

# CO<sub>2</sub>排出量を削減するエネルギー利用技術

Improvements in Energy Efficiency to Reduce Emissions of CO<sub>2</sub>

渡辺 雅浩 Masahiro Watanabe

二見 基生 Motoo Futami

千野 耕一 Koichi Chino

山岡 士朗 Shiro Yamaoka

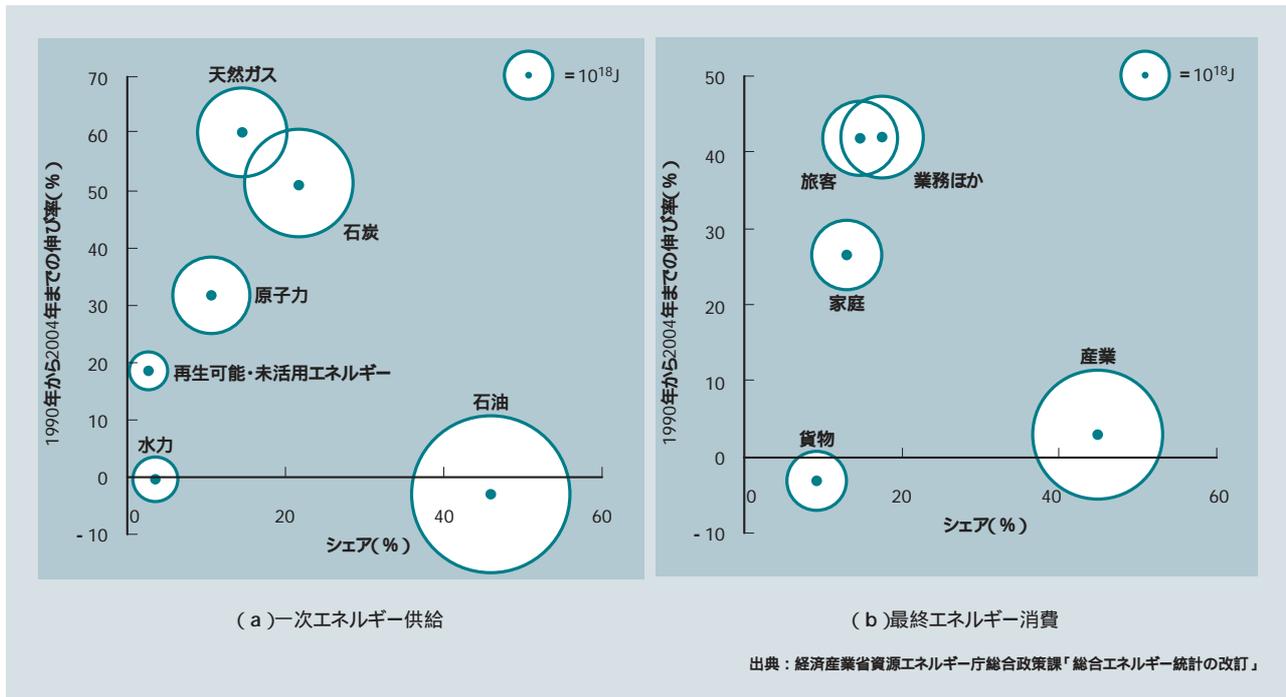


図1 わが国のエネルギー需給の内訳

一次エネルギー供給源は化石燃料が大きな部分を占める。シェアでは石油が、伸び率では天然ガスと石炭が大きい。また、新しい一次エネルギー供給源として、再生可能・未活用エネルギーが現れてきた。最終エネルギー消費は、シェアでは産業が、伸び率では旅客と業務ほかが大きい。

## 1.はじめに

わが国では発電方式が1960年ごろに「水主火従」から「火主水従」に転換して以来、火力発電の発電量が年々増加してきた。火力発電においては、石油、石炭、天然ガスなどから電気エネルギーを得る際、化石燃料の消費量に応じて必ず一定量のCO<sub>2</sub>排出を伴うので、火力発電所の発電効率向上はCO<sub>2</sub>排出量低減に直接つながる。わが国の一次エネルギー供給のシェアは石油が最も大きく、そのあとに石炭、天然ガスと続くが、伸び率では石炭と天然ガスが最も大きい(図1(a)参照)。日立グループでは、石油、石炭および天然ガスに対応した高効率発電技術の研究開発を推進している。

CO<sub>2</sub>排出を伴わない発電方式として風力発電や太陽光発電が注目されている。これらの発電方式は、限りある資源を消費するのではなく、自然の中で再生されるエネルギーを利

用するので、将来の持続可能社会を担う発電方式として期待が大きい。RPS(Renewable Portfolio Standard)法の施行もあり、再生可能・未活用エネルギー発電は普及拡大しつつある。日立グループでは、風力発電、太陽光発電の技術開発に取り組んでいる。

わが国のエネルギー消費に目を向けてみると、(1)旅客など運輸部門の伸びが大きいことと、(2)産業部門のシェアが大きいことが挙げられる(図1(b)参照)。運輸部門においては、自動車の燃費向上がCO<sub>2</sub>排出量低減のためにますます重要な課題となる。産業部門においては、熱と電気を有効に利用する最適省エネルギー制御技術が重要である<sup>1,2)</sup>。

ここでは、これらのビジョンに基づき、CO<sub>2</sub>排出量を低減するための技術開発を総合的かつ多面的に推進している日立グループの取り組みの中から、高効率発電技術、富士重工

エネルギー利用効率の向上は、CO<sub>2</sub>排出量低減の最も有効な手段である。特にわが国は化石燃料への依存度が高く、火力発電効率を高めることが重要である。また、化石燃料の代替として再生可能エネルギーへの期待や、RPS法の施行とも相まって風力発電が普及しつつあり、今後、風力の安定利用技術の向上でさらに普及が促進されると見込まれる。エネルギー消費においては、旅客など運輸部門のエネルギー消費の伸びが大きいことから、自動車の燃費向上は、CO<sub>2</sub>排出量低減のためにますます重要な課題となる。このようなビジョンに基づき、日立グループは、CO<sub>2</sub>排出量を低減するための技術開発を総合的かつ多面的に推進している。

業株式会社と共同開発した2 MW風力発電機の開発動向、およびガソリンエンジンの燃費低減技術について述べる。

## 2. 高効率発電への取り組み

IEA( International Energy Agency )の予測では、経済発展と人口増加によって世界のエネルギー需要は、2030年には2002年より59%増加する。その中でも、生活の質の向上により、電力需要の伸びは97%と大きく、電力使用量は現在の2倍近くになる。

発電電力量に占める燃料源の割合は、世界全体では化石燃料の石炭と石油、天然ガスの割合が、2002年で65%以上を占め、2030年には70%を超えると予想されている( 図2参照 )。地球温暖化防止の観点から、化石燃料を用いた発電プラントのいっそうの効率向上が不可欠である。

現在の石炭火力の中心は微粉炭燃焼による蒸気火力であるが、1970年以降、この発電効率の向上は限定的であり、革新的な技術開発が望まれる( 図3参照 )。

石炭をガス化してガスタービンの燃料にするIGCC( Integrated Coal Gasification Combined Cycle )は、海外ではすでに

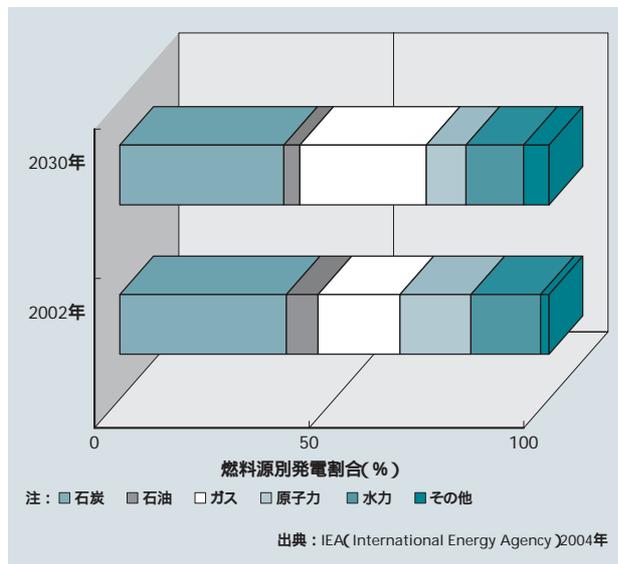
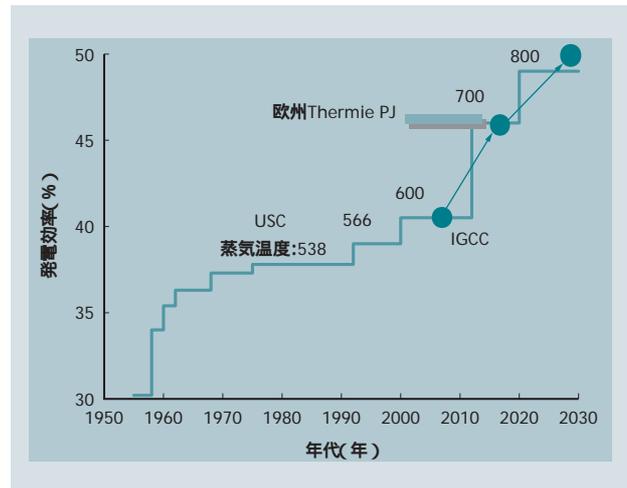


図2 発電に用いられる燃料の割合  
2030年までは化石燃料の利用が多いので、効率向上が主要な課題である。



注：略語説明 USC( Ultra Super Critical )  
IGCC( Integrated Coal Gasification Combined Cycle )

図3 石炭火力効率の変遷  
石炭火力の発電効率は、蒸気条件の改善が主力であり、将来はIGCCも主役の候補となる。

数基の商用プラントが建設されている。石炭から生成されるガスは発電とともに、液体燃料の製造に利用することも可能なので、将来の主役となる発電技術の候補である。しかし、一般に、新たな発電技術は、成熟した従来技術に比べて習熟度が低いために建設費がかさみ、また長期信頼性の実証が必要である。

蒸気火力の効率向上は蒸気温度と蒸気圧力の上昇によって達成され、現在では600級のプラントが建設されている。圧力も24.5 MPaと臨界圧力を超えて、超臨界状態の水蒸気になっている。高温条件を達成するには、高温領域で強度が高い材料を使用して、ボイラ耐圧部伝熱管の肉厚増加を抑えるとともに、熱応力の緩和と管内圧力損失を低減する必要がある。

蒸気タービン内部効率の向上では、翼形状の最適化のほかにシール流量の抑制や、排気部における圧力損失の低減が重要である。このために、流路形状の流体力学的な特性の解析が必須となる。近年の計算機の発達に伴い、大規模な計算によって複雑形状の解析が容易となり、CFD( Computational Fluid Dynamics )が設計で駆使される( 図4参照 )。

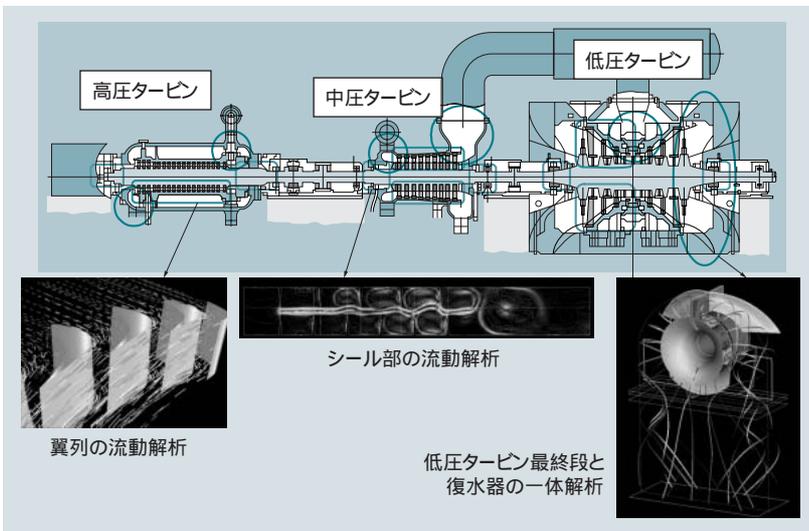
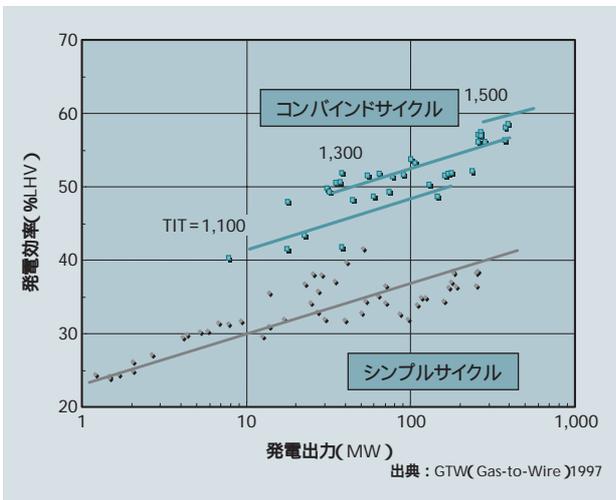


図4 蒸気タービン内の流動解析  
蒸気タービンの効率向上のためのアイデア確認には、流れの数値解析が必須である。



注:略語説明 TIT(Turbine Inlet Temperature:タービン入口温度)

図5 コンバインドサイクルの発電効率  
ガスタービンは大容量化と高温化で効率が向上する。

従来の流れ解析は理想気体を扱うにとどまっていたが、現在は蒸気による湿り条件や相変化も考慮した非平衡凝縮流れ解析が可能になった。

石炭火力のさらなる高効率化をめざし、欧州では700級の蒸気火力開発が進められている。技術の優位性を保つには、日本でもこれに対抗する大型プロジェクトが必要であり、Ni合金のような高温材料の開発がこの鍵となる。

石油と天然ガスを燃料にする発電方式としては、ガスタービンの排熱エネルギーを高圧蒸気として回収し、蒸気タービンを回すコンバインドサイクル発電の採用により、大幅に発電効率が向上した(図5参照)。発電効率の向上は、単機容量の増加とガスタービン入口温度の上昇が効果的である。現在1,500級のガスタービンが実用化されており、今後もさらなる高温化をめざした技術開発が必要である。

ガスタービン入口温度の上昇は、タービン翼の材料開発と

冷却技術によって実現される。最近では耐熱性に優れる単結晶翼も信頼性が高くなり、また材料では、母材の耐熱性向上に加えて、タービン翼表面をセラミックでコーティングするTBC(Thermal Barrier Coating) 光その有効性が示され、採用されている。

タービン翼の冷却では、冷却用の空気を翼表面に沿って流すフィルム冷却法の採用が大きな流れであるが、フィルム孔周辺の局所的な応力発生や、主流ガスとの混合損失によるガスタービン効率の低下もあり、タービン翼の内面から冷却する技術開発も盛んである。

タービン翼内の冷却構造の例を図6に示す。静翼には冷却空気を噴流として衝突させるインピジメント冷却を採用しており、熱負荷の大きい前縁部分の伝熱性能を向上する突起構造が特徴である。冷却通路には、三次元的な微小渦の発生によって熱の移動を促進させるリップを設けており、高い伝熱性能と低い圧力損失特性を示すV型スタガードリップを開発している。

### 3. 風力発電への取り組み

#### 3.1 自然エネルギー導入の拡大

地球環境問題への対応から、日本、欧州、北米など全世界で自然エネルギー発電システムへの関心が高まっている。中でも風力発電システムは大型化による設置や機器の面で低いコスト化が図られていることから、近年急速に導入が進ん

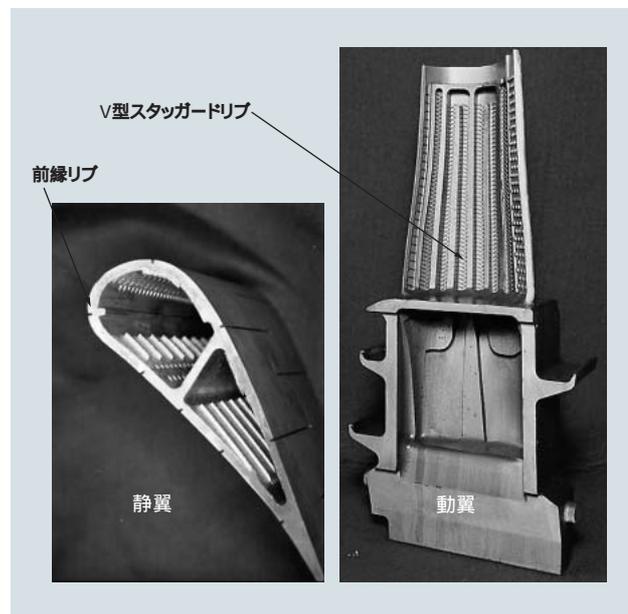


図6 ガスタービン翼内の冷却構造の例  
高温ガスに触れるタービン翼の冷却構造が信頼性と効率を左右する。

でいる。欧州では2020年に風力発電で電力の12%を賄うことをめざした活動が行われている<sup>4)</sup>。国内でも2010年には、300万kWの風力発電を導入することが目標となっており、2005年度末には107万kWに達したと発表されている。

風力発電システムは大容量化が進み、単機容量が1 MWを超える風力発電システムが実用化されたことにより、限られたスペースの中で、いっそう多くの発電電力を得ることができる一方、風速変動に伴う発電電力変動も大きく、電力系統に与える影響が懸念されている。

### 3.2 風力発電システムの発電制御

日立グループは、大容量風力発電システムに多く用いられている交流励磁式同期発電機の制御技術を可変速揚水発電システム向けに開発している<sup>5)</sup>。風力発電システムにおいても、電力変換器による電気制御で有効電力を制御する有効電力優先制御を適用した(図7参照)。

発電制御では系統側変換器と発電機固定子を合わせた電力を検出し、発電システムの有効電力および無効電力を検出している。電力変換器は風速に見合った発電出力となるように有効電力を高応答に制御し、電力系統に与える電圧変動を緩和するように無効電力を制御する。

また、発電開始時に交流励磁式同期機を電力系統に並入する際には発電機固定子の電圧振幅と位相が電力系統に一致するように自動調節することで、電力系統に与える擾(じょう)乱を低減している。



図8 2.0 MWプロトタイプシステムの外観  
2.0 MWプロトタイプシステムに搭載して実証試験を進めている発電機と電力変換器の外観を示す。

表1 「SUBARU 80/2.0」プロトタイプの仕様  
ダウンウインド方式により、発電電力量を増加する。

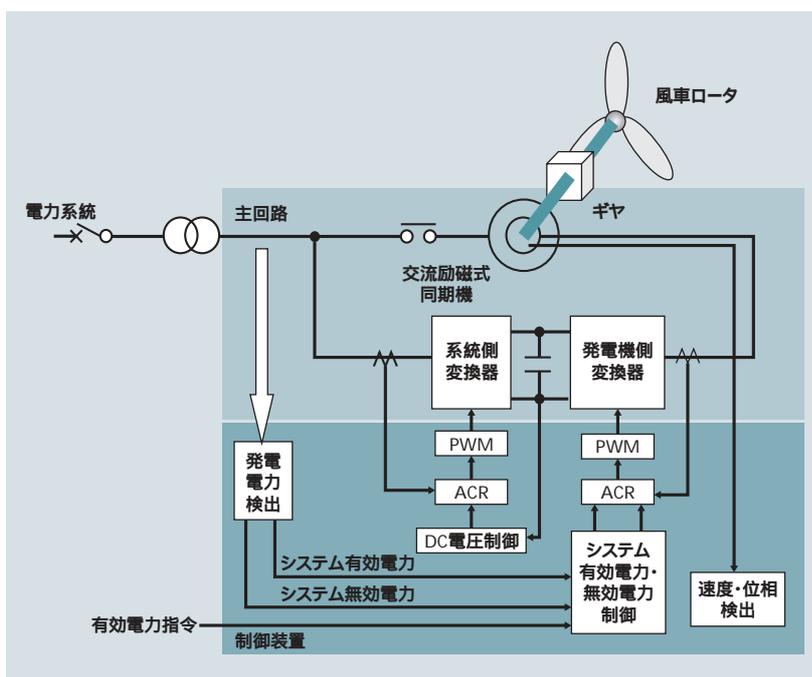
| 項目       | 仕様                            |
|----------|-------------------------------|
| 定格出力     | 2,000 kW                      |
| ロータ直径    | 80 m                          |
| ロータ位置    | ダウンウインド                       |
| カットイン風速  | 3 m/s                         |
| 定格風速     | 13 m/s                        |
| カットアウト風速 | 25 m/s                        |
| 回転速度     | 11.0 ~ 19.5 min <sup>-1</sup> |
| 増速比      | 1:66.6(50 Hz)                 |
| 発電機      | 交流励磁式同期機                      |
| 電圧       | 1,400 V                       |

### 3.3 日立グループの取り組み状況

これまでに大容量風力発電システム向けの電機システムを開発し、富士重工業株式会社と共同開発した2 MW風力発電システム「SUBARU 80/2.0」プロトタイプに搭載して運転試験を進めている(図8参照)。

実証試験を行っているSUBARU 80/2.0プロトタイプの仕様を表1に示す。ロータ位置はダウンウインド方式で、ブレードが風下側に取り付けられている。そのため、ロータ面が風上側に対して若干下向きになっており、丘陵地帯などの吹き上げ風に対してロータ面を正対させることができるため、通常のアップウインド方式より発電電力量を増加することができる。日本のように山岳地帯が多いところに適している。

今後も風力発電システムが電力系統に与える影響を緩和する技術の研究開発を



注:略語説明 PWM(Pulse Width Modulation), ACR(Automatic Current Regulator), DC(Direct Current)

図7 発電制御の構成の概要

発電システムの有効電力・無効電力制御により、電力系統に配慮した発電出力を実現する。

進め、風力発電システムの電力系統への導入を推進することで環境に貢献していく考えである。

#### 4. 自動車におけるCO<sub>2</sub>排出削減への取り組み

##### 4.1 ガソリンエンジンにおける低燃費化の要求

地球環境問題を考慮し、日本、欧州、北米など全世界で自動車の排気・燃費規制が強化される傾向にある。中でも地球温暖化に強く影響するとされるCO<sub>2</sub>排出の問題は、自動車の燃費低減にかかる期待が大きい。例えば、日本ではCO<sub>2</sub>総排出量の30%以上が自動車を中心とする運輸部門によって占められており、現在、各排気量の目標燃費への達成度に応じてインセンティブが変わる制度が導入されている。また、

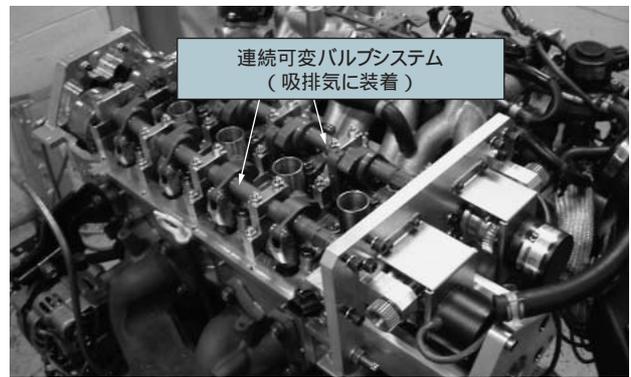


図11 試作エンジンの外観  
直列4気筒の筒内噴射エンジンに連続可変バルブシステムを搭載したHCCI試作エンジンを示す。

欧州では2008年に、企業の販売車台数平均で140 g/km (17.6 km/燃料1 L)の燃費自主規制が導入され、その後も燃費規制が強化される(図9参照)。今後強化される燃費規制に対応するためには、同図に示すように、ガソリンエンジンのさらなる低燃費化が望まれている。

##### 4.2 ガソリンHCCIの概要

日立グループでは、ガソリンエンジンの低燃費化技術の一つとして、HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition:ガソリン予混合圧縮着火)エンジンシステムの技術開発を進めている。

HCCIエンジンの燃焼は、ガソリンエンジンの特徴である点火プラグによる強制点火を用いずに、圧縮比を上げてピストン圧縮のみで混合気を多点自己着火させる形態である。このため、従来エンジンより熱効率がが高く、低温燃焼であることから、大幅な低燃費とNO<sub>x</sub>(窒素酸化物)排出量低減を両立することが可能である(図10参照)。

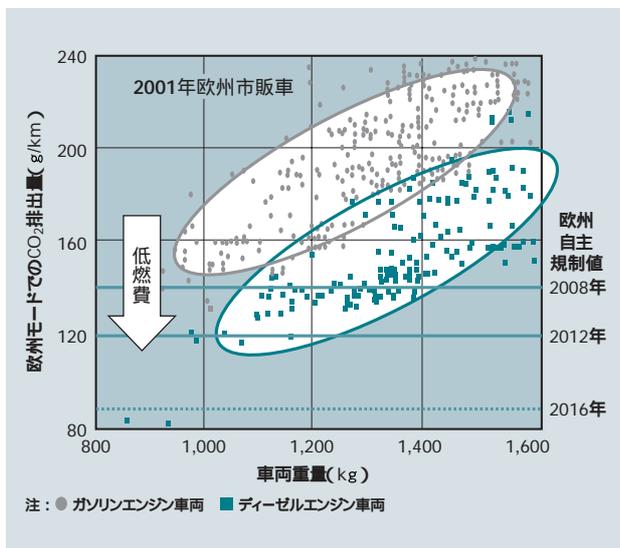
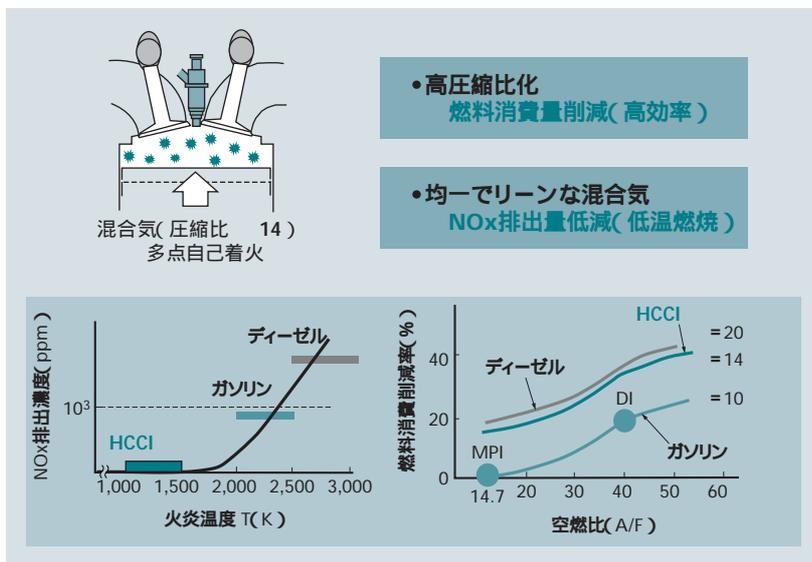


図9 欧州におけるCO<sub>2</sub>規制動向とエンジン燃費  
燃費規制の強化により、ガソリンエンジンにおいていっそうの低燃費化が望まれている。



注:略語説明 HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition), MPI(Multi-Point Injection) DI(Direct Injection)

図10 ガソリンHCCI燃焼のコンセプト  
高圧縮比化と、均一かつリーンな混合気の多点自己着火燃焼により、低燃費と低排気を両立する。

##### 4.3 日立グループの取り組み状況

HCCIエンジンを実用化するためには、広いエンジン運転領域で安定した燃焼制御を実現することが課題となる。日立グループでは、現在、連続可変バルブシステムと燃料の筒内噴射システムを搭載した4気筒エンジンを試作し(図11参照)、エンジンの筒内燃焼を総合的に制御する技術開発を進めている<sup>6)</sup>。

また、試作エンジン試験データとシミュレーションにより、同クラスの従来エンジンと比較し、燃料消費量の20%低減(欧州モード:排出CO<sub>2</sub>=124 g/km)の見通しを得ている(図12参照)。

今後、自動車の排出するCO<sub>2</sub>削減に

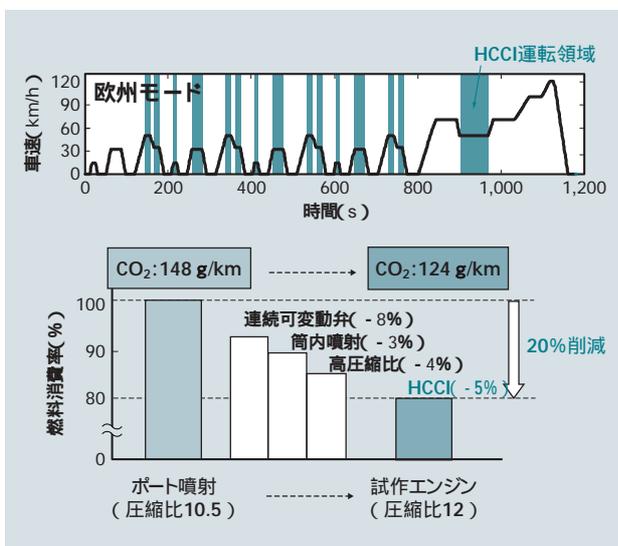


図12 試作エンジン結果とシミュレーションによる燃費低減効果  
直列4気筒2.0Lエンジン(圧縮比12)を対象とし、欧州モードで燃費性能を評価した結果を示す。

貢献する新技術として、連続可変バルブシステムや燃料の筒内噴射弁などを中心としたHCCIエンジンシステムの研究開発を進め、環境規制に対応するソリューションを提案していく考えである。

## 5. おわりに

ここでは、CO<sub>2</sub>排出量低減に有効な、高効率発電技術、風力発電技術、ガソリンエンジンの低燃費化技術について述べた。

日立グループは、今後とも、CO<sub>2</sub>排出量を低減するための技術開発を総合的かつ多面的に推進していく。

終わりに、風力発電技術の執筆にあたっては富士重工業株式会社の関係各位から多大なご指導とご協力をいただいた。ここに深く感謝を表する次第である。

## 参考文献など

- 1) 浜田, 外: 熱源機器のトータル最適エネルギー制御システム, 日立評論, 88, 11, 908~911(2006.11)
- 2) 坂内, 外: 地球温暖化を抑制するエネルギーソリューション, 日立評論, 88, 12, 960~963(2006.12)
- 3) 小豆畑: 高効率発電技術, 日立評論, 87, 5, 475~482(2005.5)
- 4) GWEC(公開文献): Wind Force 12, <http://www.gwec.net/>(2005.6)
- 5) E. Kita, et al.: 400 MW Adjustable-Speed Pumped-Storage Hydraulic Power Plant, Hitachi Review, Vol.44 No.1, 55~62(1995.1)
- 6) 角谷, 外: ガソリンHCCI制御システムの開発(第2報) 気筒別燃料制御による多気筒エンジンのHCCI燃焼安定化, 自動車技術会論文集, Vol.37, No.4, 75~80(2006.7)

## 執筆者紹介



### 渡辺 雅浩

1991年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御第二研究部 電力情報制御ユニット 所属  
現在, 電力システムの解析制御技術の研究開発に従事  
電気学会会員, エネルギー・資源学会会員, IEEE会員



### 千野 耕一

1974年日立製作所入社, 電力・電機業務本部 新事業開発推進本部 所属  
現在, 電力・電機製品の開発企画に従事  
工学博士  
日本機械学会会員, 日本原子力学会会員



### 二見 基生

1987年日立製作所入社, 日立研究所 インバーティノベーションセンター 所属  
現在, 電力システムを中心とする電力変換器の研究開発に従事  
電気学会会員, 計測自動制御学会会員



### 山岡 士朗

1999年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御第三研究部 所属  
現在, 自動車用エンジン制御システムの研究開発に従事  
自動車技術会会員, 日本機械学会会員, 日本燃焼学会会員