

ケーススタディ：ドイツ・シュパイヤーにおけるスマートコミュニティ実証事業

1. イントロダクション

2050年までに国内電力供給の80%以上を再生可能エネルギーに代替するエネルギー転換政策「Energiewende」を掲げる環境先進国ドイツで、日本企業の技術を活用したスマートコミュニティの実証事業が行われた。2015年から2017年にかけて、ライン川を臨む古都シュパイヤー市で実施されたこの実証事業は、NEDOの「スマートコミュニティ海外実証プロジェクト」のひとつとして進められ、シュパイヤー市、シュパイヤー市のエネルギー公社Stadtwerke Speyer（以下SWS）社及びシュパイヤー市の住宅公社であるGEWO社の協力の下、NTTドコモ、NTTファシリティーズ、日立化成、日立情報通信エンジニアリングからなるコンソーシアムが主体となって行われた。日本側が開発・構築したのは、蓄電池、ヒートポンプ（HP）、そして電力消費を制御するIGTといった技術を集約し、屋上太陽光（PV）パネルで発電された電力の自家消費率を最大化するシステムであり、これによりドイツの住宅における更なる再生可能エネルギー導入を助け、エネルギー公社、住宅公社に対して新たなビジネスモデルの可能性を提示することが狙いである。

本実証の実施にあたり、NEDO、シュパイヤー市、そしてSWSの3者が基本協定書（Memorandum Of Understanding MOU）を締結し、タイプAに関してはNTTドコモ及びNTTファシリティーズがSWS及びGEWOと、タイプBに関しては日立化成及び日立情報通信エンジニアリングがSWS及びGEWOとそれぞれ協定付属書（Implementation Document ID）を締結した（図1）。

本ケーススタディでは、本実証の取り組みを通して得られたスマートコミュニティ関連技術に対する示唆や実証の社会的意義について取りまとめる。

2. 取り組みの背景

ドイツでは、2000年4月の再生可能エネルギー法（EEG）施行に伴い、再生可能エネルギーへの固定価格買取（FIT）制度が本格化したことにより、PV発電システムが急速に普及した。当初、住宅向けのPV発電は主に売電されていたが、PV発電のコスト低減に伴い、2012年にはFIT価格が国内の電気料金を下回るようになった。このため、自宅で発電した電力を系統へ全量売電するのではなく、自家消費率を上げることにより電気料金を節約する方向に住民の関心がシフトしてきている。またシュタットベルケにとっても、顧客に対して「FIT制度を利用した売電により利益が得られる」という点をPV発電施設の販売・レンタルのアピールポイントとできなくなったことや、PV発電からの逆潮流増加に伴い系統設備の維持費が増大していることなどの懸念が顕在化しつつある。このように、需要家にとっても、電気事業者にとっても、PV発電電力の自家消費率の最大化は重要な課題である。

日本には、優れた蓄電池技術、給湯ヒートポンプ技術そして情報通信技術が蓄積されており、これらの技術を組み合わせることで、ドイツにおける電力・熱の自家発電・自家消費のニーズに応えられるのではないかと考えられた。本実証はまさにこういったアイデアを形にするものであった。分散エネルギー資源の導入が進んでいる故にその課題も先取りしているドイツにおいて、日本の先端技術の応用可能性を検証し、そのビジネスモデルを検討することに成功した本実証は、ドイツのみならず日本のエネルギー政策の今後や、再生可能エネルギー関連事業の発展を考える上で多くの示唆を与えるものである。

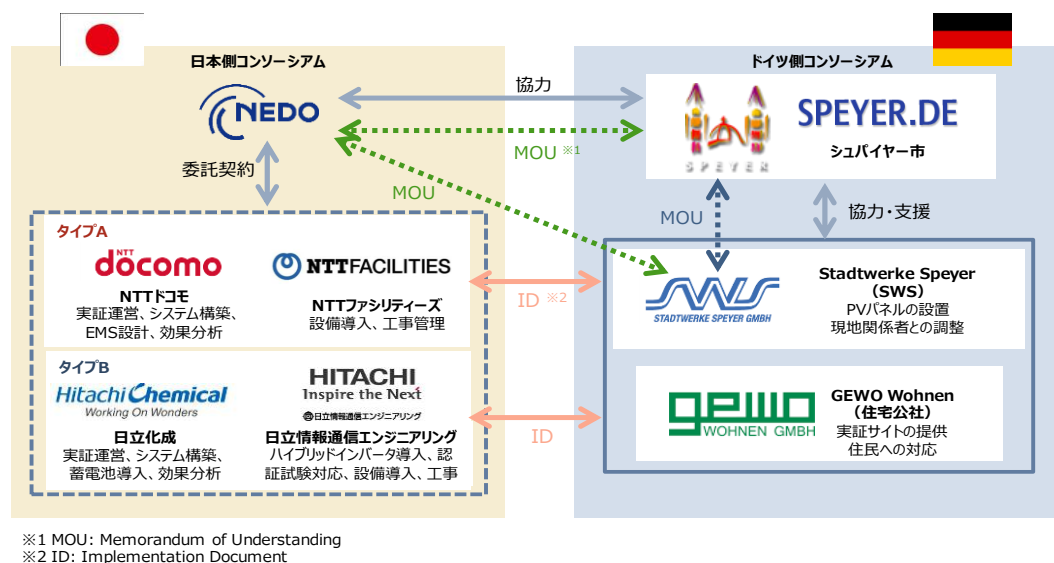


図1 実証体制

3. シュパイヤー市で実現された本実証の概要

以下では、実証の舞台となったシュパイヤー市の取り組みと、本実証の概要についてまとめる。

3.1. シュパイヤー市の取り組み

実証の舞台シュパイヤー市は、ドイツ南西部ライン川沿いに位置する人口約5万人の街である。比較的小規模な都市でありながらもその歴史は深く、10世紀頃には交易と金融の都市として発展し、神聖ローマ帝国の要所として栄えた。7人もの歴代ローマ皇帝の永眠の地とされるシュパイヤー大聖堂は、ドイツで2番目に登録された世界遺産としても有名である。そんなシュパイヤー市は、再生可能エネルギー導入への積極的な取り組みにおいても注目されている。同市は自らをエネルギー転換政策の先導者と位置づけ、2030年までに電力消費、2040年までに熱消費を100%再生可能エネルギーで賄うことを目標としている。

ドイツの電力小売・配電市場においては市や自治体が運営する「シュタットベルケ」という形態の地域公社が大きなプレゼンスを示す。2019年現在、ドイツには1,400超のシュタットベルケが存在し、そのうちの多くが、各地域のエネルギー市場における主な配電・小売事業者として機能している。今回の実証を共同実施者したSWS社も、シュパイヤー市が営むシュタットベルケであり、シュパイヤー市内の電力市場の90%以上、ガス市場の80%以上を同社が占める。また、住宅公社のGEWO社は市内に2,700戸の集合住宅、400戸の戸建住宅を有しており、シュパイヤー市人口の16%にあたる約8,000人に住居を供給している。このような公益事業者間の連携は同市で活発に行われており、2000年には、シュパイヤー市、SWS社及びGEWO社が共同でTDG (Technical Services Company) という合併企業を設立し、住宅や建物の電力及び熱供給を再生可能エネルギーにより行うサービスを提供し

ており、GEWO社が管轄する住宅群の屋上にSWS社がPVパネルを設置しての電力供給事業や、共同で建設した太陽熱による給湯設備、木質バイオマス熱電併給(CHP)設備による近隣住宅・施設への熱・電力供給事業を展開している。

3.2. 取り組みの概要

再生可能エネルギー100%を目指すシュパイヤー市にとっての最大の課題は「自家消費率の向上」であった。それを実現するために本実証で構築されたのは、HEMS (Home Energy Management System)、蓄電池、ヒートポンプ等から構成される電力・熱供給システムである。天候、需要、電力価格等様々な要素を加味し、蓄電池とヒートポンプを最適制御することで、自家消費率向上を試みる。本実証ではドイツ人の生活形態として次の2タイプを想定し、それぞれ主に以下のテーマに基づき実証が行われた(図2)。

タイプA：戸建てを想定した世帯単位での自家消費モデル

- ① 実証システムによる自家消費率改善効果の検証
- ② 電力市場価格連動を想定した蓄電池制御
- ③ ビジネスモデルの検討

タイプB：集合住宅を想定した棟単位での自家消費モデル

- ① 実証システムによる自家消費率改善効果の検証
- ② 電力市場価格連動を想定した蓄電池制御を含む2つの制御モードによる効果の比較分析
- ③ ハイブリッドインバータによるコスト削減効果
- ④ ビジネスモデルの検討

タイプAの実証はNTTドコモ及びNTTファシリティーズが実施し、タイプBについては日立化成及び日立情報通信エンジニアリングが担当した。また、実施に当たっては、ドイツ側が実証サイトの選定および住民への対応、PVパネルの設置等を担当し、日本

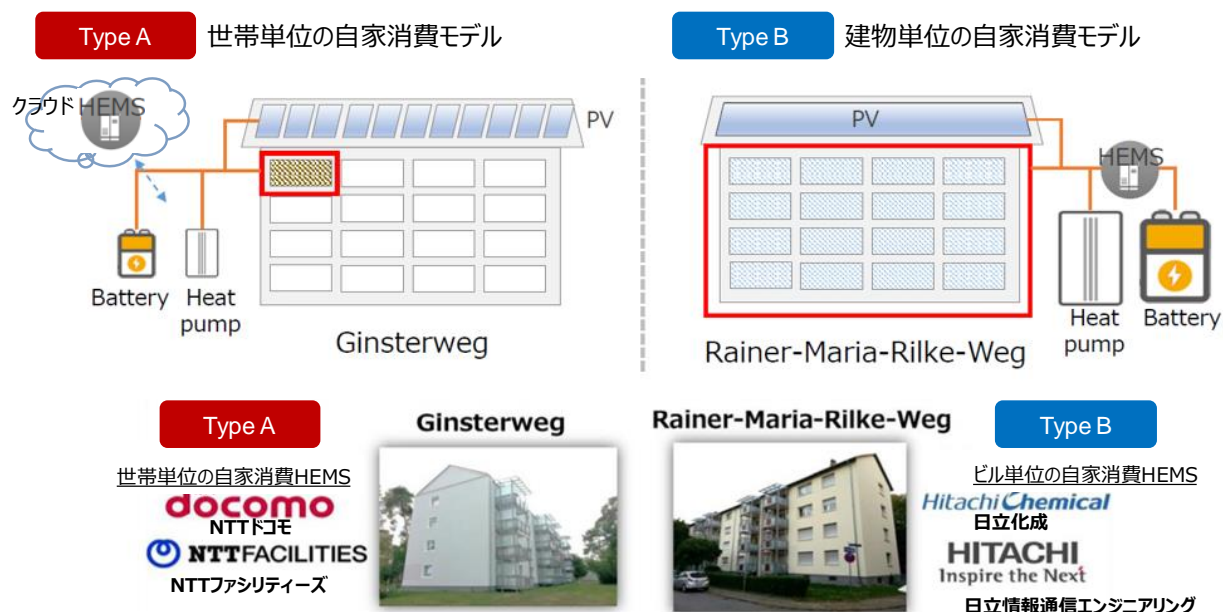


図2 本実証の取り組み概要

側は、システムの運用、システム開発、設備の導入、効果分析を担当した。

4. 実証システムの構築

以下では、2つのタイプの実証のために構築されたそれぞれのシステムについて説明する。

4.1. タイプA（世帯単位モデル）のシステムイメージ

タイプAでは、戸建住宅における自家消費モデルの検証が想定されていたが、実証サイトが集合住宅であったため、居住する16戸をそれぞれ戸建住宅に見立てた実証システムが構築された（図2左）。また、各世帯に設置できない蓄電池やヒートポンプなどの機器は、近隣にエネルギーセンターと呼ばれるコンテナを設置し、その内部に配置された。

システムの中核をなす HEMS については、複数世帯の管理制御計画策定を行うクラウド HEMS（日本からインターネット上で遠隔制御）、各世帯の機器制御に対応するローカル HEMS（各世帯に設置）の2つを構築（図3）。このような2つの HEMS を別々に設置するメリットとしては、①世帯内に設置する HEMS 機器のサイズを小さくすることで、設置条件の緩和や、機器の価格低減にも繋がること、また、②予測や制御計画を作成するなど高性能なスペックが必要となる機能をクラウド HEMS に集約することで、将来的なユーザ数増加や機能追加時にも容易に対応できること等が挙げられる。

クラウド HEMS は、ローカル HEMS から収集した各世帯の機器情報及び気象情報サービスによる気象情報を組み合わせ、以下の予測を実施する。

- ・ PV 発電量（1時間単位）
- ・ 宅内電力消費量（1時間単位）
- ・ 宅内熱消費量（1時間単位）

これに基づき、蓄電池及びヒートポンプの制御計画を1時間単位で策定する。ヒートポンプは、宅内熱消費予測に基づき貯湯タンクから熱供給を行い、ヒートポンプからの熱供給が不足する場合にはバックアップとしてボイラーを利用するよう計画される。

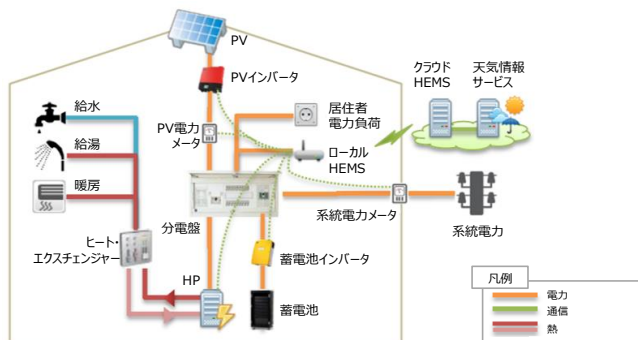


図3 戸建を想定した世帯単位の地産地消モデルイメージ (タイプA)

また蓄電池は、1日の料金メリット（売電利益-買電損益）を最大化するため、PV 発電予測、電力消費予測などを基に毎時の蓄電量、放電量の推奨値が算出され、毎日 24 時間分の充電・放電制御指示を受ける。

ローカル HEMS はクラウド HEMS からの制御計画を受け取り、蓄電池やヒートポンプの制御計画を伝達する。このように、日単位による予測処理、制御計画処理を実行していくことで、PV 発電電力の「自家消費」の最大化が図られた。

4.2. タイプB（棟単位での自家消費モデル）

タイプBでは、集合住宅向けのシステムを想定し、1棟単位でのシステム制御を実施する。増設可能なコンセプトをもとに、蓄電池、ヒートポンプ、インバータ等を設置し、HEMS による棟全体への電力供給制御システムが導入された（図4）。実証開始時に居住者があったことから、世帯内の工事を伴うシャワー等の給湯等への熱利用はできず、ヒートポンプからは部屋暖房用の熱のみ供給することとなった。

HEMS については、計画を行う LTC (Long term control) と実際に機器制御を行う STC (Short term control) に分割し、LTC は SWS 社のサーバ内に組み込まれ、STC はエネルギーセンター内に設置された。LTC は各世帯の機器情報やセンサ情報などを集約し、天気情報サービスによる気象情報を組み合わせることで、集合住宅における予測処理や制御計画作成処理を行う。STC は LTC からの制御計画を受け取り、実際に蓄電池やヒートポンプの制御を行う。また、それらの動作状況を日本で確認できるよう、欧州連合 (EU) の個人情報保護規定に合致した遠隔監視機能も導入された。

タイプBでは、HEMS システムの制御モードを「自家消費率最大化制御」モードと「エネルギーコスト最小化制御」モードという2つの運転制御モードの中から選択できるように設計された。「自家消費率最大化制御」は、PV 発電電力の買電（逆潮流）を最小限にすることを目的とし、電力の余剰・不足に応じて蓄電池とヒートポンプを最適に制御する。一方「エネルギーコスト最小化制御モード」では、電力および熱エネルギーコストの最小化を目的とし、電力市場価格が電力需給状況に応じて変動するという状況を想定して、予測した電力・熱量の過不足量から、コストが最小となるように蓄電池の充放電やヒートポンプの稼働パターンを決定

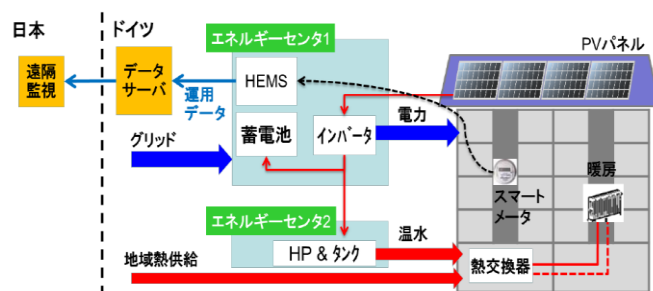


図4 集合住宅を想定した地産地消モデルイメージ (タイプB)

する。

5. システム導入・施工

タイプAの実証では、NTTドコモが本実証用に開発したHEMSの他、Sony製蓄電池（Fortelion）、ダイキン工業製ヒートポンプ（Altherma）、SMA製PVインバータ及び蓄電池インバータが導入された。タイプBの実証では、日立化成製蓄電池、日立情報通信エンジニアリング製ハイブリッドインバータ、ダイキン工業製ヒートポンプが導入された。エネルギーセンターのコンテナ製造業務はクロアチアのKoncar社、ソフトウェア製造業務はスロベニアのRobotina社に外注する形で進められた。

エネルギーセンターに設置される蓄電池の火災リスク低減のため、現地の所轄消防局及びSWS社と繰り返し協議が行われた。ドイツではリチウムイオン蓄電池（LIB）に関する消防上の規則が明確に定められていないが、消防署からは、LIBから火災が発生した際に自動的に消火する消火設備の導入が求められるなどした。そこで、NTTファシリティーズ、日立化成が中心となり、消防設備を専門とする外部コンサルタントに防火コンセプト策定の協力を得た上で消防設備の仕様を決定する等の努力が行われた（図5）。



図5 消防対策一例



図6 遮音対策一例

（エネルギーセンターには室外機の遮音設備やサイレンサを設置）

実証設備は住宅地に設置するため、騒音に対する環境基準が厳しく適用され、夜間における集合住宅の外壁面での騒音を45[dB]以下にすることが要求された。そこでヒートポンプの室外機にフードを設置したり、吸気口付近に騒音吸収素材を取付けたりする等の対策が施された（図6）。

さらに、集合住宅の共用部分およびエネルギーセンター内には電力量計、温湿度計、熱量計等のスマートメーター、通信用機器等が設置され、集合住宅の各戸内には、温湿度センサ及び熱量計、通信用機器が設置された。住居スペースへの機器の設置には住民立会が必須となるため、集合住宅エントランスに掲示と各世帯への個別レターで事前周知を行った上で、個別に電話連絡を行う事で作業日程の調整も行われた（図7）。

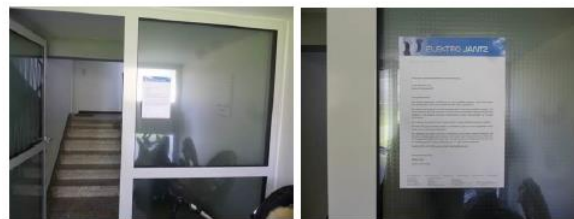


図7 集合住宅エントランスでの作業予定掲示

6. データの取得と実証効果の評価

本実証を通じて、1分単位の電力消費量、熱消費量が21ヶ月に渡り取得された。取得した実績データや各種予測データを分析することで、PV電力の自家消費率、電力系統への逆潮流量、ガスボイラーの使用ガス量、熱の使用量について、実証で得られた実績と実証システムが無い場合の想定値を比較し、実証システムの導入による効果の評価が行われた。以下では、タイプA、タイプBそれぞれのデータ分析の結果についてまとめる。

6.1. タイプAの実証結果

タイプAでは、主に以下の3つの観点から実証の評価が行われた。

- ・ 実証システムによる自家消費率改善効果の検証
- ・ 電力市場価格連動を想定した蓄電池制御
- ・ ビジネスモデルの検討

① 実証システムによる自家消費率改善効果の検証

PV発電を単独で使用した場合と蓄電池とヒートポンプを加えた実証システムを用いた場合の自家消費率の年平均（条件を変更しないグループの世帯）を比較した結果、PV単独で使用した場合は自家消費率が平均25.6%であるのに対し、実証システムを運用した世帯の自家消費率は63.8%となり、約40ポイント自家消費率を向上させたという結果が得られた。実証の対象世帯のうち自家消費率が最も高かった世帯では77.8%、最も低かった世帯では53.4%であり、自家消費率の改善効果は28.9~44.7ポイントとなった（図8）。

季節ごとに自家消費率の月平均を比較すると、発電量の少ない冬期（11月~2月）は、PV単独で使用した場合は40%前後から60%前後であるのに対し、実証システムを運用した場合は、ほぼ100%であった。一方、発電量が多い夏期（7月~9月）は、PV単独の場合は20%程度、システムを運用しても50%から80%程度であった。時間帯別で比較すると、PV発電ピークの数時間前は自家消費率の改善効果が高いが、それ以降は蓄電池の満充電状態により改善効果は限定的であることが判明した。

また、世帯別に電力消費量の大小世帯での自家消費率の年平均を比較すると、年間電力消費量が2347kWh程度と比較的多い世帯の方が、少ない世帯（925kWh程度）と比較してより自家消費率改

善効果が大きく、自家消費率年間平均は、各世帯の電力消費量の違いにより 30 ポイント以上の差が出る結果となった。

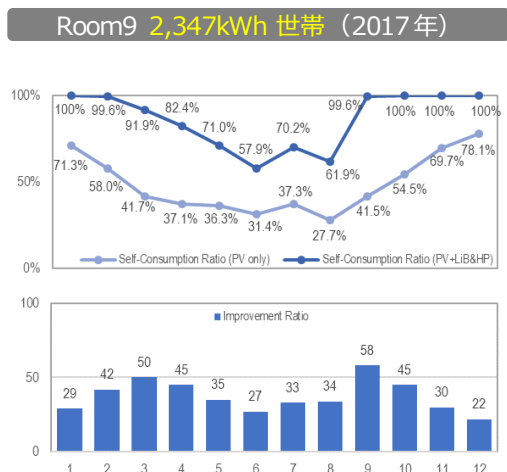
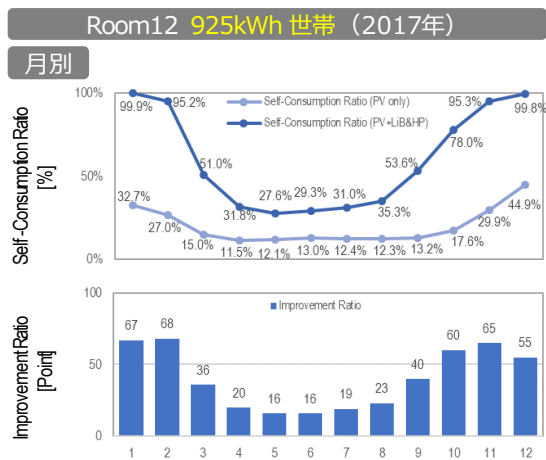
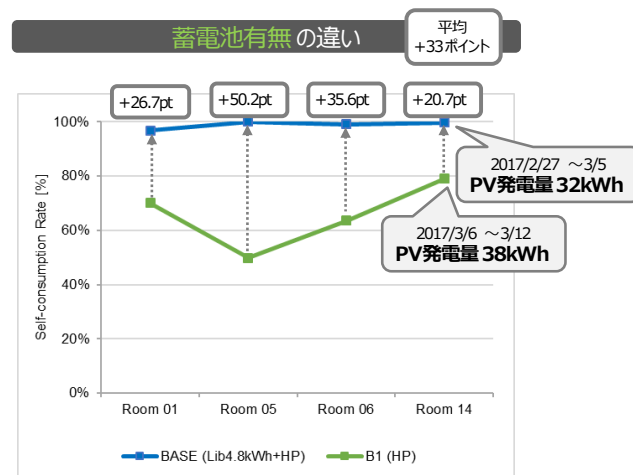


図8 電力消費量の異なる世帯における自家消費率の推移

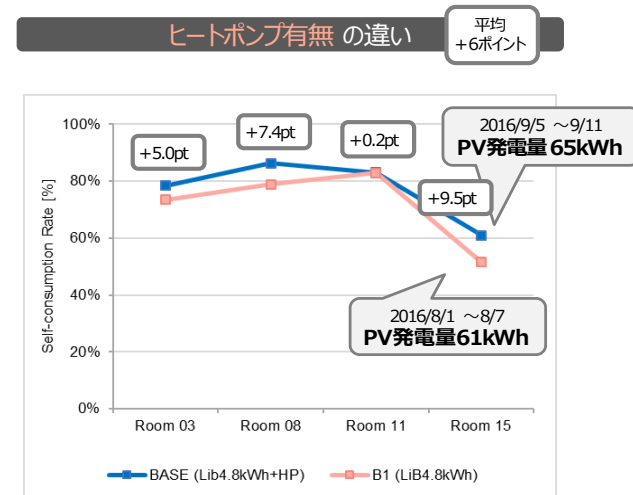
次に、蓄電池容量と自家消費率の関係を検証するため、蓄電池容量を 2.4kWh、4.8kWh、6.0kWh に設定（ベースは PV2.6kWp、蓄電池 4.8kWh にて運用）してデータを取得した結果、9 月頃から 2 月頃の 6 ヶ月間はどの蓄電池容量でも自家消費率が 100% 近くとなり、蓄電池容量を大きくしても、必ずしも自家消費率が向上するわけではなく、蓄電池の稼働割合が低くなってしまふことが判明した。ドイツでは、一般的に PV 容量と蓄電池容量は同じ数値（例として、PV が 5kWp であれば電池容量も 5kWh）とされているが、実証の結果、季節により PV 発電量の差が大きいドイツでは蓄電池容量を PV 容量の数値に合わせて設定することが適切である（今回は 2.4kWh が適切な容量）こともデータをもって示された。

機器構成と自家消費率の関係を検証するため、蓄電池の有無、ヒートポンプの有無を変更して 1 週間ずつデータ取得した結果、蓄電池がある場合では自家消費率が各世帯平均で 33 ポイント以上高くなった一方で、ヒートポンプが有る場合の押し上げ効果は限定的であった（図 9）。これは、当初は PV 発電ピーク時にヒートポンプを稼働させて自家消費率を高める想定であったが、ヒ-

トポンプが棟内共用であることに加え、測定を行った夏季の熱需要が小さかった関係で PV 発電を蓄電池より先にヒートポンプに充当できなかったことが要因と考えられる。



2017年電力消費量 (kWh)	Room 01	Room 05	Room 06	Room 14
	1,536	2,337	2,390	3,129



2017年電力消費量 (kWh)	Room 03	Room 08	Room 11	Room 15
	2,641	2,907	2,392	1,364

図9 蓄電池、ヒートポンプの有無による自家消費率の変化

② 電力市場価格連動を想定した実証結果

将来的な HEMS の付加価値の向上を見据え、自家消費運転の制御に加え、市場価格に連動して経済最適化を行えるような蓄電池制御の実証分析も行われた。

結果として、本実証システムは、経済効果を最大化するために、市場価格が低い時間帯に充電し、高い時間帯には放電するよう機能していることが確認され、市場価格の変動に対する蓄電池制御は実現可能との結果が得られた（図 10）。

この制御により、市場価格が低い時間に系統買電による蓄電池の充電ができるため、PV 発電の少ない時期でも蓄電池を有効活用し、経済メリットを向上させることができる。これは、例えば自家消費システムをシュタットベルケなどの小売電気事業者が保

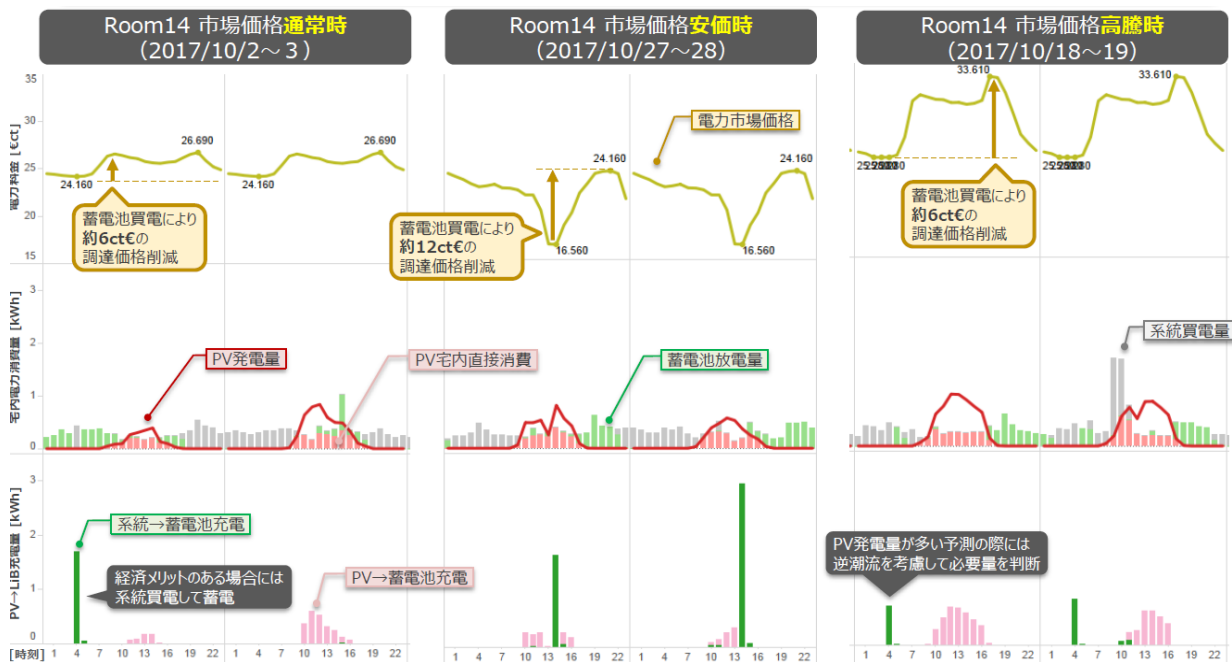


図 10 市場価格水準に応じた蓄電池制御による調達価格削減効果

有するビジネスモデルにおいて、本システムを活用して調達価格を最小化し、経済メリットの原資を得ることができることも示唆している。

③ ビジネスモデルの検討

このような技術面での検証に加え、ドイツにおける本実証システムの普及展開の可能性と、ビジネスモデルについても検討が行われた。

本実証では、システムオペレーターであるシュタットベルケ（本実証では SWS 社に当たる）が PV パネル、蓄電池、ヒートポンプ等の設備の所有、需要家宅への設置を行うモデルが想定された（図 11）。

同モデル下では、シュタットベルケは設備の購入、設置費用を

負うものの、PV で発電した電力を、系統を通さずに直接需要家に提供することにより、託送料や電気税等を減免された利幅の高い電力の販売が可能となる。また、HEMS を通じたシステム運用により電力・熱の提供を最適化することで更に利益の拡大が見込める。更に、多数の需要家宅に設置された設備を使用し、仮想発電所（VPP）を構築するなど、新たなビジネスの可能性を検討することもできる。また需要家側としては、自ら初期費用、運用費用を負担することなく再生可能エネルギーを導入でき、より安価で安定した電力価格で電力を使用することができる。住宅オーナーである GEWO 社としても、屋上スペース貸し出しによる収入や、住宅イメージの向上に伴う顧客増加が期待できる。

本ビジネスモデルの損益分岐点を分析した結果、PV パネルと蓄電池をシュタットベルケが所有し取り付ける場合（PV 出力：7kWp、

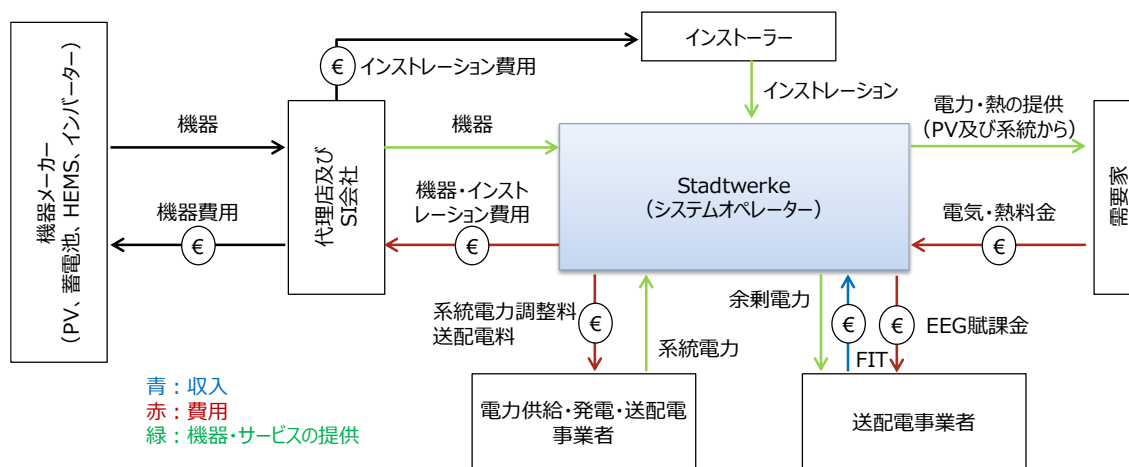
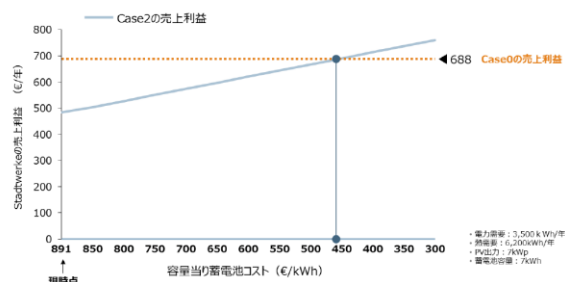


図 11 シュタットベルケ（Stadtwerke）モデルの関係図

蓄電池：7kWh、電力需要：3,500kWh/年)、蓄電池コストが現在の891.5EUR/kWhから450EUR/kWhの水準まで低減すれば、設備なしの場合と比べて収益性が高くなるとの試算となった。なお、電力需要が大きい家庭(PV出力：10kWp、蓄電池：7kWh、電力需要：4,800kWh/年)では、収入が大きくなるため、蓄電池コストが800EUR/kWhの水準まで低減すれば、利益が確保できるとの結果となった。

投資費用の回収年数については、PV+蓄電池とした場合は2020年に導入すると13~19年、2030年導入では10~12年で回収できる一方、PV+蓄電池+HPおよびPV+蓄電池+HP+HEMSにおける投資回収は長期化し、約15~30年との結果となった(図12)。



No	Condition	Business start in		
		2020	2025	2030
1	PV	9~11	7~9	6~8
2	PV + Battery	13~19	11~14	10~12
3	PV + Battery + HP	15~29	12~26	10~13
4	PV + Battery + HP + HEMS	15~29	12~26	10~13

図12 蓄電池価格の損益分岐点と投資回収年数

6.2. タイプBの実証結果

タイプBでは、主に以下の4つの観点から実証の評価が行われた。

- ・ 実証システムによる自家消費率、自給率改善効果
- ・ 2つの制御モードによる効果の比較分析
- ・ ハイブリッドインバータによるコスト削減効果
- ・ ビジネスモデルの検討

① 実証システムによる自家消費率、自給率改善効果

2017年1月から2017年12月までの1年間、蓄電池とヒートポンプを用いた本実証システムを導入した場合、PVが発電したエネルギーの自家消費率は年平均88%となり、システム導入による自家消費率向上効果は年平均34%となった(図13)。月別では、冬季に最も高い自家消費率が達成され、9月から4月の間はほぼ100%となった。最も低かったのは6月の67%であった。なお、本実証ではヒートポンプを暖房のみに用いたが、ヒートポンプをシャワー等の給湯に用いた場合、タイプAの宅内熱消費量データから推定すると、夏場の余剰電力の利用により自家消費率は93%まで向上する可能性がある。

また、集合住宅の消費電力の内、蓄電池に貯めた分を含めてPVで賄った割合を表す「自給率」は、年平均で69%となり、自給率の押し上げ効果は9月が最大で51%、年平均で27%であった(図14)。

さらに、システム導入による自家消費率向上効果を電気料金に換算すると、PV単独の場合の年間電気料金削減効果が3,976EURであったのに対し、システムの導入による削減効果は6,580EURとなり、1.66倍の削減効果があることも確認された。

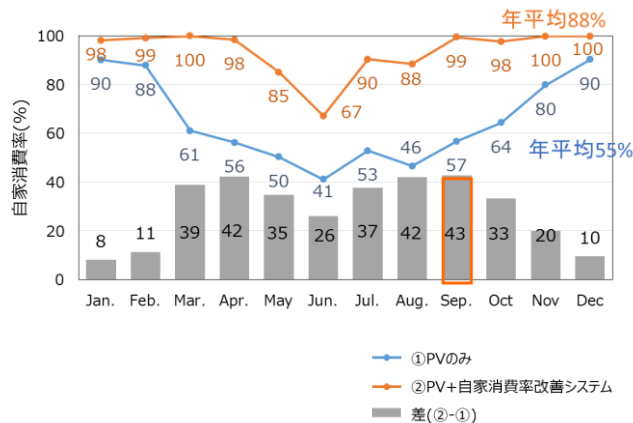


図13 自家消費率の改善効果

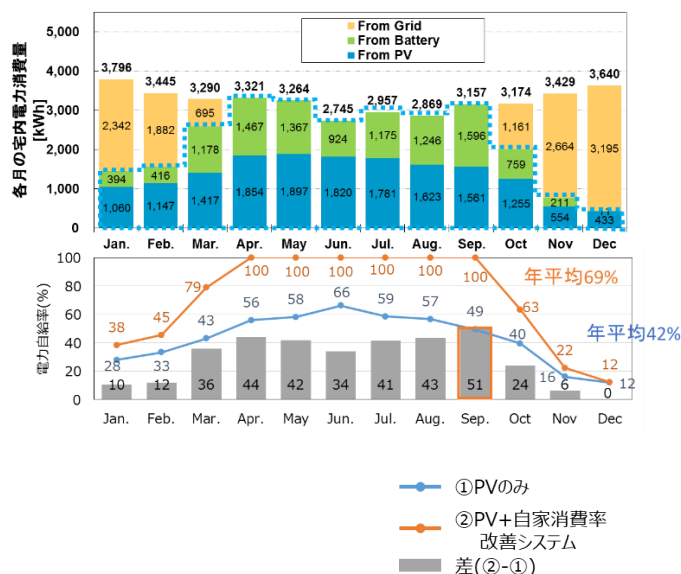


図14 自給率の改善効果

② 2つの制御モードによる効果の比較分析

第4章で述べたとおり、タイプBの実証では2種類の制御モードが設計された(表1)。「自家消費率最大化制御」は、売電(逆潮流)を最小限にするため、PVからの余剰電力発生時には蓄電池の充電やヒートポンプの稼働を促し、電力不足時には蓄電池から放電し、買電を抑制するよう制御する。一方「エネルギーコスト最小化制御モード」では、電力市場価格が電力需給状況に応じて変動するという状況を想定し、PV発電、電力・熱消費量に関する予測データや、買電、売電、買熱に関する調達コストを基に最大4

日先までを考慮した制御計画が設定され、電力が安い時間帯に積極的にシステムから電力を購入して蓄電池に充電し、価格が高い時間帯には蓄電池から放電し、高コストの買電を抑制するよう制御する。ヒートポンプについては、料金低減効果があると判断される場合（余剰電力があり、かつ宅内熱消費量が大きい場合など）に起動するよう制御される。制御モードの違いによるヒートポンプのコストメリットを比較したところ、「自家消費率最大化制御モード」下では、夏期に余剰電力が生じた場合に暖房需要が無いにもかかわらずヒートポンプが稼働するため、売電が減り、コストメリットはHPが無い場合と比較して（以下の試算も全てHP無しとの比較）、年間マイナス 203 EUR となった。

また、「エネルギーコスト最小化制御モード」におけるコストメリットは、電力価格が変動するという仮想的状況下においては、買電が多い特に冬期において、電力価格が安い1日目に電気をまとめて購入するよう制御されるため、コストメリットの改善に資するという観測結果が得られた。年間のコストメリット改善効果は、プラス 345EUR 程度と算出された。自家消費率最大化制御モード下でのコストメリットはマイナス 203EUR であったことに鑑みると、制御モードを変えることによるコストメリットは548EUR（マイナスがプラスのメリットに転じるため）になると言える（図 15）。

参考として、暖房用だけではなく、給湯用にも本システムから熱供給することを想定し、タイプAのデータを使用して試算してみると、「エネルギーコスト最小化制御モード」の場合、給湯供給元が各戸のガスボイラーから地域熱供給(District heating system : DHS)に切り替えられることに加え、年間を通してヒートポンプでのコストメリットが増え、年間プラス 1,390EUR のメリットがあることが判明した。

表 1 : 2つの運転制御モードの整理

項目	自家消費率最大化 (SCMC)制御	エネルギーコスト最小化 (ECMC)制御
目的	逆潮流の最小化	電力及び熱エネルギーコストの最小化
制御方針	余剰不足電力に応じ、充放電やHP稼働パターンを決定 a) 余剰電力発生時: 余剰電力・蓄電池SOCに応じ、蓄電池充電のみ、蓄電池充電+HP稼働を切り替え b) 買電発生時: 蓄電池から放電し、買電を抑制する。	予測から算出した電力・熱量の過不足量から、コスト最小となる売買電・買熱パターンとなるように、充放電やHP稼働パターンを決定 a) 買電: 電力が安い時間帯に、まとめて購入 b) 売電: 高く売れる時間帯に、まとめて売電 c) 買熱: 価格が高い時間帯にHPから供給できるように、HPを稼働。
蓄電池	系統売買電力量の最小化	電力が安い時間帯に買電し、高い時間帯に売電されるように充放電を制御
ヒートポンプ	熱消費に関係なく、余剰電力が大きい時にHPを起動	余剰電力・熱消費があり、HPで生成されたお湯が消費される時に、HPを起動

	固定価格時	変動価格時
自家消費率最大化制御 (SCMC)	夏期に余剰電力でのHP稼働に伴い売電が減り、コストメリットが悪化	
エネルギーコスト最小化制御 (ECMC)	unnecessary HP稼働を抑えるため、HPなしの場合とほぼコストメリットが同じ	買電が多い冬期、安い1日目に電気購入をまとめて行うため、コストメリットが改善

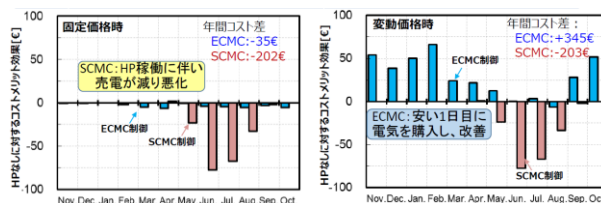


図 15 : 制御モードの違いによるHPのコストメリット比較 (熱: 暖房用途のみ)

③ ハイブリッドインバータによるコスト削減効果

タイプBでは、実証の第2段階として、2016年10月~2018年3月の間でハイブリッドインバータを導入した場合のデータも取得された。ハイブリッドインバータとは、PVインバータと蓄電池インバータを一体化したものであり、2つの直流入力回路（直流電圧変換器）と1つの交流出力回路（直流 交流変換器）を有し、直流入力回路の一方はPV発電電力制御用、他方を蓄電池充放電制御用とした。これにより電力変換ステップの削減と低電力損失

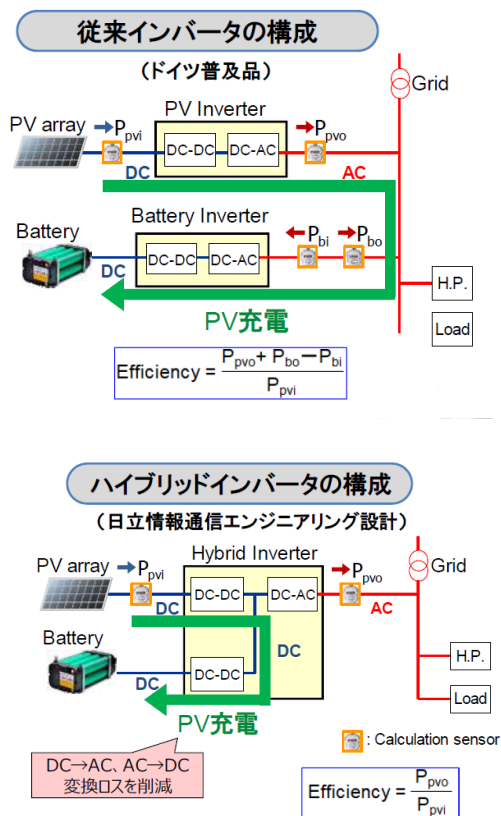


図 16 : 従来インバータとハイブリッドインバータの構成

により、太陽光発電で得られた電力を効果的に蓄電池に充電できる (図 16)。

ここでは、実証サイトのエネルギーセンター内に導入した PV インバータと蓄電池インバータを用いた従来構成と比較して、ハイブリッドインバータがエネルギー効率の優位性を示すかどうか検証された。

エネルギー効率とは、PV 発電量に対する、PCS が最終的に系統側に出力できた、つまり家庭消費できた電力量 (余剰電力を一旦蓄電池に貯めた分も含める) の割合と定義する。

従来構成の普及型インバータとハイブリッドインバータを同一条件で自家消費運転を行い、2月、5月、8月、11月の4回にわたってデータ採取し分析した結果、ハイブリッドインバータを用いた場合の方が、従来型インバータよりも PV から電力変換効率が最大 11.1%向上するとの効果が得られ、買電電力相当で年間 283EUR のコスト削減が可能との見通しが得られた (図 17)。

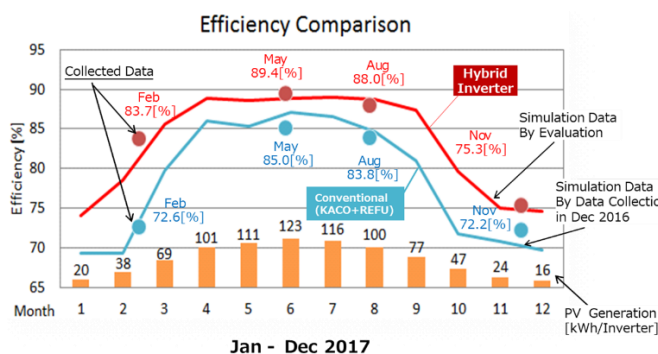


図 17: ハイブリッドインバータによるコスト削減効果

④ ビジネスモデルの検討

ここではタイプ B におけるビジネスモデルの検討の結果を示す。タイプ A と同様に、システムオペレーターであるシュタットベルケ (本実証では SWS 社に当たる) が PV パネル、蓄電池等の設備の所有、需要家宅への設置を行うモデルを想定したビジネスモデルの検討が行われた。

タイプ B では、実証事業と同じ 16 世帯の集合住宅に蓄電池、蓄電池インバータ及び HEMS を設置することを想定する。宅内電力消費量を約 40,000kWh/年、設置する PV の出力を 45kWp と想定、蓄電池の容量は 10kWh/戸/日 × 16 戸 × 1 日 = 160kWh と設定し、蓄電池容量を変化させながら電力自給率をシミュレーションしたところ、蓄電池容量が 30kWh 程度までは蓄電池容量とともに自給率が増加するものの、45kWh 程度を過ぎると電力自給率は飽和するため、自給率に対する投資回収期間が拡大し、蓄電池に対するコストメリットが低下することが判った。次に、PV 出力を 30kWp、45kWp、蓄電池容量を 30kWh、45kWh と変化させてシミュレーションを行った結果、最も投資回収が短い場合は、PV 出力が 30kWh、蓄電池容量が 30kWh の場合で、テナント電力促進法のファンドがある場合 8~10 年で投資回収可能という結果が得られた。蓄電池システムの期待寿命を 15 年とすると、寿命を迎える前までに投資が回収されることが期待されるとの評価が得られた (図 18)。

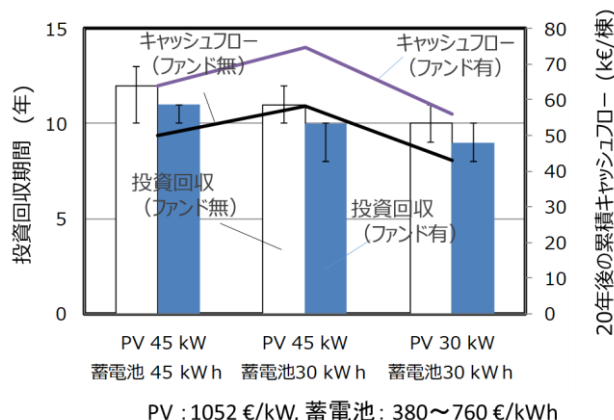


図 18: 投資回収期間の試算

6.3. 実証結果のまとめ

このように、戸建て住宅を想定したタイプ A の実証、集合住宅を想定したタイプ B の実証で確認されたデータから、本実証システムを導入することで様々な効果が期待できることを証明することができた。主な成果は以下のとおりである。

- ・ **自家消費率の改善:** タイプ A では約 40%、タイプ B では約 34%の向上を実現した。
- ・ **電力市場価格と連動した蓄電池制御の可能性:** 蓄電池の制御により自家消費運転の制御に加え、市場価格に連動して経済最適化が行えることが確認された。
- ・ **エネルギーコスト最小化制御モードの有効性:** 電力価格が安い日に電気を購入することでコストメリットが改善できることを証明した。
- ・ **ハイブリッドインバータの効率性:** 従来型インバータよりも PV から電力変換効率が向上し、コスト削減が可能との見通しが得られた。

また、上記のような効果をもたらし得るシステムの導入に際し、シュタットベルケなどがシステムオペレーターとなり、需要家宅への設備の設置を行うといったビジネスモデルを検討し、その場合の収益性や投資回収年数について具体的に示した点も大きな成果となった。

さらに、2017 年 1 月~12 月におけるシステム全体の CO2 削減効果は、以下のとおりとなった。

- タイプ A: 1 世帯あたり、580.7kg-CO2/年
- タイプ B: 1 棟あたり、11,235kg-CO2/年

~ Key Findings ~

今回の実証事業のような、高度な HEMS を含んだ包括的な家庭向けの自家発電・自家消費システムの導入は、再生可能エネルギー先進国と言われるドイツでも新たな試みであった。そのため、設備の導入や実施、実証結果を観察することで様々な気づき・教訓を得ることができた。その主なものを以下 3 つの観点から述べたい。

- ① ポストFIT で注目が高まる地産地消モデルの実現
- ② 電力の地産地消の鍵を握る日本の技術
- ③ シュタットベルケモデルから日本が学ぶこと

① ポストFIT で注目が高まる地産地消モデルの実現

2050年に再生可能エネルギーによる電力供給を80%にするとの目標を掲げているドイツでは、再エネ発電設備のコスト低下に伴い、グリッドパリティを迎えている。そのため、シュタットベルケなどの電気事業者は、FIT制度を利用して売電収入を得るといったシンプルなビジネスモデルだけでは収益を得られなくなっている。しかし、この課題が明確化すると同時に、今度は電力の「地産地消」や「Prosuming（ここでは発電した電力を自家消費したり、別の需要家に販売したりすることを指す。）」という概念が新たなインセンティブとして関心を集めている。

このような電力の地産地消を普及させるために欠かせないのが、高い経済性の実現である。本実証でも、蓄電池、ヒートポンプ、そしてHEMSを用いた自家消費率最大化システムは、戸建て単位、棟単位で行うよりも、複数の建物を同時制御することで、より大きな効果が発揮されることが考察として得られている。例えば、タイプAの実証に関しては、1世帯ごとの制御となるため、家庭内一人ひとりの行動パターンを時間単位で予測するのは難しく、どうしても的確な予測ができない。ある程度まとまった世帯大での制御の方が効率的と言える。これはタイプBについても同様であり、1棟単位で発電、制御するよりも数棟を対象とした電気供給モデルの方が規模の経済性、効率性の観点からも優れている。さらに、複数の建物を一括で管理する仕組みの利点としては以下のようなものも挙げられる。

- ① 制御システムの集約と工事の一括化により設備コストを低減できる。
- ② 住宅の蓄電池に蓄電した電力を他の住宅に供給することで面的な電力融通が可能。
- ③ 配電事業者としても、配電線の混雑回避、インバランスペナルティの回避等の恩恵を受けやすい。

このように、今回の実証事業で用いられた技術を、地域大で活用し、電力の地産地消を推進していくことで、再生可能エネルギーの利用価値は更に高まると考えられる。ドイツでは、FIT制度が終息に向かうことで自家消費の重要性が再認識されるようになり、また蓄電池やPVモジュールの価格が下がることで初期費用が下がってきたことで自家消費に対する関心も高まっている。これから政策に求められることは、補助金や設備導入費用に対する援助ではなく、地域大での電力地産地消を実現した場合の経済性や重要性をアピールすることではないだろうか。

ただし、このような複数の建物をつないだ発電・電力供給システムの実現には制度上の課題もある。その一つが託送料金である。ドイツの再生可能エネルギー法上、異なる建物間で電力を融通する場合には系統線を使用する必要があり、その使用料（託送料金及び電気税）を支払わなければならない。例えば、1つの住宅か

ら地域の共有蓄電池に送電し、そこからまた同じ住宅に電力を供給すると、二重の電気税がかかってしまう。SWS社をはじめとするドイツのシュタットベルケも、電力の地産地消を地域大で発展させたいとの思いは強いが、実現にはそれを後押しする制度改革が必要不可欠であろう。日本でも現在、託送料金等に関する議論等が行われているが、今後FIT制度終了後の新たな解として「地域レベルでの電力の地産地消」が普及していくことを見越して、それを妨げないような制度設計を念頭に置いて議論していくべきではなかろうか。

② 電力の地産地消の鍵を握る日本の技術

本実証で用いられたような、HEMS、ヒートポンプ、蓄電池等を組み合わせた包括的なシステムは、上記で述べた「電力の地産地消」を実現させる上で、重要な技術・コンセプトであったと言える。ドイツには当時から、蓄電池、ヒートポンプとPVとの組み合わせによる電力供給事業は存在していたが、高精度なHEMSによる制御システムを加えた自家消費最大化の取り組みはドイツでも新しいものであったようだ。今回の実証事業に深く携わったSWS社のビューリング社長は、日本製の高性能なヒートポンプと、HEMSによる細やかな制御システムは、SWS社にとっても新たなビジネスの可能性を示唆するものであったと語っている。

さらに、発電、蓄電と熱供給を効率的に組み合わせた今回の実証事業の成功体験は、今後ドイツのエネルギー政策の要となる「セクターカップリング」、つまり、電力、熱、輸送といった異なるセクターを連携させ、エネルギーを融通し合うことで再生可能エネルギーを最適活用する仕組みづくりに大きなヒントを与えるものとなるであろう。

このように、日本の技術、品質はドイツの「電力地産地消」の動きに一役買うこととなるかもしれない。ただし、実際にドイツで設備構築、事業運営を行う上では、日本とは異なる制度、慣習への対応も必要となる。

その一つとして、ドイツでの個人情報保護に関する規制を例に挙げられる。ドイツでは個人情報保護に関する規制が大変厳しく、実証事業を開始するにあたり、個人情報に関する住民への説明会を開催するなど、各種手続を行う必要があり、6か月程の時間を要したという。

また、前述のとおり、ドイツの安全基準、騒音基準等をクリアするのもにも苦労があったようだ。特に印象に残ったのは、リチウムイオン蓄電池の住宅への導入に際し、所轄消防署からシステム設置の許可を得る必要があったにもかかわらず、ドイツの法規にはリチウムイオン蓄電池の設置に関する消防設備に関する規定が無かったという問題である。そのため、実施企業自らが現地コンサルタントを雇い、リスク評価に基づく消防装置要求事項を策定することとなり、検討に予想以上の時間や資金を費やすことになった。

こういった現地特有の規制・慣習へ対応していくには、現場における柔軟な対応のみならず、現地業者、パートナー事業者とのコミュニケーション、密な連携が必要不可欠であることも再認識

させられた。

③ シュタットベルケモデルから日本が学ぶこと

ドイツに見られるような、地域の自治体企業がその地域の電力供給の大部分を担うという「シュタットベルケ」的な事業モデルは、近年日本でも注目を集めている。地域レベルでのエネルギーの地産地消を実現するためには、エネルギー事業者だけでなく、市政と住民との密な協力が不可欠となるからである。また、シュタットベルケは自治体出資の企業でありながら、民間企業として経営を行っており、迅速、合理的な意思決定や、リスクを取りながら最新技術を取り入れた事業運営も可能という両面の利点がある。

SWS 社のビューリング社長によると、シュタットベルケの最大の強みは「市民からの信頼」。住民の近くで経営を行うことで、地域の条件や需要に応じた最適かつ安全な分散型エネルギーシステムを運用できるとしている。また、公共の利益を追求する経営姿勢は市の環境政策との相乗効果も生む。日本でも、2016 年の電力小売自由化に伴い、自治体が電力小売事業に参入できるようになった。自治体による新電力会社が、今後の再生可能エネルギー導入、また電力の地産地消を推進する重要なプレイヤーとなっていかも知れない。シュパイヤー市のように、電力公社・住宅公社・市が三位一体となって経営にあたるという形は、地域大での「Prosuming」を推進する上では理想的であり、そこに日本が見習う点は多い。

同時に、シュタットベルケの経営モデルを見るうえで、自治体規模の経営体制が抱える課題にも目を向ける必要がある。シュタットベルケモデルの課題としては、①規模の経済が発揮されにくい、②地域による資金、ノウハウの格差がある、③ドイツ全体から見ると設備投資の重複が生じる、といった点が挙げられる。そのため、自治体間、シュタットベルケ間での経験、ベストプラクティスの共有はもちろんのこと、設備、電力そのものを共有して規模の経済を追及してことが重要となる。

ドイツの首都ベルリンには、国内に 1,400 以上存在するシュタットベルケを取りまとめるシュタットベルケ協会 (VKU) という機関が存在する。同協会エネルギーシステム課のグレートライン氏によると、協会としても「Prosuming」の概念がエネルギー転換政策を支えいくと期待しており、それをドイツ各地に浸透させていくため、各地域のシュタットベルケの活動成果・課題の共有、連邦政府への政策提言等を行っている。実施する側（シュタットベルケ）と、政策決定側のコミュニケーションを円滑にし、地域間の連携を推進していくようなシュタットベルケ協会の存在意義は大きい。

シュタットベルケ協会のこういった活動の成果は、実際のビジネスにも現れつつある。例えば、2008 年には同協会の協力の下、国内 37 のシュタットベルケが共同で「Trianel」というガスパワープラントを設立し、共同運営を開始したとの実績もある。シュタットベルケの地域密着型の特性を生かしつつ、発電分野のみならず、IT サービス、水・ゴミ処理サービスと連携するなど、地域

間、分野間の協力を進め相乗効果を高めていくことが今後の成長を後押ししていくと見られる。

今後日本でも、自治体が主体となった電力事業を発展させていくにあたり、ドイツの経験にも注目して、現在ドイツが向き合う課題についても先んじて解決策を検討しておくことが重要であろう。また、注意すべき点として、ドイツのシュタットベルケが地域密着型の企業として住民の信頼を勝ち得ているのは、同社が電力供給のみならず、水道、地域インフラ整備、廃棄物回収等、地域の福祉に必要な事業を幅広く担っているからであることを認識しておかなければならない。日本で現在発達しつつある、自治体レベルでの電力小売事業者の中で、ドイツのシュタットベルケのように包括的な地域貢献に携わっているものは少ない。そのような状況の中で、いかに自治体規模の事業者としての強みを発揮し、地域との連携を深めていくかが、今後の「日本版シュタットベルケ」の発展の鍵となっていくであろう。

7. おわりに

これまで、本実証で実施された 2 つのタイプにおける自家消費率最大化の試みについて、それぞれ実施内容、成果、そして Key Findings を整理してきた。今回の実証では、日本側のコンソーシアム、シュパイヤー市、SWS 社、GEWO 社が一丸となり、シュパイヤー市の再生可能エネルギー導入政策に資する実証事業を成功させるべく協力し合った結果が、素晴らしい形で実を結んだと言える。

高度な EMS 制御、ヒートポンプ、蓄電池を含む再生可能エネルギー発電システムは、未だ一般家庭向けには十分普及しているとは言えない。しかし、今後蓄電池やヒートポンプの価格が低下し、群、地域単位での制御が可能になり、VPP（バーチャルパワープラント）のような形でのサービス提供もできるようになれば、事業性はかなり高まると考えられる。またそれには税制や託送料金等の規制面の改革が不可欠である。地域大でのエネルギー地産地消の重要性とともに、こういった制度面での課題が浮き彫りになったことも、今回の実証事業の重要な成果のひとつである。今後、ドイツ、日本、そして他の多くの国々において、再生可能エネルギーの自家消費率最大化が環境エネルギー政策の大きなテーマとなっていく過程で、本実証で得られた知見、学び、そして潜在的な課題が広く共有されていくことを強く願っている。

最後に、本実証の誘致、事業性評価及び 2 年近くに及ぶ実証期間全てに深く携わった、SWS 社ビューリング社長が、実証関係者への感謝と今後の展望についてコメントしているのでここに紹介する。

SWS 社ビューリング社長のコメント

今回の実証を通じて特に実現したかったことは、住宅向けのPV発電技術の活用によって、「Prosuming」の有効性を検証し、それが今後のセクターカップリングや再生可能エネルギー事業の拡大に大きく貢献できることを証明することでした。私は社長に就任した当初からシュパイヤー市の再生可能エネルギー導入への取り組みに共感し、関わってきました。エネルギー事業者であるSWS、住宅公社GEWO、そして市の3者が同じ目標に向かって協力し続けていることは、シュパイヤー市のエネルギー政策の成功要因 (Success Factor) であると考えます。本実証をシュパイヤー市で実施できたのも、市全体が一丸となって取り組めたためです。

本実証の話を初めて聞いた時、是非シュパイヤー市に誘致したいと思いました。誘致のためのNEDOとの長期に及ぶ検討会議では、シュパイヤー市のポテンシャルを大きくアピールしました。特に、長く重要な歴史を持つシュパイヤー市は日本の「奈良」と通じる点や、シュパイヤー市政との密な連携、小さな都市ならではの柔軟性や安定性については他の大きな市に負けない、といった事を強調しました。結果として、日本企業独自の非常に高性能なHEMSを駆使し、高度な電力の自給自足できるという「エネルギー自己消費モデル」の実現可能性を検証したことで、ドイツが今後も再生エネルギー推進に向かう意義とメリットを示すことができたと感じています。

システム構築の過程では、日本の事業者がドイツの制度下で苦勞する面も見ました。家庭向けのリチウムイオン蓄電池導入は、当時ドイツではそれほど事例がなく、導入には安全性の証明、消防設備の設置等の対応が必要でした。しかし日本側の対応は常に迅速かつ適切であったことが印象に残っています。ある日、「リチウムイオン蓄電池は危険ではないか」と議論になった際にも、日本側のメンバーが「日本のバッテリーの安全性には自信がある。自分は毎晩このバッテリーの上で寝ても怖くない」と胸を張って発言した時は、とても心強かったです。

今回の実証を通して、1つの世帯で自家消費を実現するだけでなく、多数の世帯のネットワークを結び、電力をシェアすることで地域大での自家消費率を上げていくことが必要と実感しました。分散型電源の地域供給には配電網が重要なバックボーンとなるのですが、現在は使用する kWh に応じてグリッド使用料を支払っており、本実証モデルには適していません。これをキャパシティーベースの定額料金体系にする等の改革が必要と考えます。

実証を終えた今、SWS社は次のステップとして「Plug and Play (電源を入れれば複雑な設定を必要とせず家電・蓄電池・HP等が自動で制御されるサービス)」の標準化を目指しています。本実証で用いられたHEMSのような高度な制御システムを導入し、それを規格化していけば、効率性も上がり、またHEMSを市場価格と連動させ、各家庭で発電した電力を調整力市場等で活用し利益を生み出すような新たなビジネスも可能になると考えています。

NEDOと日本企業、その従業員、そして私達が協力して取り組んだ今回の実証事業の成果は、業界内外の多くの関係者に強い刺激を与えたと確信しています。本実証の成果は、シュタットベルケ協会が主催するシンポジウムや、州政府のエネルギー諮問委員会でのプレゼンテーションを通じて広く知られるようになり、シュパイヤー以外の地域の自治体企業による再エネ事業の活発化につながっていると確信しています。今年も連邦議会や環境省から、いくつかの講演の依頼が来ており、本実証事業について報告する予定です。このような活動は、ドイツのエネルギー転換政策に欠かせない「セクターカップリング」を実現するための有効なステップとなるはずで、このように、シュパイヤー市がドイツ全体の環境・エネルギー政策のトレンドセッターとなり、他の自治体企業が先進的なプロジェクトを実施するための手本となっていくことが私の目標です。

最後に、今回のプロジェクトは、技術面で優れたロールモデルとなっただけでなく、各自治体企業が抱える資金調達の問題にも大きな示唆を与えました。NEDOが重要な財政的貢献をしてくれたおかげで、シュパイヤー市がこんなにも先進的な取り組みに挑戦できたことと痛感しています。このような機会が今後も国内の自治体企業で活用されていくことを強く願っています。

謝辞

本ケーススタディの執筆にあたり、ご協力を賜った新井崇弘氏、大田晴啓氏 (NTT ドコモ)、宮本佳樹氏 (日立化成)、Stadtwerke Speyer の Wolfgang Bühring 氏、Mathias Reinhart 氏、GEWO Wohnen の Oliver Hanneder 氏、そしてシュタットベルケ協会 (VKU) の Fabian Schmitz-Grethlein 氏、Florian Zwerk 氏に感謝の意を表する。

参考文献

- [1] NEDO, 「国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業 ドイツ連邦共和国におけるスマートコミュニティ実証事業実証事業成果報告書(タイプA)」平成 27 年度～平成 29 年度 成果報告書
- [2] NEDO, 「国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業 ドイツ連邦共和国におけるスマートコミュニティ実証事業成果報告書(タイプB)」平成 27 年度～平成 29 年度 成果報告書
- [3] NEDO, 「ドイツ国際情報通信技術見本市 (CeBIT 2017) における情報発信等業務」平成 28 年度～平成 29 年度成果報告書
- [4] 日本エネルギー経済研究所「ドイツのシュタットベルケから日本は何を学ぶか」IEEJ:2018 年 3 月掲載
- [5] Verband kommunaler Unternehmen e. V. 「Zahlen, Daten, Fakten 2019」
(file:///C:/Users/2190990/Downloads/VKU_ZahlenDatenFakten_2019_DE%20(3).pdf) 2019 年 12 月 10 日閲覧

本ケーススタディは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により、株式会社三菱総合研究所が執筆しました。