

創エネルギー技術の現状と展望

Energy Creation Technologies: Current Status and Future Outlook

米山 直人 YONEYAMA Naoto

1 まえがき

富士電機は、“創エネルギー”分野で火力発電設備や水力発電設備の高効率化や高性能化に取り組み、日本のみならず世界各国に数多く納入し、世界のエネルギーの安定供給に貢献してきている。また、地熱発電や水力発電など、再生可能エネルギーの中でも安定的にエネルギーを供給できる発電設備に取り組んできている。これらに加えて、太陽光発電や風力発電、小水力発電、バイオマス発電などの再生可能エネルギーにも注目し、技術開発と製品化を進めている。本稿では、エネルギーの安定供給と環境負荷低減に貢献する創エネルギー技術の現状と展望について述べる。

2 世界のエネルギー事情

2.1 世界のエネルギー動向

世界のエネルギー需要は、新興国の経済成長と人口の増加を背景に大きく伸びると予想されている。国際エネルギー機関（IEA）の2012年度レポート（World Energy Outlook 2012⁽¹⁾）では、特に電気エネルギーの伸びが大きく、世界の電気エネルギーの需要は2035年には36,637 TWhになり、年率2.2%の伸びを予測している（図1）。この中で、先進国は年率0.9%の伸びであるが、新興国では年率3.3%の伸びになると予測している。

エネルギーの種別で見ると、石炭火力や天然ガスを中心とした火力発電が大きな割合を占め、石油火力の比率は減少する。その一方で、環境負荷の低減も大きな課題であり、CO₂を排出しない環境にやさしい再生可能エネルギーが大きく伸び、特にバイオマス発電、風力発電、太陽光発電が大きく伸びる。再生可能エネルギーの比率は、水力発電を含めて約30%に増える。エネルギー需要の増加に対して、燃料費を含めた発電コストの経済性の追求とともに環境負荷の低減も大きな課題であり、火力発電では天然ガスやシェールガスを燃料としたコンバインドサイクル発電の導入や石炭火力の高効率化が進められる。

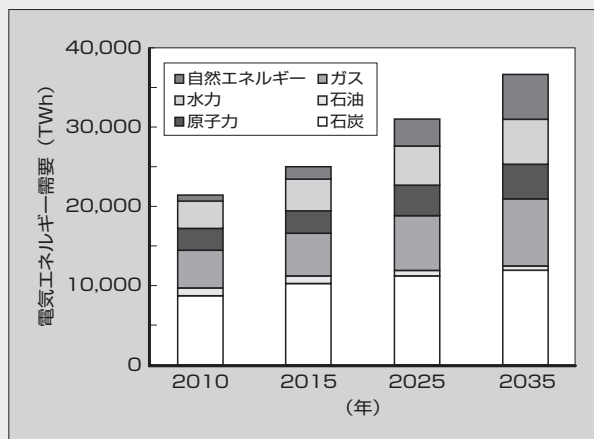


図1 世界の電気エネルギー需要

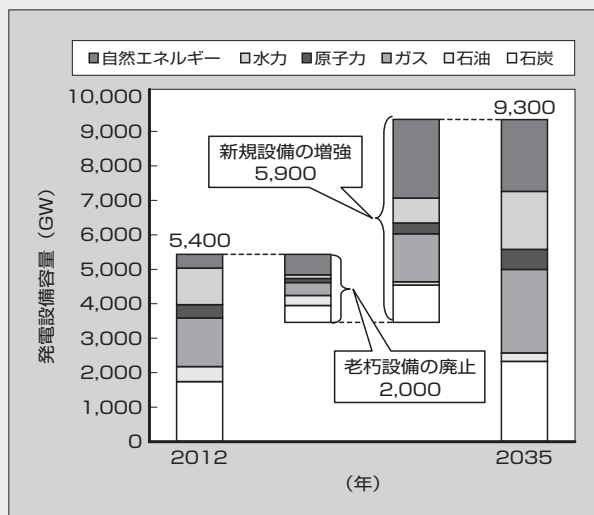


図2 世界の発電設備容量

電気エネルギー需要の伸びに対して、発電設備の発電容量の増強も必要である。図2に世界の発電設備容量を示す。2012年の世界の発電設備容量は5,400 GWであるが、2035年には9,300 GWの発電設備容量が必要であると予測されている。しかしながら、現在運転されている発電設備は、老朽化やCO₂排出低減、燃料費の高騰などにより、新鋭発電設備への置換えが必要となる。IEAレポートでは、2035年までに現在の発

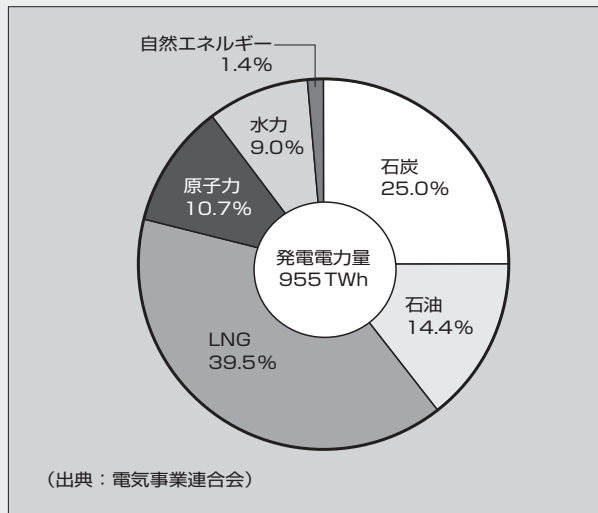


図3 日本の発電電力量の構成

電設備容量の約 1/3 に相当する 2,000 GW の発電設備が更新され、5,900 GW の新しい発電設備が建設されると予想している。

2.2 日本のエネルギー動向

図3に日本の発電電力量の構成を示す。2011年3月の東日本大震災で福島第一原子力発電所が津波による災害を受けた影響で、原子力発電所の停止が続き、電力の安定供給に対する施策の展開が検討されている。原子力発電所の再稼働問題は国レベルで継続的に論議されている。2012年9月の「革新的エネルギー・環境戦略」では、エネルギーの安定供給の確保のために、火力発電の高度利用、コージェネレーションなど熱の高度利用、次世代エネルギー関連技術の開発と利用を推進するとの方向が示された。特に、電力の安定供給に対し、火力発電所の増強と再生可能エネルギーの導入促進が骨子になっている。火力発電所の増強では、天然ガスを燃料とする高効率なコンバインドサイクル発電の導入と、石炭を燃料とした超々臨界圧火力発電(USC)^(*)などが注目を浴びている。再生可能エネルギーでは、2030年までに300TWh(現在の3倍以上)の導入を目標に、2012年7月から始まった「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」と相まって再生可能エネルギーの導入に弾みがついている。

③ 火力発電

図1に示すように、現在、世界の電気エネルギー需要に占める火力発電の比率は約67%であるが、再生可

能エネルギーの導入促進などにより2035年には57%に低下する。一方、需要電力量でみれば約1.5倍に増加する。この中で、CO₂排出削減と燃料費を含めた経済性の点から石油火力発電は半減し、天然ガスを燃料とするコンバインドサイクル発電が1.8倍に増加し、石炭火力発電も新興国を中心に1.4倍近く増加する。

今後、火力発電分野では、天然ガスを燃料としたガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた高効率なコンバインドサイクル発電、ならびに石炭を燃料とし、蒸気条件を高温・高圧化して熱効率を高めた超々臨界圧火力発電(USC)が主流になる。

3.1 コンバインドサイクル発電

コンバインドサイクル発電は、高効率でCO₂排出量が少なく地球温暖化防止に貢献するとともに、起動時間が短く負荷変化への追従性能が良いなどの特徴を持っており、今後の火力発電で大きな位置を占める。また、これまでは天然ガスを燃料としていたが、最近、米国を中心にシェールガスの開発が急速に進んでおり、ガスタービンに対する期待が大きくなっている。

富士電機は、コンバインドサイクル発電にも取り組んできている。図4に示す沖縄電力株式会社吉の浦火力発電所向けに、コンバインドサイクル発電設備(2台、251MW)の建設を進めてきた。2012年11月には、1号機が総合試験を終了し、営業運転を開始した。2号機は2013年5月の営業運転開始を目指して総合試験を進めている。この発電設備は、シーメンス社との協業で、シーメンス社製のガスタービン(STG6-4000F, Fクラス)と富士電機が開発した単車室軸流排気再熱蒸気タービンおよび発電機を組み合わせた一軸式コンバインドサイクル発電設備である。プラントの



図4 沖縄電力株式会社吉の浦火力発電所 (写真提供：沖縄電力株式会社)

(*) 1) 超々臨界圧火力発電(USC)

使用する蒸気条件が超々臨界圧(蒸気温度593℃以上、蒸気圧力24.1MPa以上)の火力発電技術である。水

を気化させるための熱エネルギーを削減し、効率良く発電することができる。

性能試験では、効率で51% (HHV 基準)^{(*)2}以上を達成し、短時間での負荷応答機能や周波数調整機能などにおいて当初の計画を上回る良好な結果が確認された。

今後、コンバインドサイクル発電は、ガスタービンの燃焼温度の高温化による熱効率の向上と大型化が進む。シーメンス社も燃焼温度を高めた大容量Hクラスガスタービンを開発し、実際のコンバインドサイクル発電設備で効率60% (LHV 基準、送電端)^{(*)2}を大幅に上回る世界最高効率を達成している。富士電機は蒸気タービンおよび発電機の高性能化と設備のコンパクト化を継続的に進め、国内外のコンバインドサイクル発電に取り組んでいく (113 ページ “一軸式コンバインドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間冷却タービン発電機” 参照)。

3.2 石炭火力発電

石炭火力発電は、経済性の面から新興国を中心に開発が進められている。先進国ではCO₂の排出低減への取組みから新規開発への制約が見られるが、超々臨界圧タービンの開発による高効率化や石炭ガス化などの新技術開発により、石炭火力の価値が見直されてきている。

富士電機は中容量領域で、多くの高性能・高信頼性の石炭火力発電設備を世界各国に納入してきている。最近では、ベトナムのハイフォン火力発電所向けに蒸気タービン・発電機 (4 台, 300 MW) やギソン火力発電所向けの蒸気タービン・発電機 (2 台, 300 MW) などに取り組んでいる。

超々臨界圧火力発電ではシーメンス社との協業で、電源開発株式会社 磯子火力発電所 1 号機のタービン・発電機 (1 台, 600 MW) を納入している。主蒸気温度は600℃、再熱蒸気温度で610℃を採用し、先進の翼列設計により高いプラント効率を達成し、CO₂低減と経済性の向上に貢献している。今後も、蒸気タービンの主蒸気の高温・高圧化による効率の向上が求められる。一方で、タービンの信頼性の向上も重要な要素となる。そのために、蒸気タービン翼列の性能向上に加えて、ロータ材やケーシング材、タービン翼材の開発、ならびにタービン翼の耐食性能の向上、腐食モニタリング技術の開発などを継続的に進めている。

次世代蒸気タービンとして、さらなる効率の向上を狙いとした蒸気温度700℃クラスの先進超々臨界圧火

力発電 (A-USC) の開発が進められている。富士電機も経済産業省の「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」に参画し、技術開発を進めている (107 ページ “火力発電所向け蒸気タービンの最新技術” 参照)。

4 地熱発電

地熱発電は、再生可能エネルギーの中でも、①天候などによる出力変動がなくベースロードとして利用できる、②設備利用率が高い、③経済性が高い、などの特徴があり、世界の地熱資源保有国で開発が進められている。

地熱資源は、環太平洋地域 (日本、米国、インドネシア、フィリピン、ニュージーランド、チリ) やアフリカ地域 (ケニア、エチオピア) などに多く存在し、各国で地熱発電の開発が進められている。日本も、米国、インドネシアに次ぐ第3位の地熱資源保有国 (約23.5 GW) といわれている。富士電機は、地熱発電に着目し、1960年代から地熱発電機器の研究開発に取り組む、信頼性の高い地熱発電機器を多数納入し、世界で高い納入シェアを持っている。

地熱発電には、次に示す二つの方式がある。地中から噴出する高温の熱水や蒸気を減圧沸騰させて蒸気だけを取り出し、地熱タービンに直接利用する大型のフラッシュ発電方式、ならびに比較的低い温度の地熱熱水で沸点の低い2次媒体を蒸発させ、この蒸気でタービンを回転させて発電する小容量のバイナリー発電方式である。

フラッシュ発電方式では、2010年10月に、ニュージーランドのナアワプルーア地熱発電所 (図5) にトリプルフラッシュ^{(*)3}発電で世界最大容量である140 MW地熱発電設備を納入した。最近では2012年12月に、インドネシアのウルブル地熱発電所向け地熱発電設備 (2 台, 55 MW) を納入した (94 ページ “火力・地熱発電所のプラント技術” 参照)。

地熱発電では地熱流体に腐食性ガスや不純物が多く含まれており、腐食やエロージョン・コロージョン^{(*)4}、スケール付着などの問題が発生する。富士電機は、数多くの納入実績から得られた点検・保守データや、サイトでの実証試験データを基に研究を進め、タービン翼やケーシングの最適材料およびコーティング技術を

(*) 2) HHV, LHV

ある一定の状態に置かれた単位量の燃料が断熱的に完全燃焼し、その燃焼ガスを元の温度まで冷却したときに放散される熱量を“発熱量”という。発熱量には、水蒸気の潜熱を含める高位発熱量 (HHV: Higher Heating Value) と、これを含めない低位発熱量 (LHV: Lower Heating Value) がある。

(*) 3) トリプルフラッシュ発電

熱水として取り出された地熱資源を、減圧して蒸気と熱水に分離し、分離した蒸気をタービンに送って発電を行う方式をフラッシュ方式という。この蒸気と熱水の分離を3段階行うことをトリプルフラッシュ発電といい、取り出した地熱資源を最大限に利用することが可能となる。

(*) 4) エロージョン・コロージョン

エロージョン (流れや固体粒子による機械的な侵食) と、コロージョン (腐食性溶液中での電気化学的な腐食) の相乗作用により、金属の減肉が加速される現象をいう。



図5 ニュージーランド・ナアワプルーア地熱発電所

開発し、タービンや発電機、付属機器の信頼性向上を図っている。信頼性の向上とともに性能の向上も重要であり、腐食に強くかつ高効率なタービン翼などの開発も進めている（98 ページ“最新の地熱タービンにおける耐食性・性能向上技術”参照）。

バイナリー発電方式は比較的温度の低い地熱熱水を有効利用するために開発され、小型地熱発電として導入されることが期待されている。一方、フラッシュ発電方式において還元井に戻されていた還元熱水は、まだ熱エネルギーを持っているため、バイナリー発電方式に利用することも可能である。富士電機はこの発電方式をハイブリッド地熱発電と称し、発電所全体でのエネルギー回収効率の向上に寄与したいと考えている。温度の低い還元水はシリカスケールが生成しやすく、還元井の狭窄（きょうさく）を防止することが必要である。富士電機は還元熱水のシリカスケール生成の研究も進めており、その成果を生かしてハイブリッド地熱発電の普及を図っていく（102 ページ“地熱熱水利用バイナリー発電システムにおけるシリカスケール対策技術”参照）。

5 再生可能エネルギー

地球温暖化防止は社会的使命として重要な要素であり、CO₂を排出しない再生可能エネルギーの導入が世界各国で推進されている。IEA リポートでも、再生可能エネルギーの導入は年率6～8%で増加すると予想している。日本でも国のエネルギー政策の中で、エネルギーのベストミックスや分散型エネルギーシステ

ム、スマートコミュニティの構築などが論議され、その中で再生可能エネルギーの位置付けが大きくなっている。再生可能エネルギーの固定価格買取制度は、太陽光や風力、地熱、中小水力、バイオマス発電に適用され、発電電力を固定価格で決められた期間買い取ることを定めている。このため、再生可能エネルギーの発電事業者は事業計画を立てやすく、再生可能エネルギー発電の導入に弾みがついている。現状では建設が比較的容易な太陽光発電の導入が進んでいるが、これに続き、風力や地熱発電などの導入が進む。富士電機も再生可能エネルギー発電機器や設備の研究開発を進めており、高効率、高性能機器の製品化やEPC^(*)でのプラント建設に取り組んできている。

5.1 太陽光発電

太陽光発電には大きく分けて、住宅の屋根に設置する小型太陽光発電と、主に地上に設置する大規模太陽光発電（メガソーラー）がある。富士電機は、メガソーラーを中心に取り組んでいる。太陽光発電システムで重要なことは経済性をいかに高めるかである。単位面積当たりの発電量を多くすることをはじめ、発電システムの損失を小さくすること、機器の信頼性を高めて稼働率を高めることで年間の発電電力量を大きくすること、ならびに太陽光パネルの設置や配線などの施工工事コストを低減することが重要な要素となる。

富士電機は、今まで培ってきたパワーエレクトロニクス技術やシステム設計技術を活用し、経済性の高い太陽光発電システムを構築してきている。パワーエレクトロニクス技術分野では、業界に先駆けてAT-NPC（Advanced T-type Neutral-Point-Clamped）3レベル変換回路^(*)を適用した、DC1,000V、1MWのメガソーラー用パワーコンディショナ（PCS）を開発した（図6）。AT-NPC3レベル変換回路の適用によりスイッチング損失とフィルタ損失を大幅に低減し、世界最高効率98.5%を実現した。直流入力を1,000Vにすることにより直流側損失を低減でき、また屋外型を実現することでPCSを設置する建屋が不要になるなど建設コストの低減が期待できる。システム設計分野では、環境に合わせた太陽光モジュールやアレイの最適化、配電ロスの低減、系統連系要件に適合した連系設備の計画、監視制御のスマート化やクラウド化など、設置環境や経済性を考慮した総合システム設計技術の

(* 5) EPC

Engineering Procurement and Constructionの略である。プラント建設時の役割範囲として、エンジニアリング設計、資材・機材の調達、建設工事を指す。これらを一括して請け負うことを、EPC方式またはEPC事業という。

(* 6) AT-NPC3レベル変換回路

一般的な2レベル変換回路の出力電圧レベルが2段であることに対し、3レベル変換回路は1段多い。この結果、インバータの出力線間電圧波形がより正弦波に近くなり、装置のLCフィルタの小型化や高い電力変換効率などのメリットがある。従来の3レベル回路は、直流電源の中間電位点に結線されていることが

ら、NPC（Neutral-Point-Clamped）方式と呼ばれる。AT-NPC（Advanced T-type NPC）方式は、異なる定格電圧の素子を組み合わせ、中間素子にRB-IGBT（Reverse Blocking IGBT）を用いることで従来方式に比べて回路を簡素化し、高い電力変換効率を実現している。

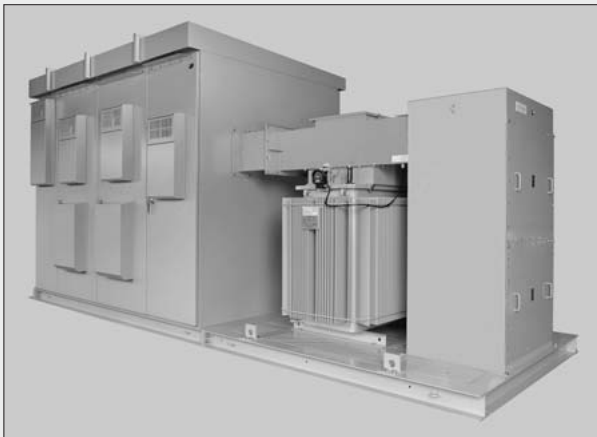


図6 屋外型 PCS (DC1,000 V, 1 MW)

向上を図っている（118 ページ “大規模太陽光発電システム技術” 参照）。

また、富士電機は山梨工場の遊休地に 2 MW の太陽光発電設備を建設する。ここでは、開発した PCS や系統連系設備の実証を行い、製品の信頼性確認と改良のためのデータ収集を行い、また、施工技術の改良のために活用することとしている。この発電設備は 2013 年 3 月末に竣工する予定であり、ここで得られる実証データや施工技術の有効性を活用し、性能や経済性の高い太陽光発電システムの構築を進めていく。

5.2 風力発電

風力発電も再生可能エネルギーの中で大きな位置付けになっている。日本では、これまで陸上設置型の風力発電が主流で規模も小さなものであった。今後は経済性の面から大規模風力発電（ウィンドファーム）が、設置場所の限界から洋上風力発電が注目され、単機の発電容量も 3 ～ 5 MW クラスの大型風力発電設備になっていく。富士電機は、風力発電設備用の大型発電機や PCS、電力安定化装置などに注力している。

風力発電では、風車の回転数を増速機で増速し、発電機を高速で回転させるダブルフェド方式が一般的であった。しかしながら、洋上風力など発電容量が大きくなると大型の増速機が必要になり、また増速機に起因するトラブルやメンテナンスの課題が大きくなる。最近の動向として、大型風力発電は増速機を省略したダイレクトドライブ方式が適用されるようになっていく。

富士電機は、ダイレクトドライブ方式に適用する 3,000 kW の永久磁石同期発電機の開発を行い、製品

化した。ダイレクトドライブ方式では回転速度が 15 min^{-1} 前後の低速となり発電機が大型となるが、永久磁石による励磁方式を採用し、通風・冷却方式や巻線方式、構造を最適化し、小型・軽量化と高性能化を図った。また、この方式では発電機に対してフル容量の大型 PCS が必要となるが、富士電機の持つパワーエレクトロニクス技術を生かした AT-NPC 3 レベル変換回路を PCS に適用し、高効率化を図っている（129 ページ “風力発電用永久磁石同期発電機” 参照）。

冷却には洋上風力への適用を考慮して外気による空冷方式ではなく水冷方式を採用し、さらに FRT 機能^(*)を標準装備させるなどの特徴を持たせている。

また、風力発電は出力が時々刻々と変化するため、電力品質への影響が課題である。富士電機では、蓄電池と電力安定化装置を組み合わせ、蓄電池の充放電制御により風力発電の出力変動を抑制し、電力系統の電圧・周波数の品質を高める電力安定化装置も実用化するなど風力発電の導入促進に寄与している（124 ページ “風力発電用のパワーコンディショナおよびコンバータにおける回路・制御技術” 参照）。

5.3 水力発電

水力発電は、太陽光発電や風力発電に比べて出力変動がなく、利用率も高く安定した再生可能エネルギーである。日本においては、大型の水力発電は既に開発され、今後の開発地点は限られている。しかしながら、中小水力発電では、農業用水路や上下水道などの遊休落差を利用した発電が可能である。再生可能エネルギーの固定価格買取制度でも、30 MW 未満の中小水力発電は固定価格買取の対象設備であり、制度を利



図7 マイクロ水力発電設備

(*) FRT 機能

FRT (Fault Ride Through) 機能は、系統での三相短絡や二相短絡の事故において、インバータが出力をすぐに停止することなく、規定範囲内で三相電流を出

力して系統の電源変動を抑制させるように動作し、運転を継続するものである。この規定範囲は、瞬低の時間と電圧低下範囲として、各国で定められている。

用した開発が期待されている。

富士電機は、容易に小水力発電設備を設置できるように、横軸チューブラ水車^(※8)と発電機をコンパクトに組み合わせて標準化し、マイクロ水力発電設備を開発した(図7)。出力は落差、流量に応じて数kW～200kWの範囲で、農業用水路や上下水道、砂防ダムなどに適用可能である。マイクロ水力発電設備は、直列に配置することにより高落差にも適用できる。また、ランナベーンを可動にすることにより流量制御が可能であり、広範囲な領域において高効率化できるなどの特徴を持っている。今後も、小水力発電設備の研究開発と特徴ある製品化を進め、遊休エネルギーの有効利用に貢献していく。

6 あとがき

今後も世界の電力エネルギーの需要は大きく増加し、これに伴って電力エネルギーを創る“創エネルギー”も重要な役割を持つ。富士電機は、電力の安定供給と低炭素社会の実現のために、創エネルギーへの取組みを継続的に進めていく。大型火力発電や地熱発電、水力発電の研究開発を今後も進め、高効率、高性能で信頼性の高い発電設備を提供していく。再生可能エネル

ギーは、CO₂を排出しない環境にやさしいエネルギーであるとともに、エネルギーのベストミックスの中で重要な位置付けになる。再生可能エネルギー分野では発電機能だけではなく、系統連系技術や安定度向上技術も重要になる。富士電機が得意とするパワーエレクトロニクス技術や制御技術を融合し、最適なシステムを構築していきたい。

富士電機は、これから発展が期待されるスマートコミュニティの構築にも取り組んでいる。スマートコミュニティ社会の構築には、創エネルギー、省エネルギー、パワーエレクトロニクスとエネルギー最適制御、情報通信などの集結が重要であり、富士電機の総合力を持って社会に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) International Energy Agency, World Energy Outlook 2012.



米山 直人

富士電機株式会社執行役員常務、発電・社会インフラ事業本部長。電気学会会員。

(※8) チューブラ水車

円筒ケーシング内に流水で回転する水車ランナを収納し、軸方向から流入した流水が軸方向に流出する水車で、低落差の水力資源を有効に利用することができる。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。