

最近の小水力発電技術

大和 昌一(やまと しょういち)

須崎 久晴(すざき ひさはる)

① まえがき

1997年12月に京都で行われた気候変動枠組み条約第3回締約国会議(地球温暖化防止京都会議)では二酸化炭素などの温室効果ガスの排出量の削減量が決められた。2008年から2012年の5年間に日本は1990年比で6%の削減を義務づけられた。二酸化炭素の排出量削減の対策は省エネルギーをさらに推進するか、化石燃料に代わる新エネルギーを導入するかである。再生可能なクリーンエネルギーとしては水力、太陽光、風力があげられる。

クリーンエネルギーの代表格として水力発電設備はこれまでに国内に多数建設されてきたが、ここにきて水力の社会的評価は厳しくなっている。高度経済成長時代のように大規模なダムを建設し、河川をせき止めて大容量の電源を確保することは、環境保護の観点からは好ましくないという時代になってきた。

もはや水力の新規建設はないのかといえれば決してそうではない。地球環境の保護に貢献するという立場で述べれば、例えば、二酸化炭素に関しては水力が太陽光、風力を下回り、最も排出量の少ないエネルギー源といわれている(図1)。図中の排出量は単に建設された設備が運転中に排出する二酸化炭素だけではなく、原材料の生産から機器の製

作、建設まで含めたトータルな排出量を算定している。以下に、環境保護に貢献するという観点から富士電機の小水力技術を紹介する。

② 小水力用水車技術の動向

表1に最近5年間に富士電機が納めた小水力発電設備(ここでは容量2,000kW以下とした)の製作実績を示す。最近の小水力は次のような特徴がある。

図1 発電システム別の二酸化炭素排出量

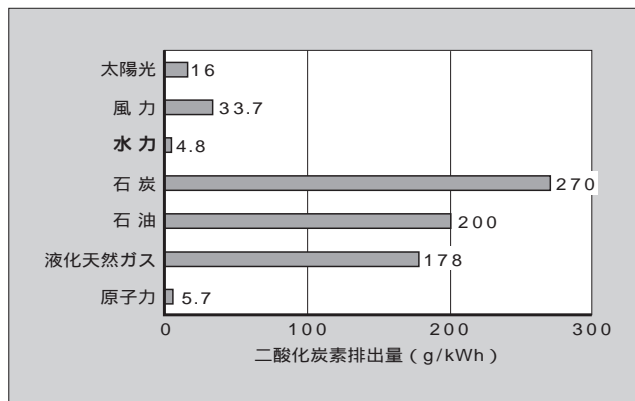


表1 最近5年間の小水力発電設備の製作実績(2,000kW以下)

項目	発電所名 顧客名	日向見	瑞慶山ダム	塩川	広野	三春ダム	比奈知ダム	臼中
		群馬県	沖縄総合事務局	山梨県	福井県企業庁	東北地方建設局	水資源開発公団	富山県農林水産部
水車形式		横軸フランシス	クロスフロー	横軸フランシス	横軸フランシス	クロスフロー	クロスフロー	横軸フランシス
水車出力(kW)		1,120	83	1,200	1,490	1,020	88	968
有効落差(m)		65.86	12	50.34	54.4	43.9	38.41	57.5
回転速度(r/min)		750	310	600	720	275	720	900
流量(m ³ /s)		2	0.89	2.8	3.2	3	0.3	2
ランナ代表径(mm)		700	460	840	770	1,000	340	580
発電機形式		同期機	同期機	同期機	同期機	同期機	同期機	同期機
容量(kVA)		1,100	85	1,200	1,500	1,080	90	980
発電機電圧(kV)		6.6	0.44	6.6	6.6	6.6	0.44	6.6



大和 昌一

水車の設計・開発、水力プラントの品質保証業務に従事。現在、電機システムカンパニーエコプロジェクト推進室水力担当部長。日本機械学会会員、ターボ機械協会会員。



須崎 久晴

水力発電設備のプラントエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニーエコプロジェクト推進室新エネルギーグループ。

(1) 大きな多目的ダムの直下に発電所を建設する傾向

従来のダム式の水力発電設備では落差を確保するために発電所はダムよりかなり下流に設置され、ダム下流から発電所までの間の河川には水が流されていない。そのため、ダム下流の河川が枯渇し、水棲（すいせい）物の生態系に影響を及ぼすおそれがあるため維持放流が行政指導されている。維持放流では目的が生態系の保護であるため、今までは放流の水力エネルギーが回収されることはなかった。

また、水の運用もダム式の場合には電力需要のピーク時に集中的に運転する方式が一般的であるが、表1の例では責任放流量の水を使って常時運転する方式が採用されている。

(2) 水車の機種は横軸フランシス水車あるいはクロスフロー水車が主流

発電機器のコストダウンを目的に横軸フランシス水車およびクロスフロー水車が適用されている。富士電機のクロスフロー水車の納入例のうち、三春ダム発電所（1,020 kW）は最大容量品であり、瑞慶山ダム発電所（83 kW）は最小容量品である。

(3) 落差は100 m以下、水量は3.5 m³/s以下

多目的ダムの規模と自流、維持放流という目的からこのような落差と水量の範囲となっている。

(4) 発電機は同期機が主流

この理由としては、主に下記が考えられる。

- (a) これらの設備はダム管理用の電源として運用されているので、系統事故が発生した際には系統から独立して自立運転を行う必要がある。
- (b) 誘導発電機とした場合、負荷に応じて力率を一定に調整できないなど、誘導発電機固有の特性が系統連系する配電線へ悪影響を及ぼすとの判断がなされた。

このように最近の小水力の動向としては、電力事業用の発電設備以外の分野で需要が伸長しつつある。以下にその概要を説明する。

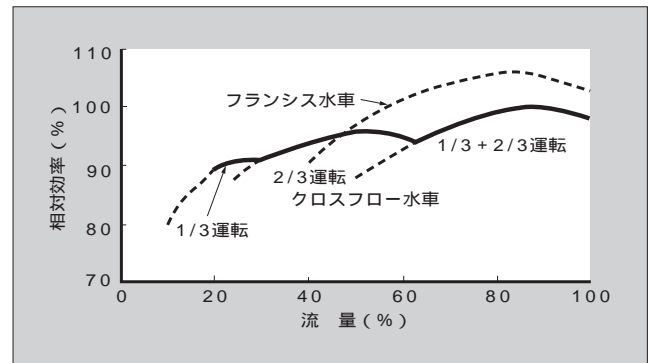
2.1 維持放流用小水力水車

既設ダムの維持放流地点は日本全国で200地点以上存在する。しかし、発電容量が1,000 kW以下と小規模のため従来の事業用水力発電設備として計画すると経済性が悪い。発電設備のなかの水車本体コストを下げる工夫がポイントとなる。

オーダーメイド品ではなく、市販の標準ポンプが採用できるならば大幅なコストダウンが可能である。この場合、市販のポンプを流れと回転の方向を逆転させて水車として使用する。ポンプ逆転水車の問題点は、ポンプの設計点と実際に運転する水力資源の仕様がマッチしないと出力不足、キャビテーション壊食、振動・騒音が発生することである。

表1で紹介した多目的ダム用の水車では下流への責任放流量が時間帯や季節で変化し、ダムの水位も季節的に変化する。ポンプ逆転水車を適用した場合、発電できる時間帯は制限され、設備の利用率が下がる。また、専用の水車に比べると効率が低い。このような理由から富士電機では横

図2 横軸フランシス水車とクロスフロー水車の特性比較



軸フランシス水車、クロスフロー水車を採用している。

落差が変化する地点への適用には横軸フランシス水車が適し、流量変化の大きい地点にはクロスフロー水車が適している。ガイドベーンを切り換えて水量を3/3, 2/3, 1/3に変換して運転ができるため（図2）、年間の発生電力量の改善に貢献している。

ガイドベーン、ランナベーンを操作するサーボモータも部品点数の多い油圧式から簡単な構成の電動式サーボモータを採用して本体コスト、メンテナンスコストを削減している。

2.2 水道設備向け水車

ダムの維持放流水車以外にも上下水道設備のなかに存在する遊休落差を用いた水力資源がある。富士電機は1993年に上水を利用したフランシス水車発電設備（有効落差81.82 m, 1.34 m³/s, 出力840 kW）を群馬県の県央第一水道発電所に納入している。飲料水に水車を適用する場合の考慮すべき内容は以下の3点があげられる。

- (1) 水道水は次亜塩素酸ソーダを含有しており、水質を変化させない工夫が必要である。
- (2) 水道の配管は複雑であり、水車がトリップ停止する場合に発生する水圧上昇は、すべての配管において許容圧力を満足しなければならない。
- (3) 飲料水であるため、水車発電設備から流水中に不純物を混入させてはならない。

県央第一水道発電所は、運転が開始されてから6年が経過しているが順調に稼働中である。

なお、水道設備は配管が長いので、水力損失が大きく、計画落差と実際の落差が異なることが多いので、落差、水量を計画時に詳細に把握しておくことが重要である。最近では、水車が運転を急きょ取りやめて停止する場合、あるいはその反対に水車を急きょ運転しなければならない場合にも、下流の水道設備への供給水量の変化量を最小限にしたいという要求も加えられてきた。

2.3 湧水発電、農業用水発電

水道設備の遊休落差と同様の資源はほかにも考えられる。例えば大規模トンネル設備で無効処理している湧水（ゆうすい）は、その流量と落差によっては十分な資源となる。

また、農業用水もこれから期待できる水力発電資源である。25 m の落差、0.5 m³/s の水量の水力資源があれば 100 kW 程度の発電が可能である。

湧水や農業用水の持つポテンシャルがどの程度になるかを簡単に測定する方法を以下に説明する。

(1) 落差の測定

発電用に水を取り込む場所および発電設備からの水を放流する場所の標高を調べる。両者の差が概略の有効落差 H になる。

(2) 流量の測定

湧水あるいは農業用水が河川に放流されるまでの経路は種々の状況があるが、その経路の途中で寸法（幅と深さ）が分かっている人工的な水路（側溝など）が流量測定に適する。

水路中のなるべく直線部において水深を測定する。例えば、ひもまたはロープにおもりを付けて流水中に垂らす方法で測定できる。水深と水路の幅を乗じて流れの断面積 A を求める。

また、ストップウォッチとメジャーを用いれば流れの速度が測定できる。例えば、10 m 間隔でマーキングしておき、目立つ色の浮体を投げ込み、マーキング間を通過する時間を測定することにより流れの速度 V が測定できる。流速は浮体を投げ込む位置によって異なるので、位置を変えて、各位置で 5 回程度繰り返して平均的に求めるのが望ましい。

断面積 A (m²) と流速 V (m/s) を乗じたものが流量 Q である。

(3) 発電可能電力

以上により発電可能電力は概略下式で求める。

$$P(\text{kW}) = 9.8 \times Q \times H \times 0.8 \dots\dots\dots(1)$$

③ 小水力用電気設備の動向

今までの中小容量の水力発電所は、電力会社が運営する設備を除いて、発電させた電気を一般の電力系統に流すこと（以降、逆潮流という）が容易ではなかった。

しかし、1986年8月に通商産業省資源エネルギー庁公益事業部から、各通商産業局および一般電気事業者あてに「系統連系技術要件ガイドライン」⁽²⁾（以降、ガイドラインという）が通知され、ある技術的要件を満足するように計画すれば一般の自家用発電設備を高圧専用線に接続し、さらに逆潮流もできるようになった。これを受けて、各電力会社もその逆潮流した電力量分を発電設備設置者に返金する制度（売電）も盛んに実施されるようになった。

さらに、1993年3月には、専用線だけではなく高圧一般配電線や低圧配電線までも接続対象にすることが可能なように技術的要件が追加改定され、今まで比較的中容量以上の設備が対象であった電力会社との売電契約も、小容量の発電設備まで緩和された。

このようなガイドラインが整備されたことで、そこに明記されている技術的要件を満足させるように計画すれば、

県企業局や民間企業が設置した比較的小容量の水力発電設備の発生電力を自らの構内だけで消費するのではなく、消費できない電力は余剰電力として系統に逆潮流させ、電力会社に電気を売るということが可能な時代となった。

3.1 系統連系するための技術的要件

各電力会社が布設した配電線に水力発電設備を連系させる場合、前述したガイドラインの指針に準じた保護装置を設置する必要がある。

小容量水力の場合は、6.6 kV の高圧配電線との連系が主流であるので、高圧配電線に接続するのに必要な保護装置を以下に列記する。

- 地絡過電圧継電器 (64B)
- 過電圧継電器 (159)
- 不足電圧継電器 (27B)
- 方向短絡継電器 (167S) (同期発電機の場合)
- 周波数上昇継電器 (195H)
- 周波数低下継電器 (195L)
- 逆電力継電器 (167R) (逆潮流がない場合)
- 単独運転防止装置もしくは転送遮断装置 (逆潮流がある場合)

基本的にこのガイドラインは、配電線側で作業をする各電力会社の保守作業員の安全および同一配電線に接続される一般需要家の保護を第一に考えたものであり、配電線側や電力会社が設置した配電線用変電所で何か事故が発生した場合に、その配電線に接続している発電設備からの発生電力が他の需要家に供給できないようにその発電設備を安全に停止させることを主眼に置いたものである。

したがって、上記の保護装置が働いた場合には、発電設備を電力系統から解列させる必要があり、一般的には発電所側の系統連系点に設置した遮断器で遮断している。

3.2 単独運転防止装置付系統連系保護装置の開発

従来は逆潮流ありの場合、連系する遠方の配電線用変電所の遮断器開放信号を通信線を介して発電設備に伝送し、系統連系点の遮断器を開放させる「転送遮断方式」を採用する方式が主流であったが、この方式は信頼性はあるものの配電線用変電所に信号伝送装置が必要になることと、発電所と変電所間に長距離の通信ケーブルを布設しなければならぬなどの理由から、全体として非常に高価な設備となる。これらの理由から特に 500 kW 未満の小容量の水力発電設備では発電設備設置者は、転送遮断装置の設置を懸念する傾向にあった。

それに比べて単独運転防止装置は、配電用変電所に新たに装置を設置する必要はなく、発電設備側のみで対応可能であり、コスト面でも前者より安価にできる。しかし、この装置は主に太陽光発電のような静止形電源としての系統連系保護装置としてはすでに取り入れられているが、水車発電機のように回転体を用いた発電設備へ適用できる装置としては今までほとんど開発されていなかった。

富士電機は、これからの小水力発電設備の需要に先駆け、

図3 概略単線結線図(同期発電機, 単独運転防止装置案)

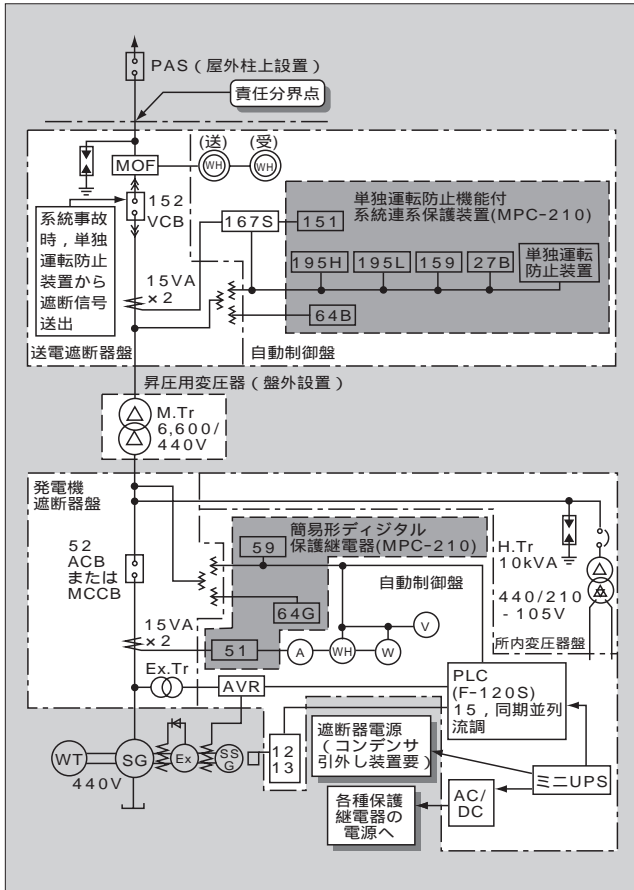


図4 概略単線結線図(誘導発電機, 単独運転防止装置案)

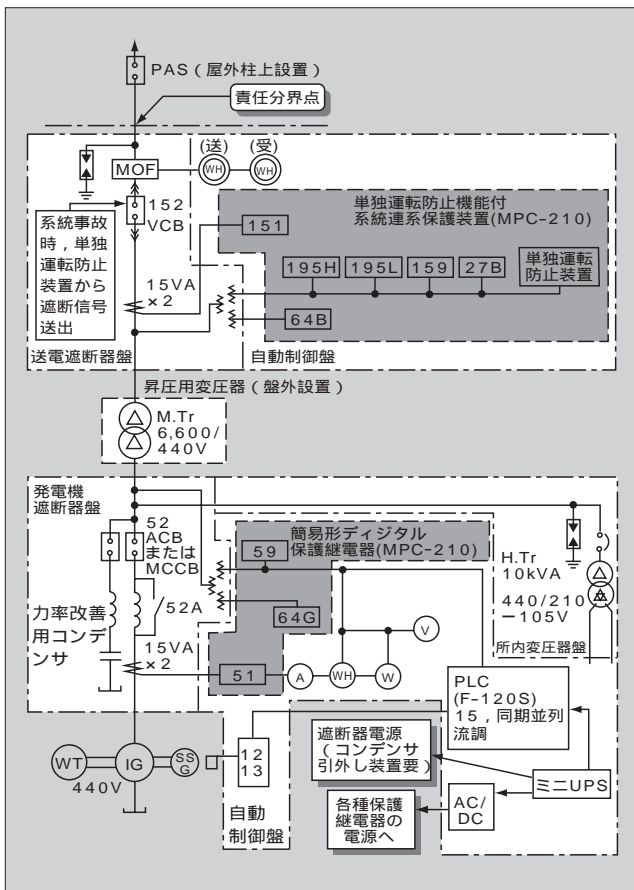


図5 転送遮断装置のシステム構成

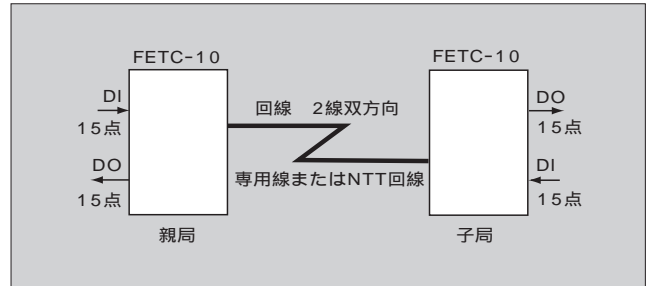
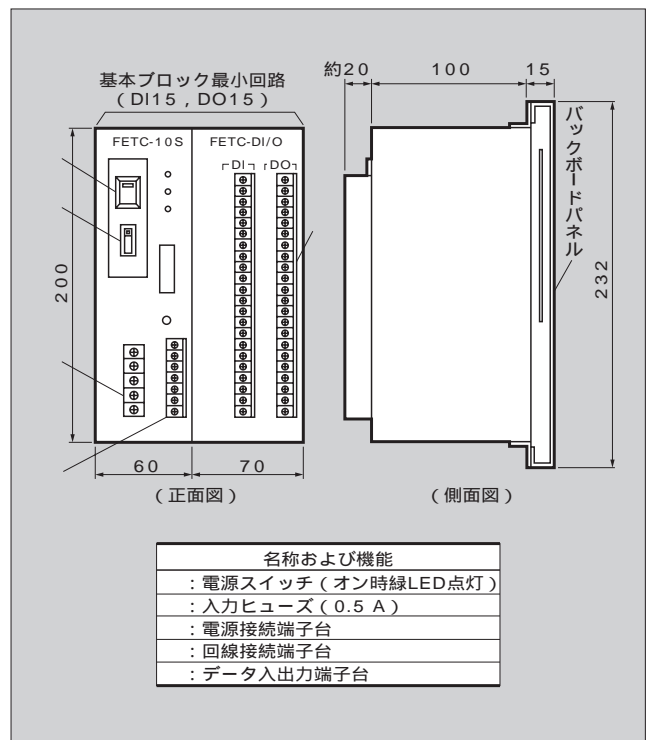


表2 転送遮断装置の基本仕様

回線	2線(半二重伝送)
信号	FSK変調方式 1,200ビット/秒
伝送手順	ポーリング伝送制御方式
伝送エラーチェック	SUMチェック
伝送容量	上り, 下りともSV 15点
電源	AC100VまたはDC110V
絶縁耐圧, 抵抗	AC1,500V 1分間, DC 500Vメガー 10M 以上
伝送距離	伝送損失 30 dB・m 600 回線約 30 km
送出レベル	0 dB・m ~
回線断検出	- 42 dB・m ± 3 dB・m
回線インピーダンス	600 ± 20%
装置故障	回線断, 情報更新不良, ハードウェア異常 (CPU不良を除く)
設置環境	周囲温度 0 ~ + 40, 相対湿度 20 ~ 90% を超えないこと

図6 装置の外形寸法図



逆潮流を実施する場合の系統連系に必要な単独運転防止装置機能と保護継電器機能をコンパクトに集約させた新しい系統連系保護装置を開発した。

この装置の詳細は、本特集号の別稿「最近の水力発電所の制御システム」を参照いただきたい。

また、この装置を採用した場合の単線結線図例を、同期発電機案、誘導発電機案それぞれ図3、図4に示す。

なお、上記で説明した以外にも、装置本体としては従来に比べ低価格でコンパクトな転送遮断装置も開発し、顧客のニーズに合わせてどちらにでも対応ができるようにした。図5にその転送遮断装置のシステム構成、表2に基本仕様、図6に装置外形寸法図を示す。

4 あとがき

膨大な水量を管理する大規模な水力発電ではなく、小水力発電機器を用い河川の水の流れをそのまま利用すれば環境に何ら影響を与えずに発電することは可能である。また、発電設備と電力消費場所が近ければ、送電などの流通設備が簡素化され、計画全体のコストも下がる。小水力発電市場は分散形発電システムとして、埋もれたニーズの発掘やコストダウンなどのさらなる課題があるものの、今後とも期待できる分野であると考えられる。

参考文献

- (1) 金元敏明：パルプ水車の吸出し管，ターボ機械，Vol.27，No.5，p.24（1999）
- (2) 資源エネルギー庁編：解説電力系統連系技術要件ガイドライン 98，電力新報社（1998）

技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
光フィールドバス技術の実用化の現状	情報制御システム事業部	池田 卓史	オートメーション，No.9（1999） 日本工業新聞社
計装ベンダの21世紀の戦略	情報制御システム事業部	福本 武也	計装，No.500（1999） 工業技術社
タービン発電機固定子巻線の導体内温度分布	富士電機総合研究所 " " エネルギー製作所 " "	小原 孝志 日和佐寛道 溝上 良一 新倉 仁之	電気学会回転機研究会（1999-5）
絶縁油中金属の分析	富士電機総合研究所	佐渡 直彦	日本分析化学会第48年会（1999-8）
系統低次高調波増大に対応した主要変圧器保護装置の研究	富士電機総合研究所 情報制御システム事業部	千原 勲 松本 俊郎	電気学会保護リレーシステム研究会（1999-9）
下水汚泥凝集の最適薬注制御方法	富士電機総合研究所	井上 公平	横浜市下水道局第17回新技術研修会（1999-9）
新部分共振コンバータ	富士電機総合研究所	五十嵐征輝	次世代エネルギーエレクトロニクス研究会（1999-9）
マイクロギャップ円筒型オゾンナイザの開発	富士電機総合研究所 " " " " 情報制御システム事業部 富士電機ファーマス	石岡 久道 橋本 孝一 田口 正樹 甲斐 一樹 高橋龍太郎 西井 秀明	電気学会放電研究会（1999-9）
バクテリオファージを用いた大腸菌迅速計測装置の開発	富士電機総合研究所 " " " " 情報制御システム事業部	野田 直広 大戸時喜雄 平岡 睦久 多田 弘	EICA 第11回研究発表会（1999-9）
光脱硝における量子効率の検討	富士電機総合研究所 " "	西村 智明 西方 聡	第40回大気環境学会年会（1999-9）
極性反転時における油浸絶縁流動系の油中電界測定	富士電機総合研究所 " " " "	清水留美子 仲神 芳武 宮本 昌広	平成11年電気学会基礎・材料・共通部門大会（1999-9）
新絶縁油の変圧器への適用検討（ ） ---- 植物油基油の特性比較 ----	富士電機総合研究所 変電システム製作所 富士電機総合研究所 " "	清水留美子 宮 良一 仲神 芳武 宮本 昌広	



*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。