

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                                                |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文)            | 水素蓄エネルギーシステムを対象とした汎用的技術/経済モデルの開発と最適化設計                                                                                                                                                         |
| Title(English)    |                                                                                                                                                                                                |
| 著者(和文)            | 大久保辰哉                                                                                                                                                                                          |
| Author(English)   | Tatsuya Okubo                                                                                                                                                                                  |
| 出典(和文)            | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第12444号,<br>授与年月日:2023年3月26日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:伊原 学,MANZHOS SERGEI,大友 順一郎,下山 裕介,松本 秀行                                                               |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering),<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第12444号,<br>Conferred date:2023/3/26,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文                                                                                                                                                                                           |
| Category(English) | Doctoral Thesis                                                                                                                                                                                |
| 種別(和文)            | 要約                                                                                                                                                                                             |
| Type(English)     | Outline                                                                                                                                                                                        |

水素蓄エネルギーシステムを対象とした  
汎用的技術/経済モデルの開発と最適化設計

令和4年度 工学博士学位論文

東京工業大学 物質理工学院 応用化学系

大久保辰哉

指導教員：伊原 学 教授

副指導教員：Sergei Manzhos 准教授

## 1. 序論

カーボンニュートラルの実現に向けて、近年大幅に低コスト化している変動型再生可能エネルギー(VRE)電源を最大限導入することが必須となる。一方、VRE 電源導入拡大に伴う系統増強や火力発電の予備力確保、設備利用率の低下、出力抑制などによって生じる「統合コスト」の増加が課題となり、蓄エネルギーを含めた多様な技術を活用した柔軟性の確保が必要となる。水素蓄エネルギー(HES)システムは電力を水素に変換し、貯蔵、必要に応じてその水素を再び電力に変換するシステムである。蓄電池などとは異なり、HES システムは出力(kW)と貯蔵量(kWh)を独立に設計できることや、生成した水素を電源だけでなく熱源や自動車燃料源としても利用できることが特徴である。これらの特徴は設計における自由度が高いことを意味し、HES システムの構成や各技術の容量を自由に設計できる汎用的手法の開発が重要となるものの、熱や水素の関連補器を含むシステムをモデル化できるソフトウェアは現状存在しない(①)。加えて、HES システムには現状経済的課題が存在するため、オフグリッドよりも経済的優位性が期待されるオングリッドの HES システムを対象とした最適化設計が重要となるが、最適化結果を決めるメカニズムを基に経済性に影響を与える要因を分析した研究例はない(②)。加えて、オングリッドの HES システムの最適化設計を行う先行研究のうち、都市部に太陽電池を導入するときに重要となる太陽電池の壁面設置を考慮したもの(③)や、水素を電源だけでなく熱源として利用する燃料電池排熱利用を考慮した電力/熱併給(CHP)システムを対象とするもの(④)、水素を電源だけでなく自動車燃料源として利用し、卸市場から電力を安く調達することを考慮した水素ステーション(HRS)システムを対象とするもの(⑤)は未報告である。以上の①~⑤の研究課題を背景として、本研究では、HES システムの構成を自由に設定し、各技術の容量を経済的に最適化できる「汎用的技術/経済モデル」を開発/提案するとともに、経済性向上に有効となる施策の検討に向けて、オングリッドの HES システムや CHP システム、HRS システムの最適化設計を行うことを目的とした。HES システムの研究課題①~⑤に基づき、本論文は以下の内容で構成される。

- 1 章：本論文の研究背景や先行研究、研究目的を説明した。
- 2 章：HES システムの汎用的技術/経済モデルを提案した(①)。
- 3 章：モデルにおける入力値を整理し、その概要を説明した。
- 4 章：HES システムの経済性に影響を与える要因を分析した(②)。
- 5 章：太陽電池の屋上/壁面設置を考慮した HES システムの最適化設計を行った(③)。
- 6 章：燃料電池排熱利用を考慮した HES システムの最適化設計を行った(④)。
- 7 章：卸市場からの電力調達を考慮した HRS システムの最適化設計を行った(⑤)。
- 8 章：本論文の総括を行った。

## 2. 水素蓄エネルギーシステムの汎用的技術/経済モデルの開発

本章では、HES システムの構成を自由に設定し、各技術の容量を経済的に最適化できる汎用的技術/経済モデルを新たに開発/提案した。モデルの汎用性を高めるため、エネルギー技術や資源、需要などのコンポーネントと、複数のコンポーネントで構成されるシステムをそれぞれモデル化した。本研究ではコンポーネントを **Technology** (太陽電池や燃料電池など) や **Resource** (系統電力や天然ガスなど)、**Demand** (電力需要や熱需要など) に分類するほか、コンポーネント間のエネルギーの流れを形成する **Hub** という概念を提案した。ユーザーは各コンポーネントにコストや GHG 排出量などに関係するパラメータを与え、Hub を通じてコンポーネント間の繋がりを設定することで、検討対象とするシステムをモデル化できる。その後、各時刻における各コンポーネントのエネルギーの利用量や生成量、貯蔵量を年間にわたってシミュレーションし、得られた結果を基にシステムの経済性や環境性を評価する。本モデルでは、シミュレーション手法として指定された日数ごとに運用最適化を繰り返し行うアルゴリズムを、評価指標としてシステムの総寿命内におけるコストや温室効果ガス (GHG) 排出量を表す正味現在コスト (NPC) やライフサイクル GHG (LCGHG) を、それぞれデフォルトとして設定した。以上のシミュレーションと評価によって得られた NPC が最小となるように対象技術の容量を最適化することが可能である。本モデルは現状 Python で記述された CUI ベースのソフトウェアとなっているが、将来的に多くの研究者や技術者が簡単に利用できるよう GUI ベースのものに拡張することが重要となる。

## 3. モデルにおける入力値の検討

エネルギーデータ (太陽電池発電出力や電力需要、熱需要など) はローカルな気象/地理的条件に依存して変化する。そのため、できる限り気象/地理的条件が一致したデータセットを使うことが重要である。そこで本研究では気象/地理的条件ができる限り同一となるよう、対象とする場所ごとエネルギーデータの収集および前処理を行った。また、モデルをベースとする最適化では設定すべきパラメータが多量に存在する。したがって、得られた最適化結果を深く分析および考察するには、各パラメータの設定根拠をできる限り明確にし、基準となるパラメータセットを設定することが重要となる。そこで本研究では、2050 年を想定して、基準となるコンポーネントパラメータ (コストや GHG 排出量、寿命など) を設定し、それらの設定根拠を整理するとともに、エネルギー学理に基づいてその妥当性を評価した。

## 4. 水素蓄エネルギーシステムの経済性に影響を与える要因の分析

本章では、オフグリッドシステムに比べて経済的優位性が期待されるオングリッドの HES システムを対象とした最適化設計を行った。太陽電池(PV)や水電解装置(EC)、燃料電池(FC)、コンプレッサ(CP)、水素タンク(HT)を含む東工大大岡山キャンパス規模の HES システムをモデル化し、年間電力需要に対する年間 PV 発電量の比率を表す PV 導入率や、年間電力需要のうち PV 由来の電力で賄われた比率を表す自給率(SSR)に制約を課した条件下で、電力コスト(COE)や LCGHG と各技術の最適容量の関係を分析した。

PV 導入率が一定の条件下では、EC 導入量を増加させると、系統電力の代わりに FC 電力を供給することで得られる kWh あたりの利益は減少するものの、年間を通して供給できる FC 電力の総量が増加する。このような FC 電力の利益の減少と総供給量の増加のバランスによって最適な EC 容量が決定される。本研究の計算条件の範囲内では、HES 技術(EC, FC, CP, HT)の価格が本研究の設定値以下となれば EC 容量に最適点が存在することが分かった。EC 容量の最適点は余剰電力が持つ一日間や一年間における変動性に影響を受けるものの、余剰電力が十分に生じるような多量の PV を導入することが、GHG の排出を抑えつつ、HES システムを導入する経済的インセンティブを生み出すことが分かった。

SSR が一定の条件下では、PV 導入量を増加させると、PV 電力を供給するためにかかるコストは増加するが、EC や HT の設備利用率が向上するほか、需要に送るべき FC 電力の総量が減少するため、FC 電力を供給するためにかかるコストは減少する。このような PV 電力コストの増加と FC 電力コストの減少のバランスにより最適な PV 容量が決定される。このとき、HES 技術の価格の低下や、PV の設置角度/方位の調整およびデマンドレスポンスによる余剰電力の変動性緩和が、PV 容量の最適値をより低い値とし、余剰電力の出力抑制を抑えつつ指定された SSR 制約を達成できる。

本分析から、将来的に HES 技術の価格が低下することを前提とすれば、多量の PV 導入が HES システムの経済性を向上させることが明らかとなった。したがって、HES システムの導入場所にて最大で達成できる PV 導入率とその導入適地を決定する一つの要素となる。地方部などの電力需要密度の小さい地域では高い PV 導入率を達成しやすいものの、送電網や配電設備などの系統容量が制約となり、接続できる PV 容量が制限される可能性がある。一方、都市部などの電力需要密度の高い地域では比較的系統容量が大きいため、接続できる PV 容量は比較的許容されるが、土地面積が制約となるため高い PV 導入率の実現は難しい。都市部において経済性の高い HES システムを実現するためには、省エネによる消費電力の削減や PV の変換効率向上、建物の屋上だけでなく壁面への PV 設置に加え、FC の発電時に生じる排熱の活用、PV のオフサイト発電などが有効となる。

## 5. 太陽電池の屋上/壁面設置を考慮した水素蓄エネルギーシステムの

### の最適化設計

本章では、都市部において重要となる建物壁面への PV 設置を考慮して、オングリッドの HES システムを対象とした最適化設計を実施した。屋上だけでなく西壁面や南東壁面の PV を含む大岡山キャンパス規模の HES システムをモデル化し、様々な SSR (年間電力需要のうち PV 由来の電力で賄われた比率)の条件下で COE や LCGHG と各面における PV 容量の関係を分析した。

SSR が 70%の条件下では、屋上とともに壁面に PV を追加的に設置することで余剰電力が生じる時間帯が長くなり、EC の設備利用率が高まる。加えて、屋上と西壁面の PV を最適に組み合わせることで余剰電力の一日間のパターンが正午から午後頃にかけて幅広くなり、EC に必要な容量が低減する。その結果、COE の増加が抑制された。

SSR が 100%の条件下では、70%のときと同様、屋上に加えて壁面に PV を追加的に設置することで余剰電力が生じる時間帯が長くなり、季節的な水素貯蔵が必要とならなくなる。加えて、屋上と南壁面に PV を最適に組み合わせることで余剰電力の季節変動性が低減し、HT に必要な容量が低減する。その結果、COE と LCGHG がともに低減した。

以上の屋上や南東壁面、西壁面の PV の組み合わせ効果を踏まえて、屋上と壁面の PV の最適な組み合わせと SSR の関係を分析した。その際、大岡山キャンパスの建物屋上と壁面における日射量を GIS で算出し、各面に設置できる PV 容量に上限を設けた。SSR が 0~60% の範囲では南東壁面や西壁面よりも設備利用率の高い屋上の PV を優先的に導入することが経済的に最適であるものの、SSR が 60~75%の範囲では屋上に加えて西壁面に、SSR が 75~100%の範囲では屋上や西壁面に加えて南東壁面に PV を導入することが最適となった。本結果において、SSR が 60~75%の範囲で、南東壁面よりも設備利用率の低い西壁面に PV が優先的に導入されたことが興味深い点である。この結果は、単純に南東壁面に PV を設置して多くの発電量を得るよりも、屋上と西壁面の PV を組み合わせて EC にかかるコストを低減する方が、経済的に適していることを示唆している。さらなる EC のコスト低減には、屋上と西壁面だけでなく東壁面への PV 設置が有効となる。SSR が 90%以上となると、EC だけでなく HT のコストが高くなるため、屋上と南壁面の組み合わせが経済的に有効となるほか、南壁面に PV を設置するときの傾斜角度も最適化できれば、さらなる COE の低減につながる可能性がある。

## 6. 燃料電池排熱利用を考慮した水素蓄エネルギーシステムの最適化設計

本章では、水素を電源とともに熱源として活用する FC 排熱利用を考慮したオングリッドの HES (CHP) システムを対象とした最適化設計を実施した。EEI 棟規模の需要家に電力や熱を供給する HES システムをモデル化し、FC 排熱を利用しない場合(NWH)や熱需要の変動に合わせて FC を稼働させる熱主電従(HDF)、電力需要の変動に合わせて FC を稼働させる電主熱従(EDF)、特定期間における運用コストを最小化する運用最適化(OCO)といった 4 つの制御方法を想定した場合の最適化結果を比較/分析することで、システムの経済性向上につながる制御方法を検討した。

ルールベース制御(NWH, HDF, EDF)を想定した場合の最適化結果を比較すると、EDF が経済性や環境性の観点で優れていることが分かった。HDF では、NWH に比べて都市ガスの購入量が減少するものの、それ以上に系統電力の購入量が増加し、NPC や LCGHG が増加した。一方、EDF では、NWH に比べて都市ガスと系統電力の購入量がいずれも削減され、結果的に NPC と LCGHG はいずれも減少した。このような HDF と EDF の違いは、熱需要が電力需要と比べて大きな季節変動性を持つことが要因である。電力需要と熱需要のミスマッチが小さい冬季(電力需要量 $\simeq$ 熱需要量)では HDF と EDF はいずれもエネルギーロスを抑えつつ各需要を満たすことができるが、電力需要と熱需要のミスマッチが大きい中間季(電力需要量 $>$ 熱需要量)では、HDF と EDF でそれぞれ電力と熱のロスが生じる。

最適化ベース制御(OCO)において、運用最適化における対象期間( $\delta d$ )を 1 日間から 1 週間、1 か月間に増加させると経済性や環境性が高まることが分かった。特に、1 週間以上の長期の運用最適化が系統電力や天然ガスの購入量削減に大きく寄与するとともに、EC や FC の設備利用率を向上させることが分かった。

ルールベース制御と最適化ベース制御を比較すると、PV 発電出力や電力需要、熱需要を精度高く予測できれば、1 か月間の運用コストを最小化する OCO は EDF よりも経済性向上に寄与しうることが分かった。比較的長期の運用最適化を行うことで、季節によって異なる電力需要と熱需要の変動に合致した電力供給や熱供給が可能となり、系統電力と天然ガスをバランスよく購入するようにシステムを制御することができる。そのため、運用最適化における対象期間の設定次第では、系統電力の購入量を優先的に少なくなるように制御する EDF よりも OCO の方が経済的に有利となりうる。

## 7. 卸市場からの電力調達を考慮した燃料電池を含む水素ステーションの最適化設計

### 7.1 卸市場からの電力調達を考慮した燃料電池を含む水素ステーションの最適化設計

本章では、経済性向上に有効となりうる卸市場からの電力調達を考慮して、水素を電源とともに自動車燃料源として活用する FC を含むオングリッドの HRS システムを対象とした最適化設計を実施した。FCV と近隣の建物(EEI 棟規模)にそれぞれ水素と電力を販売する HRS システムをモデル化し、水素需要規模(Scale 1 – 3)や運用最適化における対象期間( $\delta d$ )が異なる複数の条件下で最適化結果を比較/分析し、システムの経済性向上につながる制御方法を検討した。

水素需要が現状規模であり、運用最適化において 1 日間を対象とした場合、PV と FC を導入すると、各需要を満たすために必要な電力を全て卸市場から調達した場合と比べて NPC と LCGHG のいずれも一定程度低減された。これは、PV や FC を導入すると各技術のコスト(GHG)は増加するものの、それ以上に系統電力のコスト(GHG)が減少したことが要因である。特に FC を導入することで系統電力の購入量が減少するだけでなく、EC や HT の設備利用率が向上することが分かった。

水素需要が現状規模の場合、運用最適化において 1 週間を対象とすると、1 日間の場合と比べて NPC を維持しつつ、LCGHG を一定程度低減できる。これは、運用最適化における対象期間を 1 日間から 1 週間とすると、系統電力のコストと GHG が減少するほか、EC や HT の設備利用率が向上することが要因である。

水素需要の規模が増加すると、より長期の運用最適化によって、深夜から朝方にかけての電力調達分を削減し、PV 由来の水素の利用が促進され、システムの経済性が高まることが分かった。そのため、将来的に FCV が普及し、水素需要規模が拡大した場合、電力需要や水素需要、PV 発電出力、電力スポット価格などの数日間～1 週間後予測の高精度化が重要となることが示唆される。加えて、水素需要規模の拡大に伴い、HRS システムの収益性を維持しつつ水素の販売価格を下げるためには、本計算条件の範囲内では 50~100 JPY/Nm<sup>3</sup> の価格設定が必要となる。

## 8. 総括

以上から、本論文を通じた汎用的技術/経済モデルの開発/提案とそれを用いた最適化設計によって、以下の3つの点で学術的進展に貢献した。

1. オンサイトの詳細な実データと汎用的手法に基づく分散型エネルギーシステムを対象としたテーラーメード最適化の分野を開拓した点。これまでの分散型エネルギーシステムを対象とした最適化研究では、再エネ発電出力や電力需要、熱需要...などについて公開データや平均データを入力としており、研究対象ごとに個別のモデルを作成しているものが多かった。一方、本研究では検討対象における気象/地理的条件を反映したオンサイトデータセットを入力として用いるとともに、汎用的手法を利用して最適化を行う「テーラーメード最適化」の提案を初めて行った。
2. テーラーメード最適化に基づく様々なケーススタディによって、デバイス単独の部分最適化だけでなくシステムとしての全体最適化が必要であることを定量的に示した点。4章においては、PVのみに着目した場合、PV導入量を増加させるとイニシャルコストが増加するため、PV導入量が低い領域に最適点があると予想されるが、PVとともにECやFC、HTなどを含めたシステム全体を考えると、PV導入量が高い領域に最適点があることを示した。5章では、PVのみに着目すると屋上のみに設置することが最適であるが、蓄エネシステム全体で考えると、屋上だけでなく壁面へのPV設置が最適となることが分かった。6章においては、FC単体だとその排熱を可能な限り利用した方が総合効率が向上するため、熱需要の変動に合わせて制御する熱主電従が制御方法として有利と考えられるが、システム全体で考えると熱需要の季節変動性がECやHTの設備利用率を低下してしまうため、電主熱従制御が経済的に有利であることを示した。7章では、ECのみに着目すると、電力価格が固定の場合には設備利用率が大きくなるような一定負荷率運転が有効となりうるが、システム全体で考えると、特に電力価格が変動する場合には、長期運用最適化に基づく制御が経済的に有効となることを示した。以上のような部分最適化と全体最適化の違いは、オンサイトデータセットを入力とし、多様なデバイスを含むシステムをモデル化できる汎用的手法を使ったテーラーメード最適化を行うことで初めて明らかにできる知見である。
3. 将来的に技術開発が進めば、分散型のHESシステムがグリッドパリティを実現できることを定量的に示した点。これまでECやFCなどの個別技術の価格が高いことから、HESシステムはしばしばコスト高とされてきた。一方、本研究では様々な文献やエネルギー学理に基づき、将来的な技術開発進展を考慮した入力値設定を行った結果、系統電力価格よりもHESシステムが低コストとなることを示した。また、技術開発だけでなくテーラーメード最適化に基づくシステム設計もHESシステムのグリッドパリティ実現に必要であることが分かった。