

# 海外電力技術調査報告

いま欧米の電力機器技術はどうなっているか？

名古屋大学 大学院工学研究科 電気工学専攻 教授 大久保 仁

Dr. Hitoshi Okubo  
Department of Electrical Engineering  
Nagoya University



## まえがき

今回、約半年間にわたりアメリカ・ヨーロッパに滞在し、海外電力関連技術動向の調査をする機会を得た。調査対象は電磁環境から超電導・SF<sub>6</sub>ガス代替技術など幅広く、調査対象機関も大学・政府・国立研究所から、電力会社・メーカなどまで多岐に選定した。本報告では今回の調査期間中に得た多くの情報から、電力機器技術に関連した動向についてその概要をまとめる。

## 調査対象と訪問機関

海外調査の目的・対象は下記の4項目とした。

- (A) 電磁環境 (ELF/EMF) 研究調査
- (B) SF<sub>6</sub>ガス代替技術調査
- (C) 超電導電力応用技術動向調査
- (D) 電力機器技術動向調査

海外調査期間は1999年3月21日～9月30日の約半年間で、この期間中に下記の5ヶ所に約1カ月間ずつ滞在し、そこを起点として合計42ヶ所の機関(大学、国立研究所、政府機関、電力会社、メーカの訪問、国際会議を参加を含む)を訪問調査した。

- (1) Washington State University (USA)
- (2) National Research Council (Canada)
- (3) University of Hanover (Germany)
- (4) University of Strathclyde (UK)
- (5) Karolinska Institute (Sweden)

## 大きく動くヨーロッパの電力会社

### (1) 連系システムの拡大統一

従来より西ヨーロッパを中心にヨーロッパ同期連系システム(UCPTE)が運用されてきたが、最近では第1図に見られるように次第に東側に拡大してきている。現在ではヨーロッパはこのUCPTEの他にNORDEL、

GB、IPS/UPSから成っており、互いに密な交流・直流連系ができています。将来はロシア、アフリカ圏との連系(TESIS)まで構想されている。

### (2) 電力融通と欧州覇権争い

ヨーロッパは基本的にはEU統一経済圏の方向に動きつつあり、電力の自由化の状況は1998年にスウェーデン、フィンランド、1999年に英国、ドイツが自由化されたが、2000年時点でフランスが約30%の自由化に止まっている。自由化の進んでいるドイツ、イギリスと遅れているフランスという構図ができています。また、ヨーロッパにおける電力融通は、大きくみるとフランスの安価な原子力電力がドイツを経由して周辺各国へ流れている。また、最近では北欧からの安い電力がドイツに直接導入されつつあり、ドイツにおける電気料金の低下、リストラの激しさが目立っている。電力会社もM&A、Splitを繰り返しており、多くは発電と送電/配電とに分社された。また、ドイツ国内それにヨーロッパ全体の覇権争いが激しくなっており、ドイツ第2位のPreussen Electraと第3位のBayern Electricityが統合し1位の規模になったあと、ドイツ最大のRWEが同5位のVEWを買収し覇権の奪回を図るなど、またフランス国営EDFがドイツEnBWを買収するなど、電力地図は大きく変貌しつつある。

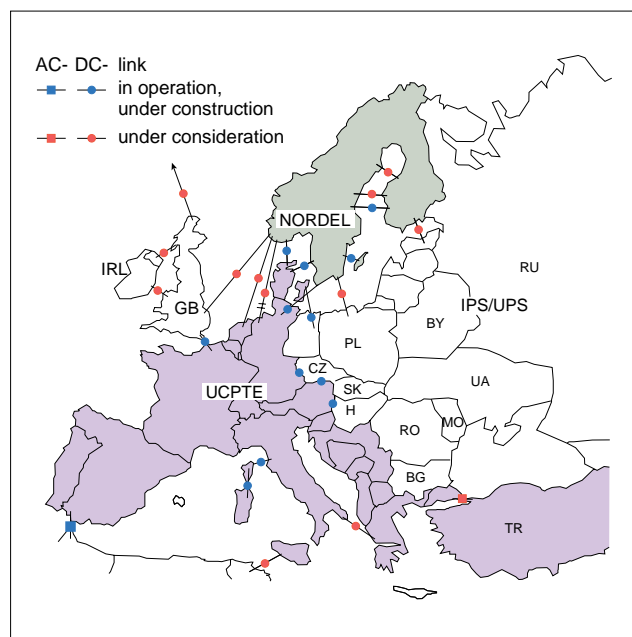
### (3) ドイツBEWAG社の研究開発

Berlinの電力供給をしているBEWAG社は東西ドイツ統一後の10年間、電力系統再構築、人員削減、電力料金の低料金化を大胆に成し遂げてきた。特に、ドイツの新しい首都として、そしてヨーロッパの新しい文化、政治中心となるBerlinの電力供給に対して、第2図に示す420kV Diagonal電力系統を構築をしつつある。特に都心地下系統に新たに420kV/XLPEケーブルの導入、GIL/XLPE技術比較などを通して先端的な地中線技術開発を行ってきた。第3図は420kV/XLPEケーブルのGIS端末の状況を示している。ドイツ統一やEU統合、電力自由化、そして首都移転など

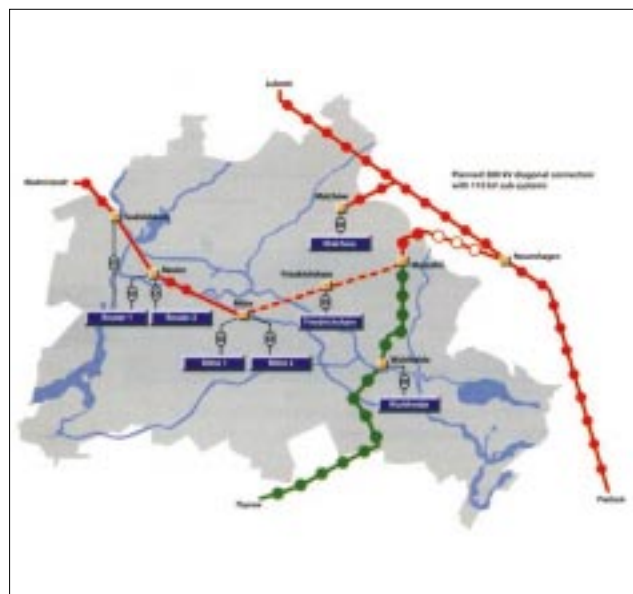
の大きな変化の中で、積極的に行ってきた技術開発成果が注目される。北欧からの安価な電力導入も視野に入れて今後の電力料金の大幅値下げを計画している。

#### (4) 研究費削減と大学の役割

電力会社の厳しい競争下で、フランスのEDFを除いて各電力会社の研究開発費は削減を余儀なくされている。しかしドイツなどでは、従来から大学がEngineeringをしっかりと支えてきた実績があり、企業の研究費削減分を大学が直接的に代替しているのが注目される。イギリスにおいても、分割自由化後のNGC社では研究開発費が約1/2に削減され、国営を維持している対フランス比1:2が1:4に減少している。しかしながらNGCでは第4図に見られるように、大学



第1図 ヨーロッパの電力連系



第2図 BerlinのDiagonal電力系統



第3図 420kV/XLPEケーブルのGIS端末



第4図 NGCにおける研究開発費分担

への委託研究費が21%と増大しており、大学との協調、役割分担が不可欠であることがわかる。

#### SF<sub>6</sub>ガスの環境規制は？

##### (1) アメリカで管理がはじまる

(a) EPRI Workshop : 米国EPRI主催のSF<sub>6</sub>Gas Handling Practices WorkshopがFort-Worthで開催された。参加者は米国・カナダの約40の電力会社のガス取り扱い実務者である。主な議題は、GCBからのSF<sub>6</sub>ガスのリークの実態と対策であった。米国では古いGCBを中心に10%を越えるリークのある機器がいくつか運転中であるが、今後保守費用の削減目的からリークを極力減らす(0.1%目標)ことに電力会社が動き出すとのことである。また、SF<sub>6</sub>ガス機器の診断や保守管理測定装置の紹介、それにSF<sub>6</sub>ガス排出を減らすための混合ガス回収装置の説明とデモがあった。さらにEPRIが開発中のレーザを用いたImage Gas Leak Detectorのデモがあった。現時点の開発品は水冷

1.1kWで重量も重く価格が\$120,000と高いが、現在開発中のものでは200Wとなり実用的となるものと期待される。第5図に測定の様子を示す。すでにいくつかの電力会社で使用されている。ガスリーク状況をImageとしてとらえることができるため現地だけでなく電力機器工場リーク試験などにも有効に応用できる可能性がある。



第5図 EPRI Image Gas Leak Detector

(b) EPAによる排出管理：米国環境庁（EPA）によるSF<sub>6</sub>ガス排出のコントロールが開始された。まず全米54の主たる電力会社との間で、SF<sub>6</sub>ガスの製造、購入、使用、回収、排出などについて量的に管理するAgreementをとり、各年ごとに詳細にまとめてEPAに報告する。EPAはそれを全米としてまとめて各年3月に公表する。さらに各電力会社は企業としてのSF<sub>6</sub>ガス管理、排出削減のPolicyを打ち立て、それをEPAがFollowすることになっている。このようなSF<sub>6</sub>ガスに関するEPAの管理は、すでにマグネシウム関連産業分野では進められており、排出削減の成果を挙げつつある。EPAは同様の管理を機器メーカーの間でも行っていく計画である。EPAの排出管理に関するこのような成果を報告する会議が本年11月に開催されることになっている。

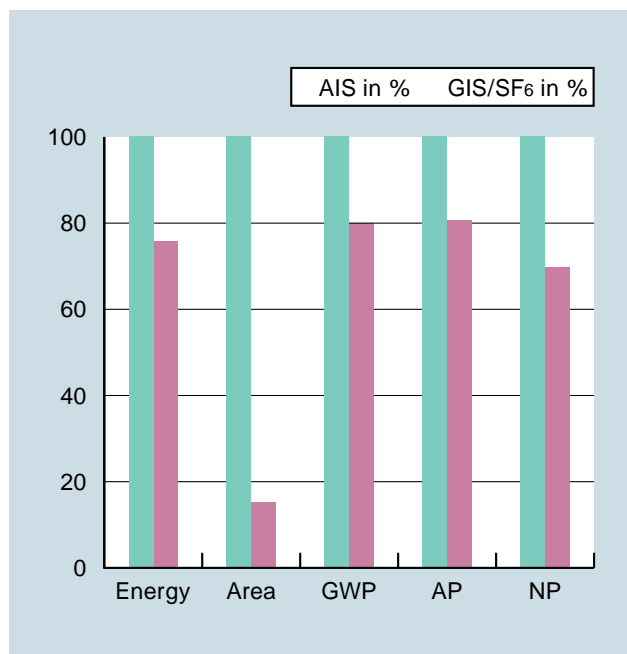
(c) 混合ガス使用実績：このほかに注目できることは、カナダにおける寒冷地向けGCBへの混合ガス使用実績であろう。BC Hydro、Ontario Hydro、Hydro Quebec社などの電力会社で18-15年にわたるSF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>ガスGCBの使用経験は、混合ガスの適用・回収に関する技術的実績として今後大きな意味を持つものと思われる。BC Hydroでは、SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>ガス混合比を適用地域温度に対して決めており - 56 対応として49/51%

が適用されている。

## (2) ヨーロッパにおける技術動向

ヨーロッパはEU統一的な考えを進めようとしているが、SF<sub>6</sub>ガス規制に関しては各国の特徴がはっきり現れている。ドイツではMaissの論文に見られるように科学的対応をしてきておりIPCC、OECD、CAPIEL、UNIPEDDなどのヨーロッパ全体の管理計画、世界全体の規制計画などに見られるように、環境に対する感度が高く対応技術もいち早く打ち出している。一方フランスは、国全体としての動きは見られず国営電力会社EDFがSF<sub>6</sub>ガス管理方針として、対応技術の確立をめざしている。イギリスでは、大きな関心はないが、NGC電力会社が大学との間で代替ガス、混合ガスの適用可能性などについて研究を行っている。Siemensなどの欧州メーカーでは、基本的に現在の純SF<sub>6</sub>ガス使用のGIS/GCBの仕様を変更するメリットはなく、GILのような新しい機器にのみ混合ガスの適用を図っていく考えである。

(a) ドイツにおけるLCA検討：ドイツにおいて二つの電力会社（RWE、Preussen）、二つの電力機器メーカー（ABB、Siemens）、SF<sub>6</sub>ガスメーカー（Solvay）の5社が共同で、SF<sub>6</sub>ガスを使用した場合と使用しない場合とで、人口14万人の中堅都市における110kV（120MW）電力系統の構築時の総合的エネルギー評価をLife Cycle Assessment（LCA）を用いて解析した。その結果を第6図に示すように、総合エネルギー、必要面積、地球温暖化影響度、酸性化係数、土壌活性度係数などのいずれをとっても、SF<sub>6</sub>ガスを使用した方が地球環境負荷が少ないことが明らかにされてい



第6図 SF<sub>6</sub>ガスを使用した場合のLCA結果



る。共通分野について企業間の協調の下に研究が行われており、わが国においても注目に値する検討結果である。

(b) オランダKEMAの検討：KEMAが中心になって同様の環境負荷について総合的に検討している。その結果10kV/1kAの30-35年間使用時のリングメイン開閉器を対象として、固体高分子使用の場合が最も環境負荷が少なく、次いでSF<sub>6</sub>ガス使用機器となっている。いずれも環境負荷が非常に少ないという結果が得られている。

(c) フランスEDFのPolicy：電力会社EDFがSF<sub>6</sub>ガスの排出規制に関して自社方針（SF<sub>6</sub> gas management）を出している。基本的考え方は、まず SF<sub>6</sub>ガスをしっかり管理下においてできるだけ使用できる形にしていく、そのために ガスリークなどの徹底的な排出抑制技術を高めていく、次に SF<sub>6</sub>ガス代替技術として混合ガス技術を検討していく、さらに 真空VCBの高電圧化など新しい考えからの適用技術を確立していくなどの計画がされている。

#### 超電導技術に託す電力技術の将来

ヨーロッパにおける大学、メーカ、ユーザを中心として超電導技術開発が盛んであり、超電導限流器、変圧器、ケーブルの開発が行われている。核融合関連を除いて電力応用では、ほとんどが高温超電導応

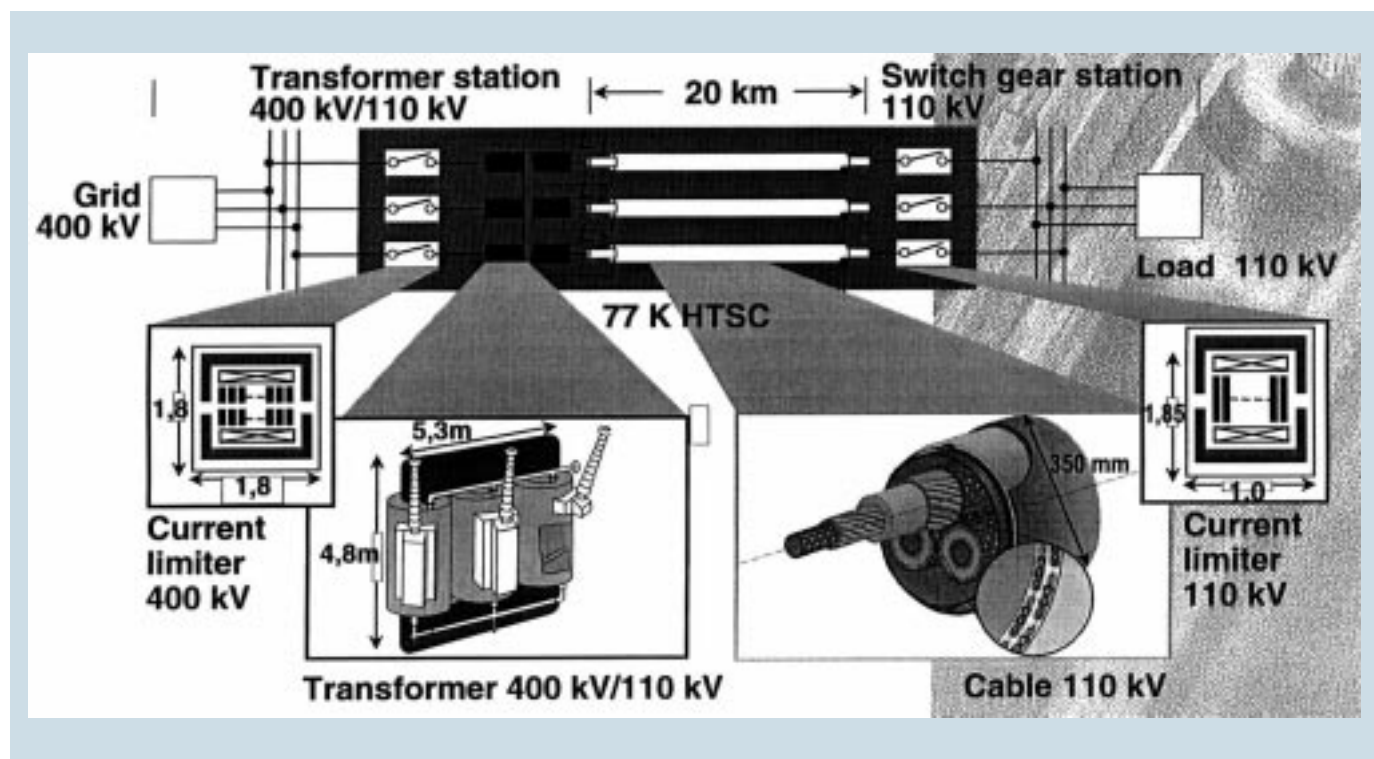
用（HTc）となっている。SMES開発ではヨーロッパSHIFT Projectがあり10-100kJの3年計画で進んでいる。変圧器については2001年にABB/ASC Projectで10MVA器の開発が計画されており、EDFでの運転計画があり、その後Parisで100MVA器の地下使用計画がある。第7図に1000MVA高温超電導システムの概念図を示す。

#### (1) 超電導限流器の開発

ヨーロッパではABB社とSiemens社で高温超電導限流器開発を行っている。ABB社で10kV/70A、1.2MVA器の開発を完了し長期課通電試験を行った。磁気シールドタイプでありBi2212を使用し材料開発からすべてABBで行っている。次期開発として2001年に10MVA器の完成を予定している。SiemensではミアンダタイプのYBCO系で高温超電導限流器開発を行っている。やはり1999年に1MVA器を開発し、2000年には10MVA器の開発を予定している。さらに大学などで電力系統の中で限流器の適用場所の最適化を行っている。

#### (2) 超電導ケーブルProjects

欧米での超電導ケーブル開発はPirelli社を中心としており、第1表にそのProjectを示す。用いる誘電体を常温（WD）か低温（CD）に分類し、まず常温そして次が低温と2段階の開発Stepで計画されている。10m長のFunction modelでは5000A、0.8W at 2kAを達成している。110kV、300-1500MVA Cable について、



第7図 1000MVA超電導電力システム

第1表 超電導ケーブルProjects

PROJECT	Warm Dielectric HV, High Power	Cold Dielectric HV/EHV, High Power	Warm Dielectric, MV, High Power	Cold Dielectric, HV, High Power
Utility Partner, Location	DOE, EPRI, USA	EDF, Europe	Detroit Edison, DOE, EPRI, USA	Internal, & Utilities, Europe
Voltage, kV	115	90/225	24	110/132
Length, m	50	50	120	50
Current, A( rms )	2000	3850/2560	2400	2000/3000
Cable Type ( WD/CD )	WD	CD	WD	CD
Prime Objective	Pipe Type Retrofit WD Technical Feasibility	0.6/1.0 GVA Urban penetration CD Feasibility	Urban MV retrofit Field trial in live network	Technology Devt, System Studies & Field Trial

2000年にジョイント付き単相Prototype、2004年に110kV 3相Pilot installation、そして2005年には商業化したいとしている。この中でも注目されるのはフランスEDF社の高温超電導ケーブル開発であり、XLPEケーブルとの比較から超電導ケーブルの経済的メリットが3000MVA以上で顕著であり、特に7.5Euro/kmA (10kA/mm<sup>2</sup>) から超電導にメリットが出るとしている。特徴的なのは225kVという高電圧系を計画していることであり、その目的は架空送電線との直結すなわち大容量送電と景観である。さらにヨーロッパではデンマークのNKT社のケーブル開発が特筆できる。デンマークの国家プロジェクトとして開発しており、大学、国研、メーカなどが関わり2001-2002年に10-60kV/2kA、30m長の3相超電導ケーブルを開発する計画である。

#### ヨーロッパの電力機器開発は何をめざすか？

ヨーロッパのメーカはM&Aを繰り返し、リストラや規制緩和などの厳しい試練を乗り越えてきており、特にメーカはたゆまぬコストダウンと限られた資源での研究開発を行っている。つまり、「やるべきこと」の絞り込みをし「研究開発の選択と集中」を徹底している。一方電力会社はフランスのEDFを除いて、分社化などのために研究開発能力を急激に失いつつある。ドイツでは従来より特にメーカの力が強く、大学との協調の中で戦略的研究開発を行っている。

(a) ABB社における戦略的機器開発：すでに我が国でも多くが紹介されているが、ABB社による

PowerformerすなわちXLPEケーブルを直接巻くことによる変圧器を省略した発電機の開発は、強烈な開発リーダーのもとで大規模に資源を投入しIdea発想から実用化までを短期間に成し遂げるといふ、きわめてヨーロッパ的な開発体制で成功を収めつつある。続いて同一開発グループで、XLPEケーブルを巻いた変圧器すなわちDryformerの立ち上げを行っており、波及的に新しい電力機器開発に取り組んでいる。これからは限られた条件の中で研究開発の選択と集中、すなわち「テーマの限定と資源の集中投資」を行うことが求められており、我が国においても参考にすべき研究体制であると思う。

(b) EDFにおけるGIL開発：ヨーロッパにおけるGIL開発計画は当初フランスEDFを軸に3メーカとともに始まったが、その後の経緯により (EDF + ABB)、(BEWAG + Siemens) の二つのGroupになり、昨年6月からEDFにおいてABBによる長期課通電がやっと開始された。420kV, 2GW, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> (90/10%) の混合ガス使用で300mの直埋式GILとなっている。今回の開発ではParis都心への420kV高電圧架空線からの5-10km直接都心導入を計画しており、GIL開発の目的はやはり「景観と大容量送電」である。

(c) 戦略的コストダウン手法：Siemens社ではXLPEケーブルに対抗してGIL開発を考えており、第2表に示すように10項目のAdvantageを挙げて800kV/8000A/4000MVA、100kmまでの製作可能性を示している。これまでも30kmに及ぶ製造実績を有している。コスト面でもXLPEケーブルと競い合うために第3表に示すような戦略的コストダウンを達成する手法

を適用している。コスト面から純SF<sub>6</sub>ガスの代わりにSF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> (SF<sub>6</sub>20%以下)の混合ガスを使用している。用いるスペーサは単純構成のスライド式であり、UHFセンサーもきわめて単純な円板形センサとし、1-2km間隔で適用される。特に注目されるのは、現地製造、組立方法であり、組立流し式など新しい発想を活用している。今後このような考え方がGISなどにも適用されるようになると、従来レベルとは違ったコンセプトの機器開発に至る可能性がある。ABB社、Siemens社ともに145kV/245kVレベルのGIS開発に主力をおいており、コストダウンに注力している。コストダウンについても日本の積み上げ型ではなく、目標を設定してそれを達成するための技術を順次入れ込んでいくという達成型であり、戦略的アプローチとして参考になるだろう。

(第8図に最新の400kV GISの写真を示す。)

第2表 GILのメリット

Low capacitance  
Low loss  
Large power capacity  
No ageing  
No critical joint  
Fire resistance  
Possible auto reclosure  
High reliability  
Direct connection to GIS/Tr.  
Environmental compatible (ELF/EMF)

第3表 コストダウン手法

現地組立 (現地配送)  
固定組立流し式  
混合ガスの使用 (SF<sub>6</sub>20%以下)  
1kmガス区画  
新スライドスペーサ適用  
1-2km UHF Sensor  
突き合わせ自動溶接  
部品の標準化  
Pipeline埋め込み手法の適用  
搬送長の長尺化



第8図 最新のGISとともに筆者

### あとがき

約半年間にわたりアメリカ・ヨーロッパに滞在し、電力機器技術動向を調査した結果の概要をまとめた。アメリカ、ヨーロッパいずれにおいても環境技術や景観対応技術が重要になってきている状況があり、電磁環境、SF<sub>6</sub>ガス代替技術とも今後の重要な位置付けになるものと感じた。SF<sub>6</sub>ガス対応では混合ガス機器の実適用が始まり、一方では新たにVCBの高耐圧化が注目されている。また、超電導電力応用研究は将来の電力技術を支えるものとして特にヨーロッパを中心に盛んであり、超電導材料の開発、限流器、ケーブルの実用化研究が軌道に乗っている状況を見ることができた。その中で、超電導技術の高電圧化が着実に進んでいることが明らかになり、低温環境下での高電圧電気絶縁技術の重要性が高まっていることが分かった。

一方従来型の電力機器分野では、M&Aが進んだヨーロッパメーカーの中で、新機種開発やコスト低減など戦略的開発体制の構築が重要であり、「選択と集中」の研究投資がヨーロッパを中心になされていることを認識し、機能複合新機器の開発や、極限まで簡素化した絶縁技術など多くの知見を得た。さらにドイツ、イギリスなどでは電力自由化が進み、厳しい電力料金値下げ競争の中で企業の分割統合や分社化が進められ、研究費削減下で「研究開発における大学の役割」、企業間での「研究開発の競争と協調」のあり方など、わが国として学ぶところの多いことが分かった。

### 大久保教授略歴

昭和23年(1948年)10月29日生まれ。  
昭和48年(1973年)名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。  
昭和51年(1976年)～53年(1978年)ドイツ・アーヘン工科大学高電圧研究所ならびにミュンヘン工科大学高電圧研究所・客員研究員。  
平成元年(1989年)より名古屋大学工学部電気学科助教授、その後同大学大学院工学研究科教授  
専門は電力工学、高電圧工学、電力機器工学。