

# 地熱研究紹介

浅沼 宏<sup>1)</sup>

## 1. 福島再生可能エネルギー研究所における地熱研究のポリシー

産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所(FREA)地熱チームでは、「地熱の適正利用のための研究開発」をキーワードに、地熱発電に関する一連の研究活動を行っています。地熱発電には資源の偏在性、不確定性、開発コスト、温泉との共生、持続性の維持等、多くの導入阻害要因があり、それらを早急に解決していくことが不可欠ですが、このためには科学的アプローチのみならず、社会的アプローチも必要となります。また、阻害要因克服に必要な見込まれる期間も課題により大きく異なります。このため、当チームでは、(a) 我が国における早期の発電量の増大や持続性維持に直接的に寄与できること、および(b) 科学的アプローチにより阻害要因の克服が見込めること、という2つの観点から研究課題のプライオリティ付けを行い、地域性の高い地下の状態、社会システムに合わせて地熱資源を適正に開発・利用可能にすることを目標に研究開発を行っています。これに加え、長期の研究開発が必要な革新的技術についても、開発が実現した場合の波及効果を勘案して長期的視点に立って基礎研究を行っています。一方、FREAのミッションのひとつである、「新しい産業の集積を通じた復興への貢献」に寄与するために、被災地域の企業が有する技術シーズ実用化のための支援事業や大学等との連携による人材育成事業を行っています。

## 2. 現在実施中の地熱研究

### 2.1 Engineered Geothermal Systems (EGS) に関する研究

加圧注水、水圧破碎等の人工的な手段により新規に造成、あるいは能力が改善した地熱貯留層はEngineered Geothermal Systems (EGS) と呼ばれています。EGS型の地熱開発は欧州やオーストラリア等、非火山地域での地熱開発において中心的役割を果たしています。また、米国ではEGS技術のひとつである涵養技術(注水)が貯留層の持

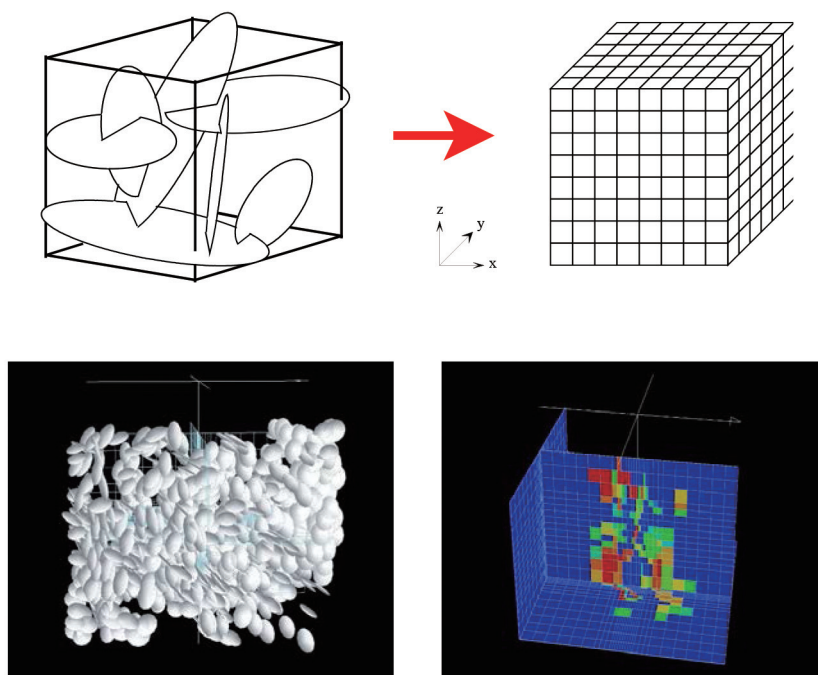
続性維持のために用いられています。

当チームでは地圏資源環境研究部門に所属する研究者らとともに、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)から「地熱貯留層評価・管理技術」(FY2013-2017)の一部を受託し、福島県柳津西山地熱発電所での生産量増大、持続性維持に向けた研究を行っています。地熱チームでは、微小地震/Aコースティックエミッション(AE)による貯留層のモニタリング部分を担当しています。このための遠隔モニタリングシステムとリアルタイム解析ソフトウェアの開発を実施し、2014年度末より連続モニタリングを開始する予定です。本システムにより微小地震/AEの発生位置、マグニチュード等の基本的情報をリアルタイムにFREAでモニタリング可能になるとともに、当地域で発生する微小地震/AEの地震統計学的性質もモニタリングする予定です。これらを通じて、涵養効果の高度評価、環境影響の低減に寄与したいと考えています。

EGSにおいては既存亀裂への加圧注水が最も主要な開発手段ですが、最適な加圧法の導出が困難である、あるいは、加圧注水時に誘発有感地震が発生する事例がある等の課題があります。このなかで、近年、米国やドイツの研究機関が誘発地震の発生を抑圧した上で、亀裂の透水性を改善する技術の導出に成功したとの報告がなされています(Dempsey *et al.*, 2013; Zang *et al.*, 2013)。これらの新技術は地下構造が比較的単純な地域を対象に開発されてきましたが、国際共同研究により、我が国での加圧注水による最適な貯留層作成工程設計技術の導出を目指した研究を実施しています(平成26年度日米等エネルギー技術開発協力事業(クリーンエネルギー利用技術及び評価技術の開発)「地熱エネルギー抽出量増大のための革新的技術の開発」)。ここでは、岩石力学モデルを用いた加圧注水貯留層造成シミュレータを作成し、地下の状態、加圧注水の目的に合わせた工程を設計可能にし、また、加圧注水作業時に地下のレスポンスに応じて工程を更新できるようにしています。このシミュレータの基本部分は2013年度に完成し(第1図)、本年度末に国内地熱地域で小規模な加圧注水試験を行い、本手法の有効性を検証する予定です。

1) 産総研 再生可能エネルギー研究センター

キーワード: 地熱発電, モニタリング, EGS, 温泉との共生, 社会受容性, センサ

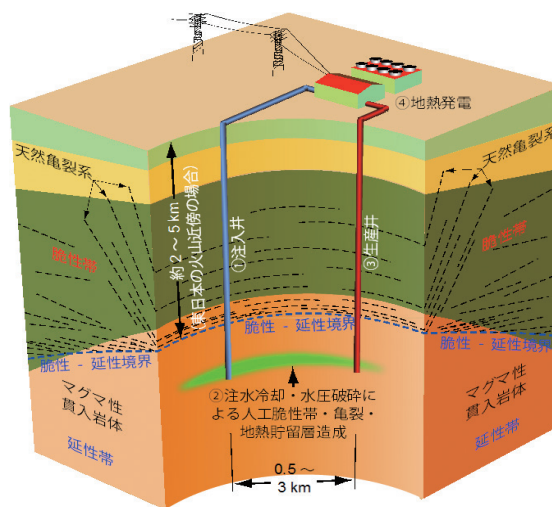


第1図 加圧注水貯留層造成シミュレータ。

EGS型地熱開発の概念は1970年代に米国で提唱された高温岩体 (Hot Dry Rock : HDR) 発電に起源を有しますが、我が国を初めとする各国で実施されたHDRプロジェクトを通じて、HDR型の地熱開発、すなわち、基盤岩内に新規に地熱貯留層を造成する開発方式では、発電コストの高さ、誘発地震の発生、流体循環時における回収率の低さ (Kaieda *et al.*, 2005) 等の課題があることが明らかになってきました。このような問題は開発対象をより深部の脆性-延性境界 (BDT) 以深とすることにより解決可能であると考えています (第2図)。地熱チーム所属の研究者は東北大の地熱研究者等と連携して、BDTにおける地熱開発の可能性を探る Japan Beyond-Brittle Project (JBBP) を2011年より開始しています (Muraoka *et al.*, 2014)。地熱チームの研究者は、プロジェクト全体の管理を行うとともに、JBBP型貯留層のモニタリング技術、地化学的視点からの貯留層内での流れ場の理解とその制御法の導出 (第3図; Saishu *et al.*, 2014)、貯留層造成時に発生する誘発地震抑制法の検討等を行っています。

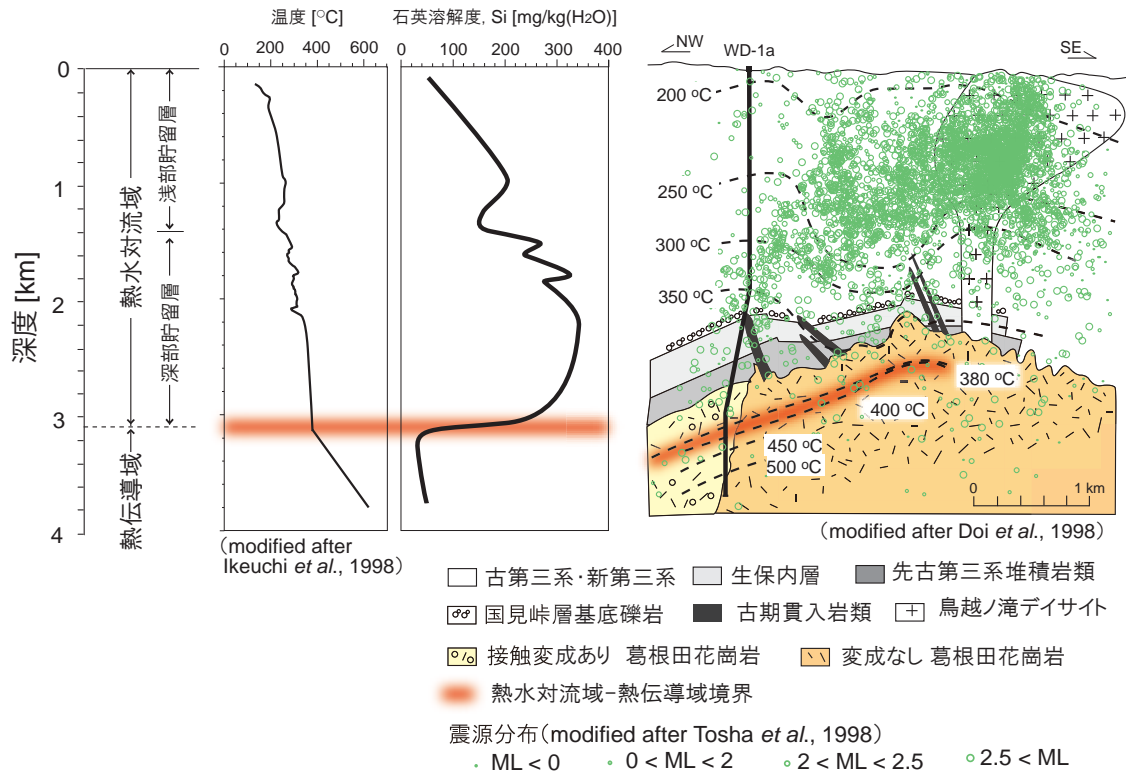
## 2.2 地熱貯留層の高度モニタリング技術に関する研究開発

地熱貯留層は多くの亀裂により構成されていますが、各亀裂の透水性は大きく異なっており、高い透水性 (生産性) を有する亀裂は極めて不均質に分布しています。しかしながら、現在の技術でこのような亀裂の位置や配向を精



第2図 脆性-延性境界以深での地熱開発 (JBBP) の概念。

度よく検出することは困難であり、このことが地熱開発の不確定性を高める主要因となっています。地熱チームの研究者は、貯留層内で発生する微小地震 / AE、あるいは坑井の掘削音を利用した貯留層モニタリング技術の開発を行っています。ここでは「超解像イメージング技術」と呼ばれる一連の高分解能の震源位置決定法、震源パラメータ推定法、反射イメージング法等を組み合わせ、通常の方法ではモニタリングが困難な貯留層の構造とその内部での流体の挙動を明らかにしようとしています。また、各種の物理探査手法により得られた結果の統合解釈法の検討も行って



第3図 葛根田地熱地域における地質構造とシリカ溶解度 (Saishu *et al.*, 2014 へ加筆).

います。

地熱貯留層の探査・モニタリングでは、対象の近傍で高分解能な情報を取得することにより、不確実性や開発リスクの低減に結びつきます。このためには、高温高圧環境下で動作するセンシングシステムを経済的に許容できるコストで実現する必要があります。本チームでは民間企業と連携して、坑内多点弾性波モニタリング用光マイクロセンサシステム、条件困難井でも使用可能なLWDツールの開発等も実施しています。

### 2.3 温泉モニタリング技術の開発

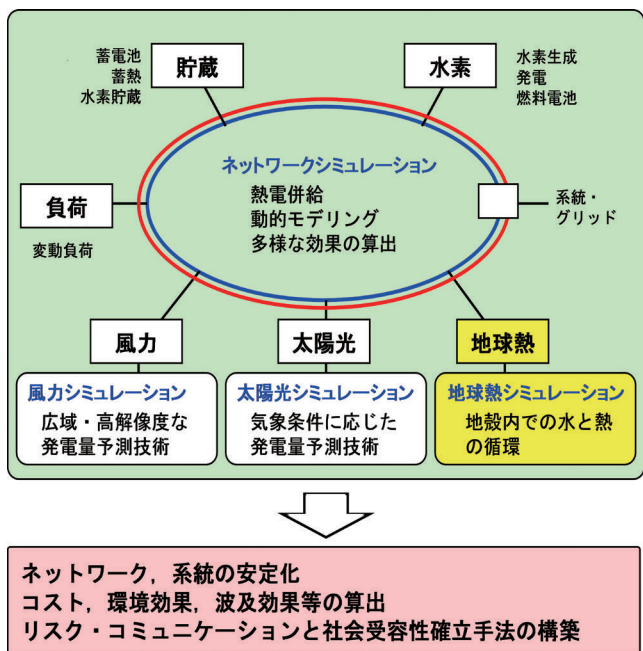
国内の地熱開発においては社会的合意形成、特に既存の温泉との共存を図ることが重要です。温泉資源は地熱発電のために用いられる地熱貯留層に比して浅部に存在することが多いため、直接的に大きな影響が出る事例は少ないと考えられていますが、両者の関連性を科学的に十分に説明できていないのが現状です。この理由の一つとして長期間にわたる連続的な温泉モニタリングが実現できていないことがあげられます。当チームでは(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託(「地熱発電技術研究開発」FY2014-2017)を受け、簡易遠隔温泉モニタリングシステムの開発を行っています。このシステムは

温泉配管に取り付け、温度、流量、電気伝導度を1分間に一回程度計測し、各種通信回線を通じてサーバへ転送するものです。温泉の性状に合わせて各種センサの追加を容易に行えるという特長も有しています。このプロジェクトを通じて実際の温泉地で長期使用が可能なモニタリングシステムを実現するとともに、その運用法についての提言も行う予定です。

地熱発電が温泉に与える影響を評価するために、当チームでは、地表付近から深部マグマに及ぶ広域での物資・熱の移動をシミュレートすることも重要であると考えています。このシミュレータを「地球熱シミュレータ」と名付け、地中熱グループ等と連携して開発を行っていく予定です。また、地熱開発に起因する温泉変動を定量的に評価するための時系列解析手法についても研究開発を始めています。

### 2.4 再生可能エネルギーネットワークシミュレータの開発

再生可能エネルギーは、エネルギー密度が大きくはなく、また、出力変動を有するエネルギー源が多いため、そのまま単体で既存のエネルギーネットワークに組み込むと様々な問題を発生させることが知られています。再生可能エネルギー研究センターでは、太陽光、風力、地熱による発電・



第4図 再生可能エネルギーネットワークシミュレータの概念図。

熱供給システムと地中熱利用システム、蓄電システム、水素利用システム等を組み合わせた「福島県産エネルギー自給自足システム」と「温暖化ガス0エネルギーシステム」の実現を目指しています(第4図)。これを実現するためには各要素技術の研究開発に加え、気象条件や負荷の状況等に応じてローカルエネルギーネットワークを最適に運用する技術を構築する必要があります。当センターでは再生可能エネルギーネットワークシミュレータの開発を予定していますが、地熱チームでは、先述の「地球熱シミュレータ」と熱電併給地熱利用システムシミュレータを開発し、ネットワークシミュレータへ組み込むことにより地域によって大きく異なる地下の状態に合わせて地熱エネルギーをベースエネルギー源として適切に利用可能にしたいと考えています。

### 2.5 地熱発電の社会への実装に関する研究

地熱発電を実現するためには地下の状況に合わせて適切な開発を行う必要がありますが、我々が取得可能な地下情報は有限であるため、特に開発の初期段階においては大きな不確定性を有さざるを得ません。このことが、過剰な設備投資や発電コストの増大に結びついている事例があると考えています。一方、地熱発電を実現するためには地元との合意形成が必要ですが、このためには、様々な立場の個人や組織との関連性を十分に考慮する必要があります。さらには発電事業の経済性や地元への波及効果についても検討すべきです。このように、地熱開発に関連する様々な事

項を総合的に検討し、地下条件、社会条件に適合させた地熱利用システムを開発時にフレキシブルに設計する概念を Overall System Design (OSD: 総合システム設計) (Soma et al., 2014) と呼び、OSD支援のためのツール開発を目標として調査および研究を実施しています。

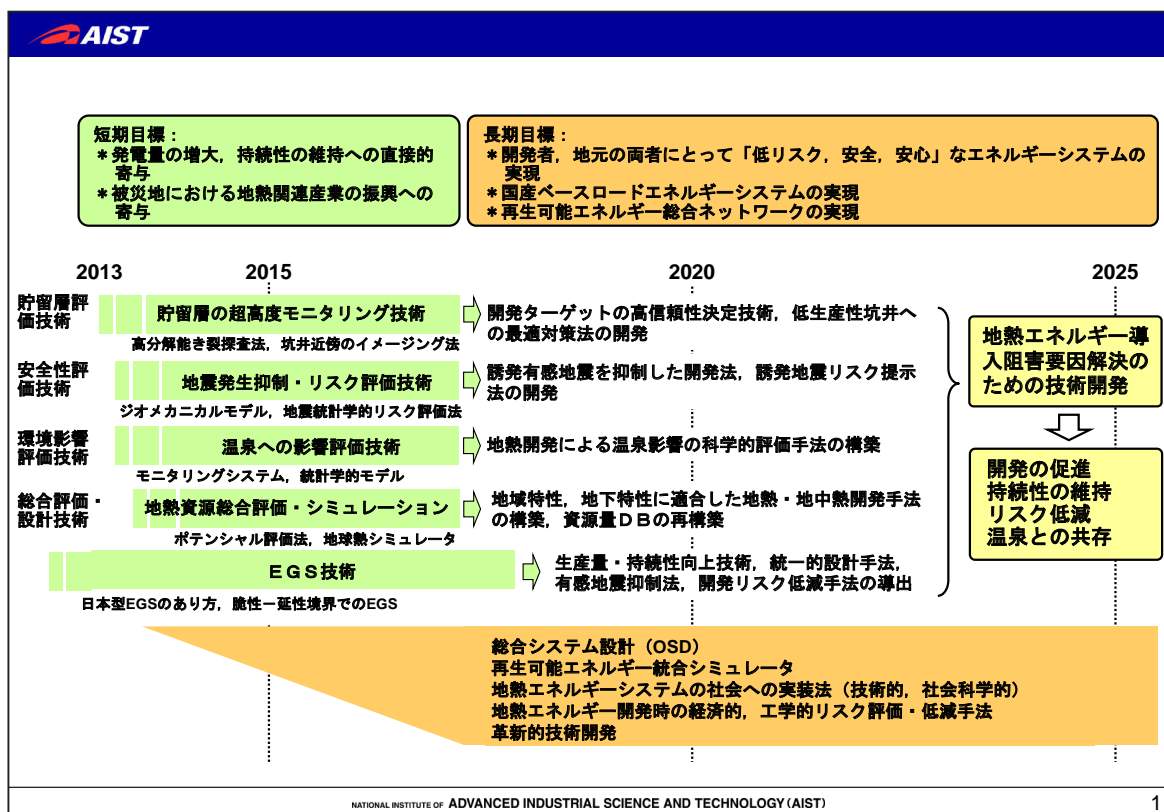
### 2.6 被災地での産業育成、人材育成事業

福島再生可能エネルギー研究所では2013年度から被災3県(福島、宮城、岩手)での再生可能エネルギー関連産業の創出を目指した活動を行っています(平成25年度福島再生可能エネルギー研究開発拠点「被災地企業の技術シーズ評価プログラム」、平成26年度福島再生可能エネルギー研究開発拠点「被災地企業のシーズ支援プログラム」)。ここでは、技術シーズを有する民間企業と産総研の間で共同研究契約を締結し、産総研側で技術シーズの性能評価や試作品の製作、試験による実用性評価等を実施しています。地熱チームでは、民間企業が有する貯留層評価手法の評価、坑内計測ツールの試作と性能評価、MEMS弾性波センサシステムの試作と性能評価等を実施し、被災地域における地熱関連産業の活性化とビジネスの創出を目指しています。

また、福島再生可能エネルギー研究所では「人材育成事業」として、大学院学生をリサーチ・アシスタント(RA)として受け入れ、教育的視点に立って研究活動を実施しています。地熱チームでは東北大から3名の大学院学生をRAとして受け入れ、先進的地熱研究に従事してもらっています。

### 3. 研究実施体制

現在、地熱チームには常勤研究員4名(うち1名は兼務)、契約職員3名、RA3名が所属していますが、広範な地熱研究をすべてカバーするために、地圏資源環境研究部門を中心とするつくばの研究者との密な連携の下、研究を実施しています。また、加圧注水による貯留層造成技術に関してLBNL、USGSを代表とする米国国研、ドイツ地球科学総合研究所(GFZ)と連携した研究を実施しています。脆性-延性境界以深でのEGSを目指すJBBPは、東北大学と共同で科学的基礎構築のための研究を実施しています。JBBPでは東北地方で脆性-延性境界以深へ試験井を掘削し、各種の実験を行う予定ですが、このような超高温井の掘削には国際的協力体制が不可欠であると考え、International Continental Scientific Drilling Program(ICDP)の枠組みの下での掘削を実現することを目指しています。



第5図 地熱チームのロードマップ.

#### 4. 今後の展望

東日本大震災以降, 再生可能エネルギーの導入を促進するとともに再生可能エネルギー関連新産業を創出することが急務となっています。地熱チームの研究実施計画を第5図に示しますが, 今後5年間程度の期間は科学的アプローチによる地熱発電の阻害要因の早期克服を通じて発電量の増大と関連産業の創出を目指します。また, これに加え, 社会科学的手法の導入により地熱発電に対する社会受容性構築手法を導出したいと考えています。

この目標を達成するためには, 地質分野の研究者を初めとする内外からの御協力が不可欠ですので, 今後も皆様からの御支援, 御指導を賜りたくお願い申し上げます。

#### 文献

Dempsey, D., Kelkar, S., Lewis, K., Hickman, S., Davatzes, N., Moos, D. and Zemach, E. (2013) Modeling Shear Stimulation of the Desert Peak EGS Well 27-15 Using a Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical Simulator. *Proc. 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA*, 13-606.

Kaieda, H., Ito, H., Kiho, K., Suzuki, K., Suenaga, H. and Shin, K. (2005) Review of the Ogachi HDR Project in Japan. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, 1601, 1-7.

Muraoka, H., Asanuma, H., Tsuchiya, N., Ito, T., Mogi, T., Ito, H. and the participants of the ICDP/JBBP Workshop (2014) *The Japan Beyond-Brittle Project, Scientific Drilling*, 17, 51-59.

Saishu, H., Okamoto, A. and Tsuchiya, N. (2014) The significance of silica precipitation on the permeable/impermeable boundary within the Earth's crust. *TERRA NOVA*, 253-259.

Soma, N., Asanuma, H. and Oikawa, Y. (2014) Concept of overall system design (OSD) for both universal use of geothermal energy and increase of social acceptability in Japan. *Proc. GRE2014*. (in-press).

Zang, A., Yoon, J. S., Stephansson, O. and Heidbach, O. (2013) Fatigue hydraulic fracturing by cyclic reservoir treatment enhances permeability and reduces induced seismicity. *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggt301.

ASANUMA Hiroshi (2014) Introduction of research on geothermal energy at FREA.

(受付: 2014年8月21日)