

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.2)

—高温岩体発電の発電コスト試算—

平成28年3月

**Geothermal Power (vol.2):**

Electricity Cost Estimation of 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-FY2015-PP-05

## 概要

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。本報告では、開発有望地点での河川から取水できる量を算出し、これを平均深度 3,000m、平均温度 300°C の高温岩体に注入して得られる熱水を用いて、地上設備をシングルフラッシュ式とした場合の、高温岩体発電所における発電出力と発電コストを計算した。

発電出力は取水量に比例して増加し、発電出力 1GW に必要な取水量は 2.4m<sup>3</sup>/s (0.76 億 m<sup>3</sup>/年) となる結果が得られた。これより、全国年間発電電力量の 20% を高温岩体発電 30GW で発電するのに必要な水量は 23 億 m<sup>3</sup>/年となる。一方、全国河川水量 2,400 億 m<sup>3</sup>/年から農業用水、工業用水、生活用水を除くと、残る利用可能な河川水量は 1,680 億 m<sup>3</sup>/年であり、上記の水量を河川から確保できると結論できる。

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。

## Summary

Although untapped potential of Hot Dry Rock geothermal power generation (HDR) is huge and its demonstration experiments had been already performed, HDR system has not yet been put into practice.

For the purpose of practical realization of HDR, the power output and generation efficiency of HDR at the two promising Japanese sites are calculated under the condition of utilizing hot water from hot rocks of average depth 3,000m and average temperature 300°C. For the calculation, we adopted single flash type geothermal power plant for surface system and estimated the intrinsic flow rate of water taken from rivers in the area.

We obtained the results that electricity output increases in proportion to the flow rate of water and electricity output 1GW requires amount of water 2.4m<sup>3</sup>/s (i.e., 76 Mm<sup>3</sup>/y). When HDR plants generate 20% of total annual Japanese energy (=200TWh/y (i.e., 30GW)), necessary amount of water is 2.3 Gm<sup>3</sup>/y. Total amount of water in Japanese rivers is 240 Gm<sup>3</sup>/y, and 168 Gm<sup>3</sup>/y is available except agricultural, industrial and daily life use. We can conclude that above mentioned amount of water is realizable.

Electricity cost of HDR system with improving the water recovery up to 98 % is almost equal to the cost of a conventional geothermal power calculated in the previous paper.

## 目次

### 概要

1. はじめに	1
2. 高温岩体発電のプロセス	2
3. 取水可能量	4
4. 発電出力と発電コスト	5
5. まとめ	7
参考文献	7

## 1. はじめに

地熱発電は、資源深さが浅い順に温泉発電、熱水系地熱発電、高温岩体発電、マグマ発電に分けることができる(図1参照)。温泉発電と熱水系地熱発電は実用化され、現在多くの開発プロジェクトが進行している。マグマ発電は研究段階である。

一方、大きな賦存量を持つ高温岩体発電について、日本ではNEDO(山形県肘折) [1]と電力中央研究所(秋田県雄勝) [2]による実証試験が行われ、基本的な技術は確立されている。本報告では、人工的に造成した貯留層に河川水を注入し、地上設備をシングルフラッシュ式とした場合の発電出力と発電コストを明らかにする。

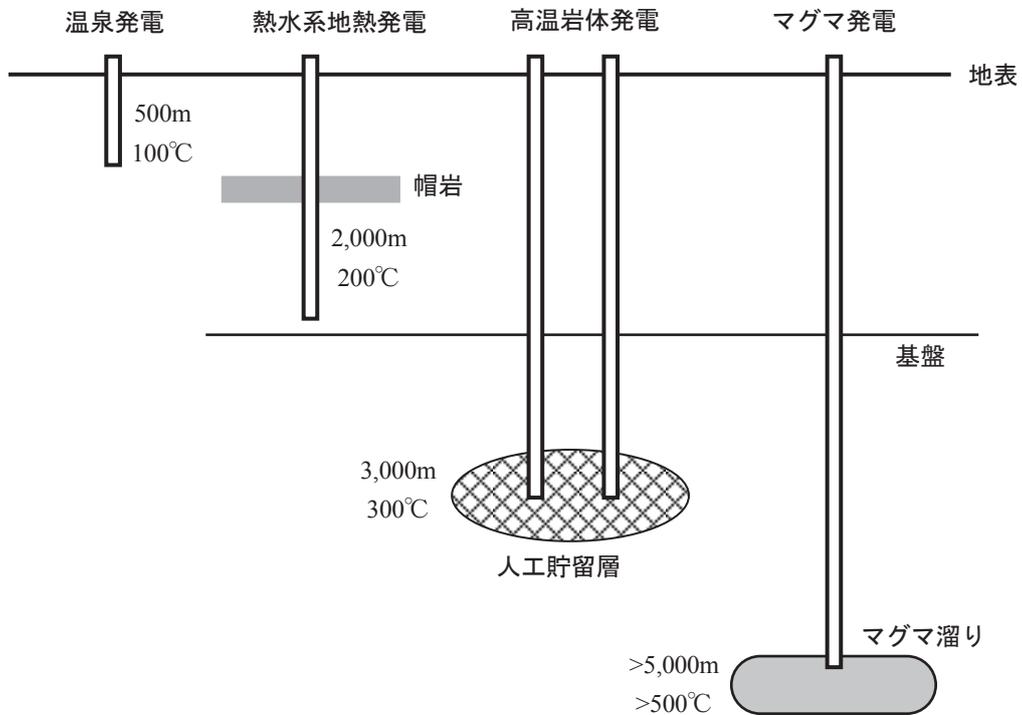


図1 地熱発電の区分

## 2. 高温岩体発電のプロセス

図 2 に、高温岩体発電とシングルフラッシュ式の組合せからなるプロセスを示す。高温岩体に人工的に造成した貯留層に注入井と生産井を掘削し、河川水を注入井から貯留層へ注入する。貯留層内で加熱された地熱流体（二相流）は生産井から取り出される。フラッシュャーによって蒸気と熱水に分離され、蒸気はタービンへ投入され、熱水は注入井に戻される。

タービンを回し、発電した後の湿り蒸気は復水器で温水になり、冷却塔で冷却水となる。冷却塔で余剰となる冷却水は注入井に戻される。

人工貯留層の水が外部に逃げる場合もあり、注入井に注入する水の総流量（すなわち、河川水量  $m_1$  (kg/s)、及び注入井に戻されるフラッシュャー熱水出口から出る熱水量  $m_3$  (kg/s) の和) に対する生産井から取り出される流体流量  $m_2$  (kg/s) の比率（ $= m_2 / (m_1 + m_3)$ ）を水回収率  $R$  (%) とする。

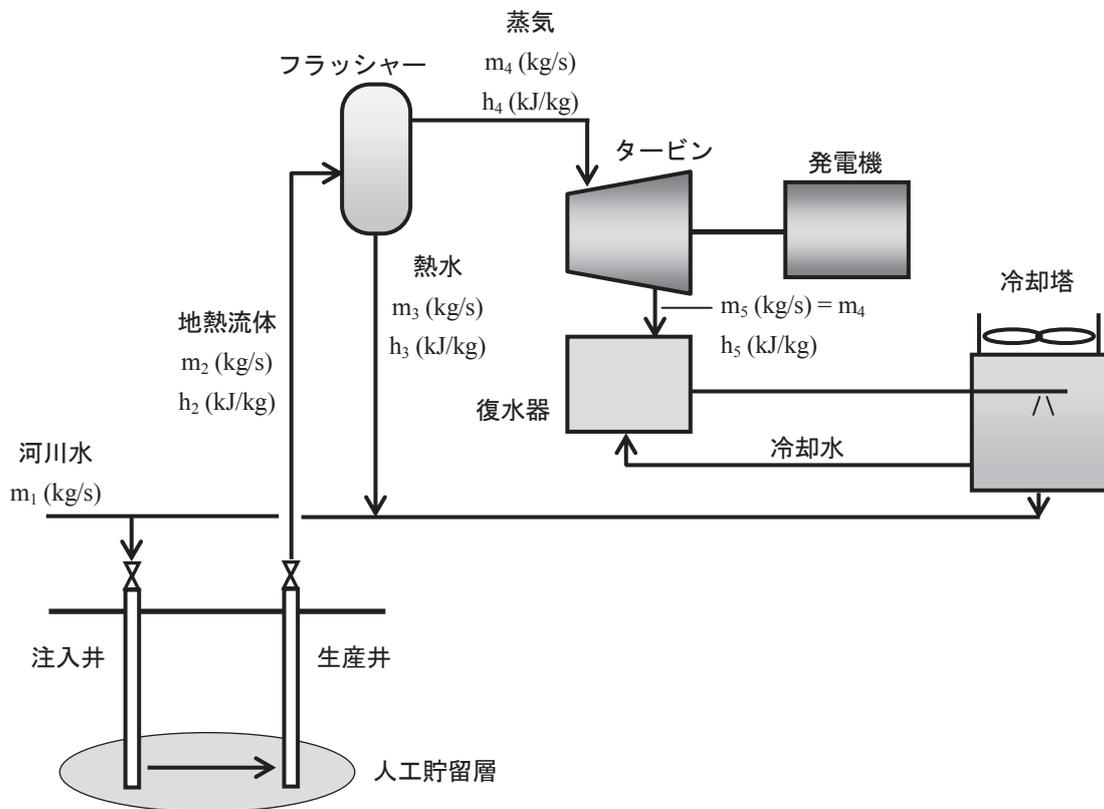


図 2 高温岩体発電とシングルフラッシュ式の組合せ

生産井から取り出す二相流体のエンタルピー  $h_2$  (kJ/kg) は、人口貯留層における熱水のエンタルピーとほぼ等しいと仮定とした。フラッシュ温度における、フラッシャー熱水出口における熱水のエンタルピーを  $h_3$  (kJ/kg)、フラッシャー蒸気出口における蒸気の流量及びエンタルピーをそれぞれ  $m_4$  (kg/s)、 $h_4$  (kJ/kg) とすると、フラッシャーから生成される蒸気の比率  $X$  は、式(1)で求まる [3]。

$$X = \frac{m_4}{m_2} = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} \quad (1)$$

ここで生産井の流量  $m_2$  は次式で表される。

$$m_2 = m_1 \times \frac{R}{1 - R(1 - X)} \quad (2)$$

河川から取水する流量  $m_1$  が分れば、式(1)と式(2)からタービンへの蒸気流量  $m_4$  が計算でき、発電出力を求めることができる。タービン出口の流量及びエンタルピーを、それぞれ  $m_5$  (kg/s) ( $= m_4$ ) 及び  $h_5$  (kJ/kg) とすると、発電出力  $W_e$  は式(3)で与えられる。

$$W_e = m_4 \times (h_4 - h_5) \quad (3)$$

$h_5$  を算出する際に、ドライ蒸気のタービン効率を 0.85 とした。また、発電効率  $\eta$  は式(4)で計算できる。

$$\eta = \frac{W_e}{m_2 h_2 - m_3 h_3} \quad (4)$$

### 3. 取水可能量

高温岩体発電開発の対象地域として、A：岩手県葛根田地域、及びB：秋田県皆瀬地域の2地点を選定した(位置は図3参照)。両地点ともにNEDO地熱開発促進調査で有望地域とされている。これらの地域では、高温岩体は深度2,000～4,000mにあると推定され、本報告では平均深度3,000m、平均温度300℃とした。この場合、坑井掘削深さ4,000mが要求される。また、平均温度300℃の人工貯留層温度は、数年で280℃程度に低下すると仮定し、計算には温度低下後の値を採用した。



図3 位置図

それぞれの地点における河川から取水可能な水量を表1に示す。取水ポイントにおける流域面積を地図上で計測し、取水ポイントの下流にある水力発電所[4]、または観測所[5]における流域面積と低水流量に基づき、取水可能量を算出した。

表1 取水可能量

	A	B
取水ポイントでの流域面積	13km <sup>2</sup>	69km <sup>2</sup>
水力発電所、または観測所	葛根田第二発電所 [4]	雄物川橋観測所 [5]
流域面積	101km <sup>2</sup>	1,240km <sup>2</sup>
低水流量	3.0m <sup>3</sup> /s	27.0m <sup>3</sup> /s
取水可能量	0.4m <sup>3</sup> /s	1.6m <sup>3</sup> /s

表1において、低水流量は1年のうち275日はこの流量を下回らない流量であり、河川の状況を示すための指標の一つである。取水ポイントにおける低水流量は、そのポイントでの流域面積に比例するとし、その流量を取水可能量として採用した。低水流量以下の日には、発電を停止するので、発電所の稼働率は約75%となる。

#### 4. 発電出力と発電コスト

表 1 の取水可能量を用い、水回収率  $R = 98\%$ 、フラッシュ温度  $150^{\circ}\text{C}$  として発電出力を計算した結果を図 4 に示す。発電出力は取水量に比例して増加する。外挿すると、発電出力 1GW に必要な取水量は  $2.4\text{m}^3/\text{s}$  ( $0.76$  億  $\text{m}^3/\text{年}$ ) となる。

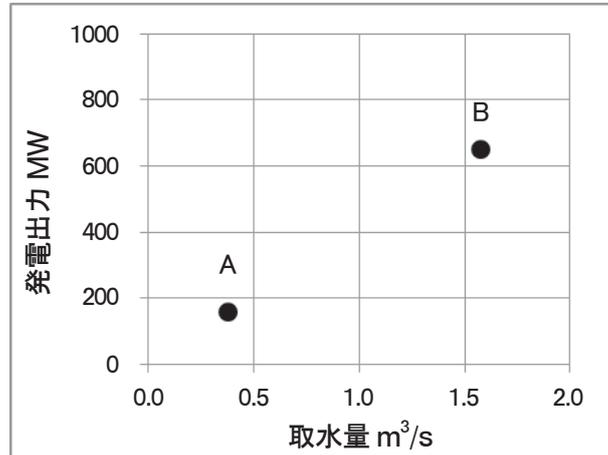


図 4 発電出力

日本の河川の総水量は  $2,400$  億  $\text{m}^3/\text{年}$  [6] であり、ここから農業用水  $520$  億  $\text{m}^3/\text{年}$ 、工業用水  $80$  億  $\text{m}^3/\text{年}$ 、生活用水  $120$  億  $\text{m}^3/\text{年}$  が使用され [7]、残る利用可能な河川水量は  $1,680$  億  $\text{m}^3/\text{年}$  である。全国の年間発電電力量約  $1,000\text{TWh}$ [8] の  $20\%$  ( $30\text{GW}$ ) を高温岩体発電で発電するためには  $23$  億  $\text{m}^3/\text{年}$  の水が必要であり、河川から取水することは可能である。

水回収率 50%、98% の場合について発電コストを計算した結果を表 2 に示す。8.5 インチ裸坑仕上げの生産井 1 本あたりの流量を計算し、二相流の流量から必要な生産井本数を算出した。水回収率を高めるため注水井 1 本の周りに生産井 4 本を配置することとし、注水井の本数を決定した。抗井配置モデルは、文献 [9] に従った。人工貯留層造成の水圧破碎費は 1,000M¥/本とした。坑井掘削費は注水井、生産井とも 2,000m 掘削で 400M¥、4,000m 掘削で 1,000M¥ となるモデルを採用し [10]、掘削深さは 4,000m とした。これらの抗井掘削費以外の建設費、及び発電コストは、式 (5) に従って算出した。

$$\text{発電コスト} = \frac{\text{建設費} \times \text{年経費率} + \text{人件費} + \text{用水費}}{\text{年間発電電力量 (送電端)}} \quad (5)$$

式 (5) において、人件費は、運転員 5 人、労務費を 5 百万円 / 人 / 年とした。年経費率 10%、用水費 20 円 / m<sup>3</sup>、稼働率 75%、所内率 20% とした。用地取得費、送電設備費は含めない。

表 2 高温岩体発電の発電コスト

地点	A		B		参照
河川水量 (取水可能量)	1,400t/h (0.4m <sup>3</sup> /s)		5,600t/h (1.6m <sup>3</sup> /s)		表 1
水回収率 R	50%	98%	50%	98%	
貯留層温度	280°C	280°C	280°C	280°C	
発電出力	38MW	157MW	155MW	650MW	式 (3)
発電効率 η	11%	6%	6%	6%	式 (4)
注水井の本数	1 本	7 本	7 本	38 本	
生産井の本数	4 本	14 本	14 本	52 本	
建設費	185 億円	573 億円	592 億円	2,280 億円	
建設単価	50 万円 /kW	37 万円 /kW	38 万円 /kW	35 万円 /kW	
発電コスト	10.9 円 /kWh	7.3 円 /kWh	8.5 円 /kWh	7.0 円 /kWh	式 (5)

比較のため、熱水系地熱発電所の発電コストの計算例を表 3 に示す。葛根田地熱発電所 1 号をモデルとし、地熱流体流量、フラッシュ温度、生産井と還元井の本数は、「わが国の地熱発電所設備要覧 2000 年」日本地熱調査会によった。稼働率 80%、所内率 10% とした。

表 3 熱水系地熱発電の発電コスト

地熱流体流量	1,300t/h
フラッシュ温度	147°C
発電出力	49MW
発電効率	10.4%
生産井の本数	12 本
還元井の本数	15 本
建設費	211 億円
建設単価	43 万円 /kW
発電コスト	6.9 円 /kWh

水回収率を 98% に高めると、高温岩体発電の発電コストは熱水系地熱発電に近づく。

## 5. まとめ

高温岩体発電にシングルフラッシュ型地熱発電を組み合わせて計算した結果、発電出力は河川取水量に比例して増加し、発電出力 1GW に必要な取水量は  $2.4\text{m}^3/\text{s}$  (0.76 億  $\text{m}^3/\text{年}$ ) となる結果が得られた。

全国年間発電電力量の 20% を高温岩体発電 30GW で発電するのに必要な水量 23 億  $\text{m}^3/\text{年}$  は河川から確保できると結論できる。

水回収率を高めることにより発電コストを低減でき、熱水系地熱発電の発電コストに近づくことが判明した。

今後は、発電コストの低減に向けて、地上設備をシングルフラッシュ式発電からダブルフラッシュ式発電、バイナリー式発電にする効果を定量的に検討し、更に、発電コストに大きく影響する水回収率を向上させる具体的方策を検討する。

高温岩体発電の開発を促すための提案を示す。

- (1) 高温岩体が賦存する地域を特定し、資源量を算出する方法を確立する必要がある。
- (2) 高温岩体発電の有望地域に近接した河川から取水できる地点と水量が分るマップを作成し、河川取水可能量を明らかにする必要がある。
- (3) 地熱資源探査リスクを軽減するため、経済的で高精度な深部地熱資源探査技術が必要である。

## 参考文献

- [1] 川崎耕一、菊池恒夫、及川寧己、高温岩体発電システムの開発－NEDO 肘折プロジェクト、地熱、39 巻、3 号、pp23-37、2002.
- [2] 海江田編、電中研レビュー第 49 号、未利用地熱資源の開発に向けて－高温岩体発電への取組、電力中央研究所、2003.
- [3] 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター、「低炭素社会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.1)－発電量拡大に向けた設計・評価－」LCS-FY2014-PP-07 (pp. 1-6)、2014 年 3 月.
- [4] 葛根田第二発電所、<http://www.suiryoku.com/gallery/iwate/kakkond2/kakkond2.html>
- [5] 国土交通省水文水質データベース、雄物川橋観測所、<http://www1.river.go.jp/cgi-bin/SiteInfo.exe?ID=302091282210060>
- [6] 日本河川協会、[http://www.japanriver.or.jp/river\\_law/map.htm](http://www.japanriver.or.jp/river_law/map.htm)
- [7] 国土交通省水資源部、日本の水資源、平成 26 年版.
- [8] 経済産業省、2015 年 7 月、「長期エネルギー需給見通し」、[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)
- [9] 北野晃一等、高温岩体発電の基盤技術の開発－実用化技術の開発と雄勝実験場での実証－、電力中央研究所報告、総合報告 U41、一般財団法人電力中央研究所、p11、2000 年 9 月.
- [10] 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター、未発表結果.

---

---

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.2)**  
—高温岩体発電の発電コスト試算—

平成 28 年 3 月

**Geothermal Power (vol.2):**  
**Electricity Cost Estimation of 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,  
2016.3

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/>

© 2016 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。

---

---