

NPO法人建築設備コミッショニング協会
—BSCA10周年記念シンポジウム in 関西—



ヨンデンビル新館における 複合蓄熱システムのコミッショニング

平成25年 7月30日(火)
於:武庫川女子大学 甲子園会館

天野 雄一郎(CxTE)
四国電力株式会社

本報告では、平成16年に竣工した**ヨンデビル新館**(四国電力本店ビル)において、竣工後から現在まで継続的に行われているコミッションングによる運用改善の取り組みについて報告する。

ヨンデビル新館では「**杭基礎を利用した自然エネルギーによる季節間土壌蓄熱空調システム**」や「**水蓄熱・躯体蓄熱空調システム**」を採用しており、これらの蓄熱方式を「**負荷平準化**」「**省エネルギー**」の観点から複合化し効率的に運用するためのツールとしてコミッションングを採用した。



1. ヨンデビル新館におけるコミッショニングの取り組み
2. 土壌蓄熱システムのコミッショニング
 - ・ システム開発と当初性能検証について
3. 複合化蓄熱空調システムの最適化
 - ・ 複合化蓄熱空調システムのモデル検討について
 - ・ 継続的な運転改善の取り組みについて
4. 今後の展開
 - ・ 自社建物におけるコミッショニングの展開

1. ヨンデビル新館におけるコミッションングの取り組み



1. コミッショニングの取り組み

ヨンデビル新館 建築概要

- 名 称:ヨンデビル新館
- 所 在 地:香川県高松市
- 建築面積: 2,438.92㎡
- 延床面積: 13,918.88㎡
- 構 造: S造 一部SRC造
- 階 数: 地上7階地下1階
- 用 途: 事務所(食堂、ホール)
- 工 期: 2002年8月～2004年4月



1. コミッショニングの取り組み

ヨンデビル新館 設備設計コンセプト

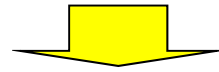


設計当時、日本でも先行事例のない「**土壌蓄熱空調システム**」の採用や、これを含む複合化蓄熱システム(水蓄熱・躯体蓄熱)の採用、各種省エネ技術の導入と「**継続的な省エネ施策の実施**」に着目しコンセプトを計画した。

1. コミッショニングの取り組み

「土壌蓄熱空調システム」の導入背景

自然エネルギーを利用した夏季ピーク負荷を低減できる安価なシステムはないか？



「土壌蓄熱空調システム」の特徴

負荷平準化に貢献できる

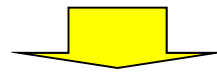
自然エネルギーを利用した**新しい蓄熱システム**

日本特有の四季を利用した季節間蓄熱

冬季の冷熱を土壌に蓄え、夏季の冷水として利用する
自然エネルギーを利用した蓄熱技術

杭基礎を利用した安価なシステム

建物杭基礎内に熱交換用配管を布設するので比較的安価



先行事例が無い**新しい蓄熱技術**の開発を目的として導入

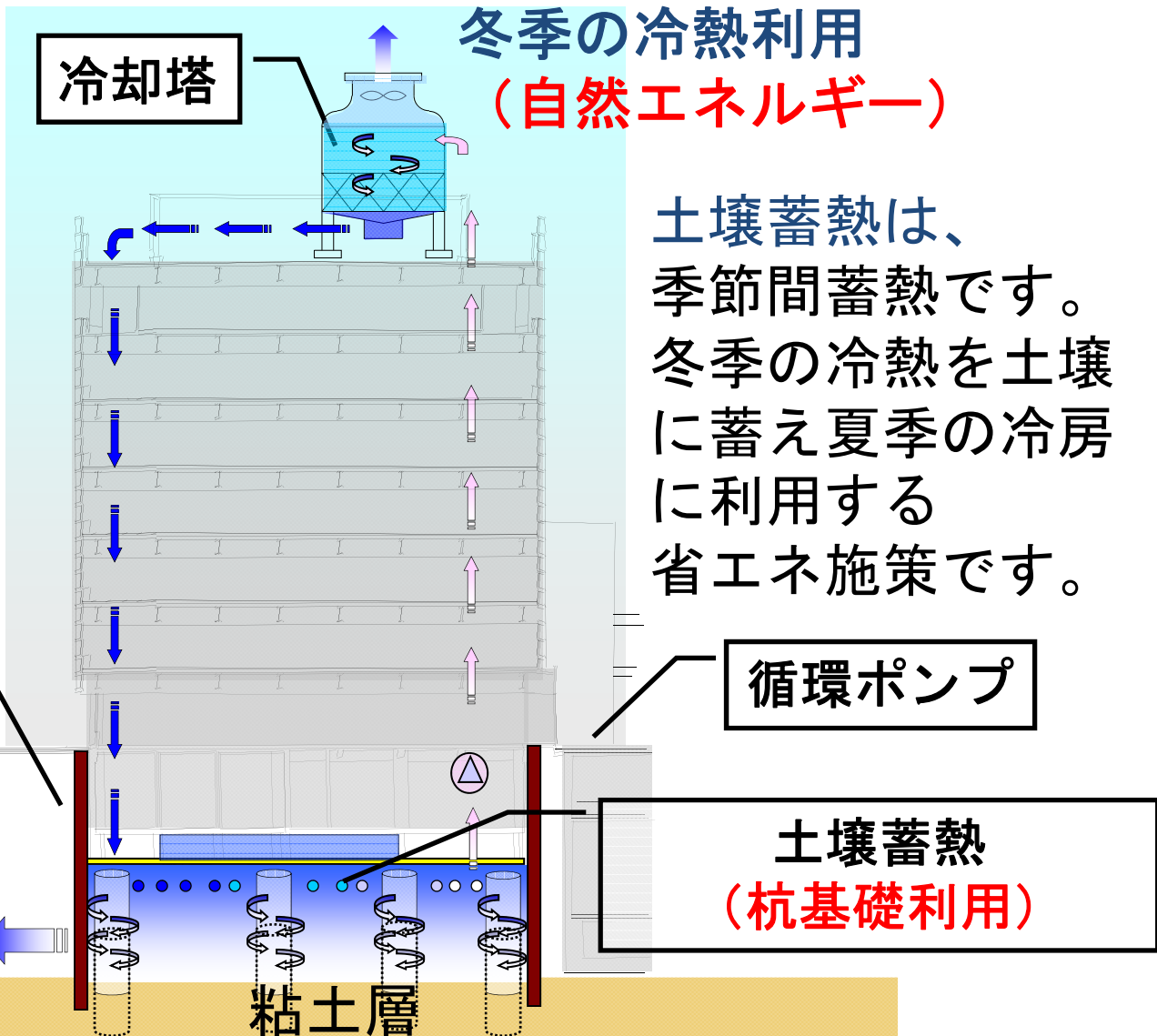
1. コミッショニングの取り組み

土壌蓄熱空調システム概念図



止水壁

夏季の冷房
補助熱源



1. コミッショニングの取り組み

ヨンデビル新館 設備概要

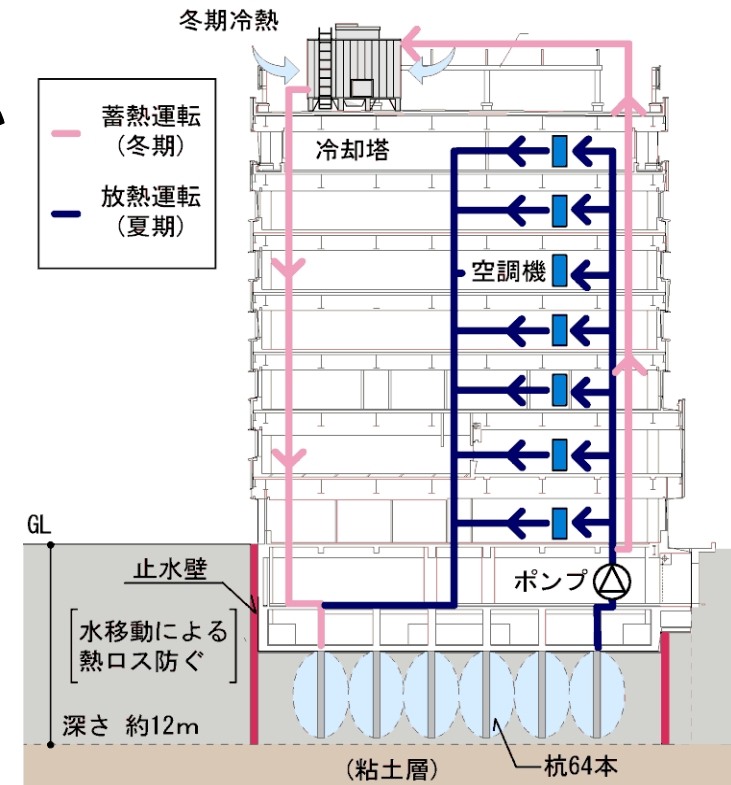
- 熱 源：地域熱供給（冷温水）
- 蓄 熱：水蓄熱（1,000m³）
：土壌蓄熱（10,000m³）
：躯体蓄熱（基準階）
- 空調方式：各階AHU（4管式）＋FCU
- 吹出方式：天井吹、床吹切替方式
- 自動制御：OPビルコンによる制御
- 換気方式：全熱交換器＋CO2制御
- フリークーリング、ナイトパーズ等を採用
- 社員食堂は電化厨房を採用



1. コミッショニングの取り組み

コミッショニングを採用した背景

- ・先行事例の無いシステム
 - 設計で定めた運転法が適切であるかどうかを検証し、調整することは極めて重要
- ・運転の**最小サイクルは1年**
 - 地盤の伝熱は長期におよぶため、実システムで様々な運転方法を試すことは困難
 - シミュレーション**による検討が有効



⇒ 不適切に運転すると、通常の冷凍機を用いるシステムよりも多大なエネルギーを消費する可能性がある。



1. コミッショニングの取り組み

フェーズ I

土壌蓄熱空調システムの当初性能検証プロジェクト

【目的】

- 1) 実運転データの計測と分析
- 2) シミュレーションを用いたシステムの当初性能検証
- 3) 設計手法の確立

【実測・検証期間】

平成17年2月～平成19年10月（蓄放熱を3シーズン実施）

【プロジェクト体制】

- 企画・検証 : 四国電力株式会社
計測・検証 : 株式会社四電技術コンサルタント
 : 株式会社安井建築設計事務所
解析・検証 : 吉田治典、宮田征門(当時京都大学)



1. コミッショニングの取り組み

フェーズⅡ

複合化蓄熱空調システムの最適化プロジェクト

【目的】

- 1) BEMSデータによる継続的分析と評価
- 2) シミュレーションを用いた不具合・運転改善の検討
- 3) 蓄熱複合化手法の確立

【実測・検証期間】

平成21年4月～平成26年4月(予定)

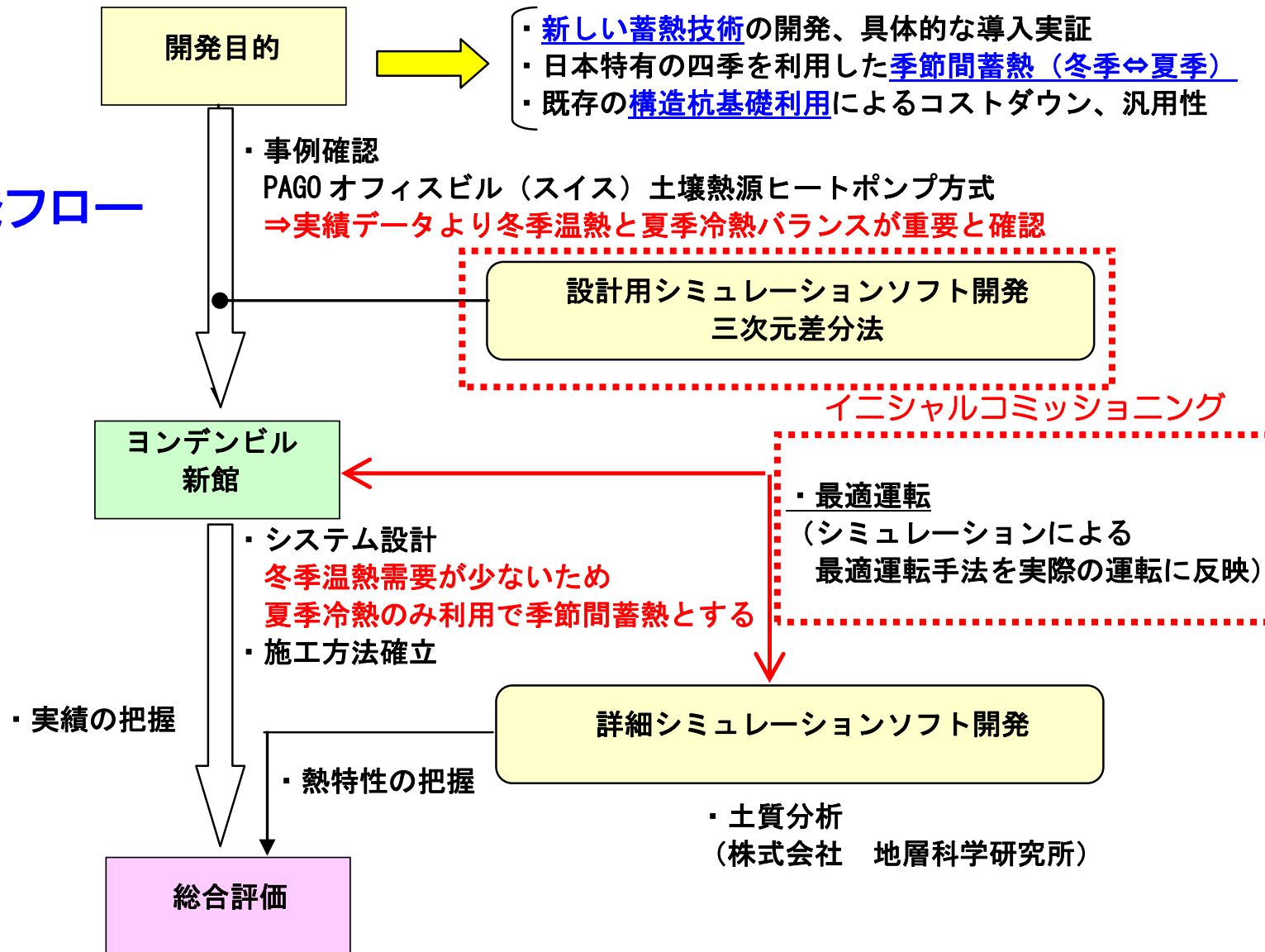
【プロジェクト体制】

- 企画・検証 : 四国電力株式会社
運転改善 : 四電ビジネス株式会社
計測・検証 : 株式会社四電技術コンサルタント
株式会社安井建築設計事務所
解析・検証 : BSCA(吉田治典、赤司泰義、住吉大輔、葛隆生)

2. 土壌蓄熱空調システムのコミッショニング

2. 土壌蓄熱システムのコミッショニング

開発フロー



2. 土壌蓄熱システムのコミッショニング

実運転データの計測と分析

ビルコンシステムは、弊社開発の「**Open Planet**」技術を利用した**OPビルコン**と**BEMS**を採用した。

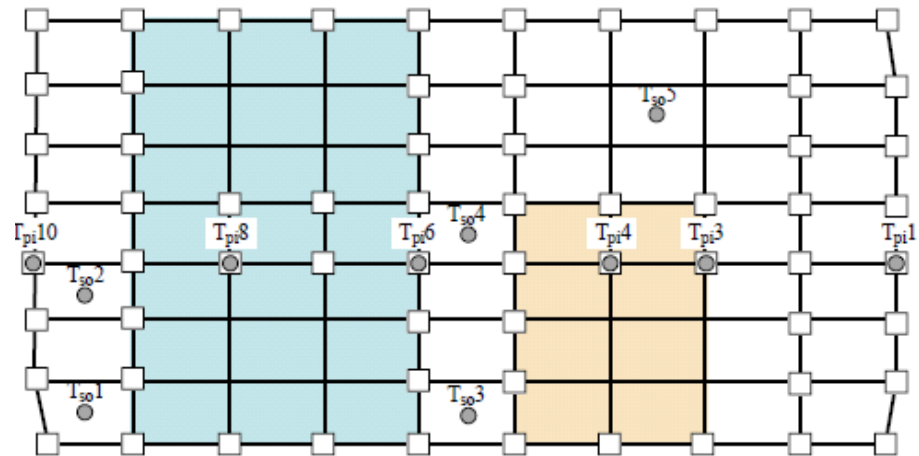
【監視点数】

- ・制御点数：約4,000点
(機械設備、電気設備含む)
- ・BEMS計測点数
：約1,000点(1時間データ)
約300点(5分データ)

常時計測していない項目(土壌温度や各AHUの冷温水流量、処理熱量等)はロガー等による、別途計測を実施した。



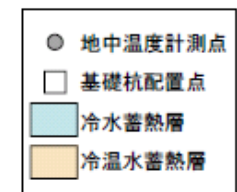
OPビルコン



別途計測例
土壌温度計測点

(土壌温度は建物下部
5ヶ所、屋外2ヶ所測定)

T_{so6}
T_{so7}

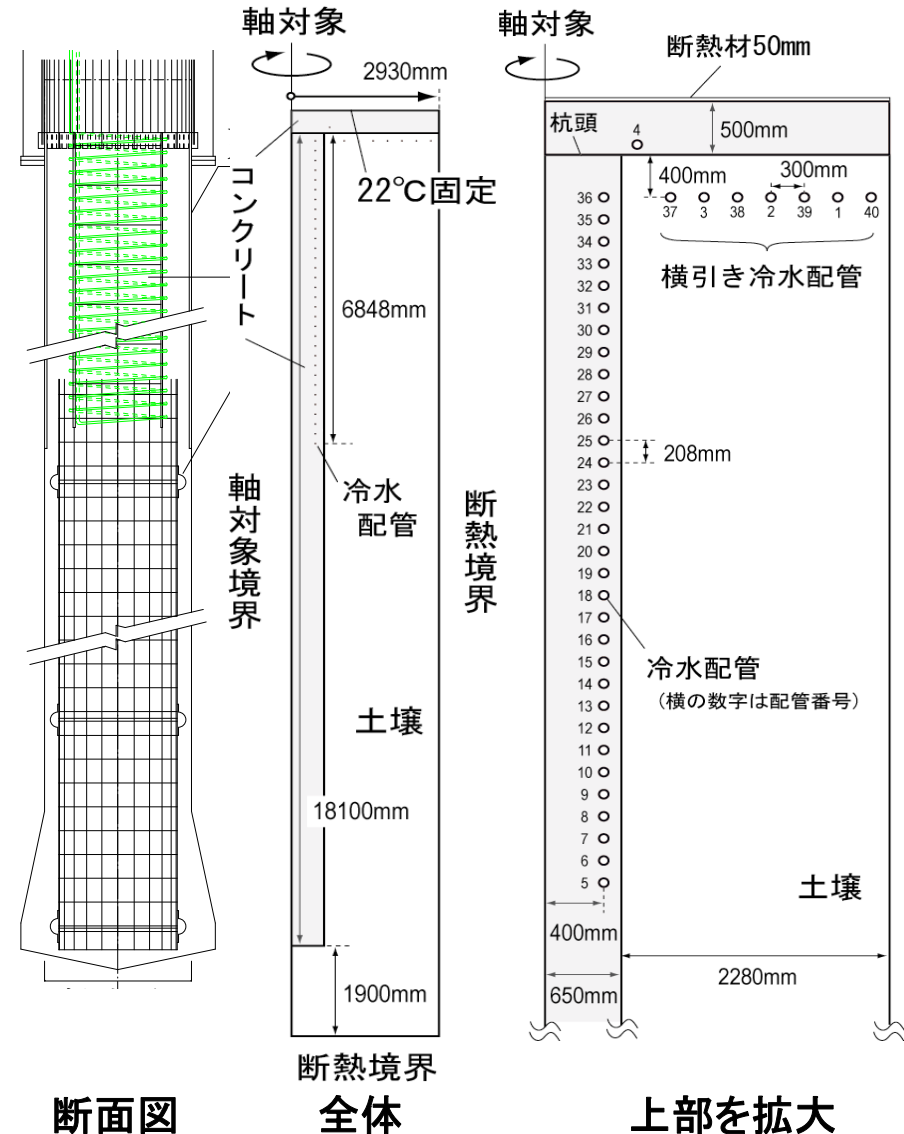


2. 土壌蓄熱システムのコミッションング

熱交換杭と地盤の伝熱モデル化

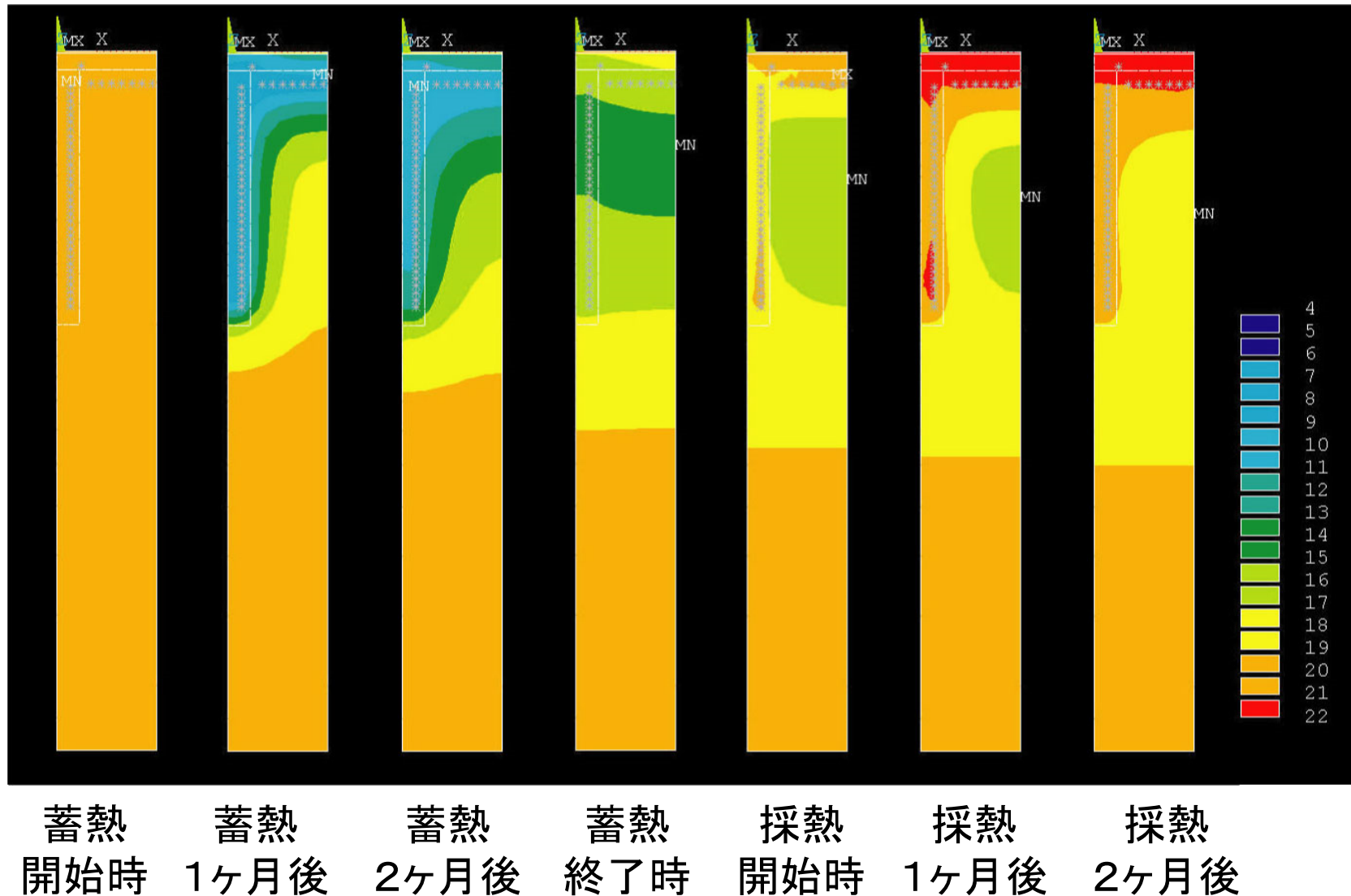
- ・杭の伝熱は全て同一とし杭一本分をモデル化
- ・2次元回転体モデル
(左端:軸対象境界)
- ・有限要素法
- ・実際は螺旋状の冷水配管であるがモデルでは独立した円環形の配管を配置(40分割)
⇒各配管の間で生じる冷温水温度変化を反映

有限要素法解析ソフトANSISで演算



2. 土壌蓄熱システムのコミッショニング

地盤モデル 計算結果の例



2. 土壌蓄熱システムのコミッショニング

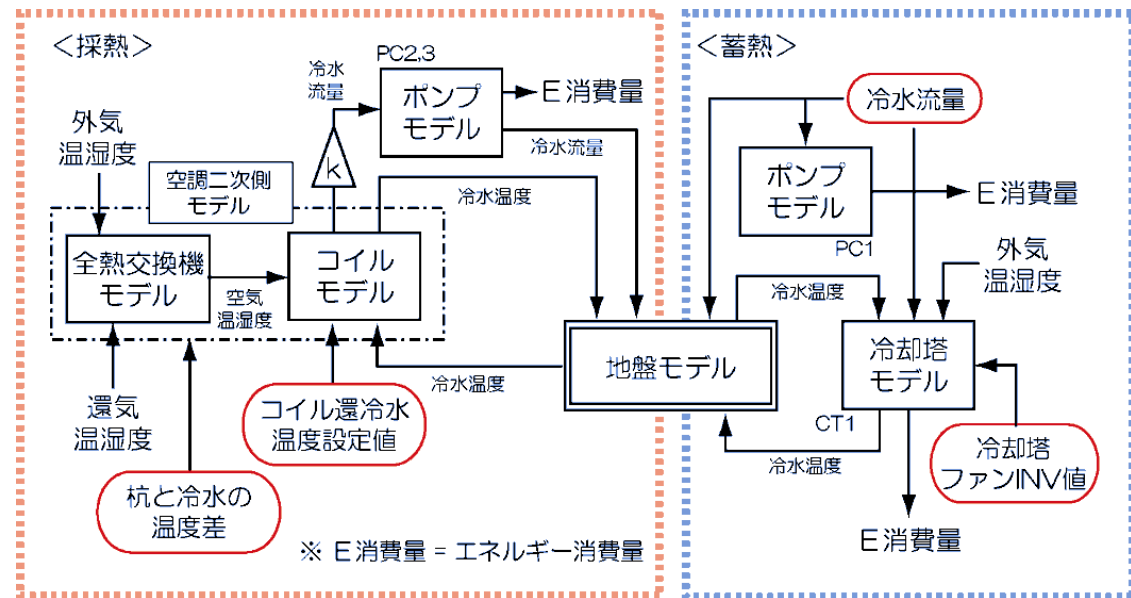
数理機器モデルをつなぎ合わせてシステム全体をモデル化

入力変数

- 外気温湿度
- 運転設定値
- ・蓄採熱時の冷水流量
- ・冷却塔ファン回転数
- ・コイル還り冷水温度

出力変数

- 蓄熱量、採熱量
- 消費電力(蓄熱用ポンプ、採熱用ポンプ、冷却塔ファン)
- システムCOP = 採熱量 / (蓄採熱に要した電力消費量)

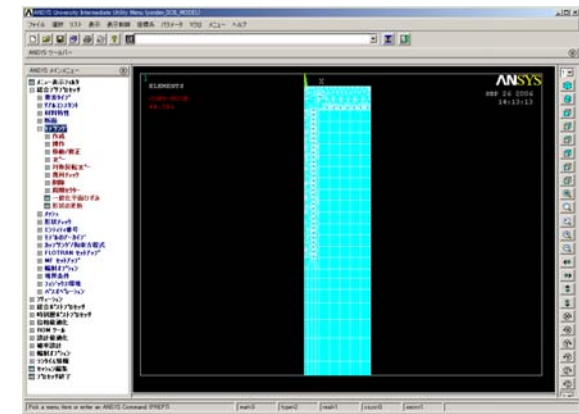
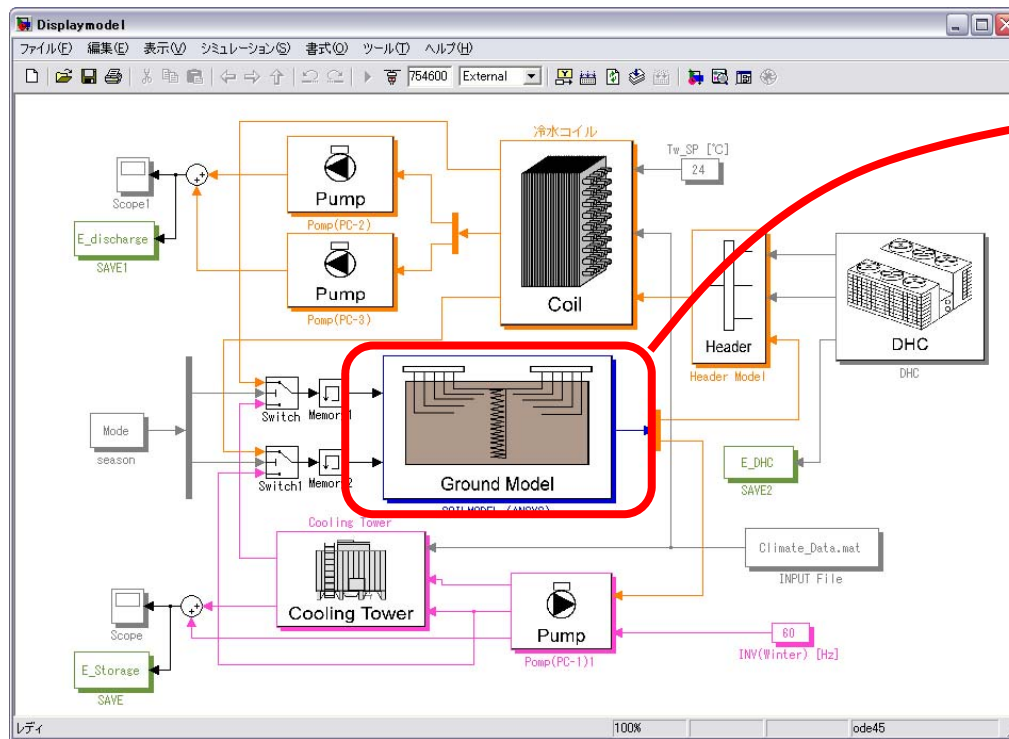


2. 土壌蓄熱システムのコミッショニング

モデルベースによるシステムシミュレーション

地盤モデルと複数の機器モデルを組み合わせてシステム全体をモデル化

- 1) 有限要素法による杭と地盤の非定常伝熱計算モデル
- 2) 空調機器の数理モデル(冷却塔、ポンプ、コイル、全熱交換器)
- 3) MATLAB/Simulink + ANSYS を連成して計算



連成計算

解析は吉田研究室で実施

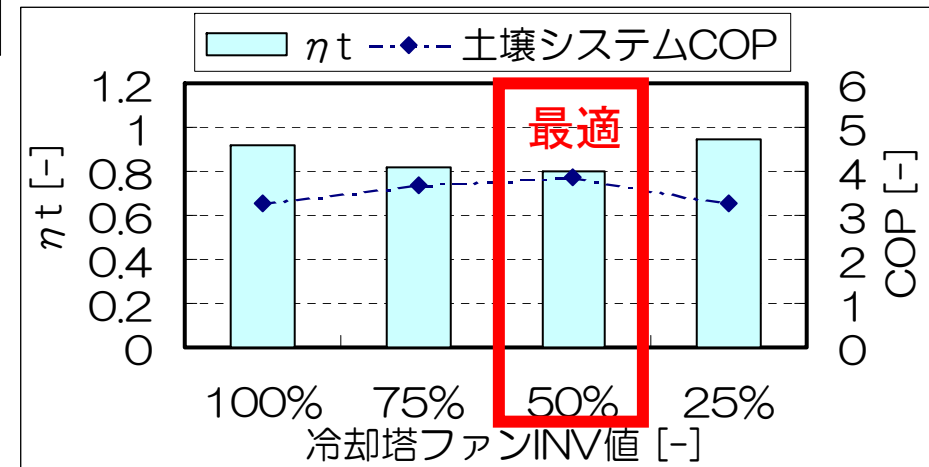
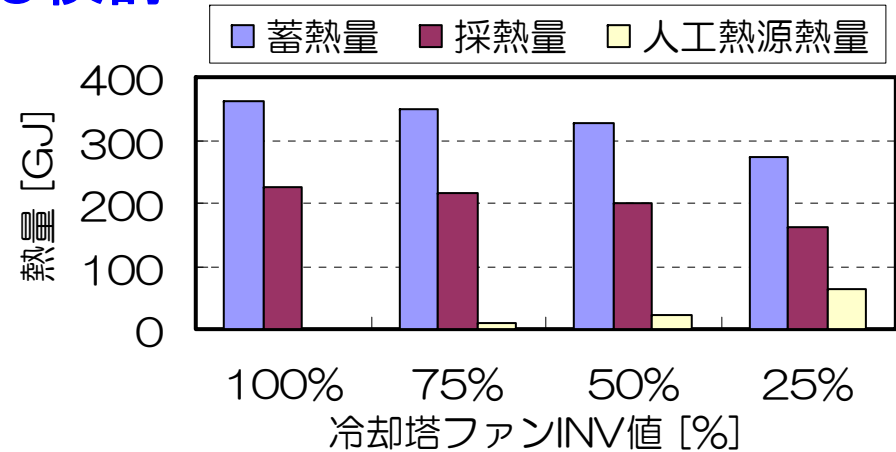
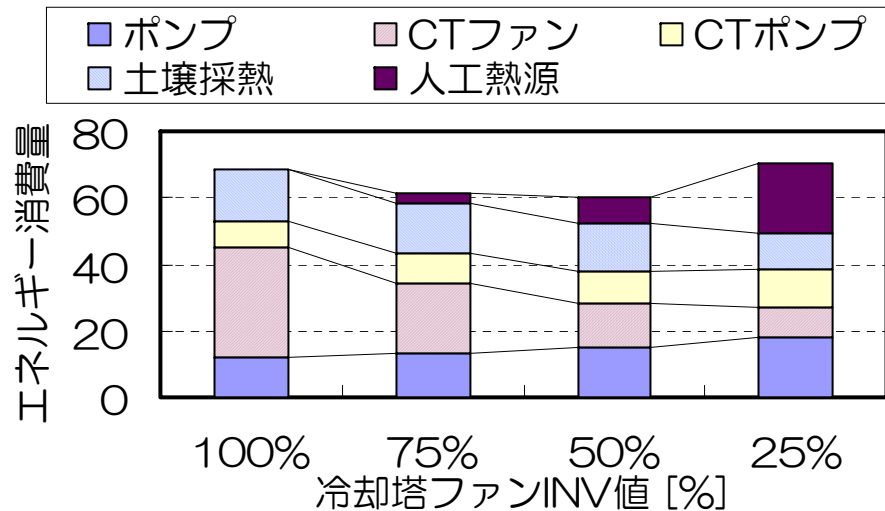
2. 土壌蓄熱システムのコミッショニング

冷却塔ファンインバータ値に関する検討

○ファンINV値を小さくすると

- ・蓄採熱量は**減少**
- ・冷却塔ファン消費電力は**減少**
- ・ポンプ消費電力は**増加**

実測では冷却塔のファン動力は全体の約50%



気象条件: 2004年12月~2005年11月の実測値

運転条件: 蓄熱12月~3月、採熱6月~10月

蓄熱時冷水流量: 45m³/h、採熱時コイル還り冷水温度25°C

⇒50%で運転に反映

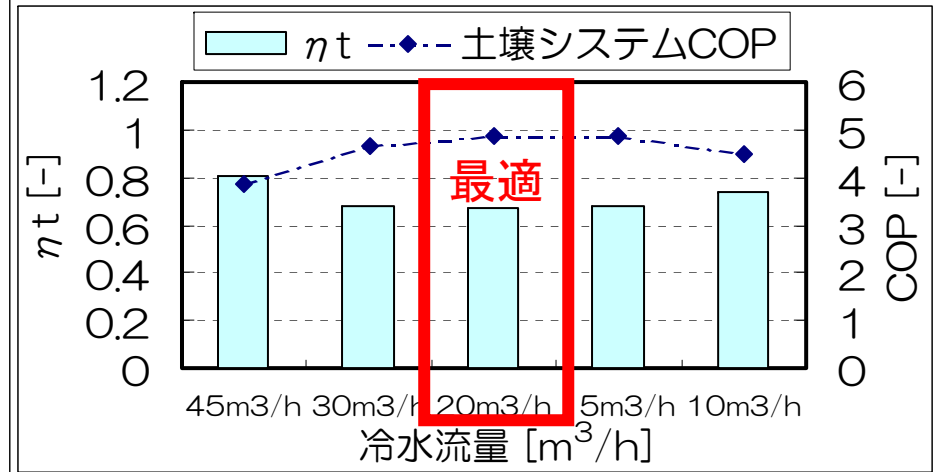
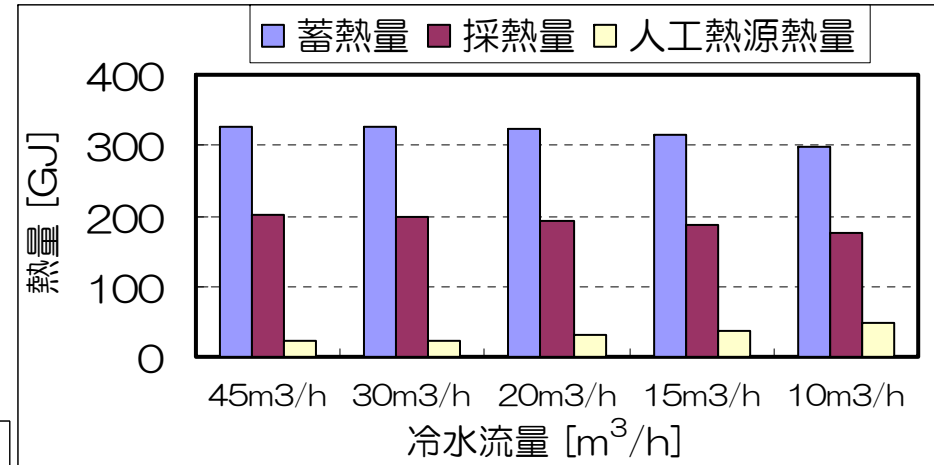
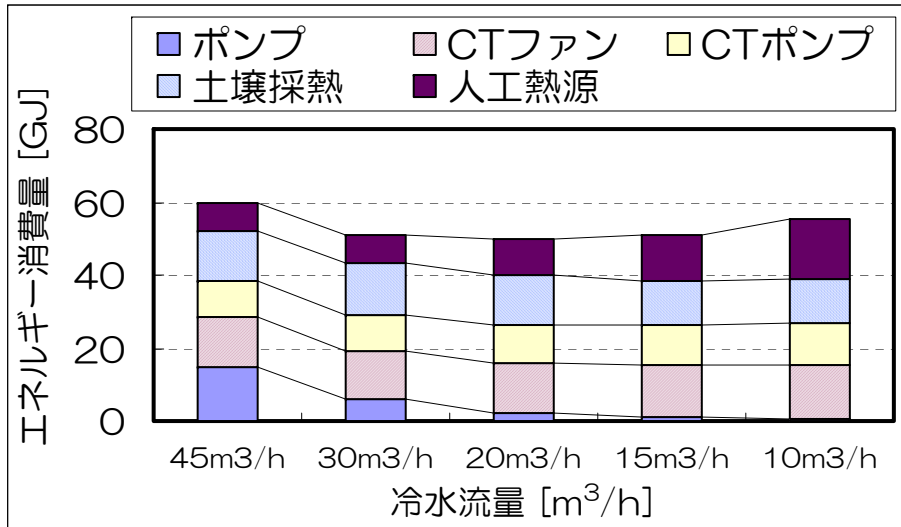
2. 土壌蓄熱システムのコミッショニング

蓄熱時 冷水流量に関する検討

○冷水流量を小さくすると

- ・ポンプ消費電力は**減少**
- ・採熱量は減少、人工熱源の消費電力が増加

目標採熱量(220GJ)を設けて、それに満たない場合は人工熱源(COP:3)で補うこととした。



気象条件:2004年12月~2005年11月の実測値

運転条件:蓄熱12月~3月, 採熱6月~10月

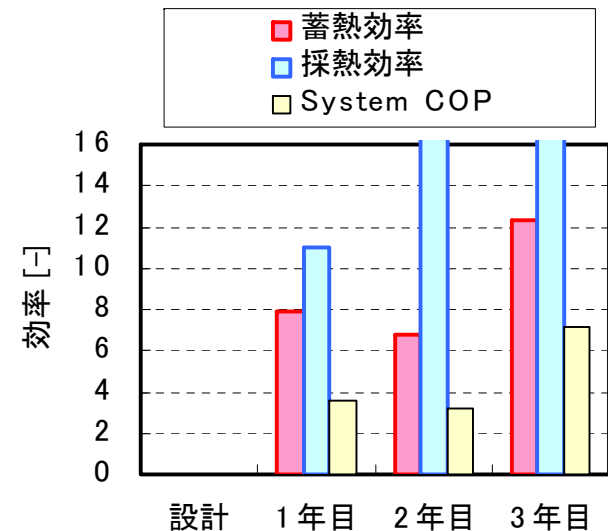
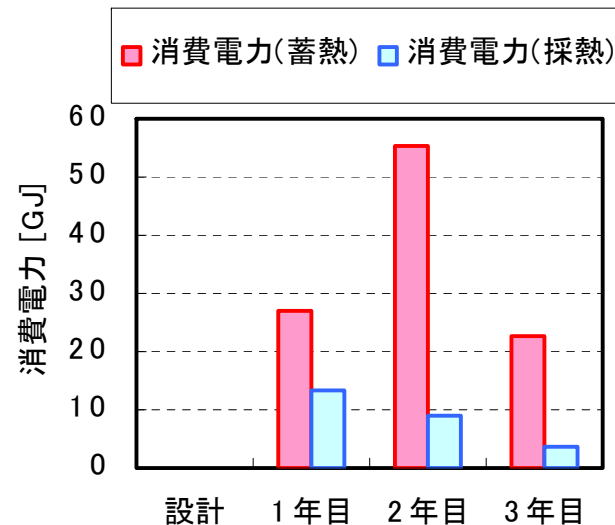
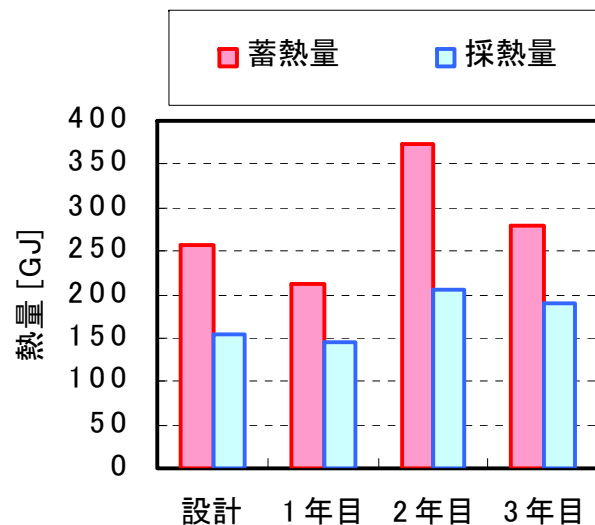
蓄熱時CTファン回転数 50%, 採熱時コイル還り冷水温度25°C

⇒30m³/hで運転に反映

2. 土壌蓄熱システムのコミッショニング

3年間のコミッショニングの結果

- ・性能のモニタリング・不具合検知より運転改善を実施
- ・システム最適化の実施
⇒蓄熱時冷水流量 30m³/h、CTファンINV 50%、採熱時冷水流量 15m³/h
- ・初年度の運転法と比べると…
⇒蓄採熱量は約50%増加，電力消費量は50%削減
システムCOPは実績で **3.61 ⇒ 7.14** に向上
⇒空調運転時間の変更や高効率ポンプへの更新等、継続的に改善を実施した結果、システムCOPは平成22年に**8.79** まで向上





2. 土壌蓄熱システムのコミッションング

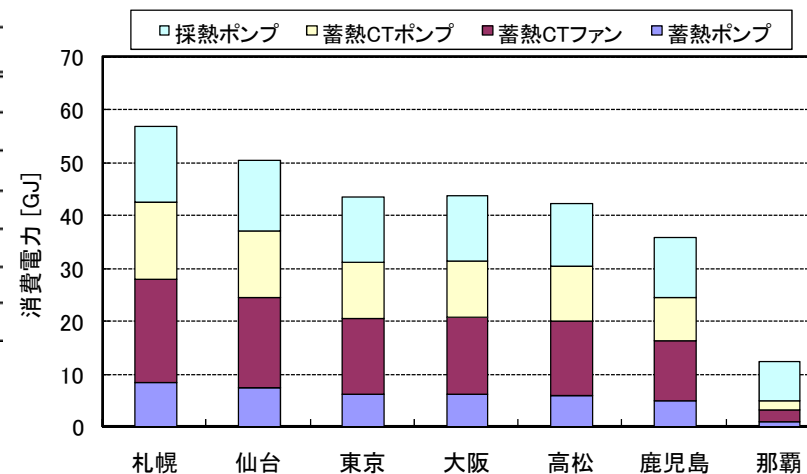
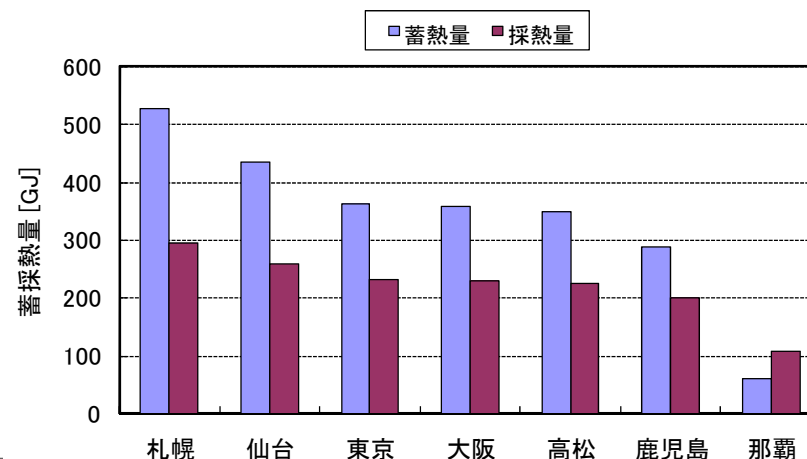
土壌蓄熱空調システムの設計法の確立

土壌蓄熱システムを他の気候条件や土壌条件、建築条件で実施した場合の効果をシミュレーションを用いてケーススタディを行った。

ケーススタディ設計条件

- ・蓄熱運転期間 12月～3月
- ・採熱運転期間 6月～10月
- ・蓄熱時流量 30m³/h
- ・冷却塔ファンINV値 50%
- ・採熱時コイル出口冷水温度 25℃

	最高気温	最低気温	蓄熱期間			採熱期間		
			気温	相対湿度	絶対湿度	気温	相対湿度	絶対湿度
札幌	32.6	-13.2	0.0	70.2	0.0027	17.7	73.6	0.0096
仙台	32.7	-6.1	4.5	63.6	0.0034	19.9	78.5	0.0118
東京	35.3	-2	8.3	63.3	0.0038	22.9	72.4	0.0129
大阪	36.5	-2.6	8.2	65.5	0.0046	24.2	71.0	0.0137
高松	35.1	-2.3	8.3	62.9	0.0044	23.4	74.3	0.0136
鹿児島	35.8	-1.5	11.1	65.2	0.0057	25.0	74.2	0.0151
那覇	32.7	10.9	18.4	70.4	0.0096	27.1	78.6	0.0179



沖縄以外、全国で採用可能なことを確認

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化



3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

蓄熱システムの複合化の目的

土壌蓄熱、水蓄熱、躯体蓄熱の蓄熱方式を採用しているため

水蓄熱システム

・・・高い蓄熱効率

土壌蓄熱システム

・・・未利用エネルギー利用の高効率性

躯体蓄熱システム

・・・空調起動時のピークカット効果

各蓄熱システムの利点を効果的に組み合わせることで更なる

『**負荷平準化効果**』『**省エネルギー効果**』を期待



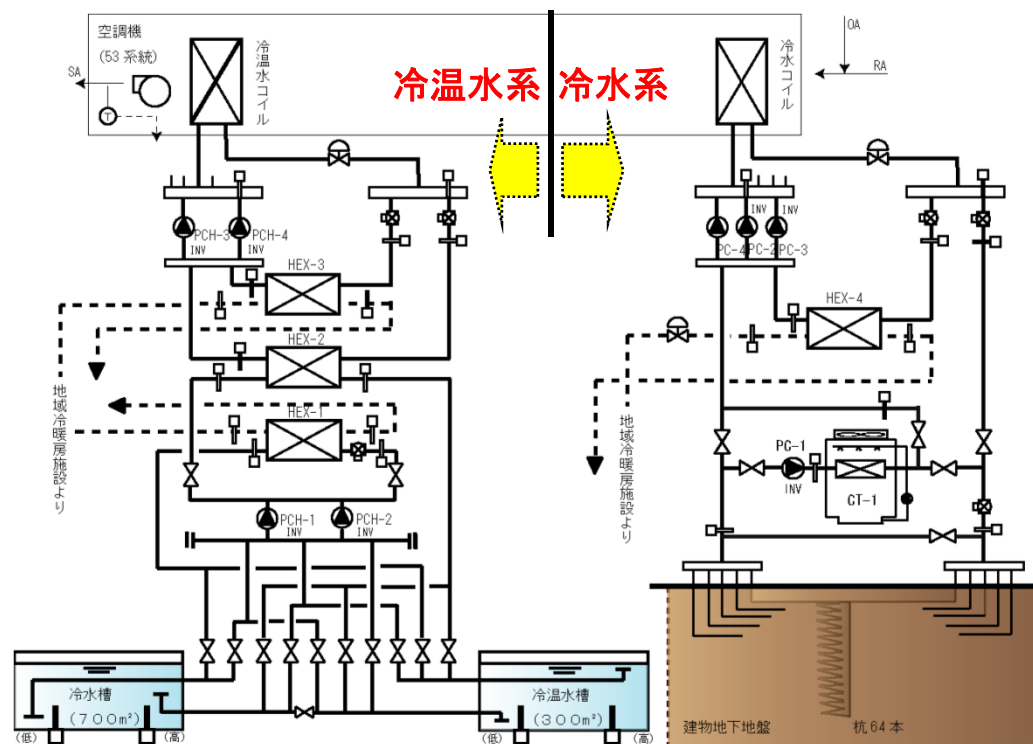
本フェーズでは、各蓄熱方式の利点を生かした組み合わせや不具合改善手法等を検討し、ヨンデビル新館において更なる「負荷平準化」と「省エネルギー」を実施することを目的とした。

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

対象システム概要

- ・水蓄熱 (1,000m³)
- ・土壌蓄熱 (10,000m³)
- ・躯体蓄熱
- ・熱源機器はなく、地域冷暖房施設から冷温水の供給を受けている
- ・熱交換器
HEX-1,2,3,4の4台

一次側・二次側システムの機器仕様

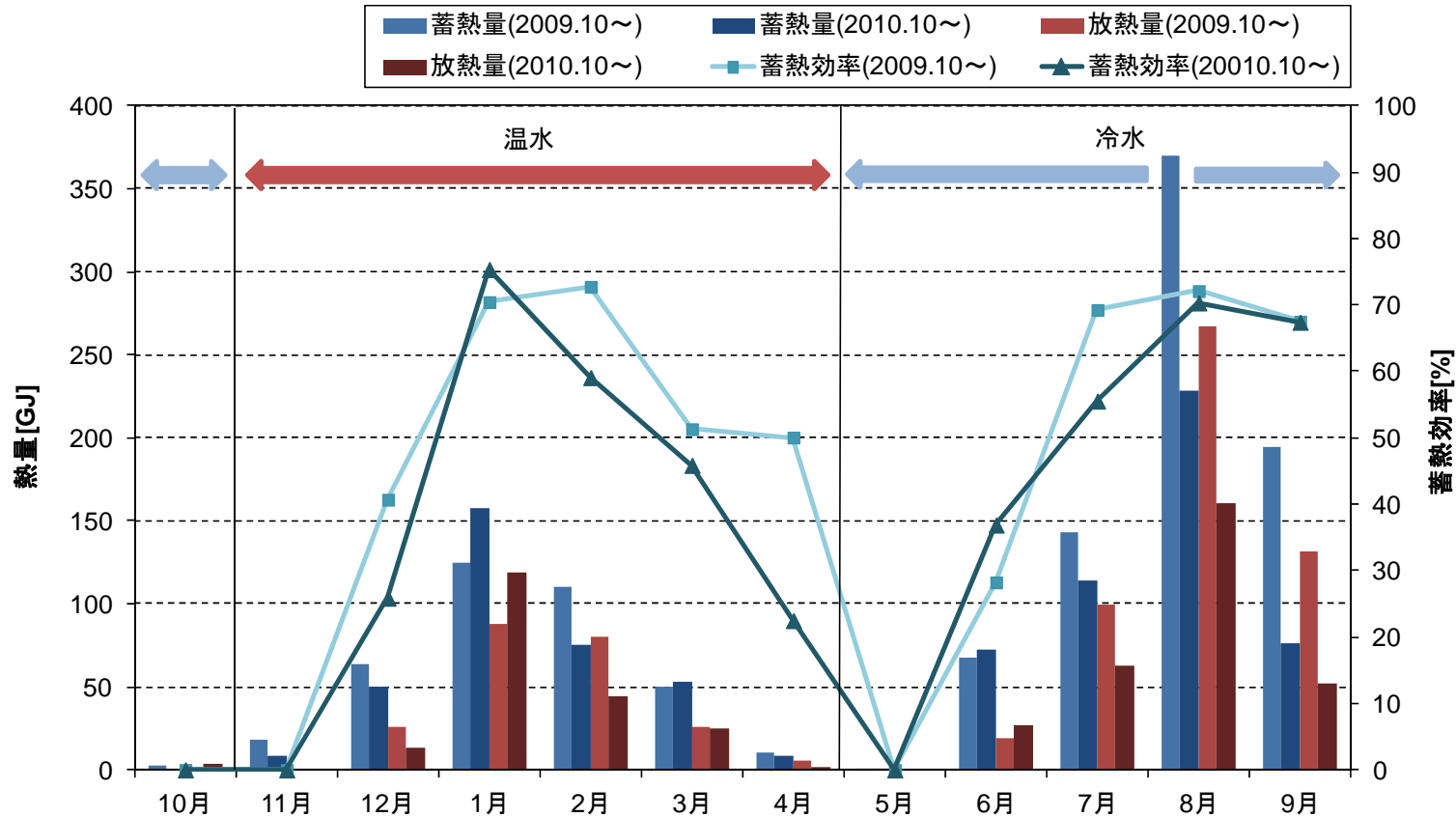


空調システム図

機器名	記号	仕様
冷却塔	CT-1	冷却能力 498.8kW、冷却水入口温度 37.5℃、冷却水出口温度 32℃、ファン台数 4台、ファン定格出力 1.5kW/台
熱交換器	HEX-1	交換熱量 1000kW、一次側冷水入口温度 6℃、一次側冷水出口温度 13℃、一次側流量 122.9m ³ /h、一次側圧力損失 0.99kg/cm ² 、二次側冷水入口温度 14℃、二次側冷水出口温度 7℃、二次側流量 122.9m ³ /h、二次側圧力損失 0.99kg/cm ²
	HEX-2	交換熱量 1000kW、一次側冷水入口温度 7℃、一次側冷水出口温度 14℃、一次側流量 122.9m ³ /h、一次側圧力損失 0.96kg/cm ² 、二次側冷水入口温度 18℃、二次側冷水出口温度 8℃、二次側流量 86.0m ³ /h、二次側圧力損失 0.48kg/cm ²
	HEX-3	交換熱量 1000kW、一次側冷水入口温度 6℃、一次側冷水出口温度 13℃、一次側流量 122.9m ³ /h、一次側圧力損失 0.97kg/cm ² 、二次側冷水入口温度 17℃、二次側冷水出口温度 7℃、二次側流量 86.0m ³ /h、二次側圧力損失 0.49kg/cm ²
	HEX-4	交換熱量 350kW、一次側冷水入口温度 6℃、一次側冷水出口温度 13℃、一次側流量 43.0m ³ /h、一次側圧力損失 0.47kg/cm ² 、二次側冷水入口温度 17℃、二次側冷水出口温度 7℃、二次側流量 30.1m ³ /h、二次側圧力損失 0.23kg/cm ²
冷温水一次ポンプ	PCH-1,2	定格流量 66.0m ³ /h、定格消費電力 11kW、定格揚程 20kPa
冷温水一次ポンプ	PCH-3,4	定格流量 90.0m ³ /h、定格消費電力 15kW、定格揚程 30kPa
冷水ポンプ	PC-1	定格流量 90.0m ³ /h、定格消費電力 15kW、定格揚程 30kPa
冷水二次ポンプ	PC-2,3	定格流量 24.0m ³ /h、定格消費電力 5.5kW、定格揚程 30kPa
冷水ポンプ	PC-4	定格流量 5.4m ³ /h、定格消費電力 0.4kW、定格揚程 10kPa

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

水蓄熱システムに関する性能検証と不具合改善 水蓄熱槽蓄熱効率の推移



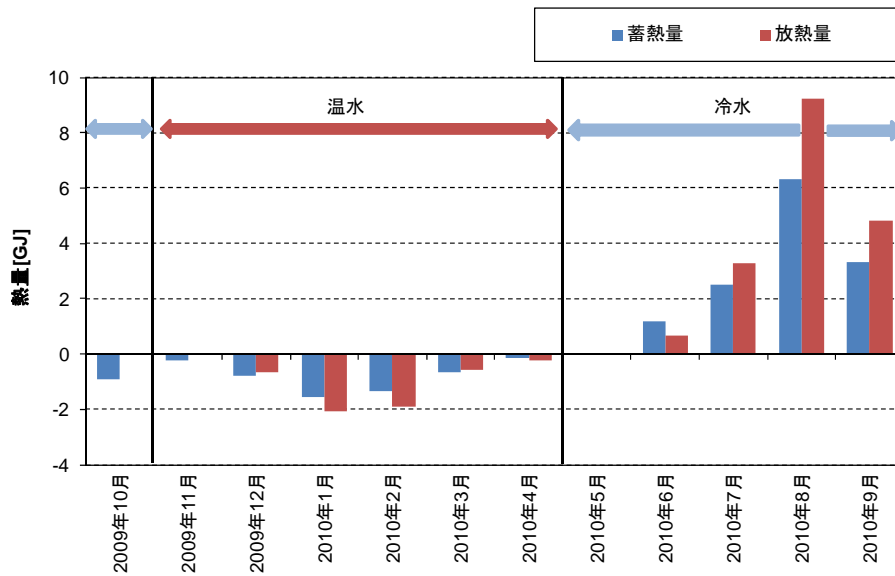
年間平均蓄熱効率：2010年度 **64%**、2011年度 **60%**

⇒BEMSデータより**何らかの不具合**の傾向が判明

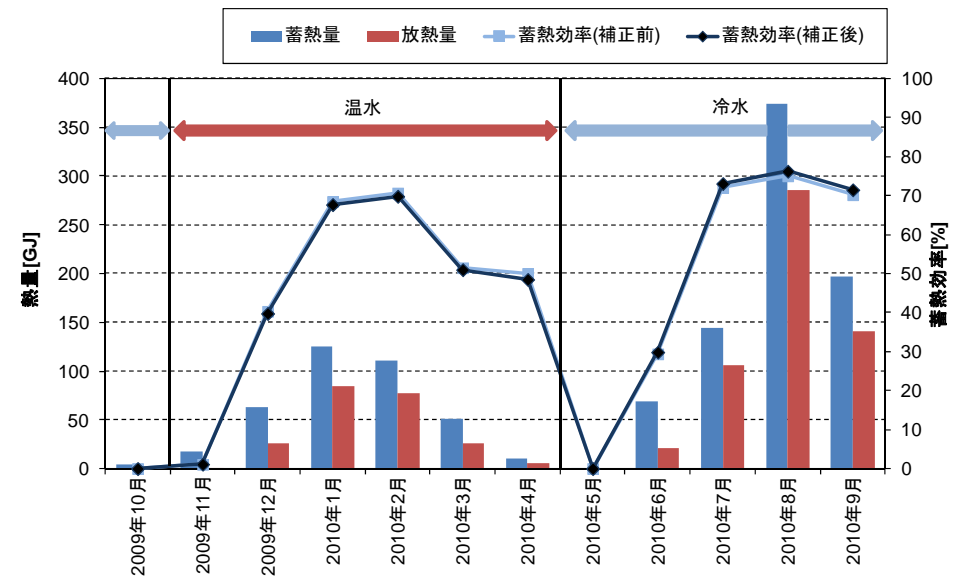
3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

水蓄熱槽効率低下の不具合要因の検討

各熱交換器及び水蓄熱槽の**温度センサー**の校正を実施



蓄熱量・放熱量の変化(補正後-補正前)



補正後の蓄熱量・放熱量・蓄熱効率

冷水蓄熱の蓄熱効率は1.19%の向上、温水蓄熱の蓄熱効率は0.72%の低下となり、年間の蓄熱効率は**0.64%**の上昇にとどまった
➡ 温度センサーの校正による蓄熱効率の変化は小さい

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

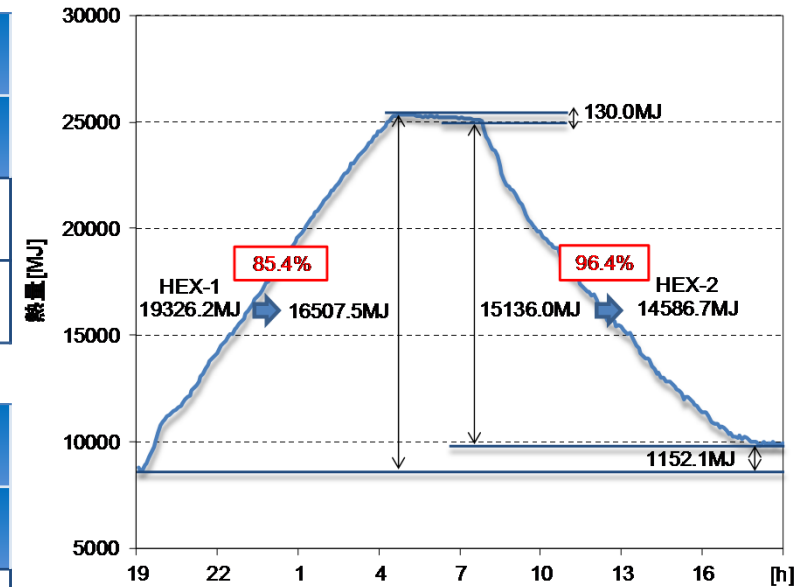
蓄・放熱量と熱交換熱量の比較

蓄熱量と熱交換熱量の比較(8月2日)

	蓄熱 (19:05~4:25)		放熱 (7:45~18:00)		熱ロス (4:25~7:45)
	熱量 [MJ]	投入に対する蓄熱の割合[%]	熱量 [MJ]	蓄熱に対する取り出しの割合[%]	熱量 [MJ]
熱交換熱量	19326.2	-	14586.7	96.4	-
蓄熱量	16507.5	85.4	15136.0	-	130.0

蓄熱量と熱交換熱量の比較(8月3日)

	蓄熱 (19:05~3:30)		放熱 (8:10~17:25)		熱ロス (3:30~8:10)
	熱量 [MJ]	投入に対する蓄熱の割合[%]	熱量 [MJ]	蓄熱に対する取り出しの割合[%]	熱量 [MJ]
熱交換熱量	17942.0	-	12050.4	94.7	-
蓄熱量	15197.9	84.7	12724.7	-	180.0



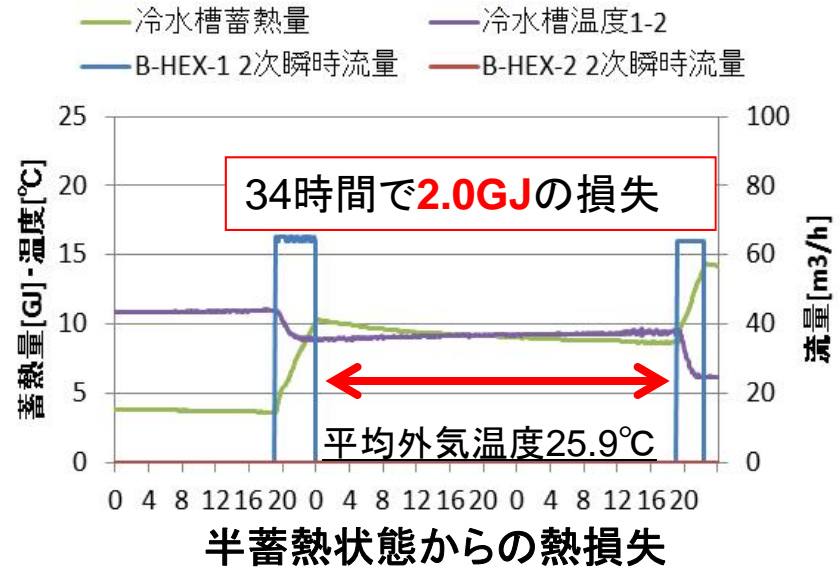
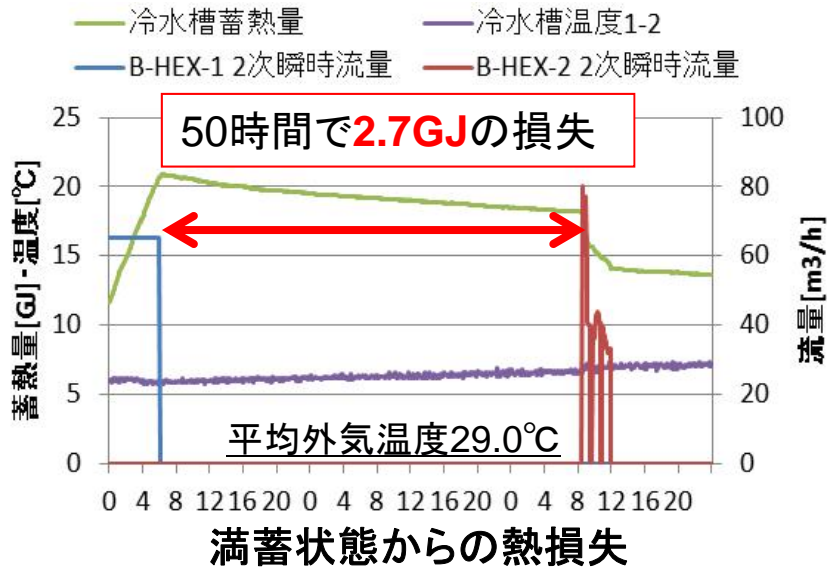
冷水蓄熱量の推移(8月2日)

- ・熱交換した熱量のうち**約15%**は蓄熱量に反映されていない
- ・放熱された熱量のうち**約5%**は熱交換器に取り出されていない

➡蓄熱・放熱運転時に失われる熱量が大きい

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

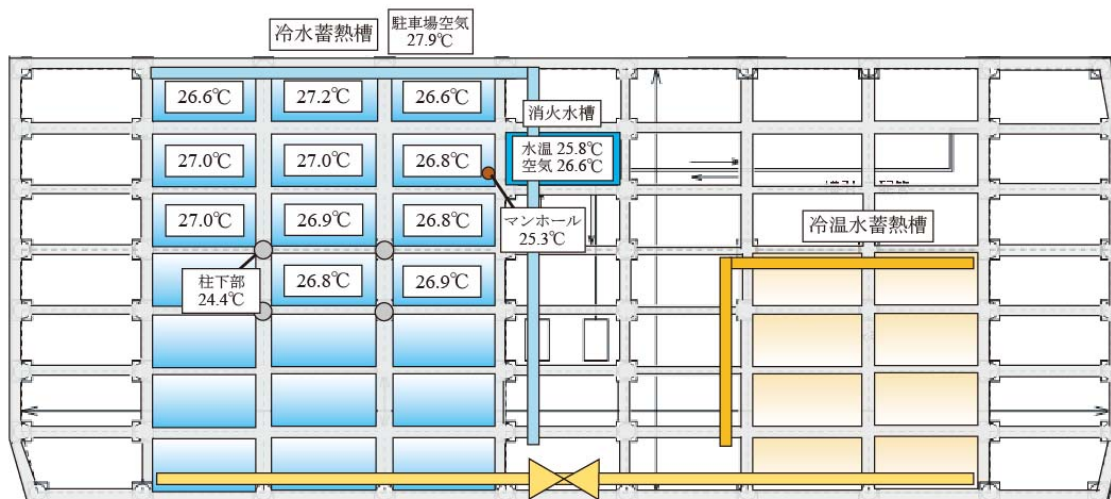
水蓄熱槽からの熱損失量の検討



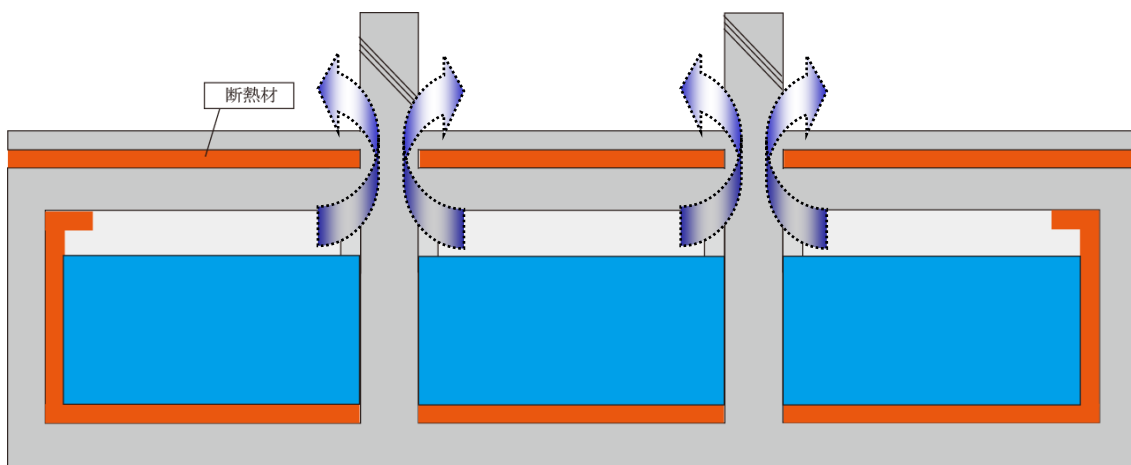
- 蓄熱状態から放置した際の熱損失量は 0.054GJ/h(満蓄から)、0.059GJ/h(半蓄から)
- 24時間で**1.3GJ**程度の損失
- 日平均蓄熱槽投入熱量(6～9月)が8.64GJであるので、**15%**は槽からの熱損失

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

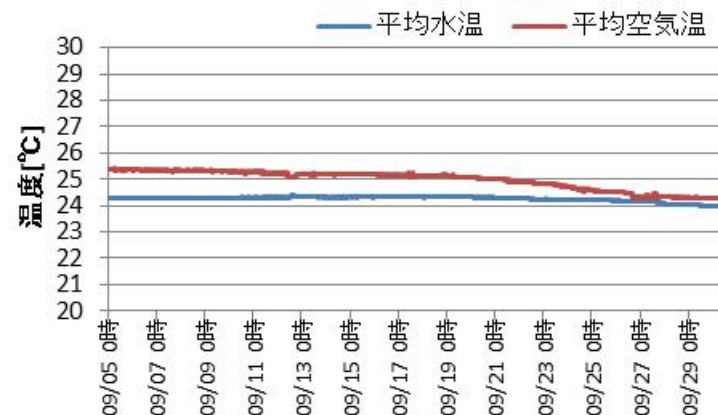
槽からの熱損失の要因



槽上部の床表面温度



断熱材の施工状況と放熱イメージ



消火水槽の温度変化(1ヶ月間)

- ・柱脚部、槽間に断熱材が施工されておらず、**躯体を通じた熱橋による熱損失**が生じている。(サーモカメラでも確認)
- ・断熱材・躯体を介して隣接する消火水槽の温度はほとんど**変化がない**。

⇒柱脚部の断熱改修を検討中

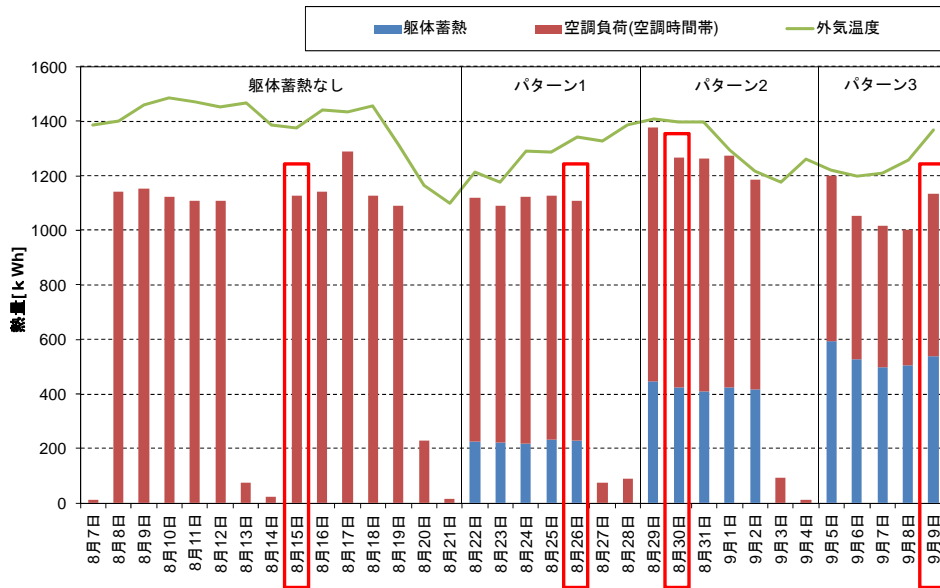
3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

性能検証に向けた躯体蓄熱システムの実測

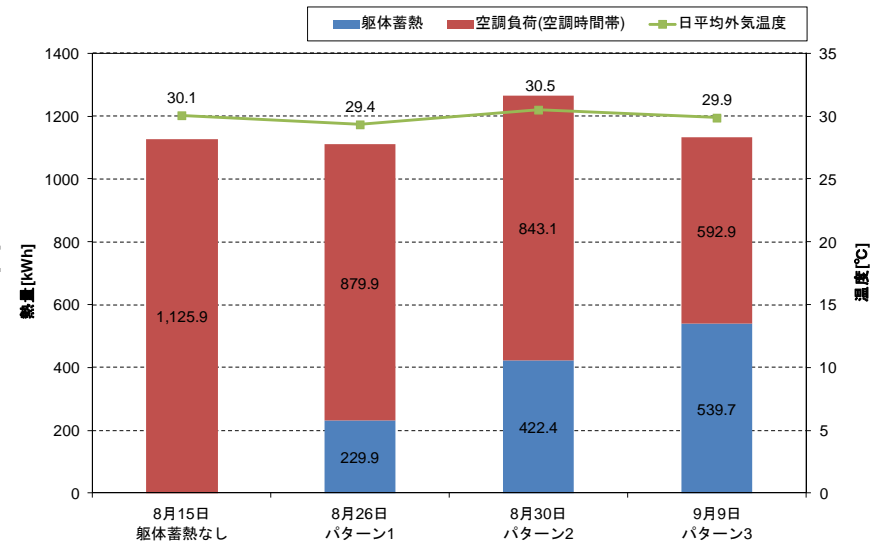
- 測定期間
2011年8月7日～9月9日
- 測定点
躯体表面温度、OA内温湿度、室内温湿度(上下方向10点)、
空調機消費電力
- 運転設定
8月 7日～8月21日: 躯体蓄熱なし
8月22日～8月28日: パターン1 / 躯体蓄熱運転開始 5時
8月29日～9月 4日: パターン2 / 躯体蓄熱運転開始 3時
9月 5日～9月 9日: パターン3 / 躯体蓄熱運転開始 1時
- 空調方式
天井吹出し ⇒ 床吸込み

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

躯体蓄熱運転パターン別の空調負荷の比較



日積算空調負荷

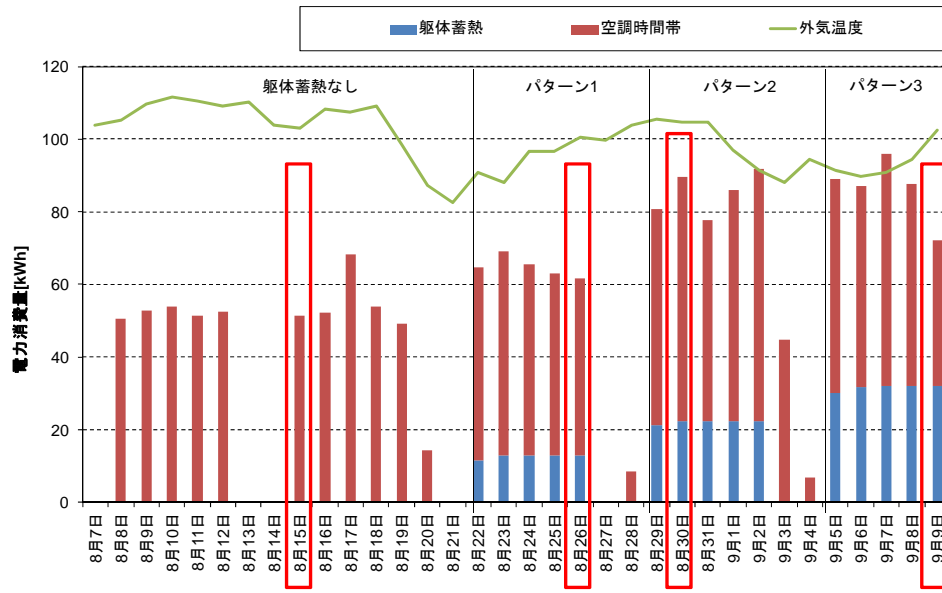


外気温度同等日の日積算空調負荷

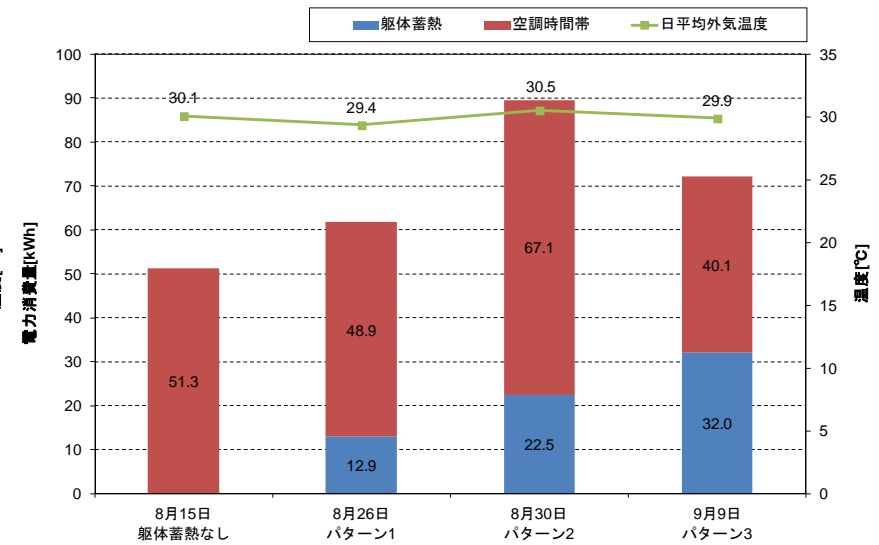
- パターン1とパターン3は空調負荷の総量がほぼ変化せずに空調時間帯の負荷を削減できている
- パターン2は空調負荷の削減量が少ない

3. 複合化蓄熱空調システムの最適可

運転パターン別の空調機電力消費量の比較



日積算電力消費量



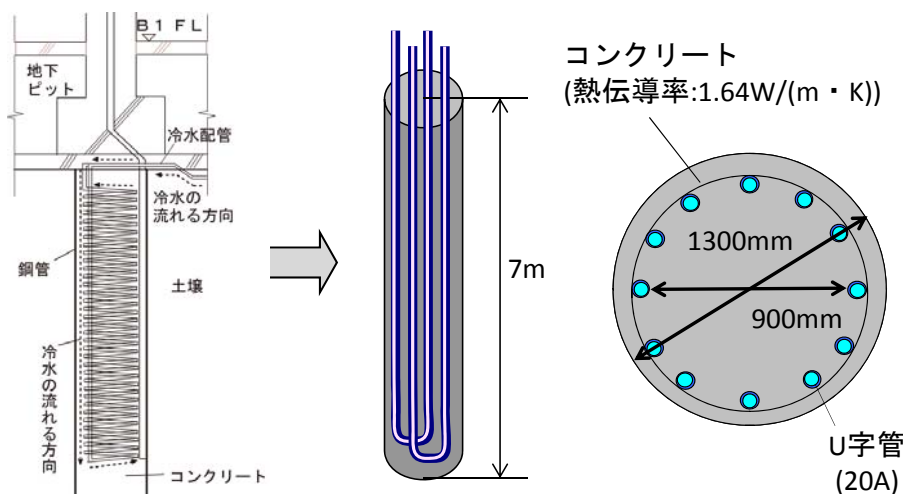
外気温度同等日の日積算電力消費量

- 躯体蓄熱運転時間が長いほど電力消費量が大きくなる
- パターン1とパターン3は総電力消費量は増加しているが空調時間帯の電力消費量を削減できている

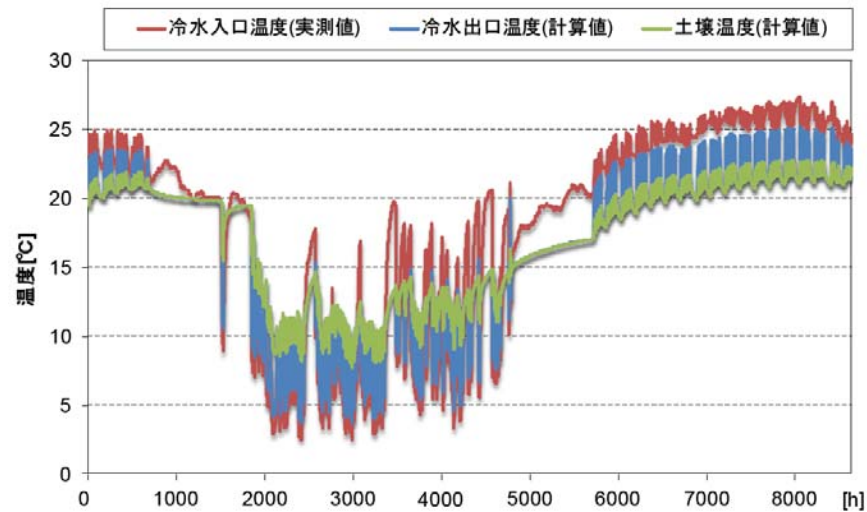
3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

複合化蓄熱空調システムの最適化シミュレーションに向けた (1) 土壌蓄熱のモデル化

- 今回のシミュレーション用に土壌蓄熱モデルを**再構築**。
- 時々刻々の地中熱交換器冷水入口温度と循環流量を入力値として与え、冷水出口温度と地中温度の計算を行う。
- 熱交換器として使用される基礎杭モデル
スパイラル型のコイル
➡
字管型地中熱交換器



基礎杭の条件とモデル化



各部の温度変化

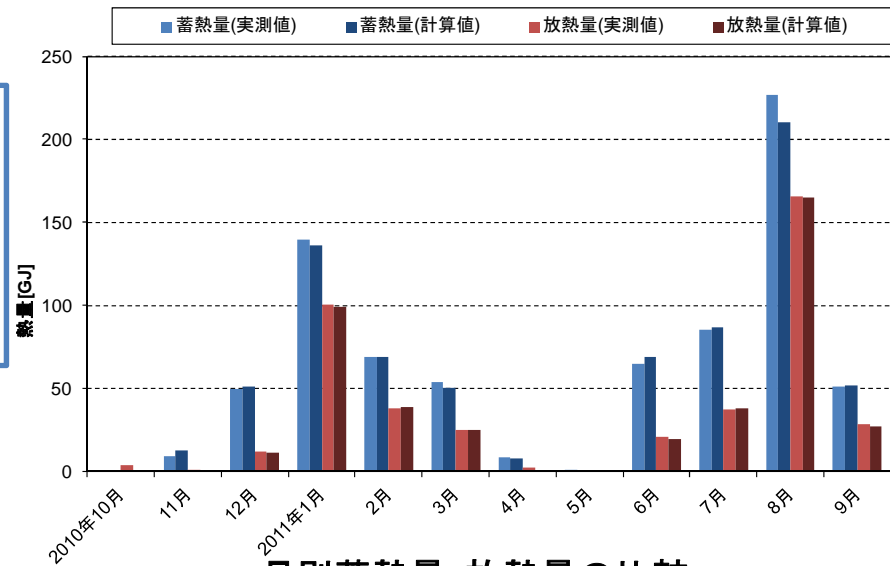
3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

(2) 水蓄熱槽のモデル化

・連結完全混合槽型蓄熱槽モデル

前時刻における各槽の温度分布、該当時刻に流入する流量と水温を入力値として、該当時刻の各槽の温度と蓄熱量を出力する。

⇒入力：一次側入口温度、一次側流量
 二次側入口温度、二次側流量
 出力：各槽の水温、蓄熱量



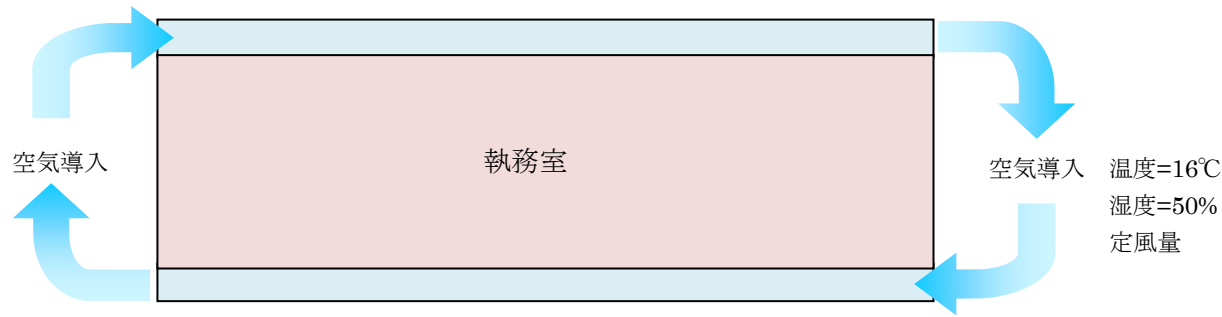
月別蓄熱量・放熱量の比較

・熱損失

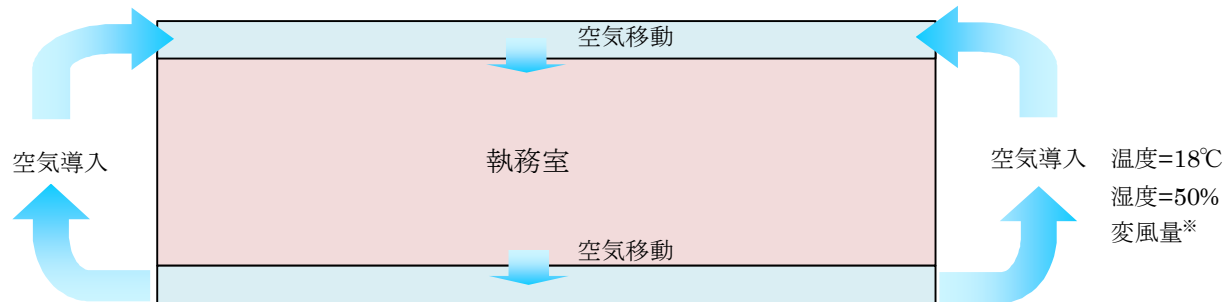
出力した各槽の温度と外気温度の差、蓄熱槽の表面積等から各槽の熱損失を求め、上昇した温度を各槽の温度に加算する。

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

(3) 躯体蓄熱のモデル化



躯体蓄熱運転



放熱(冷房)運転

※執務室温度が27°Cになるよう風量を変える

- New HASP/ACLDを用いて、対象システムの躯体蓄熱をモデル化
- 執務室、天井裏、床下の3空間に分けて計算
- 執務室の温度が一定になるように風量を変えて空調

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

シミュレーションモデルの構築

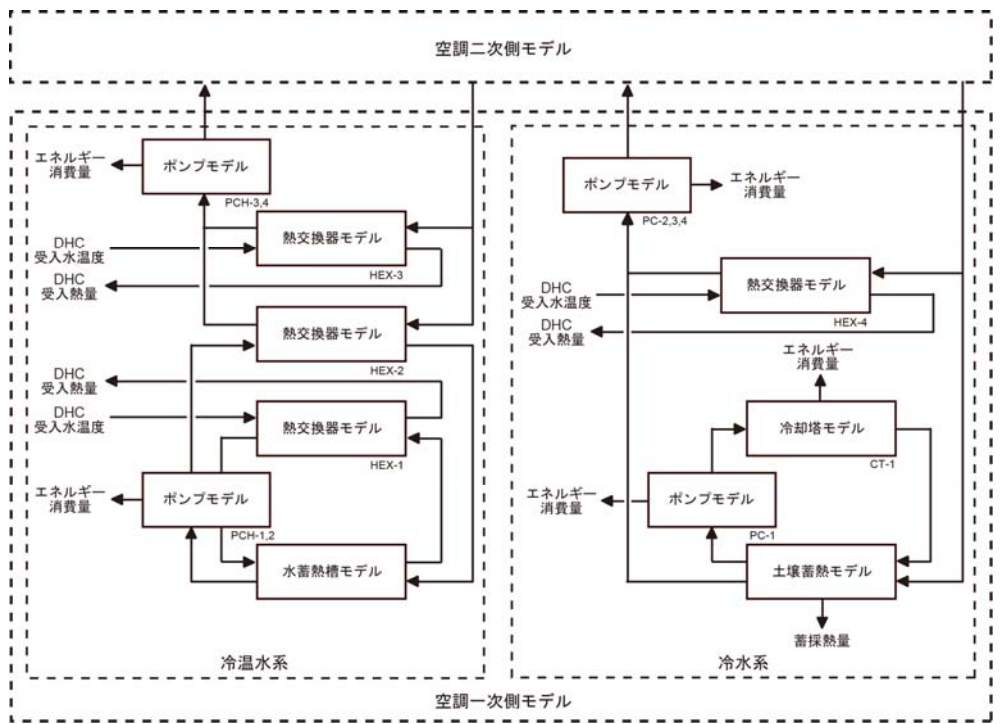


これらのモデルを組み合わせてシステム全体をモデル化

蓄熱システムにおける最適な運転方法の提案や
機器改修によるエネルギー削減量の検証が可能

**⇒現在、解析を行いながら
運用改善を試行中**

入力値: 外気温湿度、DHC受入水温度、二次側負荷・流量、水蓄熱槽目標蓄熱量、本館使用熱量等
出力値: ポンプ・冷却塔ファン電力消費量、土壌蓄・採熱量、DHCからの受入熱量 等



システムシミュレーション系統図

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

更なる省エネルギーに向けた運用改善の試み

ヨンデビル新館では現在、下記の項目について運用改善を検討中、もしくは実施中である。

【空調設備】

- | | |
|----------------------|-------------------|
| ①換気設備CO2制御 | ⑦食堂排気ファンの運転 |
| ②二次側ポンプの末端圧変流量制御 | ⑧AHU,FCUの運転 |
| ③冬期の冷水需要 | ⑨熱交換器(ジャケット化) |
| ④空調の風量の見直し(VAVの設定確認) | ⑩蓄熱槽の運用改善 |
| ⑤躯体蓄熱の運転 | ⑪土壌蓄熱用ポンプの更新
等 |
| ⑥AHU等の間欠運転の採用 | |

【衛生設備】

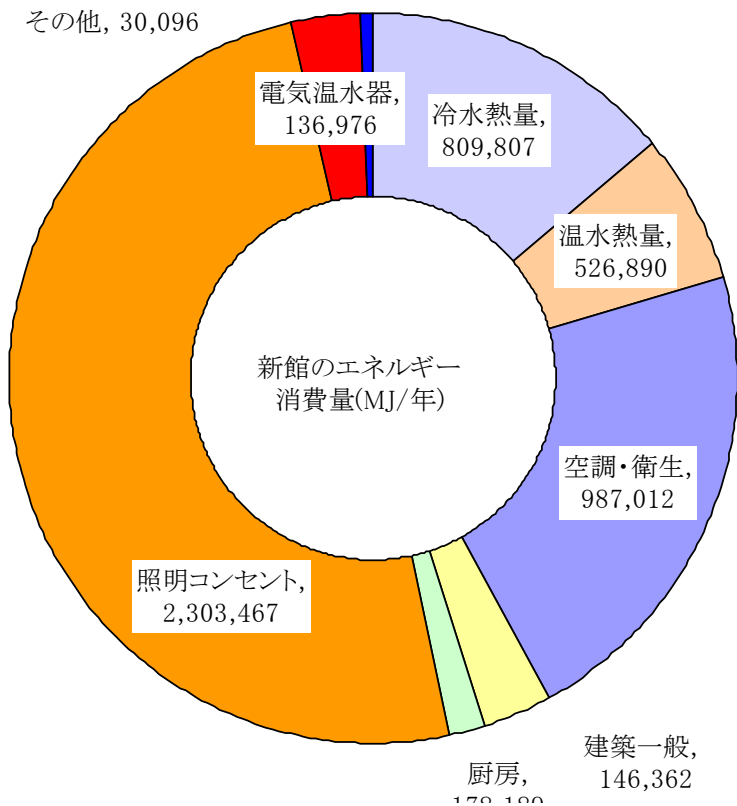
- | | |
|------------|-------------|
| ①局所給湯の運用改善 | ②排水ポンプの運転 等 |
|------------|-------------|

【電気設備】

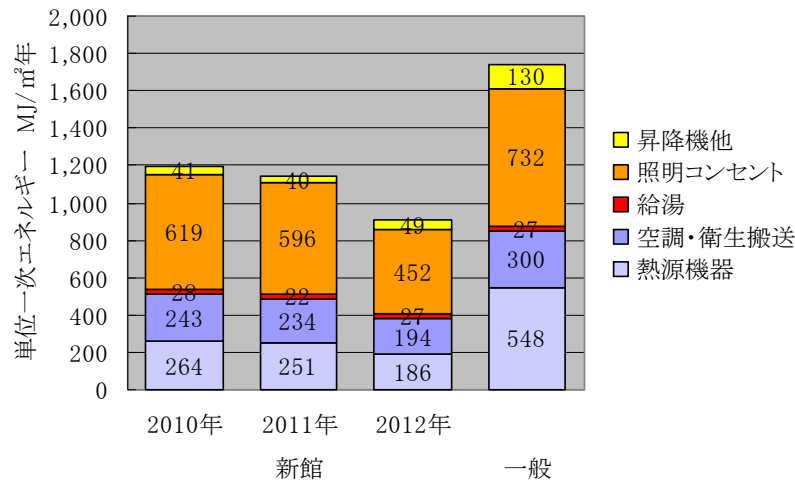
- | | |
|------------------------|-------------|
| ①照度設定の見直し(750lx⇒500lx) | ②待機電力の見直し 等 |
|------------------------|-------------|

3. 複合化蓄熱空調システムの最適化

更なる省エネルギーに向けた運用改善の試み



- 冷水熱量
- 温水熱量
- 空調・衛生
- 建築一般
- 厨房
- 照明コンセント
- 電気温水器
- その他



東日本大震災の影響による全国的な「節電・省エネ要請」への取り組みの効果があるが、エネルギー消費量は竣工時と比較すると

平成17年度(竣工時) : 1396. 2 (MJ/㎡・年)

平成24年度(現在) : 908. 0 (MJ/㎡・年)

現在は▲45.0%となっており、今後も更なる省エネ施策を講じていく予定である。

4. 今後の展開

4. 今後の展開

本報告では、平成16年に竣工したヨンデンビル新館において、竣工後から現在まで継続的に行われているコミッショニングの取り組みについて報告した。

四国電力では、これまでヨンデンビル新館以外の建物でのコミッショニングの実施事例はない。しかし、当社既設建物において最適な運転がされていない建物が点在するため、更なる「負荷平準化」「省エネルギー」に向け、蓄熱空調設備の復性能検証を検討している。

また、新築物件に関しても、設計・施工・運用を通して当初性能検証や再性能検証の過程を組込むことにより、ライフサイクルエネルギーを最小化し、環境負荷低減に寄与したいと考えている。



ご清聴ありがとうございました。