

地中熱利用における欧州と日本の法体系比較と課題解決に向けた社会発信

佐賀大学大学院 理工学研究科 理工学専攻

◎安藤 航, 香川 輝紀, Tyranowski Juan Alexandre Wladyslaw

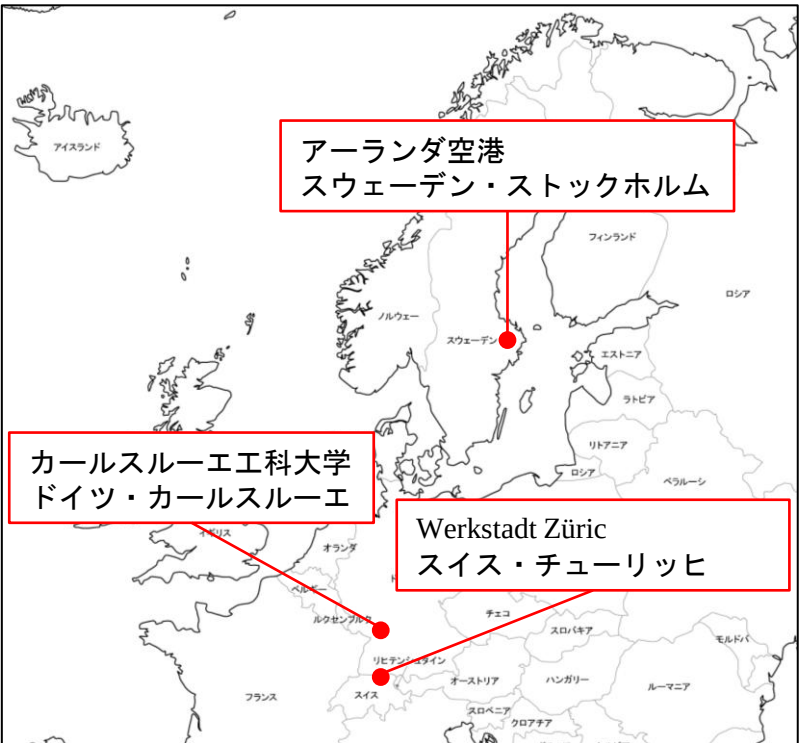
■ 研究概要

本研究は、近年、日本において導入が進められつつある帯水層蓄熱（**A**quifer **T**hermal **E**nergy **S**torage, **ATES**）システムを対象に、導入先進国である欧州諸国の視察を通して、日本の課題や背景・文化の違いについて客観的な視野を得ることを目的に研究視察を実施した。

ATESシステムは、地下水を冷暖房利用する背景から、地下汚染が懸念され、日本の導入事例でも対策が施されている。しかし、長期的な影響について日本国内の事例は乏しい。そこで、欧州の運用実績から長期影響とその対策の実態を収集した。あわせて、普及を支える法制度や文化的受容の条件を質問形式で確認し、日本への適用可能性を検討した。

欧州視察スケジュール

日付	内容	国
9/15	日本出国	
9/16	ストックホルム市内視察	スウェーデン
9/17	アーランダ空港視察	
9/18	カールスルーエ工科大学訪問	
9/20	チューリッヒ市内視察	スイス
9/21	SBB メンテナンス センター視察	
9/23	日本帰国	



視察訪問地域と施設名

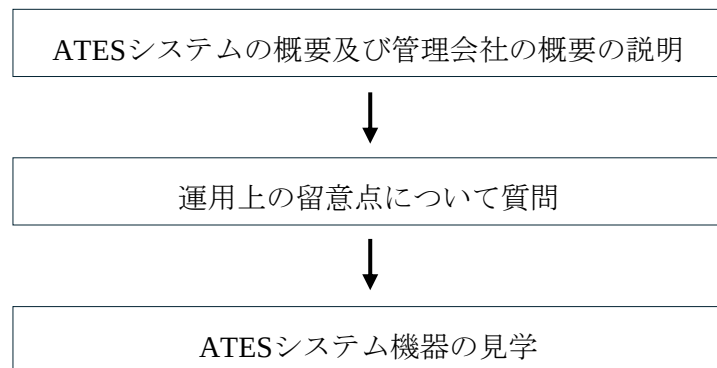
アーランダ空港視察

■アーランダ空港視察概要

アーランダ空港は、世界で初めて、ATESシステムのみで空調システムを構築した空港として知られている。2009年から運用開始し、16年も長期運用している事例。今回は、運用管理をしている会社の技術担当者の案内の下、システムの概要、実際の設備機器、運用上の留意点について伺った。

施設見学前のミーティングでは、ストックホルム名物のシナモンロールとカルダモンロールを振舞って頂き、終始、和やかな雰囲気で行われた。

■施設訪問の流れ



ミーティング前の様子（前方、技術責任者）



振舞って頂いた名物のシナモンロールとコーヒー

■視察内容の詳細

この帯水層蓄熱（ATES）システムは、2009年に完成しました。導入当初、本システムは 15 MW の冷房能力を提供し、当時の建物の全冷房需要を賄うことが可能だったが、近年の冷房需要増加で現在は、総冷房需要の70%を賄っている。本システムは長さ2kmにわたる帯水層を利用し、井戸は深度400メートルまで掘削されている。設計上の重要な特徴として、温水と冷水を分離するため、2つの井戸の間にリッジ（尾根状の仕切り）が設置されている。その他、以下に情報を書く。

- ・ 送水温度：15°C
- ・ 年間エネルギー総量：30 [GWh]
- ・ CO2排出量削減総量：7,000[t]
- ・ 帯水層の総蓄熱容量：8～10 GWh

■運用上の課題

・制御システムについて

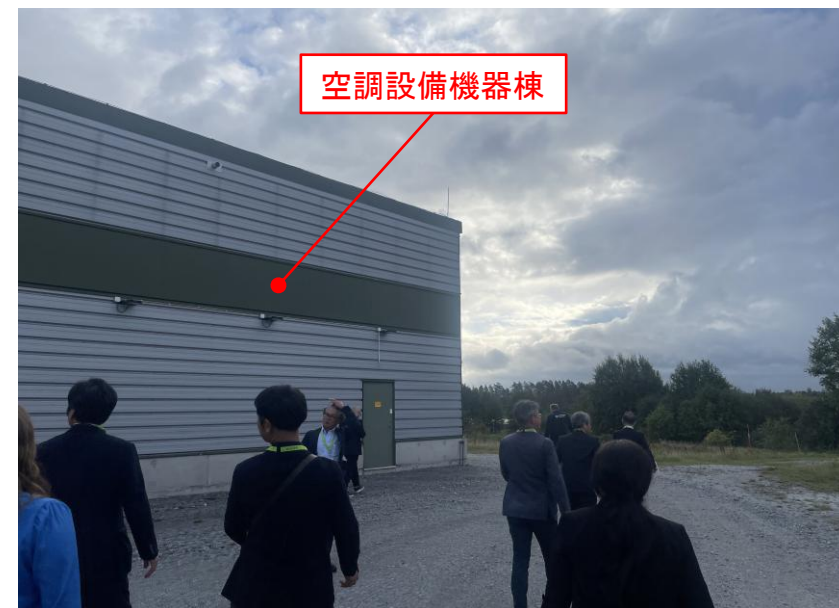
現在の制御システムは信頼性が低いため、人力による制御方法。全ての流量を毎日点検する必要がある、システム全体の交換が求められている。

・環境変化への適応

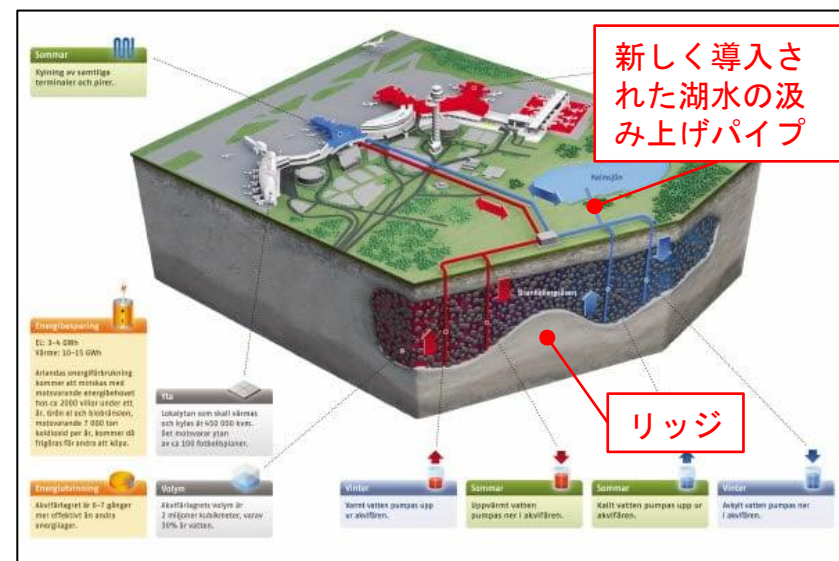
冷房需要が増加したことに伴い、帯水層の温水温度が上昇。温度を下げるため、場当たりの湖から組み上げた水で温度を下げている。

・水質の変化について

水の化学的組成が帯水層の初期状態と比較して変化していないことを確認するため、水質検査が毎年実施されているが、今のところは問題が発生していない。



ATESシステムの設備機器への案内の様子



ATESシステムの概要（引用：Swedavia Airport Web page）

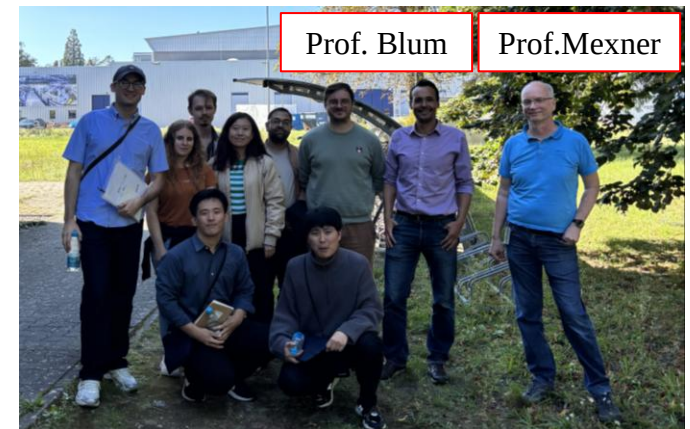
KIT (Karlsruhe Institute of Technology) 訪問

■アーランダ空港視察概要

カールスルーエ工科大学 (KIT) Campus Nord では、Prof. Philipp Blum の学生さんとともに、粒子加速器 KARA の冷却を対象とした Thermal Well System (TWS) および ATES 計画に関する施設見学を行った。Campus Nord には原子核・粒子・量子物理系の研究施設が多数集まり、各建物が個別の圧縮式冷凍機で冷却しているため、キャンパス全体として非常に大きな冷房需要を有している。これに対し、Prof. Wolfgang Mexner が推進する新規 ATES/TWS プロジェクトでは、KARA の冷却を地下水で一部代替し、将来的にキャンパス全体の冷却需要を集約・高効率化することを目指している。見学した TWS は、深さ約 40 m の井戸から約 13°C の地下水を汲み上げ、最大 1 MW の冷却能力で KARA の冷却回路 (マグネットなど) を 24→21°C まで冷却し、その後 21→20°C は従来の冷凍機で仕上げる二段階方式を採用している。鉄分を多く含む井戸水は Fermanox プロセスにより Fe 濃度を 0.96 mg/L から 0.01 mg/L 未満まで低減し、熱交換器の閉塞を抑えつつフリークーリングを実現している。また、この TWS は約 28 kW の電力で 1 MW の冷却を供給し、エネルギー効率 (EER) は従来機の約 5 に対して 35 と大幅に高く、3 台ある 1 MW 級冷凍機のうち 1 台を代替可能であることが示された。これらの説明と設備見学を通じ、加速器のような大規模かつ変動の大きい冷却需要に対し、地下水利用型 TWS/ATES が極めて有効な高効率冷熱供給システムであると理解した。



アンモニア生成を世界で初めて成功
(ハーバー・ボッシュ法)



集合写真



分岐ヘッダー



Fermanoxの説明



加速器施設の全体写真



揚水温度のモニタリング



揚水温度のモニタリング



エンドステーション

Werkstadt Zürich視察

■Werkstadt Zürich視察概要

プロジェクト名称: Werkstadt Zürich (ヴェルクシュタット・チューリッヒ)
は、旧国鉄 (SBB) 工場を対象に歴史的な鉄道産業遺産を保存しながら、地下水熱を利用した持続可能なエネルギー供給システムに取り組んでいる施設を訪問し、「マルチエネルギーグリッド」および「アネギーネットワーク」について見学した。

■導入システムの概要

本施設は、以下に列挙する目的をもってプロジェクトに取り組まれた。
特にエネルギー戦略と既存ストックの活用に焦点が当てられている。

● マルチエネルギーグリッド

ATESシステムをはじめとした地下水熱利用システムが構築されている。特に、物単体ではなく、エリア内の複数の建物を熱ネットワークで接続することで、異なる用途（製造、オフィス、飲食など）間のエネルギー需要と供給（排熱）を調整し、システム全体の効率を最適化している。

特に、地下水を「アネギー源（低品位エネルギー源）」として最大限に活用し、ヒートポンプの効率を高める「Low-Ex（低エクセルギー）戦略」が採用されている。

● 「パティナーの戦略」による資源循環

古いレンガ造りの工場建築を「壊して作り直す」のではなく、歴史的な痕跡（パティナー）を価値として残しつつ改修しているほか、余ったコンテナを設備に流用するなど、随所に持続可能性を意識した取り組みが見られる。



中央の熱源システム



鉄道で使われたコンテナの再利用

欧州における帯水層蓄熱（ATES）システム視察に関する学びと考察

1. 視察の目的と背景

本視察は、日本国内において導入が進みつつある帯水層蓄熱（ATES）システムに対し、先行事例の多い欧州（スウェーデン、ドイツ、スイス）の実態調査を通じて、技術的課題および社会的受容性を明らかにすることを目的とした。特に、日本国内で懸念される地下水汚染などの長期的影響や、法規制・文化的背景の差異に着目し、日本への適用可能性を検討した。

2. 長期運用における信頼性と適応性に関する技術的知見

スウェーデンのアーランダ空港における16年間の運用実績からは、ATESシステムの長期信頼性と課題の両面において重要な示唆が得られた。第一に、設計上の工夫として、温水井と冷水井の間に「リッジ（尾根状の仕切り）」を設けることで熱干渉を抑制している点は、システム効率の維持において重要である。第二に、運用フェーズにおける課題である。制御システムの信頼性不足により、現在は人力での流量調整を余儀なくされている現状は、設備導入後のモニタリングと更新計画の重要性を浮き彫りにした。また、冷房需要の増加に伴う帯水層温度の上昇に対し、湖水を利用した冷却で対応している点は、気候変動や需要変化に対するシステムのレジリエンス確保として参考になる。なお、懸念された水質変化については、定期検査において化学的組成の変化は見られず、適切な管理下であれば環境負荷は限定的であることが確認された。

3. 高効率熱供給と水質管理技術

ドイツのカールスルーエ工科大学（KIT）における事例では、大規模冷却需要に対するATESの有効性が確認された。粒子加速器（KARA）の冷却において、従来冷凍機のEER（エネルギー効率）が約5であるのに対し、ATES（Thermal Well System）は約35という極めて高い効率を実現している。また、地下水利用の技術的障壁となる鉄分による閉塞問題に対し、「Fermanoxプロセス」を用いて溶存鉄濃度を劇的に低減（0.96mg/Lから0.01mg/L未満）させている点は、同様の水質課題を持つ日本の地域においても重要な技術的解決策となり得る。

欧州における帯水層蓄熱（ATES）システム視察に関する学びと考察

4. 面的利用とサステナビリティ戦略

スイスのWerkstadt Zürichにおける視察からは、単体建物ではなくエリア全体でのエネルギー最適化の視点を学んだ。ここでは、複数建物を熱ネットワークで接続する「マルチエネルギーグリッド」が構築されており、地下水を「アネギー源（低品位エネルギー源）」として活用するLow-Ex（低エクセルギー）戦略が実践されている。これは、熱源の単独利用にとどまらず、排熱融通を含めたシステム全体の効率化を目指すものであり、今後の日本におけるスマートシティや再開発エリアでの熱供給計画において重要な視点である。また、歴史的建造物や鉄道コンテナを再利用する「パティナーナの戦略」は、設備更新時のスクラップ・アンド・ビルドからの脱却を示唆しており、環境配慮型建築のあり方として示唆に富む。

5. まとめ

今回の視察を通じ、ATESシステムは単なる省エネルギー技術としてだけでなく、適切な設計・管理を行えば長期間にわたり環境負荷を抑えつつ運用可能なインフラであることが確認された。日本への導入・普及にあたっては、以下の3点が鍵となると考えられる。

- ① **長期視点での運用設計：** 制御システムの更新容易性や、需要変動を見越したバックアップ熱源（アーランダ空港における湖水利用のような自然エネルギーの併用）の検討。
- ② **水質対応技術の確立：** 閉塞リスクに対するFermanoxプロセスのような具体的な技術的対策の標準化。
- ③ **面的利用への展開：** 個別建物への導入から、Werkstadt Zürichのような地域熱供給ネットワーク（アネギーネットワーク）への昇華。