

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12432

研究課題名（和文）CO2を熱輸送媒体とする地域熱供給システムの最適設計基盤の構築

研究課題名（英文）Optimisation of District Energy Distribution and Storage System by CO2 Network

研究代表者

天野 嘉春（AMANO, Yoshiharu）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60267474

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、フロア単位から、建物、そして地域全体に適用可能な、CO2を熱輸送媒体とする分散ヒートポンプシステムである第5世代地域熱供給システムの最適設計基盤を構築し、運用時CO2排出量を大幅に削減することを明らかにした。
すなわち、地域内の離れた場所で同時期に発生している冷・温熱需要地を熱輸送媒体で接続することで局所的な不均一性を平準化し、同時に熱輸送媒体を余剰エネルギーの蓄積に利用することで運用最適化へ大きく寄与することを明らかにした。熱需要特性と未利用エネルギーや再生可能エネルギーのポテンシャルを最大限利用する最適な組み合わせを見出すことで、運用時CO2排出量を最小化する設計指針を導出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱の面的利用の利点は認知されていたが、日本では特に高効率機器の開発に主眼が置かれた。一方、常温近傍での熱利用にはヒートポンプが最適な選択であることは周知の事実であった。しかし、これらをネットワークとして接続することで分散システムを構成し、システム全体の最適化の筋道を明確にした研究はほとんどなかった。また、欧州で研究されていた動力サイクルの理論的最適化手法をヒートポンプサイクルに適用し、吸収式サイクルへと拡張することで、より一般性のある最適な熱力学サイクル群を導出する理論を構築したことは学術的価値が高い。また、地域で入手可能なエネルギー資源を有効に利用することの重要性を説いた点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study shows that a fifth generation district heat supply system, a decentralised heat pump system with CO2 as the heat transport medium, applicable from floor units to buildings and then to the entire region, significantly reduces operational CO2 emissions. It was found that the connection of hot and cold heat demand areas that occur at the same time in remote locations within a region by means of a heat transport medium makes a significant contribution to operational optimisation by levelling out local heterogeneity and by using the heat transport medium for the storage of surplus energy. Design guidelines were derived to minimise operational CO2 emissions by finding the optimum combination of heat demand characteristics and the maximum utilisation of unused and renewable energy potential.

研究分野：エネルギー・システム工学

キーワード：分散ヒートポンプ CO2 最適化 再生可能エネルギー エネルギー貯蔵

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本政府は、パリ協定を踏まえた今後の対策の取組方針を 2015 年 12 月 22 日に決定した。この中で、政府が旗振り役となり国民運動を強化すること、更にパリ協定の署名・締結・実施に向けた取組を進めること等を決定した。パリ協定の長期目標及び条約の究極目標を達成するには、あらゆる部門において多大な努力が必要となることが確認された。

高効率のエネルギー変換・貯蔵機器の開発や、エンドユースにおけるエネルギー利用のあり方を踏まえた、社会システムとしてのエネルギーシステムの全体最適を図る技術について一層の研究開発が求められていた。特に、エネルギーシステムの最適化に係わる研究領域では、スマートグリッドの技術的開発が先行した。そして電力系統だけではなく、熱エネルギーの面的な利用を促進する技術として、地域熱供給システムも分散ヒートポンプを主体とする第 4 世代へと進化させる研究が、欧州で先行して進められてきた。

一方、電力系統へ再生可能エネルギー由来の電源が多く接続することによって、余剰電力の有効活用が喫緊の問題となり、様々な検討が進められた。このような状況のもと、エネルギー利用規模の大きな熱利用システムを対象に、電力系統と連携して電化された熱源機や各種エネルギー貯蔵システムを含めたシステムを、どのように最適設計するのか、どのような技術要素が最適化に貢献するのかを明らかにする必要が高まっていた。申請者は、これまで、家庭用から業務用に至るエネルギーシステムの最適運用を重視したシステム設計論を推進してきた。特に、複合発電プロセスの最適化から出発し、電力と熱を併給するシステム設計に、需要家側の積極的な制御への寄与(デマンドレスポンス)などを実現するための情報モデルの構築や効果を評価してきた。そこで、スイス連邦工科大学の研究者から、CO₂ を熱輸送媒体とする分散ヒートポンプシステムの日本における適用可能性を評価するような私信を受けて、本研究を開始した。

2. 研究の目的

1) 未利用エネルギーを有効活用し、再生可能エネルギーを面的に最適利用する地域熱供給システムを再定義する。すなわち、常温近傍で気液平衡を保つよう調整可能な CO₂ を熱輸送媒体に採用することで、輸送中の熱損失を最小化する熱供給システムの最適設計指針を明らかにする。すなわち、分散ヒートポンプのネットワーク化により、温熱および冷熱需要の局所的な不均一性をうまく平準化させつつ、熱輸送媒体そのものの熱力学的容量を系統からの余剰電力の蓄積に利用することで CO₂ 排出量を最小化する運用最適化への寄与度を具体的に評価する。このための需要端で利用する新たに開発すべき機器の機能モデルを構築し、システムの振る舞いを評価する環境を構築する。

2) 動力サイクルおよび分散ヒートポンプサイクルなどの組み合わせで、発電・冷凍・冷温熱供給を実現する熱力学サイクルを導出する組み合わせ最適化理論を構築する。

3) 地域で利用可能な未利用エネルギーや再生可能エネルギーのポテンシャルを最大限利用でき、エネルギー消費由来の CO₂ 排出量を最小化する設計指針を導出することで、システム構築にとって重要な設計パラメータを同定する。

3. 研究の方法

1) 欧州における実証評価結果を参照してシステムをモデル化し、日本国内の既存の地域冷暖房設備の更新問題を設定し、既存システムに対する提案システムの導入効果を検証する。

2) 併行して、発電・冷凍・冷温熱供給を実現する熱力学サイクルを導出する組み合わせ最適化理論を構築する。

3) 地域で利用可能な未利用エネルギーや再生可能エネルギーのポテンシャルを、大都市部で評価し、整理することで、システム構築に重要な設計パラメータの関係を明らかにする。

4. 研究成果

1) 未利用エネルギーを有効活用し、再生可能エネルギーを面的に最適利用する地域熱供給システムを潜熱輸送媒体により接続した分散ヒートポンプシステムモデルを構築し、地域で利用可能な未利用熱源と需要端とを接続条件を整理した。そして、常温近傍の潜熱輸送媒体である CO₂ を採用し、輸送中の熱損失を最小化する熱供給システムの最適設計指針を明らかにした。

CO₂ 媒体を採用することで、温熱および冷熱需要の局所的な不均一性をうまく平準化させつつ、熱力学的容量を一時的な余剰エネルギーの蓄積に利用することで運用最適化への寄与度を評価した。すなわち、機器運用に起因する年間のエネルギー消費量を従来システムと比較して約 80% 削減可能であり、その結果年間の CO₂ 排出量を約 60% 削減可能であることを明らかにした具体的には、東京都の環境条件および需要特性においても Henchoz, et., al.(2015) に近い効果を発揮

しうることを明らかにした。また、未利用熱源は河川水よりも地下水の方が望ましく、特に夏期には提案システム全体の COP が、従来システム用空調設備に比べて 2 倍程度高いことを明らかにした。

2) 発電・冷凍・冷温熱供給を実現する熱力学サイクルを導出する、ユニークな組み合わせ最適化理論のためのコード化手法を定義した。これを 吸収式冷凍 発電サイクルへの拡張に成功し、より一般性の高い、発電・冷凍・冷温熱供給システムの、温度境界条件に応じた最適化理論を構築した。

3) 地域で利用可能な未利用エネルギーや再生可能エネルギーのポテンシャルを最大限利用でき、エネルギー消費由来の CO₂ 排出量を最小化する設計指針を導出した。フロア単位から、建物、そして地域全体に適用可能な、CO₂ を熱輸送媒体とする分散ヒートポンプシステムが、CO₂ 排出量を最小化することに効果的であることを示し、その設計指針をまとめた。

4) 以上より、CO₂ を熱輸送媒体とする第 5 世代地域熱供給システムは、温熱および冷熱需要の局所的な不均一性をうまく平準化させつつ、熱力学的容量を一時的な余剰エネルギーの蓄積に利用することで運用最適化への寄与が大きいことを明らかにした。熱需要特性と、地域で利用可能な未利用エネルギーや再生可能エネルギーのポテンシャルを最大限利用する組み合わせを見出すことで、運用時 CO₂ 排出量を最小化する設計指針を導出した。本研究結果から、これまでの地域熱供給施設は、冷水、温水および水蒸気による熱供給を主としてきたが、CO₂ に限らず、ヒートポンプ冷媒を熱輸送媒体とすることで、熱利用の面的な利用価値が発揮されるシステム形態として分散ヒートポンプシステムが適しており、再生可能エネルギーによる数時間から 1 日程度のスケールの余剰電力吸収に、効果的であることを明らかにした。

<引用文献>

Henchoz, S., Weber, C., Marechal, F., Favrat, D., Performances and profitability perspectives of a CO₂ based district energy network in Geneva's City Centre, Energy, 2015;85:221-235

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nagano Takahiro, Kajita Jungo, Yoshida Akira, Amano Yoshiharu	4. 巻 226
2. 論文標題 Estimation of the utility value of unused heat sources for a CO2 network system in Tokyo	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 120302 ~ 120302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.energy.2021.120302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 NAGANO Takahiro, AMANO Yoshiharu	4. 巻 86
2. 論文標題 Evaluation on CO ₂ network for district heating and cooling system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00365	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Nagano Takahiro, Kajita Jungo, Yoshida Akira, Amano Yoshiharu
2. 発表標題 A study into the feasibility of introducing a CO2 network system for district heating and cooling in Tokyo
3. 学会等名 ECOS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wataru Ito, Keisuke Takeshita, Amano Yoshiharu
2. 発表標題 Demonstration of bottom-up procedure to explore configurations for absorption power cycle
3. 学会等名 ECOS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永野貴大, 梶田純吾, 天野嘉春
2. 発表標題 需要の冷温熱量比に対するCO2ネットワークシステムの最適な機器構成と動作点の導出
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第26期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶田純吾, 永野貴大, 吉田彬, 天野嘉春
2. 発表標題 CO2を熱輸送媒体とする複合型ビル用熱供給システムの導入効果の検討
3. 学会等名 関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永野貴大, 板東泰彬, 天野嘉春
2. 発表標題 CO2を熱輸送媒体とする地域エネルギー供給システムの基礎的検討
3. 学会等名 第24回動力・エネルギー技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	吉田 彬	早稲田大学・スマート社会技術融合研究機構・次席研究員	
	(YOSHIDA AKIRA)		
	(90707887)	(32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------