

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.4)

—高温岩体発電の水圧破砕による誘発地震に与える地下構造の影響—

平成 30 年 1 月

“Geothermal Power (vol.4):

Influence of Underground Structure on Induced Earthquakes by Hydraulic Fracturing  
for Hot Dry Rock System”

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-FY2017-PP-05

## 概要

高温岩体発電の人工貯留層を造成するために水圧破砕が実施される。水圧破砕によって誘発される地震エネルギーは、各サイトの岩石種類と地下構造によって異なることを前 LCS 提案書 (FY2016-PP-04(2017 年 3 月))で示した。本報告では、エネルギーの観点から誘発地震と地下構造の解析を行うこととし、具体的には地下構造として既存の天然亀裂の密度を取り上げた。6 サイト (雄勝、肘折、Soultz、Cooper Basin、Basel、Newberry) の天然亀裂密度を文献調査し、誘発地震のマグニチュードとの関係を明らかにした。その結果、坑井から採取された地質コア試料の天然亀裂密度を調べることにより、水圧破砕による誘発地震の最大マグニチュードを推定できるという結論を得た。

最大誘発地震エネルギーと天然亀裂密度は、天然亀裂密度から計算される岩石平均面積と坑井の開口部長さを導入することにより、密接な関係にあることを明らかにした。

また、最大誘発地震エネルギーは、天然亀裂密度と関係があるだけでなく、水圧破砕の注水エネルギーとも関係があることを示した。それに基づき、天然亀裂密度をパラメータとして注水エネルギーと最大誘発地震エネルギーを関係付ける最大誘発地震エネルギーチャートが重要であることを指摘した。

## Summary

Hydraulic fracturing is carried out to create reservoirs for Hot Dry Rock system. The previous LCS report proposal paper (FY2016-PP-04 (March, 2016)) indicated that the earthquake energy induced by hydraulic fracturing differs depending on the rock type and the geological structure of the sites. We analyzed induced earthquakes and underground structures from the viewpoint of energy, and specifically used existing natural fracture densities for the underground structure in this paper. We examined the existing literature regarding the natural fracture density at six sites (Ogachi, Hijiori, Soultz, Cooper Basin, Basel and Newberry) clarified its relation with the maximum magnitude of induced earthquakes. The result showed that the maximum magnitude of induced earthquakes induced by hydraulic fracturing can be estimated by investigating the natural fracture density of geological core samples from wells.

The close relationship between the maximum induced earthquake energy and the natural fracture density was revealed by incorporating the average rock area calculated from the natural fracture density and the open-hole length of the well.

We demonstrated that the maximum induced earthquake energy is related not only to the natural fracture density but also to the energy of the water injected for hydraulic fracturing. We also stated the importance of the maximum induced earthquake energy chart which relates the water injection energy to the maximum induced earthquake energy with a parameter describing the natural fracture density is important.

## 目次

### 概要

1. はじめに.....	1
2. 天然亀裂密度.....	1
3. 天然亀裂密度と誘発地震エネルギー.....	2
4. 開口部 1m あたりの誘発地震エネルギー.....	4
5. 考察.....	5
6. 政策立案のための提案.....	6
参考文献.....	7

## 1. はじめに

高温岩体発電の賦存量は大きく、実証実験が既に行われているにも関わらず、未だ実用化されていない。LCS では、全国の年間発電電力量約 1000TWh[1]の 20% (30GW) を高温岩体発電で発電するためには 23 億 m<sup>3</sup>/年の水が必要であり、河川から取水することは可能である事を提案した (LCS 提案書<sup>1)</sup>[2])。また、高温岩体発電の発電コストは、水回収率を 98%までに高めると、公開されているデータを基に計算した熱水系地熱発電の発電コストとほぼ等しくなる事を示した[2]。高温岩体発電では人工貯留層を造成するために水圧破碎が行われ、その際造成される人工貯留層の大きさと透水性が重要であるが、一方で近隣地域に与える影響が大きい誘発地震の抑制も重要である。前 LCS 提案書[3]では、水圧破碎の注水エネルギーと比較することにより、水圧破碎によって誘発される地震エネルギーは、各サイトの地下構造の影響を受けることを指摘した。これまでにエネルギーの観点で水圧破碎と地下構造を関係づけた報告はない。図 1 に水圧破碎の概念図を示す。本報告では地下構造として天然亀裂密度<sup>2)</sup>に着目し、前報[3]に従って、雄勝、肘折、Soulzt(仏)、Cooper Basin(豪)、Basel(スイス)、Newberry(米)の 6 サイトの天然亀裂密度を文献調査する。すなわち、坑井掘削時に採取した地質コア試料、または坑内検層のひとつである Bore Hole Tele-Viewer(以下 BHTV と略す)の画像データ等から地層の天然亀裂密度を求め、これを基に水圧破碎時の誘発地震のマグニチュードを予測できることを示す。加えて、誘発地震エネルギーと天然亀裂密度の関係を明らかにする。さらに、天然亀裂密度をパラメータとした注水エネルギーと誘発地震エネルギーの関係を示す最大誘発地震エネルギーチャートの重要性を述べる。これらを通じて、エネルギー収支の観点から水圧破碎と地下構造を解析する新たな方法論の有用性を示す[4]。

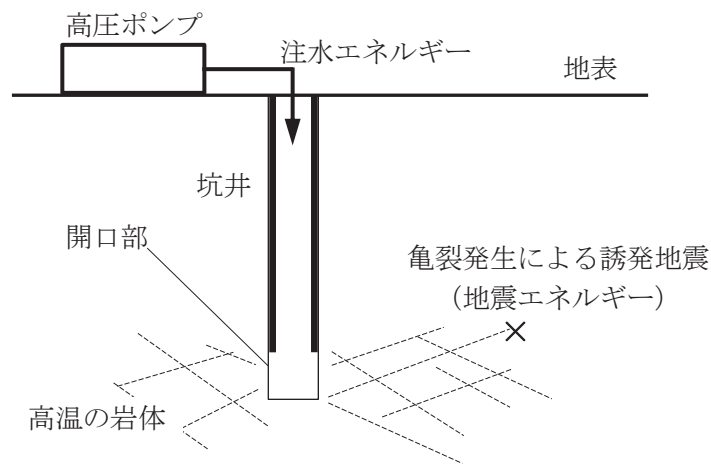


図 1 水圧破碎の概念図

## 2. 天然亀裂密度

高温岩体発電の水圧破碎が行われた 6 サイト、雄勝、肘折、Soulzt、Cooper Basin、Basel、Newberry の天然亀裂の密度を文献調査した。

雄勝の坑井 OGC-3 の深度 730–1154m で 6 個のスポットコアが採取された[5]。このうち坑井の開口部深度に近い深度 975–1154m の 2 スポットコアを対象とすると、コア長さ合計 4.1m、亀裂

<sup>1)</sup> 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、科学技術振興機構低炭素社会戦略センター (以下、LCS 提案書)。

<sup>2)</sup> 単位長さあたりの天然亀裂の数(個/m)。

数 15 個であり、天然亀裂密度は 3.7 個/m であった。

肘折の坑井 HDR-3 から採取されたコア長さ合計 9.5m に対し、幅 1mm 以下の亀裂を含め 229 個の亀裂が観測された[6]。したがって天然亀裂密度は 24 個/m となった。

Soultz の坑井 GPK-1 の地表から坑底までの平均天然亀裂密度は 3.2 個/m であるが[7]、坑底付近 (4600–5100m)での天然亀裂密度は 0.6 個/m であり[8]、後者を採用した。

Cooper Basin については 1 個/5~10m との報告があり[9]、平均をとって 0.15 個/m とした。

Basel の坑井の底部で天然亀裂密度は 0.2~0.3 個/m[10]、深度 3km 以下では 0.3 個/m[11]とあり、天然亀裂密度として 0.3 個/m を採用した。

Newberry の坑井 55-29 の BHTV のデータから、深度 1970m~2660m(幅 690m)の間に 351 個の亀裂が観測されたので[12]、天然亀裂密度を 0.5 個/m とした。

### 3. 天然亀裂密度と誘発地震エネルギー

各サイトの天然亀裂密度  $D$  を表 1 に示す。合わせて、前報[3]に示した、各サイトの水圧破碎による誘発地震の最大マグニチュード  $M$ 、注水量と坑口圧力の積により計算した注水エネルギー  $E_i$ 、および、式(1)に示す Gutenberg-Richter 式[13]で計算した最大誘発地震エネルギー  $E_s$  を、表 1 に再掲する。

$$E_s = 10^{(1.5M+4.8)} \quad (1)$$

ここで、 $E_s$  : 地震エネルギー(J)、 $M$  : マグニチュード。

表 1 天然亀裂密度、水圧破碎の注水エネルギー、最大マグニチュード、および最大誘発地震エネルギー

	雄勝	肘折	Soultz	Cooper Basin	Basel	Newberry
天然亀裂密度 $D$ (個/m)	3.7	24	0.6	0.15	0.3	0.5
実施時期 (年)	1991	1992	2000	2003	2006	2012
注水エネルギー $E_i$ (GJ)	189	47	300	879	288	347
最大マグニチュード $M$	2.0	0.3	2.6	3.7	3.4	2.4
最大誘発地震エネルギー $E_s$ (GJ)	0.06	0.0002	0.5	22.4	7.9	0.25

天然亀裂密度  $D$  と誘発地震の最大マグニチュード  $M$  の関係を図 2 に示す。

天然亀裂の密度が高くなると誘発地震のマグニチュードは小さくなることが明らかである。最大マグニチュード  $M$  は、 $c_1$  と  $c_2$  を定数として、式(2)で表される。

$$M = -c_1 \log D + c_2 \quad (2)$$

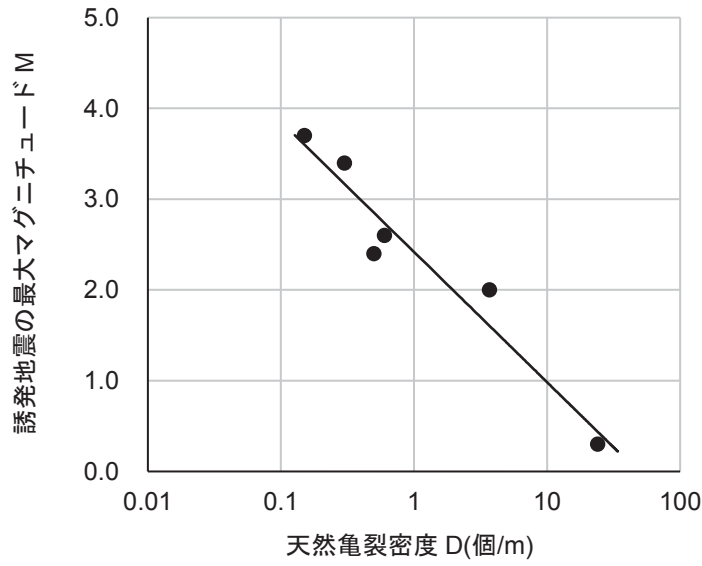


図2 天然亀裂密度と最大マグニチュード

次に、天然亀裂密度  $D$  と最大誘発地震エネルギー  $E_s$  の関係を図3に示す。天然亀裂密度が低い2サイト、BaselおよびCooper Basinの最大マグニチュードの誘発地震エネルギーは、他の4サイトに比べ突出して高いことが分かる。

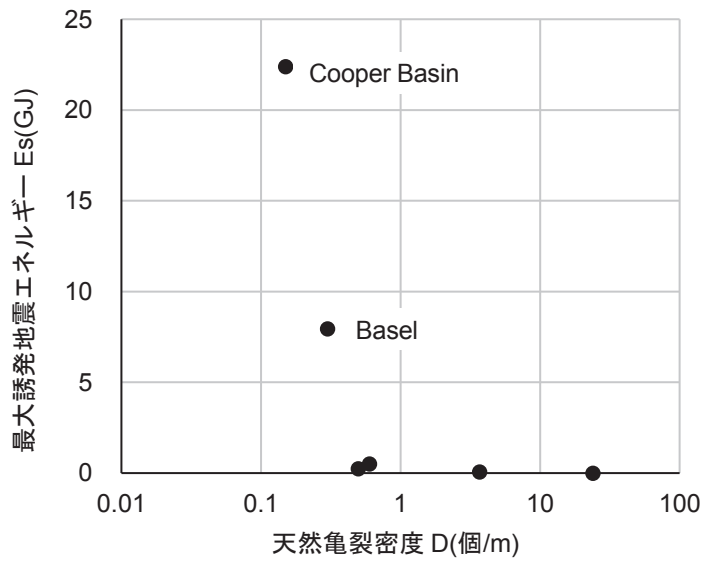


図3 天然亀裂密度  $D$  と最大誘発地震エネルギー  $E_s$

#### 4. 開口部 1m あたりの誘発地震エネルギー

天然亀裂密度は単位長さあたりの天然亀裂の数であるから、その逆数は岩石の一边平均長さに相当する。したがって、天然亀裂密度の逆数の 2 乗は岩石 1 個の平均面積となる。天然亀裂密度から計算した岩石平均面積 A を表 2 に示す。

水圧破碎によりひとつの岩石に割れやスリップが発生すると、その周辺の岩石のスリップを引き起こす。岩石平均面積が大きいほど影響を及ぼす範囲は広くなり、誘発地震エネルギーは高くなる。

水圧破碎を行う坑井の坑底部には、水を地層に浸入させるため裸坑仕上げとする開口部が設けられる(図 1)。開口部から地層へ水が浸入して誘発地震を引き起こすので、開口部単位長さあたりの誘発地震エネルギーをひとつの指標とする。6 サイトの開口部長さ L と開口部 1m あたりの最大誘発地震エネルギーも表 2 に示す。

表 2 岩石平均面積、坑井の開口部長さ、開口部 1m の最大誘発地震エネルギー

	雄勝	肘折	Soultz	Cooper Basin	Basel	Newberry
岩石平均面積 A(m <sup>2</sup> )	0.07	0.002	2.8	44	11	4.0
開口部長さ L(m)	10	54	617	286	371	1096
開口部 1m の最大誘発地震エネルギー(MJ/m)	6.3	0.003	0.8	78	21	0.2

開口部 1m あたりの最大誘発地震エネルギーは、前述のように岩石平均面積の影響を受けるので、図 4 にプロットした。

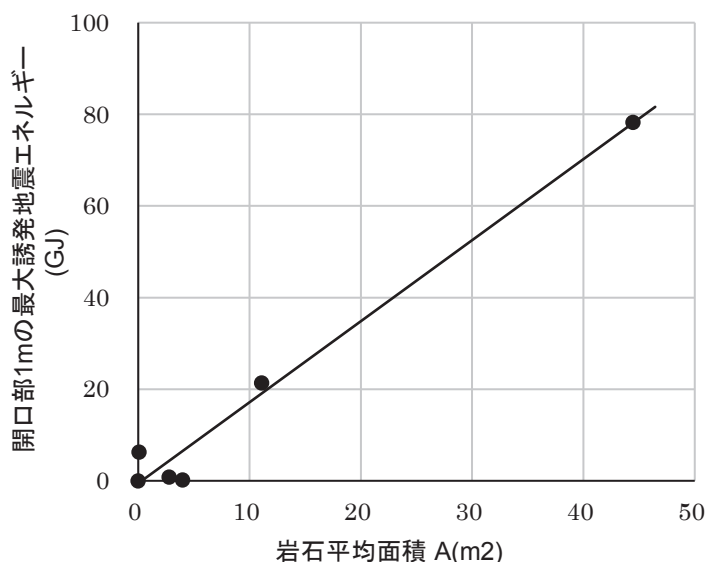


図 4 開口部 1m の最大誘発地震エネルギーと岩石平均面積 A の関係

次に、表 1 から水圧破碎の注水エネルギーと最大誘発地震エネルギーの関係を図 5 に示す。

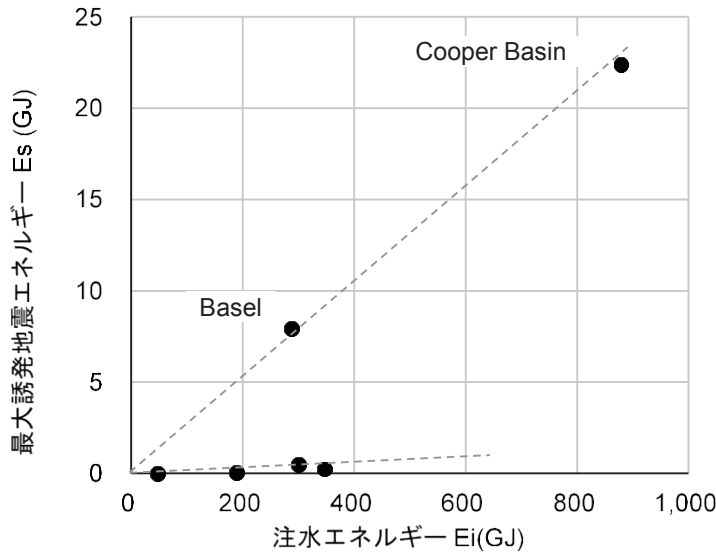


図 5 注水エネルギーに対する最大誘発地震エネルギー

全体的な傾向として、注水エネルギーが高いと最大誘発地震エネルギーも高くなる傾向が認められる。

## 5. 考察

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係することが分かった。図 2 に示したように、天然亀裂密度が 0.1 個/m であれば誘発地震の最大マグニチュードは 3.0~4.0 であり、密度が 10 個/m であれば最大マグニチュードは 2.0 以下である。天然亀裂が多く存在する地層では地震のすべり長さが短くなり、誘発地震の大きさが小さくなると考えられる。

図 4 に示したように、開口部 1m の最大誘発地震エネルギーは天然亀裂密度の逆数の 2 乗で計算される岩石平均面積にほぼ比例する。定数を  $c_3$  として式(3)で表すことができる。

$$\frac{E_s}{L} = c_3 \times \frac{1}{D^2} \quad (3)$$

Gutenberg-Richter 式を用いて整理すると、

$$10^{(1.5M+4.8)} = \frac{c_3 L}{D^2} \quad (4)$$

両辺の対数をとって整理すると式(5)を得る。

$$M = \frac{1}{1.5} (-2 \log D + \log c_3 L - 4.8) \quad (5)$$

式(5)は、最大マグニチュード M と天然亀裂密度 D に関して、式(2)と同じ関係にある。図 2 における最大マグニチュードと天然亀裂密度の関係は、岩石平均面積を導入することによって説明できた。これは水圧破碎と地下構造をエネルギーの観点で解析した成果である。



誘発地震エネルギーは、天然亀裂の密度だけでなく、亀裂の幅、亀裂幅の長さ方向の変動、亀裂の長さ、亀裂の空間分布の影響も受けると考えられ、今後誘発地震エネルギーと天然亀裂の関係を明らかにする必要がある。一方、水圧破碎により造成される貯留層の大きさ、透水率、水回収率も地下構造の影響を受ける。今後、エネルギー収支の観点から、地下構造(天然亀裂、岩石強度、空隙率など)が誘発地震や貯留層の特性(大きさ、透水性、水回収率など)に与える影響を明らかにする必要がある。

最大誘発地震エネルギーを注水エネルギーに対してプロットすると(図5)、天然亀裂密度が低いBaselとCooper Basinを結ぶ直線、および天然亀裂密度が高い雄勝、肘折、Soultz、Newberryの4サイトを結ぶ直線の2直線を引くことができる。最大誘発地震エネルギーは、図3に示したように天然亀裂密度の影響を大きく受け、図5に示したように天然亀裂密度ごとに注水エネルギーと比例関係があることが分かったので、天然亀裂密度をパラメータとした最大誘発地震エネルギーチャート(図6)を作成することが有用である。このチャートを活用することにより、水圧破碎による誘発地震のマグニチュードを推定できる。

最大誘発地震エネルギーチャートを作成するために、人工貯留層を造成する地層の地質コア試料を採取し、地質コア試料の天然亀裂の密度を調べ、水圧破碎による誘発地震のマグニチュードを観測して、データを多く積み上げる必要がある。

地下構造が誘発地震に与える影響の解析が進めば、さらに精度よく水圧破碎による誘発地震のマグニチュードを推定できる。

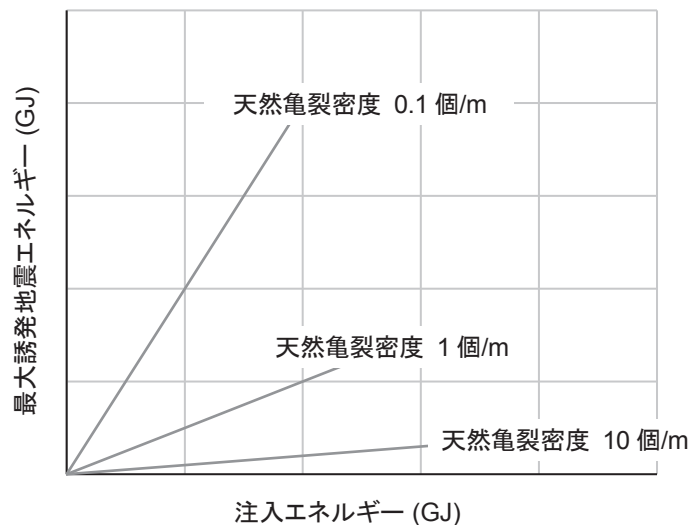


図6 最大誘発地震エネルギーチャート

## 6. 政策立案のための提案

高温岩体発電のための水圧破碎をエネルギーの観点から解析するとき、天然亀裂密度のデータを加えることにより、誘発地震の最大マグニチュードを推定でき、注水エネルギーと誘発地震エネルギーに関する有用な情報が得られることが分かった。以下に高温岩体発電の開発を推進するための課題を示す。

- (1) 効率よく水圧破碎を実施し、高温岩体発電の低コスト化を実現するために、地質コア試料を採取し、既存の天然亀裂の密度および亀裂幅などを調査する必要がある。
- (2) 天然亀裂、岩石の種類、空隙率などの地下構造と、水圧破碎による誘発地震や造成される貯留層の特性との関係を、エネルギー収支の観点から明らかにする必要がある。

## 参考文献

- [1] 経済産業省, “長期エネルギー需給見通し”, 2015 年 7 月,  
[http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/mitoshi/pdf/report\\_01.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf), (2017 年 11 月 1 日アクセス).
- [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.2)－高温岩体発電の発電コスト試算－”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, LCS-FY2015-PP-05, 2016 年 3 月.
- [3] 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.
- [4] Yamada, K. and Ishikawa, T., “Quantitative Analysis of Earthquake Energy Induced by Water Injection for Hot Dry Rock Power Generation”, Proceedings, 39<sup>th</sup> New Zealand Geothermal Workshop, 2017.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Baria, R., Jung, R., Tischner, T., Nicholls, J., Michelet, S., Sanjuan, B., Soma, N., Asanuma, H., Dyer, B. and Garnish, J., “Creation of An HDR Reservoir at 5000 m Depth at The European HDR Project”, PROCEEDINGS, Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, 2006.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Häring, M.O., Schanz, U., Lander, F. and Dyer, B.C., “Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system”, Geothermics, 37, 469-495, 2008.
- [11] 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.
- [12] Geothermal Data Repository, DOE, <https://gdr.openet.org/submissions/271>, web access 7 Aug. 2017.
- [13] Gutenberg, B. and Richter, C.F., “Magnitude and energy of earthquakes”, Ann. Geofis., 9, 1-15, 1956.

---

---

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.4)

— 高温岩体発電の水圧破砕による誘発地震に与える地下構造の影響 —

平成 30 年 1 月

“Geothermal Power (vol.4):

Influence of Underground Structure on Induced Earthquakes by Hydraulic Fracturing  
for Hot Dry Rock System”

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,  
2018.1

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  
<http://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。

---

---