

## &lt;技術解説&gt;

## 直流配電の特徴と展開

金沢工業大学 教授 泉井 良夫

## 1. はじめに

現在、電力システムは、ほぼすべてが交流システムから構成されている。電力システム導入当時の状況として、直流は、電圧を変えることが非常に難しく、遠方に電力を送ることができなかった。これに対し、交流は、変圧器により簡単に電圧を上げたり下げたりでき、電圧を上げることにより、遠方まで電力を送ることが可能であった。このため、周波数変換所や長距離直流送電、海底ケーブルなどの一部を除いては、交流が直流をほぼ駆逐し、送配電システムでは、交流全盛時代とも言える、現在のような状況になっている。

しかしながら、直流は交流とは次元の異なる特徴がある。直流機器との親和性、電力輸送量の拡大や電力輸送の安定性、運用制御の安定性や高速制御性などである。また、直流のボトルネックであった電圧を変えることが難しい、という課題は、近年のパワーエレクトロニクスの発展により、ほぼ解決されつつある。

このため、最近は直流システムが見直されつつある。たとえば、データセンターでは交直変換ロス低減のため、直流の導入が増加しているし、国内では、トンネル内照明システムを直流配電で実装した事例、海外では、交流を部分的に直流に転換した事例<sup>1)</sup>などが報告されている。

本稿では、上記の背景のもと、直流配電からみた直流の特徴、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）における最新の調査活動、国内外の事例、金沢工業大学における電熱連携型直流マイクログリッド実証実験の概要、直流配電の課題や今後の展開等について、紹介する。

## 2. 直流の特徴

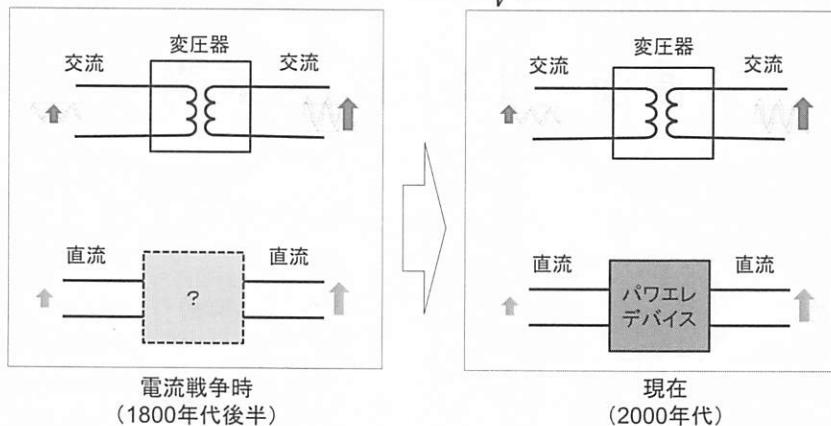
電力システムは1800年代後半から導入が始まった。当初は、電流戦争と言われ、エジソンが主導する直流システムと、テスラが主導する交流システムとの熾烈な戦いがあった<sup>2)</sup>。最初は、直流システムが優位であったが、電力損失のため、電力を遠方に送ることができなかつた。このため、最終的には交流が勝利し、その後は交流全盛時代となり、現在に至っている。

第1図に示すように、送電損失は電圧の2乗に反比例する。電力を遠くに送るためには、昇圧して送電することが望ましい。当時、直流は電圧の変換が非常に難しかった。これに対し、交流には、変圧器が存在し、容易に電圧を変えることができた。交流の勝利の主要因は「変圧器」とも言える。

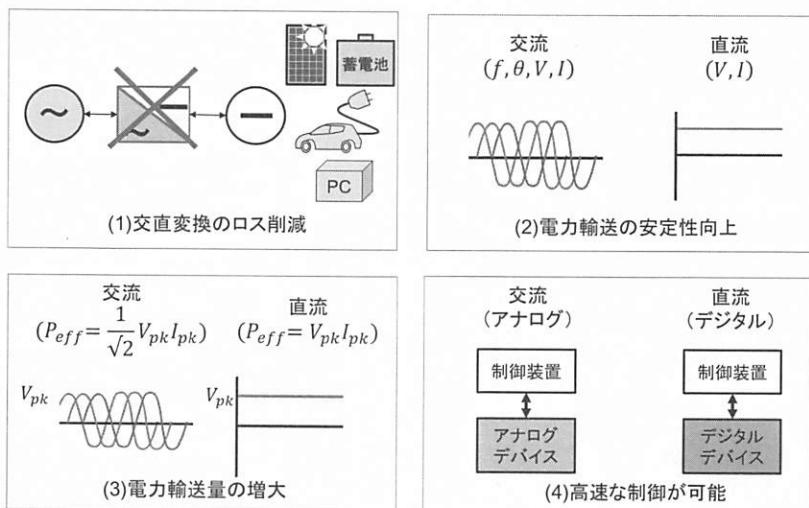
しかしながら、近年ではこの状況は変わりつつある。半導体によるパワーエレクトロニクスが急進な発展を遂げ、直流においても、電圧の変換が非常に容易になっている。すなわち、直流の最大の障害であった、電圧を変えることが難しい、という困難は克服されつつある。

交流と直流は、一方的にどちらかが機能的に優れているというものではない。交流には交流の良さ、直流には直流の良さがある。たとえば、パワーエレクトロニクスにより電圧が容易に変えられるとは言え、コスト的にはいまだに変圧器、すなわち、交流の方が有利である。また、安定かつ大量に電気を作るには回転機での発電、すなわち、交流の方が有利である。さらに、すでに、交流システムは既存システムとして、先進国においては、津々浦々、導入済みであるという事情もある。

$$P_{Loss} = RI^2 \propto \frac{1}{V^2}$$



第1図 電流戦争時代の交流の優位性



第2図 直流の特徴（優位点）

これに対し直流の良さも多数ある。第2図に代表的な優位点を示す。まず、第2図の(1)に示しているが、近年では情報通信機器（ICT）、太陽光発電（PV）などの再生可能エネルギー、蓄電池（BAT）や電気自動車（EV）の導入が進展しており、これらはすべて直流である。このため、交流と整合するためには、交直変換器（AC/DC）が必要になる。すべてを直流にしても、電圧を合わせるために、直流電圧変換器（DC/DC）が必要にはなるが、システム構成を工夫すれば、これら変換器による電力損失の低

減が可能となる。特にデータセンターでは、AC/DC、DC/ACを何回も繰り返しており、すべてを直流で統一することにより、無駄な交直変換が低減され、大きな電力損失の低減が可能と報告されている<sup>3)</sup>。

また、第2図の(2)に示すように、直流での制御変数は電圧と電流だけである。これに対し、交流は電圧と電流に付け加えて、周波数と位相も制御変数となる。このため、一般に交流システムは制御が難しく、周波数などの規定値に対する変動マージンも厳しい。たとえば、現

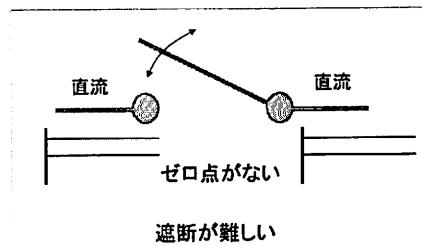
在の交流システムは電力を大量に貯めることができない。発電したら即時に消費する必要がある。つまり、需給バランス（需要と供給のバランス）を保つため、周波数はほぼ規定値ぴったりに維持する必要がある。50 Hz/60 Hz の規定値に対し、許容値は  $\pm 0.2 \text{ Hz}$  である<sup>4)</sup>。すなわち、変動マージンは約 0.4% にすぎない。

直流は、第2図の(3)に示すように、電力輸送量の増大にも有効である。送配電システムにおいては、絶縁性能を維持するため、最高電圧は絶縁耐力より低くする必要がある。交流は、最高電圧が正弦波のピーク電力であるのに対し、直流はそのまま送配電電圧に等しい。送配電電力量については、交流は実効値となるが、直流ではダイレクトに電圧と電流の積となる。このため、絶縁耐力を同じとした場合、交流は直流の  $1/\sqrt{2} = 0.7$  倍の電力しか送れない。逆にもし、交流送配電システムを直流送配電システムに更新したとすれば、 $\sqrt{2} = 1.4$  倍の電力、つまり 40% 多い電力が送れることになる。

第2図の(4)では、直流の方が、制御が高速であることを示している。一般に交流はアナログであり、直流はデジタルである。直流では、電圧変換や、電力の輸送量とその方向などは、パワーエレクトニクス技術を活用したデジタルデバイスを高速に制御して実施される。すなわち、直流での制御は、ICT 機器で構成される制御装置とほぼ同じ速度で実施可能である。このため、発電量や電力消費量の変化に、機敏に追従して制御でき、結果として、簡単には停電しない安定性が維持できる。通常はミリ秒単位で制御可能であり、この制御速度は、一般的に交流ではほぼ不可能である。

なお、電圧を簡単に変えること以外の直流の大きな課題は、「遮断」、すなわち、電流を切ることである。第3図に示すように、交流と異なり直流はゼロ点が存在しないため、特に、大電流の場合は遮断が難しい。ただし、ゼロ点がなければ作りだせば良いわけで、様々な回路的工夫により、遮断に関する課題は、配電分野については、ほぼ解決されていると考えられる。

上記では、直流自体の特徴について説明した。需要家システム全体を、商用系統とは接続



第3図 直流の特徴（課題点）

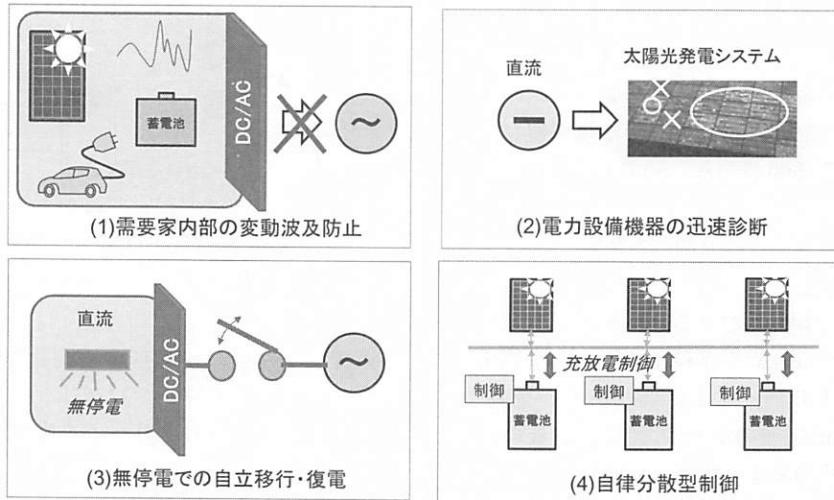
されているものの、基本的には閉じた小さな電力システムとするマイクログリッドという考え方がある。マイクログリッドを直流で構成したシステムを、特に直流マイクログリッド (DC マイクログリッド) という<sup>5)</sup>。つまり、需要家システム全体が直流で構成されているわけである。

この場合、第4図に示すように、交流で構成した交流マイクログリッドとは異なる優位点がある。DC マイクログリッドでは、商用系統との間の変換器が存在する。第4図の(1)に示すように、これが、あたかも通信設備でいうところのファイヤーウォールのように働いて、たとえば、太陽光発電システムの出力変動が商用系統に出にくい特徴がある。

また、太陽光発電パネルに、逆方向に直流を印加し、発光の有無により太陽光発電セル故障を見つける手法がある。交流の場合は、わざわざ直流電源を運び込んで接続する必要があるが、DC マイクログリッドでは、もともと直流でできているため、第4図の(2)に示すように、その実現は極めて容易である。

直流では位相がないため、位相合わせが不要である。商用系統停電時や、復電時の需要家再接続時には、交流の場合は、位相合わせが必須のため、需要家側を必ず一旦停電させる必要がある。これに対し、直流では、DC マイクログリッド内部の需給バランスがある程度維持できていれば、位相合わせが不要である。このため、第4図の(3)に示すように、停電時も復電時も、原理的には無停電である。

DC マイクログリッドでは、主に蓄電池等を制御して需給バランスを維持する。第4図の(4)に示すように、需要家内で直流配線が1本だとすると、この電圧は基本的には、各所で同



第4図 直流の特徴（DCマイクログリッドとしての優位点）

一である。交流の場合、需給バランスは周波数偏差となるが、直流の場合は、電圧偏差となる。このため、たとえば、蓄電池毎に電圧偏差から必要な充放電電力を決定して自律分散的な制御が可能である。

### 3. 直流配電の国内外の事例

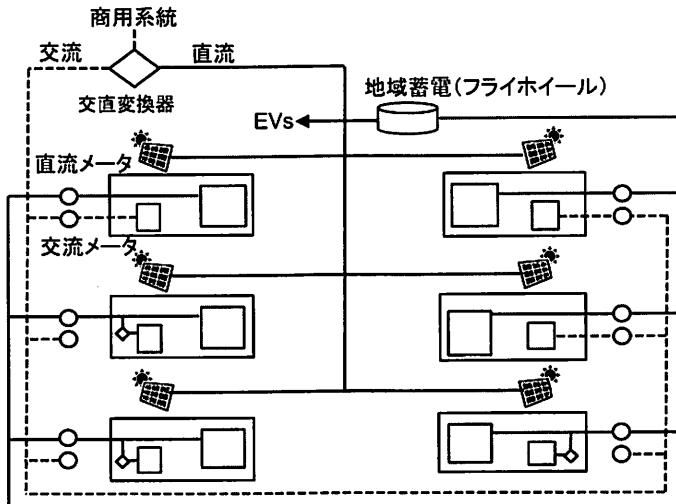
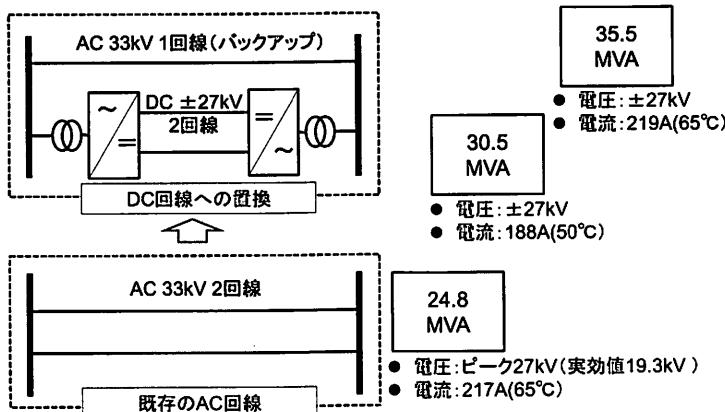
直流については、これまで、個別に実証実験や検討が行われてきたため、その成果や知見、課題等が整理されていない状況であった。そこで、電気設備学会内に、(国研)新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)からの委託事業として、有識者からなる調査委員会が組織された。ここでは、「今後の調査、技術開発、実証事業を効率的に進め、その成果を速やかに社会実装し、直流システムを普及拡大させ、国内外における直流(Direct Current: DC)に関する技術の動向を把握(技術動向調査)した上で、直流の普及・推進等の視点から、主として技術的側面からの課題を体系的に整理した技術マップ作成、及び2050年までの技術ロードマップ作成を実施することを目的」としている<sup>6)</sup>。

1,073件にも及ぶ文献調査、また、海外出張による海外事例の現地調査、国内外の規格・基準等の技術動向調査、これを踏まえて、テクニカル、非テクニカルの両分野での技術マップ作成や課題点の整理、6個のシナリオを想定した

技術ロードマップの作成が行われている。シナリオ1は新規開発地域等、シナリオ2はパーソナル、シナリオ3はモビリティ、シナリオ4はビル・工場等、シナリオ5は配電系統、シナリオ6は送電系統である。詳細は、NEDO成果報告書データベース、及び電気設備学会ホームページ<sup>7)</sup>を参照されたい。

海外事例として4事例を紹介する。まず、米国カリフォルニア州オークランドで実施されているecoblockの事例<sup>8)</sup>を第5図に示す。太陽光発電は天候依存であり、出力変動型の再生可能エネルギーである。このため、交流の商用系統に接続すると、電圧変動などの様々な課題を発生させ、導入量に制約がある。そこで、既存30~40戸の住宅街区を対象に、交流と直流を二重配線する。太陽光発電は直流配線に接続し、かつ、地域蓄エネとしてフライホイールも接続している。これにより、太陽光発電の導入量拡大を図っている。

英国にて実施されているAngle-DC Project<sup>9)</sup>を第6図に示す。ここでは、既存の交流33kVの2回線を直流±27kVの2回線へ更新している。絶縁耐力は交流と直流で同じであるため、原理的には、直流は交流の $\sqrt{2}=1.4$ 倍の電力を流すことができる。本事例では、ケーブル老朽化のため、ケーブル温度を低めに抑えて電流量を87%に低減している。それでも、電力

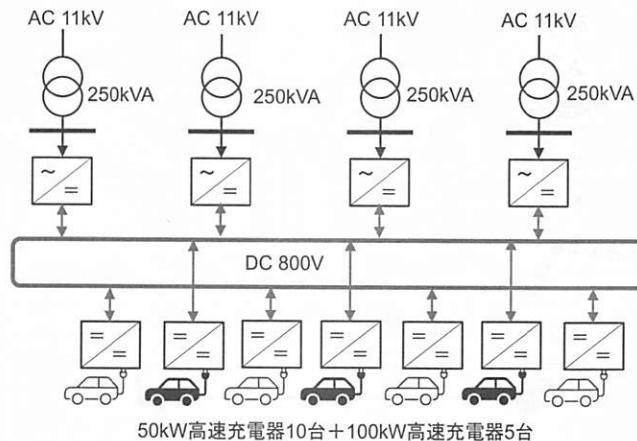
第5図 直流配電海外事例1：ecoblock（米国カリフォルニア州オークランド）<sup>8)</sup>第6図 直流配電海外事例2：Angle-DC Project（英国）<sup>9)</sup>

輸送量は直流化に伴い、24.8 MVA から 30.5 MVA へと 20% 強増加している。本事例では、もともと近辺の交流系統はループ系統を構成していた。そこで、一部分を直流化してループを電気的に遮断した。これにより、交流ループはなくなったので、交流系統の運用安定性が向上したという特徴もある。

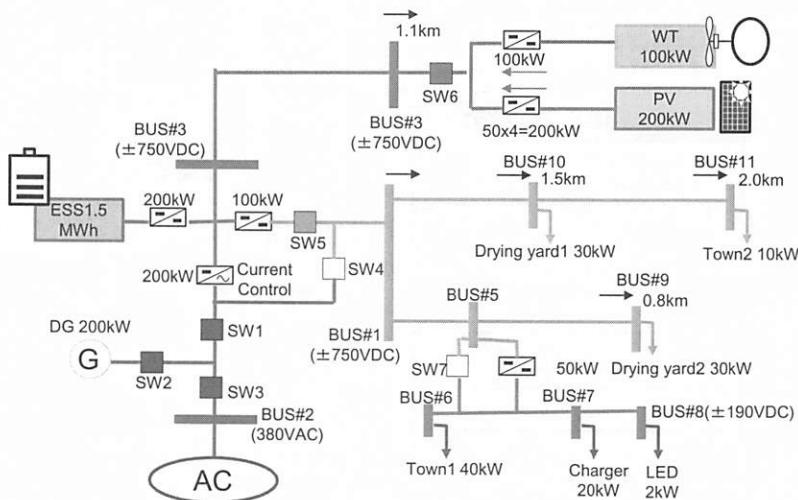
同じく英国での DC Share の事例<sup>10)</sup>を第7図に示す。これは、電気自動車向け高速充電器への配電事例である。一般に電気自動車は都市密集地で使われることが多いため、高速充電器も密集して配置される。高速充電器は電気容量が大きいため、同時に使われると配電線へ負担が

極めて重い。そこで、直流をループ状に配置して高速充電器をそこに多数配置した。具体的には、交流 11 kV 250 kVA 変電所 4 箇所の合計 1 MVA から受電し、ループ状直流配電から EV 高速充電器 15 台 (50 kW 10 台 + 100 kW 5 台) 合計 1 MW へ電力を配電している。EV 高速充電器の状態をリアルタイムで把握しつつ、パワーエレクトロニクスの高速制御性を活用して、変電所に設置した双方向変換器により直流配電のループ潮流を制御している。

離島における直流配電を第8図に示す。韓国 Seogeochado 島の事例<sup>11)</sup>で、韓国電力公社が運営する商用の直流マイクログリッドである。も



第7図 直流配電海外事例3: DC Share (英国)<sup>10)</sup>



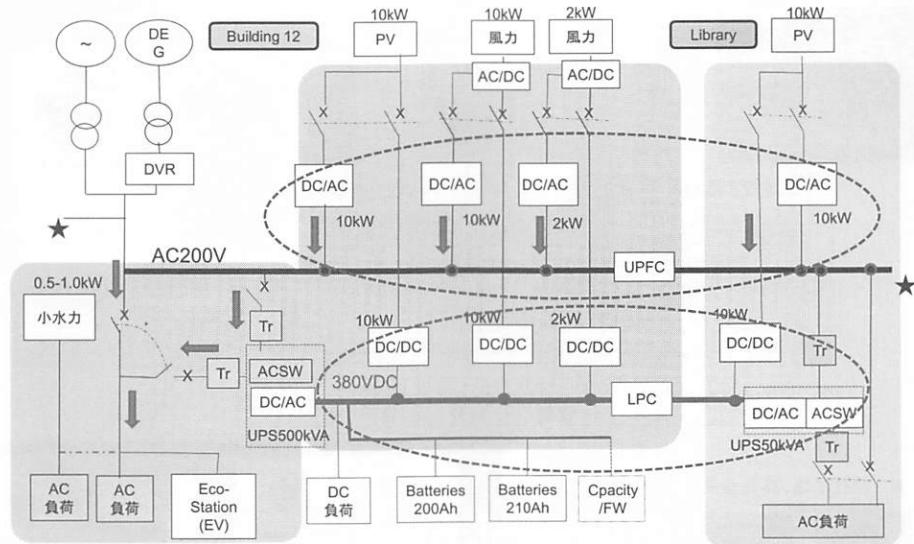
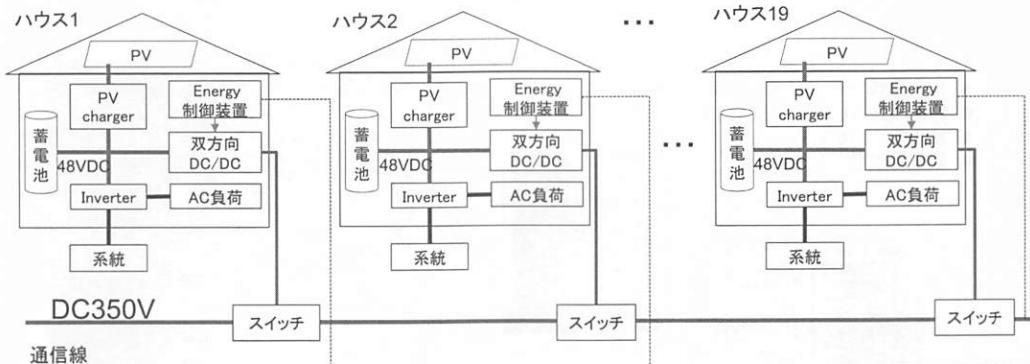
負荷	個数	供給種別	容量(kW)	直流電圧(V)
住宅	10(既設)	AC/DC	50	$\pm 190/\pm 750$
業務	2(既設)	AC/DC	50	$\pm 750$
V2Gステーション	4(新設)	DC	20	$\pm 190$
DCホーム	1(新設)	DC	5	$\pm 190$
LED街灯	10(新設)	DC	2	$\pm 750$

第8図 直流配電海外事例4: 直流マイクログリッド (韓国 Seogeochado 島)<sup>11)</sup>

ともとは交流 380 V で配電されていたが、島の一部に直流配電を敷設し実証実験も兼ねて商用化した。このため、需要家には交流と直流が二重に配線されており、開閉器で切替え可能となっている。直流電圧は業務用として  $\pm 750$  V、一般家庭用その他として  $\pm 190$  V の 2 種類の電圧が採用されており、各々は DC/DC 変換

器で双方に電圧変換されている。離島全体として、交流と直流をまとめて、商用の配電制御システムにより監視制御されている。

次に国内事例として 4 事例を紹介する。愛知工業大学で実施中の交流直流混在マイクログリッド<sup>12)</sup>を第9図に示す。大学構内の複数の建物を対象に実施している。太陽光発電、風力発電

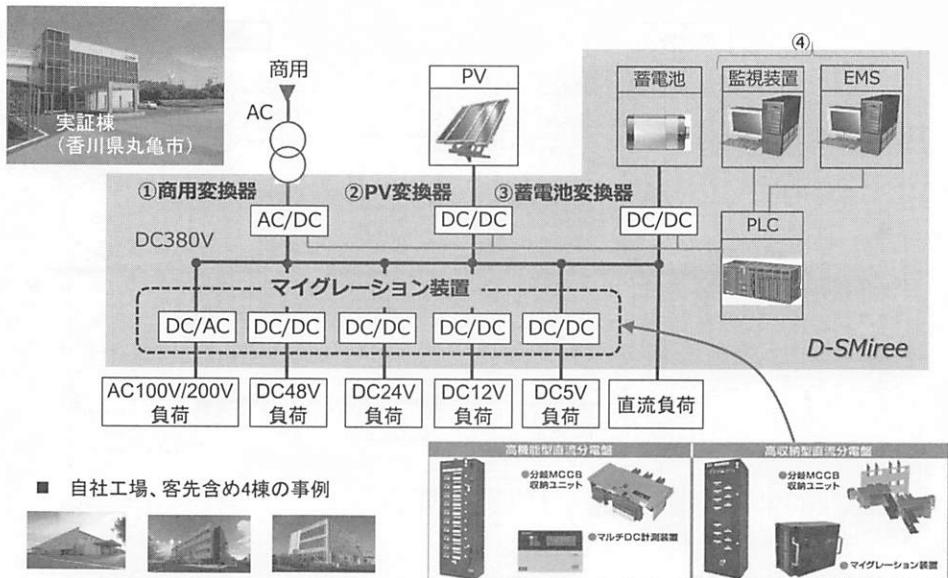
第9図 直流配電国内事例1：交流直流混在マイクログリッド（愛知工業大学）<sup>12)</sup>第10図 直流配電国内事例2：オープンエネルギー・システムズ（沖縄科学技術大学）<sup>13)</sup>

などが電源で、供給先として交流と直流を切り替えることができる。380 V 直流配線は、単独としても、200 V 交流配線と交直変換器で接続しても運用が可能となっている。直流配線は複数の建物に電力供給している。建物間は、電力量を制御できる LPC (ループパワーコントローラ) を介して接続され、建物間の供給量を制御することもできる。

沖縄科学技術大学での実証事例<sup>13)</sup>を第10図に示す。コンセプトとして、「電力をもっとオープンに、自由にして、あなたの近くに」としており、オープンエネルギー・システムプロジェクトと名称している。太陽光発電と蓄電池を備えた教職員宿舎19戸を350 V 直流配線で

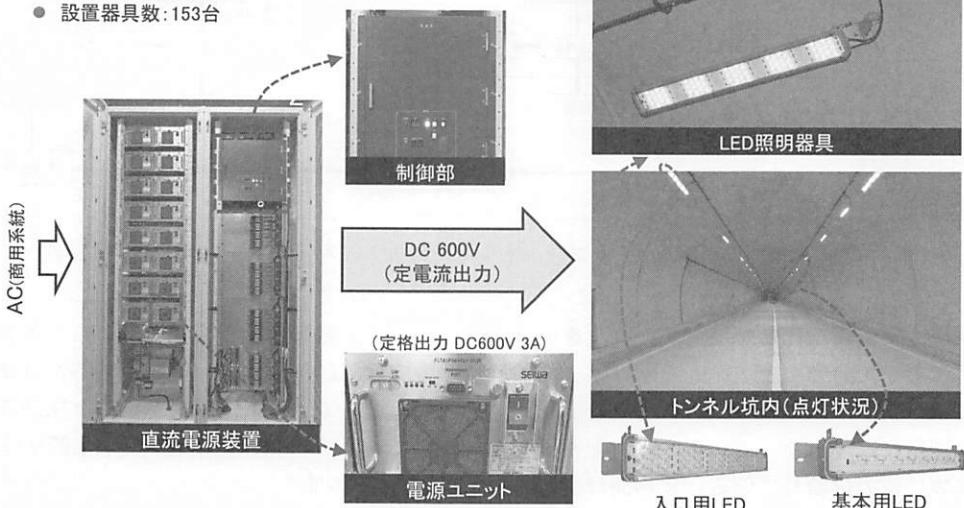
接続し、余剰電力等を相互融通する。各教職員宿舎では、双向の直流/直流変換器が自律分散的に制御して、蓄電池充放電制御と融通制御を行っている。自律分散型制御は、1箇所を定電圧制御、その他を電流制御として実現している。

三菱電機株式会社の事例<sup>14)</sup>を第11図に示す。中低圧直流配電システムを D-SMiree の登録商標で商品化している。同社受配電システム製作所（香川県丸亀市）にて専用の実証棟を建設し評価を継続している。現時点で自社工場と客先を含め4棟の事例を数えるまでになっている。システム容量が 100 kW～700 kW の大容量システム、3.5 kW～10.5 kW の小容量システムがラインナップされている。なお、現在は、既存の



第11図 直流配電国内事例3：中低压直流配電システム（三菱電機）<sup>14)</sup>

- 広島県呉市(国道185号休山トンネル)
- 給電電圧:DC600V(定電流输出力)
- 給電電力:16.0 kW
- 設置器具数:153台



第12図 直流配電国内事例4：直流給電方式トンネル照明システム<sup>15)</sup>

負荷機器の大部分が交流供給である。これらに対し、多くは直流で動作可能なことも実証している。

直流給電方式のトンネル照明システム事例<sup>15)</sup>を第12図に示す。国道185号休山トンネル(広島県呉市)で稼働中(星和電気株式会社納

入)である。近年ではLED照明が広く適用されているが、この場合でも電力は交流で配電されている。これに対し、本事例では、トンネル外に設置された直流電源装置で一気に商用交流を直流600Vに変換し、トンネル内に直流のまま給電を行っている。設置器具数153台、給電

電力 16.0 kW と大規模である。トンネル内 LED 照明器具は、電源装置レスとなるため、超小型・軽量化が実現できた、と報告されている。

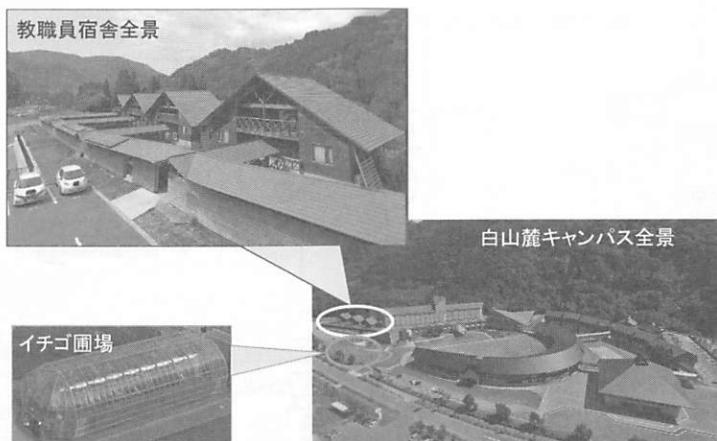
#### 4. 金沢工業大学の事例

石川県白山市に 2018 年に開学した白山麓キャンパスにて、「再生可能エネルギー・ベストミックスのコミュニティモデル実証実験」を実施中である<sup>16)</sup>。電熱連携 DC マイクログリッドをベースとし、再生可能エネルギーによる地産地消の実現を目指している。

最終的には、白山麓キャンパス全域を想定し

ているが、段階的にスケールアップしており、現時点では、第 13 図に示す教職員宿舎を対象として実施している。教職員宿舎は 8 世帯分 4 棟あり、電力供給として直流が 2 世帯分、交流が 6 世帯分である。熱は温水として暖房用に教職員宿舎に供給される。DC マイクログリッドとしては、需要家は教職員 2 世帯であるが、8 世帯全部を対象として、仮想的に AC・DC 混在マイクログリッドを構成することも可能である。温水は、切替えにより、隣接するイチゴ園場にも暖房用として供給することができる。

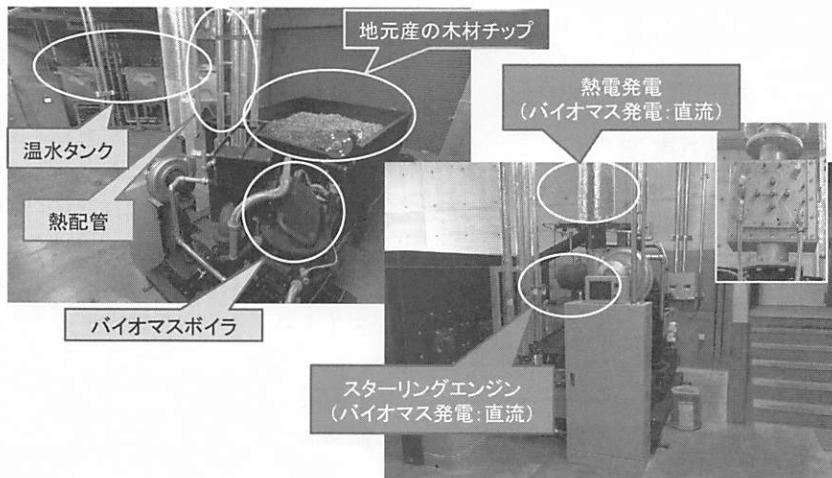
設備構成を第 14 図に示す。電源としては、太



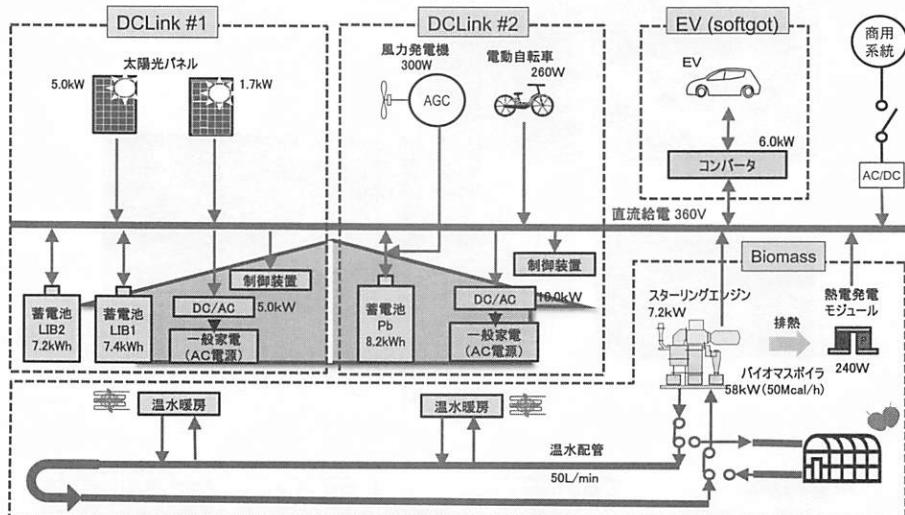
第 13 図 金沢工業大学の事例：実証実験場所



第 14 図 金沢工業大学の事例：導入設備



第15図 金沢工業大学の事例：バイオマスシステム



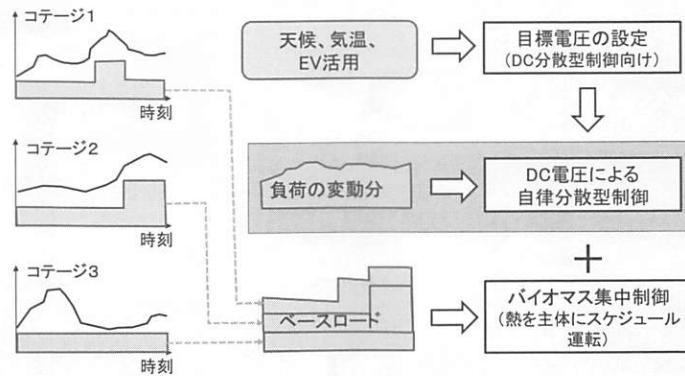
第16図 金沢工業大学の事例：システム構成図

陽光発電、風力発電、バイオマス熱源を活用するスターリングエンジン発電、熱電発電、電動自転車発電が実装されている。今後、小水力発電も計画中である。定置型蓄電池はリチウムイオン電池など複数種類、双向充電・放電器により電気自動車から充電、または、給電も可能となっている。バイオマスシステムを第15図に示す。燃料は主として、地元産の木材チップである。地元産の活用により、地域産業の活性化への貢献も考慮している。

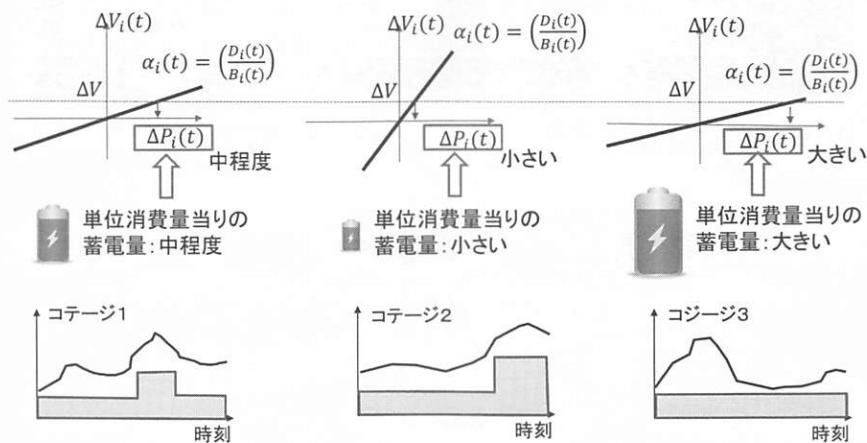
システム構成図を第16図に示す。360V直

流給電線に、すべての電力設備が接続されている。DCマイクログリッドとしては、対象需要家は教職員宿舎2軒である。各需要家に対応して制御装置が2個あり、各々独立に自律分散的に蓄電池の充放電制御を行っている。

電熱システムとしての全体制御は、第17図のようになっている。バイオマスの熱制御は集中制御で、基本はスケジュール運転である。熱は応答速度が遅いため、ベースロードを分担させる。逆に電気は応答速度が非常に早いため、自律分散型制御により、負荷の変動分を需要家



第17図 金沢工業大学の事例：電熱システム制御



第18図 金沢工業大学の事例：DC電圧による自律分散型制御

毎に制御する。

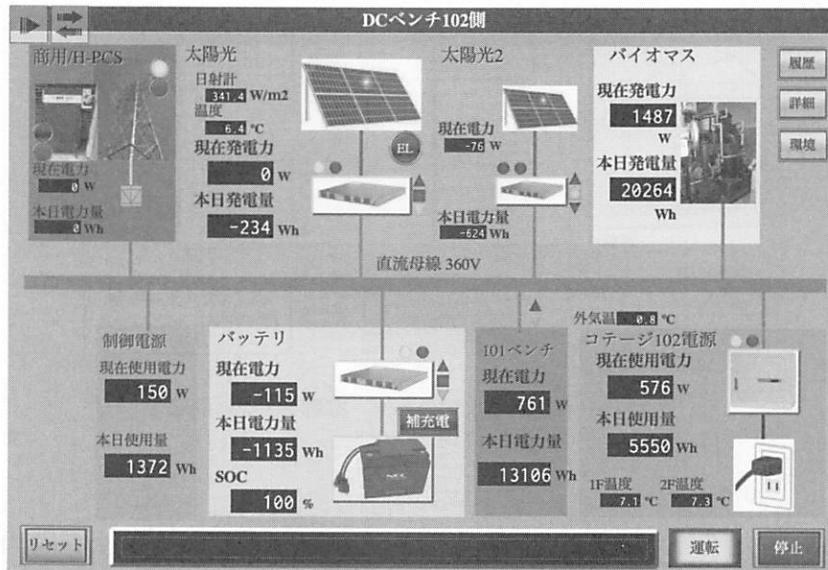
さらに、電熱連携 DC マイクログリッド全体としての蓄電量は、天候等にも依存する。そこで、天候予測により、太陽光発電の翌日発電量が大きいと判断すれば、事前に蓄電容量を減らしておき、逆に太陽光発電の翌日発電量が小さいと判断すれば、事前に蓄電量を増やしておく必要がある。これは、目標電圧を上下に変更することにより可能である。

電気の自律分散型制御のイメージを第18図に示す。基本はドループ制御であるが、蓄電池が複数あるため、使い方に若干の工夫が必要である。すべての蓄電池を一律に充放電すると、容量の大きい蓄電池は蓄電池残量がほとんど変化しないのに対し、容量の小さい蓄電池はすぐには満杯か、または残量がゼロになってしま

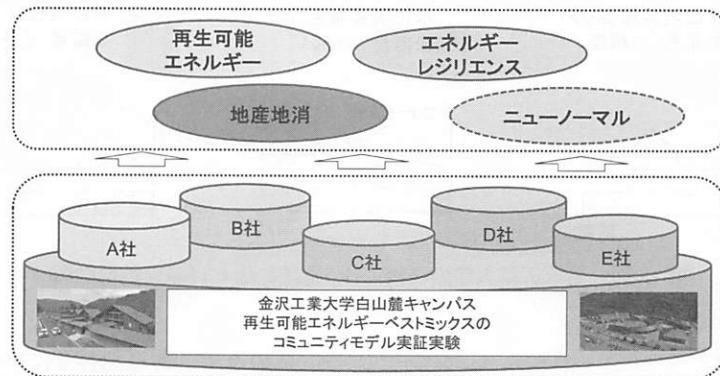
う。このため、蓄電池容量に比例して充放電量を決めることが考えられる。実際には、需要家毎の電力消費量を勘案する必要があるため、単位消費量あたりの蓄電池残量に比例した充放電量としている。DC マイクログリッドの電気部分の監視制御画面を第19図に示す。これは需要家毎に個別に存在する。

具体的な実証実験項目としては、再生可能エネルギー、地産地消、エネルギー・リエンス、個別機器に関わる項目を実施している。電気自動車（EV）の活用については、商用系統停電時に、EVで電力を運搬する、EV仮想配電線実証実験も実施している。

金沢工业大学では、第20図に示すように、本実証実験システムをオープンプラットームとして位置付けている。すなわち、金沢工业大学



第19図 金沢工業大学の事例：DCマイクログリッドの監視制御画面（電気のみ）



第20図 金沢工業大学の事例：オープンプラットフォームとしての活用

では、産学官連携を積極的に推し進めており、大学の中立的立場から、産業界に実証実験システムを広くオープンプラットフォームとして開放し、活用していただく機会を提供している。

## 5. おわりに

本稿では、直流配電について、その特徴、国内外の事例やNEDOによる調査委員会の状況、国内事例として特に金沢工業大学での事例を述べた。現在のところ、ほぼすべての電力供給は交流システムで行われている。主要因は、過去において、直流は電圧を変えることが難しかっ

たためである。

しかしながら、現在では、パワーエレクトロニクス技術が急速な発展を遂げており、直流においても、パワーデバイスにより、容易に電圧を変えることが可能である。さらに、直流は交流とは次元の異なる特長が多くあり、直流を積極的に活用することにより、さらにより良い電力供給システムを構築することができる。

ただし、直流は直流の良さ、交流は交流の良さがあり排他的というものではない。現実のシステムでは、直流の良さと交流の良さをうまく組み合わせて使っていくことが重要である。さ

らに、これまで交流が主流であったことから、直流は規格・標準化が十分でないところがあり、また、保護・遮断技術など技術的な深掘りが必要な点もある。

今後、これらの検討を進めつつ、直流システムが広く展開・活用されると期待している。

## 参考文献

- 1) 廣瀬圭一：「海外における直流利活用の動向」、電気設備学会誌、Vol. 41、No. 2、pp. 83-95 (2021-02)
- 2) 廣瀬圭一：「直流給電の歴史と国際標準化の動向」、日本太陽エネルギー学会誌、Vol. 45、No. 5、pp. 11-17 (2019-09)
- 3) 村文夫：「データセンターにおける直流利用状況と展望」、電気設備学会誌、Vol. 41、No. 2、pp. 102-105 (2021-02)
- 4) 東京電力パワーグリッド株式会社：「周波数調整・需給運用ルール」、2016年4月1日施行、2021年4月1日改定 <https://www.tepco.co.jp/pg/consignment/rule-tr-dis/pdf/freq-j.pdf>
- 5) 泉井良夫：「マイクログリッドにおける直流技術の適用と実証実験事例」、電気学会論文誌B、Vol. 140、No. 9、pp. 658-661 (2020-09)
- 6) 直流利活用に関する調査委員会：「直流利活用に関する調査方向（概括）」、電気設備学会誌、Vol. 41、No. 2、pp. 75-82 (2021-02)
- 7) [https://www.ieiej.or.jp/activity/environment/pdf/NEDOReport\\_ieiej2019.pdf](https://www.ieiej.or.jp/activity/environment/pdf/NEDOReport_ieiej2019.pdf)
- 8) <https://ecoblock.berkeley.edu/disciplines/energy/>
- 9) [https://www.spenergynetworks.co.uk/user/files/file/SPEN\\_Angle\\_DC\\_V3.pdf](https://www.spenergynetworks.co.uk/user/files/file/SPEN_Angle_DC_V3.pdf)
- 10) <https://www.westernpower.co.uk/downloads-view-reciteme/87331>
- 11) Jintae Cho, Hongjoo Kim, Youngpyo Cho, Hyunmin Kim, Juyong Kim, "Demonstration of a DC Microgrid with Central Operation Strategies on an Island", The 3rd IEEE ICDCM May 20-23, 2019, 1-B-3
- 12) 雪田和人：「マイクロ・スマートグリッドと直流給電技術」、日本太陽エネルギー学会誌、Vol. 45、No. 5、pp. 6-10 (2019-09)
- 13) <https://www.oist.jp/ja/newscenter/news/2015/2/17/18540>
- 14) [http://www.mitsubishi-electric.co.jp/service/souhaihen/sei\\_hai/dsmiree/dsmiree\\_sei.html](http://www.mitsubishi-electric.co.jp/service/souhaihen/sei_hai/dsmiree/dsmiree_sei.html)
- 15) 服部宏明：「DC 給電方式を用いたトンネル照明システムの開発と納入事例」、電気設備学会誌、Vol. 41、No. 2、pp. 38-41 (2021-02)
- 16) Yoshio Izui, et all, "DC Microgrid Experimental System at KIT Hakusan-roku Campus for Regional Areas", The 3rd IEEE ICDCM 2019, May 2019, 1-B-4