

# Green Report

## 2012

地圏資源環境研究部門成果報告  
大地の資源（めぐみ）地熱を生かそう  
—問題点と解決法—

18 December 2012





地圏資源環境研究部門長  
Director of the Institute for Geo-Resources and Environment, AIST

駒井 武  
Dr. Takeshi Komai

地圏資源環境研究部門の研究成果報告会は11回目を迎えました。本年は、昨年の東日本大震災および原発事故からの復旧・復興に向けて、各方面で政策的、実務的に大きな動きがありました。産業技術総合研究所においても、複合地質リスク調査による津波災害の実態把握や地盤安定性に関する地質調査を実施し、また放射性物質の監視や除染対策に関する研究開発も進められています。しかし、現実には東日本被災地の復興にはほど遠く、新たな居住地の設定や建設も今後の課題として残されたままです。また、特に福島県内では放射性物質の影響はきわめて深刻な状況であり、環境とエネルギーの両側面からの全国的な支援が必要になっています。震災の復旧・復興に必要な直接的な対策に加えて、再生可能エネルギーの安定的な確保、地域に根ざした環境再生のあり方や地熱のような環境共生型エネルギーの開発促進などの課題が浮き彫りになった一年であったかと思います。

当研究部門では、1980年代から地殻における物質や熱の循環およびその利活用に関する研究を重点的に進めてきました。とりわけ、地熱開発や地中熱利用に関しては研究成果が豊富に蓄積され、わが国の研究拠点として積極的な活動を行っています。これらの取り組みでは、温泉や地下水に係わる地球化学的な調査、岩盤の掘削や坑井の掘削に関する資源工学的な実験、さらには地下構造を把握するための物理探査の調査・解析など、多様な分野の基盤的な研究も重要になってきます。当部門の研究グループは、これらの全ての要素を網羅した資源環境研究を長期にわたり実施しており、わが国で唯一、地熱・地中熱研究の総合的な取り組みを実施できるポテンシャルを保持していると自負しています。

このような背景の中で、本年は「大地の資源（めぐみ）地熱を生かそう」をテーマにした成果報告会を開催いたします。招待講演として、中央温泉研究所の益子保所長より、温泉と地熱開発に係わる講演を頂戴いたします。また、これまで培ってきた研究成果や最近の話題などを取り混ぜて、地熱研究の展開および問題点、解決法などを議論していただきたいと考えております。ポスター発表により日頃から行っている研究グループの研究報告、具体的な研究テーマの研究紹介も行われます。土壌や地下水の汚染、鉱物資源、地中熱、新材料の開発など、興味深い研究成果の紹介もありますので、多様な研究をご覧下さい。この成果報告会は、部門の研究成果をお知りいただくと同時に、皆様から直接、貴重なご意見を伺う貴重な機会と位置づけております。今後とも変わらないご高配を賜りますよう、心からお願い申し上げます。



## 目 次

### 【プログラム】

|             |                          |                                 |                            |    |
|-------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|----|
| 13:30-13:45 | 地圏資源環境研究部門研究紹介           | 研究部門長                           | 駒井 武                       | 1  |
| 13:45-14:15 | 地熱研究概要と地熱ポテンシャル          |                                 |                            |    |
|             |                          | 地熱資源研究グループ長                     | 阪口圭一                       | 6  |
| 14:15-14:45 | 温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究について |                                 |                            |    |
|             |                          | 地圏環境評価研究グループ長                   | 安川香澄                       | 10 |
| 14:45-15:30 | ポスターセッション                |                                 |                            |    |
| 15:30-16:15 | 温泉からみた地熱開発               |                                 |                            |    |
|             |                          | 公益財団法人中央温泉研究所所長                 | 益子 保                       | 14 |
| 16:15-16:45 | 持続的地熱資源の採取               |                                 |                            |    |
|             |                          | CO <sub>2</sub> 地中貯留研究グループ招聘研究員 | 石戸経士                       | 18 |
| 16:45-17:15 | 工学的地熱開発の研究               |                                 |                            |    |
|             |                          | 地圏環境システム研究グループ                  | 及川寧己                       | 22 |
| 17:45       | 懇親会                      |                                 | 秋葉原 UDX ビル内別会場（徒歩 3 ～ 5 分） |    |



## 【ポスターセッションの内容】

### (研究グループ発表)

|                               |                             |       |    |
|-------------------------------|-----------------------------|-------|----|
| 地下水研究グループの紹介                  | 地下水研究グループ長                  | 丸井敦尚  | 26 |
| 地熱資源研究グループの紹介                 | 地熱資源研究グループ長                 | 阪口圭一  | 28 |
| 鉱物資源研究グループの紹介                 | 鉱物資源研究グループ長                 | 高木哲一  | 30 |
| 燃料資源地質研究グループの紹介               | 燃料資源地質研究グループ長               | 鈴木祐一郎 | 32 |
| 地圏微生物研究グループの紹介                | 地圏微生物研究グループ長                | 坂田 将  | 36 |
| 地圏化学研究グループの紹介                 | 地圏化学研究グループ長                 | 佐脇貴幸  | 38 |
| 物理探査研究グループの紹介                 | 物理探査研究グループ長                 | 光畑裕司  | 42 |
| CO <sub>2</sub> 地中貯留研究グループの紹介 | CO <sub>2</sub> 地中貯留研究グループ長 | 中尾信典  | 44 |
| 地圏環境評価研究グループの紹介               | 地圏環境評価研究グループ長               | 安川香澄  | 48 |
| 地圏環境リスク研究グループの紹介              | 地圏環境リスク研究グループ長              | 張 銘   | 50 |
| 地圏環境システム研究グループの紹介             | 地圏環境システム研究グループ長             | 高倉伸一  | 52 |

## (個人発表)

空隙スケールシミュレーションで得られた多孔質地質媒体中の

定常電流のローカルフラックスの統計的性質 \*

中島善人, 中野 司 (地質情報研究部門)

発光バクテリアを用いたバイオアッセイによる土壤汚染評価手法の開発

－土壤汚染対策法・第二種特定有害物質に関する急性毒性評価－\*

杉田 創, 駒井 武, 井本由香利, 今泉博之

CO<sub>2</sub> 地中貯留のリスクアセスメント, 最近の検討課題 \*

田中敦子, 坂本靖英, 駒井 武

電気分解法を用いたスケール対策法の地熱・温泉等への適用可能性

柳澤教雄, 松村高宏, 秋田裕武, 小祝大輔 ((株)レイケン)

56

VOCs 汚染浄化技術の現状に関する考察 \*

張 銘, 吉川美穂 (ケミカルグラウト (株)),

竹内美緒, 駒井 武

クロロエチレン類汚染サイトにおける脱塩素分解微生物および環境因子の解析 \*

吉川美穂 (ケミカルグラウト (株)),

竹内美緒, 張 銘, 駒井 武

Advances in and Limitations Associated with In-Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents\*

Ming Zhang, Miho Yoshikawa (Chemical Grouting Co., LTD.),

Mio Takeuchi, and Takeshi Komai

地中熱利用における事前調査・評価手法に関する研究 \*

神宮司元治

アジア地域におけるタングステン, リチウムの賦存について \*

大野哲二, 神谷雅晴, 奥村公男, 寺岡易司

関東平野北部における地下温度の分布と長期変化 \*

宮越昭暢, 林 武司 (秋田大学)

環境水中の放射性セシウムのモニタリング方法の開発

－福島県内での環境水中の放射性セシウム動態評価－\*

保高徹生, 川辺能成, 駒井 武, 中村公人 (京都大学),

佐藤睦人 (福島県農業総合センター),

鈴木安和 (福島県農業総合センター),

佐藤利夫 (日本環境科学 (株))

関東平野の水溶性天然ガス賦存状況に関する地質・地化学的研究 \*

佐脇貴幸, 金子信行, 棚橋 学, 猪狩俊一郎,

前川竜男, 中嶋 健, 森田澄人, 坂田 将

産総研におけるアウトリーチ活動 \*

水垣桂子, 柳澤教雄, 吉岡真弓, 内田洋平, 安川香澄,

阪口圭一, 佐脇貴幸, 古澤みどり, 中山京子

排ガスからの二酸化炭素回収を利用した農業分野への検討 (3) \*

鈴木正哉, 月村勝宏, 飯島英里, 永好けい子,

犬飼恵一 (サステナブルマテリアル研究部門),

前田雅喜 (サステナブルマテリアル研究部門)

---

\* の発表は別途要旨発表済み等の理由により本報告書には未収録

## 地熱研究概要と地熱ポテンシャル

### Outline of the Geothermal Studies of GREEN and Potential of Geothermal Energy in Japan

地熱資源研究グループ長：阪口圭一

Leader, Geothermal Resources Research Group: Keiichi Sakaguchi

Phone: 029-861-3897, E-mail: k-sakaguchi@aist.go.jp

#### 1. はじめに

発電を主なターゲットとした日本の地熱開発は、1960年代から開始され、1970年代の石油危機の時には石油代替エネルギーの一つとして、サンシャイン計画・ニューサンシャイン計画の下に調査や技術開発が進められた。その後、地熱についての政策サイドの関心が低下し、一旦は2002年に国の技術開発プロジェクトが停止されるなどの事態に至った。しかし、2000年代後半からはCO<sub>2</sub>排出が少ない再生可能エネルギーの一つとして見直されつつあった。2010年6月に発表された新成長戦略では、他の再生可能エネルギーと共にグリーンテクノロジー推進として取り上げられた。そのような状況下で2011年3月の東日本大震災が起きた。それによってもたらされた原子力発電所の運転停止による電力供給不足問題を受けて、地熱発電に対する社会の関心と期待が急速に高まっている（図1）。

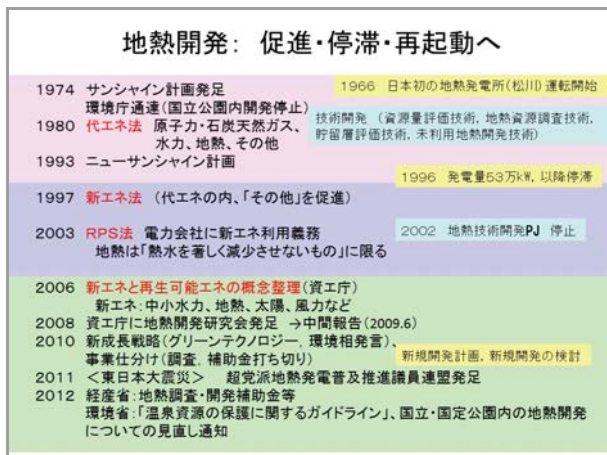


図1 地熱開発を取り巻く状況の変化

#### 2. 産総研で実施中の地熱研究

産総研では、旧工業技術院研究所時代から地熱開発についての多方面にわたる研究を行ってきた。しかし、国の地熱技術開発プロジェクトの停止等により地熱研究を行うグループと研究者数は減少を余儀なくされた。現在、産総研において「地熱」の名がつく研究グループは、地圏資源環境研究部門 地熱資源研究グループ（10月1日現在、常勤研究員5、テクニカルスタッフ2、外来研究員2）だけである。

産総研第3期中期計画期間（平成22～26年度）の地熱資源研究グループの目標は、豊富な資源量が存在するにもかかわらず開発が伸び悩んでいる地熱資源の開発ポテンシャル拡大を目に見える形で示すこ

とである。環境省から受託している地球温暖化対策技術開発・実証研究事業（競争的研究資金）「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」及び「温泉発電技術の実証研究」を中心に、温泉を含めた地熱資源の実態解明や、地熱発電資源と温泉資源の共生の実現、高温温泉を地熱発電資源として利用する技術開発を行うことによって、地熱資源開発ポテンシャルの拡大を図ることとしている。その他に、地熱資源に関する基礎的研究として、従来から継続している資源評価、スケール抑制技術、カルデラ地熱系、地熱水成分の有効利用等の研究を実施している。また、地熱資源研究グループ以外の研究員も含め、企業との共同研究・受託研究や、海外との共同研究を実施している。「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」及び「温泉発電技術の実証研究」は、他研究グループの研究員の参加も得て研究を進めている。

現在は、国立公園内開発、温泉や地元との合意のあり方など、どちらかという社会的な制約解消に注目が集まっているが、効率的な資源探査・開発や安定した発電所運転等のための技術開発も実施する必要がある（たとえば図2）。もちろん、社会的制約解消のためにも行うべき技術開発課題がある。そのような技術開発として産総研が共同研究者と共に現在進めている「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」の詳細については、本号の安川の報告<sup>2)</sup>を参照されたい。



図2 地熱発電の技術開発課題例。江原<sup>1)</sup>が挙げた6課題に温泉との共生技術を追加したもの。地熱発電所の図は日本地熱開発企業協議会作成。

#### 3. これまでの広域地熱資源量評価

全国を対象とした地熱資源評価は何回か試みられ



ている。その中で比較的良好に取り上げられるのは、宮崎ほか<sup>3)</sup>と村岡ほか<sup>4,5)</sup>による報告で、いずれも容積法<sup>6)</sup>を用いて計算された資源量である。150℃以上の地熱貯留層から得られる資源量は、それぞれ20,540MW・30年<sup>3)</sup>、23,740MW・30年<sup>4,5)</sup>と計算された。これらの値や計算根拠となったデータは、環境エネルギー政策研究所の「2050年自然エネルギービジョン」<sup>7,8)</sup>、資源エネルギー庁の「地熱発電に関する研究会」中間報告<sup>9)</sup>、環境省の「再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査」<sup>10)</sup>などで用いられ、今後の地熱開発の目標値を示す材料として活用されている。

#### 4. 自然公園内の資源分布

自然公園内での地熱調査・開発が制限されていることは、地熱開発における主要な制約の一つとされている。村岡ほかは、全国の地熱資源の約82%が国立公園の特別保護地区・特別地域内に分布すると計算した<sup>4)</sup>。以下に、Sakaguchi et al.<sup>11)</sup>が行った、自然公園特別地域種別内の資源量結果を報告する。

資源量計算は以下の手順で行った。

- (1) 産総研「全国地熱ポテンシャルマップ」<sup>12)</sup>、国土省国土数値情報ダウンロードサービス<sup>13)</sup>：GIS「行政区域 (H22)」およびGIS「自然公園地域 (H22)」を照合した。
- (2) 全国地熱ポテンシャルマップで150℃以上を対象として算出された167地域の各地熱ポテンシャル（以下、地熱賦存量という）を、特別保護地区、第1種特別地域、第2種特別地域、第3種特別地域、普通地域および公園外の各面積に応じて比例配分し、公園種別ごとの地熱賦存量を集計した。
- (3) 各公園内の地熱賦存量から資源量密度 (MW/km<sup>2</sup>) を求め、平成13年度 NEDO 戦略調査<sup>14)</sup>の成果である資源量密度と発電コストの関係式 (図3) を適用し、公園種別ごとに発電コストを求めた。
- (4) 地熱賦存量に可採係数0.437 (高山などアクセ

ス不能地域の立地制約と温泉地との競合など社会制約に関する係数の積から成る) をかけて、可採資源量を求めた。

- (5) 可採資源量に着目し、自然公園種別ごとの可採資源量やその発電コスト等との関係を集約した。

計算結果から以下のことが読み取れる (表1、図4、5、6)。

地熱資源が賦存すると計算された自然公園の面積は全自然公園面積の約13%に過ぎないが、その範囲にある可採資源量は8,076MWで、全可採資源量10,265 MWの約79%が自然公園内に賦存する。

地熱資源量密度は自然公園特別保護地区・特別地

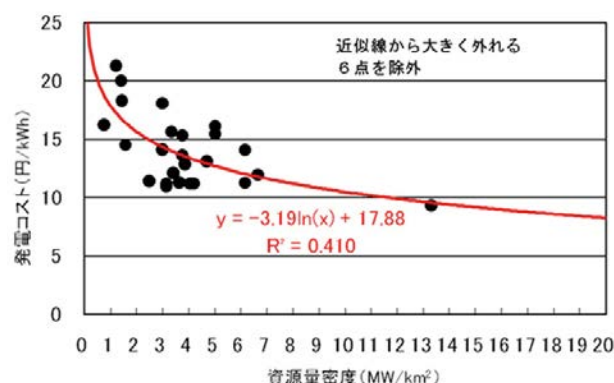


図3 資源密度と発電コストの関係<sup>14)</sup>。地熱開発促進調査の結果に基づく。送電費用、企業収益を含まない。

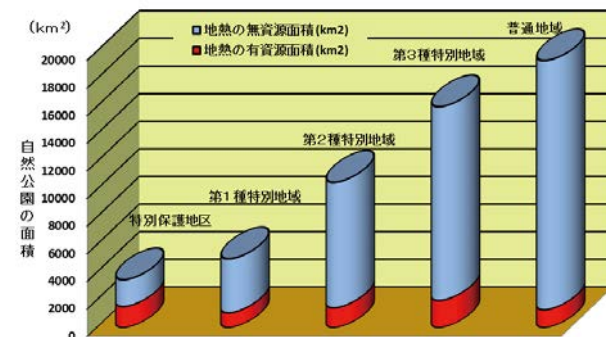


図4 自然公園種別毎の地熱資源の存在面積。

表1 容積法による公園種別のポテンシャル評価

| 公園分類    | 公園面積            | 有資源面積           | 有資源面積の割合 | 賦存量(村岡ほか,2008) | 賦存量(今回) | 資源量密度              | 可採資源量  | コスト別採算可採資源量 |              |           |
|---------|-----------------|-----------------|----------|----------------|---------|--------------------|--------|-------------|--------------|-----------|
|         | km <sup>2</sup> | km <sup>2</sup> | %        | MW             | MW      | MW/km <sup>2</sup> | MW     | 10円/kWh未満   | 10～15円/kWh未満 | 15円/kWh未満 |
| 特別保護地区  | 3,449           | 1,522           | 44.1     | 7,800          | 7,172   | 4.71               | 3,134  | 1,395       | 1,532        | 2,927     |
| 第1種特別地域 | 4,962           | 1,065           | 21.5     | 11,420         | 2,581   | 2.42               | 1,128  | 250         | 567          | 817       |
| 第2種特別地域 | 10,449          | 1,429           | 13.6     |                | 2,481   | 1.74               | 1,084  | 245         | 453          | 698       |
| 第3種特別地域 | 15,980          | 1,958           | 12.3     |                | 5,150   | 2.63               | 2,250  | 784         | 1,015        | 1,798     |
| 普通地域    | 19,314          | 1,278           | 6.7      | 4,250          | 1,085   | 0.84               | 480    | 0           | 242          | 242       |
| 公園外     | -               | 7,597           | -        |                | 5,007   | 0.66               | 2,189  | 109         | 858          | 967       |
| 合計      | 54,204          | 14,858          | 13.4     | 23,470         | 23,476  | 1.58               | 10,265 | 2,783       | 4,666        | 7,449     |

域で高く、自然公園普通地域や公園外地域と大きな差がある。

公園外も含めて、15円/kWh未満の比較的低コストで開発できる採算可採資源量は7,449 MWである。その内訳は、特別保護地区が最も多く、2,927MWと採算可採資源量の約39%を占める。以下、第3種特別地域1,798 MW（同24%）、公園外967 MW（同13%）、第1種特別地域817 MW（同11%）、第2種特別地域698 MW（同9%）、普通地域242 MW（同3%）と続く。

計算結果では特別保護地区に品位の高い資源が豊富に賦存するということが示された。特別保護地区は、一般的に火山体の中心に近い区域であることが多く、地下の賦存熱量は期待できるが、噴火の危険性、熱水の酸性化、熱水系の発達具合という観点からは開発の対象として適しているかどうかの検討の余地が残っている。今後、国立公園内での調査データが蓄積されることなどで、これらの点についての知見が深まることに期待したい。

## 5. 広域地熱資源量評価について

資源開発の方針策定等のためには国土に賦存する資源の量を把握し、技術レベルや経済的条件を加味して情報を更新していくことが求められる。前述のように、全国を対象とした地熱資源量の把握手法としては、容積法<sup>6)</sup>がよく用いられている。容積法では、まず種々のデータから地熱貯留層の体積と温度を算定・推定して貯留層内の熱エネルギーを算出する。これが資源量計算のもっとも基本の部分となる。

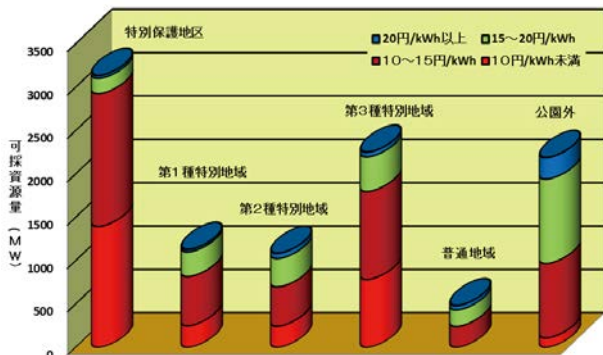


図5 自然公園種別の可採資源量と発電コストの関係。

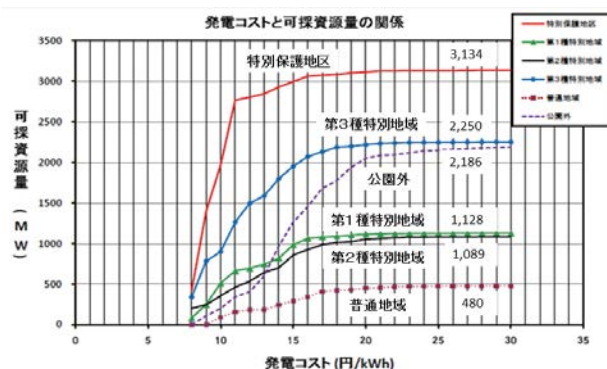


図6 発電コストと可採資源量の関係。

る。あとは、貯留層内熱エネルギーの一部の地上への取り出し、熱エネルギーから機械的エネルギーへの変換、機械的エネルギーから電気エネルギーへの変換という手順に沿って計算を行い、発電可能な電力量を得る（図7）。この電力量は対象の貯留層から得られる総発電可能量なので、発電期間（一般的には30年間）で割った値を発電量として表現する（例えば10MW・30年）。

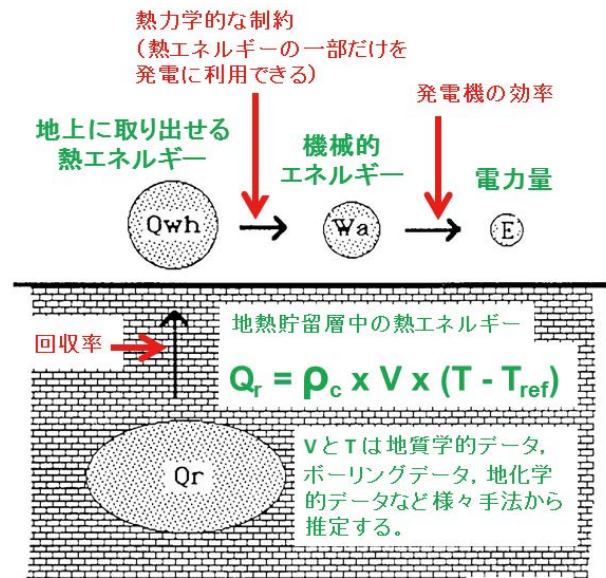


図7 容積法による資源量計算法の概要。宮崎ほか<sup>3)</sup>に加筆。

容積法で計算される広域の資源量は、マッケルビーダイアグラム<sup>15)</sup>の資源量（Resource）（図8）に相当するものと考えられるが、いくつかの問題を含んでいる。

例えば、地熱貯留層体積と温度についての算定・推定の幅（誤差）の大きさである。広域-全国を対象にした資源量評価では、探査データ等の乏しい地域については既存データからの大幅な外挿等を行うことになる。特に断裂型の貯留層を考えた場合、現実の貯留層範囲・体積と広域資源評価で想定する貯留層範囲・体積との乖離をどう扱うかを考慮する必要がある。

また、容積法では地熱貯留層の熱エネルギーの一部を、設定した発電期間で使い切る形で発電量を表現しているが、地熱資源の再生可能性との関係が十分整理されていない。地上に持ち出せる貯留層熱量の割合である回収率（図7）の設定とも関係して、検討されるべき課題である。

地熱資源は地下の生きた（動く）資源であるため、資源量の計算（条件設定）において不確かさが大きくなってしまふ。日本の場合には個々の資源賦存地域での資源賦存形態が断裂型貯留層に規制されたものであることから、広域の資源量評価においては、その不確かさが増幅される傾向にある。

以上のような問題はあつたものの、概念や計算手法が比較的単純で利用しやすい容積法は、国土全体を

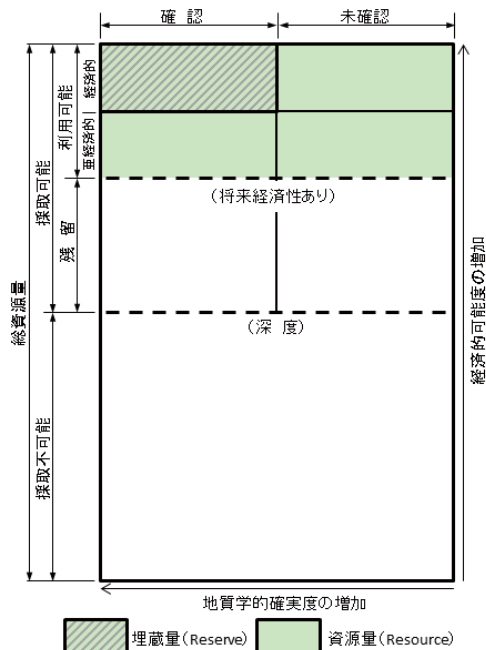


図8 マッケルビーダイアグラム。McKelvey<sup>15)</sup>を引用した宮崎ほか<sup>3)</sup>に基づく。

対象としたマクロな資源量評価には、今後もデータや計算法の更新を行いながら使っていく価値はある。広域資源評価の結果（値）を社会に示したり各種検討の材料に用いたりする際には、個別貯留層評価にもとづく個別地域の資源量との乖離についての十分な説明なされるなどの対応が採られるべきであろう。

## 謝辞

自然公園内の資源分布計算においては、産総研の野田徹郎氏、西日本技術開発（株）の田竈功一氏と鴫田洋行氏、弘前大学の村岡洋文氏に多くの部分を担当していただきました。記して感謝します。

## 参考文献

- 1) 江原幸雄（2012）国による地熱技術開発の再開の必要性。第4回地熱発電に関する研究会資料。（<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90514a07j.pdf>, <http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90514a08j.pdf>）
- 2) 安川香澄（2012）温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究について。GREEN REPORT 2012（本号）。
- 3) 宮崎芳範・津 宏治・浦井 稔・高倉伸一・大久保泰邦・小川克郎（1991）全国規模地熱資源評価の研究。地調報告，no.275，17-43。
- 4) 村岡洋文・阪口圭一・駒澤正夫・佐々木進（2008）日本の熱水系資源量評価2008。地熱学会平成20年度学術講演会要旨集，B01。
- 5) 村岡洋文（2011）熱源分布調査の概要。地熱発電の潮流と開発技術，サイエンス&テクノロジー，125-137。
- 6) Brook, C.A., Mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffaniti, M. and Muffler, L.J.P. (1979) Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures  $\geq 90^{\circ}\text{C}$ . in Muffler, L.J.P. ed., Assessment of geothermal resources of the United States - 1978, U.S.G.S. Circular, no. 790, 18-85.
- 7) 環境エネルギー政策研究所（2008）「2050年自然エネルギービジョン」～持続可能な低炭素社会の実現を目指して～。（<http://www.re-policy.jp/2050vision/2050vision080603.pdf>）
- 8) 江原幸雄・安達正敏・村岡洋文・安川香澄・松永 烈・野田徹郎（2008）2050年自然エネルギービジョンにおける地熱エネルギーの貢献。地熱学会誌，30，165-179。
- 9) 地熱発電に関する研究会（2009）地熱発電に関する研究会 中間報告。22p。（<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004561/g90609a01j.pdf>）
- 10) 環境省（2011）平成22年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書。287p。（<http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/index.html>）
- 11) Sakaguchi, K. Noda, T., Tagomori, K., Tokita, H. and Muraoka, H. (2011) Nationwide assessment of geothermal resources in Japan - Progress and problems. Abst. The 9th Asian Geothermal Symposium.
- 12) 地質調査総合センター（2009）全国地熱ポテンシャルマップ CD-ROM 版。数値地質図 GT-4，地質調査総合センター。
- 13) 国土交通省国土数値情報ダウンロードサービス（<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>）
- 14) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（2002）平成13年度地熱開発促進調査調査 開発可能性調査（戦略的全国調査）（第3次）報告書。262p。
- 15) McKelvey, V.E. (1968) Mineral potential of the submerged parts of the continents. Proceedings of a symposium on mineral resources of the world ocean, Univ. Rhode Island, Naragansett Marine Laboratory, Occasional Publication, 4, 31-38.



## 温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究について

On “Development of an advanced geothermal reservoir management system  
for the harmonious utilization with hot spring resources”

地圏環境評価研究グループ長：安川香澄

Leader, Geo-analysis Research Group: Kasumi Yasukawa

Phone: 029-861-3280, E-mail: kasumi-yasukawa@aist.go.jp

### 1. はじめに

地熱発電は、CO<sub>2</sub>排出量が少なく環境に優しいベース電源として、今後の電力供給における役割が期待されている。新規の地熱開発を行う際には、地元住民の理解が必須だが、付近に温泉がある場合には、地熱開発によって温泉に悪影響が出るのではないかと温泉業者の懸念により、開発が遅延または中止となる例があった。このように、わが国の地熱開発は、温泉との共生を図っていかなければ進展しない状況にある。

この問題を解決するため、当部門は環境省委託事業「地球温暖化対策技術開発等事業（競争的資金）「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」を平成22年度より3カ年計画で実施している（弘前大学、東電設計（株）、日鉄鉱コンサルタント（株）、八丈町との共同研究）。本事業の目標は、“温泉に対する悪影響がない発電が可能なことを実証する総合的な地熱貯留層管理システムの開発と、当該システムの有効性の検証”である（図1）。

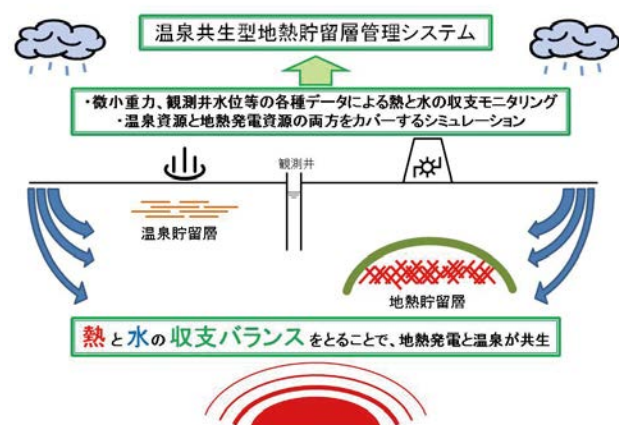


図1 本プロジェクトの構想

本研究では、八丈島と南伊豆の2つのモデル地域を対象に、1. 地熱系モデル開発及びシステム統合化、2. モニタリング技術開発、3. 変動予測シミュレーションを掲げ、図2の流れに沿って研究を進めている。表1の通り、この2地域は、地熱系の規模、温泉と地熱貯留層の関係、既存情報量等が大きく異なっている。開発規模等に応じて、温泉共生型の地熱貯留層管理に必要な情報量と種類が異なる可能性があるため、両極端な例を示すことで、他の地域への応用に繋がるよう考慮している。本文では、これまでの研究成果の中から、全体の流れが解るよう内

容を選んで報告する。

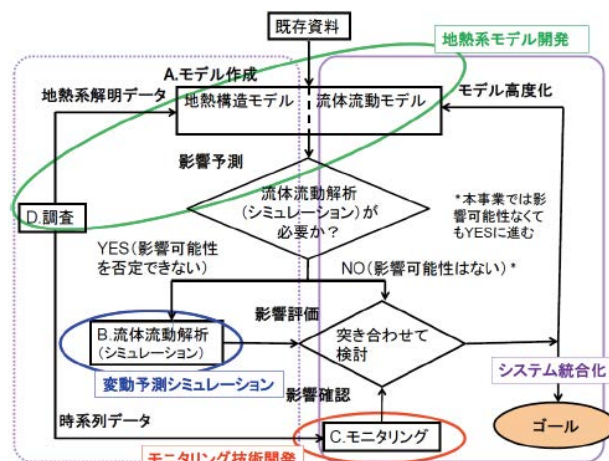


図2 温泉共生型地熱貯留層管理システムの流れ

表1 八丈島と南伊豆の比較

| 地域     | 八丈島                                                  | 南伊豆                                                   |
|--------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 地熱系の規模 | 商業規模の発電                                              | 自治体等による小規模発電を想定                                       |
| 温泉との関係 | タイプ4または5（図3参照）                                       | タイプ1または2（図3参照）                                        |
| 既存の情報量 | 多（地熱発電所建設時の調査、地熱井モニタリングデータ等がある）                      | 少（温泉井等の情報が総務省「緑の分権改革」報告書 <sup>1)</sup> に集約されている）      |
| 備考     | 1995年から3300kWの地熱発電所運開。本研究の対象地域は約5×5km <sup>2</sup> 。 | 下賀茂地区に70～125℃の高温泉が多数分布。本研究の対象地域は約2×2km <sup>2</sup> 。 |

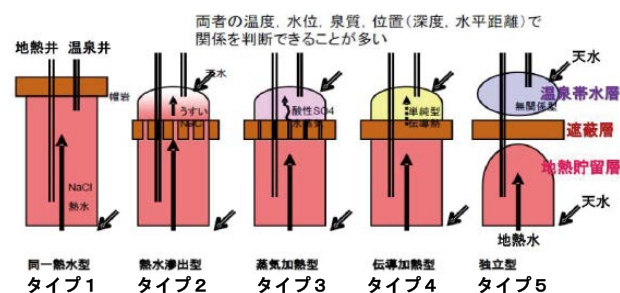


図3 温泉と地熱系との関係の5分類<sup>2)</sup>

## 2. 八丈島における研究

### 2.1. 地熱系モデル開発及びシステム統合化

#### 1) 地質・地化学・水理解析

温泉系を含む八丈島地熱系モデルを作成する上で重要と考えられる事項を既存文献から抽出し、解明すべき研究課題を、図4のように整理した。これらの地質・地化学・水理解析に関わる課題を解明すべく、新たなデータを採取し解析している。



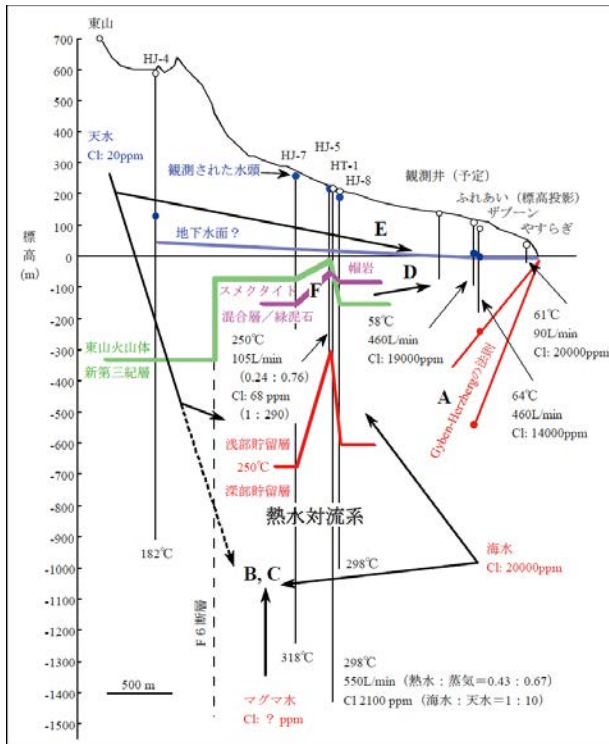


図4 八丈島の温泉系を含む地熱系の初期概念モデルと今後の検討課題 (A から F)<sup>3)</sup>

## 2) 比抵抗構造調査

MT 法・AMT 法調査を実施した (図5)。市街地や農業用設備の影響で、国内の他地域に比べてデータ品質は悪いものの、得られた見かけ比抵抗データは、地表から高ー低ー高の3構造の地下の比抵抗構造を示している。図6に、3次元解析による比抵抗構造 (図5の□の範囲) を示す。暖色系の低比抵抗範囲 (多くは帽岩層に対応する) が、比較的浅部まで分布している。

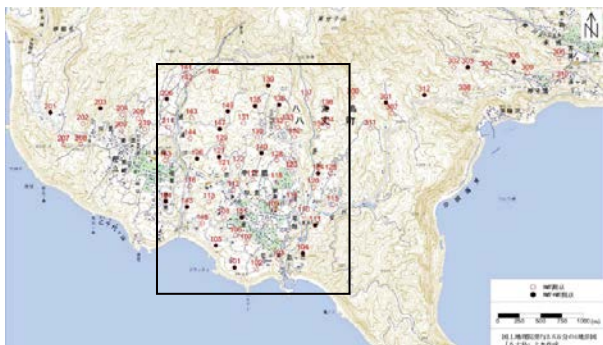


図5 八丈島におけるMT法・AMT法の測点配置

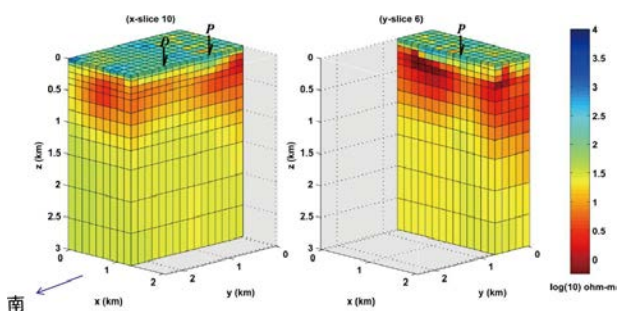


図6 3次元解析によって得られた比抵抗構造<sup>3)</sup>

## 3) 地熱系モデリング

東京電力 (株) グループによる八丈島東山南部地域の地熱系モデル (図7) によれば、熱源は東山南部地区の火山を形成したマグマだまりであり、地熱流体は新第三紀層中をほぼ垂直に延びる断層に沿って上昇し、変質鉱物からなる帽岩によって側方に流動している。本研究では、温泉系を含む地熱系モデルを作成するため、前述の2項目のほか、平成22年度に中之郷観測井 (図9参照) を掘削し、新情報を地熱系モデルに活用している。

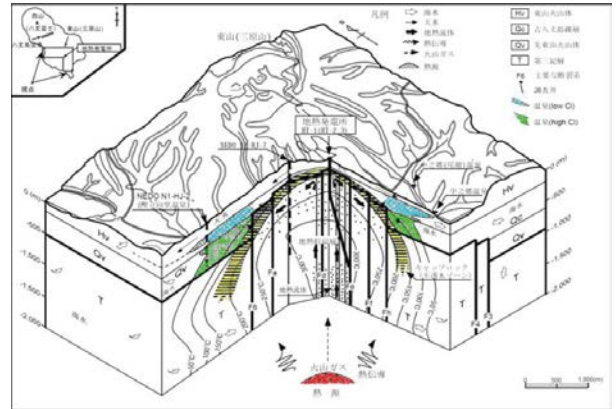


図7 八丈島の地熱系モデル<sup>4)</sup>

## 4) システム統合化

本研究では、八丈島に関しては、基本データの他に確認データも取得することで、システム統合化を図ろうとしている (図8)。基本データは、どこの地域でも最低限とすべきデータであり、より詳細に調べる必要がある場合には、確認データの取得が重要としている。

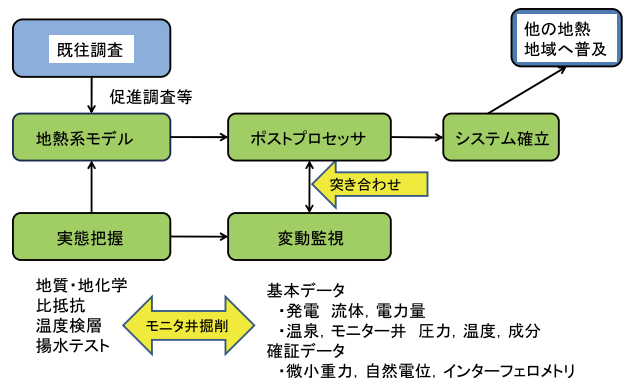


図8 八丈島のシステム統合化フロー図

## 2.2. モニタリング技術開発

### 1) 温泉モニタリング

温泉モニタリングの目的は、測定値の自然変動幅を調べ、その後の地熱開発による影響の有無を調べる基礎データとすることである。八丈島では既に地熱発電所が運開しているが、貯留層能力に対して蒸気生産量が十分小さいため、周辺温泉への影響はないものと考え、本研究では自然変動幅を捉える目的でモニタリングを開始した。

平成22年度に温泉モニタリングを開始した3地点および中之郷観測井、八丈島地熱発電所の位置を図9に示す。中之郷観測井と温泉でのモニタリング項目は、水位、温度、電気伝導度である。

図10に、末吉温泉「みはらしの湯」における長期変動を示す(2011年3月～11月)。短周期の変化を除くため、ここでは朝のポンプ稼働時から夕刻の停止時までの平均値を1日の代表値としている。電気伝導度の低下は、地表に設置したセンサーへのスケール付着が原因と考えられる。

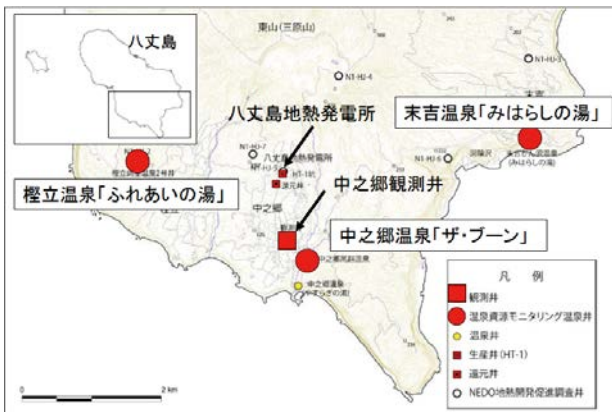


図9 八丈島温泉モニタリング関連の位置図

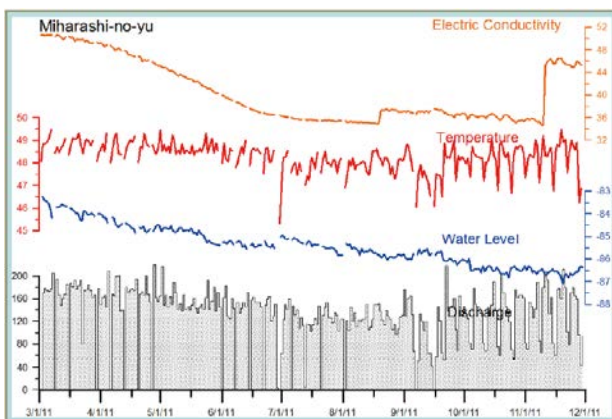


図10 ポンプ稼働時の平均値から推定した末吉温泉「みはらしの湯」の変化<sup>5)</sup>

## 2) 微小重力モニタリング

井戸で観測される水位は、スクリーン深度における水理水頭を示しており、必ずしも広域的な地下水位を表さない。そのため、広域的な水位変化を把握する目的で、本研究では、中之郷観測井近傍での連続観測および複数地点での繰り返し観測による微小重力モニタリング技術開発を行っている(図11)。

図12では、観測井における顕著な温度低下の数日後に重力が低下するイベントが捉えられており、流体の流入出による温度変化および重力変化のメカニズムを検討中である。

## 2.3. 変動予測シミュレーション

東京電力(株)グループは、八丈島地熱発電所の貯留層管理の目的で数値シミュレーション・モデルを作成している。本研究では、温泉帯水層の変化を

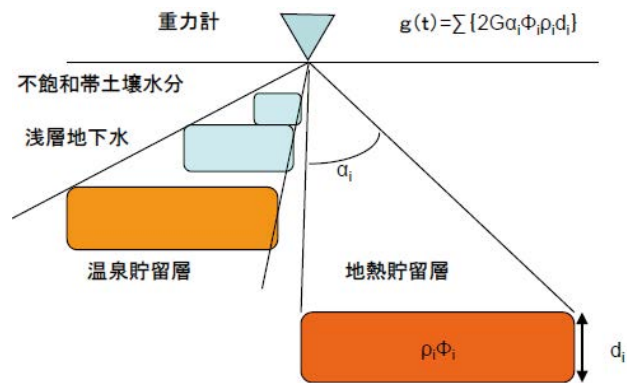


図11 微小重力測定で得られる情報の概念図

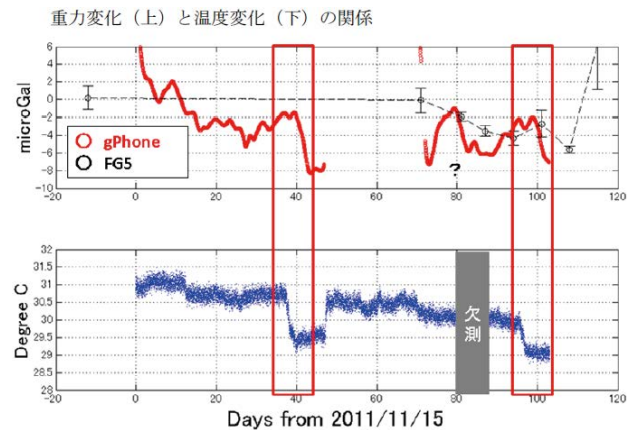


図12 重力変化と中之郷観測井の温度変化<sup>5)</sup>

計算できるよう、そのモデルを水平方向に拡張し、鉛直方向に再分割した(図13)。

図14は、八丈島地熱発電所の生産井のフィードポイントを含む断面図で、生産開始10年後の貯留層の状態を示している。生産井を中心に圧力・温度の低下が発生するとともに、蒸気卓越領域が拡大しているが、温泉への影響は見られない。

今後は、帽岩の物性を変化させた場合等について検討し、モデルの信頼性を確認する予定である。

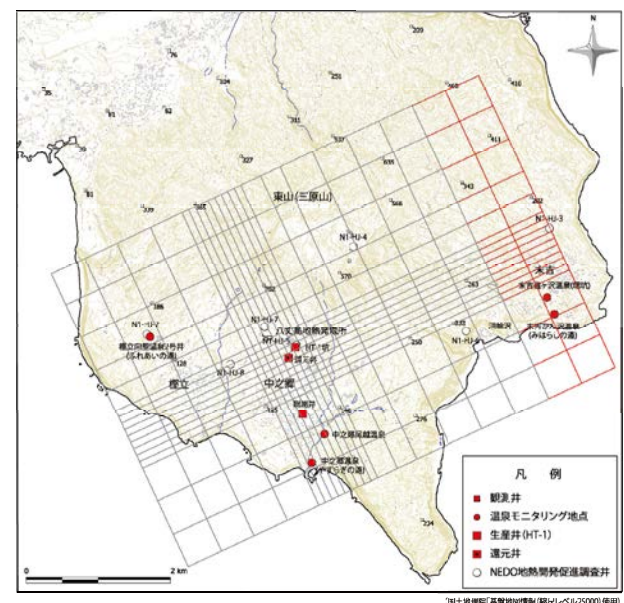


図13 八丈島数値モデル平面図(赤線が拡張部分)



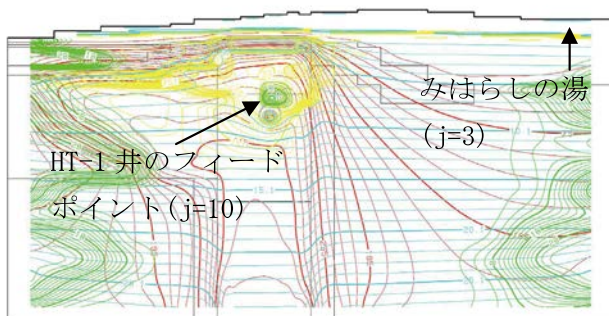


図14 生産開始10年後のWSW-ENE断面図 (j=9).  
温度：赤，圧力：青，塩分濃度：緑，蒸気卓越領域：黄。

### 3. 南伊豆における研究

#### 3.1. 地熱系モデル開発及びシステム統合化

##### 1) 地質・地化学・水理解析

下賀茂地区の温泉－地熱系の熱水の起源を調べる目的で、各種調査を行っている。平成23年度の成果として、この地域の温泉水の続成作用はあまり進んでおらず、原熱水の起源水は海水の可能性があるという、「緑の分権改革」報告書<sup>1)</sup>の結果を支持する結果が得られた。

##### 2) 物理探査

平成23年度に予備的な比抵抗調査を行った他、平成24年度には、重力探査、自然電位調査、MT法・AMT法比抵抗調査を行った。自然電位調査の結果は、鮫島・岩橋<sup>6)</sup>の示す断層の両側で双極の異常を示し(図15)、100m以深の温泉帯水層内を流体が断層の西側から東側に側方流動していることが示唆された。

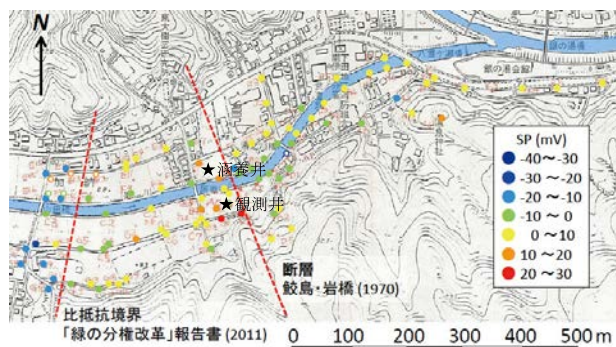


図15 下賀茂地区の自然電位分布調査結果

##### 3) 地熱系モデリング

温泉－地熱系モデルを作成するため、上記の調査に加え、690mの観測井と159mの涵養井(図15)を新たに掘削した。観測井から汲み上げた流体を涵養井から注入する生産－還元試験を行い、温泉モニタリングおよびトレーサ試験を行うことで、浅部から深部までの水理構造の確認を試みている。

##### 4) システム統合化

本地域について、情報不足の部分に関しては、八

丈島の結果から推定することによってシステム統合化を行う(図16)。これは、情報が不足している他地域での、特に温泉発電規模の地熱開発の参考になると考えられる。

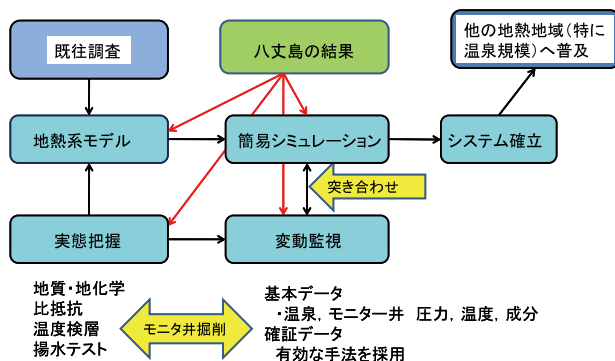


図16 南伊豆のシステム統合化フロー図

##### 3.2. モニタリング技術開発

本地域では平成23年9月より、既存の3温泉井での温泉モニタリングを開始した。水位、温度及び電気伝導度の自然変動を捉え、また生産－涵養試験時の変化の有無の確認を目的としている。

### 4. まとめ

本研究では、温泉へ悪影響を及ぼすことなく、地熱開発が行えるよう、地熱－温泉系を含めた調査・モニタリングをするための総合的なシステムを開発している。本文に記した以外にも、様々な研究を行っており、たとえば今年度は、温泉データから図3の5タイプを判別し、モニタリング・データの自然変動幅からの逸脱を自動判別するソフトウェアを作成している。今後の地熱開発の一助となれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 東電設計株式会社，南伊豆町「緑の分権改革」推進事業委託業務報告書，2011.
- 2) 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，pp.62，2010.
- 3) 環境省委託業務 平成22年度地球温暖化対策技術開発等事業（温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究）報告書，pp.136，2011.
- 4) Matsuyama, K., Narita, N., Tomita, K., and Majima: Geothermal resources of Hachijojima, Geothermics, 29, 213-232, 2000.
- 5) 環境省委託業務 平成23年度地球温暖化対策技術開発等事業（温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究）報告書，pp.198，2012.
- 6) 鮫島輝彦・岩橋 徹，下賀茂温泉の地熱構造，静岡大学地学研究報告，2-1，31-42，1970.



## 温泉からみた地熱開発 Geothermal Development and Hot Spring Users

公益財団法人中央温泉研究所所長：益子 保

Hot Spring Research Center, Japan: Tamotsu Mashiko

Phone: 03-3987-0751, E-mail: t-mashiko@onken.or.jp

### 1. はじめに

地熱発電に対して、温泉事業者は非常に大きな危惧を抱いている。それは、地熱発電が開発対象とする地熱資源は、温泉事業者が利用する温泉資源の根源で、地下深部では繋がっているとの理解が根底にある。そして、地熱発電が利用する熱水量は、温泉としての利用量をはるかに上回り、地熱発電が永続的に続くことによって、地下深部から浅層にある温泉へと供給される温泉量がいつかは減少し、温泉の枯渇に繋がってしまう、という心配である。

また、従来の温泉利用は観光・療養目的であるのに対して、地熱発電は利用面で異質なことも、温泉事業者から疎んじられる背景にあるかも知れない。現在の温泉利用には、歴史的にはまだ浅いものの、観光・療養以外の他目的利用も進んでいて、水産用や農業用として利用される例もあり、地熱発電だけが特異なわけではない。しかし、特に水産用水としての利用は量も多く、伝統的な温泉利用の脅威となっている例もある。

本項は、このような温泉事業者の心配を地熱関係者に少しでも理解して頂き、温泉事業と地熱事業とが協調して、地の底の恵である温泉・地熱資源を有効に活用できれば幸いとの思いでまとめたものである。

### 2. 温泉利用の歴史

日本でもっとも古い温泉（古湯）は、道後、有馬（有間）、白浜（和歌山県）の3湯といわれている。日本書紀（西暦720年）や風土記（同713年）に登場するものらしく、日本の温泉利用の歴史は1300年以上に及んでいることになる。温泉の利用、つまり入浴は仏教の教えの一つであり、温泉の利用は仏教伝来と密接に関連していて、温泉の記載がある上記の書物の年代も、仏教伝来の時期と前後している。このような温泉利用の歴史は本題ではないが、日本の温泉利用は古い歴史を持っていることは事実であり、それ故に温泉を利用してきた歴史や経緯（文化へと昇華？）は尊重されなければならない。同時に、温泉事業者自らも、温泉資源保護に尽力しなければならない。

現在でも、温泉地には多くの人が訪れ（図1参照、環境省<sup>1)</sup>）、日本では温泉は観光になくてはならない重要な要素となっている。

重要な観光資源のひとつとなる温泉は、温泉のない観光地や観光地化を目指す地域にとっては必須のアイテムとなり、古くから様々な地域で温泉開発を

指向することとなった。その結果もあって、我が国の温泉湧出量は、つい最近まで増加の一途をたどっている（図2参照）。ここ数年、湧出量が減少に転じているのは、可燃性天然ガス対策など、新規掘削時の規制内容が強化されたことによっていると思われる。

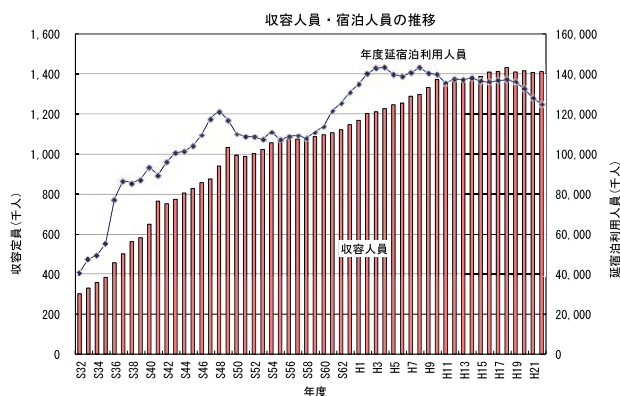


図1 温泉利用者数の推移

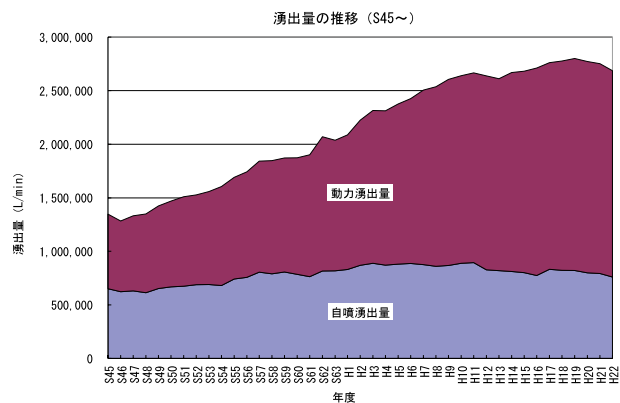


図2 温泉湧出量の推移

日本の地熱利用の現状に関して、地熱資源量のポテンシャルは高いものの、地熱利用は進んでいない、といった論調が多くなされている。確かに、地熱水の地熱発電への応用は進んでいないが、上述の如く、地熱水の直接利用は世界でも稀なほど進み、かつ多様化している。この点については、地熱関係者も十分承知していると思われるが、マスコミの報道内容を見ると、主体的な論調となっていないのは残念なことである。

### 3. 古来の温泉、新しい温泉

温泉の源泉の形態には種々のものがある。ほとんど人手が加わっていない自然湧出泉から、掘削深度

が1000m、時には2000mを越えるような深い掘削源泉まで多様である。特に、大深度掘削源泉が多く開発されるきっかけとなったのは、1988年から行われたふさと創生一億円事業において、温泉が開発されることが多かった時かもしれない。この頃には、おおむね1000～1500m程度の温泉が、調査費込みで開発された。また、平成の大合併に際しても、合併特例債等を利用して温泉が開発されることが少なからずあり、この場合も大深度掘削源泉となる。こうした自治体による開発以外に、不景気といわれながら民間の温浴施設やシティホテルを中心に、大深度の温泉開発が進められた。

大深度掘削による温泉は、地下水循環系の中の広域流動系に属するもので、温泉の流動性は一般的には乏しく、高く被圧されているのが特徴である。自噴する、しないは、温泉帯水層の圧力と源泉が所在する地点の標高との関係に依存し、中には大量に自噴するものもあるが、その自噴量は継時的に大きく減少するのが普通である。一方、高い自噴圧を有しながら自噴量はごく少量で、揚湯しても水位が大きく低下して、少量の揚湯しかできない源泉も中にはある。

自然湧出する源泉は自然の水循環系にあって、温泉として涵養されたものの一部が湧出していて、水収支的にはバランスが取れていることになる（涵養量 $\geq$ 湧出量）。これに対して、大深度掘削による温泉は、湧出量が減少傾向にあるもの、温泉水位が低下傾向を示すものが多く、多くの場合は涵養量<湧出量の関係になっていると考えられている。

こうしたことが、自然湧出泉や古来の温泉地の中にある掘削深度の浅い温泉などと、昨今の大深度掘削源泉とは区別すべきであって、後者の温泉については開発規制や湧出量規制などを実施すべきだとの論調が形成されるゆえんとなっている。地熱開発に対する温泉事業者の反応は、地熱開発による温泉への影響懸念と、調査・開発に着手すれば後戻りはしないとの疑念、さらに地熱開発は温泉の大深度掘削の延長線上に位置づけられる、といった様々なことが背景にある。

地熱資源と温泉資源とは、ともに地下に賦存する熱水資源であり、本来、両者の境界線は定められない。地下水資源も相対的に低温で恒温性を有し、良質な水質で特徴づけられる水資源であるが、地域や深度によって様々な水温、水質を有していることを考えれば、地熱資源や温泉資源ともボーダレスな関係になる。

地熱、温泉、地下水、いずれであっても、我々がこれらを資源として認識する限り、開発行為の対象から外すことはない。もちろん、その開発は持続的な開発であって、公益を害さないことが必要だが、鉱物や石油資源のように明らかな枯渇性資源であっても、高度な政策的・経済的な判断のもと、計画的開発を継続することになるのではないのか。そういう点で、大深度掘削源泉も地熱開発も、持続的・計画的

な開発が求められる。

#### 4. 温泉事業者との協調

温泉事業者の集まりである社団法人日本温泉協会は、無秩序な地熱発電開発に反対を表明し、今後の地熱発電開発に当たっては、電力確保と温泉資源保護の二つの公益が共存することが前提であり、そのことのために以下の5項目を実現することを要望している<sup>2)</sup>。

- ①地元（行政や温泉事業者等）の合意
- ②客観性が担保された相互の情報公開と第三者機関の創設
- ③過剰採取防止の規制
- ④継続的かつ広範囲にわたる環境モニタリングの徹底
- ⑤被害を受けた温泉と温泉地の回復作業の明文化

以下、これらの要望事項とも関連して、地熱開発に当たって留意願いたい点について記す。

##### 4.1. 地元との調整

地元関係者と意見調整を図る場として、協議会などの設立は極めて重要であり、効果的と思われる。そうした協議会の設置は簡単ではないし、協議会の構成について十分留意しないと、意見集約を図る場とはならない。さらに、たとえ協議会が設立できたとしても、その協議会で地元意見が100%集約できるわけではない。むしろ、特に温泉への影響判定については、協議会の場で異論が多く出る可能性が高い。最終的には多数意見を集約することになるのであろうが、少数意見を協議会としてどのように取り上げるかが大きな課題である。

これまで、既往地熱発電所周辺の温泉地等において発生した諸現象について、温泉事業者は地熱発電による影響を指摘し、地熱開発事業者は地熱発電との関係はないとして、その現象発生の原因に正反対の見解が提起されている。既往発電所においても、地元との協議会は設立され、上記のような現象について議論されていると思われるが、ある現象に対して、こうした正反対の見解が示されるのは、協議会の在り方（検討内容の情報発信）に課題があるように思われる。

また、地熱開発事業者と自治体とで連絡会議のようなものを作り、そこでの協議内容を地元温泉関係者に説明するような仕組みは、地熱開発事業者と地元温泉関係者とが対立する構図となり、地元との協調を生み出すことは難しいものと思われる。

##### 4.2. 全体調査工程の説明

温泉事業者に地熱開発への疑念を抱かせないような配慮も必要である。上述した協議会に地元関係者全員が参加することはあり得ないし、協議会への出席メンバーが地元関係者に十分な情報伝達をしてくれるとは限らない。

地熱開発のための掘削調査の中で、温泉が湧出する可能性が低い構造試錐井などは温泉掘削申請の対象にならないとされ、構造試錐井などの掘削がどの場所で、どの期間行われるかの情報が一部の地元関係者



に伝わらず、関係者の疑心を招くことが心配される。むしろ、掘削申請が必要な調査の方が、何らかの形（例えば掘削申請に際しての事前協議等）で地元関係者に情報が伝わり、安心感を呼ぶこともあろう。

地熱調査の全体工程はなるべく早い段階で地元へ告知し、地元関係者に作業内容を周知する努力が求められる。

#### 4.3. 温泉への影響可能性

一連の地熱開発調査の過程で、温泉への影響が出現する可能性があるのは、試験井を利用した噴出試験時であろう。構造試験井や試験井で行われる注水試験も、地下帯水層に圧力変化を及ぼすので、温泉への影響可能性はあるが、注水試験を行うような掘削井は掘削深度が地熱貯留層に達していない場合が多い（掘削深度が地熱貯留層に達していれば噴出試験の対象になる？）と思われるので、注水試験が実際の地熱開発時の影響を再現することはなく、一連の調査の中では、温泉への影響は比較的小さいものと思われる。

やはり、温泉への影響という点で大きな焦点となるのは噴出試験であり、それも単井での短期間の試験ではなく、複数の孔井からの長期にわたる噴出試験が、温泉への影響を検証するのに有効と思われる。噴出試験はできる限り多くの試験井を用い、試験期間も長期にすることで、実際の地熱発電における生産井からの地熱水採取に近い状態を再現することが必要である。これによって、温泉への影響検証がより確からしくなり、現実に近いものが再現できるのではなかろうか。

少ない孔井から短期間の噴出試験で温泉地への影響を議論することは、かえって温泉関係者の反発を招く可能性があるので、できれば避けるべきである。さらに、こうした噴出試験は地元にも告知し、関係者の監視のもと実施する必要がある。

#### 4.4. 温泉との影響関係の検証

上記した影響関係については、地熱井と温泉地との関係で述べてきたが、実際に温泉に影響を与えたようなデータが見いだされた場合、大きな問題となってその後の地熱開発はほとんど進捗しなくなる心配がある。温泉への影響出現はできるだけ避けるのが最善である。そのためには、構造試験井や調査井などを活用し、観測井とすることも考慮したい。

このような提案をするのは、例えば温泉地と地熱井との間に観測井が2本ある場合を想定すると、地熱井と観測井B、観測井Bと観測性A、観測性Aと温泉地Aという影響関係をリレーしていくことで、間接的に地熱井と温泉地Aとの影響関係が類推されていると考えるからである（図3参照）。

温泉の影響関係ばかりではなく、種々の影響事案についての関係者の理解は、影響があったという説明は受け入れやすく、影響はないという説明はなかなか容認してくれないのが実態である。そこで、影響が確認しやすい近距離での相互関係を結んでいくことで、最終的に把握したい関係の影響の有無と程

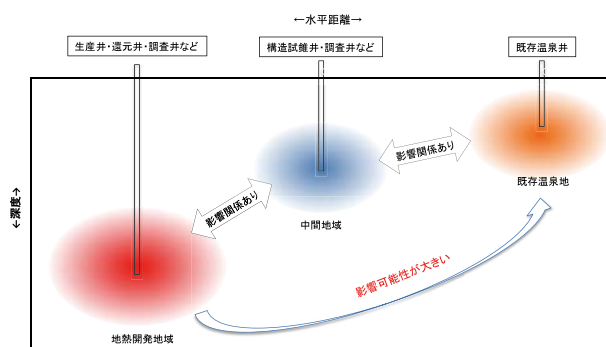


図3 影響関係リレー概念図

度を類推もしくはシミュレーションでき、関係者を説得しやすくなるのではなかろうか。

参考までに、継続的なモニタリングデータにより、他源泉の開発による影響が観測できた源泉の事例を図4に示しておく。

この源泉は、これまで温泉のなかった地域で開発された深度1500mの源泉である。水位と温度の観測記録で、赤線が水位（MAX）、青線が水位（MIN）である。こうした源泉の特徴でもあるが、水位は継続的な低下傾向を示している。その中で、新しく開発された他源泉の揚湯開始（図上辺部の▲2ヶ所）や揚湯試験時（同じく緑線）にあわせて、水位の大きな低下が観測されている。

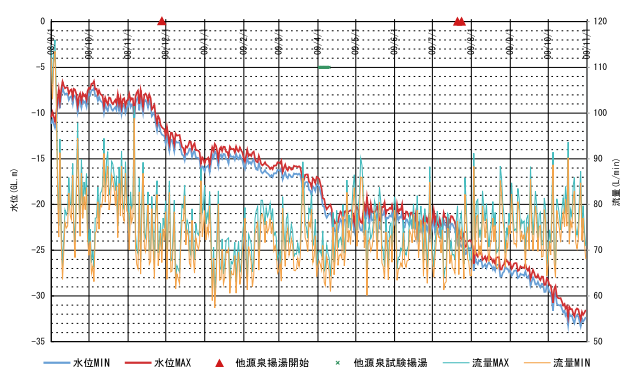


図4 温泉モニタリング例（影響確認）

なお、温泉への影響の判断について、昭和26年に青森県からの照会による回答として、国は以下のような回答をしている<sup>3)</sup>。

- ①影響により使用に耐えなくなった場合→該当する
- ②影響があってもどうにか使用に耐える場合→概ね該当する
- ③影響があってもさして困難を感じない場合→該当しない
- ④影響がごく微量である場合→該当しない

しかし、この判断は既存温泉事業者にとっては厳しすぎる。既存温泉事業者は新規温泉開発に当たって、掘削後の影響判断に委ねることを嫌い、掘削そのものの阻止に精力を傾注している。このことは、上記した既存温泉事業者にとって厳しい影響判断が背景にあると思われる。



#### 4.5. 事業化（縮小、撤退等）の判断

地熱開発調査の目的のひとつは、開発対象となる地熱資源の賦存場所（地域と深度）や資源量を検討し、事業の採算性や地熱水の持続的生産可能性を評価することであろう。同時に、地熱発電を開始した時の温泉や自然環境への影響も評価することになる。予想される影響に対しては、回避・低減・代償のいずれかを採用することになるが、それに要する費用は地熱発電事業の採算性に関わってくるので、これら相互のバランスを考慮して、事業化の決断が下されることになる（図5参照）。

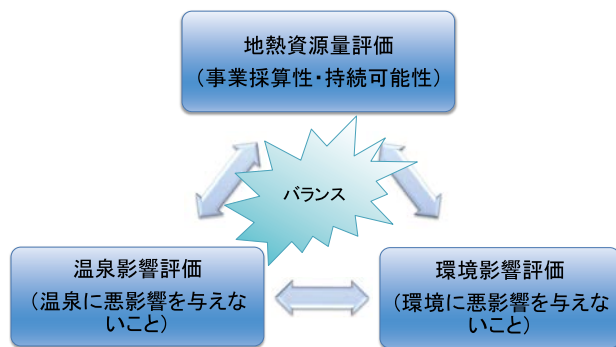


図5 地熱開発調査の要点

ここでは特に温泉への影響について考えておきたい。地熱発電所周辺の温泉に影響が予測される場合でも、代替井の確保や地熱井からの熱水補給といった代償措置で解決でき、当初の事業計画の変更を要しない場合、地熱発電所規模等の事業計画を縮小することで影響が無視できる程度に軽減でき、問題解決が図れる場合、影響を回避せざるを得ない（最終段階は地熱発電事業からの撤退）場合など、様々である。

これまで、温泉に影響があった場合の補償措置に関しては、温泉事業者からの要望もあって、多少の議論は行われているようである。しかし、温泉への影響が低減・代償措置といった内容では解決不可能な場合、事業からの撤退も含む踏み込んだ議論はできていないように思われる。公共事業は、一度調査に着手してしまえば、どのような事態が生じようとも、補償等の措置を施すだけで、必ず事業を完結してしまうという思いが温泉事業者サイドにはある。そういった不安を払拭するためにも、事業撤退のシナリオも提示する必要があるだろう。

#### 4.6. 当初事業計画は控えめに

大量に自噴する源泉であっても、その自噴量は経時的に大きく減少するのが常である。図6は自噴量が開発後10年足らずで半減してしまった例である。

自噴量の減衰に伴って、湧出温度も大きく低下して、開発時に60℃近くあったものが、30年後には25℃程度まで低下した。

地熱発電に用いる生産井からの熱水噴出量も同じ傾向があって、発電量を維持することは難しいようである（図7参照）。さらに温泉事業者は、地熱発電所の生産井や還元井を短い間隔で掘削し続けている実態から、地熱発電所の持続性に大きな疑問を持っている。前者は自噴温泉と同じ自然要因に起因するのに対し、後者の問題は人為的構造物である井戸の劣化に起因するもので、資源の持続性には直接関わらないことであるが、地熱発電所の当初の事業計画は控えめに設定して頂くことが、温泉事業者の安心を呼ぶものと思われる。

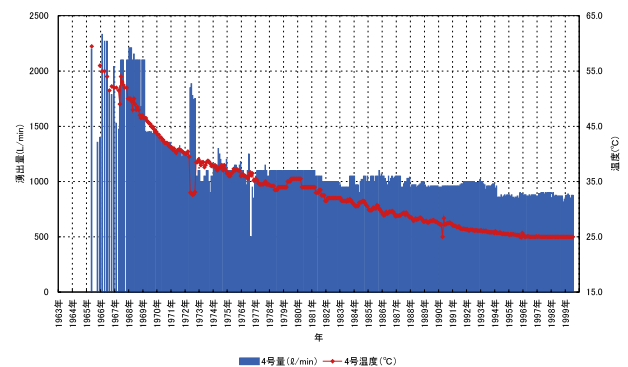


図6 自噴温泉の自噴量減衰事例

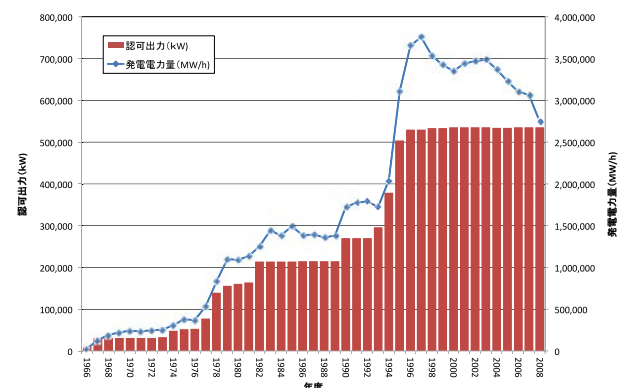


図7 地熱発電所の認可出力と発電電力量

#### 5. 参考文献

- 1) 環境省 HP：温泉利用状況経年変化表（H22）
- 2) 社団法人日本温泉協会，平成24年9月：自然保護・温泉資源保護・温泉文化保護の立場から「無秩序な地熱開発に反対」する要望書
- 3) 社団法人日本温泉協会・温泉研究会，2004：温泉必携（改訂第9版），東京

## 持続的地熱資源の採取 Sustainable Development of Geothermal Resources

CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループ招聘研究員：石戸 経士  
Invited Researcher, CO<sub>2</sub> Geological Storage Research Group: Tsuneo Ishido  
Phone: 029-861-2523, E-mail: ishido-t@aist.go.jp

### 1. はじめに

地熱貯留層の開発は、地熱流体の生産という形をとるが、本質的には、貯留層からの熱エネルギーの採取である。熱がいかにか抽出されるか、基本的な過程としてコールドスウィープと貯留層内沸騰の2つが考えられている。発電を安定的に持続するには、これらの過程がどのように進行し、どの程度の生産規模で、またどのように生産井・還元井を配置すれば貯留層の熱をうまく回収できるか予測することが必要になる。調査、開発の各段階で、対象とする貯留層について何らかの評価が行われるが、発電所の建設を決定する段階、またその後の発電所の貯留層管理の段階では、貯留層シミュレーションに基づいた評価が行われる。

貯留層シミュレーションによる予測の信頼性は、ベースとなる貯留層のモデルが実際のデータによってどの程度拘束されているか、あるいは検証されているかに依存する。データ取得には、発電所建設までに行われる地表調査や坑井調査と、発電開始後行われる各種モニタリングがあるが、産総研では、後者に焦点を当てた研究を地熱発電所での共同研究等を通して実施している。

以下、2. で1997-2003年に実施された研究開発テーマ「貯留層変動探査法」の概要を述べ、3. で最近数年間の貯留層モニタリングに関する主な研究成果、4. で他分野への適用事例を紹介する。

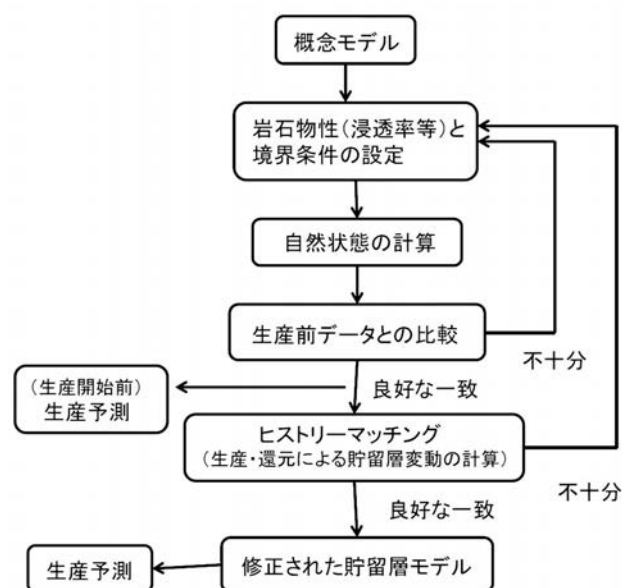


図1 貯留層評価の流れ

### 2. 貯留層変動探査法のコンセプト

現在行われている貯留層シミュレーションを中心とする貯留層評価の流れを図1に示す。予測シミュレーションは、追加井の必要本数や掘削配置を検討するのに有効であるが、ベースとなる貯留層モデルのユニークさには常に注意を払うことが必要である。十分な生産履歴のデータが集積するまでの段階において、自然状態シミュレーションによって得られた数学モデルは最良のモデルである。ただし、自然状態という定常に近い状態を再現していても、生産開始後の数年、数十年のスケールで発生する貯留層の変動を正しく予測できるとは限らない。貯留層がフラクチャー型であることによる挙動と、貯留層内の変化に対応した境界条件の変化が、特に問題となる。

生産開始前の段階に行う予測計算においては、底面境界等での流量が生産後も変化しないとする“控えめな”パラメータ設定を採用し、高浸透率ゾーンの体積も確実なところをとっておくべきである。控えめな予測では、現実の挙動が（平均的には）より好ましい方向にずれるであろうことを想定し、パラメータ設定を行う。図2のような予測が控えめな設定で行われたものであれば、MW1ないしMW2の設定で発電を開始して良いことになる。

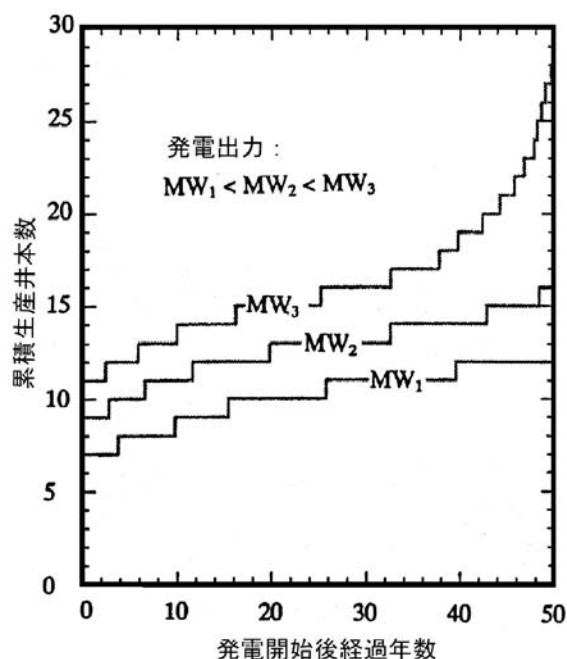


図2 生産予測シミュレーションによる生産井掘削数の予測

貯留層挙動の予測に付随する不確実性を考慮すると、一般的には、控え目な規模で発電をスタートし、発電開始後に貯留層モニタリングによってデータを取得して、そのデータを用いたヒストリーマッチングによって貯留層モデルの改良を行う、その上で“最適”な発電規模を検討するのが望ましい。貯留層モニタリングは、いわば人工的な刺激に対する貯留層応答を観測することであり、ヒストリーマッチングによって境界条件、断裂特性などのより確実な推定が可能となる。モニタリング項目のうち、生産・還元井の流量、生産流体のエンタルピーや化学成分は必須であるが、通常これらだけから貯留層モデル改訂のための十分な拘束条件を得るのは困難である。このため、観測井を掘削して圧力、温度などをモニターすることが望まれるが、これを広範囲にしかも3次元的に行うのは膨大な費用を要することから現実的ではない。

そこで「貯留層変動探査法開発」(国のプロジェクトとして1997-2003年に実施)では、地球物理学的なモニタリング手法とそのデータを用いたヒストリーマッチング技術について研究開発を行った。重力、自然電位、比抵抗、地震波、微小地震の地球物理学的モニタリング手法について、繰り返し測定法、連続測定法、ならびにデータ解析法について高精度化を目指した研究が行われた。地表からの観測は坑井を用いた観測に比べ間接的だが、フィードゾーン近傍の不均質性の影響を強く受ける坑井情報に比べ、貯留層内のマクロな変動を捉えることが可能である。個々の手法によるデータを独立して解析したのでは有効性は限られるが、ヒストリーマッチングの中で貯留層工学データと密接にリンクさせることで、貯留層モデルの改良に貢献できる<sup>1), 2)</sup>。

図3に示したポストプロセッサは、地球物理学的モニタリングデータをヒストリーマッチングに用いるために開発された。貯留層シミュレーションによって計算される各グリッドブロックの温度、圧力、気相飽和度、塩分濃度等の変化から(主として地表における)地球物理学的観測量の変化を求めるための計算ツールである<sup>3)</sup>。重力では基本式は単純

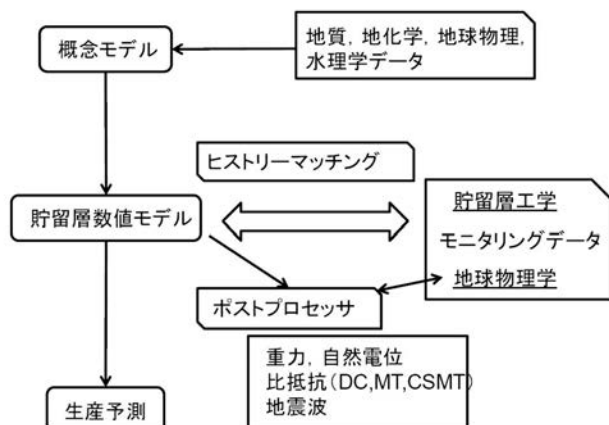


図3 ヒストリーマッチングにおける地球物理学的ポストプロセッサの適用

だが、他のポストプロセッサでは比抵抗や弾性波速度を求めるために種々の構成則、関係式が用いられる。

### 3. 「システム統合化」以降の成果

産総研では、複数の地球物理学的モニタリング手法による結果を一つの貯留層モデルに当てはめてその改良を目指す「システム統合化」のための共同研究を2002-2004年の3年間、デベロッパーとの間で実施した<sup>4)</sup>。また、その後も個別の手法について共同研究を継続している。大霧、柳津西山、澄川、上の岱地熱発電所等において、定期修繕時の生産・還元一時停止の機会などを捉えて重力、自然電位などの連続的な観測を行い、得られたデータのヒストリーマッチングを試みている。

微小重力測定については、基準点に可搬型絶対重力計を設置したハイブリッド測定により、従来は捉えることのできなかった微小な変化の検出に成功した。大霧発電所での2002-2007年の測定では、絶対重力観測による長期的な変動のトレンドを捉え、ヒストリーマッチングを行った(図4)。その結果、重力測定によるモニタリングが、流体リチャージにかかわる貯留層の境界条件を推定する上で有効な拘束条件になることを確認した<sup>5)</sup>。

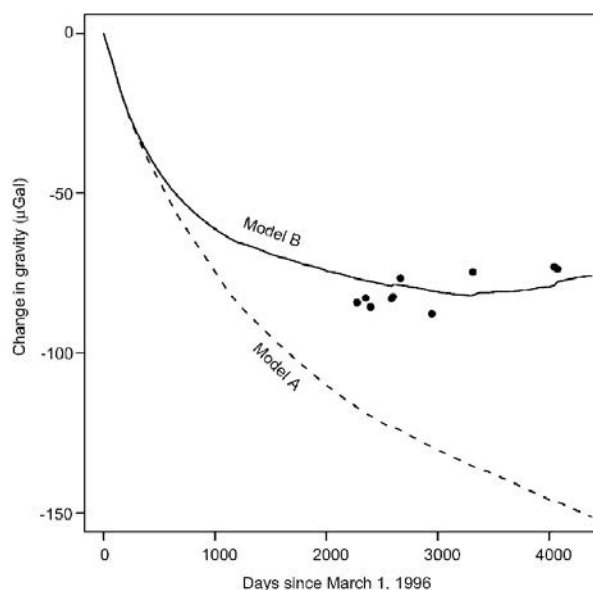


図4 大霧地域での絶対重力観測値のヒストリーマッチング

柳津西山地熱発電所のある奥会津地域では、システム統合化の共同研究の中で、発電所定期修繕に伴う生産井の一時停止時を中心に自然電位連続測定を行い、2002年と2004年にほぼ同じ短期的変化を検出した。最近行ったヒストリーマッチングにおいて、生産流体のエクセスエンタルピーに加えて自然電位の長期的変動ならびに定期修繕時の短期変動をマッチングすることで断裂型貯留層の特性をより絞り込める可能性を確認できた<sup>6)</sup>(図5)。

貯留層変動探査法開発では、「断裂水理探査法」のサブテーマのもと坑井テストや検層法についての



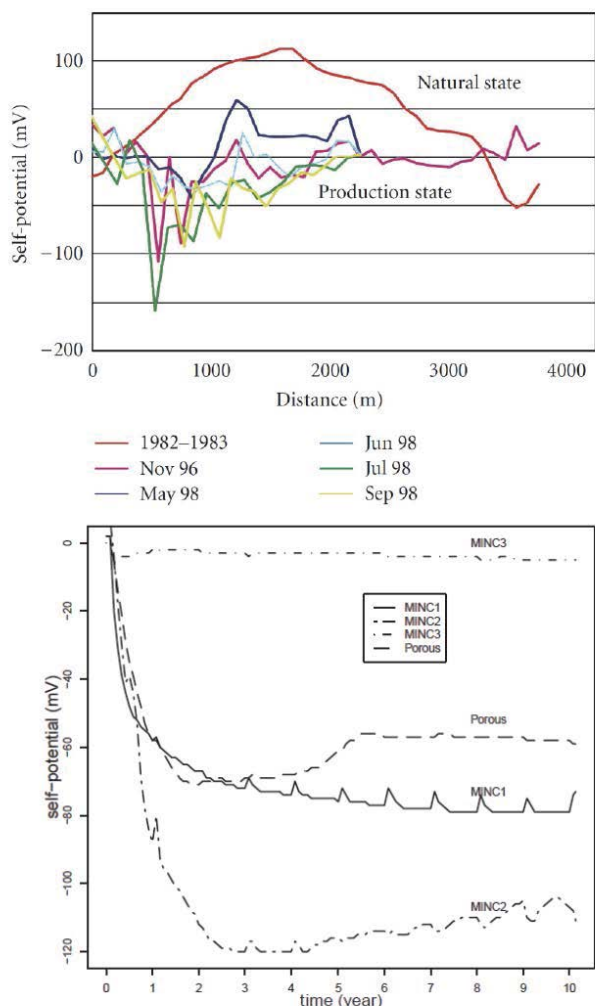


図5 (上) 奥会津地域の生産開始前および生産開始1～3年後の自然電位プロファイル<sup>7)</sup>, (下) 断層型貯留層のパラメータを変えて行った自然電位変化の予測. 実線の MINC1モデルが長期・短期の観測結果をもっとも良く説明する.

研究開発が行われた. 圧力干渉テストやトレーサートテストは地熱貯留層のキャラクタリゼーションにとって基本的な手法となっているが, 産総研では, 上の岱発電所での共同研究において, トレーサートテストの解析を行うとともに, 生産開始後の貯留層でも有効な圧力干渉テスト手法について, その解析法を含め研究を行った<sup>8)</sup> (図6).

また, 圧力遷移と自然電位変化の同時観測が断層系の特性把握に有効であるとの予測に基づいて, 釜石鉱山での基礎実験を2005～2009年にわたって行い, これを確認した<sup>9)</sup>.

#### 4. 他分野への展開

産総研では, CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループを中心として, 帯水層に注入された CO<sub>2</sub>挙動の解明と予測精度向上のための研究を進めている. 帯水層中の CO<sub>2</sub>貯留においては, 注入された CO<sub>2</sub>の挙動を把握する上で種々のモニタリングが不可欠であり, 繰り返し反射法などが基本的なモニタリング手法と考えられている. 地熱分野でのポストプロセッサ開発を引き継ぐ形で, 現在までに地震波ポストプロセッサ

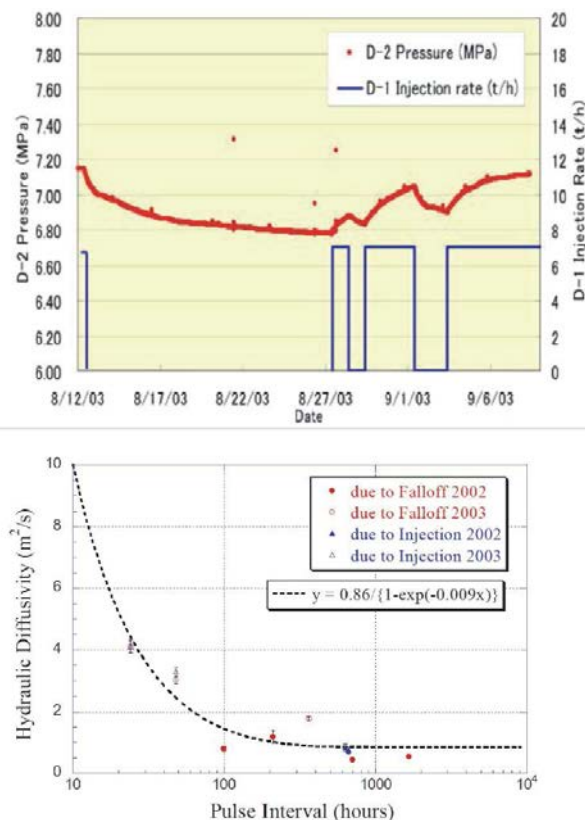


図6 (上) 上の岱での圧力干渉パルステストの実施と, (下) その解析結果. 水理拡散係数のパルス幅依存性から断層系の水理特性を推定.

(反射法, VSP, トモグラフィ) 等の開発を進めてきた<sup>10)</sup> (図7, 8). 自然電位ポストプロセッサについては, 最近, 界面動電効果に加えて, 坑井の鋼管ケーシング等の周囲に発生するジオバッテリーをメカニズムとした電位変化を計算できるよう機能拡張を行った<sup>11)</sup> (図9).

これまでに多くの火山で“w”字型の自然電位ブ

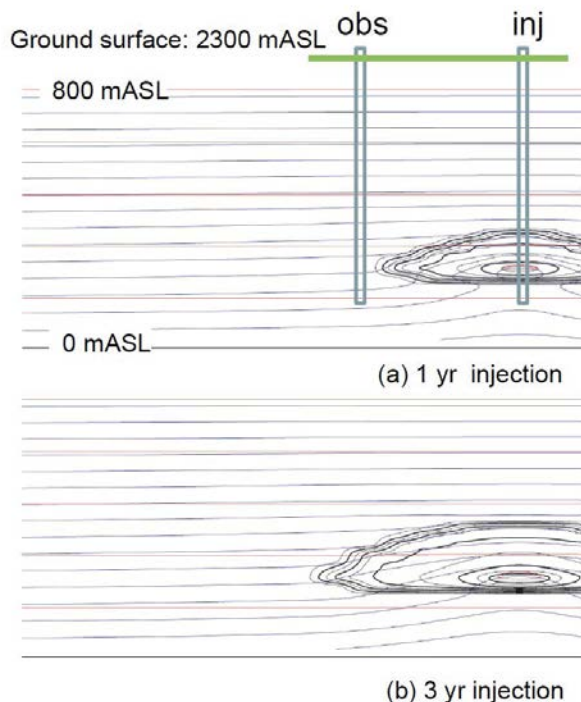


図7 ポストプロセッサ計算のための CO<sub>2</sub>圧入の数値シミュレーション例.

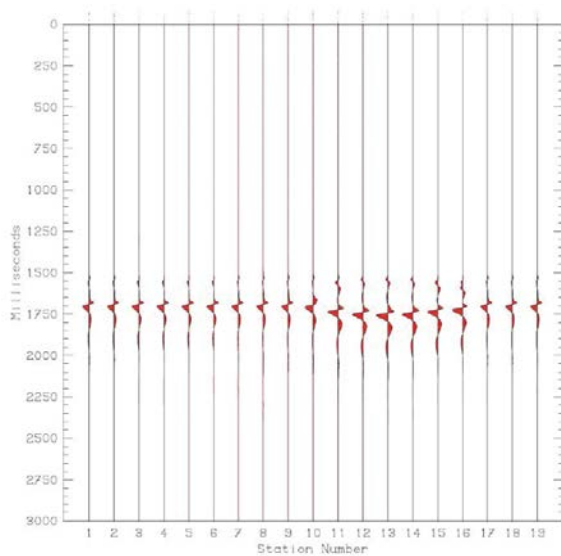


図8 反射法ポストプロセッサによる計算例。図7の3年後に対応した結果。

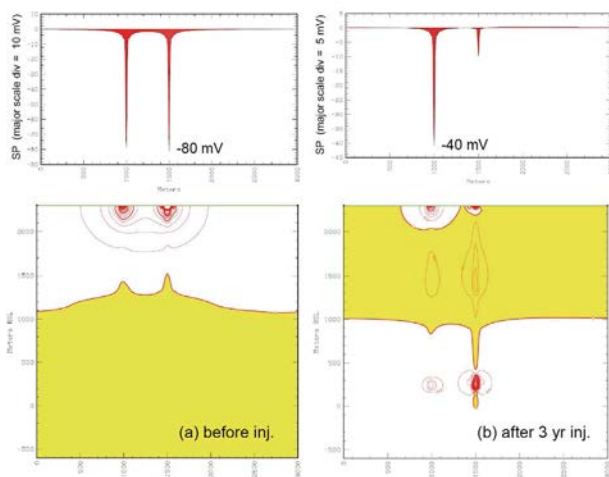


図9 ジオバッテリーを考慮した自然電位ポストプロセッサによる計算例。図7の3年後に対応した結果では、観測井周囲でもCO<sub>2</sub>プルーム到達に対応した変化が発生。

ロファイルが報告されている。自然電位法が地熱探査に用いられるきっかけの1つとなったハワイ、キラウエアで測定された噴火割れ目に沿う1 voltを超える正電位異常も、海岸付近を基準にすると一旦下がった電位が割れ目付近で元にもどった結果と解釈できる。W字型プロファイルの成因については、火山体内部の天水下降流の数値シミュレーションと自然電位ポストプロセッサによる計算から定量的なモデルを提案した<sup>12)</sup>。噴火活動に伴う電位変動については、地質情報研究部門マグマ活動RGとの連携により伊豆大島等での研究を進めている。

## 5. おわりに

これまでの地熱貯留層モニタリングの研究は、発電が継続中の地域をモデルフィールドとして進めてきた。貯留層の変動は、開発初期2-3年が最も大きいと考えられるので、今後、新規開発地域を対象として、これまでの研究成果を適用していくことが望

まれる。これまで必ずしも十分でなかったバックグラウンドの測定とそれをベースとした変動量の高精度な把握、また個々の貯留層特性に合わせたモニタリング手法の設計などが課題としてあげられる。

## 参考文献

- 1) NEDO：貯留層変動探査法開発総括報告書，(2003)
- 2) 産総研：貯留層変動探査法開発の解析・評価総括報告書，AIST03-C00018，(2003)
- 3) 當舎利行，石戸経士，中西繁隆，横井浩一：地熱地域における貯留層診断技術－熱水流動シミュレーションと組み合わせた解析方法，物理探査，54，433-454，(2001)
- 4) T. Ishido, K. Goko, M. Adachi, J. Ishizaki, T. Tosha, Y. Nishi, M. Sugihara, S. Takakura and T. Kikuchi: System integration of various geophysical measurements for reservoir monitoring, Proc.WGC 2005, Antalya, (2005)
- 5) M. Sugihara and T. Ishido: Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry, Geophysics, 73, WA37-WA47, (2008)
- 6) 西 祐司，石戸経士：奥会津地熱地域における自然電位モニタリング，日本地熱学会誌，34(2)，71-90，(2012)
- 7) T. Tosha, T. Ishido, N. Matsushima and Y. Nishi: Self-potential variation at the Yanaizu-Nishiyama geothermal field and its interpretation by the numerical simulation, Proc. WGC 2000, 1871-1876, (2000)
- 8) S. Nakao, T. Ishido and Y. Takahashi: Numerical simulation of tracer testing data at the Uenotai geothermal field, Japan, Proc. 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ., (2007)
- 9) Y. Nishi and T. Ishido: Characterization of fractured reservoirs using a combination of downhole pressure and self-potential transient data, Inter. J. Geophysics, doi: 10.1155/2012/148919, (2012)
- 10) T. Ishido, T. Tosha, C. Akasaka, Y. Nishi, M. Sugihara, Y. Kano and S. Nakanishi: Changes in geophysical observables caused by CO<sub>2</sub> injection into saline aquifers, Energy Procedia, 4, 3276-3283, (2011)
- 11) T. Ishido, J.W. Pritchett, T. Tosha, Y. Nishi and S. Nakanishi: Monitoring underground migration of sequestered CO<sub>2</sub> using self-potential methods, GHGT-11, Kyoto, (2012)
- 12) T. Ishido: Electrokinetic mechanism for the "W"-shaped self-potential on volcanoes, Geophys. Res. Lett., 31, L15616, doi:10.1029/2004GL020409, (2004)

## 工学的地熱開発の研究

### R&D Milestone of Engineered Geothermal System in Japan

地圏環境システム研究グループ：及川寧己

Geo-environmental System Research Group: Yasuki Oikawa

Phone: 029-861-3876, E-mail: y.oikawa@aist.go.jp

#### 1. はじめに

地熱は再生可能エネルギーの中では変動要素が少なく、ベースロードの担い手としての期待も大きい。昨今の社会状況を踏まえると、今後発電量の増加や関連産業の市場拡大が期待できる。その一方で、地熱は遍在性が強いことも知られており、良質なものの多くは風光明媚な山間部の地下に眠っている。地熱の利用規模拡大にともない、例えそのような良質なものでなくても工夫して使う、また端的に言えば何処でも使うようなやり方が今後の大規模利用に繋がっていくと考えられる。

工学的という言葉は幅広いが、狭義の工学的地熱開発は、従来型の手法そのままでは容易に使えないような条件の地熱資源でも、もう一手間かけてその熱を有効利用可能にすることを目指し、主に地下部分に手を加えた地熱の開発利用を指す。ここでは工学的地熱開発の一例として、以前国内で開発研究が進められていた高温岩体開発プロジェクトの取りまとめの概要を紹介する。また、海外の状況や国内における適用可能性について述べる。

#### 2. 工学的地熱開発と高温岩体

そもそも従来型の地熱開発も、その始めは井戸を掘り蒸気を導くという“工学的”な地熱の利用に他ならない。あえて工学的地熱開発と呼ぶのは、従来型の地熱開発と差別化するためであり、ここでは広義のそれを従来型の地熱開発手法では開発ベースに乗らないもので、それを人為的に様々な工夫を施して利用するための概念や技術など全般を指すこととする。一方で狭義の工学的地熱開発は、地熱エネルギー開発の構成要素のうちで、主に地下部分に手を加えて改良し利用することを指す。

広義の工学的地熱開発の例としては、マグマ熱利用システムが挙げられる。未だ机上での検討に過ぎないが、超高熱のマグマ近傍をターゲットにしているため、地下部分に手を加えるというよりは、なるべく単純な、高熱に耐え得る抽熱装置を岩盤に設置するという様な概念が提唱されている。狭義の工学的地熱開発の例として、ここでは高温岩体熱利用システムを取り上げる。従来型の地熱開発の対象である地下の高温の蒸気・熱水だまり（地熱貯留層）の周辺域には、地熱貯留層程豊富ではないにせよ、多少の蒸気・熱水や十分高温な岩盤はあると考えられる。この岩盤の主に熱を取り出して有効利用できないかというのが、そもそもの高温岩体熱利用システ

ムである。具体的には地下岩盤の透水性改善や、地下岩盤へ蒸気・熱水の素になる水の供給を行い、地表との間に循環させるシステムを構築する。またこのシステムは地下岩盤への水の供給を含んでいることから、既開発の地熱貯留層に対する流体供給や圧力保持への応用の期待もある。前者は地熱開発で利用可能な資源の飛躍的な拡大、後者は既開発エリアの効率的な利用に資するものと考えられる。

#### 3. 高温岩体熱利用システム構築技術

初期の高温岩体資源の定義とその発電への利用の概念は米国ロスアラモス国立研究所によって1970年代の初めに提唱された。米国ではその後、フィールド実験が実施され、さらに実用化に向けての検討が行われた。我が国においても当時、地熱は新エネルギーとして注目されており、その中で高温岩体の開発研究もスタートした。産総研は、米国のフィールド実験に参加し、様々な知見やノウハウを得つつ国内でもフィールド実験を開始した。当時は国内の高温岩体研究も盛んで、産総研とNEDOの山形県肘折（図1）を始め3つの現場試験フィールドが設けられていた。



図1 肘折実験場における実験の様子

国内での高温岩体資源の利用を実用化すべく、小規模なフィールド実験を通じて、様々な技術の研究が十数年に渡って進められた。また国際的な研究交流が活発に行われ、米国・日本・欧州・オーストラリアとそれぞれの地域で、それぞれの研究ポテンシャルを相互に有効活用する形で開発が進められた。

ここでは次に、1985年から2002年まで産総研とNEDOにより山形県で実施された、高温岩体発電システム構築のための要素技術開発が終了した直後、国内の高温



岩体開発研究の区切りの時期に、取りまとめられた報告書「次世代地熱開発技術の現状と将来～肘折高温岩体プロジェクトの検証～」の内容を基に、国内における高温岩体開発技術の概要について紹介する。

#### 4. 「次世代地熱開発技術の現状と将来」

ロスアラモス国立研究所時代も含めれば20年以上に及ぶ高温岩体開発研究の中では、幾つかの鍵になる革新がなされた。その中で最も重要なものは、「高温岩体」資源の概念拡張であろう。当初の資源概念は、「高温で低透水性」であり、米国で実験的に構築された地下岩盤循環抽熱システムも密閉性の高いものであった。米国での研究に参加した日本と欧州の研究者達は、本国での研究開発を加速すべくその成果を活用したが結果的に、日本においては「高温で中透水性」、欧州においては「低温で高透水性」という、米国とは異なる地質条件に対してその適用を図ったため、当初よりも幅広い地下条件に対して適用可能であることが判明した。そしてその中で生まれた圧入側だけでなく生産側にもポンプを設置するシステム構成は、生産流量の安定化と貯留層内部の流体量バランスの制御という長所を有し、この「新しい高温岩体」資源の開発における鍵であると考えられる（図2）。

##### 高温岩体エネルギーの特長

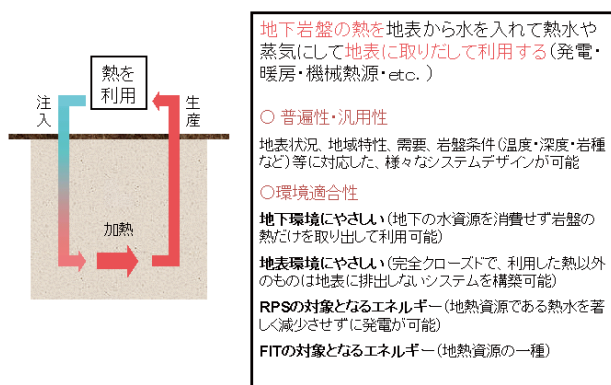


図2 高温岩体概念の拡張

国内プロジェクトにおいてはその最終段階で、270℃という高温岩体のターゲットとしては世界最高レベルの高温岩盤に、複数の生産井を有する循環抽熱システムを、深度を変えて上下2段に構築し、合計550日間にも及ぶ長期間の循環抽熱試験に成功するという成果をあげている。小規模ではあるが当時は世界唯一の多段貯留層・多坑井循環システムであり、システムの地下部分の構築においては世界でもトップレベルの技術力を有している。一方で課題としては、地下システム構築に特化して開発を進めてきたために、地表側のシステムも含めた全体システムが明確になっていないことが挙げられた。今後の進め方としては従来型地熱開発への成果のフィードバックや国際的な研究交流を通じて技術ポテン

シャルの維持を図りながら、環境負荷が低く地表設備側の要求に応じた柔軟な設計が可能という長所を生かした全体設計を検討し、他の自然エネルギーと組み合わせた総合自然エネルギー利用体系での活用を目指すことが提言されている。

個々の技術に関しては、図3に示すように大きく5つの分野に分けて取りまとめている。以下、報告書の順番に沿って、各々の技術分野の要点や課題について紹介する。

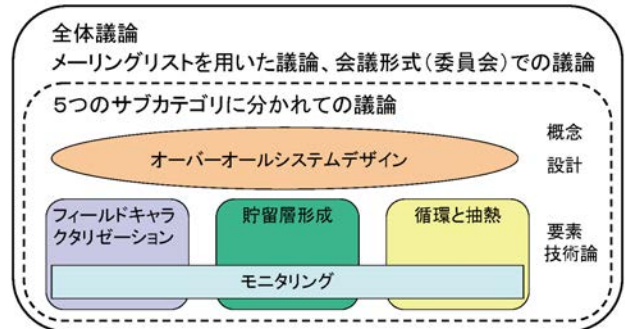


図3 「次世代地熱開発技術の現状と将来」の取りまとめ体制

##### ・オーバーオールシステムデザイン（全体設計）

それまでの高温岩体開発研究は地下の循環抽熱システム（人工貯留層）の構築に主眼が置かれていたため、開発の際の地表設備と人工貯留層の性能との関係、その特徴でもある人工的に貯留層性能を改変させていくプロセスの組み込み、環境面経済面とのマッチング等については、あまり重要視されてこなかった。今後の実用化を考えればこの部分を良く検討することが肝要と考えられる。その際には天然条件への依存度が相対的に低いという長所を生かして、適用範囲の利用拡大を目指すのが良いと考えられる（図4）。

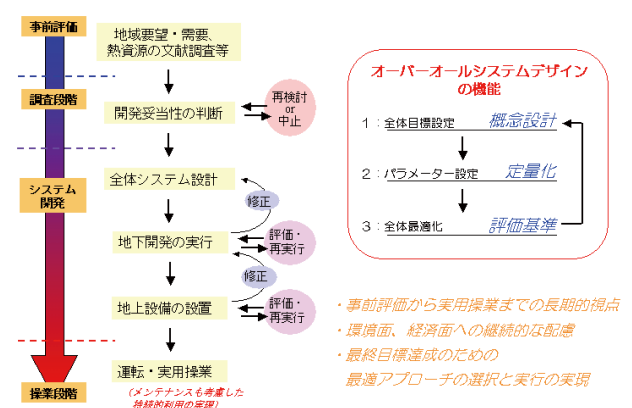


図4 オーバーオールシステムデザインの流れと機能

##### ・フィールドキャラクタリゼーション（適地評価）

適用範囲が広く、人工的な条件改善も可能と考えられる高温岩体ではあるが、やはり地下条件によるコスト的な有利不利はある。重要項目としては地下の温度（熱構造）、地下流路（き裂構造）、開発環境（立地）が挙げられている。また国内プロジェクトの反省点と

して、今の知見で考えると地下抽熱システム構築が必ずしも容易ではないフィールドを選択している点が指摘されているが、それはまた逆に考えれば、そう判断できるような知見が蓄積されてきたとも言える。

#### ・貯留層形成（地下抽熱システム構築）

地下抽熱システムの人工的な構築は高温岩体開発の鍵であり、当初はその様なことが首尾良く実現可能かどうかさえ明らかではなかった。米国で成功した手法を基に国内への適用を図り、国内では250℃を超える高温の岩盤への循環系の構築に成功したが、天然フラクチャ系を流れる循環流路のために循環系外への流出が多いなど、国内の地質状況に応じた問題も生じた。流出の問題については生産側にポンプを入れて注水量と生産量のバランスを取る方法が有効と考えられるが、国内では残念ながら実証されていない。世界の各試験フィールドを俯瞰して、貯留層のタイプとして大きく、閉鎖型、中間型、開放型の三つに分けて、それぞれを念頭に、貯留層を造成しながら柔軟に仕様変更を行う開発手法を提言している。また、後述するAEマッピング技術は、高温岩体開発研究の中で確立したものであるが、貯留層形成においては、井戸の配置やどこまで貯留層を広げるかなど直接的に循環システム構築に係る鍵の技術である（図5）。



図5 貯留層性状の分類とその指標

#### ・循環と抽熱

構築した地下抽熱システムの性能を評価・検証するためには、実際にある程度の期間に渡って連続的に水を地表と地下システムの間で循環させて熱を取り出す試験が必要である。国内研究プロジェクトにおいては、その最終段階で合計550日間にも及ぶ長期間の循環抽熱試験に成功するとともに、試験中の様々なデータを基にシミュレーションモデルの構築を行い、試験中の抽熱状況の再現やさらに試験を継続した場合の挙動予測についての検討を行った。循環抽熱試験の実施及びモデリングに関しては十分な実績を有している（図6）。

#### ・モニタリング

モニタリングは、これまで述べてきたフィールドキャラクター化・貯留層形成・循環と抽熱のいずれにも関係する、共通のツールとなる技術

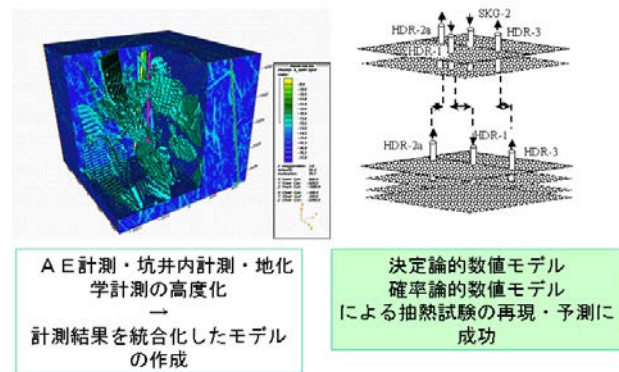
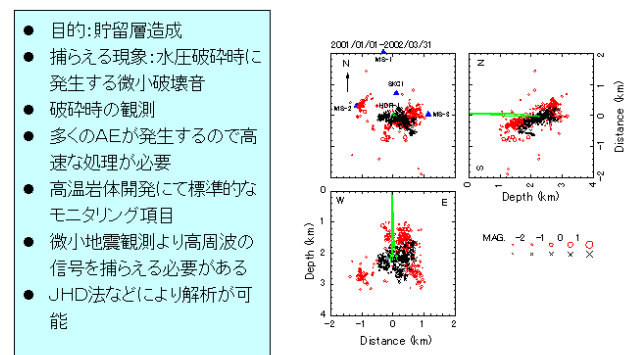


図6 循環と抽熱における解析・計測技術の高度化

で、地下抽熱システムの現況を把握するために欠かせないものである。AEマッピングと呼ばれる、人工貯留層近辺で発生する弾性波を計測して、人工貯留層の広がりや三次元的なロケーションを把握する方法は人工貯留層造成時には欠かせないものであるし、造成後の循環抽熱時にも圧入した水がどこを移動しているのかを把握するのに役立つ（図7）。トレーサ技術と呼ばれる、化学成分を用いて人工貯留層内部の流路状況を把握する技術は、循環抽熱を妨げずに実施可能であり、定期的に継続して流路状況の変化を捉えることが可能である。PTS検層と呼ばれる、生産井・圧入井の圧力・温度・流量を計測する手法は、坑内状況を直接計測することにより、特に深度別の貯留層状況の把握が可能であり、システムの維持管理に欠かせない。国内研究プロジェクトにおいては上記のような高温岩体開発において必須ともいえる技術が確立され、国内においてのみならず海外においても研究協力等の形でその技術力が発揮されている。



循環試験で観測されたAEの震源分布。

図7 AEマッピングの例

### 5. 海外の状況と国内における適用

海外では、環境問題への関心の高まりもあり、国レベルの支援も利用しながら、「新しい高温岩体」の開発が継続されている。かつて、最も商用化が近いと期待されていた、オーストラリアのCooper Basin プロジェクトは、システム構築上のトラブルに見舞われたため、いまだ発電には至っていないが、開発は継続されている。ヨーロッパにおいては



大規模実験が行われた Soutz プロジェクトは商用化に至っていないが、再生可能エネルギーの FIT 政策で有名になったドイツにおいては、近年小規模ながら地下深部の帯水層を用いた循環熱利用・発電システム (Landau プロジェクト) が稼働をはじめている。米国においては、かつて民間企業の関心が低く一旦撤退したものの、近年再び国の研究開発として従来型地熱の開発エリア周辺部等での水圧入による熱エネルギー回収の試みが行われるようになってきた (Desert Peak プロジェクト等)。

国内ではつい最近まで地熱開発自体が低調ということもあり、国内プロジェクト終了後の高温岩体開発は停滞している。今年から実施されている日本版 FIT により、国内でも久しぶりに従来型地熱開発の機運が高まってきた。ベースロードとしての役割を担う地熱エネルギーのさらなる利用拡大を図る良い機会である。これは同様に高温岩体開発の実用化の視点からも好機であろう。ここで課題として特に検討する価値があるのは、FIT との親和性の良い小規模なシステムの実現であろう。小規模なシステムは自ずとコスト高になりやすいので、人為的にあれこれ工夫する高温岩体開発技術の適用は実は不利である。立地やシステム規模の柔軟性等の長所をバランスさせる様に検討することになるが、正にこれまでの研究開発では不足していた部分でもある。

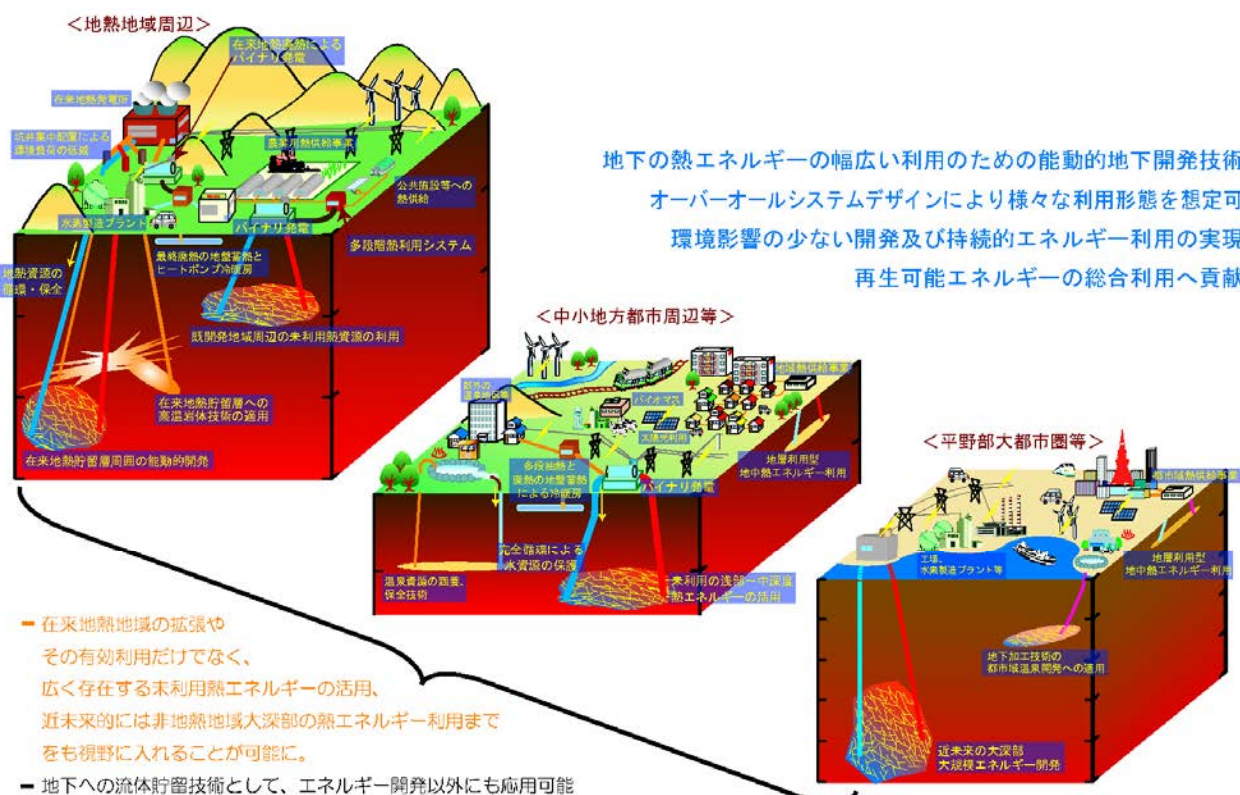
## 6. おわりに

地熱エネルギーの利用を本格的に進めていくのであれば、量的な規模拡大は避けて通れない。そして

工学的地熱開発は、端的に言えばどこでも地熱が利用可能となることを目指すものである。図 8 は「次世代地熱開発技術の現状と将来」に示された、工学的地熱開発の展開概念図であるが、他の自然エネルギーと組み合わせて、小規模グリッドにおけるエネルギー完全自給を目指すなど、長期的な観点からこの技術を継続・発展させていくことは資源小国である我が国において必要なことではないだろうか。

## 参考文献

- 1) 高温岩体技術検証調査委員会：次世代地熱開発技術の現状と将来, (2004)
- 2) 欧米の地熱発電の開発状況, NEDO 海外レポート, 1044, (2009)
- 3) 浅沼宏：海外の高温岩体 (EGS) 開発状況, 地熱技術, 33(3, 4), (2008)
- 4) G. Albert, C. Nicolas, G. Xavier, M. Bernd, S. Bernard and S. Julia: Status of Soutz geothermal project during exploitation between 2010 and 2012, Proceedings of 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, (2012)
- 5) E. Chabora, E. Zemach, P. Spielman, P. Drakos, S. Hickman, S. Lutz, K. Boyle, A. Falconer, A. Robertson-Tait, N. C. Davatzes, P. Rose, E. Majer, S. Jarpe: Hydraulic stimulation of well 27-15, Desert Peak geothermal field, Nevada, USA, Proceedings of 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, (2012)





## 地下水研究グループの紹介 Groundwater Research Group

地下水研究グループ長：丸井敦尚

Leader, Groundwater Research Group: Atsunao Marui

Phone: 029-861-2382, E-mail: marui.01@aist.go.jp

### 1. グループの研究目的

良好な環境の維持に必要な水文学・地下水学に関するノウハウの蓄積と地下の開発・利用に係る技術の向上や創造を目標としています。現在は震災復興に重きを置き、被災地の水文環境の把握や再生可能エネルギーである地中熱の有効利用に関する研究を推し進めています。また、水文環境図の作成を基軸に地下水の資源・環境に関する情報を体系的に取りまとめ、部門の重点課題でもある放射性廃棄物地層処分、CO<sub>2</sub>地中貯留プロジェクトに関しても積極的に協力し研究を推進しています。さらに、知的基盤整備の加速、研究シーズの創出に関わる研究など基礎研究にも力点を置いています。研究対象地域は日本国内のみならず、CCOP 活動などを通して海外にも進出しています。

### 2. 各研究項目の内容

#### 2.1. 震災復興に係る研究

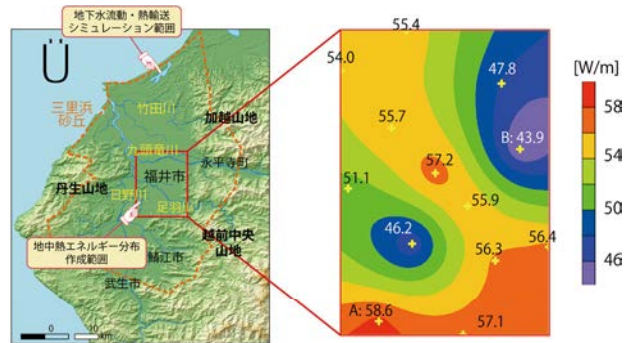
震災復興に供するため、地下水リスク評価研究として被災地の地下水環境や地下水流動予測、再興のための基盤情報提供をしています。これまでに被災地各県で200検体以上に及ぶ水試料の採取や海岸平野での地下水流動解析を行ってきました。現在は陸前高田市や気仙沼市、南相馬市などでボーリング調査を実施し、帯水層ごとの地下水の性状や流動速度をはかる調査を実施しています。



被災地におけるボーリング調査の様子

さらに、福島県に創設される新センターでは再生可能エネルギー研究として地中熱利用を推進しています。ここでは特に地中熱エネルギーの共同利用に関する効率化をテーマにこれまでにないエネルギー利用に関する取り組みにチャレンジしようとしています。

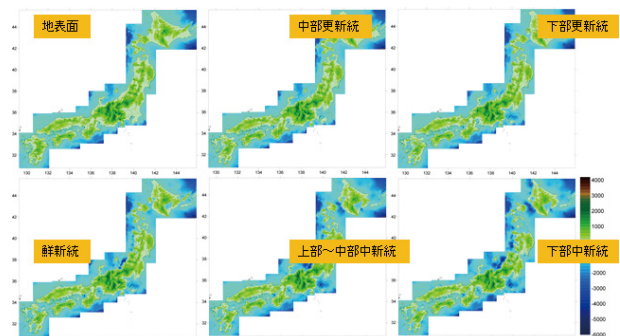
ます。



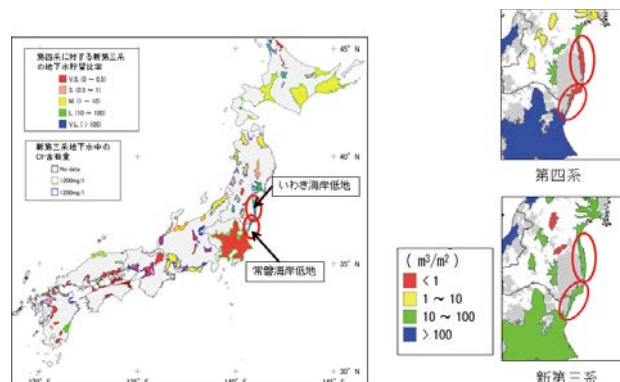
福井平野における地中熱ポテンシャル分布の研究事例、このように利用できるエネルギーを地下水流動を考慮して評価している

#### 2.2. 知的基盤整備に係る研究

水文環境図の作成に関しては世界的な基準をレビューし、我が国に見合ったものを作成して発信しています。この基準にあわせて新しい水文環境図を発刊してきました。また、全国堆積層データベースの構築により、我が国の地下水資源量が13兆トンで



全国堆積層データベースによる堆積層区分



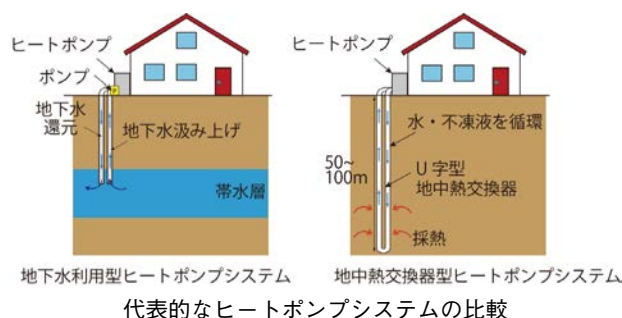
堆積層ごとの地下水貯留量、これら DB から列島の地下水総量が13兆トンであると推定された

あることもわかりました。各種データベースの構築から我が国の水環境を解き明かす挑戦が続いています。

### 2.3. 地中熱の有効利用に関する研究

地球の熱を利用する方法はその深度や温度によって異なります。およそ100m 深までの地下水や地層のもつ熱エネルギーを利用する方法を地中熱と呼んでいます。気温は夏と冬で大きく変化しますが、地下での温度変化はほとんど見られないことから、夏は冷房に、冬は暖房に利用されています。

産総研では、直接地下水をくみ上げて採熱する方法や U 字管を利用して間接的に採熱・放熱する方法などを比較検討しながら、最適な地中熱利用システムの構築を模索しています。



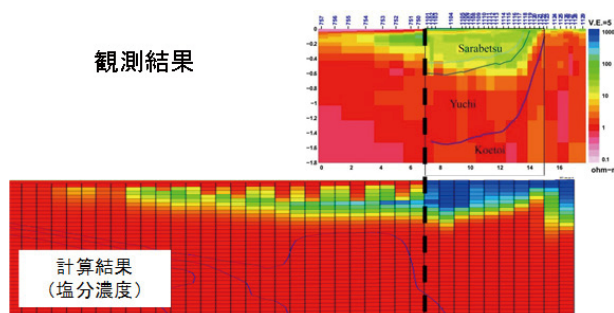
### 2.4. 深部地下環境の利活用に関する研究

たとえ原子力発電をやめてもこれまでに利用してきた原子力発電に伴う核廃棄物は処理しなくてはなりません。現在のところ、最も有効な手段として地層処分が考えられています。これは地下深部の安定した環境に廃棄物を封じ込め、人間界と遮断するものです。我が国の原発基地がすべて沿岸部に立地することから、産総研では沿岸域の深部地下に焦点を絞り、地下水環境の安定性についての研究を実施してきました。まだ中間的な成果ですが、日本列島の堆積平野の沖には氷期に活発に流動していた地下水の痕跡があり、海底下に淡水地下水の領域を形成している可能性を発見しました。この領域は超長期的に安定しているものであり、上下の地下水を遮断しています。この発見は、今後の地層処分研究に大きく貢献すると確信しています。

### 3. グループの研究体制

丸井 敦尚（グループ長）  
内田 洋平（主任研究員）  
町田 功（研究員）  
宮越 昭暢（研究員）  
井川 怜欧（研究員）

### 観測結果



幌延沿岸域における海底地下水の観測および解析の結果の断面図、点線は海岸線を表し、赤の塩水領域に黄色～青色の淡水地下水が張り出している。この研究により堆積平野の沿岸海底下には淡水領域が存在することが明らかにされた。

吉岡 真弓（研究員）  
越谷 賢（第一号職員）  
シュレスト G（第一号職員）  
小野 昌彦（第一号職員）  
藤村 善安（第一号職員：イノベーション）  
楠瀬勤一郎（第五号職員：招聘研究員）  
古宇田亮一（第五号職員：招聘研究員）  
樽沢 春菜（テクニカルスタッフ）  
中山 京子（テクニカルスタッフ）  
宮崎 桂子（テクニカルスタッフ）  
水野 麻子（テクニカルスタッフ）  
田口 雄作（産学官制度来所者；常駐）  
小原 直樹（産学官制度来所者；常駐）  
森山 哲朗（産学官制度来所者；常駐）  
その他産学官制度来所者（客員研究員）多数

### 4. 最近の主な研究成果

#### 論文

内田洋平・與田佑季・藤井光・宮本重信・吉岡真弓：地中熱利用適地の選定方法 その1 地下水流動・熱輸送解析と GIS を用いた地中熱利用適地マップの作成：日本地熱学会誌，32巻4号 pp. 229-239：2010.10.

吉岡真弓・内田洋平・與田佑季・藤井光・宮本重信：地中熱利用適地の選定方法 その2 地下水流動・熱輸送解析を用いた熱交換量マップの作成：日本地熱学会誌，32巻4号 pp.241-251：2010.10.

この2本は2012年度の日本地熱学会賞を受賞しました。また、吉岡は同時に研究奨励賞も受賞しています。グループとしてはこのほかに23の誌上発表（著書含む）を行いました。



## 地熱資源研究グループの紹介

### Introduction of the Geothermal Resources Research Group

地熱資源研究グループ長：阪口圭一

Leader, Geothermal Resources Research Group: Keiichi Sakaguchi

Phone: 029-861-3897, E-mail: k-sakaguchi@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

国内外の地熱資源の開発を目指して、地熱資源の分布、成因、探査、評価、モデル化、データベース化、利用技術、開発技術等に関わる研究業務を行う。また、これらの研究をベースに、地下空間利用や地圏環境問題等に関わる応用的な研究業務を行う。

#### 2. グループの研究資源

##### 1) グループ員

常勤研究者：阪口圭一、佐々木宗建、水垣桂子、安川香澄、柳澤教雄

客員研究員：村岡洋文

テクニカルスタッフ：古澤みどり、松林 修

##### 2) 主要予算

- ・環境省受託研究費「地球温暖化対策技術開発・実証研究事業（温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究）」
- ・地熱技術開発株式会社受託研究費「温泉発電システムの開発と実証」（環境省委託費「地球温暖化対策技術開発・実証研究事業（温泉発電システムの開発と実証）」の一部再受託）
- ・運営費交付金「地熱資源のポテンシャル評価の研究」、「地熱資源の研究」

#### 3. 平成24年度の研究計画

第3期のグループの主要研究課題を、(1)「地熱資源開発ポテンシャル拡大の研究」及び(2)「地熱資源の研究」として、研究を実施している。(1)では、豊富な資源量が存在するにもかかわらず開発が伸び悩んでいる地熱資源の開発ポテンシャル拡大を目に見える形で示すことを目標とし、(1a)「地熱・温泉共生の研究」及び(1b)「温泉発電システムの研究」を実施する。(1a)では、環境省受託研究「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」を中心に、温泉を含めた地熱資源の実態解明や、地熱発電資源と温泉資源の共生の実現などの円滑な開発促進のための技術開発を行うことによって、地熱資源開発ポテンシャルの拡大を図る。(1b)では、第2期研究課題「温泉発電の研究」の成果を発展させ、これまで発電資源対象でなかった温泉資源を地熱発電資源としても利用する技術を開発することによって開発ポテンシャルの拡大を図る。24年度は、(1a)、(1b)ともに3年計画の最終年度としてそれぞれの成果取りまとめを行う。

(2)では、第2期に引き続き、中長期的視点か

らの地熱資源の利用拡大を始め、地熱資源情報を他分野のニーズに広く生かすための基盤的研究を目的とし、地熱資源データベースの研究を中心として、地熱資源情報を様々な分野に提供することを目指す。具体的には、(2a)「地熱資源データベースの応用研究」及び(2b)「地熱シーズ・基盤研究」を実施する。

#### 4. 平成23年度の研究成果

##### 1) 地熱・温泉共生の研究

当グループを中心にして部門内及び他部門の研究者の参加を得て、環境省受託研究「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」（H22-24年度）を実施している。本研究は産総研が研究代表者となり、弘前大学、東電設計（株）、日鉄鉱コンサルタント（株）、八丈町との共同研究として実施している。23年度から24年度前半にかけては、八丈島地域での精密重力モニタリング等の継続と熱水流動シミュレーションの実施、南伊豆地域での地熱モデリング調査・解析、観測井・涵養井掘削と揚湯・涵養試験（図1）などを実施している。



図1 南伊豆実験サイトの揚湯・涵養試験設備

##### 2) 温泉発電システムの研究

当部門と地熱技術開発（株）（研究代表者）、弘前大学が共同して、新潟県十日町市松之山温泉地域において環境省受託研究「温泉発電技術の実証研究」（H22-24年度）を実施している。産総研は、A) 実証試験に利用する当該源泉および周辺地域のモニタリング、B) 実証地域の温泉メカニズムの解析および適正汲み上げ量の評価を実施した。



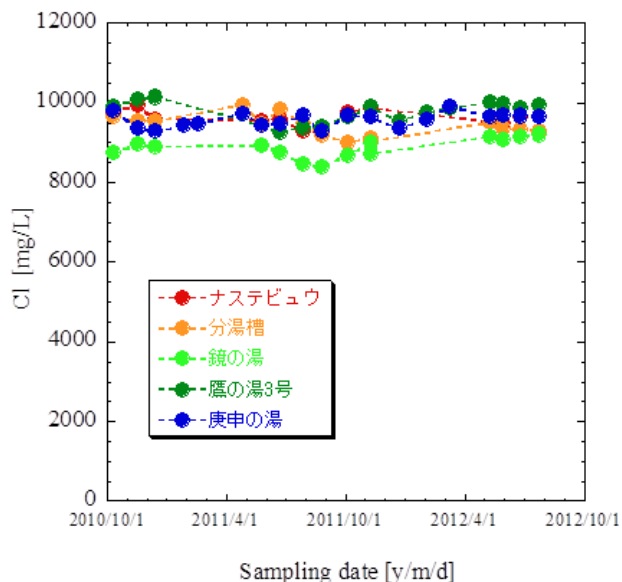


図2 松之山温泉の化学成分モニタリング

A) のモニタリングについては、鷹ノ湯3号井および周辺1 km の源泉について、月1回の泉温・流量・pH・電気伝導度測定、および主要元素分析を行い、23年度も安定した推移を示すことを確認した(図2)。B) のモニタリングについては、初期生産量(624 L/min)の60%程度の約400 L/minの生産は数十年可能と推定され、この流量での生産試験が可能であることを示した。

### 3) 地熱資源データベースの応用研究

「全国地熱ポテンシャルマップ」(2009)にまとめられた評価法改良の検討を実施した。その結果、「全国地熱ポテンシャルマップ」では、重力基盤深度データが貯留層体積計算と深部での地温分布の両方に影響するため、重力基盤深度の大きい地域での資源量が過大に評価される可能性があることが見いだされた。また、新エネルギー・産業技術総合開発機構が実施した地熱開発促進調査の地化学データをデジタル化したデータベースを作成し、地化学的特徴の整理を開始した。今後は地化学的特徴の整理を継続すると共に、共通利用できるデータベースとしての公開を目指す。さらに、「地熱資源研究・評価への電子地球科学情報利用の事例集」の出版準備を行っている(図3)。

### 4) 地熱シーズ・基盤研究

ESR法を用いた熱履歴解析の研究では、これまでの総括および今後の展望をとりまとめた。

カルデラ地熱系の研究においては、熱源の一形態として、これまで知られていなかった小型カルデラの記載を取りまとめた。オーストラリア高温岩体開

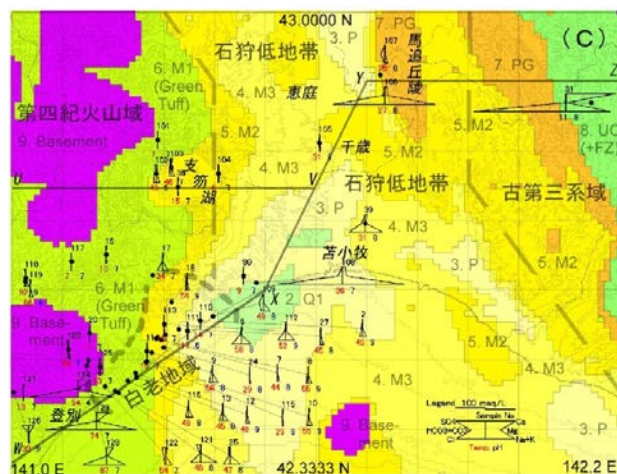


図3 石狩低地地域での各種情報統合表示の例

発サイトのクーパーベースンの循環試験中の熱水化学分析、トレーサー試験、水岩石反応試験の結果をとりまとめた。温泉水と地熱水の溶存微量成分の資源性を検討した。

本年度は、東日本大震災後のエネルギー問題への関心の高まりを受けて、地熱エネルギーに関する取材、技術相談、講演・寄稿依頼が急増し、当グループで対応した件数は合わせて100件を超えた。また、2011年11月に「第9回アジア地熱シンポジウム」を主催し、地熱開発の進展が著しいアジア諸国の研究者との情報交換を行った。

## 5. 平成23年度後期～24年度前期の主な研究成果公表

地球環境局地球温暖化対策課技術ライン(2013)平成23年度地球温暖化対策等事業(温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究)報告書・産業技術総合研究所, 136p.

Yanagisawa, N., Muraoka, H., Sasaki, M., Sugita, H., Ioka, S., Sato, M. and Osato, K. (2011) Status of development of generation system using hot spring fluid, Proceedings of 9th Asian Geothermal Symposium.

Yanagisawa, N., Ngothai, Y., Rose, P. and Wyborn, D. (2011) Geochemical behavior of EGS reservoir during first circulation test at Habanero site, Cooper Basin, Australia. J. Geotherm. Res. Soc. Japan, 33, 125-130.

Yasukawa, K. et al. (2011) Development of an advanced geothermal reservoir management system for the harmonious utilization with hot spring resources, Proc. The 9th Asian Geothermal Symposium.

## 鉱物資源研究グループの紹介

### Introduction of the Mineral Resources Research Group

鉱物資源研究グループ長：高木哲一

Leader, Mineral Resources Research Group: Tetsuichi Takagi

Phone: 029-861-3926, E-mail: takagi-t@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的と構成

鉱物資源研究グループは、陸域の鉱物資源を対象とした資源探査・評価、選鉱試験など資源上流部に関わる研究を実施している。現在6名の職員と10名の契約職員・客員研究員が所属している。ここでは当グループの研究内容を、レアメタル資源、非金属資源、鉱物資源情報、分析・選鉱技術開発の4つに分けて紹介する。

##### 研究メンバー構成

高木哲一（グループ長）

村上浩康

大野哲二

実松健造

星野美保子

森本慎一郎（TIA 兼任）

昆 慶明（産総研特別研究員，PD）

堀内 悠（産総研特別研究員，PD）

Jacqueline Satur（産総研特別研究員，PD）

徐 維那（産総研特別研究員，PD）

申 基澈（産総研特別研究員，PD）\*

恒松麻衣子（テクニカルスタッフ）

猪川洋子（テクニカルスタッフ）

奥村公男（客員研究員）

平野英雄（客員研究員）

神谷雅晴（客員研究員）

寺岡易司（客員研究員）

須藤定久（客員研究員）

\*11月末で総合地球環境学研究所に転出

#### 2. レアメタル資源の研究

レアメタルとは、鉄やアルミニウムなどの汎用金属と金・銀などを除いた希少な金属資源で、現在31鉱種が経済産業省によって指定されている。レアメタルは、中国など新興国の急成長、2004年以降金属資源の価格の急激な上昇、少数国やメジャー企業による資源の寡占化などにより、公正な価格で自由に輸入できない状況が継続している。そこで、日本では官民の総力を挙げて海外金属資源の権益確保に乗り出している。鉱物資源研究グループは、供給不足が深刻なレアアース（ランタノイド，Sc，Y）を中心としたレアメタル資源の調査に注力している。レアアースは、高性能モーター等に不可欠な金属だが、2009年来の中国の輸出制限と価格高騰（レアアース危機）で産業界が深刻なダメージを被った。2012年現在、軽レアアースは価格が安定しつつある

が、重レアアースは依然として供給不足が継続している。そのため、当グループでは、強い政策ニーズに基づき、世界各地で中国に替わるレアアース鉱床を求めて、一部は石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）、各国の地質調査所、民間企業などと共同で調査研究を実施している。

平成24年度は、経産省委託事業により、モンゴル民間企業、南アフリカ共和国地質調査所と共同で未開発重レアアース鉱床の探査・評価を実施している（写真1）。また、フィンランド地質調査所と共同で、従来分離が難しかったレアアースを含む珪酸塩鉱物の選鉱技術開発を実施している。



写真1 モンゴル西部での鉱床調査の様子（上），試鉱コアの調査・記載（下）

さらに、レアアース資源の世界的賦存状況の再評価およびマテリアルフローの解析事業を民間企業、米国地質調査所と共同で実施している。この事業は、レアアース資源の的確な情報を把握することにより、今後探査や権益獲得に注力すべき元素の絞り込んだり、適切なりサイクルモデルの構築すること



を目的とする。

平成22年度より、当グループでは情報技術研究部門と共同でリモートセンシングを利用したレアメタル資源解析技術の開発も行っている。平成24年3月に、トルコ中部のレアアース鉱床（写真2）で地表踏査を行い、リモートセンシングデータの検証作業を行った。また、東アジア鉱物資源データベース作成のためのASEAN各国との情報交換、海外技術者研修協会（AOTS）と共同で日本での各国担当者の研修などを実施した。



写真2 トルコでのリモートセンシングデータ検証調査の様子

### 3. 非金属資源の研究

石灰石、窯業原料、採石・骨材などの非金属資源（工業原料鉱物）は、現在でも主に国内鉱山から供給されている。鉱物資源研究グループでは、これらの中で、特にベントナイト資源に注目し研究を行っている。ベントナイトとは、モンモリロナイトを主体とする粘土物質で、その膨潤性や吸着性により遮水剤、掘削泥、鋳物砂粘結剤、ペット用トイレ砂などに利用されている。また、低レベル放射性廃棄物処分場や福島地域の汚染土壌処理において廃棄体の下部や周囲に遮水材として用いられる。当グループでは、国内鉱床の賦存状況調査や品質評価法の標準化に取り組んでいる。

### 4. 鉱物資源情報の研究

鉱物資源研究グループでは、政府・鉱山業界等の要請に基づき、アジア地域の地質図・鉱物資源図、鉱物資源データベースなどの作成に継続的に取り組んでいる。これまでに、300万分の1東アジア・中央アジア地質図、300万分の1東アジア鉱物資源図、500万分の1アジア地質図を出版し、2012年度には300万分の1中央アジア鉱物資源図を出版した（図1）。

### 5. 分析・選鉱技術開発

鉱物資源の研究を進める上で、鉱石や鉱物の精度

の高い分析や選鉱実験は不可欠である。そのために、鉱物資源研究グループでは、平成24年3月に、多重検出器型誘導結合プラズマ質量分析装置、電界放射型電子線プローブマイクロアナライザー、鉱物粒子解析装置（MLA）、顕微ラマン分光分析装置などを導入した（写真3）。さらに、集塵・排水浄化システムを備えた選鉱実験施設も整備し、全自動粉砕器、磁力選鉱器、浮遊選鉱器、静電選鉱器、湿式サイクロンなどを導入した。

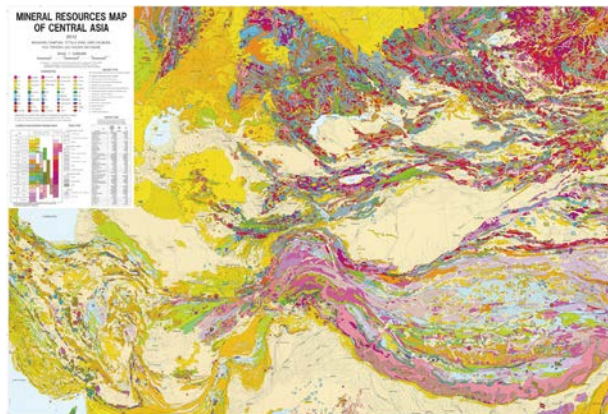


図1 中央アジア鉱物資源図



写真3 平成24年3月に導入したレアメタル分析設備

### 6. 今後の展望

日本を巡る外交関係の緊張や世界的な資源ナショナリズムの台頭などにより、鉱物資源の供給安定性に対する産業界の不安は益々増大している。鉱物資源研究グループは、経済産業省、JOGMEC、民間企業などの要請に基づき、各国の地質調査所と連携した機動的な現地調査や迅速な鉱床・鉱石の分析評価を積極的に実施していく所存である。しかしより重要なことは、その背景となる高い学術研究レベルの維持・向上である。鉱床成因の解明、鉱石・鉱物分析技術の高度化、基礎的な選鉱技術の向上などに精力を注ぎ、さらに国際的な研究交流を進め、国の資源研究の中核機関としての役割を果たしていきたい。



## 燃料資源地質研究グループの紹介

### Introduction of the Fuel Resource Geology Research Group

燃料資源地質研究グループ長：鈴木祐一郎

Leader, Fuel Resource Geology Research Group: Yuichiro Suzuki

Phone: 029-861-3919, E-mail: yu-suzuki@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

石油、天然ガス、石炭等の燃料資源鉱床に関する探査手法・資源評価技術の高度化をめざし、その基礎となる鉱床成因モデルの構築、資源探査法の改良、資源ポテンシャル評価技術についての研究開発を行う。

特に、当部門の地圏化学研究グループ、地圏微生物研究グループと協力し、重点研究課題「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」を実施する。

#### 2. グループの研究体制、研究資源

##### 2.1. 研究員（平成24年10月1日現在）

|       |             |
|-------|-------------|
| 鈴木祐一郎 | 石炭地質、有機地球化学 |
| 中嶋 健  | 海洋地質、堆積地質   |
| 佐藤 幹夫 | 海洋地質、構造地質   |
| 森田 澄人 | 構造地質、海洋地質   |
| 後藤 秀作 | 地球熱学、物理探査   |
| 小田 浩  | 石炭地質、堆積地質   |
| 中村 祐貴 | （テクニカルスタッフ） |
| 仁道 純子 | （テクニカルスタッフ） |

##### 2.2. 主な研究資金（平成23年度～平成24年度）

- ・運営費交付金「燃料資源地質の研究」（地質）及び同（エネルギー）
- ・運営費交付金（部門内グラント）「天然ガスが作用する地すべり型堆積盆の流体循環解明プロジェクトの推進」（平成24年度）
- ・受託研究（JOGMEC）「日本周辺海域における砂層充填型メタンハイドレート濃集帯以外のメタンハイドレート賦存層に関する予備検討」（平成23年度、24年度）
- ・共同研究（JX 日鉱日石開発株式会社）「国内堆積盆の炭化水素ポテンシャル評価に関する総合的研究」（平成23年度、24年度）
- ・共同研究（石油資源開発（株）技術研究所）「数的手法による砂岩分布予測の研究」（平成23年度、24年度）
- ・受託調査（資源エネルギー庁）「大水深域における石油資源等の探査技術等基礎調査に関わる高度地質解析」（分担、平成23年度）
- ・受託調査（資源エネルギー庁）「国内資源開発基礎情報取得等事業」（分担、平成23年度、24年度）
- ・科研費「急激な気候変動に対する海底扇状地の発達と二酸化炭素固定能力の応答の評価」（分担、平成23年度）

- ・受託研究（JAMSTEC）「海底地すべりメカニズム解明のための三陸沖科学掘削に向けた海域データ整備」（平成24年度）
- ・科研費「鉄堆積作用：鬼界カルデラの熱水活動場から紐解く太古代海洋環境への制約条件」（分担、平成23年度、24年度）
- ・科研費（新学術領域研究）「巨大地震断層の三次元高精度構造と物性の解明」（分担、平成23年度、24年度）

##### 2.3. 主な研究ファシリティ

- ・バーズンモデリングソフトウェア（PetroMod）
- ・地質構造解析ソフトウェア（Move）
- ・数値シミュレーションソフトウェア（COMSOL）
- ・震探解釈ソフトウェア（Kingdom）
- ・ビトリナイト反射率測定用石炭顕微鏡
- ・熱分解 GC/MS 用キュリーポイント熱分解装置
- ・恒温槽

#### 3. 平成23年～平成24年の研究成果および研究進捗状況

##### 3.1. ガスハイドレート資源の鉱床成因、形成機構、および資源ポテンシャル評価技術に関する地質学的研究

〈上越沖・日本海〉

- ・平成22年度に、東京大学との共同研究として、2010年6月に上越沖において、フランス極地研究所所属海洋調査船 Marion Dufresne（MD）号を備船し、長尺ピストンコアによる海底下数十 m までのコア試料採取、ボックスコアによる試料採取、熱流量測定、マルチビーム測深器による海底地形調査、3.5kHz サブボトムプロファイラによる海底表層探査等を実施した。
- ・船上作業では、コア中から発見されたメタンハイ



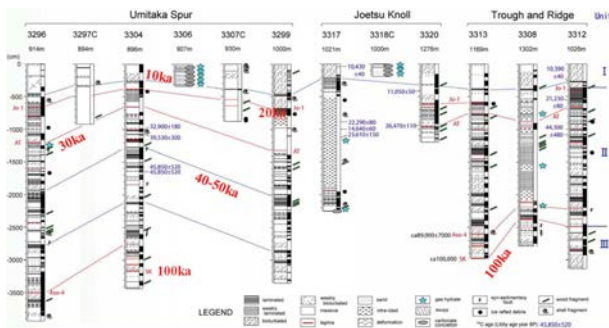
Marion Dufresne 号（MH21 HP より）

ドレート（MH）の採取・冷凍保存し、コアの堆積学的記載、温度測定、保管用堆積試料採取、密度、P波速度等の物理計測、スクィーザーによる間隙水化学分析等をおこなった。



コア中に含まれていた塊状メタンハイドレート（MH21 HP より）

- ・航海後、コアの非破壊測定およびサンプリングを進めると共に、採取した試料の微化石分析、地化学分析等の作業をおこなった。
- ・上越沖海域のメタンハイドレート安定領域下限深度を推定することを目的に、本海域で熱流量を計測した。現在、このデータに基づき後述の南海トラフと同様な手法で本海域の温度構造モデルの構築を進めている。



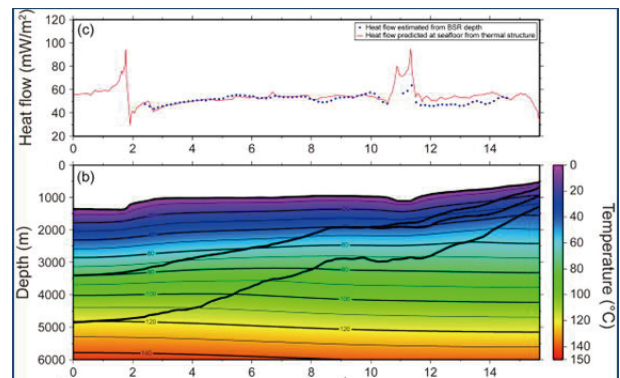
**M179採取コア年代と対比**  
(Matsumoto et al., 2011)

〈南海トラフ〉

- ・南海トラフ域の熱流量データの収集と再解析を行った。これらの熱流量データに基づき、海底下の温度構造モデルの構築を進めている。また、海底堆積物の現場法による熱伝導率の計測方法の開発を進めている。
- ・2012年6月29日～7月4日に「ちきゅう」によりおこなわれた第二渥美海丘のMH層のコアサンプルに参加した。高知コアセンターでコア試料の分析などを実施した。

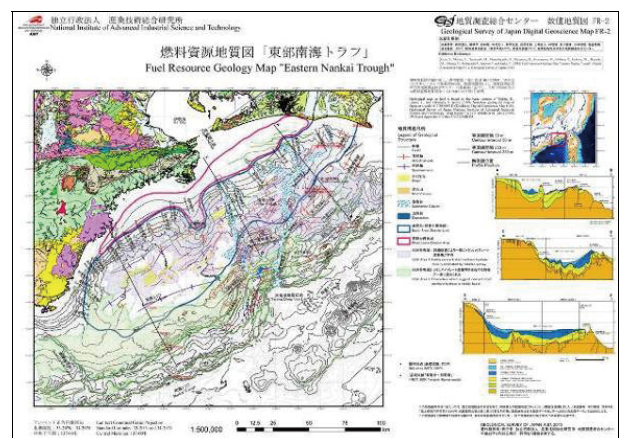
### 3.2. 燃料資源地質図の編集・出版

- ・東部南海トラフのメタンハイドレート資源ポテンシャルを評価するための基礎情報を提供すること



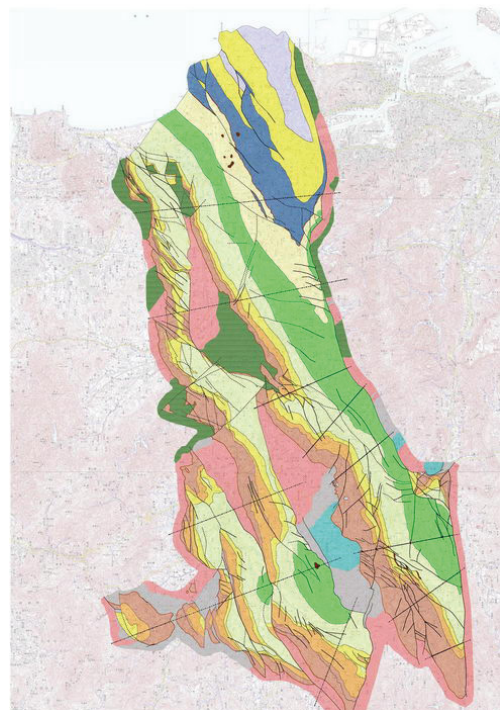
東部南海トラフの温度構造モデルの例  
(後藤ほか, 2010)

を目的に、50万分の1縮尺の地質図（本図）及び100万分の1縮尺の付図7枚の燃料資源地質図「東部南海トラフ」として出版した。



燃料資源地質図「東部南海トラフ」本図

- ・また、燃料資源図「筑豊炭田図」の編集や「上越沖・日本海」へ向けたデータ収集を進めている。

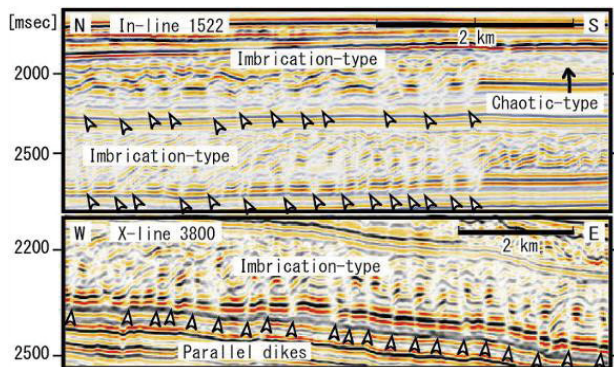


筑豊炭田図（原図）



### 3.3. 在来型天然ガス資源の鉱床成因、形成機構に関する地質学的研究

- ・燃料資源全般に関する生成機構・探査法・燃料資源評価法などについての基礎的ないし萌芽的な研究を実施した。根源岩評価法、資源評価技術、海洋地質調査法、物理探査法、地質構造発達史、堆積構造解析、地球環境論、等々広汎な課題について地球科学的考察を行い、学会誌、出版物、口頭発表等で公表をおこなった。
- ・三陸沖堆積盆の天然ガス資源を調査する目的で、下北半島東方沖の地震探査データを用いた地質構造解析を進めている。正断層群で切られた中新統以深に対し、鮮新統以浅では顕著な海底地すべり堆積層を認めた。地すべりの多くは特徴的な覆瓦構造を示し、それに依存した脱水構造も顕著に発達する。地すべり層周辺では天然ガスの存在を示す特徴が多く認められることから、一連の地すべりや脱水構造は、高いメタンフラックスが要因の現象と考えられる。（森田ほか，2011）



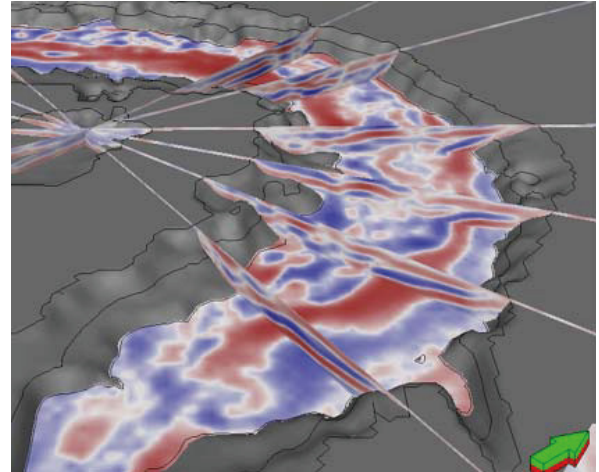
下北半島東方沖の地震探査データで認められる海底地すべり堆積層

- ・ガスに関連した海底地すべりの発生条件が重要なキーである。現在、その条件を求めることを目的とした“ちきゅう”による IODP 科学掘削計画の提案を意図として研究を進めている。2012年秋に、熱流量調査の基礎データ取得のため、三陸沖に海底温度計を設置した。（部門内グラント，JASMSTEC 委託）
- ・これに関連して、宮崎県日南市で現地検討会および研究集会を実施した。



日南市での現地検討会，猪崎鼻での地質巡検

- ・東北日本の油・ガス構造の形成に関わる脊梁部のテクトニクスについて、地形・地質調査を行い、第四紀の変動について従来にない知見を得て、学会発表を行った。
- ・3D 地震探査記録の解析から、海底チャネルおよび自然堤防の貯留岩形態に関しては、長年英国 Leeds 大学等と共同で研究を進めている。海底チャネルに発達するアウターバンク堆積物などに関して、英国での研究集会で発表し、現在印刷中である。



3D 震探断面によるチャネル湾曲部のアウターバンク堆積作用の解析（Nakajima et al., 2011発表より）

- ・鹿児島県薩摩硫黄島の南東部に位置する長浜湾では、海底から  $\text{Fe}^{2+}$  イオンに富む弱酸性の低温熱水が湧出している。長浜湾は防波堤で囲まれた半閉鎖的な環境になっており、低温熱水と海水が反応して生じた鉄質沈殿物（水酸化鉄）が海底に多量に堆積していることが確認されている。この長浜湾における低温熱水の湧出速度を長期にわたって計測することを目的に、海底下長期温度モニタリングを実施している。



鹿児島県薩摩硫黄島長浜湾

- ・コールベッドメタン（CBM）に関して、これまで収集した地化学データを再検討し、北海道における CBM 鉱床の成因について検討を進めている。
- ・今、話題のシェールガス・シェールオイルについて

ても、米国やカナダなどのシェールガスに関する文献調査を進めると共に、我が国のシェールガス・シェールオイル資源の可能性についても既存資料を基に検討を進めている。

- ・ 女川層や軽舞層などシェールオイルの可能性が考えられる地層について試料の地化学分析を検討中。
- 3.4. 資源エネルギー庁受託調査「大水深域における石油資源等の探査技術等基礎調査に関わる高度地質解析」(分担), JOGMEC 共同研究「大水深域の燃料資源ポテンシャルの検討」(分担)。

- ・ 大水深域の堆積盆の炭化水素ポテンシャル推定を、3次元石油システムシミュレータ等を用いて進めている。海洋資源地質地球物理情報可視化システムを使用した高度地質解析も目指している。

### 3.5. 共同研究

〈JX 日鉱日石開発(株)との共同研究〉

- ・ 共同研究では、三陸沖の2D/3D 地震探査記録を用いた地質構造解析とスランプ堆積物の内部構造の解析を進め、論文投稿および学会発表を行った。また、富山トラフの2D/3D 地震探査記録の解析から富山深海長谷の発達史についてまとめ、シンポジウムで発表した。
- ・ 釧路炭田地域で共同の地質調査を行い、白亜系から第三系までの貯留岩および根源岩石炭の分布の概略を把握した。また炭田ボーリングコアの記載・分析を共同で行った。
- ・ 2013年春に、JX が新潟県佐渡南西沖で実施予定の試掘調査に向けて、試掘で予想されるコアの岩相対比のため予想される地層について、新潟、富山、能登の陸上露頭で観察をおこなった。

〈石油資源開発(株)技術研究所との共同研究〉

- ・ 砂岩層厚分布から貯留岩総体積を推定する数学的手法の開発を引き続き行い、上越地域西頸城丘陵での共同地質調査を行った。



JX 開発、産総研の地質調査参加者  
(富山、能登境界の仏島を背景に)

## 4. 最近の主な研究成果 (2011年 -2012年)

〈紙上発表〉

Hamamoto, E., Yamano, M., Goto, S., Kinoshita, M., Fujino, K. & Wang, K.: Heat flow distribution and

thermal structure of the Nankai subduction zone off the Kii Peninsula. *Geochem. Geophys. Geosystems*, v.10, no.10, 1-22, 2011.

森田澄人, 中嶋 健, 花村泰明: 海底スランプ堆積層とそれに関わる脱水構造: 下北沖陸棚斜面の三次元地震探査データから. *地質雑*, v.117, no.2, 95-98, 2011

Morita, S., Nakajima, T. and Hanamura, Y.: Possible ground instability factor implied by slumping and dewatering structures in high-methane-flux continental slope. In Yamada et al. (eds.), *Submarine Mass Movements and their consequences, Advances in Natural and Technological Hazards Research* 31, Springer, 311-320, 2011.

森田澄人, 東 垣, 高野 修, 山田泰広, 真田佳典: 石油技術協会-海洋研究開発機構共催シンポジウム「地下圏微生物と石炭起源の炭化水素資源-西太平洋沿岸海域におけるエネルギー資源と生成メカニズム-」実施報告. *石油技術協会誌*, 76, 4, 338-340, 2011.

本山玲美, 柳澤文孝, 上田 晃, 鈴木祐一郎, 金井豊, 大澤英二, 小島 武, 赤田尚史: 東アジア地域の石炭に含まれる硫黄の安定同位体比とその地域分布. *Radioisotopes*, v.60, no.1, 27-33, 2011.

大塚宏徳, 森田澄人, 棚橋 学, 長久保定雄, 芦寿一郎: 東部南海トラフ三次元反射法地震探査断面に見られる地層流体の分布を示唆する音響反射面. *石油技協誌*, 76, 1, 39-42. 2011.

中嶋 健: 岩手県湯田盆地に分布する不整合と火砕岩鍵層: その奥羽山脈発達史上の意義について. *地球科学*, 66, 69-83, 2012.

〈国際研究集会発表〉

Nakajima, T. & B. C. Kneller: Quantitative analysis of the geometry of submarine levees. *Conference on Internal Architecture, Bedforms and Geometry of Turbidite Channels*, Geol. Soc., London, 2011.

Nakajima, T., Peakall, J., McCaffrey, W.D, Paton, D.A., and Thompson, P.: Outer-bank bars: a new internal architecture within sinuous submarine channels. *Conference on Internal Architecture, Bedforms and Geometry of Turbidite Channels*, Geol. Soc., London, 2011.

Nakajima, T.: Earthquake/Tsunami hazard assessments based on recurrence intervals of turbidites in the southeastern margin of the Japan Sea. *5th ISSMMTC*, Kyoto, 2011.

Yamano, M., Hamamoto, E., Goto, S. & Kawata, K.: Heat flow distribution on the floor of the Nankai Trough and thermal structure of the subducting Philippine Sea plate. *AOGS 8th Annual Meeting and Geosciences World Community Exhibition*, Taipei, 2011.



## 地圏微生物研究グループの紹介

### Introduction of the Geomicrobiology Research Group

地圏微生物研究グループ長：坂田 将

Leader, Geomicrobiology Research Group: Susumu Sakata

Phone: 029-861-3898, E-mail: su-sakata@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

地圏における微生物の分布と多様性、機能、活性を評価することにより、元素の生物地球化学的循環に関する基盤的情報を提供するとともに、資源開発、環境保全や地圏の利用に資する研究を行う。当研究部門の戦略課題「鉱物・燃料資源のポテンシャル評価」、「土壌汚染評価技術の開発」に取り組み、油ガス田や地下水汚染サイト等に生息する微生物の活動（メタン生成、消費、石油炭化水素・揮発性有機物分解）の実態解明を目指す。

#### 2. グループの研究資源（23-24年度）

##### 2.1. グループ員

研究スタッフ

坂田 将（リーダー）、片山泰樹、竹内美緒、持丸華子、吉岡秀佳、眞弓大介\*（\*特別研究員）

テクニカルスタッフ

氏家知美、小神野良美、執印訓子、野澤富美江、山岸昂夫

##### 2.2. 予算

運営費交付金

「地圏微生物の研究（地質）」

「地圏微生物の研究（エネルギー）」

委託研究費

「深部地下圏を模擬した高圧条件下における生物学的メタン生成過程の解明」（科研費）

「陸域における微生物による嫌氣的メタン酸化プロセスの解明」（科研費）

「低炭素型枯渇油田再生化技術の開発を目指した原油分解メタン生成メカニズムの解明」（科研費）

「公共用水域・地下水中窒素を低減するための畜産廃水からの窒素除去技術の開発」（地球環境保全等試験研究費）

「メタンハイドレート開発促進事業に関する委託研究－新規取得試料の微生物学的研究」（JOGMEC）

「かん水の分析に基づく南関東ガス田の地下微生物の分布及びメタン生成速度の評価」（JOGMEC）

「バイオマスプラスチックのカスケード利用～メタン発酵によるエネルギー生産に関する研究」（日生財団）

「陸域における嫌氣的メタン酸化の大気へのメタン放出抑制効果の評価」（住友財団）

「地下深部油田に隔絶されていた系統的に新規な嫌気微生物群」（発酵研）

共同研究費

「安定同位体トレーサ法による油層内微生物の原油分解メタン生成経路の評価」（国際石油開発帝石（株））

「メタン溶存天然水を用いた有機塩素化合物による汚染地下水の浄化工法の実用化に関する研究」（（株）テクノアース）

#### 3. グループの特色

有機・生物地球化学、微生物生態学を専門とする研究者で構成され、坑井等からの各種地下試料（堆積物、岩石、水、ガス、油等）の採取と、化学・同位体分析、好気・嫌気微生物培養、同位体トレーサー実験、遺伝子解析等を通じて、地圏微生物の活動に関する基盤的情報を提供する。燃料資源地質・地圏化学研究グループ、生物プロセス研究部門、JOGMEC、国際石油開発帝石（株）、（株）テクノアース、関東天然瓦斯開発（株）、放射線医学総合研究所等と連携し、水溶性天然ガス・メタンハイドレート の成因解明や有効利用、枯渇油田の天然ガス再生技術、汚染地下水浄化技術の検討を重点的に進める。

#### 4. 23年度後期－24年度前期の研究進捗状況

##### 4.1. メタンハイドレート成因解明のための生物地球化学的研究

・MH21の研究の一部として、東部南海トラフ堆積物コア試料について、 $^{14}\text{C}$ -トレーサー法でメタン生成活性を測定した。主なメタン生成経路は $\text{CO}_2$ 還元であり、砂泥互層より粘土層で高いメタン生成活性が検出された。水素、酢酸、メタノール等を添加する集積培養でメタン生成が観察され、多様なメタン生成菌の存在が推察された。16S rRNA 遺伝子を用いた微生物の群集解析の結果、バクテリアや古細菌のバイオマスは深度に対して減少し、古細菌群集構造は岩相やSMI深度と関連していることが分かった。微生物のメタン生成活性はメタン生成菌の相対量と関連していた。

##### 4.2. 在来型天然ガス資源の成因解明のための生物地球化学的研究

・石油天然ガス基礎研究委託事業（JOGMEC）として、関東天然瓦斯開発株式会社と共同で、南関東ガス田における10坑井からかん水を採取し、真正細菌・古細菌の分布、及び、メタン生成活性を評価した。いずれの試料も $\text{CO}_2$ 還元が主要なメタン生成経路であり、水素資化性のメタン生成菌が

優占していた。過去数年以内に掘削された抗井から、好気性細菌が検出され、掘削時に混入した酸素の影響と推定された。

#### 4.3. 地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術の研究

- ・天然ガス田地域のメタン溶存地下水を利用したバイオレメディエーション技術の実用化に向けて、異なる季節において複数井から地下水を採取し、メタン酸化細菌の定量評価を実施した。また実証試験の前にカラム試験を実施するため、カラムを設計し製作した。

#### 4.4. 油層内微生物の原油分解メタン生成経路に関する研究

- ・山形県の油田から原油と油層水を採取し、無機培地を加え、5MPa、55℃で培養した結果、150日後から有意に（原油無添加のコントロールより）多くのメタンが生成された。また原油とともに<sup>13</sup>C-トルエンと<sup>13</sup>C-ヘキサデカンを微量添加した系では、メタンと溶存無機炭素が<sup>13</sup>Cに富む傾向が見出された。以上から、当該油田において原油分解・メタン生成反応が進行していると判断された。

#### 4.5. 深部地下圏を模擬した高圧条件下における生物学的メタン生成過程の解明

- ・水素資化性メタン生成菌を、水素+CO<sub>2</sub>、ギ酸、または酢酸を基質として（酢酸基質の場合は酢酸酸化細菌との共生系で）培養し、基質濃度が同位体分別に与える影響について検討した。また培地に含まれる酢酸を定量し、炭素同位体分析を行う方法について検討を行った。

#### 4.6. 陸上地下圏における微生物による嫌氣的メタン酸化の解明のための地球化学・微生物学的アプローチ

- ・昨年度に東京都で掘削された沖積層コア試料について、嫌氣的メタン酸化活性を測定するとともに、堆積物中のガス成分及び間隙水の化学分析を行った。また陸域に存在する嫌氣的メタン酸化古細菌（ANME-1aFW）の生理学的特性を明らかにするため、温度、塩・電子受容体濃度が異なる条件で活性を測定した（図1）。

#### 4.7. 公共用水域・地下水中窒素を低減するための畜産排水・窒素除去技術

- ・窒素濃度、酸素濃度がアナモックス活性に与える影響を調べた。亜硝酸とアンモニアに対するKm値は1.8μMと26μMで、低い窒素濃度でも活性が維持されることが示された。また担体を利用すれば、酸素濃度0.6%でも活性汚泥のアナモックス活性が失われないことがわかった。

#### 4.8. 基礎的研究

- ・海底でのメタン消費に重要な役割を果たしている好気性メタン酸化細菌共生系のメカニズムの解明を進めた結果、難分離培養メタン酸化細菌のみがメタンを資化していることと、共生している微生物は serine pathway でメタノールを資化している

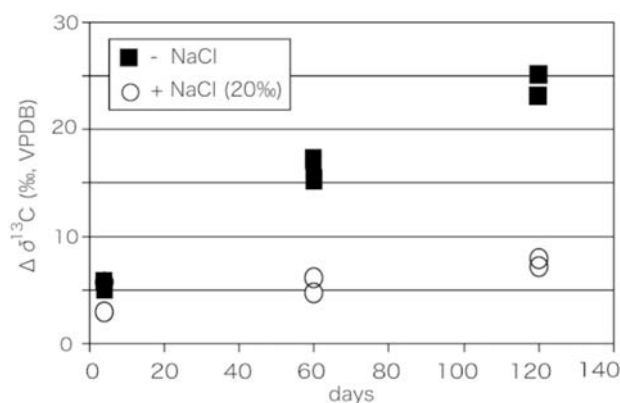


図1. ANME-1aFWのメタン酸化活性（<sup>13</sup>C-トレーサー法で評価）に対する塩分濃度の影響

ことが明らかになった。

- ・嫌氣的環境下で微生物がポリ乳酸（PLA）を分解しメタンを生成するメカニズムの解明を進めた結果、まず乳酸分解細菌が乳酸（PLAの脱重合産物）を分解し、生成するH<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>や酢酸をメタン生成古細菌がメタンに変換することが示唆された。

#### 5. 主な論文成果・受賞

Takeuchi M., Yoshioka H., Seo Y., Tanabe S., Tamaki H., Kamagata Y., Takahashi H.A., Igari S., Mayumi D., Sakata S. (2011) A distinct freshwater-adapted subgroup of ANME-1 dominates active archaeal communities in terrestrial subsurfaces in Japan. *Environmental Microbiology*, 13, 3206-3218.

前田治男・五十嵐雅之・宮川喜洋、小林 肇・佐藤光三、眞弓大介・坂田 将（2011）地下常在微生物を利用した二酸化炭素のメタン変換システム構築。石油技術協会誌, 76, 530-537.

Kobayashi H., Kawaguchi H., Endo K., Mayumi D., Sakata S., Ikarashi M., Miyagawa Y., Maeda H., Sato K. (2012) Analysis of methane production by microorganisms indigenous to a depleted oil reservoir for application in Microbial Enhanced Oil Recovery. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 113, 84-87.

Kobayashi H., Endo K., Sakata S., Mayumi D., Kawaguchi H., Ikarashi M., Miyagawa Y., Maeda H., Sato K. (2012) Phylogenetic diversity of microbial communities associated with the crude-oil, large-insoluble-particle, and formation-water components of the reservoir fluid from a non-flooded high-temperature biodegraded petroleum reservoir. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 113, 204-210.

Sakata S., Maekawa T., Igari S., Sano Y. (2012) Geochemistry and origin of natural gases dissolved in brines from gas fields in southwest Japan. *Geofluids*, 12, 327-335.

片山泰樹（2011）環境攪乱による稀少細菌群の応答-454パイロシーケンス法を用いた群集構造及び活性解析。第27回微生物生態学会優秀発表賞。



## 地圏化学研究グループの紹介

### Outline of the Resource Geochemistry Research Group

地圏化学研究グループ長：佐脇貴幸

Leader, Resource Geochemistry Research Group: Takayuki Sawaki

Phone: 029-861-3707, E-mail: res\_geo\_x-ml@aist.go.jp

#### 1. グループの研究体制・研究方針

当グループは、地球化学、石油地質学、有機化学、岩石・鉱物学等を専門とする研究者で構成されている。この体制により、燃料資源、非金属鉱物資源・材料及びこれらに関連する地圏流体についての地質学的・地球化学的・鉱物学的解析を通して、資源の成因解明・開発、環境保全、製品化等に資する研究を進めていくことをグループの目標としている。また、これらの研究課題に関して、研究機関として価値ある研究成果を上げる（論文、学会発表、特許等）のみならず、外部要請への対応、精度の高い情報の発信、研究成果の普及等を推進することを基本理念としている。

#### 2. グループ員及び研究項目等

##### 1) グループ員

佐脇貴幸（グループ長）、猪狩俊一郎、金子信行、鈴木正哉、前川竜男、末益 匠（2012/9/30まで）、須藤定久（客員研究員）および契約職員

##### 2) 主な研究項目

- ・ 関東平野における水溶性天然ガスの地質・地化学的調査研究
- ・ 燃料資源に関わる地質学的・地化学的調査研究
- ・ 機能性鉱物材料に関わる化学的・鉱物学的・材料学的研究
- ・ 地圏化学の基礎的研究
- ・ 加温機排気中の CO<sub>2</sub> の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発（農林水産省受託研究）

等

##### 3) 主な研究設備

- ・ ガスハイドレート合成実験装置
- ・ ガスクロマトグラフ
- ・ イオンクロマトグラフ
- ・ 流体包有物温度測定装置
- ・ ハスクレイ合成装置

等

#### 3. 平成23年度～24年度前期までの研究進捗状況

##### 1) 関東平野における水溶性天然ガスの分布に関する地質・地化学的調査研究

南関東ガス田（図1）が日本最大の水溶性天然ガス（メタンガス）資源の賦存地域であることを踏まえ、将来にわたる資源の安定供給に資するために、関東地域における水溶性天然ガスの賦存状況に関わ

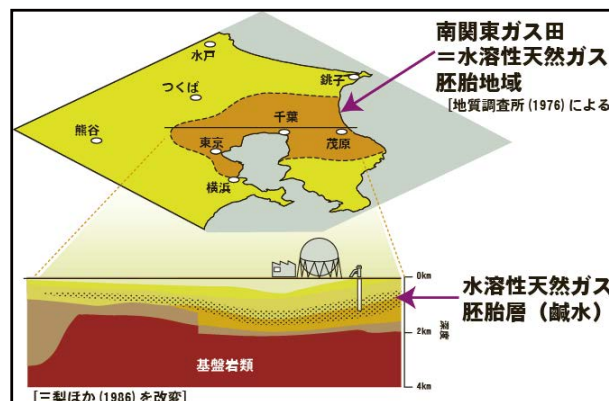


図1 南関東ガス田の概念図

る正確な地質学的情報を把握することを目的とする。研究の実施に当たっては、部門内グループ連携とともに、地方自治体、天然ガス関係企業、温泉関連機関等の各機関のご協力の下、温泉でのガス試料採取や地質学的情報の収集を進めてきた。それによりまとめた研究成果は適宜学会発表により公表してきた（たとえば、金子ほか，2010；佐脇ほか，2011；和気ほか，2012）。

当初、本研究は平成20年度から3年計画で実施する予定であったが、地質データ、特に坑井地質（地下地質）のデータの入手に支障をきたし地質学的解析が遅れたため、実施年度を延長している。平成23年度には、前年度までに収集しきれなかった坑井地質データを追加収集し、そのデータ処理を進めるとともに、関東地方の深層熱水型温泉水及び水溶性天然ガスの化学分析結果を総合し、地質学的・地球化学的データの解析を進めた。

関東地方では、房総半島中央部を中心とする南関東ガス田が水溶性天然ガスの巨大な貯留層であるが、この地域以外の様々な地域にも水溶性天然ガスが賦存している。それらは南関東ガス田の主要胚胎層となっている上総層群だけではなく、その下位層である安房層群・三浦層群等相当層、あるいは地表に近い沖積層・湿原堆積物など、さまざまな層準に存在している。

南関東ガス田の範囲は上総層群基底深度が1,000m（房総半島）～千数百m（東京・神奈川）より深い範囲に一致する。一方、埼玉県、群馬県等では、上総層群より下位の安房層群・三浦層群相当層から湧湯する温泉に、鉱床規模ではないものの、水溶性天然ガスが付随することがある。また、利根川沿いのハーフグラベンが地下に存在し、その上に新第三

系が厚く堆積した地域（埼玉～群馬）や、茨城県北部の棚倉破砕帯に沿う堆積盆にも、水溶性天然ガスを含む温泉が多数分布している。このことは、大小の違いはあるが、このような堆積盆には、水溶性天然ガスを溶存する深層熱水が普遍的に滞留していることを示している。なお、先新第三系分布域にも、水溶性天然ガスが認められることがある。例えば、四万十帯の泥岩中や常磐炭田近辺の温泉である。

これらの深層熱水型の温泉水は、塩分濃度や酸素・水素同位体組成から、基本的には化石海水と天水の混合によるものである。天水の起源は若い時代のものだけでなく、神奈川県ではより古い地質時代に侵入した天水と推定されるものが認められた。また、基盤岩や直上の地層を仕上げた温泉で、水の酸素同位体比に、基盤岩との同位体交換反応が認められることがある。

水溶性天然ガス中のメタンガスは、炭素同位体比と共存する炭化水素の組成から見て大部分が微生物起源であるが、北関東では熱分解性のメタンガスも認められる。また、そのような地域では窒素ガスの割合が多くなる傾向がある。

以上のように、関東地方における水溶性天然ガスの賦存状況について、地質学的および地球化学的な面からの検討を行った。最終的な成果物として、こ

れらの点を盛り込んだ燃料資源地質図を出版することとしている。

2) 燃料資源に関わる地質学的・地化学的調査研究  
南関東ガス田以外のガスハイドレート、水溶性天然ガス、石炭起源天然ガス等の燃料資源源（有機物）に関わる地質学的調査、地球化学的実験・分析に基づく研究を進め、それらの成因および形成過程解明、資源評価、賦存状況の把握等を行うことを目的とする。

まず、水溶性天然ガスにかかわる研究として、国内の微生物起源メタンを主成分とする水溶性天然ガスの濃集機構と、破壊プロセスまでを考慮した鉱床の形成／保存について検討を行った。その結果、数千mに達する半深海堆積物の浅層にメタンが濃集し、若い時代に急速に堆積・陸化した場合にのみ鉱床が破壊されずに水溶性天然ガス鉱床が保存されると解釈した。また、沖縄の水溶性天然ガスのうち、基盤岩中に存在する熱分解起源のメタンガスについて、その成因・形成過程の検討を行った。熱分解ガスの根源岩としては、基盤岩では名護層よりも嘉陽層（図4）の方が適当で、それ以外に本島南東海域において熟成帯に到達した島尻層群の可能性を指摘した。

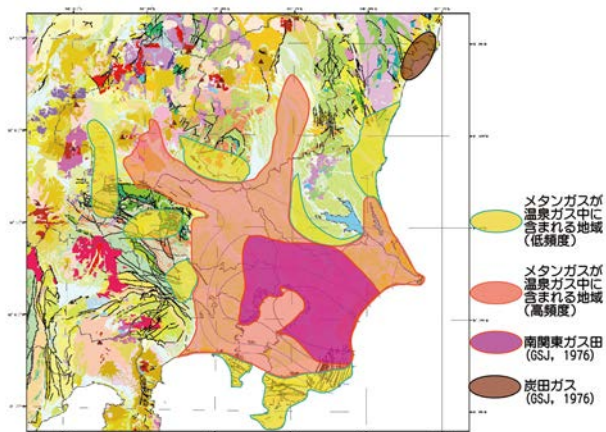


図2 上総層群基底面深度（鈴木，1996）と南関東ガス田の関係

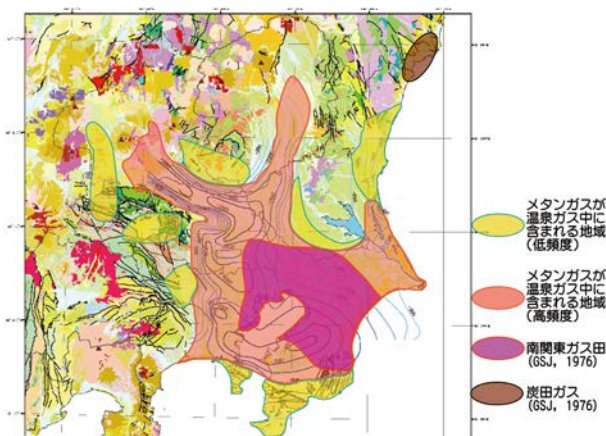


図3 新第三系基盤深度（高橋，2008）と水溶性天然ガスの分布の関係



図4 褶曲した嘉陽層の砂泥互層

次に、地球化学的実験研究として、天然ガスの各炭化水素の同位体比を用いたガスの対比法の改良を行うとともに、メタンを主成分とするガス中の微量非メタン炭化水素測定システムを改良した。その結果、非メタン炭化水素の回収率が上がり、より高精度な測定が可能になった。

また、メタン、エタン等のガスハイドレートの相平衡条件を実験的に測定した。本年度測定したメタノール、エチレングリコール等と共存するエタンのハイドレート相平衡条件の実験結果から、溶質の濃度が増加するに従って相平衡条件は低温側へシフトすることがわかった。一方、統計熱力学的手法によるハイドレート相平衡条件の推定法を改良し、アルコール水溶液等と共存するガスハイドレートの相平衡条件の推定が可能になった。



### 3) 機能性鉱物材料に関わる化学的・鉱物学的・材料学的研究

機能性鉱物材料である高性能無機系吸着材「ハスクレイ（図5）」やその他の機能性鉱物材料に関して、化学的・鉱物学的・材料学的観点から、その工業的生産・利用にかかわる研究開発を行っている。

まず、ハスクレイの物理化学的性質をまとめ、様々な工業用材料として利用するための基礎的情報となるハスクレイの性能を評価することにより、表面特性および、疎水化処理に向けた基礎的データを取得した。製品化の研究では、共同研究等によりイモゴライトおよびハスクレイに関する新しい用途開発を含め、ハスクレイのCs吸着性能が優れていることを明らかにした。さらに、ナノテック2012などの展示会出展などの普及活動を行った。

また、地圏環境リスク研究グループとの連携により、重金属汚染に関するナノ物質の重金属吸着特性に関する研究を行い、汚染土壌における主要構成鉱物を明らかにした。



図5 ハスクレイ

### 4) 地圏化学の基礎的研究

地圏資源・環境に関する新規研究課題の探索、新しい地化学的技術の開発等、萌芽的・共通基盤的研究を行うことを目的とする。研究内容について、以下に箇条書きに記す。

- ①水溶性ガス田の鹹水中での各化学種の挙動について検討した結果、蓄積した微生物起源のメタンに対して、原材料である溶存炭酸や他の成分の割合が小さいため、溶存成分からメタン生成量を推定する地化学モデルについては、精度上の問題があることが明らかとなった。また、天然ガス及び鹹水等の地下資源の有効利用についての情報収集を行った。
- ②産総研敷地内の空気を採取し、その中の非メタン炭化水素の濃度を測定し解析を行った。その結果、自動車起源と推定されるアセチレン濃度はここ15年間で不明瞭ながら低下する傾向が観察されたが、ここ数年はほぼ一定となっている傾向が観察された。
- ③生成促進剤を用いた二酸化炭素ハイドレート相平衡条件を実験的に測定した。生成促進剤にアセト

ン等を使用した場合、モル分率0.056の水溶液と共存する二酸化炭素ハイドレートが最も安定であることがわかった。

- ④ハスクレイおよび、ゼオライトやシリカゲルそして活性炭など各種吸着材について、細孔容積や細孔径分布と、二酸化炭素や窒素などの吸着量との関係を検討した。その結果、低濃度ガスからの二酸化炭素回収分離には、直径4nm程度の細孔を有する吸着剤が最も効率的であることがわかった。さらには水蒸気が存在する際の二酸化炭素吸着に与える影響について検討したところ、親水性の吸着剤では吸着された水蒸気は圧力や濃度を変えても脱離しないが、疎水性の吸着剤では吸着された水蒸気も容易に脱離できることがわかった。
- ⑤鉱物資源研究グループとの連携によりLi鉱床におけるLi存在形態に関する検討を行い、Li含有鉱物についての同定を行った。
- ⑥東日本大震災後の採石場の状況に関して調査を行い、保安上の観点から、適切な採石場の環境設計について考察した。

### 5) 加温機排気中のCO<sub>2</sub>の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発

平成22年7月に採択された、農林水産省公募型受託研究「加温機排気中のCO<sub>2</sub>の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発」（3年計画）では、施設園芸における収量増大・品質向上を目的とし、加温機の排気中の二酸化炭素を効率よく回収貯留し再利用可能な、画期的な施設園芸用省エネ型CO<sub>2</sub>施用システムとその活用技術を開発している（図6）。そのために、サステナブルマテリアル研究部門とのユニット間連携研究とともに、様々な企業及び研究機関との共同研究を進めている。

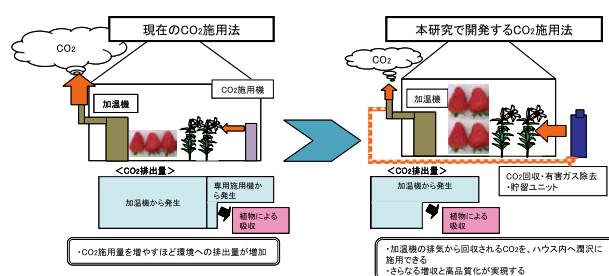


図6 施設園芸用省エネ型CO<sub>2</sub>施用システムの概念図

平成23年度までに、装置の小型化・低価格化を目指した省エネ型CO<sub>2</sub>回収貯留システムの試作機を製作し、奈良県および岩手県の施設園芸現場試験を通して園芸作物の増収・高品質化の実証試験を実施している。本研究開発については、産総研オープンラボを始め、さまざまな研究発表の場で公表しているが、「TXテクノロジーショーケース in 2012 つくば」では、「ベスト産業実用化賞」を受賞し（図7）、産業界からもその成果が期待されているところである。



図7 TX テクノロジーショーケース2012での受賞

#### 4. 2011年9月～2012年8月の研究成果（誌上発表のみ、下線部がグループ員）

【誌上発表（論文、著書等）】

猪狩俊一郎（2012）油ガス田地域（新潟）と非油ガス田地域（茨城・群馬）における軽質非メタン炭化水素濃度の比較 II, 1994年-1999年冬季. 地球化学, **46**, 51-61.

金子信行（2012）新潟および関東地方の天然ガスの起源と賦存状況について. 日本地質学会 News, **15**, no. 6, 9.

金子信行・猪狩俊一郎・前川竜男・佐脇貴幸・代田寧・小田原啓・早稲田周（2012）関東地方地下の水溶性天然ガスと地層水の地球化学. 天然ガス, **55**, 56-58.

Maekawa, T.（2012）Equilibrium conditions of ethane hydrates in the presence of aqueous solutions of alcohols, glycols, and glycerol. *Journal of Chemical and Engineering Data*, **57**, 526-531.

佐脇貴幸・中嶋 健・小笠原正継・鈴木祐一郎（2011）釧路炭田地域石炭資源探査坑井（北陽・

留真・釧路沖）のコア試料の観察結果. 地質調査総合センター研究資料集, No. 553, 1-59.

佐脇貴幸・金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎・棚橋学・中嶋 健・森田澄人・坂田 将（2012）関東地方に賦存する水溶性天然ガスについての地質学的研究. 天然ガス, **55**, 54-56.

須藤定久（2011）「日本列島総磯化」－①砂と砂浜の存在を考える－. 骨材資源, **43**, 76-81.

須藤定久（2011）日本列島総磯化－②砂浜の基本特性と構造物による変形－. 骨材資源, **43**, 144-148.

鈴木正哉（2012）アロフェン・イモゴライトの合成と応用. 粘土科学, **50**, 81-87.

鈴木正哉・前田雅喜（2012）粘土系無機多孔質材料によるデシカント空調用吸着剤の開発 - ハスクレイの除湿性能について -. 日本冷凍空調学会論文集, **29**, 89-96.

鈴木正哉・大和田朗・佐藤卓見・永好けい子・犬飼恵一・青木正博（2012）イモゴライトの薄片試料作製法. 粘土科学, **50**, 63-68.

#### 引用文献

金子信行・猪狩俊一郎・前川竜男・佐脇貴幸・代田寧・小田原啓・早稲田周（2010）関東地方地下の水溶性天然ガスと地層水の起源について. 日本地質学会117年学術大会, 2010/9/18.

三梨 昂・尾田太良・江藤哲人（1986）新生代東北日本弧地質資料集 第3巻-付録 関東地方地質断面図（北村 信 編）, 宝文堂.

鈴木宏芳（1996）江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏地域の地質構造. 防災科学技術研究所研究報告, **56**, 77-123

高橋雅紀（2008）関東平野の基盤の凹み～日本海の拡大時期に遡って～. *Japan Geoscience Letter*, **4**, No. 2, 3-5.



## 物理探査研究グループの紹介

### Introduction of the Exploration Geophysics Research Group

物理探査研究グループ長：光畑裕司

Leader, Exploration Geophysics Research Group: Yuji Mitsuhashi

Phone: 029-861-2387, E-mail: y.mitsuhashi@aist.go.jp

<http://unit.aist.go.jp/georesenv/expgeo/>

#### 1. グループの研究目的

本研究グループでは、放射性廃棄物地層処分、土壌・地下水汚染、CO<sub>2</sub>地中貯留等の地圏環境分野における地盤・岩盤の評価やモニタリング、及び、地熱・地中熱、海底熱水鉱床等の資源・エネルギー分野、地盤液状化、地滑り、断層等の防災分野における地質・地盤構造調査に不可欠な物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査手法の技術開発と適用研究を行う。平成24年度においては、以下の7項目を中心に研究を行う。

地圏の環境分野として、

- 1) 放射性廃棄物地層処分場選定における沿岸域および海域の塩淡水境界等の地質環境評価のため、沿岸域モデルフィールドにおける電磁探査や海陸接合反射法地震探査の適用試験、電磁探査データのデータ取得・処理・解析手法の開発、既存データの総合解釈等を行う。
  - 2) 土壌汚染、地下水環境分野等における浅部地質環境評価のため、東日本大震災に対応した東北地方沿岸域における空中電磁探査法や陸上の電気・電磁探査法等の適用による地下水塩水化領域の把握調査、NMR 表面スキャナーの工業製品・農業への適用、物理探査による油分土壌汚染評価等を行う。
  - 3) CO<sub>2</sub>地中貯留 (CCS) における岩石物性評価と物理探査モニタリング手法の検討を行う。
- また、地圏の資源・エネルギー分野として、
- 4) 地中熱利用における地下物性のモニタリング法、および事前評価手法の研究、新規の地熱資源調査に向けた物理探査技術に関する研究課題の立案を行う。
  - 5) 海底熱水鉱床探査や海底地盤調査等を目指した電気探査法開発の基礎研究を行う。
- さらに、地圏の防災分野への適用として、
- 6) 東日本大震災への対応として、物理探査や CPT 技術を用いた液状化調査への適用および CT 画像による液状化判定に関する研究を行う。
  - 7) 福島県沿岸域で誘発地震が活発化した断層における電磁探査法の適用調査を行う。また、震源断層評価のための各種物理探査手法の適用結果について、取りまとめを行う。

#### 2. 主な研究項目の内容

##### 2.1. 浅部地質環境評価

地盤中の汚染物質の移流・拡散に関して、ミクロな現象に着目し基礎研究を実施している。今年度は拡散現象を対象に岩石試料の X 線 CT 画像を基に、多孔質媒体中の定常拡散シミュレーションを行い、これまで重要視されていなかった流束の小さな箇所（淀み領域）が拡散輸送に重要な役割を果たしていることを見出した。今後は、本アプローチを移流のシミュレーションへと拡張する予定である。

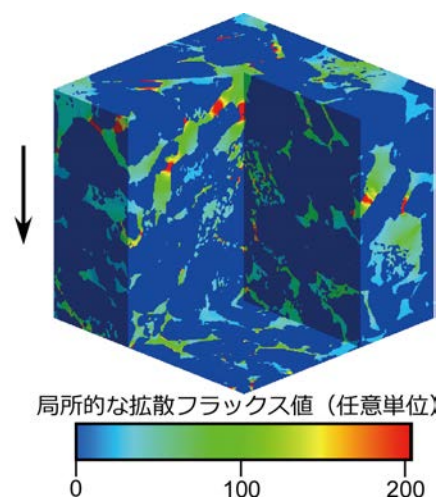


図1 水で飽和した多孔質砂岩画像（1辺は0.64mm、固体部分は濃紺色）の空隙中の定常拡散シミュレーション結果。黒い矢印方向に巨視的な濃度勾配を与えた。

東日本大震災による農業被害の復旧・復興に貢献するため、宮城県南部・福島県北部の津波浸水域で、地下水の塩水化の状況やより深部の地下水源の探査を目的に、空中電磁探査や地表における電気・電磁探査を実施している。今年度は電磁探査を133地点、電気探査を34地点で実施する予定である。

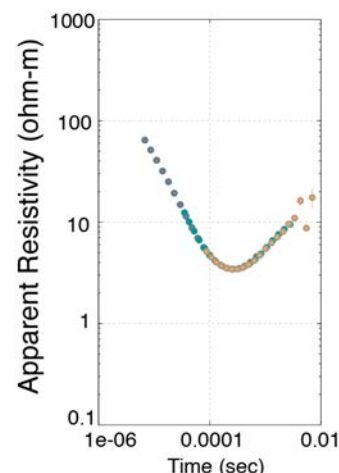


図2 宮城県山元町における電磁探査 TEM 法測定結果（見掛け抵抗）。

## 2.2. 地中熱利用における評価手法

小規模の地中熱利用において、事前調査のためにかかる費用は、地中熱利用システム導入全体のコストと比べて決して小さくはなく、現実的に実施することが困難である場合が多い。当グループでは、これまで実施してきたTCP（熱伝導率検層）による熱伝導率の深度分布データと土木工事や宅地造成の地盤評価でよく使われるN値との間に相関関係を見出し、N値からの熱伝導率の推定方法について検討を行った。また、本手法を用いて、産総研内で計画されている地中熱利用設備エリアの地盤の地中熱事前評価を行った。

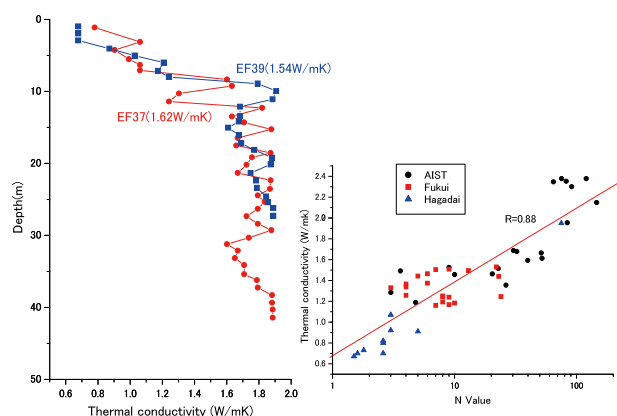


図3 産総研構内2地点のボーリングデータから求めた熱伝導率の深度分布（左図）とN値と熱伝導率の関係（産総研構内、福井市、栃木県芳賀台のデータをプロット）（右図）。

## 2.3. 海底電気探査法の基礎研究

近年注目が高まっている海底下の鉱物・エネルギー資源、海底活断層、二酸化炭素地中貯留等への適用を目指し、当グループは一般的に利用されている水平電極配置型とは異なる鉛直電極配置形を採用した海底直流電気探査法の研究開発を進めている。

今年度は、計測データの高精度化、および測定効率・安定性の向上を目指し、新型電極ケーブルを製作し、商用電気探査装置を組み合わせた測定の野外実験を実施する。

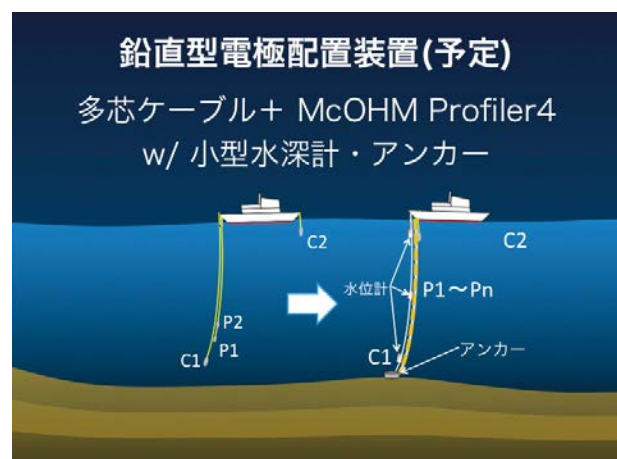


図4 鉛直形電気探査法装置の開発計画概要

## 2.4. 地盤液状化調査

東日本大震災による広域で生じた宅地地盤における液状化被害により、液状化被害への対策や地盤の液状化評価への関心が高まり、特に宅地地盤を対象とした低コストの液状化調査手法の開発が求められている。当グループでは、高密度かつ高精度な地盤の電気探査を行い、液状化層の深度・層厚を地表から求めることで、宅地地盤を対象とした簡易な液状化調査手法の開発を実施している。本調査手法は、掘削や貫入試験を用いた従来の液状化調査に対する、事前のスクリーニング調査法として位置付けることができる。

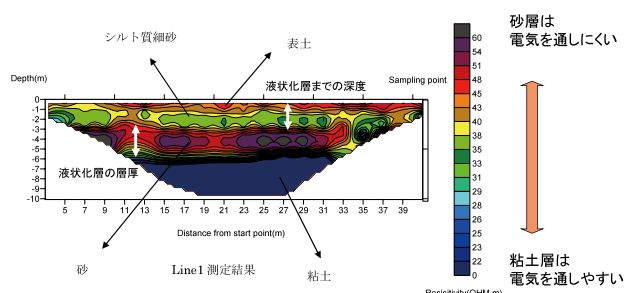


図5 液状化層の深度および層厚から液状化の発生予測を行う。

## 3. グループの研究体制

物理探査研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

光畑裕司（グループ長）

上田 匠

神宮司元治

中島善人

横田俊之

内田利弘（イノベーションコーディネータ）

川畑史子（テクニカルスタッフ）

木村夕子（テクニカルスタッフ）

紙谷 進（派遣）

## 4. 最近の主な研究成果

Nakashima, Y. and Nakano, T. (2012) Steady-State Local Diffusive Fluxes in Porous Geo-Materials Obtained by Pore-Scale Simulations, TRANSPORT IN POROUS MEDIA, **93**, 657-673.

神宮司元治, 高倉伸一, 小川康雄 (2012) マルチ送信高速比抵抗探査装置を用いた鬼首間欠泉の比抵抗モニタリング, 九大地熱・火山研究報告, **20**, 77-8.

Uchida, T., Takakura, S., Ueda, T., Adachi, M., Ozeki, H., Kamata, K. and Sato, T. (2011) 3D magnetotelluric survey at the Yanaizu-Nishiyama geothermal field, northern Japan, Proceedings of the 9th Asian Geothermal Symposium, 26-31.

横田俊之, 稲崎富士, 溝畑茂治, 内田利弘, 上田匠 (2012) 幌延沿岸陸域における反射法地震探査, 物理探査, **65**, 16-172.



## CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループの紹介

### Introduction of the CO<sub>2</sub> Geological Storage Research Group

CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループ長：中尾信典

Leader, CO<sub>2</sub> Geological Storage Research Group: Shinsuke Nakao

Phone: 029-861-3955, E-mail: sh-nakao@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

当研究グループでは、CO<sub>2</sub> 地中貯留の実用化に向けて、1) CO<sub>2</sub> がどのように帯水層内に貯留されるか（貯留メカニズムの解明）、2) CO<sub>2</sub> の挙動をどのように監視・予測していくか（モニタリング・モデリング技術）、3) どのように安全性を評価し確保していくか（安全性評価、影響評価）、という3つの問題意識に基づいた研究を推進している。また、これらの研究を地圏環境の利用と保全、資源の安定供給という観点の研究・技術開発への応用も目指している。

国内の情勢としては、国による実証事業として北海道苫小牧地点において2016年 CO<sub>2</sub> 圧入開始に向けた準備が進められており、CO<sub>2</sub> 地中貯留の2020年実用化に寄与する研究が必要とされている。

2010年度からの産総研第3期においても CO<sub>2</sub> 地中貯留は重点課題に指定されており、中期計画として、“CO<sub>2</sub> 地中貯留において、CO<sub>2</sub> の安全かつ長期間にわたる貯留を保証するための技術を開発し、早期の実用化に寄与すること”をまさに目標としている。

#### 2. グループの研究資源

##### 1) グループメンバー（平成24年10月1日現在）

中尾信典（グループ長）

雷 興林、杉原光彦、西 祐司、相馬宣和、  
徂徠正夫、加野有紀、船津貴弘、石戸恒雄、藤井孝志、上原真一（産学官制度来所者）、佐藤久代、  
当部門他研究グループ等より研究分担者15名

##### 2) 予算

- 運営費交付金：「CO<sub>2</sub> 地中貯留の研究」、「沿岸域海底下 CO<sub>2</sub> 地中貯留の安全性評価に向けた基礎的研究」他
- 経済産業省受託研究：「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（弾性波探査を補完する CO<sub>2</sub> 挙動評価技術の開発）」／「次世代型地熱エネルギー探査技術の開発」

#### 3. 平成24年度上期までの進捗状況

ここでは、当グループメンバーが実施している CO<sub>2</sub> 地中貯留研究の主な進捗状況を紹介する。

##### 1) 弾性波探査補完モニタリング技術：AE

経済産業省受託研究「弾性波探査補完モニタリング技術の開発」において、米国 Southwest Regional Partnership (SWP) が実施する大規模 CO<sub>2</sub> 地中貯留

プロジェクトに参加して、反射法地震探査を補完するモニタリング手法の研究開発を進めている。

平成23年度には SWP の予備的なサイトであったユタ州ゴードンクリークに Acoustic Emission (AE) 観測器を設置し、観測システムの動作確認とベースライン測定を実施した。導入した AE 観測機器は、平成23年12月中旬の設置から平成24年9月中旬の回収までトラブルなく動作し、長期間の連続測定が実現できる性能があることを確認できた。観測期間内には、約3万トリガが記録されるなど多数の AE 波形が得られた。ノイズ以外の波形は S-P 時間が2～3秒程度のものが多く（図1）、サイトの想定 CO<sub>2</sub> 圧入域よりも外側の、石油生産活動等に起因する AE が得られたと考えられる。本地域では AE のベースラインが不明であったので、このような事前の観測が後の CO<sub>2</sub> 注入の影響を正しく評価する上で必須であることが示された。

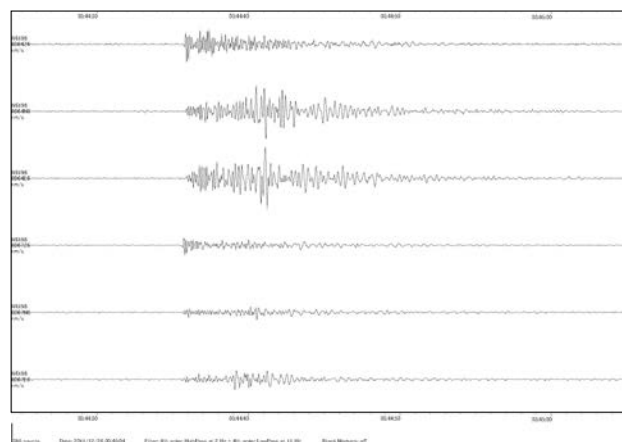


図1 2011年12月26日の観測 AE 波形例（上部3波形は観測点 AE1、下部3波形は観測点 AE4の、東西、南北、上下成分の波形記録）

##### 2) 弾性波探査補完モニタリング技術：SP

米国ユタ州ゴードンクリーク・テストサイトにおいて自然電位ベースライン測定を実施した。

銀－塩化銀電極を使用し、南北及び東西に伸びる2本の主要測線において約100m 間隔に設定した測定点の電位を計測した。周囲に商用電源等の人為的ノイズ源も少ないこともあり、ノイズの少ない品質の高いデータが取得できた。

測定したデータの標高依存性をみると（図2）、2,240～2,260m あたりを境界とし、標高の低い測定点では典型的な標高依存性が表れているが、標高の

高い測定点では標高依存性が明確ではなかった。この地域では砂岩と透水性の低い頁岩の互層がほぼ水平に堆積した平坦な台地を浸食による谷が刻んでおり、台地上にある標高の高い部分の地下水位は表面地形ではなく地下のほぼ水平な頁岩層に規制されている可能性がある。

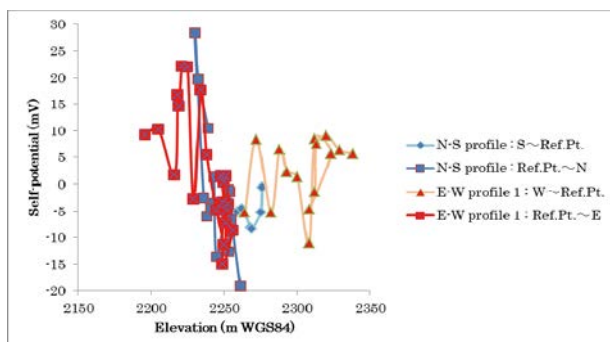


図2 自然電位ベースライン測定における自然電位の標高依存性

### 3) 弾性波探査補完モニタリング技術：重力

重力モニタリングを実フィールドで試行するために米国ユタ州ゴードンクリークの調査候補地で重力に関するベースライン測定を実施した。実施内容は①基点の構築と絶対重力計測、②基点周辺での相対重力観測網の構築とそこでの計測である。基点では連続重力計測と絶対重力計測を並行して行えるように90cm 平方の重力測定用基台を隣接して2つ設けた。この2つの基台は屋内に収めることとし、屋外に可搬型相対重力計測用の基台も隣接して設けた(写真1)。

基点での絶対重力測定結果は安定しており、基点に適していると評価できた(図3)。基台を覆う観測小屋は、超伝導重力計と絶対重力計による並行測定を行う上で必要十分な環境を提供するように設計した。自家発電とAC電源の自動切り替えが可能で、長期にわたる連続観測が可能である。現地に設置したが、移設も容易なので、モニタリング計画の変更があった場合にも柔軟に対応できる。



写真1 基点に構築した重力計測用基台(写真)と、重力計測のイメージを合成したもの。左から連続観測用超伝導重力計、絶対重力計、可搬型相対重力計。

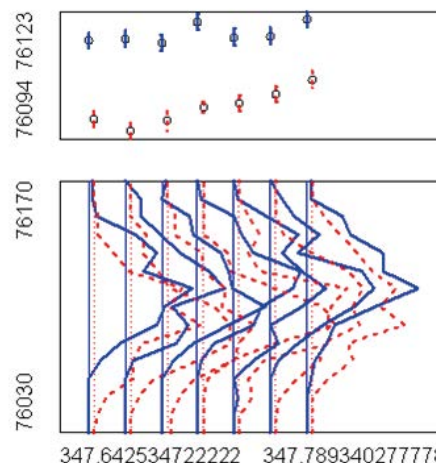


図3 絶対重力計測結果。赤青で示される2種類のレーザで120回ずつの自由落下の計測を続けて行い、平均値を評価する。屋外での約2時間半の計測では誤差 $2.7\mu\text{Gal}$ 。

### 4) $\text{CO}_2$ 長期挙動シミュレーション

本研究では、地中に圧入された $\text{CO}_2$ の長期挙動シミュレーションにより、地層構造やシール特性による $\text{CO}_2$ 貯留性の違いや、圧入に伴う力学的な影響を検討している。ここではシール層特性による $\text{CO}_2$ 挙動の検討結果を紹介する。

ごく低浸透率な泥岩・頁岩シール層に高浸透率の砂岩脈等による流路が含まれていた場合、コア試験や圧力遷移テストによって得られる平均的な浸透率が十分低い場合でも、 $\text{CO}_2$ の挙動に大きく影響する可能性がある。また二相流に対するトラッピング効果として働く毛管圧は浸透率と相関が高いが、天然岩石では同程度の浸透率に対する観測値の下限と上限で数十倍の開きがあることが知られている。

シミュレーション結果の一例を図4に示す。均質多孔質モデルでは、 $10^{-17}\text{ m}^2$ の低浸透率シールにより $\text{CO}_2$ は貯留層内に封じられるが、流路が存在し毛管圧が低い場合(bの1000年後)、 $\text{CO}_2$ が貯留層の外部へ漏洩する結果となった。一方高浸透率の流路が存在していても毛管圧が十分高い場合(c)、圧入中に僅かに $\text{CO}_2$ がシール層へ侵入するがほとんどが貯留層内部に留まる。

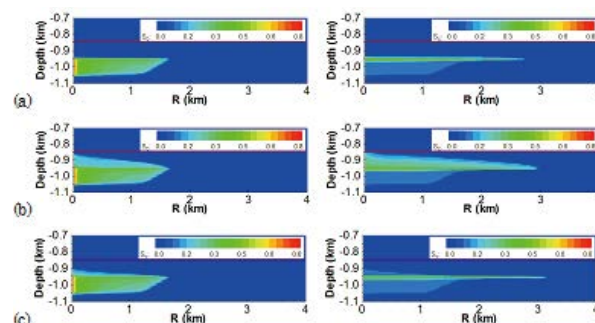


図4 平均鉛直浸透率 $10^{-17}\text{ m}^2$ のシール構造を(a)均質多孔質モデル(スレッシュホールド圧 $P_{\text{Th}}$ : 27 kPa)(b)流路存在モデル( $P_{\text{Th}}$ : 27 kPa)(c)流路存在モデル( $P_{\text{Th}}$ : 540 kPa)とした場合の(左)圧入停止時、(右)1000年後の $\text{CO}_2$ ブルーム分布。(b)モデルでは有効間隙率が小さく $\text{CO}_2$ 飽和度が高く見える。赤線は二次帯水層の底部。



## 5) 砂泥互層人工試料によるシール圧測定

CO<sub>2</sub> 地中貯留の安全サイドからの評価において、スレッシュOLD 圧低下の変動幅を把握することは非常に重要である。本研究では、キャップロックのシール性能評価の一環として、地中貯留環境下 (10 MPa, 40°C) で、超臨界 CO<sub>2</sub> に対するスレッシュOLD 圧を測定した。その際、天然岩石のスレッシュOLD 圧のばらつきに対して理論的な制約を与えるため、粒径を制御したシリカ粒子焼結体試料を作製し、種々の粒径についてスレッシュOLD 圧と浸透率の関係を求めた。今年度は、1-0.1 μm, 1-0.2 μm, 1-0.5 μm および 0.5-0.1 μm の混合粒径試料 (混合比率が 1:3, 1:1 および 3:1)、および内部構造を詳細に解析した天然岩石の測定を行った。その結果、粒径分布の効果により、スレッシュOLD 圧が均一粒径試料よりも低下し得ることが示された (図 5)。天然岩石についても、応力载荷に伴う浸透率の減少傾向は個々の岩石により異なる特色を見せたものの、粒径分布の違いに依存して、均一粒径焼結体試料のランダム密充填直線に一致するか、あるいは乖離するかが決まること、すなわち、スレッシュOLD 圧の変動に対しては粒径分布の効果が大きなことが示された。

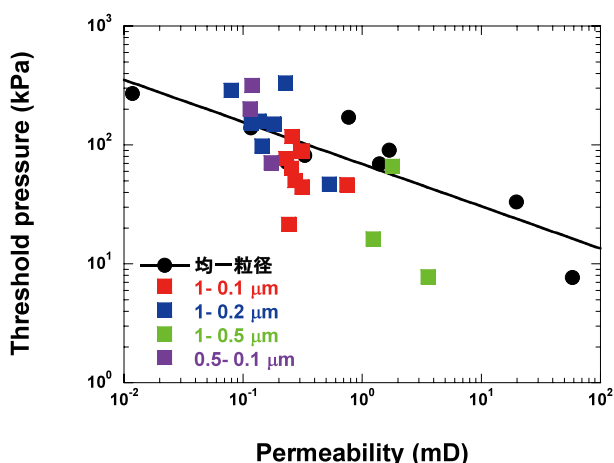


図 5 シリカ粒子焼結体試料に対するスレッシュOLD 圧と浸透率の関係

## 6) 砂泥互層内での化学的反応プロセスの評価

本研究では、CO<sub>2</sub> 地中貯留を模擬した炭酸泉および炭酸水素塩泉において現場反応実験を行い、種々の炭酸塩鉱物の反応速度の計測と CO<sub>2</sub> の固定化に至る炭酸塩鉱物の生成条件の検討を行った。本研究の目的は、CO<sub>2</sub> 地中貯留における長期地化学プロセスについて、シミュレーションによる予測精度の向上を図るために、信頼性の高いパラメータおよび知見を取得することである。特に、カルサイトの抑制剤としての Mg イオンの効果に注目した結果、Mg/Ca 比の増加とともに、生成する炭酸塩がカルサイトからアラゴナイトに変化することが確認された。一方で、一般的な帯水層条件下では、ドロマイトおよびマグネサイトは成長しないことが示唆され

た。カルサイトの成長速度と Mg/Ca 比の間には明瞭な相関性がみられず、室内実験に基づいた文献値と比較して著しく低下することが判明した。これらの実験事実は、天然では単独の Mg イオンの効果は薄れるものの、それ以外の様々な因子が複雑に関与することにより炭酸塩鉱物の成長速度が変動し、その結果、CO<sub>2</sub> 地中貯留の長期挙動予測にも大きな影響を及ぼし得ることを意味している。

## 7) ジオメカニクスを考慮した断層モデリング手法の開発

経済産業省受託研究の一環として、CO<sub>2</sub> 地中貯留において、間隙圧の変化が地層の安定性や CO<sub>2</sub> 流動に及ぼす影響を取り入れるためのモデリング技術の研究を実施している。これまでに、ジオメカニクスと流体流動の連成解析、室内試験による力学パラメータの取得等を実施した。

力学 - 流体流動連成解析においては、流体流動 - 力学連成シミュレータ TOUGH-FLAC の日本の地質への適用性を評価することを目的として、1960年代に長野県松代地域で観測された事象を対象にシミュレーションを実施した。松代では1965年から2年に亘り群発地震とそれに伴う地表面の隆起、CO<sub>2</sub> を含む流体湧出が観測された。解析結果の例として、事象開始から3年後の地表面の垂直変位分布を図6に示す。解析結果の最大隆起量は55cmであり、観測量75cmと比較して調和的な結果が得られた。

室内試験における力学パラメータの取得では、同サイトの力学的安定性の評価等に資するため、CO<sub>2</sub> 圧入実証試験サイトである苫小牧地点の岩石を対象に亀裂せん断特性の取得を実施した。

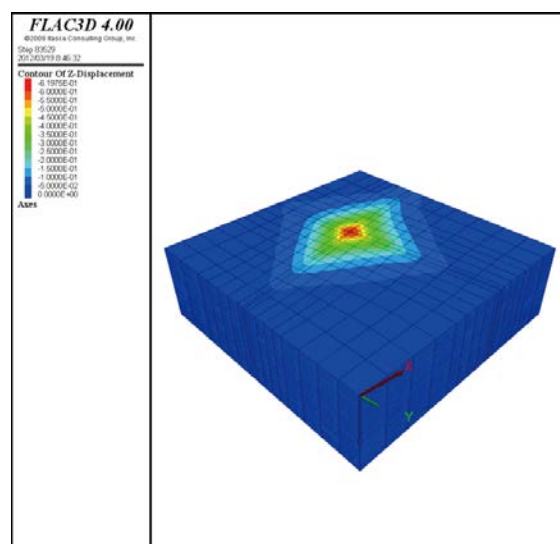


図 6 事象開始 3 年後の地表面垂直変位分布

## 8) せん断・透水試験

砂泥互層、キャップロック内には大小様々なき裂や断層が存在し、CO<sub>2</sub> 注入により、それらは岩盤の安定性に強い影響を及ぼすとともに、水理特性も変

化することが予想される。本研究では、地中貯留環境下における三軸圧縮試験により、泥岩および砂岩の供試体内にせん断帯を発達させながら透水試験を行っている。図7は、平均応力と透水係数の関係である。平均応力が10MPa以上では、応力载荷の条件に依らず、透水係数の急激な低下傾向が見られた。これは、平均応力が等方、異方の両条件ともに、10MPa以上で局所的な空隙の閉塞に伴う圧縮帯が形成されたためと考えられる。ただし、実験後の試料は、供試体の中央部が膨らむ樽型に変形したものの、明確なせん断帯の発達が観察されなかった。今後は、引き続きせん断・透水実験を行うとともに、取得した物性値を岩石変形と流体流動の連成シミュレータに取り込み、岩盤力学的変化を考慮した流体流動解析を行い、CO<sub>2</sub>貯留での適切な注入圧の設計等を検討予定である。

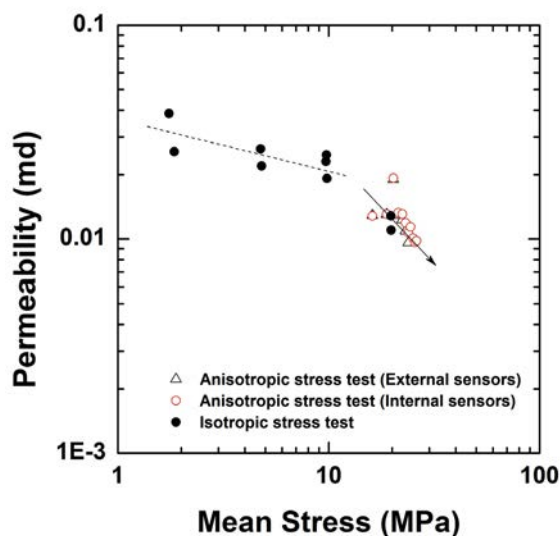


図7 等方、異方応力条件下における平均応力と浸透率の関係

### 9) 流体地下圧入による AE 及び微小地震データ解析

流体の地下圧入により、AE（岩盤の微小破壊による高周波振動）と微小地震が誘発される場合があ

ることが観測により明らかとなっている。AE と微小地震の発生は、その規模が貯留層の物性と応力状態によりさまざまであり、地下貯留系の発達状況、水圧破碎の効果、圧入流体の挙動を知るための重要な手がかりである一方、有感地震が発生すると地域社会に不安を招くリスクがある。まれなケースではあるが、地下注水による（またはそれに関係する）被害地震もこれまで10数件報告されている。被害地震の発生条件の究明は重要な研究課題である。過去の実例や地下流体が駆動する天然地震をナチュラルネスアナログとして研究すれば、注入サイトのリスク評価のための知識が得られる。そのため国際共同研究を通して当該研究を展開している。

平成24年度は GeoTaos（地の道）というフレームワークに AE 及び微小地震データ解析のための機能を統括し、海内外の実例データに適用した（図8）。GeoTaos では様々な時空間データ解析機能のほか、多相流解析プログラム（TOUGH2ツール群）、地震震源再決定プログラム（HypoDD 等）等をプラグインとして利用できる。実例として中国内陸の四川盆地の天然ガス田における注水誘発地震の解析を始めた。

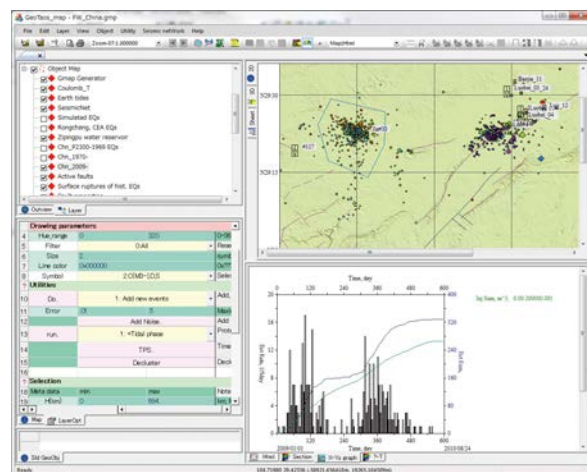


図8 GeoTaos によるガス田注水誘発地震解析。地理、地質データ、注水関連データ、地震データ等を統合的解析することが可能。



## 地圏環境評価研究グループの紹介 Introduction of the Geo-analysis Research Group

地圏環境評価研究グループ長：安川香澄

Leader, Geo-analysis Research Group: Kasumi Yasukawa  
Phone: 029-861-3280, E-mail: kasumi-yasukawa@aist.go.jp

### 1. グループの概要と研究目標

地圏環境評価研究グループは、地圏環境の評価に係る基礎的な研究及び技術開発を行っている。地圏環境と人間環境との境界において、人の健康等に関わる技術課題を取り上げて研究することで、安全・安心な社会構築に貢献することを目標としている（図1）。

2003年に土壤汚染対策法が施行され、地圏環境の適正な管理及びそれらに関連する技術開発が、重要課題となっている。当グループでは、市街地や産業用地における土壤・地下水汚染に係る深刻な問題が顕在化している社会状況を鑑み、様々な土壤特性下における有害物質による土壤・地下水汚染等の評価のための物理的・化学的・生物的な評定技術及びその浄化手法を、中心的な研究課題として取り上げている。

その他にも当グループでは、地圏環境の計測技術に係る基礎的な研究として、音環境の予測・影響評価手法に係る研究、原位置地下応力測定に係る技術開発等を幅広く実施している。

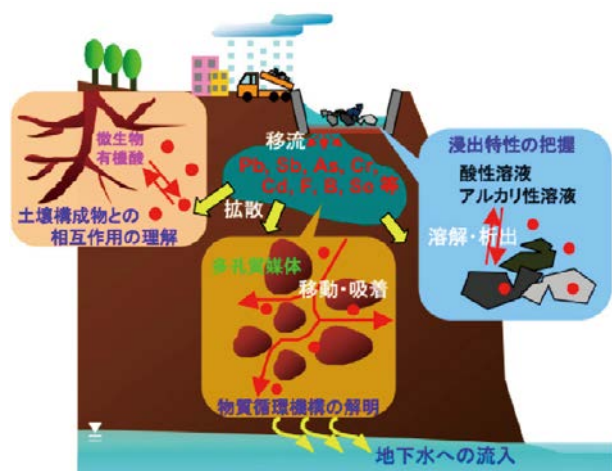


図1 土壤・地下水汚染等を中心とした地圏環境評価の研究

### 2. グループの研究資源

#### 1) グループ員

安川香澄（リーダー）

成田 孝、高橋保盛、杉田 創

#### 2) 研究課題

・運営費交付金「地圏環境評価の研究（地質）」ほか

### 3. 研究の進捗状況

#### 1) 発光バクテリアを用いた汚染土壌毒性の評価手法の開発

近年、重金属類や揮発有機塩素化合物等による土

壌汚染が顕在化しており、社会的にも土壤汚染の調査・対策等が求められ、土壤汚染対策法では、第二種特定有害物質として重金属類9物質（Cd、Pb、Hg、CN、F、B、Cr<sup>6+</sup>、As、Se）が指定されている。一方、急性毒性や汚染物質の簡易検出技術として、発光バクテリアを用いたバイオアッセイが注目されており、基礎的なデータの蓄積が求められている。土壤汚染対策法の第二種特定有害物質に指定されている重金属類9種について発光バクテリア（Vibrio fischeri）によるバイオアッセイ試験を実施した結果、以下のことが明らかになった（図2参照）。

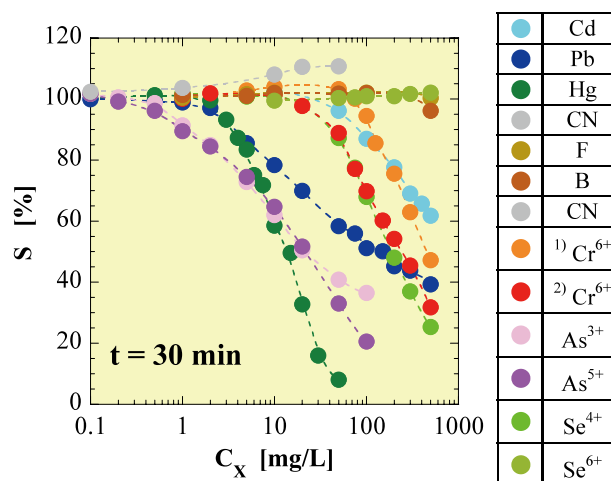


図2 発光バクテリアの相対発光強度比に及ぼす重金属濃度の影響

1)クロム酸イオン, 2)二クロム酸イオン

① Cd、Pb、Hg、Cr<sup>6+</sup>、As、4価のSeは発光バクテリアに対して濃度依存性のある毒性影響を示したため、これらの検出及び定量評価が可能であると思われる。

② CNは発光バクテリアに対して毒性影響を示さず、逆に発光強度の増加が認められた。

③ F及びBの毒性影響はほとんどない、または非常に小さいため、検出及び定量評価は困難と思われる。

④ Cr<sup>6+</sup>の溶存形態の違い（CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>及びCr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>）によって毒性影響に反応速度的な違いが見られた。

⑤ Asの価数（3価及び5価）の違いによる毒性影響の差は比較的小さかった。

⑥ Seは価数の違いによって急性毒性影響が大きく異なり、4価の亜セレン酸は極めて強い急性毒性影響を示したのに対して、6価のセレン酸は急性毒性を全く示さなかった。

⑦当該手法による土壤汚染のスクリーニングでは、

土壌溶出量基準を満たせないが、土壌含有量基準に関しては、Cd, Pb, Hg, Cr<sup>6+</sup>, As 及び 4 価の Se について適合できる可能性があることが示された。

## 2) 屋外での騒音計測に伴う風雑音に関する研究

屋外での騒音計測では通常、ウレタンフォーム製などの防風スクリーンを使用するが、マイクロホンの出力信号への風雑音の混入は避けられない。風雑音の主要な一因は、流れてくる風塊中の圧力分布、いわゆる渦がマイクロホンでスキャンされることと考えられている。

風雑音に関する一連の研究として、これまでに、屋外での計測において主風向方向に 1 m 離れた 2 つのマイクロホンの出力信号間に相関を確認した。一方、ホットワイヤで計測した変動風速信号の間には、相関が見つからなかった (図 3)。これらの関係は共に 200 Hz 以下の周波数域を対象としており、こういった比較的静音下での計測にも音響的な雑音が含まれている可能性もある。しかし、測定されたマイクロホン信号中では風雑音が主な信号だとすれば、マイク信号間と風速計信号間の相関関係の違いは何によるものかを考察した。

一つの原因として、空間的なサイズの影響が考えられる。マイクロホンの計測に用いたウインドスクリーンは 9 cm 径であり、風速 3 m/s 時の 30 Hz の波長に相当する。一方、風速計のホットワイヤは長さ 2 mm で、風向が変動する風速の流線が 1 m 離れた 2 つのホットワイヤを貫く可能性は低い。

この考察の正否を調べるため、裸のマイクロホン間及び 20 cm 径のウインドスクリーン装着したマイクロホン間の信号を比較し、風雑音信号の相関性、また、風雑音の音源の追求を行なった。その結果、20 cm 径ウインドスクリーンを装着したマイクロホンでは 9 cm 径に比べてかなり大きな風雑音低減をもたらすが、相関性検討の結果からは風塊内の空間的な圧力分布を取り除けていないらしいことが解った。低周波音の計測で風の影響を取り除くには、別の対策が必要と考えられる。

## 3) 原位置応力変化測定装置の開発及びその利用

大規模地下空間利用施設の安全安定性評価には、地下空間周辺の応力変化の長期的な測定が必要である。そこで、電気的な測定手法を用いず、測定装置の応力測定場所への設置にも、セメント等を用いた固定作業を必要としない原位置応力変化測定装置を開発した。測定部は内部がシリンダー状の本体と、その上下に一對の装置固定用兼応力測定用プラテンを持つ構造で、温度補償機能も備わっている【特許第 4167912 号】(図 4)。

本装置を石炭鉱山の採掘現場に設置し、掘進切羽の進行に伴う天盤崩落時の下盤での応力増加傾向を測定した。また応力変化測定に利用されるフラット

ジャッキを併設し、応力増加傾向を相互に比較した。図 5 の通り、本装置ならびにフラットジャッキの出力が切羽の進行に伴う天盤崩落の増大によって次第に増加する傾向が見られた。

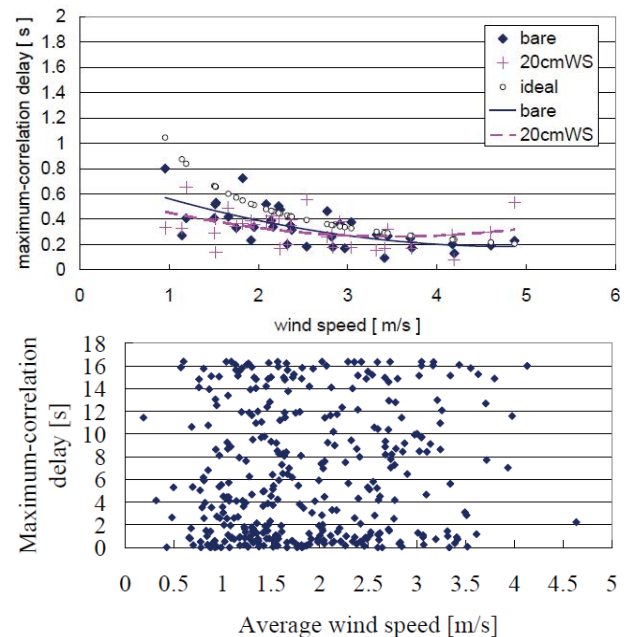


図 3 マイクロホン信号間の相関 (上) 及び類似実験によるホットワイヤ信号間の相関 (下)

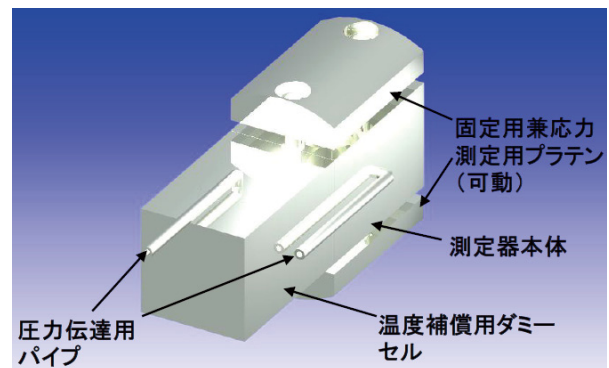


図 4 原位置応力変化測定装置

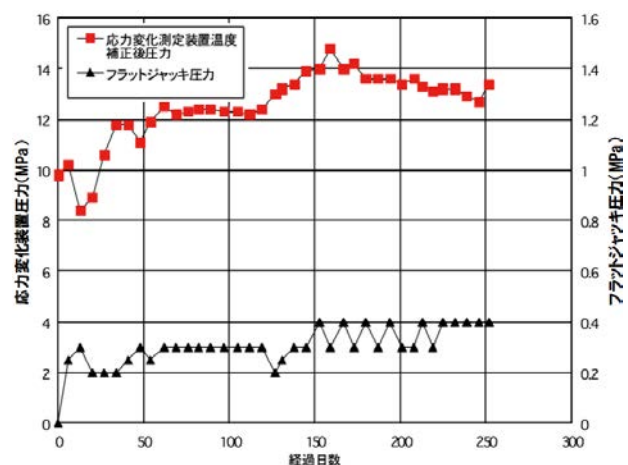


図 5 天盤崩落の増大に伴う応力増加傾向



## 地圏環境リスク研究グループの紹介

### Introduction of the Geo-Environmental Risk Research Group

地圏環境リスク研究グループ長：張 銘

Leader, Geo-Environmental Risk Research Group: Ming Zhang

Phone: 029-861-3943, E-mail: m.zhang@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

地圏環境に係る各種汚染の調査評価技術、移行評価技術、リスク評価技術並びに環境修復・浄化技術に関する研究開発を行い、理学的、工学的、環境疫学的及び社会・経済学的などの観点から関連問題を俯瞰し、研究開発を重ね、合理的・科学的なリスク管理及びリスクコミュニケーションなどに資することを目的とする。図1に地圏環境リスク評価関連の主要な研究課題を示す。

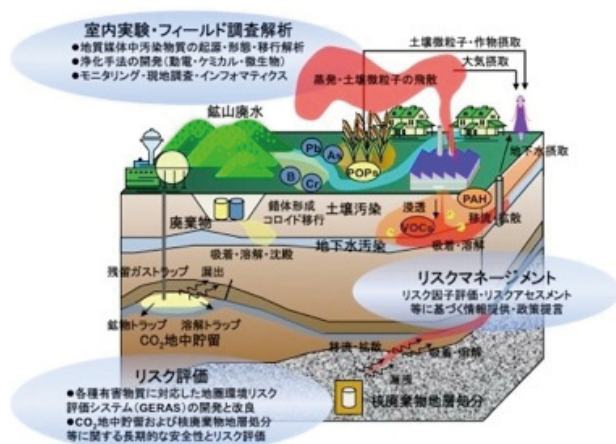


図1 地圏環境リスク評価関連の主要な研究課題

特に、東日本大震災によって顕在化した大規模地質災害リスクや放射線リスクなどにも積極的に取込み、津波堆積物の地球化学的検討とリスク評価、放射性セシウムの環境動態調査・モニタリング及びモデル化の実施、経済モデルや生活環境モデルおよび生態モデルなどを考慮した新機能地圏環境リスク評価システムの逐次開発を行い、復興支援や社会への還元を図る。

#### 2. 各研究項目の内容

地圏環境リスク研究グループは以下に示す主要項目で研究を実施している。

##### 2.1. 地圏環境リスクの研究

天然硫化鉄鉱を用いた残留性塩素系化合物の浄化メカニズムの解明を進め、特に亜熱帯地域の沿岸硫酸酸性土壌を対象とした浄化効果の評価を行う。また、同位体を用いた自然及び人為起源の土壌・表層水汚染に関する研究開発を進めると共に、表層土壌基本情報の整備を行う。図2に表層土壌評価基本図～富山県地域～を一例として示す。



図2 表層土壌評価基本図

放射性セシウムや重金属類および揮発性有機化合物（VOCs）などの環境リスク評価に必要な基本データを取得し、リスクモデルの開発と改良を重ねていく。また、科学的自然減衰の評価や、自然エネルギー及び微生物等を利活用した浄化手法の開発、及び迅速オンサイト型の分析・調査技術の開発を行い、実用化を図る。さらに、物理、化学的な視点に加え、土壌汚染浄化における環境負荷や経済的及び社会的効果を評価し、土壌汚染対策事業のさらなる展開と促進に努める。

また、地圏環境における合理的・科学的なリスク管理とリスクコミュニケーションに資するため、リスクガバナンスに適合するリスクの定量評価の可能性を探り、CO<sub>2</sub>の地中貯留や国内外における土壌・地下水汚染、ならびにスモールスケールマイニング問題などへの適用と展開を図る。

##### 2.2. 重金属類土壌汚染調査評価及びリスク低減方策に関する技術開発（重点研究加速）

日本国内における土壌汚染の事例の6割以上を占める重金属類土壌汚染関連の調査技術、浄化技術及びリスク評価技術に関する体系的な研究開発を実施し、技術の実用化と普及による社会への還元を行う。具体的に、汚染物質濃度のオンサイト計測技術、汚染物質のミクロな存在形態に関する検討、土壌有機物質の存在や鉱物組成が浄化効率に及ぼす影響の検討、酸性電解水及び動電学的手法を用いた浄化技術の開発並びに地盤における汚染物質の移行評価と環境リスク評価技術の開発を行う。これら研究開発によって、現状の民間企業との共同研究を拡大し、更なる外部資金を獲得するとともに、連携による技術の実用化と普及を図る。

##### 2.3. 地圏汚染リスク評価技術の開発（戦略的推進課題）

地圏環境リスク評価システム（GERAS）を高度化し、産業や社会に普及させる。有害物質を含む廃棄物の堆積場や埋立処分地における土壌・地下水・

地表水汚染による環境リスクを時間的・空間的に評価するために、2010年にはGERAS-3 廃棄物バージョンを公開した。また、温暖化物質排出抑制を目的としたCO<sub>2</sub>地中貯留のリスク評価に利用するために、2010年度末にはGERASのCO<sub>2</sub>地中貯留バージョンのプロトタイプとしてGERAS-CO<sub>2</sub>GSを公開した。

今後は、放射性汚染土壌の環境リスクの評価が可能となるようにシステムの改良を行う。また、植物や水生生物、土壌中生物などの生態系リスク評価の方法論を確立し、統合化リスク評価システムの検討を進める。

#### 2.4. 土壌と食品に係る放射性物質リスク管理技術の開発（分野融合・連携推進）

土壌や食品に係る放射性物質のリスク評価・管理技術の確立と情報基盤の整備を進め、関連技術の融合・実用化及び社会への還元を行う。具体的に、土壌や環境中の放射能濃度の現場計測技術を実用化し、広範囲調査及び長期的モニタリングに活用する。東日本の地域特性や土壌物性、土壌から食品への移行特性を考慮したリスク評価手法を開発し、放射性物質に起因するリスクの評価を可能とする。また、土壌や食品中の放射性物質に対応したリスクに関する情報整備を行い、除染等のリスク低減方策の策定やリスクコミュニケーション等に資する。

### 3. グループの研究体制

地圏環境リスク研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

張 銘（グループ長）  
田中 敦子  
村尾 智  
川辺 能成  
原 淳子  
保高 徹生  
坂本 靖英（イノベーション推進本部に出向中）  
高田 貞江（テクニカルスタッフ）  
渡邊真理子（テクニカルスタッフ）  
三浦 直子（テクニカルスタッフ）  
岸 優子（テクニカルスタッフ）  
張 紅（テクニカルスタッフ）  
山崎 哲生（客員研究員）  
西脇 淳子（協力研究員）  
吉川 美穂（産学官来所者）  
彭 先佳（国際制度来所者）  
黒澤 暁彦（派遣）

また、異分野や内外部との連携を重視し、研究協力や共同研究なども積極的に推進している。

### 4. 最近の主な研究成果

1. 川辺能成, 原 淳子, 保高徹生, 坂本靖英, 張 銘, 駒井 武 (2012) 東日本大震災における津波堆積物中の重金属類とそのリスク, 土木学会論文集 G, 68(3), 195-202.
2. J. Hara (2012) Chemical Degradation of Chlorinated Organic Pollutants for In Situ Remediation and Evaluation of Natural Attenuation, Organic Pollutants, No. 14, 345-364.
3. 保高徹夫, 張 銘, 駒井 武, 松田裕之 (2011) 土壌に含有された放射性物質の被ばく量評価に関する研究, 第9回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 135-138.
4. A. Tanaka, H. Sakamoto, T. Komai (2011) Risk Assessment Research about CCS, CO<sub>2</sub> flow behavior and simulation, Proc. 4th KIGAM-AIST Joint Workshop on CO<sub>2</sub> Geological Storage.
5. 保高徹生 (2012) 化学物質のリスク評価と意思決定のギャップを埋める 環境リスクと経済リスクの調和を目指す: 土壌汚染措置の意思決定, 日本リスク研究学会誌, 21(4), 201-210.
6. 張 銘 (2012) 重金属類, 重金属類汚染対策のための鉱物材料ガイドブック (第1章), (独) 日本学術振興会鉱物新活用第111委員会重金属類と鉱物の相互作用に関するワーキンググループ編集, 発行: 株式会社ブイツーソリューション, pp.10-81.
7. T. Komai, Y. Kawabe, J. Hara, Y. Sakamoto, M. Zhang (2012) Geochemical Survey of Tsunami Sediments and Transport of Toxic Elements from Off-shore Environment - Urgent Investigation for Earthquake March 11, 2011-, Proceedings of ISOPE-2012, No. 22, 49-53.
8. 張 銘, 吉川美穂, 竹内美緒, 駒井 武 (2012) VOCs 汚染浄化技術の現状に関する考察, 第18回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 講演集, 533-537.
9. 吉川美穂, 竹内美緒, 張 銘, 駒井 武 (2012) クロロエチレン類汚染サイトにおける脱塩素分解微生物および環境因子の解析, 第18回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 講演集, 13-118.



## 地圏環境システム研究グループの紹介

### Introduction of the Geo-Environmental Systems Research Group

地圏環境システム研究グループ長：高倉伸一

Leader, Geo-Environmental Systems Research Group: Shinichi Takakura

Phone: 029-861-3927, E-mail: takakura-s@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

地圏環境システム研究グループでは、環境に調和した地圏の開発・利用を図るため、岩盤応力測定や岩石コア実験による地下構造の評価技術、物理探査を利用した非破壊モニタリング技術、数値シミュレーションによる地下環境のモデリング技術などの基盤研究を進めている。また、CO<sub>2</sub>地中貯留研究や放射性廃棄物地層処分研究などへの適用研究を行っている。当研究グループ員が長年にわたり研究を進めてきた各種技術は、浅部から深部に至る地圏環境の解明、地圏の流体や熱の変動予測、地熱等資源の継続的利用などに役立ってきた。今後ますます高度化・多様化する社会のニーズに的確に応えられるよう、技術ポテンシャルの維持・向上に努めている。さらに、これらの技術を地下資源の安定的確保や継続的利用あるいは地質災害や地質汚染の防止を図る研究などへも積極的に応用して、安全で安心できる社会の実現に貢献することを目指している。このため、他のグループ・ユニット間の連携による研究、外部研究機関や企業との共同研究を積極的に進めるとともに、研究成果を迅速に発信し、社会への技術の普及と振興に取り組む。

#### 2. グループの概要

当研究グループは、CO<sub>2</sub>地中貯留研究、地層処分安全研究、地熱等資源研究、地下利用技術研究を主たるミッションにかかげ、つくば西事業所で平成19年7月に新しく組織され、平成24年6月につくば中央第7事業所に移転した。メンバーは、地球物理学、岩石力学、掘削工学、岩盤工学の専門家からなる。物理学的実験およびフィールドワークの手法を用いて、環境に調和した地下の有効利用、資源開発に必要な技術開発に取り組んでいる。

研究対象は環境評価から資源探査までと多岐にわたり、予算項目は複数にまたがっている。いずれの研究においても、「環境との調和を考えた地圏の開発・利用を図ること」を基本理念としている。研究内容も基礎研究から応用研究まで幅広いが、技術的に重なる部分も多い。そこで、研究テーマを便宜的に以下の4つに分類し、個々の研究テーマを管理し、研究の効率化を図っている。

- ・ CO<sub>2</sub>地中貯留技術に関する研究
- ・ 放射性廃棄物地層処分に関する研究
- ・ 地圏の継続的利用に関する研究
- ・ 地圏環境システムの解明に関する研究

#### 1) グループ員

高倉 伸一（研究グループ長）

及川 寧己

唐澤 廣和

竹原 孝

宮崎 晋行（24年度から）

相馬 宣和（CO<sub>2</sub>地中貯留 RG より分担）

船津 貴弘（CO<sub>2</sub>地中貯留 RG より分担）

中村 竹博（産学官制度来所者、23年度まで）

東海林太郎（産学官制度来所者）

吉場 綾美（産学官制度来所者、24年度から）

#### 2) 予算

経済産業省研究委託費「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業」

運営費交付金「地圏環境システムの研究」

日本鉱業協会研究委託費「磁鉄鉱と硫化鉄物を含む岩石の電気的特性に関する研究」

共同研究費「豊羽地域における地熱構造モデル構築に関する研究」等

#### 3. 研究の進捗状況

以下では、主な研究について平成24年度前半までの進捗状況の一例を紹介する。

##### 3.1. CO<sub>2</sub>地中貯留時における未固結堆積層の力学挙動評価に関する研究

超臨界状態のCO<sub>2</sub>を海底下の未固結層に圧入する場合、数値シミュレーション等により海底地盤の力学的な挙動を予測し、安全性を確保しなければならない。そのためには、CO<sub>2</sub>貯留層の力学特性に関する知見を十分蓄積した上で、そのモデル化を行う必要がある。そこで、海底下のCO<sub>2</sub>貯留層を模擬する未固結堆積物の供試体を人工的に作製し、三軸圧縮試験装置を使用して、三軸圧縮特性を取得する実験を行っている。供試体は、密詰め豊浦砂を一旦水で飽和した後、超臨界CO<sub>2</sub>により間隙水を置換して作製した。軸載荷は、排水状態にてひずみ速度0.1%/min、セル圧18 MPa、間隙圧9 MPa、供試体温度40℃を基本的な条件として行っている。試験結果の一例として、軸差応力-軸ひずみ曲線を図1に示す。図から、軸差応力は軸ひずみに対して単調に増加している。図には、比較のために行った、水飽和した豊浦砂の結果も示している。超臨界CO<sub>2</sub>を含む供試体の方が、水飽和した供試体よりも、わずかなではあるが、大きな軸差応力を示している。これらは、超臨界CO<sub>2</sub>を貯留する未固結堆積層のモデ

ル化を行うための基礎的なデータとなる。

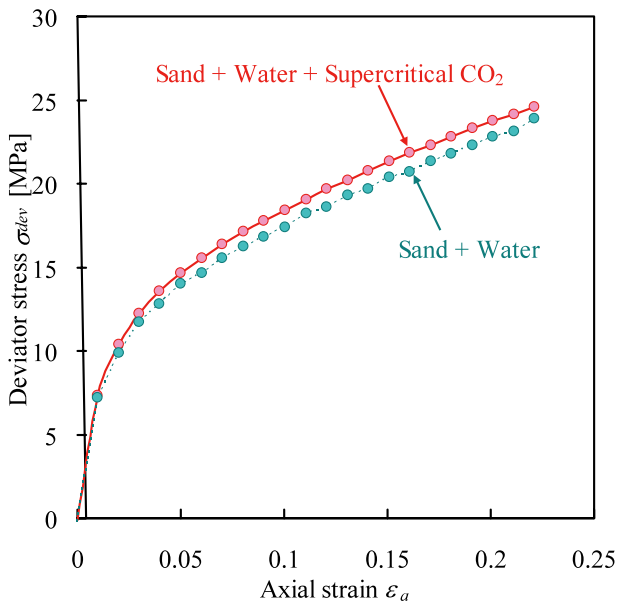


図1 軸差応力-軸ひずみ曲線

### 3.2. 放射性廃棄物地層処分における長期空洞安定性評価技術の研究

#### a) 深部岩盤空洞周り緩み域における3次元応力計測

原子力発電所から排出される高レベル放射性廃棄物は、十分深い地層中にて超長期間保存され、放射能の減衰を待つことになる。高レベル放射性廃棄物の搬入や貯留を行うためには、安定した地下に空洞を掘削することが必要である。しかし、この岩盤空洞周りでは、その開削により応力が低下するため変形などの力学的変化の生ずる領域が発生する。この領域は応力の緩み域とよばれ、潜在き裂等の開口により天然バリアとしての岩盤の遮蔽性能が低下することが考えられる。空洞の長期安定性評価の観点から、この緩み域を経時的に評価することは高レベル放射性廃棄物の地層処分において重要である。

Acoustic Emission / Deformation Rate Analysis 法は、調査ボーリング等によって得られた岩芯試料から切り出した試験片に対し実験室で繰返し載荷試験を行い、そこで認められるカイザー効果等から、載荷軸方向で受けていた元の岩盤内の応力を評価する計測法である。この計測法を地下空洞掘削にともない岩盤内に生ずる掘削影響領域を簡便かつ低コストで調査する方法として応用することを目指している。これまでに空洞開削からの経過期間の異なる2地点A・Bにおいて現場コアを用いた3次元応力場の計測実験を行ってきた。ここではB地点における研究結果を述べる。

B地点においてはそれぞれの計測個所（3孔各3深度計9個所）で、ある一つの計測方向に対して複数の試験片を用意するなどの工夫をした。その結果応力解析の基となる応力値の数については十分揃えられた一方で、各計測方向において計測した応力値

が大きくばらつくという問題が生じた。3次元応力場へのインバージョンを行いながらのデータの絞り込みを、アルゴリズムを3通りに変えながら試行したが、その違いによる変化はそれ程大きくなかった。インバージョン後の個々の計測個所の3次元応力場は、必ずしも知られている坑道周辺の初期応力場によく合致するものではなかったが、全体として見れば、水平面内の応力場として北西-南東方向が強く圧縮されているという、知られている坑道周辺の初期応力場の反映が見られた。一方で計測値の問題点としては鉛直方向の応力値が被りよりも相当大きいということがあげられる。また、2孔で主応力方向の孔深度による回転が見られた。1孔については奥から手前にかけて連続的に回転し、単純なシミュレーションモデル（図2）による検討からは再現できなかった。逆に再現するためにはモデル上に不連続面を設定するなどの工夫が必要があるとも考えられる。もう1孔については奥の2個所と手前の1個所の傾向が異なり、こちらは定性的ではあるが空洞開削部の影響として再現ができており、応力値の実測とシミュレーションモデルによる比較検討は現場応力の評価に有効と考えられる。

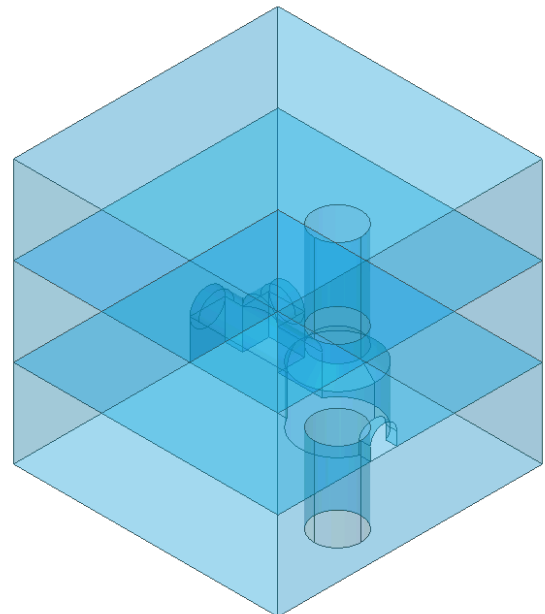


図2 B地点における3次元解析モデルの空洞形状

#### b) 空洞周り緩み域における岩盤長期変形挙動に関する研究

強制湿潤状態の珪藻土を用いてニアフィールド環境（封圧10MPa、中間温度領域として温度80℃）を模した条件下で非排水条件のクリープ試験を実施した。また、比較のため常温（25℃）での試験も実施した。昨年の載荷速度を $10^{-5}/\text{sec}$ とした三軸圧縮試験の結果を用いてクリープ応力レベルを90%の値に決定したが、供試体個体の強度のバラツキに左右されての試験となったため、一次クリープから三次クリープまでの良質なクリープ試験結果が得られた



のはわずかであった。しかし、解析可能な実験結果では、対数クリープ則に従うことを確認した。破壊しない供試体は一次クリープである対数クリープ則に従い、二次クリープの発現前に計測を打ち切っているが、最長70日の試験結果が得られている。試験後の供試体の状況を観察すると、破壊した試験片は共役なせん断破壊面を持つものと約60度のせん断破壊面を持つものであった。非破壊の試験片は、全体が収縮した状態の形状が観察された。しかしながら、この形状の違いとクリープ試験のパラメータの相関性に関してはまだ解析途中である。また、含水比に着目して解析を行ったところ、含水比が高いものほど壊れやすいという結果が定性的ではあるが伺えた。

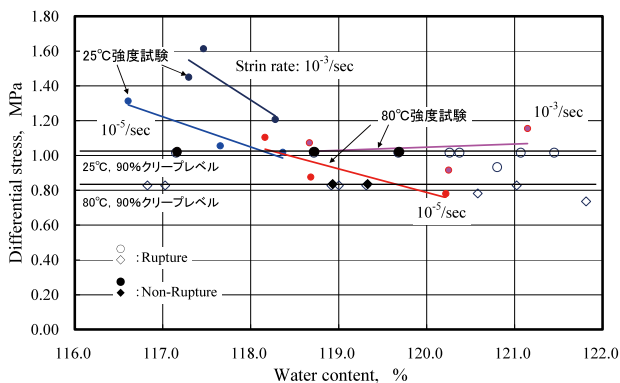


図3 力学試験結果と含水比の関係

### 3.3. 坑井掘削の効率化

ビット荷重がビット摩耗に及ぼす影響を検討するため、直径が65mmの新品のパークッションビット2個のビット荷重をそれぞれ約6kNと13kNに設定して沢入花崗岩を用いて耐久試験を行った。沢入花崗岩の一軸圧縮強度は約220MPaである。ビット荷重を除く両ビットの試験条件は、ビット回転数が75rpm、パークッションドリルへの入力油圧が13.5MPaである。以下、ビット荷重が約6kNと13kNのビットを、それぞれビットA、ビットBと呼ぶ。

図4は、ビットAとビットBの掘削長とトルクとの関係である。図からわかるように、y切片は異なるものの、両ビットの直線の傾きはほぼ同じで、約0.00406kN・m/mである。掘削長が30mのとき、両ビットのトルクは約0.12kN・m増大している。また、両ビットとも掘削長が約30mのときにほぼビットライフに達した。これらの結果から、少なくともビット荷重が試験範囲内であればトルクの計測によってビットライフの推定が可能であることがわかった。

図5は、ビットAとビットBの掘削長とゲージチップのハイトロス（チップ高さの減少値）との関係である。両ビットのゲージチップのハイトロスはほぼ同じで、直線的に増大している。直線の勾配として約0.0526mm/mを得た。

ビットの摩耗が進展したときにトルクが増大する

メカニズムについては明確になっていない。そこで、図6に示すように、ビットのフェースチップとゲージチップをそれぞれ1個のチップで模擬してメカニズムを検討した。(a)図が新品チップ、(b)図が摩耗チップである。紙数の都合から、このメカニズムを簡単に説明する。ビット荷重は $(V_f + V_g)$ で、ほぼ一定である。新品ビットの場合、フェースチップとゲージチップのビット1回転当りの圧入深さは $d_{new}$ である。すなわち、各チップに作用する荷重は同一であると看做しえる。フェースチップに比べてゲージチップのビット1回転当りの移動距離が大きいので、ゲージチップの摩耗が速く進む。(b)図に示すように、ビット1回転当りの圧入深さが $d_{worn}$ の場合( $d_{worn} < d_{new}$ )、フェースチップに比べて摩耗が大きいゲージチップに作用する荷重が増大する。荷重が増大すると、ゲージチップの摩耗面に作用する摩擦抵抗 $\mu M_g$ が増大する。トルクは回転方向の力に回転半径を乗じたものと等価である。ビット摩耗の進展にともなうトルクの増大は、回転半径が大きい摩擦抵抗 $\mu M_g$ の増大に起因していると推定される。

本研究の結果、以下のことが解明された。

- ①トルクはパークッションビットの摩耗を定量的に検知できる掘削パラメータである。
- ②トルクはビットに取り付けられたゲージチップのハイトロスと一対一の相関を示す。

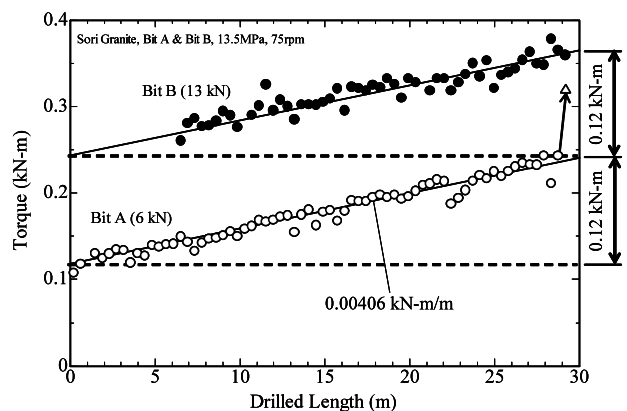


図4 掘削長とトルクとの関係

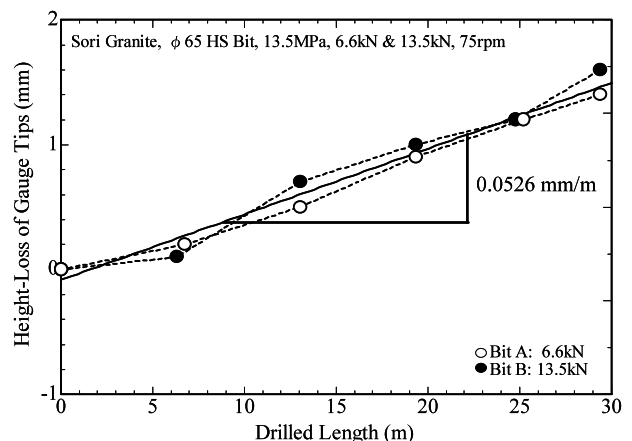


図5 掘削長とゲージチップのハイトロスとの関係

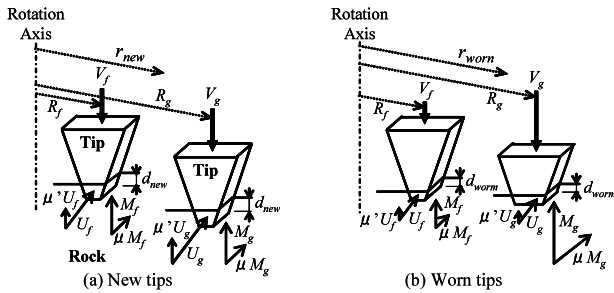


図6 新品チップと摩耗チップに作用する力の模式図

### 3.4. 磁鉄鉱と硫化鉱物を含有する岩石の電気的特性に関する研究

本研究では磁鉄鉱と硫化鉱物を含む岩石の電気的特性を詳しく調べ、それぞれの鉱物が電気的特性に及ぼす影響を解明することにより、スペクトルIP法など詳細なIP法を用いて磁鉄鉱と硫化鉱物を識別する方法の開発を目指している。平成23年度は、岩手県にある磁鉄鉱と硫化鉱物が共存する釜石鉱山の坑道において、IP法電気探査を実施した。

測定場所として、磁鉄鉱を含む鉄鉱石が分布する場所と磁鉄鉱をほとんど含まない花崗岩に覆われる場所の2箇所を選んだ。いずれの場所においても、坑道の地面に24mの測線を設定し、1mおきに25本の電極を設置した。地面は岩盤の上に砂礫が薄く積もっている状況であったので、電極位置では砂礫をどかして、そこに内径10cm、高さ5cmの塩ビ管をおき、その中に塩水をまぜたベントナイトを入れ、その上に塩水を含ませたスポンジを置いた。電流電極は直径10cmの銅網であり、電位電極は底面が直径6.5cmの鉛-塩化鉛電極である。IP法測定には、フランス国アイリス社のSYSCAL-R2を使用し、時間領域IP法のデータを取得した。電極配置はa=1mのダイポール・ダイポール配置であり、電極隔離係数は1～6とした。

それぞれの場所で得られたデータから、見掛け比抵抗と見掛け充電率を求めた。そして、それらのデータに2次元解析を適用し、比抵抗構造と充電率構造を計算した。ここでは、鉄鉱石が分布する場所の見掛け比抵抗擬似断面、見掛け充電率擬似断面、解析比抵抗断面、解析充電率断面、正規化充電率（メタルファクター）断面を図7に示す。

この図から、鉄鉱石が分布する場所では、見掛け比抵抗や見掛け充電率は局所的に大きく変化していることがわかる。2次元解析から測線の左側を中心に、

顕著な低比抵抗、高充電率異常および高正規化充電率を示す異常域が求められた。そのような異常域は鉄鉱石の露出域とほぼ重なっている。一方、花崗岩が露出する測線右側では高比抵抗、低充電率および低正規化充電率を示す。少なくとも磁鉄鉱と硫化鉱物が共存する鉱体はIP異常を示すことが確認できた。

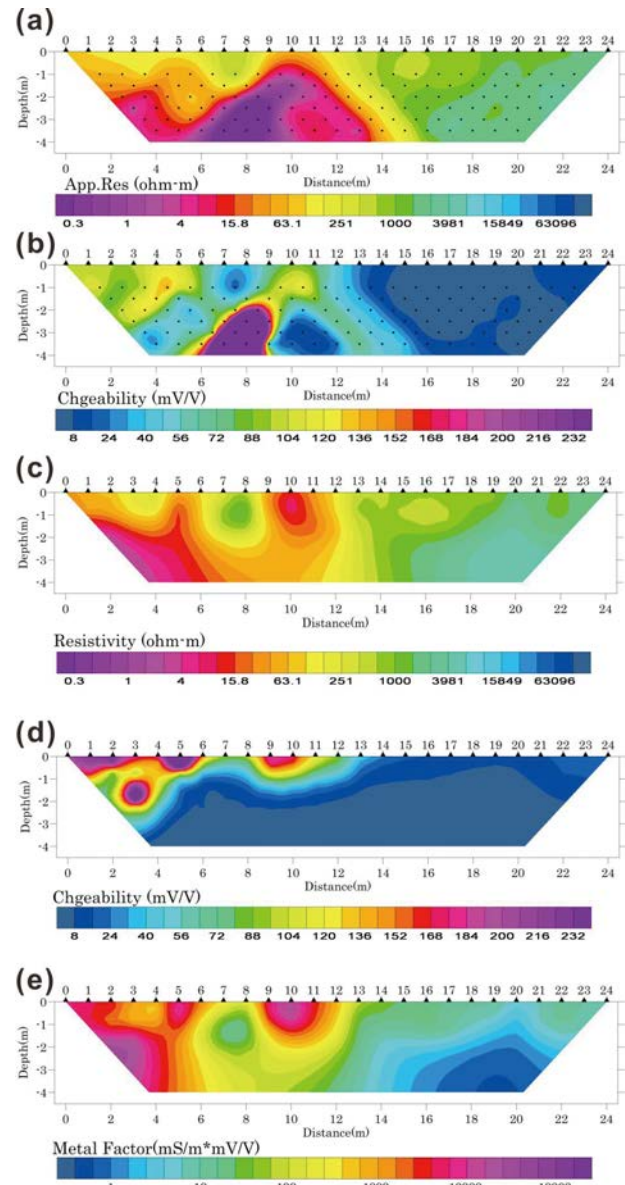


図7 鉄鉱石が分布する場所で実施したIP法電気探査から得られた (a) 見掛け比抵抗擬似断面、(b) 見掛け充電率擬似断面、(c) 解析比抵抗断面、(d) 解析充電率断面、(e) 正規化充電率（メタルファクター）



# 電気分解法を用いたスケール対策法の地熱・温泉等への適用可能性 Possibility of applying scale prevention method using electrode system for geothermal and hot spring field

柳澤教雄（地熱資源 RG），  
松村高宏，秋田裕武，小祝大輔（（株）レイケン）  
Norio Yanagisawa<sup>1)</sup>, Takahiro Matsumura<sup>2)</sup>,  
Hiromu Akita<sup>2)</sup> and Daisuke Koiwai<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Geothermal Resources R.G., <sup>2)</sup> Reiken Co., LTD.

\*Corresponding Author, E-mail: n-yanagisawa@aist.go.jp

## 1. はじめに

地熱発電所や温泉においては、熱水中のシリカや炭酸カルシウムなどが、熱交換器などにスケールとして沈積することがあり、長期的には熱交換効率の低下や流路の閉塞を招きうる。その対策として、特にスケール沈殿速度の速いシステムにおいては、スケール抑制剤の注入や酸などを用いた pH 調整などの手法で配管等への付着を抑制する手法が広く行われている。

一方、薬品を使用しない手法も検討されており、その 1 つが電気分解を用いる手法である。その場合、1) 電気分解をすることにより、その場所にスケールを付着させない、2) 電気分解を用いて 1ヶ所に強制的に捕集することにより熱水中の溶存濃度を低下させ他の場所のスケール付着を防止する、のケースが考えられる。

1) のケースの研究例としては、米谷ほか（1986）による手法で、カソード電流によりシリカ付着面の近傍のみ pH を上昇させ付着を防止させるものがあり、鹿角の熱水供給施設での実験も行われている。

今回著者らは 2) のケースとして、電気分解法を用いた炭酸カルシウムスケール対策を行っており、その捕集メカニズムの解析や温泉地での試験等を行った。その概要を本稿に示す。

## 2. 装置の概要

（株）レイケンでは、工場における熱交換システムでのスケール対策を目的として高周波電気分解水処理装置ダイナクリーン D・150T（以下 D150T と表記）を開発した。

この装置は、図 1 に示すように制御部と電極部（3本の電極と電極カバー）からなり、電極の陽極と陰極を周期的に変化させ、電極自体にスケールが付着するのを防止している。装置は、制御部と電極カバーおよび電極部からなり、電極カバーおよび電極部のサイズは、約 20cm 四方、高さ 25cm 程度のコンパクトなものであり、電極と電極カバー間の電圧は 16～20V、電流値が 1.4～3A 程度であり、消費電力が 0.02～0.06kW になるように設計されている。

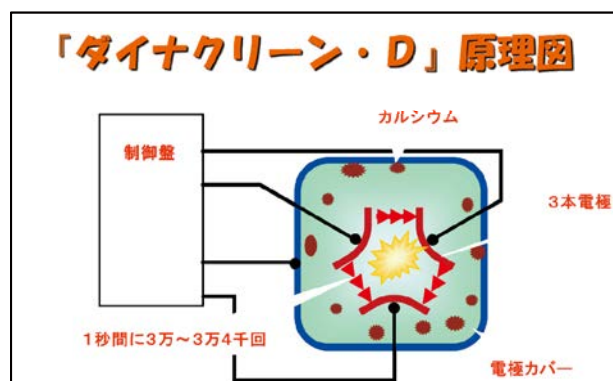
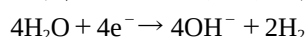


図1 ダイナクリーン D の原理図

## 3. スケール捕集メカニズム

まず、通電により陰極（－）側では、



となる。

炭酸カルシウムスケールは陰極側に捕集されるので、反応式は



で示される。そのため、Ca と OH<sup>-</sup>濃度が高いほど炭酸カルシウムの捕集効率は高まる。

そして、通電試験中は図 2 に示すように pH が電極カバー近傍で通電直後に急激に上昇しており、Ca濃度は電極カバー近傍が常時、他の箇所を上回った。これより電極カバー近傍で炭酸カルシウムの沈積が起こりやすい状況であることが示された。この

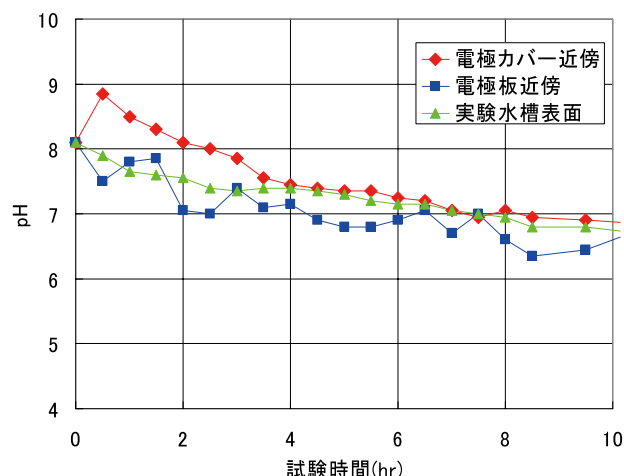


図2 通電初期の場所による pH 変化の差異

とき  $\text{OH}^-$  が消費され、陽極から生じる  $\text{H}^+$  が残り、溶液の pH は低下した。

#### 4. 温泉地域での試験

長野県小谷村の2号源泉を利用して、1) 冷却水を想定した地下水での電気分解、2) 熱水を想定した源泉と地下水の混合流体での電気分解の2つの実験を行った。

この実験では、図3に示すように、500Lのポリタンクに電気分解装置を投入し、近くに制御盤を設置した。冷却水の場合は約50L/min、熱水の場合は約70L/minでポリタンクに供給された。うち約20L/minが熱交換器を含む配管に供給され、残りをオーバーフローとして側溝に流した。通電は冷却水の試験では約280時間、熱水の試験では約24時間行い、その後、電極カバーの重量変化を測定した。



図3 電気分解装置制御盤と電極が設置されたポリタンク

まず、試験終了後には、図4に示すように電極カバーに多くの白い物質が付着しており、X線回折で炭酸カルシウムが捕集されていることが確認された。捕集量は、冷却水の280時間の試験では、46gであった。これを1日あたりに換算すると、4.03g/dayとなる。

一方、熱水での試験では、1日で16.88gであった。この16.88g/dayの捕集ペースは、冷却水の4.03g/dayの4倍以上のペースである。ここで、地下水と熱水の捕集速度の他に、流体性状（電気伝導度、pH、Ca濃度など）や消費電力を比較し、さらに工場での実験と比較したものを表1に示す。ここで、熱水のCa濃度は、冷却水（地下水）の1.2倍、 $\text{HCO}_3^-$ 濃度は冷却水の約3倍、電気伝導度は約5倍となっている。



図4 試験終了後の電気分解装置の電極カバー、炭酸カルシウムが捕集されている

工場実験も含めて比較すると、捕集速度は、Ca濃度と  $\text{HCO}_3^-$ 濃度の積にはほぼ比例する。ただし、消費電力は熱水では電気伝導度が高いこともあって、地下水の2倍以内であり、熱水においても電気分解による炭酸カルシウムの捕集効果およびそれによるスケール対策効果が高いことを示している。

表1 地下水、熱水での実験の比較

|      | 電気伝導度<br>(mS/m)               | 温度<br>(°C)    | Ca濃度<br>(mg/l) | $\text{HCO}_3^-$ 濃度<br>(mg/l) | pH        |
|------|-------------------------------|---------------|----------------|-------------------------------|-----------|
| 地下水  | 46                            | 16            | 54             | 190                           | 7.32      |
| 熱水   | 240                           | 50            | 64             | 520                           | 7.34      |
| 工場実験 | 45                            | 12            | 30             | 100                           | 7.97      |
|      | $\text{CaCO}_3$ 捕集<br>(g/day) | 流速<br>(l/min) | 装置電圧<br>(V)    | 装置電流<br>(A)                   | 電力<br>(W) |
| 地下水  | 4.03                          | 50            | 20             | 1.8                           | 36        |
| 熱水   | 16.88                         | 70            | 16             | 3.6                           | 57        |
| 工場実験 | 0.68                          | 15            | 16             | 1.4                           | 22        |

#### 参考文献

- 1) 米谷道夫・白石正夫・池庄司民夫：カソード電流による pH 上昇を利用したシリカスケールの付着防止，日本化学会誌，pp.1065-1068，(1986)
- 2) N.Yanagisawa and T.Matsumura: Analysis of the electrolytic precipitation rate of calcite, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 101, pp.319-323 (2006)
- 3) N.Yanagisawa and T.Matsumura: Scale removing and preventing by using high-frequency electrolysis system, Geothermal Resources Council Transactions, 35, pp.1269-1272 (2011)



地圏資源環境研究部門成果報告書 2012  
(GREEN REPORT 2012)  
AIST04-C00014-10

---

平成 24 年 12 月 18 日発行

編集：独立行政法人産業技術総合研究所  
地圏資源環境研究部門

発行者：駒井 武

〒305-8567 つくば市東 1-1-1 （第七事業所） TEL 029-861-3633

---

# Green Report

# 2012

*Gift from the Earth; Geothermal Energy  
-Challenges for More Effective Exploitation-*

Institute for Geo-Resources and Environment (GREEN)

**18 December 2012**