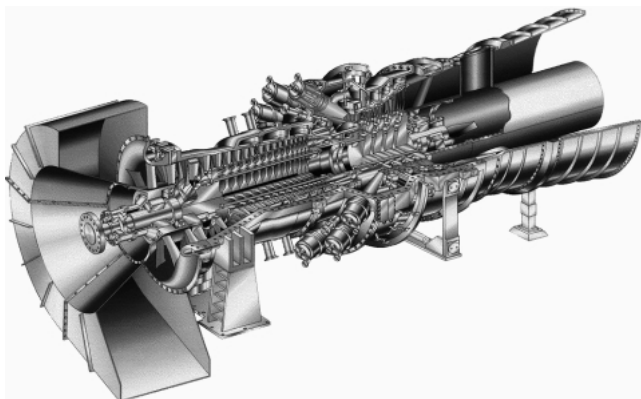


発電システムの発展にともなうエネルギー利用の高度化

Energy Solution through Development of Power Generating Systems

富永 明 若園 修 中島 道雄
藤川 卓爾 佐藤 進 杉谷 敏夫



1. はじめに

電気エネルギーは、動力・熱・光・電波等に簡単に変換できることから、多様な用途かつ広範囲に利用されており、その確実な供給は現代社会において絶対不可欠な前提条件となっている。

当社は1960年代以降の急激な国内電力需要の伸びと、1970年代の二度にわたる原油価格の高騰にこたえるべく、発電設備の大容量化と、高効率化に取り組んできた。また、1973年の第一次石油危機を契機に燃料の多様化が求められ、石油に代わる石炭だき、LNGだき発電プラントの開発に取り組んできた。

単機容量が大型化することによりトラブル発生時の緊急停止等、電力系統へ与える影響が大きくなり、ボイラ、タービンを始めとするプラント構成機器の信頼性向上が強く要請されるようになった。

高効率化の要請はガスタービンコンバインドプラントの建設につながり、1984年に大容量プラントが建設された後もガスタービンの高温化により目覚ましい効率向上が図られてきた。

また、埋蔵量が多い石炭を高効率で有効に利用するための石炭ガス化複合発電プラント(IGCC)の開発も推進している。

更なるエネルギーの高効率利用を実現すべく、電気と熱の両方を供給できる分散電源の普及が図られているが、当社はこの分野においても高効率ディーゼル、ガスエンジン等のコア機器を納入してきた。また、その将来性が最も有望視されている燃料電池についても実用化を進めている。

一方、地球温暖化に歯止めをかけるべくRPS法によって、電気事業者は風力発電、太陽光発電、廃棄物発電等の再生可能エネルギーの利用割合を高めることを義務付けられつつあるが、これ等の領域においても当社は顧客のニーズに合った製品を納入してきた。

ここでは、当社のこれまでの活動の成果とあしたに向けた取り組みについて紹介する。

2. コンベンショナル火力発電技術

2.1 大容量化及び蒸気条件の変遷

当社は、1960年代からの国内電力需要の急激な増加にこ

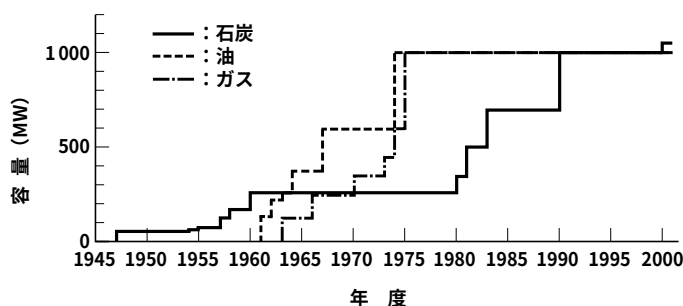


図1 火力発電プラントユニット容量の変遷 国内における火力発電プラントのユニット容量の変遷を示す。

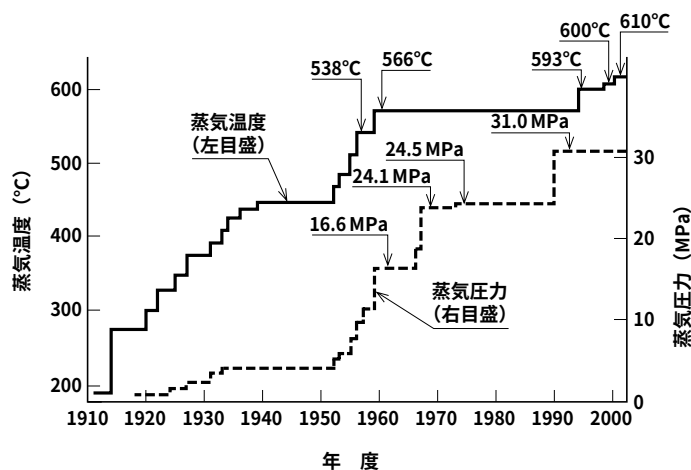


図2 火力発電プラント蒸気条件の変遷 国内における火力発電プラントの蒸気条件の変遷を示す。

たえるために、発電ユニットの大型化、高蒸気条件化による発電効率の向上に取り組んできた(図1, 図2)。

当初、海外技術導入により開かれた火力発電設備はやがて自社技術により大きく成長した。国内電力会社の強力な支援もあり、より社会のニーズにこたえるべく大容量化、高性能化を世界に先駆けて進めてきた。

国内初の1000 MWユニットである東京電力(株)鹿島5号ボイラ(1974年運転開始, 24.1 MPa, 538/566°C), 60 Hz機国内初の1000 MW機となった電源開発(株)松浦1号蒸気タービン(1990年運転開始, 24.1 MPa, 538/566°C), 世界初

の大容量での30 MPa級超々臨界圧蒸気条件を採用した中部電力(株)川越1号ボイラ(1989年運転開始, 700 MW, 31 MPa, 566/566/566℃), 大容量ユニットとして593℃再熱蒸気適用国内初号機となった中部電力(株)碧南3号蒸気タービン(1993年運転開始, 700MW, 24.1MPa, 538/593℃)等を世に送り出してきた。

2.2 ボイラ技術

ボイラ技術の変遷は, 大容量化, 蒸気条件の向上に加えて, 火炉信頼性の向上, 完全燃焼, 低NO_x化, 建設合理化を始め多岐の分野にわたり, それぞれの技術向上に取り組んできた。1998年に運転開始した中国電力(株)三隅1号1000 MW機(図3)は, 最新鋭技術を取り入れた24.5 MPa, 600/600℃高蒸気条件プラントであり, その特徴を紹介する。

火炉構造には, 世界で唯一当社が実績を有する垂直管火炉方式を採用した(図4)。超臨界圧変圧運転貫流ボイラでは, 火炉流体が垂臨界圧となる中間負荷帯における水及び蒸気側の熱伝達率低下への対策が必要である。このため管内面にらせん状の溝を付けたライフル管を採用し, 高乾き度領域まで核沸騰を維持することにより, 垂直管火炉構造でメタル温度を十分低く抑制可能となり, 以下の利点を得た。

(1) 管内重量速度が低く圧損が減少し, 流動安定性向上と運

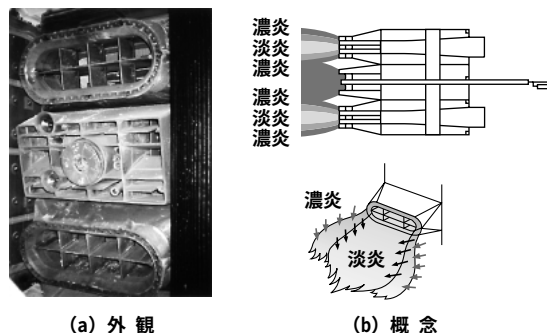


図5 A-PMバーナ A-PMバーナの外觀及び概念を示す。低NO_xで着火安定性に優れ, かつシンプルでメンテナンス性, 信頼性, 耐久性に優れたバーナである。

転動力節減が可能。

- (2) 単純な構造のため, 信頼性, 据付, 保守性に優れる。
- (3) スラッグの脱落が容易で火炉壁付着灰量が少ない。

石炭バーナには最新型のA-PMバーナ(Advanced-Pollution Minimum)(図5)を採用した。PMバーナは火炎を石炭/空気混合比の高い濃混合気炎と, 混合比の低い淡混合気炎に分離することで低NO_x化を図るバーナであるが, A-PMバーナでは単一火炎内にて同軸上に濃・淡炎に分離することにより一層の着火安定性の向上と低NO_x化及び保守性の向上を実現した。さらに, 主バーナの上方にNO_x還元のための十分な空間を確保してアディショナルエアポートを設け, ボイラ全体を使って, 一層のNO_x低減を図る炉内脱硝法MACT(Mitsubishi Advanced Combustion Technology)を採用したものである。ミルには, 回転式分級機により高微粉度を実現したMRS(Mitsubishi Rotary Separator)ミルを採用した。MRSミルでは未燃分発生に支配的な100メッシュ以上の粗粉量の大幅な低減を実現している。

以上の技術を採用することで, NO_x・灰中未燃分とも良好な結果を得るとともに, 空気過剰率を10%まで低減し, 計画値よりも大幅に高いボイラ効率を得られた。

当社では今後さらなる環境問題へ対応するべく, 低温領域でNO_x, SO_xの除去が可能な活性炭素繊維(Activated Carbon Fiber, ACF)を用いた総合排煙処理技術の実用化を進めている。この技術の最大の特徴は低い運用コストでばいじん及びSO₂も同時に除去可能になることである。

2.3 蒸気タービン技術

蒸気タービンの技術の変遷は大容量化, 蒸気条件向上, 翼列高性能化, 長翼の開発, コンパクト化に代表される。

大容量化については現在火力用では1050 MW機が運転され, 原子力用では1371 MW機が製作されている。

蒸気条件についても約30年間246 kg/cm² (24.1 MPa), 566℃の時代が続いたが, 効率向上のために主として蒸気温度を向上する開発がなされ, 最近では蒸気温度600℃級の蒸気タービンが多数製作されている。当社では現在運転中の主蒸気・再熱蒸気とも600℃級の1000 MW級蒸気タービン5台中3台を納入した。図3の中国電力(株)三隅1号1000 MWタービンは主蒸気・再熱蒸気を従来の米国単位系の593℃(1100 ℉)から初めて国際単位系の600℃とした。図6の電

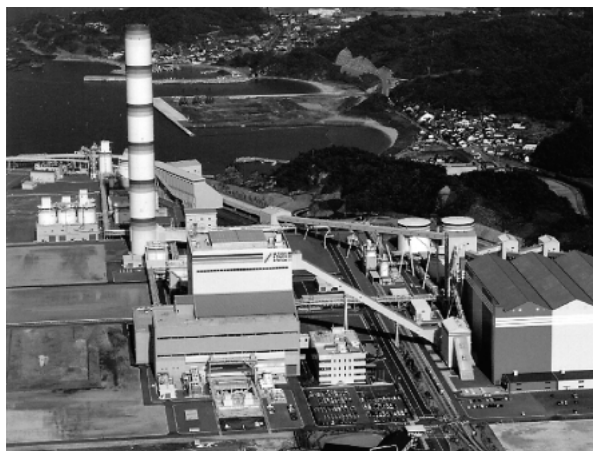


図3 中国電力(株)三隅1号1000MW機 中国電力(株)三隅1号ユニットの外觀を示す。

項目	垂直管火炉方式	スパイラル火炉方式
火炉構造	シンプル 	ベース

図4 火炉構造比較 ライフル管を使用した垂直管方式を採用した。

源開発(株)橘湾2号1050 MWタービンは主蒸気/再熱蒸気が600/610℃で現在世界最高の蒸気条件を採用し、2000年12月から順調に運転されている。

翼列高性能化については、従来用いられていた平行翼にねじりを与えて効率向上するのに加えて、最近では翼を高さ方向に弓のように反らせた完全三次元翼（バウ翼）を開発してさらなる効率向上を図っている。

長翼の開発は蒸気タービンの大容量化とともに増大する排気損失を低減するために必要不可欠である。当社では従来のグループ翼に代わって、1990年代の初めより翼とシュラウドを一体化したインテグラルシュラウド翼（ISB）を開発し、50 Hz用、60 Hz用のラインアップを完成した。完全三次元設計のISB長翼は性能が向上するのに加えて、高速回転時は全周綴り構造となり振動特性が単純化され、隣接するシュラウド同士の接触面での摩擦力による減衰効果によって振動応力が低減する。

コンパクト化設計技術の開発によって同一出力の蒸気タービンの車室数の低減が可能となった。大容量タービンでは従来は高压・中圧・2つの低压の4車室であったものが高中圧一体型タービンによって3車室になった。また長翼の開発によって低压タービンも1車室で構成できるようになり、現在

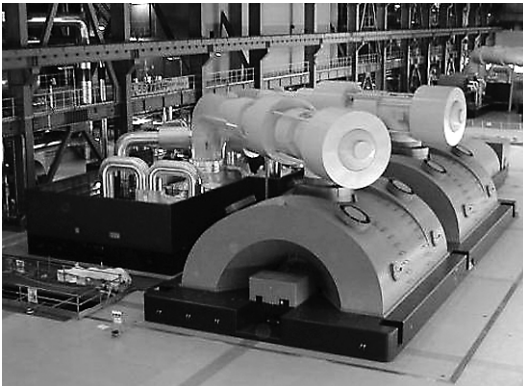


図6 電源開発(株)橘湾2号1050 MWタービン
電源開発(株)橘湾発電所2号タービンの外観を示す。1050 MW 蒸気タービンで世界最高の蒸気条件（25.1 MPa、600℃/610℃）、性能の国内火力最大容量機である。

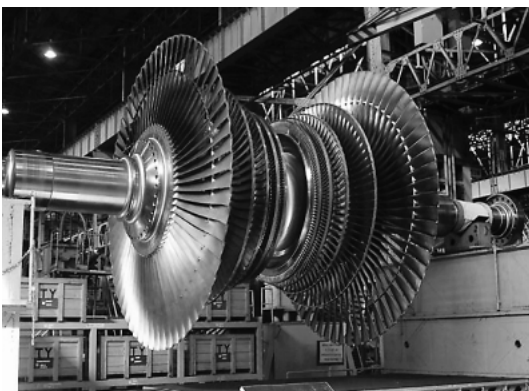


図7 3000 rpm 48インチ翼低压タービン
3000 rpm 48インチ長翼の開発により、600 MWタービンの低压タービンが1車室で構成できるようになった。

では図7に示すように東京電力(株)広野5号向けに3000 rpm 48インチ翼を用いた2車室の600 MWタービンが製作されている。

2.4 制御技術

当社は、制御装置を、ボイラ、タービン、発電機などのプラント主機と同様に、プラントの性能、機動性を左右する重要な構成機器と位置付けている。当社の最新鋭制御システム DIASYS Netmation は、マイクロソフト社 Windows ベースの操作画面であり、多くの情報を集約して監視することができる。インターネットを介して納入プラントの遠隔保守支援サービスを提供できるのも DIASYS Netmation の利点である。世界各地に納入した発電用大型ガスタービン、大型風車から、日本国内と北米にあるリモートメンテナンスセンターに、常にリアルタイムで状況推移の確認や調整ができるようになっている。何らかの異常が発生した場合でも瞬時に現地の運転員に助言することが可能で、信頼性向上に大きく貢献できる。

当社はまた、設計技術の一部として、高精度リアルタイムシミュレーション技術の開発を続けており、実機各部の過渡的挙動を忠実に模擬できる。この技術はプラントの最低負荷引き下げ、SH 変圧運転化など既設機の運用性改善工事の事前検証や、他社製を含めたユニットのトラブル解析にも役立っている。

このシミュレーション技術をいかし、プラント全体をカバーしたシミュレータを開発・商品化し、東京電力(株)火力技能訓練センター等に数多く納入している。図8に示す東北電力(株)火力必修技術訓練センターに納入したパノラマビジョンシミュレータは、10プラント分のモデルソフトを搭載し、切り替えて使用できる多機能シミュレータである。

2.5 既設機サービス技術

当社ではボイラ、タービン、制御技術者にスタートアップエンジニア、また、研究所員を加えたトータルプラントサービスを行っている。最近では、IT 技術をいかしたホームドクタとして、遠隔支援センターを関連事業所である高砂、長崎、横浜に開設し、迅速なサービスの提供に努めている。

また、非破壊検査に関しては数多くの特許を取得しており、これらを利用した余寿命診断技術は、世界トップレベルである。

一方、昨今では電力自由化に伴い保守の考え方もこれまで



図8 東北電力(株)火力必修技術訓練センター
パノラマビジョンシミュレータの外観を示す。

の予防保全から信頼性と経済性の双方を考慮した最適保守に変わりつつある。これに対応すべく、当社で独自に開発した最適保守計画立案システム（FREEDOM）を利用した保守メニューを提供している。

また、ガスタービンについては、既に、海外プラント向けにLTSA（長期保守契約）による保守を行っており、時代の要請に応じたサービスの提供に努めている。

3. ガスタービン・コンバインド発電技術

当社では1984年にタービン入口温度が1150℃級の50 Hz 向大容量ガスタービンM701Dを開発し、これを適用した大型コンバインドプラントを東北電力(株)東新潟火力発電所第3号系列に設置し、当時では記録的な総合熱効率44 %を達成した。

その後、更なるガスタービンの高温化を図り、1989年にはタービン入口温度1350℃級60 Hz向M501F及び50 Hz向M701Fガスタービンを開発した。現在M501F/ M701Fガスタービンは国内外のコンバインドプラントの主機として110台を超える受注実績があり、延べ130万時間以上の運転実績を有している。

火力発電プラントの総合熱効率上昇に対する社会的ニーズと、当社の高温ガスタービン開発の豊富な経験を背景に、1993年に次世代を担う大容量高温ガスタービンとしてタービン入口温度1500℃級のG形（タイトル図）の開発に着手した。60 Hz向M501Gガスタービンは1997年6月に当社高砂製作所内に設置された長期信頼性実証設備（図9，T地点）にて実証運転を開始して以来5年間、電力需要が高い夏期を中心に電力を供給しつつ性能・長期信頼性の検証を継続中である。また50 Hz向M701Gガスタービンは東新潟火力発電所第4号系列（図10）に採用され、50 %以上のプラント効率を達成して1999年7月に運開した。初号機ながら信頼性100 %の記録を更新中である。G型ガスタービンも既に47台の受注ならびに延べ約8万時間の運転実績を有している。

これらのガスタービンの大容量・高効率化の変遷を図11に示す。この豊富な経験を基に更なる大容量・高効率化を推進するためにH形ガスタービンを開発した。H形ガスタービンは従来のガスタービンと異なり、タービン動静翼をボトム



図10 東北電力(株)東新潟火力発電所
東北電力(株)東新潟火力発電所の全景を示す。第41号系列は事業用発電所では世界初のタービン入口ガス温度1450℃級ガスタービンを採用した。

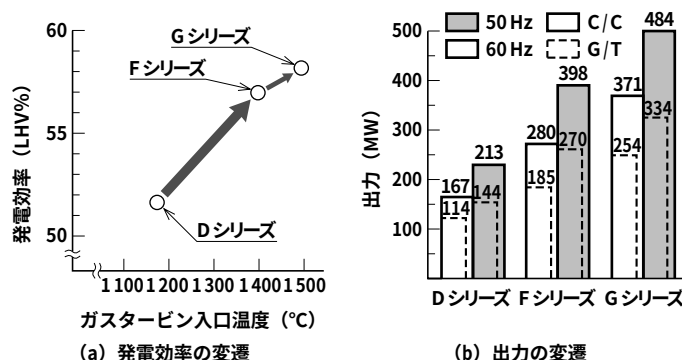


図11 ガスタービンの大容量・高効率化の変遷 ガスタービン入口温度の変遷と発電効率、出力の変化を示す。

ングサイクルからの蒸気で冷却するという特徴を有し、これによりG形ガスタービンに比較して出力、プラント効率共に大幅に向上する。2001年の試運転では当社実証設備のプラント認可出力である330 MWでヒートランを実施した。

4. エネルギー利用の高度化

4.1 燃料多様化への取り組み

近年、火力発電設備における燃料多様化が進んでいる。当社では、石炭、オリマルジョン、オイルコークス、バイオマス、廃棄物など様々な燃料の燃焼技術開発に取り組んでいる。

我が国では、エネルギーセキュリティのため、埋蔵量が豊富で価格安定性に優れた石炭を利用した火力発電を一定割合で導入することが望まれるが、一方、地球環境保全の観点からCO₂等の環境排出物の低減が不可欠であるため、石炭の使用が制約を受けている。したがって高効率で環境負荷の小さい石炭利用発電が不可欠であり、その中核技術としてIGCC（Integrated coal Gasification Combined Cycle：石炭ガス化複合発電）が注目されている。我が国におけるIGCCの開発は国家プロジェクトとして推進されている。当社では微粉炭供給系統、ガス化炉、フィルタ、脱じん／脱硫設備、ガスタービン燃焼器等の試験設備を長崎研究所構内に設置し、一貫システムとしての総合検証試験を実施し、構成機器の信



図9 長期信頼性実証設備 H形ガスタービン試運転を行った高砂製作所内実証発電設備を示す。

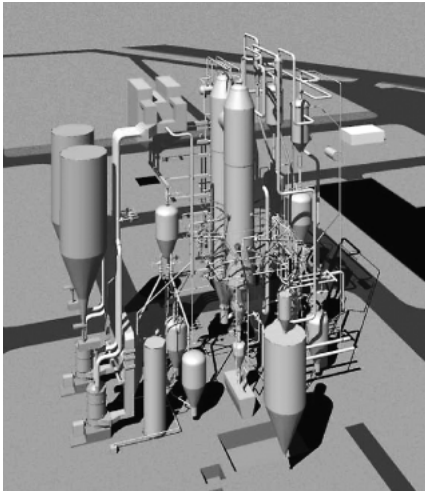


図12 IGCC実証機 石炭ガス化設備の鳥瞰図を示す。(株)クリーンコールパワー研究所が250MW級石炭ガス化複合発電(IGCC)実証機を計画中である。

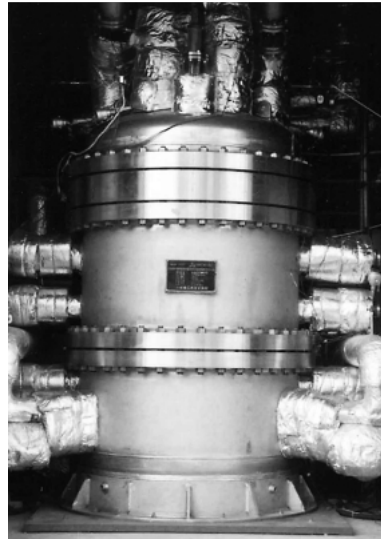


図13 円筒型SOFC 10 kW級モジュール 加圧内部改質型10 kW級モジュールの外観を示す。

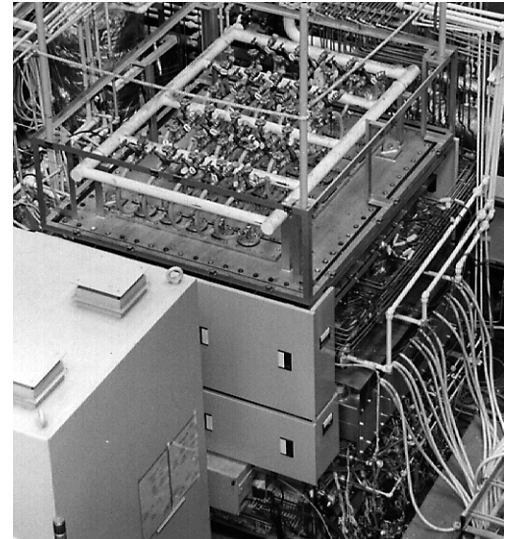


図14 一体積層型SOFC常圧10 kW級モジュール 常圧10 kW級モジュールの外観を示す。

頼性及びシステムの安定運転を確認している。この実績を(株)クリーンコールパワー研究所が計画している250 MW級実証機(図12)に反映する。

オリマルジョンについては1991年に鹿島北共同発電(株)2号で国内初のオリマルジョンだき改造を実施したのを始め、合計4基の既設ユニット改造実績がある。1999年にはオリマルジョン専焼新設計ボイラとして鹿島北共同発電(株)5号を完成させた。

オイルコークスについては1985年に三菱レイヨン(株)富山工場向けに75 t/h専焼ボイラを納入したほか、改造を含めると20基の納入実績が有る。

バイオマスエネルギー利用技術として、ボイラで直接燃焼する発電技術のほか、バイオマス原料を高温でガス化しメタノールなどの貯蔵・輸送の容易な液体燃料へ高速・高効率に転換する“バイオマスガス化メタノール製造システム”の開発を進めており、現在、農林水産省“バイオリサイクル研究”向け240kg/日試験プラントによるプロセス検証試験を実施するとともに、平成13年度より16年度にかけて新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)に採択された国家プロジェクト向け2 t/日規模プラントの建設を進めている。

廃棄物利用としては建築廃材からの木屑、廃タイヤ、RPF(Refuse Paper and Plastic Fuel)等を主燃料とする流動床ボイラにも取り組んでいる。

4.2 高効率発電

CO₂排出削減及び燃料経済性の観点から、更なる高効率発電技術が求められており、現在開発中の燃料電池は将来的に大きな期待がかかっている。1000℃高温固体酸化物形燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell: SOFC)はガスタービンと組み合わせることにより、LNGの場合70%(LHV)以上の高効率発電が実現できる。

また、前述の石炭ガス化炉と組み合わせた場合(IGFC: Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle)でも

60%(LHV)という画期的な高効率期待できる。

円筒型SOFCは、電源開発(株)と共同で2001年に10 kW級モジュール(図13)にて加圧内部改質で当初計画の700時間以上の連続運転を達成した。また、一体積層型SOFCは、中部電力(株)と共同で2001年に常圧10 kW級モジュール(図14)の運転試験を実施し、累積7500時間運転を達成した。これら実証機試作を通じて、電池モジュール構造の確立を図り、SOFC発電システムの早期実用化に向けて開発を進めている。

4.3 分散電源

火力発電所等の大規模集中電源は住宅、工場等の熱の需要地から離れた地点に設置されるため、発電所からの排熱利用は容易ではなく、投入されたエネルギーの50~60%が海水等に放出されている。地球温暖化防止、エネルギー効率向上の観点から需要地に近接した小容量分散電源(オンサイト電源)が注目されてきている。当社は分散電源としてディーゼルエンジン、ガスエンジン、小型ガスタービン等の従来型原動機や太陽光、風力、あるいは燃料電池にいたる様々な発電システムに取り組んでいる。

従来型の分散電源においては、環境規制値が厳しくなる中、これまでのエネルギー源の主流であった液体燃料に対し、CO₂排出が少なく、NO_x、ばいじん等の有害排出物の少ないガス燃料が注目されている。希薄燃焼技術により低NO_x化と高効率を同時に達成した大型ガスエンジンがここ数年需要を伸ばしている。当社では1990年に副室内に濃い混合気を形成し点火プラグにより着火する電気着火の副室希薄燃焼ガスエンジンを開発し実績を積んできたが、その後継機種として微量な液体燃料を火種として希薄混合気を確実に着火するパイロット着火方式の低公害高効率ガスエンジンMACH-30G(Mitsubishi Advanced engine of Clean & High efficiency)を開発し、42.5%の高効率とNO_x低減を達成した(図15)。また、ディーゼルエンジンについても最新技術を駆使し

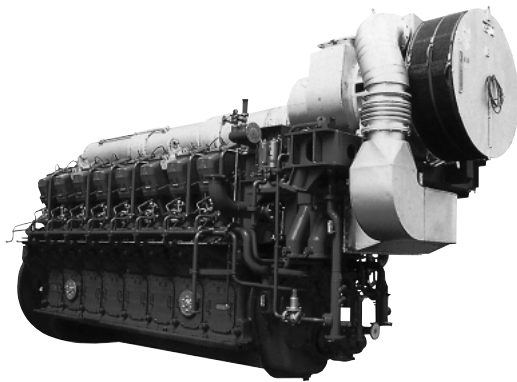


図15 高効率ガスエンジンMACH-30G 最新鋭のMACH-30Gガスエンジンの外観を示す。世界最高レベルの発電効率42.5%と低NO_x (100 ppm, O₂ 0%換算)を達成している。

KU30Bで世界最高効率47% (LHV) を達成している。

4.4 再生可能エネルギー利用技術

自然エネルギーを利用する発電方式で当社が最初に手がけたのは水力発電である。次に地熱発電を手がけ、1980年から風力発電に取り組んできた。さらに、最近では太陽光発電やバイオマス発電にも取り組んでいる。

水力発電では古くから各種の水車を多数納入しており、2000年に東京電力(株)葛野川発電所向けに世界最高落差(728 m)の国内最大容量(412 MW)機を納入した。

地熱発電では既に35年間順調に運転されている我が国初の熱水型地熱の九州電力(株)大岳発電所を始めとして、世界初の二層流体輸送ダブルフラッシュサイクルの九州電力(株)八丁原発電所等、常に最新技術の開発に取り組みながら、世界12カ国に84台の地熱タービンを納入している。

風力発電は1980年に我が国初の40 kW機を開発して以来、コスト低減と信頼性向上を図りながら、国産唯一の大型風車メーカーとして時代の要請に応じて自主技術による開発が続けてきた。1980年代後半に300 kW級機を大量受注して以来、キーコンポーネントである翼を自社生産している。NEDOの大型風力発電システムの開発プロジェクトで当社は1996年に500 kW風車を完成して、風車大型化技術の基礎を築き、1998年に600 kW風車(表紙の写真)、1999年には当時国内初の1 000 kW風車を開発した。これらの開発の結果、当社は2002年4月末までに世界各国へ総数で約1 400台、総出力で約620 MWの風車を納入してきた。

発電機については開発初期から安価な誘導発電機を用いていたが、風車の出力制御をより木目細かく行えて電力系統に優しい可変速同期発電機風車の開発導入も進めてきた。当社は三菱電機(株)と共同で永久磁石式可変速ギアレシ同期風車を開発し、300 kW機が2000年から、600 kW機が2002年から運転されている。さらに2003年には2 000 kW同期発電機風車が運転を開始する。

また、低風速域でも十分な発電量が得られるように、従来機に比べて翼長を伸展した新1 000 kW風車を開発した。

今世紀になって特に注目を集めている太陽光発電については、材料が容易に入手できることから将来的に経済性が期待



図16 高効率アモルファスシリコン太陽電池 アモルファスシリコン太陽電池の設置例を示す。家庭でも環境保全に寄与できる。

される高効率アモルファスシリコン太陽電池(図16)を、当社独自の高速プラズマCVD技術を基に製品化し、当社長崎造船所内に建設した年産10 MW設備にて量産を開始している。1.4 m×1.1 mという大面積一体パネルは意匠性、施工性の点でも注目を集めている。太陽電池パネルについてはさらなる効率向上を目指して技術開発中である。

5. おわりに

現代においてはより豊かな社会の構築に向けてエネルギー消費量は増大しつづけており、これにともなって地球温暖化、化石燃料枯渇や燃料安定供給(エネルギーセキュリティ)等の問題に対する関心が世界的に高まってきている。

これらの問題に対処するために、当社はこれまでも時代に先駆けて、機器の高効率化、化石燃料利用の多様化に取り組んできた。今後も発電システムの更なる高効率化ならびに環境に優しい技術開発を推進するとともに、次世代ガスタービン、風力、太陽光、バイオマス、石炭ガス化、燃料電池等の新エネルギーシステムについても研究開発を推進し、あしたに向けてのエネルギー利用の更なる高度化に挑戦していく所存である。



富永明
常務取締役
原動機事業本部長



若園修
取締役
原動機事業本部
副事業本部長



中島道雄
原動機事業本部
火力プロジェクト部長



藤川卓爾
原動機事業本部
タービン技術部長
工博



佐藤進
原動機事業本部
ボイラ技術部長



杉谷敏夫
原動機事業本部
エネルギーシステム
技術部長