

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）

氷蓄熱式空調システムの運転検証

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part93)

Inspection of Thermal Behavior of Ice 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）
 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 Building Research Institute *3 The University of Tokyo

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

This paper describes the outline of program for air conditioning system with ice thermal storage which was installed into the BEST. The BEST program is compatible with two types of ice storage tank which are the tank constructed on site and unit type. The former was carried out to verify the thermal behavior of the ice storage tank. The latter confirmed the validity of the control flow of heat pump. Both verification results were good.

はじめに

既報¹⁾においては、氷蓄熱槽の熱挙動の検証結果、および現場築造型氷蓄熱システムの概要を紹介した。本報では、BESTプログラムの現場築造型氷蓄熱槽および氷蓄熱ユニットの運転検証結果を示す。

氷蓄熱槽の入力画面を示す。槽分割数の指定により、槽内縦方向の水温データを複数点出力することが出来る。槽本体への流入口の寸法は、氷融解後の槽内温度成層の形成に与える影響が大きいパラメーターである。製氷コイルについても、径や長さなどを任意に指定できる。

1. 現場築造型氷蓄熱の運転検証

1.1 現場築造型氷蓄熱の概要

氷蓄熱式空調システムについても、氷蓄熱同様に筆者（中原）の研究成果²⁾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、逆転が生じた時は瞬時に逆転解消が行われるとしており、氷蓄熱の場合は水の最大密度が4℃であることから底部領域に温度逆転が生じる期間が有る。BESTの氷蓄熱槽モジュールには、TESP-ICEの計算ロジックが組み込まれている。

図1にBESTで用意されている氷蓄熱システムのモジュール構成を示す。ライン-水熱交換器と氷蓄熱槽が直列に接続されている。ライン切替弁により夜間は氷蓄熱槽へ、昼間の追い掛け運転時は熱交換器へ供給できるようになっている。二次側への送水温度については、三方弁により調整できるシステムとなっている。図2に

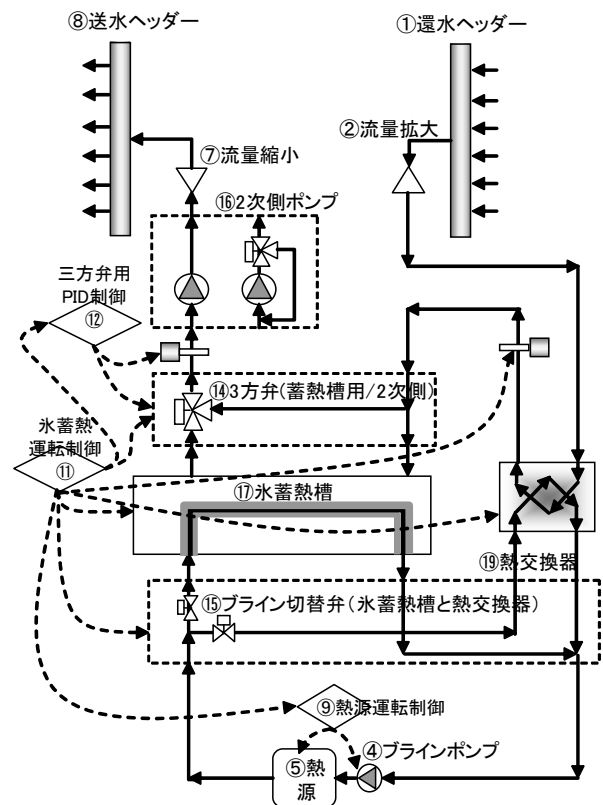


図1 氷蓄熱システムのモジュール構成

1.2 氷蓄熱槽熱挙動検証

氷蓄熱システム同様、氷蓄熱システムにおいても槽内の熱挙動は、システム全体に与える影響が大きい。そのため、氷蓄熱槽モジュールに限定して熱挙動の検証を行なうこととした。検証方法としては、氷蓄熱へ流入するブライン温度・流量、および二次側還水温度・流量を境界条件として与えて計算を実施した。図3に境界条件の内容を示す。熱源については、ピーク時間帯の3時間以外は稼動状態であり、製氷時のブライン温度は-6°Cである。追い掛け時の温度は前述の TESP-ICE の計算結果を参考にしている。二次側の還水温は 22°C で一定とし、流量は負荷に応じて変動させる条件とした。BEST プログラムには、このようにモジュール単位での計算や検証が行なえるように、境界条件ファイルを作成し、それを読み込んで計算する機能が用意されている。

槽内水温プロフィールの計算結果を図4と図5に示す。図の横軸1層側が槽の底部、低温側となり、20層側が槽の上部、高温側である。図4が蓄熱槽本体への流入口径が300mmであり、図5が600mmの場合である。残氷がある時間帯は、槽内水温は0°Cとなるが、氷の融解が進むに従い、温度成層型氷蓄熱槽の熱挙動となり、低層部の低温をより長時間利用可能としている。口径が600mmの方が流入速度は低下するため、温度成層化が強くなっており、高温側の水温も更に高温になっていることが確認できる。槽内水温の挙動の様子は、TESP-ICE の計算結果とも近い結果となっており、氷蓄熱槽内の計算ロジックとしては、TESP-ICE の内容が問題なく移植されたものと考えられる。

tmTSSI 氷蓄熱 氷蓄熱槽20090101

名称 tmTSSI 氷蓄熱 氷蓄熱槽20090101

- 蓄熱槽本体
 - 蓄熱槽タイプ: 1 温度成層(単槽)型 [-]
 - 槽分割数: 20 [-]
 - 蓄熱槽容積[m3]: 142 [m3]
 - 蓄熱槽水深[m]: 5 [m]
- パツファ槽
 - 上部接続/パツファ槽容積[m3]: 8.5 [m3]
 - 下部接続/パツファ槽容積[m3]: 8.5 [m3]
 - 初期水温[°C]上部接続/パツファ槽: 5 [°C]
 - 初期水温[°C]下部接続/パツファ槽: 5 [°C]
- 蓄熱槽本体への流入口
 - 流入口の面積[m2]: 0.2826 [m2]
 - 流入口の形状: 0円管 [-]
 - 流入口の直径あるいは高さ: 0.6 [m]
- 製氷コイル
 - 最大製氷率IPF: 0.4 [-]
 - コイル配管の内側半径[m]: 0.00115 [m]
 - コイル配管の外側半径[m]: 0.0135 [m]
 - コイルの長さ[m]: 13574 [m]
 - コイルのパス数[-]: 12 [-]
 - コイルの熱伝導率[W/(m·K)]: 400 [W/(m·K)]
 - 攪拌している: 攪拌している [-]
- 蓄熱槽からの熱損失計算
 - 設置空間への熱損失を計算する: 設置空間への熱損失を計算する [-]
 - 熱通過率[W/(m2K)]: 0.3 [W/(m2K)]

図2 氷蓄熱槽条件入力画面

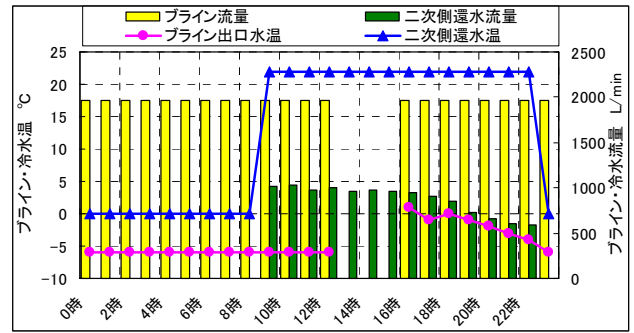


図3 温度と流量の境界条件

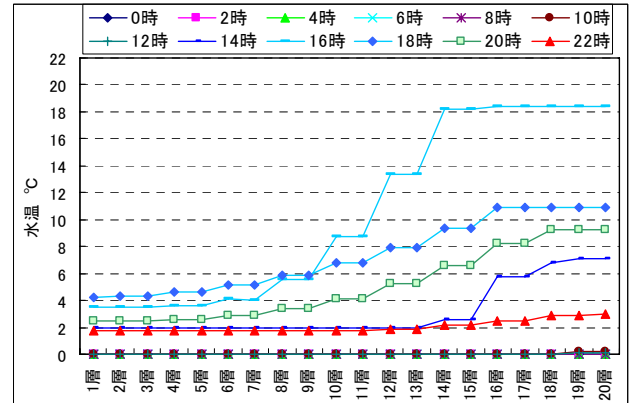


図4 口径 300mm の水温プロフィール計算結果

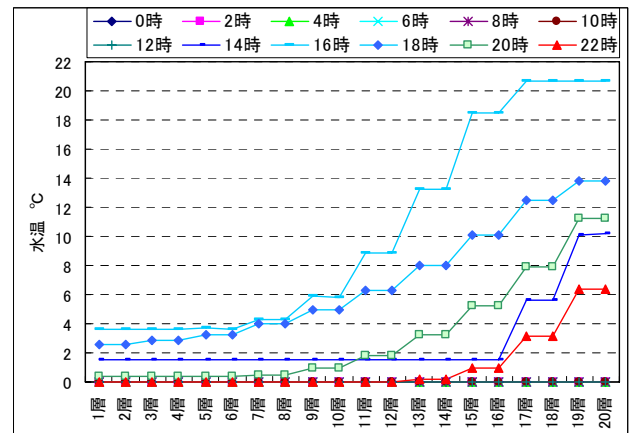


図5 口径 600mm の水温プロフィール計算結果

1.3 熱源運転制御の課題

現場築造型氷蓄熱システムの熱源制御の考え方は、氷蓄熱ユニットを参考にプログラムされている。氷蓄熱ユニットでは、氷蓄熱槽からの放熱は一定とし、熱源の出力調整によって負荷に追従する制御となっている。しかしながら、現段階ではこの熱源制御は組み込まれていない。よって、現状ではシステムとして正しく計算できない状況にある。現場築造型氷蓄熱槽の場合は、氷蓄熱システムと同様に、昼間運転時に熱源は最大出力を基本とし、放熱量で負荷に追従させる方法も考えられる。現場築造型氷蓄熱槽として、最適な熱源制御手法を検討したうえで組み込む予定である。

2. 氷蓄熱ユニットの蓄熱制御と運転検証

2.1 氷蓄熱ユニットの蓄熱制御の概要

氷蓄熱ユニットは、熱源機と氷蓄熱槽及び蓄熱制御等が一体の熱源機器で、製氷・解氷方式及び蓄熱制御方法などの違いにより、多様な機器が開発されている。そのためBESTでは、現在主流と考えられる方式を元に、汎用的に用いることが容易なモデル化を行っている。BESTの氷蓄熱ユニットモジュールの構成は、前述した現場築造型のような複数のモジュールを組合せるのではなく、氷蓄熱ユニットの製氷・解氷特性を定式化させたマクロモデルによる簡易方式とし、多様な氷蓄熱ユニット方式に容易に拡張可能としている。

氷蓄熱ユニットの構成概要を図6に示す。図中の氷蓄熱ユニットモジュールのシステム構成は代表的な内融式としており、BESTではこの部分をメーカー提供資料から定式化しブラックボックス化している。氷蓄熱ユニットモジュールとしては、外気や冷温水条件及び蓄熱制御設定によって能力変化する熱源機単体として扱うことができる。氷蓄熱ユニットの蓄熱制御フローを図7に示す。氷蓄熱ユニットでの蓄熱運転は、冷房のみを対象とし暖房は非蓄熱運転としている。また、蓄熱制御は、①ピークカット制御、②ピークシフト制御、③ピークカット+ピークシフト制御を選択できる。

ピークカット制御は、任意に設定する時間帯の熱源機を停止し、設定時刻前の放熱運転は行わず、熱源機は非蓄熱運転となる。設定時刻後は蓄熱量が0となるまで熱源機は停止する方式である。ピークシフト制御は、蓄熱槽からの放熱量を空調時間(10時間)一定として、不足する熱量を熱源機追従運転で賄う。ピークカット+ピークシフト制御は、その組合せである。

2.2 氷蓄熱ユニットの蓄熱運転制御の検証方法

蓄熱運転制御の検証は、BESTプログラムの例題負荷を用いて、各蓄熱制御を選択した時の運転状態と蓄熱制御フローの比較によって行った。検討条件を表1に示す。

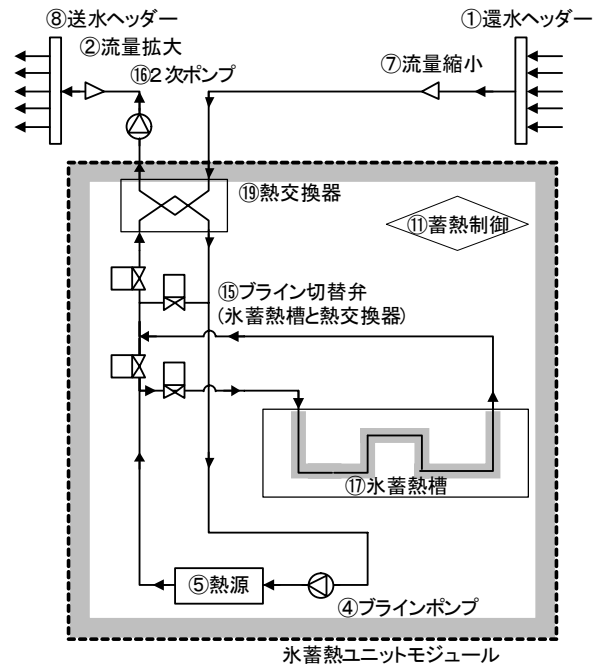


図6 氷蓄熱ユニットの構成概要

2.3 氷蓄熱ユニットの検証結果

各蓄熱制御の運転状況を図8に示す。高負荷日、低負荷日の各蓄熱運転制御は、蓄熱制御フロー通りの蓄熱・放熱運転となることを確認した。特に、ピークシフト制御の低負荷日における熱源機の追掛け運転状況は、現状の機器制御を反映できているものと思われる。

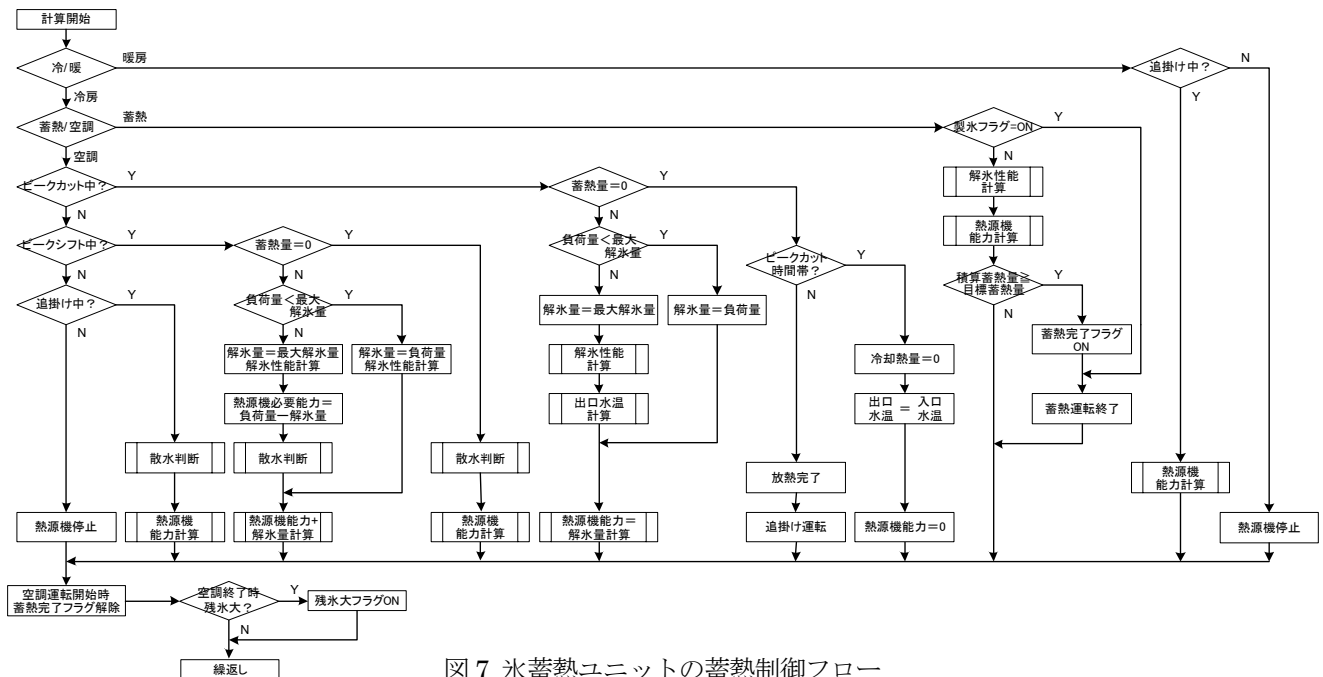


図7 氷蓄熱ユニットの蓄熱制御フロー

表 1 検証システム条件

蓄熱時間：22:00～8:00、空調時間：8:00～22:00
ピークカット時間：13:00～16:00
冷房期間：6/1～10/31 平日のみ空調
熱源機仕様：氷蓄熱ユニット×2台（並列運転）
定格冷却能力：269kW、蓄熱槽容量：4,177MJ
定格蓄熱能力：131kW
気象条件：東京

また、各蓄熱制御の空調時間帯の電力消費量の変動を見ると、負荷状況にもよるであろうが、ピークシフト制御が最大電力量を低く抑えることができることが分かる。

ピークシフト制御の年間（冷房）の制御状況を図9に示す。年間の運転状況から、低負荷日でやや蓄熱量の使用が低下する状況が見られるものの BEST プログラムの蓄熱制御通りであり、問題ないことを確認した。

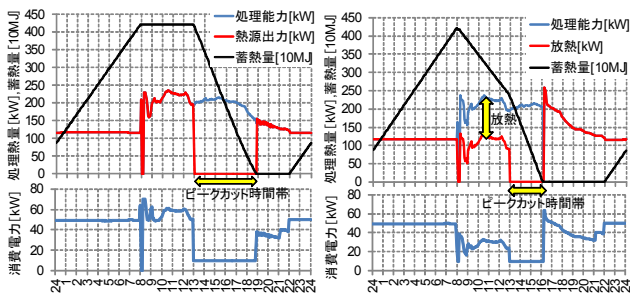
各蓄熱制御を選択したときの年間のエネルギー消費量の比較を図10に示す。検証した制御方式の中ではピークシフト制御が最もエネルギー量が小さくなる。これは、最新の熱源機の性能特性を導入したことで、部分負荷時のCOPを低下させずに運転できたためである。

3. まとめ

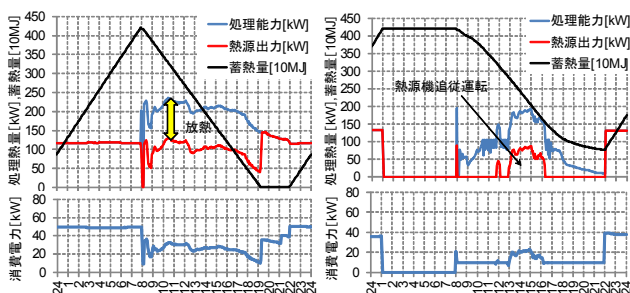
BESTプログラムの氷蓄熱システムに関して、現場築造型においては槽内の熱挙動を検証し、ユニット型では蓄熱運転制御を確認し問題ないことを確認した。

また、氷蓄熱ユニットに関しては、機種種のラインナップに応じた仕様設定や熱源機特性（能力やCOPなど）を替えることで、様々なメーカーの機種にも拡張できる可能性を確認できた。

今後は、氷（水）蓄熱の二次側運転条件を含めた検証を進めていく予定である。



(ピークカット) (ピークカット+シフト)



ピークシフト(高負荷日) ピークシフト(低負荷日)

図 8 運転モード毎の稼働状況

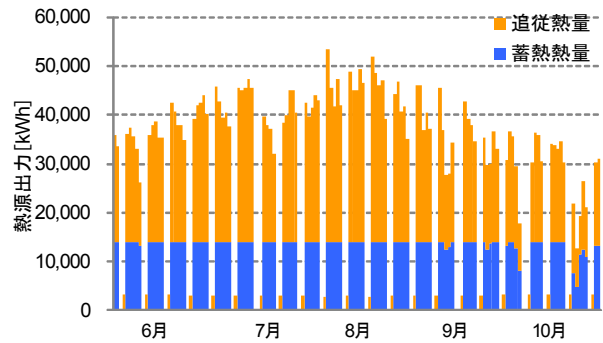


図 9 年間の冷房時の熱源機出力量（ピークシフト）

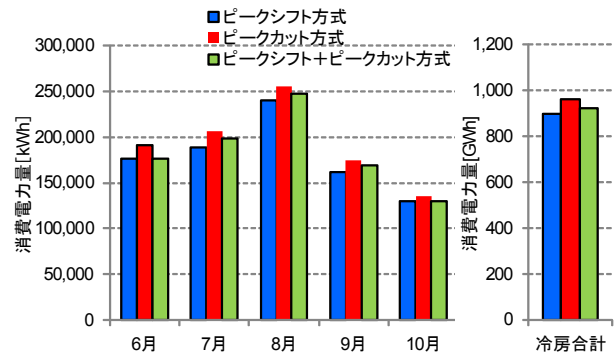


図 10 年間の冷房エネルギー比較

【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、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)、大嶋邦彦、松尾勇亮(以上、ヒートポンプ・蓄熱センター)。また、熱源機器の制御仕様等の資料提供頂いた、東芝キャリア(株)、日立アプライアンス(株)、三菱電機(株)の各社に謝意を表すものである。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) 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