2023年度SHASE北海道支部報告会・特別講演会

カーボン・ニュートラルに向けた データ駆動型ビル・エネルギーマネジメント （DDBEM）

2023.05.30

名古屋大学 施設・環境計画推進室
名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻

田 中　英 紀

CNに向けたデータ駆動型ビル・エネルギーマネジメント

本日のトピック

1. CNと建物のCO_2排出量マネジメント
2. 建築・設備分野に対する社会的要請
3. 建物エネルギー消費量評価におけるDDBEM
4. 使われる”見える化“とDDBEM
5. まとめ

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

CNと建物のCO_2排出量マネジメント

カーボンニュートラルに向けた社会的要請

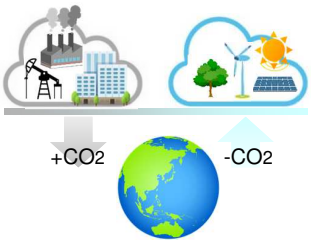
2030年、2050年に向けた目標（‘13年比)

地球温暖化ガスの排出量

2030年 46%減（更に50%の高み），2050年 CN arbon eutrality

エネルギー起源のCO2排出削減

2030年 40/46%



業務用その他 2030年時点 51%減　家庭用 66%減

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

業務その他部門の省エネルギー目標

※出典）地球温暖化対策計画, 令和3年10月22日, 内閣府

電力供給のCO_2排出係数

2030年 電源依存率: 再エネ 36～38%, 原子力: 20～22%

2013年度 実績： 0.567 kg-CO_2/kWh

2030年度 想定： 0.250 kg-CO_2/kWh※ → 対2013年 56%CO_2抑制

➢業務用建物では 2013年比 15% の 省エネの深堀 が想定

単位:百万kL	2013年度 実績	2030年 (省エネあり)	'13年増加率	2030年 (省エネなし)	'13年増加率
産業	168	140	▲17%	実質29%150	▲11%
業務	**59**	**50**	▲15%	**70**	19%
家庭	53	30	▲43%	50	▲ 6%
運輸	83	60	▲28%	80	▲ 4%
合計	**363**	**280**	▲23%	**350**	▲ 4%

出所）資源エネルギー庁: 2030年度におけるエネルギー需給の見通し, 令和3年10月をもとに作成

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

需要家側ですべきこと: エネルギー使用量の削減

需要家側

Low Energy Buildings

×

供給側

Low Carbon Energy Infrastructure

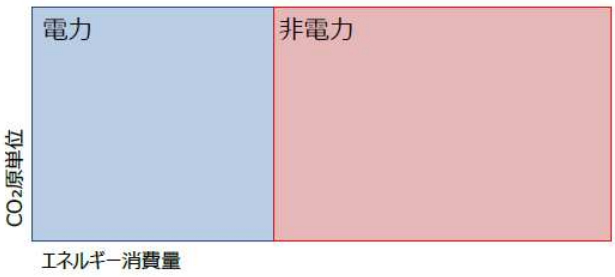
A×B = 1.0×1.0＝1.0

A×B = 0.7×0.7＝0.49

⇒ 51% CO_2削減

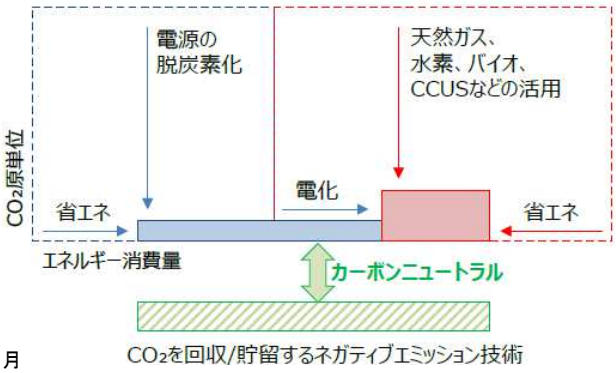
エネルギー消費削減比率：A

CO_2排出量削減比率：B



出所）（公財）地球環境産業技術研究機構秋元氏資料を簡略化

エネルギー起源の CO_2排出削減イメージ

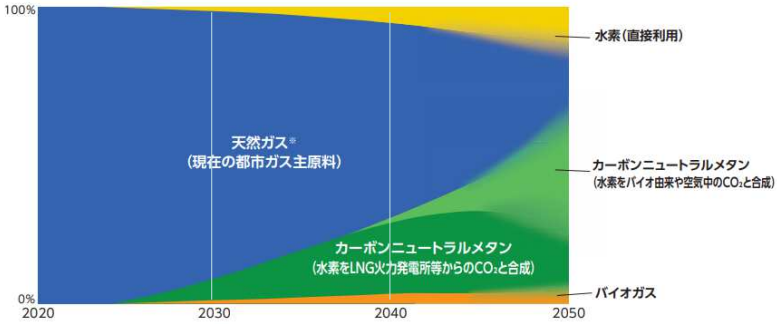


引用）経済産業省,第3回 グリーンイノベーション戦略推進会議：資料4, 2020年11月

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

ガス供給事業で目指されているもの

水素利用とメタネーション技術



※図中の手段に加えて、CCUSや海外貢献、カーボンニュートラルLNG等にも積極的に取り組み、ガスのカーボンニュートラル化を目指す

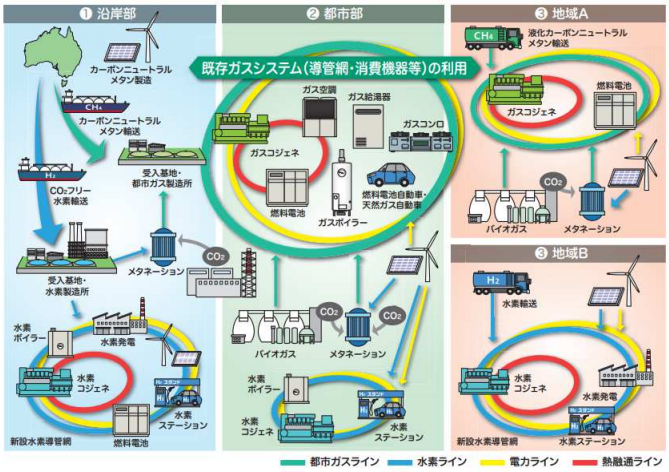


図　2050年のガス供給の絵姿

メタネーション

CO_2・水素から都市ガス主成分のメタンを合成する技術

将来的には、火力発電所などから排出され、分離・回収したCO_2 と水の電気分解などで生成される水素を、触媒を充填した反応容器内で反応させることが想定されている

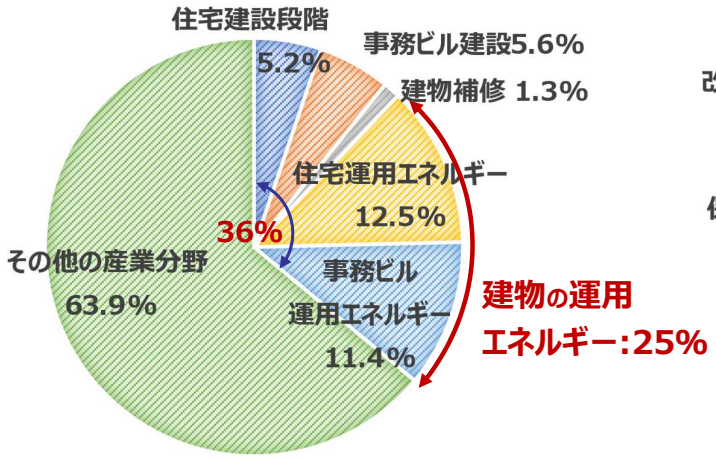
燃料系システム

再生可能エネルギー電源の調整力としての役割を新たに担うことになる

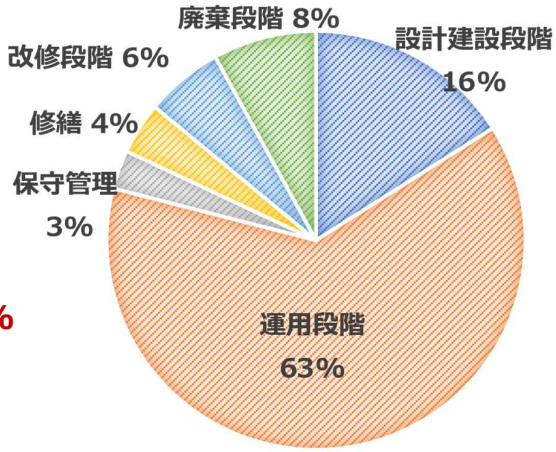
引用）日本ガス協会,「カーボンニュートラルチャレンジ2050」

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

建物におけるCO2排出量の削減



産業分野における建築関連CO_2排出量



事務所ビルLCCO2試算例

出所）日本建築学会編, シリーズ地球環境建築・専門編３, 建築環境マネジメント, 図2-1-3, 図6-1-1をもとに作図

■建物でのカーボンニュートラルメニュー　※Ssope3のカテゴリ除く

1.消費を減らす 省エネ	2.再エネを増やす 自立化	3.電源・燃料を変える ソース選択	4.吸収する オフセット
オンサイト	オンサイト	オフ・オンサイト	オン・オフサイト

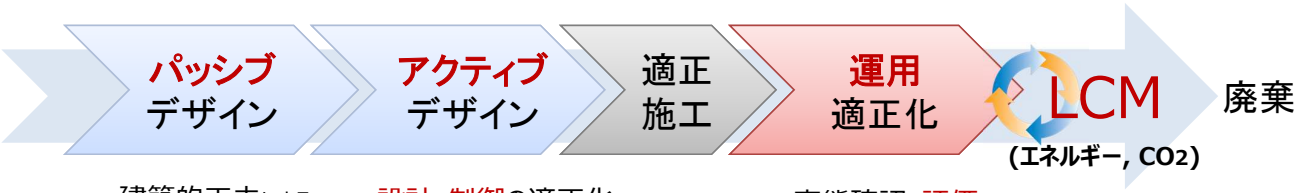
Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

建物CO_2排出量の継続的な管理

■運用段階のカーボンニュートラルメニュー ※Ssope3のカテゴリ除く

1.消費を減らす 省エネ	2.再エネを増やす 自立化	3.電源・燃料を変える ソース選択	4.吸収する オフセット
オンサイト	オンサイト	オフ・オンサイト	オン・オフサイト

■ 建物のライフサイクルマネジメント（LCM）フロー



建築的工夫による
負荷削減

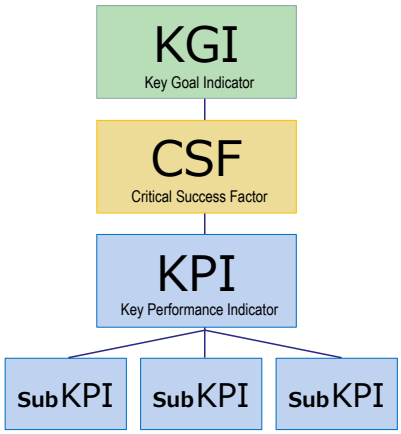
設計・制御の適正化
再エネ利用含む
エネルギー利用効率化
将来(CN)を見据えた準備

実態確認・評価
運用改善
最適化制御

エネルギー・CO_2排出 の 継続的な管理

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

管理目標とマネジメントサイクル

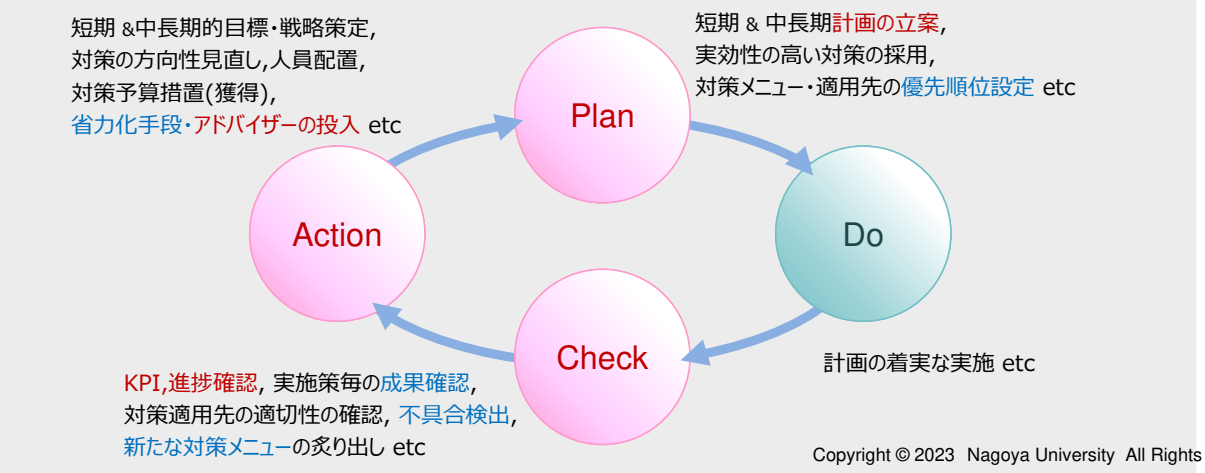


■ 重要目標達成指標（最終目標）
ex. カーボンニュートラル

■ 重要成功要因（重要施策・要因）
ex. 省エネ, オンサイト再エネ, カーボンオフセット etc

■ 重要業績評価指標（進捗評価の指標）
ex. CO2排出量, 省エネ率, 再エネ依存率, オフセット依存率 etc

■ 部門・分野別等 KPI
ex. システムCOP, 再エネ設備導入量, 建設時CO2 etc



Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

建築・設備分野に対する社会的要請

建築・設備分野に対する社会的要請

CNに向けた 業務用他の施策

地球温暖化対策計画, 令和3年10月22日 閣議決定

- 建築物の省エネルギー化（ZEB水準、システム高度化、設計最適化）
- 徹底的なエネルギー管理の実施（BEMS活用、運用最適化）
- 電気・熱・移動のセクターカップリング促進（排熱活用、需給調整）etc

建築空間・働き方への対応

- 働き方やオフィス価値の変化（ABW・オフィス計画）
- 職場の知的生産性や健康性の追求（生産効率・ウェルネス） etc

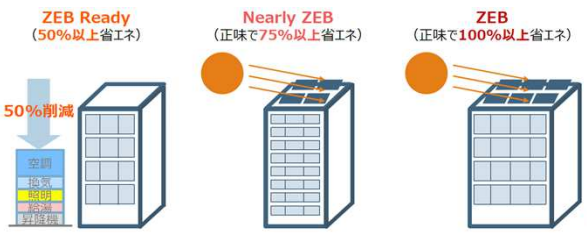
その他 社会的課題への対応

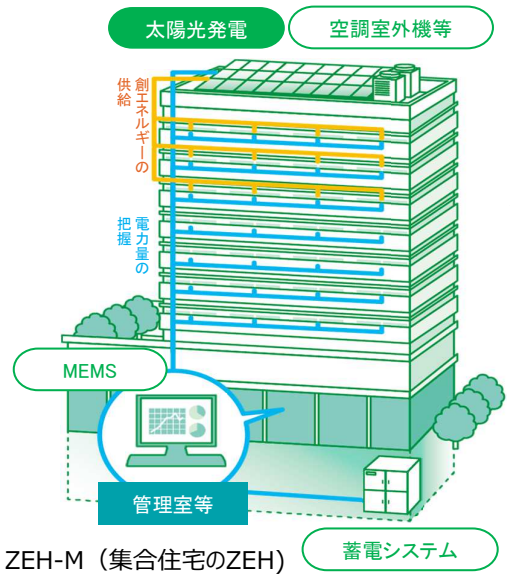
- 業務の省力化や働き手の減少（業務自動化・ロボット活用）
- 高齢化社会や技術の伝承（健康状態など見守り連動・暗黙知の数値化）
- 自然災害の多様化・多発化（レジリエンス対応） etc

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

建物を建てる・改修する（ネット・ゼロ・エネルギー化） 13

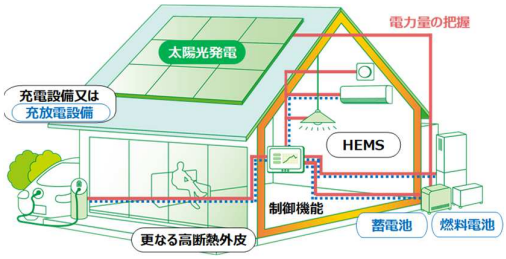
ZEB(ゼブ)・ZEH (ゼッチ)





ZEH-M（集合住宅のZEH）

住宅単体でのエネルギー自立を促す方向性
（ZEH/ZEH＋/次世代ZEH＋）



引用）経済産業省

ライフサイクルカーボンマイナス住宅
（LCCM住宅）

引用）日本サステナブル協会

ZEB/ZEH普及への動向 14

普及の現状

【出所】ZEB・ZEH-Mの普及促進に向けた今後の検討の方向性について，
ZEB･ZEH-M委員会，令和5年3月31日

- 非住宅建築物：着工数 約50,000件(2021年度)
  うちZEBは未だ 200件程度(全体の0.4%)
- 住宅：着工数 集合_約436,000件、戸建て_280,000戸(2021年度)
  うちZEH-M_32,000件程度(全体の7.4%)、ZEH_75,000戸(全体の27%)

ZEBの水準向上・普及課題

※空気調和システムの設計・制御の高度化に関する調査研究，SHASE，
研究委員会小委員会報告書(2023.3) をご参考ください

- 汎用技術のインテグレーション、環境システム技術の高度化※
- 再生可能エネルギー熱の投入拡大（Webプロ未評価技術の拡充）
- システム導入後の性能確認（運用後ZEB･CN評価法の確立）

普及へのアクセサレーション

- 建築物省エネ法の改正（2030年までに水準の引き上げ）
- 総量削減義務と排出量取引制度（キャップ＆トレード制度） ex.東京都

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

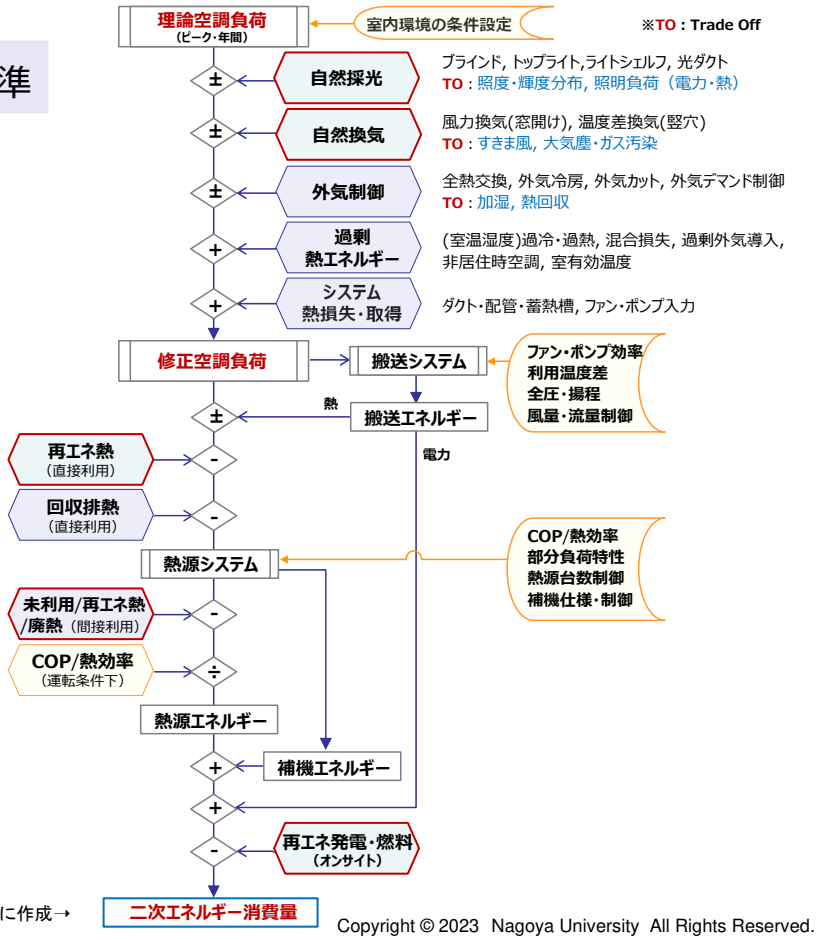
空調エネルギー消費削減の基本フロー

CNに向け 建物はZEB基準の水準

- 再エネ活用への 投資が活発化
- 設計 そして 実性能 も重要視
- 特に再エネ“熱”利用システムの導入効果を 適切に評価

☞ 取組成果の検証の重要性増す

$$\frac{\text{再エネ熱利用量}}{\text{利用に要した動力}} > 1$$



参考）中原信生：第11回建築設備シンポジウム,「環境建築の系譜
～教育と実務の軌跡と環境システム課題の検証」, 2018.9 を参考に作成→

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

コンピュテーショナル・デザイン（設計段階）

デザインToolの例

Ladybug+Honeybee ： 建築環境シミュレーションを目的にGrasshopper※をもとに開発。気象分析から日射量解析、室内照度・グレア、温熱快適性、エネルギー計算まで検討可能。

※Grasshopper ：Rhinoceros（ライノセラス：3Dモデリングソフト）のプラグインソフト。アルゴリズムを用いて造形ができる。

引用）https://www.ladybug.tools/ladybug.html

ClimateStudio

https://www.solemma.com/climatestudio

DesignBuilder SOFTWARE

https://designbuilder.co.uk/

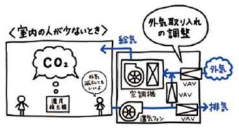
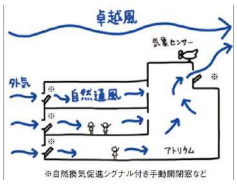
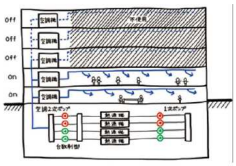
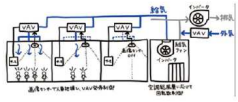
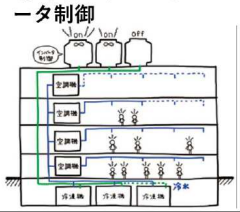
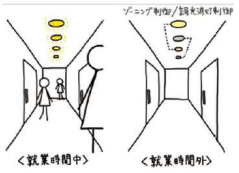
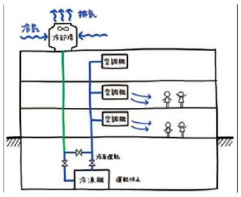
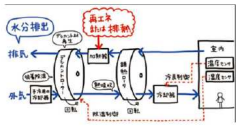
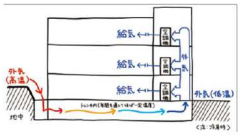
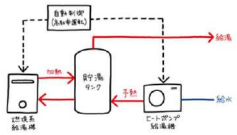
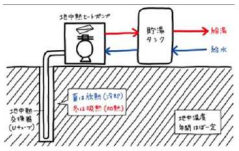
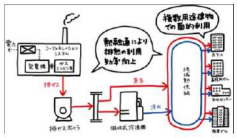
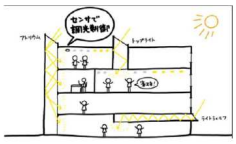
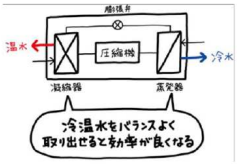
OpenStudio

https://openstudio.net/

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

WEBプログラムの未評価技術15項目

運用後のZEB･CN評価法の確立が技術導入促進のカギ？

1. CO_2濃度による外気量制御	2. 自然換気システム	3. 空調ポンプ制御の高度化	4. 空調ファン制御の高度化	5. 冷却塔ファン・インバータ制御
				
6. 照明のゾーニング制御	7. フリークーリング	8. デシカント空調システム	9. クール・ヒートトレンチシステム	10. ハイブリッド給湯システム等
				
11. 地中熱利用の高度化	12. コージェネレーション設備の高度化	13. 自然採光システム	14. 超高効率変圧器	15. 熱回収ヒートポンプ
				

【参考】エネルギー消費性能計算プログラム（非住宅版）における未評価技術について, 空気調和・衛生工学会, 2019.1.18

【イラスト引用】令和2年度経済産業省によるZEB実証事業について（パンフレット）,一般社団法人 環境共創イニシアチブ

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

データ駆動型ビル･エネルギーマネジメント

CO_2排出量管理のためのエネルギーマネジメント

CNに向けた 業務用その他 施策

地球温暖化対策計画, 令和3年10月22日 閣議決定

- 建築物の省エネルギー化（ZEB水準、システム高効率化）
- 徹底的なエネルギー管理の実施（BEMS活用、運用最適化）
- 電気・熱・移動のセクターカップリング促進（再エネ需給調整）etc

- 建物の省エネ化, ZEBの普及拡大が加速
- エネルギー管理 の重要性up
  （取組成果・目標達成 の 確認）

エネルギーマネジメント（EM）

- 実施建物 増加 → エキスパート 不足 → EMの遠隔化・外注化
- 適切かつ高質なEM を 多くの建物に提供 → データ駆動型化

建築・設備
運用管理
DX

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

建築設備の運用におけるDx推進

建物情報システムによる

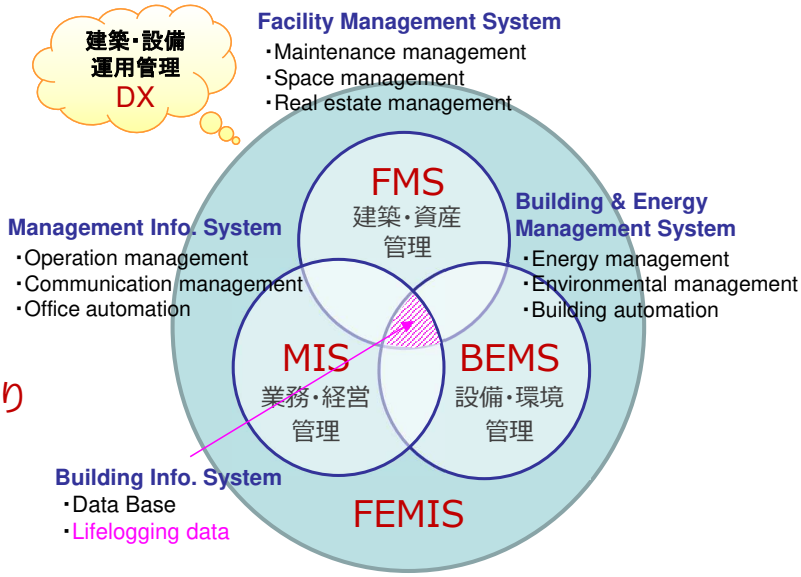
包括的な建物の管理

- 情報管理システムの確立 が必要
  - 体系的なシステム計画
  - データベースの一元化
  - 蓄積データの多面的利用
  - ログデータの共有化（リアルタイム）

ライフサイクル情報管理

- データ継続集約・活用のしくみづくり
  - 各種管理システムとの連動
    （会計・メンテ・運転管理システムなど）
  - 集約する方法（クラウドなど）
  - 収集する方法（IoT 含む）
  - 使用するツール（BIM, BEMS類など）
  - 建設・維持管理業務の一体性
    （業務発注→DB更新・利用の日常化のため）

参考）中原信生, Annex16対応研究委員会の研究開発成果とその展開について, IBEC , No80, 1994 をもとに変更を加えたもの

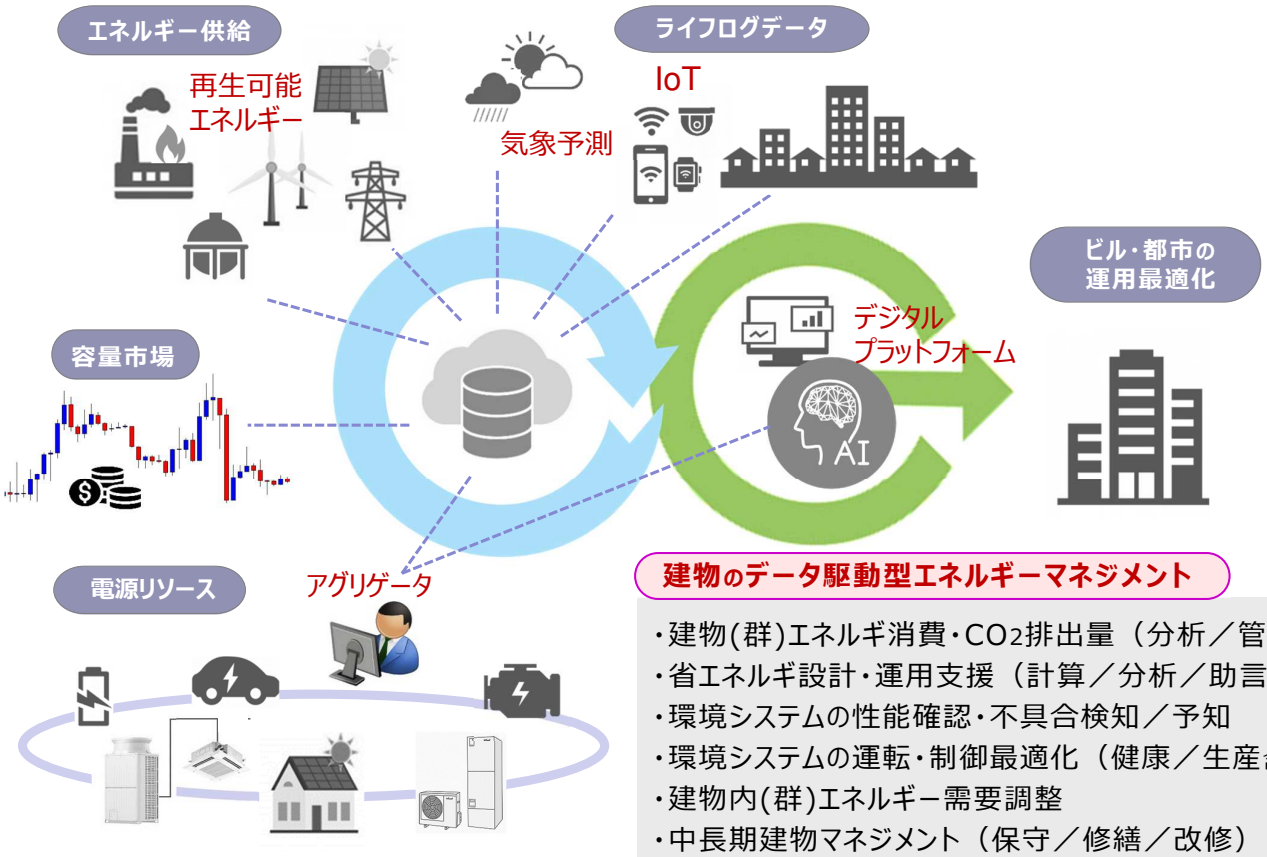


Facility **E**nergy / environmental
Management & **I**nformation **S**ystem

ファシリティ・エネルギー・環境管理情報システム

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

データ駆動型の建物・都市の運用最適化

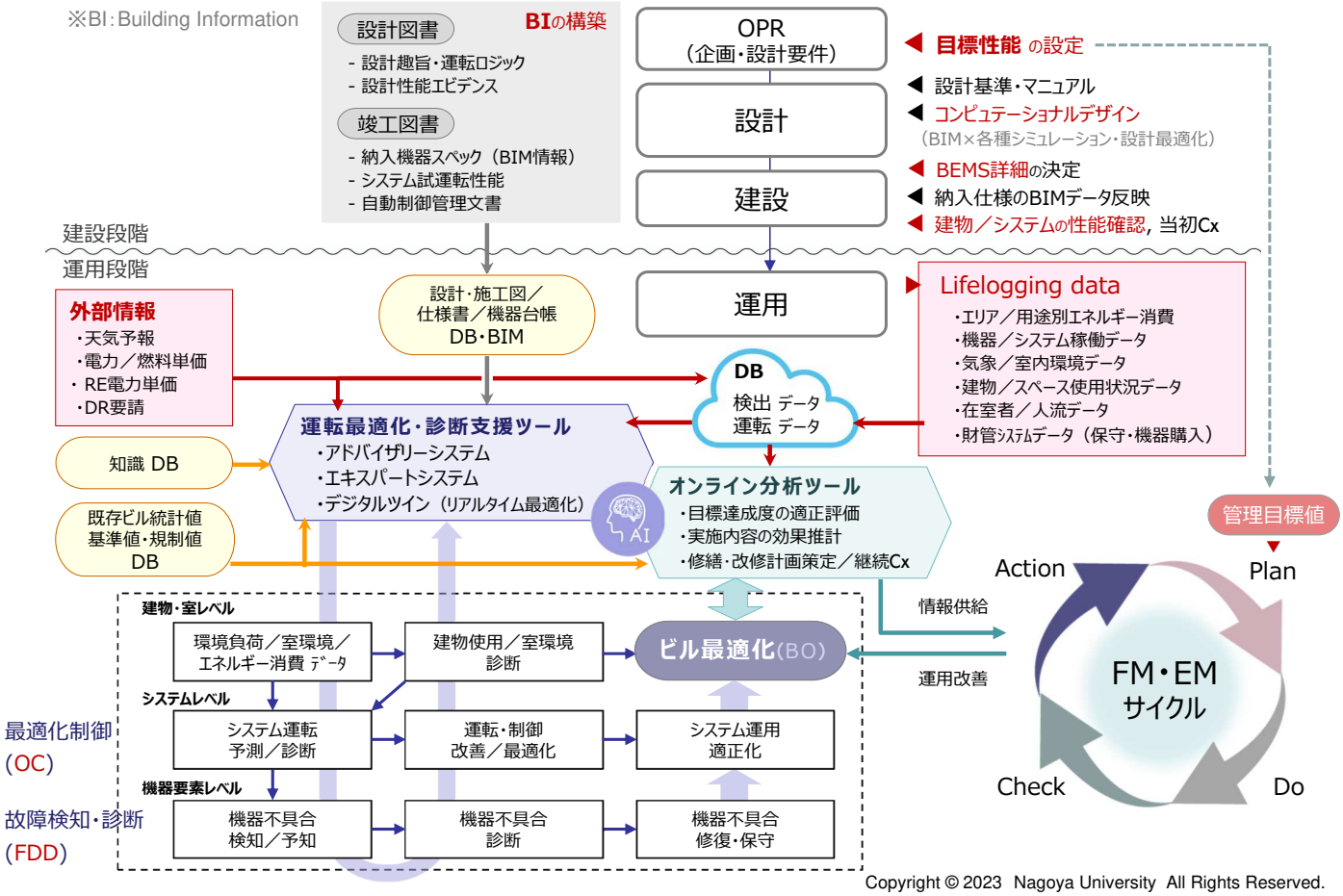


建物のデータ駆動型エネルギーマネジメント

- 建物(群)エネルギ消費・CO_2排出量（分析／管理）
- 省エネルギ設計・運用支援（計算／分析／助言）
- 環境システムの性能確認・不具合検知／予知
- 環境システムの運転・制御最適化（健康／生産含む）
- 建物内(群)エネルギー需要調整
- 中長期建物マネジメント（保守／修繕／改修）

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

データ駆動型ビル・エネルギーマネジメント（DDBEM）



Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

建物エネルギー消費量評価におけるDDBEM

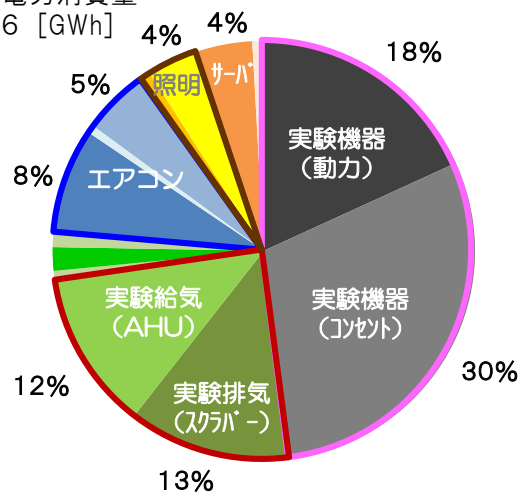
生物・化学系研究棟での分析例（従来型）

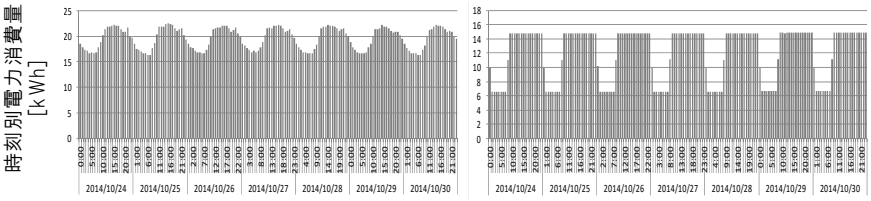
約4,800MJ/年・㎡ の建物

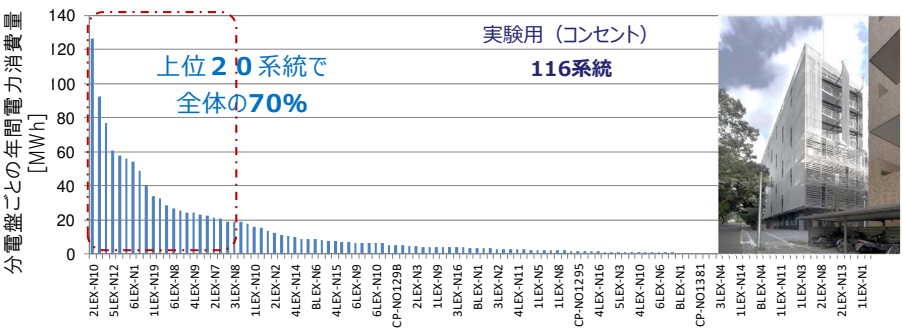
学内の理系建物平均の約２倍

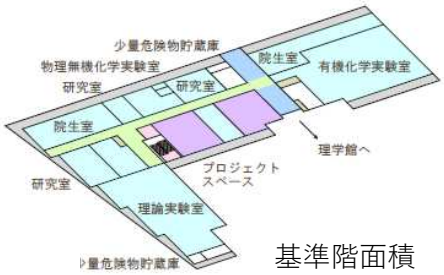
☞ 専門家が分電盤毎・使用項目毎に 手作業で
集計・時系列グラフを描いて状況把握

年間電力消費量
4.66 [GWh]









基準階面積
約2,330 ㎡

Copyright © 2022 Nagoya University All Rights Reserved.

データ分析・評価のリフレーミング

リフレーミング

物事を見る枠組み（フレーム：frame）を変えて、
別の枠組みで見直す（re-frame）

CO_2排出管理の重視、AI分析の普及を前提にした、
分析評価手法 の **再整理** が必要

☞ ダークデータの**活用**、分析業務の**省力化・高速化**を実現

※ダークデータ：有効利用されずに保存されているデータ

Copyright © 2022 Nagoya University All Rights Reserved.

ダークデータ活用：AI分析・BI可視化

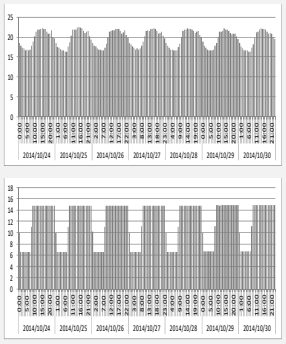
※BI：Business Intelligence

分かりやすい情報提示

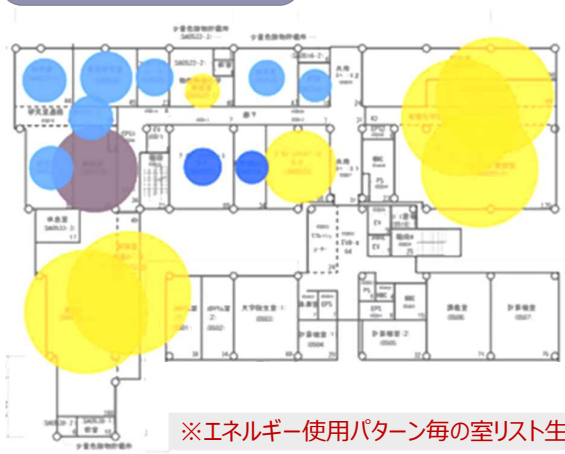
- **ユーザー**：他室との比較・傾向が **一目瞭然**
- **管理者**：容易に **状況把握・ターゲット** 抽出
  （交渉相手・対策機器/システムのあぶり出し）

【従来法】

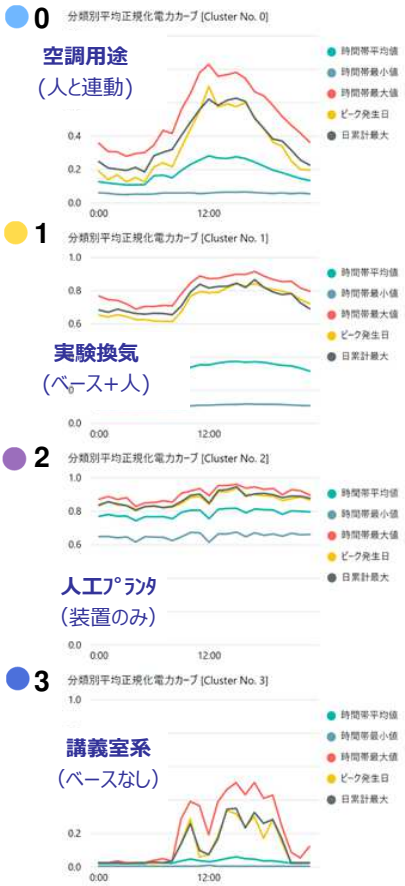
時系列グラフで状況把握
（分電盤毎・使用項目毎）



電灯・動力（コンセント電力）



※エネルギー使用パターン毎の室リスト生成



出典）三浦，久村，田中他：エネルギーマネジメントにおけるAI・BIツールの活用に関する研究 （第1報）大学施設における電力使用のパターン分類・モデル化と可視化，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，2018.9

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

建物エネルギー群管理の自動化

今後のエネルギーマネジメント

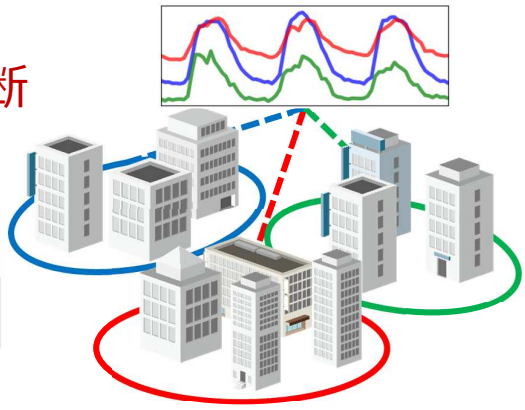
- 実施建物 増加 → エキスパート 不足 → EMの遠隔化・外注化
- 適切かつ高質なEM を 多くの建物に提供 → データ駆動型化

遠隔化によるEMの自動化

- 少ないデータ をもとに分析
- 少ない情報(建物概要・設備台帳など) で判断
- 多くの建物を 迅速・適切 に診断

☞ 建物エネルギー消費パターンの
類型化・特徴量把握 を 自動化

→ 特徴量に応じた対策 を ガイダンス

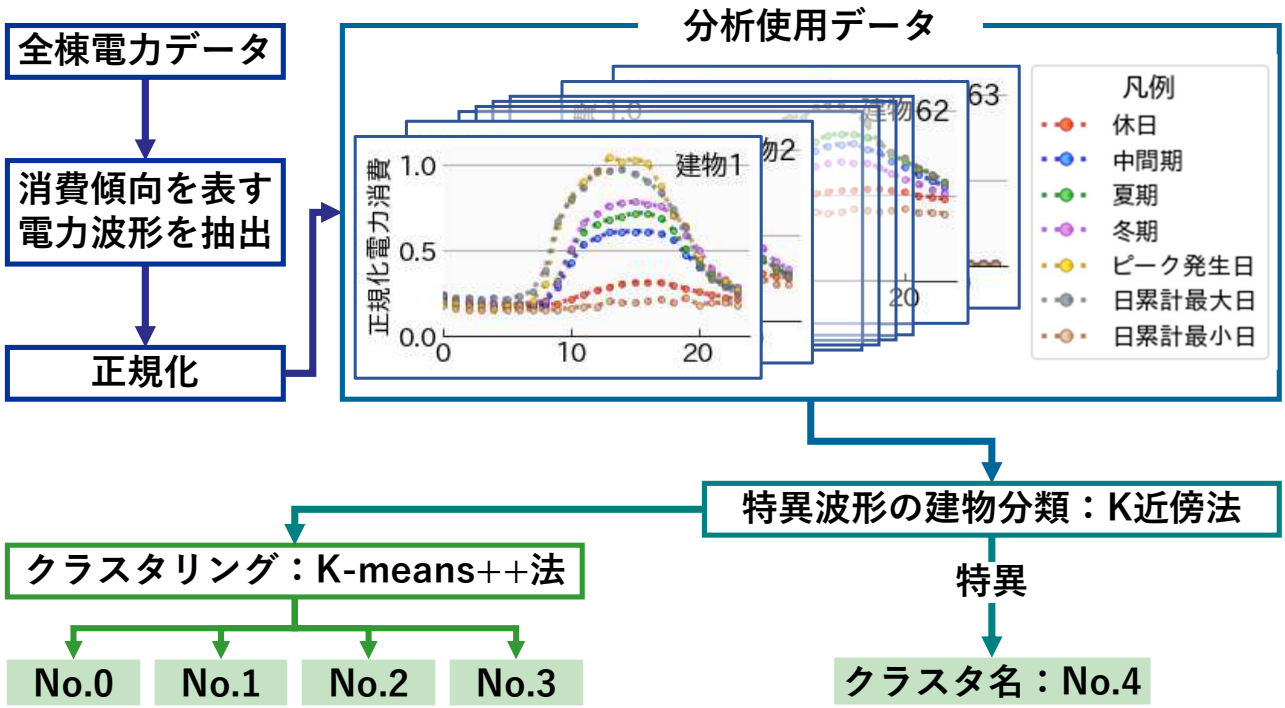


Copyright © 2022 Nagoya University All Rights Reserved.

建物群管理：エネルギー消費特性把握

クラスタリングによる建物使用パターン分類

・ エネルギー消費データをもとに建物用途・運用状態を類推



Copyright © 2022 Nagoya University All Rights Reserved.

分類パターンの“特徴量”把握手法

ランダムフォレストによる特徴量分析

クラスタリング結果

クラスタ名	No.0	No.1	No.2	No.3	No.4（異常データ群）	合計
データ数	16	15	18	8	6	63

各建物の特徴量

建物名	説明変数				
	延床面積	建築年	・・・	待機電力比	月別変動率
建物1	7835	2002		0.52	0.79
建物2	6088	1965		0.74	0.77
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
建物63	6150	1995		0.51	0.72

ランダムフォレスト

特徴量の対応付け

Clustering 結果 ダミー変数化

目的変数 No.1に属す (0 or 1)
0
1
⋮
0

精度確認

モデル予測結果

予測(再現) No.1に属す (0 or 1)
0
1
⋮
0

RF予測モデル

説明変数(特徴量)による分類結果(0 or 1)の予測モデル

特徴量の重要度分析：どの特徴量を使って建物群を分類したか**寄与度**を算出

Copyright © 2022 Nagoya University All Rights Reserved.

特徴量重要度の求め方（決定木の場合）

分割条件：$IG(D_{node})$**を最大化**するように説明変数と閾値を決定

$IG\ (D_{node})$ 情報利得 = **分割前データ** ばらつき具合 − **分割後データ** (左右それぞれ)のばらつき具合

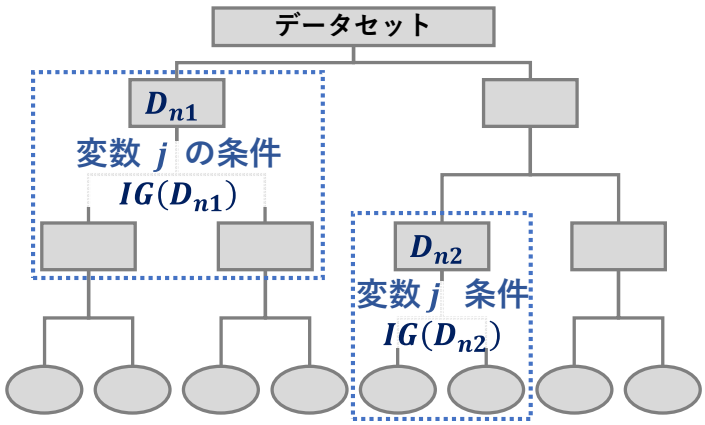
特徴量重要度

$$FI(j) = \sum_{D_{node} \in D_{node(j)}} IG(D_{node})$$

$FI(j)$：特徴量jの重要度	$D_{node(j)}$：特徴量jが分割対象となるノードの集合

$FI(j)$の基準化：

$$fi(j) = FI(j) / \sum_{i=1}^{m} FI(i)$$



$D_{node(j)} = [D_{n1}, D_{n2}]$

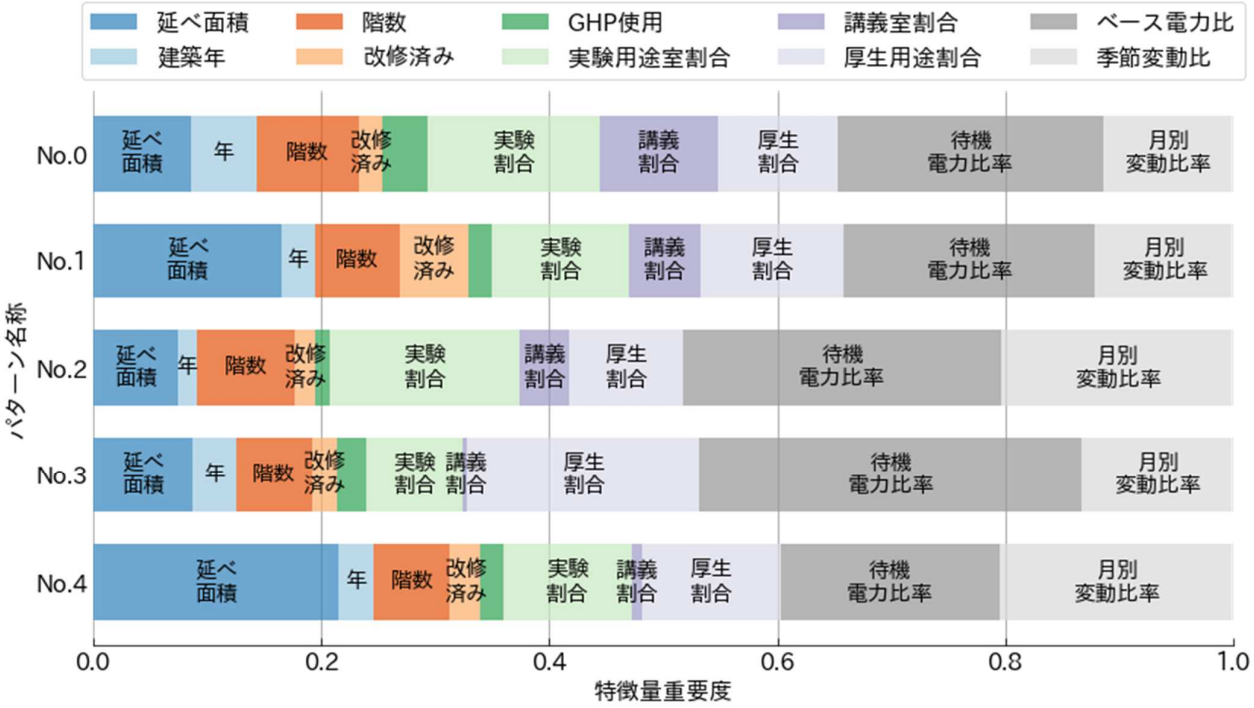
$$FI(j) = \sum_{D_{node} \in D_{node(j)}} IG(D_{node}) = \sum_{D_{node} \in D_{node(j)}} IG(D_{n1} + D_{n2})$$

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

分類パターンの“特徴量”把握手法

ランダムフォレストを用いた特徴量把握

・各建物の諸元やエネルギー消費実態により建物分類結果の特徴量を分析



Copyright © 2022 Nagoya University All Rights Reserved.

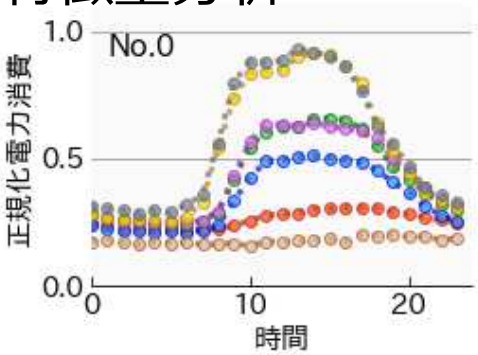
建物群の特徴量自動ラベリング

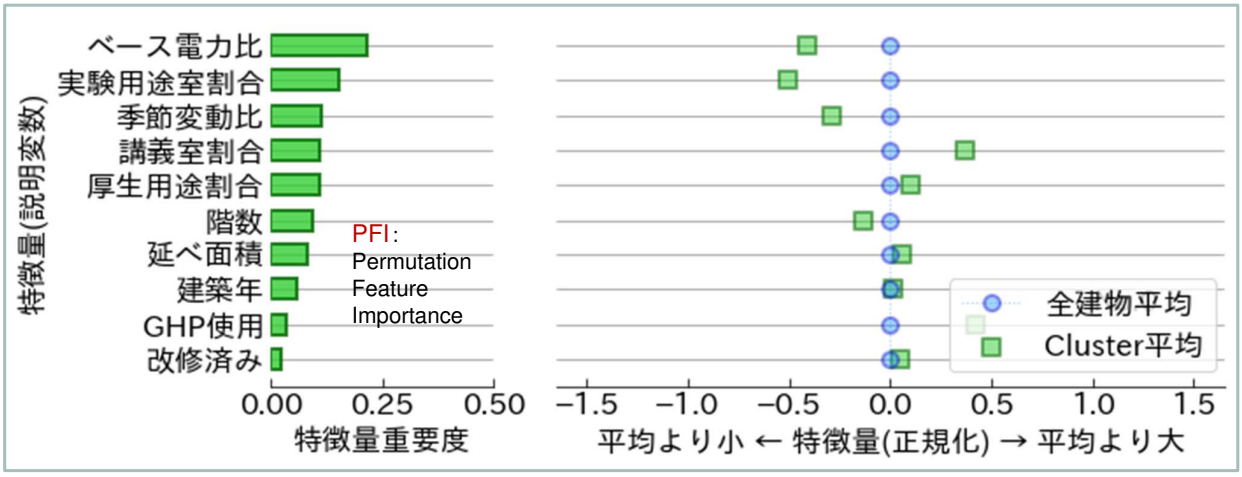
機械学習(ランダムフォレスト)による特徴量分析

・特徴量を定量化してラベル付け（文章化）

電力消費特性： ベース電力が小さい
月(季節)変動が小さい

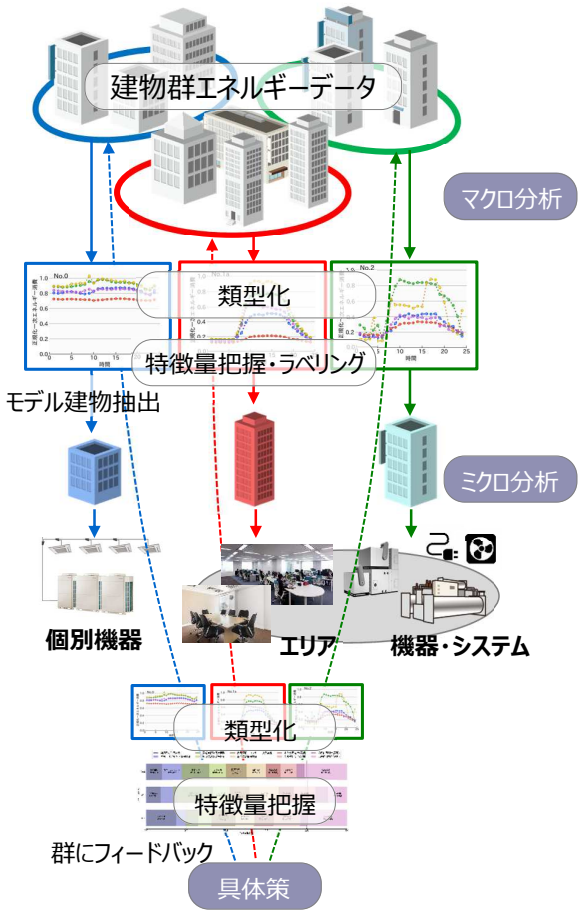
建物特性　　： 実験用途の割合が低い
講義用途の割合が高い

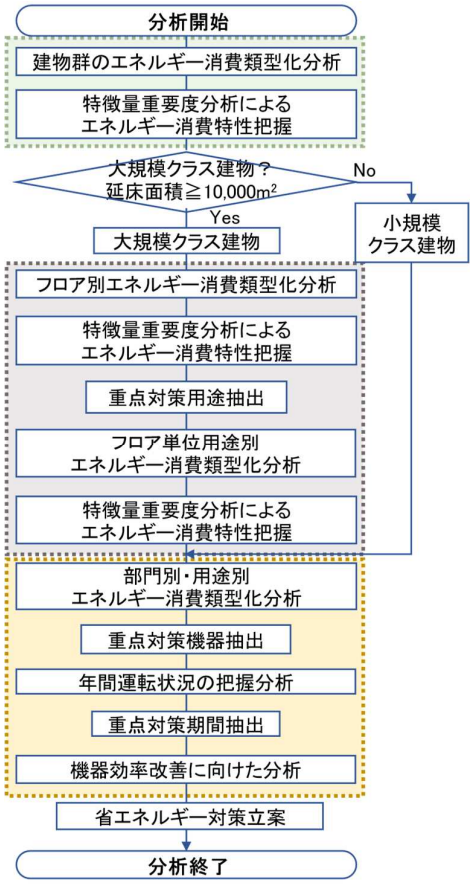




Copyright © 2022 Nagoya University All Rights Reserved.

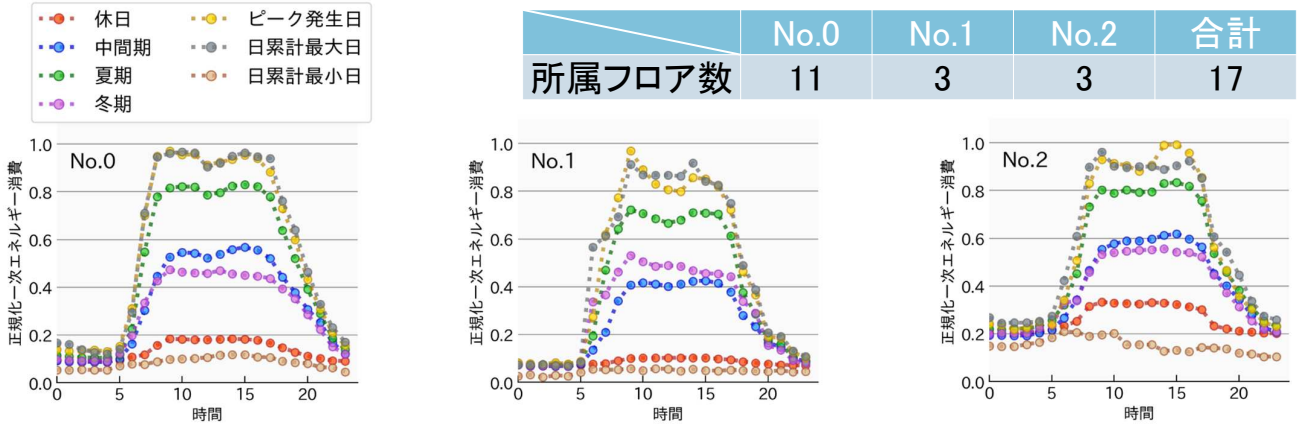
建物群エネマネの省力化・自動化の方策



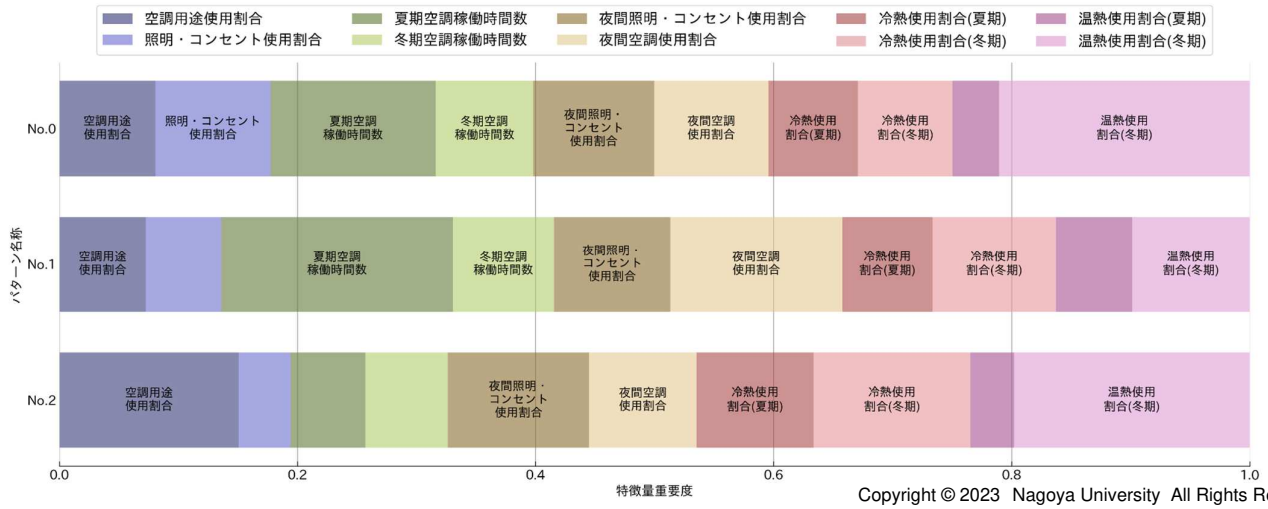


Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

類型化・特性把握結果（オフィス+商業複合施設：延床16万㎡）

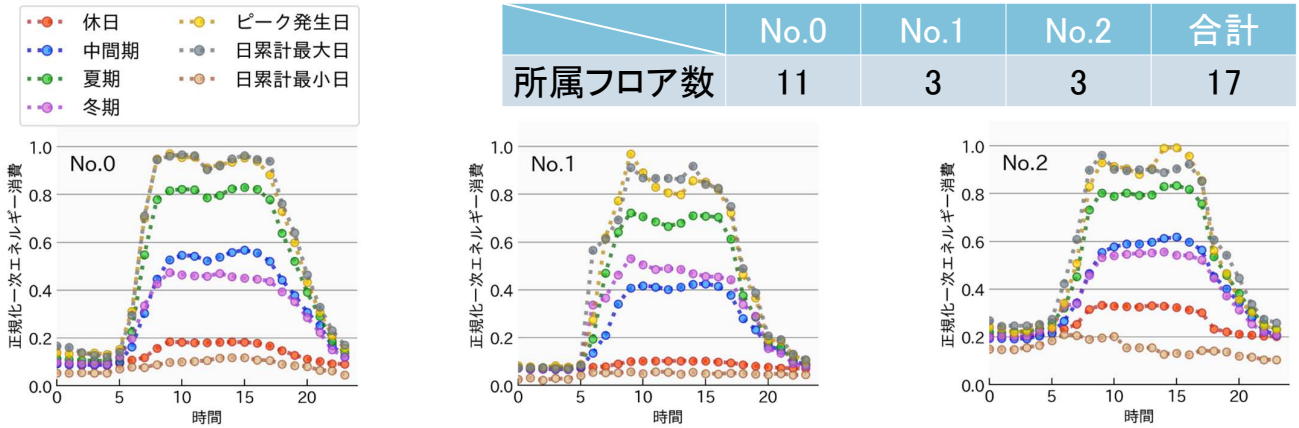


	No.0	No.1	No.2	合計
所属フロア数	11	3	3	17



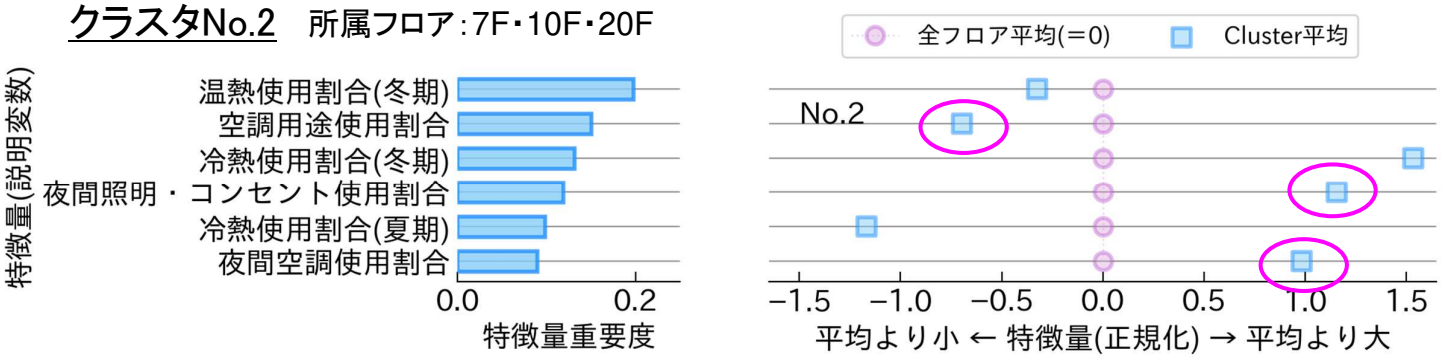
Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

類型化・特性把握結果（オフィス+商業複合施設：延床16万㎡）



	No.0	No.1	No.2	合計
所属フロア数	11	3	3	17

クラスタNo.2　所属フロア：7F・10F・20F



※コンセント電力多く、冬期冷房が顕著な（内部発熱高い）フロア群

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

バブルチャート評価（オフィス+商業複合施設：延床16万㎡）

- クラスタNo.0
- クラスタNo.1
- クラスタNo.2

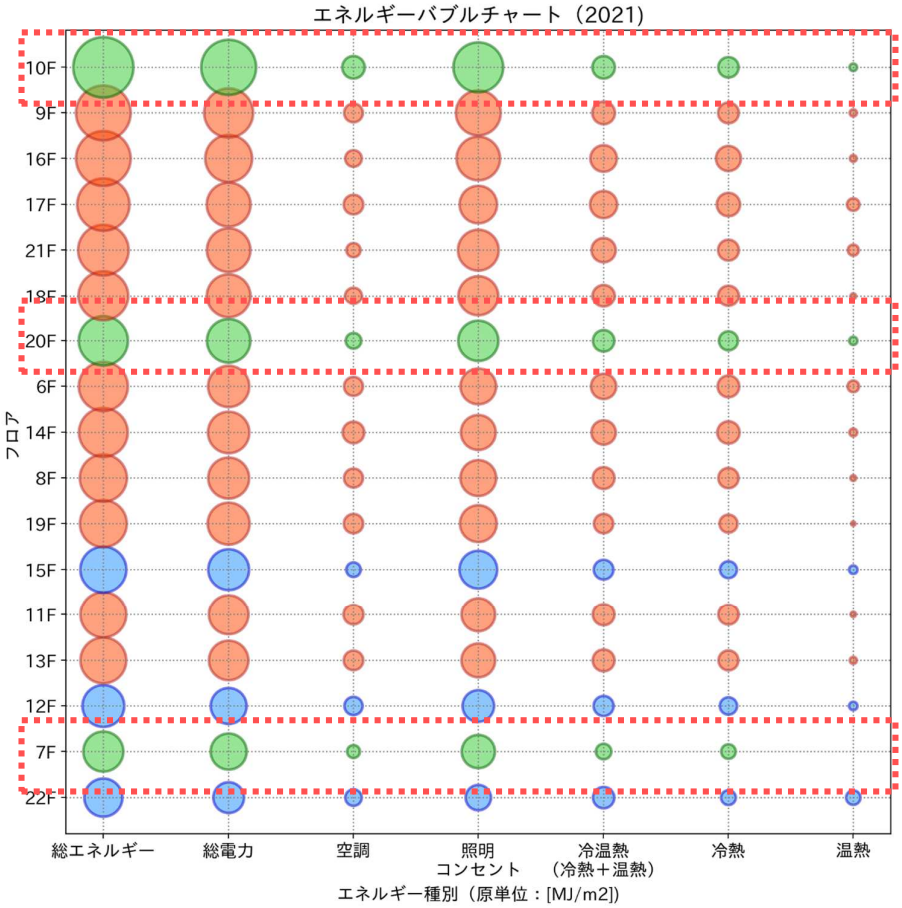
※バブル直径
エネルギー消費原単位の大きさ

クラスタNo.2

- ◻ 対策を講じるべきフロア
  10Fや20F
- ◻ 照明・コンセント消費原単位が顕著に大きい
- ◻ 夜間のコンセント電力が大
- ◻ 冬期の冷熱使用が大

⇓

サーバ等が影響か？



Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

パターン認識を用いた運用不具合診断

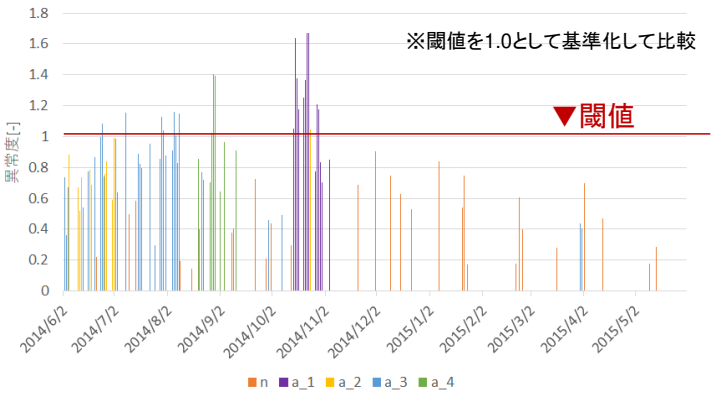
測定データの日パターン分析

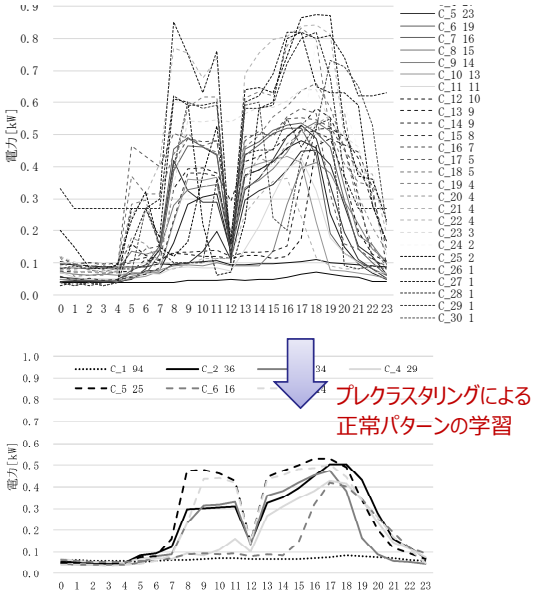
- クラスター分析 (k-means++) により測定値の日パターンを診断
  - 異常度：評価データと最近房クラスタ(類似パターン)重心との距離
  - 判定閾値：類似パターン・クラスタの重心と各学習データとの距離の最大値

$$a_{(x')} = \min_{c}\left\{\sqrt{\sum_{i=1}^{24}\left(\overline{x_{ci}} - x_i'\right)^2}\right\} \quad \cdots(1)$$

$$a_{(x')} - \max\{a_{(x_c)}\} > 0 \quad \cdots(2)$$

ここに　a：異常度, x：学習データ, x'：検証データ, c：クラスタ番号





出典）田中ら：建物のデータ駆動型エネルギーマネジメントにおけるパターン分析による不具合検知に関する研究, 第1報, 空気調和・衛生工学会論文集 , No.272, 2019

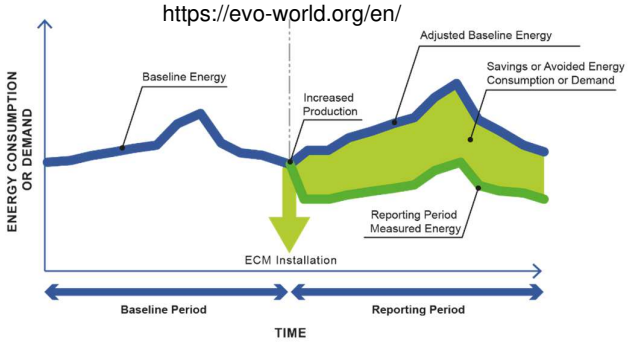
Copyright © 2022 Nagoya University All Rights Reserved.

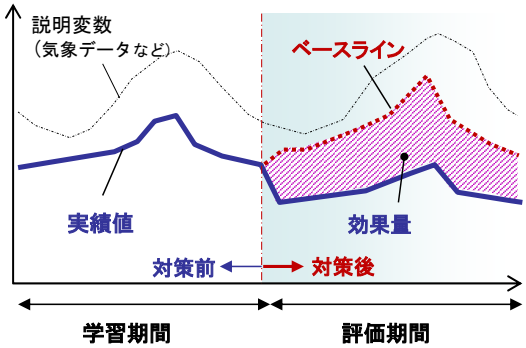
ベースラインエネルギーを用いた評価・管理

ベースラインエネルギー評価

- IPMVP：国際性能測定検証プロトコル
  (International Performance Measurement and Verification Protocol)
  - 1997年制定（1994年～DOEが支援）
  - 「ESCO事業」など省エネ改修の効果推計ルール
- M&Vアプローチ：測定と検証方法
  (Measurement & Verification)
  - 適切な評価のための計測と評価方法
- ASHRAE G-14 (2002, 2014)
  (Measurement Of Energy, Demand, And Water Savings)
  - IPMVP, M&A に多く準拠
  - 再生エネルギー利用システムの評価にも言及

出典）Efficiency Valuation Organization (EVO)
https://evo-world.org/en/





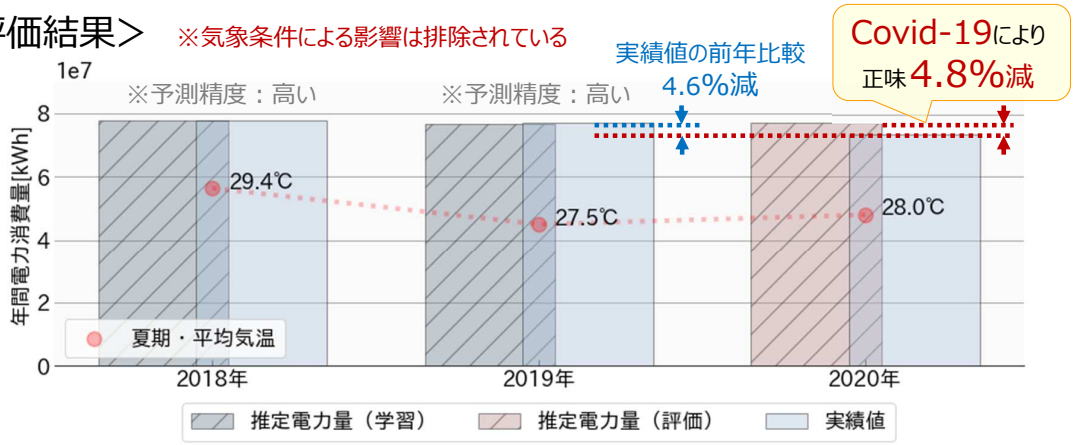
様々な評価に応用可能

- 運用変化の影響度, 効果の持続性の評価
- 機器・システムの性能変化, 不具合検知 など

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

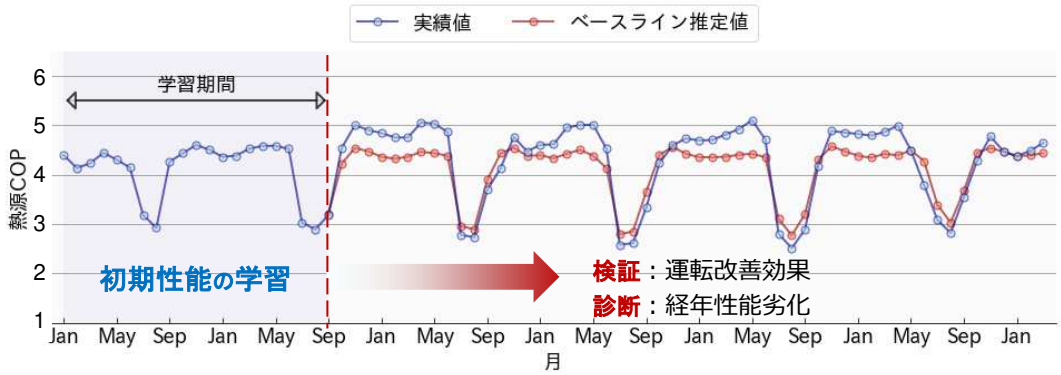
Covid-19影響評価の例（LightBGM-BLモデル）

＜評価結果＞ ※気象条件による影響は排除されている



Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

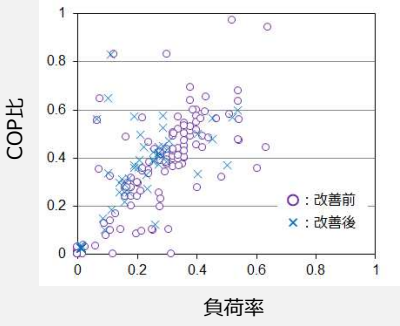
熱源機COP改善の適正評価（LightBGM-BLモデル）

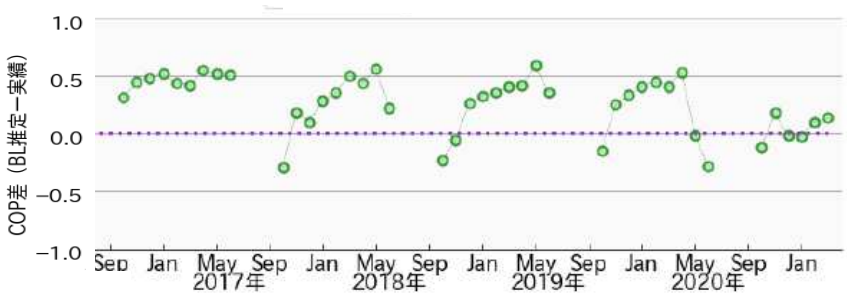


【従来法】

改善効果は 傾向を示すのみ

（他の影響因子を含む 定量評価 ）





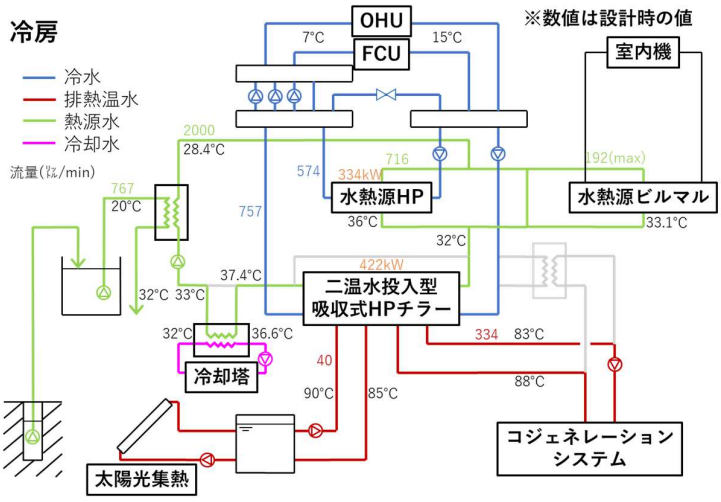
Copyright © 2022 Nagoya University All Rights Reserved.

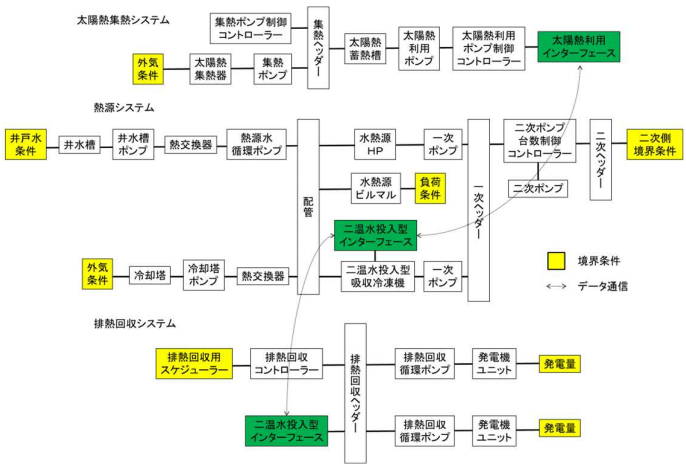
シミュレーションBLモデルを用いたシステム性能評価 41

導入技術要素に対する効果の定量評価

- 井水熱利用、CGS排熱利用、太陽熱利用
- 導入なしシステム（BLエネルギーモデル）をリアリティを持って評価

→ デジタルツイン：実負荷・実気象を計算の境界条件にできるか





システムシミュレーションモデル（LCEMツール）

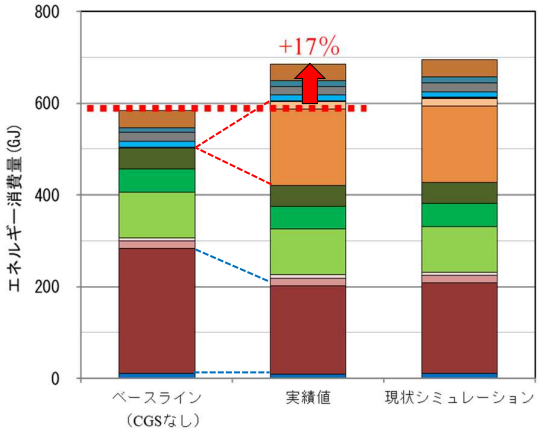
Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

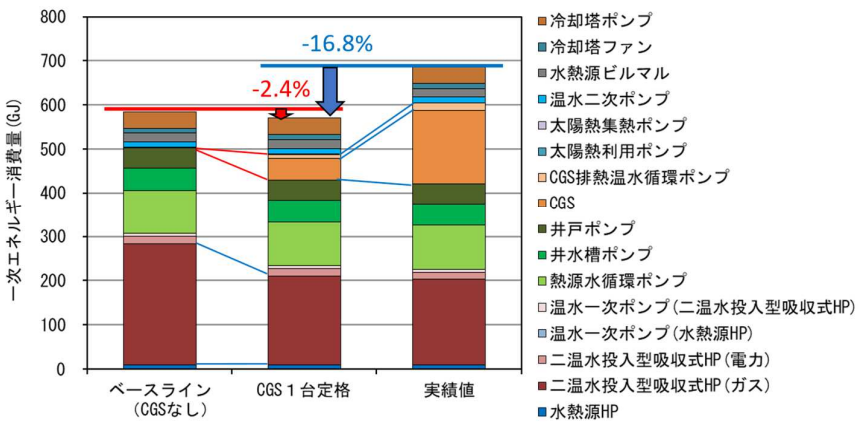
シミュレーションBLモデルを用いたシステム性能評価 42

導入技術要素に対する効果の定量評価

- CGS排熱利用効果の評価例
- 導入なしシステム（BLエネルギーモデル）との比較

→ 実負荷・実気象条件下で理論エネルギー消費vs実績を比較





※CGS2台運転(現状)の排熱利用率低下がシステム性能低下の原因→ 1台運転で向上

i.e. 時刻ごとに適正な台数制御が必要であることを示唆する

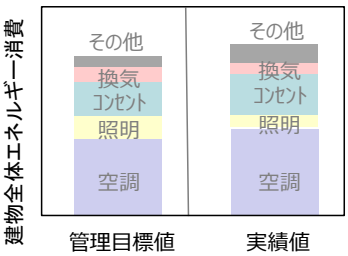
Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

使われる”見える化“とDDBEM

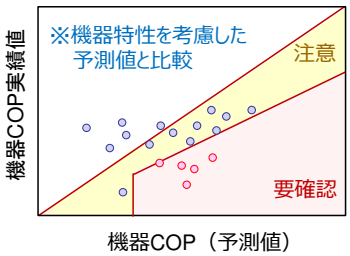
マネジメントサイクルを支えるBEMS・HEMS

使われるBEMS構築

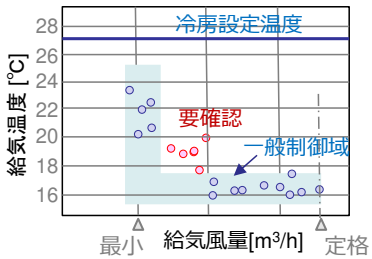
- マネジメント機能の充実
  - 管理目的に応じた KPI モニタリング
  - 建物全体評価(コスト・エネ消費・CO_2排出), ｼｽﾃﾑ/機器COP, WTF/ATFなど
- UD指向のＧUI と諸機能
  - 何を、どう管理・判断すれば良いか 見える化 & アドバイザリー化
- 部分/全体最適 が確認(・制御)できる機能
  - ex. 冷水温度緩和：熱源動力:減, 往還温度差:減？, 水搬送流量：増?



建物エネルギー性能確認チャート



熱源機性能確認チャート

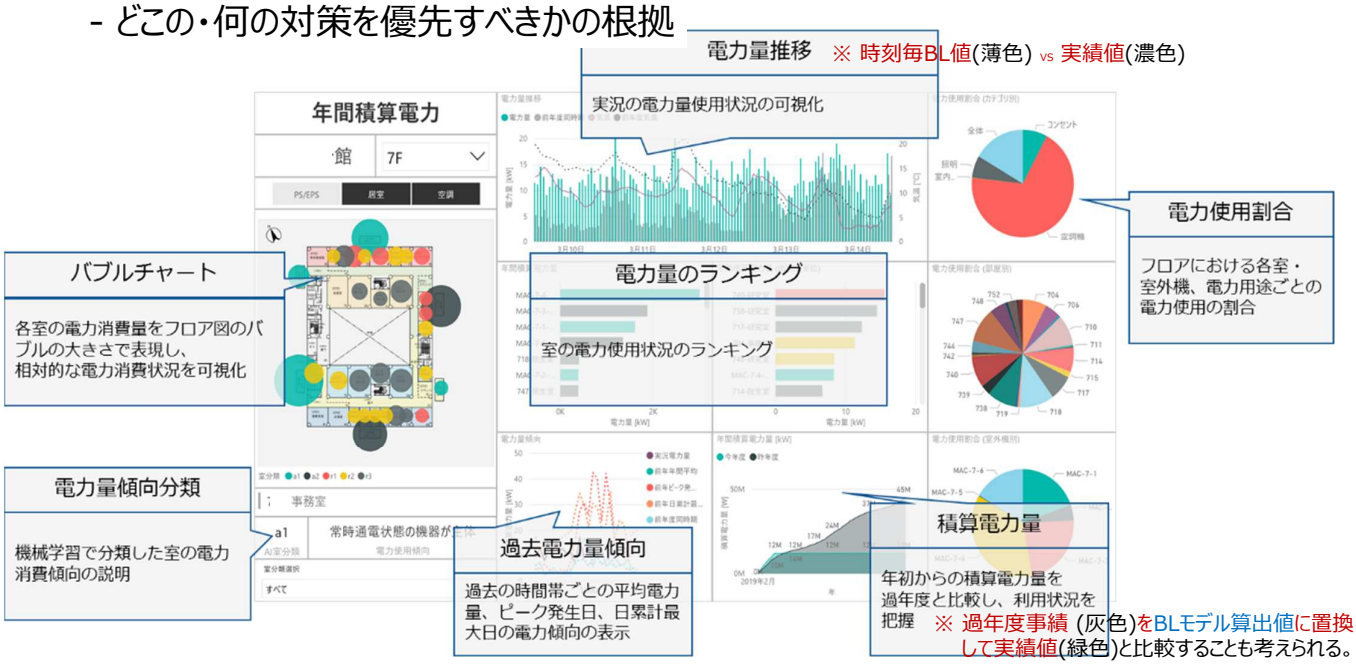


VAV挙動確認チャート

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

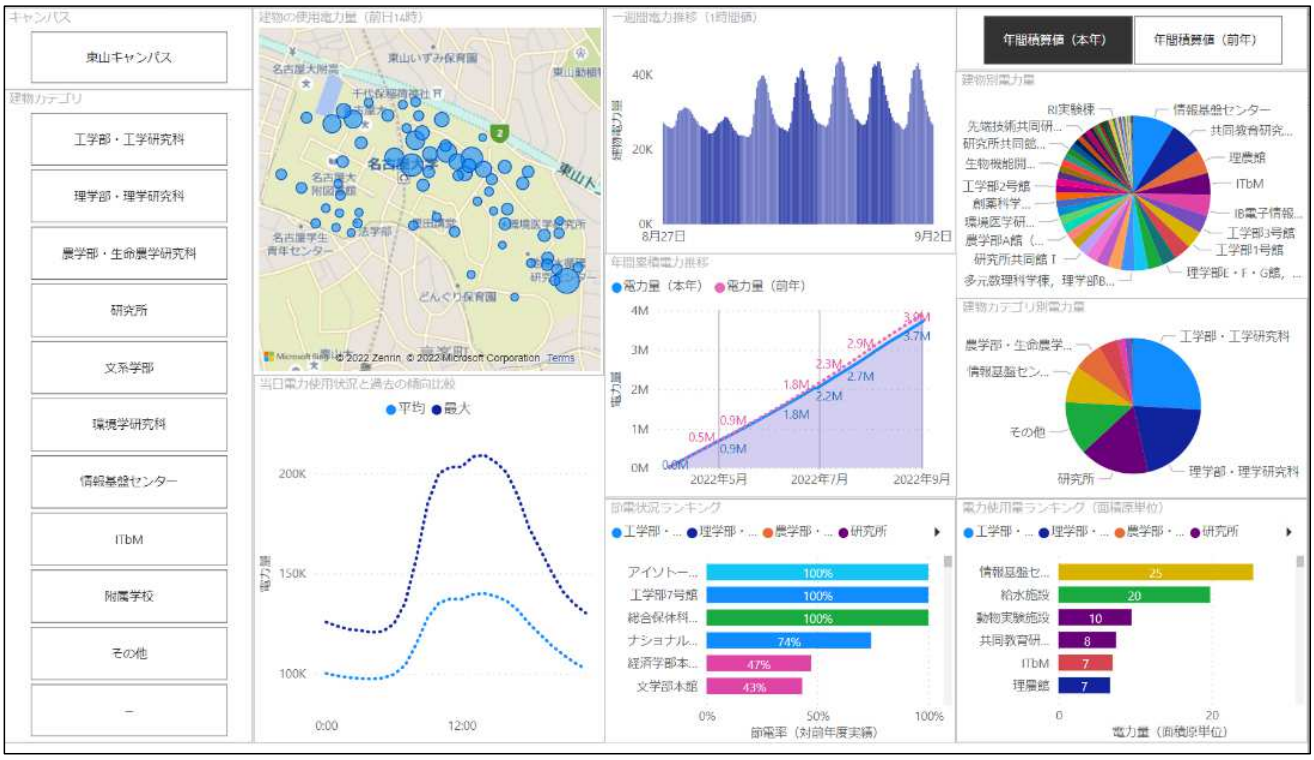
パターン分類・BL推定モデルの適用（建物・フロアレベル）

- ユーザ＆管理者向けのツールとして利用
  - 対策行動のリアルタイム評価、室毎の比較
  - どこの・何の対策を優先すべきかの根拠



Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

パターン分類・BL推定モデルの適用（キャンパス・建物レベル）



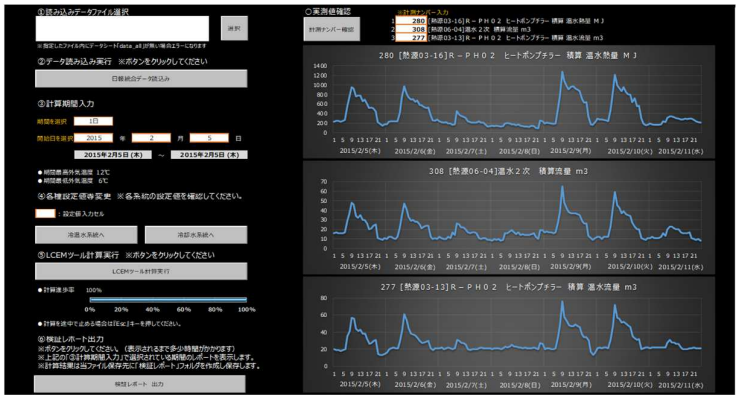
Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

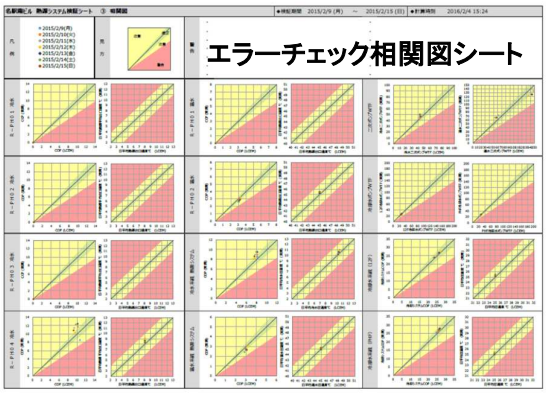
シミュレーション値のリアルタイム“見せる化”

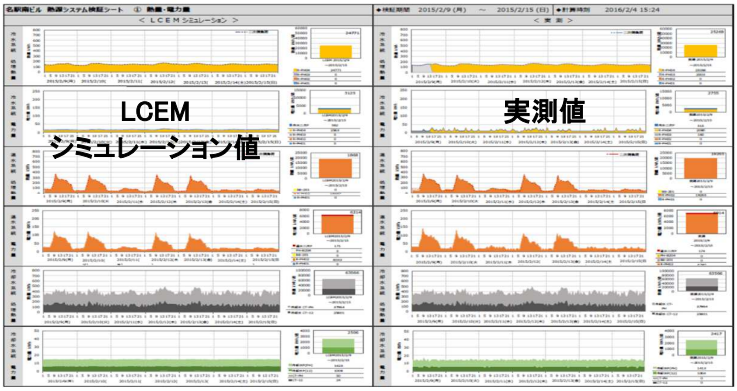
アドバイザリーシステムの構築例

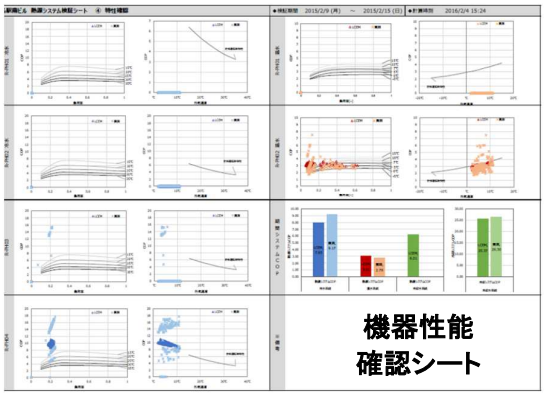
日比野, 丹羽, 田中ら:システムシミュレーションツールを用いた熱源システムの計画・設計・運転管理手法に関する研究, SHASE大会学術講演論文集, 2016

・エラーチェックシートでKPIの警報確認→問題箇所の詳細チェック









CNに向けたデータ駆動型ビル・エネルギーマネジメント

エネルギー起源 CO_2排出量の管理強化

- CO_2排出が重要目標達成指標（中・長期計画策定とPDCA推進）
- ZEB要素技術の高度化（機器・制御技術の向上）
- ZEB要素技術のスキル向上（複雑系・再エネ熱システムへの対応）
- 不具合のない状態での運転（設備の見守り：運用・機器・システム）
- 建物運用の精緻な評価・適正化・最適化（Cx・遠隔EM・AI活用）
- セクターカップリング対応：電気↔熱変換、エネ蓄（VPP・DR）
- リアルタイム対応：プライシング、非化石電源・合成燃料の選択　etc

⇨ 建物・都市のDX推進で **新たな価値・ビジネスモデル・雇用を創出、カーボンニュートラル時代の社会的な課題解決** が必要

業務・研究のリフレーミングと新展開へのアイディアを

Copyright © 2023 Nagoya University All Rights Reserved.

fin

Campus Planning & Environment
Management Office

Nagoya Univ.