

## 第 17 章 地熱バイナリー発電プランニング実習

### 演習テーマ

地熱水の条件や熱媒体の条件で変化するバイナリー発電システムの仕組みを理解し、プランニングを通して事業性を検証する

演習の狙い：モデル例を設定して、事業性に大きく影響する諸条件を定量的に明らかにし、プランニングのポイントを掴む。

演習の方法：数人一組で設計プランニングにあたる。ワークシートの空欄を埋める形で進める。講師によるオリエンテーション1時間（バイナリー発電導入の基礎など）講師はナビゲータ役。

### I. 与件の提示（前日配布）

#### 1. 施設の概要

・所在地：

福島県地熱水賦存地帯

・施設の規模：

小規模分散型での普及を前提とするので、発電規模は数 kW から 50kW くらいまでを想定し、既存の温泉地帯や新規地熱水利用開発地帯を対象にする。

### II. 演習用参照資料の配布（前日配布）

1. 再生可能エネルギー用語解説資料
2. 一般的プロジェクトエンジニアリングの全工程図
3. バイナリー発電の代表的システムの概要
4. 再生可能エネルギー全量買上制度
5. 読売新聞「福島・土湯温泉で地熱発電」
6. バイナリー発電設備に関わる規制の見直し（原子力安全保安院）

### III. 事業プランニングの手順の解説と工程表作成

立案から事業性評価までの『前工程』

1. 導入から保守までの全工程（参考）

## 2. 立案から企画設計～事業性評価

### (1) 導入理由、目的の確認

&. バイナリー発電とは

### (2) 構想の立案（WBS 展開の順序）

- ①地熱水賦存状況の調査
- ②地熱水利用の現況調査
- ③冷却水利用の現況調査
- ④地熱資源からみた発電システムの事例
- ⑤この段階での概略プロセスフロー図
- ⑥周辺環境との調和

### (3) 現地調査と確認

（今回省略、コメントのみ）

### (4) 企画設計（WBS 展開の順序）

#### 【その1：新規地熱利用のケース】

- ①地熱温水生産井の温度とバイナリーサイクルの選定
- ②生産流量の減衰と適正揚湯量の算定
- ③地熱水の入口温度、出口温度と流量の設定
- ④冷却水利用可能量、温度、冷却方式の選定
- ⑤発電出力の想定
- ⑥揚湯用ポンプ、還元用ポンプ動力の想定
- ⑦再利用可能熱量の計算
- ⑧プロセスフロー図の作成

#### 【その2：既存温泉源への併設】

- ①温泉源熱水の温度、温泉利用温度と流量の設定
- ②諸元の設定
- ③プロセスフロー図の作成

### (5) 事業性検証

#### 【その1：新規地熱利用～開発のケース】

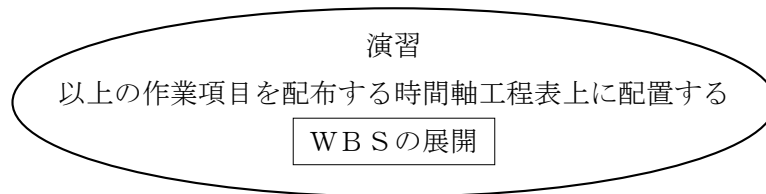
- ①地熱水採取量減衰の想定
- ②概算事業費の想定
- ③事業資金源の確認
- ④余剰地熱水利用価値の計算
- ⑤発電コストと事業収支の計算
- ⑥長期事業収支の計算、長期キャッシュフローの計算

（事業性向上のためのエンジニアリング課題については、本システムが依然開発途上にあるため、プロセスの検討は時期尚早と考える）

## 【その2：既存温泉源に併設のケース】

- ①地熱水採取量減衰の想定
- ②概算事業費の想定
- ③事業資金源の確認
- ④発電コストと事業収支の計算
- ⑤長期事業収支の計算、長期キャッシュフローの計算

(事業性向上のためのエンジニアリング課題については、本システムが依然開発途上にあるため、プロセスの検討は時期尚早と考える)



## IV. プロジェクトエンジニアリングの手順の解説と工程表作成

### 基本設計から竣工検査までの『後工程』

#### 1. 基本設計、実施設計の段階

(企画設計段階で基本設計まで済ませる場合もあれば、基本設計と実施設計を同時に行う場合もある)

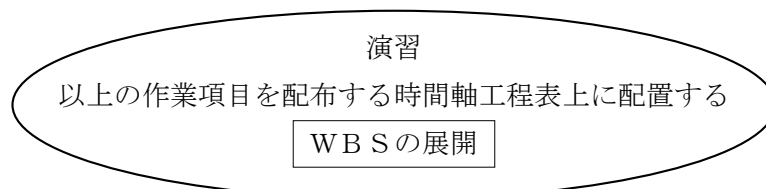
- (1) 入札～発注先選定まで (WBS 展開の順序)
  - ・ 入札先の選定
  - ・ 入札仕様書の作成、入札
  - ・ プロポーザル協議 (金額と仕様書との最終調整)
  - ・ 発注先の決定
- (2) 発注先による基本設計、実施設計
  - ・ 地熱揚湯量設計と施工法
  - ・ 周辺機器の設計と施工法
  - ・ 全体制御システムの設計と施工法
  - ・ プロジェクト全体を俯瞰した単線結線図
- (3) 基本設計書、実施計画書の点検、確認

#### 2. 施工監理～竣工検査の段階

- (1) 工事計画書
- (2) 検査実施計画書
- (3) 所管官庁等への届け出
- (4) 電力会社との契約締結

### 3. 維持管理の段階

- (1) 日常点検実施計画書
- (2) 定期点検実施計画書



## V. 事業プランの作成実習

この作成例は、ワークシート方式で、随所が空欄になっており、実習の中で空欄を埋めていく。

### 1. 導入から保守までの全工程

配布する「プロジェクトプランニングから建設までの全工程図」から、本テーマに係わる領域をマーキングで示すことにより、フロー図作成に代える。

演習参加者がどのような業種に所属しているかにより関心の置き方が変わるが、ここでは前工程の前半に絞ることで条件を統一する。

### 2. 立案から企画設計～事業性評価

#### (1) 仕組みの理解、導入理由、目的の確認

以下はフィクションである。当地は県内の山間部に位置し、古くから温泉地として栄えてきた地域である。温泉の源泉温度は90℃近くで非常に高く、このままでは温泉としての利用はできず、また加水によって温度を下げるのはせつかくの温泉成分を下げてしまうので、これまでは自然に晒して適温近くにまで下げていた。このことは結果的に利用可能な自然のエネルギーを廃棄していたことになり、予てから有効な利用方法が課題になっていた。

一方、もう一つの地域では、地下には90℃以上の中低温の熱水層が確認されているものの、熱水や蒸気を地表へ噴出させる能力がなく、この程度ではフラッシュ方式の地熱発電導入の可能性はない。通常の温水地域利用を考えると、特に深部への掘削の必要性から単なる温水利用では経済性の面で既存の熱源システムには対抗できないため、資源が眠ったままになっている地域がある。

このような中温熱水の持つエネルギー利用を前提とし、低エクセルギーの地熱水からエクセルギー100の電力をつくりだすシステムが近年開発され、「バイナリー発電システム」として普及が始まっている。

このシステムがこれらの地域に導入されるならば、温泉地域で捨てられている自然放熱エネルギーの有効活用、また経済性がないとの理由で未利用のまま眠ってい

る地熱水の利用にも新たな有効活用の道が開けることが期待される。

こうした期待を込めてこのシステムを二つに分けてプランニングし、事業性の有無、事業性確保のための諸条件を検証してみたい。

\*\*\*\*\*

ここでバイナリー発電システムとは何かについて理解しておきたい。

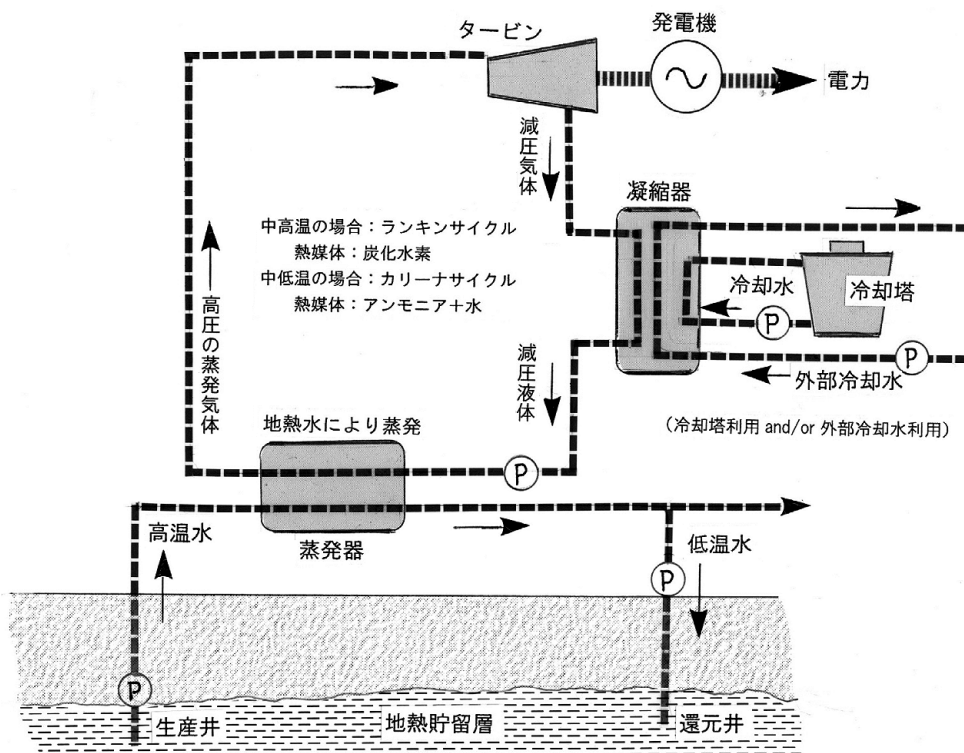
バイナリー発電のための発電機駆動部は、熱交換機とタービンと凝縮器とが配管で結ばれた閉鎖系のシステムである。

(次ページの図を参照)

配管の中は非常に低い温度で蒸発する熱媒体が流れていて、蒸発器（一種の熱交換器）の中で、地熱水によって温められて一気に蒸発し高圧の蒸発気体になる。この気体がタービンを回し、発電機をまわして発電する仕組みである。

タービンを回した後の気体は圧力が下がり、そのまま凝縮器で気体から液体に戻る。減圧された液体の熱媒体は再び蒸発器で地熱水によって蒸発し、高圧の気体になりタービンに送られる。このサイクルが循環する。

凝縮器は一種の冷却器であり、気体を液体に変化させる機能を持つ。冷却には地下水を用いたり、冷却塔（クーリングタワー）を設置して水を空気中で冷やしながら凝縮器との間を循環させる方式である。両者を併用する場合もある。



バイナリー発電システム概念図

バイナリーは正確にはバイナリーサイクルといい、バイナリーは「2つ」を意味するので、蒸発器（熱交換機）を介して地中熱の生産井と還元井を循環させるところがひとつの熱サイクル、熱媒体を蒸発器、タービン、凝縮器間を循環させるところが二つ目の熱サイクルで、これがバイナリーサイクルと呼ばれる。

熱媒体は低温で沸騰する性質をもつが、たとえばアンモニアは $-33^{\circ}\text{C}$ で蒸発し、ノルマルペンタンは $36^{\circ}\text{C}$ 、イソペンタンは $28^{\circ}\text{C}$ で蒸発する。新開発のHFC 245fa(ハイドロフルオロカーボン)は $15^{\circ}\text{C}$ で蒸発する。

このような性質から、地熱水の利用温度の高低によって利用する熱媒体が異なり、プロセスも異なってくる。

大まかには、中低温の地熱水利用の場合は熱媒体はアンモニア水（アンモニア4に対して水1の割合）、中高温の熱媒体の場合には炭化水素（ノルマルペンタン、イソペンタン等）が用いられ、前者はカーナサイクル、後者はランキンサイクルというプロセス名が付いている。最近是不活性ガスのハイドロ・フルオロ・カーボン（HFC-245fa、 $15^{\circ}\text{C}$ で蒸発）を利用した新たなプロセスが開発され商品化が進んでいる。

なお、最近の傾向としては、発電効率が比較的高いものの、熱媒体に有毒のアンモニアを利用するカーナサイクルから、無毒の熱媒体を利用するランキンサイクルを利用したシステムへのシフトがみられる。

因みに発電効率または回生効率（蒸発器・熱交換器に投入された熱量に対して何%が発電電力になったか）の理論値は10%とされているが、カーナサイクルの場合は発電端出力で7%程度、ランキンサイクルで3%前後（技術改良の余地があるという）とみられている。

なお、発電効率は直接的には事業性の良し悪しを決定する要因にはならない。（この演習を通して明らかにしたい）

## (2) 構想の立案

### ①地熱水賦存状況の調査

バイナリー発電導入の最初のステップは導入サイトでの地熱水の賦存状況の調査・確認である。既に温泉利用地帯であり源泉の温度や湧出量が把握されている場合は過去から現在に至る湧出量の変遷をみて、源泉の寿命を推計しなければならない。源泉が分散されている場合は地中で連動している可能性が高く、専門企業による調査が必要になる。

新たに地中熱水を揚湯して、バイナリー発電を導入する場合は、試掘による地温勾配をサンプル調査をもとに推計し、温泉井の「温度検層図」（(4)で詳述）のような図を作成してみる必要がある。

地熱水の温度は地中深度が深くなれば上昇し、温度が上昇すれば一定の熱水量からより多くの電力を取り出すことができるが、一方では深部から揚湯するためのポンプ動力が増加し、どのあたりに採算点があるのかは微妙である。（(4)で詳述）

また採掘井の寿命や減衰傾向が現れた場合の対策などは、発電システムの稼働年数（事業可能年数）に大きな影響をもたらすが、この分野はかなりの専門性が要求されるので、専門企業に委託して調査を進める必要がある。

## ②地熱水利用の現況調査

新たな地熱水を掘削で採取・揚湯した場合、バイナリー発電で利用後の温水を地中に還元（戻す）してしまっただけでは、揚湯用と還元用のポンプ動力で、発電した電力ではどうも賄いきれない。（(4)で詳述）

蒸発器（熱交換器）から排出される利用済み地熱水は、一部は地中に還元するにしても、多くは地域の施設で再利用し、化石燃料の代替効果を生まなければ事業の採算性は取れないだろう。

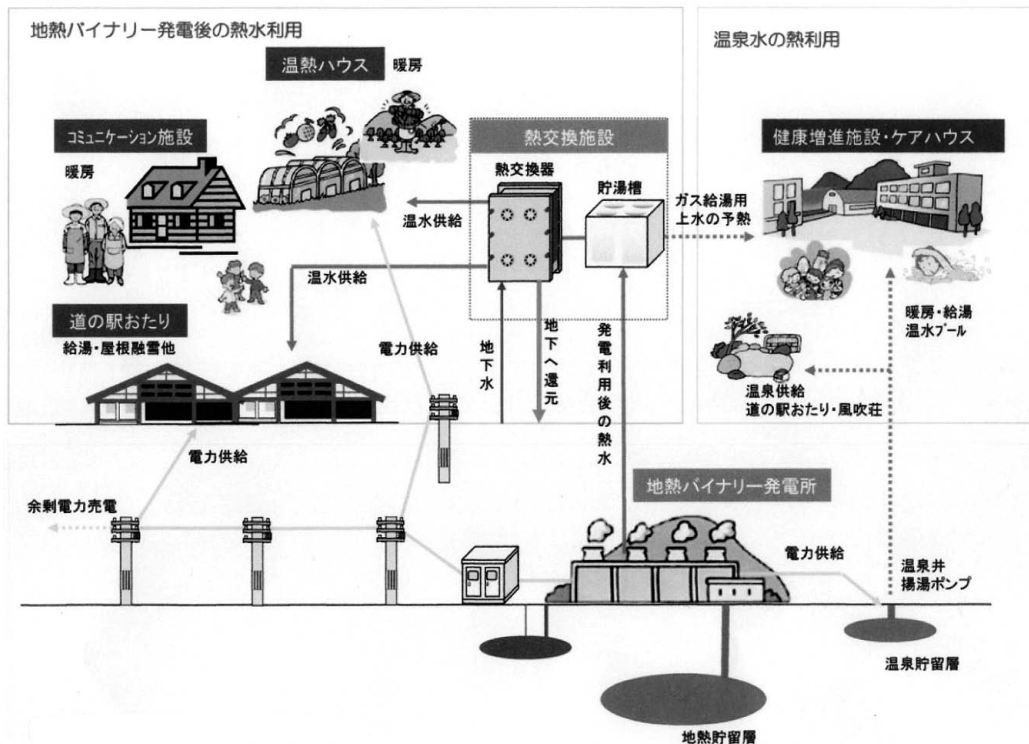
各自治体でもバイナリー発電システム導入のマスタープランを作成し、その点に開発の焦点を当てている。バイナリー発電は地熱水総合利用のひとつという考え方である。

その例を長野県小谷村の例でみてみよう。詳細説明は割愛するが、バイナリー発電利用後の熱水の総合的な利用の構図を窺い知ることができる。

なお、温水の利用は事実大変難しい。エクセルギーの考え方では温水の「利用価値の度合い：有効利用度＝エクセルギー」は非常に低く、電力のエクセルギー＝100に対して100℃の温水でもエクセルギーは11程度しかない。エネルギー密度が小さい低温の温水を利用しようとする、プラントのサイズが大きくなり、設備費が膨らんで温水利用コストは高くなる傾向がある。

したがって、温水の温度レベルをみて、どの分野に利用できるかを、熱利用効率の観点から検討しないと、温水利用は絵にかいたモチになる恐れがある。

その意味では、小谷村の構想は温度レベルごとに用途を的確に想定していることで参考になる。



地熱バイナリー発電と排温水の地域総合利用構想  
出典：小谷村地熱バイナリー発電事業化調査

温泉利用地帯での調査項目としては、源泉の温度と温泉施設での入口温度の地域分布状況の把握がある。源泉から導湯管が旅館等の各利用施設に張り巡らされているが、その送湯の過程でどのように湯温の低下が図られているか、各施設での入口温度が何度であるか、源泉元でバイナリー熱交換をする場合、熱交換後の送湯温度は何度になっているか、などが調査項目である。

当然春夏秋冬で温度の分布にはばらつきが生まれるので、既存の温泉利用者に影響が出ないようにバイナリー発電システムのエネルギー収支は慎重に決める必要がある。この演習ではそこまでは言及しない。

### ③冷却水利用の現況調査

凝縮器でタービンからの減圧熱媒体（気体）を液体に戻す際には冷却が必要であるが、この冷却には、冷却塔を利用した空気による冷却水の循環方式と、外部の冷却水による冷却の方式がある。問題は外部の冷却水供給能力である。

ある例によると、90℃の温水、75t/h を使って 50kW の発電をしようとする、20～25℃の冷却水、120t/h 必要になるという。

冷却用水をすべて外部の冷却水で賄うのは水資源量からみても厳しいので、冷却塔の利用を組み合わせる必要が出てくるが、今度は外気温により冷却塔の冷却能力に差が生じてくるのでまた厄介な問題が生じてくる。（(4) で詳述）



#### ④地熱資源からみた発電システムの事例

構想や実証試験の例は多々あるが導入事例は極めて少ない。国内初のバイナリー発電は2004年、九州電力八丁原地熱発電所に実証試験用として導入されたのが始まりである。出力は2,000kW、130℃の熱水流量64t/h(約1,000 L/分)を利用している。その後同社は指宿市の山川発電所に250kWのバイナリー発電を導入し2012年から実証運転を始めている。そのほか、2013.2月現在、長崎県の小浜温泉での60kWが間もなく運転に入るという情報がある。

また、福島県の土湯温泉でも源泉の熱を利用したプランが進んでいる。源泉をそのまま利用するので掘削・ボーリングの必要ない方式。その模様を読売新聞の記事(2012.7.14)が伝えている。(参照資料を利用)

#### ⑤この段階での概略プロセスフロー図(2ケース)

長野県小谷村の構想を参考に、福島県内ではどのようなプランが考えられるだろうか。

グループごとに導入構想を描いてみることにする。  
定性的なフロー図等でよい

#### ⑥周辺環境との調和

一番問題になるのが、源泉の途中段階での熱利用にともなう熱利用下流段階への影響であるが、月次の自然環境、温泉施設の季節別温水利用量、流量の調整を行う貯湯槽の設置、下流での熱利用を優先させた地域熱利用総合監視システムの構築などで、環境との調和は問題なく図れそうである。

ただ、新たな温泉源を開発する場合に還元井への還元をどの程度にするかという専門的な課題がある。

#### (3) 現地調査と確認

(今回省略、コメントのみ)

#### (4) 企画設計

##### 【その1：新規地熱利用～開発のケース】

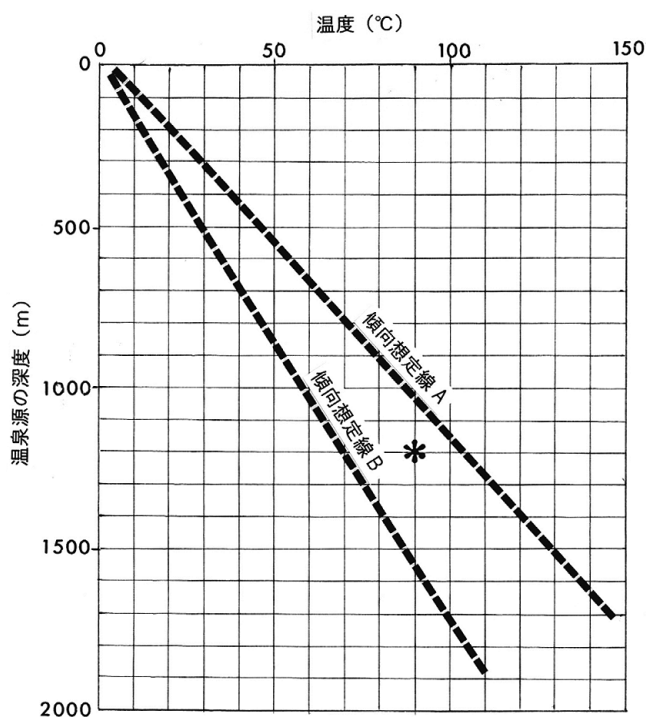
#### ①地熱水生産井の温度とバイナリーサイクルの選定

一般には地下深く入るに従って地温は高くなる傾向がある。地下何mで何℃高くなるかを「地温勾配」といい、地質調査所等が全国のデータを公開している。一般的な値としては深さ100mごとに3℃ずつ上昇するとされているが、場所によってかなりの違いがあり特定はできない。北海道東部の例では3℃～10℃のバラツキがある。

地温の勾配を測るには深井戸や掘削坑に温度計を入れたり、鉱山の坑道などを利用することもあるが正確に測るには数十mの調査坑を掘り測定する必要がある。また場所がずれただけでも地層の関係で測定値がずれることがあるので数か所の測定値をみることも必要になる。

さて、この演習では、福島県内の特定の地点を対象にしているわけではないので、以下の記述は様々な事例に基づいたひとつの「仮想値」で、地熱水源泉は自然湧出ではないことが前提である。

県内の地熱水開発プロジェクト候補地である某地点の地温の傾向を求めめるために、2本の調査坑を掘り、地温を測定した結果、次の図のような傾向想定線A、Bが得られたとしよう。実際の傾向線はこのような直線にはならず、紆余曲折したものになるようであるが、ここでは直線にした。



温泉井の深度と温度の傾向図（作成例）

採取する地熱水の温度を上げればバイナリー発電の効率は上昇するが、掘削コストが増え、揚湯用動力ポンプの出力が上がり、発電出力の自家消費分が増えるという逆相関の関係がある。ここでは専門家の意見を取り入れて採取点をグラフ上の\*をつけた点にし、地熱水採取は地下 1200 m、温度 90°C に設定した。

演習テーマの諸元設定 1：地熱水採取は地下 1200 m、温度 90°C

### ②生産流量の減衰と適正揚湯量の算定

地熱水井戸からの適正揚湯量を決める場合には、段階的揚湯試験を行い、揚湯量を増やしていった場合の水位の下がり具合を調査し、揚湯量の増加割合以上に水位の下がり方が大きくなった点を限界揚湯量とし、その60～80%を適正揚湯量とするのが一般的な考え方である。

①でみた傾向線上の採取想定深度での揚湯試験は困難なので、専門企業に委託してサイトの一般的な傾向を推計してもらう必要がある。

以下に当教程での演習用の100 m地点以下の仮設例を示す。

揚湯量と水位変動の傾向（仮設例）

段 階	自然水位 ( m )	揚 湯 量 ( L / 分 )	水位変動 ( m )	揚湯量増分 ( % ) x	水位変動量 ( % ) y	y / x
1	20	500	100	—	—	—
2		800	130	60	30	0.5
3		1,000	156	25	20	0.8
4		1,200	187	20	20	1.0
5		1,500	243	25	30	1.2
6		1,800	328	20	35	1.8

当サイトの地熱水滞層構造からみると、揚湯量増分の傾向を上回るピッチで水位が低下するのは揚湯採取量が1,500 L／分であることが分かり、その60～80%である1,000 L／分程度が適正揚湯量であることが推測される。これは60t/hの揚湯量である。

演習テーマの諸元設定2：地熱水採取量は1,000 L／分

### ③地熱水の入口温度、出口温度と流量の設定

地熱水サイクルの蒸発器（熱交換器）に入る地熱水の温度と蒸発器の出口温度の関係は、プラント全体のプロセス技術であり、サイトにより、規模により、メーカーにより、また使用する熱媒体により適正な温度帯が異なるので、一義的な設定は困難である。そして現在では、このシステムの多くが実証試験中であることから標準的なデータも入手ができない。

そこでここでは、神戸製鋼所の「マイクロバイナリー」のパフレットを参考に、入り口と出口の温度差を12℃に仮設定する。この差は暗黙の前提として中高温ランキンサイクルで炭化水素系の熱媒体利用を念頭に置いたものである。

また流量は上記で設定した1,000 L／分（60t/h）を設定する。

#### ④冷却水利用可能量、温度、冷却方式の選定

凝縮器に入ってきた熱媒体（液体）は低温の冷却水に接すると、急激に気化し高圧の気体に変化するが、冷却水の温度が低いほど蒸発気圧は大きくなってタービンの回転効率が上昇し発電出力が向上する。

凝縮器での冷却方法としては、地下水などを直接垂れ流し式に利用する水冷式と、冷却塔の間で循環させ、冷却塔の中で降らせて大気と熱交換して利用する方式がある。水冷式は地下水の場合年間を通して温度がほぼ一定なので、年間の発電量もほぼ一定になるという特徴があるが、冷却塔方式は、大気のが気温が季節ごとに異なるため、冷却水の温度が夏は高く、冬は低くなって発電量は夏に高く、冬に低い状況になる。

長野県のある試算例では、水冷式の場合の〔発電出力ーポンプ消費電力＝送電可能電力〕が毎月 100kW であった場合、大気温が低い冬季～春先に冷却塔を水冷式に組み合わせることにより、月々の〔発電出力ーポンプ消費電力＝送電可能電力〕は

1月：500kW、2月：480kW、3月：414kW、4月：290kW、

5～10月は水冷式なので 100kW

11月：282kW 12月：416kW 年間合計 2,982kW

となり、水冷式の場合の 1.5 倍になるという試算結果がある。

発電量を一定に保つためには地下水などによる水冷式が望ましいが、地下水を大量に使う場合は水資源の問題が発生する。

例えば、あるプロセスの場合、90℃の温水 60t/h で 50kW の発電を行おうとすると、20℃の冷却水が 120t/h が必要になるという試算結果がある。

そこで、現実的な利用方式としては水冷式と冷却塔式を組み合わせるということになる。

#### ⑤発電出力の想定

使用する地熱水 1,000 L/分、90℃、凝縮器（熱交換機）で熱媒体に移転される温度差 12℃とし、不活性ガスを熱媒体に利用するプロセスの場合の予想発電性能表からどの程度の発電出力がどのような条件で得られるかをトレースしてみよう。

これはあくまで一例である。バイナリーシステムメーカーにより、また移転温度差を何℃で設計するかにより性能表は異なる。当然中低温が中高温化でも異なる。

以下の性能表は神戸製鋼所が商品化している「マイクロバイナリー発電システム」発電端出力 72kW、最大送電端出力 60kW、のパンフレットで公表されているものである。当社によると、あくまで参考値であって普遍的なものではなく、サイトの条件によりその都度設定する必要があるという。

これを読んで、20℃の冷却水を利用した場合の発電出力を求めてみよう。

MB-70H予想発電性能表 送電端出力(kW)

冷却水量		120 (ton/h)					60 (ton/h)						
温水量	冷却水温度	温水温度(℃)											
		95	90	85	80	75	70	95	90	85	80	75	70
75 ton/h	15℃	60	55	47	39	32	24	58	51	44	37	30	22
	20℃	60	52	44	35	28	21	54	45	39	32	25	19
	25℃	57	49	40	32	24	17	49	41	35	28	22	15
	30℃	52	45	36	27	20	14	45	38	30	23	18	12
70 ton/h	15℃	59	54	46	38	31	24	57	50	43	36	29	22
	20℃	59	51	43	35	27	20	52	45	38	31	25	18
	25℃	56	48	40	31	24	16	47	40	34	28	21	15
60 ton/h	15℃	58	51	44	38	31	24	55	48	41	35	28	21
	20℃	57	49	41	33	26	19	50	43	36	30	24	18
	25℃	54	46	38	30	23	16	45	39	33	27	21	15
50 ton/h	15℃	56	48	42	37	30	23	53	46	40	33	27	21
	20℃	55	48	40	32	25	18	48	41	35	28	23	17
	25℃	52	44	36	29	22	15	43	37	31	25	20	14
	30℃	47	38	31	25	18	12	38	33	27	21	16	11
40 ton/h	15℃	51	44	39	33	27	21	49	43	36	30	24	19
	20℃	50	43	36	29	23	17	44	38	32	26	21	16
	25℃	47	39	32	25	19	13	40	34	28	23	18	13
	30℃	42	34	28	22	16	11	35	30	24	19	14	10
30 ton/h	15℃	46	40	35	30	24	18	45	39	33	27	22	17
	20℃	45	38	31	25	20	15	41	35	29	23	18	14
	25℃	41	34	28	22	17	12	36	30	25	20	16	11
	30℃	36	29	24	19	14	9	31	26	21	16	12	8
25 ton/h	15℃	43	38	33	28	22	17	43	37	31	25	21	16
	20℃	43	35	29	24	19	14	39	33	28	22	17	13
	25℃	38	31	26	20	16	11	34	29	24	19	15	10
	30℃	33	27	22	17	13	9	29	25	20	15	11	8

注) 本表は参考値です。詳細をご検討の際は別途お問合せください。

答：冷却水量が 60t/ h の場合は \_\_\_\_\_  
 冷却水量が 120t/h の場合は \_\_\_\_\_

定格出力に対して 58%～85%の出力であり、これがエネルギー密度の低い資源を利用する熱源機器の宿命でもある。

なお、参考までに 90℃の地熱水を 1,000 L / 分 (60t/h) 投入し、20℃の冷却水 120t/ h 利用した場合の送電端出力 49kW から熱効率を求めてみよう。

計算：

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

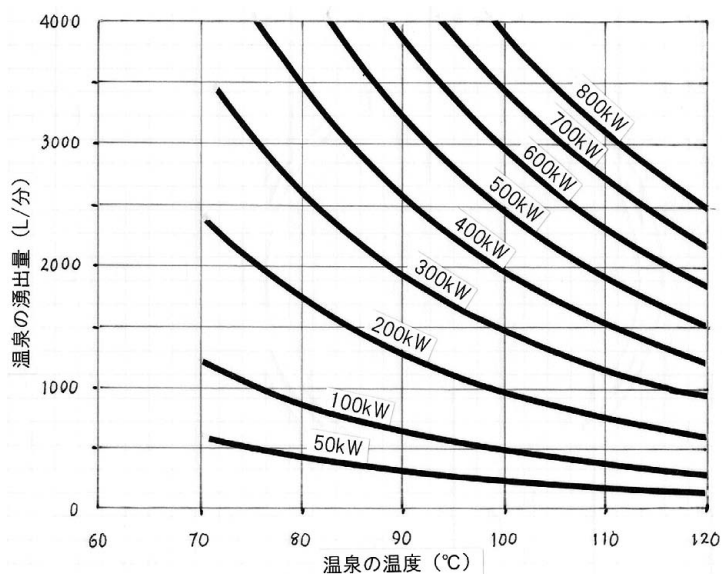
[参考]

バイナリーサイクルには、熱媒体の蒸発温度が 15℃の不活性ガス（HFC-245fa）や 28～36℃の可燃性ガス（ルルパントン、イパントン）を利用するランキンサイクルと蒸発温度が－33℃のアンモニア+水を利用するカーリーナサイクルの二つがあり、地熱水の利用温度が比較的高い場合はランキンサイクル、低い場合はカーリーナサイクルがベースになっている。事業化可能性調査をみると、現時点ではカーリーナサイクルをベースにした例が多く見られる。

上記に示した性能表はランキンサイクルがベースになっていて、地熱水の温度と湧出量の関係から見込まれる発電出力は、カーリーナサイクルの場合に比べて低くなっている。

以下参考までにカーリーナサイクルをベースにした場合の、温度と湧出量と発電出力の関係図を示す。

このデータは環境省の委託研究事業として地熱技術開発㈱、産総研、弘前大学が平成 22～24 年度に実施したもので、新潟県十日町が実証試験場になっている。



カーリーナサイクル発電システムにおける 温度、湧出量、発電出力の関係図  
 出展：静岡県伊豆地域バイナリー発電FS 報告書

⑥揚湯用ポンプ、還元用ポンプ動力の想定

揚湯の深度は地下 1,200 m、これが演習における計算上の全揚程になる。揚湯量は 1,000 L/分としたので 16.7 L/秒、ポンプ効率を 80% = 0.8 とすれば、揚湯用のポンプ動力は次の式で計算できる。

$$\begin{aligned} \text{ポンプ軸動力 (kW)} &= \text{圧力} \times \text{流量} / \text{ポンプ効率} \\ &= 9.8 \times \text{ポンプの全揚程 (m)} \times \text{流量 (m}^3 \text{/秒)} \div \text{ポンプ効率} \end{aligned}$$

演習：

計算

還元用動力ポンプは、何%を還元するかが未定なので、揚湯用の1/20の10kWと想定する。

演習：

毎分1,000 Lを地下1,200 mから設備利用率80%で揚湯した場合、1 tの揚湯に要する消費電力量を計算する。

計算

#### ⑦再利用可能熱量の計算

90°Cの地熱水1,000 L / 分から12°Cの分を熱媒体の蒸発に用いた残りは78°C × 1,000 L / 分 × 60分 × 8,760時間 × 4.19kJ/kcal = 171,776,592kJ  
= 171,776,592 MJが稼働率100%、負荷率100%としたときの年間に発生する熱交換器からの排熱量である。

実際に利用できる貯湯槽段階での熱量は稼働率と負荷率を合わせた設備利用率を加味し、還元井に戻す分や貯湯槽での蓄熱ロスを差し引かねばならない。仮に設備利用率を80%、1/3を還元井に戻し、2/3を貯湯槽にて利用するとし、蓄熱ロスを20%とみれば、実際に利用可能熱量は、

$$171,776,592 \text{ MJ} \times 80\% \times 2/3 \times 80\% = 73,291,346 \text{ MJ/年}$$

となる。

これは灯油に換算すると、灯油の熱量は36.7MJ/Lであるから、

$$73,291,346 \div 36.7 = 1,997,039 \text{ L} = 1,997 \text{ kL}$$

に相当する。

## ⑧プロセスフロー図の作成

各チームで概略フロー図を作成する。  
作成例は会場で配布する。

### 【その2：既存温泉源に併設のケース】

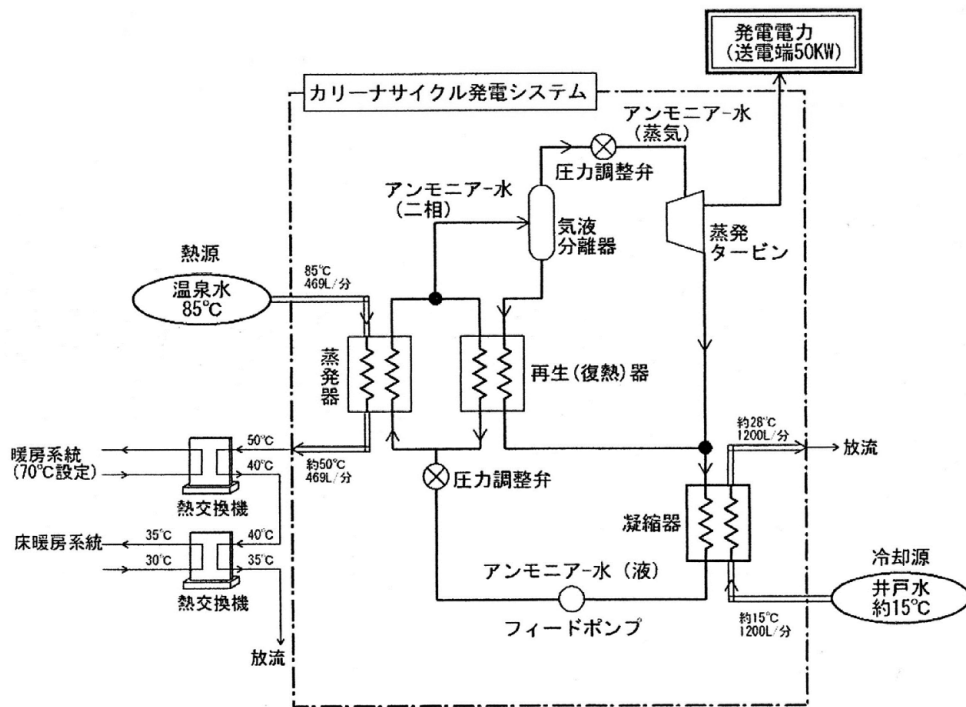
#### ①温泉源熱水の温度、温泉利用温度と流量の設定

既に温泉の源泉があり、源泉の温度が高温のためそのままでは温泉に利用できない場合、熱交換器を通して適正な温度、例えば送湯元で50℃程度まで下げ、源泉温度との差を熱サイクルの過程で発電に利用する方式である。

これまでのF Sの事例をみると、熱媒体にアンモニア+水を利用する「カーリーナサイクル」方式の採用が目立つ。カーリーナサイクルの特長は熱媒体に沸点-33℃のアンモニア+水が利用されており、比較的低い熱源の利用が可能な点である。したがって、例えば85℃の地熱水を蒸発器に投入し、30℃分を熱サイクルに利用するケースが考えられ、一定量の地熱水からより多くの電力を取り出すことができ、温泉源のように量が限られた地熱水を利用する場合は効果的とも考えられる。

カーリーナサイクルを前提とした電力・熱供給のシステム構成例を以下に示す。この例は、北海道標津町のバイナリー発電システム導入可能性調査の中で示されたものである。蒸発器では35℃の温度差を熱サイクルに利用していて、【その1】の例(12℃)とは大きな差が認められる。理由は熱媒体循環プロセスにあり、プラントコストは高くなる。





カリナサイクルを利用したフロー図の例  
 出典：標津町・小規模バイナリー発電導入可能性調査

以下の検討では、標津町でのF Sのデータを借りて、事業性評価までフォローしてみることとしたい。

標津町のフローと違っているのは、蒸発器（熱交換器）からの利用済み地熱水は50°Cであり、ちょうど温泉宿等での利用温度に近いことから、全量を温泉宿に供給することにする点である。

②諸元の設定

- 蒸発器への地熱水：85°Cの源泉湯、毎分 470 L
- 利用後の地熱水：50°C、毎分 470 L そのまま既存の温泉施設へ
- 冷却水の供給：15°Cの井戸水、毎分 1,200 L、28°Cで放流
- 所内電力消費率：16～17%（想定）
- 発電端出力：60 kW
- 送電端出力：50 kW

回生効率の計算

- ・源泉からの取り入れ熱量

---



---



---

- ・発電端の発電効率を逆算

---

あくまでF Sの段階での数値であるが、この値は、【ケース1】の場合（3.2%）に比較してかなり高い。

（末尾にカーナサイクルの熱効率概算値の調査例を掲載した）

③プロセスフロー図の作成

省略

(5) 事業性検証

【その1：新規地熱利用～開発のケース】

①地熱水採取量減衰の想定

地熱水は採取する年数により、また採取量の増加により地下の熱水水位（動水位）は下がってくる。通常はある程度の水位低下を見越して揚湯用のポンプを設置するが、水位が想定地よりも低下すると揚湯そのものが困難になり事業は立ち行かなくなる。

こうした現象を事前調査で明らかにして、事業の実施期間、その間の揚湯量等を年度別に設定して事業性を検証する。

減衰想定例を仮設として示す。

減衰想定例

地下水位	推 定 採 取 量 (L/分)					
	採取開始	1年後	5年後	10年後	15年後	20年後
1,200m	1,000	980	900	850	800	750
1,300m	1,000	1,000	950	900	850	800
1,400m	1,000	1,000	1,000	950	900	850

[想定条件]揚湯用ポンプの設置深度から、地下水位1,200mが採取の限界である。

②概算事業費の想定

実施例が乏しく標準的なデータもないので、自治体等がこれまで事業化可能性調査で推計したデータをもとに事業費を想定する。

なお、バイナリー発電システム本体の価格想定に当たっては前述の神戸製鋼所「マイクロバイナリー」を参照した。

【地熱水賦存状況調査費】

設計費を含めて3,500千円

【揚湯井開発費】

口径200mm（呼び径200）、深度1,200m、水中ポンプ（245kW）、地上配管等120,000千円（公共に関わる補助金適用分は除く）

【冷却用地下水掘削関係費】

口径200mm、深度100m、深井戸用水中ポンプ（20kW）等工事一式15,000千円

**【発電システム】**

タービン発電機 60kW、凝縮器、蒸発器、プロセスポンプ、制御機器、パワー  
コンディショナ、系統連系装置等  
一式 30,000 千円

**【付帯設備機器等】**

冷却塔と周辺機器装置  
冷却水量最大 2,600L/分、電動機 5.5kW で 2,500 千円  
地熱水再利用貯湯槽と周辺機器  
有効容量 30 m<sup>3</sup> 工場組立一体型ステンレス製 12,500 千円  
計装、照明、監視、消防、保守点検、スケール対策、付帯ポンプ類  
一式 8,000 千円

**【工事費】**

敷地造成、外構工事  
一式 4,000 千円  
配管工事、計装工事、保温工事  
一式 23,000 千円  
電気工事一式  
一式 15,000 千円  
その他フィールド諸経費  
一式 3,000 千円

**事業費まとめ**

項 目	金 額(千円)
地熱水賦存状況調査費	3,500
揚湯井開発費	120,000
冷却水井戸開発費	15,000
発電システム	30,000
<u>付帯設備機器等</u>	( 23,000)
冷却塔関係	2,500
貯湯槽関係	12,500
施設管理関係	8,000
<u>工 事 費</u>	( 45,000)
基礎、構築物工事	4,000
配管、計装工事	23,000
電気工事	15,000
その他	3,000
合 計	236,500

③事業資金源の確認

発電利用後の排地熱水は地域開発、地域新産業育成など幅広い利用が考えられるので、事業費は地域での公募債や公共事業費などで調達される。

④余剰地熱水利用価値の計算

2の⑧から、利用可能温水量を

$$171,776,592 \text{ MJ} \times 80\% \times 2/3 \times 80\% = 73,291,346 \text{ MJ/年}$$

と想定した。80%は設備利用率、もうひとつの80%は蓄熱ロスを差し引いた割合、2/3は地下還元分1/3を除いた地上利用分の割合である。

これは灯油に換算すると、灯油の熱量を 36.7MJ/ L とすれば、

$$\frac{73,291,346 \text{ MJ}}{36.7 \text{ MJ/L}} = 1,997 \text{ kL}$$

利用可能余剰地熱水の評価額

$$1,997 \text{ kL} \times 2/3 = 1,331 \text{ kL} = 66,567 \text{ 千円/年}$$

灯油の市場価格は需要端（炉前）で約 100 円 / L，kL あたり 100,000 円である。余剰地熱水レベルの単価はこれに配管費用などの設備関係費を考慮しなければならない。

余剰地熱水利用者が灯油に代替するメリットを感じ得る温水価格を灯油 50 円 / L 換算価格とし、また発生した余剰地熱水の、未利用廃棄分を除く最終的な利用割合を 2/3 としよう。

利用可能余剰地熱水の評価額 = 1,997 × 50 千円 / kL × 2/3 = 66,567 千円 / 年と計算される。

⑤発電コストと事業収支の計算

Ⅲの2の(4)の⑤で計算したように、発電量は条件設定如何で変動するが、ここでは変動幅の平均として 50kW 出力をベースに想定する。

初年度ベース（基準収支）

項目	数量	単価	金額(千円)	単位原価	備考
発電設備容量	60 kW				
発電可能量	50 kW				
設備利用率	80%				
所内率	10%				仮定
年間有効発電量	315,360kWh				
<b>収入</b>					
固定価格売電収入 (売電単価 40 円/kWh)	315,360kWh	40 円/kWh			全量
余剰地熱水評価額	③から				
収入計		項目	数量	単価	金額(千円)

支 出					
揚湯ポンプ動力費	1,790,544kWh	15 円/kWh	(基本料金込)	円/kWh	注 1
冷却関係動力費	89,352kWh	15 円/kWh	(基本料金込)	円/kWh	注 2
減価償却費					注 3
設備関係諸経費	53,000×2%				
メンテナンス費	53,000×3%				注 4
設備費調達金利	未計上				
施設管理費	月額 50 万円	×1/2			注 5
支出計				円/kWh	
事業収益					

注 1 2 の⑦から、

基本料金： $(250\text{kW} + \alpha : 50\text{kW}) \times 1,510 \text{ 円/kW} \times 12 \times 85\% = 4,621 \text{ 千円}$

従量料金： $255.5\text{kW} \times \text{設備利用率 } 80\% \times 8,760 \text{ 時間} (= 1,790,544\text{kWh})$   
 $\times 15 \text{ 円/kWh} = 26,858 \text{ 千円}$

注 2 冷却塔 5.5kW として

基本料金： $5.5\text{kW} \times 1,510 \text{ 円/kW} \times 12 \times 85\% = 4,621 \text{ 千円}$

従量料金： $5.5\text{kW} \times \text{設備利用率 } 80\% \times 8,760 \text{ 時間} \times 6/12 \text{ カ月分}$   
 $(= 19,272\text{kWh}) \times 15 \text{ 円/kWh} = 358 \text{ 千円}$

地下水揚水 20kW として

基本料金： $20\text{kW} \times 1,510 \text{ 円/kW} \times 12 \times 85\% = 4,621 \text{ 千円}$

従量料金： $20\text{kW} \times \text{設備利用率 } 80\% \times 8,760 \text{ 時間} \times 6/12 \text{ カ月分}$   
 $(= 70,080\text{kWh}) \times 15 \text{ 円/kWh} = 1,051 \text{ 千円}$

注 3 事業寿命数 20 年として定額償却

$236,500 \div 20 \text{ 年} = 11,825 \text{ 千円}$

ポンプの耐用年数経過後の更新費は年々のメンテナンス費に計上

注 4 機器費 (30,000 + 23,000 千円) の 3% / 年

注 5 管理人件費経費、地域負担分 1/2

### 演 習

このコスト計算結果についてグループ討議を行う  
 また問題点を洗い出す

⑥長期事業収支の計算、長期キャッシュフローの計算

上記のコスト計算は初年度ベースであり、その後の採取地熱水の減衰傾向は織り

込んでいない。それを考慮して長期事業収支の計算、長期キャッシュフローの計算を行う。

#### 長期事業収支、長期キャッシュフロー

	初年度	10年度	1~10年平均	20年度	10~20年平均
有効発電量(kWh/年)	315,360	283,824	299,592	252,288	268,056
年間減衰率(1%/年)	100.0	90.0		80.0	
売電単価(円/kWh)	40	40	40	27.5	33.75
<u>事業収支</u>					
売電収入(千円/年)	12,614	11,353	11,984	6,938	9,146
余剰熱水(千円/年)	66,567	59,910	63,239	53,254	56,582
収入計	79,181	71,263	75,223	60,192	65,728
動力費(千円/年)	42,130	37,917	40,024	33,704	35,810
固定経費(千円/年)	17,475	17,475	17,475	17,475	17,475
費用計	59,605	55,392	57,499	51,179	53,285
事業収益	19,567	15,871	17,724	9,013	12,443
<u>キャッシュフロー</u>			(累計)		(累計)
初期投資額(千円)					
年間キャッシュフロー					
年度末投資額残高					
投資額回収率(%)					

#### 演習

この収支計算結果についてグループ討議を行う  
また問題点を洗い出す

#### 【その2：既存温泉源に併設のケース】

##### ①地熱水採取量減衰の想定

既存の源泉を直接利用するので、地熱水採取量減衰の想定は既存の温泉事業の課題でもあるが、万一減衰傾向が生じた場合には、プラントの移設が可能である。

したがって、ここでは減衰傾向はないものとして事業性を検証する。

## ②概算事業費の想定

ケース1の場合とはかなり様相が異なるが、両者比較の意味で示す。

項 目	金 額(千円)
地熱水賦存状況調査費	—
揚湯井開発費	—
冷却水井戸開発費	15,000
発電システム (系統連系装置を含む)	35,000
付帯設備機器等	( 5,000)
冷却塔関係	—
貯湯槽関係	—
施設管理関係 (スケール対策など)	5,000
工 事 費	( 35,000)
基礎、構築物工事	2,000
配管、計装工事	20,000
電気工事	10,000
その他	3,000
合 計	90,000

## ③事業資金源の確認

ケース1のような地域開発型の支援対象にはなりにくいですが、発電事業による収益を温泉組合等に還元することにより、特定目的会社としての資金調達が考えられる。もちろん再生可能エネルギー開発関連の公的支援制度の活用もあるだろう。

## ④発電コストと事業収支の計算

ケース1と同じような手順で発電コストを試算した。

ケース1に比較すると非常に単純な計算になるが、両者比較の意味で同じ形の表を利用する。

【補助金収入を見込まない場合】

初年度ベース（基準支出）

項目	数量	単価	金額(千円)	単位原価	備考
発電設備容量	60 kW				
発電可能量	50 kW				
設備利用率	90%				
所内率	16.5%				仮定
年間有効発電量	394,200kWh				
収入					
固定価格売電収入 (売電単価 40 円/kWh)	394,200kWh	40 円/kWh			全量
余剰地熱水評価額			なし		
収入計					
支出					
採湯ポンプ動力費	所内動力で		なし		
冷却関係動力費	157,680kWh	15 円/kWh	(基本料金込)		注 1
減価償却費					注 2
設備関係諸経費	35,000×2%				
メンテナンス費	35,000×2%				
設備費調達金利	未計上				注 3
施設管理費	月額 10 万円	×1/2			
支出計				円/kWh	
事業収益					

$$\text{資金回収期間} = 90,000 \text{ 千円} \div (6,000 + 782) = 13.3 \text{ 年}$$

注 1 地下水揚水 20kW として（還元、循環ポンプを含む）

基本料金：20kW × 1,510 円 /kW × 12 × 85% = 4,621 千円

従量料金：20kW × 設備利用率 90% × 8,760 時間

（ = 157,680kWh ） × 15 円 /kWh = 2,365 千円

注 2 設備耐用年数 15 年として定額償却

90,000 ÷ 15 年 = 6,000 千円

15 年という期間は固定価格買取制度の買取期間に一致させた。

注 3 特定目的会社の配当金として。

【補助金収入を見込んだ場合】

再生可能エネルギー地域高度利用事業等、国や地方公共団体等による補助が用意されている。原則は設備費の 1/2 補助である。

補助金を会計上「圧縮記帳」処理すると、減価償却費や固定資産税（※）を減額



計上できる。

※不透明な部分あり。

その場合の発電事業収支を示す。

初年度ベース（基準支出）

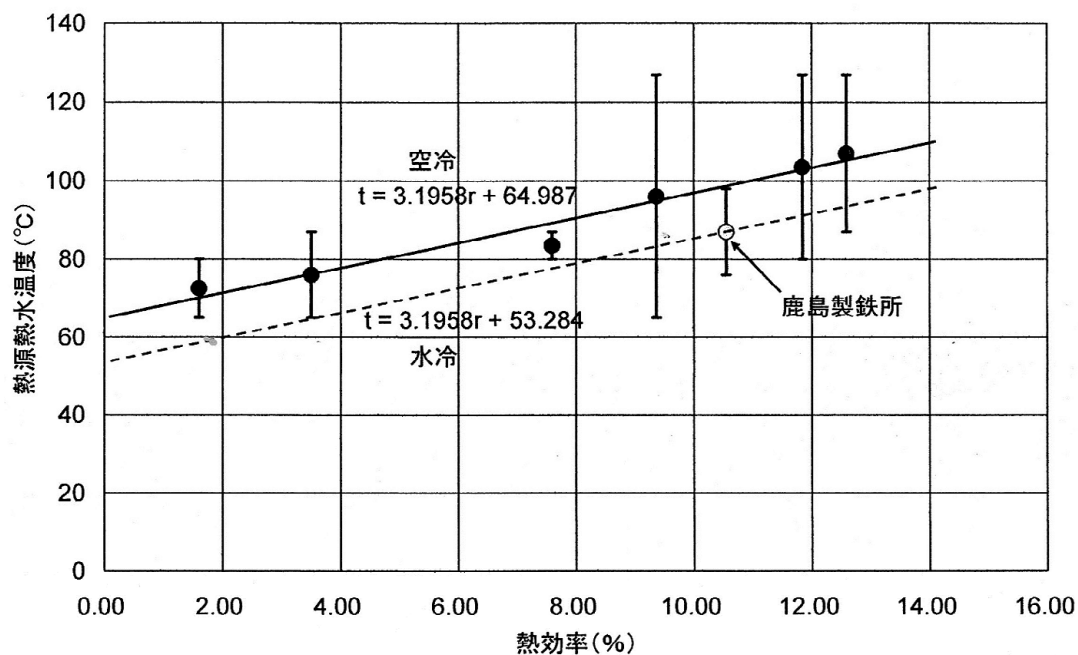
項 目	数 量	単 価	金額(千円)	単位原価	備考
収 入					
固定価格売電収入 (売電単価 40 円/kWh)	394, 200kWh	40 円/kWh			全量
余剰地熱水評価額			なし		
収入計					
支 出					
採湯ポンプ動力費	所内動力で		なし		
冷却関係動力費	157, 680kWh	15 円/kWh	(基本料金込)		
減価償却費					
設備関係諸経費	35, 000×1%				
メンテナンス費	35, 000×2%				
設備費調達金利	未計上				
施設管理費	月額 10 万円	×1/2			
支出計				円/kWh	
事業収益					

資金回収期間＝ \_\_\_\_\_ 年

演 習

このコスト計算結果についてグループ討議を行う  
また問題点や改善点を洗い出す

末尾参考図



カーリーナサイクルの熱効率概算値  
出典：産総研：温泉と地熱発電

50kWe 級カーリーナサイクルの設計仕様（大里，2009）

開発仕様項目	空冷式	水冷式
温泉水流量, kg/s	8.104	8.104
温泉水入口温度/出口温度, °C	85 / 50	85 / 50
冷却媒体温度(年平均), °C	14	14
入力熱量, kW	1,187.48	1,187.48
出口熱量, kW	1,122.45	1,118.18
タービン降下熱量, kW	68.53	72.94
タービン仕事量, kW	65.11	69.29
フィードポンプ消費電力, kW	4.67	4.85
発電端電力, kW	60.43	64.44
冷却系統消費電力, kW	10.44	4.79
送電端電力, kW	50.00	59.66
熱効率, %	4.21	5.02
単位温泉水消費量, kg/kW-h	583.5	489.0
単位電力量, watt-h/kg	1.71	2.04

出典：産総研：温泉と地熱発電

[ 演習の最後に再確認 ]

次の工程表により、演習のプロセスをフォローし確認する

(工程表はコピーを配布)