



酒井道雄\*

# 受配電システム機器の技術展望

Technological Aspects of Power Receive and Distribution Systems Apparatus

Michio Sakai

## 要旨

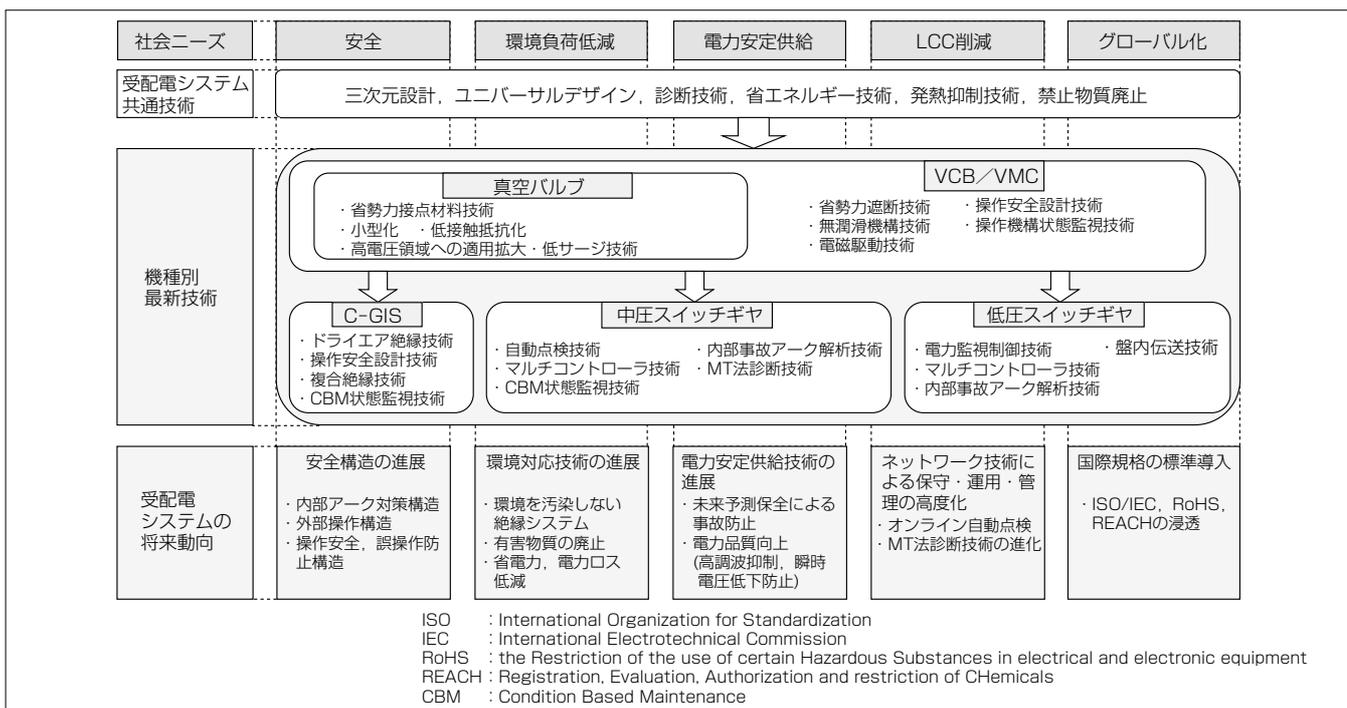
受配電システム機器は、社会ニーズ(地球環境負荷低減、安全性向上、ライフサイクルコスト(LCC)削減)に対応した絶縁技術、遮断技術、監視制御技術等の進展によって、安全性・信頼性の、より一層の向上、小型・軽量化、省エネルギーの推進、運用保守の改善がなされてきている。

- (1) 環境負荷低減対策の重要性が更に高まっている中で受配電システム機器の技術・製品が進化を遂げている。
  - ①配電電圧の昇圧化は線路ロス削減の観点で大きな省エネルギー効果があり、昇圧化対応の製品化を進めている。
  - ②温室効果ガス削減を目的とし、ドライエアを使用したガス絶縁スイッチギヤ(C-GIS)を製品化しているが、固体絶縁との複合絶縁技術の開発によって、更なる小型軽量化や適用電圧の拡大を図っている。
  - ③有害物質の含有規制強化の中で、真空遮断器(VCB)・真空コンタクタ(VMC)は、RoHS指令の特定六物質を使用しないことをコンセプトにし、かつ小型軽量化真空バルブを開発・適用した新製品化を順次進めている。

- (2) 製品の更なる安全化と言う観点からは、スイッチギヤの内部アーク時の現象解析技術の進歩による安全性の追求や、操作時の安全性を配慮した新製品化を進めている。
- (3) 製品LCC削減のため、各種の技術・製品開発を進めている。

- ①現地施工の工期短縮・費用削減・信頼性向上などを目的として、パッケージ化やグローバル汎用フィールドバスに適合した製品化を行っている。
- ②保守・点検の効率化・高度化のために、状態監視保全(CBM)技術では監視方式の信頼性向上や遠隔監視を可能とする伝送端末機能付加等の改善が図られている。また、三菱電機が開発した、マハラノビス・タグチ法(MT法)による沿面絶縁の余寿命推定技術は、診断対象をブッシングや77kV用絶縁物に、適用拡大している。

今後の更なる社会ニーズの変遷に的確に対応することを念頭に、基礎研究開発から応用・製品化・運用までの一貫した最適な受配電システム機器の技術・製品開発を行い、社会に貢献していく。



## 受配電システム機器の技術展望

受配電システム機器の社会ニーズに基づく技術マップと将来動向を示す。

## 1. ま え が き

受配電システムは、電力供給源より電力を受ける受電点から、分散した動力や照明等の負荷消費端へ各回線を通じて電力を供給する事を目的とした電力設備であり、電力流通を安定して行うために、受電・配電の電力流通状態を計測・監視するとともに、各回線に設けた開閉器による通常開閉制御や異常状態発生時の保護開閉制御を行うシステムである。

この受配電システムは、発電所(構内電源系統)や変電所、及び水処理施設、交通施設、製造業等、電力の受電・配電を行うシステムであり、社会インフラを形成する上で重要な基幹システムと位置付けられる。受配電システム機器(スイッチギヤ)は、その製品の根幹を成す絶縁技術・開閉(遮断・駆動)技術の進歩とともに進化を遂げて、社会ニーズの変遷にこたえた製品作りや、安全性・信頼性の更なる向上、小型・軽量化、監視制御の高度化が図られてきている。

本稿では、社会ニーズである①地球環境負荷低減、②安全性向上、③LCC削減要望に基づく受配電システム機器の技術開発や製品化動向を述べる。

## 2. 地球環境負荷低減を実現する受配電システム機器

環境負荷低減に関して、温暖化防止のための省エネルギーの推進、温室効果ガス削減、投入資源抑制のための機器の小型軽量化に関して次に述べる。

### 2.1 省エネルギー化を指向した配電電圧昇圧化

受配電システムの省エネルギー化は、変換(昇圧・降圧用変圧器)ロス及び線路ロスの削減が重要なポイントであり、変圧器の効率化がトランナ方式などで進められている。一方、線路ロス削減の有効な手法として受配電システムの系統電圧の昇圧が挙げられる。

日本における広域配電系統昇圧化は、中電圧を6kV級から20kV級、低電圧を200V級から400V級へ昇圧する方式で、地域開発区域などの特定地域で行われている。このような広域配電系統の昇圧化需給は、トータルの電力損失で20%、機材投入を含めたCO<sub>2</sub>総量削減で20~30%程度の削減効果があると試算されている<sup>(1)</sup>。

一方、海外での最近の動向として、中国の一部の省・市等で中電圧配電網(10kV級)の昇圧化(20kV級)の試行・運用評価が進められている(低圧は既に400V級で完備されている)。中国の当社関連会社でも、このような昇圧動向に対応した中国仕様20kV級スイッチギヤの製品化を行っている。また、この動向に加え、発電所の所内電源系統電圧の6kVから10kV級への昇圧化も一部行われている。

また、東南アジアの石油・化学関連プラントでの構内低圧系統の電圧を460Vから550/690Vへ昇圧化する計画も進められている。当社ではこのような低圧配電系統の昇

化動向に対応して、低圧スイッチギヤ“B形MCC”の、製品シリーズを拡大し、“B形ワイドMCC”を製品化した(図1)。この製品は、IEC規格への適合と、最高使用電圧690V(従来480V)・最大遮断電流80kAまでの高電圧化・大容量化へ適合させた製品である。

### 2.2 温室効果ガスを使用しない技術

中電圧クラス(定格電圧1~54kV)及び72kV級のスイッチギヤは、国内の多くの受電点に使用されているが、高電圧域(24~72/84kV)では、環境劣化因子の排除や縮小化等のニーズに呼応して1980年代から六フッ化硫黄ガス(SF<sub>6</sub>ガス)を使用したキュービクル式ガス絶縁スイッチギヤ(C-GIS)が多く適用されてきている。昨今の更なる温暖化抑制の必要性から、当社ではSF<sub>6</sub>ガスを使用しないC-GISの開発を進め、ドライエア絶縁のC-GISを製品化してきた。この製品は軽量化を指向し、低ガス圧(0.2MPa-G以下)ドライエア絶縁で従来容積レベルを実現するために固体絶縁との複合絶縁の構造としている。

図2に不平等電界下(先端R加工丸棒電極対平板)における、不平等電極側への被覆絶縁のあり・なしでのドライエア放電電圧の圧力特性(プロット)及び放電電圧値推定特性(破線)を示す<sup>(2)</sup>。放電経路は、絶縁被覆端部から平板電極へ橋絡する形態となっている。図2から、低ガス圧領域(0.2MPa-abs)では、放電モデル推定式(図中の破線)より高い放電電圧値となっており、被覆絶縁による放電電圧値上昇の効果が顕著な領域であり、被覆絶縁が耐電圧値を高める有効な対策となる。

このような被覆絶縁による放電電圧特性の改善効果を、更に解明・評価し単純放電モデル化するなどによって、被覆絶縁の有効性評価技術を進化させ、更なる製品の小型・軽量化に向けた開発を進めている。

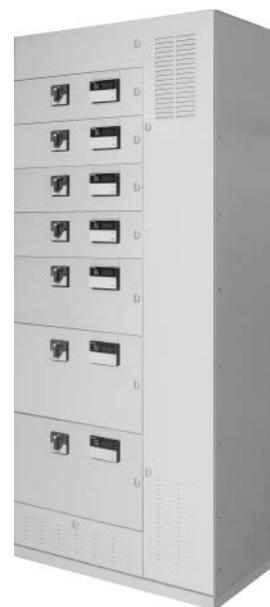
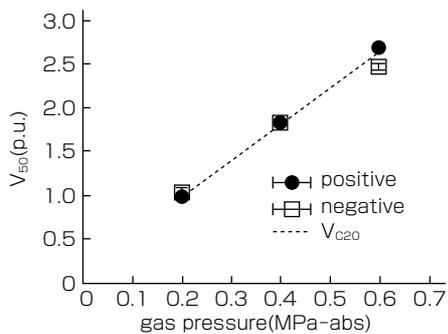
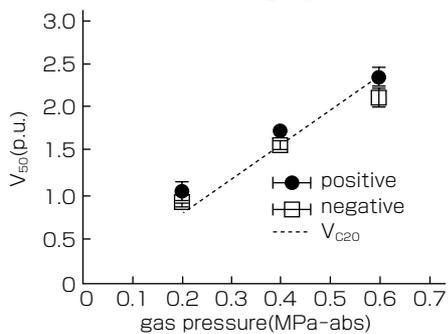


図1. 低圧690V(昇圧化)対応低圧スイッチギヤ“B形ワイドMCC”



(a) 被覆絶縁なし



(b) 被覆絶縁あり

図2. ドライエアガス圧力依存性

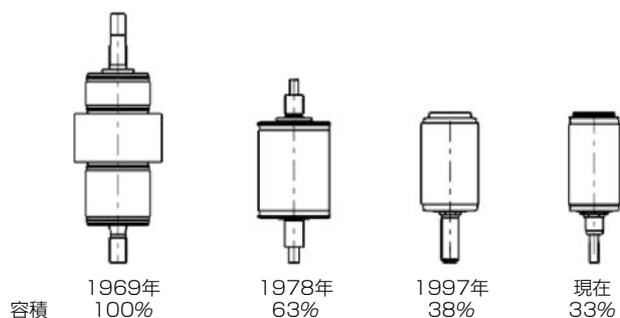


図3. 7.2kV・40kA用真空バルブ小型化の変遷

対する放熱・換気を目的にした開口部を部分的に設けている場合がある。通常は、放圧カバーなどを構造物の天井部に設けて高温膨張空気を放出する構造としているが、換気口のような小開口部からの高温・高圧ガスの漏洩(ろうえい)は、近接する人へ安全上問題となる。したがって、人への安全を確保するためには、換気開口部を初期空気膨張過程で閉鎖し、意図して天井に設けた開放開口部のみでガスを放出させる必要がある。高温・高圧ガスの挙動を解析・解明するために、当社ではCIP(Cubic Interpolated Propagation)法を適用・応用した二次元流動解析評価に基づき<sup>(3)</sup>、換気開口部の高速閉鎖構造のスイッチギヤを製品化している。図4は、スイッチギヤ下部に設けた換気開口部を初期の圧力波伝播(でんば)過程で閉鎖した後の放出流れ図を示している。

また、操作時の安全性に関して、遮断器などの“引き出し形機器”操作時の安全性を更に確保する目的で、スイッチギヤの盤外で引き出し・挿入操作ができる仕様の要求も拡大している。2.3節で述べた新形真空コンタクタでは、このような要求に対応可能なメニューを設けて製品化を行っている(図5)。また、この真空コンタクタは、グローバル国際規格整合化を図る目的で、定格電圧7.2kV(従来6.6kV)まで適用できる製品にするとともに、保守時の重要な給油部位となるラッチ構造を永久磁石保持構造とすることで、保守作業の軽減化を実現している。

#### 4. LCC削減に向けた技術動向

##### 4.1 イニシャルコスト削減

###### 4.1.1 パッケージ化

スイッチギヤは機能ユニット単位での製品を現地で据え付け・連結(配列)するとともに、スイッチギヤ相互間や外部との配結線作業、及び現地調整試験に多大な人工と期間を要している。したがって現地工期・費用削減や工場品質作り込み範囲を拡大する目的で、各種電機品を単位区分ごと一括にしてパッケージに収納して現地発送する方式がある。

この方式は、古くから海外の配電系統に採用されている需要家端の変電所パッケージ<sup>(4)</sup>や、高層ビルと併設したモ

### 2.3 有害指定物質の削減と小型・軽量化

欧州でのRoHS指令・REACH規則施行などの動向に対応して、特定六物質を使用しない7.2kV及び10kV級の新形真空遮断器(VCB)を順次製品化している。重鉛めっきに使用する六価クロメート処理の三価クロメート処理化や操作基板の鉛フリー化を図ったVCBを、2004年の8/12.5kA用VCBを初めとして、2007年に20kA級VCB、2009年に31.5/40kA用VCBと適用拡大し、2010年には新形真空コンタクタの製品化を行っている。

これら真空遮断器・開閉器に使用する真空バルブ小型化の変遷を7.2kV・40kA用の例で図3に示す。

真空バルブは、銅クロム系や銀系接点を使途に応じて適用するとともに、添加元素による投入時の接点溶着力の軽減や、アーク挙動解析に基づく最適な接点・電極構造とする製品開発によって小型・省勢力化を実現させてきている。また、真空バルブの省勢力化によって、操作機構部への無潤滑軸受適用や給油周期延長、保守省力化等の市場ニーズに呼応した製品化も進んでいる。

### 3. 安全性の追求

スイッチギヤの閉鎖構造物に要求される安全対策として“内部でのアーク短絡事故時の高温・高圧膨張ガスの放出によってスイッチギヤの周囲に居る保守・操作員へ危害を及ぼさない”構造とすることが注目され、国際規格のIEC62271-200で内部アーク事故を模擬した試験・評価方法が更に拡充され、規定化されている。

大気絶縁スイッチギヤの金属閉鎖構造物は、内部発熱に

ジュール化<sup>(5)</sup>等で適用されているが、最近では発電所などの大規模プラントでも、この方式を採用する傾向にある。発電プラントでは、例えばタービン制御用、発電機制御用、スイッチギヤ用等というような各単位区分で、電機品をパッケージに搭載する形態となっており、パッケージ収納に適合化を図ったスイッチギヤの改良・改善が図られている。

#### 4.1.2 汎用フィールドバスへの適合化

先に述べたパッケージ化によって製品完成度を上げた現地搬入・施工が実現できるが、パッケージ内外の配結線作業とその調整試験も、現地施工・調整作業で大きなウェイトを占めている。したがって、現地配線工事を大幅に削減するための監視・制御システムへの多重伝送方式の適用が拡大している。スイッチギヤでも、既にフィールドバスとして当社“MELSEC” ネット伝送端末を備えた監視制御コントローラを製品化し適用しているが、汎用的に採用されているModbus<sup>(注1)</sup>-RTU(Remote Terminal Unit)対応の低圧スイッチギヤ用マルチモータコントローラ“EMC-B形”を製品シリーズ化した(図6)。このコントローラは、Modbus-RTU 二重化方式に対応し、さらに、伝送強制出

力信号への対応化及び内部自動試験(保護・計測)機能による現地調整試験・定期点検試験の効率化を可能としており、かつループバック機能付加による運転時の伝送状態を容易に監視できることから、より一層のLCC削減に寄与する製品となっている。

(注1) Modbusは、Schneider Electric SAの登録商標である。

#### 4.2 保守・点検の高効率・省力化

今や高度経済成長期に納入し稼働している多くのスイッチギヤが更新時期になってきている状況にあり、寿命部品・ユニットの適切な部分更新などの要望が多くある。このような状況にあって、日本電機工業会では保守・点検指針の制定(モータコントロールセンタ)や改定(高圧遮断器)が検討されている。また、IEC-61439審議機関(SC17D)では、低圧スイッチギヤの主要機器の部分更新を行うための互換ユニットに関して、温度上昇や短絡電流強度についての性能評価基準を制定するためWG(Working Group)で検討が進められている。当社でも、スイッチギヤの部分更新用として旧形互換遮断器や、旧形互換引き出しユニットを製品化し、部分更新需要にこたえている。

一方、保守・点検の効率化のニーズも大きく、今後の方向性は、①TBM(Time Based Maintenance)からCBMへの移行による事故の未然防止精度の向上や、②ネットワーク技術によるオンライン状態監視、及び③更新時期を的確に判断する余寿命診断技術の高度化であると言える。

##### 4.2.1 CBM状態監視技術の進歩

スイッチギヤの状態監視技術は、既にドライエア絶縁C-GISで開閉動作特性変動を電磁操作機構の駆動電流波形で監視診断する開閉動作特性監視、コンデンサ容量監視、磁石劣化監視及びノイズ性高周波電磁波による部分放電・真空劣化監視を行うCBMコントローラを製品化している。部分放電監視に関しては、放電現象の分析・研究によって、更なる信頼性向上を図るために検出高周波帯域を上げ、さらに検出部をタンク内部とし外来伝搬ノイズの低減化を図った検出方式としている。また、CBMコントローラにデータ伝送端末機能を設け、遠隔状態監視を可能としている。

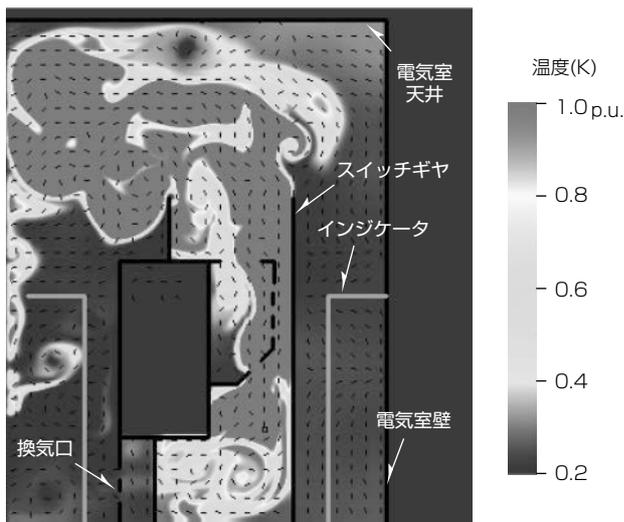


図4. 盤内アーク発生時の高温ガス分布



図5. 真空コンタクタ(盤外引き出し機構)



図6. Modbus-RTU(二重化)対応EMC-B形マルチモータコントローラ

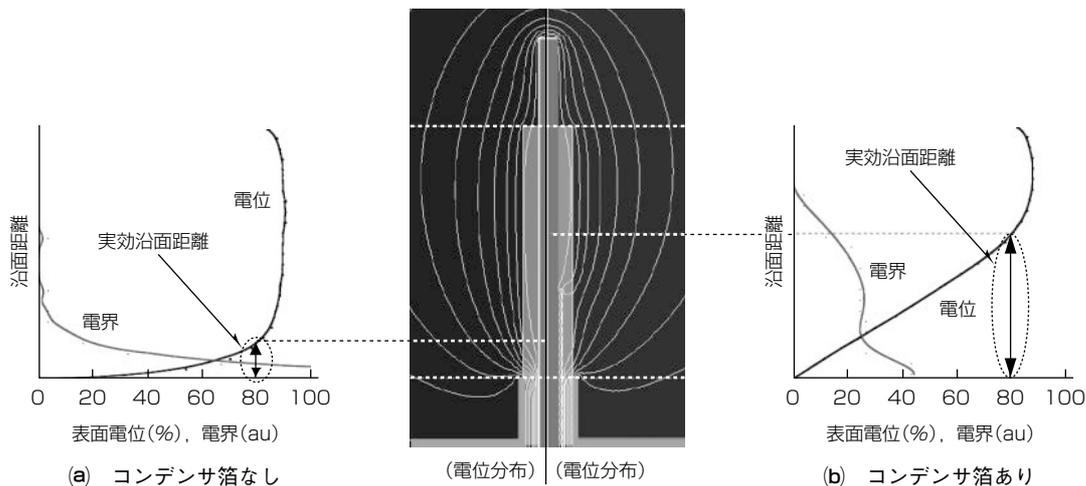


図7. 樹脂製ブッシングの実効沿面距離

4.2.2 余寿命推定技術の適用拡大

2000年に評価技術を確立したMT法による有機絶縁物の劣化診断(余寿命推定)技術は、フェノール樹脂、ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂と診断対象材料の拡大を図っており、現在は約300件に及ぶ診断実績を得ているが、さらに診断対象範囲を拡大する技術開発が進められている。絶縁支持板や碍子(がいし)などの絶縁支持構造物に関する寿命判定閾値(しきいち)は影響因子となるイオン濃度・放電開始電圧・絶縁距離等の沿面劣化を左右するパラメータから導出し従前診断データとの整合性確認によって診断精度の向上を図っている。また診断対象は低圧から33kVまでの絶縁物としていた。

その後、77kV用絶縁物でも、絶縁支持物に関しては距離パラメータを沿面距離とすることで閾値を決められることが診断データなどによって確認されたが、ブッシングのような沿面が不平等電界となる絶縁物に関しては距離パラメータを沿面距離から減補正する必要があることを見だし、診断アルゴリズムを構築した。図7にブッシングの沿面距離を減補正した実効沿面距離を示す。電界集中するブッシングでは距離の減補正が大きく(同図(a))、コンデンサ箔によって電界緩和したブッシングでは距離の減補正は小さくなる(同図(b))ことを示しており、電界集中度に距離減補正度が依存していることが分かる。これは、湿潤状況下での部分放電後の荷電粒子が電界によって沿面へドリフトしやすく劣化を加速する要因となることでの減補正である。

これらの現象解明と補正方式を確立し、現在は診断対象範囲を使用電圧77kVまで適用を拡大している。

5. むすび

受配電システム機器の技術展望を、最近の技術・製品動向を主体に述べた。受配電システム機器では、地球環境問題への対応や、より一層の安全性・信頼性向上、及びLCC低減等の社会的ニーズは、グローバル化する市場の中でもますます重要性が高まると考えられる。

また、昨今では、“スマート”の冠称の各種新語が生まれ出され利便性・効率性・人に優しいシステム構築が提案され、実現しつつある。このような社会変動の中にあって、受配電システム機器は形態の変動こそあれ今後とも社会インフラの基盤であることから、更なる技術の深化・拡大を図り、技術応用した製品作りによって社会に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 20kV級/400V 配電方式の普及拡大技術, 電気協同研究, 56, No.3 (2000)
- (2) 武輪知明, ほか: 乾燥空気インパルス破壊電圧に対する絶縁被覆効果, 平成23年電気学会全国大会, I-088 (2011)
- (3) 堀之内克彦, ほか: CIP法による配電用スイッチギヤ内部事故アーク現象の解析, 電気学会開閉保護装置研究会資料, SP-08-18 (2008)
- (4) 墨 義人, ほか: パッケージ形ユニットサブステーション, 三菱電機技報, 53, No. 4, 281~285 (1979)
- (5) 原 啓治, ほか: 香港上海銀行納めガスタービン発電モジュール, 三菱電機技報, 59, No.12, 850~853 (1985)

特集 II