

温度成層流型蓄熱槽について

Thermal Storage of Parallel Stratified

今井 博*
Hiroshi Imai

要 約

空調システムにおいて熱源装置の一部として利用されている各種蓄熱槽の中で、温度成層流型蓄熱槽のうちL字型連通管方式について模型実験及び施工実測を行った結果、蓄熱効率において高性能であることが実証された。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 蓄熱式空調システムの目的
- § 3. 蓄熱槽の種類
- § 4. 蓄熱槽の計画
- § 5. 蓄熱槽の効率
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

省資源・省エネルギーが盛んに叫ばれてから早や10年以上が経過したが、現在では建築設備における省エネ設計は常識化している。蓄熱槽は、太陽熱や外気などの自然エネルギー利用、また、排熱回収や夜間余剰電力の利用などエネルギーの有効利用に対して、大きな効果が期待できる装置である。

蓄熱槽には、その目的・形状・水流の方向などにより多くの種類が考えられているが、ここでは水の温度成層効果を利用した連通管方式の蓄熱槽について比較・検討を行った。

§ 2. 蓄熱式空調システムの目的

空調システムにおける蓄熱槽の役割りは、冷凍機又はボイラーなどの冷熱源装置と空調機又はファンコイルユニットなどの空調装置の間に位置して、冷暖房の立ち上り時ピークカットや常に変化する熱負荷に対して、熱源装置の100%運転に対応できることである。また、Fig.1に示すように、熱源装置の能力を非蓄熱式空調システム

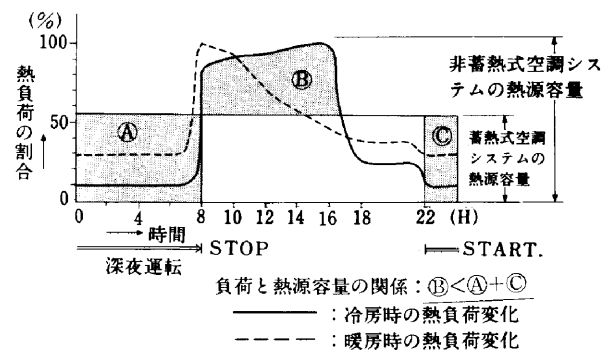


Fig.1 冷暖房時の熱負荷変化と熱源装置の関係

に比べて約50~60%に小さくすることが可能なため、イニシャルコストの低減・受変電容量の低減によるランニングコストの節約及び機械室の縮小による面積の有効利用など大きなメリットがある。その他蓄熱方式のメリット・デメリットを Table 1 に掲げる。

§ 3. 蓄熱槽の種類

蓄熱槽にはいろいろな形式があるが、配管系統により分類した例を Fig.2 に示す。

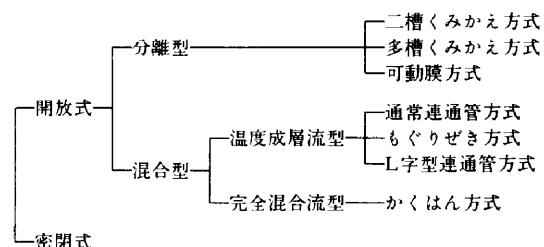


Fig.2 配管系統による分類

*関西(支)設備課係長

Table1 蓄熱方式のメリット・デメリット

	メ リ ッ ト	デ メ リ ッ ト
1.	建物のピーク負荷を蓄熱することにより、熱源機器の能力を小さくできる（設備費・受変電容量・機械室面積などの縮小が可能）	一般に建物の二重ピット内を蓄熱槽として利用するため槽内の断熱費用がかかる
2.	安価な深夜電力を利用し、熱源機器の効率良い100%運転ができる	熱源機器の深夜運転により、操作・監視をする管理者が必要となる
3.	太陽熱や外気・排熱を蓄熱し、必要な時に採り出して利用できる	開放式蓄熱槽の場合、搬送動力が大きくなる
4.	極端な低負荷による熱源機器の不安定運転をせずに、熱負荷の変動に対して容易に対応できる	蓄熱槽からの放熱損失がある
5.	熱源機器が故障した場合でも、蓄熱量だけの空調が可能	
6.	建物の増築などにより、空調負荷が増えても熱源機器の運転時間を延長することにより、ある程度まで対応可能	

密閉式は、蓄熱水が大気と接触しないため水質の悪化がなく、搬送動力も小さいが、一般に小規模のものが多く、開放式は、蓄熱水が大気と接触するため溶存酸素などが増え、薬液注入により水質の悪化を防止する必要がある。建築設備においては、大規模なものが可能な開放式蓄熱槽が多く採用されている。

一般的には蓄熱槽を単独に築造することではなく、建物の二重ピット内を利用するのがほとんどである。このため構造上の制約により多数の槽に区切られるため、これを連結するいろいろな方法が考案されている。ここでは、水の温度成層効果を利用した方式について説明する。

(1) 通常連通管方式

槽間を200mmφ～500mmφの連通管で接続する。連通管は、右→左→右・上→下→上をくり返し、槽内の水の温度が均一になるように工夫されている。

(2) もぐりぜき方式

槽内にせきを設け、水の温度差を利用して成層流になるようにしている。現在では最も効率が良いといわれているが、施工性に難点がある。

(3) L字型連通管方式

せきの代わりに槽内に設けたL字型の配管へ水を誘導し、温度成層効果を向上させたものである。蓄熱効率ももぐりぜき方式とほとんど変わりなく、施工性も非常に良い。

§ 4 . 蓄熱槽の計画

蓄熱槽計画において考慮しなければならないことは、蓄熱効率が優れていること、熱源装置の運転時間を含めた槽容量が適正であること、施工性が良いことの三つが重要なポイントとなる。以下に当社の設計・施工である徳島電気ビルの蓄熱槽について述べる。

4-1 平面計画

電気ビルの蓄熱槽は、地下1階の二重ピット内を利用したものである。Fig.4に蓄熱フロー図を示す。ここで、

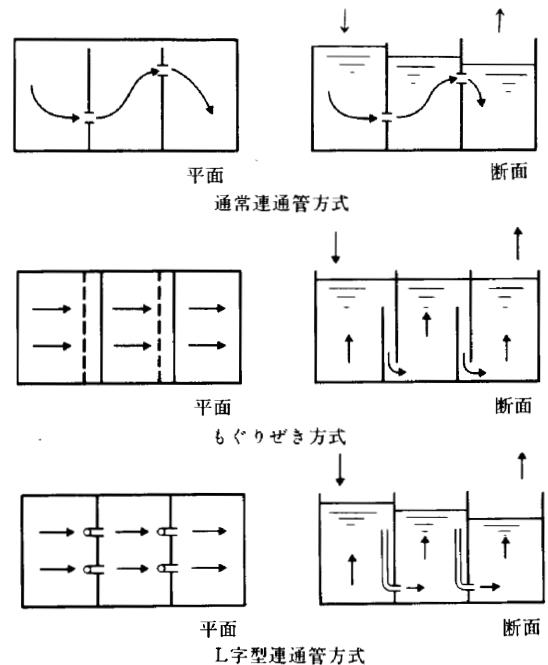


Fig.3 温度成層効果を利用した方式

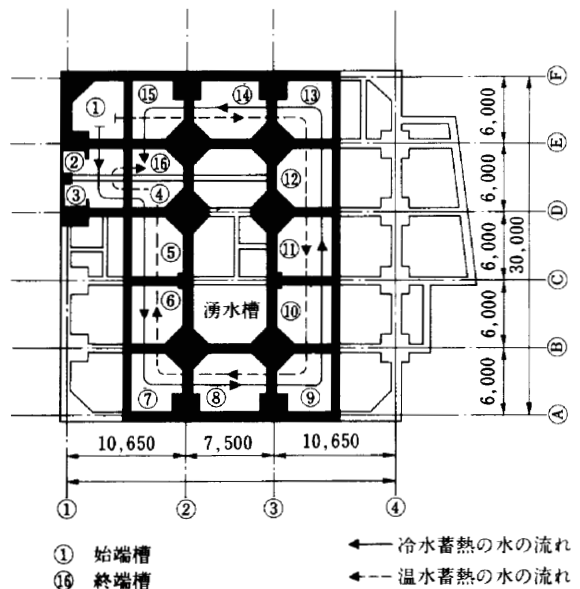


Fig.4 蓄熱槽平面図及び蓄熱フロー図

冷水蓄熱と温水蓄熱の水の流れ方向が逆になっているのは、水の温度差による成層現象を利用しているため、蓄冷時は下方より上方に向かって、蓄熱時は上方より下方に向かって蓄熱させるためである。また、始端槽と終端槽を固定したため、L字型連通管の頂部に蓄冷時と蓄熱時に手で開閉できる切替弁を設けた。

4-2 配管計画

蓄熱槽内には、水連通管、通気管、排水管、溢水管及び冷温水一次・二次ポンプシステムの吸込、吐出管の各配管がある。Fig.5・6に平面及び断面の概要を示す。配管材質の決定に当たっては、通水抵抗が小さいこと、水質悪化防止のため腐食しないこと、施工性が良いことなどから塩ビ管並びにステンレス鋼管を採用した。

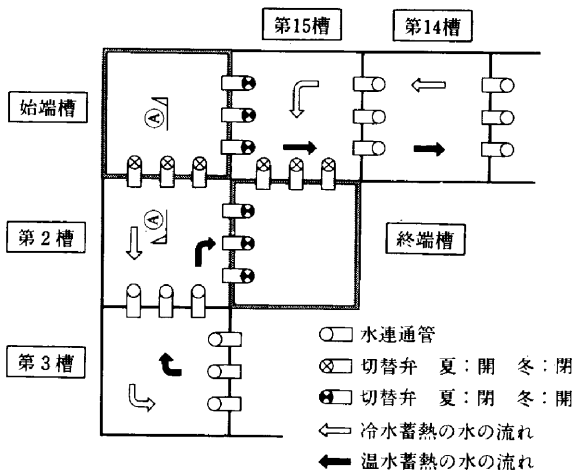


Fig.5 L字型連通管平面概要図

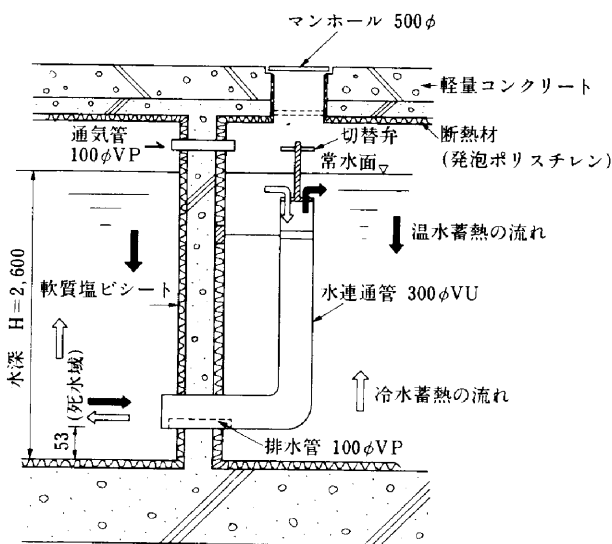


Fig.6 L字型連通管 断面概要図(A)-(A)

水連通管の口径は(1)式で求められる。

$$Q = C \cdot A \sqrt{2gh} \dots\dots\dots(1)$$

Q：流量 (m³/s)

C：流量係数 (=0.6)

A：水連通管の断面積 (m²)

g：9.8 (m/s²)

h：1槽当りの許容水位差 (m)

$$h = H / N - P$$

N：全槽数 (槽)

H：槽全体の水位差 (m)

P：配管損失抵抗 (mAq)

電気ビルの場合

蓄冷・蓄熱時 Q₁ = 0.025 (m³/s)

放熱時 Q₂ = 0.0512 (m³/s)

N = 16 (槽)

H = 200 (mm) = 0.2 (m)

P = 2.5 (mmAq) = 0.0025 (mAq)

$$h = 0.2 / 16 - 0.0025 = 0.01 (m)$$

であるから、これらの数値を(1)式に代入すると、

$$A \approx 0.193m^2$$

となる。

故に、当ビルの水連通管の口径、本数は300mmφ×3本とした。水の温度成層効果を上げるには流速をできるだけ遅くすることであるが、蓄冷時で0.15 (m/s) *1、蓄熱時で0.3 (m/s) *1以下を目安とすればその効果が期待できる。

槽内では冷温水ポンプの運転により槽間に水位差が生じるため、水の流れがスムーズになるように、槽間及び大気に開放した通気管 (50mmφ~100mmφ) を設けた。また、冷温水ポンプの吐出管などのように、蓄熱槽へ水が流入してくる個所では、断熱材の摩耗を防ぐため、直接吐出水が当たらないよう先端をL字型に加工した。

4-3 給排水計画

開放式蓄熱槽では、薬液注入などにより水質の悪化を防止しているが、1~2年ごとに水替えが必要となる。この場合水張り用の給水及び水替え用の排水は、水量が膨大なため極力動力を使用しないように計画することが肝要である。また、各槽には排水管下部に水が残るため、水抜きピットを設けて排水する必要がある。運転中の補給水は、槽間で水位差が生じるため中間槽に電極を設け、始端槽・中間槽で補給水と蓄熱水の混合を避けるため終端槽に補給水を入れる方が良い。

*1 四国電力(株)総合技術開発研究所の実験データより

蓄熱槽は、長年月の間に外部からの浸透水の影響で防水層のふくれや亀裂を起こすことがある。従って、地中壁と蓄熱槽の間に二重壁を設け、浸透水を排出しなければならない。

4-4 断熱・防水計画

二重ピット内蓄熱槽においては、地中温度と蓄熱水の温度差により熱損失が生じる。通常は、夏季で約12℃、冬期で約30℃の温度差があり、特に冬期の熱損失が大きいため断熱が必要となる。また、夏期及び中間期では室内側への結露防止対策を考慮することも大切である。

電気ビルの断熱防水仕様は、発泡ポリスチレン（吸水率0.01g/100cm³以下）厚さ50mmの断熱材に軟質塩化ビニールシート（床用：厚さ1.5mm、壁用：厚さ1.0mm）防水層の溶着工法を採用した。Fig.7にその納まり図を示す。この仕様は、塩ビ管や配管の固定に使用する塩ビブロックと防水シートとの取合部において、止水性や施工性が非常に良かった。

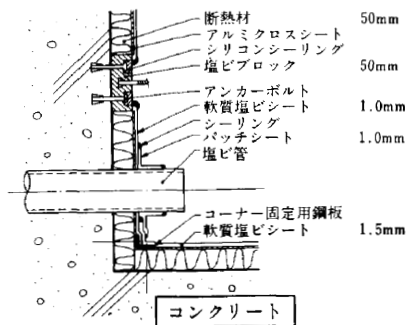


Fig.7 断熱・防水施工の納り

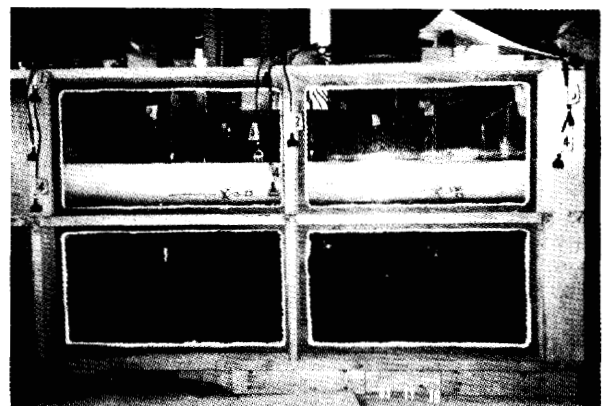
§5 蓄熱槽の効率

現在の蓄熱槽理論では、完全押し出し流で死水域の少ない蓄熱槽が、最も性能が良いとされている。

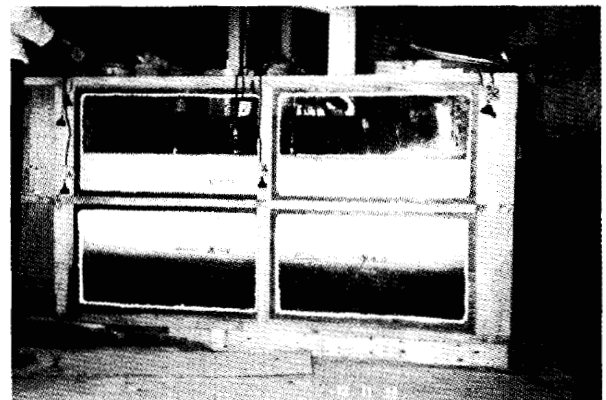
5-1 温度成層効果

冷熱源装置で作られた冷温水を、小さく区切られた各槽に均一に均一な温度で蓄熱することができるかによっ

て、蓄熱効率を向上させることができる。Fig.8・9は、すでに報告されている模型実験の結果である。Fig.8のL字型連通管方式では、温度差による成層現象が顕著に現われており、槽内のコーナー部分での死水域や短絡流も見られず、押し出し流に近い状態であることがわかる。Photo.1は90°に曲がった槽の模型実験であるが、上部に流入した高温水域が、時間の経過とともに下部の低温水域を押し下げ、きれいな成層となって蓄熱されてゆくのが良くわかる。Fig.9の通常連通管方式では、隅部に死水域が見られ、上→下→上と水の流れが変わるため成



スタート後13分経過



スタート後37分経過
(使用温水温度50℃)

Photo1 L字型連通管方式の温度成層効果

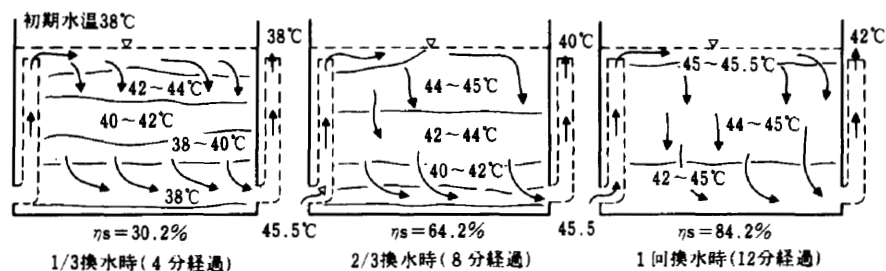


Fig.8 L字型連通管方式蓄熱槽換水時の温度分布図

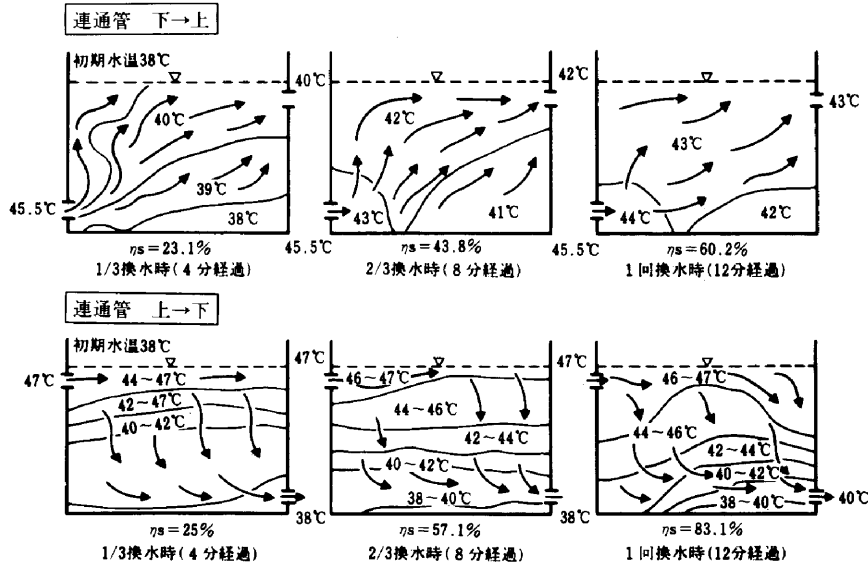


Fig.9 通常連通管方式蓄熱槽換水時の温度分布図

層→混合がくり返され、50~60%程度の蓄熱効率しか得られないのが実状である。Table2は、温度成層流方式の蓄熱効率の比較である。L字型連通管方式は、現在最も効率が良いといわれているもぐりぜき方式と、ほぼ同等の効率をもっていることがわかる。

Table2 蓄熱効率の比較 (単位%)

方式	1回換水時	2回換水時	
通常連通管方式	上→下	83.1	90.4
	下→上	60.2	85.1
もぐりぜき方式	86.1	91.7	
L字型連通管方式	84.2	90.7	

5-2 蓄熱水温度と槽数

蓄熱槽では始端槽から終端槽に至るまで、均一な温度で蓄熱することが理想である。Fig.10は、第1槽から各槽のL字型連通管出口温度の動きである。この図から槽の数が多くなるのに従って、蓄熱される温度が高くなってゆくのわかる。これは、槽の数が多くなることによって、水の混合率が大きくなってゆくため、終端槽に近い槽の水温と始端槽との水の温度差が大きくなる。このことから、できるだけ槽数を少なくした方が、蓄熱効率の向上につながるといえる。Fig.11は、電気ビルの第6槽における温度変化である。1回換水が完了した時点では、水槽の上部と下部との温度差がわずか0.35°Cとなっており、温度成層の良い高効率な結果が得られた。Fig.12は、連通管別の槽数と蓄熱効率のグラフである。槽の数が5槽を超えると、L字型連通管と通常管との効率も数%の違いしかなくなるが、これは混合の度合いが進んでゆくためである。また、水深が浅いと冷水(温水)が上部

(下部)に及ぼす影響が大きくなり、混合要素を高めることになる。このため、水深が深いほどL字型連通管方式の効率は高くなる。

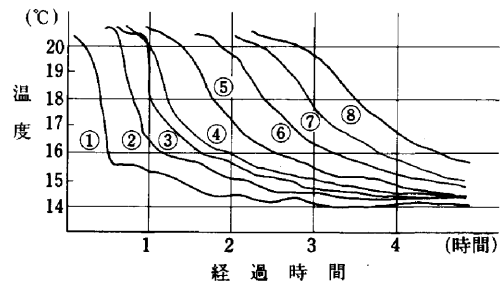


Fig.10 各槽の連通管出口温度の動き

5-3 有効容積率(P値)と蓄熱槽の効率

Fig.13に示すように蓄熱槽内では実質的に放熱運転に利用されない死水域が生ずる。蓄熱槽の有効容積率(P値)は(2)式で求められる。

$$P=1-\nu/V \dots\dots\dots(2)$$

ν : 死水域の容積 (m³)

V : 槽全体の容積 (m³)

電気ビルの有効容積率(P値)は、

$\nu=53.6641$ (m³)

$V=996.5212$ (m³)

とすると、

$$P=0.946$$

となり、約95%という大きな数値が得られた。これは、通常連通管方式に比べて有効容積率は13~15%ほど高い。

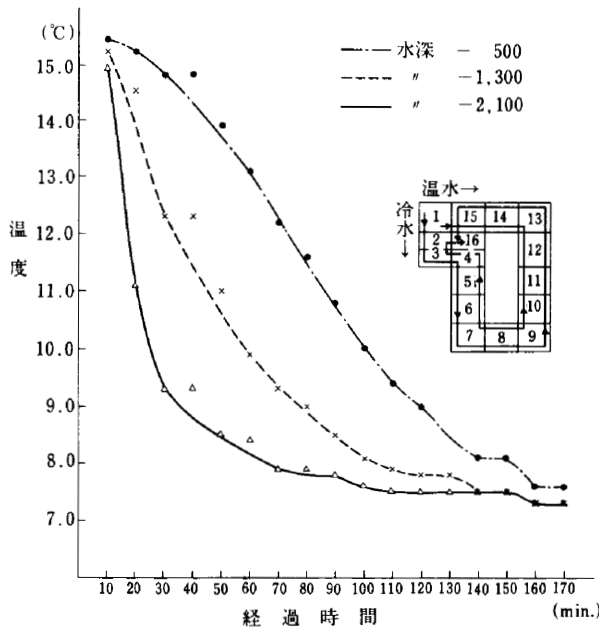


Fig.11 電気ビル蓄熱槽第6槽の水深別温度変化

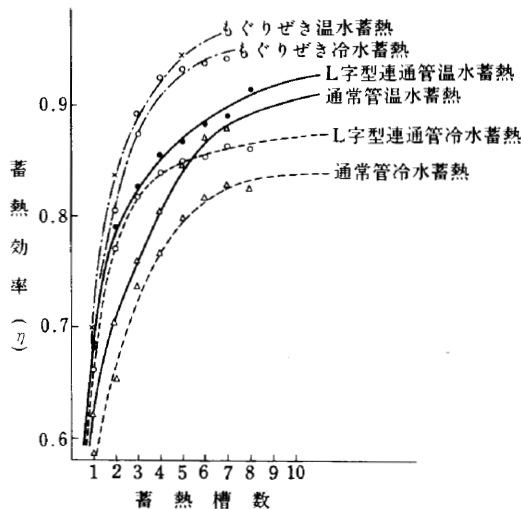


Fig.12 連通管方式別にみた槽数と効率 (1回換水時)

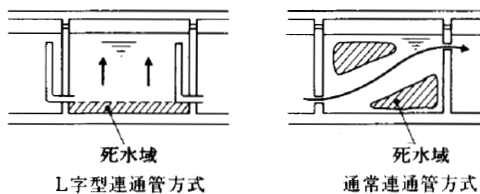


Fig.13 蓄熱槽の有効容積部分

次に蓄熱槽の効率は一般に(3)式で求められる。

$$\eta = \frac{Q}{\Delta t \cdot V \cdot 1000} \dots (3)$$

η: 蓄熱槽の効率

Q: 利用可能な熱量 (kcal)

V: 槽の容量 (m³)

Δt: 利用可能な温度差 (°C)

しかし(3)式は水深の浅い混合型蓄熱槽に適用されるのが一般的で、温度成層流型の蓄熱槽については(4)の式のように考える。

$$\eta = Q_o / Q_i \dots (4)$$

Q_o = Q_i - (Q_d + Q_w + Q_m + Q_a) とすると

$$\eta = \frac{Q_i - (Q_d + Q_w + Q_m + Q_a)}{Q_i} = 1 - \frac{(Q_d + Q_w + Q_m + Q_a)}{Q_i} \dots (5)$$

Q_o: 放熱運転により利用可能な熱量 (kcal)

Q_i: 蓄熱運転により蓄熱した熱量 (")

Q_d: 死水域の熱量 (")

Q_w: 躯体などから失った熱量 (")

Q_m: 混合損失熱量 (")

Q_a: その他の損失熱量 (")

(蒸発損失・漏水などによるもの)

電気ビルについて求めると、

$$Q_d / Q_i = (\text{全水量} - \text{有効水量}) / \text{有効水量} = (996.5212 - 912.8571) / 912.8571 \approx 0.0917$$

$$Q_w = 8,065 \text{ (kcal)} \quad Q_i = 360,000 \text{ (kcal)}$$

$$Q_w / Q_i = 8,065 / 360,000 = 0.0224$$

Q_m: 蓄熱運転の初期及び放熱運転の終期に起こるもので、Q_m/Q_i = 0.02と仮定する。

Q_a: Q_a = 0と仮定する。

(5)式より

$$\eta' = 1 - (0.0917 + 0.0224 + 0.02) = 0.8659$$

上記計算結果から、電気ビルの場合、従来考えられていた通常連通管方式蓄熱槽の効率60%前後に比較して、87%という高効率な値が得られた。

§6. おわりに

今まで蓄熱槽に対しては、建設費用がかかる割には放熱損失が多く、効率が悪いなどというイメージが強かったがそれらのものに対して、L字型連通管方式は高く評価される方式であることが実証された。Table3に各方式別の比較をまとめた。

Table3 蓄熱槽の各方式別比較表

名 称		連通管方式	もぐりぜき方式	L字型連通管方式
構 造	スペース利用度	連通管による水位差あり	良 好	連通管による水位差あり
	水 深	浅いほうがよい	深いほうがよい	深いほうがよい
効 率	槽内温度分布	むらを生じやすい	一 様	少し上下方向の温度分布あり
	蓄熱効率	50~60%	80~90%	80~90%
流 れ の 特 徴	流れの性質	押し流れと、混合流れの中間の流れ	押し流れに近い	温度成層流れて押し流れに近い
	死 水 域	隅部に生じやすい。	せき上部、または連通口下部に生じやすい	連通管下部に生じやすい
	短絡流れ	生じやすい	排水管が原因となりやすい	排水管が原因となりやすい
	蓄熱放熱の制御性	難しい	良 好	良 好
槽構築の難易		◎	△	○
そ の 他				シーズン毎の容量切替えが容易

最後に、徳島電気ビル蓄熱槽の測温データ収集にあたって、四電産業(株)徳島営業所管理課の皆様方の御協力を頂き、ここに厚く御礼を申し上げます。また、四国電力(株)建設技術部渡辺副長並びに(株)四電技術コンサルタント建築部後藤部長の御指導、御協力を頂き、ここにあわせて厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1)四国電力(株)総合技術開発研究所「L字型連通管を使用した蓄熱槽の高効率化について」S. 57. 3
- 2)(株)四電技術コンサルタント「蓄熱槽模型実験の結果」