

学位論文題名

地下鉄排熱の回収・有効利用と  
構内の環境改善に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究は、世界で初めて実現した本格的な地下鉄排熱回収・有効利用システムの開発とその運転特性に関する検討結果を纏めたもので、このシステムは地下鉄の排熱を回収し、その熱を地域冷暖房や道路を加熱して融雪を行うなど未利用エネルギーの有効利用を目指すと共に、地下鉄温熱環境の改善にも大きく寄与する点に特徴がある。システムの開発における環境の予備調査に始まりプラントの設計・建設・試運転という一連のプロセスのうち、環境評価、シミュレーションによる将来予測、システム計画の最適化に関する実証的な研究についてまとめたものである。

本研究の目的は、世界的にも注目されたこのシステムの動作特性を運転実績の分析から明確にし、さらにこの種の未利用エネルギー有効利用システムが従来方式に対してどのような条件で実用上競争力を持つことが出来るかという点についても、運転実績も加味して検討し、寒冷地という特徴を考慮にいれた具体的な実用システムを提言するところにある。未利用エネルギー有効利用システムの評価の方法に本研究の考え方が導入されれば、効果的なエネルギー利用システムの採用が加速されることとなる。

以上のような背景の下にまとめた本論文は、以下の内容から成り立っている。

第1章では、本研究の目的が地下鉄排熱という都市の中で特徴ある未利用エネルギーの更なる有効活用のための提言を行い、今後の未利用エネルギー活用技術に資することにあることを述べた。

第2章では、研究の対象とした札幌市は人口の動向やエネルギー需要動向からみて地下鉄排熱の特徴を活かした利用ができその効果の大きい条件にあることを示した。

第3章では、寒冷地の地下鉄環境の状態を把握するために行った実測結果をまとめている。測定の特徴は地下構造物内の温度変化を実測したことであり、この結果夏期には地下構造物に蓄積され冬期にそれを放熱する寒冷地特有のサイクルを見出すことができた。実測値を反映したシミュレーション解析により、涼しい札幌市といえども夏期は地下鉄構内環境は年々悪化し改善の必要のあることを明らかにし、熱回収と環境改善を同時に行うことのできる「再循環式排熱回収方式」を提案した。日本国特許として成立している本方式によれば、ファンなどの運転の組み合わせにより構内環境温度を幅広く制御できることを明らかにした。

第4章では、環境実測値をシミュレーション解析に反映し、これをベースに将来の地下鉄構内環境予測を行った。構内環境はますます厳しくなり改善の必要性が高く、「再循環式排熱回収方式」が効果を発揮することができること、またこれによって回収できる熱量などを明らかにした。

第5章では、「再循環式排熱回収方式」を用いた排熱利用システムの最適設計を行った。このためには適切な作業媒体の選定とヒートポンプ/補助熱源の最適組合わせの計画が重要である。熱媒体の選定に当たっては少ない量で作動すること、熱利用率が高いこと、小型なシステムであることなどを基準として研究を行ったが、このなかにおいて熱物性値から推算する理想状態の凝縮熱伝達率の評価方法などを新しく提案した。また、ヒートポンプ/補助熱源の最適組合わせの検討により、両者の間に熱利用率を最大にする組合わせ条件のあることを明らかにした。これらの結果、熱媒体としてはR-22、ヒートポンプと補助熱源との間の温度条件は40℃とすることとした。これをベースに具体的なシステム設計を行なった。

第6章では、運転実績とこれから導き出される課題について述べた。地域冷暖房、道路の融雪いずれにおいても機器の性能・能力は計画どおりであることが確認できた。また、1989年から1991年までの3年間にわたる地下鉄構内環境の測定により、構内環境の改善も予測どおりになっていることが明かになった。しかし、運転の状況を詳しくみると供給熱量単価の点や実働のCOPなどから 1) 現有設備のままでの排熱回収量の増大 2) 熱需要の平準化への工夫と推進 の2点が重要課題として抽出できた。

第7章では、これらの重要課題に対する改善の手段を具体的に研究した。まず、排熱回収量の増大であるが、構内環境データを詳しく分析すると現在は排熱回収運転を行っていない夕方から翌朝までにかなりの排熱が放出されていることが分かったので、これの回収方法を夜間および深夜の2つの時間帯に分けて研究し提案した。この方法によりヒートポンプ/補助熱源組合わせプラントの熱供給能力は冬期には  $183.54 \times 10^3 \text{MJ/日}$  が  $220.34 \times 10^3 \text{MJ/日}$  へと20%増加し、夏期には  $153.43 \times 10^3 \text{MJ/日}$  が  $167.98 \times 10^3 \text{MJ/日}$  に増大することができる。一方、熱需要負荷の平準化のためには熱の需要家側に完全混合型蓄熱槽に比べ小型でエクセルギー効率のよい成層型蓄熱槽の採用を推奨した。既に実績のある成層型蓄熱槽の運転データを反映して、小型で経済的な成層形蓄熱槽を設計するため混合容積比率という実用的な新しい評価手法の考案と設計方法の提案を行った。熱需要家側での負荷変動を蓄熱槽により吸収して、地下鉄排熱回収ヒートポンプ/補助熱源組合わせプラントで安定した熱供給を行った場合には、既設のプラントのままでも10%のCOP上昇が図れることになり、これは動力消費を同じにすれば10%熱の供給能力が増大したことに相当する。以上の手法による排熱回収量の増大と負荷平準化の効果を考慮にいた地下鉄排熱回収ヒートポンプ/補助熱源組合わせプラントに対して、同じ規模を持つ一般の燃料を用いる従来方式のプラントとの熱量単価の比較検討を行ったが、一次エネルギーコストが半分になっても地下鉄排熱回収ヒートポンプ/補助熱源組合わせシステム運転による価値が認められることを明らかにした。

第8章では、1) 札幌市の地下鉄排熱利用は夏期のエネルギーを冬期に活用する効果がある、2) 予測によれば構内環境改善が必要で、環境改善と熱回収を同時に達成できる「再循環式排熱回収方式」を開発しその効果を確認できた、3) ヒートポンプ/補助熱源組合わせの最適化において新しい手法を提案した、4) 運転実績は良好であったが回収熱量の増大と負荷平準化の必要性を課題として抽出した、5) それぞれの抽出課題に対して時間拡大運転と蓄熱槽の導入を提案し、その結果経済的にも価値が認められることを明らかにした、6) 負荷平準化に効果のある成層型蓄熱槽の実用的設計方法として混合容積比率の概念を新しく提案した、7) 運転結果を地球環境面からみるとCO<sub>2</sub>発生抑制効果も評価できることを結論としてまとめた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 谷 口 博  
副 査 教 授 宮 本 登  
副 査 教 授 石 川 迪 夫  
副 査 助 教 授 工 藤 一 彦

学 位 論 文 題 名

## 地下鉄排熱の回収・有効利用と 構内の環境改善に関する研究

本研究は、世界で初めて実現した本格的な地下鉄排熱回収・有効利用システムの開発とその運転特性に関する検討結果をまとめたものである。このシステムは地下鉄の排熱を回収し、その熱を地域冷暖房や道路を加熱して融雪を行うなど未利用エネルギーの有効利用を目指すと共に、地下鉄温熱環境の改善にも大きく寄与する点に特徴がある。

本論文は、世界的にも注目されたこのシステムの動作特性を運転実績の分析から明確にし、具体的な実用システムを提言したものであり、有用な多くの新知見が含まれている。

以上のような背景の下にまとめた本論文は、以下の内容から成り立っている。

第1章では、本研究の目的が地下鉄排熱という都市の中で特徴ある未利用エネルギーの更なる有効活用のための提言を行い、今後の未利用エネルギー活用技術に資することにあることを述べた。

第2章では、研究の対象とした札幌市は人口の動向やエネルギー需要動向からみて地下鉄排熱の特徴を活かした利用ができその効果の大きい条件にあることを示した。

第3章では、寒冷地の地下鉄環境の状態を把握するために行った実測結果をまとめている。測定の特徴は地下構造物内の温度変化を実測したことであり、この結果夏期には地下構造物に蓄積され冬期にそれを放熱する寒冷地特有のサイクルを見出すことができた。実測値を反映したシミュレーション解析により、涼しい札幌市といえども夏期は地下鉄構内環境は年々悪化し改善の必要のあることを明らかにし、熱回収と環境改善を同時に行うことのできる「再循環式排熱回収方式」を提案した。

第4章では、環境実測値をシミュレーション解析に反映し、これをベースに将来の地下鉄構内環境予測を行った。構内環境はますます厳しくなり改善の必要性が高く、「再循環式排熱回収方式」が効果を発揮することができること、またこれによって回収できる熱量などを明らかにした。

第5章では、「再循環式排熱回収方式」を用いた排熱利用システムの最適設計を行った。このためには適切な作業媒体の選定とヒートポンプ／補助熱源の最適組み合わせの計画が重要であり、熱物性値から推算する理想状態の凝縮熱伝達率の評価方法などを新しく提案し

た。また、ヒートポンプ／補助熱源の最適組合わせの検討により、両者の間に熱利用率を最大にする組合わせ条件のあることを明らかにし、これをベースに具体的なシステム設計を行なった。

第6章では、運転実績とこれから導き出される課題について述べた。地域冷暖房、道路の融雪いずれにおいても機器の性能・能力は計画どおりであることが確認できた。また、1989年から1991年までの3年間にわたる地下鉄構内環境の測定により、構内環境の改善も予測どおりになっていることが明らかになった。しかし、運転の状況を詳しくみると供給熱量単価の点や実働のCOPなどから 1) 現有設備のままでの排熱回収量の増大 2) 熱需要の平準化への工夫と推進の2点が重要課題として抽出できた。

第7章では、これらの重要課題に対する改善の手段を提案した。まず、排熱回収量の増大に関しては、現在は未回収の夕方から翌朝までの排熱の回収方法を、夜間および深夜の2つの時間帯に分けて研究し提案した。一方、熱需要負荷の平準化のためには熱の需要家側に、完全混合型蓄熱槽に比べ小型でエクセルギー効率のよい成層型蓄熱槽の採用を推奨し、混合容積比率という実用的な新しい評価手法の考案と設計方法の提案を行った。以上の手法により、一次エネルギーコストが半分になっても地下鉄排熱回収ヒートポンプ／補助熱源組合わせシステム運転による価値が認められることを明らかにした。

第8章では、結論を以下のようにまとめた。

- 1) 札幌市の地下鉄排熱利用は夏期のエネルギーを冬期に活用する効果がある。
- 2) 予測によれば構内環境改善が必要で、環境改善と熱回収を同時に達成できる「再循環式排熱回収方式」を開発しその効果を確認できた。
- 3) ヒートポンプ／補助熱源組合わせの最適化において新しい手法を提案した。
- 4) 運転実績は良好であったが回収熱量の増大と負荷平準化の必要性を課題として抽出した。
- 5) それぞれの抽出課題に対して時間拡大運転と蓄熱槽の導入を提案し、その結果経済的にも価値が認められることを明らかにした。
- 6) 負荷平準化に効果のある成層型蓄熱槽の実用的設計方法として混合容積比率の概念を新しく提案した。
- 7) 運転結果を地球環境面からみるとCO<sub>2</sub>発生抑制効果も評価できる。

これを要するに、著者は、地下鉄排熱回収・有効利用システムの動作特性を明らかにするとともに、その特性の最適化、及び経済性の向上に有益なシステムの提案を行い、熱工学上有益な多くの知見が得ており、熱工学および建築環境工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。