

# バイナリー発電の適用性(その1)

## 副題：バイナリー発電の仕組みと特徴

環境企画 主宰 松村 眞

本稿は工業通信社が発行する月刊誌「化学装置」の2015年10月号に掲載されたレポートである。出版社の許可を得て転載する。

### 1. はじめに

最近、バイナリー発電という言葉をよく耳にするようになった。ずっと以前からある技術だが、馴染みが薄いのは身近に接する機会が少ないからであろう。バイナリー発電は、主に150℃以下の熱源から電力を回収する技術である。この温度水準の熱源が多いのは地熱発電で、九州電力の八丁原地熱発電所がバイナリー発電を採用している。地熱発電より規模は小さいが、温泉も源泉温度が90℃以上の場合があり、バイナリー発電を導入した事例がいくつか報告されている。地熱や温泉は自然熱源だが、バイナリー発電に適した温度の工場排熱も少なくない。そこで複数のメーカーが工場排熱への利用も視野に入れて、効率のよいバイナリー発電装置を開発した。工場排熱は熱源が多様なので、汎用性の高いコンパクトな装置をパッケージ化して経済性を高めている。周知のように日本の工場は、長年にわたって省エネルギー対策を進めてきた。しかし150℃以下の工場排熱は利用率が非常に低い。その理由の一つは、この温度水準の熱は回収しても用途が少ないからである。もう一つの理由は、電力に変換しようにも水蒸気を作動媒体に使うランキンサイクルでは、排熱温度と沸点温度の差が小さくて効率が悪いからである。そこで水蒸気より沸点の低い作動媒体を使うバイナリー発電が、技術開発による高効率化もあって注目されるようになった。しかし、工場排熱への採用事例が少ないこともあって、バイナリー発電の適用性に関する判断基準の解説が少ない。本論ではバイナリー発電の工場排熱への適用性を、多少の独断を顧みずに整理してみた。関係者の参考になれば幸いである。

### 2. バイナリー発電とは

バイナリー発電は、熱源より沸点の低い作動媒体を蒸発させ、作動媒体の蒸気でタービンを回転させて発電する仕組みのことをいう。タービンは発電機のローターと同軸で直結させることが多く、タービンの回転数に比例した発電出力が得られる。作動媒体はタービンの下流で冷却し、凝縮させてから熱源で再加熱され、蒸発してタービンを回転させるサイクルを続ける。作動媒体の蒸気圧力が高いほど、また冷却して凝縮した時の温度が低く、

圧力が低いほど発電出力が大きくなる。熱源側と作動媒体側の二つの熱システムがあるのでバイナリー発電とか、バイナリーサイクルといわれる。一般的な火力発電では、化石燃料を燃焼させて高温の燃焼ガスを作り、作動媒体である水を蒸発させてタービンを回転させている。したがって言葉の意味ではバイナリー発電ともいえるが、通常はもっと低い温度、たとえば熱源が 150℃以下で、作動媒体の沸点が 100℃以下の場合にバイナリー発電、バイナリーサイクル、バイナリーシステムといわれている。

### 3. バイナリー発電の仕組み

バイナリー発電の仕組みを図 1 に示す。工場排熱の場合は左側が熱源側で右側が発電側になる。熱源側では循環温水が工場排熱から熱を回収して温度が上昇し、発電側に送られて作動媒体を加熱する。発電側に熱を与えて温度が低下した循環温水は、熱源側に返送されて再び工場排熱から熱を回収する。発電側では作動媒体が循環温水で加熱されて蒸発し、タービンを回転させて発電する。作動媒体の蒸気は冷却器で凝縮し、再び循環温水で加熱され蒸発する。バイナリー発電の発電側の設備は、循環温水（または水蒸気）と作動媒体との熱交換器、タービン、発電機、作動媒体の冷却凝縮器、それにポンプと接続配管である。バイナリー発電装置のメーカーは、この範囲の設備をコンパクトなパッケージにして市販している。

一方、熱源側の一般的な設備は、工場排熱と循環温水との熱交換器とポンプ類で、配管設備が付随する。工場排熱が水蒸気の場合は、そのまま発電側に送っても作動媒体との熱交換器に損傷を与えないので循環温水や熱交換器が不要になる。工場排熱がスチーム凝縮水の場合も、そのまま発電側に送っても熱交換器に損傷を与えないなら、循環温水を使う必要がなく熱交換器も不要になる。しかし熱源が工場排水の場合は固形分が含まれていることが多く、そのまま発電側に送ると熱交換器の伝熱面に付着する。カルシウムなどの無機物が溶解している場合も、徐々に伝熱面にスケールとなって固着する。したがって、熱源が工場排水の場合には水質基準に適合した循環温水を使用する必要がある。温泉にバイナリー発電を採用する場合も、汚れはないが鉱物が溶け込んでいる。このため、そのまま発電側に送るとスケールが固着するので、循環温水を使用する必要がある。発電側の循環温水（または水蒸気）と作動媒体との熱交換器は、コンパクト化のために多管式ではなく、プレート式が使われることが多い。同じ大きさなら多管式より伝熱面積を大きくできるからだが、それだけに固形分が付着しやすく、固着したスケールの除去が容易ではない。このため、循環温水の水質管理には十分に留意する必要がある。

工場の排熱が排水ではなく排ガスの場合は、一般的に伝熱係数が小さいので循環温水との熱交換器が大きくなり設備費が高くなる。排熱源が固体の場合は、そのままでは熱交換器が使えない。このため、窒素のような気体で固体の熱を回収する設備を、循環温水との

熱交換器の上流に設置する必要がある。このように熱源側の設備は、熱源の状態によって異なり経済性に大きな影響を与える。

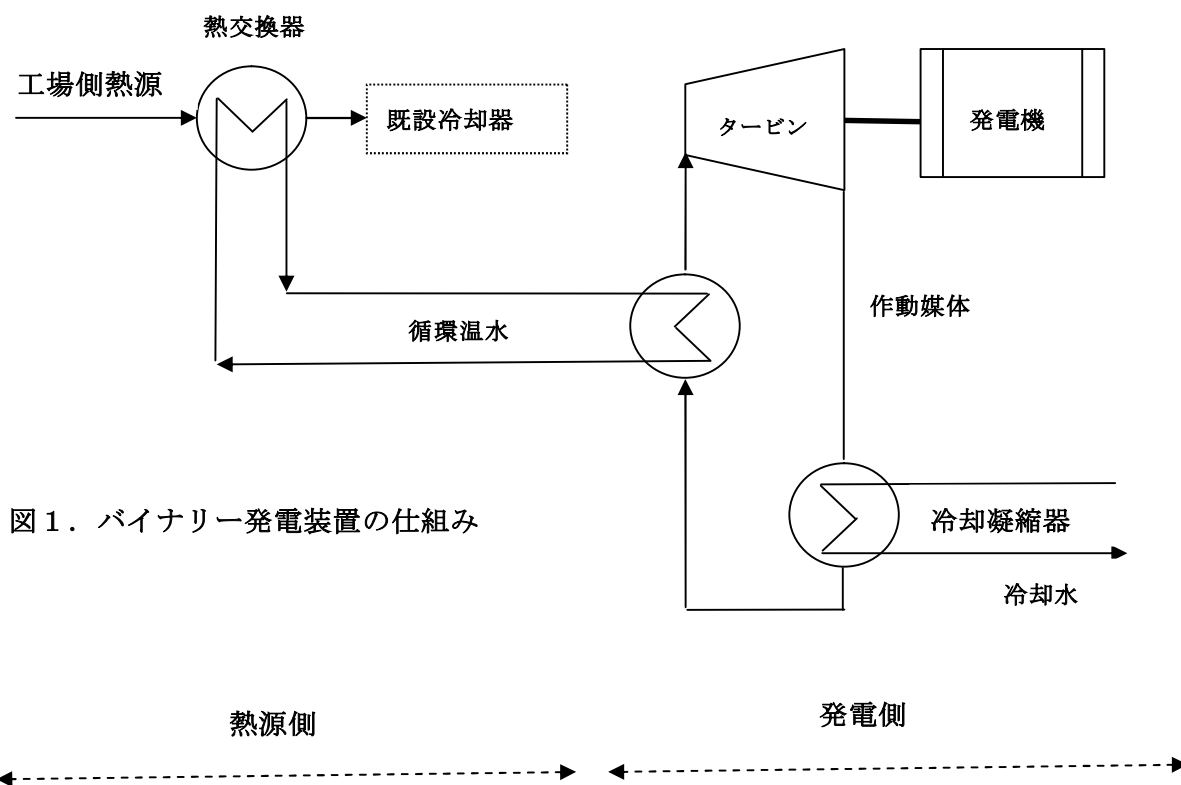


図1. バイナリー発電装置の仕組み

#### 4. バイナリー発電の作動媒体

一般的な火力発電では水が作動媒体だが、バイナリー発電ではアンモニアを作動媒体に使用することがある。しかし、強い刺激臭がある毒性物質なので取扱いに厳重な注意が必要である。炭化水素ではプロパン、ブタン、ペンタンがよく使用されるが、引火性や爆発性があるので慎重な安全対策が必要になる。毒性も引火性もない作動媒体として、フッ素化合物であるフロン類が広く使用された。フロン類は発電用だけでなく、低温で蒸発と凝縮を繰り返す冷暖房機器にも広く使われ、熱安定性と安全性から夢の化学物質と呼ばれた。フロン類は数種類に分類されるが、バイナリー発電に使われたのは、フッ素と炭素と塩素の化合物であるクロロフルオロカーボン (CFC) だった。しかしオゾン層を破壊するので、先進国ではオゾン層への影響が小さいハイドロクロロフルオロカーボン (HCFC) に代わり、現在はオゾン層に影響のないハイドロフルオロカーボン (HFC) に代替されている。

## 5. 小型バイナリー発電装置の特徴

バイナリー発電は従来から地熱発電で採用されており、発電設備はその都度、熱源の温度や必要な出力の条件から設計し製作されていた。いわばオーダーメイドの注文生産設備だったのである。一方、工場の排熱利用を想定して開発されたバイナリー発電設備は、多様な熱源の小規模需要に対応するため、カタログから選べるパッケージ製品としてラインアップされている。現在、市販されている小型パッケージ製品の特徴を下記に示す。

### 5.1 技術的な特徴

- ① 小型のタービンで出力を大きくするため、各メーカーがタービンの形状や機構に独自の工夫を加え、発電効率を高めている。
- ② 熱源に利用するのは主に 70℃から 95℃の温水。飽和水蒸気が熱源の場合は 110℃から 130℃（低圧蒸気）。
- ③ 作動媒体の凝縮には 15℃から 30℃の水道水か工業用水を使用する。作動媒体を凝縮させることで温度が上昇した冷却水は、冷水塔を設置すれば循環使用が可能。冷水塔はビルの冷房でもよく使われる装置で、塔の上部から温度の上昇した冷却水を散水し、下部から空気を吹き込んで一部を蒸発させ温度を下げる。
- ④ 標準化したので、同規模ならオーダーメイドの装置に比べて低価格を期待できる。
- ⑤ 作動媒体の蒸発器と冷却器には、多管式ではなくアルミニウムの薄板を組み合わせたプレート式熱交換器を使用しているのでコンパクト。
- ⑥ インバーターで発電機出力を制御し、熱源や負荷変動時の効率低下を抑制している。
- ⑦ 作動媒体には主に HFC245a（ハイドロフルオロカーボン）が使われている。

### 5.2 市場性の特徴

- ① 1 装置の最大能力はメーカーによるが、K 社の場合で熱源が水蒸気の場合に 125kW、温水の場合に 70kW。これより規模の大きい需要には複数装置の併設で対処できる。しかし標準ユニットなので、基数が増えると自動制御が複雑になり、スペース効率も低下する。需要規模が数百 kW 以上なら、従来のオーダーメイド設計の方が低コストでスペースを少なくできる可能性がある。一方、1 装置の最小能力は 10kW 程度まで標準化されており、多様な需要規模に対応できる。
- ② 単体での装置コストは、熱源が水蒸気で最大能力の場合に 3800 万円、熱源が温水で最大能力の場合に 2500 万円（K 社のプレスリリース）。  
[http://www.kobelco.co.jp/releases/2013/1188533\\_13519.html](http://www.kobelco.co.jp/releases/2013/1188533_13519.html)  
[http://www.kobelco.co.jp/releases/2011/09/1186618\\_12091.html](http://www.kobelco.co.jp/releases/2011/09/1186618_12091.html)
- ③ 熱源が水蒸気の場合の発電コストを前項のデータから推定すると、次のようになる。発電量は年間 300 日 24 時間稼働で 900,000kW 時/年になる。したがって、発

電装置の耐用年数を 10 年とすると kW 時あたり 4.22 円になる。一方、熱源が温水の場合も発電コストを前項のデータから推定すると、発電量は年間 300 日 24 時間稼働で 504,000kW 時/年になる。したがって、発電装置の耐用年数を 10 年とすると kW 時あたり 4.96 円になる。ただし発電装置単体コスト以外に、冷水塔を使用しないとしても、基礎工事費、電気工事費、温水（または水蒸気）と冷却水の配管工事費が必要になる。また、年に 5% 程度の保守費用が必要なため、実質コストはこれより数割は高くなるであろう。1 日 12 時間稼働の場合は、発電量が半分になるので発電単価はこの 2 倍になる。

- ④ 前項の発電コストは発電側だけで熱源側の費用は含んでいない。熱源側には循環温水が不要の場合を除けば、循環温水加熱の熱交換器とポンプが必要である。後述するように、その費用は熱源の種類と温度によって大きく異なる。配管設備は熱源とバイナリー発電装置との距離によって異なるので、個別に積算する必要がある。

## 6. 排熱の回収方法と設備

熱回収の代表的な要素技術は、図 2 に代表される多管式熱交換器である。胴の中に伝熱管が入っており、胴側と管側に別の流体を流して、低温流体が高温流体から熱を回収する。どちらの流体が与熱側でどちらが受熱側でも構わないし、液体と気体の熱交換も問題ないが固体は扱えない。伝熱管は内径が 20 ミリから 25 ミリが多く、胴の中に数十本から大規模な場合は 1000 本ぐらい挿入される。胴の長さは 1 メートルから、規模が大きければ約 6 メートルまで採用される。図 1 は固定管板方式で、胴と管が固定されているが、与熱流体と受熱流体の温度差が大きい場合は、胴の中で伝熱管が熱膨張に応じて伸縮できる形式が採用される。構造が全く同じでも、熱交換器、蒸発器、凝縮器、冷却器など利用目的で呼ばれることが多い。

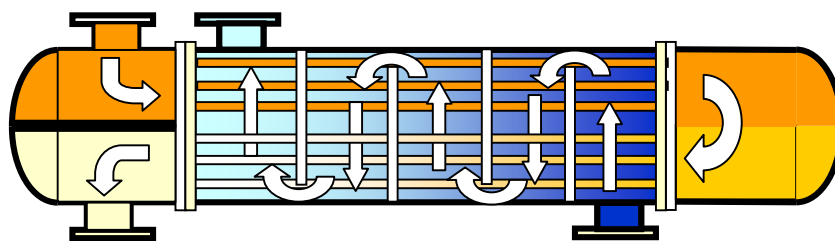


図 2. 多管式熱交換器の概略図

伝熱管の代わりにアルミニウムの薄板を組み合わせたプレート式熱交換器もある。流体を薄い板と板の間に流すので、多管式より伝熱効率がよく装置をコンパクトにできる。しかし流体に固形分が含まれていると、内部に蓄積して流路を妨げ熱交換効率が低下する。このため石油精製工場や化学工場ではあまり使われない。一方、水や飲料など汚れが少ない流体の熱交換には広く採用されている。地域熱供給でも広く使われている。

(その 2 に続く)