

安全・安心社会の 電気エネルギーセキュリティ

安全・安心社会の電気エネルギーセキュリティ特別調査専門委員会編

目	次
1. はじめに	1
1.1 特別調査専門委員会設置の目的	1
1.2 本特別調査専門委員会の活動実績	2
1.3 技術報告の概要	2
2. 安全・安心社会の電気エネルギーシステムを考 える	4
2.1 バランスのとれたエネルギー利用を目指して	4
2.2 日本の電力自由化	5
2.3 イギリスにおける電力自由化後の実態と課題	6
2.4 大停電を起こさないために	8
2.5 太陽光発電にどこまで頼れるか	10
2.6 消費者はどのような協力ができるか	11
2.7 大災害時にも電気を届けるには	12
2.8 電力技術の継承にかかわる問題点と 人材育成	13
3. 安全・安心社会に向けての課題と将来の取り組み	14
3.1 日本のエネルギーベストミックスについて	14
3.1.1 はじめに	14
3.1.2 エネルギー資源・供給方式の評価	14
3.1.3 長期エネルギー需給見通し	18
3.1.4 おわりに	19
3.2 日本の電力自由化	20
3.2.1 はじめに	20
3.2.2 自由化と電力システム改革	20
3.2.3 広域取引と競争環境の整備	20
3.2.4 電源確保と流通設備の整備	21
3.2.5 環境変化と新しい政策目標	22
3.2.6 おわりに	23
3.3 イギリスにおける電力自由化後の実態と課題	24
3.3.1 はじめに	24
3.3.2 電源構成の変化と電力市場改革の推進	24
3.3.3 国際連系線強化による安定供給の模索	24
3.3.4 配電会社の自然災害対応と顧客満足度	24
3.3.5 小売供給市場の競争と「困惑独占」	25
3.3.6 料金値上げは「政府の失敗」にも起因	26
3.3.7 新型原子力をめぐる不確実性の増大	27
3.3.8 おわりに	27
3.4 電力システムの信頼性維持の課題	29
3.4.1 はじめに	29
3.4.2 電力システムの信頼性維持	29
3.4.3 再生可能エネルギーに関連する課題	31
3.4.4 課題と将来展望	35
3.4.5 おわりに	37
3.5 再生可能エネルギー電源はどこまで頼れるか	39
3.5.1 はじめに	39
3.5.2 PV の出力特性	39
3.5.3 PV 出力のならし効果	39
3.5.4 PV の供給力としての価値	40
3.5.5 PV の接続可能量	41
3.5.6 おわりに	41
3.6 電力システム運用における需要側資源の活用	43
3.6.1 はじめに	43
3.6.2 需要側資源の活用	43
3.6.3 情報通信およびサイバーセキュリティ に関する技術検討課題	44
3.6.4 自動デマンドレスポンスシステムと インセンティブ型デマンドレスポンス 実証試験	45
3.6.5 Fast-DR のための制御対象機器と 制御システム	46
3.6.6 おわりに	47
3.7 大災害時における電力システム運用	49
3.7.1 はじめに	49
3.7.2 自然災害による電力システムの被害	49
3.7.3 電力システムのレジリエンス	49
3.7.4 分散電源を活用したレジリエンス 向上方策	50
3.7.5 あとがき	52
3.8 電力技術の継承にかかわる問題点と 人材育成	53
3.8.1 はじめに	53
3.8.2 日本の優秀な電力技術	53
3.8.3 電力技術継承の実態と問題点	55
3.8.4 人材育成について	60
3.8.5 おわりに	67
4. おわりに	70

1. はじめに

1.1 特別調査専門委員会設置の目的

【エネルギー環境の歴史・背景】

資源小国である我が国は、多くを海外に依存する国際関係の中で、技術立国を基調として経済発展を遂げてきた。そのためには、基盤となる技術力の蓄積と、それを支える安定的なエネルギー調達、およびインフラの整備は不可欠であった。電力システムは、このような流れの中で国の発展を支えるインフラとして、エネルギー供給安定性、環境性、経済性を重視して戦略的に構築されてきた。すなわち、エネルギーの不足や価格変動のリスクを分散するためベストミックスの考え方に基づく様々な種類の発電所を建設し、一方でユニバーサルサービスと呼ばれる地域や条件の異なる全ての需要家に同じレベルで電力供給を行うシステムを構築した。この過程において、信頼性と経済性を両立させるシステム計画がなされたことから、人工物としての利便性を論ずる工学の視点では、長期的に効率的なエネルギー環境が構築されたといえる。

【震災前後でのエネルギー環境の激変】

しかしながら、東日本大震災とそれに伴う原子力事故以降、エネルギーに関連する環境が激変した。エネルギーの供給や利用に対する従来の枠組みに対して疑問が投げかけられ、これらの問題を解決する手段として、従来のエネルギー政策の抜本的な見直しとともに、電力システム改革が進行した。まず、原子力発電の信頼が大きく揺らぎ、その後国内の全ての発電所が停止する状況となった。そして、原子力の是非については、現在も世論を二分する状況が続いている。

また、需給逼迫が続き、首都圏で2週間にわたり輪番停電を経験したことは非常に大きな影響があったと考えられる。国民の不満や不安感が高まり、マスコミにおいても盛んに関連する報道がなされた。その真偽や効果は別として、需給逼迫やエネルギー問題に関連するあらゆる見解、提案、問題意識が紹介された。とりわけ、震災の影響がない西日本地域からの電力融通が限定的であり、供給力の広域的な活用に限界があったことなどが問題視された。また、再生可能エネルギー（以降、再エネ）を含めた多様な供給力への期待、デマンドレスポンスやネガワット取引といった新たな手法が目まぐるしく注目の的となった。

【再エネ導入・電力システム改革】

再エネの導入については、平成15年のRPS法、平成21年の住宅用太陽光「余剰買取制度」の導入などと段階的に進められてきたが、震災を経てにわかに脚光を浴び、平成24年7月に固定価格買取制度（FIT）が実施された。将来にわたって買い取り価格が保証されたことから爆発的に普及が進み、平成26年の年度末時点で大規模水力を除く再エネの全設備容量がすでに約2955万kW、そのうち、太陽光発電は1,431.5万kWと非常に勢いで導入されている⁽¹⁾⁽²⁾。一方、電力システム

改革については平成25年4月の閣議決定「電力システム改革に関する改革方針」において3段階からなる改革の全体像が示され、それぞれの措置を定めた電気事業法改正案が成立済みである。その一環として平成27年4月には「電力広域的運営推進機関（OCCTO）」⁽³⁾⁽⁴⁾が発足した。

【工学的視点によるリスクと課題】

しかしながら、以上の全体の流れについては、工学的な視点から不合理性を含み、リスクをはらんでいると言わざるを得ない。将来のある時点で検証が必要になるとしても、現段階で考えられるリスクについては、広く認識されるべきであろう。エネルギーの選択は、いわゆる一般に言われるエネルギー問題以上に、技術立国としての日本の将来に多大な影響を及ぼす。産業技術は常に生産に結びついていないと、長い年月をかけて蓄積した技術そのものが危機に瀕する。さらに、人類の作った最大級の複雑システムといわれる電力システムでも、社会インフラを維持する上で設備形成の課題に直面している。このようなシステムには、技術的に適正な使用法があり、それに反する非効率な使い方には代償が伴うことは、理解されるべきである。課題の理解には、工学あるいは電気工学の専門領域に関する知識も必要となるが、電気エネルギーシステムという枠組みで考えると、より明確になる。

工学あるいは電気工学の視点とは、考察対象に内在する因果関係に基づく特徴の把握と確度の高い予見性である。この意味で、数年前の将来的課題は、既に一部が現実となりつつある。

例えば、太陽光発電に関する現在の状況は、当初国民が描いていた考えに沿うものであろうか。再エネは将来の重要なエネルギー源になると考えられるが、これは相当に先の話であり、その限界やコストなど負の側面については当時あまり認知されることはなかった。現在、太陽光発電の導入量は電力システム設備や運用面から限界に近づき、発電の遠隔制御を含めた追加的な設備投資が必要となり、システムの経済運用にも大きく影響しつつある。事実、九州ではこれが大きなニュースとなり⁽⁵⁾、資源エネルギー庁による緊急実証事業が開始されている⁽⁶⁾。さらに、FITによる賦課金が急激に増加し、設備の導入者とそうでない者との不公平感が広がっていることも事実である。

一部の再エネの電力システムへの悪影響は、専門家の間では当初より理解されていたので、現在の状況は制度設計の議論において電気工学の視点が重視されなかったエビデンスとも言える。電気工学の視点を尊重し、電力システムの設備計画と合体した低コストで無理のない、より効率的な導入法が制度設計において当初より検討されるべきであった。

電力システム改革を含むエネルギー政策については、まさに将来の問題である。社会インフラとしての信頼性を担保することは重要であり、現在の環境変化を考えると、工学的視点から様々な課題がある。将来、エネルギー政策の影響がいろいろな形で現れてくる可能性がある。

このような背景から、本委員会では電気エネルギーシステムが我が国の極めて重要な社会インフラであるとの認識に基

づき、「セキュリティ」をキーワードに課題を整理し、工学的視点で正確な情報として提示することとした。社会インフラとしての電気エネルギーシステムを、安心・安全な社会の実現に向けてどのように次世代に引き継ぐかを真摯に考え、工学の視点での現実性を重視した情報提供を行うことを目的としている。

1.2 本特別調査専門委員会の活動実績

本委員会は、電力・エネルギー部門を代表する委員により構成し、震災後のエネルギー環境の転換期において 2012 年 12 月に初回の会合を持ち、その後約 1 年間にわたる 5 回の準備会合を経て 2013 年 10 月に正式に設置した。「広く社会に電気および電気エネルギーに関する情報を発信するとともに、災害の復旧・復興を最大限に支援し、将来社会のあり方を社会とともに提言し、行動する」という電気学会の方針のに対応し、学会本部直轄の「電気システムセキュリティ特別技術委員会」の一翼を担って独自の活動を行ってきた。本特別調査専門委員会の委員構成を表 1.1 に、傘下の作業部会については表 1.2 に示す。

表 1.1：委員会構成および調査活動期間

役 職	氏 名	所 属
委員長	餘利野 直人	広島大学大学院工学研究科 教授
	藤井 康正	東京大学大学院工学系研究科 教授
委 員	浅野 浩志	電力中央研究所エネルギーイノベーション創発センター 研究参事, 東京大学大学院新領域創成科学研究科 客員教授
	大山 力	横浜国立大学大学院工学研究院 教授
	斎藤 浩海	東北大学大学院工学研究科 教授
	舟橋 俊久	名古屋大学未来材料・システム研究所 教授
幹 事	造賀 芳文	広島大学大学院工学研究科 准教授
調査活動期間		平成 25 年（2013 年）10 月～ 平成 29 年（2017 年）3 月（3.5 年間）

表 1.2：作業部会（WG）構成

再生可能エネルギー大量導入に向けたデマンドレスポンスと需要側対策 技術作業部会（DR-WG）		
役 職	氏 名	所 属
主 査	浅野 浩志	（委員）
幹 事	山口 順之	電力中央研究所, 早稲田大学
幹事補	坂東 茂	電力中央研究所
WG 委員	太田 豊	東京大学
	池上 貴志	東京農工大学
	吉永 淳	早稲田大学, 東京電力
	工藤 耕治	日本電気(株)
	境野 哲	NTT コミュニケーションズ(株)
	野間 節	azbil(株)
	木内 舞	(株)サイバーディフェンス研究所
	新谷 隆之	インターテックリサーチ(株)

加えて、活動の一環として一般向けのシンポジウムを開催し、情報発信を行ってきた（表 1.3）。委員会の趣旨に沿って、重要事項を分かりやすく提供する努力をしながら、説明の方法についても試行錯誤を繰り返してきた。さらに、その場でアンケートを実施し、参加者の興味や理解度を確認することにも努め、これらの結果は本技術報告の編集方針にも反映さ

れている。

表 1.3 委員会活動の概要

	開催日	開催地	講師
シンポジウム開催	2014 年 4 月 23 日	広島大学	委員 3 名
	2014 年 7 月 2 日	東北大学	委員長 1 名
	2014 年 9 月 12 日	同志社大学（電気学会 B 部門大会）	委員 6 名
	2014 年 11 月 22 日	名古屋大学	委員 5 名および加藤丈佳准教授(名古屋大)
	2015 年 3 月 24 日	東京都市大学（電気学会全国大会）	委員 6 名および野村宗訓教授(関西学院大)
委員会および WG 開催		委員会：計 11 回, WG：計 8 回	

1.3 技術報告の概要

本委員会では、工学的な視点に基づき、当面考えられるリスクを議論し、これを機会に他分野の専門家を含めて広く一般に伝達すべき課題も抽出した。これらは、既に専門家の間では知られているが、一般にはあまり認知されていない事柄をはじめ、通常では議論されることがない相当に専門家的な内容も含んでいる。この中から、日本の将来にとって重要な課題を選び、分かりやすく伝えることが本委員会の役割であると考えた。

本技術報告では、調査すべきキーワードとして

- エネルギーセキュリティ
- 再生可能エネルギー大量導入に向けた技術課題
- 電力システムのロバストセキュリティ
- デマンドレスポンスと需要側対策
- リスク管理
- 供給信頼度レベルとコスト
- レジリエントシステム
- 技術継承

などを挙げている。これらは相互に関連しており、最終的には電気エネルギーシステムの全体像、ひいては国のあり方の根幹にも関わる項目である。例えば、原子力発電のリスクは広く実感されているが、これを不要とした場合のエネルギーセキュリティ、産業の衰退、技術の喪失と言ったリスクは、あまり知られていない。これは原子力発電の是非ではなく、正しい判断材料が一般に分かりやすく提供されているかどうかに関わる問題である。本技術報告では、広い意味で電気エネルギーシステム全体に亘るこのような重要な課題について、工学的に客観的かつ包括的な整理を試み、それぞれ専門の立場で解説している。

また、本技術報告の対象とする読者は通常の技術報告とは異なり、いわゆる専門家ではない一般の方々も含まれる。よって、項目としては上記のとおりであるが、第 2 章を一般の読者向け、第 3 章を技術者向けとし、第 2 章についてはできるだけ平易で簡潔な表現を試みた。

まず、第 1 節（第 2.1/3.1 節）は日本のエネルギー源を考えるうえで重要な「経済性」、「環境性」、「エネルギー供給の安定性」、「持続可能性」、「安全性」という 5 つの評価指標を軸として、各種のエネルギー資源や供給方式の特徴を整理し、

ベストミックスについて述べている。次に、第2節（第2.2/3.2節）および第3節（第2.3/3.3節）では日本と英国の電力自由化について整理し、課題について述べている。一次エネルギー源、制度設計それぞれの課題を受け、第4節（第2.4/3.4節）では電力システム全体の供給信頼度について整理・議論している。続いて、注目を浴びている再エネ電源について一体どこまで頼ることができるのか、その特性と系統接続時の問題点について第5節（第2.5/3.5節）にて解説を試みている。さらに、今後は需要家も電気システムセキュリティの維持に参加することが期待されており、第6節（第2.6/3.6節）にて需要側資源の活用として説明している。第7節（第2.7/3.7節）では、震災後に特に注目を集めた大災害時でも機能する頑健な電力システム運用について、また第8節（第2.8/3.8節）では、日本が技術立国として持続可能な社会を維持するために重要な技術継承についての実態や問題点とともに人材育成の観点から何をすべきかについて議論している。

一般の方々には、まず第2章を読んでいただき、より専門的な内容に興味があれば第3章に進んでいただければ理解が容易になると思われる。

参考文献

-
- (1) 経済産業省・資源エネルギー庁：「再生可能エネルギーを巡る現状と課題」、総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会（第1回）配布資料、
<http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/shin_ene/pdf/001_03_00.pdf> (2014.6)
 - (2) 経済産業省・資源エネルギー庁：「再生可能エネルギー発電設備の導入状況を公表します（平成26年3月末時点）」、平成26(2014)年6月17日ニュースリリース (2014.6)
<<http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140617003/20140617003.html>>
 - (3) 経済産業省・資源エネルギー庁：「電力システム改革について」、
<http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/system_reform.html> (2013.2)
 - (4) 電力広域的運営推進機関：<<http://www.occto.or.jp>>
 - (5) 九州電力株式会社：「九州本土の再生可能エネルギー発電設備に対する接続申込みの回答保留について」、
<http://www.kyuden.co.jp/press_h140924-1.html>
 - (6) エネルギー総合工学研究所：「再生可能エネルギー接続保留緊急対応補助金（次世代双方向通信出力制御緊急実証事業）」に係る間接補助事業者の公募の結果について」
<http://www.iae.or.jp/2015/05/22/pvconpj_20150522/>

2. 安全・安心社会の電気エネルギーシステムを考える

2.1 バランスのとれたエネルギー利用を目指して

身体の健康を維持するためには、栄養バランスのとれた食事をとることが重要とされる。それと同様に、健全なエネルギーシステムを構築するには、石油などの化石燃料や、水力や太陽光などの自然から得られるものなど、様々なエネルギーをバランス良く組み合わせることが求められる。各種エネルギー資源や供給方式にはそれぞれ長所や短所があり、複数のエネルギーをうまく組み合わせることで、あるエネルギーの短所を他のエネルギーの長所で補える。表 2.1 には、特に各種エネルギーの主な問題点を示すが、現時点では万能なエネルギー資源や供給方式はない。

表 2.1：各種のエネルギー資源や供給方式の主な問題点

エネルギー資源 や供給方式	主な問題点など
石炭	豊富で安価だが環境面で問題が多い
石油	使い勝手が良いが資源量が限られ高価
天然ガス	比較的環境に優しいが輸送や備蓄が難しい
水力・地熱	安定しているが開発余地が限られる
バイオマス	生態系に依存し利用可能量は限られる
風力	多くが遠隔地にあり出力も不安定
太陽光	夜間・曇天時には利用できず季節変動もある
原子力（核分裂）	事故時の社会的な影響が大きい
核融合	技術的にまだ困難
水素	生産するために一次エネルギーが必要

日本のエネルギー政策を立案する際には、各種のエネルギーをどのように組み合わせるのが良いかを判断するために、「経済性」、「環境性」、「供給安定性」、そして「安全性」の4つの観点から検討されている。そして、もっともバランスのとれたエネルギーの組み合わせをエネルギーのベストミックスと呼ぶ。

経済性については、発電単価や燃料価格などが具体的な指標となる。発電単価は、燃料価格やプラントの稼働率、そして技術進歩などに大きく依存し、将来の不確実性も大きい。環境に良いエネルギーであっても、価格が高いと社会での利用は進まない。政府による税金や補助金で、エネルギー間の相対価格は人為的に変えられる。エネルギー価格の上昇は、家計や企業の光熱費の支出を増やすが、これまでは事業性を有しなかった省・新エネルギー技術を用いた新規ビジネスを生み出す可能性があり、必ずしも悪いことばかりではない。

環境性については、主に単位エネルギー当りのCO₂排出量が主な指標となる。CO₂は代表的な温室効果ガスであり、長期的には大幅な排出削減が必要とされている。天然ガス複合発電の単位発電電力量当たりのCO₂排出量は、石炭火力発電の約半分で済む。水力、地熱、バイオマス、風力、太陽光などの再生可能エネルギーや原子力の活用によってもCO₂排出量を削減できる。温暖化対策を取ることによって得られる便益は、現時点の科学では定量化できないため、温室効果ガスの排出目標は実際には政治的に設定されている。

供給安定性を脅かす最大の要因は、日本の場合、海外での不測の事態によるエネルギー資源の供給途絶である。そのため、主に一次エネルギー資源の調達における「国内自給率」、「輸入先の政治的安定性と残存資源量」、「輸入先の分散の程度」、「貿易契約の形態」、「海上輸送ルートの安全性」、「国内備蓄量」などが評価指標とされる。しかし、国内自給率、石油の中東依存度、国内備蓄量などを除いては、定量的評価は難しい。供給途絶時の経済損失や人的被害に関する定量的な分析はなされておらず、供給安定性向上で得られる便益は大きいと思われるが、必ずしも明確ではない。

安全性という指標は、東京電力福島第一原子力発電所の過酷事故が起きたことを受けて、追加されたものである。工学的には、安全とは受容できないリスクが無いこととされ、リスクとは一般に、「リスク＝危害のひどさ×危害の発生確率」と表現される。個別技術の安全性を高めるとともに、総合的なリスクを小さくすることが重要である。ただ総合的なリスクの推計は対象範囲が広がると難しい。

エネルギー資源や供給方式別に見てみると、まず太陽光発電などの再生可能な自然変動電源については、その導入拡大に伴う系統安定化対策のための費用増大が懸念される。将来的には、これらの出力の季節変動による余剰電力対策には、需要側での省エネルギー対策にもよるが、桁違いに安価で大容量のエネルギー貯蔵装置が必要となると考えられ、最も困難な技術経済的な課題となろう。再生可能エネルギーの利用割合は増えていくとしても、それを100%とすることは簡単ではない。

化石燃料については、気候変動問題に関する環境政策の不確実性が、その見通しを悪くしている。温暖化だけでなく資源枯渇も考慮すると、化石燃料への依存度は、いずれは下げていかざるを得ない。自然変動電源の大量導入が実際に進展している国や地域では、CO₂排出量が少ない新型の天然ガス火力発電さえも廃止へ追い込まれ、火力発電全般への投資が躊躇される状況となっている。

原子力については、低線量被曝の健康影響に対する不安や、その不安を背景にした脱原発を志向する世論がその前途に暗い影を落としている。福島原発事故では、事故を起こした原発周辺の住民への放射線被曝による明らかな健康影響は甲状腺がんも含めて現時点では見出されていないが、その一方で、住民避難の過程で高齢者や入院患者を中心に少なからずの人命が失われてしまった。原発事故の結果として、実際に何が起きたかを冷静に確かめる必要がある。

現時点では、特効薬的なエネルギー資源や供給方式は見出されておらず、「経済性」、「環境性」、「供給安定性」、そして「安全性」の4つの指標を念頭に置きつつ、バランスのとれたエネルギー利用を目指して努力するしかない。

2.2 日本の電力自由化

【自由化と電力システム改革】

1980年代末から欧米主要国で電力自由化が開始された。わが国では、長期にわたり北海道から沖縄まで地域独占の電力10社しか存在しなかったが、1995年12月に電気事業法が改正され、発電部門に自由化が適用された。2000年3月には、大口需要家を対象とする小売部門の自由化も実施された。自由化範囲は段階的に広げられ、16年4月にすべての需要家が自由に供給元を選択できる全面自由化へ移行した。

図2.2.1のような工程表で進められている「エネルギーシステム改革」に基づき、2015年に電力広域的運営推進機関が設立された。既に、16年から小売市場の全面自由化は実施済みで、20年には送配電部門の法的分離（持ち株会社の下での子会社化）が採用されることになっている。更に、料金規制の撤廃やガスの小売全面自由化が含まれているように、この改革では市場メカニズムを活用する方針が貫かれている。

【広域取引と競争環境の整備】

電力10社のうち沖縄以外の9社は連系線（送電線）でつながっている。周波数が関東以北の50Hzと中部以西の60Hzで異なるが、周波数変換設備（FC）という機器を通して電力を相互に流すことができる。発電部門と小売部門への参入者を増大させる上で、FCは重要な役割を果たす。全国大での競争を通してコスト削減効果が表れる点と、利用者が供給先を選択できる点でメリットがある。各電力会社の区域を越えて電力が取引されれば、供給力の安定化にもつながる。

2004年に中立機関である電力系統利用協議会（ESCJ）が新設され、広域運用のルール策定と監視業務を行ってきた。具体的には設備形成、系統アクセス、系統運用、情報開示についてのルール策定と監視が含まれていた。実際には送電部門の責任は大手電力10社にあったので、ESCJは各社の系統運用部門と緊密な情報交換をしてきたが、15年に解散し、新た

な組織として後述する電力広域的運営推進機関が設立された。

【電源確保と流通設備の整備】

既に電力市場に競争が導入されているが、長期的観点から供給力に加えて送電容量も拡充する必要がある。電力広域的運営推進機関（OCCTO）の業務内容には、以下の点が含まれる。①周波数変換設備、地域間連系線等の送電インフラの増強や区域（エリア）を超えた全国大での系統運用等を図る。②各区域（エリア）の送配電事業者による需給バランス・周波数調整に関し、広域的な運用の調整を行う。③災害等による需給ひっ迫時において、電源の焚き増しや電力融通を指示する。

東日本大震災以降、原子力発電の停止により電源が不足しているため、広域電力取引の重要性が高まっている。再生可能エネルギーの導入促進の観点から流通設備への投資が求められるが、料金を上昇させる要因となるので、その抑制についても考慮しなければならない。また、広域連系線は安定供給の点から有用であるが、停電が起きると連鎖的に拡大する危険性もある。従って、計画的な設備形成と系統運用の監視が必要になる。

また、安定供給の面で以下のような懸念もある。2016年にライセンス制となり、これまで電力会社に課せられていた供給責任（電気を届ける責任）が、新制度では「一般送配電事業者」（電力会社分割後の送配電部門）に引き継がれる形となる（最終保障供給約款：ラストリゾート）。しかし、自前で電源を持たない送配電事業者が非常時に正当な理由により電源を確保できなくても責められるものではない。すなわち、これまで発送配電が一体となって確保してきた供給責任に関して、真に電気が必要となる非常時には不安が残ることは否めない。

【環境変化と新しい政策目標】

電力事業を取り巻く環境は震災によって大きく変化したの



図 2.2.1 エネルギーシステム改革の工程表

(出所：経済産業省『METI Journal』, 2016 年 4・5 月号, p.12.)

で、電力政策の目標を見直す必要がある。そもそも発電燃料であるガスや石油を持たない「資源小国」である点で、わが国の電力自由化には大きな制約条件が課されている。自由化の進展に伴い、新規参入の促進と料金の引下げが追求されることになった。さらに、温室効果ガスの排出量抑制の観点から、低炭素社会の実現も政策目標に含まれた。

震災後は、制約条件として「原発停止」が付加された点に注意を払うべきである。電力改革の政策目標は、自由化推進と低炭素社会実現から福島原発の事故収束と供給力確保にシフトしている。供給力は一部の原発再稼働や再生可能エネルギーの普及を通して改善できるが、長期的視点から韓国やロシアとの国際連系線やパイプライン建設も考慮する価値はある。連系線やガスパイプラインが国際的に整備されてきた欧州の経験を参考にして、今後、アジアとの国際連系線を視野に入れた政策運用が求められる。

2.3 イギリスにおける電力自由化後の実態と課題

【電源構成の変化と電力市場改革の推進】

イギリスでは 1990 年代に、送電部門の独立性を高める「発送電分離」と、利用者が自由な契約のできる小売全面自由化を実施した。電源選択や設備投資は事業者の裁量に委ねられているので、一国としてのベストミックスの維持は難しくなっている。利用者の選択肢は広がったが、ビッグ 6 (Centrica, EDF, E.ON, RWE npower, Scottish Power, Scottish and Southern) の料金に顕著な差はなく、競争のメリットがあったとは言えない。

主たる電源は石炭とガスだったが、低炭素社会を築くための環境規制により石炭火力の多くが閉鎖されている。更に、原子力設備のほとんどは老朽化のために 2020 年代に停止する。石炭と原子力の比率が低下するとともに、ガスと再生可能エネルギーが増大している。新制度として、風力について 15 年間の固定価格買取り制 (FiT) が認められているほか、原子力についても 35 年にわたる買取り制が導入された。これらの制度は発電事業者の投資インセンティブを促すものの、自由化とは性格の異なる公的関与を伴う政策である。

【国際連系線強化による安定供給の模索】

イギリスでは安定供給を実現するために発電部門への投資を促進する電源開発のみならず、他国との電力取引を可能にする国際連系線の拡充を重視している。2020 年までに連系線能力の強化を通して、料金低下を実現する方針が明らかにされた。現実の石炭火力の閉鎖と原子力設備の老朽化を考慮すると、迫りくるエネルギー危機を回避するためには、連系線の増強は不可欠と考えられる。EU 域内でも連系線強化は、電源多様化と市場連動の観点から推進されてきた。イギリスはオランダやノルウェーなど 7 カ国と交渉を続けているので、事務的なコストもかかるが、供給力確保を実現できる点から、この取組みは評価できる。

【配電会社の自然災害対応と顧客満足度】

配電と小売供給は、ライセンスにより完全に分離されている。配電 14 社の親会社には、ドイツ・フランス・スペインなど欧州企業以外にも、オーストラリアや香港などの外国企業も関与している。近年、強風や豪雨、洪水などの自然災害による停電事故と事後対応が注目されている。2013 年末にイギリス全土を襲った嵐の影響で、200 万人超の利用者が停電の被害を受けた。エネルギー規制当局 (OFGEM) は、配電会社の実施すべき措置として、保線管理の充実、精度の高い天候予測、人員の適正な配置など、単純な業務を軽視すべきではない点を指摘した。

自由化以降、家庭用の利用者は多様な料金メニューを提示する小売会社の選択に関心を示しているが、事故時の対応にまで気を配ることは少ない。物理的な設備を修復するのは配電会社だが、顧客に周知する手法は限られている。配電会社は地域独占を維持しているために、小売供給会社のように顧客自らが選ぶ対象にはなっていない。多くの利用者が配電会社の直面する問題点について認識を深め、今後もサービス向

上のための投資が実現されているのかにも目を向けるべきである。

【小売供給市場の競争と「困惑独占」】

小売供給会社は 20 社以上存在するが、全国市場ではビッグ 6 のシェアが圧倒的に高い。家庭用電気・ガスの小売料金は、趨勢的に上昇傾向にあり、2013 年は 05 年と比較すると電気で 1.5 倍、ガスで 2 倍以上の値上げとなった。多くの需要家は小売供給会社から電気とガスをセットで購入する同時供給契約（デュアル・フュエル）を結んでいるが、2013 年の平均年間支払額は約 1,300 ポンドにも達する。

自由化以降、各社はシェア維持のために新メニューで顧客の囲い込みを進めてきた。それは選択肢の増加という点で評価できるが、実質的な料金低下をもたらしたかどうかは疑わしい。政策当局は「困惑独占」（confusopoly）という概念に注目している。これは風刺漫画家のスコット・アダムスによる造語だが、『ディルバート・フューチャー』というタイトルの本の中で使われた。通信や金融業界の企業が複雑な料金体系を作り、顧客を故意に困惑させることを意味するが、エネルギー自由化でも結果的に利用者が事業者を選びにくくなる効果を持つ点が注目されている。

【料金値上げは「政府の失敗」にも起因】

自由化後の料金上昇は、寡占的な事業者による複雑な料金メニューに原因があるが、実は政府の規制料金や新制度に基づく課金にも起因している。2009 年～13 年についての卸費用は 774 ポンドから 643 ポンドへと、131 ポンドも低下した。それに対して、中間的な段階の送配電やガス輸送の費用と、再生可能エネルギーの購入義務や固定価格買取制の負担金を含む環境費用と社会的費用については、318 ポンドから 394 ポンドへと、76 ポンドも上昇した。

ネットワークにあたる送配電とガス輸送の料金については、政府の規制を受けている。更に、政策費用に相当する再生可能エネルギーに対する支援金に関しては、民間の事業者が関与できるものではない。更に、付加価値税も外生的に決定される要素である。今後、政府・事業者・利用者などすべての主体が将来の長期エネルギー計画の策定に参画した上で、非化石燃料の導入量と負担額を明確にする必要がある。

【新型原子力をめぐる不確実性の増大】

原子力専門会社 British Energy（BE）は、自由化後の卸料金低下によって採算割れに直面し、2002 年に公的資金が投入される事態に陥った。イギリス政府とフランス EDF との間で数年にわたる協議が進められ、2008 年に BE は EDF の傘下に入ることが決まった。フランスの支援で難局は乗り切れたが、2030 年までに現行設備のほとんどが寿命を迎えるために、発電不足が懸念されている。

新型原子力については、表 2.3.1 のような 4 つのプロジェクトがあるが、現実にはどの案件も具体的な工程は提示されていない。①～③のプロジェクトは、EDF・Centrica、E.ON、RWE npower が中核になるはずであったが、リスクが大きいくことから EDF 以外の 3 社は撤退してしまった。その後、中国広核集団（CGN）、日立製作所、東芝が参画し、それらの計画は継続されているが、競争市場での収益確保については慎重論も見られる。特に、世界の原子力専門企業の業績不振とイギリスの EU 離脱（Brexit）による影響から、先行きが不透明な状況にある。

表 2.3.1：イギリス原子力発電所 新型炉プロジェクト

プロジェクト・企業名	サイト・プラント名	地域	炉型	設備容量 (MWe)	着工予定年	運開予定年
① EDF Energy	ヒンクリーポイント C-1	サマセット	EPR	1,670	2019	2026
	ヒンクリーポイント C-2		EPR	1,670	2020	2027
	サイズウェル C-1	サフォーク	EPR	1,670	—	—
	サイズウェル C-2		EPR	1,670	—	—
② Horizon	ウィルヴァ・ニューウィッド 1	ウェールズ	ABWR	1,380	2019	2025
	ウィルヴァ・ニューウィッド 2		ABWR	1,380	2019	2025
	オールドベリー B-1	グロスタシャー	ABWR	1,380	—	2020 年代
	オールドベリー B-2		ABWR	1,380	—	2020 年代
③ NuGeneration	セラフィールド・ムーアサイド 1	カンブリア	AP1000	1,135	2019	2025
	セラフィールド・ムーアサイド 2		AP1000	1,135	—	2026
	セラフィールド・ムーアサイド 3		AP1000	1,135	—	2027
④ 中国広核集団 CGN	ブラッドウェル B-1	エセックス	HPR1000	1,150	—	—
	ブラッドウェル B-2		HPR1000	1,150	—	—

（出所：World Nuclear Association 公表資料に基づき筆者作成。）

2.4 大停電を起こさないために

一般にシステムの信頼性とは、そのシステムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たす性質（すなわち正常動作）を意味する広義の工学的用語である。また信頼度とは確率的・統計的視点で正常動作の度合いまでを評価する際に用いる用語である。電力システムは電力供給を目的とするシステムであるので、電力システムの信頼性は供給支障（停電）の少なさにより評価される。例えば、日本では2015年度、需要家あたりの停電が年平均で0.13回、21分ほどであり、国際的にも高い信頼性を維持しているといえる⁽¹⁾⁽²⁾。なお、電力システムに特化した議論を行う際には、「供給信頼度」、「信頼度」といった用語が「信頼性」の意味で広く用いられている。

停電には需要家に近い配電線での故障とシステムの基幹部分での故障に起因するものがある。統計的には前者の供給支障事故が9割を占める⁽¹⁾⁽²⁾が、これは広範囲に広がる配電線が自然災害等の影響を受けやすく、加えて事故点の近傍や下流部分がどうしても停電を回避しにくいことによる。一方、基幹部分での事故は大規模な供給支障に波及し得るので、「信頼度基準」に基づく特別な方法での管理が必要とされる。現在、基幹系事故による供給支障の割合が小さいのは、重要な送電線を多回線化するなどの設備対策や、送電電力を安全範囲に保つ運用などの現状の信頼性維持方策が機能しているためである。しかし、今後は特に基幹系での信頼性低下が懸念されるので留意していく必要がある。

図2.4.1に電力システムにおける信頼性の決定要因を示す。システムの環境要因として、需要の増加などの重負荷、事故や落雷などの外乱の増大、運転状態の予測ができない不確定性の増大などに対して信頼度が低下する。一方、電力設備やシステム運用の要因として、設備の増強や設備管理の方法に関連する設備の状態や能力、システム制御の高度化など制御性の向上が信頼性を高める方策である。電力システムの信頼性は、これら両者のバランスで決まる。

現在、再生可能エネルギーの大量導入と電力システム改革が同時に進行している。まず、再生可能エネルギー（以降、再エネ）は、将来の我が国のエネルギーとして非常に重要であるが、賦課金による電気料金の上昇に加え電力システムの信頼性を低下させる要因となっている。これは太陽光や風力など天候依存形の再エネが予測困難な不確定性を伴うシステムの外乱となるためである。システムの信頼性低下は、これまでの経験では長期的視点での対策を怠った際に水面下で徐々に進むことが多く、ある段階で大規模停電といった事態に遭遇して認識される。そして、一度信頼性が低下した状態になると、回復するまで停電を繰り返すような事態にもなり得る。すなわち、現段階で長期的な視点での対策が重要である。

電力システムは、発電所で電気を発生し、送電線で需要家に届けるという単純でわかりやすいシステムであるが、一方で人類の作った最大級の複雑システムといわれ、様々な不安定要因を内在させている。具体的には、複数発電機間での振動に関連した「安定度」と呼ばれるものや、橋などの構造物

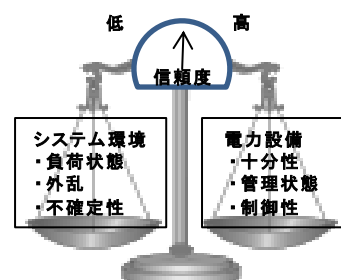


図 2.4.1 電力システム信頼性の決定要因

が崩壊する際のメカニズムに類似した「電圧安定性」と呼ばれるもの、送電線や電力機器に限界を超える電気が流れる「過負荷」、その他にも「周波数変動」などがあり、これらの不安定要因が図2.4.1の信頼性を決定する重要な内部要因となっている。世界の電力システムで経験した大停電は、何らかの外乱によりこのような安定限界に近づき、その後の系統を保護するための自動制御や系統操作により、さらなる状態悪化を招き、系統崩壊に至っている。例えば、2006年の欧州での事故や2003年の北米事故では、初期の事故や外乱に対して過負荷が発生し、その後の状態悪化の連鎖に繋がっている⁽³⁾⁽⁴⁾。また、1987年の東京での停電は、電圧安定性によるものであった⁽⁵⁾。

信頼度基準は、大停電発生メカニズムに対して、事故波及の抑止手段を組み込むために設けられる。信頼度基準はだまかに以下の3段階で確認される。

- ① 設備を計画する段階（設備計画）、
- ② 発電機等の運転計画を作成する段階（運用計画）、
- ③ 運転中で監視をしている段階（リアルタイム運用）

各段階では、外乱を受けた状況を想定して系統解析を行い、不安定要因を安定化する対策、すなわち信頼度基準を満たす対策がとられる。

現在、この信頼度基準を維持する上で、指摘すべき課題として、設備の弱体化、再エネによる不確定性の増大、従来方式や運用技術の限界など、多くの懸念事項がある。特に、再エネの大量導入により、将来の電気の流れの不確定性が増大し、予測の精度が低下し、上記①～③で実施する計算の精度が大幅に悪化する状況となりつつある。これらのことから、今後必然的に②や③の運用段階での対策が重要となると考えられるが、不確定性が増大すると、従来の運用技術では信頼性維持が困難になる可能性がある。このことから、今後の環境を考えると、懸念されるリスクとして以下を指摘できる。

- ・環境変化により危険なシステム運用が検知できない状況に変化し、危険な運用が常態化する状況
- ・電力価格の高騰や乱高下・電力市場の混乱
- ・大災害に対する強度や回復力（レジリエンス）の低下

上記第一の状況は、大事故が発生した際に後の検証においてしばしば指摘される項目である。電気の流れのパターンの変化やコスト削減の結果として電力設備の弱体化が進んだ際に懸念されるリスクである。再エネ導入による不確定性の増大は、この状況を相当に悪化させ得る。これについては第3.4節で後述するが、今後、再エネに起因する詳細な電気の流れ

の監視, および信頼度基準の常時監視は, 技術的な課題を克服して実施されるべきである。

第二の状況は, 再エネによる不確定性の増大が電力市場の混乱を誘発する状況である。特に信頼性の維持に必要となる送電制約などが不定期に発生すると, 混乱を拡大し得る。元来, 不確定性が増大する環境での信頼性維持は, 電力自由化とは相性が悪い。したがって, 適切な制度設計ができないと, 信頼性の維持と電力市場の安定が共に損なわれてしまう懸念がある。

信頼性の維持に際して, 費用は低く抑えたいが, 停電を繰り返すシステムは許容できないというのが共通の認識と思われる。そこで重要となるのが, 最小のコストで信頼性を維持する最適化の概念である。最適化の概念がないと効果の低い投資がなされたり, 弱点箇所が出現したりするなど, 費やした費用に対して達成可能なレベルまで信頼性が向上しない。最適化を行うためには, 電力システム全体を1つのシステムとして捉える必要がある。多くの事業者が混在しているとしても「発電」や「送電」といった部分に分けて扱うのではなく, 工学的視点で全体を最良のバランスで調整する対策を考えることである。

第三のリスクに関して, 現在, 高コストな発電設備の廃棄が進む一方で, 大災害に対する備えが実質的に低下し, 脆弱なシステムとなりつつある。電力システムが災害時におけるライフラインであるという認識が低下し, 大災害への備えに対する責任も曖昧になっていると懸念される。大災害に対しては, 地域を主体とした分散型のシステム構造を維持しながら問題を取り扱う視点が重要である。

工学的な観点でいえば, 信頼性を維持しながら再エネ導入量の最大化をはかり, かつ電力価格も抑制して災害にも対応するという極めて難しい一連の課題には, 地域分散型の垂直統合システムにおいて, システムの最適化の概念に基づいて実施するのが, 最も安全で確実な方法と思える。一方, 再エネ導入環境下での電力自由化は, 研究者の立場としては, これまでに経験がないチャレンジングで魅力的な研究課題を提供するものであるが, 社会インフラを維持していく視点では, 危うさの残る社会実験ともいえる。電力システム改革には, 新規事業者の参入による事業機会の拡大や需要家選択肢の拡大などの目的やメリットがあり, この点は一般に周知されているが, 信頼性や安定供給力の低下, さらに大災害に対する備えが弱体化するなどのリスクやデメリットはあまり認知されていないように感じる。

今後の環境変化は予想できるものであるので, 細心の注意を払って制度設計を行い, 信頼性低下を回避することが重要と考えられる。特に, 将来のエネルギーとして非常に重要な太陽光や風力などの再生可能エネルギーは, 従来の電力システム工学の方法論では取り扱えないほど大きな不確定性を伴う。不確定環境における電力システム運用は, 世界共通の課題であるが, 我が国独自の環境条件を考慮して, 早急に対策を確立すべき課題と考えられる。

参考文献

- (1) 経済産業省 平成 27 年度電気保安統計
http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electri

- c/detail/result-2.html
- (2) 電気事業連合会データベース FEPC INFOBASE,
<http://www.fepec.or.jp/library/data/infobase/>
- (3) Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations, U.S.-Canada Power System Outage Task Force, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, U.S. Department of Energy, April 2004
<https://energy.gov/oe/downloads/blackout-2003-final-report-august-14-2003-blackout-united-states-and-canada-causes-and>
- (4) Final Report - System Disturbance on 4 November 2006, Union for the Coordination of Transmission of Electricity (UCTE), January 2007.
- (5) T. Ohno, S. Imai, "The 1987 Tokyo Blackout," Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. October-November 2006 IEEE PES.

2.5 太陽光発電にどこまで頼れるか

2011 年の東日本大震災と福島原子力発電所の事故以来、準国産エネルギーである原子力発電が稼働しない状況が続いている。この原稿を執筆している時点でも全国で 3 機のみが稼働している状況である。この状況は今後も続くと考えられ、震災以前に策定されたエネルギー基本計画のように原子力発電に頼る状況は考えにくい。

このような状況で、化石燃料への依存を高めることは CO₂ 排出削減の観点だけでなくエネルギーセキュリティの観点からも避ける必要がある。そのため再生可能エネルギーに追い風が吹き、再生可能エネルギー電源に対する手厚い発電電力固定価格買い取り制度 (FIT) が導入され、特に太陽光発電設備 (PV) の導入が急速に進んできた。そのペースは予想を大きく上回るものであり、認定された設備の容量は想定を遙かに越えるものとなってしまった。

そのため、2014 年後半になっていくつかの電力会社ではこれ以上の受入は困難だとして、その接続申込への回答を保留するという宣言を行った。一般にはこの保留措置は「突然」の出来事だったと受け止められている。

しかし、PV や風力発電のような自然エネルギーに頼る再生可能エネルギーは気象変動の影響を受けやすく、出力が不安定に変動することが知られている（このため、PV や風力発電を「自然変動電源」と呼ぶことがある）。電力システムは瞬時瞬時の需要と供給を一致させる必要があるため、変動が大きくなると運用が難しくなってしまう。電気エネルギー分野の専門家から見れば、技術的、経済的に適正な受け入れには限界があることは明らかであり、遅かれ早かれ接続が不可能になる時期が来ることが予想されていた。

そこで、ここでは、再生可能エネルギーの中でも日本において導入が進み、系統接続の問題が起きている PV を取り上げ、その特性と系統に接続するときの問題点について考える。

太陽光発電の出力は雲がまばらに空を覆っているような状況で特に大きく変動する。PV 出力変動の例を図 2.5.1 に示す。快晴 (clear) や雨 (rain) の時は出力変動が小さいが、曇 (あるいは空に雲がある状態の「晴」) の時は非常に急峻に出力が変動する。電力システムにおいては電力の供給量と需要量は瞬時瞬時にバランスがとれていなければならない、バランスが崩れると周波数変動、ひいては大停電に至ることもあるため、需要とのバランスは PV 以外の電源がとらなければならないことになる。PV は勝手に踊るダンサーのようなもので、それにうまく対応する上手なダンスパートナーの役割をその他の電源が果たさなければならないわけである。

ただ、太陽光発電は広範囲にわたって多数設置されるため、互いの出力がほぼ無相関になり、統計的性質によって全体としての出力が平滑化される。この効果を「ならし効果」と呼んでおり、かなり効果があることが知られている。

しかし、問題はならし効果が弱まる瞬間が稀頻度でも出現するかどうかである。図 2.5.2 は AMcDAS の 10 分間日照時

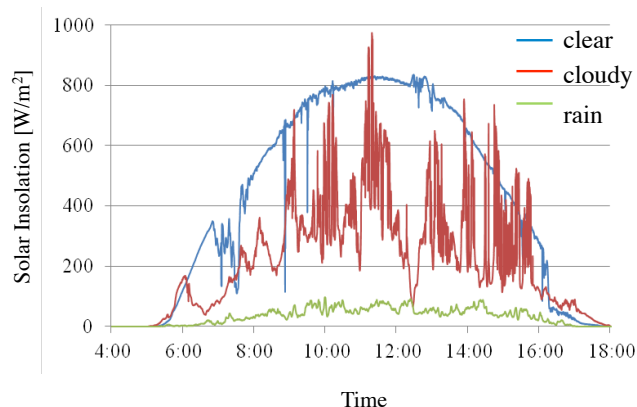


図 2.5.1 PV 出力変動の例

間データから各地点の日射量を推定し、14 地点分を足しあわ

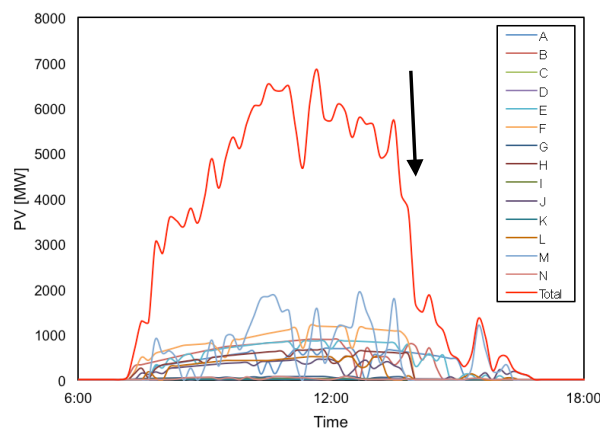


図 2.5.2 広域に設置された PV の合計出力

せたものである。一年分のデータの中から最も厳しいものを選んだのだが、矢印のところで合計出力が急峻に変化していることがわかる。このような状況はまれにしか発生しないので、「たまには周波数変動があっても良い」「たまには停電しても良い」ということであれば問題ない。しかし、電力供給ではそのようなことは許されない。このようなときにも対応することが求められる。

現在は各電力会社が最大限努力を行った結果、かなり接続可能量が増加してきているという印象であるが、逆に調整用の余力などを切り詰めたことによって運用が難しくなることが心配される。例えば地域間をつなぐ連系線を通る電力が大きく変動するといった影響がないかどうかといったことは検証していく必要があるだろう。

2.6 消費者はどのような協力ができるか

電力会社（系統運用者）は、時々刻々と変わる電力需要に合わせて、できるだけ経済的に発電機を運用し、電力を安定的に供給している。太陽光発電(PV)など出力が変動し、系統運用者が自由に出力を調整できない電源の割合が増えてくると、これまでの需要量に供給量を一致させるより、需要家が供給側と協力して、電気を使うタイミングをずらすなど、電気の使い方を工夫し、石油火力など費用の高い電気をできる限り使わずに電力支出を抑える手法、つまり、デマンドレスポンス（Demand Response, DR）が有効である。

2011 年東日本大震災以降の電力供給不足に対し、需要側の節電やデマンドレスポンスなどの取組みが拡大している。こうした中、2000 年頃からの電力自由化と電力危機を契機として、導入が進められてきた米国のデマンドレスポンスが、わが国においても注目され、一部のプログラムが導入されている。

これまで主に供給不足に対応するため、下げ DR（ネガワット、図 2.6.1）の普及が主な論点であったが、太陽光発電など気象に依存する変動電源が大量に連系してきたため、その余剰電力を有効活用し、出力抑制を回避できる上げ DR や周波数調整にも使う上げ下げ DR も重要である。

2016 年 4 月から電力小売の全面自由化がスタートし、消費者も従前に増して、電力価格や供給者選択などを通して電力部門への関心が増している。スマートメータの設置が進み、自らの電力の使い方も確認できるようになりつつある。

他の節でも議論されている太陽光発電(PV)や風力発電等の再生可能エネルギー電源導入拡大、電力市場の活用に加えて、

今後の電力システムの姿を変革させる大きな要因として、消費者（需要家）の積極的な参画に焦点を当てる。需要家選択肢の拡大（電力の小売自由化）、再生可能エネルギー電源の普及や需要家のプロシューマー化（自家発電や蓄電池の保有）は、相互に結び付いており、現在の電力系統の技術的制約および制度的制約をブレークスルーするため、規制当局および電気事業者は、IT を活用したスマートグリッド化を進めている。家庭用需要家の電力消費は小規模であるが、アグリゲーター（電力需要の集約）を通じて、電力取引に参加することも可能になる。

需要家設置の蓄電池や電気自動車など需要側資源（需要家リソース）の活用を有機的に統合することが変動電源大量連系時の一つの解決策と考えられる。PV など出力変動の大きな電源（変動電源）の大量導入は、既存の電力系統の需給バランスに大きな影響を及ぼすことが懸念され、変動電源導入が先行する欧州やアンシラリーサービスの電力市場化を拡大させている米国では、系統運用に不可欠な予備力や周波数調整などアンシラリーサービス（系統運用サービス）の供給源として需要側資源の活用が始まりつつある。

需要家に設置された PV の発電出力や需要家の電力使用量を制御するためには、十分に高速な情報処理と通信の技術が求められ、通信インフラや通信方式の適切な選択とコストの検討が必要である。また、電力需要家の設備を情報通信によって制御できる仕組みが導入されると、需要家および電力供給の安全のため、サイバーセキュリティ対策も極めて重要となる。

我が国では、ネガワット取引の実証事業、経済性評価を踏まえて、2017 年度から仮想発電所や予備電源として、需要側資源の本格的な活用が始まったところである。

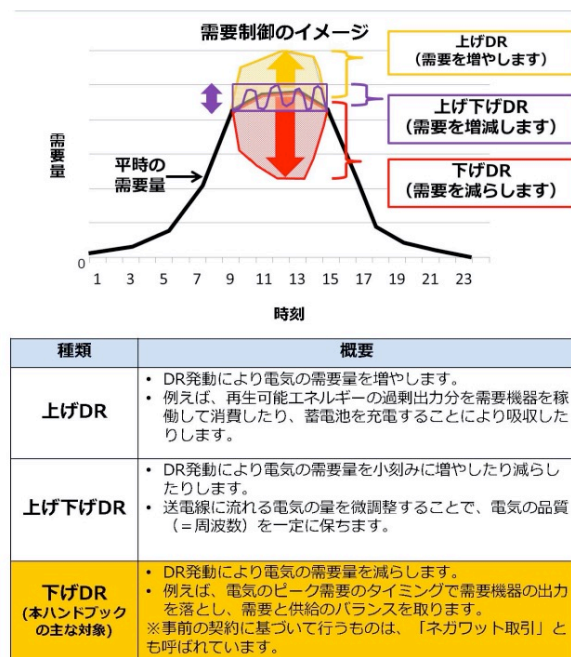


図 2.6.1 デマンドレスポンスの種類

（出典：経済産業省「ディマンドレスポンス（ネガワット取引）ハンドブック」, 2016 年 12 月）

2.7 大災害時にも電気を届けるには

「天災は忘れた頃にやって来る。」と言ったのは物理学者の寺田寅彦と言われている。阪神・淡路大震災からすでに 20 年以上が経過し、東日本大震災からも 6 年が経った。自然災害の多い国土に住む私たちは、大震災のようなつらい災禍をきれいさっぱり忘れて、毎日を明るく生きていきたいと思う習性を持っているのかもしれないが、今は次なる自然災害に備えて十分な用意をする時期であろう。特に電気に支えられた現代の社会では、大災害による停電は私たちの生活を一変させてしまう。マンション高層階の住人はエレベータ停止により移動に大変な苦勞をするであろう。また電車が停止して通勤・通学に時間がかかり会社や学校は正常に機能しなくなる。もちろんモーターを使ってポンプを動かして供給される水やガスも停止し、夜間の照明は無く、スマートフォンも充電できずに通信手段を失う。東日本大震災では多くの人々がこのような経験をしたと思う。

一方、電気を供給する側はどうなるのかというと、大津波が発生するような大震災の場合、沿岸部に位置する大型火力発電所や原子力発電所が津波による浸水等が原因で長期間停止することになる。しかし図 2.7.1 に示すように東日本大震災の場合には、電力技術者の懸命な復旧活動により一週間程度でほとんどの停電が解消されている。ただし都市近郊直下型地震による阪神・淡路大震災と大きく異なり、電気の発生源である発電所（以下、電源）が多大な損害を受けたため、長期間に亘る供給力不足が生じ、東京電力管内では 10 日間の計画停電（輪番停電）が実施された。この経験から得られる教訓は、大災害時には、とにかく電源を確保することと言える。

さて、大きな自然災害が起きた時でも電気を送り届けられる電気のネットワーク（電力系統または電力システムと呼ぶ）の能力は、レジリエンスという視点から整理すると次の 4 項目で特徴づけられる。なお、レジリエンスとは、何かのインパクトでシステムが破壊されたとき、元に復元する能力（回復力）のことである。

- ・丈夫さ **Robustness**：電力システムを構成する発電所や送電線の一部が破壊されても停電を起こさずに消費者に電気を届けられる能力。
- ・余裕 **Redundancy**：電気を送るルートが複数存在するなど多重化されていること。
- ・動員力 **Resourcefulness**：局所的に電気を供給できる電源車の保有台数や他電力会社等からの応援要員の人数など。
- ・回復の速さ **Rapidity**：停電発生時から復電（停電解消）するまでの時間。

このレジリエンスをどのような方法で向上させることができるかという点を、国では将来発生が予想されている南海トラフ巨大地震や首都直下型地震を念頭に置いて検討している。その代表的な方法としては、電力システムのシミュレーションにより停電規模を事前に把握する方法や、災害で停止した大型火力発電所の運転を早期に再開する方法など、主に

電気の送り手側に関する対策が考えられている。

他方、大学などでは電気を消費する側の手段として、家の屋根に設置された太陽光発電装置（以下、PV）を非常用電源として利用する方法、特に電気自動車（以下、EV）に積載されている蓄電池と組み合わせることで夜間でも電気を利用できる方法が検討されている。ただし、この方法は EV や PV を所有していない人には適用できない。そこで PV や EV を所有していない人でも電気を得る方法として、被害を受けなかった電力システムのネットワーク設備を活用する「自立運転配電ネットワーク IDN」という方法が提案されている。この概略を図 2.7.2 に示す。このような電力ネットワーク設備の使い方を単独運転と呼び、現在、この運転は安全性の観点から法律で禁止されている。ただし非常時に限って単独運転が許されるならば、PV と EV を所有していない人も災害時に電気を利用できるようになるであろう。この IDN を実現するためには、ネットワークの電圧を適正值に保ちながら電灯や冷蔵庫などの負荷機器と PV や EV を一緒に調子を合わせてコントロールするためのエネルギー管理システムを開発する必要がある。また IDN を普及させるためには、コストパフォーマンスの良い技術を開発しなければならないという課題もある。

これまで停電が起きない電力システムを構築するため種々の技術が開発されてきたが、人知を超える自然災害に対して停電を皆無にすることは不可能であろう。しかし電力システムの一部の設備が破壊されて停電が発生しても、破壊されずに残った健全な設備を上手く使用する技術を開発すれば、大災害時にも安全かつ効率的に電気を届けられる電力システムが構築できるであろう。

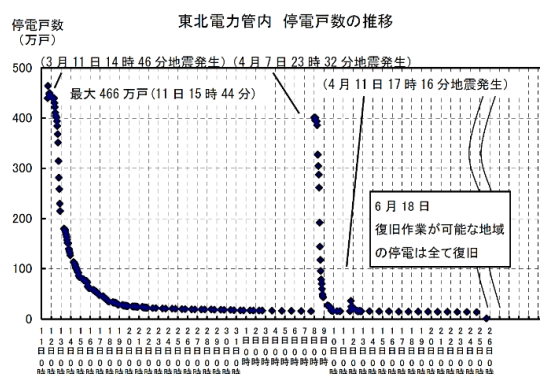


図 2.7.1 東日本大震災における停電解消の様子

出典：経済産業省：「原子力安全・保安部会電力安全小委員会電気設備地震対策ワーキンググループ報告書(案)参考資料」，2012 年 3 月

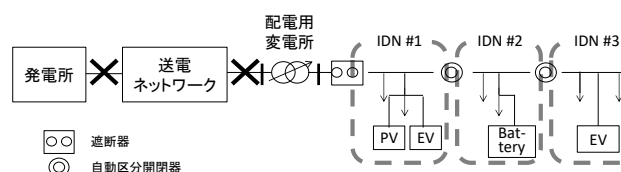


図 2.7.2 自立運転配電ネットワーク IDN の概念図

2.8 電力技術の継承にかかわる問題点と人材育成

安全・安心社会の電気エネルギーシステムを持続可能なものとするためには、人材の育成・技術の継承が極めて重要である。近年の経済成長・電力需要の鈍化から電力システムへの新規設備の導入が減少し、技術者が経験を積む場も減りつつあるなど、技術継承の危機が叫ばれるようになっている。英国のEU(欧州連合)離脱、米国の政策変更など反グローバル化の動きが台頭するにつれ、世界の社会・経済はますます複雑化し、将来の予測が困難になっている。また、一部の企業における長時間労働やモラルの低下、うっかり事故の増加なども問題になっている。さらには、AI（人工知能）やIoT（モノのインターネット）、ロボットなど新しい技術の発展に対して、その安全性の確保が叫ばれている。このような状況の中、電気エネルギーシステムや、そのセキュリティに関する技術を次世代に引き継いでいくためには、確立された技術の継承や人材育成の必要性がますます大きくなってきている。

そこで本報告書では、現状の技術継承の実態や問題点を示し、人材育成という観点から何をすべきかについて以下のように考察している。

電力技術の歴史の中では、日本の優秀な技術開発が数多くあるが、継承できていない技術もある。このような技術継承の実態と問題点が紹介され課題が指摘されている。

- ①人材確保の困難化
- ②OJTの困難化
- ③技術者魂・企業魂の喪失
- ④大学の劣化

最後に「今後の人材育成」という観点から以下の提言を行っている。

- ① 資格制度の活用と技術者の地位向上
- ② 電力技術研究の活性化
 - 新技術への対応, 他分野との連携, 新学問分野の創出, 技術書の充実
- ③ 社会への情報発信による人材確保
- ④ 海外進出と海外人材の育成
- ⑤ 教育の充実

企業における技術継承・人材育成の問題は、広く雇用にかかわる問題である。技術継承・人材育成を円滑に行うには、まず非正規雇用を減らし、海外からの人材などマイノリティも含め正規雇用を増やすことが肝要である。企業は目先の利益だけを追うのではなく、企業の社会的責任としてこれを実施しなければならない。十分な給与があれば従業員は結婚する人が増え、生まれてくる子供の数も増える。少子化問題は解決され、企業は優秀な人材を確保することが出来る。この良い流れが確立されれば、人材育成は円滑に行われることができる。

大学の劣化については、問題が多いが、まず教育・研究の活性化から始めたい。教育・研究を面白がる必要がある。教師は、人がやらないユニークな教育方法・研究テーマ

- 電力システムをとりまく状況
- ・ 経済成長・電力需要の伸びの鈍化
 - ・ 災害に対する意識の風化
 - ・ AIなど新技術の普及



- 本委員会での活動
- ・ 技術継承の実態と問題点
 - 日本の優秀な技術開発が数多くあるが、継承できていない技術もある。
 - 問題点：特定年代における人員不足, 非正規社員の増大, 少子高齢化
 - ・ 人材育成に対する提言
 - 研究・教育の充実, 海外進出, 技術書の充実
 - 新技術への対応, 他分野との連携, 新学問分野の創出

図 2.8.1 技術継承の問題点および人材育成

を見つけ、一生をかけてそれらを楽しむ。学生は、教師が教育や研究を楽しむのを見て、自分も講義や研究を積極的に楽しみ、その中で自分の進路や就職活動を考える。大学に残るもよし、企業に入るもよし、まだ決められないというのならそれもよい。とにかく教育・研究をいかに楽しめるかが重要である。楽しい勉強、楽しい研究は幸せにつながる。

すべての学問、すべての技術は人間の幸せのためにある。人間の幸福とは、多くの目的関数の和で表され、それぞれの目的関数には重みがつけられる。この重みの与え方が、その人間の個性となる。それぞれの人間（個人）の目的関数（多目的目的関数）が集合して、より大きな目的関数（ Σ 目的関数）となる。このシグマ（ Σ ）の範囲は、家庭・地域・国・そして地球と広げられる。すべての人間は地球レベルでの幸福の追求を目指すべきであり、そのためには、電力工学やエネルギー工学の手法だけでは無理がある。経済学や哲学をはじめとする社会科学・人文科学との連携が不可欠である。

本報告書の3.8節は以上の項目について詳述しており、長文となっているが、興味のある部分だけでもよいのでぜひ読んでいただきたい。

3. 安全・安心社会に向けての課題と将来の取り組み

3.1 日本のエネルギーベストミックスについて

3.1.1 はじめに

2011年3月の福島第一原子力発電所の事故以来、エネルギー基本計画の見直しや電気や都市ガス供給事業に関するシステム改革など、エネルギー政策に関する議論は喧しい。エネルギー政策は、様々な観点から包括的に考えて構築する必要がある。特に重要となる評価の基本的視点としては、3Eと呼ばれる、「経済性 (Economic Efficiency)」、「環境性 (Environment)」、「供給安定性 (Energy Security)」が挙げられる。そして特に原発事故後は「安全性 (Safety)」も社会的に関心が高まっており、上記の視点は3E+Sと拡張されている。

3E+Sの全ての点で優れる万能なエネルギー資源や供給方式は残念ながら見いだせない。そのため、様々なエネルギーを合理的に組み合わせて利用することが望まれるが、その組み合わせがいわゆるエネルギーミックスである。ベストミックスを求めるには、それぞれのエネルギー資源や供給方式の長所短所を包括的に検討する必要がある。

3.1.2 エネルギー資源・供給方式の評価

3E+Sという基本的視点から、主なエネルギーの特徴や課題について整理する。

(1) 経済性

(a) 各種電源の発電コスト 発電コストは、燃料価格やプラントの稼働率などに大きく依存し、将来の不確実性も大きい。図3.1.1には、経済産業省の長期エネルギー需給見通し小委員会に設置された発電コスト検証ワーキンググループでの2030年時点の発電コストの分析例⁽¹⁾を示す。社会的費用(CO₂対策費用、事故リスク対応費用)と政策経費を除くと、石炭火力発電と原子力発電(使用済み燃料の処分費用も含む)の発電コストの間に大差はなく、将来の石炭輸入価格やCO₂対策費用に応じて、互いの大小関係は入れ替わる。天然ガス火力発電の発電コストは、燃料費の割合が大きく石炭や原子力と比較してやや割高になると予想されている。

非在来型石油資源の生産量の増加と世界的な石油消費量の増加率の鈍化などから、2014年後半から原油価格が大幅に下落しており、短期的には化石燃料価格全般の低下が期待されるが、中長期的には石油の需給は逼迫し、その価格上昇が予想される。

(b) システム安定化費用 太陽光や風力の発電単価は現状では高いものの、太陽光に関しては将来的に、太陽電池価格の低廉化に伴い、システム全体の費用も安価になると期待される。しかも、太陽光の供給可能量は極めて大きく、例えば日本国土の2%の面積に太陽電池を設置すれば、その発電量の年間累積値は日本の年間電力需要量を越えるものと推定される。風力についても、経済的利用可能ポテンシャルは、北

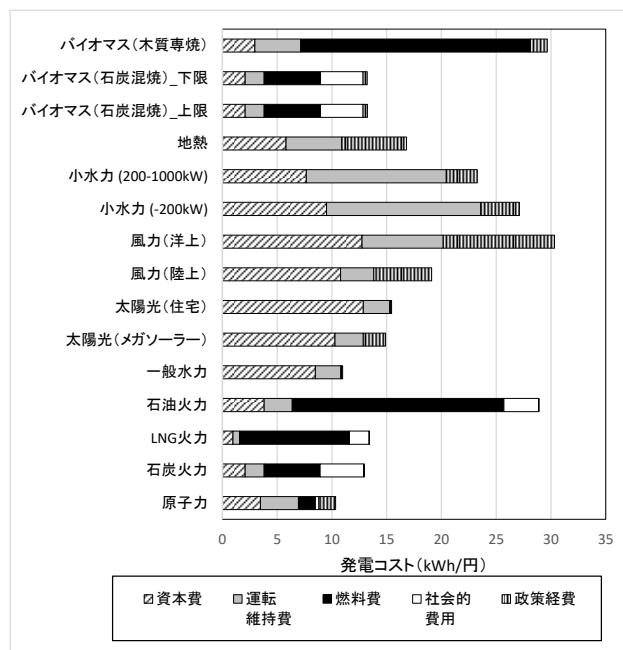


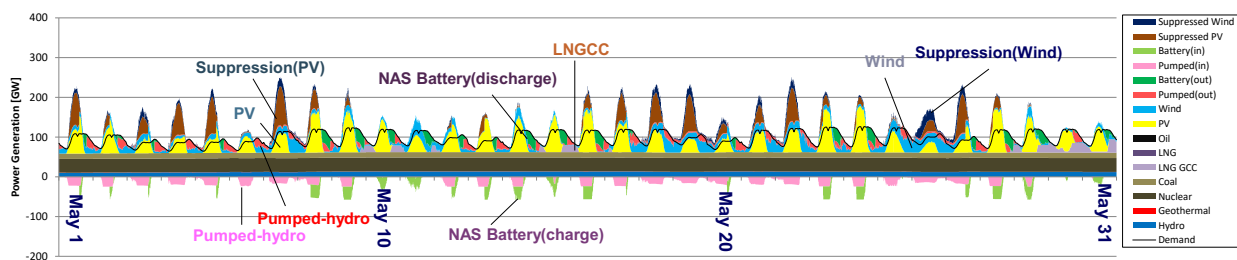
図 3.1.1 2030 年の発電コスト (資料⁽¹⁾から作成)

海道、北東北、南九州などに偏在しているが、国内の総和は十分に大きいと推測される。

電力は時々刻々の需給をバランスさせなくてはならないため、太陽光や風力という自然変動電源の大規模導入は、電力系統の供給信頼度を損ねる恐れがある。自然変動電源の全系統に占める割合が高まると、余剰電力の発生や出力変動への対策が必要となる。蓄電池による出力の平滑化は一般に費用が高く、補助金がなければ電気事業としての実施は経済性の観点で難しいと判断され、むしろ自然変動電源の出力抑制や、出力制御が俊敏に行える火力発電所の導入を進めることが実用的な解決策となると予想される。

前述の発電コスト検証ワーキンググループ⁽¹⁾でも、火力発電・揚水発電の調整運転費用を中心にした系統安定化費用の試算がなされており、自然変動電源の導入規模が約 6,000 万～1 億 kW の場合、安定化費用の合計額は概ね年間 3,000 億円～7,000 億円程度(揚水固定費分は除く)が必要との結果が示されている。自然変動電源の経済性の評価には、それ自身の発電コストだけでなく系統安定化費用も考慮しなくてはならないが、具体的な技術や方策が必ずしも確立されているとは言えず、不確実性は大きい。

海外には風力発電の割合が比較的高い国々がある。デンマークとドイツは隣接国間の電力融通が、スペインとポルトガルは自国内の水力発電設備の活用が安定化対策となっている。アイルランドは、グレートブリテン島との連系線容量も小さく、水力発電設備もほとんどないことから、主に天然ガス火力発電の俊敏な運用と風力発電の出力抑制などが系統安定化対策となっていると考えられる。風力発電で先行するこれらの国々が、特に北海道と状況が比較的似ているアイルランドが、どこまで風力の割合を高められるのかはとても興味

図 3.1.2 日本の5月を想定した電力需給の計算例⁽²⁾

深く、日本が参考とすべき制度や対策技術もあるように思われる。

図 3.1.2 には、自然変動電源の大量導入を想定した時間解像度 10 分の最適電源構成モデルの計算結果の例⁽²⁾を示す。この図からは、自然変動電源の大量導入時には、昼間を中心とした不規則な余剰電力の大量発生や、自然変動電源の出力変動に応じた火力発電所の激しい負荷追従運転など、従来の常識を超えた系統運用が必要となるであろうことが見て取れる。石炭火力と原子力は、システム総コストの最小化の結果、ベースロード電源として運用されている。グラフの負側は電力貯蔵のための充電を表しているが、経済性を考慮すると余剰電力の全てを貯蔵することにはならない。

自然変動電源の割合を増やす際の本質的な課題は、天候や昼夜による時間単位の出力変動ではなく、季節変化による月単位の出力変動なのかもしれない。桁違いに安価で大容量のエネルギー貯蔵技術が必要となるからである。

そのようなエネルギー貯蔵技術のアイデアとして、自然変動電源の余剰電力を用いた水素製造という話を良く聞くが、余剰電力の累積発生時間が短いことから、水電解装置の設備利用率は高くても 5%程度に留まると予想される。このことから、余剰電力対策は、その可変費よりも固定費（設備費）を安価にすることの優先度が高いと判断され、水素製造は残念ながら経済性は低いと推測される。極端な話、余剰電力の有効活用などは諦めて、電気抵抗などの安価な設備で熱に変換して消費することが経済的には有効と考えられる。より具体的には、汽力発電所のボイラーや復水器に、100 万 kW 級

の電熱器を設置し、余剰電力を集中的に消費することなども考えられる。ボイラーでの電熱は、最低負荷運転時の燃料の焚き減らしを想定している。これは、百万軒単位の家庭を対象に、スマートグリッドによるデマンドレスポンスを実装するのと同規模の余剰電力対策となると考えられる。さらには、時間的に変動する電熱を高温の耐火レンガの塊に貯蔵して、時間的に安定して利用可能な熱源とすることも考えられる。

(c) 経済性の指標について 経済性はエネルギーベストミックスを検討する際に最も重要な評価指標と考えられる。環境性、エネルギー供給安定性、安全性という視点も、損害や被害などを金銭で表現できれば、広い意味での経済性に還元できるからである。

経済性の指標として代表的なものはコストである。コストを議論する際には、経済主体の境界を明確にする必要がある。誰かが支払ったコストはその支払いを受け取る相手が必ずいる。国境を境界とすると、国内の相互の支払は相殺され、原材料の輸入額が支払うコストとなる。燃料輸入額の増加は国富の流出が増えるとして、国民経済への悪影響が懸念されているが、国際貿易を介した国外からのフィードバック効果もあるため、正味の影響は簡単には評価できない。

割高な再生可能エネルギーの普及による電力価格の上昇も心配されているが、前述した通り、国内のコストの支払は相殺され、これも国民経済への影響は簡単には予想できない。電力価格の上昇は、家計や企業の光熱費の支出を増やすが、これまでは事業性を有しなかった省・新エネルギー技術の導入を促進させるなどの新規ビジネスを生み出す可能性がある。

(2) 環境性

(a) CO₂ 排出量 エネルギー利用に伴う環境問題には様々なものがあるが、最も懸念されるのは大気中 CO₂ 濃度増加に起因すると考えられる地球温暖化と気候変動の問題であろう。人為的な地球温暖化の程度やその悪影響については不確実性が大きく、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) の場でも未だに専門家の間で議論が続けられている。その一方で、かつての京都議定書の温室効果ガス排出目標などのように、今後も国際社会から具体的な排出削減対策を迫られる可能性はある。実際、2015 年にはパリ協定が採択され、国際社会として気候変動対策の取り組みは進んでいる。

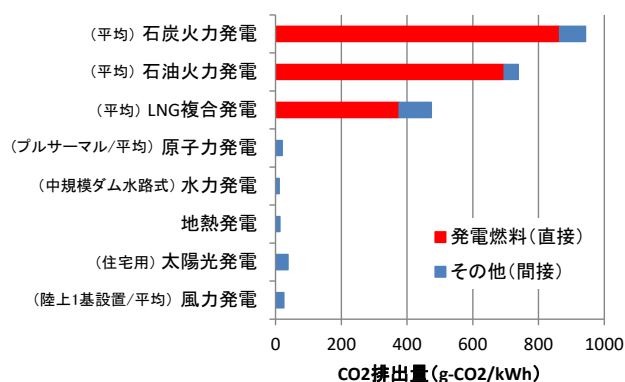
図 3.1.3 電源種別の CO₂ 排出原単位 (資料⁽³⁾から作成)

図 3.1.3 には、電源種別の CO₂ 排出原単位の推計例⁽⁴⁾を示す。CO₂ 排出量の削減を考えると、火力発電の中では LNG (Liquefied Natural Gas : 液化天然ガス) 複合発電が最も優れており、石炭火力の約半分の排出量で済む。CO₂ 排出原単位の観点では、原子力や再生可能エネルギーも確かに効果的である。出力調整運転が制限される原子力が減少し、柔軟な負荷追従運用が可能な火力が増えると、再生可能エネルギーの導入可能量を引き上げられるが、原子力の減少分を再生可能エネルギーと火力の合わせ技で補うため、系統全体としての CO₂ 排出削減効果は割り引く必要がある。

(b) CO₂ の回収貯留 原子力を抜きにして、CO₂ 排出量の大幅削減 (例えば 80%削減) を実現しようとする、エネルギー消費量自体の大幅削減、再生可能エネルギーの大規模導入という対策に加えて、火力発電所での CCS (CO₂ Capture and Storage : CO₂ の回収貯留) の利用も考えざるを得ない。CCS は、化石燃料やバイオマスなどの炭素を含む燃料を利用する際に発生する CO₂ の大部分を分離回収し、それを地中や海洋に貯留することで大気中への CO₂ 排出量を削減する技術である。CCS は CO₂ の「回収」、「輸送」、「貯留」という要素技術から構成され、これらの要素技術は既に実用化されているものが多い。しかし、実際に CCS が商業利用された実績は、経済的な負担も大きいにもかかわらず世界でもほとんどない。CO₂ 貯留サイトの候補地では、漏えい事故に対する懸念などから、住民の反対運動も起きている。CO₂ の空気中濃度が 3~4% を越えると頭痛など人体に危害が及び始め、15%以上になると致命的な仮死状態を引き起こすとされる。日本国内での経済的な貯留可能量については未知な部分も多く、後述する経産省の長期エネルギー需給見通し小委員会でも、2030 年の国内における CCS の実施は想定されていない。地理的・地層的に好条件が揃う特定の国や地域では、厳しい CO₂ 排出制約下でも化石燃料の継続的な利用を可能とする「つなぎの技術」にはなるかもしれない。

厳しい温度抑制目標を達成するために、CO₂ 濃度を人為的に下げることが必要と考えられる。そのための方策の一つが、バイオマスを燃料とする火力発電所に CCS を適用する方策である。大気中の CO₂ を植物に光合成で吸収させてバイオマスを生産し、そのバイオマスの燃焼時に発生する CO₂ を回収貯留するのである。この他に、CO₂ を大気から直接回収する方策 (Direct Air Capture : DAC) もある。利用可能なエネルギー資源がバイオマスに限定されないこと、回収プラントの設置場所の自由度を高められることなどのメリットがある。回収された CO₂ と水素から石油に近い液体燃料を合成できれば、航空機や長距離トラックなどで現状の内燃機関をそのまま利用しても、正味の CO₂ 排出量をゼロにできる。

(c) 地球温暖化の不確実性 地球温暖化問題は、1988 年のトロントでの第 14 回先進国首脳会議から国際政治の場で注目を集め始め、その後の気候変動に関する国際連合枠組条約の採択を経て、現在では人類共通の深刻な脅威として広く認識されるに至っている。しかし当初から、人為起源の地球温暖化に関しては科学的な不確実性が付随している。

大気中 CO₂ 濃度の上昇は、化石燃料の燃焼に伴って排出される大量の CO₂ が原因であることはほぼ確実であり、産業革命以前には 280ppm であったものが現在では 400ppm を越えるようになっている。しかし、大気中 CO₂ 濃度の上昇と温暖化との間には、依然大きな不確実性が残っていると言える。IPCC による最新の第五次評価報告書でも、CO₂ 濃度倍増時の全球平均気温の上昇幅は、1.5~4.5℃の不確実性の範囲で推定されている。この 1.5~4.5℃という範囲は、実は 1979 年の米国の文献⁽⁴⁾にも見出され、この間 30 年以上のスーパーコンピュータの長足の進歩を以てしても、我々はこの不確実性を解消できずにいる。

その一方で、地球温暖化の研究者の間では、昨今はハイエイトス (Hiatus) と呼ばれる気温上昇の停滞現象が話題となっている。気温上昇率の観測値が、コンピュータによる予測値を下回り、21 世紀に入ってから全球平均気温がほぼ横ばいの状態となっている現象である。(ただし、2016 年の世界年平均気温は、エルニーニョ現象の影響もあるが、1891 年の統計開始以降では最高値となった。) もし仮に、ハイエイトスの状態が今後 5~10 年継続したとすると、地球温暖化問題に対する人々の関心が薄れることも予想され、それは温暖化対策にも何らかの影響を及ぼすかもしれない。いずれにしても今後 10 年くらいの間で、コンピュータによるこれまでの温度上昇の予測値を観測値で検証することが可能となり始めるため、様々な不確実性が解消され、科学的論争のいくつかにも終止符が打たれることになるであろう。

(d) 環境性の指標について 環境性の指標として CO₂ 排出量を考慮することが多い。また、最近の気候変動枠組条約の締約国会議では、気温上昇 2℃目標が欧州諸国を中心に象徴的に繰り返し主張され、気温そのものも指標となりつつある。しかし、CO₂ 排出量や気温などの指標は、環境性の指標としては根拠が薄く、単純化された代替指標である。環境性を真面目に考慮するとなれば、温暖化や気候変動による環境リスクやその人間の生命価値への影響などを深く掘り下げた評価や検討が本当は必要である。またさらに掘り進めば、人間と人間以外の生物 (珊瑚やホッキョクグマなど) の間の生命価値のトレードオフという厄介な問題にも遭遇する。もちろん簡単な作業ではないが、これらの検討を等閑にすると、温暖化緩和策や適応策による便益を適切に評価できず、その帰結として排出目標や気温目標なども科学的根拠を以て決められなくなる。恣意的な対策目標は、長期的には様々な矛盾に直面し、いずれ覆ってしまう恐れが高い。

(3) 供給安定性 日本は、化石燃料のほぼ全量を海外から輸入しており、自給率は 6%程度 (2012 年) と低いのが特徴である。

(a) 石炭利用 経済性と供給安定性を考慮すると、原子力発電を代替する発電方式として最も適しているのは、石炭火力である。燃料費が安価なため、ベースロード電源としての運用に向いているからである。しかし、単位発電量当たりの CO₂ 排出量は、最新の高効率石炭利用技術を用いても、天然ガス火力ほどには低減できない。石炭火力発電所の新設

は、プラントの寿命が数十年と長いため、中長期的な CO₂ 排出量削減を困難にする可能性がある。ただし、具体的な排出量は、将来の排出規制、炭素税、燃料価格などに応じて、ある程度適応的に変化させられる自由度がある点には留意が必要であろう。

(b) 天然ガス利用 環境性を考慮すると、天然ガス火力が優れているが、その供給安定性には難がない訳ではない。天然ガス調達方法としては、米国からのシェールガスの輸入もある程度は期待されるが、将来的には石油と同様に中東依存度が高まっていくことが予想される。また、天然ガスの備蓄は、石油や石炭などと比較して、気体燃料であることから物理的にも経済的にもそれほど簡単ではない点にも注意が必要である。国内の LNG タンク容量の総和は、現状では国内 1 か月分の消費量程度と推計されるが、実際の平均的な貯蔵量は流通上のバッファとしてタンク容量の半分程度と考えられる。(原油の場合は、民間備蓄と国家備蓄を合計すると約 180 日分の備蓄があるとされている。)

天然ガス火力の割合が全電源中で最大となり、天然ガス火力を他の発電設備で代替することが物理的に不可能となる状況では、軍事紛争等による 2 週間程度の LNG 供給途絶で、日本の電力と都市ガスの供給は危機的状況に陥る恐れがある。対策としては、輸入先の多様化に加え、廃ガス田などの利用により天然ガスの備蓄量を大幅に増やすことや、緊急時には天然ガス火力発電所で石油も燃焼できるようにすることなどが考えられる。

対馬海峡や宗谷海峡を縦断する海底ガスパイプラインの設置は技術的には不可能ではないと考えられる。ただし、韓国が日本に比べて LNG 調達の観点で特段有利な立場にある訳ではないこと、サハリンからの LNG 供給も開始されたことなどから、パイプラインの国際連系のメリットは明らかではない。ただし、北朝鮮政府の動向次第では、東シベリアから朝鮮半島を経る天然ガスパイプラインのルートの政治経済的な状況が大きく変化する可能性はある。日本国内を縦横断するパイプライン網の構想もあるが、LNG で供給されている天然ガスを国内パイプラインで融通することのメリットは平時にはほとんどないと考えられ、経済的な観点から事業化は難しいと思われる。

なお、自然変動電源の大量導入が実際に進展している国や地域では、CO₂ 排出量が少ない新型の天然ガス火力発電さえも十分な設備利用率を確保できないことから廃止へ追い込まれ、火力発電全般への投資が躊躇される状況となっている。

(c) 再生可能エネルギー利用 日本国土の 3 分の 2 は森林であり、国全体のエネルギー消費量の 2 年分に相当するバイオマスエネルギーが木材として蓄積されている。木々の成長年数として 40 年を想定すると、木材の年間利用可能量は国全体のエネルギー消費量の約 5% となる。ただ実際には全ての森林を利用することはできない。日本で発生する可燃性の廃棄物(廃木材、古紙など)の全発熱量は、国全体のエネルギー消費量の 3% 程度に相当すると推計される。バイオマスエネルギーへの期待は大きいですが、人口密度の低い北欧諸

国などと比較すると、日本での一人当たりの供給可能量は上述の通りとても小さい。昨今は、海外からの木材輸入も調達手段として検討されるようになってきているが、温暖化対策を主目的とするのであれば、日本への輸出は行わず、木材生産国にて地産地消するのが最も効果的であろう。

地熱発電や海洋発電については、その詳細は省略するが、これらの資源を広範に活用したとしても、それぞれの貢献度は最大でも現在の水力発電(日本のエネルギー供給量の約 5%) 程度以下に留まるものと思われる。

(d) エネルギー安定供給の指標について 日本の場合、供給安定性を脅かす最大の要因は、海外での不測の事態によるエネルギー資源の供給途絶である。そのため、供給安定性の評価指標としては、主に一次エネルギー資源の調達における「国内自給率」、「輸入先の政治的安定性と残存資源量」、「輸入先の分散の程度」、「貿易契約の形態」、「海上輸送ルート安全性」、「国内備蓄量」などが挙げられる。しかし、国内自給率、石油の中東依存度、国内備蓄量などを除いては、定量的評価は難しい。安定供給確保のためには、技術的な対策のみならず、何よりも国際政治的な対策が重要である。排他的経済水域を接する中国との友好関係の維持は特に重要と思われる。

ところで、エネルギー供給安定性の議論を行うには、国内のエネルギー不足によって引き起こされる経済損失や人的被害に関する包括的かつ定量的評価がまず必要のように思われる。そのような評価の結果がなくては、合理的な国内対策や国際交渉もできないであろう。

(4) 安全性 爆発事故、感電事故、環境汚染など 100% 安全なエネルギー供給方式はない。工学的には、「安全とは受容できないリスクがないこと」とも定義され、リスクは一般に、「リスク=危害のひどさ×危害の発生確率」と表現できる。

(a) 原子力事故と避難 東京電力福島第一原子力発電所の事故の教訓から、非常用電源の更なる多重化やフィルター付きベント設備の設置など多くの新たな安全対策が原子力発電所には講じられ、2011 年 3 月と同程度の事故影響が起きる確率は大幅に低減されている。しかし、事故確率は 0 にできない。微小であっても 0 ではない事故確率を社会が受容できるか否かは、エネルギー利用に係る他の様々なリスクも考慮して、総合的評価で決められるべきであろう。

福島原発事故が起きてから 7 年近くが経つが、事故に伴う避難者数はまだおよそ 8 万人も存在し、極めて甚大な悪影響を社会に及ぼしている。さらに、人命を守るためになされた住民避難の結果、高齢者を中心に、逆に多くの人命が失われてしまったことは忘れてはならない。しかしその一方で、事故を起こした原発周辺の住民への放射線被曝による明らかな健康影響は甲状腺がんも含めて、現時点では見出されていない。

(b) 放射線被曝の影響 原発事故による危害で、社会的にも影響が大きいものは、環境中に放出された放射性物質による低線量率被曝による健康や生命への悪影響であろう。この悪影響を端的に述べると、それは「細胞内に到達した放

射線の電離作用で引き起こされる DNA の二重鎖切断が原因となっており、がんや白血病による死亡者が増えることである。

DNA の二重鎖切断自体は、実は放射線の有無とは無関係に体内の代謝過程で発生する活性酸素によっても引き起こされる。日常的に発生する活性酸素によって、細胞一日当たり平均 8 か所ほどの二重鎖切断が起きている。放射線で同数の二重鎖切断を引き起こす被曝線量は 200 ミリシーベルト（原文^⑤では 200mGy）程度とされている。（ただし、放射線による DNA 損傷はより複雑とされる。）人間の細胞はある程度の二重鎖切断には耐えられるように、DNA 修復機能を有している。

最新の分子生物学的知見や疫学調査に基づいて、放射線防護の判断基準を適宜見直していくことも必要である。1986 年のチェルノブイリ原発事故では当初、低線量率被曝による白血病やがんの死亡者が数万人単位で増加すると予想されたが、その後 4,000 人程度に下方修正された^⑥。そして低線量被曝者の中には、甲状腺がん以外のがんや白血病が多発している証拠は結局見いだせておらず^⑦、また甲状腺がんについては、大規模な検査で約 6,000 人という多数の小児にがんが発見されたが、そのうち 15 人が死亡したとされる^⑦（甲状腺がんの死亡率は他の一般のがんと比べると低いといえる）。原発事故後の福島でも、小児に甲状腺がんが発見されているが、これは甲状腺がん特有の性質に起因する集団検診の感度による可能性が高いとされ、放射線の影響とは考えられていない^⑧。そうすると、チェルノブイリで発見された甲状腺がんについてもこのような集団検診の影響を調べる必要があるように思われる。

（c）安全性の指標について 2014 年 4 月に公表されたエネルギー基本計画^⑦には、「原発依存度については…可能な限り低減させる。」と記載され、日本の原子力政策は大きく方針転換された。低減させる理由は、原子力発電の危険性が飛びぬけて高いと認識されたからであろう。この認識は合理的なものなのか、原子力発電のみならずそれ以外の種々の発電方式の安全性やリスクも横並びに評価する必要がある。リスクとしては、過酷事故による直接的な死亡者数だけでなく、環境汚染による健康影響被害も含めるべきである。そうすると前述の環境性指標のそれと同様に不確実性が大きくなり、安全性指標の厳密な評価は簡単ではなくなると考えられる。

受容できないリスクとは何か、この間に答えるために、科学的根拠に基づく発電方式全般の安全性やリスクに関する国民的なコンセンサスの形成が望まれる。その際に注意すべきことは、科学的根拠の検討の場では、世論に迎合した勧善懲悪的な視点からの議論は避けることである。人間の願望、感情、信義に応じて、制度や法律は改正できても、物理法則は曲げることはできないからである。

3.1.3 長期エネルギー需給見通し

政府は 2030 年度を対象とした長期エネルギー需給見通し^⑨を発表した。そこでは、今後の経済成長等によるエネルギー需要の潜在的な増加を想定しつつも、1970 年代の石油危機

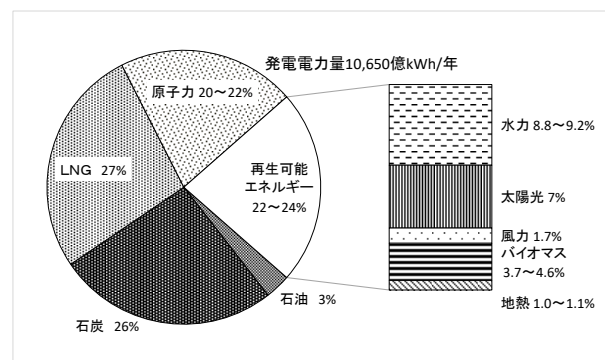


図 3.1.4 2030 年度の電源構成（資料^⑨から作成）

後並みの徹底した省エネルギーの実施により、単位 GDP 当たりのエネルギー消費量を 2030 年までに 35%低減させ、総エネルギー需要を減少させていくことを見込んでいる。電力需要に関しても、最終消費端での電化率の上昇にも関わらず、2013 年度と比較して 2030 年の需要は微増するだけに留まると想定されている。

エネルギー源別の電源構成は図 3.1.4 のように見込まれている。概要としては、経済性の視点から再生可能エネルギーの導入量の上限が決まり、環境性の視点から化石燃料による発電電力が決まる。天然ガス火力と石炭火力の割合は供給安定性に配慮してほぼ半々となっている。そして原子力発電がその残りとなる。

経済性の制約条件として、2030 年度の「火力・原子力の燃料費」、「FIT 費用」、「系統安定化費用」の総和は、2013 年度の 9.7 兆円から 0.2 兆円削減して、9.5 兆円に抑え込むとされている。2010 年度の「火力・原子力の燃料費」が 4.9 兆円（FIT 費用、系統安定化費用はほぼ 0）であったことから、2030 年度においても電気代は下がることはなく、2013 年程度に高止まることが暗黙に想定されている。また、太陽光（非住宅）は既認定量の 6 割程度のみが導入されるとされ、自然変動電源の FIT 費用は年間 2.72 兆円に抑制している。この費用の抑制が、太陽光や風力の導入量がやや控えめな数字となっている主な理由である。

2030 年度の原子力発電の発電量は 2,168~2,317 億 kWh 程度と想定されているが、設備利用率として 90%を仮定しても、設備容量として 2,750~2,940 万 kW が必要と推計される。国内全ての原子力発電プラントの寿命を 40 年とすると、2030 年度に残存する設備容量は、建設中の島根 3 号機と大間 1 号機を加えても 2,413 万 kW にしかならず、明らかに原子力発電所の設備容量は不足する。

環境性の制約条件として、2030 年度のエネルギー起源の CO₂ 排出量の削減目標は 2013 年度比 25%削減とされている。また、特に電力由来エネルギー起源 CO₂ 排出量については、原子力発電所の再稼働などにより、2013 年度比 35%の大幅削減を見込んでいる。これらの削減目標の数値自体には科学的根拠はなく、「欧米に遜色ない温室効果ガス削減目標を掲げ世界をリードする。」ことを目的に政治的に判断されている。

3.1.4 おわりに

エネルギーのベストミックスを考える上で、重要となる「経済性」、「環境性」、「供給安定性」、「安全性」の評価指標を軸として、各種のエネルギー資源・供給方式の特徴を整理し、ベストミックスに関する私見を述べた。再生可能エネルギー利用については系統安定化対策が、化石燃料利用については地球温暖化問題の不確実性が、そして原子力利用については低線量率被曝の健康影響が、これらの重大な懸念材料となり、見通しを悪くしていると考えられるが、それぞれ電力系統工学、気象学・海洋学、放射線生物学などの進歩により、長期的には克服あるいは解消されるものと期待される。現時点では、特効薬的なエネルギー供給方式は見出されず、各種のエネルギーを文字通りベストミックスする努力の継続が望まれる。

参考文献

-
- (1) 総合資源エネルギー調査会、長期エネルギー需給見通し小委員会、発電コスト検証ワーキンググループ、「発電コストレビューシート」(2015)
 - (2) R. Komiya and Y. Fujii, "Analysis on Japan's Long-term Energy Outlook considering Massive Deployment of Variable Renewable Energy under Nuclear Energy Scenario", IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.132, No.9 pp.780-792 (2012)
小宮山・藤井:「原子力の長期シナリオと太陽光・風力発電の大量導入を考慮に入れた日本の長期エネルギー需給に関する分析」, 電学論 B, Vol. 132 No. 9 pp.780-792 (2012)
 - (3) 今村・井内・坂東:「日本における発電技術のライフサイクル CO2 排出量総合評価」, 電力中央研究所報告, 総合報告 Y06 (2016)
 - (4) Report of an Ad Hoc Study Group on Carbon Dioxide and Climate, Woods Hole, Massachusetts, July 23-27, 1979, to the Climate Research Board, Assembly of Mathematical and Physical Sciences, National Research Council, "Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment", National Academy of Science, Washington DC, USA (1979)
 - (5) Maurice Tubiana et al., "The Linear No-Threshold Relationship Is Inconsistent with Radiation Biologic and Experimental Data", Radiology: Volume 251: Number 1, April (2009)
 - (6) Chernobyl Forum, Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. IAEA, p.10, (2005)
 - (7) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. "Annex D. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident". Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2008 Report vol. II: Effects, Report to the General Assembly Scientific Annexes C, D and E. New York: United Nations. pp. 64-65 (2011)
 - (8) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "東日本大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響に関する UNSCEAR2013 年報告書刊行後の進展", 国連科学委員会による今後の作業計画を指し示す 2016 年白書, New York: United Nations. pp. 25-26 (2016)
 - (9) 総合資源エネルギー調査会、長期エネルギー需給見通し小委員会、第 11 回資料 3 (2015)

国、四国、九州、沖縄で地域独占が認められ、系統運用や需給バランスも地域単位で発展してきた。図 3.2.4 に示されるように、沖縄以外は連系線であつてつながっているが、周波数が東 50Hz と西 60Hz で異なるために、周波数変換設備 (FC) を通して広域運用が行われている⁽⁷⁾。北本連系設備は 2018 年度末までに 60 万 kW から 90 万 kW に、東西の FC は、現在の 120 万 kW から 210 万 kW に増強される。小売部分自由化以降、広域取引が重視されてきたが、2016 年の小売全面自由化によりその重要性はますます高まっている。

広域取引が必要とされる理由は、以下のような点にある。第 1 に、自由な電力取引を全国規模で推進すれば、新規参入者の増加を通して活発な売買が可能になる。小売供給市場への参入者を促進するためには、全国どこからでも電力を調達できることに加え、どの地域にでも電力を販売できるような広域市場の整備が不可欠である。部分自由化後、既存電力会社以外の小売事業者のシェアが伸び悩んだ反省からも、早急な対応が望まれている。

第 2 に、既存電力会社間の活発な競争も求められる。従来の地域独占に縛られることのない、自由な電力取引に基づく競争促進が期待されている。競争を通してコスト削減が実現できるなら、広域市場の形成は国民経済上の厚生を改善する可能性がある。広域で費用を最小化する電力供給の組み合わせは、「広域メリットオーダー」と呼ばれる。

第 3 に、電力の安定供給を確保する上で、広域市場の形成が最善と考えられる。自由化導入前には、電力会社は地域内の需要の伸びを見越した予備力を持つ必要があつた。しかし、自由化以降、余剰供給力を減らす行動が定着し、予備力としての発電設備は減少する傾向にある。広域市場が構築され、各電力会社の区域を越えて電力が活発に取引されるようになれば、供給力は全国規模で安定化する。

小売部分自由化以降、従来からの既存電力会社 (一般電気事業者) に加え、パワー・プロデューサー・アンド・サプライヤー (PPS) と呼ばれる新規参入者 (特定規模電気事業者) が、発電と小売供給事業を行う。自社の送配電網を持たない PPS は、既存企業の送配電設備を利用するため、送配電網に

アクセスする上で公平性・透明性の確保が必要であつた。会計分離の下、2004 年に新設された中立機関である電力系統利用協議会 (ESCJ) により広域運用のルール策定と監視が行われてきた⁽⁸⁾。

ESCJ は電気事業法に基づく「送配電等業務支援機関」であり、経済産業大臣の指定を受ける民間主導の中間法人として発足し、2005 年 4 月から本格的な業務を開始した。その主要任務はルールの策定・監視と紛争時の斡旋・調停であつた。具体的には設備形成、系統アクセス、系統運用、情報開示についてのルール策定と監視が含まれた。実際には系統運用の責任は既存電力会社にあつたので、ESCJ は各社の系統運用部門と緊密な情報交換をしてきたが、15 年に解散し新組織として電力広域的運営推進機関が設立された。

3.2.4 電源確保と流通設備の整備

広域的な電源の活用に必要な送配電網の整備と、平常時・緊急時の需給調整機能の強化を目的として、2015 年 4 月に電力広域的運営推進機関 (OCCTO) が設立された。広域系統整備計画は、表 3.2.1 の通りだが、国が提起者となる場合もある点に特徴がある。OCCTO の業務内容には、以下の点が含まれる。①需給計画・系統計画を取りまとめ、周波数変換設備、地域間連系線等の送電インフラの増強や区域 (エリア) を超えた全国大での系統運用等を図る。②平常時において、各区域 (エリア) の送配電事業者による需給バランス・周波数調整に関し、広域的な運用の調整を行う。③災害等による需給ひっ迫時において、電源の焚き増しや電力融通を指示することで、需給調整を行う。④中立的に新規電源の接続の受付や系統情報の公開に係る業務を行う。

東日本大震災以降、原子力発電の停止により電源不足が問題となり、広域電力取引の重要性は競争促進から電源確保にシフトした。それは 2016 年 3 月に公表された「広域系統長期

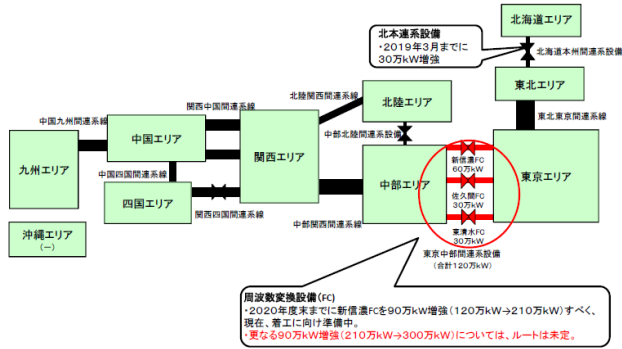


図 3.2.4 電力連系線と周波数変換設備

(出所：総合資源エネルギー調査会基本政策分科会、電力需給検証小委員会、第 9 回会合、資料 6 p.2. (2015 年 4 月 3 日))

表 3.2.1 : 計画策定プロセスの開始

提起者等	計画策定プロセスを開始する場合
広域機関	次のア) 又はイ) の観点に基づく送配電等業務指針で定める検討開始要件に該当すると認めた場合
	ア) 安定供給 大規模災害等により、複数の発電機の計画外停止その他供給区域の供給力が大幅に喪失する事態が発生した場合において、供給区域間の電力の融通により安定供給を確保する観点
電気供給事業者	イ) 広域的取引の環境整備 現に発生し又は将来発生すると想定される広域連系系統の混雑を防止し、広域的な電力取引の環境を整備する観点
	次のア) からウ) のいずれかの観点に基づく広域系統整備に関する提起があり、送配電等業務指針に定める検討開始要件に該当する場合
	ア) 安定供給 大規模災害等により、複数の発電機の計画外停止その他供給区域の供給力が大幅に喪失する事態が発生した場合において、電力の融通により安定供給を確保する観点
	イ) 広域的取引の環境整備 個別の広域的な電力取引に起因する広域連系系統の混雑を防止し、広域的な電力取引の環境を整備する観点
国	ウ) 電源設置 特定の電源の設置に起因した広域的な電力取引の観点
	国から広域系統整備に関する検討の要請を受けた場合

方針「中間報告書」でも明らかにされた⁽⁹⁾。同報告書の「はじめに」で、電源確保とともに電力流通設備の整備が不可欠である点、再生可能エネルギーの導入を促進する観点から電力系統の整備が課題となっている点、流通設備への投資が増大することにより電気料金が上昇するが、それをできるだけ抑制する必要がある点が示された。

まず第1に、電源確保と電力流通設備の整備に関して、東日本大震災による大規模電源の被災とその後の原子力発電所の再稼働問題により、全国的に供給力が不足している点が指摘された。東西の周波数変換設備や連系線の運用容量の制約などにより、国民生活に大きな影響が及んだ点が言及された。従って、適切な信頼度を確保し続けるために、電源の確保と電力流通設備の整備が不可欠であることが再認識された。

第2に、再生可能エネルギーの導入と電力系統の整備に関して、2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画を踏まえ、15年7月には経済産業省で「長期エネルギー需給見通し」が公表された点が確認された⁽¹⁰⁾。次に、長期エネルギー需給見通しにおいて、電力の需給構造について安全性、安定供給、経済効率性及び環境適合に関する政策目標を同時達成する中で、徹底した省エネルギー（節電）の推進、再生可能エネルギーの最大限の導入、火力発電の効率化を進め、原発依存度を低減することが基本方針となっている点が紹介された。更に、再生可能エネルギーを促進する点で電力系統の整備が課題であり、広域的運用の強化と低廉な電源の活用が求められた。

第3に、流通設備への投資増大が料金上昇を招くので、その抑制も必要であると考えられた。2012年7月から固定価格買取制度により、太陽光発電などの稼働率の低い電源が急増した点、16年4月以降、小売全面自由化に伴い電源の立地や計画の見通しが立てにくくなった点、効率的な電力系統の計画策定が従来よりも困難となった点などが明らかにされた。長期エネルギー需給見通しでは、電力需要増加を見込む中、省エネルギーを推進し、30年度時点の電力需要を13年度と同レベルまで抑えることを想定しているが、流通設備の投資は増える。将来、電気料金の上昇を抑制する点から効率的な設備形成が求められる。

既に電力市場に競争が導入されているが、何らかの投資回収メカニズムに基づき長期的観点から供給力と送電容量を確保する必要がある。安定供給のために広域連系線が重要であ

るが、停電時の影響が連鎖的に拡大する危険性がある点を考慮すると、計画的な設備形成を前提として、系統運用の監視も極めて重大な業務となる。OCCTOにより広域系統長期方針が公表されるが、今後の活動は自由化と安定供給を両立させる点から注目される。

3.2.5 環境変化と新しい政策目標

2011年の東日本大震災に伴う津波により、東京電力福島第一原子力発電所で原子炉がメルトダウンに至る大事故が起きた。同年夏のピーク時には東京と東北において、電気事業法第27条に基づき計画停電が実施されることになった。その後、すべての原発についてストレステストや地層調査などの安全面の審査が続けられてきた。既に、一部の設備は再稼働されているが、多くの原発はまだ停止している。

電力事業を取り巻く環境は震災により大きく変化したので、電力政策の目標とプライオリティを見直す必要がある。それらを整理すると、表3.2.2のように示される。震災前には「資源小国」が制約条件として重視されてきた。自由化の進展に伴い、新規参入の促進と料金の引下げが追求されながらも、安定供給の確保が重視されていた。さらに、温室効果ガスの排出量抑制の観点から、低炭素社会の実現も政策目標に含まれた。

震災後は、制約条件として「原発停止」が付加された点に注意を払い、適切な政策が追求されるべきである。福島原発事故への損害賠償と廃炉作業の継続、東京電力の企業としての存続が重要な項目となった。同社の健全な経営のためにも、福島第一原子力発電所に関する公的負担の制度を確立し、長期観点から廃炉作業を進めていく方針が求められる。

電力改革の政策目標は、自由化推進と低炭素社会実現から福島原発の事故収束と供給力確保にシフトしてきた。2020年に実施される発送電の法的分離は、競争条件の整備としての効果は期待できるが、料金低下を保証するものではない。また供給力確保については、電源多様化に加えてデマンドレスポンスやネガワット取引も重視されている⁽¹¹⁾。しかし、大規模電源となるのは火力であり、その燃料が長期契約に基づき調達されている点から、新規参入者が短期で設備を稼働するとは考えにくい。火力発電の燃料となるLNGを確保するためには、上流部門の開発と大型タンカー用の港湾整備が不可欠である。

表 3.2.2：東日本大震災前後の政策比較

制約条件		政策目標	実現手段	プライオリティ	長期的政策・戦略
震災以前	資源小国	安定供給の実現	ベストミックス達成	原発推進	インフラ輸出の展開
		新規参入の容認	アンバンドリング	会計分離	取引所取引の活性化
		料金引下げ	小売供給分野の自由化	部分自由化	全面自由化
		低炭素社会の実現	再生可能エネルギー促進	送電線接続の透明化	スマートグリッドへの投資
震災以降	原発停止	原子力損害賠償	原子力損害賠償・廃炉等支援機構	被災地支援の継続	費用負担の再検討
		東京電力の存続	資金調達・収支改善	福島第一原発の公的管理	組織再編と収益確保
		原発再稼働	安全審査の徹底	地元合意の促進	運転・廃炉の技術継承
		電力供給力の確保	電源多様化の推進	火力発電の充実	タンカー用の港湾整備
		料金値上げ抑制	公共料金の見直し	総括原価の見直し	ブライスカップの導入
		日本経済の衰退防止	アジア経済圏の確立	協調的資源外交	国際連系線の拡充

小売料金に関しては、自由化以前には総括原価方式に基づき決められていた。それに対して、自由化以降の新規契約については規制を受けないが、燃料費の高騰、再生可能エネルギーの固定価格買取制度に伴う負担、原子力損害賠償・廃炉等支援機構の一般負担金など、小売料金の上昇につながる要因が多い。今後、小売料金の抑制を狙って、プライスキップ規制のようなインセンティブ規制を適用する選択肢もある。

供給力は一部の原発再稼働や再生可能エネルギーの普及を通して改善できるが、長期的視点から韓国やロシアとの国際連系線やパイプラインにも期待が寄せられている。欧州において、連系線やガスパイプラインが広域的に整備されている点は参考になる。今後、アジアとの国際連系線を視野に入れて、日本経済の衰退を避ける必要がある⁽¹²⁾。

3.2.6 おわりに

2016 年 4 月に小売全面自由化が開始され、「地域独占」という概念はまったく通用しなくなった。既存電力会社と新規参入者の間で料金競争が展開されているところに、17 年 4 月からガス小売全面自由化も始動したので、顧客争奪戦が激化している。電力とガスに加え、テレコムや商業施設のポイントなどの特典が付与されることもある。セットで割安感が強調されているが、料金メニューが複雑化しているために、必ずしも電力料金が低下したかどうかを容易に理解できない。

電力自由化が経済活性化に寄与すると言われるが、電力需要が鈍化している場合にはパイの奪い合いになり淘汰現象が起こり、活性化につながらない。資源小国のわが国では、輸入燃料価格の変動リスクに加え、自由化以降の固定価格買取制と震災後の原子力損害賠償・廃炉等支援機構の一般負担金により、料金値下げは難しい状況にある。更に、東京電力福島第一原子力発電所の事故をめぐる損害賠償と廃炉措置問題が、将来の不確実性を高めている。公的負担のスキームを確立した上で、自由化の枠組みを再構築する必要がある。

参考文献

- (1) 電力システム改革専門委員会：「電力システム改革専門委員会報告書」p.3, (2013 年 2 月)
- (2) 電力システム改革専門委員会：「電力システム改革の基本方針 ―国民に開かれた電力システムを目指して―」(2012 年 7 月)
- (3) 電力システム改革専門委員会：「電力システム改革専門委員会報告書」p.55, (2013 年 2 月)
- (4) 経済産業省資源エネルギー庁：「小売全面自由化に関する進捗状況」(2016 年 8 月)
- (5) 経済産業省資源エネルギー庁：「電力小売全面自由化の進捗状況」p.14, (2017 年 4 月)
- (6) 経済産業省資源エネルギー庁：「電力小売全面自由化の進捗状況」p.1, (2017 年 4 月)
- (7) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会，電力需給検証小委員会，第 9 回会合，資料 6 p.2, (2015 年 4 月 3 日)
- (8) 野村宗訓・草薙真一：『電力・ガス自由化の真実』エネルギーフォーラム，p.32, (2017 年)
- (9) 電力広域的運営推進機関：「広域系統長期方針 中間報告書」(2016 年 3 月)
- (10) 経済産業省：「長期エネルギー需給見通し」(2015 年 7 月)

- (11) 経済産業省：「ダイヤモンドリソース（ネガワット取引）ハンドブック」(2016 年 12 月)，山内弘隆・澤昭裕編：『電力システム改革の検証』白桃書房，pp.151-153, (2015 年)
- (12) 野村宗訓・草薙真一：『電力・ガス自由化の真実』エネルギーフォーラム，pp.80-83, (2017 年)

3.3 イギリスにおける電力自由化後の実態と課題

3.3.1 はじめに

イギリスでは1990年代に、所有上の発送電分離、小売全面自由化、料金規制の撤廃が実施された。電力取引は2001年まで強制プール制であったが、その後、相対取引も認められることになった。2005年にイングランド・ウェールズとスコットランドの市場は統合され、送電会社であるナショナル・グリッド社の子会社 (NGET) が全国の系統運用者としての役割を果たしている⁽¹⁾。現在の電力市場は、図 3.3.1 のように示される⁽²⁾。

電源選択や設備投資は事業者の裁量に委ねられているので、一国としてのベストミックスの維持は難しくなっている。最終利用者の選択肢は広がったが、ビッグ 6 (Centrica, EDF, E.ON, RWE npower, Scottish Power, Scottish and Southern) の料金に顕著な違いはなく、メリットが大きいとは言えない。むしろ、近い将来に電源不足とそれに伴う料金上昇が起きるために、その対策が必要と考えられる。

3.3.2 電源構成の変化と電力市場改革の推進

電力自由化後の電源構成の変化は図 3.3.2 の通りである⁽³⁾。石炭とガスが主たる電源となっているが、今後、大型燃焼施設に関する EU 指令 (Large Combustion Plants Directive) ⁽⁴⁾ に基づき石炭火力は閉鎖しなければならない。更に、原子力設備の多くは老朽化のために2014年～23年までに停止する⁽⁵⁾。図 3.3.3 の通り 2013 年と 14 年の比較から、石炭と原子力の比率が低下し、ガスと再生可能エネルギーが増えてきていることがわかる⁽⁶⁾。

供給力不足に関しては、電力市場改革 (EMR) の中で安定供給の手法が模索されてきた⁽⁷⁾。新しい制度として既に、差額契約に基づく固定価格買取制 (FiT CfD) の導入と容量市場 (キャパシティ・マーケット) の創設が決められた。政府は

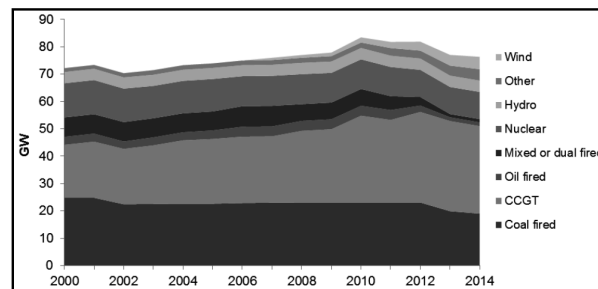


図 3.3.2 電源構成の変化 (2000 年～2014 年)

(出所: DECC⁽³⁾ (2015), p.121.)

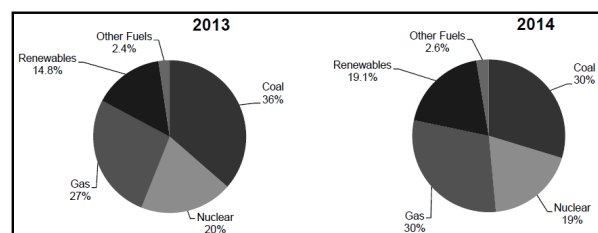


図 3.3.3 電源構成の比較 (2013 年・14 年)

(出所: DECC⁽⁶⁾ (2015), p.119.)

風力について 15 年間の固定価格買取制を認めているほか、原子力に関しても事業者リスクを軽減するために、差額契約を併用した上で 35 年にわたる買取制を導入した。これらの制度は発電事業者の投資インセンティブを促すものの、自由化当初に想定されていたような市場原理に依存する政策とは明らかに異なる。

3.3.3 国際連系線強化による安定供給の模索

イギリスでは安定供給を実現するために電源開発のみならず、国際連系線の拡充を重視している。2020 年までに連系線能力の強化を通して、料金低下を実現する方針が明らかにされた⁽⁸⁾。現実の石炭火力の閉鎖と原子力設備の老朽化を考慮すると、迫りくるエネルギー危機を回避するためには、連系線の増強は不可欠である。

国際連系線の現状と将来計画は、図 3.3.4 に示されている⁽⁹⁾。EU 域内でも連系線強化は、電源多様化と市場連動の観点から推進されてきた。イギリスはオランダやノルウェーなど 7 カ国と交渉を続けているので、事務的なコストもかかるが、供給力確保を実現できる点から、この取組みは評価できる。

3.3.4 配電会社の自然災害対応と顧客満足度

配電と小売供給は、ライセンスにより完全に分離されている。配電会社は 14 社だが、所有者別で見ると図 3.3.5 の通り 6 社になる。現在、独仏の電力会社の他、スペイン、米、オーストラリア、香港などの外国企業も株式保有を通して関与している。唯一のイギリス企業 SSE パワー・ディストリビューション (SSE) は、地理的に離れたスコットランド北部とイングランド南部の 2 エリアを持つ。ロンドンなど 3 エリアを持

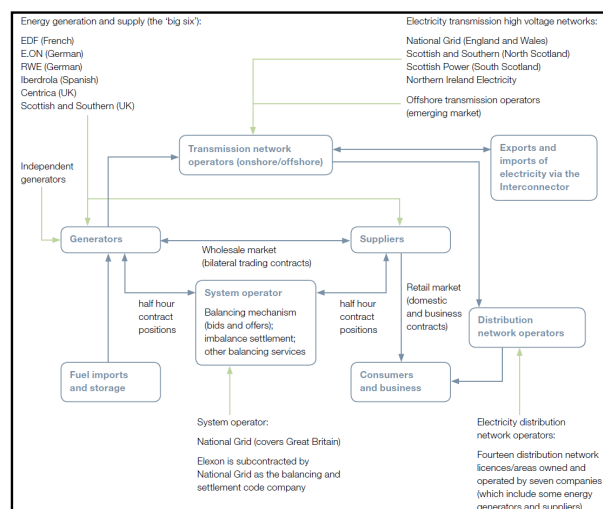


図 3.3.1 イギリスの電力事業者と取引関係

(出所: NAO⁽²⁾ (2012), p.8.)

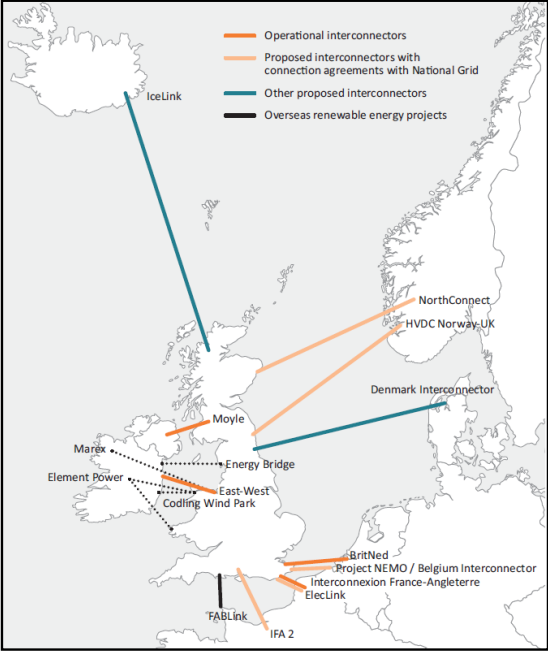


図 3.3.4 イギリスの国際連系線
(出所：Moore⁽⁹⁾ (2014), p.7.)

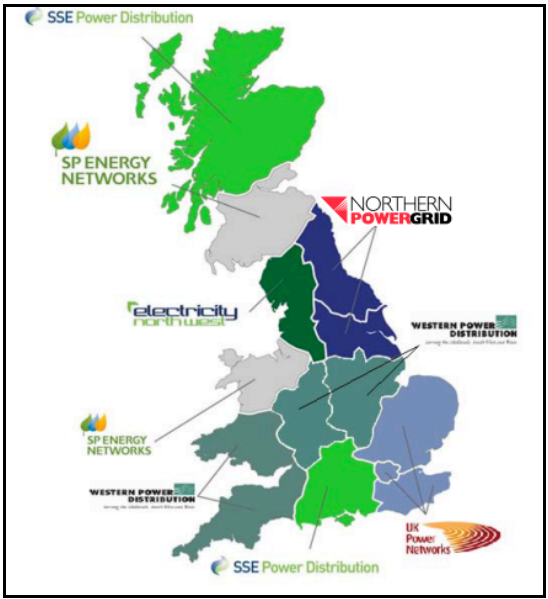


図 3.3.5 イギリスの配電会社マップ

(出所：Utilitiessavings,

<http://utilitiessavings.co.uk/resources/electricity-distributors/>)

つ UK パワー・ネットワークス (UKPN) は、フランス EDF から香港の長江インフラに売却された。

近年、強風や豪雨、洪水などの大規模な自然災害が多発しているために、停電事故とそれに伴う顧客への補償が注目されている。2013 年 12 月末にイギリス全土を襲った嵐の影響で、200 万人を超える利用者が停電の被害を受けた。その 95% が 24 時間以内に復旧したが、約 1 万 6 千世帯の復旧には 48 時間も要した。特に SSE と UKPN の地域で、約 500 世帯が 5

日以上にも及ぶ停電を強いられたことが問題視され、エネルギー規制当局 (OFGEM) は事後調査に乗り出した⁽¹⁰⁾。

OFGEM の調査において配電会社を実施すべき措置として再確認されたのは、保線管理の充実、精度の高い天候予測、人員の適正な配置など、意外にも単純な内容であった⁽¹¹⁾。架線にダメージを与える樹木の伐採が停電防止の有効策になるという指摘はわかりやすいが、実際には送電会社でも人件費削減の点から保線管理が軽視されているのも事実である。

一般家庭の利用者は自由化以降、多様な料金メニューを提示する小売会社の選択に集中しすぎて、事故時の対応について考慮することは少ない。物理的な設備の修復を行うのは配電会社だが、顧客に周知する手法は限られている。依然、配電会社は地域独占を維持しているために、小売供給会社のように顧客自らが選ぶ対象にはなっていない。多くの利用者が配電会社の直面する問題点について認識を深め、今後もサービス向上のための投資が実現されているのかに関心を払うべきであろう。

3.3.5 小売供給市場の競争と「困惑独占」

小売供給会社は 20 社以上存在するが、全国市場ではビッグ 6 のシェアが圧倒的に高い。表 3.3.1 と表 3.3.2 から、それ以外の小規模な供給事業者は電気・ガスともに、個別に見ると 1~3% のシェアしかないことがわかる⁽¹²⁾。

家庭用電気・ガスの小売料金は、図 3.3.6 のように趨勢的に上昇傾向にあり、2013 年は 05 年と比較すると電気では 1.5 倍、ガスで 2 倍以上の値上げとなった⁽¹³⁾。多くの需要家は小売供給会社から電気とガスをセットで購入する同時供給契約 (デュアル・フュエル: Dual Fuel) を結んでいるが、2013 年の平均年間支払額は約 1,300 ポンドにも達する。

表 3.3.1 電力小売供給市場のシェア

(出所：Buckley and Moss⁽¹²⁾ (2014), p.15.)

	10%以上 の事業者数	3%以上 10%未満 の事業者数	1%以上 3%未満 の事業者数	ビッグ6 のシェア
2011年1月末	6	0	8	99.4%
2011年7月末	6	0	9	99.3%
2012年1月末	6	0	9	99.1%
2012年7月末	6	0	9	98.6%
2013年1月末	6	0	9	97.9%
2013年7月末	6	0	13	97.4%
2014年1月末	6	0	15	94.6%
2014年7月末	6	0	16	92.7%

表 3.3.2 ガス小売供給市場のシェア

(出所：Buckley and Moss⁽¹²⁾ (2014), p.16.)

	10%以上 の事業者数	3%以上 10%未満 の事業者数	1%以上 3%未満 の事業者数	ビッグ6 のシェア
2011年1月末	6	0	8	99.4%
2011年7月末	6	0	9	99.3%
2012年1月末	6	0	9	99.1%
2012年7月末	6	0	9	98.6%
2013年1月末	6	0	9	97.9%
2013年7月末	6	0	13	97.4%
2014年1月末	6	0	15	94.6%
2014年7月末	6	0	16	92.7%

OFGEM の調べでは、デュアル・フュエルの料金内訳は卸費用 42%, 小売供給費用 14%, 税引き前利益 9%, 送配電・ガス輸送費用 23%, 環境費用・社会的費用 7%, 付加価値税 5%となる⁽¹⁴⁾。小売供給会社は卸のコストについて、自らコントロールできるものではないと主張しているが、発電会社と垂直統合型で多角経営を進めているために、コスト配分と料金設定に不透明性が残ると厳しく批判されている。

自由化以降、各社はシェア維持のために新メニューで顧客の囲い込みを進めてきた。それは選択肢の増加という点で評価できるが、実際にスイッチングを促したかどうかは疑わしい。政策当局は「困惑独占」(confusopoly)という概念に注目している⁽¹⁵⁾。これはアメリカの作家で風刺漫画家でもあるスコット・アダムスによる造語だが、1997 年に出版された『ディルバート・フューチャー』というタイトルの本の中で使われた⁽¹⁶⁾。通信や金融業界の企業が複雑な料金体系を作り、顧客を故意に困惑させることを意味するが、エネルギー分野の自由化においても結果的に利用者が事業者を選びにくい状況を生む点が注目されている。

ビッグ 6 のデュアル・フュエルの料金動向は、図 3.3.7 の通りである。更に、6 社の過去の値上げ時期を見ると図 3.3.8 のように、ほぼ同時期に実施されてきた点が確認できる⁽¹⁷⁾。このようなカルテルに近い現状から、需要家側の不信感はあるばかりである。エネルギー会社が不当な利益を得ることのないように、透明度の確保された中で合理的な料金をつけるべきことが求められている⁽¹⁸⁾。欧州のシェールガス開発やロシアのエネルギー輸出などに不確実性が残る状況下では、政策当局の調査は国民の信頼を得るためにも重要な役割を担っている。

3.3.6 料金値上げは「政府の失敗」にも起因

自由化以降の料金上昇は、主として寡占的な事業者による複雑な料金メニューに原因があるが、実は政府の規制料金や新たな制度に基づく課金にも起因していることが明らかにされている⁽¹⁹⁾。2009 年～13 年についてのデュアル・フュエルの料金内訳と利益に着目すると、表 3.3.3 のように推移してきた⁽²⁰⁾。この期間の卸費用は 774 ポンドから 643 ポンドへと、131

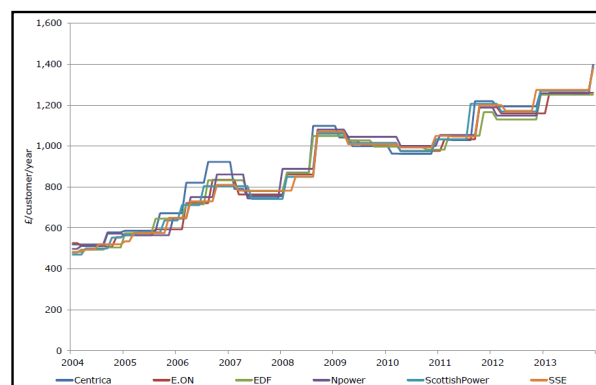


図 3.3.7 ビッグ 6 のデュアル・フュエルの料金動向
(出所：OFT, OFGEM and CMA⁽¹⁷⁾ (2014), p.65.)

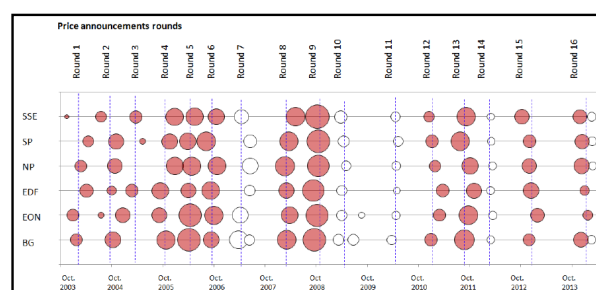


図 3.3.8 ビッグ 6 による料金値上げのタイミング
(出所：OFT, OFGEM and CMA⁽¹⁷⁾ (2014), p.67.)

ポンドも低下した。それに対して、発電・ガス生産と小売供給市場をつなぐ中間的な段階の送配電やガス輸送の費用と、再生可能エネルギーの購入義務や固定価格買取制の負担金を含む環境費用と社会的費用については、318 ポンドから 394 ポンドへと、76 ポンドも上昇していることがわかる。

ネットワークにあたる送配電とガス輸送の料金については、政府の規制を受けている。更に、政策費用に相当する再生可能エネルギーに対する支援金に関しては、民間の事業者が関与できるものではない。更に、付加価値税も外生的に決定される要素である。これらは前述した通り料金の 35%を占めるが、政府のコントロール下にあるにもかかわらず、値上げを引き起こしている点は軽視できない。

今後、電源ボリュームを確保し、電源多様化を推進する点から再生可能エネルギーのみならず、原子力発電についても

表 3.3.3 デュアル・フュエルの料金内訳と利益

(出所：OFGEM⁽²⁰⁾ (2015) に基づき筆者作成。)

(注) 数値はすべて 2014 年を基準として、物価上昇を考慮した上で調整されている。

	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
卸費用(£)	774	673	585	646	643
送配電費用・ガス輸送費用・ 環境費用・社会的義務費用(£)	318	329	320	373	394
小売り供給費用(£)	148	174	159	162	168
付加価値税(£)	62	61	55	62	63
総費用(£)	1,303	1,237	1,118	1,243	1,266
収入(平均利用者支払額)(£)	1,312	1,277	1,150	1,300	1,316
税引き前利益(£)	10	41	32	56	49
利益率(%)	0.7	3.2	2.8	4.3	3.7

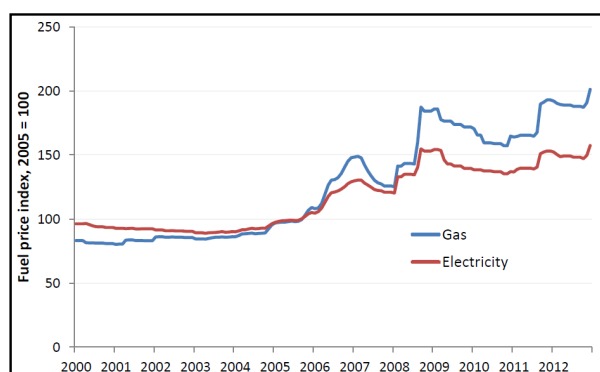


図 3.3.6 電気・ガス小売料金の推移
(出所：DECC⁽¹³⁾ (2013), p.9.)

差額契約に基づく固定価格買取制の負担金が加算されるので、上昇要因が増えることになる。解決策としては、政府・事業者・利用者などすべての主体が将来の長期エネルギー計画の策定に参画した上で、非化石燃料の導入量と負担額を明確にする必要があるだろう。更に、料金規制の見直しができるスキームを築くことも考慮する価値がある。

3.3.7 新型原子力をめぐる不確実性の増大

原子力専門会社 British Energy (BE) は、自由化後の卸料金低下によって採算割れに直面し、2002 年に公的資金が投入される事態に陥った。イギリス政府とフランス電力会社 EDF との間で数年にわたる協議が進められ、2008 年に BE は EDF の傘下に入ることが決まった。フランスの支援で難局は乗り切れたが、2030 年までに現行設備のほとんどが寿命を迎えるために、発電不足が懸念されている。

新型原子力の計画は、表 3.3.4 の通りであるが、現実にはどの案件も具体的な工程は提示されていない。①～③のプロジェクトは、EDF・Centrica, E.ON, RWE npower が中核になるはずであったが、リスクが大きいため EDF 以外の 3 社は撤退してしまった。その後、中国広核集団 (CGN)、日立製作所、東芝が参画し、それらの計画は継続されているが、競争市場での収益確保については慎重論も見られる。

①は EDF が推進するプロジェクトで、ヒンクリーポイントとサイズウェルの 2 地点で、フランス原子力大手 Areva の欧州加圧水型炉 (EPR) を建設する予定である。もともと Centrica が EDF のパートナーだったが、2013 年に撤退し、それに代わって CGN が参画している。出資比率は、EDF が 66.5%、CGN が 33.5% である。

②は日立が買収した Horizon のプロジェクトである。もともとドイツの E.ON と RWE npower のジョイントベンチャーで進められてきたが、この 2 社は自国の原発廃止に従い撤退した。2013 年に日立が継承し、日立 GE ニュークリア・エナジーの改良型沸騰水型軽水炉 (ABWR) が導入される予定である。

③は東芝傘下の NuGeneration (NuGen) によるプロジェクトである。もともとフランスのガス電力会社 GDF スエズ (2015 年に ENGIE と改称) とスペインの電力会社 Iberdrola の計画であったが、2013 年に Iberdrola が NuGen の全株式を東芝に売却した。東芝の子会社であるアメリカ Westinghouse (WH) の AP1000 (最新加圧水型軽水炉) の導入が予定されていた。しかし、2017 年に WH の経営が破綻したために、本計画は苦境に立たされている。東芝は GDF スエズの保有する NuGen の全株式を取得しなければならないが、東芝自らが経営悪化に直面しているために、先行きは不透明である。

④は中国 CGN が主導するプロジェクトである。上記①に CGN が参画することが決まった後に新たな計画として追加された。フランスの技術を取り込んだ中国製の加圧水型原子炉「華竜 1 号」(HPR1000) が導入される点で、他の計画とは異なる。プロジェクトの出資比率は CGN が 66.5%、EDF が 33.5% で、①とは逆の比率になっている。

表 3.3.4 イギリス原子力発電所 新型炉プロジェクト

プロジェクト・企業名	サイト・プラント名	地域	炉型	設備容量 (MWe)	着工 予定年	運転 予定年
① EDF Energy	ヒンクリーポイント C-1	サマセット	EPR	1,670	2019	2026
	ヒンクリーポイント C-2		EPR	1,670	2020	2027
	サイズウェル C-1	サフォーク	EPR	1,670	—	—
	サイズウェル C-2		EPR	1,670	—	—
② Horizon	ウィルヴァ・ニューウインド 1	ウェールズ	ABWR	1,380	2019	2025
	ウィルヴァ・ニューウインド 2		ABWR	1,380	2019	2025
	オールドベリー B-1	グロスタシャー	ABWR	1,380	—	2020年代
	オールドベリー B-2		ABWR	1,380	—	2020年代
③ NuGeneration	セラフィールド・ムーアサイド 1	カンブリア	AP1000	1,135	2019	2025
	セラフィールド・ムーアサイド 2		AP1000	1,135	—	2026
	セラフィールド・ムーアサイド 3		AP1000	1,135	—	2027
	ブラッドウェル B-1		HPR1000	1,150	—	—
④ 中国広核集団 CGN	ブラッドウェル B-2	エセックス	HPR1000	1,150	—	—

(出所：World Nuclear Association 公表資料に基づき筆者作成。)

3.3.8 おわりに

イギリスの経験から、いくつかの示唆が得られる。まず第 1 に、発送電分離の実施後に安定供給を考慮した体制が崩れてしまった点である。発電市場では再生可能エネルギーを中心に小規模な参入者が現れたものの、石炭火力の閉鎖と原子力発電の停止によって電源不足の問題が表面化した。その対応策として、計画的に供給が確保できるように電力市場改革が進められている。それと同時に、国際連系線の拡充によっても安定供給が実現できるように、隣接する諸国と協力関係を深めている。

第 2 に、自由化導入後の小売料金は値上げに反転するだけでなく、上昇傾向が長期的に続く事態もあり得る点が明らかになった⁽²¹⁾。燃料価格が高騰する状況下においては、事業者が透明性の確保された中で料金を設定しなければならない。更に、政府と事業者は料金の内訳を正確に把握した上で、需要家に対して理解を求める必要がある。もちろん料金抑制策が望まれるが、値上げを回避できない時に、その理由を利用者に対して公明正大に説明できる環境を整えておくことも重要であろう⁽²²⁾。

第 3 に、再生可能エネルギーを中心とする非化石燃料の普及・支援の観点から、固定価格買取制は評価できるが、それは「環境費用・社会的費用」として最終利用者の料金を押し上げる要因にもなっている。もちろん低炭素社会実現のためには肯定的な見解も見られる。しかし、永続的な料金値上げは回避されるべきであるので、負担方法についての合意形成を踏まえた政策形成が求められることは言うまでもない。

第 4 に新型原子力のプロジェクトは、すべて外国企業に依存しているが、建設コストや廃炉問題の点から計画の実現は容易ではない。2016 年 6 月 23 日に国民投票によりイギリスの EU 離脱 (Brexit) が決まった点から、今後のエネルギー政策は不安定化すると考えられる。EU 離脱はこれまでにイギリスが築いてきた EU 加盟国との関係を悪化させる要因になる。フランス EDF が撤退するとの意思表示はしていないが、将来的に不確実性が残っていると看做される⁽²³⁾。この事例は、電力のようなインフラ産業に外国資本を入れるメリットとデメリットについては、慎重に判断すべきことを示唆している。

参考文献

-
- (1) OFGEM, National Grid Electricity Transmission System Operator Incentives from 1 April 2011, p.3 (2011)
 - (2) NAO, Department of Energy and Climate Change: The government's long-term plans to deliver secure, low carbon and affordable electricity, p.8 (2012)
 - (3) DECC, Digest of United Kingdom Energy Statistics, p.121 (2015)
 - (4) Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants (2001)
 - (5) 野村宗訓:『エナジー・ウォッチー英国・欧州から 3.11 後の電力問題を考える』, 同文館出版, pp.20-21 (2012)
 - (6) DECC, Digest of United Kingdom Energy Statistics, p.119 (2015)
 - (7) DECC, Electricity Market Reform: Policy Overview (2012),
DECC, Consultation on the draft Electricity Market Reform Delivery Plan (2013),
DECC, Electricity Market Reform: Consultation on Proposals for Implementation (2013),
DECC, Electricity Market Reform: Delivering UK Investment (2013),
DECC and OFGEM, Synergies and Conflicts of Interest arising from the Great Britain System Operator delivering Electricity Market Reform (2012)
 - (8) DECC, More interconnection: improving energy security and lowering bills (2013)
 - (9) S Moore, Getting Interconnected: How can interconnectors compete to help lower bills and cut carbon?, Policy Exchange, p.7 (2014)
 - (10) OFGEM, The December 2013 storms review – impact on electricity distribution customers (2014)
 - (11) OFGEM, The December 2013 storms review – impact on electricity distribution customers, pp.13-14 (2014)
 - (12) R Buckley and A Moss, Competition in British household energy supply markets: An independent assessment, Cornwall Energy (2014)
 - (13) DECC, Estimated impacts of energy and climate change policies on energy prices and bills, p.9 (2013)
 - (14) OFGEM, Charts: Outlook for costs that make up energy bills, Breakdown of a dual fuel bill (2015)
 - (15) OFT, An introduction to Confusopoly (2013),
OFT, Competition in public services (2013),
UK Regulators Network, Consumer engagement and switching (2014)
 - (16) S Adams, The Dilbert Future, HarperBusiness (1997)
 - (17) OFT, OFGEM and CMA, State of the Market Assessment, pp.65-68 (2014)
 - (18) OFGEM, The Retail Market Review – Implementation of Simpler Tariff Choices and Clearer Information (2013)
 - (19) P Bolton, Components of an energy bill, Standard Note: SN/06751 (2014)
 - (20) OFGEM, Charts: Outlook for costs that make up energy bills, Chart data as of April 2015 (2015)
 - (21) P Bolton, Energy Prices, Standard Note: SN/SG/4153 (2013),
OFGEM, Electricity and Gas Supply Market Report (2010),
OFGEM, The Retail Market Review -Findings and initial (2011),
OFGEM, The Retail Market Review -Updated domestic proposals (2012)
 - (22) 野村宗訓:「電気料金の規制手法～自由化の進展に伴う再考～」『電気評論』No.613, p.71, (2015 年 5 月)
 - (23) 野村宗訓・草薙真一:『電力・ガス自由化の真実』エネルギーフォーラム, pp.77-80, (2017 年)

3.4 電力システムの信頼性維持の課題

3.4.1 はじめに

東日本大震災とそれに伴う原子力事故以降、エネルギーに関連する環境が激変した。首都圏で2週間に亘る輪番停電を経験するなど需給逼迫が続き、エネルギーの供給や利用に対する従来の枠組みに対して疑問が投げかけられた。そして、問題を解決する手段として、従来のエネルギー政策の抜本的な見直しに伴い、電力システム改革が進行した。この流れの中で、再生可能エネルギーの促進^{(1)~(3)}は重要な位置を占め、固定価格買取制度（FIT）が施行され、特に太陽光発電など天候に依存する自然変動電源の導入が加速した。現在、①広域系統運用の拡大、②小売及び発電の全面自由化、③法的分離の方式による送配電部門の中立性の一層の確保という3段階の電力システム改革が進行中である。現在は、この第2段階にあり、2015年4月に電力広域的運営推進機関（OCCTO）が設立され、2016年4月に小売全面自由化が実施された。

電力システム改革の背景には、「安定供給の確保」、「電気料金の抑制」、「需要家選択や事業機会の拡大」といった目的があるが、これらは電力システムが健全に機能することが前提になる。電力システムは、発電所で電気を発生し、送電線で需要家に届けるという単純でわかりやすいシステムであるが、一方で人類の作った最大級の複雑システムといわれ、その複雑さのため様々な不安定要因を内在させている。従って、将来にわたって安定に電気を使えるよう、社会インフラとしてのシステムの信頼性をいかに維持しているかを理解し、リスクについても認識しておきたい。

本稿では、現在の電力システム環境の大きな変化として、再生可能エネルギーの大量導入を考え、システムの信頼性を維持するための考え方や手法⁽⁴⁾⁽⁵⁾について解説し、将来に亘って電力システムという社会インフラを維持していくための課題や方策について、最近の我々の研究^{(6)~(23)}なども交えて考えてみたい。

3.4.2 電力システムの信頼性維持

3.4.2.1 電力システムの信頼性

（1）システムの信頼性 一般にシステムの信頼性とは、そのシステムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たす性質（すなわち正常動作）を意味する広義の工学的用語である。また信頼度とは確率的・統計的視点で正常動作の度合いまでを評価する際に用いる用語である。電力システムは電力供給を目的とするシステムであるので、電力システムの信頼性は供給支障（停電）の少なさにより評価される。例えば、日本では2015年度、需要家あたりの停電が年平均で0.13回、21分ほどである⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。これらの指標は、計画停電を除外するなど国や地域により統計方法が異なり直接的な比較は難しい場合があるが、日本は国際的にも高い信頼性を維持しているといえる。ちなみに、震災の2011年度は停電回数0.94回、514分であった。

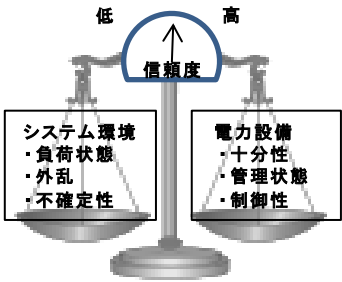


図 3.4.1 電力システム信頼性の決定要因

表 3.4.1 環境に対する設備の相対的レベル

レベル	当該レベルの設備での電力システム運用
高	システム環境に対し全く不安定性が発生しない。
中	適正な運用・制御を実施すると、不安定性を回避できる。
低	適正な運用・制御を実施しても、不安定性を回避できない状況に遭遇し得る。
不適	連続運用ができない。

なお、電力システムに特化した議論を行う際には、信頼性の度合いとは別に、慣例的に「供給信頼度」、「信頼度」といった用語が広く用いられているので、本稿でも同様の趣旨でこれらの用語を用いる。

（2）配電系と基幹系の信頼性 電力システムの信頼性維持の目的は、停電の頻度や時間を低く抑えることである。停電には、需要家に近い配電線での故障とシステムの基幹部分での故障に起因するものがある。システムを木に例えれば前者は枝葉の部分、後者は幹に相当する。2013年度の統計では、配電線事故による供給支障が90.3%、需要設備事故が3%、これ以外が基幹系の事故（送電線2.4%、変電所0.4%、発電所0.4%、系統外部事故3.5%）であった⁽²⁷⁾。

統計的には前者の供給支障事故が9割以上を占めるが、これは広範囲に広がる配電線が自然災害等の影響を受けやすく、加えて確率的に発生する事故に対して、事故点の近傍や下流部分がどうしても停電を回避しにくい事による。

一方、基幹部分での事故は大規模な供給支障に直結するので、後述する手法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾で信頼性を維持している。現在、基幹系事故による供給支障の割合が小さいのは、後に説明するように現状の信頼性維持方策が機能しているためである。しかし、この基幹系の信頼性は電力システムの環境に影響を受けやすいため、今後の環境変化には特に注意していく必要がある。特に大規模停電が発生すると、社会・経済の混乱を招き、国民の生命が脅かされるなど甚大な社会的損失を伴う。したがって、基幹系における信頼性維持は、想定される事故や外乱に対して、大停電への波及をくい止めるという基本概念に基づいている。以下ではこの点について述べる。

（3）信頼性の決定要因と設備のレベル 一般に、電力システムの信頼性は様々な要因によって変化するが、主に電力設備と周辺環境のバランスによって決まるといって良い（図3.4.1）。すなわち、設備投資や維持費を増やすほど信頼性は高

くなり、同じ設備であっても負荷需要が増し外乱が大きくなるほど低下する。これは後述するシステムの安定限界が、概ねこのバランスに基づいて決まるためである。そして、このバランスに多少なりとも影響するのが、運用・制御技術である。ここでは厳密性には欠けるが、電力システムの基本的な性質を理解するため、電力システム的环境に対する相対的な設備のレベルを表 3.4.1 のように分類してみる。例えば、大きな設備投資により、「高」レベルの設備を維持するなら、多少乱暴なシステム運用をしても不安定な状況には至らないが、「中」レベルに設備の状態が低下すれば、安定性に留意したシステム運用が必要になる。さらに、「低」レベルに下がれば、どのようにうまく運用したとしても、物理的に不安定性を回避できない状況に遭遇し、「不適」レベルでは連続運転すら不可能な状況に至る。通常、先進国のシステムは「中」レベルであり、停電を繰り返す途上国のシステムは「低」レベルといつてよい。

現在わが国では設備維持のためのコストが抑制されている。また、太陽光発電の導入は、天候に依存して発電量が大きく変化するなど外乱を増大させている。そして、安定な既存電源の利用率が下がり、廃棄されることで安定性や制御性を低下させている。これらはいずれも図 3.4.1 のバランスにおいて、信頼性を低下させる要因である。したがって、効果的な対策を講じなければ、環境に対する設備の相対的レベルは必然的に低下する。

3.4.2.2 信頼性に関わる要因と信頼性維持の方法論

(1) 電気の品質 ここでは、電気の品質について、簡単に述べておきたい。一般に、電気の品質は主に以下の 3 つの要素で決まる。

- (a) 電圧
- (b) 周波数
- (c) 停電時間、停電頻度

上記の(a)と(b)は、電気製品が正常に動作しなくなる、照明がちらつく、寿命が短くなるなど、電気を使用する際に問題となる品質である。実生活においてこのような電気の品質を気にすることはあまりなさそうであるが、近年は太陽光発電の増加などに伴い、これらが改めて重要視されつつある。また、上記(c)に関して、必要時に電気を使えることは品質の重要な要件であり、これは本文の主題である。

(2) 電力システムの安定限界 例えば航空機において積載量を増加させていくと最終的には飛行できなくなるように、電力システムにおいても物理的な安定限界がある。そして、システムの信頼性は物理的な安定限界と密接に関係している。電力システムには、重要な 5 つの不安定要因（周波数変動、安定度、電圧安定性、過負荷、電圧変動、表 3.4.2 参照）があり、全ての要因が安定でなければシステムを運用できない。安定な運用状態において電力需要や発電機の出力などを増加させていくと、最終的にはいずれかの安定限界に到達する。

一般に想定するシステム環境で、安定性を維持できるかど

表 3.4.2 電力システムの不安定要因

不安定要因	説 明
周波数変動	需要と供給のバランスが崩れた際に周波数（発電機の回転速度）が維持できなくなる不安定性。
安 定 度	発電機間の振動の安定性。定常状態における安定性（定態安定度）や脱調と呼ばれる不安定現象に関する安定性（過渡安定度）がある。
電圧安定性	電力潮流の最大電力点（静的分岐点）に対応する安定限界。安定限界付近で急激に状態が変化（電圧が低下）する。
過 負 荷	電力機器や送電線の運用限界を超える負荷（電流）状態。
電圧変動	系統運用上、許容される電圧の上下限。

表 3.4.3 電力システムの外乱の例

外 乱 要 因 (事故・事象)	対応手段 (事象それ自体は回避不能)
落雷・自然災害	自動遮断, など
機 器 故 障	定期検査（停電作業等の維持管理）
ヒューマンファクタ	訓練, 教育, 組織, 安全システム, 他

うかを調べるためには、電力システム解析（数値計算およびシミュレーション）を実施して、それぞれの不安定要因に対して個別に安定条件を評価する必要がある。特に重要なものについては後の節で説明する。

(3) 外乱 電力システムは落雷や突発的な設備故障などの外乱に常にさらされており（表 3.4.3）、外乱を受けた際の安定限界が特に重要である。機器故障やヒューマンファクタによるものなど、対応可能なものについては発生頻度を低下させる設備の維持管理や訓練など様々な対策が施される。しかし、電力システムの外乱は確率的に発生し、完全に回避することはできない。例えば、2003 年の北米での事故や 2006 年の欧州での事故では、初期の事故や外乱に対してオペレータの対応が必ずしも適切ではなく、系統内で過負荷が発生し、その後の状態悪化の連鎖に繋がっている⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾。また、1987 年の東京での停電は、想定外の需要の増加により、電圧安定性の限界付近に到達してしまったことによるものであった⁽³¹⁾。

(4) 信頼度基準 これまで世界で経験している大停電は、最初に切掛けとなる事象があり、その結果、上記の安定限界に近づき、系統保護リレー動作などの自動的な遮断機動作、系統操作や制御でさらなる状態悪化を招き、系統崩壊に至っている。すなわち大停電には、最初の事象が次の事象を引き起こす形でカスケード的に進展するという共通のパターンがある。そこで、大停電を回避する手法として、予め外乱を想定して、それに耐えられるよう信頼度基準を設定する。世界的に広く採用されているのが、N-1 信頼度基準である。

N-1 信頼度基準とは、電力系統内の重要な N 個の要素（発電機、送電線、変圧器など）のいずれか 1 つに故障が発生することを予め想定し、必要な準備をしておくことである。想

表 3.4.4 信頼度維持の手続き

手順 A) 需要等の予測に基づき運用状態を推定。
手順 B) 信頼度基準に基づく想定故障を仮定し、指定した運用状態に対し安定性を解析。(想定故障解析)
手順 C) 安定 ⇒ 信頼度基準を達成 不安定 ⇒ 対策を検討・実施

表 3.4.5 システム運用における信頼度基準の維持

信頼度制御	想定事象に対し事故波及を防止する対策
予防制御	事象発生に備えた事前の制御
補正制御	予め準備した事象発生直後の制御
復旧制御	想定外事故時に発生する供給支障の復旧計画の事前準備

定故障の設定は非常に重要であるので、N-1 基準をベースに、重大な故障は想定故障に組み入れ、想定故障の発生を前提として安定性を確保する。これは、大停電に至るカスケード的な連鎖において、最初の第一歩で連鎖を断ち切る手法である。

一般論として、電力システムの供給信頼度は、表 3.4.4 の手続きによって維持される。ここで特筆すべきは、手順 A) B) において実際には発生するかどうか分からないが確率的には発生し得る影響の大きい外乱に対して、手順 C) で常に準備しておくことが信頼性維持の手法である点である。これは一見無駄に思える対策であるが、運転期間中に一定の頻度で故障発生や外乱を受けるため、長時間の正常動作を維持するには避けて通れない方策である。このとき、不確実性が增大すると、以下の課題を生ずる。

課題： 不確実性が增大すると、手順 A) で多数のシナリオが生じ、それに相乗して手順 B) と C) の解析計算の負荷が増大する。なお、従来の計算ツール（入力値が確定値で計算結果も確定値である確定論的解析法）で真面目に対応する場合の計算量の増大は、不確定変数が k 個あり変動の上下限を計算するとして単純に見積もれば 2^k 倍となり、爆発的な増大である。

(5) 信頼度基準のチェックポイント 信頼度基準は、実際の日々の電力システム運用において、常時満たされていることが重要である。しかし、事前の準備がなければ信頼度基準を維持することはできない。このため一般論として信頼性維持のために、以下の 3 段階でのチェックがある。

- ① 設備を計画する段階（設備計画）
- ② 発電機等の運転計画を作成する段階（運用計画）
- ③ 運転中で監視をしている段階（リアルタイム運用）

ここで最も重要な事は、実際の運転③において信頼度基準が満たされることである。しかし、これを確実にするためには運用計画②が必要であり、さらに設備面での準備として設備計画①が必要になる。すなわち、上記の①～③の各段階で表 3.4.4 の手順 A)～C) を実施することが基本である。

設備計画①においては、上記手順 A)～C) で不安定性が検出される場合、対策として設備の増強が検討される。運用計画

②においては使用する発電所、発電機の運転台数、各発電機の出力配分の計画修正などが検討される。リアルタイム運用においては、発電機出力のリアルタイムの調整や再エネの抑制、負荷しゃ断などが検討対象になる。

ここで 3.4.2.1 節での議論を思い起こしたい。すなわち①の設備計画が万全であれば、②や③の手続きは軽減され、場合によっては不要になることである。少なくとも現時点で、②や③の段階で表 3.4.2 に示す全ての安定限界を対象として、手順 A)～C) の解析が実施されている訳ではない。従来は、それ以前に構築された電力設備の恩恵により、安定性が保証され、運用において必ずしも全ての検討が必要ではなかった。しかし、現在は再エネの導入により運用環境が変化しつつあり、系統内での状態を把握しにくくなっている。

課題： 将来の予想される環境に対して不確実性が大きい場合、手順通りの A)～C) の解析が必要である。また、設備のレベルが低下する状況で信頼性を維持するためには、必然的に②や③のシステム運用での対応がより重要となると予想できる。

(6) 運用における信頼性維持 信頼度基準の逸脱を回避する目的で、システム運用時に実施される制御を表 3.4.5 に示した。まず、予防制御とは予め計算を行い、危ないと分かった所に近づかないというシステム運用である。万全な運用計画の策定が基本となる。予防制御の範疇には、前日計画では対応が難しい状況に対して、当日リアルタイムで発電機出力を再調整し、送電線の電力潮流を制限するなど様々なパターンがある。これに対して補正制御は、外乱や故障が発生した後に実施する制御である。故障発生時に実施する高速な制御として、不安定性を回避する系統脱調防止リレーなども広い意味でこれに該当する。

このような運用段階での信頼性維持対策は、いわば最後の砦である。このとき以下の課題がある。

課題： 運用段階での信頼性維持には、技術的にも高度な計算手法や計測・制御システムが必要となる。設備を有効利用しながら、信頼性を維持するための、将来環境を見据えた手法やツールの開発が必要である。

3.4.3 再生可能エネルギーに関連する課題

3.4.3.1 概要

太陽光や風力のように自然環境により発電量が変動する電源を自然変動電源という。この自然変動電源の大量導入に対して、関連する種々の課題が各所で議論されている。表 3.4.6 に重要と考えられる課題を示しておく。まず、これらの課題は配電線の末端で個別に発生するようなローカルな問題と、基幹システムの安定性に影響するようなグローバルな問題を含んでいる。

配電系統の電圧問題、逆潮流問題とは、元来電源がなかった配電線に太陽光発電などが設置されることで、下流から上流に向かう逆向きの電力潮流が流れ、日射条件で電圧が大きく変動するなどの問題をいう。電圧は、3.4.2.2(1)節で説明したように電気の品質に関わるので、配電線・配電設備の増強

表 3.4.6 再生可能エネルギーに関連する課題

配電系統の電圧問題、逆潮流問題
周波数問題、需給調整問題、外乱時の分散電源一斉解列
事故時の分散電源単独運転、その他
供給信頼度の維持（本稿で取り扱っている課題）

や電圧制御法を含めて現在対策が進められている。これは、さらに抜本的な対策が必要となる重要な課題である。

以下では、基幹系統全体に関わるグローバルな問題として、まず周波数問題・需給調整問題を取り上げ、次に信頼性維持の問題を考えたい。これらは、基幹システムの安定性や信頼性に深く関係し、システム全域にわたる調整や制御を必要とする広域的な問題である。前者の周波数問題・需給調整問題も広い意味では後者の信頼性維持の問題の一部であるが、両者とも大きな問題であるため、それぞれ切り分けて扱う。前者の周波数問題・需給調整問題については「調整力」、「デマンドレスポンス」、「ネガワット取引」、「リアルタイム市場」など様々なキーワードで議論されているが、後者の信頼性に関わるリスクについては、あまり議論されていないようにも感じる。以下ではこの両者がともに重要な課題であることを改めて指摘したい。

3.4.3.2 周波数問題・需給調整問題

(1) 周波数維持のメカニズム まず、周波数とは1秒間あたりの発電機の回転数である。周波数問題とは、自然変動電源の大量導入により、周波数が変動する問題である。ここでは図 3.4.2 の火力発電機を例に電力システムにおける周波数維持のメカニズムについて説明したい。タービンへの蒸気エネルギー（発電）は、発電機で電気に変換され負荷で消費されるが、発電、負荷、回転数の間には以下のエネルギー保存則が成り立っている。

$$(\text{発電}) - (\text{消費}) = (\text{回転エネルギーとして蓄積})$$

ここで、発電と消費が等しければ回転エネルギーの蓄積はゼロであり、回転数は一定に保たれる。発電と消費の不均衡を需給不均衡と呼ぶが、需給不均衡の発生により回転エネルギーの蓄積や放出が起こり、回転数が変化する。これは自動車に例えればアクセルを一定に踏み続けていても（エンジン出力一定）、上り坂になると消費（自動車のエネルギー消費）が増し、エンジン回転数が下がるのと同じ原理である。電力系統では全ての発電機が同期して、あたかも1つの発電機のように回転するので、需給不均衡が生じるとシステム全体の周波数が同時に変動する。そこで、常に周波数を計測して発電量を調整している。

このとき調整できる制御能力を調整力と呼ぶが、自然変動電源の大量導入に対して、変動を吸収する調整力が不足することが課題となっている。再エネ電源の増加により既存の火力発電機などの調整力が減少し、従来型のダム式水力、揚水式水力などの調整力にも限界があるので、今後は蓄電池の活

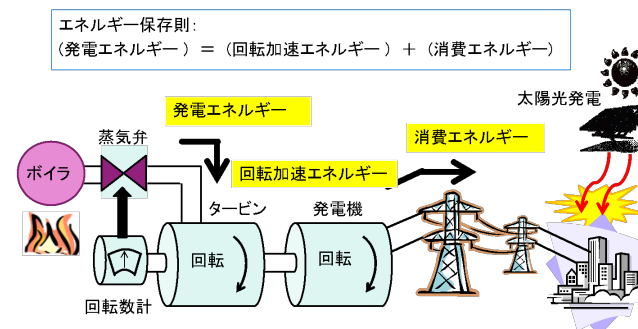


図 3.4.2 周波数維持のメカニズム

用を含めてデマンドレスポンス（負荷の制御）など需要側からの調整力の調達が期待されている。再エネ導入に伴う周波数問題・需給調整問題は、将来に亘って継続的に対応が必要な大きな課題である。

(2) 需給調整シミュレーションに基づく考察 ここではシミュレーションにより、自然変動電源が大量導入された際の系統運用の状況を考察する。図 3.4.3 は離島を想定した例題系統で、24 時間の発電機運用をシミュレーションしたものである。小規模系統のためディーゼル発電機 3 台が主な供給力であり、太陽光発電と風力発電は合計で総需要の 30%程度である。ここでは不確定性の影響を極限まで考慮した開発法を用い、設備能力に対して再エネ電源を最大導入した際の発電機制御がどのようなものになるかを検討する⁽¹⁸⁾⁽²³⁾。

使用した EMS ツールの概要を表 3.4.7 に示すが、これは不確定環境下での最大性能を追求した需給制御法として開発したもので、マイクログリッドの制御や将来系統の評価のためシミュレーションツールとして用いている。この手法では、予測の不確定性を予め想定して 1 時間先までの運転計画を作成し、万全な準備（需給不均衡の可能性がある場合の対応）をしたのち、5 分先の値だけを発電機に指令する。これを 5 分毎に繰り返して需給制御を実施し、周波数を評価しながらシステムを運用する。この手法では実際に再エネ出力の実測と予測を実施し⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、リアルタイム環境を想定したシミュレーションに組み込んでいるため、需給不均衡の発生や発生限界までの極限的な状況を解析できる⁽¹⁸⁾⁽²³⁾。なお、制御間隔を 5 分としているのは、これ以上長くすると実効性を判定する上で意味のない解析結果となってしまうためであるが、この値は変更できる。

図 3.4.3 左は上から、総需要および発電機 1～3 の一日の運転実績を示している。図 3.4.3 右の各図は、変動の激しい時刻 14:10 に表 3.4.7④の手法を用いて、リアルタイム環境で算出した 1 時間先までの計画値である。2 本の点線で囲まれた領域が上記 A) の実行可能領域であり、実線は C) の発電計画値である。この例では以下が観測できる。

- 14:10 付近は再エネ出力変動が激しく、3 本の点線と実線が重なり 1 本の線のようにになっている。
- 全ての発電機が指令通りに 1 本の線上を追従しないと、需給バランスを保てない。

再生可能エネルギーの大量導入環境では、この例に示されるように、設備の調整力を効果的に利用する特別な手法と制

表 3.4.7 再エネ導入限界の検討のための計算機能
需給運用 EMS・シミュレーションモデル^{(12)~(18)}

- ① 再エネ出力と負荷の予測 (5 分毎に 60 分先まで)
- ② 実行可能領域の厳密計算 (5 分毎に 60 分先まで)
- ③ 需給不均衡の検出と最小限予備力の算出 (同上)
- ④ 運転計画の作成 (60 分先までの計画を 5 分毎に更新)

以上を 5 分ごとに算出し、④での 5 分先の計画値を各発電機に指令する。各発電機は指令を受けて出力を変更する。

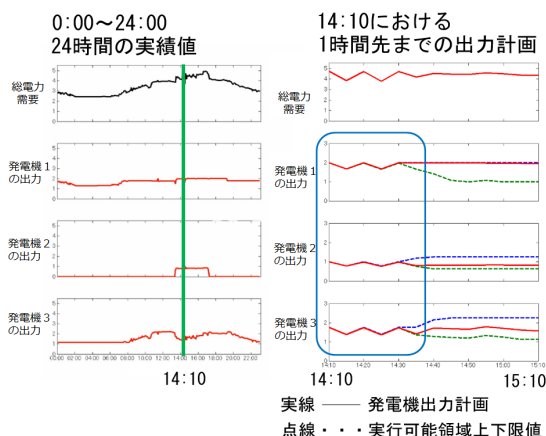


図 3.4.3 発電機出力の実績値

御の緻密性が重要となる。この例では、各発電機が軌道から外れてしまうと需給不均衡が発生し、周波数変動に至ってしまう。このとき各発電機は、最大出力に達している訳ではないが、出力を増減できる自由度はない。実系統で調整力が不足し、これに近い状況が発生すると、総動員される全ての発電機がシステムの安定性の維持に不可欠な存在となる。

(3) 需給計画と需給運用における課題 一般に需給計画は電力市場取引を介して実運用の一日前に決定される。このとき、周波数の維持に関しては、外乱に対して供給信頼度を維持するため、発電機脱落なども想定し、追加的に発電できる予備力を準備している。予備力には、

- A) 瞬動予備力：即時に使用できる予備力
- B) 運転予備力：10 分程度で調達可能な予備力
- C) 待機予備力：数時間程度で調達できる予備力

があり、必要となった時点での調達可能時間により分類し、システム運用時には常に必要量を確保している⁽⁴⁾。また、欧米の自由化系統では、調整用の電源を上記に相当する 3 段階の枠組みで事前に確保し、リアルタイムの制御や事故等に対処する予備力として用いている。我が国でも海外の方式にならって、調整力の公募制度が開始された。

周波数維持は、負荷の変動が大きくなるほど難しくなり、さらに予測の精度が悪化すると難しさに拍車がかかる。したがって、自然変動電源の大量導入に際しても、調整力・予備力を適正に確保していくことが重要である。近年、自然変動電源の予測精度は向上してきているが、当然限界がある。また、例えば年一回だけ大きく外れるようなケースがあると、

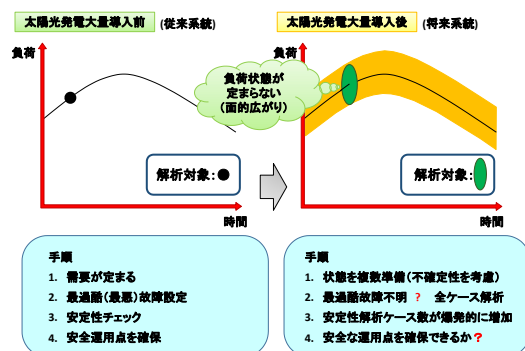


図 3.4.4 再生可能エネルギー電源による系統解析の課題

むしろ対応が難しくなる。このような急激かつ大きな変動をランプ変動と呼び、各所で予測精度の向上に取り組んでいるが、希にしか発生しない特殊な状況を予測することはかなり難しい。これに対して現状の運用では、

- ・ 30 分単位での各発電機の出力計画 (市場取引を含む)
- ・ 各時刻の予備力と調整力の確保 (同上、事前の調達)

を前日までに決定し、この調整力をリアルタイム環境で駆使して周波数を維持するが、この枠組み自体が不確実性の増大により、非効率になる懸念がある。すなわち、前日の 30 分間隔の計画は、不確定環境下ではシステム運用の視点で、実際に運用できる保証がない。そのため、予備力や調整力に関して過大な余裕を見積もる必要が生じ、不必要に不経済かつ非効率な運用となる可能性がある。

今後、自然変動電源の増加に伴い、必要となる調整力も増加すると考えられる。蓄電を含めて需要側からの調達を最大限に実施し、従来型電源も調整力としてこれまで以上に確保する必要があると予想される。この場合に制度設計がうまくできないと利用率の低い電源ばかりが増え、全体のコストが必要以上に増加する懸念もある。

3.4.3.3 供給信頼度の維持に関する課題

(1) 不確実性の増大 電力システムの計画および運用において、従来は電力需要の変動は概ねパターン化されており、危険度の高い運用状態を特定し、これに対して供給信頼度を維持しておけば十分であった (図 3.4.4 左)。これに対して自然変動電源が大量に導入されると、発電量が天候に左右されて急変するなど、予測外れが大きくなる (図 3.4.4 右)。すなわち、事前の解析では信頼度基準を維持したつもりでも、実際には予測外れによって維持できなかったなどの事態が起こり得る。このような不確定環境では、系統運用や制御の先行時間に応じて予測誤差の限界を考慮した解析が必要となる。このような不確定環境においては、

- ・ 確率論
- ・ 確定論

のどちらを用いるかは非常に重要である。

例えば天候により商品の売れ筋や利益が変化する場合、確率論を用いると効果的である。すなわち、確率論によ

り利益の期待値を最大化する戦略を採用すれば、その時々で予測外れがあっても、長期的には利益を最大化することができる。これに対して、確定論は、例え低い確率でも、それが発生すると破局を招くような場合に採用する。電力システムの信頼性維持は、従来から大停電を回避するという目的で、確定論に基づいて管理されてきた。しかし、不確定性の増大により、これまでの方法論を維持すること自体が難しくなりつつある。

(2) ロバスト信頼度^{(6)~(8)(17)} ロバスト信頼度という用語は特別な概念ではなく、不確定環境においても確定論に基づく信頼度基準を維持するという考え方である。例えば、前節の表 3.4.7 に示した手法は、太陽光発電予測値が最大に外れる上下限值（すなわち信頼区間）を指定して、その範囲内なら予測が外れても確実にシステムの信頼性を保証する。このようなロバスト信頼度の考え方は、最悪の可能性に対して常時準備をしていくため万全であるが、一方でより厳密なリスク管理とコスト評価が必要になる。例えば予測の最大外れを小さく見積もって運用計画を策定すれば、システム運用のコストは低下するが、これは代償としてリスクを受け入れることに相当する。

不確定環境下においては、従来のシステム管理法が限界に達してしまう可能性があるため、新しい方法論の検討が必要になる。次節では、不確定性が信頼性維持に影響する具体例を考える。

(3) 停電作業計画における信頼性の低下⁽²⁰⁾ これは送配電線の過負荷に着目した信頼性の解析例である。停電作業は、需要家への電力供給は維持したまま送配電線の一部分を停電させて行う作業であり、電力設備の維持管理に不可欠であるので、常にシステムのどこかで実施されている。前述の N-1 信頼度基準を遵守する系統構成となるよう、スイッチの入切手順を決め、作業員の配置も含めた年間計画の下で実施されている。この停電作業中においても電力系統は運用されており、想定故障時に過負荷発生の有無が問題となる。すなわち、太陽光発電の変動に対しても、従来と同等の安全性を担保した年間作業計画が望まれる。

図 3.4.5 はある実系統を例にとり、年間の正確な天候は予想できないという条件で、太陽光発電の導入量に対して、作業条件を満たすパターン（状態）の数を調べたものである。太陽光発電（PV）の導入前は 125 の作業可能パターンの選択肢が存在したが、PV 導入の増加に伴ってパターン数が減り、10%の導入で天候に依存しない選択肢ができない状況となった。

この結果は、停電作業計画が年間計画であることから、計画時において、作業当日の天候予測が難しいために生じている。この研究では、天候に応じて発電機出力の再配分を行うようにすれば、さしあたり問題が解決できることも確認している。しかし、ここでは、現在の環境において、従来の手法がそのままでは使用できなくなりつつある事実が重要である。逆にいえば、この解析結果は従来と全く同条件のシステムにおいて、太陽光発電が導入されるだけで信頼性が低下す

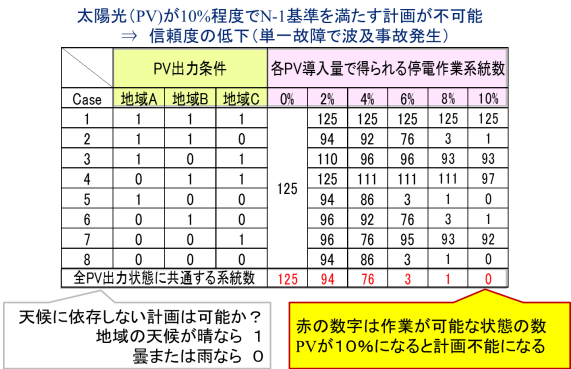


図 3.4.5 停電作業計画の困難化

ることを示すエビデンスともいえる。すなわち、将来環境において、従来と同程度の信頼性を維持しようとするなら、従来以上の対策が必要になることを意味している。

(4) 信頼領域について 不確定環境下で信頼度基準を満たす発電機の運転とはどのようなものかを、図 3.4.6 を用いて考えたい。まず、将来の時点 t1 において不確定性があっても、その点で運用を行えば信頼度基準が満たされるような運転点の領域がある。これを、ロバスト信頼領域（以降、信頼領域）と呼ぶこととすれば、全ての時刻において信頼領域の内部で運転計画を行えばよいことになる。しかし、時間の推移を考えると、実際にはシステムの制御性に限界があり、例えば火力発電機では毎分 3~5%程度しか出力を変化させることができない。すなわち、時点 t1 では、将来の時点 t2 の信頼領域に到達できる領域（到達可能領域）がある。したがって、時刻 t1 での実質的な信頼領域は、次の時刻の信頼領域への到達可能性を考えると実際の信頼領域より狭くなり、これ

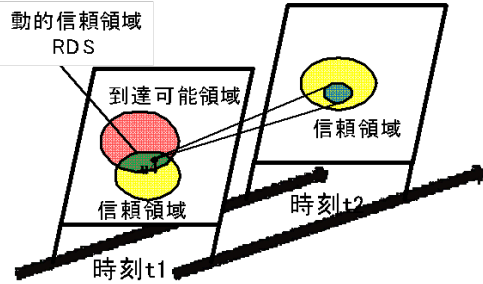
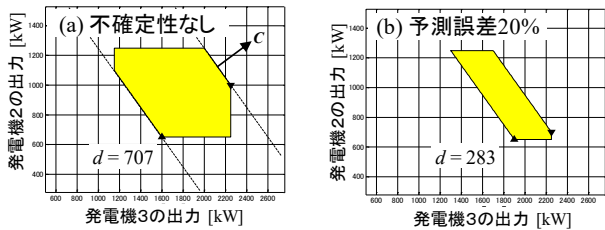


図 3.4.6 信頼領域



(3機6母線系統で、再エネ電源3箇所総需要の30%を出力)

図 3.4.7 信頼領域の例

をロバスト動的信頼領域 RDS と呼んでいる。信頼領域 RDS は、不確実性が增大するほど、また、システムの制御性が悪くなるほど狭くなり、信頼性を維持するシステム運用が困難になる。

図 3.4.7 は、不確定環境下で信頼領域を解析した例である。ここで留意すべきことは、元来十分な信頼領域が存在している系統（左）であっても、不確実性が 20%（すなわち、再エネ出力は予測値に対して 80～120%の範囲）に増大すると（右）、信頼領域がかなり縮小することである。さらに不確実性が増大すると領域が消滅し、信頼度基準を満たすこと自体が困難になる⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾。この状況を回避するためには、系統内の必要箇所に蓄電池などの調整力を適正に配置し、システムの制御性を確保する必要がある。

（5）過渡安定度に対する信頼性維持 過渡安定度は、送電線への落雷などにより、複数の発電機が秒オーダーで振動する現象であり、我が国では、特に西日本系統において重要な不安定要因である。このため、西日本地域ではシステムの常時監視に基づき、高速に発電機等の遮断を行う高度なシステム⁽²⁴⁾を導入するなどの対策を行っている。

図 3.4.8 は、西日本系統を発電機 30 機で模擬した電気学会の標準系統である。文献⁽²⁰⁾⁽²²⁾の結果に基づき様々な故障点での故障に対して過渡安定度を評価する。ここでは

- ・東向き幹線電力潮流 (λ_1 : 1GW 変化)
- ・偏在潮流が発生する太陽光発電量 (λ_2 : 1.4GW 変化)

を変化させて故障の影響を調べる。図 3.4.9 の縦軸は、様々な故障に対する臨界故障除去時間 (CCT) すなわち各故障で系統が不安定になるまでの時間を示している。この CCT が変電所のしゃ断器の動作時間 0.07 秒 (図中の安定限界線) より小さくなると、系統が不安定になる。まず、左図から、幹線潮流の増加に対して CCT が小さくなる。これが西日本系統での安定度の低下を示しており、このことは以前から知られている。また右図は、幹線潮流 λ_1 の限界付近で、太陽光発電による偏在潮流 λ_2 が発生した場合に、さらに安定度が低下するケースを示している。 λ_2 が大きくなるほど太陽光発電量が増加し、既存の発電機群にとっては軽負荷になるが、このように安定度が低下する偏在潮流が存在する。太陽光発電の出力状態を正確に監視することは現状では課題であり、運用において太陽光発電の影響に対して最大限の配慮が必要である。

3.4.4 課題と将来展望

3.4.4.1 課題

（1）再生可能エネルギーの大量導入、電力自由化、信頼性維持の 3 者は、基本的に相矛盾する課題を内在させている。すなわちいずれかに力点を置けば、いずれかが犠牲にならざるを得ない。再生可能エネルギーは、資源に乏しい我が国にとって非常に重要であり、今後も最大限の導入を図っていくことについて、既に国民的な合意に至っていると考えられる。また、震災に伴う輪番停電等で社会の混乱を経験した我が国は、今後も供給信頼度の低下を許容しないであろう。このこ

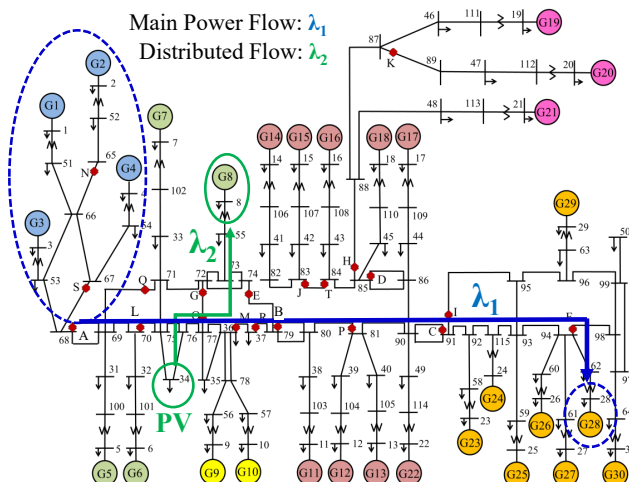
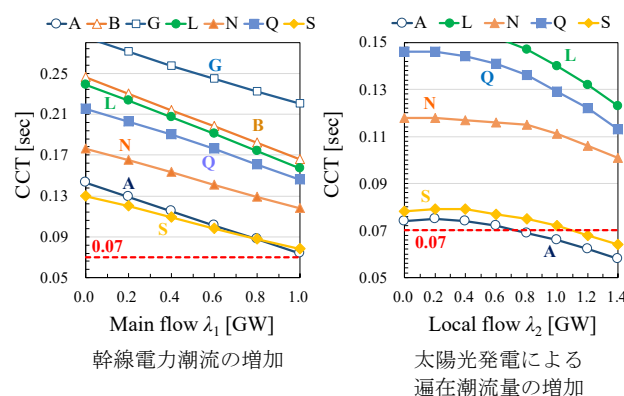


図 3.4.8 電気学会 WEST30 機モデル



(縦軸の CCT は臨界故障除去時間。0.07 以下で不安定。)

図 3.4.9 電気学会 WEST30 機モデルでの過渡安定度評価

とから、自由化環境下での制度設計は、矛盾を抱えながらも将来へ向けての長期的かつ挑戦的な課題となると考えられる。

（2）現在わが国では設備形成や維持のためのコストが抑制されている。設備の維持には適正なメンテナンスが必要であるので、競争環境下で過度のコスト削減が進むことは、社会インフラを維持するという視点で好ましくない。十分な注意の下で使用できる設備を延命化する、あるいは再利用することは推奨されるが、一方で過度のコスト削減による設備故障率の増加も懸念される。

（3）信頼性低下の構造的な課題 電力設備の弱体化に加えて、太陽光発電など再エネ電源の大量導入により外乱や不確実性が增大している。また一方で、安定な既存電源の減少により、システム全体の安定性や制御性が低下している。これらの事実はいずれも図 3.4.1 のバランスにおいて信頼性を低下させる要因であるので、効果的な対策を講じなければ、供給信頼度は必然的に低下していく。これらの要因は、急激に悪化することもなければ、早急に改善できるものでもない。暫くは変化のない状況が継続し得るが、逆にいえばこれが大きなリスクとなり得る。

（4）供給信頼度の維持に対して、電力設備の状態は最も

大きな決定要因である（表 3.4.1）。設備の状態のレベルが低下した状態になると、高度な運用が必要になる。一般に、設備状態のレベルが高いほどシステム運用は容易になり、運用コストも低下するが、その逆は運用者にとっても運用システムにとっても困難な状況となり、加えて追加的なコストも発生する。例えば今後、自然変動電源の増加に対して、信頼度基準を満たす信頼領域が縮小していくと、制約的なシステム運用が必要になる頻度が増すことになる。

（5）技術面では、供給信頼度が低下傾向にある状況下では、電力システムの運用において、表 3.4.3 の不安定要因がこれまで以上に重要になる。すなわち、リアルタイム環境における不安定要因のモニタリングとコントロールである。しかし、不確定環境下においては、解析ケースの増大、解析自体の精度悪化などに直面する。したがって、高度な計算技術と運用技術の開発が必要になる。

（6）我が国では「過渡安定度」がボトルネック（臨界制約）となっている。自由化で先進している欧米系統では、上記の信頼度解析を含む最適潮流計算により約定処理を行っているが、過渡安定度は高速に計算処理を行う事が難しく、また欧米では臨界制約ではないこともあり、約定処理計算において考慮できていない。不確定環境下での過渡安定度問題への対応は、世界的にも、また特に我が国では重要な課題である。

3.4.4.2 将来に向けての方向性に関する考察

（1）電力設備計画における最適化 電力システム改革において、設備形成に対する課題は様々に指摘されている。ここでは、電力設備が社会インフラであるとの視点で、設備計画の意義を考えてみる。工学の問題として、論点は以下の2点である。

- ・安定供給の確保（供給信頼度の維持）
- ・電気料金の抑制（非効率性の排除）

電力システムの設備状態がどのように供給信頼度と電気料金に影響するかは、以下に示す因果関係から解析することができる。まず、設備状態が決まると、選択可能な運用状態が決まり、そこで特定の故障の発生を想定して解析すると、停電に至るかどうか分かる。したがって、各故障の年間発生頻度を考慮して、年間の運用状態について調べれば、年間の運用費や停電発生確率が計算できる。さらに、これに停電コストを乗ずれば、特定の設備状態に対して年間の平均停電コストも計算できる。停電コストの算定や取り扱い方法には様々な議論があるが、例えば 2003 年の北米大停電の被害額は、概算でも 60～80 億ドルで、1 兆円に迫るとされている。加えて、犠牲者も出るなど、2 次 3 次の被害を考えると莫大な社会損失である。また、電力システムの設備状態が一旦悪化すると早急な改善ができないため、停電を繰り返すことで被害が蓄積されるケースも多い。

供給信頼度を考慮したシステム設計は、設備計画から運用までの一貫した最適化を行うことが、工学的には正当なアプローチである。例えば、信頼度基準を満たすシステム運用を

制約条件として、インフラとしての年間あたりの総コストを最小化するなどの設備計画手法がある。このような計画法で算出される最適解は、最適な設備計画と同時に最適な運用計画を示しており、この解から電気料金の下限値も算出できる。この問題は極めて数学的であり、設備計画の最適性が損なわれると、その設備で最適運用を行っても電気料金の下限値が上昇する。このような下限値は電力システムを使用する限り超えることができない、物理的な下限値である。このように電力設備は、電気料金の下限値とも密接な因果関係を持つ。

（2）運用における最適化 将来を予測して最適な設備を構築していくことは別に、現実的には現在の電力システムを使用して電力供給が行われる。費用は低く抑えたいが、頻繁に停電を繰り返すことは許容できないというのが共通の認識と思われる。この場合にも重要となるのが、最小のコストで信頼性を維持する最適化の概念である。最適化の概念がないと費やす費用に対して達成可能なレベルまで信頼性が向上しない。最適化を行うためには、電力システム全体を1つのシステムとして捉える必要がある。「発電」や「送電」といった部分に分けて扱うのではなく、工学的視点で全体を最良のバランスで運用状態を調整する対策を考えることである。現在の環境においては、様々な個別の難しい課題が出現しているが、最適化は全ての課題に共通する重要な概念である。

（3）電気料金の安定 再エネ導入は世界的に進んでおり、我が国としても重要であろう。今後、太陽光発電など自然変動電源に影響を受けにくいシステム構築や運用形態を確立する必要がある。特に大量の再エネ導入下では、信頼性維持に必要な送電制約（すなわちシステム運用のボトルネック）が時間帯や時々の条件で発生し得る。送電制約が発生すると発電所の立地点により発電量や送電量が制限されるなど、事実上の市場参加者の不公平性や市場支配の問題が発生し得る。競争環境においては、これをうまく管理できないと市場が混乱し、電気料金の高騰や乱高下を招く可能性がある。再エネ導入は当初からの前提であり、一方で自由化に起因する電気料金の高騰は、本来あってはならない事である。電力システムの安定性や信頼性に関する特性を十分に加味した制度設計とシステム構築が不可欠と考えられる。

（4）システムの全体管理 図 3.4.10 は従来の電力会社が実施していた計画・運用に関する全体手続きの概要である⁽¹⁰⁾。これまで発電、送電、配電といった全体システムを一括して管理する垂直統合システムにおいて、必要なコストを電気料金に上乗せする総括原価方式の下で維持されてきたシステム管理・運用方法である。従来の制度に対して様々な批判があったが、システム管理に関しては大停電や供給信頼度に関する責任所在も明確であり、長期的な視点でシステム運用に負担をかけない設備計画、メンテナンス計画が行われてきたといえる。電力システム改革により、このようなシステムの管理体制はもはや過去のものとなるが、社会インフラを持続的に維持していくという視点で、図 3.4.10 のような全体手続きは、どうしても必要である。

（5）災害時システムの頑強さと回復力 競争環境で高コ

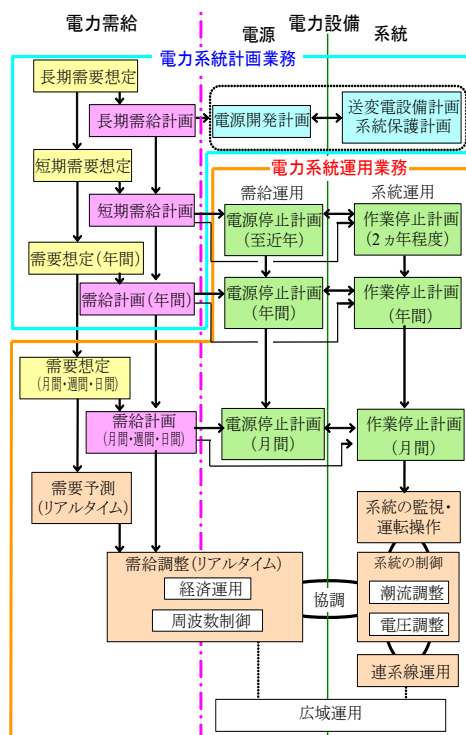


図 3.4.10 設備形成・維持管理・運用に関する全体業務

ストな設備の廃棄が進んでいるが、2011年の震災時の経験に基づけば、これらは非常時や大災害時には威力を発揮する設備である。現在、電力自由化により非効率なものが排除されていく環境において、大災害に対しては明らかに脆弱なシステム構造となりつつあるように思われる。一般に平常時に効率的なシステムほど災害時には脆弱になるので、災害に強いシステム構造をどのように組み込んでいくかは非常に大きな課題である。後の3.7節で考察しているように、大災害時の電力システムは平常時とは別の議論が必要であろう。

大災害に対しては、ボトルネックが存在しない分散型のシステムが強い性能を発揮するといわれている。極論すれば各家庭で独立した電源を持つ自給自足のシステムや地域を主体とした分散型のシステム（マイクログリッド）である。我々も高性能インバータを開発し、太陽光発電と蓄電池を組み合わせたマイクログリッドを大学内で構築するなどの実験を行っている⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。現在、世界中でこの種の技術開発が行われているが、コストと信頼性の両者を勘案しながら、現実的な問題の解決を行うこと、そして将来に向けた研究開発を継続して行うことが重要であろう。

最後に、災害時のシステムの回復力は、いわゆるマンパワーによるところが大きいことも強調しておきたい。これまで災害時には全国の電力会社の間で、人の力を最大に発揮できる万全な協力体制がとられてきた。しかし、このような体制が今後も機能するかについては、少なからず危機感がある。3.8節では技術継承や人材育成の問題を多面的に考察し、その中で「技術者魂」や「企業魂」の喪失についても指摘しているが、とりわけ災害時には最終的な拠り所は人間力と

考えられる。電力システムが社会活動を支える重要なインフラであることを考えると、人間力や設備の価値を多面的な視点で正当に評価することが重要と感じる。

3.4.5 おわりに

太陽光発電など自然変動電源の大量導入は、電力システムの信頼性を相当に低下させる側面があるが、殆どのエネルギーを海外に依存する我が国にとって、再生可能エネルギーは将来の重要な国産エネルギーである。したがって、再生可能エネルギーの恩恵を最大化できるよう、工学的視点で最適なシステム像を描き、無理のない形で次世代に向けて維持・再構築していくことが、最良の選択肢と考えられる。最適なシステムとは、想定する環境条件に対して全コストを最小化し、長期的視点で安価で安定した電気料金と高い信頼性とを両立しながら、さらに災害時においても強いシステムでなければならない。今後、自然災害も心配される中で、社会の安全・安心は何よりも大切に思える。

これまでの電力システムは、適度に地域主体の分散構造となっており、人間力も含めて災害時の頑強さと平常時における効率性を微妙なバランスでうまく維持してきた。しかし、ここで解析例を紹介したように、物理的な環境変化に対しては確実に余力がなくなっている。システムの信頼性の低下は、うまく管理できないと水面下で進行し、ある時点で大停電の発生という形で認識される。また一度低下した信頼性は回復が難しく、長期にわたり停電の頻発に遭遇することも知られている。電力システムは重要な社会インフラであるので、工学的視点で課題を認識し、長期的に持続可能な対策を講ずることが重要である。

参考文献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁：「低炭素電力供給システムの構築に向けて」、低炭素電力供給システムに関する研究会報告書（2009）
<http://www.meti.go.jp/report/data/g90727ej.html>
- (2) スマートグリッド実現に向けた電力系統技術調査専門委員会：「スマートグリッドを支える電力システム技術」、電気学会(2014)
- (3) Renewable Electricity Futures Study, National Renewable Energy Laboratory
http://www.nrel.gov/analysis/re_futures/
- (4) 電気学会技術報告：「電力系統の利用を支える解析・運用技術」、第1100号（2007）
- (5) NERC Planning Standards, “NERC Planning Standards and Guides,” North American Electric Reliability Council (1997)
- (6) 餘利野, 奥本, 他：「自然エネルギー電源大量導入に対する系統解析・計画・運用技術の課題」, 電学論B, Vol.131, No.8, pp.670-676 (2011)
- (7) Y. Okumoto, N. Yorino, Y. Sasaki, Y. Zoka, S. Fujita, “Power System Operation under large amount of Renewable Energy Sources Penetration,” CIGRE-AORC Technical Meeting (2011)
- (8) Y. Okumoto, N. Yorino, et al, “A Concept of Robust Power System Security and its Application under Renewable Energy Sources Penetration,” IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, No. 2012ISGT0312 (2012)
- (9) 奥本, 餘利野, 他：「将来断面における太陽光発電の大量導入に伴う信頼度面の諸課題」, 電学論B, Vol.132, No.2, pp.171-180 (2012)
- (10) 奥本, 餘利野, 他：「不確定性環境下におけるロバスト信頼度の適用」, 電学論B, Vol.133, No.1, pp.56-63 (2013)
- (11) 奥本, 餘利野, 他：「将来の不確定環境下における供給信頼度に関する検討」, 電学論B, Vol.134, No.12, pp.949-956 (2014)
- (12) N. Yorino, et al, “High-Speed Real-Time Dynamic Economic Load Dispatch,”

- IEEE Trans. on Power Sys, Vol.27, No. 2, pp.621-630 (2012)
- (13) H. M. Hafiz, N. Yorino, et al. "Feasible operation region for dynamic economic dispatch and reserve monitoring," European Trans on Electrical Power, Vol. 22, No. 7, pp.924-936 (2011.8)
 - (14) Y. Sasaki, N. Yorino, et al, "A Robust Supply and Demand Controller Against Uncertainties of Renewable Energy Sources," 18th PSCC, No. ID352 (2014.9)
 - (15) L. Ma, N. Yorino, and K. Khorasani, "Solar radiation (insolation) forecasting using constructive neural networks," Proc. of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) 2016, pp.1-6, Vancouver, BC, Canada, 24-29 (Jul. 2016).
 - (16) 佐々木, 餘利野, I. W. Fardi, 清木場, 朝田, 馬, 造賀, "ローカル電力需給制御に適した太陽光発電量の予測手法," 電気学会論文誌 B, Vol.137, No.7, pp.538-545, (July 2017).
 - (17) N. Yorino, M. Abdillahi, Y. Sasaki, Y. Zoka, "Robust Power System Security Assessment under Uncertainties Using Bi-Level Optimization," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.32, No.99, pp.1-11, (April 2017).
 - (18) Y. Sasaki, N. Yorino, Y. Zoka, I. Farid, "Robust Stochastic Dynamic Load Dispatch against Uncertainties," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. PP, No.99, pp.1-8, (March 2017).
 - (19) 伊藤, 川原, 造賀, 餘利野, 佐々木, 小林, "太陽光発電の出力変動を考慮した作業系統決定法の提案," 電気学会論文誌 B, Vol.137, No.2, pp.117-123, (February 2017)
 - (20) N. Yorino and Y. Sasaki, "Power System Reliability Monitoring and Control for Transient Stability," 14th International Workshop on Electroc Power Control Centers (EPCC14), Session2-2, May 14-17, Wiesloch, Germany, (2017).
http://www.epcc-workshop.net/Presentations/2017/Yorino_Sasaki.pdf
 - (21) Y. Sasaki, S. Sekizaki, and N. Yorino, "Development of a Plug-in Type Synchronous Inverter for Grid Stability Enhancement," 14th International Workshop on Electroc Power Control Centers (EPCC14), Session2-6, May 14-17, Wiesloch, Germany, (2017).
 - (22) N. Yorino, Y. Nakamura, M. Abdillahi, Y. Sasaki, Y. Okumoto, "A Method for Evaluating Power System Security Region under Uncertainties and Its Application to Transient Stability Problem," IREP Symposium, Porto, Portugal, (August 2017).
 - (23) Y. Sasaki, N. Yorino, Y. Zoka, I. W. Farid, S. Sekizaki, "Robust Dynamic Load Dispatch under Uncertainties," IREP Symposium, Porto, Portugal, (August 2017).
 - (24) 吉田, 舘, 高藤, 今枝, 武石, 田口, 草場, 「次世代グリッドに適応した基幹系統合型オンライン系統安定化システム (ISC) の開発」, 電学論 B, Vol.137, No.6, pp.434-445 (2017).
 - (25) 餘利野, 関崎, 特許「単相同期化カインバータおよびそのコントローラ」, 特願 2017-031555 (2017).8
 - (26) S. Sekizaki, Y. Nakamura, Y. Sasaki, N. Yorino, Y. Zoka, I. Nishizaki, "A Development of Pseudo-Synchronizing Power VSCs Controller for Grid Stabilization," Proc. Of the 19th Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, Italy, (2016).
 - (27) 経済産業省 平成 27 年度電気保安統計
http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/detail/result-2.html
 - (28) 電気事業連合会データベース FEPC INFOBASE,
<http://www.fepec.or.jp/library/data/infobase/>
 - (29) Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations, U.S.-Canada Power System Outage Task Force, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, U.S. Department of Energy, April 2004
<https://energy.gov/oe/downloads/blackout-2003-final-report-august-14-2003-blackout-united-states-and-canada-causes-and>
 - (30) Final Report - System Disturbance on 4 November 2006, Union for the Coordination of Transmission of Electricity (UCTE), January 2007.
 - (31) T. Ohno, S. Imai, "The 1987 Tokyo Blackout," Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. October-November 2006 IEEE PES.

3.5 再生可能エネルギー電源はどこまで頼れるか

3.5.1 はじめに

2011 年の東日本大震災と福島原子力発電所の事故以来、準国産エネルギーである原子力発電が稼働しない状況が続いている。この原稿を執筆している時点でも全国で 3 機のみが稼働している状況である。この状況は今後も続くと考えられ、震災以前に策定されたエネルギー基本計画のように原子力発電に頼る状況は考えにくい。

このような状況で、化石燃料への依存を高めることは CO₂ 排出削減の観点だけでなくエネルギーセキュリティの観点からも避ける必要がある。そのため再生可能エネルギーに追い風が吹き、再生可能エネルギー電源に対する手厚い発電電力固定価格買い取り制度 (FIT) が導入され、特に太陽光発電設備 (PV) の導入が急速に進んできた。そのペースは予想を大きく上回るものであり、認定された設備の容量は想定を遙かに越えるものとなってしまった。

そのため、2014 年後半になっていくつかの電力会社ではこれ以上の受入は困難だとして、その接続申込への回答を保留するという宣言を行った。一般にはこの保留措置は「突然」の出来事だったと受け止められている。

しかし、PV や風力発電のような自然エネルギーに頼る再生可能エネルギーは気象変動の影響を受けやすく、出力が不安定に変動することが知られている（このため、PV や風力発電を「自然変動電源」と呼ぶことがある）。電力システムは瞬時瞬時の需要と供給を一致させる必要があるため、変動が大きくなると運用が難しくなってしまう。電気エネルギー分野の専門家から見れば、技術的、経済的に適正な受け入れには限界があることは明らかであり、遅かれ早かれ接続が不可能になる時期が来ることが予想されていた。

本稿では、再生可能エネルギーの中でも日本において導入が進み、系統接続の問題が起きている PV を取り上げ、その特性と系統に接続するときの問題点について解説を試みる。

3.5.2 PV の出力特性

PV の発電は日射に依存するため、夜に発電することはできず、昼であっても曇や雨のときは発電量が極端に少なくなる。年間を通した設備利用率（定格出力で 1 年中発電した場合に比べてどれだけの発電ができるか）は、日本においては 12% 程度といわれている。最近の電力系統の年負荷率（平均需要 ÷ 最大需要）は 65% 程度であるから、電力需要の全エネルギーを PV でまかなうためには最大需要の 5 倍以上の PV を設置しなければならない計算になる。

しかし、電気エネルギーは貯蔵するのが困難であり、最大需要の 5 倍もの出力不安定な電源を接続することは難しい。貯蔵に頼らないとすると、PV 出力が軽負荷期の需要を上回らないようにする必要があり、自ずと導入限界量が定まることになる。

もし PV 出力が需要を上回らないとしても、気象状況による出力変動への対処の問題は残る。PV の出力は天気によって

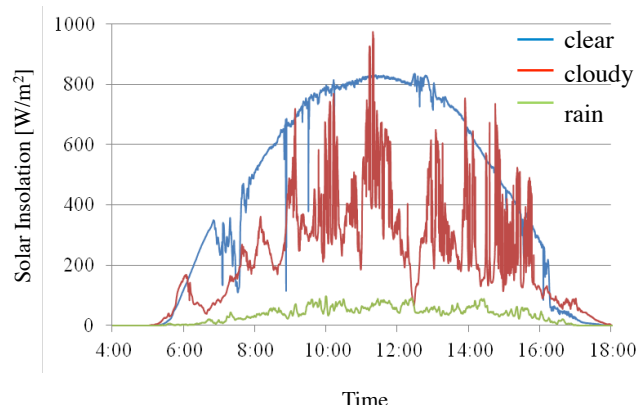


図 3.5.1 PV 出力変動の例

図 3.5.1（横浜国大で測定した例）のように変動する。快晴（clear）や雨（rain）の時は出力変動が小さいが、曇（あるいは空に雲がある状態の「晴」）の時は非常に急峻に出力が変動する。電力システムにおいては電力の供給量と需要量は瞬時瞬時にバランスがとれていなければならない、バランスが崩れると周波数変動、ひいては大停電に至ることもあるため、需要とのバランスは PV 以外の電源がとらなければならないことになる（図 3.5.2）。PV は勝手に踊るダンサーのようなもので、それにうまく対応する上手なダンスパートナーの役割をその他の電源が果たさなければならないわけである。

このような運転は PV 以外の電源（火力発電所など）によって過酷なものであり、効率の低下による発電単価の上昇を招くだけでなく、設備の寿命にも影響を与えることが懸念される。

3.5.3 PV 出力のならし効果

ただし、PV は広範囲にわたって多数設置されるため、互いの出力がほぼ無相関になり、統計的性質によって全体としての出力が平滑化されることが知られている。この効果を「ならし効果」と呼んでいる。図 3.5.1 の例は一地点で測定したもののなので、多数地点の出力の合計をとれば出力変動は穏やか

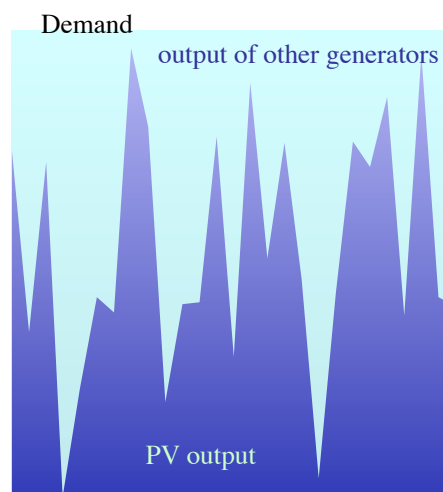


図 3.5.2 PV 出力と一般電源出力

になると期待される。

その効果を検証するため、5km 程度離れた 4 地点の日射量データを用い、それぞれの地点で FFT 解析を行って各周波数成分の大きさを足し合わせた場合（ならし効果を考慮していない場合）と各地点の出力を合計してから FFT 解析を行った場合（ならし効果が考慮されている）でどれだけ変動が抑制されているかを調べてみた。その結果を図 3.5.3 に示す。

ここでは 4 地点のデータを用いているので、全く無相関であれば-3dB になるはずである。結果を見ると晴れ（Fine）の日は周波数が非常に小さい（ゆっくりと変化する）領域を除いて大体-3dB となっていることがわかる。「晴れ」というのは雲量が 2~8（全天の 2 割から 8 割に雲がある）と定義されているので、雲によって出力変動が起こるような状況ではならし効果が効いていることがわかる。

快晴（Clear）、曇り（Cloudy）、雨（Rain）では晴れに比べてならし効果が小さいが、そのような天気ではもともと日射量の変動が小さいので他の電源に負担をかけることも少ないはずである。

このように、ならし効果が一般的にかなり効くことは知られている。しかし問題は「常に」効くのかどうかである。もし 1 年に一度でもならし効果が効かないときがあれば、ダンスパートナー（他の電源）が間に合わず、周波数変動が起ってしまう。

図 3.5.4 は AMeDAS の 10 分間日照時間データから各地点の日射量を推定し、14 地点分を足しあわせたものである⁽¹⁾。一年分のデータの中から最も厳しいものを選んだのだが、矢印のところで合計出力が急峻に変化していることがわかる。このような状況はまれにしか発生しないので、「たまには周波数変動があっても良い」「たまには停電しても良い」ということであれば問題ない。しかし、電力供給ではそのようなことは許されない。このようなときにも対応することが求められる。

3.5.4 PV の供給力としての価値

PV の設備利用率は 12%程度であると述べたが、それでは PV は供給力としてどれだけ期待できるのであろうか。東日本大震災以降に資源エネルギー庁が行っていた電力需給検証小委員会では、夏期の需要の大きい上位 3 日の PV 出力を 20 年

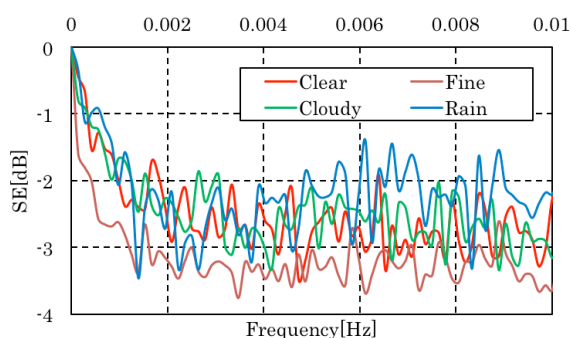


図 3.5.3 PV 出力のならし効果

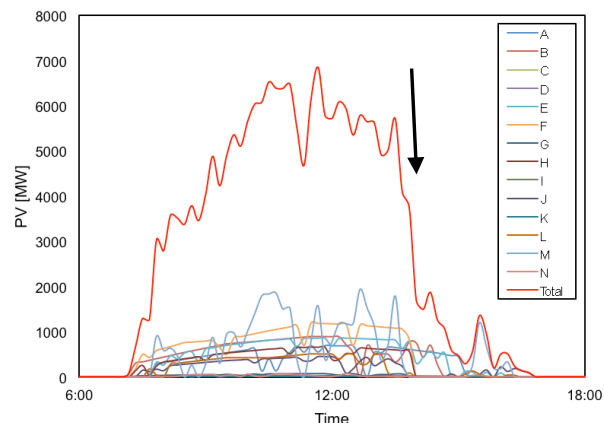


図 3.5.4 広域に設置された PV の合計出力

分集計し、そのうち下位 5 日の平均値を安定的に見込める供給力として評価している⁽²⁾。その考えでは、地域によっても異なるが供給力は設備容量の約 30%程度となっている。

これは、安定供給は堅持するという考え方に基づいた算定手法である。そのために「下位 5 日」といった形で少なめの評価が行われている。もちろん、安定供給のためには保守的な評価が必要だが、ここでは PV が従来電源を代替できる上限を求めることを試みたい。そのために総需要から PV 出力分を除いた「残余需要」の考え方で調べてみることにする⁽³⁾。残余需要は PV がフルに発電したときに PV 以外の発電設備で供給しなければならない需要分に相当する。

図 3.5.5、図 3.5.6 にその考え方を示す。まず各地域の負荷持続曲線（図 3.5.5 の上部の線）を用意する。次に時間毎の地域内平均日射量を調べ、それに PV 導入量を乗じることによって PV の出力を求める（図 3.5.5 の下部の棒グラフ）。そしてそれを総負荷量から引くと残余需要が中間のぎざぎざの線として求められる。さらにそれを大きい順に並べ替え、持続曲線とすると図 3.5.6 のようになる。この図の左端（ピーク時の需要）の差が PV 以外の電源の供給力を減らせる可能性のある量の上限である。

ここで注意してほしいのは、残余需要の求め方からも明らか通り、残余需要は PV の導入量によって変化するということである。PV は太陽が出ている昼間に出力するため、ピーク需要の削減効果があるといわれているが、導入量を増加させていくと昼間でも曇っているとき、あるいは夜間の需要が残り、残余需要のピーク削減効果が少なくなってしまうのである。実際に、PV 導入量が増加したここ 1-2 年の状況を見ると、ピーク需要が早朝や夕方に移動する現象が生じている。

PV 導入量に対してどれだけ残余需要のピークが削減できるかを PV の kW 価値と定義して、PV 導入量（各地域のピーク需要に対してどれだけ導入されるかの比率）を横軸にとって描いたものが図 3.5.7 である。この図を見ると、導入量が少ないときは kW 価値が 50%を超えるような地域もあるが、導入量が多くなればなるほど kW 価値が低くなっていくことがわかる。なお、北海道地域に関しては需要がピークとなるのが日射のない冬期の夜になるため、kW 価値はほぼゼロとな

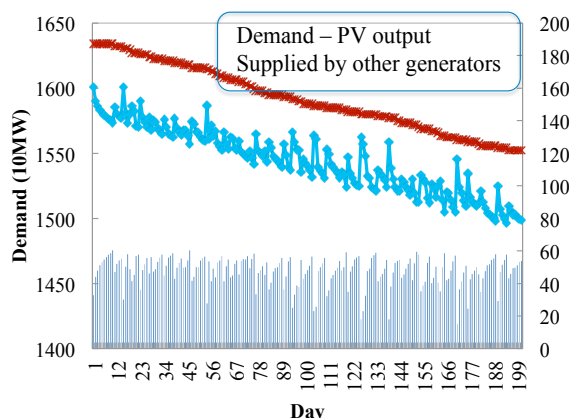


図 3.5.5 残余需要

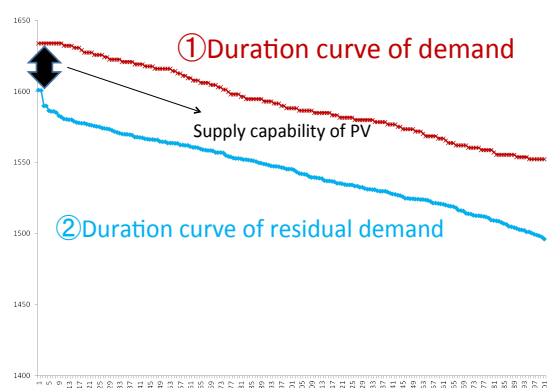


図 3.5.6 PV の供給力

る（図では横軸と重なってしまっているため見えない）。

この結果は（特に導入量が少ないうちは）需給検証小委員会の試算より大きくなっている。これははじめにも書いた通り、PV が従来電源を代替できる上限を求めているためである。この計算通りに従来型電源を減らしてしまえば、5 年に一度、10 年に一度の気象条件に対応することが出来ず、停電も覚悟しなければならない。

また、この計算では量的に足りているかどうか（電力システムの供給安定性を議論するときのアデカシーに相当）だけを見ており、ダイナミックな変化に追従して安定に運用できるかどうか（同セキュリティに相当）については全く考えていないことも指摘しておかなければならない。例えば図 3.5.4 に示したような PV 出力の急変が起こった場合に対応できるかどうかは前もってしっかりと検討しておく必要がある。

3.5.5 PV の接続可能量

「はじめに」でも述べたように、2014 年後半になっていくつかの電力会社では PV の接続申込への回答を保留するという宣言を行った。それを受けて資源エネルギー庁では新エネルギー小委員会の下に系統ワーキンググループを設置し、接続可能量の検討を行った⁽⁴⁾。

検討にあたっての大前提は、下記のようなことである（詳

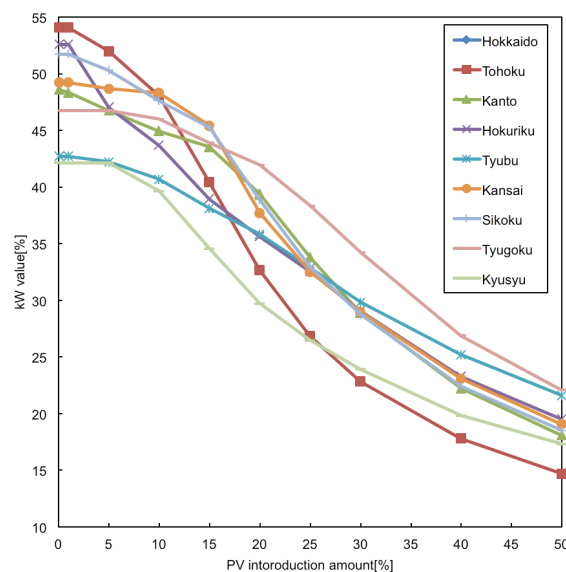


図 3.5.7 PV 導入量と kW 価値

細な設定は報告書を参照されたい）。

- 天候が急変して PV 出力がなくなっても大丈夫なように従来型の発電所を起動しておく。
- PV 出力は平均値ではなく、平均値から 2σ だけ多い状況を想定する。ただし、曇天、雨天日は平均値程度の出力が出るものとする。
- その上で、PV 出力が大きくなったときには火力等の発電所の出力減少、揚水発電所の揚水運転、可能な場合には連系線の活用などを最大限見込む。
- それでも PV 出力が余った場合には PV の出力抑制をかけるが、抑制日数はルールで定められた 30 日を超えないようにする。

各電力会社が最大限努力を行った結果、これまでよりはかなり接続可能量が増加したという印象であるが、逆に LFC 容量などを切り詰めたことによって運用が難しくなることが心配される。例えば連系線潮流が荒れるといった影響がないかどうかといったことは検証していく必要があるだろう。

今後さらに接続可能量を増加させるためには、

- 天候の予測精度向上と予測の活用方法の高度化
- 通信を利用した PV 出力抑制のさらなる活用
- デマンドレスポンスなどの確実な活用方法の開発等が求められる。

3.5.6 おわりに

再生可能エネルギー電源、特に PV 等の自然変動電源を電力システムに接続するのは簡単ではない。設備を導入してもその設備利用率は 12% 程度であり、エネルギー面の貢献は限られている。

出力変動特性はならし効果によって緩和されるが、どこまで緩和されるかについてはこれからの運用経験の積み重ねとそれに基づく研究成果を待つ必要がある。供給力としてどれ

だけ貢献できるか（kW 面の価値）についてもまだ評価を行っている途中である。本稿では触れなかったが、低圧ネットワークに接続されるために生じる問題（ローカルなネットワークがどれだけ PV による擾乱を吸収できるかという問題）も指摘されている。

種々の問題はあるが、再生可能エネルギーは純国産エネルギーとして活用を図っていくことが求められている。また、諸外国では日本よりも野心的な目標が設定されているところも多い。諸外国に盲目的に追従する必要はもちろんないが、電力システムの運用などにどのような違いがあるのかはきちんと検討し、技術的、経済的に導入可能量を増加するために、様々な課題を解決する努力を続けていく必要がある。

参考文献

-
- (1) Tsujii, et al., “Study on the Methods to Suppress the Frequency and Tie-Line Power Flow Fluctuation Due to High Penetration of Photovoltaic Generation Using the Existing Thermal Generators,” Proceedings of 4th Solar Integration Workshop, Berlin, Germany, Nov. 2014
 - (2) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会電力需給検証小委員会, 「電力需給検証小委員会報告書」, 平成 26 年 4 月
 - (3) 松本, 辻, 大山, 「予備力を考慮した電力系統における太陽光発電の kW 価値の算定手法の研究」, 電気学会電力系統技術研究会, PSE15-011, 2015 年 1 月
 - (4) 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会系統ワーキンググループ (第 3 回) 資料 9, 「各社接続可能量の算定結果 (暫定)」, 平成 26 年 12 月

3.6 電力システム運用における需要側資源の活用

3.6.1 はじめに

今後の電力システムの姿を変革させる大きな要因は、太陽光発電(PV)や風力発電等の再生可能エネルギー電源導入拡大⁽¹⁾、規制改革・電力市場の活用⁽²⁾、そして需要家の積極的な参画(active participation)⁽³⁾である。これらの要因は相互に結び付いており、現在の電力システムの技術的制約および制度的制約をブレークスルーするため、規制当局および電気事業者は、既存システムのスマートグリッド化を進めている。出力変動の大きな電源（変動電源）の大量導入は、既存の電力システムの需給バランスに大きな影響を及ぼすことが懸念され、変動電源導入が先行する欧州やアンシラリーサービスの電力市場化を拡大させている米国では、予備力や周波数調整などアンシラリーサービス（系統運用維持サービス）の供給源として需要側資源(demand-side resources)の活用が始まりつつある。さらに、米国においては、変動電源の出力予測誤差に対応するため、ISO/RTO（独立系統運用者/地域送電機構）によるシステム柔軟性(system flexibility)確保のための新しいサービスの設計・開発が進みつつある。

給電指令に対する応答性の優れた蓄電池の導入や負荷追従性の高い電源の導入など系統側の対策とならんで、需要家設置の蓄電池や電気自動車など需要側資源（あるいは分散型エネルギー資源とも称す）の活用を有機的に統合することが変動電源大量連系時の一つの解決策と考えられる。

「安全・安心社会の電気エネルギーセキュリティ特別調査専門委員会」は、再生可能エネルギー大量導入に向けた技術課題とデマンドレスポンス(DR)と需要側対策を調査項目にあげており、再生可能エネルギー大量導入に伴う電力需給バランス問題への対策としての需要側対策に焦点を当てた「再生可能エネルギー大量導入に向けたデマンドレスポンスと需要側対策技術作業部会」（デマンドレスポンス WG 主査は筆者）を2013年に設置し、2015年9月まで活動した。主にDRやエネルギーマネジメントシステムのシステム分析、制御技術、通信技術等に関わる専門家（電力中央研究所、東京都市大学、東京農工大学、早稲田大学、日本電気、NTTコミュニケーションズ、アズビル、サイバーディフェンス研究所、他）で委員を構成し、欧米のDRアグリゲータからの聞き取り調査や関連設備の見学を行った。

米国では予備力供給などにFast DR（高速デマンドレスポンス）実装が進みつつある。日本、米国、欧州における卸電力市場・小売市場の現状を整理した上で、各国におけるDR、需要側資源を電力システムに統合する取り組みを重点的に調査した。DRに関連して下記の観点で詳細な調査を行った。

- 需要家自身が応答するDR
- 自動DR（Slow DR, Fast DR）
- DR実施に必要な機器・技術
- 関連する標準化（国内、国際）
- サイバーセキュリティ

- DR市場化に必要な制度・政策

本稿で、主な調査結果と検討中のDRポテンシャルを紹介する。

3.6.2 需要側資源の活用

米国では、アグリゲータ等の新たなプレイヤーやさまざまなスマートグリッド技術を活用しながら、電力貯蔵やデマンドレスポンスなどの分散型エネルギー資源を電力市場に組み込み、系統運用に役立てる制度が展開されるであろう。NERC（北米信頼度協議会）によると、現在、給電指令可能なデマンドレスポンスの容量（全米）は46GWに達するが、2022年に59GWまで増加していくことが期待されている。特にNPCC,MISO,PJMの各地域ではピーク負荷の8%以上を占め、本格的に需要側資源が活用されている。

北東部の主要なISO/RTOは、2006年頃から、従来の発電機に加え、需要側資源が経済的であれば、アンシラリーサービス供給に参加させる試みを始め、現在では、北東部に加え、テキサス州やカリフォルニア州でも実プログラムが導入されている（表3.6.1, FR, RCは後述）。これらをアンシラリーサービス型デマンドレスポンスと称する。北米で風力発電など出力予測誤差のある変動電源の割合が増え、従前以上に予備力や周波数調整能力を確保する必要が出てくる。カリフォルニア州では、ISOではなく、電力会社やアグリゲータが実施している（表中、△で表記）。系統運用者から需要家ないしは、DRアグリゲータへの通告時間が短く、電力システムの信頼度を維持するために、自動的かつ迅速に（概ね10分未満で）応答する必要がある場合、高速デマンドレスポンス(Fast DR)とも称される。

最も先駆的に需要側資源を参加させているPJMでは、同期予備力（10分瞬動予備力）に参加している資源の容量は、320MW（122サイト）に達する。また、実時間応答を必要とするレギュレーションサービスに参加している需要側資源の能力は10MW（29サイト）である。2014年冬季の荒天時に、停電が起きそうな状況で、PJMが必要な予備力を確保するために、数百万kWの負荷削減が達成され、正に安全・安心社会のための電力供給に寄与している。

もう一つの特徴は、系統運用者のDR活用提案と実施により、規制当局FERCが指令（例：FERC Order No. 745）を出し、提案されたDRプログラムが制度化されていくというフィードバックループができてきていることである。我が国もイン

表 3.6.1 米国電力市場におけるデマンドレスポンス

ISO/RTO	PJM (北東部)	CAISO (加州)	MISO (中西部)	ERCOT (テキサス州)
需要規模 [MW]	163,848	46,847	98,526	68,305
DR使用の有無				
リアルタイム市場	○	△	○	○
一日前市場	○	△	○	○
アンシラリーサービス市場	○	△	○	○
容量市場	○	×	×	×
再生可能エネルギーの電源容量比率	5%	18%	14%	15%
新たな予備力	-	FR	RC	-

センティブ型 DR 実証事業に見られるように、数年遅れでこのトラックに乗り始めたところである。

また、欧州においてもフランスやベルギーなどで DR アグリゲータが事業を行っている。例えば、2013 年 4 月に季節外れの寒波がフランスを襲った時、急激な需要増と原子力発電所定期点検に伴う供給力不足に対して、系統運用者 RTE は、産業用 DR を発動して、最大 505MW の負荷削減を実施した経験をもつ。事業者によると、必要な需要調整量を確保しておくのに最も重要なことは、負荷の中身を熟知し、最適な需要ポートフォリオを形成することである。

3.6.3 情報通信およびサイバーセキュリティに関する技術検討課題

需要家に設置された PV の発電出力や需要家の電力使用量を制御するためには、十分に高速な情報処理と通信の技術が求められ、通信インフラや通信方式の適切な選択とコストの検討が必要である。また、電力需要家の設備を情報通信によって制御できる仕組みが導入されると、サイバーセキュリティ対策も極めて重要となる。米国において産業制御システムのためのサイバーセキュリティ事案の対応を行っている ICS-CERT のレポート⁽⁴⁾によると、2014 年度の 1 年間に ICS-CERT に連絡があった事案のうち、エネルギー分野の件数が 32%を占めている。エネルギー分野には、石油・ガス・電気事業などが含まれる。スマートグリッドではサイバーセキュリティ分野の標準化が進められており⁽⁵⁾、デマンドレスポンスも対象に含まれている。

デマンドレスポンスの普及に向けた情報通信およびサイバーセキュリティにおける技術検討課題を、システムを構成する設備ごとに分類した(表 3.6.2)。制御の対象となる設備、そのバックグラウンドで動作するサーバシステム、両者をつなぐ情報通信ネットワーク、またデマンドレスポンスを実施する新電力事業者・アグリゲータ事業者の 4 つの視点から課題を整理した。

(1) 制御対象設備 デマンドレスポンスによって制御の対象となる設備においては、次のような課題が考えられる。

(a) 発電設備や負荷設備の稼働状況を系統運用者がリアルタイムに把握する仕組み 多数の発電設備の発電量や、

負荷設備の電力使用量等の大量のデータを、系統運用者へほぼリアルタイムに共有できるシステムを低コストで効率的に構築する必要がある。また、太陽光や風力等の発電量の余剰に備え、効率的な遠隔出力制御の方式を確立し、パワーコンディショナ等の関連機器にも機能を装備する必要がある。

(b) 相互接続性の確保 個々の設備の電力使用量や発電量を把握するには、各設備の監視情報を収集するため、データの送受信が容易にできるように、通信プロトコルやデータ形式を標準化しておくことが望ましい。3.6.4 節で実際の取り組み状況を述べる。

(c) 通信切断時の独立運転の仕組み インターネットを使用して通信する場合は、電話や専用線に比べて通信品質が低く、通信がつながらなくなることも想定する必要がある。大規模災害時には、通信ケーブルや無線基地局等の破損あるいは停電により、通信が途絶することもある。通信途絶時にも、各機器が安定的に振る舞い、可能な限り電力品質を維持できるように設計しておく必要がある。

(d) 制御システムセキュリティ対策 制御用機器の設定情報やソフトウェアが不正に書き換えられると、異常なデータの送受信や通信妨害が起こる可能性があり、電力品質の低下やシステム全体の機能不全の恐れもある。このようなリスクを減らすためには、接続する通信機器やシステムにセキュリティ対策を施す必要がある。一定以上の水準のセキュリティレベルを保証する方法や、改ざんやなりすましを防ぐ認証・暗号方式の採用、改ざんを検知し機器をシステムから切り離す仕組み等の検討が求められる。

(2) サーバシステム 制御の対象となる設備のバックグラウンドで動作するサーバシステムにおいては、次のような課題が考えられる。

(a) 発電量・使用量・デマンドレスポンス効果の正確な予測 電力需給制御を安全確実に行うためには、発電量や使用量、デマンドレスポンスや出力制御の効果等を正確に予測する必要があるが、太陽光や風力の発電量は、設備数や日射・風況により変動するため、正確な予測は困難である。そのため、今後は、ビッグデータ解析や機械学習等の技術を活用して、発電量を高精度に予測できるノウハウを蓄積していく必要がある。

表 3.6.2 情報通信およびサイバーセキュリティに関する技術検討課題

分類	必要となる対策・技術
制御対象設備	(1) 発電/負荷設備の稼働状況を系統運用者がリアルタイムに把握する仕組み (2) 相互接続性の確保(通信プロトコル・データ形式の標準化など) (3) 通信切断時の独立運転の仕組み (4) 制御システムセキュリティ対策(機器認証、改ざん防止など)
サーバシステム	(1) 発電量・使用量・デマンドレスポンス効果の正確な予測 (2) データ量の変動に応じたコンピュータリソースの自動最適化 (3) データの漏えい・改ざん防止対策(匿名化、断片化など) (4) 情報システムセキュリティ対策(情報の暗号化、侵入防止・検知など)
情報通信ネットワーク	(1) 大量データの圧縮・間引き技術 (2) 通信回線のデリバリ・契約管理・ユーザ認証方法 (3) 災害復旧時などに急増するトラフィックや回線輻輳時の対応 (4) サイバー攻撃対策(インシデント自動検知、回線自動切断など)
新電力事業者・アグリゲータ事業者	(1) 各社システムの相互接続性の確保(通信プロトコル、データ形式の標準化など) (2) 情報システムセキュリティ対策(機器認証、情報の暗号化など)

(b) データ量の変動に応じた計算機資源の自動最適化
デマンドレスポンスの発動頻度は、気象条件や時間帯によって異なるため、データ通信量や情報処理量も大きく変動する。データ量が最大の時に必要となるシステムを常に確保しておくにはコストがかかるため、クラウドコンピューティング等の技術を活用し、必要な資源をリアルタイムに割り当てるような仕組みが考えられる。

(c) データの漏えい・改ざん防止対策
デマンドレスポンスシステムで扱う情報には、系統設備に関する情報や各需要家の契約情報、電力利用情報、個人情報、インセンティブ支払情報など、機密情報や、改ざんされると社会全体に損害を与える情報が含まれる。データの匿名化・暗号化・断片化等の方法で、万一データが流出しても被害を最小化できることが望ましい。

(d) 情報システムセキュリティ対策
デマンドレスポンスの安定運用を担うサーバシステムでは、システムダウンを防ぐよう冗長構成をとる必要がある。また、情報の暗号化、不正アクセス防止、インシデントの検知と迅速な対処等のセキュリティ対策が必要である。

(3) 情報通信ネットワーク
制御対象設備とそれを支えるサーバシステムとをつなぐ情報通信ネットワークにおいては、次のような課題が考えられる。

(a) 大量データの圧縮・間引き技術
センサデータ等をすべてサーバに送信すると、データの通信量や蓄積量も膨大となりコストが増大するため、データの間引きや圧縮といった情報処理機能を各機器に持たせ、値が大きく変化した時やサーバシステムからリクエストがあった時だけデータを送る等、通信量を抑制する等の工夫が求められる。

(b) 通信回線のデリバリ・契約管理・ユーザ認証方法
膨大な数の通信回線や通信機器の工事、契約者管理、認証、課金請求等の業務を効率化し、契約者の転居や装置の廃棄等にも簡単に対応できるようなサービスが望まれる。

(c) 災害復旧時などに急増するトラフィックや回線輻輳時の対応
災害等で通信ネットワークが一時的に途絶した後の復旧時にすべての機器から一斉にデータが送信されると、通信ネットワークやサーバシステムに大きな負荷がかかるため、データ通信量を平準化する機能が求められる。また、回線輻輳時でも重要な通信はできるよう、優先データ伝送の仕組みも考えられる。

(d) サイバー攻撃対策
膨大な数の情報通信機器のサイバーセキュリティを制御対象設備の所有者が常時監視することは、実際には非常に難しい。例えば通信事業者等が、セキュリティインシデントの発生を検知し、感染した端末機器をシステムから切り離すといったセキュリティ対策の実施が考えられる。

(4) 新電力事業者・アグリゲータ事業者
デマンドレスポンスを実施する新電力事業者・アグリゲータ事業者においては、次のような課題が考えられる。

(a) 各社システムの相互接続性の確保
効率的に低コストでデータを送受信できるよう、デマンドレスポンスを提

供する事業者の通信機器では、通信プロトコルやデータ形式を標準化しておくことが望ましい。

(b) 情報システムセキュリティ対策
相互接続する事業者のどこか1カ所でも脆弱性があれば、サイバー攻撃者が侵入して電力系統全体がダメージを受ける可能性がある。一定以上の水準のサイバーセキュリティを保てるよう基準を設けるなどの方策が求められる。

3.6.4 自動デマンドレスポンスシステムとインセンティブ型デマンドレスポンス実証試験

デマンドレスポンスを広範にかつ効率的に実施するためには、電気事業者とアグリゲータや需要家の情報連携の自動化とそのための通信規約やインタフェースの標準化が重要である。経済産業省スマートハウス・ビル標準・事業促進検討会に設置された DR-TF において、米国の自動デマンドレスポンスの標準通信規格である Open ADR をベースにした国内標準プロトコルが検討された。2014 年に日本版 ADR 手法が提案され、電力システム改革小委員会で議論された DR とネガワット取引を実施するための技術実証（早大—4 地域実証、横浜市、豊田市、けいはんな、北九州市）が行われた（図 3.6.1）⁽⁶⁾。

DR の活用領域を従前の夏季ピークカットだけでなく、アンシラリーサービスや経済代替活用まで拡大することを念頭に、平成 25 年 12 月～平成 27 年 3 月の期間で経済産業省資源エネルギー庁実証事業として、DR 事業者（アグリゲータ）と東京電力がインセンティブ型 DR 実証を実施した。DR 発動から実負荷抑制までの時間や削減量の有効性等を検証し、DR の価値を評価した。当該実証を通じて、今後の DR 市場の姿を示すことで、海外事業者も含めた DR 事業者の支援、ビジネス環境整備の促進を目的としている。

国内外 6 社の DR アグリゲータ合計のアグリゲート需要家数は 500 件以上、調整容量は約 110MW にて実施し、全事業者で「通告～調整まで」が 1 時間未満のインバランス領域での DR 発動も実施した。

負荷調整方法としては、自動遮断・制御等による特定負荷の制御や自家発電の制御による調整、ならびに蓄電・蓄熱等

4地域実証	横浜市	豊田市	けいはんな	北九州市
対象	ビル7棟 集合住宅7棟	住宅52棟 + HEMS連携4棟	住宅14棟 ビル3棟 EV100台	住宅225棟 事業所49棟
DR種別	インセンティブ型	電気料金型	インセンティブ型	
前日告知	✓	✓	✓	✓
粒度	1時間単位	日単位	30分単位	日単位
DR信号種別	時間帯指定の抑制値 (kW)	抑制値のみ (3段階の抑制レベル)	30分毎指定の抑制値 (kW)	・2段階の料金レベル ・地域全体の削減目標値(kW)
DR発動実績(冬)	2014/1月	2014/2月	2013/12月	2014/2月
DR発動実績(26年度)	2015/1月	2014/9月	2014/8月	2014/8月-11月

早大給電指令所からの発動

図 3.6.1 4 地域 DR 実証の対象と信号種別⁽⁶⁾

(出典：自動デマンドレスポンス～国際標準規格と実証試験の取り組み～、電気評論、2015 年 9 月)

を活用した自動運転制御による調整を用いた。実証では、東京電力の操作者が週単位で発動スケジュールを統合DRAS(Demand Response Automation Server)に登録し、平成26年度は合計159回の自動DR発動を実施した。

さらに、平成27年度はネガワット取引を対象とした「エネルギーマネジメントシステム構築に係る実証事業」が行われた。本事業では、需要削減を発電と等価な資源として相対契約や市場を通して取引することを想定して、ネガワット取引と称している。アグリゲータ21社が事業者として採択されており、一般電気事業者3社（東京、関西、中部）との間でネガワット取引の実証を行っている。本事業の目的は、資源エネルギー庁が策定した「ネガワット取引に関するガイドライン」に定めたネガワット量を確定するためのベースラインの決定と測定方法等の妥当性の評価、国内のネガワットポテンシャルの推計である。

3.6.5 Fast-DRのための制御対象機器と制御システム

(1) 需要家機器のFast-DR適用ポテンシャル Fast-DRでは、制御対象機器の特性として、①高速な応答や②制御できる電力量の連続性が求められ、且つ、機器の制御に対する受容性として、需要家の利便性や快適性の維持を考慮した上での③制御時間の融通性や④制御できる電力量の柔軟性が求められる。しかし機器によっては、応答性の悪い機器や、スイッチのOn/Offしかできず②を満足するためには複数の機器を束ねて制御する等の工夫が必要な機器がある。また、利用できる時間に制約がある機器や、利用できる電力量に制約がある機器もある。一方で蓄電池のように単体で、上記要求①～④を満足する機器もある。以下では、上記①～④の要求について、その重みをほぼ等しいと仮定した上で、要求条件の充足度をもとに、各種機器のFast-DR適用ポテンシャルを検討した。検討にあたっては、これまでに報告されている需要家機器の周波数制御等に関する研究を参考にした⁽⁷⁾⁻⁽¹⁵⁾。Fast-DRのアプリケーションとして、調整力(Regulation)と予備力(Reserve)を想定し、各種機器の適用ポテンシャルを、要求①～④を満足するか否かで整理した(表3.6.3)。ここでは、自家発電機、PV等の分散電源はDR対象外とした。

調整力は、電力系統における平常時の電力需給バランス変動に対応するもので、ガバナフリーや負荷周波数制御(LFC)

に相当するアプリケーションである。秒～分程度の応答性が求められ、DR契約の最低時間単位を考慮すると時間程度以上の継続性が必要であり、電力需要制御機能としては“需要の増減”が求められる^{(16),(17)}。本アプリへの高い適用性が期待できる機器は、要求条件①～④を満足する“蓄電池”である。次に適用性が高いものは、③に難がある“電気自動車”であり、①と②に難がある“HP(ヒートポンプ)給湯機”や、①②に加えて④の出力可変幅を大きくできない“空調機器”が続く。ただし、空調機器は、産業用から家庭用まであらゆる需要分野にあり、国全体での普及規模が大きく、調整力としてのポテンシャルは大きい⁽²⁰⁾。

予備力は、系統事故等の緊急時に備えて常時用意しておくなければならない機能であり、瞬動/運転/待機予備力に相当するアプリケーションである。求められる応答性としては、瞬動予備力の秒から、運転予備力の十数分程度である。また、求められる継続性としては、瞬動予備力の十数分や運転予備力の時間程度以上が必要である。電力需要制御機能としては“需要の減少”が求められる^{(16),(17)}。よって実際のDRでは、機器をOffする、若しくは、蓄電池の充電停止や放電が行われる。本アプリへも“蓄電池”が最も適しており、次に“電気自動車”や“HP給湯機”が該当する。これらに比べて“空調機器”は、利便性や快適性を損なわない範囲でのみ機器をoffできることから、やや適用性が劣る。

このように、Fast-DRで想定される“調整力”、“予備力”といったアプリケーションに対して、総合的に最も高い適用ポテンシャルを有する機器は“需要家側の蓄電池”であり、“電気自動車”も有望と考えられる。

(2) 制御システム 次に、Fast-DRを実施する制御システムについて、最も適用ポテンシャルの高かった需要家側の蓄電池を例として、調整力への適用を想定して説明する。制御システムの類型を図3.6.2に示す。大きく、集中型、分散型、そして集中・分散協調型に分類することができ、その特徴は、制御に必要な通信コスト、制御の信頼性、蓄電池群全体の制御の最適化可能性、制御可能な蓄電池の数に対するスケーラビリティ、システムとしての制御の応答性、などの観点で捉えることができる。

集中型の制御システムは、中央サーバが制御対象の複数の蓄電池全体へ一括して制御信号を送信し、個々の蓄電池を制御するシステム形態であり⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾、横浜スマートシティプロジェクトにおける蓄電池SCADAが代表例として挙げられる⁽¹⁹⁾。電力系統における自営網のような高信頼・高セキュリティな通信を前提とすれば、制御の信頼性は高くなるが、インターネット等を利用する場合、信頼性に懸念が出る。制御対象の蓄電池群全体の制御最適化も可能であるが、サーバからの制御の周期 T_1 と蓄電池個々の制御の周期 T_0 が等しいため、周期 T_1 で最適化を行うためには計算コストが高くなり、制御可能な蓄電池の“数”に関するスケーラビリティは低い。また、通信遅延の影響を直接受けるため、制御応答性は低い。

分散型の制御システムは、中央サーバに対し、個々の蓄電池が独立して制御を実施するシステム形態である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。蓄電

表 3.6.3 各種需要家機器のFast-DR適用ポテンシャル

サービス	調整力				予備力			
概要	秒～分程度の応答性、時間程度以上の継続性、が必要な平常時の不規則な電力需給変動への対応				秒～十数分程度の応答性、十数分～発電機の起動に必要な時間程度以上の継続性、が必要な緊急時の電力需給変動への対応			
必要な機能	需要の増減				需要の減少			
評価項目	①	②	③	④	①	②	③	④
蓄電池	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
電気自動車(EV)	✓	✓		✓	✓	✓		✓
HP給湯機			✓	✓	✓	✓		✓
空調機器			✓		✓	✓		

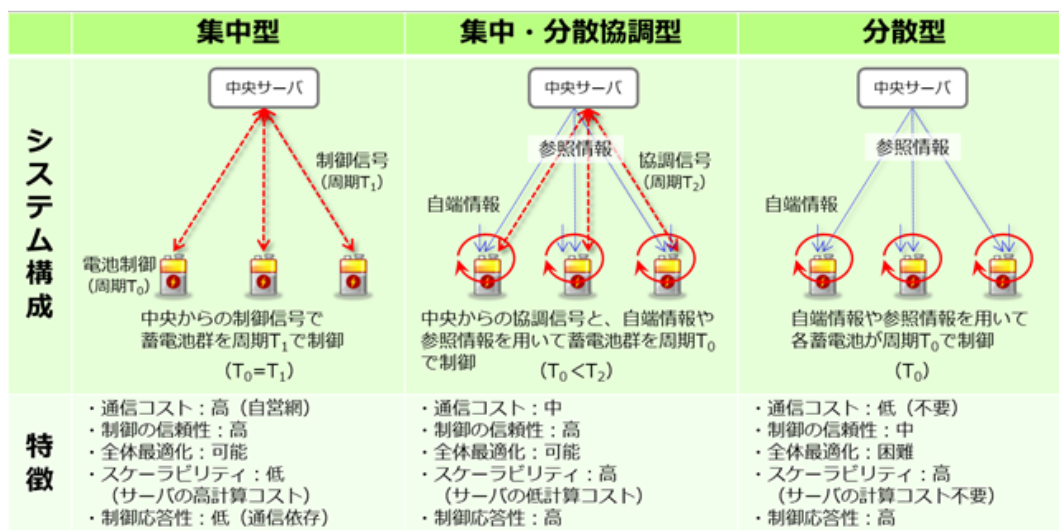


図 3.6.2 Fast-DR のための制御システム類型

池個々がローカルの制御アルゴリズムに基づき、自端で計測する周波数等の情報や、中央サーバから送られる LFC 信号等の参照情報に応じて制御を実施する。通信依存性が小さいため、通信コストを低く抑えられるが、集中型に比べて制御信頼性は低く、蓄電池群全体の最適化は難しい。但し、スケーラビリティは高く、制御応答性も高い。

集中・分散協調型と分類できる制御システムが最近報告されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。中央サーバからの長周期 T_2 の協調信号と、蓄電池個々が自端で計測する周波数や LFC 信号等の参照情報を用いて、短周期 T_0 で制御を実施する形態である。蓄電池群全体の制御最適化が可能であり、制御の応答性も高く維持することができる。最適化情報を、例えば十数分程度以上の長周期の協調信号として配信すればよいと、最適化処理に必要な計算時間を確保でき、制御可能な蓄電池の“数”に関するスケーラビリティも高い。協調信号の配信で通信エラーがあっても再送できる時間的余裕があるためインターネットの利用も可能であり、通信コストの低減も期待できる。各蓄電池の制御状態の把握も可能であり、高い制御信頼性が期待できる。

なお、予備力・調整力についてみると、平成 29 年度調整力電源の中で稀頻度リスク対応電源 I' として、デマンドレスポンス資源が 95.8 万 kW を落札した。さらに 29 年度需要家側エネルギーリソースを活用したバーチャルパワープラント (VPP) 構築実証事業においては、電源 I-b 相当の調整力供給の実証実験が計画されている。電力系統に分散して存在するエネルギーのリソース（ディマンドレスポンス制御機器、電気自動車等）をアグリゲート（統合制御）し、あたかも一つの仮想発電所のように機能させるリソースアグリゲーターの活用が提案されている。

3.6.6 おわりに

変動電源導入拡大と電力市場の高度化が進む中、系統運用者から需要家へのデマンドレスポンス信号による需要側資源

の系統運用への積極的な関与が進みつつある。国内外で、幅広い需要側資源の本格活用が始まっている。供給不足時や変動電源連系時の電力系統の信頼度維持に役立つことを目指し、正に電気エネルギーセキュリティに貢献することがデマンドレスポンスと仮想発電所の役割である。

謝辞： 本稿執筆に協力いただいた境野哲氏（NTTコミュニケーションズ株式会社）、木内舞氏（株式会社サイバーディフェンス研究所）、吉永淳氏（早稲田大学）、工藤耕治氏（日本電気）、太田豊氏（東京都市大学）、池上貴志氏（東京農工大学）の各 WG 委員に感謝します。

参考文献

- (1) 浅野浩志，特集解説「出力変動電源の系統連系技術」，電学論 B, 132 巻, 4 号, 2012 年 4 月, pp.297-300
- (2) 浅野浩志，電力規制改革の国際動向と今後の展望，電気学会誌, 135 巻, 6 号, pp.364-365, 2015 年 6 月
- (3) 浅野浩志，デマンドレスポンスによる需給安定化，電気学会誌, Vol.132, No.10, 2012 年 10 月, pp.688-691
- (4) National Cybersecurity and Communication Integration Center, Department of Homeland Security: “ICS-CERT Year in Review 2014” (2014) https://ics-cert.us-cert.gov/sites/default/files/documents/Year_in_Review_FY2014_Final.pdf
- (5) 嶋田文裕：「スマートグリッドのサイバーセキュリティ標準化動向」電気学会論文誌 C, Vol. 133 No.3, pp.558-561, 2013 年 3 月
- (6) 林泰弘，自動デマンドレスポンス ～国際標準規格と実証試験の取り組み～，電気評論, 2015 年 9 月
- (7) 入江寛，横山明彦，多田 泰之：大容量風力発電導入時における需要家ヒートポンプ給湯器と蓄電池の協調による系統周波数制御，電学論 B, 131(9), 747-755, (2011).
- (8) 清水浩一郎，益田泰輔，太田豊，横山明彦：系統周波数変動抑制のための電気自動車群の使用者利便性を考慮した SOC 同期制御手法，電学論 B, 132(1), 57-64, (2012).
- (9) 益田泰輔，清水浩一郎，横山明彦：大量の再生可能エネルギー電源が導入された電力系統における多数台のヒートポンプ給湯機と電気自動車を利用した負荷周波数制御，電学論 B, 132(1), 23-33, (2012).
- (10) 菊池広典，浅野 浩志，坂東 茂：再生可能エネルギー電源大量連系時の業務用空調機電力制御による負荷周波数制御，電学論 B, 135(4),

- 233-240, (2015).
- (11) 太田豊, 谷口治人, 中島達人, K. Liyanage, 清水浩一郎, 益田泰輔, 馬場旬平, 横山明彦: ユビキタスパワーネットワークにおけるスマートストレージの周波数制御への効果, 電学論 B, 131(1), 94-100, (2011).
 - (12) Y. Ota, H. Taniguchi, J. Baba, and A. Yokoyama, "Implementation of Autonomous Distributed V2G to Electric Vehicle and DC Charging System", Electric Power Systems Research, Vol.120, pp.177-183 (2015-03)
 - (13) H. Sakuma, R Hashimoto, H Yano, A Vichweider, K Kudo, "Novel Demand Response Scheme For Frequency Regulation Using Consumers' Distributed Energy Storages," 2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Washington DC (2014)
 - (14) 橋本龍, 佐久間寿人, 矢野仁之, 工藤耕治: "需要家側蓄電池の仮想統合制御によるアンシラリー・デマンドレスポンス", 平成 27 年電気学会全国大会, 6-223 (2015)
 - (15) PJM 2014 Load Response Activity Report.
 - (16) PJM, "PJM Manual 11, 12"
 - (17) ERCOT Concept Paper, "Future Ancillary Services in ERCOT" (2013-09)
 - (18) CAISO Draft Final Proposal Flexible Ramping Product 2014.
 - (19) 平成 26 年度次世代エネルギー・社会システム実証事業 成果報告書, "CEMS② (蓄電池 SCADA) 実証", 一般社団法人新エネルギー導入促進協会, http://www.nepc.or.jp/topics/2015/0330_1.html (2015-03)
 - (20) 電力中央研究所報告 Y13030(2014)

3.7 大災害時における電力システム運用

3.7.1 はじめに

我が国の電力システムは夏季の台風、冬季の暴風雪など毎年繰り返し厳しい自然環境にさらされている。また地震や火山が多い国土であるため、これらの自然現象の被害を受ける可能性も高い。記憶の新しいところでは1995年1月の阪神・淡路大震災や2011年3月の東日本大震災が広域の停電を引き起こした。また我が国に限らず2012年10月の米国東部でのハリケーンの上陸により大規模停電が発生している。

本稿では、地震・津波・暴風雨による電力システムの被害の特徴とその対策を紹介する。対策についてはレジリエンス（Resilience、回復力、弾力性）という視点から電力システムに望まれる性質や機能を整理している。また私案であるが、レジリエンス向上方策として、災害時に生き残った分散電源と配電ネットワークを活用する電力供給のコンセプトも紹介する。

3.7.2 自然災害による電力システムの被害

電力システムにとって代表的な自然の脅威は雷である。しかし、避雷・絶縁・保護システム技術の高度化により雷が原因となる大停電は現代の日本では稀である。大停電を引き起こす最たる自然災害はやはり地震と台風であろう。地震による大停電と言えば1995年1月17日の早朝に発生した兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災である。この災害により約260万軒が停電し、停電解消まで6日間ほどかかっている。都市近郊で発生した直下型地震であったので、架空配電設備の被害が多かったようである⁽¹⁾⁽²⁾。

また2011年3月11日午後に発生した東北地方太平洋沖地震による被害は甚大で、発生した停電は東北電力管内で約466万軒（全戸数の約70%、8日後に約94%停電解消）、東京電力管内で約405万軒（全戸数の約20%、7日後にすべて停電解消）であった。この震災の特徴は東北地方北部太平洋沿岸から関東地方北部沿岸までの広い範囲で大津波が発生し、それによる沿岸部の火力・原子力発電所が浸水被害を受けた結果、電力供給源を失った点である⁽³⁾⁽⁴⁾。

台風については我が国では毎年2、3個の台風が上陸しており、それに伴う暴風雨や土砂崩れによる被害は絶えることが無い。しかし幸いなことに近年は阪神・淡路大震災クラスの大規模停電を発生させてはいない。一方、米国東部において2012年10月29日にハリケーン・サンディが上陸し、広範囲で停電を発生させた。停電件数は約860万軒と東日本大震災のときの停電に匹敵している。文献⁽⁵⁾によると完全復旧するまでに10日間以上を費やしている。

これらの自然災害による電力システムの被害を図として簡略表現したのが図3.7.1である。地震による直接的被害としては、鉄塔や電柱の倒壊等による送変電・配電設備の損傷があり、電力分配機能の低下により停電を招く。津波は沿岸に位置する発電所を浸水させる危険性があり、発電能力不足による停電を引き起こす。台風などの暴風雨は上陸した経路に依

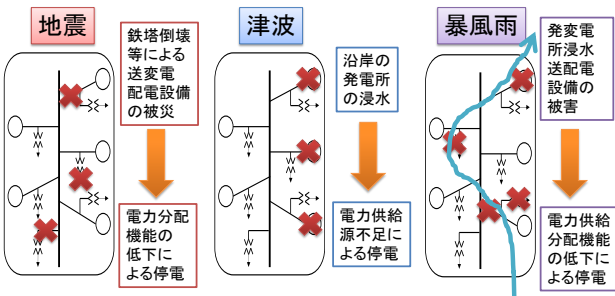


図 3.7.1 自然災害による電力システム設備の典型的な被害

存するが、発電所や変電所の浸水、送配電設備の損傷により停電が広域化する可能性がある。

3.7.3 電力システムのレジリエンス

前述した自然災害に代表されるインパクトを電力システムが受けた際、如何に可能な限り速やかに健全な状態に回復できるのかをレジリエンスという視点から整理してみる。まず、物理的・社会的システムのレジリエンスを特徴づける項目を文献⁽⁷⁾に従って示すと表3.7.1の第1列目ようになる。第2列目には、著者が各項目に対応すると考える電力システムの性質と機能を記している。

Robustness は、システムの機能性を失わずにサービスを提供できるシステム固有の能力を指す。電力システムに対応させてみると、被害を受けても送配電の機能を失うことなく需要に電力供給を行える能力、要するに停電を起こさない能力であり、電力システムの“丈夫さ”と言える。

Redundancy は代替となる選択肢や代用となる物を備えている性質を指し、電力システムで言えば送電ルートが複数あること、中央給電指令所のバックアップがあることなど、設備が多重化されていることに相当する。すなわち停電を起こさないための電力システムの“余裕”を表わしている。

Resourcefulness は緊急時に必要な物資やサービスを動員できる能力を意味している。電力システムでは、設備の保守・点検時に使用される電源車の保有台数や災害時に他電力会社等から人員等の応援の得やすさなどが対応すると思われる。要するに、停電してもそれを軽減できる“補う力”あるいは“動員力”と言ってもよいであろう。

Rapidity はシステムの機能が復旧する速さを指し、電力システムでは停電発生時から復電するまでの時間に対応する。

表 3.7.1 自然災害に対する電力システムのレジリエンス

レジリエンスを評価する項目	対応する電力システムの性質・機能
Robustness 丈夫さ	◎停電しない能力： 電力設備の地震動耐力、浸水耐力など
Redundancy 余裕	◎電力設備の多重化： 送電ルートの複数化、中央給電指令所のバックアップなど
Resourcefulness 動員力	◎緊急時の動員力： 電源車の保有、他組織からの支援など
Rapidity 回復の速さ	◎停電からの復旧時間： 復旧要員の人数、技術水準などに依存

要するに健全状態に戻る“回復の速さ”を表わしている。なおこの速さは復旧要員の人数や技術水準に依存する。

さて、システムの丈夫さと回復の速さを定量的に示したのが図 3.7.2 である。システムの丈夫さは、被害を受けた直後（時刻 t_0 ）のサービス提供能力によって表わされる。またサービス提供能力が、被害を受ける前のレベルにまで回復する過程の傾きが回復の速さに対応する。したがって、被害直後のサービス提供能力が大きく、回復するまでの時間が短いシステムがレジリエンスの高いシステムである。

このレジリエンスの定量的な見方を図 3.7.3 に示す東日本大震災における停電戸数の推移とハリケーン・サンディのときのデータ⁽⁹⁾に適用してみると、おおよそ表 3.7.2 に示す数値が得られた。ただし、東北管内と東京管内の電力システムが地震や津波によって受けたインパクトの大きさは異なるので表 3.7.2 に示した数値の単純比較はできないが、米国のハリケーンの場合よりは早期に回復できているようである。電力システムのような巨大なインフラシステムの復旧過程には、送配電設備と需要の地理的広がり、復旧要員の行動力など多様な要因が絡んでいる。したがって、レジリエンスを正確に評価するためには停電戸数の減少過程の因果関係をきめ細かく分析し、それに基づく対策を立てておくことが、将来の大災害に対する備えになると思われる。

国では将来発生が予想されている南海トラフ巨大地震や首都直下型地震を念頭に電力システムのレジリエンスを向上させる方策を検討し、電力安全小委員会の報告書⁽⁹⁾としてまとめている。それに依ると大規模電源・基幹送変電設備側の対策として次の方策が挙げられている。

- 想定被災ケースの電力需給シミュレーションによる供給支障量の把握
- 中長期的視野の設備形成
- 火力発電の早期再開運用法、増出力運転活用など
- 技術水準を維持した復旧要員の確保
- 復電の優先順位の判断基準の合意形成・最適化
- 公的機関等への非常用発電導入の推奨

3.7.4 分散電源を活用したレジリエンス向上方策

(1) 提案されている方策 前述した電力システムのレジリエント向上方策は主に大規模電源と基幹送変電設備に関するものであるが、需要側の分散電源を利用する方策も考えられている。その一つの方策として、著者は災害時に健全な状態で生き残った既存の配電ネットワークを使用して自立運転を行うことを提案している⁽¹⁰⁾。これについては次節で少し詳しく紹介したい。もう一つの方策は最も標準的な考え方であると思うが、各消費者単位で自身の家屋等の屋根に設置された太陽光発電装置（以下、PV）を非常用電源として使用する方法である。蓄電池が導入されていれば昼間に蓄えた太陽エネルギーを夜間にも使用できる。この方法の必要性は神戸大学による阪神・淡路大震災の研究⁽²⁾において指摘されている。ただし、この方法の問題点は発電装置を所有している人は系統停止時にも電気を利用できるが、所有していない人は

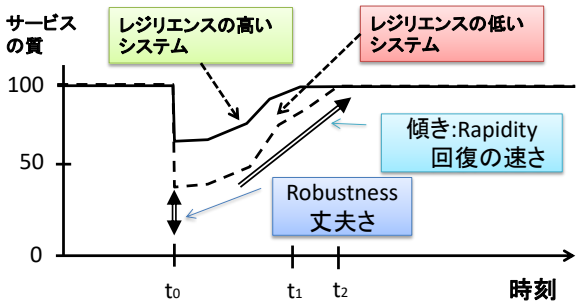
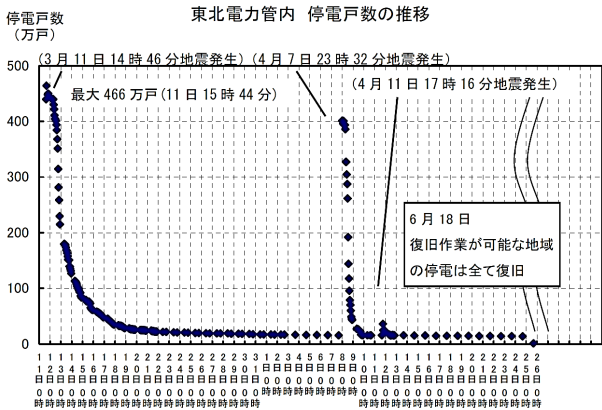
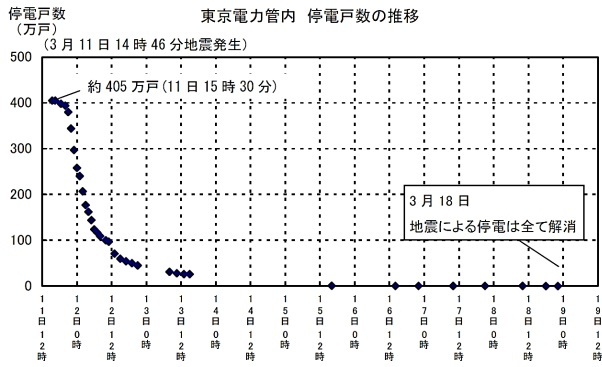


図 3.7.2 レジリエントシステムの応答特性



(a) 東北電力管内の停電戸数



(b) 東京電力管内の停電戸数

図 3.7.3 レジリエントシステムの応答特性

(出典：経済産業省：「原子力安全・保安部会電力安全小委員会電気設備地震対策ワーキンググループ報告書(案)参考資料」，2012 年 3 月)

表 3.7.2 自然災害に対する電力システムの丈夫さと回復の速さの例

レジリエンスの評価項目	東北地方太平洋沖地震			ハリケーン・サンディ
	東北電力管内		東京電力管内	米国東部
	本震 2011年3月11日 14:46	余震 2011年4月7日 23:32	本震 2011年3月11日 14:46	上陸 2012年10月29日
丈夫さ Robustness	37. 0%	45. 8%	85. 9%	87. 6%
回復の速さ Rapidity	0. 31%／時間	1. 1%／時間	0. 19%／時間	0. 05%／時間

電気を使用できない点である。要するに大災害時の異常事態に、電気を使用できる人と使用できない人が同じ町内などに存在し、それが長期間に及ぶと、場合によっては社会的な不安定を招きかねない点が危惧される。

他に提案されている方策としては、クラスター拡張型グリッドというマイクログリッドに類似した方法がある⁽⁹⁾。この方法では、ある地域に存在する分散電源と電力貯蔵装置および需要の組を、ひとかたまり（クラスターと呼ぶ）とみて、正常時はクラスター間が連系して運転されている。ただし、クラスターが接続している上位系統に事故が発生したときには、各クラスターが自立運転を行うという方法である。この方法は後述する著者の考えている方法とかなり類似したアイデアである。

また分散電源の活用に限定した考え方ではないが、RESCUE (Resilient Energy System for Continuity in Ultimate Emergency) というコンセプトも横浜国大から提唱されている。このシステムでは、被害の受けにくいエネルギー供給ネットワークの構築、供給力不足時の電力需要の優先度付け、ネットワーク管理者と需要家の行動決定メカニズムなど、災害時のエネルギー供給に適した社会・経済的なルールに重点が置かれている。

(2) 配電ネットワークの非常時自立運転のコンセプト
東日本太平洋沖地震発生後の電力システムでは、主要な大規模発電所が停止したため、配電設備に大きな被害が出なかった地域であっても停電に見舞われた。著者も仙台市において地震発生から丸二日間ほど停電を経験した。復旧は市内の他の地域よりも早い方であったと思うが、その二日間、特に夜間は真っ暗闇の中、早く電気の灯りが欲しいと家族とともに切望した。そのような中、自宅近くの配電線や電柱は見た目には壊れたところも無さそうで、このような健全な配電設備と可制御の分散電源があれば町内の近隣の人々に電灯や暖房、携帯電話用の電源など、最低限の生活を維持するために必要な電力を供給できるのではないかと感じた。そしてそれを実現するための研究を始めなければいけないのではないかと、電力システムを研究する一人として強い使命感を感じた。この停電の経験が、以下に述べる非常時の電力供給方法を研究するきっかけになった。

ところで、上述した配電ネットワークの運用は一般に単独運転と呼ばれ、保守技術者の安全性の観点から電気設備技術基準の省令により禁止されている。したがって現在の法規制の下では、以下に紹介する電力供給の方法は実現できない。しかし、もし非常時に限って単独運転が許されるならば、将来起り得る災害発生時に、部分的ではあるかもしれないが多くの人が電力不足の危機を免れることができるかもしれない。なお本稿では、通常の単独運転と非常時の単独運転を区別するため、後者の単独運転を配電ネットワークの自立運転と呼ぶことにする。

現在、図 3.7.4 に示す配電ネットワークの自立運転の技術的実現可能性を検討している。送電網や大規模電源の故障により配電ネットワークへの電力供給が停止すると 6.6kV の高压

配電線は無電圧になり、配電線は遮断器と自動区分閉器により複数の区間に分離される。提案の自立運転は、その配電線の各区間に接続している分散電源を活用して、各区間における分散電源出力と重要負荷の需給平衡および電圧と周波数の品質を保つように自律分散制御を行う方式である。著者は、そのような配電線の区間を「自立運転可能な配電ネットワーク (Islanded Distribution Network, IDN)」と呼び、主に家庭用の PV や燃料電池 FC、電気自動車 EV などの交直変換器を介して配電線に連系する分散電源の活用を想定している。

IDN の安定な運用を可能にするため、次の監視・制御技術を開発する必要があると考えている。

- (a) 負荷制御を含むエネルギー管理システム EMS
- (b) 隣接する IDN と無停電で同期連系する技術
- (c) 低消費電力の監視とデータ収集・制御 SCADA
- (d) 自律分散型の保護システム

EMS の目的は IDN 内の重要負荷へできるだけ長く安定に電力を供給することであるので、需給平衡と電力品質を保ちながら分散電源と負荷を統一的に管理・制御する技術が必須となる。無停電同期連系技術は、復旧後の電力システムに配電線が再連系する際や、IDN の安定運用のために複数の IDN を接続または切り離しを柔軟に行うときに必要である。低消費電力 SCADA は、言うまでもなく電力供給力が十分ではない IDN の監視・制御にとって必須であろう。IDN の実現において最も困難な課題と考えられるのは保護システムである。IDN 運用時に発生した事故の検出・除去と復旧の仕方は、現状の配電システムの保護システムと大きく異なるものと考えられる。したがって、新たな開閉機器や保護システムの開発など、コスト面も含めた課題の解決が必要であろう。

これまで、IDN を実現するための技術上の課題の中で、負荷制御と EV バッテリー群による最適需給運用⁽¹¹⁾や、単相分散電源群による IDN の電圧制御⁽¹²⁾について基礎的な研究に取

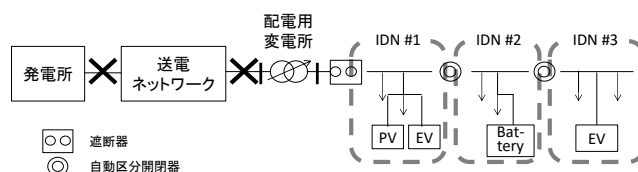


図 3.7.4 緊急時の自立運転配電ネットワークのコンセプト

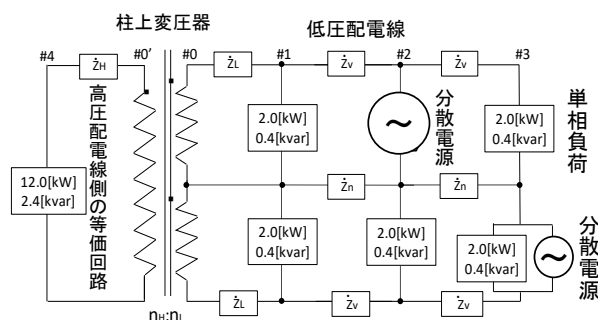


図 3.7.5 不平衡潮流計算法を開発するための IDN モデル

り組んできている。紙面の都合で研究内容の詳細は文献にゆずるが、IDN の運用・制御の検討に必須となる不平衡潮流計算法を、図 3.7.5 に示した低圧側のみに複数の単相電源が存在する電力回路を対象に開発中である。

3.7.5 あとがき

種々の技術が進歩しても大規模な自然災害による電力システムの被害とそれに伴う停電を皆無にすることは不可能であろう。したがって、システムの一部が破壊されても残りの健全な部分でシステムの機能を維持できる能力、すなわちレジリエンスを如何に電力システムに埋め込んでいくのかが今後の重要な技術開発の視点である。文献 (13) によると、翼の一部を失ったジェット戦闘機をパイロットが巧みに操縦して無事に帰還した出来事が 1980 年代にあった。そしてその出来事を皮切りに、損傷を受けても安定な飛行を可能にするインテリジェント飛行制御システムの研究が始められたそうである。これに照らして考えてみると、災害時に被害を受けずに生き残った健全な分散電源や電力設備を上手に運用・制御して停電の被害を最小化する技術の研究開発は、自然災害の多い我が国にとって大変重要であると言える。

参考文献

- (1) 金山, 西川:「阪神・淡路大震災における電力ライフラインの復旧について」, 研究・技術計画学会第 11 回年次学術大会講演要旨集, 2 C11, pp.234-239(1996)
- (2) 大澤:「災害と電力供給システム」, 平成 9 年度第 15 回神戸大学工学部公開講座テキスト, pp.53-62
- (3) 原子力安全・保安部会電力安全小委員会:「電気設備地震対策ワーキンググループ報告書」(平成 24 年)
- (4) 豊馬:「電力システムの被害・対応状況とその課題」, 電気学会公開シンポジウム配付資料(平成 23 年)
- (5) Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, U.S. Department of Energy, “Comparing the Impacts of Northeast Hurricanes on Energy Infrastructure” (2013)
- (6) 産業構造審議会保安部会電力安全小委員会:「電気設備自然災害等対策 WG 中間報告書について」(平成 26 年)
- (7) T. D. O’Rourke, “Critical Infrastructure, Interdependencies, and Resilience,” The BRIDGE LINKING ENGINEERING AND SOCIETY, Vol. 37, No. 1, pp.22-pp.29 (2007)
- (8) 豊田, 白崎, 千田:「電力供給システムの弾力性(レジリエンス)に関する検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-11-134/PSE-11-151, pp.63 - 68 (2011)
- (9) 横山編著:「災害に強い電力ネットワーク スマートグリッドの基礎知識」, 早稲田大学ブックレット「震災後」に考える (2011)
- (10) H. Saitoh, M. Abe, and W. Yashima, “A Proposal of Emergency Microgrid Operation of Distribution Systems after Large Scale Disasters,” IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference 2013, pp.152-157 (2013)
- (11) M. Abe and H. Saitoh, “An Optimal Scheduling of Battery Output and Load Control for Loss Minimizing Islanding Operation of Distribution Networks in Emergency,” Proceedings of 18th PSCC, ID382, pp.1-7 (2014)
- (12) 石倉, 斎藤:「緊急時単独運転の配電系統を対象とした不平衡潮流計算法の基礎検討」, 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 (2014)
- (13) S. Massoud Amin and Bruce F. Wollenberg, “Toward a Smart Grid,” IEEE Power and Energy Magazine, pp.34-41, Sept./Oct. 2005.

3.8 電力技術の継承にかかわる問題点と人材育成

3.8.1 はじめに

我が国の電力システムは 100 年余の歴史を持ち、世界に誇ることができる優秀な技術を数多く生み出してきた。しかし、近年の経済成長・電力需要の鈍化から電力システムへの新規設備の導入が減少し、技術者が経験を積む場が減りつつある。そして製造現場や開発現場などで、技術継承の危機が叫ばれるようになった。日本が世界に誇る優秀な技術が次世代に引き継がれることなく廃れていくといった現象がいくつか見られるのである。また、いま現在はそれほど深刻な状況でなくても、将来に対する危機感が増大している。このような状況の中で、我々は電力システム分野における新たな人材を育てることで、この危機を乗り越えていかなければならない。

安全・安心社会の電気エネルギーシステムを持続可能なものとするためには、人材の育成・技術の継承が極めて重要である。近年の経済成長・電力需要の鈍化から電力システムへの新規設備の導入が減少し、技術者が経験を積む場も減りつつあるなど、技術継承の危機が叫ばれるようになっている。英国の EU(欧州連合)離脱、米国の大統領選など反グローバル化の動きが台頭するにつれ、世界の社会・経済はますます複雑化し、将来の予測が困難になっている。また、一部の企業における長時間労働やモラルの低下、うっかり事故の増加なども問題になっている。さらには、AI(人工知能)や IoT(モノのインターネット)、ロボットなど新しい技術の発展に対して、その安全性の確保が叫ばれている。また、2011 年の福島原発事故から約 6 年が経過し、そのショックがともすると風化しつつある現在でも、震災や火山噴火・台風などの災害は引き続き発生しており、電力システムに対する脅威となっている。このような状況の中、電力エネルギーを支えるシステム技術(電力系統技術)や、個々の電力機器に関わる要素技術、さらにはそれらのセキュリティに関する技術を次世代に引き継いでいくためには、確立された技術の継承や人材育成の必要性がますます大きくなってきている。

委員会では、技術継承や人材育成について検討してきた(4)。本稿では、これらの検討内容の中から、まず電力技術の歴史の中で特に日本の優秀な技術について述べる。次に、メーカ幹部へのインタビューに基づいて技術継承の実態を述べ問題点を挙げる。加えて、メーカ在籍時における本章執筆者の経験について述べる。最後に、「人材育成」という観点から、電気学会における資格制度の活用、我々自身の立場からできること(大学での研究・教育活動の活性化、社会に向けた情報発信、活動など)を考える。(図 3.8.1 参照)

3.8.2 日本の優秀な電力技術

日本の電力技術は 100 年余の歴史を持ち、世界に誇ることができる優秀な技術を数多く生み出してきた。ここでは、その歴史を概観し、その後、日本の優秀な電力技術について具体的に紹介する。

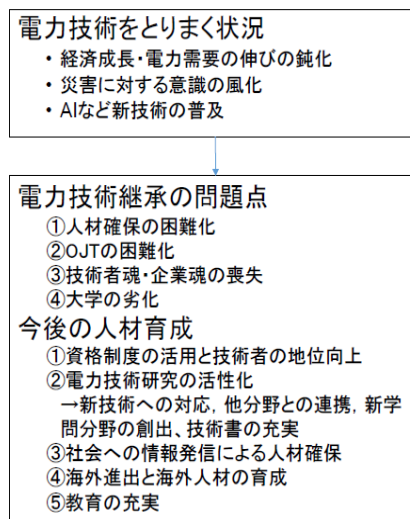


図 3.8.1 電力技術の継承と人材育成

(1) 日本の電力技術の歴史 文献(5)~(7)では日本の電力技術がたどった歴史について考察している。ここでは、文献(7)における、三つの時代に分けての考察について以下にその概要を示す。

A：多数の電力会社が併存した時代(1883年2月~1939年3月)

B：電力国家管理の時代(1939年4月~1951年4月)

C：九電力体制の時代(1951年5月以降)

Aの多数電力併存時代では、民有民営の多数の電力会社が主で、それに地方公共団体が所有する公営電気事業が部分的に併存した。この時代は電力会社間の市場競争の有無によって、さらに下記の三つの時期に細分化される。

A-1：小規模火力発電に依拠する電灯会社が都市ごとに事業展開し競争がない時期(1883~1906)

A-2：水力発電と中長距離送電に依拠する地域的な電力会社が激しい市場競争を展開した時期(1907~1931)

A-3：カルテル組織である電力連盟の成立と供給区域独占原則を掲げた改正電気事業法の施行により市場競争がほぼ終わった時期(1932~1939年3月)

Bの電力国家管理の時代には、民有国営の日本発送電と九配電会社が、それぞれ発送電事業と配電事業を独占的に担当した。

Cの九電力体制の時代は、1998年10月の沖縄電力の民営化以降は厳密には10電力体制の時代である。民有民営で発送配電一貫経営・地域独占の九(10)電力会社が主で、それに公営事業や電源開発(株)などが併存した。この時代は市場競争の有無やパフォーマンス競争の強弱によって、さらに下記の三つの時期に細分化される。

C-1：民営九電力会社による地域独占が確立し市場競争はないが、パフォーマンス競争が展開された時期(1951年5月~1973年)

C-2：地域独占が確立しておりパフォーマンス競争も後退し

表 3.8.1 連載エッセイ「電力技術のイノベーション」タイトル一覧

#	タイトル, 著者, 発表月
1	大容量国産火力1号タービン・発電機の建設, 長野 進, 柿島 正好(2007.11)
2	成出・大河内可変速開発裏話, 山浦眞治(2007.12)
3	電力系統解析システムの開発, 谷口治人, 田中和幸, 内田直之(2008.2)
4	酸化亜鉛形避雷器の開発, 林 正夫, 小林三佐夫(2008.3)
5	長距離送電用 500 kV CV ケーブル実用化への道程 —ミクロン技術が支える超高電圧大容量ケーブル—, 田中秀郎(2008.4)
6	550 kV ガス絶縁開閉装置 (GIS) の開発と製品化, 高塚桂三, 土江 瑛(2008.5)
7	電力貯蔵用 NAS 電池の開発と実用化, 良知秀樹(2008.6)
8	日本初の直流送電, 三瓶雅俊(2008.7)
9	大容量ガス絶縁変圧器, 戸田克敏(2008.8)
10	電力系統解析シミュレータ“APSA”の開発, 河合忠雄, 須崎 志郎, 後藤益雄, 鈴木智宏(2008.9)
11	大容量変圧器の分解輸送技術開発と製品化の変遷, 天野直樹, 渡辺 優(2008.10)
12	100 万ボルト送電線の技術開発, 磯崎正則(2008.11)
13	地熱発電設備の開発, 酒井吉弘(2008.12)
14	世界初の 500 kV 超大束径 6 導体送電線の開発, 仰木一郎, 宮崎真一(2009.1)
15	広域停電をきっかけとした電力系統安定化技術の飛躍的進歩, 江川正尚(2009.2)
16	阪神・淡路大震災における復旧, 青嶋義晴(2009.3)
17	需給自動制御システム (ELDAC) の開発, 鈴木 守(2009.4)
18	国産第一号原子力機の系統単独運転, 柴田芳昭(2009.5)
19	世界初となる 500 kV 大容量直流海底ケーブルの開発と納入, 宮崎拓哉(2009.6)
20	自励式無効電力補償装置 (STATCOM) の開発と製品化, 竹田正俊(2009.7)
21	汎用回路解析プログラム EMTP は何故開発されたか, 雨谷昭弘(2009.8)
22	熟練運用者の知識を組み込んだエキスパートシステム開発への挑戦, 坂口秀治(2009.9)
23	大規模橋梁添架 500 kV ケーブルの実現, 前川雄一(2009.10)
24	光ファイバ複合架空地線の開発, 花田敏城, 田村 清(2009.11)

た時期 (1974 年~1994 年)

C-3:電力自由化の開始により電力の卸部門と小売部門で市場競争が部分的に展開されるようになった時期 (1995 年以降)

(2) 電気の礎 電気学会は, 平成 20 年に創立 120 周年を迎えた。それ以来, 科学技術の未来の糧として, 歴史的に記念される“モノ”, “場所”, “こと”, “人”を「電気の礎」として顕彰してきた⁽⁸⁾。その数は, 平成 29 年 3 月の第 10 回で 67 件に及ぶ⁽⁹⁾。その中で, 電力技術に関連するものを順不同で挙げてみると, ガス絶縁開閉装置, 500kV 系送電の実運用, 電力系統安定化技術, 電力用酸化亜鉛形ギャップレス避雷器, 明治期の古都における電気普及の先進事蹟, 黒部川第 4 発電所, 北海道・本州間電力連系設備, 大容量高効率コンバインドサイクル発電, 佐久間周波数変換所, 送電系統用 STATCOM, デジタル技術による送電線電流動作保護方式などがある。いずれ劣らぬ立派な業績である。

(3) 電力技術のイノベーション 電気学会電力・エネルギー部門誌では, 2007 年 11 月から 2009 年 11 月まで約 2 年間にかけて「電力技術のイノベーション」と題した連載エッセイを掲載した⁽¹⁰⁾。筆者も当時の編修委員会に属していた

が, この企画は NHK テレビの番組「プロジェクト X」を意識したもので, 電力技術におけるイノベーションといえる技術や出来事について当時を知る人に執筆していただいた。表 3.8.1 に示すように, 大容量国産火力 1 号タービン・発電機の建設, 成出・大河内可変速開発裏話, 酸化亜鉛形避雷器の開発, 長距離送電用 500 kV CV ケーブル実用化への道程, 550 kV ガス絶縁開閉装置 (GIS) の開発と製品化といったハード的なものから, 電力系統解析システムの開発, 汎用回路解析プログラム EMTP は何故開発されたかといったソフト的なもので, そうそうたるものである。ここで個々の技術について詳細には説明できないが 24 件の日本の優秀な電力技術について改めて認識していただきたい。

(4) オーラルヒストリー 電気学会では 1993 年 (平成 5 年) から電気技術史技術委員会に順次 5 つの委員会を設置し, 電気技術の各分野の専門家や電気学会の名誉員を対象としてオーラルヒストリーを実施してきた⁽¹¹⁾。オーラルヒストリーとはいわゆる口述史で, 特許や論文からは得られない, 成果に至るまでの失敗や試行錯誤, 開発時の思わぬ展開などを知ることが出来る。

2013 年 7 月現在で 46 名の方から聞き取りが行われており, 逐次電気学会誌などで報告されている。これらの記事からも日本の優秀な電力技術の数々を, またそれぞれの研究者の研究開発への取り組み, その人となりまで伺い知ることが出来る。

(5) 卓越的データベース 我が国の科学技術の発展過程やそれを支える学術研究の重要性に対する理解を広めることを目的として, 日本の研究者が生み出してきた研究成果に関するデータベースを構築し, 国内外に発信している^(12,13)。このデータベースは, 我が国の学協会が顕彰している優れた研究成果を対象としており, 関係する学協会 (映像情報メディア学会, 情報処理学会, 照明学会, 電気学会, 電子情報通信学会, 日本機械学会), 国立情報学研究所とともに, 独立行政法人日本学術振興会が作成にあたっている。2010 年以降の電力関連の卓越研究を拾ってみると以下ようになる。

- ✓ 小型人工衛星「まいど 1 号」の開発・運用と雷観測
- ✓ 新幹線電車で走行風冷却主変換装置の開発と実用化
- ✓ 世界最大容量 670MVA 高効率水素間接冷却発電機の完成
- ✓ 水素火炎・水素ガス可視化技術の開発
- ✓ 八戸市マイクログリッドにおける需給制御・自立運転技術の開発と実証
- ✓ 500kV 送電用避雷装置のコンパクト装柱技術の開発
- ✓ 光 CT の波長分割多重伝送技術を用いたケーブル事故区間検出装置の開発, 実用化
- ✓ 冬季の上向き雷放電新現象の発見
- ✓ 住宅における雷被害調査手法の確立と高度情報社会の雷害対策手法の開発

- ✓ 世界初の Y（イットリウム）系超電導線材を用いた電力用超電導変圧器の開発
- ✓ 広域ネットワーク分散型監視制御システムの開発、実用化
- ✓ 受配電設備用絶縁物余寿命診断技術の開発と実用化
- ✓ 給電技能訓練用リアルタイムシミュレータの開発
- ✓ 電力システムの過渡現象数値解析の高度化
- ✓ 新幹線単相き電用静止形周波数変換装置の開発
- ✓ パーム・ヤシ脂肪酸エステル変圧器の開発
- ✓ 新型 1100kV 50/63kA 二点切ガス遮断器の開発および実用化
- ✓ 落雷位置標定方式の高精度化と適用性拡大
- ✓ 北杜サイトにおける大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証研究
- ✓ 長距離送電系統に適用した新オンライン系統安定化システムの開発
- ✓ 鉄道車両運用計画自動提案システムの開発
- ✓ 配電系統に連系された電源の運転状態推定手法の開発
- ✓ 人体に対する高度数値ドシメトリ手法の開発と国際標準化
- ✓ 電気二重層キャパシタを用いた電気鉄道用電力貯蔵装置の研究
- ✓ グローバル低コストエアコン向け単相電解コンデンサーレスインバーターの開発
- ✓ 使用電線を半減した大容量 500kV 全三相一括変圧器の開発
- ✓ 450MVA GCT-STATCOM の長距離大容量送電系統への適用
- ✓ 風力発電設備の雷害様相の調査と原因の解明
- ✓ アナログ信号処理を用いた可搬型部分放電位置標定装置の開発
- ✓ 住宅用太陽光パワーコンディショナの開発・実用化
- ✓ 世界初の 66kV/6kV—三相 2MVA 高温超電導変圧器の開発
- ✓ 統合型スマートグリッド評価システムの開発
- ✓ 国内初となる高温超電導ケーブルの電力系統での実証運転の成功
- ✓ 超高压直流架橋ポリエチレン電力ケーブルの開発と実線路適用
- ✓ レドックスフロー電池システムの開発
- ✓ UHV 電力機器の雷インパルスおよび開閉インパルス耐電圧試験法の開発

3.8.3 電力技術継承の実態と問題点

電力自由化の開始により、電力系統を取り巻く状況は垂直統合環境から利益優先の競争環境へと変わってきた。このような状況では、全般的に投資が抑制され、特に将来を見据えた技術開発への投資は困難となっていった。そのため電力関係の人材が他部署へ移動したり、早期退職したりして消滅し、同時にその人たちがもっていた技術も消滅しつつある。技術

の消滅の危機はメーカーにとっては、その存続自体の危機であり国内のすべての技術が消滅すれば国家存亡の危機となる。

世界に目を向ければ、資源の枯渇・環境問題という地球レベルの課題があり、東日本大震災の余波は世界的な原子力発電からの脱却の動きを生んでいる。これにより天然ガスなどの化石燃料の購入費用が増え、国費が流出する。また、技術的に見ればメーカの受注が激減し、上にのべた人事異動→人材消滅→技術の消滅→メーカーの消滅→国内技術の消滅という流れになりかねない。物理的に見ればエネルギー自給率の向上（セキュリティの向上）のため、再生可能エネルギーの導入を推進しなければならない。これにより電力系統は信頼度低下を免れず重要なインフラの崩壊につながる恐れがある。

上に挙げた顕彰制度や連載エッセイが企画された背景には、若い技術者が歴史にふれることのみならず、そのことによりあらたな科学技術の目標を創出してほしいといった願いもあると思われる。しかし、今後、上にあげたような新技術、革新的技術が電力業界においてこれまでのように次々と現れて来るだろうか。また、果たして上記の日本の優秀な電力技術は次の世代に継承できているのだろうか。委員会では、文献調査と複数のメーカ幹部へのインタビューを実施し技術継承の実態と問題点を探った。

メーカ幹部へのインタビューは 2015 年 2 月 18 日から 3 月 10 日にかけて、重電メーカ 4 社（システム担当 3 名、パワーエレクトロニクス担当 1 名）、パワーエレクトロニクスメーカ 1 社（開発担当 1 名）に対して実施した。対象者の内 2 名は女性である。比較的短い時間のインタビューではあったが、幅広い意見を聞くことが出来た。ただし、紙面の都合もあり、代表的な意見のみを記す。

本節では、まず近年の電力分野における人材確保の困難化についてインタビュー結果を交えて述べる。次に、中間層の崩壊による企業内訓練（OJT: On the Job Training）について述べる。最後に、企業における技術者魂の喪失、大学における研究や教育の劣化について述べる。

（1）人材確保の困難化 そもそも新卒人材が確保できなければ人材育成はままならない。ここでは、人材確保を困難にしている原因とみられる少子高齢化、非正規社員の増大、そして日本型新卒一括採用法の短所について述べる。

少子高齢化問題

中長期的な視点で見ると少子高齢化が大きな問題である。日本における 2016 年の出生数は 97 万 6000 人であり、初めて 100 万人を割った。女性一人が生涯に産む子供の推定人数は 1.44 である。結婚件数は戦後最少であり、第一子の数が減少している。人口規模が大きい団塊ジュニア世代が 40 代になり主な出産世代ではなくなったこと、若い世代の結婚願望が減退していることから、今後も人口減少・少子高齢化が深刻化するのには必至であろう。政府は 2015 年度末までに出生率を 1.8、2060 年度末に人口一億人維持を目指しているが、い

ずれも実現することは難しそうに思われる。

文献(14)の第一章「なぜ我が国の人口は減少するのか－女性・少子化・未婚化（津谷豊子）」では、少子化の原因のひとつとして女性の社会的地位の変化をあげている。わが国の男性の家事・育児分担割合が先進国の中で最も低い国のひとつであり、これは即急な変化は期待できない。よって少子化に歯止めをかけるには、仕事と家庭の両立のための政策的支援の充実と効果的な実施が必要であるとしている。

このように、少子高齢化が進むという問題は国レベルの課題であり急激に状況が好転するとは考えにくい。よって、今後は新入社員の総数が減少方向になり、これが技術継承を阻害する要因となる。

少子高齢化は必ずしも「問題」ではなく、むしろ積極的に利用すべきだという意見もある。文献(14)や(15)ではマクロ経済学の立場から、経済成長を決めるのは人口ではなく、労働力人口が変わらなくても（減っても）一人当たりの労働者が作り出すモノが増えれば、すなわち「労働生産性」が上昇すれば経済成長率はプラスになるとしている。そのためには新しい設備や機械の投入（資本蓄積）と広い意味での「技術進歩（イノベーション）」が必要であるとする。

文献(16)の著者は統計学者の立場から、少子高齢化を背景とする貧困、医療、介護といった社会問題に対する対策として「公的なお金の使い方」による経済成長の重要性を論じている。文献(17)の著者は、35 国の先進諸国が加盟する国際機関 OECD（経済協力開発機構）の東京センター所長を 2013 年から務めている。この本において、著者は多数の OECD 統計を交えながら、人口減少を武器にすべく埋もれた人材（中高年齢層やニートなど）の掘り起こし、女性の活用などを政策として実施すべきとしている。

文献(18)では、人口減少社会において様々な分野における人々の主体性を伴った「参加」が「希望」を作り出すとしており、具体的に、環境、情報、商業、芸術、医療・福祉、教育などの分野で「参加」を促している。文献(19)では、地方における人口減に的をしぼり、補助金頼みの地方定着ではなく、人口減を受け入れつつ地方を「豊かな暮らしの場」とすべきことを提案している。

少子高齢化、人口減に対して対策を行うことは必要だが、その効果は限られている。文献(20)で指摘されているように、人口減により安価となった土地や安くなった教育環境を少ない人口でうまく活用し、より豊かな場を作ろうといった視点は、自治体やコミュニティなどだけではなく、企業や大学などでも必要となるであろう。

非正規社員の増大

この 10 年スパンで見ると、非正規社員が増大し、製造業においては特に製造部門でそれが目立っている。世の中全体で見るとサービス業は非正規社員の比率が大きい。これは国が定めた制度に則り企業が人件費を圧縮すべく採用しているのが現状と考えられる。非正規社員の賃金は、ボーナスを除き、正規社員の 60%弱と言われている。ボーナスを含めればさらに差は大きくなる。国が認めた制度であること、企業がその

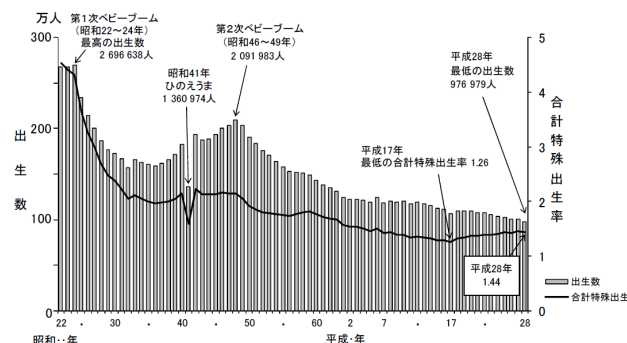


図 3.8.2 出生数の推移

(出典：平成 28 年人口動態統計月報年計(概数)，厚生省)

<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/geppo/nengai16/index.html>

存在を維持するためにやむを得ず採用したという側面もあるが、この非正規社員の増加が技術継承を阻害する要因になっている。あるメーカ幹部は語った。

「非正規社員は賃金を抑えることが出来るだけでなく、負荷変動に応じて人数自体を調整できるという企業側にとっては大きなメリットがある。また、正社員の場合は、一度採用すると業績が悪化したからと言って安易に解雇することはできない。景気状況による調整弁のようなこの仕組みを改革し技術を継承していくことが可能かどうか難しい問題である。」

以上、メーカ幹部へのインタビュー結果から主なコメントをかいつまんで紹介した。対象者が口を揃えて発言されたことは、技術継承を円滑に行うには企業として平滑化した人員確保、それも正社員としての確保が必要であるということである。こうした企業努力を長期にわたって継続していくことが重要であろう。また、大学など教育機関に対する期待も大きい。現在の制度では学生自身の希望を優先することが必要であるが、バブルのような時期でも日本の将来を見据えて一定割合の学生を技術系の企業に推薦するような指導も必要かも知れない。大学と企業が長期にわたる良好な関係を構築し、一時的な経済状況に惑わされない人材育成を行うことが必要となる。

日本型新卒一括採用方法のデメリット

次に日本型新卒一括採用のデメリットについて述べる。

まず、文献(21)を参照しつつ、現在の就職活動（「就活」と略されることが多い）の流れについて整理する。

- ① 就職ナビサイト（ネット上で新卒求人を掲載するサイト、以下「就職ナビ」）に企業が採用情報を掲載する。学生は個人情報就職ナビに登録し、気に入った企業の採用情報があれば「プレエントリー」する。プレエントリーした学生の情報が企業に集まる。
- ② 企業はプレエントリーした学生を会社説明会に勧誘する。説明会では会社の事業・職務内容・採用したい人物像などを説明し、質疑応答を行う。
- ③ 説明会に参加した学生たちから応募を募る。エントリーシート（応募趣意書）と履歴書を提出させる形が多い。

- ④ 企業はエントリーシートや履歴書を読み込み、その中から自社が採用したい学生に書類選考通過の連絡をする。この段階でかなりの応募者が「お祈りメール」をもらうことになる。
- ⑤ 書類選考通過者は面接を3~4回経て「内々定」に至る。この段階で多数の応募者が「お祈りメール」をもらう。
- ⑥ 「内々定」に至った学生たちは入社内定式を経て正式な内定にたどり着く。

上記の「お祈りメール」とは企業から学生に送られてくる不採用通知のことである。不採用のことを「ご縁がなかった」と表現し、末尾には「今後の発展をお祈り申し上げます」と書くことから、「お祈りメール」と呼ばれている。

現在はこのような形で行われる就職活動だが、1920年代から始まった日本の新卒一括採用の歴史的変遷をまとめると以下ようになる⁽²²⁾。

- ① 求人数の増減と連動しながら、就職難と売り手市場化が繰り返り起こってきた。
- ② 産業構造の変化と連動しながら特に求人数が激減する局面などで今まで大卒者が行かなかった業界や職種に行くようになった。
- ③ 大学および学部・学科の数が増え、大学生の数が増加し、競争が激しくなっていく。
- ④ 就職ナビなど自由応募を促すツールが普及してきた。
- ⑤ 就職活動の学業阻害や早期化が何度も問題となり、そのたび時期の見直し論が起こり、フライングが問題となる。

これらの問題をかかえつつ、新卒一括採用というシステムが長期にわたって存続しているのは、このシステムが企業にとってメリットがあるからである。新卒一括採用は若年層の離職率低下に一定の役割を果たし、日本の経営の特徴である長期継続雇用の出発点を提供する制度として、その社会的意義が評価されてきた。未経験の新人に対して企業内で教育訓練が行われる仕組みとしても成熟してきた。この仕組みを前提とし、企業は、安定した年齢別組織構造の維持、効率の良い教育システムの構築、質的担保とコスト効率を念頭に置いた採用戦略を行うことが出来た⁽²¹⁾。

前述したように就活のシステムは変わってきたが、新卒一括採用にまつわる就活の早期化やフライングの問題は100年前(1920年代)からすでに存在していた。このような問題が起きてしまう理由を突き詰めると最終的には「日本の特殊な雇用システム」に行きつく⁽²¹⁾。

- 欧米では職務をしっかりと決めそれに合った人を採用する。
- 日本では職務はあらかじめ決めず、基礎能力と将来性、そして社風に合うかどうか(「肌合い」の良さ)で人を採用する。

基礎能力については学校名である程度識別できる。将来性や「肌合い」については明文化できるものではないので、面接が選考の中心となり、リクルータやOB訪問などを通した学生の人格把握による採用となる。そのため選考基準は不明確なものとなり、学生は自分が落ちた理由が分からない。さら

に、「肌合い」重視のため、企業は新卒での未経験採用を重視し、中途採用市場が育たない。その結果、新卒で就職できないと仕事や賃金の面で不幸になりやすく、好不況による採用数の増減で人生がおおきく変わってしまう。新卒一括採用には、こうした根源的な問題がある⁽²¹⁾。

次に同じ文献から日本型雇用の便利さについて言及している箇所を引用しておく。

- 役員が抜けてもその補充は新卒採用で事足りる
- ゆで卵のように未経験者を育てられる無限階級
- 不況をも跳ね返すヒミツの報奨制度

すなわち、一言でいえば、代わりはいつでも用意できるというのが企業にとっての日本型雇用の便利さである。このような日本型雇用の問題に対する改善策としては、例えばいったん働いてから採否・入社を決める(ただし、非正規での雇用延長は認めない)、肌合い合わせのために行なう就活後期のインターンシップ(就業体験)などが提案されている。また、就活の早期化・フライングに対しては、学業重視を徹底するため書類選考で成績を考慮する、「説明会」が学業阻害の原因とならないよう広報活動の解禁を後ろ倒しにする、インターンシップの形骸化を防ぐため就活直前のインターンシップは禁止するなどの改善策を提案している⁽²¹⁾。

(2) 中間層の崩壊によるOJTの困難化 文献(23)の第6章において、分厚い中間層の崩壊について述べられている。特定世代における人員不足はOJT困難化の原因とも考えられる。ここでは中間層の崩壊によるOJTの困難化と、不具合から学ぶことの困難化について述べる。

中間層の崩壊

1980年代後半から90年代初めに、株価と地価がすさまじい高騰を見せた。これを「バブル経済」といい、その中で社会に出た世代は「バブル世代」と呼ばれる⁽²⁴⁻²⁶⁾。この時期において、製造業全般に人材採用が困難な状況が継続した。この原因の一つとして、この時期に製造業以外の特定企業、すなわち金融・証券系の企業が専攻学部に関係なく非常に多くの人材を採用した。つまり技術系学生が金融・証券系に流れたというわけである。しかし、テレビドラマ「半沢直樹」(2013年TBS系列で放送、主演は堺雅人、原作は池井戸潤^(27,28))に見られるようにバブル世代の技術系学生は金融・証券系に大量採用されたが、バブル崩壊により会社経営が危機的状況になると、一部の選抜された人材を除いて余剰人員化したともいわれている。

このバブル世代の人員不足により、年長者がいつまでも担当レベルの業務遂行を強いられ、配下に入るべき新人にOJTで教育できる機会のない状況が生じた。バブル崩壊後、数年が経過した後では新人が配属されても世代間の感性の差や会社における立場の差が大きくなり円滑に技術継承が行えない状況が継続した。

不具合から学ぶことの困難さ

ここでは、他者へのインタビューではなく、メーカー勤務時

の自身の経験から電力技術の継承について考えてみる。この章の筆者は、メーカ勤務時代に、デジタル保護システム、デジタル型故障点標定装置、瞬時電圧低下対策装置、大容量低速ディーゼル発電システムなどの製品開発に携わったほか、系統解析チームとして他部門の製品開発への協力、不具合発生時の原因究明・対策などの仕事も行った。特に後者は技術力を上げるという観点から筆者にとって貴重な経験となった。具体的に内容をあげると、雷サージの移行によると思われるフィーダーの一時運転停止、高構造物への落雷に起因する大地電位の上昇によると思われる発電所内通信装置の不具合、地中配電線を多く含む配電変電所における地絡保護リレーの不具合、配電線落雷時の変圧器移行サージによる発電所装置の絶縁破壊などがあつた。

これらは仕事の性格上、学会などで発表できる内容ではなかったが、これらの仕事をきっかけとして解析モデルの開発や、解析手法の開発といった形で多数の論文を発表することが出来、それらをまとめて博士論文⁽²⁹⁾も書くことが出来た。このよう電力系統における不具合現象は 20~30 年前まではしばしば起きていたが、その後ほとんど見られなくなった。電力系統の信頼度が増したということでももちろんよいことではあるが、筆者のように不具合から学ぶというチャンスは少なくなったと言えよう。

不具合の経験を後輩に伝えていくことは重要である。電力会社によっては、研修所などの付属施設として不具合を生じた機器を展示し、貴重な経験を関係者に伝えている。たとえば中部電力の「失敗に学ぶ回廊」と呼ばれる施設は、事故概要を示すパネルや実物または模型を展示した「失敗事例を学ぶ」ゾーンや、その失敗事例の原因を学ぶ「失敗事例の解説」ゾーンなど 6 つのゾーンから構成されている。鉄道会社にも主要駅の研修施設でこのような展示を行っている例がある。

(3) 技術者魂・企業魂の喪失 電力系統は極めて専門的な知識を必要とするだけでなく、その専門家は電気事業者とメーカのごく一部に集中している。電気事業者やメーカの内部でも他の部門の人には極めて分かりにくい分野である⁽³⁰⁾。このような専門性を持つ技術を次世代に伝えていくためには新人技術者に対する教育や企業内訓練 (OJT) に十分な投資を行うことが必要になる。すなわち、企業には教育システムを整備し、労力と時間をかけて人材育成を行う覚悟が必要である。しかし、昨今の世知辛い世の中では、目先の利益、短期目標の達成を第一に考え、長期的視野に立った技術者教育や技術継承がおろそかにされる風潮が少なからずある。これは筆者がインタビューした中で複数の中堅技術者が強く主張された問題点である。

リーダーシップの不足

文献(31)において、コンサルティング会社マッキンゼー・アンド・カンパニーの人材育成・採用マネージャーだった著者は、「リーダーシップ」の重要性を説いている。マッキンゼー社が採用したいのは将来のリーダーであり、リーダーにはリーダーシップが求められる。同文献より引用する。

「日本では管理職というポジションとリーダーシップが結びつけられてしまっており、しかも管理職には管理能力、リーダーシップ、プレーヤーとしての能力のすべてが求められているが、リーダーシップには重きが置かれていない。成果目標を達成することよりも組織のわが優先されることもある。高い成果目標がチームに与えられた時、初めてリーダーシップが必要とされる。何かを達成したり問題を解決したりするためのリーダーシップなのである。全員がリーダーシップを持つ組織は、一部の人だけがリーダーシップを持つ組織より、圧倒的に高い成果を出しやすいのである。」

日本ではこうしたリーダーシップを持つ人が少ないようだ。文献(32)では、逆にいわゆる「クラッシャー上司」について述べられている。「企業や組織の健全な運営のためには、部下の力を引き出すこそリーダーに据える必要がある。しかし、部下を威圧するクラッシャー上司の場合は、部下が上司の誤りに気付いても正しにくいので、場合によっては人の命をも危険にさらす可能性がある。」部下が何でも話しやすく、周囲から協力を得られる人物に求められる資質として“EQ” (情動指数) がある。IQ (知能指数) が知識や技術の習得のうまさを表すのに対して EQ は心の豊かさや人間性の高さを表す。部下の気づきを謙虚に受け止める、コミュニケーション能力など非技術的なスキルが必要になる。

長時間労働とその改善

日本企業は内部で人材を育成する内部労働市場型の組織であり、人材ニーズはできる限り内部で解決することを前提としている。このためスペシャリストよりも、どんな仕事にも対応できるゼネラリストの需要が高まることになる。流動性の高い外部労働市場であれば、景気変動に応じて柔軟に雇用を調整できる。日本企業は労働者数ではなく労働時間で調整してきた面が大きい⁽³³⁾。これが過ぎると長時間労働の原因となる。

しかし、日本人も価値観と行動様式が多様化してきた。企業なども長時間労働を見直している。その結果、厚生労働省の発表によれば日本全体の残業時間は 2015 年、2016 年と 2 年連続で減ってきている。人手不足に直面した民間企業は、働く時間に制約のある人材をつなぎとめようとさらに長時間労働の見直しを進めている。官民が進めている「働き方改革」は、育児や介護などと仕事を両立しやすくして働く人を増やすのが狙いである。しかし、効率的な働き方で労働生産性を高め、その成果を基本給アップなどによって従業員に還元すれば、それが消費につながることになる⁽³⁴⁾。このような好循環を作ることが人材育成の面でも重要だと思われる。

文献(35)の第 6 章で著者は、「働きすぎ社会の処方箋」としてトヨタ生産方式の導入を勧めている。整理整頓を徹底する、職場において「標準・基準」を設けること、それをもとに正常か異常かを判断し、必要なら改善を行なう。あらゆるものを「見える」状態におき、作業を効率化することで労働者はより気持ちよく働くことができる。「見えない」場合は実際に「測る」ことにより「見える」ようにしていく。これらのノウハウは製造業だけでなく非製造業にも通じるものである。

同じ文献で著者は、日本の長時間労働の原因のひとつは取引先に振り回されることにあるとしている。取引先が過剰な要求をしてくるのに対して「お客様は神様」といった過剰なサービス、過剰な労働を生む。自己中心の文化に対する「間柄の文化」と特徴づけられる日本の文化の中で「個」を生きていくのではなく「間柄」を生きてしまう⁽³⁶⁾。「お客様」は過剰なお客様扱いを当然とみなすようになり、どんどんわがままになっていく。その一方で労働者は過剰労働を強いられ、ストレスをため込み精神的に追い込まれていく。取引先との関係、サービスを見直す例として文献(35)において、「予約のとれないすし屋」や「ドレスコードのあるお店」のビジネスモデルをあげている。客にルールを提示し仕事の量を制限するのである。今後、顧客満足だけでなく従業員の満足も追及する、多目的あるいは全体最適化の考えが重要になるだろう。

企業の存在意義に関する認識不足

近年、わが国では技術者魂、企業魂が劣化しているように思われる。文献(37)では、組織を滅ぼす「高学歴社員」をこう定義している。①リスク回避的である、②安定志向であり、自己保身主義的である、③相手を判断するとき、世間で重んじられるヒエラルキー（世間の評価・評判、学歴、職歴、企業規模など）を重視する、④自分よりも「格上」と見做した人間には、思考を停止しておもねる。身内に対しては、自分が傷つきたくないので過剰に甘く、お互いに傷を舐めあう。⑤「格下」の人間に対しては生死にかかわる問題も含め極めて冷淡な態度をとる。すなわちランク主義者であり、常に保身に走り付和雷同してリスクを取らない「高学歴社員」が組織を滅ぼすとしている。一方、企業は企業でこうした「高学歴社員」を採用し、ジョブローテーションで管理職に養成した後、経営の最前線に立たせてしまう。現場を知らない「高学歴社員」はおかしな（あるいは無理な）事業計画を立て現場を苦しめるというわけだ。

文献(38)、(39)では、電機産業における、企業魂が劣化した会社の例が具体的に示されている。大きな成功を収め、世界のナンバーワンに上り詰めた日本の電機産業が、なぜ弱体化してしまったのかを分析し、そこから得られる教訓を述べている。これらの文献は、学際的な共同研究により大東亜戦争における日本の敗北の原因を探った「失敗の本質」⁽⁴⁰⁾、に倣って電機産業の敗北の原因を考察したものである。文献(40)では破綻する組織の特徴として①トップからの指示がいまい、②大きな声は論理に勝る、③データの解析がご都合主義、④「新しいか」よりも「前例があるか」が重要、⑤大きなプロジェクトほど責任者がいなくなる、をあげている。これらの組織に対する分析は、電機産業などの企業についてもそのままあてはまるのではないだろうか。

文献(39)では、組織が肥大化し、悪い情報が伝わらず変化に対応できない「大企業病」が敗北の原因の一つとしている。10社もの総合電機メーカーが存在する日本の電機業界では事業売却や統合といった機運がなかなか高まらなかった。経営者も従業員もリスクを取らない、起業家精神を失ったサラリーマン集団となってしまった。成功を収め、優位を獲得する

とそれを守ろうとする。成功体験は自己否定を妨げ、ライバル会社を過少評価してしまう。

大企業病の会社が対応できない変化の一つが「イノベーション」である。文献(41)では、優良企業がたびたび失敗するのは、そのような企業を業界リーダーに押し上げた経営慣行そのものが、「破壊的技術」（イノベーション）の開発を困難にし、最終的に市場を奪われる原因となるからだという。優良企業は破壊的技術ではなく持続的技術の開発を得意としている。しかし、破壊的技術はそれ自身が市場の価値基準を変えてしまう。たとえばコンピュータのディスク・ドライブの場合、最初は容量が少なかったが、小型・単純・使いやすいといった別の特長により新たな市場が開拓され、やがて容量についても十分な性能が得られるようになった。この文献は破壊的技術が従来の技術にとって代わる過程と、優良企業に見られる強力な力（大企業病のようなものか）が破壊的技術の開発を妨げる要因になっていることを述べている。

文献(40)では、企業の魂について述べられている。以下に要約してみたい。人間の営みとしての経済活動は、人間を幸せにするものでなければならない。不幸を発生させてしまえば、その時点で経済活動は経済活動でなくなる。このような特性を持つ経済活動の中心的部分に企業経営が位置している。この認識こそが企業統治のあり方や企業の社会的責任というようなテーマを考える上での原点でなければならない。人間には魂があり、人間の集まりである企業にも魂があるはずである。この魂を失った企業はもはや企業とは言えない。企業には魂が、良心が、倫理性が備わっていなければならない。

かつて、企業メセナという言葉をよく聞いた。最近はまだ聞き慣れないようだが今も行われている。メセナ（mécénat）とは、文化・芸術活動支援を意味するフランス語である。企業が主として資金を提供して芸術・文化活動を支援することを企業メセナという。また、企業による事業主催なども含まれる。例えばコンサートや個展、アート・フェスティバルの開催などが行われている。利益を追求するあまり、こうした活動から手を引く企業もあろうかと思われるが、それでは魂を失った企業ということになる。

文献(43)では幸福の条件として、5つの要素①仕事のやりがいがあること、②人間関係が充実していること、③経済的に満たされていること、④心身が健康であること、⑤地域社会が活性化していることがあげられている。そして、経営学は「人間を幸福にする」ため学ばなければならないとしている。「幸せを“つくる”—人的資源管理論」と題された第5章では、人事制度のグローバルに通用する人材の育成、リーダーシップ論、組織構成員の健康管理などの実務面に加えて、人事制度の存在意義、人材育成の理念が説明されている。これらの議論はあらゆる企業にとって有益なものと思われる。文献(44)では、企業の役割について以下のように述べられている。

「ただ金を儲けるだけが目的なら企業とは呼べない。企業の素晴らしい点は、そこで働く人々の人生も背負っていることだ。当然人々には家族があり、そこには未来が（子供たち

のことを考えてもらってもいい) かがやいている。それらのものをすべてかかえ、なおかつ企業は社会をゆたかにし、人々に何らかの貢献をしていなくてはならない。若い人たちは給与で企業を判断するが、己の半生を預け、そこで懸命に働くことが人間形成につながるかということが肝心なのだ。」

(4) 大学の劣化 日本の大学教育システムがすでに崩壊していると言われる⁽⁴⁵⁾。2016年9月21日、英国のタイムズ社が発行している高等教育情報誌タイムズ・ハイヤー・エデュケーション (THE : Times Higher Education) にて世界大学ランキング 2016-2017 年度版が発表された⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾。これによれば、1位はオックスフォード大学 (英国) で、2位は昨年1位のカリフォルニア工科大学 (米国)、3位はスタンフォード大学 (米国) であった。国別では、アジアの国々の大学が目立つとされ、全 980 校のうち、289 校がアジア地域 (24 개국) の機関である。また、アジア地域の国の 19 校がトップ 200 校にランクインしている。200 位以内の校数の 1 位は米国で 63 校、2 位は英国 (32 校)、3 位はドイツ (22 校) であった。日本の大学は 200 位以内に東京大学と京都大学の 2 校だけであり、アジアでも、香港 (5 校)、中国と韓国 (4 校) に後れをとっている。ちなみに、アジア圏の大学 TOP3 は、24 位のシンガポール国立大学、29 位の北京大学 (中国)、33 位のメルボルン大学 (オーストラリア) となった。

多くの研究機関が独自の指標をもとに世界大学ランキングを発表しているが、上記 THE のランキングは以下の指標をもとにしており、世界で最も権威があるとされている。

- Teaching : 教育－学習環境
- International Outlook : 国際的な見通し－教授陣と学生の質
- Industry Income : 産業へ与える利益－革新性
- Research : 研究－ボリューム/収益性/評価
- Citations : 論文の引用度合

月刊誌中央公論では毎年 2 月号で大学特集を組んでいる。2017 年 2 月号の特集は「国立大学は甦るか」と題され、「マネジメント不在が招く研究の劣化」と題した対談や、東京大学・東北大学の総長インタビュー、ノーベル賞受賞者 (東京大学宇宙線研究所長の梶田隆章氏) からの警鐘などを掲載している⁽⁴⁸⁾。対談記事から抜粋する。

2004 年度に独立行政法人化された国立大学は、研究機関として「地盤沈下」をしている。予算配分に競争原理を導入することで「選択と集中」を進め、有望な研究を行う大学や研究室には潤沢な資金が流れ込むことを意図したものだった。しかし、上に述べたように大学の国際ランキングにおいても大きな成果は出ていない。論文数においても同様である。

2016 年 11 月 9 日、日本大学協会の里見進会長 (東北大学総長) は、「運営費交付金」の拡充を求める声明を出した。「運営費交付金」とは、2004 年に国立大学が独立法人化されて以来、各校の収入不足を補うために国が出している補助金である。この運営費交付金は毎年 1% のオーダーで減り続けている (一律ではない)。これにより教職員の人件費や基礎的な教

育研究環境の整備費が削減されている。これに対して「競争的資金」は 2.5 倍に増えた。国全体で見れば研究費予算は増えており、成果が期待できる分野に資源配分する制度は整ったと言える。しかし、実際に成果は出ていない。

雑誌「現代思想」においても複数の号にて大学教育・研究の特集を組んでいる⁽⁴⁹⁻⁵¹⁾。文献⁽⁴⁹⁾の「特集：大学の崩壊」では、國分功一郎氏と白井聡氏による「対談：教員は働きたいのであって、働くフリをしたいわけではない」が刺激的である。ガバナンスや産学協同といった観点から大学の劣化が語られる。最後に白井氏の発言を引用する。「われわれ教員は働きたいんですよ。そして、大学で働くこととは、学生を教えることと研究をすることであり、誰も読まない書類を書くことではないのです。教員が正しく働ける環境を整えば、研究も加速し、ジャーナルへの引用件数も増加し、学生の学力も向上します。これが大学をより良いものとするための本筋であり、他に道はないはずです。」

本特集では、国立大学だけでなく私立大学に的を絞った記事もある。文献⁽⁵⁰⁾では、軍産学協同や大学の専門学校化、大学の企業化をキーワードに検討されている。文献⁽⁵¹⁾では、学校におけるリスク、教育費、奨学金、子どもの貧困対策、部活動などの課題が検討されている。文献⁽⁵²⁾では主に文学部不要論について検討されている。

3.8.4 人材育成について

この節では、資格制度の活用と技術者の地位向上、電力技術研究の活性化、社会への情報発信、海外進出と海外人材の活用、大学・高専における教育の充実について考察する。

(1) 資格制度の活用と技術者の地位向上 ここでは、日本技術者教育認定機構 (JABEE)、電気学会 CPD システム、技術者の地位向上について紹介する。

日本技術者教育認定機構 (JABEE)

電気学会は、技術者教育の重要性に鑑み、日本技術者教育認定機構 (JABEE) の設立準備の段階より積極的に関与および貢献をしてきた。その一つとして、平成 11 年 11 月の JABEE 設立にあわせる形で、技術者教育認定制度検討委員会が設立され、継続的に活動が行われている。さらに電気学会では、技術者教育委員会の中に「センター構想検討部会」を設置して、技術者教育を推進する組織の構築について検討を進め、「電気学会技術者教育センター (仮称)」基本組織案を作成した⁽⁵³⁾。現在は実際の組織、活動内容に関して具体化を進める段階にある。

電気学会 CPD システム

CPD (Continuing Professional Development : 継続教育) を普及させるには技術者資格と対になった教育制度が必要であるとの認識から、技術者教育委員会の中に「関連 WG」を発足させ認定対象の専門技術の更なる絞込みの必要性の有無・それぞれに要求される技術要求レベルの階層化・必要技術の知見範囲・技術レベル認定試験問題の作成など、対象技術分野の専門家により詳細な検討を実施していく予定である。また

関連 WG として発足したパワーエレクトロニクス技術者教育 WG 主催のパワエレ・セミナーを 2013 年から年 2 回程度実施している。H25 年電気学会全国大会では技術者教育委員会により「社会が求める技術者の育成～小学生から社会人まで～」と題したシンポジウムが行われ、技術者教育委員会の活動概要、小中教育支援事業、高等教育支援事業、JABEE 認定審査の最新事情、電気学会 CPD システムが紹介された後、パネルディスカッション「技術立国日本の将来を考えると、優秀な電気技術者をどのように育てるか」が行われた⁽⁵⁴⁾。

このような電力技術の技術者資格を普及させるための活動により、電力技術を継承・発展させるための人材の育成に貢献できるものとする。

技術者の地位向上

2011 年 3 月の地震・津波による大停電に際して、特に何度も輪番停電（意図的に順に地域を変えて行う停電）を経験した方々は電気の重要性を再認識していただいたと思うが、それから 6 年が経過した今、多くの人が電気がないことの不便さを忘れていないのか。ましてや地震の影響を受けなかった地域の人にとっては、やはり電気はあって当たり前といった感覚ではないだろうか。

こうした電気の安定供給を技術面で支えているのが電気事業者やメーカの技術者であり、彼らは電力の安定供給を維持することに誇りを持っている。ベテランだけでなく若い技術者も先輩から「安定供給の DNA」を引き継いでいるのである。（例えば文献(55)参照）こうした技術者は電気だけでなくガスや水など他のライフラインの安定供給を支える技術者も含めて、もっと世の中の人から尊敬されてよいのではと考える。そのため電気事業者やメーカは、「黒部の太陽」のような映画を企画したり、「プロジェクト X」のような番組に積極的に投資したりしていくべきではないだろうか。

映画やテレビに頼るだけでなく、電気技術者の地位を高めるため、技術者や研究者自身が社会に対して情報を発信していくことも重要だろう。新聞や雑誌からの執筆依頼や取材に対して積極的に応えることはもちろんだが、読者投稿として自ら投稿していくような自主的な動きを期待したい。

（2）電力技術研究の活性化 次に人材育成という観点から、我々の立場からできること、すなわち大学・工専での活動、社会に向けた活動などを考える。電力技術の継承のためには研究・教育の活性化が必要である。そのためにまず伝統を大切にすることが必要ではなかろうか⁽⁵⁶⁾。前節であげた電気の礎、電力技術のイノベーション、オールヒストリー、卓越データベースなどを参照することにより、先達の偉大な足跡を知ると同時に、夢を持つこと、具体的な目標を持って研究を楽しむことができる環境を作っていくことが重要であろう。

分野は異なるが沖縄において伝統芸能を継承していくために「島唄継承」というプロジェクトが 2015 年からスタートしている。若手民謡歌手の島袋辰也がプロデュースしたもので、毎年一回、大御所の名曲を複数の若手民謡歌手が歌い未来へ

引き継いでいこうというものである。初回の 2015 年は近代琉球民謡の祖と言われる普久原朝喜（ふくはら ちょうき）氏に、2016 年は知名定繁（ちなていはん）氏にスポットをあてて行われた。名古屋では、2013 年より毎年秋に「やっとかめ文化祭」が開催されている。江戸時代、尾張徳川家に生まれた尾張狂言や、かつて芸どころと呼ばれた名古屋の舞踊や落語・講談などの伝統文化を継承すべく様々な場所で様々な形で催しが行われている、一大文化祭である。電力・エネルギーの分野でも、このように先達の偉大な業績を知ると同時に、あらためて理解を深め、未来に継承していくことが重要であろう。

研究分野

電力技術研究の活性化のために、我々のできることとして何があるか。文献(57)では、1990 年から 2015 年までの期間に、電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）に掲載された論文にて使用されたキーワードに着目し、それを元に電力分野の研究動向を考察した結果を紹介している。これらの調査結果を参照することにより、今どんな研究がされているか、あるいは今後どのような研究をすべきかを考えることは意味がある。

現状の社会に照らして見れば、まず社会に対して持続可能社会の構築に向けたエネルギーシステムのビジョンを提示し、これを実現するための研究を実施していくことがあげられるだろう。現在の電力エネルギーシステムは変革期にあり、再生可能エネルギー（RE: Renewable Energy）電源、規制緩和と電力市場、分散型電源、需要家サイドのエネルギーマネジメントシステム（EMS: Energy Management System）といった、今後の電力エネルギーシステムに導入が予想される新しい要素を研究対象とすることができる⁽⁵⁸⁾。また、電力市場や EMS においては昨今進歩の著しい人工知能（AI: Artificial Intelligence）や IoT（Internet of Things）などの新技術の導入も考えられる。（図 3.8.3 参照）。

ここからしばらくの間、専門分野の話になる。専門用語が頻出するが、それらの専門用語について逐一説明を加えることはしないことにする。「再生可能エネルギー電源」の項から「エネルギーマネジメント」の項までは個別の研究分野の例を示している。読み飛ばしていただいてもかまわない。

再生可能エネルギー電源

本報告書の 3.1 節では、日本におけるエネルギーのベストミックスについて述べられている。エネルギーの確保（セキュリティ）のため、また環境対応のため RE 電源の導入促進が必要であり、わが国では平成 15 年の RPS 法、平成 21 年の住宅用太陽光「余剰買取制度」の導入など段階的に進められてきた。平成 24 年には固定価格買取制度(FIT)が実施され将来にわたって買取価格が保証されたことから太陽光発電は爆発的に普及が進んだ。3.5 節では RE 電源にどれだけ頼れるかといった議論をしている。そこでは、太陽光発電の出力特性（測定例）や「ならし効果（複数の太陽光による出力平準化）」、太陽光発電の供給力としての価値、接続可能量などについて述べられている。

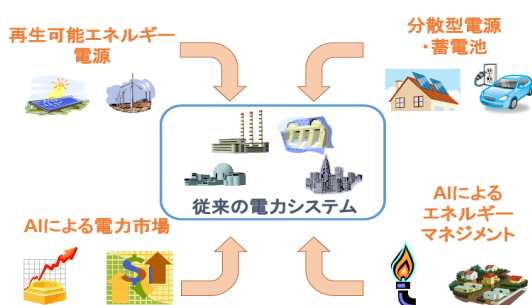


図 3.8.3 変革期の電力システム
(文献⁽⁵⁸⁾をもとに作成)

太陽光発電などの自然変動電源は、出力が天候に依存して急峻に変動するため、その出力予測技術を開発し電力システムの運用に活用していく必要がある。出力予測の基礎データとなる日射量や風速の実測値解析、出力変動特性評価、衛星画像や天空画像による日射予測手法、あるいは気象データや地形データを用いた風速予測手法の開発が重要である。また、RE 電源が大量に導入された電力システムの運用技術や評価手法として、負荷周波数制御、発電機起動停止計画、供給信頼度評価、安定度解析などの検討や、RE 電源大量導入を想定した設備計画（電源、送電設備、地域間連系線）手法の検討が重要である。

電力市場

わが国では、今後、規制緩和により電力市場が導入され、設備計画は垂直統合から利益優先の競争環境へと変化していくと思われる⁽⁵⁸⁾。本報告書の 3.2 節は日本の電力自由化に関する節であり、広域取引や競争環境の整備、あるいは電源の確保と流通設備の整備などについて述べられている。また、3.3 節ではイギリスの電力自由化に関連して電源構成の変化や電力市場改革の推進について述べられている。

このような自由化環境では、電力価格の高騰や供給信頼度の低下など、これまでにないリスクが発生する可能性がある（図 3.8.4 参照）。このような危険を回避するため、あるいはその影響を微小化するため、RE 電源やデマンドレスポンスの大量導入に対応した電力市場設計の提案やリアルタイム市場

・設備計画は垂直統合管理から利益優先の競争環境へ
→ 電力価格高騰や供給信頼度低下の危険性

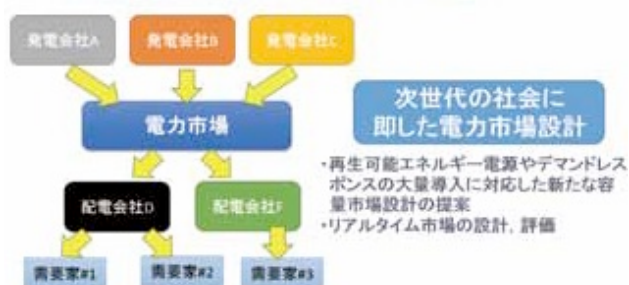


図 3.8.4 電力自由化と電力市場
(出典：文献⁽⁵⁸⁾)

の設計・評価などの研究を行っていく必要がある。今のところ、日本の大学・高等専門学校（以下、「高専」）でこのような研究を手掛けている研究室は多くはないと思われる。今後の重要なテーマであり、より多くの研究者が電力市場に関する研究を手掛けていただくことを希望したい。

分散型電源

需要家設備にも太陽光発電や小型の蓄電池、電気自動車などの分散型電源が導入されてくる。これらの要素が配電系統に大量に導入されることで配電系統の電圧上昇、周波数変動などの問題が発生する可能性がある。これを解決するため、インバータによる無効電力制御などのパワーエレクトロニクス応用技術、スマートメータの情報を利用した電圧管理・制御技術、需給制御技術などの研究が考えられる。

エネルギーマネジメント

3.6 節で述べられたように、電力システムにおいてデマンドレスポンスなどの形で需要家資源が活用されつつある。また、家庭やビル・工場などの省エネルギーも指向されつつある。電力システムの効率的運用には必須の技術であった EMS が、HEMS (Home EMS) や BEMS (Building EMS), FEMS (Factory EMS) といった形で家庭や、ビル、工場など需要家サイドへも導入されつつある。災害時の応用や離島など遠隔地向けのシステムとして、小地域で電源・負荷をまとめて効率的に運用するマイクログリッドの技術も、大震災後は特に注目を集めている。世界には無電化地域も多く残っており、このマイクログリッド技術は今後ますます重要になるとと思われる。3.7 節では分散電源を活用したレジリエンス向上対策が述べられている。

これらの小規模システムでは、電力系統と独立して運転した場合に、限られた電源に対して需要変動が大きいと安定運転ができなかったり停止してしまったりする危険性がある。そのためインバータ電源大量導入時の安定性評価やパワーエレクトロニクスを応用した仮想同期機による安定運転技術などが研究テーマとなる。

共同研究のメリット、他分野との連携

以上のように種々の研究課題が考えられるが、その成果をより高めるため、他の研究機関、特に研究分野の近い大学間での交流会や共同研究等により研究の活性化・技術の継承・人材育成を行うことが考えられる。非公式な大学間交流会では学会などでは困難な、少人数で納得のいく議論を行うことが出来る。

他分野との連携も必要である。例えば地域における新しい電力供給システムを検討する際、技術的な検討だけでは不十分である。そのシステムに必要な信頼度・品質を満たしており、設備・運用・メンテナンスに必要なコストが最小化されたとしても、電力を供給されるユーザにとって、それが真に最適かどうかを判断するには、さらに社会的コスト、社会的便益などの検討が必要である。

システムを最適化する場合の目的関数は、常に「人の幸せ」であるべきである。まずは、そのシステムによって電気を供給される地域のユーザの幸せ、これは電気代のことだけでは

なく、そのシステムによってもたらされる追加の幸せ、例えば災害時に停電しないこと、あるいは停電からの復旧の早さといった、いわゆるレジリエンシー（回復力）といった要素などを考えなければならない。また、エネルギー供給システムを計画・運用することで見学者や観光客も増え、地域住民が活性化するという社会的な要素も見逃せない^(59,60)。逆に、例えば再生可能エネルギーとして導入される風力発電システムが地域として受容できるかどうかという社会的受容性の要素、具体的には騒音（低周波騒音を含む）、電磁波の問題、さらには景観の問題などがある。これらの要素は純粋に技術的な問題ではなく、地域住民がどう受容できるかといった社会的な問題としてとらえなければならない^(61,62)。こうした検討には社会科学あるいは人文科学との連携が必要である⁽⁶³⁾。自然科学以外のこれらの学問の助けを借りて初めて、真に最適なシステム（人の幸せが目的）を達成することができると考える。（図 3.8.5 参照）

パワーアカデミー

以上のように種々の研究課題が考えられるが、その成果をより高めるためには、他の研究機関、特に研究分野の近い大学との交流や共同研究等により研究を活性化し技術継承を充実していくことが重要である。学会などでは困難な、少人数で納得のいく議論を行うことも有効だろう。テーマをしばった個別の共同研究も重要ではあるが、交流の場をより増やし、個別の大学や高専においてだけでなく、より大きな単位での研究・教育を実施することにより、より効果的な人材育成が可能になると考えられる。「パワーアカデミー」の研究助成⁽⁶⁴⁾はそのよい一例と言っている。

また、近年深刻化する人的資源の不足への対策も必要である。誰が、どのような分野を得意としているのかを整理し、その情報を共有できるネットワークが整備できれば、不足する知識の補完、新たな情報の共有も容易となろう。この例としては、パワーアカデミー 若手教員／研究者支援活動（YPAN）が挙げられる⁽⁶⁴⁾。学—学、産—学の交流を通じて電気工学分野の教育・研究の活性化／人材育成へと繋げることを目的とし、2011 年からその活動を開始している。こうした企画を通じて、組織内での知識・技術の継承のみではなく、組織の枠を超えて知識・技術を継承・発展する仕組みを構築

することが、電力分野の人材育成において益々重要になるものと考えている。

電気学会研究会の活用

電気学会には海外からも注目を集める二つの大きな特徴がある。ひとつは調査専門委員会およびそのアウトプットとしての「技術報告」、そしてもうひとつは「研究会」⁽⁶⁵⁾である。研究会は、全国大会や部門大会のような大きな大会ではなく、分野をしばった比較的小規模な発表会である。比較的長めの発表・討論ができる、質問がしやすい、参加費が無料である、論文は研究会資料として残るといった多くの特徴がある。

特に近年は離島など不便な場所における研究会の効用が注目を集めている。都会での研究会の場合、自分の発表が終わったら他の人の発表を聞かずに帰ってしまったり、1セッションのみの参加としたりすることが多くなっている。忙しい中での参加であり、宿泊費用などの節約といった面もあるかと考える。しかし、離島であればいったん行けばそう簡単には帰れない。いきおいゆっくり腰をすえて研究会に参加することになる。場合によっては夜の懇親会、あるいはその後まで議論が続くこともある。研究会自体も俗世間を離れた環境の中で腹を割った深い議論をすることができる。こうした研究会を技術継承・人材育成に活用することが出来るだろう。

（3）社会への情報発信 ここでは、社会への情報発信としてすでに実施されているシンポジウム・講演会や出前授業・論文コンテストなどの状況を紹介し、さらに小説・ドキュメンタリーの企画について提案を行う。

シンポジウム・講演会等の実施

シンポジウム、講演会等を主催・共催することにより、社会への情報発信を積極的に行っていくことも重要であろう。上記の学々連携に加え、産学連携の推進も重要である。全国大のパワーアカデミー活動のほか、地域におけるパワーアカデミー（たとえば筆者の地域では中部パワーアカデミー）による地域ならではの多彩な活動も人材の育成に対して有効である。社会におけるニーズと、大学における基礎研究の蓄積・人材の集積などの研究環境との強い連携の下で、社会の要請に応えた機動的、弾力的な研究・教育を実施していくことが重要である⁽⁶⁶⁾。前節で述べた「島唄継承」や「やっとかめ文化祭」に倣い電力技術の伝統や歴史を振り返るイベントを企画するのも良いかもしれない。

出前授業・論文コンテストの実施

応用物理学会と電気学会それぞれの東海支部が連携し、「出張リフレッシュ理科教室」を毎年各地で実施している⁽⁶⁷⁾。開催趣旨は、科学的な施設に恵まれない地域への理科啓発、地域に根差した理科教育、そして児童生徒が直接見聞き体験できる先端技術の紹介の3つである。例えば2016年度は、三重県鳥羽市答志島の鳥羽市立答志島小学校で、ノーベル物理学賞の受賞対象となった青色LED開発に関する講演、液体窒素を使った実験、そして小グループに分かれての科学工作を行った。

電気学会の電力・エネルギー部門（以下、B部門）ではパワ

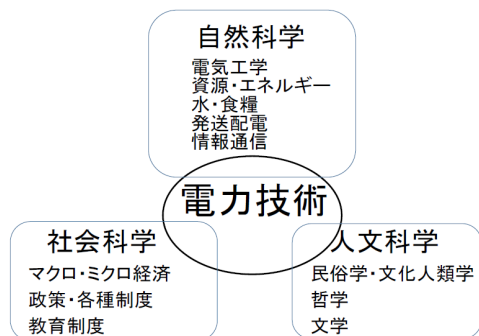


図 3.8.5 社会・人文科学との連携

（文献⁽⁶³⁾を基に作成）

ーアカデミーと共催で電気学会高校生懸賞論文コンテストを実施している⁽⁶⁸⁾。2016年度で10回目を迎え、全国の高等学校、工業高等専門学校17校から94編の応募があった。論文の内容は、再生可能エネルギーなど様々な発電方法に関するものや、環境問題に関するものが多くを占めた。

このように小学生や高校生をターゲットにしたイベントにより、たとえばデビューからの連勝新記録を達成した将棋界の藤井聡太四段や、卓球で目覚ましい活躍を見せる平野美宇選手・張本智和選手、フィギュアスケートの本田真凜選手などのように素晴らしい才能を発揮する若者をスカウトすることが出来るかもしれない。

小説・映画・ドキュメンタリーの企画

ここでは電力技術に関わる小説や映画・ドキュメンタリーなどをあげ、これらの作品が電力技術を世に知らしめるための一助になっていることを示す。

日本の女優第一号といわれる「貞奴」は、明治時代の流行歌「オッペケペー節」で一世を風靡した興行師で新派劇の創始者でもある川上音二郎の妻であり、川上一座の一員として米国や欧州でも芝居興行を行った⁽⁶⁹⁾。彼女の一生は杉本苑子らの手により小説にもなっている^(70,71)。その後、貞奴は川上と死別し、芝居興行から引退した後に、福沢諭吉の娘婿であり「電力王」といわれた福沢桃介と、最盛期のビジネスを支えたパートナーとして公私にわたって支え合う関係であった。岐阜県の観光地として知られる恵那峡は約80年前に木曾川をせき止めて作られた大井ダムによってできた人造湖であり、大正9年に地理学者の志賀重昂によって恵那峡と命名された。1924年(大正13年)に日本初のダム式水力発電所である「大井発電所」を作ったのが福沢桃介である^(72,73)。

アーチ式のコンクリートダムで知られる黒部川第四発電所は、映画「黒部の太陽」⁽⁷⁴⁾などで有名である。昭和30年代、電力不足の日本を救うため、人跡未踏の地で、水力発電所建設のため「黒四ダム」の建設が始まった。この黒四ダムの困難な工事にまつわる物語は、連載小説として毎日新聞に掲載され、後に映画化された。(1968年、三船敏郎・石原裕次郎主演、熊井啓監督)さらに単行本としても刊行された⁽⁷⁵⁾。黒三ダムの工事の中でその過酷さが有名になった高熱トンネルの工事の実録小説になっている⁽⁷⁶⁾また、NHKテレビのドキュメント番組「プロジェクトX 挑戦者たち」(2000年から2005年の間に放送)では、2000年と2005年の2回にわたって黒四ダムが取り上げられた。現在、これらの番組はDVDで見ることが出来る⁽⁷⁷⁾。同じNHKテレビの「紅白歌合戦」(2002年)で中島みゆきが「プロジェクトX」の主題歌「地上の星」を黒四ダム建設現場のトンネル内から生中継で歌い、寒さのため2番の歌詞を間違えたことは有名なエピソードである。このように黒部川第4発電所は、電力がらみの業績として広く知られた数少ない例である。

真山仁の「マグマ」はフィクションではあるが九州の温泉地帯を舞台とした地熱発電の開発秘話である⁽⁷⁸⁾。「マグマ」は小野真千子主演でドラマ化もされた⁽⁷⁹⁾。同じ著者により地熱発電の入門書も書かれている⁽⁸⁰⁾。池澤夏樹の小説「すばらし

い新世界」⁽⁸¹⁾は風力発電を扱っている。

停電を扱った小説に「ブラックアウト」⁽⁸²⁾がある。送電線の異常によりイタリアとスウェーデンで突然発生した大停電が、瞬く間に冬のヨーロッパ全域へと拡大した。交通網をはじめ全ての社会インフラは麻痺し、街では食品の奪い合いや暴動が多発している。完全に機能不全に陥った世界で元ハッカーの主人公は、この前代未聞の事態が人為的に引き起こされた可能性に気づく。

停電を扱った映画に「大停電の夜に」⁽⁸³⁾、「サバイバル・ファミリー」⁽⁸⁴⁾などがある。前者はクリスマス・イブの数時間の停電の中での男女の出会いや別れを描いている。実際にニューヨークで起こった大停電をモチーフにしている。後者は3か月以上続く大停電の中での家族の再生を描いた映画であり、電気、水道、ガスが使えない状況がジワリジワリと深刻になっていく過程がリアルに描かれていて恐ろしい。これらの作品のテーマは電気の重要性を説くことではないが、これらの小説や映画を鑑賞した人の何割かには、普段当たり前に存在する電気のありがたさや重要性をあらためて認識していただけるのではないだろうか。

東日本大震災に関連する本は数多く出ている^(85,86)。例えば人文書の品揃えで定評のあるちくさ正文館書店(名古屋市)にはずらりと関連本が並んでおり、それらは震災後文学と呼ばれる⁽⁸⁷⁻⁹⁴⁾。このうち「影裏」⁽⁹³⁾は第157回芥川賞(2017)を受賞した。題名は禅宗の言葉(禅語という)である「電光影裏斬春風(でんこうえいりにしゅんぷうをきる)」からとられている。坐禅中に斬られそうになった僧侶が、「私を斬るというけれど、言ってみればその大刀も空、私も空。空で空を斬る、あたかも稲妻がピカリと閃ひらめく間に春風を斬るようなものではないか。さぞかし、手応えの無いことだろうよ！死ぬもよし、生きるもよし、どうぞご自由にこの老いぼれ坊主の首を斬りなさい！」と言ったという。悟りを得たもの(プロフェッショナル)の不变で悠久の構えを表した言葉であり、この言葉が主人公の心情に深くかかわってくる。「グラウンド・ゼロ」⁽⁹⁴⁾は台湾を舞台にした近未来のディストピア(反理想郷)を描いたSF(サイエンス・フィクション)である。小説以外でも、大震災とそれにかかわる人の生活を考察した書籍がいくつか発行されている⁽⁹⁵⁻⁹⁸⁾。これらはすべて宗教学・社会学・人類学・経済学など、いわゆる「文系」研究者の立場から発信されたものであるが、「理系」からの発信はほとんど見られない。もっと積極的に、工学・理学・医学などの分野から事実に基づく考察、あるいは理系ならではの数値的(統計的)分析を伴った考察を行い、将来につなげていくべきであろう。大震災を忘れてはならない。

(4) 海外進出と海外人材の活用 ここまで電気学会の活動や、我々が研究・教育の場で技術継承や人材育成のために行っていること、できそうなことを述べてきた。しかし、実際の現場においては、適用機会が少ないためにうまく継承されてこなかった技術がある。これらの適用機会を探しその技術を次の世代に継承していくためには、海外進出が有効と

思われる。日本の比較的成熟した電力システムの中では適用機会のない製品であっても、海外において適用できる機会があれば、そこで技術の継承が行われていく。例えばスマートグリッドや HVDC・LVDC システムに用いる製品など海外における需要は大きいと思われる。そのような海外での適用機会をいかに増やしていくか、学会や大学でも出来ることがあると思われる。まずは中国やインド、東南アジアといった国々の技術者との交流から始めてはどうだろうか。近年の ASEAN 諸国の技術力の向上は目を見張るものがあり、最新技術の適用機会として格好の舞台となるのではないだろうか。この問題については電気学会国際活動委員会とも連携し、さらに考えてみたい分野である。名古屋のカレー屋さん Coco 老番屋（ココイチ）は全国に展開しているが、近年は海外にも進出を始め、あろうことかカレーの本場インドにも進出した。この思い切りの良さは見習いたいところだ。

海外からの人材登用については、ワーカとしての労働力を確保するには有効かもしれないが、技術継承という側面から見ると技術の海外流出につながる可能性もあり、企業としてどこまで踏み込めるかという課題がある。

昨今の電気料金の高騰により企業自体が海外に移転するという動きが加速した時期がある。東南アジアを主体に工場を移転し、地産地消の考えで海外に工場を移し需要の大きい現地で販売するという構図もある。このような動きについても技術継承という点では考えるべきことが多そうである。

海外との交流の活性化

ここでは国際会議 ICEE (International Conference on Electrical Engineering) を中心に海外との交流の活性化について述べる。ICEE は、国内およびアジア・太平洋地域をはじめとする海外の研究者・技術者に対して、電気工学分野における最新の研究成果の発表および検討の場を提供し、学術研究活動の活性化と国際貢献を推進することを目的とする国際会議であり、日本、韓国、中国、香港の4カ国・地域の電気関連学会（日本は電気学会）の持ち回りで運営・開催されている⁽⁹⁹⁾。

ICEE の基本理念は 1994 年に電気学会電力・エネルギー部門大会国際セッションにおけるパネルセッション” Global Contribution” にて調印された東京宣言 (Tokyo Declaration) に記載されている⁽¹⁰⁰⁾。アジア・太平洋地域をはじめとする世界の研究者・技術者に対して、電気工学分野における最新の研究成果の発表および検討の場を提供し、学術研究活動の活性化と国際貢献を推進することを目的としている。ICEE 発足当時の議論では、欧米には CIGRE: International Council on Large Electric Systems (France), IET: Institution of Engineering and Technology (UK), IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (USA) などの国際学会があるのに対してアジア地域にはそれに匹敵する国際学会がない、世界に向けて情報発信をしたいアジアの電気技術者のためにアジアにも CIGRE, IET, IEEE に匹敵する国際学会が必要ではないかといった意見が ICEE 発足の原動力になったと推察される。

1995 年に第一回を開催して以来、これまで 20 年以上の歴史を重ねてきたが、その内容や各機関の力関係は徐々に変わ

表 3.8.2 ICEE における国別論文数（筆者調べ、大会によって
はショートペーパーを含む、概数）

年	開催	日本	中国	韓国	香港	他
2014	韓国	126	34	234	12	17
2015	香港	122	45	79	21	10
2016	日本	290	11	101	13	18
2017	中国	95	199	63	9	12

ってきた。たとえば、ここ 4 年間の国別の論文件数を表 3.8.2 に示す。日本の論文件数は他国開催の場合は 100 件前後であるが、中国開催の場合は中国が、韓国開催の場合は韓国が日本の件数を大きく超えている。これ以前の国別論文数データははっきりしないが、近年の中国・韓国の台頭が著しいように思われる。他の国際会議や CIGRE, IEC での活動などを見ると、特に中国の活性化は目覚ましいものがある。日本も負けず切磋琢磨していく必要があるだろう。

ICEE のような広い分野をカバーする国際会議に対して、電気学会では上述の「研究会」を国際化したような、比較的小規模でローカルな国際開始（ワークショップやシンポジウムと呼ばれる）を部門ごとに開催している。たとえば A 部門の ISEIM, B 部門の IWHV, D 部門でやられている SAMCON(The IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control and Optimization), および日韓台国際ワークショップ (Symposium on Semiconductor Power Conversion), さらに E 部門の Sensor Symposium などがある。ほとんどの会議が毎年開催されており、アジア地域からの参加者が多い。

米国主導のグローバリズム世界が崩れつつあり、欧州も一つになれず苦しんでいる。このような世界情勢の中で経済大国となった中国やロシアはどう動くか分からず、日本は米国に追従する以外に、確固とした外交方針を持ち得ていないように見える。米国主導の秩序が崩れるとき、次世代の一つのオプションはアジアの近隣諸国と仲良くやっていくことだろう。具体的には、技術力の高い台湾・韓国などである。その次に候補とすべきは ASEAN 諸国、すなわちタイ、インドネシア、ベトナムあたりであろうか。その意味で上述した「日韓台国際ワークショップ」は意味がある。歴史的・政治的なことを考えると、日韓台という枠組みを維持することは難しいかも知れないが⁽¹⁰¹⁾、少なくとも技術に限れば各国の研究者・技術者にわだかまりは少ない。こうしたところから民間の外交もかねて技術交流を深めていくことはアジア諸国の安全保障の面でも意味があると思われる。

(5) 大学・高専における教育の充実 本稿では、日本政府が目指す未来社会である「ソサイエティ 5.0」について紹介し、次にこれからの教育における高齢者の活用について提案をする。最後に、AI 時代の人材育成、および技術書・技術報告書の充実について述べる。

ソサイエティ 5.0

日本政府が推進している経済財政運営の基本方針（いわゆる「骨太の方針」）によれば、人類社会の主な特徴は、①狩猟、

②農耕, ③工業, ④情報と変遷し, 次の5番目の社会像が Society 5.0 である。世界では, ①蒸気機関, ②電力, ③コンピュータに続く第4次産業革命が進展している。人工知能(AI)やモノのインターネット(IoT)がその特徴である。日本では, これらの世界的な技術動向を活用した「超スマート社会」(2016年5月に文部科学省が発表した「第5期科学技術基本計画」で示された政策のひとつ)を「Society 5.0」とし具体的に推進している。ドイツでの「インダストリー4.0」, 米国での「インダストリアル・インターネット」, 中国での「中国製造2050」などの動きに対応するものである。

2017年6月13日に「未来投資戦略2017—Society 5.0の実現に向けた改革—」が閣議決定された。投資戦略の概要を示す資料⁽¹⁰²⁾によれば, Society 5.0の実現に向けて, 健康寿命分野, 移動革命, サプライチェーンの次世代化, 快適なインフラ・まちづくり, FinTecの5分野に政策資源を集中投入することになっている。少子高齢化や人手不足などに力点を置いた政策が, 今後進められていくことを望みたい。

AI時代の人材育成

今後, 電力技術はどうなるのであろうか。英国の週刊誌「エコノミスト」は2050年のテクノロジーとして人工知能(AI), バイオ, 農業, 医療, エネルギー, 軍事, 仮想現実(VR), 拡張現実(AR)などの技術と, それが経済・社会・人間の幸福に与える変化を予測している⁽¹⁰³⁾。この本の第9章, 「太陽光と風力で全エネルギーの三割」を担当したアン・シューカット氏は, これからの数十年で脱・化石燃料という抜本的な変化が起き, 太陽光発電と風力発電のテクノロジーの改良とコスト低下により, 両者が総発電量に占める割合は現在の5%から2040年には30%に上昇する可能性があるとしている。リチウムイオン電池やフロー電池の蓄電効率は大幅に高まり, エネルギー不足はなくなり, エネルギーが潤沢にある世界が実現すると楽観的な予測を披露している。このような状況の中では電気技術者の役割はなくなるのだろうか。いや, 本稿で述べたように電力技術に関する課題は人材育成の問題を始めとして山ほどある。エネルギー分野でも最も重要な技術の一つである電力技術は, 社会にとって今後さらに重要なものになっていくだろう。

AI時代を迎えて, 人間と機械の共存といった問題も現実化してきた。米国の仕事の47%, 欧州では54%が20年以内にAIやロボットに奪われるという予測もある⁽¹⁰⁴⁾。しかし, たとえどのような時代になろうとも, 人々の暮らしを支えるのは, 水・食糧そしてエネルギーである。すなわち, 電力技術者は, いつの世でも世の中に我々の技術を役立てていくことができるのである⁽¹⁰⁵⁾。そのような研究が出来るチャンスがあることに感謝したい。

電気学会創立125周年を記念した電気学会誌特集「これからの25年への期待」の中で坂本織江氏(上智大学)はエリーヒ・ケストナーの作品「五月三十五日」を引用しつつ25年後のエネルギーネットワークについて予想をされている⁽¹⁰⁶⁾。表題だけまとめると, ①25年後には電力系統が今よりも方々でつながり地球規模の持続可能なエネルギーネットワークにな

っている。②その地球規模の電力系統を運用するための, 超大規模電力系統シミュレータが実現している。③電力系統が身近なものとして日常会話に上る。④電気電子系の学生の半分が女子になっている。以上である。壮大な夢のある予想である。

このような状況の中では電気技術者の役割はなくなるどころか, 社会にとってもっとも重要なものになっていくだろう。平成27年度電力・エネルギー部門大会の特別講演にて天野浩氏(名古屋大学)は「地球規模の問題解決に挑戦してみたい」との考えから, 人々の暮らしを便利にする通信(インターネット), 人々の暮らしを支えるエネルギー, 水・食糧, 環境・健康問題への挑戦をあげられた^(107,108)。青色LEDの開発をされた先生方や実用化された企業の方々のように, 我々にも世の中に我々の技術を役立てていくことが可能なのだ。そのためには, 専門家として専門分野でベストを尽くすことが重要であろう。

高齢者の活用

定年後をいきいきと過ごしている人は2割未満で, 居場所を見つけられずにいる人が大多数といわれる⁽¹⁰⁹⁾。企業では, 高年齢者雇用安定法の効果により, 定年延長あるいは定年後再雇用, あるいは定年そのものをなくすことによる定年年齢の繰り延べが増えている。しかし, これらの人材は非正規雇用である場合が多く, 経営者側としては総人件費抑制という枠組みから見て, その給与は極力抑えたい。かといってあまりにも待遇が悪ければ熱心に仕事をするのが出来ないのが人情である。雇用延長者のモチベーションをどのように維持できるかが課題となっている。

高齢者は概して「教えたがり」である。時にはそれが説教臭いということで顰蹙を買ったりもするが, そればかりではない。こうした働く意欲のある人たちを客員教授や特任教授として大学に迎えば, 大学における教育も充実し, 人手不足も解消される⁽¹¹⁰⁾。文献⁽¹¹¹⁾では, お金に換算できないが価値ある資産として, ①生産性資産, ②活力資産, ③変身資産を挙げている。このうち①生産性資産は専門分野のスキルや知識, あるいは仲間(人脈), 評判(ブランド)などである。②活力資産は脳も含めた体の健康, バランスのとれた生活, 前向きな友人関係などである。③変身資産としては, 多様性に富んだネットワーク, 新しい経験に対して開かれた姿勢などがあげられている。こうした資産を持つ高齢者であれば, 教育の場においても活用のしがいがあるだろう。映画「Trouble with the Curve, 邦題: 人生の特等席」ではクリント・イーストウッド扮するプロ野球スカウトマンが「必要とされることの喜び」を強く表現している。

高齢者の活用については教育の場だけでなく, 一般の企業でも少子化対策のひとつとして考えるべきオプションであろう。塩野七生氏は最近発表されたエッセイの中でこんなことを書いている⁽¹¹²⁾。「リストラしないで国を立て直すのと, リストラしてでも繁栄を手にするやり方を比べてみると, 長期的に見れば前者が成功したのは, 歴史が示すとおりだ」

しかし, ここではあえて触れないが, 実際に高齢者を活用

するには多くの障壁があると思われる⁽¹¹³⁻¹¹⁵⁾。また「年寄りの冷や水」とか「老害」とか言われて避けられる場合もあるかも知れない。「老害」とは、本来は、世代交代が図れず老朽化した「組織」のことだが、近年は、能力の衰えた高齢者が社会や組織の中で活動の阻害をする際に使われる。たとえば、自分に知識や経験が備わり、特に学習する必要がないと思いつき込み、自分の常識や意見が一般論、もしくは一般論に優越する正論だと勘違いをするようなことがある。しかし、これらの悪い傾向は若い人にも見られるものであり、高齢者であっても、常に新しい技術や考え方に興味を持ち学習していれば企業にとって十分に戦力に成り得るのではないだろうか。

もちろん、こうした積極的な高齢者とは逆の考え方もある。例えば、日本の伝統的村落社会では今も「隠居」という慣習が残っている⁽¹¹⁶⁾。定年後は、仕事はやめ、趣味やボランティア活動に励むのもひとつの生き方である。

技術書・技術報告書の充実

最後に電力技術の研究・教育に欠かせない教科書や技術書などのテキストについて少しだけ触れたい。名著の絶版が相次いでいる。例えば文献(117)～(123)である。これらの名著の絶版は研究・教育の活性化、人材の育成に対して障害となる可能性がある。幸い文献(121)は限定出版ではあるが昨年復刻された。また、文献(124)～(130)といった電力技術関連の新しい技術書も発行されている。このように電力技術やエネルギーシステムに関する図書の出版・復刻を地道に続けていくことが必要であろう。電気学会の調査専門委員会において、複数の企業・大学などの委員が作り上げる「技術報告」も有用である。

書籍ではないが、インターネットで自由に読める解説書として文献(131)がある。これは、電気事業の現状と課題について、技術的・歴史的な観点を大切に、Q & A方式で平易に解説した一般向けの資料（無料）である。基本的な事項が丁寧に説明されており、格好の入門書の一つになるだろう。また、電気学会ホームページから無料でダウンロードできる電気の知識を深めようシリーズ Vol.1～7⁽¹³²⁾は、“電気の専門家があなたのためにもう一度、やさしく電気の基礎をご説明します”と銘打っており、電気に詳しくない方に電気の知識を深めていただくことを目的として企画された。全7冊構成で、Vol.1 から Vol.7 まで読み進めていくと、やさしく正しく電気の知識を身につけることができる仕組みになっている。今後このように電力技術やエネルギーシステムに関する図書・電子媒体などの出版・復刻を地道に続けていくことが必要であろう。

3.8.5 おわりに

日本の優秀な電力技術、電力技術継承の課題と問題点、人材育成について書いてきた。インタビューに協力いただいた方々には、この場を借りてお礼を申し上げる。

企業における技術継承・人材育成の問題は、広く雇用にかかわる問題である。技術継承・人材育成を円滑に行うには、まず非正規雇用を減らし、海外からの人材などマイノリティ

も含め正規雇用を増やすことが肝要である。企業は目先の利益だけを追うのではなく、企業の社会的責任としてこれを実施しなければならない。十分な給与があれば従業員は結婚する人が増え、生まれてくる子供の数も増える。少子化問題は解決され、企業は優秀な人材を確保することが出来る。この良い流れが確立されれば、人材育成は円滑に行われることができる。

大学の劣化については、問題が多いが、まず教育・研究の活性化から始めたい。教育・研究を面白くすることが必要である。教師は、人がやらないユニークな教育方法・研究テーマを見つけ、一生をかけてそれらを楽しむ。学生は、教師が教育や研究を楽しむのを見て、自分も講義や研究を積極的に楽しみ、その中で自分の進路や就職活動を考える。大学に残るもよし、企業に入るもよし、まだ決められないというのならそれもよい。とにかく教育・研究をいかに楽しめるかが重要である。楽しい勉強、楽しい研究は幸せにつながる。

すべての学問、すべての技術は人間の幸せのためにある。人間の幸福とは、多くの目的関数の和で表され、それぞれの目的関数には重みがつけられる。この重みの与え方が、その人間の個性となる。それぞれの人間（個人）の目的関数（多目的目的関数）が集合して、より大きな目的関数（ Σ 目的関数）となる。このシグマ（ Σ ）の範囲は、家庭・地域・国・そして地球と広げられる。すべての人間は地球レベルでの幸福の追求を目指すべきであり、そのためには、電力工学やエネルギー工学の手法だけでは無理がある。経済学や哲学をはじめとする社会科学・人文科学との連携が不可欠である。

参考文献

- (1) 餘利野 直人, 造賀芳文ほか: 安全・安心社会の電気エネルギー, 電気学会誌, Vol. 135, No. 11, pp. 752-753, 2015
- (2) 舟橋俊久: 電力技術の継承にかかわる問題点と人材育成, 電気学会誌, Vol. 135, No. 12, pp. 829-833, 2015
- (3) 舟橋俊久: 電力・エネルギー分野の人材育成, 電気評論(2017.8)
- (4) 舟橋俊久: 電力分野における技術継承と人材育成, 電気・電子・情報関係学会東海地区連合大会シンポジウム(2017.9)
- (5) 橋川武郎: 「日本電力業発展のダイナミズム」, 名古屋大学出版会(2004)
- (6) 橋川武郎: 「日本電力業の発展と松永安左エ門」, 名古屋大学出版会(1995)
- (7) 橋川武郎, 「電力改革, エネルギー政策の歴史的大転換」, 講談社現代新書(2012)
- (8) 長谷川 有貴, 勝河幸一: 「でんきの礎」から未来を拓く, 電学誌 133 巻 11 号 p738-741 (2013.11)
- (9) 電気学会「電気の礎」ホームページ
<http://www.iee.or.jp/ishizue/>
- (10) 電気学会「電力技術のイノベーション」ホームページ
<http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/14-magazine/index100.html>
- (11) 山本正純: 電気技術オーラルヒストリー～先達からの聞き取り調査活動～, 電学誌 133 巻 11 号 p742-747 (2013.11)
- (12) 大来雄二: 卓越データベース, 電学誌 133 巻 11 号 p748-751 (2013.11)
- (13) 国立情報学研究所「発明と発見のデジタル博物館」ホームページ
<http://dbnst.nii.ac.jp/>
- (14) 津谷典子, 樋口義雄編: 「人口減少と日本経済」, 日本経済新聞出版社(2009)
- (15) 吉川 洋: 「人口と日本経済」, 中公新書(2016)
- (16) 西内 啓: 「統計学が日本を救う」, 中公新書ラクレ(2016)
- (17) 村上 由美子: 「武器としての人口減社会」, 光文社新書(2016)
- (18) 山崎 亮: 「縮充する日本 参加が創り出す人口減少社会の希望」, PHP

- 新書(2016)
- (19) 藤波 匠:「人口減が地方を強くする」, 日本経済新聞出版社(2016)
- (20) 澤野雅樹:「絶滅の地球誌」, 講談社選書メチエ(2016)
- (21) 海老原 嗣生:「お祈りメール来た 日本死ぬ」, 文春新書(2016)
- (22) 常見陽平:「就活と日本社会へ平等幻想を超えて」, NHK Books(2015)
- (23) 玄田有史編:「人手不足なのになぜ賃金が上がらないのか」, 慶應義塾大学出版会(2017)
- (24) 特集:最後の証言 バブル全史, 東洋経済(2017.5.20)
- (25) 永野健二:「バブル, 日本迷走の原点」, 新潮社(2016)
- (26) ジョン・K・ガルブレイス:「バブルの物語～暴落の前に天才がいる」, ダイアモンド社(1991)
- (27) 池井戸 潤:「オレたちバブル入行組」, 文芸春秋(2004)
- (28) 池井戸 潤:「オレたち花のバブル組」, 文芸春秋(2008)
- (29) Toshihisa Funabashi, A Study on Modeling Technique for Power system Transients Analysis, A Thesis submitted to Doshisha University, Kyoto, Japan for the Degree of Doctor of Electrical Engineering (1999.12)
- (30) 関根泰次:「学窓から眺めた日本と世界そして電気 随想 101 話」, 電気学会(2007)
- (31) 伊賀泰代:「採用基準」, ダイアモンド社(2012)
- (32) 三浦耕喜:要注意!! クラッシャー上司, 中日新聞(2017.6.19, 6.26, 7.3)
- (33) 小野 浩:「日本の長時間労働を考える」, 日本経済新聞(2017.5.11~12)
- (34) 福山 絵里子:「働き方改革で残業減, 懐直撃」, 日本経済新聞(2017.5.13)
- (35) 常見陽平:「なぜ, 残業はなくならないのか」, 祥伝社新書(2017)
- (36) 榎本博明:「おもてなし」という残酷社会～過剰・感情労働とどう向き合うか」, 平凡社新書(2017)
- (37) 上念 司:「日本経済を減ぼす「高学歴社員」」, PHP 文庫(2017)
- (38) 大西康之:「東芝解体～電機メーカーが消える日」, 講談社現代新書(2017)
- (39) 佐藤文昭:「日本の電機産業 失敗の教訓」, 朝日新聞出版(2017)
- (40) 戸部良一他:「失敗の本質～日本軍の組織論的研究」, 中公文庫(1991)
- (41) クレイトン・クリステンセン:「イノベーションのジレンマ～技術革新が巨大企業を減ぼすとき」, 翔泳社(2001)
- (42) 浜 矩子:「無魂企業は企業にあらず～経済活動の主役たちに求められるもの」, 世界, 岩波書店(2016.10)
- (43) 酒井 穰:「幸せの経営学」, 日本能率協会マネジメントセンター(2014)
- (44) 伊集院 静:「大人の流儀」, 講談社(2011)
- (45) 特集:行きたい大学がない, 日経ビジネス, 2017.02.20 No.1879
- (46) World University Rankings 2016-2017: results announced (THE, 2016/9/21) <https://www.timeshighereducation.com/news/world-university-rankings-2016-2017-results-announced>
- (47) World University Rankings 2016-2017 (THE) https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings/2017/world-ranking#/page/0/length/25/sort_by/rank_label/sort_order/asc/cols/rank_only
- (48) 特集:国立大学は甦るか, 中央公論(2017.2)
- (49) 特集:大学崩壊, 現代思想 (2014.10)
- (50) 特集:大学のリアル, 現代思想(2016.11)
- (51) 特集:教育は誰のものか, 現代思想(2017.4)
- (52) 特集:文学部不要論を論破する, 文学界(2015.12)
- (53) 石井修三:技術者の継続教育支援のための組織構想, 電学誌 125 巻 10 号(2005.10)
- (54) 高木 勲:「技術者教育委員会の活動について」, 平成 25 年電気学会全国大会 H5-1
- (55) 中部電力ホームページ:電気を届ける無限大の想い http://www.chuden.co.jp/corporate/publicity/pamphlet/movie/index.html?cid=ul_me
- (56) 前島正裕・永田宇征:電気技術の進展と技術史研究, 電学誌 133 巻 11 号 p728-733 (2013.11)
- (57) 高野浩貴:電力分野の研究動向と人材育成, 電気・電子・情報関係学会東海地区連合大会シンポジウム(2017.9)
- (58) 舟橋俊久・真鍋勇介:エネルギーシステム寄附研究部門の紹介, 電学誌 135 巻第 3 号 p170(2015.3)
- (59) 諸富 徹編著:「再生可能エネルギーと地域再生」, 日本評論社(2015)
- (60) 諸富 徹:「エネルギー自治」で地域再生!ー飯田モデルに学ぶー, 岩波書店 (2015)
- (61) 丸山康司・西城戸 誠・本巣芽美編著:「再生可能エネルギーのリスクとガバナンス」, ミネルヴァ書房(2015)
- (62) 丸山康司:「再生可能エネルギーの社会化」, 有斐閣 (2014)
- (63) 手塚哲央:特集:「エネルギー・資源のこれまでとこれから」について, エネルギー・資源 37 巻 6 号 p354(2016)
- (64) パワーアカデミーホームページ <http://www.power-academy.jp/future/rg/>
- (65) 電気学会「研究会」ホームページ http://www.ieee.jp/?page_id=6818
- (66) 名古屋大学未来材料・システム研究所, エネルギーシステム寄附研究部門ホームページ <http://www.nucee.nagoya-u.ac.jp/labs/katolab/frdes.html>
- (67) 栗本宗明:東海支部の青少年向け科学教室の紹介～出張リフレッシュ理科教室とおもしろ科学教室へ, 電学誌 137 巻 4 号 (2017.4)
- (68) 佐野常世:平成 28 年度 電気学会 高校生懸賞論文コンテスト表彰式報告, 電学誌 137 巻 6 号, P 380(2017.6)
- (69) 安保邦彦:「二人の天満」, 花伝社(2017)
- (70) 杉本苑子:「マダム貞奴」, 読売新聞社(1975)
- (71) 長谷川 時雨:「マダム貞奴」, 青空文庫 (<http://www.aozora.gr.jp/>) 初出:「婦人画報」1920 (大正 9) 年 2~4 月
- (72) 神津 カンナ:「水燃えて火 - 山師と女優の電力革命」, 中央公論新社(2017)
- (73) 竜門冬二:「川上貞奴 物語と史蹟をたずねて」, 成美堂出版(1984)
- (74) 三船敏郎・石原裕次郎 (主演):「黒部の太陽」, DVD()
- (75) 木本正次:「黒部の太陽」新潮社, 1998 (オリジナルは毎日新聞社 1967)
- (76) 吉村 昭:「高熱隧道」, 新潮文庫(1975)
- (77) 国井 雅比古・久保純子・膳場貴子 ほか出演:「プロジェクト X 挑戦者たち 厳冬 黒四ダムに挑む～断崖絶壁の輸送作戦～」, NHK エンタープライズ(DVD) (初回放送 2000/6/27) および「プロジェクト X 挑戦者たち “シリーズ黒四ダム～秘境へのトンネル 地底の戦士たち 絶壁に立つ巨大ダム 1 千万人の激闘～」, NHK エンタープライズ(DVD) (初回放送 2005/10/11・2005/10/18)
- (78) 真山 仁:「マグマ」, 朝日文庫(2008), 角川文庫(2009)
- (79) 尾野 真千子・谷原章介 (主演):「マグマ」, DVD-BOX, ポニーキャニオン(2012)
- (80) 真山 仁:「地熱発電が日本を救う」, 角川学芸出版(2013)
- (81) 池澤夏樹:「すばらしい新世界」, 中公文庫(2003)
- (82) マルク・エルスベルグ:「ブラックアウト(上), (下)」, 角川文庫(2012)
- (83) 豊川悦司・原田知世ほか出演:「大停電の夜に」, DVD(2006)
- (84) 小日向 文世・深津絵里 (主演):「サバイバル・ファミリー」, DVD, BD(2017)
- (85) 限界 研 編:「東日本大震災文学論」, 南雲堂(2017)
- (86) 斎藤 美奈子:「ニッポン沈没」, 筑摩書房(2015)
- (87) 橋 玲:「大震災の後で人生について語ること」, 講談社(2011)
- (88) 川上弘美:「神様 2011」, 講談社(2011)
- (89) 谷川 俊太郎ほか:「それでも三月は、また」, 講談社(2012)
- (90) 奥泉 光:「東京自叙伝」, 集英社(2014)
- (91) 大江 健三郎:「晩年様式集 イン・レイト・スタイル」, 講談社文庫(2016)
- (92) 池澤夏樹:「アトミック・ボックス」, 角川文庫(2017)
- (93) 沼田真佑:「影裏」, 文藝春秋(2017)
- (94) 伊 格言:「グラウンド・ゼロ 台湾第四原発事故」, 白水社(2017)
- (95) 中沢新一:「日本の大転換」, 集英社新書(2011)
- (96) 野口 悠紀雄:「大震災後の日本経済」, ダイアモンド社(2011)
- (97) 遠藤 薫:「大震災後の社会学」, 講談社現代新書(2011)
- (98) トム・ギル, ブリギッテ・シテガ, デビッド・スレイター編:「東日本大震災の人類学一津波, 原発事故と被災者たちの「その後」」, 人文書院(2013)
- (99) 舟橋俊久:国際電気工学講演会 (ICEE)の活動, 電気学会全国大会シンポジウム I-H4-5(2016.3)
- (100) Fumio Arakawa, “16 Years of ICEE”, ICEE(2010)
- (101) 内田 樹・姜 尚中:「アジア辺境論 これが日本の生きる道」, 集英社新書(2017)
- (102) 内閣官房日本経済再生総合事務局「未来投資戦略 2017—Society 5.0 の実現に向けた改革—」(2017.6) http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/sankou_society5.pdf
- (103) 英「エコノミスト」編集部:2050 年の技術 英「エコノミスト」誌は予測する, 文芸春秋(2017)
- (104) ルトガー・グレッグマン:「隷属なき道 AI との競争に勝つ ベーシックインカムと一日三時間労働」, 文芸春秋(2017)
- (105) 斎藤昌義:「未来を味方にする技術」, 技術評論社(2017)
- (106) 坂本織江:五月三十五日のエネルギーネットワーク, 電学誌 134 巻 5 号 (2014.5)
- (107) 天野 浩:新しいエレクトロニクスによる省・創エネルギーへの貢献, 平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会特別企画(3)特別講演レジュメ(2015.8)

- (108) 天野 浩・福田大展：「天野先生の青色 LED の世界」，講談社(2015)
- (109) 楠木 新：「定年後」，中央新書，(2017)
- (110) 中野雅至：「ビジネスマンが大学教授、客員教授になる方法」，ディスカバー携書(2013)
- (111) リンダ・グラットン，アンドリュー・スコット：「LIFE SHIFT 100 年時代の人生戦略」，東洋経済新報社 (2016)
- (112) 塩野七生：政治の仕事は機器の克服，文藝春秋(2017.9)
- (113) 濱口 桂一郎：「日本の雇用と中高年」，ちくま新書(2014)
- (114) 清家 篤：「生涯現役社会の条件 働く自由と引退の自由と」，中公新書(1998)
- (115) 清家 篤・山田篤裕：「高齢者就業の経済学」，日本経済新聞社(2004)
- (116) 関沢 まゆみ：「隠居と停年 老いの民俗学的考察」，臨川書店(2003)
- (117) Charles Concordia, “ SYNCHRONOUS MACHINES, Theory and Performance” John Wiley & Sons (1951)
- (118) 関根泰次：「電力系統解析理論」，電気書院(1971)
- (119) 新田目 倖造：「電力系統技術計算の基礎」，電気書院(1980)
- (120) 新田目 倖造：「電力系統技術計算の応用」，電気書院(1980)
- (121) 関根泰次：「電力系統過渡解析論（復刻版）」，オーム社 (2014.11)
- (122) 河野照哉：「系統絶縁論」，コロナ社(1984)
- (123) 雨谷昭弘：「分布定数回路論」，コロナ社(1990)
- (124) 横山隆一：電力自由化と技術開発，電機大出版局(2001.9)
- (125) 奈良宏一：電力自由化と系統技術－新ビジネスと電気エネルギー供給の将来－，電気学会(2008.9)
- (126) 河村達雄,柳父 悟,河野 照哉：「高電圧工学 (電気学会大学講座)」，(2003)
- (127) 日高邦彦：高電圧工学 (新・電気システム工学)，数理工学社(2009)
- (128) サージ現象に関する数値電磁界解析手法調査専門委員会：「数値過渡電磁界解析手法」，電気学会(2008)
- (129) 横山明彦，太田宏次：「電力系統安定化システム工学」，電気学会(2014.2)
- (130) スマートグリッド実現に向けた電力系統技術調査専門委員会：「スマートグリッドを支える電力システム技術」，電気学会(2014.12)
- (131) 仁田旦三 (監修)：「電気事業の基本的考え方」，電気協同研究会ホームページ
<http://www.etra.or.jp/concept/index.html>
- (132) 電気の知識を深めようシリーズ Vol.1～7，電気学会ホームページ
<http://www.ieej.org/denki/>

4. おわりに

本委員会で実施した一般向けのシンポジウムでのアンケートでは、偏りなく様々な話題が印象に残り、興味を持たれたようであった。周波数調整力の重要性や供給信頼度の概念、デマンドレスポンスなどを初めて知り、内容が理解できて有意義だったといった感想に加え、このような内容を広く一般に知らせるべきだという意見が少なからず寄せられたことが印象的であった。

これより、工学の専門的な内容についても、ポイントをうまく説明すれば、正確に理解され得るという実感を得て、このような活動の意義や必要性を改めて感じた。

本技術報告では、電気エネルギーシステム全体にわたる重要な課題について、工学的に客観的かつ包括的に整理し、解説した。エネルギーミックス、電力自由化、再エネの特性、電力システムの信頼性、デマンドレスポンス、災害対策、人材育成について、それぞれの委員による専門の立場から解説を試みた。この中で、特に関西学院大学経済学部・野村宗訓教授には、電力自由化に関する海外事例研究の第一人者として、本委員会の趣旨に賛同され、寄稿頂けたことに感謝している。

現在、我が国のエネルギー自給率はわずか 6%であり、ほとんどを海外に依存している。そして、電力化率と呼ばれる電力向けに投入されるエネルギーの割合は、一次エネルギー全体の 45%に達し、電力供給の重要性と電力システムのインフラとしての役割はさらに高まりつつある。電力システムを含む電気エネルギーシステムの課題は、日本の将来の姿に大きく影響し得るため、国家像を決める重要な要因となる。国民全体が関心を持ってエネルギーについての知識と課題を共有し、その上で冷静に議論することが望まれる。将来にわたって、日本が技術立国として持続可能な安全・安心社会を維持できるよう、本技術報告が少しでも助けとなれば幸いである。