

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その77）
蓄熱式空調システムの槽内熱挙動検証

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems,
the BEST (Part77)

Inspection of Thermal Behavior of Thermal Storage Tank

正会員 ○河路 友也（トーエネック） 特別会員 村上 周三（建築研究所）
正会員 柳原 隆司（東京大学） 正会員 工藤 良一（蒼設備設計）
正会員 二宮 博史（日建設計） 名誉会員 中原 信生（環境システック中原研究処）

Tomoya KAWAJI*1 Shuzo MURAKAMI*2 Ryuji YANAGIHARA*3 Ryoichi KUDO*4

Hiroshi NINOMIYA*5 Nobuo NAKAHARA*6

*1 Toenec Corporation *2 Building Research Institute *3 The University of Tokyo

*4 Soh M&E engineers Corporation *5 Nikken Sekkei *6 NESTEC

This paper describes the result of inspection of thermal behavior of thermal storage tank. The calculation precision was inspected by comparison of BEST and TESEP-W which was provided by Heat Pump & Thermal Storage Technology Center of Japan. About connected perfect mixing type and thermal stratification type storage tank, enough precision was confirmed in practical use. Regarding ice thermal storage system, the program is still incomplete and the verification process is continuing.

はじめに

BEST は自由にモジュールを接続することにより、多様な空調システムのシミュレーションが可能となる。蓄熱システムにおいても、水蓄熱槽(連結完全混合槽型、温度成層型)と現場築造型氷蓄熱のモジュールが用意され、シミュレーションが可能となっている。蓄熱を行わない空調システムでは、熱源で製造された冷温水がそのまま二次側空調機に供給されるが、蓄熱式空調システムの場合には、熱源からの冷温水は一旦、蓄熱槽に投入してから二次側に送水される場合が多い。また、熱源入口水温も二次側還水ではなく、蓄熱槽からの供給となるシステムが多い。そのため、蓄熱式空調システムでは、蓄熱槽内の熱挙動が、二次側への送水温度や熱源の運転に影響を与えることになる。よって、蓄熱槽内水温の計算精度はエネルギー計算においても重要な要素となる。本報では、主に水蓄熱槽の熱挙動の検証結果について述べると共に、氷蓄熱システムの概要を紹介する。

1. 水蓄熱式空調システム槽内熱挙動検証

1.1 検証方法

既報¹⁾で示したように、BEST の水蓄熱槽計算部分には、TESEP-W²⁾の内容が移植されている。このプログラムは、筆者(中原)が名大在官時代に水蓄熱の研究³⁾を進めていく中で、N88BASICで開発した蓄熱槽効率の推定表作成のためのプログラムであるが、(財)ヒートポンプ・蓄熱センター(HPTCJ)の委員会にてWindows 化作業が行われ、成果品はHPTCJ の研修会教材として配布

されている。このソフトは実測値との検証もいくつか行なわれており、精度が確認されている。そこで、BEST と TESEP-W との計算結果比較により、精度検証を行なうこととした。

1.2 連結完全混合槽型蓄熱槽の検証

検証の方法は、TESEP-W と条件を可能な限り合致させた状態で BEST の計算を実施し、水温プロファイルの比較によって精度検証を行う。具体的には、以下の手順で行った。

- ①TESEP-W で計算を実行。
- ②TESEP-W の計算結果から、二次側還水温度・流量、熱源出口水温・流量を取り出す。
- ③BEST 側で、②の二次側還水温度・流量、熱源出口水温・流量を読み込み、その状態での計算を可能とする。
- ④二次側還水温度・流量、熱源出口水温・流量が同一条件で、蓄熱槽の水温計算が正しければ結果は同じになるはずである。
- ⑤両者の水温プロファイルを比較して、精度検証を行う。

なお、BEST は検証用に二次側還水温度・流量、熱源出口水温・流量を読み込み、それらを用いて計算が行なえるように一部改造したバージョンを使用している。計算条件は、30m³ の槽が 18 槽連結しており、熱源の運転時間は、昼間の 13~15 時を除く 21 時間、温度設定は熱源 10℃→5℃、二次側 7℃→15℃である。

図 1 に BEST の計算結果による水温プロファイルを示す。計算結果は 5 分間隔で出力されるが、ここでは 2 時間間隔の結果を示している。蓄熱・放熱の変動の様子が

確認できる。図 2 には、同一時刻、同一槽の水温を TESEP-W の計算結果を横軸に、BEST の計算結果を縦軸にした図にプロットしている。両者の結果はほぼ合致しているといえる。若干の誤差が生じる原因としては、BEST の方では簡易的に水温と流量を 1 時間の間は一定としているが、TESEP-W の方では直線内挿により 1 時間の中でも変化がある状態で計算が行われていることが考えられる。但し、この程度の誤差であれば、実用上は問題ないとする。

1.3 温度成層型蓄熱槽の検証

温度成層型蓄熱槽も連結完全混合槽型と同様な方法で検証を行った。計算条件は蓄熱槽容量 125m³ (1 槽式) の水深 4m とし、熱源運転時間は 24 時間とした。温度設定は、熱源 10℃→5℃、二次側 7℃→17℃の大温度差仕様である。また、蓄熱槽への接続は統括ヘッダー方式とし、温度成層型蓄熱槽では、冷温水の流入速度が槽内の温度成層の形成に与える影響が大きいので、口径を 250φ と 150φ の 2 タイプでそれぞれ検証した。なお、分割数は TESEP-W と同じ 31 とした。

図 3 と図 4 に接続口径 250φ 時の TESEP-W 及び BEST 計算結果による放熱時 (7:00~18:00) の水温プロフィールを

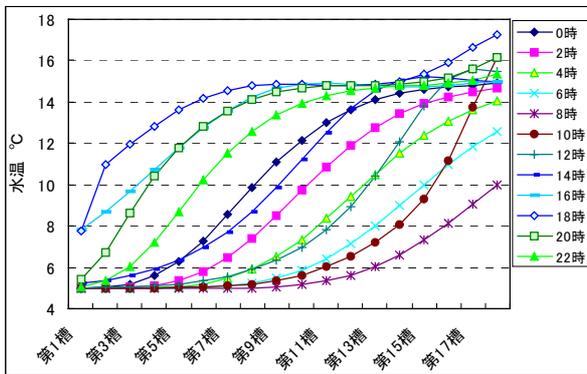


図 1 BEST 計算結果による槽内水温プロフィール

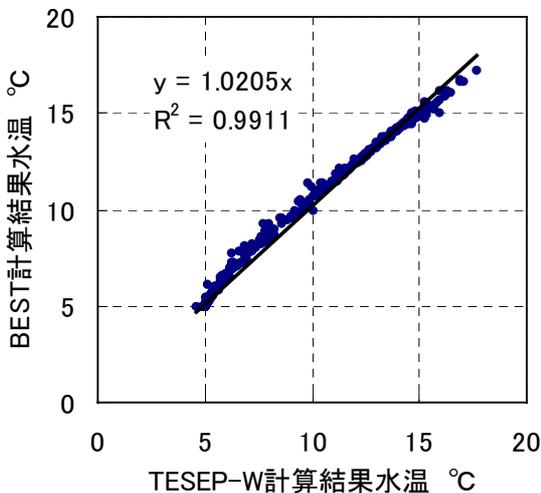


図 2 TESEP-W と BEST の水温計算結果比較

示す。熱源機の冷水出口温度は BEST では 5℃一定としたが TESEP-W では 4℃までを許容するなどの設定及び運転制御上の差などにより蓄熱完了間際 (7:00) の蓄熱温度は BEST でやや高めとなっているが、両者の結果はほぼ合致している。図 5 には、口径 250φ と 150φ の時の同一時刻、同位置の水温を比較しているが、この結果からも両者に大きな誤差は生じていないことが確認できた。

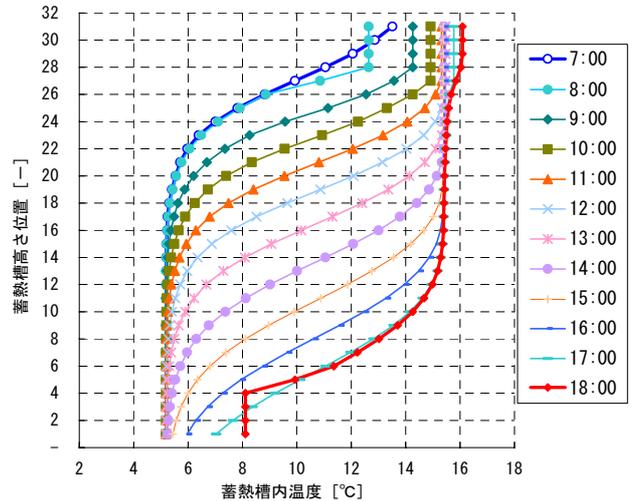


図 3 TESEP-W 計算結果による槽内水温プロフィール

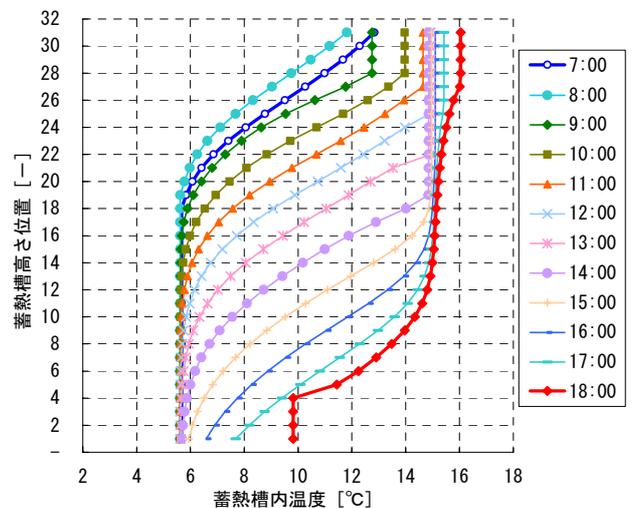


図 4 BEST 計算結果による槽内水温プロフィール

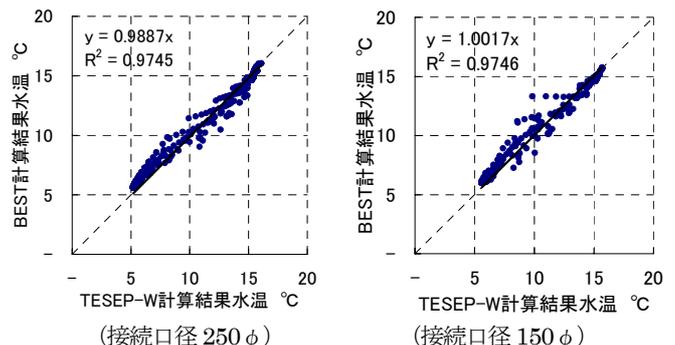


図 5 TESEP-W と BEST の水温計算結果比較

以上の検証結果から、BEST プログラムの水蓄熱式空調システムは、槽内の熱挙動が正確に計算された上で、年間のエネルギー消費量が計算されていると考えられる。

2. 水蓄熱槽の熱挙動ケーススタディ

2.1 基準システムと運転状態

前章で、水蓄熱槽の熱挙動の検証結果を示したが、入力の差異により、蓄熱槽内の水温プロファイルにどのような影響が現れるのかを、最新版のBEST 専門版 (BEST1004) を用いてケーススタディを行なった。計算に用いたシステムは、平成 21 年度に実施した、「1 から学ぶBEST実践講習会⁴⁾」で使用した 20 槽の連結完全混合槽型蓄熱槽である。このデータを基準状態とした。計算は助走期間 5 日間の後、8 月 7 日～14 日まで行い、8 月 10 日 22 時～11 日 21 時までのデータを利用した。図 6 には基準状態の蓄熱運転時の水温プロファイルを、図 7 には熱源の冷水出入口水温を示す。熱源の設定は入口 10℃、出口 5℃であるが、図 7 のようにシミュレーションにおいても熱源入口三方弁制御により 10℃程度に制御され、出口水温も 5℃程度に維持されている。水温プロファイルにおいては、蓄熱開始時の 22 時には第 1 槽の水温も 12℃まで上昇し、若干過放熱状態ではあるが、朝の 8 時以前に満蓄状態になり、熱源も停止している。

2.2 熱源入口三方弁故障時の槽内挙動の変化

基準状態から熱源入口三方弁が故障した場合を想定した試算結果を図 8、9 に示す。BEST における設定の方法は、熱源三方弁 PID 制御モジュールにおいて、設定値を 10℃から 30℃に変更している。これによって、末端槽温度が 30℃以上にならない限りは三方弁が働かないことになる。図 9 で分かるように、熱源入口水温が安定しないため、出口水温も変動し、槽内水温プロファイルも図 6 と比べ乱れた状態になっている。図 8 の 22 時の槽内水温は前日の放熱シミュレーションの結果であり、この水温では空調負荷が処理出来ていないと考えられる。

2.3 空調機仕様変更による槽内挙動の変化

空調機の仕様を変更し、二次側利用温度差を拡大させた計算結果を図 10 に示す。BEST の設定では、AHU のコイルモジュール流量の減少と、コイル列数を増加した。熱源と槽容量の変更はない。22 時の水温は放熱シミュレーションの結果であるが、図 6 に比べ前日の放熱量が増加するため水温が高くなり、熱源も 8 時まで稼働するため 22 時と 8 時の水温プロファイルで囲まれる面積は約 5% 大きくなった。同じ槽容量であっても、利用できる蓄熱量が増大する例である。これにより、二次側搬送動力の低減、夜間移行率の向上などが期待できるが、熱源の夜間運転での総熱出力以上には蓄熱量は増加しない。実際の設計では、二次側利用温度差の拡大により、槽容量の低減、夜間移行率の向上などの検討を行なうことになる。

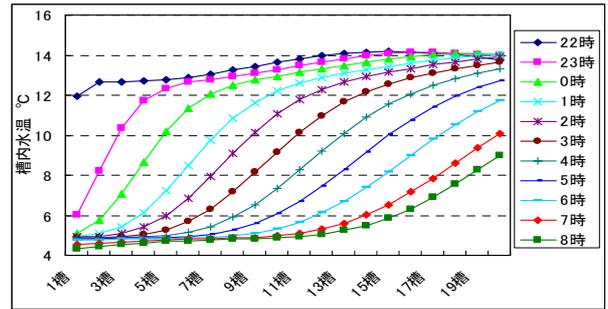


図 6 基準状態における蓄熱運転水温プロファイル

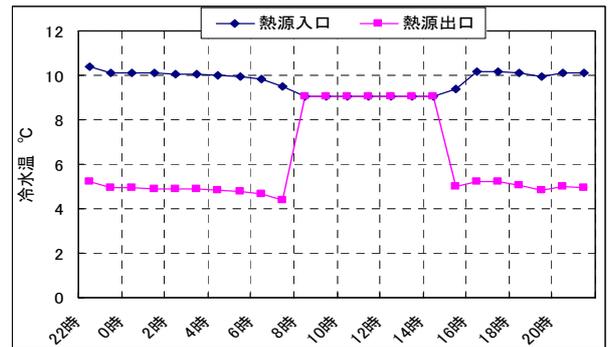


図 7 基準状態における熱源出入口水温

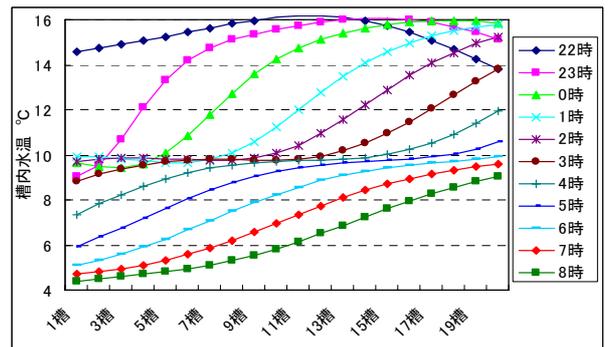


図 8 熱源入口三方弁故障時蓄熱運転水温プロファイル

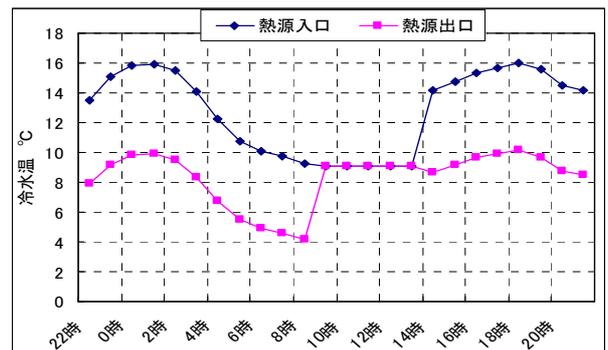


図 9 熱源入口三方弁故障時熱源出入口水温

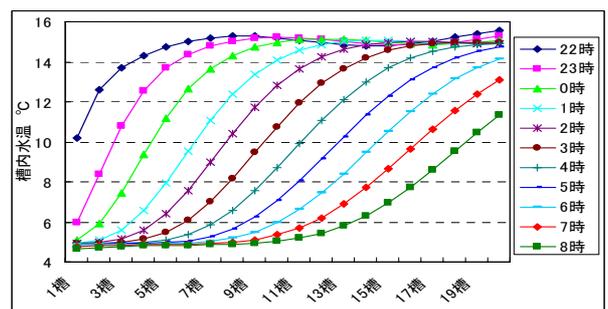


図 10 二次側温度差拡大時蓄熱運転水温プロファイル

3. 氷蓄熱システムの概要

3.1 基本プログラム

氷蓄熱式空調システムについても、筆者(中原)の研究成果⁹⁾である、N88BASICで開発されたTESP-ICEを基本プログラムとしている。このアルゴリズムは温度成層型であり、IPFが小さくなった場合に氷蓄熱部分が有効に利用できるように考慮されている。温度成層のモデルは、アイスオンコイルモデルであり、アルキメデス数から自動的に混合特性が計算されるようになっている。また、TESP-ICEには密度逆転ロジックも組み込まれており、水の最大密度である4℃の冷水が発生した場合には、瞬時に逆転・混合計算が行なわれる。

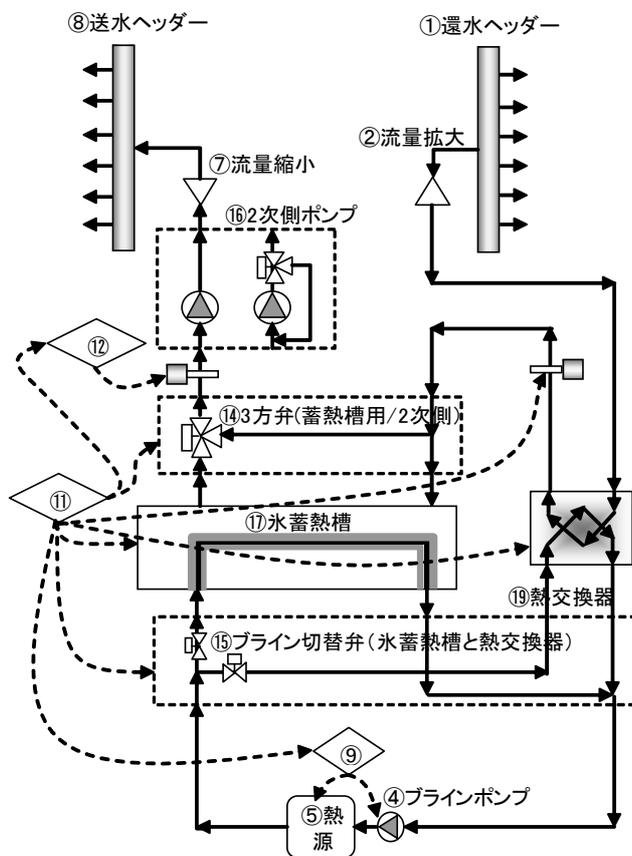


図11 氷蓄熱式システムとモジュール構成

表1 氷蓄熱式システムの各モジュールの名称

No.	モジュール名称	No.	モジュール名称
①	還水ヘッダー	⑫	PID制御(2次側送水)
②	流量拡大	⑭	3方弁(蓄熱槽用/2次側)
④	ラインポンプ	⑮	ライン切替弁(蓄熱槽用/ 熱源側)
⑤	ラインチラー	⑯	2次側ポンプ
⑦	流量縮小	⑰	氷蓄熱槽
⑧	送水ヘッダー	⑱	熱量計
⑨	熱源制御		
⑪	蓄熱コントローラ		

3.2 システム構成

図11と表1に氷蓄熱システムの構成とモジュール名称を示す。氷蓄熱システムと共通な部分も多いが、ブライン-水熱交換器などが追加される。

3.3 検証状況

氷蓄熱システムについても検証作業を進めているが、現時点では、以下のような状況である。

- ・氷融解ロジックは、問題ないと考えられる。
- ・密度逆転解消ロジック組込み後の低部及び頂部の温度プロファイル計算が十分満足できる安定性を得るまでに至っていない。
- ・熱源の追いかけ運転を含む完全な運転シミュレーションを行うまでに至っていない。

4. まとめ

BESTプログラムの氷蓄熱システムの槽内熱挙動の検証結果から、精度的に問題無いことを示した。また、各種設定による槽内熱挙動の変化を示し、BESTの性能検証的な利用の可能性も紹介した。氷蓄熱については、現状の紹介のみ行なったが、早期に検証作業を進める予定である。

【謝辞】

本報は、(財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」・「BEST 企画委員会」(村上周三委員長)および専門版開発委員会(石野久彌委員長)、行政支援ツール開発委員会(坂本雄三委員長)、蓄熱・蓄電等システム検討WG(柳原隆司主査)の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表するものである。蓄熱・蓄電等検討WG名簿(順不同)主査:柳原隆司(東京大学)、幹事:合田和泰(蒼設備設計)、委員:中原信生(環境ステック中原研究処)、光野茂生(関西電力)、柳井崇(日本設計)、岩田美成、澤田佳也、井上聡(以上、中部電力)、山本秀希、小澤正一(以上、東京電力)、工藤良一(蒼設備設計)、鄭明傑(三晃空調)、河路友也(トーエネック)、助飛羅力(三機工業)、野原文男、二宮博史(以上、日建設計)、内海一朗(ヒートポンプ・蓄熱センター)、事務局:生稲清久(建築環境・省エネルギー機構)、岡崎玲子(ヒートポンプ・蓄熱センター)

【参考文献】

- 1) 河路友也・村上周三・柳原隆司・合田和泰・二宮博史: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その33) 蓄熱式空調システムのプログラム概要、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp. 1133~1136、2008. 8
- 2) 河路友也、中原信生: 熱源・エネルギーシステム最適設計のためのシミュレーションプログラム実用化への取り組み、日本建築学会学術講演梗概集D-2、pp. 1123-1126、2008
- 3) 中原信生・相良和伸・辻本誠: 蓄熱槽に関する研究、第3報-運転シミュレーションを用いた実験計画法による連結完全混合型蓄熱槽の蓄熱槽効率の推定、空気調和・衛生工学会論文集、No. 20、pp. 59~72、1982 他一連の研究
- 4) BEST コンソーシアム発行: 1から学ぶBEST 実践講習会テキスト、2009
- 5) 中原信生・山羽基: 氷蓄熱槽の熱特性に関する研究、第3報-アイスオンコイル型氷蓄熱槽のシミュレーションモデルと蓄熱槽効率推定表の作成、空気調和・衛生工学会論文集、No. 56、pp. 13~24、1994