

佐藤総合計画(AXS)の天井放射冷暖房への取り組み

最近の事例紹介・設計手法の検討



2023年3月2日(木)

株式会社佐藤総合計画

執行役員

環境オフィス機械ディレクター

未来・都市・環境計画センター長

田村富士雄

1. AXSはなぜ天井放射冷暖房に取り組むのか
 - (1) 天井放射冷暖房 導入実績
 - (2) 数値からひとへ ウェルネスを重視する
2. 事例を紹介する
 - (1) 羽島市庁舎
 - (2) 志木市庁舎
3. CFD解析を活用した天井放射冷暖房システムの設計手法の検討
 - (1) 背景
 - (2) 目的
 - (3) 既往の設計手法の概要・課題
 - (4) CFD解析を活用した設計手法の提案
 - (5) 実在オフィスを対象とした提案手法の検証

まとめ

1. AXSはなぜ天井放射冷暖房に取り組むのか

(1) 天井放射冷暖房 導入実績

水式:6物件 (2018年以降)

	建築名称	吉川市庁舎	敦賀市庁舎	鹿沼市庁舎
建築概要	外観写真 (完成予想図)			
	所在地	埼玉県吉川市	福井県敦賀市	栃木県鹿沼市
	延床面積[m ²]	8,229.94	15,148.16	10,205.88
竣工年月	2018年3月	2022年3月	2023年3月	
放射システム概要	方式	水式	水式	水式
	設置場所	執務室	執務室	執務室
	敷設面積[m ²] (敷設率)	約800m ² (執務室面積の約50%)	約1,220m ² (執務室面積の約50%)	約1410m ² (執務室面積の約44%)
	特徴	①潜熱(湿度)と顕熱(温度)を別々に処理 ②天井放射パネルと微風送風システムの併用	①地下水利用の放射冷暖房システム ②デシカント調湿機能により外気処理	①コイルバイパス型空調機の採用
	効果	<ul style="list-style-type: none"> 基準一次エネルギー消費量に対して、一次エネルギー消費量30%削減(実績値) 	<ul style="list-style-type: none"> ZEB Ready取得(BEI値:0.47) 	<ul style="list-style-type: none"> 基準一次エネルギー消費量に対して、一次エネルギー消費量約20%削減(計算値)

(1) 天井放射冷暖房 導入実績

	建築名称	羽島市庁舎	志木市庁舎	世田谷区庁舎
建築概要	外観写真 (完成予想図)			
	所在地	岐阜県羽島市	埼玉県志木市	東京都世田谷区
	延床面積[m ²]	9,800.71	12,697.75	72,946
竣工年月	2022年3月	2022年3月	1期:2023年9月 2期:未定	
放射システム概要	方式	水式	水式	水式
	設置場所	執務室	執務室	執務室
	敷設面積[m ²] (敷設率)	約1,150m ² (執務室面積の約46%)	約780m ² (執務室面積の約57%)	約7,400m ² (執務室面積の約56%)
	特徴	<ul style="list-style-type: none"> ①地下水利用の天井放射冷暖房 ②天井放射パネルと微風送風システムの併用 ③PMV制御を導入 	<ul style="list-style-type: none"> ①1フロア2系統送水によるゾーニング制御 ②放射空調に適した平面計画 ③実測による検証中 	<ul style="list-style-type: none"> ①潜熱と顕熱を別々に処理 ②デシカント調湿機能により外気処理
	効果	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ 従来方式と比較し、30~50%程度のランニングコスト縮減(想定値) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ZEB Oriented認証取得 (BEI:0.54)

建築・都市づくりにおいて
カーボンニュートラル(≒ZEB)は
喫緊の命題である

ただし、そのみを絶対視すると
足場はしっかりし楽になるが
数値のみにとらわれ
建築の価値を狭めてしまう危険性もある

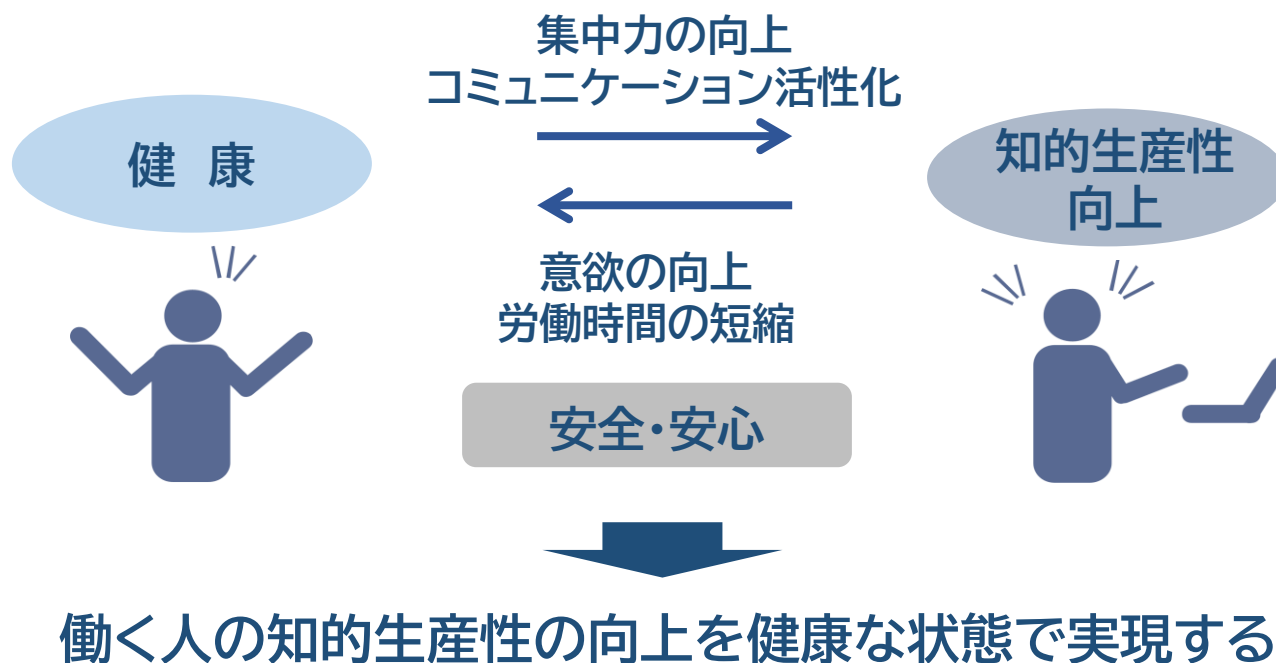
そこで当社(AXS)はZEBの実現に加え、
ウェルネスの向上、環境・エネルギーマネジメントをキーワードに

パッシブデザインと(最先端)技術のバランスがとれた
人に寄り添った環境親和建築の実現を目指している

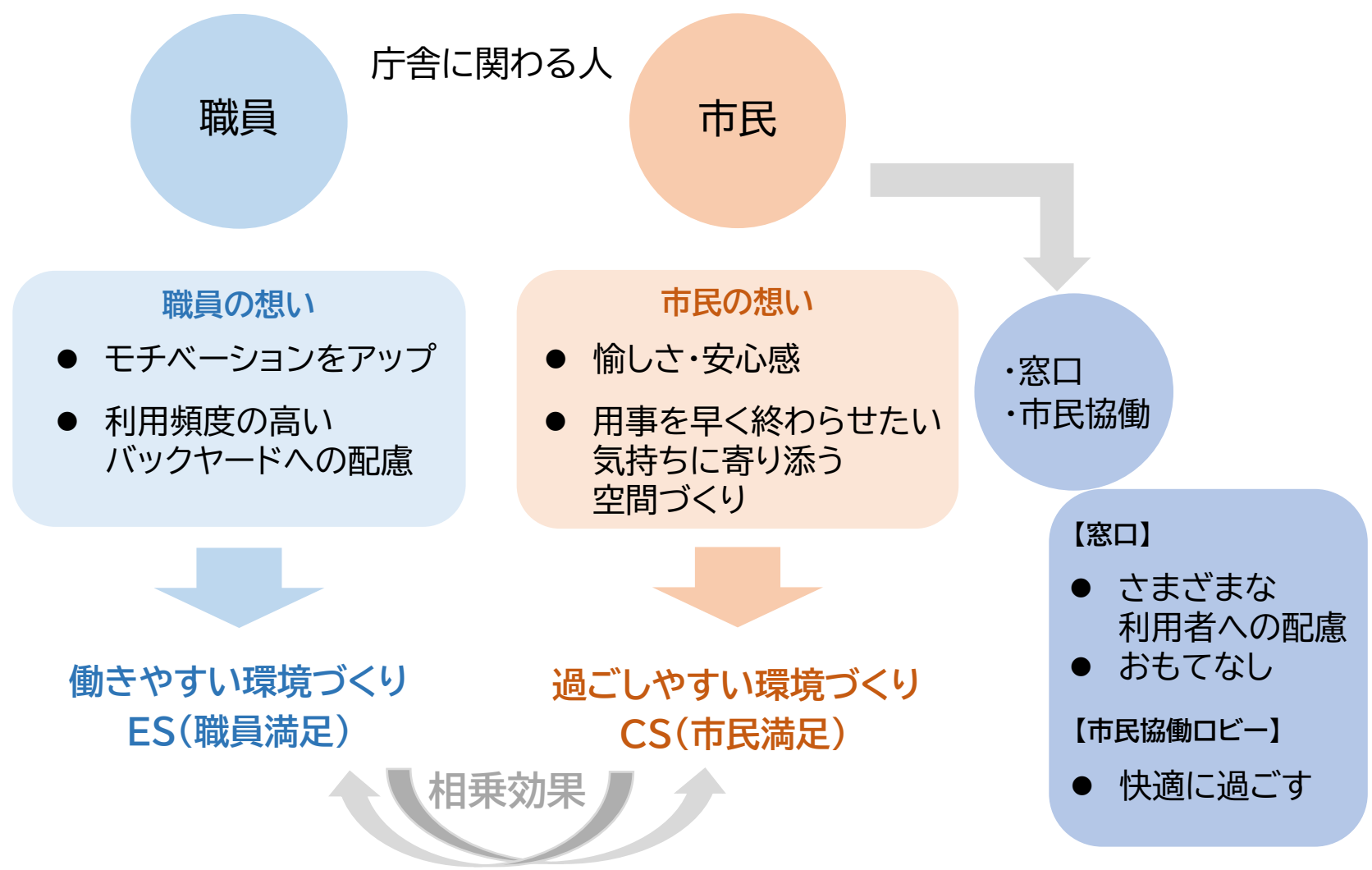


ウェルネスな執務環境とは

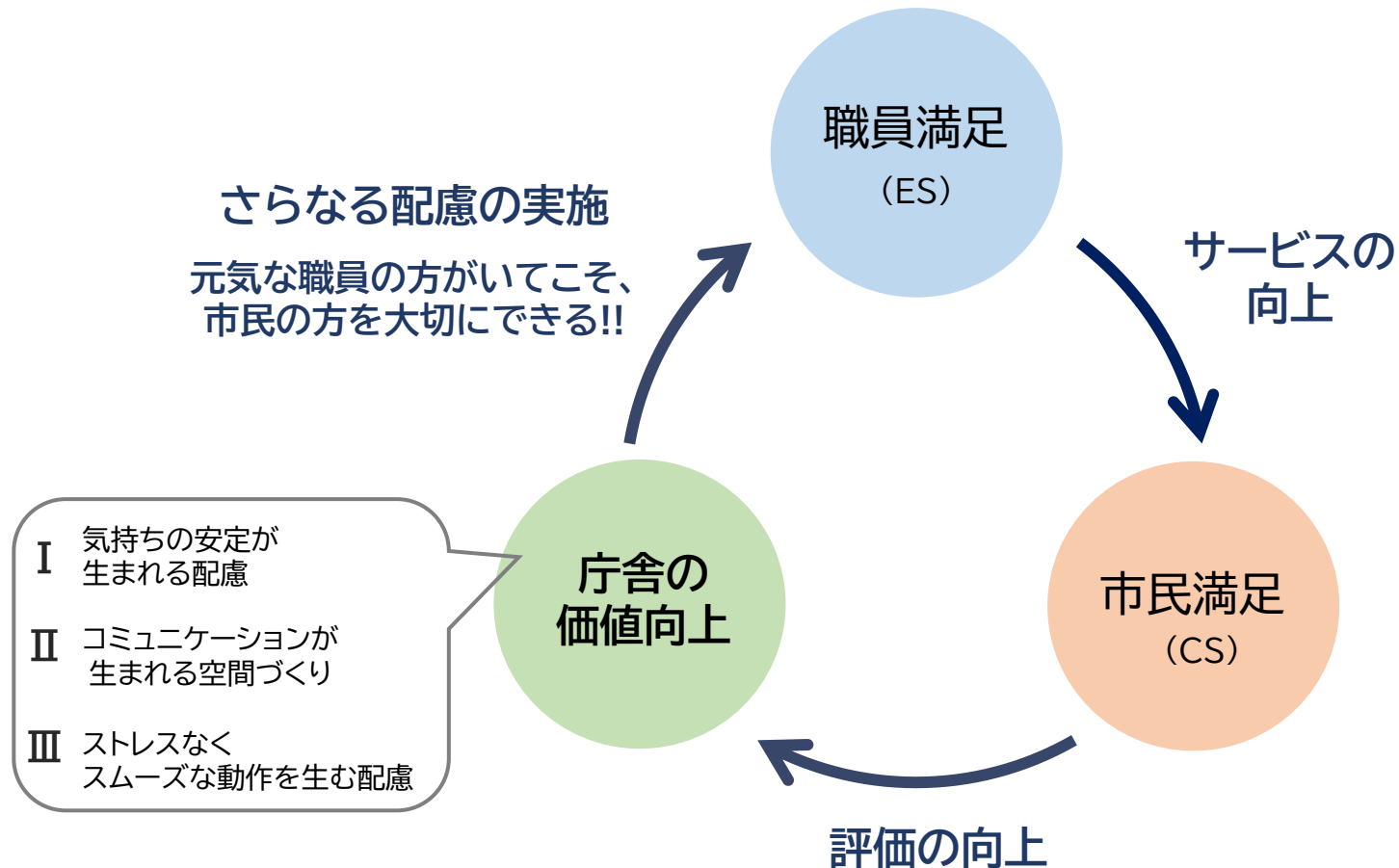
- 健康な状態の確保に加えて、オフィスの本務である働くことを高めることを目的に計画されている環境と考える
- 言いかえると、働く人の知的生産性の向上を健康な状態で実現した環境と考えられる



それが、庁舎全体のモチベーションアップに繋がっていくのではないだろうか

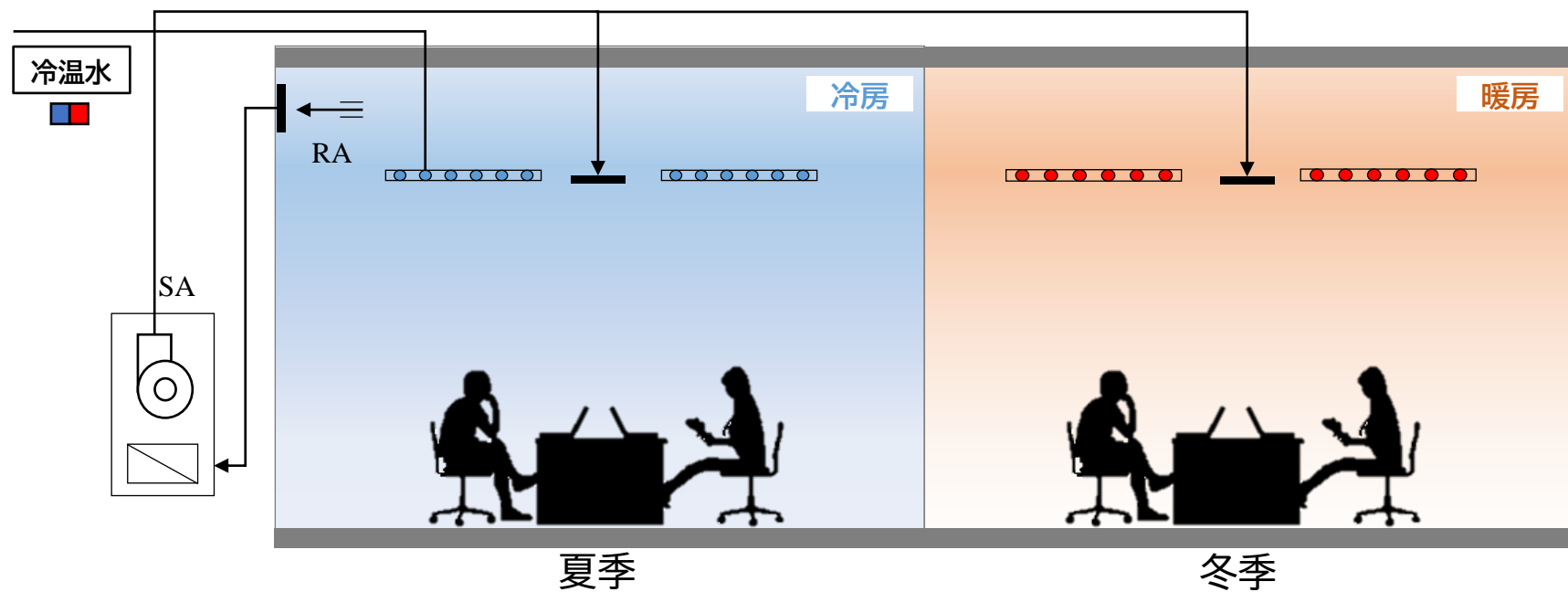


職員の満足度が向上すると、市民の満足も向上し、さらに庁舎への評価もさらに高まっていくのでは……



そのための解のひとつとしての放射冷暖房

放射冷暖房は、熱源の効率向上や搬送動力の削減が期待できる上、
良好な温熱環境も形成できる



AXSは、ウェルネスの向上に対する解のひとつとして、
天井放射冷暖房を積極的に導入している

2. 事例を紹介する

(1) 羽島市庁舎



2022年3月竣工

建築概要

- ・ 建物名称 : 羽島市庁舎
- ・ 敷地面積 : 22,468m²
- ・ 延床面積 : 9,800.71m²
- ・ 構造 : 鉄骨造 基礎免震構造
- ・ 階数 : 地上5階建

機械設備概要

主な熱源機器	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水ヒートポンプチラー(オープンループ式) ・空冷ヒートポンプチラー ・マイクロコージェネレーション
放射システムの送水温度	冷温水:夏16℃、冬45℃
敷設面積[m ²] (敷設率)	約1,150m ² (執務室面積の約46%)
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ①地下水を利用した天井放射冷暖房 ②天井放射パネルと微風送風システムの併用 ③PMV制御の導入



今、
自然と人間との関係の在り方が
あらためて問われている

次代の環境(建築・都市)を創造するためには、
風土というものの再認識が不可欠だろう



建築づくりに関わる者(環境・設備設計者)がなすべき第一歩は

- 一つひとつの風土(敷地・地域)のポテンシャルを発見すること
- そのポテンシャルを生かすデザインを求めること
(環境がかたちをつくる)

かもしれない

①自然の恵みをパッシブに使わせてもらう

- 北西からの卓越風(伊吹おろし)の積極利用
→ 温度差換気・風力換気に補助ファンを組み合わせたハイブリッド換気の採用
- アースチューブの導入

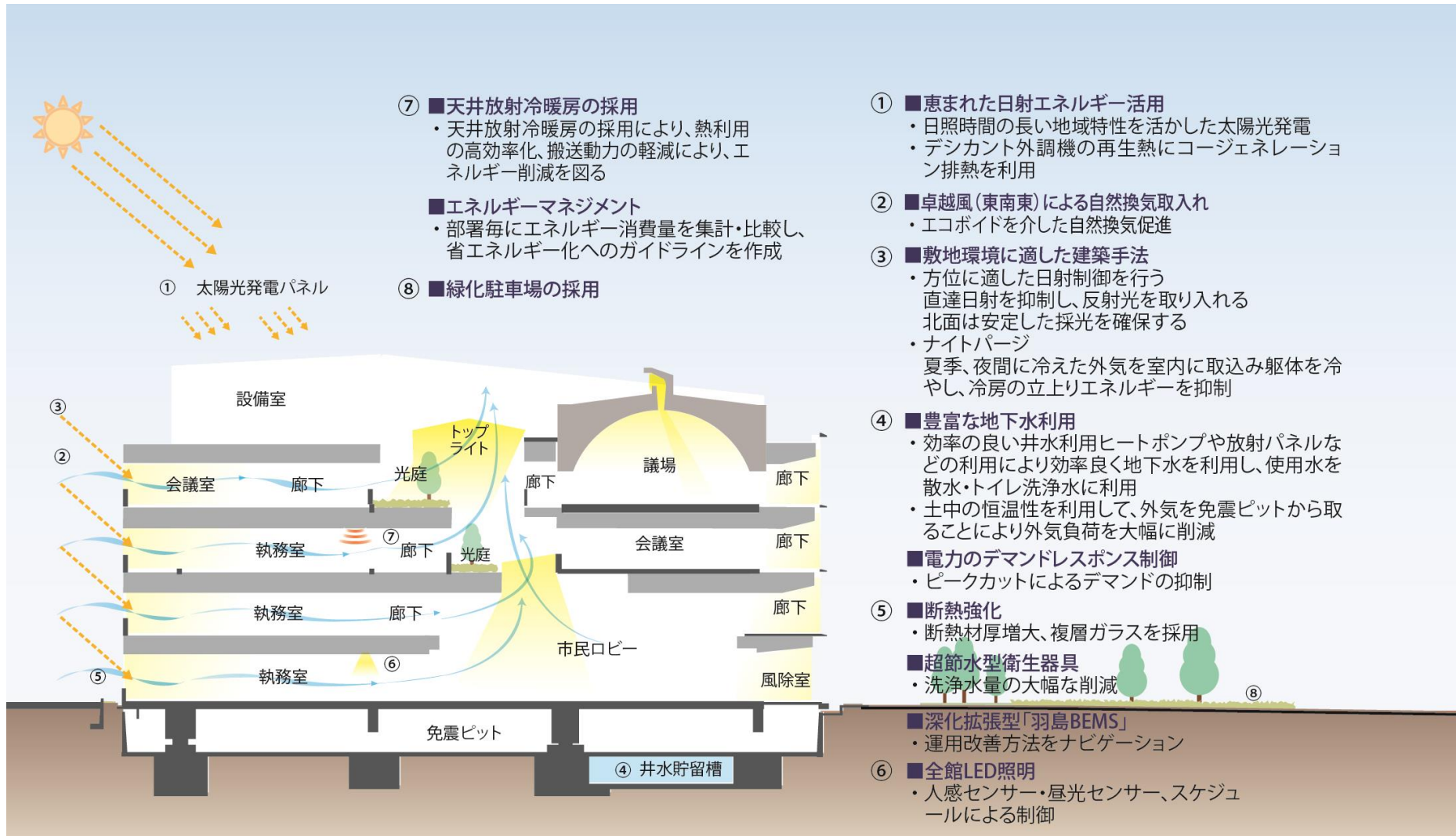
②自然の恵みをアクティブに使わせてもらう

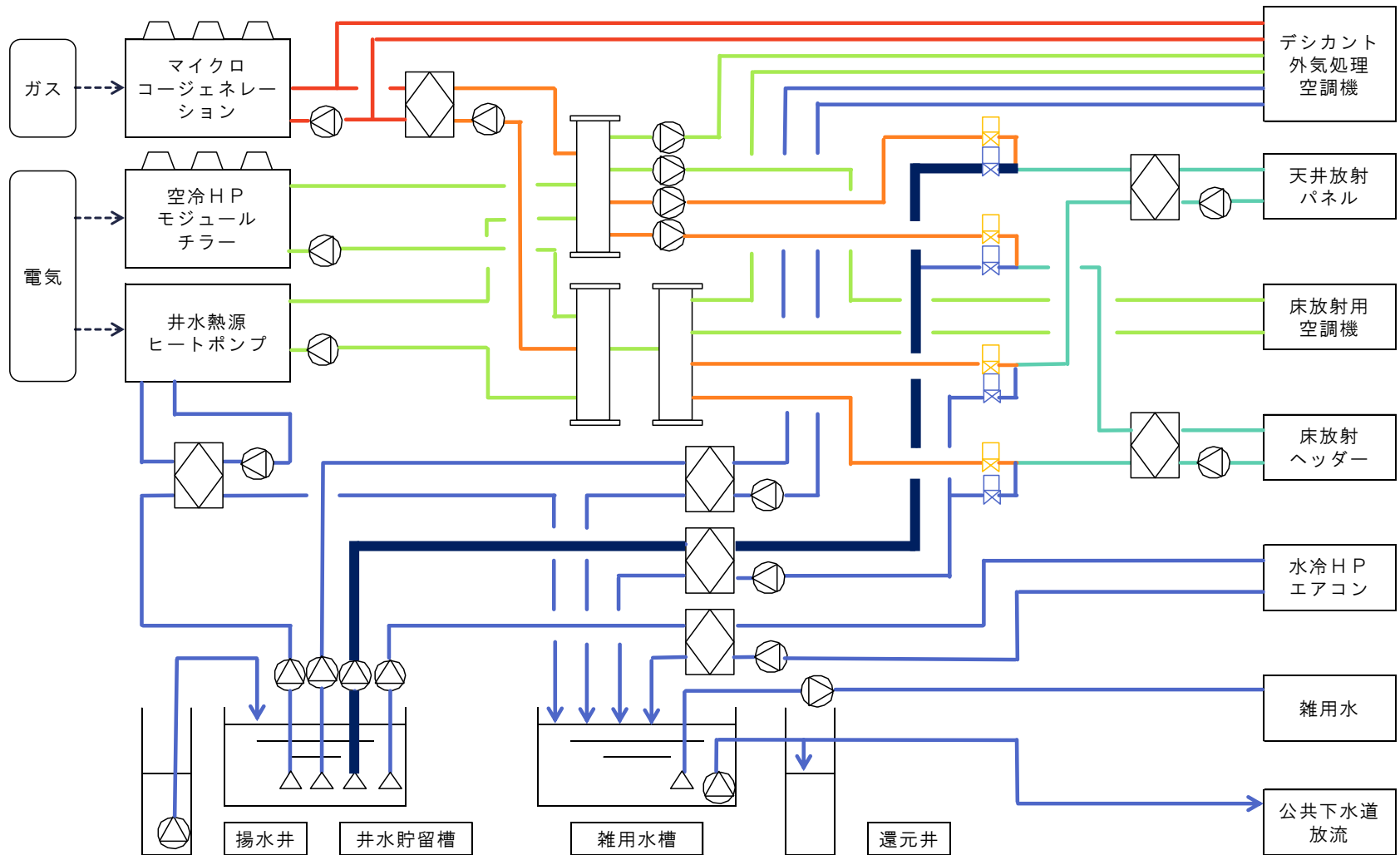
- 羽島(長良川と木曾川に挟まれた地域)の豊富な地下水をカスケード利用
- チラー熱源水・外調機予冷・天井放射パネル冷水→トイレ洗浄水・散水
- 冷水中温水域利用

③温熱環境・快適性の向上

- 天井放射・対流併用空調システム(執務室)
- 床放射冷暖房システム(市民ロビーなど)
- PMV制御の導入
- 無駄をなくすオンデマンド環境制御システム

環境断面図





凡例

■: 冷温水 ■: 冷温水(弱冷)
■: 温水 ■: 高温水 ■: 井水

空調・制御システムの特徴

天井放射パネル+デシカント外調機で空調

従来の室温一定制御ではなく、PMVにより制御

PMVの現在値から天井放射パネルの表面温度を可変させる

デシカント給気制御+オンデマンド環境制御

- 赤外線アレイセンサで検知した人数により、外気量を制御
- またデシカント外調機による顕熱負荷処理分を考慮し、補完的にPMV制御に組み込むことで、省エネルギーと負荷追従性を向上

対流併用の天井放射パネル冷暖房

- 天井放射パネルをパンチングメタルにすることで、対流効果も向上させている

PMV制御

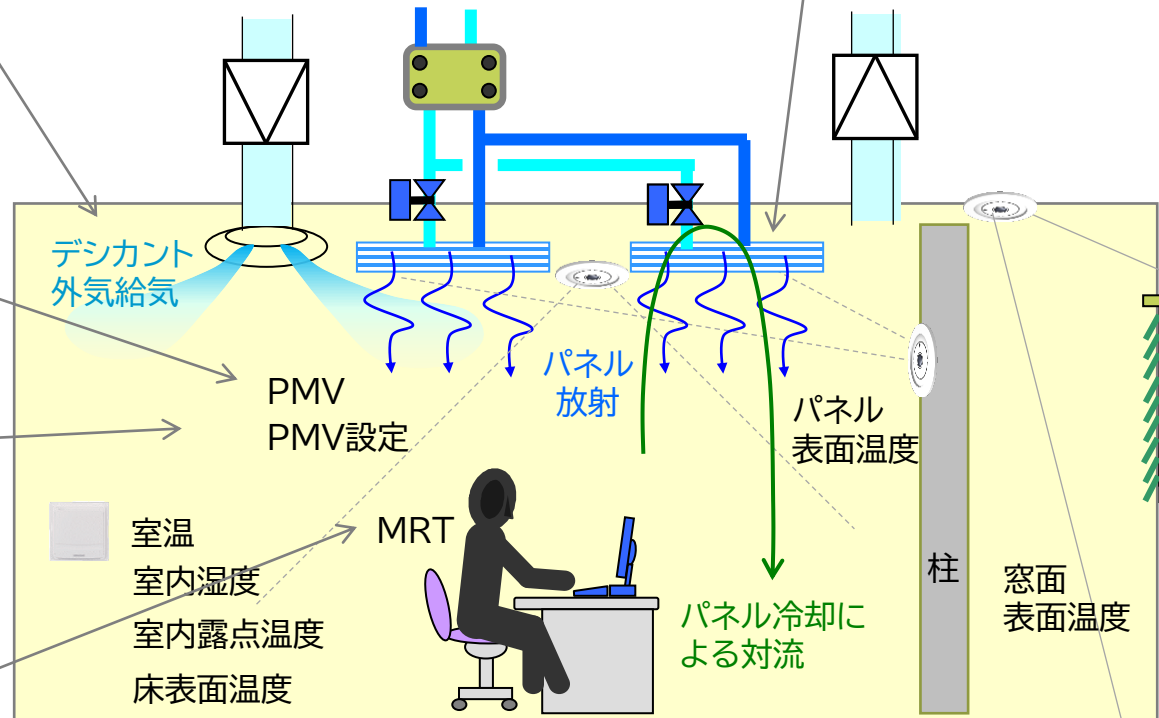
- 演算したPMV(計測値)が設定値(目標値)となるように、放射パネル表面温度を制御
- またデシカント給気量を補完的に制御

PMV設定と不在時緩和制御

- 建物管理者は制御目標値としてPMVを設定
- 人がいないシステムのPMV設定値は自動的に緩和し、人が来たらPMV設定値を元に戻すことで省エネルギーを実現

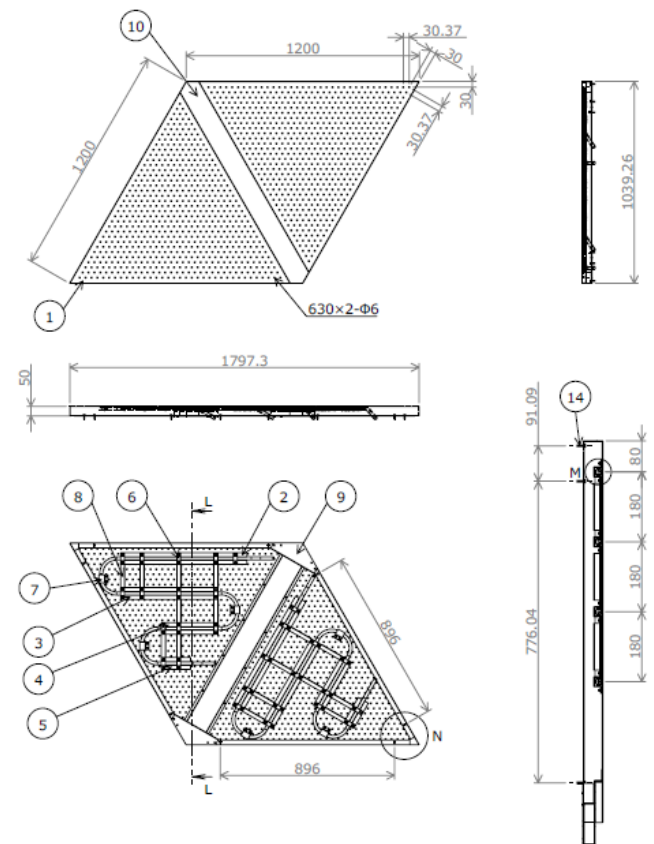
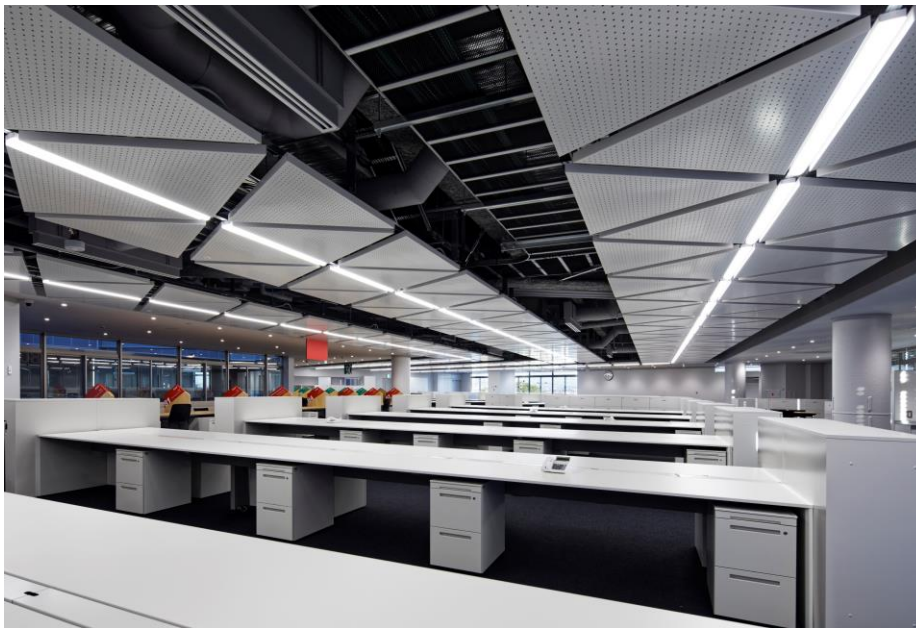
平均放射温度(MRT)の算出

- 赤外線アレイセンサによる表面温度計測値を用いて平均放射温度(MRT)を演算

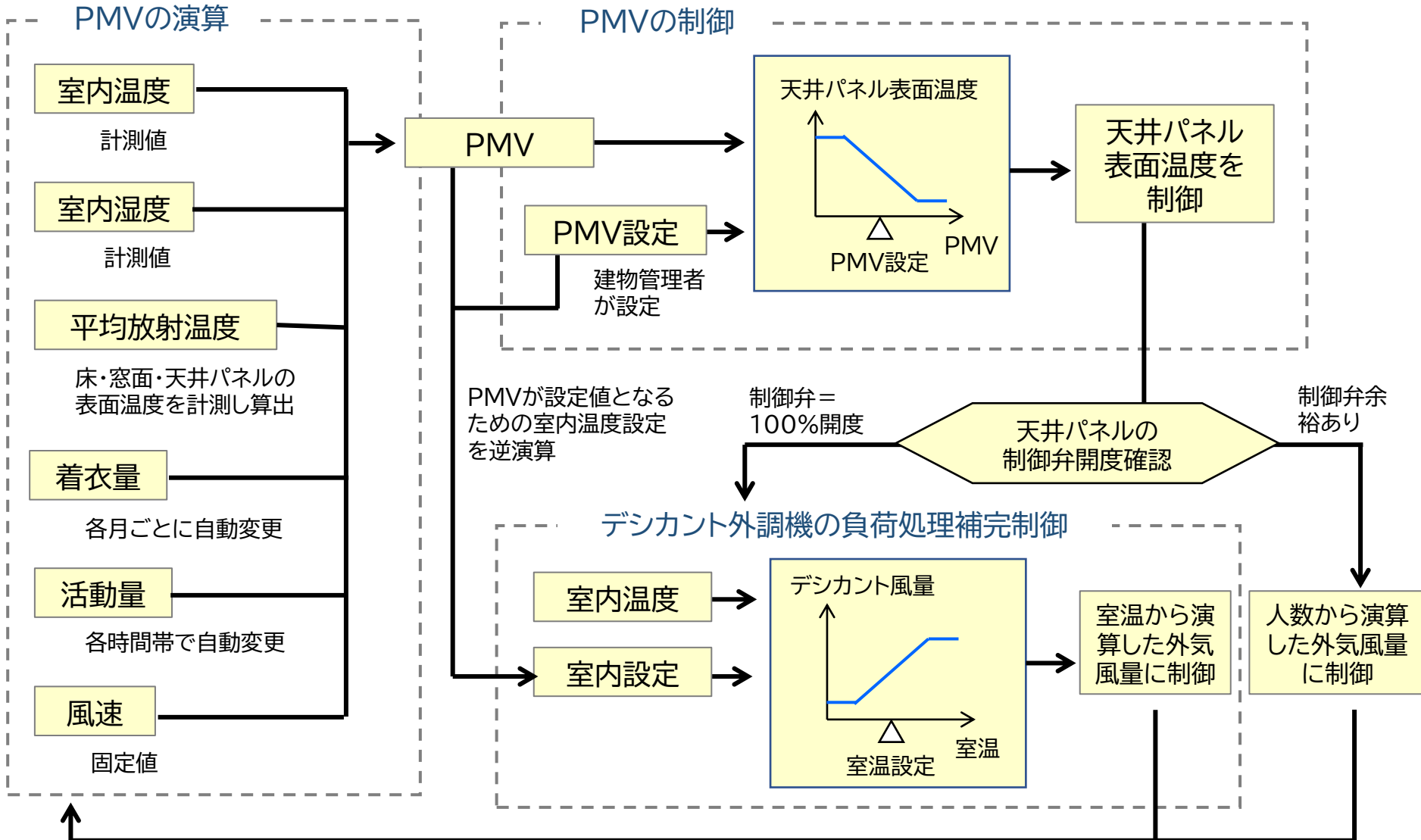


天井パネルとデシカント外調機による空調システム

三角形の構造スパンに合わせ
放射パネルモジュールと天井伏を計画



PMVを各種要素から演算し、天井パネル表面温度を変えることにより環境を制御



赤外線アレイセンサの働き

- ① 平均放射温度算出のための表面温度計測(パネル・床・窓面)
- ② 床表面温度分布から動く発熱体を人として検知し、制御単位(放射パネルごと)の人数検知



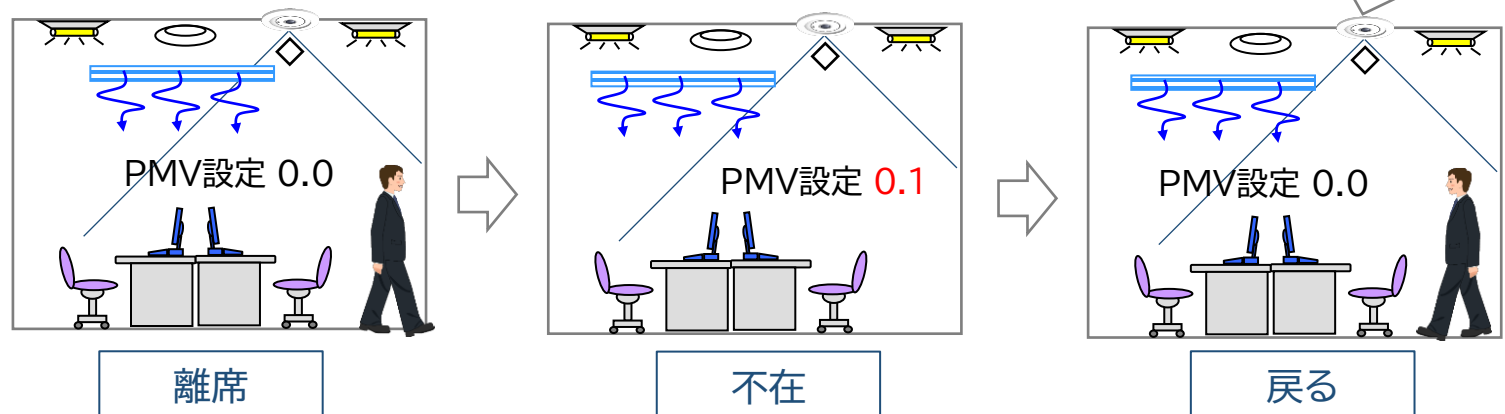
人の状況をリアルタイムで把握しながら、省エネルギー制御を実施

人数による外気量制御

検知した人数に応じた外気量を導入し、無駄な外気処理を削減

人の在／不在による環境緩和制御

人がいない場所があれば、その場所の環境を緩和
(PMV設定を自動で緩和)



不在時の環境緩和制御

(2) 志木市庁舎



2022年3月竣工

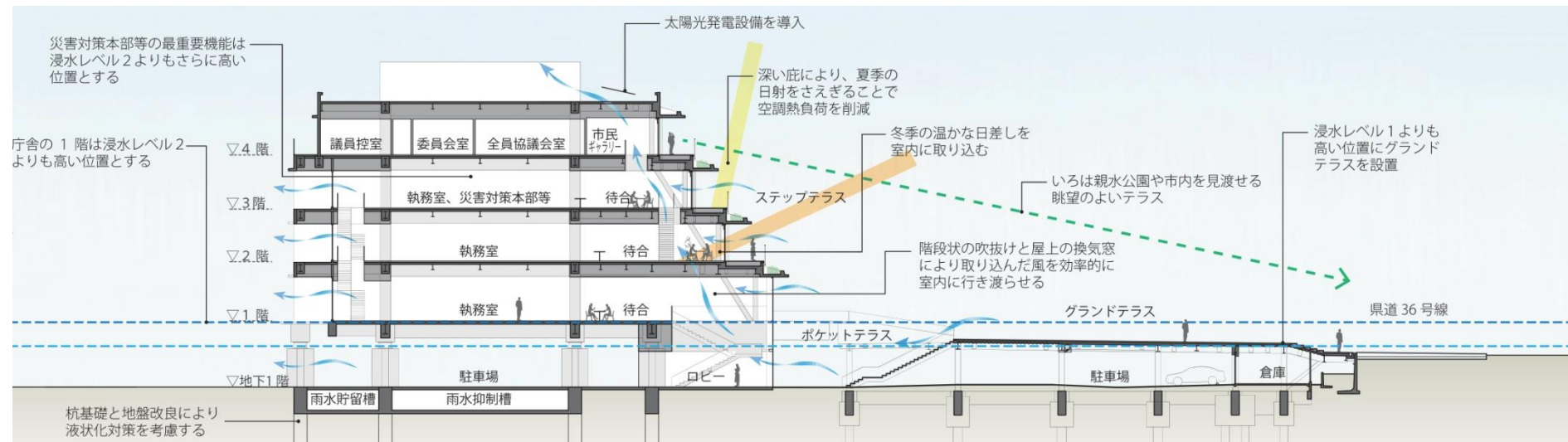
吹き抜け空間を持つ市庁舎における放射冷暖房

建築概要

- 建物名称 : 志木市新庁舎
- 敷地面積 : 4228.20m²
- 延床面積 : **12697.75m²**
- 構造 : 鉄骨造 鉄筋コンクリート造
- 階数 : 5階建
- 竣工年月 : 2022年3月

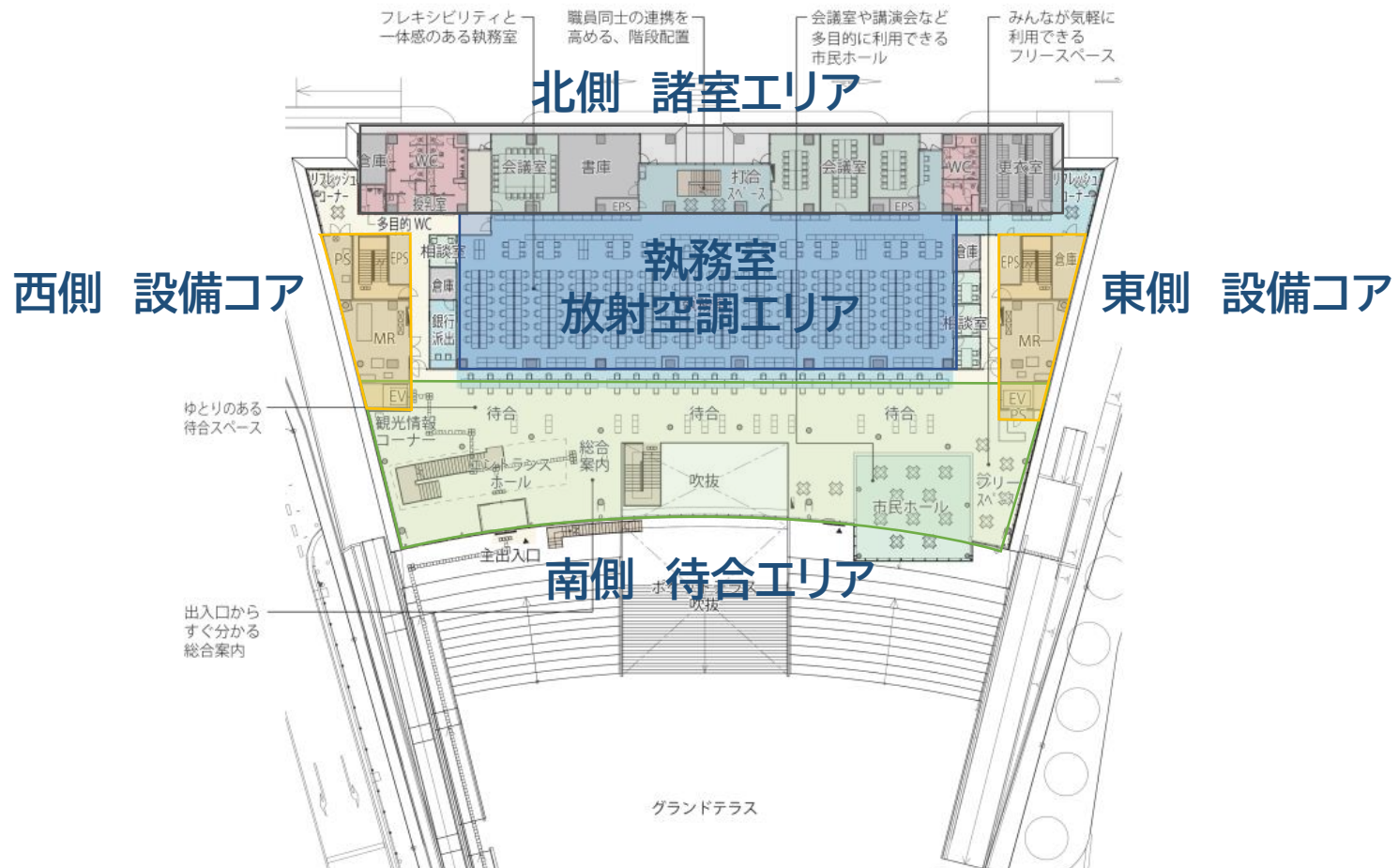
機械設備概要

主な熱源機器	<ul style="list-style-type: none"> • 空冷ヒートポンプチラー(放射パネル) • ガス焚吸収式冷温水発生機(外気処理)
放射システムの送水温度	冷温水:夏7℃、冬45℃ 中冷温水:夏11℃、冬40℃
敷設面積[m ²] (敷設率)	約780m² (執務室面積の約57%)
特徴	①1フロア2系統送水によるゾーニング制御 ②放射冷暖房に適した平面計画

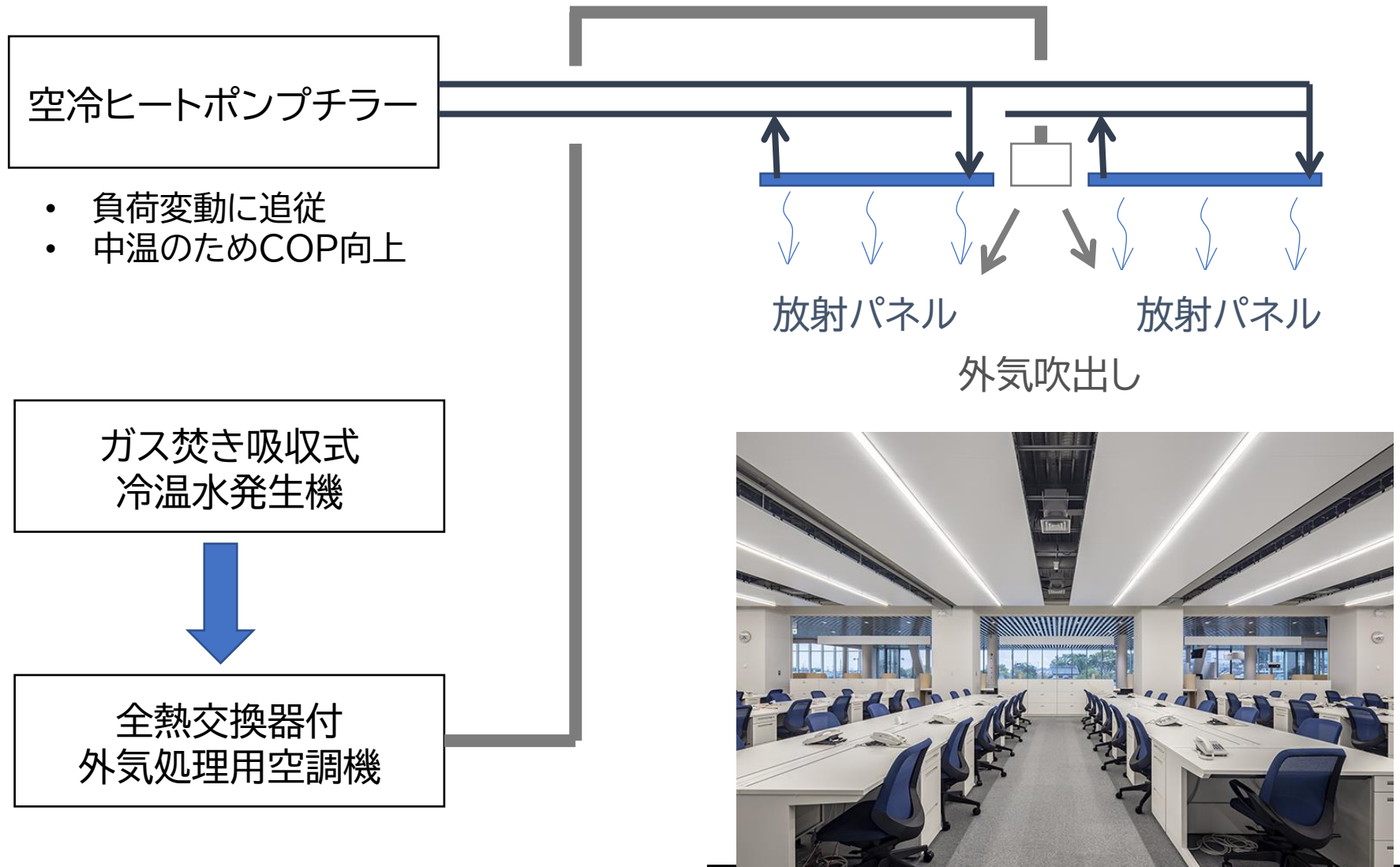


特徴

- 設備コアや空調空間に挟まれており、外部の影響を受けにくい執務室の配置
- 外気による結露の懸念も少なく、放射冷暖房に適した平面計画となっている

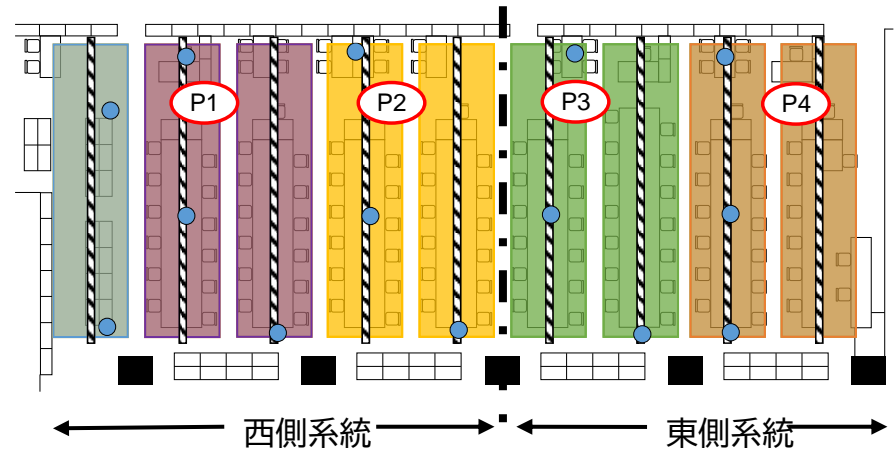


概要

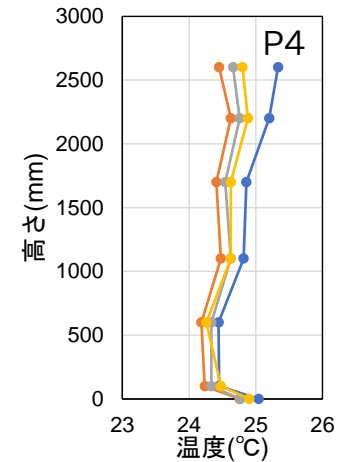
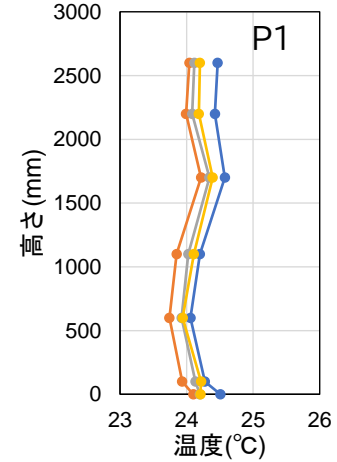


実測・アンケートによる検証

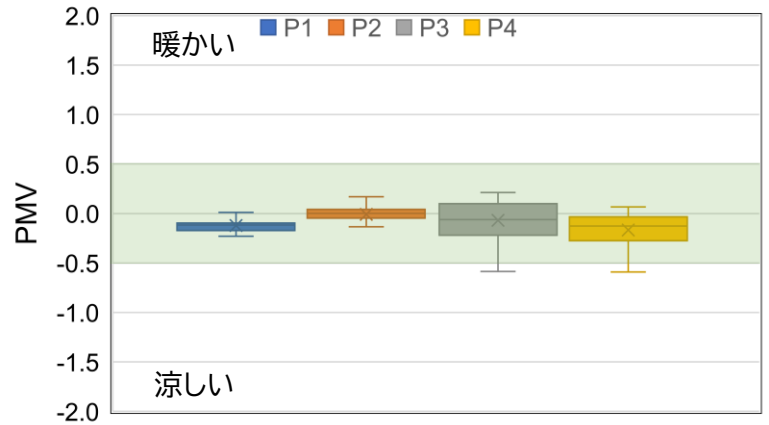
● 測定箇所: 3階執務室



● 上下温度分布 8月23日



● PMV 8月23日



● 満足度アンケートの調査

■ 快適	14%	} 89%
■ やや快適	19%	
■ どちらでもない	56%	
■ やや不快	11%	
■ 不快	0%	

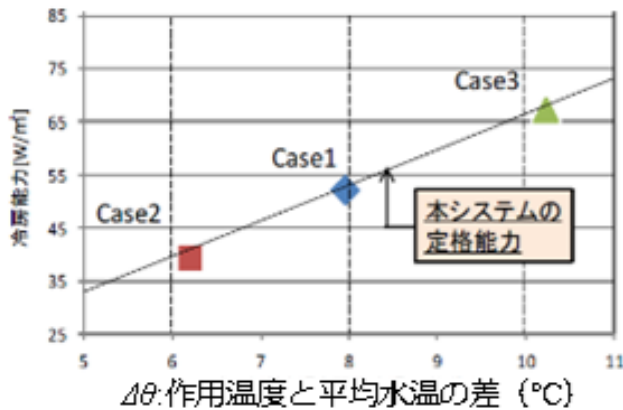
※全エリア

● 西側系統と東側系統で若干差が見られるものの、
上下温度分布および**PMV**の結果および**温熱環境満足度のアンケート調査**から、
 快適な執務環境が形成されていると判断している

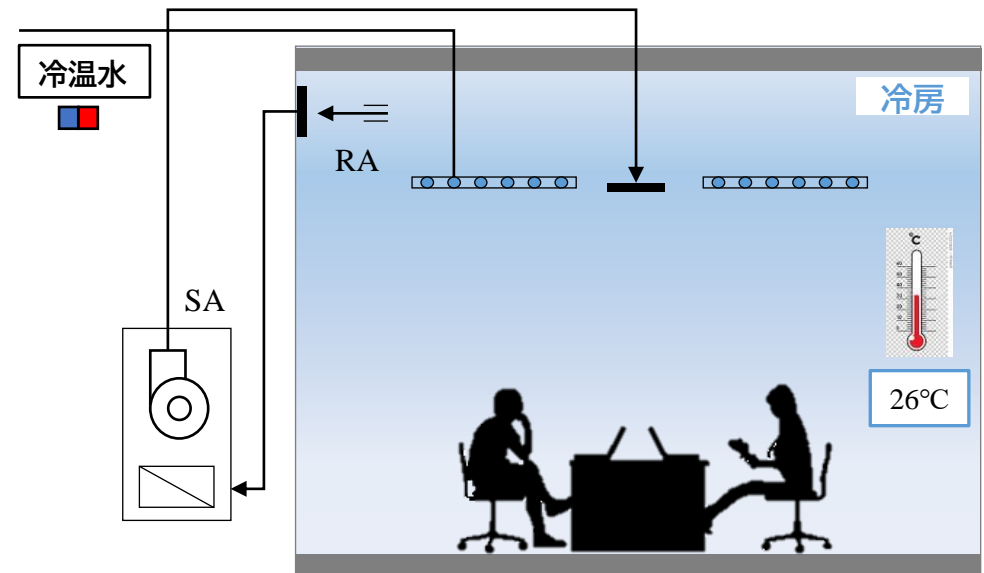
3. CFD解析を活用した 天井放射冷暖房システムの 設計手法の検討

北九州市立大学 白石靖幸教授(研究室)との共同研究

- 放射冷暖房の設計では、パネルの能力線図が利用される
- 能力推定には室内温熱環境の目標値となる作用温度を設定する



放射冷暖房パネルの能力線図



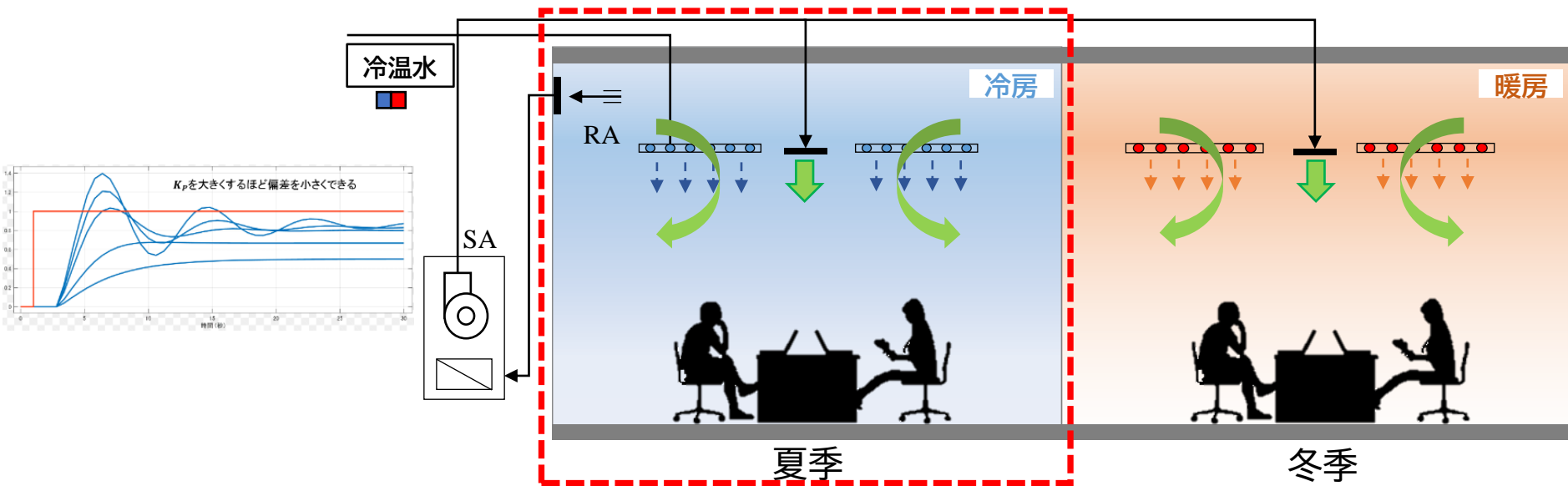
しかし、想定した作用温度が実現できるとは限らず

- 処理負荷の誤差
- 負荷偏在
- パネル同士の干渉

が起こる

(1) 背景

- 特に、対流との併用の際は、対流と放射の**処理熱量の比率**を季節別に想定している
- しかし、負荷の日変動に応じて放射冷暖房をどのように**非定常的に制御**するのかなどの課題もある



- **天井放射冷暖房システムの設計・運用手法の確立を目指す**
- 実物件を対象としたケーススタディを通じて
その有効性を明らかにする



- **夏季冷房時を想定した設計手法**
- 天井放射パネルが導入された実在オフィスを対象とした検討

放射冷暖房の設計手法に関して

学会では

1)	ASHRAE	2012 ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment SI edition – Ch.6 Panel Heating and Cooling, American Society of Heating, refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2012.06
2)	空気調和・衛生工学会	第14版 空気調和・衛生工学便覧 空気調和設備編,空気調和工学会,p277,2010,02

研究レベルでは

3)	松本若菜,森太郎,羽山広文,菊田弘輝:建築物総合シミュレーションを用いた天井放射冷房システムの設計法の検討,日本建築学会環境系論文集,第80巻 第707号,p21-28,2015.1	
4)	伊藤清:天井放射パネルの設計手法に関する研究, p183,博論2019.3	
5)	井上昌,奥宮正哉,尹奎英:放射空調システムの設計・制御に関する研究(第1報)CFDによる放射パネル能力予測の基礎検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,第3巻,p277-280,2017.9	
6)	迫博司,高橋幹雄,塩谷正樹,桑原亮:放射環境を考慮した自然エネルギー利用のオフィス空調システム構築, 日本建築学会技術報告集,第16巻 第34号,p1041 – 1044,2010.10	

- 放射冷暖房の設計手法の特徴

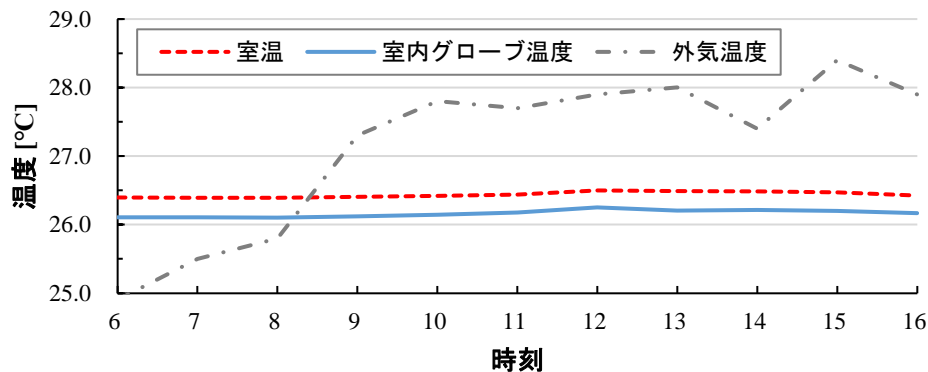
- ① 必要換気量(換気による処理熱量を含む)を決定し、放射パネルの負担する冷房負荷を決定
- ② 結露防止のため、パネル表面温度の下限值を決定
- ③ 夏季の熱負荷ピーク時 or 中間期を想定した定常的な検討

- 実務面での課題

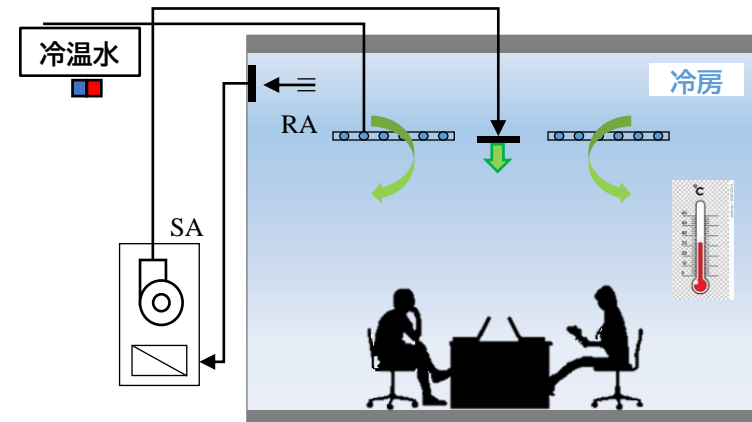
設計段階: **想定した室内温熱環境(作用温度)**と**実際の室内温熱環境の乖離**

冷房能力: 実験室実験(定常)で作成したものであり、
(パネル) 実運用で同程度の能力が得られる**保証はない**

さらに、設計段階では、**室温 = 作用温度** と仮定したとしても、**放射冷房下では 室温 > MRT** となるため、**室温 ≠ 作用温度**



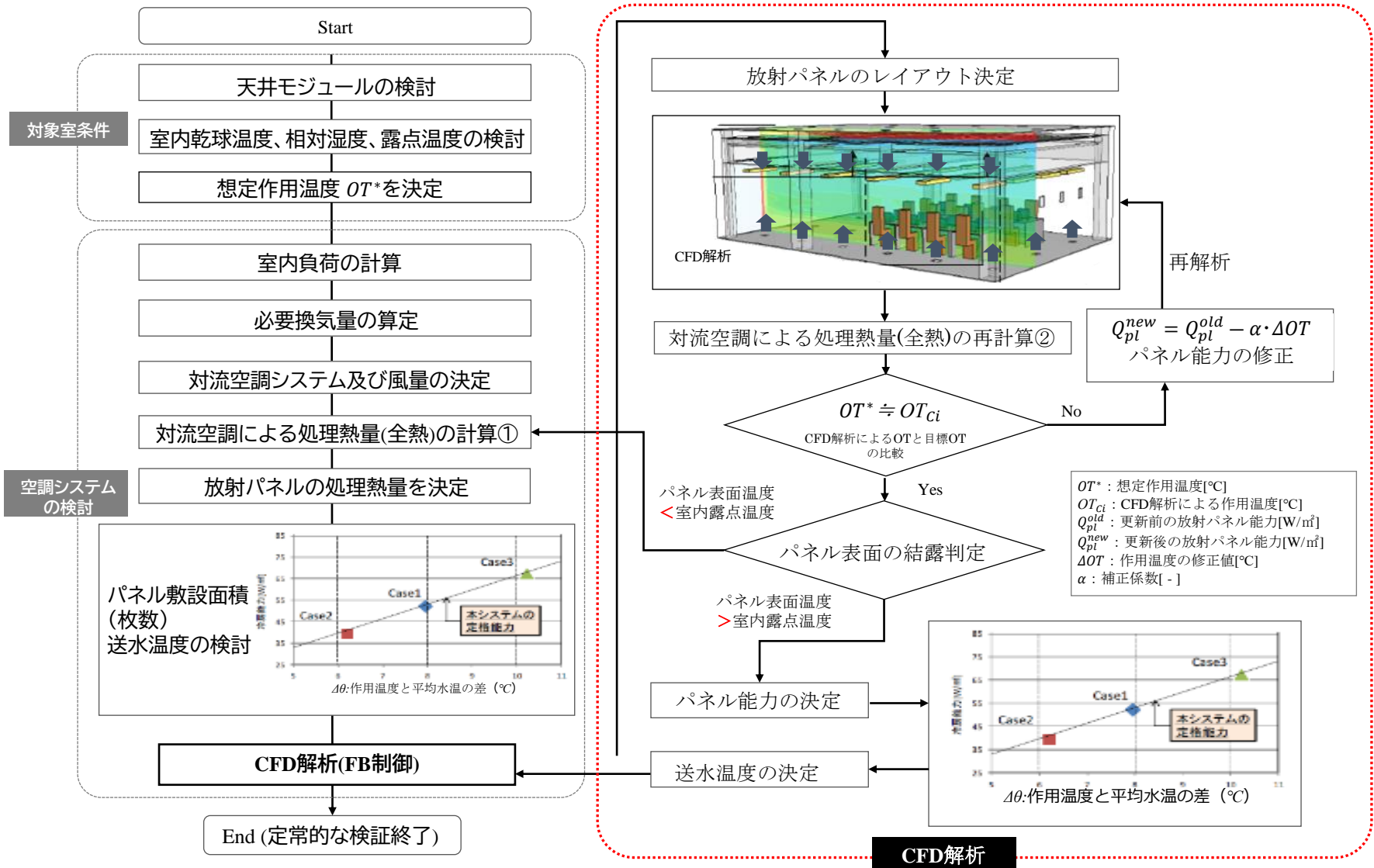
実験室放射冷房計測データ例(2022/7/22)



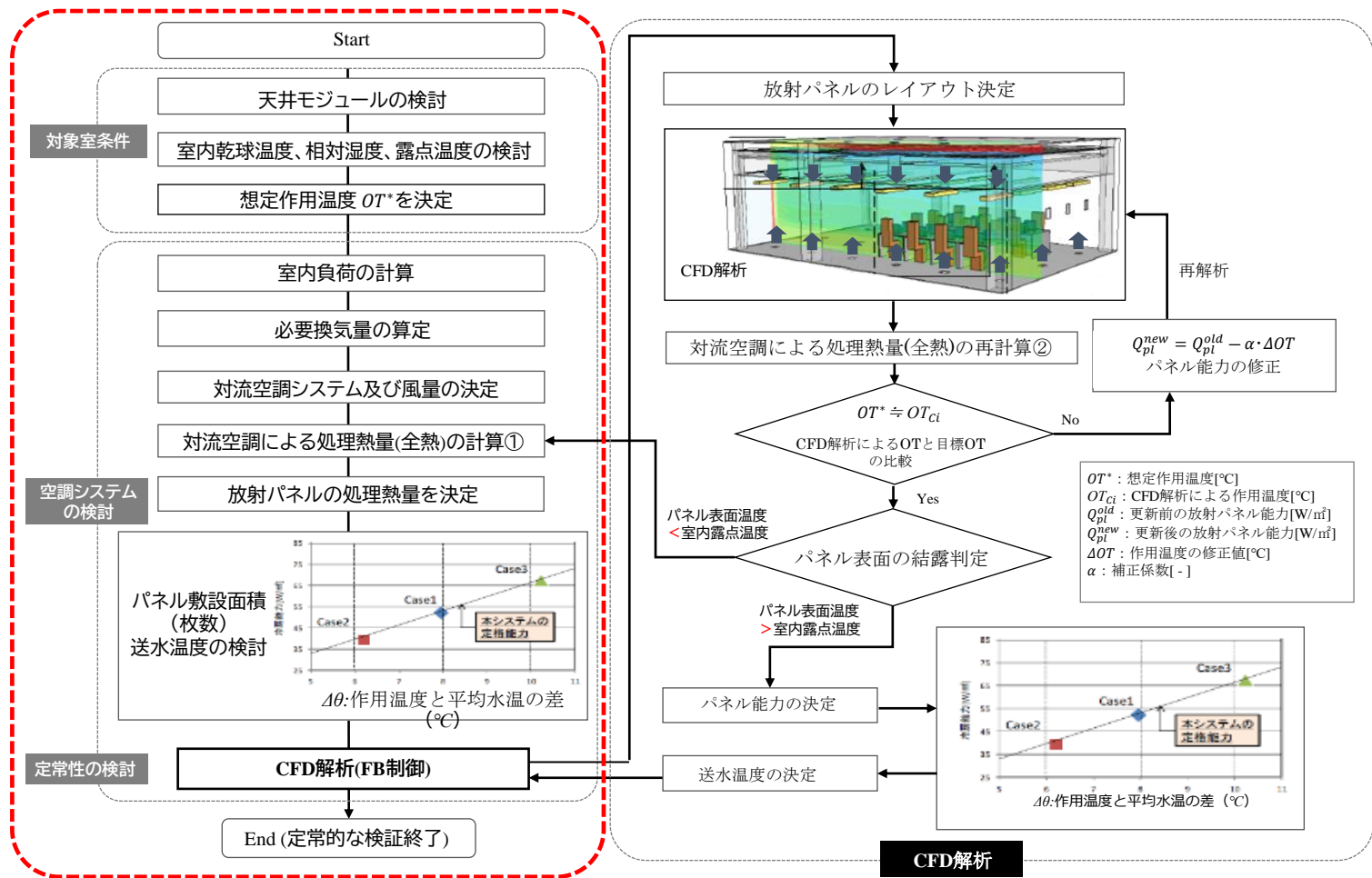
対流方式と併用した場合のパネル能力の評価や設計法についても

- 短期的な対応(立ち上がり、ペリメータ負荷などによるダイナミックな変動)
 - 夏季以外の季節別の対応
 - 非定常的な制御手法
- など、検討の余地がある

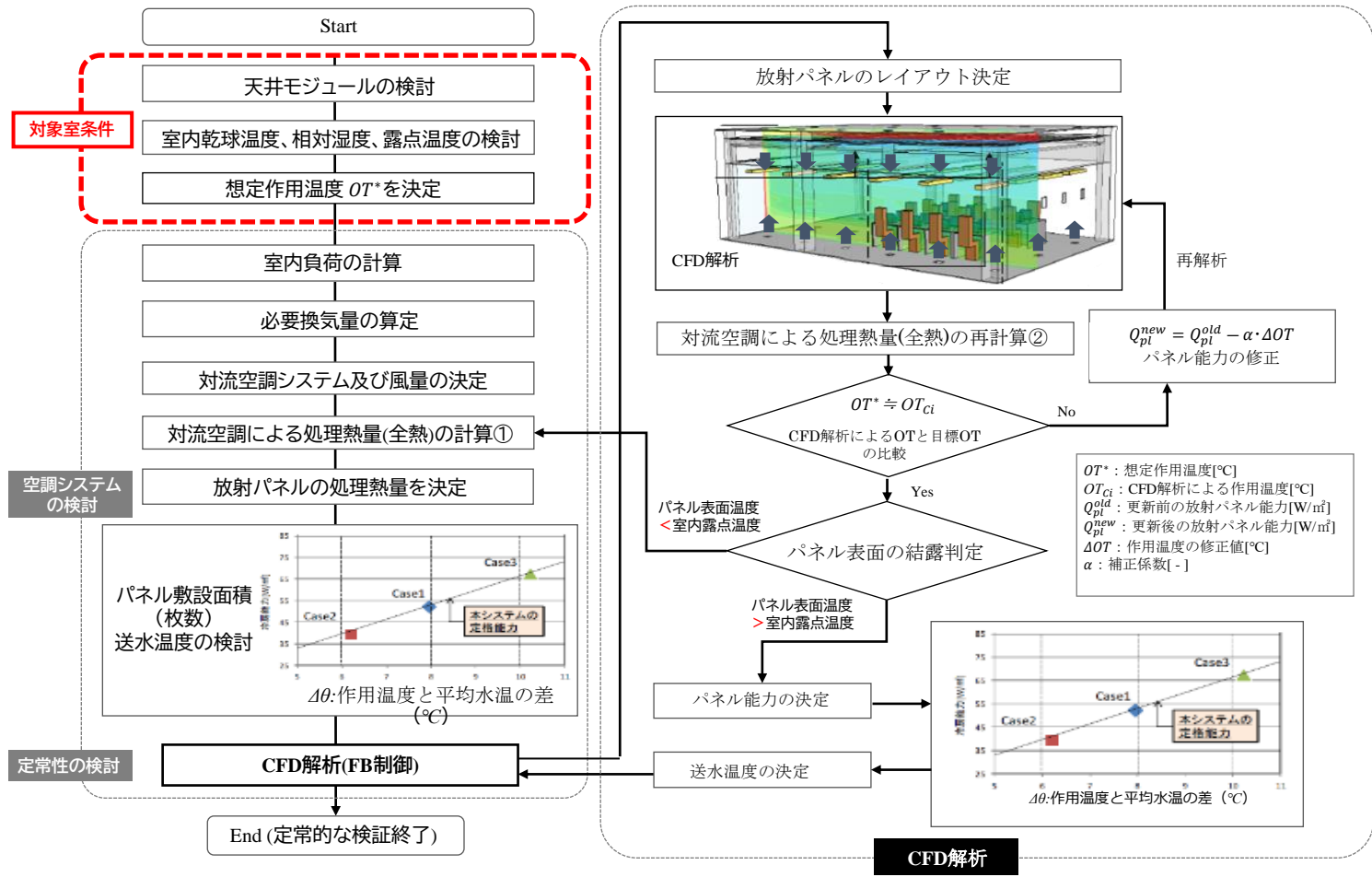
(4)CFD解析を活用した設計手法の提案



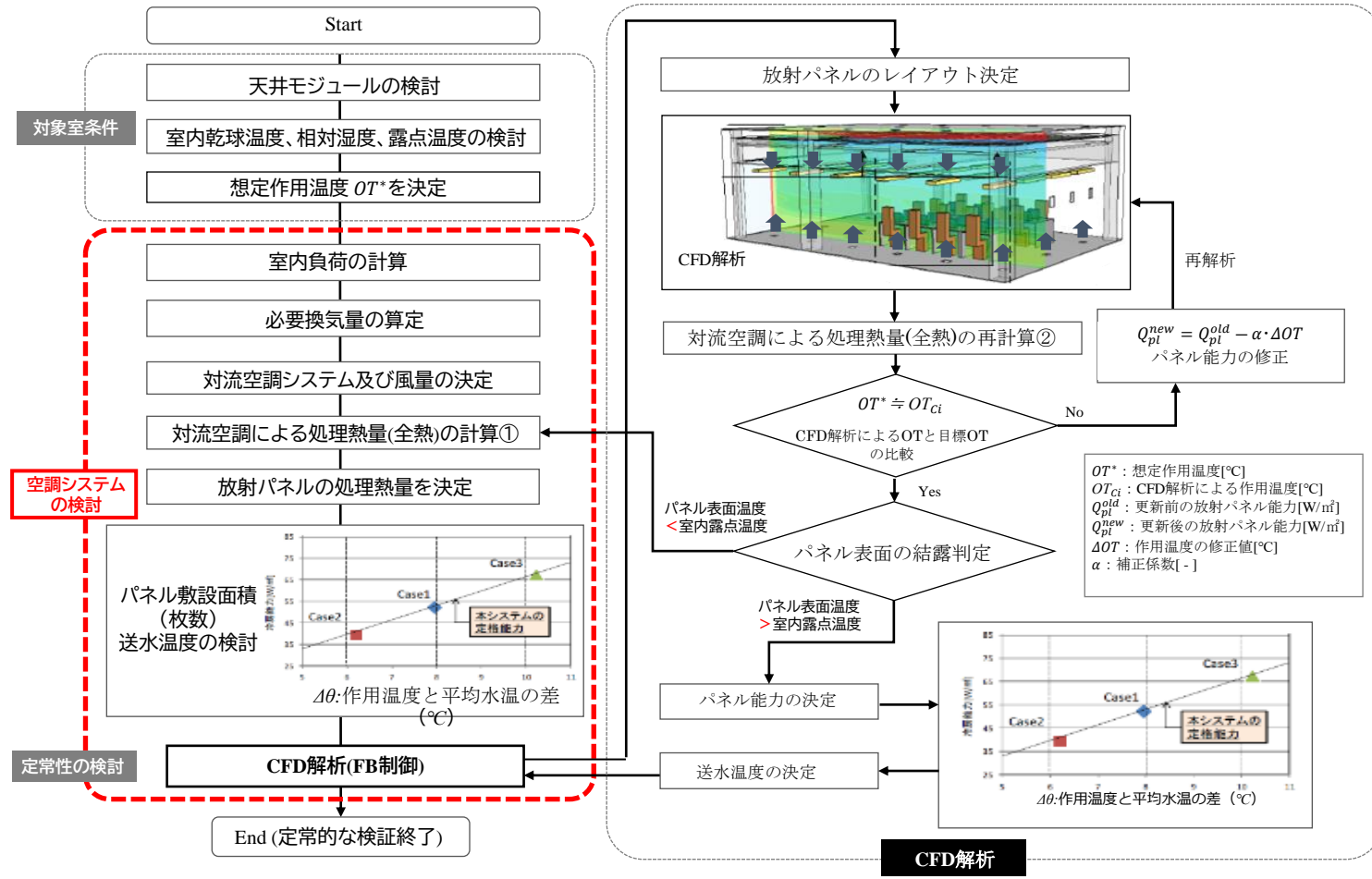
放射冷暖房システムの提案設計フロー



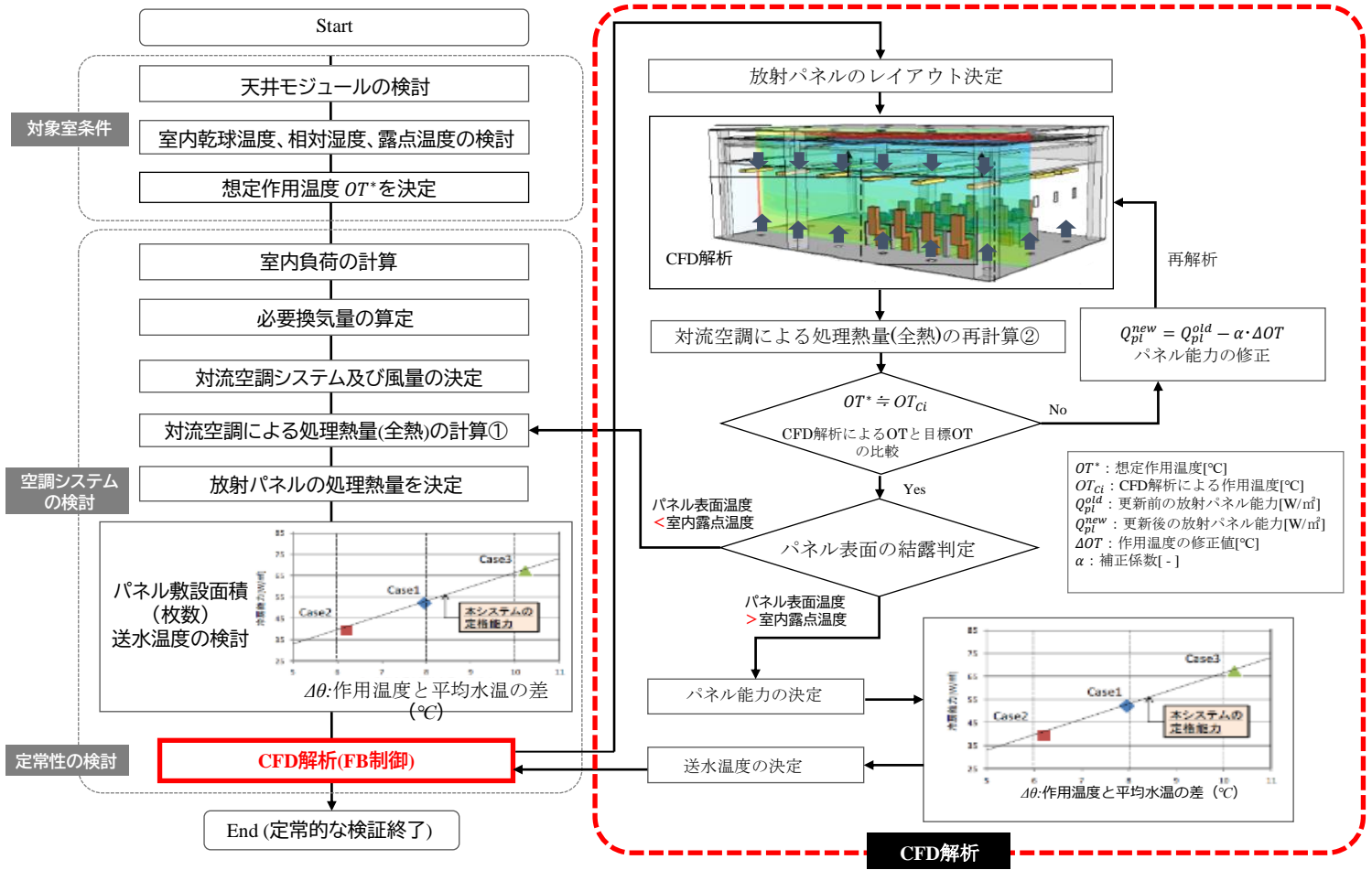
放射冷暖房システムの提案設計フロー



放射冷暖房システムの提案設計フロー

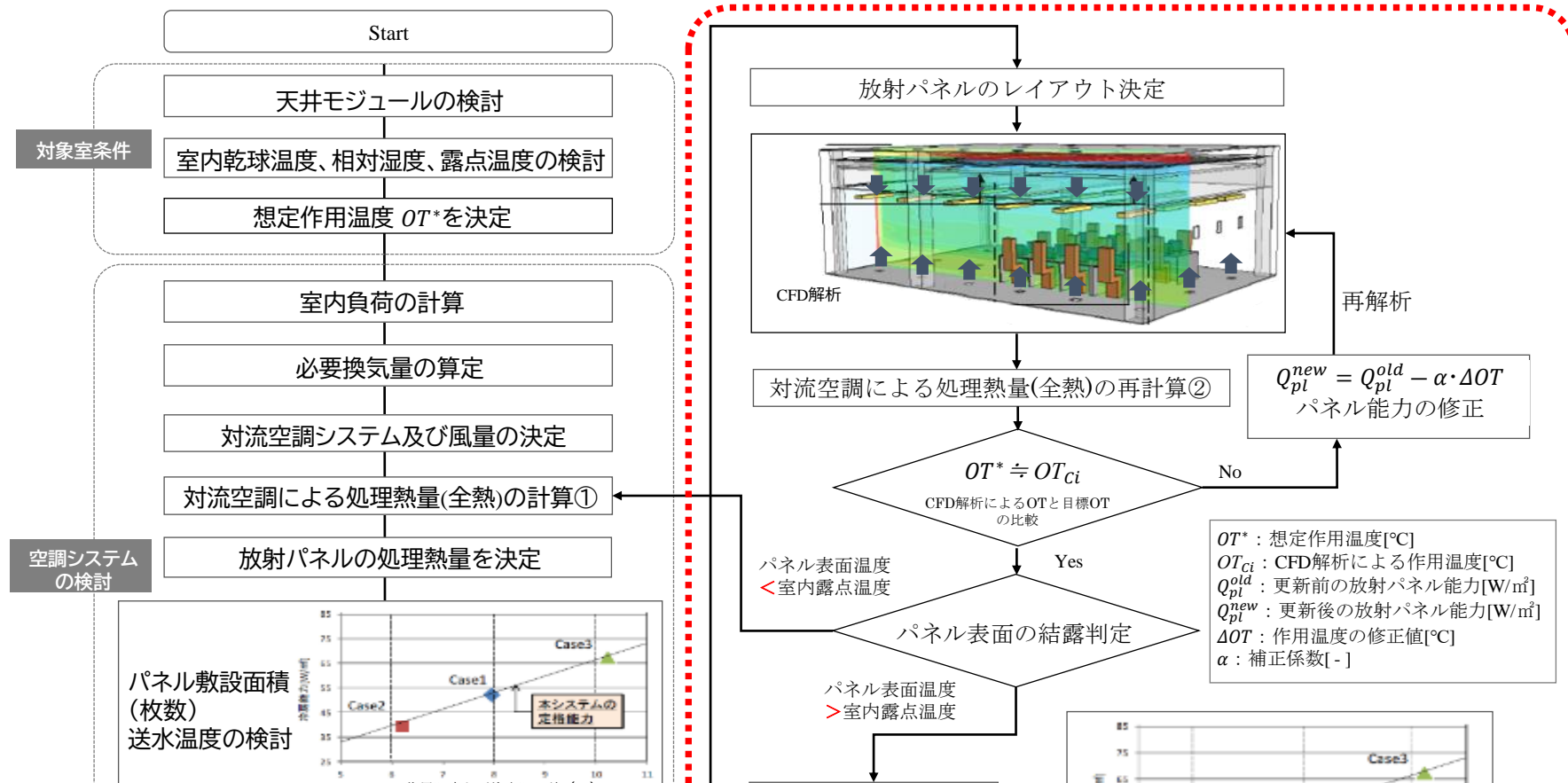


放射冷暖房システムの提案設計フロー



放射冷暖房システムの提案設計フロー

放射パネル能力の制御方法

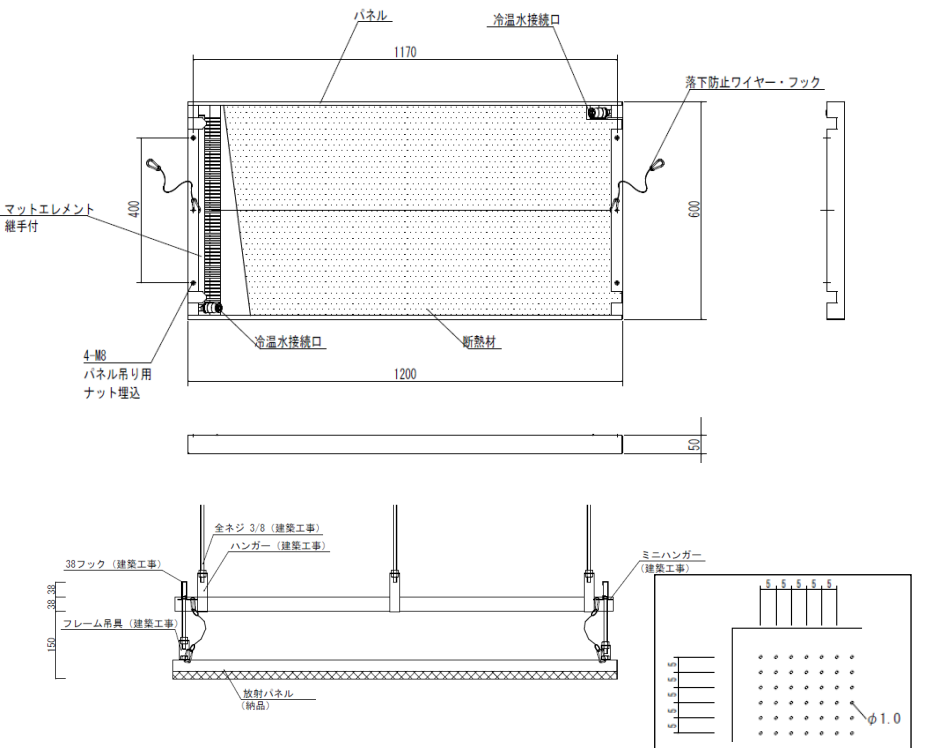


本設計手法における計算上の放射パネル能力の増減は、
実運用時の放射パネルへの送水温度あるいは送水流量の制御
によって対応

対象施設の概要 志木市庁舎(3階執務室)

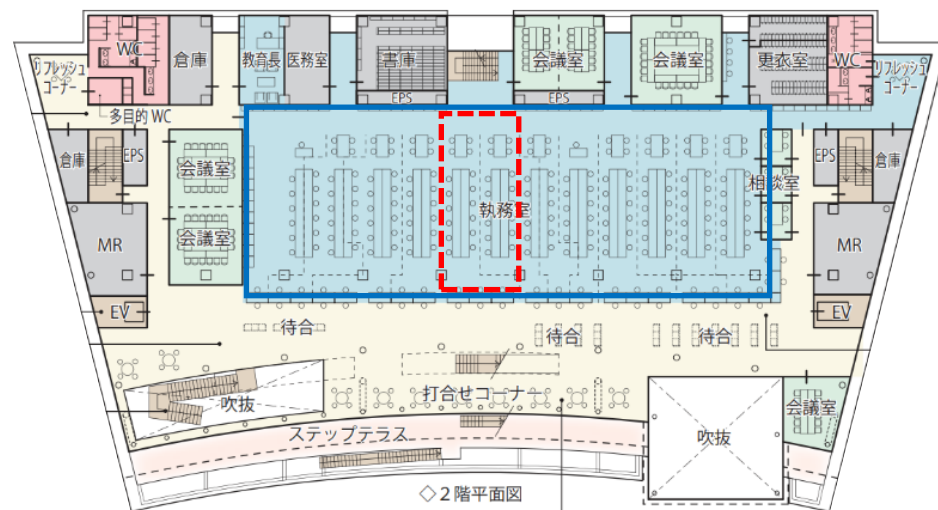
放射パネルの仕様

寸法	仕様
W:600 L:1200	冷房能力: 64 W/m ² (室温27°C, 送水温度17~19°C)
	暖房能力: 61 W/m ² (室温20°C, 送水温度34~31°C)
	断熱材: GW40mm
	板厚: 1.0mm, φ1.0mm×5mmピッチパンチング
	重量: 4.5kg/枚(乾燥時), 5.0kg/枚(満水時)



パネル表面パンチング詳細

放射パネル仕様



◇ 2階平面図

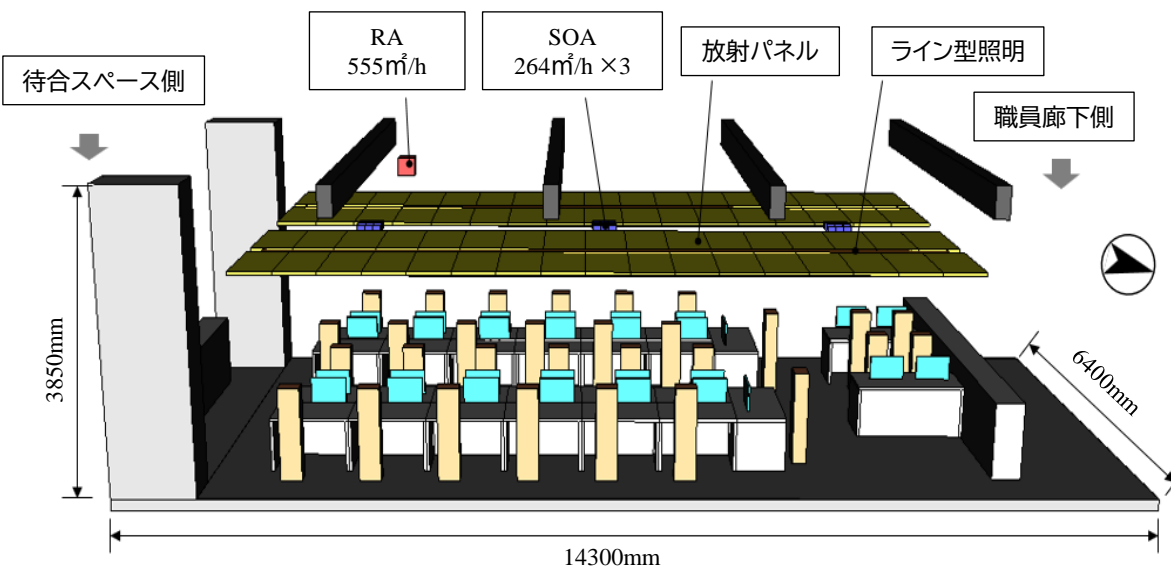
□ パネル設置エリア 〰 解析対象エリア

3階平面図

インテリア側の執務室天井に冷温水放射パネルを設置

解析モデルの概要

3階執務室の1スパン分の範囲を解析対象と設定



天井放射パネル: 68枚
(面積: 48.96㎡、敷設率53%)

□ 模擬人体 □ OA機器

執務室の解析モデル

解析条件

解析領域	6.4m(x)*14.3m*4.15m(z)	
メッシュ数	2,216,625	
乱流モデル	標準k-εモデル	
SOA吹出	温度: 16.5°C, 流量: 792m³/h, $k_{in} = (U_{in}/10)^2, \epsilon_{in} = C_{\mu}^{3/4} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$	
流出条件	定流量	RA: 555m³/h, 北職員廊下側: 273m³/h
	東, 南, 西: 自然流入流出	
対称境界	東, 西: 対称境界	
壁面境界	ノースリップ壁	
内部発熱	人体: 100W/人×30, 照明: 349W/本×2, OA機器: 74W/台×30	
	合計: 5918W	

U_{in} : 吹出風速[m/s], k_{in} : 吹出風の乱流エネルギー[m²/s²].
 ϵ_{in} : k_{in} の散逸率[m²/s³], C_{μ} : モデル定数(=0.09)[-]
 l_{in} : 吹出口代表長さ[m]

解析対象エリア内部設定最大負荷

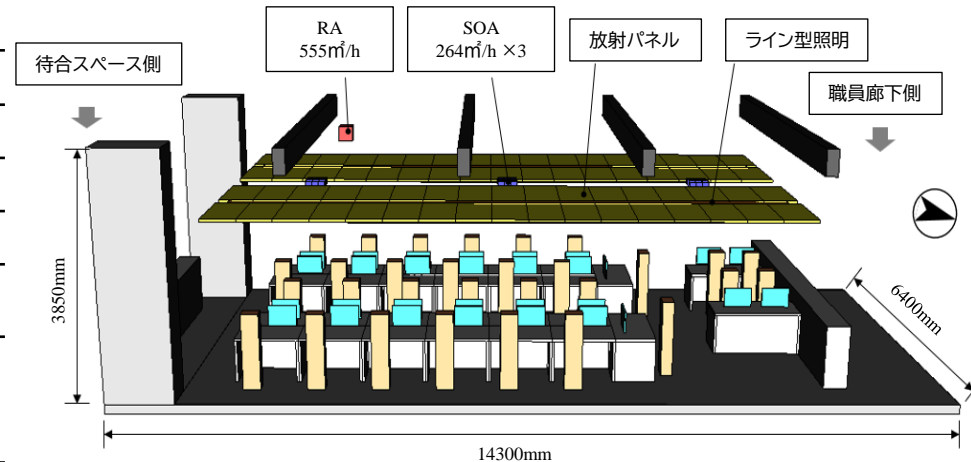
室内負荷	数	単位熱量	負荷小計
		W	W
室内人数	30	100	3000
照明	2	349	698
OA機器	30	74	2220
解析室内想定負荷合計			5918

空調機側処理熱量

OSA流量(1箇所)	m ³ /h	264
吹出数	個	3
吹出温度	℃	16.5
室内代表温度	℃	26
想定処理熱量	W	2559

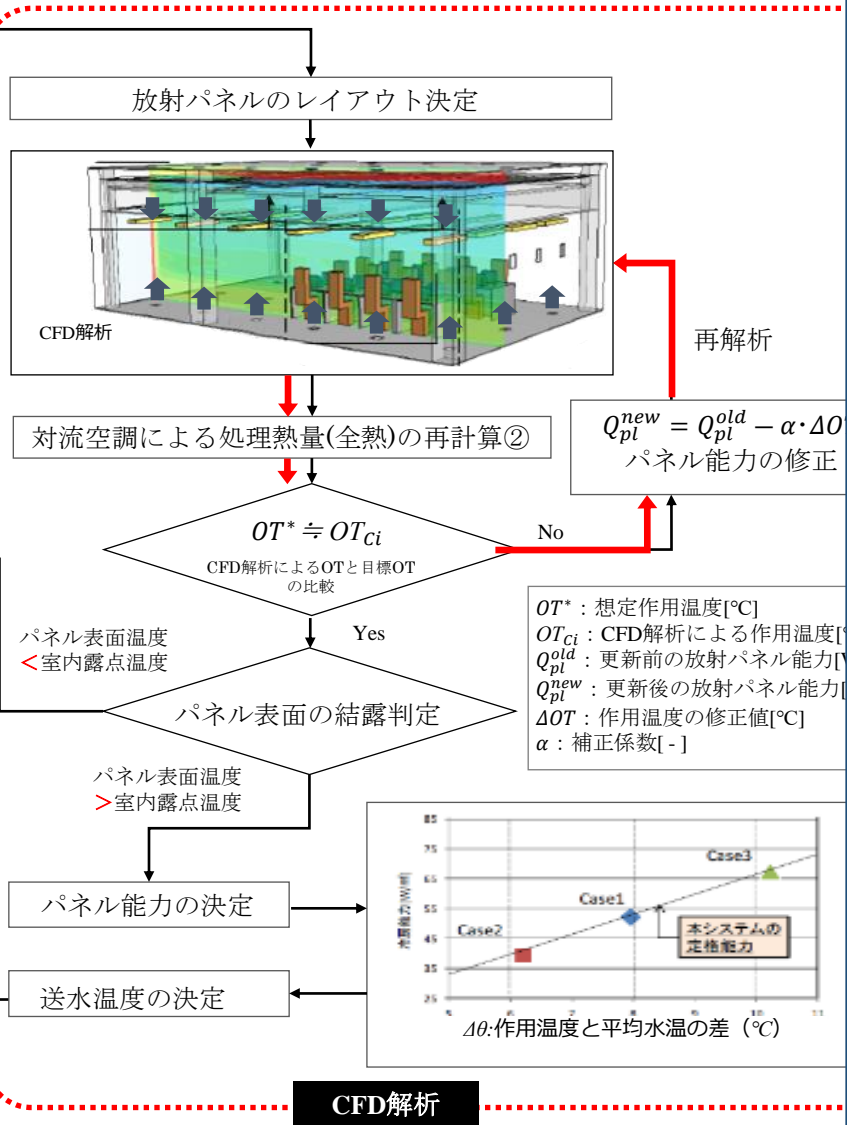
パネル側必要能力の計算

パネル想定処理熱量 = 室内想定負荷合計 - 空調機想定処理熱量	W	3359
パネル想定必要単位能力 = パネル処理熱量 / 設計面積	W/m ²	68.6



執務室の解析モデル

想定作用温度 $OT^* = 26^\circ\text{C}$



CFD解析の収束結果

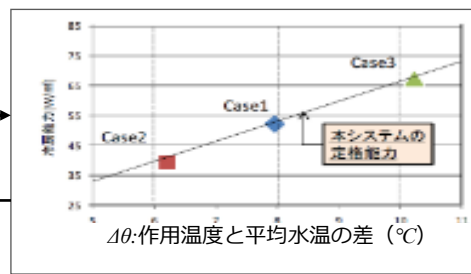
CFD解析の収束回数		1	2	3	4	5	6	7	8
パネル能力	W/m ²	68.60	67.73	66.84	65.75	65.13	64.35	63.78	63.23
室温	°C	25.99	25.97	25.90	26.02	25.98	26.02	26.03	26.04
MRT	°C	25.69	25.71	25.70	25.75	25.74	25.77	25.77	25.80
OT	°C	25.84	25.84	25.80	25.89	25.86	25.90	25.90	25.92
PMV	-	0.50	0.50	0.45	0.51	0.47	0.45	0.45	0.48

(clo : 0.7 met : 1.2)

収束計算サイクルによって

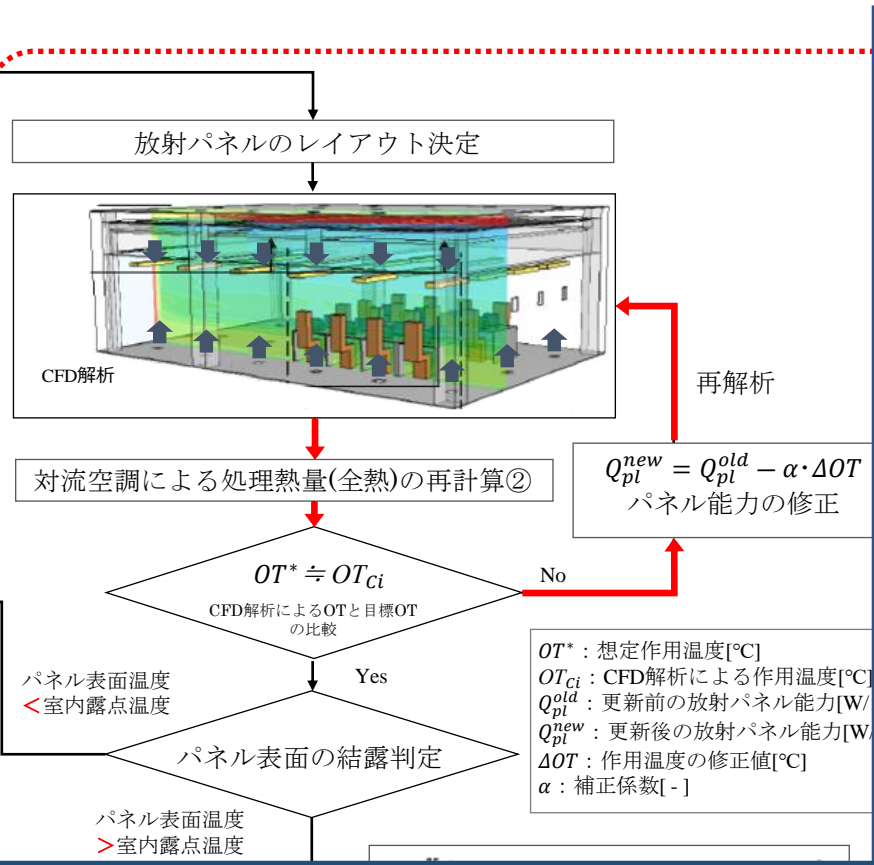
- 初回(1回)
パネル能力:**68.6 W/m²**、OT:**25.84°C**
- 最終回(8回)
パネル能力:**63.23 W/m²**、OT:**25.92°C**

となり、
パネル能力は初回から**約9%減少**
(=従来の設計手法の誤差)



CFD解析

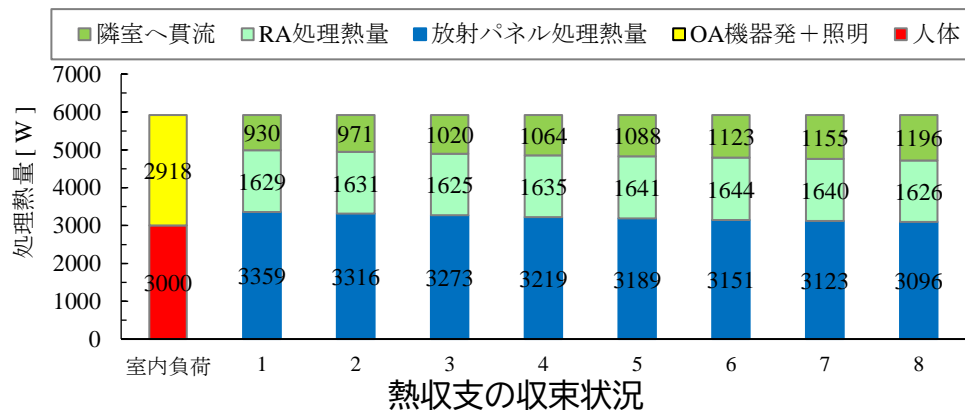
想定作用温度への到達状況



CFD解析の収束結果

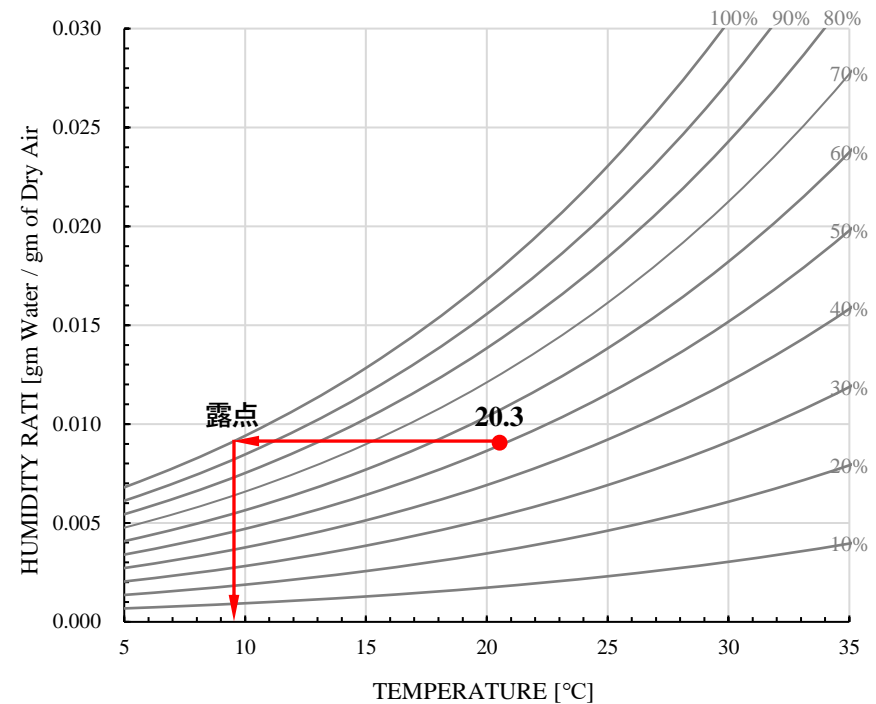
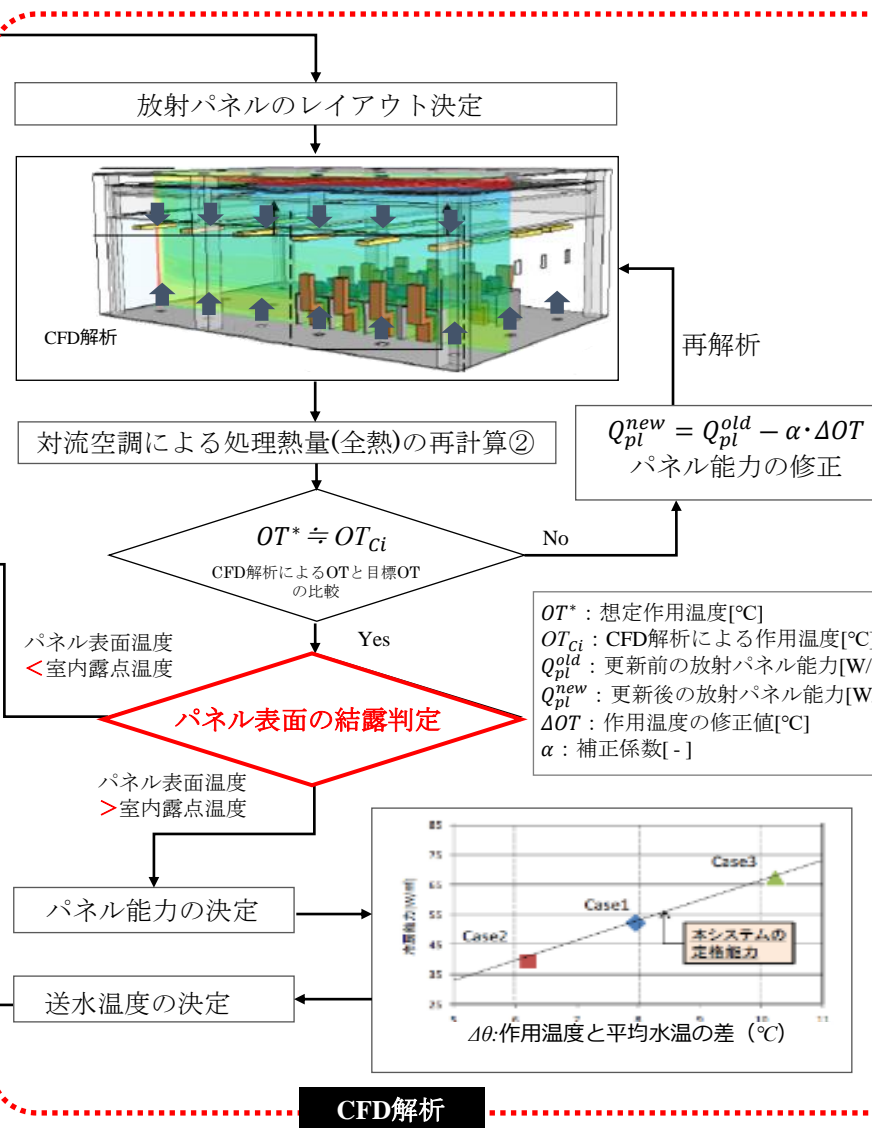
CFD解析の収束回数		1	2	3	4	5	6	7	8
パネル能力	W/m ²	68.60	67.73	66.84	65.75	65.13	64.35	63.78	63.23
室温	°C	25.99	25.97	25.90	26.02	25.98	26.02	26.03	26.04
MRT	°C	25.69	25.71	25.70	25.75	25.74	25.77	25.77	25.80
OT	°C	25.84	25.84	25.80	25.89	25.86	25.90	25.90	25.92
PMV	-	0.50	0.50	0.45	0.51	0.47	0.45	0.45	0.48

(clo : 0.7 met : 1.2)



収束計算を伴った本提案手法によって、
放射パネルの能力が更新され、
作用温度が目標値(OT*=26°C)に収束することを確認

パネル表面の結露判定



パネル表面の最低温度は20.3°C

相対湿度が50%の場合、
露点温度は約9.7°C

表面結露は発生しないと判定

- 処理熱量の比率

放射パネルによる処理熱量	52%
対流空調による処理熱量	48%

設計段階において、
放射パネル・対流空調の処理熱量の割合を明らかにすることができる

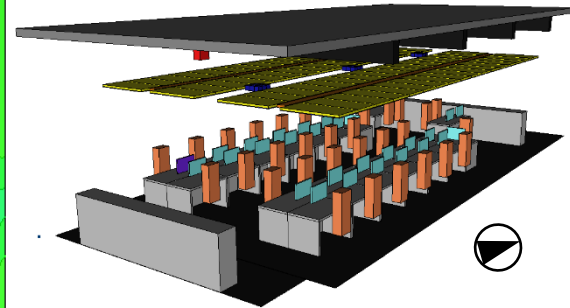
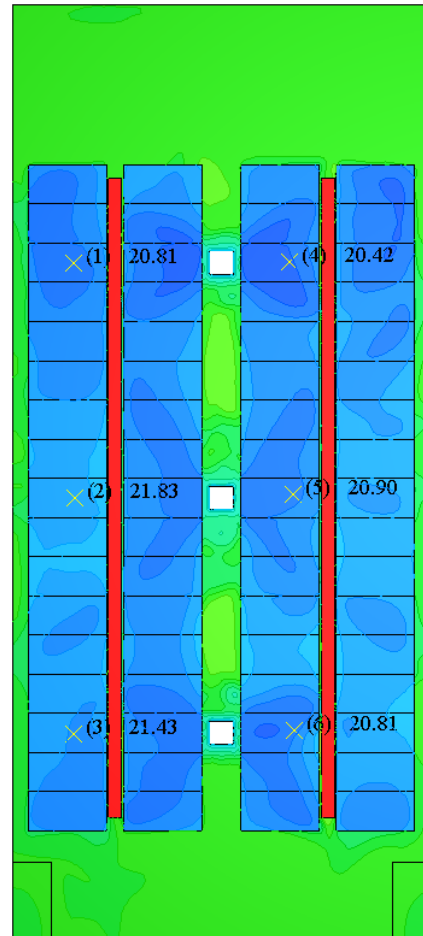
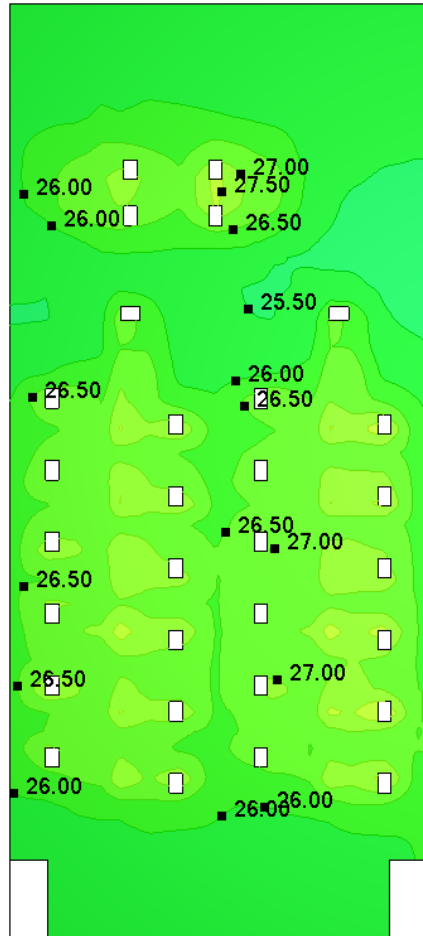
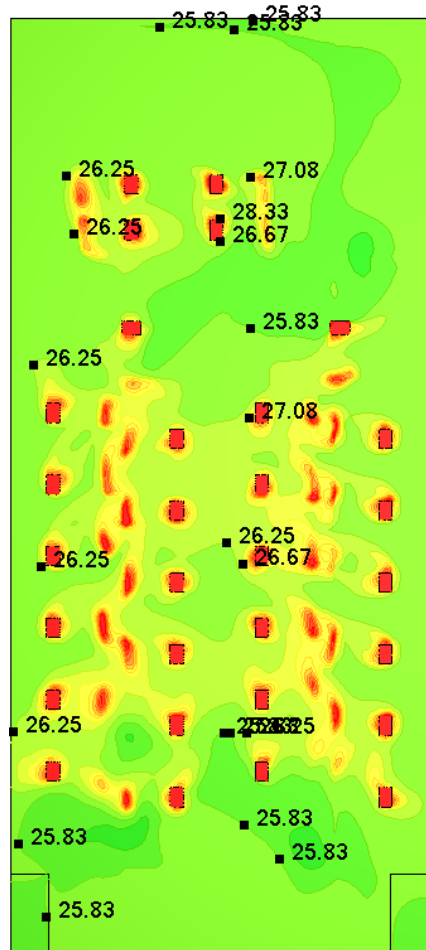
- 本対象の場合、

従来のパネル設計手法と

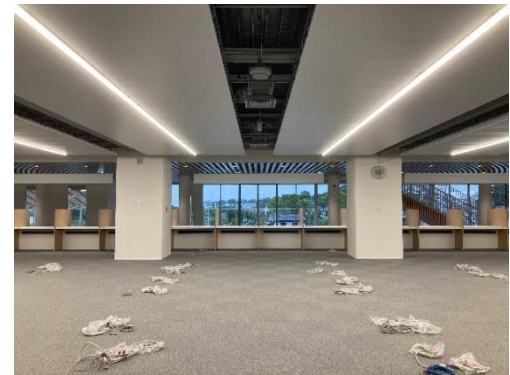
パネル能力の誤差は約 9%
対流空調の処理熱量の誤差は 2%

従来の設計手法による
作用温度や対流空調の処理熱量の誤差を解消できる

- 提案手法は良好な収束性を有し、
実物件に対して信頼性の高い設計が可能となる



解析モデル



執務室写真

(a) 温度分布(高さ1.2m)

温度[°C] 20 32

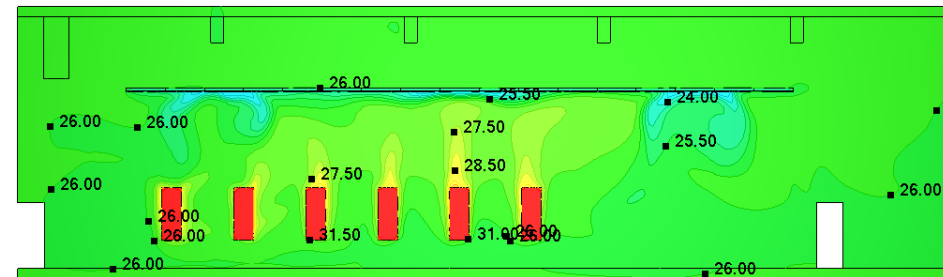
(b) MRT分布(高さ1.2m)

MRT[°C] 20 32

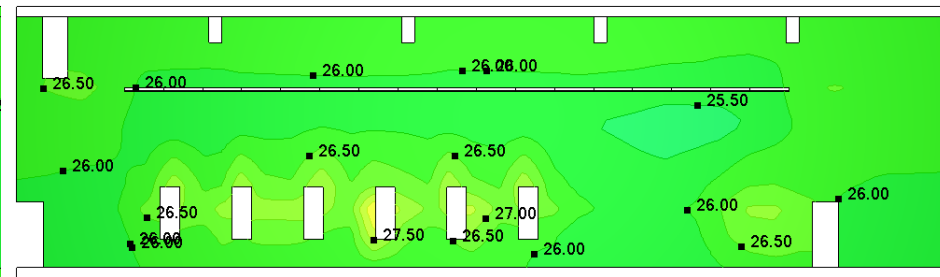
(c) パネル表面温度分布

温度[°C] 20 32

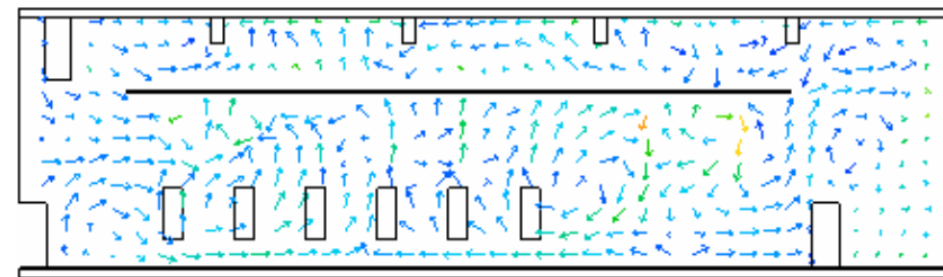
水平面温度分布



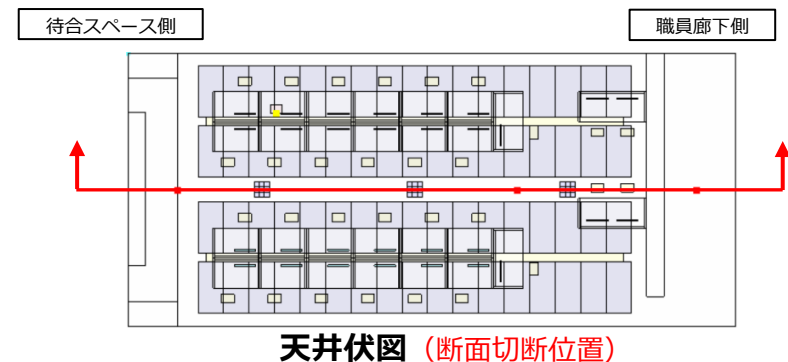
(a) 温度分布 温度[°C] 20 32



(b) MRT分布 MRT[°C] 20 32

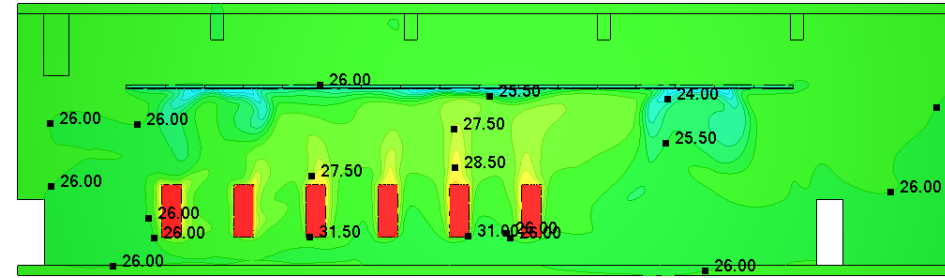


(c) 流速分布 流速[m/s] 0.0 0.5

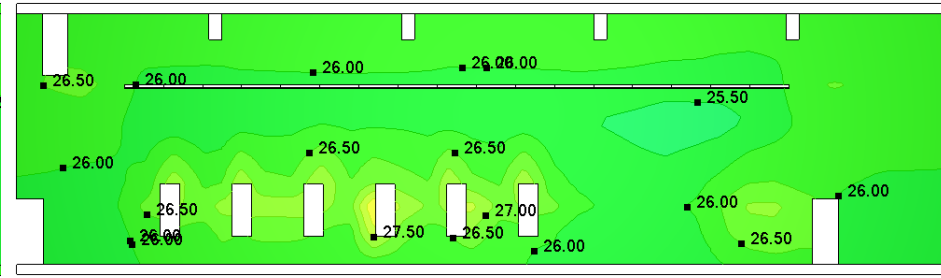


鉛直面の温度、MRT、流速ベクトル分布

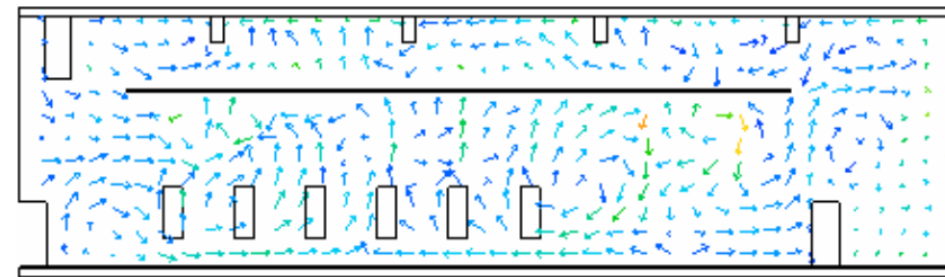
- 上下温度差のない均一な温熱環境を形成
- 居住域の代表点平均流速は約0.12m/s→静穏な気流場を形成



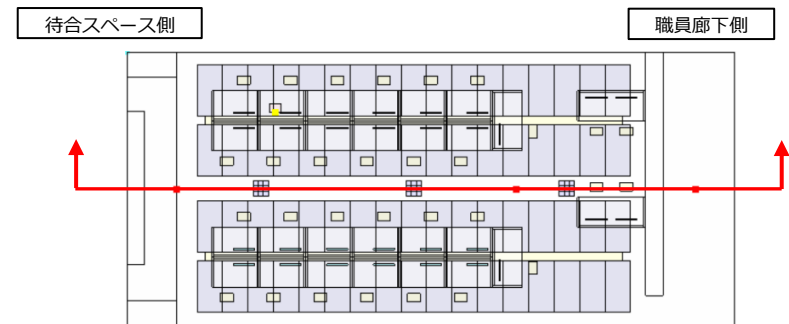
(a) 温度分布 温度[°C] 20 32



(b) MRT分布 MRT[°C] 20 32



(c) 流速分布 流速[m/s] 0.0 0.5



天井伏図 (断面切断位置)

鉛直面の温度、MRT、流速ベクトル分布

- 居住域のPMVは0.48となり、快適な温熱環境が形成されていることを確認
- 今後は、実測データとの比較を進めていく予定である

- AXSは、**数値からひとへ ウェルネスを重視する**をキーワードに人に寄り添った**環境親和建築**の実現を目指している
- その手段のひとつとして**放射冷暖房システム**の導入をすすめている
- また、
既往の設計手法の課題点を解決するべく
CFDを活用した新たな設計手法の提案を行っている
- 提案した設計手法を用いることで、
従来の設計手法による作用温度や対流空調の処理熱量の誤差を**解消**できる
可能性を示唆した