

# 複合機関



東電富津火力発電所／各世代の  
コンバインドサイクルプラント



1軸式複合発電／新電気 2012.9

# 概要

化石燃料需要の増大と地球環境保護のためのCO<sub>2</sub>削減に対する対応としてエネルギーの効率的な利用は世界の喫緊の課題であり、複合機関はそのひとつの解決策として、種々の開発研究と実用化が進められている

設備全体としての狙い:

1. 時間、季節の需要変動とのマッチング
2. エネルギー変換効率、部分負荷特性の向上
3. 全体システムのCO<sub>2</sub>発生削減の計画
4. 石油代替エネルギーの活用
5. 電力、動力、熱源等の多様な需要に対応
6. 温度のカスケード利用、排気熱の徹底活用

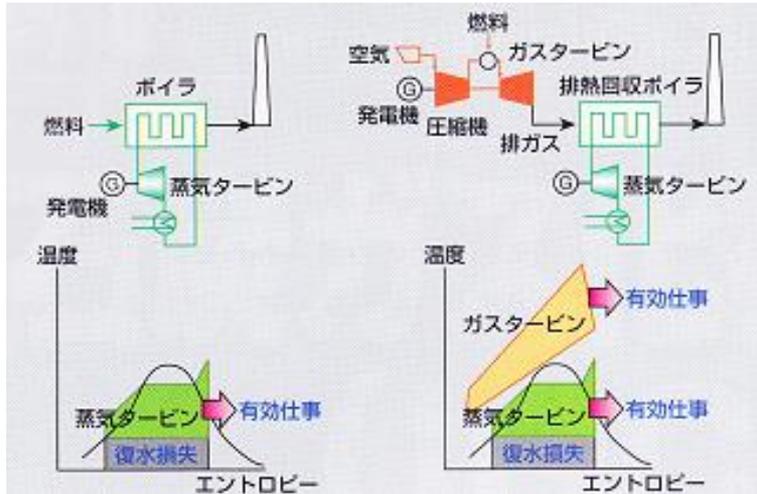


図60-1 シンプルサイクルとコンバインドサイクルの比較 (新電気2012.9 IGCC特集)

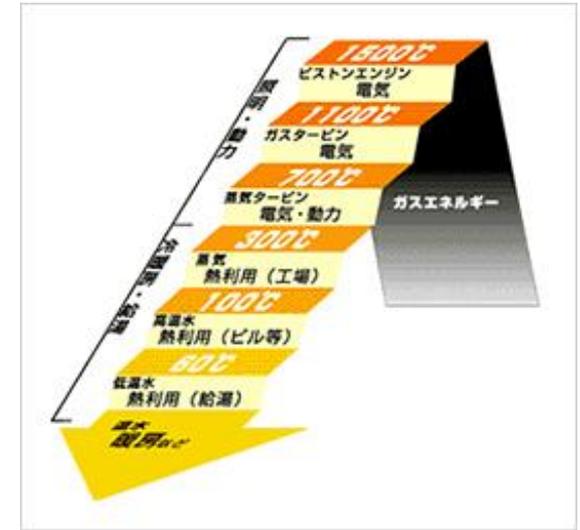


図60-2 エネルギーのカスケード利用 (東部ガス)

出力発生機関としての特徴:

1. 大出力発電装置 - 昼夜、夏冬の大きな需要変動に応じて迅速な出力応答性
2. 石炭火力 - 環境負荷を考慮した最高のサイクル効率の追求
3. コージェネレーション - 電力と熱供給の需要バランスに対応
4. 交通機関 - 自動車、艦艇など大きな速度変動の応じた迅速な出力調整
5. 地域エネルギー管理(EMS) - ビル、地区など一定の範囲でのコスト、環境上の最適なエネルギー供給

複合機関の一般的な課題:

1. 装置、燃料供給ライン、動力伝達ライン等が多くなり、出力当たりのコストが高くなる
2. 設備、部品数が多くなり、配置等に十分検討が必要
3. 異種機関を統合運用するため、制御が複雑
4. 異種機関の保守には慎重な計画が必要

# コンバインドサイクル発電

**コンバインドサイクル発電 (combined cycle/CC)** : 内燃力発電の排熱で汽力発電を行う複合発電。内燃機関としては主にガスタービンエンジン (以下「GT」) が使用され、ガスタービンコンバインドサイクル発電 (Gas turbine combined cycle/GTCC) という

高温部に1,100℃級GTを適用し、その排気エネルギーを蒸気系で有効に回収することにより、熱効率をHHV約43% (LHV約47%) ※1まで向上。また、小容量原動機の複数組み合わせのため、起動、停止操作が容易で需要の変動に即応。運転台数を調整することにより、部分付加でも高効率で運転が可能 (※1 HHV: 高位発熱量基準 LHV: 低位発熱量基準)

**1,300℃級コンバインドサイクル発電 (ACC)** : GTの入口ガス温度を1,300℃へ高温化するとともに、蒸気タービンの蒸気条件を高温・高圧化し、再熱サイクルを適用して熱効率を向上。熱効率はHHV約50% (LHV約55%)

**1,500℃級コンバインドサイクル発電 (MACC)** : GTの入口ガス温度をさらに1500℃に高温化。GTの耐熱材料の開発、蒸気冷却などの技術革新により、LHV約59% (HHV約53%) の高効率を実現する。CO2排出量の低減、大容量化による建設コストの低減などで、これからの火力発電の中心となる技術

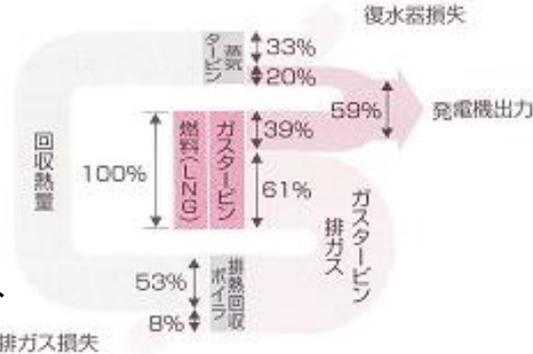


図60-3 CCのエネルギーフロー ① 排ガス損失

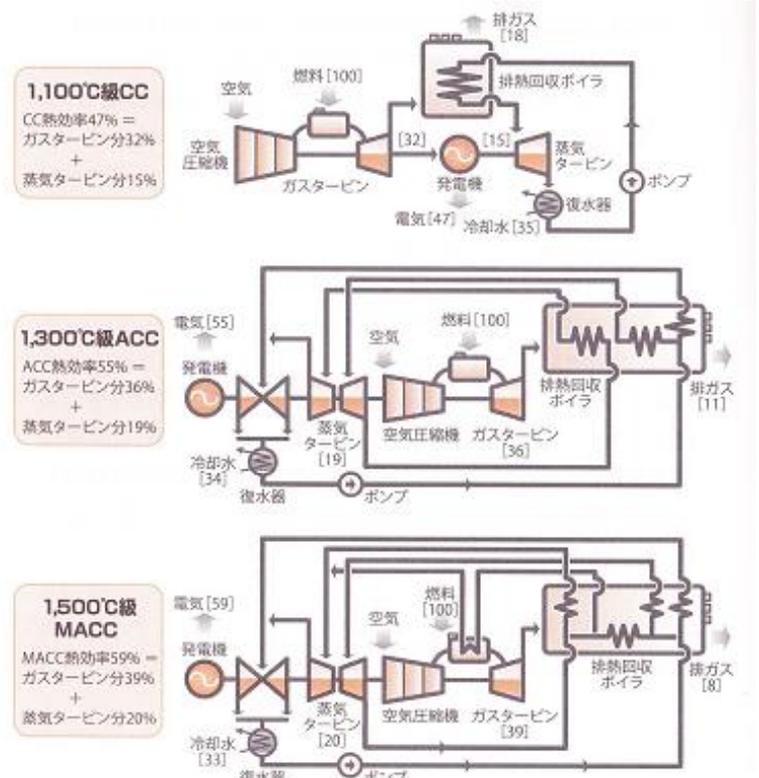


図60-4 GTCC、ACC、MACCのしくみ ③ 3

GT	天然ガス、軽油等を燃料として動力を得る
発電機	GTと蒸気タービンを動力として発電
排熱回収ボイラ (HRSG)	GTの高温排気で蒸気を発生するボイラー
蒸気タービン (ST)	蒸気から動力を取り出す
復水器	STの排出蒸気を冷却し、水に戻す

**加圧流動床複合発電 (PFBC : Pressurized Fluidized Bed Combustion)** : GTの圧縮機を使った加圧流動床ボイラーから発生した高温・高圧蒸気により蒸気タービンを回して発電するとともに、ボイラーの排ガスによりGT発電をする方式。従来型の微粉炭発電に比べ、送電端効率は約2%高くなる。ボイラーを小型化、発電所をコンパクトにつくることができる。

# コージェネレーション

**コージェネレーション／コージェネ (cogeneration):** 内燃機関、外燃機関等の排熱を利用して動力・温熱・冷熱を取り出し、総合エネルギー効率を高める、新しいエネルギー供給システムのひとつ

コージェネには発電用エンジンの種類により以下のタイプがある (Wikipedia)

**ガスタービンエンジンシステム:** 発電用GTにより排出される排気によって蒸気を作る。蒸気吸収冷凍機で冷熱を製造したりと、蒸気使用設備で有効に使用される。発電効率23～39%、総合効率で69～86%が可能

**ガスエンジンシステム:** 発電用ガスエンジンの排気熱ボイラで蒸気を製造したり、エンジン冷却水で水道水を加熱し給湯する。蒸気を蒸気使用設備で使用したり、蒸気吸収冷凍機で冷熱を作る。温水は温水吸収冷凍機で冷熱を製造に使う。発電効率26%～49%、総合効率で72%～92%が可能

**ディーゼルエンジンシステム:** 発電用ディーゼルエンジンの排気熱をガスエンジンシステムと同様な用途に活用。発電効率33～45%、総合効率で64～81%が可能

**燃料電池システム:** 水素と空気中の酸素から電気をつくりだし、副次的に発生する熱を蒸気や温水として回収する。現在、発電効率35～65%、総合効率で80～90%に達している。排出されるものは、CO<sub>2</sub>、水以外ほとんどなく、騒音や振動も少ない。大型で高効率のものは、現在、実証実験段階

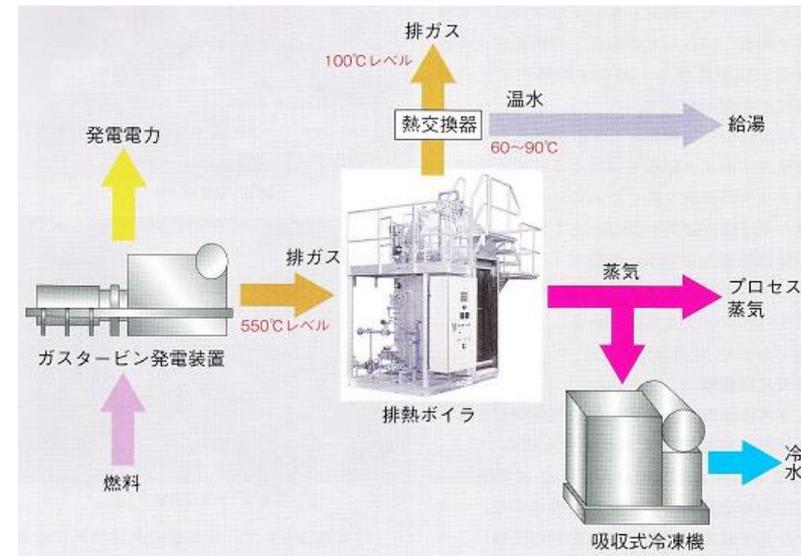


図60-5 コージェネ排熱利用の例 ④

日本のコージェネ導入量は314億kwh/2010年度、1200億kwh/2030年度(目標)。分散型電源を地域に配置することにより電力需給が緩和できる (日経産業新聞2013.5.23-29)

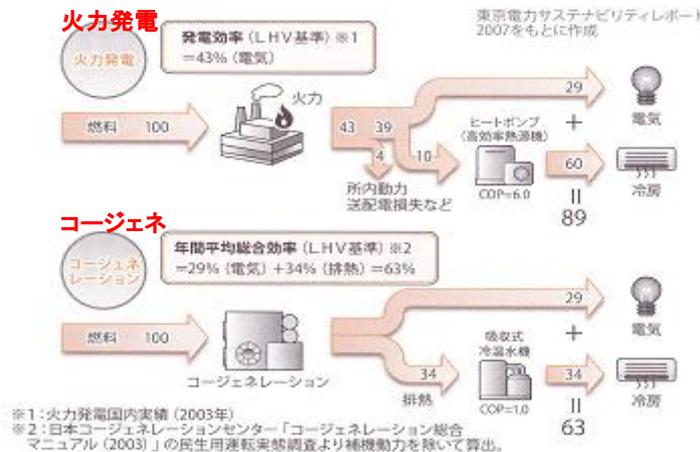


図60-6 コージェネエネルギーフロー ③

**トリジェネレーション (tri-generation):** コージェネ(=電熱併用)の熱、電気利用に加え、発生するCO<sub>2</sub>も温室栽培などで有効活用するエネルギー供給システム。京都議定書発効を契機として、近年導入されるようになりつつある。(Wikipedia)



図60-7 コージェネ導入量 ④

# IGCC

**石炭ガス化複合発電 (IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle):** 石炭燃料のガス化とコンバインドサイクル発電を組み合わせた発電形式。微粉炭をガス化炉に供給して、約3MPa、1300~1800°Cの条件で空気あるいは酸素と反応させて、水素・一酸化炭素を主成分とする不純物のない燃料ガスを発生させる複合発電技術

IGCCでは、低質な石炭や重質油、廃棄物などの燃料に含まれる硫黄や塩素、重金属を燃料ガス化により除去して生成したクリーンなガスを用いて発電。環境負荷物質排出の少ない発電を行うことができる。また、従来の方式に比べてCO<sub>2</sub>排出量を削減し、石炭を燃料とした発電で石油発なみのCO<sub>2</sub>排出量を達成することができる

IGCC実証実験: クリーンコールパワー研究所 (CCP: 電力9社と電源開発の共同設立) は経済産業省の補助金で2007年より福島県いわき市で実証試験を開始。2010年度で5000hr耐久試験を含め、初期目標を達成。出力25万KW、送電端効率42%。その後IGCC技術の成熟化のため運転を続け、2012年12月終了。2013年以降は常磐共同火力がCCPを吸収して商用電源として運転を継続 ④

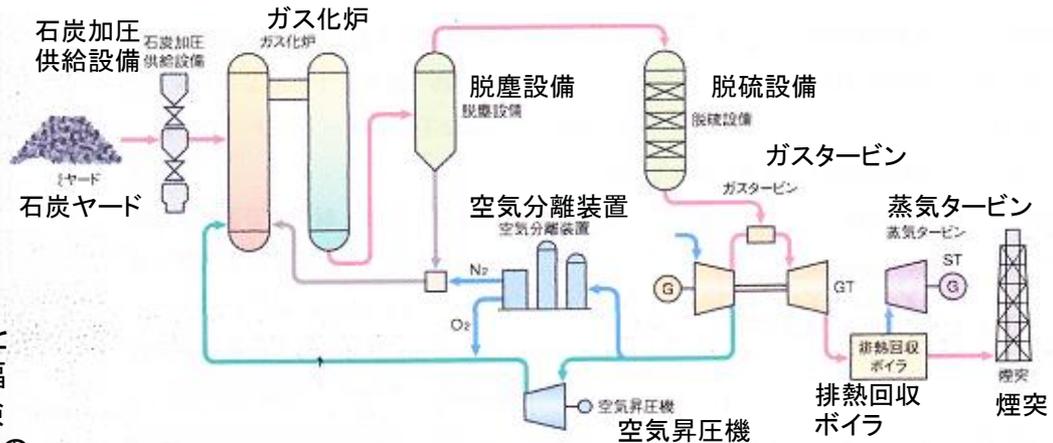


図60-8 IGCC系統図 (J-COAL)

① 微粉炭火力		② 石炭ガス化複合発電 (1,500°C級IGCC)		③ 石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC)	
最新火力(USC)	A-USC				
発電端: 43% (HHV) 送電端: 41% (HHV) (比較ベース)	発電端: 48% 送電端: 46% CO <sub>2</sub> 低減: 約▲11%	発電端: 51~53% 送電端: 46~48% CO <sub>2</sub> 低減: 約▲13%	発電端: 60%以上 送電端: 55%以上 CO <sub>2</sub> 低減: 約▲25%以上		

図60-10 高効率石炭発電システムの目標効率 (OHM 2013.3/J-COAL)



図60-9 IGCC実証機全景 (新電気 2012.9/CCP)

# トリプル複合発電

一般的にGTと蒸気タービンの発電機を組合わせたGTCCの高温ガス上流側に固体酸化物型燃料電池(SOFC)の発電を組合わせたもの。GTCCより一層の効率化とCO<sub>2</sub>排出量削減を狙う

トリプル複合発電はNEDOの公募研究「固体酸化物形燃料電池を用いた事業用発電システム要素技術開発」に対するMHIの提案が採択されたもので、開発期間は平成24年度から2カ年の計画 (MHI PRESS Information/2012年6月1日)

**石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC: Integrated Gasification Fuel Cell):** 石炭をガス化してそのガスを使って燃料電池(以下「FC」)、GTおよび蒸気タービンにより発電する技術。FCには陽極に酸素、陰極に燃料ガスを連続的に供給して電気化学に反応させて発電する。FCを出た高温高圧のガスを利用してさらにGTおよび蒸気タービンを回して発電する。IGCCよりさらに高効率で送電端効率は55%以上 (J-COAL)

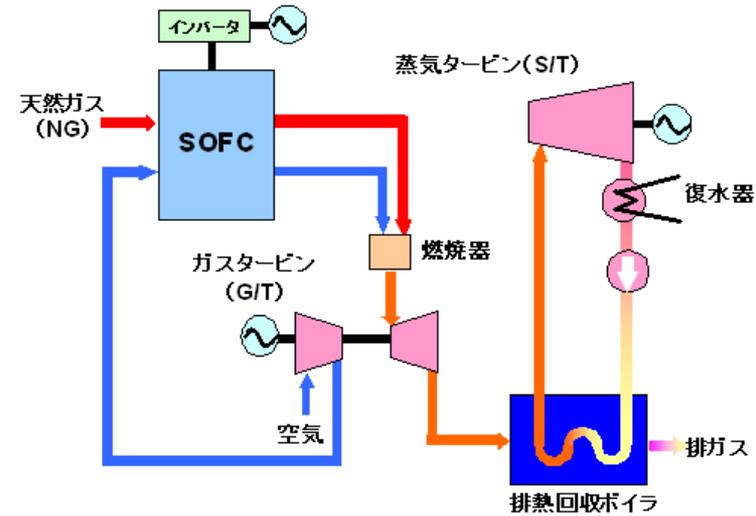


図60-11 トリプルCCのフロー (MHI)

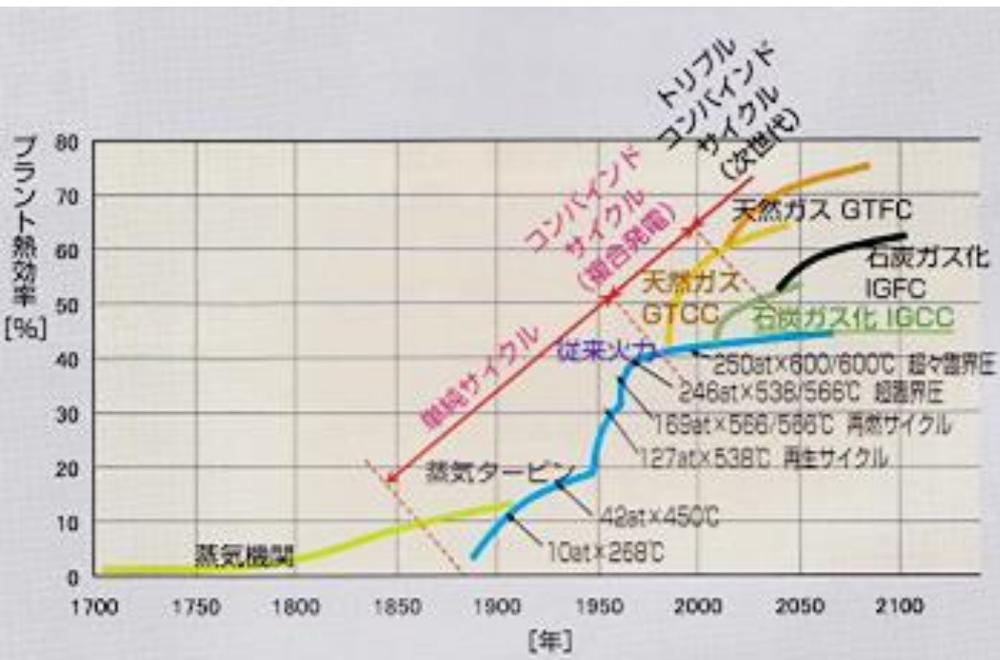


図60-13 火力発電効率向上のロードマップ (新電気誌 2012.9)

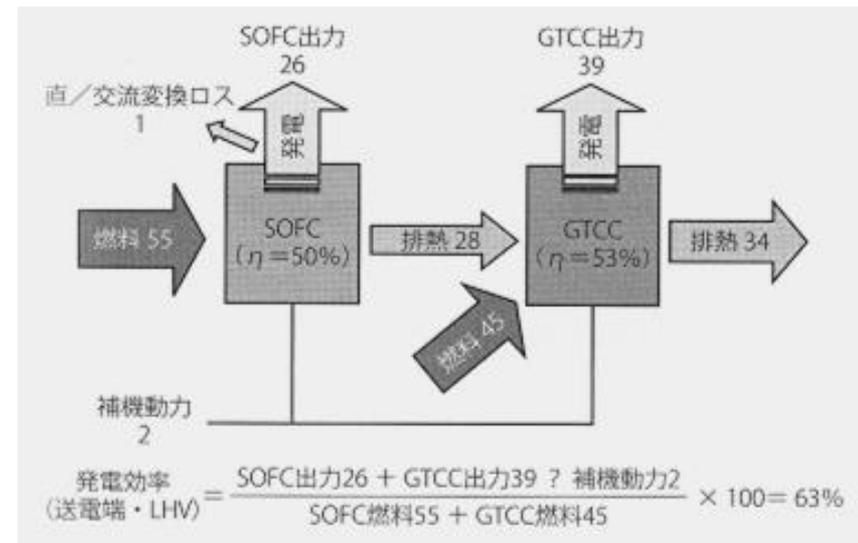


図60-12 トリプルCCヒートバランスの例 ②

# 熱電発電

**熱電変換:** 熱エネルギーと電気エネルギーとの間の直接変換で、特殊な半導体や金属材料を用いて、効率良く相互エネルギー変換を行うもの。材料に温度差を与えると起電力が発生するゼーベック効果により熱流から電力を取り出したり、反対に材料に電流を流すことで吸熱現象を起こすペルチェ効果により物を冷やすことができる (AIST)

熱電変換の本体である熱電素子は可動部分がないため、長寿命でかつ長期にわたって保守作業を必要としない。これは人工衛星の電源として極めて重要な特性であり、1960年代から米国と旧ソ連により宇宙探査衛星用電源目的のための研究が行われてきた。近年、熱電発電は廃熱から電力エネルギーを直接回収する技術として世界的に注目、日本ではNEDOのプロジェクトが組まれた。現在、これらの成果をもとに工場や自動車の排熱、地熱や温泉の熱などの未利用熱エネルギーを電気エネルギーとして利用するための手段として研究開発が進められている

- 特長**
- ・動く部分がない(全固体デバイス, 高信頼)
  - ・小型化しても効率が変わらない
  - ・構造がシンプル(軽量, 小型, 高信頼, 長寿命)
  - ・同じ原理で広い温度範囲に適用できる(材料開発次第)

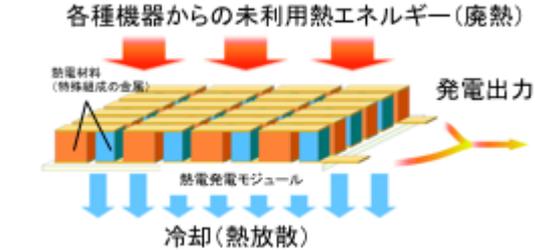


図60-14 熱電発電の原理 (AIST)

注)  
LCA: ライフサイクルコスト  
ETP: eco-toxicity potential

- 材料高性能化
- 高信頼長寿命化
- システム化技術

- 社会受容性の改善**
- LCA, ETP評価
  - 適用事例の拡充

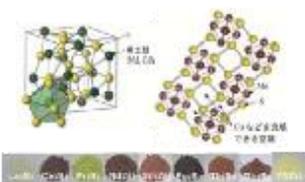


図60-15 熱電発電技術の中長期的展望 (AIST)

## 新材料合成技術開発

## 熱電発電モジュール設計・試作・技術開発

## 発電性能評価技術開発



環境負荷の低い硫化物熱電材料等



高効率セグメント型モジュール  
高効率カスケード型モジュール



低環境負荷新材料モジュール



パッケージ型モジュール



標準的発電特性評価システム

注) AIST=独立行政法人産業技術総合研究所

図60-16 研究開発課題 (AIST)

# ハイブリッドカー

**ハイブリッドカー**: 作動原理または利用エネルギーの異なる複数の動力源をもち、単独切換あるいは複数の動力源により走行する車両。日本で一般的に内燃機関と電動機を動力源としてHEV (hybrid electric vehicle) という

HEVのシステムは、一般的に以下の3方式に分類される。エンジンとモータの両方を備えるという点は変わらない ⑩

- 1. シリーズ方式** エンジンは発電のみに使用し、モータを車軸の駆動と回生のみに使用するもの。エンジンを発電用の動力源として搭載した電気自動車
- 2. パラレル方式** 搭載している複数の動力源を車輪の駆動に使用する方式。エンジンはトランスミッションを介して車輪の駆動も行い、同時に発電機の駆動も行う。蓄えられた電気エネルギーはモータへと送られ、走行用として使われる。また、モータは回生ブレーキにも用いられる
- 3. シリーズ・パラレル方式(スプリット方式)** エンジンからの動力をプラネタリーギアを用いた動力分割機構により分割(スプリット)し、発電機と車輪の駆動へ振り分けたり、エンジンとモーターからの駆動力を自由に合成することが可能な方式。発進時や低速走行時にはバッテリーに蓄えられた電気でEV走行、通常走行時にはエンジンを最大トルク近辺の燃料消費率の低い回転域で使用し、同時に発電機でバッテリーへも充電を行う

(注) 回生ブレーキ: 通常は駆動力として用いているモータを発電機として作動させ、運動エネルギーを電気エネルギーに変換して回収することで制動をかける電気ブレーキの一手法

トヨタはHEVをモータの駆動率によって「**ストロングハイブリッド**」と「**マイルドハイブリッド**」に分けて呼んでいる。マイルドハイブリッドは信号待ちなどでの短時間の停車時と、発進時にエンジンを停止させることを目的としたシステム。モータとしても働く36ボルトの専用オルタネーターを持ち、それがVベルトを介し、アイドルストップ時のエアコンプレッサーの運転、発進用モータ、エンジン再始動用スターター、通常発電機、回生発電機として機能する

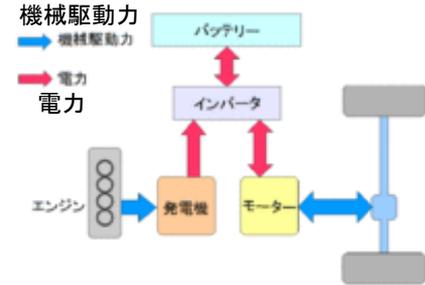


図60-17 シリーズ方式 (Wikipedia)

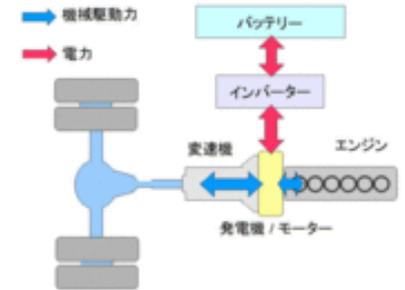


図60-18 パラレル方式 (Wikipedia)

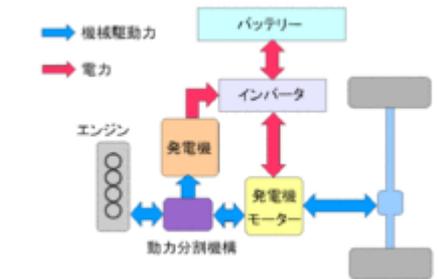


図60-19 シリーズ・パラレル方式 (Wikipedia)

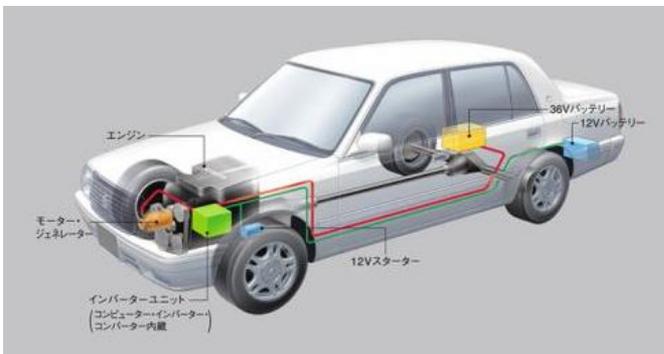
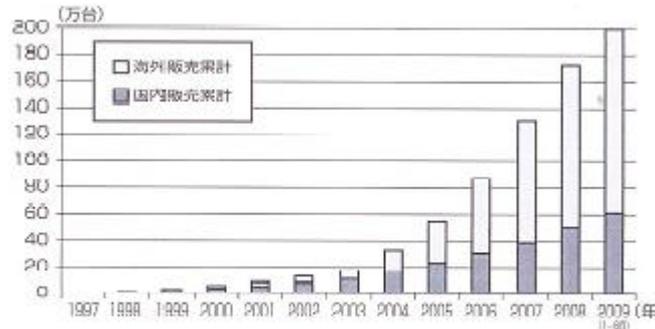


図60-20 トヨタマイルドハイブリッド (Gulliver)



●トヨタのハイブリッドカーの累計販売台数200万台突破の推移

図60-21 ハイブリッドカーの普及 ⑩

# 舶用機関

艦艇では30kt以上の高速時と15kt以下の巡航時では主機の要求出力に10倍近い差があり、1台のエンジンでは効率的な対応が不可能。巡航時とは別に**高速用には軽量・小型で大出力のガスタービン(GT)**が組合わされる

(以下Wikipedia - 「CODOG」より)

組合せエンジン	巡航時	高速時	メリット	デメリット	海上自衛隊艦艇の例
<b>CODOG</b> Combined Diesel Or Gas turbine	DE	GT	減速歯車装置の設計はCODAGより容易	走行時GT、DEのいずれかがデッドウェイトとなる	DE艦「とね」: DE2基、GT2基 2.7万PS 基準排水量2000t 2003年2月竣工
<b>CODAG</b> Combined Diesel And Gas turbine	DE	+GT	高速時、全出力を活用	DE、GT異種特性の同時運転が難しい	
<b>COGOG</b> Combined Gas turbine Or Gas turbine	小型GT	GT	減速歯車装置の設計は容易	巡航用GT、高速用GTのいずれかがデッドウェイトとなる	DD艦「あさゆき」: GT4基 4.5万PS 基準排水量3050t 1996年2月竣工
<b>COGAG</b> Combined Gas turbine And Gas turbine	少数GT	+GT	全機同一GTでは操作性・保守性に優れる	巡航時GT部分負荷では燃費が悪い	DDH艦「いせ」: GT4基 10万PS 基準排水量13950t 2011年3月竣工
<b>CODLAG</b> Combined Diesel Electric And Gas Turbine	DE電気推進	+GT	減速歯車装置がなく静粛性が高い	電動モータを追加搭載	

**統合電気推進 (IEP: Integrated Electric Propulsion)**: DEとGTの両方を推進用電力を作るために使用するが、推進力はすべて電動機から得て、どちらのエンジンからも機械的には推進力を得ないシステム。客船クイーン・メリー2や、イギリス海軍の45型駆逐艦などに採用例がある

注) DE: ディーゼルエンジン

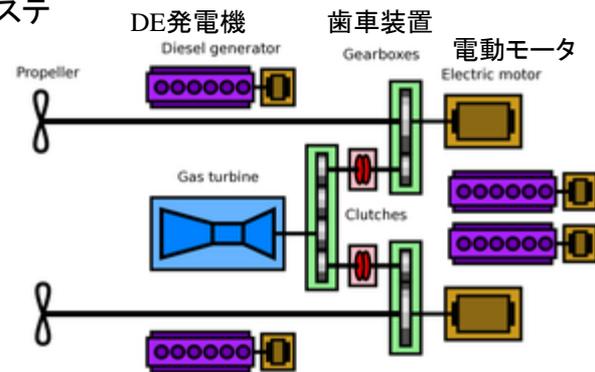
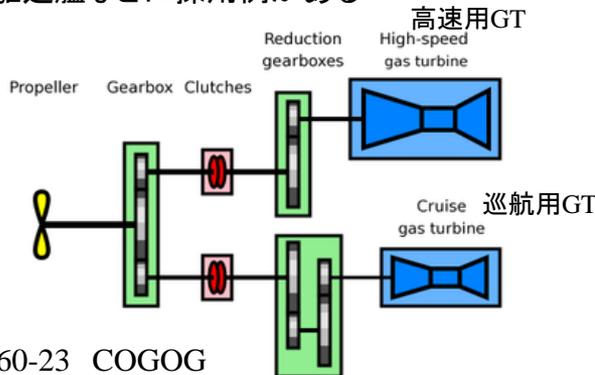
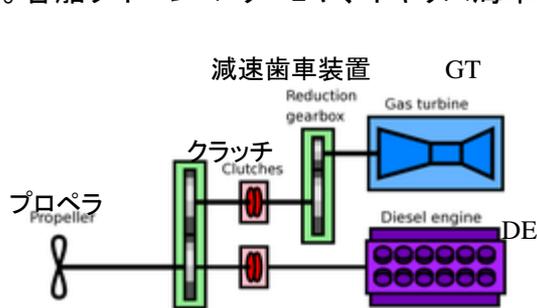


図60-22 CODOG (Wikipedia)

図60-23 COGOG (Wikipedia)

図60-24 CODLAG (Wikipedia)



# エコウィル

**エコウィル、エネファーム**：都市ガス、LPガス等を使って発電し、その際発生する排熱で給湯する家庭用コージェネレーションシステム。自宅で発電するため送電ロスほぼゼロ。発電装置、貯湯タンク設置のスペースが必要

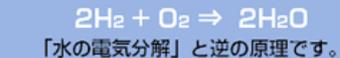
**エコウィル**：家庭用コージェネの愛称。ガスエンジンで発電し、その際に発生する排熱を給湯などに利用する

**エネファーム**：家庭用燃料電池コージェネの愛称。燃料電池で発電し、発電時の排熱を給湯に利用する

- 利用者のメリット：
- 発電で発生した排熱を直接有効利用できるため、エネルギー利用率が高い(エコウィル92%、エコキュート80%、通常の火力発電37%)
  - 発電した分、電気使用量が減る(年間約40%削減)
  - 補助金制度がある

- 利用者のデメリット：
- 貯湯タンク設置スペースが必要
  - ガス給湯器と比べると初期費用が高い
  - 定期点検が必要
  - 貯湯タンクのお湯が沸ききると発電を止める仕組みのため、お湯の使用量が少ない季節は発電量が減少する
  - 発電できる電力は、最大でも1kW(1,000W)程度

## 燃料電池の化学反応



メタン  $CH_4$  (天然ガスの主成分)

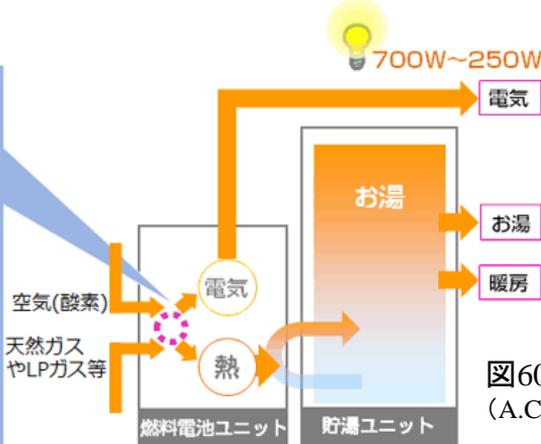
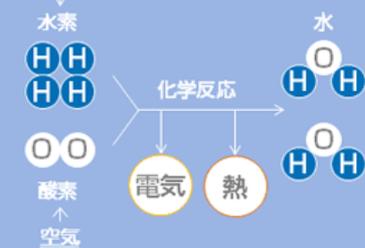


図60-27 エネファーム (A.C.E.J燃料電池室)

**参考**：コージェネではないが、給湯を主体に高効率化を狙ったものとして、エコキュート(電力会社)、エコジョーズ(ガス会社)がある

**エコキュート**：ヒートポンプ技術を利用し空気の熱で湯を沸かすことができる電気給湯機のうち、冷媒として、フロンではなく二酸化炭素を使用している機種

**エコジョーズ**：二次熱交換器で排気中の水蒸気を水にすることにより、温度計では計れない排気中にひそむ潜熱をも回収して、熱効率を大幅に向上させる



図60-26 エコウィル (東京ガス)

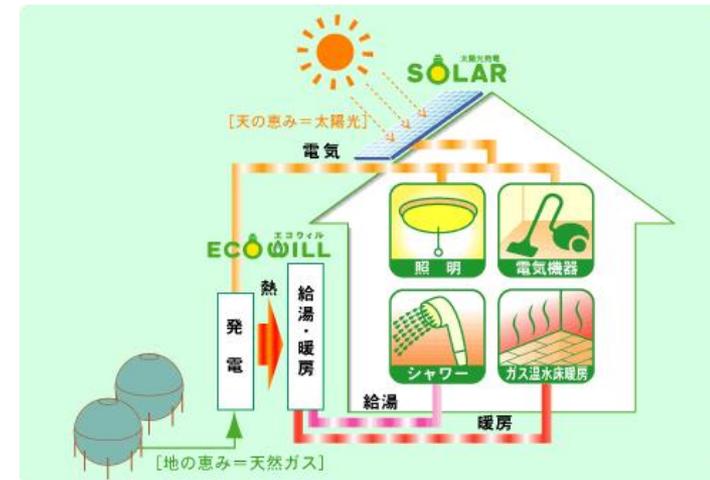


図60-28 太陽光のエネルギーと天然ガスのエネルギーのダブル発電 (東京ガス)

## 課題

<b>スマートグリッドの技術展開</b>	スマートグリッドは「システムのシステム」と言われるほど多くの部品と広いビジネス領域からなるシステム。今後は； a.システムの思考を持ったエンジニアの育成、 b.国際標準化活動への注力、 c.社会インフラとしての要求水準に耐えうる開発が必須となる ⑨
<b>EAGLE炉</b>	IGFC向けの技術開発として従来技術を凌ぐ高い石炭ガス化効率と適用炭種幅の広さを持つ酸素吹き1室2段型旋回流型噴流床ガス化炉(EAGLE炉)の開発が進められており、2002年度より電源開発(株)とNEDOの共同研究としてパイロット試験を実施している。EAGLEの狙いは酸素吹きIGCC.CO2回収技術の商用化にある ②、⑤
<b>GTCCの開発課題</b>	IGCC/IGFCでは発電効率の一層のアップを狙って種々の要素開発が進められている。主なものは、1. ガスタービンの高温化；1200℃→1500℃→1700℃、 2. 排熱をリサイクルするエクセルギー再生式など。送電端効率は、IGCC一現40%→57%、IGFC一目標65%
<b>ハイブリッドカーの課題</b>	HEVの一層の普及のためには、今なお電池性能についての課題を有している。電池エネルギーの密度はガソリンや軽油の1/100程度に過ぎず、航続距離の確保が難しい。航続距離を伸ばすために電池を多量に搭載すれば、車室空間の減少、車両重量の増大をきたし、電力消費量を悪化させるとともに電池コストが上昇し、車両価格が高くなる。車両寿命相当の電池寿命確保も大きな課題。

## キーワード

<b>エネルギーベストミックス</b>	各電源を最適なバランスで組み合わせていくという意味で使用されている。ベストミックスは、火力発電、水力発電、原子力発電などの各供給電源の特徴を生かし、その時々需要状況に適切に対応できるような電源の組み合わせを追求する。CO2などの温室効果ガスの大量排出による地球温暖化問題や化石燃料入手の不安定性もあり、化石燃料を出来る限り燃やさない方法で必要な量の電気を生産し、安定な供給が重要 (EICネット)
<b>分散型電源</b>	現在の電力需給システムの主流である電力会社の大規模集中発電に対して、需要地に隣接して分散配置される小規模な発電設備全般を「分散型電源」という。特に、燃料電池、太陽光発電や風力発電など新エネルギーを利用した分散型電源は、CO2など温室効果ガスの削減効果のため、普及への期待が高まっている ((社)日本電機工業会)
<b>CCS (二酸化炭素回収・貯留)</b>	排出されたCO2を、大気中へ出さずに地中や海洋などにため込む技術。CO2排出量が多い発電や製鉄業などにおける有効な削減手法として注目され、技術開発や制度面での整備、実証プロジェクトなどが世界各国で進められている。日本でも、低炭素、脱炭素社会の実現に向けた技術として、政府は2020年までの実用化を目指して、CCSの導入に向けた技術、政策両面での整備を進めている (環境goo)

下記文献は#31～59と合わせて巻末に収録するもので、この資料(#60)の末尾に載せるものではありません

## 参考資料

- ① よくわかる最新火力発電の基本と仕組み (社)火力原子力発電技術協会 秀和システム 2011.9.10
- ② 進化する火力発電 高橋毅 日刊工業新聞社 2012.9.28
- ③ 火力発電カギのカギ 相澤善吾ほか (社)日本電気協会新聞部 2009.9.28
- ④ 新電気 2013年1月号 特集ガスタービン発電設備 オーム社
- ⑤ Clean Coal Technologies in Japan
- ⑥ 日本機械学会誌 2013年4月号 新時代のエネルギー特集 (社)
- ⑦ トコトやさしいスマートコミュニティの本 NEDO編著 日刊工業新聞社 2012.6.15
- ⑧ よくわかるスマートグリッドの基本と仕組み 秀和システム
- ⑨ OHM 2013年1月号 特集再生可能エネルギー導入拡大とスマートグリッド
- ⑩ ハイブリッドカーのしくみがよくわかる本 御堀直嗣 技術評論社 2009.12.5
- ⑪ 各HP、パンフレット