

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 107）

BEST を利用した水蓄熱式空調システムの高効率化検討とフォルトシミュレーション

## Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part107)

### Study on Efficiency Improvement and Fault Simulation of Air Conditioning System with Water Thermal Storage Using the BEST

正 会 員 ○河路 友也（トーエネック） 特別会員 村上 周三（建築環境・省エネルギー機構）  
技術フェロー 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 Takashi YANAGIHARA\*3 Ryoichi KUDO\*4

Hiroshi NINOMIYA\*5 Nobuo NAKAHARA\*6

\*1 Toenec Corporation \*2 Institute for Building Environment and Energy Conservation

\*3 The University of Tokyo \*4 Soh M&E engineers Corporation \*5 Nikken Sekkei \*6 NESTEC

The thermal storage systems installed in the BEST program are water thermal storage, ice tank constructed on site and ice unit type. Verification of the thermal behavior of all models has already finished, however the thermal storage controller is being developed because it is inadequate yet. This paper shows the study on efficiency improvement and fault simulation of air conditioning system with water thermal storage using the BEST.

#### はじめに

既報<sup>1)~3)</sup>においては、BEST 専門版に搭載されている蓄熱システムの概要、計算精度検証などを紹介してきた。本報では、蓄熱システムの最新の開発状況を示すと共に、BEST 専門版を利用した、水蓄熱システムの高効率化検討およびフォルトシミュレーションの内容について示す。節電要請が高まる中、蓄熱システムは、快適な室内温熱環境を維持しながら節電が可能なシステムであるため、採用が拡大することも期待される。その場合には、本稿で示すような、蓄熱システムの効果を最大限に引き出すための検討を実施していただきたい。

## 1. BEST 専門版における蓄熱システム開発状況

### 1.1 水蓄熱システム

水蓄熱システムについては、既報<sup>1)2)</sup>で示したように、精度検証まで終了しており、利用可能な状態になっている。但し、蓄熱コントローラについては、簡易なものしか準備されていないため、実際の蓄熱コントローラに近い制御や最適制御は行えない状態にある。そこで、現在は、蓄熱コントローラのバリエーションを増やす作業を進めている。具体的には、①簡易予測（前日負荷）：前日と同等な負荷があると想定して翌日の熱源運転時間を決定、②簡易予測（曜日別負荷）：前週の同一曜日と同等な負荷があると想定して翌日の熱源運転時間を決定、③負荷計算予測：BEST で事前に計算した負荷を利用して翌日の熱源運転時間を決定、の 3 種類である。この他、運

転スケジュールや熱源出口水温の設定を、月別に変更可能なように改良も進められている。

### 1.2 氷蓄熱ユニットシステム

氷蓄熱ユニットについては、既報<sup>3)</sup>で示したように、メーカーの特性式を組み込み、実機の運転に近い計算を可能としており、開発作業は完了している。

### 1.3 現場築造型氷蓄熱システム

現場築造型氷蓄熱システムについては、既報<sup>3)</sup>で示したように槽内の熱挙動についての確認は終えているが、システム全体としての制御については未完成の状態であり、実用可能なレベルではない。氷蓄熱システムについても、水蓄熱システムと同様な蓄熱コントローラを実装することを予定している。

## 2. 検討用モデルシステム

前記のように氷蓄熱ユニット以外は、年間計算を最適な蓄熱制御で実行することは困難な状況ではある。しかし、水蓄熱システムについては、短期間の計算による高効率化の検討やフォルト状態の再現は可能である。そこで、次章より、BEST 専門版を利用した、水蓄熱システムの高効率化検討およびフォルトシミュレーションの内容について示す。本章では、計算に用いたモデルシステムについて説明する。図 1 に検討用モデルシステム系統図を示す。蓄熱槽は、検討内容によって連結完全混合槽型、温度成層型蓄熱槽として計算している。二次側は二方弁制御による変流量制御としている。図 2 に熱源、蓄

蓄熱槽設計に利用した冷房最大負荷を示す。これは、BESTプログラムの最大負荷計算機能により算出した値である。この負荷に対して、熱源冷水 11℃→6℃（限界入口水温 9℃）、二次側冷水 7℃→17℃（限界送水温 8.5℃）で設計を行った結果、熱源の冷房能力は 630kW、冷水蓄熱槽容量は連結完全混合槽(30 槽)では 450m<sup>3</sup>、単槽温度成層型蓄熱槽では 420m<sup>3</sup>となった。暖房負荷に対しても、これらの容量で処理可能なことを確認している。

### 3. 水蓄熱システムの高効率検討

#### 3.1 連結完全混合槽型水蓄熱槽の槽数変化

連結完全混合槽型蓄熱槽の場合は、槽全体としてのピストンフローを形成するために、50 槽程度までは可能な限り槽数を増加することが望ましい。しかしながら、槽数の違いによる差を直感的に判断することは容易ではない。そこで、BEST プログラムを用いて、槽数の違いによる槽内水温の差について検討を実施した。2 章で示したようにモデルシステムでは 30 槽としているため、10 槽に減らした場合の計算結果との比較を行った。30 槽では 15m<sup>3</sup>/槽であるが、10 槽では 45m<sup>3</sup>/槽として計算を行った。図 3 と図 4 に、始端槽、終端槽、中間 2 点の水温変化を示す。15 時の時点における水温を比較すると、10 槽の方が、水温が高くなっていることが分かる。図 5 と図 6 には、位置型の水温プロフィールを示す。ピストンフローの形成状況に差が表れており、10 槽の方では始端槽の水温上昇が確認できる。仮に、10 槽で 30 槽の場合

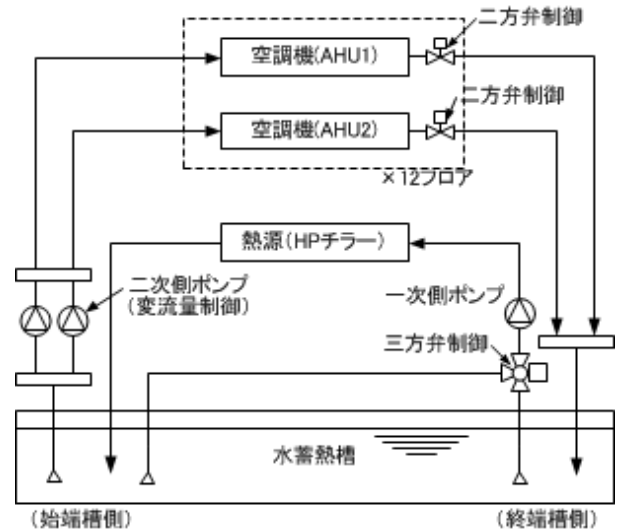


図1 検討用モデルシステム系統図

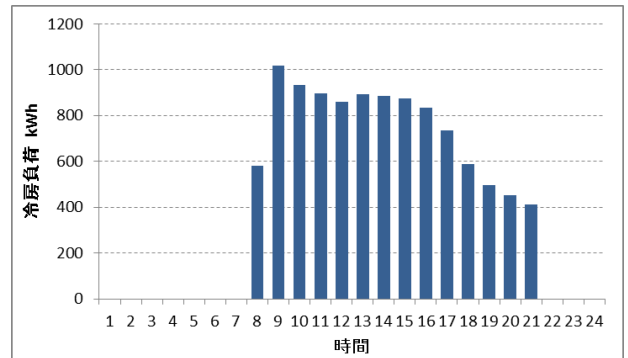


図2 検討システム設計用冷房負荷

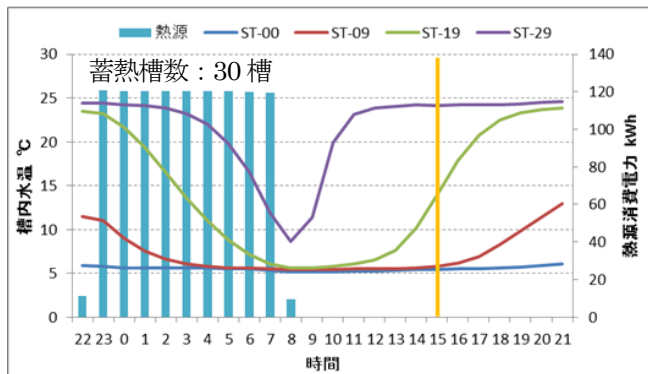


図3 蓄熱槽数が30槽の場合の槽内水温変化

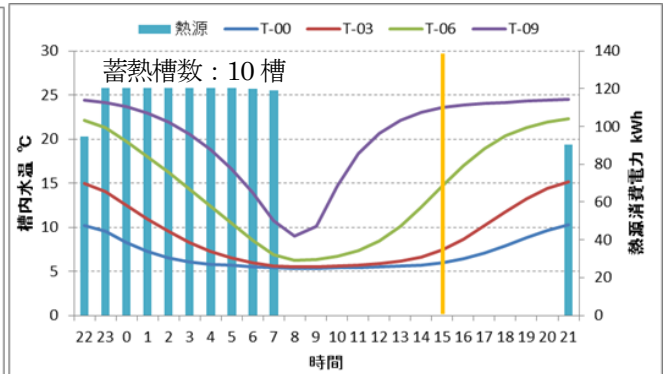


図4 蓄熱槽数が10槽の場合の槽内水温変化

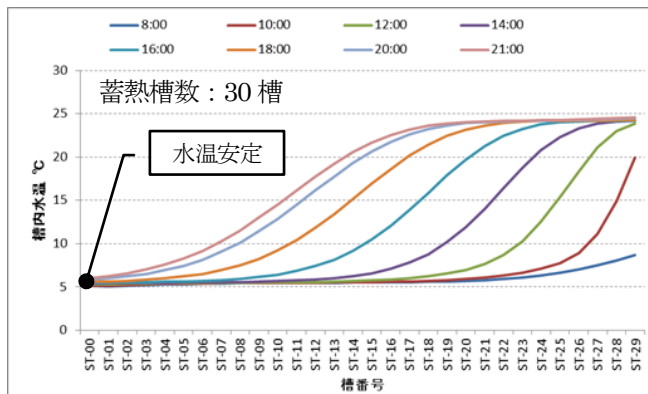


図5 蓄熱槽数が30槽の場合の位置型水温プロフィール

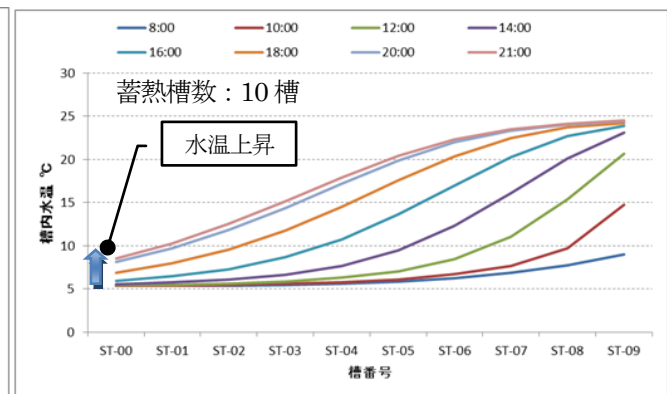


図6 蓄熱槽数が10槽の場合の位置型水温プロフィール

と同程度の二次側送水温度を維持することを考えれば、全体の槽容量を増加させることが必要となる。

以上のような検討を行えば、実設計においても適切な槽数と槽容量の組み合わせを決定することが可能となる。

### 3.2 温度成層型蓄熱槽の流入出面積変化

連結完全混合槽型では槽数がピストンフローの形成に影響を及ぼしたが、温度成層型蓄熱槽では流入速度が槽内の温度成層の形成に大きな影響を与える。流入速度が速くなると槽内混合が促進され、温度成層が破壊されることになる。適切な流速の目安はあるものの、槽内水温への影響を確認するためにはシミュレーションが必要となる。今回の例では、適正な流入口面積を  $0.69 \text{ m}^2$  とし、比較として面積を  $1/4$  程度にした  $0.18 \text{ m}^2$  での計算を実施した。図7と図8に計算結果を示す。図7が適正な流入口面積の計算結果である。温度成層が形成されており、低温側は低温に維持されている。一方、図8に示すように流入口が小さくなると槽内の完全混合域が拡大し、温度成層が破壊される。その結果として、低温側の水温が上昇してしまい、二次側送水温度が高温になってしまう。

以上のような検討により、温度成層型蓄熱槽の適切な流入出面積を決定することが可能となる。

## 4. 水蓄熱システムのフォルトシミュレーション

蓄熱システムのフォルトシミュレーションに関しては、BEST(水蓄熱)の元になっている TESP-W(水)と HVACSIM+を用いて行われたものがあり<sup>4)</sup>、同等の検証が BEST 専門版でも可能であることを示すために、シミュレーションを行った。

### 4.1 熱源入口三方弁故障

水蓄熱システムにおいて、定流量熱源の場合には、熱源入口三方弁が必要であり、この三方弁が正常に動作しなくては、正常な蓄熱運転が行えなくなる。しかしながら、三方弁が故障するような事象が発生することもある。三方弁が故障した場合にどのような現象が発生するのかを事前に理解しておくことにより、故障の早期発見に繋がる。そこで、BEST を利用したフォルトシミュレーションをここでは紹介する。BEST において、直接的に三方弁が故障したことを設定するような機能は無いが、設定値の工夫により故障状態を模擬することは可能である。三方弁の出口水温設定値は、冷房時においては  $10\sim 12^\circ\text{C}$  程度が一般的な値となる。この設定値を、十分に高い値、例としては  $50^\circ\text{C}$  に設定することにより、末端槽(高温側)から常に  $100\%$  吸い込むような運転となり、三方弁が故障した状況を再現することが可能となる。

図9と図10に、熱源入口三方弁が正常に動作した場合と故障した場合のシミュレーション結果を示す。三方弁が正常に動作している場合には、熱源の出口水温も設定値に制御されるため、蓄熱完了時には槽全体の8割近

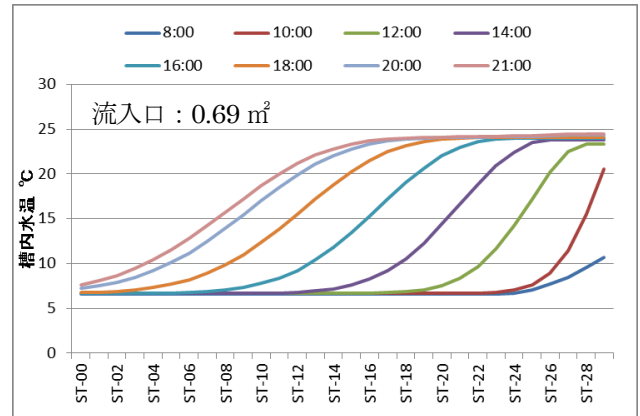


図7 流入口面積が適正時の位置型水温プロフィール

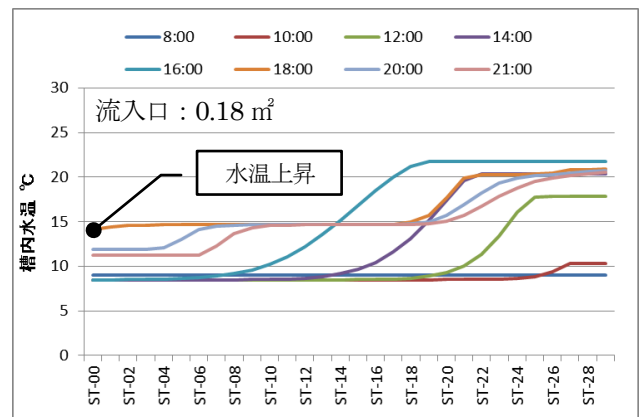


図8 流入口面積が過小時の位置型水温プロフィール

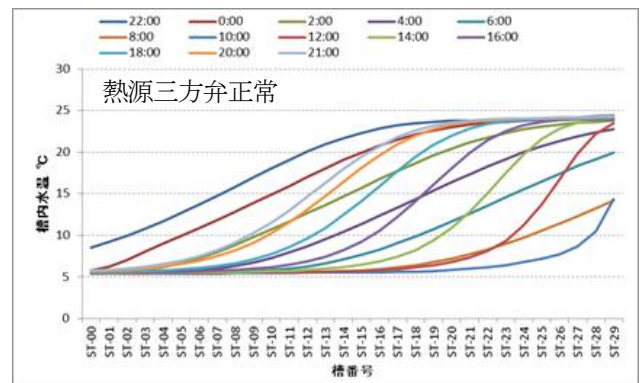


図9 熱源入口三方弁正常動作時の位置型水温プロフィール

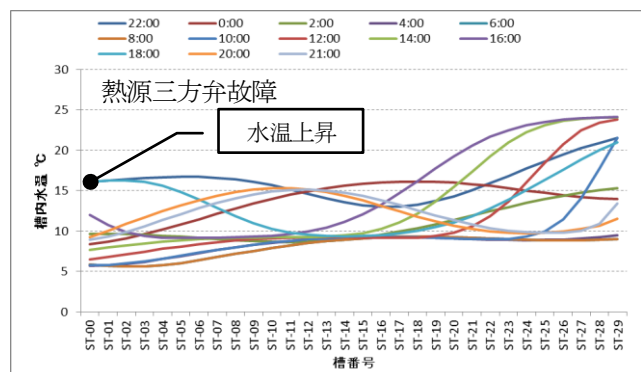


図10 熱源入口三方弁故障時の位置型水温プロフィール



くが目標蓄熱温度となっている。一方、三方弁が故障した場合には、熱源には終端槽の水温のまま投入されるため、熱源の出口水温も大きく変動してしまう。結果として、蓄熱完了時においても、槽のほとんどが目標蓄熱温度に達しない状況となり、二次側送水温度も早期に上昇することになる。二次側利用温度差を大きく設計するほど故障時の異常度合は大きくなるため、高効率な設計を行ったシステムでは、常に槽内水温プロフィールを監視することが望ましい。

#### 4.2 二次側二方弁故障

水蓄熱システムが正常に動作する要因として、熱源の入口三方弁と同様に重要なものが、二次側の利用温度差の確保であり、これを実現するのが、空調機の二方弁である。この二方弁の故障により、二次側が定流量となってしまう場合には、温度差が十分に確保されない状態で蓄熱槽に還水されてしまうため、蓄熱槽の利用熱量が低減してしまうなど、大きな悪影響を及ぼす結果となる。BEST プログラムにおいて、二次側二方弁故障を模擬する方法は、冷温水コイル二方弁のモジュールにおいて、最小流量の設定値を最大流量とほぼ同量の設定にすればよい。この設定により、二方弁の可変量は非常に小さくなるため、計算上は定流量と同様な状態となる。

図 11 と図 12 に二次側二方弁が正常に動作している場合と故障している場合の計算結果を示す。正常に動作している場合には、蓄熱槽の利用温度差が十分に確保されており、その結果として、始端槽側の水温は低温に維持されている。一方、二方弁が故障した場合には、蓄熱槽利用温度差は 50%程度に低下してしまっている。また、流量が増加することにより、蓄熱槽も 1 回転では収まらず、2 回転近く槽内水が入れ替わることになり、始端槽側の水温も高温となる。この状態では、室内の温熱環境を設定値に維持することは困難となる。

以上、2 つの事例でフォルトシミュレーションを紹介したが、図 10、図 12 のような状況に陥ることが事前に故障原因と関連付けておくことができれば、実際に故障が発生した時に、早期に原因箇所を特定でき、対応することが可能となる。このような運転管理により、エネルギー浪費や執務者からのクレームが削減できるものとする。

### 5. まとめ

BEST 専門版の蓄熱システム対応プログラムの現状と今後の予定について示した。また、水蓄熱システムのプログラムを利用した、高効率化検討およびフォルトシミュレーションについても計算事例を紹介した。

本報で示したような検討を実際のシステムにおいても実施し、改善を行うことによって、省エネルギーや快適な節電が実現されることを期待している。

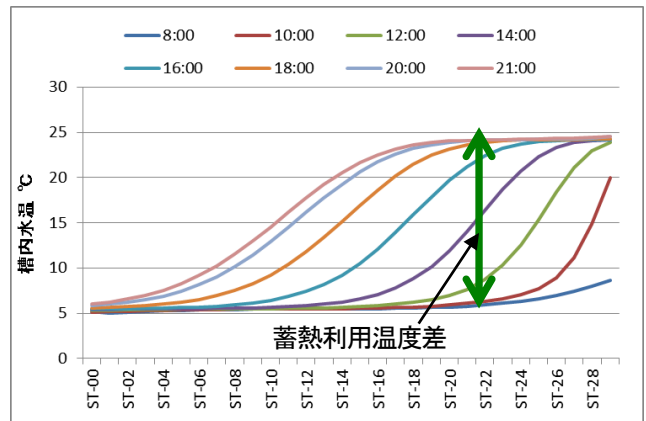


図 11 二次側二方弁正常時の位置型水温プロフィール

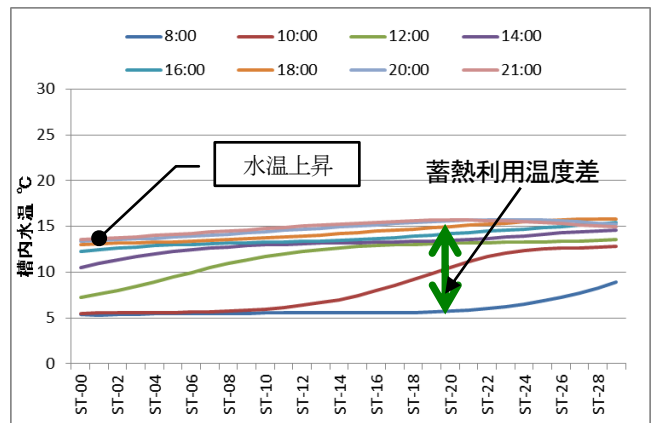


図 12 二次側二方弁故障時の位置型水温プロフィール

#### 【謝辞】

本報は、(一財)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(環境システム中原研究処)、光野茂生(関西電力)、柳井崇(日本設計)、加藤伯彦、井上聡(以上、中部電力)、田中勝彦、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)、松原隆彦(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)、早瀬訓、岩崎由佳(以上、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・村上周三・柳原隆司・工藤良一・二宮博史・中原信生: 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、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp. 2587~2590、2010. 9
- 3) 河路友也・村上周三・柳原隆司・工藤良一・二宮博史・中原信生: 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 93) 水蓄熱式空調システムの運転検証、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp. 1735~1738、2011. 9
- 4) 中原信生他: 空調システムフォルトの動的シミュレーションその 3~その 6、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 365~368、1993. 10、pp. 1105~1116、1994. 10