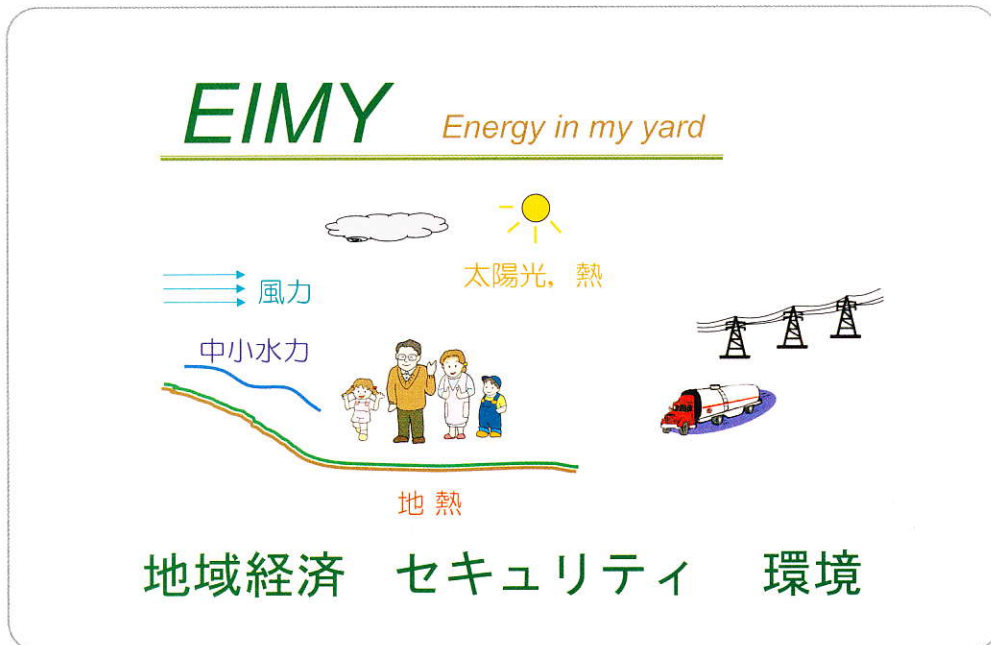


企画調査研究

地球環境適応型地熱開発戦略

報告書

2002年 5月



<http://www.earth.tohoku.ac.jp/geoth21/>

企画調査研究「地球環境適応型地熱開発戦略」研究組織

- 新妻 弘明 (研究代表) 東北大学・大学院工学研究科・地球工学専攻・教授
- 浅沼 宏 東北大学・大学院工学研究科・地球工学専攻・助教授
- 飯倉 穰 東京都市開発株式会社・常務取締役
- 系井 龍一 九州大学・大学院工学研究院・地球資源システム工学部門・助教授
- 江原 幸雄 九州大学・大学院工学研究院・地球資源システム工学部門・教授
- 海江田秀志 電力中央研究所・我孫子研究所・地圏環境部・上席研究員
- 木村 繁男 金沢大学・自然計測応用研究センター・エコテクノロジー部門・教授
- 笹田 政克 産業総合技術研究所・深部地質環境研究センター・副センター長
- 正路 徹也 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・環境学専攻・教授
- 高島 勲 秋田大学・工学資源学部・素材資源システム研究施設・教授
- 土屋 範芳 東北大学・大学院工学研究科・地球工学専攻・助教授
- 手塚 和彦 石油資源開発・技術研究所・主任研究員
- 当舎 利行 新エネルギー・産業技術総合開発機構・地熱開発室 主任研究員
(現在、産業総合技術研究所・地圏資源研究部門・主任研究員)
- 中田 俊彦 東北大学・大学院工学研究科・技術社会システム専攻・助教授
- 新堀 雄一 東北大学・大学院工学研究科・量子エネルギー工学専攻・助教授
- 橋本 一郎 新エネルギー・産業技術総合開発機構・地熱開発室長
- 松永 烈 産業総合技術研究所・地圏資源環境研究部門・副部門長
- 泰田 宗義 日本政策投資銀行・環境・エネルギー部・調査役(電力担当)

(アドバイザー)

- 阿部 博之 東北大学総長
- 小川 克郎 名古屋大学名誉教授・元地熱学会会長
- 厨川 道雄 元地熱学会会長

まえがき

温室効果ガスの少ない再生可能エネルギーの利用拡大は人類の大きな課題である。地熱資源の豊富な、数少ない先進国の一つである我が国では、地熱は質的にも量的にも最も実用性の高い自然エネルギーであり、その利用技術を開拓することは国民にとっても、また、国際的にも重要である。

しかし、21世紀において地熱が地球環境問題の軽減にどのような役割を果たしうるのか、また地熱を利用することの環境的意義について、一般の国民はおろか、これまで地熱開発に携わってきた人々ですら十分理解しているとは言いがたい。これは我が国の地熱開発が、オイルショックを契機に、石油代替エネルギーとしての開発を主眼として行われてきたことに起因している。このため、地熱開発の環境技術的側面の検討やそのことを主眼にした開発課題の検討や問題発見は十分に行われていないのが現状である。欧米では地熱は再生可能エネルギーの一つとして明確に位置づけられ、環境技術としての地熱利用の拡大が図られている。我が国は、地熱開発技術そのものに関しては世界のトップレベルにありながら、視点の転換が国際的に大きく遅れていると言わざるを得ない。

一方、我が国では、行財政改革、電気事業の自由化、電力需要の低迷、総合資源エネルギー調査会における審議、地球温暖化対策推進大綱の策定、RPS制度の導入、グリーン税制導入の検討、京都議定書発効、とエネルギー・環境をめぐる情勢は目まぐるしく変化している。このような中であって、経済産業省は2001年、地熱に関する国レベルの研究開発には政策的意義は見出せないとして、開発に直結する促進調査費を除く研究開発を全面的に中断する決断を下している。このため、これからの我が国の地熱利用の大幅な停滞や、世界に伍してきた技術の空洞化が危惧されている。もし、21世紀において地熱が地球環境問題の軽減に重要な役割を果たしうるにもかかわらず、我々の努力不足により地熱利用技術の停滞を招いたとしたら、我々は子孫に対して大きな負債を残したと言わざるを得ない。

このような時代にあっても、専門家自らが、長期的視野に立った体系的検討を科学をベースとして行うことは重要である。すなわち、これからの技術の進歩と社会情勢、国際情勢、市場動向を大局的に踏まえながら地熱利用に関する総合的な研究開発戦略の議論を行うことがいまこそ必要である。

以上のような背景のもと、地熱開発に関して異なる専門と実績を持つ研究者により、21世紀の我が国の地熱開発のありかたに関する提言をまとめることを目的に、2000年11月、本企画研究はボランタリーベースで開始された。その後、2000年度には文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)(350万円)を得て研究を本格化させた。

研究メンバーは、地熱研究に実績のある国内主要大学の9人の研究者のほか、産業技術総合研究所 松永 烈、笹田政克 両氏、新エネルギー・産業技術総合開発機構 橋本一郎、当舎利行（現産業技術総合研究所）両氏、電力中央研究所 海江田秀志氏、石油資源開発株式会社 手塚和彦氏、日本経済研究所 飯倉 穰氏、日本政策投資銀行 泰田崇義氏の参加を得るとともに、自然エネルギーシステムに関して実績のある東北大学 中田俊彦氏にお入り頂いた。

また、アドバイザーとして阿部博之東北大学総長、小川克郎元地熱学会会長、厨川道夫元地熱学会会長にいろいろと御助言を頂いた。

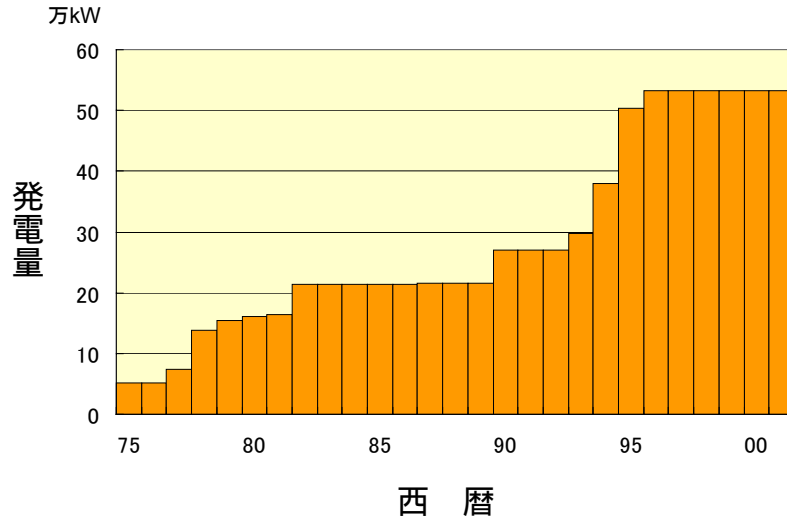
本企画研究では、計13回の検討会ならびにインターネットによる多くの情報交換を通し、地熱エネルギーの持つ特性と問題点について幅広く検討するとともに、21世紀における我が国の地熱開発のあるべき姿について精力的に議論を行った。また、ゲストメンバーとして京都大学由佐悠紀教授（地球熱学・陸水物理学）、東北大学斎藤浩海教授（電力系統学）をお招きし、それぞれ御専門の立場から意見を述べて頂いた。

今、ここに提言書をまとめるにあたり、本書が我が国の環境適応型自然エネルギーとしての地熱利用拡大のための何らかの指針となることを願うとともに、いろいろと御助言を頂いた多くの方々、熱心に御議論頂いた研究メンバー各位に謝意を表したい。

2002年5月

研究代表 新妻 弘明

地熱発電量の推移



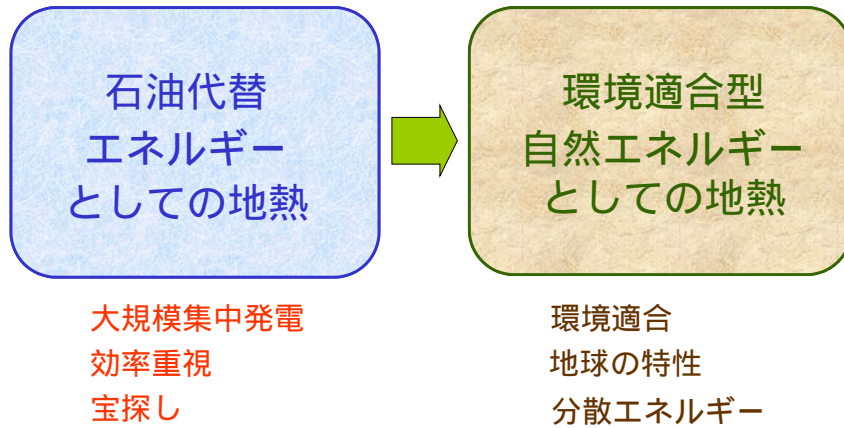
オイルショック後，我が国では地熱は国策として開発が振興され，1995年までは急速な伸びが見られたが，その後は横ばいの状態が続いている。純国産のクリーンエネルギーでありながら，現在の我が国のエネルギー需給見通しでも将来の地熱利用の伸びは実質的に見込んでいない。

地熱発電の問題点

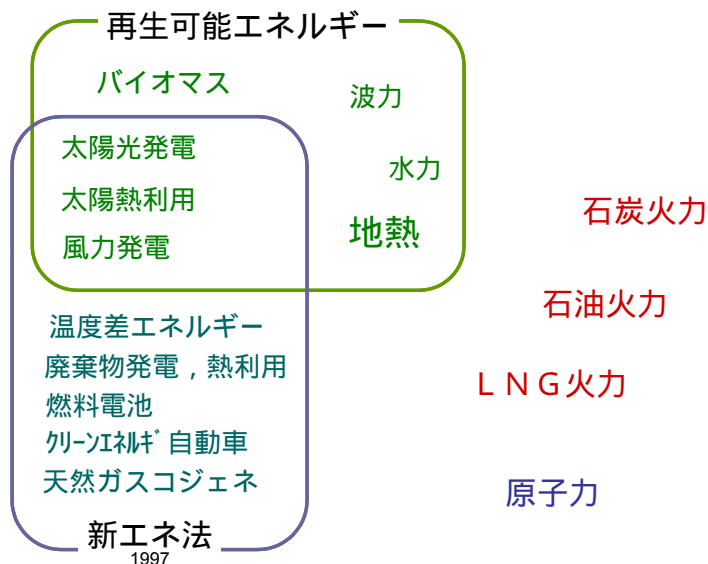
不確実性：	開発リスク
減衰：	井戸の追掘
コスト高：	10～13円/KWh
リードタイムの長さ：	10～15年
排出物：	ガス，熱水
景観	
開発地点が限られる：	国立公園

地熱発電量が伸びない原因として，開発リスクを伴うこと，化石燃料による発電に比べコスト高であること，開発地点が限られること，等のほか，規制・制度上の問題があげられている。

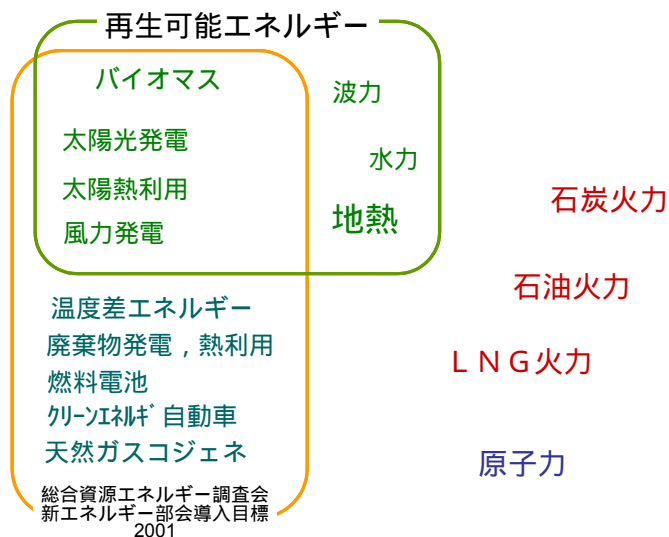
地熱利用の新しい流れ



20世紀末、地球環境問題が顕在化するに及び、環境負荷の少ないエネルギーの開発が急務になっており、自然エネルギーの利用拡大がさげばれている。地熱エネルギーは、我が国では、これまで主に石油代替を主眼として開発が行われてきており、その環境適応型自然エネルギーとしての側面の検討は十分ではなかった。

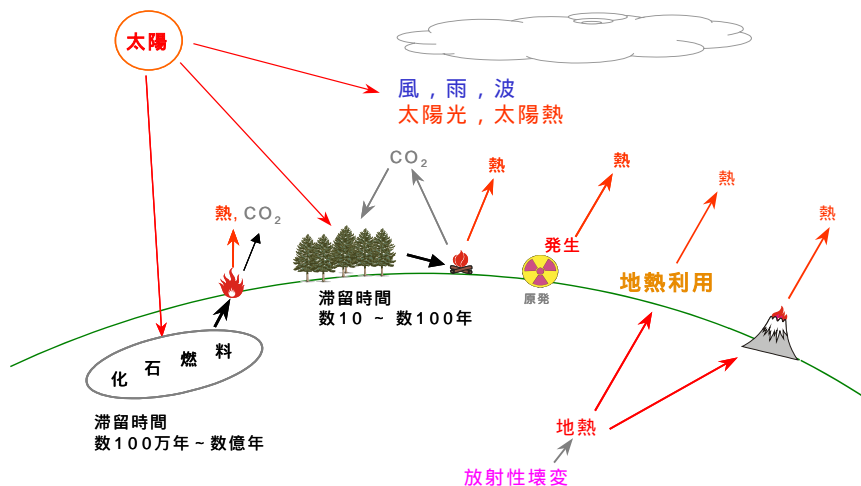


国際的には、太陽、風力、地熱、波力、水力、バイオマスが再生可能エネルギーとされているが、1997年に制定された我が国の新エネ法では、このうち太陽、風力のみが新エネルギーに含まれ、地熱は実用エネルギーとして位置づけられている。



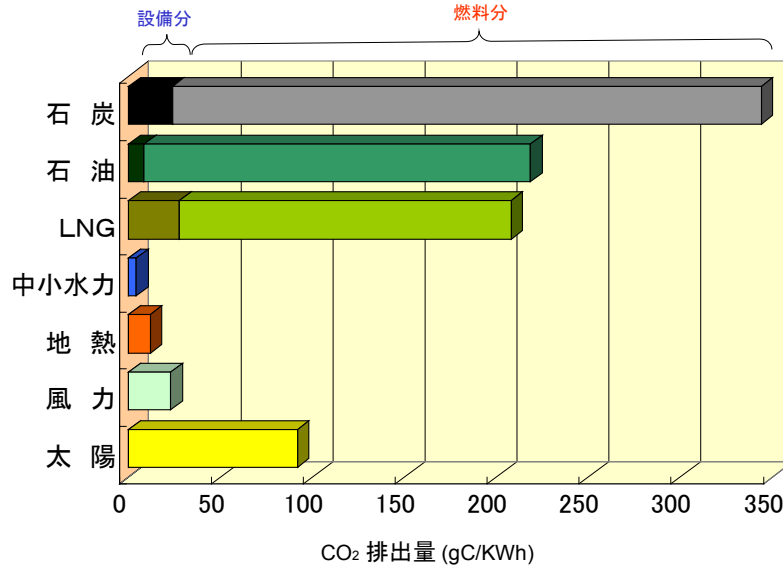
2001年の総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会の導入目標には新たにバイオマスが組み入れられたが、地熱は含まれていない。このように、地熱のもつ環境適応型自然エネルギーとしての側面は、我が国では認知されていないのが現状である。

我々のエネルギー



我々の利用できるエネルギーは、太陽起源のもの、地球起源のもの、そして原子力エネルギーに大別される。地熱エネルギーは利用しないにもかかわらず地球表面から宇宙に放射されたり、火山エネルギーとして放出されている。この意味で地熱エネルギーは風力エネルギーや太陽エネルギーと同等である。

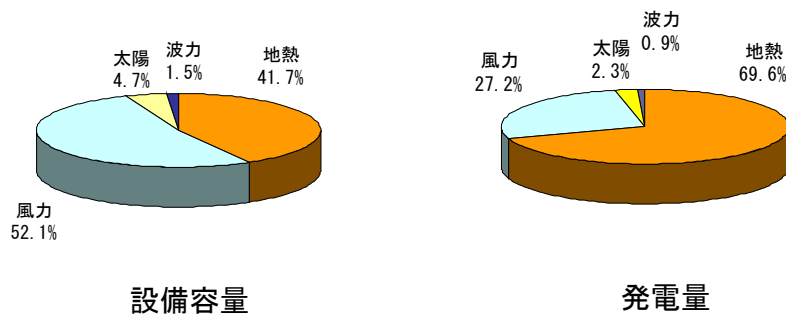
各種発電設備の電力あたりのCO₂排出量



CO₂は、発電においては、主に発電設備を作る際と燃料を燃やす際に発生する。自然エネルギーでは燃料を消費しないためCO₂の発生は少ない。単位電力あたりのCO₂排出量は、地熱発電は中小水力発電の次に少ない（内山・山本，1991による）。

自然エネルギーによる世界の発電実績

(1998)



発電では設備容量のほかに、その設備の利用率が問題になる。地熱は気候や昼夜を問わない安定したエネルギー源であるため、1998年の世界の自然エネルギーによる発電実績では、設備容量では風力に及ばないものの、発電量では大きく勝っている。

地熱エネルギーの特徴

地球内部から宇宙空間への熱の流れを利用

温暖化ガス、新たな熱の発生なし
エネルギー循環の摂理に適合

温暖化ガス発生量が少ない

水力、地熱 < 他の自然エネルギー < 石炭、石油

エネルギー収支が大きい

設備・運用

水力、地熱 > 石炭、石油、原子力 他の自然エネルギー

投入エネルギー

水力、地熱 > 他の自然エネルギー 石炭、石油、原子力

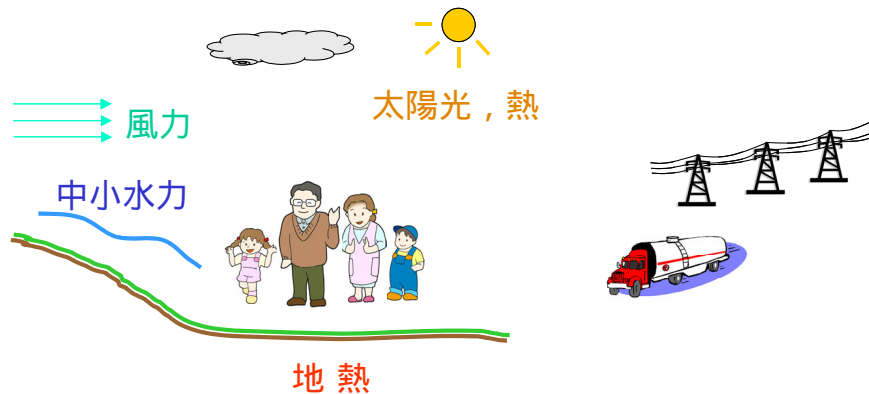
設備利用率が高い

分散エネルギー

純国産

このように、地熱エネルギーは様々な環境メリットを有しており、また賦存量も莫大であることから、我が国の21世紀を担う環境適応型自然エネルギーとしての受け皿となり得る。

EIMY Energy in my yard



地域経済 セキュリティ 環境

本企画研究では、EIMY (Energy In My Yard) という概念を提唱するとともに、地熱エネルギーのもつ環境適応型自然エネルギーとしての側面について幅広く検討を行った。EIMYとは、ある需要単位があった場合、その地域で利用可能な自然エネルギーを自然条件、経済条件が許す限り最大限利用し、その過不足分をナショナルグリッドにより需給するようなエネルギーシステム・経済システムをいう。このようなシステムは環境ばかりではなく、地域経済、エネルギーセキュリティにも貢献する。

検討課題

- 1．地球環境適応型エネルギーとしての地熱
 - (1) 環境メリットと環境負荷
 - (2) 量，質，分布，特性
 - (3) 現開発方法の問題点とあるべきすがた
- 2．我が国の社会における地熱エネルギー
 - (1) 市場と経済性
 - (2) 地域経済と分散エネルギーとしての役割
 - (3) 現開発体制，制度の問題点とあるべきすがた
- 3．環境適応型地熱利用のキーコンセプト
- 4．21世紀の地熱開発戦略
- 5．国際戦略

本企画研究では、2000年11月から2002年3月まで、計13回の検討会ならびにインターネットによる情報交換を通し、地熱エネルギーのもつ特性と問題点について幅広く検討するとともに、21世紀における我が国の地熱開発のあるべき姿について精力的に議論を行った。

環境適応型地熱利用のキーコンセプト

- ・ 形態と規模の多様性 (*Diversity*)
- ・ 持続可能な利用 (*Sustainability*)
- ・ ゼロエミッション
- ・ 地域分散エネルギーとしての役割
- ・ 産業と市場性の創出
- ・ 総合自然エネルギーシステム

本企画研究では、環境適応型自然エネルギーとしての地熱利用拡大を考えると、上記の6つのキーコンセプトが重要であるとの結論に達した。

形態と規模の多様性 (*Diversity*)

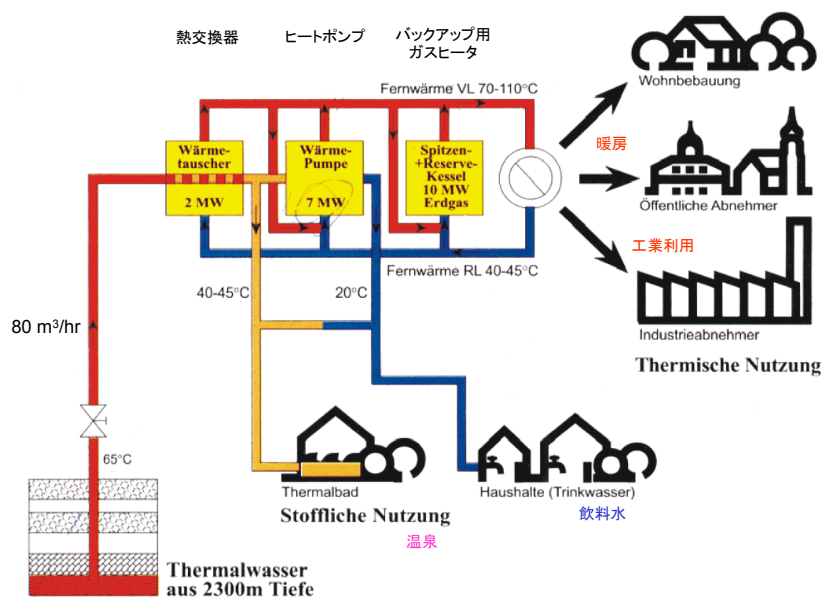
- ・ 従来型地熱発電
- ・ 中小地熱利用，GHP
- ・ 発電，直接利用，総合利用
- ・ カスケード利用
- ・ 地域に応じたシステム
- ・ 総合自然エネルギーシステム

我が国の地熱開発はこれまでナショナルグリッドに連結する5万kWの発電所の建設を主眼としていた。しかし、これらの規模や形態は必ずしも地下の特性や地域の需要に対応したものはなかった。近年、諸外国では多様な規模や形態の地熱利用が、環境技術として積極的にすすめられている。

ドイツ，エルディンクの地熱利用施設

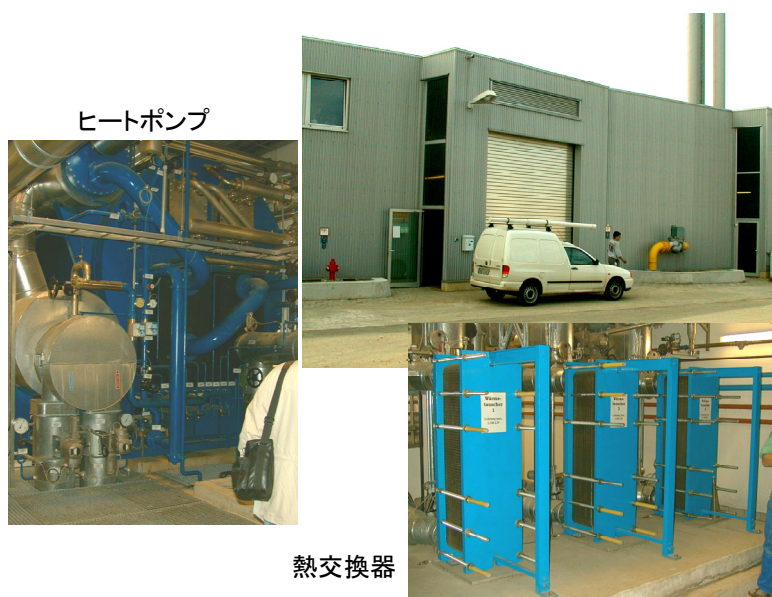


ドイツ，ミュンヘンの北のエルディンクでは1999年に地熱エネルギーの総合利用施設が開設されている。



So wird Geowärme zu Fernwärme

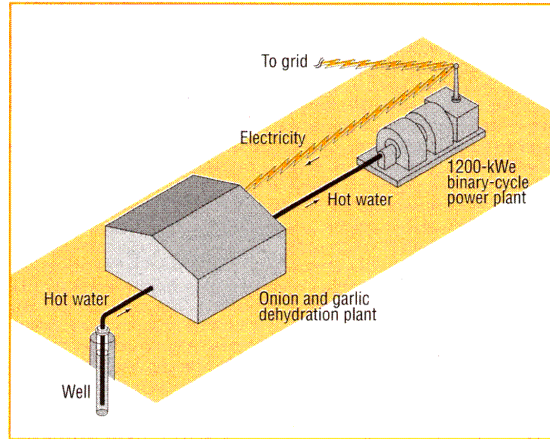
本施設では、深さ2300mの井戸より65℃の温水が毎時80トン供給され、そこから熱交換器およびヒートポンプにより約100℃の熱水を得ている。この熱水は地域暖房と工業に利用されている。一方、熱交換およびヒートポンプにより冷却された地下水は人工温泉と飲料水に利用されている。このように、本施設では地下から得られた熱および水資源を全て有効に利用している。



エルディンクの地熱利用施設のヒートポンプと熱交換器およびその建屋

Empire Energy Project

(米, ネバダ州, エンパイア, 2000~)



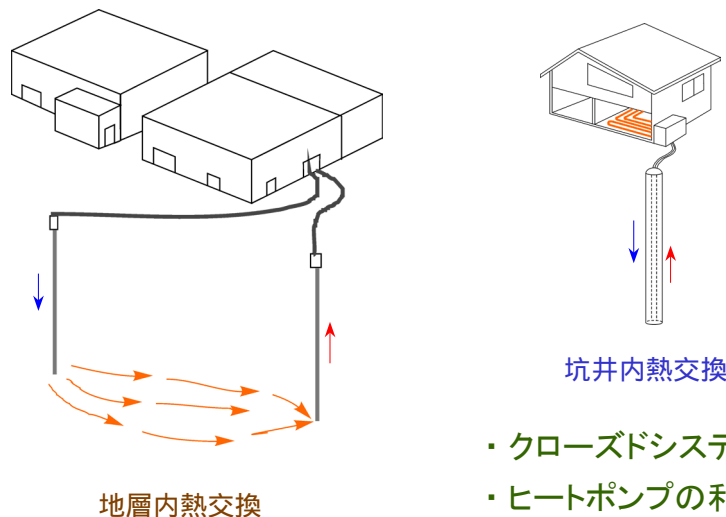
550 m既存井, 120°C, 4500 l/min
タマネギ, ニンニク乾燥プラント

1200 kWe 空冷バイナリー発電

US\$ 2,585,000 (80% DOE/NREL補助)

アメリカのDOE (Department of Energy) とNREL (National Renewable Energy Laboratory) は2000年より, 中小規模の総合地熱エネルギー利用プラントの実証試験を実施している。ここでは, 地域にあわせた1000kW程度のバイナリー発電と熱の直接利用を組み合わせたシステムについて3カ所で試験を行っている。

能動的地熱直接利用



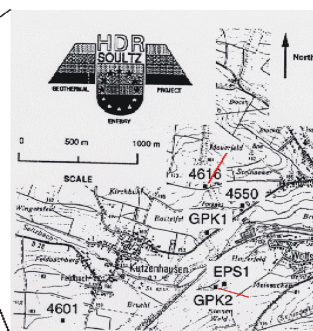
- ・クローズドシステム
- ・ヒートポンプの利用

我が国の地熱開発では自噴する井戸が主に用いられてきたが, 最近, 井戸そのものを熱交換器として用いたり, 地下に熱交換面を作成し水を循環することにより熱エネルギーを取り出す“能動的な地熱利用技術”が実用段階になってきている。本方法によれば, 環境負荷の少ないクローズドループのシステムが実現でき, また, 地熱を利用できる地域が飛躍的に拡大する。



肘折高温岩体プロジェクト 長期循環試験 '01-02

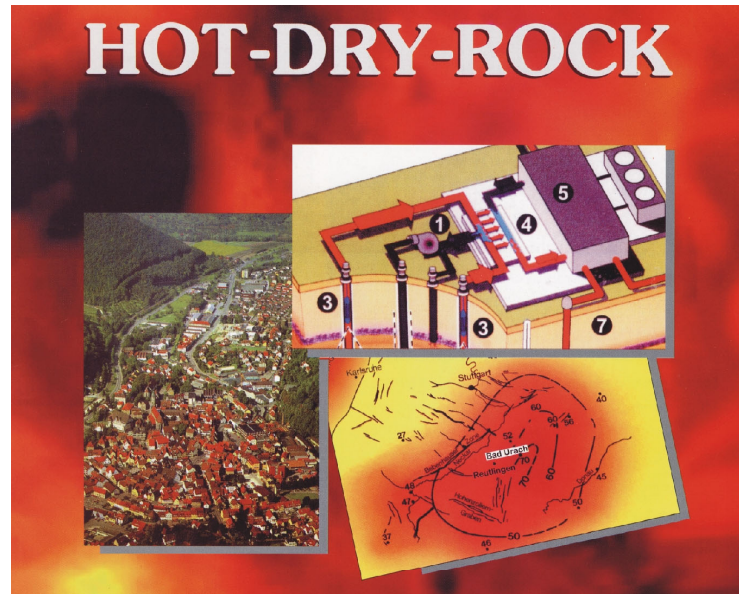
高温岩体技術は能動的地熱利用技術の代表的なものである。山形県肘折では新エネルギー・産業技術総合開発機構により2001年から2002年にかけて長期循環による抽熱実験が行われている。



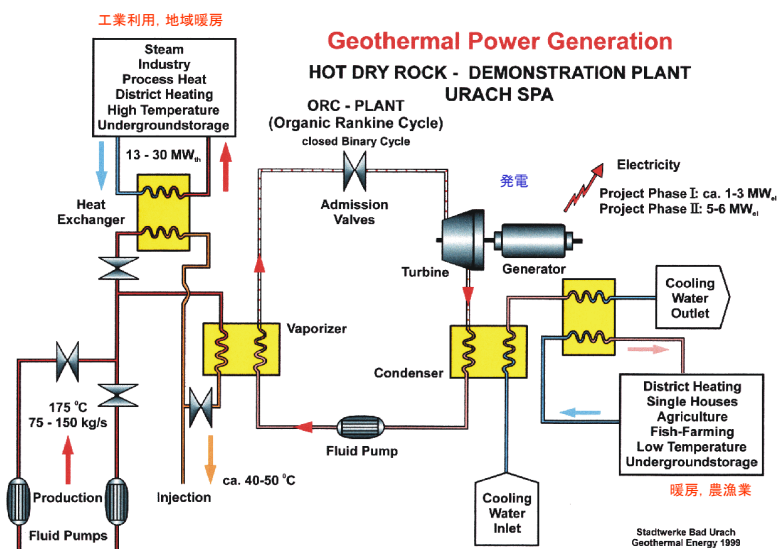
HDR (Hot Dry Rock)
Geothermal Field,
Soutz, France, 2000

フランス、アルザス地方のソルツではECによる高温岩体プロジェクトが産業界と連携して商用化を視野に遂行されている。そこでは地下5000mに人工熱交換面が作成されている。

ドイツ、バド・ウラッハの地熱利用計画



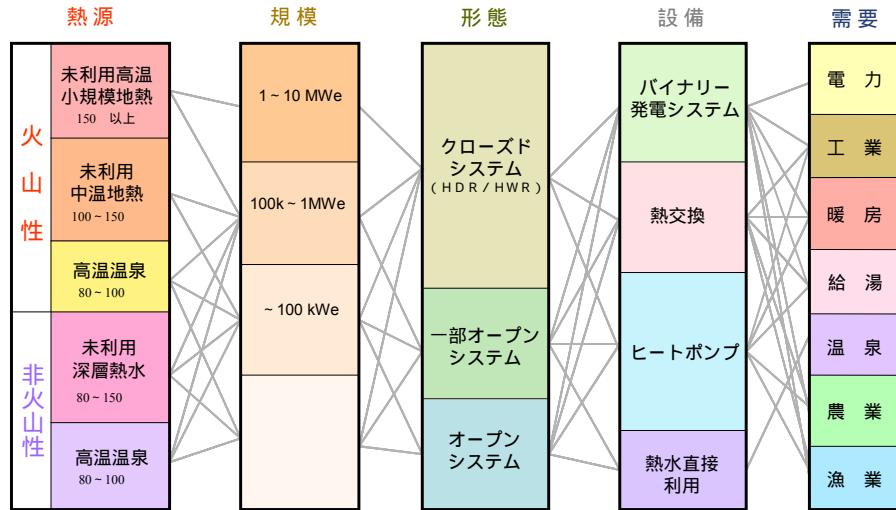
ドイツのバド・ウラッハでは高温岩体システムによる地熱の総合利用プロジェクトが2002年より開始されている。



バド・ウラッハプロジェクトではクローズドループの高温岩体システムからの熱が、熱交換器とバイナリー発電機を組み合わせたシステムにより、発電、工業、地域暖房、農漁業に総合的に利用される。

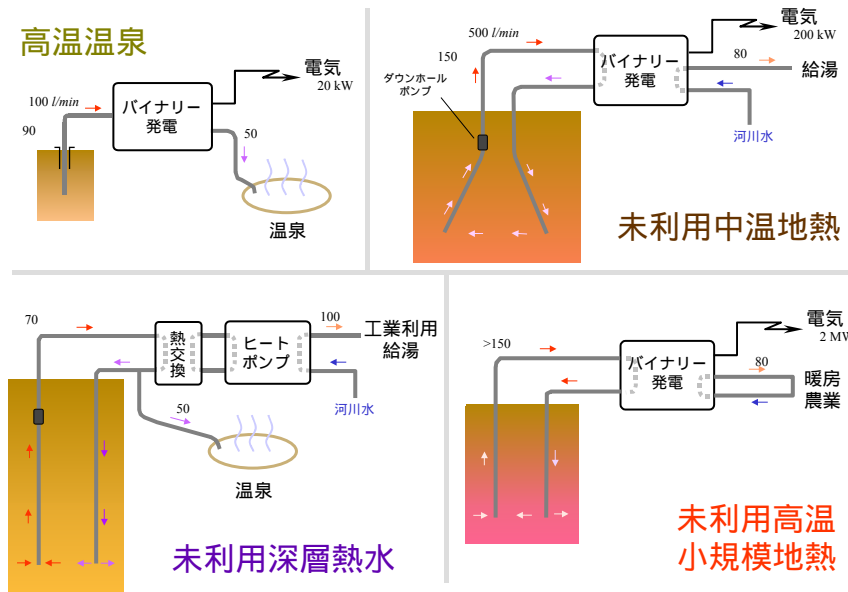
地域のための地域のエネルギー

中小地熱利用のコンセプト



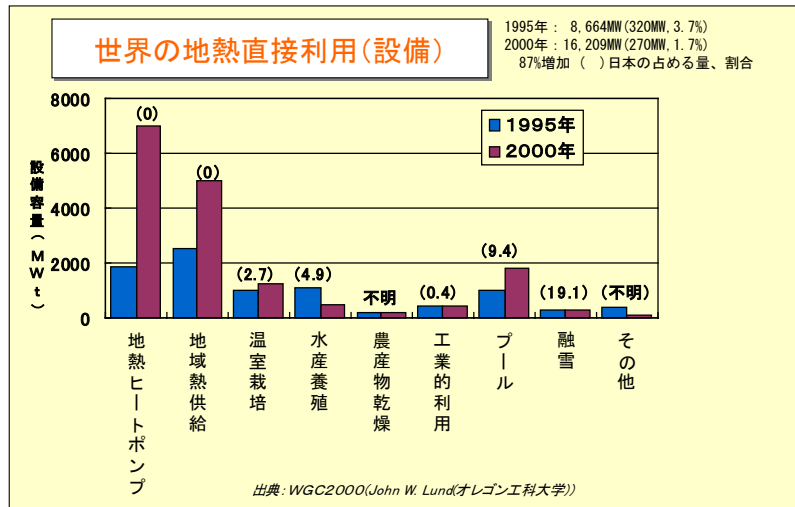
我が国のこれからの地熱開発においては、欧米の例に見られるように、従来型の地熱発電ばかりではなく、中小地熱利用を促進する必要がある。中小地熱利用の熱源には、これまで開発対象外であった小規模あるいは中温の火山性熱源や高温の温泉、これまで全く利用されていない深層熱水、等がある。その形態や設備、規模は地域の需要や地下の特性にあわせ多様な組み合わせが考えられる。

中小地熱利用のイメージ例



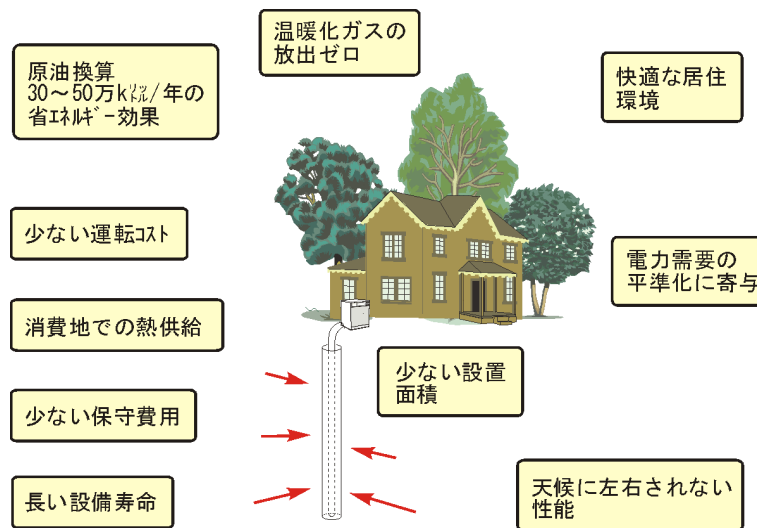
中小地熱利用には多種多様な形態が考えられるが、例えば、高温の温泉を利用した小規模発電、高温岩体技術とバイナリー発電による中温の地熱利用、深層熱水の利用、高温で小規模な地熱の利用、等があげられる。

世界のGHP普及状況



世界的には地熱ヒートポンプ(GHP)の利用が伸びている。

ヒートポンプを用いることにより、10℃程度の低温熱源も暖房に利用できる。このようにヒートポンプによれば、これまで利用の対象外であった低温地熱資源も有効に利用することができる。ヒートポンプの利用は、世界的には、この数年著しい伸びを示しているが、我が国ではほとんど伸びが見られない。



GHP (Geothermal Heat Pump)

坑井とヒートポンプを組み合わせた暖房システム(地熱ヒートポンプ)は、温暖化ガスを放出しない、設置面積が小さい、天候に左右されない、設備寿命が長い、等の数々の利点があり、欧米では普及が進んでいる。

地熱ヒートポンプの適用対象

福祉施設 医療施設 社会施設 オフィス
一般住宅 集合住宅 道路 農漁業

暖房 冷房 給湯 融雪
快適居住空間

省エネルギー ヒートアイランド現象の防止
地球温暖化防止

地熱ヒートポンプは暖房のほか、冷房、給湯、融雪、等に用いることができるが、我が国ではこのための装置産業や施工産業が成熟しておらず、コスト高である。しかし、暖房、給湯負荷の大きい福祉施設、医療施設や寒冷地の住宅では、現状でも10年以下のペイバックタイムが期待できる。

持続可能な利用 (Sustainability)

- ・ 熱と熱水の持続可能性の考慮
- ・ 最適抽熱量の算定
- ・ 持続可能性を前提とした生産・還元技術
- ・ 長期安定運転
- ・ 段階的拡張が可能なシステム

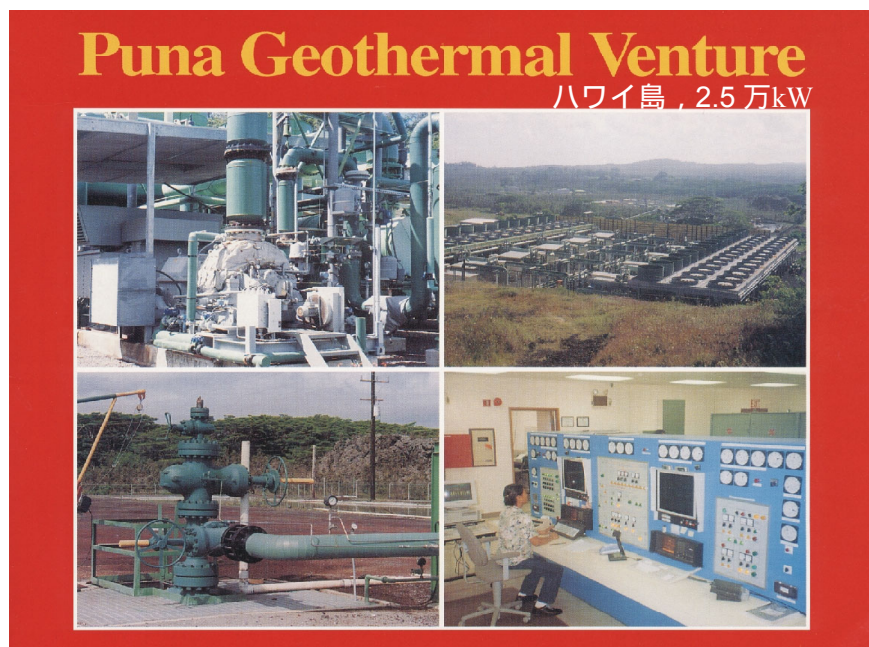
環境適応型地熱利用の2つめのキーコンセプトは“持続可能な利用”である。我が国のこれまでの地熱開発では、地下の特性を考慮した持続可能な抽熱やそのためのシステム設計が十分に行われてきたとは言いがたく、ひいては生産量の減衰と高コストの井戸の追掘につながっていた。

ゼロエミッション

- ・ オープンシステムから
クローズドシステムへ
- ・ 熱水，廃熱の有効利用
- ・ インジェクション技術の確立
- ・ スケール対策技術の確立

ゼロエミッションを目指すことは、環境適応型地熱利用を考えるうえで重要である。従来型の地熱発電でも、地下から取り出された熱水は地表に放出されることなく、地下に還元されている。また、地熱蒸気は発電後、冷却器により復水、循環されているが、熱水、熱蒸気に含まれるガスはわずかではあるが地表に放出されている。

世界で最も環境基準の厳しい地熱発電所



最近、バイナリーシステムによる完全クローズ型の地熱発電所がハワイ、プナに開設されている。本システムによれば、地熱流体は大気に接することなく熱だけが抽出され、すべて地下に還元される。これによって、厳しい環境基準をクリアしている。

地域分散エネルギーとしての役割

- ・ 環境に配慮した小型システム
- ・ 需要地に近い需要地のためのシステム
- ・ 安定したエネルギー源としての地熱
- ・ 他の自然エネルギーとの相補性
- ・ 地域経済への寄与
- ・ ユニット化された設備と自動運転
- ・ 段階的拡張が可能なシステム

環境技術として地熱利用をとらえた場合、地域分散エネルギーとしての役割が重要である。ここでは“需要地に近い需要地のためのシステム”を供給するための技術と産業基盤の確立が重要である。

産業と市場性の創出

- ・ 利用形態の多様化による需要先の多様化と多数化
- ・ 小規模多数システムによる量産効果
- ・ ユニット化システム
- ・ 地域における設備産業，メンテナンス産業の創出

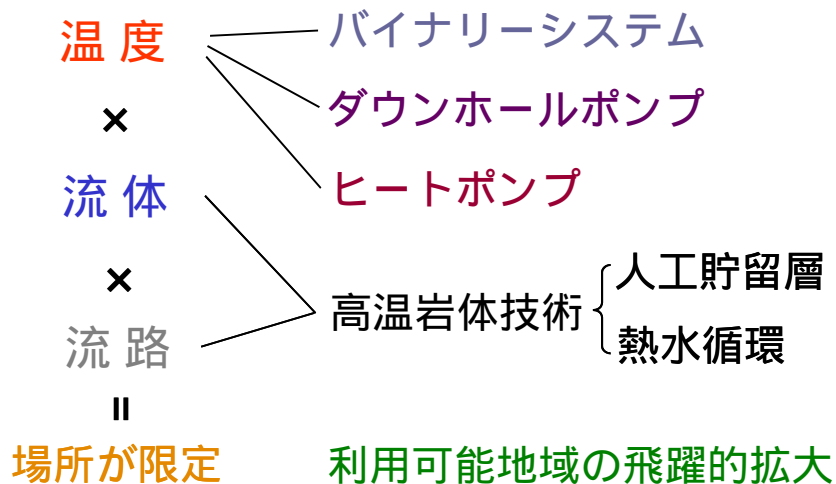
市場性の欠如が地熱利用のコスト高の大きな原因の一つであった。このため、利用形態の多様化による、需要の多様化と多数化が、地熱利用の拡大を考えると重要である。

総合自然エネルギーシステム

- ・ 自然エネルギーとしての地熱の位置づけ
- ・ 環境適応型地熱利用への転換
- ・ 地熱エネルギーの特徴の有効利用
- ・ 他の自然エネルギーシステムとの有効な組み合わせ
- ・ 国民的理解

大局的には、地熱、風力、太陽、水力、バイオマス、等、各々の自然エネルギーの特徴ならびにその地域の特性を活かした、総合エネルギーシステムとその実現のための社会システムの構築が望まれる。

従来型地熱開発の3要素と新技術



バイナリーシステム、ヒートポンプ、高温岩体技術、等の新技術により地熱利用が可能な地域は飛躍的に拡大した。これらの技術は、地域分散エネルギーとしての地熱利用のキーテクノロジーである。

2 1世紀の地熱開発戦略

- 1 . 環境適応型への転換
- 2 . 規模と形態の多様化
- 3 . 適用地域の拡大
- 地域に応じたシステムの開発 -
- 4 . 地域分散エネルギーとしての役割追求

本企画研究では、21世紀の我が国の地熱開発戦略として、環境適応型への転換、規模と形態の多様化、適用地域の拡大、地域分散エネルギーとしての役割追求、の4項目を提案している。

従来型地熱発電

- ・ 環境適応型（サステイナブル，ローエミッション，トータル利用）への転換
- ・ 環境適応型発電所の新規開発

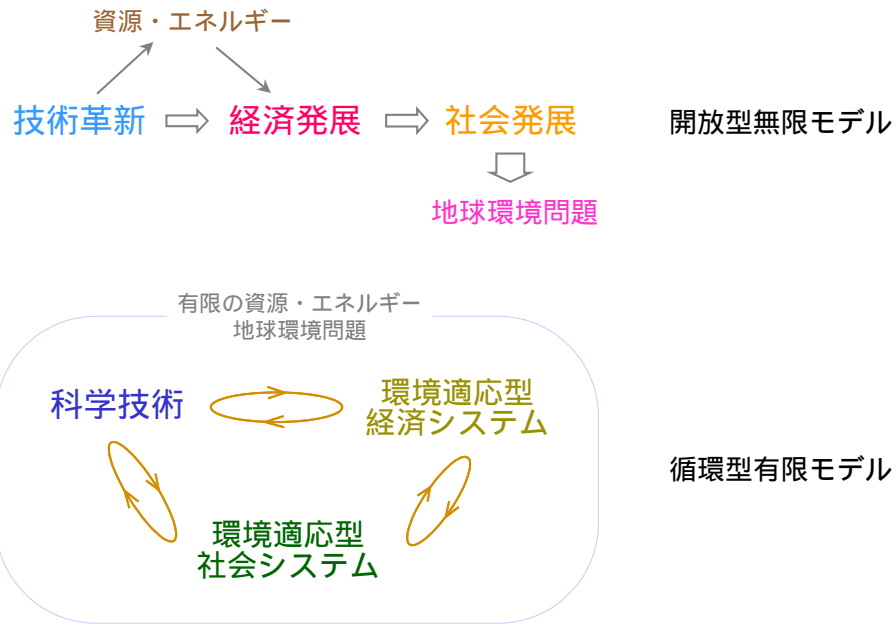
中小地熱利用

- ・ 火山性，非火山性未利用地熱資源の活用
- ・ 地域分散エネルギーとしての利用創出・拡大

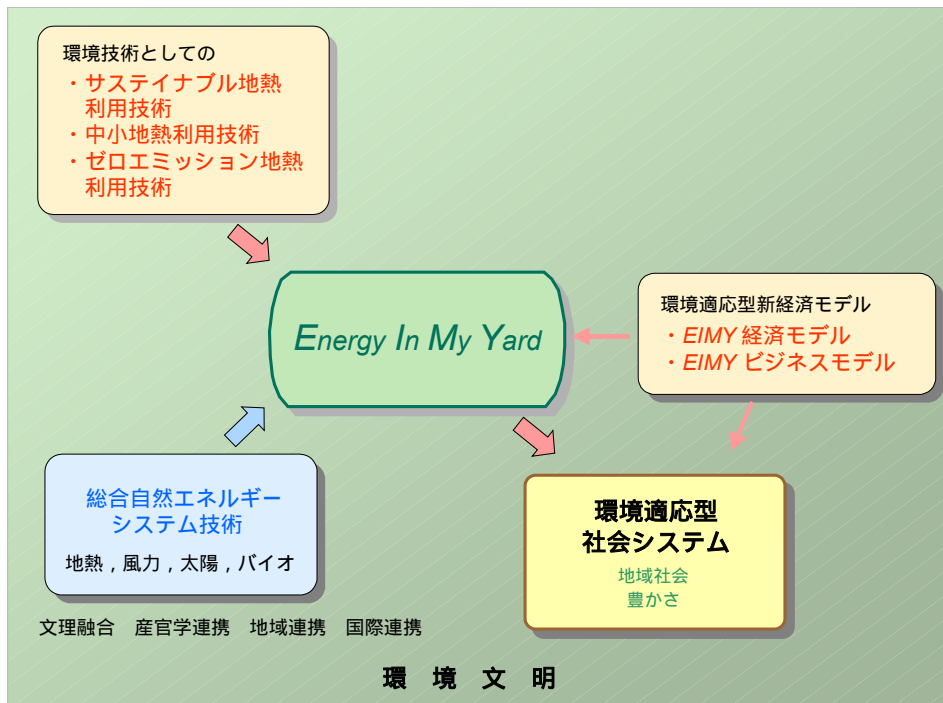
GHP

- ・ 地域分散エネルギーとしての利用拡大

提案した「地熱開発戦略」では、従来型地熱発電，中小地熱利用，地熱ヒートポンプ，の各利用形態ごとに目標を設定するとともに，今後の研究開発課題，技術開発課題ならびに，そのための社会システムについて検討を行った。



これまでの、技術革新が経済発展を産み、これがひいては社会発展につながっていた。しかし、この連鎖が現在の地球環境問題を引き起こしたと言える。環境適応型社会を構築するためには、従来のような開放型モデルではなく、環境適応型経済システム・社会システムを実現するための科学技術、環境適応型科学技術・経済システムを実現するための社会システム、環境適応型社会システム・科学技術を実現するための経済システムを構築するという、循環モデルによる必要がある。



EIMYとしての地熱利用の拡大のためには、地熱利用技術開発ばかりではなく、他の自然エネルギーと組み合わせた総合エネルギーシステム技術の構築、その実現のための経済モデル、ビジネスモデル、ならびに社会制度の構築が必要である。

1 地球環境適応型エネルギーとしての地熱

1 - 1 環境メリットと環境負荷

地熱エネルギーの利用を地球環境に及ぼす影響の観点から見た場合、化石エネルギー資源に対して大きな優位性を持つ。しかし、地熱開発が環境に及ぼす影響は皆無ではない。現状の開発が地表環境および地下環境に及ぼす影響を認識し、これらの影響の低減策あるいは影響を極力排除可能な開発方法の創造が重要である。

1 - 1 - 1 環境メリット

地熱エネルギーはその温度レベルに応じて様々に利用できるエネルギー資源である。その中でも、高温の地熱貯留層から生産される流体を用いた地熱発電は、化石燃料を使用した他の発電システムに比べ単位出力あたりの炭酸ガス排出量が少ないことから、環境負荷が少ないというメリットを有する。さらに、バイナリー発電¹により地下のガスや流体を外部へいっさい排出しないゼロエミッションシステムを採用した発電システムの構築も可能であり、この場合運転時の環境負荷は皆無に近い。また、発電に利用する蒸気を分離した後の熱水は温度に応じた多段利用が可能であり、この直接熱利用により電力および化石燃料消費の削減効果も生じる。

他方、エネルギーレベルとしては低いが、普遍的にかつ無尽蔵に存在する低温の地熱資源を、ヒートポンプを用いて利用する形態があり、地熱ヒートポンプあるいは地中熱利用システム(以下GHP)と呼ばれている。このシステムは、近年実用化の域に達しその普及が急速に進んでおり²、従来型の地熱発電に利用可能な高温貯留層の分布が極めて強い地域的偏在性を有するのに対し、地熱資源の特性に応じた需要地での開発が可能である。また熱交換システムを地層内あるいは坑井内に設置することができるため、地表景観への影響が少なく、土

¹ バイナリー-発電とは、地上でタービンを回すのに必要な圧力の蒸気を得られない場合でも、生産井から汲み上げた熱水を熱交換器に通し、気化させた低沸点流体によりタービンを回す方式により発電するものである。

² スイス、米国等欧米で普及している。わが国では、平成13年4月地中熱利用懇談会が設立され、現在70社を超える会員が所属する。また、日本地熱学会では地中熱利用技術専門部会が同年12月に設置された。

地の有効利用できる等の特長を有する。さらに本システムは、都会においては夏季には地表の熱を地下へ貯蔵することになるため、ヒートアイランド現象を緩和する役目も果たすことができる。

地熱エネルギーは、風力や太陽光などの自然エネルギーに対しても炭酸ガス排出原単位を比較すると、水力に肩を並べ、風力や太陽光より優れている。また、地熱発電は風力や太陽光発電に比べ圧倒的に高い設備利用率をもっている。さらに、廃熱水を利用できる利点も有している。しかし、自然エネルギーの中での優劣にのみ着目することは、自然エネルギーの有効利用の観点から得策ではない。地熱の安定性に着目し、他の自然エネルギーとの協調的な利用開発を視野に入れることが肝要である。

1 - 1 - 2 環境負荷

地熱エネルギーは多くのメリットを有する一方、必ずしも環境に及ぼす負荷が皆無ではない。しばしば、そのメリットが強調されるあまりデメリットや環境負荷については目が向けられないことがある。しかし、地熱エネルギーの開発利用行為が環境にどのような負荷を及ぼすかを認識し、その大きさを理解することは、負荷の許容可能範囲を規定し、あるいは限度を超えた負荷の軽減策を講じるためにも必要である。さらに、地熱開発に直接間接的に携わる産官学の関係者がこのような環境負荷を認識しておくことは、地熱エネルギーの開発に対する社会および国民の理解を得るためにも重要な課題といえる。地熱利用における環境負荷を、地表および地下に焦点を当て、それぞれについて以下に述べる。

(1) 地表における環境負荷

(景観への影響)

まず、従来型の地熱発電所において指摘される環境負荷を考えてみる。国内の多くの地熱発電所は山岳地帯に位置しており、特に国立公園の近傍や国有林内で開発された場合、発電所の建設、坑井掘削基地および取り付け道路の建設、坑口設備およびパイプラインの建設は周辺環境に負荷を与えている。開発時における、これらの環境負荷低減が重要であり、その試みは、すでに実行されている。例として、坑井基地集約方式の採用による掘削基地および坑井基地の土地造成面積の縮小化、発電所周辺における緑化など、環境負荷および景観への

影響削減策が施されている。

(スケール)

次に、発電所運転時における環境負荷の一つとして、熱水配管内や滞留槽に析出するスケール³の処理が挙げられる。地熱発電所から排出される廃棄物の一つであるシリカスケールは、主成分はシリカであるがこれにヒ素が含まれる場合があり、現状では産業廃棄物として処理されている。

(排熱水、排気体)

また、発電所運転時における環境負荷には、冷却塔からの大量の水蒸気および非凝縮ガス(炭酸ガス、硫化水素)の大気放出も挙げられる。冷却塔から大気中に放出される水蒸気は、特に山岳地帯に位置する発電所では冬季に周辺の樹木に結氷する可能性があり、施設建設時における影響調査が必要である。また、蒸気分離後の熱水は塩濃度が高く、ヒ素やホウ素、シリカを含んでおり、国内の地熱発電所では全量を地下に還元している。海外のごく一部の開発地域では熱水の一部を隣接する河川、海域、地表に放出処理しているケースがある。しかし、これらの地域においても熱水中の溶存成分により環境汚染がある地域については将来的に地下還元が予定されている。また冷却塔から排出される過剰な凝縮水は化学処理後、河川に放出されるが低温であり溶存成分濃度も低いため、周辺環境に及ぼす影響は小さい。非凝縮ガスの中でも硫化水素は臭気の原因となるため、濃度が高い場合は脱硫除去されている。一方、地熱開発に伴う周辺地域の地表変化にも着目する必要がある。海外の大規模開発地域では、周辺の間欠泉が停止したり、逆に新たに噴気地帯が生じるなどの大きな変化が生じている例もみられるが、これらの現象は熱水を地下に全く還元しない状態で生じている。国内における開発地域では、熱水はその全量が地下に還元されているため、このような地表徴候の顕著な変化は生じていないが、地盤沈下などには細心の注意を払う必要がある。

(クローズドシステムの実現)

これらの従来型の地熱発電に対し新たなシステムであるバイナリーシステム、GHPによる直接熱利用システム、高温岩体システムは、基本的には地熱流体を系外へ放出しないクローズドシステムを採用しており、前述のような種々の環境負荷は発生しない。しかし、バイナリーシステムやGHPでは、作動媒体

³ ここでのスケールとは、配管等への熱水溶存化学種の析出物を意味する。流体に含まれるシリカや炭酸カルシウム等の溶解成分は、熱交換による流体温度の低下に伴って配管等表面に沈殿、析出し、時間をかけて脱水が進みスケールが形成される。

としてフロンガスなどを使用するため、媒体の漏出による環境負荷の問題が生じてくる。この問題に対処するために、より環境負荷の少ない自然媒体を使用する研究が進められている。中高温の地熱利用においても、バイナリー技術によりクローズドシステムの実現が可能となれば、地下からのガスや流体を周辺環境に全く放出しないゼロエミッションシステムの構築が可能である。現状では高コストであるが、クリーンな地熱エネルギーの理想的な利用形態といえる。

(2) 地下における環境負荷

従来型の地熱発電は、基本的に地下から流体と熱エネルギーを地表に生産し、エネルギーの抽出を行っている。この流体生産に伴い地熱貯留層の圧力や温度に何らかの変動が生じることは避けられないが、問題はその形態と変動幅にある。

地下からの供給能力以上の過剰な生産は貯留層の急激でかつ大きな圧力低下を引き起こし、浅層の低温水の侵入や還元熱水の過剰な還流による貯留層の温度低下や地層内での流体の二相化を招く可能性がある。地下における環境負荷を人為的な活動によって生じる自然状態の変化ととらえるならば、このような地下における状態の変動は環境負荷そのものである。しかし、地表における環境負荷と同様に、エネルギー資源の有効利用においては環境負荷を全くゼロにすることはできず、ある程度の許容可能な範囲が存在する。この点については、開発利用によって地下環境に過剰な変動が生じるのを避け、長期間にわたって安定した利用開発が可能であるサステイナブル（持続可能）な開発手法を必要とする。そのためには、開発対象地域における適切な開発規模とそれに見合った最適生産量の設計が重要である。

現状においても、様々な開発規模を想定した貯留層評価が実施され、当該地域の最適な開発規模が推定されている。しかし、定量的な評価を行う際に必要となる貯留層の空間的広がりや境界条件、流路の分布とその能力に関する地下の情報量がきわめて限られており、その評価精度は十分とはいえない。その精度向上は今後の課題であるが、一方では、小規模開発からスタートし、貯留層の変化をモニタリングしながら段階的に開発規模を拡大する方法が重要となる。

また、バイナリー発電やGHP等の直接熱利用の場合は、従来型地熱発電に比べ、地下からのエネルギー抽出量は小さいが、比較的浅層を対象とするため地下水環境に及ぼす影響に注意を払う必要がある。

1 - 2 特性，分布，質，量

地熱エネルギーは多様であり，流体と熱を利用する場合（発電や温泉等）と，熱のみを利用する場合（バイナリ - 発電，GHP等）によってその資源量の算定法が異なる。その分布は，高エンタルピーなものほど限定される。質，量，分布の関係については，中低温熱水のデータベース化等のさらなる整備が必要である。中低温熱水のうち，低温熱水は非火山性地域に，中温熱水は火山性的地域に分布する傾向にあるが，需要とコストによってその利用量は支配される側面が出てくる。GHPについては，地中熱エネルギー自体は需要に対して十分大きく，需要によって利用量が決まる。

1 - 2 - 1 地熱エネルギーの特性と分布

（特性）

地熱エネルギーは，温泉という身近な存在から地下深部の高温流体を利用した地熱発電まで，様々に利用可能なきわめて多様性の高いエネルギー資源である。さらに，熱エネルギーの観点から見れば，国内に広く分布する豊富かつ純国産のエネルギーである。この資源は適切に開発すれば，枯渇することなく長期間にわたって安定した利用が可能である特性を有している。しかし，その多様性にもかかわらず，限定された温度範囲の地熱エネルギーのみがこれまで主に開発利用されてきたといえる。

（分布）

従来型の地熱蒸気発電⁴が適用可能な高温の地熱貯留層の大半は九州と東北地方の山間部に分布しており，その地域的偏在性は顕著である。しかし，一方では，国の全国地熱資源調査結果によれば，従来型の地熱発電には適さない中低温の地熱資源が膨大な量存在することが確認されている。さらに，これら以外の地熱エネルギー資源として，高温岩体，浅層の地中熱があり，また将来的な資源として火山エネルギーも開発対象となり得る。

⁴ 坑井から生産される蒸気あるいは蒸気・熱水混じりの気液二相流体から分離した蒸気を直接タービンに送り発電するシステム。

1 - 2 - 2 地熱エネルギーの質と量について

(質の多様性)

地熱資源の特徴の一つに温度の多様性がある。従来型の発電システムを適用できない200℃以下の地熱資源については、これまでほとんど評価の対象外であった。すなわち、200℃以下の中低温地熱エネルギーは質から言えば、低いレベルにおかれていた。しかし、中低温の地熱資源の存在は多くの地域で確認されており、地域的偏在性も高温型の貯留層に比べ比較的小さい。従来型の発電に利用できる高温の貯留層の存在が極めて地域的偏在性が強く、今後飛躍的にその存在が見いだされる可能性が大きくないことから中低温のエネルギー資源を有効に利用する技術の開発により、これまで低レベルと見なされていた資源を、高温の地熱資源と同等かそれに近い良質の利用可能な資源として取り扱うことが可能となる。

(資源量とその算定)

地熱資源は、質についての多様性を含んでいるため、地熱エネルギーの質と量を単一の評価方法で包括的に表すことはできない。このため存在形態、利用形態を勘案した適切な評価方法を導入する必要がある。ここでは地熱エネルギーの質と量に関する概括的なイメージを持つために、エネルギー消費量と存在量を石油換算量として相互比較することを試みる。

我が国の地熱発電の設備容量は約55万kWであり、これによる年間発電量は約0.8ギガリットル(80万キロリットル)の石油に換算される。一方、温泉として放出される熱量は年間3.5ギガリットルに相当する(角, 1980a⁵, b⁶)。実に地熱発電量の数倍のエネルギーが温泉から放出されていることになる。さらに90℃までの低温熱水の資源量は 3.6×10^4 ギガリットル、また150℃までの中温熱水は 2.1×10^4 ギガリットルに相当する(宮崎ほか, 1991⁷)。このように現在の地熱発電設備による年間あたりのエネルギー消費量は、低・中温熱水資源量の全体量に比べてごくわずかである。さらに、非火山性の深層熱水資源の存在量は約 1.3×10^4 ギガリットルと推定されている(茂野, 1982⁸)。

このように低中温熱水や非火山性深層熱水の存在量はきわめて膨大である。実際にはこれらをすべて利用できるわけではないものの、今後の需要や技術的ブレークスルーにより利用量が飛躍的に増大することが期待される。

⁵ 角 清愛(1980a) 日本温泉放熱量分布図

⁶ 角 清愛(1980b) 日本の温泉放熱量分布と第四紀火山分布との関係, 地調月報, 31, 255-266.

⁷ 宮崎ほか(1991) 全国規模地熱資源評価の研究, 地調報告, 275, 17-43.

⁸ 茂野 博(1982) 非火山性地域の地熱資源 - 深層熱水 -, 地質ニュース, no.337, 202-203.

このほかに地中熱利用があげられる。地中熱は需要に対して無尽蔵と考えることができる。この場合は需要によって利用量が決定される。

地熱エネルギーが、地下にどの程度存在するかをより適格に定量化するためにはデータベースの整備が必要である。地熱エネルギーを熱エネルギーのみ、あるいは流体とともに熱エネルギーを採取するかによって、評価手法が異なってくる。熱エネルギー量の評価には、一般に容積法が用いられ定量的に評価されている。しかし、流体資源を採取することによりエネルギー利用を行う場合、容積法が静的な状態下での評価法であるのに対し、流体の生産還元を行う動的状態下での評価が必要となる。流体資源は、温度に関わらず熱水対流系のシステムの一部を構成する領域から生産される。流体の供給能力を、この熱水対流系の全貌を把握することによって評価することは極めて困難である。したがって、地下の状態に大きな変動を及ぼさないような適切な生産量あるいは持続可能な生産量を指標とすべきであろう。

さらに、これまでいくつかの公的機関により実施された全国規模の地熱資源調査結果を融合再検討し、温度レベルに応じた利用可能なシステムの検討、およびそれらの結果をデータベース化し公開する必要性がある。

1 - 3 現開発方法の問題点とあるべきすがた

地熱エネルギーの利用は、開発地域の地下の特性や能力を考慮し、地域の需要に応じたものにするのが肝要であり、地域のエネルギー供給に寄与する安定な自然エネルギーとしての導入技術の整備が必要である。具体的には、発電プラントのモジュール化による段階的開発体制、地下からの流体（熱水、ガス）を系外に放出しないゼロエミッション技術、他の自然エネルギーとの組み合わせ技術の早期構築が重要である。

1 - 3 - 1 現開発方法の問題点

我が国においては主に従来型の地熱発電を対象とした開発が進められてきたが、その際地表設備とプラントの経済性を優先した発電規模の設計が行われてきた側面を否定できない。しかし、地下の貯留層は地域によってそれぞれ特性を持ち、開発に伴う流体の生産供給能力も異なる。従って、この供給能力を越えた蒸気の過剰な生産は致命的であり、貯留層は短期間にその能力を喪失することになる。その結果、蒸気量の不足によりプラントの設備利用率が低下し、地熱発電に対する信頼性の低下を招いている。また発電規模が大きいと、坑井の掘削から発電までのリードタイムが極めて長期にわたるため、投下資本の回収が遅れ、開発業者にとって経済的な負担が大きい。

1 - 3 - 2 開発方法のあるべきすがた

（地熱発電）

従来型の地熱発電を念頭に置いた開発は、それに適した資源の地域偏在性という資源側の要因により今後飛躍的な発展を望むことはできない。さらに、大規模な発電所の建設は周辺環境に及ぼす負荷の大きさを考慮すると困難な状況である。従って、これからの地熱エネルギー資源の開発に当たっては、これまでの開発経験をもとに、開発地域の地下の特性や能力を考慮した、地域の需要に応じた種々の開発利用手法を積極的に導入することが望まれる。すなわち相手に合わせた能動的開発手法の適用が必要である。今後さらに、火力発電や水力発電においても小規模発電所の開発が主流になると考えられており、地熱発電においても地域の特性に応じた小規模発電と熱利用システムを組み合わせた複合的かつ地域に根ざした開発手法が必要である。

また、発電プラントをモジュール化することにより地表設備のコストを削減し、発電までのリードタイムの短縮をはかるとともに、投下資本をできるだけ早期に回収できる開発スキームが必要である。プラントの運転開始と同時に、隣接地域での探査を継続し、開発に伴う貯留層挙動の変化を観測しつつ当該地域の生産量評価を行う。その結果、余剰な能力の存在が確認できれば、それに見合った発電プラントの増設をはかるような段階的な開発手法の適用も有力な方法と考えられる。

（発電と熱利用）

従来型の地熱発電が困難である貯留層温度200℃以下の地域では、バイナリー発電の導入および廃熱の温度に応じた多段熱利用を組み合わせた総合的なエネルギー利用システムをまずモデルプラントとして開発し、普及促進を計る戦略が望まれる。このバイナリーシステムの採用により、地下から生産されるガスや流体を全く系外に放出しないゼロエミッションシステムの構築が可能である。

現在、地域分散型の小規模発電システムの開発が提唱されているが、その場合地熱発電と風力や太陽光などの自然エネルギーを組み合わせたハイブリッド型のエネルギー利用や総合自然エネルギーシステムの構築はクリーンな自然エネルギーの利用を促進する効果が大きい。さらに、地域におけるエネルギーに対する住民の意識の向上に資する効果が大きいと考えられる。また、地域分散型発電では、保守が容易でかつ安定した運転ができることが必須の条件であり、それに対するエンジニアリング技術の開発も必要であろう。熱供給利用施設を付帯した村営町営の地熱発電所が各地にできれば、地域のエネルギー自給システムの中核として地熱を位置づけることができ、エネルギーをより身近なものに感じると同時に地熱エネルギーの開発に対する国民的理解も深まるであろう。このような開発戦略を推進するためには、まずモデル事業をスタートさせる必要がある。

（熱利用）

さらに温度の低い地熱資源は、地域的偏在性がなくかつ比較的浅層に存在しており、ヒートポンプを利用した暖房への利用が可能である。この地熱資源を利用することは地域分散エネルギー利用のいっそうの促進を図ることができる。

（多様な利用とその評価）

このような多様な地熱エネルギーの開発利用においては、地表および地下環境に及ぼす影響を極力低減する努力が必要である。さらに、国内に豊富な地熱

資源ではあるが、できるだけ長期間にわたってかつ再生可能な形で利用することが望ましい。そのためには、現状では開発に伴う周辺環境への影響調査が主となる環境アセスメントから一步踏み込んだ形で、持続的開発利用を目的としたサステナビリティ評価が可能となるような地熱エネルギー資源の最適な抽出量の第三者機関による評価も今後必要であろう。

2 我が国の社会における地熱エネルギー

2 - 1 市場と経済性

地熱発電が発電事業にとって魅力あるものになれば、自ずと電力市場への普及が進む。電気事業の完全自由化を念頭に置いた、経済性に優れた地熱エネルギー利用技術開発が市場参加の必要条件である。地球環境保全と経済性、それにエネルギー・セキュリティを融合した国家規模の新たな戦略が求められている。

我が国の地熱利用技術は、おもに電気事業の発電部門と共に歩んできた。今日の電気事業の形態は、そもそも昭和 26 年の電力再編成¹に遡る。現在では、我が国の電力会社は世界的にも優れた電力設備を保持していて、系統運用技術も一流である。その結果、技術大国日本の繁栄に大きく寄与したといっても過言ではない。

従来の地熱発電所は、電気事業におけるベース電源の位置づけであった。つまり、大規模な原子力発電や石炭火力などと同様、一定の発電出力を長期間安定して供給することを主目的としてきた。エネルギー・セキュリティの観点からは、電源の多様化²がエネルギー・リスクの分散と考えられ優先されてきた。しかし、近年の経営効率重視の高まりによって、発電所の採算性、つまり経済性を優先する傾向が強まってきている。経済性と、我が国のエネルギー・セキュリティ、さらに地球環境問題への対応と、要求される課題は多岐にまたがっている。

一方で、昨今の国際情勢をみると、規制撤廃による経済効率の追求と地球環境問題への対応を巡って、各国が競って独自の戦略を打ちたてている。欧州、とくに北欧やドイツ主体の環境調和重視の方策、これに対して米国の市場経済、

¹ 電力の鬼といわれた松永安左衛門の卓越したリーダーシップのもとで、全国を 9 電力地域に分割して安定供給義務と地域独占を課す体制が導入され、これが成功して現在まで 50 年余り続いてきた。

² つまり、水力、火力（ガス、石油、石炭）、原子力など異なる発電源を保持すること。

特に企業の経済性を追求した運営スタイルの普及がある。いずれにしても、地球環境保全と経済性、それにエネルギー・セキュリティを融合した国家規模の新たな戦略が求められている。

今後の地熱を取り巻く日本社会の構造変化を、以下の3点から考えてみる。

第1に、2007年を目途に予定されている電気事業の完全自由化に伴って、大きな変革が予想されることである。すでに先進諸国で導入されつつある電力自由化では、発電・送電・配電事業の分離、独立系統運営機関の設置など、「公正な競争なくして経営なし」というきわめて明快な理念がベースとなっている。隣国の韓国では、独占的運営を行っていた韓国電力公社の発電部門が6分割され、6つの発電株式会社（現時点では株式は全て政府保有）が設立された。託送部門は引き続き韓国電力公社が担当することが決定された³。また、興味深いのは社会主義国である中国の変革で、国家電力公司⁴を発電と送電の部門に分離する方針が最近発表された。

地熱発電は、そもそも割高な日本の電力業界の中でも設備費が突出しており、原子力発電所に比べて高価であるとも言える。そのため、電力会社も最近では地熱発電所の建設に消極的である。このほかにも、石炭火力、揚水発電所など、経営効率の観点から各種発電所計画の凍結や撤退が相次いでいる。また、既設の老朽発電所の長期運転停止は、日常的に生じている。コスト競争力の強化が、今後の電力市場に参加できる必要条件であるといつてよい。

第2に、2001年度の電力需要は、15年ぶりに前年度を1.7%減少した⁵。今後、長期間にわたって電力需要が停滞する場合には、既設の発電所運用を工夫すればさしあたりニーズを満たせることになる。このような厳しい状況下で発電所を新設する場合には、当然として熱効率や運用特性に優れ、さらに投資額の小さい発電所が選択肢となる。

興味深いのは、国内製造業の空洞化は、割高な電力料金も原因になっていることである。人件費や設備費が世界的に高いことに加えてユーティリティ⁶の負担増は、結局のところ製造業の海外流出を招き、結果として国内需要の低下の

³ 政府の推進する電力完全自由化に対して労働争議まで生じている。

⁴ 電力供給を一元的に担っている国営公社。

⁵ 暖冬で暖房需要が落ち込んだのに加え、景気低迷を背景に製造業の減産の影響を受けたため。

⁶ 電力、ガス、水、廃水処理など。

引き金になった。国内のコスト上昇が引き金となって、経営効率に優れた企業が海外に流出したのであれば、我が国の制度自体が大きな矛盾を抱えているといわざるを得ない。

第3に、外資系企業の参入である。当然のことながら、我が国の電気事業が企業経営に適うものであれば、外資系企業にとっても魅力的であり新たに参入が始まることになる。地熱発電所が、従来のように国産設備である必要はとくに見あたらず、電気事業自体も、輻輳を管理する送電部門を除いては参入の対象になり得る。ただし、地上設備は汎用性を持つものの、地下の地熱資源に関わることになると、広域の周辺も含めた地下条件や、経験的に知られている事項に熟練した国内企業も優位である。いずれにせよ、電気事業の構造改革が進行すれば、競争力に優れた諸外国の地熱産業と新たな競合が予想される。

さて、それでは国内の電力産業がすべて停滞しているかといえば、そうではない。すでに先行的に施行された電力の部分自由化によって、IPP⁷の参入や大口電力の入札が相次ぎ、民間企業に新たなビジネスチャンスを提供すると共に、大口ユーザーの電気料金負担を軽減させている。さらに、地球環境問題への対応から、自然エネルギーへの発電ニーズが高まっている。とくに、採算性に優れた風力発電を巡っては、新たな立地箇所を巡って日本中で先陣争いがなされているといっても過言ではない⁸。

このように、地熱発電が発電事業にとって魅力あるものになれば、自ずと電力市場への普及が進む。いうまでもなく、地熱エネルギーは自然エネルギーの一形態であるから、京都議定書の批准によって、地熱エネルギー利用による二酸化炭素排出量の削減効果があらためて脚光を浴びることになる。同時に、中低温地熱エネルギーを活用したバイナリー発電やGHPは、地域を主体とした分散型エネルギー源としての活躍が期待できる。

⁷ 独立系発電事業者のこと。Independent Power Producer の略で、一般的には電力会社の行う入札で落札した卸供給事業者をさす。

⁸ 急増する風力発電所出力を運用する電力会社側が、入札上限制度を設けて買い取る風力発電量に上限を設定するという事態まで生じている。

2 - 2 地域経済と分散エネルギーとしての役割

地熱利用の進展によって、恵まれた自然エネルギーの恩恵を地域に直接還元できる。地熱発電，中小地熱利用，GHPの利用技術の普及は，低コストで快適な地域社会を実現し，新規産業や雇用の創出を促す。

本項では、電力自由化、つまり電気事業法の改正によって創出される、地域を主体にしたエネルギー市場について考える。

これまでは、たとえ自然エネルギーに恵まれた地域⁹であっても、その恩恵を地域に直接的に還元する方策がなかった。しかし、電気事業に関わる規制撤廃によって、地域（たとえば地方自治体や企業体、NGOなど）が独自に電気事業に参入することが可能になる。いい換えれば、自然エネルギーの恩恵を、有効に活用する機会が地域社会にも開かれることになる。

ちなみに、分散型電源とは、風力発電、太陽光発電、燃料電池、マイクロガスタービンなどを指す。これらの分散型電源が注目される理由として、以下が挙げられる。

- 大型化によるコスト削減効果を担う従来技術の限界と、事故時に想定されるリスクの大きさなど、規模のメリットが薄らいだこと。
- 大規模集約型電源の立地難を緩和し、需要変動への対応が容易であること。
- 電源の地域依存性が高いことから、地域経済規模に応じたエネルギー供給の確保や、災害時におけるエネルギーの自立供給など、地方分権や地域のエネルギー・セキュリティの視点で評価できること。
- 技術革新によって発電効率が飛躍的に上昇したこと。
- 環境への負荷が少なく、二酸化炭素を排出しないあるいは排出量の少ないエネルギーとして、地球環境問題の対応策となりうること。

このように、需要家に近い位置に設置する分散型電源は、大規模発電所から

⁹ たとえば、風力、太陽光、地熱など。

送電線を經由して電力を送る場合に比べて送電ロスが少ない。発電時に発生する熱もエネルギー源として活用できる。なかでも、地熱エネルギーは、出力が安定しているという点で、気象条件に左右される他の自然エネルギーにはない大きな利点を有している。従来の地熱発電のような発電要素としての利用技術に加えて、他のエネルギー利用技術と組み合わせた総合自然エネルギーシステムを構築できれば、地熱エネルギーの利用範囲が大きく広がる。以下に将来に向けた地熱利用と地域経済について、1) 従来地熱、2) 中小地熱利用、3) GHPに分けてそれぞれ考えてみる。

(1) 従来地熱発電

地熱発電所は、1970年代の石油危機以降、政府の新エネルギー振興の動きと合わせるように、おもに九州や東北地方など国内各地への普及が進んだ。しかし、1990年代に入ると、建設の勢いは止まり、最近では新規計画のない状態にまで停滞している。地熱発電所は、建設時期は多くの雇用を創出し、市域経済への波及効果が高いが、いったん稼働し始めるとその多くは無人の遠隔操作であり、地域との連携は乏しかった¹⁰。地熱は、発電用としてだけでなく熱源としても利用することができる。カスケード利用によるエネルギーの効率的利用、地域のための電気・熱総合利用システム等、地熱発電所を地域のエネルギー拠点施設として位置づけていくことが重要である。

また、地熱発電の自然エネルギーとしての位置づけ、つまり地球環境面での優位性が十分に発揮されていない現状も挙げられる。地熱貯留層のサステナビリティを考慮した生産が可能であり、温泉等への影響も配慮されているにもかかわらず、立地周辺に及ぼすさまざまな環境影響が、いまだに明確に整理されていない。専門家からの情報発信と住民の理解の両方が十分でないことに留意する必要がある。

(2) 中小地熱利用

バイナリー発電は、従来の地熱発電に比べて、小容量でユニット化された発電システムである。比較的低温の熱源を利用できるために、設置可能なサイトも多くなる。出力の安定した従来型地熱発電と、機動性に優れたGHPの長所

¹⁰ ただし、温泉利用（岩手県松尾村）や熱エネルギー利用（大分県九重町）など、地域の産業振興に役立っている好例もある。

を合わせ持っているといえよう。我が国ではまだ商用化の事例はないが、海外ではすでに普及が進み運転性能にも優れているといわれている。設備費が従来の地熱に比べて割安であるために、市場競争力が高くなると期待できる。

さらに、地域主体のエネルギーシステムを構築するためには、電力需要や熱需要の変動に機敏に対応できる運用技術の構築がきわめて重要となる。小規模のエネルギー機器を複数組み合わせ、機動性に優れたエネルギーネットワークを構成することは、情報部門におけるインターネット技術にも類似している。また、この情報通信技術を地域エネルギーシステムの運用に応用することによって、気象条件や需給量の変動、来るべき電力市場の価格変動に迅速な対応が可能となり、経済性にも優れたエネルギーシステムを実現できることになる。

中小地熱利用の促進によって、さまざまな経済効果も期待できる。1) 安価で快適な熱・電利用システムを地域社会に実現できる、2) 化石燃料への依存度を低下できる、3) バイナリー発電などの新規産業を生み出し雇用の創出につながる、などである。生活環境への利用だけでなく、地域の1次産業¹¹、2次産業¹²、3次産業¹³においてそれぞれ活用することができる。また、高効率媒体の研究開発¹⁴との相乗効果も期待できる。

(3) GHP

GHPは、今後急速な普及が期待できる地熱利用技術である。冷暖房に利用した場合には、使用電力を50～80パーセント程度削減できる。とくに、外気温の低下する寒冷地の暖房には威力を発揮する。このGHPに、地域で発電される安価な風力発電を組み合わせることによって、他の燃料源による熱供給に比べて安価に利用できることが期待されている。当然のことながら、この場合には風力発電出力の不安定性を補うために、既設の系統電力によるバックアップ契約が不可欠である。地域の自然エネルギーを、地域の需要に合わせて経済的に供給できる可能性を秘めている。このほかにも、GHPは、地上設備の設置や地中における熱交換器の設計・施工などに新たな雇用を創出する。

¹¹ 温室栽培、水田保温、農作物乾燥、牧草地融雪、木材乾燥、畜舎暖房など。

¹² 冷凍冷蔵施設、食品工業施設など。

¹³ 観光開発、温泉・宿泊施設、温水プールなど。

¹⁴ 環境負荷が少なく安全性の高い媒体の開発。代替フロンの使用期限である2020年が目標。冷蔵庫などの家電でも同様の問題を抱えているので、共同開発や成果の共有が可能である。

2 - 3 現開発体制，社会制度の問題点とあるべき姿

従来の地熱開発体制から脱却して，地熱を核にした地域経済のビジネスモデルの構築が基本となる。IT導入や機器のユニット化によって，運用性，経済性，環境特性に優れた総合自然エネルギーシステムを実現することが望ましい。

これまで，技術革新が経済発展の機動力となり，これが社会全体の繁栄をもたらしてきた。しかし，今日の地球環境問題は，空間の無限性に基づいた開放型モデルによって生じたといえる。今後，環境適応型の社会を実現するためには，資源・エネルギーの有限性を考慮した循環型モデルを構築する必要がある。

我が国のこれまでの地熱技術開発は，経済産業省と新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）がリーダーシップを取り，産学官連携のもとで20年余りにわたって続けられてきた。各地で地熱資源の調査，開発，利用が進められ，地熱発電の普及と促進に大きな足がかりとなった。一方で，地熱発電の直接の利用者が電力会社であるという特殊な事情が，地熱発電の市場参入にさまざまな影響を及ぼしてきた。これまでの問題点と，今後のあるべき姿についてまとめてみる。

（1）電気事業への参入障壁の解消

これまでおもに電力の安定供給を目的として，電力会社以外の事業者による市場参入に対してさまざまな規制があるが部分的には緩和されてきている。平成7年には，電気事業法が改定され，地域を限定して電気を供給する特定電気事業者という事業形態が設定されたが，一般電気事業者と同等の許可や供給義務が課せられている¹⁵。一方，新規参入の企業が既存の電力会社の区域外へ電力を売る際には，特定規模電気事業者としての届け出が必要で，販売地までに経由する他の電力会社に振替供給に係る料金¹⁶を支払う必要がある。この中の事故

¹⁵ 特定電気事業の許可の基準（電気事業法第5条）のひとつに「その事業の用に供する電気工作物の能力がその供給地点における電気の需要に応ずることができるものであること」がある。特定電気事業者は，他社の供給能力に依存することなく，自ら保有する電気工作物の供給能力によりその供給地点の需要に応じなければならないので，送電網を保有していなければ，電力会社と振替供給約款を結びその送電網を使用する必要がある。

¹⁶ これを託送料金という。託送料金 = 送電サービス料金 + 事故時補給電力料金である。電力会社の区域越境時に1kWhあたり約30銭かかるが，区域をまたぐ度に派生するため，新規参入者の発電設備が多い東京電力管内から北海道電力管内に送電すると，東京電力だけでなく通過するだけの東北電力にも振替料金を払わなければならない。

時補給電力料金は新規参入者の発電所が事故を起こした場合など緊急時に電力を代替供給する場合の緊急時送電サービス料であるが、新規参入者の持つ電源の最大容量に対する基本料金で支払う料金体系で設定されており、大きな負担となっている¹⁷。

地熱開発事業者（地熱ディベロッパー）が地熱を電力に変換して特定電気事業者または特定規模電気事業者として事業化する場合には、他の化石燃料系特定電気事業者や特定規模電気事業者と同様に現行制度ではまだ課題が存在する。公正取引委員会は、振替料金は競争制限的であるとして電力会社に廃止の方向で見直しを求めている¹⁸。また、新規参入事業者が既存電力会社の送電網を利用する際に不当な条件を掲示された場合に、迅速に紛争解決ができるような相談指導制度を設けることも検討されている。このように、電力自由化の流れが今後大きく加速することが予想される¹⁹。

（2）従来の運営方式からの脱却と、地域経済のビジネスモデルの構築

これまでの我が国の地熱発電所の運営形態には2種類あり、1つは電力会社が発電設備を所有する場合、もう1つは地熱開発企業（ディベロッパー）が発電設備を所有する場合である。地下の蒸気部門、つまり蒸気源の開発と供給の多くは、ディベロッパー企業が担当してきた。ディベロッパーから見れば電力会社の意向が大きな影響力を持つこと、電力会社にとってはディベロッパーから購入する電力（または蒸気）が割高になることがあり、必ずしも両者の足並みは揃っていたとはいえない²⁰。この結果、地熱発電をビジネスチャンスとして市場に参入する企業のインセンティブを停滞させてきたことは否めない。さらに、製造メーカーが自らコスト削減に励み市場競争力を強めるというインセンティブも、結果として電力の他分野に比べて弱かったといえる。

¹⁷ 現行の東京電力の補てん契約では、基本料金が1kWあたり月555円、追加料金は1kWh約16円。無事故で電力供給を受けない場合は基本料金の3割を支払う。たとえば、年10万kWhの電力を小売りする新規参入者は東京電力から供給を受けなくとも年間約2億円を支払う。

¹⁸ このほか、公正取引委員会では電力業界団体の電気事業連合会についても、調整的な活動を競争制限的な動きの可能性があると問題視している。

¹⁹ 現行の制度を見直しに向け、平成13年11月に経済産業大臣諮問委員会の総合資源エネルギー調査会電気事業分科会が発足し、この中で、現行制度の検証、自由化領域の拡大の検討中である。

²⁰ 電力会社は、電気事業法によって一般電気事業者と卸電気事業者（電源開発など）と定められている。電力自由化以前（平成7年以前）は、電気料金は、総括原価方式によって発電方式によらず一律に定められてきた。ところが、電力自由化以降は、市場で売れる価格（市場原価主義）での価格交渉となっており、他の火力電源並みの発電単価が求められているため開発インセンティブは相対的に低くなっている。

今後は、2007年に予定されている電気事業の完全自由化を契機にして、さまざまな業種の企業が地熱エネルギー分野に参入することが予想される。優れた技術を組み合わせたエネルギーシステムを構築し、魅力的なビジネスモデルを展開することが望まれる。

(3) 地熱の資源調査からシステム・エンジニアリングへ

産学官の地熱研究開発を振り返ると、地熱資源の調査や将来技術として的高温岩体発電等に重点が置かれ、地熱利用技術が市場に普及するための技術性能や経済性の目標設定が十分ではなかったといえる。自然エネルギーの後発である風力発電技術が、電力自由化をにらんだビジネスモデルとして盛んに脚光を浴びているのと対照的である。

今後は、地熱利用機器のダウンサイジングを進め、機動的な投資を誘引する魅力を高めることが期待される。要素機器の開発やユニット化、ITを活用した運用技術の高度化など、地熱資源を効率的に活用するための開発課題への人材資源の投入が急務である。

(4) 環境アセスメントの効用

地熱資源を持続的に利用するためには、サステナビリティを考慮した環境アセスメント²¹が重要である。環境アセスメントの手法として、海外で広く普及している計画アセスメント²²に対し、我が国では事業アセスメント²³が導入されてきた。とくに、我が国の制度では直接的な環境影響をおもな対象とし、プロセス段階への住民参加の機会が格段に少ないことから、行政側の手続きに近い形態に留まっている。環境アセスメントの本来の趣旨に立ち返り、計画段階から地域住民や専門家の参加の下でプロジェクトを進めることが望ましい。長期的な視点に立てば、プロジェクト事後の地域トラブルを回避できるだけでなく、プロジェクトを活用する協力体制を事前に形成することができる。

²¹ Environmental Impact Assessment の訳で環境影響評価ともいう。評価項目の選定 (scoping)、分析 (analysis)、評価 (assessment)、緩和措置の検討 (mitigation) からなる。一般に、評価項目には大気や水質、生態系など直接的な環境影響だけでなく、関係するあらゆる間接影響、たとえば、サステナビリティ、コストと便益、リスク評価、社会・経済的影響も含む。プロジェクト施工後のフォローアップ体制も評価項目の対象となる。また、代替案の形成では、「何もしない (no action)」選択肢も含まれる。

²² プロジェクトの計画時、つまり初期段階から評価を行う方式。

²³ プロジェクトの計画後、事業段階で評価を行う方式。

(5) エネルギー・セキュリティから環境セキュリティへ

21世紀に入り、国際的なエネルギー政策の主眼は、石油危機から発したエネルギー・セキュリティの確保から、これに地球環境保全を加えた環境セキュリティの構築へと推移している。我が国は、国産資源が脆弱であり、エネルギー問題が国家の安全保障の根幹にあることは変わらない。

地熱エネルギー利用は、自然エネルギーの一利用形態としてきわめて重要な意味があり、その役割をいかに担うかの英知が問われている。先に述べた分散型地域エネルギーシステムの展開、そのために必須な市場競争力の強化を含めた、地熱エネルギー利用の開発戦略の策定がスタートになる。

3 環境適応型地熱利用のキーコンセプト

環境適応型地熱利用のキーコンセプトとして、

- (1) 地熱の利用形態と規模の多様性、
- (2) 持続可能な利用、
- (3) ゼロエミッション、
- (4) 地域分散エネルギーとしての役割、
- (5) 産業と市場性の創出、
- (6) 総合自然エネルギーシステム

があげられる。地熱エネルギーは、安定で持続可能な地域分散エネルギー源であり、バイナリ・発電、ヒートポンプ、高温岩体技術等の新技術を基礎に、地域のニーズに応じた多様な利用形態を提供することが可能である。また、他の自然エネルギーとの協調が肝要であり、地熱とのそれらの組み合わせは“需要地に近い需要地のためのシステム”となる。本報告書ではこのような総合自然エネルギーシステムを *EIMY (Energy In My Yard)* と称し、従来型の大規模、集中システムとは異なる地域エネルギー供給形態として提唱する。地熱エネルギーは *EIMY* において中心的な役割を果たす。

3 - 1 形態と規模の多様性 (*Diversity*)

地熱エネルギーの利用形態は一意ではない。しかしながら、これまで、地熱開発イコール地熱発電といった印象が周囲から持たれていることも事実である。

高温蒸気が生産される貯留層では発電が可能であり、自然エネルギーからの一つの発電形態である。実際わが国では5万kW級の発電所の建設を期待できる地域が数多く存在する。その代表的な調査はNEDOによる地熱開発促進調査¹であり、これまで本調査は、蒸気発電の可能な200以上の温度を観測した地域（現在のところ27地域）を明らかにし、わが国の地熱資源量の定量化にも貢献している。このような規模での地熱利用方法を本報告書では従来型地熱発電と

¹ この調査は、民間企業の探査リスクと調査費用の削減し、地熱発電の早期開発を図ることを目的とし、オイルショック直後の昭和55年から現在まで50地域の調査を行い、現在も進行中である。本調査では、蒸気発電のほかバイナリ発電に適している地域の調査も行っている。

呼称している。

従来地熱の開発はナショナルグリッドへの連結が念頭にあった。しかし、それらは必ずしも地下の特性や地域の需要に対応するものではなかった。近年、諸外国では多様な規模や形態の地熱利用が、環境技術として積極的に進められている。

具体例

- (1) ドイツ、ミュンヘンの北に位置するエルディングでは、1999年に地熱エネルギーの総合利用施設が開設された。ここでは、2300mの井戸から65、80トン/hの熱水が供給されており、熱交換器やヒートポンプにより約100の熱水を得ている。製造された熱水²は地域暖房と工業に利用し、熱交換等により冷却された地下水は人工温泉と飲料水に利用されている。
- (2) 米国 DOE (Department of Energy) / NREL (National Renewable Energy Lab.) では、2000年より1000kW程度のバイナリ - 発電と熱の直接利用との組み合わせたシステムの実験を3箇所で行っている。その中で、たとえばネバダ州、エンパイアの例では、550mの井戸より120、270トン/hにより、農作物の乾燥プラントの熱供給および1200kWe空冷バイナリ - 発電を行っている
- (3) ドイツのバド・ウラッハでは高温岩体システムによる地熱の総合利用プロジェクトが2002年度より開始されている。この利用方法は、高温岩体からの熱を、クローズドループにより、地上設備に供給する。ここでは、熱交換器とバイナリ - 発電機を組み合わせ、電気供給、地域への暖房供給、工業、農漁業への熱供給等、総合的なエネルギー供給を行う設計になっている。
- (4) スイスや米国を中心に普及している地中熱ヒートポンプ (GHP) は、地中熱を熱源としたヒートポンプである。このシステムは、現在一般家庭に普及しているエアコンの熱源を空気から地熱に置き換えるもので、温暖化ガスを直接放出しない、設置面積が小さい、天候に左右されない、設備寿命が長い、ヒートアイランド現象の軽減等の利点がある。現在、わが国では普及に向けての検討が急速に進められている。

² 当該分野ではこのような熱水を「造熱水」と言うが、ここでは意味がより明確になる表現を選んでいる。

3 - 2 持続可能な利用 (Sustainability)

従来型地熱発電では、熱と熱水の持続的な利用への配慮が十分でない場合があった。これまで多くの発電所で、生産量の減衰などを経験し、高コストの井戸の追掘につながっている。また、シリカスケールの生成など、還元井の確保も安定な発電を維持するためには重要な問題となっている。環境負荷軽減のための地熱利用は、持続可能性を十分に考慮した抽熱を行うことが必要不可欠である。

地熱発電は、大規模な発電を直ちに開始することを前提にするのではなく、段階的開発を通じて貯留層のデータを蓄積し、持続可能な採熱量とすることが肝要である。

一方、バイナリ - 発電による最新のシステム、地中熱利用ヒートポンプ、高温岩体システム等の新技術では持続可能を前提としており、その技術的検討が進みつつある。

3 - 3 ゼロエミッション

ここで言うゼロエミッションとは、地下からの熱水、気体等流体を地表に放出することなく、完全に地下に還元することを意味している。従来のが国の地熱発電では、生産流体のほとんどが地下に還元されるものの、その一部は冷却塔から蒸気として大気に開放されている。今後はオープンなシステムからクローズドなシステムにより一層移行していく必要がある。

ハワイ島におけるプナに開設された地熱発電所は、バイナリ - システムにより、地熱流体は大気に接することなく熱のみが抽出され、厳格な環境基準を満たすに至っている。この発電所は一つの理想的な利用形態と言える。

クローズドシステムの実現には、流体を地下に再注入（還元）する技術、いわゆるインジェクション技術およびスケール対策技術の確立が不可欠である。

インジェクション技術では、地下に還元する熱交換後の流体が、地下において十分に熱せられ、生産流体として再び地上に戻ることが重要であり、長期安定運転に資する地下熱交換面の設計と連動する必要がある。

スケールは、流体に含まれるシリカや炭酸カルシウム等の溶解成分が、熱交換による流体温度の低下に伴って配管等表面に沈殿、析出し、時間をかけて脱水が進み形成される。それらは流体の流路を狭め、配管の閉塞に到る場合があ

る。地下においても完全にクローズドシステムを実現できる場合（たとえば，Uチューブを用いたGHPなど）は，循環流体の溶解成分を予め取り除くことが可能である。地下でオープンシステムを構成している場合は，注入流体以外の地下流体の混入がない場合でも，溶解成分の供給が岩体からなされるためスケール除去についての適切なメンテナンスあるいはスケールの付着速度を抑える熱交換の方法が必要になる。

フランスのソルツでは現在，高温岩体システムとして地下 5000 m に人工熱交換面を作成し，商業化を目指した抽熱プロジェクトが実施されている。また，わが国でも，山形県肘折においてNEDOにより 2001 年から 2002 年にかけての長期循環試験により抽熱実験が行われている。これらの熱抽出では，インジェクション技術およびスケール対策技術の確立の基礎となる。

3 - 4 地域分散エネルギーとしての役割

地熱は，化石燃料に比較してエネルギー密度の低いエネルギーであり，熱の採取や運搬がしにくい一方で，自然エネルギーのなかでは，安定で相対的に密度が高く，また，高温資源を除けばどこにでも存在するエネルギーである。わが国でも，この特長を十分に認識し，温暖化対策などの環境負荷軽減に活用すべきである。

今後の地熱利用は，ナショナルグリッドへの連結よりむしろ，地域分散エネルギーの有力な選択肢としての役割の飛躍的な増大が期待される。

“ 地域のための地域のエネルギー ” として地熱利用するために，ユニット化した小型システムの供給技術と産業基盤の確立が必要である。また，このような地域分散エネルギーシステムにおいて地熱エネルギーは，その特長を十分に把握し，他の自然エネルギーと相補的に利用することが肝要である。

3 - 5 産業と市場性の創出

過去の地熱利用は国家プロジェクトに従って進められてきた側面が強くあり，市場性の欠如によりコスト高であったことが否めない。したがって，利用形態の多様化による需要先の多様化と多数化を目指すことが，結果的にコスト軽減を生む。また，大規模利用よりは，むしろ小規模多数システムによる量産効果，規模に対応するためのユニット化システムなどが期待される。

地域分散エネルギーの設計には、風力、地熱さらに太陽エネルギーを考慮に
 入れたユーザーのニーズ（エネルギー需要，経済性）に沿う最適システムの提
 供が必要である。

市場調査は、一般家庭のエネルギー供給，各地域における農業，水産業，製
 造業等へのエネルギー供給などの個別需要だけでなく，地域，自治体の視点か
 らニーズマップを整理し，対応する必要がある。

自然エネルギーを組み合わせたエネルギー供給システムの創出は，各地域に
 おいて，当該装置の設計を担うコンサルタント業，それに関連した製造業，さ
 らにメンテナンス業等産業を創出し，地域経済に大きく貢献する。

一方，このような地域分散エネルギーの普及とそれにともなう地域経済の活
 性化には自治体のなすべき役割も大きい。

3 - 6 総合自然エネルギーシステム

自然エネルギーとして現在考えられているものとして，地熱以外に，風力，
 太陽，水力，バイオマス等があげられる。前述のように，地域の特性に合わせ
 たこれら自然エネルギーの組み合わせにおいて地熱を如何に位置づけるかが重
 要である。

例えば，地熱に，太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーを組み合わせ
 た総合自然エネルギーシステムを構築することを考える。安定した出力特性を
 持つ地熱を中核として，気象条件に左右されやすい他の自然エネルギーを利用
 させることで，負荷応答性に優れた熱・電力エネルギー供給システムが実現で
 きる。このように自然エネルギー間の協調によって各エネルギー機器の設備容
 量を最適にできるため，一種類の自然エネルギーに依存する場合に比べて投資
 効率を高めることができる。また，化石燃料などの他のエネルギー源に比べて
 燃料費および運転維持費も低減でき，結果的に，経済性に優れたエネルギーシ
 ステムの構築が可能となる³。

³ 具体例として EFF レポート（久保一雄・中田俊彦「地域自然エネルギー利用システムの統合評価」（2002））を本報告書の参考資料として添付する。

3 - 7 *EIMY* (Energy In My Yard) の提唱

以上の環境適応型地熱利用のキーコンセプトを統合するものとして、本報告では、“*EIMY* (Energy In My Yard)” という概念を新たに提唱する。図3 - 1 にその概念図を示す。

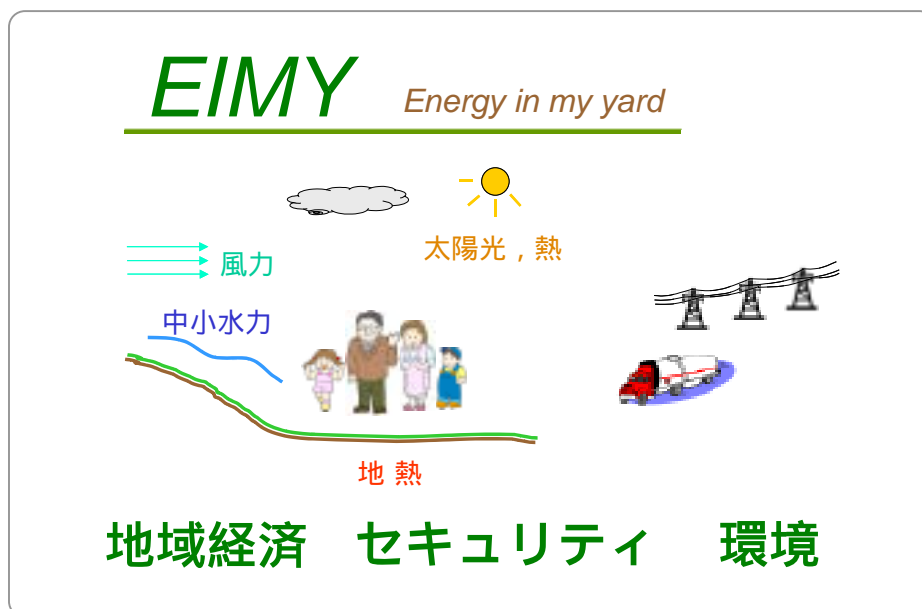


図3 - 1 *EIMY* の概念図

この概念は、ある需要単位があった場合、その地域で利用可能な自然エネルギーを自然条件、経済性が許容する範囲において最大限に利用し、その過不足分をナショナルグリッドにより需給するエネルギーシステム・経済システムを言う。すなわち、遠隔地で生産されたエネルギーを大量消費する従来の立場から脱却し、自らの地域でその環境特性や経済性を考慮し、エネルギーの生産、変換、利用を地域のシステムとして再構成することを必要とする。

*EIMY*としての地熱利用の拡大には、地熱利用技術開発ばかりでなく、他の自然エネルギーと組み合わせた総合エネルギーシステム技術の構築、その実現のための経済モデル、ビジネスモデル、ならびに社会制度の構築が必要である。

地熱は、安定性、多様性などの特長を持ち、総合自然エネルギーシステムの中核的な役割を担うべきものである。

4 2 1世紀の地熱開発戦略

4 - 1 開発戦略

21世紀の我が国の地熱開発は、以下の4つの基本戦略によるべきである。

- (1)環境適応型への転換
- (2)規模と形態の多様化
- (3)適用地域の拡大
- (4)地域分散エネルギー源としての役割追及

4 - 1 - 1 環境適応型への転換

これまで地熱開発は5万kW程度の発電を主たる目的として実施されてきた。また、公的研究機関、大学等における基礎研究、実用研究課題についても高温岩体発電、マグマ発電等、数万～数10万kWの発電を最終的な目標に掲げてきたものが多い。これは、石油ショック以降、エネルギーリスク低減のために、地熱発電をベース電源のひとつと位置付けてきたためである。

地熱発電の炭酸ガス放出量は化石燃料に比して非常に小さく、太陽光発電、風力発電に対しても優位である。また、クローズドシステムを導入し、適切な生産を行えば、大気、河川水、および地下環境への影響を極小化した形で発電を行うことができる。さらに低エネルギー密度の地熱資源を最適な形で利用することにより、化石燃料の使用量低減、すなわち温暖化ガス放出の低減に寄与できる。

各国で環境セキュリティの概念が重要視されつつある現状を踏まえ、地熱エネルギーは今後その環境メリットを十分発揮できる形で開発を行うべきである。このためには、まず産学官の関係者が地熱の持つ環境メリット、エネルギー源としての特色を理解した上で、これまでの地熱イコール発電という視点を転換し、有望な自然エネルギー源のひとつとして位置付けるべきである。さらに、このことを国民および社会に広くPRしていくことが必要であろう。

地熱の開発・利用においては、森林伐採、土地造成、水質汚染、大気汚染等の環境負荷が極力小さくなるよう、開発手法、開発形態を追求する必要がある。

また、エネルギー採取時においては、可能な限り大量の地熱流体を採取するというこれまでの概念から、地熱の再生力の範囲内でエネルギーを採取する「サステイナブルな生産」の概念へ転換しなければならない。さらに地熱の利用システムについては地下の状況に柔軟に対応できるシステムや外部の環境へ負荷を与えないシステムの開発が今後重要である。

要約すれば、

地熱の認識をベース電力源から環境適応型エネルギー源へと転換する、
 開発手法、開発形態を環境適応型へ転換する、
 エネルギー採取法を環境適応型へ転換する、
 エネルギー利用システムを環境適応型へ転換する、

ことが重要である。

4 - 1 - 2 規模と形態の多様化

地熱エネルギーは、温度、資源量、賦存形態が多様性に富むのが特徴のひとつである。

高温地熱資源（200℃以上）については、発電可能な資源の存在が確認できた地域の幾つかで、従来型の地熱発電所がこれまで開発されてきた。しかし地形上・制度上の制約により発電所の建設が困難である場合、あるいは可採量が少ない場合、未開発である事例が多い。

中低温地熱資源（80℃から200℃）は、資源量の全容には未解明の部分があるが、より広い地域で存在していると考えられることから、我が国全体での資源量は膨大である。中低温地熱資源により、発電のほか、給湯、冷暖房、工業、融雪、農業、漁業等多くの熱需要をまかなえるが、現在、我が国では産業用および温泉に一部利用されているに過ぎない。

地表付近の低温地熱資源は、我が国ではほぼ均一に分布しているため、その資源量は膨大である。低温地熱資源はGHPによる冷暖房、給湯、融雪に利用可能であり、米国、スイスでは一般的な熱源のひとつとして実用されているが、我が国ではGHPの産業化、実用化が遅れているのが実情である。

地熱資源の多様性を生かすためには、まず我が国における地熱資源の資源量の全容を把握し、データベース化する必要がある。産総研、NEDOでは坑井調査、地表調査等により地熱資源のデータベース化を行っており、主として火山性地熱および平野部深部の地熱資源分布についてデータベース化が進んでい

る。今後、深層熱水や地表付近に局在する中低温・低温地熱資源についても調査、既存データの解析・整理によりデータベース化を進める必要がある。また、同時に各地における熱需要のデータベース化も進めるべきである。これにより、開発に先立ち最適な開発形態およびその規模、経済性を事前に提示できる。また、これに加え、賦存形態、資源量、熱需要に応じた地熱利用システムの開発体制の整備も重要である。

以上要約すれば、

中低温地熱資源、低温地熱資源を含む我が国の多様な地熱資源全体のデータベース化、
最適利用形態、規模、経済性の事前評価手法の開発、
賦存形態、資源量、熱需要に対応した地熱利用システム開発体制の構築、

を行うことにより、地熱利用の形態と規模の多様化を実現できる。地熱利用の規模および形態の多様化は、新規産業の創出、温暖化ガス放出量削減、自然エネルギーの有効利用に対して寄与するものである。

4 - 1 - 3 適用地域の拡大

地熱の現在の主な利用目的は温泉または発電であり、開発対象地域は山間部の非人口密集地域であるのが一般的である。また、地熱エネルギーを利用した熱水供給システムも存在するが、既存の温泉、発電所からの熱水を利用しているため、需要地までのパイプラインが必要になるなど化石燃料に比べ経済的に優位であるとはいえない事例もある。

地熱は広範に分布しており、多様な熱需要を満たすため、熱需要が存在する地域のエネルギー源として適用地域を拡大することが可能である。このためには、これまで未利用であった地熱資源を需要とコストに見合う形で利用可能にする努力が不可欠である。すなわち地熱の存在形態、資源量、地域の社会・経済システム、さらに熱需要に適合した形態で低コストにエネルギーを供給できるようにすることが重要であり、そのため、地域の状況に合わせたシステム設計技術が要求される。適用地域の拡大には中低温の地熱資源を有効に利用する必要があり、このために水圧破碎、バイナリーユニット、ヒートポンプ等の新技術がキーテクノロジーとなる。

すなわち、

地域の状況に合わせたシステム設計技術と経済性評価手法の開発、

新技術の導入による抽出可能エネルギーの増大，
 が，適用地域の拡大につながることになる。また，これにより，需要地でのエネルギー供給が実現するとともに，地熱エネルギーの恩恵を広く国民が享受できることになる。

4 - 1 - 4 地域分散エネルギー源としての役割追求

従来型地熱発電は，ナショナルグリッドへのベース電力供給が主目的とされてきた。しかし，大型発電所のコスト削減効果に限界が見えてきたこと，大規模発電所の事故リスクが大きいこと，ベース電力の供給が過剰になりつつあること，等の理由により，ベース電力供給用の新規大規模発電所の開発意義は低下している。このため，電力自由化後にはナショナルグリッドと地域分散型エネルギーシステムが共存するものと考えられる。

21世紀の自然エネルギー利用のキーワードとして本報告書で提案している *EIMY* は，自然エネルギーを地域の特性に適応した形で最大限利用しようという概念であり，自然エネルギーの総合利用による地域分散型エネルギーシステム・経済システム・社会システムの構築を目指している。*EIMY* の概念によれば，地域はエネルギーの供給に加え，新規産業や雇用の創出等の恩恵を受けることになり，地域経済の発展にも寄与できる。

地熱エネルギーを *EIMY* の中心的な要素として位置付けるためには，地域分散エネルギー源としての役割を追求することが重要である。地熱は安定なエネルギー源であることから，地域分散エネルギーシステムのベース部を担うことが望ましい。このためには，地域エネルギー供給のための小型かつ安価なエネルギー抽出・利用システムの開発，およびそれらの地域社会への導入法の検討が急務である。また，他の自然エネルギーを各々の特徴を生かしつつ，地域の自然条件，社会・経済システム，需要に適合した形で組み合わせるためには，技術的課題の克服に加え，総合自然エネルギーシステムの経済モデル・ビジネスモデルを構築する必要がある。

以上を要約すれば，

地域分散総合エネルギーシステムのベースとして地熱をとらえる，
 小型かつ安価なエネルギー抽出システムの開発を行う，
 他の自然エネルギーと組み合わせた利用法を開発する，
 総合自然エネルギーシステムの経済モデル・ビジネスモデルを構築する，

ことが重要である。

4 - 2 研究開発課題

地熱エネルギーの存在地域，存在形態，資源量，および各地域のエネルギー需要，社会・経済システムのデータベース化は最適な開発形態・規模を提示するシステム構築のために不可欠である。ここで地熱の資源量は再生能力を考慮して再評価すべきである。

従来型地熱発電については，地域の環境適応型エネルギー源へ転換するために，サステイナブル生産技術，ゼロエミッション化，コスト低減等について研究開発を行うべきである。

中小地熱利用では，賦存状態・資源量・熱需要に対応した多様な熱利用を実現するため，バイナリー発電システム，低コストエネルギー抽出技術の研究開発が重要である。

GHPについてはコスト削減技術の開発に加え，国民へのPRと市場の拡大が急務である。

科学的技術の研究開発は，経済システム，社会システムに関する研究と相互にリンクして行う必要がある。

4 - 2 - 1 地熱エネルギー全般に関連する研究開発課題

- (1)地熱資源の資源量再評価とデータベース化：地熱エネルギーの分布および形態の多様性に対応した開発を行うためには，まず，地熱資源量の新たな評価とデータベースが必要である。すなわち，地熱資源は化石燃料・鉱物資源とは異なり，再生可能な地下資源であるから，サステナビリティを考慮した資源量の評価法を構築する必要がある。これまで，NEDO，産総研は全国規模で火山性地熱資源および平野部深部の地熱資源について体積法¹によりデータベース化を行ってきたが，これらについては新基準のもと再評価するのが望ましい。また，深層熱水および表層付近に局在する中低温・低温地熱資源については新規調査，データの整理・解析・解釈を行い，広範な温度領域のデータベースを作成し，それを公開すべきである。

¹ 地熱資源が分布する領域の体積と温度によりエネルギー量を評価する方法。同様の資源量評価手法は化石燃料・鉱物資源開発の分野で一般的であるが，地熱エネルギーの場合には再生可能エネルギーであることを考慮する必要がある。

- (2)最適エネルギーシステムの設計法：地熱エネルギーを中核とする総合自然エネルギーシステムにおいて、電力や熱エネルギーの供給量は需要家サイドの負荷特性と均衡することが要求される。このために、対象地域のエネルギー需要を表すエネルギーデータベースの構築が必要であり、さらに地域の気候、経済・社会システムを考慮した地域エネルギーの需給システム設計法を確立することが重要である。
- (3)自然エネルギー間の連携：総合自然エネルギーシステムでは、供給サイドにある地熱、風力、太陽光などの自然エネルギー間の連携が不可欠である。このために、対象地域の気象条件や立地条件などを考慮した供給サイドのエネルギーデータベースを作成する必要がある。さらにこれを利用して、個々のエネルギー源の出力特性に加え、既設の送配電線などのインフラ設備も考慮して、安価かつ運用性に優れたエネルギー供給システムを設計する手法を構築する必要がある。また、ここでは、技術開発に加え、社会システムおよび地域の経済システムに関しても併せて研究を行うべきである。
- (4)アセスメント法：地熱利用に関わる環境影響を評価するために、評価手法と評価体制の両面から環境アセスメントの制度を充実させる必要がある。評価手法については、評価対象、評価項目、評価方法について項目とその内容を整備する。一方、評価体制については、評価に関わる専門家や地域住民との連携、さらにフォローアップ時限の設定などを含めて、具体的な体制を検討することが重要である。

4 - 2 - 2 各開発形態における研究開発課題

本報告では、地熱の開発形態を便宜的に、(1)従来型地熱発電、(2)中小地熱利用、(3)GHP、の3つに分類し、以下、各開発形態固有の研究開発課題について述べる。要素技術開発の具体例については添付資料に列挙する。

(1)従来型地熱発電

従来型地熱発電については、今後、以下の技術開発により、環境適応型への転換を図るとともに地域のエネルギー供給の側面も追求することが重要である。

(環境適応型発電へ向けての研究開発課題)

既存の従来型地熱発電所では設計、開発、運転の各段階で、景観上の配慮、地熱流体の放出量低減等、環境負荷低減のための努力が払われているが、今後、

以下の点についてさらに研究開発を行い，安定かつ大出力の環境適応型自然エネルギー源として開発・運用すべきである。

- * 低環境負荷掘削システム：掘削システムに付随するディーゼル機関は少なからず環境負荷を与えている²。また，掘削に使用される泥水³とそれに浮遊する岩盤の切り屑を地表，河川に放出すれば環境汚染が生じる。掘削にともなうこのような環境負荷を低減するために“ローエミッション掘削技術”の開発が必要である。
- * サステイナブル生産技術：従来型地熱発電では，ある一定の発電量を確保するために生産が行われ，多くの貯留層で生産量の減衰が生じている。また，坑井・パイプラインに付着する地熱流体中の析出鉱物（スケール）も，システムの寿命に影響する。今後，サステイナブルな生産を実現するためには，
)貯留層の再評価とサステナビリティを支配するパラメータの解明，
)シミュレーションによる経時変化の事前予測技術の研究開発，
)スケール対策技術の研究開発，
)貯留層設計技術，水圧破砕法，熱水循環技術等，高温岩体技術として開発された新技術の導入，
)貯留層変動の計測技術の研究開発，等を今後も着実に行うべきである。
- * 段階的拡張技術：従来型の地熱発電では貯留層の性状に不確定な要素が多いにもかかわらず，当初から所定の生産目標を達成するように開発が行われてきた。このことが過剰な初期投資やリードタイムの長期化を招く原因のひとつになるとともに，サステイナブルな生産を実現困難にするものであった。したがって，今後，
)段階的にシステムを拡張可能な発電システムの開発，
)生産にともなう貯留層変動の計測方法の研究開発，
)貯留層の変動を事前予測可能な手法の構築，を行うことにより，貯留層の生産能力に適合したサステイナブルな利用が実現する。また，それにより，開発コストが低減されるとともにリードタイムが短縮される。
- * ゼロエミッション生産技術：従来型地熱発電所では，ガス・金属を微量に含有した蒸気，熱水の一部がパイプライン，冷却装置から大気・河川へわずかながら放出されている。またスケールは有害金属を含んでいる事例が多い。このため，
)地熱流体の地下への還元法の検討，
)複合サイクル発電システム，2次熱交換器等の導入による完全クローズドループの実現，
)スケールの処理・再資源化の研究開発，が必要である。

² 大型の掘削システムに付随するディーゼル機関には1日あたり数千リットルの軽油を消費するものもある。

³ 掘削泥水は粘土とポリマーが溶解したアルカリ性の高比重懸濁液である。

(地域のエネルギー源へ向けての研究開発課題)

従来型地熱発電所を地域のエネルギー源としてとらえると、発電に加えて熱供給の役割も併せ持つことが望ましく、これを実現するために以下の開発を行う必要がある。

- * 低コスト発電：地熱発電は運用特性が優れているため、地域のベース電力を担うことが期待できるが、このためにはナショナルグリッドから供給される電力に対してコスト競争力を有することが必要である。さらに、地域の需要以上の発電量をナショナルグリッドへ売却する際の経済性も考慮してシステムを設計する必要がある。したがって、()開発・運用過程の再検討による過剰投資の抑圧と目標値までのコスト低減、()地熱蒸気による発電後にバイナリーシステムにより2次発電を行う複合サイクル発電システムの研究開発、()地域への電力供給価格と過剰電力の売却価格を考慮し、経済的に最適な発電規模を提示可能なモデルの構築、を行う必要がある。
- * 地域への熱供給：タービンを回転させた後の地熱流体から、熱交換器により熱を取り出し、それを地域への熱供給に使用可能である。本技術については地域の熱需要へのマッチングとコストが実用上の鍵であり、モデルによるシステム設計、経済性の評価、さらには実証試験を行うことが望ましい。

(2) 中小地熱利用

中小地熱利用では、資源量の全容の解明とデータベース化がまず第一に必要である。本形態では、開発、運転時の環境負荷が小さいことに加え、地下条件、地域の経済・社会システム、および熱需要に適応した形態、規模でエネルギー抽出を行えることが重要である。また、他のエネルギー源とのコスト競争力を有することも必要である。

(資源量の解明とデータベース化)

- * 資源量の解明とデータベース化：中小地熱利用では、熱源として、()火山性高温小規模地熱、()火山性中温地熱、()高温温泉、()深層熱水、を利用することが想定される。これらの熱エネルギー源のうち、火山性のものについては、NEDO、産総研により、データベース化が進んでいるが、深層熱水、非火山性温泉についてはその成因、資源量等について未解明の部分が多い。よって、今後、サステナビリティを考慮して資源量の評価法を検討することに加え、調査および各種データの再検討によりデータベース化を進める必要がある。

(低環境負荷エネルギー抽出のための開発課題)

- * 低環境負荷掘削システム：従来型地熱発電と同様にローエミッション掘削技術の研究開発が必要である。さらに、浅部の地熱開発では泥水を用いない掘削方法の開発により地下水への影響を抑えることも望まれる。
- * 段階型拡張システム：小規模なシステムで抽熱を開始し、その後、貯留層の状況に合わせて段階的に拡張し抽熱量を拡大する段階拡張型システムを開発することにより、経済的かつサステナブルに熱抽出を行える。特にバイナリー発電では、本システムにより過剰な設備投資によるコスト高および不適切なエネルギー抽出を避けることができる。
- * 低環境負荷バイナリー発電システム：バイナリー発電システムでは媒体として、フロン、アンモニア、ペンタン等が使用されている。バイナリーシステムはクロードシステムとして設計されているが、事故、天災、解体・廃棄等により媒体が外部に放出された場合の環境負荷は大きい。このため、) 大気中への媒体放出防止法の研究、) 低環境負荷媒体の開発、が必要である。

(多様なエネルギー抽出のための開発課題)

- * バイナリー発電システムの開発：中小地熱利用では、温度と規模および電気・熱需要の多様性に対応して様々な発電システムが必要である。現在、市場では海外で開発された数 100kW 以上の出力を有する空冷型の製品が代表的である。しかしながら我が国では数 10kW 程度のシステムを用いる事例も多いと考えられること、豊富な河川水を用いた水冷式が効率・騒音の点で優位であること、特に需要地では小型・低騒音かつ安全なシステムが必要であること等の理由により、我が国の特色に合った商用化バイナリーシステムを開発する必要がある。
- * 多段熱利用システム：発電ばかりではなく、バイナリー発電後の媒体からヒートポンプや熱交換器により熱を取り出し、それを温泉、暖房、農業に用いる多段熱利用商用化システムを開発する必要がある。

(低コスト化のための開発課題)

- * 低コスト掘削システム：我が国の掘削コストは、欧米の数倍であると言われているが、これは掘削システムの稼働率が低いこと、人件費が高いこと、工程が非効率であること、オーバークオリティな施工が行われている場合があ

ること、等による⁴。よって)自動化、省力化掘削システムの開発、)機動性に富むモバイル掘削システムの開発、また、)最適な坑井仕上げ法の検討、により施工時間・コストの低減を図ることができる。

- * 高能率バイナリー発電システム：媒体および発電サイクルの見直し、発電機の効率上昇により、発電効率を上昇させることができれば、発電単価を引き下げることが可能である。
- * 高能率・低コストヒートポンプ：エアコン用ヒートポンプ等の民需技術を活用することにより、ヒートポンプの高能率化、低コスト化を実現できる。
- * 機器の遠隔管理：分散型エネルギー源では管理コストの低減が重要である。これについては、)各種法規制の見直しを図る、とともに、)IT技術を使用した遠隔モニタリングシステムを開発し、管理にかかる経費の低減を図るのが望ましい。

(3) GHP

GHPについては、基本技術は開発されており、低コスト化が実用化の鍵になる。沖積平野、河岸段丘、扇状地等、地下水の流動が大きい地域ではGHPのエネルギー消費効率が2倍以上向上するため、地下水理に関する理解を進めるとともに、GHPの適地をデータベース化することが重要である。また、モデルハウスおよびモデルシステムにより、本システムに対する国民の理解を得ることも、本技術を普及させるために、早急に行う必要がある。一方、GHP方式の低環境負荷性を生かすために、施工も低環境負荷であるべきである。

(地表付近の低温地熱資源の理解とデータベース化)

- * 地表付近の水理の理解：礫層を含む沖積平野、河岸段丘、扇状地等では、地表付近の高透水層を利用して、高能率に熱を抽出できる。このため、実データ解析、シミュレーションをもとに地表付近の透水層内での流速分布、温度分布等の地下水理についての理解を深めることが必要である。
- * GHP導入最適地のデータベース化：全国の平野・盆地部について、既存のデータの集約・解析により透水層の分布、抽熱量、抽熱コストをデータベース化し、特に多くの熱抽出が見込める地域をGHPに最適な地域として導入

⁴ 米国では通信線を内蔵したカーボンファイバ製掘削用チュービングと、それ用いた新世代の掘削システムの開発プロジェクトが行われており、実用レベルのシステムが実現している。これにより掘削時における、掘削システムの制御、工程監視、地下情報計測がリアルタイムに実現し、高精度掘削による開発リスクの軽減、工程の短縮・安全性向上等が見込まれている。

を進めることが望ましい。

(低コスト化のための研究開発課題)

GHPによる熱利用の低コスト化は、施工および、システムの低コスト化、さらに単位設備投資あたりのエネルギー抽出量の増大により実現可能である。

- * 施工の低コスト化：GHPでは坑井の掘削および仕上げにかかる経費が支配的である。掘削コスト低減のためには、()高速掘削方法の開発、()モバイル掘削システムの開発、()掘削と仕上げの同時施工技術の開発、()半自動化掘削システムの開発、が重要である。一方、パイプの埋設、セメンティング等の仕上げに関しては、()最適仕上げ法の開発、によりオーバークオリティな施工にかかる経費を低減できる。
- * システムの低コスト化：ヒートポンプ部については、中小地熱と同様に、()他の民生機器の技術を活用し低コスト化を図るべきである。また、住宅の建設時に冷暖房用配管を敷設することが屋内施工コストの低減に寄与する。このため、()新規に建設される建売住宅、集合住宅について導入を積極的に進めることが必要である。また、()既存住宅のうち、温水等による暖房設備が設置済みのものについてもGHPを低コストに導入可能であり、普及を進めるべきである。GHPは断熱性が高い高性能住宅と組み合わせて、初めてその本来の特徴を生かせるものであり、導入は住宅メーカーと連携するのが望ましい。
- * 地下水流動を考慮したシステム設計技術：我が国では流動する地下水からGHPにより熱を抽出する方法が最も経済的である。このため、地下水理に関する理解を図るとともにデータベースを構築し、それを利用した最適システム設計法を構築する必要がある。
- * 地層内熱交換技術：高温岩体技術で開発された水圧破碎法を導入し、地層内熱交換システムを作成する技術を確立すれば、地下水の流動が小さい地域でも採取可能な熱量とサステナビリティを増大させることが可能である。これによりGHPの適用可能地域の拡大も見込める。

(国民へのPR)

GHPが市場で認知されていない主要な原因はコストと国民の理解不足にある。大量生産により機器コストの低下が期待できるが、そのためには、GHPが有する環境メリット、安全性をPRし、導入件数を増大させる必要がある。

このためには、地方自治体と連携して、まず、福祉施設、医療機関等、給湯・暖房用の熱需要が大きく、公共性が高い施設への導入を早急に進めるのが望ましい。また、住宅展示場においてモデルハウスを設置しPRすることも必要である。

(低環境負荷施工)

GHP施工時の環境負荷を低減するためには、他の開発形態と同様に、ローエミッション掘削システムを導入する必要がある。特にGHPについては掘削泥水を用いない掘削方法が開発できれば環境負荷を極力低減することができる。

4 - 2 - 3 他分野と密接に関係する研究開発

研究開発課題のうち、いくつかは他分野と共通の課題や密接に関連する課題である。これらについては以下のように研究開発を進めることが望ましい。

- * スケール対策技術：スケールの処理は、資源リサイクル事業と密接に関連する。金属を含んだ産業廃棄物から有用金属を回収する技術については、素材関連会社が技術開発を行っているため、本分野ではその成果を導入するのが望ましい。
- * バイナリー発電システム：ごみ焼却施設からの廃熱、工場廃熱、固形化燃料等を利用したバイナリー発電システムが開発されつつある。サイクルの検討、媒体の開発、ゼロエミッション等、バイナリー発電に関する基本的な技術開発は熱源によらず共通に実施できる。地熱利用バイナリー発電システムの特徴として、小容量、低温度熱源、段階的拡張可能等があげられるが、これらについては地熱独自の仕様であり、地熱発電に関係する企業・研究者が発電機器メーカーと連携して技術開発を行うのが妥当である。
- * 多段熱利用：地熱の有効利用のためには多段階の熱利用が望ましいが、これはコージェネレーションと共通の研究課題である。コージェネレーションでは需要の熱電比に対応して適切なシステム設計を行う技術の開発が行われており、地熱利用システムの設計でもこの技術を活用するのが望ましい。
- * 高効率ヒートポンプ：中小地熱利用、GHPにおいては高効率ヒートポンプの開発が望まれるが、現状では地熱利用の市場規模が小さく、開発経費に制限があるため、エアコン等のために開発された技術を導入すべきである。
- * 総合自然エネルギーのシステム：自然エネルギーをそれぞれの特徴を生かし

た形で組み合わせることにより、各々のメリットを最大限生かすことができるが、このための技術開発、経済性評価等については自然エネルギー開発に従事している各分野の企業や研究者が協調して行うのが望ましい。このとき地熱に関係する企業、研究者は地熱が自然エネルギー総合利用システムのベース部となることを踏まえ、率先して中心的役割を担うべきである。

- * 分散型電源の系統連系技術：分散エネルギーを利用した電源を一般電気事業者が所有する電力系統に連系する場合、系統との同期運転や事故時の保護協調など系統連系に関する技術要件を満たすことが不可欠である。電力自由化後に多くの分散型電源が実用化されるであろうことから、工場廃熱による発電、廃棄物による発電等、他分野で開発されつつある系統連系に関する各種技術を導入するべきである。
- * 分散電源の制御技術：分散電源のコスト低減のためには、管理コストを抑えることが重要である。このためにIT技術を利用して電源を遠隔監視・制御する技術の研究開発が必要である。この問題は多くの分散型自然エネルギー発電について同様に発生するため、自然エネルギーによる発電を行う企業が連携して研究開発にあたるべきである。

4 - 3 研究開発体制

従来型地熱発電の今後の開発は、ディベロッパーが中心となり、公的研究機関・大学等で蓄積されてきた知見・基礎技術も活用して実施するのが望ましい。

中小地熱利用については、過渡期には公的研究機関、大学が研究開発の主導的立場となりプロジェクトを遂行する必要がある。実用段階では、公的研究機関・大学とリンクしたコンサルタント会社の設計・指導のもと、各地域の業者が施工・メンテナンスを行う形態が望ましい。

GHPについては、関連企業による技術協会等が中心となり、実用化へ向け、開発、導入、PRを行うのが望ましい。

政府・地方自治体は中小地熱利用、GHPに新規参入する業者に対し、税制的優遇措置、補助等を行い、地域産業として育成していくとともに、ひろく市民へ情報提供を行うことが必要である。

4 - 3 - 1 これまでの研究開発体制

これまで、地熱エネルギー利用に関する研究・技術開発は、公的研究機関、大学等が各々独立して基礎研究、要素技術開発を行ってきた。また、ディベロッパーは特に開発技術、生産技術に関して技術開発、実用化、知見の蓄積を行ってきた。これらの研究開発はNEDO等から給付される公的資金により行われる例が多かったが、公的資金に過剰に依存した研究開発体制が、新技術の開発とその実用化の遅れ、コスト競争力の低さの一因となったことは否めない。

4 - 3 - 2 今後の研究開発体制

(1)従来型地熱（図4 - 1）

従来型地熱においては、ディベロッパーが主体となり、コスト低減、サステイナブル生産、ゼロエミッション、地域エネルギー源としての役割、に関して実用的な研究開発を行うべきであろう。公的研究機関、大学は基礎的・先進的分野で研究を実施し、それにより得られた知的資産をディベロッパーに提供するのが望ましい。このとき、研究経費については一定の公的資金の導入が必要であるが、コスト・経済性の目標値、具体的研究開発目標、成果等を明示した上で公的資金を受け入れ、それらの達成を図るべきである。

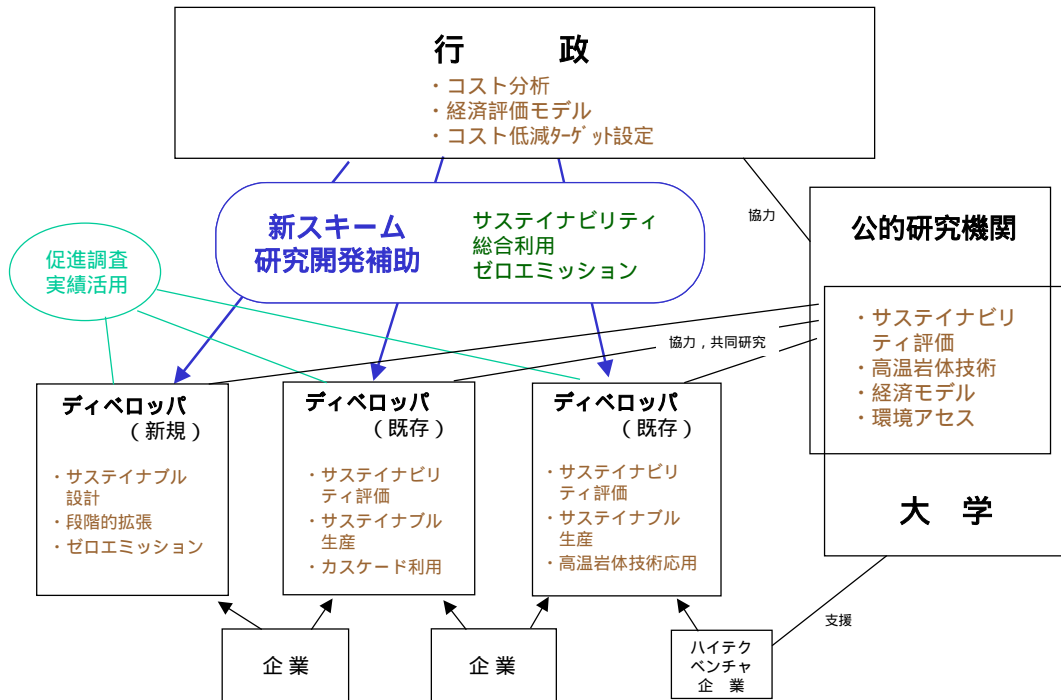


図4 - 1 : 従来型地熱の研究開発体制

(2) 中小地熱

中小地熱についても、最終的に地域産業として民間企業が自立することが望ましい。しかし本分野については産業基盤は存在せず、今後新産業分野を創出する必要があるため、立上げ期と実用期に分けて研究開発体制を考えるのが適当である。

(立上げ期)(図4 - 2)

中小地熱資源による発電・熱利用総合システムは、我が国にはこれまで開発実績が無い。アメリカにおいてはDOE/NRELの44～80%の補助により、3つのテストプラントによる実証プロジェクトが、2000年より開始されている。このため我が国においても立上げ期においては公的資金による研究開発プロジェクトが不可欠であろう(図4 - 3)。

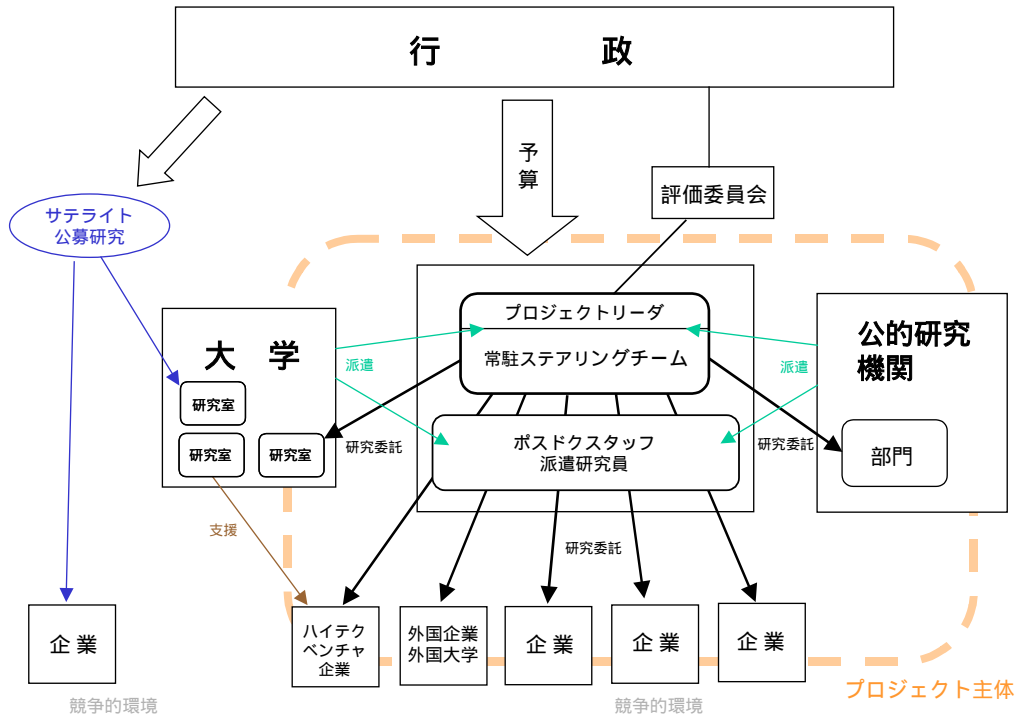


図4 - 2 : 中小地熱利用の立ち上げ期における研究開発体制

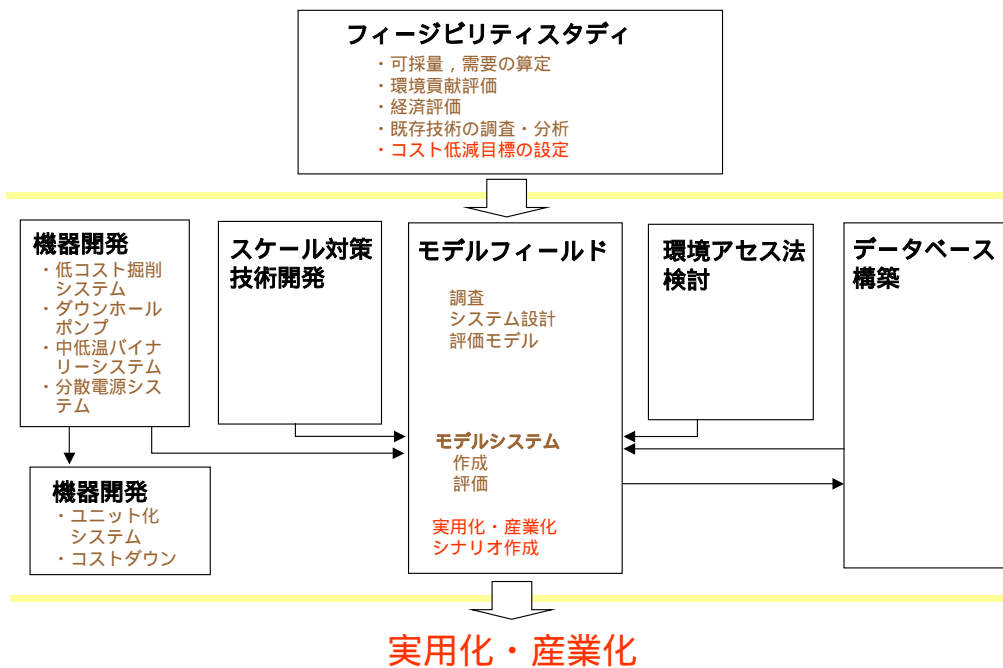


図4 - 3 : 中小地熱利用技術開発・実用化のマイルストーン

本プロジェクトは、常駐ステアリングチームと研究スタッフが企業、公的研究機関、大学と連携をとりながら主体的に遂行する形態が望ましい。また、本プロジェクトにはハイテクベンチャー企業を積極的に参入させ、ベンチャー企業の育成と関連先端技術の開拓・熟成を図るべきであろう。

本プロジェクトと併行して、関連したサテライト研究を公募し、国内の基礎研究、関連研究の活性化を図るとともに、競争的環境を創出することが考えられる。

また、本プロジェクトが国内の産業化にそのままつながるように、プロジェクトの企画・運営を行うとともに、プロジェクト後に行政がフォローアップを行うことが不可欠である。

(実用期)(図 4 - 4)

中小地熱は地域分散エネルギーの役割を担うことになるため、実用期においては、基本的に各地域の業者がシステムの施工、メンテナンスを行う形態が望ましい。しかしシステムの実現には、その地域の地下性状の把握とそれに基づくシステムの最適設計、施工方法の選択、経済評価等、高度な知識と経験が必要とされる事項も多いため、広域をカバーする少数のコンサルティング会社がシステム設計等を行い、地域の業者と連携してシステムを実現する方法が考えられる。このコンサルタント会社は高度な技術者からなる小規模なものが適当であろう。立上げ期から実用期への移行期においては、産総研や大学発ベンチャー企業、地熱ディベロッパー等が、このコンサルタント業務を行うことも考えられる。本体制により、地域の施工・メンテナンス業者の参入が容易になる。政府・自治体はこれらの業者に対して税制的優遇措置、補助等を行い、地域産業として育成していくとともに、ひろく市民に対し情報提供を行う必要がある。

システムの低コスト化には、長期的に視野に立った、設備や施工機器の開発・改良が不可欠であるが、これは一定の公的補助の下で中央大手企業が需要をにらみながら行うことになる。

自然エネルギーの開発においては、不確定要素を完全に取り除くことは不可能であり、一定の開発リスクや施工時のトラブルをとまなうことは避けられない。このことは地域の施工業者には負担であり、開発コストを引き上げる要因となり得る。このため、予測以下の抽熱量、施工トラブル、性能低下等に対して保険を活用できるようにすることが考えられる。

実用期にあっても、将来の技術革新や問題発見のために基礎研究が重要であることは言を待たない。

(3) GHP (図4 - 4)

GHPは、我が国でも、遅ればせながら、いくつかの導入事例があがってきており、また、GHPの技術発展と利用拡大のために、2001年に関連企業からなる“地中熱利用懇談会”が産総研や大学との連携の下に設立され活動を開始している。この意味でGHPについては、我が国は実用期の初期段階にあると言えよう。したがって、研究開発体制は上記(2)中小地熱の(実用期)に準じたものになると考えられる。ただし、GHPの需要は小単位で多数であることが予想されるため、データベースの整備や需要家への情報提供がより重要になる。また、普及が進むにつれて施工・メンテナンス業者の数も相当数にのぼることになるため、中小地熱のケースとは若干異なった対応が必要となる。

大学は基盤技術、新技術に関して公的研究機関と共同で基礎研究を行い、その成果を企業、地方自治体、コンサルタント業者へ提供する。

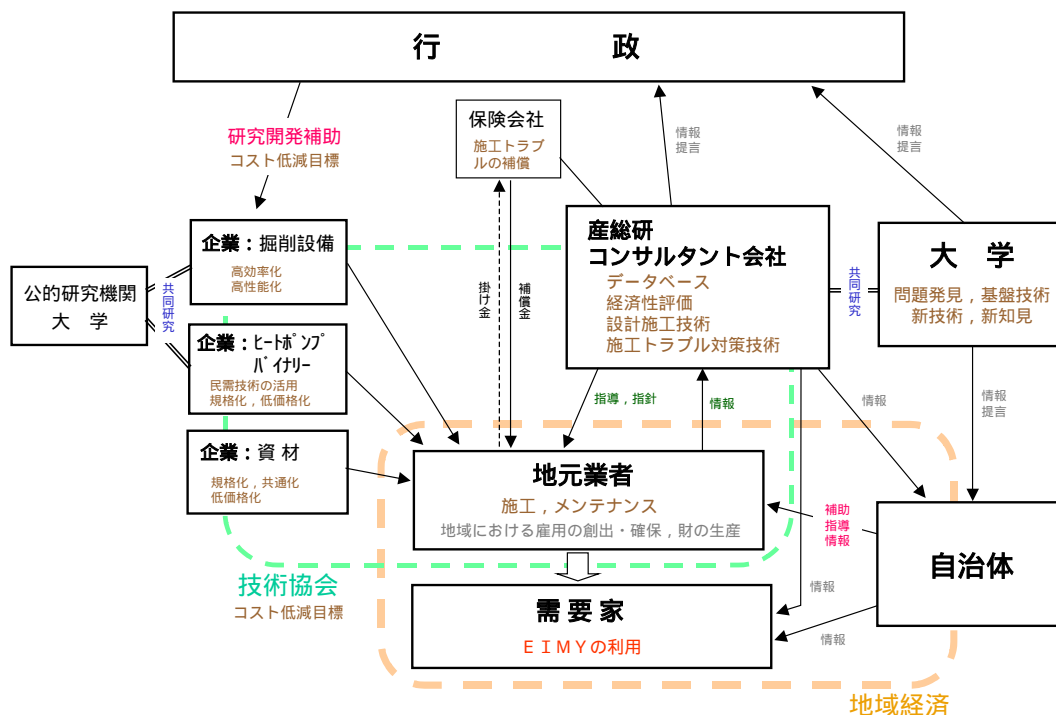


図4 - 4 : 中小地熱利用・GHPの実用期における研究開発体制

(4) 総合自然エネルギーシステム

地域の需要と自然条件に対し、地熱含む各種自然エネルギーの最適な組み合わせを追求することが、本報告書で提唱する *EIMY* の主眼とするところである。自然条件ばかりではなく、技術レベルの進歩やコスト、経済システム、社会システムをも視野に入れた最適化問題は、我が国でその取り組みが最も遅れている分野の一つである。また、異なる特性をもつ自然エネルギーシステムを、それぞれの特徴を活かしつつ最適化するという、純科学技術的問題に限ってみても、多くの興味深い問題や将来の技術的ブレークスルーの種が含まれている。このため、総合自然エネルギーシステムに関する研究分野は総合大学や公的研究機関が、その特色を活かして、分野横断・文理融合の形で積極的に開拓すべきである。

5 国際戦略

5 - 1 世界における日本の地熱開発

日本とアメリカは地熱利用の上位国としてランクされ，また科学技術レベルや経済力等を勘案すると，世界の地熱エネルギー開発の牽引役として強く期待されている。

アジアにおける主要な地熱利用国は日本，フィリピン，インドネシアであり，さらに中国，タイ，ロシア極東地域，モンゴル等で地熱開発意欲が高まっている。

地熱の利用は，産業構造，社会構造，地域の特徴を反映して，国別の地熱利用の形態と規模は多様性に富み，将来はさらに変遷が予想されるが，国際的に日本が果たすべき役割は大きい。

2000年における全世界の地熱発電の設備容量総計約800万kWeのうち¹，日本は国別第6位で約55万kWeの設備容量を有している。また，地熱発電設備は上位7カ国²で全世界の設備容量の約90%以上を占めている。先進国（G7）のうち地熱発電に比較的積極的に取り組んでいる国はアメリカ，イタリアと日本であり，またアジア地域では，日本，フィリピン，インドネシアが自立した産業として地熱開発を行っている。さらに，中国（チベット），タイが地熱発電に取り組みつつあり，またロシアの極東地域（主としてカムチャッカ半島）も有望な地熱資源を抱え，開発意欲が高まっている。

一方，全世界の地熱直接利用は約1500万kWtであり³，日本は第4位で120万kWtの利用がはかられている⁴。ただし，本資料の日本の直接利用には温泉（約95万kWt）が含まれており，これを直接利用設備に含めるかどうかについては議論が分かれるところである。発電，直接利用ともアメリカが第1位であるが，

¹ Hutter, G. W. (2001), The status of world geothermal power generation 1995-2000, Geothermics, 30, 1-27.

² 国別の地熱発電設備容量は アメリカ（約220万kWe），フィリピン（190万kWe），イタリア（79万kWe），メキシコ（76万kWe），インドネシア（59万kWe），日本（55万kWe），ニュージーランド（44万kWe）で，この上位7カ国で全世界の地熱発電設備の約90%を占めている。国内発電量の10%以上が地熱発電に供給されている国は，フィリピンの他，アイスランド，エルサルバドル，ニカラグア，グアテマラなどに限られている。

³ Lund, J. W. and Freeston, D. H. (2001), World-wide direct uses of geothermal energy 2000, Geothermics, 30, 29-68.

⁴ 地熱直接利用の国別第1位は発電と同様にアメリカ（約380万kWt）であり，ついで中国（230万kWt），アイスランド（150万kWt），日本（120万kWt）となり発電設備容量とは大きく異なる順位となる。アジア諸国の中ではモンゴルは発電よりも直接利用に大きな関心がある。

それ以外の国の順位は発電と直接利用では大きく異なっている。地域別ではヨーロッパが全世界の直接利用量の約 40%を占めている。すなわち地熱エネルギーの利用形態は国や地域により事情が異なっており，おおむねヨーロッパ地域では暖房やヒートポンプ等の直接利用の比率が高く，アジア地域のうちフィリピンやインドネシアは発電に偏った利用となっている。

このように地熱エネルギーの利用は，国や地域によりその産業構造や社会構造および地勢等に強く依存している。このなかで日本とアメリカはいずれの場合も上位国としてランキングされ，また科学技術レベルや経済力等を勘案すると，我が国はアメリカとともに世界の地熱エネルギー開発の牽引役として強く期待されている。

5 - 2 海外プロジェクト

これまで我が国は多くの海外プロジェクトを実施し，それらを通して日本の技術力は高く評価されている。しかし，プロジェクトの多くは海外援助であり，我が国のエネルギー安全保障ならびに国際環境政策上の観点からの包括的国家戦略が欠如している。

日本の地熱企業は高い技術力を有しているにもかかわらず，総合コンサルタント能力では地熱先進国に大きく遅れをとっている。我が国の技術と企業の特徴を引き出せるプロジェクトスキームの創出により，海外市場の開拓と国内の地熱関連産業の活性化が望まれる。

我が国の大学，公的研究機関の地熱研究は，世界のトップレベルにある。海外のプロジェクトに積極的に参加することにより，これらのレベルを維持し，さらに発展させることは，我が国の将来にとって極めて重要である。

これまでの我が国の産業技術開発プロジェクトの成果が，国内企業の海外進出に結びついた例はほとんど見当たらない。これはプロジェクトの成果を展開させるスキームとフォローアップ体制の欠如によるものと考えられ改善が望まれる。

我が国は J I C A（国際協力事業団）による O D A（政府開発援助）として開発途上国に対して地熱探査や開発の援助を行ってきた。また N E D O による海外プロジェクトも多数行われ，直接的な開発援助および研究ベースの海外協力が頻繁に行われている。最近の例では，J I C A による中国チベットの地熱資源探査，タイ北部の地熱地帯探査，産総研を主体とする研究者チームによる

インドネシアやマレーシアの地熱研究などが行われている。また大学研究者は科研費などを利用して国際共同研究をすすめている。これらのプロジェクトを通し、日本の技術力は国際的に高い評価を得ており、一定のレベルでは海外貢献がなされていると考えられる。しかしながら、これらの多くはいわゆる海外援助であり、エネルギー安全保障ならびに国際環境政策上の観点からの包括的国家戦略が欠如している。

地熱エネルギーは生産現場で消費する必要があり、石油、石炭、天然ガス等の化石燃料とは異なり、戦略物資とか市場調達物資とは成り得ない資源であった。しかし、CO₂排出権の取引等が現実味を帯びてきている昨今、地熱開発援助は我が国が行える国際環境政策のひとつの戦略カードになり得、これらも考慮した国家戦略の構築が望まれる。

日本の地熱企業は、地熱発電の探査から維持・管理までカバーする高度な技術力と実績を有しているが、海外事業では、単に個別的、要素的な技術の援助にとどまっており、総合コンサルタント能力では、アメリカ、ニュージーランド、イタリア、アイスランド、等の地熱先進国に大きく遅れをとっている。このため、日本の企業進出が現地での本格的・長期的開発に結びついた例は少ない。これは、我が国では、海外援助プロジェクトをさらに長期的な開発プロジェクトに移行させる戦略が不足しているからと考えられる。このことが民間企業の海外投資意欲を低下させ、悪循環に陥っている。日本企業の総合コンサルタント能力を向上されるとともに、我が国の技術と企業の特徴を引き出せるプロジェクトスキームの創出により、海外市場の開拓と国内の地熱関連産業の活性化が望まれる。

我が国の大学、公的研究機関の地熱研究は、世界のトップレベルにある数少ない分野の一つであり、特に高温岩体関連技術、貯留層評価技術、探査技術では世界をリードしている。海外のプロジェクトに積極的に参加することにより、これらのレベルを維持し、さらに発展させることは、我が国の将来にとって極めて重要である。

一方、NEDO等の技術開発プロジェクトでも先進的成果があげられているが、これらが国内企業の海外進出に結びついた例はほとんど見当たらない。これはプロジェクトの成果を展開させるスキームとフォローアップ体制の欠如によるものと考えられ改善が望まれる。

5 - 3 人的交流と国際貢献

発展途上国の人材養成は国際貢献の大きな柱であるとともに、将来の国際市場開拓のための重要な布石であり、今後も着実に継続すべきである。

I G A（国際地熱協会）での日本人の活動は個人的努力に強く依存しており、組織的バックアップが希薄である。また、I E A（国際エネルギー機構）のもとでのG I A（地熱実施協定）プログラムでは、今後も、国際的役割を十分に果たすよう努力すべきである。

国際機関、国際誌、国際集会への貢献は学術研究の国際化に有効に働くばかりではなく、日本の地熱産業の活性化や海外市場開拓など、産業界にも大きな恩恵をもたらす。

ニュージーランドのオークランド大学には Geothermal Institute（地熱研究所）が 1978 年に設置され、アジア地域や中南米、中近東、アフリカ諸国から多くの地熱関連の学生、技術者を受け入れている。この研修生が帰国後、再び部下や後輩を送り込む正のフィードバックが働いており、地熱研究所は教育・研修システムとして有効に機能している。また、アイスランドにある国連大学でも同様な人材養成を行っている。

一方、我が国では、九州大学に、1970 年より国際地熱研修コースが設けられ、開発途上国から研究者・技術者を招き地熱開発に関する教育を行ってきた⁵。この研修コースは九州大学関係者の献身的努力で維持されてきたものである。本コースは発展途上国の将来を担う人材育成と将来の市場開拓に有効なシステムであり、今後、我が国がこの分野で影響力を保持するためにも継続が望まれる。

世界の地熱開発をサポートする国際組織として I G A⁶がある。I G A に参加している日本人の数はきわめて限られ、またその活動は個人的努力によって支えられており、組織的なバックアップはなされていない。

一方、I E A⁷は先進国のエネルギー政策の策定にきわめて重要な役割を果たしているが、I E A のもとに G I A（地熱実施協定）が締結され、地熱開発に

⁵ この研修コースは国際協力事業団（JICA）およびユネスコからの資金援助を得て開始され、1990 年には国際地熱上級コースへ、2000 年には国際地熱エネルギーと環境科学コースへと時代の要請に応じたコースの改革を行い、2001 年までに 36 カ国から合計 393 名の研修員を送り出している。なお、地熱エネルギーを含む再生エネルギーを対象として、特定国に対する国際研修コースが 2003 年度より、九州大学に新たに開設される予定である。

⁶ IGA: International Geothermal Association, 事務局イタリア, 1988 年設立で 65 カ国が参加する。地熱に関する科学、技術、開発、利用をサポートする国際組織。

⁷ IEA: International Energy Agency, 石油ショックを契機として世界的にエネルギー問題の解決を目指すことを目的に設立された OECD の下部組織。IEA のもとに GIA(Geothermal Implementation Agreement, 地熱実施協定)が締結されている。GIA の参加国は 11 ヶ国, 1 機関である。

関連する幾つかの課題について参加各国の地熱専門家やグループがお互いの活動成果を持ち寄って、情報交換とノウハウの共有を進めている。我が国はN E D Oを協定締結者として、環境、高温岩体、深部地熱、革新掘削のタスクに参加しており、高温岩体ではタスクリーダーとして日、米、英、独、E U、スイス、豪、伊8ヶ国間の研究協力をリードしている。

これらの国際機関でリーダーシップを発揮することは、研究活動の振興のみならず、海外地熱開発マーケット（G H P、バイナリー発電、従来型発電等）のいち早い情報の取得と、市場での主導権獲得のために極めて重要である。

学術研究では、国際誌への論文発表が研究のアクティビティを示す大きな役割を担っている。論文の水準が世界レベルにあることが国際誌に掲載される必須条件ではあるが、学術研究の動向、掲載紙の編集方針等の周辺状況をよく見極めたうえで適切な雑誌に投稿する必要がある。国際誌の編集委員会への参加やレビューへの協力などの地道な活動が、日本の学術研究の国際化に貢献すると考えられる。

さらに我が国の機関や研究者が主催する国際学会や研究集会を通じて、人的交流をはかる試みも多くなされている。これらの努力を支える制度的および財政的支援を継続的に行い、日本が世界、特にアジアの地熱研究の最大拠点であること、さらに研究者・技術者の供給源として、重要な役割を果たす用意があることを積極的にアピールする必要がある。

5 - 4 東アジアのエネルギー開発と我が国の役割

東アジア地域におけるエネルギー開発は、その経済発展とともに急速に進展している。

そのなかにあつて、地中熱利用、中小地熱利用を含む多様な地熱利用システム技術を我が国が確立できれば、その市場は膨大である、

本地域の地熱開発意欲は急速に高まっているが、日本の民間企業の海外進出意欲は高くはない。

本地域における、地熱を中核とした環境適応型地域エネルギーシステムの普及に我が国が貢献することは、環境貢献ばかりではなく、我が国のエネルギーセキュリティの面でも重要である。

東アジア地域は急速に経済発展し、世界の生産拠点として確固たる地位を築いている。経済発展にともない、東アジア地域のエネルギー開発が急速に進展し、またロシアや中国でのエネルギー投資の拡大は近年めざましいものがある。韓国では、大陸からのガスパイプラインの延設計画があり、その完成時には朝鮮半島の南端までガスラインが整うことになるであろう。欧州各国では既に実現されている電力、石油、ガスの国境を越えたライフラインは、いずれ我が国にとって無縁ではなくなる。国産資源に乏しい韓国と台湾との連携も考慮した、東アジアのエネルギーネットワーク整備が21世紀の鍵となるであろう。

東アジア地域は寒冷地帯が多く、また、地熱資源も豊富であるため、地中熱利用、中小地熱利用を含む多様な地熱利用システム技術を我が国が確立できれば、その市場は膨大である。

本地域の地熱開発意欲は急速に高まっているが、我が国の民間企業の海外進出意欲は必ずしも高くはない。東アジアのエネルギーネットワーク整備を考えるにあつて、地熱を中核とした環境適応型地域エネルギーシステムの普及に我が国が貢献することは、環境貢献ばかりではなく、我が国のエネルギーセキュリティの面でも重要である。

(添付資料1)

研究開発課題例

【地熱利用全般に関する研究開発課題】

- 地熱資源の形成プロセスの解明と資源量評価
 - * 非火山性深層熱水の起源と熟成プロセスの解明
 - * 非火山性深層熱水探査法の研究開発
 - * 浅層での地下水理の解明と低温地熱資源のサステナビリティ評価
 - * 地熱エネルギーのサステナビリティを考慮した資源量評価法の構築
- 地熱資源・エネルギー需要の統合化・データベース化
 - * サステナビリティを考慮した地熱資源量評価法による、火山性地熱資源および平野部深部の地熱資源に関する既存データベースの構築
 - * 新規調査および既存の坑井データ・物理探査データの再解析による、深層熱水データベースの構築
 - * 既存坑井データの集約および新規調査結果の解析および整理による、地表付近での地下水の分布、流速、流動方向、温度、等に関するデータベースの構築
 - * 地域におけるエネルギー需要（熱、電力）のデータベース化
 - * 地域における産業構造、経済・社会システム、エネルギーインフラに関する情報抽出・統合化およびデータベース化
- 最適エネルギーシステム的设计法に関する研究開発
 - * 地下水流動シミュレータの開発による低温地熱資源抽出システム設計法の構築
 - * 中低温地熱資源の経時変化シミュレータの開発
 - * 開発対象地域のエネルギー産出量、エネルギー需要、エネルギーインフラ、売電価格、石油価格、等をもとにした地熱エネルギーシステム設計手法の構築
- 総合自然エネルギーシステムの構築に関する研究開発
 - * 気象条件、コスト、エネルギー需要、地域社会・経済システム等をもとにした最適自然エネルギー供給システム設計法の構築
 - * 気象条件、需要を予測し、それにより最適なエネルギー構成を制御するシステムの研究開発
 - * GHPもしくは中小地熱ヒートポンプと風力、太陽光発電を組み合わせた自立型熱供給システムの研究開発
- アセスメント法に関する研究課題
 - * 対象となる大気、河川、地下環境、地域社会等についての評価項目の整理
 - * 物理的影響（おもに直接的）、社会・経済的影響（おもに間接的）について、環境影響を評価する具体的手法の検討
 - * プロジェクト遂行者、国家機関、専門家（公的研究機関、大学、等）、地域住民、自治体などの参加体制の構築
 - * 評価に要する費用負担についての検討
 - * 評価項目の妥当性、評価手法の信頼性、評価体制の役割分担と機動性、代替案等について確認、検討するための環境影響評価のケーススタディ

【掘削技術】

- 低コスト掘削技術の研究開発
 - * 工程の高速化、人件費の削減のためのドリルストリングの接続・分離工程の半自動化

技術の開発

- * チューピングを用いた掘削法，掘削時のリアルタイムケーシング技術の研究開発
 - * 容易に設置，撤収が可能なモバイル掘削システムの実現
 - * GHP用坑井の超高速掘削システムの開発
 - * 地下情報を掘削プログラムヘリアルタイムにフィードバックするための掘削時地下情報リアルタイム計測システムの開発
- ローエミッション掘削技術の開発
- * 商用電力，燃料電池，ハイブリッド発電システム等，低環境負荷エネルギー源の掘削システムへの導入
 - * 泥水による環境汚染防止のための，完全クローズド泥水循環システム，無泥水掘削法，低環境負荷泥水の開発

【貯留層技術】

- 従来型地熱におけるサステナブル生産技術に関する研究開発
- * 既存貯留層の地質学的，岩石力学的，貯留層工学的，地球化学的，熱力学的，水理学的側面からの再検討による，貯留層の再生能力を支配するパラメータの解明
 - * 既存の貯留層の生産量，抽熱量を模擬するシミュレーションコードの作成，およびそれを用いたサステナブル生産プログラムの提示
 - * 水圧刺激，循環，還元等の新技術の既存貯留層への適用による，サステナビリティ向上
 - * スケールの付着を抑えるための最適な生産方法の検討。pHの調整等による化学的スケール除去法の開発
 - * 弾性波，電磁波，重力，磁気，等による，貯留層内の温度，圧力，透水ゾーンの分布，等の長期モニタリング法の開発
- 新技術による可採量・サステナビリティの向上に関する研究開発
- * 高温岩体型貯留層造成技術として開発されてきた水圧破砕法の中小地熱利用およびGHPの貯留層作成への適用と貯留層の透水性改善。注水，循環による抽熱量・サステナビリティの増大
 - * 小規模な抽熱から開発を開始し，その後の生産量および温度の経時変化，貯留層の変化，地下構造条件をもとに，サステナビリティを保持しつつ，段階的に生産量を増大する段階的開発手法の構築
 - * き裂分布，地質，応力，温度，等の地下構造条件から最適な貯留層作成法を提示するシステムの構築
 - * 坑井内から能動的に熱水を取り出すダウンホールポンプの小型化，低コスト化，耐久性の向上，適用温度範囲の拡大

【地上設備】

- バイナリーシステムの研究開発
- * 100 以下の中低温熱源を用いて発電可能な小型バイナリーシステムの開発
 - * 河川水，地下水を冷却に使用する水冷型バイナリーシステムの開発
 - * 人口密集地域用の超小型・低騒音システムの開発
 - * 小規模のバイナリーユニットを段階的に接続し，発電規模に合わせてシステムを拡張可能なシステムの開発
- ヒートポンプの研究開発
- * 中低温の熱水から抽熱し，それを工業，暖房，給湯用の熱エネルギーとして供給可能な大型ヒートポンプの開発
 - * 低温熱源から高能率で抽熱可能なGHP用ヒートポンプのエアコン業界との共同開

発

- 段階型熱利用システムの研究開発
 - * 従来型発電所での未利用熱エネルギー抽出のための、複合サイクル発電システムの開発
 - * 発電後の蒸気および熱水の熱交換による熱水供給システムの開発
 - * バイナリー発電システムの後段にヒートポンプ、熱交換器を組み合わせた2次熱抽出システムの実用化

- ゼロエミッション技術の研究開発
 - * 従来型発電における完全クローズドループの実現と、環境効果の実証
 - * 環境負荷が生じない媒体を用いたバイナリーシステムの開発
 - * 事故・災害時においても、媒体を極力外部へ放出しない構造のバイナリーシステムの開発
 - * 素材関連企業との共同研究によるスケール処理法の開発と、有用資源としての再生

- 地域分散エネルギー源に関する研究開発
 - * 経済性、負荷、等を判断し系統への接続を自動的に制御する“電源ルータ”の開発
 - * 光ファイバケーブル、または電力線を利用して通信を行う、分散型発電システム遠隔集中監視、制御システムの開発

地球環境適応型地熱開発戦略 用語集

E I M Y

E I M Y(エイミー)とは Energy In My Yard の略であり、本報告書で提案する新たな概念である。この概念は、ある需要単位があった場合、その地域で利用可能な自然エネルギーを自然条件、経済性が許容する範囲において最大限に利用し、その過不足分をナショナルグリッドにより需給するエネルギーシステム・経済システムを指す。この“需要地に近い需要地のためのシステム”は、環境ばかりではなく、地域経済、エネルギーセキュリティにも貢献する。地熱エネルギーは *E I M Y* において中心的な役割を果たす。

なお、廃棄物処分場などの施設に対して *N I M B Y* (Not In My Back Yard) という言葉がある。

利用形態と規模の多様性

地熱エネルギーの利用形態は、発電のみならず、バイナリー発電、直接利用、ヒートポンプの熱源等、様々であり、その利用形態に応じて利用規模は異なる。従来地熱の開発はナショナルグリッドへの連結が念頭にあり、必ずしも地下の特性や地域の需要に対応するものではなかったが、近年、諸外国では多様な規模や形態の地熱利用が、環境技術として積極的に進められている。(具体例が本文 3-1 に示されている。)

持続可能な利用

利用する量を適確に設定することにより、資源の枯渇や過度の環境負荷をとまなわないよう継続的に利用する利用形態を指す。従来型地熱発電では、熱と熱水の持続的な利用への配慮が十分でない場合があり、これまで多くの発電所において、生産量の減衰などを経験し、高コストの井戸の追掘につながっている。また、シリカスケールの生成防止など、還元井の能力確保も安定な発電を維持するためには重要な問題となっている。これからの地熱利用ではこれらの問題を克服し、適切な利用量の設定、利用形態の選択を行うことが重要となる。

ゼロエミッション

ここでのゼロエミッションとは、地下からの熱水、気体等流体を地表に放出することなく、完全に地下に還元することを意味している。従来のわが国の地熱発電では、生産流体のほとんどが地下に還元されるものの、その一部は冷却塔から蒸気として大気に開放されている。今後、一層の環境負荷軽減を目指し、オープンなシステムからクローズドなシステムに移行していく必要がある。

地域分散エネルギー

需要家に近接して分散配置される小規模のエネルギー源。太陽光、中小水力、風力、地熱などの自然エネルギーは、発電だけではなく地域のいろいろなエネルギー需要にも対応できる地域分散エネルギーである。地域分散自然エネルギーの特長として、遠隔の大都市ではなく近接地域で利用できること、運用形態の工夫によって自然エネルギーの恩恵を直接地域社会に還元できることなどがあげられる。

産業と市場性の創出

利用形態の多様化により、需要先の多様化と多数化、小規模多数システムによる量産効果、

ユニット化システムによる簡便性・拡張性などをキーコンセプトとした、産業と市場性が創出される。市場性はエネルギーの開発・供給において極めて重要であり、本報告書では、自然エネルギーを組み合わせたエネルギー供給システムが、今後、各地域において、当該装置の設計を担うコンサルタント業、それに関連した製造業、さらにメンテナンス業等産業を創出し、地域経済に貢献すると指摘している。

総合自然エネルギーシステム

地熱、風力、太陽、水力、バイオマス、等、各々の自然エネルギーを用いて、各々の特徴ならびに需要地の特性を活かし、複数の自然エネルギーを組み合わせたエネルギー供給・利用システム。たとえば、地熱と風力との組み合わせといった、相互に補完しあうエネルギーシステムが既に提案されている。これらは *EIMY* (前出) の概念を具体化した理想的なエネルギーシステムである。

ヒートアイランド現象

冷房による排熱など人工熱放出および地面の舗装により、地球規模よりも局所的、地域的規模において気温が上昇する現象である。オフィスビルが密集した都市部においては夜間でも気温が下がらない現象が深刻化している。その直接の原因になるエアコンは熱源を外気とする。一方、地中熱利用ヒートポンプ (GHP) は、地中に熱を蓄積し、冬季には夏季の熱を、夏季には冬季の熱 (冷熱) を利用するため、ヒートアイランド現象の軽減に寄与するシステムとしても注目される。

炭酸ガス排出原単位

発電や生産の過程において排出されるすべての二酸化炭素を、発電量や生産量で割った値である。発電形態の比較にしばしば利用されている炭酸ガス排出原単位は、二酸化炭素量を炭素量に変換して g/kWh とし、単位発電量あたりの排出される二酸化炭素量を意味する。地熱は、水力、原子力と並んで、太陽や風力よりも炭酸ガス排出原単位が低い。

非凝縮ガス

大気環境 (1 気圧、大気温度範囲) において凝縮しないガスを指す。地熱流体中には、代表的な非凝縮ガスである硫化水素や炭酸ガスなどが含まれている。その中で硫化水素は、悪臭防止法の規制対象になっており、当該事業所の境界線での基準は 0.02 ~ 0.2 ppm 以下である。地熱発電所では濃度が高い場合には脱硫除去がなされる。

環境アセスメント

Environmental Impact Assessment の訳で環境影響評価ともいう。評価項目の選定 (scooping)、分析 (analysis)、評価 (assessment)、緩和措置の検討 (mitigation) からなる。一般に、評価項目には大気や水質、生態系など直接的な環境影響だけでなく、関係するあらゆる間接影響、たとえば、サステナビリティ、コストと便益、リスク評価、社会・経済的影響も含む。プロジェクト施工後のフォローアップ体制も評価項目の対象となる。プロジェクトの計画時から行う手法は計画アセスメント、事業段階で行う手法は事業アセスメントと呼ばれる。

中低温地熱資源

従来型の発電システムを適用できない 200 以下の地熱資源を意味する。中低温の地熱資源の存在は多くの地域で確認されており、地域的偏在性も高温型の貯留層に比べ比較的

小さく、存在量は膨大である。今後の需要や技術的ブレークスルーにより利用量が飛躍的に増大することが期待されている。

深層熱水資源

地下深部の帯水層中に貯留されている降水起源または化石海水起源の熱水からなる非火山性地熱資源を指す。わが国では、東京、名古屋、大阪、札幌、稚内、釧路、新潟、宮崎などが賦存地域として知られており、比較的高温（40～150 程度）の地熱流体が得られる。熱源が火山でない新第三紀後期以降の堆積盆を分布域とすると考えられている。

容積法

資源量を算出する方法の一つである。貯留層単位体積あたりに含まれる地熱資源の量および温度、貯留層の全体積から、対象貯留層に賦存する熱エネルギーを求め、地熱の資源量とする。この方法は、地熱の静的条件下での評価法であり、流体の生産、還元を行う場合は動的な要素を考慮する必要がある。容積法から発電量を求める場合は、熱水の回収率（地下にある熱エネルギーのうち地上に取り出すことのできる割合。よく使われる値として、たとえば0.25）および発電効率（0.38）を乗じて発電量を求める。

設備利用率

発電の場合を例にとると、発電設備容量に対する、発電量を意味する。設備利用率低下の原因としては、エネルギー源の不安定性、発電設備の故障、定期点検などがあげられる。地熱エネルギーは季節や昼夜にかかわらず供給されるため、他の自然エネルギーに比べ設備利用率が高いのが特長である。

スケール

流体に含まれるシリカや炭酸カルシウム等溶解成分が、圧力の減少や熱交換による流体温度の低下に伴って配管等表面に沈殿、析出し、時間をかけて脱水が進み形成される析出物を言う。特にシリカスケールはわが国においても深刻な問題である。スケール付着防止法として、高温還元法、pH調整法、希釈法、シード添加法などがある。また、付着したものについては、定期点検の際に、物理的なクリーニングを行う。

バイナリー発電システム

熱水、蒸気等により低沸点の媒体を加熱・沸騰させ、それにより発電を行うシステム。地熱利用においては、従来型地熱発電には不適な200 以下の地熱資源を利用可能である、蒸気と熱水の分離および蒸気の乾燥が不要である、タービンの設計が容易である、タービンへのスケール付着が発生しない、クローズドシステムを容易に実現できる、地熱の多段利用を実現できる、等、本システムを導入するメリットは大きい。今後、低環境負荷媒体の開発、90 以下の地熱資源を利用した高能率システムの開発、小規模システムの開発、低コスト化、等が課題である。

複合サイクル発電システム

異なるサイクルを組み合わせた発電方式の総称。地熱発電の場合には地下から採取・分離した蒸気によりタービンを回転させ、その後、蒸気・熱水によりバイナリー発電を行う複合発電システムをいう。

クローズドシステム

地熱エネルギーの利用過程において熱水や蒸気などの地熱流体を外部環境へ放出しない低環境負荷システム。地熱流体の地下への還元技術，地熱の多段階利用技術，水冷式クーリングシステム，等により実現可能である。

ヒートポンプ

低い温度の熱源から冷媒を介して熱を抽出する装置。エアコンに用いられている。地中の熱を熱源に用い，冷暖房，給湯用のエネルギーとして利用する形態を地中熱ヒートポンプ（GHP）と呼ぶ。GHPによれば10 程度の地層から熱を取り出し，暖房，給湯に用いることができる。

多段階熱利用，カスケード利用

地熱エネルギーを温度に応じて段階的に利用し，熱の総合利用を図る方式。発電後の地熱流体から熱交換器，ヒートポンプにより給湯，暖房用の熱を取り出し，その後，温泉に利用する形態等が考えられる。

電気・熱総合利用システム，コージェネレーション

発電と熱供給を同時に行い，エネルギーの総合利用を図るシステム。コージェネレーションは熱源としてガスタービン，ディーゼル機関等を使用しているが，発電後の熱エネルギーにより熱供給やバイナリー発電を行うコンセプトは地熱の多段階利用と共通である。電気と熱の需要に応じた最適なシステム設計技術が経済性確保および普及の鍵になる。

地上設備のモジュール化

発電機，熱交換器，冷却システム，配管，変電設備，等の機器について，システムの規模を変更可能にするため，各機器を容易に追加可能なモジュールにすること。これにより，メンテナンスが容易になるとともに，地熱利用の段階的拡張や低コスト化が実現できる。

段階的開発法

地熱開発の初期段階においては小規模なシステムでエネルギー抽出を行い，その後，地下状態の変動をみながら段階的に規模を拡大していく開発方式，リードタイムの短縮，初期投資の低減，サステナビリティの確保，等，本方式によるメリットは大きい。

能動的開発手法

井戸そのものを熱交換器として利用したり，地下に人工的に熱交換面を作成して抽熱する開発手法。従来，我が国では自噴する井戸を主として利用してきたが，能動的開発手法によれば，利用可能地域の拡大と抽熱量の増大が見込め，さらにサステナブルな生産も可能になる。

高温岩体技術

能動的な地熱開発手法のひとつで，地下の高温の岩体内に人工的に貯留層（熱交換面）を作成し，地上から流体を循環させることにより熱を取り出す一連の技術。人工貯留層設計技術，水圧破碎による貯留層の作成技術，熱水循環技術，貯留層計測・制御技術，等からなる。本技術によれば従来は利用できなかった地熱エネルギーが利用可能になる。

インジェクション技術

地熱貯留層内に水または熱水を注入し地熱生産量の維持をはかる技術。近年，アメリカ，イタリアなどで実績が上がっている。

環境セキュリティ

我が国は化石燃料の大部分を外国から輸入しているため，エネルギーセキュリティの確保が，外交・経済上の重要な課題になっている。このエネルギーセキュリティに地球環境問題を加えた“環境セキュリティ”という概念を本報告書で用いている。

I P P

Independent Power Producer。独立系発電事業者を指し，電力会社に対し入札により電力を販売する業者。現在，主として素材・エネルギー関連企業がI P Pとして事業を行っている。

J I C A

国際協力事業団 (Japan International Cooperation Agency)。国際協力事業団法に基づき設立された特殊法人で，開発途上地域等の経済及び社会の発展に寄与し，また，国際協力の促進に資することを目的としている。開発途上国への技術協力，研修員受入，青年海外協力隊員の派遣，無償資金協力，開発協力，等を行っている。地熱開発に関してJ I C Aは主としてアジア地域での地熱探査や開発に対して，政府開発援助を行ってきた。また，九州大学の国際地熱研修コースに援助を行い，地熱開発に関する国際的教育活動にも寄与してきた。

I G A

International Geothermal Association。和訳名は国際地熱協会。事務局はイタリアにあり，1988年に設立され，現在65カ国が参加している。地熱に関する科学，技術，開発，利用をサポートする国際組織。

G I A

Geothermal Implementation Agreement。和訳名は地熱エネルギー研究技術協力プログラム実施協定，あるいは略して地熱実施協定である。G I AはI E Aのもとに締結され，11ヶ国，1機関が参加している。我が国ではN E D Oが1997年に日本の協定締結機関として協定に署名し，地熱開発の環境インパクト，高温岩体，深部地熱資源，革新掘削の4つのタスク（アネックス）に参加し，情報交換，ノウハウの共有等を進めている。

(添付資料2) **本研究メンバーが書いた解説，著書**

- [1] 新妻弘明：使えば使うほど地球にやさしいエネルギー 地熱発電，AERA Mook (朝日新聞社)，No.68，p.82-85 (2001)
- [2] 飯倉 穰：米国における再生可能エネルギーの現状と課題を見る[1]-水力含め全エネの7%を供給，太陽電池は世界市場の確保狙う意気込み-，週刊エネルギーと環境，No. 1602，p.8-9 (2000)
- [3] 飯倉 穰：米国における再生可能エネルギーの現状と課題を見る[2]-風力は豊富な資源を背景に急速に拡大。バイオマス発電 1,000 万 kW の目標-，週刊エネルギーと環境，No. 1603，p.7-8 (2000)
- [4] 飯倉 穰：米国における再生可能エネルギーの現状と課題を見る[3]-地熱・水力の現状と課題。再生可能エネ普及で政府の関与強化の主張も-，週刊エネルギーと環境，No. 1604，p.7-8 (2000)
- [5] 久保一雄・中田俊彦：地域自然エネルギー利用システムの統合評価，EFF レポート (2002)
- [6] 正路徹也：地球環境からみた地熱資源，地熱エネルギー，Vol.23，No.1，p.4-21 (1998)
- [7] 江原幸雄：地熱エネルギーの利用技術，自然エネルギー利用学 (改訂版，清水幸丸編著，パワー社)，p.219-240 (1999)。
- [8] 江原幸雄：大学における地熱研究と大学からみた地熱開発，地熱エネルギー，Vol.25，No.4，p.4-15 (2000)
- [9] 新妻弘明：地球環境時代の地熱利用 地熱エネルギー，Vol.24，No.4，p.4-7 (1999)
- [10] Murphy, H.，新妻弘明：環境技術としての地熱利用 -世界の動向-，電気学会 Vol.117，No.11，p.768-771 (1997)
- [11] 高島 勲：再生可能エネルギーとしての地熱の将来性，技術予測シリーズ第 2 巻(日本ビジネスレポート株式会社)，p.89-97 (2000)
- [12] 糸井龍一：ニュージーランドにおける地熱開発と資源管理法についての資料，本企画研究資料および補足資料 (平成 13 年 3 月 29 日)
- [12-1] 講演資料 「ニュージーランドにおける地熱開発と資源管理法について」
- [12-2] Luketina, K.M. 「ニュージーランド国の地熱資源管理 - 規定の展望」の和訳 (原文名) New Zealand geothermal resources management A regulatory perspective, Proc. World Geothermal Congress 2000, p.751-756 (2000)