

技術的課題と解決策について

温泉資源の保護と地熱発電関係に関する技術的課題について、「温泉資源の保護に関するガイドライン（地熱発電関係）」（H24.3、環境省）における整理内容や、関連する研究・技術開発動向、専門技術図書（たとえば「地熱エネルギーハンドブック」（H26.2 オーム社）における整理内容等より、下記の3点について整理・提示する。

1. モニタリングデータによる温泉影響評価
2. 地熱貯留層と温泉帯水層を含む地熱系概念モデルの構築
3. 地熱流体採取による温泉影響を定量的に検討する数値シミュレーション

なお、技術的課題を整理し、それら課題を解決するためには、モニタリング等の実施体制、費用、地熱発電事業者、温泉事業者、自治体等のあいだでの情報の共有方法や合意形成方法が大きく関連する事項となる。これらの社会的課題や経済的課題については、第3回検討会の討議事項として主に扱うこととし、第2回検討会では、技術的課題に関する課題と解決に向けた方向性等について、特にモニタリングデータによる温泉影響評価を重点に議論する。

1. モニタリングデータによる温泉影響評価

要旨

【技術的課題】

科学的根拠の取得方法

【解決策】

正確な調査・データ取得・解析

1-1. 技術的課題

これまで、地熱発電事業者からは、地熱発電が温泉に影響を与えたという報告はない。一方で、温泉事業者からは、温泉に影響があったと報告されている（図-1参照）。

このような食い違いを生む一つの要因として、科学的根拠の欠如が挙げられる。定期的（または連続的）データ取得と正確なデータ解析が必要であることを示している。したがって、両事業者が科学的データを取得・共有し、温泉影響評価を議論する必要がある。

昭和47年～63年 大霧発電所調査開始
 企業調査井戸21本 国の調査井戸 15本 合計36本
 総距離39563mの井戸を掘削

平成2年(1990)～平成3年
 生産井戸7本 還元井戸7本掘削 平成3年12月3万KWの発電量決定

平成6年(1994) 大霧地熱発電所建設

平成8年3月(1996) 19本の井戸で大霧発電所運転開始

このようにたくさんの巨大な生産井戸が掘られて大霧発電所が始まりました。それ以後も3万kwを維持するために次々に井戸が掘られ続けています。現在26本(6本は休止)

そしてえびの高原は温泉も温泉蒸気も枯渇しました。

平成17年(2005) えびの高原露天風呂 廃業

図-1 出典：「霧島温泉を守る会ホームページ」

1-1. 解決策1「定期的なモニタリングの推進」

(1) 定期的なモニタリングによるデータ取得

① 今後推進すべき温泉・地熱井モニタリングの内容

温泉については、「温泉資源の保護に関するガイドライン(改訂)(環境省, H26.4)」(以降、「温泉ガイドライン」と記載)の別紙7に詳しく記述されている。観測項目は、湧出量、温度、水位・孔口圧力、主化学成分等である。測定頻度は、温泉保護ガイドラインでは自動観測器を用いた方法を紹介しており、同機器の使用では1時間毎に記録がされている。また、下記に示すとおり、年1回程度とするものもあり、さらに坑内の情報が重要となる(図-2 参照)。

モニタリングの対象は、全源泉ではなく、温泉貯留層を代表する数箇所の源泉と地熱開発地域と水理的に最も関係している温泉を対象にすべきである。地熱貯留層と温泉帯水層との関係が明らかな場合、モニタリングは最も影響が出やすい項目に絞り込むことができる(図-3 参照)

地熱井の観測項目は、蒸気・熱水流量、還元流量、流体化学成分などがあげられる。これらは、各地熱発電所で年数回の定期調査で取得されている。また、坑口圧力(あるいは坑内水位)等が連続観察され、坑井間の干渉関係をモニタリングし、最適な生産還元の運用・管理に使われている場合がある。さらに、実際の流体の流動状況(還元井から各生産井への流体の流動範囲、流速、影響度)を見

るために、トレーサー試験等も実施される。このようなモニタリング手法は、地熱系概念モデルの構築や最適生産還元の検討の基礎資料となっている。

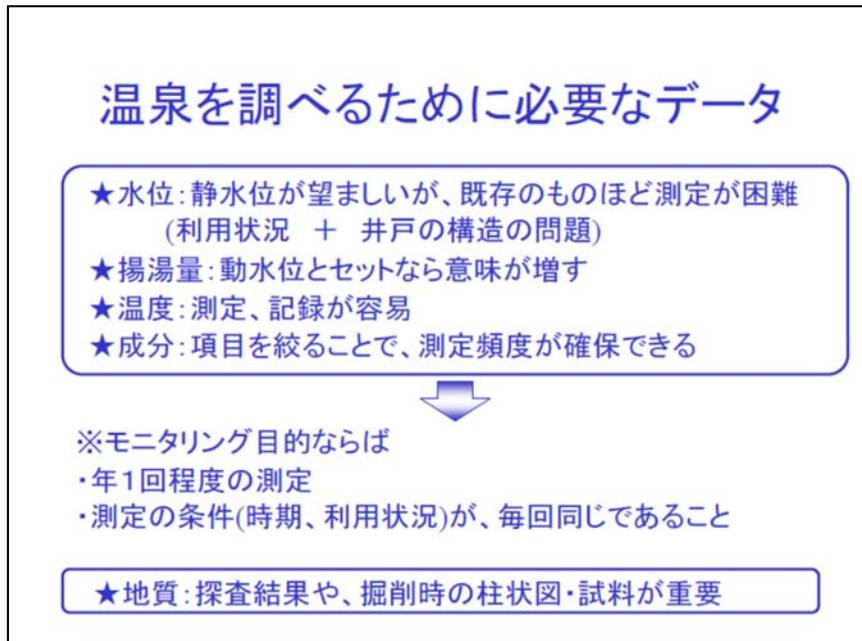
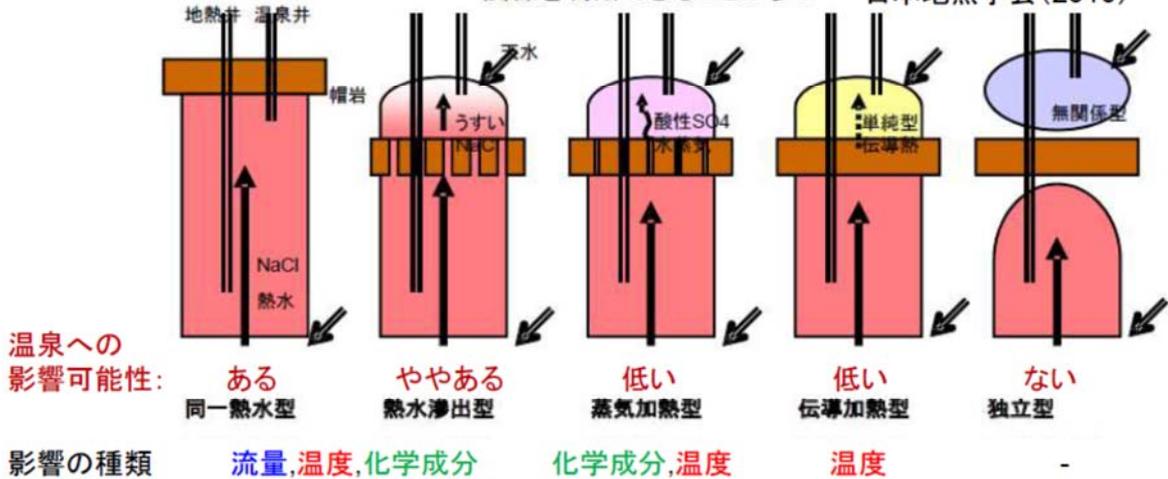


図-2 出典:「板寺(2006)中央環境審議会「温泉小委員会」資料5」

温泉との関係

温泉への影響可能性について
(科学的側面からは?)

地熱貯留層と温泉帯水層との関係:5つのタイプ
両者の温度, 水位, 泉質, 位置(深度, 水平距離)で
関係を判断できることが多い 日本地熱学会(2010)



- ・温泉源と地熱貯留層の間に水の流れを遮断する地層があれば、問題ない(上記のタイプ判断)
- ・たとえ影響可能性のあるタイプでも、天然の熱・水の供給量と利用量の収支バランスが合えば、問題ない
→収支バランスが合うような利用計画と、そのための事前調査が大切!
- ・温泉相互の関係、他の人為的・自然的影響が有り得るので判断には注意を要する。

産総研は環境省委託事業「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」を実施(H22-24)

図-3 出典:「安川(2013)まつざき温泉熱利用プロジェクト第一回勉強会」

② 今後の温泉・地熱井モニタリングの推進に向けた課題と方向性について

・モニタリング技術の向上

→モニタリング技術はほぼ確立されている。現在進められようとしている研究として、「温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔モニタリング装置の研究開発」がある。研究の達成目標は、1)温泉関係者との開発合意形成の円滑化、迅速化、2)発電所運転時の広域水理系変動モニタリング(環境影響評価)、3)低価格の製品化、である。

・モニタリング箇所の選定方法

→地熱貯留層と温泉帯水層の関係を考慮するとともに、現実に長期観測が可能な箇所の選定が必要である。たとえば温泉源であれば、公共の温泉源を選定する方法などが考えられる。関係者での合意が重要である。適切な場所に源泉がない場合は、新たにモニタリング井を掘削することも検討すべきである。

・モニタリングの体制の確立

→たとえば、協議会など(温泉管理者、地熱開発者、地元関係者、自治体などより構成)の設立などが考えられる。→次回社会的課題で討議する。

- ・情報の取り扱い・共有の方法の確立
→次回社会的課題で討議する。

- ・モニタリング費用の確保・分担の方法
→次回社会的課題・経済的課題で討議する。

(2) 温泉変動要因の明確化

① 今後推進すべき温泉変動モニタリングの内容

温泉は、温泉貯留層内での相互干渉が顕著である。模式的に温泉資源の開発を示すと、図-4 のようになる。すなわち、自然湧出期→掘削導入期→動力導入期→バランス・欠乏期と変遷し、自然湧出や掘削自噴は激減していく。これらは、定期的なデータを取っている地域では、明確である（別府、南伊豆など）。

さらに、定期的かつ高頻度にモニタリングが行われている場合、図-5 のような内因・外因による温泉変動も明確になる。したがって、源泉所有者、地熱開発事業者及び自治体等は、それぞれデータを定期的にしかも高頻度取得しておくことが望ましい。

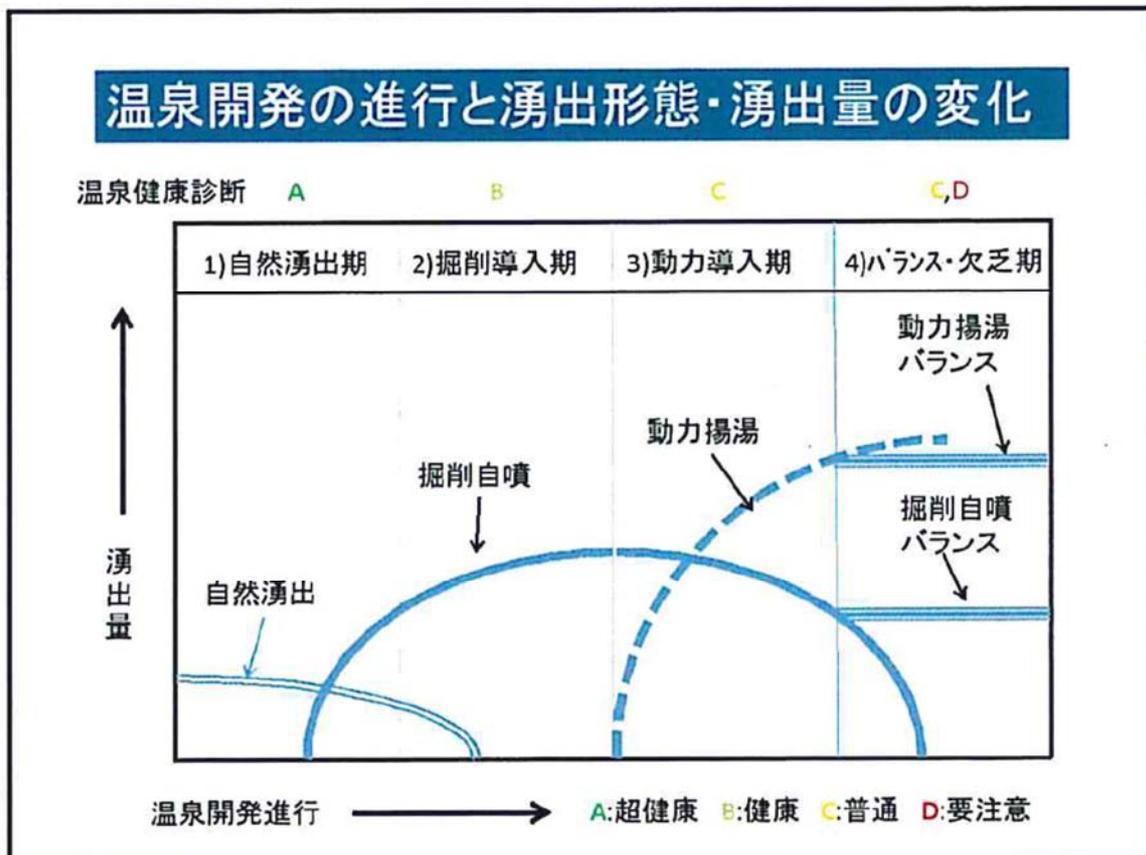


図-4 出典：「野田(2014)日本温泉科学会第67回大会資料」

温泉変動の影響による分類と特徴

影響原因による分類	影響因子	影響の特徴
単独内因的影響	坑井トラブル(目詰まり, スケール, 坑井劣化), 揚湯装置損傷	・周辺の温泉と関連しない独立の変動 ・突発的で変動幅が大きい
全体内因的影響	全体的な採湯傾向(過剰揚湯)	・温泉地単位と同じ成因の温泉が一斉に変動する ・変動は長周期で緩やか
局部外因的影響	土砂崩れ, 土木工事, 河川・湖沼水位, 潮汐	・全体の温泉とは関連しない特定地域にある同じ成因の温泉群の変動 ・温泉群はそろって同じ変動をする ・変動前に原因となるイベントがある
全体外因的影響	降雨, 積雪, 渇水, 地震, 火山活動, 地熱開発	・温泉地単位と同じ成因の温泉が一斉に変動する ・変動は長周期で緩やか ・変動前に原因となるイベントの変化がある

- ・影響は一般に上位因子によるものほど頻発し程度は大きい
- ・影響対策は上位因子から先に検討するのが効果的
- ・人為的影響は適切な対策により復旧可能

図-5 出典：「野田(2013)第2回上川町層雲峡温泉白水沢地区等地熱研究協議会資料」

② 今後の温泉変動モニタリングの推進に向けた課題と方向性について

- ・定期的(連続的な)データ取得と蓄積

温泉変動を解析するためには、正確な科学的データが必要となる。この点で、モニタリング技術の向上というよりむしろ、定期的(連続的)なモニタリング・データの取得と蓄積が重要である。

- ・モニタリング箇所の選定方法、モニタリングの体制の確立、情報の取り扱い・共有の方法の確立、モニタリング費用の確保・分担の方法等については、(1)温泉・地熱井モニタリングと同様の今後の解決のための課題であり、一部は次回社会的課題・経済的課題で討議する。

1-2. 解決策2「掘削時の調査の推進」

① 今後推進すべき調査の内容

井戸の坑跡(方位傾斜測定)、物理検層(泉脈の位置・温度・圧力・流入量など)、地質情報、坑井特性、流体化学組成などは、モニタリングデータの正確な解釈や地熱系概念モデル構築の基礎となるデータである。データの質は、温泉と地熱井を統一(あるいは同じレベルで解釈できるように)することが重要である。

② 今後の調査の推進に向けた課題と方向性について

・坑内調査技術の向上

現時点で、温泉の坑内状況の把握に必要なデータ取得のための坑内調査技術はほぼ完成している。したがって、井戸の掘削時に地熱系概念モデルを構築するため、また温泉影響評価を科学的に評価するためのデータ取得を心がけることが望ましい。

2. 地熱貯留層と温泉帯水層を含む地熱系概念モデルの構築

要旨

【技術的課題】

当該エリア毎の温泉帯水層と地熱貯留層の関係の明確化
* 開発段階に応じてモデルが改良される。

【解決策】

必要に応じた地表調査の実施
坑井データの取得

2-1. 技術的課題

多数の坑井が掘削されている既存開発エリアでは、ある程度正確な地熱系概念モデルを構築できるが、坑井データが乏しい場合はモデルの精度が低いことが予想されるため、解釈に注意が必要となる。

2-2. 解決策1「適正なデータの決定」

① 今後推進すべきモデル構築のデータ確保の手法

地熱井と温泉井では、取得情報が異なるため、適正なデータを決める必要がある。

温泉ガイドラインの大深度掘削泉（約1,000m以深）の特性把握等の参考となる科学的資料として、以下が列挙されている。これらについて比較しやすいよう各都道府県において統一様式を用いる等の整理しやすい形式にして収集することが重要とある。

- ① 地質柱状図・・・地質技術者による高精度なもの
- ② 検層図
- ③ 揚湯試験結果

さらに場合により、

- ④ モニタリングデータ
- ⑤ 水質変化の時系列データ
- ⑥ 同位体分析等による起原水の推定
- ⑦ 温泉水の年代測定結果

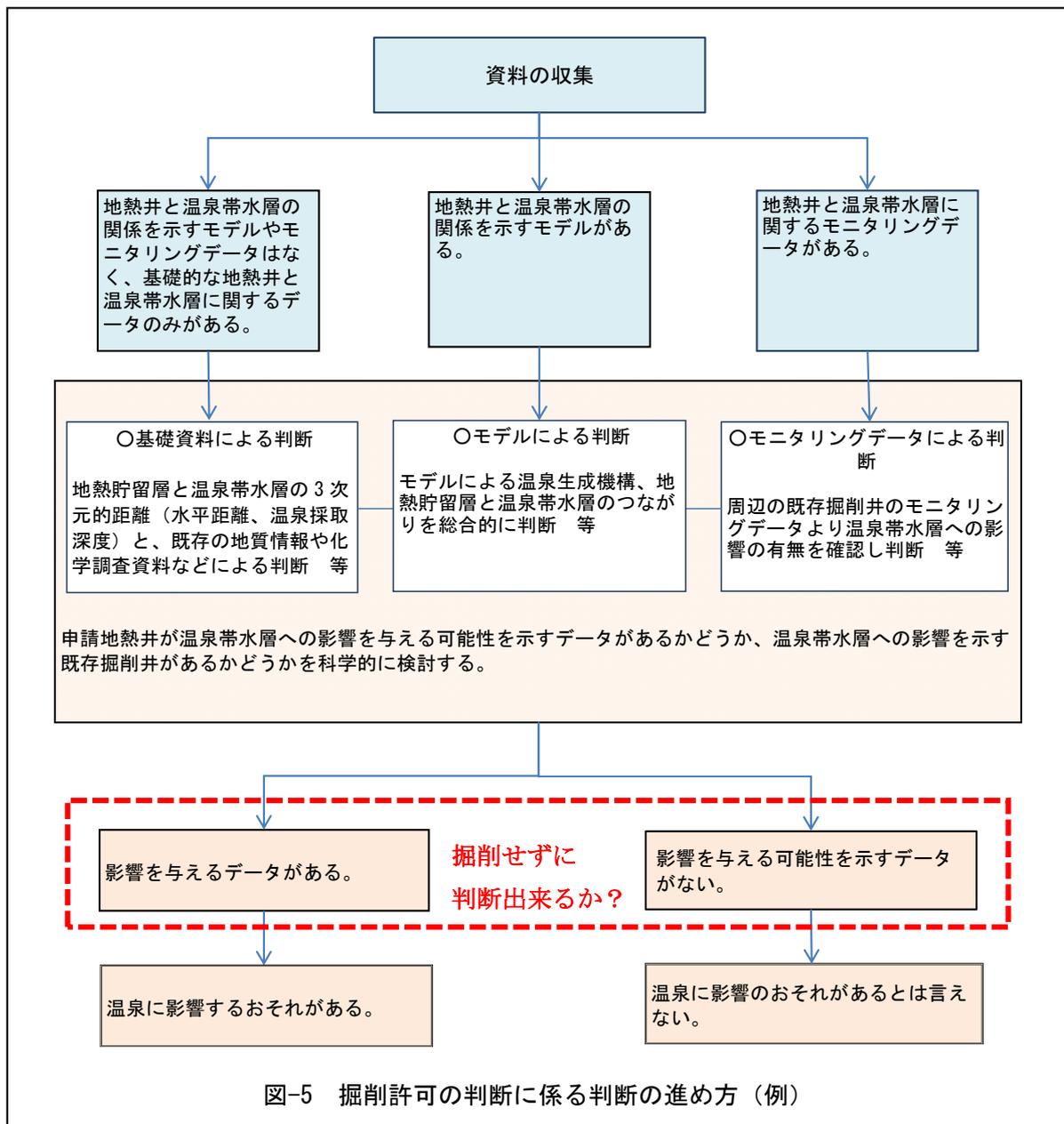
また、上記に加え温泉ガイドラインには、井戸の方位傾斜記録による正確な坑跡が追加されるべきである。本ガイドラインの距離規制は坑口位置で判断されて

いるので、実際は坑口位置の離隔距離ではなく、流入点（泉脈）間の離隔距離が重要である。

- ② 今後の地熱系概念モデル構築のデータ確保に向けた方向性について
 - ・地熱貯留層と温泉帯水層の関係性を示す地熱系概念モデルの妥当性の評価方法
 - 温泉学・地熱学に関する高度な専門知識をもつ有識者からなる第3者的な審議機関の設置の検討
 - ・地熱開発側のデータ精度にあわせて、温泉側の詳細なデータの取得方法（実施者、費用などの検討）

2-3. 解決策2「（地熱井が温泉帯水層へ）影響を与えるデータに関する取り決め」

- ① 今後推進すべき影響評価の手法
 - 掘削許可の判断に関わる判断の進め方（「温泉資源の保護に関するガイドライン（地熱発電関係）」図-5）では、
 - ・どのような基準を以て掘削する前に「影響を与えるデータ」と判断するか
 - また、逆に
 - ・どのような基準を以て掘削する前に「影響を与える可能性を示すデータが無い」と判断するか
 - が示されていない。この点について、温泉関係者、地熱関係者及び自治体等で判断基準を共有することが必要である。（地域毎、事例毎の判断が望ましい）
- ② 今後の影響評価の手法の向上に向けた課題と方向性
 - ・地熱貯留層と温泉帯水層の関係性を示すモデルの妥当性の評価方法
 - 温泉学・地熱学に関する高度な専門知識をもつ有識者からなる第3者的な審議機関の設置の検討
 - 技術面に加え、審議体制の課題（社会的課題）でもある



出典：「温泉資源の保護に関するガイドライン（地熱発電関係）」（平成24年）環境省自然環境局

2-4. 解決策3「透水性断裂分布の把握」

① 今後推進すべき断裂系分布把握の内容

流体が流動・貯留しうる断裂は縦型だけではなく、水平に近い低傾斜のものもある。また、第四紀花崗岩上面に地熱貯留層が発達している場合（葛根田地熱発電所）や褶曲運動によって特定の岩石に断裂が発達している場合（森発電所）もある。

したがって、当該地域の地質情報を解析して、最適な地熱系概念モデルを作成し、温泉と地熱貯留層の関係を明らかにしておく必要がある。

水平な貯留層は多孔質の透水性地層（砂層）を想定させるが、実際は上述のように高透水性断裂が低傾斜である地域もあり、地質構造や断裂成因・分布を温泉事業者、地熱開発事業者及び自治体が共有して理解しておく必要がある。

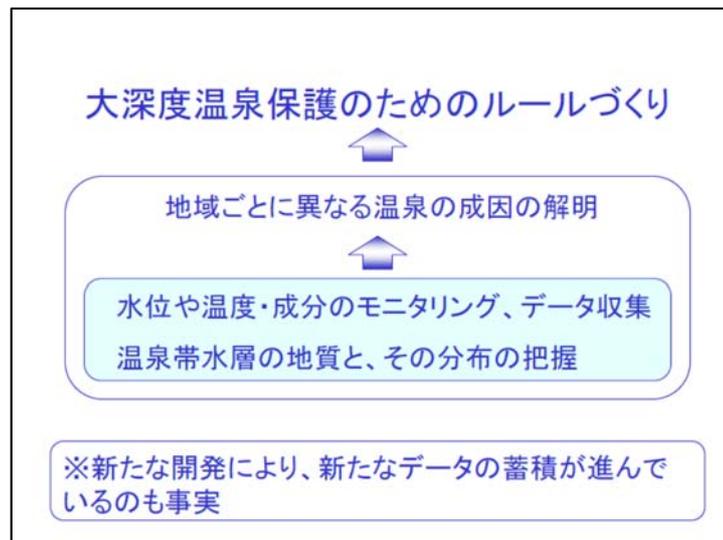


図-6 出典：「板寺(2006)中央環境審議会「温泉小委員会」資料5」

② 今後の断裂系分布把握のための課題と方向性

- ・ 断裂分布調査技術の向上
- 基本的に技術の向上ではなく、正確なデータ取得を行うことが重要となる。
そのために、坑井内調査（地質、検層）と正確な坑跡把握が必要である。

3. 地熱流体採取による温泉影響を定量的に検討する数値シミュレーション

要旨

【技術的課題】

数値シミュレーションの精度

【解決策】

実証試験の実施

3-1. 技術的課題

数値シミュレーションは、これまで温泉と地熱貯留層の関係を明瞭に再現出来ている事例はない。したがって、今回は、数値シミュレーションの必要性を検討いただきたい。

なお、環境省は平成22～24年に、八丈島の地熱発電所と温泉について、世界初の温泉との共生を目指した地熱貯留層管理システムの開発を行った。そこでは、温泉帯水層と地熱貯留層を含めた数値シミュレーションを行っている。しかし、まだ導入実証の研究開発フェーズであるため、課題解決には実証試験の実施が必要であろう（「平成25年度地熱開発技術の収集・整備委託業務」参照）。

3-2. 解決策1「実証試験の実施」

実証試験が必要である。現時点では、数値シミュレーションは将来予測の補助的ツールとするのが妥当であろう。