

# スクリュ技術が100kW級の蒸気発電を可能に

## - スクリュ式小型蒸気発電機『M.S.E.G.』による蒸気の有効利用 -

少量の蒸気でも高効率な発電ができる小型蒸気発電機が開発された。少量・低圧蒸気を電気エネルギーに転換できることから、これまで蒸気有効利用の課題だった中小規模の蒸気プラントでの活用が期待できる。開発者がその仕組みと特徴を紹介する。

松隈 正樹

(株)神戸製鋼所 機械エンジニアリングカンパニー 圧縮機事業部

上原 一浩

(株)神戸製鋼所 機械エンジニアリングカンパニー 開発センター

垣内 豊嗣

神鋼商事(株) 機械・情報本部 M.S.E.G.チーム

高田 敏則

(株)ティエルバイ マーケティング部

### 1. 蒸気有効利用の課題と蒸気タービン式発電機

蒸気の有効利用を図る上で重要なことは、蒸気を持つ熱・圧力などのエネルギーを総合的に、かつ徹底して活用することである。

しかし、実際の蒸気プラントではまだ改善余地が多く、例えば、通常、プロセス蒸気の減圧は、減圧弁や制御弁を使って単に減圧蒸気を作っているだけで、減圧時に蒸気の熱・圧力エネルギーともまだ有効に使い切れていない。また、発電を優先しているプラントでは、使い道のない蒸気が利用されないまま放出されており、木屑・産廃などの焼却ボイラでは余剰となった蒸気が廃棄されていることもある。

従来、このような蒸気減圧や余剰蒸気のエネルギーを有効利用する技術として、蒸気タービン式発電機を用いた電気エネルギーへの変換の技術があるが、主流の軸流タービン式発電機は、少量・低圧蒸気で使えるものが少なく、発電効率が低い、負荷変動にも適さないなどの理由から、大規模プラントのような蒸気量が大量かつ安定したプラントしか採算性に乗らなかった。

すなわち、これまでは少量・低圧蒸気を有効利用する効果的な解決策がなかったため、産業界で大きなシェアを占める中小規模の蒸気プラントで

は、このような課題が残されたままになっている。

したがって、このような課題を解決するために必要な技術は、

- 1) 少量・低圧の蒸気でも効率的にエネルギーを回収する技術。
- 2) 回収した動力エネルギーを発電や駆動源として活用する技術。
- 3) 発電と同時に、減圧機能によってプロセス蒸気を高精度に制御する技術。

の3つであり、これらの技術的課題を達成する必要がある。本稿で紹介するスクリュ式小型蒸気発電機はこの課題達成を実現したものである。

### 2. 次世代のスクリュ式小型蒸気発電機

『M.S.E.G. (エムエスイージー)』

中小規模のプラントでの蒸気の有効利用を図り、さらなる省エネルギー・CO<sub>2</sub>削減の促進を目的として開発されたのが、スクリュ式小型蒸気発電機『M.S.E.G. (エムエスイージー)』(以後、M.S.E.G.とする)である。『M.S.E.G.』は、日本初のオイルフリー式スクリュ・コンプレッサを開発した神戸製鋼グループが、蒸気のスぺシャリストであるティエルバイのマーケティング活動に基づき、共同開発した世界初のスクリュ式小型蒸気発電機で、少量の蒸気でも高効率な発電ができ、同時に減圧

機能によって高精度な減圧プロセス蒸気が供給できるという特長を備えている。

## 2-1 構造・原理

### (1) スクリューエキスパンダの構造

スクリュ式小型蒸気発電機の本体部の構造を図-1に、また外観を写真-1に示す。スクリュエキスパンダは、オスロータ、メスロータとケーシングで構成される空間の圧力が異なり、高压域と膨張

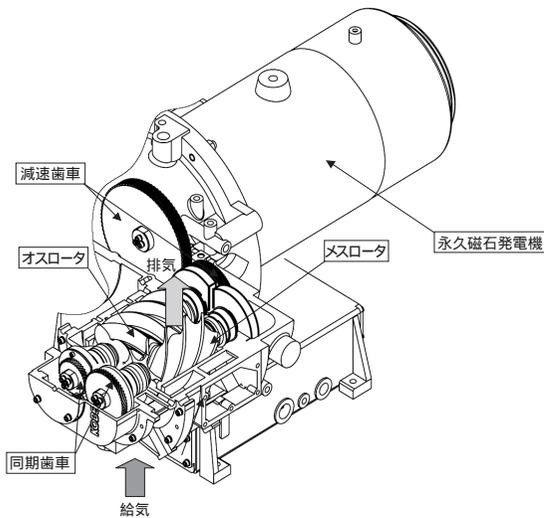


図-1 スクリュー式小型蒸気発電機『M.S.E.G.』本体構造



写真-1 スクリュー式小型蒸気発電機『M.S.E.G.』外観

後の低压域との差圧によって回転力が発生する。この差圧による回転力により、1対のオス・メスロータを互いに反対方向へ回転させ、V字形の空間容積が増大し、蒸気は膨張する。オス・メスロータを同期回転させるため、軸端には同期歯車が設けられ、ロータ同士は非接触で微小な隙間を保持して回転する。

また、スクリュエキスパンダの膨張工程を図-2に示す。回転が進むにつれて本図の給気端面のV字溝が、排気端面に向かって増大し、給気膨張排気の行程となる。また、給気圧力が排気圧力まで膨張する行程で、差圧による回転トルクによって発生する動力が、オスロータの軸端から減速機を介して発電機軸に伝達され、発電する。

### (2) スクリューエキスパンダの発生動力と発電動力

この状況を圧力-容量線図と、スクリュで形成されるV字溝空間の変化を関連付けて見ると図-3のようになる。スクリュが発生する動力 $L$ は、この圧力-容量線図の面積に等しいため、図に示す給気体積 $V_1$ 分の圧力差 $(P_1 - P_2)$ 発生動力 $L_1$ 面積、膨張行程動力 $L_2$ 面積と排気体積 $V_2$ 分の圧力差 $(P_2 - P_3)$ 発生動力 $L_3$ 面積の合計が発生動力となる。

回転式膨張機の特徴として、内部で膨張が完了

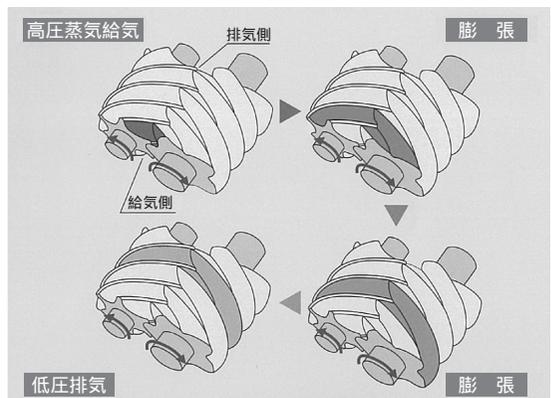


図-2 スクリューエキスパンダの膨張行程

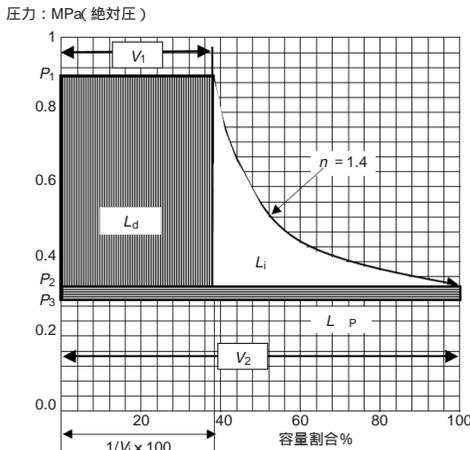


図-3 圧力-容量線図とスクリュウ溝容積

する内部排気圧力 $P_2$ は設計膨張体積比( $V_2/V_1$ )と給気圧力 $P_1$ により決定されるため、内部排気圧力 $P_2$ と排気圧力 $P_3$ とは通常一致しない。

また、スクリュエキスパンダで発生した動力 $L$ から発電機より回生電力 $L_e$ を取り出すまでには各種のロスが発生するため、個々のロスの最小化が課題となる。

スクリュエキスパンダの軸出力 $L_{se}$ はメカニカルロス、放熱ロス、流体摩擦ロスの総和 $L_m$ 分がロスとして減少するため

$$L_{se} = L - L_m$$

スクリュエキスパンダの軸出力効率  $se$  は、

$$se = L_{se} / (H_1 - H_3)$$

回生できる電力 $L_e$ は、

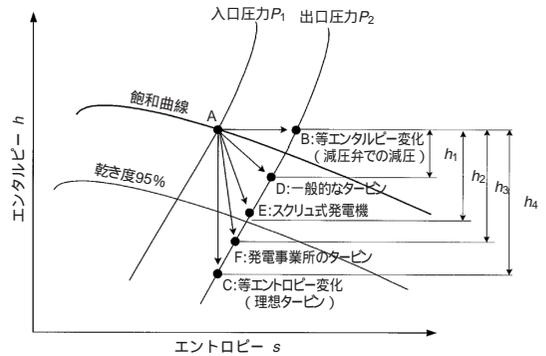


図-4 スクリュ式小型蒸気発電機とタービン式発電機のh-s線図

$$L_e = L_{se} - L_g - L_{inv} - L_{conv}$$

回生電力端効率  $e$  は

$$e = L_e / (H_1 - H_3)$$

となる。

スクリュエキスパンダ、発電事業所などの大型蒸気タービン、100~300kWクラスの一般的な軸流タービンをそれぞれ、 $h-s$ 線図で比較すると図-4のようになる。

## 2-2 スクリュ式小型蒸気発電機『M.S.E.G.』の特長

### (1) 優れた定圧制御が可能な減圧機能

蒸気プロセスで必要とする蒸気の温度(圧力)は、プロセスの負荷が変動した場合も常に一定に保つ必要があるため、通常は減圧弁または制御弁によって定圧制御する。『M.S.E.G.』は、減圧弁と同等の定圧制御性能も持つので既設の減圧弁と代替することが可能である。

### (2) 幅広い流量変動にも安定した発電性能

『M.S.E.G.』は、回転数と通過する蒸気流量がほぼ比例し、発電電力も回転数に比例する。流量変動時の最小流量が、スクリュの最大回転数の相当流量より多い場合は、常に発電電力が最大となり、また最小流量がスクリュ最大流量を下回る時には、発電機の回転数をインバータ制御してプロセス蒸気圧力が一定となるようPID制御し、流量に見合

った発電を行う。そのため、幅広い流量域に渡って常に高効率な発電が出来る。

(3) 高性能・高効率発電

50年以上にわたるドライ非接触のオイルフリー・スクリュ圧縮機の技術をベースに小型蒸気発電機に最適なスクリュ歯形を開発し、低速回転化および転がり軸受の採用で、メカニカルロスの低減を実現した。電気系の発電ロスに関しては高効率永久磁石発電機、高効率インバータ、コンバータを採用してロスの低減を図り、回生電力端効率で60%以上と、これまで100kWクラスの蒸気タービン式発電機では成しえなかった高効率を達成した。

(4) 低速・高剛性スクリュによる安定・安全運転

スクリュはタービン翼と異なり、剛体のスクリュロータを数千rpm程度の低速で回転させる。回転体としてのスクリュロータの共振回転数は常用回転数の4倍程と大きく離れており、起動、減速、回転数制御時など、あらゆる運転範囲で共振による振動が発生しない。タービン式発電機と異なり、転がり軸受によるロータの支持構造が可能でロス

が少なく、かつ安全に運転できる。

(5) 優れた耐久性のスクリュ

エロージョンは高速流体による物理的な減肉現象であり、ドレン水滴を含んだ高速蒸気流による機械的剥離力に起因する。『M.S.E.G.』は、蒸気タービンと異なり低周速でも性能を維持するスクリュの特長を生かして低速で運転するとともに、スクリュロータのステンレス化、蒸気に接するケーシング内面に耐食硬化処理を施してエロージョン対策を万全なものとしている。また、『M.S.E.G.』はロータ回転速度が遅いため、運転開始時の暖機運転も不要である。

(6) 必要機器をすべて一体化したオールインワン構造

スクリュ式小型蒸気発電機に必要な制御盤、緊急遮断装置、インバータなど必要な付属機器のすべてを写真-1のパッケージ内に装備しており、また屋外設置も可能である。

2.3 仕様

『M.S.E.G.』の発電能力を表-1に、主要諸元を表-2に示す。

表-1 M.S.E.G.発電出力表

M.S.E.G.発電出力 (圧力表示はゲージ圧で示す)		回転速度 3,600rpm 単位 = kW										
排気圧力 MPa	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05	0	
給気圧力: 給気量 MPa : kg/h												
0.95	3332	55	61	75	89							
0.90	3178	47	50	64	78	92						
0.85	3024	40	48	53	67	81	95					
0.80	2870	33	41	49	56	70	84	98				
0.75	2716	26	33	41	50	59	73	87	100			
0.70	2561	20	27	34	42	51	62	76	90	100		
0.65	2406		20	27	35	43	51	65	79	93	100	
0.60	2251			20	27	35	44	53	67	81	95	100
0.55	2095				20	28	36	46	56	70	84	98
0.50	1939					21	28	37	47	59	73	87
0.45	1782						20	28	37	48	62	76
0.40	1625							20	29	39	51	65
0.35	1467								21	30	41	54
0.30	1308									22	32	45
0.25	1148										23	35
0.20	986											25

□ 表内白色部分の領域：発電出力制御によりユニット内蔵コントロール弁で給気圧力を自動的に減圧するため、発電出力は92～100kWとなります。

表-2 M.S.E.G.標準仕様

項目	型式	M.S.E.G.100L
一次側条件(給気)	圧力(ゲージ圧)MPa	0.2~0.95
	最高温度	220
二次側圧力(排気)	(ゲージ圧)MPa	0~0.5
最大圧力差	MPa	0.6
蒸気量	kg/h	1,000~3,332
出力	kW	20~100
電圧	V	400/440
制御方式	インバータによる 二次側定圧制御	
発電方式	IPM同期発電	
寸法(幅×奥行×高さ)	mm	2,604×1,335×2,005
概略質量	kg	2,800

## 2-4 蒸気タービン式発電機との性能比較テスト結果

### (1) 発電効率

軸流蒸気タービン式発電機とスクリュ式小型蒸気発電機『M.S.E.G.』の発電効率の比較を図-5に示す。100kWクラスの小型ではタービン式発電機は発電効率が30~40%程度であるのに対して、『M.S.E.G.』は同じ蒸気流量でタービン式の1.5~2倍の発電量を得ることができる。

### (2) 流量変動時の発電能力

蒸気タービン式発電機は速度式で、蒸気流量が変動するときの制御は、蒸気量の絞りによって行われるため、流量制御の範囲は狭い。スクリュ式は、容積式で前述のように流量の変化に対しては、回転数を制御することによって容易に排気圧を一定圧力に制御することが可能で、幅広い流量範囲で高い発電効率を維持し、かつ継続して発電ができる。流量変動時の発電能力、発電可能範囲を比較したテスト結果は、図-6の通りとなる。

## 3. スクリュ式小型蒸気発電機『M.S.E.G.』の用途と効果

スクリュ式小型発電機『M.S.E.G.』により、これまで有効利用されてなかった蒸気減圧時のエネルギーや余剰蒸気を電気エネルギーとして利用す

蒸気発電機の効率比較

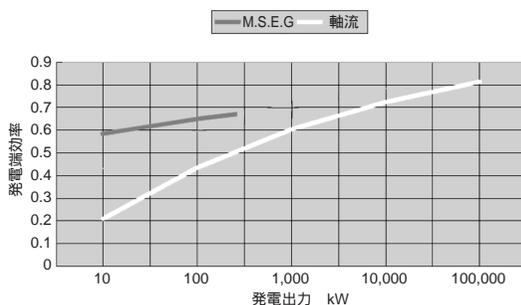


図-5 蒸気出力と発電効率

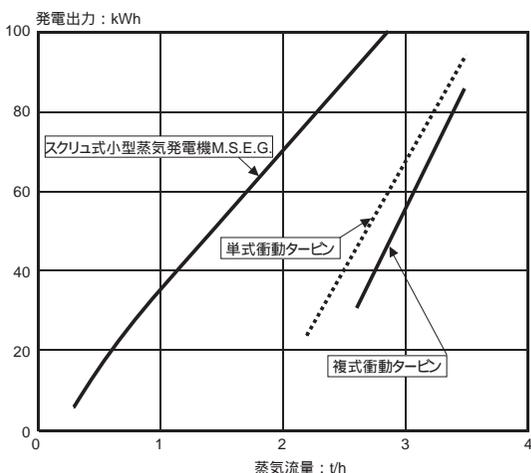


図-6 スクリュ式小型蒸気発電機と蒸気タービン式発電機

ることが可能となるので、省電力の新たな利益を生むことは言うまでもないが、CO<sub>2</sub>排出量の低減によって地球温暖化防止にも大きく貢献できる。

また、『M.S.E.G.』は、すべての機器をパッケージ内にオールインワン構造にして、設置スペースの縮小化や工事費の低減も図っている。

この章では本来ならば実際の導入事例を紹介したいところであるが、新製品のため代表的な用途と予想効果を以下に紹介する。

### 3-1 減圧弁に代わる新しい減圧・発電システム(用途A)

蒸気プラントでは、ボイラで発生した高圧の蒸気を各蒸気プロセスの操業に最適な圧力まで減圧して供給しているが、普通は減圧弁などによって

単に減圧されているだけで、減圧の際に蒸気エネルギーを有効利用するための発電は行なわれていない。『M.S.E.G.』が有効な最初の用途としては、従来の単に蒸気を減圧するだけの減圧弁に代わる「発電機能付き減圧ステーション」としての用途がある。

具体的な用途を図・7で紹介する。加熱・乾燥工程に使用されるプロセス蒸気を0.8MPa(ゲージ圧)から0.2MPa(ゲージ圧)に減圧するラインに『M.S.E.G.』を設置すれば、減圧と同時に発電ができる。

下記の運転条件で、毎時98kW発電し、年間約900万円近いメリット、ならびに年間254トンのCO<sub>2</sub>排出量削減が期待できる。

『M.S.E.G.』 蒸気入口圧力	0.8MPa
『M.S.E.G.』 蒸気出口圧力	0.2MPa
『M.S.E.G.』 通過蒸気量	2.87t/h
電気料金基本料金	1500円/kW(高圧B)
電気料金従量料金	10円/kWh
『M.S.E.G.』 発電出力	98kW
年間稼動時間	7,200時間/年
電気代メリット	8,820,000円/年
CO <sub>2</sub> 排出削減量	254t・CO <sub>2</sub> /年

ここでは、蒸気のドレン化によるボイラの追い炊きを考慮していない。

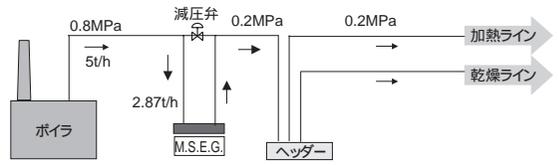
### 3-2 余剰蒸気の有効利用(用途B)

次に、プラント内で蒸気の使い道がないために余剰となっている蒸気の有効利用の例を紹介する。

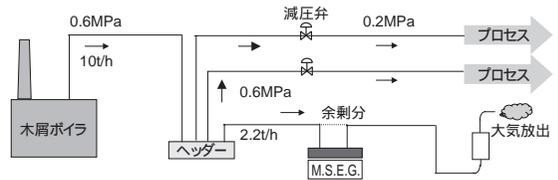
発電を優先するために発電後の蒸気が余るプラントや、木屑ボイラなどで発生した蒸気の使い道がないプラントがあり、蒸気をやむなく大気放出しているが、この蒸気で発電を行う用途である。

図・8に示す用途では、余剰となっている0.6MPa(ゲージ圧)の2.2t/hの蒸気を有効利用するために『M.S.E.G.』を設置し、発電する。

下記の条件で、毎時100kWの発電ができ、年間約500万円のメリット、ならびに年間180トンの



図・7 プロセス蒸気の減圧の用途 - A



図・8 余剰蒸気の利用の用途 - B

CO<sub>2</sub>排出量削減が期待できる。

『M.S.E.G.』 蒸気入口圧力	0.6MPa
『M.S.E.G.』 蒸気出口圧力	大気圧
『M.S.E.G.』 通過蒸気量	2.2t/h
電気料金基本料金	1500円/kW(高圧B)
電気料金従量料金	10円/kWh
『M.S.E.G.』 発電出力	100kW
年間稼動時間	5,000時間/年
電気代メリット	5,000,000円/年
CO <sub>2</sub> 排出削減量	180t・CO <sub>2</sub> /年

### 3-3 大量蒸気に対応するマルチ・システム(用途C)

対象となる蒸気量が大きい場合には、『M.S.E.G.』を複数台設置したマルチ・システムで対応することができる。複数台を設置し、台数制御を行うことにより、大量の蒸気に対して、かつ負荷の変動に応じた運転が可能となる。これは、特徴の項での説明の通り、『M.S.E.G.』が単体で回転数制御によって排気圧を一定に制御し、幅広い流量範囲で、高い発電効率を保持して発電を行うことができるためである。したがって、マルチ・システムにおいても10~100%×設置台数までリニアに負荷に追随し、大きな蒸気流量の変動を吸収することも可能となる。