

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.1)

— 発電量拡大に向けた設計・評価 —

平成27年3月

“Geothermal Power (vol.1):

Design and Estimation to increase Generation Power”

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-FY2014-PP-07
(平成27年4月印刷版)

概要

日本の地熱導入ポテンシャル（150℃以上）は、約 14GW と推計されているが、これまでに開発されているのは約 520MW である。発電出力を増大させるためには、新しく地熱発電所の建設を促進すること、及び従来技術を有効活用して発電効率を向上させることが必要である。

国内の地熱発電所について公開されている運転データに基づいて、シングルフラッシュ式とダブルフラッシュ式について発電出力を計算した。その結果、エンタルピーが低い地熱流体にダブルフラッシュ式を適用すると、シングルフラッシュ式と比べて発電出力が 10～20% 増加し、発電効率は 1～2% 向上することが分かった。発電コストも 0.7¥/kWh 低減し、経済性の面でもダブルフラッシュ式の優位性が確認できた。低エンタルピー地熱流体にはダブルフラッシュ式を採用するなど、地熱流体の特性に合わせて適切な発電方式を選択することが重要である。例えば、NEDO の開発可能性調査に基づいて開発が進められている 1,000MW 規模の地熱発電にダブルフラッシュ式を適用すると 100MW 程度の出力増加が見込めることがわかった。

一方、ダブルフラッシュ式では還元熱水の温度が下がり、還元井のスケール付着が発生しやすくなるため、今後その対策を検討する。

Summary

The power output of Japanese Geothermal power plants are almost 520MW and the untapped potential, more than 150℃, is estimated to be 14GW. In the first place, construction of new geothermal power plants should be promoted to increase power output. Further, improvement of generation efficiency by effective use of conventional technologies is also important.

The power output of single and double flash type geothermal power plants are calculated on the basis of open operating data of commercial geothermal power plants, for the comparison. Output power is increased by 10 to 20 %, generation efficiency is improved by 1 to 2 % and generation cost is decreased 0.7¥/kWh, when double flash type is applied to geothermal fluid in “low enthalpy” group. It is important to select a generation type according to the characteristics of geothermal fluid. The increase of output power 100MW can be expected by applying double flash type to geothermal power plants in totally 1000MW, which are under development based on “Geothermal Development Promotion Survey” by NEDO.

On the other hands, the scale is likely to occur in the re-injection well of double flash type power plants because of low temperature of the re-injection water. We will discuss this problem in near future.

目次

概要

1. はじめに	1
2. 地熱発電プロセス	1
3. シングルフラッシュ式とダブルフラッシュ式	2
3.1 シングルフラッシュ式	2
3.2 ダブルフラッシュ式	4
4. 発電コストの試算	5
5. まとめ	6
参考文献	6

1. はじめに

日本の地熱導入ポテンシャル（150℃以上）は、約 14GW と推計されているが¹⁾、これまでに開発されているのは約 520MW である。地熱開発を促進するとともに、従来技術の活用によって発電出力を増大させることは可能である。

地熱資源は偏在しており、地域によって地熱流体の特性（温度、エンタルピー、流量）は異なっている。本稿では国内の地熱発電所をモデルとして、シングルフラッシュ式とダブルフラッシュ式について発電出力、発電効率、発電コストを計算し、地熱流体の特性に応じた発電方式を検討する。

また、現在開発が進められている地熱発電の発電出力についてダブルフラッシュ式を採用した場合の効果について評価する。

2. 地熱発電プロセス

シングルフラッシュ式地熱発電プロセスの概要を図 1 に示す。

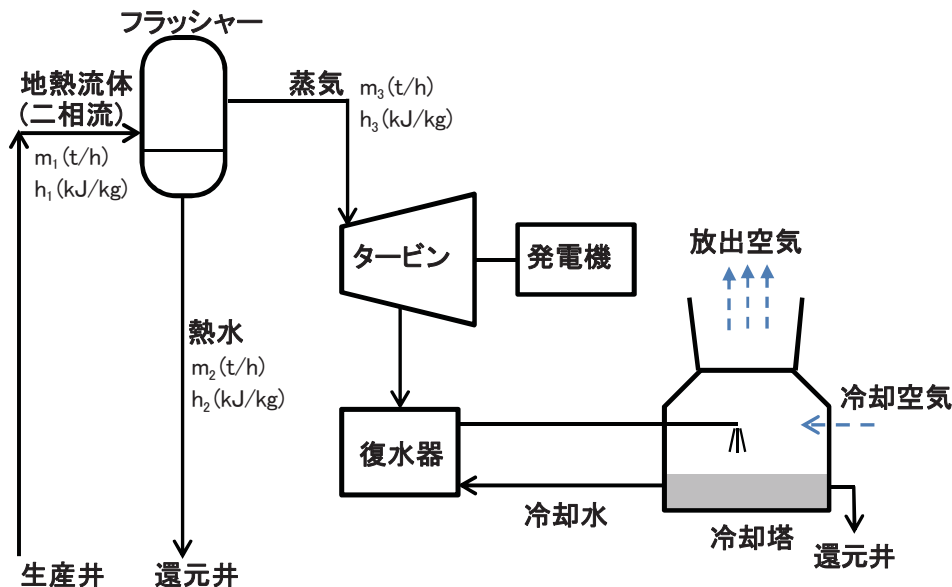


図 1 シングルフラッシュ式地熱発電プロセスの概要図

生産井から得られる地熱流体は、蒸気と熱水の混合の二相流であることが多いため、フラッシュャーで減圧して蒸気と熱水に分離する。分離された蒸気でタービンを回し発電するシングルフラッシュ式を SF 式と表す。一方、図には示していないが、フラッシュャーで分離された熱水を第 2 フラッシュャーで減圧して 2 次蒸気を作り、タービンの中間段に投入して発電出力を高める方式のダブルフラッシュ式を DF 式と表す。ここで、フラッシュャー入口における地熱流体のエンタルピー及び流量を、それぞれ入口エンタルピー h_1 (kJ/kg) 及び m_1 (t/h)、フラッシュャー熱水出口における熱水のエンタルピー及び流量を、それぞれ熱水エンタルピー h_2 (kJ/kg) 及び流量 m_2 (t/h)、フラッシュャー蒸気出口における蒸気のエンタルピー及び流量を、蒸気エンタルピー h_3 (kJ/kg) 及び流量 m_3 (t/h) と表す。地熱流体の流量 m_1 は、単純に以下の式から求めることができる。

$$m_1 = m_2 + m_3 \quad (1)$$

3. シングルフラッシュ式とダブルフラッシュ式

3.1 シングルフラッシュ式 (SF 式)

日本には 2013 年 3 月末現在、事業用として 16 基、自家用として 4 基の地熱発電所が稼働している。事業用 16 基の内訳は、ドライスチーム式 1 基、SF 式 11 基、DF 式 3 基、バイナリー式 1 基であり、自家用 4 基は全て SF 式である。

事業用 SF 式について公開されている運転データを表 1 に示す。

表 1 SF 式発電所の運転データ

	方式	フラッシュ 温度℃	熱水量 m_2 (t/h)	蒸気量 m_3 (t/h)	復水器出口 温度 (℃)	認可出力 (MW)
澄川	SF	158	750	420	43.5	50
葛根田 1	SF	147	1,061	478	48.8	50
葛根田 2	SF	152	797	283	48.8	30
上の岱	SF	167	62	243	48.8	28.8
鬼頭	SF	149	592	135	40.5	15
柳津西山	SF	167	39	494	48.1	65
八丈島	SF	188	1	35	46.6	3.3
大岳	SF	136	445	136	41.4	12.5
滝上	SF	129	1,070	253	45.0	27.5
大霧	SF	137	836	269	45.3	30
山川	SF	187	463	215	49.4	30

出典：わが国の地熱発電所設備要覧 2000 年、社団法人日本地熱調査会（文献 2）

地熱発電の現状と動向 2013 年、一般社団法人火力原子力発電技術協会（文献 3）

表 1 から蒸気表により各フラッシュ温度における熱水エンタルピー h_2 及び蒸気エンタルピー h_3 を求め、発電出力 W を計算した。発電出力 W の計算方法の記載は省略するが、詳しくは文献 4 を参照されたい。また、以下の式を利用すると、入口エンタルピー h_1 、発電効率 η 、及び乾き度 X を計算できる。

$$h_1 = \frac{m_2 h_2 + m_3 h_3}{m_1} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{3.6 \times 10^6 \times W}{m_1 \times h_1} \quad (3)$$

$$X = \frac{m_3}{m_2 + m_3} \quad (4)$$

表 1 に示した各 SF 式発電所について、入口エンタルピー h_1 、発電出力 W 、発電効率 η 、及び乾き度 X を計算した結果を表 2 に示す。表 2 にはフラッシュ温度も合わせて示している。

表 2 SF 式発電出力の計算結果

	方式	フラッシュ温度 $^{\circ}\text{C}$	入口エンタルピー h_1 (kJ/kg)	発電出力 W (MW)	発電効率 η (%)	乾き度 X
澄川	SF	158	1416	55	12.0	0.36
葛根田 1	SF	147	1278	56	10.2	0.31
葛根田 2	SF	152	1192	34	8.8	0.26
上の岱	SF	167	2346	32	16.2	0.80
鬼頭	SF	149	1020	17	8.4	0.19
柳津西山	SF	167	2614	66	17.0	0.93
八丈島	SF	188	2728	5	19.1	0.97
大岳	SF	136	1076	17	9.5	0.23
滝上	SF	129	958	27	7.5	0.19
大霧	SF	137	1100	30	8.9	0.24
山川	SF	187	1424	31	11.6	0.32

フラッシュ温度はおおよそ $130 \sim 190^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、表 2 から入口エンタルピー h_1 の高い地熱流体は乾き度 X も高いことが分かる。

入口エンタルピー h_1 と発電効率 η の関係を図 2 に示す。エンタルピーが高いほど発電効率が高い傾向が認められ、高エンタルピー群と低エンタルピー群に分かれる。低エンタルピー群は乾き度が低く、蒸気量より熱水量の比率が高い。

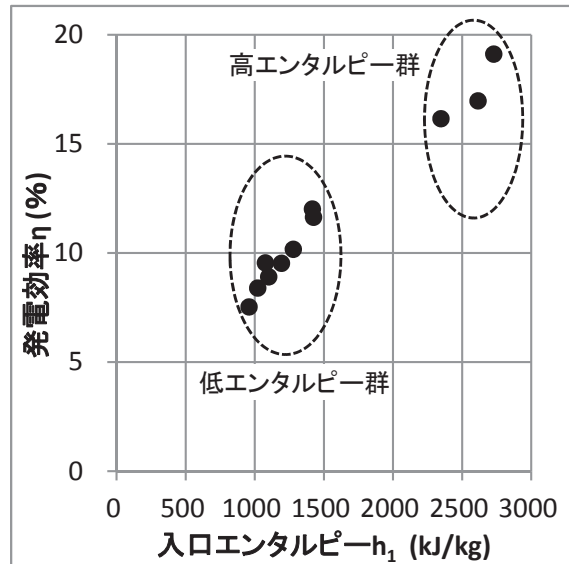


図 2 入口エンタルピー h_1 と発電効率 η

3.2 ダブルフラッシュ式 (DF 式)

図 2 の低エンタルピー群の地熱流体は熱水を多く含むので DF 式にすれば発電出力は大きくなる。低エンタルピー群から 2 個 (葛根田 1 及び山川)、比較のため高エンタルピー群から 1 個 (上の岱) を例に取り、SF 式を DF 式に変えた場合の発電効率を計算した結果を図 3 に、発電出力、発電効率の計算結果を表 3 に示す。計算にあたり DF 式の 2 次フラッシュ温度は、1 次蒸気と 2 次蒸気の混合蒸気の乾き度が 0.95 以上となるように設定した。

SF 式を DF 式に変えることで、低エンタルピー群の発電出力は 10 ~ 20% 増加し、発電効率は 1 ~ 2% 向上するが、高エンタルピー群の発電出力はほとんど増加しない。

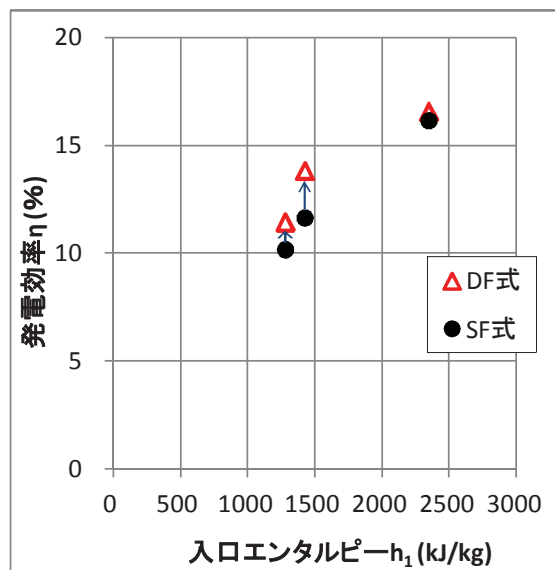


図 3 SF 式と DF 式の発電効率

表 3 SF 式と DF 式の発電出力、発電効率の計算結果

発電方式	低エンタルピー群 1 (葛根田 1)		低エンタルピー群 2 (山川)		高エンタルピー群 (上の岱)	
	SF	DF	SF	DF	SF	DF
入口エンタルピー (kJ/kg)	1278	1278	1424	1424	2346	2346
第 1 フラッシュ温度 (°C)	147	147	187	187	167	167
第 2 フラッシュ温度 (°C)	—	105	—	125		105
発電出力 (MW)	56	63 (+13%)	31	37 (+19%)	32	33 (+3%)
発電効率 (%)	10.2	11.4	11.6	13.8	16.2	16.6

事業用の SF 式 11 基のうち、低エンタルピー群に属する 8 基をすべて DF 式に変えた場合、発電出力の合計はおよそ 40MW 増加する。これは 8 基の合計発電出力 267MW の 15% にあたる。

低エンタルピー群の SF 式 8 基の合計発電出力は、国内地熱発電の総発電出力の半分を占める。NEDO による調査⁵⁾では、地熱発電開発の有望地域として 31 カ所、合計 950MW が報告されており、地熱発電の開発が進められている。

950MW の半分が低エンタルピー群に属すると仮定し、これを SF 式から DF 式に変えると発電出力は 71MW 増加する。

4. 発電コストの試算

発電コストは次の式で求めた。

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

建設費は、坑井掘削費、フラッシュー建設費、蒸気輸送管建設費、発電設備建設費を含む。
 主要機器のコスト（価格）は LCS のデータベースにより算出した。
 生産井、還元井の本数は現在使用している本数と同じとし、掘削単価は文献⁶⁾によった。生産井の掘削深さは 2000m、還元井は 1500m とした。
 年経費率は、坑井の追加掘削費を含めて 15% とした。
 人件費は、運転人員 5 人、労務費を 4 百万円 / 人 / 年とした。
 設備利用率は 80%、所内率は 10% とした。
 調査費、用地取得費、送電設備建設費は含めない。

表 3 に示した 3 例の発電コストの試算結果を表 4 に示す。

表 4 発電コストの試算結果

	低エンタルピー群 1 (葛根田 1)		低エンタルピー群 2 (山川)		高エンタルピー群 (上の岱)		
	SF 式	DF 式	SF 式	DF 式	SF 式	DF 式	
発電出力 (MW)	56	63	31	37	32	33	
建設費 (M¥)	坑井掘削費	15,400	15,400	6,240	6,240	5,760	5,760
	蒸気生産設備	493	730	228	459	213	278
	発電設備	6,970	7,770	4,349	5,166	4,290	4,409
年経費率 (%)	15	15	15	15	15	15	
人件費 (M¥)	20	20	20	20	20	20	
年間発電電力量 (× 10 ⁶ kWh)	353	397	195	233	202	208	
発電コスト (¥/kWh)	9.7	9.1	8.4	7.7	7.7	7.6	

低エンタルピー群の SF 式を DF 式に変えることによって発電コストは 0.7¥/kWh 程度下がり、経済性の面で有利である。一方、高エンタルピー群については、SF 式を DF 式に変えても 0.1¥/kWh しか下がらない。

5. まとめ

国内地熱発電所をモデルとして、SF 式と DF 式で発電出力、発電効率、発電コストを計算した。

- ・ 熱水量の多い低エンタルピー群の地熱流体に DF 式を採用することによって SF 式より発電効率が 1～2% 向上し、発電コストも 0.7¥/kWh 低減する。
- ・ DF 式発電出力は SF 式よりも 15% 増加するので、現在開発が進められている 1,000MW 規模の地熱発電について、DF 式を採用することにより低エンタルピー群の割合を考慮して 100MW 程度の発電出力増加が見込めることが分かった。
- ・ 高エンタルピー群の地熱流体については、DF 式を採用しても発電効率はわずかに増加するだけであり、SF 式が適している。
- ・ DF 式を採用することにより還元する熱水の温度が低下し、還元井へのスケール付着が発生しやすくなり、保守修理費が増大する。今後はスケール対策について検討を進める。
- ・ 地熱発電の普及には、導入ポテンシャル評価の高精度化により有望地域を増やす必要がある。同時に、地熱資源の有効活用のため、120℃以下の地熱資源を利用する小型バイナリー発電設備の低コスト化が必要である。
- ・ 建設費に占める割合が大きい坑井掘削費について、コスト分析を行い、コストを低減できる対策を検討する。

参考文献

- 1) 平成 25 年度地熱発電に係る導入ポテンシャル精密調査・分析委託業務報告書、環境省
- 2) わが国の地熱発電所設備要覧 2000 年、社団法人日本地熱調査会
- 3) 地熱発電の現状と動向 2013 年、一般社団法人火力原子力発電技術協会
- 4) Geothermal Power Plants, DiPippo, 2012
- 5) 平成 13 年度地熱開発促進調査 開発可能性調査、NEDO
- 6) 地熱発電の経済性と開発リスク、安達正敏、2009
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/data/g90130bj.html>

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.1)
—発電量拡大に向けた設計・評価—

平成 27 年 3 月

“Geothermal Power (vol.1):
Design and Estimation to increase Generation Power”
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,
2015.3

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

(平成 27 年 4 月印刷版)

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 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/>

© 2015 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。
