

第 1 章 緒論

1.1 地熱開発の諸問題

地熱エネルギーは、地球そのものを熱源とする自然エネルギーであり、火山国であるわが国において豊富に存在する純国産エネルギーといえる。総合エネルギー調査会需給部会中間報告（1998年6月）では、開発可能な地熱資源量は約 2,500MW と見積もられており、これは年間約 3.8GJ の石油に換算される。このうち現在の地熱発電の設備容量は未だ約 550MW に過ぎない（石油換算では 0.8GJ となる）。一方、温泉として放出される熱量も、年間 3.5GJ に相当し（角，1980）、現在稼動する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を意味する。さらに、90 までの低温熱水の資源量は 3.6×10^4 GJ、また 150 までの中温熱水は 2.1×10^4 GJ に相当する（宮崎ほか，1991）。従って、その利用形態は、発電、熱水直接利用、表層・浅部地下熱利用等多目的な利用が可能であるという特徴を有している。

一方、地熱エネルギーは、温室効果ガスの排出も極めて少ないクリーンな再生可能エネルギーとしての性質を備えている。1997年には 地球温暖化防止京都会議が開催され、地球環境問題として CO₂ガスの排出にあたっては、世界各国ともその排出量の削減が求められており、再生可能エネルギー（太陽光、風力、バイオマス、地熱、水力等）への期待が高まっている。この中で、地熱は、太陽光や風力に比べ安定性の点で優位であり、最も実用性の高い自然エネルギーと位置付けられる。従って、その技術開発の推進は、国内外を問わず重要な役割を果たすものとして期待される。

地熱発電は、1904年イタリアで試験運転に成功したのが始まりである。以来、1913年同じくイタリア・ラルデレロ地熱発電所において発電容量 250kW で初めて商業運転が開始され、1958年ニュージーランド・ワイラレイ地熱発電所、1960年米国・ザ・ガイザース地熱発電所、そのほかフィリピン、インドネシア、メキシコ等と世界各地へと広まった（日本地熱調査会，1993）。

わが国においても、1924年（大正13年）別府で 1kW の試験運転が最初に行われ、1966年松川地熱発電所（岩手県、日本重化学工業株）で初めて商業運転が開始された。その後オイルショックを契機に石油代替エネルギーとして注目を集めその開発が促進され、2002年3月現在で、総設備容量は 548.9MW まで達し、世界でも 6 番目の地熱発電量を誇るに至っている（図 1.1）。しかしながら、2002年の九重地熱発電所の運転

開始を最後に、最近ではその開発は停滞している（日本地熱調査会，2002）。

こうした開発の伸び悩みの原因としては、電力需要の低迷、電気事業の自由化、火力や原子力エネルギーに比べ発電原価が高い等の理由が挙げられるが、地熱資源特有の問題に着目すると以下のことが指摘される（新妻ほか，2002）。

地熱資源は偏在し、不確実性が高く、また、金属資源や化石燃料に比べて規模が小さいこと。

このため資源量の適正な見積もりが容易とはいえず、開発リスクが高いこと。

運転開始以降、過剰生産による枯渇、生産 - 還元の運用の問題、またはスケール問題等により減衰が発生すること。

上記の問題点は、地下の情報量に制約があり、地熱貯留層（経済的価値のある地熱資源が賦存するところを意味する）の現状把握とその将来予測に対する技術の未熟さに負うところが少なくない。同技術のさらなる発展が急がれる。

1.2 地熱資源の特性

(1) 地熱資源の分布

世界の主要な地熱地域は、火山の分布と関連が強い。火山が分布するところとして、海嶺等のプレートの拡大域、島弧等のプレートの収斂域、それにホットスポットがあり、これらはいずれも地熱資源にとってポテンシャルが高い地域となる。

プレート拡大域は、東太平洋海膨がカリフォルニア湾を通り北米大陸へ入ったところに、メキシコ・セロプリエト地域から米国・インペリアルバレー地域へと連なる一大地熱地帯がある。この他に大西洋中央海嶺上のアイスランド、アフリカのリフトバレーに沿うケニアやジブチ等の国々が挙げられる。プレート収斂域は、わが国、イタリア、ニュージーランド、フィリピン、インドネシア、グアテマラ、ニカラグア等の国々の地熱地域が相当する。ホットスポットは、プレート運動とは直接関係がなく深部からマグマが供給されている場所であり、有名なのがハワイ島の地熱地域であるが、世界最大の地熱地帯ザ・ガイザース地域（米国・カリフォルニア）も北米プレート内のホットスポットと考えられている（笹田，2001）。

(2) 地熱資源の賦存形態

地熱資源の開発は、地下深部に蓄えられた熱エネルギーを、蒸気や熱水を輸送媒体

として井戸を通して生産し、利用するものである。地熱資源として必要な構成要素は、一般に熱（あるいは熱源）、地熱流体、及び割れ目（地熱資源の3要素）と云われている（野田，1997）。

熱は、エネルギーそのものであり、地熱資源としては最も重要で、かつ本質的な要素となる。マグマの温度は、650 から 1300 と高温であるが、それ自体では現状の技術として資源とはならない。同エネルギーの利用には、水（地熱流体）の存在と、それが流動する場（例えば、岩石中の孔隙や割れ目）が不可欠である。これらの3要素は、別の表現を用いると、熱は温度に、水の量の程度とその性状は、それぞれ圧力及び化学成分に、そして、割れ目の発達程度は、透水性という指標で表され、対象とする地熱地域の特性を把握する際に適用される。

このように地熱資源が賦存する場を地熱系と呼んでいるが、その賦損形態は、一般に以下のように特徴づけられる（石戸，1990）。

地表から地下へ浸透した冷水は、断層や割れ目を通して地下深部へと浸透する。これが熱源付近の高温領域で加熱され、冷水と熱水との密度差による不均衡が駆動力となり熱水は断層や割れ目を通して上昇する。同位体地球化学（水の酸素・水素同位体組成）の研究から、深部に存在する地熱流体はほとんど地表水起源であることが報告され、マグマ起源の水は乏しいことが判明している。熱水の上昇路と交差して帯水層或いは割れ目系が発達し、長い年月（数千年から数万年というオーダー）をかけて暖められる。このような過程で地熱貯留層が形成される。地熱貯留層の上部には、しばしばキャップロック（割れ目系の発達が乏しい地層）が存在し、これは、上昇してきた熱水が地表へ流出するのを抑制し、貯留層の発達に重要な役割を果たす（図 1.2）。

(3) 地熱資源の発電利用におけるライフサイクル

地熱発電は、再生可能エネルギーと云われているが、その一方で減衰が起こることも多くの地域で認められる。しかしながら、金属或いは石炭の鉱山のようにある時点で急にゼロに向かって低下するのではなく、石油井のように、生産開始から指数関数的に減衰が起こるものでもない。地熱には、地熱特有のライフサイクルのパターンがあり、Lovekin(1999)が以下のように報告している（この邦訳は、花野（2000）に記される）。

一般に、資源の種類によりそのライフサイクルは異なる挙動を示すと考えられる。

ここに 3 種類の典型的な資源のライフサイクルの挙動の概念モデルを図 1.3 に示す。鉱山のモデルの特徴は、出鉱を開始した時点では、鉱体の全容が必ずしも明確でなくてもその資源量は有限であると認識されている。出鉱開始前は、非常に多くの投資が必要であるが、ひとたび出鉱が開始されると、経済環境の激変がない限り、採掘能力の範囲で一定のレートで採掘が続けられる。プロジェクトには明確であり、かつ予測しうる終わりがある。

次に石油井の理想的なモデルでは、開発業者は井戸を掘り、石油を生産可能な最大量でその井戸から生産し続ける。採油の継続に伴い、その井戸からの生産量は減衰し続け、それが経済的にみて限界に達した場合、その井戸は廃棄される。鉱山におけるモデルと同様、石油井に対するモデルは、その井戸から回収できる資源は有限であることを認識している。しかし鉱山とのモデルと最も大きな違いは、石油生産に対する貯留層の応答として必然的に生じる生産量の曲線的な減衰である。石油井のライフサイクルの終焉は、ややあいまいであって、貯留層に対して水攻法や水蒸気攻法といった EOR 法（強化採取法）を適用することで、延命することが可能である。

理想的な再生可能なエネルギー資源のモデルの特徴は、その資源から回収しうるエネルギーは無限にある。資源自体の減衰はない。プロジェクト自体にも終焉はない。一般に、水力発電、風力発電、太陽光発電はこれに近いと考えられる。

上記の概念モデルも地熱資源の特質を表すのに十分とは言い難い。地熱発電のライフサイクルを概念的に示したものを図 1.4 に示す。地熱発電所では、運転開始の最初の時期は、予備井が確保されていたり、また、出力低下が発生しても補充井により見掛け上の出力が維持されることにより、発電出力は維持される。このような補充井掘削が経済的にもはや成り立たなくなった場合、それ以降、発電出力は低下する。しかしながら、ある程度発電出力が低下してしまうと、生産量と貯留層周辺からの流体の補給がバランスすることで発電出力が安定することがある。これが、再生可能と呼ばれる段階であり、新たな坑井を追加しなくても減衰は起きなくなる。この段階の出力がどの程度になるかは、対象とする地域の貯留層特性によって異なる。

従って、地熱事業を成功させるためには、安定な出力を維持できる出力設定をどのように決定するかということが重要な鍵を握っている。蒸気生産開始後、予想どおりの出力が維持される場合には、高い収益が確保されることになるが、スケールメリットを優先し、貯留層規模より高く出力設定を行い、予想以上の減衰が起こり、予定以

上の補充井掘削に見舞われた場合、経済性に与えるダメージは大きい。こうした意味で、蒸気生産以降、貯留層の挙動を監視し、最大の収益が得られるよう最適な貯留層の運用を行う方策が、「貯留層管理」であり、これは地熱事業の成否を左右する重要な役割を担う。

1.3 これまでの研究とそれらの問題点

(1) 貯留層管理

地熱貯留層の開発に伴う流体及び熱の生産は、貯留層の圧力低下を引き起こす。貯留層温度が高い地域では、液単相から気-液の二相状態へと変化が起こる。また、蒸気分離後の熱水やタービン通過後の蒸気腹水を還元すると、還元領域の圧力は上昇し、生産領域への還流が促進される。一方、生産領域の圧力低下により、浅層の低温熱水が生産ゾーンに流入する場合もある。このような還元水や系外の低温水が、生産ゾーンへ流入する間に充分岩盤から熱供給がないと、生産ゾーンの温度低下が発生し、結果として出力の減衰が起こる(糸井, 2001)。異なる化学性状をもつ流体との混合は、スケールの沈殿を起こし、割れ目や坑井内を閉塞させる場合がある。これについても生産能力の低下としてしばしば認められる現象である(例えば、佐久間, 1998; Ajima et al., 1998)。

花野(1995 a)は、このような生産井の蒸気生産量低下に影響を及ぼす主な要因を5つに分類した(図 1.5)。それらは、貯留層圧力の低下、流体エンタルピーの低下、坑井内・貯留層内のスケール付着とシーリング、貯留層外からの不十分な流体補給、坑井内のメカニカルトラブルである。このうち、貯留層圧力の低下は、坑井から地熱流体を噴出させ、熱エネルギーを抽出する従来型の地熱発電方式では、蒸気生産に伴い貯留層の質量欠損は必然的に発生し、程度の差はあるものの避けることはできない本質的な問題である。一方、他の要因については、それらに対して十分な配慮と適切な対処が行われれば、回避或いは最小限に抑えることは可能である。

貯留層管理とは、生産開始後の貯留層の挙動を各種モニタリングを通して監視し、問題点の抽出と原因究明を検討し、適切な対策を施すことにより貯留層の能力に見合った最適な生産を行うことを目的とする。貯留層の挙動を把握するために、一般に次のようなモニタリングが実施されている。

生産流量及び還元流量

生産流体の地化学

トレーサテスト

観測井による貯留層圧力の連続観測

定期的な坑井内検層

重力変動調査

こうして得られたデータに基づき、還元流体の還流状況の把握、モデリングによる貯留層の将来挙動、スケールの予測等の解析を行い、トラブルの回避或いは早期発見の一助とする。以下に、現存する地熱発電所で実施された貯留層管理の事例を記述する。

a) 還元井の再配置

熱水卓越型貯留層では、ほとんどの地域において蒸気分離後の熱水を地下へ還元している。Stefansson(1997)は、還元に関しその重要性和問題点について、多くの既存報告に基づき包括的な取りまとめを行い、熱水還元は、当初廃棄物処理という目的で行われてきたが、昨今では貯留層管理の点で重要な役割を果たしていることを指摘する。1974年運転を開始した大沼地熱発電所では、世界に先駆けて初めて熱水の還元が行われ、また、その還元熱水の生産井への還流状況(還流量や応答時間等)、流動経路、還元井-生産井間の透水性を把握し、貯留層管理の一助とすることを目的として、地熱地域では世界で初めてトレーサテストが実施された(伊藤ほか、1977a及びb)。

葛根田地域における熱水還元を問題とした貯留層管理の事例として、花野(1995a)は以下の報告を行った。葛根田1号機は、運転開始後約1年半が経過した1979年後半から蒸気生産量が急速に減衰し発電出力が低下した。このため、トレーサテストや噴出流体の化学性状調査、並びに生産井や調査井の温度・圧力検層を行い、この結果に基づき、坑井内流動シミュレーション並びに3次元モデルによる貯留層シミュレーションを実施した。その結果、ここでの蒸気生産量の減衰の原因は、主に還元熱水が予想よりも短期間のうちにほとんど温度回復せずに生産井に混入したために生産流体の温度が低下したことによることを明らかにした(平子、1982)。これらの結果に基づき、生産井に悪影響を与えている還元井の使用回避や抑制を図ったり、生産基地と還元基地の再配置を実施することで、発電出力の回復に成功している。こうした事例は、八丁原地域(鶴田、2001)でも報告される。

b) 注水による貯留層涵養

米国ザ・ガイザース地域に代表される蒸気卓越型貯留層は、熱は豊富にあるものの透水性が低いために貯留層周辺からの流体の供給が少なく閉鎖系に近い地下構造をもつ。こうした特性により、貯留層圧力の低下による蒸気生産量の減衰が発生し、この対策方法として、“注水による貯留層の涵養”が1970年代より試験的に行われた(Chasteen, 1975)。その後、この注水による出力回復の対策は、非凝縮性ガスの増加、流体の酸性化、スケール等の問題を抑制する方策としても注目され(例えば、Gambill, 1990; Goyal, 1995; Sanyal, 2000)、その他の地域でも適用されるに至っている(Cappetti et al., 1995; Hanano et al., 1991)。ザ・ガイザース地域では、生産蒸気の50~70%を注水により地下に戻し、注水された水の60~80%が蒸気として回収されていることがトレーサテストや地化学モニタリングから明らかになっている。その結果、減衰率は注水前の20%/年から3%/年まで緩和できたことを報告している(Sanyal, 2000)。

わが国で唯一の蒸気卓越型貯留層である松川地域においても、笠井(2001)によりその適用事例が報告され、トレーサテストにより注水の効果を定量的に把握し、注水による貯留層の冷却という悪影響を引き起こさないよう、貯留層応答のモニタリングとシミュレーションによる挙動予測の重要性を指摘している(鷹嘴, 1992; 花野, 1995b)。

(2) スケール問題

スケール問題の概要

スケールは、地熱開発の当初から発生している地熱開発特有の本質的な課題の一つである。1988年8月、地熱系でのスケールリングに関する国際会議が開催された(Gudmundsson and Thomas, 1989)。報告された論文は、地熱流体からのスケールリングに関するフィールド並びに実験による研究事例である。取上げられたスケールのタイプは、炭酸塩鉱物、非晶質シリカ、金属硫化物/酸化物である。スケール生成は、広範囲のエンタルピー及び化学条件下での地熱系で発生すると報告された。スケール生成は、温度やpHの変化によって生じるスケール鉱物の溶解度に規制される他、他成分の化学種濃度や反応速度の効果にも影響される。スケール生成が起こる条件の多様性から、沈殿する場所も、生産井、地上設備、還元井と広範囲に及ぶ。地熱エネルギーの抽出中に起こるスケールリングの対策に適用された化学的エンジニアリングの手

法は、化学的抑制法、流体の温度・圧力の制御、沈殿したスケールの機械的及び化学的洗浄法である。本会議の報告からは、現状技術ではこれらの適用に限界があることが示唆された。今後の課題としては、化学的抑制剤の開発が効果的であるということが推奨された。

生産井坑井内のスケール

生産井坑井内に生成するスケールは、坑径の縮小を伴い蒸気生産量に直接影響を及ぼす原因となる(図 1.6[A])。その生成メカニズムの解明、スケール成長予測、抑制技術等について多くの報告がある。このうち、方解石スケールは最も多く報告があり、いずれも坑井内(場合によっては地層内)でフラッシュ(沸騰による気液分離)が起こる過程で、同スケールの生成が起こることを報告している(例えば、Armannsson, 1989; Benoit, 1989; Reed, 1989; Herras et al., 2000)。

Herras et al.(2000)は、フィリピン・レイテ島マハナグトン地熱地域における方解石スケールリングのメカニズムについて研究した。同地域では、方解石スケールの生成は生産井の出力減衰の主要な原因の一つとなっており、生産流体は貯留層内では、方解石に対し飽和状態にあるが、坑井内でのフラッシュにより流体は過飽和状態に変わり、その結果沈殿が起こることが明らかになった。ある生産井では、方解石スケール生成による坑井内閉塞により主要フィードゾーンが他のレベルへシフトする現象が生じ、さらに噴出流量の減衰が加速されることもわかった。化学平衡計算により、方解石沈殿量とスケール厚さの推定を試みた結果、スケールリングによる坑井内閉塞で噴出流量の減衰が起こる周期は、MG-1坑で5ヶ月、MG-23D坑で10ヶ月、MG-7D坑で11ヶ月、MG-19坑で1年5ヶ月と予測され、計算された方解石スケールの厚さは、実測値と概ね一致した。

他の種類のスケールとしては、スメクタイトについては、Ajima et al.(1998)が鬼首地域においてその生成メカニズムを研究し、異なるフィードポイントからそれぞれ酸性熱水と中性熱水が坑井内へ流入しそれが混合することで対象とするスケールに対して過飽和状態が形成され、スケールリングが起こることを報告した。同様に、硬石膏については、赤工(1988)が伏目地域において同スケールの生成メカニズムとその対策を研究し、熱水温度が顕著に異なる流体が坑井内にて混合し、硬石膏の沈殿が起こり、坑口圧を制御することで各フィードポイントから坑井内へ流入する流体量を変化させ

ることでスケールは抑制されることを報告した。

一方，Granbakken et al.(1991)は，油田地域における炭酸塩及び硫酸塩鉱物スケールについて坑井内及び坑井近傍の貯留層内での沈殿量を化学平衡論及び速度論を用いたモデルにより数値シミュレーションを実施し，坑井内スケールに対しては実測されたスケール厚と計算結果との整合性を図りモデルの妥当性を評価した（図 1.6[B]）。

(3) 貯留層モデル

モデル概要

貯留層管理において，貯留層の現状を把握し，将来の挙動を予測することは，合理的な貯留層規模の決定，適正な生産管理，及びこれと関連した貯留層の寿命を判断する上で重要である。一般に，数値モデル作成によるシミュレーションが主として適用されている。これは，物理的法則に基づき，基本的仮定のもとにこれを数学的に表現し，実測データ，或いは推測データを用いて各調査開発生産段階においてモデルを構築し，種々の特性を定量的に再現しようとするものである（和田・大牟田，1984）。

シミュレーション作業を図 1.7(1)～(2)に示す。通常以下のステップで行われる（例えば，新エネルギー・産業技術総合開発機構，1993）。

- a) 概念モデルの構築
- b) 数値モデルの作成
- c) 自然状態シミュレーション
- d) ヒストリーマッチング
- e) 生産予測シミュレーション

シミュレーション作業の初めは，地質，地化学，地球物理，貯留層工学等の各種データを総合的に解釈し，概念モデルを構築することである。この概念モデルには，地質構造，上昇流域，リチャージ域，キャップロック，温度・圧力分布等の地熱系を構成する基本的な要素が盛り込まれる。

次は概念モデルに則り，これを数値モデルに変換する。取得データの質・量に応じて，ブロックの形状とその大きさ，グリッド間隔を決定し，各ブロックに岩石物性値を設定する。また，境界条件やヒートソースも概念モデルに基づきある仮定を設定する。

次に，作成された数値モデルを用いて自然状態シミュレーションを行い，生産開始

前の状態の再現を図る。ここでは、適当な温度・圧力状態を各ブロックに初期条件として与え、通常数万年オーダーの計算を行い、現在の貯留層状態（例えば、温度・圧力分布）を再現させる。再現しない場合は、数値モデルの各パラメータを適宜修正し、現状を再現する最良のモデルを作成する。

蒸気生産に伴って貯留層は、物理化学的な変化が起こる（例えば、温度、圧力、蒸気飽和度、流体地化学性状等）。これらの変化をモデルを規定する拘束条件として、ヒストリーマッチングを行い、モデルのさらなる精緻化を図る。一つの拘束条件を正確に再現するよりも、複数の拘束条件（例えば、噴出流体の比エンタルピー、塩濃度、ガス濃度、貯留層の温度、圧力、重力変動、地表における歪等の観測値）を大局的に再現させる方が、モデルの精緻化には有効であることを Grant（1983）は指摘する。

自然状態シミュレーションとヒストリーマッチングの2段階のモデルのキャリブレーションの後、生産予測シミュレーションを実施し、貯留層の挙動とこれに伴う出力の変化を推定し、今後の貯留層管理の一助とする。また、予測計算と実際の観測値に乖離が生じた場合、適宜モデルの改良が実施される。

なお、取り扱うモデルのタイプとして、ランプトパラメータモデルと分布パラメータモデルの2つが知られている（Grant et al., 1982）。以下にその概要を示す。

ランプトパラメータモデル

ランプトパラメータモデルは、貯留層を、温度、圧力、孔隙率等の各特性値を平均的な値で代表させる1つの均質なタンクと見なし、貯留層全体の挙動を簡便に予測する手法である。ワイラケイ地域(Whiting and Ramey, 1969)では、1957~1961年までのヒストリーデータ（貯留層圧力）によりマッチングを行い、タンク全体の貯留係数等を求めた。求められたパラメータに基づき1965年までの貯留層圧力を予測し、実測値とよく一致した結果が得られた(図1.8)。その後、ザ・ガイザース地域(Brigham and Morrow, 1977)、セロ・プリエト地域(Westwood and Castanier, 1981)、イースト・メサ地域(Castanier and Brigham, 1983)等多くの地域で適用されてきた。最近では、同モデルに対し、CO₂による熱力学特性の変化を考慮したモデル(Alkan and Satman, 1990)、半自動解析用プログラムの開発(茂野ほか, 1992)、地化学成分を拘束条件として加えモデルを精緻化することによる多くの貯留層特性値を推定する試み(窪田・松葉谷, 1998)、カルマンフィルター法を適用し、時間経過に伴う還

元流体の生産流体への混入率の解析 (Itoi et al., 1998) 等の報告があり, 蒸気生産開始後の貯留層管理を行う上で有意義な解析事例が紹介されている。

分布パラメータモデル

ランプトパラメータモデルでは, 貯留層或いは生産ゾーンの大局的な挙動しか予測が出来ないという限界がある。これに対し, 分布パラメータモデルでは, 生産ゾーン周辺の冷水の浸入や, 還元流体への生産ゾーンへの影響等の検討が可能である。

モデルの精緻化に当たっては, ヒストリーマッチングを通して, 運転開始後の貯留層の挙動を再現することが不可欠となるが, 蒸気生産に伴って, 貯留層内では沸騰過程, 並びにコールドスウィープ過程 (より高温の岩盤からより低温の水への熱の掃き出し) が発生する。このような現象を再現するには, 単一ブロック内が物性的に均一な単一孔隙型である従来のモデル (以下ポラス型モデルと称す) では困難であり, より透水性が高く容積率が小さいフラクチャーゾーンと, 透水性が低く容積率が大きいマトリックス部に分かれた二重孔隙型のモデルの使用が必要となる (石戸, 1999)。地熱貯留層での解析においては, 二重孔隙型モデルとして MINC (Multiple Interacting Continua) 法 (Pruess and Narasimham, 1985) がしばしば適用されている (以下 MINC モデルと称す)。

貯留層内沸騰過程が活発となる蒸気卓越型貯留層として代表的なザ・ガイザース地域 (米国) において, Williamson(1990) 及び Menzies and Pham(1995)は, フラクチャー部並びにマトリックス部のそれぞれの浸透率や液相飽和度を調整することにより, 観測された経年的な貯留層圧力の低下を再現する良好なモデルの構築に成功した。一方, コールドスウィープ過程の事例として, 還元熱水の還流の影響で貯留層温度の低下が発生しているパリンピノン地域 (フィリピン) について, Amistoso et al.(1993) は, 噴出流体の Cl 濃度や貯留層温度を拘束条件としてヒストリーマッチングを行い, 短期間に還元熱水が生産井から再噴出し, Cl 濃度の増加と貯留層温度の低下が発生する挙動に対しては, MINC モデルの適用が不可欠となることを報告した (図 1.9)。

また, 最近では貯留層変動をフィールド全体に渡って平面的に捕らえる手法として, 地球物理的なモニタリング手法が注目されている (例えば, Yamazawa et al., 2001)。同手法は, 前述の蒸気生産に伴って生じる貯留層内沸騰に伴う二相領域の拡大や, 還元流体の挙動に対して, 坑井データが取得できない領域での貯留層変動の挙動につい

て情報が得られるため有意義である。このうち重力変動に関しては、その観測結果について、ワイラケイ地域 (Allis and Hunt, 1986), 八丁原地域 (斎藤ほか, 1998), 滝上地域 (西島ほか, 2000), 澄川地域 (Sugihara and Ishido, 1998), 奥会津地域 (志賀ほか, 2001), ザ・ガイザース地域 (Gettings et al, 2001) 等の報告がある。

(4) 従来の問題点

坑井内スケールに関しては、従来化学平衡論に基づいた解析や予測が主として行われてきた。しかしながら、坑井内では速い流速の中で沈殿現象が生じており、その環境は必ずしも化学平衡状態とは言い難い。こうした状況下におけるスケール成長に対し、精度の高い予測を行うには反応速度論の適用が不可欠であるが、そのような報告は未だ乏しいのが現状である。さらに、スケール成長に伴い、噴出流量は低下していくが、これに対する予測技術の開発も現在のところ十分なされていない。

地化学モニタリングは、貯留層の挙動 (周辺水の流入や、還元流体の還流等) を把握する手法として、安価、かつ簡便であり、ほとんどの発電所で適用されている。しかしながら、従来は定性的な議論に留まり、モデリングで利用される事例は少ない。一方、ランプトパラメータモデルは、1970年代までは主たる貯留層評価手法として適用されてきたが、コンピュータの処理能力の向上に伴い、昨今では分布パラメータモデルが主体となっている。従って、地化学データを適用したランプトパラメータモデルの開発は、分布パラメータモデルを適用する前の概念モデル構築の一助となるが、そのような適用例は現在のところ少ない。

貯留層管理を行うにあたり、貯留層モデリングは重要な役割を果たす。蒸気生産開始後の挙動 (貯留層内沸騰、還元流体の還流等) を再現するには、MINCモデルの適用が不可欠となるが、実フィールドでの適用事例は少なく、また、フラクチャーパラメータの特性について充分言及されていない。また、モデルの精緻化には、ヒストリーマッチングとして多くの拘束条件 (従来の噴出流量や貯留層圧力とともに、地球化学並びに地球物理的な観測値を含めて) を適用する必要があるが、これについても実フィールドでの解析事例に乏しく、十分な評価がなされていないのが現状である。

1.4 本研究の目的とここで取り扱うテーマ

(1) 本研究の目的

生産現場にあっては、スケール成長がどの程度の速さで起こり、これにより生じる蒸気減衰率を正確に見積ることは、掃坑工事（スケール除去）のタイミングや頻度を計画する上で重要である。従って、スケール成長とこれに伴う噴出流量の予測技術の開発は、優先順位の高い技術課題と位置付けられる。

地化学データを適用したランプトパラメータモデルの開発は、トレーサテストと同様に還元流体の再湧出率を解析することが可能となり、安価で簡便なツールとなる。これより得られた知見は概念モデルの改善に有用である。また、運転開始前に構築した貯留層モデルを改良し、MINCモデルと多くの拘束条件（噴出流体の比エンタルピー、Cl濃度、貯留層圧力、微小重力変動）を適用した貯留層モデリング（分布パラメータモデル）は、精度の高い貯留層の挙動予測には不可欠であり、有意義な技術課題と位置付けられる。

本研究は、以上に挙げた貯留層と坑井内のモデリングを通して貯留層の物理化学的挙動や坑井内の噴出挙動の把握並びにその予測に関する技術の開発を行い、適正な貯留層管理に資することを目的とする。

(2) 取り扱うテーマの概要

本研究は、秋田県澄川地熱発電所を対象フィールドとして、そこで生じた蒸気減衰に関わる諸問題をテーマとして選定し、蒸気減衰や貯留層変動のメカニズムを解明し、適正な貯留層管理について検討を行ったものである。

第1章では、緒論として、地熱開発の取り巻く環境、並びに地熱資源の特性について解説し、発電出力を維持する上で貯留層管理の重要性を指摘した。併せて、従来の研究を概観し、本研究の目的とテーマ概要について取り纏めた。

第2章では、対象フィールドとなる澄川地熱発電所の運転状況と、貯留層特性について詳述した。併せて、蒸気減衰の諸問題について言及した。

第3章では、坑井内スケールにより蒸気減衰が生じた生産井 SC-1 坑について、そのスケール生成メカニズムを、取得されたデータ、並びに化学平衡論に基づく解析により解明し、スケール成長とこれに伴う蒸気減衰予測のためのモデルを構築し、同モデルを用いてそれらの予測・評価を実施した。

第4章では、代表的な生産井の地化学モニタリングデータから、それらの還元流体還流のメカニズムを解明した。これに基づき、生産 - 還元を表現するランプトパラメ

ータモデルを構築し、同モデルを用いて還元流体の還流率、並びに各生産井が貯留層内に支配する生産領域の広がりを定量的に解析した。

第 5 章では、運転開始前に構築された貯留層モデル（分布パラメータモデル）を改良し、貯留層モデルの再構築を図った。特にモデル精緻化のために行ったヒストリーマッチングでは、MINC モデルを適用し、複数の観測データを拘束条件として適用した。これらの過程により作成されたモデルを用いて生産予測シミュレーションを実施し、将来の貯留層挙動と発電出力の変動を推定し、今後の貯留層管理の課題について言及した。

第 6 章では、結論として、前章までに得られた知見について取り纏め、併せて今後の課題について補足した。