

冷熱蓄熱を活用した大型冷凍機の自動制御システムの開発

申請者名:水野竣介、和泉陽大、穂山公宏、秦珠実

1. プロジェクトの背景、目的、目標

1-1 開発の背景

本プロジェクトは、東日本大震災の際に発生した福島第一原発の事故をきっかけとして代表者の水野が抱いたエネルギー問題を解決したいという強い思いが原動力となり、水野の所属する東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻における研究テーマを基に稼働しているプロジェクトである。

水野は大学入学時より、様々な視座からエネルギー問題の解決方法を模索してきた。その中でも本プロジェクトの前身となるのは、水野が2022年夏に東京大学教養学部の授業で石川県白山市を訪れた中で得た知見を基に開発に取り組んだ「雪発電デバイス」である。水野は、現地でのヒアリングを通じて、白山市のような雪国では除雪された雪の使い道に困っているという課題を把握し、自分の専攻分野と組み合わせることで雪発電デバイスの着想を得た。しかし、残念ながらこの発電デバイスでは実用可能なほどに期待された発電量を練り上げることができなかった。そこで水野は、雪のような冷たいものの冷熱をそのまま熱エネルギーとして活用すればエネルギー効率を高めることができるのではないかと発想を転換させ、冷凍機の電力消費を最適化し冷熱エネルギーを蓄熱することで、電力需給バランスを安定化させる制御システムの開発に着手し始めた。その後、電気工学や化学などを専攻する、水野と同様にエネルギー問題の解決を志向する仲間が集まり、約1年前より、研究開発だけでなく多数企業への実地ヒアリングを通じて事業開発も進めている。

1-2 社会的背景

● 日本の電力システムが抱える課題

2050年にカーボンニュートラルを達成するという国の目標実現に向けて、CO₂排出量の少ない電力システムの構築が求められており、近年では太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーが国内でも急速に普及し始めている。しかし、これらの電源は天候などによって発電量が大きく変化するため、電力需給バランスに大きな影響を与えかねない。実際、最近西日本を中心に昼間に余剰電力が大量に発生し、太陽光発電の出力制御を行わなければならない事態を招いている。このような実例から、昨今国内でも、再生可能エネルギーの余剰電力の有効活用方法の検討が盛んとなっている。

● 冷凍冷蔵倉庫が抱える課題

本プロジェクトでは、冷凍冷蔵倉庫にかかる電気代の高騰という課題の解決を目指す。冷凍冷蔵倉庫業では、倉庫稼働に莫大な電力が消費され運営費の多くがここに費やされる。昨今のクリーンエネルギーへの移行の要請や、ロシアのウクライナ侵攻に伴う燃料価格高騰に準じて、倉庫の運営にかかる電気料金は近年大幅に高騰しており、事業者の経営を圧迫している。ヒアリングを行った企業の中には、年間約17億円にも及ぶ高額な電気代を支払っている企業も存在し、解決が急がれる大変大きな課題となっている。また、日本の冷凍冷蔵倉庫業が抱える大きな問題の一つとして、倉庫の老朽化がある。日本で現在運営されている倉庫のうち約34%が築40年を超えている。冷凍冷蔵倉庫の法的耐用年数は長くて19年であり、築40年を超える倉庫は早急な建て替えが必要とされている。建て替えが進んでいない原因は、単純なる資金不足にある。倉庫を扱う事業者のうち約9割が中小企業であり、今後廃業を余儀なくされる中小企業も出てくると考えられている。とある中小企業によると、小規模倉庫でも建て替えに10億円必要であり、電気料金高騰と人件費で手一杯な今は、建て替えは検討すらできていないとのことであった。更に我々は20社以上の企業へのヒアリングから、冷蔵冷凍倉庫業界では、冷凍機の温度設定には統一された制御手法が存在せず、それが電気料金高騰の問題を深刻化させ経営が悪化している実態に気づいた。ある企業では、温度設定は手動で行っており、ベテランと新入社員の制御方法の違いで、電気代に毎月30万円ほどの差が出ることもあるという。このように業界内どころか社内ですら統一された制御手法が存在せず、さらには業界の人手不足問題が技術の受け継ぎを阻んでおり、自動化を望む声も多数聞かれた。

このような状況にもかかわらず、冷凍冷蔵倉庫の主要品目である冷蔵冷凍食品の市場は今後も大きく成

長、拡大し続けていくと見込まれており、日本全国で倉庫の需給の逼迫が将来起こることが予想されている。

しかしながら、上記問題点の解決につながるような技術的に効果的対策は未だ講じられていない。例えば、ビルシステムや工場などにおいては人工知能や蓄電池などの技術を活用したエネルギー使用量の最適化制御(エネルギーマネジメントシステム:EMS)が行われている一方で、これが冷凍冷蔵倉庫に適用されている例はまだない。これは、エアコンなどと比べて冷凍冷蔵倉庫の稼働には莫大な電力が消費されることや、倉庫内の温度推移を体系的にモデル化し、それに基づいて倉庫内の保管物の品質を担保しながら制御するシステムを作るには相当高度なIT技術が必要であることに起因する。冷凍食品で有名な某企業も過去に挑戦したが失敗に終わってしまったと聞いている。このように、業界内で数少ない大企業の経験をもってしても解決の難しい課題なのである。

1-3 提案の目的

そこで、本プロジェクトでは、冷熱を蓄熱しながら冷凍機を自動で最適に制御するシステムを提案する。具体的には、JEPX(日本卸電力取引所)の電力市場価格や冷凍冷蔵倉庫の翌日の入庫量・出庫量、外気温などの情報を読み取り、電力市場価格が安価な時間帯に冷凍機を稼働させ、高価な時間帯に稼働を止める市場連動型のデマンドレスポンス [1]を行うことで、冷凍冷蔵倉庫の運営にかかる電気料金が最も低くなるような最適制御を施す。(デマンドレスポンス:需要家エネルギーリソースの保有者もしくは第三者が、需要家エネルギーリソースを制御することで、電力需要パターンを変化させること)

1-4 提案の目標

本プロジェクトにおいては、「倉庫管理業者が、翌日の倉庫の入庫量・出庫量の情報を入力するだけで、自動で翌日の冷凍機の最適制御アルゴリズムを計算し、自動で制御を行うシステム」の販売を目標とする。これにより、冷凍冷蔵倉庫にかかる電気料金を抑制することができただけでなく、再生可能エネルギーの余剰電力を有効活用することにより、電力需給をバランス化することが可能となり、カーボンニュートラルへの貢献も期待される。

冷凍機のオンオフに伴う倉庫内の温度推移は、庫内保管物の量や、入庫時間・出庫時間などによってめまぐるしく変化する。そこで、まずは熱容量や熱抵抗の値を用いた伝熱工学によるシミュレーションと、我々が実際の大型冷凍冷蔵倉庫で測定したデータを比較し、正確な温度推移モデルを予測することを目指す。また、測定した倉庫内の温度や消費電力のデータから冷凍機の制御モデルを同定する。その後、予測した温度推移モデルと冷凍機の制御モデルから、冷凍機の最適制御アルゴリズムを求め、得られたアルゴリズムに基づいて、冷凍機のスイッチのオンオフを自動で行う制御デバイスの開発を行う。この制御システムを、後付け可能な形で冷凍冷蔵倉庫を抱える全国の食品加工業者・物流業者に販売することを未踏事業期間中の目標とする。

2. 開発に関する未踏性の主張、期待される効果など

2-1 開発製品の未踏性と技術シーズの優位性

本プロジェクトは、東京大学の松橋研究室に所属する水野の卒業論文の技術がベースとなっている。卒業研究では、家庭用冷凍庫を対象として制御モデルを同定し、JEPX(日本卸電力取引所)の市場価格に連動させて倉庫に冷熱を蓄熱させながら家庭用冷凍庫を最適に制御させる、市場連動型のデマンドレスポンスを行う制御アルゴリズムを開発した。従来の冷凍冷蔵倉庫の基本的な制御方法は、2つの温度を閾値として庫内温度がその値に達したら冷凍機を入り切りするというとても単純なものであった。これに対して、水野の研究では、冷熱エネルギーを倉庫内に蓄熱させることで、冷凍冷蔵倉庫および冷凍機を蓄電池のように機能させるという業界にはいまだない全く新しい試みに踏み入ったものであり、その点において未踏性がある。本プロジェクトはこの制御アルゴリズムを技術の優位性、強みとして持っており、それを裏付ける証拠として、水野は本論文において、東京大学工学部電気電子工学科の優秀卒業論文賞、および電気学会東京支部電気学術奨励賞を受賞している。

事業期間中には、このモデルを応用させることで、大型冷凍冷蔵倉庫において最適な制御を行うアルゴリズムの開発を行い、製品の形として倉庫へ導入することを目指す。大型冷凍冷蔵倉庫を対象としたモデルに関してはすでに開発をスタートさせており、倉庫の入出庫量を考慮した庫内の温度推移モデルの

プロトタイプが完成している。今後も開発を継続し、最終的には世界初の大型冷凍冷蔵倉庫の温度推移モデルの完成を目指している。こうした点においても未踏性があるといえる。

また、我々のチームは実証先の確保に向けて約70の企業・機関にアプローチしている。そして、4社から倉庫のデータをご提供いただくことが決定した。各企業の温度推移データや詳細の商品管理方法は社外秘とされていることがほとんどであるため、多種多様な倉庫データを集めることは大変難しいと考えられるが、こうしたデータは多く集めれば集めるほどモデルの精度の上昇につながるため、その点においても優位性があるといえる。

更に、市場連動型のデマンドレスポンスモデルという手法は、冷凍冷蔵倉庫にかかる電気料金を減少させられるだけでなく、近年増加している再生可能エネルギーの余剰電力を有効活用することで、日本のエネルギー問題を解決することができるポテンシャルを有しており、技術そのもののだけでなく、冷凍冷蔵倉庫からエネルギー問題へつなげるアイデアにも未踏性があるといえる。

2-2 期待される効果

水野の研究では、一般家庭用の冷凍庫において、作成した制御モデルを用いると約25%電気料金が減少したことが確認された。業務用の冷凍冷蔵倉庫は、家庭用冷凍庫と比べて冷凍機の消費電力が高いだけでなく、熱容量が大きく蓄熱性能が高いため、業務用巨大冷凍倉庫においては更なる電気料金の低減が可能であると考えられる。また本プロジェクトで開発する製品は、常に倉庫内の温度をモニタリングしながら冷凍機の制御を行うため、倉庫内の保管物の温度をリアルタイムで把握することが可能となる。さらに制御の自動化を実現することにより、温度制御のノウハウを新入社員に教える手間を省くことができるだけでなく、特に慢性的な人手不足問題に悩まされている物流業者については人手を物流に回すことが可能となる。

3. 開発の具体的な進め方

3-1 現状のプロトタイプ

● 概要

家庭用冷凍庫向けのプロトタイプが完成し、それを大型冷凍冷蔵倉庫に応用させる形で、現在は山梨県の倉庫業者と協力しながら開発を進めている。これまで、倉庫に温度計(写真左)や三相クランプメーター(写真右)を設置し、温度や消費電力のデータを測定した。また、倉庫の日々の入庫量・出庫量のデータを伝票の形で業者に提供いただき、モデルの開発を行っている。



● 温度推移および消費電力モデルの予測

測定した庫内温度データから冷凍機の電源オフ時およびオン時の温度推移を抽出し、外気温、入庫データを考慮しながらPythonのscikit-learnライブラリを用いたカーブフィッティングおよび外挿を行うことで、入庫量を加味した電源オフ、オン時の温度推移モデルの推定を行った。また、冷凍機の消費電力モデルに関しては、フィードバック制御であると仮定したうえで温度と消費電力の測定結果を用いて同定した。家庭用冷凍庫のモデルについてはMATLABのSimulinkによってその妥当性が検証されている。大型冷凍機のシステム同定にあたっては、入出庫量や外気温の情報を加味しなければならないため、現在ARXモデルなどを用いて解析を進めている。家庭用冷凍庫において最適な制御アルゴリズムを適用させた際の庫内温度および消費電力の推移を図1に、測定した大型冷凍冷蔵倉庫の温度と消費電力推移を図2に示す。

● 制御アルゴリズムの開発

前項で同定した温度推移モデルと冷凍機の消費電力のモデルを関数として、最適化問題を設定し、日々の入出庫量に合わせて翌日の最適な制御アルゴリズムを計算する仕組みになっている。庫内の温度制約や消費電力の推移などについて制約条件を設定している。そのまま立式すると非線形となるため、

McCormick envelopesを用いて線形に変換している [2]。実装については、MATLABの Optimization ToolboxのIntlinprog関数を用いている。

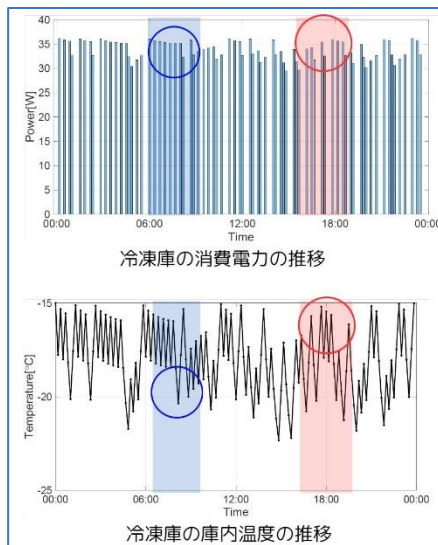


図 1

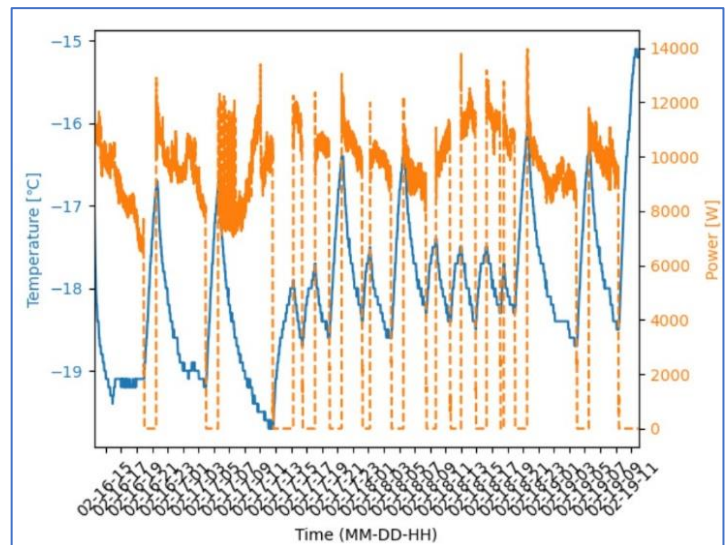


図 2

3-2 事業期間中の開発内容

● ソフトウェア

① 大型冷凍機の制御モデルの同定

倉庫内の温度および冷凍機の消費電力を測定した結果、冷凍機には何らかのフィードバック制御モデルが取り入れられていると考えられる。しかし、モデルを正確に同定することは困難であったため、今後はARXモデルやLSTMを用いて冷凍機の制御モデルを予測する。

② 冷凍機のオンオフ時の温度推移モデル予測

実際の倉庫の温度推移モデル(時定数)は、庫内荷物の種類や量、1日の入出庫量や時間、外気温の状況によりめまぐるしく変化する。まずは、後述の入出庫時間検出センサーなどを用いて必要なデータを全て取得し、重回帰分析により個々の要素の重要性を定量化する。また、伝熱工学を用いて倉庫の熱容量や熱抵抗を推定し、有限要素法などを活用した伝熱シミュレーションを行うことで、より正確な倉庫の温度推移モデルを予測する。

③ 冷凍機およびデフロストの最適制御アルゴリズム

現在のモデルにおいては、翌日の入出庫量による倉庫の温度推移の時定数の変化は考慮できているが、入出庫やデフロスト(霜取り)による突発的な温度の上昇までは考慮できていない。ヒアリングによると実際には、この影響は大きく、翌日の搬入状況などに応じて、作業員が長年の経験と勘で事前に冷やしこみ(予冷)による蓄熱を行うことがあるという。事業期間中には、翌日の搬入状況も考慮したうえで最適な制御を行うアルゴリズムを開発予定である。開発に当たっては、①・②で予測したモデルを最適化モデルに適用させる。

● ハードウェア

① 冷凍機制御を担うデバイス

上述の制御アルゴリズムに基づいて自動で冷凍機の制御を行うデバイスの開発を行う。山梨の倉庫業者の冷凍機にはあらかじめ、温度にのみ基づいて制御を行う制御器が組み込まれている。この制御器と冷凍機の間にマグネットスイッチを設置し、通信により入力信号を飛ばすことで制御を実現する。これにより、万が一我々の製品が正常に作動しない場合でも既存の温度制御器は稼働し続けるため、倉庫運営に悪影響を及ぼすことはない。

② 倉庫の入出庫時間検知センサー

正確な温度推移モデルを構築するには、詳細な入出庫時間を知ることが不可欠であると過去の検証で判明したが、実証先では記録されていないため、チームで測定機器を開発する必要がある。扉に加速度セン

サーを取り付けるか、扉の開閉と同時に稼働するエアカーテンに何らかの形でリレー回路を挟むことで入庫の時間を検知するセンサーの開発を行う。

3-3 開発体制

● プロジェクトメンバー紹介

① 水野竣介

東京大学工学部電気電子工学科卒業。東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻修士1年。小学生の頃より、エネルギー問題に興味を持ち、電気工学・エネルギー工学を専攻する。松橋研究室にて、本プロジェクトの技術シーズである、冷凍冷蔵倉庫の実時間最適制御による電力系統安定化について研究を行っている。前述のように、本研究で優秀卒業論文賞及び電気学会電気学術奨励賞を受賞している。また、昨年度のNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)のNEP開拓コースに採択され、研究開発及び事業検討を行ってきた。本プロジェクトの代表者である。開発面においてはこれまで、100program、東京大学Spring Founders Programなどで経験を積んできた。昨年春の100programにおいては雪冷熱を用いた温度差発電デバイスの開発を行い、東大IPC賞(スポンサー賞)を受賞した。今年の100programではアラムナイメンターや、本郷テックガレージのスタッフが務まるほどに、各種ハードウェア設計の経験があり、各種最新工作機械の扱いに長けている。ビジネス面では、2021日経大学ビジコン優秀賞、2023東京大学アントレプレナーシップチャレンジ優秀賞などの受賞経験がある。また、再生可能エネルギーベンチャーである株式会社クリーンエナジーコネクにて2年前からインターンとして勤務しており、太陽光発電所の異常検知や、建物の電力需要予測などを担当。再生可能エネルギーの法制度にも知見を持つ。昨年度は、学内のスタートアップコミュニティの海外研修メンバーに選出され、様々な研修に参加し、海外の電力・エネルギー事情やスタートアップエコシステムにも精通している。

研究室での活動が開発へ直結するため、月150時間以上のコミットが可能。

② 穂山公宏

東京大学工学部電子情報工学科4年。電気電子工学と情報工学の基礎を学びつつ、研究と現実の課題へ適用するためのソフトウェア解析を行ってきた。過去には半年以上産業総合技術研究所にてインターンとしてコンピュータービジョンに関する基礎研究に従事し、現在まで3年の4月から活動が続いている東京大学生産技術研究所佐藤洋一研究室にて、人物行動解析システムの開発に取り組んできた。また研究室での活動以外にも、東京大学Spring Founders Program(SFP)に2度の参加経験をもとに技術力を磨いてきた。初回はサッカーのゴールキーパーのプレー分析システムの開発に携わり、認識モデルの学習、各種アルゴリズムを開発し方針設計に貢献した。2度目の参加では、サッカーにおけるシュート自動制御マシンの開発に取り組み、ボールの物体認識や物理シミュレーションを担当することで、仮想的なプロトタイプ構築に貢献した。

本プロジェクトのメンバーとは2度目のSFPの同期として出会い、エネルギー制御に関するアイデアや情熱に共感し、新たなメンバーとして加入。卒業研究との兼ね合いを見ながら月100~150時間ほどを本プロジェクトに捧げる予定。

③ 和泉陽大

東京大学理学部化学科4年。水野と同じくエネルギー問題の解決を志す強い思いがあり、中高の頃からの友人である水野の裏方として、2023年8月からプロジェクトメンバーとして稼働してきた。分野は異なるが、過去には水素生成源として期待されている光触媒の担持金ナノ粒子の形成機序の解明や水の凝固点付近での熱電変換技術の創生の研究に従事したことがあり、その過程で学んだプログラミングによる数値データ解析を用いて本プロジェクトの開発面にて携わってきた。

本プロジェクトでは今まで主にはビジネスプランの構築や企業へのヒアリングを主導してきており、今後も社会実装へ向けて、各種企業との連携や業界の情報収集を通してビジネス展開、事業化を主導していく。海外経験で身に着けた英語力で、今後エネルギー技術が盛んな海外進出の際に大きな力となると考えられる。卒業研究との兼ね合いを見ながら月100~150時間ほどを本プロジェクトに捧げる予定。

④ 秦珠実

東京大学工学部電気電子工学科卒業。東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻修士1年。廣瀬夏秋

研究室にてドローン搭載のレーダによる合成開口(SAR)画像の高画質化についての研究を行っている。100Programや東京大学Spring Founders Program(SFP)への参加経験の他、複数企業での長期インターンシップ経験があり、IoTデバイスの開発からWebアプリ開発などを行い、多数の実務経験も積んできた。水野の学科同期兼良き友人であり、2023年SFPからプロジェクトメンバーとして加入し、開発に従事してきた。研究との兼ね合いを見ながら月100~150時間ほどを本プロジェクトに捧げる予定。

⑤ 島田春樹(外部協力者)

幼少期より日米を往来し、高校2年生に上がり次第シアトルセントラルカレッジに入学。プログラミングに出会い、コンピュータサイエンスクラスのTAなどを務め経験を積み、2019Hack the Now and Nextハッカソンで準優勝。そこから更にウェブ開発にのめりこみ、帰国後はスタートアップの立ち上げフェーズからの開発に携わる。FintechベンチャーRespoや三井物産のアクセラベンチャーIsshoのリードエンジニアなどとして多数の実務経験を積んできただけでなく、種々中規模ベンチャーにてフルスタックエンジニアとして活動したりなど、確かな技術力を保有するだけでなくスタートアップの立ち上げに関わる事情にも精通。現在はPaidyで決済トランザクションの基幹システムの開発を行い、不正決済探知やバックエンドサービスのアップタイム向上、データパイプラインの構築などにも携わる。さらに、メトリクス検証ライブラリや、コード変更の後方互換性を確かめるテストを自動生成するライブラリなども作成。また業務外では、自主的にOSS活動も行い、書ききれないほどの様々な経験を通して技術力をブラッシュアップしてきた。

水野と和泉とは中学の頃からの古い友人であり、技術の面白さと事業の社会インパクトの大きさに興味を惹かれ参加を決意。英語が堪能であるため、和泉とともに海外進出検討の際の大きな助力となると考えられる。9月から大学編入を考えており今後の予定が非常に不安定なため外部協力者として参加。

⑥ 尾崎武尊(外部協力者)

東京都立産業技術高等専門学校電気電子工学コース卒業。東京都立産業技術高等専門学校創造工学専攻電気電子工学コース2年生。参加者唯一の高専生。所属する再生可能エネルギー研究室において、需給調整市場に参入するためのスマートコミュニティの電力運用方法の研究を2年間行っている。高専在学時には、電気電子に関する基礎知識の学習と実験実習を約5年間行ってきた。また、少し分野は異なるが、デザイン思考を用いて、宿泊施設周辺の観光スポットの案内板の作成、リモートワーク改善のためのクエスト式業務の提案、視覚障害者のためのサポートアイテムの製作を行ってきた。そのため、本プロジェクトではエネルギー制御、デバイス開発をサポートする。研究室での研究に大学院入試が重なり多忙が予想されるため外部協力者として参加。

● アドバイザー

① 東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 松橋研究室 松橋隆治 教授

東京大学大学院にて電気工学の博士課程修了。四半世紀にわたり、電力システムを含むトータルエネルギーシステムと地球温暖化対策の研究、およびエネルギー政策に関わる多様な研究に従事。エネルギー総合学連携研究機構の機構長も務めている。

② 東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 松橋研究室 前匡鴻 助教

2023年3月東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻博士課程修了。博士(工学)。2023年4月より東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻助教(現職)。産業応用におけるメカトロニクスおよびエネルギーシステムの多変数制御とデータ駆動学習に関する研究に従事。

● 役割分担

作業内容	主力メンバー	補助メンバー
制御モデル、アルゴリズムの開発	水野、亀山	和泉、島田、秦、尾崎
温度推移モデルの開発	水野、亀山	和泉、島田、秦
制御デバイス、センサー製作	水野、和泉、秦	亀山、尾崎
データ収集、企業との連携	和泉	水野、亀山

3-4 プロジェクト実績

本プロジェクトは2023年度NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)NEP開拓コースに採用されたことがあり、技術の重要性和対象としている課題の重要性が裏付けられているといえる。また、東京大学Spring Founders Programにおいては本郷テックガレージ賞と大和証券賞(スポンサー賞)の両方を受賞し、技術力だけでなくアイデアの面白さと有効性を再確認した。

3-5 開発線表

		2024										2025	
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	
主な連携先		山梨の企業				他3実証先企業				日本冷蔵倉庫協会			
ソフトウェア	制御アルゴリズム	プロトタイプ		センサーデータ利用		プロトタイプ検証		モデルの改善			新実証先でモデル検証		
			デフロスト機能搭載		リリース版制作								
	モデル予測	伝熱シミュレーションによる温度推移モデル予測				モデル検証		モデルの改善			新実証先でモデル検証		
		ARXやLSTMによる冷凍機の制御モデル予測											
			センサーデータ利用										
ハードウェア	制御デバイス			マグネットスイッチの開発		通信機構の開発	デバイス作成の思案UIの改善		統一性向上、プロダクト版の制作				
	各種センサー			プロトタイプ (扉andエアカーテン)		通信機構の搭載	扉orエアカーテンの片方のみへ移行		プロダクト版の制作				

3-6 克服すべき課題とその解決策

制御アルゴリズムが完成したとして、それを温度が上がりすぎないように正確に制御し、保管物の品質に絶対に影響を及ぼさないようにしなければならない。そこで、Wi-Fiでの通信のほか、バックアップとしてSIMを用いて通信を行うことで、通信が絶対に途絶えないようなシステムの開発を行う。また、実際に開発した最適な制御アルゴリズムの妥当性を検証するための実証を行う前に、冷凍機の自動制御システムが正確に動作するかを検証する実証を行う。具体的には、我々チームメンバーの立会いのもと、制御システムを短期間の間稼働させ、通信の安定性を確かめる。実証については、慎重に進め、倉庫業者からの信頼を勝ち取りたい。

また、各倉庫業者によって、使用している冷凍機のメーカー、制御方法が異なるため、今後の実証実験を通じて各々の冷凍機の稼働方法を理解して、いかにして統一性の高い制御システムを作り上げるかを常に意識する必要がある。

4. 事業化・社会実装の新規性・優位性、想定するターゲットと規模

4-1 事業の新規性・優位性

● 大手との差別化要因

我々の開発している製品は、電気代の高騰という課題に対して、冷凍冷蔵倉庫内の保管物や入出庫状況を見ながら電力市場価格に合わせて冷凍機を自動で最適に制御するというこれまでにないものである。このような製品がこれまで存在してこなかった理由は、冷凍機の開発と冷凍冷蔵倉庫の管理とが、分野的に互いに独立したものであるからだ。冷凍機を開発するメーカーは実際に倉庫を運用せず、そのまた逆も然りである。冷凍機メーカーが我々の開発するような製品を作るには、実際の倉庫の温度だけでなく種々の運営データを取得する必要があるが、顧客の個人情報保護の観点から、他の倉庫業者とも密接な関わりが大きい冷凍機メーカーがそのようなデータを取得するにはハードルがとても高い。一方、我々は業界外の視点から倉庫を運用する業者にヒアリングを行い、倉庫の運用データ提供が決まった実証先は2024年3月時点で4社に上る。そのうち1社とはすでに実証が始まっており、我々の製品に対する期待がうかがえる。

また、我々のチームは、冷凍冷蔵倉庫業界を熟知しており、課題を知り尽くしている。昨年にNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)のNEP開拓コースに採択されてから、我々は約70の企業・機関にアプローチし、そのうち22社から話を伺うことができた。実際にヒアリングした結果、ある水産系の企業からは、初期投資するので、何とか電気代が安くなる製品を開発してほしいとの声をいただいた。また、物流業者の方からは、電気代を削減して、人手不足がさらに深刻である物流に人を回したいという声をい

ただいた。このように現場から生の声を聞くことで、この課題を解決したいという強い使命を抱くようになった。

● 本事業がもたらす新たな価値観

我々のシステムの特徴として、冷凍冷蔵倉庫さえあれば場所の制約なく、後付けすることでどこでも実現可能なシステムであるという点がある。このようなシステムであれば、倉庫建て替えや冷凍機の入れ替えを行う資金余力がなく古い冷凍機の使用を余儀なくされる中小企業へ、冷凍機の種類に関わらず幅広くアプローチ可能であるという点で、既存の冷凍機メーカーに大いなる優位性を持つといえる。さらに、我々が庫内温度を常にモニタリングすることで、保管物の品質を外部の立場から担保することができ、保管物のトレーサビリティの向上にもつながる。

更には、冷凍冷蔵倉庫業界外では、現在ではEVや蓄電池を活用したエネルギーマネジメントシステムが盛んに行われているが、寒冷地ではバッテリーへの負荷が高くなるためあまり普及していない。その点、本システムの場合、寒冷地であればあるほど契約電力に余裕が生じるため、より多くの電力を蓄熱のために利用することができ、デマンドレスポンスシステムとしての効果を発揮しやすい点で優位性がある。

● 社会的インパクト

我々のシステムは、様々な点でメリットの大きい、「市場連動型電気料金プラン」の導入を促進することができる。現在、企業の多くでは深夜帯のほうが昼間よりも電力量料金単価が低い電気料金プランを採用しているが、これは昼間に余剰電力が発生するようになっている今の電力システムの状況にはマッチしていないだけでなく、「市場連動型電気料金プラン」を導入するよりも電力コストが高価になってしまう。市場連動型の電気料金プランへの切り替えは、電力会社を変えずにすぐ行うことが可能であり、このプランの導入の促進は、全体の電力コストの削減のほか、カーボンニュートラルな電力システムの実現に貢献することができる点で新規性と優位性がある。

4-2 対象とする市場

我々は、業務用の大型冷凍冷蔵倉庫を所有する物流業者や食品加工業者をターゲットとして想定している。首都圏だけでも220を超える冷凍冷蔵倉庫があり、1つの倉庫当たりの冷凍設備の出力を100kWとして、首都圏の倉庫全てに我々のデバイスを導入すると、4ha以上の太陽光発電所と同等の規模で電力需給をバランスすることが可能である。また、首都圏にある冷凍冷蔵倉庫だけで年間約60億円の市場規模(電力需要)を見込むことができる。

4-3 競合との比較

● 冷凍機メーカー、冷凍冷蔵倉庫事業者

4-1「大手との差別化要因」で述べた通り、冷凍機メーカーと倉庫運営業者は全くの別物であるため、倉庫運営側の声を的確に反映しながら冷凍機制御システムをつくる点において我々に新規性と優位性がある。また我々の製品の基盤となる技術は、2-1や3-4で述べた通り、学術的にも開発面でも多数の賞を受賞しており、技術レベルの高さという面での優位性も保持している。

● Viking Cold Solutions

独自開発の保冷剤を用いて夜間に冷熱を貯めることで、冷凍倉庫の電力消費量を削減するサービスを提供している米企業。しかし、保冷剤を倉庫に置くための初期費用やスペースが必要となるため、冷凍機のブレーカーに後付けでき、より手軽に導入できるという点で我々の製品に優位性がある。また、我々のように最適制御モデルを作成したり用いたりしているわけではなく、この点においても独自の最適制御モデル技術を有する我々に優位性があるといえる。

5. 事業化・社会実装の具体的な進め方

5-1 ビジネスモデル

現在検討しているビジネスモデルでは、自動制御を行うための機器の導入にかかる初期費用を数万円程度として、代わりに企業側が削減できた電気料金のうち一定の割合(2, 3割)をいただく形を想定している。削減できた電気料金は、従来の温度制御のみを行った場合の電気料金シミュレーションと、実際に冷

凍機稼働にかかった電気料金との差によって求められる。また、将来的には数十台の冷凍機をまとめて制御(アグリゲート)することで需給調整市場に参入し、最適な入札戦略を実行することで、収益化を行うことも目指している。このビジネスモデルは、初期費用を安めに抑えても、削減した電気料金からの一定割合の徴収による利益確保の面で現実的であるだけでなく、複数企業の経営者へのヒアリングで集まった意見を基にして作成したものであるため、顧客目線でも妥当性を有するモデルであると思われる。

5-2 事業化・社会実装に向けた作業内容

● 作業線表

		2024										2025	
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	
山梨の実証先企業	開発概要	モデル開発(プロトタイプ)					モデルの先鋭化						
		各種ハード開発(プロトタイプ)											
	事業面				導入と効果実証(実績作り)						山梨にて利益創出		
他3実証先企業 (企業①、②、③)	開発概要	企業①からデータ収集						モデル、各種ハード開発					
						企業②③からデータ収集							
	事業面	企業①とNDA締結				企業②③とNDA締結			山梨での実績利用し導入				利益創出
新実証先	開発概要									データ収集			
										各種ハードの統一性向上			
	事業面					山梨の実績もとに協会から企業紹介							導入

● プロトタイプの完成と実績作り

まずは、現在すでに実証段階にある山梨の冷凍冷蔵倉庫業者において測定・収集したデータの解析を通じて作成中のモデルの完成を急ぎたい。また、モデル作成と同時進行で、倉庫に実際に導入可能な形の各種デバイスのプロトタイプを作り上げる。5-3にあるように動作性能の確認をしながら、モデルの完成とともに実証実験を行うことで、実際の稼働とともにモデルを改善しつつ、事業期間前半中に、山梨の企業にて電気料金削減効果を出すことを目指す。

● モデルの先鋭化と実証先の拡大

ほかの実証先でもデータ提供へ向けて現在具体的な話を進めており、いただいたデータを用いてモデルの精度を向上させていく。また、山梨の企業で作った実績をエビデンスとして実証先企業での導入を促進するだけでなく、新たな実証先確保へ向けて動き出す。具体的には、日本冷蔵倉庫協会を通して事業者アプローチしていく。日本冷蔵倉庫協会とは、昨年ヒアリングさせていただいたことをきっかけにコネクションを構築し、我々個人の力では協力を得られなかった有名企業を実証先として紹介していただいた。協会とうまく連携しながら、我々の製品が、保管物の品質に万が一にでも影響を与えないよう、実証を進めていきたい。その後は、協会に加入していない、大型スーパーなどにもアプローチすることで、より多くの企業に導入してもらえるよう努力していきたい。

● 作業体制

昨年度からヒアリングなどを精力的に行っており、業界に対する理解が深い和泉を中心に進める。

5-3 克服すべき課題とその解決策

● 課題

① 制御デバイスへの動作性についての信頼

万が一我々の製品を導入したことで冷凍機が誤作動を起こし、庫内の商品が解凍されてしまうと、商品そのものの弁償だけでなく、冷凍機の不具合により各事業者の業務に支障をきたす事態に発展することもあると考えられ、数十億の賠償責任を負う可能性がある。我々のプロジェクトに最も協力的な山梨の企業によると、モデルの先鋭化による電気料金削減の効果上昇よりも前に、我々の製品が絶対に安全であるという保障が欲しいとのことであった。

② モデル導入後の不安

上記①の課題を克服して実際に我々の作ったモデルを基に安全に制御できるようになっても、電気料金が本来の価格を上回ってしまった場合は協力していただいた企業の不利益につながってしまう。

● 解決策

① 営業時間中に我々の立会い下で検証

制御デバイスへの信用獲得のために、まずは我々の立会いの下、企業の営業時間内にものみ制御を施すことを考えている。営業時間内でかつ我々の立会いがあれば、温度データを通信して可視化することで、何か不具合があった場合にすぐに対処ができる。営業時間内のみであっても、数日もしくは数週間ほど安全に稼働すれば、安全性の理解を得られると考えている。

② モデルを仮想運用し、電気料金削減効果の実証

我々の作ったモデルが実際に電気料金を削減できると示すためには、我々のデバイスを導入していない通常の冷凍冷蔵倉庫において、倉庫の稼働に合わせてモデルを仮想的に運用することが有効であると考えられる。電力計や温度計、入出庫把握センサーなどのみを取り付け、モデルで算出された電力料金と、実際の稼働の電力料金の違いを可視化することでモデルへの信用を獲得することができると思われる。

6. 事業期間終了後の事業化・社会実装に関する計画

6-1 本プロジェクトの長期的目標

本プロジェクトにおいては、全国の冷凍冷蔵倉庫に我々が開発した製品を導入することを目指している。本プロジェクトの技術シーズはデータセンターなどへの応用も可能であり、再生可能エネルギーの余剰電力を冷熱として蓄熱させることで、再生可能エネルギーの主電源化とそれに伴う環境負荷低減を実現することが最終目標である。

6-2 成長へ向けた具体的計画

事業期間終了後に、ベンチャーキャピタルからの資金調達を目指す。まずは5年間で1000の冷凍冷蔵倉庫に我々の製品が導入されることを目的としている。

7. 予算内訳まとめ

名目	費用
三相クランプメーター(×10)	300万
温度計(×50)	50万
実証先への交通費・滞在費	200万
保管物損害対応保険・実証先へのお礼など	150万
実証・検証にかかる費用(冷凍機の動力費など)	500万
開発費(センサーや通信機構など)	300万
合計	1500万円

8. 参考文献

[1] 資源エネルギー庁, “これからの需給バランスのカギは、電気を使う私たち～「ディマンド・リスポンス」とは?”, 2022. [オンライン]. Available: <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/dr.html>. [アクセス日: 16 9 2023].

[2] S. L. a. C. C. a. Y. L. a. Y. Hou, “Resilient Disaster Recovery Logistics of Distribution Systems: Co-Optimize Service Restoration with Repair Crew and Mobile Power Source Dispatch,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, 第 巻10, 第 6, pp. 6187-6202, 2019.