

特集:持続可能なモビリティへの挑戦 ～カーボンニュートラルを実現するための先端技術～

1. 2050年CO₂排出ネットゼロに向けた戦略

上條 元久*

池原 賢亮**

片村 淳二***

中田 智也****

1. はじめに ～Nissan Green Program 2030

1.1 日産のサステナビリティの取り組み

日産は、サステナビリティを事業の中核に位置づけており、長期ビジョンNissan Ambition 2030や経営計画 The Arcの実現に向け、サステナビリティの取り組みを体系的・戦略的に実践していくことが重要となってきた。

そこで、日産の優先課題を明確にするため、社会課題の高まりや、ステークホルダーの皆さまの関心や技術革新等の最新動向に基づいたリスクや機会分析を行い、環境・社会性・ガバナンスの3つの視点から、日産全体として取り組むべき21項目のマテリアリティ（重要課題）を特定した。（図1）

特定にあたり、従来から投資家からの関心が高かった「社会・環境が日産へ与えるインパクト」の視点に、「日産が社会・環境へ与えるインパクトや価値」という新しい見方を加えており、いずれかの軸でインパクトが最も大きい項目を「最重要12項目」としている。

日産は、特定された項目の事業活動への織込みにより、持続可能な企業、ひいては持続可能な社会を築く道筋を開いていく。日産はこの考え方を企業の根幹に据え、着実にサステナビリティを推進し、よりクリーンで、より安全で、よりインクルーシブな社会の実現に向けて取り組みを推進する計画である。

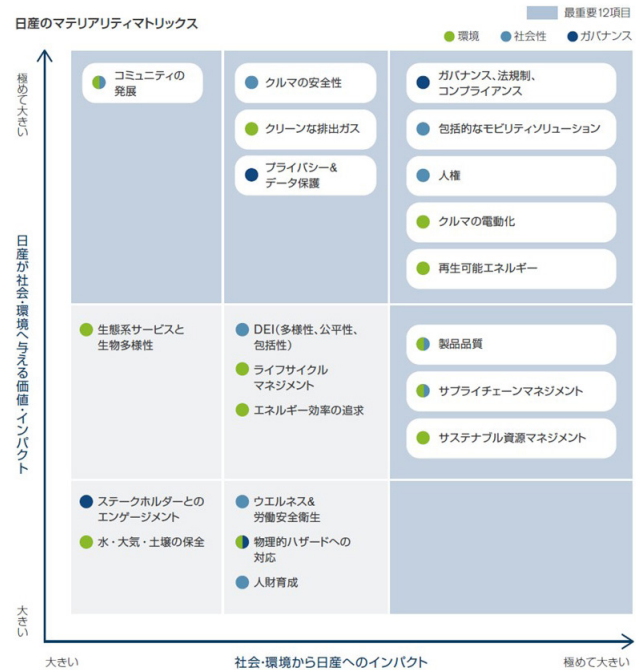


図1 日産のマテリアリティマトリックス

1.2 日産の環境の取り組み

～ Nissan Green Program 2030

事業の環境側面の推進のため、日産は、環境理念として「人とクルマと自然の共生」を掲げ、「事業活動やクルマのライフサイクル全体で生じる環境への依存と負荷を自然が吸収可能なレベルに抑え、豊かな自然資産を次世代に引き継ぐ」という究極のゴールを目指して取り組みを続けてきた。そして2023年、第5世代となる中期環境行動計画「ニッサン・グリーンプログラム（NGP）2030」を公開。自然と調和するサステナブルな社会の実現に向け、環境負荷のさらなる低減と、環境にポジティブな価値の創造を推進していく。

「NGP2030」では、日産全体のマテリアリティに基づき、中長期的に取り組むべき環境側面の重要領域を「気候変動」「資源への依存」「大気品質と水」と設定した。そこでは、カーボンニュートラルを目指した1.5℃シナリオ適合への取り組みの推進や、サーキュラーエコノミーへの移行、自然や生態系

*EV システム研究所 ** 技術企画部 *** 研究企画部 **** サステナビリティ推進部

への依存と影響の最小化、事業基盤の強化等、企業全体で環境課題への取り組みを加速させると同時に、新たな社会価値の創出に取り組む。さらに、ビジネスパートナーを含む外部のステークホルダーとの対話によるニーズ把握や、彼らへの行動変容の働きかけを通じ、持続可能な社会の共創に努めていく。

(表1)

表1 NGP2030 KPI一覧

重要課題	領域	2030年目標	環境的価値	関連するマテリアリティ
気候変動 	CO ₂ 排出の削減 (基準2018年)	ライフサイクル(t-CO ₂ /台数)	グローバル -30%	車両の電動化とモノづくりの革新による、クルマのライフサイクル全体におけるカーボンニュートラルへの貢献 ・クルマの電動化 ・再生可能エネルギー ・サプライチェーンマネジメント ・コミュニティの発展 ・サステナブル資源マネジメント ・エネルギー効率の追求 ・ライフサイクルマネジメント ・物理的ハザードへの対応 ・生態系サービスと生物多様性
		クルマの利用(g-CO ₂ /km)	グローバル -32.5% 4地域* -50%	
		生産(t-CO ₂ /台数)	グローバル -52%	
		サプライヤー		
		物流		
		R&D拠点	ライフサイクル目標の達成を目指す	
		オフィス		
		販売店		
資源依存 	材料資源	サステナブルマテリアルの拡大(重量ベース)	4地域* 40%	資源の効率的・持続的な利用 およびクルマの活用を最大化する仕組みの創造による、サーキュラー・エコノミーの推進 ・クルマの電動化 ・再生可能エネルギー ・サステナブル資源マネジメント ・サプライチェーンマネジメント ・コミュニティの発展 ・生態系サービスと生物多様性
		廃棄物/埋め立ての管理	低水準の維持	
	クルマの活用	エネルギーマネジメント機能の拡大	EVへの搭載率100% (日本、米国、欧州)	
大気品質と水 	水	生産拠点での水リスク管理の強化	ハイスリスクサイト数のゼロ化を目指す	クルマや事業活動からのエミッション低減による大気品質への影響の最小化、および地域課題を考慮した水使用量の削減と水質管理の推進 ・製品品質 ・サプライチェーンマネジメント ・サステナブル資源マネジメント ・クリーンな排出ガス ・生態系サービスと生物多様性 ・水・大気・土壌の保全 ・物理的ハザードへの対応
		生産拠点での使用量の削減		
		生産拠点での排水の水質管理		
	大気品質	クルマからのエミッション削減(テールパイプ以外も含む)	技術の開発と適用	
		生産拠点でのVOC管理	活動の継続(塗装)	
		車室内空質の管理	車室内VOCの日産基準の遵守	
基盤	責任ある調達の実施		サプライチェーンのリスクマネジメントの実施	バリューチェーン全体における環境リスクの特定・説明責任の遂行、および環境パフォーマンス向上の仕組み構築 ・ガバナンス、法規制、コンプライアンス ・サプライチェーンマネジメント ・ステークホルダーとのエンゲージメント
	バリューチェーン情報の統合管理および説明責任の確保(トレーサビリティ)		・企業活動/部品製造からのカーボンフットプリント等の情報管理システムの構築/運用 ・サプライチェーン情報の信頼性向上	
	環境ガバナンスの強化			

* 4地域：日本、米国、欧州、中国

2. 2030 年に向けた気候変動の取組み

2014年までに公表されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次報告書では、人間活動が温暖化の要因である「可能性が極めて高い」と結論付けられた。2015年のCOP21（国連気候変動枠組条約第21回締約国会議）では、「世界の気温上昇を2℃よりも十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をすること」を掲げた枠組み（パリ協定）が採択された。これは、先進国・新興国を問わず全ての参加国に、排出低減の努力を求める画期的な枠組みで、世界中で脱炭素に向けた取り組みが加速する契機となった。さらにIPCC第6次報告書は、人為的な温室効果ガスの排出が地球温暖化を引き起こしたことに「疑いの余地はない」とし、2021年のCOP26では、「気温上昇を1.5℃に抑える努力を追求する」という、意欲的な表現が盛り込まれることとなった（グラスゴー気候合意）。2024年のCOP29では、新興国が気候変動対策を進めるための資金について、2035年までに少なくとも年間3,000億米ドルとする目標が合意された（従来は年間1,000億米ドル）。さらに温室効果ガス排出削減に向け、国際的に協力して削減・除去を実施する詳細ルールが決定される等（パリ協定第6条 炭素市場等）、気候変動への適応に対する目標や仕組み作りにおいて具体的な進展が見られた。

気候変動への対応の機運がグローバルに盛り上がる中、2021年、日産は2050年までに事業活動を含む製品のライフサイクル全体におけるカーボンニュートラルの達成を目標として設定した。（図2）



図2 2050年 カーボンニュートラルの目標設定

日産は、2050年に向けた重要なマイルストーンとして、2030年におけるCO₂目標を、「NGP2030」の気候変動の領域で規定している。（図3）

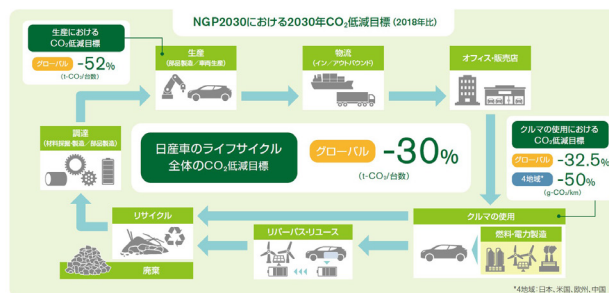


図3 NGP2030におけるCO₂目標

自動車のライフサイクル全体では、調達、生産、物流、オフィス、販売店、クルマの利用の全ての領域におけるCO₂低減努力の総和として、グローバルにおいて、2030年までにCO₂排出量を30%低減（2018年比）することを目指す。

さらに、ライフサイクルの中でも自動車会社として責任を果たすべき、内製生産やクルマの利用時のCO₂排出において、1.5℃シナリオへの整合を目指している。

内製生産のCO₂は、2030年までにグローバルの生産拠点で52%低減（台数あたり、2018年比）を目指す。主に、消費エネルギーの最小化、化石燃料を使用する設備の電化、カーボンフリーエネルギーへの代替の3つのアプローチにより、目標を達成する計画である。

一方、クルマの利用時のCO₂は、2030年までに、グローバルで32.5%、主要4地域（日本、米国、欧州、中国）で50%の低減（2018年比）を目指す。内燃機関のクルマが中心の2023年現在、日産では、クルマの利用時に排出されるCO₂がライフサイクル全体の約80%以上を占めており、経営計画The Arcでは、CO₂の効果的な低減のため電動車ラインナップの拡充を進める計画である。2024年度から2030年度の間に計34車種の電動車両を投入してすべてのセグメントをカバーし、グローバルな電動車両のモデルミックスは、2030年度には60%になる見込みである。（図4）

モデルミックス

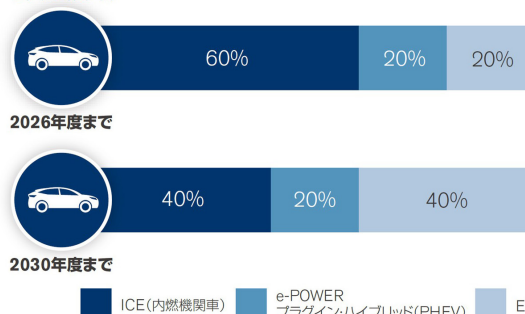


図4 経営計画The Arcにおける商品の電動化計画

このような、日産の気候変動に対する継続的かつ意欲的な取組みとその情報開示により、環境分野の国際的な非営利団体であるCDPの気候変動部門において、2024年度は最高評価の「A」認定を受け、2013～2024年度の12年連続で「A」または「A-」のリーダーシップレベルの評価を継続している。2024年度は、水セキュリティ部門と併せてダブル「A」認定となり、日産の環境への取組みは第三者からも高く評価されている。

3. 2050年に向けた気候変動の取組み

前述の通り日産自動車は、2050年までにカーボンニュートラルを達成する目標を掲げている(図2)。この目標の実現に向けた活動のアプローチを以下に示す(図5)

ライフサイクルにおける長期ビジョン

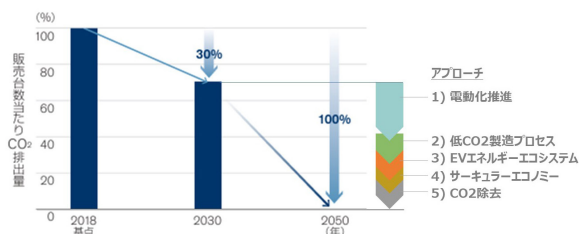


図5 ライフサイクル長期ビジョンと実現に向けたアプローチ

1) 電動化推進

まず、バッテリーEVの拡大においては、バッテリーEVのコストを内燃機関車(ICE)と同等にするための技術開発などを通じて、EVが普及するための基本的な性能向上を目指す。

その上でさらに、EVがお客様に受け入れられ広く普及するためには、様々なシーンでEVの価値を最大限に活用できるようになることが重要である。EVは走行時ゼロエミッションのほかにも、災害時の電力供給を可能にしたり、太陽光発電電力を積極的に充電するなどの多くの機能を有している。これらの機能を生かし、「日本をさらに美しいブルーに、さらに美しい国に」との想いを込め、社会・地域の課題を解決する電動化アクションである「ブルー・スイッチ」をパートナーの皆様と推進している。このような活動を通してEVを拡大し、CO₂削減と持続可能な社会の実現を目指す。

2) 低CO₂製造プロセス

次に、製造プロセスのCO₂削減においては、ガスや蒸気などさまざまな動力形態で運営されている工場設備の全面電化を実施する。同時に、使用電力については、再生可能エネルギーと代替燃料を用いた燃料電池で自家発電した電

力を全面適用することで、生産工場におけるカーボンニュートラルを実現する。

以上は、自動車会社の能力を生かして効果的に実行可能であることから先ず取り組むべき活動であるが、カーボンニュートラルという高い目標の実現に向けては、これらのCO₂削減だけでは不十分である。

3) EVエネルギーエコシステム

目標達成のためには上記に加え、再エネ充電を積極的に推進し、かつ充電した再エネを走行時のエネルギーとしてだけでなく、家庭やオフィスだけでなく製造現場などで利用するためのV2X技術や仕組みを構築することも必要になる。

4) サーキュラーエコノミー

さらに、サーキュラーエコノミーの実行においては、リユース、リサイクル、リパーパス、リファーマービッシュなどを効率的に実現する技術を開発・実行し、製品ライフサイクル全体でのCO₂排出を最小化する必要がある。

特に、EVにおいては使用済みバッテリーの再利用とリサイクル技術の開発と促進を通じて、製品ライフサイクル全体でのCO₂排出の最小化を目指す。

5) CO₂除去等

最後に将来、Direct Air Captureなどの将来的に有望な技術を見極め、残余CO₂排出に相当するCO₂を除去することでカーボンニュートラルを達成する。

以上の活動を表2に整理する。

表2 カーボンニュートラルに向けた活動範囲と具体的な取り組み例

活動範囲	アプローチ	具体的な取組
次世代電動車作り	1) 電動化推進	ASSB [*] によるEV競争力向上 地域貢献活動によるEV価値拡大(ブルースイッチ)
	2) 低CO ₂ 製造プロセス	低CO ₂ 排出プロセス(SOFC ^{**}) EV36Zero
次世代電動車と社会の融合	3) EVエネルギーエコシステム	Vehicle to Grid (V2G)
	4) サーキュラーエコノミー	バッテリー再利用事業化 低コスト・低CO ₂ 再生プロセス(DCR ^{***})
	5) CO ₂ 除去等	DAC ^{****} など

^{*}All Solid-State Battery, 全固体電池
^{**}Solid Oxide Fuel Cell, 固体酸化燃料電池
^{***}Direct Cathode Recycle
^{****}Direct Air Capture

1) 電動化推進、2) 低CO₂製造プロセスは、自動車セクターの本業であり、日々継続して技術開発を行っている。加えて、3) EVエネルギーエコシステム、4) サーキュラーエコノミー、および5) CO₂除去等の実現には、自動車セクター以外との協業が不可欠である。

自動車セクターの一員として次世代電動車づくりを確実に実

行しながら、サプライチェーン、バリューチェーンの各ステークホルダーとの連携強化を図り、技術開発と並行して連携の枠組みを広げる必要がある。様々な場面で目標や進捗状況、課題を発信し、透明性を持ったコミュニケーションを通じて連携の枠組みを強化したい。今回の特集号ではその一環として、それぞれの領域で重要となる具体的な取り組みについて解説する。

参考文献

- (1) 日産自動車 サステナビリティデータブック 2024
https://www.nissan-global.com/JP/SUSTAINABILITY/LIBRARY/SR/2024/ASSETS/PDF/DB24_J_All.pdf
- (2) 日産自動車 統合報告書 2024 https://www.nissan-global.com/JP/IR/INTEGRATED_REPORT/ASSETS/PDF/IR24_J_All.pdf
- (3) 日産自動車 経営計画「The Arc」 <https://www.nissan-global.com/JP/COMPANY/PLAN/ARC/>
- (4) 日産自動車、2050年カーボンニュートラルの目標を設定
<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/210127-01-j?origin=channel-NNG244>
- (5) 日産自動車、カーボンニュートラルを目指しRace to Zeroキャンペーンに参加 <https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/210826-01-j>
- (6) 日産自動車、CDPの「ウォーターセキュリティ」・「気候変動」の2部門でリーダーシップレベル認定 <https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/240215-00-j>

著者



上條 元久



池原 賢亮



片村 淳二



中田 智也

特集:持続可能なモビリティへの挑戦 ～カーボンニュートラルを実現するための先端技術～

2. 全固体電池によるEV競争力向上

青谷 幸一郎* 相原 雄一* 大谷 和史* 川上 裕貴*

1. はじめに

日産自動車では長期ビジョン「Nissan Ambition 2030」において、2028年度までに自社開発の全固体電池を搭載したEVの市場投入を目指すことを発表した⁽¹⁾。全固体電池は広義の意味で、高分子固体電解質、あるいは一部に電解液を含む疑似固体系も含まれる事があるが、日産自動車では、イオンが理想的に輸送される無機固体電解質を採用した全固体電池の開発を行っている。従来のリチウムイオン電池で使用されている液体(有機溶媒)電解質を、無機固体電解質に置き換えたものである。無機固体電解質の高い物理的・電気化学的安定性と理想的なイオン伝導性を応用することで、これまで実現が不可能であった高いエネルギー密度と入出力特性の両立が可能となる。また、昨今ではEV普及に伴う、電池材料の資源確保も課題となりつつあり、鉱物資源の安定した価格での確保は自動車産業にとっては最重要課題である。無機固体電解質は従来のリチウムイオン電池で用いられる有機電解液とは異なり、電気化学的・物理的観点から、利用可能な電池材料の幅の拡大、例えば、中間反応物の有機電解液への溶解とシャトル反応が課題であった硫黄正極や、電解液と反応し、系中へ溶解してしまうマンガンの利用等、高容量・低コスト・資源安定供給可能な材料の採用も期待できる。従って、全固体電池は、電池特性のみならず、電池コストの低減により、EVの普及を促進させる革新的な技術として期待されている。

本稿では、現在開発中の全固体電池(ASSB)の材料とプロセスの両輪の進化に伴う性能向上と今後の展望について述べる。

2. 固体電解質

無機固体電解質の研究の歴史は古く、固体イオニクス創成期である1970年頃まで遡る。当時は安定な金属であり、且つ、高速なイオン伝導が発現する、 AgI や $\text{Rb}_4\text{Cu}_{16}\text{I}_7\text{Cl}_{13}$ に代表される、銀イオンや銅イオン無機固体電解質の研究が主体であった⁽²⁾⁽³⁾。その後、リチウム電池開発への期待と共に、リチウムイオン伝導体の研究が進むものの、無機材料独特の加工性・界面接合の困難さから、実用的な電池特性の報告は、1996年の近藤、高田らの報告まで待たなければならない。当時NASICON型の電解質が多く研究される中、 $\text{Li}_3\text{PO}_4\text{-Li}_2\text{S-SiS}_2$ を用いた全固体電池の充放電特性が報告された事により、硫化物固体電解質が注目される事となった⁽⁴⁾⁽⁵⁾。その後、南、辰巳砂らの $\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$ 系 glass-ceramics の系統的な研究が行われ⁽⁶⁾、一方で $\text{Li}_2\text{S-GeS}_2\text{-P}_2\text{S}_5$ をベースとする thio-LISICON 系固体電解質が菅野らによって検討が進められた。2011年には液体電解液リチウムイオン伝導を上回る固体電解質、 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (LGPS) が菅野らによって提案される事となる⁽⁷⁾。これにより、デバイスとしての全固体リチウムイオン電池の研究開発の機運が一気に加速した。近年では、Argyrodite型($\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$)やLGPS型固体電解質の改良を中心に、液体電解質の2～3倍のイオン伝導度を示す電解質も報告されている⁽⁸⁾。硫化物系固体電解質を用いた全固体電池は、常温での加圧成形加工性にも優れ、大型化が比較的容易であることから、次世代の大容量車載向けバッテリーの有力候補とされている(図1)。一方で、その実用化のためには課題も多く、特に、液体電解質ではほぼ100%確保できていた電極材料との接触面(界面)を形成し、安定して維持するための①材料、②電極構造、③プロセスを開発する必要がある。以降の章では、この安定した界面形成に向けた日産の取り組みについて詳細を記す。

* 先端材料・プロセス研究所

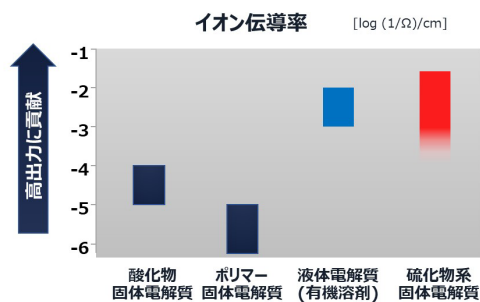


図1 各種電解質のイオン伝導度

3. 正極での界面設計

従来の液体電解質を用いたリチウムイオン電池における正極電極は、一般的にNMC（三元系、Lithium Nickel-Manganese-Cobalt Oxideの総称）などの活物質粒子とカーボン等の導電助剤、主に高分子樹脂であるバインダーにより形成される3次元の多孔質構造体であり、電池製造プロセスにおいては電極構造を形成後に注液と呼ばれる電解液浸潤工程を経ることで、活物質粒子と電解質の界面を形成している。一方で全固体電池は電解質が固体の粒子であるため、電解質を予め活物質、導電助剤、バインダーと混合・分散し電解質が充填された電極構造体を予め形成する必要がある。また、液体と異なり、イオン経路である固体電解質とイオン貯蔵体である活物質の接点は基本的に固体-固体の点接触であるため、いかにそれぞれの粒子を偏りなく均一に分散し、イオン経路を確保しながら接触点数を高められるかが、電池性能設計において非常に重要となる。



図2 バインダー構造によるイオンパスの確保

図2に正極においてバインダー材料種が界面構造に及ぼす影響を概念図で示す。従来のバインダー構造は隣接する粒子間を結着するために糊のような不定形の構造を取っており、正極活物質の表面の大部分を覆うことで、固体電解質粒子との接触点数が十分に取れないことで電池抵抗が高くなる要因となる。一方で、繊維状構造を有するバインダーの場合は、繊維が三次元的な網目構造を形成することで、正極活物質の表面を広く覆うことなく複数の粒子を構造的に結着することが可

能となり、構造としての強度を維持しながら固体電解質との接触点数を多くとることができる(図3)。

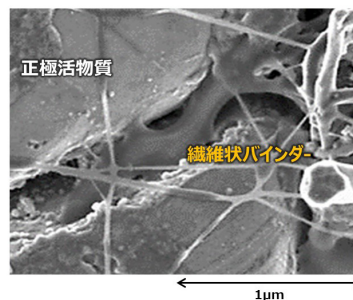


図3 繊維状バインダーを用いた場合の活物質表面二次電子顕微鏡像

ここで、低い電池抵抗を実現するためには、この繊維状バインダーを用いて電極構造を固定する段階で構成材料(活物質、固体電解質、導電助剤)がすでに均一に配置されている必要があるため、材料の分散プロセスが最も重要となる。

図4に異なる分散方法を用いて作製した電極構造のイメージと実際の電極の断面SEM像を2値化処理した像を示す。混合が不十分な従来プロセスでは粒子同士の凝集体を残したまま電極構造を形成しているため、固体電解質を介したイオンの輸送経路が大きく屈曲し、電極の厚さ方向に対し、十分なイオン伝導が出来ない。結果として濃度勾配が形成され、電池の抵抗が高くなる。一方で、凝集を抑える精密混合プロセスで作成した電極では、イオンの輸送経路が比較的直線的に形成されるため、電池抵抗を従来プロセスと比較し、およそ1/10に低減することができる。このように、分散工程は非常に重要であるが、 μm オーダーの大きさや形状の異なる微粒子について、プロセス中の分散性の定量的な評価を実験的に行うことは困難である。そこで分散性について定量的理解を深めるために、我々は粉体シミュレーションを用いることで、粒子の形状や凝集状態、分散手法が電極構造形成に与える影響を解析している⁽⁹⁾。本稿では分散性の制御因子として固体電解質粒子の凝集サイズに着目し、凝集数が変化した場合の圧縮特性、および電極構造への影響についてのシミュレーション解析結果について述べる。具体的には粉体シミュレーションを用いて、固体電解質粒子の凝集数が増加した場合の圧縮特性および電極構造への影響について検討した。シミュレーションには粒子間の衝突や回転、摩擦が考慮可能な個別要素法(DEM)をベースとし、接触モデルについてはHertz-Mindlin with JKRモデル、凝集体粒子の粒子間力は特定の粒子間に結合力を持たせ、指定する応力が加わった場合にその結合力がなくなり、凝集粒子が乖離するモデルを用いた。

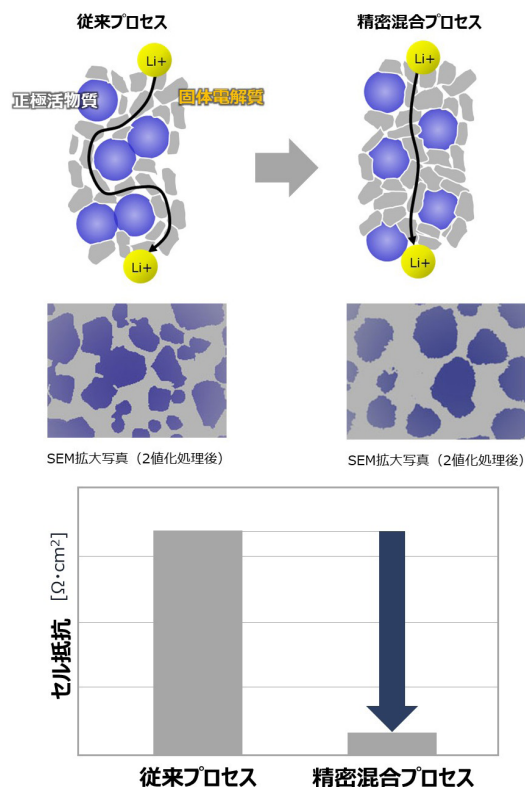


図4 異なる分散プロセスにより得られる電極構造と性能の比較

計算過程は図5(a)に示すように、周期境界を設けた領域に、活物質粒子と凝集状態の固体電解質粒子をランダムに配置し、図5(b)のように重力で充填したのちに、図5(c)のように平板で圧縮することで構造体を形成し、得られる構造体の密度や固体電解質粒子の屈曲度を解析している。

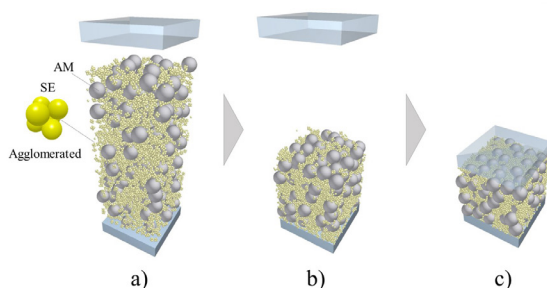


図5 粉体シミュレーションの計算過程

図6に圧縮時に加えた圧力と緻密度を、固体電解質粒子の凝集数ごとに比較したグラフを示す。凝集数1個に対して、凝集粒子数が多いほど初期から緻密度が低く、圧縮してもその緻密度は分散状態に対して低いままであることがわかる。緻密度が低い場合、合剤電極中の有効イオン伝導度が低下することが予測され⁽¹⁰⁾、セル性能の低下が懸念される。さらに凝集粒子数が6個でも3%程度緻密度が低下していることから、固体電解質粒子の凝集抑制が重要であることがわかる。

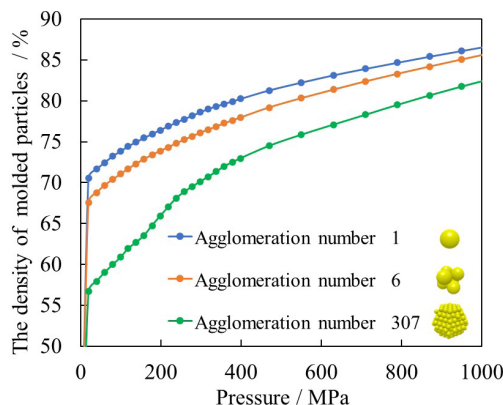


図6 固体電解質の凝集数と圧縮後の緻密度の計算結果

4. 負極での界面設計

全固体電池においては、正極と負極を電子的に絶縁するセパレーターの役割として、固体電解質を緻密に成形したSE (Solid Electrolyte) 層を用いる。一般的にLIBでは多孔質セパレーターを用いるが、全固体電池では固体電解質の物理的強度と、その緻密性からデンドライトショートを防ぐことが可能と考えられ、理論上最も高エネルギー密度の負極である金属リチウムの応用に期待がかかる。また、金属リチウムに対し還元分解をする有機電解液系とは大きく異なり、ある種の固体電解質は電気化学的に金属リチウムに対して安定であり、還元分解・被膜生成に伴う抵抗上昇が極めて小さい。一方で、金属リチウムのような平板状の第一種電極を使用した場合、電極の接触界面＝反応界面は、正極とは異なり2次元平面となり、単位電極界面面積当たりの反応電流量(電流密度)は大きくなる。エンジニアリング的には、わずかな接触不良が大きな反応電流の偏り(反応分布)を引き起こし、例えば充電過程において負極で生じるリチウムデンドライトの生成と成長を助長するリスクがあるため、この界面接触状態の維持が急速充電性能の観点からも非常に重要である。

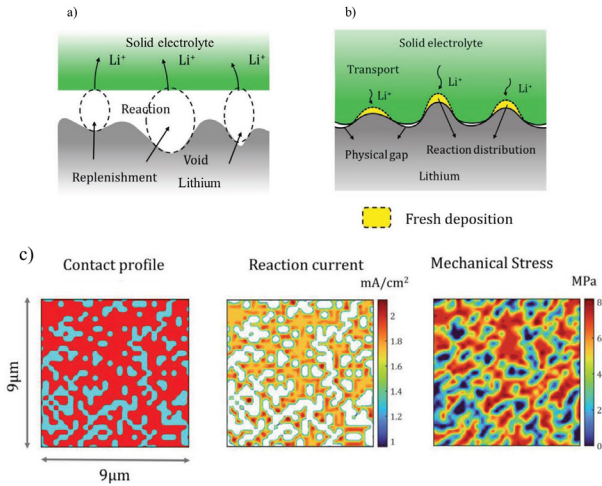


図7 負極界面シミュレーションの模式図
a) Li溶解時のvoid形成, b) Li析出時の接触回復, c) ラフネスに応じた界面の接触分布、反応分布、応力分布

本稿では負極とSE層の界面接触状態の決定因子として外部拘束圧に着目し、ミクロおよびマクロの視点で検討した結果を述べる。まずミクロな視点では、負極-SE層界面のラフネスに着目した。SE層は直径数 μm の固体電解質粒子により構成されるため、厳密には μm オーダーの微小な凹凸が表面には存在するが、この影響を実験解析的に明らかにすることは非常に困難であるため、モデルによるシミュレーションを活用した⁽¹¹⁾。図7に界面のラフネスが反応分布に及ぼす影響を解析するモデルの模式図を示す。SE層ドメイン(緑)は負極金属リチウムドメイン(灰色)の上にあり、計算においては、(1)まず、界面に任意にランダム生成させたラフネスを形状パラメータとして与え、外部から一定拘束圧を与えた状態での界面の接触分布を算出、(2)つぎに、得られた接触分布から面圧分布を算出(図7c)左、図7c)右)、(3)そして、得られた接触分布および面圧分布から、金属リチウムの時間ステップ当たりの積層方向の変形量分布と電気化学反応に伴う金属リチウムの時間ステップ当たりの溶解量分布を算出、(4)さらに、界面の細分化された計算領域ごとに、得られた金属リチウムの変形量と溶解量を比較し、変形量が溶解量を上回る場合は界面接触を維持、溶解量が変形量を上回る場合は非接触と定義し、1つ時間ステップ進んだ界面全体の接触分布を算出、(5)新たに得られた接触分布を元に(2)～(4)の計算を繰り返し、任意の反応時間における接触状態を算出した。

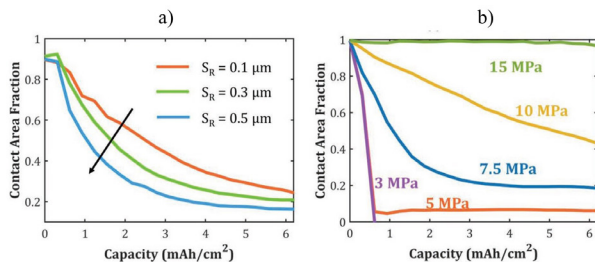


図8 界面の接触維持率の時間変化
a) ラフネス感度, b) 外部拘束圧感度

図8に放電中の界面の接触維持率に対する界面ラフネス、外部拘束圧の影響を検討した結果を一例として示す。界面ラフネスが大きいくほど、外部拘束圧が低いほど、放電の進行に伴う界面の接触維持率が低くなる。これより、金属リチウムを負極に用いる全固体電池においては固体電解質-負極界面の平滑性と外部拘束圧が安定作動のための重要なパラメータであることが分かる。

続いてマクロな視点では、車載環境において発生しうる外部拘束圧と温度の分布の影響に着目した。

全固体電池は前述の通り、安定した固体-固体界面を維持するために、外部から拘束圧を印加する必要があるものの、車載レベルの大面积のセルに対し、完全に均一な拘束圧を印加することは困難であり、ある一定の面圧分布が車載時には生じることが想定される。また、従来のリチウムイオン電池と同様に、特に高出力での充放電時には、面内での温度分布も発生するが、全固体電池において、面圧分布と温度分布はいずれも反応分布を引き起こす要因であり、特に負極に金属リチウムを使用する場合は、析出リチウムの変位を左右する因子になりうる。したがって、前述のミクロな分布に加え、車載環境下においてはマクロな拘束圧と温度分布がセル性能に与える影響を考慮し、システム設計を行う必要がある。

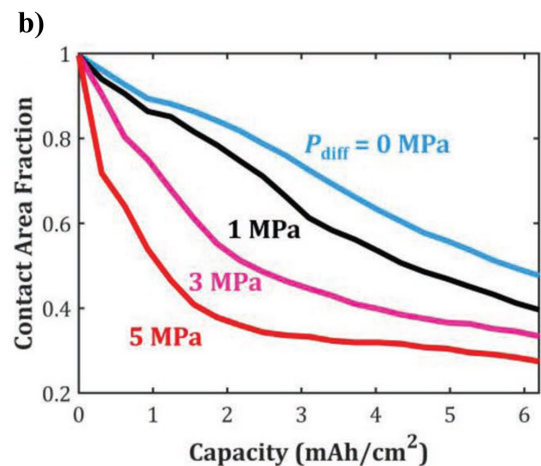
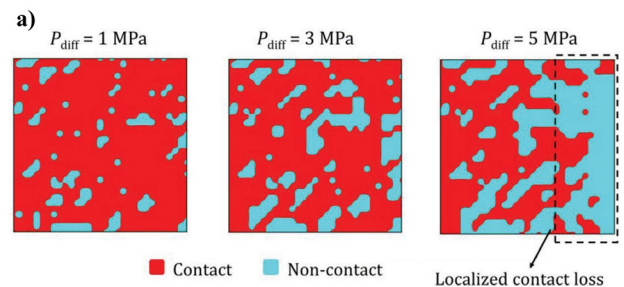


図9 面内の面圧分布が界面維持に与える影響
a) 面圧分布が異なる条件での放電後の界面接触率
b) 界面接触維持率の面圧差依存性

図9に先述のモデルを用い、平面方向に拘束圧の分布を与えた状態での放電中の界面接触状態の変化を計算した結果を示す。図9-a)に示すように、平面方向に異なる拘束圧勾配 ($\Delta P=1, 3, 5$ MPa) を与えた状態で放電した場合、勾配が大きいほど、放電後のLi-SE界面の接触維持率は低下することが分かる。これは、放電時のLi-SEの接触界面の維持は、ミクロな凹凸に起因する局所の反応分布 ($\equiv$ Li溶解量分布) と、その分布を埋めるためのLiのクリープ変形速度のバランスによって決まっており、Liクリープ速度を決定する因子として、Liに印加される応力 ($\equiv$ 外部拘束圧) のマクロな分布がそのバランスに大きな影響を与えているためであると考えられる。

5. おわりに

全固体電池の性能向上と実用化における鍵は“安定した界面の形成と維持”にあり、材料だけではなく、混合・分散といった電極形成のプロセスと、拘束圧に代表されるデバイスとしてのパッケージングでそれを実現する必要がある。さらに、製品としての安全性検証は最も重要である。しかしながら、まだ市場実績が殆ど無いことから、全固体電池の安全性に関するデータはいまだ少なく、設計・評価手法を含め作り上げていく必要がある。日産自動車には、2010年にEV「リーフ」を世界で初めての量産発売して以来、車載用リチウムイオン電池とEVの開発経験から得られた膨大な安全信頼性設計の知見があり、この知見を最大限に活用し、全固体電池の早期実用化に向けて開発を加速していく。

参考文献

- (1) <https://www.nissan-global.com/JP/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/ASSB/>
- (2) Yokota, I. et al., J. Phys. Soc. Japan, 21 (3), 420-423 (1966).
- (3) Takahashi, T. et al., J. Electrochem. Soc., 116, 357-360 (1969).
- (4) Kondo, S. et al., Solid State Ionics, 53-56, 1183 (1992).
- (5) Takada, K. et al., Solid State Ionics, 86-88, Part 2, 877 (1996).
- (6) Minami, T. et al., Solid State Ionics, 177, 2715 (2006).
- (7) Kamaya, N. et al., Nature Mat., 10 (9), 682 (2011).
- (8) Kato, Y. et al., Nat. Energy, 1, 16030 (2016).
- (9) 大谷他, 第65回電池討論会要旨集, p325, IG17 (2024).

- (10) Otani, K. et al., J. Energy Storage, 58, 106279 (2023).
- (11) Vishnugopi, B. S. et al., Adv. Energy Mater., 13, 2203671 (2023).

著者



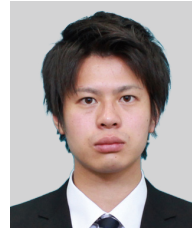
青谷 幸一郎



相原 雄一



大谷 和史



川上 裕貴

特集:持続可能なモビリティへの挑戦 ～カーボンニュートラルを実現するための先端技術～

3. 社会課題解決によるEV価値拡大(ブルー・スイッチ)

高橋 雄一郎* 石田 則子* 権藤 央子*

1. はじめに

ガソリン車と比較した電気自動車(以下、EV)の最大の特徴は、走行中のCO₂排出がゼロであることと、車両から電力を供給できることだ。2018年5月、日産自動車はEVのこれらの特徴を生かし、EVによる社会課題解決を図る活動、日本電動化アクション「ブルー・スイッチ」(図1)を発表した。「ブルー・スイッチ」はEVのパイオニアである日産自動車が、EVの普及を通してゼロ・エミッション社会を実現し、社会の変革に取り組んでいくという決意表明であり、使命とする活動だ。

EVが普及すればするほど脱炭素化に貢献し、いざという時には電力も確保できてレジリエンス強化に貢献する。再生可能エネルギーとEVを掛け合わせれば、完全にCO₂フリーのエネルギーマネジメントが実現する。また、EVの使用済みバッテリーは再利用が可能だ。さらに、EVを活用したサステナブルツーリズムの実施や交通課題の解決など、できることは多岐にわたる。

このような特徴を持ったEVを地域のために活用しようという動きは、全国各地へ確実に波及している。ブルー・スイッチの活動開始から6年が経過した2024年10月現在、約270に及ぶ全国の自治体や企業・団体と連携し、脱炭素化の促進と地域の強靱化を目指し、持続可能な社会実現に向けて共に活動を進めている。

本稿では、日本電動化アクション「ブルー・スイッチ」の取組みと、これまでの社会課題解決における具体的なEV活用事例を紹介したい。



図1 ブルー・スイッチ

2. 脱炭素化

2020年10月、日本政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラル実現を目指すことを発表し、脱炭素化への取り組みが本格化した。日本のCO₂排出量のうち約18%が運輸部門から、そのうち自動車が約88%を占め、カーボンニュートラルの実現には、車両の電動化が不可欠である⁽¹⁾。取り組みの一つとして、2035年までに乗用車新車販売でEVを含む電動車100%を実現する目標を掲げ、様々な施策を講じている。例えば、EVの購入時には、国と自治体からの補助金が利用できる。一般的に高価なイメージのあるEVだが、税金の優遇措置であるエコカー減税に加え、新車購入時には環境・エネルギー性能に優れた次世代自動車を対象とした国の補助金(最大85万円)を受けることも可能だ。さらに革新的なバッテリーの開発促進や充電拠点の拡充などの支援も行っている。

EVの製造～輸送～使用～廃棄に至るまでのライフサイクル(LCA)トータルでのCO₂排出量を見ると、日産リーフ40kWhにおいては同型のガソリン車と比較して32%減となる(図2)。現在は化石燃料による発電が一定程度を占めている国内の電源構成において、電力の製造時にEVのほうがCO₂排出量が高くなっているが、今後再生可能エネルギーの利用率が高まれば、この電力製造時のCO₂排出量も下がることとなり、EV

* 日本事業広報渉外部

におけるLCAでの更なるCO₂排出削減効果に繋がることが見込まれる。

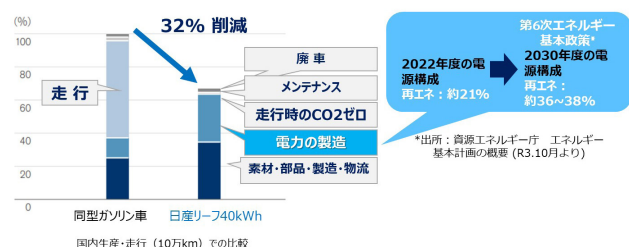


図2 ライフサイクルでのCO₂排出量 ガソリン車vs.EV

脱炭素社会を目指す潮流が強まる中、ガソリン車と比べてCO₂排出量が少ないEVを公用車・社用車に導入する自治体や企業は着実に増えている。

3. 強 韌 化

日本は、その地理、地形や気象などの自然条件から災害大国であり、近年では大型台風や豪雨が毎年のように発生している。そのような状況下で、自治体においては、防災対策の充実・強化は重要な課題だ。

全国の販売会社を含む日産グループと自治体との災害連携の基本的な内容は、自治体がEVを導入し、通常は公用車として、そして停電時には非常用電源として活用するというものだ。日産としては、当該自治体内にある販売会社店舗が有するEVを自治体に貸与し、これにより、自治体は1台でも多くの非常用電源が確保できることになる。

住民に協力を呼び掛ける自治体もある。電力を供給することのできる次世代自動車を所有する住民や企業に事前に登録してもらい、安全を確認の上、停電発生時に避難所などに自身の車両を貸与し、電力供給に協力してもらうというのだ。EVが1台増えることは非常用電源が1つ増えることである。繰り返し起こる災害を前に、このような仕組みを取り入れようとしている自治体は増えている。

ここでは、日産自動車が行ったEVを活用した災害支援事例をいくつか紹介する。

2019年9月の台風15号によって千葉県で長期停電が発生した際、非常用電源として日産リーフが活躍した。台風による甚大な被害が発生した翌日に停電が長引きそうだということを知り、社内で有志のドライバーを募り、日産リーフで大規模停電に陥った市原市、木更津市、君津市などへ向かった。横浜にある本社からこれらの自治体へはアクアラインを越えればすぐであるという地の利を活かすことができ、到着後も十分な電力が残っていた。

到着した公民館や市役所などでは、EVから電力を供給できることを知らない職員が多く、説明に時間がかかる場面もあったが、実際にはEVからの給電方法は非常に簡単で、説明後は自治体職員自身ですぐに操作できるようになった。日産リーフを運んだ直後は公民館で主にスマートフォンの充電に使用されていたが、その利便性に気付いた職員から、もっと多くの人に電力を届けたいと相談があり、高齢者福祉施設や保育園など、避難弱者がいる所にも電力を届け、活用の輪が広がった。残暑厳しい折に電気が使えないことは命に関わるため、扇風機を回したり、冷蔵庫で水を冷やすなどに活用された。また、ある市では、自衛隊が給水所を設置したが、夜間はその給水所がどこにあるかわからない暗闇となってしまった。そこで、日産リーフで給水所に移動し、照明をつけることで安全性を確保した。

長引く停電の中、最終的に計53台の日産リーフによって千葉県の様々な地域で電力を提供し、利用された方から多くのポジティブな声が寄せられた。そこから我々は、日産リーフから電力を供給することの4つの利点を改めて認識した。

- ・ 静粛性による快適さ
- ・ 排気がないことによる安全性
- ・ 大容量バッテリーによる継続性
- ・ 高出力により複数の家電製品の併用が可能

この中でも、災害が発生している状況においては静粛性と安全性は特に重要である。高齢者福祉施設などでは災害に備え、自家発電機を準備している。これは大切な備えだが、常に騒音が発生し、一酸化炭素中毒の心配もある。騒音は睡眠の妨げになり、それ自体がストレスの元となり得る。また、ガソリンや軽油といった燃料は危険物でもあるので、小さな子供がいる保育園などでは扱いづらい。EVであればこのような問題が発生しないという利点がある。

翌2020年7月に発生した熊本豪雨では、被災した旅館の復旧においてEVが力を発揮した(図3)。通常、床上浸水被害の場合は、ホースとほうきで泥を流すといった、非常に労力の要する方法で片付けをしていくことになる。しかし、EVの電力を活用し、高圧洗浄機で泥や汚れを落とすことができ、かなりの時間短縮になった。



図3 日産リーフからの電力供給の様子

まだ記憶に新しい2024年1月に発生した能登半島地震では、被災した穴水町や珠洲市などに日産アリア8台を貸与し、避難所での電力供給を行った(図4)。非常に困難な状況だったが、都市部からかなり離れた地域、道路事情もありよくない場所での対応について、多くの学びが得られた。



図4 日産アリアからの電力供給の様子

ここまで紹介したのは全て、可搬型外部給電器(V2L: Vehicle to Load)を使って電気機器に直接電力供給した事例だ。V2H (Vehicle to Home) 機器を備えた家やオフィスがあれば、EVの電力を活用し、その場が避難所にもなり得る。多くの人が集合住宅に住み、タワーマンションも増えている都市部では、マンションの防災は大きな課題の一つである。そこで、エレベーターなどの大型機器にも電力を供給することができるEVは、その課題対策にも活用できる。

2023年には、(株)日立ビルシステムとともに、EV軽自動車の日産サクラから電力を供給してエレベーターや給水ユニットを稼働させる実証実験を行った(図5)。バッテリー容量は比較的小さい20kWhながらも、日立ビルシステムの6階建て実験棟のエレベーターを約15時間にわたり連続稼働させることができ、その間の昇降回数は416往復を数えた。また、給水ポンプの稼働実証も行い、約2万1,100Lの水を供給できる結果となった。これは1日に必要な1人当たりの水分摂取量を2.5Lとした場合、約8,500人分に相当する。



図5 日産サクラからの電力供給の様子

もちろん、非常時の電力需要をEVで全て賄えるわけではないが、電気が生活の重要なインフラである現代において、災害に対する備えの中でも非常用電源の確保は喫緊の課題といえる。EVはクルマとして、大容量バッテリーとして、「いつも」と「もしも」の両方のニーズに応えられる車両だ。

4. エネルギーマネジメント

日産自動車は2024年3月、EVのバッテリーを蓄電池として充放電制御を行う日産独自のエネルギーマネジメントを活用したサービス「ニッサンエナジーシェア」の提供を開始した。

「ニッサンエナジーシェア」は、これまで様々な実証実験を通して培った技術や知見を基にした日産独自の技術で、充電器・充放電器に接続した充放電制御システムが、クルマの使用予定やバッテリー残量、建物の電力使用状況をリアルタイムに把握しながら、最適な受給電タイミングを自律的にコントロールする。クルマとしての利便性を損なうことなく電力のピークシフトやピークカットを図り、太陽光パネルなどでつくられた再生可能エネルギーと連携させることで、エネルギーの地産地消や脱炭素化にも貢献できる。これは、EVの使われ方を熟知した日産自動車ならではのエネルギーマネジメントの仕組みであり、お客さまのニーズや状況に応じた最適なエネルギーマネジメントを、企画から構築、保守運用までワンストップで提供するサービスだ。

ここに至るまでに日産は多くのエネルギーマネジメント実証実験を行ってきたが、その詳細は今号に掲載されている「Vehicle Grid Integrationの取り組み」の章をご一読いただきたい。

「ニッサンエナジーシェア」は、EVの魅力をさらに向上させるソリューションであり、「ニッサンエナジーシェア」、太陽光とEVの組み合わせによるカーボンニュートラルの実現や未来のまちづくりへの取り組みとしての活用は、今後着実に広がっていくと考えている。

5. サーキュラーエコノミー

クルマが寿命を迎えても、EVの車載バッテリーは同時に寿命を迎えるわけではない。バッテリーはクルマが寿命を迎えるまでの約10年動力源として活用された後でも、新品時の約70～80%の電力を貯蔵する能力を有しており、エネルギー貯蔵ソリューションとしてさまざまな用途への再利用が可能だ。

2010年9月、日産自動車と住友商事株式会社はフォーアールエナジー株式会社を設立し、EVバッテリーの再利用、再製品化、再販売、リサイクルするための技術とインフラを開発してきた(図6)。

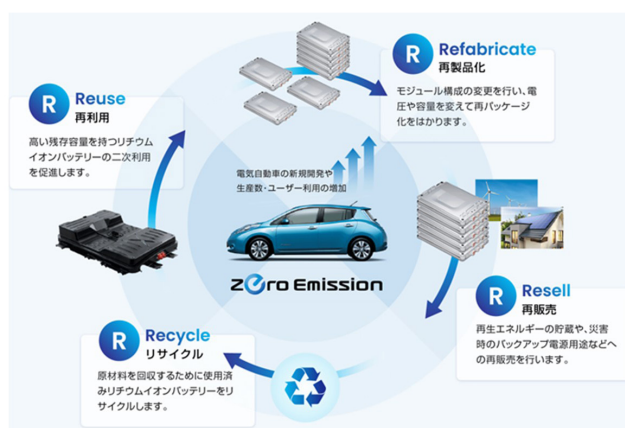


図6 4R事業について

回収されたバッテリーの寿命は、そこからさらに10～15年と続き、従来のバックアップ蓄電池として使われてきた鉛電池よりはるかに長い。例えば、冷蔵庫や照明を常時稼働させる必要がある食料品店などでは、停電や自然災害など電力網が故障した際のバックアップ電源が必要となる。そのような場合に、再利用バッテリーが十分に役に立つ。

ここでは、実際に再生バッテリーがどのような分野で活用されているかをご紹介します。

フォーアールエナジー社は、革新的な世界初のリユース蓄電池システムを開発した。大阪府にある人工島 夢洲には「日産リーフ」16台分のリチウムイオンEVバッテリーが設置され、太陽光発電の蓄電に使われた。さらに、鹿児島県の甕島では、CO₂を排出しない「エコアイランド」になるという目標の達成のために、リユース蓄電池を太陽光で発電した電気の貯蔵に活用し、しばしば停電が発生する離島での電力インフラの安定化を支援している。

より身近なところでは、JR東日本の踏切用のバックアップ電池に採用されている。JR東日本では、事故や災害、工事などにより、踏切保安設備が一時的に停電した際でも動作を継続できるよう、鉛蓄電池を設置しているが、より環境にやさしい鉄道設備づくりの一環として、EVの再生バッテリーの活用を目指し、性能の検証を進めてきた。検証の結果、充電時間は従来の鉛蓄電池の約1/3の時間で完了し、鉛電池と比較して寿命を見込めること、そして鉄道沿線の環境において安定稼働することが確認できたことから、2023年1月より順次切り替えを進めている。

EVのバッテリーをエネルギー貯蔵システムの一部として使用することは、CO₂の排出量削減に貢献し、再生可能エネルギーの安定的な供給を実現する方策として大変有効だ。バッテリーにさらなる価値を与えることでEVの価値はいつそう高まり、EVの普及にもつながる。

6. サステナブルツーリズム

環境に対する意識が高まる中、EVを移動手段として利用し環境に配慮しながら観光を楽しむ、平時の身近なEVの利用促進の取組みも進めている。

2021年に阿蘇山を抱く熊本県阿蘇市と日産は、環境にやさしい電気自動車を活用した観光活性化にむけた電気自動車優遇施策を発表した。この優遇施策では、EVで阿蘇市内の観光スポットや道の駅を訪れると、有料道路や観光地での割引、ホテルや旅館に宿泊する場合に様々なおもてなしや特典を受けることができる。EVという環境に優しいクルマを使い、地元の雄大な自然を存分に楽しんでもらおうというものだ。

以降、この活動は2022年長崎県佐世保市、2023年一般社団法人日本観光自動車道協会に属する全国18の観光自動車道路、2024年千葉県南房総エリア、神奈川県相模原市、滋賀県の琵琶湖エリアへと拡大し、EVを観光活性化につなげる取り組みとして注目されている。さらに2024年8月より、日本旅行他14社と共に環境配慮型の旅を推進する新組織、「GREEN JOURNEY推進委員会」を立ち上げ、EVを活用した新たな旅行体験を提案している。

また、観光以外にも平時の身近なEV利用として、環境や防災イベントに留まらず、町おこしやイルミネーションのライトアップといった多岐に渡る野外イベントでの電源としての活用も注目を集めている。ガソリンや軽油での発電機と違い、静かでクリーンな環境に配慮した心地の良いイベントが可能。EVから取り出す電力は安定しているため、音と相性がよい言われており、最近では音楽フェスなど使用されるケースも増えている(図7)。



図7 BLUE EARTH MUSIC FEST 2023 IN MITOでの日産リーフからの電力供給の様子

イベントでのEV活用は、環境イメージの向上や温室効果ガスの削減にもつながる。そして、お祭りでの利用を通じて、実際にEVを身近に感じてもらう機会を提供することで、訪れてくれた人の環境意識を向上させる効果が期待される。

7. 地域交通

公共交通機関の縮小といった、多くの地方都市が抱える課題にもEVが一つのソリューションとして活用されている。このような課題をSDGs(持続可能な開発目標)推進へ変える取組みとして、奈良県三郷町と2020年1月に締結した「EVを活用した社会課題解決に関する包括連携協定」をご紹介します。

三郷町は、SDGsに向けて優れた取り組みを提案する自治体として、内閣府により認められ、令和元年7月1日、「SDGs未来都市」として選定された。人にもまちにもレジリエンスなスマートシティSANGOの実現をめざし、環境負荷低減、災害対策強化、社会課題解決に対して積極的に取り組んでいる。

三郷町では、公共用通機関として他エリア同様バスを活用していた。しかしバスの運営も厳しく、高齢者などの交通弱者のためのモビリティソリューションとしてバスから予約制乗合タクシーに切り替え、日産リーフをその車両として導入した。また、町役場にV2Hを導入し、災害で停電が起こった場合に、災害対策本部としての機能が果たせるよう、この日産リーフから町役場に電力を供給できるよう対策されている(図8)。平時と災害時に活用されるこの1台の日産リーフが、脱炭素化・交通課題・災害対策に貢献している。



図8 三郷町予約制乗合タクシー

2020年にEVを活用した「SDGs達成に向けた連携協定」を締結した荒尾市では、オンデマンド型相乗りタクシー(おもやいタクシー)として、日産リーフを導入し運行している。誰でも市内全域で利用でき、買い物、通院のほか、ビジネスや観光にも利用可能。また、地域で発電した電力をタクシー(日産リーフ)に充電し、電力の地産地消を実現している。

名護市役所では、自治体自らEVの公用車をカーシェア化している。平日は職員が使用し、休日は観光客や地域住民に開放しEV公用車の有効活用を進めている。この取り組みは、公共交通機関の補完としてだけでなく、環境面における地域貢献も実現している。

8. 次世代教育

環境問題と環境負荷低減に向けた自動車業界の取り組みを伝えることで、将来を担う子どもたちの環境意識醸成と自発的な行動の一助となるべく、環境教育も実施している。

日産自動車が独自に企画した授業、「日産わくわくエコスクール」(以下、わくエコ)は、環境問題をテーマとした出張授業プログラムだ。授業では、地球温暖化の課題とそれに貢献するEVの価値や再生可能エネルギー活用的重要性を紹介する座学とモビリティ社会を擬似的に体験できるモデルカー実験を組み合わせたプログラムを提供している。また、小学校へ出張授業の講師やサポーターは、日産や日産グループの社員がボランティアで行っており、講師になるための社内認定制度を設けている。

わくエコは2008年に正式開始し、開始当初は近隣の小学校を対象としていたが、2019年からは、販売会社の協力のもと全国で実施し、受講生はすでに14万人を突破している。

さらに、海洋プラスチック問題も取り上げるため、長野県伊那市内で回収したエコキャップをアップサイクルしてモデルカー(図9)を作成し、実際にわくエコの教材に使用する取り組みや、日産が地方自治体や企業と締結するブルー・スイッチの各協定の内容にわくエコの開催が組み込まれるなど、活動はさらに広がりを見せている。そして、日本だけでなく、英国、中国、ブラジルなどでも現地のニーズに合わせて環境教育を提供している。



図9 エコキャップを使ったわくエコ教材モデルカー

9. おわりに

災害による停電発生時にEVが非常用電源として活用できることは少しずつ知られてきたが、EVについてよく知らない、ハードルが高いという声は未だよく聞く。単なる移動手段以上の価値をもつモビリティとして社会に貢献できるEV。日産自動車は、これまでもCO₂排出量の削減や電動化技術の実用化など、環境対応と社会的価値の創出に取り組んできた。「ブルー・スイッ

チ」においては、全国各地の自治体や企業とともに、EVを活用することによる社会課題解決を果敢に推進している。

日産自動車はEVのリーダーとして「美しい日本を、さらに美しいブルーに」という思いで、これからもEV普及を通じてのカーボンニュートラルな未来の実現を目指して活動を強化して行く。

参考文献

- (1) 自動車の“脱炭素化”のいま(前編)～日本の戦略は？
電動車はどのくらい売れている？ | 資源エネルギー庁

著者



高橋 雄一郎



石田 則子



権藤 央子

特集:持続可能なモビリティへの挑戦 ～カーボンニュートラルを実現するための先端技術～

4. SOFCを用いた工場カーボンニュートラル化への取り組み

高市 哲* 高橋 成生** 小出 寿幸**

1. はじめに

日産は、積極的に自動車のライフサイクル全体でCO₂排出量の削減に取り組んでいる。CO₂は原料の採掘から製造、輸送、製品の使用、廃棄までのそれぞれの段階で発生するため、これらバリューチェーン全体で新たな技術開発や再生可能エネルギーの導入が必要となる。これらのうち製造に関して日産は、図1に示すように2050年までに生産工場のカーボンニュートラルを実現するロードマップを発表している⁽¹⁾。具体的には2030年までに工場のエネルギーを削減しながら革新的な生産技術の導入や再生可能エネルギーの適用拡大を進めていくこと、さらに2030～2050年の間では設備の電化を進めると同時にカーボンニュートラル燃料と燃料電池による代替エネ

ギーの自家発電設備(図2)を導入することで、生産工場におけるカーボンニュートラルを実現する。自家発電の燃料として後述するイネ科のソルガムを用いたバイオ燃料を、そして発電装置としては固体酸化物形燃料電池(以下、SOFC)を用いることを計画している。さらに排気のCO₂をメタネーションで樹脂部品として再利用する予定である。このように系統電力のみに頼ることなく、自家発電によって電力を賄うことで、国ごとに異なるエネルギーミックスへの依存を抑えてカーボンニュートラルを達成することができると考えている。ここで鍵となるのは、高効率な燃料電池発電とカーボンニュートラル燃料の調達である。日産では長年にわたって車両用に高効率な燃料電池やカーボンニュートラル燃料の研究に取り組んできており、これらの技術を工場用電力へと応用する取り組みについて紹介する。

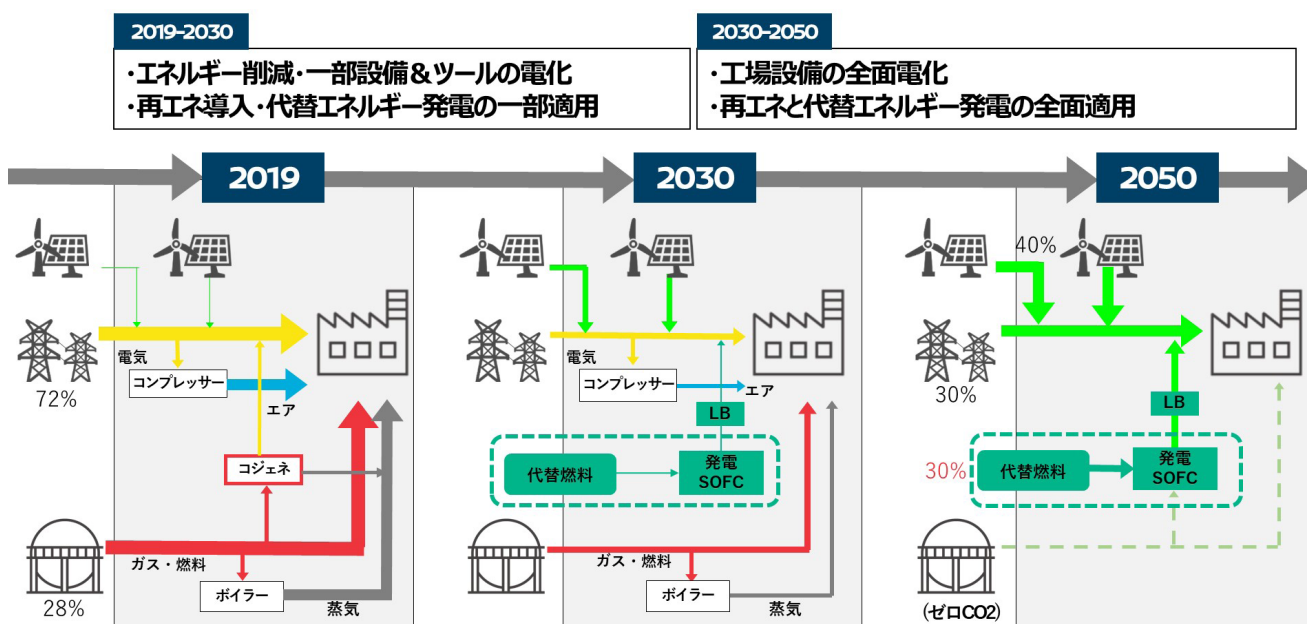


図1 工場カーボンニュートラルに向けた全体の取り組み

*EVシステム研究所 **環境 & ファシリティエンジニアリング部

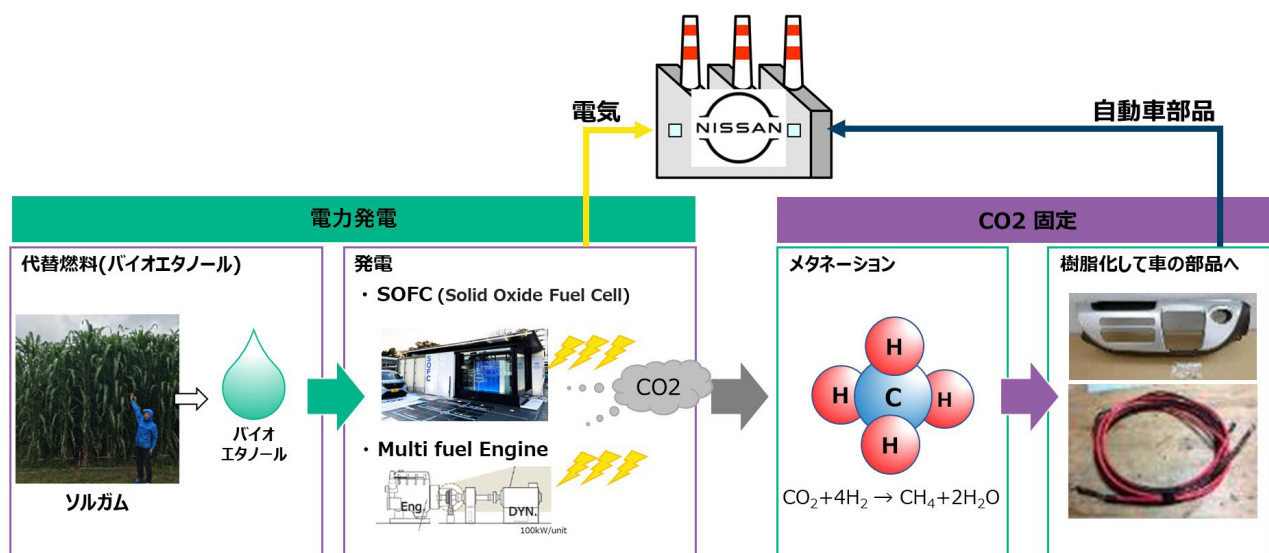


図2 代替エネルギーの自家発電設備

2. 固体酸化物形燃料電池

2.1 燃料電池について

自動車用動力源として注目されている燃料電池には固体高分子形燃料電池（以下、PEFC）とSOFCの2つがある（図3）。PEFCは純水素を燃料とし、一般に100℃以下の比較的低温で動作する。利点として、出力要求に対する応答性が高く、また高い出力密度を有しており、大出力を直接駆動力として使う電動車両の動力源に適している。しかし、その一方で作動温度が低いことから触媒活性が低くなり、これを補うために高価な白金等の貴金属を用いる必要があることが課題となっている。

これに対し、SOFCは、様々な燃料、例えばメタン、プロパンなどの炭化水素ガス、メタノールやエタノールなどの液体燃料を改質してできた水素を利用することができる。また、運転温度が600℃以上と高いことから触媒活性が高く、高効率な運転が可能となる。しかしその一方で、高温でしか動作しないため、起動に時間がかかることや、一般にセラミック材料を使用しているため急速起動のための熱衝撃により破損するといった課題がある。また高温であることから電気抵抗が高く、高出力を取り出すことにも不向きであり、出力密度はPEFCよりも低くなる。このような課題のため、従来は急速起動や小型化が求められる自動車用の用途よりも、定常発電が可能な家庭や産業向けの定置電源として考えられてきた。

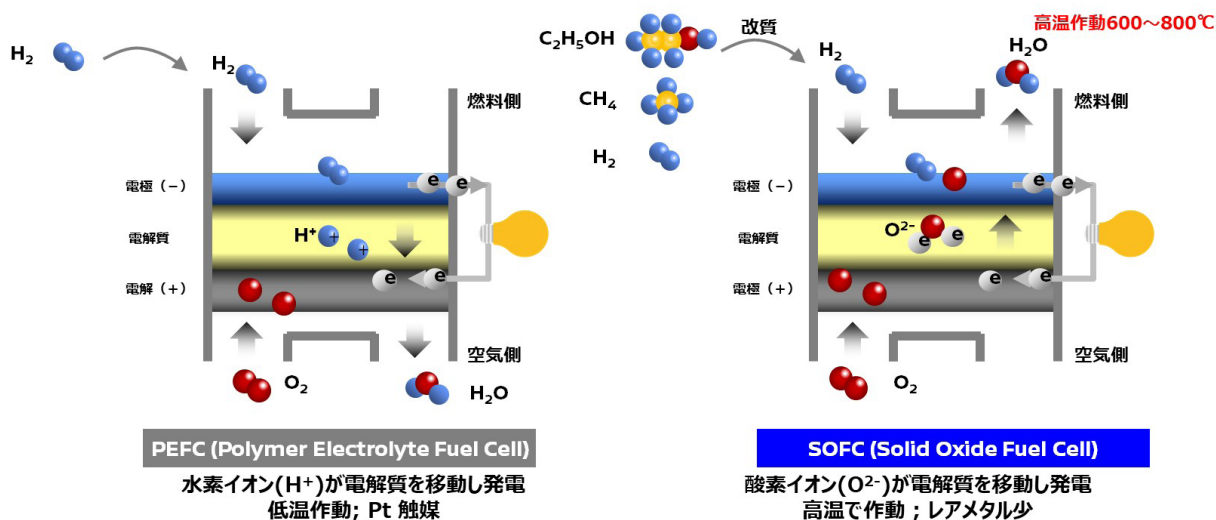


図3 PEFCとSOFC

2.2 SOFCを用いた燃料電池自動車の開発

日産はSOFCの高効率性に着目し、比較的起動回数が少ない商用車向けの動力源としてSOFCシステムの検討を進めてきた。そして、バイオエタノールを燃料とするSOFCシステム「e-Bio Fuel-Cell」を搭載した燃料電池車コンセプトを2016年に発表した。(図4)



Specifications of research prototype vehicle

Features	Specs.
Base vehicle	e-NV200
Battery Capacity	24kWh
Powertrain	Electricity
Fuel tank capacity	100% Ethanol
SOFC power	30L
Driving range	5kW
	Over 600km

図4 e-Bio Fuel-Cell コンセプト車

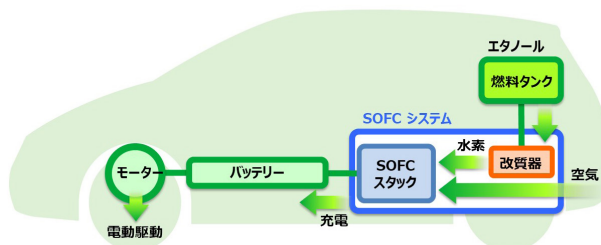


図5 e-Bio Fuel-Cell コンセプトシステム

システム構成を図5に示す。SOFCの出力密度が低い弱点を補うため、SOFCで発電した電力をバッテリーに充電し、バッテリーでモーターを駆動するレンジエクステンダーとして開発を行った。SOFCは液体燃料であるエタノールが利用可能なことから、既存の流通網の活用が可能であり、純水素を用いる燃料電池車よりもインフラ普及の面で優れている。また、発電効率の高いSOFCとエネルギー密度の高い液体燃料の組み合わせとなるため、ガソリン車並みの航続距離(600km以上)と充填時間の両方の実現が可能となる。このように既存インフラを活用しつつガソリン車と同等の充填時間や航続距離をカーボンニュートラルで実現できるSOFCを用いた燃料電池車への

期待は大きい。

日産では、SOFCの課題である急速起動性を向上させるため、金属支持体をSOFCに組み込んだ金属支持型セルの開発に注力している。図6は、金属支持型セルと従来のセラミックでできた燃料極支持型セルとの熱衝撃試験結果比較である。車両で想定される急速起動時の温度分布を模擬して、セル面内に大きな250℃の温度差を与えても、燃料極支持型セルは破損するが、金属支持型セルは破損に至らない。この結果のように、熱入力に対する金属支持型セルの熱的な優位性が確認できているだけでなく、機械強度が大きいことから金属支持層のさらなる薄層化が可能であり、さらにそれに伴う熱容量低減効果もあるため、車載適用に向けた出力密度向上および起動時間短縮技術としても重要な位置づけとなる。

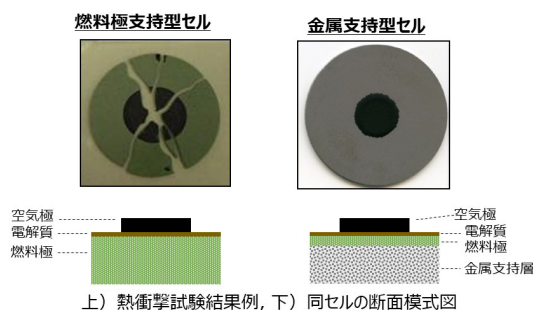


図6 燃料極支持型セルと金属支持型セルの熱衝撃試験結果

2.3 定置用燃料電池システム

日産ではこの車載用SOFC技術を定置用発電システムへ応用し、日産栃木工場にて定置用発電のトライアル運用を開始した(図7)。このシステムは図8に示すように車載用システムと同様に燃料タンクからエタノールを改質器へ供給し、水素へと改質した後、SOFCスタックへ供給するものである。SOFCによって発電した電力を系統電力に送ることや蓄電システムに貯めること、電気自動車用充電器として用いるなど様々な用途の電力として活用することができる。この栃木工場へのSOFCシステムトライアル運用は日産の全工場への本格普及への第一歩であり、栃木工場にて発電量を増加させて実績を積んだ後、グローバルに展開していく。



図7 栃木工場に導入したSOFCシステム外観

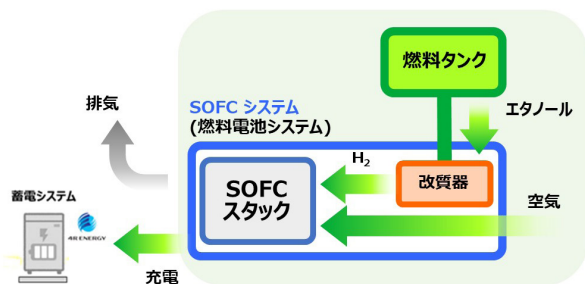


図8 e-Bio fuel cell システム概要

3. バイオエタノールの調達

3.1 バイオエタノール

SOFCシステムとともに重要となるのがカーボンニュートラルなバイオエタノールの調達である。日産はバイオエタノールの原料作物としてイネ科のソルガム(図9)に着目し、バイネックス株式会社との共同開発を行っている。ソルガムには約4万種類もの品種があるがその中でも共同開発のソルガムには以下4つの特徴がある。

- ①一年草植物で、生育が早く、約3ヵ月で収穫可能であり、栽培適地では年に複数回の収穫が可能
- ②寒冷地や乾燥地にも順応できるため、幅広い地域や土壌での栽培が可能
- ③茎部分をエタノールの原料、実部分は食料に使用するため、食料と非競合な第二世代バイオエタノールであること
- ④搾汁後の茎の絞りカス(バガス)もバイオマス発電に活用できる可能性あり

これらの特徴から、比較的気候や天候の影響を受けにくく安定した供給が可能と考えている。今後、栃木工場を始めとしてグローバルに展開している日産の生産工場においてこのソルガムを原料としたバイオエタノールを採用していく予定である。



図9 ソルガム

3.2 ソルガムの栽培実証

図10に示すようにソルガムはオーストラリアで栽培をし、その糖液はバイオエタノールへ加工し、バガスはペレット化して、それぞれ日産工場やバイオマス発電事業者へ供給することを計画している。

日産はすでにオーストラリアで小規模のソルガム栽培の実証試験を開始しており、今後は以下3つの工程の課題の洗い出しを進める。

- ①栽培したソルガムを圧搾し糖液を抽出
- ②糖液を発酵・蒸留することでバイオエタノール製造
- ③海上輸送で日本へ輸入し、国内の工場へ供給

これら工程のトライアルを実施し、将来の量産に向けまた、副産物として発生するバガスのバイオマス発電用の燃料として活用についても実現可能性の研究を進める計画である。

これらの計画は単にカーボンニュートラルな燃料を用いることで環境対応だけでなく、電力コスト低減可能な技術であり、資源リスクに対してもロバスト性の高いエネルギーを確保できることに繋がると考えている。

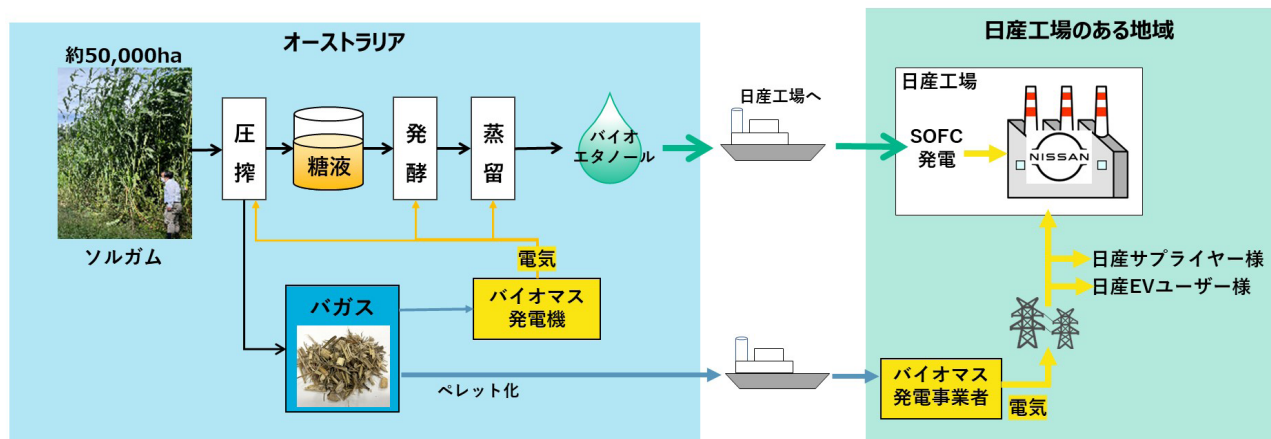


図10 ソルガムエタノールの工場導入までの流れ

4. おわりに

本報では工場におけるカーボンニュートラル化に向けた取り組みについて紹介した。系統電力のエネルギーミックスは国や地域によって異なっており、系統電力のみに頼っているのはカーボンニュートラルを達成することは難しい。一方で、燃料を調達する場合にも法規制も国や地域ごとに異なっており、利用できる燃料も変わってくる。このことから、多種多様な燃料を高効率に電気に変換できる変換デバイスが必須であり、SOFCはこの条件に合致するものと考えている。(図11)

日産は高効率なSOFCの開発に長年にわたって取り組んできた。そして、その技術は将来的には車両への適用を目指しているが、定置用途のSOFCは車載時に比べサイズ的な制約が小さく、起動時間に対する要求も低い。このため、技術開発としてはまず工場などの定置用途から導入を開始し、技術開発の進捗に伴って車載用SOFCへと移行する計画である。また、パートナーを増やし、数を多く作ることが低コスト化には必須であり、広く普及させるためにも自動車用や定置用だけでなく様々な移動体用途のエネルギーとして用いることを目指している。

参考文献

- (1) 日産自動車:環境、Sustainability data book 2024、pp.14-62 (2024)

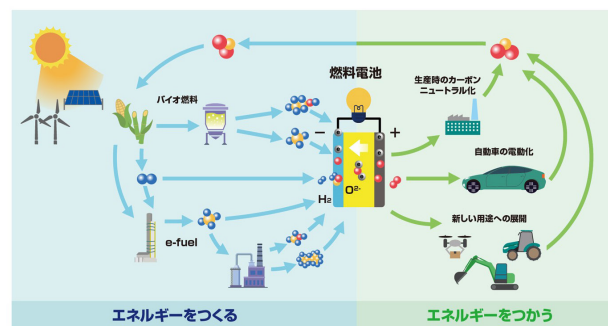


図11 SOFCの役割

著者



高市 哲



高橋 成生



小出 寿幸

特集:持続可能なモビリティへの挑戦 ～カーボンニュートラルを実現するための先端技術～

5. 英国サンダーランド工場におけるEV36zeroと
カーボンニュートラルの取り組み

伊久美 亮太*

1. はじめに

自動車産業は、CO₂排出量の削減と化石燃料への依存からの脱却に取り組むことが求められており、そのビジネス構造は大きく変化しつつある。日産はグローバルな自動車メーカーとして、クルマの原材料の調達から輸送、走行時など、サプライヤーを含むバリューチェーン全体でのCO₂排出量を視野に入れ、新たな技術開発を進め、再生可能なエネルギーを利用するなど、企業活動との両立を意識してCO₂削減に取り組んでいる。生産過程におけるCO₂排出の主たる要因は、化石燃料を使用したエネルギー消費であり、日産は、生産過程におけるエネルギー消費とCO₂排出量が最も少ない自動車メーカーとなるよう、さまざまな省エネルギー活動に取り組んでいる。また、日産自動車は2050年までに企業活動と製品のライフサイクルを通じてカーボンニュートラルを達成することにコミットしており(図1)、日産のカーボンニュートラルに向けた取り組みにおいては、車両の電動化と製造技術の革新が重要な役割を果たすと考え、車両やパワートレインの生産工場においても同様にCO₂排出量削減の取り組みをグローバルの各工場で推進している。

日産は2050年カーボンニュートラルを実現へ

- 2050年までに事業活動を含むクルマのライフサイクル全体におけるカーボンニュートラルを実現
- 2030年代早期より、主要市場に投入する新型車をすべて電動車両とすることを目指し、戦略分野において、電動化と生産技術のイノベーションを推進



図1 カーボンニュートラルへの取り組み

2. 日産サンダーランド工場の取り組み-EV36Zero

2.1 日産サンダーランド工場の概要

イングランドの北東部に位置するサンダーランド工場は1986年9月の操業開始以来、現在までの総生産台数が1,100万台を超えている、日産自動車における欧州で最大規模の生産拠点である。サンダーランド工場で働く従業員の数は約6,000名、生産能力は約44万台/年を有しており、現在キャシカ、ジューク、日産リーフの3車種を生産、並びに英国国内とヨーロッパを含む世界各地へ輸出している。(2024年現在) またCNに関する取り組みについては2005年に10基の風力発電設備(6.6MW)を導入したことから始まり、また、2016年に設置された太陽光発電設備は4.75MWの電力を発電し、再生可能電力の能力拡大に加え、生産事業におけるCO₂排出量の削減にも日々努めている。

2.2 EV36Zeroの概要

「EV36Zero」とは、カーボンニュートラルへの取り組みを加速させ、ゼロ・エミッション社会の実現に向けて、新たな360度のソリューションを確立するべく、サンダーランド工場で2021年に発表され、また日産の中期経営計画「The Arc」の中においても、日本国内の工場並びに北米の工場への今後展開していくことをコミットしている生産戦略のことである。(図2)



図2 EV36zeroの展開

* 戦略企画部

この革新的なプロジェクトは、3つの取り組みを軸に構成されている(図3)。①サンダーランド工場にて2025年に生産を開始する次世代EVの生産②世界最先端のバッテリー技術を有するエンビジョン AESCの新工場をサンダーランド工場のすぐそばに建設③サンダーランド市政府の主導によるIAMP (International Automotive Manufacturing Park) と呼ばれるサプライヤパークをサンダーランド工場の近郊に展開し、そこでマイクログリッドを展開するという内容である。

マイクログリッドについてはIAMP内の日産並びに周辺のパートナー企業による再生エネルギーの発電量の拡大、また発電した再生エネルギーを企業間でシェアし、更に企業間でエネルギーマネジメントができる。EV36zeroのこれら3つの取り組みについて投資総額約10億ポンドの投資を投じる内容で、2021年7月に対外発表された。EV36Zeroは、EV、再生可能エネルギー、バッテリー生産の取り組みから構成されており、自動車業界の未来の青写真を示した生産戦略である。

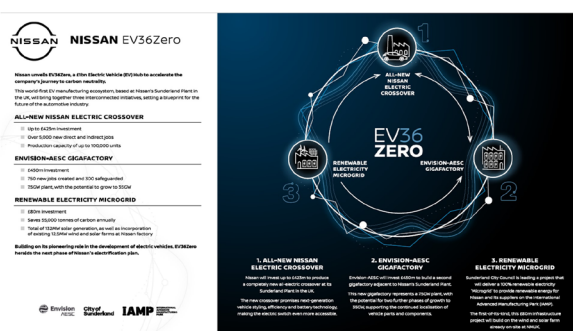


図3 EV36zeroの概要

加えて、2021年12月にはサンダーランド工場の再生可能エネルギーの発電施設を大幅に拡張する計画が発表され、新たに20MWの太陽光発電設備の導入が発表された。導入に向けた開発は直ちに開始され、工場の既存の風力発電および太陽光発電設備と並び、設置完了・運用の開始をしている。

この20MWの太陽光発電が加わることで、日産のサンダーランド工場における再生可能エネルギーの発電量は倍増し、工場で使用される電力の2割を占めることとなり、欧州で販売される「日産リーフ」全ての生産を賄うことができる。

また、2021年の発表から2年後の2023年11月にupdateの内容が対外発表された。前回の発表内容に加え、新たに将来2つの新型EV車種の生産、並びにそれに関わる追加総投資額約20億ポンド追加するという内容である。(図4)

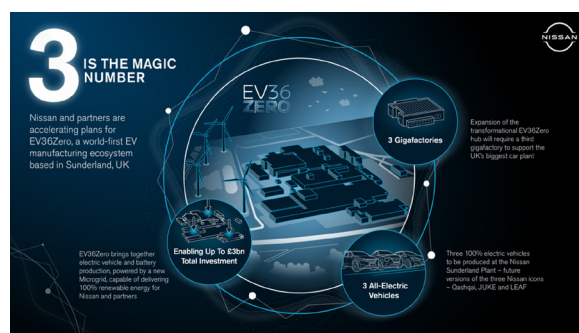


図4 EV36zero update

3. サンダーランド工場のカーボンニュートラルの取り組み

日産の生産領域のカーボンニュートラル目標に向けた取り組みのアプローチとして、下記5点を中心に活動を進めている(図5)。

- ・エネルギー使用量の削減
- ・設備&ツールの電化
- ・再生可能エネルギーの導入
- ・代替エネルギーによる発電
- ・カーボンクレジットの活用

この基本方針に基づき、2018年対比で50%のCO₂削減を2030年に実施する目標を掲げている。サンダーランド工場では、この方針に基づき、冒頭で述べた風力発電、太陽光発電の活用と更なる拡大、工場設備の電力消費量を常時モニターできる仕組みや電源のオンオフ管理の効率化などの取り組みにより、日産自動車のグローバル工場の中において工場由来のCO₂排出量がベストな工場の中の一つである。今後の取り組みとしては電気自動車のバッテリーを活用した大型蓄電池の採用、バイオメタンガスなどの代替エネルギーの採用を計画中で、2030年の目標設定を上回るスピードで工場由来のCO₂発生の削減を実現できている。

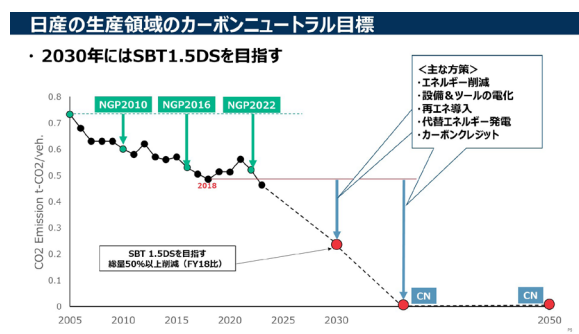


図5 EV36zeroの概要

4. 今後の発展

EV36zeroは将来車種の生産開始時期をターゲットに、日産のみならず、周辺パートナー、並びに地域自治体と足並みを揃え、カーボンニュートラルの実現に取り組みつつ、生産拠点としての競争力を継続的に向上させていくという生産戦略のことである。このEV36zeroを更に進化させるべく、現在サンダーランド工場ではサンダーランド市政府と共に4つのテーマでの取り組みを加速させている(図6)。

①再生可能エネルギーの活用並びにV2X技術を利用した持続可能な住居の提供(Sustainable Living)、②限りある資源の再利用を目指した循環型ビジネスの実現(Circular Economy)、③地域の雇用の拡大と教育の場の提供ならびに大学や専門学校との共同研究(Skill for the Future)、④カーボンニュートラルの実現やDX、自動物流などを目指す持続可能な生産形態(Sustainable Manufacturing)。以上4つの分野を軸に将来に向けた製造業としての競争力の確保、カーボンニュートラルへの貢献、地域との共生の実現を目指している。

欧州地域という歴史の古い自動車OEMがひしめく、また環境規制が厳しく、環境について市場の感度が高い地域での地方自治体、並びにパートナーや教育機関と足並みを揃えながら取り組んでいるEV36zeroとその実績は近い将来日本や他の地域の取り組みの手本となる活動であり、日産自動車の中期計画「The Arc」の元、グローバル生産拠点への展開活動も併せて進めている。

Key areas for collaboration

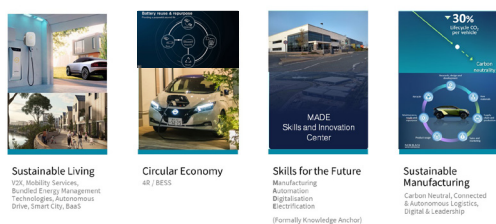


図6 更なる取り組み

著者



伊久美 亮太

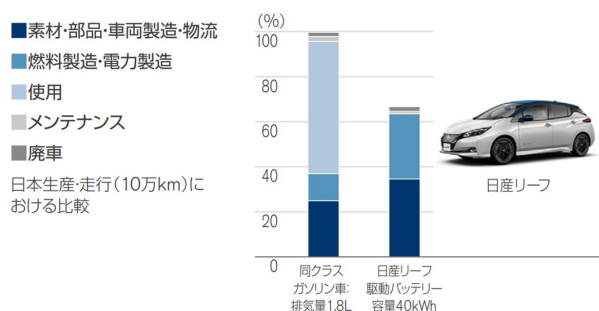
特集:持続可能なモビリティへの挑戦 ～カーボンニュートラルを実現するための先端技術～

6. Vehicle Grid Integrationの取り組み

池添 圭吾*

1. はじめに

日産自動車は2021年1月に、2050年までに事業活動を含むクルマのライフサイクル全体におけるカーボンニュートラルを実現する新たな目標を発表した。自動車会社として脱炭素化を実現するためには、製造時CO₂の削減だけでなく、お客様に商品を提供した後の、使用時や燃料・電力製造時のCO₂排出に対しても責任を持って削減していく必要があり、それは図1に示すように、大きな割合を占めている。したがって、EVの普及と同時に、再生可能エネルギー（以下、再エネ）の大量普及が必要であり、再エネで発電された電気でEVを走行させることで、自動車会社としての脱炭素化の実現につなげていかなければならない。

図1 EVとガソリン車でのライフサイクルCO₂排出量比較⁽¹⁾

太陽光発電や風力発電などの再エネは、一般的に発電量をコントロールできないため、再エネを大量に普及させるためには、電力系統の需給調整の能力を増強し、再エネ普及時における電力系統運営の経済性を上げていかなければならない。一方、EVユーザにとっては、EVの充電は次に使用する時まで完了していればよく、充電を実施する時間帯、すなわち、系統の電力を使用する時間帯を柔軟に変更することができる。つまり、EVは、他の電力消費デバイスには無い、“電力需要の柔軟性”という特徴を備えている。この特徴を活かして、EV

による電力需給の平準化を行うという考え方は、Vehicle Grid Integration（以下、VGI）と呼ばれており、日産としてこれまで積極的に推進してきた。

図2は、福島県浪江町で公用車として導入された日産リーフを活用したV2B（Vehicle to Building）の実証実験の様子である。この実証では、併設されている道の駅の屋根上に設置された太陽光の発電電力を積極的にEVに充電し、また建屋の電力需要がピークになりそうな場合は、逆にEVから放電することによりピークを抑制する制御が実装されている⁽²⁾。



図2 福島県浪江町におけるV2B実証実験の様子

日産は、このような実証を世界各地で数多く実施してきたが、その経験をもとに、2024年3月1日から、EVを活用したエネルギー管理の企画から運用までワンストップで提供するサービス「ニッサンエナジーシェア」の提供を開始した⁽³⁾。このニッサンエナジーシェアは、すでに図3に示した群馬日産自動車株式会社様、および、図4に示した、国立大学法人広島大学様で稼働しているが^{(4) (5)}、そこには、それぞれのお客様が掲げているカーボンニュートラル実現に向けてのビジョンと包括的な戦略が存在しており、その一構成要素として価値を共有し、導入して頂いているということに、言及しておきたい。

*EVシステム研究所



図3 群馬日産自動車品質保証センターにおける
ニッサンエナジーシェア導入事例

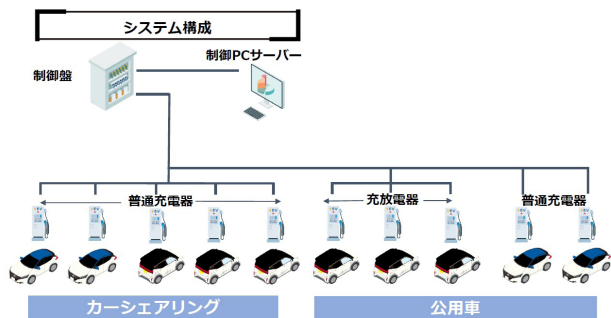


図4(a) 広島大学におけるニッサンエナジーシェア導入事例



図4(b) 広島大学におけるニッサンエナジーシェア導入事例

このように、日産では社外の方々との共創を通して、VGIを積極的に推進しているが、その背景として、EVが電力システムという社会システムに与える影響が極めて大きいと考えているからである。そこで、本稿では、次の第2章、第3章で、その影響度を数値解析手法で定量的に明らかにした内容を紹介していく。さらに、第4章では、VGIの取り組みを拡大させていくための、地域や異業種との共創の取り組みの事例について紹介する。

2. EVの大量普及が電力システムへ与える影響

将来EVが大量に普及すると、これまで消費していたガソリンのエネルギーの多くを電力に置き換えるということになり、その結果、電力システムには大きな負荷がかかってしまう懸念がある。一方、乗用車は一般的にその95%が駐車しているといわ

れているため、EVの充電は1日の時間に対する柔軟性が極めて高い。つまり、電力システムにおいて、比較的全体負荷が小さいときや、再エネが余剰している時間帯に充電するような制御をすることができれば、電力システムの増強が不必要になるだけでなく、より再エネの経済性をあげることが可能となる。そこで、本章では、大量EVが電力システムへ与える影響について、様々なパラメータによるケーススタディが可能なシミュレーターを開発し、定量的な評価を実施した内容について紹介する。

2.1 手法

日産自動車総合研究所では、将来のEVの仕様および充電インフラ整備状況、さらに地域ごとに異なる車両利用パターンなどの、多様な制約条件および統計データを入力とし、それらを基に時刻毎のEV充電による電力需要を計算するツールを開発した⁽⁶⁾。その開発にあたり、約1.1万台のEVの利用データを統計的に解析した基礎データを作成した。また、計算手法としては、複数の確率分布に基づいてエージェントを状態遷移させることで、複数日にわたる連続的なシミュレーションを短時間で実行可能なモンテカルロ法を採用している。これにより、種々のパラメータによるケーススタディが可能となり、EVの充電に関わる様々な施策の効果や跳ね返りについて、計算機上での実験を可能とした。

2.2 EV利用データの統計分析

図5に、本シミュレーションに必要なEVの利用データの例を示す。これらは、実際のEVからテレマティクスを通じて取得できるデータ(以下、テレマティクスデータ)を統計処理することによって作成した。また、EVの充電は、多くの場合自宅もしくは職場などで実施するが、自宅や職場に駐車しているからといって、必ずしも充電ケーブルをプラグインしているとは限らない。

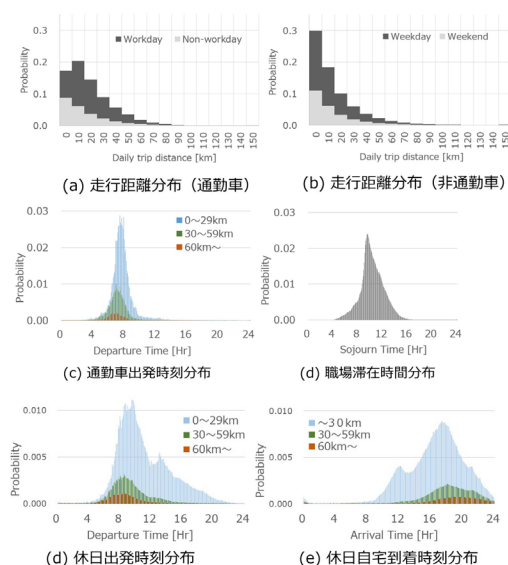


図5 リーフテレマティクスデータにより生成されたEV行動の確率分布の例

例えば、電池残量（以下SOC）が多く残っており、航続距離を十分確保できる場合にはわざわざプラグインするような行動はとらないことが想定される。そこで、この行動特性をシミュレーターに組み込むために、テレマティクスデータを用いたプラグインの行動特性モデルを作成した。図6は、自宅および職場に到着した時のSOCに応じたプラグイン確率を示したものである。すなわち、自宅（職場）到着時のSOCが高い場合は、プラグインする確率が低くなり、SOCが低い場合は、多くの人がプラグインを実施するという行動特性を表しているが、特に、自宅と職場ではその傾向が異なっていることは注目に値する。この確率分布は、テレマティクスデータを取得した2015～2016時点でのユーザの行動特性を示したものであり、バッテリー容量、職場や集合住宅での充電設備の占有状況、さらには、将来、自動充電などが普及した場合でそれぞれ大きく傾向が異なることが予想される。本研究で開発したシミュレーターでは、このプラグイン行動特性を示す確率分布を、インプットデータとして入力できるようにして、将来を想定したパラメータスタディを可能とした。

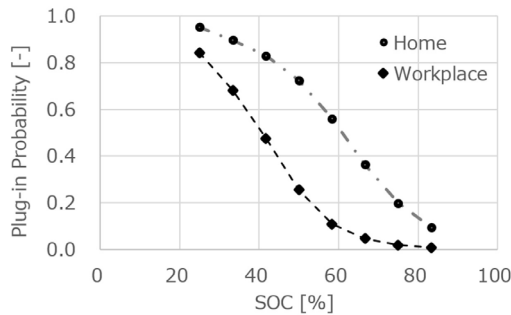


図6 プラグイン確率(自宅および職場での充電時)

2.3 EV 充電電力需要の計算

EVの使われ方確率分布および、充電行動モデルを用いて、時刻ごとのEV充電による電力需要カーブを算出するための、計算フローを図7に示す。シミュレーターでは、まず、通勤用途のユーザ(commuter)と非通勤用途のユーザ(non-commuter)に分類し、設定された比率でエージェントを発生させる。各ステップで確率分布に応じた乱数を用いて行動を選択し、全エージェントの充電電力を時刻ごとに合計することで、EV充電電力需要 P_t を算出した(式(1))。

$$P_t = \sum_{i=1}^{n_1} P(com)_{t,i} + \sum_{j=1}^{n_2} P(non_com)_{t,j} \quad (1)$$

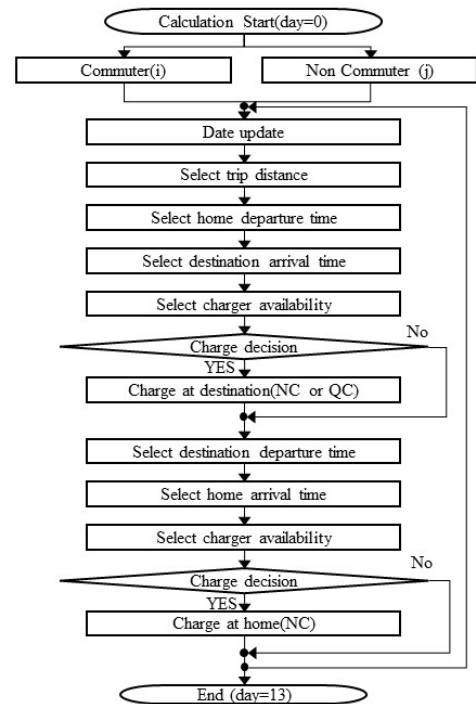


図7 充電需要カーブ算出のためのモンテカルロシミュレーションフロー

2.4 計算結果

2.4.1 基本条件とその結果

図8は、表1に記載されたパラメータを基本条件として、東京電力管内の既存電力需要に対するEV充電による電力需要を示したものである。EV以外の電力需要には、夏季の最大電力ケースの日負荷曲線を使用した⁽⁷⁾。EV普及率は2040年頃に35%と想定し、東京電力管内の乗用車台数を6.5百万台とした。夕方から夜間にかけてのEV充電は通常住宅街で行われることが想定されるため、本稿では家庭部門と産業部門の日負荷曲線を別々に表記し、その影響を考察した。結果としては、図8に示すように帰宅時間と家庭部門の夕方の電力ピークが重なるため、家庭部門の電力ピークにEV充電が上乗せされる状況となり、住宅街の電力系統に影響を及ぼすことが懸念される結果となった。この結果を“EVの充電をなにも制御しないベースケース(成り行き充電)”とし、これを基準として各種パラメータスタディを実施し、さらなる考察を行う。

表1 EV電力需要シミュレーションの初期前提条件

	Commuter	Non-commuter
EV penetration	35% of private passenger vehicle	
Commuter/Non-commuter	50%	50%
Home charger ratio	100%	100%
Destination charging	(workplace) 0%	0%
Ratio to go out	90%	70%
Battery capacity	24kWh	24kWh
Normal charging	3kW	3kW

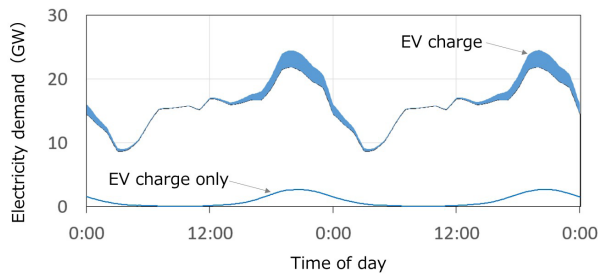
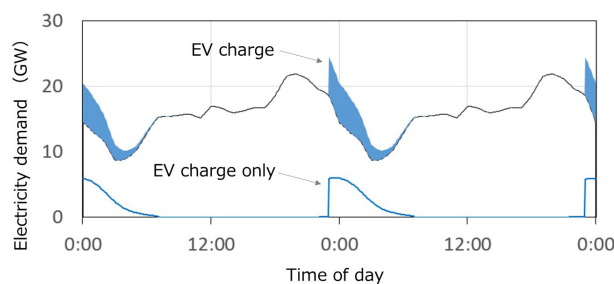


図8 充電需要シミュレーション結果(EVの充電を制御しないケース)

2.4.2 深夜電力料金を想定した結果

EV 充電を夕方の電力ピークと重ならないようにするため、夜間の電力価格を安くする方法が取られている地域がある。しかしながら、本シミュレータでの前述した条件での解析の結果、シフトした先に新たなピークが生じるという現象が発生した(図9)。このことから、EV が大量普及した時に充電シフトを行うような施策を実施する場合は、同一の配電網内でシフトの量や時間が分散されるようなマネジメントの設計が必要であることが示唆された。


図9 充電需要シミュレーション結果
(11:00からの深夜電力料金を想定したケース)

2.4.3 自宅充電および、職場充電普及率の影響

集合住宅等のユーザが自宅に充電器を保有しない場合、通勤用途のユーザは職場で充電することを想定したパラメータスタディを実施した。その結果を図10(a)(b)に示す。結果としては、自宅での充電頻度が低下するため深夜電力料金が設定された場合のピークが半分以下に低減され、その分が、産業部門の電力需要に上乗せされる形となっている。また、図10(b)

に示す通り、職場充電は太陽光による発電の余剰電力発生 の時間帯とも合致し、効率的に再エネ電力を利用できるという利点もある。したがって、職場における充電器普及の促進は、電力部門のCO₂削減、急速充電設備投資の削減、家庭部門の電力需要ピークの削減など、複数の点で有効な策であると考えられる。なお、図10(b)の太陽光発電は、東京電力管内における2017年の発電実績公表値を基に、2030年までに太陽光発電が27GW導入された想定での電力供給カーブである。

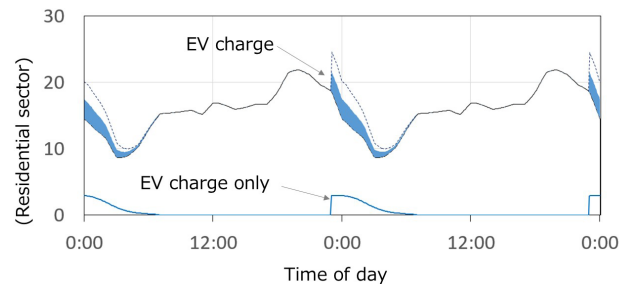


図10(a) 充電需要シミュレーション結果(職場充電が普及したケース)

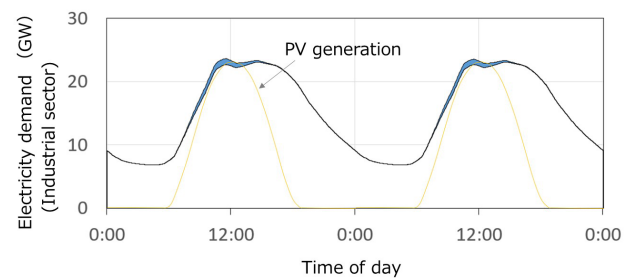


図10(b) 充電需要シミュレーション結果(職場充電が普及したケース)

2.5 本シミュレーターによる将来課題の事前把握

本章では、約1.1万台のEV実利用データを用いて、EV 充電行動をモデル化し、さまざまなパラメータ変化が電力システムに与える影響を定量的に可視化することが可能なシミュレータについて紹介した。将来的に、例えば搭載バッテリー容量などのEV仕様の変化や、充電インフラの導入状況など様々な社会状況が変化した場合に、その条件を本シミュレータの入力パラメータとして設定することにより、EVの充電が電力システムに与える影響を事前に把握することができ、問題が生じる前の対策につなげることが期待できる。

3. VGI導入によるCO₂削減効果

前章では、EVの充電が電力システムに与える影響とそのマネジメントの必要性を紹介した。一方、大量普及したEVの蓄電池を、電力システムにおける需給調整力として活用することにより、再エネ発電の余剰回避に貢献し、火力発電所の燃料消費を

削減することが可能となる。本章では、その場合の、CO₂削減効果を定量的に算出した結果を紹介する。

3.1 手法

本研究では、電力系統シミュレーションとして、宇田川らにより開発された発電機起動停止計画モデル⁽⁸⁾⁽⁹⁾に、EVモデルを適用させることにより、VGIによるCO₂削減効果を算出した⁽¹⁰⁾。適用した電力系統シミュレーションの概念図を図11に示す。本モデルの目的関数は、火力発電機運用費用（燃料費、起動費及び炭素税）の最小化であり、混合整数計画問題として定式化されている。また、電力需給の一致と、LFC調整力の必要量確保を制約条件に設定している。さらに本モデルの計算は、太陽光発電の出力予測値を用いた翌日計画と、実測値を用いた当日運用の2段階で行なっている。今回の計算では、VGIによるCO₂排出削減効果を定量化するため、3つのシナリオ①成り行き充電、②充電制御あり、③充放電制御ありを想定した。

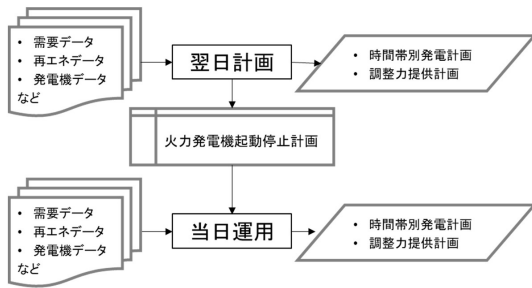


図11 電力系統シミュレーションの概念図

3.2 CO₂削減効果計算の前提条件

3.2.1 電力需給システムおよびEVの条件

解析対象は2030年の九州電力管内エリアとした。2030年度の電力需要は、資源エネルギー庁の予測による8,640億kWh⁽¹¹⁾を使用し、RE設備容量は太陽光発電21.8GW⁽¹²⁾、風力発電4.7GWとした⁽¹³⁾。CO₂排出量係数は石炭火力795g CO₂/kWh、LNG火力376g CO₂/kWh、石油火力695g CO₂/kWh⁽¹⁴⁾とし、炭素税は20,000円/ton-CO₂とした。また、EV普及の前提条件として、国内の乗用車台数を6,800万台とし、九州地域の乗用車台数比率11%および2030年のEV普及率4.3%⁽¹⁵⁾を踏まえ、九州におけるEV台数を32万台とした。今回の計算では、VGIによる火力発電所燃料消費削減の最大限のCO₂排出削減効果を評価するため、自宅および職場に駐車する全てのEVが充放電器に接続されると仮定している。EVはリーフe+（蓄電池容量62kWh）をモデルとし、初期SOCは50%、充放電電力は6kW、充電および放電効率は90%、走行における電費は1kWhあたり7kmとした。

3.2.2 EV群モデル

前述した電力系統モデルにEVの特性を入力パラメータとして適用させるにあたり、EV群モデルを作成した。そのモデルでは、一般的な車両利用方法を考慮し、ガソリン車35,000台の2019年テレマティクスデータから、ランダムに10,000台を抽出し、10種類のEV群にクラスタリングした。図12に各クラスターの各時間帯の合計走行量データ、および図13に自宅駐車確率を示す。また、成り行き充電電力（帰宅後即充電）の推定として、2019年1月～12月のEVのテレマティクスデータから、自宅到着時のSOCおよび次回走行距離と、プラグイン確率の関係性を示すマップ（図14）を作成し、前述した10種類のEV群クラスターごとに集計することにより、EV群充電電力時系列データを作成した。

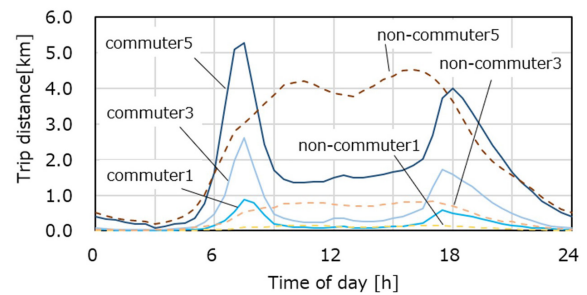


図12 各時間帯の走行量データ

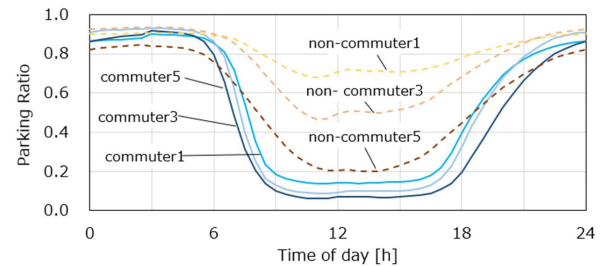


図13 各時間帯の自宅駐車確率

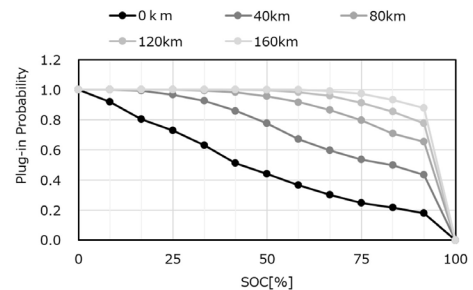


図14 次回走行距離ごとのプラグイン確率

3.3 結果

3.3.1 電力需給シミュレーション結果

電力需給シミュレーションは、前述した前提条件で、1年間の最適化計算を実施しているが、ここでは一例として、8月1日の電力需給を図15に示す。この日の最大電力需要は17.2GWであり、再エネ発電量が多い日である。昼間は再エネの出力が増加しているため、火力発電の出力を最低限まで抑えているが、夕方再エネ発電量の減少とともに、火力発電の出力が大きくなっている。また、最適化計算の結果として、夕方の火力発電のランプアップ時には、揚水発電の出力が増加し火力発電の出力を抑えるような計算がされているのがわかる。この日を例として、EVの各シナリオで最適化計算した場合のEV総充放電電力を図16に示す。“①成り行き充電”のピークは0.1GWで、最大電力需要に対して小さいものの18:00以降の火力発電のピークと重なってしまっている。それに対して、“②充電制御あり”では日中の再エネの発電量が多い時間帯に充電が増加し夕方の充電を抑えていることがわかる。また、“③充放電制御あり”では日中に充電が増加し、その電力を夕方に放電するような計算結果となっている。

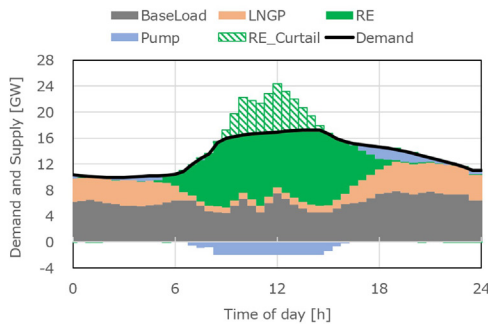


図15 シミュレーションでの仮定とした電力需給の例(8月1日想定)

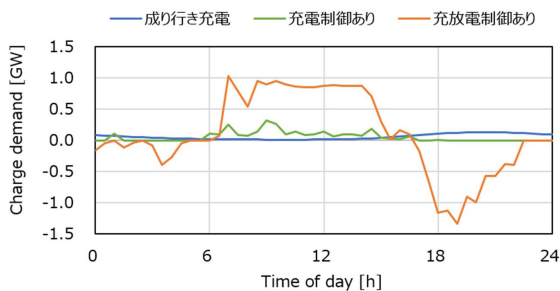


図16 EV充放電電力カーブ(図15の仮定において)

図17に、充電制御ありを、図18に充放電制御ありのシナリオにおけるEVクラスタ毎のそれぞれの充電電力を示す(10クラスタ中6クラスタのみ抜粋)。

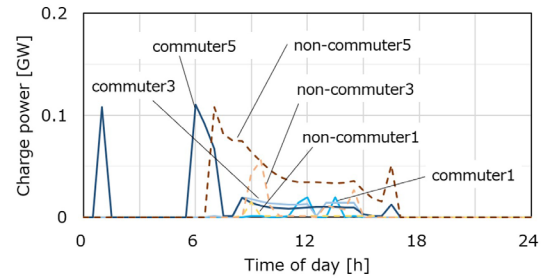


図17 充電制御ありケースの各クラスタにおける時系列電力需要時系列データ

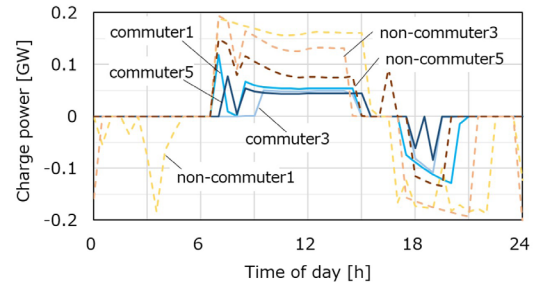


図18 充放電制御ありケースにおける電力需要と供給の時系列データ

3.3.2 CO₂排出量評価結果

各シナリオにおける火力発電機運用費用とCO₂排出量の計算結果を表2に示す。成り行き充電のCO₂排出量は7.5Mton-CO₂/年であり、充電制御ありで0.3Mton-CO₂/年の削減、充放電制御ありで0.7Mton-CO₂/年の削減が見込まれる結果となった。また、これを、EV一台当たりのCO₂削減量に換算すると、充電制御ありで0.9ton-CO₂/年の削減、充放電制御ありで1.9ton-CO₂/年の削減となった。

表2 各シナリオにおけるシミュレーション結果

	Operation cost [billion yen]		CO ₂ emission [Mton-CO ₂]	
w/o Control	165.1	(-)	7.5	(-)
w/ V1G	160.4	(-4.7)	7.2	(-0.3)
w/ V2G	151.9	(-10.2)	6.8	(-0.7)

また、本稿では割愛したが、出典となる論文⁽¹⁰⁾では、このVGIによる蓄電池劣化の定量的評価も同時に実施しているので、参考にされたい。

4. 地域・異業種との共創による取り組み

これまで述べてきたように、EVはモビリティとしての革新だけでなく、将来の社会システム、特に電力系統への影響が極めて大きく、その対応によってポジティブにもネガティブにも影

響してしまう。したがって、EVを提供している自動車会社としてはその影響をポジティブな方向に持って行く責任がある。このような背景をベースとして、日産ではこれまで多くの自治体や民間企業の方々とVGIの実装について、様々な意見交換を実施してきた。本章では、その中でも、福島県の会津・喜多方地域で、自治体および民間企業との共創を行い、EVの充放電制御と空調のデマンド制御を組み合わせた、新たなエネルギーマネジメントの実証に至った事例を紹介する。図19は、実際に設置された充放電器4台と導入先であるマツモトプレシジョン(株)の社用車アリアである。



図19 VGI実証の様子(福島県喜多方市マツモトプレシジョン(株))

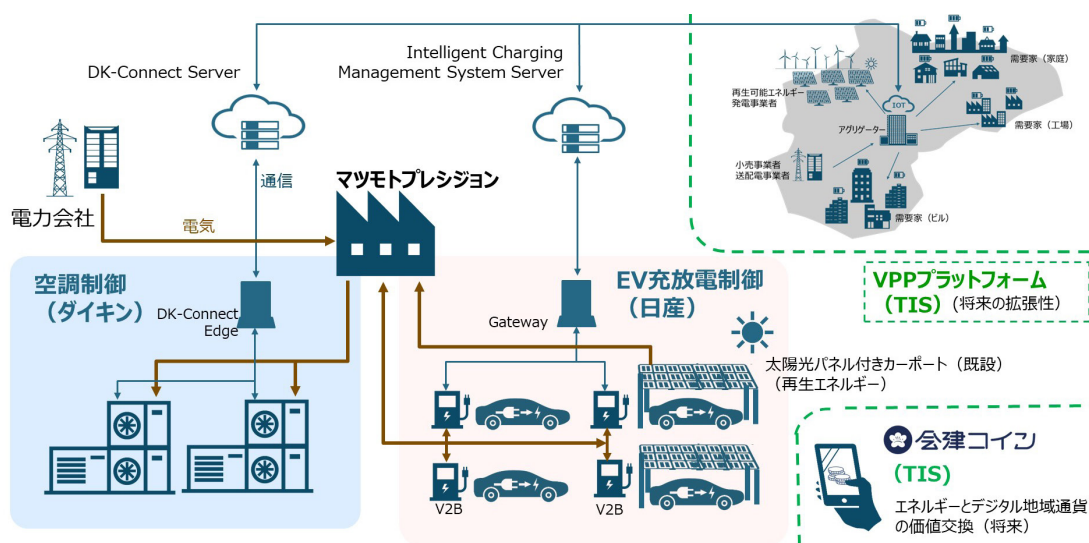


図20 電気自動車と業務用空調が協調したエネルギーマネジメントの実用化検証 概念図(日産自動車、ダイキン工業、TIS、マツモトプレシジョン共同実施)

図20は2023年12月から実証を開始した、エネルギーマネジメント実証の概念図である⁽¹⁶⁾。このシステムにおいて、社用車や従業員のEVは、その時のEV各々のバッテリー充電率や次の利用時刻などから、モビリティとしての利便性を損なわないように自動的に充放電の出力が決定・実行される。さらに、それを、ダイキン工業(株)の業務用空調デマンド制御と連携することにより、職場の快適性も維持しながら、電力コスト削減とエネルギーの地産地消に貢献する。また、将来的にこの取り組みは、一需要家の価値だけではなく、このような電力需要の柔軟性を持つ建物を、地域に増やし束ねることによって、地域全体の再エネの経済性を上げ、再エネ普及の促進につなげる狙いがある。そのために、共同実施者であるTIS(株)のもと、将来のVPP¹⁾への展開の構想や、地域のEVユーザの積極的な参加を促すためのインセンティブの仕組みとして、地域通貨「会津コイン」の導入も視野に入れ実証を計画している(図20右側)。

このような取り組みは、きわめて新規性が高いため、ほとんどの自治体、また導入先の企業は「何をやったら良いのか?」「どのような価値が出て、それにはどのような条件があるのか?」な

ど情報がなく、そのような状況で、導入の判断をすることは難しい。したがって、お客様やパートナー企業とともに、ビジョンと価値を共有し、方向性や課題を確認しようという継続した議論を経て、双方がWin-Winとなる具体的な活動に落とし込む必要がある。そのような継続した取り組みにより、VGIの導入が広がっていくと考えている。

5. おわりに

EVを活用したエネルギーマネジメント(VGI)は、再エネを大量に普及させることが必要な将来には、必ず必要となる社会システムの一つであると言える。しかしながら、EVがある程度普及して、且つ、すべてのステークホルダーの事業性が成り立つようなエコシステムができあがるまでは、まだまだ時間がかかる可能性がある。そこで、VGIの価値をわかりやすく伝え、かつ、実質的な効果が出ることを定量的に示すことが必要であり、それによって導入事例が増え、その結果、充放電器本体の低コスト化や、設置コストの削減が進むと考えている。さらに、車両のコネクテッドの進歩により、大量のEVで広範

囲に効率的にエネルギーマネジメントが実現できるようになるという期待もある。日産では、そのような未来を目指し、さらなる技術開発とその社会的効果の実証の両軸で、今後も普及への努力を継続していく。

用語解説

*1 VPP: バーチャル・パワー・プラント(仮想発電所)。分散型のエネルギーリソースをIoTによって仮想的に束ね、電力の需給バランス調整を行う仕組み

参考文献

- (1) 日産自動車ESGデータブック2023
- (2) 日産ニュースリリース:<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/220112-01-j>
(参照日: 2024.10.25)
- (3) 日産ニュースリリース:<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/240202-01-j>
(参照日: 2024.10.25)
- (4) 日産ニュースリリース:<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/240306-01-j>
- (5) 日産ニュースリリース:<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/240202-02-j>
- (6) 鈴木健太、ほか: EV大量普及が電力系統へ与える影響について実走行データに基づくシミュレーションによる定量的分析、自動車技術会学術講演会予稿集(2019.5)
- (7) 経済産業省: 夏期最大電力使用日の需要構造推計(東京電力管内)<http://www.meti.go.jp/setsuden/20110513taisaku/16.pdf>(2011)
- (8) 宇田川佑介、ほか: 太陽光発電出力予測に基づく起動停止計画モデルの開発と実規模系統の解析、電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌),136(5),484-496.
- (9) 宇田川佑介、ほか: (2016). 太陽光発電出力予測に基づく起動停止計画モデルの開発と実規模系統の解析、電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌),136(5),484-496.
- (10) 木内寛允、ほか: (2024). Vehicle Grid Integration 導入によるCO₂削減効果とEV蓄電池劣化量の定量化、電気学会論文誌D(産業応用部門誌),144(7),523-529.
- (11) 経済産業省 資源エネルギー庁: 第6次エネルギー基本計画(2021)
- (12) 太陽光発電協会: JPEA PV OUTLOOK 2050(2020)

- (13) 日本風力発電協会: 再生可能エネルギーの適正な導入に向けた環境影響評価の在り方に関する検討会(2021)
- (14) 経済産業省 資源エネルギー庁: 「2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討(2020)
- (15) BloombergNEF: “Electric Vehicle Outlook2021”(2021)
- (16) 日産ニュースリリース:<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/231219-01-j>

著者



池添 圭吾

特集:持続可能なモビリティへの挑戦 ～カーボンニュートラルを実現するための先端技術～

7. 使用済バッテリーの再利用事業化

堀江 裕*

1. はじめに

持続可能な社会に向けて、2050年カーボンニュートラルを目指し、自動車の電動化が進められている。電気自動車が普及すると、多くのバッテリーが流通することになる。バッテリーには貴重な材料が多く使われており、それを資源として循環させることが、低炭素社会の実現、新規採掘資源の低減のために重要となる。日産は電気自動車が市場で広く普及していく中で、再利用可能なバッテリーを有効に活用することを見据え、初代「リーフ」の販売開始に先立ち、2010年9月にフォーアールエナジー株式会社を設立した。2018年には浪江事業所を立ち上げ、市場から戻ってきた「リーフ」のバッテリーの再利用、再製品化し、再販売するビジネスを本格的に開始している。

2. 4Rビジネスとは

図1に示す通り、フォーアールエナジー株式会社(4R-Energy Corporation)の4Rは、Reuse(再利用)、Refabricate(再製品化)、Resell(再販売)、Recycle(リサイクル)の4つのRを意味している。

市場から回収してきたバッテリーをパックの状態ですぐに再利用するReuse、モジュールに分解後、構成等を変更し、クライアントニーズに合わせて電圧や容量の違う新たなパッケージを創り出すRefabricate、再生可能エネルギーの貯蔵や災害時のバックアップ電源など様々な用途へ再販売するResell、そして二次利用後に再回収して材料リサイクルするRecycleを表している。フォーアールエナジー株式会社は、世界的に見てもビジネス化している数少ない会社であり、14年の経験を持つバッテリーリユース/リパース業界の先駆者である。

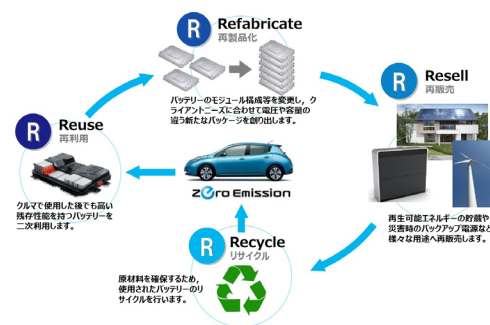


図1 4Rビジネスとは

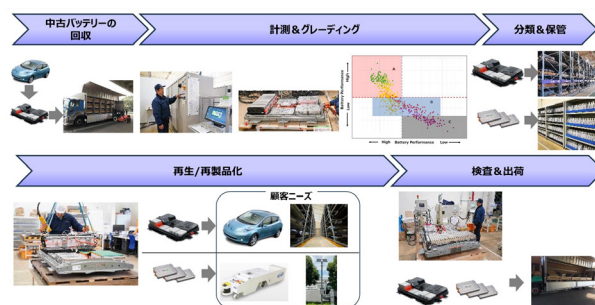


図2 再利用、再製品化プロセス

2.1 中古電池の再利用、再製品化プロセス

図2に、中古電池の再利用、再製品化プロセスを示す。全国の日産自動車販売店及び自動車廃車処理業者からバッテリーを回収し、清掃、受入検査を実施。

受入検査に合格したパックは全てのセルの性能を測定後、管理システムにデータを格納、劣化度合いでグレーディングしパックは専用ラック、モジュールは保管棚に一時保管する。お客様の注文に合わせて要求性能を満たすパックあるいはモジュールを選定する。

パック出荷の場合は分解、モジュールの入替、再組立を行い、バッテリーコントローラーのプログラムをリユース専用書き換える。最期にリレー制御やセンサー機能などパック機能を検査し出荷。モジュール出荷の場合は該当グレードのモジュールを保管棚あるいはパックを分解して集め、専用ケースに格納

* フォーアールエナジー株式会社

して出荷する。

3. バッテリーの再利用

3.1 バッテリーの再利用の価値

バッテリーの再利用の価値として、以下4点が挙げられる。

①電動車の価値向上

電池再利用により、電動車の価値＝残価向上。販売拡大に貢献。

②再生可能エネルギー普及

使用済み電池を再利用する為、競争力の高い価格で蓄電池を提供し、再生可能エネルギー普及に貢献。

③レアメタルの有効活用

電池には、リチウム、コバルト、ニッケル、グラファイトなどのレアメタルが使用されている。電池を再利用することにより、資源問題に貢献可能。

クルマとしての役割及びリユース、リパーパスも終わったバッテリーを廃棄するのではなく、そこから材料を取り出してリサイクルする(図3)。リユース、リパーパスは電池として使えるうちは最後まで使い切る。このリサイクルされた材料が製造工程に戻り、より安く、製造CO₂を抑えたバッテリーをつくり、新しい電気自動車が生み出される。



図3 バッテリー材料の循環利用

④電池製造時のCO₂削減

EV1 台の電池製造時のCO₂発生量は6.2t (3.23人が年間に排出するCO₂量に相当)。電池を再利用し、新たな電池製造を回避することで、電池製造時のCO₂発生を削減できる。

フォーアールエナジー株式会社の再生電池は新品電池に

対して93%のCO₂が削減できる。(図4) 再生電池は、電池製造時のCO₂ライフサイクルアセスメントの中で、資源採掘、原料生産、バッテリー生産に関わるCO₂を削減できるのが特徴である。

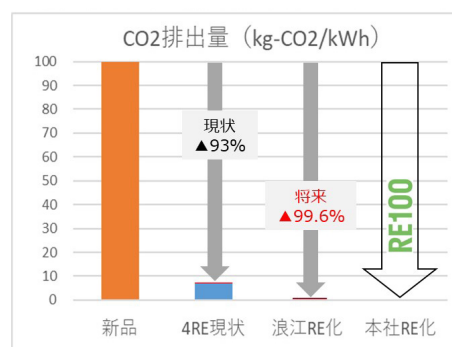


図4 バッテリー製造時のCO₂削減

3.2 バッテリーの再利用のキーポイント

キーポイントは2つ、「性能」と「安全」である。

まず「性能」については、再生電池に対するお客様の、「中古電池は劣化していて使えない」というイメージを覆すために回収時の劣化性能を正確に測定する技術と再販売後の劣化特性を推定する技術を開発した。測定した性能をもとに、適正な製品へ提供することで、たとえ一番性能の低いバッテリーであっても再利用が可能となる。

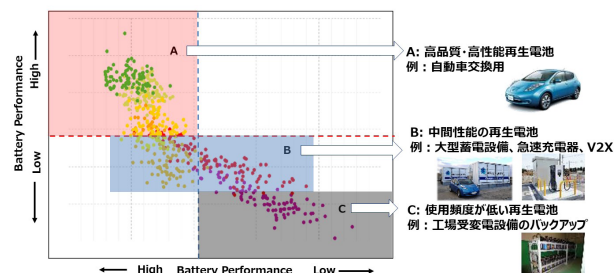


図5 バッテリーの劣化状態と適用先

二つ目の「安全」についても、お客様の「中古のリチウムイオン電池は危険」というイメージに対し、四重の安全確保思想を理解頂き、安心して利用頂いている。

四重の安全確保思想

- ①そもそも安全性・信頼性・耐久性の高い日産リーフの電池を使用。日産はEVを67万台以上販売している。
- ②UL1974認証を取得。4REの電池再利用プロセスが安全に十分配慮していることを、国際認証機関であるULがお墨付き。
- ③日産リーフに採用されている安全思想と制御ロジックを採

用し、リーフと同じ安全性・信頼性を確保

- ④再生電池パック自体は、万が一に備えた防爆設計または、条例キュービクルに格納。

3.3 バッテリーの再利用事例

カーボンニュートラル 2050、災害多発によるBCP需要、電力不足/電気代高騰対応で再エネ拡大 など、電池の需要は拡大してきている。昨今は電力調整市場向け大型蓄電池事業も拡大している。このため、図6の様に大型のエネルギー貯蔵システム (ESS) から太陽光外灯蓄電池まで大小さまざまな規模の蓄電池を取り揃えた。



図6 再利用電池の活用事例

回収時点で比較的劣化の少ないバッテリーは、「リーフ」の交換用バッテリーとして再生している。

大型ESSの事例としては、浪江事業所のバッテリーステーションがあげられる。建屋屋上に設置した太陽光パネルで発電し、バッテリーステーション内にある「リーフ」84台分の再生バッテリーに蓄電する。蓄電した電気を事業所内で使用することで再生エネルギー 100%の実証実験中だが、3日連続で雨曇りでなければ、RE100で運営が可能である。



図7 浪江事業所バッテリーステーション

また、JR東日本株式会社と共に踏切保安器用バックアップ電源を開発、2022年から導入を開始し500ヶ所以上で鉛蓄電池からの入替を完了した。今後も鉛蓄電池の交換時期を待って入れ替えていく。(図8)

株式会社JVCケンウッドとはポータブル電源を開発、販売を開始した。(図9) 能登半島地震の際は、日産から100台のポータブル電源、JVCケンウッドから100台分の太陽光パネルを現地に送り、避難所で利用頂いた。



図8 踏切保安器用バックアップ電源(鉛代替)



図9 ポータブルバッテリー from LEAF

日産の工場内を走るAGV（無人搬送車）の鉛バッテリーも順次、「リーフ」の再利用バッテリーへ切り替えが進んでいる。(図10)

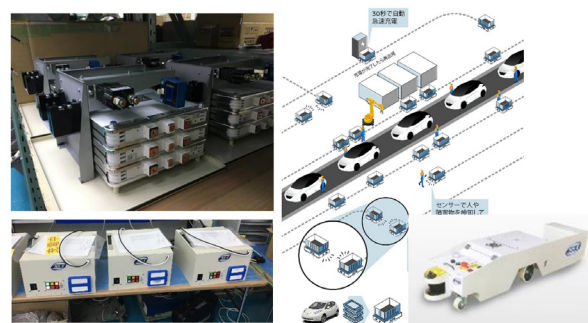


図10 工場内 無人搬送車

再生バッテリーを蓄電池とするオフグリッド街路灯も、日産グループを中心に130灯以上設置した。太陽光パネルで発電

後蓄電し、夜間はLEDを照らす。災害時の避難所や避難経路の照明として停電時でも使用可能である。電池BOXは取り外すことができ、USBポートから携帯電話の充電も可能である。(図11)



4. 課題と取り組み

バッテリーサーキュラーエコノミービジネスを持続可能なものにするためには、取り組むべき課題がある。例えばEVやバッテリーを日産圏に戻すための仕組みやサービスの構築である。フォーアールエナジー株式会社の調べによると、2023年には約2万台のEVが中古車として海外に輸出されており、国内に残る車両数が頭打ちとなっている。EVの中古車の海外流出を止める仕組みやサービスについて、検討中である。電池の性能や残存容量への不安から、国内で中古EVの利用が進まないことも海外流出の背景にある。販売後のバッテリーの健康状態を迅速に正しく推定できる技術の開発が求められており、日産が取り組んでいる。また、グローバルにEVの販売台数が増大していく中で、自動車解体事業における電池取り外しの高効率化と安全性向上の実現も求められる。簡便で短時間に車両からバッテリーを取り外せる設計、パックからモジュールを取り外せる設計も日産が取り組んでいる課題である。4Rの最後のR、リサイクルについては、効率的なリサイクル技術の開発と、リユース輸送効率・CO₂最適化を考慮した計画なリサイクルのための静脈物流の構築が必要である。また、再生電池の市場を拡大するには、お客様を惹きつける新たな価値の創造、例えばカーボンフットプリントなども検討すべき課題である。

これらの課題解決のために、日産および日産グループの協力を頂いているが、協業する他業界の仲間づくりも重要と考えており、官民共同でのバッテリーサーキュラーエコノミーに関する協議会も発足している。

5. おわりに

フォーアールエナジー株式会社はEVバッテリーのサーキュラーエコノミービジネス構築を通じて、グローバル日産の

- 1) 気候変動対策としての「低炭素社会の実現」
- 2) 資源依存対策としての「新規採掘資源の低減」「資源循環」へ貢献していく

参考文献

- (1) 日産技報No.90 特集1-1. 日産自動車の電動化革命：「たま」から「アリア」までの75年の歴史と未来への展望 寺地 淳
- (2) 日産技報No.90 特集1-3. 日産における電気自動車向けバッテリーの進化と今後の展望 大間 淳 他5名
- (3) Global EV Outlook 2019, Page152 Figure 4.1, International Energy Agency

著者



堀江 裕

特集:持続可能なモビリティへの挑戦 ～カーボンニュートラルを実現するための先端技術～

8. バッテリー材料の革新的なリサイクル技術

奥井 武彦* 光山 知宏* 大間 敦史*

1. はじめに:

リチウムイオン電池リサイクルの社会的背景

近年、電気自動車(以下、EV)およびEVに使用されるリチウムイオン電池(以下、LiB)の市場が急速に拡大しており、環境保護、規制対応、資源確保等の観点からLiBのリサイクルが注目されている。

環境保護の観点では、有機電解液や重金属など土壌や水を汚染する材料を多く含むLiBの適切な処理が必要であることに加え、それら材料に使われる資源の採掘・精錬に伴うCO₂排出量を低減することが課題にある。

規制面の観点では、2023年8月に発効し、2024年2月より順次適用が開始されている欧州(EU)のバッテリー規則において、バッテリーのリサイクル効率および金属原料の回収率に関する目標値(第71条)や、活物質中の金属原料におけるリサイクル材の含有率に関する要求値(第8条)、さらにはバッテリーモデルおよび製造工場ごとのカーボンフットプリント宣言義務(第7条)などが規定されている。⁽¹⁾

資源確保の観点では、LiBの急速な需要拡大による原材料の供給不足や、LiB原材料の生産能力が特定の国に集中していることに伴う供給リスクがある。

上記のような背景事情から、使用済みLiBや製造スクラップを処理してバッテリーグレードのLiB原材料を再生産する、クローズドループリサイクルの実現に向けた取組みが近年のトレンドとなっている。

本章では、LiBリサイクル技術、その中でも特に革新的な技術として研究開発を行っている正極ダイレクトリサイクル技術の概要と、その社会実装に向けた取組みを紹介する。

2. LiBリサイクル技術の概要

LiBのリサイクルにおいて対象となる材料は、リチウム(Li)を含む正極活物質や電解液をはじめ、銅(Cu)が使用される

バスバーや集電箔、スチールやアルミニウム(Al)が使用されるセル、モジュール、パックの外装材等がある。特に、当社が2017年より製造販売する第二世代「リーフ」をはじめ多くの車載用LiBに適用されている三元系(NMC)正極活物質は、Liに加えニッケル(Ni)、コバルト(Co)のレアメタルを多く含むことから、リサイクル対象材料の中心となっている(図1)。ここではNMC正極活物質のリサイクルに焦点をあて、そのリサイクル技術について述べる。図2に示すように、正極活物質のリサイクルには多様な工程フローが存在するが、近年実用化され始めた現行のリサイクル工程と、研究開発段階であるダイレクトリサイクル工程とに大別して概要を述べる。

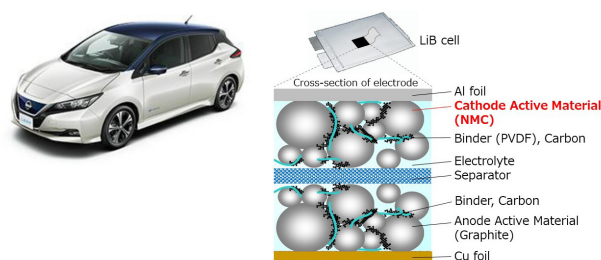


図1 第二世代「リーフ」とそのLiBにおける電極構造の概略

2.1 現行の正極リサイクル

現行のリサイクルは、前処理によって回収した正極活物質を含む粉体(ブラックマス)、あるいは乾式工程によって回収した合金や金属酸化物を、浸出、溶媒抽出、沈殿、晶析等の湿式工程を経て各金属(化合物)への分離と不純物の除去を行う手法が用いられている⁽²⁾。図2に代表的なリサイクル工程の例をフローチャートで示す。適用される技術は多様であり、どの工程フローを辿るかはリサイクル会社により異なるが、概ね以下に述べる工程を適用するケースが多い。

前処理においては、放電後のLiBをモジュールまたはセルにまで解体し、焙焼したLiBを破碎・分離・分級してブラックマ

*EVシステム研究所

スを製造する。焙焼工程では電解液を気化して破碎時の発火を抑制するとともに、樹脂材料を熱分解して分離を容易にする。焙焼工程を経ずに不活性環境下でLiBを破碎するケースもある。

乾式工程においては、LiBをモジュールやセルのまま炉に投入し、1000℃超の高温処理により金属以外の材料を燃焼させて金属材料のみを回収する。LiBに含まれる金属のうち、還元性の高いCu、Ni、Coが合金として回収可能であり、Liやその他の金属は混合酸化物（スラグ）となる。回収された合金は不純物が少ないため後工程の湿式工程を簡易に実施できる利点がある。そのため、ブラックマスを乾式工程で処理した後に湿式工程を行なうケースもある。

湿式工程においては、前処理後のブラックマス中の金属元素、あるいは乾式工程後の合金を、酸またはアルカリを用いて水溶液中に浸出する工程、および浸出液に有機溶媒と抽出剤を添加し、温度やpHを調整することにより各金属イオンを有機溶媒相と水相に分離する工程（溶媒抽出）を中心とした技術で構成される。分離された各金属イオンは、更なる不純物除去工程を経て硫酸ニッケル（NiSO₄）、硫酸コバルト（CoSO₄）等に合成され、NMC正極活物質の原料として使用される。近年では、各金属イオンへ分離することなく同時抽出し、高純度Ni/Co/Mn混合水溶液に精製した後にNMC正極活物質の原料とするリサイクル会社もある。

現行のリサイクルにおける課題は、多工程・長期間に及ぶ処理に伴うコストの高さ、CO₂フットプリントの高さがある。前処理や乾式処理においては、LiB材料の燃焼に伴うCO₂排出が多いことに加え、電解液やバインダーの熱分解に伴い発生するフッ化水素ガスの無害化処理を必要とする。湿式工程においては、浸出やpH調整に使用する酸・アルカリ化学品の消費量や廃水処理量が多い⁽³⁾。また、湿式工程によりバッテリーグレードのLiB原料を生産するには多段階で長時間の溶媒抽出工程を要し、大規模な設備投資が必要となる。

現行のリサイクル技術は発展途上の段階であり、新たな抽出剤の開発による工程改善や、乾式処理後のLi含有スラグからのLi回収技術によるリサイクル率向上など、近年さまざまな技術進歩が見られている⁽³⁾。それでもなお、現状は資源採掘からなる精錬工程に比べてコストやCO₂フットプリントの面で明らかな優位性があるとは言えず、リサイクルの収益性もLi、Ni、Coの資源価格に大きく依存した状態である。

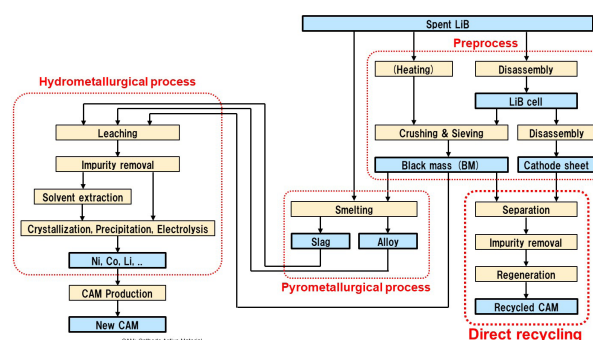


図2 LiB正極活物質のリサイクル工程フローの例

2.2 正極ダイレクトリサイクル

ダイレクトリサイクルは、正極活物質の構造を維持したまま分離・回収し、不純物を除去した後に再生処理を施して再びLiBの正極活物質として使用するリサイクル手法である。現行のリサイクルとの大きな差異の一つは、リサイクルされた原料から正極活物質を製造する工程が省略される点である。正極活物質の製造は図3に示すように、化学合成と熱処理を伴う多段階の工程を経る。このような化学品やエネルギーの消費量が多い工程を省略できることから、ダイレクトリサイクルが低コスト・低CO₂フットプリントのクローズドループリサイクルを実現可能な技術として当社では注目している。

現在、さまざまな研究機関やLiBメーカー、リサイクル会社などでダイレクトリサイクルの研究開発が行われている⁽³⁾。各工程における手法は多種多様に存在するが、ここでは当社で取り組んでいるダイレクトリサイクル工程の例を挙げ、図4に沿って解説する。大まかには①LiBから正極板を分離する前処理工程、②正極板から正極活物質を分離する工程、③正極活物質から残留不純物を除去する工程、④正極活物質を再生する工程、の4ステップからなる。

2.2.1 前処理工程

前処理においては、活物質の熱分解、あるいは前述したフッ化水素の発生により活物質の劣化が引き起こされないよう、一般的には熱処理以外の手段が用いられる。LiBセルを解体して正極板を取出す手法、または水中や不活性環境下でLiBモジュールまたはセルを破碎して正極板を分離・回収する手法を取り得るが、工業的には後者がより適している。破碎後の分離手段としては比重選別、磁力選別、風力選別等の物理選別手段がコスト面で優れている。

2.2.2 正極活物質の分離工程

正極活物質をAl集電箔から分離する工程においては、バインダーとして使われているPVDF (Polyvinylidene difluoride) をNMP (N-methyl-2-pyrrolidone) 等の有機溶

媒に溶かして剥離する手法がある。正極板をNMPに浸漬し、加熱攪拌によって剥離した正極粉体を固液分離して回収する。使用済みNMPは蒸留等の手段によって精製し、再利用することが可能である。NMPは現在のLiB製造において工業的に利用されており、既に確立された回収・蒸留精製・再利用のサプライチェーンを活用できる。

2.2.3 残留不純物の除去工程

上記の前処理、分離工程を経て回収された正極活物質には、処理設備やLiBセル部材に由来する不純物が混入している。負極集電箔由来のCuや負極活物質のグラファイトカーボン、正極の剥離工程で残留したAl集電箔の破片やPVDF、正極合材中の導電助剤（カーボン）が主な不純物である。いずれも破砕片を篩分けした後に残る微小片・粒子状のものであり、これらが残留したまま後工程を施すと正極活物質やLiBセルに不具合の懸念が生じる（表1）。

例えば、PVDFが残留した正極活物質において後工程の熱処理を行うと、PVDFの熱分解により生成したフッ化水素（HF）が正極活物質中のLiや酸素（O）と反応し、活物質表面へのフッ化リチウム（LiF）不純物の形成、あるいは活物質の結晶構造変化が生じる⁽⁴⁾。また、Cu等の金属不純物が残留した正極活物質を用いてLiBセルを製造すると、内部短絡に至る重大な不具合の懸念が生じる。従って、残留不純物を除去して高純度の正極活物質を得ることが極めて重要である。

各不純物成分の除去には以下に述べる各手段を適用可能である。カーボン類の分離には浮遊選別法を利用できる⁽⁵⁾。これは、界面活性剤や水中攪拌・バブリングにより疎水性粒子を泡で捕捉して浮遊させ、水底に沈む親水性粒子と分離する手法で、選鉱法として鉱業で利用されている技術である。カーボンは疎水性粒子、正極活物質は親水性粒子に相当する。

Cu、Al等金属不純物の除去に対しては、専らアルカリ水溶液を使用して溶解除去する。酸は正極活物質を溶解するためダイレクトリサイクル工程には適さない。Cuの溶解にはアンモニアが適しており、Alの溶解には水酸化リチウム（LiOH）をはじめさまざまな強アルカリ水溶液を利用可能である。

PVDFの除去には水熱処理を適用可能である。回収した正極活物質をアルカリ水溶液に浸漬し、オートクレープで加圧加熱することにより、PVDFが分解してフッ化物イオン等の水溶性物質に変化する。特に、高濃度LiOH水溶液を用いることにより、劣化してLi不足となっている正極活物質にLiを再補填することも同時に達成できる。

Cu、Al、PVDF不純物の除去においてはアルカリ化学品を使用するが、これら不純物の残留量は正極活物質に対して通常1wt.%未満であるため、反応に伴う化学品の消費量は僅かである。従って、最適な工程パラメータの選定や、使用済み

アルカリ水溶液の精製再利用工程を確立することにより、工業的には低コストで環境負荷の低い工程を構築可能である。

2.2.4 正極活物質の再生工程

残留不純物を十分に除去した後、正極活物質を再生するための熱処理を行う。LiBの使用履歴により劣化状態は異なるが、使用済みLiBの正極活物質にはLi不足に加え、表面の結晶構造変化やクラックが生じている場合がある⁽⁴⁾。正極活物質の製造工程における熱処理と類似した条件で行うことにより、このような劣化を相当程度修復可能である。

当社では、「リーフ」の使用済みLiBを用いて、上記のようなダイレクトリサイクル工程を経た再生NMC正極活物質において、未使用のNMC正極活物質（図5“Pristine”）とほぼ同等の充放電特性を示すことを、一連のラボスケールでの検証により確認した（図5）。今後、さまざまな劣化状態の正極活物質においても再生可能な工程手法・条件を確立すべく、技術開発を進めている。

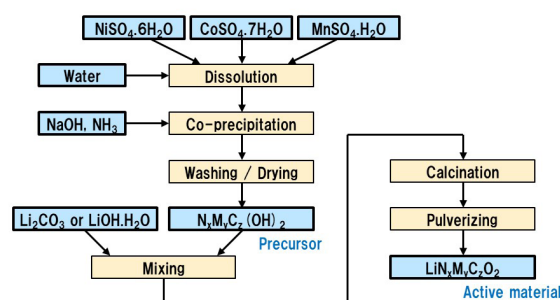


図3 NMC正極活物質の製造工程の例

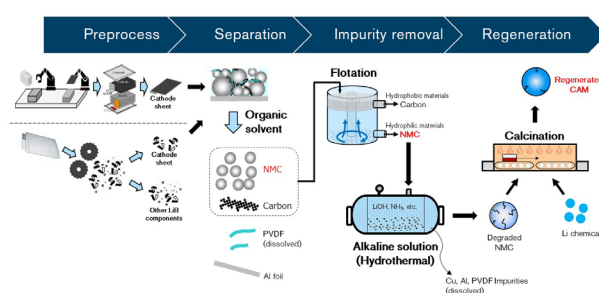


図4 正極ダイレクトリサイクル工程の例

表1 正極ダイレクトリサイクルにおける主な不純物とその影響

Impurity	Source of impurity	Influences on NMC and LiB
PVDF	Cathode binder	Changing crystal structure of NMC Forming surface impurity on NMC $(\text{CH}_2\text{CF}_2)_n + 2\text{nO}_2 \rightarrow 2\text{nHF} + 2\text{nCO}_2$ $2\text{LiMO}_2 + 2\text{HF} \rightarrow 2\text{LiMO}_2\text{F} + \text{H}_2\text{O}$ $4\text{LiMO}_2 + 4\text{HF} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{LiF} + 4\text{LiF} + 2\text{H}_2\text{O}$ (M: $\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}$)
Carbon (Graphite)	Cathode conductive additive Anode active material	Changing crystal structure of NMC (by reducing transition metals during calcination)
Fe (Steel)	LiB cell casing Process equipment	Changing crystal structure of NMC (due to incorporation into NMC)
Cu	Anode current collector	Internal short-circuit in LiB cell
Al	Cathode current collector	

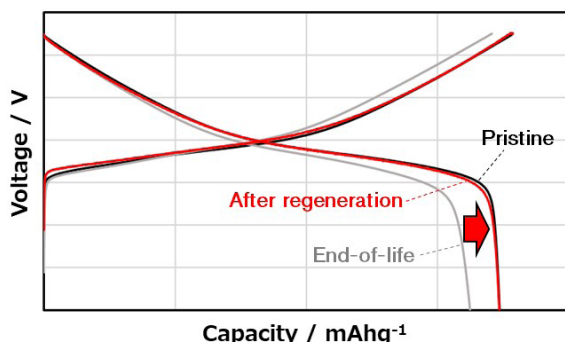


図5 リサイクル正極活物質の充放電特性

3. 正極ダイレクトリサイクルの価値と課題

当社のダイレクトリサイクル工程（図4）に基づいて、再生NMC正極活物質の原材料採取～製造段階におけるCO₂フットプリントを試算した結果、図6に示す通り、現行のリサイクル工程で回収した金属原料を用いた正極活物質のCO₂フットプリント（図6 “Conventional recycling”）に対して75%の低減効果が得られる見込みとなった。なお、前述の通り、現行リサイクルは多様な手段を取り得るため、現行リサイクルにおけるCO₂フットプリントの値も一意には決まらない。図6は試算の一例であることに留意する必要がある。それでもやはり、資源採掘からなる精錬工程（図6 “Pristine”）に対して、現行リサイクルにはCO₂フットプリントの面で優位性に乏しいこと、およびダイレクトリサイクルは正極活物質の製造工程が不要であることから、当社のダイレクトリサイクル技術は資源採掘からなる精錬工程および現行リサイクルに対して、CO₂フットプリントの面で明らかな優位性を持っている。

LiBの原材料採取～製造段階におけるCO₂フットプリントに対するNMC正極活物質の占める割合は大きく、文献により異なるが概ね30%～40%とされている⁽⁶⁾。一例として、リサイクル正極活物質を20%含むLiBのCO₂フットプリントを試算すると、当社のダイレクトリサイクル技術（現行リサイクル比75%減とする）を適用することにより、正極活物質として15%程度、LiBとして5～6%程度のCO₂フットプリント低減効果が得られ

る見込みである。

また、コスト面に関しても、使用済みLiBの調達コストや設備投資の精査を今後必要とするものの、資源採掘からなる正極活物質に対して1/2程度のコストでリサイクル正極活物質を製造できる可能性がある。

上述した正極ダイレクトリサイクルの価値を達成するためには未だ課題も多くあり、技術課題については概ね以下（1）～（4）に集約される。

- （1）リサイクル正極活物質の充放電容量に限らず、入出力特性、耐久性、安全性等の諸特性に対しても、未使用の正極活物質と同等レベルを確保すること。
- （2）使用済みLiBのさまざまな劣化状態に対する最適なりサイクル工程条件を確立すること。
- （3）工業スケールにおける各工程手段を確立すること。
- （4）リサイクル正極活物質を適用したLiBの品質確保と、それを実現するための製造方法を確立すること。

今後、ラボスケールにおいて（1）（2）に対する技術の作り込みと、その後のスケールアップにおいて（3）（4）に対する工程作りに取り組んで行く。

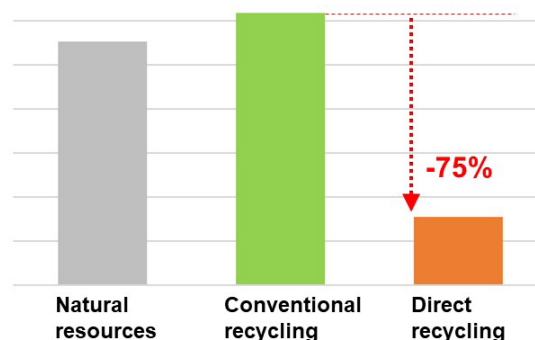


図6 NMC正極活物質の原材料採取～製造段階

4. 正極ダイレクトリサイクルの社会実装に向けた取り組み

当社では、上述したリサイクル正極活物質を車載用LiBに適用する資源循環の構築を目指している。その実現に向けて、図7に示すような資源循環の全体像をデザインし、一連のサプライチェーン構築に取り組んでいる。

使用済みLiBの二次利用については、フォーアールエナジー株式会社において事業が行われている。そこでは使用済みLiBの劣化状態を把握し、その劣化状態に応じてリユース（車載LiBへの再利用）、リパーパス（他用途への再利用）、リサイクルのいずれかに分類し、各用途で活用されている。

図7に示す資源循環システムの構想では、上記に加えて正極の劣化状態を非破壊で推定し、その劣化状態に応じて正極ダイレクトリサイクル、現行リサイクル（金属原料の回収）のい

ずれかに分類する。正極の劣化状態推定では、計測手段に加えてLiBの使用履歴に基づく状態推定手段も用いる。

ダイレクトリサイクル工程へ分類されたLiBは、正極活物質の分離・再生処理を経てリサイクル正極活物質が製造され、新たなLiB製造に用いられる。この一連の工程においてはリサイクル技術に加えて、リサイクル正極活物質およびそれを用いたLiBの製造技術と品質保証が必要となる。従って、ダイレクトリサイクル技術を資源循環システムに組み込むために、LiBリサイクル会社、正極活物質メーカー、およびLiBメーカーとのパートナーシップが必要である。また、正極のダイレクトリサイクル技術には現行のLiBリサイクル技術とは異なる工程も多いことから、従来のリサイクル会社に限定せず他業界とのパートナーシップの可能性も考えられる。今後、資源循環システムの各工程に必要な技術を持ったパートナーを募り、協力して取組みを進めて行きたい。

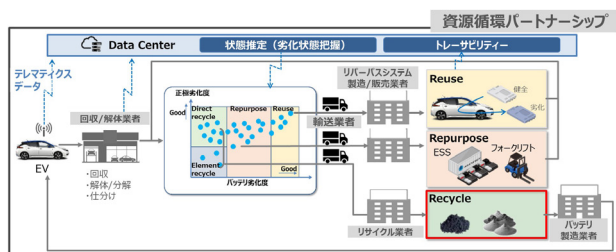


図7 LiBリサイクル技術を活用した資源循環システム

5. おわりに

LiBのリサイクルは車載用LiB市場の急拡大に伴って近年注目され始めた事業であり、自動車メーカーにおいてはこれまでに経験の無い技術も多い。当社のLiBリサイクル技術を事業へと結び付けるには、リサイクル会社とのパートナーシップが必要不可欠である。

本章で述べた革新的なりサイクル技術の社会実装を通じて、持続可能なモビリティ社会の実現に向けた一助となるよう、引き続き取組んで行きたい。

謝辞

本章における研究開発成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の助成事業（JPNP21014）の結果得られたものです。

参考文献

- (1) European Union. Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste

batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/1542/2024-07-18>

- (2) Lin, X.; Wang, X.; Liu, G.; Zhang, G. Recycling of Power Lithium-Ion Batteries: Technology, Equipment, and Policies; John Wiley & Sons, 2022.
- (3) Chen, M.; Ma, X.; Chen, B.; Arsenault, R.; Karlson, P.; Simon, N.; Wang, Y. Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries. Joule 2019, 3, 2622–2646.
- (4) Okui, T. Lithium Batteries – Lithium Secondary Batteries – Li-ion Battery | Recycling. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition) 2025, 4, 472-483.
- (5) Shin, H.; Zhan, R.; Dhindsa, K. S.; Pan, L.; Han, T. Electrochemical Performance of Recycled Cathode Active Materials Using Froth Flotation-Based Separation Process. Journal of Electrochemical Society 2020, 167, 020504.
- (6) Dai, Q.; Kelly, J. C.; Gaines, L.; Wang, M. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. Batteries 2019, 5 (2), 48.

著者



奥井 武彦



光山 知宏



大間 敦史