

2.1.13 地域熱供給（地域冷暖房）

(1) 研究開発領域の定義

この研究開発領域には、二つの側面がある。一つは低炭素型熱供給システムとしての側面である。世界が脱炭素社会を目指す中で、都市における民生（業務・家庭）部門のエネルギー消費の大きな部分を占める「冷温熱」すなわち熱力学的に低レベルの環境温度に近い温度（100℃以下）の、冷暖房給湯に供する熱エネルギーをいかに温室効果ガス排出の少ない形で供給するかが課題である。

もう一つは、スマートコミュニティの一要素としての側面である。エネルギー供給側で変動性の再生可能エネルギーの普及が進み、建物や住宅ではZEB（Zero Energy Building、ゼロエネルギービル）、ZEH（ゼロエネルギーハウス）が普及している。その中で、コージェネレーション、蓄熱等の技術を駆使して、エネルギー供給側からのデマンドレスポンスの要求、需要家側の不安定なエネルギー需要変動への対応など両者の調整を担う装置としての役割を担う。スマートコミュニティ推進の背景として、災害による停電時に自営送配電線により需要家に電気も供給する熱供給から熱電一体供給への移行のニーズもある。

(2) キーワード

未利用エネルギー、スマートコミュニティ、ヒートポンプ、再生可能熱、BCP、デマンドレスポンス、コージェネレーション、最適制御

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

我が国の東京をはじめとした大都市において、都市開発が更に進展する中で、その冷暖房熱源システムを如何に脱炭素化していくかは喫緊の課題である。更に、災害が頻発する我が国の都市において、広域エネルギーシステムからの供給が絶たれた際に如何にエネルギー供給を継続するかというBCP（Business Continuity Plan、業務継続計画）においてもコージェネレーションシステム等を有する地域熱供給システムは重要な役割を果たす。

IEAが2019年に発表したThe Future of Cooling¹⁾によれば、世界の業務施設における冷房容量は2016年の5,500 GWからアメリカ、中国、EU、インドなどを中心に2050年には14,000 GWへと約2.5倍の増加となる。高効率冷凍機や排熱利用冷凍機の技術は従来日本が世界をリードしてきた。拡大するマーケットに対して今後も日本の技術が貢献していくためには冷温熱源システム技術をはじめ関連技術の更なる開発が重要である。そのためには地域冷暖房システムをテストベッドとした実証実験が重要である。

[研究開発の動向]

• 熱搬送技術

地域冷暖房のコスト的、エネルギー的デメリットとしてエネルギーセンターから各需要家への熱搬送導管の敷設費と搬送のための動力がある。特に冷水送水に関しては供給温度差が数℃程度しか取れないため配管系・動力共に大きくなるのが高い障壁である。そのため、以前は氷水の送水²⁾や配管抵抗を低減させる界面活性剤の冷水への付加³⁾などが研究されていた。現在では流量制御による省エネルギー化の研究が進んでいる⁴⁾。

• ヒートポンプ・冷凍機技術

ヒートポンプ技術は地域冷暖房だけでなく、後述する第4世代以降の地域暖房においても重要な技術である。日本では近年多様な技術開発が進んでいる。インバーターターボ冷凍機⁵⁾、三重効用吸収式冷凍機など高効率機器の技術開発が進んでいる。地域冷暖房プラントにおける複数種類の冷凍機を負荷や気象条件に応じて最適に運用するための技術⁶⁾、機械学習を用いて運転中の不具合を検知する研究⁷⁾等も進んでいる。

• 未利用エネルギー活用技術

未利用エネルギー活用技術としては、近年下水熱の利用技術として、都市内にある下水管から生下水の持つ熱を直接採熱する技術開発がおこなわれている。また、ヒートポンプ熱源としてもっとも温度条件の良い熱源は年間を通じて温度がほぼ一定となる地下水であるが、これまで多くの都市圏では地盤沈下対策により地下水の取水が禁止されていた。最近、熱交換後の地下水を涵養することで取水を可能にするための実証実験が大阪市において行われた⁸⁾。また低温の未利用エネルギー利用には熱源水ネットワークがある。これは、建物の熱源設備を熱供給プラントに集約せず、建物個々の熱源設備の採熱源や放熱先として低温未利用エネルギーを供給し、建物の個々の熱源設備の高効率化を図るものである。例えば、データセンターの冷房排熱を冬季に隣接する建物のターボ冷凍機の冷却水やヒートポンプの熱源水として利用する事例がある⁹⁾。

• 建物側を含めたスマート化

地域冷暖房システムは本来、建物側の空調機と一体となって制御されることで最適な運用となるが、従来は建物受け入れ端での温度や圧力が規定されておりこのような最適化ができていなかった。近年では建物に熱を供給するだけにとどまらず、IoT技術の応用により、建物で受け入れた熱を建物内の各室に供給する設備まで同時に制御することで全体の最適化を図るシステムも登場している¹⁰⁾。

• コージェネレーション技術

地域冷暖房システムにおけるコージェネレーションシステムは従来、都市ガスや石油を燃料としたタービンやエンジンのシステムが基本であった。今後、水素社会の到来やより高効率なコージェネレーションシステムの追求のため、大型燃料電池システムの開発が行われている。例えば、九州大学においては250 kW級のSOFC（固体酸化物型燃料電池）の実証実験が実施されている。

• 再生可能熱の利用

ヨーロッパの地域暖房では、熱源としてバイオマス焼却熱や太陽熱を用いることがよく行われている。例えば、デンマークでは太陽熱活用型地域暖房（SDH：Solar District Heating）の普及が進められており、大規模な太陽熱収集パネルと季節間蓄熱槽との組み合わせで年間熱需要の40%程度を賄っている^{11), 12)}。また、最近普及が始まった北欧の地域冷房では、日本の地域冷暖房のような冷凍機システムを使用せず、低温の海水、河川水や湖水等との直接熱交換（フリークーリング）により冷熱を得ている事例もある¹³⁾。

• エネルギーシステムの最適運転支援技術

建物の個々の中央熱源システムに対する地域熱供給の優位性の一つに運転管理技術がある。今後、エネルギー自由化の中で電気式、ガス式のベストミックスを目指すことによる複合熱源システムが増えることと、熱電一体供給が増えることなどから、複数の需要家の熱負荷のみならず電力負荷も予測される。それに対して、

コージェネレーションシステムや熱源システムの最適運転計画を提示、制御する必要があり、自動化アルゴリズムやAI等の活用を目指した最適運転支援技術の研究¹⁴⁾が進められている。

(4) 注目動向

• ヨーロッパの第4世代、第5世代地域暖房

一年のうち暖房期間の長いヨーロッパ、北米、中国、ロシア、韓国などの寒冷地では、100℃程度の温水のみを供給する地域暖房システムが古くより発達しており、日本の地域冷暖房とは区別して論じられるべきものである。ヨーロッパではその発展過程を3つの世代に分類している^{13), 15)}。第1世代の地域暖房は、ニューヨークで1880年代に開始され、主として石炭を熱源として蒸気を供給していた。ニューヨークのマンハッタンやパリではこのシステムが現在でも使用されている。第2世代の地域暖房は1920年代に始められ、高温水を媒体とし、石炭や石油ボイラーの他、熱電併給プラントによる排熱が用いられた。1970年代にデンマーク、スウェーデン、フィンランドで始まった第3世代熱供給では、省エネルギーを主眼に配管のプレハブ化による熱損失の低減とサブステーションの設置によって、より低温の温水供給が行われ、廃棄物焼却熱・バイオマスや熱電併給プラントの排熱が用いられることで、より低炭素な熱供給を実現している。

これらに続いて始まった第4世代の地域暖房では、より熱の脱炭素化を目指し、さらなる再生可能熱源の導入のため、第3世代より更に低く、フレキシブルな供給温度と、省エネルギーが進み熱負荷密度の小さくなった建物に対する供給が特徴である。デンマークには第4世代地域暖房（4DH）を冠した研究センターが設立されている。¹⁶⁾

第5世代地域冷暖房（5GDHC）は従来と大きく様相の異なるシステムである。分散配置されたサブステーションに0℃から30℃の熱源水を送り、水熱源ヒートポンプで温水および冷水を建物に供給する。これは smart thermal grids concept、すなわち地域冷暖房システムの電化により smart energy system における電力システムと熱システムを統合しようとするコンセプトに基づいたものである¹⁷⁾。この場合、給湯用途には温度が低くなるため、給湯システムが建物毎の個別システムに切り替えられる。送水温度が数十℃となるため、配管内でのレジオネラ菌の発生対策についても研究が進められている。例えば、デンマークでは、住戸に設置された瞬間湯沸かし器へは45℃温水が供給されるが、ドイツの規制 DVGW W55 に基づいた設計で熱交換器と温水システムへの滞留量を少量に抑える制御や、住戸側で電気ヒータを設置し60℃に昇温するなどの対策がなされている^{11), 12)}。

• デマンドレスポンス

地域冷暖房システムは、容量の大きな蓄熱槽や大型のコージェネレーション発電機、多数の電動冷凍機と吸収冷凍機の組み合わせにより、電力需要を自在に変化させるポテンシャルを有している¹⁸⁾。今後のスマートグリッドの構築において、ピーク電力の抑制や再生可能エネルギー電源の変動など、広域電力システムの要求に応じて電力負荷を増減させるデマンドレスポンスが容易かつ大規模に行いうるという点は地域冷暖房の重要な特性と言える。

電力供給システムへの負荷平準化という意味では、上記のような地域冷暖房システムはすでに大きな貢献がある。また海外の事例を見ると、シンガポールでは冷房負荷が年間を通じて発生するが、電力市場の自由化が進み30分毎に電力価格が変動する。そのため、地域冷房プラントにおいて大規模な氷蓄熱システムを有し、電力価格に応じて蓄熱量を調整することで安価な冷熱製造を目指している事例もある¹⁹⁾。また北欧では、

大規模な熱電併給（コージェネレーション）プラントに大型の蓄熱槽を併設し、北欧の電力市場の動向に合わせて発電し、排熱発生と熱需要の時間差を蓄熱槽で調整している事例もある。さらには、電力市場において風力発電の出力が大きくなり電力単価が安い時間帯では電気ボイラーやヒートポンプで熱を製造し蓄熱槽に溜めて用いられている²⁰⁾。

• 業務用・産業用燃料電池

排熱を温水の生成に利用する一般家庭用のコージェネレーションシステムに比べ、業務用・産業用燃料電池は高い発電効率が要求される。そのため熱需要が多い病院やホテルに加え、熱需要の少ないデータセンターやスーパーコンピュータの電源としても期待されている。使用される燃料電池は主にりん酸形燃料電池や固体酸化物型燃料電池で、すでに2017年に業務用5 kW級SOFCおよび業務用250 kW級SOFCハイブリッドシステムの市場導入を開始している。

• BCP

我が国において、大型コージェネレーション発電機を備えた地域冷暖房は、災害時などの都市の電力供給確保にも大きな役割を果たしうると考えられている。東日本大震災後の電力需給逼迫時、特定電気事業者として街区へ電力供給していた六本木エネルギーサービスは供給区域内のみならず外部へも電力供給を続けて注目を浴びた。最近では東京都日本橋地区においてコージェネレーションシステムによる特定送配電事業および地域冷暖房事業が開始され、災害時の高いエネルギー安定供給能力により地域のBCPに多大な貢献を行っている。

• 熱供給プラントの水害対応

近年、地震による津波のみならず、気候変動の影響と考えられる集中豪雨等による水害への対応が都市のレジリエンスにおいて重要になっている。そのため、最近建設される熱供給プラントでは水害対応も行われており、地下のプラントを守るために壺型潜水艦構造としたり、プラントを地上4階などの上階に造ったりする事例が出てきている。

• 熱負荷の減少と地域冷暖房（DHC）の優位性に関する議論

今後ZEBをはじめとする低エネルギー建築が普及すると、冷暖房熱需要も小さくなり、地域の熱負荷密度が下がって地域冷暖房システムの省エネルギー性²¹⁾や経済性²²⁾が低下することが懸念され、それが前述の第4世代、第5世代の地域熱供給システム開発への契機となっている。

• 段階的开发に併せた熱供給プラントのスパイラルアップ整備

我が国の地域熱供給は大規模な面的開発地区を中心に普及してきた。しかし、近年は拠点開発（建物単体、街区）がほとんどである。そのため、地域熱供給の普及において拠点開発に適応する整備が進んでいる。既存の地域熱供給内や隣接街区における段階的な拠点開発ではサブプラントが設置され、既存の熱供給プラントと連携し、既存地区内全体の高効率化を図るスパイラルアップが行われている²³⁾。また、拠点開発街区の新しい熱供給のみならず隣接する街区の既築ビルにも熱供給することで、地域全体の高効率化を図る事例も出てきている。

(5) 科学技術的課題

• 新しい空調方式と組み合わせた地域冷暖房方式の検討

東京都の京橋1・2丁目地域冷暖房地区では、放射空調方式を採用した清水建設本社ビルに対して、同方式の冷水要求温度の高いことを利用している。通常の5～7℃の冷水送水でなく、地域冷房の需要家から戻ってくる15℃の冷水送水する冷水のカスケード利用、地域冷房プラントに戻る冷水の温度が高くなることによる冷凍機の大温度差・高効率運転を実現し、システムとしての最適化を果たしている²⁴⁾。

• 熱供給のサブスクリプションサービス

スウェーデンのイエテボリエネルギー公社ではエネルギーサービスの一環としてClimate Agreement（気候契約）を展開している。その大きな特徴は、地域暖房の供給を受ける建物側での空調運用管理などのサービスの契約にも生かされている。年間を通じて一定の熱環境（たとえば室温20℃以上など）の保証を条件として、床面積あたり一定のサービス料金を受け取る長期契約を結んでいる。すなわち、実際にその建物がどれだけの熱量を消費したかにかかわらず、一定の料金となるシステムで、省エネになればなるほどエネルギー供給側であるイエテボリエネルギー公社が利益を得るシステムとなっている点に特徴がある²⁵⁾。

• 脱炭素燃料熱源装置の技術開発

現在、地域熱供給では、まずは低炭素化を目指した技術開発や整備が行われている。しかし、今後中長期的に脱炭素化を目指す場合には、熱源プラントの高効率化技術のみならず、使用エネルギーを再生可能エネルギーに転換する必要がある。そのためには、系統電力における再生可能エネルギー電源の普及に加え、熱源プラント自身で、木質バイオマス、バイオガス、グリーン水素などに対応できる熱源システムやコージェネレーションシステムの開発が必要となる。

水素の事例では、NEDOの事業の実証試験において、神戸市の市街地において水素燃料100%のガスタービン発電（1700 kW）による熱電供給を世界で初めて成功している²⁶⁾。今後、太陽光発電や風力発電の電気から製造されるグリーン水素やメタネーションとともに、その利用先技術として地域熱供給は重要になる。

バイオガスの事例では、ドイツにおけるバイオガスCHP（Combined Heat and Power、熱電供給システム）による熱供給がある¹²⁾。これはバイオ天然ガスネットワークによるものであり、バイオ天然ガスは天然ガスに、有機材料（家畜の糞尿、食品残渣等）の発酵処理から得られるバイオガスを10%程度混合したものである。

• 熱供給地区の広域連携技術

我が国の地域熱供給は地区ごとに熱源プラントを持ち、熱を製造して熱導管で需要家へ熱を供給する形態である。北欧（デンマーク）の大都市の熱供給システムは、生産、輸送、配給の3層構造からなり、生産では発電所（CHP）、清掃工場、企業の工場（セメント工場等）からの排熱が収集され、輸送では全長160 kmに及ぶ広域熱供給網を形成され、そして各熱供給事業者がそれらを配給する広域ネットワーク形態である^{11)、12)}。我が国ではこの規模の整備は困難と考えられるが、大都市、特に東京都心部では隣接する熱供給事業地区が数多く整備されており、複数の熱供給事業が広域連携することのメリットを持つネットワーク整備技術が求められる。

• 冗長性を持つエネルギーシステム

地域熱供給は、複数の建物の熱需要に対応するシステムだが、開発地区内では、建物が段階的に竣工する場合もある。したがって、建物個別熱源システムに比べ、計画段階の負荷想定が難しい。実運用段階時に計画負荷（量、パターン、冷温熱比、熱電比等）と想定と異なったり、運用後の変動を受けたりしやすい。そのため、負荷の変化に対応できる冗長性のあるエネルギーシステムの構築や運転技術が重要である。

(6) その他の課題

日本での地域冷暖房は1970年に千里中央で開始し、2020年に50周年を迎えた。今後、(3)で述べたように世界において冷房需要が伸びる中、日本が得意としてきた高効率冷凍機技術をはじめとする関連技術への期待は高い。一方、国内でのパッケージエアコンのシェアの増大や都市開発スピードの低下、更には東京都など一部を除けば行政による権限が弱いこと等から、現在日本国内で新規の地域冷暖房システムの設置はほとんど進んでいない。それに従って、地域冷暖房システムにおいて最先端の関連技術の実証がほとんどできなくなってしまっている。このことは関係する製造業のみならず、大学など研究機関での研究開発も停滞する原因となっている。

前述したように、新規の設置が少ない原因の一つに、我が国の地域熱供給は首都圏や地方大都市がほとんどで、人口規模10～30万人の地方都市における地域熱供給が少ないことがある。今後、地方都市においてまちづくりと一体になって設置できる地点熱供給システムの整備方法、事業主体の構成方法やシステム技術の開発が求められる。その際、我が国では欧州に比べて需要家として圧倒的に少ない住宅まで、取り込めるシステムの技術開発も重要となる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↘	(6)で述べたように基礎研究人材が薄く、研究が活発とは言えない。世界の地域冷暖房の研究レビューである文献 ¹⁰⁾ に日本の論文は無い。
	応用・開発研究	○	→	冷熱技術など一部海外でも高い評価を受けている技術を有している。
米国	応用・開発研究	○	-	セントポール市におけるバイオマス利用地域暖房など、ヨーロッパと変わらない開発も見られる。
デンマーク	基礎研究	◎	↗	第4世代地域熱供給の研究センター4DH Research Centreを有する。
	応用・開発研究	◎	↗	第4世代・第5世代地域熱供給に関する多くの研究開発が進んでいる。また、太陽熱活用型地域暖房(SDH)の普及が進められている。
フランス	基礎研究	○	→	政府が環境・国土整備等に関する研究開発のため設置した公設法人CEREMAが熱供給に関する研究を実施。
	応用・開発研究	○	→	国内に600カ所の地域熱供給システムを有し、最大が配管延長460kmのパリ。フランス政府は2009～2013年の間に11.2億ユーロの基金を設け、これらの拠点に対し大規模に助成した結果、二次エネルギー供給の7%に達している。2030年までに当初の5倍まで伸ばす方針。電力は原子力が主体のため再生可能エネルギーの拡大余地が小さく、再生可能エネルギー活用拡大の手段としてバイオマス・地熱などを利用した地域暖房システムの拡大が図られている。

中国	応用・開発研究	△	→	文献 ¹³⁾ によれば世界第2位の地域熱供給規模を有する。国の北部での化石燃料による地域暖房が主体。
韓国	応用・開発研究	○	→	コージェネレーションや清掃工場排熱を活用した地域暖房の普及が見られる。
ロシア	応用・開発研究	△	→	文献 ¹³⁾ によれば世界で最大の地域熱供給規模を有する。
オーストラリア	応用・開発研究	○	→	シドニーではEnergy Master Plan2010-2030として、2030年までにCO ₂ 排出量を2006年比70%削減するため市内の電力供給の70%をトリジェネレーション（冷暖房発電でトリジェネレーションと呼ぶ、日本のコージェネレーションと同じ）、30%を再生可能エネルギーで供給する目標を実行中ギーで賄う計画である。これは、オーストラリア政府のエネルギー政策に則ったもので、オーストラリアではこれらの政策は、連邦政府から州政府、市当局へと引き継がれ、地方行政が積極的に推進している。市の具体的な計画の実施段階では、連邦政府や州政府がプロジェクトを支援している。
シンガポール	応用・開発研究	○	→	世界最大規模の地域冷房ネットワークを有している。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・電気エネルギー利用（エネルギーマネジメントシステム）(環境・エネ分野 2.1.8)
- ・電気エネルギー利用（電力貯蔵）(環境・エネ分野 2.1.9)
- ・熱エネルギー利用（産業熱利用）(環境・エネ分野 2.1.10)
- ・熱エネルギー利用（民生熱利用）(環境・エネ分野 2.1.11)
- ・水循環（水資源・水防災）(環境・エネ分野 2.2.3)
- ・水利用・水処理（環境・エネ分野 2.2.4)

参考・引用文献

- 1) IEA, “The Future of Cooling : Opportunities for energy-efficient air conditioning”, IEA, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling> (2020年12月28日アクセス)
- 2) 百田真史他, 「地域冷房に用いる氷水搬送方式に関する基礎的研究」『空気調和・衛生工学会論文集』26巻83号(2001) : 11-20, doi : 10.18948/shase.26.83_11
- 3) 小野島一他, 「配管内の摩擦損失低減技術の開発—界面活性剤による空調配管系の摩擦損失低減—」『大林組技術研究所報』62号(2001) : 127-134, <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9387581>
- 4) 佐藤文秋他, 「最小差圧変流量制御による搬送効率向上に関する研究」『空気調和・衛生工学会論文集』

43巻259号(2018) : 21-30, doi : 10.18948/shase.43.259_21

- 5) 上田憲治,長谷川泰士,下田吉之,「民生業務用熱源システムにおける高効率ターボ冷凍機の使用法に関する研究:第1報-インバーターターボ冷凍機の全作動領域での性能特性評価」『空気調和・衛生工学会論文集』33巻136号(2008) : 17-25, doi : 10.18948/shase.33.136_17
- 6) Kenji Ueda,Yoshie Togano and Yoshiyuki Shimoda, “Energy Conservation Effects of Heat Source Systems for Business Use by Advanced Centrifugal Chillers”, *ASHRAE Transactions* 115, no. 2 (2009) : 640-653
- 7) 宮田翔平他,「機械学習を用いた空調熱源システムの不具合検知・診断」『空気調和・衛生工学会論文集』43巻261号(2018) : 1-9, doi : 10.18948/shase.43.261_1
- 8) 大阪市環境局環境施策部環境施策課,「報道発表資料:帯水層蓄熱利用の普及に向けた国家戦略特区の規制緩和提案を行います」『大阪市』, <https://www.city.osaka.lg.jp/hodoshiryo/kankyo/0000443076.html> (2020年12月28日アクセス)
- 9) 山川智他,「次世代型地域熱供給システム(熱源水ネットワーク)の研究:その1 冷却排熱による熱源水ネットワークシステムの稼動実績と導入効果の検証」『日本建築学会大会学術講演梗概集』(2016) : 773-774, <https://www.aij.or.jp/paper/detail.html?productId=380739>
- 10) 坂齊雅史他,「スマートエネルギー-ネットワークによる省CO₂まちづくり(第12報)」『空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集』2巻(2016) : 21-24, doi : 10.18948/shasetaikai.2016.2.0_21
- 11) Think Denmark グリーン経済・社会のための白書「地域熱供給」『State of Green』, <https://stateofgreen.com/jp/uploads/2018/10/12788.pdf?time=1555052452> (2020年12月28日アクセス)
- 12) 平成30年度海外事情調査研究会「欧州熱供給事情視察報告会開催結果概要」『一般社団法人日本熱供給事業協会』, [https://www.jdhc.or.jp/wp_kanri/wp-content/uploads/2019/05/★HP掲載文\(終了後、報告書\).pdf](https://www.jdhc.or.jp/wp_kanri/wp-content/uploads/2019/05/★HP掲載文(終了後、報告書).pdf) (2020年12月28日アクセス)
- 13) Sven Werner, “International review of district heating and cooling”, *Energy* 137 (2017) : 617-631, doi : 10.1016/j.energy.2017.04.045
- 14) 飯嶋二裕美,池田伸太郎,長井達夫,「エネルギーシステムの統合的最適設計に関する自動化アルゴリズムの開発(第1報)知的最適化と動的計画法によるCHPと蓄熱槽を含むシステムの最適化」『空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集』(2019) : 29-32, doi : 10.18948/shasetaikai.2019.9.0_29
- 15) 環境エネルギー政策研究所,「第4世代地域熱供給とは」『環境エネルギー政策研究所』, <https://www.isep.or.jp/archives/library/11602> (2020年12月28日アクセス)
- 16) 4DH Research Centre (4DH), “WELCOME TO 4DH”, 4DH, <https://www.4dh.eu/> (2020年12月28日アクセス)
- 17) S Buffa, “5th generation district heating and cooling systems : A review of existing cases in Europe”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104 (2019) : 504-522, doi : 10.1016/j.rser.2018.12.059
- 18) 日本建築学会,『都市の環境設備計画』日本建築学会編(東京:森北出版,2020), <https://www.morikita.co.jp/books/book/3335>
- 19) Hida et al., “District Cooling Plant with High Efficiency Chiller and Ice Storage System”, *Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review* 45, no. 2 (2008) : 37-44

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

- 20) コージェネ財団, 「2014年度欧州コージェネ(CHP)市場に関する調査」(概要)『コージェネ財団』, http://www.ace.or.jp/web/info_member/images/20141021141001_1.pdf (2020年12月28日アクセス)
- 21) M. Thyholt and A. G. Hestnes, “Heat supply to low-energy buildings in district heating areas : Analyses of CO₂ emissions and electricity supply security”, *Energy and Buildings* 40, no. 2 (2008) : 131-139, doi : 10.1016/j.enbuild.2007.01.016
- 22) U. Persson and S. Werner, “Heat distribution and the future competitiveness of district heating”, *Applied Energy* 88, no. 3 (2011) : 568-576, doi : 10.1016/j.apenergy.2010.09.020
- 23) 佐藤文秋他, 「地域冷暖房の負荷実態に基づく省エネルギー手法に関する研究 : その2 プラント連携運転によるスパイラルアップ効果の概念と実際」『空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集』2巻 (2016) : 85-88, doi : 10.18948/shasetaikai.2016.2.0_85
- 24) 一般社団法人日本熱供給事業協会, 「熱供給の放射冷暖房・デシカント空調への活用① プラント入居建物空調システムと協調した高効率面的融通熱供給システム(プラント側)」『熱供給』83巻(2013) : 18-19
- 25) 下田吉之, 『都市エネルギーシステム入門』(京都 : 学芸出版社, 2014)
- 26) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「世界初、市街地で水素による熱電供給システム実証試験を開始—神戸ポートアイランドに実証プラントを完成—」『国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構』, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100883.html (2020年12月28日アクセス)