



低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

地熱発電 (Vol.5)

－水圧破砕による誘発地震の低減に関する提言－

平成 30 年 12 月

Geothermal Power (Vol.5):

Proposal on Reduction of Induced Earthquakes by Hydraulic Fracturing

Strategy for Technology Development

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2018-PP-04

概要

地熱発電の発電量は、2015年において全発電量の0.3%を占めるに過ぎず、再生可能エネルギーの中で確たる地位を得るには、地熱発電の割合をさらに高める必要がある。これを達成するために、高温岩体発電は有望である。高温岩体発電の開発にあたり、人工貯留層を造成するために実施される水圧破碎による誘発地震の抑制が、課題のひとつである。

誘発地震の最大マグニチュードは、天然亀裂密度が低くなるほど大きくなり、天然亀裂密度の対数と負の比例関係にあることを2017年度に公表したLCS提案書(FY2017-PP-05, 2018年1月)に示した。

本報告では、水圧破碎が実施された6サイト(肘折、雄勝、Soultz、Newberry、Basel、Cooper Basin)について、天然亀裂密度と地震エネルギーの関係を調べることにより誘発地震エネルギー総和が注水エネルギーと天然亀裂密度の関数で表されることを明らかにした。また、最大誘発地震エネルギーと誘発地震エネルギー総和を比較することにより天然亀裂の間隔分布が誘発地震に影響することを示した。

エネルギーの観点から誘発地震を解析することにより高温岩体発電の設計に役立つ情報を得ることができ、地下構造との関係を明らかにすることにより誘発地震の抑制ができることを明らかにした。

Summary

Geothermal power generation amounted to only 0.3% of the total power generation in 2015. In order to obtain a firm position among renewable energy, it is necessary to increase the proportion of geothermal power generation further. Hot Dry Rock Power generation is promising to achieve this. One of challenges is to control the induced earthquakes caused by hydraulic fracturing, which is carried out to develop artificial reservoirs in the development of hot dry rock power generation.

The previous LCS report proposal (FY2017-PP-05, January 2018) indicated that the maximum magnitude of induced earthquakes increases with decreasing natural fracture density and has a negative proportional relationship with the logarithm of the natural fracture density.

We examined the relation between natural fracture density and earthquake energy for 6 sites (Hijiori, Ogachi, Soultz, Newberry, Basel, and Cooper Basin) where hydraulic fracturing was performed, and we clarified that the total induced earthquake energy is expressed as a function of injection energy and natural fracture density. By comparing the maximum induced earthquake energy with the total induced earthquake energy, we also showed that the spacing distribution of natural fractures affects induced earthquakes.

It is clarified that useful information for designing hot dry rock power generation can be obtained by analyzing induced earthquakes from the viewpoint of energy and that induced earthquakes can be controlled by clarifying the relation with the underground structures.

目次

概要

| | |
|----------------------------|---|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 誘発地震と天然亀裂..... | 1 |
| 2.1 誘発地震エネルギーと天然亀裂密度 | 1 |
| 2.2 天然亀裂の間隔分布..... | 3 |
| 3. 結論..... | 4 |
| 4. 政策立案のための提案..... | 4 |
| 参考文献..... | 4 |

1. はじめに

高温岩体発電の開発のために、地下の高温岩体に向かって坑井が掘削され、坑井を通じて高圧水を注入し、岩体に割れを生じさせる。この水圧破碎によって巨大な熱交換器となる人工貯留層を造成する。このとき、水圧破碎によって誘発される地震の抑制が課題のひとつである。

水圧破碎の注水エネルギーは流量、坑口圧力、時間の積により、誘発地震エネルギーは Gutenberg-Richter 式により計算され、誘発地震の解析をエネルギーの観点から行うことが有用であることを示した[1]。さらに、誘発地震の大きさは地下構造の影響を受けること、誘発地震の最大マグニチュードは天然亀裂密度と密接に関連していること、最大誘発地震エネルギーは注水エネルギーに比例すると共に天然亀裂の影響を受けることを明らかにした[2]。

本報告では、水圧破碎が実施された 6 サイト(肘折、雄勝、Soulzt、Newberry、Basel、Cooper Basin) について、天然亀裂密度と地震エネルギーの関係を調べることにより誘発地震エネルギー総和は注水エネルギーと天然亀裂密度の関数で表され、最大誘発地震エネルギーと誘発地震エネルギー総和を比較することにより天然亀裂の間隔分布が誘発地震に影響することを示す。今後、日本で高温岩体発電を実現するためには、誘発地震を小さくする必要がある。そのためには、国内の数箇所深度 2,000~3,000m で水圧破碎を実施し、誘発地震の測定と測定結果の解析が必要である。

2. 誘発地震と天然亀裂

2.1 誘発地震エネルギーと天然亀裂密度

水圧破碎による誘発地震の最大マグニチュードは、天然亀裂密度の対数と負の比例関係にあることを示した[2]。対数と負の比例関係にあることを表す $-\text{Log}(D)$ は、 $\text{Log}(1/D)$ と書き直せる。前 LCS 提案書[2]に示した 6 サイトについて、注水エネルギー E_i 、誘発地震の最大マグニチュード M_{\max} 、最大マグニチュードの誘発地震エネルギー E_{\max} 、誘発地震エネルギー総和 E_{st} 、天然亀裂密度 D および $\text{Log}(1/D)$ の計算値を表 1 に示した。地震エネルギーは、Gutenberg-Richter 式[3]を用い、公開されている地震マグニチュードから計算した。天然亀裂密度は文献[4-8]、公開されているデータ[9]から求めた。

表 1 6 サイトの注水エネルギー、地震エネルギー、天然亀裂密度

| | 肘折 | 雄勝 | Soulzt | Newberry | Basel | Cooper Basin |
|-----------------------------|--------|-------|--------|----------|-------|--------------|
| 注水エネルギー E_i (GJ) | 47 | 189 | 300 | 347 | 288 | 879 |
| 最大マグニチュード M_{\max} | 0.3 | 2.0 | 2.6 | 2.6 | 3.4 | 3.7 |
| 最大誘発地震エネルギー E_{\max} (GJ) | 0.0002 | 0.06 | 0.5 | 0.5 | 7.9 | 22.4 |
| 誘発地震エネルギー総和 E_{st} (GJ) | 0.0002 | 0.06 | 6.8 | 4.1 | 12.5 | 56 |
| 天然亀裂密度 D (/m) | 24 | 3.7 | 0.6 | 0.5 | 0.3 | 0.15 |
| $\text{Log}(1/D)$ 計算値 | -1.38 | -0.57 | 0.22 | 0.30 | 0.52 | 0.82 |

誘発地震の最大マグニチュード M_{\max} と $\text{Log}(1/D)$ の関係を図 1 に示した。

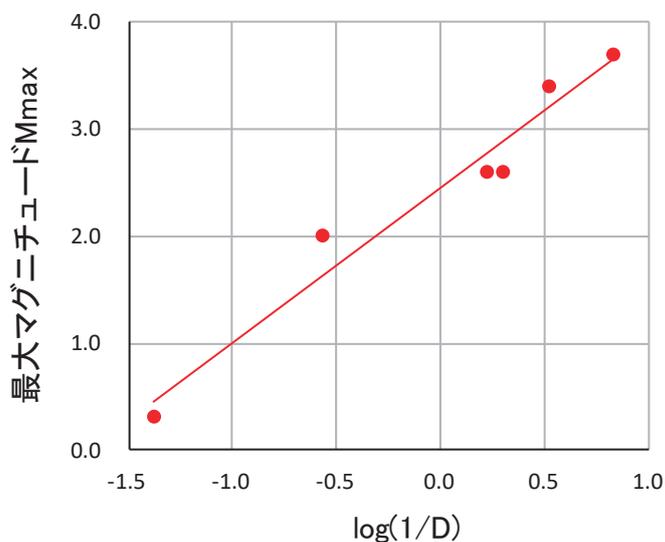


図 1 最大マグニチュード M_{\max} と $\text{Log}(1/D)$ の関係

$\text{Log}(1/D)$ の増加、すなわち天然亀裂密度 D が小さくなると、最大マグニチュードは大きくなる。次に、エネルギーに着目して $\text{Log}(1/D)$ に対する最大誘発地震エネルギー E_{\max} と誘発地震エネルギー総和 E_{st} の関係を図 2 に示した。

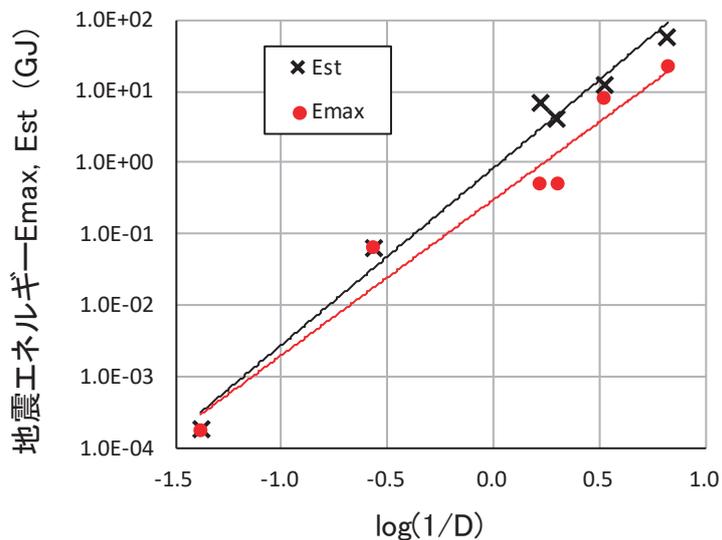


図 2 最大誘発地震エネルギー E_{\max} と誘発地震エネルギー総和 E_{st}

図 2 から $\text{Log}(1/D)$ が大きくなると E_{\max} が増加するだけでなく、 E_{st} も増加することが分かった。Soultz、Newberry、Basel の注水エネルギー E_i は表 1 に示したように 288~347GJ であり、ほぼ同じである。しかし Soutlz、Newberry の誘発地震エネルギー総和が 4.1~6.8GJ であるのに対し、Basel の誘発地震エネルギー総和は 12.5GJ と 2 倍以上の開きがある。注水エネルギーが同じであるにもかかわらず誘発地震エネルギー総和に差が出る原因は、天然亀裂密度の違いにあると考えられる。誘発地震エネルギー総和 E_{st} は E_i と D の関数であるので、実験式を作成した。

$$E_{st} = 0.08 \times \text{Log}(1/D - 0.1) \times E_i \quad (1)$$

最大マグニチュード以外のマグニチュードが公開されている Soutlz、Newberry、Basel および Cooper Basin の 4 サイトに実験式(1)を適用した結果を表 2 に示した。

表 2 誘発地震エネルギー総和の観測値と実験式計算値

| | Soutlz | Newberry | Basel | Cooper Basin |
|------------------|--------|----------|-------|--------------|
| E_{st} 観測値(GJ) | 6.8 | 4.1 | 12.5 | 56 |
| E_{st} 実験式(GJ) | 4.7 | 7.7 | 11.7 | 57.5 |

実験式による計算値は観測値と概ね一致しており、誘発地震エネルギー総和は注水エネルギーと天然亀裂密度を用いて数式化できることが分かった。

観測値と実験式の差を小さくするためには、天然亀裂密度以外の要素も考慮する必要がある。天然亀裂密度以外の要素として、天然亀裂の開口幅、天然亀裂の長さ、岩石強度などの地下構造パラメータが考えられる。

2.2 天然亀裂の間隔分布

図 2 に示したように最大誘発地震エネルギー E_{\max} と誘発地震エネルギー総和 E_{st} は $\text{Log}(1/D)$ に比例して増加するが、 E_{\max} と E_{st} の関係を調査するため、最大マグニチュード以外のマグニチュードが公開されている 4 サイトについて、比率 E_{\max}/E_{st} を表 3 に示した。

表 3 比率 E_{\max}/E_{st}

| | Soutlz | Newberry | Basel | Cooper Basin |
|-----------------------|--------|----------|-------|--------------|
| E_{\max}/E_{st} (%) | 7 | 12 | 64 | 40 |

Basel と Cooper Basin では、1 つの最大誘発地震エネルギー E_{\max} が誘発地震エネルギー総和 E_{st} の 40~64% を占めた。Basel では約 3,500 個、Cooper Basin では約 5,000 個の誘発地震が特定されており、1 つの最大誘発地震エネルギーが他の誘発地震のエネルギーより際立っている。

誘発地震マグニチュードは天然亀裂密度、すなわち天然亀裂の間隔に依存する。仮に、天然亀裂の間隔が同じであるとすると、誘発地震マグニチュードはほぼ等しくなり、比率 E_{\max}/E_{st} は小さくなる。しかし、Basel と Cooper Basin の比率 E_{\max}/E_{st} は 40~64% と大きく、天然亀裂の間隔のばらつきが大きいと考えられる。

天然亀裂密度が低い地域では、天然亀裂の間隔の差が大きく、マグニチュードが大きく異なる誘発地震が発生する。加えて、誘発地震の最大マグニチュードは大きくなる。

天然亀裂密度が高い地域では、天然亀裂の間隔の差は小さく、ほぼ同じマグニチュードの誘発地震が発生し、最大マグニチュードも小さくなる。

地質コア試料の採取あるいは坑井の Bore Hole Tele-Viewer 観測により、天然亀裂の密度だけでなく、天然亀裂の間隔分布を調査することにより、誘発地震と地下構造の関係を明確にすることができる。

3. 結論

エネルギーの観点から誘発地震を解析することにより、誘発地震エネルギー総和が注水エネルギーと天然亀裂密度の関数で表せることを示した。

誘発地震の大きさは地下構造の影響を受け、天然亀裂密度だけでなく天然亀裂の間隔分布も影響することを示した。

4. 政策立案のための提案

水圧破碎による誘発地震を抑制するために、地質コア試料の採取あるいは坑井の Bore Hole Tele-Viewer 観測により、天然亀裂密度と天然亀裂の間隔分布を調査する必要がある。

効率よく水圧破碎を実施するために、誘発地震と地下構造の関係を明らかにし、地下構造に適した水圧破碎条件（流量、圧力、時間）を明確にする必要がある。

日本で高温岩体発電を実現するために、国内の数箇所深度 2,000~3,000m での水圧破碎の実施、誘発地震の測定、および測定結果の解析が必要である。

参考文献

- [1] 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書, “地熱発電(Vol.3)－高温岩体発電の水圧破碎エネルギーと開発可能な発電出力”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, LCS-FY2016-PP-04, 2017年3月.
- [2] 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書, “地熱発電(Vol.4)－高温岩体発電の水圧破碎による誘発地震に与える地下構造の影響”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, LCS-FY2017-PP-05, 2018年1月.
- [3] Gutenberg, B. and Richter, C.F., “Magnitude and energy of earthquakes”, Ann. Geofis., 9, 1-15, 1956.
- [4] 伊藤久敏, “高温岩体発電のための貯留層亀裂構造評価(その3)－坑井壁面画像解析に基づくフラクチャの分布・性状評価－”, 電力中央研究所研究報告書, U01004, 2001.
- [5] 木谷清一, 手塚和彦, “NEDO 肘折実験場の地質構造と高温岩体貯留層のフラクチャ系”, 日本地熱学会誌, Vol.24, No.3, 2002.
- [6] Dezayes, C., Genter, A. and Gentier, S., “Fracture Network of the EGS Geothermal Reservoir at Soultz-sous-Forêts”, Geothermal Resources Council Transactions, Vol.28, 2004.
- [7] Nelson, E.J., Chipperfield, S.T., Hillis, R.R., Gilbert, J. and McGowen, J., “Using Geological Information to Optimize Fracture Stimulation Practices in The Cooper Basin, Australia”, Petroleum Geoscience, Vol.13, 2007.

- [8] Ziegler, M., Valley, B. and Evans, K.F., “Characterisation of Natural Fractures and Fracture Zones of the Basel EGS Reservoir Inferred from Geophysical Logging of the Basel-1 Well”, Proceedings World Geothermal Congress, 2015.
- [9] Geothermal Data Repository, DOE, <https://gdr.openet.org/submissions/271>, web access 8 Nov. 2018.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

地熱発電 (Vol.5)

—水圧破碎による誘発地震の低減に関する提言—

平成 30 年 12 月

Geothermal Power (Vol.5):

Proposal on Reduction of Induced Earthquakes by Hydraulic Fracturing
Strategy for Technology Development,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2018.12

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 主任研究員 石川 環 (Tamaki ISHIKAWA)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2018 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
