

1. まえがき

再生可能エネルギーの導入が最も進んでいるドイツにおいて題記研究活動を行った。RWTH アーヘン工科大学 ACS に客員教授として 1 年間在籍し、研究内容の情報交換を行った。また、欧州で開催されたいくつかの学会に参加し、最新の研究動向を調査した。さらに ACS の課外活動に参加し、先生・スタッフや学生達と交流を深めた。

2. RWTH アーヘン工科大学 ACS の概要

RWTH アーヘン工科大学はドイツ西部のベルギーやオランダとの国境近くのアーヘン市内にあり、ドイツ有数の工科大学の一つである。アーヘン市民の約 70% がアーヘン工科大学に関係する仕事を行っていると言われており、アーヘンは大学街である。

ACS は電力システム分野での複雑な電力システムの自動化を研究している大学院の組織であり、Prof. Monti がディレクター教授として以下の 7 つの研究グループを束ねている。

- (1) Distribution Grid Monitoring and Automation
- (2) Resiliency and Interoperability in Smart Grids
- (3) Advanced Control Methods for Power Systems and HiL
- (4) Simulation Infrastructure and HPC
- (5) Simulation Methods and Automation Software Solutions
- (6) Energy Flexibility Management and Optimization
- (7) Energy Management Systems and Data Analytics

ドクターコースの学生が全体で約 50 名在席している他、1 名の教授や管理スタッフ、秘書を有している。

研究予算は EU のプロジェクトや企業（電力会社など）との共同プロジェクトが主であると思われる。Prof. Monti は州から最も顕著な研究成果を出した人に贈られるイノベーション賞を 2022 年に受賞しており、ACS の研究活動の活発さが伺える。

3. ACS での情報交換

- (1) 私の研究内容の講演（2023 年 5 月 16 日）

Prof. Monti が zoom を介した講演会をアレンジし、私の過去の研究内容を総括した「Electric Vehicles Contributing to Energy Management and The Future」の題目で約 1 時間講演した。この講演で(3)の学生との情報交換が開始された。

- (2) Prof. Monti との情報交換

欧州での研究トピックスや社会的な問題点を教えて頂いた。

- 2050 年カーボンニュートラルにはもっと消費者 (customer) を巻き込む必要がある。
- 風力・太陽光発電が多くなり、low inertia の問題を解決する必要がある。
- 様々な機能で transparency が要求されていて、open source のニーズが高まっている。IEC standard を規定するのでは遅すぎる。

- Digital twin（エネルギーのデジタルの現実世界と仮想世界）のプロジェクトが始まろうとしている。
 - 太陽光などの再生可能性エネルギー導入のための workforce が足りていない。
- (3) 在席しているドクターコースの学生との情報交換
- マイクログリッドの EMO(Electric Mobility Operator)の運用を研究しているチームと、EV の振る舞いをどのように模擬するか議論をした。また、私が過去に発表した日本の自動車の分析データを彼らに使用してもらうこととした。
 - 企業経験があり IoT と EMS に精通している学生と幅広く議論した。私からはバッテリーの寿命・監視制御の技術動向を説明し、学生からは現在の研究内容（電力システムの状態把握のための機械学習と CIM（Common Information Model）の適用）について紹介があった。
 - 太陽光発電を周波数制御や low inertia 対策に使用するために、Model based algorithm を用いて太陽光発電を制御する研究を行っている学生と、最近の太陽光発電技術に関する情報交換を行った。

4. 参加した学会での調査内容

(1) PSCC (Power Systems Computation Conference)@ポルトガル・ポルト

- ① 訪問日時：2022 年 6 月 27 日～2022 年 7 月 1 日
- ② 主な調査内容：以下の 3 つの研究発表が興味深かった。内容について今後詳細を調査する予定である。

1) Stochastic Operation of Energy Constrained Microgrids Considering Battery Degradation（ノルウェー大学）

蓄電池の運用に依存する蓄電池の劣化は複雑な要因である。本論文では、蓄電池の劣化を線形に近似することを提案し、それを確率的二重動的計画法に基づくエネルギー管理手法に実装した。日常運転における劣化モデリングがもたらす長期的な影響について、ノルウェーの小型マイクログリッドを対象に検討した。また、バッテリーと水素の貯蔵により、需要と供給のバランスをとることを検討した。その結果、提案する戦略により、蓄電池の寿命を 4 年以上延ばすことができた。

2) Modeling Probabilistic Driving And Charging Profiles of Commercial Electric Vehicles（ドイツ, RWTH）

EV の充電管理の最適化手法を開発するためには、EV の走行・充電行動の不確実性をモデル化することが必要であるが、ほとんどの論文は、個人所有の EV のモデリングに焦点を当てていた。本論文では、商用 EV（乗用車および小型商用車）の走行・充電挙動をモデル化する手法を提案している。5,000 台の車両を対象に、年間平均走行距離、平日の走行距離、季節ごとのエネルギー需要の観点から、妥当性を評価している。

3) A Modified Progressive Hedging Approach for Multistage Intraday Trade of EV Aggregators (スウェーデン王立大学)

短期電力市場における電気自動車アグリゲータの挙動をモデル化することに注目し、EV が提供する需要側の柔軟性を活用することで、EV の充電コストを削減しようとしている。本論文では、EV アグリゲータの日中市場およびバランシング市場への参加について、多段階のモデル化を多段階の確率計画問題としてモデル化している。この問題では、日中市場の特殊性を用いて、プログレッシブ・ヘッジング・アルゴリズム (PHA) と呼ばれるシナリオベースの分解手法で解かれる。ランダム化シナリオサンプリング手法を導入し、PHA を高速化している。さらに、並列ランダム化 PHA により、PHA をさらに改善している。

(2) SEST(International Conference on Smart Energy Systems and Technologies)2022@オランダ・アイントホーフェン

① 訪問日時：2022 年 9 月 5 日～2022 年 9 月 7 日

② 主な調査内容：

1) eNeuron プロジェクト

ローカル・エネルギー・コミュニティ (LECs) は、市民が参加するエネルギーシステムである。EU が資金を提供する eNeuron プロジェクトでは、以下のような革新的なツールを開発することを目的とした。

- ・LEC の最適な設計と運用のための革新的なツールを開発する。
- ・エネルギーハブコンセプトを推進することで、複数のエネルギーキャリアと統合されたエネルギーシステムを制御・管理するための概念モデルとして推進し、すべてのステークホルダーに持続可能性とエネルギー安全保障の具体的な利益をもたらすソリューションを提供する。

本発表では、研究開発コミュニティと最初の成果を共有することを目的とし、ツールの紹介とエネルギーシステムの制御・管理アルゴリズムなどの紹介があった。

2) FLEXGRID

H2020 年の研究プロジェクト FLEXGRID は、次のような重要な問題に答えることを目的としている。

- － DSO は、分散型再生可能エネルギー発電の大きな割合によって引き起こされる新たな運用上の課題にどのように対処することができるか？
- － 分散型再生可能エネルギー発電の大きなシェアに起因する新たな運用上の課題に、電力供給会社はどのように対処できるのか？
- － 系統運用者は、分散型再生可能エネルギー発電の柔軟性を効率的に活用することで、コストのかかる送電網の補強を回避できるのか？
- － 経済的に持続可能なビジネスモデルを構築するにはどうすればよいのか？
- － スマートグリッドのエコシステムにおいて、すべてのステークホルダーが Win-Win

になれるような、経済的に持続可能なビジネスモデルをどのように構築できるか？

－ 小規模なエネルギー需要家は、どのように柔軟性市場に参加することができるのか？

－ どのようにすれば、エネルギー市場のステークホルダーの様々な役割と独自の利害を調整することができるのか？

－ 新しい配電レベル柔軟性市場（DLFM）は、既存の規制の枠組みの中でどのように統合され、既存の送電網レベルの市場とどのように相互作用させることができるか？信頼性の高い送電網の運用と柔軟性市場の効率性のギャップを埋める FLEXGRID のビジョンについて 市場を意識した配電網の運用とネットワークを意識した配電網の運用に重点を置いて紹介された。

今後、日本で検討されるであろう送電網と配電網の間の協調方法について、欧州では一定の方向性が定まっているように見受けられた。

(3) WCPEC(World Conference on Photovoltaic Energy Conversion)@イタリア・ミラノ

① 訪問日時：2022 年 9 月 26 日～2022 年 9 月 30 日

② 主な調査内容：まず、世界の PV 累積導入量が 1TW に達したとの報告があった。また、2050 年のカーボンニュートラルのためには世界中で 63TW の PV 累積導入量が必要とのことで、この量の PV を設置するための面積はフランス全土やテキサス州に相当する。この問題に対し、新しい太陽光発電技術が発表、議論された。一方、「この数値を実現するためには今までの考え方を変えなければならないのではないか？」との目が覚めるような意見もあった。

私が着目していなかった太陽光発電として、両面 PV（裏側が地面の反射光を拾うことで効率が向上）、tracker 付 PV（太陽の動きに合わせて PV の角度が変わる）が発表されていた。また、水力発電所ダムの水面や河川などに設けるフローティング型 PV、Agrivoltaic（農場、ハウスへの PV 設置）なども紹介されていた。これらはそのまま日本には適用できないが、太陽光発電を増やすためのヒントになると思われる。

今後の PV 大量生産・リサイクルの議論もあり、PV の原料・製造で中国がほとんどのシェアを占める問題点も指摘されていた。

電力貯蔵に関しては、PV＋蓄電池＋ヒートポンプ（欧州は日本と較べて熱エネルギーのニーズが高い）や PV＋Electrolizer によるガス（水素など）化の設備容量の最適化や経済性の評価の発表があった。

シンガポールからの発表では、シンガポールは PV を大量に導入することはできないが、ビル一体型 PV やフローティング型 PV を推進する予定である。日本と PV 導入環境の共通の問題点があるので、今後のシンガポールの活動を日本は参考にした方が良いと感じた。

③ その他：オーストラリアは、南東部の州では太陽光発電などの大量導入によって電力エネルギーに占める再生可能エネルギー100%を 2025 年に達成する予定だけでなく、

大規模な蓄電池などの電力貯蔵設備を導入しており、本学会や 2050 年カーボンニュートラルに向けての世界の中で存在感が大きい。その方面において、オーストラリアの動向にも注目する必要があると感じた。

5. アーヘン工科大学での課外活動への参加

- (1) BBQ パーティ：年 1 回開催され、ほぼ ACS 全員が参加。
- (2) クリスマスパーティ：ACS だけでなく E.ON Research Center として開催される。クイズあり、ダンス・音楽ありのパーティ。
- (3) カーニバルパーティ：冬の終わりを告げるパーティで、全員が仮装して参加する。

6. 最後に

今回の貴重な在外研究の機会を頂いたことに、大学の関係者および学部・学科の皆様に感謝します。