

地球温暖化防止と分散型電源技術の進展

久留 正敏 (機械部門)[†]

I CO₂削減の基本的対策

1. CO₂削減目標

石炭を動力源として利用し始めた産業革命以来化石燃料消費量は急速に増加し、それに伴い大気中二酸化炭素 (CO₂) 濃度も急速に増加した。大気中 CO₂ は地表から放射される赤外線を吸収するため温室効果を有し、水蒸気、メタン、亜酸化窒素、オゾン、フロン等と共に温室効果ガスと称される。産業革命前は 280ppm 程度であった大気中 CO₂ 濃度は現在 360ppm 程度に増加し、これからの人口増加等によるエネルギー消費量増加により、その削減努力をしなければ 21 世紀中には 700ppm レベルに達し、数度 (2~5℃) の温度上昇とこれに伴う海面上昇、砂漠化や生態系への影響等地球環境への影響が懸念されている。1997 年京都で開催された COP3 (第三回気候変動枠組条約国会議) において、我が国は 2008 年~2012 年の平均 CO₂ 排出量を 1990 年比 -6% にすることが議定された。因みに、2000 年における我が国の CO₂ 排出量は 1990 年比約 8% 増で 14% の削減が必要であり (エネルギー消費量の伸び率を 1%/年としエネルギー源構成を現状通りとした場合の、2010 年の CO₂ 排出量は削減目標の約 30% 増となることが試算されている、図 1)、我が国は CO₂ 排出量削減に真剣に取り組まなければならない状況にある。

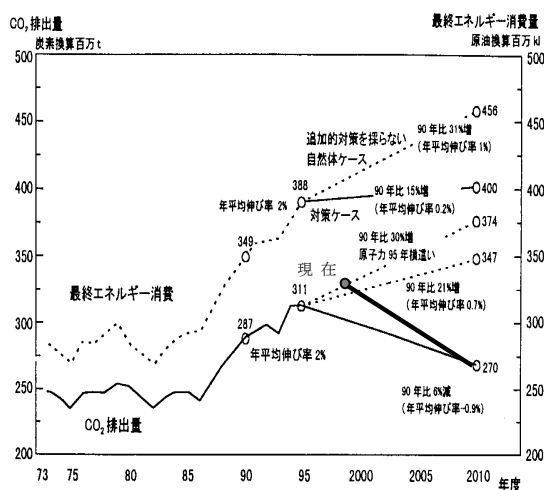


図 1 我が国の CO₂ 排出量の予測⁽¹⁾

2. 電力関連 CO₂削減対策

我が国の火力発電技術は世界最高水準にあるが、一次エネルギーの約 41%、化石燃料資源の約 30% が発電に使用されていることから火力発電に伴う CO₂ 排出量の削減対策は重要である。電力産業分野 (発電および電力消費) における CO₂ 削減の基本は化石燃料消費量を低減することであり、発電及び付随設備の建設に伴う化石燃料消費量を考慮したライフサイクルベースのエネルギー有効利用効率 (η_{LC}) を向上することであり、基本的対策は以下のとおりである。

$$\eta_{LC} = \frac{[\text{有効発電電力量 (kWh)} \times 860 \text{ (kcal/kWh)} + \text{有効熱発生量 (kcal)}]}{[\text{電力及び熱発生に消費したエネルギー量 (kcal)} + \text{設備建設に消費したエネルギー量 (kcal)}]} \times 100 \text{ (\%)} \dots\dots\dots (1)$$

(1) 電力の高効率利用および高効率発電による燃料消費量の低減

- ① 電力消費機器の高効率化、無効・無駄電力の低減
- ② 発電のエネルギー効率の向上及び送配電損失の低減
 - ・火力発電の発電効率向上
 - ・熱併給発電による熱効率向上
 - ・分散電源による送電損失低減 等

(2) CO₂ 排出を伴わない発電及び熱発生による化石燃料消費量の低減

- ① 原子力発電
- ② 再生エネルギー発電
 - ・太陽光/熱 ・風力 ・水力 ・地熱
 - ・廃棄物 (植物のリサイクル)
 - ・海洋エネルギー (海洋温度差、波浪、潮汐、海流)
 - ・その他未利用エネルギー利用 等

(3) CO₂ の固定化

- ① 自然固定化
 - ・植物による吸収 ・海洋による吸収
- ② 人為的固定化 - 燃焼ガス中 CO₂ の分離回収
 - ・EOR ・化学製品 (肥料、樹脂等) 原料 ・海洋貯留 等

3. 燃料の種類と CO₂ 発生量

火力発電はその使用燃料により大きく天然ガス、石油および石炭火力発電に分類されるが、燃料により発熱量当たりの CO₂ 発生量は相違し、更に発電効率が異なるため、単位発電電力量当たりの CO₂ 発生量は大きく相違す

表 1 燃料別発生量比較

燃料	発熱量当たりの CO ₂ 発生量比 (%)	発電電力量当たりの CO ₂ 発生量比 (%)	
		現在の高効率発電技術ベース	開発中の高効率発電技術ベース
天然ガス	60	46 (ガスタービン複合発電)	37 (燃料電池複合発電)
石油	80	80 (蒸気タービン発電)	53 (同上)
石炭	100 (約 360gr/10 ³ kcal)	100 (同上) : ベース (約 780gr/kWh)	74 (同上)

[†] 久留技術士事務所長、工学博士
E-mail : mhisatome@yahoo.co.jp
Tel : 045-955-4920

る。表 1 に各燃料の発熱量当たりの発生量及び発電電力量当たりの CO₂ 発生量の比較を示す。燃料中の炭素量の少ない燃料程また高効率発電程 CO₂ 発生量は少なく、天然ガスを燃料とするガスタービン複合発電の発電電力量

当りの CO₂ 発生量は石炭火力発電の半分以下である。このように、石炭火力発電により発生する CO₂ が最も多いが、石炭は埋蔵量が最も豊富であり（石油約 40 年、天然ガス約 70 年に対し石炭約 230 年）、世界各地で産出され取扱いが容易な燃料であるので、途上国等においては最も重要なエネルギー源として今後人口の増加とともに消費量が急速に増加することが予想される。

4. 分散型電源

(1) 分散型電源の特徴

分散型電源とは従来電力会社により建設されてきた電力事業用の大容量発電所（集中電源、Central Power Station）に対し、電力消費地またはその近傍に建設される発電設備をいい、容量は地域供給用や産業用の数万 kW のものから家庭用の数 kW にわたる。通常電力消費地には蒸気または温水等の熱需要があるので、これらを同時に供給する熱併給発電（コージェネレーション）を行うものが多い。分散型電源の基本的特徴は以下のとおりである。

- ①エネルギー利用効率が高い
- ②発電効率が高い
- ③環境負荷が低い
- ④送電設備が不要である
- ⑤送電損失が無い
- ⑥冷却水が不要である
- ⑦設備の立地が容易である
- ⑧フレキシブル運用に適している
- ⑨運転が容易である

(2) 分散型電源設置の目的

通常分散電源は下記の目的で建設される。

- ①電力および熱（蒸気/温水）の低コスト供給
- ②発電能力の確保、低コスト発電
- ③送電設備の負荷軽減
- ④燃料資源の節約と CO₂ 削減

(3) 分散型電源技術の進歩⁽²⁾

①分散型電源技術の進歩

ガスタービン、ディーゼルエンジン、ガスエンジン等の中小容量熱機関の効率向上が図られ、発電効率が大容量発電プラントと同水準に達するとともに設備費も低下し経済性が向上した。また、吸収式冷暖房装置等による熱需要の増加により、エネルギーの利用効率が高く経済性が大きく向上する熱併給発電の需要が増加した。

次世代の発電技術と言われる燃料電池は実用化に近い開発段階（りん酸型は商用化されている）にあるが、特に高温型は複合発電に適し 70% を超える高い発電効率達成が可能であることから早期実用化に大きな期待が寄せられている。表 2 に主な分散型電源適応機種種の単機容量と発電効率の目安を示す。発電効率は単機容量や燃料性状等の運転条件により変動する。

太陽光発電や風力発電等の再生エネルギー発電は、技術の進歩と導入量の増加により設備費は低下しつつあり、国の導入支援もあって経済性が得られるようになりつつある。

②パワーエレクトロニクス技術の進歩

分散型電源には、例えばマイクロタービンのような 10 万 rpm に及ぶ超高速回転の熱機関や燃料電池のような直流発電等あり、これらの電源による発生電力を規定周波数および電圧の交流に変換して系統に供給しなければならない。近年コンバーターおよびインバーター等のパワーエレクトロニクス技術が進歩し変換損失が低減され良質の交流への変換が容易になった。

③通信・制御技術の進歩

通信・制御技術 (IT) の進歩により、発電装置の遠隔監視や運転制御が容易になり、複数の分散電源を合理的に一括運転管理することも可能であり、運転経費の低減が可能になった。

表 2 分散型電源適応機種種の基本的特徴

機種	単機出力 kW	発電効率 (送電端 LHV 基準%)	備考
(1) 熱機関			
ガスタービン	1~50,000 (~350,000)	25~40	燃料として都市ガス、LNG、灯油/軽油、A 重油等が用いられ、環境性は相対的に良好である。NO _x は都市ガスまたは LNG を使用するガスタービンが最も少なく、重油を燃料とするディーゼルエンジンが最も多いが、脱硝装置により低減が可能である。
ガスエンジン	1~6,000	25~42	
ディーゼルエンジン	10~15,000 (~70,000)	25~44	
(2) 燃料電池			
りん酸型 (PAFC)	1~10,000	30~40	都市ガスや LNG を燃料とし、カルノーサイクルの制限を受けない直接発電であり、発電効率は容量の大小に殆ど無関係に高く、環境汚染物質の排出量が少ない。実用化されている PAFC 以外の燃料電池は至近年の実用化が予想される。特に高温型は内部改質機能を有し、ガスタービンとの複合化により 70% 以上の高効率を得られる究極の化石燃料発電装置である。
溶融炭酸塩型 (MCFC)	1~100,000	35~45 (内部改質) (GT 複合 50~65)	
固体高分子型 (PEFC)	1~10,000	30~40	
固体電解質型 (SOFC)	1~100,000	40~50 (内部改質) (GT 複合 55~70)	

(5) 分散型発電事業の環境改善

分散型電源は集中型電源に付随する問題の改善策になり、発電原価の低減と燃料資源の節約および CO₂ 削減に有効なことが期待されることから、政府はその導入促進を図るため電気事業法およびガス事業法の規制緩和を進めると共に、熱供給事業法の廃止を検討中である。

III. 分散型電源用熱機関

分散型電源に適合する機種は大きく 1. 熱機関 2. 燃料電池 3. 再生エネルギー発電装置 4. 都市型電力貯蔵装置に分類することができるが、ここでは①大容量ガスタービン ②高圧力比ガスタービン ③二流体タービン ④マイクロタービン ⑤ディーゼルエンジン ⑥ガスエンジン ⑦ミラーサイクルガスエンジン ⑧CO₂ 回収型発電等の分散型電源適応熱機関の概要を述べる。

1. 大容量高温ガスタービン

(1) 特徴

① 複合化による高効率発電

複合発電プラント(コンバインドサイクル)を構成することにより、約58%(LHV基準)の高い発電効率が得られ、天然ガス等を燃料とする高効率大容量発電プラントに最も適した機種である。世界で初めて1500℃級の高温化を実現した三菱701G型ガスタービンを例に述べる。現在、

燃焼器のみならず高温翼も冷却媒体を蒸気とする蒸気冷却式のH型ガスタービンが開発され、60%におよぶ複合発電プラント効率の達成が可能になっている。

② 熱併給発電に対する適性

単体(シンプルサイクル)の発電効率も高く、NOx発生量が少なく(25ppm以下)、高温蒸気(~600℃)の供給ができるので、高効率発電プラントとしてのみならず大容量熱併給発電プラントにも高い適応性を有している。

表3 三菱701G型ガスタービンの出力および発電効率^{(3),(4)}

プラント形式	発電容量 MW	発電効率	
		LHV基準 %	熱効率 LHV基準 %
ガスタービンシンプルサイクル	334	38.7	38.7
ガスタービン+排熱回収	334	38.7	熱併給発電: ~85
複合発電プラント	454	58.0	58.0
複合発電+排熱回収	~454	~58.0	熱併給発電: ~85

③ 高効率

ガスタービンの効率 η_{GT} は次式で表される。

$$\eta_{GT} = \frac{(\tau \eta_c \eta_T - \phi)(1 - \phi^{-1})}{(\tau \eta_c - \phi + 1 - \eta_c)} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、最高最低温度比 $\tau = T_3/T_1$
 断熱膨張温度比 $\phi = T_3/T_4' = \phi^{(\kappa-1)/\kappa}$
 圧力比 $\phi = P_2/P_1$ 、比熱比 $\kappa = Cp/Cv$
 η_c : 圧縮機効率、 η_T : タービン効率、
 P_1 : 圧縮機入口圧力、 P_2 : 圧縮機出口圧力、
 T_1 : 圧縮機入口温度、 T_3 : タービン入口温度、
 T_4' : タービン出口温度(断熱膨張における)

上式において、比熱比 κ (正確にはガス組成や温度により変化する)、機械効率(圧縮機効率 η_c およびタービン効率 η_T)を一定とすれば、ガスタービン効率は最高最低温度比 τ および圧力比 ϕ の関数である断熱膨張温度比 ϕ に依存することが分る。

・タービン入口温度の上昇

一方凝固耐熱合金(DS)等の高温翼材料、遮熱コーティング(TBC)や精密鋳造による内部構造改良による翼冷却機能の向上、および蒸気冷却式低NOx燃焼器の開発等により、冷却空気量の増加を必要とすることなくタービン入口温度 T_3 の高温化(~1500℃)を実現した。特にコンバインドサイクルでは、ガスタービン排ガス温度が高い程ボトムサイクルの蒸気条件を上げ、効率向上を図ることもできるので、タービン入口温度の上昇はサイクル効率向上に最も効果的である。コンバインドサイクルのTS線図を図2に示す。

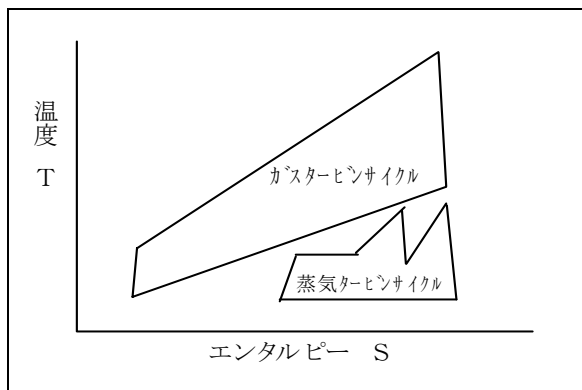


図2 ガスタービンコンバインドサイクルのTS線図

・高圧力比化

ガスタービンの理論サイクル(プレートンサイクル)効率 η_{BC} は、上式において $\eta_c = \eta_T = 1$ であるので次式で表される。すなわち圧力比 ϕ の関数であり、圧力比の増加に伴い効率 η_{BC} は増加する。

$$\eta_{BC} = 1 - 1/\phi^{(\kappa-1)/\kappa} \dots \dots \dots (3)$$

特にシンプルサイクルでは圧力比が効率を左右するが、コンバインドサイクルではボトムサイクルとのマッチングの観点から適正な圧力比が存在する。

・翼の高性能化

圧縮機およびタービンの翼は、三次元翼設計等の最新空力設計技術および製造技術の向上により高性能化が図られている。

・ボトムサイクルの高性能化

ガスタービン排気温度の上昇に対応し、ボトムサイクルの蒸気条件を適正化して複合プラントの効率向上が図られている。

(2) 基本構造

三菱701G型ガスタービンの基本的仕様は以下のとおりである。

- ・圧縮機 : MCA翼(Multi-curved airfoil)およびCDA翼(Controlled diffusion airfoil)17段軸流式
- ・タービン : 完全三次元翼4段軸流式
- ・燃焼器 : 蒸気冷却蒸気回収式低NOx型

2. 高圧力比ガスタービン

(1) 特徴

① シンプルサイクルの発電効率が低い

ガスタービンシンプルサイクルの発電効率 η_{GT} は(1)式で表される。ここで、空気および燃焼ガスの比熱比 $\kappa_c = 1.4$ 、 $\kappa_T = 1.32$ 、圧縮機効率 $\eta_c = 0.9$ 、タービン効率 $\eta_T = 0.93$ とした場合の圧力比およびタービン入口温度をパラメータとしたガスタービン効率の特性例を図3に示す。シンプルサイクルではタービン入口温度上昇と共に圧力比を上げることが効率向上に効果的である。

② 航空用ガスタービンの転用^{(5),(6)}

航空用ガスタービンには高圧低圧の同心2軸または高圧中圧低圧の同心3軸で構成され高圧力比(~45)のものが、これらを発電用に改造した航空転用型ガスタービンの効率はシンプルサイクルで高効率が得られることから、近年陸用、特に分散型電源に転用されている。航

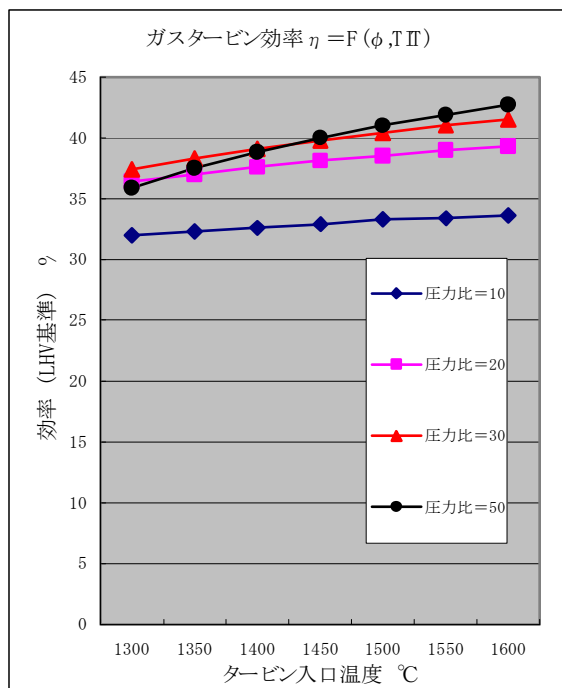


図3 ガスタービンシンプルサイクルの効率特性例

空転用型ガスタービンの基本的特徴は以下のとおりである。

- ・圧力比が高く、シンプルサイクルで40%を上回る高効率を得られるものがある。
- ・圧縮機注水または燃焼器蒸気投入による出力増加および効率向上が可能である。
- ・軽量コンパクトで据付けが容易である。
- ・起動および負荷変化追従性が優れフレキシブル運用に適する。
- ・ヘビーデューティ(発電用)に比べ高頻度の保守が必要とされる。

3. 二流体タービン

(1) プラントシステム

① プラントの構成

シンプルサイクルで複合発電プラントと同等レベルの発電効率および出力を得ることを基本目的とするガスタービン発電方式であり、ガスタービンとその排熱により燃焼器投入蒸気を発生する排熱回収ボイラまたは水噴霧した圧縮空気を加熱する再生熱交換器で構成される。

タービン駆動流体が燃焼ガスと蒸気であることから二流体タービン(DFT: Dual Fluid Turbine) または、燃焼器導入前の圧縮機空気に水または温水噴霧の方式ではHATタービン(HAT: Humid Air Turbine)⁽⁷⁾、あるいは燃焼器投入蒸気量を調整することにより電気出力と熱出力の調整が可能であることから熱電可変タービンとも呼称される。

大量の温水(または蒸気)を投入する場合は、ヒューミディファイア(加湿装置)を圧縮機出口に設置し、燃焼器投入前または再生熱交換器導入前に一様混合流体にする。空気量が相対的に少なくなるので圧縮機はサージング対策、タービンは流量およびエンタルピー増加による段あたり仕事量の増加に対応する強度が必要である。図4に中間冷却二流体タービンプラントのシステム例^{(8), (9)}を示す。

② ガスタービンの設計

燃焼器およびタービンは、圧縮空気と一定量(～全量)の

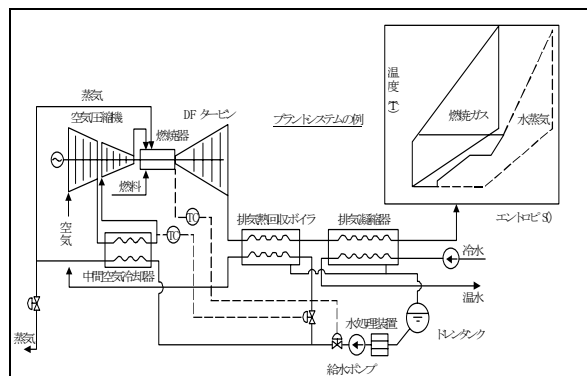


図4 中間冷却二流体タービンシステムの例

排熱回収ボイラ発生蒸気、または噴霧水含有圧縮空気を投入できるように設計される。通常ガスタービンに比べると、相対的にタービンの出力が大きい(タービンは複合発電プラントにおける蒸気タービンの機能を兼ねる格好である)。したがって、高圧力比の設計ではガスタービン複合発電と同等の出力および効率を発揮することが可能である。蒸気の比熱は燃焼ガスの比熱より大きいので、効率向上には圧力比(膨張比)を高くすることが必要である。

③ 熱電可変運転

系外へ熱供給(蒸気または温水)が必要な時は、燃焼器に投入する蒸気量または圧縮空気投入噴霧水量を減らす(すなわち発電量を減らす)ことにより、系外に供給する熱(蒸気または温水)を増加することができる。このように電力と熱出力の調整が可能であることから“熱電可変タービン”とも呼称される。

(2) 特徴

① 電気出力の増加と発電効率の向上

排熱回収ボイラによる発生蒸気、または再生熱交換器により加熱された湿り空気を燃焼器に投入し高温作動流体にすることにより、圧縮機動力が相対的に減少し(タービン駆動流体の燃焼ガスから蒸気への置換)出力および効率の向上が可能である。ここで、蒸気の比熱は燃焼ガスより小さく、比熱は大きいので圧力比の高いガスタービンほど有利であり、例えば航空転用型ガスタービンは相対的に高圧力比であることから二流体タービン(HAT/熱電可変タービン)に対し適性が高い。(例: GE社 LM6000 SPRINT では注水式中間冷却を行い、出力増加のみならず効率向上を達成している⁽⁶⁾)。圧力比の増加と燃焼温度の上昇または再熱サイクルの適用等により効率および出力は複合サイクルに近づく。

② 熱電可変運転

熱(蒸気または温水)需要に応じ、投入蒸気量を調整し系外に供給するフレキシブル運転が可能であり、熱需要の変動に対しても高効率の熱併給発電を行うことができる。

③ 低NOx性能

燃焼器に大量の蒸気投入が行われるので、NOx発生量は少なく10ppm以下が可能であるとされる。

④ 圧縮機とタービンのバランス

従来型発電用ガスタービンと比較すると、相対的に風量が減少しタービン負荷(出力)が増加するので、圧縮機はより少風量で高圧力比、タービンはより高負荷に耐える設計が必要である。

⑤ 従来型ガスタービン適用における制限

現在、熱電可変ガスタービンとして運転されているものは、従来型または航空用ガスタービンを用い投入蒸気

量をタービンの許容できる範囲とし、圧縮機の改造や圧縮空気の一部放出による空気量の減少によりサージング発生を防止すると共に圧縮機とタービンのバランスを図っており、シンプルサイクルからの出力増加および効率向上は少ない。

4. マイクロタービン

(1) 特徴

①小容量の熱併給分散型電源用熱機関である⁽¹⁰⁾

ガスタービンの理論サイクル効率 η は、(3)式で表されるように圧力比 $\phi = P_2/P_1$ に左右される。マイクロタービンは圧力比 ϕ が低く(3~5)単体では発電効率が低いので、再生熱交換器を設置して効率向上を図るが、更に排熱の有効利用が経済性向上の観点から重要である。例えば、現在実用化されている高性能機で圧力比 4、タービン入口温度 900℃、再生熱交換器出口温度 250~300℃、発電効率約 30% (LHV 送電端基準)である。しかし大容量機に比べれば発電効率が低く排熱の有効利用が経済性向上の観点から必要である。

圧力比および再生サイクルと効率の関係例を表 4 に示す。

表 4 ガスタービン効率と圧力比の関係

圧力比	効率 (LHV 基準)
30	40%とすると
4	シンプルサイクル効率：約 17% (機械効率が低いので更に低い~15%) 再生サイクル効率：約 30%

また、再生式ガスタービンの概略効率 η_{RC} は次式で概算することができる。

$$\eta_{RC} \doteq (\tau \eta_c \eta_T - \phi) (1 - \phi^{-1}) / \{ (1 - \eta_{RH}) \times (\tau \eta_c + 1 - \eta_c - \phi) + \tau \eta_c \eta_T \eta_{RH} \times (1 - \phi^{-1}) \} \dots (4)$$

ここに、

最高最低温度比 $\tau =$ タービン入口温度 (°K) / 大気温度 (°K)

断熱圧縮温度比 $\phi = \phi^{(\kappa-1)/\kappa}$

圧力比 $\phi =$ 圧縮機出口圧力 / 大気圧力

比熱比 $\kappa = C_p/C_v$ 、 C_p 、 C_v はそれぞれ定圧比熱、定容比熱、 η_c 、 η_T 、 η_{RH} はそれぞれ圧縮機効率、タービン効率および再生熱交換器温度効率を示す。

図 5 に再生熱交換器温度効率と再生式マイクロタービン効率の関係例を示す。

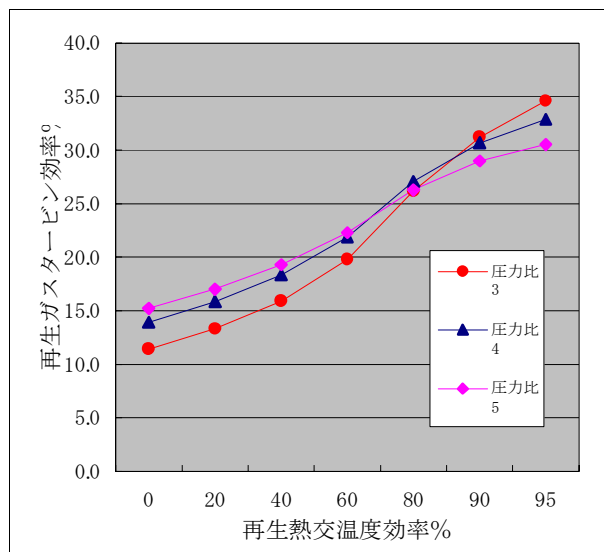


図 5 再生熱交換器温度効率と再生式 MGT 効率特性

②環境性が優れる

クリーンな燃料を使用し比較的低温 (~900℃) 燃焼するので、NOx、SOx、煤塵および HC 等を殆ど排出しない。

③高速回転熱機関である

高速回転 (~10 万 rpm) するので永久磁石同期発電機を装備し、パワーエレクトロニクス (コンバータ・インバータ) により周波数、電圧および力率調整等を行い送電する。

④軽量コンパクトで据付けが容易である。

⑤フレキシブル運転 (例：昼間運転、夜間停止のツーシフト運転) が可能であり、ピークシェイプ運転に適する。

⑥実用化段階にある分散電源用機種である。

(2) 構造⁽¹⁰⁾

①簡素な構造

発電機、圧縮機およびタービン一軸構造である。圧縮機およびタービンはそれぞれ遠心式 1 段無冷却翼で構成されシンプルである。

②燃焼器

単筒方式またはアニューラー方式が用いられる。

③軸受

従来型の油潤滑軸受と空気軸受方式があるが、空気軸受は油潤滑や水冷却を廃止し保守が容易である。但し、長期使用における信頼性の確認が必要とされる。

④小型軽量化

発電機ロータには永久磁石が用いられ装置の簡潔化とコンパクト化が図られている。

⑤再生方式による効率向上

一般に再生熱交換器を内蔵して効率向上を図っている。単体の効率は約 15% 程度であるが再生式にすることにより約 30% の効率を達成することができる。

5. ディーゼルエンジン

(1) 特徴

①4 サイクルディーゼルサイクル

熱力学的にはディーゼルサイクル (サバテサイクルに近い) を作動原理としている。オットーサイクルを作動原理とするガスエンジンに比べ圧縮比を高くできるのでより高い効率を得ることができる。

②効率

ディーゼルサイクル (定圧加熱) の機関効率 η_{DC} は(5)式で表される。

$$\eta_{DC} \doteq 1 - (\epsilon^{\kappa} - 1) / \{ \Phi^{(\kappa-1)} \kappa (\epsilon - 1) \} \dots (5)$$

ここに、

圧縮比 $\Phi = V_1/V_2$

噴射縮切り比 $\epsilon = V_3/V_2$

比熱比 $\kappa = C_p/C_v$

V_1 、 V_2 : それぞれ圧縮前 (膨張後)、圧縮後のシリンダー容積

V_3 : 燃料噴射終了時のシリンダー容積

C_p 、 C_v : それぞれ定圧、定容比熱 である。

(5)式から分かるように、効率は圧縮比 Φ の増加、噴射縮切り比の減少(1、すなわちオットーサイクルに近づく程)により上昇する。オットーサイクルと比較すると、同一圧縮比であれば効率は低くなるが、予混合気を圧縮するオットーサイクルよりノッキング限界が高く、圧縮比を高くすることによりより高い効率を得ることができる。発電用 4 サイクルディーゼルエンジンの代表的な三菱 KU ディーゼルエンジンでは、このクラスで世界最高の発電効率約 48% (LHV 発電端基準) が達成されている。^{(11), (12)}

③NOx 発生量

ディーゼルエンジンのNOx発生量は熱機関の中では最も多いが、三菱KUディーゼルエンジンでは燃料・水層状噴射法の開発により、NOx発生量の半減(450ppm以下)が可能になっている。また、脱硝装置の適用により必要レベルに低減することができる。

(2) 代表的例

代表的例として三菱 KU ディーゼルエンジンの主要仕様を以下に示す。

形式	: 4 サイクル
過給方式	: 排気過給(静圧過給)
出力	: 3, 750kW(12KU30 型) ~15, 400kW(18KU44 型)
効率(LHV 発電端基準)	: ~48%
NOx(水噴射しない場合)	: 950~1200ppm(13%O ₂ 換算)

6. ガスエンジン

(1) 特徴^{(13), (14)}

①希薄予混合燃焼 4 サイクルエンジン

従来ガスエンジンの空気比は理論空気比に近い低空気比燃焼が主流であったが、副燃焼室式パイロット点火希薄燃焼方式(空気比>2)が実用化された。この方式の代表的な例である三菱 MACH30G ガスエンジンを例に述べる。

②高効率

三菱 MACH30G ガスエンジンではディーゼルエンジンとほぼ同等レベルの約 43%(LHV 基準発電端)の高い発電効率が達成されているが、これは以下の改良によるものである。

- ・副燃焼室式パイロット点火による着火改善、コモンレール方式の適用による各シリンダーパイロット燃料噴射の最適化
- ・各シリンダー主燃焼室燃料噴射の最適化
- ・ノッキング回避制御および過給機性能の向上等による平均有効圧力の上昇および可変ガイドベーン過給機による空気比制御 等の効果によるものである。

③低 NOx 性能

NOx 発生量は理論空気比近傍で高く、空気比の増加と共に低減する。空気比 2 以上の希薄予混合気の安定燃焼の実現により、100ppm(O₂=0%換算)以下の低 NOx 燃焼が実現されている。

④高効率熱併給発電

エンジン冷却水による温水と排熱回収装置による蒸気が得られるので、発電効率の高い高熱効率の熱併給プラントを構成することができる。

(2) 高効率低 NOx 燃焼技術

①圧力比上昇による理論効率の向上

オットーサイクルの理論効率 η_{oc} は(6)式で表される。

$$\eta_{oc} = 1 - 1/\Phi^{(\kappa-1)} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$\Phi = V_1/V_2$$

V_1, V_2 : それぞれ膨張後(圧縮前)、膨張前(圧縮後)のシリンダー容積

κ : 燃焼ガスの比熱比

効率は圧縮比 Φ の増加により上昇するが、圧縮比を上げるとノッキングを生じるので圧縮比上昇には限界がある。従って空気増加による比熱比 κ を大きくし、急速着火燃焼による圧力比 ξ (=燃焼後の圧力 P_3 /燃焼前の圧力 P_2) を上げ平均有効圧力を増加することが有効である。

このガスエンジンでは前記のとおり、副燃焼室式パイロット着火方式の開発、燃料噴射系およびガス供給シ

テムの改良、ノッキング監視・防止制御および可変ガイドベーン過給機の開発等により、全負荷域に亘り平均有効圧力の上昇による高効率を達成している。

②希薄予混合燃焼による NOx および燃費の低減

NOx 発生量は理論空気比近傍(空気比 $\mu = 1.0 \sim 1.1$)で最大になり、空気比増加に伴い減少する。このガスエンジンでは上記のとおり空気比 2 以上の希薄予混合燃焼を実現により低 NOx と高効率を達成している。

③空気比の最適制御

可変ガイドベーン過給機および電子燃焼制御により最適空気比制御を実現している。

④点火方式の改善

電気着火方式から液体燃料を使用したパイロット着火方式に変え、信頼性の高い希薄予混合燃焼を実現している。

⑤過給機出口空気の冷却

空気冷却器を設けて、過給機出口空気温度を下げ空気温度上昇による NOx 発生量の増加を防止している。

(3) ガスエンジンの仕様例(三菱 MACH30G 型)

形式	: 4 サイクル
燃焼	: 希薄予混合燃焼
過給方式	: 排気過給
出力	: 3, 650kW(12MACH30G) ~5, 750kW(18MACH30G)
平均有効圧力	: 約 2MPa
効率(LHV 基準発電端)	: 42.5%
NOx	: 100ppm 以下

7. ミラーサイクルガスエンジン

(1) 特徴^{(15), (16)}

①希薄予混合燃焼ミラーサイクルの実現

中小容量のガスエンジンとしては世界最高効率を達成している三菱ミラーサイクルガスエンジンは、希薄予混合燃焼ガスエンジンにミラーサイクルを適用し、電気着火副燃焼室式トーチの採用、燃焼室形状、吸気スワールおよび電子制御による空気比の最適化等により燃焼を改善し、過給機を高機能化して発電効率 40%(LHV 基準)を達成している。以下三菱ミラーサイクルエンジンを例に述べる。

②高効率熱併給発電

エンジン冷却水による温水と排熱回収装置による蒸気が得られるので、高効率発電の熱併給分散型電源に適している。

③低 NOx 性能

NOx は約 150ppm(O₂=0%換算、簡易脱硝使用)以下であり、脱硝装置の機能強化により任意のレベルに低減することは可能である。

(2) ミラーサイクルの原理

①オットーサイクルの機関効率

ミラーサイクルもオットーサイクルがベースでありその理論効率 η_{mc} は次式で表される。

$$\eta_{mc} = 1 - 1/\Phi^{(\kappa-1)} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、圧縮比 $\Phi = V_1/V_2$ 、 V_1, V_2 はそれぞれ圧縮前および圧縮後の容積、 κ は比熱比を示す。

②圧縮比の減少、膨張比の増加

理論効率は圧縮比の増加により上昇するが、圧縮比を上げるとノッキングの発生によりシリンダー内温度および圧力の急上昇が起こり損傷を招く。ミラーサイクルは吸気弁の閉じ時期を下死点からずらすことにより、実質の圧縮比を抑え膨張比を大きくすることにより高効率化

を図る方式である。ミラーサイクルではピストンの下死点を過ぎて(または前で)吸気弁を閉めるので、膨張比 Φ' > 圧縮比 Φ となり、理論効率は上式において $\Phi \approx \Phi'$ となる。

(3) 代表的エンジンの仕様例

(三菱ミラーサイクルエンジン)

三菱ミラーサイクルの仕様を示す。

形式	: 4 サイクルエンジン
過給方式	: 排気過給
燃焼方式	: 希薄予混合燃焼
出力	: 280kW (SPG - M280) ~1, 015kW (SGP - M1, 015)
膨張比	: 15
実圧縮比	: 11
効率(LHV 基準発電端)	: 40%
NOx(簡易脱硝後)	: 150ppm 以下

8. 廃棄物、バイオマス利用発電^{(17), (18)}

廃棄物やバイオマスは再生エネルギー資源であり、これらを燃料とする発電は通常再生エネルギー発電に分類され、発電設備は熱機関が用いられている。

(1) 廃棄物発電

廃棄物発電はサーマルリサイクル(保有エネルギーの回収)、マテリアルリサイクル(含有有用物質の回収および残渣のスラッグ化)および減容化等の観点から重要である。廃棄物は産業廃棄物と一般廃棄物に分かれるが雑多な物質の混合物であり、高低温腐食成分、重金属、ハロゲン化合物を含んでおり、燃焼によりボイラの高低温腐食、ダイオキシン、SO_x、NO_x、HCL等の環境汚染物質を発生するので、ボイラの高低温腐食対策や環境対策が重要である。一般にボイラ-蒸気タービンを主機とするので、前述の分散型電源に比し従来型集中電源に類似している。近年ダイオキシンや重金属等の有害物質の排出規制強化やサーマルおよびマテリアルリサイクル重視の観点から、ガス化溶融方式の採用が増加している。廃棄物発電に適用される主なプラント形式について述べる。

① ストーカーボイラ

従来からごみ焼却炉として用いられてきたストーカーボイラは、高温腐食防止のため約 3MPa×300℃レベルの発電用に比べればかなり低い蒸気条件が採用され、そのため発電効率は一般に 15%以下と低かったが、近年耐食性材料の開発や高温伝熱面配置の改善、或いは循環流動層ボイラの適用により蒸気条件を上げて(例えば 10MPa×500℃)、効率向上(目標効率: 30%)を図る実証研究が行われた。

② スーパーごみ発電

廃棄物燃焼ボイラは高温腐食防止のため蒸気条件の上昇が困難であるので、ガスタービンを併設してボイラで発生した低温蒸気をガスタービンの排ガスで加熱し、蒸気温度を上げ効率向上を図るスーパーごみ発電(ガスタービンとの複合発電)が実用化され、25%以上の効率が達成されている。

③ ガス化溶融炉

ダイオキシン排出規制強化および灰の減容・有効利用の観点から、近年ガス化溶融炉方式の導入が増加している。幾つかの形式があるが、低温還元雰囲気中でガス化する分解炉、発生した熱分解ガス等を燃料として有用金属回収残渣を高温で溶融燃焼する溶融炉および廃熱ボイラより構成される。近年注目を集めている直接ガス化溶融燃焼炉(シャフト炉)は、溶鉱炉の技術を応用しガス化分解炉と溶融燃焼炉を一体化した格好である。溶融燃焼炉

は 1200~1300℃の高温燃焼するのでダイオキシンの発生量が少なく、重金属回収後の灰は有害物質の溶出しにくいガラス質の粒状となり建材として有効利用される。

(2) バイオマス発電

バイオマスは資源量の豊富な再生エネルギーであり、特にエネルギー資源の乏しい我が国では発電用燃料として有効利用することが期待されている。現在は石炭燃焼ボイラや廃棄物燃焼ボイラにおける木質系バイオマスの混焼や発酵ガスが利用されている程度であるが、ガス化、合成ガスからのメタノール等の液体燃料製造、微生物や超臨界圧流体を用いたエタノールやメタノール製造技術等の高品位燃料製造技術の開発が進められている。これらの技術が実用化されればバイオマスも分散型電源に適した燃料となる。

9. CO₂回収型発電^{(19), (20)}

(1) CO₂回収発電の必要性

我が国は 2010 年までに CO₂ 排出量を 1990 年比 -6% に削減することを公約しており、その達成に官民協力して全力で取り組むことが必要である。特に当初 CO₂ 排出量削減に大きく貢献する原子力発電プラントの新規建設を約 20 基予定していたが、諸事情により大幅に減少せざるを得ない見通しであり(現在 9 基予定)、また既設原子力発電プラントの保守点検に関する不備等もあって、既設原子力発電の運用にも障害が出つつあり原子力発電量の減少が懸念されている。原子力発電の他に CO₂ 発生量を低減には、エネルギー消費量の低減、電力その他のエネルギー利用機器の高効率化、発電の分野では再生エネルギー利用発電の増加、発電の高効率化、CO₂ 発生量の最も少ない天然ガスへの燃料転換(石炭の CO₂ 発生量を 1 とすると、石油は約 0.8、天然ガスは約 0.6 の割合である。更に発電プラントの効率差を考慮すると、天然ガスは約 0.5 以下である)等有効であるが、これらの削減努力をしても目標達成が困難視されており、CO₂ 排出権に余裕のある国との共同実施(JI: Joint Implementation)や途上国との CDM(Clean Development Mechanism)制度を利用した CO₂ 排出権の拡大が不可欠な状況にある。ここで、CO₂ 削減の抜本的対策として、燃焼ガスから CO₂ を分離回収し固定化する方法があり、現在その技術開発が進められつつある。

図 6 は天然ガス(説明を簡単にするため成分をメタン CH₄ とする)を燃料とするガスタービン複合発電プラントをベースとした 3 種類の CO₂ 分離回収発電プラントの基本システム概念を示す。

(a) はガスタービン複合プラントの排出ガスから化学吸収または物理吸着方式の回収装置により CO₂ を分離回収する方式である。

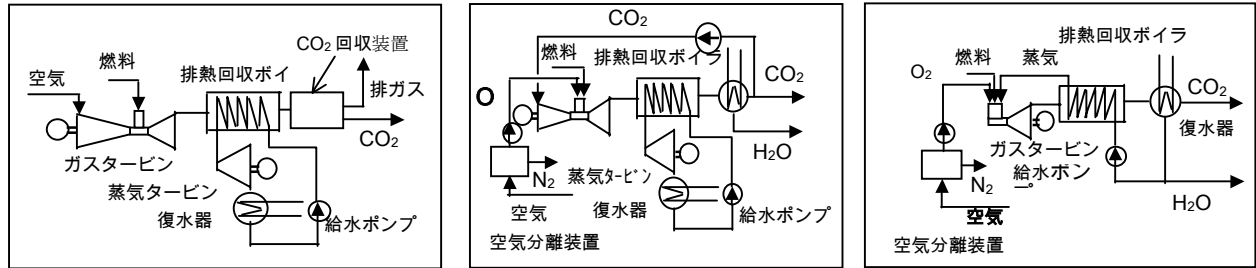
(b) はガスタービンの燃焼用空気の代わりに空気分離により製造した酸素を用い、排ガス中の水蒸気の凝縮分離により分離回収した CO₂ との混合気をタービン作動流体とし、循環する CO₂ 以外の CO₂(燃焼で生じる CO₂) を回収する方式である。

(c) はガスタービンの燃焼用空気の代わりに空気分離により製造した酸素を用い、排ガスの凝縮分離により回収した凝縮水を排熱ボイラで加熱し、製造した過熱蒸気との混合流体をタービン作動流体とし、CO₂ は排ガス中の水蒸気の凝縮により分離する方式である。

b) および(c) のシステムは空気分離された窒素(N₂)をガスタービン駆動流体にせず、回収した CO₂ または蒸気でタービン入口温度制御を行うと共にタービン作動流体とすることにより、酸素量は燃焼に必要な最小量(ほぼ理論

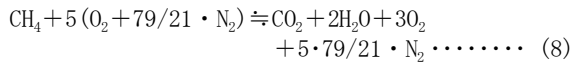
当量)とすることができる。これらのシステムでは空気のO₂分離に動力を消費するが、CO₂の分離は排ガス(水蒸気とCO₂が成分である)中の水蒸気を復水器で凝縮することにより行われるので吸収法や吸着法に比べ消費動力は少なく容易である。発電プラントに注目すると、従来型ガスタービンをを用いる場合は(a)および(b)の方式とすることが必要であるが、ガスタービンを高圧力比二流体タービンとする(c)方式は蒸気タービンサイクルが不要であり、設備の大幅な簡潔化可能である。

また、(a)方式では回収されるのはCO₂だけであるが、(b)および(c)方式ではN₂、CO₂および水が回収され実質無排ガスプラントとなる。回収したCO₂およびN₂はEOR(Enhanced Oil/Gas Recovery)や、窒素、尿素および樹脂製造の原料として有効利用することができる。空気分離装置(Air Separating Unit)は実用化されており新規に技術開発を必要とする機器はないが、復水器等の炭酸腐食対策等が必要である。



(a)ガスタービン複合発電
 - 燃焼排ガスからの吸収/吸着CO₂分離
 (b)CO₂循環ガスタービン複合発電
 - 燃焼排ガスの凝縮によるCO₂分離
 (c)蒸気投入二流体タービン発電
 - 燃焼排ガスの凝縮によるCO₂分離
 図6 CO₂回収型発電プラントの基本システム

次に各方式における処理ガス量を比較する。図(a)における燃焼反応は空気比を2.5(1300℃級ガスタービンの空気比にほぼ相当)と仮定すると凡そ次のとおりである。



すなわち燃料1モル当たりのCO₂発生量は1モルであるが、処理ガス量は約25モルである。図(b)および(c)方式では酸素量をほぼ理論当量にすることができるので、燃焼反応は次のとおりである。



すなわち、必要酸素量は約2モルで相当する空気量は2(O₂ + 79/21 · N₂)で約10モルである。従って、例えば(a)、(b)および(c)いずれの方式においても、物理吸着法を適用する場合は、(b)および(c)は処理ガス量が少なく有利である。表5は上記3方式のCO₂回収発電プラントについて基本的特徴の定性的比較を示す。今後地球環境保全(CO₂削減)およびエネルギー資源保全の観点から再生エネルギーの導入拡大および高効率発電と共にCO₂回収高効率発電が不可欠になることが予想される。単に排出ガスからCO₂を分離する方式ではなく、設備および消費エネルギー等の観点から最も合理的なCO₂回収発電プラントの実用化が期待される。

表5 CO₂分離回収発電プラントの特徴比較

CO ₂ 分離方式		空気燃焼排ガス中CO ₂ 分離回収	酸素燃焼排ガス冷却CO ₂ 分離回収	
			CO ₂ リサイクル方式	蒸気リサイクル方式
CO ₂ 分離	CO ₂ 分離方式	化学吸収法または物理吸着法	排ガス冷却(水蒸気の凝縮分離)	同左
	CO ₂ 分離設備(処理ガス量)	化学吸収プラントまたは物理吸着法(空気比約2.5相当)	復水器(空気比約1.0相当)	同左(空気比約1.0相当)
	CO ₂ 分離エネルギー相対比較(動力等)	大(処理ガス量大)	少	同左
O ₂ 製造比較	空気分離酸素製造	不要	要	要
	O ₂ 分離設備(処理空気量)	不要	深冷分離またはPSA(空気比約1相当)	同左
	O ₂ 分離エネルギー相対比較	不要	CO ₂ 分離動力に比し少(処理ガス量少)	同左
発電プラント比較	ガスタービン	要(ベース)	要(ベースにほぼ同じ、駆動流体:CO ₂ が主体)	不要(加圧酸素使用)
	・圧縮機			
	・酸素圧縮機	不要	要(容量:小)	要(容量:小)
	・タービン	要(空気比約2.5の燃焼ガス)	要(空気比約2.5相当量のCO ₂ ガス)	要(蒸気タービン兼用型)
	排熱回収ボイラ	ベース	ベースに同等	同左
蒸気タービン	ベース	ベースに同等	不要	
発電効率(送電端)	ベース	ベースに同等	高圧力化により高効率可能	

III 燃料電池

1. 燃料の発電原理と構造

(1) 燃料電池の発電原理

燃料電池は電解質により分類される。電解質には多くの種類があり、種類により移動するイオンが異なる。図7に固体高分子燃料電池(PEFC)および図8に固体電解質燃料電池(SOFC)の発電原理を示す。固体高分子燃料電池においては、電解質はスルホン酸基を有し水素イオン H^+ のみ導伝する高分子膜である。燃料極に供給された水素は、電解質との界面において電子を放出して水素イオン H^+ となり、電解質膜を空気極に移動する。外部回路を経て空気極に流入する電子と空気極に供給された酸素と電解質界面において結合し H_2O となり排出される。このように燃料極界面において放出された電子が、負荷が接続される外部回路を経て空気極へ流れることにより電流が発生する。電極はイオン化または再結合の触媒機能も有している。

固体電解質燃料電池においては、空気極に供給された酸素は外部回路を経て空気極に流入する電子を受取り、

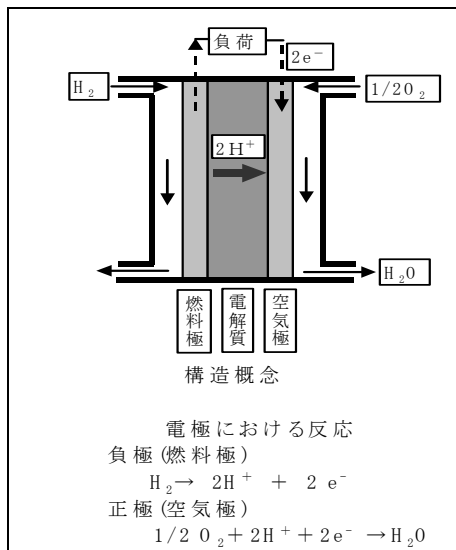


図7 PEFCの発電原理

酸素イオン O^{2-} となり電解質を燃料極側に移動する。電解質と燃料極との界面において酸素イオンは電子を放出し、 H_2 および CO と結合して H_2O および CO_2 となって排出される。燃料極界面において放出された電子は、負荷が接続される外部回路を経て空気極へ流れることにより電流が発生する。

(2) 燃料電池の構造

燃料電池セルの基本構造は、特定のイオンのみの導伝性を持つ電解質の緻密薄膜と、その両面に燃料ガスまたは空気透過性とイオン化または再結合の触媒機能を有するポーラスな薄膜状の燃料極(負)と空気極(正)が接合され、燃料極側に燃料(水素、または水素および一酸化炭素)および空気極側には空気または酸素が連続的に供給され排出される構造である。

燃料電池は最少単位であるセルを積層してスタックとし、所定の電圧および電流になるように直列および並列に接合してモジュールまたはユニットにする。発生した直流電力はインバータで系統接続に適合した電圧および周波数の交流に変換される。

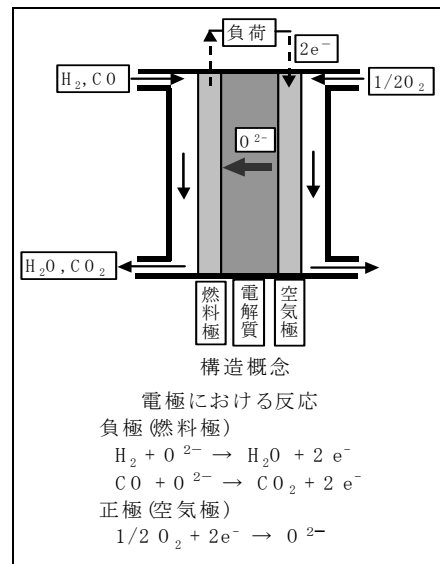


図8 SOFCの発電原理

以下、高温動作で内部改質機能を有し、ガスタービン等のボトミングサイクルと複合化することにより超高効率が得られ究極の化石燃料発電装置と言われるSOFCについて述べる⁽²¹⁾。SOFCの基本的な形式には、平板状セルをセパレーター(複極板)を介して積層しスタックする平板型、基体管上に多数のリング状セルを構成しインターコネクタにより電気的に直列に接続した横縞円筒型および基体管または円筒型電極上に構成されたセルをインターコネクタを介して電気的に直列に接続しモジュールを構成する縦縞円筒型の3形式が代表的である。三菱重工業(株)開発の横縞円筒型セルおよびシーメンス・ウエスティングハウス社開発の縦縞円筒型セルの断面構造をそれぞれ図9および図10に示す。

2. 燃料電池の種類と特徴

(1) 燃料電池の種類

燃料電池は電解質の種類により分類されるが、現在実用化しているものおよび至近年内に実用化されると思われる代表的電池の基本的特徴を表6に示す。

(2) 燃料電池の基本的特徴

① 発電効率が低い

従来の分散型電源は発電機を原動機(主に熱機関)で駆動するものであるが、熱機関の効率 η_t は、その理想サイクルであるカルノーサイクル効率 η_c 以下である。即ち、

$$\eta_t < \eta_c = 1.0 - Q_2/Q_1 = 1.0 - T_2/T_1 \dots \dots (10)$$

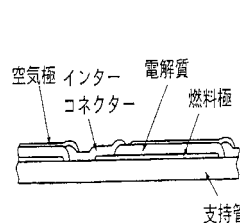


図9 横縞円筒型 SOFC

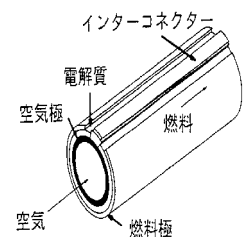


図10 縦縞円筒型 SOFC

表 6 各種燃料電池の基本的特徴

項目	固体高分子型 (PEFC)	りん酸型 (PAFC)	熔融炭酸塩型 (MCFC)	固体電解質型 (SOFC)
電解質	プロトン導伝性高分子膜 (DP 社ナフィオン等)	りん酸 (H ₃ PO ₄)	炭酸塩 (Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃)	イットリア安定化ジルコニア (Y ₂ O ₃ -ZrO ₂)
空気極(カソード)	Pt/C	Pt/C	NiO	(La, Sr) MnO ₃
燃料極(アノード)	Pt/C	Pt/C	Ni	Ni/YSZ
移動イオン	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
作動温度 ℃	常温～100	約 200	600～700	900～1000
発電効率(LHV 基準) %	～40	～40	～45	～50～
発電効率(GT ハイブリッド) %	—	—	～65	～70
熱効率(LHV 基準) %	～70	～75	～80	～85
反応ガス	H ₂	H ₂	H ₂ , CO	H ₂ , CO
燃料	H ₂	H ₂	H ₂ , CO, CmHn	H ₂ , CO, CmHn
燃料の内部改質機能	なし	なし	あり	あり
電極の CO 被毒と制限	あり、10ppm 以下	あり、1%以下	なし	なし
用途	車両、分散電源	分散電源	分散/集中電源	車両、分散/集中電源
ハイブリッド化の適性	不適	不適	適	適

ここに、 Q_1 及び Q_2 はそれぞれ温度 T_1 の高温熱源から与えられた熱量及び温度 T_2 の低温熱源に放出された熱量である。このように熱機関の効率は高温熱源温度および低温熱源温度や材料の許容温度により支配され、現在実用に供されている熱機関の最高発電効率はガスタービン複合サイクルで約 58% である。

この熱機関に対し、燃料電池は燃料の保有する化学エネルギーを直接電気に変換する発電装置であり、熱源温度に支配されるカルノー効率の制約を受けず、ギブスの自由エネルギー $-g (=i-Ts, I, T, s$ はそれぞれエンタルピー、温度及びエントロピー) を限度として高い発電効率を得ることが可能である。中でも SOFC は動作温度が高く吸熱反応である内部改質機能を有し、更に内部加熱機能をもたせることにより、燃料電池単体で 50% (LHV 基準) 以上、加圧型としガスタービンまたはガスタービンおよび蒸気タービンとハイブリッド化することにより 70% 以上の高い発電効率を得ることが可能である。また、熱機関は容量が小さくなるにつれ、機械的損失等が増加し効率が低下するが、燃料電池は発電効率が容量に殆ど影響されず、小容量のものでも高い効率が得られることも大きな特徴であり、分散電源として優れた適性をもっている。

②環境汚染物質を排出しない

除塵および脱硫した燃料を使用して熱機関に比べ低温 (1,000～900℃以下) で動作し、NO_x および SO_x の発生量は極微量で排出ガスはクリーンである。また、高効率であるので燃料消費量が少なく、地球温暖化ガスである CO₂ 発生量は他種発電装置に比べ大幅に少なく、地球環境保全に非常に有効な発電装置である。

③運転が静かである

熱機関のような回転式または往復動原動機ではないので、振動および騒音の問題がない。

④熱併給発電に適する

種類により作動温度が異なるが (SOFC の 1,000℃～PEFC の 80℃)、特に SOFC および MCFC は高温蒸気、温水の供給が容易であり高効率 (～85%) の熱併給発電に適する。

⑤多種類の燃料を使用できる

天然ガス (都市ガス)、DME/NGL、醗酵ガス等のガス燃

料を始め、各種石油および石炭等の液体および固体燃料もガス化し除塵脱硫して燃料にすることができ、燃料のフレキシビリティが高い。

⑥冷却水が不要である

熱機関は通常冷却水を必要とする、特に代表的熱機関である蒸気タービンは、排気の凝縮に冷却水として大量の海水または河川水が必要であるが、燃料電池 (特に SOFC 等の高温動作型のもの) は冷却水を殆ど必要とせず、設置点に制約を受けないので電力消費地に設置することができる。

このように燃料電池発電は高効率でクリーンであり、従来型火力のように設置点が制約されないため、特に分散型電源として優れた適性を有している。

3. 燃料電池—ガスタービンハイブリッド電源^{(22), (23)}

(1)ハイブリッド発電の原理

一般に高温作動の燃料電池、例えば SOFC の場合では、供給空気の空気比はおおよそ 2.0～2.5 で、排出される燃料排ガスには 10～15% 程度の未反応燃料が含まれる。また、SOFC からの排ガスおよび排空気温度は改質方式、空気比および熱交換器方式等により異なるが、通常 700～1000℃前後であるので、燃料電池を加圧型にして未反応燃料を含む排ガスおよび供給燃料ベース空気比約 1.5 程度に相当する残存酸素を含有する排空気を燃焼器 (混合器) に導入し、未反応燃料を完全燃焼させ高温ガスにして、温度調整してガスタービン駆動流体として利用することにより、必要圧力の SOFC 供給空気と電力を得ることができる。このように燃料電池のボトミングプラントとしてガスタービンを設置しハイブリッド化することにより、燃料電池の出力だけでなくガスタービン出力も得られ、従来の発電プラントに比べ非常に高い発電効率が得られる。SOFC のボトミングとしてガスタービン (GT) を設置した SOFC-GT ハイブリッドシステムにおいて、燃料電池効率が同じであれば、作動温度が高いほどガスタービンは高効率を得られるので、SOFC はハイブリッド発電に最も適した燃料電池といえることができる。例えば発電効率 50% の SOFC に効率 40% の高温高圧力比ガスタービンを設置すると、複合プラントの発電効率は、おおよそ $50+50 \times 0.40 \approx 70\%$ が可能であり、最新のガ

スタービン複合発電プラント効率約 58%を大幅に超える高い発電効率を得ることが可能である。小容量 SOFC のボトムリングとして設置するマイクロタービン (MGT) は効率が低い (~12%) のでハイブリッドシステムの効率も低下するが、再生熱交換器を設置することにより 60% 以上の高効率を得ることが可能である (図 11)。

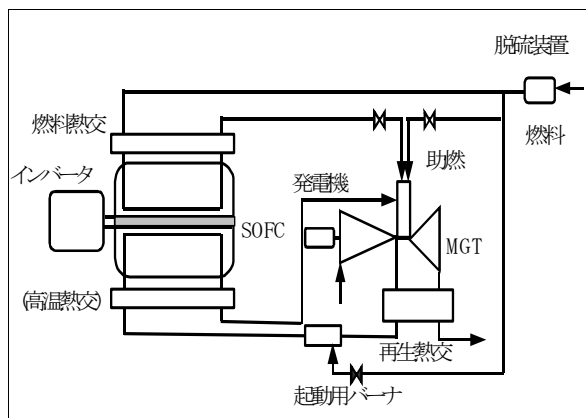


図 11 SOFC-MGT ハイブリッドシステム

(2) SOFC-MGT ハイブリッドシステム化のポイント

①ハイブリッドシステムの総出力と SOFC-MGT の適正出力比率

ハイブリッドプラントにおける SOFC-MGT の出力比率は SOFC の性能により変るが、おおよそ以下のとおりである。SOFC および再生式 MGT の発電効率をそれぞれ 50% および 30%、コンバータおよびインバータ等の効率をそれぞれ 0.95 と仮定すると、燃料投入量 100 に対し SOFC および MGT の出力はそれぞれ $50\% \times 0.95 = 47.5\%$ および $(1 - 0.50) \times 0.30 \times 0.9 = 13.5\%$ 、ハイブリッドシステム効率は約 61% (LHV 送電端) となり、総発電量の約 4/5 を SOFC、約 1/5 を MGT で発電するシステム構成が適正であることが分る (但し、SOFC と MGT がマッチングすることを条件としている)。このような発電量比率が適正でない場合 SOFC または MGT が部分負荷運転となり効率は低下する。

本来 SOFC の容量および運転条件に適合するように MGT および再生熱交を設計し、それぞれ最高効率で運転するシステム設計をすべきであるが、現在実用化されつつある市販の MGT を適用する場合は、30kW、50kW、75kW、100kW および 300kW のように出力がシリーズ化されているので、SOFC を MGT の運転条件を考慮した適正出力とし、SOFC の最適運転条件において MGT が高効率運転するハイブリッドシステムの構築が必要である。上記容量の MGT に対応する SOFC の適正容量はそれぞれ、凡そ 120kW、200kW、300kW、400kW および 1,200kW であり、ハイブリッドシステムの総出力はそれぞれ、凡そ 150kW、250kW、375kW、500kW および 1500kW となる。なお、SOFC からの排ガス条件は、通常 MGT の定格条件からずれるので、調節の手段 (再循環装置やテンパリング装置) を設けることが望ましい。

②MGT の選定

市販の MGT は SOFC のボトムリングとしての設置を考慮して設計されたものではないので、SOFC の適正な運転条件と MGT の適正な運転条件は合致せず最適運転条件からずれる。

市販の MGT はタービン翼および燃焼器は無冷却のためタービン入口温度が制限され、燃焼ガス量 (空気量) は決められているので、MGT の圧縮機出口空気量に適合するように SOFC 容量を選定し、熱交換器またはテンパ

リングエアにより SOFC 出口排ガスを適正な MGT 入口ガス条件に調整することが必要である。高温ガスタービンを用的中・大容量の SOFC ハイブリッドシステムはこの限りではない。

ハイブリッドシステムの最高効率を得るためには、燃料電池の高性能化が基本であるが、一般に MGT の再生熱交換器により SOFC への供給空気温度をできるだけ上げて外部熱交を最小ないしは不要とし、MGT 入口ガス温度を高くして助燃を不要にすることが有効である。MGT の概略選定要領を図 12 に示す。

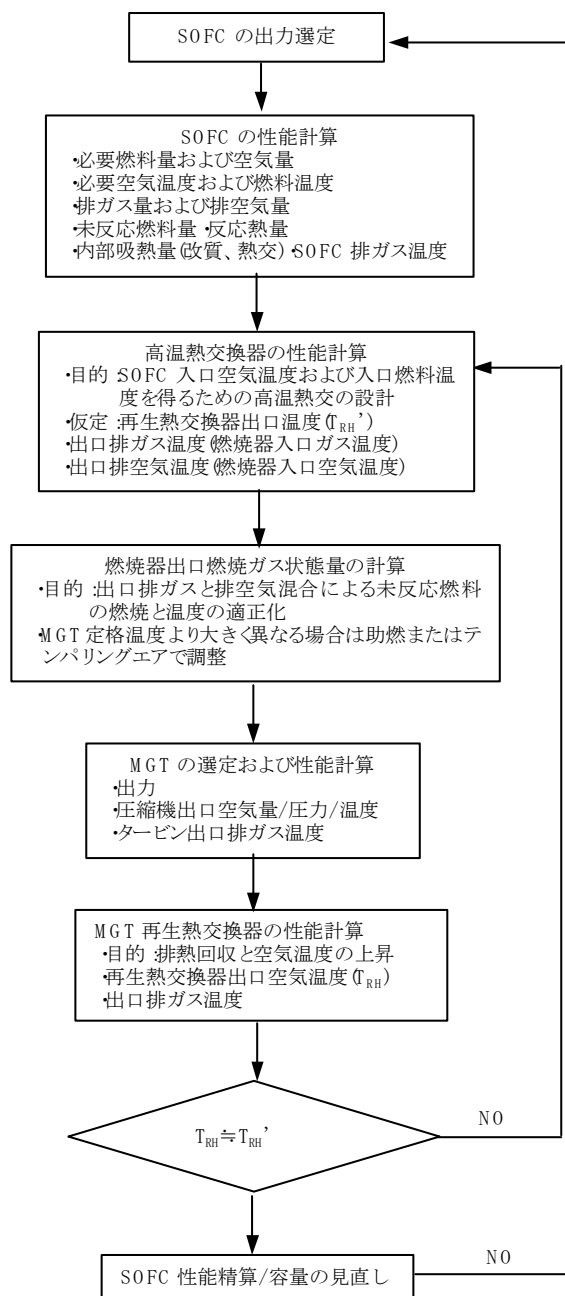


図 12 SOFC-MGT ハイブリッドシステムの設計

③MGT の高効率化—再生式 MGT の適用

MGT は小型であることから圧力比 ϕ が低く ($\phi < 4 \sim 5$)、シンプルサイクルの発電効率が低い (通常 15% 以下) ので再生熱交換器を装備して効率の向上を図る。圧力比約 4、タービン入口温度約 900°C の現在実用化されている代表的高性能 MGT では、再生熱交換器出口排ガス温度は

約 250~300°Cで、発電効率は約 30%に向上する。以下に圧力比、再生熱交温度効率と再生式 MGT の効率の熱力学的関係の概略試算の一例を表 7 に示す。

表 7 圧力比、再生サイクルと効率の関係例

圧力比	効 率
30	40%と仮定すると
4	シンプルサイクル効率：約 17% 再生サイクル効率：約 30% (再生熱交温度効率 η_e ：約 90%)

なお、MGT 排ガス保有熱が大きいのでその有効利用が経済性の観点で重要である。再生式ガスタービンの概略効率 η_{RC} は II の 4. マイクロタービンの項で述べたように (4) 式で求めることができる。

④MGT の構造および性能の適合化

市販の MGT を適用する場合は、ハイブリッドシステム図から分るように、MGT のかなりの改造が必要である。主要な改造部位は次のとおりである。

- ・ MGT 再生熱交換器出口空气管

燃焼器に接続されている再生熱交換器出口空气管を高温熱交(高温熱交が不要の場合は直接 SOFC)に接続する。

- ・ 高温熱交(または SOFC) 出口排空气管および排ガスマ高温熱交(または SOFC) 出口排空气管および排ガスマを MGT 燃焼器(または混合器)へ接続する。

- ・ 燃焼器の改良

助燃を行う場合は、投入燃料は僅少であるが燃焼器が必要である。排空気および排ガスの温度は、MGT 再生熱交換器出口空気温度より高いので燃焼器の材質変更または空気冷却等が必要になることがある。

- ・ 再生熱交換器の適正化

必要な SOFC(または高温熱交) 入口空気温度が得られるように、再生熱交換器の調整(または高温熱交換器の設置)が必要である。再生熱交換器の温度効率が高いほど効率は向上する。

⑤SOFC-MGT ハイブリッド熱併給システム

SOFC-MGT ハイブリッドシステムは分散型電源として電力消費地に設置され、通常、熱(温水/蒸気)の需要があるので、排熱回収ボイラを設置し温水または蒸気を発生することにより熱効率が向上する。排ガス温度が 250~300°C でりん酸型燃料電池や高分子燃料電池より高く、吸収冷凍機熱源用として利用することもできる。

(3)ハイブリッドプラントの発電効率

①高効率が得られる理由

SOFC-MGT ハイブリッドプラントは分散電源用の比較的小規模でも、大容量最新鋭のガスタービン-蒸気タービンコンバインドサイクル以上の高効率を得ることができる。この基本的理由は、表 9 の両プラントの概略比較に示すように、SOFC-MGT ハイブリッドプラントのボトムミングの MGT 効率 30~27% に対し、蒸気タービン効率は約 32% であるが、トッピングの SOFC が、最新鋭ガスタービンの効率(約 39%) を絶対値で 10% 以上上回る高効率達成が可能であることによる。

MGT の代わりに、高圧力比高温ガスタービンを設置する大容量の SOFC-GT ハイブリッドシステムでは、圧縮機出口空気温度が高いので高温熱交は不要であり、ガスタービン入口温度が高くなるので 40% 以上のガスタービン効率達成が可能であり、ハイブリッドプラントの発電効率約 70% が可能となる。また、さらに排熱回収ボイラ発生蒸気で蒸気タービン(ST)を駆動する集中電源用

の SOFC-GT-ST トリプルハイブリッドプラントとすれば、70% 以上の高い発電効率を達成することが可能である。

表 8 SOFC-MGT ハイブリッドプラントと GT-ST コンバインドプラントの概略比較

プラント	SOFC-MGT ハイブリッドプラント	GT-ST コンバインドプラント
燃 料	都市ガス/ 天然ガス	都市ガス/ 天然ガス
トッピングプラント効率(LHV 発電端)	SOFC 約 50%	GT 約 39%
ボトムミングプラント効率(LHV 発電端)	再生式 MGT 約 30%	ST 32%
概略総合効率(LHV 発電端)	$50 + (100 - 50) \times 0.30 \approx 65\%$	$39 + (100 - 39) \times 0.32 \approx 59\%$
概略総合効率(LHV 送電端)	$50 \times 0.95 + 15 \times 0.9 \approx 61\%$ (コンバインダ損失を含む)	$59 \times 0.98 \approx 58\%$

②効率向上対策

- ・ SOFC の高効率化

電池性能の向上、高圧化、内部改質/内部熱交(吸熱機能)の向上による空気比の低減等により、理論的には 60% 以上の高効率が可能である(既に 50% の目途が得られているようである)。

- ・ MGT の高効率化

再生熱交換器無し MGT の効率は、圧力比が低いので熱力学的に高くできず、また小型のため流体力学的損失や機械損失が相対的に大きい、高温材料適用による高温化等の改善により高効率化が可能と思われる。

- ・ 再生熱交換器の高効率化

圧力比が低く、従って圧縮機出口空気温度が低く、タービン排ガス温度が高いので、再生熱交換器の温度効率を適正な範囲で最大にし、排ガス保有熱を圧縮空気に最大限回収することにより高効率を得ることができる。

図 13 にガスタービン圧力比、SOFC 空気比、熱交換器温度効率と発電効率の関係例を示す。

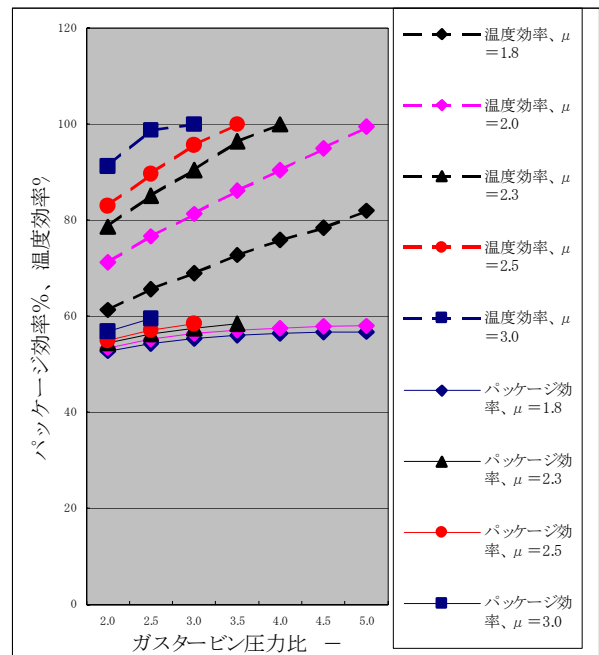


図 13 空気比、再生熱交温度効率および圧力比とハイブリッド効率の関係

(4) 環境負荷

SOFC-MGT ハイブリッドプラントは、いずれも作動温度が 1000℃以下であり、ガスエンジン、ディーゼルエンジンやガスタービンに比べると作動(燃焼)温度が低く、都市ガス(天然ガス)等のクリーンな燃料を使用し効

率が高いので、環境性能が非常に優れており、電力消費地設置の分散電源としての適性が高い。環境性能(環境負荷)の従来型分散型電源との比較を表9および図14に示すように、環境負荷が小さいことが分る。

表9 MGT-SOFC ハイブリッドプラントと既存機種との環境性能の概略比較

機種	SOFC-MGT ハイブリッド	ガスエンジン	ディーゼルエンジン	ガスタービン
燃料	都市ガス(天然ガス)	同左	A 重油	都市ガス(天然ガス)
CO ₂ 排出量 g-C/kWh	90~100	140~200	170~250	140~200
NOx ppm (%O ₂ ,dV)	~9 (O ₂ =15%)	100~200 (O ₂ =15%)	~1500 (O ₂ =13%)	~25 (O ₂ =15%)
SOx ppm (0%O ₂ ,dV)	≒0	≒0	~600(燃料中の硫黄含有量による)	≒0
騒音 dBA (機側 1m)	~85 (高周波数が高い)	~100	~110 (低周波数が高い)	~110

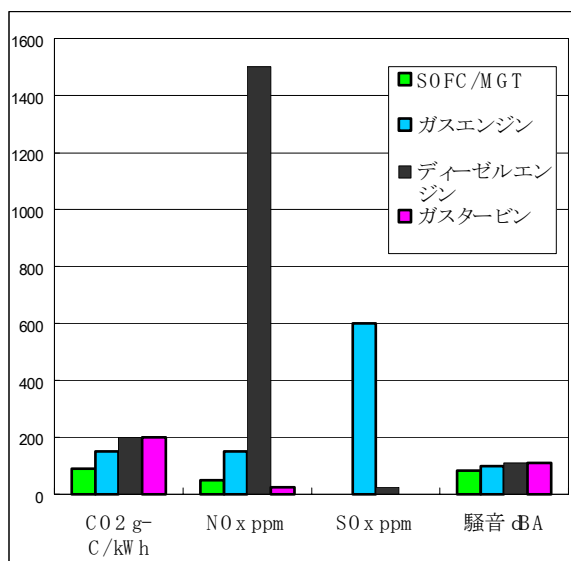


図14 分散型電源用機種別の環境性能

(5) 適用例

SOFC-MGT ハイブリッドプラントは、集中電源としても従来型発電方式に比し優れているが、特に、分散電源として電力消費地に設置し、コジェネレーションすることによりその優れた機能を最高度に発揮する。高発電効率と共に80%以上の高い熱効率を達成でき、燃料節減および地球環境保全に貢献すると共に経済性が更に向上する。SOFC-MGTの容量はある程度の高性能が得られるMGTの容量が30kW程度とすれば、約150kW以上が適当と言うことができよう。従って略あらゆる電源に適用可能である。具体的な適用例を上げるとおおよそ次のとおりであろう。

①小容量(100kW~1MW)

- ・オフィスビル ・学校 ・アパート/マンション
- ・病院 ・ホテル ・店舗ショッピングセンター ・工場

②中~大容量(1MW~100MW)

- ・地域用(熱併給)電源 ・産業用(熱併給)電源
- ・スポーツ施設

Ⅳ 再生エネルギー型分散電源システム

1. 再生エネルギーの特徴

(1) 種類と賦存量⁽²⁴⁾

地球における各種再生エネルギー賦存量は下記のとおり

り膨大であり、有効利用できれば人類はエネルギー問題から開放される。

- ・太陽光 : 約 753,000 T kWh/年(世界の消費エネルギー約 96T kWh/年の約 8,000 倍)
- ・風力 : 約 45 T kWh/年
- ・水力(技術包蔵水力) : 約 15 T kWh/年
- ・地熱 : 約 430 T kWh/年
- ・海洋エネルギー(海洋温度差、潮汐、波流) : 膨大
- ・バイオマス : 約 1.6×10⁹ toe

(2) 再生エネルギーの特徴

- ・クリーンエネルギーであり、CO₂削減に有効なエネルギーである。
- ・無尽蔵である(再生される)。
- ・世界中に存在する。但し、季節、時刻、地方により存在量は異なる。
- ・エネルギー密度が低い。従って発電装置(エネルギー収集装置)が大型化する。
- ・そのままの形では貯蔵ができない。
- ・純国産エネルギーである。燃料資源が殆どない我が国はエネルギー確保(エネルギーセキュリティ)の観点においても有効利用が重要である。

(3) 我が国の再生エネルギー利用計画

我が国は COP3 の京都議定書で 2,010 年(2,008~2,012 年の平均)の CO₂ 排出量を 1,990 年比-6%に削減することが求められていることにも鑑み、表 10 に示すように再生エネルギーの大幅導入増加を目論んでいる。

表 10 我が国の再生エネルギー導入計画

再生エネルギー発電	1999年実績	2010年目標
①太陽光発電	20.5 万 kW	482 万 kW
②太陽熱利用	104 万 k1	450 万 k1
③風力発電	8.3 万 kW	300 万 kW
④地熱発電	54.7 万 kW	150 万 kW
⑤温度差エネルギー等	4.1 万 k1	58 万 k1
⑥廃棄物発電	109 万 kW	417 万 kW
⑦バイオマス発電		33 万 kW

2. 風力発電

(1) 特徴

風はほぼ地球のいたるところで利用可能なクリーンエネルギーであり、その資源量はおおよそ 45 T kWh/年と推定されているが(CF: 世界の全エネルギー消費量は約 96 T kWh/年)、エネルギー密度が希薄であるため発電装置が

大型化する、風力は所によって異なる、エネルギー量が不安定である(変動する)、エネルギーの貯蔵ができない、等の好ましくない特性も有している、利用に際しては系統との連携または蓄電池等の併設が必要である。

(2) 発電の原理

風力発電は風の持つ運動エネルギーを、風車で機械エネルギーに変換し、発電機を駆動して電力を発生する発電方式である。

風車の出力

風の保有する運動エネルギー P_{th}

$$P_{th} = 1/2 M V_1^2 = 1/2 \rho A V_1 V_1^2 = 1/2 \rho A V_1^3 \dots \dots (11)$$

M : 風車翼車を通過する気流の質量 kg

ρ : 空気の密度 kg/m³

A : 風車ロータの掃過面積 m²

V : 風速 m/s

添字 1: 風車上流側風速 2: 風車翼車通過風速

3: 風車後流側風速

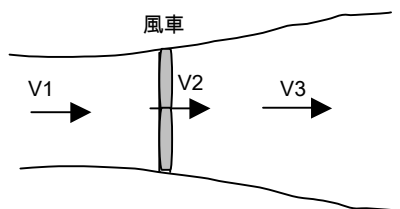
風車の出力 $P = C_p P_{th}$

$$\text{出力係数 } C_p = P/P_{th} = P / (1/2 \rho A V_1^3) \dots \dots (12)$$

最大出力係数(ベッツ効率*) $C_{pmax} = 0.593$

ここで、風車効率を η_t とすると、

$$C_p = 0.593 \times \eta_t$$



高性能プロペラ風車で $C_p = 0.45$ 程度 ($\eta_t \approx 75\%$) である。次に出力計算の例を示す。

出力計算例 : ハブ高さにおける風速 $V = 13\text{m/s}$ 、空気の密度 $\rho = 1.28\text{kg/m}^3$ の風況における翼車径 $D = 60\text{m}$ 、出力係数 $C_p = 0.40$ の風車の出力は、

$$P = 1/2 \times 1.28 \times \pi \times (60/2)^2 \times 13^3 \times 0.40 \dots \dots (13)$$

$$= 1,590 \text{ kW}$$

*参考: ベッツ効率(最大パワー係数)の算出法

$$P = M V_2 (V_1 - V_3) = \rho A V_2^2 (V_1 - V_3)$$

$$= \rho A \{ (V_1 + V_3)/2 \}^2 (V_1 - V_3) \dots \dots (14)$$

ここに、 $\alpha = V_3/V_1$ とおくと

$$P = 1/4 \rho A V_1^3 (1 + \alpha) (1 - \alpha^2) \dots \dots (15)$$

P_{max} において $\partial P / \partial \alpha = 0$ より、

$$\alpha = V_3/V_1 = 1/3$$

$$C_{pmax} = P_{max}/P_{th} = P_{max} / (1/2 \rho A V_1^3) = 0.593 \dots \dots (16)$$

(3) 風況データ

① 風況の計測

風力発電所建設等に際しては風車の年間発電量または利用率の予測が重要であり、上記の出力計算式が示すように信頼性の高い風況データが必要であるので、建設地点の風車ハブ高さにおける最低一年間の風況計測(短時間間隔)が必要である。風況は時期・時刻、地勢および高度等により変動するからである。なお、風車の強度設計には乱流強度および最大風速のデータが必要である。

② 風況および利用率の推定

立地点のハブ高度における風速データがない場合の風速分布予測の手法を以下に示す。

- ・ 風速の高度補正

風車の設置高度が計測データと異なる場合は次の指数法則または対数法則を適用して高度補正を行う。

$$V = V_b (H/H_b)^{(1/n)} \dots \dots (17)$$

ここに、V: 風車設置高度 H における風速、 V_b は計測高度 H_b における風速、n は地表面の状態、風況および気象条件等により変わる定数で、高さ方向に計測した複数高度のデータをもとに求める。

- ・ 風速出現率の推定

発電量計算には風速出現率が必要であるが、例えば平均風速データしかない場合、下記のレーリー分布に従うものとして風速分布を推定する。

$$F(V) = \pi V / (2V_m^2) \cdot \exp\{-\pi \cdot 4 \cdot (V/V_m)^2\} \dots \dots (18)$$

ここに、 $F(V)$ は風速 V の出現確率、 V_m は平均風速である。

以下に筆者らがカザフスタン共和国の風力発電所建設計画に関連して調査したデータを参考に試算例を示す。図 15 は建設候補地点近傍測候所計測の高度 20m における月間平均風速データをもとに高度 40m における月別風速出現率をもとめたもので、図 16 はハブ高さ 40m の 600kW 風車の利用率を前記データおよび建設地点の高度 33m における実測データの両方に基づいて試算した結果を示す。月別利用率の変化の傾向は類似しているが、かなりの差異が見られる。

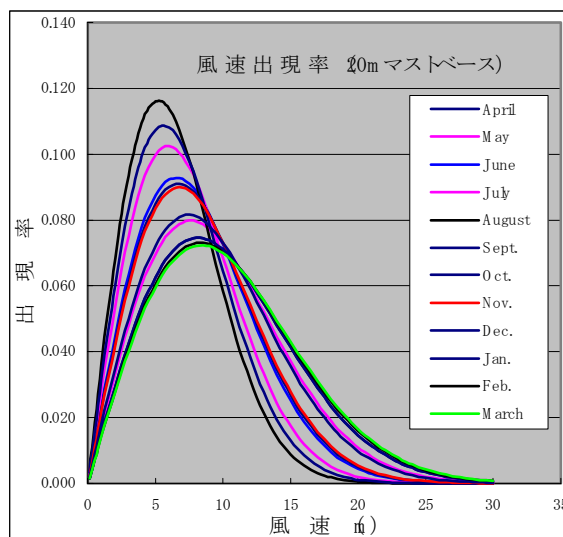


図 15 レーリー分布による風速出現率の推算

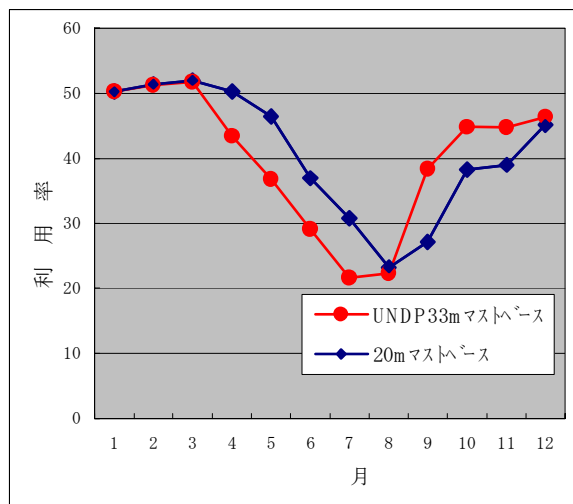


図 16 風況データの違いによる予想利用率の差異

(4) 風況と経済性

設備の経済性判断の目安として、我が国では年平均風速 6m/s または利用率(=年間発電量 kWh/(風車定格出力 kW×年間暦時間 h/年) 20%が目安として参考にされる。電力価格の安い国ではより速い風速またはより高い設備利用率であることが採算確保に必要である。

(5) 風車の形式と構造^{(25), (26)}

①風車の形式

風車は回転トルクの発生方式により揚力型と抗力型に分けられる。前者の代表的なものがプロペラ型、後者の例がサボニウス型である。発電用には高速回転の揚力型が適しており、風力発電に用いられるのは通常3枚翼のプロペラ型である。また、回転軸の方向により、プロペラ型のような水平軸型とダリウス型のような垂直軸型に分類される。

②風車の構造

プロペラ型風車は一般に3枚の翼、ナセル(ハブ付軸、増速機、カップリング、発電機が収納される)、制御装置及びタワーで構成される。大型プロペラ風車の回転数は通常 20~40rpm であるので、一般に増速機により発電機定格回転数に増速される。近年パワーコンディショナーを装備し、多極同期発電機を用いた直結型も実用化されている。

通常、プロペラ風車は風速約 3~4m/s で発電を開始し(カットイン)、13~14m/s で定格出力に達し 25~28m/s まで定格出力運転、25~28m/s で停止し(カットアウト)、最大風速 60~70m/s に耐え得るように設計される。

③風車の制御

出力制御は翼ピッチ制御、翼車の可変速制御、または翼失速制御等により行う。ヨー制御により翼車の方向を風上方向に保持する。風車の回転数は大きさにより異なるが電力用は通常 20~40rpm 以下であるので、増速装置により発電機定格回転数に増速し、電圧は変圧器により所定電圧に昇圧する。近年同期多極発電機にパワーエレクトロニクスを適用して、発電電力の周波数、電圧および力率を制御し、信頼性の向上、系統への影響低減、出力増加及び騒音低減を目指した可変速風車が実用化されている。

(6) 大型風車の例

国内で唯一風車を製造している三菱重工業(株)の 1MW 風車の基本仕様および概観を図 17 に示す⁽²⁷⁾。



図 17 発電用大型風車の例—三菱 MWT-1000

基本仕様

型式 : 可変ピッチアップウインド 3 枚翼
定格出力 : 1,000/250kW 定格回転数 : 21/14rpm
定格風速 : 13m/s
カットイン風速 : 3m/s カットアウト風速 : 25m/s
耐風速 : 60(または 70)m/s
ロータ直径 : 56m
発電機 : 550V3 相誘導発電機 2 速制御

(7) 技術動向

①大型化⁽²⁸⁾

風は高層ほど地表面抵抗の低下により速く安定しているため、ハブ高さが高くなるほど大きく安定した出力が得られる。近年 FRP(ガラス/炭素繊維強化エポキシ樹脂)等の軽量高強度材料が実用化され、大型化による経済性が追求されている。西欧では陸上設置の 2.5MW 機が運転され、我が国では 1.65MW 機が運転中である。国産では同期発電機を備えた可変速 2MW 機が営業運転に入っている。

②洋上風力発電⁽²⁹⁾

西洋では洋上風力発電プラント(オフショアウインドファーム)の建設も進められており、経済性向上のため大容量化が進められている。120 万 kW 級の洋上風力発電プラントの建設計画もあり、単機容量 5MW の大容量機が開発中である。

③発電機直結可変速風車

同期多極発電機およびパワーエレクトロニクス(コンバーターおよびインバーター等)を適用した発電機直結可変速風車が実用化されている。増速ギアが不要になるので騒音が軽減し、信頼性および出力が向上する、より低風速から高風速の風を利用することができる、フライホイール効果により電力の品質がよく風車の信頼性が向上する、併入時の突入電流が無く系統への外乱が少なく、単独運転が可能で力率調整が可能である、など利点を有するが、発電機が大型化し、励磁装置が必要であり設備費はやや割高になるようである。

④永久磁石同期発電機の実用化⁽³⁰⁾

回転子に永久磁石を用いて励磁システムを不要にし、構造の簡素化、軽量コンパクト化して設備費低減を図った同期発電機が実用化されている。

3. 太陽光発電

(1) 発電の原理

太陽電池は半導体の光起電力効果を利用して、光エネルギーを電気エネルギーに直接変換するエネルギー変換装置である。例えば、IV族半導体の Si は B(ボロン)や Ga(ガリウム)等の III 族元素を添加すると正孔密度が増大し電子密度が減少する p 型半導体、P(リン)や As(ヒソ)等の V 族元素を添加すると電子密度が増加し正孔密度が減少する n 型半導体になる。この特性により、p 型と n 型半導体を接合したものに、太陽光($\lambda < \lambda_c = 1.1 \mu\text{m}$)が当たると内部に正孔と電子が生じ、正孔は p 型に電子は n 型に引き付けられ、外部回路に負荷を接続すると電流が得られる。図 18 にアモルファスシリコン太陽電池の構造概念を示す。

(2) 太陽電池の主な種類

現在実用化又は至近年内の実用化が予想される主な太陽電池の分類を図 19 に示す。現在は半導体工業の廃材を原料とする多結晶および単結晶シリコン(Si)等の結晶型が発電用太陽電池の殆どを占めている。アモルファス Si 太陽電池は電力用としては後発であるが、結晶型に比べ Si 使用量および製造エネルギー量が大幅に少なく量産に適しているため、製造技術の進展に伴いコスト低下によ

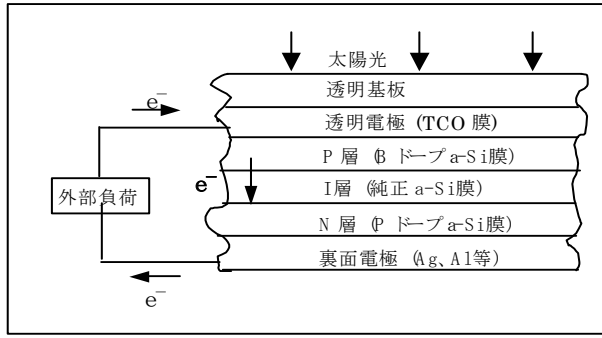


図 18 アモルファスシリコン型の構造概念

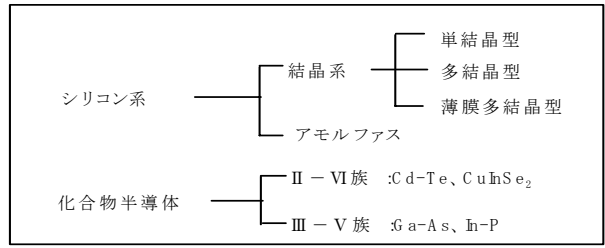


図 19 太陽電池の分類

り需要の増加が予想されている。Cd-Te、CuInSe₂等のII-VI族電池のコスト低減やGa-As、In-P等のIII-V族電池は宇宙用等特殊用途用に高効率化が進められている(表12)。

表 11 各種太陽電池の基本的特徴

項目	結晶系		非晶質系 アモルファス	II-VI族系	III-V族系
	単結晶	多結晶		CIS、Cd-Te	Ga-As、In-P
発電効率 % (実用モジュールベース)	14~15 (アモルファスタケム:16)	12~13	7~9 (薄膜多結晶タケム:~12)	10~12	20~30
電池材料および使用量など	高純度のシリコンが必要。現在は半導体廃品を使用しており供給量に制限がある。結晶インゴットをスライスして製造する。電池厚さは数百μmである。		シランガス等を用い大面積基板上にCVD法等により薄膜を形成する。電池の厚さは数μmである。	実用化開発段階にある。薄膜系電池である。	宇宙用等特殊用途用である。

(3) 太陽電池システム

太陽電池は複数のセルを直列接続しモジュールとし、モジュールを直列/並列に接続してアレイとする。太陽電池発生電力は直流であるので、直交変換装置(インバーター)で所定電圧および周波数の交流に変換し電力系統に供給する。

(4) 電池型式による発電電力量の違い

太陽エネルギー量は晴天(ピーク)時地表面 1m²あたりおおよそ 1kWである。従って電池の変換効率を10%とすると、 $P \approx 1.0 \times 0.1 = 0.1 \text{ kW} = 100 \text{ W}$ の出力となる。我が国の平均的日照時間はピーク換算で約3.8時間であるので、1日の平均発生電力Wはおおよそ、

あるので、1日の平均発生電力Wはおおよそ、

$$W \approx 0.1 \times 3.8 = 0.38 \text{ kWh/d/m}^2 \quad (139 \text{ kWh/y/m}^2)$$

太陽電池の電池温度に対する出力特性は型式により相違し、結晶型では温度上昇に伴い出力が低下し、アモルファス型では出力が増加する。太陽電池の規格出力は通常日本品質保証機構(JQA)規格(AM:1.5日射強度:100mW/cm²の模擬太陽光を使用し、温度25℃の測定条件における出力)で表示されるが、日中の太陽電池温度の平均温度は25℃より高いので、結晶型は効率が低下しアモルファス型は上昇する。

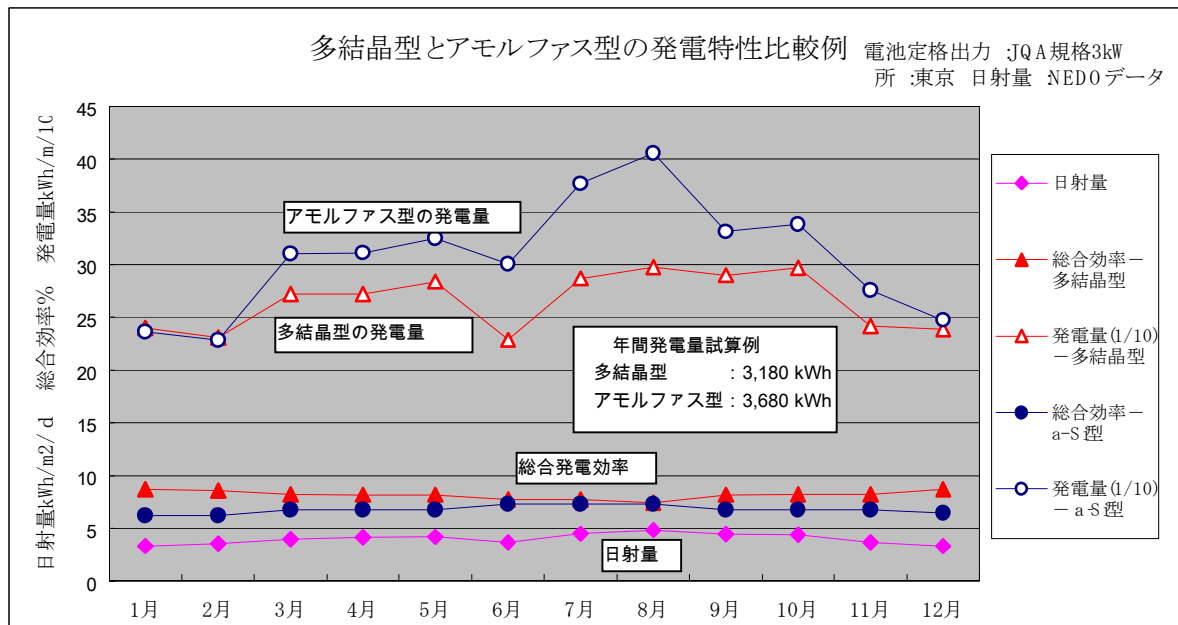


図 20 JQA 規格出力 3kW 太陽電池の実際の発電量試算例

したがって、太陽電池の発電量予測計算には、日射強度だけではなく太陽電池温度に対する補正が必要である。特に日射強度の強い夏季ほど、気温(電池温度)の高い地方ほどこの特性の違いが顕著に現れる。

一例として JQA 規格出力 3kW の太陽電池を東京地区の南向き傾斜角 40 度の住宅屋根に設置した場合の発電量の試算例を図 20 に示す。この試算例では年間の発電量はアモルファス型が結晶型より約 15% 多い。実際の発電量は太陽電池設置面(屋根)の傾斜角および方位等によっても変る。

(5) 太陽光発電の特徴

- ① 資源量は無尽蔵(おおよそ 753,000Tkw/年)であり地球上いたる所で利用できる。
- ② クリーンエネルギー発電である。
- ③ システムが単純で保守が容易である。
- ④ エネルギー密度が小さいので設備が大型化する。
- ⑤ 天候に左右され保存ができない。地方により日射強度に差異があり発電電力量は異なる。

(6) 最近の開発状況と技術動向^{(31), (32)}

① 導入量

現在のわが国の導入量は約 32 万 kW(2001 年 3 月)で世界一であり、2010 年までに 480 万 kW を目標に導入が促進される。現在我が国で電力用に導入されている型式は多結晶型(50%強)および単結晶型が殆どであるが、今後原料および製造エネルギーの少ないアモルファス型の導入増加が予想される。

② 発電効率

実用モジュールベースで a-Si : 8~9%(薄膜多結晶とのタンデム : ~12%)、多結晶型 : ~13%、単結晶型 : ~15%(アモルファスとのタンデム : 16%)が達成されているが、更なる効率向上が進められている。

③ 発電コスト

太陽電池設備費は 70~80 万円/kW、対応する発電コストは諸条件により変わるが、60~70 円/kWh 程度である。製造コストの低減が最大の課題であり、アモルファス型では大面積高速製膜等の量産技術や結晶型では SOG シリコンインゴット製造技術の確立によるコスト低減が進められている。

④ 技術動向

製造コスト低減に関しては、省資源省エネルギー型であるアモルファスシリコン太陽電池および CdTe 太陽電池の低コスト大面積モジュール製造技術、薄膜 Si 多結晶型や CuInSe₂ 型電池の低コスト大面積モジュール製造技術、SOG シリコンインゴット製造技術や色素増感太陽電池等の改良開発が進められるものと思われる。

V 分散型電力貯蔵

1. 電力貯蔵の目的

(1) 電力負荷平準化

電力需要は図 21 に示すように一定ではなく、地方にもよるが、特に夏季の夜間電力需要は昼間の 50% 以下になり季節的にも変動する。発電プラントの設備容量は、最大電力をある程度の予備能力(予備率)を残して賄えることが必要である。従って夜間は発電設備の余力が大きく発電プラントは低負荷運転されるか停止される。低負荷運転では発電効率が低く運転の経済性は低い。また起動停止は無用な燃料を消費しボイラおよびタービンは急速な温度変化により寿命を消費するなどの問題が伴う。一方昼間のピーク需要に対しては、将来的には発電設備容量が不十分または不足する。ここで昼夜間の電力需要を

均一化できれば、すなわち夜間の電力需要を増やし昼間の電力需要を低減できれば、夜間も様な高負荷運転(発電設備の利用効率向上)により高効率運転が可能になると共に、発電設備の容量増加も抑制することができる。近年、負荷変化運用に不向きな原子力発電や大容量石炭火力発電の比率増加により負荷平準化の必要性は増大している。

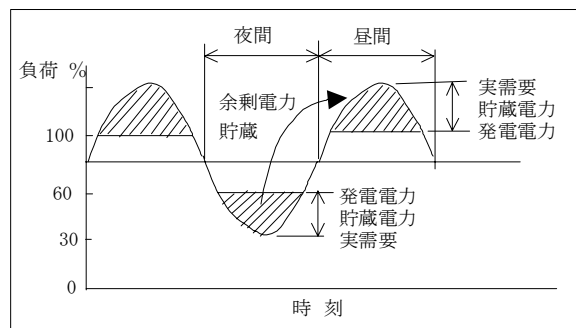


図 21 電力需要パターンと電力貯蔵による平準化

(2) 無停電電源(UPS : Uninterrupted Power Source)

無停電電源は停電、電圧低下、電源ケーブル抜け等の電源事故等が生じた際に、緊急に電気を供給する電源設備であり、

- ・貯蔵しておいた電力を即時供給し、最低限必要な処理(例えば、シャットダウン処理など)を行う間の電力を供給する、あるいは、
- ・代替電源による電力供給ができるようになるまでバックアップ電源として電力供給する 電力貯蔵装置であり、二次電池(バッテリー)およびフライホールが実用化されている。キャパシタは現在は電気製品のバックアップ電源や電池代替等小容量のものが用いられている。

① 二次電池

無停電電源(UPS)の方式には常時商用給電方式(SPS)と常時インバータ給電方式(UPS)があり、前者では通常時は系統からの電力がそのまま負荷に供給され、停電時のみ二次電池からインバータを経由した電力が供給される。

② フライホイール

充電時間が短く、短時間(通常数秒)に大電流を必要とする無停電電源に適している。また、鉄道車両の回生ブレーキとしても実用化されている。

③ キャパシタ

二次電池より小容量の頻繁且つ急速な充放電が必要な電力貯蔵装置として優れた適性を有している。ハイブリッド車両や再生エネルギー発電設備等に開発が進められている。

(3) 電力品質の保持

常時安定した高品質電力を供給する機能を持つ二次電池の他にフライホイールが実用化されている。情報および情報機器産業の発達に伴い安定した高品質電力の供給確保の観点からその必要性が増大している。二次電池の場合は常時インバータ給電方式と常時商用給電方式が用いられるが、前者では負荷入力は常時インバータにより調質された高品質の電力が供給されるので、高品質電力を必要とする OA 機器等の普及により需要が増加している。後者では電源事故直後の瞬停の問題がある。今後分散型電源の増加により電力品質維持対策は重要性を増すものと思われる。

2. 二次電池^{(33)～(35)}

分散型電力貯蔵装置の代表的なものが二次電池(バッテリー)であり、開発中のものを含むと多くの種類がある。電力貯蔵用として鉛-硫黄電池、携帯用電気製品の電源としてはコバルト酸リチウム電池等が実用されているが、

鉛-硫黄電池に比べ電力貯蔵密度の数倍大きいナトリウム-硫黄電池、低コストのマンガン酸/ニッケル酸リチウム電池やレドックスフロー電池の実用化開発が進められている。表 12 に主要二次電池の基本的特徴を、表 13 にそれらの化学反応式を示す。

表 12 主な二次電池の概略の基本的特徴

電池種類	鉛-硫黄	ナトリウム-硫黄	リチウムイオン	レドックスフロー
正極活物質	PbO ₂	S	LiCoO ₂ 、LiMn ₂ O ₄ 、LiNiO ₂	(VO ₂) ₂ SO ₄
負極活物質	Pb	Na	Li/C(黒鉛)	VS ₄
電解質	H ₂ SO ₄ 水溶液	β"アルミナ	有機電解液(LiPF ₆)	Va系電解液
作動温度 ℃	常温	300～350	常温	常温
回路電圧 V	2.1	2.1	3.8	1.4
エネルギー密度 Wh/l	～100	～200	～300(試験実績 332)	(～150)
Wh/kg	～50	～100	～150(試験実績 164)	(～100)
エネルギー効率 %	～85	～90	～95	～85

備考：記載値は至近年の実用機における達成予想値、エネルギー効率は電池単体について示す。

表 13 主な二次電池の反応式

鉛 - 硫黄電池	$\left[\begin{array}{l} \text{負極} : \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \xrightleftharpoons[\text{充電}]{\text{放電}} \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^- \\ \text{正極} : \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{e}^- \xrightleftharpoons[\text{充電}]{\text{放電}} \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \end{array} \right]$
Na - 硫黄電池	$\left[\begin{array}{l} \text{負極} : 2\text{Na} \xrightleftharpoons[\text{充電}]{\text{放電}} 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^- \\ \text{正極} : x\text{S} + 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^- \xrightleftharpoons[\text{充電}]{\text{放電}} \text{Na}_2\text{S}_x \end{array} \right]$
リチウムイオン電池	$\left[\begin{array}{l} \text{負極} : \text{LiC} \xrightleftharpoons[\text{充電}]{\text{放電}} \text{Li}^+ + \text{e}^- \\ \text{正極} : \text{Li}^+ + \text{e}^- + \text{CoO}_2 \xrightleftharpoons[\text{充電}]{\text{放電}} \text{LiCoO}_2 \end{array} \right]$
レドックスフロー電池	$\left[\begin{array}{l} \text{負極} : \text{VS}_4 + 1/2\text{H}_2\text{SO}_4 \xrightleftharpoons[\text{充電}]{\text{放電}} 1/2\text{V}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{e}^- + \text{H}^+ \\ \text{正極} : 1/2(\text{VO}_2)_2\text{SO}_4 + 1/2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}^+ + \text{e}^- \xrightleftharpoons[\text{充電}]{\text{放電}} \text{VOSO}_4 + \text{H}_2\text{O} \end{array} \right]$

3. 電気二重層キャパシタ^{(36)、(37)}

キャパシタ(電気二重層コンデンサ)は、電解液を含浸させた表面積の大きな多孔質電極(活性炭が用いられる)2枚を電解液中に配置した構造で、充電により2枚の電極表面にそれぞれ正負に荷電された内層が形成されると共に、電極表面には電解液中の負正イオンが吸着した外層が形成され電気二重層(Electric double layer)が形成される。内層は電解液の電気分解電圧(耐電圧)以下では完全な絶縁状態であり、2段直列キャパシタが形成される。キャパシタは一種のコンデンサーであり、アルミ電解コンデンサの数千倍の容量が得られるようになった。電力貯蔵量U(J/cm²)は次式で表される。

$$U = CV^2/2$$

ここに、C：静電容量(F/cm²)、V：耐電圧(V)である。電解液としては水溶液系と有機系があり、後者の電気二重層面積あたりの静電容量は前者の約1/3であるが、前者のキャパシタとして使用できる耐電圧約0.9Vに対し後者は2.7V以上であり、蓄電量は3倍大きい。

電極は表面積の大きな多孔質で導電性に優れた化学的に安定した材料である活性炭が使用される。二次電池に比べエネルギー密度は低い(25Wh/kg、30Wh/lが達成されている)、動作温

度範囲が広く氷点下でも動作し、電気化学反応を伴わないので急速充放電や大電流放電が可能であり劣化しないことが特徴である。頻繁な充放電運用に適し、UPS/EPS、太陽電池、風車や二次電池との併設運用、回生ブレーキや車両用に適性がある。カーボンナノチューブの適用による貯蔵能力の飛躍的増加が期待されている。

4. フライホイール

フライホイールは真空容器に設置されたフライホイール(回転円盤)を発電機兼電動機で高速回転させることにより電力を回転エネルギーとして貯蔵し、電力の必要な時に発電機運転をして電力を供給する電力貯蔵型発電である。電力貯蔵型電源の中ではエネルギー密度が高く(～150kWh/m³)、エネルギー効率がよく(～90%)、電力変換器(パワーエレクトロニクス)の制御により1ms程度の高速度出力制御ができるので、系統の瞬時波形ひずみ補償にも利用できる。貯蔵エネルギーE(J)は次式であらわされる。

$$E = I\omega^2/2 = (2\pi r t L\rho r^2)\omega^2/2 = MV^2/2 = \pi r S \sigma_t \dots \dots \dots (19)$$

ここに、I：フライホイールの慣性モーメント(kgm²)、ω：角速度(rad/s)、r：半径(m)、t：幅(m)、L：

厚さ (m)、 ρ :密度 (kg/m³)、M:質量 (kg)、V:周速 (m/s)、S:断面積 (m²)、 σ_t :断面の引張り応力 (kgm/s²/m²)、 $\sigma_t = \rho V^2$ である。単位体積当たりの貯蔵エネルギー量は

$$E/(2\pi r t L) = \sigma_t / 2 \dots\dots\dots (20)$$

であり、フライホイールの密度ではなく許容応力に左右されることを示す。近年軽量高強度の FRP の実用化により小容量機が実用化され、現在高温超電導材を使用した磁気軸受を用いたフライホイールの実用化が進められつつあり、高性能化と大型化による本格的実用化が期待されている。

VI 分散型電源システム構築との機種選定

1. 電源システム選定

(1) 設置点の条件

分散型電源設置の基本的目的は排熱の有効利用等によるエネルギー効率の向上により、従来の集中型電源より安価に電力を供給すること、CO₂ 排出量低減等の環境負荷を低減することである。従って、電源型式選定に際しては、使用燃料の種類(例えば都市ガスの有無)、環境規制条件(排煙、騒音、振動)、冷却水の有無、設備容量、熱需要の有無、電力/熱(蒸気・温水の必要条件)の需要割合および変動、負荷パターン、系統連携の有無/系統容量、所用スペース等の設置点のあらゆる条件を考慮して、エネルギー効率の高い設備にすることが基本である。すなわち、これらの環境条件にたいし最適システムの構築と最適機種選定が重要である。

経済性は設備コスト、燃料価格や電力価格等の諸条件に影響されるが、本格的に実用化されている熱機関では発電効率 35%が経済性判断の目安とされ、35%以下では熱需要のあることが経済性確保の観点から必要とされる。また、超高効率発電が期待される燃料電池は風力発電や太陽光発電等の再生エネルギー発電と同様に、地球温暖化防止および燃料資源節減に非常に有効であるが、実用化初期は製造費が割高で経済性の確保が困難であるので、公的支援等による製造の低コスト化や導入促進が必要と思われる。

(2) 設置目的と電源型式

電源の適正型式は主に燃料の種類に依存する。例えば大容量ガスタービンはLNG(または大量の都市ガス)の供給が可能である所、中小容量のガスタービン、ガスエンジンおよび燃料電池は都市ガス(またはLNG)の利用できる所に限定される。LNG および都市ガスの利用できない所では、重・軽油を燃料とするディーゼルエンジンにほぼ限定される。燃料価格によっては都市ガスが利用できる所においても重・軽油の価格次第でディーゼル発電の経済性が高くなることもある。

また、熱(蒸気または温水)の安定した需要があるところでは、~85%に及ぶ高いエネルギー効率が得られるので高い経済性と共に大幅な環境負荷低減が可能であるが、温度条件や熱需要の割合および変動に適応できる電源システムおよび機種選定を行うことが必要である。通常安定した電力需要がある場合が多く、発電を主体とした設備とすることが多いが、安定した熱需要があれば発電効率が 30%以下の機種(例:マイクロガスタービン)でも経済性が得られる。二流体タービンプラント(HAT、熱電可変タービンプラント)は熱(蒸気)需要が変動する電源に適し、蒸気の需要変動に応じ燃焼器投入蒸気量を調整して合理的な運転を行うことができる。

(3) 系統連携と発電設備

系統連携を行う分散電源には供給の信頼性と電力品

質確保が求められるので、発電機や電力変換機器の選定に十分な注意が必要である。

①電力供給信頼性の確保

電源設備には高い信頼性が求められる、特に逆潮流する系統連携においては、異常時は解列し系統への影響を防止する対策が必要である。また系統に短絡事故等の異常が発生した時も解列し、系統遮断器解放後の短絡電流の供給防止が必要である。

②系統電力の安定性および品質への考慮

逆潮流する系統連携においては、常時電圧変動、瞬時電圧変動および高調波抑制対策等が必要であり、機器選定に際し考慮が必要である。発電機容量に対し容量が小さい系統において誘導発電機を用いると、突入電力による瞬時電圧低下や電圧変動を起因するので発電機には同期機が採用される。高速回転するマイクロガスタービンでは永久磁石を適用した同期発電機にパワーエレクトロニクス(コンバータおよびインバータ等)を併用して、規定の電圧および周波数の電力とし力率調整して系統に供給する。

また、風況により出力が変動する風力発電では、系統への影響軽減や可変速運転による出力変動低減のため同期発電機にパワーエレクトロニクスを併用した発電装置が実用化されている。発電機(通常多極)の軽量コンパクトシンプル化および信頼性向上の観点から永久磁石を回転子に用いた発電機が実用化されている。同期発電機を用いれば容量の小さい系統への連携や単独運転が可能である。

燃料電池、二次電池および太陽光発電は直流発電であるので、自励式インバータにより規定の電圧および周波数の交流に変換し同期投入して突入電流の減少を図る。

③高調波対策

インバータを用いて系統連携を行う場合高調波電流が発生し、家電機器やOA機器等の過熱や焼損を生じる可能性があるため、高速スイッチング(PWM)等を用いて高調波を抑制することが必要である。

2. 電源システム構築—発電システムと熱需要システムの統合による全体システムの最適化

通常、熱機関や燃料電池を主機とする分散型電源は、発電システムと熱需要システムを統合して最高熱効率が得られる全体システムを構築し、そのシステムに最も適合する高効率発電装置を選定することが基本である。発電が主体である場合は最高効率発電に適した発電設備を選定し、これに排熱の高効率利用に適した熱需要システムを構築することが必要である。

前記分散型電源用各機種の一般的排熱温度は、大容量ガスタービン約 550~650°C、高圧力比ガスタービン、二流体タービン、ディーゼル、ガスエンジンは約 400~500°C、マイクロガスタービン 250~300°C、固体電解質燃料電池(SOFC) 900~300°C(ガスタービン設置の場合)、固体高分子燃料電池(PEFC)約 80°Cである。従って、例えばPEFCの排熱は浴場、暖房、温水プールや厨房等の温度数十°Cの比較的低温の熱需要に限定され、一般の吸収冷凍機用熱源には有用でない。一方吸収冷凍機の高温再生器のように高温熱源を必要とする場合は高温排熱を供給できるSOFC、ガスタービン、ガスエンジン等が適当である。また、排熱量は発電効率が高い機種ほど少なく低い機種ほど多いことも全体システムの最適化に考慮することが必要である。吸収冷凍機においては、例えばガスエンジンと組合せ、排熱ボイラ発生蒸気を高温再生器の熱源に、エンジン冷却水を排熱回収熱交換器

(吸収液加熱)の熱源に利用すること等により、高効率の熱併給分散電源を構築することができる。

VII まとめ

主な分散型電源の概要と最近の技術の進展について述べた。従来型大容量集中型電源に付随する問題点が顕在化しつつあるなかで、近年分散型電源はその技術の進展と吸収冷凍機等の熱需要の増加により有用性が増大し、電力事業法やガス事業法改正等の分散型電源普及のための環境整備も進められている。化石燃料を使用する分散型電源対応機種は、発電性能においても従来型集中電源と同等水準に達しているが、熱需要地に設置することにより集中型電源の倍にも及ぶ高い熱効率を得ることが可能であり、燃料資源の節減とCO₂削減に非常に有効な対策になり得る。

工学的観点からみれば、これからの分散型電源は従来型熱機関から電気化学的直接発電やパワーエレクトロニクス技術を活用した原動機及びそれらをハイブリッド化した発電装置に進展(原動機と電気化学装置およびパワーエレクトロニクスとの融合一体化)する。技術とその可能性を正しく予測した技術開発への取組みが重要である。

分散型電源対応機種はそれぞれ特徴があるので、設置環境や運用条件に最適なシステムの構築と機種選定が最大効果を得るのに重要である。

燃料資源を殆ど産出せずCO₂の大幅削減が必要な我が国は、エネルギーセキュリティ(エネルギー安定供給の確保)および地球環境保全の観点から、また技術立国としてますます重要性を増す分散型電源や再生エネルギー発電技術の一層の向上とそれらの導入・普及の促進が必要である。これは同時に我が国の技術力の向上と産業・経済の発展に有効であろうと思われる。以上

<参考文献>

- (1) 資源エネルギー庁試算
- (2) 久留、「分散電源技術の進展」、クリーンエネルギー-Vol.10 No.3 2001
- (3) 梅村他、「最新鋭1500℃級ガスタービンの開発・運転状況」、三菱重工技報VOL.35 NO.1 1998
- (4) 三菱重工業(株)製品カタログ「三菱ガスタービン501G/701G」
- (5) 「GE Aero Energy Products」GE home page 01/07/04
- (6) D.Smith, 「SPRINT spray intercooling augments LM 6000 output」、GTW July-August 1998
- (7) V. d. Biasui, 「DOE evaluating CHAT for next generation gas turbine program」、GTW May-June 2001
- (8) 久留、「熱併給発電設備」、特願昭61-278750号(1986.11.25)
- (9) 久留他、「タービンプラント」、特願昭63-224698号(1988.9.9)
- (10) マイクロガスタービンメーカー各社のパンフレット
- (11) 宮野他、「三菱KUシリーズディーゼル機関の開発」、三菱重工技報Vol.34 No.4(1997-7)
- (12) 三菱重工業(株)製品カタログ「三菱ディーゼル発電プラントKUシリーズ」
- (13) 中野他、「高性能希薄燃焼ガスエンジンの研究開発」、三菱重工技報Vol.38 No.4(2001-7)
- (14) 三菱重工業(株)製品パンフレット「MACH-30G」
- (15) 福澤他、「高効率ミラーサイクルエンジンの開発」、三菱重工技報Vol.38 No.4(2001-7)
- (16) 三菱重工業(株)カタログ「ミラーサイクルエンジン」
- (17) 久留他、「期待される新エネルギー」、電学誌116巻9号、(1996)
- (18) 小川(紀)、「廃棄物発電技術の現状」、エネルギー・資源Vol.22 No.3 (2001)
- (19) 久留他、「水素利用クリーンエネルギーシステム(WE-NET)用主機の開発」、三菱重工技報、Vo.35 No.1(1998-1)
- (20) 久留、「CO₂回収高効率発電技術」、クリーンエネルギー、Vol.9 No.2 (2000-2)
- (21) 久留(長)他、円筒型SOFCの開発状況、三菱重工技報VOL.37 NO.1(2000-1)
- (22) 久留、「21世紀の超高効率発電技術」、クリーンエネルギー、Vol.9 No.8 (2000-8)
- (23) 久留、「分散型電源システムの最新技術開発動向」、(株)技術情報センター講習会テキスト、2002-8
- (24) 山地・藤井、「グローバルエネルギー戦略」、電力 新報社1995
- (25) 清水、「大型風車の現状」、ターボ機械第29巻第9号(2001.9)
- (26) 牛山、「風力発電の最新技術」、化学工学第63巻第8号(1999)
- (27) 三菱重工業(株)製品カタログ「Mitsubishi WIND TURBINE」
- (28) 「Towards the 5MW turbine」、MPS Germany Supplement 2000
- (29) Andreas Wagner and Martin Kuhn, 「Offshore wind : Utgrunden leads the way」、MPS October 2001
- (30) 長田他、「ギヤレス可変速風力発電装置の開発」、三菱重工技報VOL.38 No.2 2001
- (31) 「2001太陽光発電システム」、Solar Systems No.85
- (32) 浜川、「太陽光発電の最近の進歩」、ENERGY 2000-6
- (33) 田中、「NAS電池システムの開発と今後の展望」、電気評論2001.8
- (34) 寺田、「リチウム二次電池の開発状況」、電気評論2001.8
- (35) 徳田他、「レドックスフロー電池の開発と実証試験の状況」、電気評論2001.8
- (36) 米田、「次世代コンデンサとして注目される大容量電気二重層コンデンサ」、OHM 2000/7
- (37) 岡村、「電気二重層キャパシタを用いた蓄電装置」、電学誌Vol.120No.10(2000)