

芝浦工業大学
博士学位論文

既成市街地における建物間双方向熱融通
ネットワークシステムの有効性に関する研究

平成31年3月

永井 猛

既成市街地における建物間双方向熱融通ネットワーク システムの有効性に関する研究

第1章 序論

1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究に関連する事例調査.....	5
1.2.1 エネルギーの面的利用における熱融通事例.....	5
1.2.2 都市部のバイオマスエネルギー利用熱供給.....	13
1.2.3 海外における協力型及びバイオマス利用エネルギーの面的利用の先進事例.....	16
1.3 本研究の目的.....	29
1.4 論文の構成.....	29
1.5 まとめ.....	33

第2章 建物間双方向熱融通ネットワークの検討

2.1 はじめに.....	35
2.2 本研究で検討する建物間双方向熱融通ネットワークシステムの概要.....	35
2.2.1 システムの機能.....	35
2.2.2 システムの適用フィールド.....	36
2.3 建物間双方熱融通に必要な装置の検討と留意事項の整理.....	37
2.3.1 双方向熱融通を実施するために必要な装置の検討.....	37
2.3.2 双方向熱融通を可能とする熱融通相互接続装置の検討.....	37
2.3.3 システムの熱融通配管の検討.....	41
2.3.4 留意事項の整理.....	45
2.4 まとめ.....	46

第3章 熱ルータ（熱融通相互接続装置）に関する実験研究

3.1 はじめに.....	47
3.2 熱ルータのコンセプト.....	47
3.2.1 熱ルータを使ったループ管路中の熱媒の流れ.....	47
3.2.2 熱ルータと熱源機の位置関係.....	49
3.3 熱ルータ相互水搬送制御実験.....	49
3.3.1 実験目的.....	49
3.3.2 実験装置.....	50

3.3.3	熱ルータの制御ロジック	51
3.3.4	実験の組合せ	51
3.3.5	実験要領	52
3.3.6	実験手順	52
3.3.7	実験結果	55
3.3.8	実験結果のまとめ	66
3.3.9	実験から得られた知見と今後の展望	66

第4章 実建物における建物間熱融通に関する実証研究

4.1	はじめに	68
4.2	実証研究概要	68
4.3	建物間熱融通制御に関する検証	69
4.3.1	検証概要	69
4.3.2	建物間熱融通制御の概要	70
4.3.3	熱融通配管の道路占用	70
4.3.4	建物間熱融通制御による効果の検証	71
4.4	熱源統合制御に関する実証評価	74
4.4.1	実証概要	74
4.4.2	熱源統合制御の概要	74
4.4.3	熱源統合制御の効果確認	75
4.5	まとめ	80

第5章 段階的に熱源更新を行う既築建物に導入したSHGによる建物間熱融通の有効性に関する研究

5.1	はじめに	82
5.2	段階的に熱源更新を行う既築建物に導入したSHGの導入効果	83
5.2.1	対象既築モデルビル配置の設定	83
5.2.2	4つの既築モデルビルを対象とした双方向熱融通シミュレーションの考え方	84
5.2.3	熱融通量の設定	86
5.2.4	既築モデルビル間熱融通配管の融通能力の設定	86
5.2.5	熱融通配管口径の選定と同配管材料選定	87
5.2.6	熱融通シミュレーションの考え方	87
5.2.7	熱源システムの設定	89
5.3	段階的に熱源更新を行う既築建物に導入したSHGの評価	97

5.3.1	省エネルギー率試算結果	97
5.3.2	熱融通に伴うエネルギーロス（搬送動力・放熱ロス）の時刻別推移	98
5.3.3	熱源運用と熱融通状態の時刻別推移	101
5.3.4	双方向熱融通によるエネルギー需要の統合化効果	106
5.3.5	熱源稼働負荷率向上と低負荷稼働時間の低減効果	107
5.4	まとめ	109

第6章 既存の地域冷暖房と連携したSHGによる建物間双方向熱融通に関する研究

6.1	はじめに	110
6.2	既存DHCを取り巻く環境の変化と既築建物の状況把握	110
6.3	シミュレーションモデル	112
6.3.1	シミュレーション・フロー	113
6.3.2	既築モデル建物の熱源システム設定	115
6.3.3	DHC施設の条件設定	116
6.3.4	熱融通量の設定	117
6.3.5	熱融通配管口径と熱ルータ用熱搬送ポンプの設定	117
6.3.6	熱融通配管放熱ロスの算定	117
6.3.7	熱融通搬送ポンプ電力消費量及び熱媒入替ポンプ電力消費量	118
6.4	環境性（省エネルギー性）及びその他評価結果	118
6.4.1	SHGによる建物熱融通を導入したモデル建物の省エネルギー評価	118
6.4.2	省エネルギー率計算結果	119
6.4.3	熱融通間配管敷設断面積	120
6.4.4	既築モデル建物熱源の低負荷需要域における稼働負荷率の改善	121
6.4.5	既築モデル建物熱源の低負荷需要域における稼働負荷率の改善	121
6.4.6	ガスエンジン・コージェネレーション廃熱の有効活用	122
6.5	DHC連携型SHG設備所有スキーム	123
6.6	SHG導入事業性評価	124
6.6.1	事業性評価の条件設定	124
6.6.2	事業性評価結果	126
6.7	既存地域冷暖房（DHC）連携型SHGの可能性	128
6.8	まとめ	131

第7章 事業系一般廃棄物起源バイオマスガスのポテンシャルと地域熱供給システムにおける活用効果

7.1	はじめに	133
7.2	乾式メタン発酵法による都市部の事業系一般廃棄物のバイオマス資源化実証	134

7.2.1	メタン発酵法の比較	134
7.2.2	都市部における事業系一般ごみの再利用状況	135
7.2.3	実証試験用ごみの選定	136
7.2.4	乾式メタン発酵実証試験施設の概要	138
7.2.5	乾式メタン発酵実証試験結果	139
7.2.6	実証試験評価	141
7.3	モデル地区におけるUBES導入検討	142
7.3.1	検討対象地区の概要と既存地域冷暖房併設UBESの検討	142
7.3.2	バイオマス資源量を変化させた場合のエネルギー収支について	145
7.4	都市再生緊急整備地域を対象とした都市型バイオマスエネルギーシステム導入に関する研究	150
7.4.1	都市再生緊急整備地域を対象としたバイオマス資源発生量の推計	150
7.4.2	UBES導入効果の推計	154
7.5	まとめ	157
 第8章 結論		
8.1	各章のまとめ及び総括	160
8.2	今後の課題と展望	168
 付録「都市型バイオマスエネルギーシステムの実用化に関する技術開発」実証試験設備図面及び写真		

第1章 序論

第1章 序論

1.1 研究の背景

(1) 建物の熱源設備の省エネルギー化の重要性

2015年12月国連気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)において、「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2°Cよりも十分に低く保つとともに、1.5°Cに抑える努力を追求する」「今世紀後半に人為的な温室効果ガスの排出と吸収源による除去の均衡を達成するために、最新の科学に従って早期の削減を行う」事が記載され、我が国を含む55か国以上が批准し発行に至った。今後5年ごとに見直しを行い国連へ報告、温暖化対策被害への対応・適応策に取り組み、途上国への資金支援を行う等、具体的な取り組みを開始する。

我が国では、2030年までに温室効果ガスの26%削減(2013年比)、2050年までに80%削減を目標としている。2030年の削減目標を見ると、エネルギー転換分門が27.7%、運輸部門が27.6%、建築部門が39.6%、産業部門が6.5%と、建築部門の削減目標が大きい。つまり今後、建物における省エネルギー化や省CO₂化が急務と言える。業務施設(オフィスビル等)を例にとると、年間一次エネルギー消費量の約43%は空調設備(熱源設備約31%、熱搬送設備約12%)に起因し、特に熱源設備の割合が大きい。したがって、建物の省エネルギー化や省CO₂化では、空調(冷暖房)用の冷水や温水、蒸気を効率よく製造することが重要である。

建物の熱源設備に係わる一次エネルギー消費量を削減する方法には大きく2つある。一つは建物自体の環境性能の向上であり、冷熱・温熱負荷を削減し、熱源設備の高効率化などが期待されている。もう一つは街区や地区内の複数の建物による熱エネルギーの面的利用であり、冷熱・温熱負荷の平準化効果、熱源システムの高効率運転、下水熱やごみ焼却廃熱等の未利用エネルギー活用や河川水熱や地中熱等の再生可能エネルギー活用などの効果が期待されている。

(2) 熱エネルギーの面的利用の種類と動向

熱エネルギーの面的利用には表1.1.1に示すように、①地域熱供給事業型、②地点熱供給事業型、③建物間熱融通型の3つに大別される。地域熱供給事業型と地点熱供給事業型は集中熱源方式と呼ばれ、建物に設置されている熱源設備を一箇所の熱源プラントに集約し、そこで効率よく冷水と温水、蒸気を製造し、配管を通じて各建物にそれらを供給するシステムである。各建物では受け入れたそれらを用いて空調(冷暖房)を行う。両者の違いは加熱能力が21GJ/h以上の大規模システムが前者であり、それ未満は後者となる。これら集中熱源システム方式に対して、建物間熱融通型は建物個々に熱源設備を設置したまま、建物個々の余剰熱や熱源容量に余裕がある時間帯に他の建物に製造熱を融通するシステムである。

我が国の地域熱供給事業型は、1970年の千里ニュータウン地区(大阪府)に始まり現在約131地区(2018年12月)に至っている。地域熱供給事業型の多くは大規模地区再開発事業に伴って整備されているものがほとんどであり、既成市街地において既に熱源設備を保有している建物から熱源設備を集約することで整備された地域熱供給事業地区は無い。現在、大規模な地区開発事業は少なく、既成市街地に適した熱エネルギーの面的利用の促進が求められている。

表 1.1.1 熱エネルギーの面的利用の概要

	①地域熱供給事業型	②地点熱供給事業型	③建物間熱融通型
イメージ図			
概要	一定地域内の複数の建物に、集約した熱源プラントで製造された冷熱・温熱を配管を通じて供給を行う。熱供給事業法の適用対象となる。	熱供給事業型と同様、集約した熱源プラントによる熱供給システム。規模が小さい等から熱供給事業法に該当せず、需要・供給両者間の相互契約を行う。	近接する建物の小規模な熱源を配管で接続、建物相互間で熱を融通又は共同利用する形態。①②と異なり、各建物が熱源を有している。

注:イメージ図は「2011年まちづくりと一体となった熱エネルギー有効利用に関する研究会資料」から

(3) 既成市街地の熱エネルギーの面的利用で期待される建物間熱融通

東京区部・大阪・名古屋・横浜の4都市における延床面積3千㎡以上のオフィスビルのうち、既築ビルの割合は99.1%と殆どであり、特に1982年(新耐震基準)以降に竣工した、今後設備更新・リニューアルが考えられるオフィスビルは71.5%(4都市調査対象延床面積3千㎡以上のオフィスビル延床合計が9,072万㎡、1982年以降の同合計が6,484万㎡)である(図1.1.1)¹⁻¹⁾。

そのため既成市街地内の複数の建物を対象に、熱源設備を集約せずに既存熱源設備を活用し、近隣の複数の建物相互間で熱源設備を熱融通配管で接続して共同利用する「建物間熱融通」が期待されている。しかし再開発時の新築建物と異なり、複数の既存建物間における調整が必要となるため、まだ「建物間熱融通」事例は少ない。今後の普及の鍵となるのが調整を支援する効果的・効率的かつ経済的に熱融通が可能となる「熱融通システム」の開発である。

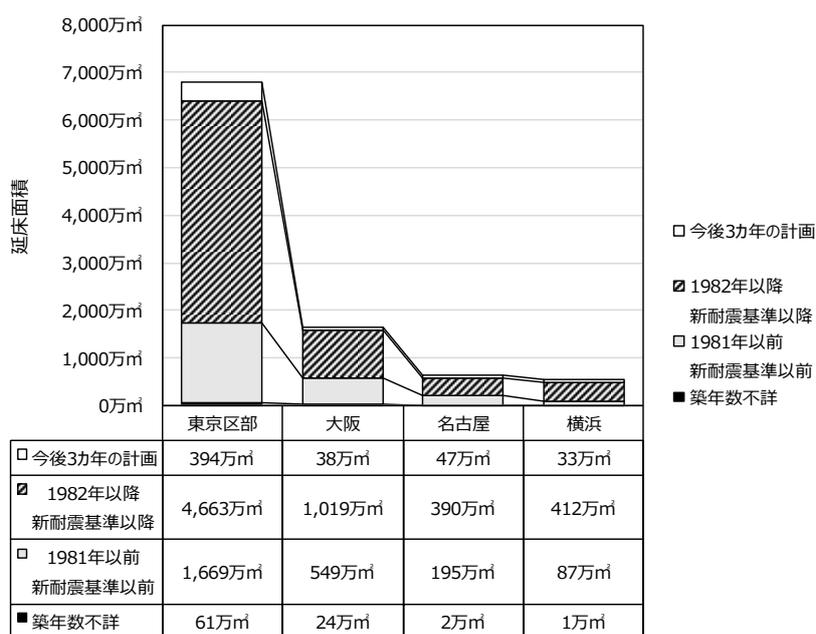


図 1.1.1 4都市の年別オフィスビル延床面積調査

(3) 協力型熱エネルギーの面的利用

現在、一般的なエネルギー供給モデルは、需要増に合わせて供給が不足する場合、供給機器を増設し、需要側は効率的にエネルギーを利用する、集中型システムによる一方向のエネルギーの流れが一般的である。一般的に、最終エネルギーとして消費される2次エネルギー量は1次エネルギー供給量の約2/3で、転換時に1/3を損失、需要側が満足する“暖かさ”や“涼しさ”、“使い易さ”等を各需要のエネルギーサービス量として捉えると、1次エネルギー供給量の1/3程度しか利用されていないとされている（図1.1.2）¹⁻²⁾。これは、その大半が熱として大気に放熱されており、エネルギーサービス量が不明確なまま、過剰にエネルギーを供給している可能性がある事を示している。

従来は、一方向のエネルギーの流れの場合、エネルギーの質について供給側が保証するモデルが標準であったが、供給するエネルギーの変動をある程度許容し需要側が受入、不足する場合には需要側が自ら自己熱源で補完し利用する方法、「協力型¹⁻³⁾」が考えられる。この方法は、今後の熱エネルギーの面的利用を整備する上でのポイントと考える。特に建物間熱融通型はこの考え方に近いシステムと言える。

本技術は省エネルギー技術戦略2016¹⁻⁴⁾の中で、特定エリア内における熱利用率を向上させる技術としてコージェネシステム、再生可能エネルギー、未利用エネルギーの大幅導入、情報通信技術の活用によるエネルギー需給の最適制御を行うネットワーク技術の開発等と共に期待されている。

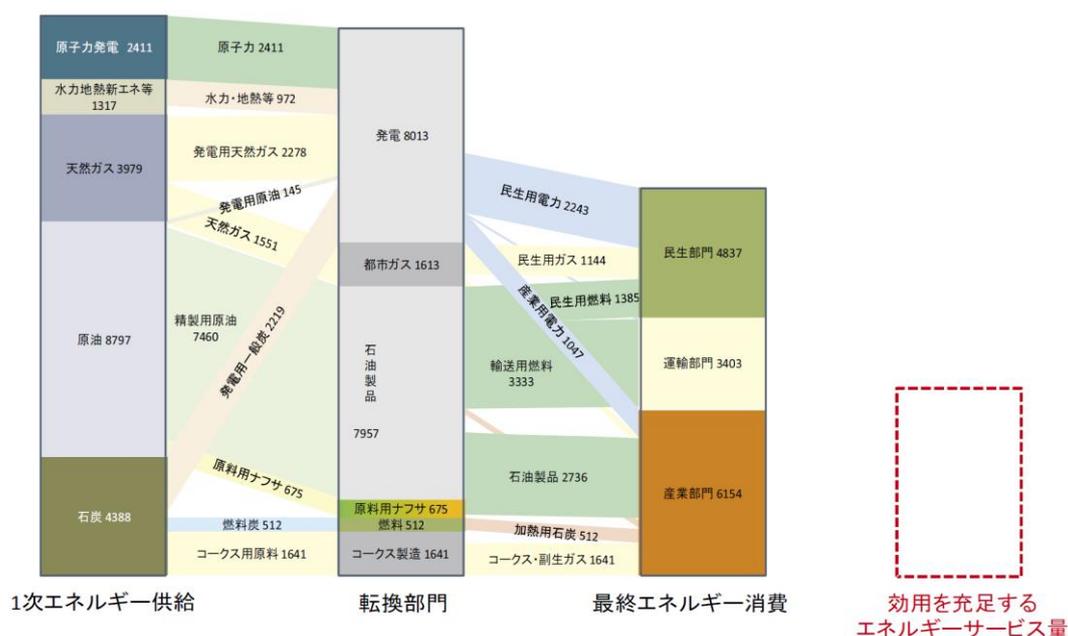


図 1.1.2 日本のエネルギーバランス（2009年）単位 10^{15}J

(4) 熱エネルギーの面的利用における再生可能エネルギー活用

2018年7月に、政府より第五次エネルギー基本計画が示された。2030年におけるエネルギーミックスの確実な実現や2050年におけるエネルギー転換・脱炭素化への挑戦が目指されている。特に注目すべきは、再生可能エネルギーの主力電源として位置付けたことである。2030年度における再生可能エネルギー電源の比率は22~24%である。その内訳を図1.1.3に示す。太陽光とともにバイオマスへの期待が大きい。

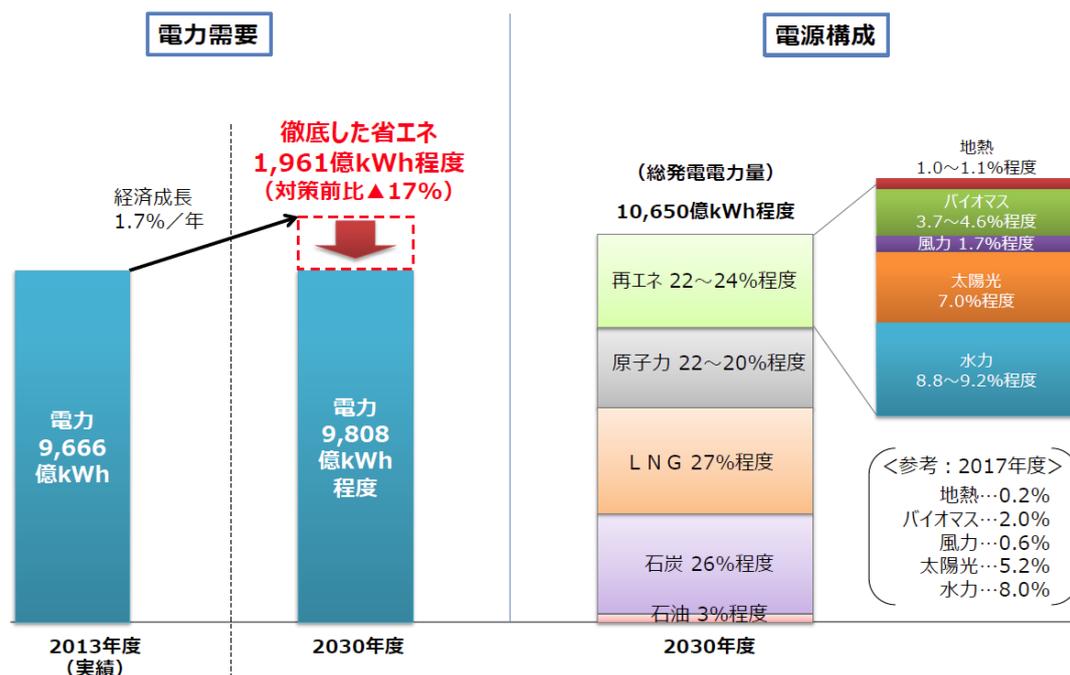


図 1.1.3 第五次エネルギー基本計画における電源構成

バイオマスは、地方都市では間伐材等を利用する木質バイオマス発電が考えられるが、都市部では難しい。我が国の都市部におけるバイオマス発電としては一般廃棄物の清掃工場における廃棄物発電がある。しかしごみ焼却時の廃熱を発電利用する場合の一般的な発電効率は5~15%程度であり、既成市街地の熱需要密度が大きい都市部では発電利用のみならず熱利用との併用が有効とされている。欧州においてもごみ焼却廃熱を熱供給利用や、熱電併給利用するケースが多く見られる。また都市部の熱供給では、再生可能エネルギー利用として河川水熱、海水熱や地中熱が考えられるが、立地制約やポテンシャル量の制約がある。そこで、今後都市部では、熱エネルギーの面的利用とともに一般廃棄物のバイオマスエネルギー利用を促進させる事が期待される。

(5) 研究背景の整理

以上より、既成市街地のエネルギー面的利用を進める上で、建物の熱源設備を集約する地域熱供給事業型や地点熱供給型とは別形態である「建物間熱融通型」を推進するための研究が重要であると考えた。その際に、「協力型」を可能にするために融通する熱量と建物の自己熱源が製造する熱量のバランスの検討、および都市部における再生可能エネルギー利用の促進方策として熱エネルギーの面的利用と連携した一般廃棄物のエネルギー有効利用方法を検討することなどが重要であると考えた。

1.2 研究に関連する事例調査

研究背景を受け、本研究を進める上で参考となる熱エネルギーの面的利用の事例調査を行った。

1.2.1 熱エネルギーの面的利用における熱融通事例

我が国の熱エネルギーの面的利用では建物間熱融通の事例はほとんどなく、地域熱供給事業型において熱源プラント（サブプラント）間において熱融通する事例が出てきている。

(1) 地域熱供給事業型における熱源プラント連携事例

①大丸有地区（スパイラルアップ効果）

我が国を代表する地域熱供給事業者である丸の内熱供給株式会社は、1976年4月に大手町地区で熱供給を開始後、丸の内一丁目・二丁目地区、有楽町地区へ供給エリアを拡大し、現在は、内幸町地区、青山地区を合わせ、合計6地区で熱供給事業を行っている。2013年3月時点における熱供給先の建物合計は105箇所、オフィスビル・ホテル（85棟）、地下鉄駅舎（17駅舎）、地下通路（3通路）である。供給先の総延床面積は約618万 m^2 、冷熱源能力は合計約120,000RTh、温熱源能力630TON/h（蒸気換算）で、合計18箇所の熱供給プラントから、熱供給配管を通じて各供給先建物へ熱供給を行っている。熱供給配管の総延長は約27km、洞道の総延長は約4kmである。

大手町地区は其中最も古く、1976年に供給を開始していたが、2012年10月、大手町フィナンシャルシティサブプラントを新設、それにあわせて、既存の大手町センター、大手町カンファレンスセンターサブプラントと連携運転を2013年3月から開始した。当初、事務所ビル中心のエリアのプラントは冷熱ピークの50%以上の負荷は、年間積算時間の約7%程度にしかならず（図1.2.1）、結果大手町地区では既存2プラントのみの連携時には、エリア内COPが1.167であった。単体のエリアCOP1.737の大手町ファイナンシャルシティサブプラントを連携させた結果、3プラントのエリアCOPは1.404となり、既存2プラントは効率が20%上昇した（図1-2-2）。この熱源プラント間の熱融通効果はスパイラルアップ効果と称されている¹⁻⁵⁾。

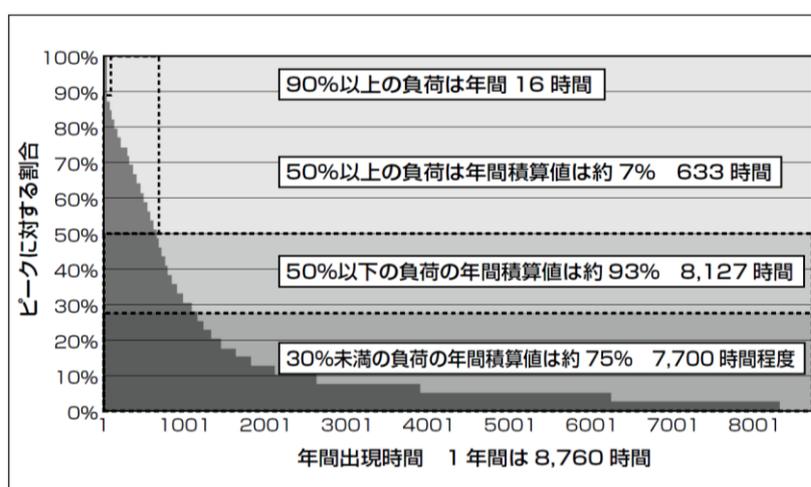


図 1.2.1 年間冷熱供給累積負荷曲線
(既存 2 プラントケース)

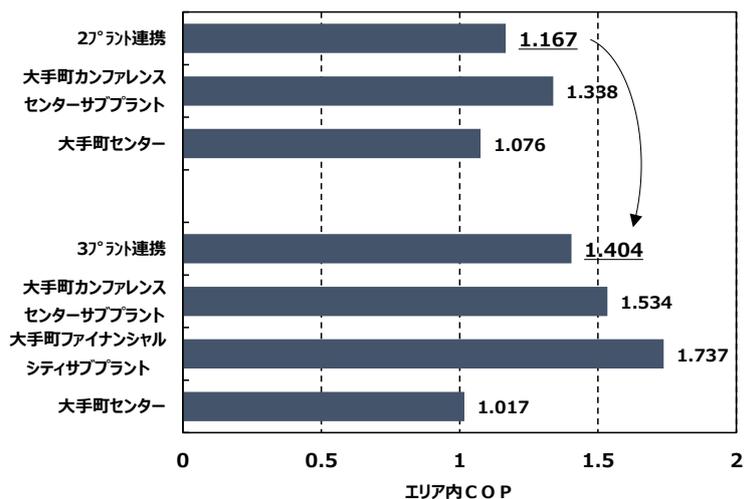


図 1.2.2 3 プラント連携によるエリア内 COP 向上

本事例では、連携する熱融通量が小さくとも、ベース負荷部分を部分負荷効率が高いインバータターボ冷凍機を稼働させる事で、大きな効率向上となったと報告している。更に、大手町地区の別の4つのプラントのうち冷熱源のリニューアルを行い46%効率向上させたプラントを、何も工事をしていない1つの別プラントと連携、但し、熱融通量に制限があり、ピーク負荷の9%程に留まったが、全体効率が37%向上させる効果があったとヒヤリングした。以上、小容量でも高効率機をベース負荷対応用で使用する事で、大きな省エネルギー効果が期待できる事を確認した。

②名古屋駅前地区（供給熱の状態等が異なるケース）

名古屋駅前のミッドランドスクエアを拠点に、同高層ビル、周辺地下街及び他の建物に熱供給を行っているDHC名古屋株式会社が運営する「名鉄東地区（2006年稼働）」と東邦ガス株式会社が運営する「名鉄南地区（1998年稼働）」を導管で直結、我が国初めての地域導管ネットワーク化を実現した。ネットワーク化については、プラント間同士を直接接続する方法も考えられたが、東地区・南地区のプラント間の距離が長く、連絡配管の施工が現実的に不可能であったため、冷熱（冷水）は地域導管を利用し、最寄り地点に熱交換器を設置した間接接続、温熱（蒸気）は地域配管を直接接続する方式となっている。又、熱融通の流れについては、新しい名駅東地区側→名駅南地区側の一方向の流れで、熱交換器・ポンプ等が選定されている¹⁻⁶⁾。

冷水については、それぞれの供給エリアで定める供給条件（名駅東地区が6.5℃送り→16.5℃戻りで供給圧力0.677~0.727MPa、名鉄南地区が7.0℃送り→14.0℃戻りで供給圧力0.62~0.78MPa(NP+3m))はそのままで、防食等水処理方式もそのまま使用している。但し、融通する側と受入する側の間である程度の温度差が必要で、融通する熱は連絡配管及び熱交換器の搬送能力により制限がある。蒸気については、当初は水管理について異なる薬剤を使用していたが、DHC名古屋株式会社が使用していた薬剤に変更統一し、直接接続方式としている。蒸気還水についてはプラント間の返送ポンプで調整すると共に、名駅南地区と同東地区のプラント設置場所に高低差があった事から、ネットワーク導管部分に10%程度の勾配をつけ接続している。



図1.2.3 名古屋駅前における2つの地域熱供給地区間の熱融通事例

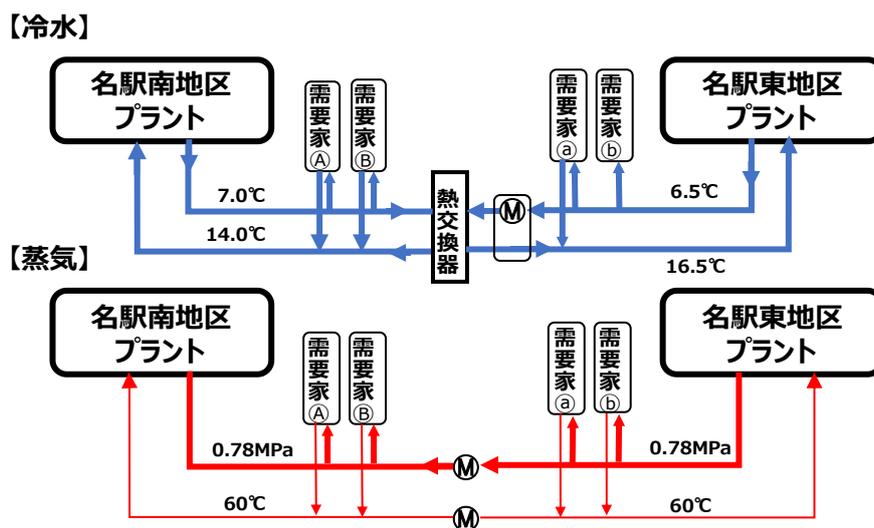
表1.2.1 各プラント主要機器

名 駅 東 P	吸収冷凍機	10,700RT
	ターボ冷凍機	900RT
	蓄熱槽分	450RT
	ガスボイラ	34.0T/h
	コージェネ	4,295kW
名 駅 南 P	同上廃熱ボイラ	34.0T/h
	吸収冷凍機	7,300RT
	ターボ冷凍機	1,200RT
	ガスボイラ	39.2T/h
	コージェネ	3,000kW
	同上廃熱ボイラ	10.0T/h

最大熱融通量は、冷熱が $800\text{m}^3/\text{h}$ (口径 350A) $\rightarrow \Delta T=6.5^\circ\text{C}$ とすると 1,720RT 相当で、名駅南地区冷熱設備容量に対して 23.6%、名駅東地区の同容量に対して 16.1%である。同様に、温熱(蒸気)については、最大熱融通量が 5t/h (口径 350A:蒸気管、80A:還水管) で、名駅南地区設置ガスボイラ能力の 14.7%、名駅東地区設置ガスボイラ能力の 12.8%を有する。(図 1.2.4)

結果、年間の名駅南地区の約 40%に相当する融通を行い、省エネルギー率は約 13%で、大きな効果を上げている。特に、中間期には名鉄東地区の高効率機器がベース運転を行い、名駅南地区のほとんどの需要を熱融通で賄う事が確認されている¹⁻⁷⁾。

本調査から、建物間熱融通を行う場合、同一熱媒を使用する際には水管理の観点から薬剤を統一する必要がある事、異なる熱媒条件では熱交換器を設置する事で熱融通量等の制約条件を考慮する必要があり、放熱や搬送動力等のエネルギーロスの発生も考慮する必要があるが、既設建物間で熱融通実施が可能な事を確認した。



※**M** ネットワーク（冷熱）計量装置。最大融通量 800 m³/h、温度差 6.5°Cで 1,720RT 相当量
 ※HEX:冷熱ネットワーク熱交換器

図 1.2.4 冷水・蒸気各配管ネットワークの構成

(2) 建物間熱融通の事例

建物間熱融通の代表事例として、新横浜地区にある横浜市公共3施設（障害者スポーツ文化センター横浜ラ・ポール、リハビリテーションセンター、総合保健医療センター）がある。前者2施設は横浜市リハビリ事業団、後者は横浜市総合医療財団の横浜市関連2団体が運営している。設備経年化に伴う設備更新を横浜市が公共建築物ESCO（Energy Service Company）事業の第1号として実施された。但し、電力に関しては団体毎の建物受電に合わせてコージェネエネルギーシステムを導入、ラ・ポールとリハビリテーションセンターの2棟間でコージェネエネルギーシステムによる電力融通を行い、総合保健医療センターは単独のコージェネエネルギーシステム導入して

いる。本研究では同建物間熱融通に着目、導入設備と建物間熱融通に関わる熱源運用に関して確認した。

①熱源設備改修の概要

本事業の実施は2006年4月である。建物竣工から14~19年経過していた3施設の設備機器更新に合わせて実施された。その中で、それぞれの建物の需要パターンが異なり、3施設連携することによって負荷が平準化される事から「建物間熱融通」を導入し、大きな省エネルギーを実現している。9年間ESCO契約で省エネルギー率18.2%、CO₂排出量削減30.5%を目指している。

熱源の更新については既設熱源の経年度合い、熱源の省エネルギー運用及びESCO事業の観点から、熱源は選択して更新している（表1.2.2）。

表 1.2.2 各建物熱源更新状況

建物名	熱源	方式	更新/新設
リハビリ テーション センター	R-1	直焚	○
	R-2	吸収式	○
	GE	ガスエンジン	○
横浜 ラ・ポール	R-1	直焚	○
	R-2	吸収式	-
	B	ボイラー	-
保険医療 センター	R-1	直焚	○
	R-2	吸収式	-
	R-3	空冷HP	-

※「○」は更新又は新設、「-」は既存のまま

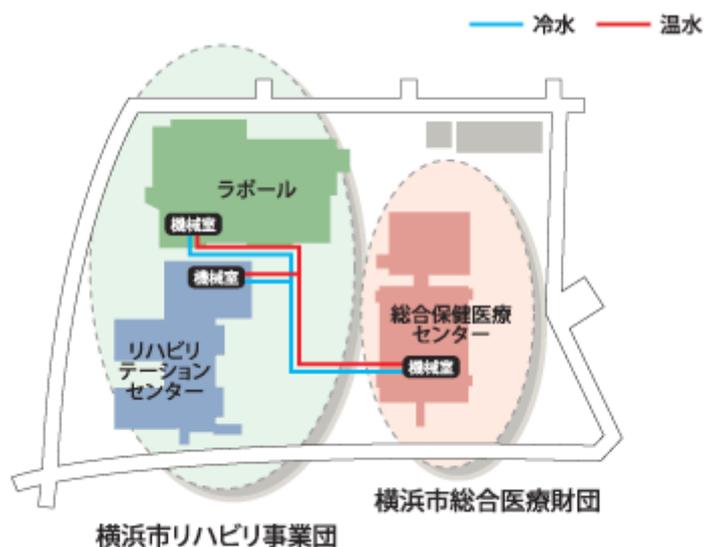


図 1.2.5 新横浜 3 施設建物位置関係

(<http://www.tokyogas-es.co.jp/case/municipality/yokohama3.html>)

1987年竣工し、3建物の中で最も古いリハビリテーションセンター（他の2建物は1992年竣工）にガスエンジンコージェネレーションシステムを導入、ガス直焚吸収冷温水機2台（うち1台は廃熱投入型）に更新して、横浜ラ・ポール、総合保険医療センターに冷水と温水を供給（融通）している。また、中間期には熱融通せず、各建物の熱源で需要を賄う様に、横浜ラ・ポール及び総合保健医療センターの熱源容量見直しを行っている。その内容は、横浜ラ・ポール設置のガス直焚吸収冷温水機2台のうち1台を280RT→225RTに、総合保健医療センター設置のガス直焚吸収冷温水機2台のうち1台を240RT→225RTに更新である。

②熱融通の概要

季節・昼夜間により異なる空調利用状況を考慮した、図1.2.6～図1.2.9に示す4つの熱源運用設定（夏期昼間、中間期昼間、冬期昼間、夜間）を行い、建物間熱融通を行っている。夏期昼間及び冬期昼間はリハビリテーションセンターから横浜ラ・ポール及び総合保健医療センターへ冷水と温水を供給している。中間期は熱融通せずに各建物で熱製造を行っている。

ガスエンジン廃熱について、夏期は廃熱投入型吸収冷温水機に使用、冬期と中間期は横浜ラ・ポールのプール加温に使用している。

上記のように、建物間熱融通ではあるが、基本はリハビリテーションセンターから他2施設への一方方向融通である。しかし夜間に発生するリハビリテーションセンター及び保健医療センターの小容量需要対応は、総合保健医療センター設置の空冷ヒートポンプチラーからリハビリテーションセンターへ熱供給している。これは安価な電気料金を使用することが背景にある。

④熱融通配管

建物間熱融通を行うには熱融通配管が必要となる。3施設は、近接する一級河川の多目的遊水地内に立地しているため、ピロティ構造を構築し、同部分を通常時駐車場として使用している。そのため、駐車場の天井部分に熱融通配管を敷設する事が出来たため建物間熱融通が検討し易い状況であった。

【夏期昼間】

夏期の昼間は、リハビリテーションセンターから横浜ラ・ポールと総合保健医療センターへ冷水と温水を供給している。

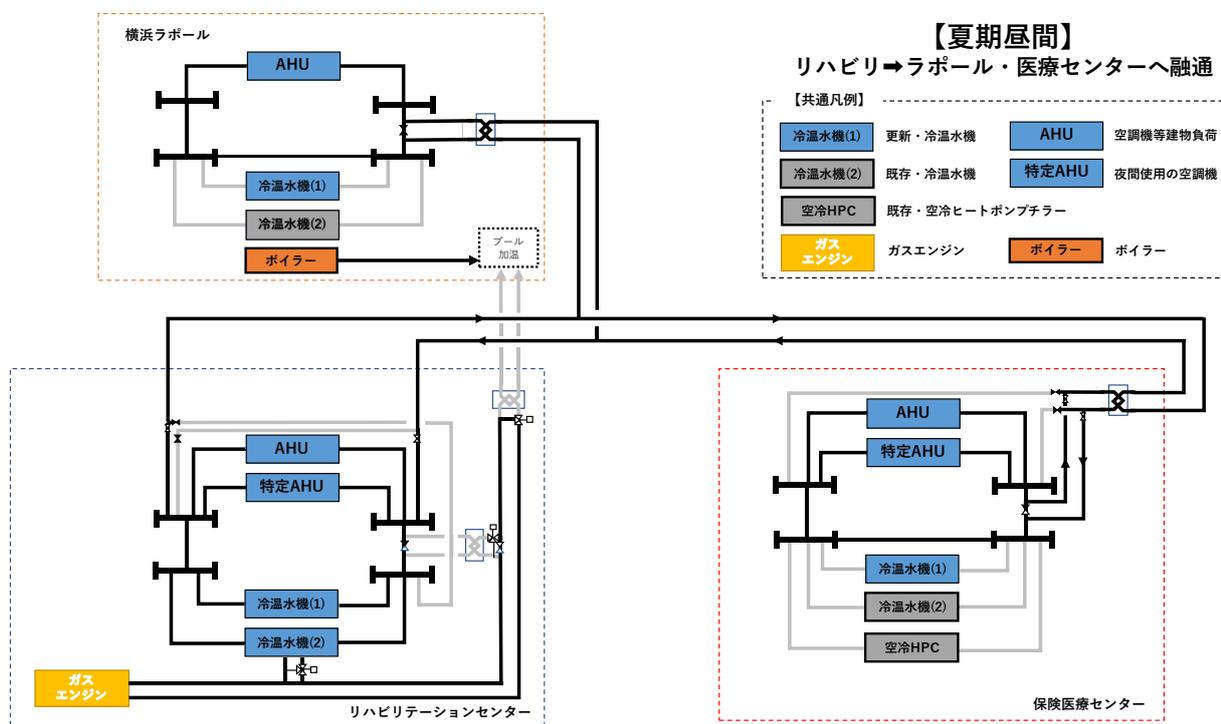


図 1.2.6 夏期昼間の冷温水融通

【中間期昼間】

中間期の昼間は、リハビリテーションセンターから横浜ラ・ポールにプールの加温用にコージェネレーション廃熱を熱交換した温水を供給している。

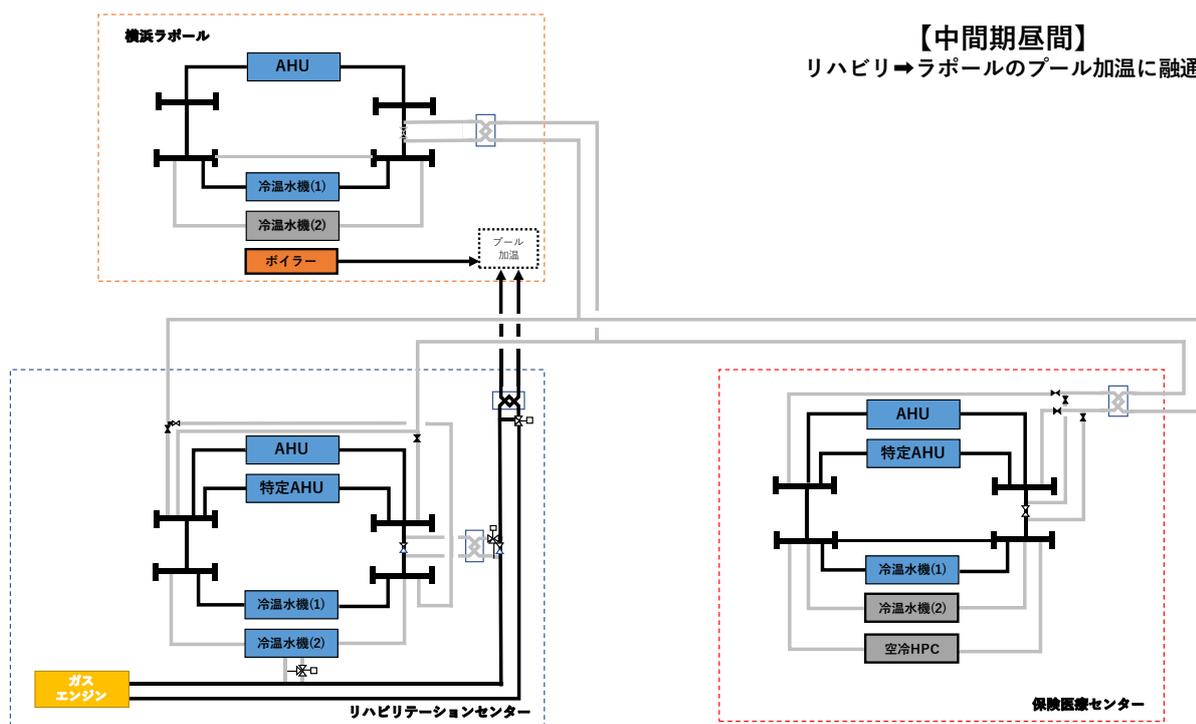


図 1.2.7 中間期昼間の冷温水融通

【冬期昼間】

冬期の昼間は、夏期昼間同様に横浜ラ・ポールと総合保健医療センターへ冷水と温水を供給している。中間期同様にコージェネレーション廃熱をプールの加温用に供給している。

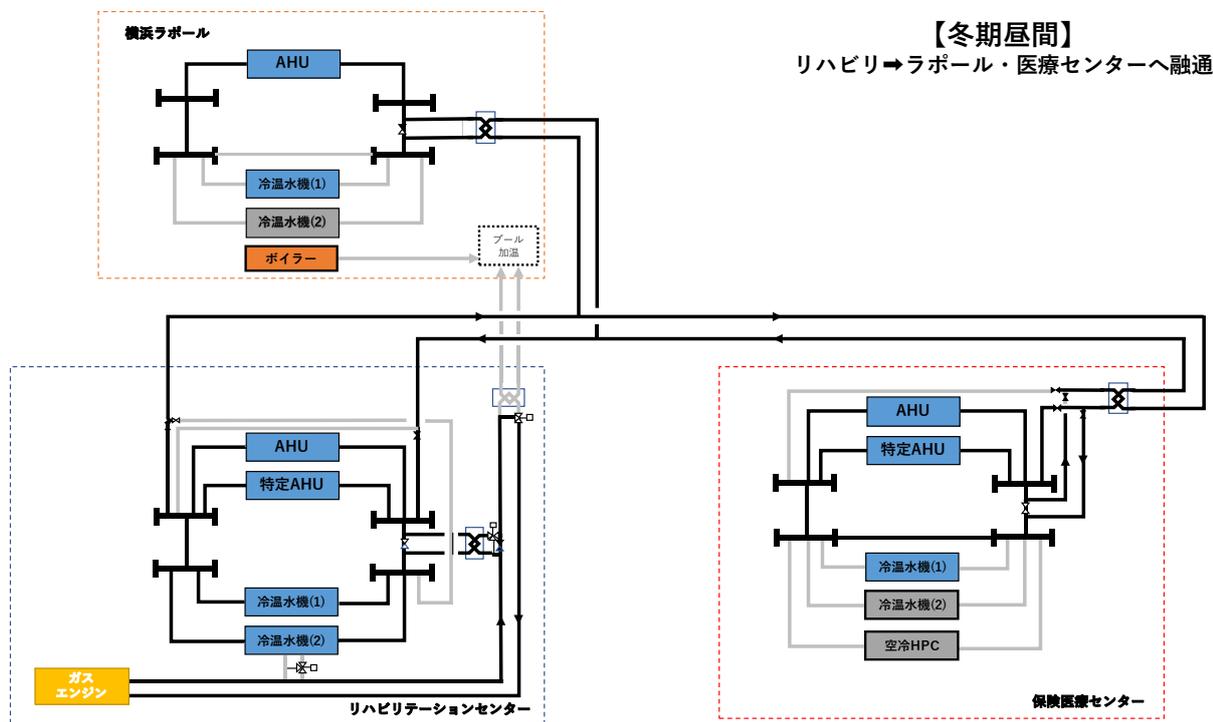


図 1.2.8 冬期昼間の冷温水融通

【夜間】

夜間は総合保健医療センターからリハビリテーションセンターへ冷水と温水を供給している。

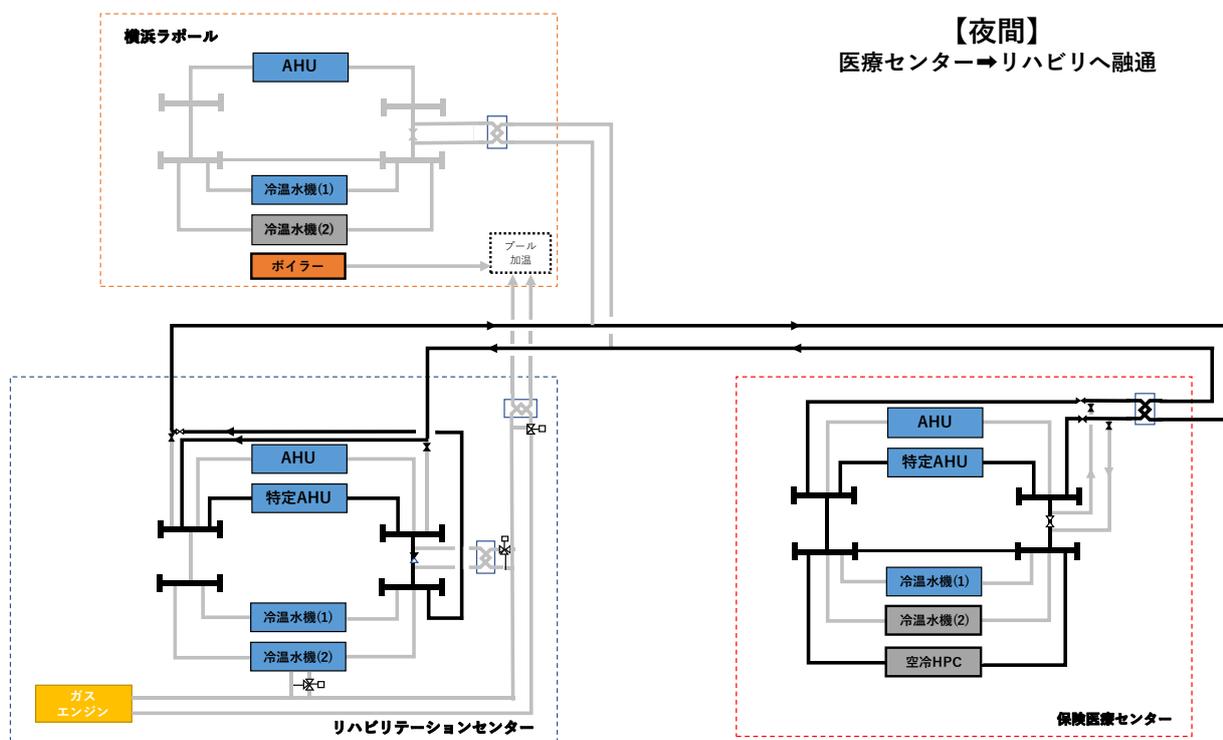


図 1.2.9 夜間の冷温水融通

1.2.2 都市部のバイオマスエネルギー利用熱供給

(1) 汚泥焼却廃熱活用地域温水供給システム

都市部のバイオマスエネルギー利用熱供給システムの事例として六甲アイランド CITY 地区（神戸市）がある。本地区では下水処理場から排出される汚泥の焼却廃熱を大規模集合住宅に、予め定めた条件に基づいて供給するのではなく、成り行き供給の様な緩やかな熱供給を行っている。神戸市・事業者ヒヤリング調査を行った（2013年6月17日）。

①熱供給側概況:

熱供給元である神戸市東部スラッジセンターは、六甲アイランド CITY 住宅ゾーンの北東部から約 300m 北に位置し、神戸市内の 9 か所の下水処理場から搬入される脱水汚泥を集中焼却処理し、埋め立て用資材として活用化処理を行っている汚泥処理施設。1991 年に供用開始し、廃熱ボイラによる熱回収等の省エネルギー化を実施していたが、最終段階の廃ガススクラバーで発生する約 250℃の廃ガスを洗浄処理する過程で発生する廃熱（廃温水）を下水放流するため、冷却用の中水で希釈混合し 45℃以下に冷却した後に下水に放流していた。

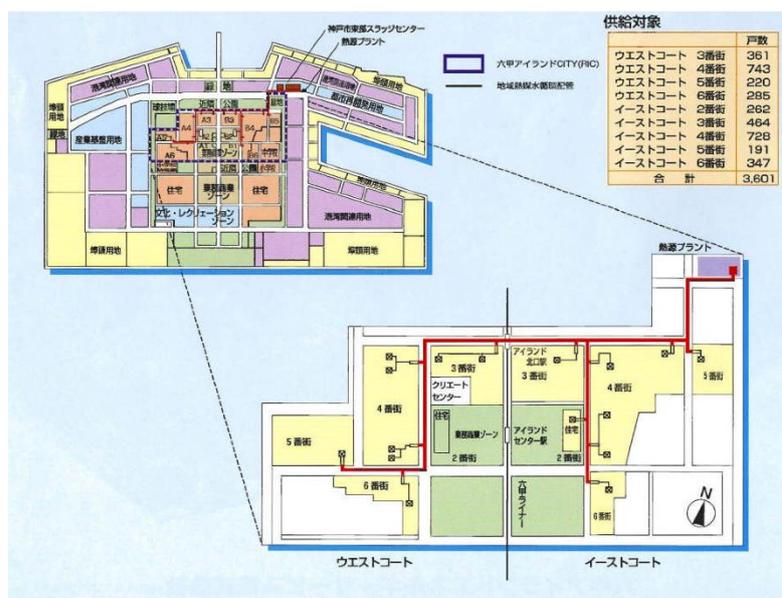


図 1.2.10 六甲アイランド CITY 地域温水配管

②汚泥焼却廃熱の有効活用の計画内容

中水で希釈混合し放熱していた廃温水の有効活用を図るため、神戸市・集合住宅開発者（デベロッパー）、エネルギー供給事業者で検討を開始した。熱供給側（神戸市東部スラッジセンター）に設備を付加し、熱媒を高温にして供給する方法も比較されたガスラッジセンター敷地内に廃熱回収用熱交換器・ポンプ等のみで構成される熱源プラントを設置、公道内に熱媒配管を埋設、六甲アイランド CITY の集合住宅棟へ熱媒搬送し、各住宅棟に設置する熱交換器に送り、再度上水と熱交換をして各戸の給湯器・予熱温水として供給する方式に決定した。なお、熱供給実施及び建物の一次側までの熱供給設備建設・設置者及び熱料金請求元はエネルギー供給事業者、二次側の集合住宅側設備建設・設置者はデベロッパー、各住戸給湯器所有及び熱料金支払者は各住戸区分所有者である。

③熱供給料金

供給対象戸数は、3601戸、利用料金は各戸、それぞれ入居時100千円、毎月1575円/月（税込：2013年6月17日ヒヤリング時）の定額制。エネルギー供給事業者に対して、各住戸区分所有者が月々定額払い。但し、集金代行を行い、同業務は管理会社が実施。なお、入居時の100千円分で熱供給建設費を賄い、月々の定額料金分でメンテナンス費用、及び搬送用電力費、将来の設備更新時費用まで見込んでいる。

④実運用確認:

スラッジセンターの廃熱温水温度は計画通りであったが、各住宅棟の熱交換器入口側で58℃、出口側で53℃を確認。ヒヤリング確認したところ、夏期は同程度の温度だが、冬期には入口側で40℃程度まで低下するとの事。但し、成り行き供給のため、問題は生じておらず、各住戸にアンケートを実施したところ、夏期には水で薄めたシャワーを使用し、ガス使用は調理程度との事。結果、約80%の居住者から「満足」「やや満足」の回答を得ている¹⁻⁸⁾。

⑤安全対策

各戸の給湯口の出湯温度が高温とならない様、安全装置機能（高温出湯時停止）付きの特注給湯器が設置。また、スラッジセンター～各住宅棟の熱媒水は給湯用防錆材を混入しているガスラッジセンターからの熱媒水が各住戸棟側の二次側温水管に混入しない様、熱交換器隔壁が腐食等で破損しても、熱媒水側より二次側温水の圧力が高くなるように圧力バランス設定している。万一、断水等によって二次側温水の圧力が低下した場合は、差圧検出装置で確認、熱媒水側の出入口遮断弁を閉止し、放出弁を開放し熱媒水を大気法開放し、混入を防ぐシステムを採用している。

⑥設備更新計画

運用開始して25年経過（2013年段階）し、熱交換器については来年度から交換する予定。熱融通配管については劣化診断の結果約10年以上運用可能と確認済み。特別仕様の給湯器については各居住者負担となっており、定期的に取り替促進提案を実施している。

⑦配管放熱ロス

スラッジセンターで中水を使い希釈放熱していた廃熱を、成り行きで供給する廃熱利用の計画であるため、配管は保温せず、直埋設している。なお、熱融通配管は公道に総延長約3,550m（口径65mm～200mm）、材質はポリエチレン被覆鋼管（STPG38、Sch40）を使用し、低コスト化した。

⑧拡張に際しての留意点

現対象エリアで供給能力は満たしており、拡張計画は現在無い。一般的に、熱融通配管の掘削費用の割合が大きい。本配管敷設工事は、対象エリアが埋め立て地であり、公道幅員は一般的な既成市街地に比べて広く、道路占用協議調整をし易かった事、交通量もある程度想定でき工期も計画通り進められた事等から実施し易かった。

(2) 一般廃棄物焼却廃熱活用地域熱供給

都市部のバイオマスエネルギー利用熱供給システムの事例として東京臨海副都心地区（東京都）がある（図 1.2.11）。本地区は東京湾ウォーターフロントの中心に位置する再開発地区であり台場地区、有明南地区、有明北地区、及び青海地区の 4 つに区分され、そのうち、有明北地区を除く 3 地区において地域熱供給が行われている。

地区内には 1994 年に竣工した有明清掃工場が立地し、5,600kW の背圧抽気タービンが 1 基設置され、190℃、0.94MPa の抽気蒸気を台場地区と有明南地区の 2 つの熱源プラントへ供給している。図 1.2.12 に示すように、抽出蒸気は冷水を製造する吸収式冷凍機や温水を製造する熱交換器の熱源として利用され、7℃の冷水と 80℃の温水を地区内の建築物に供給している。

本地区の事例は、発電機用タービンからの抽気蒸気を地域熱供給プラントの蒸気として供給し、蒸気を製造するボイラのガス消費量を削減している。

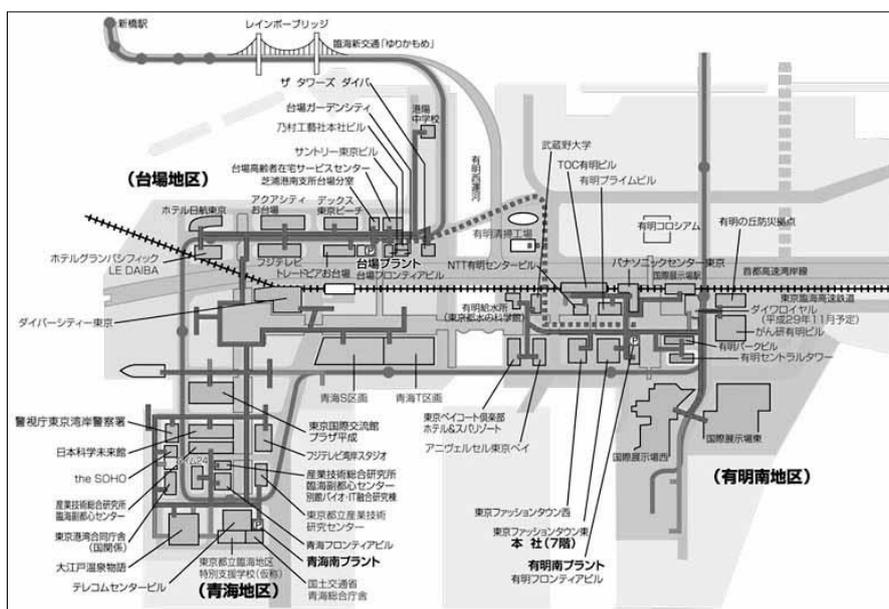


図 1.2.11 東京臨海副都心地区の供給区域図

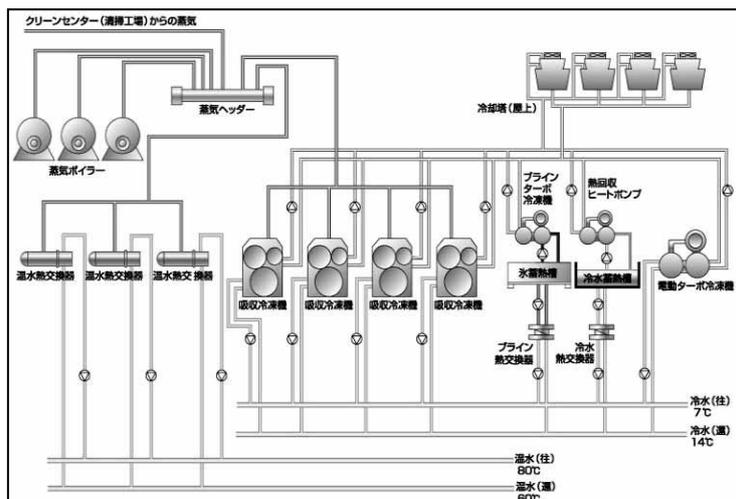


図 1.2.12 東京臨海副都心地区におけるごみ焼却廃熱利用システムの概要図

1.2.3 海外における協力型及びバイオマス利用熱エネルギーの面的利用の先進事例

2000年に英国政府は英国内における気候変動政策を取りまとめた「気候変動プログラム(The UK Climate Change Programme)」を発表し、その中で都市づくりにおけるCO₂排出量削減手段として、Lean（需要サイドの抑制）、Clean（コージェネレーション・地域冷暖房）による面的エネルギーネットワークを通じた削減、Green（再生可能エネルギー）をあげている。そして、それを受けて地方行政が具体的に政策もしくはプロジェクト開発誘導を行っている。本項では、ヒヤリング調査を行った内容を記す。特に、熱供給側と需要側（熱受入側）との協力型や再生可能エネルギー利用の取り組みに着目した。

(1) London Olympic Park Energy Centre（バイオマスボイラ活用熱エネルギーの面的利用）

本地区は、ロンドンオリンピックに合わせた大規模地域開発が行われ、地域熱供給が導入されている。特徴としては、地域熱供給の熱源プラントは天然ガスコージェネレーションシステム、天然ガスボイラが主要熱源機器であるが、設備容量の約7%程度をバイオマスボイラが賄っている。

①対象エリア概要

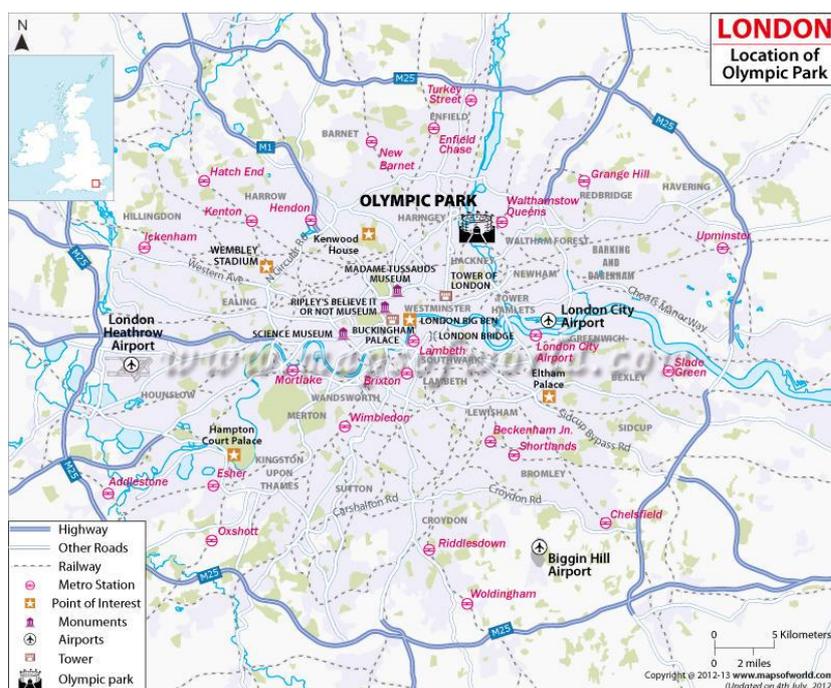


図 1.2.13 London Olympic Park 位置図

ロンドン東部・ストラトフォード地区の西側に広がる250haのエリア（図1-3-11）。周囲に整備された自然保護公園と住宅、オフィス、商業地区を加えると再開発総面積は700haに及ぶ。現在はQueen Elizabeth Parkと呼ばれる大都市公園を配し、大規模住宅と業務・商業等の複合開発が行われた。従来、東ロンドンはいノリティ住民が多い貧困地域が多く、旧工業地帯という事で土壤汚染も深刻で、ストラトフォード地区を中心に東ロンドン

の地域再生を図る事はロンドン市の長年の課題と捉えられており、オリンピックに合わせた大規模地域開発が行われた。そして、地域開発に合わせてロンドン・プランに沿って、地域冷暖房を導入している。

②London Olympic Park Energy Centre について

GDF Suez（仏）のエネルギーサービス部門であるCofely社が建設・運営し、ロンドンオリンピックパーク内で熱供給を行っている。同開発地には約100の土地所有者いたが、政府主導で短期間に土地

を買収、新規に大規模開発を行い同再開発地域に対応したエネルギー供給センター（図 1.2.13、表 1.2.3）を建設している。

- 開発エリアが広く、最終計画が完成するまで時間を要すると判断し、リーズナブルな熱料金で需要家に提供する事を目的に、40年間のコンセッション・アグリーメントを締結している。（エネルギーサービス契約では英国で最長）又、行政側（オーナー）の契約者である Olympic Delivery Authority (ODA) は40年間、組織が継続しない事を考慮して、契約者は別に継承される事を想定している。
- オリンピック・パーク内の熱料金は、同料金フォーミュラーに基づいて6ヶ月に1回見直しが行われる（英国で初めて）。フォーミュラー中のインデックスは公的な値を使用している（例えば、HEREN Index NBP（National Balancing Point ガス価格（英国ガス市場取引価格））。料金改定はスーパーバイザー・ボードの承認が必要となる。更に、熱料金については OFGEM（ガス・電力市場規制局）が監視しており、使用者の理解を得ている。

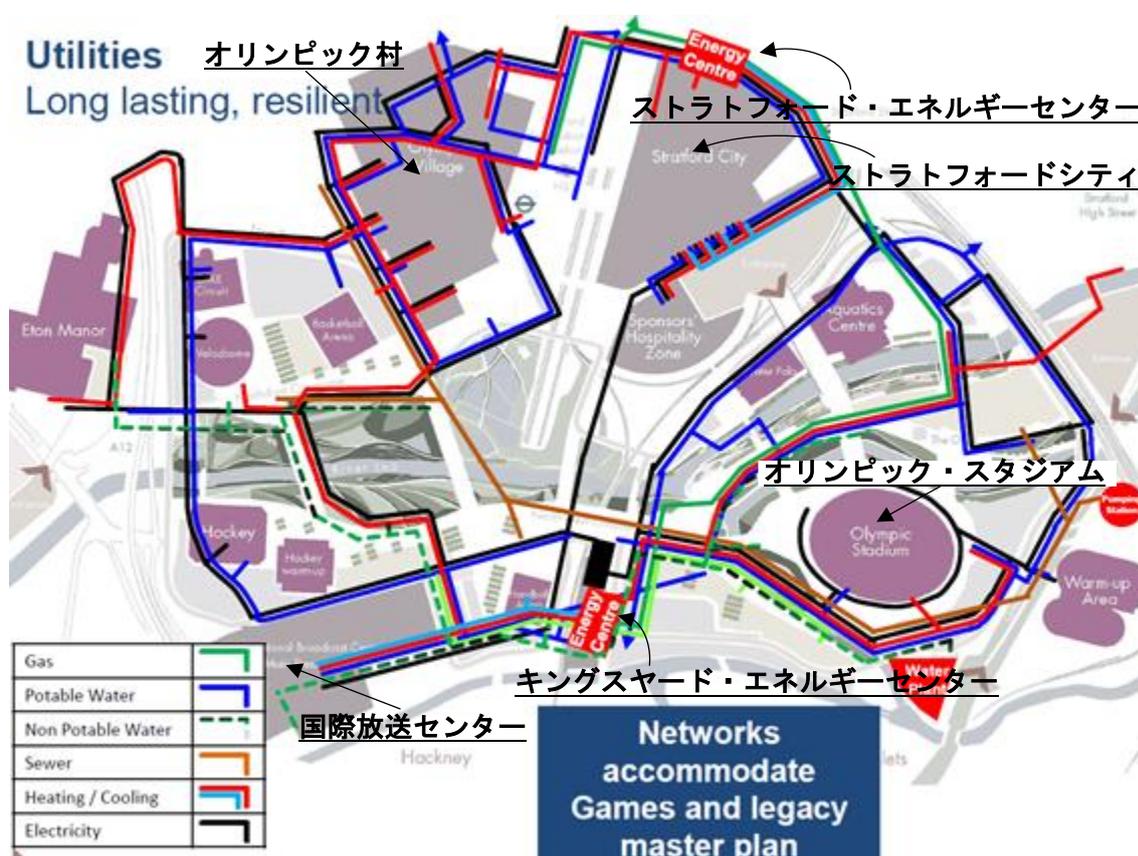


図 1.2.14 オリンピック・パーク エネルギー供給ネットワーク（マスタープラン）

黒線：配電線、赤線：温熱導管

水色：冷熱導管、緑線：ガス導管

- エネルギーセンターは2ヶ所、ネットワーク延長は18 km（温熱16 km、冷熱2 km）。
- オリンピック会場・オリンピック村・ストラトフォードシティ（ショッピングセンター）等ストラトフォード地域への温熱（温水:95℃⇔85℃）、冷熱を供給している。

- 40年間のコンセッションの中で、CCHP（Combined Cooling Heating and Power）で年間30%以上、バイオマスボイラで年間10%以上の低炭素化目標が記載されている。
- 初期投資:1億£（1£=190円換算で、190億円）
- エネルギーセンター設備（2008年10月着工→2010年10月供給開始）

表 1.2.3 各エネルギーセンター設備

キングスヤード・エネルギーセンター	ストラトフォード・エネルギーセンター
<ul style="list-style-type: none"> ・天然ガス CHP: 3.1 MW（GE Jenbacher J 620）× 1 基 ・天然ガス炊きボイラ: 20MW × 2 基 ・バイオマスボイラ: 3.5 MW × 1 基 ・蒸気吸収式チラー: 4.0 MW ・アンモニア吸収チラー: 14 MW 	<ul style="list-style-type: none"> ・天然ガス CHP: 3.1 MW（GE Jenbacher J 620）× 2 基 ・天然ガス炊きボイラ: 20MW × 2 基 ・蒸気吸収式チラー: 4.0 MW ・アンモニア吸収チラー: 35 MW

- 熱供給契約について、エリア内の供給義務は熱供給事業者の Cofely にあるが、同様に、需要家にも熱供給使用義務がある。現在、熱料金は個別方式に比べ安くなっているため、必然的に需要家は熱ネットワークに接続・使用している。前記の様に、熱料金についてフォーミュラー（市場連動型）の価格決定を取入れ、透明性が担保されている効果も大きいと考えられる。
- バイオマスボイラはエネルギーセンター内（写真 1.3.1 及び 2）の CO₂ 排出原単位を下げするために導入されたが、単独では経済性が成り立っていない。但し、CO₂ 排出削減原単位目標がコンセッション・アグリーメントの条件で定められており、他の再生可能エネルギー選択もあったが、バイオマスボイラを選定した。これは、木質チップ材はエネルギーセンターから 50 マイル（90km）以内の製造元から購入しているが、将来的にイングランド以外のスコットランドやスカンジナビア半島も対象に考えており、供給リスクが少ないと考えたとの事である。



写真 1.2.1 キングスヤード・エネルギーセンター外観



写真 1.2.2 バイオマスボイラ

- CHP で発電した電力はエネルギーセンター内で自家消費した後、エリア内には直接供給せず、外部に卸販売している。エリア内の建物へ直接電力供給するには自営線の敷設が必要となり、コストを要し経済的ではないと判断したためである。熱源プラントは熱需要に合わせて設計されている。
- オリンピック・パーク内を供給エリアに計画を進めていたが、同エリア外周辺に再開発計画があり、熱供給の検討を行っている。
- 集合住宅の契約は個別ではなく、デベロッパーとマスター契約を行い、各戸はデベロッパーと個別契約を締結している。
- 熱需要が増加しプラントを増設する場合に、CO₂ 排出原単位を維持するためバイオマスボイラの増設を併せて行っている。将来増設用の設置スペースも確保している。
- 契約段階で、配電線敷設・ガス導管敷設・電話回線敷設・水道管敷設・熱供給管敷設・エネルギーセンター建設・同運営、以上をまとめて 1 社に全て発注しようと入札を行ったが、一社しか応募がなく、しかも高い入札額となった。そこで、別々に入札を行ったところ入札額が下がったため、各インフラ別の個別発注となっている。

【補注】

既往研究¹⁻⁹⁾¹⁻¹⁰⁾¹⁻¹¹⁾から、英国における CO₂ 排出削減のための地域冷暖房事業と都市づくりの関係について紹介されている。時系列的には、英国中央政府が 2000 年に Climate Change, The UK Programme から 2012 年まで、10 の計画・法律を位置付け、特に 2008 年 Climate Change Act の中で「2050 年の CO₂ 排出量を 90 年比 80%に削減」と目標を明確に定めた。それを受けて、ロンドン市は 2011 年ロンドン・プラン 2011¹⁻¹²⁾を定め、①Lean (エネルギー需要の抑制)、②Clean (コージェネエネルギー、地域冷暖房)、③Green (再生可能エネルギー) の計画開発指導を行うとしており、優先順位を定めたエネルギー序列 (Energy Hierarchy) が存在している。ロンドンでは市街地が形成されているため、それまで風力等の再生可能エネルギー導入機会が限定的で 2007 年段階で再生可能エネルギーの導入量はエネルギー消費量の 0.8%しか達成できていない。そこでロンドン市内で開発された後のモニタリング調査から最も CO₂ 排出量削減に寄与するのがコージェネエネルギーと報告されていたことから、2025 年までに熱需要の 25%を分散型エネルギーからとする独自目標が設定された¹⁻¹³⁾等、Clean 政策が充実したものとなっている。以上の政策方針の下、ロンドンの基礎自治体はそれぞれに低炭素型市街地形成方針を定めている。

(2) London of Borough of Islington (協力型熱エネルギーの面的利用)

イズリントン区のエネルギー面的利用は低炭素都市の形成と弱者支援の両立を目的に整備されたものである。南地区に建設・運用開始された Bunhill Energy Centre の特徴としては以下の点があげられる。

- エネルギーセンターからの熱供給量は、需要量の 60%程度。不足分は各需要家が設置している熱源で補完運転し賄っている。結果、エネルギーセンターの熱源及び熱ネットワーク（導管）の稼働率は高く、過剰な投資・設置スペースが不要となり、既成市街地内で導入し易くなっている。又、エネルギーセンターが故障した場合、各需要家が自己熱源でバックアップできるため、供給停止リスクもほとんど考慮されていない。
- エネルギーセンター（ガスエンジン設置）及び熱導管は地域行政の管理用地（公園用地及び道路）に設置し所有し、同設備の建設・維持管理はエネルギーサービス会社を入札で決定し、委託契約して運用している。
- 需要家とは 10 年契約の長期契約をしている。ガスを燃料としているため、価格変動リスクを伴うが、市民からは自治体がエネルギーセンター施設と共に熱ネットワーク・インフラを所有するスキームの熱供給であり、低炭素化・弱者支援を目的にしているため、信任を経て 850 以上の受給契約に至っていると推察される。
- エネルギーセンターの発電電力については、専用線を敷設・利用せず、電力送電会社のネットワークに接続、そのまま売電している。

また、将来的なイズリントン区におけるエネルギーシステムの推進施策としては「小規模な街区レベル」から「連結した地域レベル」、そして「隣接する大規模再開発と連携した広域レベル」へ拡張するモデルが考えられている。その計画を作成する際には、行政が保有するデータを活用して具体的なシステムの導入効果を CO₂ 削減量で定量化指標としている。

以下にヒヤリング調査の詳細を記す。

①イズリントン区（Borough of Islington）の概況

イズリントン区は、ロンドン北部に位置し、行政区画としてグレータ・ロンドン（以下 GLA）の 32 あるロンドン特別区の一つとなっている。19 世紀には高級住宅街やショッピング街として繁栄したが、20 世紀半ばになると経済不況の影響から人口減少と共に貧困街が見られるようになった。その後、1960 年代から大規模な再開発が行われるようになり、中産階級も居住する地区となっている。GLA が定めたロンドン・プランに基づき、低炭素型都市づくりの一手法として地域熱供給を推進している。具体的には、イズリントン区自らが熱ネットワークを所有して実施する。これは比較的貧困層の多い同区の弱者に安いエネルギーを供給する考え方から導入推進の優先順位を高くする事で、低炭素都市の形成と弱者支援の両立を目指す手段として有効と捉えられた結果との事である。結果、イズリントン区では、行政が熱導管を敷設するので建物開発者や建設事業者、利用者との事前調整を含め工事を進め易い状況が実現している。

②具体的なプロジェクト内容（Bunhill Energy Centre の事例）

- イズリントン区の熱供給導入の目的は、2020年のCO₂排出削減目標を90年比40%達成し、エネルギーコストを低減、結果、燃料代金の支払いが滞る貧困層を減らす事としている。
- イズリントン区の熱供給は現在、市有地（公営集合住宅敷地や公共施設、そして公園も含む）に設置したエネルギーセンターから各需要家のベース熱負荷に供給（需要家の年間熱使用量の60%程度）。熱需要変動やピーク時対応については各需要家所有のボイラ等で対応している。同方式は、エネルギーセンターの設置スペースが十分に確保できない等の場所の制約や需要変動対応リスク回避のため考えられたとの事。
- エネルギーセンターにはガスエンジンは2MWと2.25MW相当の貯湯槽を設置している。850程度の住宅と2つのレジューセンターを含む7つの地元サイトに敷設した断熱被覆された往還配管で供給している。
- 中央型のコントロールセンターは特になく、各エネルギーセンターからのモニタリングデータに基づいて自動運転している。同情報はイズリントン区のオフィスでも確認できる。
- エネルギーセンターの故障等の緊急時対応は各需要家に需要変動対応用のボイラ等があるので全く熱が使用できなくなる事はないと考えられている。
- 熱ネットワークの普及の鍵は熱の価格であり、ガスを燃料としているため、燃料費の高騰が懸念されるが、自治体がインフラを所有、運営しているので安い熱料金を提供する事が可能であるし、購入側も信頼してくれている。民間事業者では利益を求める事になるので、同じような運営は難しいのではと考えられている。
- 熱ネットワークの近傍に電力系統の変電所があり買電し、更に廃熱を利用する事が可能となっている。
- ホテル等の比較的大型のボイラやCHPからの熱を買い取るメニューもある。
- 需要家との熱供給契約は10年間契約である。
- エネルギーセンターは入札でエネルギーサービス会社を決定、同社に建設・運営を委託している。なお、設置しているガスエンジンはエネルギーサービス会社の推奨品を使用している。
- 熱供給事業の拡張対応は、同対応に備えて、大きめの口径の導管を敷設しており、将来の需要家接続や導管延長にも対応できるようになっている。

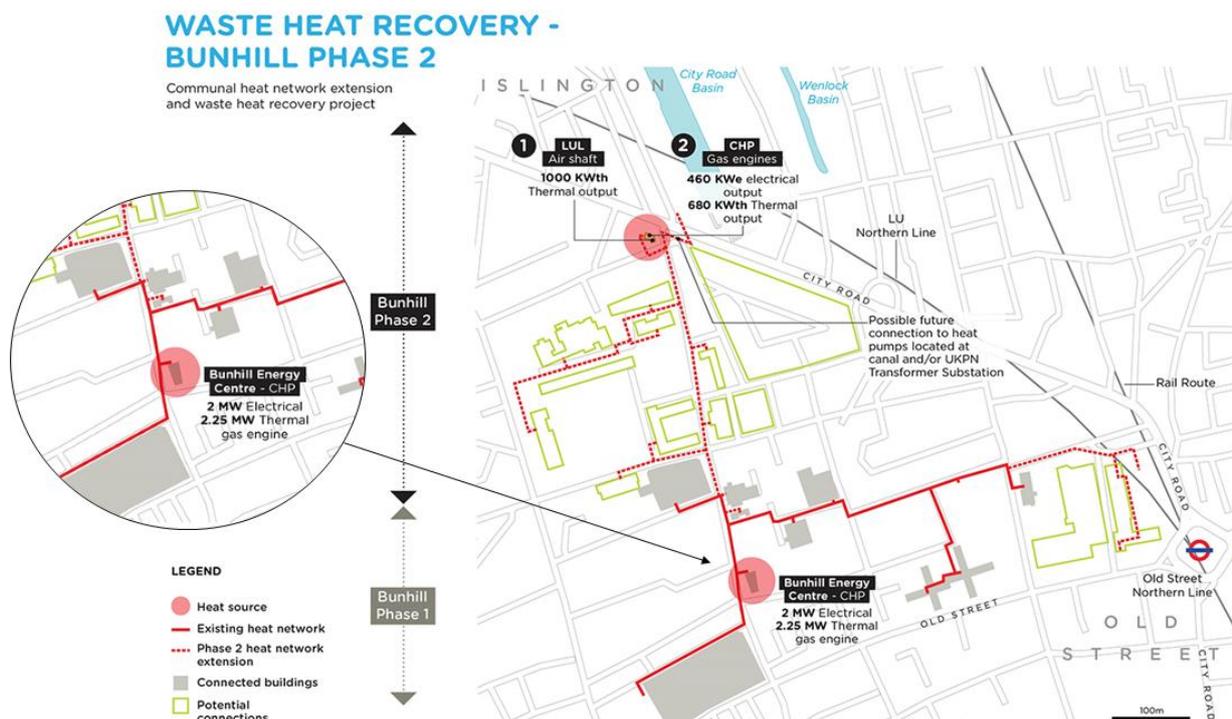


図 1.2.15 Bunhill Energy Centre の配置と周辺の熱ネットワーク状況



写真 1.2.3 Bunhill Energy Centre 外観

- 公園用地をエネルギーセンターに活用した Bunhill Energy Centre の事例を確認した。公園内に 2MW のガスエンジンコージェネレーションを地上設置し、115m³ の蓄熱槽 (写真中の木質壁円柱状のもの) を併設している。(写真 1.2.3)
- 同エネルギーセンター周辺の熱ネットワークを図 1.2.15 に示す。赤実線が Bunhill Energy Centre を中心に敷設された 1 期もので、現在、850 以上の住居、スイミングプール、レジャーセンターに供給している。赤破線は 2 期計画で変電所廃熱や河川水をヒートポンプ (図中①及び②) で回収した熱を利用した熱ネットワークを拡張する計画であり、省エネルギー化と CO₂ 削減を目指す検討を行っている。

この 2 期計画は EU が行うスマートシティ研究プロジェクト・Celsius のパートナー・プロジェクトの一つになっており、具体的に進められている。以上の様に、イズリントン区では前述の都市の低炭素化と弱者支援の目的を達成するため、公営住宅等で既に形成されていた小規模な区所有の熱ネットワークを、公有地の敷地を利用した高効率な大型 CHP から廃熱を供給するエネルギーセンター、

又は再生可能エネルギーや未利用エネルギー等の使用するエネルギーセンターと新たな熱ネットワークを敷設して連結、更に省エネルギー化と CO₂ 削減を目指す検討を行っている。

③イズリントン区におけるエネルギーシステムの推進施策の考え方¹⁻¹⁴⁾

- 第一段階で既に建物・街区レベルで熱供給を行っている複数の需要場所に新たに CHP を設置したエネルギーセンターと熱ネットワークから成る小規模クラスタ[Ⓐ]を構築する。次に、大型のエネルギーセンターを建設、小規模クラスタ間を連結する地域クラスタ[Ⓑ]に展開する。

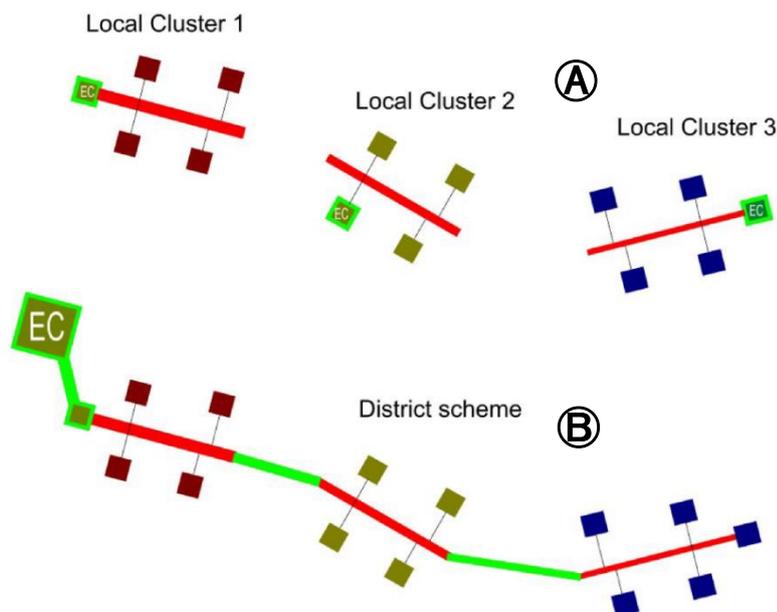


図 1.2.16 Ⓐ小規模エリアクラスタとⒷ連結型地域クラスタのイメージ図

【小規模クラスタの検討概要】(図 1.2.18 及び図 1.2.19 なお、Bunhill Energy Centre の位置を示す)

- 各需要量設定は、イズリントン区が保有する共同暖房による住宅やボイラプラントから供給される建物のガス消費量、国勢調査のデータや同区所有住宅、及び学校や建設会社、病院、レストラン等 150 団体が参加する環境ボランティア (イズリントン気候パートナーシップ) のデータから想定している。なお、Bunhill Energy Centre クラスタの位置を図 1.2.18 中に示す。
- ボイラ効率を 75%としガス消費量から建物の年間温熱需要を計算した。配管熱損失は各建物の年間需要の 5%と設定し、配管サイズを決定する単位長さ当たりの圧力損失は 100Pa/m としている。各建物に設置する熱交換温度差は 25°Cと設定、熱融通流量を定め、一つの小規模クラスタに単一のエネルギーセンターから供給する想定をし、その小規模クラスタの範囲を GIS にマッピングし示している (図 1.2.17)。図中の黄色の円は、公共のボイラやイズリントン区所有の建物の大型ガス焚ボイラから供給されている住宅等の地域を示し、緑の円は小規模クラスタを形成する際に対象としていない地域を示す。なお、赤色の点部分は燃料貧困層が存在する地点を示す。
- イズリントン区は前期の区内需要推計から小規模クラスタ内の熱ネットワーク形成について、以下の施設の順に優先順位を定め構想案を示した。
 - ①既存の共同暖房設備を備えた住宅施設、②イズリントン区が関与する大規模公共施設
 - ③新築大規模施設、④イズリントン区が関与しない大規模公共施設⑤大規模民間施設、⑥地域暖房を受け入れしていないイズリントン区管理の公共住宅⑦個人住宅

- 結果、図 1.2.18 に示す小規模エリア別クラスタを A~N の 14 の小規模クラスタを設定した。

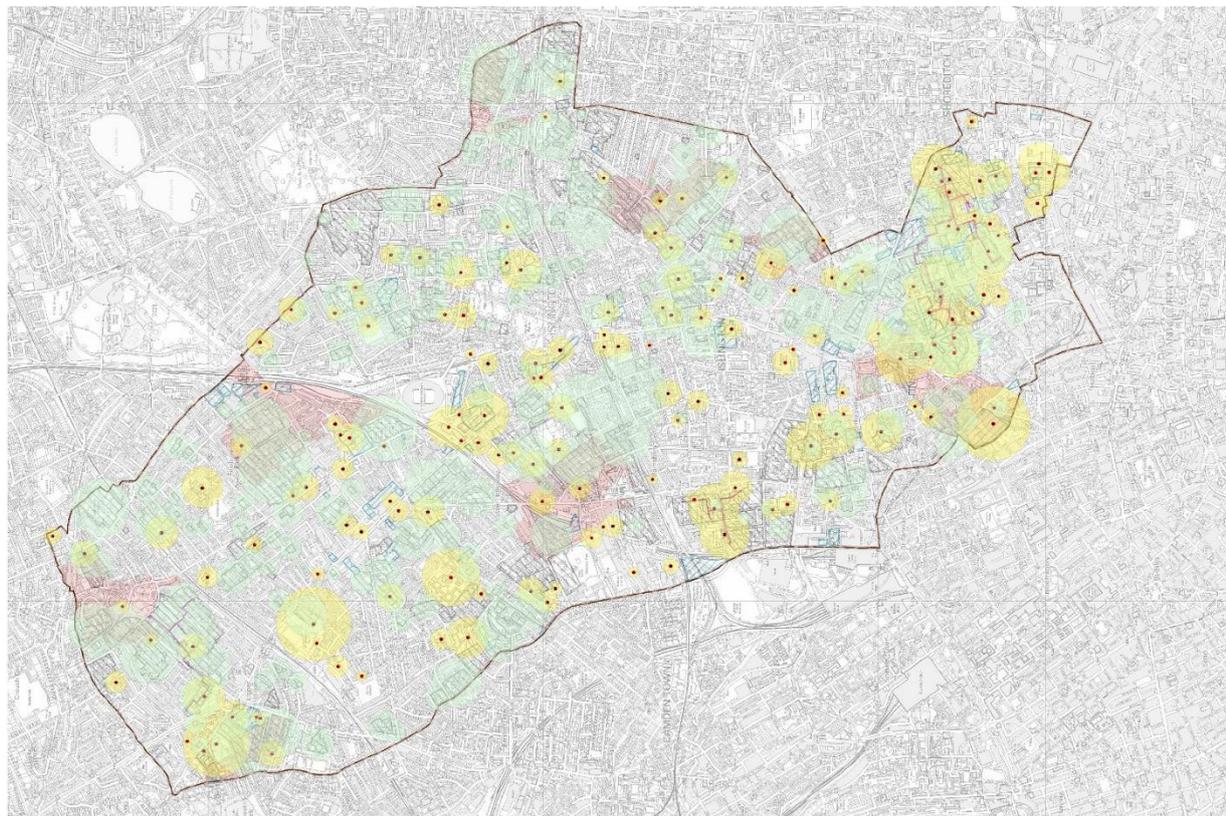


図 1.2.17 イズリントン区内の熱負荷及び貧困層地区

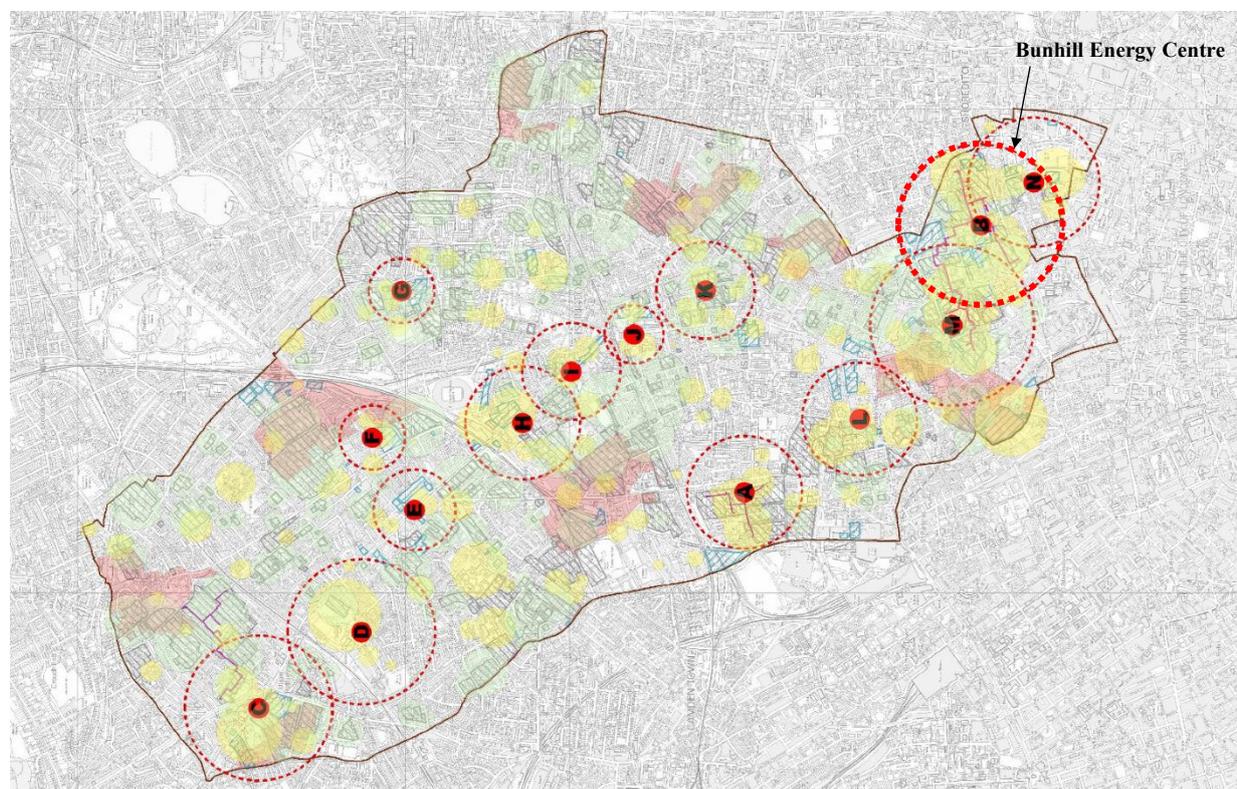


図 1.2.18 小規模クラスタの設定

- 2007年のイズリントンのガス及び電力の各消費量からCO₂排出量は89万ton/年。
- それぞれの小規模クラスタに設置する小規模エネルギーセンター内のCHP容量計算時の条件を以下の様に定めている（表1.2.4）。

表 1.2.4 CHP 容量計算時の設定条件

変数	入力値
全負荷相当の年間稼働時間	5000 時間
CHP によって賄う年間熱需要最大割合	70%
蓄熱容量	最大 CHP 熱出力 (kW) の 5 時間
ベースケースのボイラ効率	80%

- 上記前提条件で CHP から供給可能な熱の割合（70%）と年間運転時間（5000 時間）と設定していることが特徴的である。そして、その選定条件で各小規模クラスタの熱需要に最も適した CHP 容量について市販の70kW~16MWのガスエンジンユニットリストから選択している。結果年間エネルギー収支計算を行い年間のCO₂削減量を求めている（表1.2.5）。

表 1.2.5 各小規模クラスタのエネルギーセンター設置の CHP 容量と CO₂ 削減量

小規模 クラスタ	年間熱需要 (kWh)	ピーク熱需 要 (kW)	CHP 発電出 力 (kW)	CHP 熱出 力 (kW)	CHP からの 実年間供給 割合 (%)	CO ₂ 削減量 (t/年)
クラスタ A	10,854,426	4,187	1,406	1,343	62	2,140
クラスタ B	31,074,088	10,037	4,029	3,914	63	6,167
クラスタ C	6,849	3,029	3,029	3,020	59	4,722
クラスタ D	16,960,045	7,201	1,600	1,792	53	2,511
クラスタ E	2,661,329	1,131	307	358	67	417
クラスタ F	2,635,437	896	307	358	68	416
クラスタ G	2,144,723	998	185	280	65	281
クラスタ H	9,245,409	3,958	1,150	1,195	65	1,658
クラスタ I	4,537,806	1,830	500	527	58	614
クラスタ J	1,120,398	665	70	104	46	102
クラスタ K	4,787,234	1,842	526	640	67	750
クラスタ L	9,068,060	3,849	1,150	1,195	66	1,656
クラスタ M	26,989,596	11,195	3,029	3,020	56	4,740
クラスタ N	10,206,641	4,830	1,406	1,343	66	2,131
合計						28,305

- 以上の様に、イズリントン区はまだ接続されていない自らが所有する団地を中心に熱ネットワークを構築、その各小規模クラスタにガスエンジン CHP を設置して、28,305t/年のCO₂削減量が期待できると試算した。（イズリントン区CO₂排出量の3.18%に相当量）

【連結型地域クラスタの検討概要】

- 次に、連結型地域クラスタを検討するため、地域暖房の拡張可能性について、既に共同暖房設備から熱供給されているイズリントン区の住宅熱需要の平均年間熱負荷を原単位とし、イズリントン区所有の個別ボイラ設置の住宅を対象に熱需要及び、同区全ての住宅熱需要を含めプロットし、小規模クラスタの俯瞰図を作成している（図 1.2.19）。
- 図 1.2.18 の小規模クラスタ集積の度合いを考慮した連結型地域クラスタに展開を想定、以下の3つ（南地区:図 1.2.18 中の紫色の破線円、中央地区:同図中ダークブルーの破線円、北地区:朱色の破線円）を設定している。
- 小規模クラスタと同様の CHP 容量計算時の設定条件を使って、地域クラスタのエネルギーセンターの CHP 容量及び CO₂ 削減量をシミュレーションしている。同結果を表 1.2.6 に示す。

表 1.2.6 地域クラスタ段階の CHP 容量と CO₂ 削減量

クラスタ	年間熱需要 (kWh)	ピーク熱 負荷 (kW)	CHP 発電 容量 (kW)	CHP 廃熱 容量 (kW)	CHP から 実際に供 給される 熱の割合 (%)	CO ₂ 削減 量 (t/年)	小規模ク ラスタケ アの追加 CO ₂ 削減 量 (t/ 年)
南地区 計画	88,192,810	37,297	15,743	14,911	70%	21,809	4,975
中央地 区計画	19,690,846	9,158	2,430	2,399	67%	4,138	1,013
北地区 計画	47,957,999	17,037	7,744	6,148	64%	9,513	1,522
合計							7,510

- 各小規模クラスタから熱需要を集約した連結型地域クラスタを形成する事で、より効率的な大型のガスエンジンを使用する事で、小規模クラスタに比べて、更に 7,510 t/年の追加削減が可能と報告している。（イズリントン区 CO₂ 排出量の 4.02%相当量）
- 特に、南地区のイズリントン区の住宅は小規模クラスタ M、B、N の周りに配置されており、潜在的に実現可能性の高いグループと考えられている。なお、小規模クラスタ B のエネルギーセンターが前記の Bunhill Energy Centre である。
- 地域クラスタの CHP を木質バイオマス CHP に置き換えた検討も行っている。バイオマス CHP は蒸気タービンを選定し試算している。（表 1.2.7）

表 1.2.7 バイオマス CHP を用いた地域クラスター段階の CHP 容量と CO₂ 削減量

クラスター	年間熱需要 (kWh)	ピーク熱 負荷 (kW)	CHP 発電 容量 (kW)	CHP 廃熱 容量 (kW)	CHP から実 際に供給 される熱 の割合 (%)	CO ₂ 削減量 (t/年)	ローカル クラスター 上の追加 の節約
南地区 計画	88,192,810	37,297	5,400	10,000	57% ^{※2}	23,703	6,869
中央地 区計画	19,690,846	9,158	625	2,810	70%	4,366	1,241
北地区 計画	47,957,999	17,037	1,540	7,105	70%	10,542	2,550
合計							10,661

※2:本計画の中で CHP から供給される熱の目標は 70%と設定されているが、利用可能なバイオマス CHP エット(本体とバイオマス資源ストック場所のスペース) によるため、南地区は同スペース確保が難しいと考えられ、補正している。

- CO₂ 削減量は大型ガスエンジン方式よりも更に 10,661 t/年追加削減できる(イズリントン区 CO₂ 排出量の 4.38%相当量) 試算結果となっている、但し、懸念事項として以下の事項を指摘している。
 - i. バイオマス燃料の貯蔵場所だけでなく、バイオマス CHP 本体もかなりのスペースを必要とするため、地域暖房スキームの供給を行うにはかなりの占有面積が必要。
 - ii. バイオマス燃料の搬送にかなりの数の車両を必要とするので、搬送時の騒音や排気ガスの課題がある。
 - iii. 現状ではバイオマス燃料の燃焼は、ガスエンジン CHP と比較して煤塵処理が必要であり、都市部で利用する場合には蒸気煙流や臭いが課題と捉えている。
- 更に、最終的な構想として、CO₂ 排出量削減などの定量化評価は行われていないが、イズリントン区周辺の大規模再開発で導入されている地域暖房プラントとの連携も考えられている。(図 1.2.20)

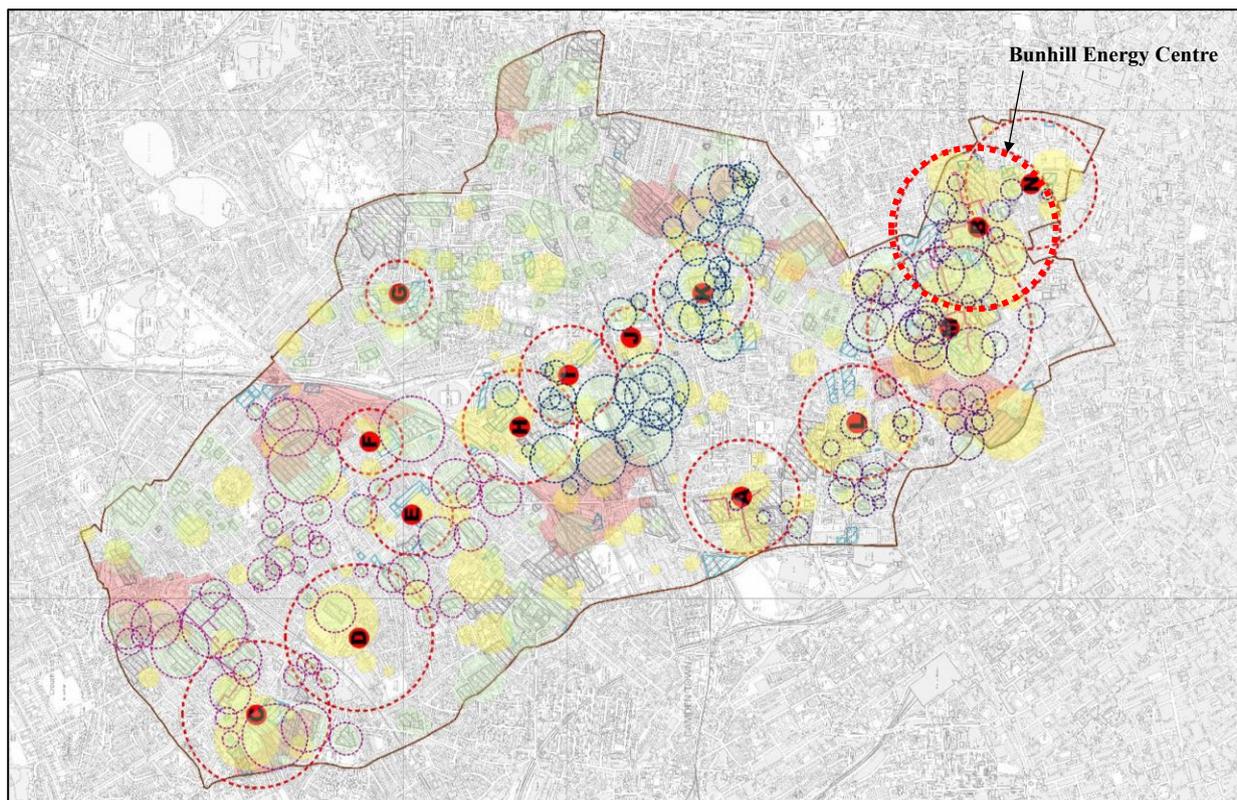


図 1.2.19 イズリントン区内小規模クラスター俯瞰図

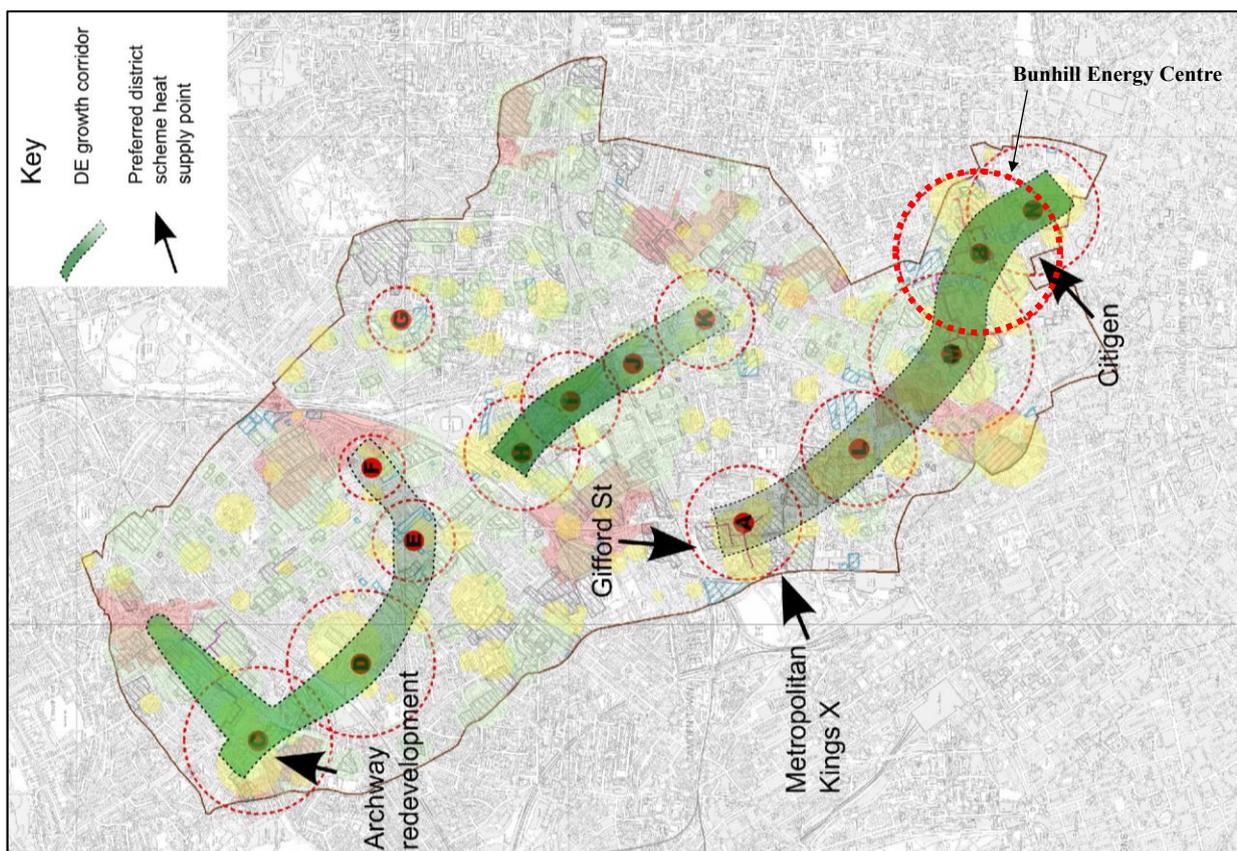


図 1.2.20 地域暖房計画のための分散型エネルギーシステム開発構想と潜在的供給地点

1.3 本研究の目的

研究背景を踏まえ、既成市街地のエネルギー面的利用を進める上で、未だ相対的に整備が進展していない「建物間熱融通型」を推進するための研究が重要であると考えた。そして事例調査を通じ、現在の熱融通は供給側と受入側が固定化された一方向熱融通がほとんどである事が分かった。しかし、既成市街地では建物及びその熱源設備の更新は一斉ではなく段階的に進み、熱源設備の効率順位も逐次変化するため供給側と受入側が交替できる熱融通が求められる。また一年の中でも季節に応じてや一日の中でも昼夜間に応じて供給側と受入側が交替する事も考えられる。

そこで本研究では熱源設備の供給側と受入側を円滑に切替可能な「建物間双方向熱融通ネットワークシステム」に関する研究を行った。まずは熱融通の方向を自由に変えられるネットワーク装置を提案するとともに、模擬装置実験によりその可能性を検証した。

次に、既成市街地に「建物間双方向熱融通ネットワークシステム」を導入できた場合の有効性をモデルスタディした。一つは、段階的に熱源設備の更新が行われる複数建物間におけるスタディを、もう一つは地域熱供給の熱源プラントから需要家以外の周辺建物に熱融通する場合のスタディを行った。

更には、都市部の既成市街地で再生可能エネルギー利用を促進するために、一般廃棄物バイオマスを熱エネルギーの面的利用で活用する方法とその有効性を検討した。

1.4 論文の構成

本論文の構成を図 1.4.1 に示す。

第 1 章では、既成市街地における熱エネルギーの面的利用を推進する方策として建物間熱融通を挙げ、熱エネルギーの面的利用の事例を調査し、建物間双方向熱融通等に関する研究の目的と意義について整理した。

第 2 章では、建物間双方向熱融通を可能とする熱融通搬送接続装置「熱ルータ」及びそれをベースとした熱融通ネットワークを提案し、それを構築するための留意事項と期待される効果を整理した。なお、本研究ではこの「建物間双方向熱融通ネットワークシステム」を「スマート・ヒート・グリッド (Smart Heat Grid 以下、SHG を記す)」と称する。

第 3 章では、SHG のコア技術である熱融通相互接続装置「熱ルータ」の特徴である、供給側と受入側の切替による任意の熱融通ルートの設定と適切な搬送動力の選定について、通水による相互水搬送制御実験を行い、その有効性を確認した。

第 4 章では、分散型エネルギー複合最適化実証研究の一環として行った、太陽熱を有する建物とコージェネレーションシステム (以下 CGS と記す) を有する建物間において太陽熱と GGS 廃熱を双方向熱融通の実証試験を行い、熱融通効果を確認した。

第 5 章では、既成市街地における段階的な建物や熱源設備の更新ケースとして、4 つの既築建物が段階的に熱源設備を更新する「基本形 SHG モデル」を想定し、SHG による継続的な省エネルギー化と熱源設備の低負荷稼働時間の低減等の熱融通効果を分析した。

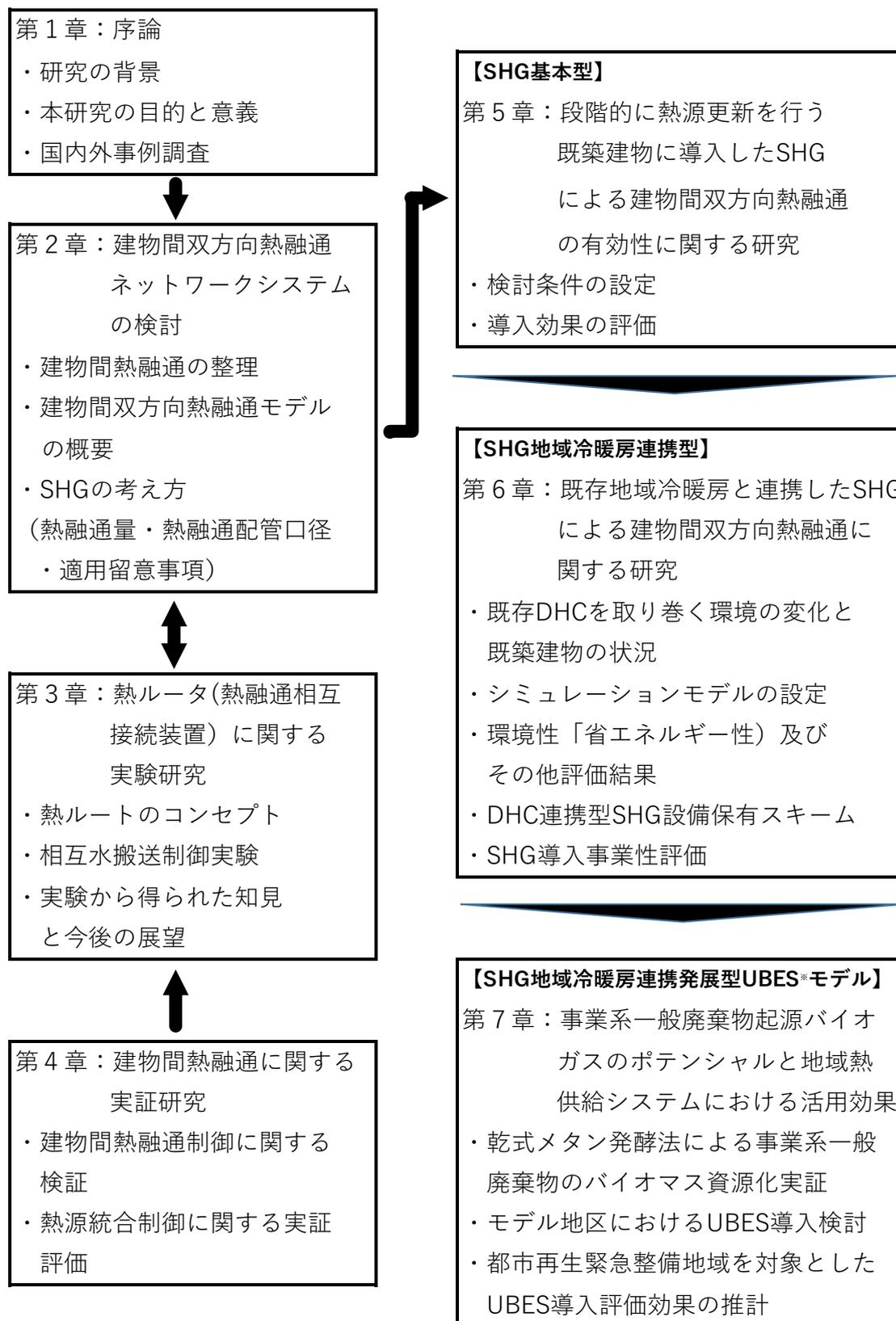
第 6 章では、既成市街地における既存地域熱供給の熱源プラントから需要家以外の周辺建物で形成された SHG に熱融通する「地域熱供給連携型 SHG モデル」を想定し、その熱融通効果と事業性な

どを分析した。

第7章では、都市部におけるバイオマスエネルギー利用の推進方策として、「地域熱供給連携モデル」において事業系一般廃棄物バイオガス利用を検討した。具体には、リサイクル率が低い厨芥やその他の紙ごみ（表面が特殊な加工がされている紙ごみや汚れた紙ごみ）のメタン発酵実証実験を行いバイオガス発生量のポテンシャルを確認した。そしてそれを基に、地域熱供給熱源プラントで活用する「地域熱供給連携型 SHG における都市型バイオマス利用モデル」を想定し、その効果を分析した。

第8章では、本論文で得られた知見を取りまとめる。

なお、上述した第5章から第7章で検討するモデルのイメージを図1.4.2に示す。



※都市型バイオマスエネルギーシステム
(Urban Biomass Energy System)

図 1.4.1 本論文の構成

<p>【個別中央熱源方式】</p>	<p>経年化等に伴い、建物毎に高効率機種（高COP機種）に更新</p>
<p>【建物間双方向熱融通ネットワークシステム基本型】</p>	<p>各熱源を配管で接続・ネットワーク化し、熱源機の中で高効率機種（高COP機種）を定格稼働させ自家消費後余剰分を融通</p>
<p>【建物間双方向熱融通ネットワークシステム地域熱供給連携型】</p>	<p>地域熱供給プラント定格稼働時余剰分を地域熱供給需要家以外の隣接する建物に熱融通</p>
<p>【建物間双方向熱融通ネットワークシステム地域熱供給連携型都市型バイオマスエネルギーシステムモデル】</p>	<p>SHG 地域熱供給連携型の熱源プラントにバイオマス由来の熱を活用した将来発展形モデル</p>

図 1.4.2 本研究で検討する街区・地区レベルにおける
建物間双方向熱融通ネットワークシステム活用モデルのイメージ図

1.5 まとめ

本章では、最初に既成市街地における建物の熱源設備の省エネルギー化の一方策として期待される熱エネルギーの面的利用の中で地域熱供給事業型に比べ、未だ整備が進んでいない建物間熱融通型に着目した背景や都市部で再生可能エネルギー利用を進める一方策として一般廃棄物由来のバイオマス資源の熱利用に着目した背景を述べた。そして、国内における地域熱供給地区間や建物間の熱融通の事例、廃棄物由来のエネルギーの熱供給利用の事例調査結果を述べた。更にロンドンのイズリントン区における先駆的な熱エネルギーの面的利用におけるバイオマスボイラの活用や協力型熱融通事例の整備に関する事例調査結果を述べた。

以上の背景と調査を踏まえて、熱源設備の供給側と受入側を円滑に切替可能な「建物間双方向熱融通ネットワークシステム」に関する研究の意義を見出し、それを研究するための論文構成を整理した。大きな論文構成の流れは、熱融通の方向を自由に変えられるネットワーク装置の提案、その模擬装置実験や実証研究、更にモデルスタディにより既成市街地に「建物間双方向熱融通ネットワークシステム」を導入できた場合の有効性の検討及び熱エネルギーの面的利用における一般廃棄物由来バイオマスガス活用の可能性と有効性の検討とした。

【参考文献】

- 1-1) (一)日本不動産研究所:全国オフィスビル調査(2014年1月現在)の調査結果、2014.10.9
- 1-2) JST CRDS:課題解決型研究開発の提言(1) 都市から構築するわが国の新たなエネルギー需給構造、2014.6
- 1-3) 安田ら:超分散型エネルギーシステムの基本構想と自律分散制御,電気学会論文誌 B, vol.123 (2003) No.8 P907 - 917
- 1-4) 資源エネルギー庁・NEDO:省エネルギー技術戦略 2016、平成 28 年 9 月
- 1-5) 丸の内熱供給(株):地域冷暖房のネットワーク化による効率と信頼性向上、新都市 2012.11 都市計画協会
- 1-6) 池澤広和:エネルギーの面的利用の実例とその実現スキーム、空気調和・衛生工学会近畿支部、http://kinki-shasej.org/activities/membership/kankyout267_ikezawa.pdf
- 1-7) 経済産業省:総合資源エネルギー調査会ガスシステム改革小委員会第14回資料8、P14
- 1-8) 中西孝之:六甲アイランドCITY温水供給システム下水処理施設の温排水を活用した省エネルギー型地域温水供給システム、建築設備と配管工事'88年増刊号、P122-127
- 1-9) 村木美貴:英国におけるCO₂排出量削減のための官民連携に関する研究-地域冷暖房事業に着目して、都市計画論文集、Vol.48 No.3 2013年10月
- 1-10) 経済産業省:海外における省エネルギー・再生可能エネルギーに関連する熱の有効利用促進施策に関する調査、2013年2月28日
- 1-11) 村木美貴:英国における低炭素型市街地形成のあり方、(一社)海外環境協力センター「環境と共生する都市づくりフォーラム」、平成22年2月
- 1-12) Greater London Authority, Monitoring the Impact of London Plan Energy policies in 2010
http://london.gov.uk/sites/default/files/monitoring_impact_london_plan_energy_policies.pdf

1-13) GLA(2011)The London Plan、P194、

[http://www.london.gov.uk/sites/default/files/London%20Plan%20March%20201%20\(FALP\).pdf](http://www.london.gov.uk/sites/default/files/London%20Plan%20March%20201%20(FALP).pdf)

1-14) London Borough of Islington : DECENTRALISED ENERGY PROJECT – STAGE 3、

[http://www.islington.gov.uk/publicrecords/library/Planning-and-building-control/Information/Advice-and-information/2011-2012/\(2011-11-22\)-Decentralised-Energy-Strategy.pdf](http://www.islington.gov.uk/publicrecords/library/Planning-and-building-control/Information/Advice-and-information/2011-2012/(2011-11-22)-Decentralised-Energy-Strategy.pdf)

第2章 建物間双方向熱融通 ネットワークシステムの検討

第2章 建物間双方向熱融通ネットワークシステムの検討

2.1 はじめに

前章において、既成市街地の省エネルギー化の必要性を述べた。そして、特に既築建物において推進する事が重要である考えを示した。その一つの対応策として、個別集中型の熱源システムを有する複数の既築建物を熱融通配管で接続、各建物の熱源設備を共有して、熱需要に合わせて効率の良い熱源設備を選択して熱を製造・融通し合う建物間熱融通の検討を挙げた。更に、更新する熱源と既設置の熱源の効率を比較して、熱源更新される度に、供給する役割の熱源設備を替えて熱融通を行う事となり、継続的な熱源設備の省エネルギー運用を行う事が期待できる。そのためには、建物間で融通する熱の流れる向きが変更できる双方向熱融通が可能なネットワークが必要となる。

又、建物の熱源設備は年間に数日しかない最大需要日の最大需要時間に対応できる様にその能力は決定しており、ほとんどの時間は最大能力の50%以下で稼働している。又、熱源設備は稼働時期によって運転効率が異なる。従って、負荷を可能な限り高効率な熱源設備に集約して、同熱源を優先的に稼働させ、効率の低い熱源設備の稼働割合を少なくする事ができる。

更に、熱源機は熱負荷が少ないと電力・燃料消費量が少なくなるが、冷温水・冷却水各ポンプや冷却塔等の補機は、2010年以前のモータ・フロー量におけるインバータ化率の推移をみるとインバータ装着率は20%以下との報告²⁻¹⁾があり、既築建物の多くの補機動力は熱源機の運転台数により決まるシステムが多いと考えられる。熱融通を行えば、熱負荷を特定の熱源機で対応するため、熱源設備の運転台数を減らして、補機動力も小さくすることが期待できる。

又、通常、熱源設備の選定仕様は、将来的な経年劣化や点検による運転停止を考慮して、余裕率を持って計画²⁻²⁾されており、稼働選択した効率の良い熱源機を使用した熱融通が可能である。

本章では、建物間双方向熱融通ネットワークシステム（以下、本文中 SHG と記す）に必要な技術要素の整理を行い、双方向熱融通に伴う熱媒の流れに関して整理する。その中で、使用する部材を少なくすることにより省スペース化や省コスト化を考慮した SHG のコア技術要素・熱融通相互接続装置「熱ルータ」及び熱融通ネットワークの検討を行う。最後に、SHG を適用する際の留意事項に関して整理する。

2.2 本研究で検討する建物間双方向熱融通ネットワークシステムの概要

2.2.1 システムの機能

SHG は、熱融通相互接続装置（以下、熱ルータ）、熱融通配管、各建物等の熱源機等から構成され、その概念図を図 2.2.1 に示す。熱ルータを介して各建物の熱源機と可能な限り小口径な熱融通配管で接続（ネットワーク化）し、接続された熱源の中でエネルギー消費原単位が一番小さい高効率熱源機を稼働優先順位第1位とし優先的に利用、まず自家消費した後に定格稼働して生じた余剰熱を、他の建物（熱源機）に熱融通する。

余剰熱がない場合は、それまで熱の受入側であった別建物の2番目に高効率な熱源機で余剰熱が発生できる場合、他の建物に熱融通（供給）を行う。この時、2番目に熱融通を行う建物（熱源機）は熱の受入側から供給側へ役割が変更するため「双方向熱融通」となる。

更に、熱源機が更新され、その更新された熱源がネットワーク中で一番高効率な熱源機となった

場合も、熱の受入と供給の役割が変更され、双方向熱融通が行われる。但し、全てのケースにおいて、熱を受入する建物が熱融通で需要を賄え切れない場合には、自己熱源を稼働させ需要対応（補完運転）する。

従って、複数の建物へ集約した熱源設備から熱を一方向で供給する地域冷暖房や建物間熱融通と異なり、SHGは各建物熱源のうち、機器の仕様や、異なる季節・時間帯等の設定条件の下で、その都度、高効率熱源機を選択し、建物の中で供給役割の順番を定め供給する。一方、熱を供給しない建物は熱を受入（不足する場合は自己熱源で補完し需要を賄う）し、結果、ネットワーク形成する複数建物間において、高効率熱源機を活用する双方向熱融通ネットワークを形成される。

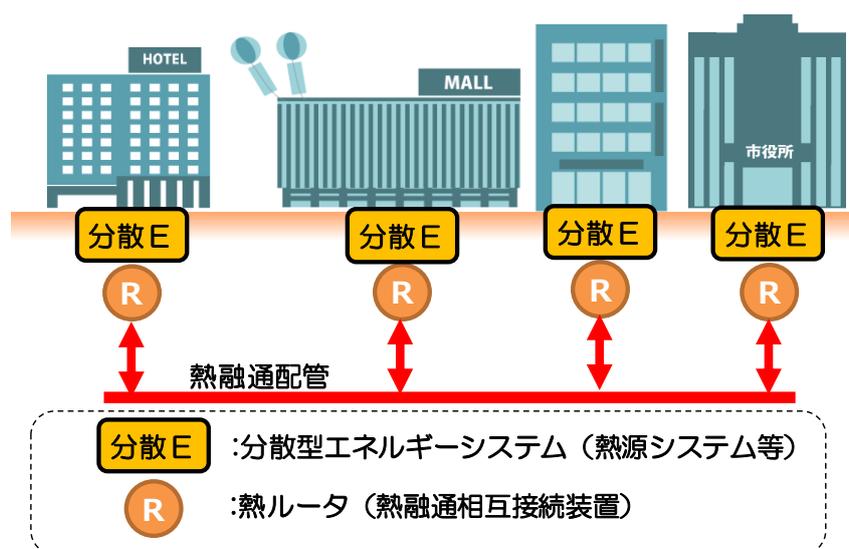


図 2.2.1 建物間双方向熱融通ネットワークシステム（SHG）のイメージ図

注）熱融通配管は冷温熱融通の場合は4管・熱ルータは2ケとなる。

なお、※熱ルータは2.3節で記述する。

2.2.2 システムの適用フィールド

本研究で検討するSHGの適用フィールドは、既成市街地における街区・地区内の複数の建物で形成されるネットワーク規模を考えている。第1章で事例調査した英国のイズリントン地区の小規模クラスタに相当するが、本研究では本地区で目指している連結型地域クラスタのスケールは検討対象外とした。

また、第1章の事例調査では、既存地域熱供給熱源プラントが新規に整備された熱源プラントと熱融通する事例があり、同システムを熱源プラント連携と称している。そこで、既成市街地に整備されている既存地域熱供給の熱源プラントと熱供給需要家以外の周辺建物間でSHGを形成するシステムを本検討の対象とした。

2.3 建物間双方向熱融通に必要な装置の検討と留意事項の整理

2.3.1 双方向熱融通を実施するために必要な装置の検討

構成・配置を整理するため、図 2.3.1 に建物間熱融通を行う $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ の3ビル間の熱媒の流れを示す。まず α から β と γ に、そして β が役割を替えて α と β から γ に熱媒の流れが変わった場合のイメージを示す。なお、図中、受入の水色枠熱源機は融通受入の熱で需要を賄う事ができない場合、補完運転する熱源機の意味で、補完運転分の熱の流れも記載した。

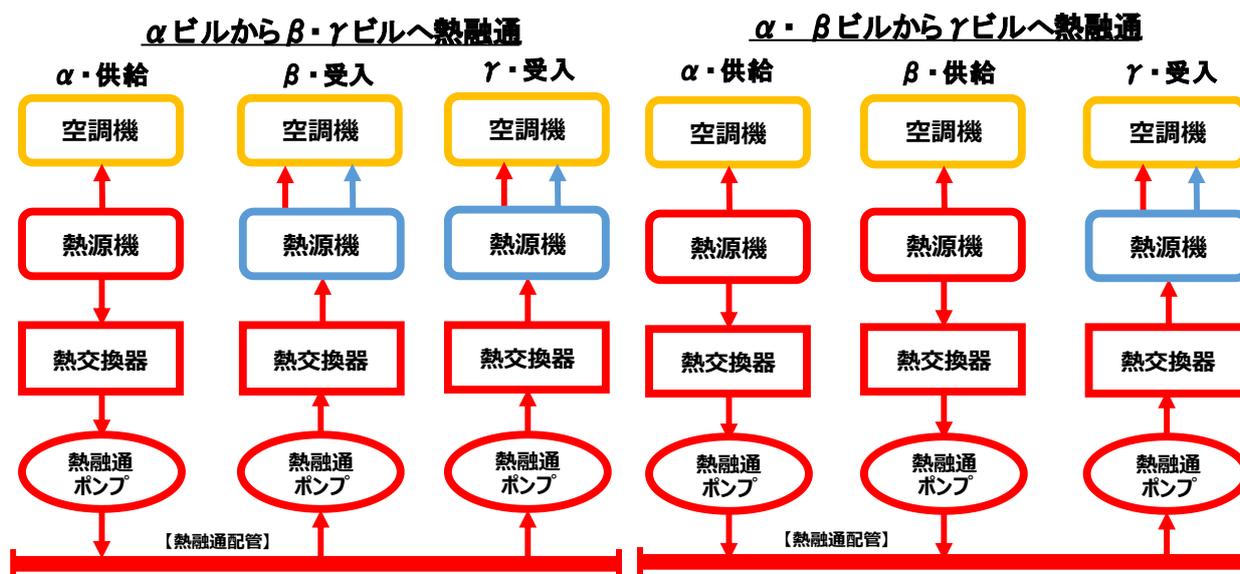


図 2.3.1 双方向熱融通・熱媒の流れと機器構成 ($\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ の3建物間熱融通で β が熱受入役割から熱供給役割に変更したイメージ)

2.3.2 双方向熱融通を可能とする熱融通搬送接続装置の検討

(1) 現在の熱融通方式で双方向を実現する場合

双方向熱融通システムは熱融通配管、熱融通ポンプ、熱交換器から構成される。まず「 α ビルから $\beta \cdot \gamma$ ビルへ熱融通」の場合、図 2.3.2 に示すように α ビルの熱源機で自家消費分と熱融通分の熱を製造、熱の受入側である β ビルと γ ビルは自家消費分をまず熱融通により受入、使用し需要対応し、不足する場合は自己熱源（図中の水色枠熱源機）を補完運転して賄う。そして、何らかの事由（ α の自家消費分が増えたり、 β の自家消費分が減ったり様々なケースが考えられる）により、次に供給の役割を担う β からの熱融通・供給が可能な場合は、図 2.3.3 に示すように β ビルは供給側の熱交換器に切り替えて γ ビルへ熱を供給する。

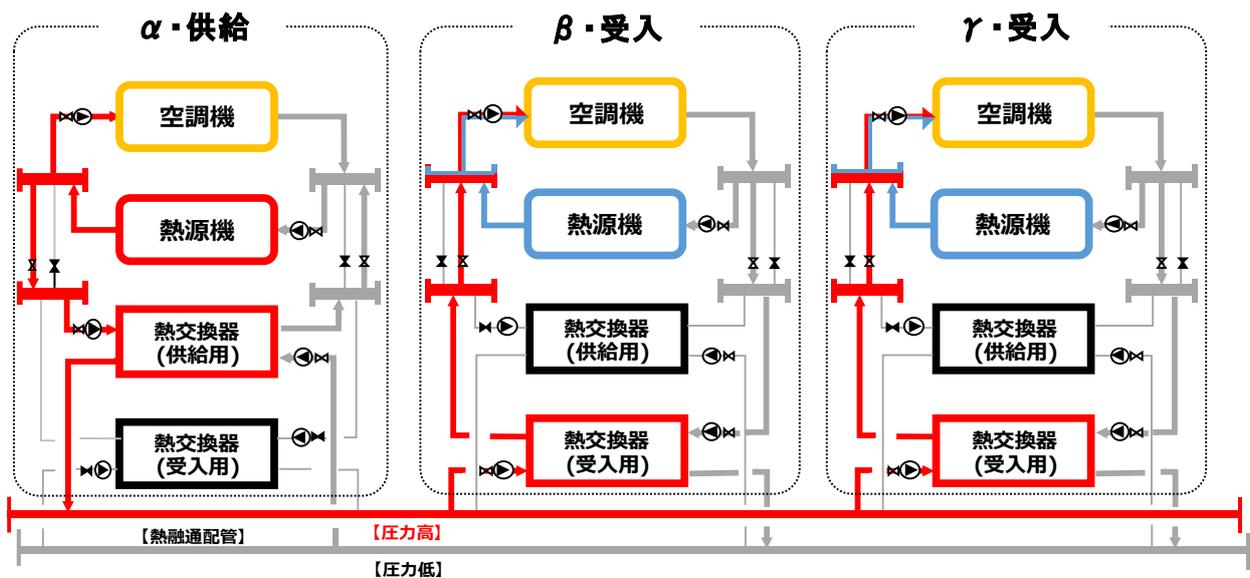


図 2.3.2 双方向熱融通・各建物内機器構成と熱媒の流れ ($\alpha \rightarrow \beta \cdot \gamma$)

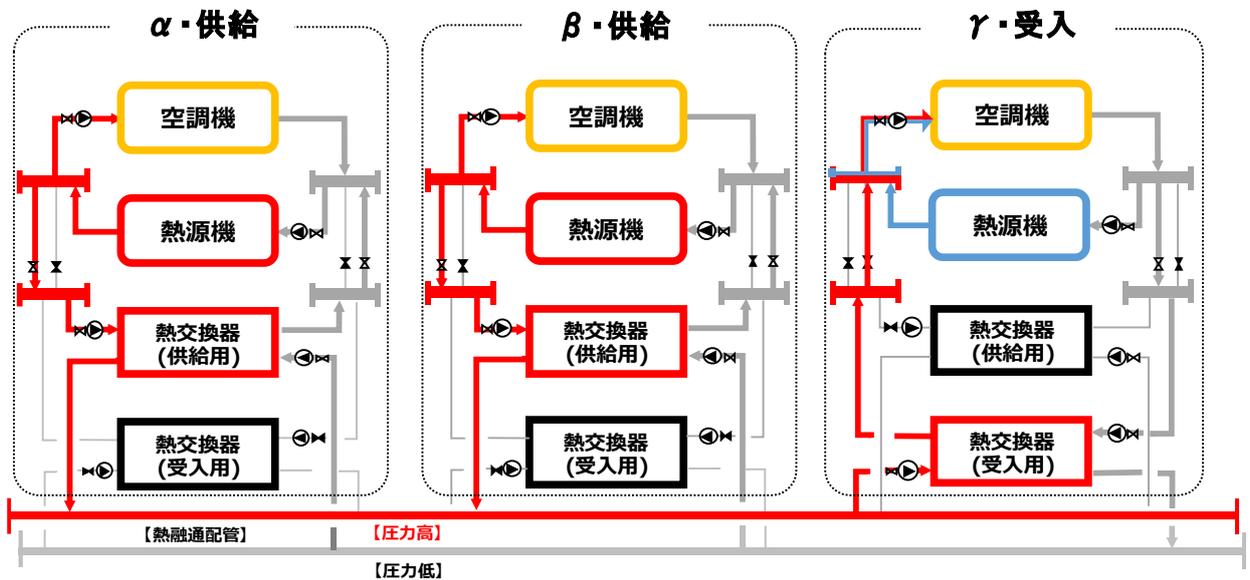


図 2.3.3 双方向熱融通・各建物内機器構成と熱媒の流れ ($\alpha \cdot \beta \rightarrow \gamma$)

熱融通配管（圧力高：冷熱の場合は低温、温熱の場合は高温、圧力低：冷熱の場合は高温・温熱の場合は低温）に対して、熱の供給役割と受入役割を替えた場合のスムーズな熱融通の移行を考慮して、供給用と受入用それぞれに熱交換器を設ける必要がある。なお、熱交換器周辺にはポンプ、制御及び計測用の温度計・流量計、制御用バルブ等が必要となる。各建物（熱源機）が供給用の熱交換器と受入用の熱交換器を設置することであり、熱融通ポンプも熱交換器毎に設置される。そのため設備的には複雑となり、さらに設置スペースも大きくなる。

(2) 本研究で提案する熱融通方式で双方向を実現する場合

本研究では、以上のデメリットを改善し省スペース化を図ると共に、高い熱交換効率を得るため、対向流型のプレート型熱交換器を採用、バルブ切替で熱媒の供給側と受入側の役割変更が可能な装置構成を考えた。本研究ではこの SHG における熱融通搬送接続装置を「熱ルータ」と称する。

図 2.3.4 に熱源機と熱交換器がシリーズに配置する供給モードの α ビルから空調機と熱交換器が平行に配置する受入モードの β ビル及び γ ビルに熱融通するイメージを示す。なお、図中、灰色塗りの熱交換器・熱融通ポンプ・制御バルブ（同制御システムも含む）から構成される部分が「熱ルータ」で、図中では詳細には示していないが、流量・圧力・温度の各センサーも取付、熱交換・熱搬送・熱計量を行い、双方向熱融通を可能とする。以上、熱ルータを使用した場合、一台の熱交換器をバルブ切替で熱の供給用と受入用に使用する事で、省スペース化と共に、熱媒搬送用ポンプ、制御・計測用の圧力計、温度計も兼用する事ができ、省コスト化も図れる事が考えられる。なお、熱ルータは SHG 主要技術要素であり、関連する留意事項を本章後段で記述する。

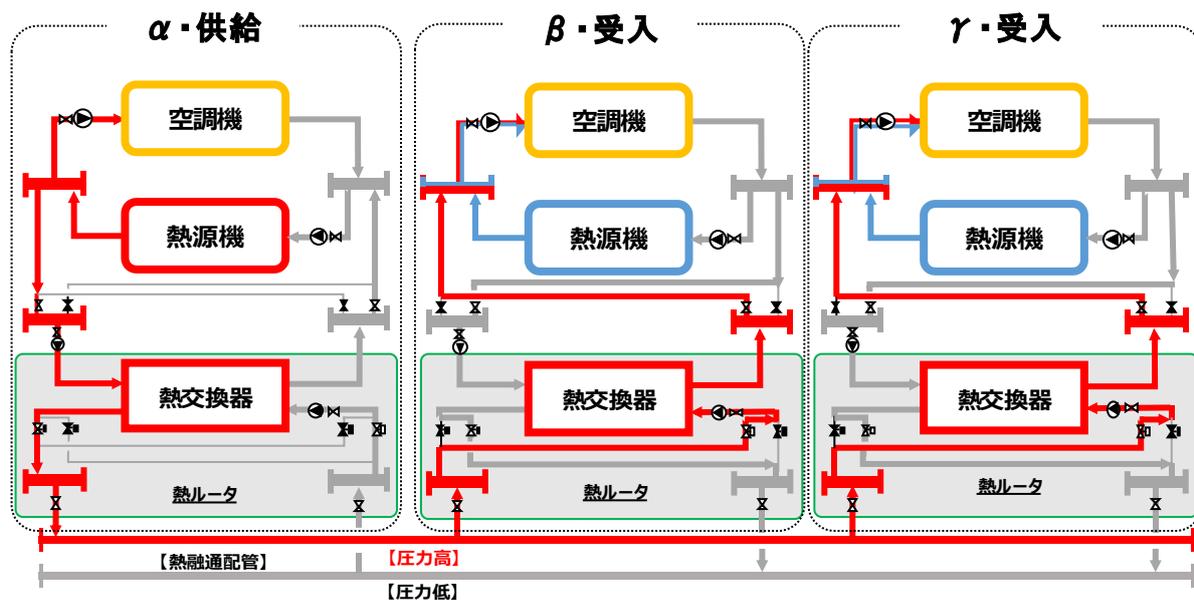


図 2.3.4 熱ルータによる双方向熱融通・各建物内の熱媒の流れ ($\alpha \rightarrow \beta \cdot \gamma$)

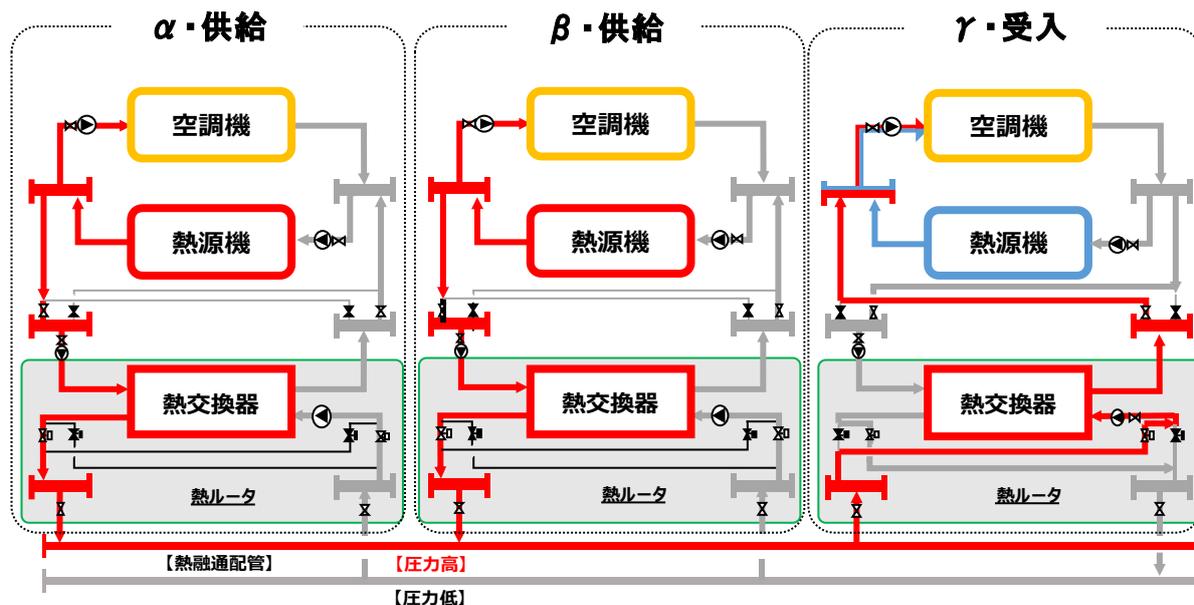


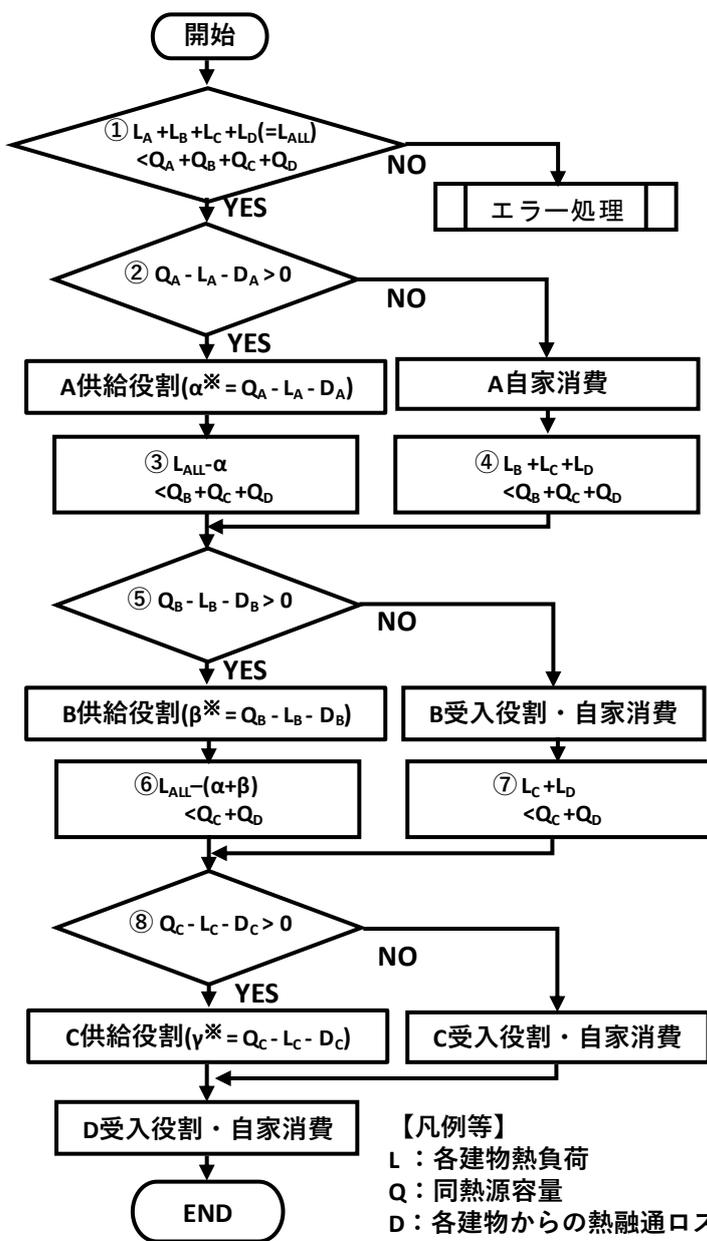
図 2.3.5 熱ルータによる双方向熱融通・各建物内の熱媒の流れ ($\alpha \cdot \beta \rightarrow \gamma$)

(3) 熱ルータの供給・受入役割切替選択の基本的な考え方

熱ルータの供給・受入役割は各建物の熱源の稼働優先順位によって定まる。そこで、既築建物の負荷データや熱源の仕様、熱融通配管ネットワークシステム等の情報を使ってシミュレーションを行い、全建物の熱源年間平均 COP が高くなる様に、予め熱源の稼働優先順位を決定しておく。

A、B、C、D の4ビルを例に熱ルータの供給・受入役割切替選択の考え方を以下に示す。A の建物負荷を L_A 、同様に B、C、D の各建物負荷を L_B 、 L_C 、 L_D 、各建物熱源容量を Q_A 、 Q_B 、 Q_C 、 Q_D とする。又、各ビルから熱供給時の熱融通に伴うエネルギーロスを D_A 、 D_B 、 D_C 、 D_D 、そして予め実行したシミュレーション結果から、熱源の稼働優先順を $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ と設定する。

熱ルータの供給・受入切替選択のフロー図を図 2.3.6 に示す。以下の各事項の考え方を示す。



- ① 全建物負荷合計よりも熱源設備総容量が大きい事を確認（熱融通実施の確認）
- ② 稼働優先順位1位のAの熱源容量負荷と自家消費分と熱融通に伴うロスを比較し、Aの役割を決定する。余剰熱がある場合は供給役割。不足する場合には熱源は自家消費。
- ③ 熱融通受入後の3建物負荷合計より同3建物熱源容量が大きい事を確認（熱融通実施の確認）。
- ④ A以外の3建物負荷合計が同3建物熱源設備容量が大きい事を確認（熱融通実施の確認）。
- ⑤ 稼働優先順位2位のBについて②同様に比較。Bの役割を決定する。
- 以下、⑥～⑧を含むフローに従い、Cの役割を決定する。
- なお、Dは受入役割か自家消費となる。

【凡例等】
 L：各建物熱負荷
 Q：同熱源容量
 D：各建物からの熱融通ロス
 ※：各建物熱融通可能量
 (A建物がα、以下Bがβ、Cがγ)

図 2.3.6 熱ルータ供給・受入役割切替選択の考え方

2.3.3 システムの熱融通配管の検討

(1) 融通熱量

図 2.3.7 に某地域冷暖房プラントの 2012 年度の冷熱の累積負荷曲線を示す。ピーク負荷に対して 10%以下の負荷の合計が年間総熱負荷の 43%であり、同部分を省エネルギー化する事で大きな効果が期待できる。実際に、同効果について、第 1 章の事例調査において示した、大丸有地区及び名古屋駅前地区で確認されており、熱融通により複数建物のベース負荷を省エネルギーな熱で融通する事は、大きなエネルギー削減に繋がる事が期待される。

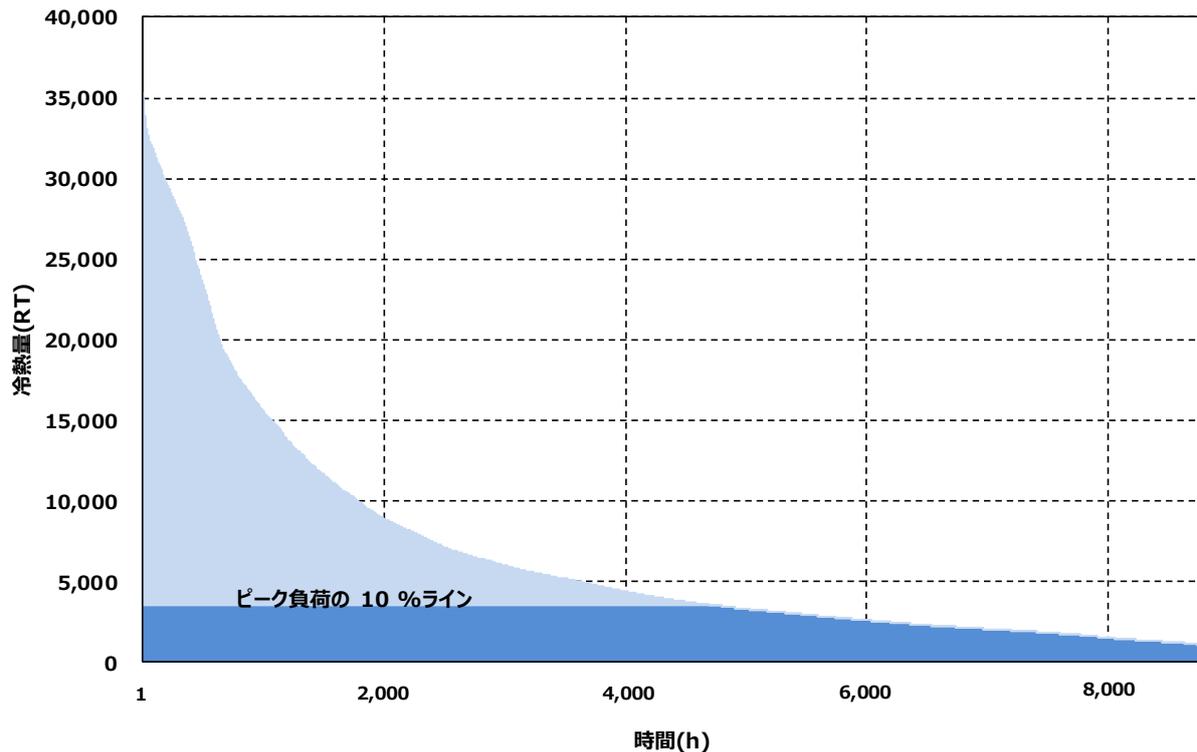


図 2.3.7 某地域冷暖房施設の冷熱の累積負荷曲線

(2) 熱融通配管口径

熱融通する際、熱融通配管中で発生するエネルギーロス、圧力損失（配管摩擦抵抗）と放熱ロスである。具体的には、搬送動力と放熱熱量であり、その算定には配管口径が大きく影響する。そこで、異なる口径の熱融通配管に対して流量及び配管内温度を変化させた場合、その搬送動力、放熱ロスの変化について確認した。以下にそれぞれの試算結果を述べる。

①搬送動力の算定

流体が配管の断面に充満して流れる場合の圧力損失は、ダルシー・ワイスバッハの式(2.1)で表される。摩擦損失水頭 H_f は、摩擦係数 f 、全揚程 H 、搬送動力 P_p で以下の様に求められる。

$$H_f = f \times \frac{l}{d} \times \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

H_f : 摩擦損失水頭[m]

f : 摩擦係数[-]

d : 配管内径[m]

l : 配管延長 [m]

v : 流速[m/s]

g : 重力加速度[m/s²]

$$f = 0.002 \times \frac{0.0005}{d} \quad (2.2)$$

d : 配管内径[m]

$$H = H_f \times a \quad (2.3)$$

a : 損失水頭補正係数(1.2)

$$P_p = 0.163 \times \gamma \times \frac{H \times Q}{n_p} \quad (2.4)$$

P_p : 搬送動力[kW]

γ : 水の比重量[ton/m³]

H : 全揚程[m]

Q : 流量[m³/min.]

n_p : ポンプ効率(70%)

流配管口径を 50A～300A、流量を 0.5m³/min.～3.0m³/min.と変化させて、単位配管長さ当りの搬送動力を算出した。その結果を図 2.3.8 に示す。

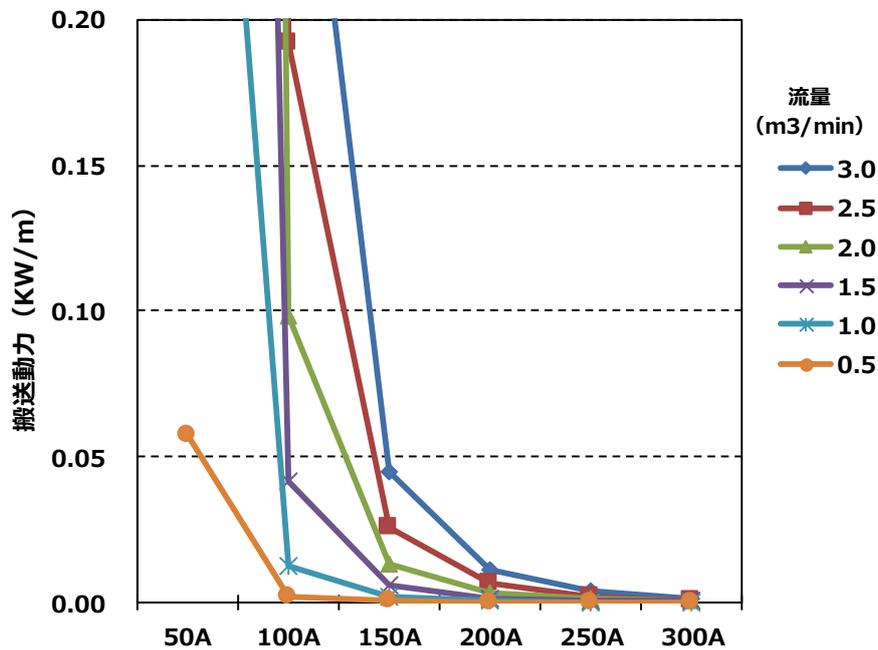


図 2.3.8 配管口径別・単位長さ当りの搬送動力

②放熱ロスの算定

一般的に配管単位長さ当りの放熱量の算出は以下の式を用いる。

$$q = \frac{2\pi(\theta_{si} - \theta_a)}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{2}{\alpha d_1}} \quad (2.5)$$

q : 放熱量[W/m]

θ_{si} : 保温内側温度[°C]

θ_a : 周囲温度 [°C]

d_e : 保温材の外径 [m]公共建築工事標準仕様書から 25mm で計算

d_i : 保温材の内径 [m]50A~300A で計算

λ : 保温材の熱伝導率[W/m・K]JIS A 9504/グラスウール保温管

α : 表面熱伝達率[W/m²・K] JIS A 9504 附属書から 12 W/m²・K

保温内側温度を 30°C~100°C、保温材の内径を 50A~ 300A とした場合の熱ロスを算出した。同結果を図 2.3.9 に示す。

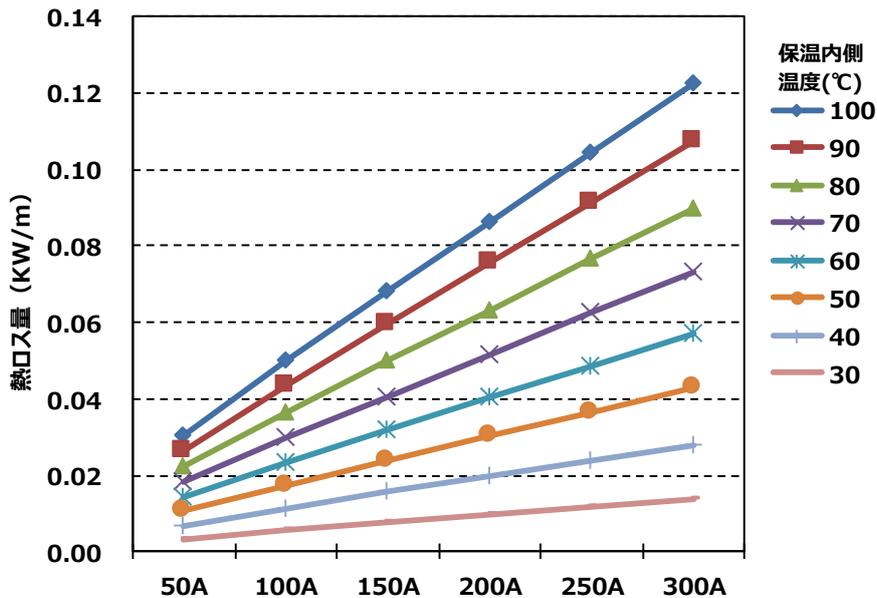


図 2.3.9 保温内側温度を変化させて場合の配管口径別単位長さ当たりの放熱ロス

③搬送動力+放熱ロスの算定

以上から、内側温度を 40°C~100°C、流量を 0.5m³/min.~3.0m³/min.に変化させて場合の口径別の搬送動力及び放熱ロスは表 2.3.10 となる。

表 2.3.10 口径別の単位長さ当たりの搬送動力及び放熱ロス (内側温度及び流量を変えた場合)

単位 : kW/m

		50A	100A	150A	200A	250A	300A
放熱ロス	熱ロス(内側温度100°C)	0.030	0.050	0.068	0.086	0.104	0.123
	熱ロス(内側温度80°C)	0.022	0.037	0.050	0.063	0.077	0.090
	熱ロス(内側温度60°C)	0.014	0.023	0.032	0.040	0.049	0.057
	熱ロス(内側温度40°C)	0.007	0.011	0.015	0.020	0.024	0.028
搬送動力	搬送動力(流量3.0m ³ /分)	12.323	0.331	0.045	0.011	0.004	0.001
	搬送動力(流量2.5m ³ /分)	7.132	0.192	0.026	0.006	0.002	0.001
	搬送動力(流量2.0m ³ /分)	3.651	0.098	0.013	0.003	0.001	0.000
	搬送動力(流量1.5m ³ /分)	1.540	0.041	0.006	0.001	0.000	0.000
	搬送動力(流量1.0m ³ /分)	0.456	0.012	0.002	0.000	0.000	0.000
	搬送動力(流量0.5m ³ /分)	0.057	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000

熱媒温度 80℃の場合における、搬送動力+放熱ロスの合計値を図 2.3.10 に示す。

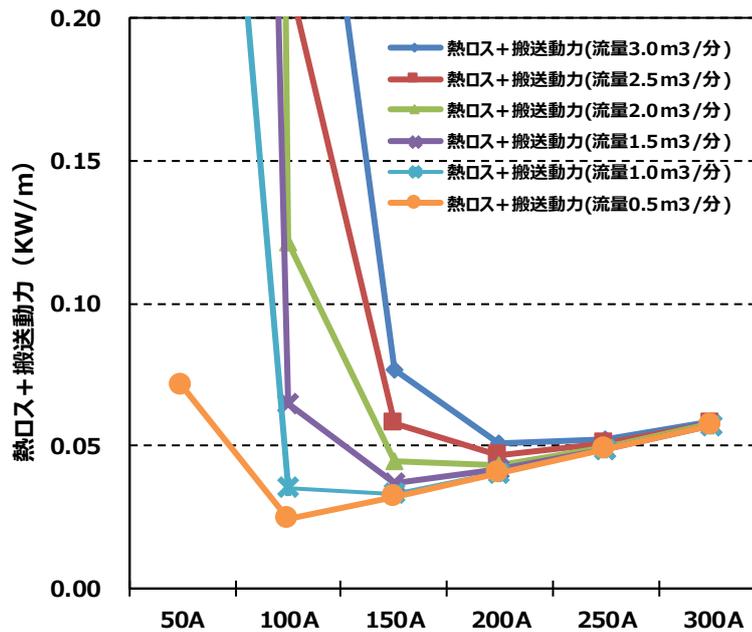


図 2.3.10 配管口径別の放熱ロス+搬送動力 (熱媒温度 80℃)

図 2.3.10 から配管口径が 200A 程度までのエネルギーロスは搬送動力が支配的であるが、それ以上の大口径配管は、配管表面積が大きくなるため放熱ロスが支配的となる傾向が確認できる。以上から、システムの熱融通配管は放熱ロスを考慮し、配管口径 200A 以下とした。

④熱融通実施条件

時刻別に熱融通を実施する判断の考え方は、時刻別配管放熱ロス (R_L) と同搬送動力 (P_L) に融通する熱の製造に要するエネルギー投入量の合計量が自己熱源に投入するエネルギー量よりも小さい場合に熱融通を行い、以下の算定式で熱融通実施判断する。

$$\frac{Q}{COP_R} > \frac{(R_L + Q)}{COP_S} + P_L \quad (2.6)$$

Q : 時刻別熱融通量

COP_R : 自己熱源の COP

R_L : 時刻別配管放熱ロス

COP_S : 熱融通する熱を製造する熱源の COP

P_L : 時刻別搬送動力 (時間当たりの消費電力量を熱量換算)

2.3.4 留意事項の整理

SHG (SHG) を適用する際の留意事項を以下に整理する。

(1) 設備条件

- ① 熱融通配管口径は 200A 以下とする。
- ② 熱融通配管接続は間接接続方式とし、効率よい熱交換をするため対向流型熱交換器を使用、バルブで熱媒の供給と受入の切替を行う。
- ③ 熱交換器に加え、熱計量・搬送・制御に必要な計測装置・ポンプを兼用する熱ルータを設置する。従って、熱ルータの設置スペースが必要となる。
- ④ 熱ルータ間の熱媒流量・圧力制御を行う制御システムが必要となる。
- ⑤ 熱融通実施判断条件は、配管放熱ロスと熱媒搬送動力、融通する熱の製造に要したエネルギー投入量の合計値が自己熱源に投入するエネルギーよりも小さい場合に実施する。
- ⑥ 各建物熱源を保有するため、以下の場合は各建物の自己熱源を補完運転し需要対応する。
 - 熱受入側が、熱融通のみで需要対応できない場合
 - 熱融通に伴うロス（配管放熱ロスや搬送動力）と融通する熱の製造に要するエネルギー投入量の合計値より自己熱源に投入するエネルギー量の方が小さい場合

(2) 考慮しておくべき事項

①直接接続と間接接続

熱交換器を介さずに熱源設備に熱媒を直接供給する方法の直接接続と、熱交換器を介して熱媒のやり取りを行う方法の間接接続がある。それぞれ以下の様な特徴があるとされており留意する必要がある。

□ 直接接続

- 熱媒の温度及び圧力条件を等しくする必要がある。
- 冷熱融通の場合、熱媒温度を低温の条件に合わせた際には、温度を下げた方の建物の冷熱源が能力不足となる可能性があり、何らかの対策が必要である。
- 圧力に関して、高い方に合わせる場合には、低い方の機器や配管等の耐圧の確認が必要。
- 防食材等の薬剤を統一する必要がある。

□ 間接接続

- 熱交換器による温度低下の影響を把握しその対策が必要となる。
- 熱交換器による圧力損失増加の影響を把握しその対策が必要となる。

②熱融通配管の道路占用の扱い

熱融通配管の道路占有については道路法第 32 条の「水管、下水道管、ガス管、その他これに類する物件」で位置づけられており、熱融通配管を公道下に敷設する場合は、道路管理者の許可を受けることが必要となる。また、道路占有に関しては、1996 年 6 月に旧建設省道路局路政課長通達があり、上下水道、電気、ガス等の義務占有に準じた取扱いとなっており、個別の取扱いではあるものの、具体的な許可事例が出ており、建物間熱融通も同様な扱いが必要となる。

③計量・管理区分

効率の高い熱源を優先的に稼働する事が多くなり、同熱源が設置されている建物のエネルギー使用量が多くなってしまふ。従って、各建物の熱負荷に応じて公平に配分するために、融通熱量の

計量を行い、熱源のエネルギー消費量を按分する。そのために、融通熱量計量装置が必要となる。また、管理区分は、事業形態によって複数のパターンが考えられるとしている。そこで、様々なスキームにおいても対応可能な汎用性のある熱融通接続装置が必要となる。

2.4 まとめ

本章では、既成市街地のエネルギー面的利用の促進方策として、複数の建物間における双方向熱融通ネットワークシステム（SHG）について検討した。SHGの機能は各建物の熱源機のうち、機器の仕様や、異なる季節・時間帯等の設定条件の下で、その都度、高効率熱源機を選択し、建物の中で供給役割の順番を定め、双方向に熱を融通する事である。各建物の不足熱負荷分は自己熱源で製造する。

そこで、まず建物間双方向に必要な熱融通搬送接続装置と熱融通配管の要件を検討した。通常の接続方式では供給用と受入用の2つの熱交換器等が必要となるが、本研究では1つの対向流型のプレート型熱交換器とバルブ切替により供給と受入の変更を効率的に行える「熱ルータ」を提案した。そして、熱融通量はピーク負荷の10%程度以下の熱負荷の融通を想定し、熱融通配管中で発生するエネルギーロス（搬送動力と放熱熱量）の観点から、熱融通配管口径は200A程度が目安となることを示した。最後にシステムを整備する上での留意事項を整理した。

【第2章参考文献】

- 2-1) (財) 新機能素子研究開発協会：電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査,2009.3.23
- 2-2) 空気調和・衛生工学便覧第14版：空気調和設備設計 P79
- 2-3) 国土交通省都市・地域整備局：建物間熱融通普及促進マニュアル
http://www.mlit.go.jp/crd/city/sigaiti/shuhou/ecomachi/fukyu_manual.pdf

第3章 熱ルータ（熱融通相互接続装置）に関する実験研究

第3章 熱ルータ（熱融通相互接続装置）に関する実験研究

3.1 はじめに

熱ルータは、SHG内の各建物が熱融通の供給、又は受入（いわゆる、プロシューマ）となり、熱の供給・受入の役割の変更や、特定の時間帯における熱融通の実行・停止、熱媒を圧力・流量制御する事で主熱融通配管にバルブ設置無しに任意の熱融通ルートを設定（以下“ループ管路”）して、適切な搬送動力の選択する、SHGの主要な要素技術である。結果、各建物の熱源と熱融通配管との接続部に設置する事で、バルブ不要によるコストの低減と共に、熱融通に伴う圧力損失の回避ができる。又、必要に応じて主配管の延伸や分岐取出しが可能で、拡張性ある地域熱ネットワークの構築が期待できる。

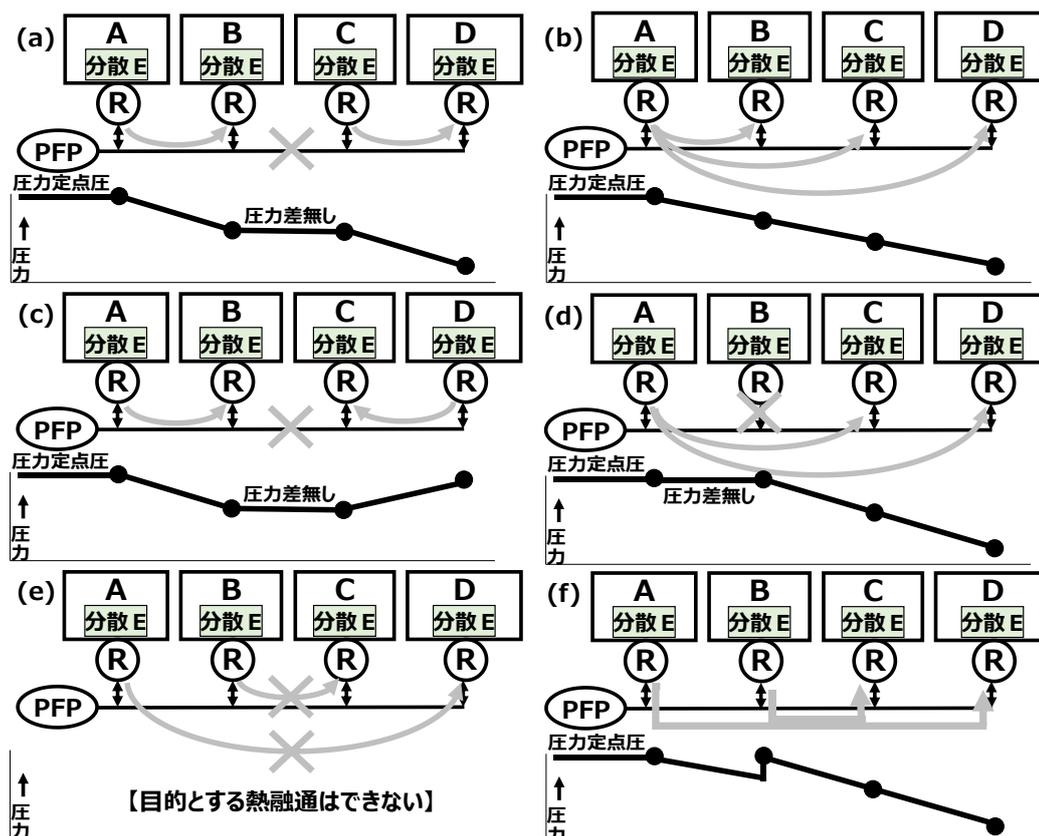
本章では、熱媒の流量・圧力制御を行う熱ルータを試作し、任意の熱融通ルートの設定と適切な搬送動力の選定が可能か、水搬送実験をしてその評価を行い³⁻¹⁾、同結果が街区レベルの実プロジェクトに展開できるか可能性について確認した。

3.2 熱ルータのコンセプト

3.2.1 熱ルータを使ったループ管路中の熱媒の流れ

一つのループ管路において消費される搬送動力は、管路の損失水頭によって失われる動力の総和（総管路損失）であり、実現する管路で最小値となる³⁻²⁾。従って、同管路に接続する負荷設備の要求流量に応じて、総管路損失動力が最小化される最適な流れのパターンが選択され、各負荷設備間の管路流量は決定される。

SHGは、熱の供給・受入の役割を各プロシューマが選択、熱融通条件に合意したプロシューマ間で任意のループ管路を設定し、熱ルータが熱媒の圧力・流量を制御して行う。具体的には、熱ルータを用いて主熱融通配管内を配管設計圧力内でバランスさせることで区分（熱媒の流れを発生させない）し、ループ管路を構築する。熱媒の流れと配管中の圧力分布のイメージを図3.2.1に示す。



各需要先の位置は同一高さとし、配管圧損・熱媒膨張等は考慮していない。※PFP: Pressure fixed point

図 3.2.1 熱ルータを用いた熱媒の流れと圧力分布イメージ

(a)は A/B 及び C/D の 2 つのループ管路、以下(b)は A/B/C/D の 1 つ、(c)は A/B 及び C/D の 2 つ、(d)は A/C/D の 1 つ（この中で(a)と(c)は B・C 間で熱媒が流れない状態。以下「流量＝0 制御」と記載）。但し、(e)は異なる圧力域を同一配管内で成立できないので、目的の熱搬送する事ができず、(f) の様な A/B/C/D の 1 つ圧力分布域で熱融通を行う。（なお、同イメージ図では高低差や配管圧損、温度変化による熱媒体積変化等詳細は反映していない。）以上の様に、熱ルータを使って複数のループ管路を構成する事で、ループ管路内で供給・受入、それぞれの役割を担うプロシューマ間で熱融通を行う事が可能と考えた。

SHG 内の建物は、熱の供給、受入、融通不実施等の役割を事前に決定する（熱を供給しながら受入する事はない）。そこで、第 2 章の要件定義に記した様に、熱ルータをできるだけ省スペース化・低コスト化を図り効率的な熱交換を行うため対向流型のプレート型熱交換器を選択、バルブ切り替えて熱媒の流れる向きを変更し、役割切替の選択が可能な機器構成とした（図 3.2.2）。そして熱融通量が決定すると、熱融通配管の口径・延長から各熱ルータ間の圧力損失が定まり、目標の圧力分布になる様、熱ルータ相互が連携して流量制御を行う。但し、SHG 内の熱ルータ 1 台には全体の流量制御の誤差集積を調整するための圧力制御機能を持たせた。

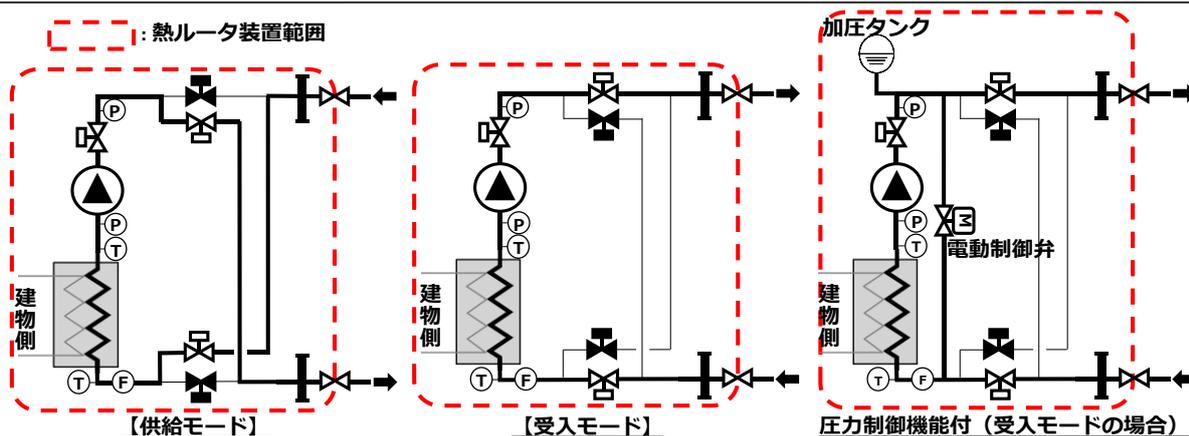


図 3.2.2 熱ルータ機器構成と熱媒の流れ

3.2.2 熱ルータと熱源機の位置関係

熱の供給・受入時の熱ルータと熱源機の間係を図 3.2.3 に示す。熱を外部から受入する場合は、熱ルータを熱源機と並列に配し、建物負荷のベース運転対応を行い、負荷が増加した場合、他の熱源と運転発停順位を上位とする設定の台数制御運転を行う。逆に、供給する場合は、自建物負荷と同様に熱ルータを建物負荷の一つの空調機の様に取り扱い、負荷に合わせて制御運転する。

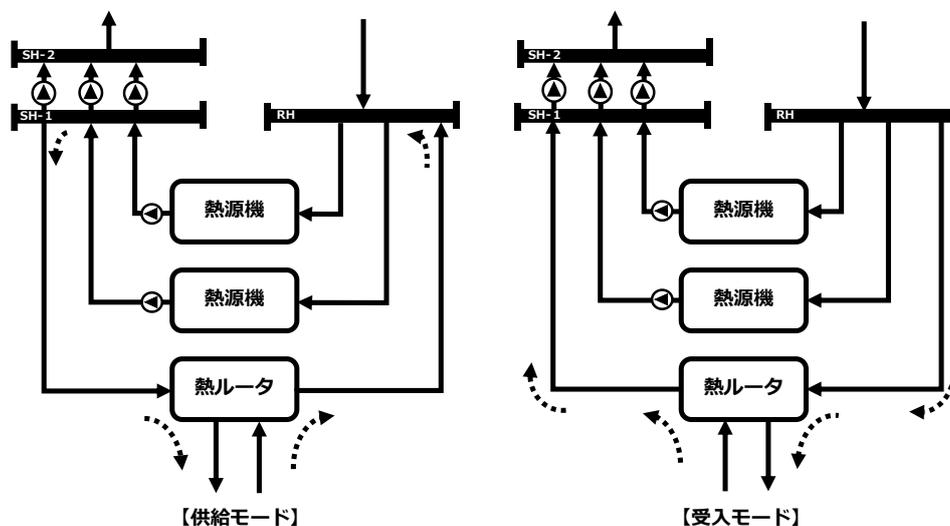


図 3.2.3 熱ルータと熱源機の位置関係

3.3 熱ルータ相互水搬送制御実験

本実験は、4 台の熱ルータ模擬実験装置を製作し、SHGとみたてた小口径配管ユニットに取付け、熱ルータの組合せによる通水試験を行った。

3.3.1 実験目的

熱ルータはSHG内の各建物間で合意した条件で熱融通を行うため、熱媒を圧力・流量制御し熱融通配管の中にループ管路を設定する。本実験では、配管に通水し、各熱ルータで流量・圧力を制御する事で、主配管にバルブ無しで目標とする流れの向きと流量分布が所定の時間内で形成される

事を確認する。なお、本来であれば、冷水・温水による熱搬送にて確認すべきであるが、前記の任意の熱ルータ間の組合せが配管中の流量分布を所定の圧力以下で可能かを確認する事を目的とするため、熱交換器を設置せず、通水（水搬送）のみで実験を行なった。

3.3.2 実験装置

実験装置は4つの熱ルータに接続する往管と還管の2本のヘッダ管から構成される（図 3.2.4）。各熱ルータはヘッダ管から見て左から順に「熱ルータA」、「熱ルータB」、「熱ルータC」、「熱ルータD」とした。各熱ルータには、1つの循環ポンプとその前後に圧力計、ポンプの吸い込み側に流量計を設置した。そして2本のヘッダ管は、熱ルータに近い側を「還ヘッダ」、遠い側を「往ヘッダ」と呼ぶ事とする。図中のヘッダ管（主配管）に設置した流量計・圧力計は、実験用にヘッダ内の水の流れる方向をチェックするため設置したものである。なお、熱ルータAには前述の流量制御の誤差集積調整用の差圧制御を目的とした自動制御弁（電動弁）、及び圧力定点を定めるための密閉タンク（加圧タンク）、そして安全装置として逃し弁を設置した。なお、図 3.2.4 中の各ヘッダ番号をつけた圧力計及び流量計は通水実験における水の流れる向き、流量・圧力分布を確認するため設置したもので、実際のSHGには設置しない。実験装置外観を写真 3.2.1 に示す。

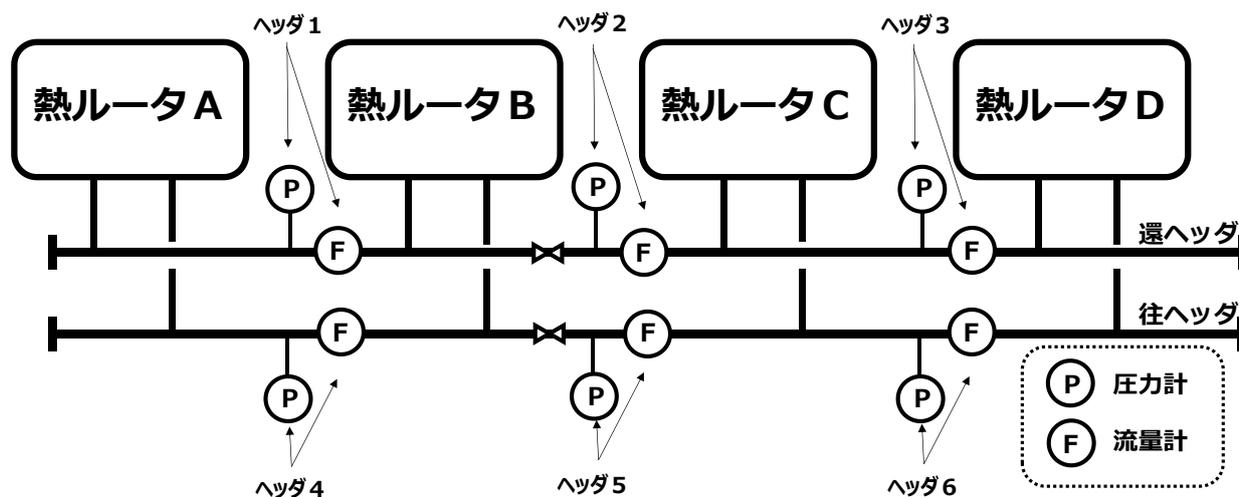


図 3.2.4 熱ルータ相互水搬送制御実験装置構成図

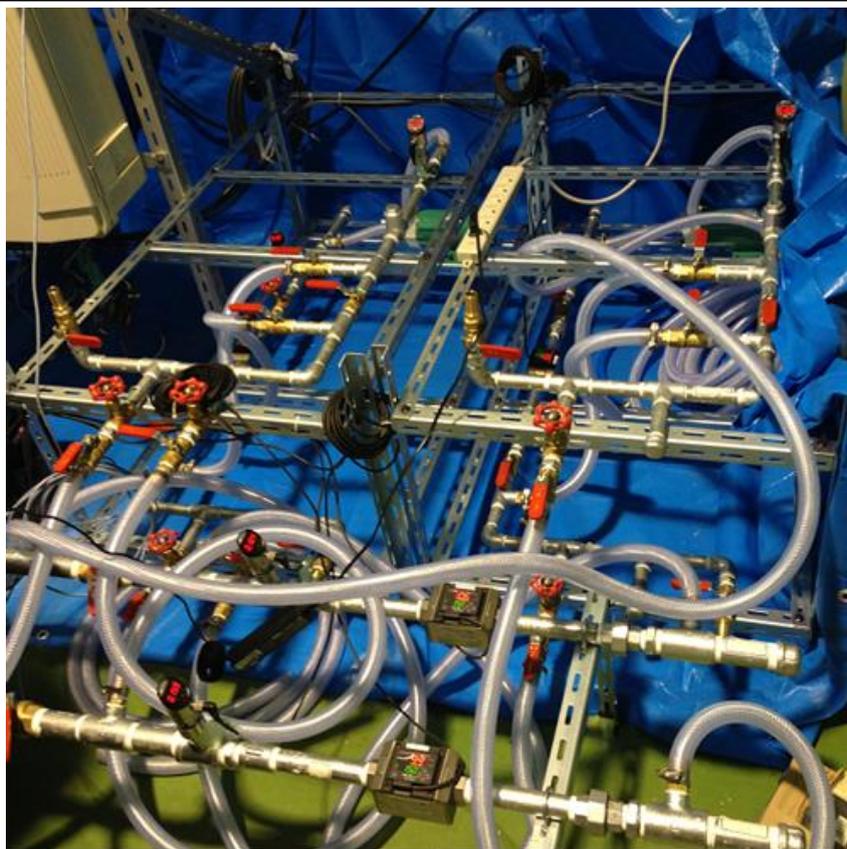


写真 3.2.1 熱ルータ相互水搬送制御実験装置外観

3.3.3 熱ルータの制御ロジック

熱ルータ制御用 PLC に実装した自動制御一覧を表 3.2.1 に示す。操作対象機器は、循環ポンプインバータ と圧力制御弁で、循環ポンプは流量制御、又は差圧制御の何れかを選択し使用可能とした。また、熱ルータ A の圧力調整弁はポンプ出口圧力制御とした。

表 3.2.1 熱ルータ制御用 PLC に実装した自動制御一覧

熱ルータ	操作端	制御方式
A	循環ポンプインバータ	流量制御/差圧制御
	圧力調整弁	ポンプ出口圧力制御
B・C・D	循環ポンプインバータ	流量制御/差圧制御

3.3.4 実験の組合せ

4 台の熱ルータで供給・受入の組合せ 38 通りの相互水搬送実験を行った。流量の組合せは、実験装置のポンプ最大～最小の出力範囲の中で実現できる流量とし、ネットワーク内の圧力勾配を最大限発生させることを制約条件に設定した。但し、実験装置ゆえに、十分な圧損が取れない配管延長・口径から流量=0 制御は行っていない。予備実験として、4 台のうち 3 台の熱ルータを設定値の流量を確保する目的で流量計を起動し、その際の熱ルータ近傍の圧力を測定、圧力制御の設定値を確

認した。なお、4台の熱ルータ・38通りの組合せは、以下の様に考えた。

- ① 4台が全て運転するケース:それぞれが供給又は受入の役割となるので、 2^4 で16通りあるが、全てが供給又は受入となる場合を除いた、14通りを対象とした。
- ② 4台中3台が運転するケース:4台の熱ルータから3台を選択する順列総数なので、 ${}_4P_3=24$ 通りとなる。そのうち、全てが供給・受入となる6通りを除く、18通りを対象とした。
- ③ 4台のうち2台が運転するケース:②と同様に、 ${}_4P_2=12$ 通りとなる。そのうち、全てが供給・受入となる6通りを除く、6通りを対象とした。

以上の計38通りを実験対象とした。

3.3.5 実験要領

上記の38通りのケースについて、4台の熱ルータを起動し自動制御にて水搬送を行い、所定の流量分布になるか確認した。更に、異なる流量分布に移行させて、目標精度と移行時間について、

- 所定の流量分布を自動制御で達成する場合の誤差は目標値の10%以下
- 別の流量分布から自動制御で移行・安定するまでの許容時間を10分以内となる事を確認した。

3.3.6 実験手順

(1) 予備実験

各熱ルータ・4台供給・受入モード（以下供受モード）を表3.2.2、3台供受モード表3.2.3、2台供受モード表3.2.4にして、インバータ出力を手動にて操作する予備実験を行い、任意の流量バランスの状態を保ち、その時の各熱ルータの流量・圧力状態を確認し、熱ルータAの制御圧力値を計測する。なお、表中の数字のみ記載は供給モード、▲数字記載は受入モードを表す。

表 3.2.2 実験の組合せ（4台供給・受入モード）

実験 番号	流量(L/min)			
	熱ルータA	熱ルータB	熱ルータC	熱ルータD
102	▲4.5	▲4.5	▲4.5	13.5
103	▲4.5	▲4.5	13.5	▲4.5
104	▲7.0	▲10.0	7.0	10.0
105	▲4.5	13.5	▲4.5	▲4.5
106	▲10.0	7.0	▲7.0	10.0
107	▲7.0	10.0	7.0	▲10.0
108	▲13.5	4.5	4.5	4.5
109	13.5	▲4.5	▲4.5	▲4.5
110	10.0	▲7.0	▲10.0	7.0
111	10.0	▲7.0	7.0	▲10.0
112	4.5	▲13.5	4.5	4.5
113	10.0	7.0	▲10.0	▲7.0
114	4.5	4.5	▲13.5	4.5
115	4.5	4.5	4.5	▲13.5

表 3.2.3 実験の組合せ（3台供給・受入モード）

実験 番号	流量(L/min)			
	熱ルータA	熱ルータB	熱ルータC	熱ルータD
202	▲5.0	▲8.5	13.5	—
203	▲8.5	13.5	▲5.0	—
204	▲13.0	8.0	5.0	—
205	13.0	▲5.0	▲8.0	—
206	8.0	▲13.0	5.0	—
207	8.0	5.0	▲13.0	—
210	▲8.5	▲5.0	—	13.5
211	▲5.0	13.5	—	▲8.5
212	▲13.0	5.0	—	8.0
213	13.0	▲5.0	—	▲8.0
214	8.0	▲13.0	—	5.0
215	8.0	5.0	—	▲13.0
218	▲7.0	—	▲5.0	12.0
219	▲7.0	—	12.0	▲5.0
220	▲12.0	—	5.0	7.0
221	12.0	—	▲5.0	▲7.0
222	7.0	—	▲12.0	5.0
223	7.0	—	5.0	▲12.0

表 3.2.4 実験の組合せ（2台供給・受入モード）

実験 番号	流量(L/min)			
	熱ルータA	熱ルータB	熱ルータC	熱ルータD
302	▲10.0	10.0	—	—
303	10.0	▲10.0	—	—
306	▲6.0	—	6.0	—
307	6.0	—	▲6.0	—
310	▲11.0	—	—	11.0
311	11.0	—	—	▲11.0

（2）自動化実験

予備実験で確認した流量及び圧力状態を、全てのポンプを停止した状態から、自動制御にて再現し、前記の表 3.2.2、表 3.2.3、表 3.2.4 の全ての組合せを自動化実験対象とした。また、各組合せについては、熱ルータの起動順位を変えて複数回実験を行った。

具体的には、4台の組合せの場合は

A→B→C→D

A→C→D→B

A→D→B→C

以上の3通り。

3台の組合せの場合は

A→B→C

A→C→B

以上の2通り。

2台の組合せの場合は

A→B

B→A

以上の2通りを実施した。

（3）遷移制御実験

連続的に異なる流量バランスの状態に遷移させる実験を行った。但し、状態を変化させるポンプの発停指令は手動で行い、出力制御は自動制御させた。

実験を行った組合せを表3.2.5に示す。

表 3.2.5 遷移実験の組合せ

実験 番号	流量(L/min)			
	熱ルータA	熱ルータB	熱ルータC	熱ルータD
302	▲10.0	10.0	－	－
↓				
204	▲13.0	8.0	5.0	－
↓				
107	▲7.0	10.0	7.0	▲10.0
↓				
204	▲13.0	8.0	5.0	－
↓				
302	▲10.0	10.0	－	－

3.3.7 実験結果

(1) 予備実験結果

「実験番号 302」について、熱ルータ B を FIC として、熱ルータ A の出力を手動で徐々に上げながら、目標流量に到達するインバータ出力値の探索を行った結果を図 3.2.5 に示す。

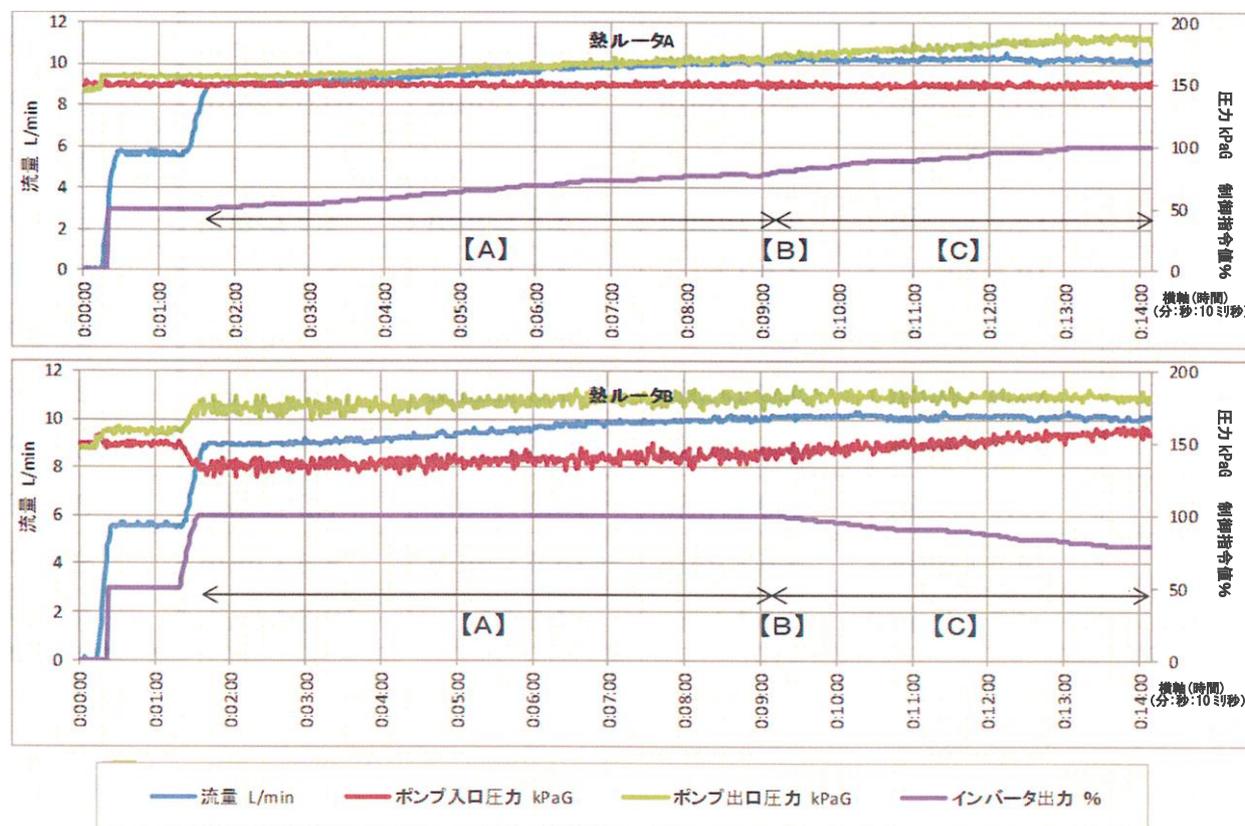


図 3.2.5 予備実験 (実験番号 302)

図中の区間【A】では、ポンプの出力が不足して目的の流量に到達出来ていない。【B】のポイントで目標流量の 10.0L/min に到達する。その時のインバータ出力は熱ルータ A が約 77%、熱ルータ B が 100%となっている。これ以降さらに熱ルータ A の出力を上げていくと両ルータの流量は目標値を維持する様に熱ルータ B のインバータ出力が下がっていく。区間【C】では常に目標流量を達成している。この様に目標流量となるための熱ルータ A、B のインバータ出力の組合せは無数に存在している事が分かった。

本予備実験ではインバータ出力値を手動で調節しながら、極力全ての熱ルータの出力が近い値を取る組み合わせを選択し熱ルータ A の圧力制御値 ΔP 値を確認した。

表 3.2.2、表 3.2.3、表 3.2.4 の実験組合せに対する予備実験の結果として得られた ΔP 値を表 3.2.6、表 3.2.7、表 3.2.8 に示す。

なお、ここで確認した ΔP 値・制御圧力値を制御用パラメータとして、自動化実験で使用した。

表 3.2.6 予備実験結果（4台供給・受入モード）

実験 番号	流量(L/min)				制御圧力値 ΔP (kPa)
	熱ルータA	熱ルータB	熱ルータC	熱ルータD	
102	▲4.5	▲4.5	▲4.5	13.5	29
103	▲4.5	▲4.5	13.5	▲4.5	29
104	▲7.0	▲10.0	7.0	10.0	16
105	▲4.5	13.5	▲4.5	▲4.5	26
106	▲10.0	7.0	▲7.0	10.0	30
107	▲7.0	10.0	7.0	▲10.0	10
108	▲13.5	4.5	4.5	4.5	33
109	13.5	▲4.5	▲4.5	▲4.5	20
110	10.0	▲7.0	▲10.0	7.0	29
111	10.0	▲7.0	7.0	▲10.0	29
112	4.5	▲13.5	4.5	4.5	32
113	10.0	7.0	▲10.0	▲7.0	33
114	4.5	4.5	▲13.5	4.5	32
115	4.5	4.5	4.5	▲13.5	33

表 3.2.7 予備実験結果（3台供給・受入モード）

実験 番号	流量(L/min)				制御圧力値 ΔP (kPa)
	熱ルータA	熱ルータB	熱ルータC	熱ルータD	
202	▲5.0	▲8.5	13.5	—	22
203	▲8.5	13.5	▲5.0	—	36
204	▲13.0	8.0	5.0	—	34
205	13.0	▲5.0	▲8.0	—	32
206	8.0	▲13.0	5.0	—	37
207	8.0	5.0	▲13.0	—	38
210	▲8.5	▲5.0	—	13.5	35
211	▲5.0	13.5	—	▲8.5	19
212	▲13.0	5.0	—	8.0	36
213	13.0	▲5.0	—	▲8.0	34
214	8.0	▲13.0	—	5.0	36
215	8.0	5.0	—	▲13.0	38
218	▲7.0	—	▲5.0	12.0	28
219	▲7.0	—	12.0	▲5.0	26
220	▲12.0	—	5.0	7.0	35
221	12.0	—	▲5.0	▲7.0	28
222	7.0	—	▲12.0	5.0	28
223	7.0	—	5.0	▲12.0	29

表 3.2.8 予備実験結果（2台供給・受入モード）

実験 番号	流量(L/min)				制御圧力値 ΔP (kPa)
	熱ルータA	熱ルータB	熱ルータC	熱ルータD	
302	▲10.0	10.0	－	－	29
303	10.0	▲10.0	－	－	29
306	▲6.0	－	6.0	－	8
307	6.0	－	▲6.0	－	9
310	▲11.0	－	－	11.0	36
311	11.0	－	－	▲11.0	37

(2) 自動化実験結果

● 2台供受モード〈実験番号 302〉

【実験条件】

- 熱ルータA制御方式：dPIC、制御設定値：29kPa、受入モード
- 熱ルータB制御方式：FIC、制御設定値：10L/min、供給モード
- 起動順序 A → B

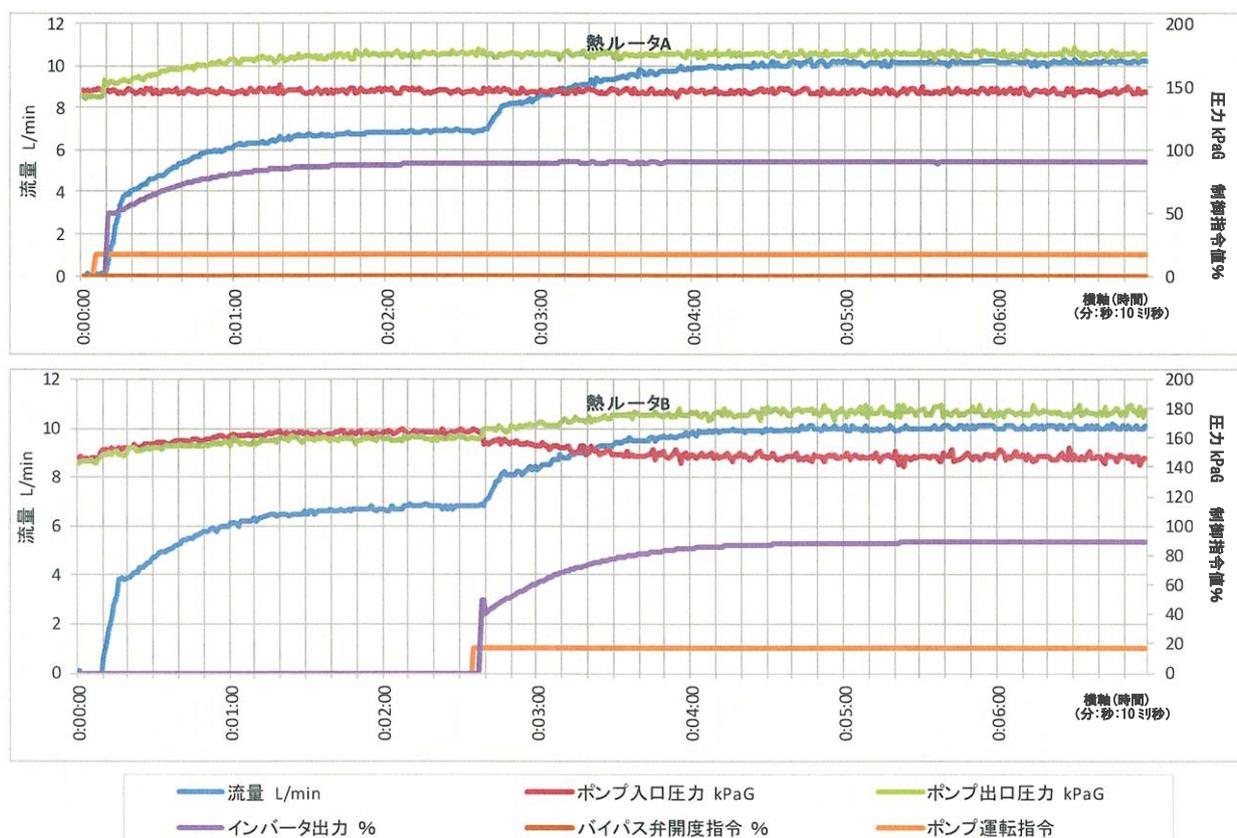


図 3.2.6 自動化実験結果（実験番号 302）

最初に熱ルータAのポンプを起動しdPIDで出力制御を開始した。この時、熱ルータBのポンプは停止しているが、熱ルータAのポンプから押し出された水が流入し、熱ルータBでも流量が計測された。0:02:00頃にはポンプ出力は安定しているが、流量は目標値に到達していない。

熱ルータAの出力が安定した0:02:40頃に熱ルータBのポンプを起動し、FICで出力制御する。熱ルータBのポンプが徐々に出力を上昇しながら、熱ルータA及びBの流量が上昇し、0:04:40頃に目標流量に到達した。この時のインバータ出力指令値は熱ルータAが約90%、熱ルータBで約89%であった。

本実験では系の流量が発信する事もなく、比較的スムーズに目標流量に到達する事が確認できた。

● 4台供受モード〈実験番号102〉

【実験条件】

- 熱ルータA制御方式：dPIC、制御設定値：4.5L/min、29kPa、受入モード
- 熱ルータB制御方式：FIC、制御設定値：4.5L/min、受入モード
- 熱ルータC制御方式：FIC、制御設定値：4.5L/min、受入モード
- 熱ルータD制御方式：FIC、制御設定値：4.5L/min、受入モード
- 起動順序 A→B→C→D

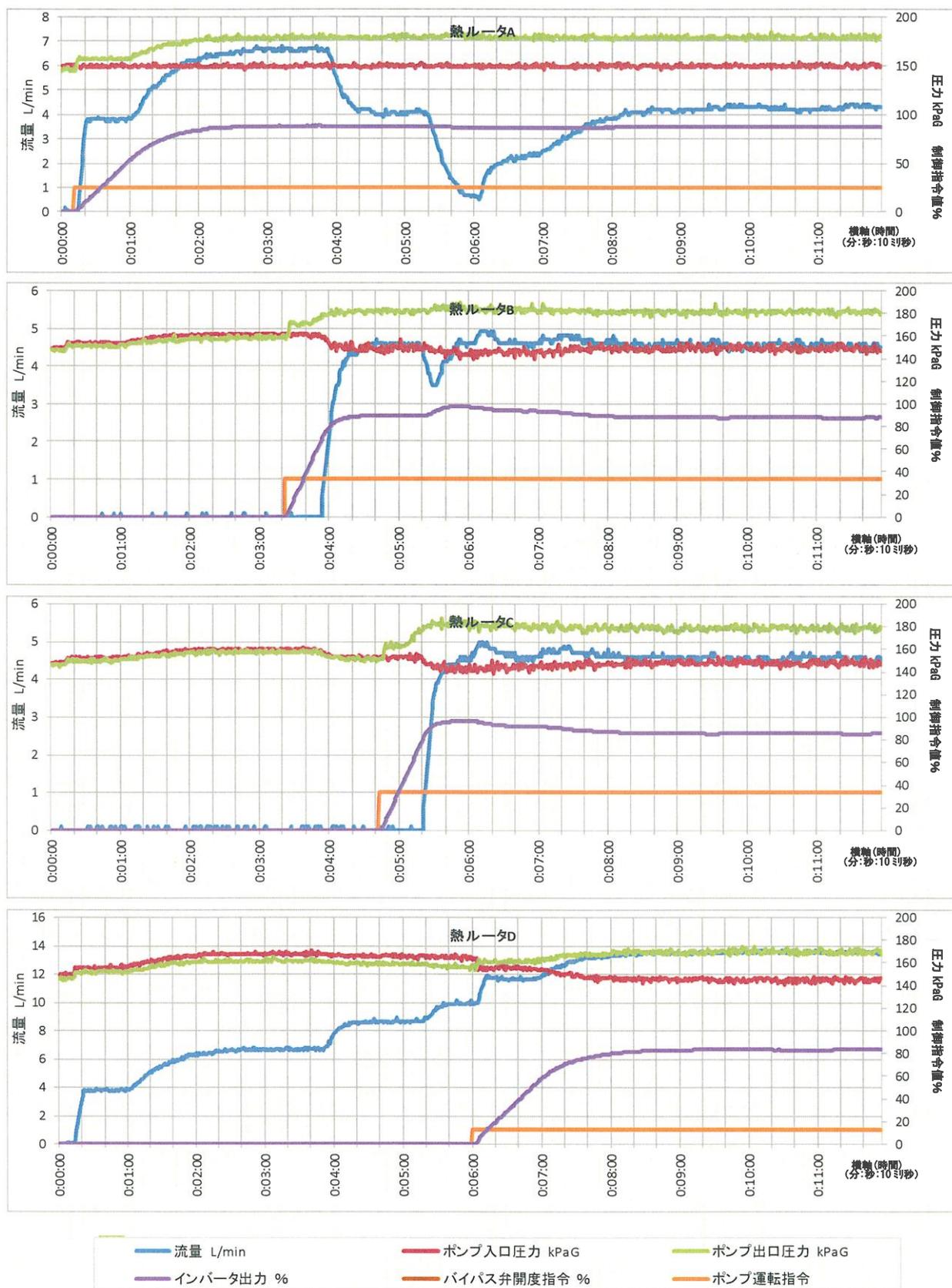


図 3.2.7 自動化実験結果（実験番号 102）

先ず、熱ルータAのポンプを起動、dPICで出力制御を開始した。熱ルータAと異なる供給モードの熱ルータDに水が流れるが、熱ルータAと同じ受入モードのB及びCには水は流れない。この時流量が6.7L/min程度まで上昇したところで目的の差圧に達して出力が安定した。

次に熱ルータBのポンプを起動、FIC制御を開始した。熱ルータBの目標流量に向かって上昇し、熱ルータDの流量も上昇する。一方でdPIC制御する熱ルータAの出力は6.7L/min → 4L/min程度まで減少する。

次に熱ルータCのポンプを起動、FIC制御を開始した。熱ルータCの流量は目標流量に向かって上昇し、熱ルータDの流量も上昇する。熱ルータA、Bの流量はCが起動した瞬間に大きく減少する。その後、熱ルータBは緩やかに元の流量まで戻り、熱ルータAは0.7L/min程度とC起動前よりも低い流量のところで安定した。

最後に、熱ルータDのポンプを起動、FIC制御を開始した。この時Cの起動時に見られた様な他の熱ルータの流量の急激な変化は見られない。熱ルータB、Cはインバータ出力を低下させながら流量を維持し、熱ルータAは徐々に流量を増加させながら4.5L/min付近まで到達し、全てのルータが目標流量に達成する事を確認した。

表3.2.9及び表3.2.10に自動化実験を実施した全ての組合せの結果を示す。表3.2.9は目的の差圧及び流量に到達してインバータが安定した平衡状態における各種計測結果であり、表3.2.10は全ての組合せの設定流量と計測流量の誤差である。同結果から、平衡状態における設定流量と計測流量の誤差は最大で5.8%、平均で0.6%あった。全ての組合せに対しても目標に対する誤差は10%以内に抑える事ができる事を確認した。

表 3.2.9 自動化実験結果一覧1（計測値）

No.	熱ルータA					熱ルータB					熱ルータC					熱ルータD					ヘッダ												
	ポンプ運 転指令	インバータ 出力 %	バイパス 弁開度指 令 %	FT A-1 流量 L/min	PT A-1 ポンプ入 口圧力 kPaG	PT A-2 ポンプ出 口圧力 kPaG	ポンプ運 転指令	インバータ 出力 %	FT B-1 流量 L/min	PT B-1 ポンプ入 口圧力 kPaG	PT B-2 ポンプ出 口圧力 kPaG	ポンプ運 転指令	インバータ 出力 %	FT C-1 流量 L/min	PT C-1 ポンプ入 口圧力 kPaG	PT C-2 ポンプ出 口圧力 kPaG	ポンプ運 転指令	インバータ 出力 %	FT D-1 流量 L/min	PT D-1 ポンプ入 口圧力 kPaG	PT D-2 ポンプ出 口圧力 kPaG	FT H-1 流量1 L/min	PT H-1 圧力1 kPaG	FT H-2 流量2 L/min	PT H-2 圧力2 kPaG	FT H-3 流量3 L/min	PT H-3 圧力3 kPaG	FT H-4 流量4 L/min	PT H-4 圧力4 kPaG	FT H-5 流量5 L/min	PT H-5 圧力5 kPaG	FT H-6 流量6 L/min	PT H-6 圧力6 kPaG
102-1	1	87.55	0	4.29	150.7	179.4	1	87.68	4.54	148.4	181.3	1	85.6	4.5	147.7	178.4	1	83.63	13.51	145	170.1	4.37	177.9	8.8	179.3	13.58	178.8	4.21	152.2	8.88	155.5	13.06	153.6
102-2	1	87.49	0	4.34	150.0	179.8	1	87.52	4.53	150.1	180.5	1	85.56	4.54	148.6	178.6	1	84.21	13.58	145.5	169.7	4.38	177.7	8.8	179	13.66	177.8	4.25	152.5	8.91	155.9	13.08	153.4
102-3	1	87.61	0	4.39	150.3	179.1	1	87.53	4.53	149.8	181.8	1	85.48	4.57	148.5	178.9	1	84.06	13.61	145.5	169.8	4.41	178.9	8.87	178.9	13.52	178.5	4.23	152.9	8.85	156.1	13.17	154.2
103-1	1	88.27	0	4.6	149.5	179.1	1	87.23	4.56	147.4	181.7	1	83.85	13.59	140.5	167.6	1	84	4.53	149.6	178.7	4.55	177.8	9.16	178.7	4.28	177.5	4.5	152	9.1	155.5	4.74	153.3
103-2	1	88.31	0	4.53	149.6	179.2	1	87.2	4.59	149.4	179.6	1	83.88	13.57	140.5	167.8	1	84.28	4.56	150.5	177.4	4.53	177.7	9.17	178.3	4.33	177.6	4.4	152.1	9.06	155.5	4.86	153.3
103-3	1	88.56	0	4.5	148.7	179	1	87.31	4.5	147.9	180.5	1	83.84	13.55	141.3	168.1	1	84.46	4.56	149	178.6	4.48	178	9.11	179.9	4.43	178.1	4.52	152.2	8.95	155.3	4.79	152.7
104-1	1	69.33	0	6.88	150.8	167.4	1	94.93	10.11	139.3	174.8	1	65.74	6.96	150.1	166.7	1	88.66	10.01	143.7	171.3	6.96	161.8	16.92	161.6	10.04	160.4	6.76	160.1	16.94	165.1	9.56	163.7
104-2	1	69.19	0	7.27	150	166.4	1	91.74	9.99	140.8	173.3	1	70.01	7.13	148.8	167.4	1	91.96	10.1	141.2	173.9	7.22	162.1	17.24	161	10.28	159.5	7.05	161.3	17.26	167.1	9.62	165.4
104-3	1	69.3	0	6.92	150.2	166.9	1	94.67	10.09	138.4	173.4	1	65.69	7.03	150.5	165.7	1	88.89	9.96	143.4	171.3	6.82	161.3	16.92	161	10.1	160.2	6.74	159.8	16.87	165.6	9.45	164.2
105-1	1	83.86	0	4.49	149.2	174.3	1	84.67	13.55	139.5	166.8	1	85.62	4.59	145.7	176.2	1	85.35	4.57	147.2	177.8	4.52	174.1	9.2	176.6	4.4	175.5	4.32	151.6	9.17	153.7	4.74	150.3
105-2	1	83.86	0	4.48	149	174.3	1	84.03	13.52	140.3	165.6	1	85.99	4.52	146.4	176.8	1	85.88	4.53	147	176	4.41	173.8	9.06	176.5	4.34	175.4	4.39	151	9.08	153.1	5.02	149.7
105-3	1	84.35	0	4.5	148.2	176	1	84.84	13.52	139.5	167.7	1	86.37	4.55	145.2	176.1	1	85.94	4.54	147.4	175.4	4.59	174.6	9.09	178.8	4.31	176	4.34	151.8	9.22	152.9	4.69	150
106-1	1	90.93	0	9.93	148.4	178.9	1	62.44	6.99	159.6	174.5	1	62.63	7.07	158.9	173.8	1	86.31	10.1	151.6	178	9.9	168.4	2.74	169.9	10.02	169.1	9.76	169.8	2.87	173.8	9.61	170.2
106-2	1	90.85	0	9.93	148.5	178.4	1	63.1	7.08	160.7	174.7	1	61.9	7.11	157.9	172.9	1	86.48	10.05	150.6	178.4	9.84	168.6	2.81	169.9	10.04	169	9.79	169.9	2.78	173.8	9.48	170.1
106-3	1	91.47	0	10.09	148.3	178.6	1	64.97	7.13	159	176	1	60.04	7.03	159.1	172.5	1	87.63	10.07	149.5	181.2	10.04	168.8	2.9	169.9	10.05	168.6	10.01	170.6	2.76	174.2	9.44	170.9
107-1	1	60.25	0	7.24	148.7	160	1	89.32	10.02	135.8	168.4	1	66.83	7.06	145.1	161.7	1	85.83	10.06	137.1	164.5	7.27	154.9	2.92	155.6	9.78	155.3	7.11	158.3	3.01	162	10.19	158.8
107-2	1	60.02	0	7.26	148.2	159.9	1	89.3	10.04	135.4	169.2	1	66.84	7.1	144.2	161.1	1	85.97	10.12	136.8	165	7.19	154.4	2.84	155.7	9.84	155.2	7.02	159.6	2.95	162	10.22	159
107-3	1	60.59	0	7.27	148.5	159.7	1	89.55	10	135.9	168.1	1	66.74	7.06	145	163.1	1	85.49	10.04	137.4	164.3	7.23	154.5	2.89	156.1	9.74	155.3	7.11	159.5	2.87	161.8	10.06	158.6
108-1	1	95.27	0	13.55	149.8	183.9	1	90.08	4.47	159.9	194.6	1	91.9	4.52	159.1	192.9	1	92.23	4.49	160.8	193.2	13.48	162.9	9.12	163.3	4.59	162.7	13.41	191.8	8.95	195.9	4.39	194.3
108-2	1	95.35	0	13.76	149.5	182.9	1	92.39	4.54	159.7	196	1	94.73	4.54	158.2	195.8	1	94.4	4.56	157.5	196.1	13.66	162.3	9.18	162.8	4.65	161.2	13.56	193	9.12	197.5	4.12	195
108-3	1	94.91	0	13.82	150.1	182.3	1	92.63	4.56	161.4	194.5	1	95	4.54	156.5	195	1	94.59	4.57	158.7	194.5	13.67	162.1	9.12	162.9	4.62	162	13.59	193.3	9.16	197.6	4.52	194.7
109-1	1	92.25	0	13.61	149.5	178.7	1	84.32	4.46	160	187.4	1	86.73	4.52	157.3	187.7	1	86.79	4.51	157.2	188.4	13.4	184.9	9.05	187.5	4.12	187.4	13.57	162.9	9.05	164.1	4.73	160.7
109-2	1	91.66	0	13.65	149.2	179.3	1	85.26	4.52	158.9	188.1	1	87.87	4.51	155.2	188.7	1	87.46	4.53	157.2	187.4	13.41	184.8	9.12	187.9	4.31	187.7	13.58	162.2	9.06	163.9	4.84	160.1
109-3	1	91.38	0	13.57	149.1	180.2	1	83.71	4.44	159.9	187	1	85.86	4.44	157.4	187.5	1	85.37	4.47	158	187.2	13.34	184.8	8.96	187.1	4.23	187.8	13.49	162.8	9.06	165.1	4.81	160.9
110-1	1	90.16	0	10.25	148.5	178.3	1	64.43	7.08	158.1	173.9	1	92.81	10.04	145.6	179.5	1	95.05	7.06	160	171.3	10.16	166.6	3.09	169.2	7.18	168.6	10.25	168.8	3.24	170.9	6.49	168.1
110-2	1	90.56	0	10.17	148	177.9	1	63	7.05	158.4	173.2	1	91.41	10.05	144.2	178	1	90.85	7.09	159.3	172.1	10.11	166.3	2.96	168.9	7.2	167.3	10.18	169.3	3.14	171.7	6.65	168.6
110-3	1	89.83	0	10.23	147.9	177.7	1	63.88	7	157.9	173.8	1	92.21	10.01	144.5	178.1	1	90.14	6.99	160.3	171.7	9.95	166.6	3.03	169.3	7.08	168.3	10.24	168.7	3.15	170.8	6.64	167.8
111-1	1	90.26	0	9.91	147.7	177.4	1	60.35	7.08	159.2	172.3	1	63.46	7.06	155.2	171.6	1	88.81	10.01	148	175.9	9.83	165.5	2.77	168	9.75	167.2	9.92	169.5	2.81	172	10.14	168.1
111-2	1	90.28	0	10.11	147.7	177.7	1	62.39	7.13	158.3	172.6	1	61.79	7.02	156.6	170.1	1	89.93	10	145.1	177.6	9.92	165.9	2.99	168.7	9.75	167.4	10.01	169.7	3.03	172	10.14	168.7
111-3	1	89.95	0	10	148.1	178	1	62.03	7.04	158.3	173.3	1	61.85	7.03	156.5	171.4	1	89.28	10.03	146	177	9.87	165.2	2.84	167.9	9.67	167.2	10.13	168.9	2.89	172	10.3	168.2
112-1	1	92.63	0	4.51	148.2	181	1	90.42	13.6	141.4	172.3	1	93.64	4.57	143.1	182.5	1	93.36	4.55	148	181.8	4.59	149.5	9.02	150.2	4.68	149.5	4.62	181	9.07	184.1	4.03	181.2
112-2	1	92.48	0	4.48	148.7	180.9	1	90.4	13.6	141.6	172.6	1	93.27	4.5	145.3	181.8	1	93.32	4.53	145.7	183.8	4.45	148.8	9.1	150.5	4.68	149.6	4.51	181.4	9.15	184.4	4.43	181.6
112-3	1	91.32	0	4.36	147.6	180.9	1	90.34	13.51	141.1	172.4	1	92.73	4.58	145.2	180	1	92.82	4.58	146.1	181.9	4.26	149.4	9.2	150.1	4.67	149.5	4.41	179.6	9.16	184.1	4.4	181.1
113-1																																	

表 3.2.10 自動化実験結果一覧2（流量誤差）

No.	熱ルータA				熱ルータB				熱ルータC				熱ルータD			
	設定流量 L/min	計測流量 L/min	誤差 L/min	誤差 %												
102-1	4.5	4.3	0.21	4.7%	4.5	4.5	-0.04	-0.9%	4.5	4.5	0	0.0%	13.5	13.5	-0.01	-0.1%
102-2	4.5	4.3	0.16	3.6%	4.5	4.5	-0.03	-0.7%	4.5	4.5	-0.04	-0.9%	13.5	13.6	-0.08	-0.6%
102-3	4.5	4.4	0.11	2.4%	4.5	4.5	-0.03	-0.7%	4.5	4.6	-0.07	-1.6%	13.5	13.6	-0.11	-0.8%
103-1	4.5	4.6	-0.1	-2.2%	4.5	4.6	-0.06	-1.3%	13.5	13.6	-0.09	-0.7%	4.5	4.5	-0.03	-0.7%
103-2	4.5	4.5	-0.03	-0.7%	4.5	4.6	-0.09	-2.0%	13.5	13.6	-0.07	-0.5%	4.5	4.6	-0.06	-1.3%
103-3	4.5	4.5	0	0.0%	4.5	4.5	0	0.0%	13.5	13.6	-0.05	-0.4%	4.5	4.6	-0.06	-1.3%
104-1	7.0	6.9	0.12	1.7%	10.0	10.1	-0.11	-1.1%	7.0	7.0	0.04	0.6%	10.0	10.0	-0.01	-0.1%
104-2	7.0	7.3	-0.27	-3.9%	10.0	10.0	0.01	0.1%	7.0	7.1	-0.13	-1.9%	10.0	10.1	-0.1	-1.0%
104-3	7.0	6.9	0.08	1.1%	10.0	10.1	-0.09	-0.9%	7.0	7.0	-0.03	-0.4%	10.0	10.0	0.04	0.4%
105-1	4.5	4.5	0.01	0.2%	13.5	13.6	-0.05	-0.4%	4.5	4.6	-0.09	-2.0%	4.5	4.6	-0.07	-1.6%
105-2	4.5	4.5	0.02	0.4%	13.5	13.5	-0.02	-0.1%	4.5	4.5	-0.02	-0.4%	4.5	4.5	-0.03	-0.7%
105-3	4.5	4.5	0	0.0%	13.5	13.5	-0.02	-0.1%	4.5	4.6	-0.05	-1.1%	4.5	4.5	-0.04	-0.9%
106-1	10.0	9.9	0.07	0.7%	7.0	7.0	0.01	0.1%	7.0	7.1	-0.07	-1.0%	10.0	10.1	-0.1	-1.0%
106-2	10.0	9.9	0.07	0.7%	7.0	7.1	-0.08	-1.1%	7.0	7.1	-0.11	-1.6%	10.0	10.1	-0.05	-0.5%
106-3	10.0	10.1	-0.09	-0.9%	7.0	7.1	-0.13	-1.9%	7.0	7.0	-0.03	-0.4%	10.0	10.1	-0.07	-0.7%
107-1	7.0	7.2	-0.24	-3.4%	10.0	10.0	-0.02	-0.2%	7.0	7.1	-0.06	-0.9%	10.0	10.1	-0.06	-0.6%
107-2	7.0	7.3	-0.26	-3.7%	10.0	10.0	-0.04	-0.4%	7.0	7.1	-0.1	-1.4%	10.0	10.1	-0.12	-1.2%
107-3	7.0	7.3	-0.27	-3.9%	10.0	10.0	0	0.0%	7.0	7.1	-0.06	-0.9%	10.0	10.0	-0.04	-0.4%
108-1	13.5	13.6	-0.05	-0.4%	4.5	4.5	0.03	0.7%	4.5	4.5	-0.02	-0.4%	4.5	4.5	0.01	0.2%
108-2	13.5	13.8	-0.26	-1.9%	4.5	4.5	-0.04	-0.9%	4.5	4.5	-0.04	-0.9%	4.5	4.6	-0.06	-1.3%
108-3	13.5	13.8	-0.32	-2.4%	4.5	4.6	-0.06	-1.3%	4.5	4.5	-0.04	-0.9%	4.5	4.6	-0.07	-1.6%
109-1	13.5	13.6	-0.11	-0.8%	4.5	4.5	0.04	0.9%	4.5	4.5	-0.02	-0.4%	4.5	4.5	-0.01	-0.2%
109-2	13.5	13.7	-0.15	-1.1%	4.5	4.5	-0.02	-0.4%	4.5	4.5	-0.01	-0.2%	4.5	4.5	-0.03	-0.7%
109-3	13.5	13.6	-0.07	-0.5%	4.5	4.4	0.06	1.3%	4.5	4.4	0.06	1.3%	4.5	4.5	0.03	0.7%
110-1	10.0	10.3	-0.25	-2.5%	7.0	7.1	-0.08	-1.1%	10.0	10.0	-0.04	-0.4%	7.0	7.1	-0.06	-0.9%
110-2	10.0	10.2	-0.17	-1.7%	7.0	7.1	-0.05	-0.7%	10.0	10.1	-0.05	-0.5%	7.0	7.1	-0.09	-1.3%
110-3	10.0	10.2	-0.23	-2.3%	7.0	7.0	0	0.0%	10.0	10.0	-0.01	-0.1%	7.0	7.0	0.01	0.1%
111-1	10.0	9.9	0.09	0.9%	7.0	7.1	-0.08	-1.1%	7.0	7.1	-0.06	-0.9%	10.0	10.0	-0.01	-0.1%
111-2	10.0	10.1	-0.11	-1.1%	7.0	7.1	-0.13	-1.9%	7.0	7.0	-0.02	-0.3%	10.0	10.0	0	0.0%
111-3	10.0	10.0	0	0.0%	7.0	7.0	-0.04	-0.6%	7.0	7.0	-0.03	-0.4%	10.0	10.0	-0.03	-0.3%
112-1	4.5	4.5	-0.01	-0.2%	13.5	13.6	-0.1	-0.7%	4.5	4.6	-0.07	-1.6%	4.5	4.6	-0.05	-1.1%
112-2	4.5	4.5	0.02	0.4%	13.5	13.6	-0.1	-0.7%	4.5	4.5	0	0.0%	4.5	4.5	-0.03	-0.7%
112-3	4.5	4.4	0.14	3.1%	13.5	13.5	-0.01	-0.1%	4.5	4.6	-0.08	-1.8%	4.5	4.6	-0.08	-1.8%
113-1	10.0	10.0	-0.01	-0.1%	7.0	7.1	-0.13	-1.9%	10.0	10.0	-0.01	-0.1%	7.0	7.0	-0.01	-0.1%
113-2	10.0	10.1	-0.06	-0.6%	7.0	7.1	-0.09	-1.3%	10.0	10.1	-0.08	-0.8%	7.0	7.1	-0.06	-0.9%
113-3	10.0	10.1	-0.06	-0.6%	7.0	7.0	-0.04	-0.6%	10.0	10.0	-0.03	-0.3%	7.0	7.0	-0.04	-0.6%
114-1	4.5	4.5	0	0.0%	4.5	4.6	-0.06	-1.3%	13.5	13.6	-0.05	-0.4%	4.5	4.5	-0.03	-0.7%
114-2	4.5	4.4	0.08	1.8%	4.5	4.6	-0.12	-2.7%	13.5	13.6	-0.08	-0.6%	4.5	4.6	-0.09	-2.0%
114-3	4.5	4.5	-0.04	-0.9%	4.5	4.6	-0.06	-1.3%	13.5	13.5	-0.04	-0.3%	4.5	4.5	-0.03	-0.7%
115-1	4.5	4.4	0.13	2.9%	4.5	4.5	0.01	0.2%	4.5	4.5	0.04	0.9%	13.5	13.6	-0.06	-0.4%
115-2	4.5	4.3	0.17	3.8%	4.5	4.5	-0.02	-0.4%	4.5	4.5	-0.03	-0.7%	13.5	13.6	-0.06	-0.4%
115-3	4.5	4.2	0.26	5.8%	4.5	4.6	-0.08	-1.3%	4.5	4.6	-0.05	-1.1%	13.5	13.6	-0.1	-0.7%
202-1	5.0	5.0	-0.02	-0.4%	8.0	8.5	-0.52	-6.5%	13.5	13.5	-0.03	-0.2%	-	-	-	-
202-2	5.0	5.1	-0.05	-1.0%	8.0	8.5	-0.51	-6.4%	13.5	13.6	-0.05	-0.4%	-	-	-	-
203-1	8.5	8.4	0.06	0.7%	13.5	13.5	-0.04	-0.3%	5.0	5.1	-0.1	-2.0%	-	-	-	-
203-2	8.5	8.5	0.05	0.6%	13.5	13.5	0.02	0.1%	5.0	5.1	-0.06	-1.2%	-	-	-	-
204-1	13.0	13.2	-0.15	-1.2%	8.0	8.0	0.04	0.5%	5.0	5.0	-0.01	-0.2%	-	-	-	-
204-2	13.0	13.2	-0.21	-1.6%	8.0	8.0	0.03	0.4%	5.0	5.1	-0.05	-1.0%	-	-	-	-
205-1	13.0	13.1	-0.11	-0.8%	5.0	5.0	-0.02	-0.4%	8.0	7.9	0.06	0.7%	-	-	-	-
205-2	13.0	13.2	-0.18	-1.4%	5.0	5.1	-0.06	-1.2%	8.0	7.9	0.08	1.0%	-	-	-	-
206-1	8.0	8.2	-0.17	-2.1%	13.0	13.2	-0.23	-1.8%	5.0	5.1	-0.05	-1.0%	-	-	-	-
206-2	8.0	8.2	-0.24	-3.0%	13.0	13.2	-0.23	-1.8%	5.0	5.0	-0.02	-0.4%	-	-	-	-
207-1	8.0	8.0	-0.02	-0.2%	5.0	5.0	-0.02	-0.4%	13.0	12.9	0.07	0.5%	-	-	-	-
207-2	8.0	7.9	0.08	1.0%	5.0	5.1	-0.08	-1.6%	13.0	12.9	0.12	0.9%	-	-	-	-
210-1	8.5	8.2	0.26	3.1%	5.0	5.0	-0.01	-0.2%	0.0	0.0	-0.01	-	13.5	13.4	0.1	0.7%
210-2	8.5	8.3	0.23	2.7%	5.0	5.1	-0.12	-2.4%	0.0	0.1	-0.05	-	13.5	13.4	0.06	0.4%
211-1	5.0	5.1	-0.12	-2.4%	13.5	13.5	-0.03	-0.2%	0.0	0.0	-0.03	-	8.5	8.6	-0.06	-0.7%
211-2	5.0	5.2	-0.17	-3.4%	13.5	13.6	-0.06	-0.4%	0.0	0.0	-0.02	-	8.5	8.5	-0.03	-0.4%
212-1	13.0	13.0	0	0.0%	5.0	5.0	0.03	0.6%	0.0	0.0	-0.02	-	8.0	8.0	0	0.0%
212-2	13.0	13.1	-0.09	-0.7%	5.0	5.1	-0.07	-1.4%	0.0	0.0	-0.01	-	8.0	8.0	-0.03	-0.4%
213-1	13.0	13.1	-0.11	-0.8%	5.0	5.0	-0.04	-0.8%	0.0	0.0	0	-	8.0	8.0	-0.03	-0.4%
213-2	13.0	13.2	-0.17	-1.3%	5.0	5.0	-0.04	-0.8%	0.0	0.1	-0.05	-	8.0	8.1	-0.09	-1.1%
214-1	8.0	8.1	-0.06	-0.7%	13.0	13.1	-0.1	-0.8%	0.0	0.0	-0.02	-	5.0	5.1	-0.05	-1.0%
214-2	8.0	8.0	-0.03	-0.4%	13.0	13.1	-0.06	-0.5%	0.0	0.0	-0.02	-	5.0	5.1	-0.11	-2.2%
215-1	8.0	7.9	0.08	1.0%	5.0	5.0	-0.04	-0.8%	0.0	0.0	-0.02	-	13.0	13.1	-0.1	-0.8%
215-2	8.0	7.9	0.09	1.1%	5.0	5.0	0	0.0%	0.0	0.0	-0.01	-	13.0	13.1	-0.06	-0.5%
218-1	7.0	7.0	-0.04	-0.6%	0.0	0.0	-0.02	-	5.0	5.0	-0.01	-0.2%	12.0	12.1	-0.11	-0.9%
218-2	7.0	6.9	0.09	1.3%	0.0	0.0	0	-	5.0	5.1	-0.06	-1.2%	12.0	12.1	-0.1	-0.8%
219-1	7.0	7.2	-0.15	-2.1%	0.0	-0.0	0.03	-	12.0	12.1	-0.05	-0.4%	5.0	5.0	0	0.0%
219-2	7.0	7.1	-0.09	-1.3%	0.0	-0.0	0.01	-	12.0	12.0	-0.03	-0.2%	5.0	5.1	-0.05	-1.0%
220-1	12.0	12.0	0.01	0.1%	0.0	-0.0	0.03	-	5.0	5.0	0.01	0.2%	7.0	7.0	0.03	0.4%
220-2	12.0	12.1	-0.09	-0.7%	0.0	-0.0	0.03	-	5.0	5.0	0.01	0.2%	7.0	7.0	0.04	0.6%
221-1	12.0	12.2	-0.18	-1.5%	0.0	0.0	0	-	5.0	5.1	-0.07	-1.4%	7.0	7.1	-0.07	-1.0%
221-2	12.0	12.2	-0.23	-1.9%	0.0	-0.0	0.03	-	5.0	5.1	-0.08	-1.6%	7.0	7.1	-0.08	-1.1%
222-1	7.0	7.1	-0.11	-1.6%	0.0	-0.0	0.02	-	12.0	12.0	0.01	0.1%	5.0	5.1	-0.08	-1.6%
222-2	7.0	7.2	-0.18	-2.6%	0.0	0.0	0	-	12.0	12.1	-0.07	-0.6%	5.0	5.0	0	0.0%
223-1	7.0	6.9	0.11	1.6%	0.0	-0.0	0.03	-	5.0	5.0	0	0.0%	12.0	12.0	0	0.0%
223-2	7.0	6.8	0.19	2.7%	0.0	0.0	0	-	5.0	5.1	-0.06	-1.2%	12.0	12.0	-0.01	-0.1%
302-1	10.0	10.2	-0.16	-1.6%	10.0	10.0	-0.04	-0.4%	0.0	-0.0	0.01	-	-	-	-	-
302-2	10.0	10.1	-0.12	-1.2%	10.0	10.1	-0.06	-0.6%	0.0	0.0	-0.02	-	-	-	-	-
303-1	10.0	10.1	-0.1	-1.0%	10.0	10.1	-0.05	-0.5%	0.0	0.0	-0.02	-	-	-	-	-
303-2	10.0	10.1	-0.14	-1.4%	10.0	10.0	0	0.0%	0.0	-0.0	0.01	-	-	-	-	-
306-1	6.0	6.2	-0.17	-2.8%	0.0	0.0	-0.01	-	6							

（3）遷移制御実験結果

表 3.2.5 に示した、連続して異なる流量バランスに遷移制御させた実験結果を以下に報告する。なお、同結果は図 5.2.8 に示す。

- 実験番号 302 → 204 に遷移（0:02:50～0:04:40）
熱ルータ A（受入）、熱ルータ B（供給）が運転している状態に、供給モードで熱ルータ C を追加した。既存の流れは大きな乱れが発生する事無く、スムーズに状態が移行されている。
- 番号 204 → 107 に遷移（0:04:40～0:08:50）
熱ルータ A（受入）、熱ルータ B（供給）、熱ルータ C（供給）が運転している状態に、受入モードで熱ルータ D を追加した。こちらも流れに大きな乱れが発生する事無く、スムーズに状態の移行がされている。
- 実験番号 107 → 204 に遷移（0:08:50～0:11:20）
熱ルータ 4 台が運転している状態から、熱ルータ D（受入）を停止させた。熱ルータ D を停止させた直後に、送りモードである熱ルータ B、C の流量が急激に低下する現象が確認された。その後 B、C 共に 1 分以内に目的の流量に復帰している。一方で受入モードの熱ルータ A については流量の大きな乱れは見られなかった。
- 実験番号 204 → 302 に遷移（0:08:50～0:11:20）
熱ルータ 3 台が運転している状態から、熱ルータ C（供給）を停止させた。熱ルータ C を停止させた直後に、供給モードである熱ルータ B の流量が急激に上昇する現象が確認された。その後 1 分以内に目標の流量に復帰している。一方で受入モードの熱ルータ A については流量の大きな乱れは見られなかった。
- 達成精度と所要時間
設定流量と計測流量の誤差の最大は、表 3-2-8 から最大 5.8%、平均 0.6% で、全ての組合せに対する目標誤差 10% 以内で達成できることを確認した。また、停止状態から異なる流量バランス状態に遷移させた場合、全熱ルータ 4 台の間を融通する遷移制御をさせた場合でも、概ね 3 分程度で流量が安定する事を確認できた。

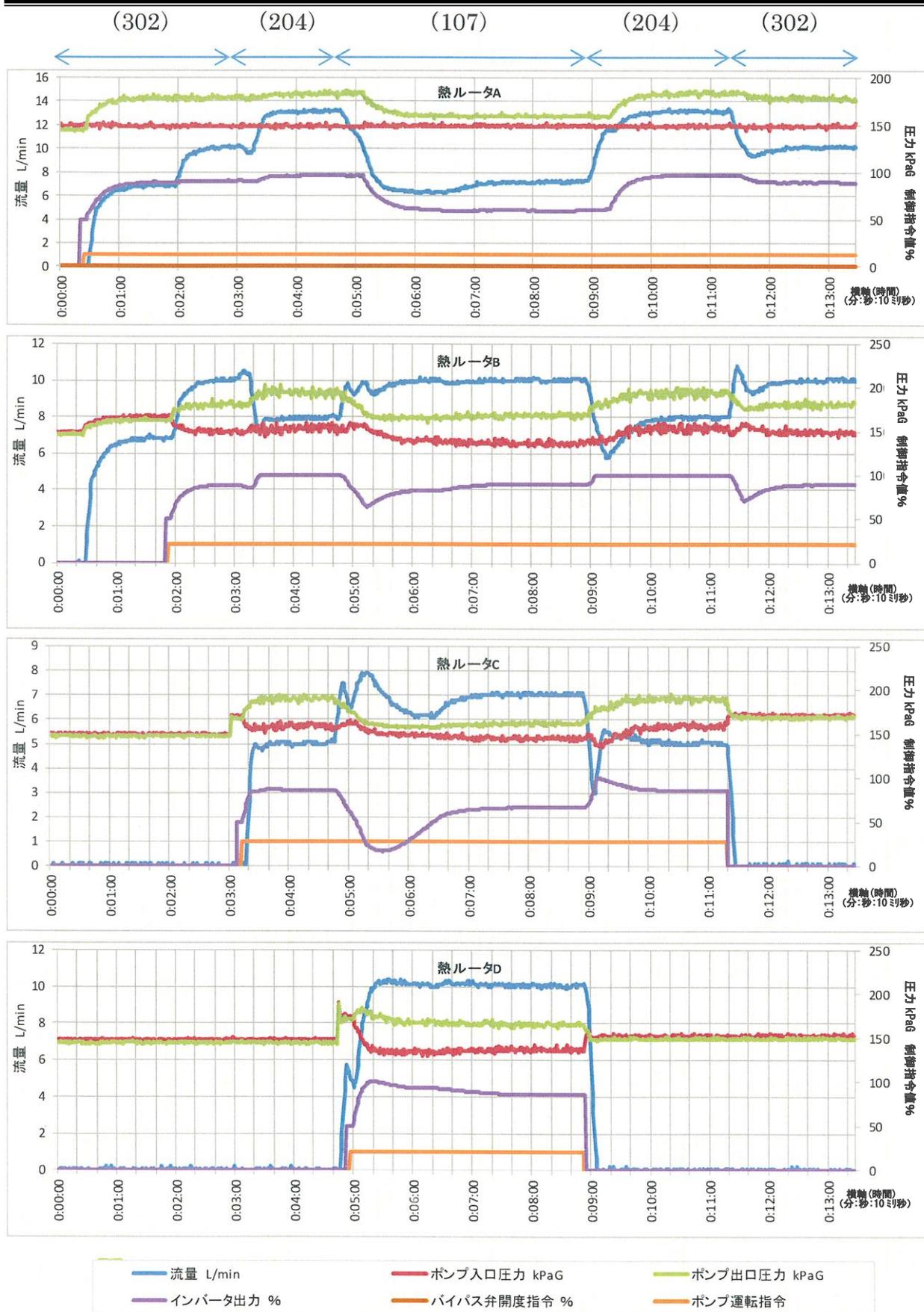


図 3.2.8 遷移制御実験結果

3.3.8 実験結果まとめ

本章では、双方向熱融通を行う SHG の主要な要素技術である熱ルータが任意のループ管路の設定や更に異なるループ管路の設定へ移行ができるか、4 台の熱ルータ実験装置を作り、相互水搬送制御を行う通水試験で確認した。確認できた内容は以下の通り。

- (1) 実験は、最初に 4 台の熱ルータを使って、設定した実験の組合せ毎に手でインバータ出力を操作し、目的の流量バランスの状態を保ち、その際の各熱ルータの流量・圧力状態を確認、更に全体の圧力補正用の熱ルータの A の制御圧力値を計測、以上を設定した組合せのループ管路を形成する制御目標値と確認した。
- (2) 確認した制御目標値を設定し、全熱ルータ停止した状態から自動制御にて再現する、自動化実験を行い、その設定状態の設定流量と計測流量との差を計測、誤差は最大で 5.8%、平均で 0.6% であった。当初設定した自動制御で達成した目標誤差が 10% 以内であるので、同目標以下である事を確認した。又、移行時間についても、自動制御で遷移・安定するまでの許容時間を 10 分以内と目標設定したが、3 分程度で遷移できた。以上から、異なる流量バランスに遷移させることは可能と考えられる。
- (3) 以上の結果から、流量制御と圧力制御を連携させる事によって、任意のループ管路を設定する制御は可能であると考えられる。
- (4) 実験装置のポンプ定格容量は 15ℓ/min、配管口径 20A (JIS G 3459 Sch40、内径 21.4mm)、であるので、水の動粘性係数を ν とすれば、レイノルズ数は $Re = VD/\nu$ (V : 平均流速(m/s)、 D : 管の直径(m)) から、 $Re = 0.0149/\nu$ 。街区レベルの熱融通配管も同じレイノルズ数とすれば、配管内流速は 50A (内径 52.7mm) で、 $0.0149/\nu = V \times 0.0527/\nu$ から、 $V \approx 0.28\text{m/s}$ 、200A (内径 199.9mm) では、 $0.00149/\nu = V \times (0.1999)/\nu$ から $V \approx 0.08\text{m/s}$ となる。一般的に冷温水配管内の流速は 2~3m/s 以下である³⁻³⁾ので、同条件を満たし、レイノルズの相似則が成立すると考えられる。以上から今回行った熱ルータ制御実験結果を複数建物間レベルに適用する事は可能であると思われる。以上から、熱ルータを用いた熱融通制御は、メイン配管にバルブ設置が不要となり、少ない配管抵抗で、容易に熱融通の実行・停止の切替が可能で、熱融通先の組合せ変更できる事が確認できた。

3.3.9 実験から得られた知見と今後の展望

実験から 4 台の熱ルータを相互に連携させ、流量制御と圧力制御を行う事で、任意のループ管路設定が可能である事が分かった。又、設定した目標 10% 以内の流量誤差及び、遷移時間 10 分以内で制御が可能な事も確認できた。SHG は熱の受入側が補完運転可能な自己熱源を持っているので、前記の流量誤差・遷移時間であれば十分に補正対応可能と考える。更に、熱ルータを使った熱融通は配管口径 50A~200A の建物間熱融通レベルで適用可能であることをレイノルズの相似則で確認した。熱媒である水は非圧縮性流体であるので、実機スケールでは配管容量の影響に比べて、ポンプの出力変動速度やバルブの動作時間の影響が大きいと考えられるが、DHC や個別ビルの空調・給湯システムで使用されている機器であれば、応答速度で問題が起こるとは考えにくいと思われる。そして、制御に使用する計測機器は DHC や各ビルの施設で使用されている実績のある機器であれば特段問題はないと考えた。

今回の実験から、予め設定した条件を複数の熱ルータに与えて連携させ、管路全体を制御し、熱融通ネットワークが構築できることを確認した。言い換えるならば、中央から熱媒の圧力・流量を制御する事で、主配管にバルブ無しで熱融通配管の設計圧力内の複数の建物間で、任意のループ管路が構築できる事が分かった。なお、同条件を満たせば、後付けでSHGに加わることも可能である。

以上の特徴を活かすために、インターネット等の情報通信技術分野において、情報通信用ルータを使って後付でネットワークに自動接続が可能となっているが、同様に、構築されたSHGに新たに建物が加わる場合、新たに加わった建物の熱ルータと既存SHG側の熱ルータが、それぞれ制御に必要な情報（熱融通可能量や配管延長、同口径、ポンプ仕様等）を自動的に共有し、その後、指示した熱融通情報（熱融通の量や時間帯）に基づき制御を行うロジックについて開発を進めたいと考えている。

【参考文献】

- 3-1) 荒木他: スマートヒートグリッド用熱ルータの開発 第一報 4台の熱ルータ間での相互水搬送実験報告, 空気調和・衛生工学会大会学術論文集, pp309-312, 2015.9.16~18(大阪)
- 3-2) 坂東修著: Excel で解く配管とポンプの流れ, (株)オーム社, 2011.2.25
- 3-3) (一)都市環境エネルギー協会: 地域冷暖房技術手引書(改定第4版), 2013.10

第4章 建物間熱融通に関する 実証研究

第4章 建物間熱融通に関する実証研究

4.1 はじめに

本章では、建物間熱融通制御に関して実証試験結果から確認する。具体的には、分散型エネルギー複合最適化実証研究⁴⁻¹⁾の中で行った、建物間における太陽熱とコージェネレーションシステム（以下 CGS）廃熱の熱融通制御（疑似的な双方向熱融通）を行い、太陽熱の利用率を高めるため余剰分を融通し、同熱が不足する場合は CGS 廃熱で補完する制御を行い、その有効性を確認した。合わせて、太陽熱や CGS 廃熱を優先的に活用する熱源統合制御に関する実証も行い、評価した。

4.2 実証研究概要

本実証研究は、低炭素社会の実現に向けた分散型エネルギーの最適なエネルギーシステム確立する事を目的に実施した。

具体的には、都内荒川区内の東京ガス千住事業所を対象とした特定エリアにおける実証事業で行った実証研究のうち、SHG に活用が期待される「建物間における太陽熱とコージェネレーション廃熱の熱融通制御（疑似的な双方向熱融通）」及び「熱源統合制御」について確認した。同実証研究を、以下「千住スマートエネルギーネットワーク（以下、千住 SEN）」と記載する。

千住 SEN における実証事業は図 4.2.1 及び図 4.2.2 に示す様に、東京ガス千住テクノステーション内の A 館/B 館/暮・楽・創ハウス（住宅モデルハウス）に熱を供給するエネルギーセンター（以下「EC」と公道を挟んで隣接する荒川区立特別養護老人ホーム「サンハイム荒川」）の建物間において、CGS と再生可能エネルギーを組合せた熱と電力を融通するシステムを構築して実施した。⁴⁻²⁾⁴⁻³⁾⁴⁻⁴⁾⁴⁻⁵⁾⁴⁻⁶⁾⁴⁻⁷⁾

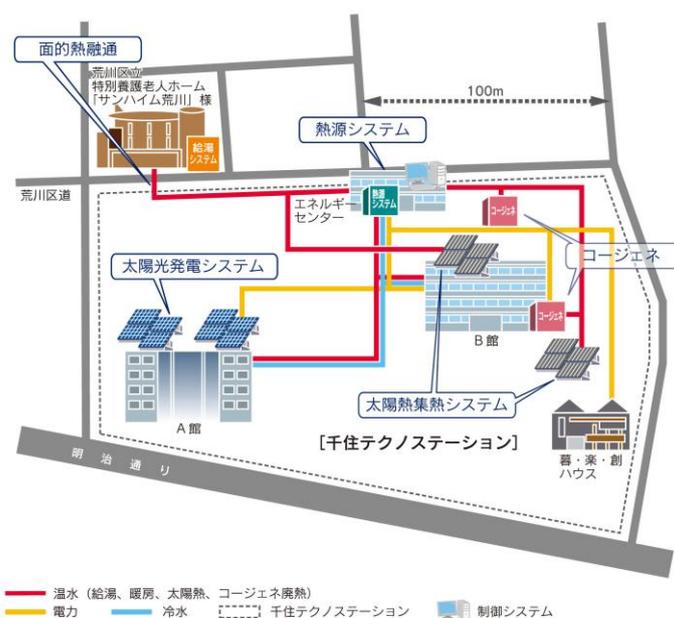


図 4.2.1 千住 SEN 建物レイアウトと導入設備配置

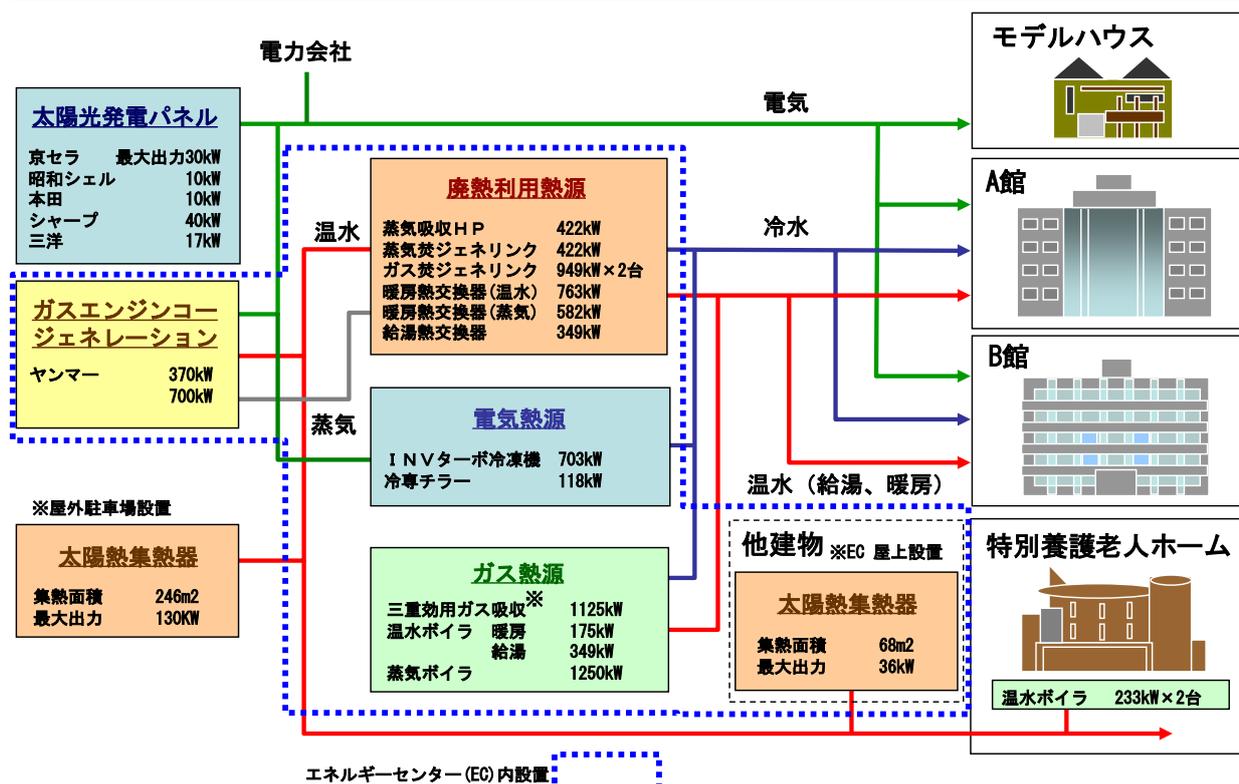


図 4.2.2 千住 SEN エネルギーシステムフロー

4.3 建物間熱融通制御に関する検証

4.3.1 実証設備

熱需要密度の高いエリアを一体としてとらえ、熱を面的に利用する事で、エネルギーの有効利用と再生可能エネルギー等を活用したシステムの導入が期待される。そこで、千住 SEN では、エネルギーセンター屋上に設置した太陽熱集熱装置（隣接する特老ホームが太陽熱を優先的に利用する事を検討したが、既築でかつ 24 時間施設利用がある等の施工に際して制約条件があったため、特老ホームが同装置由来の太陽熱を優先して利用する配管接続を施している）と CGS 廃熱を特老ホームと千住テクノステーション内の EC で融通する実証を行い、建物間熱融通制御による省エネ効果・CO₂削減効果の確認及び、太陽熱の有効活用の可能性の検証を行った。

4.3.2 建物間熱融通制御の概要

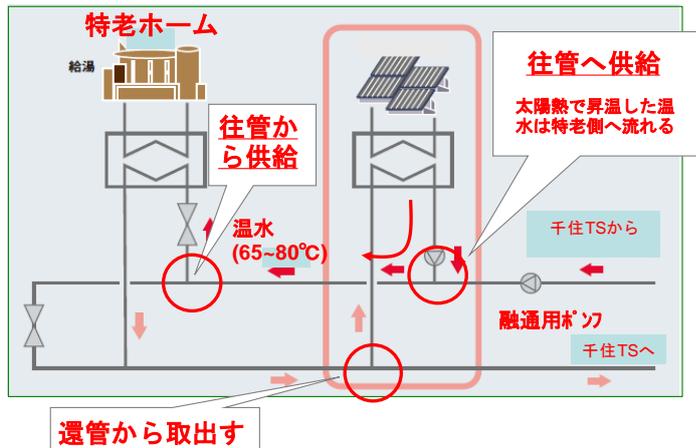


図 4.3.1 特老ホームへの熱融通ネットワークの概要

図 4.3.1 に隣接する特老ホームと EC との熱融通の流れを示す。前述のように EC 屋上に設置した太陽熱集熱装置からの熱を優先的に特老ホームは利用し、余剰分発生時には EC 側に供給する。そして、特老ホームの熱需要に対し天候の変動や夜間等、太陽熱の集熱量が不足する場合は、EC の CGS 廃熱を熱融通した。なお、既存の建物内給湯配管との接続であった為、図 4.3.2 の様に熱交換器を介して施設内で利用した。

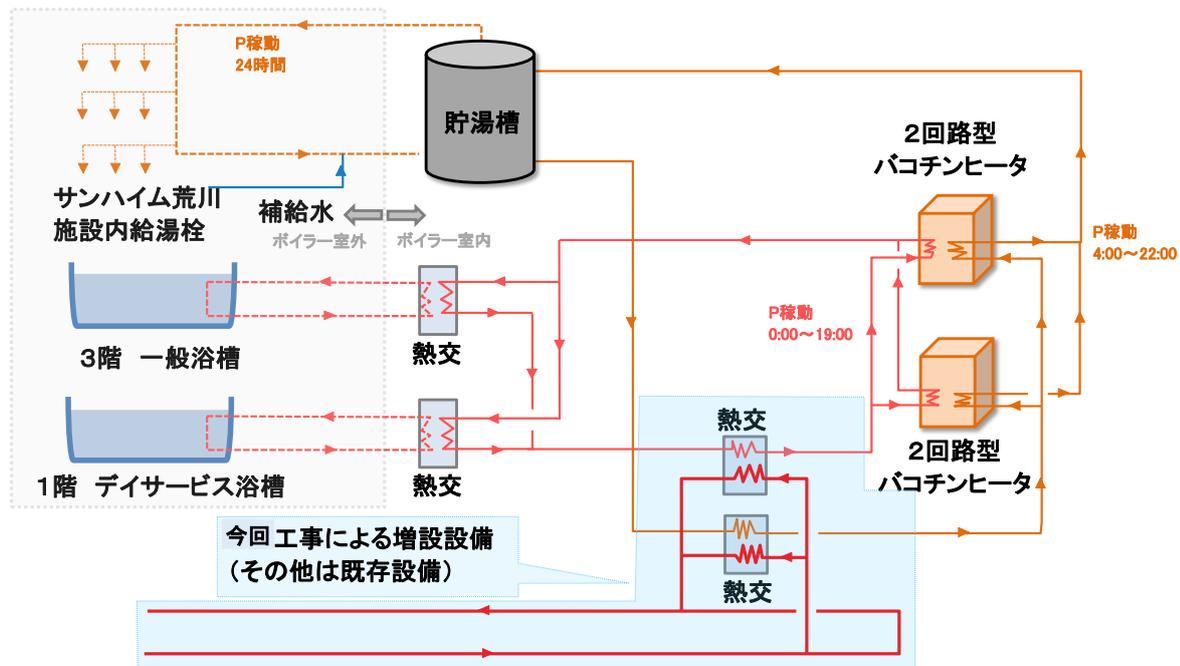


図 4.3.2 特老ホーム内給湯設備イメージ図

4.3.3 熱融通配管の道路占用

千住 SEN の熱融通配管については、荒川区土木部と協議し「建物間融通」の扱いで、区道の占用許可が認められた。

熱融通配管の道路占用に関する取扱いは、道路法第 32 条で「水管、下水道管、ガス管、その他これに類する物件」で位置づけられており、同配管はその他これに類するもの扱いと判断された。本実証では公道に敷設する熱融通配管について、道路管理者（荒川区役所）に個別占用許可届出を行い、許可を受けることができた。これは、1996 年 6 月に旧建設省道路局路政課長通達によって、熱融通配管の道路占用について、上下水道、電気、ガス等の義務占用に準じた取扱いをしたと道路管

理者から説明を受けた。

4.3.4 建物間熱融通制御による効果の検証

(1) 建物間熱融通制御による省エネ・CO₂削減効果の検証

熱融通によって特老ホームで削減されるエネルギー量（ガス削減量：実測の受入熱量からボイラ効率 0.8 として算出）と、熱融通により追加的に投入したエネルギー量（実測の温水搬送動力・温水製造のためのエネルギー量）の差を算出する事で、一次エネルギー削減量・CO₂削減量の定量化を行った。なお、経済産業省・実証事業公募資料に基づき、一次エネルギー換算係数は、系統電力：9.68GJ/MWh、都市ガス：45.0MJ/m³N、再生可能エネルギー：0GJ/MWh、CO₂排出係数は、系統電力：0.69 kg-CO₂/kWh、都市ガス：51.0 kg-CO₂/GJ、再生可能エネルギー：0 kg-CO₂/GJ、を用いた。

【省エネ効果の計算方法】

省エネ効果＝①ガス削減量－（②温水製造エネルギー＋③搬送動力）

- ① ガス削減量：客先受入熱量をボイラ効率（0.8）で除して算出
- ② 温水製造エネルギー：CGS のガス消費量を電力、廃熱に分配配分（発電電力一次エネルギー消費量は系統電力と等価と仮定し、残りを廃熱分とした）
- ③ 搬送動力：熱融通ポンプの消費電力を一次エネルギー換算して算出

以上から、表 4.3.1 に示す様に、双方向熱融通による省エネ・CO₂削減効果は省エネ量 194GJ/年、CO₂削減量は 16t-CO₂/年となった。

表 4.3.1 建物間熱融通制御による省エネ・CO₂削減効果の評価結果

	双方向熱融通導入効果 (2011 年度実績)
特別養護老人ホーム給湯需要	733 GJ/年
熱融通量	257 GJ/年
太陽熱（自家消費分）	55 GJ/年
熱融通により削減されるボイラ一次エネルギー消費量	▲412 GJ/年
温水製造に要する一次エネルギー消費量	173 GJ/年
搬送動力による一次エネルギー消費量	45 GJ/年
省エネ量（省エネ率）	194 GJ/年（21%）
熱融通により削減されるCO ₂ 排出量	20,957 kg-CO ₂ /年
熱融通に発生するCO ₂ 排出量	5,161 kg-CO ₂ /年
CO₂削減量	15,796 kg-CO₂/年

結果、熱融通制御による特老ホームの省エネ・CO₂削減効果は、給湯需要 733GJ のうち、約 45%（312GJ/年）を熱融通受入分と太陽熱で賄い、省エネ率は 21%、CO₂削減率は 34%と大きな効果がある事を確認した（図 4.3.3）。また、太陽熱の余剰熱は太陽熱集熱量の 43%（55GJ/年）生じ、EC に熱融通した。

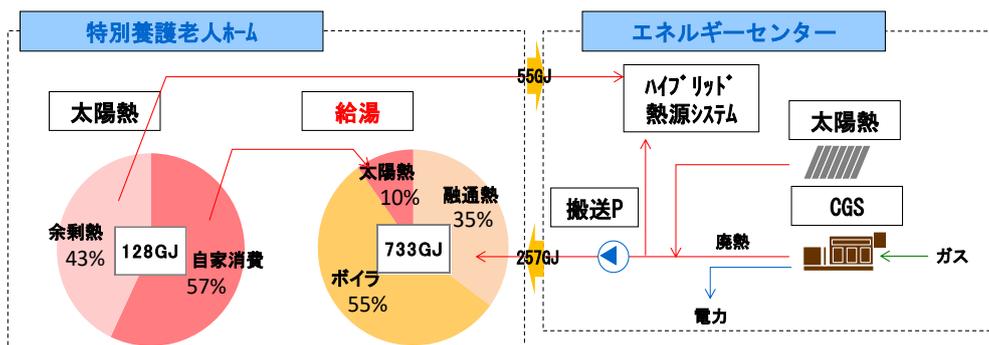


図 4.3.3 双方向熱融通量の内訳

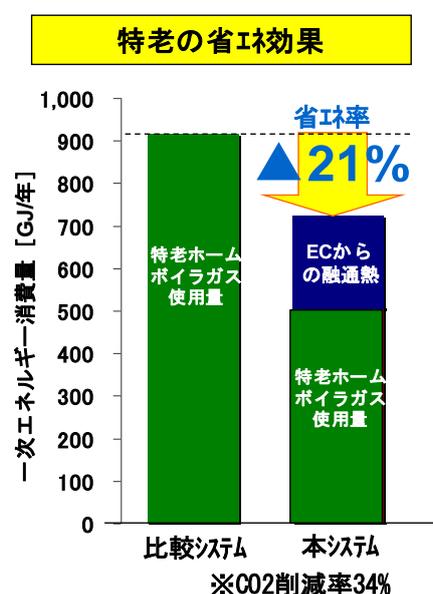


図 4.3.4 特別養護老人ホームの省エネルギー効果

(2) 太陽熱及び CGS 廃熱を活用した建物間熱融通制御の検証

熱融通制御技術の確認結果として、2011年9月28日データを代表日とし、千住 SEN 側設置太陽熱集熱量と日射量の関係を図 4.3.4 に、特別養護老人ホームにおける温熱需要と供給エネルギー源の内訳を図 4.3.5 の熱融通制御による稼働状況に示す。

特老ホームの給湯需要は、7:00～13:00、18:00～22:00 に発生している。7:00～13:00 の給湯需要は当該施設外の来訪者のデイサービス対応によるものである。午後の昼過ぎの時間帯は、施設の稼働率が下がるため、給湯需要が減り、18:00～22:00 の給湯需要は、施設居住者の風呂利用等の給湯需要が発生する特異な負荷パターンとなっている。

2011年9月28日は晴天であり、8:00～16:00 に安定した集熱量が確認できる。特老ホームにおける給湯需要が発生する 8:00～13:00 に自家消費を行い、需要が少ない 13:00～16:00 は太陽熱が余剰となり、EC へ融通している。一方、特老ホームに給湯需要があり、太陽熱集熱量では不足する時間帯は、EC から CGS 廃熱の余剰熱が融通されていることを確認した。以上の様に、建物間熱融通制御が技術的に実現可能であることが確認できた。

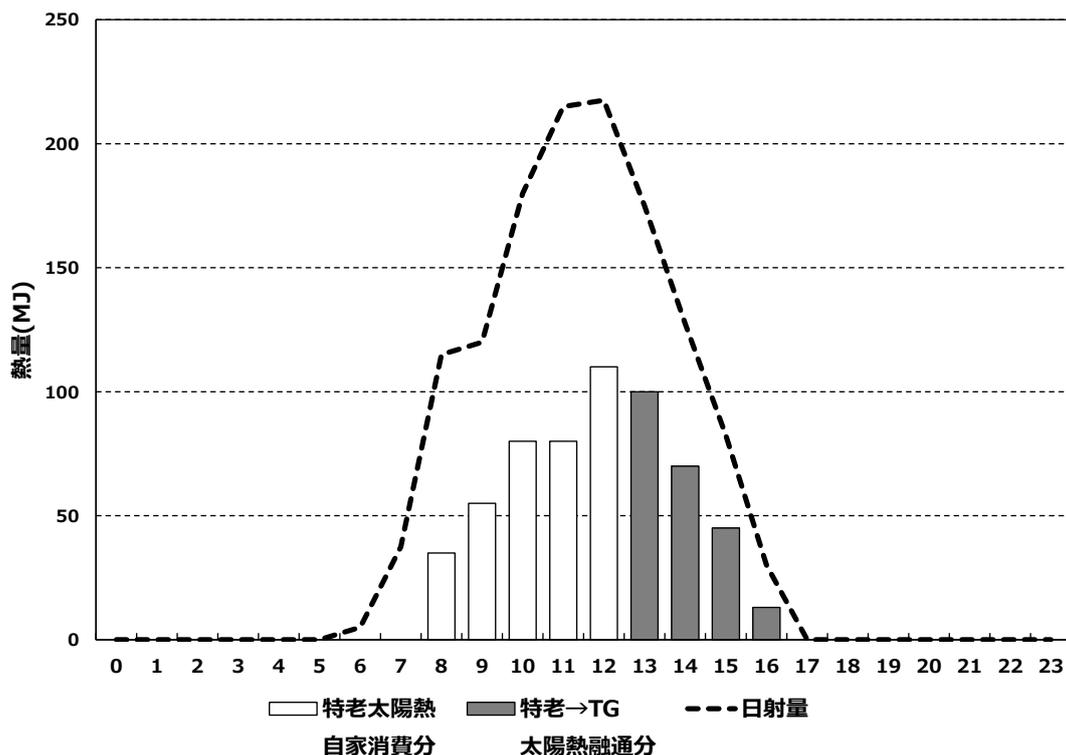


図 4.3.4 特別養護老人ホームにおける太陽熱集熱量と日射量 (2011/9/28)

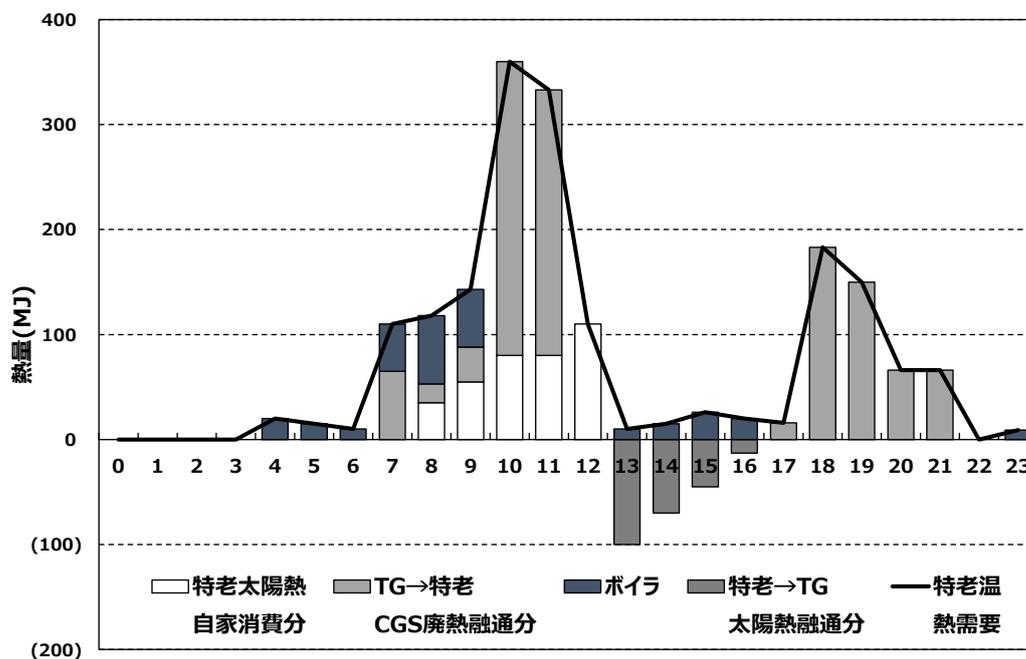


図 4.3.5 熱融通制御による状況 (2011/9/28)

特老ホームは午前中～昼前までと夕方～夜間にかけて給湯需要が発生する。一方、午後に給湯需要はないが太陽熱は集熱している (図 4.3.4)。そこで、給湯需要がある時間帯は、太陽熱を自家消費しつつ、隣接する EC に設置されている CGS 廃熱を受入する熱源運用を行った。午後は、給湯需要がないため、太陽熱が余剰熱となり、EC 側に供給した。従って、特老ホーム側から見ると、熱融

通に関して午前は受入、午後は供給、夕方は再び受入と熱融通を行った。なお、午後の時間帯に特老ホームには、少量ではあるが給湯需要があるが、本ケースでは太陽熱集熱装置が外部設置で EC 側を介さずに優先的に太陽熱を供給される様に接続されているが、太陽熱は外部からの熱を受入れる流れとなるため、自家消費した後に供給する事ができず、熱融通は供給・受入のいずれかを選択しなければならない。

4.4 熱源統合制御に関する実証評価

4.4.1 実証概要

設置スペースが十分に確保できない都心部において、太陽エネルギー等の再生可能エネルギーの活用を推進するために、単位面積当たりの太陽エネルギー収集量が多い太陽熱の活用は有効と考えられている。しかし、太陽熱出力が天候に影響を受け、熱であるため利用先も限定される事から、面的に活用されている事例は限定的となっている。そこで、CGS 廃熱と組合せて活用する事で、供給の安定性を確保し、更に、太陽熱や CGS 廃熱等のエネルギー消費原単位の低い熱源を優先的に選択する熱源を統合制御する事で、省エネ・CO₂削減が期待できると考えた。

そこで、気象条件によって変動する太陽熱、そして CGS 廃熱等のエネルギー消費原単位の低い熱を優先的に利用しながら、電力・都市ガスを最適に組合せて、冷温水を安定供給する熱源統合制御システムを構築し、その制御動作及び導入効果の実証を行った。

4.4.2 熱源統合制御の概要

任意の建物熱需要の条件下で、再生可能エネルギー等が天候変化によって変動する場合、CGS 廃熱と組合せて最大限活用し供給、更に不足する際には「電力」「ガス」でバックアップし、省エネな冷温熱製造を行う熱源台数制御を含む統合制御盤を製作して動作検証を行った。

熱源統合制御の考え方を図 4.4.1 に示す。図 4.4.1 の横軸はエネルギー消費原単位の低い順に使用するエネルギーの選択を表し、左から右の順に利用すべきである事を示している。具体的には、「再生可能エネルギー・未利用エネルギー」→「CGS 廃熱」→「CGS 電力」→「都市ガス」の順にエネルギーを利用する事が省エネルギーな熱源運用となると考えた。そこで前記選択の順にエネルギーを使用する複数の熱源機器を図 4.4.1 に示す上から順に稼働する制御とした。具体的には、建物熱需要の変化や天候の変動に対して再生可能エネルギーや CGS 廃熱が一定でない事を想定し、熱需要量・同供給量をリアルタイムに確認し、随時最適な熱源機の運転台数や冷温水ポンプ流量の設定を見直す仕様とした。これを「熱源統合制御」という。

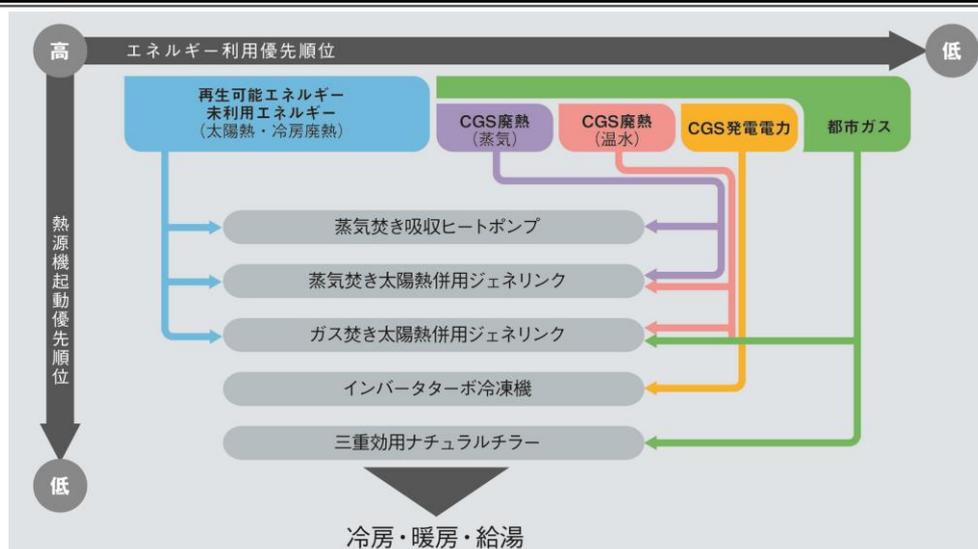


図 4.4.1 熱源統合制御（エネルギー利用優先順位と熱源起動優先順位）

4.4.3 熱源統合制御の効果確認

（１） 「通常の台数制御」と「熱源統合制御」の差異分析

「熱源統合制御」の導入効果を確認するため、「通常の台数制御」と「熱源統合制御」について、熱源調合制御を行った 2011 年実績冷房負荷データを元に、シミュレーションを行い、通常の台数制御との差異を確認、省エネルギー化を目的に太陽熱や CGS 廃熱の利用率向上を図った。

両制御による結果を比較すると、

- ① 太陽熱・CGS 廃熱による冷房出力は、「熱源統合制御」のほうが大きい。

「通常の台数制御」では、熱源の容量比により負荷按分比率が固定されるため、太陽熱や CGS 廃熱温水を最大活用する負荷率にジェネリンクを調整する事ができない。そこで「熱源統合制御」では、冷水ポンプをインバータ制御し、負荷按分比率を変える事で、ジェネリンクの太陽熱・CGS 廃熱温水の利用量が拡大し、最大限活用できる熱源負荷率に調整、結果、太陽熱・CGS 廃熱による冷熱出力割合が大きくなった。

- ② ジェネリンクのガス追焚モード OFF 機能による低炭素化

ジェネリンクは「通常の台数制御」では高負荷域でガスを使用するが、「熱源統合制御」はガス追焚モードを OFF とする。これは、「通常の台数制御」では、ジェネリンクの機能は CGS 廃熱等の温水が不足する場合、冷熱を安定供給するため、ガスによるバックアップ機能が働くが、「熱源統合制御」では、極力、都市ガスを使用しない様に、ジェネリンクのガスを強制 OFF モードとし、蒸気吸収ヒートポンプも蒸気弁開度制限を設定、廃熱利用しない場合にはガス追焚は行わない設定とした。

2011 年 8 月 9 日（火）の冷房負荷実績を元に、時刻別冷熱製造量と同エネルギー源内訳及び年間省エネルギーそして太陽熱と CGS 廃熱の利用率について「通常の台数制御」のシミュレーションで求めた結果と「熱源統合制御」の実績値の比較を図 4.4.2 に示す。

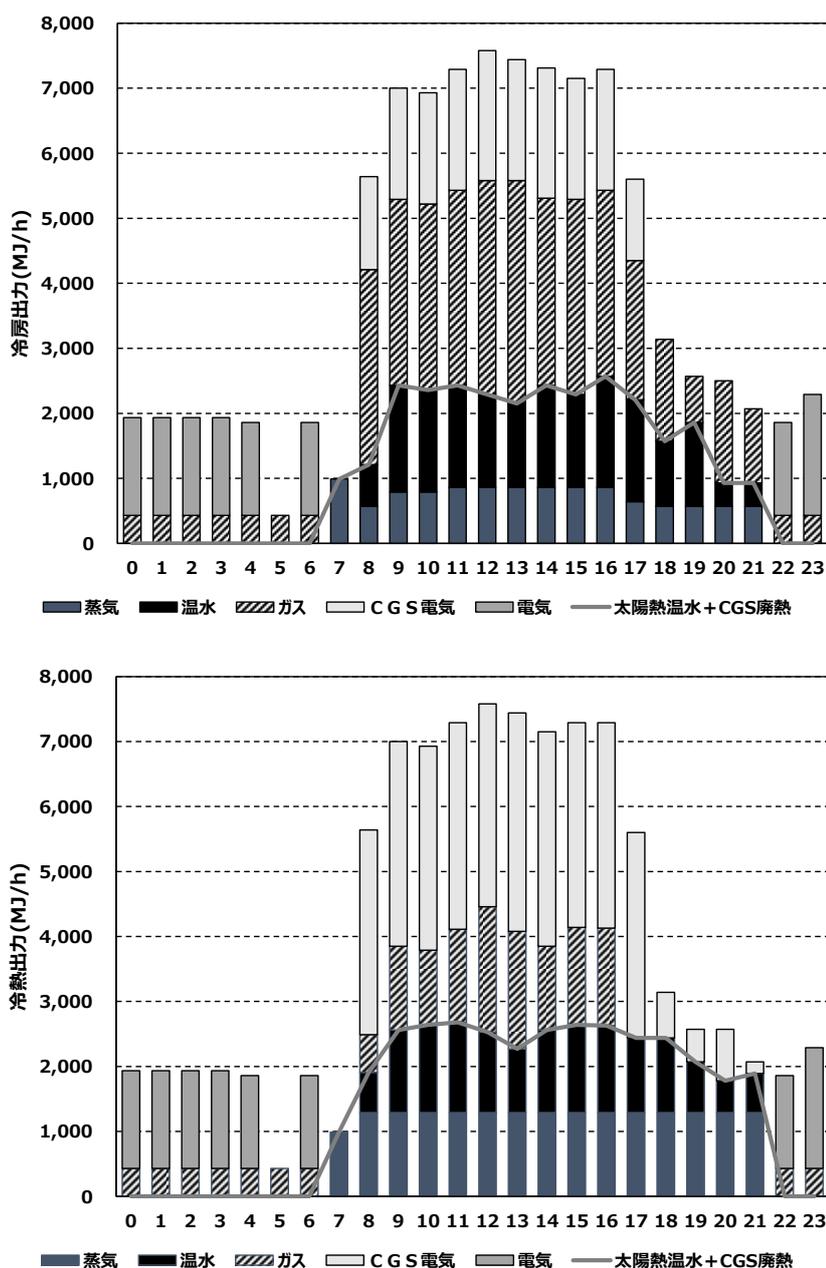


図 4.4.2 「台数制御(上)」と「熱源統合制御(下)」の時刻別冷房出力

以上から、「熱源統合制御」は「通常の台数制御」に比べて、太陽熱と CGS 廃熱の利用率が通常の「台数制御」が 87.2%に対し、「熱源統合制御」97.8%と比率で 12%程度向上した。結果、図 4.4.2 に示した様に、ジェネリンクのガス使用量が減少し、CGS 電力の使用割合が増え、7 時～22 時の CGS 発電電力及びガス由来の冷熱比率が通常の台数制御で 1:2 であったものが、5:2 と改善された CGS 発電由来のターボ冷凍機製造冷熱が増加した。

(2) 「熱源統合制御」の概要

「熱源統合制御」は、太陽熱や CGS 廃熱を最大限活用するため、ジェネリックが太陽熱や CGS 廃熱を最大活用する負荷率に調整する冷水流量を変えて、負荷按分比率調整を行っている。

具体的には、図 4.4.3 に示す様に、蒸気ジェネリックとガス焚ジェネリックの冷水流量を以下のように制御する。CGS 廃熱は蒸気及び温水の 2 系統取り出しとなっており、このうち、廃熱蒸気については蒸気吸収ヒートポンプで全量活用可能なため、蒸気焚ジェネリックが高負荷率で稼動した場合、CGS 廃熱蒸気だけでなく、ガス焚蒸気ボイラからの蒸気を消費する可能性がある。それを回避するため、蒸気焚ジェネリックは低負荷域で稼動させる必要がある。同様に、ガス焚ジェネリックも高負荷率で稼動した場合、熱源統合制御の起動順位が先の CGS 電力で稼動するターボ冷凍機に先行して、ガスによる追焚モードとなるため、低負荷率の温水モードで稼動してしまう。但し、他の全ての熱源が稼動しても冷熱負荷対応ができない場合にはガス焚モードで稼動させる。そこで、蒸気焚ジェネリックの冷水配管に冷水流量を調整するバルブを設けて、開度調整する事で、蒸気ボイラからの蒸気を消費する事にならない様に、冷水量を調整し、低負荷域での運転とすると共に、ガス焚ジェネリックには冷水一次ポンプをインバータ制御して低負荷域を選択し温水モードで稼動させるとした。(但し、高負荷運転が必要となった場合には、冷水を定格流量とし、ガス追焚モードで定格能力稼動できるようにしている) 2011 年 8 月 9 日の熱源統合制御を行った廃熱利用熱源の負荷率推移を図 4.4.4 に示す。

この冷水一次ポンプの INV 制御による負荷按分比率調整は、熱源を選択して負荷率を変える設定を行い、稼働率を高く設定する事が可能となる事から、SHG に応用して、熱融通量と熱融通受入側で補完運転する熱源を最適な負荷分担を行う制御に考えられる。

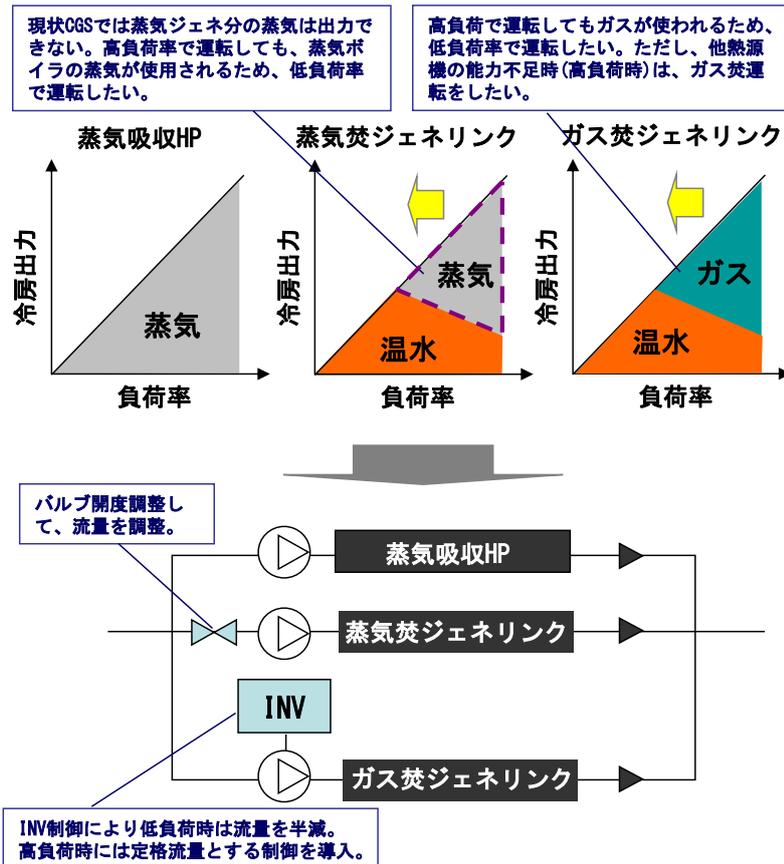


図 4.4.3 廃熱利用熱源負荷率調整の仕組み

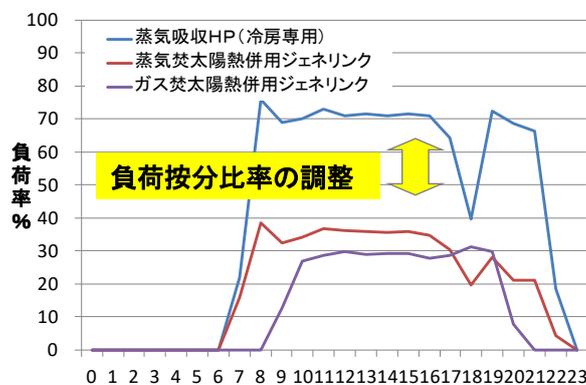


図 4.4.4 廃熱利用熱源負荷率の推移 (2011年8月9日)

(3) 夏期・中間期・冬期の代表日における「熱源統合制御」の稼動実績評価

「熱源統合制御」による、夏期・中間期・冬期の代表日における冷温水製造に要する時刻別のエネルギー源内訳推移、及び蒸気 (CGS 廃熱) や温水 (太陽熱・CGS 廃熱) の利用状況を図 4.4.5 (夏期代表日)、図 4.4.6 (中間期代表日)、図 4.4.7 (冬期代表日) に示す。夏期・中間期・冬期のいずれも、太陽熱・CGS 廃熱を優先的に活用した熱源制御ができています。又、中間期には蒸気吸収ヒートポンプが冷水製造時に発生する廃熱を暖房用の温水製造に有効活用し、不足する負荷対応を CGS 廃熱で補完している。

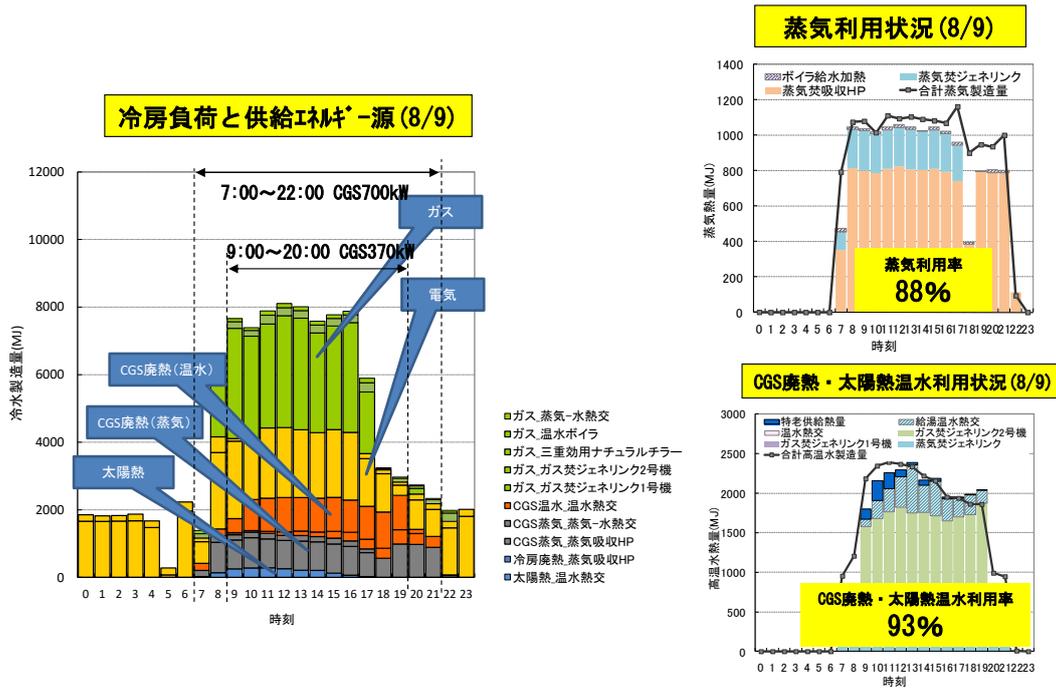


図 4.4.5 夏期代表日における稼動実績 (2011年8月9日)

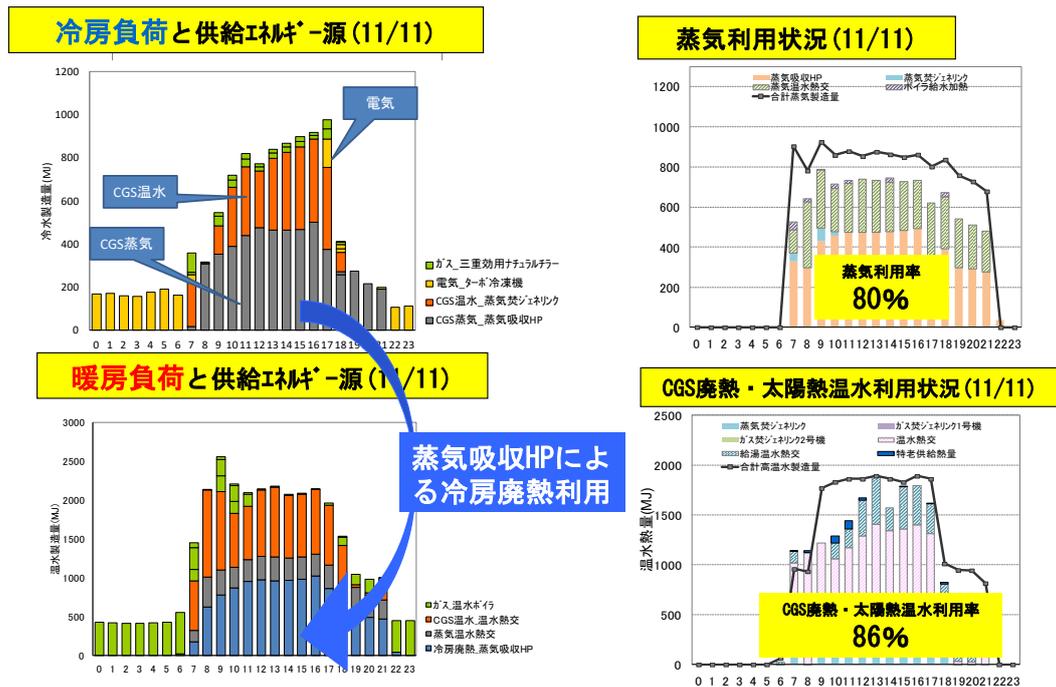


図 4.4.6 中間代表日における稼動実績 (2011年11月11日)

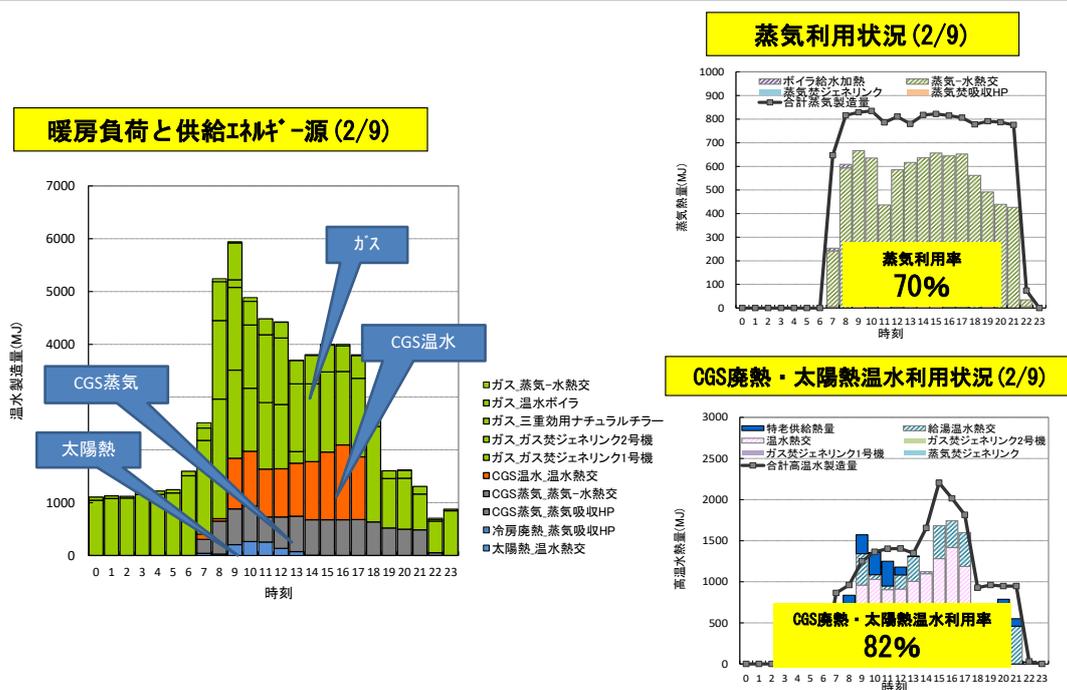


図 4.4.7 冬期代表日における稼働実績 (2012年2月9日)

4.5 まとめ

本章では、公道を挟んで隣接する建物間で太陽熱と CGS 廃熱による「双方向熱融通制御」に関する制御考え方、その導入効果と建物間熱融通の一類型である SHG に活用する「熱源統合制御」とを示した。

4.3 では、公道を挟んで隣接する特老ホームとエネルギーセンターの間で、特老ホーム側に模擬的に設置した様な配管接続し利用した太陽熱 (年間太陽熱集熱量 128GJ) のうち、57%を特老ホームで自家消費し、余剰熱分の 43%を EC 側に熱融通した。結果、特老ホームでは従前のガスボイラ方式に対して一次エネルギー消費量換算で省エネルギー率は 21%、CO₂ 削減率は 34%を確認した。

4.4 では、需要にあわせて、エネルギー消費量の少ない熱源を優先的に稼働させる熱源統合制御の導入効果検証を行った。結果、熱源統合制御を行う事で、通常の数制御に対して太陽熱と CGS 廃熱の利用率が 12%程度向上した。

【参考文献】

- 4-1) 永井猛/佐々木裕文/和田祐介/土橋亮太, 特定エリアにおけるスマートエネルギーネットワーク実証試験: 第1報千住スマートエネルギーネットワークの計画と目論見, 日本建築学会/学術講演梗概集 (関東) D-1,953-954
- 4-2) 永井猛/岡本和久/竹内由実/塚田龍也/渡部洋介/佐々木裕文/和田祐介/土橋亮太, スマートエネルギーネットワーク実証試験その1: 特定エリアにおけるスマートエネルギーネットワークの構築, 日本エネルギー学会/大会講演要旨集 (20), 284-285

-
- 4-3) 永井猛,佐々木裕文,和田祐介,土橋亮太. 特定エリアにおけるスマートエネルギーネットワーク実証事業について：(第1報) 千住スマートエネルギーネットワークの計画と目論見, 空気調和・衛生工学会/学術講演会論文集平成23年(2),1231-1234
- 4-4) 佐々木裕文/和田祐介/永井猛, 東京ガス千住テクノステーションにおけるスマートエネルギーネットワーク実証試験, 日本エネルギー学会/大会講演要旨集(21),276-277
- 4-5) 和田祐介/佐々木裕文/渡辺洋介/須澤健太郎/永井猛/土橋亮太, 特定エリアにおけるスマートエネルギーネットワーク実証試験(第2報) 千住スマートエネルギーネットワークの1年間の実績, 空気調和・衛生工学会/学術講演会論文集平成24年(3),2437-2440
- 4-6) 和田祐介/佐々木裕文/永井猛/土橋亮太, 特定エリアにおけるスマートエネルギーネットワークの実証試験：第2報千住スマートエネルギーネットワークの1年間の実績, 日本建築学会/学術講演梗概集(東海) 2012 環境工学 I,737-738

第5章 段階的に熱源更新する
既築建物に導入した建物間双方向
熱融通ネットワークシステム
の有効性
に関する研究

第5章 段階的に熱源更新する既築建物に導入した建物間双方向熱融通ネットワークシステムの有効性に関する研究

5.1 はじめに

本章では、建物間双方向熱融通による複数建物の省エネルギー化の可能性を確認する。具体的には、既成市街地内の複数既築建物間で SHG を形成、同建物が段階的に熱源更新する場合の SHG の導入効果について検討する。検討モデルは近接する4つのビルを想定、建物の内訳は3つが事務所ビルと一つのホテルとした。そして、4つの建物群において順次5年間隔で35年間、6回の熱源設備更新を設定し、各段階で4つの全建物熱源年間平均 COP が高くなる様に各熱源の稼働優先順位を定め熱融通（供給・受入）する検討を行い、SHG の導入効果を確認する。

複数の既築建物の熱源を配管でネットワーク化し、熱源の中で高効率な熱源（高 COP 機種）を優先的に定格域で稼働させ、自家消費後に余剰熱が生じる場合、他の建物に融通する。熱を受入れた建物は融通された熱のみでは不足する場合、自己熱源を補完運転させて需要対応する。本モデルは、建物間双方向熱融通ネットワークシステム基本型モデル（図 5.1.1）である。本モデルの考え方は、建物間双方向熱融通ネットワークシステム地域熱供給連携型や同型都市型バイオマス利用モデル等の発展形モデルにも繋がる。

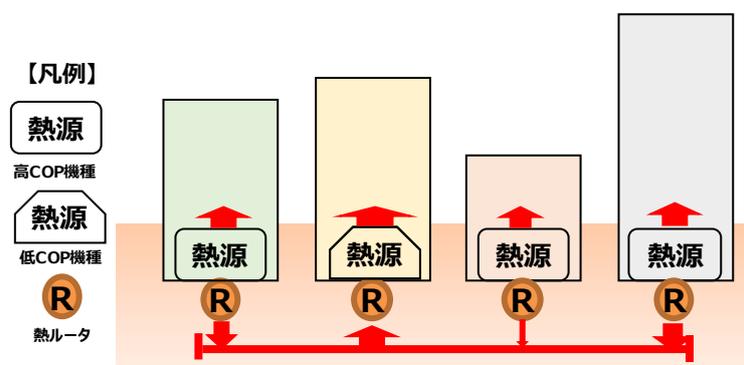


図 5.1.1 建物間双方向熱融通ネットワークシステム基本型

複数建物の省エネルギー化を進めるためには、各ビルにおいて高効率な熱源に更新する事を促すことが重要であるが、一時に全ての建物が設備更新する事は現実的ではない。そこで、比較的小口径な熱融通配管と、熱搬送・熱交換を担う省スペースで設置可能な熱ルータを使った SHG を形成する事で、エネルギー需要量の異なる用途・規模の建物間をピーク需要に合わせて導入した熱源設備を全熱源年間平均 COP が高くなる様に稼働優先順位定め、COP が高くなる熱源機の稼働負荷率を上げ、比例制御域で稼働させる事で熱源機の省エネルギー運用を行う。

本章では、5.2 で段階的に熱源更新を行う既築建物に SHG を導入、双方向熱融通の有効性を検討するモデルを設定し、双方向熱融通シミュレーションの考え方を示しその評価を行う。5.3 に省エネルギー率や熱源更新に伴う全熱源年間平均 COP の推移等の環境性評価結果を示す。そして、熱融通

第5章 段階的に熱源更新する既築建物に導入した建物間双方向熱融通ネットワークシステムの有効性に関する研究に伴うエネルギーロス（放熱ロス・搬送動力）の年間・時刻別推移、熱源更新に伴う熱源運用と熱融通状態の時刻別推移の変化、熱需要の統合化効果による熱源総稼働時間の減少、更に同効果による熱源稼働負荷率の改善効果について示し、SHGの有効性について評価する。5.4では、以上の検討結果をまとめる。

5.2 段階的に熱源更新を行う既築建物に導入した SHG の導入効果

5.2.1 対象既築モデルビル配置の設定

既成市街地内の近接する既築ビル4棟を対象に、Aビルが熱源更新する時にSHGを構築、その後、他のビルが熱源更新する毎に熱の供給・受入の役割を変更するSHGによる建物間双方向熱融通ネットワークシステム・モデルの建物配置・熱融通配管延長を設定した（図5.2.1）。

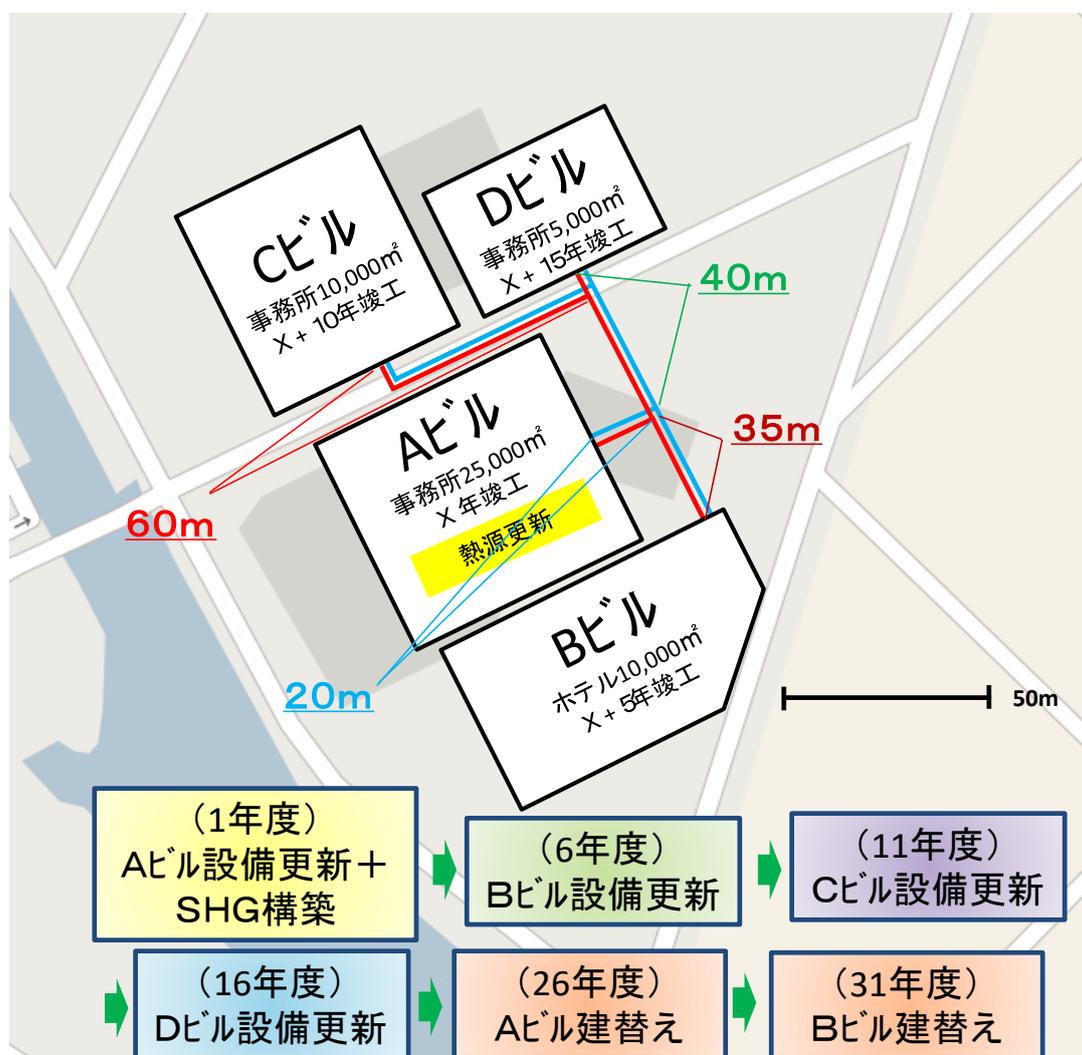


図 5. 2. 1 既築モデルビル配置

5.2.2 4つの既築モデルビルを対象とした双方向熱融通シミュレーションの考え方

4ビルの全熱源年間平均 COP が高くなる様に稼働優先順位定め、熱融通に伴う放熱ロス及び搬送動力のエネルギーロスを考慮して双方向熱融通を行なうケースと熱融通を行わず各ビル自己熱源が稼働し需要対応するケースのエネルギー消費量をそれぞれ算出、時刻別に比較し少ないエネルギー消費量を抽出・合成し算出した。(図 5.2.2)

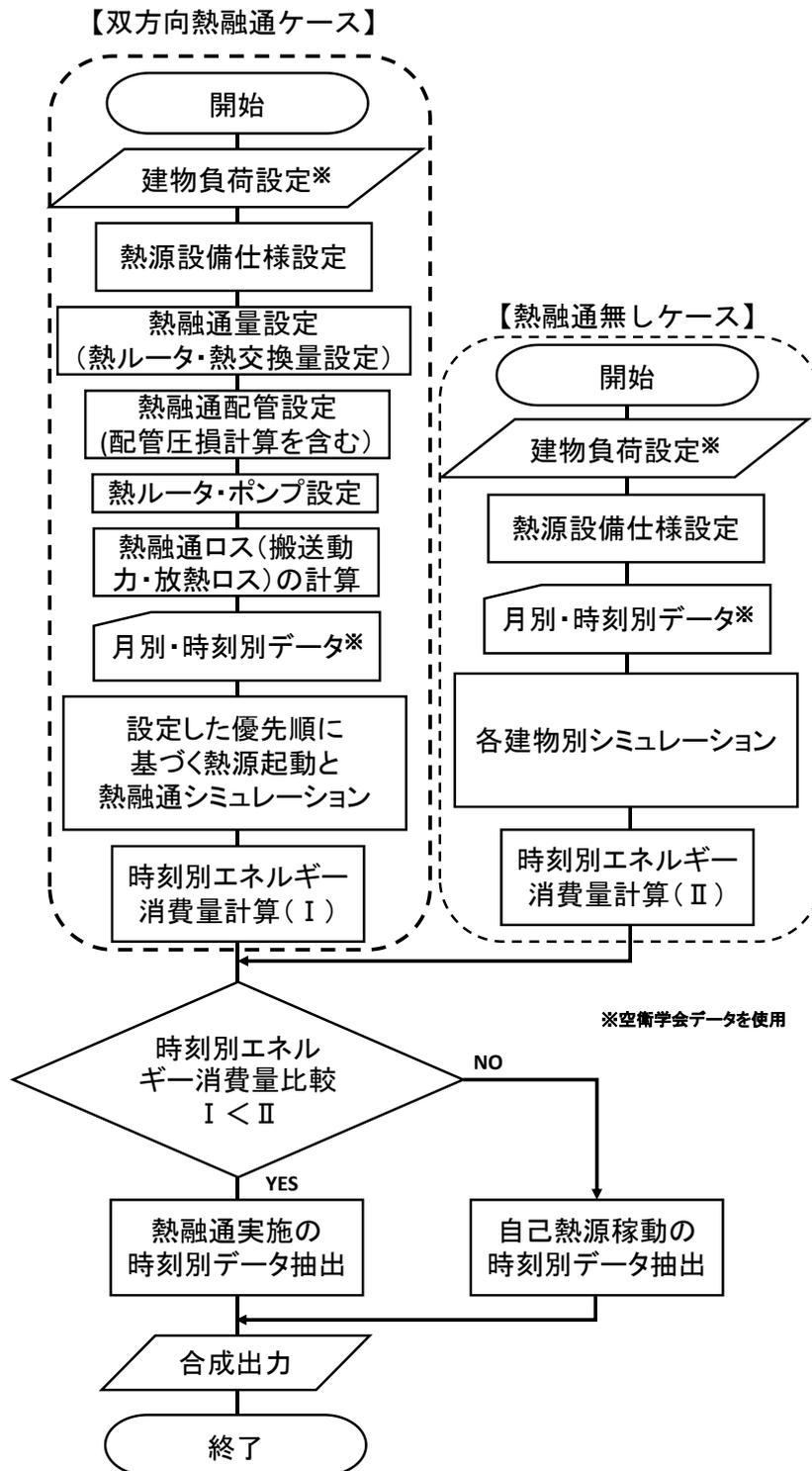


図 5.2.2 双方向熱融通シミュレーション・フロー

- Aビルが熱源更新する際に、熱融通配管及び各建物に熱ルータを設置し、SHGを構築し双方向熱融通を行う設定とした。その後、熱源の稼働順は、双方向熱融通を行う事を前提に、4ビル全熱源の年間製造熱量を一次エネルギー換算したエネルギー使用量で除した値を「全熱源年間平均COP」と称し、同COPが高くなる熱源稼働順を採用した。具体的には、一番に稼働を優先させる熱源を設置する供給役割を担う建物で製造した熱を自家消費に利用、供給能力に余裕がある場合に定格稼働させ、他の建物の受入要求に対して余剰分を供給させる。更に、受入側の要求量に対して不足する場合には、一番目と同様に、二番目の稼働優先順位の熱源機を保有する建物が自家消費し、まだ製造能力に余裕がある場合、熱融通する設定とし、従前、受入モードであった二番目の稼働優先順位の建物が供給モードに切り替える、時刻別に熱融通の流れが変化するシミュレーションを行った。三番目に稼働優先の建物・熱源も同様の設定とした。なお、熱受入側建物が熱融通のみでは不足する場合には、その分は自己熱源で補完し需要対応させる。但し、エネルギーロスを加えた熱融通への投入エネルギー量が自己熱源で賄うそれよりも多い場合、融通は行わず自己熱源で賄うとした。なお、熱融通に伴う放熱ロス分は供給側が融通分を含めて製造し、搬送動力は供給・受入双方の熱ルータで賄う設定とした。以上のシミュレーションは熱源更新の設定をした35年間を対象に行った。
- 各建物の電力・冷暖房・給湯負荷はそれぞれの延床面積に、空気調和・衛生工学会の用途別エネルギー原単位を用いて設定した。
- 設備更新する各機器については、メーカーヒヤリングを行い、今後の技術開発を見込んだ高効率化を考慮したCOPの設定した(表5.2.1)。なお、本シミュレーションでは、3度目の設備更新時の26年度目にAビル、31年度目にBビルを建替と設定したが、建物規模、同負荷は同じとした。

表 5.2.1 各既築モデル建物の熱源の構成と効率等設定仕様

対象年度	熱源更新計画	A事務所(延床面積:25千㎡)					Bホテル(延床面積:10千㎡)					C事務所(延床面積:10千㎡)					D事務所(延床面積:5千㎡)							
		冷熱負荷					冷熱負荷					冷熱負荷					冷熱負荷							
		1,450kW					1,940kW					580kW					290kW							
熱源機器		能力 [kW]	台数 [台]	冷房 COP	暖房 COP	熱源機器		能力 [kW]	台数 [台]	冷房 COP	暖房 COP	熱源機器		能力 [kW]	台数 [台]	冷房 COP	暖房 COP	熱源機器		能力 [kW]	台数 [台]	冷房 COP	暖房 COP	
1~5年度	Aビル熱源更新 SHG構築	GE	370	2	37%	AR	527	2	1.00	0.80	HPC	118	10	3.20	3.20	HPC	118	5	3.50	3.50				
		GL	738	2	1.30	0.86	B	500	2		0.80													
		HPC	150	10	4.50	4.50																		
6~10年度	Bビル熱源更新					AR	527	2	1.40	0.86														
						B	500	2	-	0.86														
11~15年度	Cビル熱源更新											HPC	118	10	5.00	5.00								
16~25年度	Dビル熱源更新																HPC	118	5	5.25	5.25			
26~30年度	Aビル建替え	GE	370	2	37%																			
		GL	738	2	1.70	0.86																		
		HPC	150	10	5.75	5.75																		
31~35年度	Bビル建替え					HPC	150	7	6.00	6.00														
						B	500	2	-	0.86														

補記)

・GE:ガスエンジン、GL:廃熱投入型冷水温水機、HPC:空冷ヒートポンプチラー、AR:ガス吸収冷水温水機、B:ボイラーを示す。なお、ガスエンジンのCOP欄は発電効率(LHV)を記す。
 ・表中の色付セル記載の熱源は更新対象、色の付いていないセル記載の熱源は従前から設置熱源

5.2.3 熱融通量の設定

SHG の適用条件から熱融通配管口径は 200A 以下、従って、架橋ポリエチレン管の場合 (JIS K 6769)、配管内径は 182mm、熱媒温度差を冷熱の 5°C とすると、 $\pi \times (182(\text{mm})/1000)^2 \div 4 \times 3600 \times 5^\circ\text{C} \times 4.1868 \div 3.6 = 1,089.2\text{kW}$ 。ここで、A ビルの冷熱源総容量は 2,976kW (=738kW×2 台+150kW×10 台) から、30%値が 892.8kW となるため、熱融通量を最大各建物熱源の総容量の 30%相当量とした。なお、感度分析の観点から同 10%、20%相当量も加えて、3つのケースを各建物の熱融通量 (熱ルータ交換熱量) とした (表 5-3-2)。又、熱媒温度条件は、冷熱 7°C→12°C (熱融通配管内平均温度 9.5°C)、温熱 65°C→55°C (同平均温度 60°C)、それぞれ温度差 5°C・10°C で熱融通量を設定した。なお、配管口径 200A の最大熱融通量を建物熱源総量の 30%相当量とした。更に、感度分析の観点から同 10%、20%相当量のケースもシミュレーションを行った。表 5.2.2 に各既築モデル建物の供給熱量を示す。

表 5.2.2 各既築モデル建物の熱融通供給熱量

		冷熱				温熱			
		Aビル	Bビル	Cビル	Dビル	Aビル	Bビル	Cビル	Dビル
10%	供給熱量(kW)	297.6	105.4	118.0	59.0	248.8	205.4	118.0	59.0
20%	供給熱量(kW)	595.2	210.8	236.0	118.0	497.6	410.8	236.0	118.0
30%	供給熱量(kW)	892.8	316.2	354.0	177.0	746.4	616.2	354.0	177.0

5.2.4 既築モデルビル間熱融通配管の融通能力の設定

前項で確認した各既築モデル建物の熱融通供給熱量 (熱ルータ交換量) から各ビルの熱融通パターンの組合せについて 10% 双方向熱融通、以下、20%、30% の各ケースを表 5.2.3 に示す。熱融通配管を設定するための熱融通量は、供給側と受入側となるので、その組合せに対して各合計能力を供給能力と受入能力とし、比較して小さい方がその組合せを必要能力 (融通可能な熱量) と考えた。そして各建物共用のヘッダ管融通熱量は必要熱量の最大値と設定した。

表 5.2.3 双方向熱融通パターンの組合せと融通可能な熱量 (必要能力)

建物		冷水			温水			
		供給	受入	必要能力	供給能力	受入能力	必要能力	
10% 双方向熱融通	A	BCD	297.6	282.4	282.4	248.8	382.4	248.8
	B	ACD	105.4	474.6	105.4	205.4	425.8	205.4
	C	ABD	118.0	462.0	118.0	118.0	513.2	118.0
	D	ABC	59.0	521.0	59.0	59.0	572.2	59.0
	AB	CD	403.0	177.0	177.0	454.2	177.0	177.0
	AC	BD	415.6	164.4	164.4	366.8	264.4	264.4
	AD	BC	356.6	223.4	223.4	307.8	323.4	307.8
20% 双方向熱融通	A	BCD	595.2	564.8	564.8	497.6	764.8	497.6
	B	ACD	210.8	949.2	210.8	410.8	851.6	410.8
	C	ABD	236.0	924.0	236.0	236.0	1026.4	236.0
	D	ABC	118.0	1042.0	118.0	118.0	1144.4	118.0
	AB	CD	806.0	354.0	354.0	908.4	354.0	354.0
	AC	BD	831.2	328.8	328.8	733.6	528.8	528.8
	AD	BC	713.2	446.8	446.8	615.6	646.8	615.6
30% 双方向熱融通	A	BCD	892.8	847.2	847.2	746.4	1147.2	746.4
	B	ACD	316.2	1423.8	316.2	616.2	1277.4	616.2
	C	ABD	354.0	1386.0	354.0	354.0	1539.6	354.0
	D	ABC	177.0	1563.0	177.0	177.0	1716.6	177.0
	AB	CD	1209.0	531.0	531.0	1362.6	531.0	531.0
	AC	BD	1246.8	493.2	493.2	1100.4	793.2	793.2
	AD	BC	1069.8	670.2	670.2	923.4	970.2	923.4

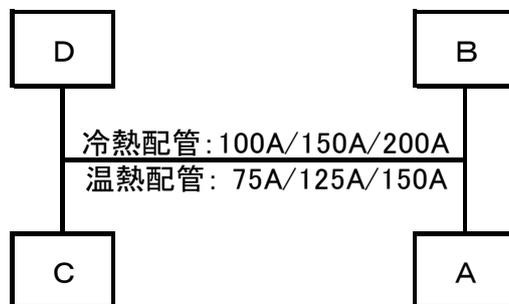
5.2.5 熱融通配管口径の設定と同配管材料選定

図 5.2.1 の示した既築モデルビル 4 ビル間の配管距離で最も長いのは、B～C 間：135m であるので、1 台のポンプで 135m の距離を搬送可能な能力を選択した。なお、配管系については、複数建物間における双方向熱融通を考慮し全域ヘッダ管同口径方式を採用した。

又、熱媒流速については、一般的に 2～3m/s 以下⁵⁻¹⁾とされており、本研究では 2m/s を選択した。配管材料については、冷温水配管である事から、施工性や管内摩擦抵抗を考慮して、架橋ポリエチレン管で検討した。同管材仕様はメーカー資料⁵⁻²⁾を参考に配管仕様等を確認し供給熱量から配管口径を決定した。以上をまとめて表 5.2.3 及び図 5.2.3 に示す。

表 5.2.3 双方向熱融通パターンの組合せと融通可能な熱量（必要能力）

		冷熱				温熱			
		Aビル	Bビル	Cビル	Dビル	Aビル	Bビル	Cビル	Dビル
10%	供給熱量(kW)	297.6	105.4	118.0	59.0	248.8	205.4	118.0	59.0
	配管口径(mm)	100				75			
20%	供給熱量(kW)	595.2	210.8	236.0	118.0	497.6	410.8	236.0	118.0
	配管口径(mm)	150				125			
30%	供給熱量(kW)	892.8	316.2	354.0	177.0	746.4	616.2	354.0	177.0
	配管口径(mm)	200				150			



※上図配管口径は左から10%、20%、30%の熱源容量割合を熱融通した場合

図 5.2.3 全域ヘッダ管同口径方式の配管口径イメージ図

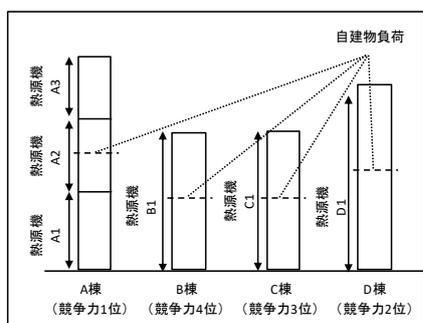
5.2.6 熱融通シミュレーションの考え方

4 つの建物間で熱融通を行うシミュレーションに際して、本章では全熱源一次エネ平均エネルギー効率の高い組合せの順に稼働優先（以下、競争力が高いと記載）を設定とした。その他、熱融通に伴うロスの評価、再生可能エネルギー等を含む省エネルギーな熱の選択、ランニングコストや一次エネルギー消費量の最小化、電力ピーク時対応を考慮した熱源の選択等、選択肢を拡張する必要あ

と考える。競争力の最も高いプロシューマは自家消費を優先し、熱源機の供給能力に余裕がある場合（余剰熱を発生させることができる）熱融通量を決定し、競争力の最も低いプロシューマに熱融通、そして更に競争力が2番目に低いプロシューマに…と順に熱融通を行う。

そして、競争力が2番目に高いプロシューマ、3番目に高いプロシューマと順次、自家消費～余剰熱の熱融通量を決定していく。具体的に4ビルの熱融通シミュレーションのイメージを以下に示す。

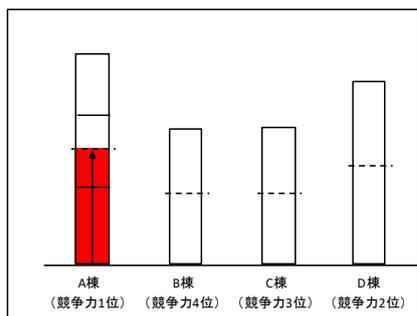
(1) 前提条件



- 棒グラフ高さは各熱源機能力を示す。
- 破線はある時刻における各建物の熱負荷を表す。

図 5.2.4 前提条件

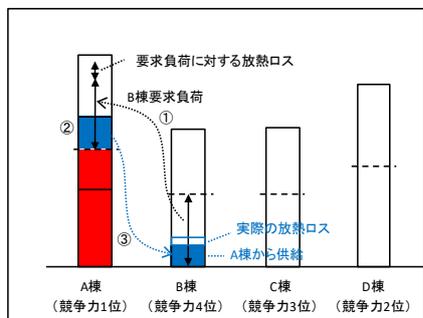
(2) 競争力1位の建物(A棟)が自家消費する



- 競争力1位のA棟負荷に対して、A棟の熱源が稼働する。

図 5.2.5 競争1位建物(A棟)自家消費

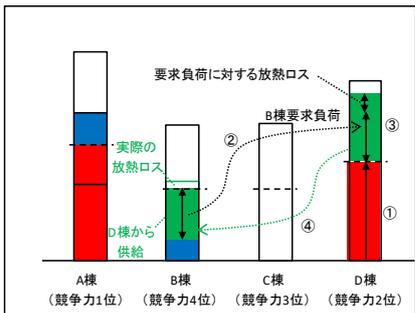
(3) 競争力1位建物(A棟)から建物(B棟)熱融通する(熱融通I)



- A棟の熱源に余力があるため、競争力の一番低いB棟に熱融通する事を検討
 - ① B棟負荷+放熱ロスをA棟熱源に要求
 - ② A棟供給可能上限<B棟要求負荷のため、A棟熱源が供給可能上限まで出力
 - ③ B棟へはA棟の追加出力分+放熱ロスを供給(A棟熱源は更に余力があれば、C棟、D棟も順次供給)

図 5.2.6 競争1位建物(A棟)から熱融通I

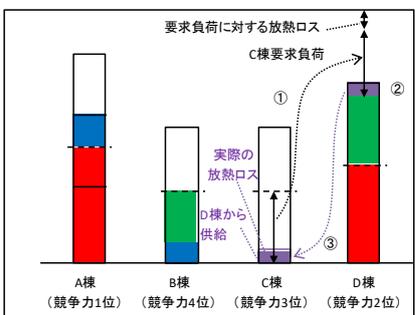
(4) 競争力2位建物(D棟)が自家消費し、更に建物(B棟)熱融通する(熱融通Ⅱ)



- 次に競争力2位のD棟のシミュレーションを行う。
 - ① D棟負荷に対し、D棟熱源が稼働。
 - ② A棟からの熱融通受入後のB棟負荷+放熱ロスをD棟熱源に要求
 - ③ D棟供給可能上限>B棟要求負荷のため、要求負荷全量をD棟熱源が出力
 - ④ B棟へはD棟の追加出力分を供給

図 5.2.7 競争2位建物(D棟)自家消費
→更に熱融通Ⅱ

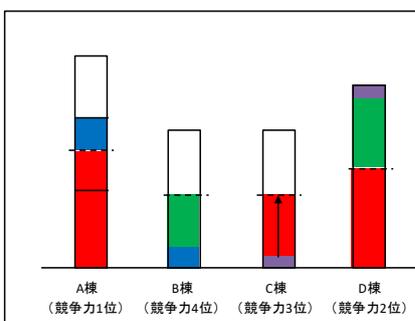
(5) 競争力2位建物(D棟)から建物(C棟)に熱融通する(熱融通Ⅲ)



- D棟熱源に余力があるため、C棟へ熱融通を検討
 - ① C棟負荷+放熱ロスをD棟熱源に要求
 - ② D棟供給可能上限<C棟要求負荷のため、D棟は供給可能上限まで出力
 - ③ C棟へD棟の追加出力分を供給

図 5.2.8 競争2位建物(D棟)から熱融通Ⅲ

(6) 競争力3位建物(C棟)が自家消費



- C棟はD棟から熱融通を受けた残りの負荷を自熱源から供給
- B棟はA棟、D棟からの熱融通で熱負荷を賄っており、自熱源の追稼働不要

図 5.2.9 競争力3位建物(C棟)自家消費

5.2.7 熱源システムの設定

本章のシミュレーション対象の熱源システムをシミュレーションするに際して、以下の条件設定を行った。

- 補機を含む熱源機 (空気熱源ヒートポンプチラー・ガス吸収冷温水機・廃熱投入型吸収冷温水機・ガスボイラー)
- 外気温・冷却水温度

- 熱融通ポンプ(搬送動力)
- ガスエンジンコージェネレーションシステム (以下、CGS)
- 配管放熱ロス

以下に、それぞれのシミュレーションに用いたモデルを示す。

(1) 熱源機

熱源機の運転 COP は、部分負荷及び冷却水又は外気温度を考慮し、以下の特性式でシミュレーションを行った。

$$\text{運転 COP} = \text{定格 COP} \times \text{部分負荷補正係数} \times \text{冷却水又は外気温度補正係数} \quad (5.1)$$

補正係数については、国土交通省の LCEM ツールに内蔵されている吸収式及び空冷ヒートポンプのオブジェクトの機種 (図 5.2.10~16) の中から、表 5.2.3 及び 4 に示した機種をシミュレーション対象とし、特性式を作成した。

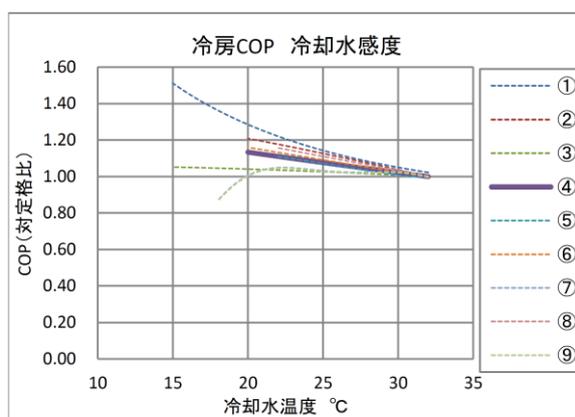
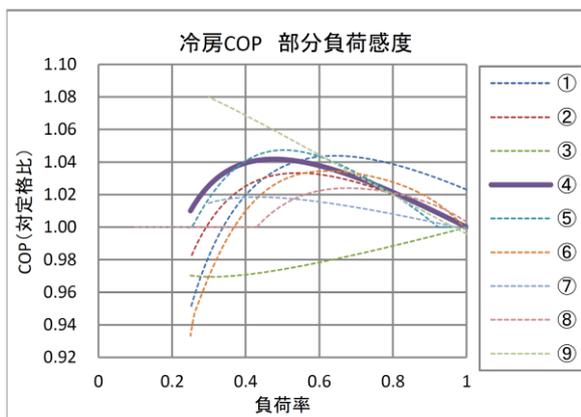


図 5. 2. 10LCEM オブジェクト負荷率(吸収式/冷房) 図 5. 2. 11LCEM オブジェクト温度特性(吸収式/冷房)

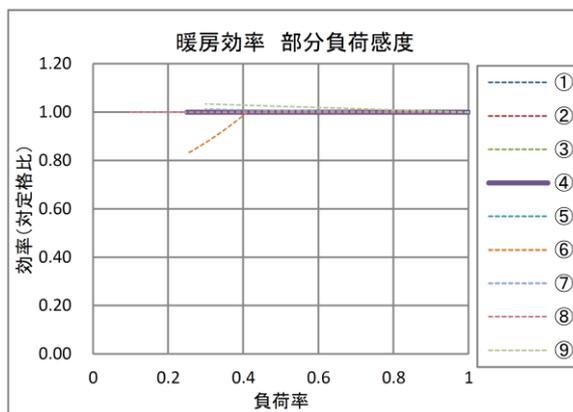


図 5. 2. 12 LCEM オブジェクト負荷率(吸収式/暖房)

表 5.2.3 LCEM オブジェクト吸収式冷温水機一覧

No.	オブジェクト名	定格COP
①	直だき吸収冷温水機(二重効用-標準)	1.10
②	直だき吸収冷温水機(二重効用-標準)	1.09
③	直だき吸収冷温水機(二重効用-高効率)	1.35
④	直だき吸収冷温水機(二重効用-高効率)	1.32 採用
⑤	直だき吸収冷温水機(二重効用-高効率)	1.28
⑥	直だき吸収冷温水機(二重効用-高効率)	1.21
⑦	直だき吸収冷温水機(二重効用-1.3クラス)	1.30
⑧	直だき吸収冷温水機(二重効用-標準)	1.10
⑨	直だき吸収冷温水機(二重効用-1.2クラス)	1.20

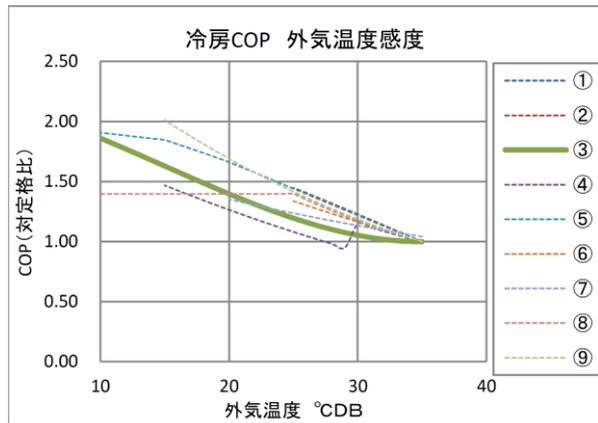
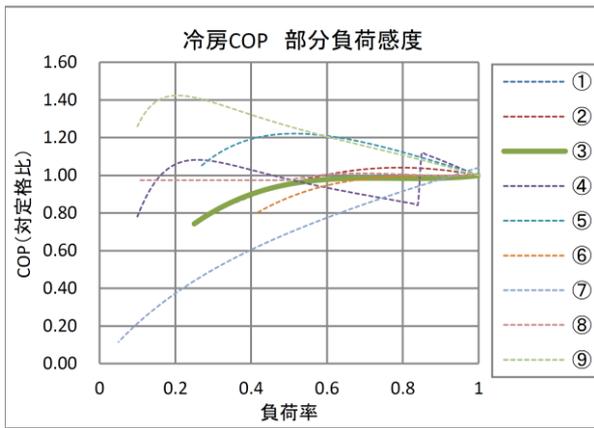


図 5.2.13 LCEM オブジェクト負荷率(空冷 HP/冷房)

図 5.2.14 LCEM オブジェクト温度特性(空冷 HP/冷房)

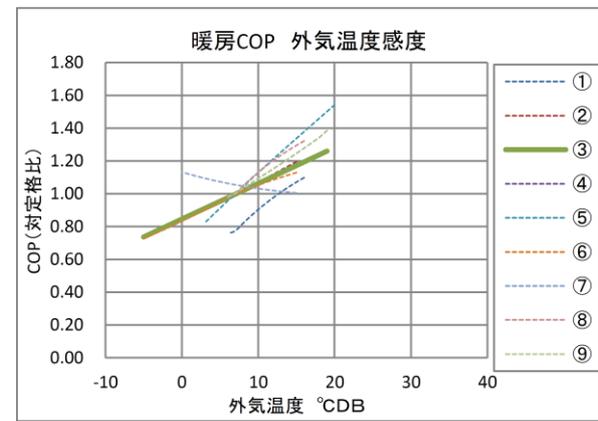
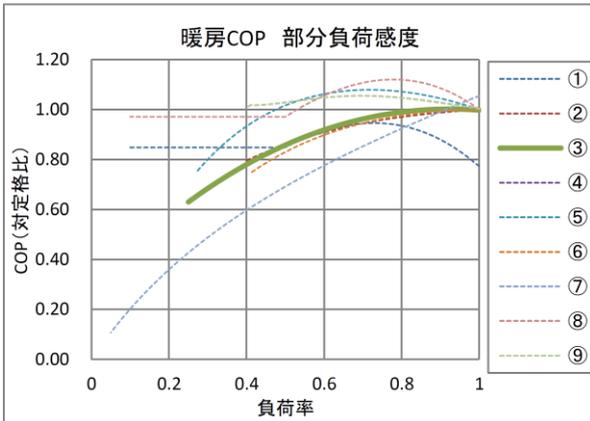


図 5.2.15 LCEM オブジェクト負荷率(空冷 HP/暖房)

図 5.2.16 LCEM オブジェクト温度特性(空冷 HP/暖房)

表 5.2.4 LCEM オブジェクト空冷ヒートポンプ・チラー一覧

No.	オブジェクト名	定格COP
①	空気熱源HPユニット(高効率)	4.00
②	空気熱源HPユニット(高効率)	3.70
③	空気熱源HPユニット(高効率)	4.30 採用
④	空気熱源HPユニット(高効率型コンパクトタイプ)(散	4.30
⑤	空気熱源ヒートポンプチラー	3.65
⑥	空気熱源HPユニット(標準)	2.80
⑦	チリングユニット(空冷式/標準)	2.51
⑧	空気熱源HPユニット(標準型コンパクトタイプ)	3.65
⑨	空気熱源HPユニット(標準型コンパクトタイプ)	3.35

特性式の各補正係数について、各変数（負荷率、外気温度、冷却水温度）に対して4次式で以下の様に定義した。

$$\text{補正係数} = A \times (\text{各変数})^4 + B \times (\text{各変数})^3 + C \times (\text{各変数})^2 + D \times (\text{各変数}) + E \quad (5.2)$$

なお、各補正係数 A~E を表 5.3.5 に示す。

表 5.2.5 各補正係数数値

			A	B	Z	D	E	補正下限値	補正上限値
吸収式	冷房	負荷率特性	-0.6453001	2.00006014	-2.3658205	1.17332516	0.83707033	25%	100%
		温度特性	0	0	0	-0.0111338	1.3552429	20°C	-
	暖房	負荷率特性	0	0	0	0	1	25%	100%
		温度特性	0	0	0	0	1	-	-
空冷HPC	冷房	負荷率特性	0	1.72165432	-4.0130205	3.9867898	0.19270246	25%	100%
		温度特性	0	3.9661E-05	-0.0017808	-0.0020782	2.20836506	5°C	-
	暖房	負荷率特性	0	0	-0.8372645	1.53386389	0.30185242	25%	100%
		温度特性	0	0	0	0.02180516	0.84765507	-	19°C

以上から、補正係数を考慮した吸収冷温水機の現行機(定格 COP:1.3)及び将来開発機(定格 COP:1.6)の冷却水温度を変化させた場合の負荷率別各吸収冷温水機 COP を図 5.2.17 に、同様に空冷ヒートポンプ・チラーの場合、現行機(定格 COP:3.2)及び将来開発品(定格 COP:5.0)の冷却水温度を変化させた場合の負荷率別の冷房及び暖房 COP を図 5.2.18、19 に示す。本モデルの考え方を使い、各熱源更新時に設定した熱源負荷率・冷却水・外気温度の影響を考慮してシミュレーションを行った。

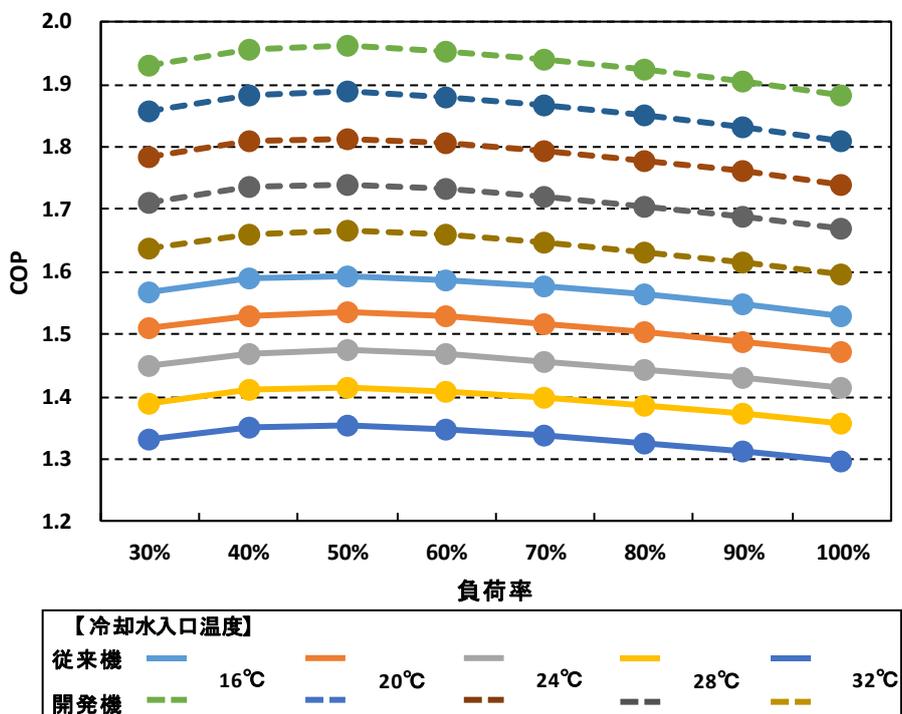


図 5.2.17 従来機及び開発機の吸収冷温水機冷房特性曲線

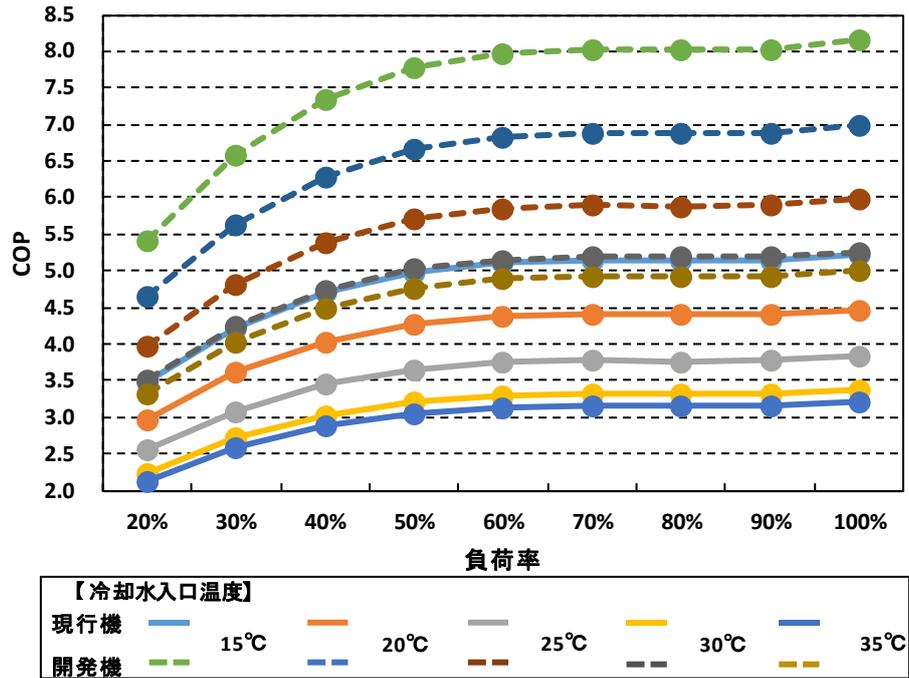


図 5.2.18 従来機及び開発機の空冷ヒートポンプ・チラー（冷房）特性曲線

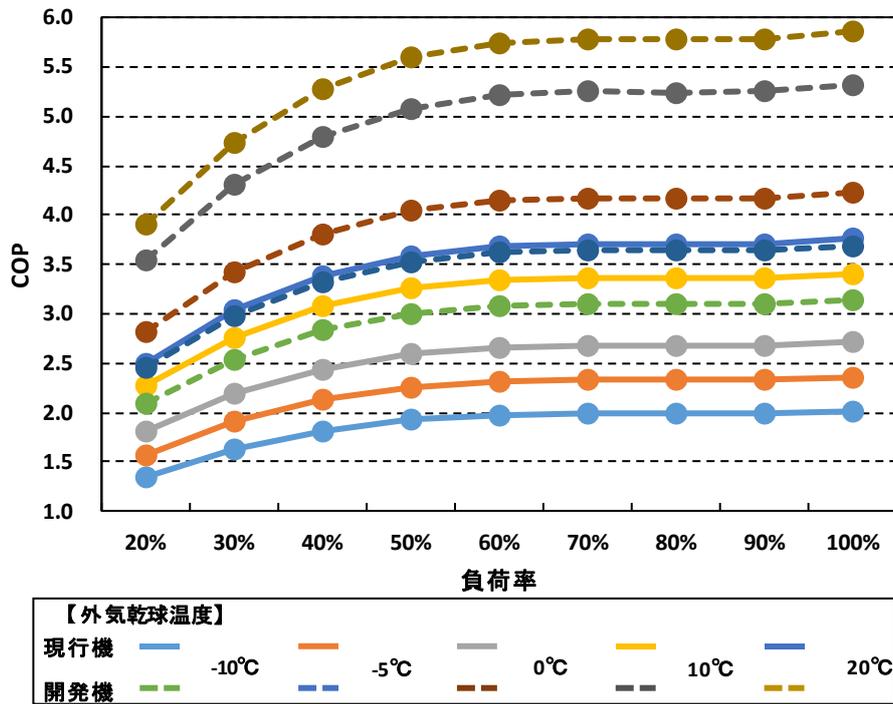


図 5.2.19 従来機及び開発機の空冷ヒートポンプ・チラー（暖房）特性曲線

(2) 外気温度及び冷却水温度

熱源機 COP の温度補正に用いた外気温度・冷却水温度等の条件は、以下のデータを使用した。

- 外気温度：経済産業省 METPV-11 に格納されている時刻別データ（1990年～2009年の20年間平均値）を使用した。
- 相対湿度：気象庁データ月別データ（1990年～2009年の20年間の平均値）を使用した。
- 冷却水温度：国土交通省の LCEM ツールに格納されている冷却塔オブジェクト用い、外気温度・相対湿度条件から計算した。

(3) ポンプ（熱ルータ・熱搬送用）選定

ポンプの容量設定について、以下の条件で行った。

- 冷熱（冷水）については温度差 5°C、温熱（温水）は温度差 10°C（前記載）とした。
- 流速はエロージョン等を考慮し、本シミュレーションでは流速を 2m/s（前記載）とした。
- 熱交換器等の固定圧損を 5mAq、又、本検討では配管材を「架橋ポリエチレン管」を選択した。熱融通配管が大口径配管である事を考慮し、本シミュレーションでは同配管材の口径別圧力損失をメーカーが公表している「流量線図」⁵⁻²⁾のデータ（図 5.2.20）を用いた。

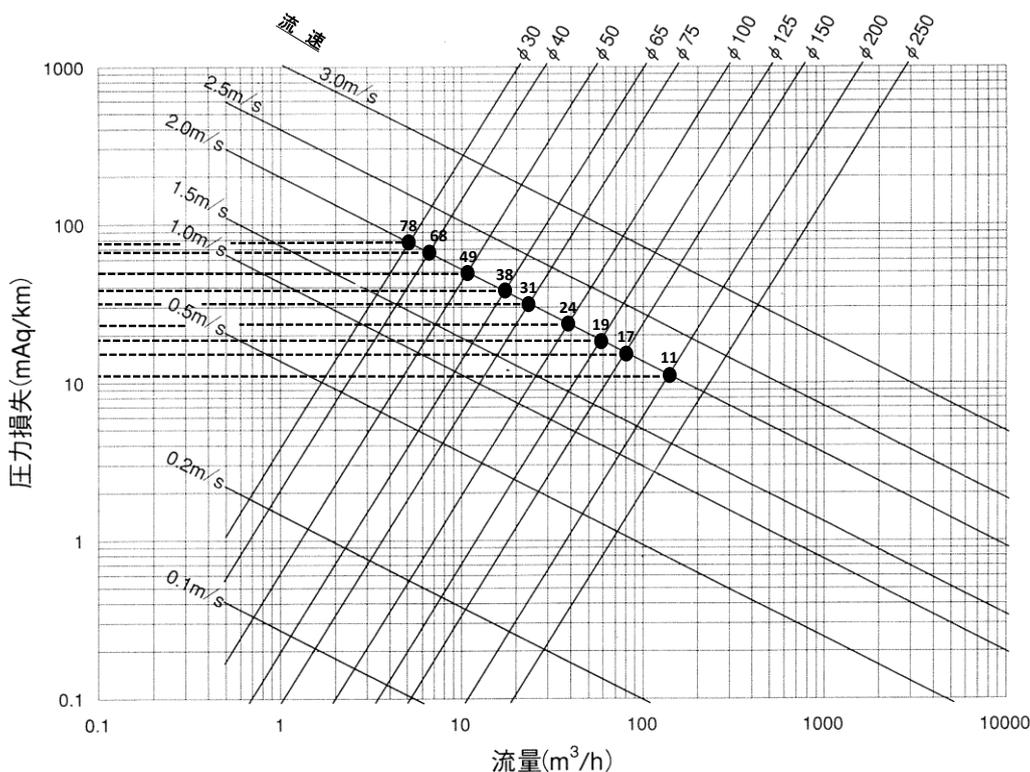


図 5.2.20 架橋ポリエチレン管・流速 2m/s における口径別単位長さ当りの圧力損失

口径別の架橋ポリエチレン管のスペックを表 5-2-6 に示す。

表 5.2.6 架橋ポリエチレン管スペック

呼び径	-	30A	40A	50A	65A	75A	100A	125A	150A	200A
配管内径	mm	34.7	39.7	50.7	63.8	74.8	95.6	117.0	137.0	182.0
配管外径	mm	42.7	48.5	60.5	76.0	89.0	114.0	140.0	165.0	216.0
許容流速	m/s	2	2	2	2	2	2	2	2	2
許容流量	m ³ /h	6.81	8.91	14.54	23.02	31.64	51.68	77.41	106.14	187.31
冷熱供給量 ΔT=5°C	kW	39.59	51.83	84.53	133.85	183.98	300.53	450.14	617.18	1089.22
温熱供給量 ΔT=10°C	kW	79.19	103.65	169.05	267.70	367.96	601.06	900.27	1234.36	2178.44

図 5.2.20 で確認した各口径別の圧力損失から、最大配管長 135m における配管圧損を求めた (表 5.2.7)。以上から、その最大値 10.6mAq を 1 台のポンプが受け持つ配管圧損とする。

表 5.2.7 流速 2m/s における架橋ポリエチレン管口径別圧力損失

呼び径	-	30A	40A	50A	65A	75A	100A	125A	150A	200A
圧力損失 (図6.3.20から)	mAq/km	78	68	49	38	31	24	19	17	11
配管長135m における圧損	mAq	10.6	9.2	6.7	5.2	4.2	3.3	2.6	2.3	1.5

- ポンプ軸動力は以下の式から算定した。

$$P_w = \frac{Q \times H \times \rho \times g}{1000} \quad (5.3)$$

P_w : 軸動力 (kW)

Q : 流量 (m³/s)

H : ポンプ全揚程 (密閉配管のため実揚程は 0。故に配管圧損と固定圧損の合計 15.6mAq)

ρ : 熱媒の密度 (水の場合、1,000 kg/m³)

g : 重力加速度 (=9.8m/s²)

ポンプ効率を 75% とし、ケース 1~3 の各ビルのポンプ容量をそれぞれ表 5.2.8~10 に示す。

表 5.2.8 ケース 1 (10%) の各建物ポンプ容量

熱媒・温度差	冷水 ΔT=5°C				温水 ΔT=10°C			
	Aビル	Bビル	Cビル	Dビル	Aビル	Bビル	Cビル	Dビル
建物 供給能力 kW	297.6	105.4	118	59	248.8	205.4	118	59
融通配管径	100A				65A			
設計流量 m3/h	51.19	18.13	20.30	10.15	21.40	17.66	10.15	5.07
ポンプ容量 kW	2.90	1.03	1.15	0.58	1.21	1.00	0.58	0.29

表 5.2.9 ケース 2 (20%) の各建物ポンプ容量

熱媒・温度差	冷水 ΔT=5°C				温水 ΔT=10°C			
	Aビル	Bビル	Cビル	Dビル	Aビル	Bビル	Cビル	Dビル
建物 供給能力 kW	595.2	210.8	236	118	497.6	410.8	236	118
融通配管径	150A				100A			
設計流量 m3/h	102.37	36.26	40.59	20.30	42.79	35.33	20.30	10.15
ポンプ容量 kW	5.79	2.05	2.30	1.15	2.42	2.00	1.15	0.58

表 5.2.10 ケース 3 (30%) の各建物ポンプ容量

熱媒・温度差	冷水 ΔT=5°C				温水 ΔT=10°C			
	Aビル	Bビル	Cビル	Dビル	Aビル	Bビル	Cビル	Dビル
建物 供給能力 kW	892.8	316.2	354	177	746.4	616.2	354	177
融通配管径	200A				125A			
設計流量 m3/h	153.56	54.39	60.89	30.44	64.19	52.99	30.44	15.22
ポンプ容量 kW	8.68	3.08	3.45	1.73	3.63	3.00	1.73	0.87

なお、シミュレーションの中でポンプはインバーター制御運転とした。

(4) CGS

CGSは建物側電力負荷が発電機容量の50%を超えた時に稼働するとした。また、Aビルに設置を想定したCGS(ガスエンジン)の運転形態を、8時~21時稼働のDSSとし、①熱主運転(部分的に逆潮電力あり)②電主運転(逆潮電力なし)③定格運転(①②と時刻別稼働台数を同じとし、定格運転を設定、逆潮電力が発生)の3ケースを検討した。また、発電機の補機等で消費する電力を発電量の5%と設定した。なお、CGSについては370kWクラスを想定し、文献の発電効率及び総合効率(いずれもLHVベース)データから特性曲線を求めた(図5.2.21)。

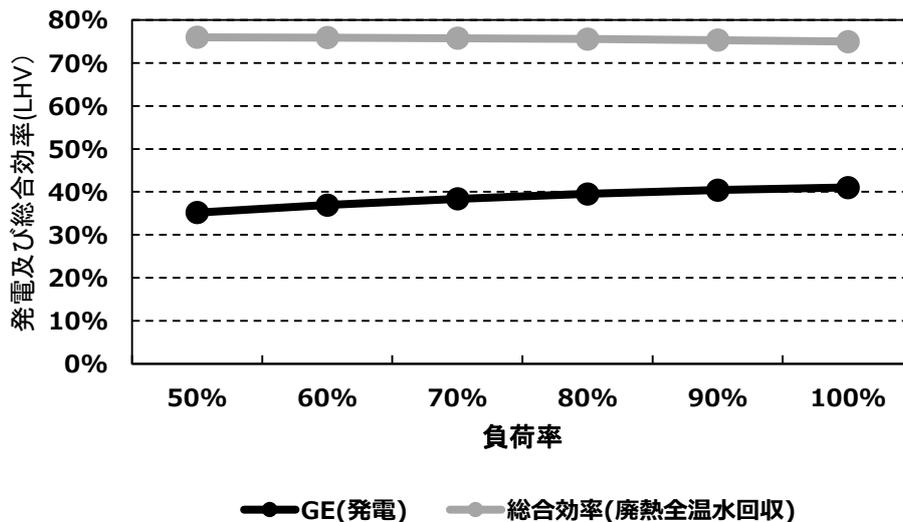


図 5.2.21 CGS の部分負荷特性 (LHV)

(5) 配管放熱ロス

本シミュレーションでは、配管放熱ロスを以下の式に従い算出した。

$$q = \frac{1}{R_l + R_{le}} (\theta_{si} - \theta_a) \quad (5.4)$$

$$R_l = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{D_{ej}}{D_{ij}} \right) \quad (5.5) \quad R_{le} = \frac{1}{h_{se} \pi D_e} \quad (5.6)$$

q : 放散熱量 (W/m)

θ_{si} : 保温内側温度 (°C)

θ_a : 周囲温度 (°C)

D_e : 保温材の外径 (m)

D_i : 保温材の内径 (m)

λ : 保温材熱伝導率 (W/mK) (メーカーカタログから、0.0263 W/mK を用いた)

h_{se} : 表面熱伝達率 (W/m² K) (JIS A 9501 記載の「経済的な保温厚さでの条件は 12 W/m² K、保冷は 8W/m² K を採用している」から本研究は 12 W/m² K を用いた)

5.3 段階的に熱源更新を行う既築建物に導入した SHG の評価

5.3.1 省エネルギー率試算結果

フェーズ毎に熱源更新し熱融通を行わない 1 年度目のケースを基準に、双方向熱融通量を熱源総定格容量の 10%・20%・30%及び CGS の運転形態 3 ケース（電主・熱主・定格）について、空調給湯負荷を対象に省エネルギー率を算出した。そのうち図 5.3.1 に CGS 定格運転ケースにおける 1 年度目熱融通を行わないケースをベースラインとした場合の省エネルギー率の推移を示す。1 年度目各熱融通割合別に、() 内に省エネルギー率を記すと、0% (0%)、10% (19.8%)、20% (25.8%)、30% (27.8%) となった。その後の稼働優先順位の見直しを行い、省エネルギー率は熱源更新を経る毎に増加し、11 年度目は、0% (14.1%)、10% (30.8%)、20% (35.6%)、30% (36.6%)、最終 31 年度目には、0% (37.2%)、10% (45.4%)、20% (46.0%)、30% (46.1%) となった。最終 31 年度目の熱融通無しが従前の傾向と異なるのは、B ビル・ホテル（建替えを想定）の熱源を吸収式から空冷 HP に変更した事による。

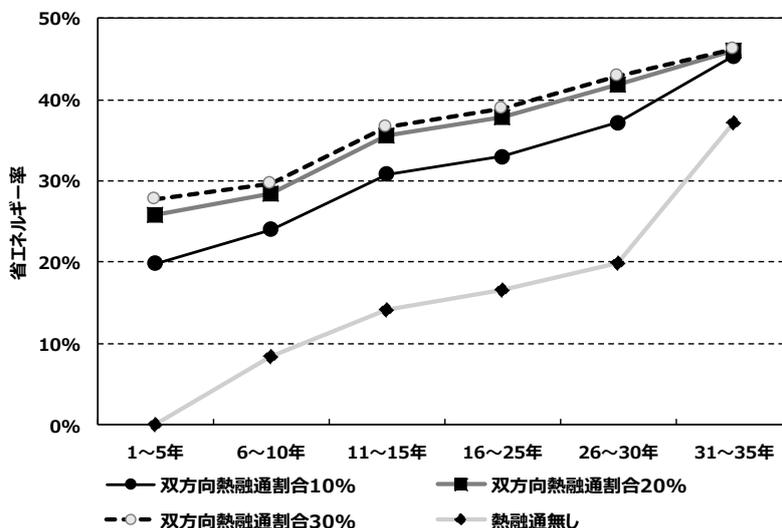


図 5.3.1 熱源更新に伴う双方向熱融通割合別の省エネルギー率推移 (CGS 定格運転)

図 5.3.2 に CGS 定格運転ケースにおける各フェーズの熱源稼働優先順位を定めた際の全熱源年間平均 COP を示す。なお、全熱源年間平均 COP は以下の様に定義した。なお、CGS 廃熱から回収した温熱については、年間の発電出力量と廃熱回収量からガス使用量を按分し、温熱 COP 算出時にエネルギー使用量に加えて評価した。

$$\text{全熱源年間平均 COP} = \frac{\text{年間製造熱量}}{\text{一次エネルギー換算したエネルギー使用量}} \quad (5.7)$$

熱源更新の後、4 ビルの全熱源年間平均 COP を算出、稼働優先順位を確認した。同結果を表 5.3.1 にまた、CSG 定格稼働時の全熱源年間平均 COP の推移を図 5.3.2 に示す。参考に熱融通無しケースを記載したが、SHG による最適な供給者の選択と受入の組合せが可能となり、その導入効果が確認できる。

表 5.3.1 各フェーズ別熱源稼働優先順位

建物及び同用途		1～5年	6～10年	11～15年	16～25年	26～30年	31～35年
冷熱	A 事務所	1	1	2	3	3	2
	B ホテル	4	4	4	4	4	1
	C 事務所	3	3	1	2	2	4
	D 事務所	2	2	3	1	1	3
温熱	A 事務所	1	1	2	3	1	1
	B ホテル	4	4	4	4	4	4
	C 事務所	3	3	1	2	3	3
	D 事務所	2	2	3	1	2	2

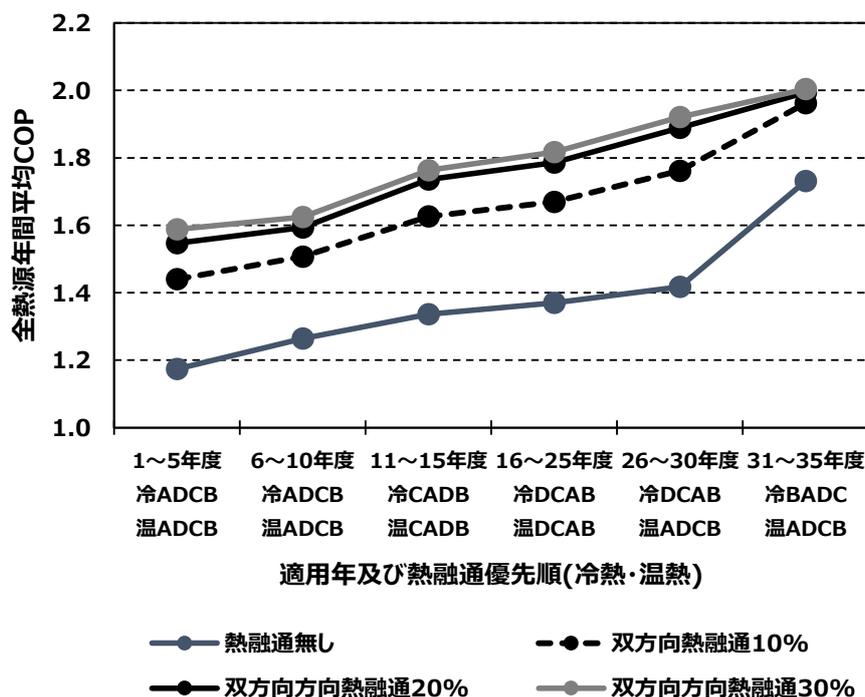


図 5.3.2 熱源更新に伴う熱融通割合別の全熱源年間平均 COP の推移 (CGS 定格運転)

複数建物が熱源更新に伴い SHG を活用し熱源機の稼働優先順位を換えた熱の双方向熱融通を行う事で、持続的に省エネルギー化が図れる事を確認した。また、双方向熱融通を行う際に各建物の熱源起動優先順位を定める方法として、熱融通に伴う熱の供給と受入、そして自家消費と熱融通分で不足する場合の補完運転、それらを総括した全熱源年間平均 COP を指標とする方法は有効である。図 5.3.2 に示した様に、熱源更新する毎に全熱源年間平均 COP は向上する（具体的には 1 年度目熱融通無しケースで 1.17、それに対して 10%～30%熱融通量ケースで 1.44～1.59 で、以降値は高くなる事を確認した）。これは、建物間熱融通を行う SHG を導入する事で、熱源単体の高効率化効果に加えて、エネルギー需要の統合化や異なる用途の需要の組合せ等、熱の面的利用効果を熱源更新毎に得て、持続的な省エネルギー化を図る事ができていると考える。

5.3.2 熱融通に伴うエネルギーロス（搬送動力・放熱ロス）の時刻別推移

時刻別の熱需要に対する熱融通割合を確認するため、11 年度 CGS 電主運転（30%熱融通）の平日

代表日・時刻別の冷熱及び温熱需要と熱融通量（上部：受入分、下部：供給分）の推移について図 5.3.3（冷熱）、図 5.3.4（温熱）に示す。又、同ケースで熱融通に伴うエネルギーロス（放熱ロス・搬送動力）推移を図 5.3.5 に示す。

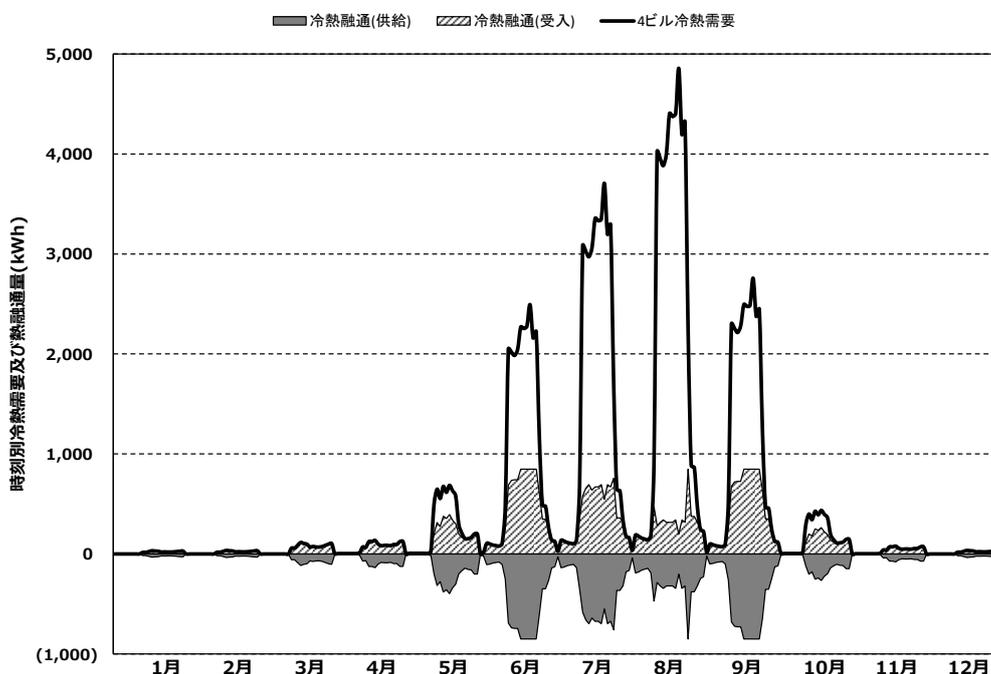


図 5.3.3 各月平日代表日の冷熱需要と熱融通の時刻別推移

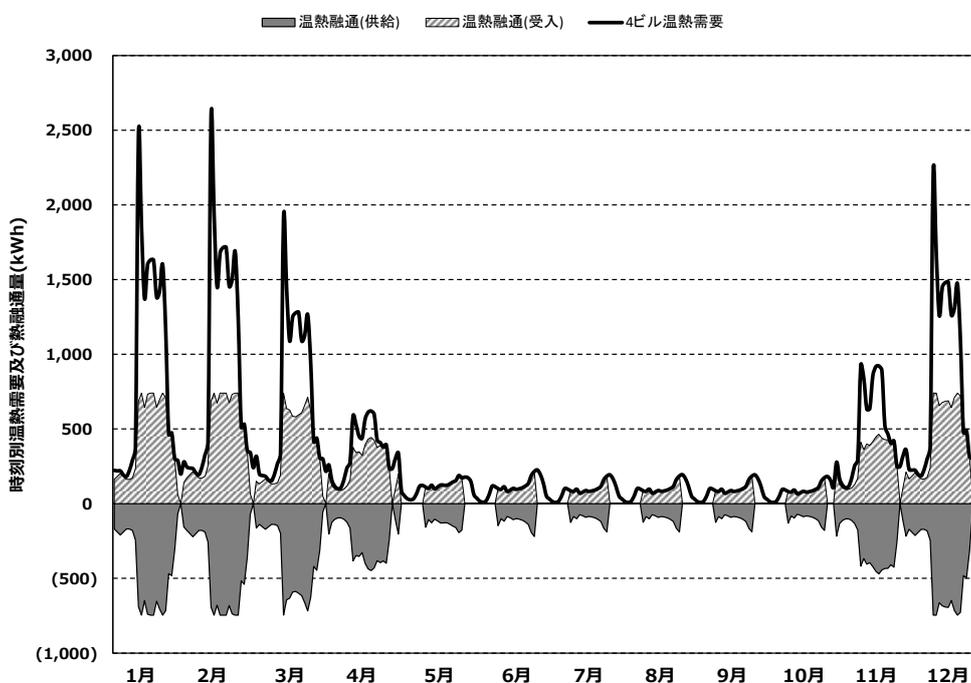


図 5.3.4 各月平日代表日の温熱需要と熱融通の時刻別推移

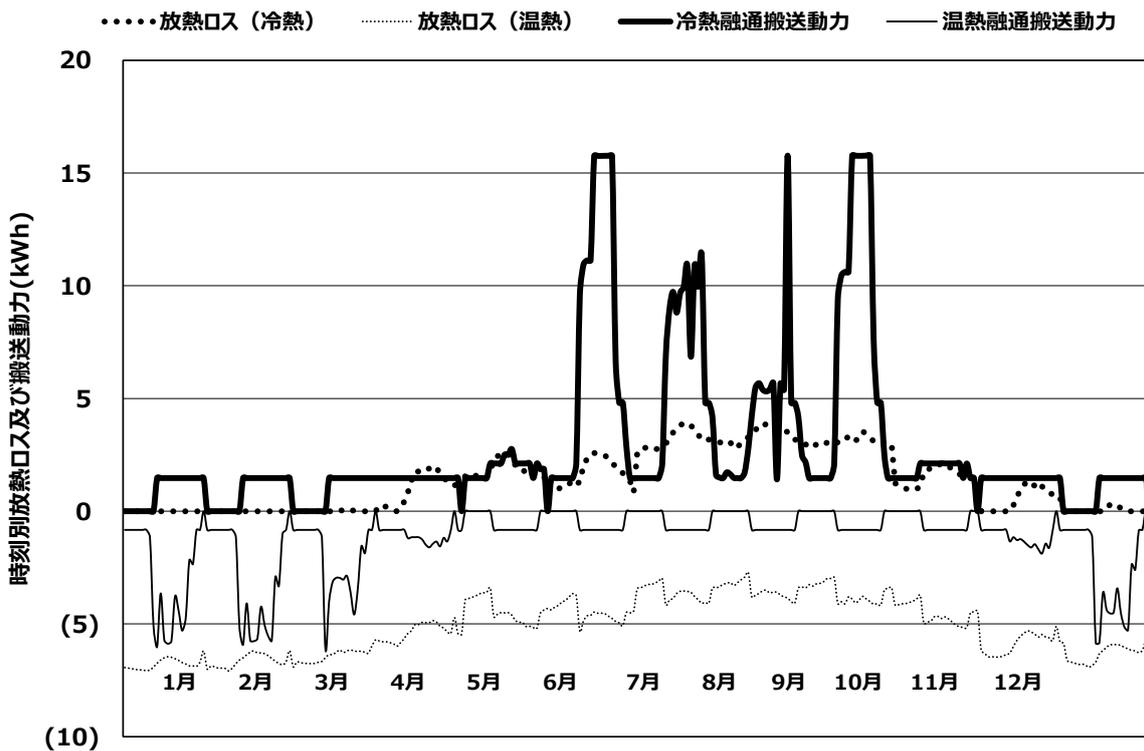


図 5.3.5 各月平日代表日における熱融通に伴うエネルギーロス（放熱ロス・搬送動力）年間推移

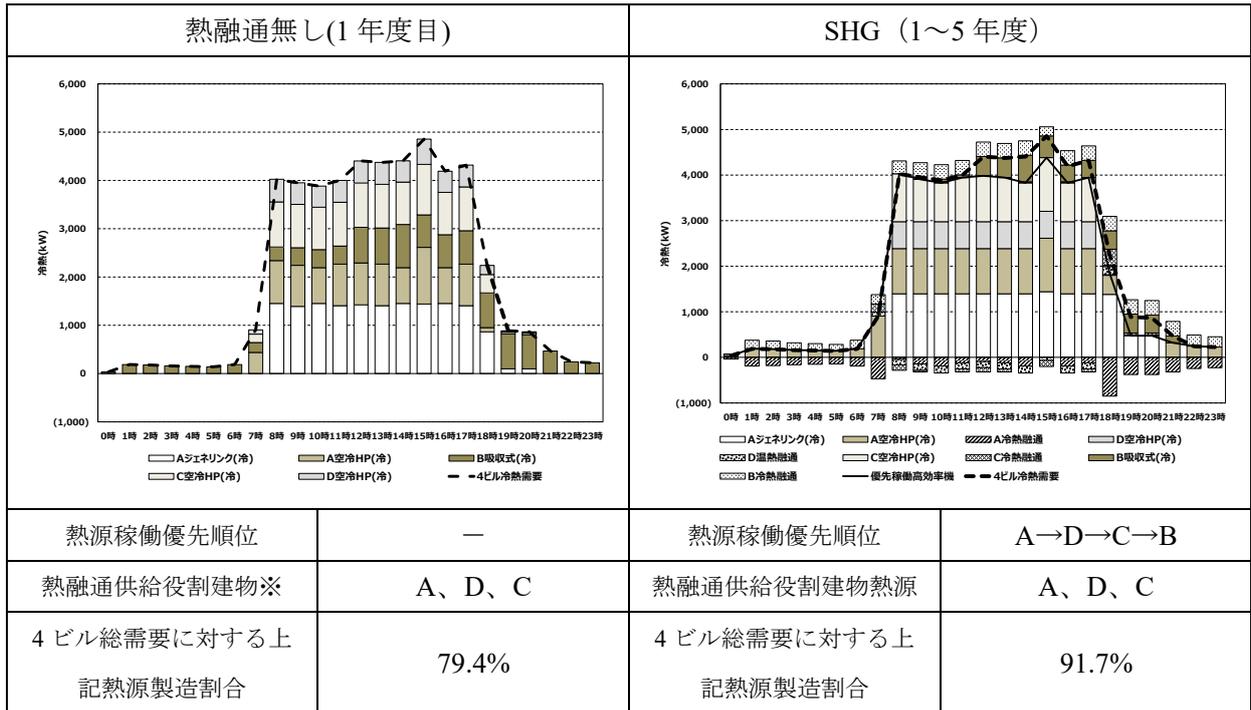
自己熱源で製造するよりも投入するエネルギーが少なく製造できる熱（熱融通する熱）を需要がピーク時にベース負荷に使用、中間期等のオフピーク期には熱融通のみで需要対応する。又、熱融通に伴うエネルギーロス（放熱ロス・搬送動力）と融通する熱の製造に使用するエネルギーの合計が自己熱源を使用して賄う方が少ない場合には熱融通を行わずに従前と同じ熱源の運用を選択するため、高い省エネルギー効果が期待できる。

熱融通に伴うエネルギーロスは、全シミュレーション結果から、年間放熱ロス率=年間放熱ロス熱量÷年間熱融通受入量、及び年間搬送動力率=年間搬送動力消費電力量÷年間熱融通受入量と定義すると、CGS 電主運転の全ケースにおいて、年間放熱ロス率が 1.71%~2.33%、年間搬送動力率が 0.95%~1.11%となり、熱融通受入量に対して 5%未満となった。

5.3.3 熱源運用と熱融通状態の時刻別推移

本研究では SHG を使い、既築建物が従前よりも高効率な熱源に更新、その導入効果を複数建物で供受する事を確認する。本項では、CGS 廃熱とヒートポンプから供給する 1～5 年度、高効率ヒートポンプから供給する 11～25 年度、従前は吸収冷温水機を使用し、熱融通受入の役割が主であった建物 B が熱源更新した高効率ヒートポンプから供給する 31～35 年度と、供給役割が変化する設定フェーズに着目、時刻別の熱源運用状態を確認する。具体的には、CGS 定格運転・熱融通割合 30% のケースの中で夏季（冷熱）・冬季（温熱）・中間期 I（事務所ビル・冷房需要ありの冷熱）及び中間期 II（事務所ビル・暖房需要ありの温熱）の平日代表日における時刻別熱源の運用と双方向熱融通の状態を図 5.3.6～9 に示す。なお、グラフ中の一側の熱融通分は供給分を表し、+側は受入分を表す。比較のため 1 年度目の熱源構成で熱融通しない場合も例示する。又、熱融通の供給役割を担う建物（熱源）の 4 ビル総需要に対する製造割合を記載する。その際、熱融通無しのケースは、1～5 年度の SHG ケースで供給役割を行った建物（熱源）の製造量の 4 ビル全需要に対する割合を参考に示す。

(1) 夏期・冷熱



※：参考値として1~5年度 SHGの熱供給役割建物の熱製造割合を示した。以下、同様。

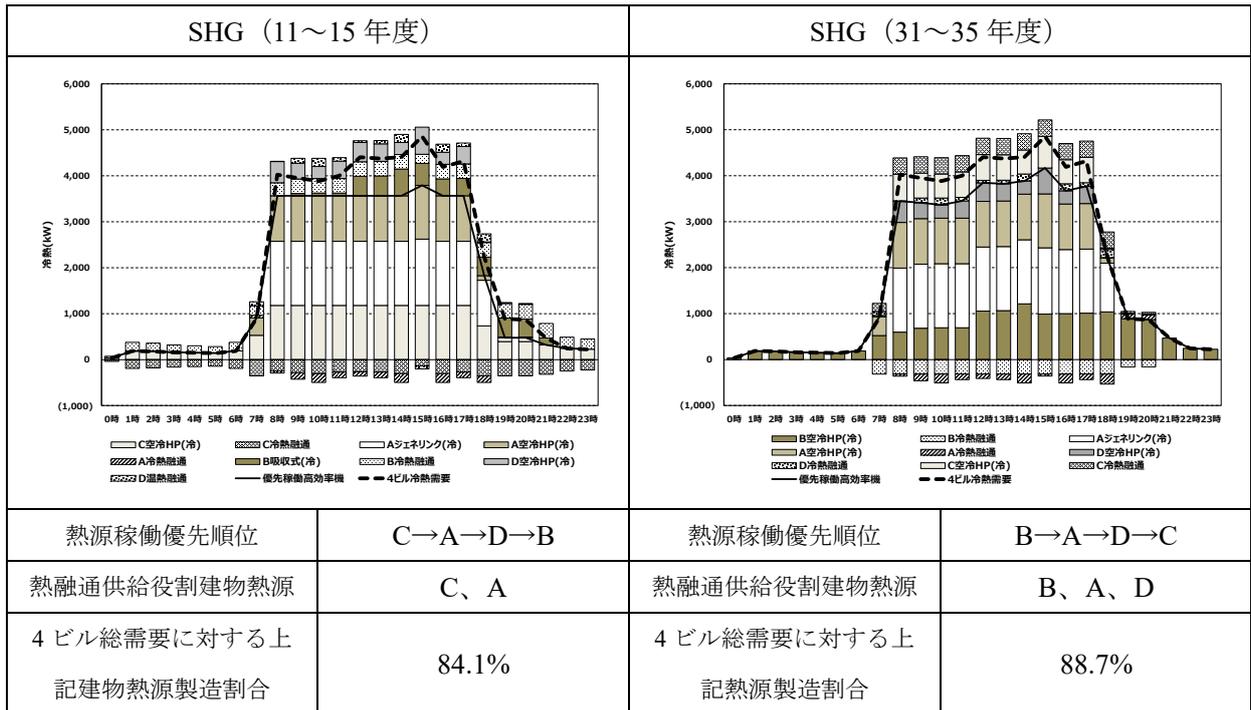


図 5.3.6 各フェーズにおける熱源運用と熱融通の状況 (夏季・冷熱)

SHG (1~5年度) では、ピーク時間帯に ACD がまず自家消費に熱を使用、定格稼働させ生じた余剰分をホテル B に融通、B は不足分を自己熱源を補完稼働させ需要対応する。但し、夏期・日中は、各ビル共に冷熱需要が多いため余剰分が少なく、ピーク需要に対する熱融通割合は少ない。同時時間帯、CD は 7 時、18 時は A から受入するが、8~17 時は供給側となる、所謂、熱融通の流れる向きが逆となる双方向熱融通が行われる。更に (11~15年度) 及び (31~35年度) においては、第一優先が C、B に変更、他の建物も同様の双方向熱融通を行う。そして各熱源が高効率熱源に更新

しているため、従前よりも更に省エネルギーな熱源運用が可能となる。

(2) 中間期・冷熱

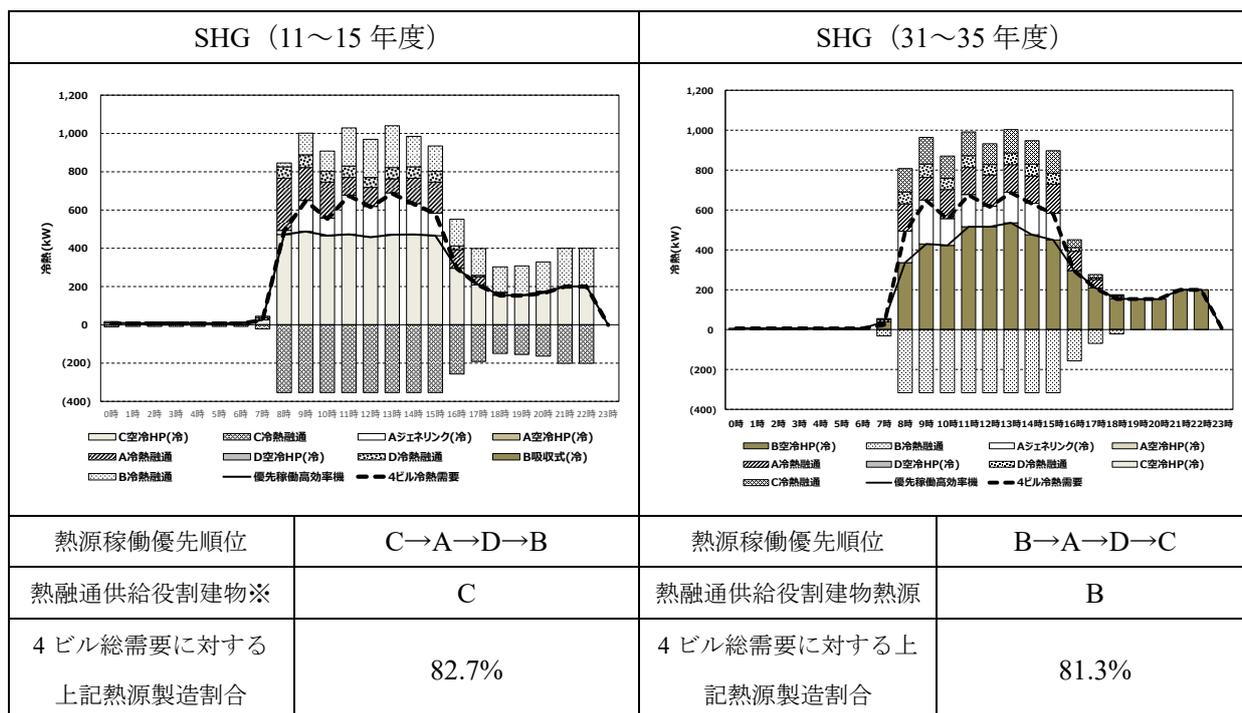
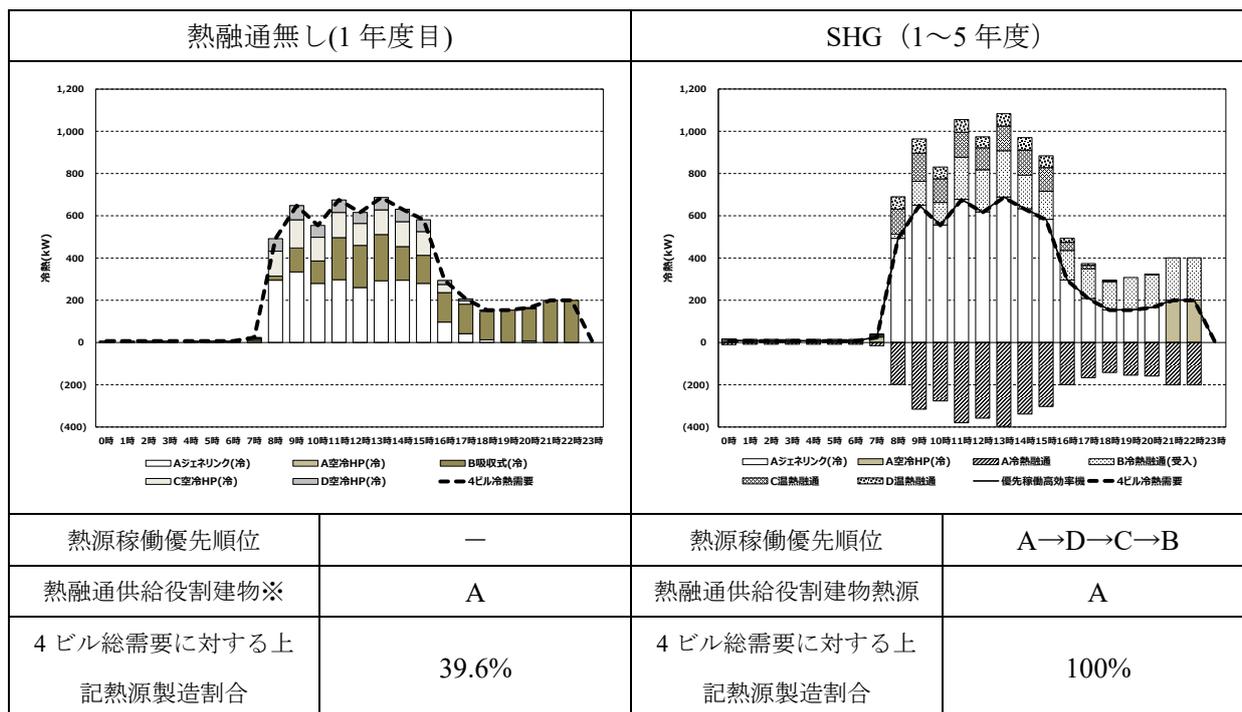


図 5.3.7 各フェーズにおける熱源運用と熱融通の状況 (中間期・冷熱)

ACDの事務所ビルに冷熱需要が生ずる中間期(図5.4.7)は、(1~5年度)はA、(11~15年度)はC、(31~35年度)はBが全建物の冷熱需要を製造、自家消費後、その余剰分を他のビルに熱融通する。その際、他のビルは受入熱融通分で冷熱需要を全て賄い、自己熱源は稼働しない。

(3) 冬期・温熱

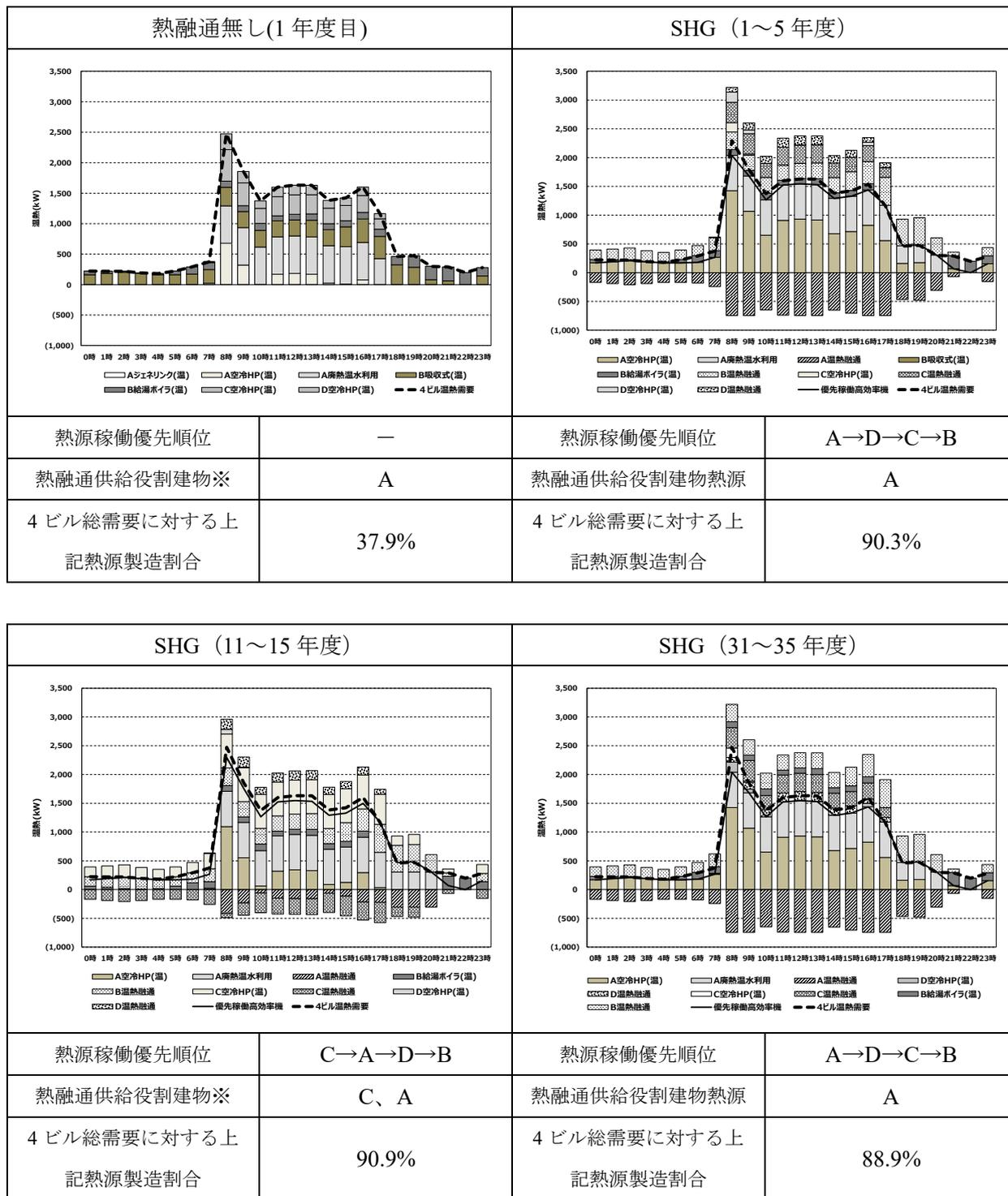


図 5.3.8 各フェーズにおける熱源運用と熱融通の状況 (冬季・温熱)

冬季・Bの温熱、特に給湯需要対応に、AのCGS稼働時間帯(8~21時)の廃熱を融通、その他の時間はBの自己熱源ボイラーを使用して需要対応する。(11~15年度)において、温熱源の稼働優先順位をCに設備更新で導入設定した空冷HPを第1位に設定した場合、全熱源年間平均COPは熱融通割合30%の場合「1.76」(A→C→D→Bの場合は「1.74」)となるため採用した。又、(31~35年度)では、Bがガス吸収冷温水機を空冷HPに設備更新し、冷熱についてはBを稼働優先順位第1位とした場合に最も高い全熱源年間COPとなったが、温熱については、Bを稼働優先順位第1位に

すると、全熱源年間 COP は「1.77」と低い値で、上記の順位の場合「2.00」になり採用した。これは、熱ルータによる熱融通の供給・受入の選択が必要で、B が給湯を含めた温熱需要があるホテルのために、空冷 HP の温熱を自家消費+他建物へ熱融通・供給して、給湯分を自己熱源（ボイラー）で製造するよりも CGS 廃熱を受入し、給湯需要と暖房需要の一部に使用し空冷 HP で需要に対して補完する方が省エネルギーとなるためである。双方向熱融通を検討する際、需要特性を考慮し、全熱源年間 COP を使用し熱源稼働優先順位を決定する事が最適解を得る事に繋がると考えた。

(4) 中間期・温熱

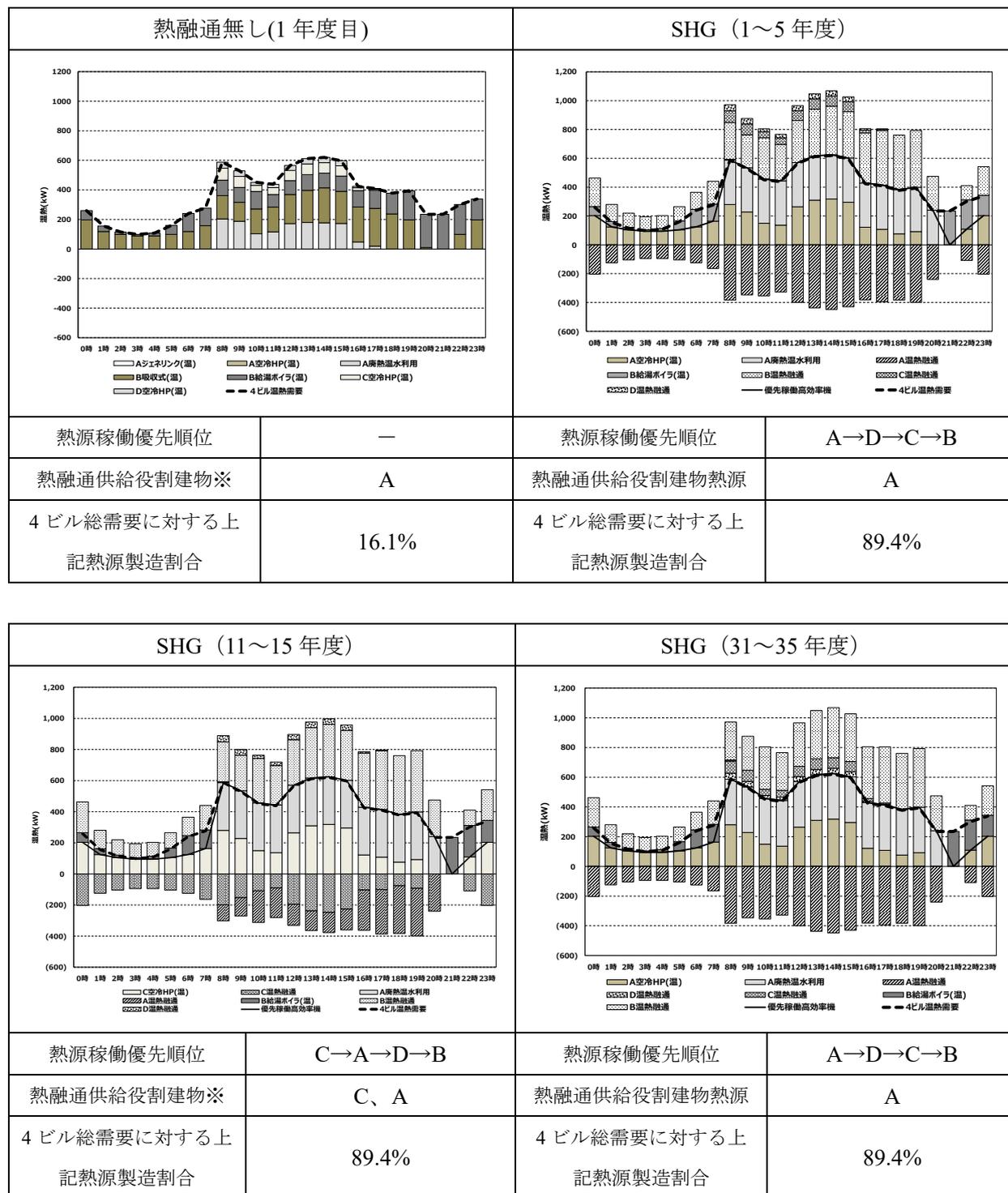


図 5.3.9 各フェーズにおける熱源運用と熱融通の状況（中間期・温熱）

温熱需要が事務所用途の ACD に生ずる中間期、A の CGS が稼働している時間帯（8～21 時）は廃熱を優先的に活用、空冷 HP で製造した熱と併せて供給する。結果、BCD は自己熱源を稼働せず、熱融通のみで需要を賄う。CGS が停止している時間帯には、暖房負荷対応は A 又は C の空冷 HP から供給、給湯負荷のある B は自己熱源のボイラーで対応する。

以上から、いずれのケースにおいても 4 ビルの全需要に対して優先稼働する建物の熱源で 80% を超える割合を賄える事が確認できた。設備更新に伴い熱融通の供給を新たに導入した高効率機が担う事でエネルギー消費量の削減に繋がると共に、熱融通だけでは不足する需要に対応する補完稼働する熱源機も、従前、供給役割を担っていた高効率機が対応する事で、更にシステムとしての高効率化が図られ、SHG は持続的に省エネルギー化が可能な熱融通システムと考える。

5.3.4 双方向熱融通によるエネルギー需要の統合化効果

各建物熱源機運転時間を 35 年間合計した時間を熱源機累積稼働時間と称し、熱融通無と双方向熱融通割合 10%・20%・30% の各ケースを同時間に比較した結果を図 5.3.10 に示す。図中の時間数は各建物熱源の 35 年間の稼働時間の合計であり、建物規模・熱源機の容量で定まる時間ではなく、同用途の建物であれば同じ時間となる。結果、熱融通無しケースに比べて、双方向熱融通割合 10% のケースで 96.9%、同 20% で 78.1%、同 30% で 69.0% となった。A は事務所としたが CGS を設置しており、廃熱を冷熱源に利用、又は暖房利用し自家消費及び熱融通に使用したため、同じ事務所の CD と稼働時間が異なる。また、熱源容量及び稼働優先の設定と同設定期間が異なる事から、C と D の稼働時間も異なる。

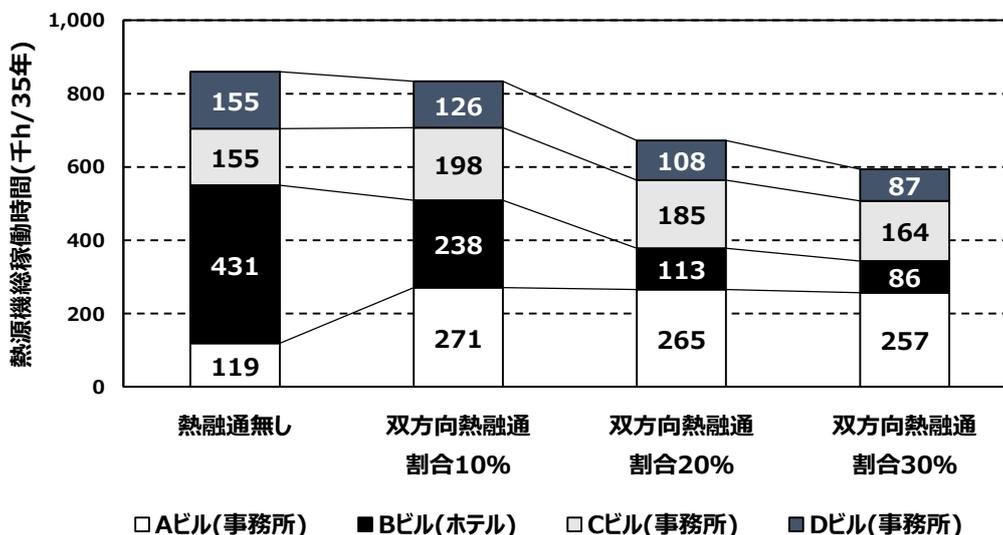


図 5.3.10 熱融通割合別の 35 年間における各建物熱源累積稼働時間

エネルギーの面的利用効果である需要の統合化がなされ、SHG のケースは熱源の稼働時間が熱融通無しに比べ累積稼働時間が短くなり、結果的に熱融通無しの場合と比較して、運転時間が短くなる事によってメンテナンスコストの上昇を抑え、熱源の長期使用に繋がる事が期待できる。

5.3.5 熱源稼働負荷率の向上と低負荷稼働時間の低減効果

双方向熱融通受入する事で、特に冷熱需要対応において、従前、20%以上の比例制御域で稼働できていた熱源機が、熱融通を受入、補完稼働して20%未満のON/OFF制御域の運転になる事が懸念される。そこで、熱融通受入前後の熱源稼働負荷率について確認した。5.4.3と同じケースの各建物熱源機の負荷率20%未満運転時間と冷熱源稼働平均負荷率を図5.4.11~12に示す。なお、図中の適用フェーズ年度の左に記載の丸数字は同フェーズにおける熱源稼働優先順位を示す。

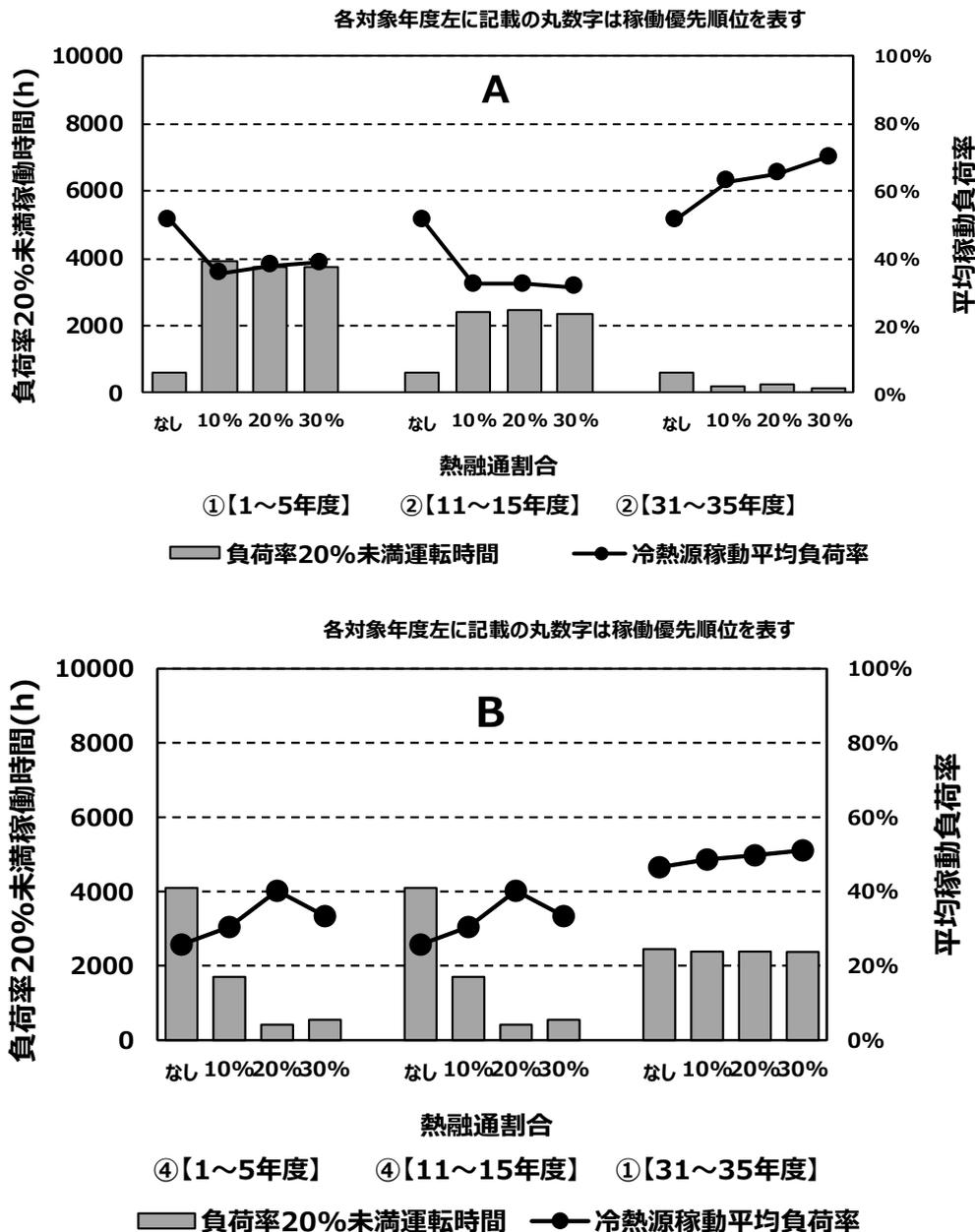


図 5.3.11 負荷率 20%未満運転時間と冷熱源平均稼働負荷率 (A 及び B)

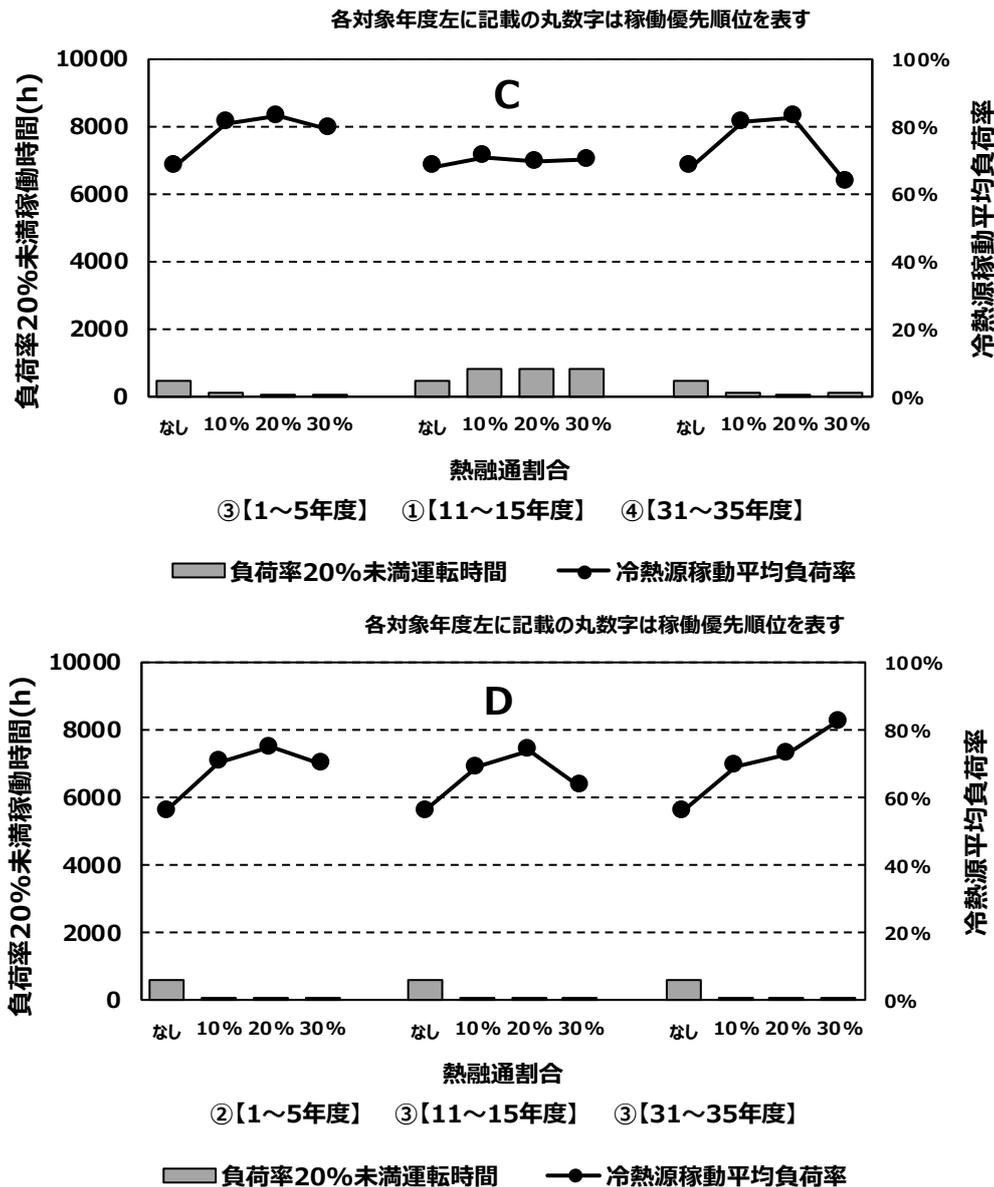


図 5.3.12 負荷率 20%未満運転時間と冷熱源平均稼働負荷率 (C 及び D)

1~5年度・供給役割の A ビルにおける負荷率 20%未満の稼働時間は、熱融通無し：602 時間に対して 10%：3,898 時間、20%：3,757 時間、30%：3,751 時間と増加するが、平均稼働負荷率は熱融通無し：51%に対して 10%：36%、20%：38%、30%：39%と低下するが、熱の面的利用による統合効果で高負荷率稼働時間帯が多く、負荷率は 20%未満にはならない。これは、本項で設定した 4 ビルが 24 時間を通じて冷熱・温熱需要があるホテル 1 棟と 3 棟の事務所の組合せであったため、熱融通の供給役割を担う建物がホテルの低負荷率需要域に熱融通する供給役割となった場合、熱源稼働負荷率が 20%未満となる運転時間が増え、一方、熱融通受入するケースのホテル B は、負荷率 20%未満の熱源稼働時間が大幅に減少した。又、熱源の稼働優先順位は全熱源年間平均 COP が高い組み合わせを確認し決定したが、全ケースで年間を通じた冷熱源稼働平均負荷率は比例制御域である 20%超の値である事が確認でき、熱源の省エネルギー運用に繋がる事が確認できた。

5.4 まとめ

本章では、段階的に熱源更新を行う 4 つの既築建物を対象とし、建物間双方向熱融通ネットワークシステム・システム・SHG の有効性を確認するシミュレーションツールを開発した。本シミュレーションツールは、段階的に熱源更新を行う毎に、全建物熱源の年間 COP が高くなる様に熱源の稼働優先順位を定め、諸条件（外気温や負荷率等）を考慮し、熱融通に伴うエネルギーロスも加えて、各段階における各熱源機のエネルギー消費量を算出する。更に建物間熱融通せずに各自己熱源で需要を賄うか否かの確認を行い、各建物のエネルギー消費量を算出する事が特徴である。

省エネルギー率は 6～30 年度目の平均で、熱融通を行わない場合に比べ 10%熱融通割合の場合、16.6%、同 20%で 21.2%、同 30%で 22.3%上回り、年次を経る毎に増加する傾向が確認できた。全熱源年間平均 COP も、1 年度目熱融通無しケースの全熱源年間平均 COP は 1.17、それに対して 10%20%30%の熱融通量の各ケースは 1.44、1.55、1.59 となり、その後も熱源更新に伴う稼働優先順位の見直しを行う事で、全熱源年間 COP は増加する。5.3.2 では、熱融通に伴うエネルギーロスは、全ケースで年間放熱ロス率（年間放熱ロス熱量／年間熱融通受入量）は 1.71～2.33%、年間搬送動力率（年間搬送動力消費電力量／年間熱融通受入量）は 0.95%～1.11%となり、熱融通受入量に対して 5%未満となった。5.3.3 では、熱源稼働優先順位の見直しを行い、熱源運用と熱融通状態について、CGS 廃熱とヒートポンプから熱融通（供給）する 1～5 年度、高効率ヒートポンプから供給する 11～25 年度、従前に熱融通受入役割が主であった建物（B・ホテル）が高効率ヒートポンプに熱源更新して受入役割から供給役割に変更する 31～35 年度の 3 ケースについて、夏期（冷熱）・中間期（冷熱）・冬期（温熱）・中間期（温熱）の各期・時刻別推移を確認した。稼働優先の熱源機が各期の 4 ビル総熱需要に対して製造供給割合が 82.7～100%と高くなっている事が確認できた。特に中間期割合が高い。以上から、SHG は持続的な省エネルギー化が可能な熱融通システムと考えられる。5.3.4 では、4 ビルの冷熱需要に対し供給を担う建物の ON/OFF 制御域となる負荷率 20%未満の稼働時間が増加するが、全ケースで年間を通じた冷熱源稼働平均負荷率は比例制御域である 20%超の値である事が確認でき、熱源の省エネルギー運用に繋がる事が確認できた。

【第5章参考文献】

- 5-1) (一) 都市環境エネルギー協会：地域冷暖房技術手引書（改訂第4版）,2013.10
- 5-2) 三井金属エンジニアリング株式会社パイプ事業部：GNG パイプ技術資料（波付鋼管がい装断熱二重架橋ポリエチレン管），2001年12月制定，2009年9月改訂，P22
- 5-3) 天然ガスコージェネレーション機器データ 2014、日本工業出版株式会社、平成 26 年 4 月 10 日発行

第6章 既存の地域冷暖房と連携した
建物間双方向熱融通ネットワーク
システムに関する研究

第6章 既存地域冷暖房と連携した建物間双方向熱融通ネットワークシステムに関する研究

6.1 はじめに

本章では、既存地域冷暖房のポテンシャルを活用した建物間双方向熱融通の導入効果を確認する。既存市街地の既存地域熱供給（DHC）と DHC 需要家以外の周辺建物間と SHG を形成、DHC から熱融通する「建物間双方向熱融通ネットワークシステム地域熱供給連携型」を想定し、SHG の導入効果及びその事業性について分析する。検討モデルは既存地域冷暖房の熱源プラントから地域冷暖房エリアに隣接する1つのビル（建物用途：ホテル・事務所・商業施設・病院の4用途）に熱を供給、更に、熱融通配管の延長を変えて評価した。そして、同じ設置条件で熱源プラントを更新したプランで同様の検討も行った。

本研究では、建物間双方向熱融通 SHG の活用モデルの一つとして、熱供給の専門家である熱供給事業者が、SHG の供給役割を担う事で、地域冷暖房プラントの稼働率が向上し、熱受入する隣接の既築建物が省エネルギー化される事を確認する。又、その他期待される効果に関して評価を行う。

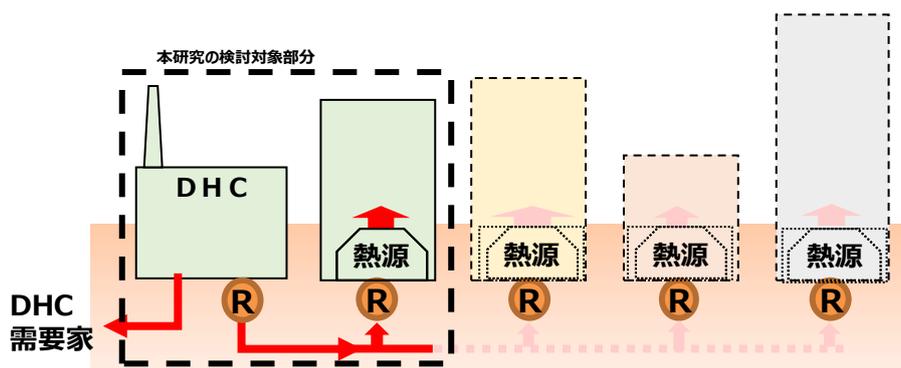


図 6.1.1 建物間双方向熱融通ネットワークシステム地域熱供給連携型

具体的には、6.2 で熱を供給する側の既存 DHC の省エネルギー化に関する動きと熱受入側として想定する既築建物の状況について概説し、6.3 で DHC 連携型 SHG のシミュレーション・フローを定め、熱を受入する既築モデル建物と DHC の熱源システム（熱源機・冷却塔・ガスコージェネレーションシステム・配管圧力損失・配管熱損失）や SHG の設定（熱融通量・熱融通配管口径・熱ルータ用熱搬送ポンプ等）等のシミュレーションモデルを設定した。そして同結果から 6.4 で、環境性（省エネルギー性）評価及びその他（熱融通配管敷設面積評価、既築モデル建物熱源補完運転割合と同稼働率評価、ガスエンジン廃熱の有効活用）に関する事項、6.5 で DHC 連携型 SHG 設備所有スキームの整理、6.6 で事業性評価に関する事項について行う。

6.2 既存 DHC を取り巻く環境の変化と既築建物の状況把握

エネルギー密度の高い都市部において省エネルギー化を推進するために、需要側の個々の建物側

で対策を図ると共に、複数建物間で熱エネルギーを面的に利用する事が期待されている。この面的エネルギー利用のうち、数多くの実績がある方式としてDHC（地域冷暖房）がある。DHCは1970年大阪千里地区に導入され、電力事業・ガス事業と同様に公益事業の一つとして、我が国の経済成長と共に全国で導入が進んだ⁶⁻¹⁾。特に、1980年代後半から2000年代前半に主要都市で多く採用され、現在稼働しているDHCの約半数を占めており（図6.2.1）、今後、多くのDHCで設備更新が行われる事が予想される。

以上の様な状況を踏まえ、多くのDHCの区域指定を行っている東京都は、「地域におけるエネルギーの有効利用計画制度」⁶⁻²⁾の見直しを2010年に行い、新規の大規模開発ばかりでなく、既存DHC事業者に対して、エネルギー利用効率の向上を促し、経済性を確保しつつ対象エリアの省エネルギー化を行うシステムに更新する事を求めている。

更に、電力事業・ガス事業と共に制度システム改革（エネルギーシステム三法の改正）が検討され、その中でDHCに関して、事業を許可制から登録制とした上に、料金規制や供給義務等の撤廃、需要家保護を図るための規制（契約条件の説明義務等）が事業者に課された制度に変更される等、既存のDHCを取り巻く環境は大きく変化してきている。

一方、第1章に記載した様に、オフィスビルの場合、2014年1月の日本不動産研究所の調査⁶⁻³⁾から、東京区部・大阪・名古屋・横浜の4都市における延床面積3千㎡以上のビルのうち、既築ビルの割合は98.1%と殆どであり、特に1982年（新耐震基準）以降に竣工した今後設備更新・リニューアルが考えられるオフィスビルが71.5%（4都市調査対象延床面積3千㎡以上のオフィスビル延床合計が9,072万㎡、1982年以降の同合計が6,484万㎡）を占めるとの報告があり、既築ビルの省エネルギー化は喫緊の課題と捉えることができる。

本研究では、SHGを活用し、既存DHCエリアに隣接する既築建物に同DHCから熱融通を行い、経済性を確保しつつ、既築建物を含むエリア全体が省エネルギー化するモデルを検討する。

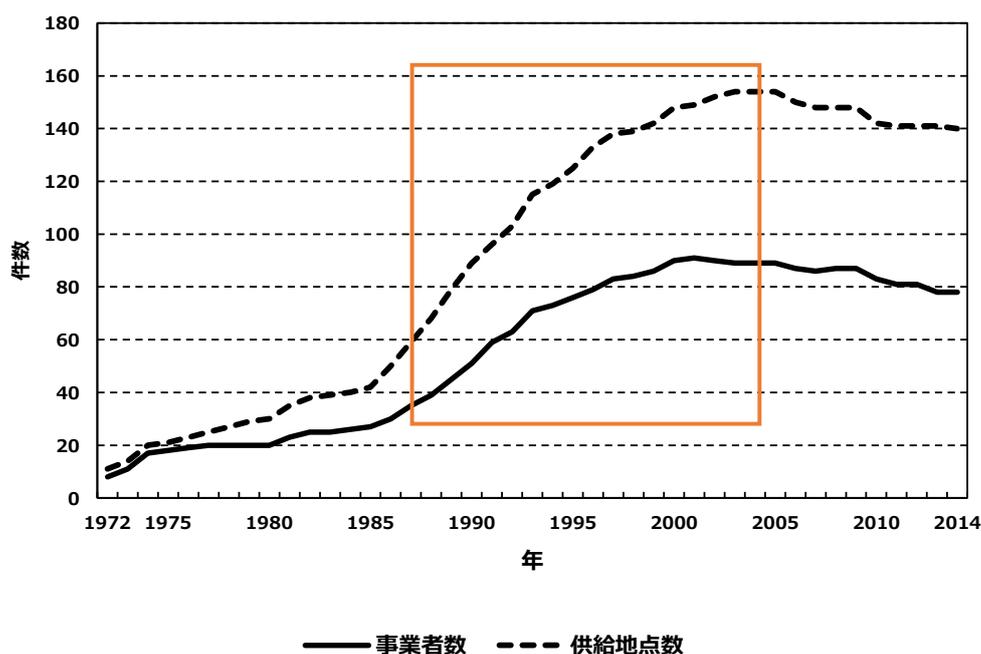


図 6.2.1 DHC 事業者数と供給地点数の推移

6.3 シミュレーションモデル

本節では、既存 DHC と連携した SHG を隣接する既築モデル建物を対象に構築、その環境性と事業性の評価を行う。そこで以下の条件を考慮したシミュレーションモデルを設定する。

- 既存 DHC は既存熱供給需要家に熱供給を行いながら、隣接する既築モデル建物と SHG を構築し熱融通する（図 6.3.1）。
- 既築モデル建物の用途はホテル・事務所・商業施設・病院の4用途とし、それぞれの建物延床面積は 10,000 m²とした。
- 各モデル建物のエネルギー消費原単位⁶⁻⁴⁾を定め、年間のエネルギー需要量及び平日・土曜・休日の各月平均日における時間別の需要量を設定した。
- 時間当たりの熱融通量は既築モデル建物の年間冷熱及び温熱需要量の 10%、30%、50%相当量を 8,760 時間で割った値とした。
- 熱融通配管延長は DHC から各建物まで 50m、100m、200m とし、熱ルータのポンプも同じ条件で設定した。
- 熱媒温度は、冷熱は温度差 5℃の冷水で需要入口 7℃→需要出口 12℃（平均温度 10.5℃）、温熱は温度差 10℃の温水で需要入口 65℃→需要出口 55℃（平均温度 60℃）とした。
- 放熱ロスの算出は、東京管区気象台の 1996 年～2006 年の 11 ヶ年の平均日時刻別データの外気温と熱媒の平均温度との差から求めた。

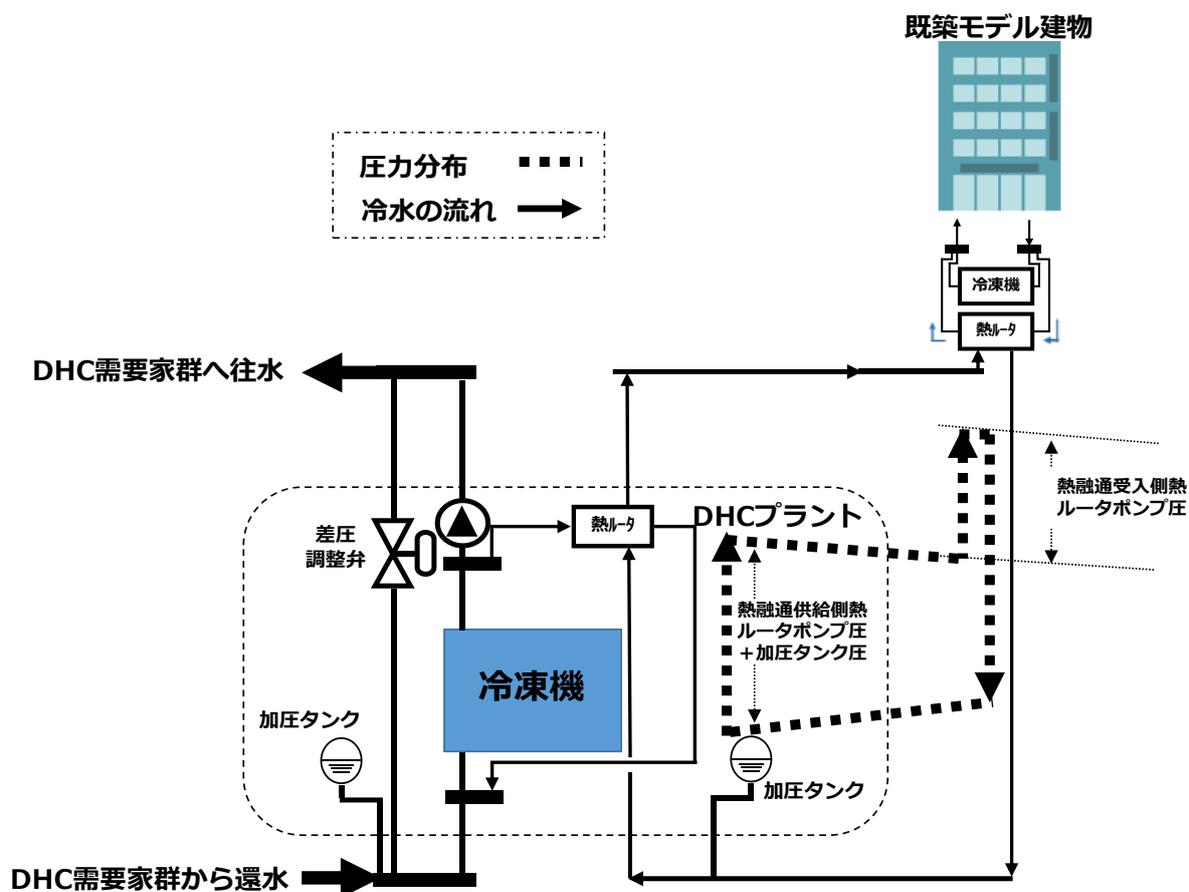


図 6.3.1 既存 DHC 連携型 SHG モデルのイメージ（冷熱融通の場合）

6.3.1 シミュレーション・フロー

前述の設定条件を考慮した既存 DHC 連携型の SHG の導入効果の評価シミュレーション・フローを図 6.3.2 に示す。

本シミュレーションは、時刻別に既築モデル建物側の熱負荷に対し、既存 DHC から熱融通する際、同熱を製造するのに要する投入するエネルギー量と放熱ロス、搬送動力（単位時間消費電力量を熱量換算）の合計が既築モデル建物で同熱を自己熱源で製造、その際に投入するエネルギー量よりも小さい場合に熱融通を行うとした。この熱融通実施判断の考え方から、熱融通を行わない場合と、熱融通を受入し、同熱だけで既築モデル建物の需要を賄う事ができない場合（以降、補完運転）に自己熱源を稼働し需要を対応した。

以上から、本シミュレーションでは、熱融通を実施する際に消費するエネルギー量（DHC 側で消費するエネルギー量と熱融通に伴う発生するエネルギーロス）と既築建物が自己熱源を稼働し消費するエネルギー量を加えた合計値を 1 次エネルギー換算してエネルギー消費量とした。

さらに、熱融通しない場合とランニングコストの比較を行い、ランニングメリットも確認した。

そして、同メリットと熱融通配管や熱ルータ等の SHG のイニシャルコストを投資コストと捉えて、事業性評価を行った。

なお、熱融通配管長の影響を確認するため、配管長を 50m、100m、200m と変化させて、感度分析を行った。

最後に、DHC 全体を省エネルギー化する目的で、熱源設置スペースや設備容量等の要件を満たす条件で既存 DHC の熱源システムを見直した更新 DHC の設定を行い、シミュレーションを行い、既存 DHC と同様の評価を行った。

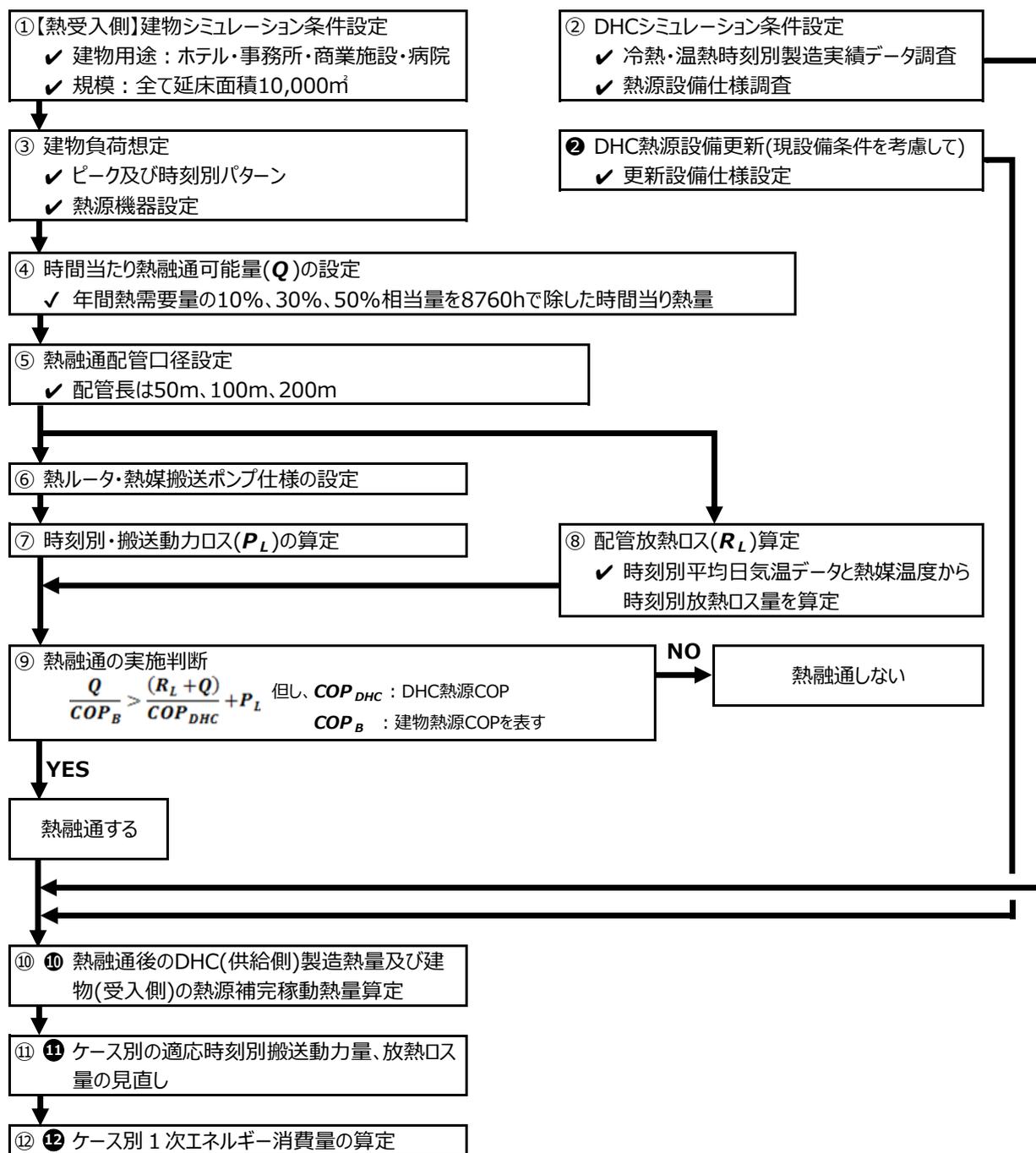


図 6.3.2 シミュレーション・フロー

6.3.2 既築モデル建物の熱源システム設定

東京都内の事務所ビルの寿命は約 40 年程度であると報告⁶⁻⁵⁾があるが、前述の様に都市部では新耐震基準適用のオフィスビルが約 6 割以上占めている。

そこで本研究では、既築建物熱源について山口らが空気調和・衛生工学会の 1984 年～2006 年に竣工した大規模ビルの熱源システム調査結果を整理し、約半数以上が吸収冷温水機を採用していると報告^{6-6)注1)}されている事から以下の様に既築モデル建物を設定した。

- 熱源システム：吸収冷温水機による建物別・中央熱源方式
- 熱源機器：COP は 1990 年代に設置されたもの⁶⁻⁷⁾を想定、負荷計算から得られたピーク負荷の 140%程度を総容量とし台数分割。比例制御範囲は 30%以上で、単機容量が 50%熱融通量より大きい事を確認。部分負荷特性及び外気温度特性も考慮した。
- 同上冷却水ポンプ等の補機：吐出圧一定制御^{6-8)注2)}
- 運転順位等：負荷率 60%超で次機器稼動、同一負荷率で稼動分担

以上の条件で前記の用途別エネルギー消費原単位を用いて年間のエネルギー需要量等を算出、表 6.3.1 に示す機器容量・台数とした。

表 6.3.1 既築モデル建物熱源システム構成

対象施設 延床面積:10000	最大負荷(kW)		熱源	機器容量 (kW)	台数	定格COP
	冷熱	温熱				
ホテル	739	721	ガス吸収冷温水機(冷房)	352	3	1.007
			同(暖房)	263	3	0.84
			給湯ボイラ	230	1	0.84
事務所	805	599	ガス吸収冷温水機(冷房)	352	2	1.007
			同(冷房)	422	1	1.007
			同上(暖房)	263	2	0.84
			同上(暖房)	316	1	0.84
商業施設	977	507	ガス吸収冷温水機(冷房)	422	3	1.007
			同上(暖房)	395	3	0.84
病院	918	751	ガス吸収冷温水機(冷房)	352	2	1.007
			同上(冷房)	633	1	1.007
			同上(暖房)	263	2	0.84
			同上(暖房)	475	1	0.84
			給湯ボイラ	170	1	0.84

注1) 空気調和・衛生工学会の竣工設備データのうち、1984～2006年に竣工された事務所2,339件、商業684件、宿泊1,003件、医療1,262件の竣工設備データを調査し、採用率の高い8種の熱源システムに集約、その採用比率を集計している。そのうち、吸収式を採用しているケースは事務所ビル延床面積6,000㎡以上で50%、商業・店舗延床面積8,000㎡以上で52%、宿泊延床面積2,000㎡以上で49%(同15,000㎡以上で66%)、医療延床面積6,000㎡以上で56%と報告している。

注2) 文献6-8)の(財)新機能素子研究開発機構の調査で、モータのインバータ化率はストック量で2000年6.5%、2005年10.4%と9割弱が汎用インバータ未装着と報告があり、モデル建物はインバータ無しとした。

6.3.3 DHC 施設の条件設定

首都圏内の DHC 事業者ヒヤリングを行い、負荷データ及び熱源設備の仕様等を入手した。

表 6.3.2 モデル建物熱源システム構成

対象施設	熱源	機器容量	台数	定格COP
【DHC】 ・供給対象建物 総延床面積 : 350,152m ² ・供給対象建物 : 7棟	電動ターボ冷凍機	1,936.0kW	2	5.0
	蒸気吸収冷凍機	7,032.0kW	8	1.31
	蒸気ボイラー	14,375.0kW	3	0.92
	同上	3,750.0kW	1	0.92
	コジェネ(ガスタービン) [*]	1,000.0kW	1	0.245
	同上廃熱ボイラー	1,437.5kW	1	1.0
	冷熱源総計	60,128.0kW	-	-
	【更新DHC】 :供給対象建物 等の条件は上記 と同じ	電動ターボ冷凍機	7,032.0kW	2
蒸気吸収冷凍機		7,032.0kW	6	1.31
蒸気焚ジェネリンク		1,969.0kW	2	1.51
蒸気ボイラー		14,375.0kW	3	0.92
同上		3,750.0kW	1	0.92
コジェネ(ガスエンジン)		1,000.0kW	2	0.423
同廃ガスボイラー		408.9kW	2	1.0
同ジャケット廃熱温水熱交器		446.8kW	2	1.0
冷熱源総計		60,194.0kW	-	-

^{*}コジェネ(ガスタービン)は当初2台設置であったが経年により現在は1台運転。故に、設置スペース及び対応する電気設備等は2000kW分あり。又、コジェネ部分に記載のCOPは発電効率を記す。

なお、下段記載の更新 DHC は現状の DHC の設備要件を満たす容量で DHC 全体を省エネルギー化する目的で熱源設定(更新 DHC)を行った。設定するに際して、リプレース検討対象設備の設置スペースの確認をした。(表 6.3.3) ^{注3)}

表 6.3.3 リプレース検討対象設備の設置スペース

現DHC				
検討対象設備	能力	台数	対象面積	合計面積
吸収冷凍機	7,032kW	2台	280m ²	505m ²
ターボ冷凍機	1,936kW	2台		
ガスタービン	1,000kW	2台 [*]	225m ²	

↓

更新DHC				
検討対象設備	能力	台数	対象面積	合計面積
ターボ冷凍機	7,032kW	2台	227m ²	417m ²
蒸気焚ジェネリンク	1,969kW	2台		
ガスエンジン	1,000kW	2台	190m ²	

注3) 更新対象の吸収冷凍機(7,032kW×2台)及びターボ冷凍機(1,936kW×2台)の設置スペースが7.5m×37.5m≒280m²、リプレース導入対象はターボ冷凍機(7,032kW×2台)が本体5.7m×9.8m×2台≒112m²、チューブ引き抜きスペースが6.4m×3.6m≒25m²インパータ盤3.1m×0.8m×2台≒5m²、蒸気焚ジェネリンク(1,969kW×2台)が本体4.58m×7.0m×2台≒65m²、チューブ引き抜きスペース5.04m×3.18m≒20m²、以上から撤去スペース:280m²>112m²+25m²+5m²+65m²+20m²=227m²、以上から更新設置可能と考えた。又、コジェネ設備設置スペースは、既存ガスタービン設置スペース225m²>ガスエンジン設置スペース190m²、以上から同様に更新設置可能と考えた。なお、コジェネ設備の運転時間については、ヒヤリング結果及び経年を考慮し、既存DHCのガスタービンは1台・7時~21時(14時間)の運転時間、更新DHCについては、電力・熱の時刻別需要量を勘案し、ガスエンジン2台を8時~24時(16時間)の運転時間でシミュレーションを行った。又、ガスタービン・ガスエンジン共にメンテナンスに伴う運転停止時間をシミュレーションの中で考慮した。近年、インパータ・ターボ冷凍機は定格時COPが向上すると共に、低負荷時効率が最大となる部分負荷特性が優れた仕様となっている。更に、需要端効率と同等以上の発電効率を有するガスエンジンからの電力を使う高効率なプラントの構築を考え選定した。

6.3.4 熱融通量の設定

既築モデル建物の年間時刻別負荷から年間需要量を算出し、同需要量の10%、30%相当量を8,760時間で除した熱融通量を設定、各モデル建物の低負荷・熱源 ON/OFF 制御域を熱融通で賄い、インシヤルコスト低減を考慮して小口径な熱融通配管を選択した。また、モデル建物熱源の比例制御下限値（容量の30%）以上での熱融通効果を確認するため、同様に50%相当の熱融通量を設定した。各既築モデル建物の熱融通量は表6.3.4に示す。

表 6.3.4 各既築モデル建物の熱融通量と年間熱融通割合

建物用途	熱媒	最大負荷 (kW)	熱融通量 (kW)	年間熱融通割合 (%)	建物用途	熱媒	最大負荷 (kW)	熱融通量 (kW)	年間熱融通割合 (%)
ホテル	冷水	739	25.0	11.2	商業施設	冷水	977	52.0	10.1
			75.0	29.8				190.0	35.6
			155.0	51.4				275.0	50.4
	温水	721	20.0	10.1		温水	507	31.0	11.1
			60.0	28.7				97.0	33.2
			125.0	51.7				165.0	56.0
事務所	冷水	805	35.0	11.3	病院	冷水	918	21.0	10.6
			115.0	33.2				82.0	30.4
			215.0	56.0				176.0	49.9
	温水	599	11.5	11.0		温水	751	13.0	10.5
			38.5	32.5				47.5	33.5
			81.5	56.2				90.5	55.8

6.3.5 熱融通配管口径と熱ルータ用熱搬送ポンプの設定

SHGは細い配管を選択し、比較的中低温の熱媒を融通するケースが想定されるため、熱媒の残存空気を考慮し最大流速3m/s以下⁶⁻⁹⁾で配管口径を選定、単位摩擦抵抗が400Pa/m以下⁶⁻¹⁰⁾である事も確認した。

ポンプ容量 (kW) は軸動力 P(kW) を $P = (Q \times H \times \rho \times g) / 1000$ (Q (m³/min) : ポンプ吐出量、H (m) : ポンプ全揚程、ρ (kg/m³) : 液体密度 (水の場合 1,000 kg/m³)、g (m/s²) : 重力加速度から、ポンプ効率60%、余裕率40%とし選定した。更に、熱融通停止・再搬送に伴う配管中の熱媒の入替時間を算出し、熱搬送ポンプ消費電力量に加えた。以上の結果を表6.3.5に示す。

表 6.3.5 熱融通配管口径と熱ルータ・熱搬送ポンプ容量

建物用途	熱媒	熱融通割合	熱融通配管口径	ポンプ容量	建物用途	熱媒	熱融通割合	熱融通配管口径	ポンプ容量
ホテル	冷水	10%	32A	0.65kW	商業施設	冷水	10%	50A	1.12kW
		30%	50A	1.59kW			30%	80A	3.80kW
		50%	80A	3.17kW			50%	100A	5.39kW
	温水	10%	32A	0.33kW		温水	10%	32A	0.49kW
		30%	50A	0.96kW			30%	50A	1.45kW
		50%	65A	1.75kW			50%	65A	2.38kW
事務所	冷水	10%	40A	0.79kW	病院	冷水	10%	32A	0.79kW
		30%	65A	2.38kW			30%	65A	2.38kW
		50%	80A	4.29kW			50%	80A	4.29kW
	温水	10%	25A	0.16kW		温水	10%	25A	0.16kW
		30%	40A	0.65kW			30%	40A	0.65kW
		50%	50A	1.28kW			50%	50A	1.28kW

6.3.6 熱融通配管放熱ロスの算定

保温内側温度を温水：65℃→55℃（平均温度60℃）、冷水：7℃→14℃（平均温度10.5℃）、配管周

囲温度を外気温（東京管区気象台データ）とし各月平均日×24h 毎に放熱ロスを算出した。具体的には以下の算定式から求めた。

$$\begin{aligned}
 q_1 &: \text{配管からの放熱量 (W/m)} & Rl_e &: \text{表面熱抵抗 (mK/W)} & Rl &: \text{保温材の熱抵抗 (mK/W)} \\
 \theta_{si} &: \text{保温材内側温度 (}^\circ\text{C)} & \theta_a &: \text{周辺温度 (}^\circ\text{C)} \\
 h_{se} &: \text{表面熱伝達率 (W/m}^2\text{K)} & \lambda &: \text{保温材熱伝達率 (W/m}^2\text{K)} & \theta &: \text{平均温度 (}^\circ\text{C)} \\
 D_e &: \text{保温材外径 (m)} & D_i &: \text{保温材内径 (m)}
 \end{aligned}$$

$$q_1 = \frac{1}{(Rl_e + Rl)} \times (\theta_{si} - \theta_a) \quad (6.1)$$

$$Rl_e = \frac{1}{(h_{se} \times \pi \times D_e)} \quad (6.2)$$

$$Rl = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \times \left(\frac{1}{\lambda}\right) \ln \frac{D_e}{D_i} \quad (6.3)$$

$$\lambda = 0.0324 + 1.05 \times 10^4 \times \frac{\theta_{si} + \theta_a}{2} + 4.62 \times 10^7 \times \left\{ \frac{(\theta_{si} + \theta_a)}{2} \right\}^2 \quad (6.4)$$

以上の式を用いて各月代表日×24時間の放熱量を算出した。なお、周辺温度が保温材内面温度よりも低い冷水供給の場合は、放熱量は0とした。

なお保温材（グラスウール）厚さは冷水 40mm、温水 25mm⁶⁻¹¹⁾とした。

6.3.7 熱融通搬送ポンプ電力消費量及び熱媒入替ポンプ電力消費量

各モデル建物への熱融通は、放熱ロス+搬送動力に熱融する熱を製造するため使用するエネルギー消費量の合計が熱融通を行わず自家消費する際のエネルギー消費量よりも大きい場合行わず、需要対応は建物自己熱源を補完運転した。又、時間別に熱融通ポンプ電力消費量、及び熱媒入替に必要なポンプ消費電力量を算出して、いずれも一次エネルギー消費換算し評価した。

6.4 環境性（省エネルギー性）及びその他評価結果

6.4.1 SHG による建物熱融通を導入したモデル建物の省エネルギー評価

前記 6.3 に示した設定条件に従いシミュレーションを行い、従前の建物別熱源方式+DHC と比較した。その結果について、「E：省エネルギー率」で評価した。E を算出するにあたり、その計算式及びその計算に用いた各消費量の定義を以下に示す。

$$E = \frac{(Q_0 + D_0) - (Q_A + D_A) - (P_h + P_p)}{Q_0} \quad (6.5)$$

- Q_0 : SHG 導入前のモデル建物一次エネルギー消費量
- Q_A : 熱融通割合 A%の熱受入したモデル建物一次エネルギー消費量
- P_h : 熱融通搬送ポンプ動力一次エネルギー消費量
- P_p : 熱媒入替時の熱融通搬送ポンプ動力一次エネルギー消費量
- D_0 : SHG 導入前の DHC 一次エネルギー消費量
- D_A : モデル建物に熱融通割合 A%熱融通した DHC 一次エネルギー消費量

6.4.2 省エネルギー率計算結果

既築モデル建物の省エネルギー率は SHG を構築し DHC から熱融通を受入した場合、BAU 比 0.8%~10.1%となった。又、更新 DHC から熱融通した場合は、BAU 比 1.2%~13.8%となった。(図 6.4.1) なお、DHC から更新 DHC に更新した際の地域冷暖房熱源プラントの省エネルギー率は BAU 比 12.0%となった。

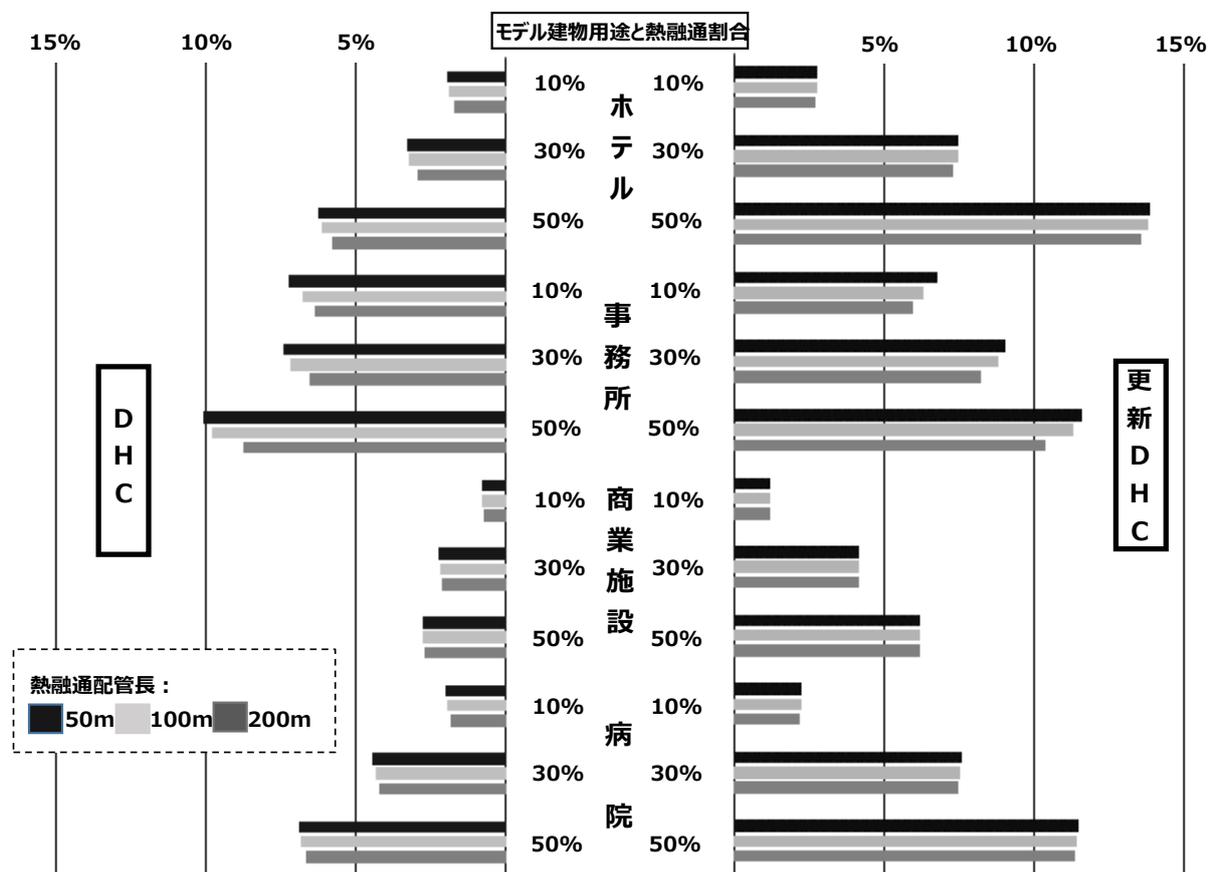


図 6.4.1 シミュレーション結果 (DHC から各既築モデル建物へ熱融通したケースの省エネルギー率と設備更新に伴う DHC 部分の省エネルギー率)

なお、それぞれ熱融通する前の地域冷暖房の総合エネルギー効率 (= 熱販売量/一次エネルギー消費量) は、DHC が 0.57、更新 DHC が 0.68。

6.4.3 熱融通配管敷設断面積

DHC は熱源設備から各建物まで地域配管の敷設が必要で、初期コストが大きいという点が課題である。地域配管敷設費用は、都市化が進んだ地区では一般的に高く、プラント設備費の3~4倍程度かかる例があると報告されている⁶⁻¹²⁾。SHG は熱融通配管を小口径化する事で省コスト化を目論見、本研究ではベース負荷需要（年間需要量の10%、30%、50%相当を8760時間で除した熱融通量）を賄う配管口径を定めた。又、配管離隔距離を100mm⁶⁻¹³⁾とした場合、各モデル建物への熱融通配管（冷温水各2本）の敷設有効断面積は、全量供給するDHCの30%~60%程度となった。同結果を表6.4.1に、算出した配管敷設断面積のイメージ図を図6.4.2に示す。

表 6.4.1 熱融通配管敷設有効断面積比較

モデル建物	ホテル				事務所				商業施設				病院				
	熱融通相当割合	全量	10%	30%	50%	全量	10%	30%	50%	全量	10%	30%	50%	全量	10%	30%	50%
25A						●									●		
32A		○●									●				○		
40A						○	●									●	
50A			○●					●			○	●					●
65A				●			○						●		○		
80A				○				○				○					○
100A					●				●				○				
125A	○●				○								○●				
150A										○							
断面積計㎡	0.20	0.06	0.08	0.11	0.18	0.06	0.08	0.10	0.20	0.07	0.10	0.13	0.20	0.06	0.08	0.10	
同上一比率	-	29.9%	39.2%	53.1%	-	33.2%	46.4%	54.5%	-	34.3%	47.8%	61.5%	-	28.2%	41.8%	49.1%	

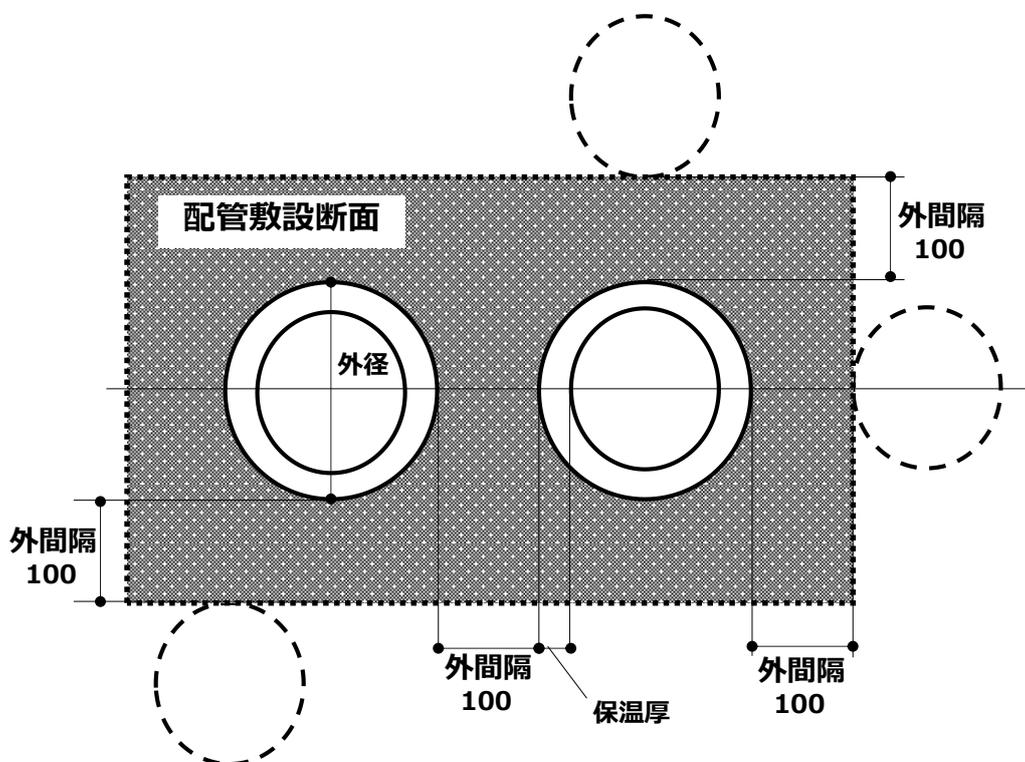


図 6.4.2 配管敷設有効断面積のイメージ

6.4.4 既築モデル建物熱源補完運転割合

SHGによる熱融通を受入する建物は、その熱で需要が賅えない場合、自己熱源を稼働し対応する（補完運転）。その補完運転時間（ON/OFF 運転時間を含む各熱源機運転時間の合計）を、熱融通を行わない場合の熱源機運転時間（前記と同じ）で除した値を“補完運転時間割合”とし、全ての用途の既築モデル建物・配管長 100m の場合の計算の結果を表 6.4.2 に示す。

熱融通割合が増えるほど補完運転相当時間割合は小さくなり、需要量に対する熱融通の寄与度合いが大きくなる事を確認した。

表 6.4.2 既築モデル建物熱源補完運転時間割合

モデル建物	熱融通割合	補完運転時間相当割合		モデル建物	熱融通割合	補完運転時間相当割合	
		冷熱源	温熱源			冷熱源	温熱源
ホテル	0%	100.0%	100.0%	商業施設	0%	100.0%	100.0%
	10%	78.1%	95.8%		10%	92.5%	93.4%
	30%	62.8%	79.0%		30%	71.8%	89.3%
	50%	41.8%	51.5%		50%	61.9%	88.5%
事務所	0%	100.0%	100.0%	病院	0%	100.0%	100.0%
	10%	45.8%	92.5%		10%	78.1%	99.8%
	30%	36.5%	86.2%		30%	47.8%	73.1%
	50%	28.7%	73.4%		50%	32.3%	60.2%

6.4.5 既築モデル建物熱源の低負荷需要域における稼働負荷率の改善

熱融通受入の効果を確認するため、熱源が ON/OFF 制御となる 30%未満（ON/OFF 運転）の冷房低負荷需要域における発生累積時間及び年間空調時間に対する割合、各建物熱源の稼働平均負荷率を図 6.4.3 に示す。低負荷需要時間帯が比較的少ない商業施設を除き、熱融通を受入する事で、低負荷運転域での自己熱源稼働を抑え、高い稼働負荷率に移行する運用改善に繋がる事が確認できた。

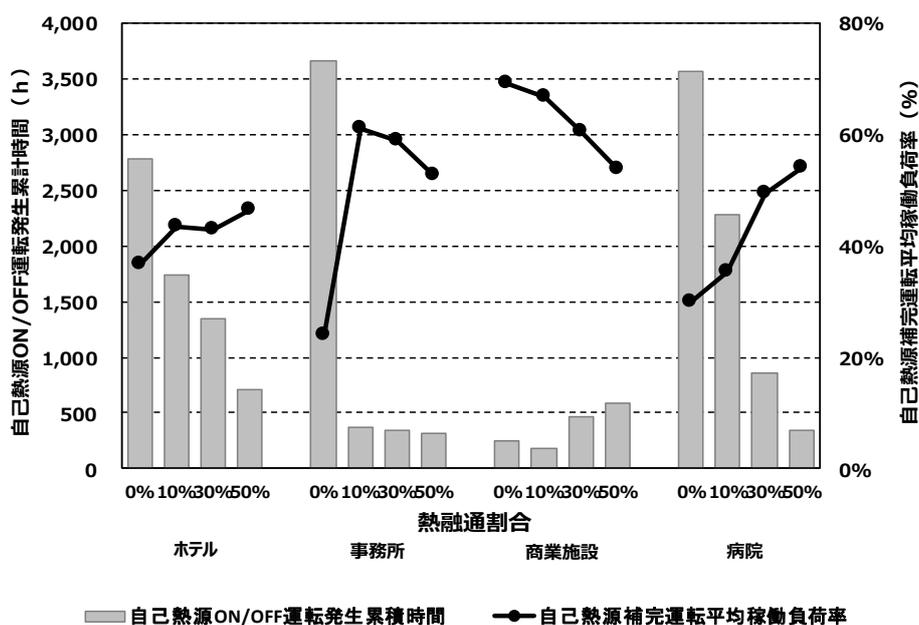


図 6.4.3 熱融通受入による既築モデル建物自己熱源補完運転の運用改善

6.4.6 ガスエンジン・コージェネレーション廃熱の有効活用

更新DHCのコージェネ廃熱利用は、廃ガス分を蒸気回収しDHC内の蒸気需要に利用、ジャケット廃熱分は温水回収し冷熱製造に利用した。しかし、SHGは廃熱温水の省エネルギー活用に着目し、冷熱製造利用でなくSHGで温熱利用とした。

熱融通配管長100mのケースの結果を表6.4.4に示す。未利用熱活用制度では、ガスエンジン方式コージェネの廃ガスや冷却水から回収した熱は、熱需要に応じて、量や質を調整できない事から全てを未利用熱と評価され、熱供給事業者から供給された熱であっても、未利用熱として取り扱う事が可能で、エネルギー消費原単位を算出する際に、購入した未利用熱をエネルギー使用量から除く事ができる。(表6.4.4中の熱源補完運転の割合分のみエネルギー消費原単位算出時の対象とする)

但し、蒸気回収分はDHC設備で利用可能なため、同需要家との配分を考える必要がある。そこで、本研究では廃熱温水を対象にその利用割合を示した。

表 6.4.4 ガスエンジ・ジャケット温水廃熱の温熱融通利用割合

モデル建物	ホテル			事務所		
熱融通割合	10%	30%	50%	10%	30%	50%
熱源補完運転	89.3%	70.6%	47.8%	90.4%	70.1%	48.7%
放熱ロス	0.6%	0.8%	0.9%	1.1%	1.3%	2.9%
DHC蒸気ボイラー	3.4%	8.5%	13.6%	0.0%	2.2%	4.2%
ジャケット温水利用	6.7%	20.1%	37.7%	8.4%	26.5%	44.3%
モデル建物	商業施設			病院		
熱融通割合	10%	30%	50%	10%	30%	50%
熱源補完運転	89.5%	69.5%	48.9%	89.8%	68.8%	49.1%
放熱ロス	0.4%	0.5%	0.6%	0.7%	0.8%	1.0%
DHC蒸気ボイラー	0%	0%	0%	3.2%	8.2%	11.5%
ジャケット温水利用	10.1%	30.0%	50.5%	6.4%	22.2%	38.4%

6.5 DHC 連携型 SHG 設備所有スキーム

DHC は既存需要家に熱供給を行いながら、プラント熱源機を定格運転させた際に生ずる余剰熱を SHG で熱受入する建物へ熱融通する。そこで、SHG を実施するために必要な熱融通配管・熱ルータは DHC 事業者が所有するスキームを考えた。(図 6.5.1)

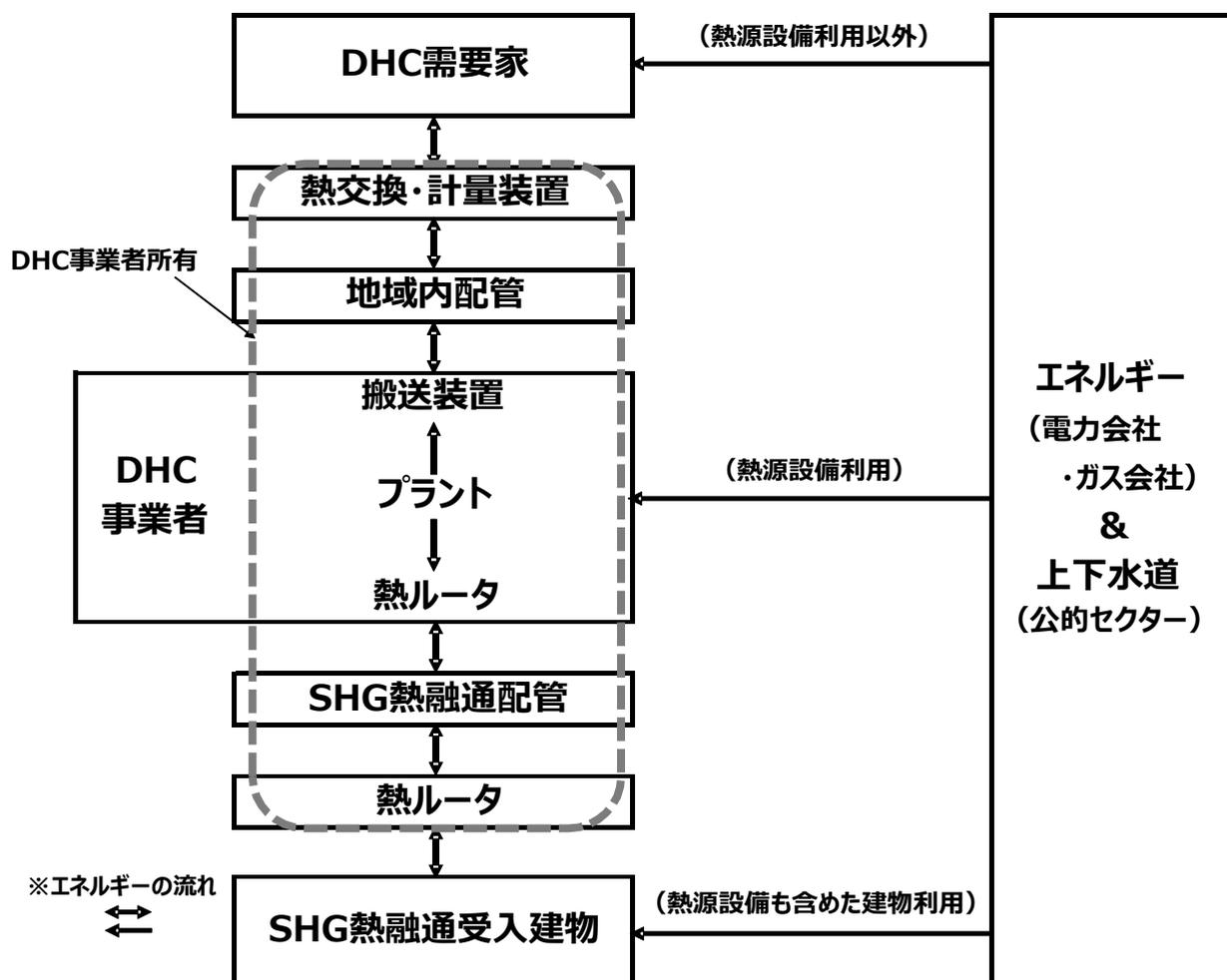


図 6.5.1 DHC 連携型 SHG 設備保有スキームイメージ図

6.6 SHG 導入事業性評価

SHG 導入の事業性評価について、熱融通配管長 100m のケースについて以下に記載する。

6.6.1 事業性評価の条件設定

SHG 構築に必要な熱融通配管敷設及び熱ルータ製作及び据付・同制御システムにかかる費用をイニシャルコスト項目(表 6.6.1)とした。ランニングコストについては、SHG を導入したモデル建物側の自己熱源補完運転と従前の個別中央熱源方式、それぞれの光熱費(電力・ガス・水道)と SHG の維持管理費、熱ルータ機械保険料を計上した。更に、導入インセンティブを図る目的でメリット分の 10%を熱融通メリットとして SHG 導入側(モデル建物)に再配分すると共に、光熱費等のエネルギーコストの上昇率を考慮し 1%分を加えた(表 6.6.2)。

具体的には、従前のモデル建物の光熱費と前述のランニングコストとの差額を原資に、事業期間 34 年(熱供給事業設備法定耐用年数 2 期分、但し、感度分析として想定した補助金適用(1/2 又は 2/3)については初年度のみとし、事業開始後 17 年度に設定した熱ルータのポンプ等消耗品交換等の費用は DHC 側が自己資金を適用)に対する事業性評価を以下の 3 つの指標で行った。

注1) 16 年事業年及び 34 年事業年の内部収益率 (IRR : Internal Rate of Return)

注2) 同事業年度の正味現在価値 (NPV : Net Present Value)

注3) 34 年間のプロジェクト事業期間内の損益推移

なお、NPV 算定における割引率は公共事業評価⁶⁻¹⁴⁾で用いられている 4%とした。

又、イニシャルコストに影響する各部材は、海外も含め、多数の研究開発・商品化が進んでおり、今後高性能化や低廉化が期待されるが、エネルギーコストに関しては、再生可能エネルギー等の新し取扱いや電力・ガス・熱供給各事業のスキームが大きく変わろうとしている状況にあり、不確実性があるため、将来、ランニングコストが変動する可能性を考慮して、算出したメリット額に対して、▲10%、▲30%と変化させた感度分析を行った。今回選択した工場製作の保温材付鋼管であるプレハブ保温保冷 2 重管(以下プレハブ 2 重管)及び、架橋ポリエチレン管^{注4)}(以下架橋 P(1))は、工場で外装を鋼管で覆い、断熱層を挟み鋼管、架橋ポリエチレン管を内管に使用した 2 重管である。製作を工場で行う事から、品質は同等と考えた。又、プレハブ 2 重管の土木工事費を架橋 P 材料費等に加えた架橋 P(2)も比較対象とした。

注4) 架橋ポリエチレン管の断熱材は発泡ウレタンを使用している。グラスウールに比べ断熱性能は 2 倍高く高性能であるが、SHG 放熱ロス計算では大口径架橋ポリエチレン管の実績が少ない事を考慮し、グラスウールの値を使用した。

表 6.6.1 イニシャルコスト算定項目一覧

項目	単価等
①配管材料単価(円/m) ^{a)}	(1)プレハブ保温保冷2重管： $Y=0.99X^2+283.5X+34775$ R乗値=0.9997 (2)架橋ポリエチレン管： $Y=-0.47X^2+404.1X-4125$ R乗値=0.9812 それぞれ、Y：m当り単価、X：口径
②配管材料費(円)	①×配管長(100m)
③配管工事費(円) ^{b)}	②×0.5
④その他材料費(円) ^{b)}	②×0.5
⑤土木工事費(円) ^{b)}	②×1.5
⑥諸経費	配管工事諸経費：(②+③+④)×0.25 土木工事諸経費：⑤×0.4、なお掛率については上記と同じ
熱ルータ ^{c)}	$Y=507.09 \times X^{-0.381}$ 、R乗値=0.9363 それぞれ、Y：価格(千円)、X：熱交換量(kW))
同上制御装置 ^{c)}	20,000千円 (最大4箇所の熱ルータの制御可、装置本体及び計装工事・プログラム製作費を含む)

a)メーカヒヤリング(2013/9/6) b)DHCコンサルヒヤリング(2013/5/16)
c)空調設備会社の本体・据付工事概算見積(2014/1/31)

表 6.6.2 ランニングコスト算定項目一覧

項目	単価等
電気料金 ^{注5)}	20.30円/kWh
ガス料金 ^{注6)}	10万m ³ を上回るケース： $Y=-5.16 \times \ln(X)+96.178$ 、 $R^2=0.9957$ Y:推定大口ガス料金単価(円/m ³)、X:ガス使用量(千m ³) 10万m ³ 未満のケース： 東京ガス(株)空調夏期契約料金を参考に設定。
上下水道料金	473円/m ³
エネルギーコスト上昇率	年率1%
維持管理費	熱ルータイニシャルコストの0.5%
機械保険料	同上の0.3%
SHG管理諸経費	熱融通メリットの3%
熱融通メリット	従前の電力・ガス・水各料金との差額×10%
道路占用料	道路法施行令改正・第一級地単価:510円/本・m・年 ^{a)}
租税課税	固定資産税(1.4%) 都市計画税(0.3%)

a) <http://www.mlit.go.jp/common/001019083.pdf>

注5) 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2016」の一般電気事業者 10 社の 2014 年度平均電力料金に 2013 年→2014 年の上昇率 7.6%を乗じた 20.30 円/kWh を使用した。

注6) 東京ガス(株)HP「平成 27 年大口ガスの平均価格」から推定式を算出した。

6.6.2 事業性評価結果

熱融通配管長 100m ケースの IRR について、熱融通 10%のケースを表 6.6.3 に、以下同 30%を表 6.6.4 に、同 50%を表 6.6.5 に示す。

結果、10%熱融通では、全額自己資金及びプレハブ 2 重管、及び商業施設の全ケースでは投資回収できず、全てマイナスとなる。一方、架橋 P は 1/2 または 2/3 の補助金適応の場合、ランニングコストを減額しても、一部のケースを除き、収益性の高い事業が確認できた。

次に、50%熱融通のケースにおける 4%NPV の試算結果を表 6.6.6 に示す。年間需要量の少ない事務所の場合は、投資回収可能なケースがあるものの、ホテル・病院のケースに比べて、額が小さいことが確認できた。

更に、年次変化を確認するため、同様の 50%熱融通のケースについて、34 年間の事業期間中の損益推移を確認した(表 6.6.7)。50%熱融通の場合、商業施設と一部に投資回収不能の場合があるが、事業期間内には累積赤字は解消しており、初年度から黒字となっているケースも多く確認できた。

表 6.6.3 IRR16 年及び同 34 年による事業性評価（熱融通割合 10%のケース）

【10%熱融通のケース】			ホテル			事務所			商業施設			病院		
RM変動	熱融通配管	補助割合	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3
0%	プレハブ 二重管	IRR16年	-12%	-8%	-6%	-13%	-9%	-6%	-16%	-14%	-13%	-13%	-10%	-7%
		IRR34年	-5%	-2%	0%	-6%	-3%	-1%	-12%	-8%	-7%	-6%	-3%	-1%
	架橋P(1)	IRR16年	-6%	0%	5%	-7%	-1%	3%	-14%	-11%	-8%	-7%	-1%	4%
		IRR34年	-1%	4%	7%	-1%	3%	6%	-8%	-5%	-3%	-1%	3%	6%
	架橋P(2)	IRR16年	-10%	-5%	-2%	-11%	-6%	-3%	-15%	-13%	-11%	-11%	-7%	-3%
		IRR34年	-3%	0%	2%	-4%	-1%	2%	-10%	-7%	-5%	-4%	-1%	1%
▲10%	プレハブ 二重管	IRR16年	-13%	-9%	-7%	-13%	-10%	-7%	-17%	-15%	-14%	-14%	-10%	-8%
		IRR34年	-6%	-3%	-1%	-7%	-4%	-2%	-14%	-9%	-8%	-7%	-4%	-2%
	架橋P(1)	IRR16年	-7%	-1%	3%	-8%	-2%	2%	-15%	-12%	-10%	-8%	-2%	2%
		IRR34年	-1%	3%	6%	-2%	2%	5%	-9%	-6%	-4%	-2%	2%	4%
	架橋P(2)	IRR16年	-11%	-6%	-3%	-11%	-7%	-4%	-16%	-14%	-12%	-12%	-8%	-5%
		IRR34年	-4%	-1%	1%	-5%	-2%	1%	-11%	-8%	-6%	-5%	-2%	0%
▲30%	プレハブ 二重管	IRR16年	-14%	-11%	-9%	-15%	-12%	-10%	-18%	-17%	-16%	-15%	-12%	-10%
		IRR34年	-8%	-5%	-3%	-8%	-5%	-4%	—	-13%	-11%	-9%	-6%	-4%
	架橋P(1)	IRR16年	-9%	-4%	-1%	-10%	-5%	-2%	-16%	-14%	-13%	-10%	-5%	-2%
		IRR34年	-3%	0%	2%	-4%	-1%	2%	-13%	-9%	-8%	-4%	-1%	1%
	架橋P(2)	IRR16年	-12%	-9%	-6%	-13%	-10%	-7%	-17%	-16%	-15%	-13%	-10%	-7%
		IRR34年	-6%	-3%	-1%	-6%	-3%	-2%	—	-11%	-10%	-7%	-4%	-2%

表 6.6.4 IRR16年及び同34年による事業性評価（熱融通割合30%のケース）

【30%熱融通のケース】			ホテル			事務所			商業施設			病院		
RM変動	熱融通配管	補助割合	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3
0%	プレハブ 二重管	IRR16年	-7%	-2%	3%	-11%	-7%	-4%	-11%	-7%	-4%	-7%	-1%	3%
		IRR34年	-1%	3%	6%	-4%	-1%	1%	-4%	-1%	1%	-1%	3%	7%
	架橋P(1)	IRR16年	-2%	6%	12%	-7%	-1%	3%	-8%	-3%	2%	-1%	7%	14%
		IRR34年	3%	9%	14%	-1%	3%	7%	-2%	2%	5%	4%	10%	15%
	架橋P(2)	IRR16年	-5%	2%	7%	-9%	-4%	-1%	-10%	-5%	-2%	-5%	2%	7%
		IRR34年	1%	6%	9%	-3%	1%	4%	-3%	1%	3%	1%	6%	10%
▲10%	プレハブ 二重管	IRR16年	-8%	-3%	1%	-12%	-8%	-5%	-12%	-8%	-5%	-8%	-2%	2%
		IRR34年	-1%	2%	5%	-5%	-2%	1%	-5%	-2%	1%	-1%	3%	6%
	架橋P(1)	IRR16年	-3%	5%	10%	-8%	-2%	2%	-9%	-4%	0%	-2%	6%	12%
		IRR34年	2%	8%	12%	-1%	2%	5%	-2%	1%	4%	3%	9%	13%
	架橋P(2)	IRR16年	-6%	0%	5%	-10%	-6%	-2%	-11%	-6%	-3%	-5%	1%	6%
		IRR34年	0%	5%	8%	-3%	0%	3%	-4%	-0%	2%	0%	5%	9%
▲30%	プレハブ 二重管	IRR16年	-10%	-5%	-1%	-13%	-10%	-7%	-13%	-10%	-8%	-10%	-5%	-1%
		IRR34年	-3%	1%	3%	-6%	-3%	-1%	-7%	-3%	-1%	-3%	1%	3%
	架橋P(1)	IRR16年	-5%	1%	6%	-10%	-5%	-1%	-11%	-6%	-3%	-5%	2%	7%
		IRR34年	0%	5%	9%	-3%	0%	3%	-4%	-1%	2%	1%	6%	10%
	架橋P(2)	IRR16年	-8%	-2%	2%	-12%	-8%	-5%	-12%	-8%	-6%	-8%	-2%	2%
		IRR34年	-1%	3%	5%	-5%	-2%	0%	-5%	-2%	-0%	-1%	3%	6%

表 6.6.5 IRR16年及び同34年による事業性評価（熱融通割合50%のケース）

【50%熱融通のケース】			ホテル			事務所			商業施設			病院		
RM変動	熱融通配管	補助割合	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3
0%	プレハブ 二重管	IRR16年	-4%	3%	8%	-9%	-4%	-1%	-11%	-7%	-4%	-5%	1%	6%
		IRR34年	2%	6%	11%	-3%	1%	4%	-4%	-1%	1%	1%	5%	9%
	架橋P(1)	IRR16年	1%	11%	18%	-5%	1%	6%	-8%	-3%	1%	0%	9%	16%
		IRR34年	5%	13%	19%	0%	5%	9%	-2%	2%	5%	5%	11%	17%
	架橋P(2)	IRR16年	-2%	6%	12%	-8%	-2%	2%	-10%	-5%	-2%	-3%	4%	10%
		IRR34年	3%	9%	14%	-1%	3%	6%	-3%	0%	3%	2%	8%	12%
▲10%	プレハブ 二重管	IRR16年	-5%	1%	6%	-10%	-5%	-2%	-12%	-8%	-5%	-6%	0%	5%
		IRR34年	1%	6%	9%	-3%	0%	3%	-5%	-2%	1%	0%	4%	8%
	架橋P(1)	IRR16年	0%	9%	16%	-6%	-0%	4%	-9%	-4%	-0%	-1%	7%	13%
		IRR34年	4%	11%	17%	-0%	4%	7%	-3%	1%	4%	4%	10%	15%
	架橋P(2)	IRR16年	-3%	5%	10%	-8%	-3%	1%	-11%	-6%	-3%	-4%	3%	8%
		IRR34年	3%	8%	13%	-2%	2%	5%	-4%	-0%	2%	2%	7%	11%
▲30%	プレハブ 二重管	IRR16年	-7%	-1%	3%	-13%	-10%	-7%	-13%	-10%	-7%	-8%	-3%	1%
		IRR34年	-1%	3%	7%	-6%	-3%	-1%	-7%	-3%	-1%	-1%	2%	5%
	架橋P(1)	IRR16年	-2%	5%	11%	-10%	-6%	-3%	-11%	-7%	-4%	-4%	3%	9%
		IRR34年	2%	8%	13%	-4%	-0%	2%	-4%	-1%	1%	2%	7%	11%
	架橋P(2)	IRR16年	-5%	1%	6%	-12%	-8%	-5%	-12%	-9%	-6%	-6%	-0%	5%
		IRR34年	1%	5%	9%	-5%	-2%	0%	-5%	-2%	-0%	-0%	4%	8%

表 6.6.6 4%NPV による事業性評価（熱融通割合 50%のケース）

建物用途 補助割合	ホテル			事務所		
	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3
プレハブ二重管	-47百万円	28百万円	53百万円	-111百万円	-38百万円	-14百万円
架橋P(1)	17百万円	58百万円	72百万円	-48百万円	-7百万円	7百万円
架橋P(2)	-10百万円	46百万円	65百万円	-76百万円	-21百万円	-3百万円
建物用途 補助割合	商業施設			病院		
	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3
プレハブ二重管	-134百万円	-48百万円	-19百万円	-56百万円	15百万円	39百万円
架橋P(1)	-65百万円	-13百万円	4百万円	7百万円	46百万円	60百万円
架橋P(2)	-96百万円	-29百万円	-6百万円	-22百万円	32百万円	50百万円

表 6.6.7 累積赤字解消年度（熱融通割合 50%のケース）

【50%熱融通のケース】		ホテル			事務所			商業施設			病院		
RM変動	熱融通配管	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3	無し	1/2	2/3
0%	プレハブ二重管	25年	7年	0年	-	26年	15年	-	-	25年	28年	10年	0年
	架橋P(1)	0年	0年	0年	30年	11年	0年	-	22年	10年	12年	0年	0年
	架橋P(2)	18年	0年	0年	-	19年	8年	-	30年	18年	21年	0年	0年
▲10%	プレハブ二重管	28年	10年	0年	-	30年	19年	-	-	-	32年	13年	0年
	架橋P(1)	12年	0年	0年	34年	14年	0年	-	26年	-	16年	0年	0年
	架橋P(2)	21年	0年	0年	-	22年	11年	-	-	-	24年	6年	0年
▲30%	プレハブ二重管	-	18年	6年	-	-	27年	-	-	-	-	21年	9年
	架橋P(1)	20年	0年	0年	-	23年	11年	-	-	25年	23年	5年	0年
	架橋P(2)	28年	9年	0年	-	32年	20年	-	-	33年	32年	13年	0年

6.7 既存地域冷暖房（DHC）連携型 SHG の可能性

本章では、都市部で現在稼働中の DHC が設備を更新する時期となっていると共に、既築ビルが殆どを占める大都市部では、新耐震設計移行竣工の今後リニューアルが考えられる事務所ビルが 7 割を超える事から、DHC 連携型 SHG（DHC 側から周辺の DHC エリア外のビルを想定し熱融通する）について、現状プラント設備要件を満たす更新プラントのケースを設定して環境性・事業性を評価した。更に東日本大震災以降、ビルの節電が進み、特に冷熱需要減の傾向が顕著に表れているとの報告⁶⁻¹⁵⁾がある。これは、ピーク負荷が低減する事に加え、低負荷の出現比率が上昇する事にもつながる事になり、供給余力のある地域冷暖房から周辺の熱供給需要家以外の建物に熱を供給する事によって、熱エネルギーの面的利用が図られることに繋がり、更なる省エネルギー化が期待できる。そこで、以下の様に DHC 連携型 SHG の可能性について整理した。

（1）拡張性・多様性を持ったエネルギーの面的利用推進

本研究は、既築建物の省エネルギー化を推進するため、DHC と連携した SHG を導入し、従来の全量供給方式に比べ、省スペースで省コストに設置できる可能性が高い熱融通配管・熱ルータを介して熱融通するモデル「DHC 連携型 SHG」を考えた。DHC が供給役割を担い、DHC 供給エリアに隣接する建物に熱融通するモデルである。そのイメージを図 6.7.1 に示す。DHC がエネルギー消費原単位の低い熱源を高効率運転域で稼働させ、DHC 需要家に熱を供給、更に熱源が定格域稼働した

場合に生ずる余剰熱を既築建物のベース負荷用に熱融通する事で、環境性（省エネルギー性）と経済性が両立する可能性を示した。従来、DHCは熱源設備計画の段階で熱供給先を設定する必要があるが、DHC連携型SHGは既築建物が自己熱源システムを有しているため、SHG導入（参画）時期に制約はない。更に、将来的に、既築建物が建替えや設備更新をした場合、受入側から供給側に役割変更する事も可能である（図6.7.2）。同図はDHCと連携せず熱融通するイメージだが、DHCと共同で供給側の役割を担う事もできる。又、SHGを拡張する場合、適切な熱融通配管の仕様を選択する事で、配管放熱ロスや搬送動力の制限からDHCから直接熱融通を受入ができないエリアとなっても、隣接する建物間でSHGを構築する事は可能である。

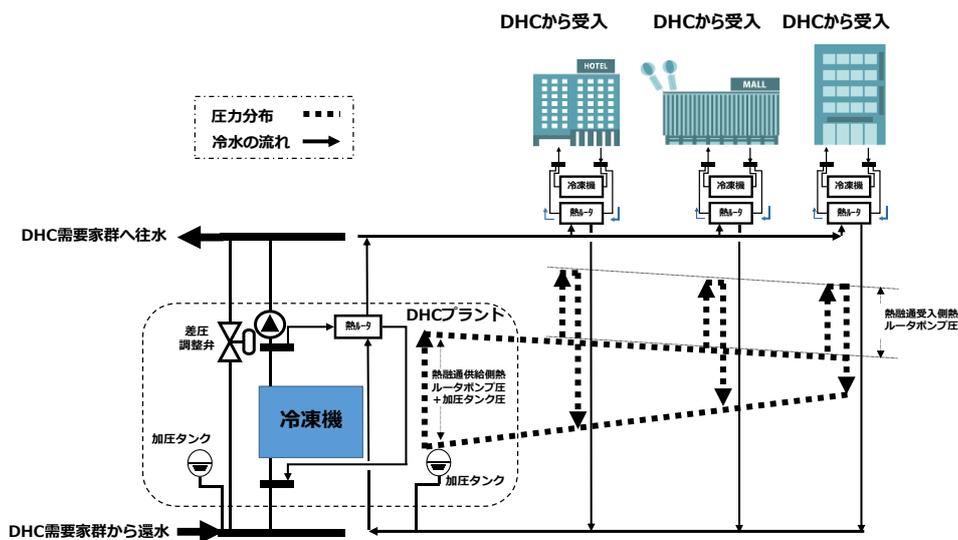


図 6.7.1 DHC 連携型 SHG モデル・イメージ図 (DHC 供給)

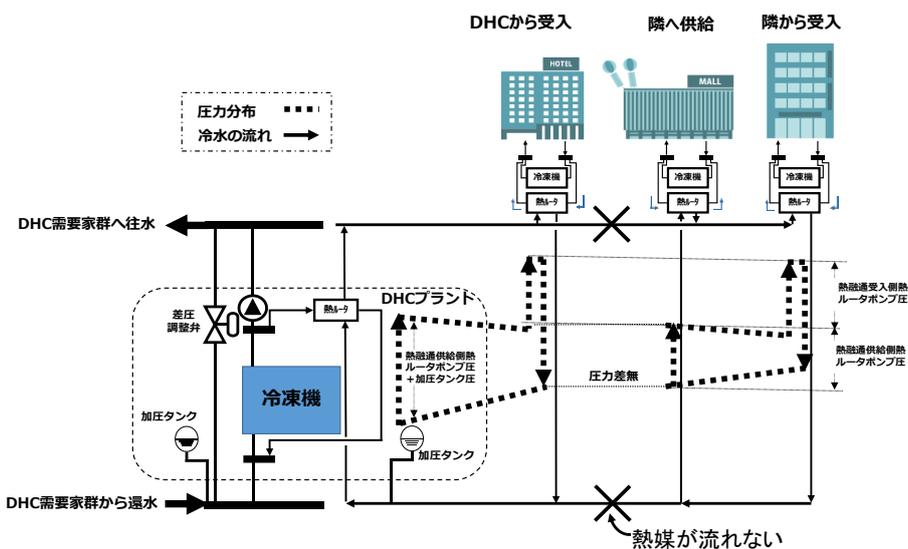


図 6.7.2 DHC 連携型 SHG モデル・イメージ図（受入から供給への変更）

(2) 既築建物の省エネルギー化推進に DHC のポテンシャルを活用

DHC に設置されている熱源を高効率稼動域で使用する事で中間期に加えピーク時も、既築建物の

省エネルギー化すると共に、DHC は熱源の稼働率向上による事業性改善が期待できる。又 SHG では、供給義務を課さないため DHC 側に熱源運用に関するリスクが少ない。更に、具体的な経済的効果の定量化には至っていないが、既築建物は熱源の総稼働時間や低負荷域稼働時間が少なくなる事によって、同熱源の延命化が期待できる副次的な効果も考えられる。

(3) 未利用熱活用モデルの提案

2017 年度から未利用熱活用制度が開始され、年間エネルギー使用量が 1,500kℓ 以上の特定事業所や連鎖化事業者は未利用熱の販売・購入双方共に、未利用熱分をエネルギー使用量から差引き、義務付けられている年平均 1%以上のエネルギー消費原単位低減の効果に算入する事できる。本研究の中では、ガスエンジンの廃熱温水をそのまま温熱需要に利用し一次エネルギー削減効果を確認する事ができた。

同様に、工場廃熱等の未利用熱を自施設で活用した後の余剰熱についても、熱融通条件に合う近隣施設と SHG を構築し、供給側はバックアップ機器を持たず、受入側も既存熱源を利用しながら環境性と経済性の両立が期待できる。結果、未利用熱を有効に活用する新たなモデルが考えられる。

(4) 地域エネルギーハブ機能としての DHC の提案

我が国は人口の 91.3%が都市に住む、都市偏重が進んでいる⁶⁻¹⁶⁾。従って、東京を始めとする大都市圏の省エネルギー化は喫緊の課題であるが、一時に最新の設備を導入した建物に更新される事は難しい。そこで、その対応策としてエネルギーを面的利用して省エネルギー化を推進する方法が考えられる。しかし実行するためには、面的利用するエネルギーシステムの担い手が必要である。DHC 事業者は熱源運転管理の専門家が常駐しており、経理処理等のノウハウも有している。本研究では初期のインシャルコストに、現在運用されている補助事業⁶⁻¹⁷⁾が適用できれば、収益性の高い事業が展開できる可能性を確認した。そこで熱供給ポテンシャルがある DHC が、SHG を熱融通配管ネットワークの運営・管理業務を担い、新たな熱供給事業の制度の下で特定エリアの省エネルギー化を実行する地域エネルギーハブ機能を持った事業者へのビジネス展開を期待したい。

(5) エネルギーインフラ技術としての SHG 活用（新技術との連携）

本研究の中では、「熱供給義務なし」「熱融通は熱搬送に伴うエネルギーロスよりも小さい場合に行う」の SHG の考え方を提案した。例えば、冷却塔で大気に放熱する設備を有する清掃工場や下水処理汚泥処理施設、製造工場等と隣接する熱受入先間で「熱融通に伴うエネルギーロスが自施設で冷却に要するエネルギー量よりも小さい事」が該当する場合、SHG を使った新しいスキームの熱融通が考えられる。今回の結果から、ホテルや病院等の温熱需要が多いケースで高い収益性が期待できる事が分かった。従って、温熱需要の多い家庭用部門への SHG の展開も考えられる。既に、デンマーク・オールボーン大学を中心に「第 4 世代の熱供給」⁶⁻¹⁸⁾の提案が行われている。その中では、熱版のスマートメーター、大温度差熱搬送や漏水センサー付ツイン・ダブルポリエチレン管（熱配管）の実装や双方向熱融通、レジオネラ菌対応の技術開発が行われている。今後、これらの技術と連携しながら、高性能化や省コスト化した技術の導入と複数建物での活用する SHG を実証する中で確認したいと考えている。

6.8 まとめ

本章では、首都圏内の DHC が同需要家に熱供給を行いながら、供給地域に隣接する需要家ではない延床面積 1 万 m² の 4 用途の建物（事務所・ホテル・商業施設・病院）と SHG を構築する事を想定、DHC の余剰熱を熱融通するモデルを設定しシミュレーションを行った。その際、熱融通量は各建物の年間需要量の 10%、30%、50%相当量を 8,760 時間で除した値とした。省エネルギー評価は、従前の各建物熱源エネルギー消費量+熱融通無しの DHC エネルギー消費量をベースラインに、熱融通を受入、更に補完運転する各建物熱源のエネルギー消費量と熱融通した場合の DHC のエネルギー消費量に搬送動力及び放熱ロス分を加えたケースを比較して、省エネルギー率を求めた。なお、DHC 負荷データ及び熱源設備仕様は同事業者から入手し、同資料の設備要件を満たす設備容量で熱源設定（更新 DHC）も設定し評価を行った。結果、省エネルギー率は現 DHC のケースで 0.8%～10.1%、更新 DHC のケースで 1.2%～13.8%となった。

SHG による付帯的なメリットとして、各建物側は熱源機を保有するので、供給保障は不要となる。従って、全量供給する場合と比べて、細い熱融通配管の敷設で可能であるので、低コスト化や施工のし易さが期待できる。全量供給する場合に比べて、本章で行った熱融通相当割合 10～50%を 2 管敷設の場合、熱融通配管敷設有効断面積は全量供給の 30～60%程度になった。

熱融通相当割合 10～50%の補完運転時間割合は、熱融通相当割合が増える程、小さくなる。但し、各建物の用途別需要パターンの違いから、その寄与度合いは異なる。例えば、事務所は m² 当たりのピーク負荷が商業施設に比べて小さく（事務所 104.65W/m²⇔商業施設 139.53W/m²）、土日に需要量が減少する等相対的に熱需要量が少ないため、熱融通を受入する事による効果が大きいと考えられる。

熱融通を受入する事で、負荷率 30%未満の ON/OFF 制御域冷熱源稼働時間は、負荷のピークとオフピークの差が他の用途に比べて小さい商業施設以外のホテル・事務所・病院共に減少し、稼働時の冷熱源稼働平均負荷率は全て比例制御域（30%以上）で稼働する事が確認できた。

本検討の中で、ガスエンジンの導入効果の評価を行った。2017 年度から省エネルギー法運用の中で、未利用熱活用制度が導入され、ガスエンジンの廃熱から回収した熱は未利用熱として扱い、エネルギー消費原単位を算出する際、DHC 事業者から購入する同熱は未利用熱の扱いとなり、エネルギー使用量から削除する事ができる。廃熱蒸気は DHC 需要家への供給が可能のため、ジャケット廃熱温水回収分に着目した。温熱融通割合増加とほぼ比例して熱源補完運転の割合が減少し、（ホテルの場合、熱融通割合 10%→熱源補完運転 89.3%、同 30%→70.6%、同 50%→47.8%）同量分はエネルギー消費原単位算出時に使用した燃料分から差し引く事が可能となる。

事業性評価については、ホテル・病院については補助金の条件が整えば、IRR4%以上の事業性あるケースを確認した。しかし、商業施設に関しては、本検討の熱を受入する場合には事業性ある結果を得る事ができなかった。

【第6章参考文献】

- 6-1) 村上公哉：大規模熱源システムー地域冷暖房ーの現況と同行，空気調和・衛生工学会 vol.90, No.8, 2016.8
- 6-2) 東京都環境局：地域におけるエネルギーの有効利用計画制度，

<http://www7.kankyo.metro.tokyo.jp/yukoriyou/index.html>, 2010.1

- 6-3) (一) 日本不動産研究所、全国オフィスビル調査 (2014年1月)、2014.10.9
- 6-4) 空気調和・衛生工学会: 都市ガスコージェネレーションの計画・設計と運用, 2015.3
- 6-5) 小松他: 竣工記録に基づいた事務所建物の寿命調査, 日本建築学会計画系論文集, No.565, pp.317~322, 2003.3
- 6-6) 山口他: 建築・設備ストックの集積状況を考慮した大阪市の民生業務部門エネルギー需要モデルの開発と温暖化対策の評価、日本建築学会環境系論文集, Vol.74, No.641, 853-862, 2009.7
- 6-7) (一) 環境共創イニシアチブ, 平成27年度中小企業等の省エネ・生産性革命投資促進事業費補助金設備別省エネルギー効果計算の手引き (高効率空調 吸収式冷凍機), 2015.7
- 6-8) (財) 新機能素子研究開発協会: 電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査, 2009.3.23
- 6-9) (一) 都市環境エネルギー協会: 地域冷暖房技術手引書 (改定第4版), 2013.10
- 6-10) (一) ソーラーシステム振興協会, 業務用太陽熱利用システムの設計・施工ガイドライン, 2013.4
- 6-11) 国交省: 公共建築工事標準仕様書 (機械設備工事編), 2016.3.2
- 6-12) 武石礼司: 世界の地域熱利用システムの現状と日本の課題, FRI 研究レポート No.57, 1999.7
- 6-13) (一) 都市環境エネルギー協会: 地域冷暖房技術手引書, 2013年11月改訂第4版
- 6-14) 国交省: 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針 (共通編), 2009.6
- 6-15) 佐々木他: 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1: 地域冷暖房の負荷実態と冷温熱比率等によるシステム COP, 空気調和・衛生工学会大会学術論文集 pp81~84, 2016.9.14~16 (鹿児島)
- 6-16) 国連: World Urbanization Prospects, the 2011 Revision, 2012
- 6-17) (一) 低炭素投資促進機構: 地産地消型再生可能エネルギー面的利用等推進事業費補助金 (エネルギーシステムモデル構築事業), 2016.4.25
- 6-18) Henrik Lund etc.: 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems, Energy 68 (2014)

第7章 事業系一般廃棄物起源バイオ ガスのポテンシャルと地域熱供給 システムにおける活用効果

第7章. 事業系一般廃棄物起源バイオガスのポテンシャルと地域熱供給システムにおける活用効果

7.1 はじめに

再生可能エネルギーの中で食品系廃棄物等をバイオマスエネルギー資源の活用は、循環型社会形成の観点から、既に地方都市においては実績があり、今後、都市部においてまとまった量が賦存するエネルギー資源の一つとして更に利用拡大が期待されている⁷⁻¹⁾。

そこで、都市部において分別収集・廃棄が行われている事業系一般ごみを対象に、その中でもリサイクル率の低い厨芥やその他の紙ごみ（表面に特殊な加工がしてある紙ごみ等）をバイオマス資源とするメタン発酵実証実験を行い、そのポテンシャルを確認した。更に、バイオマスエネルギー資源を活用して低炭素化した温熱媒（蒸気）を都市部の既存地域冷暖房で使用、建物間双方向熱融通ネットワークシステムの将来発展形の一つとして「建物間双方向熱融通ネットワークシステム地域熱供給連携型都市型バイオマス利用モデル」を提案する。本研究では、図7.1.1中の破線枠内のエネルギー収支を検討し、地域冷暖房の温熱製造に使用するエネルギーの削減量を求め、その評価を行った。

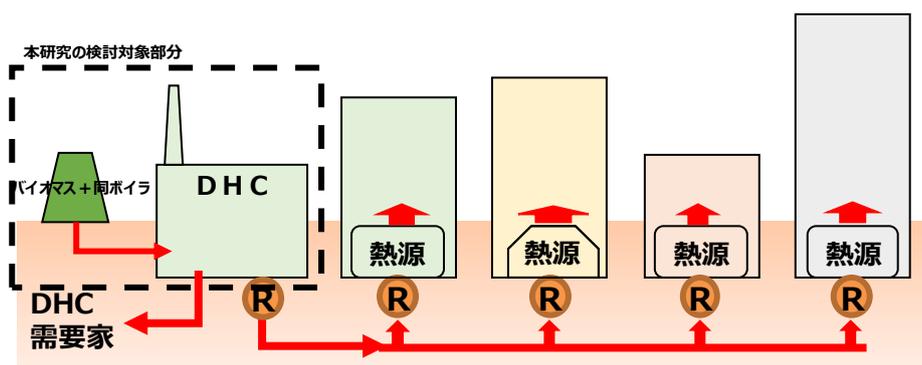


図 7.1.1 建物間双方向熱融通ネットワークシステム地域熱供給連携型都市型バイオマス利用モデル

7.2 乾式メタン発酵法による事業系一般廃棄物のバイオマス資源化実証

7.2.1 メタン発酵方法の比較

メタン発酵は処理対象の固形物調整濃度で湿式と乾式に分類される（表 7.2.1）

表 7.2.1 メタン発酵の比較⁷⁻²⁾

方式	湿式メタン発酵	乾式メタン発酵
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 固形物調整濃度は6～10%。 厨芥類が対象となる。 液状残渣の処理が課題。郊外部では液肥等としての利用可能性もあるが、都市部では一定の排水処理を行った上で下水に排出する事が考えられる。 我が国でも導入事例は多く、比較的小規模（数t/日クラス）でも成立している。 	<ul style="list-style-type: none"> 固形物調整濃度は25～40%。 厨芥に紙類を混入したごみを対象にできる。 排水が発生しないので水処理設備は不要。固形状残渣の処理が必要になるが、燃料としての利用の可能性もある。 単位ごみ量当たりの発生ガス量が多い。（環境省循環型社会形成推進交付金対象^{*1}） 欧州や韓国では大規模導入事例（処理能力100t/日以上）があるが、我が国では本格的導入に向けた実用化段階にある^{*2}。
原料	高含水率バイオマス 例 ・厨芥類・家畜ふん尿・有機性汚泥 ・脱水汚泥・汚水等	低含水率バイオマス 例 ・厨芥類・紙類・剪定枝葉 ・有機性汚泥・脱水汚泥・汚水等
残渣形状	液状残渣(消化液)  含水率：90%以上	固形状残渣  含水率：60～85%

*1： 地方自治体が廃棄物の3R（reduce、reuse、recycle）推進を目的に、廃棄物処理施設整備する際、環境省が交付する交付金。同対象施設は、①マテリアルサイクル推進施設（不燃物、プラスチック等の資源化施設等）②エネルギー回収推進施設（ごみ発電施設、熱回収施設、バイオガス化施設等）③有機性廃棄物リサイクル施設（し尿・生ごみ等の資源化施設）④浄化槽⑤最終処分場等が対象となる。特に、エネルギー回収推進施設のうち、メタンガス化施設でメタン回収ガス化率が150Nm³/ごみton以上及びメタン回収発生量が3000Nm³/日以上を「高効率原燃料回収施設」とし、交付率を1/2とした、重点的な支援対象としている。

以上から乾式メタン発酵法の特徴として、4点考えられる。

（1） 単位ごみ量当たりのバイオガス発生量が多い

- 乾式メタン発酵法は、水に溶けない紙類等の処理が可能のため、湿式メタン発酵法よりも広範な都市ごみの処理が可能であり、単位ごみ量当たりのバイオガス発生量も多い。
- 環境省では、メタンガス化施設について循環型社会形成推進交付金の対象として、通常 1/3 に対して、表 7.2.1 に記載する条件を満たした場合、交付率を 1/2 とする高効率原燃料回収施設としており、ガス化率について実験事業で確認されている⁷⁻³⁾。

（2） 小規模プラント化が可能で、地産地消型エネルギーシステムへの活用が期待される

- 乾式メタン発酵は紙類と厨芥類を処理する事が可能で、発酵温度が高く、バイオガス化率が高く、有機物の分解速度が速いため発酵槽も小さくする事が可能である。また、一般的に湿式に比べて、廃液発生量が少ないため水処理施設の規模が小さくて済む。

（3） 排出者、収集運搬事業者が参加しやすいごみ処理システムである事

- 都市部の可燃ごみには厨芥と紙ゴミが混合して収集されるが、乾式メタン発酵法はこれらを合

わせて処理することが可能であることから、ごみ排出者側、収集運搬事業者等にとって分別の負担が軽減される点で、活用しやすいごみ処理システムと考えられる。

(4) 発酵残さ処理が課題

- 乾式メタン発酵法は、発酵残さから水が分離せず、廃水の発生がなく、都市内設置で最も問題となる廃水中の高濃度窒素の処理を必要としない。しかし、発酵残さがごみ投入量に対し約80%発生すると見込まれ、その処理方法には課題がある。そこで別途焼却等の処理が必要となる。

7.2.2 都市部における事業系一般ごみの再利用状況

東京23区部では、事業用大規模建物（延床面積3,000㎡以上）の所有者に対して、発生するごみ（事業系一般ごみ）の処理と再利用計画書の提出を求めている。同計画に基づき、23区のごみ量等の実績が集計されており、その再利用状況から、焼却処分される可燃ごみに含まれる厨芥の再利用率は11.5%にとどまっている。また「OA用紙」、「新聞紙」等は再利用率が全て約90%程度以上であるが、「その他の紙ごみ（ビニールコーティングされた物や裁断された紙ごみ等）」の再利用率は43.8%で過半が未利用となっている。これら再利用率のバイオマス資源として利用が期待できる。

(図7.2.1)

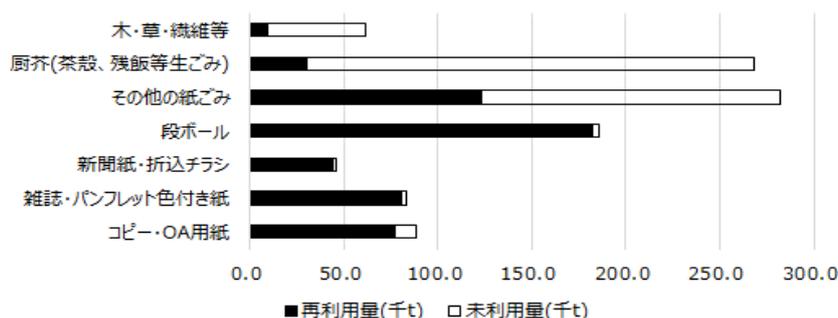


図7.2.1 東京23区部における可燃ごみの再利用状況

注) 出典は東京二十三区清掃協議会「東京23区再利用計画書のまとめ」(平成17年度版)

東京23区部における建物用途別発生のごみ組成は、表7.2.2に示すように、オフィスビルではごみの62.1%を紙類が占め、厨芥は16.9%、店舗ビルでは紙類49.4%であるが、厨芥は32.0%とオフィスの2倍である。また、ホテル・結婚式場等では、厨芥の比率は高く、47.1%を占める。

表7.2.2 東京23区部各建物用途別発生ごみ組成

建物用途	(構成比%)							
	紙類	厨芥	可燃・その他	びん類	缶類	ペットボトル	不燃・その他	合計
オフィスビル	62.1	16.9	1.1	1.5	3.0	2.3	13.1	100.0
店舗ビル	49.4	32.0	0.4	1.9	2.4	1.7	12.2	100.0
ホテル・結婚式場等	29.3	47.1	0.0	6.7	3.3	1.6	12.0	100.0
医療機関	38.4	30.9	2.7	2.1	2.7	2.5	20.7	100.0
学校	43.6	28.9	0.4	1.7	3.7	2.9	18.8	100.0
駅舎	40.1	29.7	0.1	3.9	11.2	2.4	12.6	100.0

注) 出典は図7.2.1と同じ

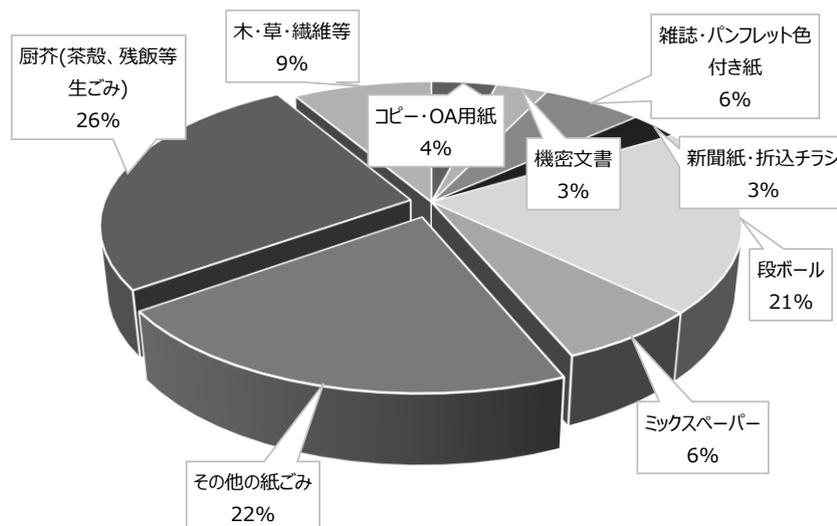


図 7.2.2 東京 23 区部における可燃ごみの構成比率（事業系一般廃棄物）

注) 出典は図 7.2.1 と同じ

図 7.2.2 に示す様に東京 23 区部における事業系一般廃棄物の可燃ごみの構成比率から「厨芥」は 26%を占めており、一方、図 7.2.1 で示した様にその再利用率は 11.5%程と、ほとんどが未利用のまま焼却処分され、焼却熱利用発電において潜熱分がロスとなっている。また、紙類のうち「OA 用紙」「雑誌・パンフ」「段ボール」の再利用率は約 90%以上であるが、可燃ごみの 22%を占める「その他の紙ごみ」の再利用率は 43.8%と未利用の割合が高い。以上から、「厨芥」や「その他の紙」を資源化し再利用する事で、効率的な運用が期待できる。

そこで本項では、「厨芥」や「その他の紙ごみ」をメタン発酵により資源化する「都市型バイオマス利用システム」を活用した場合、その導入効果を検討する基礎データを収集するため、都内K区内の用途の異なる事業所から収集した事業系一般廃棄物を使って、乾式メタン発酵試験プラントでバイオガスを製造し、その性状・発生量等を調査した。

7.2.3 実証試験用ごみの選定

(1) 乾式メタン発酵適合ごみの性状

プラントメーカーから提示された「乾式メタン発酵に適合するごみの性状」は、表 7.2.3 に示す通り、厨芥の比率は最大 70%、紙類比率が最大 60%、これらが許容範囲の上限とのことであった。

表 7.2.3 メーカー推奨の乾式メタン発酵適合ごみ性状

	厨 芥	紙 類	混合ごみ
T S (全固形分 : %)	20.0	70.0	45.0
V S (揮発性分 : %)	19.3	61.6	40.5
全窒素 (mg/kg)	7,900	1,500	5,000

※ 1 : Total Solids (蒸発残留物) ※ 2 : Volatile Solids (強熱減量)⁷⁻⁴⁾

(2) 実証実験用ごみの選定と実験期間及び同ごみの性状

都内の事業系一般廃棄物は、紙類のリサイクルが進展した事によって厨芥比率が増加し、家庭用

一般ごみに比べて、焼却熱利用発電を行う場合に潜熱分がロスとなっている（表 7.2.4）。

そこで本研究では、分別収集が行われている大規模事業場で発生する事業系一般廃棄物を対象に、同ごみを乾式メタン法で処理をし、バイオガスを回収する事を検討する。その際、都内で乾式メタン発酵法を用いたごみ処理を行う場合に、紙の混入割合の上限を把握する事が必要と考え、紙ごみの混入比率を変えると共に、紙ごみの種類（シュレッダー紙と雑紙）も変化させて行った（表 7.2.5）。なお、本実証事業は 2009～2011 年度環境省委託地球温暖化対策技術開発事業として採択され実施したものである。

表 7.2.4 事業系一般廃棄物の平均組成

	厨芥	紙類	草木織 維等	プラ金 属等	合計
区部大規模事業場	49.8%	37.4%	12.8%	—	100%
清掃工場搬入ごみ：区部	35.5%	43.5%	14.3%	6.8%	100%
清掃工場搬入ごみ：多摩	31.1%	36.6%	18.2%	14.2%	100%

※東京 23 区再利用計画書、東京 23 区一部事務組合、多摩清掃協議会資料から作成

表 7.2.5 試験ごみの組成と種類

(実施年度は 2010 年度)	各実証試験ごみの組成と種類
第 1 期 (6/1～8/31)	厨芥 50%と紙ごみ 50%（シュレッダー紙のみ）の混合物
第 2 期 (9/1～11/22)	同上、紙ごみは、シュレッダー紙と雑紙の 50%混合物
第 3 期 (11/23～2/22)	厨芥 45%と紙ごみ 55%の混合物。紙ごみの種類は同上

試験ごみは、K 区内の大型複合施設（オフィス棟 4 棟、商業棟 1 棟より構成）から発生するごみを用いて、施設内の集積所からポリ袋で分別された厨芥と紙ごみを、そのままの状態でも回収した。このうち、紙ごみは、オフィスから排出されるごみで、OA用紙とOA用紙をシュレッダーした紙、紙コップ等からなる雑紙から構成される。一方、厨芥は飲食店のごみが主体であり、魚類を中心とした食べ残しが調理屑よりも多かった。

ごみの分別状況は良好で、厨芥に月平均で約 17%のプラスチック主体の異物が混入しているだけであった。なお、紙ごみには異物の混入はほとんどみられなかった。

各期別にごみの性状を表 7.2.6 に示す。同表から試験用ごみは、メーカより、これまでの処理実績に基づき、乾式メタン発酵処理に適したごみとして提示された参考値に比べ、水分が少なく、VS の割合が多い。全窒素量の T-N 濃度も、厨芥中に魚類等が多いためか、やや高い状態にある。また、発熱量も高く、厨芥の比率が高いにも係わらず、清掃工場搬入ごみ（区平均で 11,070 MJ/Kg 程度）と同程度の値となっている。

なお、第 1～3 期のごみの性状には大きな変化はないが、紙ごみの割合が多い第 3 期は、第 1 期、2 期と比べて、水分の割合が少なく、灰分、可燃分の割合が多くなっている。

表 7.2.6 実証試験用ごみの性状

試験期間	第1期	第2期	第3期	参考値(表7.2.3)
水分 (%)	38.7	40.0	36.4	55.0
灰分 (%)	5.2	4.7	6.6	4.5
可燃分 (VS : %)	56.1	55.3	57.0	40.5
窒素 (mg/l)	6,370	7,120	7,630	5,000
高位発熱量 (MJ/kg)	11,500	9,970	10,500	—

7.2.4 乾式メタン発酵実証実験施設の概要

図 7.2.3 の設備フローに示す実証実験施設を使い、以下の流れで実証実験を行った。まず、厨芥と紙ごみを分別収集して紙ごみは粉碎処理し、厨芥はプラスチック等の異物除去の後、投入装置に入れて発酵残渣と混合の後、乾式メタン発酵槽に投入した。発酵槽の中で発生したバイオガスは硫黄分を除去後、ガスホルダに貯めた。バイオガスはボイラ燃料として使用し、蒸気を発生させ発酵層の加温に利用した。バイオガスの余剰分は、燃焼装置で焼却後に大気放出した。発酵残渣は発酵槽返送分を除き排出・貯留され、清掃工場に搬送し焼却処分した。(付録図 1.1~1.2・写真 1.1~1.4)

なお、設備の処理能力は設置スペース制約条件等から、厨芥とその他の紙類の混合ごみを1日当り最大 300kg とした。更に、バイオガス回収量の目標値を、環境省循環型社会形成交付金の高効率原燃料回収施設の選定数値を参考に、ごみ 1 t 当り 150Nm³ 以上とした。

実験は実証施設利用の制約から、設定した混合ごみ投入を1週間のうち月～金の5日間に発酵槽へ投入、土日は不投入とした。そして、1回当りの投入量は、厨芥 133 k g、紙ごみ 133 k g の計 266 k g とした。これは前記の処理能力 300kg を下回っているが、前述の通り、混合ごみの紙ごみ比率が高くバイオガス発生量が多い事を考慮した。また、投入したごみはメーカー推奨平均値よりも含水率が低いため、発酵槽加温用の蒸気添加を行い、希釈水は使用せず実施した。

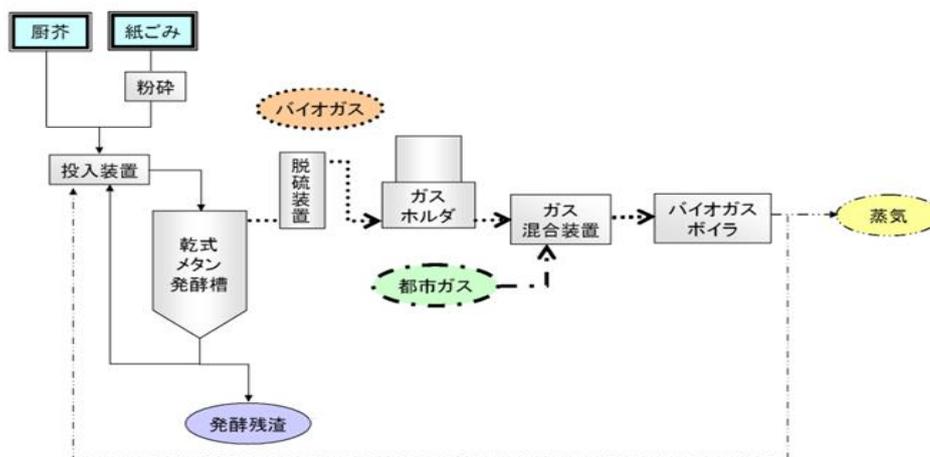


図 7.2.3 実証試験施設の設備フロー

7.2.5 乾式メタン発酵実証試験結果

(1) バイオガス発生量の日変動

- バイオガス発生量は、混合ごみを投入しない週末に急速に低下し、月～金にかけて増加した。メタンガス発生量も同様の挙動を示した。
- 混合ごみを投入する平日はCO₂が発生する反応が優勢なためメタン濃度が下がり、ごみを投入しない週末はメタンが発生する反応が優勢になり、メタン濃度が上がる傾向が見られた。尚、各日データは原料を投入前の朝に計測したため、月曜日が見かけ上、最高濃度となった。
- なお、同挙動は他の実験期間でも同様の傾向であった。

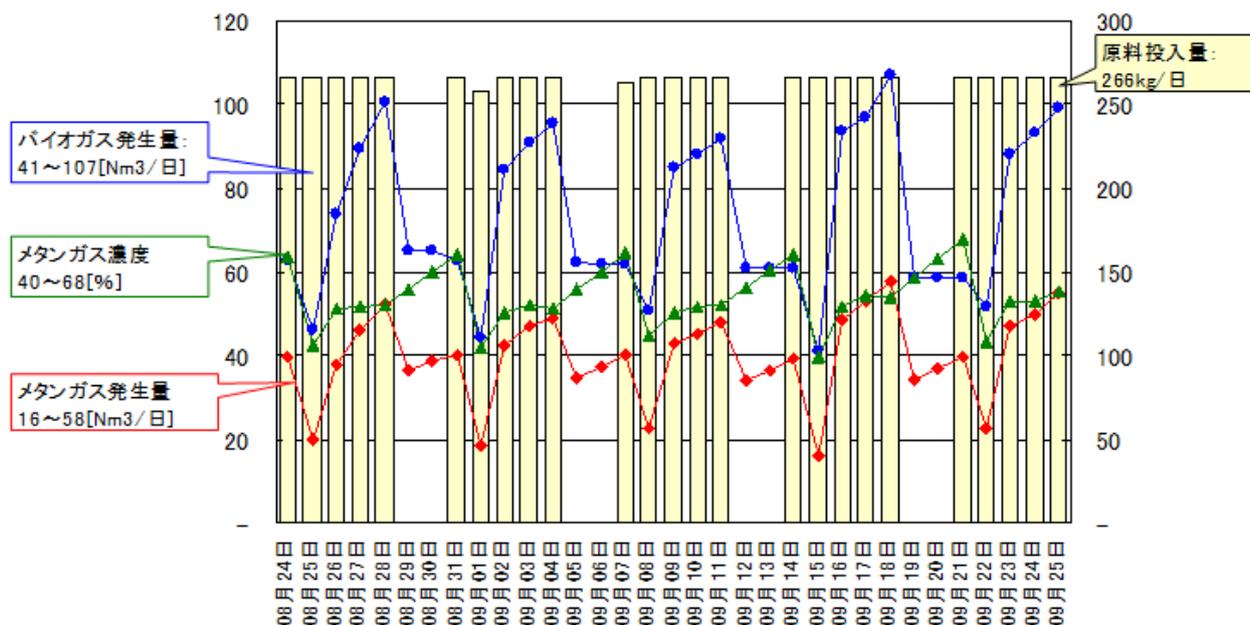


図 7.2.4 混合ごみ投入量とバイオガス発生量の日変動

(2) 試験期間別乾式メタン発酵実証試験結果

厨芥と紙ごみの混合割合及び紙ごみの種類（シュレッダー処理紙ごみと雑紙の混合割合）を変化させた第1期、第2期、第3期の実証試験結果を表7.2.7に示す。また、同様に各期間毎のごみ処理量1t当りのバイオガス発生割合、蒸気使用割合、残渣発生割合を図7.2.5、及び各期の発酵残渣の性状を表7.2.8に示す。

表 7.2.7 乾式メタン発酵実証試験結果

各実証試験期間 (2010年度)	第1期 (6/1～8/31)	第2期 (9/1～11/22)	第3期 (11/23～2/22)	合計
A 混合ごみ処理量(kg)	14,896	15,919	16,353	47,168
B バイオガス (Nm ³)	5,553	5,852	6,227	17,632
メタン濃度 (%)	53.9	55.0	55.7	54.9
C 蒸気使用量 (kg)	3,275	4,253	6,035	13,563
D 残渣排出量 (kg)	8,321	11,972	16,089	36,382
B/A ガス発生割合 (Nm ³ /t)	373	368	381	374
C/A 蒸気使用割合 (kg/t)	220	267	369	288
D/A 残渣排出割合 (kg/t)	559	752	984	771

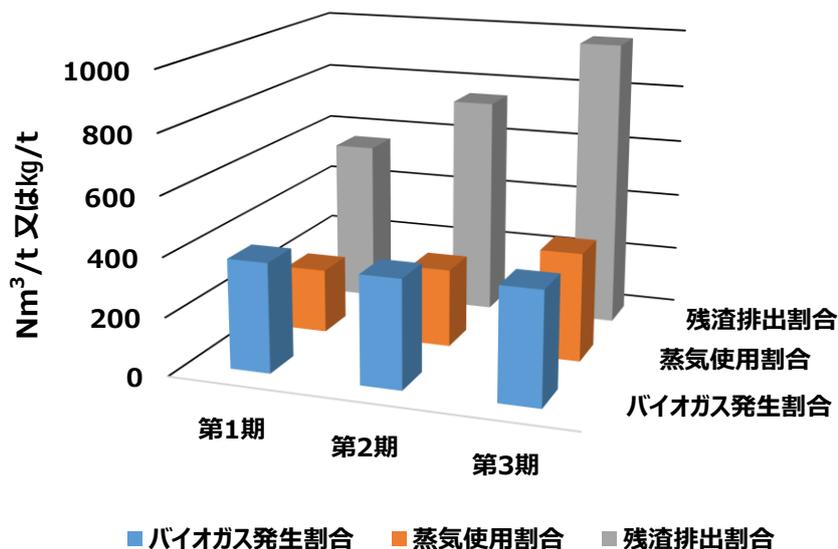


図 7.2.5 混合ごみ処理量 1t 当りの
バイオガス発生割合/蒸気使用割合/残渣排出割合

表 7.2.8 発酵残渣の性状変化

各実証試験期間 (2009年度)	第1期 (6/1～8/31)	第2期 (9/1～11/22)	第3期 (11/23～2/22)
水分 (%)	80.4	80.6	80.9
灰分 (%)	6.1	6.5	6.6
可燃分 (VS : %)	13.5	12.9	12.5
窒素 (mg/l)	2,070	2,330	2,100
高位発熱量 (MJ/kg)	2,420	2,300	2,150

以上の結果から、

- ① ごみ処理量1トン当たりのバイオガス発生量は、平均374N m³と、地方都市において乾式メタン発酵法でごみを処理した場合の発生量(244N m³程度)⁷⁻⁵⁾に比べて1.5倍超のガス発生率となった。これは、厨芥、紙ごみ、特に紙ごみのVS分解率^{*}が、表7.2.9に示すように高いためと考えられ、その原因は、紙ごみ中のOA用紙とそのシュレツダー紙が比較的単位湿重量当りのガス化量が大きい漂白コピー紙であったためと推定される。
(^{*}メタンガスに分解する有機物の割合を示し、バイオマスの種類によって異なる)
- ② バイオガス発生量は、第2期で確認できた様に、雑紙の混入によりやや低下し、第3期で紙ごみの割合が多くなると増える傾向にあった。しかし顕著ではなく、全期間を通じて発生量が多い状態で安定していたと考えられる。
- ③ 一方、蒸気使用量と発酵残渣生成量は、第1期から、第2期、第3期と増大している。このうち、蒸気使用量の増大の原因は、実証試験施設が小規模な装置であり、保温が難しいため、実験期間が、夏～秋～冬と外気温の低下に伴い、使用量が増大したためと考えられる。

表 7.2.9 厨芥と紙類のVS分解率の当初計画値とラボ実験値

	厨 芥	紙 ご み		
		シュレツダー紙	雑 紙	紙類全体
当初計画値	80 %	—	—	65 %
ラボ実験値 [*]	90 %	89 %	77 %	—

^{*}紙ごみについて、各紙ごみサンプルを実験室で分析した値

7.2.6 実証試験評価

事業系一般廃棄物は分別収集を事業者責務で行われる事から、異物混入率が低く、家庭用一般ごみに比べてバイオマス資源として活用し易い。そこで事業系一般廃棄物の厨芥と再利用し辛い紙ごみを混合したごみを原料に選定、乾式メタン発酵法による実証実験を行った。結果、環境省が定める高効率原燃料回収施設のガイド値「ごみ1トン当り150N m³以上」を上回る370N m³以上のバイオガスを製造する事が出来た。また、気温の影響と共に、土日にごみ投入しないバッチ処理の場合、バイオガス発生量が変動する事も確認した。

7.3 モデル地区における都市型バイオマスエネルギーシステム導入の検討

本節では、前節の実証試験で確認した事業系一般廃棄物を活用した乾式メタン発酵法による都市型バイオマスエネルギーシステム（以下本文中は、UBES = Urban Biomass Energy System と称する）を導入、事業系一般廃棄物起源バイオガスをバイオガスボイラの蒸気製造に利用し地域冷暖房熱源プラントに供給、地域冷暖房エリアのエネルギー消費削減量について定量的に把握する。

7.3.1 検討モデル地区の概要と既存地域冷暖房併設UBESの検討

検討モデル地区として想定した地域を図 7.3.1 に、UBES のシステムフローを図 7.3.2 に示す。又、開発予定地の想定建物規模は表 7.3.1、対象地域内建物の用途別床面積及び廃棄物発生量は表 7.3.2 の様に設定した。UBES は乾式メタン発酵装置とバイオガス蒸気ボイラを組合せ、大型のガスホルダー（貯留施設）を設けず、成り行きで製造した蒸気を隣接する地域冷暖房施設に供給するとし、既存の蒸気ボイラによってバイオガス蒸気ボイラで不足する蒸気は補完する。なお、乾式メタン発酵施設で発生した発酵残渣は乾式メタン発酵施設内でバイオガスを使って乾燥処理し、近隣の清掃工場に持ち込み焼却処分を行うとした。

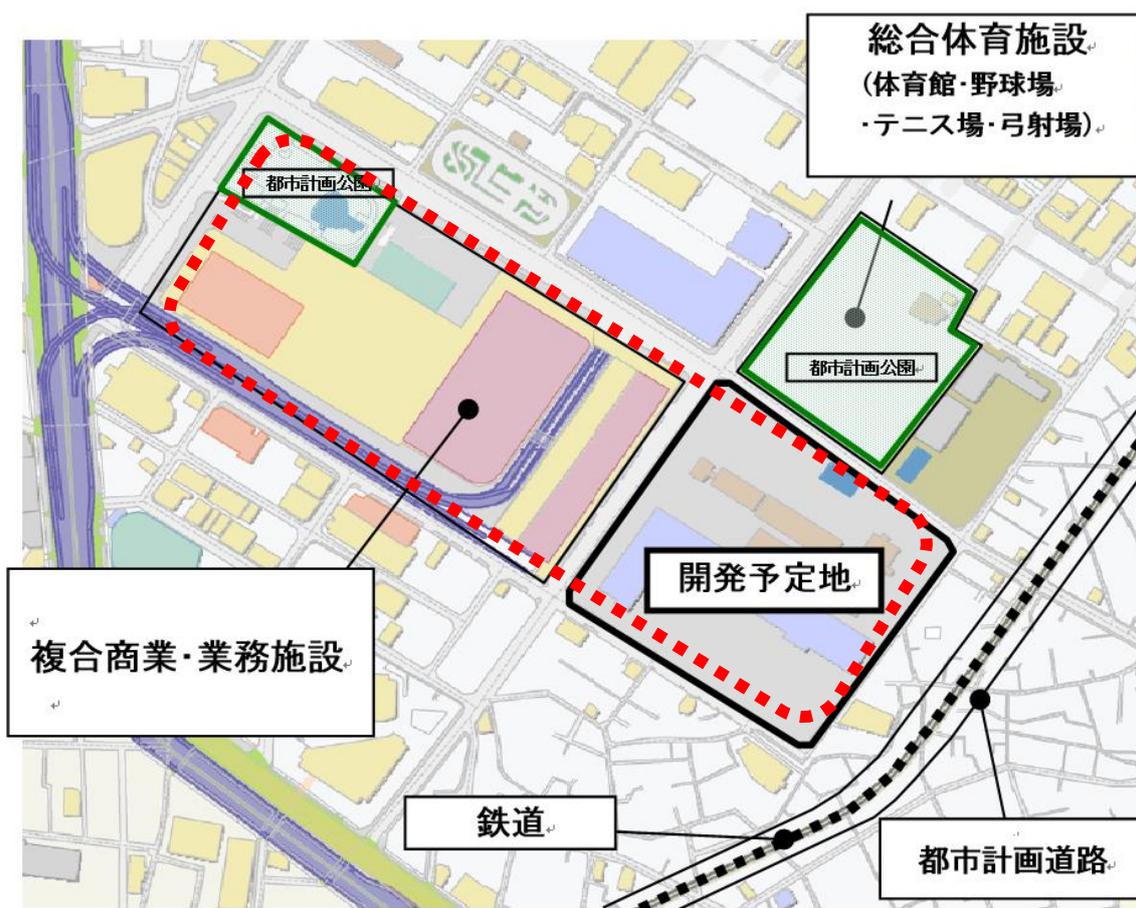


図 7.3.1 検討対象地区

(1) 既設地域冷暖房プラント併設UBESの検討

- 図 7.3.2 に示す様に、検討モデル地区の建物内で、従来、焼却処分されている紙類、厨芥類を収集し、開発予定地内に想定した施設内に設置する UBES を使って、バイオガスを製造し、バイオガス蒸気ボイラを使って蒸気を製造する。
- 同蒸気を隣接する複合商業・業務施設内の既存地域冷暖房プラントに供給し、熱供給の一部・温熱源として活用する。
- 発生した発酵残渣は乾式メタン施設内でバイオガスを利用して乾燥処理し、近接清掃工場に持ち込み焼却処分する。

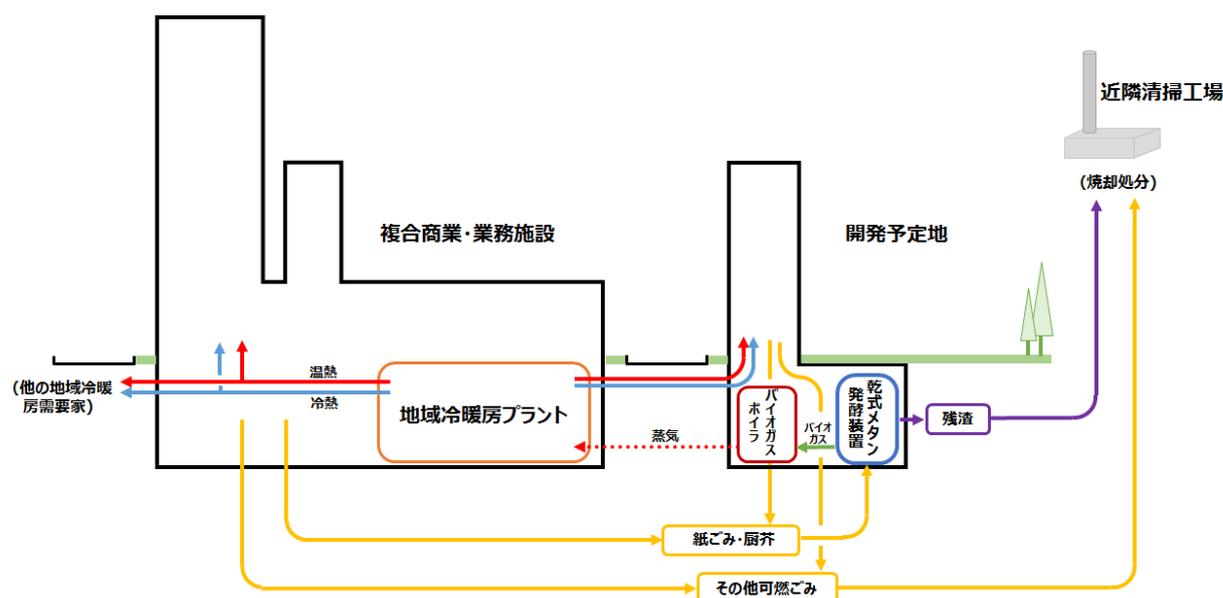


図 7.3.2 既存地域冷暖房プラント併設UBESのフロー図

(2) 開発予定地の想定

表 7.3.1 開発予定地の概要

敷地面積	約33,000㎡
用途地域	第一種住居地域・防火地域
建ぺい率	60% (可能建築面積：約19,800㎡)
容積率	400% (可能延床面積：約132,000㎡)

本検討においては、敷地面積の 1/3 ($33,000 \text{ m}^2 \times 1/3 = 11,000 \text{ m}^2$) について容積率 400%の再開発床を見込み、オフィスの廃棄物発生原単位を使用して、廃棄物発生量を想定した。

(3) 検討モデル地区の廃棄物発生量の想定

表 7.3.2 検討モデル地区の廃棄物発生量想定

用途	①床面積 (㎡)	②発生原単位(kg/㎡)			③発生量(t/年)				
		紙類	厨芥	その他	紙類	厨芥	その他	計	
複合商業・ 業務施設	オフィス(1)	190,595	6.2	1.7	2.1	1,181.7	324.0	400.2	1,906.0
	商業施設	51,640	13.5	8.7	5.1	697.1	449.3	263.4	1,409.8
	オフィス(2)	93,370	6.2	1.7	3.9	578.9	158.7	364.1	1,101.8
	その他用途	18,830	4.9	3.3	4.1	92.3	62.1	77.2	231.6
	集合住宅	246	338	262	150	60.7	47.0	26.9	134.7
	都市ホテル	63,820	4.8	7.7	3.9	306.3	491.4	248.9	1,046.6
	都市施設(駐車場・その他)	131,465	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	公共歩廊	17,345	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(小計)	567,311	-	-	-	2,917.0	1,532.6	1,380.8	5,830.4	
開発予定地	オフィス③	44,000	6.2	1.7	2.1	1,181.7	74.8	92.4	1,348.9
合計	611,311	-	-	-	4,099	1,607	1,473	7,179	

なお、以下の条件で上記想定を行った。

- 各用途別廃棄物発生原単位は「平成17年度版東京23区再利用計画書のまとめ」(以下、23区資料)を使用した。(表7.3.3)
- 集合住宅は戸当たり人数を2名と想定した。
- 住宅廃棄物発生原単位は、検討モデル地区の行政が発行する「一般廃棄物処理基本計画」資料に記載の「市民一人当たりの廃棄物量=748 kg/人・日」を使用した。なお、紙類・厨芥・その他の内訳は区部の清掃工場搬入廃棄物(表4.2.4)を参考にそれぞれ35%、45%、20%と想定した。

表 7.3.3 東京23区資料による建物用途別廃棄物発生原単位

建物用途	ごみ発生原単位 (kg/年・㎡)	内訳(%)			種類別ごみ量 (kg/年・㎡)		
		紙類	生ごみ類	その他	紙類	生ごみ類	その他
オフィス	10.0	62.1%	16.9%	21.0%	6.2	1.7	2.1
商業施設	27.3	49.4%	32.0%	18.6%	13.5	8.7	5.1
ホテル	16.4	29.3%	47.1%	23.6%	4.8	7.7	3.9
その他建築物	12.2	40.0%	26.7%	33.3%	4.9	3.3	4.1

7.3.2 バイオマス資源量を変化させた場合のエネルギー収支について

(1) エネルギー収支の考え方

検討モデル地区で想定される廃棄物量から処理規模は 10t/日であるが、感度分析の観点から処理規模 20t/日、50t/日を加えた 3 ケースについて、厨芥類・紙類の廃棄物を清掃工場で焼却する場合と、乾式メタン発酵施設で処理し、バイオガスで蒸気製造し隣接する地域冷暖房を介して、温熱源として利用するUBESのエネルギー収支比較を行った。但し、残渣は乾燥し近接清掃工場で焼却するとした。

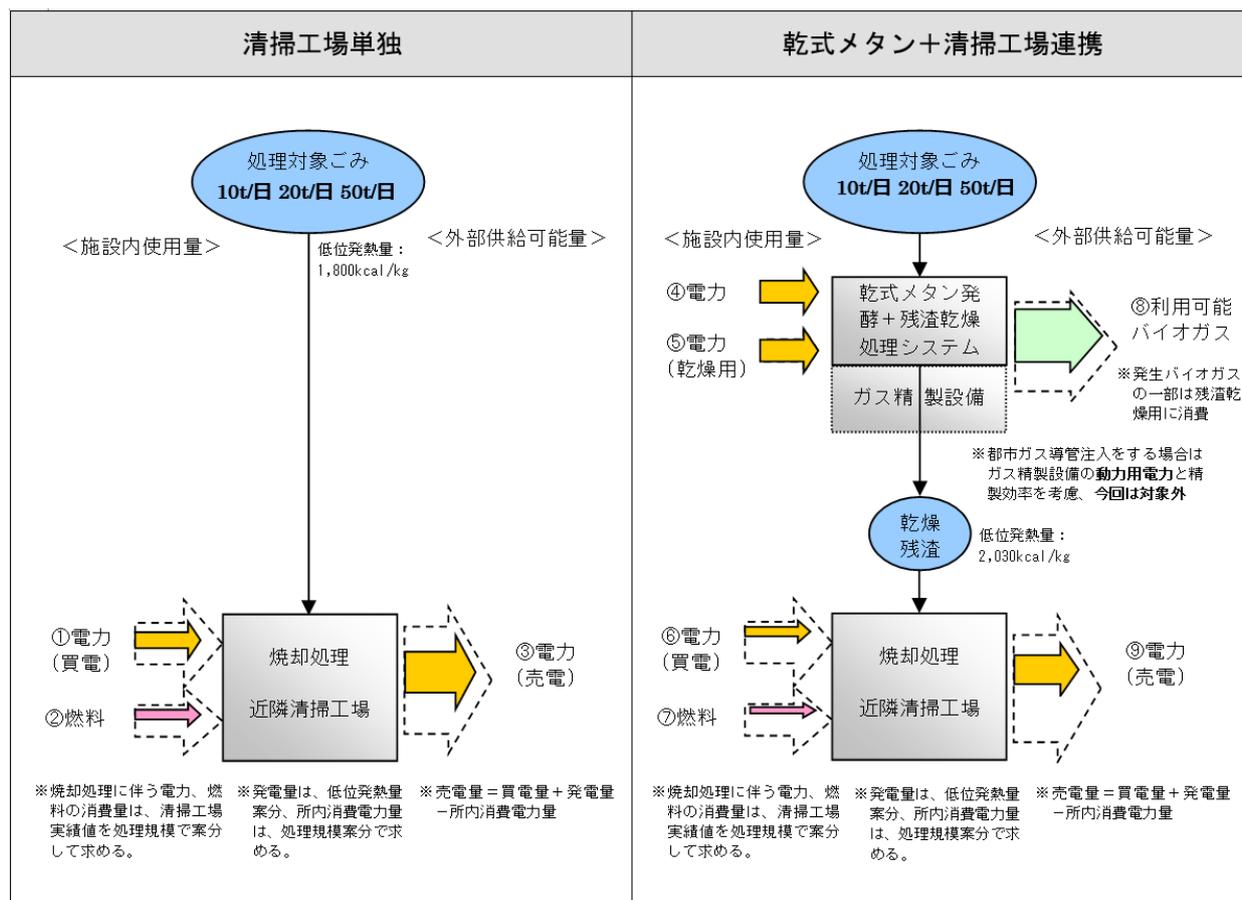


図 7.3.3 ケーススタディにおけるエネルギー収支の考え方

エネルギー収支検討結果を 10t/日のケースを表 7.3.4、20t/日のケースを表 7.3.5、50t/日のケースを表 7.3.6 に示す。乾式メタン発酵施設を導入した場合の余剰エネルギー（外部供給分－施設内使用分）は、清掃工場焼却と比べて、処理規模 10t/日のケースで 1.62 倍、20t/日のケースで 2.01 倍、50t/日のケースで 3.31 倍に増加する結果となった。なお、検討に際して使用した値・原単位は、乾式メタン発酵装置製造メーカーにヒヤリングし確認したデータを付録参考 1～3 に、又、東京 23 区清掃一部事務組合の資料から整理・作成した東京 23 区内清掃工場別年間データを参考 4～6 に示す。なお、本項のガス発生割合は 7.2 項の実証試験で確認した平均 374Nm³/t から 370 Nm³/t を使用した。

表 7.3.4 エネルギー収支検討結果（廃棄物処理量 10t/日のケース）

		清掃工場単独	乾式メタン+清掃工場連携
施設内使用エネルギー量	電力(買電電力)	① 焼却時買電量 10t/日×300日×13.15kWh/t ^{※1} ×9.76MJ/kWh÷1,000 385GJ/年	④ メタン発酵買電量 (1.16Gcal/日 ^{※6} ×1.5 ^{※7} ×365日+0.33Gcal/日 ^{※8} ×300日) ×1000/0.86Mcal/kWh×9.76Mcal/kWh÷1000 8,331GJ/年
	都市ガス(補助燃料)	② 清掃工場補助燃料(都市ガス) 10t/日×300日×0.77m ³ /t ^{※2} ×40.6MJ/m ³ ÷1000 94GJ/年	⑤ 残渣乾燥用動力買電量 0.71Gcal/日 ^{※9} ×12h/24h×300日×1000000 ÷860kcal/kWh×9.76MJ/kWh÷1000 1,209GJ/年
	(小計)	479GJ/年	⑥ 乾燥残渣焼却時買電量 2.4t/日×300日×13.15kWh/t×9.76MJ/kWh ÷1,000 92GJ/年
外部供給可能エネルギー量	バイオガス (バイオガスボイラー)	-	⑦ 乾燥残渣焼却時買電量 2.4t/日×300日×0.77m ³ /t×40.6MJ/m ³ ÷1000 23GJ/年
	電力(売電電力)	③ 焼却時売電量 (a.買電量)10t/日×300日×13.15kWh/t (b.発電量)10t/日×300日×1800kcal/kg ^{※3} ×4.186MJ/kcal ÷1000×36.77kWh/GJ ^{※4} (c.所内消費電力量) 10t/日×300日×178.9kWh/t ^{※5} (a+b-c)×9.76Mcal/kWh÷1000 3,259GJ/年	⑧ 残渣乾燥用を除くバイオガス利用量 (a.バイオガス発生量)10t/日×370Nm ³ /t×300日×0.53 ^{※10} ×8.557Mcal/Nm ³ ×4.186MJ/Mcal÷1000 (b.残渣乾燥用熱量)3162Mcal/日 ^{※12} ÷0.5 ^{※13} ×300日 ×4.186MJ/Mcal÷1000 (a-b) 13,131GJ/年 (c.バイオガスボイラー-蒸気量) (a-b)×0.87 ^{※14} 11,424GJ/年
	(小計)	3,259GJ/年	⑨ 乾燥残渣焼却による発電(売電量) (a.買電量)2.4t/日×300日×13.15kWh/t (b.発電量)2.4t/日×300日×2030kcal/kg ^{※15} ×4.186MJ/kcal ÷1000×36.77kWh/GJ (c.所内消費電力量) 2.4t/日×300日×178.9kWh/t (a+b-c)×9.76Mcal/kWh÷1000 1,031GJ/年
合計(供給分-使用分)	2,780GJ/年 100%	9,655GJ/年 101%	

※1 平成19年度23区12清掃工場の買電量(22,297,686kWh/年)÷同廃棄物処理量(1,696,247t/年)

$$\frac{22,297,686\text{kWh/年}}{1,696,247\text{t/年}} = 13.15\text{kWh/t}$$

※2 平成19年度23区12清掃工場の補助燃料(都市ガス)使用量(1,313,129m³/年)÷同廃棄物処理量(同上)

$$\frac{1,313,129\text{m}^3}{1,696,247\text{t/年}} = 0.77\text{m}^3/\text{t}$$

※3 全国都市清掃会議発行「廃棄物処理施設整備の計画・設計容量」から厨芥及び紙ごみのkg当り発熱量(kcal)が、各々800kcal/kg、2,800kcal/kgから、混合比50:50とし、発熱量1,800kcal/kgを算定

$$800\text{kcal/kg} \times 0.5 + 2,800\text{kcal/kg} \times 0.5 = 1,800\text{kcal/kg}$$

※4 平成19年度23区12清掃工場の焼却廃棄物平均発熱量(低位)が2,167kcal/kg、同発電量が565,811,190kWh/年、以上から年間発電量÷入熱量(年間廃棄物処理量×焼却ごみ平均熱量)

$$\frac{565,811,190\text{kWh/年}}{1,696,247\text{t/年} \times 2.167\text{kcal/t} \times 4.186\text{MJ/kcal} \div 1,000} = 36.77\text{kWh/GJ}$$

※5 平成19年度23区12清掃工場の所内電力使用量(303,519,280kWh/年)÷同ごみ焼却量(同上)

$$\frac{303,519,280\text{kWh/年}}{1,696,247\text{t/年}} = 178.9\text{kWh/t}$$

- ※6 メーカーの「規模 10t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」からメタン発酵消費エネルギー・動力分（メタン発酵を促す発酵槽内循環に要するポンプ、コンベヤー等の動力分）1.16Gcal/日。終日メタン発酵は行われるので 365 日適用
- ※7 脱臭等を目的とした換気装置動力分として、建物形状・設置場所等により異なることから、上記 6 の 50%相当量を加算
- ※8 メーカーの「規模 10t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」から蒸気添加量（蒸気熱量）分、0.33G/日。但し、ごみ原料を投入する際に必要なので原料投入日 300 日を適用
- ※9 メーカーの「規模 10t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」から残渣乾燥消費エネルギー量は 0.71Gcal/日。乾燥装置は 12h/日なので 1 日当りの投入量を 0.71 Gcal/日×12h/24h
- ※10 バイオガス中のメタン濃度
- ※11 メタンガス低位発熱量
- ※12 メーカーの「規模 10t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」から搬出残渣 7,965 kg/日、同 TS 濃度（固形分）20.9%から乾物は 7,965 kg/日×0.209=1,664.7 kg/日、同様に残渣水分は 7,965 kg/日×(1-0.209)= 6,300.3 kg/日。乾燥物は 2,379 kg/日、同水分 30%、以上から乾燥物の水分量は 2,379 kg/日－1,664.7 kg/日=714.3 kg/日。以上から、残渣から乾燥物にするために取り除く水分量は、6,300.3 kg/日－714.3 kg/日=5,586 kg/日。ここで、発酵槽内は高温発酵温度 55℃から、残渣も同温度と考え、55℃の蒸発潜熱は 565.9kcal/kg、故に乾燥に必要な熱量は、5,586 kg/日×565.9kcal/kg=3,161,117kcal/日≒3,162Mcal/日。
- ※13 乾燥効率：50%
- ※14 バイオガスボイラ効率：0.87（2012 年 3 月農林水産省バイオマス事業化戦略資料から）
- ※15 平成 19 年度 23 区 12 清掃工場処理ごみ平均低位及び高位発熱量 2,167kcal/kg、2,637 kcal/kg の比率と乾式バイオマス残渣実測値（実証実験時残渣高位発熱量）2,470kcal/kg から、以下のように低位発熱量を推計した。

$$\frac{2,470\text{kcal/kg} \times 2,167\text{kcal/kg}}{2,637 \text{ kcal/kg}} \cong 2,030 \text{ kcal/kg}$$

表 7.3.5 エネルギー収支検討結果（ごみ処理量 20t/日のケース）

		清掃工場単独	乾式メタン+清掃工場連携
施設内使用エネルギー量	電力(買電電力)	① 焼却時買電量 20t/日×300日×13.15kWh/t×9.76MJ/kWh÷1,000 770GJ/年	④ メタン発酵買電量 (2.04Gcal/日 ^{※15} ×1.5×365日+0.52Gcal/日 ^{※16} ×300日) ×1000/0.86Mcal/kWh×9.76Mcal/kWh÷1000 14,446GJ/年
			⑤ 残渣乾燥用動力買電量 1.63Gcal/日 ^{※17} ×12h/24h×300日×1000000 ÷860kcal/kWh×9.76MJ/kWh÷1000 2,775GJ/年
			⑥ 乾燥残渣焼却時買電量 4.8t/日×300日×13.15kWh/t×9.76MJ/kWh÷1,000 185GJ/年
	都市ガス(補助燃料)	② 清掃工場補助燃料(都市ガス) 20t/日×300日×0.77m ³ /t×40.6MJ/m ³ ÷1000 188GJ/年	⑦ 乾燥残渣焼却時買電量 4.8t/日×300日×0.77m ³ /t×40.6MJ/m ³ ÷1000 45GJ/年
	(小計)	958GJ/年	17,451GJ/年
外部供給可能エネルギー量	バイオガス	-	⑧ 残渣乾燥用を除くバイオガス利用量 (a.バイオガス発生量)20t/日×370Nm ³ /t×300日×0.53 ×8.557Mcal/Nm ³ ×4.186MJ/Mcal÷1000 (b.残渣乾燥用)6210Mcal/日 ^{※18} ÷0.5×300日 ×4.186MJ/Mcal÷1000 (a-b) 26,548GJ/年 (c.バイオガスボイラー蒸気量)(a-b)×0.87 23,097GJ/年
	電力(売電電力)	③ 焼却時売電量 (a.買電量)20t/日×300日×13.15kWh/t×1 (b.発電量)20t/日×300日×1800kcal/kg×4.186MJ/kcal ÷1000×36.77kWh/GJ (c.所内消費電力量) 20t/日×300日×178.9kWh/t (a+b-c)×9.76Mcal/kWh÷1000 6,518GJ/年	⑨ 乾燥残渣焼却による発電(売電量) (a.買電量)4.8t/日×300日/年×13.15kWh/t (b.発電量)4.8t/日×300日×2030kcal/kg×4.186MJ/kcal ÷1000×36.77kWh/GJ (c.所内消費電力量) 4.8t/日×300日×178.9kWh/t (a+b-c)×9.76Mcal/kWh÷1000 2,062GJ/年
	(小計)	6,518GJ/年	25,159GJ/年
合計(供給分-使用分)		5,560GJ/年 100%	7,708GJ/年 139%

- ※16 メーカーの「規模 20t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」からメタン発酵消費エネルギー・動力分（メタン発酵を促す発酵槽内循環に要するポンプ、コンベヤー等の動力分）2.04Gcal/日。終日メタン発酵は行われるので 365 日適用した。
- ※17 メーカーの「規模 20t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」から蒸気添加量（蒸気熱量）分、0.52G/日。但し、ごみ原料を投入する際に必要なので原料投入日 300 日を適用した。
- ※18 メーカーの「規模 20t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」から残渣乾燥消費エネルギー量は 1.63Gcal/日。乾燥装置は 12h/日なので 1 日当りの投入量を 1.63 Gcal/日×12h/24h とした。
- ※19 メーカーの「規模 20t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」から搬出残渣 15,730 kg/日、同 TS 濃度（固形分）21.2%から乾物は 15,730 kg/日×0.212=3,334.8 kg/日、同様に残渣水分は 15,730 kg/日×(1-0.212)= 12,395.2 kg/日。乾燥物は 4,757 kg/日、同水分 30%、以上から乾燥物の水分量は 4,757 kg/日-3,334.8 kg/日=1,422.2 kg/日。以上から、残渣から乾燥物にするために取り除く水分量は、12,395.2 kg/日-1,422.2 kg/日=10,973 kg/日。ここで、発酵槽内は高温発酵温度 55℃から、残渣も同温度と考え、55℃の蒸発潜熱は 565.9kcal/kg、故に乾燥に必要な熱量は、10,973 kg/日×565.9kcal/kg=6,209,621kcal/日≒6,210Mcal/日。

表 7.3.6 エネルギー収支検討結果（ごみ処理量 50t/日のケース）

		清掃工場単独	乾式メタン+清掃工場連携
施設内使用エネルギー量	電力(買電電力)	① 焼却時買電量 50t/日×300日×13.15kWh/t×9.76MJ/kWh÷1,000 1,925GJ/年	④ メタン発酵買電量 (2.88Gcal/日 ^{※19} ×1.5×365日+0.98Gcal/日 ^{※20} ×300日) ×1000/0.86Mcal/kWh×9.76Mcal/kWh÷1000 21,231GJ/年
			⑤ 残渣乾燥用動力買電量 1.30Gcal/日 ^{※21} ×300日×1000000÷860kcal/kWh ×9.76MJ/kWh÷1000 4,427GJ/年
			⑥ 乾燥残渣焼却時買電量 11.9t/日×300日×13.15kWh/t×9.76MJ/kWh÷1,000 458GJ/年
	都市ガス(補助燃料)	② 清掃工場補助燃料(都市ガス) 50t/日×300日×0.77m ³ /t×40.6MJ/m ³ ÷1000 469GJ/年	⑦ 乾燥残渣焼却時買電量 11.9t/日×300日×0.77m ³ /t×40.6MJ/m ³ ÷1000 112GJ/年
	(小計)	2,394GJ/年	26,228GJ/年
外部供給可能エネルギー量	バイオガス	-	⑧ 残渣乾燥用を除くバイオガス利用量 (a.バイオガス発生量)50t/日×370Nm ³ /t×300日×0.53 ×8.557Mcal/Nm ³ ×4.186MJ/Mcal÷1000 (b.残渣乾燥用)15,241Mcal/日 ^{※22} ÷0.5×300日 ×4.186MJ/Mcal÷1000 (a-b) 67,084GJ/年 (c.バイオガスボイラー-蒸気量)(a-b)×0.87 58,363GJ/年
	電力(売電電力)	③ 焼却時売電量 (a.買電量)50t/日×300日×13.15kWh/t×1 (b.発電量)50t/日×300日×1800kcal/kg×4.186MJ/kcal ÷1000×36.77kWh/GJ (c.所内消費電力量)50t/日×300日×178.9kWh/t (a+b-c)×9.76Mcal/kWh÷1000 16,295GJ/年	⑨ 乾燥残渣焼却による発電(売電量) (a.買電量)11.9t/日×300日/年×13.15kWh/t (b.発電量)11.9t/日×300日×2030kcal/kg×4.186MJ/kcal ÷1000×36.77kWh/GJ (c.所内消費電力量)11.9t/日×300日×178.9kWh/t (a+b-c)×9.76Mcal/kWh÷1000 5,112GJ/年
	(小計)	16,295GJ/年	63,475GJ/年
合計(供給分-使用分)		13,901GJ/年 100%	37,247GJ/年 268%

※20 メーカーの「規模 50t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」からメタン発酵消費エネルギー・動力分(メタン発酵を促す発酵槽内循環に要するポンプ、コンベヤー等の動力分)2.88Gcal/日。終日メタン発酵は行われるので365日適用した。

※21 メーカーの「規模 50t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」から蒸気添加量(蒸気熱量)分、0.98G/日。但し、ごみ原料を投入する際に必要なので原料投入日300日を適用した。

※22 メーカーの「規模 50t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」から残渣乾燥消費エネルギー量は1.30Gcal/日。乾燥装置は規模が大きくなるため24h連続運転となり、1日当りの投入量を1.30Gcal/日とした。

※23 メーカーの「規模 50t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質、熱収支」から搬出残渣38,825kg/日、同TS濃度(固形分)21.4%から乾物は38,825kg/日×0.214=8,308.6kg/日、同様に残渣水分は38,825kg/日×(1-0.214)=30,516.5kg/日。乾燥物は11,893kg/日、同水分30%、以上から乾燥物の水分量は11,893kg/日-8,308.6kg/日=3,584.4kg/日。以上から、残渣から乾燥物にするために取り除く水分量は、30,516.5kg/日-3,584.4kg/日=26,932.1kg/日。ここで、発酵槽内は高温発酵温度55℃から、残渣も同温度と考え、55℃の蒸発潜熱は565.9kcal/kg、故に乾燥に必要な熱量は、26,932.1kg/日×565.9kcal/kg=15,240,875.4kcal/日÷1000=15,240.8754Mcal/日。

(2) ケーススタディ結果の比較

以上の3ケースについて比較したグラフを図7.3.4に示す。

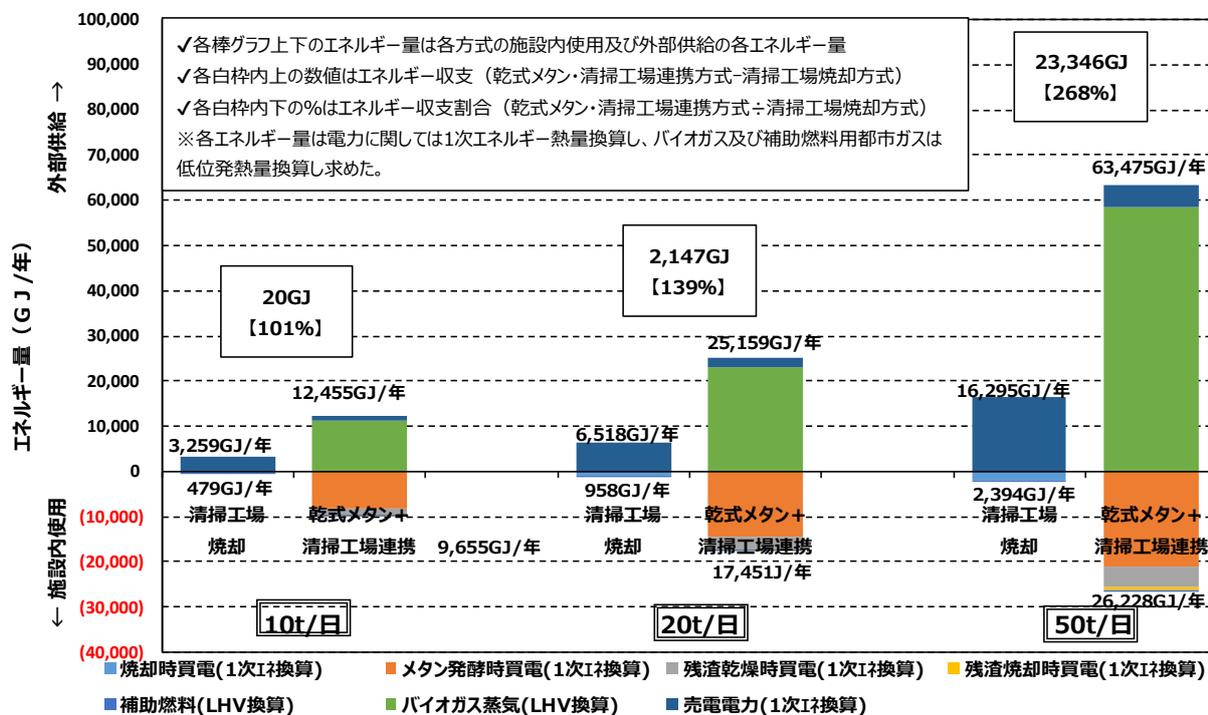


図 7.3.4 3 ケーススタディにおけるエネルギー収支の比較

いずれもケースもバイオマス資源を活用したエネルギーの有効利用が期待できる事が分かった。又、処理規模が大きくなるほど、単位処理量当りの投入エネルギー消費量が小さくなる傾向があり、スケールメリットが生ずる事も確認できた。

7.4 都市再生緊急整備地域を対象とした都市型バイオマスエネルギーシステム導入に関する検討

7.4.1 都市再生緊急整備地域を対象としたバイオマス資源発生量の推計

(1) 対象地域

UBESは都心部に発生するバイオマス資源を活用した地産地消型エネルギーシステムである。エネルギー源となるバイオマス資源の発生量・同密度が高い地域で導入効果が期待される。そこで、都市開発プロジェクトが進展し業務機能・商業機能の集約化が進む東京都内の都市再生緊急整備地域を対象にバイオマス資源の発生量を想定し、UBESの導入効果を検討した。

(2) 活用可能なバイオマス資源量の推計

都市再生緊急整備地域におけるバイオマス資源発生量を図7.4.1に示す推計フローにより算定した。なお、バイオマス資源として、生ごみや紙ごみ（再利用されないもの）の発生量を推計した。

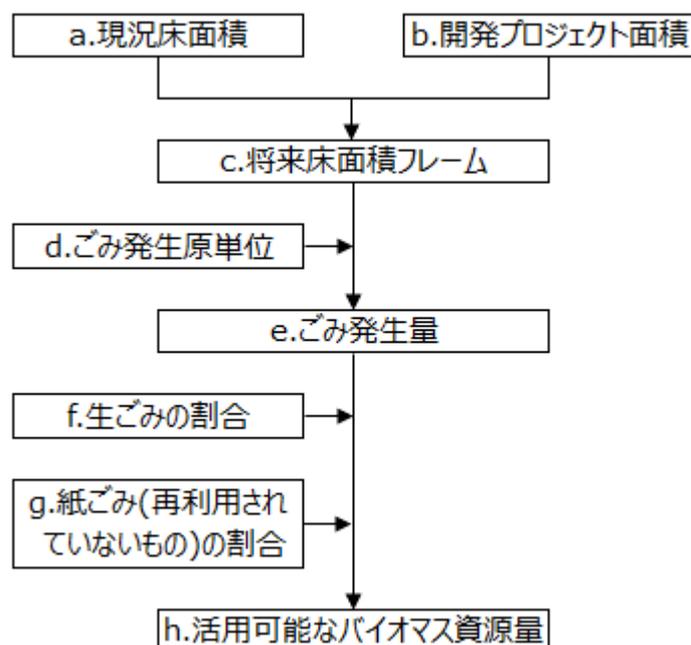


図 7.4.1 活用可能なバイオマス資源量推計フロー

具体的な、検討内容は以下の通り進めた。

- (a) 各地域の現況延床面積を求め、床面積を業務系、商業系、宿泊、住宅の4区分（平成13年GISデータ：以下「平13GISデータ」）で集計。
- (b) GIS調査データに新たに公表されている主要な大規模開発プロジェクトを用途別床面積に加算。
- (c) 本作業で前提とする床面積フレーム計を想定。
- (d) 推計用途別床面積フレーム計にごみ発生原単位を乗じ
- (e) 結果、ごみ発生量が求まる。
- (f) 各生ごみの割合及び、
- (g) 紙ごみの割合を乗じ、
- (h) 活用可能なバイオマス資源発生量を求めた。

(2) 各地域別の将来床面積フレーム：

各都市再生緊急整備地域の平13GISデータによる用途別床面積に主要な大規模開発プロジェクトの用途別床面積を加えた合算値を求めた。（表7.4.1及び表7.4.2）

表 7.4.1 都市再生緊急整備地域における将来床面積フレーム

都市再生緊急整備地域	データ区分	床面積 (千㎡)					地域面積 (ha)	グロス容積率(%)
		業務系	商業系	宿泊	住宅	合計		
東京駅・有楽町周辺地域	a.平13GISデータ	8,995	1,141	377	58	10,571	320	330
	b.開発プロジェクト	2,209	211	82	0	2,502		78
	c.計	11,204	1,352	459	58	13,073		409
新橋周辺・赤坂・六本木	a.平13GISデータ	8,909	1,195	1,121	2,067	13,292	590	225
	b.開発プロジェクト	3,752	519	418	494	5,183		88
	c.計	12,661	1,714	1,539	2,561	18,475		313
秋葉原・神田地域	a.平13GISデータ	3,054	495	105	152	3,806	160	238
	b.開発プロジェクト	289	94	12	49	444		28
	c.計	3,343	589	117	201	4,250		266
東京臨海地域	a.平13GISデータ	5,856	1,451	482	3,646	11,435	1010	113
	b.開発プロジェクト	474	239	9	2,376	3,098		31
	c.計	6,330	1,690	491	6,022	14,533		144
新宿駅周辺地域	a.平13GISデータ	4,236	1,008	1,267	539	7,050	220	320
	b.開発プロジェクト	280	22	0	301	603		27
	c.計	4,516	1,030	1,267	840	7,653		348
新宿富久地域	a.平13GISデータ	19	9	0	58	86	10	87
	b.開発プロジェクト	5	5	0	130	140		140
	c.計	24	14	0	188	226		227
大崎駅周辺地域	a.平13GISデータ	909	74	33	356	1,372	60	229
	b.開発プロジェクト	429	18	0	415	862		144
	c.計	1,338	92	33	771	2,234		373
渋谷駅周辺地域	a.平13GISデータ	1,952	1,169	398	244	3,763	139	271
	b.開発プロジェクト	115	43	0	2	160		12
	c.計	2,067	1,212	398	246	3,923		282
計	a.平13GISデータ	33,930	6,542	3,783	7,120	51,375	-	-
	b.開発プロジェクト	7,553	1,151	521	3,767	12,992		
	c.計	41,483	7,693	4,304	10,887	64,369		

表 7.4.2 各緊急整備地域における 2001 年以降の開発プロジェクト

都市再生緊急整備地域	対象プロジェクト	用途別床面積(千㎡)				
		業務	商業	宿泊	住宅	計
東京駅・有楽町駅周辺地域	東京ビル建替/新丸ビル/丸の内オアゾ/八重洲開発事業/丸の内1-1(丸の内トラストタワー)/大手町第一次再開発/有楽町駅前第一地区/日比谷パークビル/丸の内2-1/丸の内MY PLAZA/三菱商事丸の内新本社ビル/日本橋三井タワー/丸の内二丁目/大手町1-6/丸の内1-1-2/東銀ビル建替	2,209	211	82	-	2,502
新橋周辺・赤坂・六本木地域	汐留地区/環状2号新橋・虎ノ門/霞ヶ関3丁目南/東京ミッドタウン/南青山一丁目団地建替/赤坂4丁目薬研坂北/同薬研坂南/赤坂TBS/赤坂1丁目/虎ノ門4丁目西	3,752	519	418	494	5,183
秋葉原・神田地域	ダイビル/UDX/インテージ秋葉原/東京青果/富士ソフトABC/8街区/ヨドバシAKIBA/TX秋葉原開発/東京タイムスター/神田消防署	289	94	12	49	444
東京臨海地域	勝どき六丁目/勝どき駅前/晴海2丁目/晴海3丁目西/有明南LM2・3区画/豊洲1~3丁目(センタービルアクセス、IHI、芝浦工大、らぽーと、豊洲3丁目スーパービバホーム、豊洲2~3丁目集合住宅)/東雲/フジテレビ臨海副都心スタジオ	474	239	9	2,376	3,098
新宿駅周辺地域	西新宿6丁目成子地区/西新宿6丁目西第6/西新宿6丁目西第7/北新宿/西新宿1丁目7地区/	280	22	0	301	603
新宿富久地域	西富久地区	5	5	0	130	140
大崎駅周辺地域	大崎駅西口E東/大崎駅西口中/大崎駅東口第3/東五反田2丁目第2/北品川5丁目第1/東五反田2丁目4-1街区/大崎駅西口南	429	18	0	415	862
渋谷駅周辺地域	桜丘口地区	115	43	0	2	160
計		7,553	1,151	521	3,767	12,992

(3) 廃棄物発生源単位及びバイオマス資源組成率

建物用途別廃棄物原単位及びバイオマス資源組成率を以下の様に設定した(表7.4.3)。

表 7.4.3 廃棄物発生源単位及びバイオマス資源組成率

	廃棄物発生原単位 (kg/m ² ・年)		バイオマス資源組成率 (%)			
			厨芥		紙ごみ (再利用されていないミックスペーパー)	
業務系	10.0	(*1)	16.9	(*1)	16.1	(*4)
商業系	27.3	(*1)	32.0	(*1)	12.8	(*4)
宿泊	16.4	(*1)	47.1	(*1)	7.6	(*4)
住宅	12.5	(*2)	35.0	(*3)	10.9	(*5)

*1: 「平成17年度版東京23区再利用計画書のまとめ」による

*2: 下記より設定

- ・各区再利用対象物保管場所設置届作成要領の住宅排出基準値: 1kg/人・日
- ・都区部平均世帯人員: 2.126人(平15東京都統計年鑑)
- ・都区部住宅延床面積: 61.92 m²/戸(平15東京都統計年鑑)

*3: 都市機構資料(「集合住宅の生ごみ処理」)

*4: 「平成17年度版東京23区再利用計画書のまとめ」による建物用途別紙ごみの割合に、非再利用率として23区紙類非再利用率平均値(26.0%)を乗じて設定。

*5: 上記都市機構資料による紙ごみの割合(42.0%)に上記と同様23区紙類非再利用率平均値(26.0%)を乗じて設定

(4) 地域別廃棄物発生量及びバイオマス資源発生量

検討対象の各都市再生緊急整備地域を対象とした廃棄物発生量及びバイオマス資源発生量の試算結果を表7.4.4に示す。

表 7.4.4 地域別廃棄物発生量及びバイオマス資源発生量試算結果

	対象地域	(a)用途別想定床面積(千m ²)				廃棄物 ^{※1} 発生量 (t/年)	バイオマス ^{※2} 資源発生量 (t/年)
		業務系	商業系	宿泊	住宅		
都市再生緊急整備地域	東京駅・有楽町周辺地域	11,204	1,352	459	58	157,202	57,959
	新橋周辺・赤坂・六本木	12,661	1,714	1,539	2,561	230,654	91,244
	秋葉原・神田地域	3,343	589	117	201	53,941	20,438
	東京臨海地域	6,330	1,690	491	6,022	192,764	80,514
	新宿駅周辺地域	4,516	1,030	1,267	840	104,558	43,686
	新宿富久地域	24	14	0	188	2,972	1,329
	大崎駅周辺地域	1,338	92	33	771	26,070	10,260
	渋谷駅周辺地域	2,067	1,212	398	246	63,360	26,626
原単位等	(b)用途別廃棄物原単位(kg/m ² ・年)	10.0	27.3	16.4	12.5		
	(c)用途別厨芥ごみ割合(%)	16.9	32.0	47.1	35.0		
	(d)用途別ミックスペーパー割合(%)	16.1	12.8	7.6	10.9		

※1: 廃棄物発生量=用途別(a)×(b)の合計、※2: バイオマス資源発生量=各廃棄物発生量×{(c)+(d)}

7.4.2 UBES導入効果の推計

(1) 地域別バイオガス発生量の推計

バイオガス量を算出するにあたって本項では、都市部において既に行われている乾式メタン発酵システムを用いた実証試験「京都バイオリサイクルプロジェクト」で報告されているバイオガス発生原単位を用いた。バイオガス発生率は、廃棄物成分と共に、含水量に大きく影響をうける。本章2項で行った実証実験では水分は40.0%弱でガス発生割合が370Nm³/t程度であったが、京都バイオリサイクルプロジェクトでは水分が70%前後でガス発生割合200Nm³/tと報告⁷⁻⁶⁾されている。そこで、本項では、既に都市部で実証された京都バイオリサイクルプロジェクトの乾式メタン発酵システムの同原単位で試算した方が確実な評価ができると判断し採用し、表7.4.5に示す様に、各地区のバイオガス量を推計した。

表 7.4.5 UBESエネルギー量

	対象地域	バイオマス 資源発生量 (t/年)	バイオガス量 (千Nm ³ /年) ^{※1}
都市再生緊急整備地域	東京駅・有楽町周辺地域	57,959	11,592
	新橋周辺・赤坂・六本木	91,244	18,249
	秋葉原・神田地域	20,438	4,088
	東京臨海地域	80,514	16,103
	新宿駅周辺地域	43,686	8,737
	新宿富久地域	1,329	266
	大崎駅周辺地域	10,260	2,052
	渋谷駅周辺地域	26,626	5,325

※1：京都バイオリサイクルプロジェクトで報告されているバイオガス発生原単位200Nm³/tにバイオマス資源発生量を乗じて算出した値。

(2) モデル地区内温熱需要量推計

各対象地域内の地域冷暖房事業及び大規模開発建物の温熱需要量を表7.4.6に示す。なお、同需要量は、(一)日本熱供給事業協会発行の平成28年版熱供給事業便覧に掲載されている温熱販売熱量(蒸気・直接蒸気・温水の合計)及び、東京都環境局が公表している「地域エネルギーの有効利用に関する制度」の地域エネルギー供給実績報告書及びエネルギー有効利用計画書に記載されている温熱需要量を使用した。

表 7.4.6 対象地域温熱需要量

単位：GJ

	対象地区	蒸気	直接蒸気	温水	合計
東京・有楽町	大手町	302,352	12,376	16,016	
	丸の内一丁目・二丁目	335,927	-	-	
	八重洲日本橋	13,825	764	-	
	有楽町	108,827	-	-	
	東京国際フォーラム	48,589	259	16,989	
	内幸町	89,575	7,471	4,380	
	東銀座	23,749	-	-	
	日比谷	-	-	11,685	
	銀座5・6丁目	-	-	1,917	
	小計	922,844	20,870	50,987	994,701
環状2号線 新橋・赤坂・ 六本木	青山	33,803	-	-	
	永田町2丁目	70,166	-	-	
	赤坂5丁目	79,704	5,531	-	
	赤坂	27,821	1,383	-	
	霞ヶ関3丁目	25,731	9,674	-	
	虎ノ門2丁目	44,634	4,130	-	
	虎ノ門4丁目城山	15,954	656	-	
	赤坂・六本木パークヒルズ	84,164	6,490	-	
	六本木ヒルズ	116,979	15,522	-	
	北青山二丁目	13,353	1,163	5,247	
	小計	512,309	44,549	5,247	562,105
秋葉原・神 田地域	神田駿河台	-	-	22,462	
	小計	0	0	22,462	22,462
東京臨海地 域	東京臨海副都心	-	-	383,329	
	新川	-	-	13,382	
	箱崎	-	-	10,220	
	豊洲3丁目 ^{※1}	-	-	19,738	
	晴海アイランド	-	-	33,014	
	明石町	87,428	6,961	-	
	小計	87,428	6,961	459,683	554,072
新宿駅周辺 地域	新宿歌舞伎町	43396	2917	-	
	西新宿1丁目	45226	6836	-	
	西新宿	187524	1522	-	
	新宿新都心	562965	-	-	
	新宿南口西	104960	9145	-	
	新宿南口東	14773	-	-	
	初台淀橋	42155	14744	9998	
	西新宿6丁目	186638	1928	4732	
	小計	1,187,637	37,092	14,730	1,239,459
環状4号線 新宿富久沿 道地域	西富久地区第一種市街 地再開発事業 ^{※2}			25,890	
	小計	0	0	25,890	25,890
大崎駅周辺 地域	大崎1丁目			15,306	
	小計	0	0	15,306	15,306
渋谷駅周辺 地域	渋谷道玄坂	24,414			
	小計	24,414	0	0	24,414

※1・2：平成27年度東京都地域エネルギー供給実績報告書及びエネルギー有効利用計画書から

(3) UBES導入効果算定

都市再生緊急整備地域の各地域別バイオガス量（表 7.4.5）及び同地域の温熱需要量（表 7.4.6）から、バイオガスボイラで温熱製造するUBESをモデル地区内で導入、その導入効果割合推計を表 7.4.7 に示す。

表 7.4.7 UBES導入効果

	対象地域	(a)バイオガス量 ：表4.4.5 (千Nm3/年)	(b)UBES 温熱製造量 (GJ/年) ^{※1}	(c)対象地区内温 熱需要： 表4.4.6(GJ)	(d)UBES導 入効果割合
都市再生緊急整備地域	東京駅・有楽町周辺地域	11,592	242,037	994,701	24%
	新橋周辺・赤坂・六本木	18,249	381,035	562,105	68%
	秋葉原・神田地域	4,088	85,351	22,462	380%
	東京臨海地域	16,103	336,228	554,072	61%
	新宿駅周辺地域	8,737	182,431	1,239,459	15%
	新宿富久地域	266	5,550	25,890	21%
	大崎駅周辺地域	2,052	42,847	15,306	280%
	渋谷駅周辺地域	5,325	111,191	24,414	455%

※1：バイオガス量×24MJ/m³×0.87（24MJ/m³：バイオガス高位発熱量⁴⁻⁷、0.87：バイオガスボイラ効率）

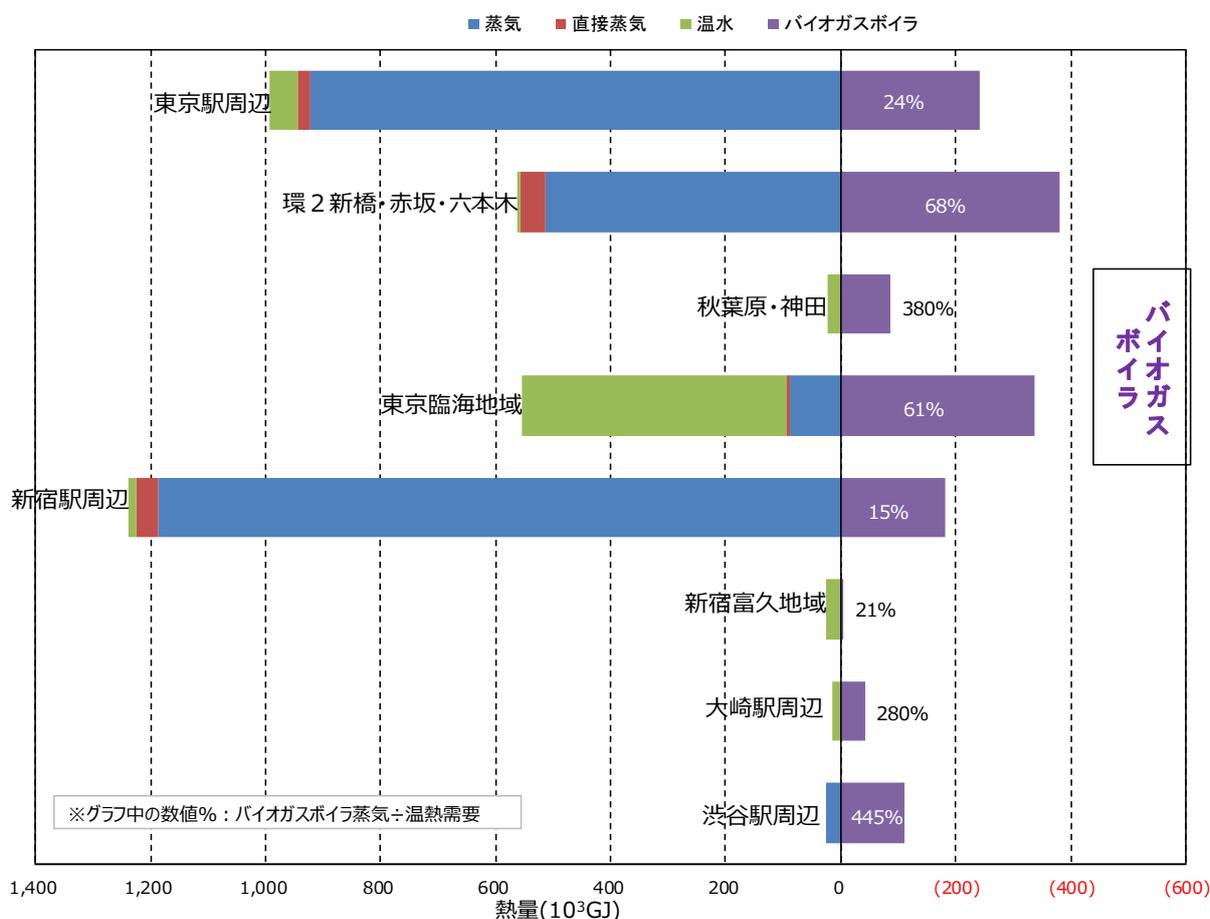


図 7.4.2 対象地域内温熱需要に対するUBES製造温熱の割合

推計の結果、各地域内の地域冷暖房施設等の温熱需要の21%~445%相当量をバイオガスボイラで賄える可能性がある。

更に、UBES施設で発生する残渣は、近隣の清掃工場で焼却処分する事を想定し、温熱需要場所と清掃工場の位置関係を図7.4.3に示す。

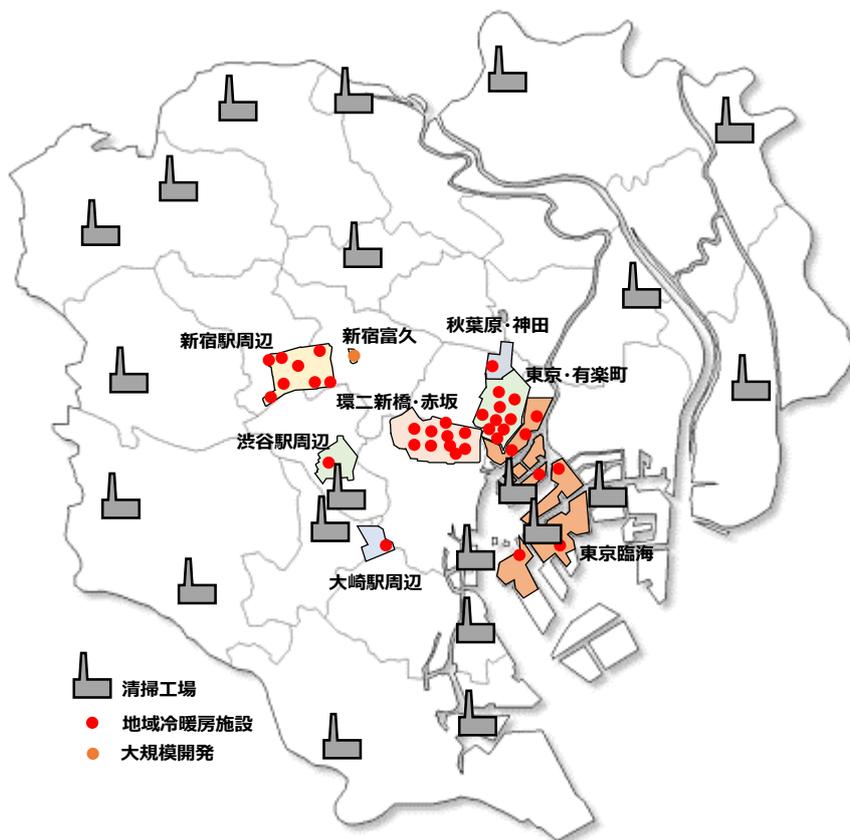


図 7.4.3 東京 23 区内における温熱需要場所と清掃工場の位置関係

5.5 まとめ

本章では、都心部で大量に発生し、排出者に分別収集・廃棄の責任が課せられ、取り扱いし易い事業系一般ごみに着目、そのうちリサイクル率の低い厨芥やその他の紙ごみ（表面に特殊な加工がしてある紙や汚れている紙ごみ）をバイオマス資源とし、排水が発生しない乾式メタン発酵法を用いたUBESの実現可能性を検討した。

7.2 では、実用化されているメタン発酵法を比較し、バイオガス発生量が多く小規模プラント化も可能、又、事業系一般ごみのうち厨芥及び紙ごみに着目、同ごみをバイオマス原料として使用できる乾式メタン発酵の特徴を整理した。そして、東京 23 区内の事業系一般ごみの特徴を整理し、UBESをイメージして、乾式メタン発酵試験プラントを建設、同プラントを使いバイオガスを製造、その性状・発生量等を確認した。

7.2.5 では、乾式メタン発酵試験プラントを使って、都内 K 区内の大型複合施設で発生した厨芥と紙ごみの混合割合を変えて実証試験を行い、ごみ処理量 1 トン当たりのバイオガス発生量は平均

374 Nm³ と、地方都市において乾式メタン発酵法でゴミを処理した場合の発生量の 1.5 倍超のガス発生率を確認し、紙ごみの割合が多くなるとバイオガス発生量は増えるが、年間を通じた評価の中で、夏～秋～冬と外気温の低下に伴って、加温用蒸気投入量が必要となる事を確認した。

次に 7.3 において、実証実験で確認した事業系一般廃棄物を活用した乾式メタン発酵法によるバイオガスシステムを地域冷暖房会社による熱供給が行われている特定地域に適用した場合のエネルギー削減量を定量的に把握した。検討モデル地区を想定し、同地区内で焼却処分される厨芥・紙ごみを使った乾式メタン発酵装置とバイオガスボイラを設置する都市型バイオマスエネルギーシステム（UBES）を同地区内の開発予定地内に設定、同システムで蒸気を製造して隣接する既存地域冷暖房に供給、熱媒として利用するシステムを設定した。エネルギー収支の検討については、検討モデル地区で想定されるバイオマス資源対象ごみ量は 10t/日であるが、感度分析の観点から、20t/日、50t/日を含めた 3 ケースについて、清掃工場で焼却処分するケースとエネルギー収支の比較を行った。結果、清掃工場で焼却処分するケースと比べて、10t/日で 1.62 倍、20t/日のケースで 2.01 倍、50t/日のケースで 3.31 倍と UBES を導入した場合の余剰エネルギー（外部供給分－施設内使用分）は増加する事が確認できた。

UBES は都市部で生じたバイオマス資源をその地域でエネルギーとして活用する地産地消型エネルギーシステムとなる可能性がある。そこで、東京都内の都市再生緊急整備地域を対象に UBES の導入効果を検討した。東京都内の都市再生緊急整備地域 8 地区（東京駅・有楽町周辺／新橋周辺・赤坂・六本木／秋葉原・神田／東京臨海／新宿周辺／新宿富久／大崎駅周辺／渋谷駅周辺）を選定し、現況用途別床面積及び開発プロジェクト面積から将来床面積フレームを定め、ごみ発生量を推計した。同値から UBES に活用可能なバイオマス資源量を推計し、地域別バイオガス発生量を算定した。なお、バイオガス量の算出は、京都バイオリサイクルプロジェクトで実証・確認されているごみ 1 トン当たり 200Nm³ のバイオガス発生原単位を使用した。

対象地域内の地域冷暖房施設等の温熱需要の 21%～44%に相当するバイオガスボイラによる温熱製造の可能性を確認した。UBES の導入は、第 7 章の既存地域冷暖房と連携した SHG への展開も期待する事ができると考えている。又、第 1 章で記載したロンドンでは、将来、大幅な低炭素化を推進するための手段として、木質チップを主としたバイオマスシステムを地域エネルギーシステムに導入する構想を立てている。これは、熱融通のエネルギーインフラを活用して、CGS や高効率機器の活用に加え、使用するエネルギーそのものを低炭素化し、複数建物のベース負荷に使用する事でエネルギー消費量の大幅な削減に繋がる考え方に基づいている。SHG を一つのエネルギーインフラと捉えて、多様なエネルギーシステムの構築が期待できる。

【参考文献】

- 7-1) 環境省：循環型社会形成推進基本計画、
<http://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku.html>
- 7-2) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：メタンガス化（生ごみメタン）施設整備マニュアル,P9～P10,2008
- 7-3) 森田他,先進型高効率乾式メタン発酵システム実験事業（第 1 報）～可燃ごみ各組成のバイオガス発生特性に関する研究,第 17 回廃棄物学会研究発表会講演論文集（2006）

7-4) 環境省 HP : メタンガス化に関する用語集

<http://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/keywords.html>

7-5) 二條他, 先進型高効率乾式メタン発酵システム実験事業 (第2報) ～実験事業の概要及び実験システムの運転報告, 第19回廃棄物学会研究発表会講演論文 (2008)

7-6) 京都バイオサイクルプロジェクト高効率メタン発酵技術開発 (第2報)、第20回廃棄物学会研究発表会論文集、pp.295-296、2009

7-7) 日本ガス協会ホームページ、http://www.gas.or.jp/bio/contents/bio_gas.html

7-8) 金田一淳司ほか: 地下空間を活用した都市再生に関する研究、第25回土木計画学研究発表会講演集、No.96、2002

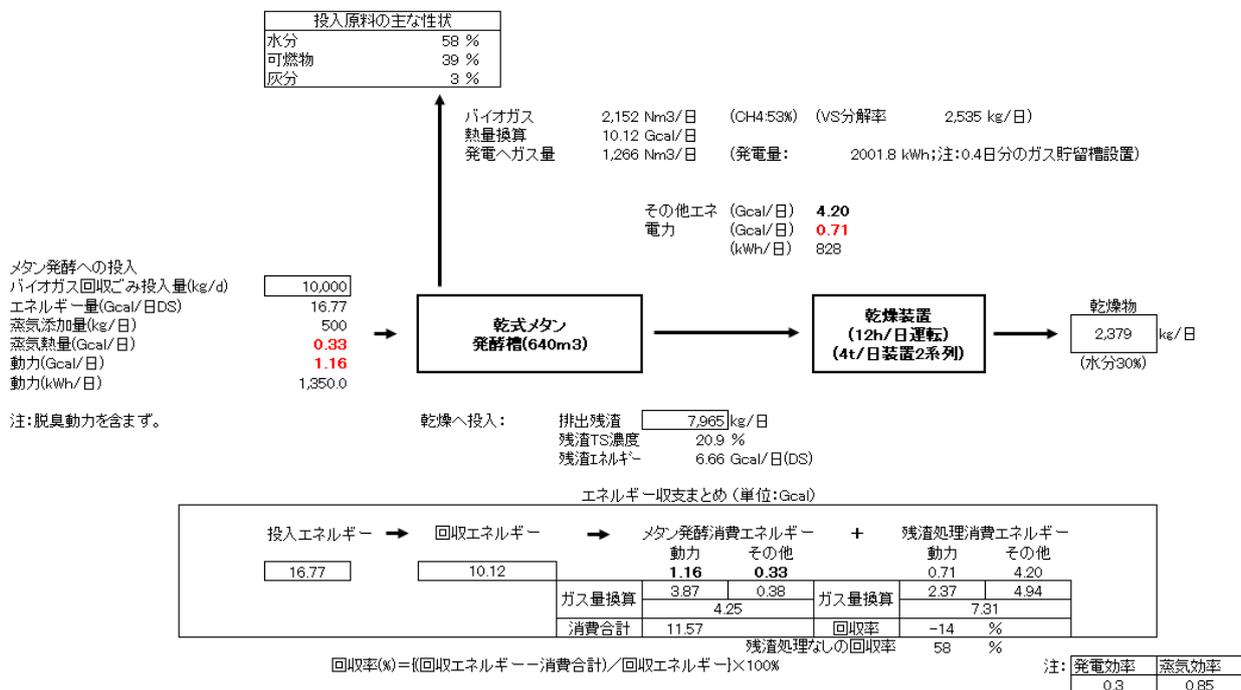
7-9) 東大門環境資源センター (韓国・ソウル) 視察ヒヤリングより、20090409～10

7-10) 塩田憲明、徳田直子、竹林徹也、水口護、斉藤彰、長谷川猛; あべのハルカス向け都心型バイオガスシステムの安定運転結果、神鋼環境ソリューション技報、Vol.13 No1 (2016/9)

【参考1】規模10t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質・熱収支（メーカヒヤリング資料）

【参考：K社ヒヤリング資料】

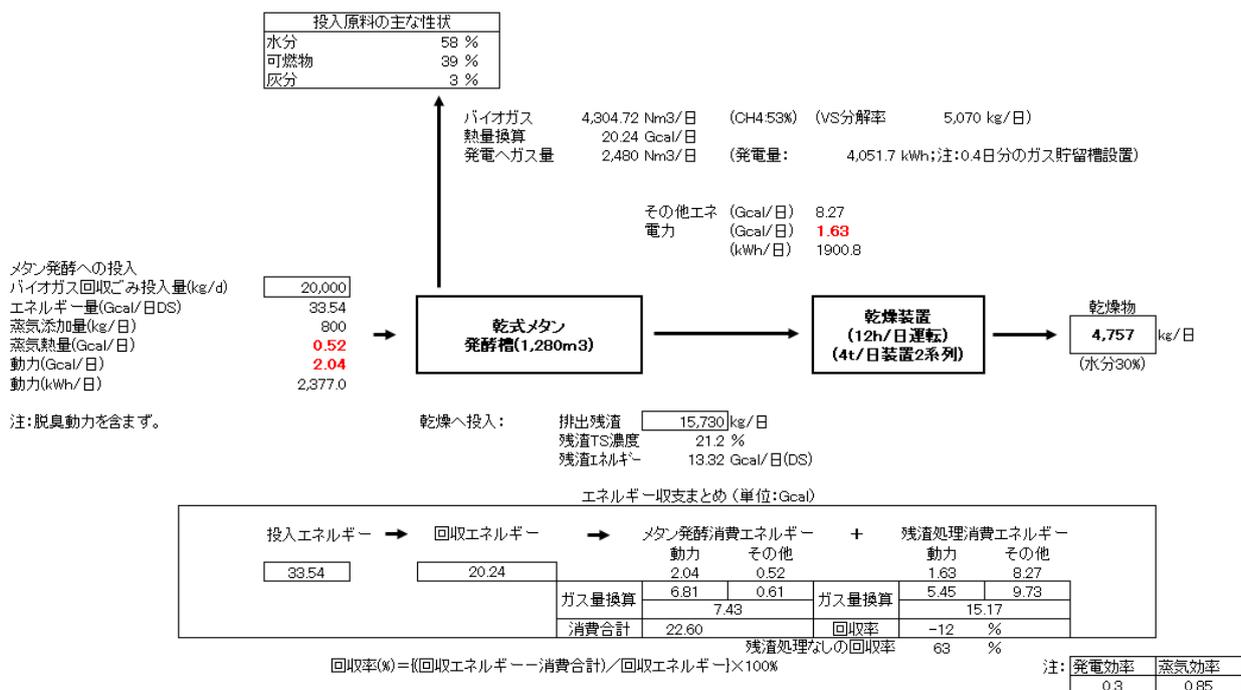
規模10t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質・熱収支（制度：±15%）



【参考2】規模20t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質・熱収支（メーカヒヤリング資料）

【参考：K社ヒヤリング資料】

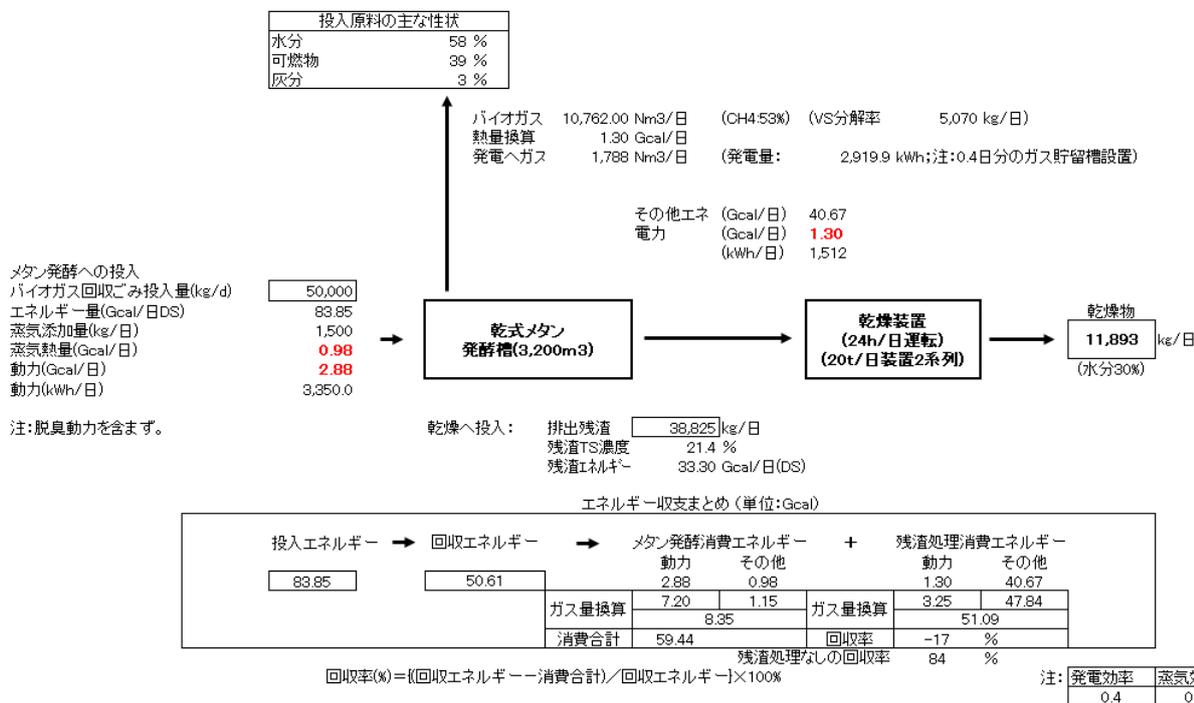
規模20t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質・熱収支（制度：±15%）



【参考3】規模50t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質・熱収支（メーカーヒヤリング資料）

【参考：K社ヒヤリング資料】

規模50t/日の乾式メタン+乾燥の概算物質・熱収支(制度: ±15%)



【参考4】東京23区内清掃工場のごみ焼却量、買電量及び売電量

	ごみ焼却量 [t/年]	買電量 [kWh/年]	単位ごみ処理量あたりの買電量 [kWh/t]		売電量 [kWh/年]	単位ごみ処理量あたりの売電量 [kWh/t]		補助燃料 (都市ガス) 使用量[m3/ 年]
中央	156,210	547,040	4	中央	41,967,080	269	中央	166,323
港	163,914	1,506,768	9	港	31,161,024	190	港	115,650
墨田	143,240	3,271,620	23	墨田	35,373,140	247	墨田	158,553
新江東	351,070	3,562,920	10	新江東	60,622,500	173	新江東	188,293
目黒	101,741	1,222,784	12	目黒	8,678,960	85	目黒	95,843
千歳	140,110	2,519,424	18	千歳	35,360,856	252	千歳	117,145
渋谷	55,363	1,792,856	32	渋谷	8,418,952	152	渋谷	56,798
杉並	127,283	1,477,272	12	杉並	7,338,636	58	杉並	59,167
豊島	94,731	2,665,712	28	豊島	9,903,040	105	豊島	43,858
北	145,384	2,488,660	17	北	25,267,080	174	北	63,992
練馬	103,058	385,254	4	練馬	2,444,568	24	練馬	186,511
江戸川	114,143	857,376	8	江戸川	18,053,760	158	江戸川	60,996
12工場	1,696,247	22,297,686	13	12工場	284,589,596	168	12工場	1,313,129

※1 ごみ処理量、買電量、売電量の数値は「平成19年度清掃工場等作業年報」東京二十三区清掃一部事務組合

【参考5】東京23区内清掃工場の補助燃料使用量

	ごみ焼却量 [t/年]	補助燃料(都市ガス) 使用量[m3/年]	単位ごみ処理量あたりの補助燃料(都市ガス) 使用量[m3/t]※1	
中央	156,210	166,323	1.06	中央
港	163,914	115,650	0.71	港
墨田	143,240	158,553	1.11	墨田
新江東	351,070	188,293	0.54	新江東
目黒	101,741	95,843	0.94	目黒
千歳	140,110	117,145	0.84	千歳
渋谷	55,363	56,798	1.03	渋谷
杉並	127,283	59,167	0.46	杉並
豊島	94,731	43,858	0.46	豊島
北	145,384	63,992	0.44	北
練馬	103,058	186,511	1.81	練馬
江戸川	114,143	60,996	0.53	江戸川
12工場	1,696,247	1,313,129	0.77	12工場

※1 「平成19年度清掃工場等作業年報」東京二十三区清掃一部事務組合

【参考6】東京23区内清掃工場書内電力使用量、発電量及びごみ発熱量（平成19年度）

	ごみ処理量 [t/年]※1	所内電力使用量 [kWh/年]※1	単位ごみ処理量あたりの所内電力使用量 [kWh/t]		発電量 [kWh/年]※1	単位ごみ処理量あたりの発電量 [kWh/t]		発電効率 発電量 /所内電力 使用量	高位 発熱量 [kcal/kg] ※2	低位 発熱量 [kcal/kg] ※2
			中央	平均		中央	平均			
中央	156,210	27,616,490	176.8	442	69,036,530	442	15%	2,940	2,480	
港	163,914	35,415,824	216.1	397	65,070,080	397	15%	2,723	2,255	
墨田	143,240	21,902,880	152.9	377	54,004,400	377	15%	2,598	2,134	
新江東	351,070	64,795,170	184.6	347	121,854,750	347	13%	2,799	2,337	
目黒	101,741	17,918,525	176.1	249	25,374,701	249	10%	2,704	2,235	
千歳	140,110	17,591,168	125.6	360	50,432,600	360	15%	2,582	2,110	
渋谷	55,363	14,220,387	256.9	377	20,846,483	377	14%	2,785	2,331	
杉並	127,283	21,403,136	168.2	214	27,264,500	214	8%	2,685	2,209	
豊島	94,731	23,460,262	247.7	324	30,697,590	324	12%	2,714	2,247	
北	145,384	27,417,960	188.6	345	50,196,380	345	17%	2,193	1,709	
練馬	103,058	10,050,856	97.5	118	12,110,170	118	6%	2,233	1,747	
江戸川	114,143	21,726,622	190.3	341	38,923,006	341	13%	2,683	2,212	
12工場	1,696,247	303,519,280	178.9	334	565,811,190	334	13%	2,637	2,167	

※1 ごみ処理量、所内電力使用量、発電量の数値は「平成19年度清掃工場等作業年報」東京二十三区清掃一部事務組合

※2 高位発熱量、低位発熱量の数値は「平成19年度清掃工場等搬入先ごみ性状調査報告書」H20.3 東京二十三区清掃一部事務組合

第8章 結論

第8章 結論

8.1 各章のまとめ及び総括

以下に、各章の成果を総括して述べる。

【第1章】序論

第1章では本研究の背景となる建物部門のエネルギー消費削減の必要性について概説し、本研究の目的及び関連する国内外の先進事例調査について述べ、本研究の構成と街区・地区レベルにおける活用モデルイメージを示した。

具体的には、建物部門のエネルギー消費削減の方法の一つである熱エネルギーの面的利用を推進する事を目的に、既成市街地の既築建物に適用させるため、熱源設備を集約せず、各既存熱源設備を熱融通配管で接続して共同利用する「建物間熱融通型」に着目した。しかし、既築建物の熱源更新は一斉におこなわれるのではなく段階的に進み、熱源設備の効率順位も逐次変化するため、供給側と受入側が交替する事が考えられる。そこで、本研究では熱源融通の供給側と受入側の切替が可能な「建物間双方向熱融通ネットワークシステム(以下、SHGと略す)」に関する研究を行った。

論文構成としては、SHGの考え方・必要な機能の整理・提案を行うと共に、模擬実験装置によりその可能性を検討するとした。次に、既成市街地にSHGを導入できた場合の有効性に関する評価を行った。一つは、段階的に熱源更新が行われる複数の既築建物にSHGを形成したモデルスタディ、いま一つは既存地域熱供給の熱源プラントと熱供給需要家以外の周辺建物間でSHGを形成したモデルスタディを行い、SHG導入効果を評価した。

都市部の既成市街地で再生可能エネルギーの利用を促進するため、事業系一般廃棄物起源バイオガスを上記のモデルを取り入れ、熱エネルギーの面的利用に活用する方法とその有効性を評価した。

【第2章】建物間双方向熱融通ネットワークシステムの検討

第2章では、既成市街地の熱エネルギーの面的利用の方策として、街区・地区内の複数の建物間において供給側と受入側の役割が、異なる期間や時間帯の中で変更可能なSHGを検討した。通常熱融通の接続方式で双方向を実現するには供給用と受入用の2つの熱交換器等が必要となる。しかし、熱融通は一つの建物で供給と受入が同時に発生しない事から、本研究では、熱交換効率の高く省スペース化が期待できる対向流型のプレート型熱交換器(間接接続)を使用して、バルブ切替する事で供給と受入の変更が効率的に行える「熱ルータ」を提案した。

提案するSHGは熱融通相互接続装置(以下、熱ルータ)、熱融通配管、各建物等の熱源機等から構成される。熱源機の稼働制御は以下を想定した。接続さ

れた熱源機の中で最も高効率な熱源機を稼働優先順位第1番として利用、自家消費した後に定格稼働して生じた余剰熱を、他の建物に熱融通する。余剰熱がない場合は、2番目に高効率な熱源機が設置された建物が受入側から供給側に役割を変更し上記と同様の稼働を行う。更に、熱源機が更新された場合も供給側と受入側の役割が変更され、双方向熱融通が行われる。

次に、建物間双方向熱融通に必要な熱融通相互接続装置（熱ルータ）と熱融通配管に必要な適用事項を検討した。既存 DHC の負荷特性を参考に高効率熱源機が融通する熱量はベース負荷を想定し、エネルギーロス（搬送動力と配管放熱量）の観点から制限があると考え、熱融通配管口径は最大 200A 程度が目安となる事を示した。

【第3章】熱ルータ（熱融通相互接続装置）に関する実験研究

第3章では、建物間双方向熱融通を可能にするために設置が必要な熱融通相互接続装置（熱ルータ）に求められる事項を整理した。

具体的には以下の2点である。一つは、建物毎に供給と受入の切替制御を行い任意の熱融通ルートの設定が可能である事、もう一つは、適切な搬送動力の選定が行われる事である。そこで、4台の熱ルータ模擬実験装置を製作し、通水実験を行い前記事項について確認した。

実験としては、手動で水が流れていない状態の熱ルータから任意の組合せの流量にする通水実験を全ての組合せについて行い、制御圧力値を確認した。そして、各熱ルータに目標流量値と制御圧力値を設定し、自動制御による再現実験を行い、目標流量値と計測流量値の差、および流れの変動が安定するまでの時間の計測を行った。

次に、任意の組合せの熱ルータを別の組合せの状態に自動制御で遷移させる実験を行い、同様に目標流量と計測流量の差、および流れが安定するまでの時間を計測した。なお、上記の全ての組合せは4台全てが運転するケース14通り、4台中3台が運転するケース18通り、4台中2台が運転するケース6通りの計38通りである。遷移実験は2台→3台→4台→3台→2台の組合せで行った。

結果、熱ルータの組合せ実験及び遷移実験について、自動制御にて目標の流量分布となった際の設定流量と計測流量の誤差は最大5.8%、平均0.6%（目標値：10%以内）と目標設定内である事を確認した。又、移行時間についても、自動制御で水の流れが安定するまでの時間は3分程度（目標値：10分以内）であった。以上から異なる流量分布に移行させる事が可能である事を確認した。

【第4章】実建物における建物熱融通に関する実証研究

第4章では、分散型エネルギー複合最適化実証研究の一環として行った、太陽熱集熱装置（68 m²・36 kW）を有する建物（特老ホーム）と CGS（370 kW×1

台、700 kW×1台)を有する建物(エネルギーセンター)間で、太陽熱とCGS廃熱の熱融通制御(疑似的な双方向熱融通)の評価を行った。本実証では、①太陽熱の利用率を高めるため特老ホームで自家消費後、余剰熱がある場合にエネルギーセンターに熱融通、②特老ホームが太陽熱のみでは不足する場合にはCGS廃熱をエネルギーセンターから特老ホームに熱融通、③更に不足する場合は特老ホームの自己熱源を補完稼働、以上の熱融通制御について評価を行った。

太陽熱については、年間集熱量の57%を特老ホームの自家消費分として使用、残りの余剰熱43%をエネルギーセンターに融通できた。また、特老ホームの需要対応は、太陽熱集熱分で10%、エネルギーセンターからの融通分で35%、自己熱源(ガスボイラ)で55%を賄った。結果、特老ホームの年間省エネルギー率は21%となった。更に、需要に合わせてエネルギー消費量の少ない熱源(太陽熱やCGS廃熱利用熱源)を優先的に稼働させる熱源統合制御の導入効果検証を行い、結果、熱源統合制御を行う事で、通常の数値制御に比べて太陽熱とCGS廃熱の利用率が12%程度向上する事を確認した。

【第5章】段階的に熱源更新する既築建物に導入した建物間双方向熱融通ネットワークシステムの有効性に関する研究

第5章では、SHGの基本型と捉えることができる複数建物間でSHGを形成するモデルを設定しシミュレーションを行い評価した。具体的には、4つの既築建物を対象に段階的に35年間に渡って熱源更新する設定(熱源COPを更新毎に見直し)を行い、熱の供給と受入の役割を変更するSHGのシミュレーションを行い、その導入効果の評価を行った。先ず、基礎データとしてSHGの計画・設定に必要な事項(熱融通量の設定、ヘッダー管方式のSHG熱融通配管熱融通能力の設定と配管口径の設定、熱融通配管材料の選定と熱ルータポンプ容量設定、放熱ロス等)の設定方法を整理した。そして、双方向熱融通(①熱融通に伴う搬送動力・配管放熱ロス等のエネルギーロスを考慮した他の建物への熱融通(供給)と自家消費運転、②他の建物から受入と補完運転、③熱融通を実施しない場合の自家消費運転)する熱源機のエネルギー消費量を算出した。

結果、CGS定格運転ケースの場合、省エネルギー率は、熱融通を行わない場合と比べて31年度目(Bビル(ホテル)を建替えと想定し、熱源方式を吸収式から空冷ヒートポンプに変更した他の期間と傾向が異なる)を除き、6年度目～30年度目まで、10%熱融通割合で平均16.6%、同様に20%で21.2%、30%で22.3%上回り、年次を経る毎に増加する傾向を確認できた。

熱融通受入量に対するエネルギーロス(搬送動力・放熱ロス)は、全ケースで年間放熱ロス率1.71～2.33%、年間搬送動力率0.95%～1.11%となり、熱融通受入量に対して5%未満を確認した。

次に、熱源稼働時間について、35年間の各建物の累積時間を比較した。双方向熱融通割合10%で96.9%、同20%で78.1%、同30%で69%と短くなる事を確

認した。

最後に、4ビルの冷熱需要に対し供給を担う建物の ON/OFF 制御域の稼働時間は増加するが、供給・受入の全ケースにおける年間を通じた冷熱源稼働平均負荷率は比例制御域である事を確認した。

【第6章】既存地域冷暖房と連携した建物間双方向熱融通ネットワークシステムに関する研究

第6章では、既存地域冷暖房のポテンシャルを活用した建物間双方向熱融通の導入効果を評価した。具体的には、既成市街地の既存地域熱供給（DHC）と DHC 需要家以外の周辺建物との間で SHG を形成、これを DHC から熱融通する「SHG 地域熱供給連携型」の導入効果及びその事業性の評価を行った。検討モデルは、既存地域冷暖房の熱源プラントと地域冷暖房エリアに隣接する延床面積 1 万 m² の既築モデル建物 1 棟（建物用途：ホテル・事務所・商業施設・病院の 4 用途）を熱融通配管で接続し、熱源プラントからモデルビルに熱を供給する。

そして、熱融通配管の延長を 50m、100m、200m と変化させ感度分析を行った。熱融通量についても各建物の年間需要量の 10%、30%、50%相当量を 8760 時間で除した熱量に変えてそれぞれ検証した。

シミュレーションの結果、省エネルギー率が 0.8%～10.1%である事を確認した。

次に、熱融通を受入する事で、ON/OFF 制御域冷熱源稼働時間が負荷のピークとオフピークの差が小さい商業施設以外のホテル・事務所・病院は共に減少し、稼働時の冷熱源稼働平均負荷率は全て比例制御域で稼働する事を確認した。

最後に、事業性評価について本研究の中でケーススタディを行った。設定した前提条件の下での検討であるが、ホテル・病院については補助金等の条件を整えば、IRR4%以上の事業性あるケースを確認した。

【第7章】事業系一般廃棄物起源バイオマスガスのポテンシャルと地域熱供給システムにおける活用効果

第7章では、都市部における再生可能エネルギーの活用的一方策として、バイオマスエネルギーに着目、SHG 地域冷暖房連携型でバイオマスエネルギーを活用する「SHG 地域熱供給連携型都市型バイオマス利用モデル」を提案し、その導入効果の評価を行った。更に、同モデルを都内都市再生緊急整備地域に適用した場合の効果について評価を行った。

都内 K 区内の事業系一般廃棄物（都市部においてリサイクル率の低い厨芥やその他の紙ごみ）を資源ごみとする乾式メタン発酵実証実験を行い、高いバイオガス発生割合を確認した（環境省が定める高効率原燃料回収施設のバイオガス発生量のガイド値「ごみ 1 トン当たり 150 N m³以上」を上回るごみ 1 トン当たり

370N m³以上のバイオガス製造を確認した)。

次に、前記実証実験で確認したデータを元に、検討モデル地区に SHG 地域冷暖房連携型バイオマス利用モデルを想定し、エネルギー収支計算を行った。検討モデル地区で想定されるバイオマス資源対象ごみ量は 10t/日程度であるが、感度分析の観点から、バイオマス資源対象ごみ量 20t/日、50t/日を含めた 3 ケースについて、清掃工場で焼却処分するケースとエネルギー収支の比較を行った。結果、清掃工場で焼却処分するケースと比べて、10t/日で 1.62 倍、20t/日のケースで 2.01 倍、50t/日のケースで 3.31 倍と余剰エネルギー（外部供給分－施設内使用分）が増加する事を確認した。

更に、都内の各都市再生緊急整備地域のバイオマス資源発生量を想定し、同じ地域内で地域冷暖房事業を行っている DHC と SHG 地域冷暖房連携型バイオマス利用モデルを適用した場合の導入効果について検討した。結果、対象地域内の地域冷暖房施設等の温熱需要の 15～455%相当のバイオガスボイラによる温熱製造が可能である事を示した。

8.2 今後の課題と展望

本論文では、既成市街地における既築建物のエネルギー消費削減を推し進めるため、熱エネルギーの面的利用に着目し、熱源を集約せず、方式・仕様・設置時期等条件の異なる各建物の熱源設備を活用する「建物間双方向熱融通型」の適用について研究を行った。これまでの一般的な熱融通は供給側と受入側が固定化された一方向熱融通がほとんどであり、一方、既築建物の更新は一斉に行われる機会は少なく、段階的に進むことが多い。そこで、効率の高い熱源設備に更新される毎に熱の供給・受入の組合せ選択が可能な双方向熱融通ネットワークシステムが必要となる。本研究の中で、その導入評価のために必要となるシミュレーションツールと双方向熱融通を行うために必要な熱融通配管や熱ルータの仕様決定の考え方を整理した。シミュレーションツールは複数の建物における双方向熱融通を検討・評価する事が可能であるが、実プラントでの適用の確認には至っていない。また、熱ルータに関しても、通水実験による任意の熱融通ルートの設定、目標とする流量・圧力分布に至る制御パラメータの決定法に関しては検証したが、実際の冷熱・温熱を使用した実証には至っていない。以上に関して、コンセプトは確立できているので、実装段階で調整可能と考える。

最後に、本研究で提案した SHG は、近接する供給するエネルギーの変動をある程度許容し、需要側が受入、不足する場合には自ら自己熱源で補完し利用する「協力型」の熱融通ネットワークシステムである。関係者の目的と導入効果を相互に理解して進める事が必要である。本研究内容が関係者の理解を促す一助となり、既成市街地のエネルギー消費削減に貢献できることを期待したい。

謝辞

本論文は、筆者が東京ガス株式会社に在籍時、及び同社から東京工業大学ソリューション研究機構に出向時、芝浦工業大学村上研究室所属時を通して実施した研究の成果をまとめたものである。

本論文の作成にあたり、芝浦工業大学村上公哉教授には、学位取得の機会をご提供頂いたばかりでなく、研究の進め方や論文作成に際して、私の至らぬ点が多々あるにも関わらず、広い見識から示唆に富んだご指導・ご鞭撻を賜りました。ここに深く感謝いたします。

芝浦工業大学田中耕太郎教授には、副主査として本論文を査読頂き、貴重なご意見を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

横浜国立大学佐土原聡教授には、学外審査委員として貴重なお時間を割いて頂き、ご指導を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

芝浦工業大学鈴木俊治教授、斎藤寛泰准教授には、学内審査委員として本論文を査読頂き、大変有益なご示唆を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

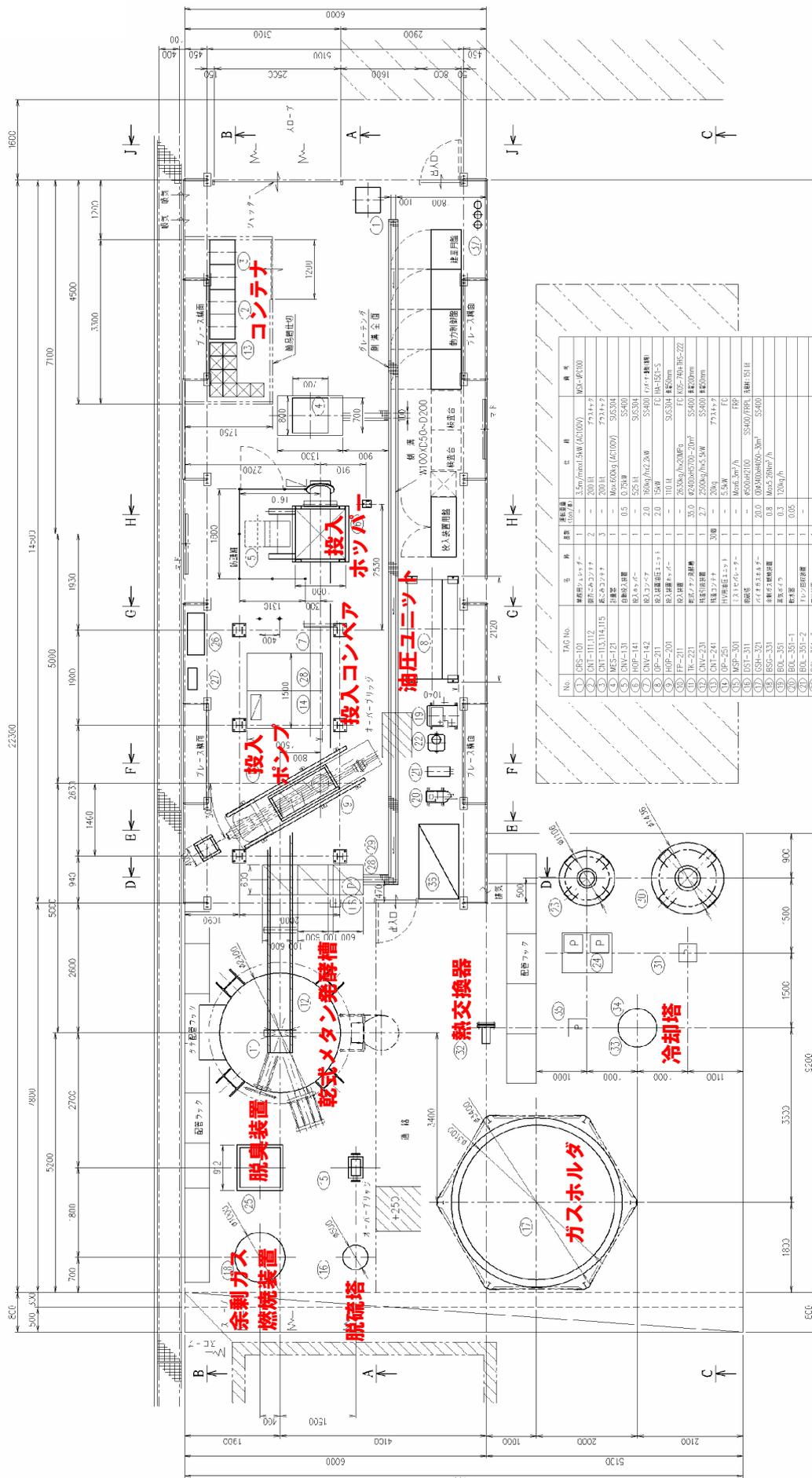
また、東京工業大学荒木和路特任教授をはじめ東京工業大学関係者の方々には学会等への論文投稿等に際して貴重なアドバイスを頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

芝浦工業大学村上研究室の皆さんには、本研究を進める中でデータ整理や資料の提供、準備等、ご協力を頂きました。ここに改めて御礼申し上げます。

本研究の遂行や論文作成にあたり、ご理解とご支援、励ましを頂きました東京ガス株式会社の関係諸氏に感謝の意を表します。

最後に、本論文に取り組み始めてから4年近くの長期にわたり協力してくれた家族に、心より感謝します。

付録「都市型バイオマスエネルギーシステムの実用化に関する技術開発」実証試験設備図面及び写真



No.	TAG No.	名称	仕様	数量	単位	備考
1	GRS-101	制御用エレベータ	3.5m/min(1.5kW AC100V)	1	台	NS-40C100
2	GRS-111,112	駆動エレベータ	200HL	2	台	773377
3	GRS-113,114,115	駆動エレベータ	200HL	3	台	773377
4	GRS-116	駆動エレベータ	200HL	1	台	56400
5	GRS-117	駆動エレベータ	200HL	1	台	56400
6	HOP-141	ポンプ	0.05m³/min(AC100V)	1	台	56400
7	HOP-142	ポンプ	0.05m³/min	1	台	563304
8	OP-211	ポンプ	2.0m³/min(4.2kW)	1	台	56400 (1台+1台)
9	HOP-201	ポンプ	10.0m³/min	1	台	FG-104-1501-5
10	FP-211	ポンプ	26.3kg/h(2MPa)	1	台	563304 駆動用
11	TR-221	ポンプ	35.0g/h(2MPa)	1	台	FG-105-704-105-221
12	GVW-231	ポンプ	2500g/h(5.5kW)	1	台	56400 駆動用
13	GVW-232	ポンプ	2500g/h(5.5kW)	1	台	56400 駆動用
14	GVW-233	ポンプ	2500g/h(5.5kW)	1	台	773377
15	MSB-301	ポンプ	1.31m³/h(1.7kW)	1	台	56400
16	SS1-311	ポンプ	85004(2100)	1	台	SS400/FPP1 駆動用(1台)
17	GS4-321	ガスホルダ	20.0m³(0.8404040523m³)	1	台	56400
18	BSS-331	熱交換器	1.08m³/min(28kW/h)	1	台	56400
19	BOL-351	ポンプ	0.3m³/min	1	台	120kg/h
20	BOL-351-1	ポンプ	0.05m³/min	1	台	
21	BOL-351-2	ポンプ	0.05m³/min	1	台	
22	BOL-351-3	ポンプ	0.05m³/min	1	台	
23	PMP-465	ポンプ	1.10m³/min	1	台	FE
24	DD1-411	ポンプ	0.067m³/min(2.2kW)	1	台	FE
25	CMP-421	ポンプ	10m³/min(0.75kW)	1	台	FPP
26	DR1-425	ポンプ	750l/min(0.3kW)0.75kW	1	台	
27	PMP-431	ポンプ	17000AC100V(10)	1	台	
28	TR-431	ポンプ	0.6000(700)	1	台	RC
29	TR-432	ポンプ	2m³/min(0.2kW) 駆動/505304	1	台	
30	TR-441	ポンプ	2m³/min	1	台	FE
31	PMP-445	ポンプ	2m³/min(0.75kW) SS1/SBS04	1	台	
32	GVW-451	ポンプ	2500g/h(5.5kW)	1	台	56400
33	GVW-452	ポンプ	2500g/h(5.5kW)	1	台	56400
34	GVW-453	ポンプ	2500g/h(5.5kW)	1	台	56400
35	FM-460	ポンプ	0.3m³/min	1	台	
36	CT-460	ポンプ	46°C-26°C	1	台	
37	PMP-465	ポンプ	7m³/min(22m³/5kW) F020/S0304	1	台	
38		ポンプ		1	台	
39		ポンプ		1	台	
40		ポンプ		1	台	
41		ポンプ		1	台	
42		ポンプ		1	台	
43		ポンプ		1	台	
44		ポンプ		1	台	
45		ポンプ		1	台	
46		ポンプ		1	台	
47		ポンプ		1	台	
48		ポンプ		1	台	
49		ポンプ		1	台	
50		ポンプ		1	台	
51		ポンプ		1	台	
52		ポンプ		1	台	
53		ポンプ		1	台	
54		ポンプ		1	台	
55		ポンプ		1	台	
56		ポンプ		1	台	
57		ポンプ		1	台	
58		ポンプ		1	台	
59		ポンプ		1	台	
60		ポンプ		1	台	
61		ポンプ		1	台	
62		ポンプ		1	台	
63		ポンプ		1	台	
64		ポンプ		1	台	
65		ポンプ		1	台	
66		ポンプ		1	台	
67		ポンプ		1	台	
68		ポンプ		1	台	
69		ポンプ		1	台	
70		ポンプ		1	台	
71		ポンプ		1	台	
72		ポンプ		1	台	
73		ポンプ		1	台	
74		ポンプ		1	台	
75		ポンプ		1	台	
76		ポンプ		1	台	
77		ポンプ		1	台	
78		ポンプ		1	台	
79		ポンプ		1	台	
80		ポンプ		1	台	
81		ポンプ		1	台	
82		ポンプ		1	台	
83		ポンプ		1	台	
84		ポンプ		1	台	
85		ポンプ		1	台	
86		ポンプ		1	台	
87		ポンプ		1	台	
88		ポンプ		1	台	
89		ポンプ		1	台	
90		ポンプ		1	台	
91		ポンプ		1	台	
92		ポンプ		1	台	
93		ポンプ		1	台	
94		ポンプ		1	台	
95		ポンプ		1	台	
96		ポンプ		1	台	
97		ポンプ		1	台	
98		ポンプ		1	台	
99		ポンプ		1	台	
100		ポンプ		1	台	

図1.1 実証試験設備平面図

No.	TAG No.	名 称	数量	単位	仕 様	備 考
①	CRS-101	業務用コンテナ	1	-	3.5m ² /minx1.5kW (AC100V)	MSX-VP100
②	CNT-111,112	閉鎖用コンテナ	2	-	200 lit	フワフワ
③	CNT-113,114,115	紙ごみコンテナ	3	-	200 lit	フワフワ
④	MES-121	計量器	1	-	Max.600kg (AC100V)	SUS304
⑤	CNV-131	自動吸入装置	1	0.5	0.75kW	SS400
⑥	HOP-141	投入コンバ	1	-	525 lit	SUS304
⑦	CNV-142	投入コンバ	1	2.0	160kg/hx2.2kW	SS400 (ワナナ製) (脚)
⑧	OP-211	投入装置	1	2.0	15kW	FC HA-1501-S
⑨	HOP-201	投入装置	1	-	110 lit	SUS304 高さ50mm
⑩	FP-211	投入装置	1	-	2630kg/hx20MPa	FC KOS-140-HS-222
⑪	TK-221	乾式メタン発酵槽	1	35.0	φ2400xH5700-20m ²	SS400 高さ200mm
⑫	CNV-231	集塵引込装置	1	2.7	2500kg/hx5.5kW	SS400
⑬	CNT-241	集塵コンテナ	30個	-	20kg	フワフワ
⑭	OP-251	HV用排気ユニット	1	-	5.5kW	FC
⑮	MSP-301	ミシエバスター	1	-	Max.5m ² /h	FRP
⑯	DST-311	脱臭器	1	-	φ500xH2100	SS400/FRP 深淵:151 lit
⑰	GSH-321	バイオガスホルダー	1	20.0	0.063x0.04050-30m ²	SS400
⑱	B5G-331	赤菌培養槽	1	0.8	Max.5.26lm ² /h	SS400
⑲	BOL-351	蒸気ボイラ	1	0.3	120kg/h	
⑳	BOL-351-1	乾式器	1	0.05		
㉑	BOL-351-2	ヒノコ回収装置	1	-		
㉒	BOL-351-3	集塵装置	1	-		
㉓	TK-401	格差タンク	1	1.0	1m ³	PE
㉔	PMP-405	格差ユニット	1+1	-	0.26m ² /minx31mmx2.2kW	
㉕	DD1-411	脱臭装置	1	0.6	10m ² /minx0.75kW	FRP
㉖	CMP-421	コンクリーター	1	-	750l/minx0.9MPax0.75kW	
㉗	DRY-425	エアライナー	1	-	170W (AC100C, 1φ)	RC
㉘	PMP-431	フレポン	1	-	0.600x0.700	
㉙	PMP-435	フレポン	1	-	2m ² /hxD10mmx0.2kW	脚板/SUS304
㉚	TK-441	格差ボツ	1	2.1	2m ²	PE
㉛	PMP-445	格差ボツ	1	-	2m ² /hxD15mmx0.75kW	SS316/SUS304
㉜	HEX-451	脱臭機	1	-	0.48m ²	SUS316
㉝	FAN-460	冷却ファン	1	-	0.2kW	
㉞	CI-460	冷却器	1	-	46C→36C	脚板
㉟	PMP-465	循環ボツ	1	-	7m ² /hxD20mmx1.5kW	FC200/SUS304
㊱		分岐計器	1	-		
㊲		排水機器	3	-	ABC3型	

地上高さ約 10m

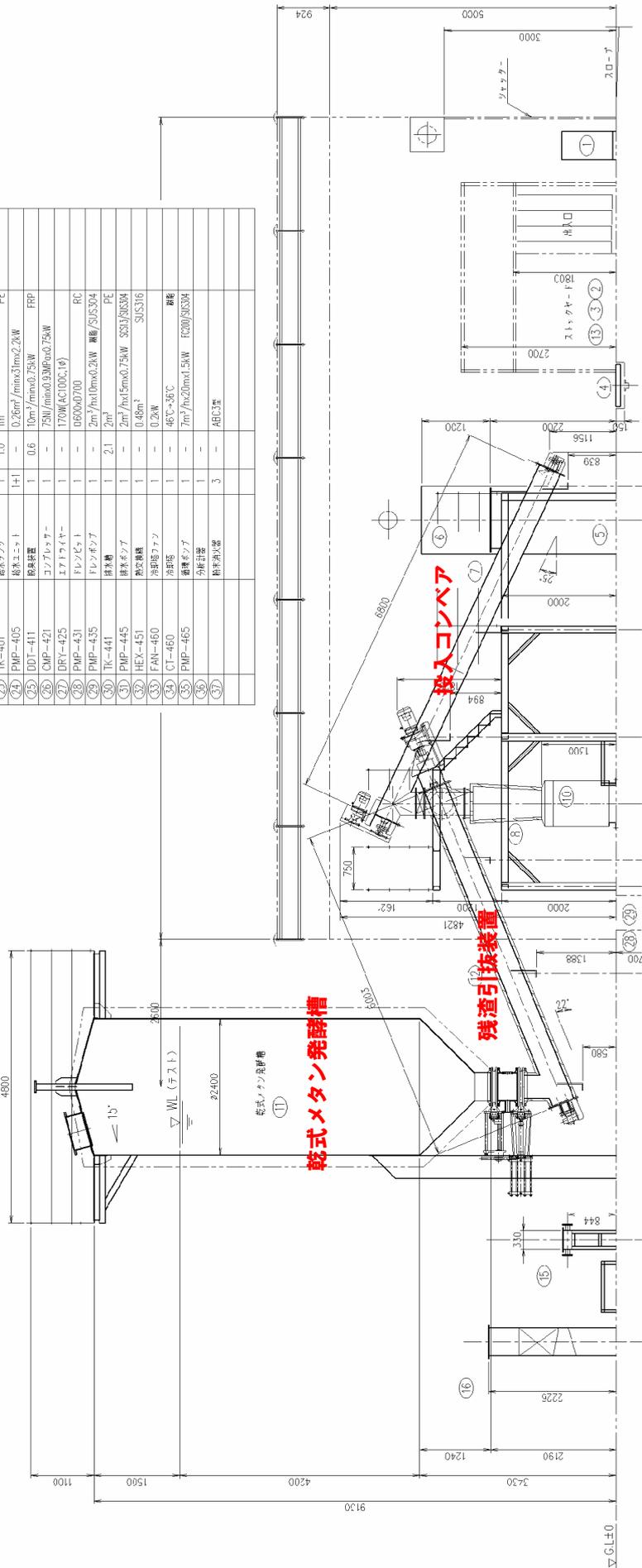


図1.2 実証試験設備立面図



写真1.1 実証実験設備施設全景

<p>①軽量台</p> 	<p>②原料コンテナ</p> 
<p>③コンテナ反転式ごみ投入装置</p> 	<p>④投入コンベア</p> 
<p>⑤乾式メタン発酵槽</p> 	<p>⑥発酵残渣引抜き装置</p> 

写真1.2 実証試験各設備・機器（1）

⑦投入ポンプ



⑧脱硫装置



⑨余剰ガス燃焼装置



⑩ガス貯留槽



⑪混焼ボイラ



⑫脱臭装置



写真1.3 実証試験各設備・機器 (2)

<p>⑬ガス分析計</p>  <p>A HORIBA gas analyzer with a blue top panel and a control panel featuring a screen and buttons. The brand name 'HORIBA' is visible at the top.</p>	<p>⑭酸素濃度計</p>  <p>An oxygen concentration meter with a digital display showing '5.81'. A yellow warning label is attached to the front.</p>
<p>⑮シュレッダー</p>  <p>A paper shredder with a red and white body. The model number 'JISX-VPC-100' is printed on the side.</p>	<p>⑯動力制御電磁盤</p>  <p>A large grey metal cabinet housing a power control magnetic panel with a digital display and various control elements.</p>

写真1.4 実証試験各設備・機器（3）

論 文 要 旨

平成 3 1 年 1 月 1 0 日

※報告番号	第	号	氏 名	永井 猛
主論文題名 既成市街地における建物間双方向熱融通ネットワークシステムの有効性に関する研究				
<p>既成市街地における既築建物のエネルギー消費削減を推し進めるため、エネルギーの面的利用に着目、熱源を集約せず、各建物の熱源設備を活用する「建物間熱融通型」の適用を考えた。しかし、既築建物の熱源更新は一斉におこなわれるのではなく段階的に進み、熱源設備の効率順位も逐次変化するため、供給側と受入側が交替する事が考えられる。そこで、本研究では熱源融通の供給側と受入側の切替が可能な「建物間双方向熱融通ネットワークシステム（以下、SHG と略す）」に関する研究を行い、同システムを活用した既成市街地における導入効果を定量評価し、同システム導入時の検討事項を提供する事を目的とした。</p> <p>通常の熱融通の接続方式で双方向を実現するには供給用と受入用の 2 つの熱交換器等が必要となるが、熱融通は一つの建物で供給・受入が同時に発生しない事から、熱交換効率が高く省スペース化が期待できる対向流型プレート熱交換器（間接接続）を使用して、バルブ切替で供給・受入の変更が効率的に行える「熱融通相互接続装置（以下、熱ルータ）」を提案した。</p> <p>提案する SHG は熱ルータ、熱融通配管、各建物の熱源機から構成され、熱源機の稼働制御を以下の様に想定した。接続された熱源機の中で最も高効率な熱源機を稼働優先順位第 1 番として利用、自家消費した後に定格稼働して生じた余剰熱を、他の建物に熱融通する。余剰熱がない場合は、2 番目に高効率な熱源機が設置された建物が受入側から供給側に役割を変更し、同様の稼働をする。更に、熱源機が更新された場合も供給側と受入側の役割が変更され、双方向熱融通が行われる。</p> <p>そして、SHG に必要となる熱ルータと熱融通配管に必要な適用事項を整理した。既存 DHC の負荷特性を参考に、高効率熱源機が供給する熱量はベース負荷を想定し、エネルギーロス（搬送動力と配管放熱量）の観点から制限があると考え、熱融通配管口径は最大 200A 程度が目安となる事を示した。</p> <p>SHG のコア技術要素である熱ルータに求められる事項は以下の 2 点である。①建物毎に供給と受入の切替制御を行い任意の熱融通ルートの設定を行う事、②適切な搬送動力の選定が行われる事。以上を検証するため 4 台の熱ルータ模擬実験装置を製作し、通水実験で確認した。全ての組合せは 38 通りあり、自動制御にて目標値内での設定が可能な事を確認した。更に異なる組合せに自動制御で遷移させる実験も行い、同様の結果となった。以上から熱ルータを用いた任意の熱融通ルートの設定は可能である事を確認した。</p> <p>実物件で建物間熱融通に関する実証研究を行った。太陽熱集熱装置を有する建物（特老ホーム）と CGS を有する建物（エネルギーセンター）間で、太陽熱と CGS 廃熱の熱融通制御の評価を行い、年間太陽熱集熱量の 57%を特老ホームで自家消費し、残りの 43%をエネルギーセンターに融通、特老ホームの年間省エネルギー率は 21%となった。</p> <p>次に、SHG の導入効果について段階的に熱源更新する既成市街地内の 4 棟の既築建物を対象に</p>				

※印欄記入不要

論 文 要 旨

平成 3 1 年 1 月 1 0 日

※ 報告番号	第 号	氏 名	永井 猛
<p>同システムの計画・設計時に必要な事項を整理し、シミュレーションを行った。結果、省エネルギー率は熱融通を行わない場合に比べ 6～30 年度目まで熱融通割合 10%、20%、30%の場合、それぞれ平均 16.6%、21.2%、22.3%上回り、年次を経る毎に増加する傾向を確認した。</p> <p>更に発展形として、既存 DHC との連携型を考え評価を行った。既存 DHC の熱源プラントと同エリアに隣接する既築モデル 4 用途の建物と熱融通を設定、熱融通割合・配管延長を変えたシミュレーションを行った。結果、省エネルギー率は現 DHC の場合 0.8～10.1%、更新を想定した更新 DHC の場合 1.2～13.8%となった。</p> <p>最後に都市部における再生可能エネルギーの活用として事業系一般廃棄物由来のバイオガスに着目、前記の DHC 連携型への展開を想定したモデルを考え、導入評価を行った。バイオガスのポテンシャル評価を行うため、乾式メタン発酵実証試験を行い、ガス発生割合等の確認を行った。結果、環境省のバイオガス発生ガイド値の 2 倍以上の発生量を確認した。同値を使用したモデルスタディを行い、従来の焼却処分に比べて、活用できる余剰エネルギーを確認した。又、都内の都市再生緊急整備地域内のバイオマス資源量を推計し、同地域内で DHC 連携型モデルを導入した場合のスタディを行い、温熱需要の 15～455%相当のバイオマスガス由来蒸気の活用が見込める事を確認した。</p> <p>本研究の成果として得られた SHG の考え方とシミュレーションツール、導入効果の検証結果が、関係者に理解され、既成市街地における既築建物の継続的な省エネルギーを図るため一方策として、貢献する事が期待される。</p>			

※印欄記入不要

