

平成24年度
環境研究総合推進費補助金 研究事業
総合研究報告書

**ごみ焼却排熱有効利用に向けた
常温熱輸送・常温蓄熱の実験的評価
(K2419) K2368, K22012**

平成25年4月

国立大学法人 東京農工大学

研究代表者 秋澤 淳

補助事業名	環境研究総合推進費補助金研究事業（平成22年度～24年度）
所 管	環境省
国庫補助金	24,931,000円
研究題目名	ごみ焼却排熱有効利用に向けた常温熱輸送・常温蓄熱の実験的評価
研究期間	平成22年4月1日～平成24年3月31日
研究代表者名	秋澤 淳（東京農工大学）
研究分担者名	なし

環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書概要

- ・ 研究題目名 = ごみ焼却排熱有効利用に向けた常温熱輸送・常温蓄熱の実験的評価
- ・ 研究番号 = (K2419) K2368, K22012
- ・ 国庫補助金精算所要額 (円) = 24,931,000
- ・ 研究期間 (西暦) = 2010~2013
- ・ 研究代表者名 = 秋澤 淳 (東京農工大学)
- ・ 研究分担者名 = なし

・ 研究目的

ごみ焼却排熱を広域で有効利用するには熱輸送、蓄熱機能が不可欠である。本提案技術は濃度の異なる冷媒と溶液を輸送することによって常温での熱輸送を実現するのみならず、濃度の異なる溶液を貯蔵することにより常温で蓄熱を実現できる。これまで常温熱輸送の原理は実証されているが、距離を離れた熱輸送および常温蓄熱の性能は検証されていない。そこで本研究では、次の2点を実証することを目的とする。

- ① 50mの溶液配管を用いた熱輸送実験を行い、溶液輸送を伴う場合の冷凍サイクルの性能および動作を実証する。
- ② 溶液貯蔵タンクに溶液を貯留する方式による蓄熱の実験を行い、溶液の出し入れによる蓄熱・放熱の性能および動作を実証する。

さらに、既存技術と比較して提案技術を評価するため、熱輸送を含むごみ焼却排熱を利用する地域熱供給システムを最適化型モデルとして表現し、総コストの最小化に基づいて導入可能性を解析する。

・ 研究方法

本研究はシミュレーションによって性能を予測するとともに、実験機を用いて実際に性能を検証した。さらに、提案システムを数理モデルに表し、最適化シミュレーションによって導入可能性を評価した。

(1) 溶液輸送による熱輸送

シミュレーションではASPEN HYSYSをツールに用いて動的解析を行った。アンモニア-水系吸収冷凍サイクルをベースとして、アンモニア液、濃度の濃い強溶液と薄い弱溶液を輸送する長距離配管を持たせ、排熱源側の発生器・凝縮器から熱負荷側の蒸発器・吸収器に

輸送する系をモデル化した。1000冷凍トンを出力するサイクルの動的挙動を調べるため、負荷がステップ的に減少した条件における系の内部状態の挙動を動的シミュレーションによって解析した。

実験装置としては既存のアンモニア吸収冷凍機を改造し、アンモニア冷媒液、強溶液、弱溶液を輸送する3本の50m配管を付け加えた。図1に実験装置の写真を示す。50m配管を經由しない運転も可能とし、溶液輸送あり／なしの性能比較を行える装置とした。

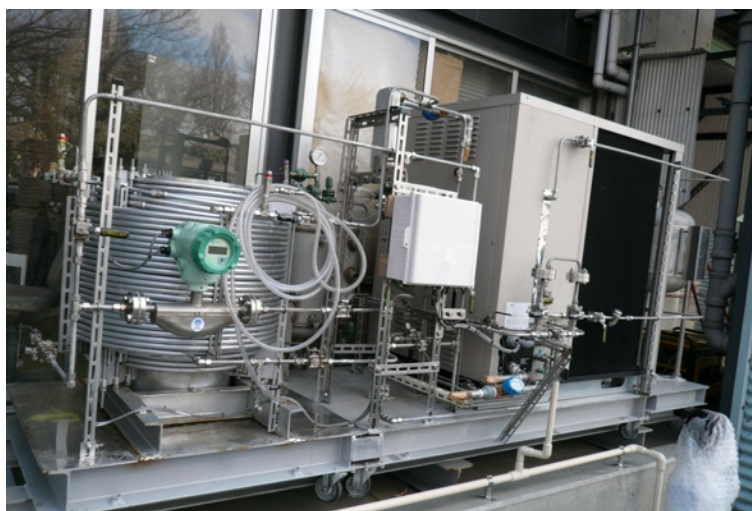


図1 50m輸送配管を持つ溶液輸送実験装置



図2 溶液貯蔵タンクを持つ蓄熱実験装置

(2) 溶液貯蔵による蓄熱

シミュレーションではASPEN HYSYSをツールとして吸収冷凍サイクルの発生器・凝縮器側と蒸発器・吸収器側のそれぞれをモデル化し、蓄熱工程（強溶液を加熱し、冷媒液と弱溶

液に分離する)と放熱工程(冷媒液と弱溶液を投入し、冷熱を発生させる)の動的解析を行った。

蓄熱実験装置は既存のアンモニア吸収冷凍機を改造し、冷媒液、弱溶液、強溶液をそれぞれ貯蔵する3つのタンクを付け加えた。タンクから本体に液を移送させるにはタンクを加熱して圧力を上げ、流入させる方式とした。また、放熱工程においても冷凍機の冷却ファンが動作するように改造を加え、制御盤を整備した。図2に溶液貯蔵実験装置の写真を示す。タンクは約30分の蓄熱に相当する容量を持たせた。

(3) 提案システムの導入可能性評価

提案する溶液輸送と溶液貯蔵を一体化させた技術の有効性を評価するため、ごみ発電の凝縮熱を本技術によって回収して都市部に輸送し、地域熱供給の熱源として冷熱・温熱を供給するシステムを想定した。本システムと従来技術を合わせた全体システムを総コスト(設備コスト、燃料コスト、配管建設コストの合計)の最小化を目的関数とする混合整数計画問題として定式化した。冷熱・温熱需要としては実際の地域熱供給の毎月の代表日およびピーク負荷日のデータを与えた。また、冷却水温度は外気温・湿度の影響を受けることを反映し、冷凍機の性能が月ごとに変動することを考慮した。

・結果と考察

(1) 溶液輸送による熱輸送

50m溶液輸送方式の性能を実測し、溶液輸送のない従来型との比較を行った。その結果、溶液輸送方式と従来型のCOPはほぼ同じであり、50m熱輸送が実現可能であるとともに熱輸送がサイクルの性能を劣化させないことを明らかにした。一方、起動時の挙動を比較すると溶液輸送方式では状態が安定するまでに長時間を要することが示された。これは溶液を50m輸送する間の時間遅れがあることに起因する。

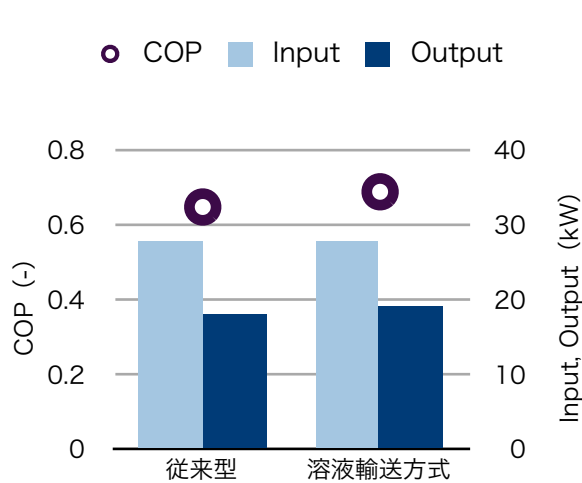


図3 溶液輸送方式のCOP

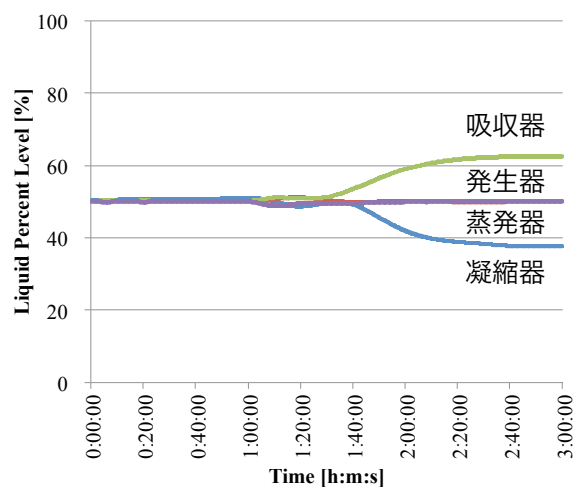


図4 負荷変動に伴う液面変化

シミュレーションによって負荷変動が動的挙動に及ぼす影響を解析した結果では、長距離溶液輸送時には凝縮器と吸収器の液面が大きく緩やかに変動することが示された。これは負荷が減少したことによってアンモニア溶液濃度が変化し、強溶液濃度が濃くなったことに起因する。長距離輸送配管中の溶液濃度が上昇し、凝縮器に貯まっていたアンモニア液が強溶液中に移行したことによって通常型より大きな液面変動が生じた。このことより、溶液輸送方式においては凝縮器および吸収器の液溜めを大きくとる必要があるとの設計上の指針が得られた。

(2) 溶液貯蔵による蓄熱

溶液貯蔵による放熱工程のシミュレーションを行った結果、放熱開始後ただちに出力が上昇し、所定の冷凍出力を維持して放熱工程を終了することが確認できた。タンクの冷媒および弱溶液はポンプによって移送されるため、出力の追従性能は速いと予想される。

溶液貯蔵による蓄熱・放熱実験ではポンプでなくヒータ加熱によって圧力を高めており、ポンプによる移送とは条件が異なる。実験の結果、蓄熱工程では通常の冷凍機と同等のアンモニア濃度の高い冷媒液を取り出せることが確認できた。放熱工程では貯めておいた冷媒液と弱溶液をそれぞれ蒸発器と吸収器に投入を開始して2分程度で出力は立ち上がり、5分程度で冷凍機の定格出力に到達した。すなわち、従来は連続的に流動している冷媒および弱溶液を独立して流入させることによって通常と同様の出力を得られることが実証された。

このとき、冷凍出力はアンモニア流入量に依存しており、放熱工程が物質移動律速であると解釈される。従来の氷蓄熱は伝熱律速であるのに対し、溶液貯蔵による蓄熱ではメカニズムが異なることが確認された。このことから冷媒の移送速度を制御することによって放熱挙動の追従性を高めることができると期待される。また、通常の冷凍機の起動時における挙動と比較すると、溶液貯蔵の放熱工程の方が出力が速く立ち上がることが示された。

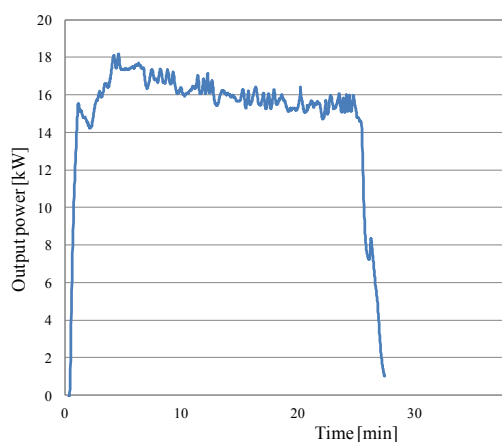


図5 溶液貯蔵方式の放熱出力

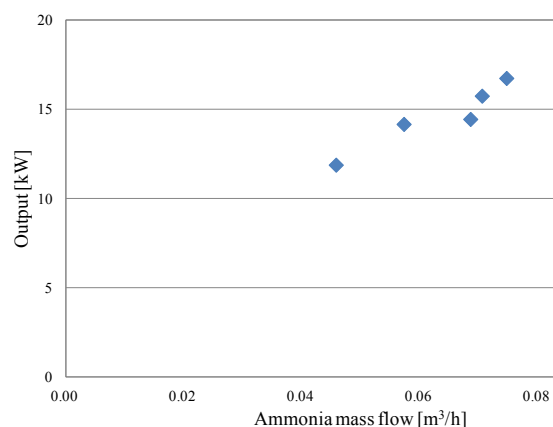


図6 アンモニア流量と放熱出力

(3) 提案システムの導入可能性評価

配管地中埋設・3km輸送を条件としたシステム最適化の結果として、提案の熱輸送・貯蔵

システムが選択され、夏期の冷熱負荷に対してベースロード運転され、ピークロードにはガス焚き吸収冷凍機が運転される。一方冬期の温熱負荷については、提案システムがベースロード運転され、不足するピーク負荷にはボイラが補う構成となる。すなわち、提案システムが選択されたことから、輸送配管の建設コストを見込んでも、本システムがコスト競争力を有することが示された。ごみ焼却排熱を利用することによって一次エネルギー消費量は48%削減されると予想された。

提案システムのコストを変動させた感度分析を行った結果、提案システムのコストが2倍になっても選択されることが見いだされた。また、輸送距離が4kmまでは提案システムが選択される。配管を地上設置として建設コストが半分以下に低減された場合には、輸送距離は12kmまで伸びる。このことから、輸送配管の建設コストを下げるのがごみ焼却排熱利用にとって大きな課題であることが示唆された。

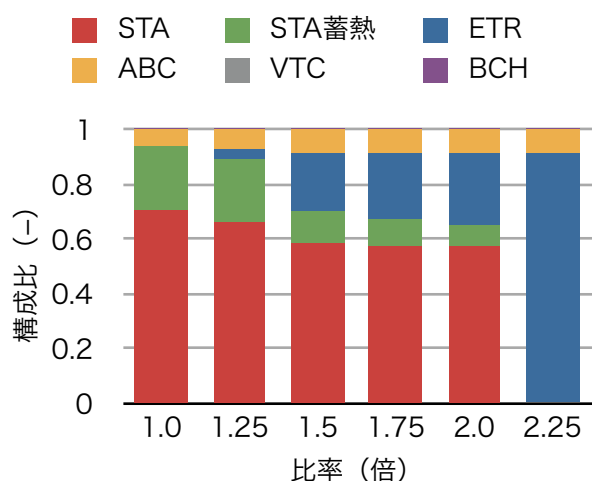


図7 STAコストが及ぼす影響

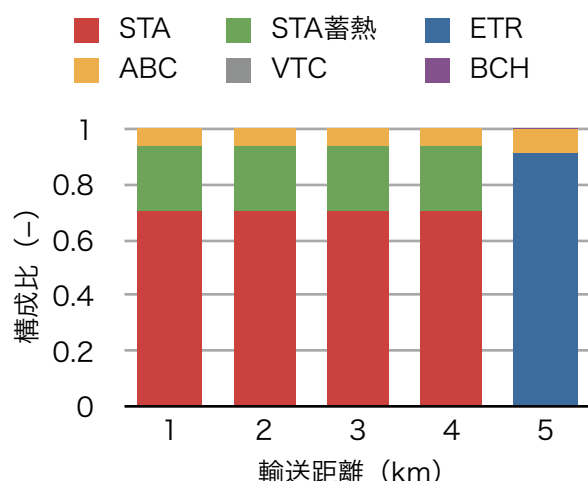


図8 熱輸送距離が及ぼす影響

・環境政策への貢献

ごみ焼却排熱は都市部において発生するエネルギー資源と位置づけられる。低炭素化社会を形成する上で、ごみ焼却排熱を有効利用し、化石燃料消費を抑制することは重要な課題である。しかしながら、排熱輸送はごみ処理施設の近隣以外にはほとんど送られていない。これは従来の熱輸送では断熱が不可欠であり、輸送インフラの建設コストがかさむことが理由である。

本研究が提案する溶液輸送方式による熱輸送では断熱材を使わない配管を用いて、排熱が持つ熱エネルギーを冷媒濃度差に変換して輸送する。断熱層がないこと、従来の冷水輸送に比べて輸送量が大幅に少なくてすむことから、配管コストの低減が可能となる。

性能の点からいえば、熱輸送の機能を付加したにもかかわらず、アンモニア吸収冷凍サイクルとしての性能 (COP) は低下しない。言い換えれば、輸送距離にかかわらず同じエネルギー変換性能を維持することができる技術であることが実証された。さらに、溶液を貯蔵することによって時間的な調整も可能となり、熱エネルギーを冷媒濃度差に変換して蓄熱も同

時に可能となる。熱輸送時と同様に断熱不要となることから、断熱材で被われていないシンプルなタンクを使って蓄熱を実現できる。

以上より、提案する技術は、これまで十分に使い切れていないごみ焼却排熱を有効活用する途を開くものであり、化石燃料消費を代替し、低炭素化の推進に貢献する技術といえることができる。なお、大型のごみ処理施設ではごみ発電が導入されているが、発電効率が低いことから大部分の熱は環境中に廃棄されている。提案技術はごみ排熱の高温部分を電力に変換すると同時に、低温部分を吸収冷凍サイクルによって冷熱・温熱に転換する。そのため、ごみ焼却排熱をすべて有効利用できる意味で、発電だけにとどまらず熱利用も含めた全体としてごみ焼却排熱の社会的インパクトを大きく高めると期待できる。

さらに、本提案の技術は工場等における排熱有効利用にも応用ができ、都市部から離れて立地する排熱源を都市のエネルギー資源として取り込むことに寄与する。提案技術は多様な場所で発生する排熱を時間変動する熱負荷に供給する手段となる。したがって、都市域で発生する排熱の包括的な有効利用を実現するシステムの基盤となり、大幅なCO₂排出低減に貢献できる。

・研究成果の実現可能性

本研究で提案する技術はアンモニア吸収冷凍機を技術的な基礎としている。吸収冷凍機は既に確立した技術であり、それに溶液輸送配管や貯蔵タンクを付加することで実現できるので、技術的に大きなハードルはないといえる。一方、モデル分析の結果から、溶液輸送配管の建設を考慮に入れても従来技術に対してコスト的な優位性が示されている。この点はエンジニアリングの観点からプラント設計を行ってコストを精査し、フィージビリティスタディを行う価値があると考えられる。

なお、本技術ではアンモニアを輸送・貯蔵するので、漏洩がないように安全を確保することが必須である。この点には産業分野で培われた安全管理技術が役立つと予想される。

・結論

アンモニアおよびアンモニア水溶液を媒体とした排熱輸送および貯蔵方式について、本研究によって実験的に実証することができた。実際に50mの熱輸送を実現するとともに、蓄熱および放熱を実現した。断熱材のない通常の配管によって50mの熱輸送を行っても、溶液輸送のない通常の場合と同じ冷凍能力、COPを達成できた。溶液貯蔵による蓄熱・放熱は通常の吸収冷凍機よりも速い負荷追従性を持つことを示した。

また、本技術をごみ発電に応用し、発電後の蒸気の凝縮熱を回収し、離れた熱需要地に輸送して使用するシステムを提案した。提案システムは、輸送配管建設コストを見込んでも従来技術に比べて優位性があると評価された。ただし、輸送距離は3~4kmに留まることから、排熱利用を拡大するためには輸送配管コストの低減が重要である。

以上より、提案技術によるごみ焼却排熱の利用は有効であり、低炭素化に貢献する。

目 次

総合研究報告書概要

1. 研究概要	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
2. 溶液輸送型吸収冷凍サイクルによる熱輸送	4
2.1 吸収溶液輸送による熱輸送方式	4
2.2 溶液輸送実験による熱輸送性能の実証	5
2.3 サイクルシミュレーションによるSTAの動的解析	10
2.4 溶液輸送方式のまとめ	13
3. 溶液貯蔵型吸収冷凍サイクルによる蓄熱	14
3.1 溶液貯蔵による蓄熱方式	14
3.2 実験装置の製作	16
3.3 シミュレーションによる蓄熱・放熱工程の解析	20
3.4 蓄熱・放熱実験	28
3.5 溶液貯蔵による蓄熱のまとめ	35
4. 提案技術のモデル分析による評価	36
4.1 モデル分析の基本的考え方	36
4.2 最適化モデルの定式化	39
4.3 入力データの設定	40
4.4 最適化シミュレーション	44
4.5 提案技術評価のまとめ	49
5. 研究成果のまとめ	50
5.1 熱輸送のまとめ	50
5.2 蓄熱のまとめ	50
5.3 最適化モデル分析のまとめ	50
6. その他	51
6.1 研究発表	51
6.2 知的財産権の取得状況	51

概要説明図	52
英文概要	53

1. 研究概要

1.1 研究背景

地球温暖化抑制を背景として化石燃料消費削減が喫緊の課題となっている。一般廃棄物は居住地において定常的に発生するものであり、都市部のエネルギー源として位置づけることが可能である。従来から大型のごみ焼却場では発電設備が整備され、電力としてエネルギー回収がなされている。図1.1-1に処理規模別の発電利用の状況を示した。200t/dを超える処理規模では外部に供給するほどの発電利用が行われているが、200t/dを下回る規模では必ずしも発電利用は多くない。

ごみ焼却排熱は発電だけでなく、一部では近隣のプールなどで利用されている。しかしながら、排熱は電力に比べて輸送しにくいことから、ある程度距離が離れた排熱利用は、地域熱供給の熱源に利用されている場合などに限られている。

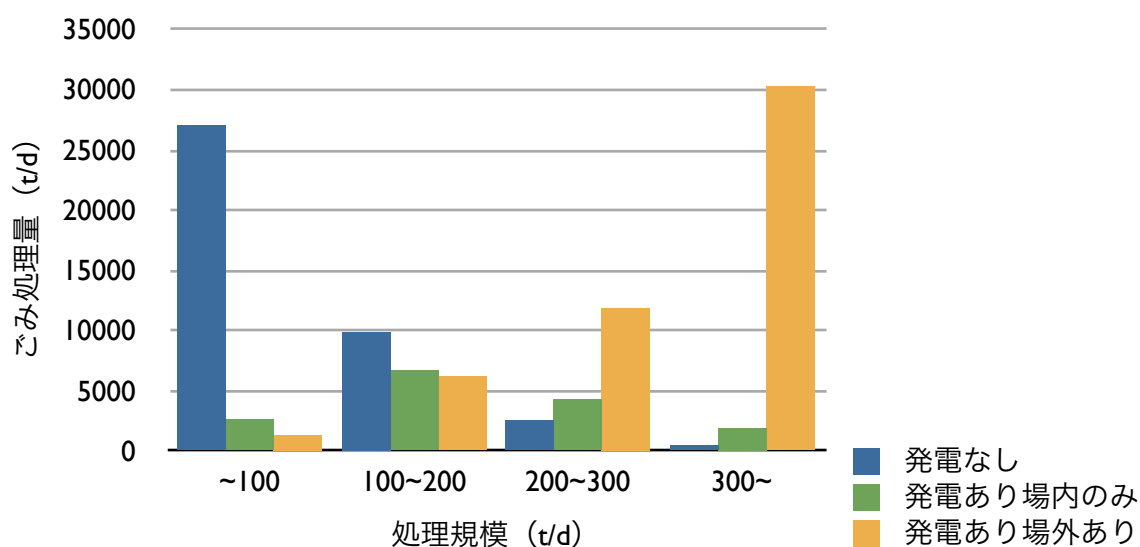


図1.1-1 ごみ処理規模と発電利用の現状

一方、ごみ焼却排熱から発電している場合でも発電効率は10~15%程度に留まる。これは投入した熱エネルギーの大部分が環境に放出されていることを意味する。発電出力は多少低くなるが、蒸気の凝縮温度を通常の50℃程度よりも高くとることも可能である。例えば、100℃で凝縮させると仮定すると、凝縮熱を回収して熱供給に利用することが可能となる。このとき、発電出力は3割程度減少してしまうが、有効に使える100℃の熱が発電出力の3倍以上得ることができる。すなわち、発電効率が15%とすると、残り85%のエネルギーを熱として回収し、ごみ焼却排熱が持つエネルギーをほぼ100%有効利用できることになる。

言い換えれば、ごみ焼却発電を行うような大規模なごみ処理プラントにおいても排熱有効利用の余地がある。本研究ではこの凝縮排熱を回収し、長距離輸送することによって熱負荷のある都市部において有効活用するシステムを想定する。

1.2 研究目的

ごみ焼却排熱を広域で有効利用するには熱輸送、蓄熱機能が不可欠である。従来の蒸気あるいは温水による熱輸送は地域熱供給などにおいて実現しているが、断熱が不可欠であり、配管が大型となる。特に冷房用の冷水輸送においては往還の温度差が10℃程度であるため、大量の冷水を送ることが必要となり、そのためのポンプ動力も消費する。

本研究では従来の熱輸送方式とは異なり、断熱不要で常温で熱エネルギーを輸送する方式「溶液輸送型吸収冷凍機」を提案する。溶液輸送型吸収冷凍機は濃度の異なる吸収溶液を輸送することによって常温での熱輸送を実現する。さらに溶液を別々に貯蔵する「溶液貯蔵型吸収冷凍機」は、濃度の異なる溶液を貯蔵することにより常温で蓄熱を実現できる。すなわち、ごみ焼却排熱を輸送し、貯蔵し、熱変換する機能を一体的に実現することが可能なシステムとなる。

これまでこの常温熱輸送の原理は実証されているが、長距離輸送は温度制御による模擬にとどまっており、実際に距離を離れた熱輸送の性能は検証されていない。また、常温蓄熱は考え方のみで、実際に実現した例はない。そこで本研究では、次の2点を実証することを目的とする。

- ① 50mの溶液配管を用いた熱輸送実験を行い、溶液輸送を伴う場合の冷凍サイクルの性能および動作を実証する。
- ② 溶液貯蔵タンクに溶液を貯留する方式による蓄熱の実験を行い、溶液の出し入れによる蓄熱・放熱の性能および動作を実証する。

さらに、既存技術と比較して提案技術を評価するために熱輸送を含むごみ焼却排熱を利用する地域熱供給システムを最適化型モデルとして表現し、システムコストを最小化することによって導入可能性を解析する。

1.3 研究計画

本研究は3年間で実施する。研究内容は以下の通りである。各年度における概ねの研究内容を表1.3-1に示した。

(1) 溶液輸送型吸収冷凍サイクルの実証

既製のアンモニア吸収冷凍機を改造し、溶液輸送配管を追加することによって実際に溶液を輸送することによる熱輸送の性能を実証する。ただし、既製品を用いるため元々の溶液輸送式とはやや異なるフローであることから、元来の吸収冷凍サイクルとしての性能をシミュレーションによって導くこととする。

(2) 溶液貯蔵型吸収冷凍サイクルの実証

既製のアンモニア吸収冷凍機を改造し、溶液を貯蔵するタンクを付加することによって溶

液貯蔵による蓄熱・放熱を実証する。排熱を投入することなく貯蔵された溶液のみで冷熱を発生させる性能を実験的に検証する。

また、溶液・冷媒の放出による放熱工程について動的シミュレーションによって性能を予測する。

(3) 提案システムによる一次エネルギー代替可能性の評価

溶液輸送や貯蔵を行う提案システムはごみ焼却排熱の利用拡大を目指すものである。ここではごみ発電排熱の復水器からの排熱を回収し、提案システムに投入するシステムを想定する。事務所ビルなどの温熱・冷熱負荷に供給する状況において、システムコストを最小化する最適化手法を用いてシステムの技術選択および最適運用を導き、提案技術の導入可能量およびごみ焼却排熱利用による一次エネルギー代替効果を評価する。

表1.3-1 研究スケジュール

研究項目	H22	H23	H24
溶液輸送型吸収冷凍サイクルの実証	<ul style="list-style-type: none"> 既製冷凍機の改造による溶液輸送方式実験装置の設計および製作 溶液輸送方式のサイクルシミュレーションの予備的解析 	<ul style="list-style-type: none"> 溶液輸送方式の実験による性能測定 溶液輸送方式の動的シミュレーションによる挙動解析 	<ul style="list-style-type: none"> 補足実験
溶液貯蔵型吸収冷凍サイクルの実証	<ul style="list-style-type: none"> 既製冷凍機の改造による溶液貯蔵方式実験装置の設計および製作 	<ul style="list-style-type: none"> 溶液貯蔵方式の実験装置の製作および予備的試験 溶液貯蔵方式の動的シミュレーションによる挙動解析 	<ul style="list-style-type: none"> 溶液貯蔵方式の実験による性能測定
提案システムによる一次エネルギー代替可能性の評価		<ul style="list-style-type: none"> 提案システム評価のためのモデル構築 	<ul style="list-style-type: none"> システム最適運用の導出 一次エネルギー代替効果の評価

2. 溶液輸送型吸収冷凍サイクルによる熱輸送

2.1 吸収溶液輸送による熱輸送方式

2.1.1 熱輸送の原理

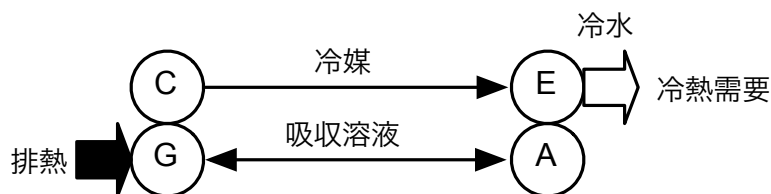
従来の地域熱供給において冷熱を輸送するために使われている熱媒は水（冷水）である。熱供給プラントで吸収冷凍機により冷水を製造し、冷水を需要家までパイプラインで輸送する（図2.1-1(a)）。図中ACEGの四つの○で示されているのは吸収冷凍機内の熱交換器を意味する。

ここで提案する熱輸送においては、この熱交換器を二組のペア、蒸発器E・吸収器Aと発生器G・凝縮器Cに分け、発生器・凝縮器を排熱源側に残す一方、蒸発器・凝縮器を需要家側に設置し、その間は吸収溶液と冷媒が流れる配管でつなぐ（図2.1-1(b)）。この二分割された吸収冷凍機の動作は排熱源から熱を受け取り、需要家側で冷水を供給している。図2.1-1(a)の従来型の冷熱供給（冷水輸送）と比べてみると、どちらも全く同じ境界条件を満足しており、機能的に変わらないことがわかる。言い換えれば、従来型は冷水を輸送することによって熱輸送しているのに対し、二分割された吸収冷凍機は溶液と冷媒をそれぞれ輸送することによって熱輸送を実現している。そこで、本研究で提案する方式を溶液輸送型吸収冷凍機（Solution Transportation Absorption Chiller, 略してSTA）と呼ぶこととする。

本研究では冷媒にアンモニア、溶液にアンモニア水溶液を用いるアンモニア-水系吸収冷凍機をベースにする。配管中を流れるのはアンモニア液、アンモニア濃度の高い溶液（強溶液）、アンモニア濃度の低い溶液（弱溶液）の3種類である。



(a) 従来方式熱輸送（冷水輸送）



(b) 溶液輸送方式

図2.1-1 溶液輸送型吸収冷凍サイクルによる熱輸送の原理

(A：吸収器，C：凝縮器，E：蒸発器，G：発生器)

なお、溶液や冷媒は輸送中に放熱し、環境温度まで温度が低下する。言い換えれば、常温の熱媒輸送によって冷熱輸送が実現できることになる。この点は従来の冷水輸送や蒸気輸送では全く実現できない機能である。本システムにおいては熱エネルギーは強溶液、弱溶液、冷媒の濃度差に転換されて輸送されていると解釈できる。

2.1.2 アンモニア吸収冷凍サイクル

アンモニア吸収冷凍サイクルに基づいたSTAの基本的なフローを図2.1-2に示す。冷媒、強溶液、弱溶液を輸送する配管が中央部分に描かれている。なお、図示したフローでは吸収器として高温吸収器と低温吸収器の2つを有する。高温吸収器はアンモニアの吸収熱を回収して50°C程度の温水を発生する機能を持つ。低温吸収器は残りの吸収熱を冷却水に排出する。

アンモニア吸収冷凍サイクルの特徴は精留プロセスを必要とする点である。冷媒であるアンモニアも吸収溶液に含まれる水も発生器で蒸発するが、蒸発器に戻すのはアンモニア冷媒のみであるため、発生器の出口にアンモニア濃度を高める精留器を持つ。また、蒸発器に入る冷媒を冷却するため、蒸発器から発生した低温の冷媒蒸気と冷媒液とを熱交換させるための冷媒熱交換器を有する。

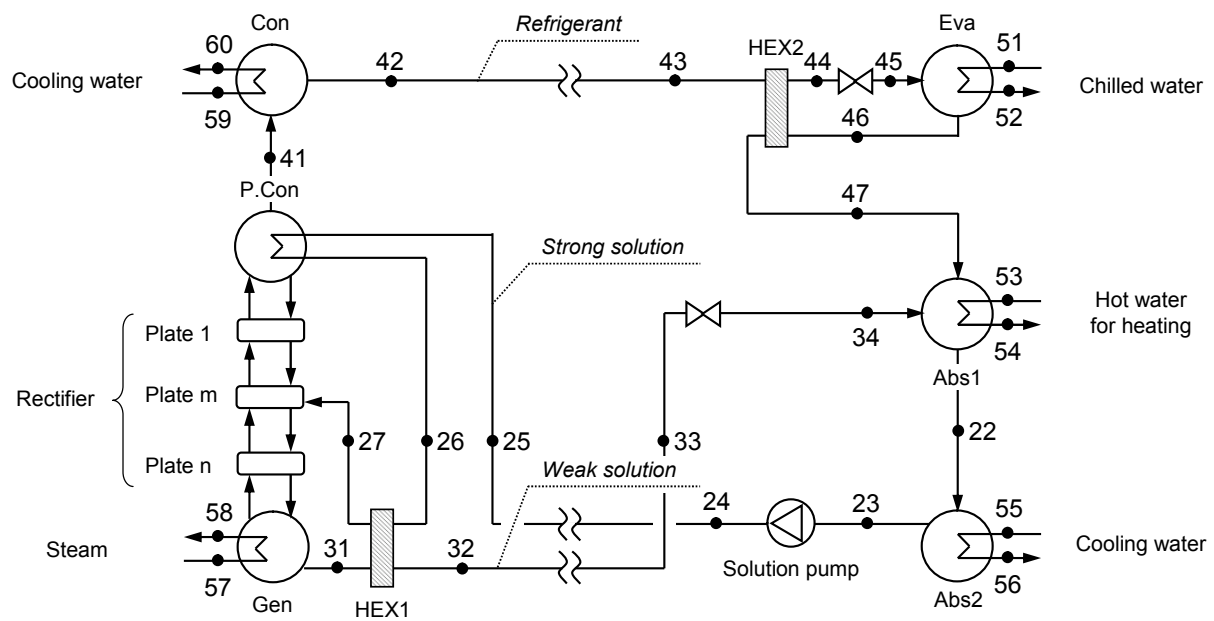


図2.1-2 アンモニア吸収冷凍サイクルに基づくSTAのフロー

2.2 溶液輸送実験による熱輸送性能の実証

2.2.1 実験装置

(1) 実験装置の構成

実験装置の構成図を図2.2-1に示す。実験装置は吸収冷凍機本体に加え、改造して付加した配管、冷水を加熱するための模擬負荷、吸収冷凍機に電源を供給するためのエンジン発電機および変圧器から構成される。

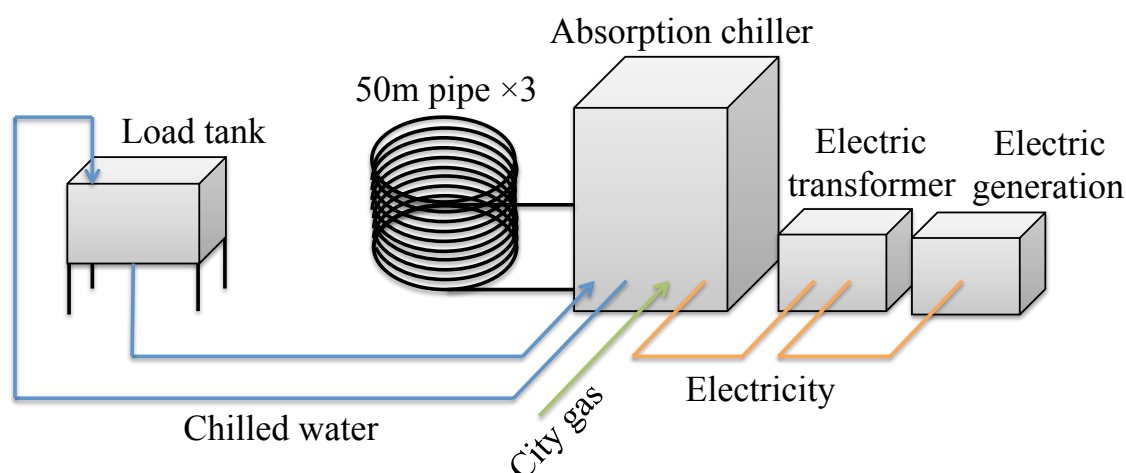


図2.2-1 溶液熱輸送方式実験装置の全体構成

(2) アンモニア吸収冷凍機の仕様

既成品であるアンモニア吸収冷凍機を改造して実験機を製作した。元となった装置はRobur社の冷房専用機GA Line ACF60-00Model (出力17.7kW) である。冷凍機の仕様を表2.2-1に示す。本機はCOP (=発生冷熱/投入熱) を向上させるために「吸収熱交換器」を有しており、弱溶液に冷媒を吸収させた時の吸収熱を強溶液の加熱に用いている。この部分はSTAには含まれない要素であるが、取り除くことが困難なためにそのまま実験に用いた。

(3) 溶液輸送配管の追加改造

冷媒、強溶液、弱溶液それぞれを装置内部から外部に引き出し、50mの溶液輸送配管を経由して装置に戻るように装置を改造した。実験装置の外観を図2.2-2に示した。また、溶液輸送配管を含む実験装置のフローを図2.2-3に示す。溶液輸送配管をバイパスする流路構成をとることも可能としている。

溶液配管は断熱を施していない通常の鋼管を使用した。同心円筒状に入れ子となった3重のコイルとして取り付けられている。

(4) 吸収冷凍サイクルのCOP

吸収冷凍機の性能評価には成績係数 (COP : Coefficient of Performance) を用いる。溶液輸送型吸収冷凍サイクルにおいても、既存の吸収冷凍機と同様にCOPを定義する。すなわち、次式で表される通り、蒸発器で得られる冷熱出力 Q_{eva} を発生器に投入した熱量 (都市ガス消費量 Q_{gas}) で除した値で計算する。

$$COP = \frac{Q_{eva}}{Q_{gas}} \quad (2.2-1)$$

表2.2-1 アンモニア吸収冷凍機の仕様

項目	仕様	単位	備考
COP	0.64	-	外気温度：35℃
冷凍能力	17.7	kW	冷水入口／出口温度：12／7℃
ガス消費量	27.8	kW	都市ガス13A
外気温度	0～49	℃	
冷却空気流量	56～168	m ³ /min	
冷水入口温度	3～45	℃	
冷水流量	42～53	L/min	
電力消費	0.75	kW	
内部圧力損失	29	kPa	
重量	340	kg	

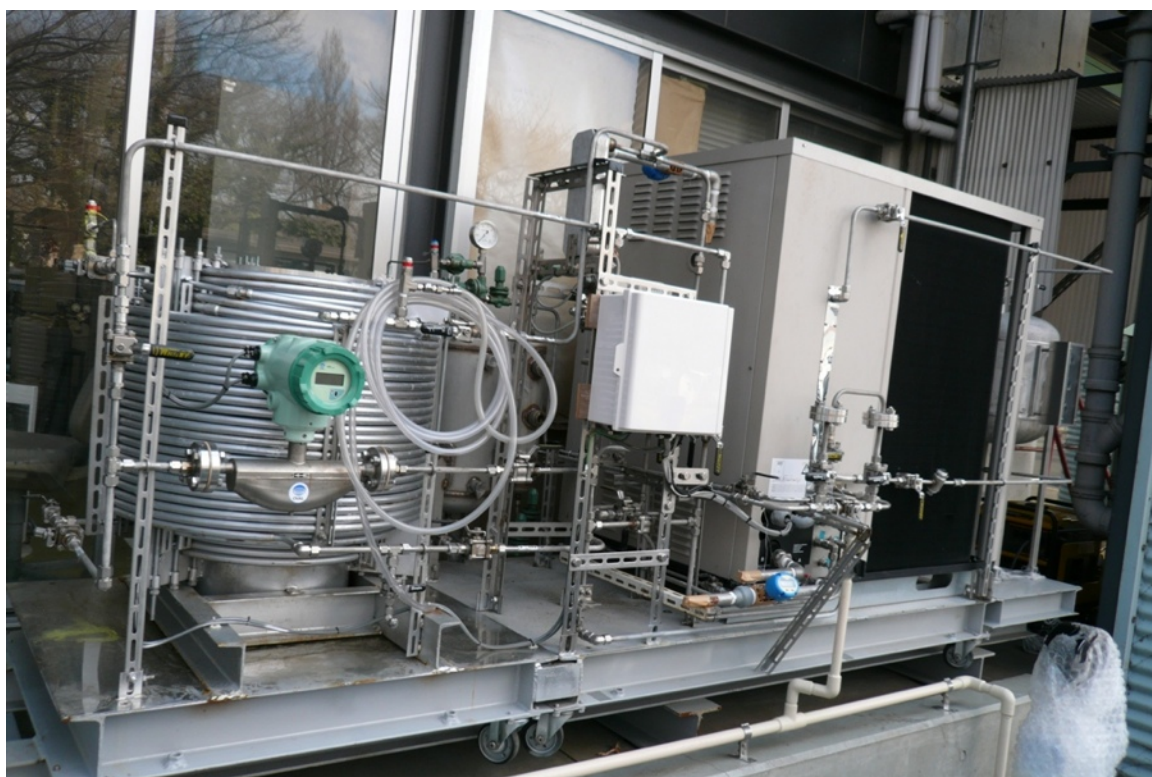


図2.2-2 溶液熱輸送方式実験装置の外観

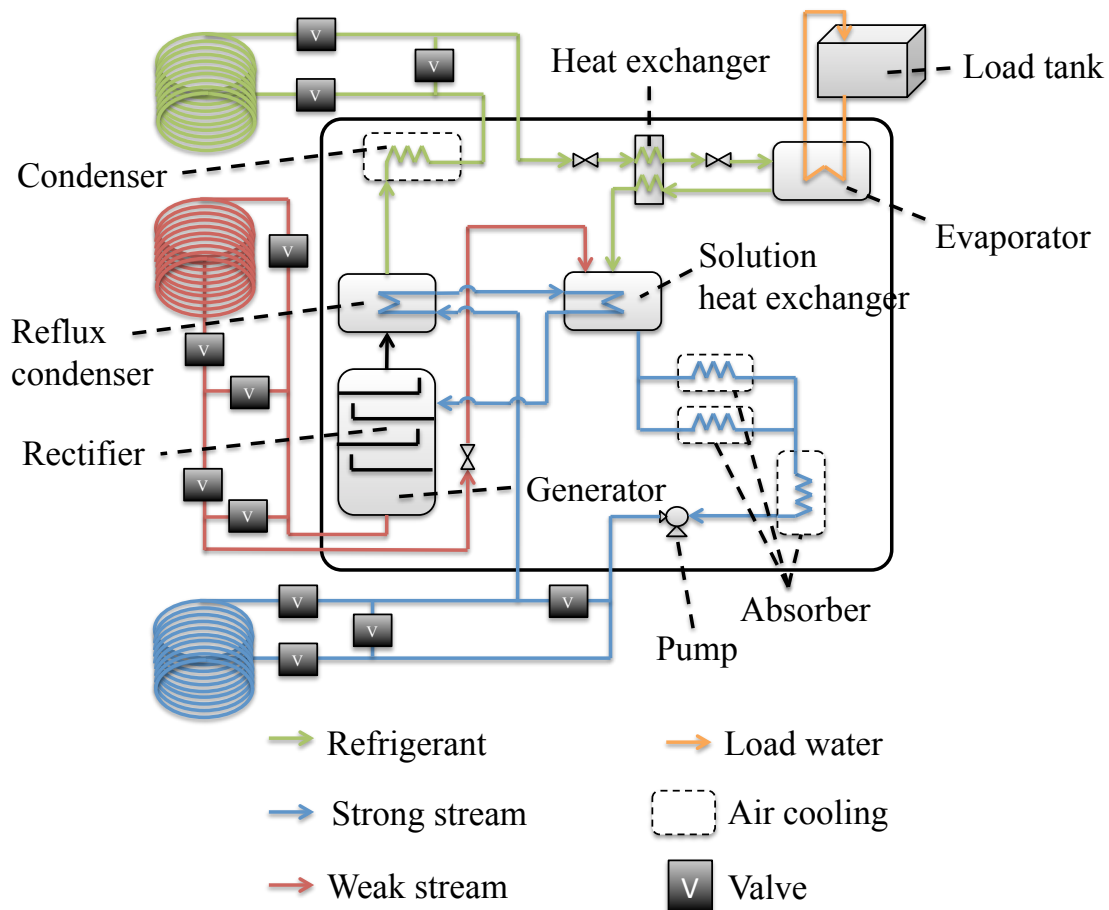


図2.2-3 溶液熱輸送方式実験装置のフロー

2.2.2 定常状態に関する実験結果

実験は、比較対象となる従来型冷凍機としての運転と溶液配管を経由するSTA運転について行った。実験時の外気温には多少の差があるが、違いは大きくない。

図2.2-4に冷凍出力およびCOPの比較を示す。従来型では冷凍出力が18.0kWに対し、溶液輸送方式では19.1kWの出力が得られている。COPも前者の0.65に比べて後者では0.69と向上している。これは後者の方が外気温が低いことが影響していると考えられる。この結果より、溶液輸送を行うSTAにおいても従来型吸収冷凍機と同等の性能が得られることが示唆された。すなわち、50mの溶液輸送を伴う熱輸送を実現する吸収冷凍サイクルの性能を実証できたといえる。

2.2.3 起動時に関する実験結果

従来の吸収冷凍機と比べたSTAの特徴は、溶液輸送配管を持つことにある。安定状態で運転されている場合にはその違いは現れないことが前述の結果からわかった。しかしながら、非定常な状態では溶液配管を持つことの影響が表れると予想される。

そこで、起動時における従来型と溶液輸送方式の挙動を比較した。冷水温度差を図2.2-5に示す。前者では25分程度でほぼ安定するが、28分、45分の時点で再び大きく乱れてい

る。これは蒸発器温度が下がりすぎて発生器の燃焼が停止したことによる。この現象がなければ安定したと予想される。一方、後者では20分以後も冷水温度には緩やかな変動が残っており、安定するまで1時間程度を要している。

このことから、STAでは溶液がサイクル内を循環するのに従来型よりも時間がかかるため、溶液濃度の調整などに時間がかかることが示された。したがって、50mよりも配管が長くなれば、さらに安定するまでに要する時間は長くなると予想される。

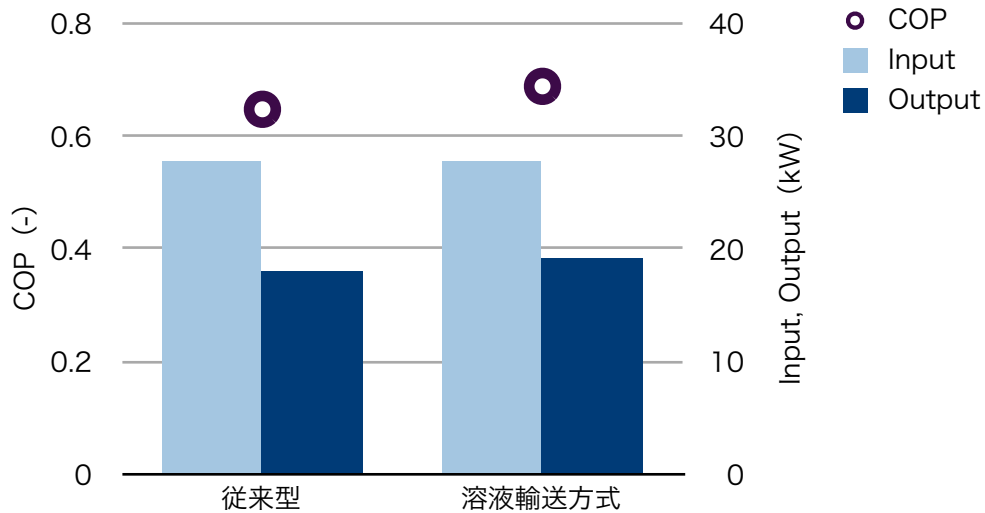


図2.2-4 従来型と溶液輸送の性能比較

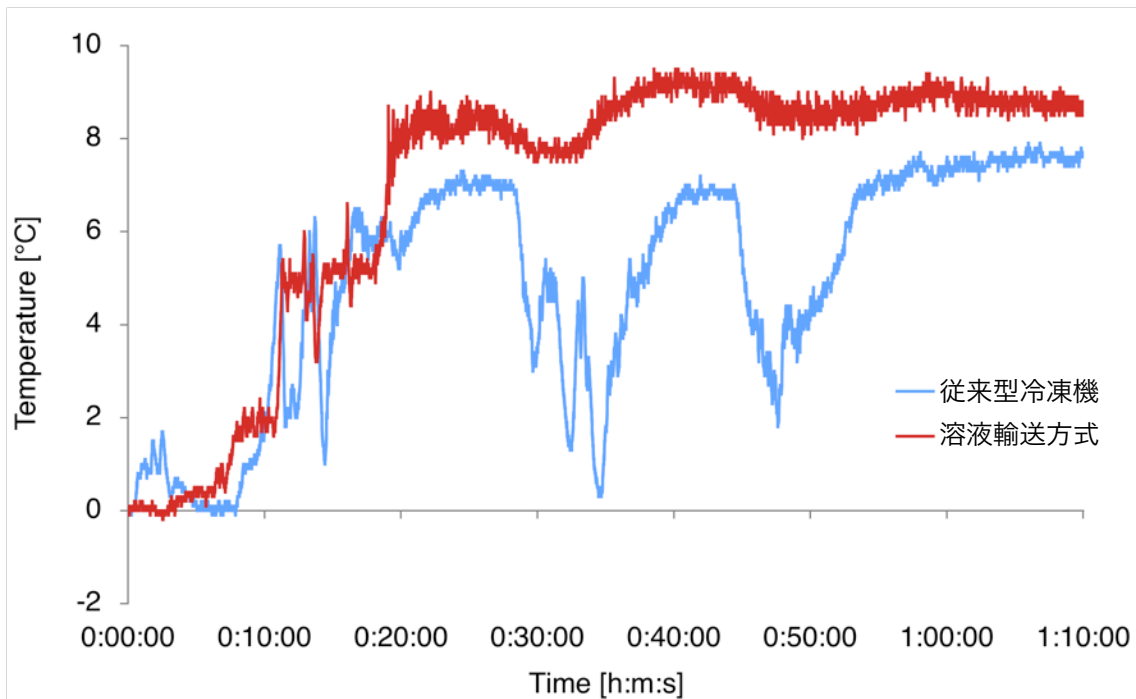


図2.2-5 起動時の冷水温度差の挙動

2.3 サイクルシミュレーションによるSTAの動的解析

2.3.1 サイクルシミュレーションモデル

(1) シミュレーションモデルの構成

シミュレーションにはプラント解析ツールAspen HYSYSを用いた。STAを表すモデルを図2.3-1に示す。本研究でシミュレーションを行うSTAは一般的な吸収冷凍機に溶液輸送配管を接続したものとなっている。

吸収器の後、ポンプを通り精留器に向かうストリームと吸収器に戻るストリームに分岐される。吸収器に戻るストリームは静的解析では流量が0kg/sとなっているが、冷水温度が動的に変化した場合に蒸発器に戻る冷媒流量を調整するためにバイパスする流量を制御する。

(2) シミュレーション条件

まず、静的解析にてサイクル各部の状態量を算出する。STAの設計パラメータを表2.3-1に示す。溶液配管の長さはSTAの場合は1km、従来型吸収冷凍機の場合は1m（輸送なし）と設定した。

表2.3-1 シミュレーション条件

項目		値	単位
冷凍能力		3517	kW
外気温度		30	degC
冷水	入口温度	12	degC
	出口温度	7	degC
冷却水	入口温度	30	degC
温度	発生器	150	degC
	蒸発器	0	degC
	凝縮器	40	degC
	吸収器	40	degC
アンモニア重量比率		0.998	-
熱交換器 温度効率	冷媒熱交換器	0.80	-
	ブリード熱交換器	0.80	-
	溶液熱交換器	0.95	-

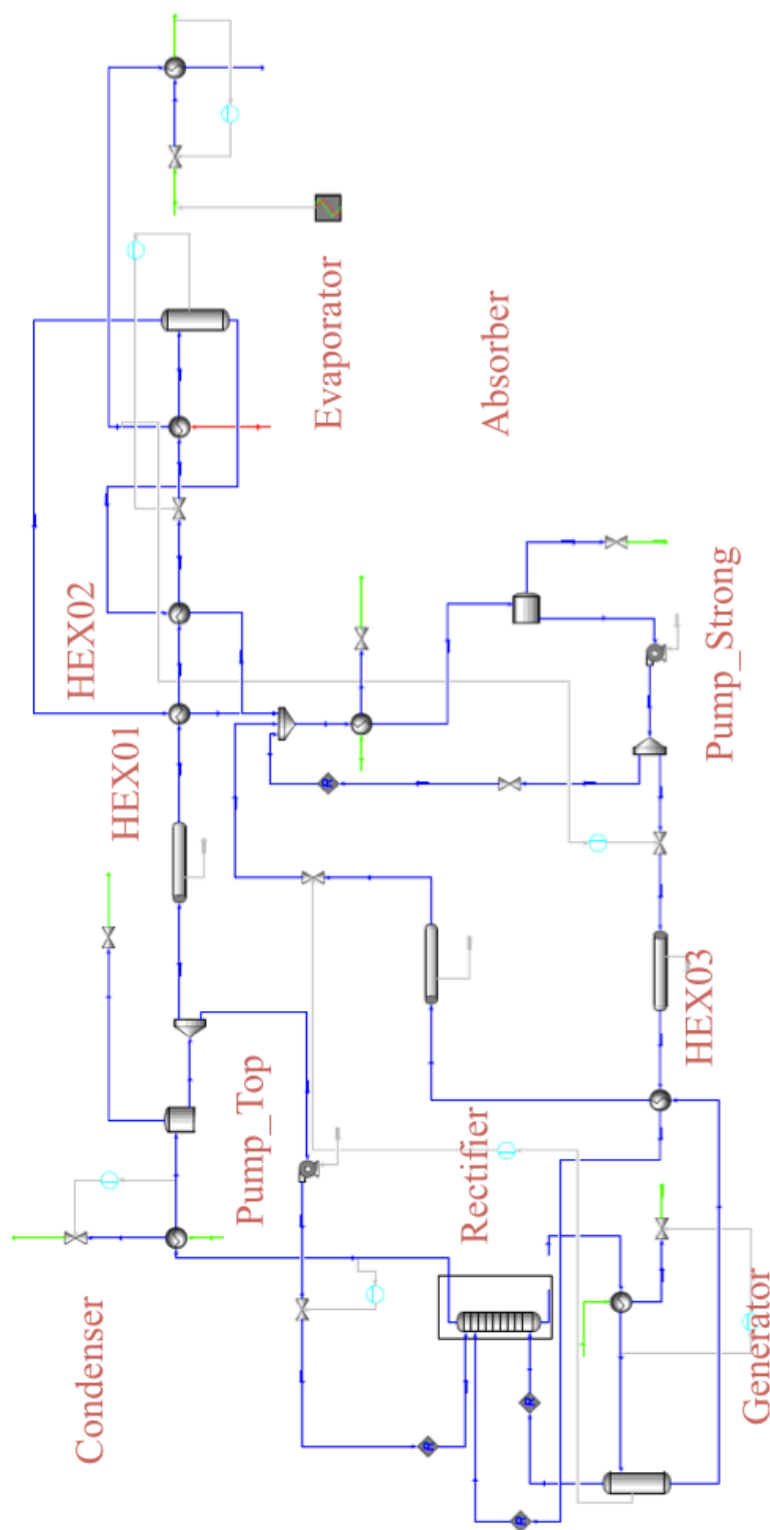


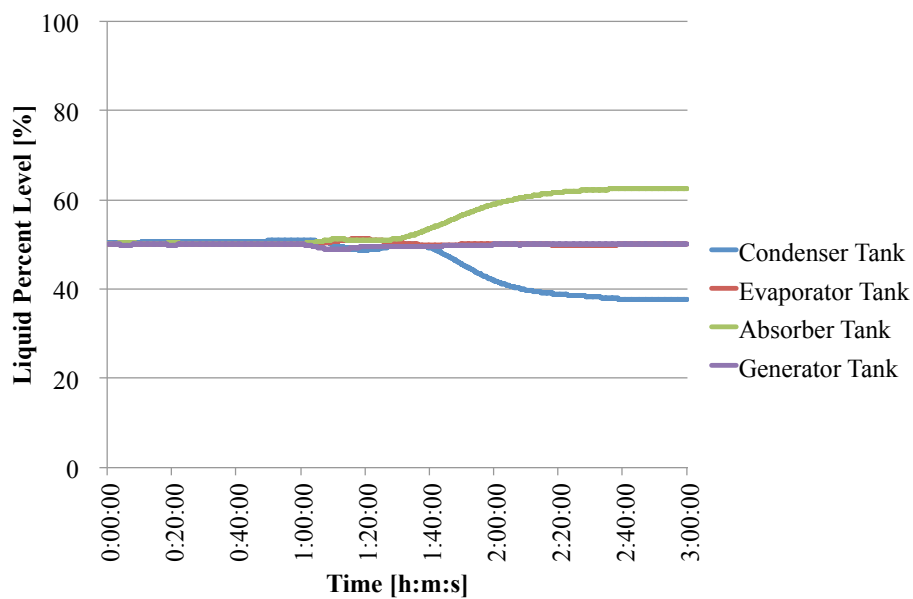
図2.3-1 STAモデルのフロー図

2.3.2 動的解析結果

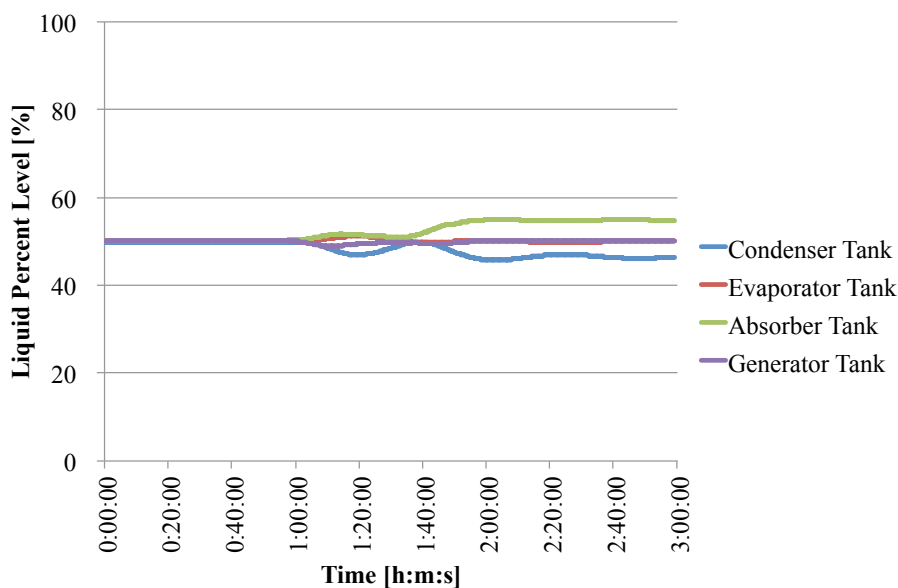
溶液配管長が1km (STA) の場合と1m (従来型吸収冷凍機) の場合について比較する。条件の変動としては、冷熱負荷が定格出力から約0.8倍に減少する状態を与えた。

図2.3-2に示した液面高さの比較では、2つのケース間で挙動が大きく異なっている。これはアンモニア濃度の変化に起因する。負荷変動に伴い強溶液濃度が若干上昇する。このことは吸収器内に加えて輸送配管内に存在する強溶液全体のアンモニア濃度が高まることを意味し、アンモニア冷媒が凝縮器側から吸収器側に移行することとなる。そのため、1mの場合よりも1kmの場合ではより多くアンモニアが移行し、その結果として凝縮器の液面が大きく低下する一方、吸収器の液面が上昇したと解釈できる。

以上より、輸送距離が長くなると配管中に移行する冷媒の量が増え、そのため安定するまでに時間を要すること、液面の変動幅が拡大することが予想される。



(a) 輸送距離1km



(b) 輸送距離1m

図2.3-2 熱交換器内液面高さの変動

2.4 溶液輸送方式のまとめ

2.4.1 50m熱輸送の実証

約18kWの冷凍出力を持つアンモニア吸収冷凍機に50mの溶液輸送配管を接続して、実際に溶液を流すことによる熱輸送実験を行った。その結果、提案する溶液輸送方式による熱輸送は従来の吸収冷凍機と同等の出力およびCOPを有することが実験的に確かめられた。言い換えれば、熱輸送機能を付加することは吸収冷凍サイクルの性能を劣化させることにはつながらない。

一方、冷凍サイクル起動時の挙動から、溶液輸送を伴う場合には安定な出力が取れるまでに従来よりも時間を要することが観測された。これは溶液や冷媒が発生器・凝縮器と吸収器・蒸発器間を移動するのに時間がかかることに起因する。

2.4.2 熱輸送挙動の動的シミュレーション

プラントシミュレーションツールAspen HYSYSを用いて提案する溶液輸送方式をモデル化し、サイクルシミュレーションを行った。動的シミュレーションとして負荷変動が内部状態の挙動に与える影響を解析した。その結果次の知見が得られた。

- ・ 輸送距離によらず冷熱出力は指令値に対して安定に追従する。従来型と溶液輸送方式で追従速度に大きな違いはない。
- ・ 吸収器と凝縮器の液面高さは輸送距離が長いほど大きく変動する。これは溶液輸送配管中の強溶液濃度が変化するためアンモニア冷媒が凝縮器側から吸収器側に移行することに起因する。
- ・ 液面高さの変動幅を許容するためには、吸収器および凝縮器の液溜め容量を大きく設計する必要が生じる。

以上のサイクル内部状態の挙動は従来の静的シミュレーションでは得られないものであり、今回の動的シミュレーションによる成果である。

3. 溶液貯蔵型吸収冷凍サイクルによる蓄熱

3.1 溶液貯蔵による蓄熱方式

3.1.1 蓄熱動作の考え方

吸収冷凍機において冷熱を発生するのは蒸発器内での冷媒の蒸発による。冷媒の蒸発プロセスは発生器における熱の投入とは独立して動作する。蒸発プロセスが機能を発揮するには蒸発した冷媒が吸収溶液に吸収されることが不可欠である。したがって、蒸発器と吸収器は一体的に動作することが必要である。(図3.1-1(a))

一方、冷媒を吸収した強溶液は、冷媒を循環させるために発生器で加熱されて冷媒蒸気を放出し、その冷媒蒸気は凝縮器で凝縮して冷媒液が蒸発器に戻る。このプロセスは蒸発器で冷媒が蒸発しているかどうかによらず、独立して動作することが可能である。ここでは、発生器と凝縮器が一体的に動作する。(図3.1-1(b))

このように蒸発器・吸収器のペアと発生器・凝縮器のペアはそれぞれ独立して運転することができる。ただし、そのためには十分な溶液および冷媒液が蓄積されていることが条件となる。そこで、強溶液、弱溶液、冷媒液を貯蔵するタンクを用意し、前述のように運転すると、排熱がなくても弱溶液と冷媒液を使って図3.1-1(a)のプロセスを動作させて冷熱を発生できることがわかる。発生した強溶液はタンクに蓄積する。その後、排熱が利用できる時間帯において強溶液を図3.1-1(b)のプロセスに投入し、弱溶液と冷媒液に分離して貯蔵する。この結果、2つのプロセスを異なる時間帯に動作させることになり、等価的に排熱あるいは冷熱を貯蔵したことと同じ機能を実現できる。(例えば、排熱がない時間帯に冷熱を発生することは、排熱が使える時間に予め冷熱を蓄熱しておいて、後で放出することと同じである)

従来の吸収冷凍サイクルは一連の蒸発・吸収・再生・凝縮のプロセスが連続的に動作していたのに対し、提案サイクルではタンクをバッファとすることによって、間欠的な動作を行う。この動作より冷熱発生を時間的にずらすことを可能とし、蓄熱機能を新たに取り込む。

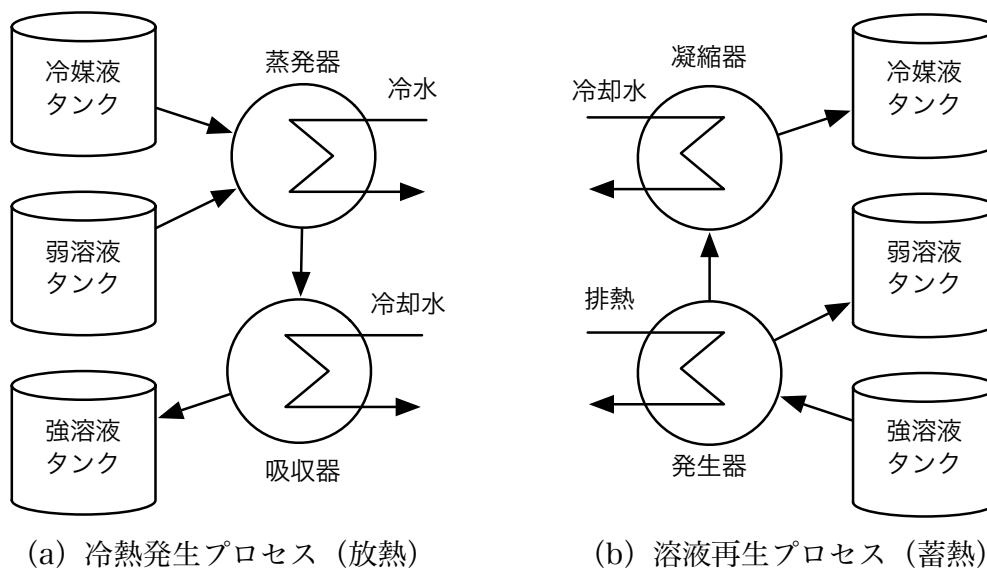


図3.1-1 溶液貯蔵による等価的な蓄熱の動作

3.1.2 溶液貯蔵型吸収冷凍サイクルの構成

溶液貯蔵型吸収冷凍サイクルの設備構成を図3.1-2に示す。前述の通り、基本的には従来の吸収冷凍機に3つのタンクを付加した構成となる。

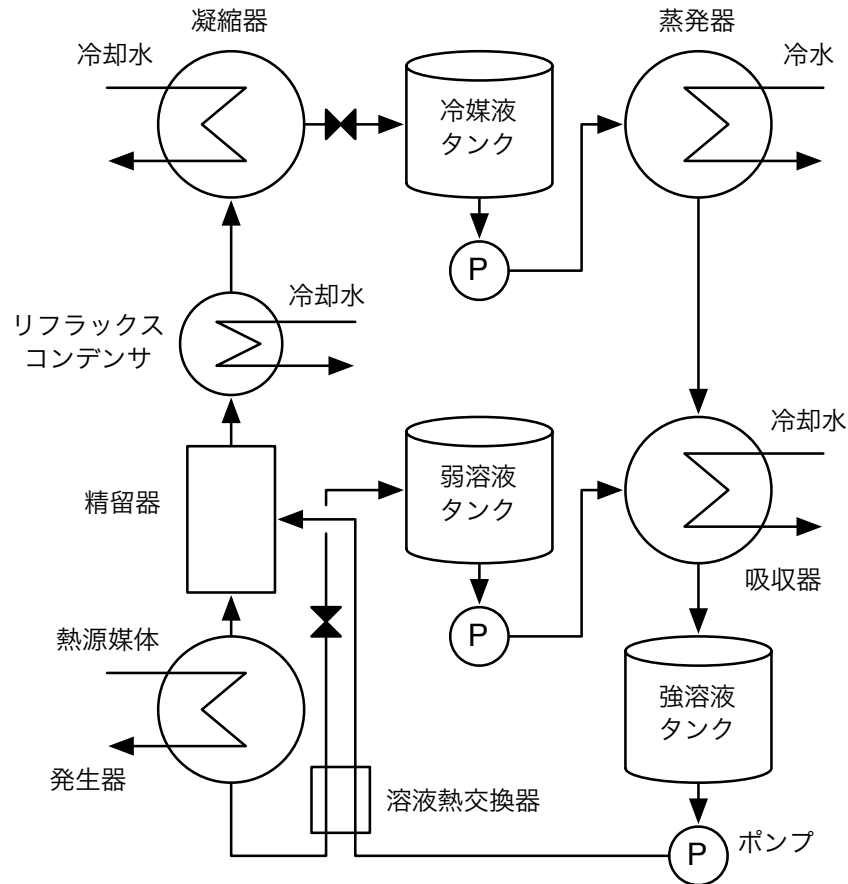


図3.1-2 溶液貯蔵型吸収冷凍機のフロー構成

3.1.3 蓄熱運転方法

蓄熱・放熱運転は次のように操作する。

(蓄熱工程)

- ① タンクから強溶液を発生器に送り、冷凍機を運転（発生器を加熱）する。
- ② 発生器からの弱溶液をタンクに貯留する。
- ③ 凝縮器からの冷媒液をタンクに貯留する。

(放熱工程)

- ④ タンクから弱溶液を吸収器に送る。
- ⑤ タンクから冷媒液を蒸発器に送る。
- ⑥ 発生した強溶液をタンクに貯留する。

溶液輸送方式と同様に、溶液貯蔵方式もエネルギーを溶液濃度差で蓄えているので、タンクの断熱が不要であり、構造的にシンプルになる点に優位性がある。

3.2 実験装置の製作

3.2.1 実験装置

溶液輸送方式の実験装置と同じく、Robur社製アンモニア吸収冷凍機を改造することによって溶液貯蔵型吸収冷凍機の実験装置を製作した。既製品の冷凍機は表2.2-1に示したものと同型である。そのため、フロー構成は図3.1-2と必ずしも一致せず、吸収熱交換器が付加された状態である。

(1) 仕様策定の考え方

図3.1-2に示すように既製品に3つのタンクを付加する。本研究では基本的な機能の検証が目的であることから、タンク容量は概ね30分程度の蓄熱動作ができる程度とした。

冷媒・弱溶液タンク： 73 L

強溶液タンク： 132 L

図3.1-2においては各タンクにポンプを取り付けて、溶液等の移送時にはポンプによって送り込む形態になっている。本実験装置は小型であるため個別にポンプをつけることが難しいことから、タンクにヒータあるいは温水パイプを取り付け、加温することによって加圧する方式をとることとした。図3.2-2および3に実験装置のフロー図および組立図を示す。

(2) 製作された実験装置

実験装置および制御盤の写真を図3.2-1に示す。既製品のRobur社製冷凍機に隣接して3本のタンクが横置きに配置され、冷凍機内部から溶液・冷媒液が引き出されている様子を図3.2-4に示す。



図3.2-1 溶液貯蔵方式実験装置の外観

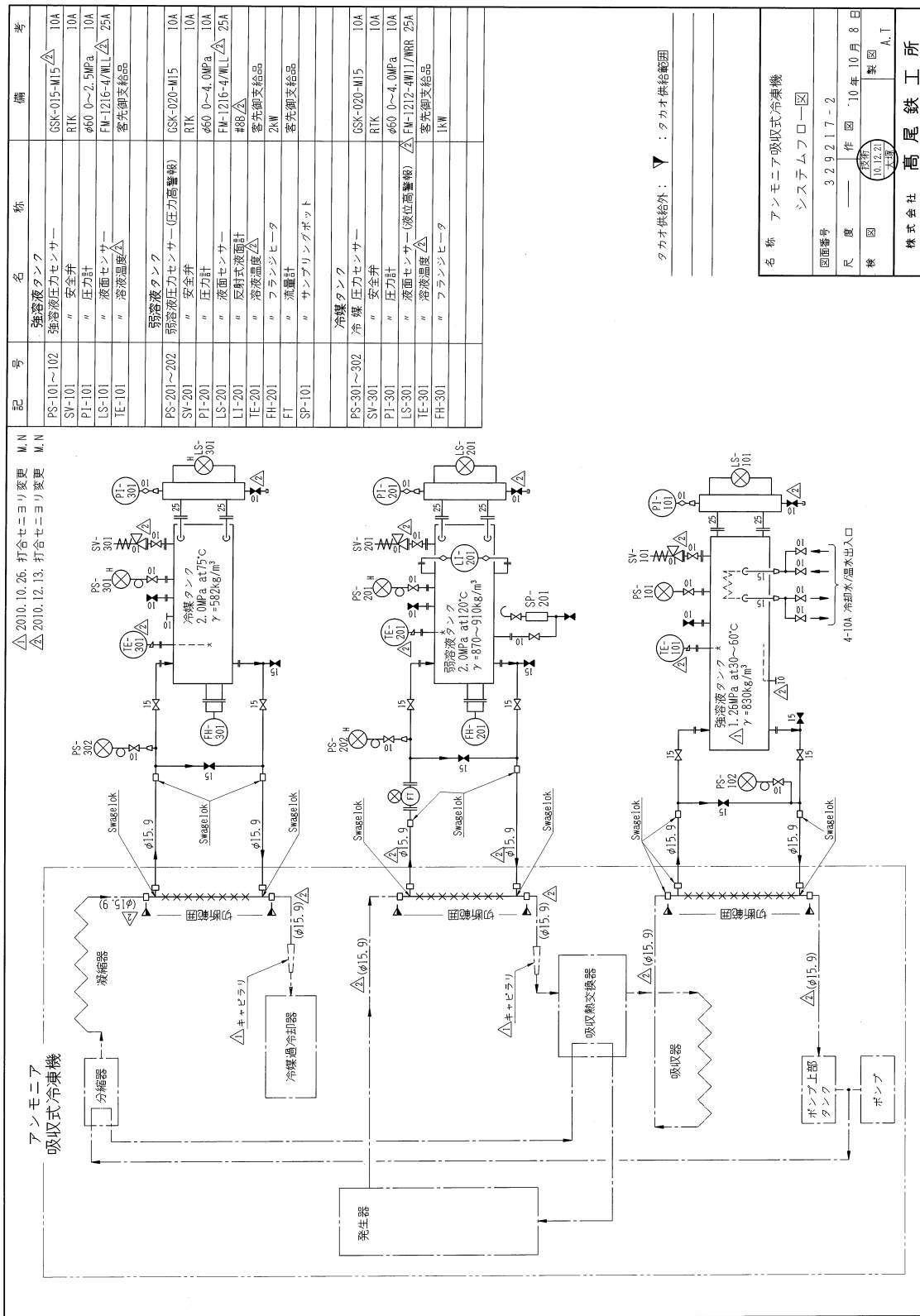
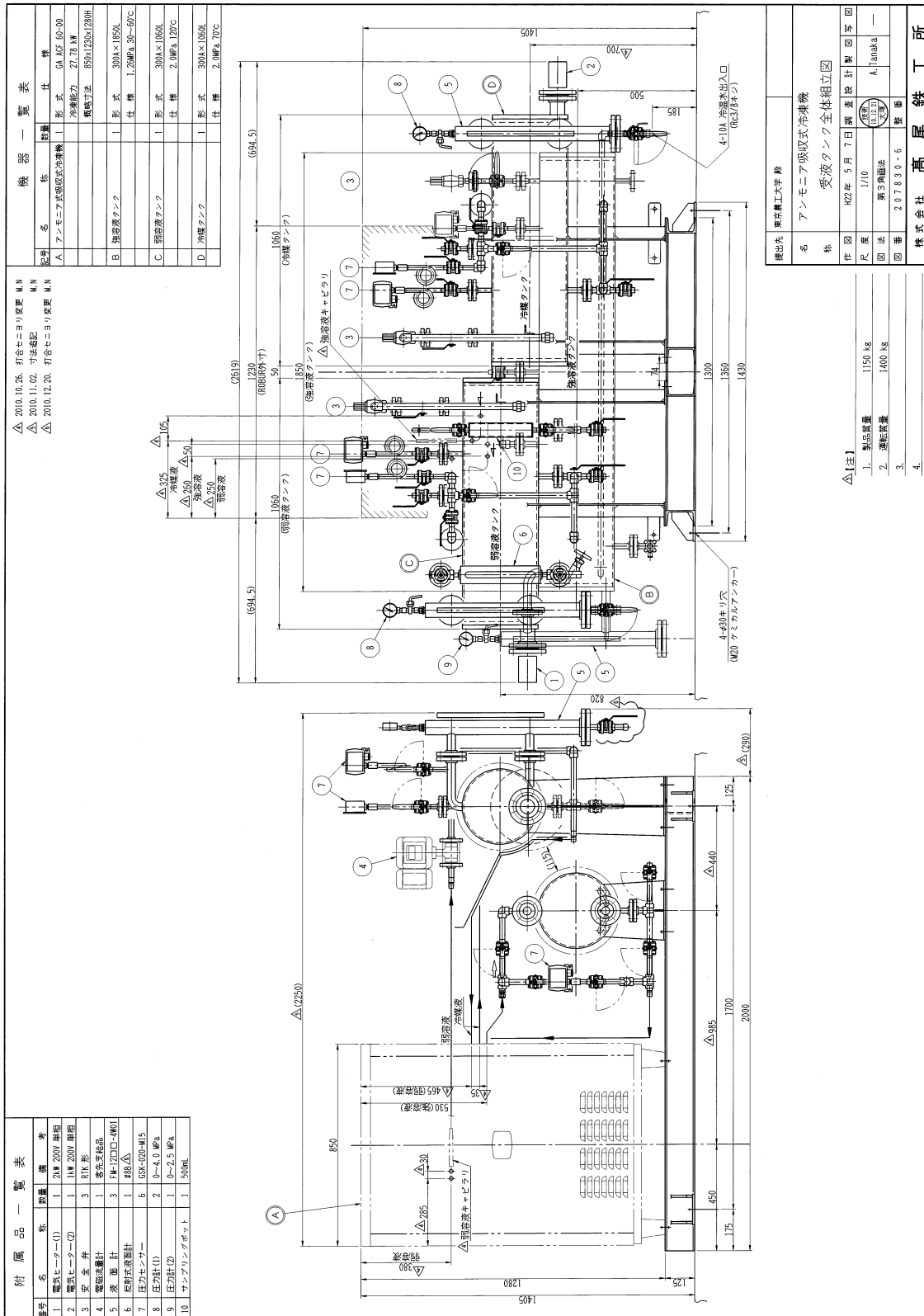


図3.2-2 実験装置システムフロー図



提出先 東京農工大学 院
 名 アンモニア吸収式冷凍機
 図 受液タンク全体組立図
 作 図 H22年 5月 7日 調 査 設 計 図 号 回
 尺 度 1/10
 図 法 第3角画法
 図 番 207830-6 製 者
 株式会社 高尾鉄工所

- △【注】
1. 製品質量 1150 kg
 2. 連結質量 1400 kg
 - 3.
 - 4.

図3.2-3 実験装置組立図

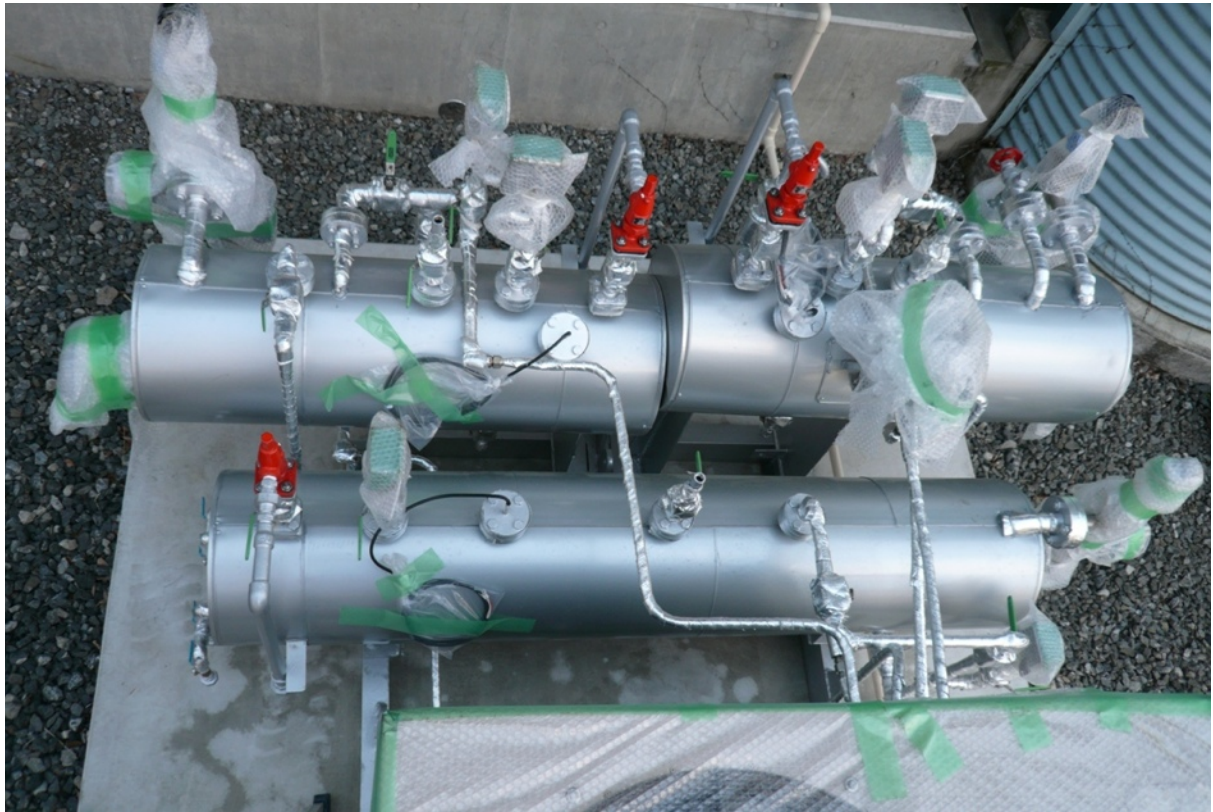


図3.2-4 溶液貯蔵タンクの写真
(奥左：冷媒液タンク，奥右：弱溶液タンク，手前：強溶液タンク)

3.2.2 蓄熱および放熱運転の制御

(1) 溶液の移送方法

蓄熱運転時にはアンモニア強溶液を発生器に送り，発生したアンモニア冷媒液とアンモニア弱溶液とタンクに貯める．強溶液を送る制御は強溶液を加熱して圧力を調整することによって行う．

一方，放熱運転時にはアンモニア冷媒液とアンモニア弱溶液を蒸発器および吸収器に移送し，吸収器から強溶液を取り出してタンクに貯める．この時の冷媒液と弱溶液を送る制御についてもタンクをヒータで加熱して圧力を上げることによって行う．また，強溶液タンクを冷却水で冷やして圧力を下げることにより，強溶液の移送を確保する．

(2) 空冷ファン制御

冷凍機の蓄熱運転時にはバーナーが点火して発生器が動作し，凝縮器を冷やすために空冷ファンが回転する．これは従来通りの動作であり，冷凍機本体が制御する．一方，放熱運転時には発生器を動作させないために冷凍機の運転を停止させる．その場合でも吸収器を冷却する必要があるため，空冷ファンを回転させなければならない．そのため，冷凍機停止には制御盤から空冷ファンに対して直接電力を供給し，空冷ファンの動作を制御するように改造した．

3.3 シミュレーションによる蓄熱・放熱挙動の解析

3.3.1 蓄熱シミュレーション

(1) 蓄熱工程のモデル化

Aspen HYSYSを用いて表現した蓄熱運転のシミュレーションモデルを図3.3-1に示す。強溶液貯蔵タンク (Tank3) から精留器に強溶液が流し込まれる。精留器にてアンモニア濃度の高い冷媒となる。冷媒は精留器を出て、凝縮器で凝縮し、液体の状態でタンク (Tank1) に貯められる。凝縮器直後では、タンクへ向かう流れと精留器に戻る流れに分岐している。発生器と精留器は繋がっており、発生器において熱を投入し蒸発した冷媒が精留器に入る。発生器から液体の状態となった弱溶液は冷媒との熱交換を経てタンク (Tank2) に貯められる。用いたシミュレーションツールであるAspen HYSYSでは熱交換器に溶液を貯める機能を持たせられないため、発生器の直後にSeparatorを設けている。

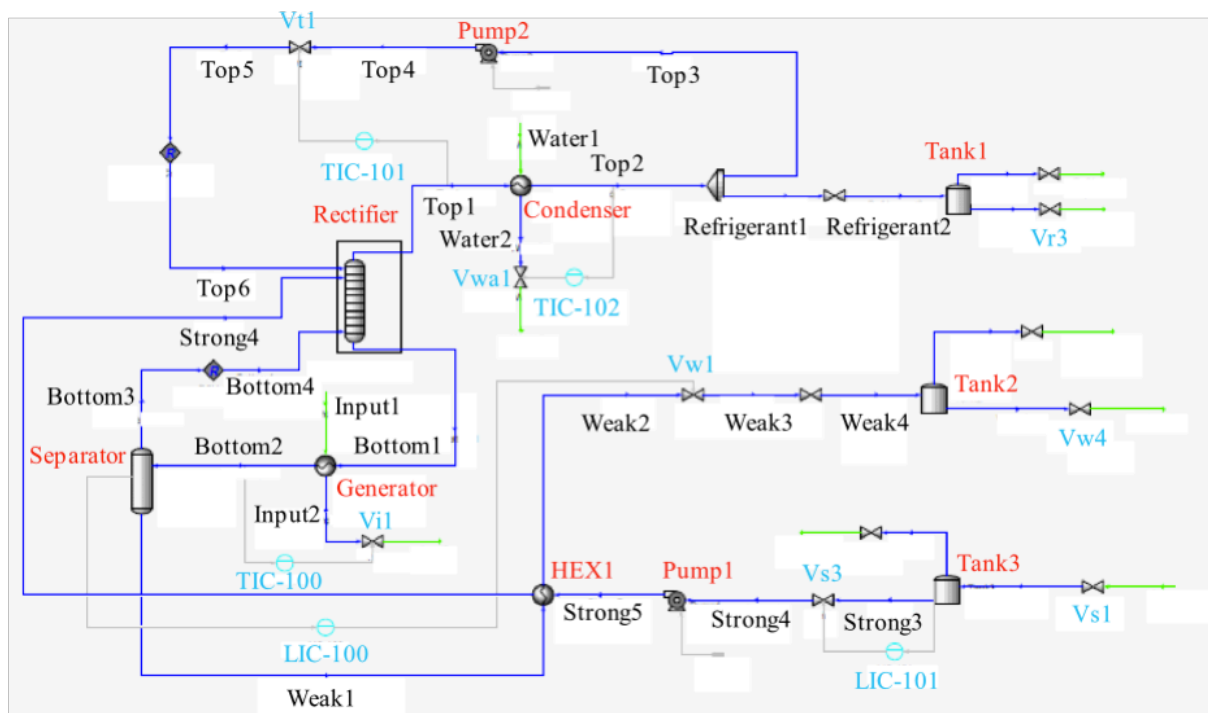


図3.3-1 蓄熱運転シミュレーションモデル

蓄熱運転モデルには5種類の制御系がある。

- ・ 発生器液面高さ制御 (LIC-100)
- ・ 強溶液タンク液量制御 (LIC-101)
- ・ 発生器出口の弱溶液温度制御 (TIC-100)
- ・ 精留器出口の蒸気温度制御 (TIC-101)
- ・ 高圧側圧力制御 (TIC-102)

制御系のPIDパラメータは感度分析を行い、比較的安定な挙動が得られた値に設定した。

(2) シミュレーション条件

蓄熱運転モデルを解く前に定常サイクルシミュレーションを行い、各部の状態を算出した。その結果を表3.3-1に示す。外気温30°C、発生器内部温度150°Cとしている。外気温はタンクの貯蔵溶液温度に対応する。精留器から取り出す冷媒の濃度は一般的なアンモニア吸収冷凍機と同様の0.998とし、凝縮器圧力は冷媒の凝縮温度が40°Cとなる1541kPaとした。冷媒の凝縮器出口温度は確実に液体となるように37°Cとした。溶液流量は蒸発器の定格出力を1000RT（3540kW）と想定して算出した。発生器投入熱量は定常シミュレーションより5505kWとなった。

タンク容量は、以上で求めた溶液流量で連続3時間の運転を行える溶液量を貯蔵する大きさとした。蓄熱シミュレーションにおいては、強溶液タンク出口の温度を外気温と同じ30°Cとした。

表3.3-1 定常シミュレーションによる状態

項目	設定値	単位
発生器加熱入力	5505	kW
加熱流体入口温度	160	°C
加熱流体出口温度	150	°C
冷却水入口温度	30	°C
冷却水出口温度	35	°C
凝縮器圧力	1541	kPa
冷媒濃度（アンモニア濃度）	99.8	%
弱溶液濃度	17.3	%
強溶液濃度	43.0	%
アンモニア冷媒流量	3.11	kg/s
アンモニア弱溶液流量	6.88	kg/s
アンモニア強溶液流量	10.0	kg/s
溶液熱交換器温度効率	0.55	—
冷媒タンク容量	100	m ³
弱溶液タンク容量	150	m ³
強溶液タンク容量	250	m ³

(4) シミュレーション結果

設計した制御パラメータで蓄熱運転の動的シミュレーションを行った。運転の初期条件として、Tank3（強溶液）にはタンク容量の80%の溶液、Tank1（冷媒）とTank2（弱溶液）は20%の溶液が入っているとす。流量、タンク内貯留量、溶液濃度、発生器投入熱量を図3.3-2から図3.3-5に示す。

時刻 $t=0$ で強溶液を発生器に投入を開始した。0分で起動し220分で強溶液タンク内の溶液量が下限値である20%に達したため、溶液の供給および発生器の加熱を停止した。結果として、蓄熱運転時間は220分であった。図3.3-2より時間が進むにつれて流量が緩やかに低下することがわかった。図3.3-3のタンク貯留量を見ると冷媒タンクと弱溶液タンクに溶液がほぼ一様に追加されている。溶液濃度についても図3.3-4より、起動直後に弱溶液の濃度がやや振動するものの、その後は安定した濃度の溶液が流れている。これより設計した濃度の溶液をタンクに貯蔵できていることが示された。図3.3-5の投入熱量は溶液の流量が低下するのに従って減少している。ただし、定常シミュレーションでの加熱負荷に対して蓄熱運転の初期には2倍程度の加熱が必要となることがわかった。

以上より、蓄熱運転のシミュレーションより次の知見が得られた。

- ・ 強溶液の流量が徐々に低下し、冷媒流量と弱溶液流量も低下する。
- ・ 発生した冷媒と弱溶液の濃度は安定している。
- ・ 蓄熱運転直後には発生器加熱負荷が定常時に比べて約2倍に上昇する。

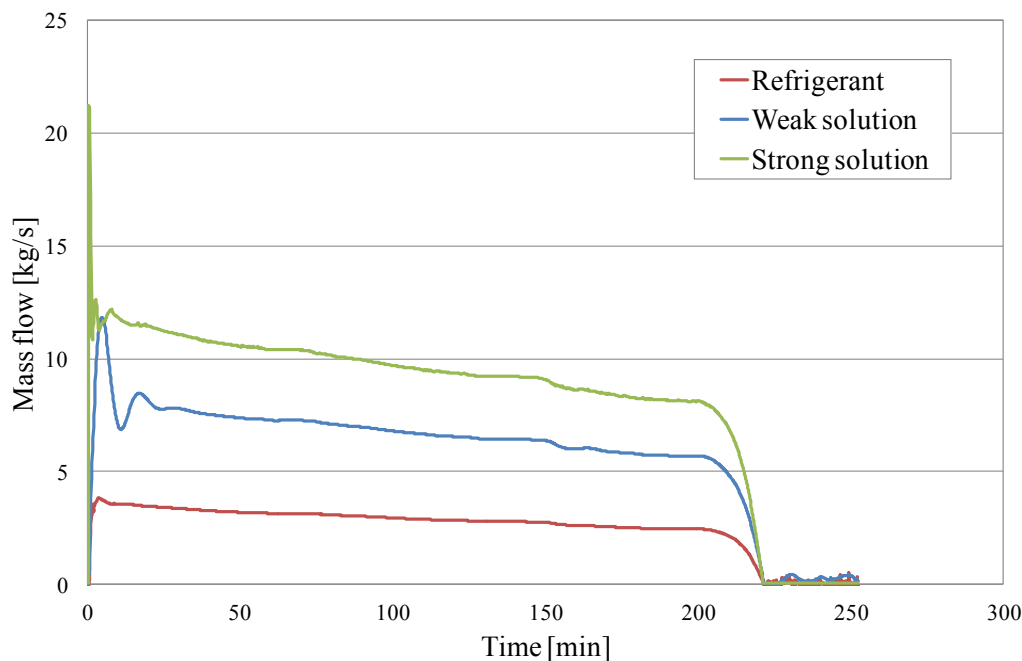


図3.3-2 溶液および冷媒の流量（蓄熱運転）

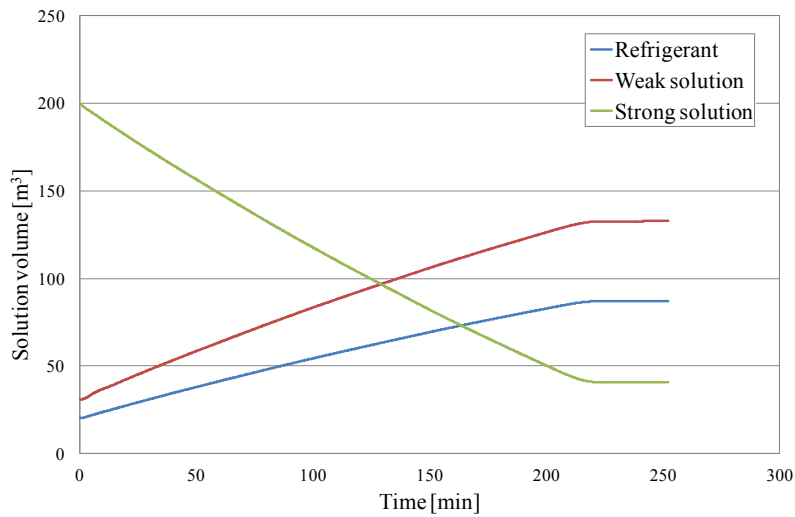


図3.3-3 タンク内の貯留量 (蓄熱運転)

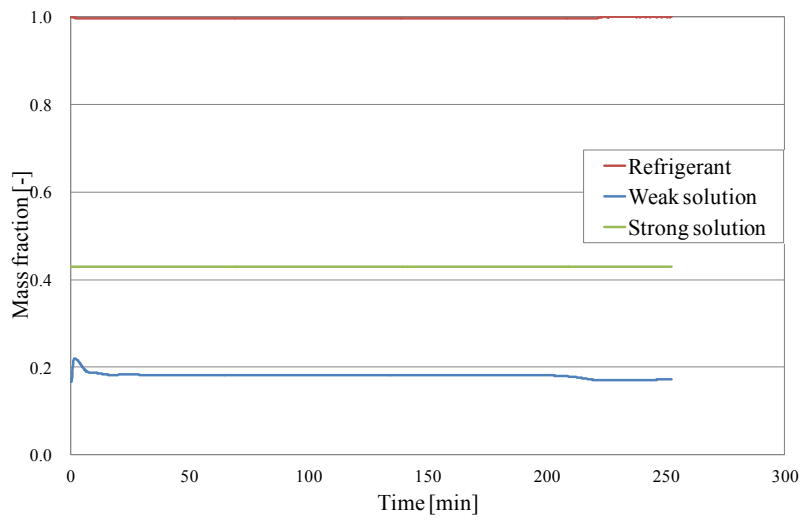


図3.3-4 冷媒および溶液濃度 (蓄熱運転)

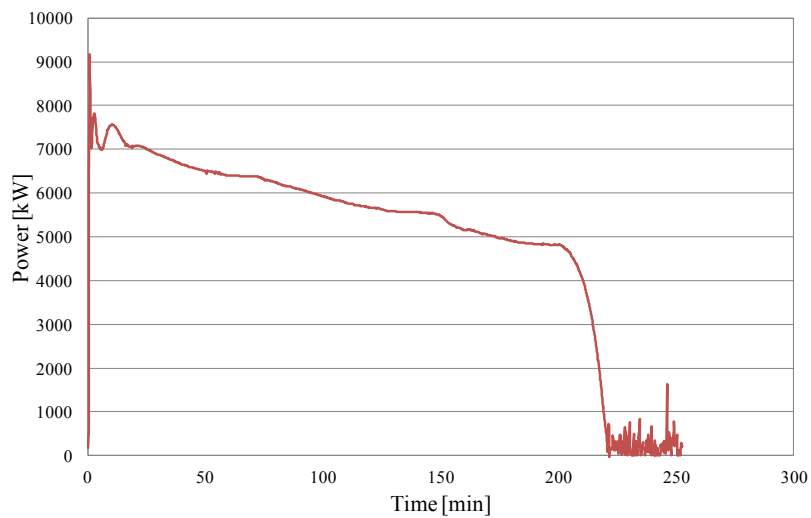


図3.3-5 発生器への投入熱量 (蓄熱運転)

3.3.2 放熱シミュレーション

(1) 放熱工程のモデル化

放熱運転のシミュレーションモデルを図3.3-6に示す。冷媒貯蔵タンク (Tank1) から冷媒が蒸発器に流し込まれる。蒸発器では冷媒が蒸発し、外部から投入された冷水を冷やす。蒸発器を出た冷媒は冷媒熱交換器を通り、吸収器に向かう。この熱交換器は、蒸発器に入る前に冷媒液を冷やすと同時に、冷媒蒸気を加熱する役割を持つ。その後、弱溶液タンク (Tank2) からポンプによって送られてきた弱溶液と冷媒が吸収器で混合される。実際の吸収器では、弱溶液が噴射されて冷媒を吸収するとともに吸収器内で冷却水により冷却される。本シミュレーションでは一つのコンポーネントで吸収器を表現できないため、冷媒と弱溶液を混合してから冷却を行うものと表現している。吸収器を出た強溶液は強溶液タンク (Tank3) に貯められる。

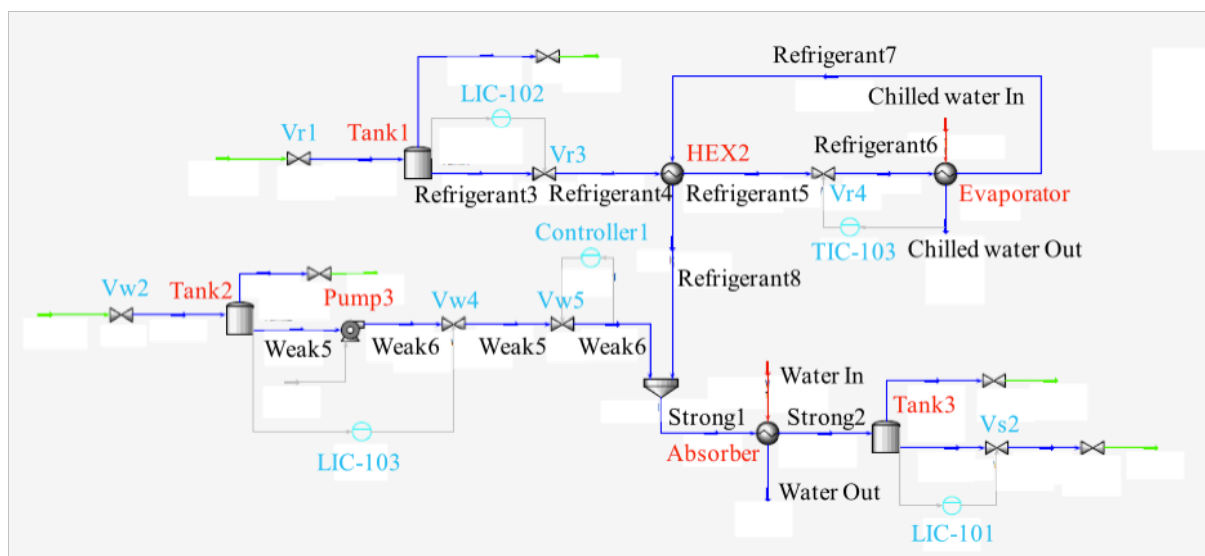


図3.3-6 放熱運転シミュレーションモデル

放熱モデルには制御系が3種類 (合計5つ) 付いている。

- ・タンクの溶液量制御 (LIC-101, LIC-102, LIC-103)
- ・冷水温度制御 (TIC-103)
- ・弱溶液流量制御 (Controller1)

制御系のPIDパラメータは蓄熱運転と同様に感度分析を行い、比較的安定な挙動が得られた値に設定した。

(2) シミュレーション条件

放熱運転の操作方法を定めるために、予め定常シミュレーションを行い、定格出力を得るための流量および濃度を算出した。定常シミュレーションの結果を表3.3-2に示す。放熱運転モデルでの定格出力は1000RT (3540 kW) とした。冷房目的で利用することを想定してい

るため、蒸発器の冷水入口温度を12℃、冷水出口温度を7℃とし、蒸発器内の蒸発温度は0℃と与えた。これより低圧側の圧力が424kPaと定まる。吸収器からの強溶液取り出し温度は37℃とした。吸収器の冷却水温度は入口が30℃、出口温度が35℃とした。冷媒タンク出口の冷媒温度は30℃とした。

表3.3-2 定常シミュレーションによる状態

項目	設定値	単位
定格出力	3540	kW
冷水入口温度	12	℃
冷水出口温度	7	℃
冷却水入口温度	30	℃
冷却水出口温度	35	℃
蒸発器温度	0	℃
低圧側圧力	424	kPa
冷媒濃度（アンモニア濃度）	99.8	%
弱溶液濃度	17.3	%
強溶液濃度	43.0	%
アンモニア冷媒流量	3.11	kg/s
アンモニア弱溶液流量	6.88	kg/s
アンモニア強溶液流量	9.99	kg/s
冷媒熱交換器温度効率	0.11	—
冷媒タンク容量	100	m ³
弱溶液タンク容量	150	m ³
強溶液タンク容量	250	m ³

(3) シミュレーション結果

設計した制御パラメータで放熱運転の動的シミュレーションを行った。運転の初期条件として、Tank1（冷媒）、Tank2（弱溶液）には蓄熱運転で貯蔵されたタンク容量の80%の溶液、Tank3（強溶液）は20%の溶液が入っているとした。流量、タンク内貯留量、圧力、冷凍出力のグラフを図3.3-7から図3.3-10に示す。

時刻 $t=0$ に冷媒液および弱溶液の投入を開始した。シミュレーション結果より0分から205分に冷媒タンクの残量が下限値の20%に達して停止するまで運転できている。図3.3-7より放熱運転中は、安定した流量で動作していることがわかる。図3.3-9を見ると、冷媒タンクの圧力が徐々に低下する。しかし、流量は安定しているため、TIC-103の制御が問題なく行われているが、設計指針としてVr4のバルブは圧力低下に対応できるバルブのCv値にする必要がある。

図3.3-10より、出力は放熱運転開始直後に速やかに立ち上がり、運転中安定している。これは冷媒流量の制御が行われていることによる。また通常の吸収冷凍サイクルの実験結果では、起動から安定まで20分程度を要する。それに対して本シミュレーションでは2分程度で安定しているため、格段に応答が速いサイクルであることが期待できる。

以上よりタンクに貯蔵した冷媒および溶液を投入することで放熱運転の出力が得られることが示された。放熱シミュレーションより次の知見が得られた。

- ・ 冷水温度を参照して冷媒流量を制御することにより、安定した出力が得られる。
- ・ 冷媒および弱溶液の投入直後、冷熱出力はただちに立ち上がる。溶液貯蔵による蓄熱システムでは放熱の応答が非常に速い。

なお、各タンクから出る溶液は飽和液である。そのため冷媒の圧力は1155kPaでありバルブ操作のみで低圧側に送ることができるが、弱溶液の圧力は86kPaであるため、弱溶液を移送するにはポンプを用いて圧力を上げる必要がある。

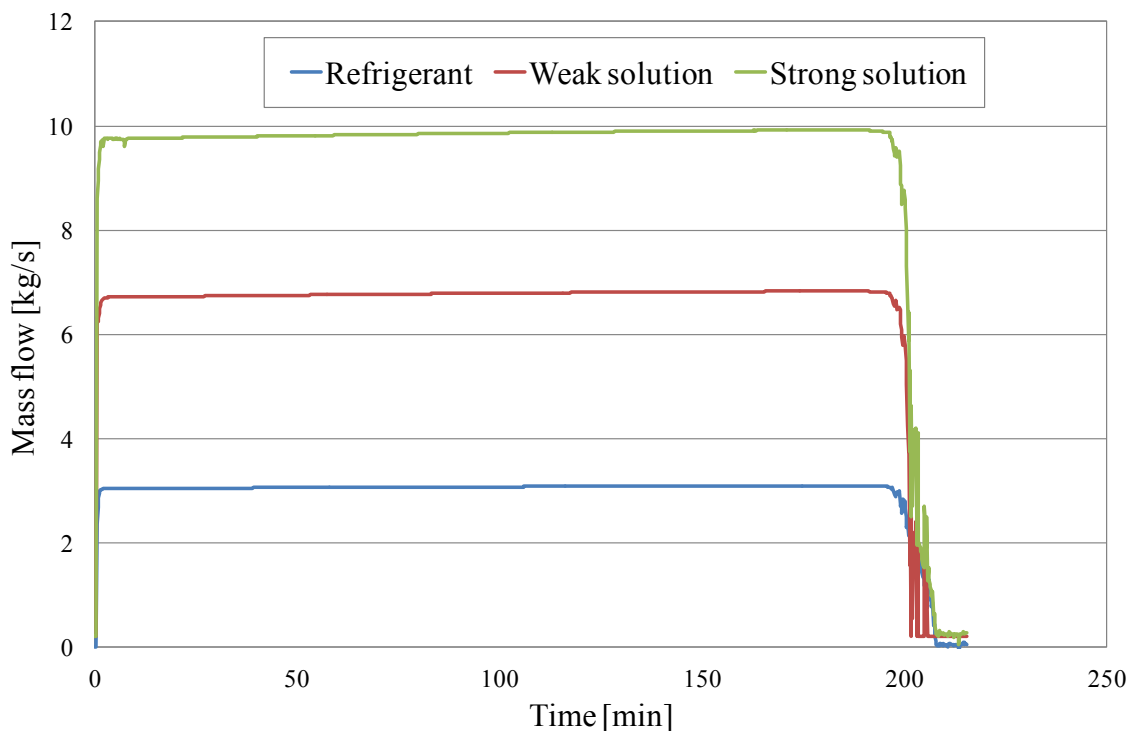


図3.3-7 冷媒および溶液の流量（放熱運転）

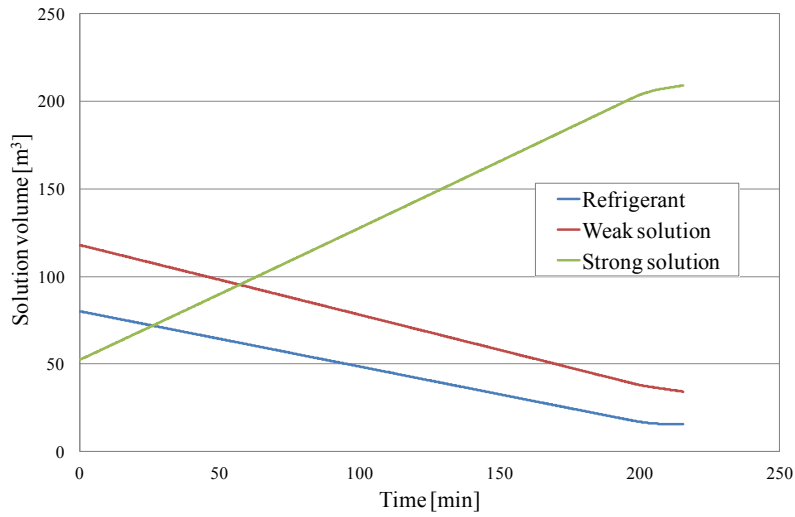


図3.3-8 冷媒および溶液の貯留量 (放熱運転)

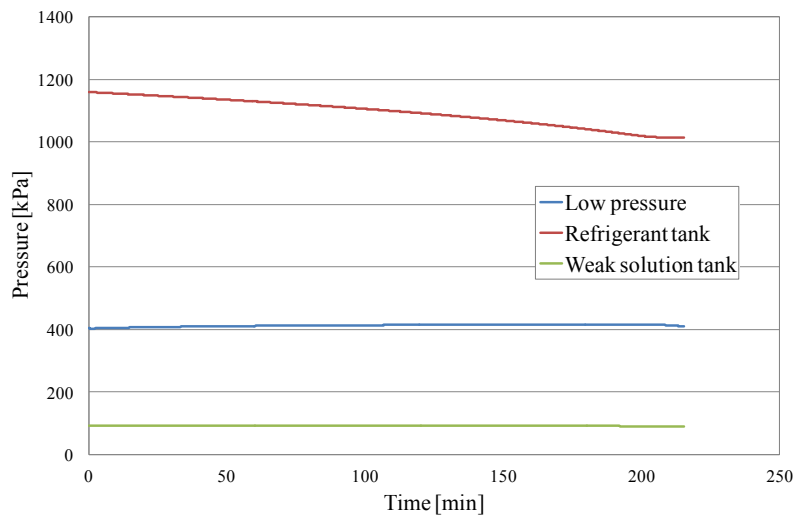


図3.3-9 冷媒タンクおよび溶液タンクの圧力 (放熱運転)

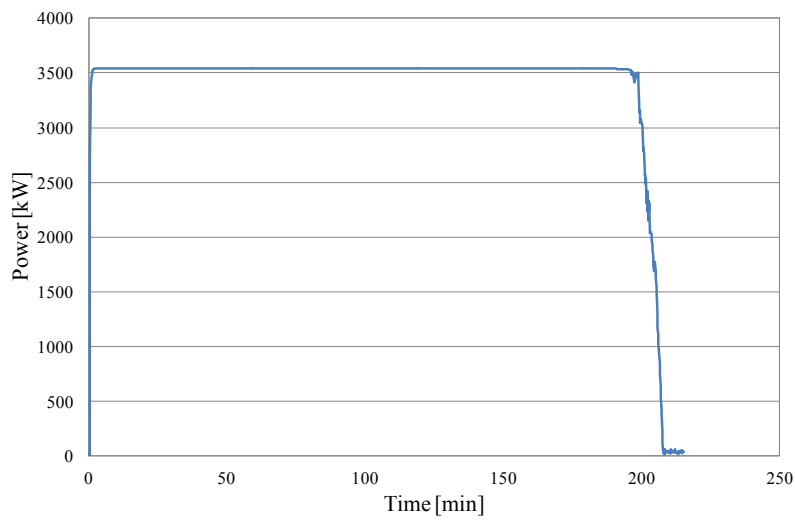


図3.3-10 冷凍出力 (放熱運転)

3.4 蓄熱・放熱実験

3.4.1 実験方法

(1) 実験装置構成

実験装置の構成図を図3.4-1に示す。実験装置は、アンモニア吸収冷凍機、内部溶液を貯蔵するための3つのタンク、冷水を加熱するための模擬負荷、実験装置と模擬負荷を制御するための制御盤、吸収冷凍機に電源を供給するためのエンジン発電機、変圧器、強溶液タンク加熱のための温水を作る給湯器から構成される。

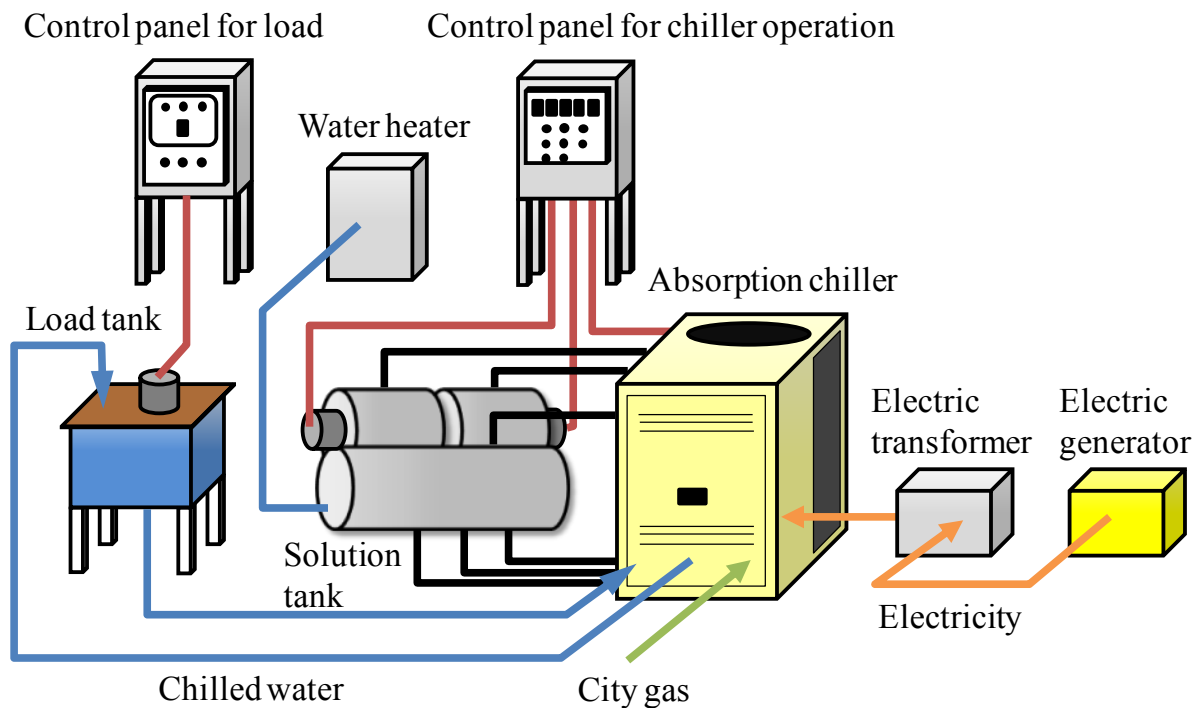
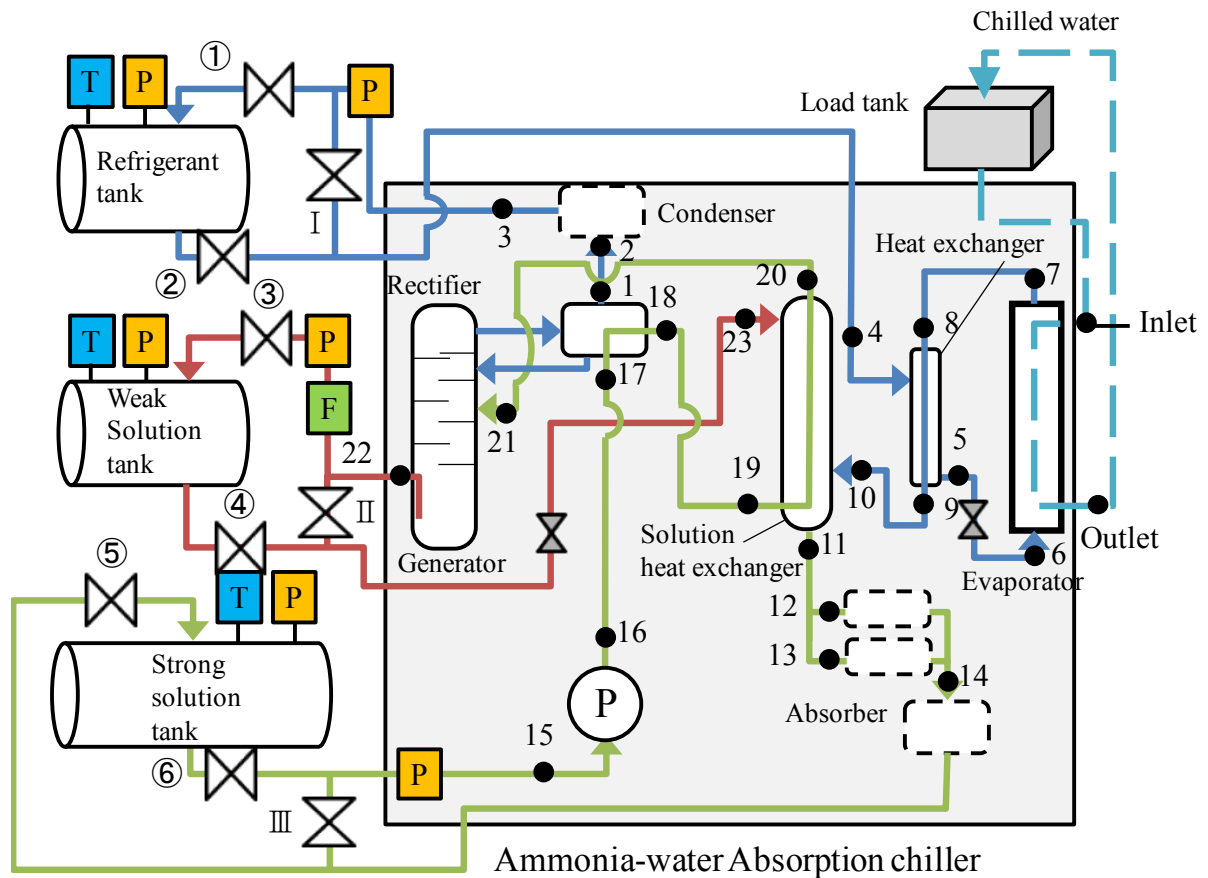


図3.4-1 実験装置の全体構成

(2) データ計測点

温度・圧力・流量は図3.4-2に示す位置にて測定した。温度の測定位置はそれぞれCH番号で示す。圧力は各タンクと、強溶液タンク-ポンプ間、発生器-弱溶液タンク間、凝縮器-冷媒タンク間で測定した。



- | | | | |
|--|-----------------|--|---------------------------------|
| | Refrigerant | | Air cooling |
| | Weak solution | | Capillary tube |
| | Strong solution | | Pressure gauge |
| | Chilled water | | Platinum resistance thermometer |
| | Thermometer | | Flow gauge |

図3.4-2 実験装置のデータ計測点

3.4.2 蓄熱実験

ここでは蓄熱運転の実験結果について、図3.4-3に運転中の3つのタンク内貯留量、図3.4-4にタンク内の圧力、図3.4-5にタンク内の温度、図3.4-6に冷媒および弱溶液温度、図3.4-7に蓄熱運転のアンモニア濃度を示す。溶液貯蔵した際にタンクは密閉空間となり溶液が飽和状態となるため、アンモニア濃度はタンク内の温度と圧力から算出した。

図3.4-3において、各タンクの貯留量が階段状に出力されているのは、液面計の仕様に起因する。蓄熱運転では強溶液タンクから出た溶液が、冷媒と弱溶液に分離され各々のタンクへ貯蔵されていることがわかる。よって、溶液貯蔵による蓄熱運転が実現されたことが示された。

図3.2-7は各タンクでの圧力と配管での圧力を示している。タンク圧力について、弱溶液タンクと強溶液タンクの圧力は運転中にあまり変化していない。それに対して冷媒タンク圧力

は運転が進むにつれて上昇していき、配管圧力と同じ値となることがわかった。圧力が同じ程度となった場合には、溶液が流れすいようにバルブ①を全開とした。

図3.4-5より、冷媒タンク温度は前述の理由により20°C程度で一定となっている。弱溶液タンク温度は、冷媒タンクから5分程度遅れて温度が上昇し、運転終了まで上がり続ける。図3.4-6より、冷媒であるCH1の温度は50°C、CH2の温度は40°C、CH3の温度は20°C前後で安定することがわかった。弱溶液であるCH22の温度は安定しているときで約80°Cである。

図3.4-7は、運転後の冷媒および溶液のアンモニア濃度を示している。これを見ると、冷媒のアンモニア濃度は98.9%であることがわかった。これより溶液貯蔵型吸収冷凍サイクルの蓄熱運転において、通常の吸収冷凍サイクルと同じ高い冷媒濃度を得られることが確認できた。

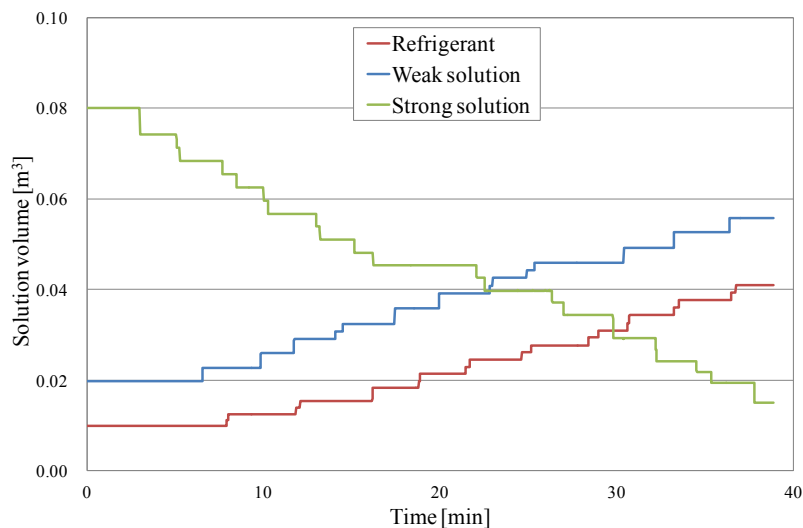


図3.4-3 タンク内の貯留量（蓄熱運転）

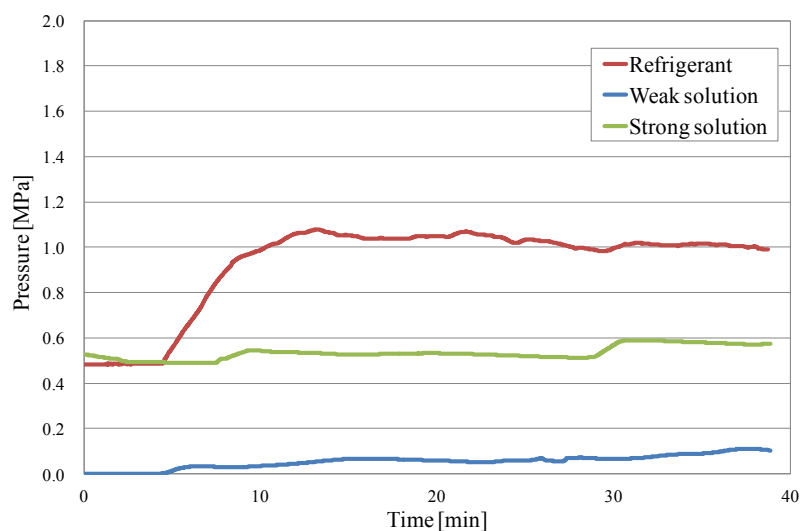


図3.4-4 タンクの圧力（蓄熱運転）

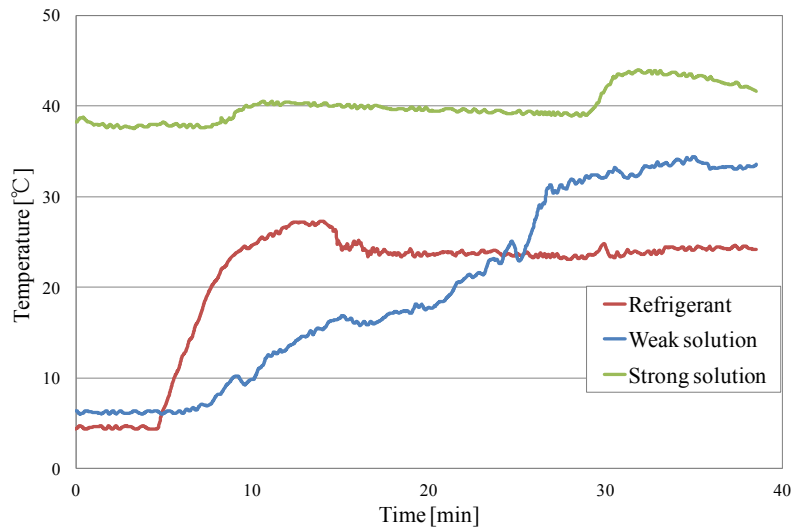


図3.4-5 タンク内の温度 (蓄熱運転)

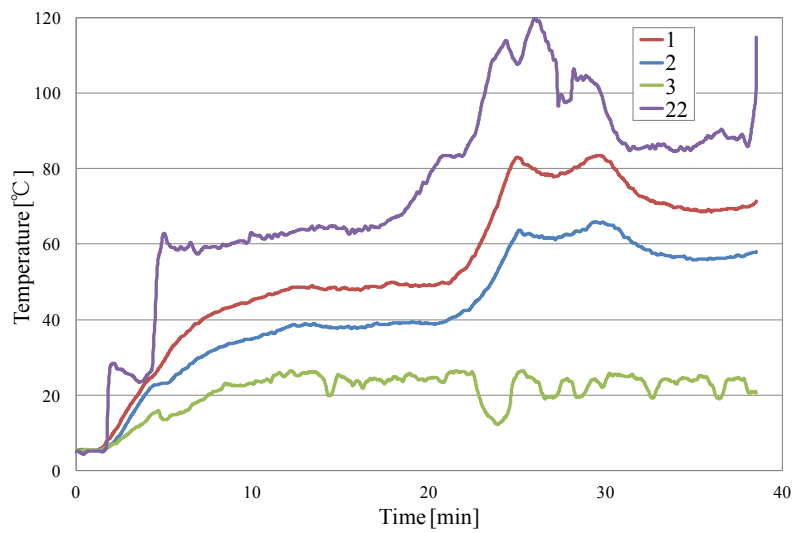


図3.4-6 冷媒 (CH1, 2, 3) および弱溶液 (CH22) の温度 (蓄熱運転)

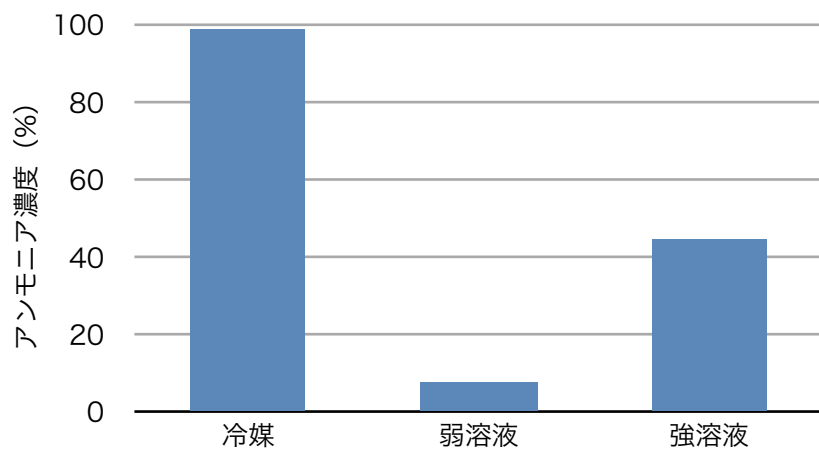


図3.4-7 蓄熱実験後の冷媒および溶液のアンモニア濃度

3.4.2 放熱実験

(1) 放熱時挙動の測定

放熱実験は11～1月に行い、外気温は2°C～7°C程度であった。放熱運転では冷媒タンクと弱溶液タンクのヒータを制御しタンク圧力を上昇させ、蒸発器に流し込む流量を変化させて実験を行った。放熱実験では蓄熱実験時と異なり、バルブ②、④、⑤は運転開始とともに全開とした。タンクから吸収冷凍機へ流れ込む冷媒と弱溶液の流量はキャピラリーでの圧損、つまりタンクと吸収冷凍機本体との圧力差で決まる。

本実験ではタンク圧力を変更することで流量を変化させた。冷媒タンクと弱溶液タンクの圧力はPID制御でヒータを調節した。また、模擬負荷タンクと吸収冷凍機間を循環している冷水の還り温度を制御した。吸収冷凍機に流れ込む冷水温度を15°Cと設定し、PID制御を行った。

図3.4-8より、冷媒液および弱溶液がほぼ一定の速度で吸収冷凍機本体に移送され、強溶液となってタンクに排出されている様子が見て取れる。

図3.4-9には冷水入口および出口の温度、図3.4-10には冷水温度差に基づいて算出された冷凍出力の時間変化を示す。グラフより25分程度の放熱が継続した。また、放熱工程が開始して2分程度で冷凍出力が上昇し、冷凍機の定格出力である17.7kWまで5分程度で到達している。この結果から、連続的に吸収冷凍サイクルを動作させるのではなく、蒸発器と吸収器のみを独立して動作させても定格出力を実現できることが確認できるとともに、放熱の動作は開始後すぐに立ち上がることが示された。

図3.4-11はタンク圧力を示す。強溶液タンクの圧力実験開始後は低く、徐々に圧力が上昇する。このとき、実験開始直後は相対的に冷媒・弱溶液タンクと強溶液タンクの圧力差が大きく、冷媒の流入量が多くなったと考えられる。そのため、定格出力を超える出力が一時的に発生したと考えられる。図3.4-12よりタンクの温度は一定に維持されている。

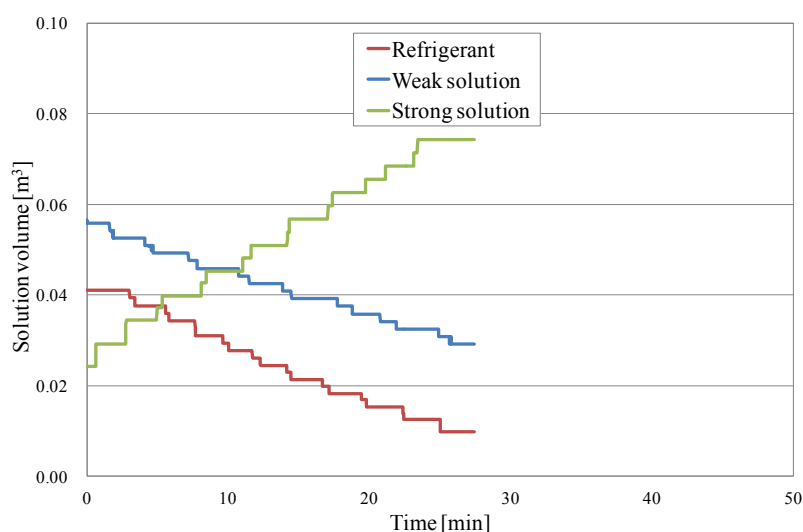


図3.4-8 タンク内の貯留量（放熱運転）

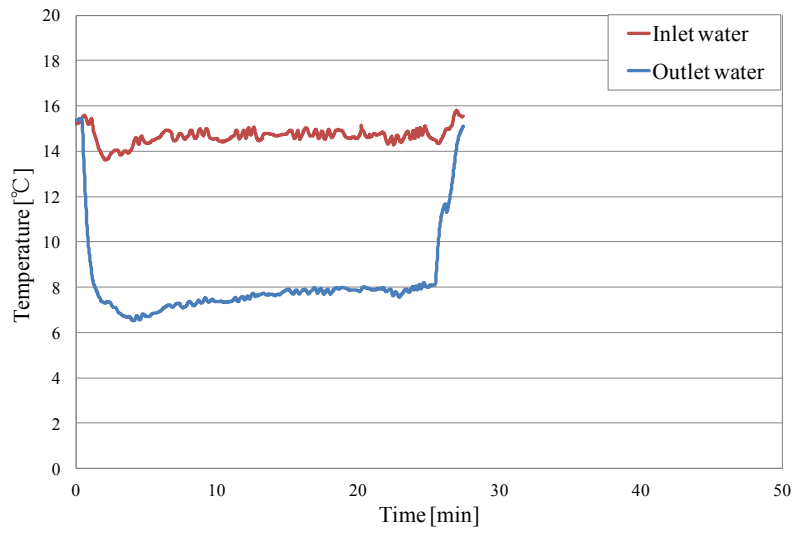


図3.4-9 冷水入口および出口温度（放熱運転）

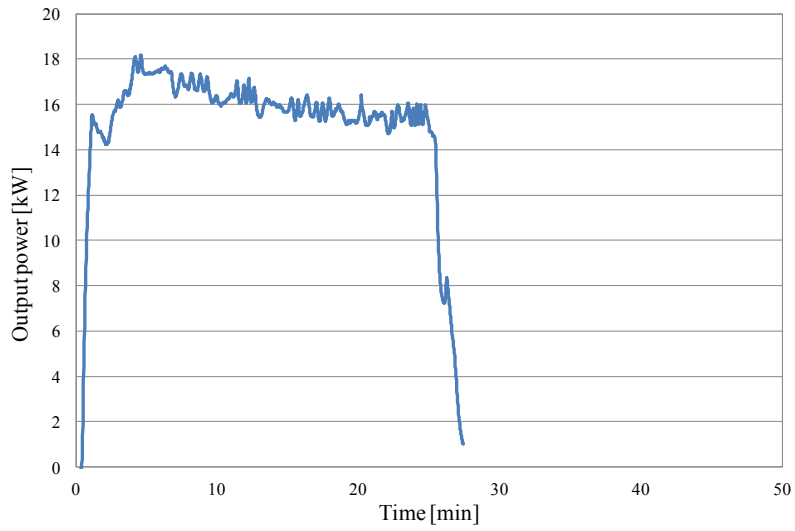


図3.4-10 放熱時の冷凍出力（放熱運転）

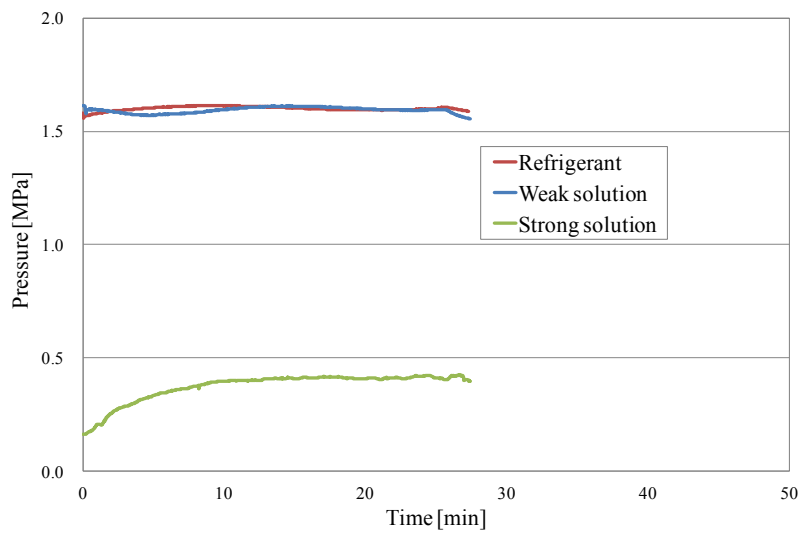


図3.4-11 タンク内の圧力（放熱運転）

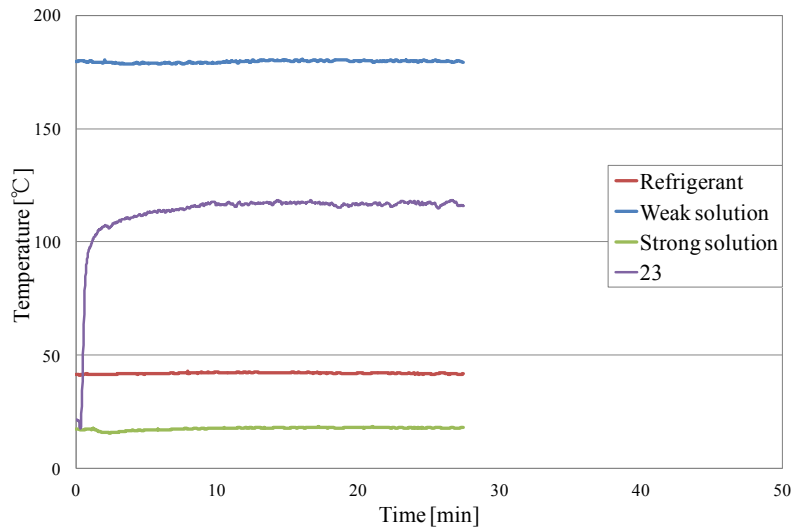


図3.4-12 タンク内の温度（放熱運転）

(2) 冷媒流量と冷凍出力の関係

冷媒タンク、弱溶液タンクの圧力を変化させて放熱実験を行った。図3.4-13に実験から得られたアンモニア冷媒流量と冷凍出力の関係を示す。流量はタンク内溶液量を線形近似して計算された傾きを平均流量として用いた。アンモニア流量は、冷媒流量に濃度をかけることによって算出した。これよりアンモニア流量が多い、すなわち蒸発器に流れ込むアンモニア量が多いほど出力は大きくなる。この結果より、流量をコントロールすることで放熱時の出力を制御できることがわかった。

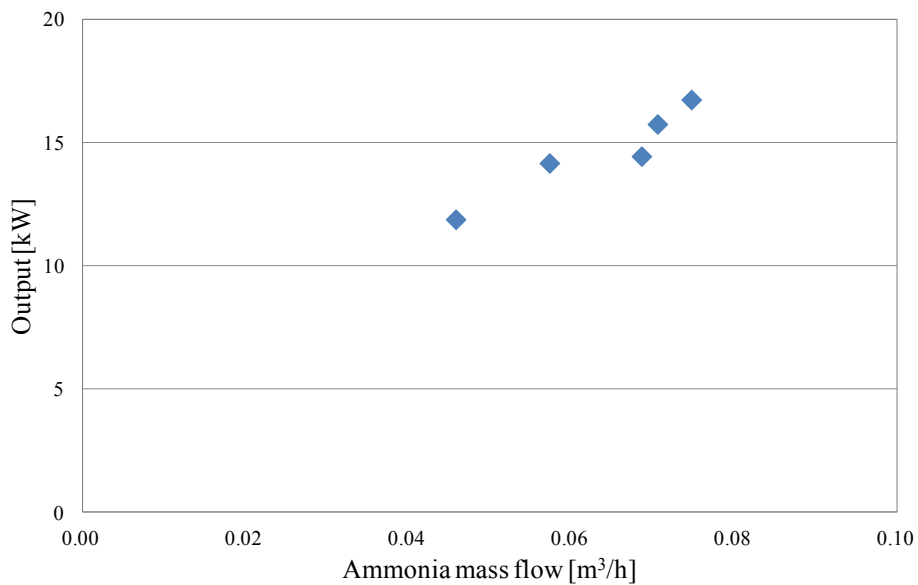


図3.4-13 アンモニア冷媒の流量と冷凍出力の関係

また、この特性は、放熱工程が伝熱律速ではなく、物質移動律速であることを示している
と解釈できる。従来の氷蓄熱では放熱は氷から冷水への伝熱性能によって律速されている。
それに対して、溶液貯蔵方式による蓄熱では物質移動によって律速されるため、従来の蓄熱
とはメカニズムが異なり、より速い動作が可能であることを示唆している。

(3) 起動時の冷熱出力の挙動

放熱運転と通常の冷凍機の起動から15分までの挙動の比較を図3.4-14に示す。放熱運転に
おける起動とは、冷媒タンクと弱溶液タンクバルブを全開にしたときである。これを見る
と通常の冷凍機では出力が上がるまでに15分以上かかるのに対し、溶液貯蔵方式では約2分
で14kWまで上昇し、安定するまでの所要時間は4分であった。すなわち、溶液貯蔵方式は
通常の冷凍機と比較して1/5程度の非常に短い時間で起動できることがわかった。このこと
から、タンクを設置した溶液貯蔵型吸収冷凍サイクルは、負荷の急激な変動にも対応できる
高速な負荷追従性を持つことが示された。

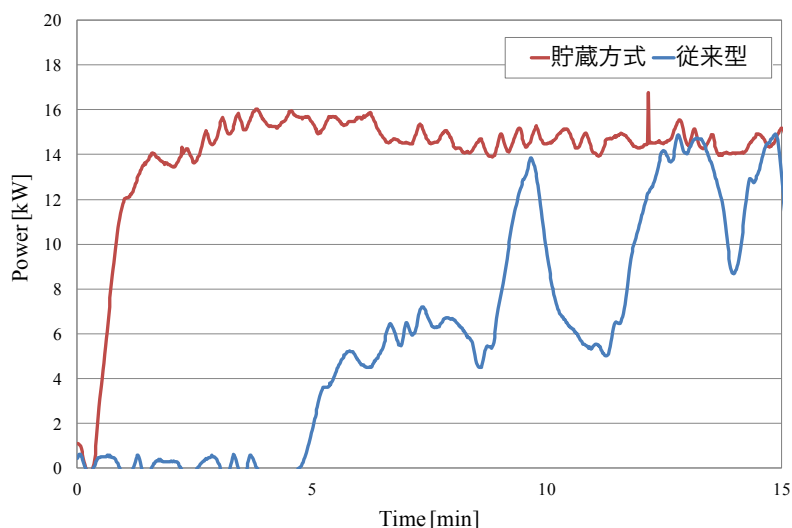


図3.4-14 起動時の従来型冷凍機の出力と溶液貯蔵方式の放熱出力の比較

3.5 溶液貯蔵による蓄熱のまとめ

3.5.1 シミュレーションによる蓄熱・放熱挙動の解析

溶液貯蔵方式の蓄熱・放熱挙動をシミュレーションによって解析した。その結果、放熱時
に冷凍出力は急速に立ち上がり、ほぼ一定の出力を保つように動作することを示した。

3.5.2 実験による蓄熱・放熱挙動の実測

実験機を用いて溶液貯蔵方式の蓄熱・放熱行程の動作を確認した。放熱時の冷凍出力はア
ンモニア流量に依存すること、放熱開始とともに出力が急速に立ち上がることを実証した。
本方式は従来の伝熱律速ではなく、物質移動律速であることが確かめられた。言い換えれば
冷媒流量の制御によって出力を調整することができる。

4. 提案技術のモデル分析による評価

4.1 モデル分析の基本的考え方

4.1.1 モデル分析の目的

本研究ではごみ焼却排熱を有効利用するため、熱輸送および蓄熱機能を溶液濃度差によって実現することを提案している。そこで、これらの技術が利用できることによる一次エネルギー削減効果を評価するために、ごみ焼却排熱利用システム全体をモデル化する。従来の技術と提案技術の競合性についてシミュレーションによって調べることを目的とする。

4.1.2 ごみ焼却排熱を利用した地域熱供給

提案するシステムの構成を図4.1-1に示す。ごみ焼却排熱はまずボイラで蒸気を発生して蒸気タービン発電によって電力変換される。さらに排出された蒸気が凝縮する際に放出する凝縮熱をSTAに投入し、遠隔地の熱需要に送る。ごみ焼却プロセスは24時間一定運転であるのに対し、熱需要は時間的に変動するため、冷媒貯蔵タンクと溶液貯蔵タンクを持つことによって蓄熱する。このとき、STAでは溶液貯蔵によって冷熱と温熱を同時に蓄熱できる点に従来の蓄熱技術とは大きく異なる特徴がある。

ごみ焼却排熱によって発生する蒸気の発電サイクルを図4.1-2に示す。通常のごみ発電では50°Cで凝縮させる際の凝縮熱は大気中に廃棄される。一方、ごみ発電から蒸気を取り出してSTAを駆動する場合には蒸気の凝縮熱をSTAが回収利用するため、ごみ焼却ボイラに入力された熱を全て活用できることになる。そのため、発電量はごみ発電単独よりも少なくなるが熱利用まで含めれば排熱から得られるエネルギーは大きく拡大できる特徴を持つ。

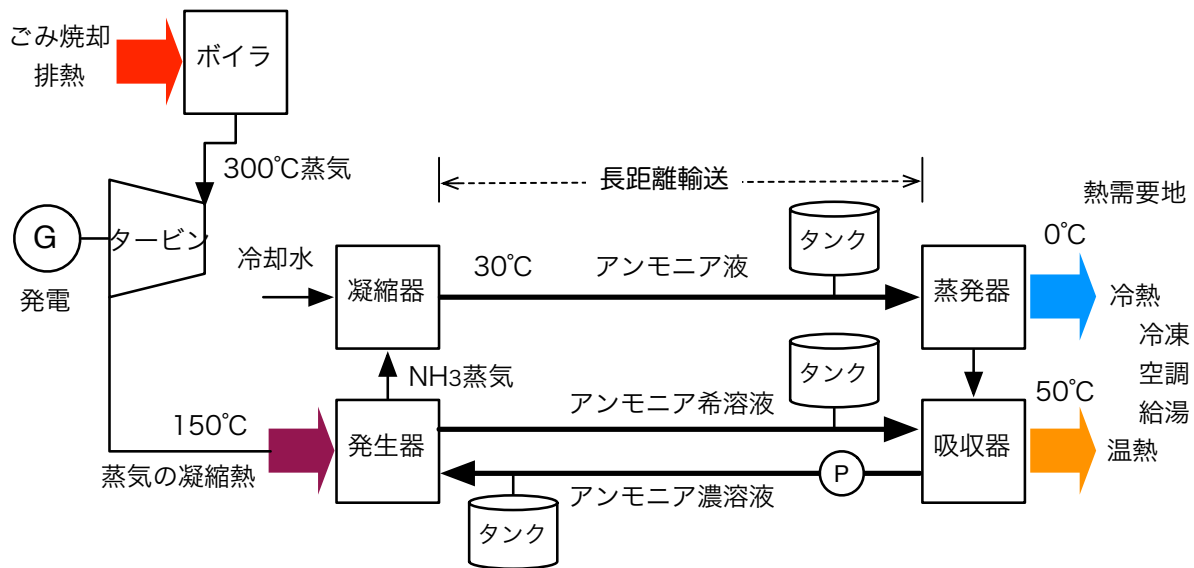


図4.1-1 ごみ焼却排熱の有効利用システム

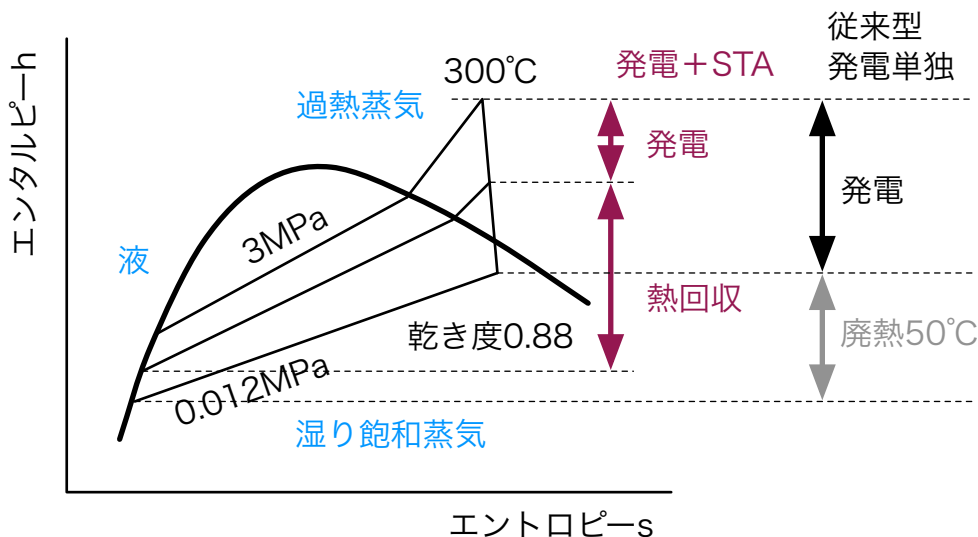


図4.1-2 ごみ焼却による蒸気発電のサイクル

4.1.3 システムのモデル化

提案技術の可能性を評価するため、図4.1-1に示したシステムに加えて従来型のシステムを同時に考慮し、システムコスト最小化の観点から技術選択を導くこととする。

(1) 従来システム

従来からごみ焼却排熱の利用は行われており、ごみ発電や地域熱供給の実例がある。本提案技術は冷熱供給機能を持つシステムであるので、一般的に使われている圧縮冷凍機（例えばターボ冷凍機）、吸収冷凍機が競合技術としてあげられる。その他、温熱供給のためのボイラ、ヒートポンプ等もシステムの一要素となる。供給するエネルギー形態によって従来技術を整理すれば次の通りまとめられる。

- (発電)
 - ・ごみ発電（発電単独）
 - ・電力系統からの買電
- (冷熱供給)
 - ・ターボ冷凍機
 - ・ブラインチラー（氷蓄熱用）
 - ・ガス焼き吸収冷凍機
 - ・蒸気焼き吸収冷凍機
 - ・氷蓄熱
- (温熱供給)
 - ・ガスボイラ
 - ・電力ヒートポンプ
 - ・ごみ焼却熱による蒸気輸送
- (輸送)
 - ・蒸気輸送

(2) 対象システムの構成

従来技術と提案技術を包含するシステムを図4.1-3に示す。上部に示されているのが本研究で提案する溶液熱輸送および蓄熱のシステムであり，下部が競合する従来システムを表している。なお，溶液貯蔵の蓄熱機能では，放熱時に冷熱と温熱の出力を同時に得ることができる。この点は従来の水蓄熱にはない機能である。

STAが導入される場合には溶液輸送配管が設置されることになる。従来技術の蒸気輸送が導入される場合には蒸気輸送配管が設置される。電力輸送については電力ネットワークは既に存在していることから，設置コストを見込まず，必要に応じて利用できるものとする。

最終的に実現されるシステム構成は，この中から経済的に有効性があると評価された技術が選択される。その選択は最適化シミュレーションの結果として得る。

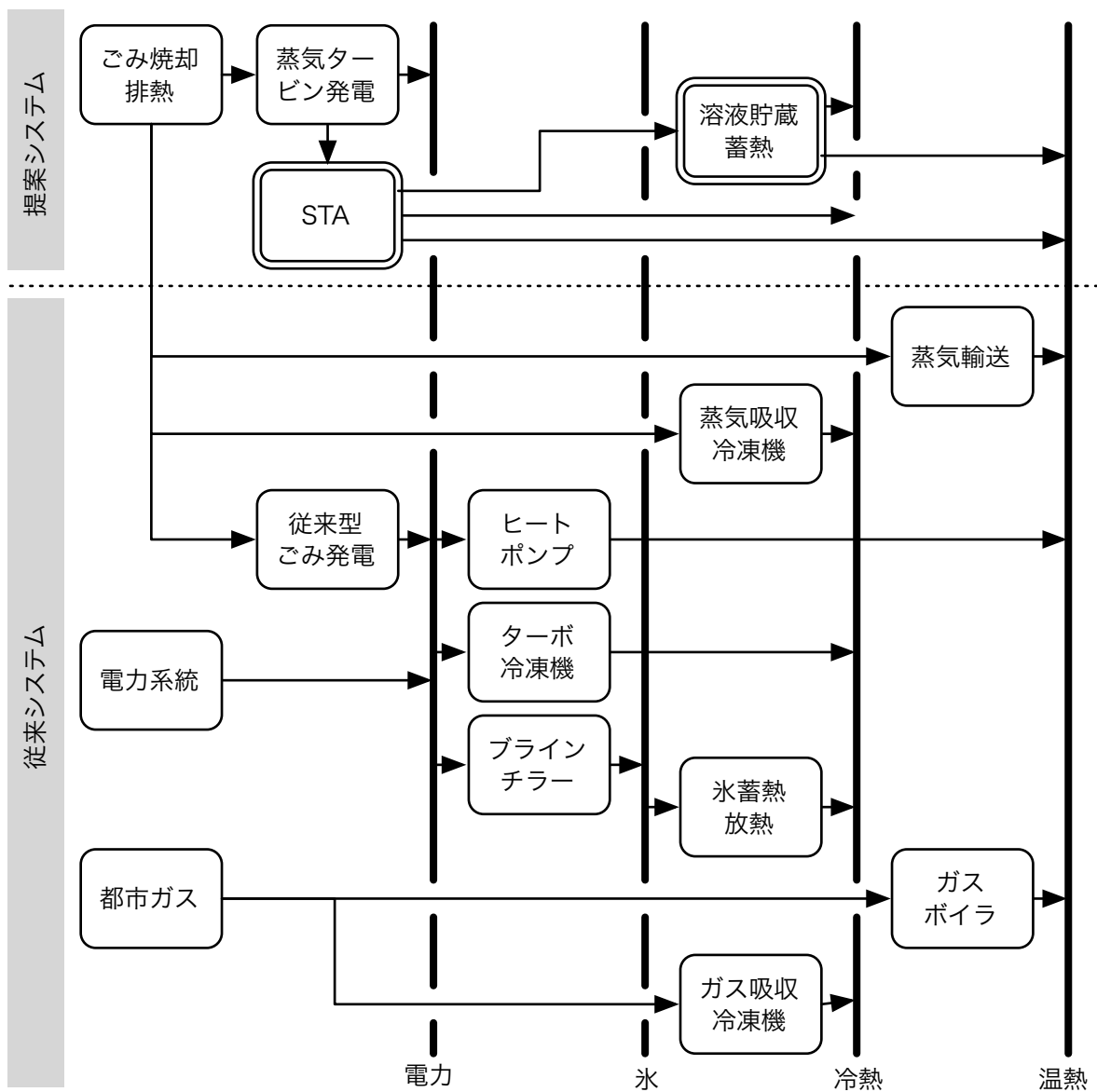


図4.1-3 対象システムの技術構成

4.2 最適化モデルの定式化

4.2.1 変数および記号定義

モデル内の技術はそれぞれ設備容量と、時間帯ごとの出力を変数によって表現される。

X : 出力 (月ごと, 時間帯ごと)

K : 設備容量

輸送配管 (STA配管または蒸気配管) はある／なしの2状態しかない。そこで, 設置の有無を表すバイナリ変数 δ を用いて表現する。

δ : 輸送配管の有無を表すバイナリ変数 (1または0をとる)

各技術はあるエネルギー種別を出力する。なお, STAの場合には複数のエネルギー種別 (冷熱と温熱) を同時に出力する。この関係を表すパラメータを導入する。

$CONV$: 技術のエネルギー変換を表すパラメータ

負荷を表す変数は次の通り。

D : 負荷 (種別ごと)

添字は技術や負荷の区別および月, 時間の区別を表す。本モデルでは一年間の解析を行うため, 年間を12ヶ月, 一日を24時間帯に区分した。

I : 技術の添字

J : 負荷種別の添字 (電力, 温熱, 冷熱, 氷蓄熱)

M : 月の添字 (1月~12月)

T : 時間帯の添字 (1時~24時)

4.2.2 目的関数

最適化の目的関数は経済性の観点からシステムコストの最小化とした。具体的には次の項目から構成される。

- ① 設備コスト (1年分に換算したもの)
- ② 燃料コスト (買電コストおよびガス燃料)
- ③ 輸送配管コスト
- ④ CO₂ペナルティコスト

4.2.3 制約条件

制約条件としては以下の通りモデルに考慮した。

(1) エネルギー需給バランス制約

それぞれの時間帯における技術の出力の正味の総和は負荷以上となる。出力とは電力, 冷熱, 温熱である。

$$\sum_I CONV(I, J) X(I, T, M) \geq D(J, T, M)$$

(2) 設備容量制約

設備容量は年間の最大ピークを賄えるように決まる。各時間帯における出力は設備容量以下となる。

$$X(I, T, M) \leq K(I)$$

(3) 輸送配管設置制約

輸送配管（STA配管または蒸気配管）の設置状態は変数 δ を用いて表現される。 $\delta=1$ であれば輸送配管が設置されており、STAまたは蒸気の輸送が可能となる。 $\delta=0$ であれば輸送配管は持たず、従来の燃料を使用する技術のみでエネルギー供給がなされる。

$$X(I, T, M) \leq A \delta(I)$$

ただし、 A は十分に大きな値。ここでの I は熱輸送技術を示す。

(4) 蓄熱制約

蓄熱（STA溶液または氷蓄熱）は正味のエネルギー入力が増分となる。一日の終了時点の蓄熱量は一日の開始時点の蓄熱量に一致する条件を与えた。

4.3 入力データの設定

(1) 地域冷暖房負荷データ

温熱・冷熱負荷は大型地域冷暖房の実際のデータから月別の代表日のデータを与えた。また、設備規模はピーク負荷で定まるため、温熱と冷熱の負荷がそれぞれ最大となるピーク日を与えた。図4.3-1に年間の地域熱供給の負荷データを示す。ホテルが立地しているため夏期でも温熱負荷がある一方、事務所などでは冬期でも冷熱負荷がある。ピーク日の負荷の状況を図4.3-2に示した。

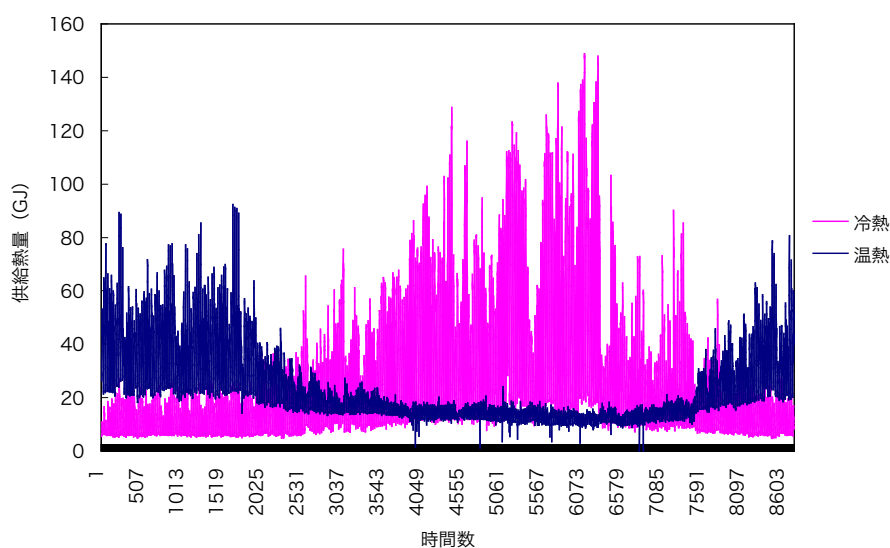
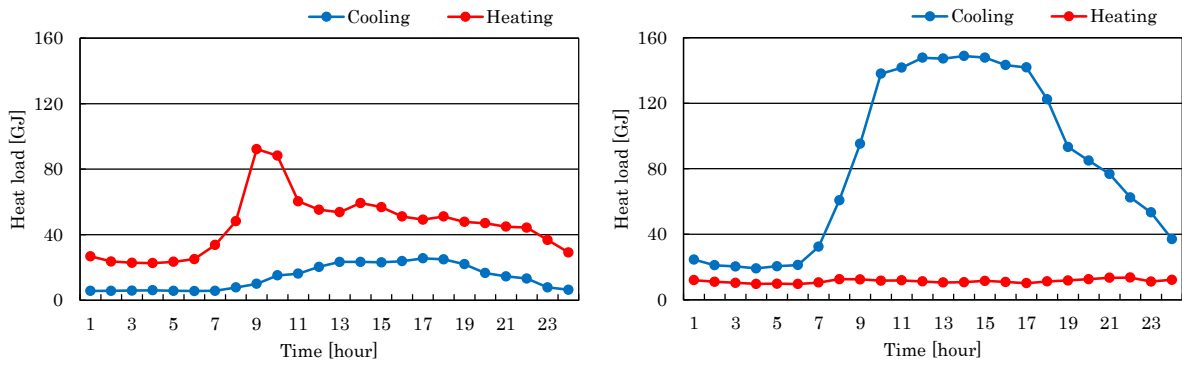


図4.3-1 地域熱供給の温熱・冷熱負荷



(a) 温熱ピーク日

(b) 冷熱ピーク日

図4.3-2 ピーク日における負荷

(2) ごみ焼却施設の電力負荷

電力の最終消費についてはごみ焼却施設における電力負荷のみを考慮し、地域冷暖房施設の最終消費は含めない。従来のごみ焼却施設においてはごみ発電によって得た電力は施設内の設備が消費する電力に供給されている。ごみ処理施設の電力負荷は、東京都港清掃工場の実績を参考に、蒸気117MWを用いて発電した電力出力26.6MWを与える。ごみ処理施設は24時間稼働しているの、26.6MWの電力を常時消費しているとした。

(3) 技術的性能

エネルギー変換の効率を表4.3-1に示す。なお、冷凍機のCOPは冷却水温度によって変化する。本解析では月ごとの計算を行うが、外気温が下がれば冷却水温度が低下し、COPは上昇する傾向を示す。そこで、気温と相対湿度を考慮して月ごとの冷却水温度を算出し、COPの年間変動を考慮した。図4.3-3に冷却水温度に対する各種冷凍機のCOPを示す。

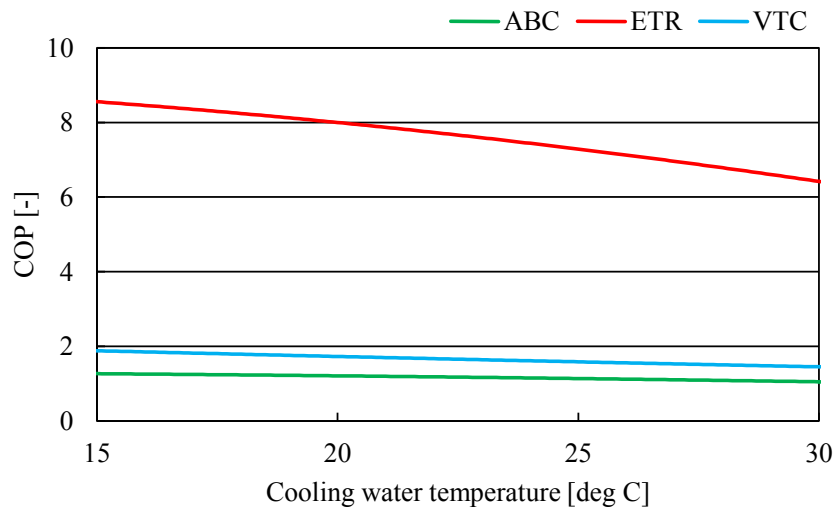


図4.3-3 冷却水温度が冷凍機COPに与える影響

STAは吸収冷凍サイクルであるため溶液貯蔵による蓄熱性能は外気温の影響を受ける。図4.3-4のグラフに示す通り、外気温が低下するにつれて体積あたりの蓄熱密度は上昇する。氷蓄熱の場合にはIPFを常に0.5と想定した。

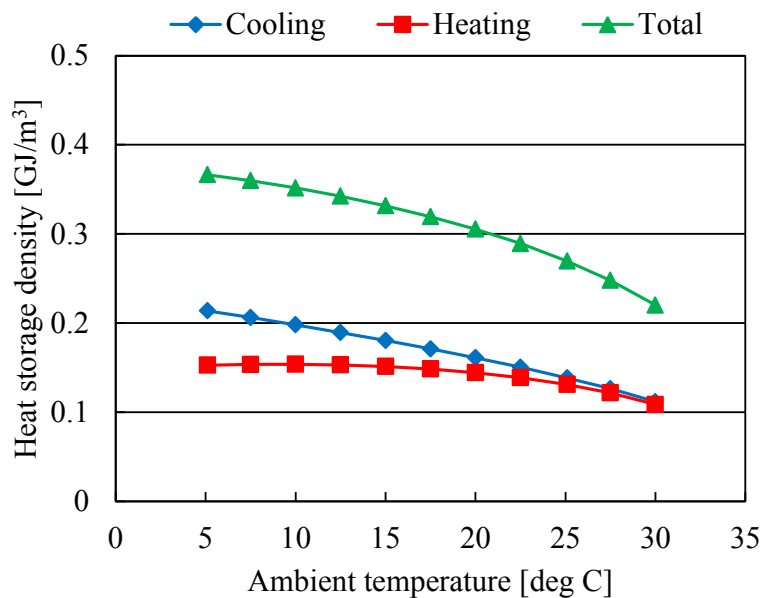


図4.3-4 STAの溶液貯蔵による蓄熱密度

表4.3-1 エネルギー変換効率

技術	記号	変換効率	備考
ごみ発電 (通常型)	RP1	23%	
ごみ発電 (STA接続)	RP2	14%	125°C蒸気を取り出す場合
ガスボイラ	GBO	80%	
電気ヒートポンプ	EHP	COP=3	
ターボ冷凍機	ETR	COP=6	
ブライン冷凍機	BCH	COP=2	
ガス焚き吸収冷凍機	ABC	COP=1.4	
蒸気焚き吸収冷凍機	VTC	COP=1.4	蒸気輸送効率を乗じてCOP=1.17
蒸気輸送	VTH	80%	
STA	STP	冷熱COP=0.67 温熱COP=0.65	

(4) 熱輸送距離

既存文献より、ごみ焼却施設と都市部との距離の分布は3kmをピークとし、距離が長くなるにつれて減少する傾向がある。6kmまで取ると大部分の施設が包含されることが報告されている。そこで、本解析では熱輸送距離を3kmと想定する。

(5) コストパラメータ

各技術の設備コストを表4.3-2に示す。STAのコストは技術士事務所による推計結果を採用した。配管については既存文献からデータを取った。STA溶液貯蔵タンクは単純なタンクであるが、氷蓄熱は内部に熱交換用の配管を有している。そのためSTAのタンクの方がコストが小さいと予想されるが、ここでは同一と仮定した。

機器および蓄熱設備については耐用年数を15年、輸送配管は30年とし、一年あたりの固定費を算出した。

表4.3-2 設備コスト

区分	技術	記号	コスト	備考
機器	ガスボイラ	GBO	7,000 円/kW	
	電気ヒートポンプ	EHP	43,000 円/kW	
	ターボ冷凍機	ETR	40,000 円/kW	
	ブライン冷凍機	BCH	37,000 円/kW	
	ガス焼き吸収冷凍機	ABC	20,000 円/kW	
	蒸気焼き吸収冷凍機	VTC	45,000 円/kW	蒸気輸送を含む
	蒸気輸送	VTH	1,000 円/kW	配管以外の分
	STA	STP	58,800 円/kW	配管以外の分
配管	蒸気輸送		1,395,000 千円/km	
	STA溶液輸送		868,000 千円/km	
蓄熱	氷蓄熱		200,000 円/m ³	
	STA溶液貯蔵タンク		200,000 円/m ³	

(5) CO₂排出ペナルティ

ごみ焼却排熱を有効利用できれば従来の燃料消費を代替することになる。STAや排熱蒸気

4.4.2 溶液タンクを持つSTAケース

蓄熱機能を持つSTAの場合における最適化結果を図4.4-2に示す。夏期の冷熱供給ではSTAがベース運転され、夜間に貯蔵した溶液によるSTA出力が昼間の一部を賄っている。不足する分はガス焼き吸収冷凍機が供給している。蓄熱放出時には冷熱と同時に温熱も供給している様子が見て取れる。冬期の温熱供給ではSTAがベース運転され、蓄熱分が負荷の一部をカバーする。ピークの不足分はボイラが補う。なお、電気ヒートポンプがわずかに常時運転されている。

この結果から、STAが優先的に選択され、ごみ焼却排熱を長距離輸送して有効利用することは優位性を持つことが示された。また、溶液貯蔵による蓄熱機能により、夜間の排熱を昼間に利用することも総合的なコストの観点からみて有効であることも示された。

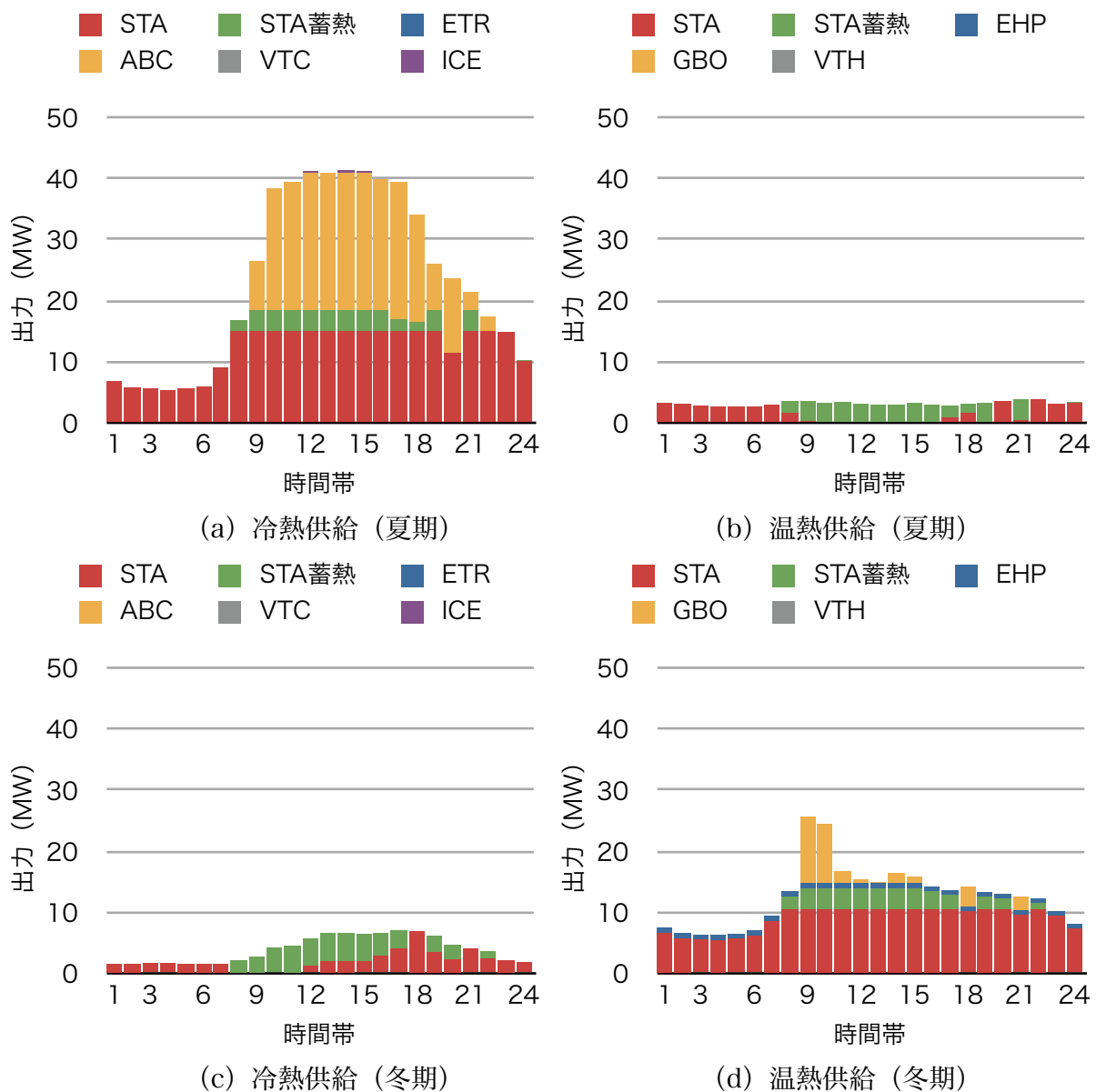


図4.4-2 STAシステムにおける供給

一次エネルギー消費量についてSTAの効果を見ると、従来型システムに比べて48%の削減になっており、STAによるごみ焼却排熱利用の有効性は極めて大きいと期待される。

4.4.3 パラメータ感度分析

モデルの挙動は入力したパラメータに依存する。そのため、不確実性があると予想される①STAのコスト、②輸送距離、③配管建設コスト、④ガス燃料価格の4点について感度分析によってパラメータの影響度合いを解析した。

(1) STAプラントコストの影響

STAのプラントコストが想定よりも高くなる場合を考える。1.0倍から2.25倍まで、0.25倍刻みでコストを与えて最適化を行った。図4.4-3は各コスト想定に対する年間エネルギー供給量の構成比を示す。この結果は、STAコストが2倍まで許容されることを示唆している。また、1.5倍～2.0倍の間はあまりSTAの比率は下がらない。ガス焚き吸収冷凍機の比率は一定であり、STAを代替するのは、冷熱ではターボ冷凍機であり、温熱では電気ヒートポンプである。

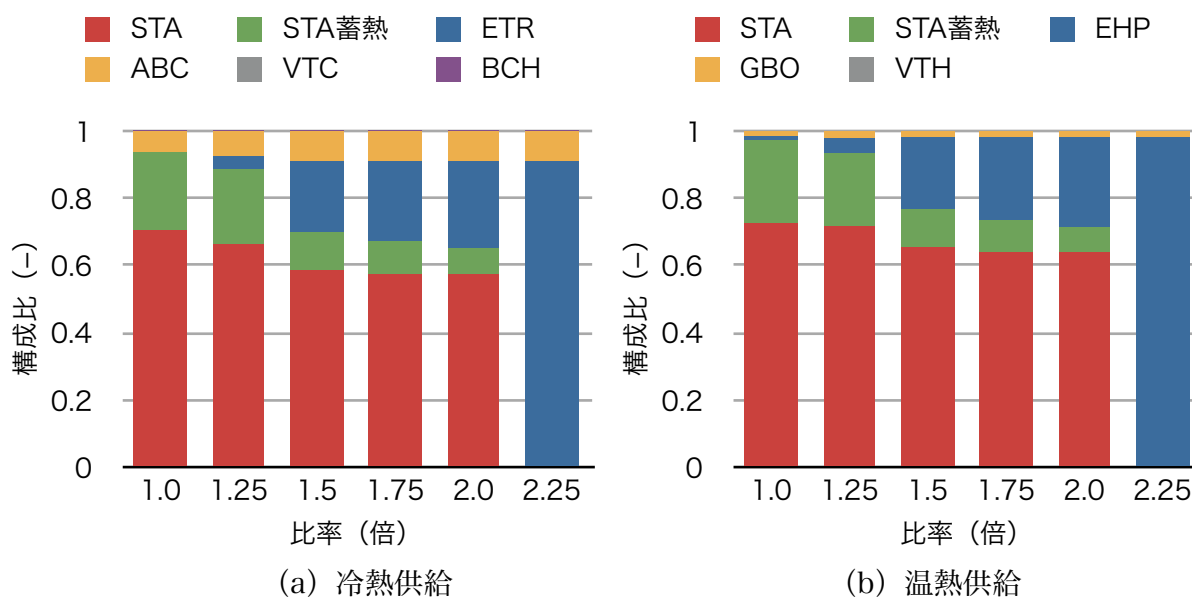


図4.4-3 STAプラントコストが及ぼす影響

(2) 輸送距離の影響

熱輸送距離を1km～5kmの範囲で変化させて最適化を行った結果を図4.4-4に示す。STAのコストは標準想定とした。この結果、4kmまでの輸送ではSTAが選択されたが、5kmでは従来型システムが選択された。輸送配管の建設コスト（地下埋設）は高いため、輸送距離としては4kmが限界と予想される。排熱輸送を広域で実現するためには輸送配管の建設コストの低減が課題と考えられる。

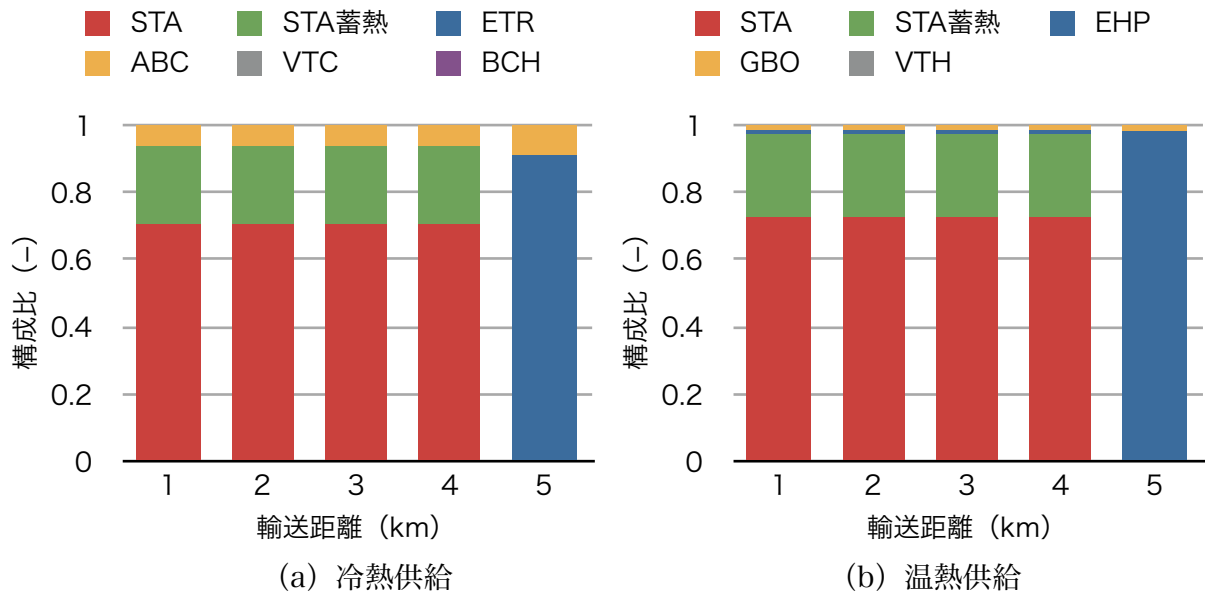


図4.4-4 熱輸送距離が及ぼす影響

(3) 配管建設コスト

輸送配管を地下埋設ではなく地上設置とすると建設コストが低下する。地上設置の建設コストを表4.4-1に示す。地上に配管を設置できれば配管建設コストは半分以下となるため、排熱利用の競争力が高まると予想される。

表4.4-1 配管建設コスト

方式	単位	地下埋設	地上設置	比率
STA溶液輸送配管	百万円/km	868	384	0.44
蒸気輸送配管	百万円/km	1395	494	0.35

STAのプラントコストを標準ケースと2倍に見込んだケースについて最適解を導いた。その結果を図4.4-5に示す。なお、冷熱供給の構成比のみを示した。この結果より、STAコストが標準で地上設置の場合には12kmまでの熱輸送が可能となる。地下埋設に比べて輸送距離は3倍に増加する。一方、STAコストが2倍のケースでは、地上設置によって6kmまで輸送距離が伸びる。

文献によれば、ごみ焼却施設と都市部との距離が6km以内の施設のごみ処理量は全体の約8割に昇る。配管建設コストを低減できる設置方式を開発できれば、大多数のごみ焼却排熱を有効利用が可能となることが示唆される。

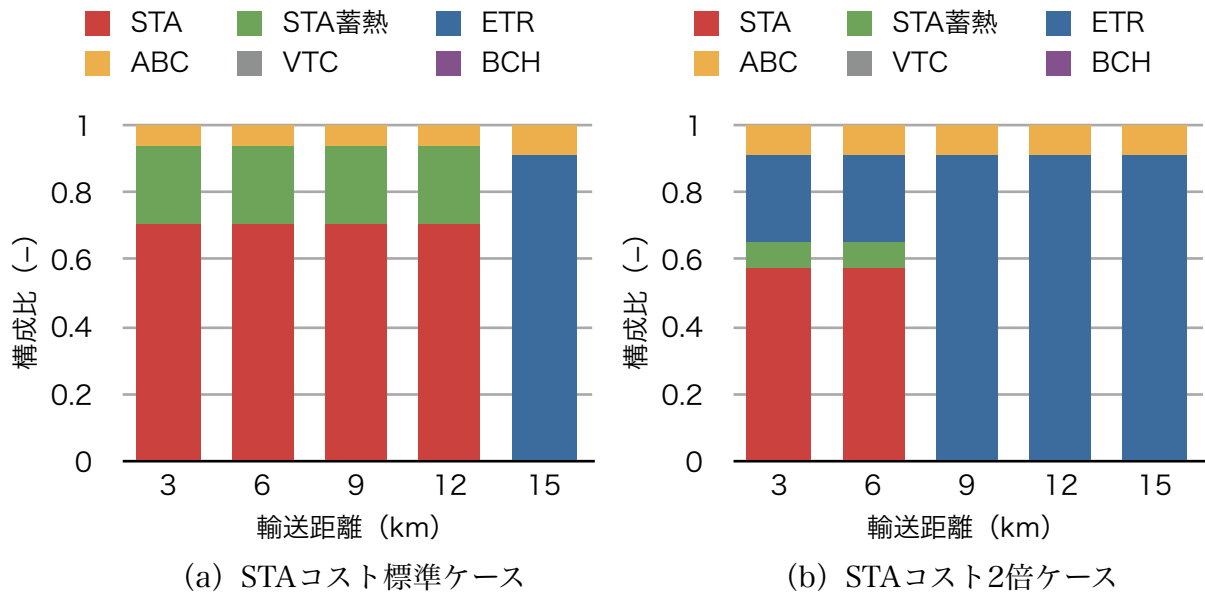


図4.4-5 配管地上設置の場合の冷熱供給

(4) ガス燃料価格の影響

都市ガスの価格が変化した場合に技術構成が受ける影響を解析した結果を図4.4-6に示した。現状よりもガス価格が上昇する場合には、ガス焚き吸収冷凍機が賄っていた部分をターボ冷凍機が置き換える。一方、ガス価格が低下すると吸収冷凍機の比率が高まり、その分STAの比率が低減する傾向が見て取れる。温熱供給においても、ガス価格が低下するとボイラの比率が高まる。このとき、STAの蓄熱出力の部分が代替されるが、STAが直接出力する分はほぼ一定であり、ボイラには置き換わらない。温熱供給においてSTAによるごみ焼却排熱利用は優位性を持っているといえる。

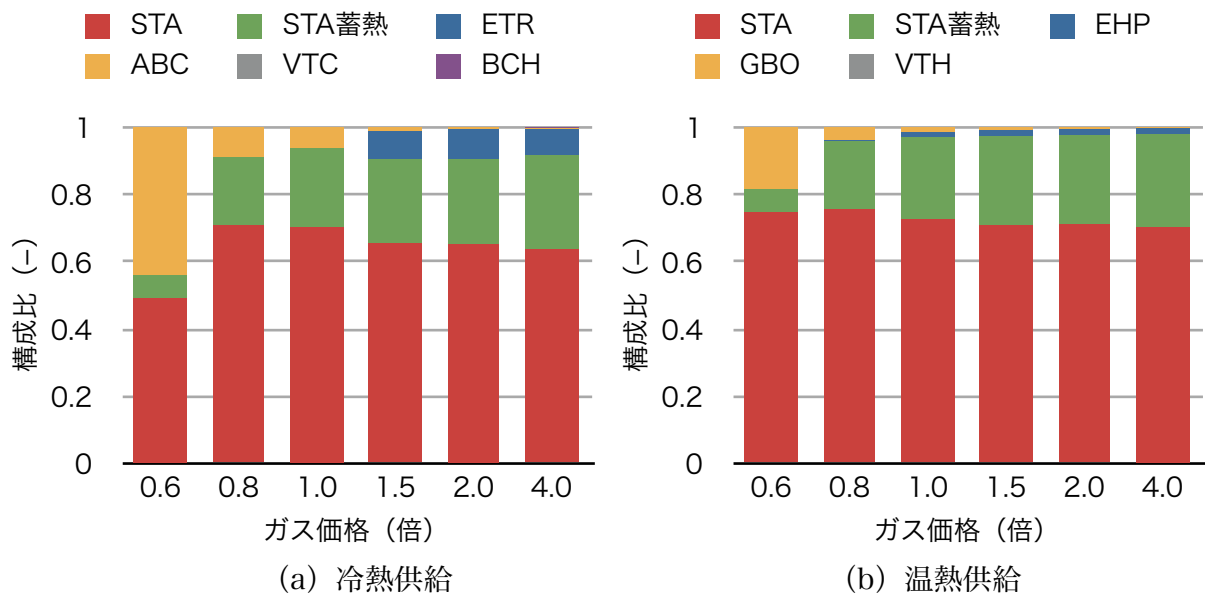


図4.4-6 ガス料金が及ぼす影響

4.5 提案技術評価のまとめ

本研究で提案した溶液貯蔵機能を持つSTAをごみ焼却排熱利用に用い、ごみ焼却施設から離れた地域熱供給施設に供給するシステムを最適化型モデルに表現し、システムコスト最小化に基づいて望ましい技術選択について解析した。その結果、提案したSTAに関して次の知見が得られた。

- ・ STAによる排熱利用は従来型システムの技術に比べて優位性があり、冷熱供給・温熱供給ともに供給量の大部分を担う。STAはベース運転され、不足する冷熱はガス焚き吸収冷凍機で、温熱はボイラで賄われる。STA導入により一次エネルギー消費量は半減する。
- ・ STAのプラントコストには不確実性があるが、本研究で想定したコストの2倍であっても選択され、STAが冷熱・温熱供給の6～7割を占める。それよりもコストが高い場合には優位性が失われる。
- ・ 配管が地下埋設の場合、熱輸送距離としては4kmまでSTAが有効である。ただし、配管が地上設置される場合には、優位性を持つ輸送距離は12kmまで伸びる。STAのプラントコストが2倍の場合でも輸送距離は6kmまで伸びる。
- ・ 競合する燃料である都市ガス価格が低下するとガス焚き吸収冷凍機やボイラの比率が高まるが、STAの比率は大きく低下することはない。ガス価格が0.6倍でも冷熱供給の約6割、温熱供給の約7割をSTAが賄う。

以上より、提案したSTAはごみ焼却排熱利用において経済的な競合性を有することが期待できるとともに、一次エネルギー消費量は半分程度に削減できることが示された。ごみ焼却排熱利用を拡大するには輸送配管の建設コストの影響が大きく、建設コストを抑制する配管敷設技術の開発が重要な課題である。

5. 研究成果のまとめ

5.1 熱輸送のまとめ

溶液輸送方式による50mの熱輸送を実現し、性能を実測した。その結果、熱輸送時の冷凍能力およびCOPは熱輸送を伴わない通常型の吸収冷凍機の性能と同等であることが確認できた。このことから新たに熱輸送機能を付加しても定常状態における吸収冷凍サイクルの性能は劣化しないと認められた。

一方、起動時の非定常状態における挙動を実測した結果、通常の吸収冷凍機よりも安定状態に移行するのに長時間を要することがわかった。これは溶液を輸送するために時間遅れがあることに起因する。

また、動的シミュレーションによって負荷変動が生じると溶液濃度が変化し、そのために凝縮器と吸収器の液面高さに大きな変動が誘起されることが判明した。このことから液溜め容積の設計に注意が必要であるとの知見を得た。

5.2 蓄熱のまとめ

溶液貯蔵による蓄熱方式の能力を実験的に検証した。蓄熱工程として、実際にアンモニア強溶液を発生器に投入して分離したアンモニア冷媒液とアンモニア弱溶液を準備した。次いで冷媒液と弱溶液をそれぞれ蒸発器および吸収器に投入し、発生器を運転することなく、放熱工程として冷熱を約25分間発生できることを確認した。放熱工程では実験機であるアンモニア吸収冷凍機の定格出力をほぼ達成し、蓄熱・放熱によって元々の冷凍機と同等の性能を出せることを実証した。

また、放熱時の冷凍出力がアンモニア冷媒の移動量に依存することを実験的に確かめられた。このことは提案する蓄熱方式が伝熱律速ではなく、物質移動律速であることを示している。すなわち、従来の氷蓄熱のように伝熱性能に規定されることなく、応答が速い放熱が可能となることを意味する。実際に冷媒・溶液を投入して2分程度で出力が定格付近まで上昇した。

5.3 最適化モデル分析のまとめ

提案する溶液貯蔵を伴う溶液輸送方式により、ごみ発電の排熱を輸送して地域熱供給システムに用いる形態をモデル化し、システムコスト最小化に基づく技術選択を解析した。その結果、提案方式は配管建設費を考慮しても従来型システムよりも優位性を持っており、冷熱と温熱供給の9割以上を担うことが示された。その結果として排熱有効利用によって一次エネルギー消費が半減すると期待される。ただし、配管を地下埋設する場合には4km、地上設置する場合には12kmまで提案方式による熱輸送が優位である。したがって、熱輸送に必要な配管建設コストの低減が課題であることが示された。

6. その他

6.1 研究発表

- (1) 秋澤 淳, 富田 達, 上田祐樹, 武居俊孝, 溶液輸送型吸着冷凍機による50m熱輸送実験および動的シミュレーション解析, 第22回環境工学総合シンポジウム, 2012年7月4日~6日, 仙台, pp.335-338.
- (2) 渡辺 史, 秋澤 淳, 上田祐樹, 荒木和路, 武居俊孝, 溶液輸送型吸収冷凍機による50m熱輸送時の動的挙動, 2012年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, 2012年9月12日~14日, 札幌, pp.211-214.
- (3) 平山 薫, 上田祐樹, 秋澤 淳, 荒木和路, 武居俊孝, アンモニア-水系吸収冷凍サイクルに基づく溶液貯蔵による蓄熱, 2012年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, 2012年9月12日~14日, 札幌, pp.207-210.

6.2 知的財産権の取得状況

特になし

ごみ焼却排熱有効利用に向けた常温熱輸送・常温蓄熱の実験的評価

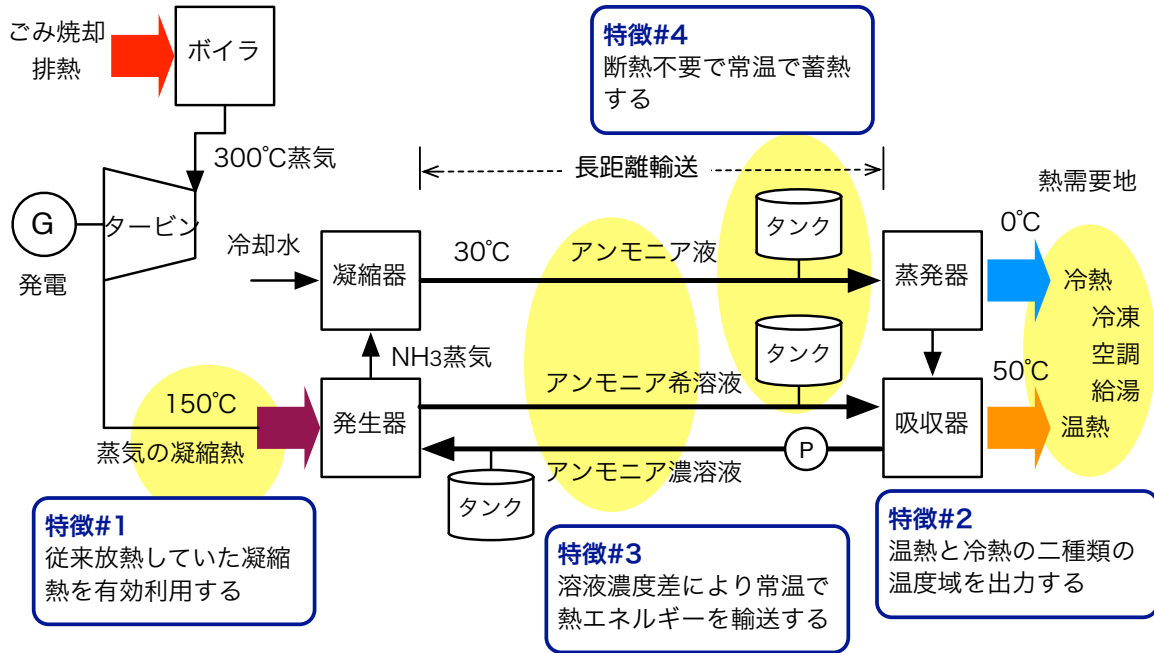
研究代表者：秋澤 淳（東京農工大学）

研究目的

- ・ごみ焼却排熱を有効利用するために溶液濃度差による熱輸送・蓄熱機能を実証する
- ・ごみ発電排熱を回収し熱供給に利用するシステムに応用し、技術評価を行う。また、一次燃料消費削減効果を定量的に評価する

研究背景

- ・地球温暖化抑制のため化石燃料消費の大幅削減が必要
- ・廃棄物のエネルギー的な有効利用により、社会的循環を実現する

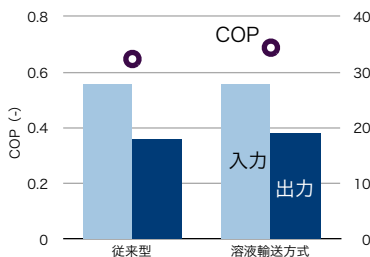


熱輸送・蓄熱機能によりごみ焼却排熱の利用を高度化するシステム

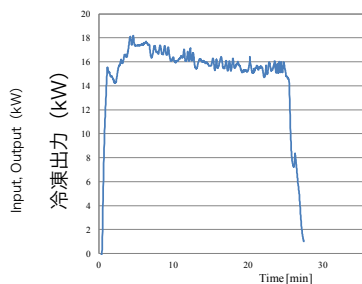
研究の方法

- ①50mの溶液輸送配管を吸収冷凍機に接続し、熱輸送を伴う冷凍機の性能方式を試験する
- ②冷媒および溶液を貯蔵するタンクを吸収冷凍機に付加し、蓄熱・放熱運転を試験する
- ③ごみ発電排熱を回収し地域熱供給に輸送するシステムを最適化型モデルに表現し、コストを最小化する解を導出し、輸送距離等の感度分析を行う。

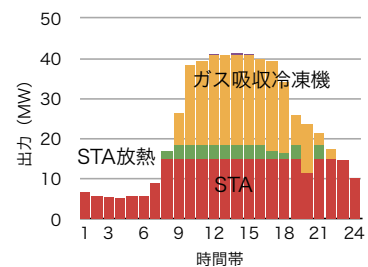
溶液輸送方式実験結果
輸送なし/ありの性能比較



溶液貯蔵方式実験結果
放熱時の冷凍出力



最適化シミュレーション結果
夏期冷熱供給



結論#1

50m溶液輸送は吸収冷凍機のCOPに影響を与えない

結論#2

冷媒と弱溶液を投入後、放熱出力は速やかに立上がる

結論#3

3kmの配管建設費を含めても熱輸送は優位性を持つ

英文概要

【研究課題名】

Study on the transportation and storage of wasted heat from refuse incineration plants at ambient temperature

【研究代表者氏名および所属】

Atsushi Akisawa (Tokyo University of Agriculture and Technology)

【要旨】

The objective of this study is to examine the performance of heat transportation or heat storage based on the mechanism of ammonia-water absorption cycle where thermal energy is converted into concentration difference. Experimental equipments for both functions were developed. The heat transportation equipment has 3 pipes of 50 m long between heat source side and heat demand side. The heat storage equipment has 3 tanks instead of the pipes to store strong/weak solutions and ammonia liquid. According to the experimental results, it was observed that the heat transportation with solution transportation did not affect the refrigeration COP while it required longer time to stabilize the initial behavior of start-up than that without transportation. The heat storage test revealed that cooling output increased quickly just after the start-up of heat release process. Because it depended on the refrigerant mass flow, it indicates the performance is dominated by mass transfer. Optimization Model analyses suggested that utilizing wasted heat from refuse incineration plants through the proposed heat transfer/storage system would be feasible even though it requires investment cost of the pipelines. It contributes to replacing half of primary energy with the wasted heat.

【キーワード】

wasted heat utilization, heat transportation, heat storage, ammonia-water solution, absorption cycle

