

地球環境適応型地熱開発戦略

東北大学名誉教授 新妻 弘明

1. はじめに

東日本大震災とそれにともなう福島第一原子力発電所の大事故、そして固定価格買取制度の導入は、再生可能エネルギー開発にとって強い追い風になっている。とりわけ東北地方では復興予算もあいまつて、現在「復興バブル」の様相を呈していると言っても過言ではない。

しかし、東日本大震災の数々の「想定」を超えた猛威は現代文明の脆弱さを露呈させたばかりではなく、東アジアの地殻応力状態の変動にともなう、大地震、大津波、火山噴火、内陸地震等、次なる猛威の予兆を我が国社会に見せつけたとも言える。このような状況にあつて、現在はまさに現代文明社会の大転換期にあり、今生を受けた我々が今後どのように大きく社会の舵をきっていくかを後世から問われていると言えよう。

かつては経済発展を、国家が決定した大方針を、あるいは市場経済を指標として突き進んできた我が国のエネルギー開発も、これから何を抛り所にして考え、行動すべきか、あらゆる立場の人々が、大自然の猛威を目の当たりにして、分からなくなっているというのが現状なのではなからうか。

今から 10 年程前の 2000～2002 年にかけて、当時の低迷する我が国の地熱開発を背景に、異なる専門と実績を持つ科学者が、利害を超えて、我が国の地熱開発の現状分析と中長期的視野に立った体系的検討を行い、「地球環境適応型地熱開発戦略」と題した報告・提言書（以下本稿では、「報告・提言書」と記す）をまとめている（日本 E I M Y 研究所 2002）。この内容は 10 年を経過した今日でも示唆に富むものであり、数々の本質的問題を言い当てている。本稿では、本報告・提言書を現代の視座から見直し、これからの我が国の地熱開発はどうあるべきかを考えてみたい。

2. 企画研究「地球環境適応型地熱開発戦略」

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再生可能エネルギーである。しかし、我が国の地熱開発は、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ため、2000 年当時は、地熱開発の環境的側面の検討や問題発見は十分ではなかった。一方、当時は、行財政改革、電気事業の自由化や規制緩和の議論、電力需要の低迷、石油価格の安値安定、地球温暖化対策大綱の策定、R P S 制度の導入検討、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た。その中にあつて、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、開発に直結する調査費を除く研究開発を全面的に中断する決断を下し、これが文部科学省関連予算等にも波及していた。

このような背景をもとに、地熱に関わる専門家自らが、地球環境問題を含む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い、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、地球環境適応型地熱開発戦略に関する企画研究がボランティアベースで開始された。その後本研究は、2001 年度に文部科学省科学研究日補助金基盤研究(c)を得て本格化した。

表 1：地球環境適応型地熱開発戦略企画研究メンバ（所属はいずれも当時）

新妻 弘明	東北大学（研究代表）
浅沼 宏	東北大学
飯倉 穰	東京都市開発株式会社
糸井 龍一	九州大学
江原 幸雄	九州大学
海江田秀志	電力中央研究所
木村 繁男	金沢大学
笹田 政克	産業技術総合研究所
正路 徹也	東京大学
高島 勲	秋田大学
土屋 範芳	東北大学
手塚 和彦	石油資源開発株式会社
當舎 利行	新エネルギー・産業技術総合開発機構
中田 俊彦	東北大学
新堀 雄一	東北大学
橋本 一郎	新エネルギー・産業技術総合開発機構
松永 烈	産業技術総合研究所
泰田 宗義	日本政策投資銀行

研究メンバは表 1 に示すように、地熱や再生可能エネルギーシステムの研究に実績のある国内主要大学の 10 人の研究者のほか、産業技術総合研究所、新エネルギー・産業技術総合開発機構、電力中央研究所、石油資源開発株式会社、日本経済研究所、日本政策投資銀行（いずれも当時）の有志からなっている。

本企画研究では、計 13 回の検討会ならびにメールによる多くの情報交換を通し、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。本企画研究の検討課題を表 2 に示す。

以下、各項目について、震災後の我が国が直面している現状と問題の考えながら本報告・提言書を見直して見よう。

表 2：企画研究の検討課題

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

2. 1 環境メリットと環境負荷

報告・提言書では、まず、地熱利用の環境メリットと環境負荷について述べている。

環境メリットでは、「地熱利用の温暖化ガス排出原単位は水力と肩を並べ、風力や太陽光よりも優れている」「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」とし、これからの環境共生社会に向けて地熱エネルギーは主要な役割を担うべきものであると指摘している。

一方、環境負荷に関しては、「必ずしも環境に及ぼす負荷は皆無ではない」「地熱開発に直接間接的に携わる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」と述べ、考えられる地表への環境負荷として、景観への影響、スケール、排熱水、排気体等をあげている。一方、地下における環境負荷について、「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」とし、さらに「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」と述べている。さらに「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」と述べている。

このように報告・提言書では、「環境負荷は無いと断言し、それに目を向けずに開発を断行するのではなく、環境負荷が多少なりともあることを想定し、その影響を最小にすべく開発を行うべきである」との立場を取っている。また、「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」という重要な指摘をした上で、「最適生産量の評価精度は現在の技術をもってしても、必ずしも十分とは言えず、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、現在、環境分野では常識になっている「無知の知」と「順応的開発管理」の考え方に相当する考えを述べている。

このような考え方は、今後我が国で開発地域の拡大を考えていく上で、特に重要なことと言える。

なお、地熱開発の温泉への影響については、その後、日本地熱学会地熱発電と温泉との共生を検討する委員会でも検討が行われ、2010年にその報告書が出されている（日本地熱学会 2010）。

2. 2 特性、分布、質、量

本項では、「従来型の地熱発電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」と述べる一方、従来型の地熱発電には適さない中低温の地熱資源、より深部の高温地熱資源、浅部の低温地熱資源等、多様な地熱資源が、我が国には大量、広範囲に分布していることを述べ、「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」と指摘している。

我が国では、本報告・提言に前後して地中熱利用や温泉発電、中小規模バイナリー発電等の多様な地

熱資源の利用技術が注目され、特に、地中熱利用に関しては着実な進展を見るに至っている（笹田 2011）。我が国の熱需要は大きく、それによる温暖化ガス排出も著しい。もとより、電気だけが必要なエネルギーではなく、地熱の直接利用あるいは発電後の排熱利用は重要な選択肢である。原発事故を受けて、その代替エネルギーとしての大規模発電だけに目が行きがちな現在において、多様な地熱資源にあわせた利用形態も併せて考えていくことは重要である。

2. 3 現開発方法の問題点とあるべきすがた

本項では、それまでの開発方法の問題点として、「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」と述べ、人間の都合を優先した開発の問題点を指摘している。このような認識は、現在では、実績のある地熱ディベロッパーの間では共有されているが、新期参入者にとって特に留意すべき点であると言える。

そのうえで本報告・提言書では、「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」と述べている。すなわち、これまでオーダーメイドであった発電設備を、規格化・モジュール化し、地下の挙動を見ながら複数のモジュールを段階的に増設する手法を提案している。この方式はイタリアではすでに実用化されており、今後我が国でも有力な選択肢と言えよう。

2. 4 市場と経済性

ここでは地熱エネルギーの市場と経済性について検討している。当時は、石油価格の安値安定と、2001年度の電力需要が15年ぶりに前年度を1.7%減少するなど電力需要が低迷しており、地熱の市場競争力の弱さが問題となっていた。しかし現在では、本年度から導入された固定価格買取制度と、原発事故による電力需要の逼迫がこの状況を大きく変え、地熱事業にとって有利な局面になってきている。

しかし、このような状況にあっても地熱開発に特有の開発リスクの問題は解決されたわけではない。坑井の掘削に多大な資金を必要とする地熱開発では、開発リスクの低減は本質的な課題である。これについては2009～2011に行われたJSTの調査研究「環境共生地熱開発のための計測・探査技術に関する調査研究」（代表：新妻弘明）で検討が行われ、開発リスク低減のための技術開発と社会システムの重要性が指摘されている（浅沼 2012）。

2. 5 地域経済と分散エネルギーとしての役割

報告・提言書では、地熱の地域経済における役割と分散エネルギーとしての貢献について述べ、「地域メリットの重要性」「エネルギー・セキュリティ」「分散型電源」「他の再生可能エネルギーと組み合わせ合わせた総合自然エネルギーシステム」について検討している。これはまさに震災後、特に注目されている事柄であり、本検討の先見性を示している。

また、地域メリットと経済性の創出のため「カスケード利用によるエネルギーの効率的利用と地域のための電気・熱総合利用システム」を提案している。高温の熱エネルギーを熱機関により発電にだけ利用した場合、その利用効率は高々30%であるのに対して、その排熱も段階的に利用する「カスケード利用」によれば、利用効率は大幅に高くなるとともに、熱電併給により経済的にも現実的なものとなる

(小谷村 2008)。これも地域の分散型エネルギーとしてのメリットである。カスケード利用は、地熱に限らず、バイオマス発電等、これからの地域のエネルギーシステムにとって重要である。

2. 6 現開発体制，社会制度の問題点とあるべき姿

当時の開発体制，社会制度の問題点として，報告・提言書では「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」を指摘し，規制緩和や新しいビジネスモデルの必要性を説いている。また，この特殊事情から，これまでの研究開発は「地熱資源の調査や将来技術としての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」としている。震災を受けて，これらに関する状況は変化しつつあり，今後有効な社会システムの創出が望まれる。

また，環境アセスメントに関して，「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」の重要性を指摘し，地下の状態を十分考慮しない過度の開発を戒めている。さらに，「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」と述べている。これも現代の視座からも重要な指摘である。

本項ではエネルギー・セキュリティの重要性も指摘はしているものの，国家の安全保障の観点からの指摘であり，震災後の現在から見れば，地域ごとのエネルギー・セキュリティの重要さと深刻さについての認識は甘かったと言わざるを得ない。

2. 7 環境適応型地熱利用のキーコンセプト

報告・提言書では，以上の議論を踏まえ，「我が国のこれまでの地熱開発は，5万kW級の発電所の建設による石油代替を主眼とし，環境メリットを追求するものではなく，このままの開発形態あるいはビジネスモデルの延長では，地熱開発の環境的側面を論ずることは無理がある」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)総合エネルギーシステム，の6つのキーコンセプトを掲げている。特に，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，報告・提言書では，“*EIMY (Energy In My Yard)*”という概念を初めて提唱し，「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」と述べている。この概念は特に震災後注目を集めている。この時点では*EIMY*は，ハードウェアシステムとしての側面の強いものであったが，その後この概念は深化し，地域の社会システムや人々の営みを含む総合的な概念となっている（新妻 2011）。

2. 8 21世紀の地熱開発戦略

報告・提言書では，21世紀の地熱開発戦略として，(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，の4つの基本戦略を示すとともに，そのための技術開発課題を挙げている。

前述のように，当時は石油価格の安値安定と電力需要の低迷を背景としており，現在においては，これに加えて基幹電源としての地熱の役割があることは言うまでもない。しかし，基幹電源であっても，

それが立地する地域の地域メリット、地域社会への影響、環境影響を第一義に考えるべきであることは言をまたない。

3. これからの地熱開発

地熱開発はこれまで、世界的に見ても、世の中の過度の期待と失望により浮沈を繰り返してきた。これは、要素還元的・確定論的手法が通用する人工物の世界とは異なり、地熱は未知にして不確定な自然の摂理に支配されていることによる。地熱の「順応的開発管理」が必要なゆえんである。地熱に強力な追い風が吹く現在にあって、相手は地球であり、人間の都合では動かないことを謙虚に認識し、冷静に事を運ぶべきである。利用されることを目的とした科学ではなく、真理と未知が混融した本来の科学が今必要とされている。

10年前に行われた企画研究「地球環境適応型地熱開発戦略」は、我が国の地熱開発の環境的側面を本格的に検討した最初の試みであったが、それに加え、それまでのエネルギー開発の国家的視点に加え、地域的視点から検討を加えたことは特筆に値する。地域的視点を欠いたエネルギー開発は将来に禍根を残すことは原子力発電所の重大事故が示すところである。再生可能エネルギーは我が国の国土に広く薄く存在するものであり、地域との共生は不可欠である。地熱開発にあっては、温泉との共生はもとより、地域社会との共生に真正面から取り組むべきである。

本企画研究では、採取可能な地熱エネルギーの抜本的量的拡大については、検討は行われなかった。現在の技術で採取可能な地熱エネルギーを超え、持続性と低環境負荷を維持しながらその量を拡大するためには、中長期的視野に立った基礎研究が不可欠である。日本地熱学会は2010年に、そのための大型研究計画として「広領域地熱システムの理解とエネルギー・資源の抽出」を学術会議に提案し、それはマスタープラン2011として採択されている（日本学術会議2011）。本研究計画は、従来の地熱開発領域をとりまく広領域の水循環システムの解明と、深部に存在する超高温岩体からのエネルギー抽出のための技術開発を行うもので、浅部・深部地熱エネルギーの持続的開発と、地熱利用の飛躍的な拡大に不可欠な開発・管理リスクとコストの抜本的低減を目指している。しかし、学術会議のマスタープランには予算的裏付けがあるわけではなく、震災を受けて、今後本大型研究計画の実現が待たれる。

これからの我が国の地熱開発を考えるにあたって、その人材育成と知や技術の継承は重大な問題である。かつては世界のトップクラスの実績を誇った我が国の地熱技術も、2001年の経済産業省による研究開発の全面停止によって、国内の研究アクティビティの低下、人材の散逸、高度な技術やノウハウの散逸、技術者・経験者の高齢化、研究者ネットワークの機能低下、国際的評価の下落が急速に進むに至ってしまった。このことは、米国で開催されているGRC（Geothermal Resources Council）年次大会等の国際会議における我が国からの発表件数や、セッション構成における我が国研究者の主導性から見ても明らかである。

地熱開発は地域依存性が高く、未知、想定外の事象の連続であると言っても過言ではない。そこでは既存のマニュアルやネットに氾濫する情報の寄せ集めだけでは対処することはできない。現場経験で磨かれた総合知と感覚、そして創意性を有する多くの人材が不可欠である。この意味でも、中長期的視野に立った息の長い研究開発の遂行は大きな意味を持つ。なぜなら、このような人材は、本質的な課題に対して原理原則に立ち返り、自らの頭で真正面から取り組むことによつてのみ育成されるからであり、技術の継承には時代に沿った技術の創造が不可欠であるからである。また、我が国の地熱技術・地熱産業の世界展開を図るためには、それらの先端技術や知見のレベルが大きな意味を持つてくる。高度なレベルを保ち続けるためには、具体的な地熱開発をすすめる一方で、我が国独自のたゆまない研究開発が不可欠である。

地熱開発は今こそ、知に足のついた冷静な取組みが必要である。国家予算が投入されたことを理由に

自らを正当化し、国民の税金であるその資金を真の意味で有効活用しなければ、早晚我が国の地熱開発は停滞し、後世に負債を残すことになる。これからの地熱開発に関わる行政官、事業者、研究者は今正念場にあると言えよう。

(参考文献)

- 浅沼 宏：「J S T環境共生地熱開発のための計測・探査技術に関する調査研究の成果」，地熱技術，vol. 37 (2012)，29-37.
- 小谷村：「小谷村地域新エネルギービジョン～重点テーマ：地熱エネルギー利用の可能性調査～」(2008)
- 笹田政克：「地中熱利用の現状と今後の展望」，ベース設計資料，建設工業調査会 (2011)
- 新妻弘明：「地産地消のエネルギー」N T T出版 (2011)
- 日本 E I M Y 研究所：「企画調査研究 地球環境適応型地熱開発戦略報告書」 (2002)
<http://ve.cat-v.ne.jp/ni.eimy/>
- 日本学術会議：「学術の大型施設計画・大規模研究計画 マスタープラン2011」，(3)エネルギー・環境・地球科学，計画番号26 (2011)
- 日本地熱学会：「地熱発電と温泉利用との共生を目指して」 (2010)