

蓄熱システムのライフサイクル最適化の技術及び性能検証のマニュアル体系について

Comprehensive Technical Manuals for Life-Cycle Optimization of Thermal Storage HVAC System Technologies and Commissioning

名誉会員 ○中原信生(環境システィック中原研究処)

特別会員 射場本忠彦(東京電機大学) 正会員 南島正範(ヒートポンプ・蓄熱センター)

Nobuo NAKAHARA^{*1}, Tadahiko IBAMOTO^{*2}, Masanori Minamijima^{*3}

^{*1} Nakahara Laboratory, Environmental Syst.-Tech.

^{*2} Tokyo Denki University ^{*3} Heat Pump and Thermal Storage Technology Center of Japan

Thermal energy storage, TES, technology was first proposed early in 1950s claiming its advantage for cost and energy saving. Lots of efforts on researches and actual applications have been practiced since then for water storage and ice storage system. Then, the Heat Pump and Thermal Storage Center of Japan began fulfil duties for establishing TES technical manuals and educational activities for energy conservation, peak-shift of electricity and global warming gas reduction since latter half of 1990s as the TES national center, for which authors, Nakahara and Ibamoto, were invited as the technical advisors to lead the duty. After more than fifteen years of efforts the comprehensive technical manuals for life-cycle optimization of TES including commissioning guidebooks, as introduced in this paper.

1. 蓄熱式空調システム展開と基準化の沿革

1.1 初動期の活動

水蓄熱システムは1952年に柳町政之助氏の設計により日活多摩撮影所に適用、当学会では衛生工業協会誌 1957年3月号に同氏による講演記事が初めて掲載された。水蓄熱モデルの理論化は1970年代に中島泰孝氏が、外水外融型氷蓄熱システムは1980年代筆者(射場本)らが嚆矢となる研究開発を行い、それぞれ性能予測モデルを確立した。筆者(中原)は柳町氏の設計による大阪新歌舞伎座(1959年竣工)と倉敷市庁舎(1960年竣工)の施工を担当して感銘を受け、大阪放送会館新館(1963年竣工)の設計を担当し熱回収式複槽式水蓄熱システムを適用して以来その虜となり、大阪大林ビルに1973年に蓄熱最適化制御を開発・導入し、コンピューターコントロールを導入、その後、設計の鍵である蓄熱温度プロファイルを基軸とした蓄熱槽効率の同定と水蓄熱及び氷蓄熱システムシミュレーションの研究開発へと展開した。

1.2 学会の委員会活動

本学会に於ける活動としては1980年当時に東京電力より「蓄熱システムの省エネルギー設計手法の研究」を受託(委員長:中原)、蓄熱理論と設計・施工・保全技術のノーハウが集約され、その成果は「蓄熱式空調システム」(1982年発行)にまとめられた。次いで氷蓄熱の普及に伴い同書の増補改訂のための委員会が設置され(委員長:射場本)、1995年発行の「蓄熱式空調システム、基礎と応用」が発行された。さらに1996年にも同社委託による「蓄熱式空調システムの最適化制御と故障・異常診断に関する研究」(委員長:中原)が、国際共同研究 IEA/ECBCS/Annex25の研究活動を引き継ぐ形で設置され、その成果として1998年にオープンフォーラム「蓄熱システムの最適化と負荷予測」が開催され、負荷予測のベンチマークテストのコンペティション結果が討論された。

1.3 ヒートポンプ・蓄熱センターの活動

1997年にヒートポンプ技術開発センターがヒートポンプ・蓄熱センターに改組され、蓄熱技術のナショナルセンターと

して再発足したのを機に、蓄熱技術基準策定活動を開始し、筆者らは技術顧問として招聘され、水蓄熱を中原、氷蓄熱を射場本の役割分担で、マニュアルやプログラムの作成等を主導することとなった。それ以降今日まで18年間の活動により以降に示すような蓄熱システムのライフサイクルに亘る最適化の技術とコミュニケーションのための蓄熱技術基準が確立できたのであるが、前述の学会ベースで実施された諸研究成果が基盤にあることを記しておきたい。

マニュアルごとにワーキンググループを設け、委員の中から担当幹事(幹事会社)を指名し、持ち寄り資料も参考にしつつ執筆担当し、委員同士の査読を経てとりまとめられており、委員及び担当幹事名は各マニュアルの序文に記されている。

2. 蓄熱システム全体像

はじめに蓄熱システムの全体像を図1に示す。これをトータルシステムダイアグラムと呼び、氷蓄熱(アイスオシンコイル)を含め、この図上で不要な線を除去すればシステム系統図ができあがるようになっている。並列に設けられている蓄熱槽の一つ一つはそれ自体が単一温度成層型蓄熱槽であり、一連の連結完全混合層型蓄熱槽である。

3. 蓄熱技術基準の体系とその概要

3.1 全体構成

表1に蓄熱技術基準の体系を示す。設計関連マニュアルから不具合知診断ツールまでは建物・システムの企画から設計・施工・試験調整・運営保全・リニューアルといったライフサイクルの各フェーズの順に並べられている。コミュニケーションガイドブックと蓄熱技術の総論的な位置づけを含む「設計・制御マニュアル」、並びに後半の「低温送風空調」以降の周辺技術(初級マニュアルを含む)は全フェーズに関わるものである。但し、氷蓄熱技術に関わるものは主として設計・制御に関わるものであるが後半中にまとめて並べてある。ほかに資料として実態調査類と蓄熱用語集を含めている。

本体系に含まれるマニュアルは、特に水蓄熱システムに関

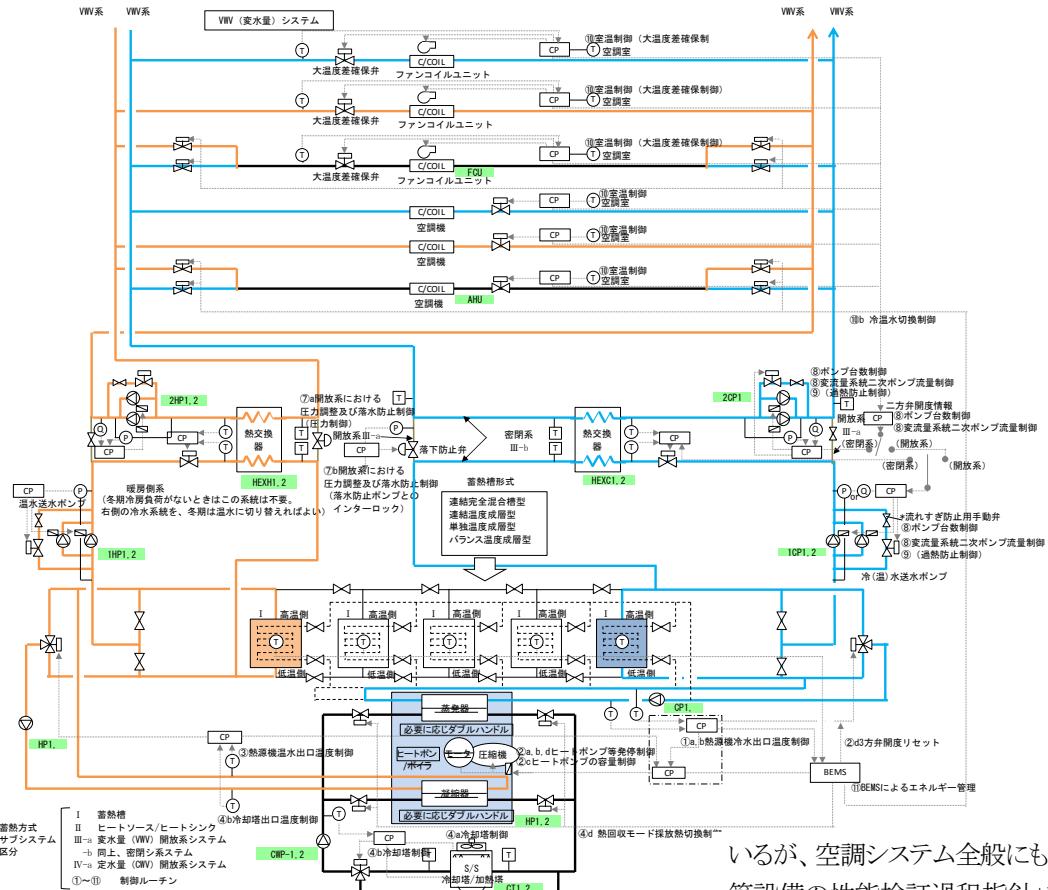


図1 蓄熱トータルシステムダイアグラム

表1 蓄熱技術基準の体系

蓄熱技術基準マニュアル運用ガイドブック		計算ソフト
コミュニケーション(Cx)	新築建物の蓄熱Cxガイドブック	
	既設建物の蓄熱Cxガイドブック	
	プロセス管理ツール/MQC蓄熱版	MicroHASP/TES/Win(負荷計算) TESEP-W(水蓄熱最適設計) BEST/TES(水・氷) TES_ECO(3E性能評価ツール)
設計・制御マニュアル		計画・設計編 現場築造型設計編 設計例編 事務所ビル(新設・リニューアル) データ集(事例図集、メーカーラインアップ) ソフト
設計ハンドブック	東京版 仙台版	低温送風空調システム 騒音対策マニュアル 水質対策マニュアル
蓄熱2次側空調システム設計マニュアル		初級蓄熱研修会テキスト 初級マニュアル(水蓄熱) 初級マニュアル(氷蓄熱)
センサーの基礎と保守ガイド		「建築設備設計基準(茶本)」蓄熱技術セミナーテキスト
蓄熱最適制御設計マニュアル		蓄熱機器カタログ 蓄熱技術WEB講座 Q&A
設計例	複合熱源蓄熱最適設計運用マニュアル ①老健施設、②中小規模病院、③高層オフィス、④大規模店舗、⑤寒冷地庁舎	ウェブサイト
施工	施工マニュアル 試運転調整(TAS)マニュアル	
機能性能試験(FPT)	試験マニュアル(TASマニュアルに含む) 制御シーケンスに基づくFPTマニュアル プロセスマニュアル(Cxに含む)	
保全診断	運用保全マニュアル 異常診断・性能評価マニュアル リニューアルマニュアル	
不具合検知診断ツール	C/E表(中原モデル) 不具合原因検索ツール(マクロモデル) 診断ツール運用ガイド	資料 氷蓄熱運転実態調査(第一期) 氷蓄熱運転実態調査(第二期) 異常診断データベース 用語集

しては全体を通じて内容に矛盾のないように首尾一貫するように努力されたり、計算ソフトとも有機的に繋がっており、設計例中に活用例が取り入れられている。

3.2 蓄熱技術基準運用

ガイドブック

本体系にある各マニュアル等についてその概要と活用法について述べたもの。センターのウェブサイトからダウンロードが可能である。

3.3 コミッショニングガイドブック

新築システムの当初性能検証と既設システムに分けて集大成した。蓄熱システムに重点を置いて

いるが、空調システム全般にも応用できる。学会発行の「建築設備の性能検証過程指針」を実際のプロジェクトに展開するための実用マニュアルで各種文書例、テンプレートを含む。そのほか、「管理ツール+データベース」としてのMQC(Model Quality Control)をこのグループに含む。

以下、建築生産・運転管理の進行に対するコミッショニングのフェーズ・段階分類に従って順に解説する。

3.4 設計フェーズ対応マニュアル

3.4.1 設計・制御マニュアル

蓄熱システム及び蓄熱槽の基礎知識と設計法について、手計算及びプログラム利用計算の両方の設計例を含め、設計と制御に重点を置いて記述したもの。

3.4.2 設計ハンドブック、蓄熱 2 次側空調設計マニュアル、センサーの基礎と保守ガイド、設計例(5 冊)

設計ハンドブックは具体的な設計例(中規模店舗、東京及び仙台)を対象として別冊の設計例の構成の見本であり、必要な注釈、周辺知識を書き加えたもの。別冊の設計例は表に見るような 5 種の施設を対象としている。また電気・ガス複合、及び蓄熱・非蓄熱複合システムの設計例を別マニュアルとして、詳細設計指針を含めた。すべて負荷計算から制御設計、文書化(設計趣旨文書、システム制御・操作説明書)の例まで懇切に記述した。蓄熱システムの性能には二次側のシステム設計・制御が大きく影響するために、「蓄熱 2 次側空調設計マニュアル」と「センサーの基礎と保守ガイド」を用意した。

3.4.3 蓄熱最適制御設計マニュアル

体系中、最後に完成したもので、現実の実証プロジェクトにおける検証を踏まえた内容になっており、本編と別冊とからなる。前述の大林ビルや学会の蓄熱最適化委員会の研究成果の知見も活用されている。(この別冊は原則非公開であるが要点は学会大会論文として発表されている。)

3.5 施工フェーズ及び受渡し後段階対応マニュアル

3.5.1 施工マニュアル

施工者の知っておくべき蓄熱システムの基礎知識を含め、蓄熱槽と熱源周り、並びに二次側空調機周りの注意事項を網羅している。

3.5.2 試運転調整(TAS)、機能性能試験(FPT)マニュアル

(運転フェーズ)受渡し段階前後に行われる試運転調整(工事請負範囲内)及び機能性能試験(コミッショニングプロセス)を対象としている。総合試運転調整に当たる部分は機能性能試験と内容的に重複するところが有り、より前者に近いものは試運転調整マニュアルの後半に、より後者に近いところは「制御シーケンスに基づく FPT マニュアル」に含めているが、後者は蓄熱システムに関わる制御シーケンスとその試験手続きを詳細化したもので、設計より運転保守に亘って明記すべきものとして記述されている。

3.6 (運転フェーズ)定常運転段階

3.6.1 保全診断マニュアル三部作

運転フェーズ用、言い換えれば継続コミッショニング対応として、運用保全、異常診断・性能評価、リニューアルの三部作を用意している。運用保全マニュアルは O&M(運転管理者)が実施する定常コミッショニングに対応するもので日常的な運転保守作業に関して記述、異常診断・性能評価マニュアルはコミッショニング専門技術者を対象としたものであるが

前者の理論的側面を網羅したもの、リニューアルマニュアルは文字通りリニューアルの意思決定の考え方、またその手続き、実施例などについて記した。

3.6.2 不具合検知診断ツール

運転保全中に発生する水蓄熱システムの不具合現象の同定、原因追及のツールで有り、運用マニュアルにその使い方と、保全診断マニュアル記述中の具体例との関連づけを行っている。マクロモデルは表 1 の最終部に表記した「異常診断データベース」の解析結果によっている。C/E 表はセンターのウェブサイトからダウンロードが可能である。

3.7 氷蓄熱関連マニュアル

製氷に付随する諸事項を除き、氷蓄熱も水蓄熱も根幹は同一であり、大半の部分で水蓄熱のマニュアル類が利用できる。氷蓄熱台頭の背景にある冷房負荷割合の増大、高層化に伴う二重スラブ空間の相対的減少、電力負荷平順化の要求と料金施策等と共に、製氷に伴う冷凍機効率の低下分を、氷の持つポテンシャルを活用して取戻す2次側搬送方式や合理的温熱環境形成の工夫など、判断要因も多く標準設計になり難い恨みがある。加えて、多くの製氷・蓄熱・解氷のバリエーションと性能に関わる部分は、メーカーに依存する側面が多い。マニュアル上も条件整理の項目と留意点や設計例をまとめ、併せて設備技術者とメーカー間での発注仕様／受注内容が間違ひなく交互伝達されるよう、チェックシート例を用意した。

3.8 フェーズ、水・氷蓄熱共通対応のマニュアル群

3.8.1 計算ソフト

負荷計算プログラム MicroHASP/TES はオリジナル公開プログラム MicroHASP に改良を加え、また以下に述べる TESEP-W、TES_ECO へのデータ出力機能を有するもの。予熱負荷計算や内部負荷稼働率設定、外気負荷の整理と外気制御効果の予測など最適設計のための機能を含む。

TESEP-W は筆者(中原)のプログラム (TESP-W) を Visual-BASIC に組み替え、出力機能等に工夫を加えたもので、連結完全混合層型、単槽または連結温度成層型及びバランス温度成層型の計算ができる。外氷外融型(アイスオンコイル)型氷蓄熱のプログラムは TESEP-W には含まれず、もとの TESP-W のロジックが BEST に移植され、そちらで計算できるようになっている(表 1 の BEST/TES)。

TES_ECO(3E 評価ツール)は広範囲の蓄熱・非蓄熱を網羅して年間エネルギー、年間コスト、環境影響(CO₂ 発生量)を比較することができる複合熱源システム(コジェネも含められる)対応プログラムである。ヒートポンプ等の特性データは入力或いは蓄積データによって計算が行われる。

3.8.2 空調システム設計関連マニュアル

必ずしも蓄熱専用事項では無く一般的に利用可能であるが、空調システムの省エネルギー設計のための「低温送風空調マニュアル」、空冷(熱)ヒートポンプや冷却(加熱)塔などの屋上設置大型機器から近隣への「騒音防止対策マニュアル

ル」、配管腐食防護のための「水対策マニュアル」は蓄熱システムでは必須事項として入念にチェックする必要がある。

3.8.3 初級蓄熱研修会テキスト

蓄熱技術初級者のための教育テキストとして用意された。

3.9 その他

3.9.1 用語集

蓄熱関連用語に共通認識が必要で有り、本体系作成の当初にとりまとめ、隨時更新しているもので、関連者間の的確な意思伝達に役立つ。センターのウェブサイトからダウンロードが可能である。

3.9.2 建築設備設計基準(茶本)蓄熱技術セミナーテキスト

本体系外であるが、公共建築対応の基準マニュアルとして、蓄熱部分に本体系と整合性を持たせたいとの要望により、情報交流にセンターが協力したものである。

3.9.3 WEB サイト

(1) 蓄熱機器カタログ:蓄熱に関する推奨機器を検索するために設けたサイトで有り、当初は推奨機器として作成されたが、廃番、機器更新等に対応するために、現在データ更新はメーカーに依存している。

(2) 蓄熱技術 WEB 講座:体系化された蓄熱マニュアルはフェーズ毎に専門や立場が異なる設計者や技術者が利用する。とは言えその境は幾らも無い。ただ、本システムも採用物件が増え、正しい運転管理の下に効果の享受が浸透して始めて社会的貢献を為す。ビルオーナーや総務・管財と言った採用側の理解も極めて重要で、説明し納得させるツール作りは欠かせない。筆者(射場本)らは、ビギナーに対して蓄熱をオーバーオールに納得させ、食わず嫌いを無くす意味もあって、Web 上の公開講座を緩慢ながら進展させている。

(3) 氷蓄熱運転実態調査(内部報告書)

二回にわたって実施した(第一回は国補助調査)氷蓄熱システム主体の運転性能実態調査で、それぞれ共通のフォーマットで整理されたもの。実績データの整理法や運転状況、性能評価指標のまとめ方を提案している。関連資料として(水・氷)蓄熱コミッショニングの実施例情報シートがある。

4. 水蓄熱システム高効率化の軌跡

はじめに述べたように筆者らにとっては、長くて実に 50 年の蓄熱への関与の歴史があり、本マニュアル体系化のさなかにも実際的並びに思考的に蓄熱高効率化を目指した。蓄熱式空調システム(低充填率の氷蓄熱を含む)においては温度プロファイルの中に負荷や熱源の運転状況はもちろん、システム設計、運転制御の良否が集積され、善し悪しに問わらず状況推定が可能である。結論としてあらゆる負荷変動に対して、始端槽・終端槽温度の所定の限界値を満たしつつ蓄熱槽内全体の大温度差(有効温度差 Δte)が確保できているのが望ましい。図 2 に筆者(中原)自身が設計(図 2.1 を除く)に関与し性能検証した例を中心に蓄熱槽効率高効率化の足跡を辿る。図 2.1 は他社の設計で中原らが調査した例で、大水量の FCU 系の低温度差 CWV が致命的な例である。図

2.2 は温度プロファイル改善による高効率化を想起させた原点となった設計例、図 2.3 は連結完全混合槽型で高温度差(コイル設計値 13°C)の実現を目指した例、図 2.4 は中原のバランス型蓄熱槽の研究結果に基づく設計の実績、図 2.5 は大温度差 VWV が徹底された例(図に現れないが夜間 FCU の大温度差確保が不満足)、図 2.6 が最終到達点で、負荷である FCU の大温度差確保制御に徹底配慮した例である。

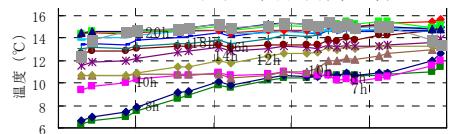


図 2.1 B 事務所ビル
1976 年竣工、連結完全
混合槽型、HEX 無
($\Delta te \approx 4^\circ\text{C}$)
2 次側: AHU(VWV)
+FCU(CWV)

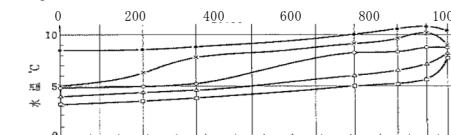


図 2.2 旧大阪放送会館
1963 年竣工、連結完全
混合槽型、HEX 無
($\Delta te \approx 5^\circ\text{C}$)
2 次側: AHU+FCU
ブリードイン(擬似)VWV

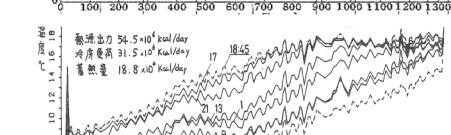


図 2.3 大阪大林ビル
1973 年竣工、連結完全
混合槽型、HEX 無
($\Delta te \approx 8^\circ\text{C}$)
2 次側: AHU(VWV)
+BC(ブースターコイル,
on-off 2 方弁)
+FCU(P, on-off 2 方弁)

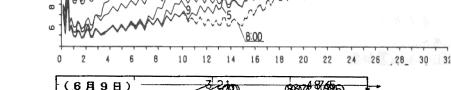


図 2.4 知多市民病院
1984 年竣工、並列バランス温度
成層型、HEX 無
($\Delta te \approx 8^\circ\text{C}$)
2 次側: AHU(VWV)、但し外来系と
病室系は井水冷却カサバー利用
で蓄熱冷温水は不使用
+BC(ブースターコイル on-off 2 方
弁)

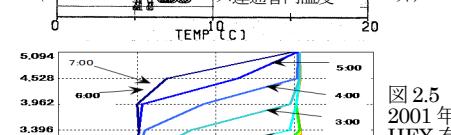


図 2.5 晴海トリトン DHC
2001 年竣工、並列温度成層型)、
HEX 有
($\Delta te \approx 9^\circ\text{C}$)
2 次側: AHU(VWV) +FCU(on-off
2 方弁)と想定

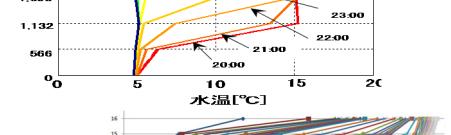


図 2.6 名大 CKK 棟
2013 年竣工、並列温度
成層型、HEX 有
($\Delta te \approx 17^\circ\text{C}$)
2 次側 FCU(大温度差確
保制御弁付き)のみ

図 2 典型システムの温度プロファイルによる蓄熱槽効率向上の足跡(定温蓄熱制御温度 5°C、始端槽限界上昇温度 8°C と仮定して満蓄熱～完全放熱状態を推定。無次元槽容量、温度のスケールは概略合わせてある)

5. 終わりに

各基準策定に直接参加頂いた各委員、特に幹事又は幹事会社、並びにセンター歴代の事務局、同上部委員会の委員各位のご貢献に深甚の謝意を表すると共に、省エネ・高効率化を目指す設計家各位による活用を切に願うものである。