に礫岩を始め厚い粗粒堆積物よりなる。) |
| 断層構造 | NE-SW 系(地域)<br>NE-SW 系(GtUha2)およびそれに直交する NW-SE 系(GtUha1) |
| ターゲット | 断層沿いに発達した高透水領域 |
| 坑井 | 生産井１本(GtUha1)<br>還元井１本(GtUha2) |
| | GtUha1:掘進長 3,446m(垂直深度 3,350m)、最大傾斜 33°、<br>掘削中の逸水は少量で、酸処理によって坑口圧力が 16bar から 0bar に低下した。 |
| | GTUha2:掘進長 3,864m(垂直深度 3,590m)、最大傾斜 40°、主要な断裂帯通過深度(掘進長 3,340m 付近、 3,540m 付近)<br>掘削中に逸水(掘進長 3,340m) |
| 地層最高温度 | GtUha2:134℃ |
| 流体温度 | GtUha1:123℃<br>GtUha2:134℃ |
| 生産時の透水性 | GtUha1:180～240t/h(試験時)kh=8～12Dm=8～12×10$^{-12}$m$^3$ |
| | GtUha2:198t/h(試験時)<br>kh=13～20Dm=13～20×10$^{-12}$m$^3$ |
| 流体生産方法 | ダウンホールポンプ(540t/h) |
| 発電方法 | カリーナサイクル |
| 利用方法 | 発電(発電端 4.3MWe/送電端 3.7MWe)<br>地域熱暖房(47MWth) |
| 立地条件 | 工業団地内(防音対策等が必要) |
| 事業性 | ドイツの再生エネルギー固定価格買取制度により 15Euro¢/kWh(2008 以前)→20Euro¢/kWh(2009～)での買取 |

（出典：Wolfgramm,M. *et al.*, 2007）[7)]

### 3.1.2　その他の発電システム

低温の地熱資源から電力エネルギーを取り出すには、効率の良いエネルギー変換システムが不可欠である。100℃前後の熱水から電力を取り出すシステムとしては、前節までに述べたようにバイナリ発電システムが実用化している。ここでは実用化には一歩及ばないが、今後、低温地熱発電に適用できる可能性のある事例を紹介する。

低温の熱源からエネルギーを取り出す仕組みとして、熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する方法や外燃機関により気体の熱膨張・熱収縮を運動エネルギーに変える方法が検討されている。前者は熱電変換素子を用いて発電するもので、後者はスターリングエンジンやロータリー熱エンジンと呼ばれるエンジンを用いて発電するものである。これらは、発電システムとして確立された技術ではないが、将来的な展望も含めて概説する。

1)　熱電変換素子

熱電変換素子とは、異なる2種類の金属または半導体の両端を結節し、結節点に温度差を与えると電位差が生じる性質（＝ゼーベック効果)を利用したもので、小さな温度差でも電気を発生されることができる（図 3.1.2-1)。ゼーベック効果とは逆の電位差によって温度差が生じるペルティエ効果を利用したものとしては、小型の冷蔵庫や CPU の冷却器などがすでに実用化しているが、いずれも規模の小さいものである。

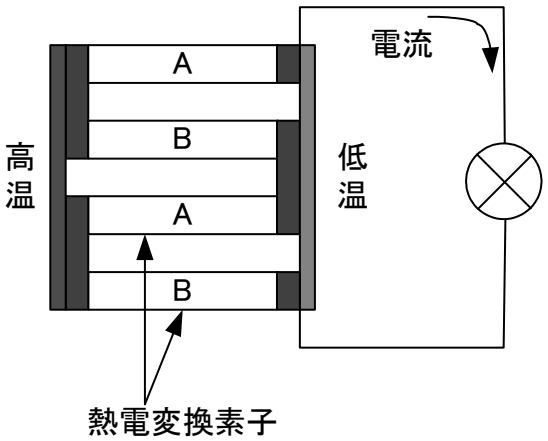



図 3.1.2-1　熱電変換素子による発電概念

新藤他（2008)[8] はゼーベック効果を利用した熱電変換モジュールを開発し、温泉熱による発電システムの実験を草津温泉にて行った（図 3.1.2-2)。

村岡（2010）[9]によると、新藤他（2008）[8] の装置では高温側 130℃、低温側30℃の100℃の温度差において3.6%のエネルギー変換効率が得られたとされている。また、新藤他（2008）[8] の実験結果（図 3.1.2-3）を見ると、およそ1万5千時間で累積発電量は約1、200kWh となっており、太陽光発電の約6倍の発電量となっている。しかしながら、1平方メートル当たりの発電出力は約 80W であり、バイナリー発電機による温泉発電なみの出力を得るには 625m² の面積が必要となり、実用化には単位面積あたりの発電効率の飛躍的な向上が望まれる。

図7. 温泉とわき水との温度差で発電する温泉発電システム ― 温泉熱を利用した熱電発電システムを開発し，群馬県草津町で稼働中である。運転時間は20,000時間，総発電量は1,000 kWhに達している。
Thermoelectric system for power generation utilizing heat source of hot spring

図 3.1.2-2　熱変換モジュールと温泉を利用した発電システム（出典：新藤他、2008）[8]

2)　スターリングエンジン

スターリングエンジンとは、ヘリウムや水素などの気体を外部から加熱することによる昇圧と冷却することによる降圧を繰り返してピストンを往復運動させる外燃機関である（図 3.1.2-4）。原理的には熱エネルギーを運動エネルギーに変換する効率は高いとされるが、気体の気密性の保持や装置が大型となるなどの理由により、実用的なエンジンとしては普及していない。

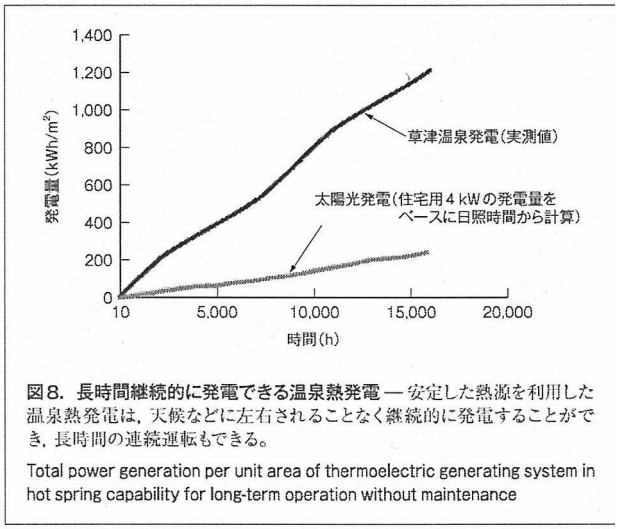
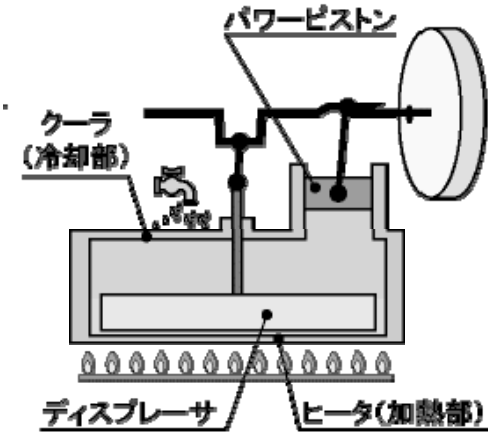



**図8. 長時間継続的に発電できる温泉熱発電** ― 安定した熱源を利用した温泉熱発電は，天候などに左右されることなく継続的に発電することができ，長時間の連続運転もできる。

Total power generation per unit area of thermoelectric generating system in hot spring capability for long-term operation without maintenance

**図 3.1.2-3　熱電変換システムによる累積発電量（出典：新藤他、2008）**[8)]

独立行政法人海上技術安全研究所（以下、NMRI と呼称）では、船舶エンジンの排熱利用の観点から低温度差で動作するスターリングエンジンの研究を行っている。図 3.1.2-5 は NMRI のホームページに掲載された低温側を 40℃とした場合の高温側温度と理論熱効率のグラフである。これによると、高温側の温度が 100℃前後では理論的には 15%程度のエネルギー熱効率が得られるが、実際にはいろいろなエネルギー損失のため、これよりも効率は低下すると考えられるが、エネルギー効率が半分に低下したとしても 7%程度の効率となり、有望な発電システムとなり得る。




**(b) 低温度差エンジン**

**図 3.1.2-4**
**低温度差スターリングエンジンの概念図**
**（出典：海洋技術安全研究所ホームページ）**

スターリングエンジンの実用化に向けた課題として NMRI は以下の 6 項目を挙げている。NMRI が挙げた課題について低温地熱発電への適用を想定した場合の評価と合わせて以下に整理する。

(1)冷却熱源の確保

冷却ラジエーターの大型化や冷却ポンプの動力増大が問題とされている。低温地熱発電に適用する場合、河川水が利用できる立地であれば問題は少ないと考えられる。

(2)エンジンの大型化

交換熱容量を大きくするため伝熱面積が大きくなり、装置が大型化する。低温地熱への適用を考えた場合、装置の大型化は装置のコストや用地の確保の観点から望ましくないが、船舶内や工場敷地内への立地と比較すると制約は少ない可能性がある。

(3)高性能熱交換器

熱源の種類に応じたヒーターとクーラーが必要。熱源が排気ガスの場合、腐食も問題となる。低温地熱発電の場合、熱源は低温熱水を前提としているためこれに適用可能なヒーターやクーラーを設計することとなる。

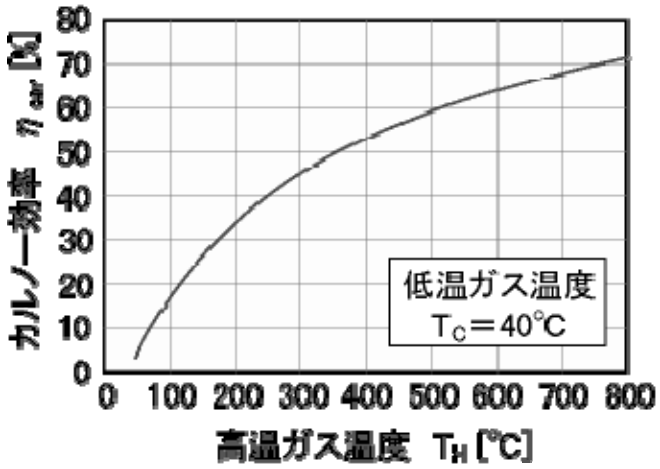



**図 3.1.2-5　スターリングエンジンのエネルギー効率**
（出典：NMRI ホームページ）

(4)作動ガスの種類と圧力レベル

作動ガスの種類や動作圧力レベルによって、エンジンの基本構造、シール性能、コストに影響する。低温地熱で適用する場合には、基本的にはヘリウム等の安全性の高いガスを使用し特殊な装置の不要な大気圧条件で製作することになると想定される。

(5)熱源の温度レベル

低温熱源の場合、エンジン出力よりも熱交換量を増大させる構造となり、エンジンの基本構造が異なってくるため、広い温度範囲には対応できない。低温地熱発電の場合、熱源の種類と温度は固定されるため、広い温度範囲に対応する必要はない

(6)気密性

大型･低回転のため発電機の気密性を確保して高出力を図ることが難しい。これは、低温地熱利用においても不利となる

3)ロータリー熱エンジン

ロータリー熱エンジンは、150℃以下の排熱の回収を目的として東京大学、関西電力、株式会社ダ・ビンチが共同開発したエンジンである。熱交換はバイナリー発電機にも利用されているランキンサイクルと同様であるが、作動媒体でロータリーエンジンを回転させている（図 3.1.2-6)。ロータリーエンジンを用いることにより、タービン式の発電機よりも機械損失は大きくなるが、少ない蒸気量で回転運動を得られるため、同じ蒸気量で比較するとタービン発電機よりも高回転が得られるという利点がある。

ロータリー熱エンジンを使用した発電システムとしては、2010 年 5 月時点で、80℃の温熱を利用し、1ｋW の出力が得られる試作モデルが製作されおり、10ｋW 級のモデルを開発中である（東，2010）[10]。図 3.1.2-7 に試作モデルのヒートマスバランスを示す。

試作モデルでは、80℃の温水を 0.43l/sec で供給し、冷却水として 17℃の水を 0.35l/min で供給することにより 1ｋＷの出力を得ている。また、温水は 62.5℃まで温度が低下し、一方、冷却水は 37.48℃まで上昇している。

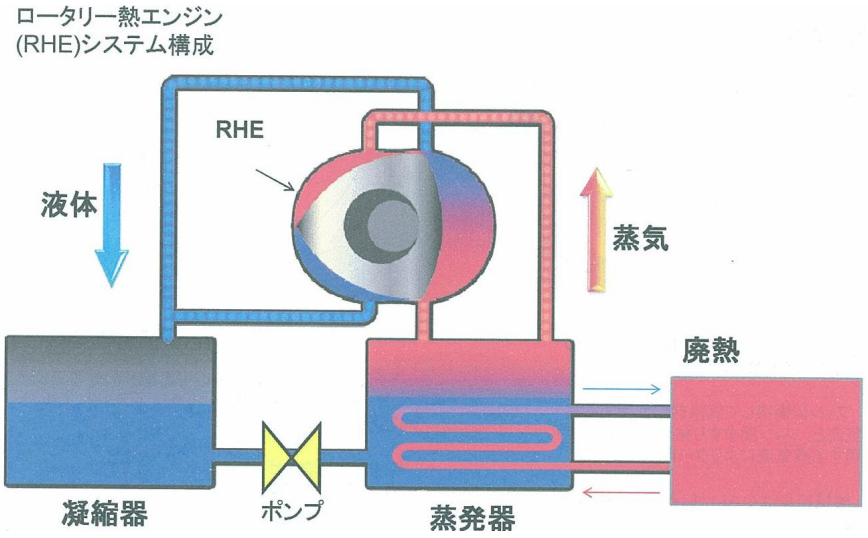



図 3.1.2-6　ロータリー熱エンジンの構成

（出典：東，2010）[10)]

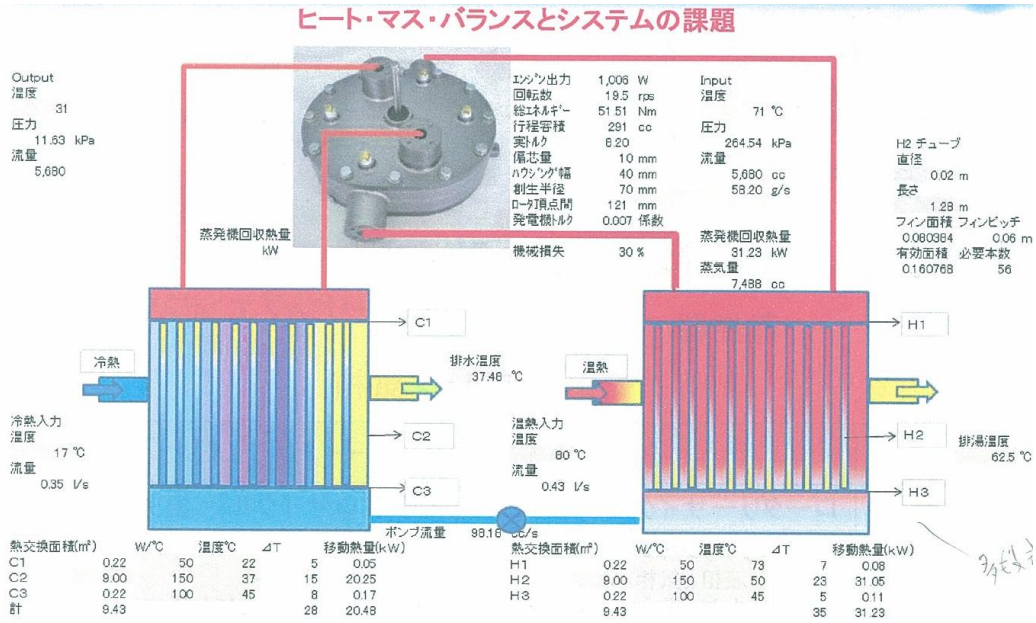



図 3.1.2-7　ロータリー熱エンジンのヒートマスバランス

（出典：東，2010）[10)]

東（2010）[10)]は利用済みの温排水をさらに利用して電気エネルギーに変換することを試みており、ロータリー熱エンジンの排熱を熱損失の少ないマグネチックヒートポンプで輸送し、熱電変換素子による発電で制御用の電力をまかなうことを将来構想として示している（図 3.1.2-8）。

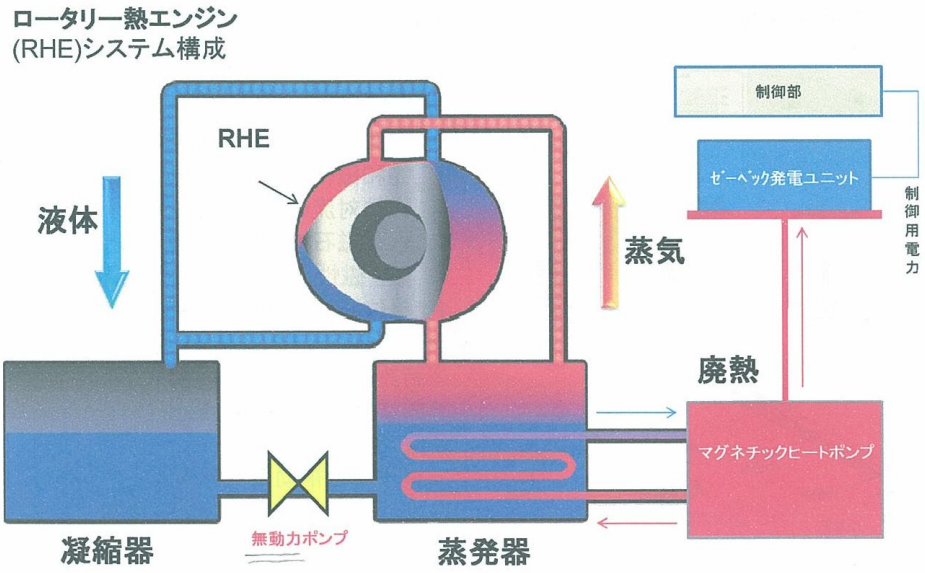



図 3.1.2-8　ロータリー熱エンジンと将来の拡張システム

（出典：東，2010）[10)]

### 3.1.3　既往技術のとりまとめ

1)　バイナリ発電の事例

前述の既往技術のうち操業を開始している発電設備（地熱以外も含む）について比較を行った。国外については比較的低温で操業している発電設備を、国内についてはバイナリ発電の実績のある発電設備についてとりまとめた。表 3.1.3-1 に各発電設備の特徴をまとめる。

バイナリ発電を行っている国内外の 4 ヶ所の発電設備についてまとめたが、うち 3 ヶ所は 120℃程度以下の低温地熱流体から発電を行っている。発電規模としては、5 ヶ所すべてで 2,000kW 以上の出力で操業しており、比較的規模が大きい。また、ウンテルハッキンとランダウではダウンホールポンプを使用して地熱流体をくみ上げているが、十分な温度が得られていることおよびドイツ国内での再生エネルギー固定価格買取制度の後押しもあり、採算がとれていると考えられる。

表 3.1.3-1　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<br>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<br>熱水540t/hのうち、90t/hは地域暖房、450t/hを発電利用 |

2)　発電システムの比較

前述の既往技術のうち実用化レベルにあるバイナリー発電システムについて比較を行った。表 3.1.3-2 に各システムの特徴をまとめる。

作動媒体については、各社で異なる媒体を使用しており、可燃性、毒性、地球温暖化係数についてみるとそれぞれ一長一短があることが分かる。どのシステムも漏洩を完全に防止すること、ならびに１年程度での定期点検が求められることから維持管理コストも同等程度であることが予想される。（可燃性ガスやアンモニアと異なり、代替フロン系媒体には、１年毎の定期点検の義務付けは現在無いものの、冷凍機等での漏洩の実態が予想量を上回っているため、その対策として１年毎の自主点検の方向でガイドラインが作成されつつある。）

一定流量(kW)当たりの必要流量をみると、カリーナサイクルでは 0.32(ton/hr)/kW と他のシステムと比較して低い値を示しており、一定熱量の熱水から得られる発電量が他の方式に比べると高いことが分かる。事業性には発電機の費用が関わってくるため、このデータからそのまま各方式の経済性を判断することは難しいが、低温地熱資源では一般的に坑内ポンプを坑井の中に降下して熱水を汲み上げる必要が生じることから、大量の熱水を必要とするシステムでは坑内ポンプの消費電力がそれに比例して増大し、所内電力が増えてしまうので事業性が悪化することは否めない。

## 表 3.1.4-2　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<br>既製ユニット | KCS-34g，KCS-11<br>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<br>(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<br>（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<br>（t/h） | | 0.75*<br>(98℃) | 0.54*<br>(98℃) | 1.2<br>(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<br>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

## 3.2 低温発電システムの評価と課題

### 3.2.1 適用可能温度

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 3.2.1-1 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。

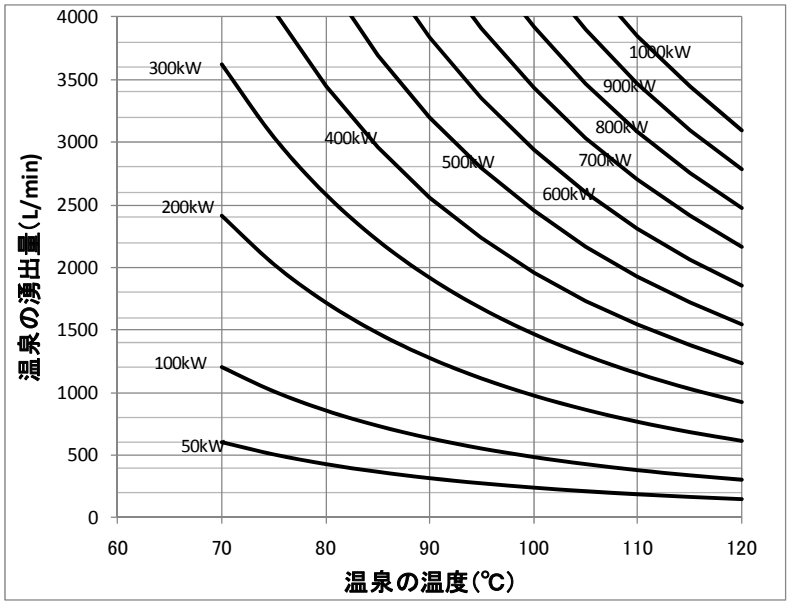



図 3.2.1-1 カリーナサイクル（温泉発電）における温度と湧出量の関係

### 3.2.2 付帯設備

1) 坑内ポンプ（高温用 ESP）

(1) 海外における実績

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。

現在の米国における地熱用 ESP の稼働実績を第 3.1.2-1 表に示した。この資料によると 2008 年時点で 122 基の地熱用 ESP が米国で稼働中である。また､地熱開発（EGS を含む）によって、2025 年の米国の地熱用 ESP 市場は、4、902 基に増加するとの予測である。

表 3.2.2-1 米国における地熱用 ESP 市場の将来予測

| Areas | # of Pumps needed initially | # of Pumps to 2025 | # of Pumps to 2050 |
|---|---|---|---|
| U.S. Hydrothermal existing | 122[1] (known) | 244 | 457[7] |
| U.S. Hydrothermal under development | 991[5] | 1,982[6] | 6,498[10] |
| U.S. Hydrothermal Potential (WGA) near term | 1,278 | 2,556 | 5,751[10] |
| U.S. Hydrothermal Potential (WGA) long-term | 2,216 | -0- | 8,862[11] |
| U.S. EGS short-term[8] | 10 | 20[6] | 25[7] |
| U.S. EGS Long-term[12] | 6,000 | 100[13] | 21,000[12] |
| **Total (pumps)** | | **4,902** | **42,593** |

（出典：Molloy,L., 2008）

海外の耐熱 200℃以上の極高温(Extreme High Temperature)用 ESP は、Baker Hughes Centrilift(BHC)、 Schlumberger REDA(SR)、 Woods Group(WG)の 3 社でほとんどを占めている。また、耐熱 180℃までの温度範囲であれば、より低価格の中国製 ESP（例えば、 Rodless Pump 社など）が 普及しはじめている。

また、耐久性だが、地熱における BHC 社の実績では、米国ネバダ州において大動力用 ESP で、157℃で 1,000 日の連続運転実績がある。また、国内では箱根温泉で 170℃環境、 揚湯量 200L/min で 10 年間連続運転の実績がある。

BHC 社ではオイルサンドの SAGD（蒸気注入による強制回収法）井や地熱の EGS（Enhanced Geothermal System）を目的とした 250℃耐熱のシステムの開発を完了し、2010 年 4 月 15 日に最初の 250℃システム 9 基がカナダオイルサンドの SAGD フィールドに導入されて稼働中である。現在では、200℃以上での稼動実績は 16 基に増えている。この開発に伴い、現状の 200℃の ESP システムの信頼性も年々向上している。また、現在、BHC 社、 SR 社、WG 社では、現在、米国エネルギー省の地熱開発研究予算を活用して、さらに高温の 300℃を目指した ESP システムの開発に着手している。

表 3.2.2-2　ESP システムの現状のまとめ

| | |
|---|---|
| 実績等 | 2008 年時点で 122 基の地熱用 ESP が米国で稼働中である。また、地熱開発（EGS を含む）によって、2025 年の米国の地熱用 ESP 市場は、4、902 基に増加するとの予測である。 |
| メーカー | Baker Hughes Centrilift(BHC)、Schlumberger REDA(SR)、Woods Group(WG)が主流メーカー。180℃以下では、中国製の Rodless Pump などが低コストで普及し始めている。 |
| 耐熱性 | 200℃以下が主流。250℃の ESP（BHC 製）が 2010 年 4 月 15 日に最初の 250℃システム 9 基がカナダオイルサンドの SAGD フィールドに導入され、現在 16 基が稼働中である。 |
| 耐久性 | 地熱における BHC 社の実績では、米国ネバダ州において大動力用 ESP で、157℃で 1,000 日の連続運転実績がある。また、国内では箱根の温泉で 170℃環境、揚湯量 200L/min で 10 年間連続運転の実績がある。 |
| 研究開発 | BHC 社、SR 社、WG 社では、現在、米国エネルギー省の地熱開発研究予算を活用して、さらに高温の 300℃を目指した EPS システムの開発に着手している。 |
| 低温地熱での利用 | 技術的な問題はないと考えられる。低温では、耐用年数もさらに長くなると考えられる。 |

(2)　ESP の連続運転実績と故障原因

海外における高温・高馬力の ESP ポンプの連続運転実績は、現在では 1,000 日以上に達している。従って、200℃で 2 年以上(730 日)の稼働は可能と考えられる。さらに、低温地熱資源では、より長い期間の稼働が可能になると考えられる。

ESP の故障原因は、表 3.2.2-3 のとおりである。モーター・ポンプ・ケーブルで故障の原因の 8 割以上を占める。故障時には、これらのセクションあるいは坑内部分全体を交換することになる。

第 3.2.2-3 表　ESP の故障原因

| ESP の部品 | 発生した故障の比率（%） |
|---|---|
| モーター | 32 |
| ポンプ | 30 |
| ケーブル | 21 |
| シール・プロテクター | 10 |
| 吸込口 | 4 |
| センサー | 1 |
| ガスセパレーター | 1 |
| その他の部品 | 1 |
| その他の原因 | 1 |

（出典：Molloy,L., 2008）[11)]

### 3.2.3　低温地熱資源の可採量と発電規模の検討

1)　坑井の透水性とポンプの揚水能力と発電量の検討

(1)　計算式

・ケース 1（ポンプ揚程 100m、 熱水温度 120℃、kh=$10^{-11}$m$^3$ を仮定）
・ケース 2（ポンプ揚程 100m、 熱水温度 100℃、kh=$10^{-11}$m$^3$ を仮定）

表 3.2.3-1 ポンプ能力の計算例（上：ケース 1、下：ケース 2）

| $Q(L/min)=\frac{2\pi\rho gkh\Delta P}{2.3\mu\{\log(re/rw)+s\}}=$ | 計算結果(t/h) | T(℃) | ΔP(m) | log10(re/rw) | ρ(kg/m3) | g(m/s2) | kh(m3) | μ(Pa・s) | s(スキン) | ρgkh/μ(m2/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 107.5 | 120 | 100 | 3.48 | 9.43E+02 | 9.8 | 1.00E-11 | 2.29E-04 | 0 | 4.04E-04 |
| $Q(L/min)=\frac{2\pi\rho gkh\Delta P}{2.3\mu\{\log(re/rw)+s\}}=$ | 計算結果(t/h) | T(℃) | ΔP(m) | log10(re/rw) | ρ(kg/m3) | g(m/s2) | kh(m3) | μ(Pa・s) | s(スキン) | ρgkh/μ(m2/s) |
| | 91.4 | 100 | 100 | 3.48 | 9.58E+02 | 9.8 | 1.00E-11 | 2.78E-04 | 0 | 3.38E-04 |

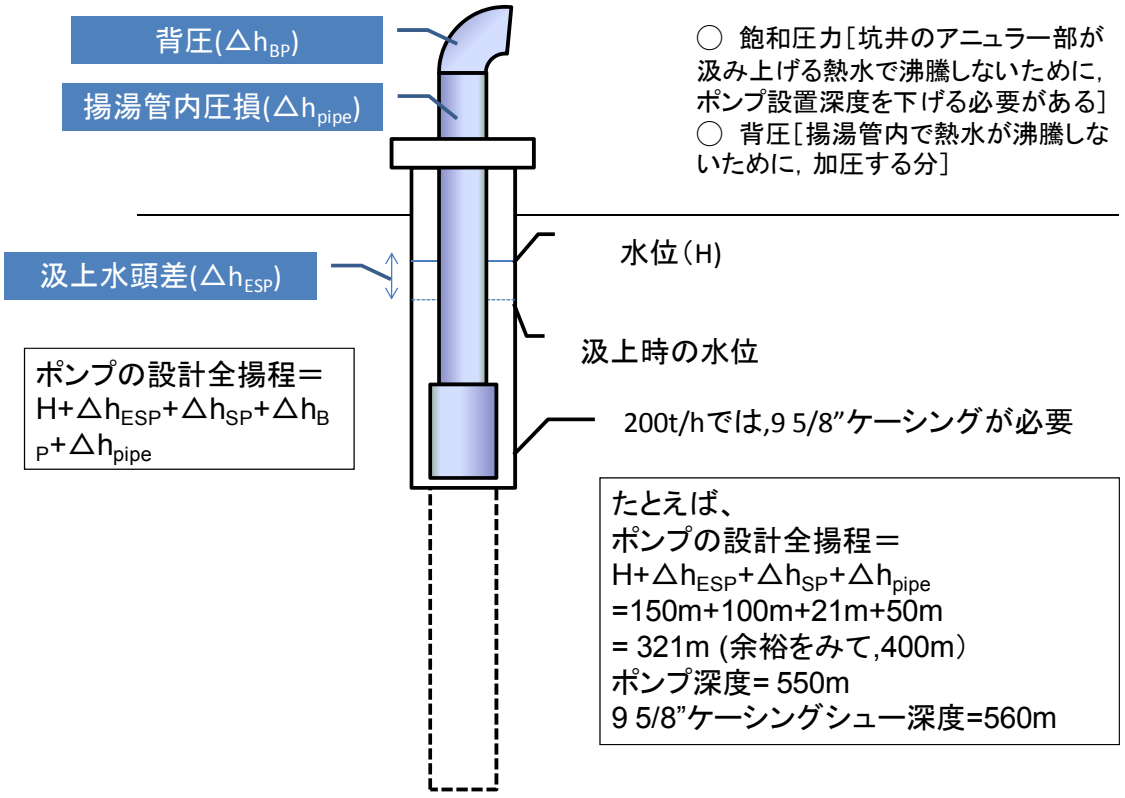



図 3.2.3-1 ESP の能力設計について

(2) 計算結果

上記の計算条件で、kh=1×$10^{-13}$～2×$10^{-11}$m$^3$ の範囲で、揚水できる流量およびその流量から試算した発電量を第 3.2.3-2 図に示した。

この結果から、1,000kW の発電を行うには、揚程（汲上水頭差）100m のポンプで 120℃の熱水を 200t/h 程度揚水する必要がある。この時の地層の透水性（浸透率－層厚積）は、2×$10^{-11}$[m$^3$]程度が必要になる。

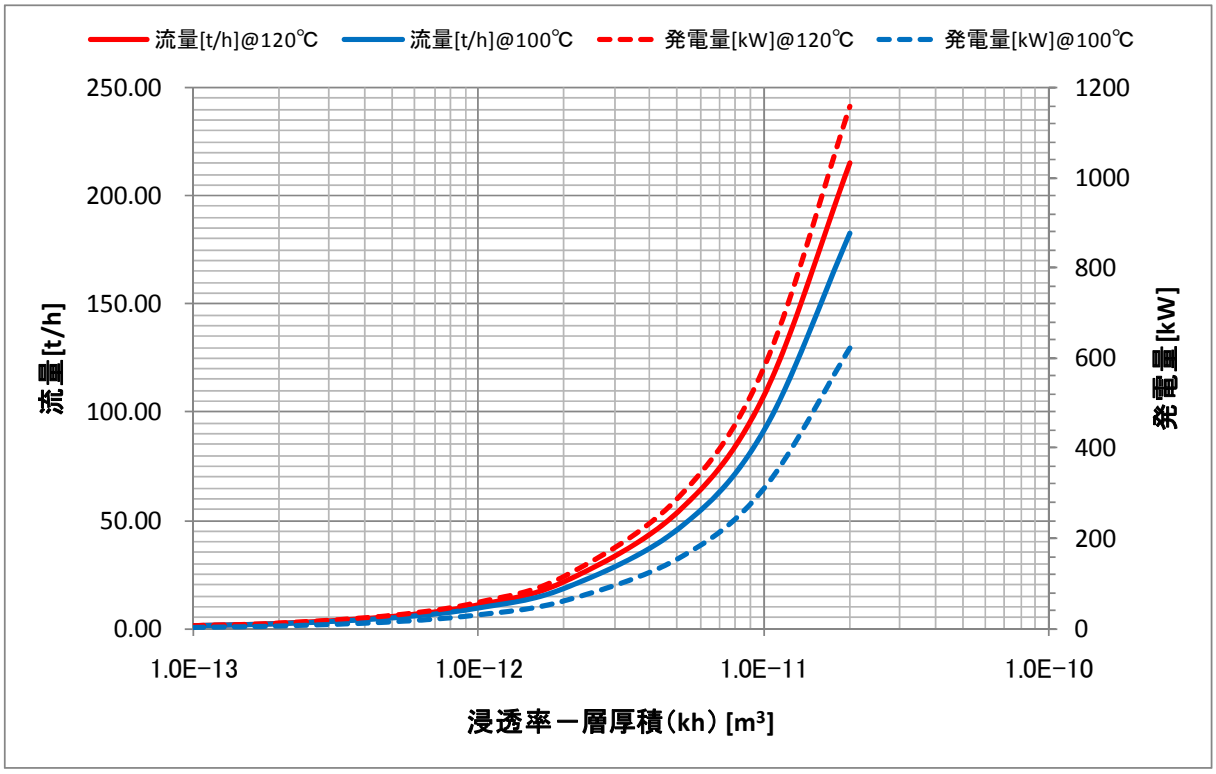



図 3.2.3-2　浸透率ー層厚積（kh）と揚水量・発電量（送電端）の関係
（温度 100、 120℃、揚程（汲上水頭差）＝100m を仮定）
※発電量は、カリーナサイクルをベースに計算した。

(3)　実際のポンプ揚程についての検討結果

実際のポンプ性能を決定する上で必要なポンプ揚程は、以下のパラメータが必要になる。ここでは、括弧内の数値を仮定した。

①水位（150m）
②汲上水頭差（100m）
③背圧[揚湯管内で熱水が沸騰しないために、加圧する分](120℃で、0.198MPa=21m)
④揚湯管内圧力損失（50m）
合計　321 m

ポンプの設計全揚程は、将来の水位低下等の余裕をみて 400m 程度は必要となる。ポンプ自体は、全揚程より深く設置する必要があるため、ポンプ設置深度は、550m 程度となる。200t/h の汲上を確保するポンプの場合、ケーシング口径は 9-5/8”が必要となるため、ケーシングプログラムでは、9-5/8”ケーシングシュー深度は、560m 程度が必要になる。ただし、水位はここでは 150m に設定したが、水位が深くなると、より深い深度に設置して、かつポンプ設計揚程も大きくする必要があり、その分、ポンプ動力も大きくなる。ちなみに、ポンプ揚程 400m のポンプの場合、300～350kW 程度の消費電力が必要になってくるため、例えば、120℃の熱水で 1,000kW の発電を行った場合でも、実際の送電端電力は、7 割程度になってしまう。また、第 3.2.3-2 図において 100℃の熱水で 180t/h を汲み上げた場合($kh=2.0\times10^{-11}[m^3]$)では、その発電量は 620kW であり、実際の送電端電力は、約半分の 300kW まで減ってしまうため、

熱水温度 100℃で事業を行う場合は、水位ができるだけ高いこと、ならびに透水性が $kh=2.0\times10^{-11}[m^3]$よりもさらに高透水性の地層をターゲットにする必要があると考えられる。

## 参考文献


1)地熱学会ホームページ：http://wwwsoc.nii.ac.jp/grsj/whatbook/chapter5.html

2) R.Schellschmid、B.Sanner、S.Pester、R.Schultz(2010)：Geothermal Energy Use in Germany、Proc.、World Geothermal Congress 2010 Bari、Indonesia、25-29 April 2010

3)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

4)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

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

6)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

7)Wolfgramm、M.、 Bartels、J.、 Hoffmann、F.、 Kittl、G.、 Lenz、G.、 Seibt、P.、 Schulz、R.、
Thomas、R.、Unger、H.J.(2007)：Unterhaching geothermal well doublet: structural and hydrodynamic reservoir characteristics; Bavaria (Gerany)、Proc. European Geothermal Congress 2007、 Unterhaching、 Germany、 30 May-1 June 2007

8)新藤尊彦・中谷裕二郎・大石高志(2008)：未利用エネルギーを有効御に活用する熱電発電システム、東芝レビュー、v.63、№2

9)村岡洋文(2010)：低温熱水発電の動向、期待される市場および今後の課題、100 度以下の低温熱発電技術の高効率化、セミナー資料、サイエンス＆テクノロジー㈱

10)東　謙治(2010)：外燃式ロータリーエンジンを採用したランキンサイクルと排熱回収の高効率化、セミナー資料、サイエンス＆テクノロジー㈱

11)Molloy、L.(2008)：Designing a global geothermal Challenge、 The Lemelson Meeting、The Foundation for Geothermal Innovation

# 第４章　地域開発に資する地熱利用の検討

## 4.1　地熱利用事例

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。既往の温泉や工場排熱が利用できれば初期投資は少なくて済むが、新たに熱源を開発するとなると、発電だけで初期投資を回収することが難しくならざるを得ない。一方、低温地熱を発電に利用しても、数十度の温湯が排出される。発電に利用した温排水の熱を２次利用することにより、低温地熱発電に付加価値を付けることができるものと思われる。

ここでは、地熱を直接利用した事例を調査し、発電事業と組み合わせることで、地域開発の可能性について検討を行った。

### 4.1.1　一般的な地熱利用の形態

発電以外での地熱の直接利用は図 4.1-1 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 4.1-1 に示すような利用が想定される。

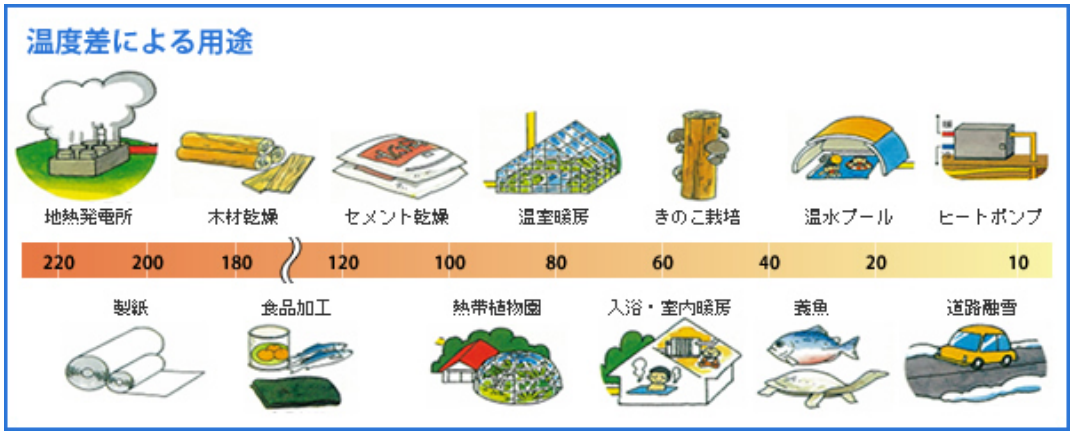



**図 4.1-1　地熱の用途**

（出展：地熱開発企業協議会ホームページ）[1)]

表 4.1-1　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 |

### 4.1.2　地域での利用事例

1)大分県での事例

大分県農林水産研究センター花き研究所（以下花き研究所と呼称）は、敷地内の孔井から得られた蒸気を、温室の暖房だけでなく土壌の消毒等に利用している。花き研究所は、豊富な湯量と高温度を兼ね備えた別府温泉の温泉熱を農業研究に役立てることを目的に、昭和 27 年に設立された、大分県温泉熱利用農業研究所を母体として、昭和 41 年には野菜等の研究部門を他所に移し、花き専門の研究機関となった大分県農林水産研究センター傘下の研究所である。図 4.1.1-1 に花き研究所の住所及び位置を示す。なお現地では、企画指導担当の菊池主管研究員から説明・案内を受けた。

**図 4.1.1-1　花き研究所の住所及び位置**

図 4.1.1-2 に花き研究所の敷地内平面図を示す。花き研究所では、温室及び本館の暖房と土壌等の消毒用に泉源から配管で導いた蒸気を利用している。泉源の深度は 350m、発生蒸気量は 2.5t/h で 120℃、熱水量は 11.0t/h で 100℃であり、花き研究所では蒸気のみを使用しており、熱水は全量温泉組合に無償で配湯されている。

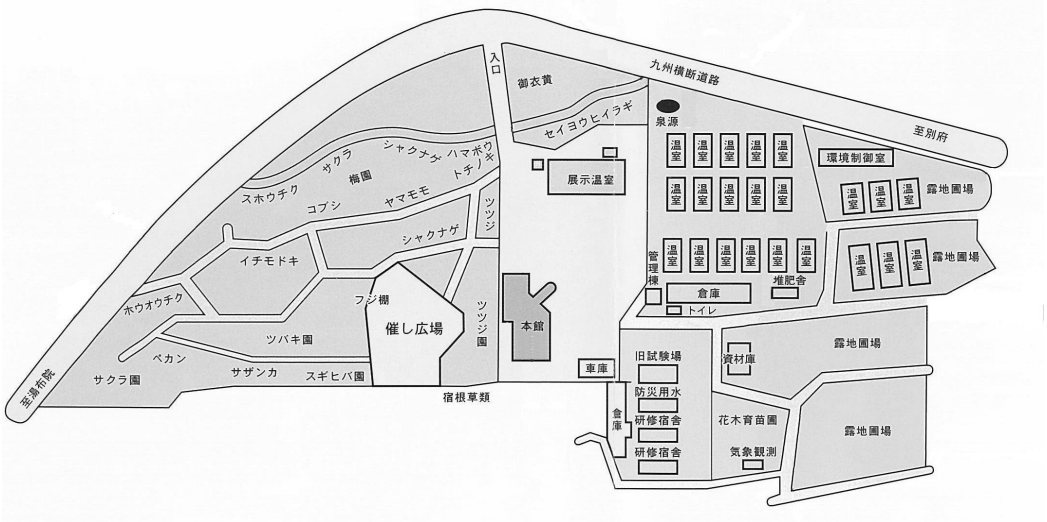



**図 4.1.1-2　花き研究所の敷地内平面図**

（出典：花き研究所パンフレット）

図 4.1.1-3 に源泉を、図 4.1.1-4 に土壌消毒状況を、図 4.1.1-5 に温室内の暖房設備を示

す。

**図 4.1.1-3　源泉**

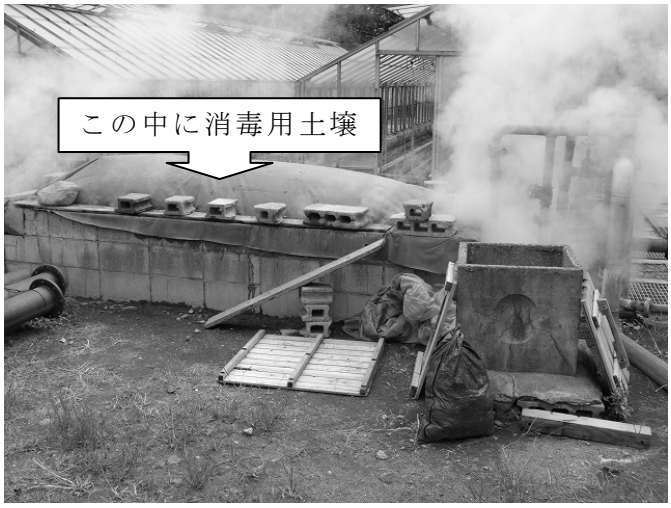



**図 4.1.1-4　土壌消毒状況**

**図 4.1.1-5　温室内の暖房設備**

配管系の操作のためのバルブ類には、図 4.1.1-6 に示すような樹脂製のものが用いられ

ており、火傷等の人身事故に対する配慮がなされていた。

**図 4.1.1-6　樹脂製のバルブ**

消毒は栽培用土壌のみならず､栽培に用いるプランターやポット等も対象としている(写真－９参照)。花き研究所では、この土壌等の消毒を、スケジュールに空きがある限り、希望する農家の利用を受け入れているとのことであった。高温蒸気を用いた消毒は、消毒が確実であり、農薬を使用しない点で環境面においても優れた地下熱利用の形態と考えられる。地熱開発に付随可能な利用方法として注目される。ただし、地熱、温泉利用に一般的に発生する配管の腐食が発生しており、メンテナンスコストが生じているとのことであった（写真－10 参照)。

**図 4.1.1-7　消毒対象となるプランター等**

**図 4.1.1-8　腐食した配管の例**

2)北海道での事例

北海道茅部郡森町濁川地域では、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。当地区では、地熱発電所が建設される以前の 1970 年代から過疎化や米の生産調整に対応するため、濁川温泉の温泉水を利用したハウス栽培を導入しており、温泉熱によるトマト栽培では先駆的な地域であった。森地熱発電所が運転を開始してからは、発電に利用した還元熱水によって水道水を約 90℃まで加熱し、これを熱源として利用している。現在では、独自の泉源と地熱発電所からの温水の双方が利用されている（図 4.1-9）。

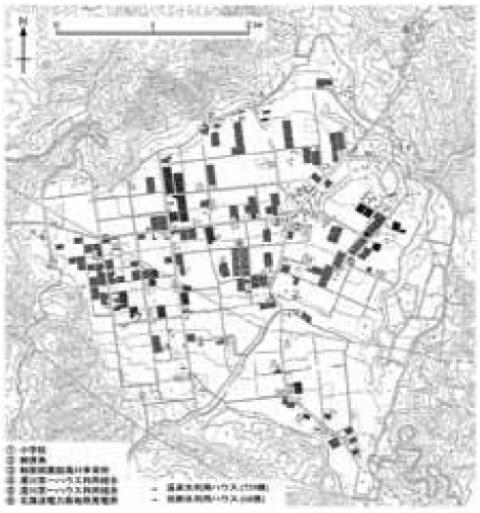



**図 4.1-9　濁川地域の地熱利用ハウスの分布**

（出展：梅田,2006）[2)]

梅田（2006）[2)]は、濁川地域の事例を地熱利用型の園芸施設としては成功モデルと位置づけつつ、以下の 3 点において今後の持続性について課題を挙げている。

①地熱資源の枯渇

現在使用している泉源数が 200 を超え、過剰な汲み上げや揚湯量の不安定化が生じていること、および電力の自由化が進む中で地熱発電所の稼働率が 50%台となっており、先行きが不透明である。

②連作障害

ハウスの立地が泉源の位置によって規定され容易に移動することができないため、連作障害による収量と品質の低下が生じている。

③産地間競争の激化

高収益性に惹かれて新規参入する産地が相次いでおり、対抗するための増産が見込めない。

上記の①と②は地熱を利用した温室栽培の課題として、今後の課題とするべき事項である。

なお、北海道渡島中部地区農業改良普及センターの2003 年度の情報誌「ほりでい」No.100（2003 年 10 月）[3]によれば、濁川地区で地熱発電所の冷却水を利用した土壌の熱水消毒を全国で初めて取り組んだ、との記事が掲載されている。地熱を利用した土壌消毒の方法が確立すれば、上記②に挙げた連作障害の影響を低減できるものと考えられる。

**図 4.1-10　熱水による土壌の消毒**
（出展：渡島中部地区農業改良普及センターだより）[3]

## 4.2　地熱利用の可能性検討

前掲図 4.1-1 および表 4.1-1 に示したような温水の利用は、地熱分野よりもゴミ焼却施設や工場の排熱の二次利用として実用化されている場合が多く、地熱の直接的な利用方法として導入するにあたっての技術的課題は少ないと思われる。

地域の振興を考慮した場合、技術的な課題よりも地域の特性に合った利用形態をいかに構築できるかが問題となる。比較的成功した事例として挙げた北海道の濁川地域は、高度経済成長期における過疎化や米の生産調整といった現実に向かい合う中で温泉熱の利用を模索したものであり、背景には温泉観光地としての資産に乏しかったことが挙げられる(梅田，2006)。一方、大分県の事例は、温泉観光地としての事業が成立しており、豊富な地熱資源のごくわずかな量を再利用しているに過ぎない。しかしながら、蒸気を土壌の消毒に用いることは、地熱地域でなくては出来ない事であり、地熱の特異な利用事例として評価できる。蒸気を利用した土壌消毒と薬品を用いた消毒との経済性を比較した資料は無いが、環境への影響といった観点からは、蒸気利用のほうが優れていると考えられる。

事例調査の結果と電力の利用も含めて、地熱利用の可能性を図 4.2-1 にまとめて示す。まず、第一に考えられるのは、温室による農産品の栽培である。栽培する品種は地域の特性、市場動向、運用コスト等を勘案して決めることとなる。隔離された条件の基で、気候的な制約から国内では栽培できない外国品種を導入し、地域の特産とすることも可能である。次に、少子高齢化社会を迎え介護施設の需要が増加する中で、温浴や給湯に地熱を利用できれば、需要と供給を補完できる可能性がある。また、漁業資源の枯渇や海外漁場での漁獲割り当てが減少する中で、養殖漁業の重要性は増していくものと思われる。従来、養殖漁業は海や河川の近くに限られていたが、近年では山間部で温泉水を利用した養殖が実用化されつつある。養殖漁業は地熱利用の有効な利用方法となると思われる。

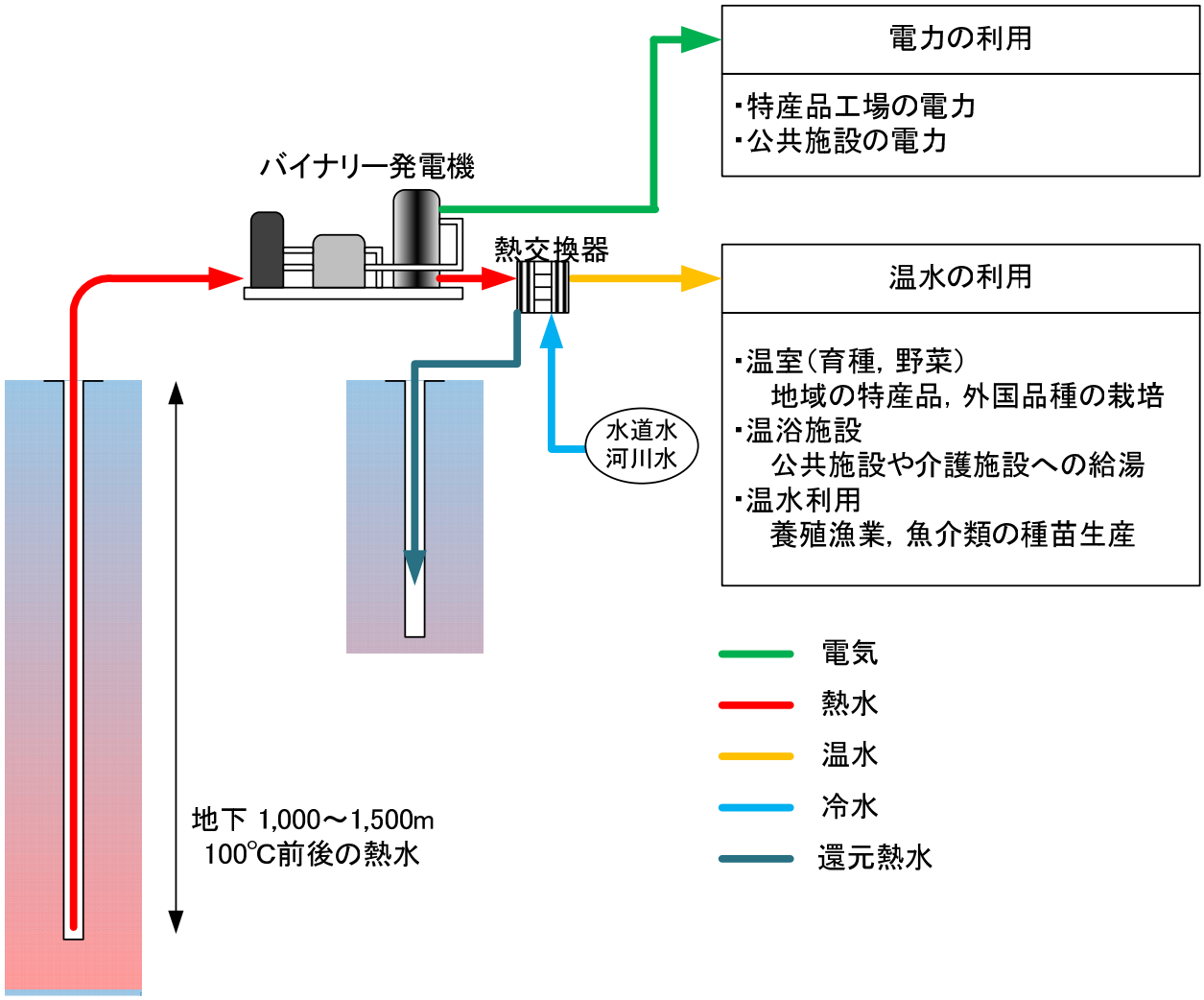



図 4.2-1　低温地熱を利用した地域開発の概念

**参考文献**

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

2)梅田克樹（2006）：地熱利用型ハウス野菜産地の成立とその持続可能性－森町濁川地区を事例として－、開発こうほう、No.516、p7-11

3)北海道渡島中部地区農業改良普及センター（2003）：渡島中部地区農業改良普及センターだより「ほりでい」、No.100

# 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

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 $3.16\times10^{17}$ 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、$5.12\times10^{17}$ ジュールの資源量が見込まれた。

### 5.1.2　低温地熱発電システムの検討

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。ところが、これらの発電に利用されている熱水は通常の蒸気フラッシュタイプの地熱発電に比べて温度が低いとは言え、100 数十度と比較的高温である。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、ドイツのランダウでは断層帯から、ウンテルハッキンでは石灰岩および断層帯からそれぞれ熱水を汲み上げている。これらの地質は一般的に透水性が大きいといった特徴を持っている。日本はドイツのような安定大陸ではなく変動帯に位置しているため、ドイツと比べると石灰岩の分布

は少ないものの断層の密度は多いと考えられる。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。

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る。

### 5.1.3 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は小規模とならざるを得ず、発電のみでは経済的に成立しない可能性が高く、発電に利用した温水を再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。

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。

## 5.2 資源量の試算

仙台南西部と隠岐島後においてそれぞれ算出された $3.16\times10^{17}$ (J)ジュールおよび $5.12\times10^{17}$ (J)といった資源量は、一般的に馴染みの薄い数値であるため、理解しやすい数値として発電量への換算を試みた。現段階では各地域の浸透率や可能揚湯量等が不明なため、以下の試算はあくまでもひとつの目安としての位置づけである。

試算の前提として、発電は 3 章の検討結果を受けて、カリーナサイクルによるバイナリー発電を用いるものとした。試算に使用したパラメータを表 5.2-1 にまとめて示し、以下に概要を記す。2 章で算出した資源量は熱の直接利用も想定して基準温度を 15℃としているが、ここでは発電のみに利用するとの前提で基準温度を 53℃とした。これは、発電にカリーナサイクル発電を利用した場合の出口温度である。基準温度を 53℃とすることにより、資源量はそれぞれ $1.31\times10^{17}$(J)と $2.83\times10^{17}$(J)となる。回収率は資源量のうち回収可能なエネルギー量の割合であるが、現時点でこれを規定できる情報が無いため Brook *et al.*(1979) の 0.25 を採用した。発電機への入力温度を仙台南西部で 80℃、隠岐島後で 100℃と仮定した。発電機からの出口温度は、前掲図 2.1-11 から 53℃とし、発電効率は同図から読み取り、仙台南西部で 0.08、隠岐島後で 0.14 とした。

表 5.2-1　換算発電量試算の条件

| | | 仙台南西部 | 隠岐島後 |
|---|---|---|---|
| 資源量（基準温度 15℃；J) | | $3.16\times10^{17}$ | $5.12\times10^{17}$ |
| 資源量（基準温度 53℃；J) | | $1.31\times10^{17}$ | $2.83\times10^{17}$ |
| 回　　収　　率 | | 0.25 | |
| 貯留層の中間深度　(m) | | 1,150 | |
| 発電条件 | 発電方法 | バイナリー発電（カリーナサイクル） | |
| | 入口温度（℃） | 80 | 100 |
| | 出口温度（℃） | 53 | 53 |
| | 発電効率 | 0.08 | 0.14 |

試算は村岡(1991)に示された手順にしたがい、まず、資源量に回収率を乗じて回収エネルギーを算出し、次に地熱貯留層深度に相当するエネルギー損失を計算した。さらに、熱エネルギーを機械的仕事量に換算し、これに発電効率を乗じて電気エネルギーに変換した。最終的にはこの電気エネルギーを 30 年間にわたって利用すると仮定した場合の発電量を試算した。

試算結果を表 5.2-2 に示す。試算の結果、隠岐島後の換算発電量は仙台南西部の約 4 倍と見積もられた。

なお、参考までに 1 世帯当りの消費電力を 4kW と仮定した場合、これらの発電量は仙台南西部では約 860 世帯分、隠岐島後では約 3,300 世帯分に相当する。

表 5.2-2　換算発電量

| | 仙台南西部 | 隠岐島後 |
|---|---|---|
| 電気エネルギー(kWh) | $9.06\times10^{8}$ | $3.53\times10^{9}$ |
| 発電量(kW)* | 3,448 | 13,432 |

*)エネルギーを 30 年間にわたって利用した場合

## 5.3　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地熱賦存量の算出を行なったが、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、地熱資源の概観と発電システムの調査を行ったが、今後は、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する必要がある。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、今年度の調査で抽出した 2 地域のうちどちらかの地域をモデルケースとして選定し、事業を行った場合の成立性の机上検討を行う必要がある。

検討に際しては、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。

・対象地熱貯留層の性状（貯留機構、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）
・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（条件設定、変動幅、電力単価、維持管理コスト）

書　名　平成 22 年度 地域開発に資する低温地熱発電の可能性調査
報告書
発　行　平成 23 年 3 月 31 日
財団法人　エンジニアリング振興協会
地下開発利用研究センター
（ＧＥＣ：Ｇeo-space Ｅngineering Ｃenter）
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目４番６号
TEL　03 (3502) 3671　FAX 03 (3502) 3265
印　刷　ホクエツ印刷株式会社
禁無断転・掲載