

第 198 回地質調査所研究発表会講演要旨*

特集 日本の地熱地帯の資源評価

「日本の地熱地帯の資源評価」研究概要

岡部賢二

地質調査所が、地熱開発利用を明確に念頭に置いて組織的に調査研究を始めたのは、昭和 22 年 (1947) のことであるが、それは火山、温泉等の地熱微候の著しい地区を対象としたスポット的なものであった。その後、「全国地熱基礎調査」や「地熱資源開発基礎調査」を含め、經常研究、特別研究などによる研究が続けられて来たが、それらは地熱の実態を把握し、基礎的概念を確立するための準備段階であったと見ることもできる。

通商産業省は昭和 54 年 (1979) に「全国地熱資源総合調査概念設計」を実施し、翌年発足する新エネルギー総合開発機構(現：新エネルギー・産業技術総合開発機構；以後、NEDO と略称)を事業主体とする地熱開発の国家プロジェクトの路線を敷いた。その後の地熱開発の施策は、基本的にはこれに拠って基礎的研究は地質調査所が担当する体制で進められてきている。

当時、国としての地熱資源評価を早急に行う必要から、全国的な規模、等レベルの調査データが急がれた。これが NEDO 事業の「全国地熱資源総合調査(第一次)」(昭和 55-58 年)として、当時の先進的技術によるキューリー点データ、重力データ、レーダ画像データの全国規模でのデータ取得となって具体化された。

地質調査所はこれに対応して「国土地熱資源基本図作成に関する研究」(昭和 55-58 年)を実施し、これによって得られたデータとこれまでに蓄積した独自の各種調査データの処理・解析を経て、「国土地熱資源基本図」を作成した。これは、新たに構築した地質情報データシステムを利用して、全国の調査資料を 20 万分の 1 区画に纏め、重ね合わせて見ることができるようにし、全国規模の地熱及び地熱地域の解析・評価の基礎資料としたものである。

昭和 59 年から NEDO により「全国地熱資源総合調査

(第二次)」(昭和 59-61 年)が展開され、第一次調査により抽出された有望地域についての各種調査が実施されることになった。地質調査所はこれに対応して「国土地熱資源評価技術に関する研究」を開始した。これはわが国に賦存する地熱資源を全国規模及び広域規模で評価しようとするもので、次の 3 テーマからなる。

1) 全国規模資源評価の研究

第一次調査で得られたデータ及び独自に収集整理した各種データをもとに、容積法評価手法によって地熱資源量を定量的に試算するものである。

2) 広域規模資源評価の研究

第二次調査対象地域である「ニセコ」、「八甲田」、「南会津」、「国分」をそれぞれ包含するより広域の 4 地域、及び地熱探査技術等検証調査の対象地域である「仙岩」及び「栗駒」地域について、より高精度の資源評価を行うものである。

3) データベースによる評価手法の研究

全国規模及び広域規模での資源評価をデータベース(SIGMA)によって行うため、必要なデータのパンキング、各種基図類の表示化技術、評価アルゴリズムのソフトウェア化等を研究開発するものである。この成果は昭和 62 年開始の NEDO の第三次調査で、地熱有望地域抽出のためのコンピュータ処理システム構築に利用されている。

本研究の成果は、新たな知見・概念、データの蓄積、評価手法の開発など地道な調査・研究努力の蓄積によって、より精緻な、高精度のものにされる必要がある。

(地殻熱部)

全国地熱資源総合調査(第一次)の資源評価

宮崎芳徳

地熱資源評価は、長期的展望にたつて我が国の地熱賦存量の将来供給可能量を広範囲にわたって推定することであり、国レベルの開発・利用計画の策定にとって欠くことのできない作業である。地熱資源の評価が最初に報告されたのは、1957 年までさかのぼる。それ以来、地質

* 平成元年 11 月 17 日日本所において開催

調査所による1957年評価, 日本地熱調査会による1970年評価, 産業技術審議会地熱分科会による1974年評価, 地質調査所による1977年評価, 機械振興協会・新機械システムセンターによる1977年評価, 地質調査所による1984, 1985年評価などここ数回以上, 日本の地熱資源評価が行われてきている。以前に実施された評価法は, マグマ残存熱量法, 自然放熱量法, 面積法, 包蔵水量法及び循環水量法などを用いた評価であるが, 計算に使用したデータのカバレッジがあまりにも狭かったり, その手法の汎用性という点で客観性を欠いていたりで難があった。

MUFFLER and CATALDI (1978) は, 自然放熱量法, 容積法, 板状フラクチャ法, マグマ残存熱量法の4種の地熱資源量評価手法の比較を行って, 容積法が最も有用な評価手法であり, 異なった地域や異なった地質条件間の対比が可能であると結論づけている。米国ではUSGSが本格的な地熱資源評価を実施してきているが, 手法には容積法を採用している(USGS, 1975, 1979)。

ここでも新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の全国地熱資源総合調査(第一次)のデータ, 地質調査所がバンキングを進めている全国の既存地熱データ及び国土地理院作成の国土数値情報に基づき, 容積法により我が国の地熱資源量評価を実施した。同じ容積法ではあるがUSGS(1979)と異なる点は次の様な点である。

1. モデル地域ごとに均質な地熱貯留層を想定するのではなく, 初めから全日本データの存在する場所をすべて対象としてグリッド評価作業を実施した。

2. 温度情報は, 地球化学的温度ではなく, キュリー等温面深度情報と地熱坑井温度データを採用。

3. 貯留層厚さは, 重力基盤深度情報をもとに計算。

4. 貯留層内温度は一定でなく, 深度方向に線形的に上昇するモデルを想定。

熱水対流型資源のうち, 地熱発電を主目的とした地熱資源量評価の算定を行ったので, 対象は高温熱水系(150°C以上)のみとした。算定にあたっては, まず貯留層熱エネルギー Q_r を求め, 次に回収率 R_g を乗じて坑口での回収地熱エネルギー Q_{wh} を計算する。 Q_{wh} を機械的エネルギーに変換して電気エネルギーをおこなすが, その際, 熱力学的な制約により機械的仕事量(W_a)と呼ばれる最大仕事量が定義される。この W_a が求まると発電効率 N_z を乗じて最終的な電気エネルギー E が算出される。

重力データのカバレッジが限定されるため, 全日本を15ブロックに分割して評価を実施した。我が国の高温熱

水対流型資源量を試算した結果, 総計2054万kW・30年の発電量を得た。最近, 深部基盤内においても断裂に伴う熱水の存在が確認されている。この場合には基盤の保持する熱量も回収できるわけで, そこで基盤1kmを含むトータルの地熱資源量を計算すると, 6396万kW・30年の地熱ポテンシャル値を算定することができる。今後, 新規の地熱データを追加していき, 又評価手法についても検討を加えて地熱資源量のグレードアップをはかっていく予定である。(地殻熱部)

全国地熱資源総合調査(第二次)調査地域の地熱モデルと資源評価—八甲田地域

大久保泰邦・村田泰章

八甲田地熱地域を例として, 数十km×数十kmの広域規模の地熱地域を対象とした新しい地熱資源量評価手法を開発した。利用するデータは各種地表調査データに加えて, 約200孔の温泉ボーリング, 地熱ボーリングデータである。この手法は, 各種データより地熱の3要素, 熱, 水, 構造を確率分布として定量化し, モンテカルロ法によって資源量を演繹的に推論し, 確率で与えるものである。八甲田地熱地域で実施した結果, 3km深のボーリング1本からの発電量の期待値が2500kWを越える地域は, 八甲田火山群周辺, 沖浦カルデラ, 下湯周辺, 碓ヶ関カルデラであった。有望地域の分布, 資源量の値が正しいか否かは, データの質, 量, 知識の正否や量に依存する。これらが変われば, 各要素の確率分布も変わり, 最終の答も変動する。地下の問題を扱う資源量評価では, 大量のデータと多くの知識より演繹的に推論することが必要であると考えられることから, 大量のデータを効率良く扱うデータベースと知識を有機的に扱うエキスパートシステムが必要になろう。

(地殻物理部・地質情報センター)

全国地熱資源総合調査(第二次)調査地域の地熱モデルと資源評価—南会津地域

山口 靖

南会津地域は, キュリー点深度の浅い高温可能性地域でのモデルとして選定され, NEDOによって各種調査が実施されている。本地域の中-南部には, 先第三紀の基盤岩類が広く分布し, 地形的には険しい山地を作っている。また, 本地域北部には, 中新世中-後期の凝灰岩類および

堆積岩類が分布する。これらの地層を不整合関係で覆って、中新世後期-鮮新世に形成されたカルデラ(北部から古町カルデラ、山王峠カルデラ、八総カルデラ、木賊カルデラ、湯西川カルデラ)に関連する堆積物が分布する。

本地域北-中部の温泉は、これらのカルデラ内またはカルデラの外縁部に分布するが、泉温は 40-50°C 前後で、アルカリ比温度は 100°C 以下と低い。これらのカルデラに関連したマグマ溜りは、カルデラ形成年代から考えて、既に周囲の岩石と同じ温度まで冷却してしまっているとみなされる。また、NEDO によって実施された熱流量調査のためのボーリング結果によれば、カルデラの外側の基盤岩中においても、カルデラ内の凝灰岩中においても、地温勾配に有意な差は認められない。いっぽう、カルデラ内の凝灰岩の熱伝導率は、基盤岩類の熱伝導率よりも明らかに小さい。もしも、地下深部から地表へ向けての熱流量は一定であると仮定すれば、本来、熱伝導率の小さいカルデラ内においては、基盤岩中よりも地温勾配が高くなるはずであるが、実際には両者の間で有意な差は観測されていない。これは、カルデラ内の断裂に沿った小規模な熱水対流により、カルデラ底部の熱が上方へ運搬されているためであろう。すなわち、熱伝導率の局所的な差異を作り出すようなカルデラ構造があれば、その地下深部に特別な熱源の存在を想定しなくても、アルカリ比温度が高々 100°C 程度であるような温泉は、存在しうると考えられる。

本地域南端部の鬼怒川最上流部には、鬼怒川流紋岩類と呼ばれる中新世後期の溶結凝灰岩が分布する。この地域の温泉は、鬼怒川に沿って分布し、泉温は 70°C 以上、アルカリ比温度は 200°C 以上のものも含まれている。NEDO による調査では、鬼怒川流紋岩類の年代値は、全岩試料によって測定されたため、黒雲母およびカリ長石を分離し、K-Ar 法放射年代を再測定した。その結果、鬼怒川流紋岩中部層については 7 Ma 前後、鬼怒川流紋岩類上部層については 6 Ma 前後の年代値を得た。さらに、NEDO によって測定された鬼怒川流紋岩類上部層の全岩年代値について検討した結果、ばらつきは大きいものの、試料採取地点の標高と年代値との間に正の相関が認められた。これについてのひとつの解釈としては、河川による侵食と火成活動の推移に伴い、熱水対流系の発達する上限標高がしだいに下降していったとの推論も可能であるが、今後のより詳細な検討が必要であろう。

こうした地質モデルに基づき、本地域の地熱資源量を試算した。本地域北-中部では、深さ 1.5 km 以浅において地温 150°C を越える地域はなく、発電を前提とした地熱資源量は算出されない。いっぽう、本地域南部の鬼怒

川最上流域では、ふたつの貯留層形態モデルに基づき、それぞれ約 17 万 kW および約 62 万 kW という数字が求められた。これらの数字は、地質モデルの改良によって、変化するものである。(地殻熱部)

全国地熱資源総合調査(第二次)調査地域の地熱モデルと資源評価一国分地域

阪口圭一

近年の年代測定の増加によって再構築されつつある南九州北部(桜島以北)地域の主に鮮新世以降の火成活動史について、既存放射年代値のコンパイルと演者が実施した地質調査と年代測定の結果を基に、地熱活動を考える上で最も基礎的なデータの 1 つである火山活動の時空分布と噴出物量の時間推移を求めた。

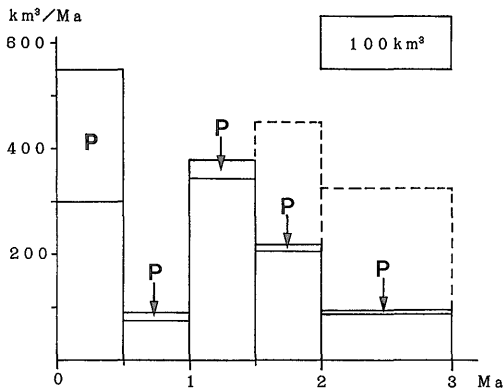
火山活動の時空分布に関しては以下のような指摘ができる。

①鮮新世以降の火山岩についてこれまで得られている年代値は、7-10 Ma および 3 Ma よりやや古い時代以降という 2 グループに大別でき、5-7 Ma には火山岩の活動が少なかった(または無かった)ことがうかがえる。

②鉱床生成年代から言われていたように(例えば浦島・池田, 1987)、概して西側ほど噴出年代が古くなっている。1.5 Ma 以降の火山岩の大部分は鹿児島地溝(現在の火山フロント)近傍に分布する。現在のところ、火山活動の場が順次東に移動してきたのか、1.5 Ma 頃に鹿児島地溝沿いの新しい活動が開始したのかははっきり区別できない。

③火山フロントから 30 km 西方の蘭牟田火山で 0.3 Ma の年代が得られ、蘭牟田火山はこの地域で特異的に若い火山であることが明らかになった。蘭牟田火山の周囲に 60°C を越える温泉が存在することと調和的である。蘭牟田火山の場所でこのような新しい火山活動が起こったことの意味はまだ明らかでないが、いずれも 0.3 Ma より若い蘭牟田-住吉池-清水流紋岩-敷根安山岩は西北西-東南東の一直線上に乗り、ランドサット画像にみられるリニアメントや基盤の四万十層群中に推定されている構造線もほぼ同じ方向であることから、このような火山の配列は基盤の大構造を反映しているのかもしれない。

3 Ma 以降の火山岩について、0-0.5, 0.5-1.0, 1.0-1.5, 1.5-2.0, 2.0-3.0 Ma のタイムスパンに分けて噴出物量を計算した(第 1 図)。ただし肥薩火山区の 3 分の 2、紫尾山地南側-串木野地域については放射年代値が得られておらず、1.5-3.0 Ma に均等に割り振った。0-0.5 Ma では火砕流堆積物が多いために噴出物量が多くなっているが、



第1図 南九州北部(桜島以北)の噴出率の時代変化破線部は年代値の得られていない肥薩火山区の3分の2および紫尾山地南側-串木野地域の火山岩を1.5-3.0 Maに均等に割り振ったもの。Pは火砕流堆積物。

古い時代の火砕流堆積物が侵食によって多くが失われているとすると、0.5-1.0 Maの期間を除いて、3 Ma以降の火山岩噴出率はそう大きく変化していないように見える。0.5-1.0 Maの期間の噴出率の低下は、その時代の火山岩が鹿児島地溝内に埋積されているための見かけ上の低下とも考えられるが、霧島地域のボーリングデータ等から考えると、実際にその時期の活動が低かった可能性が大きい。(地殻熱部)

地熱探査技術等検証調査(仙岩・栗駒地域)の資源評価—仙岩地域

松林 修

地熱資源の評価を行う場合の基本的物理モデルとして地下深部からのエネルギーの定常的供給を考慮する再生型資源と見る立場と、30年程度の時間スケールで地中に貯蔵された熱を引き出して使い尽くすと見る立場とがある。前者の観点からは、仙岩地域の熱流量の最小値が145 mW/m²であることから、これと同程度のエネルギー流量で熱を抽出できるならば無限に(30年と比較して3桁以上の長期)長い寿命を持つ資源と見なすことができる。

他方、後者の考え方に立って通常計算される「容積法地熱資源量」とは厳密には採取可能総資源量(角ほか, 1983)と呼ばれるべき量であって、第一近似的には地下で測定された温度を深さz方向に積分した値

$$\int_{z_b}^{z_0} \{T(z) - T_{ref}\} dz$$

に比例することを示すことができる。演者はこの積分値

を抽熱量インデックスと定義することを提唱する。温度プロファイルが上に凸の形をした上昇浸透流に対する抽熱量インデックスは、下に凸の形をした下降流パターン温度プロファイルより明らかに大きくなる。そして、坑井内同軸熱交換システム(盛田・松林, 1986)という新しい抽熱方法を用いる場合の抽出可能なエネルギーの生産率が抽熱量インデックスにほぼ比例することを計算で示すことができた。従って採取可能総資源量として求めるエネルギー総量とは上記熱交換法(又は同等の技術)によって採り出しうる値の上限を示すものに他ならない。

地表から深さ3 kmまでの地層の有する総熱量(採取可能総資源量)を仙岩地域について求めてみると、5 km×5 kmのブロックを単位として、4×10¹⁸ calから12×10¹⁸ calの範囲にあることが分かった。これらの値は各ブロックでの平均的温度勾配と良く対応しているが、これは温度場が大局的には熱伝導卓越的であることを意味する。

地熱資源を一面的に「資源量評価」するべきではなく、多角的にとらえることが必要である。更に評価を行うモデルのパラメータ変化に対応する計算結果の相違などを十分に検討することも重要であることを指摘したい。

(地殻熱部)

地熱探査技術等検証調査(仙岩・栗駒地域)の資源評価—栗駒地域

安川香澄・石戸恒雄

鬼首カルデラ南部の熱水系について、自然状態を再現するような分布パラメータタイプの数値モデルを作成した。そして、得られた数値モデルの透水ゾーンの拡がりから、この地域の資源量を推定した。また作成した数値モデルを利用して、生産時の挙動予測も行った。

1. 数値モデルの作成

地質、放熱量、物探、検層などのさまざまなデータを基に系の物性分布を数値的に表し、まず初期モデルを作る。決定できなかったパラメータについては、推定値を用いる。シミュレーションは、系が冷たい状態から開始して、熱伝導と熱水対流の双方によって、系が暖まる過程を計算する。生産・還元といった数十年のスケールに比べれば自然状態の系は準定常状態にあると考えられるので、計算値がほぼ定常になった状態で、温度・圧力・放熱量を、測定値と比較する。測定値と一致しなければ、パラメータを少しづつ調整し、計算を繰り返す。調整し

たパラメータは、地表の圧力、深部の熱水源、浸透率の分布である。結果的には十数回、計算を繰り返し、測定値と一致するようなモデルが得られた。

2. 資源量の推定

系の自然状態をよく再現するモデルが得られたので、このモデルの透水ゾーンの部分に包蔵熱量法を適用し、この地域の資源量を評価した。

通常はデータの少ない段階でこの方法を利用するため高温域全体に含まれる熱量を計算するが、ここでは透水ゾーンの拡がりか推定されているので、そこから採取可能な熱量を見積もった。

その結果、賦存するエネルギー量は全体で 2.2×10^{16} (J) と計算された。これに適当な回収率、発電効率をかけて、30 年間で生産すると仮定すると 24 万キロワットという計算になる。

3. 生産時の挙動計算

片山地域を中心として総流量 2000 t/h 程度の流体を生産し、生産と同時にその 70% を還元に戻した場合を分布パラメータモデルに基づいて計算した。ここに設定した生産ゾーンの大きさは、包蔵熱量法に用いた体積の約半分程度である。

生産開始の時点では、2 万キロワット相当の生産しかできないが、生産ゾーンの蒸気飽和度が増すに従って蒸気の生産量が増え、十年後にはおよそ 10 万キロワット相当の蒸気が生産できるようになる。圧力は次第に減少するが、少なくとも 30 年は生産を続けられる。

4. ま と め

このように、自然状態を再現する数値モデルを作成することによって、この地域の透水ゾーンの拡がりか推定し、採取可能な資源量を推定した。その結果、30 年間で生産を行うとすれば約 24 万キロワットという値が得られた。しかしこれはあくまでも、それだけ生産できる可能性があるという数値であり、決定的な値ではない。またシミュレーションで生産時の挙動予測を行ったが、その通り生産できるかどうかは、実際に坑井を掘ってみなければわからない。今回の数値モデリングはむしろ、今後の調査を進めていく上でのターゲットを決めるのに役立つ、と考えている (地殻熱部)

全国地熱資源総合調査の経緯と NEDO による最近の資源量評価

野田徹郎

昭和 55 年度に全国地熱資源総合調査が開始されて以

来 10 年になる。これまで第 1 次 (昭和 55-58 年度)、第 2 次 (昭和 59-61 年度)、第 3 次 (昭和 62-) と調査を行ってきた。本調査の大目標は、わが国の地熱資源賦存状況を体系的に把握し、合理的な地熱開発の促進を図るため、地熱資源有望地区を効率的、科学的に抽出する技術開発を行うというものである。

第 1 次調査では、全国的な規模で地熱賦存状況を明らかにして有望地域をマクロ的に把握するため地質構造、温度分布、地下基盤構造について、最新の広域探査技術により全国を調査し、地熱有望地域図を作成した。いわば全国 37 万 km^2 から平均約 500 km^2 の種々のタイプの有望地域が抽出されたことになる。

第 2 次調査では、抽出された地熱有望地域の中から、タイプの異なる 4 地域 (火山性熱水対流系地域タイプ①: ニセコ, 同タイプ②: 国分, 同タイプ③: 八甲田, 高温可能性地域: 南会津) において火山岩分布・年代調査、流体地化学調査、精密重力調査、比抵抗調査などを実施し、地熱構造の実態解明・地熱モデル作成を行った。また、この 4 地域の熱源評価を行い、タイプ別の有望度の判定、有望地区 (約 50 km^2) の抽出を行った。その結果、火山性熱水対流系地域タイプ①と同タイプ③が有望度が高いと判定された。またこの間の作業を通じ、地熱構造モデル作成の重要性が認識され技術的見通しがついた。

第 3 次調査では、第 2 次調査の結果を受けて、各種の地熱情報を活用した地熱構造モデルに基づく有望地区抽出のためのコンピュータ利用総合解析システムの開発を行っている。このため、有望度の高い地域 (62 年度開始地域: 十勝, 那須, 鶴見岳, 63 年度開始地域: 秋田駒, 磐梯, 阿蘇) において、各 3 年をかけて火山岩分布・年代、流体地化学、精密重力、比抵抗に関する広域的調査を実施し、総合解析システム開発のための入力基礎データを取得している。システムでは一部 AI 技術の取入れも図っており、完成の暁には使用開放を予定している。

地熱資源開発を円滑に推進するためには資源の種類別の賦存地域と資源量を的確に把握する必要がある。NEDO では、全国調査とは別に、資源量把握の緊急必要性に鑑み、資源量評価に関する調査を行った。

調査は次の 2 つの方式により行った。

方式 1 では、これまでに実施された資源量評価を概観し、現状において一応妥当だと考えられる種類別の地熱資源量を拾い上げた。各資源量は時評のとおりである。

方式 2 では、独自の方式により浅部地熱系、深部地熱系それぞれの資源量を算定した。まず日本地熱資源賦存地域索引図 (資源エネルギー庁・地質調査所, 1976) に

第1表 地熱資源賦存量

資源の種類	賦存量(MW)	資 料	根 拠	グ レード
浅部地熱系	蒸気発電	'85 GS 中間報告 報告	容積法(重力基盤深度→貯留層厚さ, キュリー一点+ 坑井→温度 200°C以上, 回収率 25%, 30 年)	○促進調査坑井 による確認
	バイナリー発電	同 上	容積法(同上, 但し温度 150-200°C)	○回収率?
	深部地熱系	同 上	容積法(基盤岩深度 1 km を考慮した場合)	△
	高温岩体系	'85 NEDO/GS 部内資料	容積法(更新世以降の火山岩分布, キュリー一点深 度 10 km 以浅, 重力基盤深度 1 km 以浅) 2,500-3,000 m, 300°C, ダブルフラッシュ方式によ る効率(システム中最高)	△ 仮定多い
(火山発電)	(20,000)	'70 地熱調査会	残存熱量法(マグマ溜 500 年に 1 個生成, 効率 12%, 5,000 年)	△ 概算
合 計	79,540	(火山発電を除く)		
深層熱水系	(26,050) 多目的利用	'77 機振協報告	容積法(概算)? 50-90°C	△

グレード△については数分の1程度に下方修正の可能性あり

取上げられた有望 204 地域について, 評価指標により有望度区分を行った。次に各有望度区分の実例(八甲田: 村岡, 1989; 栗駒: 安川・石戸, 1989)を用い, 有望度区分ごとの面積当たりの浅部地熱資源量を求め, 全国の該当面積を乗じて浅部地熱系資源量を算出する。深部地熱系資源量は方式 1 における深部地熱と浅部地熱の比 2.14 を乗じることにより求める。求められた資源量は, 浅部地熱系 22,070.0 MWe・30 年, 深部地熱系 47,229.5 MWe・30 年である。

(新エネルギー・産業技術総合開発機構)

各探査手法による地熱系モデル
—九州中部域の重力モデル

駒澤正夫

九州全域の 2 万点を越す重力データについて統一した処理により編集した。その結果, 概略的には述べられていることだが別府湾より島原半島に至る火山列に対応するように帯状の低重力異常(別府-島原地溝帯)の詳細なパターンが見いだされた。更に広域的なパターンでは上記低重力帯の分岐が阿蘇火山付近で南へ屈曲し霧島, 鹿児島湾へと連なる火山列につながる。また地殻変動のデータを見ると別府-島原低重力帯を境として南北に伸張しているように見え, アフリカ東部のリフト系との類似点がある。しかし, 重力データだけでは実際に地殻が薄くなっているのかを決めるのは困難で, 特に地震のデータとの対比が必要であろう。

阿蘇火山については, 別府-島原地溝帯の南縁である大分-熊本線上の重力急傾斜部上にある。また, カルデラ壁のコンターパターンから阿蘇火山の表層(火砕物など)

の平均的な密度は 2.2 g/cm³ 程度と比較的小さい。低重力異常域は地形的なカルデラの内側にあり(根子岳は低重力異常域の外側), カルデラ壁の後退を示している。カルデラ内には少なくとも 4 個の局所的低重力異常域が見いだされ, 多量の火砕物を噴出した痕跡を示している可能性が考えられる。定量解析の結果からは, 阿蘇カルデラの陥没量は 1 km 程度と小さく, 複数回の陥没の結果として基盤の落差に比べて直径の大きなカルデラを形成したと考えられる。また, カルデラ内に見られる局所的な高重力異常域は小規模な火山の痕跡(灰塚, 本塚)もあるが, 陥没せずに基盤が浅く残ったものを反映していると考えられ, 地熱流体の上昇域に対比できると思われる。(地殻物理部)

各探査手法による地熱系モデル
—南会津地熱地域の密度構造モデル

高倉伸一・山口 靖

南会津地熱地域は新エネルギー・産業技術総合開発機構による全国地熱資源総合調査(第 2 次)の対象地域である。筆者らは, 本地域の地熱資源評価の基礎データとするため, 重力基盤解析を行い, 本地域の地熱微候と関係の深いカルデラの密度構造モデルについて考察した。

重力基礎解析を行うには, 解析に使用するブーゲー異常図の仮定密度や, 基盤岩を構成する先新第三系の岩石と新第三系以降の岩石の密度差を正しく見積もる必要がある。また, 場所による岩石密度の違いを把握しておくことは, 得られた解析結果を評価する上で重要なことである。そこで, 全地域から岩石サンプル約 400 個を採取し, 密度測定を行い, 表層密度分布図の作成および岩石

別や地層別の統計処理を行った。地質と岩石密度はよく対応しており、基盤岩は約 $2.60\text{--}2.70\text{ g/cm}^3$ 、本地域の南部を広く覆う鬼怒川溶結凝灰岩類は約 2.55 g/cm^3 、北部のカルデラを埋める凝灰岩類は約 $2.30\text{--}2.50\text{ g/cm}^3$ であった。また、仮定密度は 2.4 g/cm^3 が最も適当であることがわかった。

作成したブーゲー異常図と地質とは概ね調和的であった。すなわち、基盤岩地域は高重力異常を、カルデラ域は低重力異常を示している。ただし、鬼怒沼付近から木賊カルデラの西部にかけては基盤岩が広く分布しているにもかかわらず、低重力異常を示しており、この付近だけ基盤岩が低密度化していると予想された。表層岩石分布図にはそのような差異が見られないことより、これは破碎・断裂による深部の基盤岩の見掛上の低密度化と考えた。この低重力異常域には、いくつもの温泉が分布していることから、基盤岩中に破碎域があることは支持される。重力異常から計算すると、基盤岩の見掛上の密度の減少は、鬼怒沼付近では約 $0.2\text{--}0.3\text{ g/cm}^3$ 、木賊カルデラ西部では約 $0.1\text{--}0.2\text{ g/cm}^3$ である。これらの破碎域が密度 1.0 g/cm^3 の水で飽和されていると仮定すると、見掛上の空隙率の増加はそれぞれ約 15%、10%となる。

上記の値を用いて重力基盤解析を行った結果、カルデラに対応するいくつかの基盤の沈降域を解析できた。本地域にあるカルデラはほぼ錐形であり、各カルデラの最深深度は、木賊カルデラが約 2400 m、八総カルデラが 1600 m、古町カルデラが 1600 m、山王峠カルデラが 1200 m、湯西川カルデラが 3500 m、土呂部カルデラが 2000 m となる。宮沢カルデラについては解析できなかった。鬼怒沼・日光周辺では、北部と南部の 2 つの沈降域があるように解析された。現在のところ、これがカルデラであるとの確証はないが、鬼怒川溶結凝灰岩の上部層と中部層の噴出源となったカルデラの可能性が高い。

今回の研究では、正確な岩石密度を考慮して、詳細な密度構造モデルを解析することを考えた。また、岩石密度と重力異常の対応より、基盤岩中の破碎域の存在を考察した。今後、坑井データ等を考慮し、より精密な解析を行う予定である。(地殻物理部・地殻熱部)

各探査手法による地熱系モデル—CSAMT 法・シュランベルジャ法探査と地熱モデル

内田利弘

地熱資源探査において CSAMT 法・シュランベルジャ法などの比抵抗探査がよく用いられているが、それらに

よって得られる地下比抵抗モデルが、地熱構造を考える上でどう貢献するかについて考察した。

岩石の比抵抗を決める要因には、(1)孔隙率、(2)孔隙水の性質、(3)温度、(4)粘土鉱物、および(5)金属鉱物がある。孔隙率 ϕ と地層比抵抗 ρ の関係は石油探査の分野で作られ主に堆積岩にあてはまるアーチーの式、

$$F = \rho / \rho_w = a\phi^{-m}$$

を適用することが多い。ここで、 F は地層係数、 ρ_w は孔隙水の比抵抗、 a および m は定数である。 $a=1$ 、 $m=-2$ (硬質堆積岩に適用) の場合について、 $\rho_w=1\Omega\text{m}$ とすると、 $\phi=10\%$ で $\rho=100\Omega\text{m}$ 、 $\phi=20\%$ で $\rho=25\Omega\text{m}$ になる。従って、孔隙率によって比抵抗は数倍の変化をすることになる。孔隙水に溶けているイオンの濃度および温度によって地層の比抵抗は次式のように変化する。

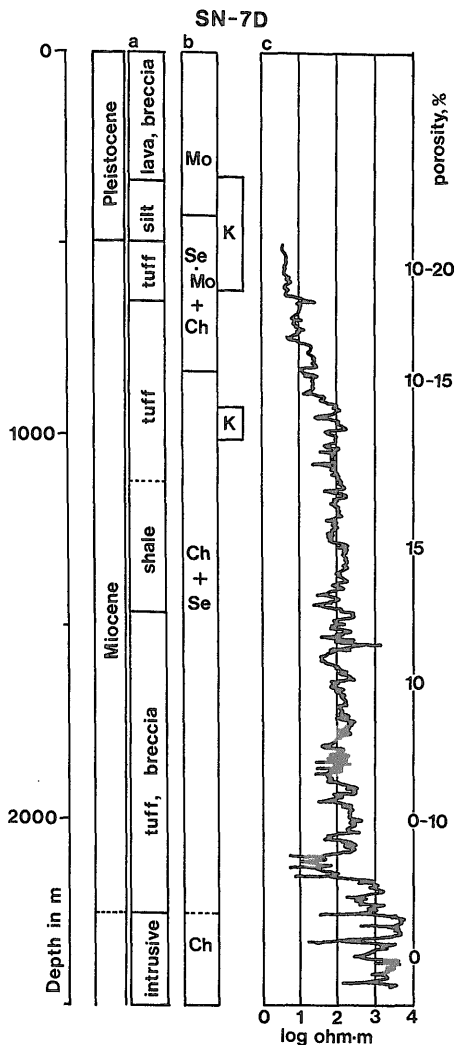
$$\rho_w \propto \frac{6\pi}{nFZ^2} \exp(U/RT)$$

ここでは、 n はイオン濃度、 F はファラデー定数、 Z は原子価、 U は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度である。 n および T が増加すると比抵抗は減少する。温度による比抵抗変化は、例えば、常温から約 200°C まで温度が上昇したとき、岩石の比抵抗は $1/5\text{--}1/10$ に低下することが報告されている (横山ほか, 1983)。

鉱物粒子と孔隙水が接触したとき、その境界には分極した薄い層 (電気二重層) が形成され、それは一般に孔隙水よりも導電率が大きい。粒子径の小さい粘土では、単位重さ当たりの粒子の表面積が大きくなり、電気二重層による比抵抗の低下は著しくなる。

新エネルギー・産業技術総合開発機構が仙岩地熱地域に掘削した SN-7D 坑の柱状図を第 1 図に示す (新エネルギー総合開発機構, 1988)。SN-7D 坑は複数の優勢な逸水層に遭遇し、大量の噴きを見ている。SN-7D 坑の比抵抗は、深度約 $500\text{--}600\text{ m}$ の凝灰岩で数 Ωm 、 $600\text{--}900\text{ m}$ の凝灰岩は $10\text{--}100\Omega\text{m}$ 、 $900\text{--}2,200\text{ m}$ の凝灰岩・頁岩は $100\Omega\text{m}$ 、 $2,200\text{ m}$ 以深の貫入岩は $1,000\Omega\text{m}$ となっている。比抵抗の要因である孔隙率は中性子検層の値によると、中新統の堆積岩は岩質にあまり依存せず $10\text{--}20\%$ の値を有する。中性子検層はすべての水素原子の量に対応した値を示すので、これらの数値がかならずしも正しい孔隙率とは言えないが、比抵抗は孔隙率にそれほど支配されていないようである。

温度検層によると、深度約 400 m から $1,100\text{ m}$ までは伝導型の温度上昇を示し、なかでも、深度 $400\text{--}600\text{ m}$ の温度変化は急激である。深度 $1,100\text{ m}$ 以深では $250\text{--}300^\circ\text{C}$ の値をとり、対流型の温度変化である。比抵抗と温度の関係をみると、温度の低い深度 $500\text{--}600\text{ m}$ 付近



第1図 仙岩地域 SN-7D 坑の柱状図 aは地質, bは変質鉱物, cは電気検層を表す。比抵抗はラテログ, 孔隙率は中性子検層による。Moはモンモリロナイト, Seはセリサイト, Chは緑泥石, Kはカオリナイトの変質帯を表す。

の方が900 m以深の高温部より低比抵抗を示す。岩質は凝灰岩が卓越しており、比抵抗は岩質には依存していない。従って、ここでは比抵抗変化を支配しているのは変質鉱物、特に粘土鉱物であると考えられる。粘土鉱物は粒子径が小さく一般に低比抵抗と言われているが、ここでは特に低温で生成し、水分を結晶格子の間に多く蓄えて膨潤するモンモリロナイトが低比抵抗部を形成していると考えられる。高温の粘土鉱物(セリサイト、緑泥石)に富む深部は低比抵抗を示さない。逸水層は高温粘土鉱

物が卓越するところに存在し、地熱貯留層を形成している。また、膨潤性のモンモリロナイト層は不透水性であり、地熱流体のキャップロックになっている。これは温度変化と強い相関を示す。従って、地熱貯留層を比抵抗構造で見ると、低比抵抗のキャップロックと中/高比抵抗の貯留層で特徴づけられる。(地殻物理部)

各探査手法による地熱系モデル —広域規模比抵抗モデリング

小川康雄

新エネルギー・産業技術総合開発機構による「地熱探査技術等検証調査」, 「全国地熱資源総合調査」などのプロジェクトにおいて、数十 km×数十 km 程度の範囲を対象とした MT 法調査が行われている。本講演では、全国地熱資源総合調査第2次で行われた八甲田地熱地域の MT 法データを用い、広域規模比抵抗モデリングの問題点を指摘した。

MT 法調査から、得られる地熱系に関する以下の情報が得られる。(1)地質構造(特に熱水の入れ物としての比抵抗基盤構造), (2)変質帯分布, (3)熱源と関連する深部低比抵抗異常。本講演では、(3)に焦点を絞る。

周期 200 秒までカバーする MT 法では、深度 10 km 程度までの深部構造の情報が入り得るため、熱源に関する情報をもたらす。本講演では、八甲田地熱地域の MT 法データを再解析し、深部比抵抗異常について考察した。

八甲地域の比抵抗曲線は、周期が 10 秒以上になると、電場の方向によって顕著な異方性を示す。すなわち、周期が 10 秒より長くなるにつれて、南北方向の電場の見掛け比抵抗が下がり、東西方向の電場の見掛け比抵抗が上がる。

新エネルギー総合開発機構(1986)では、この異方性の原因を、調査域の直下に押し付けた。その結果、深部の“マグマ”と思われる数本の低比抵抗ダイクを調査域内に分布させる必要が生じた。一方、筆者は、より広域的な構造を考慮することにより、容易に見掛け比抵抗の異方性を説明することができることを示した。

MT 法では、周波数が低くなるにつれ深部の構造の影響を受けると共に、側方の広い範囲の浅部構造の影響を受けるので、熱源と関連する深部構造を解析するに当たっては、調査域を取り囲む広域的な構造についても注意を払う必要がある。(地殻物理部)

各探査手法による地熱系モデル—温泉泉質の新しい表示法について

高橋正明

温泉の泉質を地質図等の上に明瞭に表示することは、熱水の形成・胚胎状況、湧出機構と地質などとの関連を考察する上でも、さらに調査を精密に行う上でも非常に重要なことである。

温泉の泉質（化学成分・組成・濃度）は温泉の成因、即ち火山ガス等の付加・周辺部の岩石との反応・相状態の変化・地下水等との混合（稀釈）などを反映している。そのため、①濃度の差が違う温泉の間でも、違う化学成分の間でも著しく大きく、その差は対数的である。②違う温泉の間で、濃度が著しく違っているが化学組成は類似している場合がある。③河川水等ではあまり観測されない特殊な成分を含んでいる、等の特徴がある。ここから、①濃度の著しい違いを同じスケールで表現するため、二次元的な表現（面積）あるいは対数的な表現ができる表記法、②稀釈を表現するため相似形になる表記法、③基本的に全てのイオン種が表現できる表記法が必要である。今回筆者はこの表記法として円グラフ（厳密には半円グラフ 2 つ）を提案した。

この円グラフは以下のように表記する。

①円グラフの上半分は陽イオン、下半分に陰イオンをそれぞれ当量百分率にて表示する。この表記では中性の場合には円形に、酸性では船形に、アルカリ性では茸形になる。微量に存在するイオン種、pH により存在形態を変えるイオン種については十分に注意する。

②円グラフの大きさで濃度を表示する。この場合円の半径を、I 濃度そのもの、II 濃度の平方根、III 濃度の対数および IV 濃度の段階的な区分、のいずれかに対応させる。III の方法を用いる場合には十分な注意が必要であるが、通常は II の方法で数百倍の濃度の違いのある温泉を同じスケールで表記できる。

この円グラフは以下のような応用が可能である。

- ①円グラフに内円を付け、その中に温泉名など必要な情報を書き入れる。
- ②円グラフを必要に応じて拡大したり、縮小したりして温泉相互の化学組成の比較を行い易くする。
- ③違う温泉の円グラフをいくつか重ね合わせ、温泉相互の化学組成の類似の程度を視覚的に示す。
- ④特殊な成分を含む場合にはその部分を円グラフから切り離すなどして強調する。

⑤ある特定の成分のみが温泉相互で変化している場合には、ある基準の円グラフからその成分に当たる部分の扇形の面積のみを増加させたり、減少させたりして強調する。これは 1 つの温泉などで連続的に観測を行っている場合にも使用できる。

⑥円グラフを適当に着色すればより視覚的である。

今回提案した円グラフは温泉の泉質を表記するものであるが、同様の方法で温泉等の水温・湧出量・放熱量などの表記も可能である。（地殻熱部）

全国坑井データの編集図表から示される地下情報

矢野雄策・須田芳朗

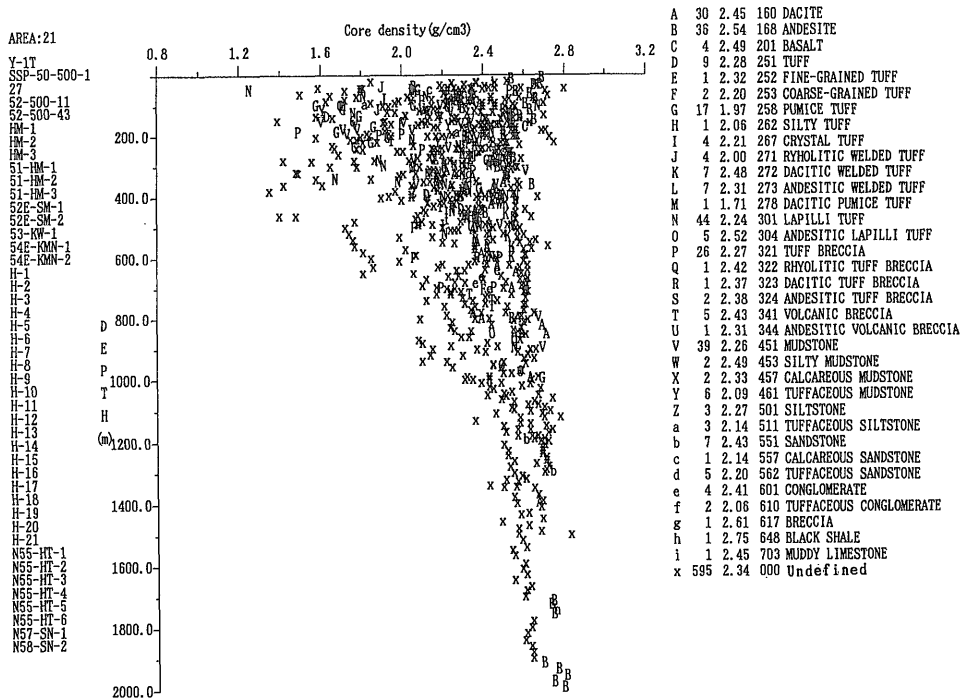
地熱情報データベースのうち、坑井データベースに収録した全国 33 地熱地域の地熱調査坑井のデータの図表編集を行った。このうち、コア物性、地質層序、年代検層、化学分析の各データの図表については地質調査所報告第 271 号（元年 11 月発行）に取りまとめた。また、検層図、地質柱状図については編集作業中である。坑井位置図や坑井一般情報データ表についてはいずれにも掲載し、利用の便を図る予定である。

対象とした坑井は、地熱開発精密調査、地熱開発環境調査、地熱資源開発調査、発電用地熱開発環境調査、地熱開発基礎調査、広域熱構造調査法の研究開発、地熱探査技術等検証調査、大規模深部地熱発電所環境保全実証調査、地熱開発促進調査の各地熱調査で掘削された坑井及び鬼首における電源開発株式会社の調査井の一部となる。総数は 321 本である。

第 1 図は編集図の一例である。これは仙岩地域の利用可能な坑井のコアの密度（自然乾燥状態）をプロットしたものである。岩石の種類によって異なったシンボルでプロットした。この地域の岩石密度は、上限が約 2.7 g/cm³ で、これは浅部から深部まで大きな変化はない。しかし、下限は深度に応じて大きくなり、深度 1,000 m までの大きな変化が多数のデータによって示されている。

密度以外の物性についても各地域について見てみると多様なパターンが読み取れる。

他に、各地域の地層ごとの物性値を統計数値化した表も編集し、地熱資源の評価・解析の基礎となる情報を提供することが可能となった。（地殻熱部）



第1図 仙岩地域の岩石密度

総合解析技術—変質温度推定
エキスパートシステムに関して

野呂春文

変質鉱物の組合せから変質に関与した熱水の温度と pH を推定するためのプログラムを開発した。単純な動作のプログラムであるが、知識内容のひんぱんな修正や、人間との複雑なやりとりが発生するため、従来の手続き型言語での実現は面倒である。しかも、高速性が要求されず、人間との対応が文字ベースであるため、実現言語は Prolog/KR が適当であると判断された。Prolog/KR を採用したため、知識は単純なホーン節で記述でき、プログラムの動作も Prolog/KR 組み込みのもので用が足りた。

多数のテストデータを用いて、専門家の判断との比較を行った結果、以下のような問題点が明らかとなった。(1)余計なデータ：熱水成以外の鉱物、例えば初生の石英や風化生成の粘土鉱物がデータとして入力された場合、誤った結果あるいはノイズの多い結果が得られてしまう。(2)不正確な同定：通常の変質鉱物同定が風乾試料の X線粉末法だけに頼っているため、上記のような誤りを

発生させてしまう。

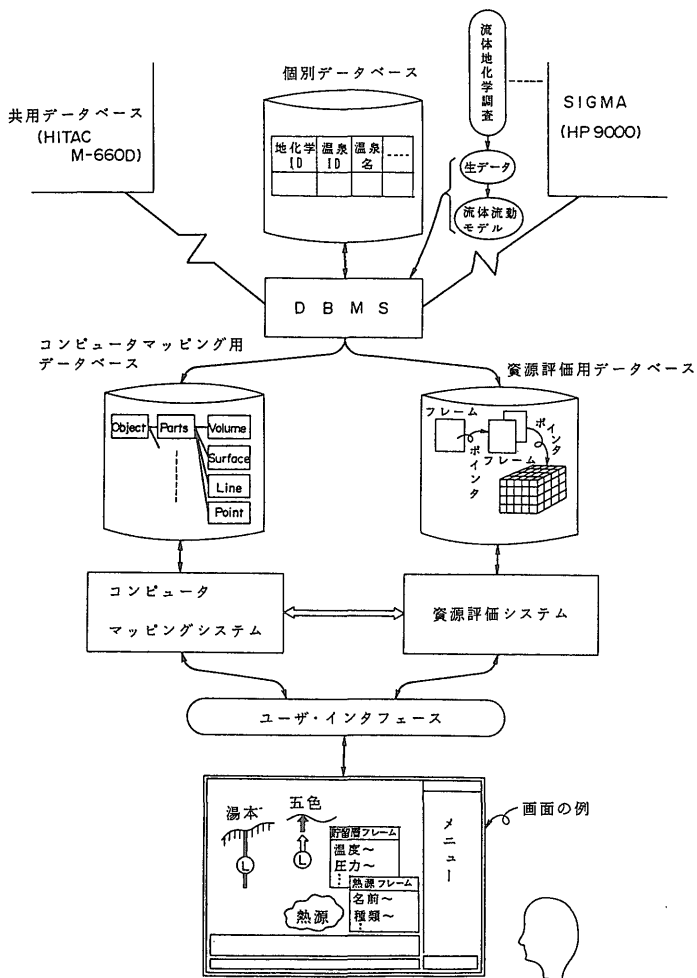
これらの問題は、データの質にからむ本質的なものであって、応用ソフトのレベルでは解決が不可能に近い。変質鉱物の組合せをデータとして得る際には、正確な鉱物同定が必須であり、そのためには、ていねいな X線回折法、正確な地質記載、光学顕微鏡観察結果等が不可欠である。(地質情報センター)

総合解析技術—地熱有望地区抽出のための
総合解析技術

松山一夫

新エネルギー・産業技術総合開発機構では、昭和 62 年年度から全国地熱資源総合調査(第3次)の一環として、地熱調査データを効率的に解析・管理・利用し、地熱有望地区を的確に抽出するため、高度の情報処理技術を採用した資源評価システムを中心とする総合解析システムの開発を進めている。

本総合解析システムの開発にあたっては、その構成上、情報ネットワークシステム、コンピュータマッピングシステム及び資源評価システムの3サブシステムに区分して作業を進めている(第1図)。



第 1 図 総合解析システム概念図

情報ネットワークシステムは、地質調査所の地熱情報データベース (SIGMA) 等外部との情報交換システムを構築するものである。

コンピュータマッピングシステムは、資源評価をサポートするための各種調査データの保存・処理・表示システムを構築するものである。

資源評価システムは、各種調査手法別のデータ解析結果を総合的に解析して地熱有望地区を抽出・評価するシステムを構築するもので、地熱系モデルを作成するプロセスのシステム化を進めており、この中で流体流動経路の解析を行う処理部についてエキスパートシステムを開発することにしていく。

本総合解析システムの開発にあたって、当機構にエンジニアリングワークステーション 2 台を中心としたハー

ドウェア及び開発に必要なソフトウェアを導入した。また、全国地熱資源総合調査 (第 2 次) で調査を実施したニセコ地域及び八甲田地域の調査データならびに全国地熱資源総合調査 (第 3 次) で並行して実施している広域熱水流動系調査の調査データについては順次データベース化を進め、システム開発について利用している。

これまで昭和 62, 63 年度の 2 年間で各サブシステムについて概念設計から詳細設計ならびに一部プログラムの開発及びテストランを実施してきた。今後、各サブシステムの開発を進めていき、それらを統合して全体システムとしての機能調整等を行い、平成 4 年度末までに総合解析システムを完成させる予定である。

(新エネルギー・産業技術総合開発機構)