

第7章 温泉発電に関する資源分布図の作成

本章では、温泉発電が可能な温泉の条件を設定し、条件を満たす温泉を抽出し、発電可能量を算定、資源分布図を作成した。その結果を以下に記述する。

7.1 温泉発電が可能な温泉の抽出

温泉発電が可能な温泉の条件を現在実用化されている発電機の使用等を参考に以下のとおり設定した。

- 1) 湧出温度が 80℃（現在の実用的下限温度）以上の温泉を対象とする。
- 2) 湧出量が 100L/分（実用的発電規模の下限流量）以上の温泉を対象とする。
- 3) 温泉水の化学的特徴（pH、スケール成分等）による制限は設けないこととする。

温泉発電の条件に関する文献収集結果を表 7.1-1 に示す。熱源下限温度は最低で 53℃、最高で 90℃といった条件が得られた。流量については発電機の出力に依存するので下限値の特定が難しいが、現在製造・開発されている発電機の最小の出力クラスである 10 kW 未満の機種で約 3～12 t/時（50～200 L/分）という値が掲げられていること、また専門家へのヒアリングにおいて上記条件が妥当であるとの意見が得られたことから、上記条件に基づき温泉発電が可能な温泉を抽出することとした。

表 7.1-1 温泉発電の条件に関する文献収集結果

資料名・出典等	条件	
	熱源温度（下限）	流量
大里・村岡（エネルギー学会誌, 2008）	約 53℃以上（カーリーナサイクルの最低動作温度）	言及なし
H24 年度調査でのメーカー・ヒアリング	約 80℃以上	言及なし
発電機メーカーカタログ記載値等	70～90℃	10 kW 以下の機種においては約 3～12 t/h
山田（地熱エネルギーハンドブック, 2014）	70-80℃以上（実績値）	言及なし

収集・整理した温泉データ（12,656 か所）から上記条件に合致する温泉を抽出して全国の温泉発電可能量の評価を行うことを試みたが、収集温泉データには湧出量の情報がほとんどの場合付随していなかった。そのため現時点で全国の温泉データを一定の基準で網羅している最も詳細なデータと考えられる「日本温泉・鉱泉分布図及び一覧（第 2 版）」（金原, 2005）のデータを用いた。「日本温泉・鉱泉分布図及び一覧（第 2 版）」には 4,536 か所の温泉データが掲載されており、そのうち 3,702 か所について熱源温度（泉温）と湧出

量の両方の情報が揃っている。3,702 か所のうち、上記条件（湧出温度 80℃以上、かつ湧出量 100L/分以上）を満たす温泉は 149 か所であった。抽出された温泉例（北海道）を表 7.1-2 に示す。

表 7.1-2 温泉発電資源量計算のための温度・湧出量条件を満たす温泉（例：北海道）

温泉名	湧出温度（上限）（℃）	湧出量（L/分）
羅臼	99	385
層雲峡	88.4	1,253
高原(大雪高原)	91	227
養老牛	85	510
和琴	98.2	736
弟子屈	96	2,468
トムラウシ	95	288
阿寒湖畔	88.6	2,940
十勝岳	90	390
定山溪	80	8,973
五色	82	430
北湯沢	91.9	1,145
大荘	88	636
幡溪	87	586
登別	98	9,207
北檜山	83.7	491
貝取潤	82.7	1,288
見市	82	116
平田内	95.6	3,495
濁川	95	3,359
上の湯	98	724
鹿部	98.4	2,798

7.2 温泉発電の可能設備容量の推計

温泉には、温泉水（液体）のみを湧出するものと、蒸気を伴うもの（場合によっては蒸気のみを湧出するもの）があり、その両方について温泉発電可能設備容量の推計を行うことを試みた。しかし、蒸気を伴う温泉についてのデータが非常に乏しいことが判明したため、蒸気を伴う温泉については、7.4に示す2事例についてのみ現地測定とそれに基づく発電可能量推計を実施した。7.2及び7.3では、温泉水（液体）のみを湧出する温泉の温泉発電可能設備容量の推計結果を示す。

温泉発電に用いられる主なシステムは、ランキンサイクル（炭化水素、不活性ガスを使用）とカーリーナサイクル（アンモニア-水混合物を使用）である。両者を比較すると、温泉発電で対象とする低温域ではカーリーナサイクル発電システムの方が発電効率が良いとされる。後述のように、ランキンサイクル及びカーリーナサイクル双方について、温泉の温度・湧出量と発電出力の関係についての経験式が示されているため、ランキンサイクル及びカーリーナサイクルそれぞれの場合の発電量を計算した。

温泉の泉温と湧出量から温泉発電の資源量（発電量）の計算方法とそれに基づく計算結果を以下に示す。

①村岡（2007）及び大里・村岡（2008）の資源量計算

我が国の温泉発電可能量の最初の試算は村岡（2007）及び大里・村岡（2008）が行った。村岡氏及び大里氏へのヒアリング結果を踏まえ計算方法を整理した。まず、いくつかのカーリーナサイクル発電の実績値に基づき、熱エネルギーから電力への換算係数を温度の関数として求める（図7.2-1）。次にそれを国内の温泉データに適用し、温泉ごとの発電可能量を計算する。使用する温泉データは前述の「日本温泉・鉱泉分布図（第2版）」（金原，2005）のデータである。

冷却システムを空冷にする場合と水冷にする場合で効率が異なるが、効率の良い水冷（図7.2-1の破線）の場合の関係を用いて計算した。図7.2-1に示された関係からカーリーナサイクルでの発電が可能と考えられた53.3℃以上の温泉について可能設備容量を計算した。その結果、得られた温泉データのうち、泉温・湧出量データが揃っている温泉を対象として算出した総可能設備容量は9.55万kWである。なお、経済性を考慮し出力規模30kW未満の温泉を除いている。

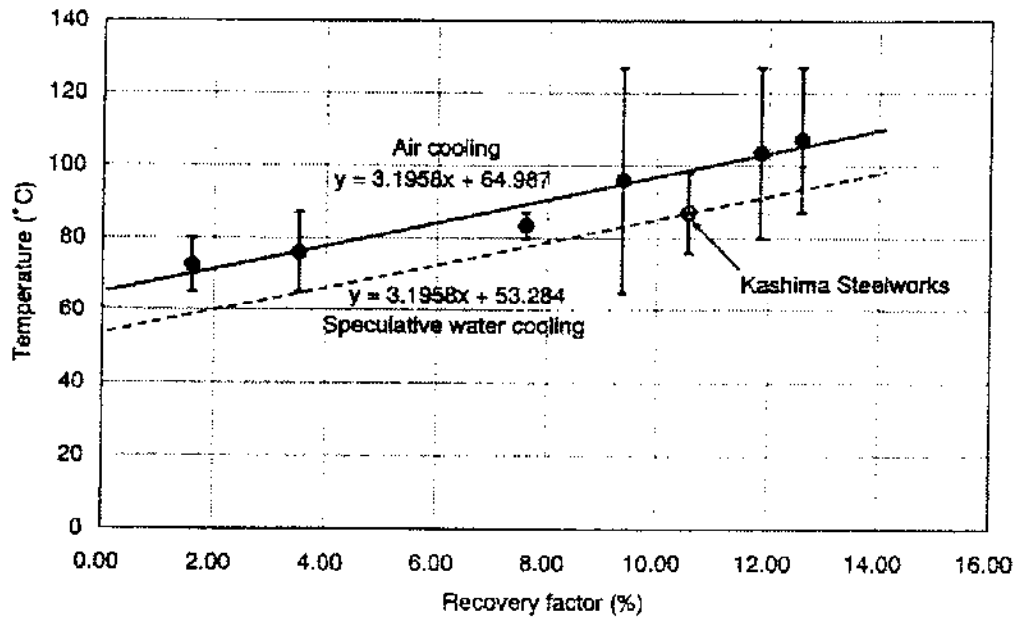


図 7.2-1 カリーナ・サイクルにおける温度と電力変換効率の関係 (大里・村岡, 2008)

②大里による計算方法

JOGEMC（受託：エンジニアリング協会）の「平成24年度 小規模地熱発電及び地熱水の多段階利用事業の導入課題調査 手引書」（2013）において図7.2-2の温泉の温度・湧出量と発電出力の関係が示されている。この関係は、地熱技術開発株式会社によって作成されたものであり、同社の大里氏へのヒアリング結果を踏まえ以下に計算法を記す。なお、この計算法は大里氏の考案によるものであるが、同氏の名前による適当な公表文献が無いため、仮に大里による計算方法と呼ぶ。

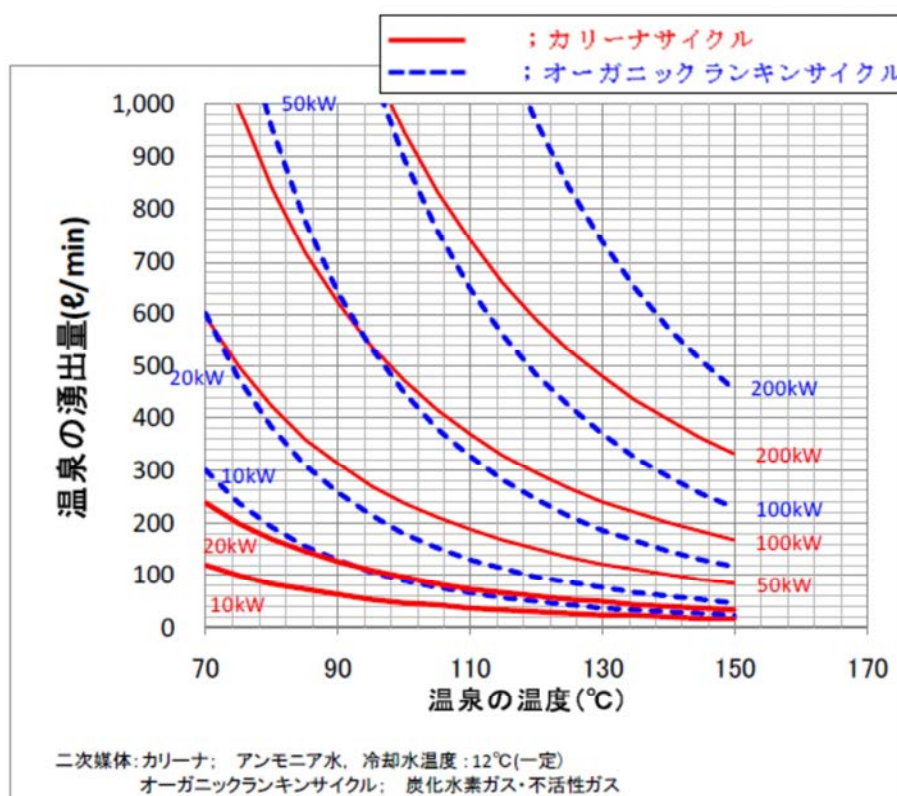


図 7.2-2 ランキンサイクルとカリーナサイクルにおける温度・湧出量と発電出力の関係 (JOGMEC, 2013) (データ提供は地熱技術開発株式会社)

この計算方法は、海外の発電所でのカリーナサイクルとランキンサイクルの運転実績 (図 7.2-3) に基づいている。図 7.2-3 における熱水温度と単位流量当たりの出力の関係の近似式は、カリーナサイクルとランキンサイクルのそれぞれについて以下になる。

$$\text{カリーナサイクル} \quad P=Q \times 9.005 \times 10^{-6} \times T^{2.773}$$

$$\text{ランキンサイクル} \quad P=Q \times 1.184 \times 10^{-7} \times T^{3.588}$$

ただし、P: 発電端出力 (kW)、Q: 熱源流量 (t/h)、T: 熱源温度 (°C) である。

図 7.2-2 は、主に温泉発電の可能性の評価や設置規模の検討のために用いられており、上述の関係式を使って全国の温泉発電可能量を検討した例はまだ無いようである。

この 2 種類の計算法のうち、大里による計算法を用いて全国の温度・湧出量条件を満たす温泉（149 か所）の温泉発電可能量を推計した。推計結果は 7.3（2）に整理した。

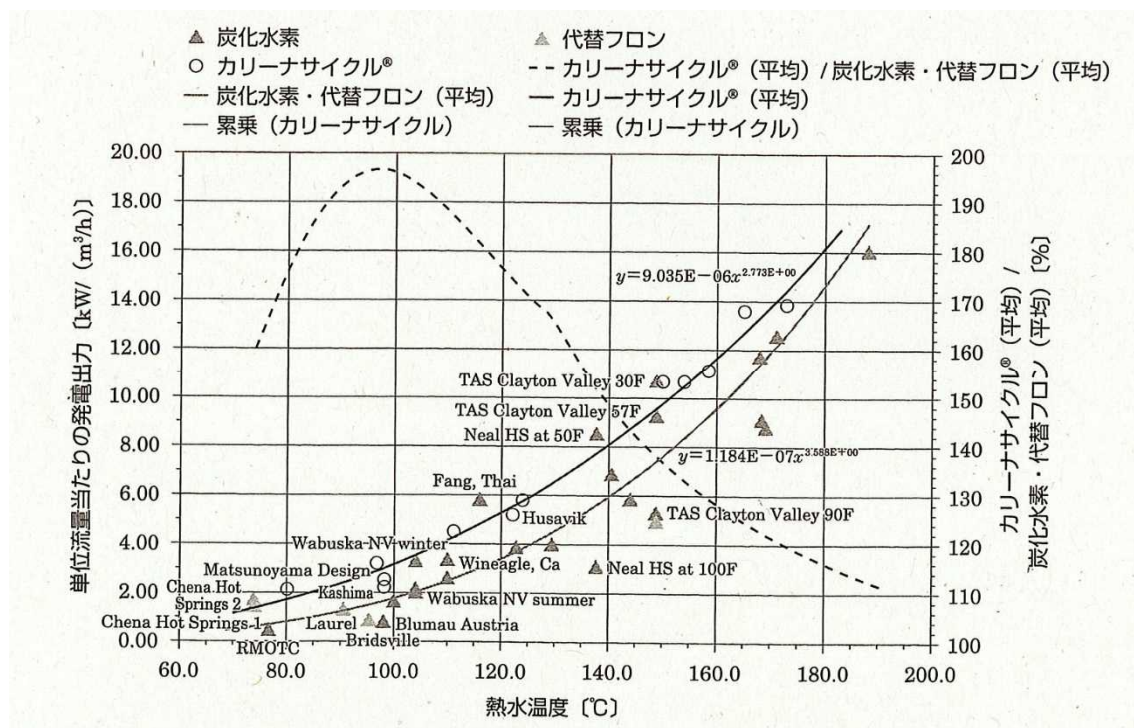


図 7.2-3 ランキンサイクルとカリーナサイクルの実績から求めた、温度と単位流量あたりの発電出力の関係（山田，2014，地熱エネルギーハンドブック）

金原（2005）に収録された温泉の温度・湧出量データと、大里の計算方法に基づくランキンサイクル及びカーナサイクルの発電量の関係を図 7.2-4 に示す。オレンジ色の点が資源量計算の対象としたデータである。

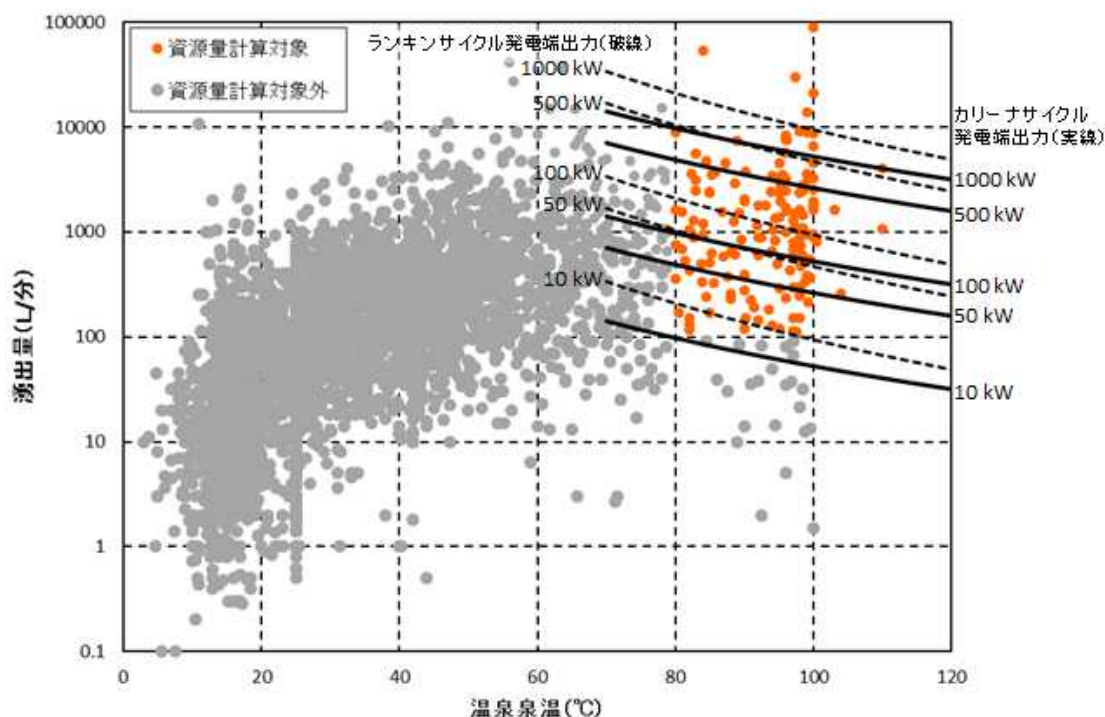


図 7.2-4 金原（2005）に収録された全国の温泉の泉温と湧出量、及び大里の計算方法によるカーナサイクルとランキンサイクルの発電可能量

既存温泉による温泉発電（低温バイナリー発電）の資源量計算結果についての注意点を整理する。大きくは温泉データに係るものと、温泉発電（バイナリー発電）技術に係るものに分けられる。金原（2005）に収録された温泉データは、個々の泉源のデータではなく温泉地ごとのデータである。温度としては、その温泉地で得られる最高温度が「温度上限」として掲載されている。湧出量は、その温泉地の総湧出量となる。そのため今回の計算は、「各温泉地で湧出する温泉を全てまとめて、かつその温泉地の最高温度の温泉熱水として、温泉発電に利用した場合の発電可能量」という位置づけになる。また、データの取得時期に幅があると考えられることによるデータ同時性の不確定さ、特に温泉の湧出量データについての不確かさ（湧出量データは公開されていないことが多い）、などがあることにも留意する必要がある。

温泉発電（バイナリー発電）の可能設備容量の算定における課題としては、発電可能な湧出温度・湧出量条件の設定が挙げられる。今後の発電システムの技術開発動向に合わせて適切な湧出温度・湧出量条件を設定していくことが求められる。また、温泉発電では低

温域でのバイナリーサイクル発電を行うため、冬季と夏季の外気温の差が発電効率に大きく影響し、夏季の出力が冬季の50～36%に減少する例があることが報告されている(山田, 2014)。夏季と冬季の出力変動差の程度は発電地点の地域的な要因にもよるので、今回のような資源評価には組み入れるのは難しいが、発電量に大きく影響する要素があるという認識は必要であろう。

<7.1、7.2の引用文献>

- 金原啓司 (2008) 日本温泉・鉱泉分布図及び一覧 (第2版) . 数値地質図 GT-2, 地質調査総合センター.
- 村岡洋文 (2007) 日本の地熱エネルギー開発凋落の現状と将来復活の可能性. 日本エネルギー学会誌, vol. 86, p. 153-160.
- 大里和己・村岡洋文 (2008) 温泉バイナリー発電. 日本エネルギー学会誌, vol. 87, p. 812-818.
- 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) (2013) 平成24年度 小規模地熱発電及び地熱水の多段階利用事業の導入課題調査 手引書. 82p.
- 山田茂登 (2008) バイナリー式発電の仕組み. 日本地熱学会地熱エネルギーハンドブック刊行委員会(編)「地熱エネルギーハンドブック」, p. 348-357, オーム社.

7.3 温泉発電の資源分布図の作成

(1) 温泉発電の資源分布図の作成

大里による計算方式により推計した、カーリーナサイクルとランキンサイクルの資源分布図を図7.3-1、7.3-2に示す。

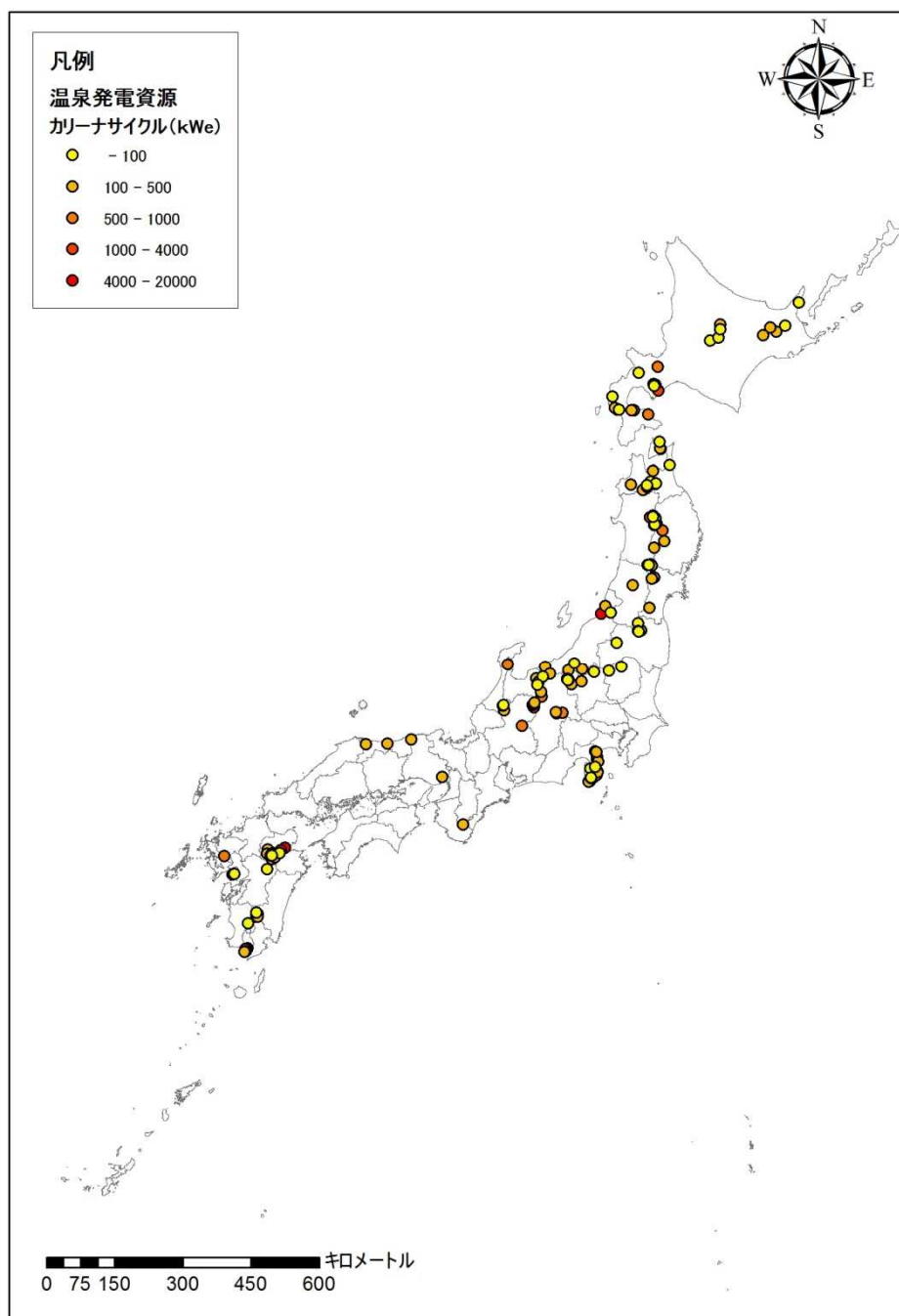


図 7.3-1 カーリーナサイクルを想定した温泉発電資源分布図

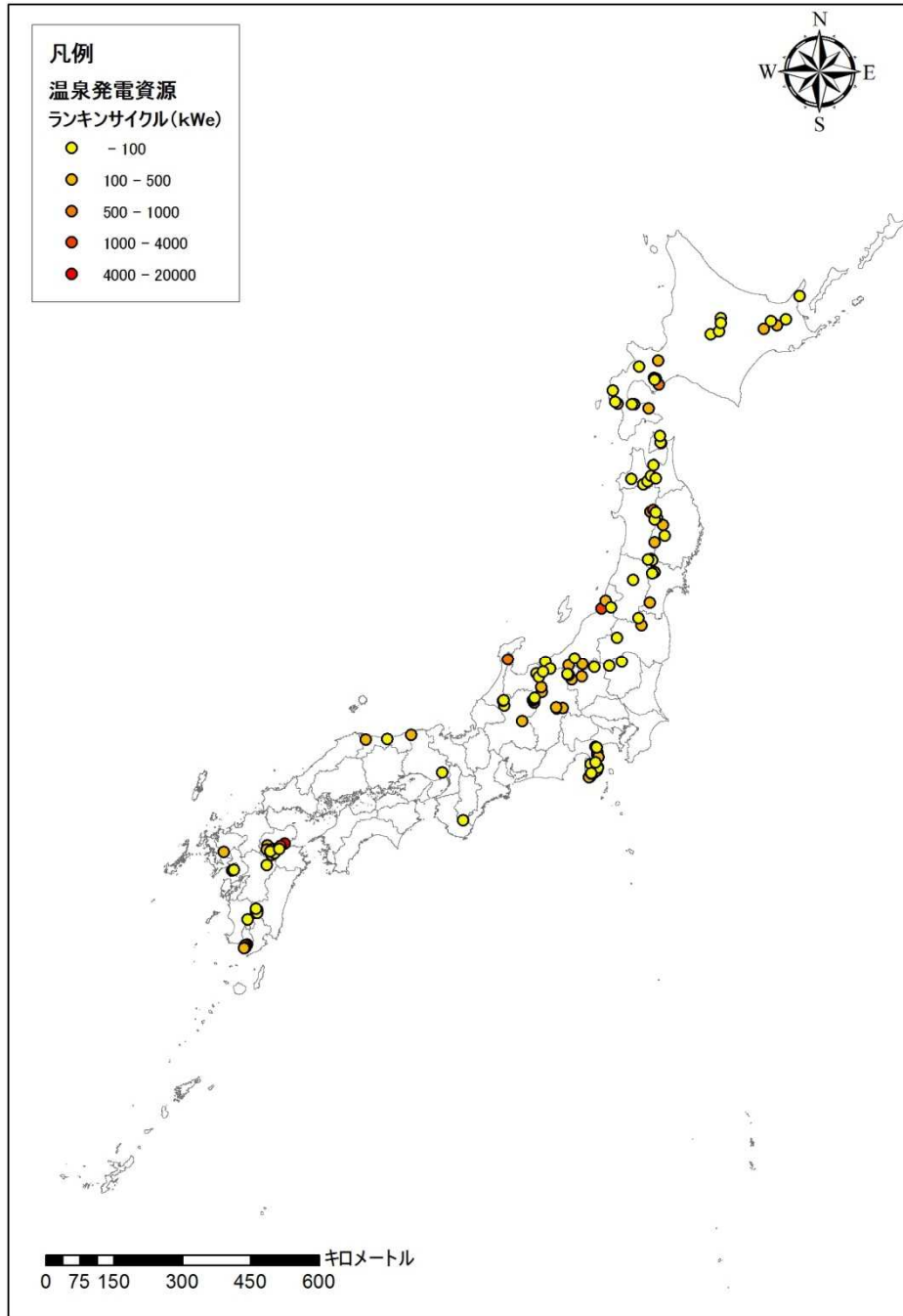


図 7.3-2 ランキンサイクルを想定した温泉発電資源分布図

(2) 温泉発電資源量集計結果

温泉発電の資源量集計結果を表 7.3-1 に、図 7.3-3 に示す。ランキンサイクルの場合は 4.14 万 kW、カリーナサイクルの場合は 7.65 万 kW と推計された。

表 7.3-1 温泉発電資源量の集計結果

発電方式	対象温度区分	資源量 (万 kW)
ランキンサイクル	80℃以上	4.14
カリーナサイクル	80℃以上	7.65

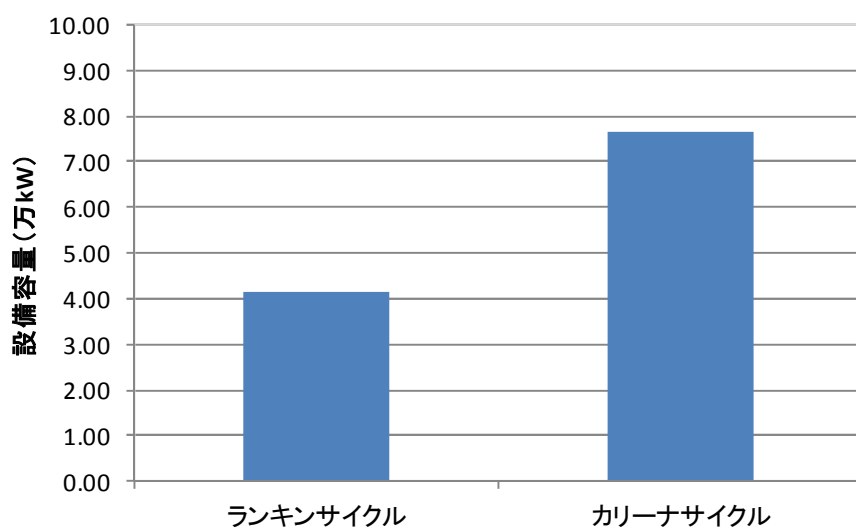
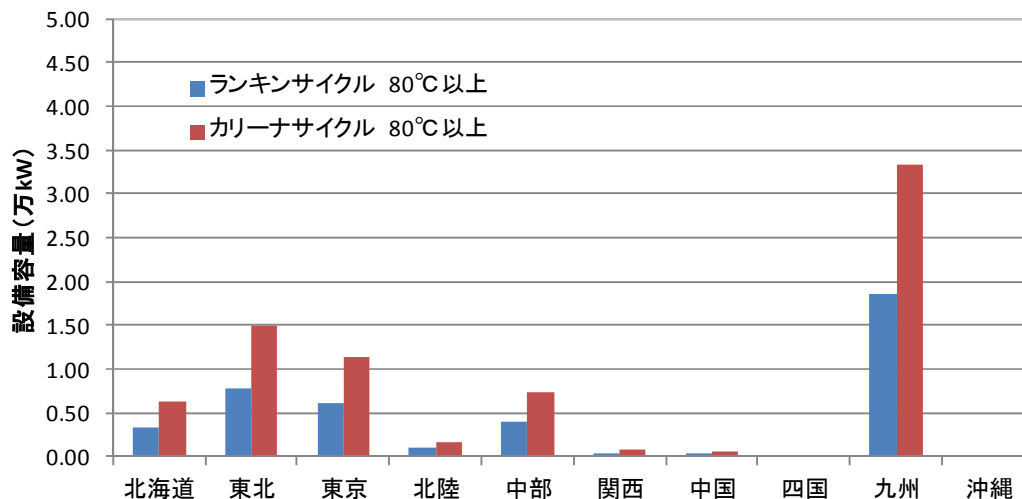


図 7.3-3 温泉発電資源量の集計結果

(3) 電力供給エリア別の温泉発電資源量分布状況

温泉発電の電力供給エリア別の資源量の分布状況を図 7.3-4 に示す。これによると九州電力管内に多く分布しており、その次に東北、東京電力管内に多く分布する。

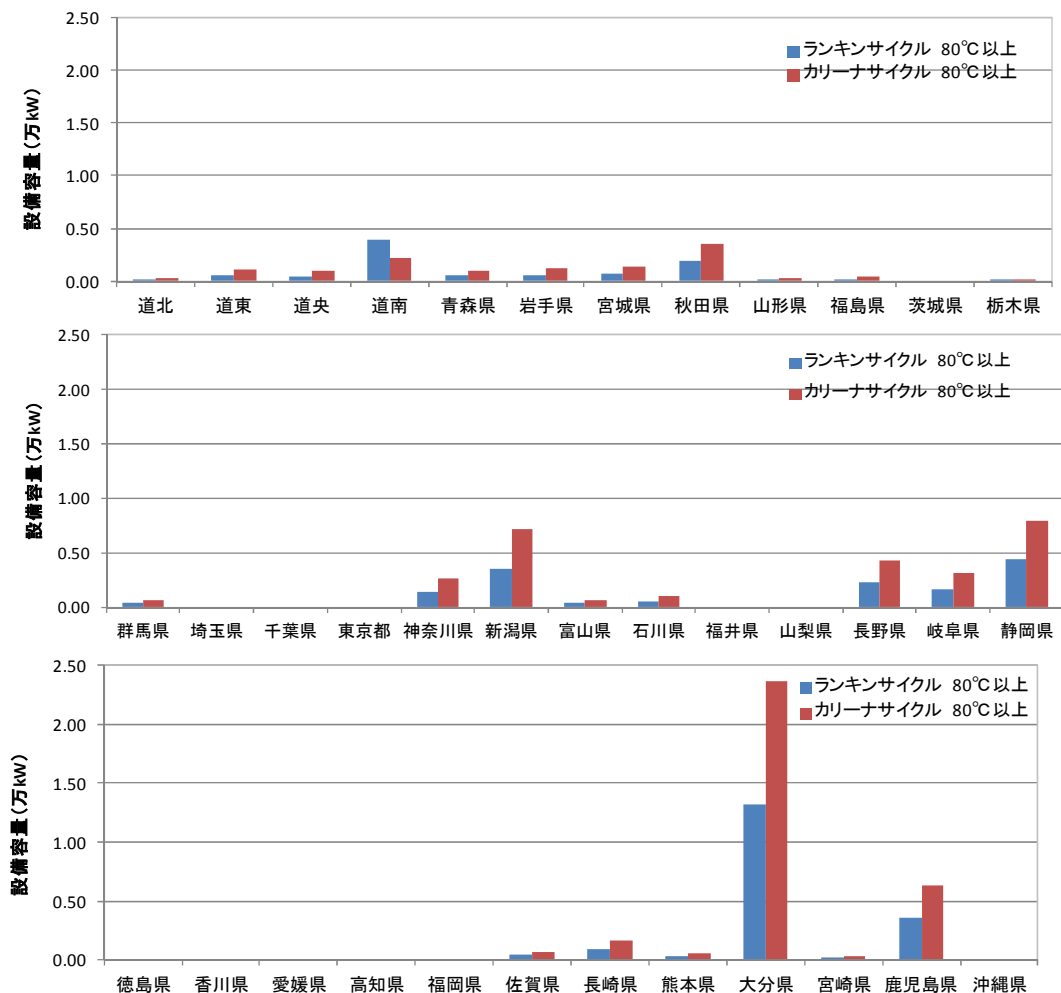


発電方式	対象温度区分	全国	北海道	東北	東京	北陸	中部	関西	中国	四国	九州	沖縄
ランキンサイクル	80℃以上	4.14	0.33	0.77	0.62	0.09	0.39	0.04	0.03	0.00	1.86	0.00
カーリーナサイクル	80℃以上	7.65	0.63	1.50	1.14	0.17	0.74	0.08	0.06	0.00	3.33	0.00

表 7.3-4 温泉発電の電力供給エリア別の資源量分布状況 (設備容量：万 kW)

(4) 都道府県別の温泉発電資源量分布状況

温泉発電の都道府県別の資源量分布状況を図 7.3-5 に示す。これによると新潟県、静岡県、大分県、鹿児島県に多く分布しているのがわかる。



発電方式	対象温度区分	全国	道北	道東	道央	道南	青森県	岩手県	宮城県	秋田県	山形県	福島県	茨城県	栃木県
ランキンサイクル	80℃以上	4.14	0.02	0.06	0.05	0.40	0.05	0.06	0.08	0.20	0.01	0.02	0.00	0.01
カーリーナサイクル	80℃以上	7.65	0.03	0.11	0.10	0.22	0.10	0.12	0.14	0.36	0.03	0.04	0.00	0.01
発電方式	対象温度区分	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	新潟県	富山県	石川県	福井県	山梨県	長野県	岐阜県	静岡県
ランキンサイクル	80℃以上	0.04	0.00	0.00	0.00	0.14	0.35	0.04	0.06	0.00	0.00	0.23	0.17	0.44
カーリーナサイクル	80℃以上	0.07	0.00	0.00	0.00	0.27	0.71	0.06	0.10	0.00	0.00	0.43	0.31	0.80
発電方式	対象温度区分	愛知県	三重県	滋賀県	京都府	大阪府	兵庫県	奈良県	和歌山県	鳥取県	島根県	岡山県	広島県	山口県
ランキンサイクル	80℃以上	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
カーリーナサイクル	80℃以上	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
発電方式	対象温度区分	徳島県	香川県	愛媛県	高知県	福岡県	佐賀県	長崎県	熊本県	大分県	宮崎県	鹿児島県	沖縄県	
ランキンサイクル	80℃以上	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.09	0.03	1.32	0.02	0.36	0.00	
カーリーナサイクル	80℃以上	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.17	0.06	2.37	0.03	0.63	0.00	

図 7.3-5 温泉発電の都道府県別の資源量分布状況（設備容量：万 kW）

7.4 蒸気井に関する現地測定及び発電可能量の推計

7.4.1 調査対象とした蒸気井

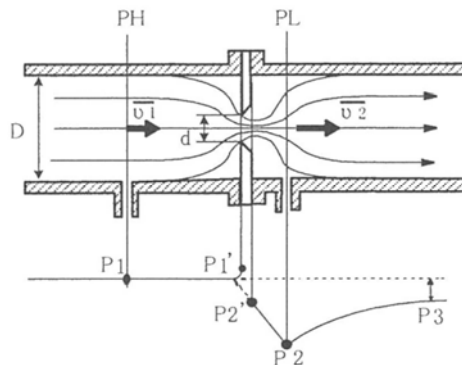
温泉水とともに蒸気を生産する温泉井を対象とする資源量評価方法の検討を行うため、全国から蒸気の噴出を伴う温泉井を抽出し、調査実施の可否を検討した。その結果、杉乃井ホテル（大分県別府市）及び中の湯（長野県松本市）の2箇所を選定した。

7.4.2 流量測定方法の選定

噴出流量の測定方法としては、オリフィス法、ピトー管を用いた流速測定法及びトレーサー希釈法などがある。これらの原理及び長所・短所を表7.4-1に示す。

表 7.4-1 各流量測定方法の原理及び長所・短所

測定方法	原理	長所	短所
オリフィス法	オリフィス板によって円管の流路断面積を絞り、その前後の圧力差から流量を求める（図7.4-1）。オリフィス板の形状及び計測方法についてはJIS Z 8762で定められている。	<ul style="list-style-type: none"> オリフィス板の絞り直径を変えることで、小流量から大流量まで測定可能である。 オリフィス板の構造が簡単で、保守が容易である。 蒸気流量の測定に適しており、多くの地熱発電所の蒸気配管に設置されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 単相流の測定が前提であり、蒸気と温泉水の混合流の場合、それぞれの流量は測定できない。 オリフィス板による圧力損失が大きい。 測定箇所の上下流に直管部が必要である。
ピトー管を用いた流速測定法	定常流が流れる配管内にピトー管を挿入し、全圧・静圧を測定して流速を求め、それと配管内径から体積流量を算出する（図7.4-2）。ピトー管の規格はJIS B 8330に定められている。	<ul style="list-style-type: none"> ピトー管の構造が簡単で、信頼性が高い。 保守が容易である。 	<ul style="list-style-type: none"> あまり強くない噴気（水滴と飽和水蒸気からなる湿り蒸気）が対象。 噴気測定の場合はピトー管内に水滴が溜まりやすく、誤差の要因になる（地熱開発総合ハンドブック）。 噴気配管内の流速分布を求める必要がある。 測定箇所の前後に直管部が必要。 ピトー管を挿入できる大きさのバルブ（1インチ）が必要。 噴気密度の測定装置（湯原式蒸気密度計）の誤差が10%以上と大きい（地熱開発総合ハンドブック）。
トレーサー希釈法	蒸気及び温泉水が流れる配管内に一定の流量でトレーサー試薬を注入し、その試薬が蒸気または温泉水でどの程度希釈されたかを分析して、蒸気・温泉水の流量を導く（図7.4-3）。	蒸気・温泉水の単相流及び混合流のいずれにおいても、蒸気及び温泉水のそれぞれの流量が同時に測定できる。	<ul style="list-style-type: none"> 現地では流量が分からない。 配管にトレーサー注入バルブ及び試料採取バルブが必要である。 トレーサー注入と試料採取バルブの間には、トレーサーの混合を促進する構造（配管の曲がり、弁、オリフィス板など）が必要である。

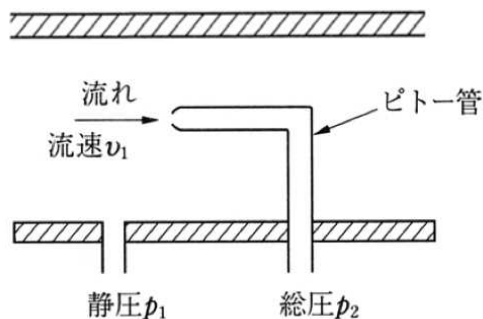


$$Q = \varepsilon C \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (P_1 - P_2)}$$

- Q : 体積流量 (m³/s)
- ρ_1 : 上流側圧力測定断面における流体密度 (kg/m³)
- β : 絞りの内径 d(m)管内径 D(m)との比 ($\beta = d/D$)
- C : 流出係数 (実際の流量と理論流量との比)
- D : 絞りの直径(m)
- ε : 膨張補正係数 (非圧縮性流体では $\varepsilon = 1$)

図 7.4-1 オリフィス法による流量測定の原理

出典：メーカー技術者が書いたやさしく計装がわかる 工業計測と制御の基礎,2003,工業技術社



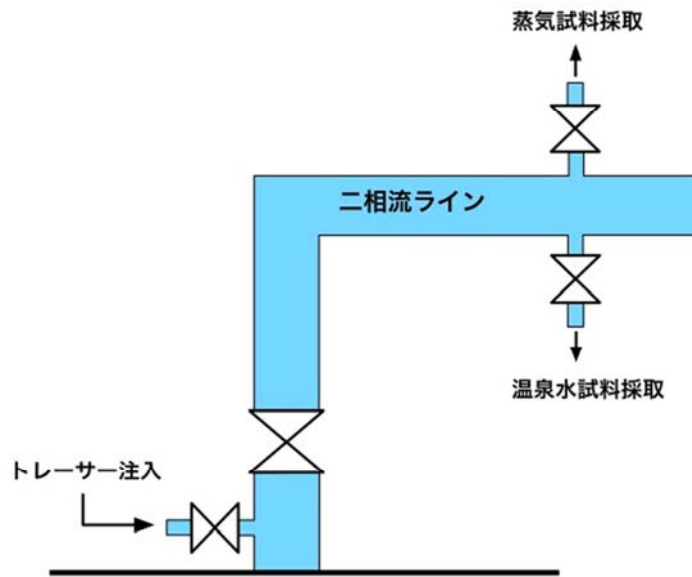
$$v = c \sqrt{2(P_2 - P_1) / \rho}$$

$$Q = A \times v \times 60$$

- v : 流速 (m/s)
- c : ピトー管係数
- P_2 : 全圧 (Pa)
- P_1 : 静圧 (Pa)
- ρ : 流体密度 (kg/m³)
- Q : 体積流量 (m³/min)
- A : 管内断面積 (m²)

図 7.4-2 ピトー管による流量測定の原理

出典：日本大学工学部 HP



$$WF = Gb/Cb$$

$$SF = (Ga - WF \cdot Ta) / Ca$$

WF : 温泉水流量 (t/h)

SF : 蒸気流量 (t/h)

Gb : 温泉水トレーサー注入流量 (g/h)

Ga : 蒸気トレーサー注入流量 (g/h)

Cb : 温泉水サンプル中の温泉水トレーサー濃度 (g/t)

Ca : 蒸気サンプル中の蒸気トレーサー濃度 (g/t)

Ta : 温泉水サンプル中の蒸気トレーサー濃度 (g/t)

図 7.4-3 トレーサー希釈法による流量測定の実験原理

出典：地熱エンジニアリング株式会社社内資料

各流量測定方法の原理及び長所・短所を踏まえて、杉乃井ホテル及び中の湯において現地設備状況を確認し、流量測定方法を選定した。その結果を表 7.4-2 に示す。杉乃井ホテルおよび中の湯ともにオリフィス板は設置されておらず、ピトー管が挿入できるバルブもなかったため、両地点での流量測定はトレーサー希釈法を用いることとした。なお、トレーサー希釈法の精度は Lovelock (2006) で検討されており、オリフィス流量計による蒸気流量値とトレーサー希釈法により求まる蒸気流量の誤差は最大でも 3.2%であることが分かっている (表 7.4-3)。

表 7.4-2 流量測定方法の選定結果

No.	流量測定方法	現地調査結果	選定結果
1	オリフィス法	杉乃井ホテル及び中の湯の輸送配管にオリフィス板は設置されていない。そのため、本調査でオリフィス法を適用する場合にはオリフィス板を新設する必要がある。しかし、本調査では蒸気井の設備改造は行わないため、オリフィス法は適用できない。	
2	ピトー管を用いた流速測定法	杉乃井ホテル、中の湯ともに流体の輸送配管上にピトー管を挿入できる大きさのバルブが無い。	
3	トレーサー希釈法	杉乃井ホテル、中の湯ともにトレーサー注入及び試料採取に適したバルブがある。また、それらのバルブの間に、トレーサーと噴気流体の混合を促進させる構造（配管の曲がり,流量調整弁）が存在する。	○

表 7.4-3 オリフィス流量計とトレーサー希釈法による蒸気流量の比較

Table 1. Comparison of flows measured by orifice plate and tracer flow testing: isopropanol (IPA) and SF₆ methods. Flows are calculated at the separator pressure of 10.5 b.g.

Well	Measurement Date		Enthalpy kJ/kg	Steam Flows (kg/s)			Differences (%)			Brine Flow (kg/s)		Diff. (%)
	SF ₆ and Orifice	IPA		Orifice Plate	IPA	SF ₆	IPA vs Orifice	SF ₆ vs Orifice	IPA vs SF ₆	IPA ¹	SF ₆ ²	
A	01-Sep-01	27-Sep-01	~2800	45.7	44.8	43.2	-2.0%	-5.4%	3.6%	dry steam		
A	11-Mar-02	27-Mar-02	~2800	41.0	42.3	39.5	3.2%	-3.7%	7.2%	"		
A	29-Aug-02	29-Aug-02	~2800	39.9	40.2		0.8%			"		
A		13-May-03	~2800	43.3	42.9		-1.0%			"		
B	01-Sep-01	27-Sep-01	~2800	34.4	34.3	32.1	-0.2%	-6.7%	7.1%	dry steam		
B	04-Mar-02	27-Mar-02	~2800	33.5	34.0	37.5	1.7%	12.0%	-9.2%	"		
B	29-Aug-02	29-Aug-02	~2800	34.8	34.8	31.6	0.0%	-9.1%	10.0%	"		
B		13-May-03	~2800	37.6	37.2	35.8	-1.1%	-4.8%	3.9%	"		
C	01-Sep-01	27-Sep-01	~2800	59.4	60.1	57.6	1.2%	-3.0%	4.4%	dry steam		
C	04-Mar-02	27-Mar-02	~2800	60.3	60.5	61.6	0.3%	2.2%	-1.9%	"		
C	29-Aug-02	29-Aug-02	~2800	59.7	59.0		-1.2%			"		
C		13-May-03	~2800	58.9	59.9		1.6%			"		
D	05-Mar-02	26-Mar-02	1330	-	32.2	31.0			3.9%	87.6	79.4	10.3%
D	30-Aug-02	29-Aug-02	1330	-	27.3	26.6			2.9%	74.2	69.5	6.7%
D	15-May-03	12-May-03	1370	-	26.4	21.7			21.8%	64.2	64.6	-0.7%
E	02-Sep-01	28-Sep-01	2180	-	12.9	13.0			-1.3%	5.5	5.5	1.4%
E	11-Mar-02	26-Mar-02	2140	-	12.0	12.1			-0.8%	5.6	5.8	-3.0%
E	29-Aug-02	30-Aug-02	2520	-	12.6	12.0			5.6%	1.9	3.6	-47.0%
E	13-May-03	12-May-03	2310	-	13.4	13.7			-2.5%	4.2	3.0	39.7%
F	02-Sep-01	28-Sep-01	2370	-	23.4	24.5			-4.4%	6.2	9.3	-33.7%
F	05-Mar-02	26-Mar-02	2540	-	23.3	25.9			-10.1%	3.3	3.1	6.1%
F	29-Aug-02	30-Aug-02	2370	-	25.4	28.3			-10.3%	6.6	6.2	6.5%
F	13-May-03	12-May-03	2600	-	34.1	32.3			5.6%	3.4	2.3	45.1%

Wells A, B and C are dry steam producers. Enthalpy for wells D, E and F calculated from alcohol flows

¹ Benzoate used as brine phase tracer. ² Proprietary brine phase tracer used.

出典：Lovelock,2006

7.4.3 トレーサー希釈法による流量測定方法

トレーサー希釈法による二相流流量測定は、蒸気及び温泉水が流れる配管内にトレーサー試薬を一定流量で注入し、その試薬が蒸気または温泉水でどの程度希釈されたかを分析し、蒸気及び温泉水の流量を求める方法である。トレーサーとしては、安息香酸ナトリウム（温泉水流量測定用）とイソプロピルアルコール（蒸気流量測定用）を混合した溶液を使用した。

本調査では、注入したトレーサーが蒸気及び温泉水と均一に混合されて一定の濃度になったことを確かめるために、トレーサー注入開始 15 分前から 1 分～10 分間隔で連続して蒸気及び温泉水試料を採取した。蒸気・温泉水試料は地熱エンジニアリング（株）にて分析し、試料中のトレーサー濃度を求めた。そのうち、一定の値が確認された試料のトレーサー濃度と、注入したトレーサー溶液の濃度を基に、蒸気及び温泉水の流量を計算した。

杉乃井ホテル及び中の湯における現地作業の詳細は以下の通りである。

（1）杉乃井ホテル

1) 測定対象

6 本の生産井のうち、バルブ等の設備の状態が良い 3 号井において流量測定を実施した。温泉水の噴出は認められなかったため、蒸気流量のみを測定した。

2) 測定方法

a. トレーサー注入

・ トレーサー注入箇所（図 7.4-4 及び写真 7.4-1）

3 号井の坑口直上に備わる 1 インチのバルブからトレーサー注入ノズル（120cm）を差し込み、流体が流れる配管中にトレーサーを注入した。

・ トレーサー原液濃度及び注入流量

杉乃井ホテル（3 号井）では、安息香酸ナトリウム 0.125wt%、イソプロピルアルコール 10wt%のトレーサー原液を使用し、平均 115.4g/min の一定流量で注入した。

b. 試料採取

・ 蒸気試料採取箇所

井戸元から約 10m 下流に備わる下向きの 1 インチバルブより蒸気を取り出した。この試料採取バルブは本流ラインではなくバイパスライン上にあるため、流量測定時はバイパスラインに通じる仕切り弁を杉乃井ホテル様に開いて頂き、採取箇所にも定常的に流体を流動させた。

・ 試料採取間隔

トレーサー注入開始 15 分前から 30 分後まで 1～10 分間隔で蒸気試料を採取した。

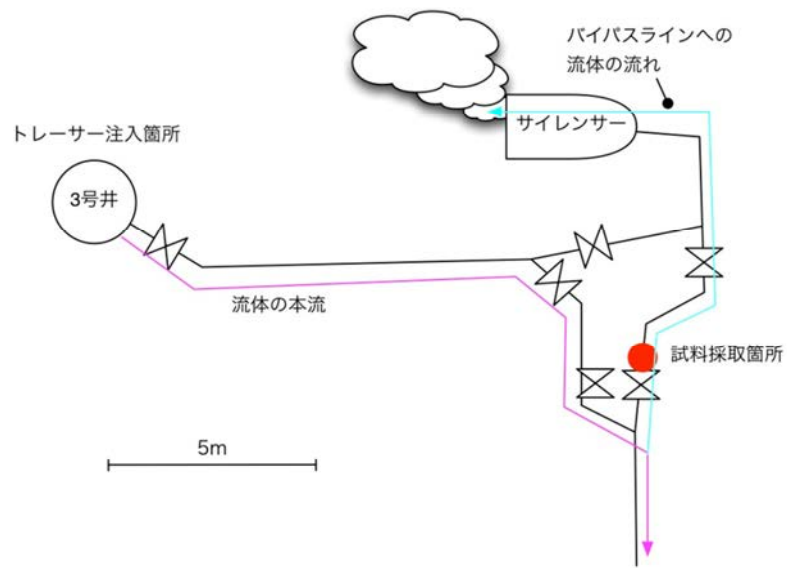


図 7.4-4 トレーサー注入箇所及び試料採取箇所の概略図：杉乃井ホテル（3号井）



3号井全景

蒸気試料は、サイレンサーに向かうバイパスラインから採取した。
サイレンサーに向かうバイパスラインは通常閉じられている。
流量測定時は、仕切り弁を開けて頂き、サイレンサーからブローしてバイパスラインに流体を流した。



トレーサー注入風景

坑口直上の1インチバルブからトレーサー注入ノズル(120cm程度)を挿入した。



蒸気試料採取風景

サイレンサーに向かうバイパスライン上の1インチ下向きバルブから蒸気を取り出し、試料採取を行った。
温泉水の噴出は認められなかった。

写真 7. 4-1 トレーサー注入箇所及び試料採取箇所：杉乃井ホテル（3号井）

(2) 中の湯

1) 測定対象

主力井である F 孔を測定対象とした。

F 孔には既設のセパレータが設置されており、その後の蒸気ライン及び温泉水ラインには、それぞれ渦流量計（蒸気流量測定用）及び電磁流量計（温泉水流量測定用）が設置されている。本調査ではそれらの計測値との比較も行った。

2) 測定方法

a. トレーサー注入

・ トレーサー注入箇所（写真 7.4-2 参照）

F 孔の坑口ブリード弁からトレーサー注入ノズル（105cm）を挿入し、坑口配管の中心にトレーサーを注入した。

・ トレーサー原液濃度及び注入流量

中の湯（F 孔）では、安息香酸ナトリウム 20wt%、イソプロピルアルコール 20wt%のトレーサー原液を使用し、平均 24.2g/min の一定流量で注入した。

b. 試料採取

・ 温泉水試料採取箇所

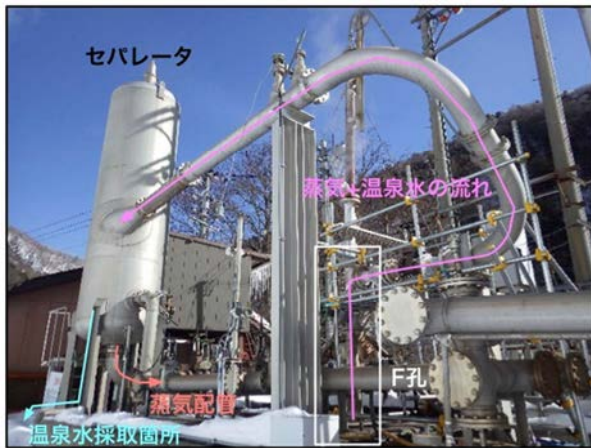
F 孔の生産流体は、坑口から流量調整弁を経て既設のセパレータに導入される。このセパレータのドレン抜きから、温泉水試料を採取した。

・ 蒸気試料採取箇所

セパレータ後の蒸気ラインに備わる上向きバルブ（3/8 インチ）から蒸気試料を採取した。

・ 試料採取間隔

トレーサー注入開始 15 分前から 50 分後まで 1～10 分間隔で蒸気及び熱水試料を採取した。



F 孔全景

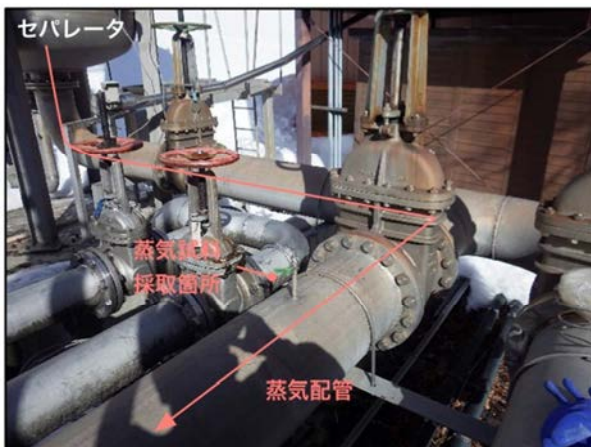
F 孔の噴出流体（蒸気+温泉水）は既設のセパレータに導入され、蒸気と温泉水に分離される。

温泉水試料はセパレータのドレン抜きから採取した。



トレーサー注入風景

坑口ブリード弁からトレーサー注入ノズル（1m 程度）を挿入した。



蒸気試料採取風景

蒸気試料は、セパレータ後の蒸気ラインの上向きバルブ（3/8 インチ）から採取した。

写真 7. 4-2 トレーサー注入箇所及び試料採取箇所：中の湯（F 孔）



蒸気試料採取風景



温泉水試料採取風景

写真 7.4-3 トレーサー注入箇所及び試料採取箇所：中の湯（F 孔）

7.4.4 流量測定結果

(1) 流量測定結果

トレーサー希釈法による流量測定の結果を表 7.4-4 に示す。

杉乃井ホテル (3号井) の蒸気流量は 3.7t/h であった (温泉水の流量は 0t/h)。

中の湯 (F 孔) の蒸気流量は、4.7t/h、温泉水流量は 33t/h であった。この値は、現地に設置されている流量計の値 (蒸気: 4.6~4.7t/h, 温泉水: 34~35t/h) とほぼ同じであった。

表 7.4-4 杉乃井ホテル (3号井) 及び中の湯 (F 孔) の流量測定結果

坑 井 名		3号井	F 孔	
測定年月日		2010/2/20	2010/2/12	
測定時間		10:45~11:15	11:10~12:02	
大気圧力	hPa	997	866	
坑口圧力	MPaG	0.19	0.628~0.629	
測定圧力	MPaG	0.10	0.008	
測定圧力	MPaA	0.20	0.095	
測定結果	蒸気流量	t/h	3.7	4.7
	熱水流量	t/h	0	33
	総流量	t/h	3.7	38
	乾き度	-	1.0	0.12
	坑口における蒸気温度	℃	135	166
	総噴出エンタルピー	kJ/kg	2729	693
	総噴出エンタルピーに相当する液相 (純水) の温度	℃	-	164
(参考) 現地計測値	蒸気流量 (渦流量計)	t/h	-	4.6~4.7
	熱水流量 (電磁流量計)	t/h	-	34~35

(2) 試料中のトレーサー濃度変化

杉乃井ホテル (3号井) における試料中のトレーサー濃度の変化を表 7.4-5 及び図 7.4-5 に、中の湯 (F 孔) における試料中のトレーサー濃度の変化を表 7.4-6 及び図 7.4-6 に示す。

杉乃井ホテル (3号井) では試料 No. 3 (トレーサー注入開始 2 分後) 以降、中の湯 (F 孔) では試料 No. 11 (トレーサー注入開始 30 分後) 以降に、蒸気及び温泉水試料中のトレーサー濃度が安定していることを確認した。このことから、杉乃井ホテル (3号井) ではトレーサー注入開始 2 分後以降に、中の湯 (F 孔) ではトレーサー注入開始 30 分後以降に試料採取箇所に到達した流体には、注入したトレーサーが均一に混合されていたと判断する。したがって、杉乃井ホテル (3号井) ではトレーサー注入開始後 2 分~30 分の試料 (No. 3~No. 18) を、中の湯 (F 孔) ではトレーサー注入開始後 30 分~50 分の試料 (No. 11~No. 14) を用いて流量を算出した。

表 7.4-5 杉乃井ホテル（3号井）の流量調査における IPA の濃度変化

試料No.	試料採取時刻	トレーサー注入からの経過時間(分)	蒸気試料中 IPA濃度 (mg/L)	温泉水試料中 安息香酸濃度 (mg/L)
BG-1	10:30	-15	0	-
BG-2	10:35	-10	0	-
BG-3	10:40	-5	0	-
-	10:45	トレーサー溶液注入開始		
1	10:45:30	0.5	22.5	-
2	10:46	1	184.3	-
3	10:47	2	187.4	-
4	10:48	3	185.5	-
5	10:49	4	178.6	-
6	10:50	5	185.3	-
7	10:51	6	179.6	-
8	10:52	7	187.8	-
9	10:53	8	181.7	-
10	10:54	9	177.5	-
11	10:55	10	183.4	-
12	10:57	12	182.0	-
13	10:59	14	184.5	-
14	11:01	16	186.5	-
15	11:03	18	190.2	-
16	11:05	20	188.3	-
17	11:10	25	185.3	-
18	11:15	30	188.4	-

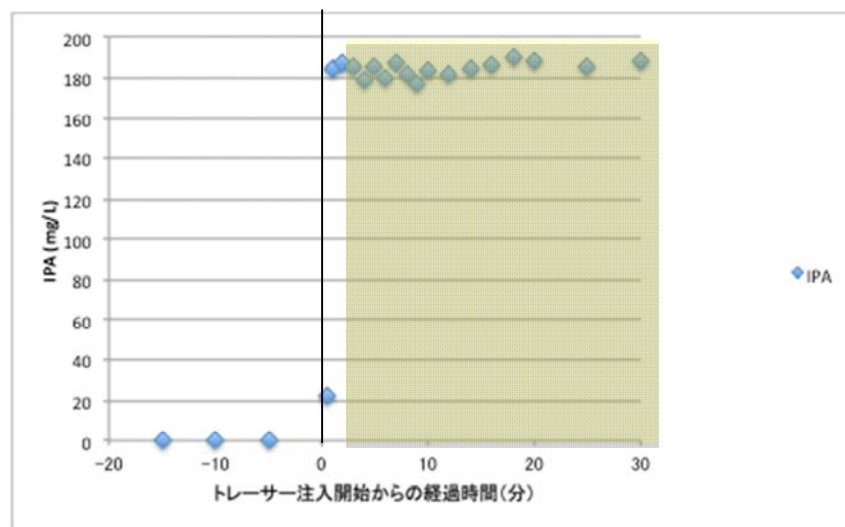


図 7.4-5 杉乃井ホテル（3号井）の流量調査における IPA の濃度変化

表 7.4-6 中の湯（F 孔）の流量調査における IPA 及び安息香酸の濃度変化

試料No.	試料採取時刻	トレーサー注入からの経過時間(分)	蒸気試料中 IPA濃度 (mg/L)	温泉水試料中 安息香酸濃度 (mg/L)
BG-1	10:55	-15	0	0
BG-2	11:00	-10	0	0
BG-3	11:05	-5	0	0
-	11:10	トレーサー溶液注入開始		
1	11:11	1	12.3	0.45
2	11:12	2	34.1	3.0
3	11:13	3	44.7	4.2
4	11:15	5	47.9	6.3
5	11:17	7	47.3	7.4
6	11:19	9	47.0	8.0
7	11:22	12	46.3	8.6
8	11:26	16	47.2	8.6
9	11:30	20	47.9	8.7
10	11:35	25	49.4	8.8
11	11:40	30	49.1	9.0
12	11:45	35	49.3	8.9
13	11:50	40	48.9	8.6
14	12:00	50	48.6	8.7

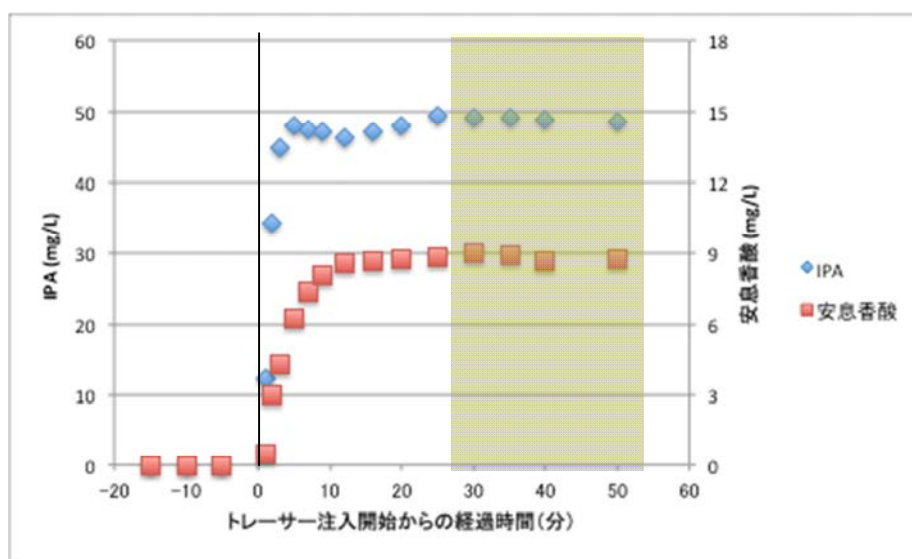


図 7.4-6 中の湯（F 孔）の流量調査における IPA 及び安息香酸の濃度変化

<引用文献>

Brian Lovelock, 2006, FLOW TESTING IN INDONESIA USING ALCOHOL TRACERS, Proceedings 31st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University.

7.4.5 蒸気井の発電可能量の推計

(1) 蒸気井の発電可能量の推計方法

上述 7.2 に整理した大里による計算方法によって発電可能量を推計する。計算の流れを図 7.4-7 に示す。蒸気量を同じ温度・圧力下の同エンタルピの熱水量に置き換え、7.2 で用いたカーナサイクルとしての発電可能量計算式及びランキンサイクルとしての計算式を用いて発電可能量を計算した。

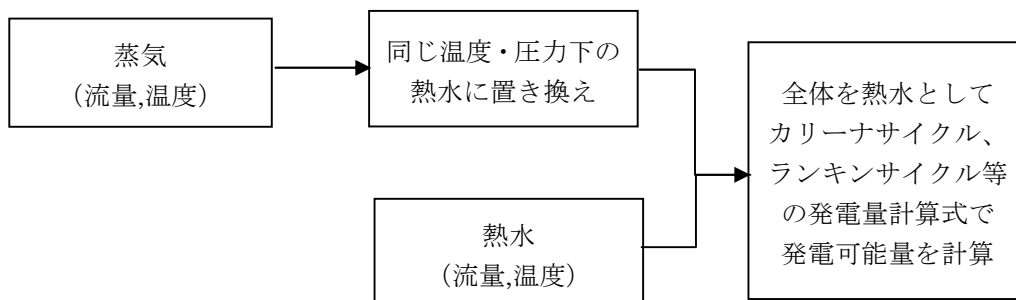


図 7.4-7 蒸気井及び気液 2 相が湧出する温泉での発電可能量推計の計算要領

(2) 蒸気井の発電可能量の推計結果

今回測定を実施した 2 地点の発電可能量推計に係る情報を表 7.4-7 に整理する。

表 7.4-7 発電可能量推計に係る情報（表 7.4-4 の一部再掲）

地域／ 坑井名		杉乃井 3 号井	中の湯 F 孔	
大気圧力	hPa	997	866	
坑口圧力	MPaG	0.19	0.628～0.629	
測定圧力	MPaG	0.10	0.008	
測定圧力	MPaA	0.20	0.095	
測定結果	蒸気流量	t/h	3.7	4.7
	熱水流量	t/h	0	33
	総流量	t/h	3.7	38
	乾き度	-	1.0	0.12
	坑口における蒸気温度	℃	135	166
	総噴出エンタルピ	kJ/kg	2729	693
	総噴出エンタルピに相当する液相（純水）の温度	℃	-	164
(参考) 現地計測値	蒸気流量（渦流量計）	t/h	-	4.6～4.7
	熱水流量（電磁流量計）	t/h	-	34～35

2 地点での発電可能量推計計算を以下に示す。

①杉乃井 3 号井

- ・ 蒸気表より、135℃、0.20 MPa の過熱蒸気の比エンタルピを求める。
比エンタルピ 2737.8236 [kJ/kg]
- ・ 蒸気表より、135℃の飽和水の比エンタルピを求める。
比エンタルピ 567.7661 [kJ/kg]
- ・ 上記 2 つの関係から、蒸気流量を等しいエンタルピの飽和熱水量に換算する。
 $3.7 \text{ [t/h]} \times (2737.8236/567.7661) = 17.8 \text{ [t/h]}$
- ・ 大里による計算式より、カーリーナサイクル及びランキンサイクルでの発電量を計算する。
カーリーナサイクル $P=Q \times 9.005 \times 10^{-6} \times T^{2.773}$
炭化水素ガス、不活性ガス $P=Q \times 1.184 \times 10^{-7} \times T^{3.588}$
P：発電端出力 (kW)，Q：熱源流量 (t/h)，T：熱源温度 (℃)

カーリーナサイクルの場合	129.5 kW
ランキンサイクルの場合	92.8 kW

②中の湯 F 孔

- ・ 蒸気表より、0.095MPa での飽和蒸気温度を求める。
飽和蒸気温度 98.2℃
- ・ 蒸気表より、98.2℃での飽和水蒸気と飽和水の比エンタルピを求める。
飽和蒸気の比エンタルピ 2672.7224 [kJ/kg]
飽和水の比エンタルピ 411.5064 [kJ/kg]
- ・ 上記の関係から、蒸気流量を等しいエンタルピの飽和熱水量に換算し、さらに全体流量を計算する。
 $4.7 \text{ [t/h]} \times (2672.7224/411.5064) = 30.5 \text{ [t/h]}$
 $30.5 + 33 = 63.5 \text{ [t/h]}$
- ・ 大里による計算式より、カーリーナサイクル及びランキンサイクルでの発電量を計算する。

カーリーナサイクルの場合	191.2 kW
ランキンサイクルの場合	105.6 kW

以上の結果を表 7.4-8 にまとめる。

7.2 に述べたように、温泉発電では低温域でのバイナリーサイクル発電を行うため、システムの冷却条件（季節に夜の外気温の差や空冷/水冷の別など）が発電効率に大きく影響する。大里による計算式は海外各地での稼働実績から近似的に求められたもので、平均的な冷却条件の下での発電可能量推計値が得られていると考えられる。

表 7.4-8 調査を実施した 2 温泉での発電可能量推計結果

温泉	カリーナサイクルとして計算した場合	ランキンサイクルとして計算した場合
杉乃井 3 号井	129.5 kW	92.8 kW
中の湯 F 孔	191.2 kW	105.6 kW