

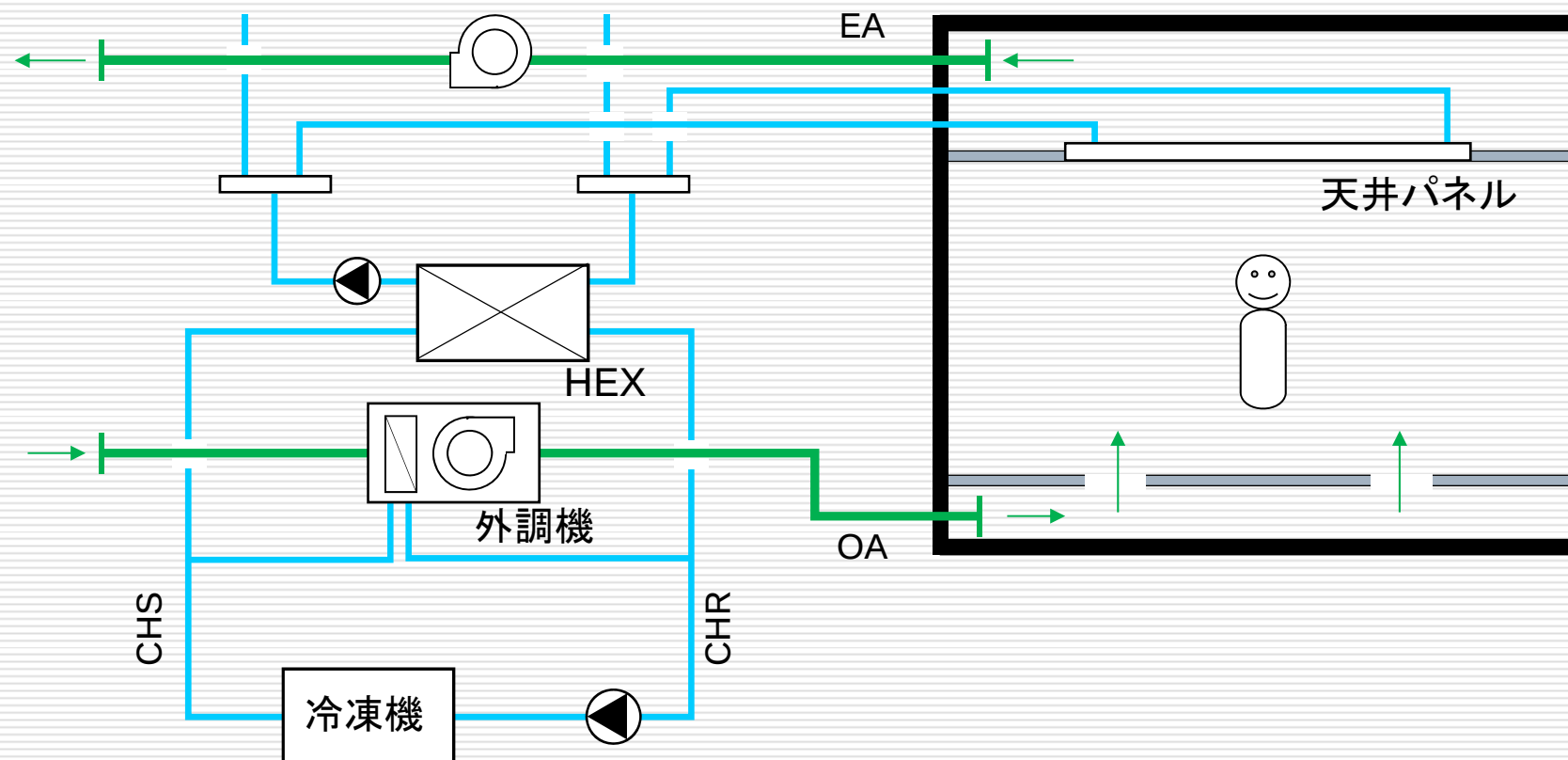
放射(輻射)冷暖房の消費エネルギー計算

東京理科大学
長井 達夫

はじめに

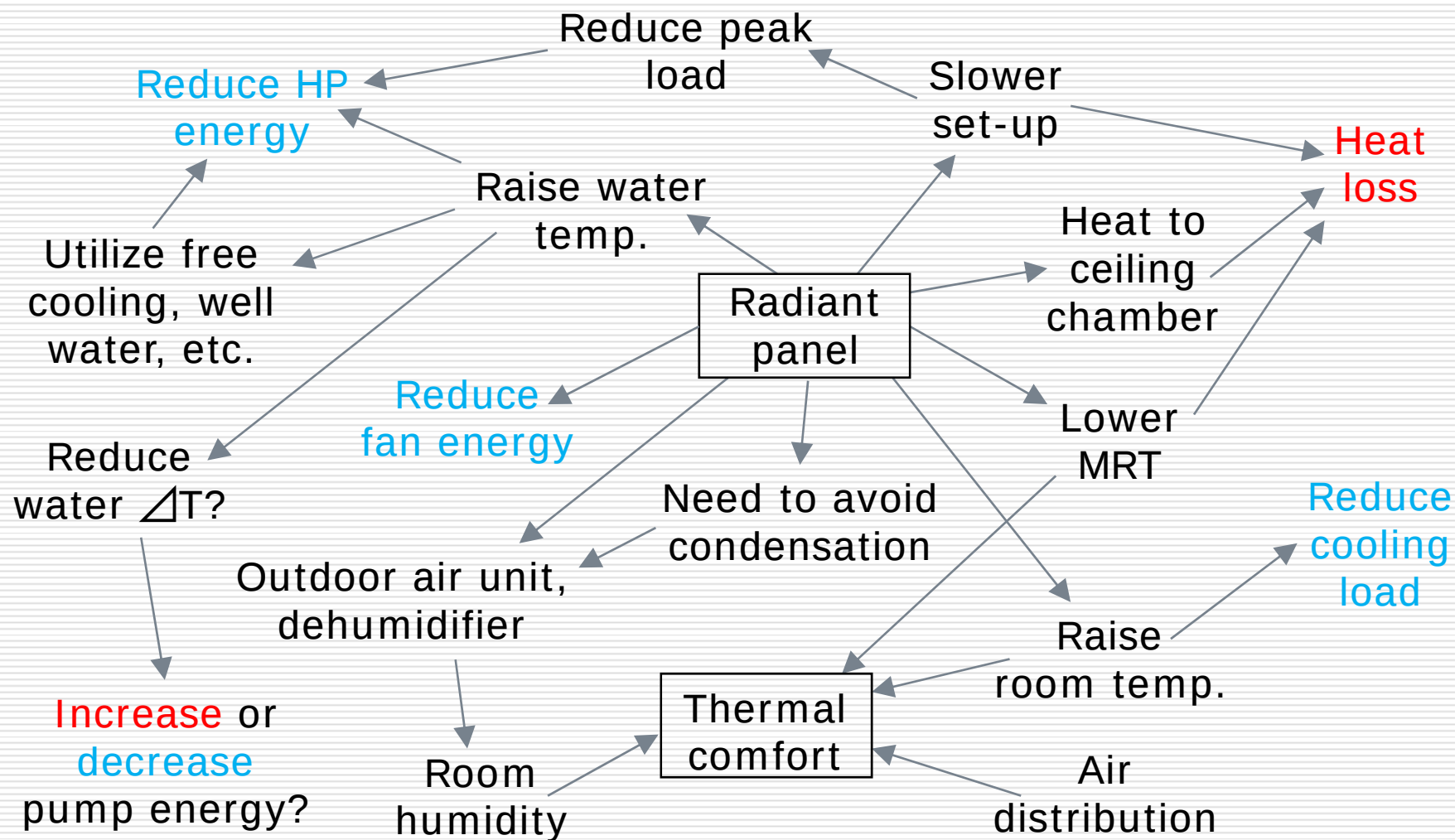
- 「放射冷暖方式のエネルギー計算」とは？
 - 既往の研究にみる放射冷暖房方式の省エネ効果
 - 従来方式(全空気方式との比較)
 - 他の省エネ手法との比較
 - 放射冷暖房方式のシミュレーション
 - BESTによる計算
-

放射冷暖房方式の構成



放射パネルは放射空調システムの一要素(受動的要素)

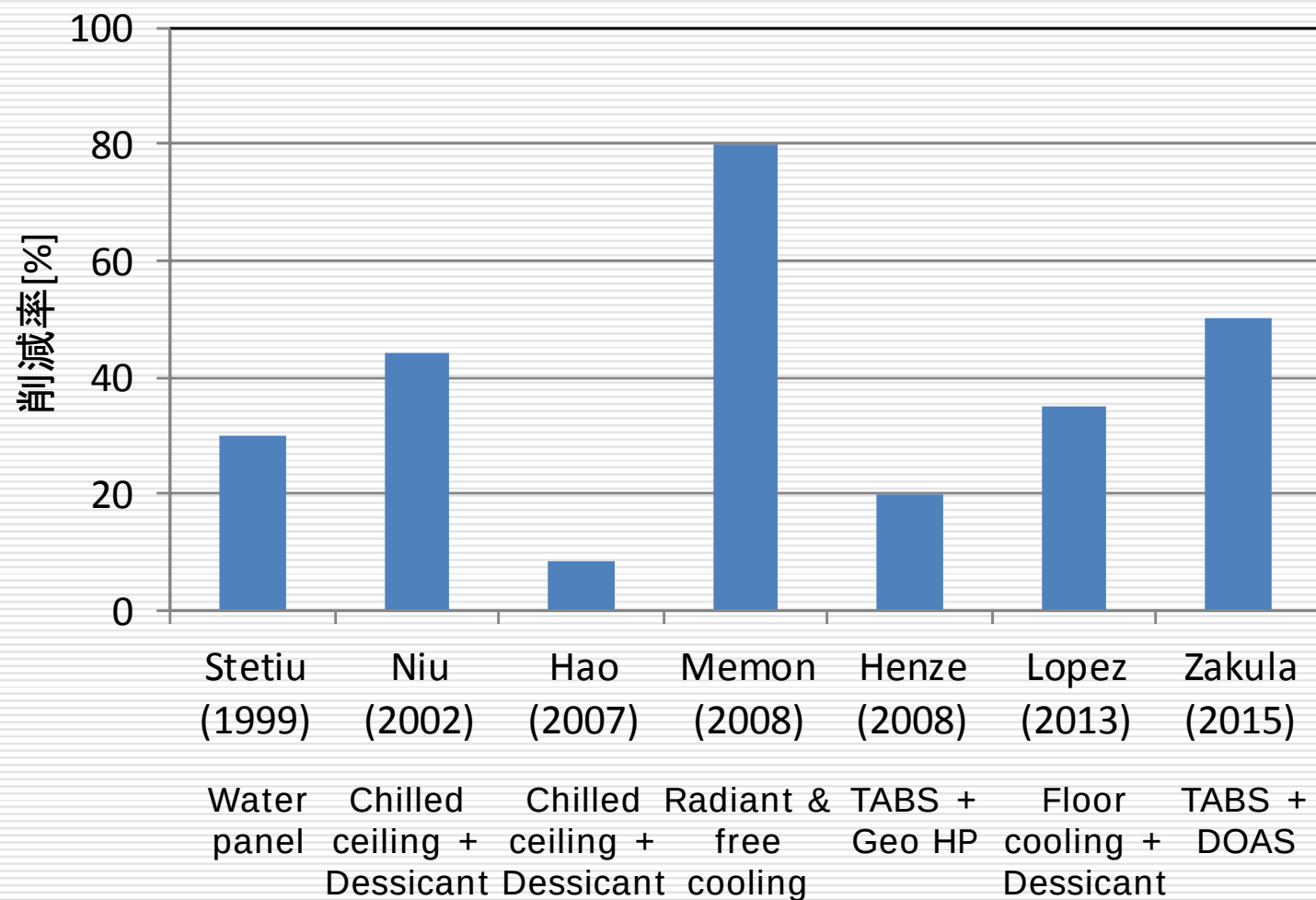
放射冷暖房方式のエネルギー増減の因果関係



既往の研究にみる放射冷暖房の省エネ効果

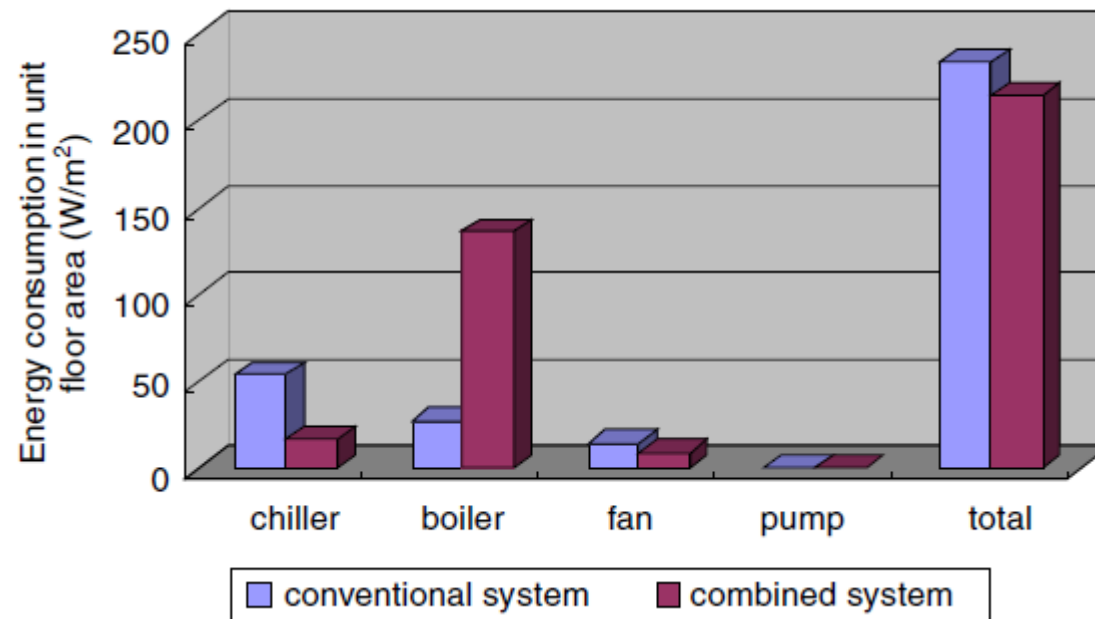
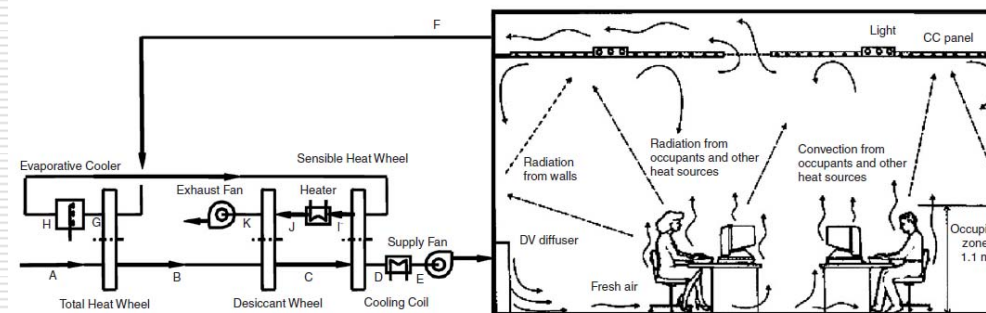
ー 放射冷暖房vs空気式

対流式を基準とした放射冷暖房の省エネ率



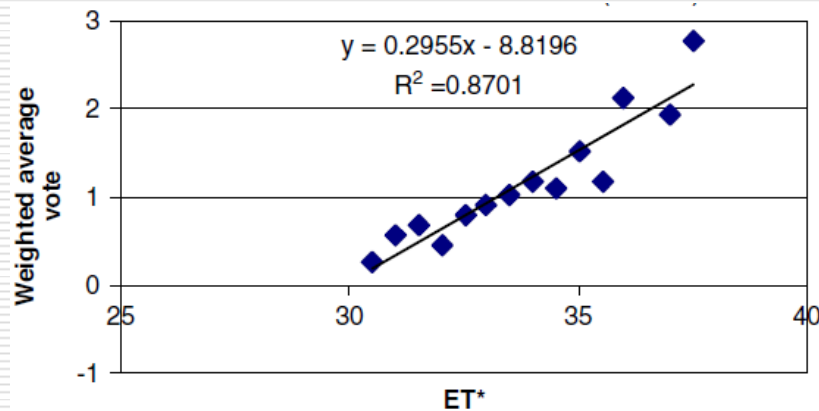
Kyu-Nam Rhee and Kwang Woo Kim: A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment, Building and Environ, 2015;91:166-190.

Hao(2007)の検討例

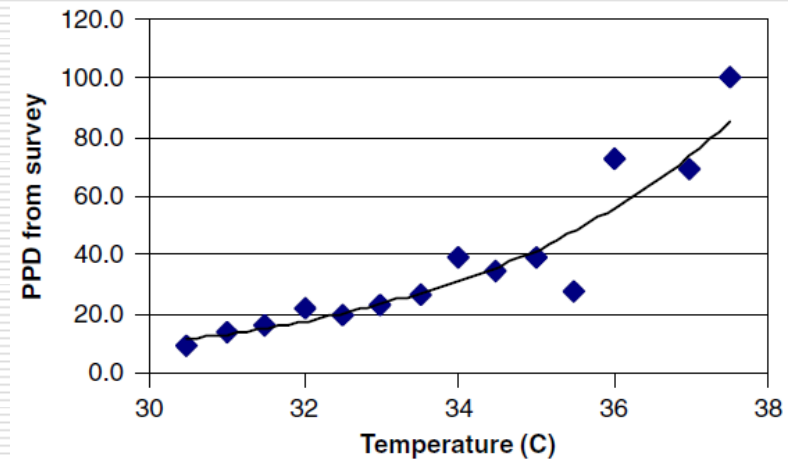


Hao X, Zhang G, Chen Y, Zou S, Moschandreas DJ. A combined system of chilled ceiling, displacement ventilation and desiccant dehumidification. Build Environ 2007;42:3298-3308.

Memon(2008)の検討例



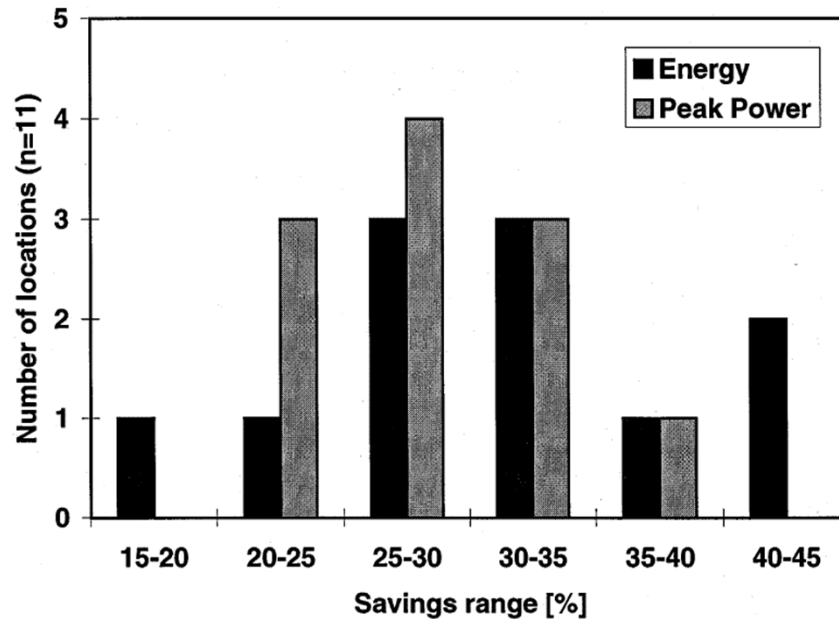
ET*と温冷感申告の関係



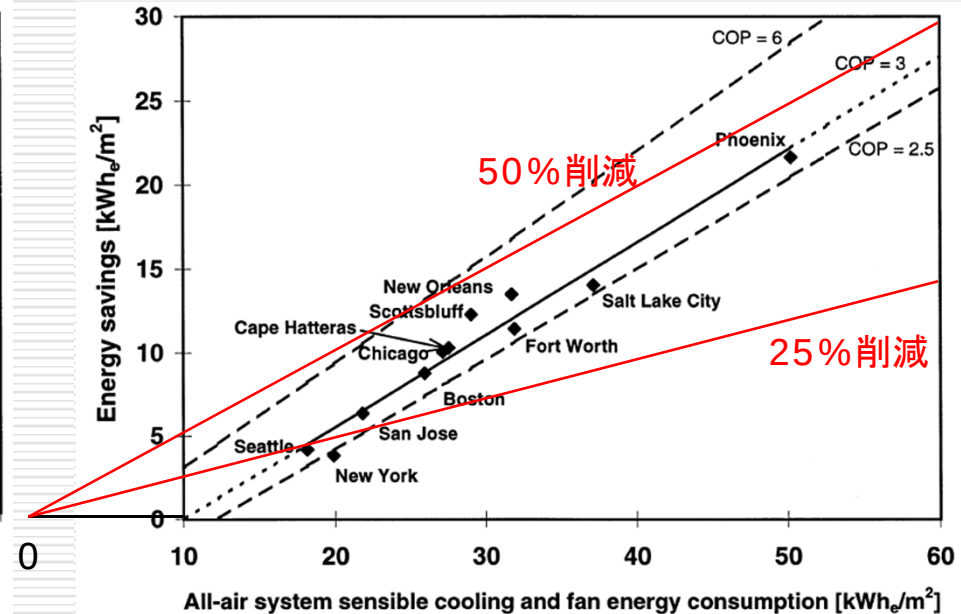
教室での申告に基づくPPD

- ❑ 中立 $ET^* = 29.9^\circ\text{C}$ (パキスタンの教室における被験者)
- ❑ 従来式の設定温度 $= 26^\circ\text{C}$
- ❑ 放射冷暖房はCTを利用(2ACHの外気?も処理)
- ❑ CTで処理できなくてもシーリングファンでしのぐ(?)

Stetiu(1999)の検討例



地域による夏期削減率の差



気候と負荷削減の関係

- 外気処理、冷凍機COPは同一条件で米各地域で比較
- 放射方式による削減効果の主要因は空気搬送動力低減
- Hot & dry な地域で効果大、COP大の方が効果大

Stetiu C. Energy and peak power savings potential of radiant cooling systems in US commercial buildings. Energy Build 1999;30:127-138.

既往の研究にみる放射冷暖房の省エネ効果

ー 放射冷暖房 vs 他の省エネ手法

DOEレポート(2002)の検討

**Energy Consumption Characteristics of
Commercial Building HVAC Systems
Volume III: Energy Savings Potential**

Prepared by

Kurt W. Roth
Detlef Westphalen
John Dieckmann
Sephir D. Hamilton
William Goetzler

TIAX LLC
20 Acorn Park
Cambridge, MA 02140-2390

TIAX Reference No. 68370-00

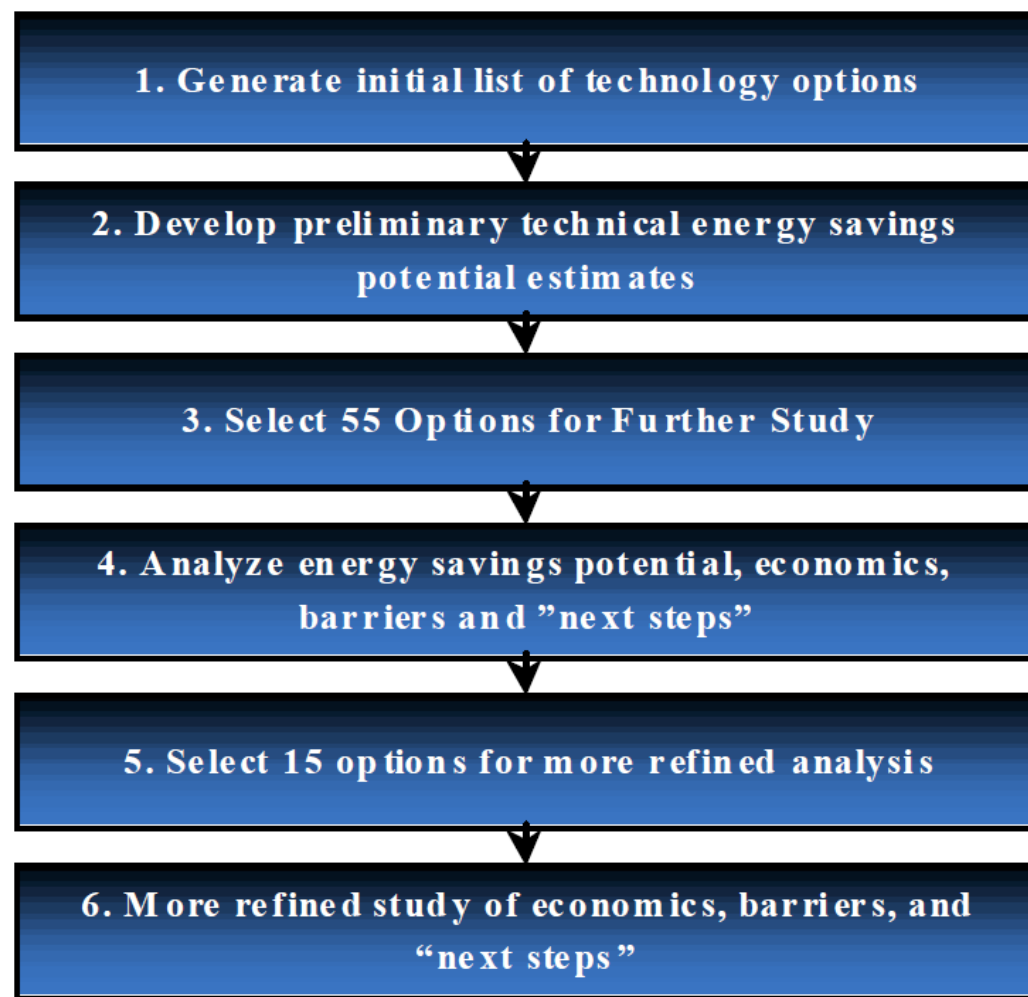
For

Building Technologies Program
Project Manager: Dr. James Brodrick (DOE)
Contract No.: DE-AC01-96CE23798

July, 2002

- DOE研究プロジェクト(報告書3分冊)
- 米業務用HVACの現状のエネルギー消費量の算出
- 種々の省エネ手法による国全体の削減量の見積り、普及への課題の提示

DOEレポート(2002)



Kurt W. Roth et.al.: "Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems Volume III: Energy Savings Potential", Building Technologies Program (DOE), 2002

DOEレポート(2002)

Component

Component (24):

- ☐ Advanced Compressors
- ☐ Advanced Desiccant Material
- ☐ Backward-Curved/Airfoil Blower
- ☐ Copper Rotor Motor
- ☐ Direct-Contact Heat Exchanger
- ☐ Electrodynamic Heat Transfer
- ☐ **Electronically Commutated Permanent Magnet Motor (ECPM)**
- ☐ Electrostatic Filter
- ☐ Heat Pipe
- ☐ High-Efficiency (Custom) Fan Blades
- ☐ High-Temperature Superconducting Motor
- ☐ Hydrocarbon Refrigerant
- ☐ **Improved Duct Sealing**
- ☐ Larger Fan Blade
- ☐ Low-Pressure Refrigerant
- ☐ **Microchannel Heat Exchanger**
- ☐ Refrigerant Additive (to Enhance Heat Transfer)
- ☐ **Smaller Centrifugal Compressors**
- ☐ Twin-Single Compressor
- ☐ Two-Speed Motor
- ☐ Unconventional (Microscale) Heat Pipe
- ☐ Variable-Pitch Fans
- ☐ Variable-Speed Drive
- ☐ Zeotropic Refrigerant

Systems

Systems (14):

- ☐ All-Water (versus All-Air) Systems
- ☐ Alternative Air Treatment (to reduce OA)
- ☐ Apply Energy Model to Properly Size HVAC equipment
- ☐ Chemical Heat/Cooling Generation
- ☐ Demand-Control Ventilation
- ☐ **Dedicated Outdoor Air Systems**
- ☐ **Displacement Ventilation**
- ☐ Ductless Split System
- ☐ Mass Customization of HVAC Equipment
- ☐ **Microenvironment (Task-ambient Conditioning)**
- ☐ Novel Cool Storage
- ☐ ~~Natural Refrigerants~~
- ☐ **Radiant Ceiling Cooling/Chilled Beam**
- ☐ Variable Refrigerant Volume/Flow

Equipment (10):

- ☐ Dual-Compressor Chiller
- ☐ Dual-Source Heat Pump
- ☐ Economizer
- ☐ **Enthalpy/Energy Recovery Heat Exchangers for Ventilation**
- ☐ Engine-Driven Heat Pump
- ☐ Ground-Source Heat Pump
- ☐ **Heat Pump for Cold Climates**
- ☐ **Liquid Desiccant Air Conditioner**
- ☐ Modulating Boiler/Furnace
- ☐ Phase Change Insulation

Equipment

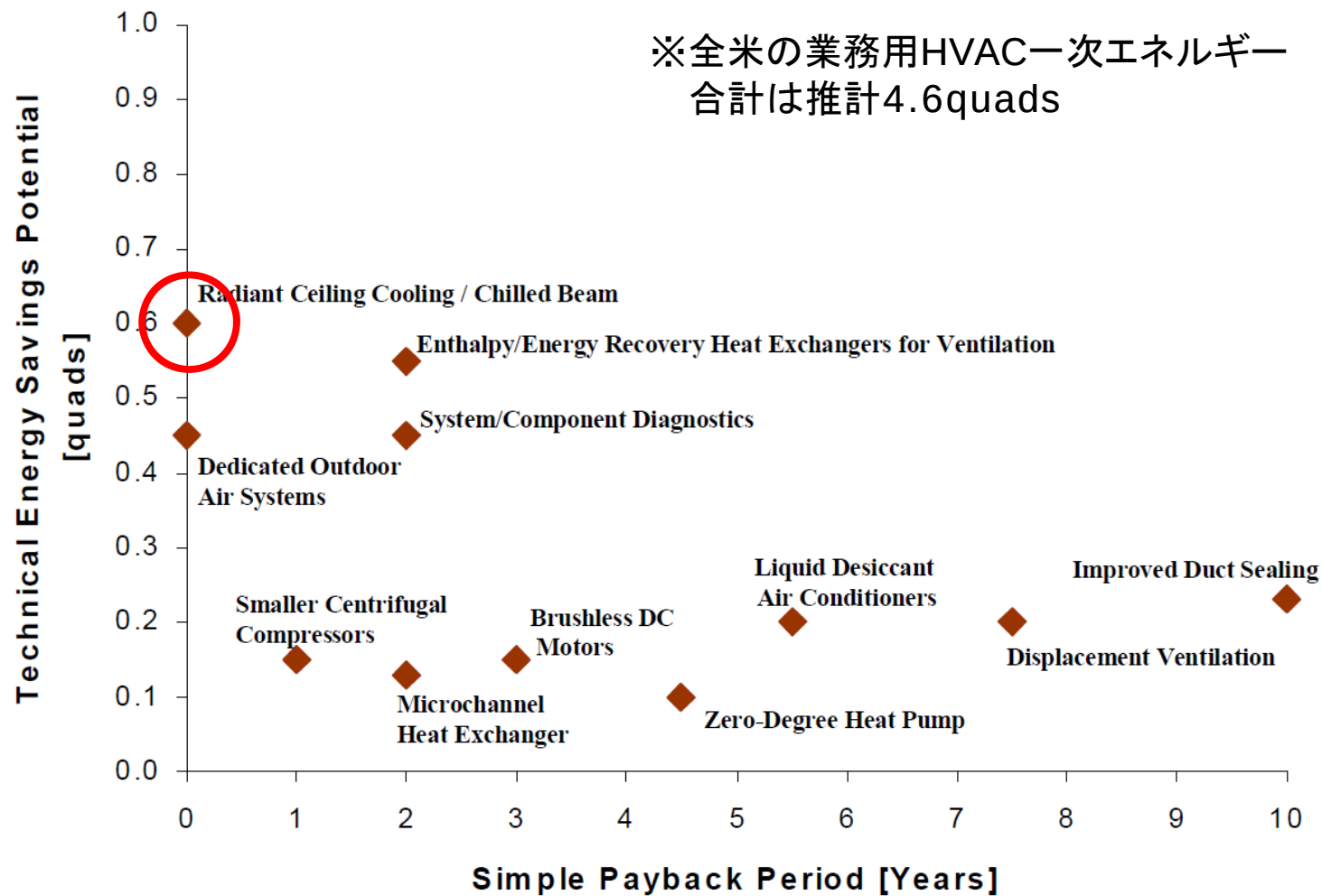
Controls / Operations (7):

- ☐ **Adaptive/Fuzzy Logic HVAC Control**
- ☐ Building Automation System
- ☐ Complete/Retro Commissioning
- ☐ Finite State Machine Control
- ☐ Personal Thermostat (e.g. Ring Thermostat)
- ☐ Regular Maintenance
- ☐ **System/Component Performance Diagnostics**

Controls/ Operations

Kurt W. Roth et.al.: "Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems Volume III: Energy Savings Potential", Building Technologies Program (DOE), 2002

DOEレポート(2002)



Kurt W. Roth et.al.: "Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems Volume III: Energy Savings Potential", Building Technologies Program (DOE), 2002

DOEレポート(2002):放射式の省エネ効果

- 搬送動力の低減(20~30%)
 - 搬送風量の低減(導入外気のみで可)
 - 換気基準(ASHRAE 62)を満たすための外気量を減らせる(DOASの場合)
- 冷凍機動力の低減(15~20%)
 - 蒸発温度の上昇
 - 換気量・ファン動力低減による冷房負荷の低減
- 暖房エネルギーの低減(8~10%)
 - 換気量の低減

(コスト増分がほぼ0なのはダクト・ファンの機器、スペースコスト削減のため)

DOEレポート(2002): 省エネ手法の分類

Energy Consumption Reduction Theme	Relevant Technologies
<i>Separate Treatment of Ventilation and Internal Loads</i>	• Dedicated Outdoor Air Systems (DOAS) • Radiant Ceiling Cooling • Liquid Desiccant for Ventilation Air Treatment • Energy Recovery Ventilation • Displacement Ventilation
<i>Fix Common HVAC Problems</i>	• Adaptive/Fuzzy Control • Improved Duct Sealing • System/Component Diagnostics
<i>Improved Delivery of Conditioning Where Needed</i>	• Microenvironments • Displacement Ventilation • Variable Refrigerant Volume/Flow • Adaptive/Fuzzy Logic Control
<i>Improved Part-Load Performance</i>	• Electronically Commutated Permanent Magnet Motors • Smaller Centrifugal Compressors • Variable Refrigerant Volume/Flow

Kurt W. Roth et.al.: "Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems Volume III: Energy Savings Potential", Building Technologies Program (DOE), 2002

DOEレポート(2002): 各手法のNEB

Non-Energy Benefit	Relevant Technologies
<i>Down-Sizing of HVAC Equipment</i>	• Dedicated Outdoor Air Systems (DOAS) • Radiant Ceiling Cooling • Enthalpy/Energy Recovery Exchangers for Ventilation • Displacement Ventilation • Novel Cool Storage • Liquid Desiccant Air Conditioner for Ventilation Air Treatment. • Variable Refrigerant Volume/Flow
<i>Enhanced Indoor Air Quality</i>	• Displacement Ventilation • Liquid Desiccant Air Conditioner
<i>Improved Humidity Control</i>	• Dedicated Outdoor Air Systems (DOAS) • Enthalpy Recovery Exchangers for Ventilation • Liquid Desiccant Air Conditioner
<i>Notable Peak Demand Reduction</i>	• Novel Cool Storage • Dedicated Outdoor Air Systems • Enthalpy/Energy Recovery Exchangers for Ventilation • Improved Duct Sealing • Radiant Cooling / Chilled Beam • Variable Refrigerant Volume/Flow

Kurt W. Roth et.al.: "Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems Volume III: Energy Savings Potential", Building Technologies Program (DOE), 2002

DOEレポート(2002): 各手法の課題

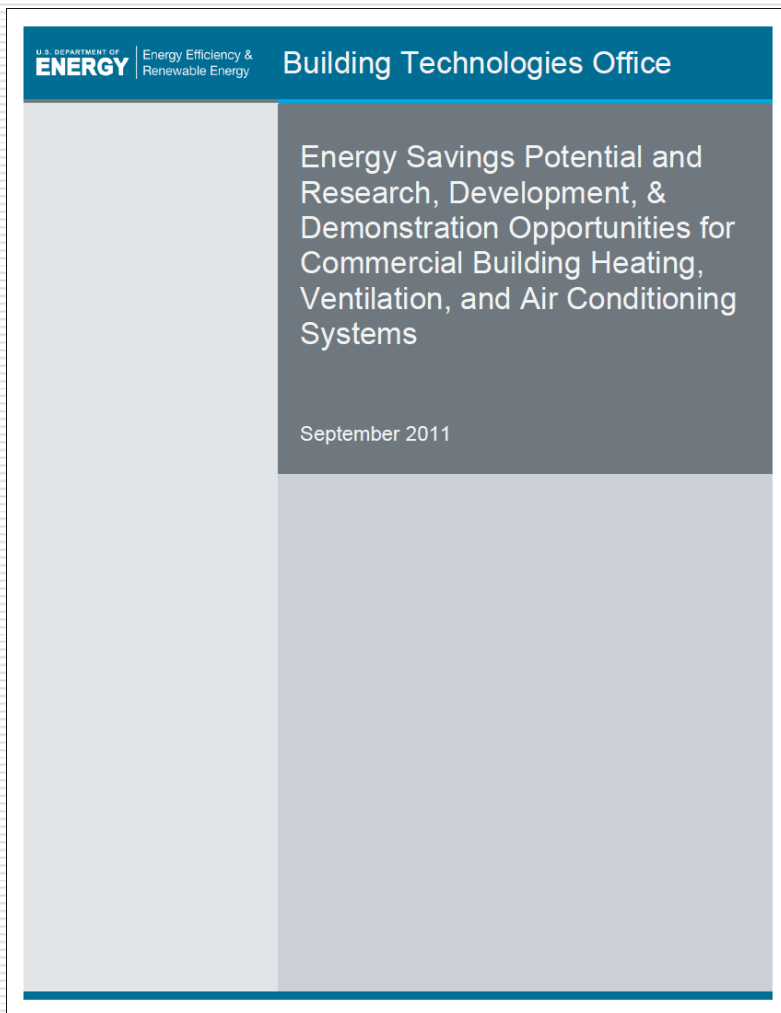
Potential “Next Step”	Relevant Technologies
<i>More Research and/or Study</i>	• Adaptive/Fuzzy Logic Control • Heat Pump for Cold Climates (CO₂ cycle) • Liquid Desiccant Air Conditioner • Small Centrifugal Compressor • System/Component Diagnostics
<i>Education</i>	• Dedicated Outdoor Air Systems (DOAS) • Displacement Ventilation • Enthalpy/Energy Recovery Exchangers for Ventilation • Radiant Ceiling Cooling • Variable Refrigerant Volume
<i>Demonstration</i>	• Displacement Ventilation • Improved Duct Sealing • Radiant Ceiling • Variable Refrigerant Volume/Flow
<i>Market Conditioning, etc.</i>	• Electronically Commutated Permanent Magnet Motors • Enthalpy/Energy Recovery Exchangers for Ventilation • Microchannel Heat Exchangers

Kurt W. Roth et.al.: “Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems Volume III: Energy Savings Potential”, Building Technologies Program (DOE), 2002

DOEレポート(2002):放射式の課題

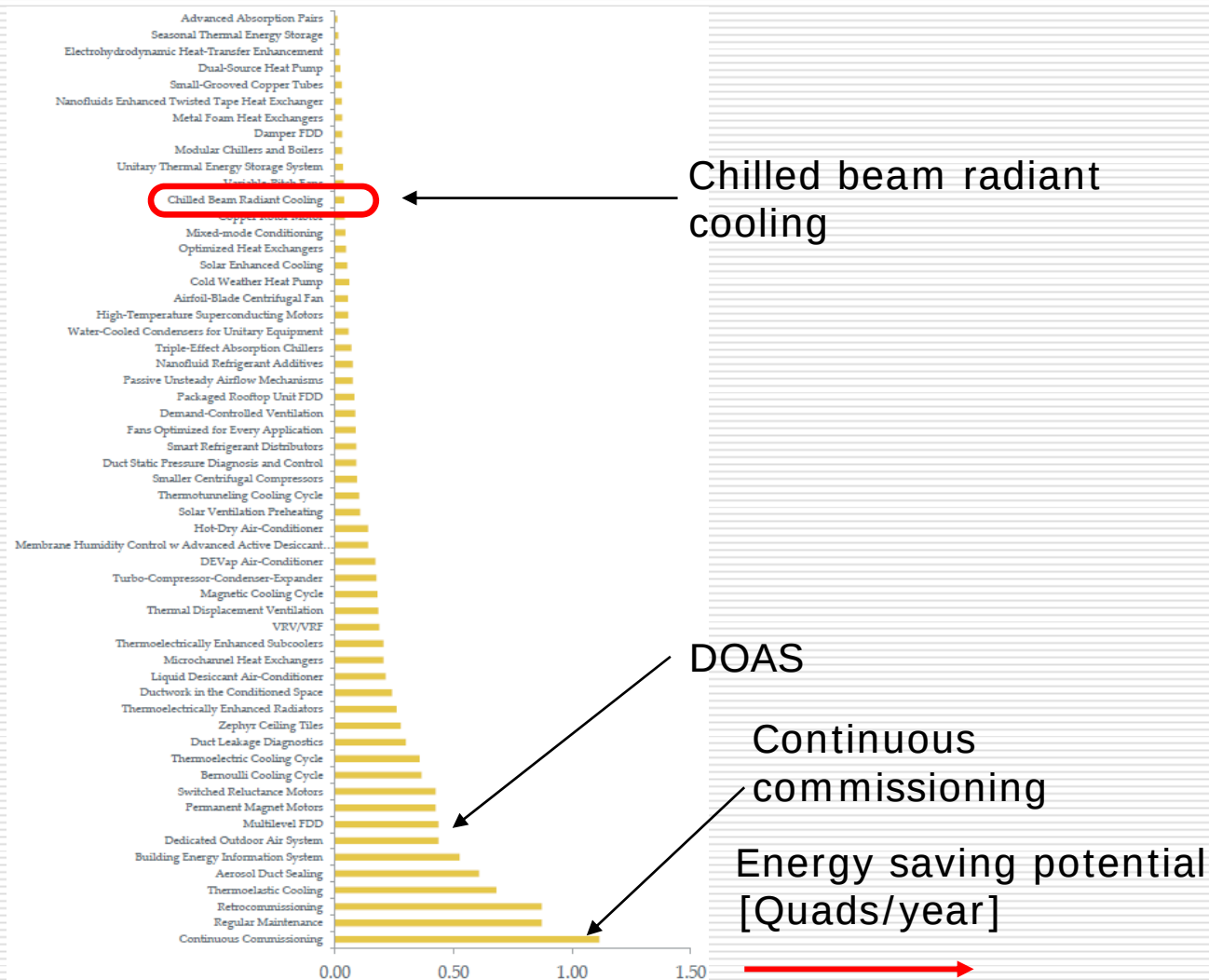
- HVAC system designer/installer education with approach;
 - Integration into commonly-used HVAC design tools
 - Demonstration of operational benefits
 - Cost and energy consumption comparison with VAV system using an enthalpy wheel and dedicated outdoor air systems.
-

DOEレポート(2011)の検討



- 2002年版の改訂版的報告書
- 放射冷暖房としては Chilled beam radiant coolingのみ
- 普及済みあるいは開発完了技術は除外

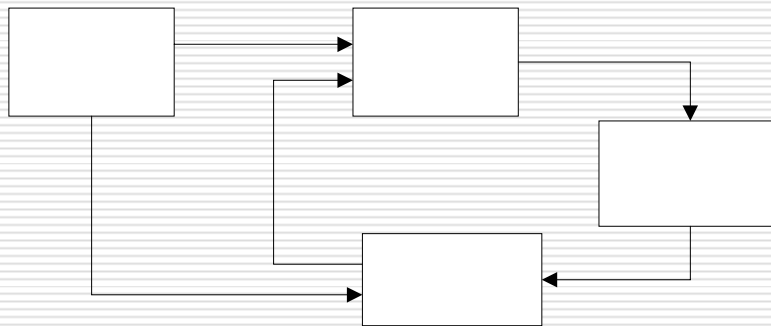
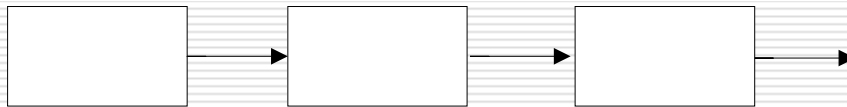
DOEレポート(2011)の検討



“Energy Savings Potential and RD&D Opportunities for Commercial Building HVAC Systems”,
Building Technologies Office (DOE), 2011

放射パネルのシミュレーション (BESTの場合)

BESTにおけるシステム計算



モジュール: 要素機器、制御、
画面表示、...

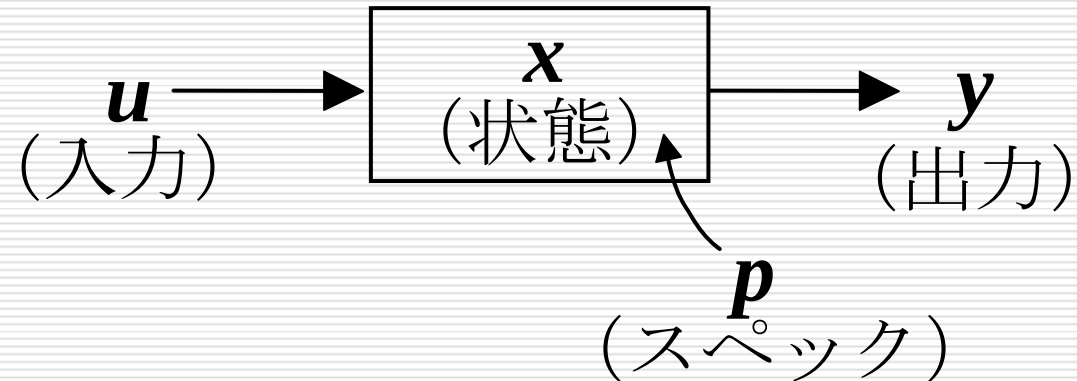
■ 計算順序に従って
モジュールに計算を
させ、情報の受け渡
しをする

■ 情報の流れはルー
プを成すこともある

■ 情報の流れ
≡ 物理的な流れ

■ 時刻ステップの数
だけ同じ処理を実行

要素モジュールの基本形



例) 空冷ヒートポンプチラー

p : 定格能力、定格電力、定格冷水量、...

u : 冷水入口水温・流量、外気温湿度、on/off、...

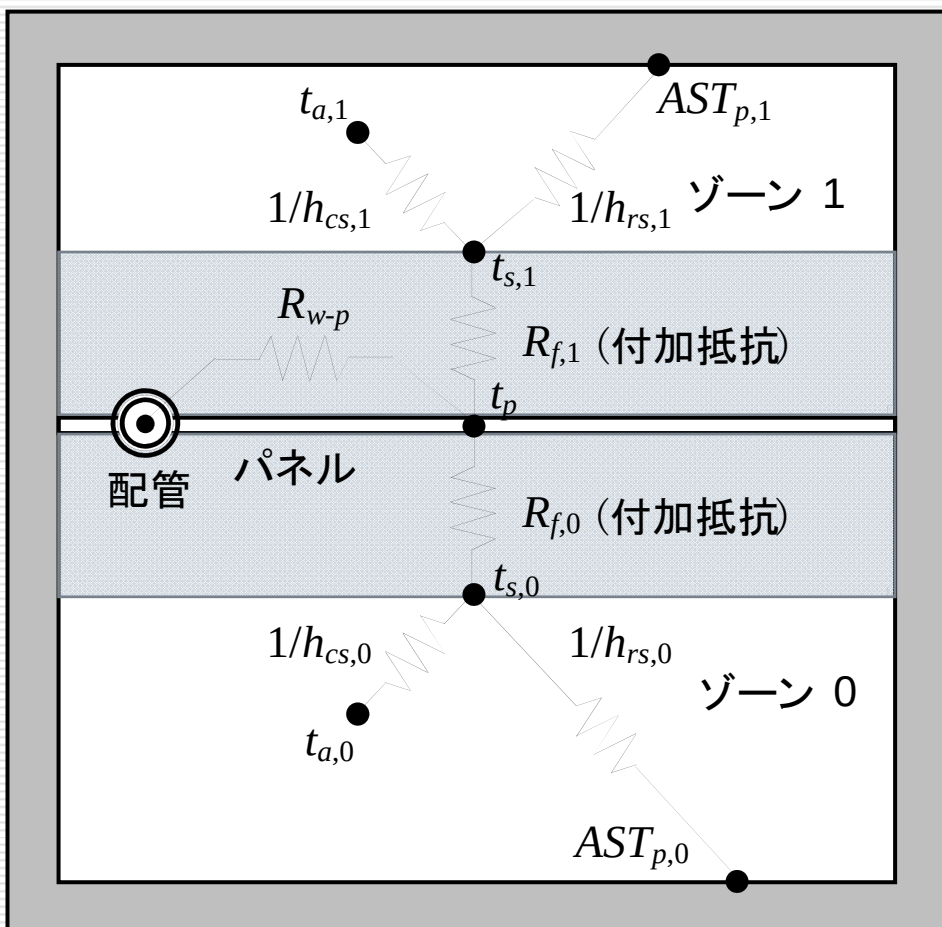
x : なし(動特性考慮せず)

y : 冷水出口水温・流量、消費電力等の記録

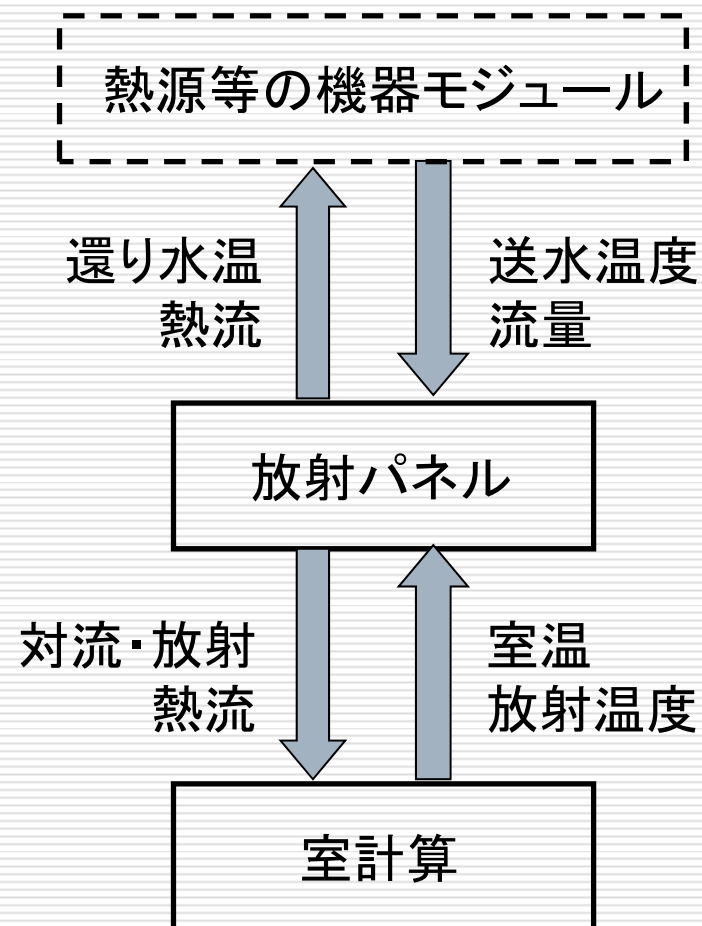
空調標準モジュール

分類	モジュールの例
熱源機器	冷温水発生機 ターボ冷凍機 ボイラ HPチラー ビルマルチ
熱源補機	冷却塔 熱交換器 蓄熱槽
搬送機器	ポンプ ファン
空調機	冷温水コイル 加湿器 全熱交換器 OAチャンバー ファン
制御機器	熱源・AHU制御(発停・台数制御等) PID制御
搬送系部品	配管およびダクト(分岐・集合ヘッダ) 流量拡大・縮小 他
室	ゾーン(システム接続用) 他
集計部品	1次エネルギー消費量集計、資源消費量集計 メータ(電力等)
ソース	固定条件(水・空気等) 気象データ 外部データ読み込み
シンク	計算中のグラフ表示(空気・水・電力などの状態値や積算値)

放射パネルモジュールの概要



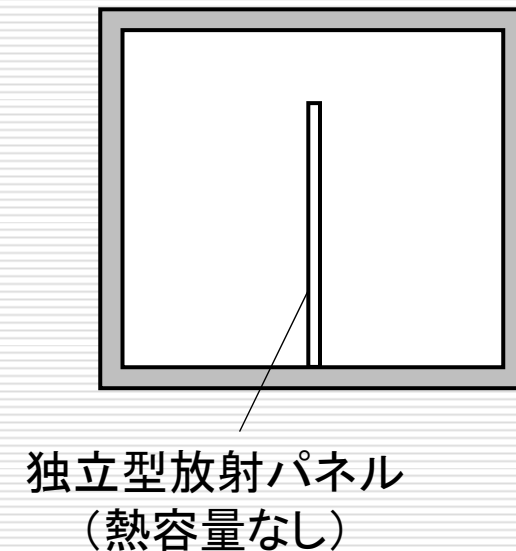
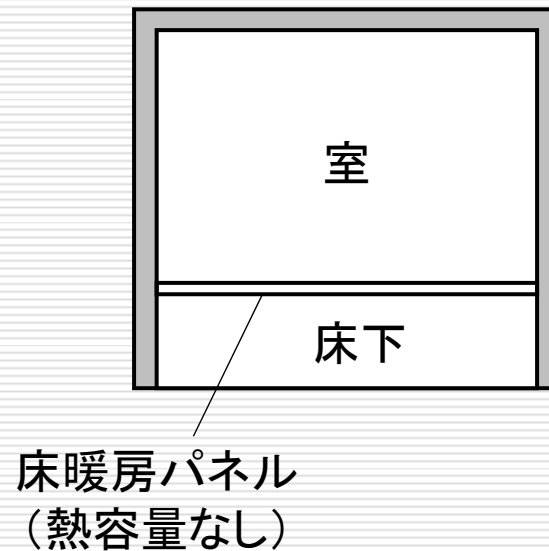
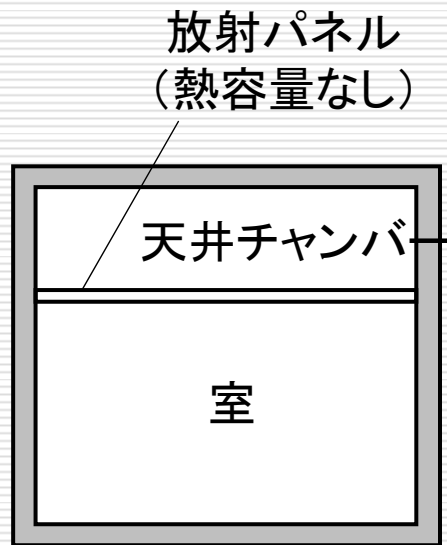
(熱回路網)



(他モジュールとの関係)

対象とする放射パネル

- ❑ 熱容量を持たない冷温水パネル
- ❑ 両側が空気に接している



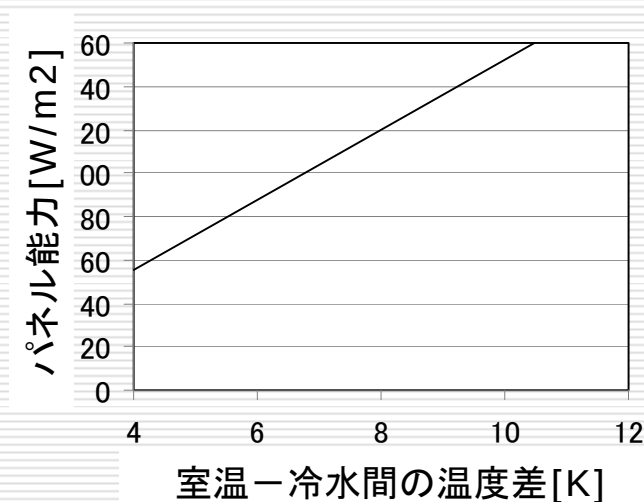
放射パネルのモデルアプローチ

□ 演繹的モデリング

- 配管、パネル形状等から熱コンダクタンスを算出
- 放射パネルの設計に利用可
- 入力データが複雑、メーカー品の場合入手困難

□ 帰納的モデリング

- メーカーの試験特性から水～室温間のコンダクタンスを読み取り、水～パネル間の熱コンダクタンス(固定値とみなす)を算出



放射パネルモジュールのパラメータ

パラメータ:

A_p : パネル1枚あたり面積[m²]

N_p : パネル並列系統数

N_s : パネル直列接続数

c_{pw} : 水の比熱[J/(g·K)]

R_{f0}, R_{f1} : 固定付加熱抵抗値[m²K/W]

$\varepsilon_0, \varepsilon_1$: パネル両面の長波放射率[-]

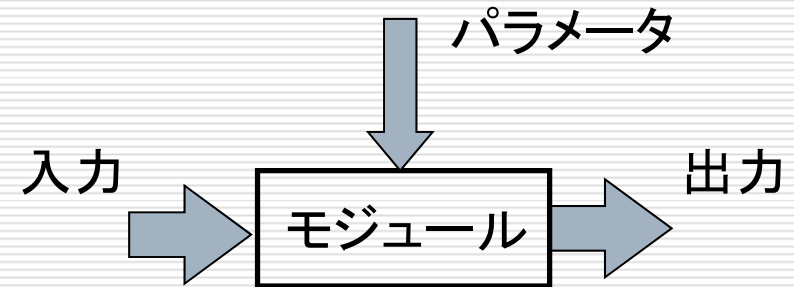
$h_{c,s}$: パネル面の熱伝達率[W/(m²·K)] (冷却、加熱に対する、上向面、下向面、垂直面の計6つの値)

$face_0, face_1$: 両面の向き('up':上向き、'down':下向き、'vertical':垂直)

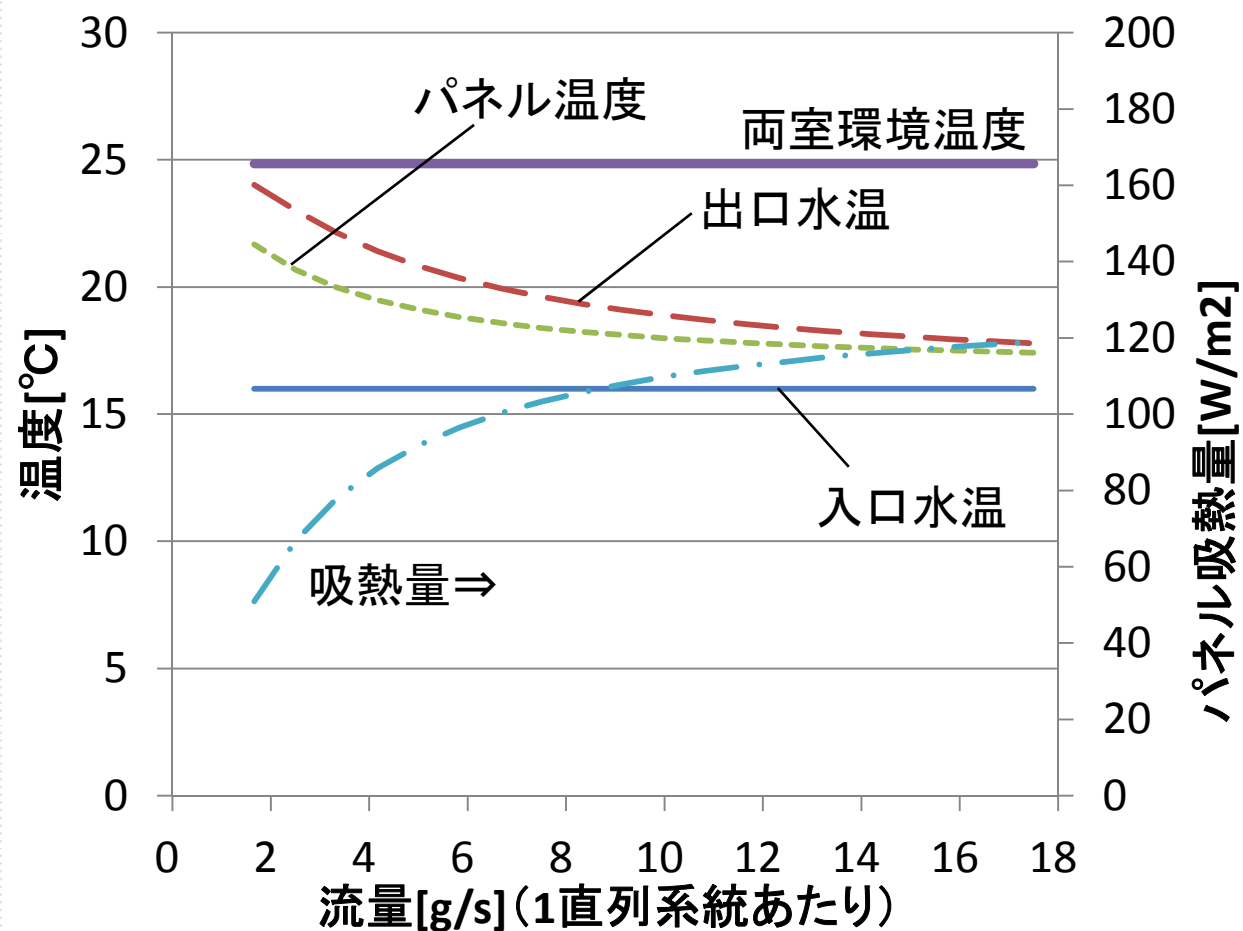
$K_{w-otp,t}$: 試験時の熱コンダクタンス(パネル単位面積あたり)[W/(m²·K)]

$inc_{r,0}, inc_{r,1}$: 両側の温度が、性能線図の横軸(室温－水温)の「室温」に含まれるか否かのフラグ

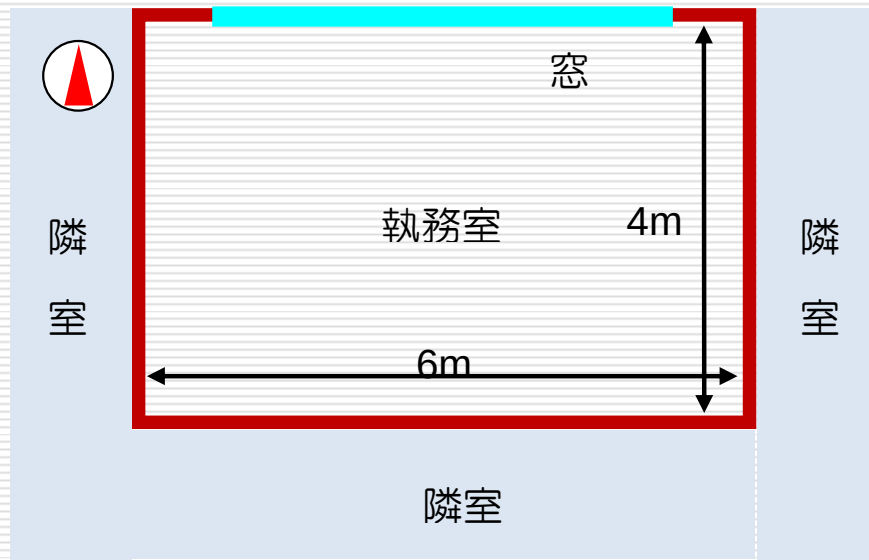
$mode_t$: 試験時の冷暖モード



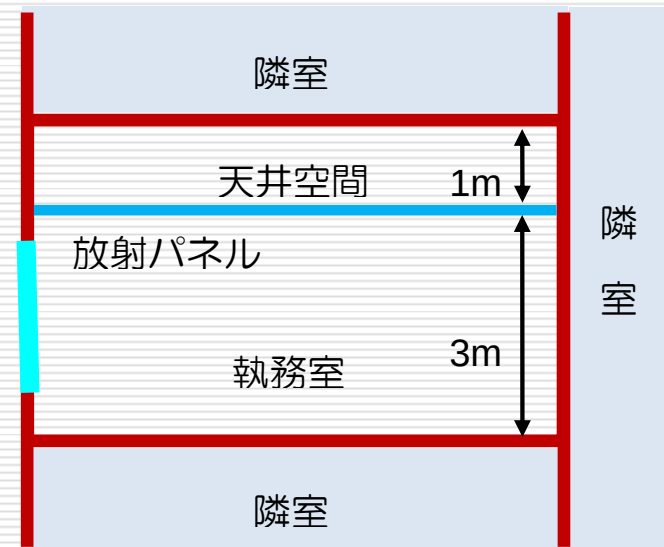
モジュール単体によるテスト計算例



計算対象モデル

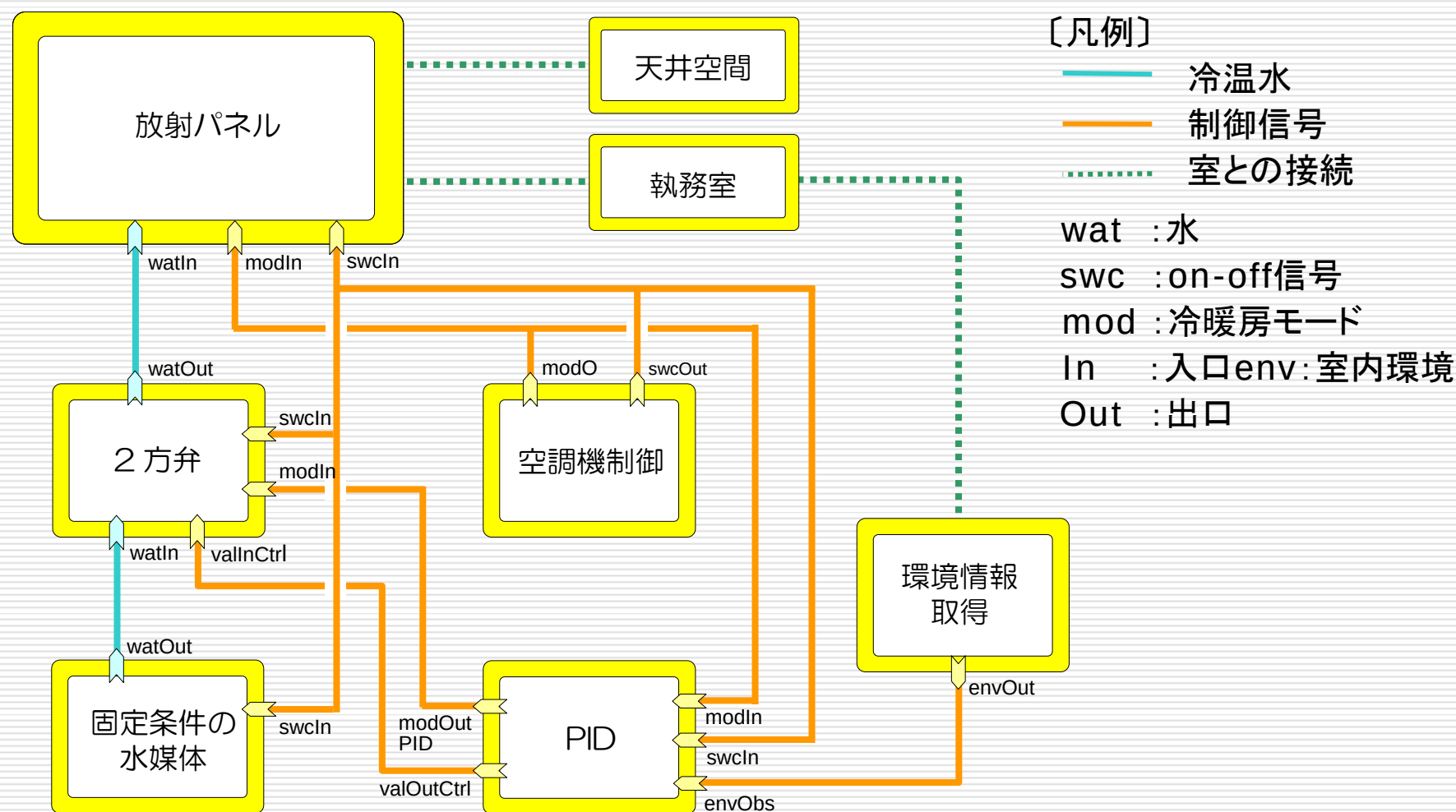


平面図



断面図

放射冷暖房(2次側のみ)のモジュール構成





おわりに



放射冷暖房のエネルギー計算の今後(昨年度のもの)

- 関連機器、制御等の評価体系の整備
 - 省エネルギー基準への対応
 - パネル性能試験およびその表示方法の統一
 - 設計へのフィードバックが可能なツール開発
-