

研究助成実施報告書

助成実施年度	2021 年度
研究課題（タイトル）	再エネ等由来の水素利用による第 5 世代地域熱電供給システムの設計・分析研究
研究者名※	時松 宏治
所属組織※	東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授
研究種別	研究助成
研究分野	都市交通システム、エネルギー計画
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団2021年度研究助成実施報告書

所属機関名 東京工業大学
申請者氏名 時松宏治

研究課題	再エネ等由来の水素利用による第5世代地域熱電供給システムの設計・分析研究
<p>(概要) ※最大10行まで</p> <p>来る水素社会における更なる熱利用の高度化を目指し、再エネ等由来の水素利用システムの排熱を地中に季節間蓄熱することで、電力需要の時間変動性と熱需要の季節変動性の調整を可能とする第五世代地域熱供給システムの設計・分析を行った。第五世代地域熱供給とは一般的な地域熱供給システムのように熱源プラントから需要家に一方的に熱供給されるのではなく、各需要家が温冷熱を融通し合うシステムである。</p> <p>システムを構成する設備の効率・価格の代表値より熱収支を分析した結果、宿泊施設・医療施設・大学への導入を想定した場合、従来型の地域熱供給に対して、運用時の直接CO₂排出量・年間の燃料費をおよそ30%削減可能との示唆を得た(コージェネレーションプラントの設備容量:1MW)。また、この結果を基に動的なシミュレーションによる高精度な実証を進行している。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>本研究は、第5世代地域熱供給に再エネ由来水素と地中熱利用による熱電併給システムを複合したシステムを提案し、その導入適合性を経済・環境面から評価・分析することを目的とした。従前より一般的な「集中方式の熱源プラントから需要家に一方向」で熱供給されるシステムと比べて、第5世代の最大の特徴は熱融通が双方向であること。各需要家が温冷熱供給を担い、ループ式熱源水ネットワークと水熱源ヒートポンプを介して温冷熱を融通し合うことで、未利用排熱を最大限に活用することが可能となる。</p> <p>第五世代地域熱供給は蓄熱槽をシステムに具備するが、熱源として従来の太陽熱や排熱に加え、未利用熱源として地中熱・湖水・地下水・海水利用が欧州実用例にある。一方、我が国では熱心な再エネ・水素・燃料電池の熱電併給は海外では見当たらない。季節間蓄熱が可能な地中熱利用は熱需要の季節変動性を調整し、再エネ由来水素は電力需要の時間変動性の調整を可能にする。本研究はこれら2つの長所のシナジー効果により、再エネの最大限の活用と熱源の更なる低温度差利用を実現し、第5世代地域熱供給システムの高効率化および環境性・経済性評価・分析に取り組んだ。</p>	

2. 研究の経過	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>本研究では以下2つのサブテーマにより、再エネ等由来水素を利用する第五世代地域熱電供給システムの設計・分析を行った。</p>	

1. 対象とする需要家の組合せおよび経済性・環境性評価

建物用途別熱負荷（温・冷熱負荷）の統計データより月・施設ごとに負荷原単位を算出し、温熱負荷より冷熱負荷の年間積算値が二倍且つ施設の組合せが説明可能なモデル街区（施設種別・規模）を設定した。夏季冷房時の排熱量が冷房負荷の二倍程度と推計されるため、温熱負荷が冷熱負荷よりも小さい東京都心等では回収・季節間蓄熱した温熱を全量消費することは現実的とは言えない。そのため、本研究では冬季の排冷熱のみ回収・全量消費を想定し、温熱負荷の年間積算値が冷熱負荷の二倍となるよう街区を設定した。

このモデル街区に対して熱源水ネットワークと熱供給プラントを設計し、設計条件における構成設備の代表的なエネルギー収支を文献・ヒアリング調査により設定した。比較対象は熱源プラントから需要家へ一方的に温・冷熱が供給される一般的な地域熱供給システム（第4世代地域熱供給）及び、建物ごとに熱源設備が導入される分散中央熱源方式とした。なお、供給される水素は都市ガスの改質と水素サプライチェーンの二通りを想定した。エネルギー収支より求めた投入エネルギー量を種別ごとに積算し、エネルギー種に対する二酸化炭素排出原単位およびエネルギー料金を乗ずることで、システム運用時の経済性・環境性を評価した。

2. 非因果的モデルによる熱源システムのモデル化・動的シミュレーション手法の開発

サブテーマ1では概念設計に基づき、システムのフィジビリティを経済・環境面から評価したが、今後は実証試験に向けて動特性解析に基づく詳細設計・エネルギー評価が求められる。サブテーマ2では非因果的モデルを用いて、提案するシステム及び比較対象とするシステムの動特性解析ツールの構築を試みた。非因果的モデルとは一般的なモデリング言語 (matlab/simulink など) とは異なり、モデルに対する入力と出力を明示せず、変数の等価関係によってモデル同士が接続されるモデルである。数式を整理する（＝伝達関数を導出する）ことなく微分方程式のままモデリング可能となり、機器モデル間の接続に関する表現が直接的となるため、大規模なシステム・プラントの動特性解析に優れている。本研究では非因果的モデルの一つである Modelica 言語をベースに、建築環境工学や建築設備の計算モデルのライブラリである Modelica Buildings Library (MBL) を適用した。

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

1-1. 導入対象とする想定街区およびプラントの設定

評価対象とする街区は東京都心及び近郊の駅前地区とし、延床面積2万平米の宿泊施設、4万平米の医療施設、3万平米の大学等の教育機関の3施設への温冷熱供給を想定した（図1）。熱源水ネットワークは熱源側20℃、冷熱源側15℃の2管式とし、熱源プラントは夏季と冬季で以下のエネルギーフローを想定した。地中熱交換器（ボアホール蓄熱槽（BTES））は1日につき12時間400kWの採/放熱時に出入口温度が冬季12/7℃、夏季25/20℃に近似する容量を地中熱伝導シミュレーションに基づき設定した。

【エネルギーフローの概要(夏季)】

1. 冬季に冷却したBTESを冷熱源として水熱源ヒートポンプ（WSHP）より冷熱供給

- 購入した水素を燃料源として燃料電池で発電
- 燃料電池の排熱は、吸収式冷凍機のエネルギー源として冷熱供給へ利用. 吸収式冷凍機は冷却塔より廃熱.
- 冷熱需要を満たせない場合は都市ガスを購入し、吸収式冷凍機のエネルギー源として冷熱供給へ利用

【エネルギーフローの概要(冬季)】

- 購入した水素を燃料源として燃料電池で発電
- 燃料電池の排熱は吸収式冷凍機のエネルギー源として利用し、ボアホール蓄熱槽 (BTES) の冷却に利用. 吸収式冷凍機の廃熱は熱交換器を介して熱源側ネットワークの温熱供給源として回収
- BTES の冷却完了後は、燃料電池の排熱は熱交換器を介して、直接温熱供給に利用.
- 温熱需要を満たせない場合、加熱塔を熱源とした WSHP より温熱供給.

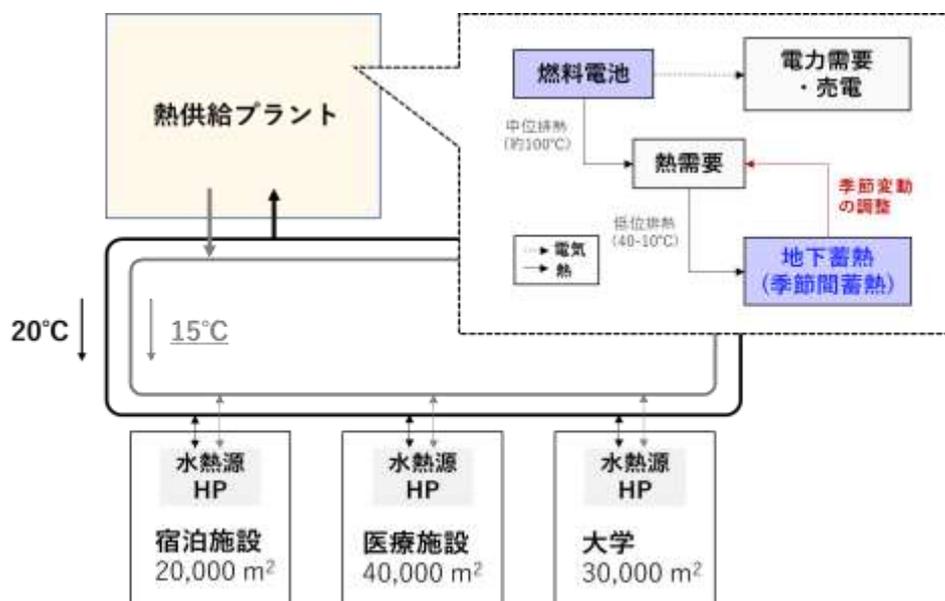


図1 導入対象とする街区と熱源プラントおよび熱源水ネットワーク

1-2. 環境性・経済性分析の結果

以下に燃料電池（および比較対象におけるコジェネレーションプラント）の発電容量を 1MW とした場合のシステム運用時の CO₂ 排出量，エネルギー料金，分散中央熱源方式に対する省エネ率および各システムの効率を示す（図 2.1-3）。いずれの指標においても地中熱利用による季節間蓄熱を用いた第 5 世代地域熱供給システムが優位性を持つ結果となった。これは分散中央熱源方式および第 4 世代地域熱供給に対して、熱の融通が可能である第 5 世代地域熱供給システムは熱源機が処理する熱負荷を減少させることが出来、且つ季節間蓄熱により高品質な熱源（低温度差利用）を用いたことが原因である。また、分散中央熱源に対して第 4 世代地域熱供給はエネルギー料金が低いが、これは分散中央熱源方式のみコジェネレーションによる売電を想定していないことが原因である。分散中央熱源に対して第 4 世代地域熱供給の CO₂ 排出量が増加しているのは、コジェネレーションプラントの燃料として都市ガスの供給を想定したためである。以上より、季節間蓄熱を組合わせた第 5 世代地域熱供給は、運用時に高い環境性・経済性を持つ可能性が示唆された。

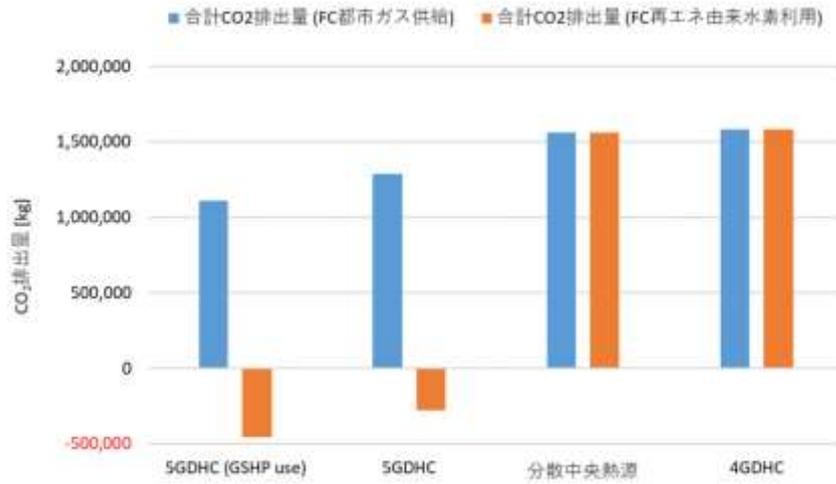


図 2-1 運用時の CO₂ 排出量

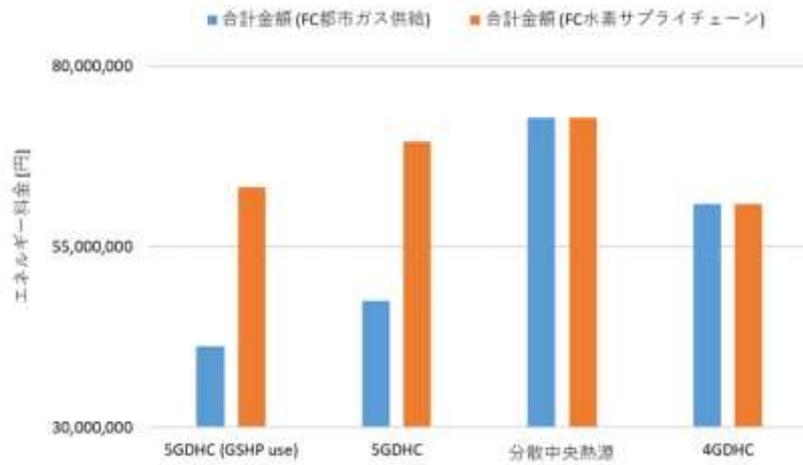


図 2-2 運用時のエネルギー料金

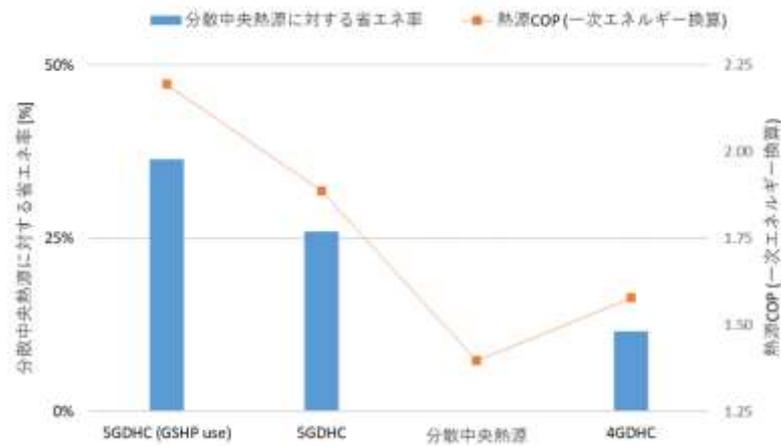


図 2-3 分散中央熱源に対する省エネ率及びシステム効率

2. 非因果的モデルによる熱源システムのモデル化・動的シミュレーション手法の開発

本研究では第5世代地域熱供給システムへの拡張を目的に、地中熱利用を組み入れた分散中央熱源システムのモデル化および動的シミュレーション手法の開発に取り組んだ。本研究ではModelica言語のユーザーインターフェースとしてDymolaを用い、熱源システムを構成する各設備のコンポーネントには米国ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)が開発するModelica Buildings Library (MBL)を用いた。MBLは建築環境工学や建築設備のエネルギー計算を目的に開発されたModelicaのオープンライブラリであり、主に熱と流れを扱う。以下の図3にモデル化した分散中央熱源システムのプロット図およびDymola上でのモデルの表現を示す。

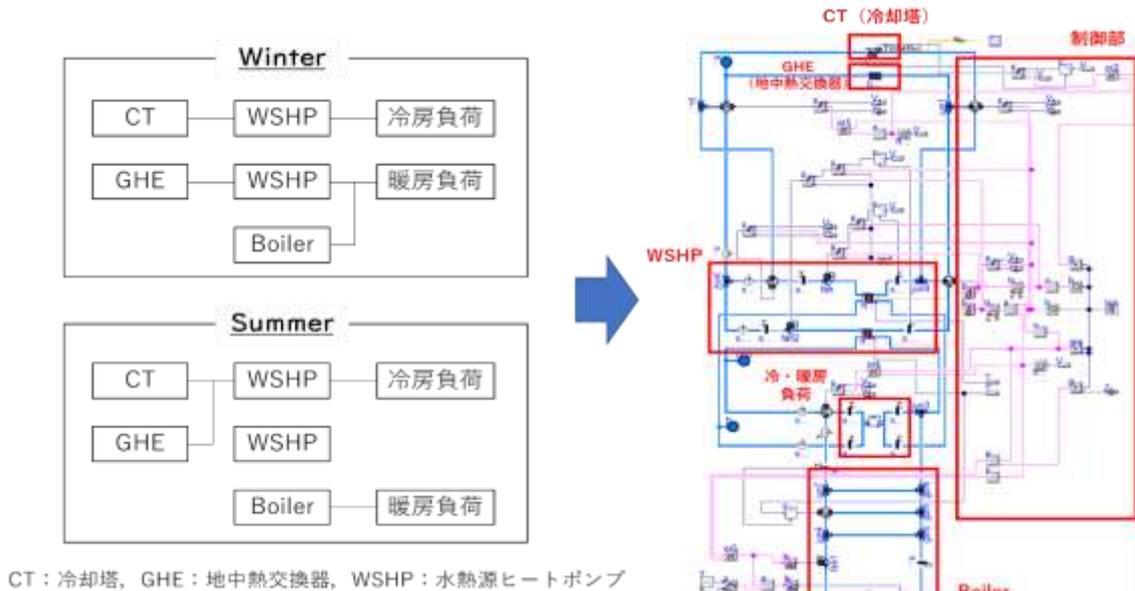


図 3 分散中央熱源方式の動特性解析モデル

図3に示す解析モデルを用いて負荷側(2次側)および熱源側(1次側)の流体温度挙動の年間シミュレーションの結果を図4に示す。

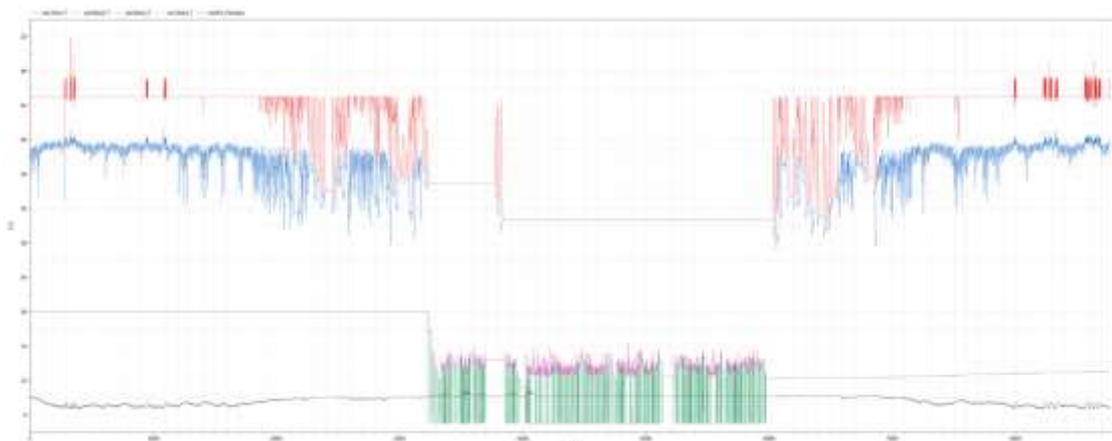


図 4-1 システム負荷側の流体温度挙動

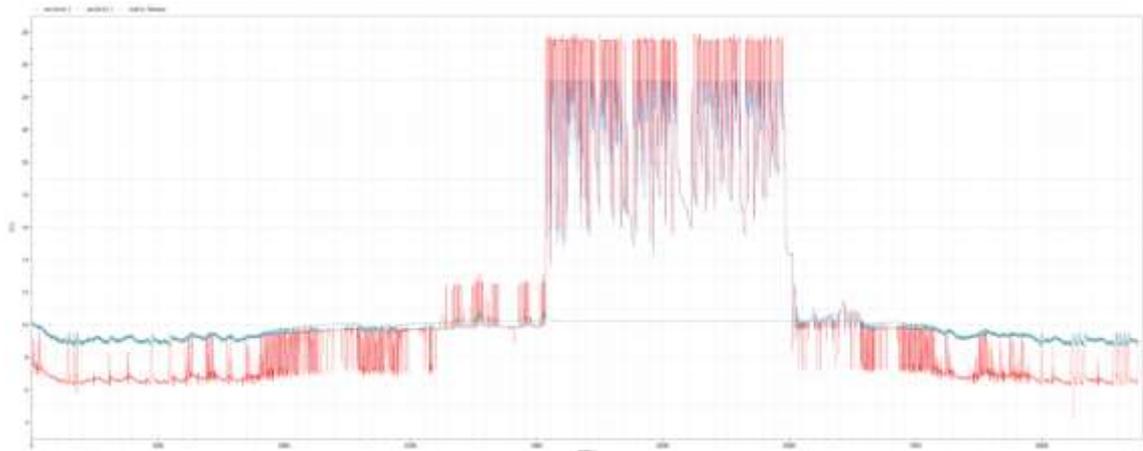


図 4-2 システム熱源側の流体温度挙動

シミュレーションでは地中熱交換器出口温度に応じて熱源を夏季には冷却塔に，冬季にはボイラーに切り替える制御ロジックを導入した．シミュレーションの結果，負荷に応じて冷暖房運転の切り替えや地中熱交換器出口温度に応じて熱源の切替えが実行されていることを確認した．また，熱源機の性能についても地中熱利用時には地中温度の上昇に応じて成績係数が減少し，冷却塔利用時には外気温に応じて冷却塔の送風量が変動するなど，実際の熱源設備と理論的に同様の挙動を示すことを確認した．

上述の成果に基づき，以下の成果報告を行った．

“A Proposal on Inter-seasonal Thermal Energy Storage in a 5th Generation District Heating and Cooling with Green Hydrogen”, Rino Hirose, Yutaro Shimada, Tatsuya Okubo, Koji Tokimatsu, Grand Renewable Energy 2022 International Conference (GRE2022), Online, (2022.12)

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では今後の課題として，搬送動力を含めたシステムの動的挙動に基づく詳細なエネルギー性能評価，システム運用時だけでなくシステム建設時を含めたライフサイクルに基づく環境性・経済性評価，および実際の街区における適地評価や実証試験などが今後の課題である．