

地熱資源の開発に係る地下の流体モデル・指標の構築と再現性の検証結果

1. はじめに

本資料は、「地熱資源の開発に係る地下の流体モデル・指標の構築と再現性の検証」の概要をまとめたものである。

この検証では、国内の既存発電所 3 ヶ所を選定し、各地域において行われた地熱開発の各ステージの調査結果と構築された地熱系概念モデルの状況及び地熱開発が温泉に与える影響を調べるための温泉モニタリングの概要についてまとめた。

調査対象地域の内の 1 地域については、数値シミュレーションモデルを構築し、地熱発電に伴う地熱流体の生産・還元が温泉に影響を与える場合は、どのような現象としてとらえ得るかを検討した。

2. 流体モデルとモデル構築のステージについて

一般的に流体モデルの種類については様々あるが、ここでは地熱系概念モデル（地熱構造モデルと地熱流体流動モデルとに分けられる）と数値シミュレーションモデルを指すものとした。各モデルの概要を以下に示す。

1) 地熱構造モデル

温泉と地熱貯留層の関係について地質構造の観点から、地層や断層等の分布、地熱貯留層と温泉帯水層の分布、熱源等の概要を説明したモデル。地熱調査ステージの概査段階以降において作成される。

2) 地熱流体流動モデル

地熱構造モデルを発展させ、温泉水や地熱流体の温度や圧力、地化学情報を基に、温泉及び地熱流体の生成機構、地熱貯留層温度、熱水系の分類、混合状態、流動状態を説明したモデル。地熱調査ステージの精査段階以降において作成される。

3) 数値シミュレーションモデル（地熱資源量評価）

地熱流体採取による貯留層の圧力変化や温泉への影響予測といったことを定量的に検討するために、地熱構造モデルや地熱流体流動モデルを反映し、コンピューター（数値シミュレータ）等を使用して構築されるモデル。地下の特性を定量化するために、坑井から得られるデータ（地層の間隙率や透水性、温度分布等）が最低限必要である。また、モデルの精度を検証するには、数値シミュレーションにより予測された結果（地熱貯留層や温泉帯水層の圧力や温度）について、より多くのモニタリングによる実測データを取得し、計算値と実測値との照合を行う必要がある。現在、このモデルは地熱資源量の評価に用いられているが、将来的には既存温泉への影響予測にも適用されることが期待される。

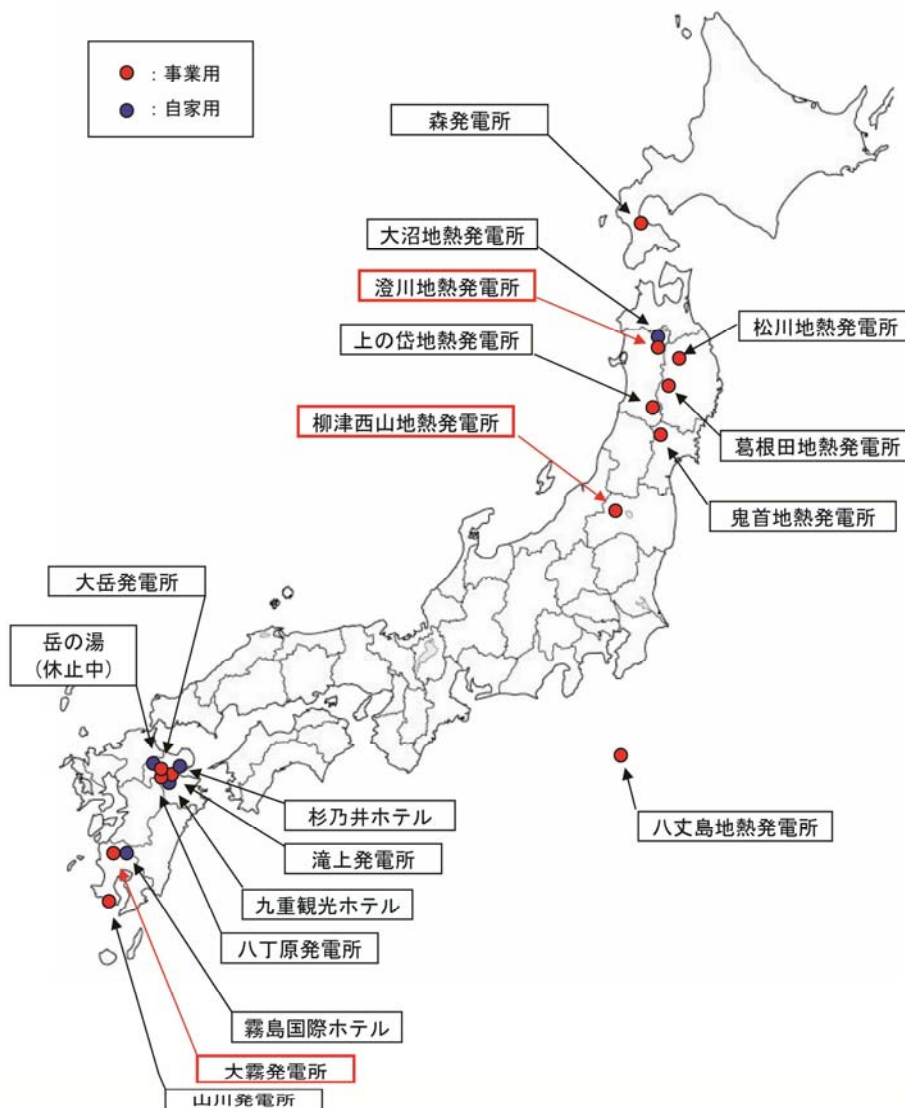
温泉と地熱貯留層との関係を検討する際の指標としては、地熱構造モデルや地熱流体流動

モデルを参照するのが適切である。

ガイドライン本編の表 3 に示されているが、一般に地熱調査のステージは「 ．広域調査段階」、「 ．概査段階」、「 ．精査段階」、「 ．発電所建設段階」、「 ．発電所運転開始段階」に分類される。このうち、地熱構造モデルは「 ．概査段階」以降、地熱流体流動モデルは「 ．精査段階」以降に構築され、数値シミュレーションモデルは「 ．発電所建設段階」以降で実施される。なお、ここでのステージと構築される流体モデルの関係は一般的なものとして整理したもので、実際には個々の場合で異なる。

3．国内 3 地域の地熱発電所における流体モデル概要と温泉モニタリング

国内の既設地熱発電所の内、柳津西山地域（福島県）、澄川地域（秋田県）、大霧地域（鹿児島県）の 3 地域を選定し、各地域の蒸気供給会社より概念モデルの概要と温泉モニタリングに関する情報を提供していただいた。



付図-1 既存地熱発電所の位置図

環境省（2011）平成 22 年度地熱発電に係る環境影響審査報告書より引用編図

3.1 各地域の開発経緯

3.1.1 柳津西山地域

1) 所在地

福島県河沼郡柳津町大字黒沢

2) 事業者

東北電力株式会社（発電部門）

奥会津地熱株式会社（蒸気生産部門）

3) 出力

設備容量：65,000kW

認可出力：65,000kW

4) 位置案内

発電所は、福島県会津若松市の西南約 20km、河沼郡柳津町西山地区の只見川沿いの標高 380m に位置し、国土利用計画法に基づく森林地域及び農業地域となっている。また、発電所蒸気生産設備の一部は、自然公園法に基づく只見柳津県立自然公園の普通地域に指定されている。最寄りの温泉地としては、柳津温泉と西山温泉がある。

5) 開発経緯（付表-1）

概査期：1974年

三井金属鉱業（株）は奥会津地域の地熱資源量探査を目的とする予察調査を開始し、地質構造と地熱構造井の調査を行った。

概査期：1976-1977年

通産省工業技術院地質調査所と日本地熱開発促進センター（現（財）新エネルギー財団）による「地熱開発基礎調査：西山地域」が実施され、変質帯調査、放熱量調査、電気探査、温泉調査及び構造試錐掘削が行われた。この後、1978-1980年に調査中断期がある。

概査期：1981-1983年

柳津町及び町議会から地熱調査再開の要請を受け、三井金属鉱業（株）は1m深地温調査、地化学調査、温泉調査を実施した。これらのデータを基に、新エネルギー総合開発機構（現（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）による「地熱開発促進調査：奥会津地域」が1982年度から2年間実施された。また、1983年11月12日に、三井金属鉱業（株）、三井建設（株）（株）東芝の出資によって奥会津地熱（株）が設立された。

精査期：1984-1989年

奥会津地熱（株）は企業化・開発調査を実施し、22本の坑井掘削を行った。1989年に9坑井の同時噴出試験を行い、蒸気量 509t/h を確認し、同年、東北電力（株）と推進協定を締結した。

建設期：1990-1994年

1990年に東北電力（株）と奥会津地熱（株）は基本協定を締結し、環境アセスメント（1990-1992年）を経て、第122回電調審（1992年）にて建設計画が了承され、

1993年に発電所の建設工事を着工した。この期間に新たに7本の坑井掘削を行った。また、柳津町・東北電力(株)・奥会津地熱(株)の三者で環境保全協定が締結され、運開準備が整った。

運転期：1995年以降

1995年5月25日、出力65,000kwの柳津西山地熱発電所が運開した。1998年7月、東北電力(株)は硫化水素除去装置を設置し、環境対策にも万全を期している。

付表-1 柳津西山地域の開発経緯

	概査(1974-1983) 地質、変質帯調査 温泉、地化学調査 1m深地温調査	精査(1984-1989)	建設(1990-1994)	運転(1995以降)
企業調査	地表調査			
	坑井掘削	調査井/試験井掘削22本 ・生産井転用9本 ・還元井転用2本	生産井掘削6本 還元井掘削1本	補充井掘削
	資源量評価	噴出試験 確認蒸気量509t/h	噴出試験 確認蒸気量376t/h	地熱貯留層シミュレーション
	環境影響調査		環境アセスメント	
国の調査	地熱開発基礎調査	変質帯調査 地上物理探査 温泉調査 構造試錐1本		
	地熱開発促進調査	地化学調査 1m深地温調査 小口径調査井・試験井13本 経済性評価		

3.1.2 澄川地域

1) 所在地

秋田県鹿角市八幡平字熊沢

2) 事業者

東北電力株式会社(発電部門)

八幡平地熱株式会社(蒸気生産部門)

3) 出力

設備容量 50,000kW

認可出力 50,000kW

4) 位置案内

発電所は秋田県鹿角市南端の八幡平地区の標高 1,062m に位置し、周辺には南東約 6km に秋田・岩手両県にまたがる標高 1,613m の八幡平がある。十和田八幡平国立公園に指定されていないが、国土利用計画法に基づく森林地域となっている。最寄りの温泉地としては、八幡平温泉郷がある。

5) 開発経緯(付表-2)

概査期 : 1965 ~ 1973 年

三菱金属(株)(現三菱マテリアル(株))は、広域調査を実施して、有望地区として大沼地区と併せて澄川地区を抽出した。

概査期 : 1974 ~ 1980 年

三菱マテリアル(株)は澄川地区に対し、追加地表調査と調査井の掘削を実施した。また、国の調査(地熱開発精密調査、全国地熱基盤調査、広域熱構造調査、発電用地熱開発環境調査)も導入された。試験井 N52-SM-2 で蒸気噴出を確認し、本格的調査の開始へと移行した。

精査期 : 1981 ~ 1985 年

三菱マテリアル(株)と三菱ガス化学(株)の共同開発が開始した。試験井を 4 本掘削し、そのうち S-4 坑井で優勢な蒸気を確認した。また、東北電力(株)との共同調査委員会が設置され、50MW(50,000kW)発電所建設の可能性について調査した。

精査期 : 1986 ~ 1990 年

三菱マテリアル(株)と三菱ガス化学(株)は 50MW 発電所建設を前提とした調査井(試験井)掘削計画を策定した。また、地熱探査技術等検証調査(仙岩地域)と地熱開発促進調査(地熱貯留層評価手法開発)が導入され、1990年に3ヶ月の一斉噴出試験を実施し、50MW相当の蒸気量が確認され、東北電力(株)と三菱マテリアル(株)とで開発基本協定が締結された。

建設・運転期 : 1991 年以降

環境アセスメント(1990~1991年)を経て建設計画が了承され(1992年3月)、建設を開始し、1995年3月営業運転に入った。

付表-2 澄川地域の開発経緯

	概査期 (1965-1973)	概査期 (1974-1980)	精査期 (1981-1985)	精査期 (1986-1990)	建設・運転期 (1991以降)
地表調査	65.66 地層調査 67.68 重力探査	73.74 比抵抗探査 75.76 弾性波探査	81.82 S-1 83.84 S-2 85.85 S-3 S-4	86.87 SA-1 88.89 SA-2 90.90 SB-1 SA-4 SB-2 SB-3 SD-2	91.92 SC-2 93.94 SB-4 95.96 SF-2 97.98 SE-1 99.00 SD-3 SD-4 SA-3
企業による調査		O-5T Y-2T Y-3T			
資源量評価			資源量評価		
環境影響評価					環境影響評価 建設工事開始 営業運転開始
国による調査		50-HM-3 52E-SM-1 52E-SM-2		N60-KY-1 N61-KY-2 N59-SN-5 N61-SN-7D N62-SN-8R	
地熱開発精密調査					
発電用地熱開発環境調査					
地熱開発促進調査					
地熱探査技術等検証調査					
				電気探査(シュラブジャー法) 電気探査(チューベル法) 電磁探査(MT法)	

凡例:

小口径井(構造試験、調査井、試験井、観測井)

大口徑井(調査井、試験井、生産井、観測井、還元井、還元井、掘削深度2,000m未満)

大口徑井(調査井、試験井、生産井、観測井、還元井、還元井、掘削深度2,000m以上)

日本地熱調査会(2000)わが国の地熱発電所設備要覧を引用加筆

3.1.3 大霧地域

1) 所在地

鹿児島県始良郡牧園町大字万膳及び栗野町大字木場

2) 事業者

九州電力株式会社(発電部門)

日鉄鹿児島地熱株式会社(蒸気部門)

3) 出力

設備容量: 30,000kW

認可出力: 30,000kW

4) 位置案内

発電所は、霧島連山の西部に位置し、万膳川と鑄河川に挟まれた標高 700~900m の丘陵地であり、その周辺には北約 2km に標高 1,094m の栗野岳、東約 6km に標高 1,700m の韓国岳、東南東約 5km に大浪池、南西約 2km に佐賀利山がある。霧島屋久国立公園の普通地域内に位置する。

5) 開発経緯(付表-3)

霧島地域の地熱調査・開発は、1973年に日鉄鉱業(株)により地下資源の探査開発の一環として開始され、地表地質調査、物理探査が実施された。また、国の地熱開発基礎調査(1974年)、地熱開発精密調査(1975年)が行われ、これらの結果から有望地域と認識された。

1979年から新日本製鐵(株)と日鉄鉱業(株)の共同調査体制で本格的調査に入った。1979年以降の調査・開発は以下のステップに分けられる。

1979~1981年

銀湯、白水越地域に小口径試験井3本を掘削し、蒸気熱水の噴出を確認した。特に、KEI-2号井は浅部で銀湯断層を貫通し、極めて優勢な地熱流体を噴出したことが大霧の銀湯貯留層開発のスタートとなった。企業調査井掘削に伴い、国は環境調査井2本を掘削し、「発電用地熱開発環境調査」を実施した。

1982~1984年

銀湯、白水越地区に小口径4本、大口径7本の調査井・試験井を掘削し、坑井利用電気探査も実施した。これに先立つ1980~1982年には、NEDOによる「栗野・手洗地域地熱開発促進調査」の調査井・試験井8本が掘削された。

白水地区の3坑井では、300に近い坑底温度を記録し、同地区の有望性を確認した。銀湯地区の2坑井からも優勢な流体噴出が認められ、銀湯断層の南東への広がり及び銀湯断層深部の活発な地熱流体の存在が確実視された。

1985~1987年

銀湯地区の開発可能量実証のため、大口径試験井5本を掘削した。銀湯断層の深部を狙った3本全てから優勢な流体噴出が見られ、調査解析の結果、銀湯断層は走向延長1,200mの透水性の高い地熱貯留層であることが確認された。

続いて、3ヶ月間、生産井4本、還元井2本を使用し、一斉噴出還元試験を実施し、

出力 14,000kW 相当の安定した蒸気量 125t/h (口元 5 気圧換算) を確認した。

その後、九州電力(株)の「大霧地区地熱プロジェクト評価委員会」の総合解析評価の結果、30,000kW 規模の地熱資源が長期安定して確保できると評価され、九州電力(株)及び地元自治体との開発基本協定締結へと進展した。

なお、1984年、1985年には NEDO により「地熱貯留層評価手法開発」の観測井 2 本が掘削された。

1990～1991年

1990年日鉄鹿児島地熱(株)が設立され、大霧開発地区に生産井 7 本、還元井 7 本を掘削した。その後、転用井を含めた生産井 10 本の全量噴出実証試験を行い、蒸気量 360t/h (口元 5 気圧換算) と、出力 30,000kW に十分な蒸気が安定して得られることが確認された。

1992～1996年

1992年から九州電力(株)とともに環境影響調査を実施し、第 125 回電源開発調整審議会を通過した。1994年から九州電力(株)が発電設備を、日鉄鹿児島地熱(株)が蒸気生産設備をそれぞれ建設し、試運転、使用前検査を経て、1996年 3 月に営業運転を開始した。

付表-3 大霧地域の開発経緯

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
1) 企業調査																							
地表調査		電気・磁気・変質帯・30m深地温 電気	電気	電気・磁気・変質帯・30m深地温 電気	地化学・法熱量・電気	地化学	電気	AFMT 地化学	坑井電探							流体地化学							
坑井掘削																							
K1地区									地熱資源確認調査 調査井/試験井: 3本 1000-1200m	地熱資源開発実証調査 調査井/試験井: 11本 480-2000m	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 7本 900-1750m	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本	地熱資源開発調査 調査井/試験井: 1本
K2地区																							
環境現況調査										気象・河川・温泉・地下水位・待機室・水質・土壌汚染・騒音・振動・地盤変動・植生・動物・騒音・湖沼・シミュレーション・地盤強度等													
2) 国の調査																							
全国地熱基礎調査		霧島	変質帯・重力・放熱量																				
地熱開発精密調査									霧島地域 構造試験3本(500m) 電気														
地熱開発環境調査																							
地熱開発促進調査										栗野・手洗地域 地表調査・物理探査 調査井/試験井: 900-1800m 8本	霧島地域地熱貯留層評価手法開発調査 調査井/試験井: 1500m 2本												

日鉄鹿兒島地熱株式会社内部資料より引用

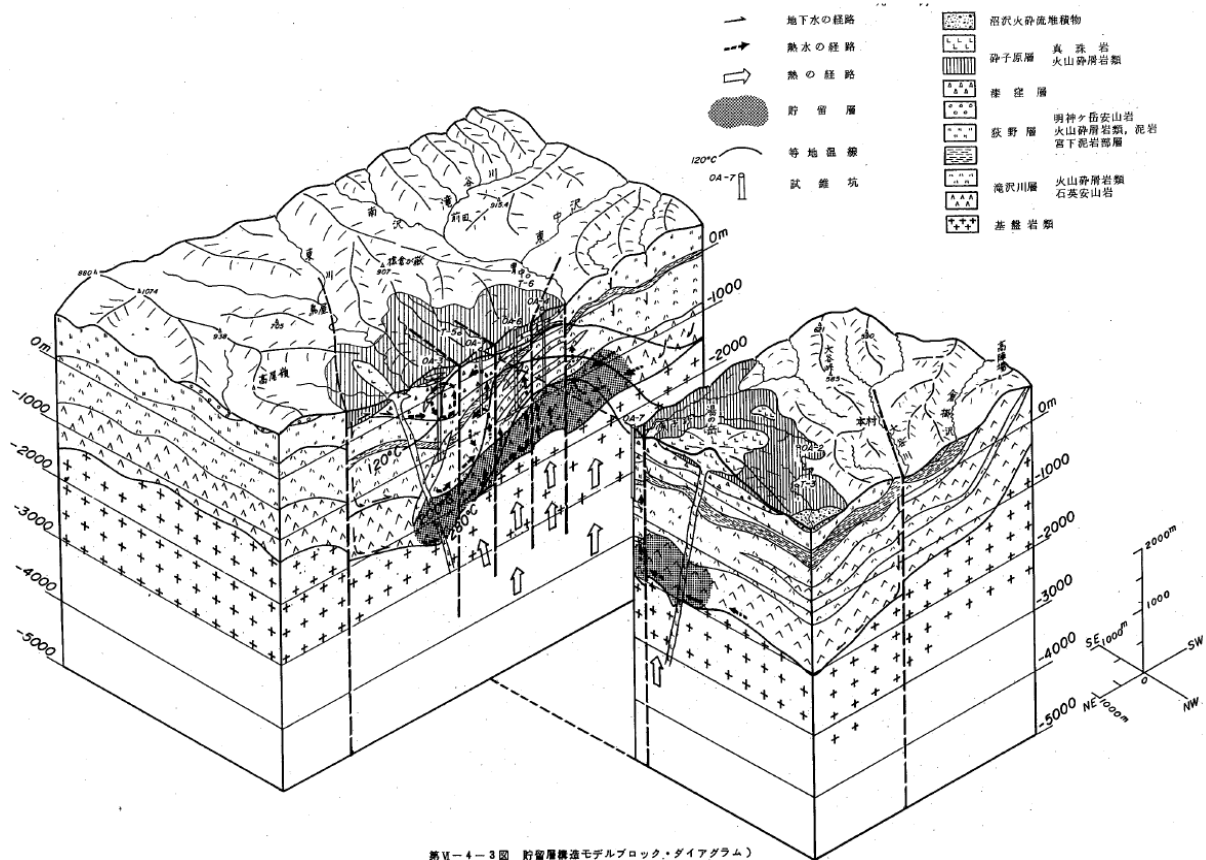
3.2 流体モデル

柳津西山地域、澄川地域、大霧地域においては、それぞれの地熱調査ステージの進展に伴い、地熱構造モデル、地熱流体流動モデル、数値シミュレーションモデルがそれぞれ構築されている。ここでは、代表例として柳津西山地域の各モデルを付図-2~4に示した。

付図-2に示した地熱構造モデルは、国が行った地熱開発促進調査で構築されているが、同調査ステージは概査段階に相当するものである。同モデルは、地表調査（地質・物理探査・地下学探査他）、坑井調査（構造試錐井、観測井、試験井）などの結果を総合的にまとめたもので、広域的な地下温度分布や主要な断裂系によって地熱構造が規制されている様子を示している。

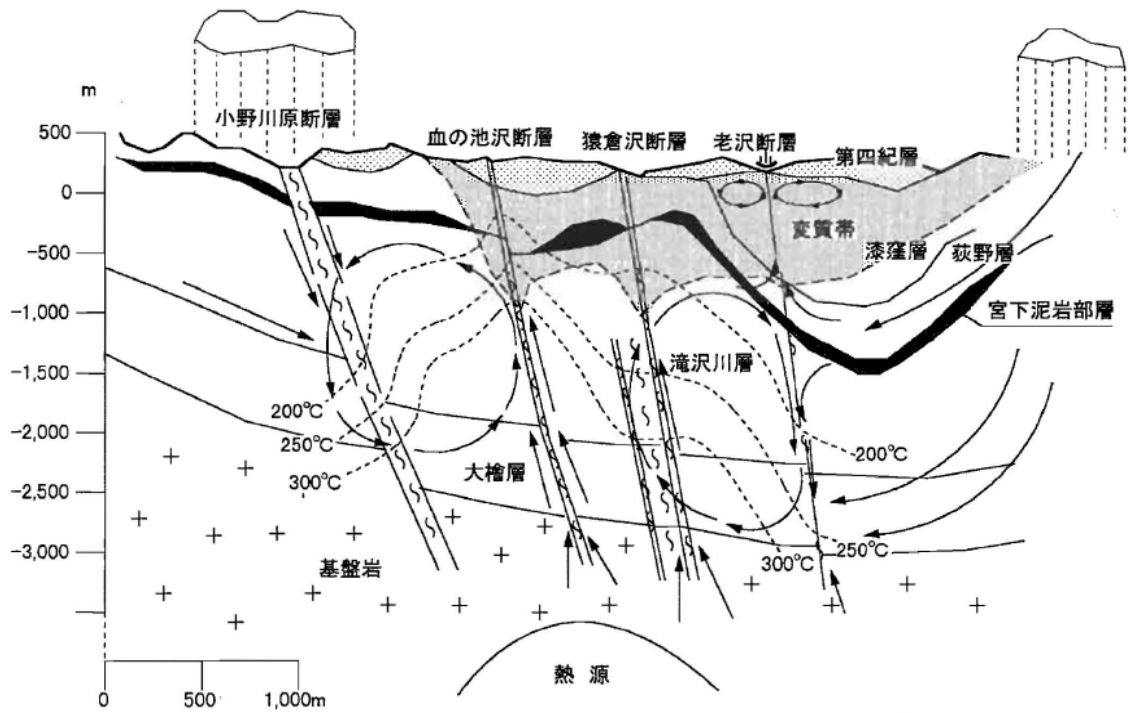
付図-3に示した地熱流体流動モデルは、精査の段階で構築されている。同モデルは精密な地表調査（地質、物理探査、地化学調査）や坑井調査（試験井）など、更に対象を絞った詳細調査の結果をまとめたものがある。モデルには地熱構造と共に地熱流体の流動の様子が表現されており、また、温泉帯水層との関係が示されている。

付図-4に示した数値シミュレーションモデルは、精査～地熱発電所建設の段階で構築されている。同モデルは地熱流体流動モデルを基に、地熱流体の地下での動きを定量的に再現している。なお、同モデルは地熱貯留層をモデル化しており、温泉帯水層はこれに含まれていない。



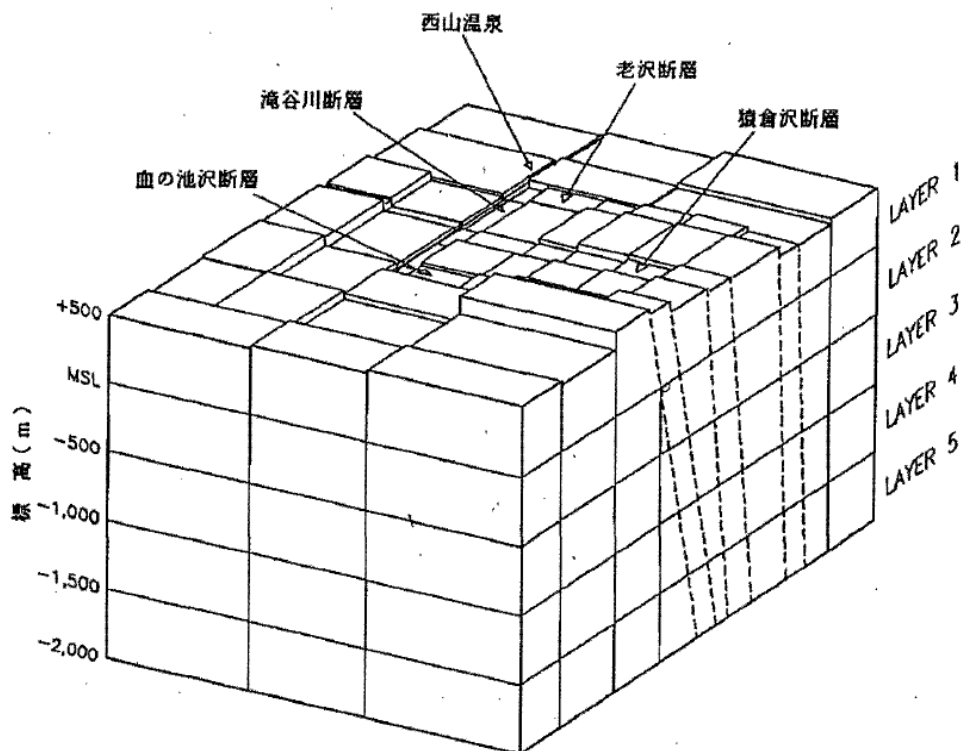
付図-2 地熱構造モデル（柳津西山地域）

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（1983）地熱開発促進調査報告書より引用



付図-3 地熱流体流動モデル（柳津西山地域）

日本地熱調査会（2000）新版わが国の地熱発電所設備要覧より引用



付図-4 数値シミュレーションモデル

佐伯（1993）地熱エネルギーの評価（3）-柳津西山地点-より引用

地熱貯留層のみが対象とされており、温泉帯水層はモデルに含まれていない。

3.3 温泉モニタリング

一般に、温泉・地下水系の状態変化をもたらす要因として以下のことがあげられる

【自然要因】

- a . 降雨, 降雪, 積雪
- b . 河川, 湖沼水位
- c . 潮汐
- d . 地震
- e . 火山活動
- f . 気圧変化
- g . 泉源のスケール付着
- h . その他

【人為的要因】

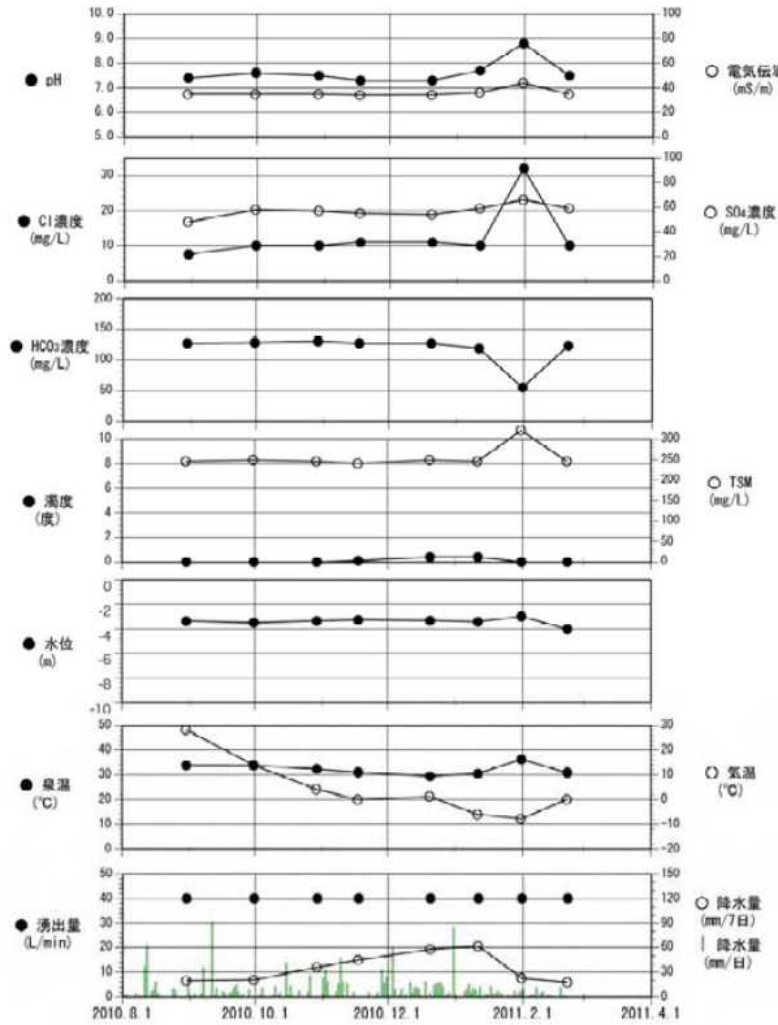
- a . ダム・貯水池工事
- b . 河川・護岸工事
- c . トンネル・隋道工事
- d . 道路・広域駐車場工事
- e . 温泉・井戸同士の干渉, 乱開発
- f . 泉源のスケール浚渫, 改修工事
- g . 森林伐採
- h . 土地改良工事
- i . その他 (たとえば, 地すべり対策のための水抜き孔掘削)

地熱発電と温泉利用との共生を検討する委員会(2010)報告書 地熱発電と温泉利用との共生を目指してより引用加筆

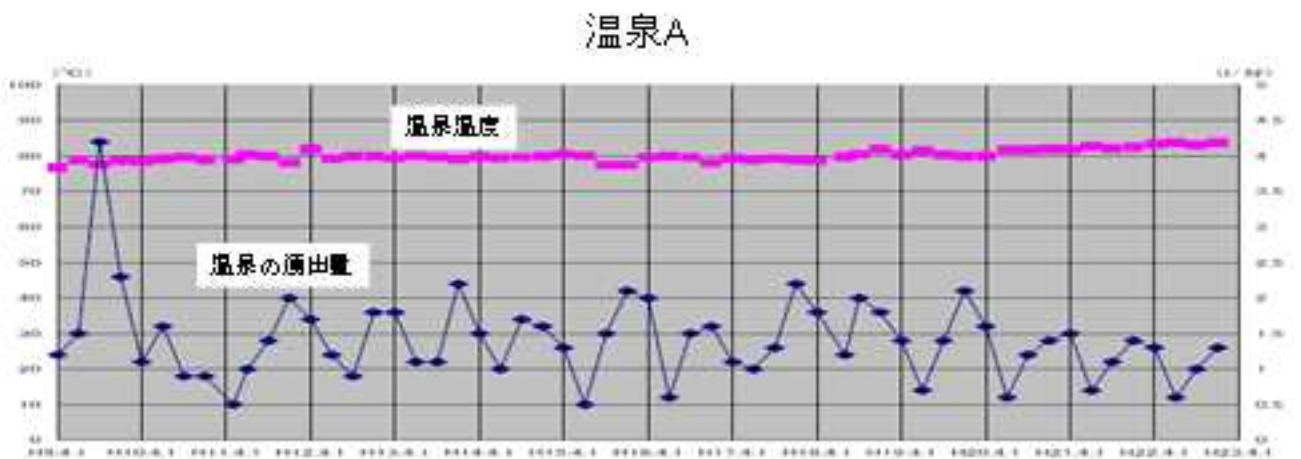
このため、温泉モニタリングを適切に行い、これら要因による変動に対して地熱開発に伴う有意な変化を観測する必要がある。

柳津西山地域、澄川地域、大霧地域では、発電所運転開始以前の段階より温泉モニタリングが実施されている。各地域とも、付近の温泉の湧出量や成分が定期的に計測され、自治体等に報告されている。付図-5 及び 6 に澄川地域と大霧地域のモニタリング例を示す。

各地域とも地熱開発に伴う温泉湧出量減衰は認められていない。これは、発電所の運転開始前の地熱構造モデルや地熱流体流動モデルを含む各種調査・検討結果と整合している。

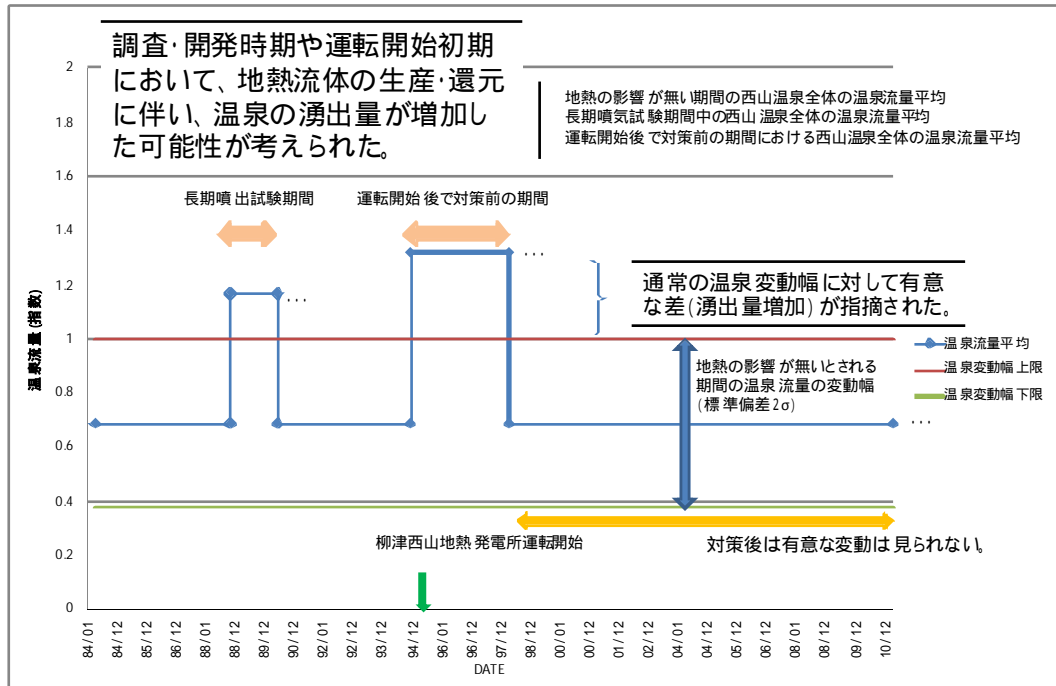


付図-5 温泉モニタリングの例（澄川地域付近の温泉）
 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（2011）地熱開発促進調査報告書より引用

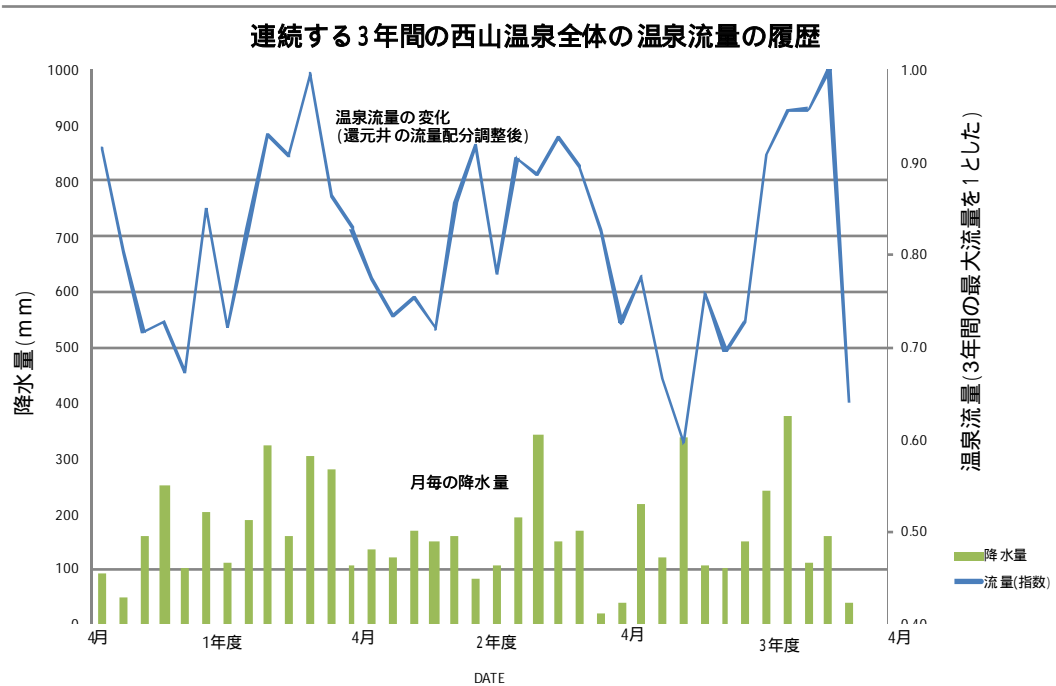


付図-6 温泉モニタリングの例（大霧地熱地域付近の温泉）
 日鉄鹿兒島地熱株式会社内部資料より引用

一方、柳津西山地域では、温泉モニタリング結果により開発段階から発電所運転開始初期において温泉湧出量が増加する現象が指摘された（付図-7）。この温泉湧出量の増加が指摘された期間は、通常の温泉変動幅よりも有意な差が観測されている。これについては、温泉モニタリングデータの検討や解析等から地熱流体の還元による影響と推定され、各還元井への還元流量配分の調整等を行った結果、上記現象が解消されている。



付図-7 柳津西山地域の温泉モニタリング結果の解釈について



付図-8 柳津西山地域の温泉モニタリング例

対策後は地熱流体生産・還元に伴うと考えられる有意な差は見られない。

4. 柳津西山地域対象とした数値シミュレーションモデルを用いた検証

4.1 数値シミュレーションモデルについて

柳津西山地域を対象とした数値シミュレーションモデルを構築し、同モデルを用いて地熱発電に伴う地熱流体の生産・還元が温泉帯水層に与え得る応答の特徴について検討した。

一般的に、地熱資源量評価では以下の手順で数値シミュレーションモデルが構築される。

数値ブロックモデルの作成

地熱流体流動モデルを参考に、地熱流体流動を規制する構造（地質分布や断層）をブロックモデルで表現する。この際、個々のブロックに水理パラメータ（透水性、空隙率、熱伝導率、比熱、密度等）を入力する。

自然状態シミュレーション

で作成したモデルに熱源を与えて、対流系を再現する。この際、構造試錐井や試験井、観測井などの各種坑井で観測された温度・圧力分布が計算結果と合うように、個々の数値ブロックの水理パラメータを調整する。

ヒストリーマッチングシミュレーション

の自然状態シミュレーションで構築したモデルを使い、試験井や生産・還元井の地熱流体生産・還元履歴をモデル上に再現し、観測結果（生産流体のエンタルピー変化や、圧力・温度観測井などの観測データ）と計算結果が整合するように、特に坑井が分布している領域の個々の数値ブロックの水理パラメータを調整する。

生産還元挙動予測シミュレーション

のヒストリーマッチングシミュレーションによって最適化されたモデルが、地下の地熱流動を定量的に再現していると仮定し、同モデルに目標とする事業を想定した生産・還元シナリオを再現する。想定した事業期間で想定した発電量が維持できるかを計算によって評価する。

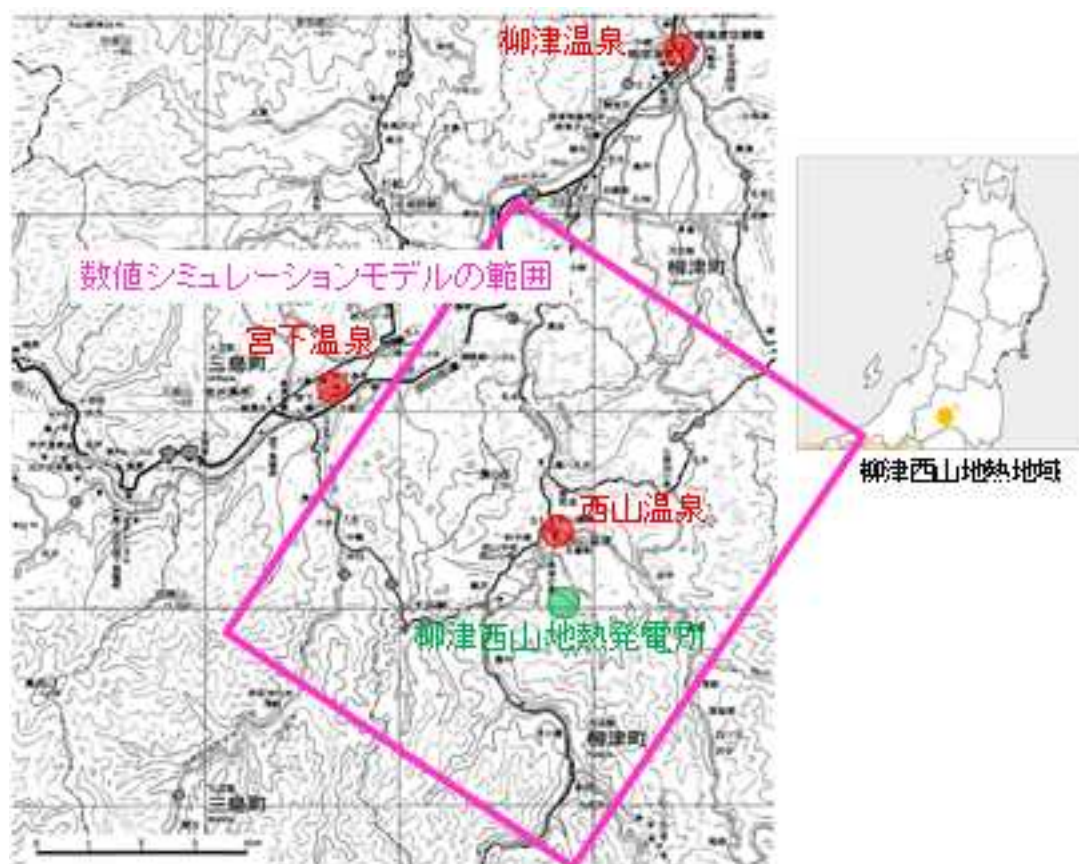
地熱分野で行う数値シミュレーションは、以上のように資源量評価を目的として体系化された手法に基づいて行われる。このため、温泉影響を対象とした数値シミュレーションを行う場合は、温泉変動観測手法やそのデータ解釈方法、数値シミュレーション手法などの構築が必要とされ、将来的にこれら手法が提案されることが期待される。

ここでは上記に示した通常の資源量評価を目的とした数値シミュレーションモデルの構築手法を用いて温泉帯水層を含むモデルを作成し、地熱流体の生産・還元が温泉帯水層に相当するブロックに対し、どのような応答を与えるかを検討した。これにより、地熱貯留層や温泉帯水層内のどのような変化が温泉変動の原因となり得るかを検証し、温泉影響を判断するための指標となり得るパラメータについても考察した。

4.2 数値シミュレーション結果について

付図-9 に柳津西山地域で作成した数値シミュレーションモデルの範囲を示す。柳津西山地域付近では西山温泉と柳津温泉、宮下温泉がある。宮下温泉や柳津温泉は発電所から 5~10km 程度以上離れているが、西山温泉は比較的近傍に位置する。3.3 温泉モニタリングで述べたように、運転開始以降、1998 年前期頃までの期間で、西山温泉の湧出量が増加したと考えられ

たため、還元井の還元流量の配分が調整された結果、この問題は解消された。



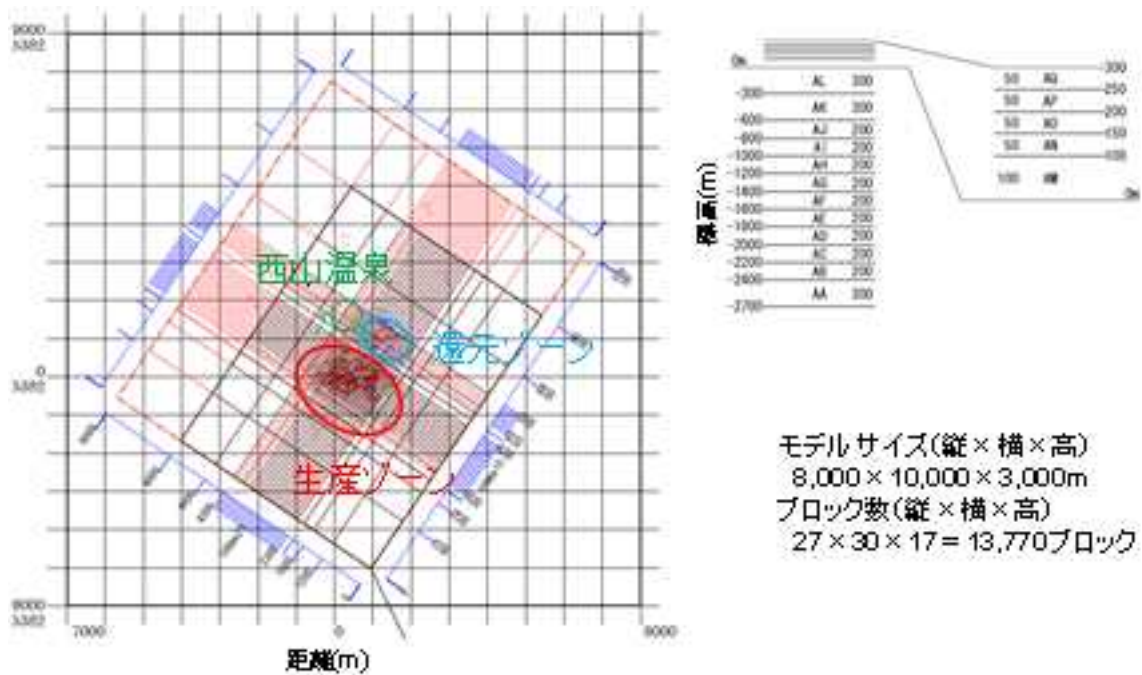
付図-9 柳津西山地域の数値シミュレーションモデル範囲

ここでは、同現象を数値シミュレーションモデルで再現し、この現象が温泉帯水層にどのような変化として出現するかを検討した。

付図-10 に数値シミュレーションモデルを示す。モデルは縦×横×高さが 8km×10km×3km で西山温泉がほぼ中央付近にくるようにブロックを配置し、モデルのブロック数は 13770 ブロックである。同モデルは地熱流体流動モデル(付図-3)を基に作成し、自然状態シミュレーション及びヒストリーマッチングシミュレーションを行うことで最適化した。

温泉変動の計算では、発電所運転開始以降の地熱流体の生産・還元を与え、西山温泉相当ブロックの変化を観察した。以下に手順を示す。

- 最適化されたヒストリーマッチングモデルを用い、西山温泉相当ブロックの圧力の履歴を計算。
- 運転開始以降、1998 年前期頃までの期間に影響があるとされた還元井(A)に対して、還元したケースと還元しないケースでシミュレーションを行い、各ケースの西山温泉相当ブロックの圧力差を計算。
- この差が湧出量増加した時期に大きく変化するようにモデルを修正(地熱貯留層と温泉帯水層の間のブロックの透水性等を修正)



付図-10 数値シミュレーションモデル

一般に、温泉の流量は以下のような関係があるとされる。

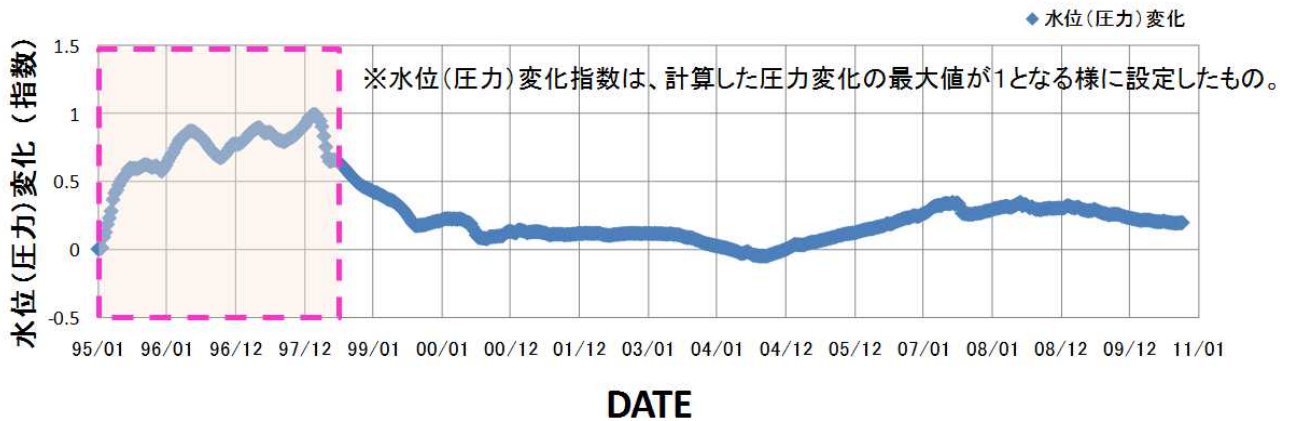
$$\text{温泉の湧出量} = (\text{温泉帯水層の圧力} - \text{湧出時の温泉井戸の圧力}) \times \text{生産効率}$$

ここで、「湧出時の温泉井戸の圧力」と「生産効率」は温泉井戸や地層に依存する一定値と考えることができるので、湧出量は温泉帯水層の圧力に依存する。そこで、西山温泉相当ブロックの圧力変化が温泉モニタリングで得られた知見と整合するようにモデルを最適化した。

付図-11 に結果を示す。図では、西山温泉で有意な差が観測された運転開始直後から 1998 年前半までは、西山温泉相当ブロックの圧力が上昇している様子が示されている。この差は、影響があると考えられた還元井 A 相当ブロックへの還元を行った場合と、行わなかった場合の差である。

温泉モニタリング結果が適切に説明できるようにモデルを修正することができれば、地熱流体生産・還元がどのように温泉帯水層に影響を与えるかを計算できる可能性が示された。このことから、将来的には適切な温泉変動観測手法や解釈手法、数値シミュレーションモデル構築手法の体系化が可能であると考えられる。

また、温泉湧出量の変化は温泉帯水層の圧力変化により起きる様子が示されたが、温泉モニタリングを行う上で同パラメータ（温泉帯水層の圧力）は重要な指標になると考えられる。



付図-11 数値シミュレーション結果例

ピンクの枠で囲った期間について、還元井(A)に還元していた時期に西山温泉相当ブロックの圧力上昇が計算されている。この傾向は温泉モニタリングデータと整合的で、この計算結果では水位変化の指数が0.5を超え良く一致している。

5. まとめ(指標の検討)

1) 指標について

- 地熱構造モデル、地熱流体流動モデルは開発ステージの進展によって構築され、各種調査データを基に地熱貯留層と温泉帯水層の関係を含む流動構造などを説明するモデルである。
- 今回、検討対象とした3地域でも開発の段階でこれらモデルが構築され、資源量評価のために利用されている。
- 地熱貯留層と温泉帯水層の関係を議論する同モデルによって、地熱開発のための各種掘削が温泉帯水層に影響を与える可能性を必要に応じて説明することは、許可を判断するための指標の一つとして適切であると考えられる。

2) 温泉モニタリングについて

- 今回検討の対象とした地熱発電地域(3地域)では、各地域とも開発段階より温泉モニタリングが実施されている。
- 今回の事例では、これまで観測された温泉モニタリングの傾向から、温泉の減衰等の影響は報告されておらず、これは各地域とも運転開始の段階で地熱流体流動モデル等により予測したものと整合的であると考えられる。
- 一部地域では地熱開発によって温泉湧出量が増えた可能性が指摘された例があるが、温泉モニタリングデータを基にした対策によって、現在その問題は解消されている。長期の温泉モニタリングによる対策は、問題が指摘された場合にも有効であることが示されている。
- 今回の数値シミュレーションモデルを用いた検討では、温泉の湧出量変化は地熱流体の生産・還元に伴い、引き起こされる温泉帯水層の圧力変化などとの関係があることが示された。また、これら変化を適切に捉え、季節変化や地表の人為的・自然環境的な構造の変化などと区別する手法が、温泉モニタリングとして重要であると考えられる。

3) 数値シミュレーションモデルについて

- 現在の数値シミュレーションモデルは、地熱資源量評価のために開発された手法を基にしているため、これを温泉影響予測等を使う場合は、同評価のためのデータ解釈方法や適用方法、数値シミュレーションモデル化手法などの構築が必要であると考えられる。
- 一般に、資源量評価のための数値シミュレーションは、相当な数の坑井情報や生産・還元履歴データに基づいて構築されるが、想定した事業に対してどの程度の資源量を期待できるか、事業性を見誤らないように（過大な評価にならないように）評価するものであるため、計算で与える生産・還元に対し減衰しやすい地熱貯留層となるような数値シミュレーションモデルを構築することが一般的である。このため、資源量評価を目的とした手法で構築した数値シミュレーションモデルをそのまま温泉影響予測に使用する事は、適切ではない。
- 今回の数値シミュレーションモデルでは解析対象とする現象を絞り込み、これに観測データを適切に反映させる事で、地熱貯留層の生産・還元が温泉帯水層に与える応答を計算できる可能性が示されたと考えられる。よって、将来的には温泉変動を適切に捉えるモニタリング手法が提案され、同手法で観測された“有意な影響”を、温泉変動予測を目的に提案された手法で構築された数値モデルで再現する事で地熱貯留層と温泉帯水層とのつながりを評価し、これを予測（あるいは対策）に活用できる可能性が考えられる。

6. 参考引用文献

環境省（2010）平成 22 年度 地熱発電に係る環境影響審査手法調査業務，委託先：株式会社ブ
レック研究所．

佐伯和宏（1993）地熱エネルギーの評価（3）-柳津西山地点-，地熱エネルギー，
Vol. 18, No. 2, pp159-175．

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（1983）地熱開発促進調査報告書 No.8 奥会津地域．
新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（2011）平成 22 年度成果報告書 地熱開発促進調
査（開発可能量調査 菰ノ森地域），委託先：三菱マテリアル株式会社 三菱マテリアルテク
ノ株式会社．

地熱発電と温泉利用との共生を検討する委員会（2010）報告書 地熱発電と温泉利用との共生を
目指して，日本地熱学会．

日本地熱調査会（2000）新版わが国の地熱発電所設備要覧．