

4DHフォーラム 季節間蓄熱層の日本への導入



2026年2月17日（火）
三井住友建設株式会社
土木本部SX営業推進部 澤井淳司



目次

1. はじめに

2. デンマーク調査

2.1 デンマークと日本の相違点

2.2 ドロニングルン季節間蓄熱槽と太陽熱パネル

2.3 ドロニングルン地域熱供給組合事業

3. 日本に導入した場合の試設計

3.1 構造物の諸元

3.2 蓄熱槽の容量と貯蔵効率

3.3 地下水と熱損失の関係

3.4 高い地下水位の対策

3.5 耐震対策

3.6 断熱蓋の水平変位拘束

4. まとめ





写真-1 季節間蓄熱槽（手前白色）と太陽熱パネル（奥紺色）全景
（ドローイングレン地域熱供給組合資料より）

1. はじめに

デンマーク国において10基以上の実績のある季節間蓄熱槽に関して、現地調査報告を行った後、日本に導入した場合の試設計の概要を報告する。この際、特に日本特有の高い地下水位対策と耐震対策について記述する。

再生可能エネルギーの先端国であるデンマークでは、夏に太陽熱パネルで生産した約90°Cの温水を地下のピットに貯めて、気温の低くなった冬に暖房用熱源に使用する季節間蓄熱槽が建設されている（写真-1）

日本においては、かつて屋根の上の太陽熱温水器で日中作った温水を8時間後の夜間のふろ水に利用したことを記憶されている方も多いと思う。その太陽熱温水器を4万倍の面積の太陽熱パネルにし、お湯をためる浴槽の容量を20万倍にして地中に埋め蓋をする事により、約半年後に熱い温水を利用可能としたものである。これにより、太陽熱というCO2を排出しない無料の熱源を使用し、カーボンニュートラルに大きく貢献する施設となっている。



2. デンマーク調査

デンマーク国の調査を筆者が行ったのでその内容を報告する。

2.1 デンマークと日本の相違点

北欧の国デンマークの首都コペンハーゲンは、緯度的には北海道の北樺太の北端と同じ緯度であるが、海流の影響で1月の平均気温は1.8°Cと同時期の仙台の2.1度とあまり変わらない。

1970年代のオイルショック時には、日本は電化製品の省エネ化を図ったが、デンマークにはその技術がなく現有の資源で賄うために焼却炉の排熱の有効利用を行った。さらに、デンマークでは一般家庭に水道管は勿論のこと熱導管を引くことが義務づけられており、温水を利用するインフラが備わっている。

このような条件の下、デンマークでは50°C～60°Cの低温水を熱導管で供給する第4世代の熱供給システムに移行中であり、100°C以上の高温水を熱導管で供給する第2世代以前の現在の日本のインフラと比べて、長い距離の熱導管による熱供給が可能である。さらに、この熱導管を介して多くの熱生産施設と熱消費施設の相互接続が可能である。



2.2 ドロニングルン季節間蓄熱槽と太陽熱パネル

オルボーにあるドロニングルン季節間蓄熱槽を2018年6月11日に調査した。

はじめに写真-1は、手前に逆角錐台の天端平面90m×90m×深さ16.9m容量6.2万m³の季節間蓄熱槽と、奥に平面200m×200mの太陽熱パネルの全景を示す。太陽熱パネルで生産した熱エネルギーを約90°Cの温水として季節間蓄熱槽に蓄熱する。

次に、写真-2に季節間蓄熱槽の天端に位置する断熱蓋と地盤の様子を示す。生産された温水は、天端上面の断熱蓋と、側面と底面の地盤に囲まれて保温される。

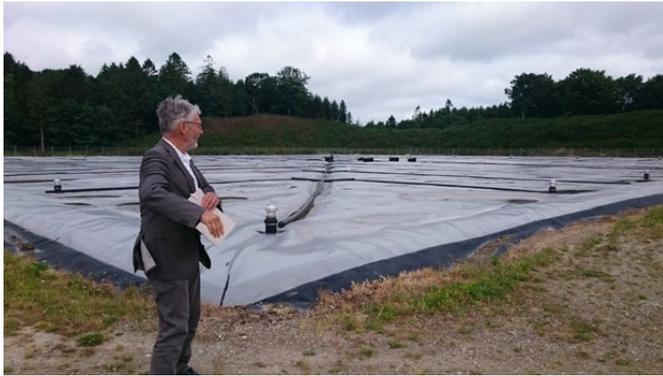


写真-2 季節間蓄熱槽の断熱蓋



写真-3 ①建設前（左）及び、②掘削と③熱水供給送水装置の設（右）
（ドロニングルン地域熱供給組合資料より）

さらに、季節間蓄熱槽の施工法を示す。

写真-3左

①建設前の現地の状況を示す。

地下水との離隔を3m確保するため丘の上が選定された。

同じく右に

②掘削状況

③熱水供給送水装置の設置状況



写真-4 ④防水シート敷設（左）と⑤貯水と⑥断熱蓋敷設（右）
（ドロニングルン地域熱供給組合資料より）

写真-4左

④掘削断面への防水シート敷設状況。

同じく右に

⑤貯水と

⑥水面上での断熱蓋敷設状況





写真-5 太陽熱パネル

写真-5に高温水を生産する太陽熱パネルの写真を示す。温水をパネルに循環させて温度を上げる機能を有する。エネルギー変換能力は約50%と類似の形状の太陽光パネルの約20%と比べて高い。

ただし温水を遠距離運ぶ場合は、熱損失が大きくなり適していない。

2.3 ドロニングルン地域熱供給組合事業

季節間蓄熱槽の建設においては、その蓄熱された温水を熱導管（写真-6）を介して消費する一般家庭の需要家（写真-7）の存在が不可欠であり、ドロニングルンでは1,350世帯、3,300人に供給している。ここでは供給された熱エネルギーをパネルヒーターで消費している。



写真-6 熱導管 写真-7 市街地の需要家



3. 日本に導入した場合の試設計

季節間蓄熱槽の日本導入の試設計を東北地方のある郊外を対象に行ったので、その内容を報告する。

3.1 構造物の諸元

日本の場合、デンマークと異なり、土地の利用面積に対する制約が大きい。ドロニングルンでは、切土と盛土のみの構造にして、経済性を目的に逆角錐台の形状であったが、今回図-1で示すように利用面積を縮小するため、擁壁で囲まれた蓄熱槽としている。

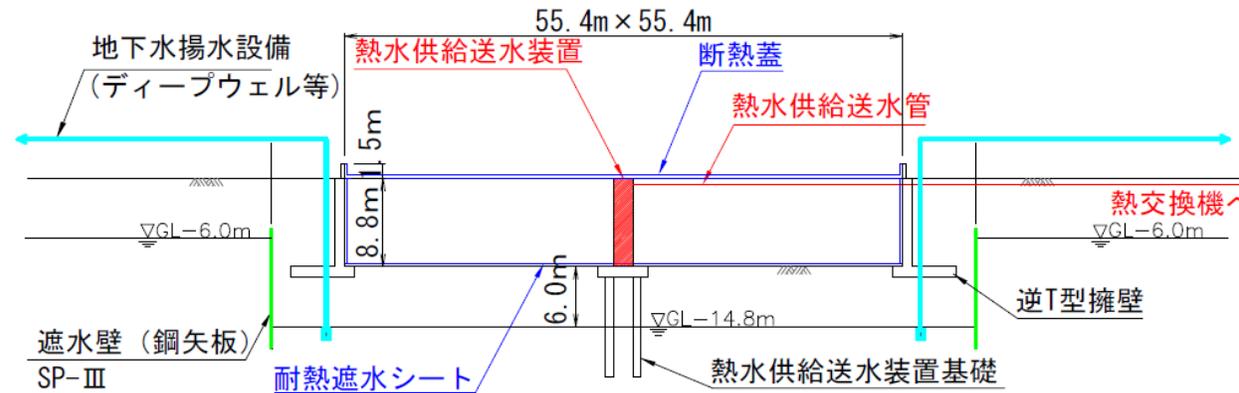


図-1 蓄熱槽の断面図



3.2 蓄熱槽の容量と貯蔵効率

今回の地盤条件における蓄熱槽容量と貯蔵効率の関係を図-2に示す。

温度解析値'（実線）によると蓄熱槽容量2万m³以上で貯蔵効率（蓄熱槽への熱エネルギーの入力量に対する一年後の蓄熱槽からの出力量の比）が0.49以上に安定する。

比較のため、他の蓄熱槽の実績値であるドロニングルン0.78とマスダル0.62をプロットする。おおむね解析値は実績値を表しているとして、今回の容量2.7万m³で約0.49以上となると想定し、解析値を採用した。

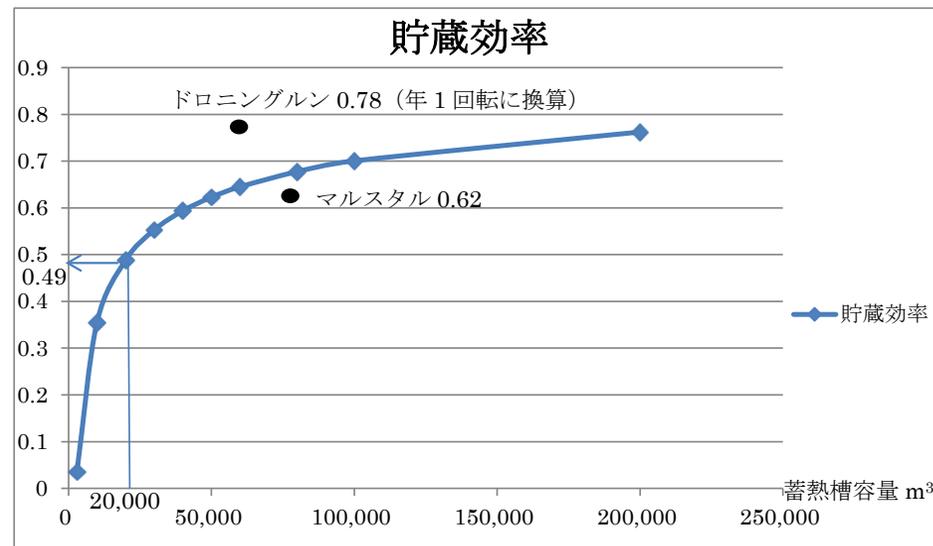


図-2 今回の地盤条件における蓄熱槽容量と貯蔵効率



3.3 地下水と熱損失の関係

地下水と蓄熱槽の離隔が小さいと地下水による熱の損失が大きくなる。

地下水の離隔と熱損失の関係を示したのが、図-3である。

これによると、離隔が3m未満になると急激に熱損失が大きくなる。

今回は熱損失の急激な増加と地盤状況を考慮して擁壁および底版と地下水の離隔を6mとした。

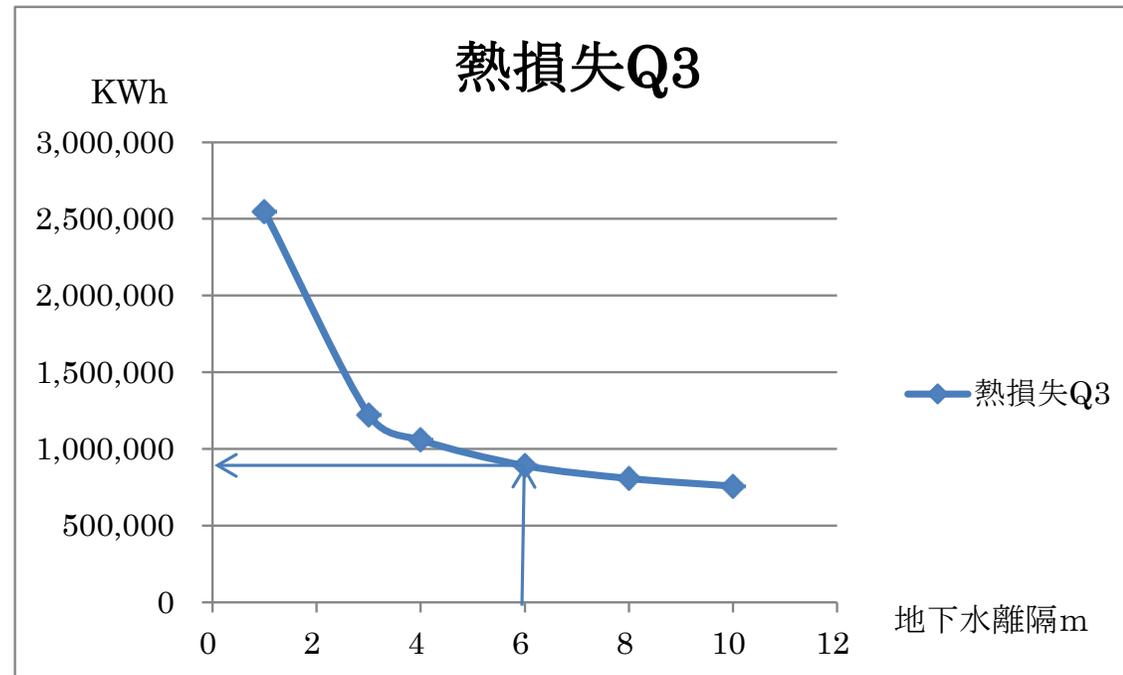


図-3 地下水との離隔と熱損失の関係 (蓄熱槽容量2万m³)



地下水位は現地盤下6.0mにあり、蓄熱槽の底版の位置が現地盤下8.8mにあるので、このままでは6mの離隔を確保するどころか、蓄熱槽と地下水が接して、地下水による熱損失が非常に大きくなる。

そのため、次項で述べる高い地下水位の対策を行った。

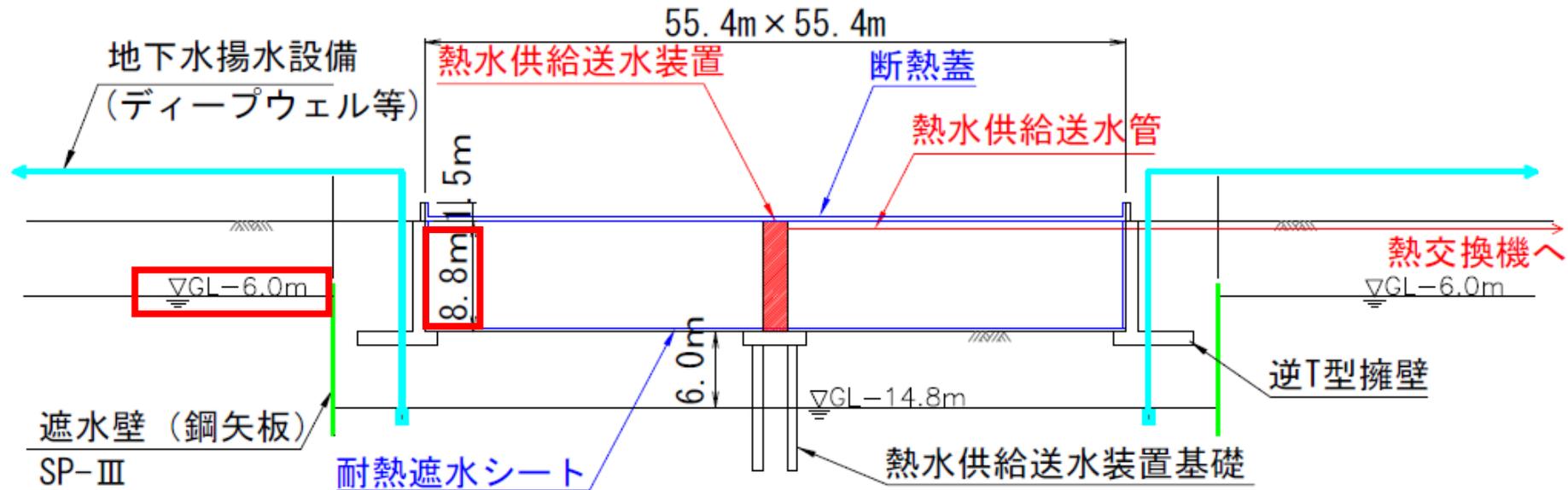


図-1 蓄熱槽の断面図



3.5 耐震対策

デンマークでは地震がほとんど発生しないため、耐震検討を行っていない。今回日本に適用するに当たり、地震時の蓄熱槽内用水のスロッシングによる断熱蓋及び防水シートの破損が考えられ、これに対して以下の耐震性確保を行った。

内容水のスロッシングに対して、蓄熱槽にスロッシング高さ $h=1.5\text{m}$ に相当する余裕高さを設定し、同時に防水シートと断熱蓋に**緩衝領域**（図-5中“A”）を設ける。

内容水のスロッシングによる水面の上昇につれて、断熱蓋の緩衝領域が追隨して上昇し、断熱蓋及び防水シートに大きな引張応力が発生するのを防止する。（図-6スロッシング①及び図7スロッシング②）

緩衝領域で吸収できない局所的な過剰な水圧は、**圧力抜管**より蓄熱槽の内側に、空気と内容水が排出される事により開放される。

圧力抜管は蓄熱槽中心方向に向いているので、約 90°C の温水が敷地外に流出する危険性がない。（図8スロッシング③と圧力抜き管）

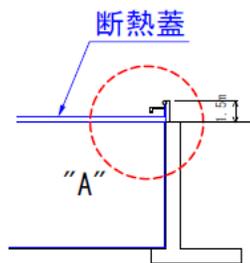


図-5 緩衝領域”A”



図-6 スロッシング①

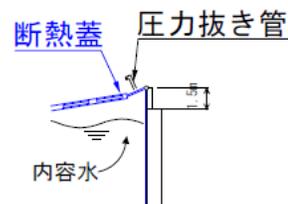


図-7 スロッシング②

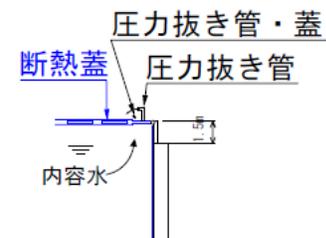


図-8 スロッシング③と
圧力抜き管



3.6 断熱蓋の水平変位拘束

前項の耐震対策で断熱蓋に緩衝領域を設けるので、暴風時などの水平力に対して水平方向の変位を拘束できない。

これに対して、図-9に示すように、蓄熱槽蓋上空の1.5m程度に、引張材1を設置し、それと蓄熱槽蓋を水平方向に対して大きく傾き、適度にたるませた引張斜材2で連結する事により、暴風時などの水平力に対して水平方向変位を拘束でき、かつ、蓄熱槽の温度変化による鉛直方向の変位を拘束しない。

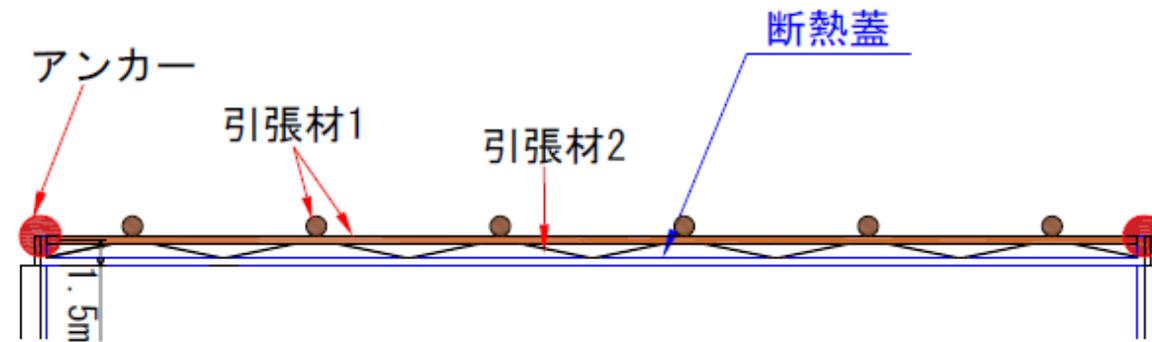


図-9 断熱蓋の水平変位拘束方法

4. まとめ

今回の試設計では、デンマークと日本の異なる事象に対して対策を設計した。

1つ目は、日本の高い地下水位に対しては、鋼矢板とディープウエルで保温性の高い地盤を構築し、蓄熱槽を囲んで熱損失を小さくした。

2つ目は、デンマークではほとんど発生しないが日本では頻度高く発生する地震に対して、蓄熱槽内容液のスロッシング高さに相当する余裕高さを設定し、同時に防水シートと断熱蓋に緩衝領域を設け、さらに断熱蓋の水平変位拘束を行うことで耐震対策を設計した。

上記以外にも両国の相違を反映した対策を設計し、技術的には季節間蓄熱槽の日本への導入は十分可能と考える。

ただし、日本への導入には以下の問題がある。

デンマークと日本とも給熱事業が電力事業と同様に自由化され、季節間蓄熱槽及び熱導管などを含めた給熱事業全体の経済的成立が最重要となっている。この事業の成立性においてデンマークと日本では、給熱事業には欠かせない各需要家への熱導管の設置が大きく異なっている。先に述べたように、デンマークにおいての熱導管の敷設は義務化により設置済みが多く、その設置済みの給熱用インフラを利用した季節間蓄熱槽の整備に対して、日本においては給熱用インフラの整備から始めなければならず採算性が非常に厳しくなっている。今後、季節間蓄熱槽整備などに関する補助金などの公的なサポートが望まれる。

参考文献：電力土木2024年1月号「海外情報三井住友建設」、澤井淳司他



ご清聴ありがとうございました

