

放射冷暖房に関する ホールライフカーボンについて

早稲田大学 創造理工学部 建築学科 助教

新藤 幹



自己紹介

更新日: 15:03



新藤 幹

シンドウ カン (Kan Shindo)

ホーム 研究キーワード 研究分野 経歴 学歴 受賞 論文 MISC 所属学協会 共同研究・競争的資金等の研究課題

メニュー

マイポータル

研究ブログ

資料公開

基本情報

所属 [早稲田大学](#) 創造理工学部 建築学科 助教

学位 博士（工学）(2024年3月 早稲田大学)
修士（工学）(2021年3月 早稲田大学)

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-2612-3450> researchmap会 員ID R000079027

早稲田大学創造理工学部建築学科助教、専門は建築環境学。博士（工学）。特別研究員DC1、デンマーク工科大学客員研究員を経て現職。



研究キーワード 4

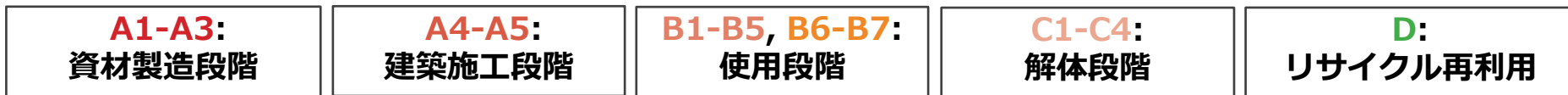
[カーボンニュートラル](#) [ネット・ゼロ](#) [省エネルギー](#) [熱的快適性](#)

Researchmap
<https://researchmap.jp/KanShindo>

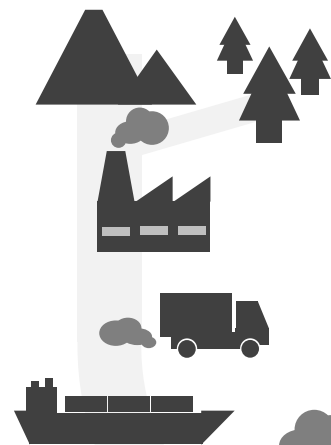
室内温熱環境・空調システムの一つである放射冷暖房システムの研究から派生して、建築物の脱炭素化に関する研究（カーボンニュートラル・ネットゼロ）にも取り組んでいます

ホールライフカーボン評価 (A1-A5, B1-B5, B6-B7, C1-C4, D)

EN15978: 2011, ISO21930:2017



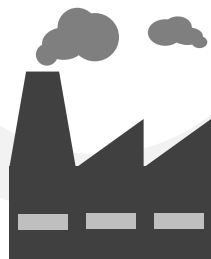
A1
原材料の調達



A2
工場への輸送



A3
製品の製造



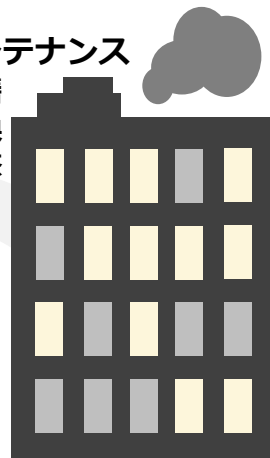
A4
現場への輸送



A5
施工

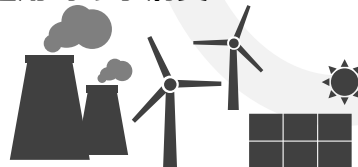


B1-B5
使用
メンテナンス
修繕
交換
改修



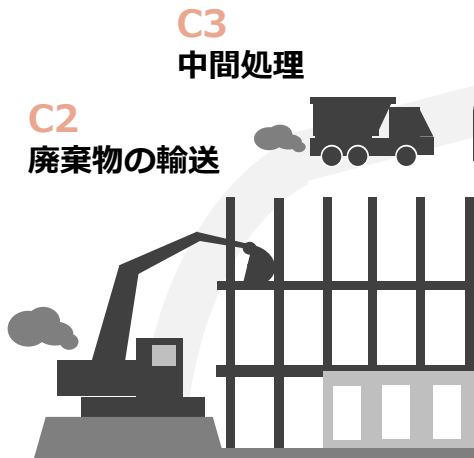
B6-B7

運用時のエネルギー消費撤去・解体
運用時の水消費



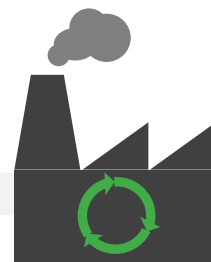
C3
中間処理

C2
廃棄物の輸送



C4
廃棄物の処理

D
再利用
リサイクル
エネルギー回収

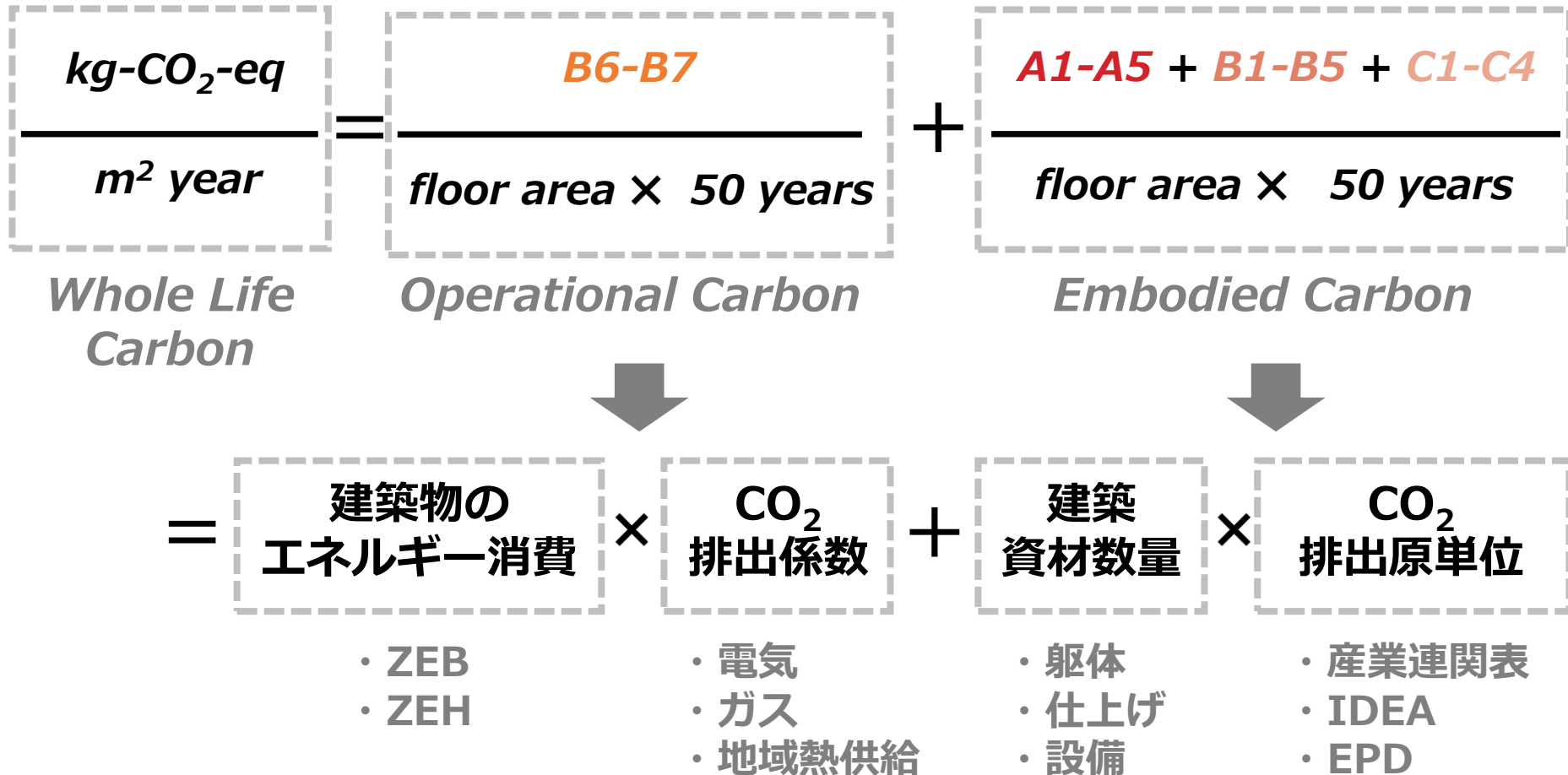


アップフロントカーボン (A1-A5) オペレーショナルカーボン (B6-B7)

エンボディドカーボン (A1-A5, B1-B5, C1-C4) ※ B6-B7 除く

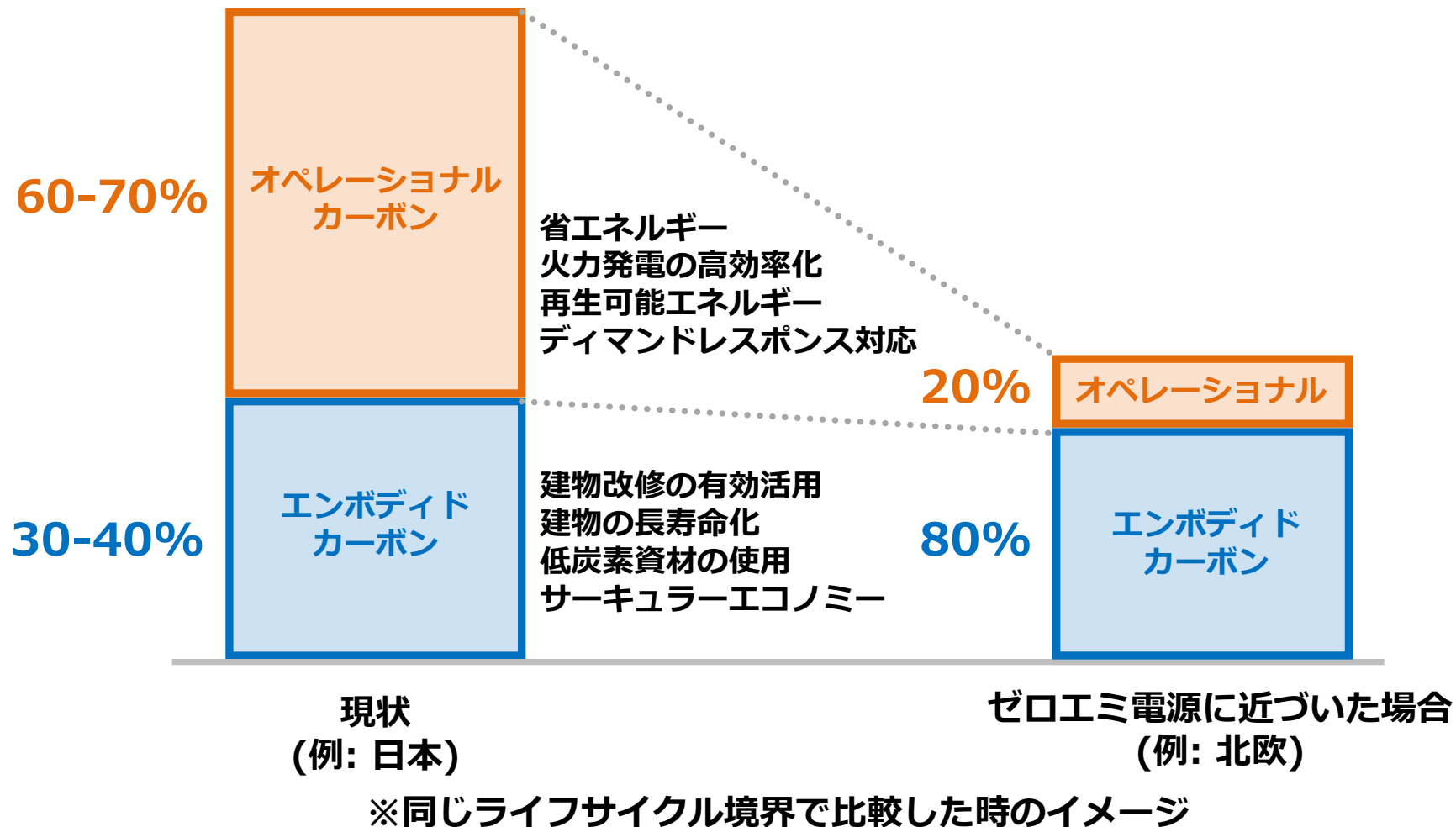
ホールライフカーボン評価方法

※単位・評価年数については国・地域ごとに異なる場合がある。



オペレーショナルカーボン、エンボディドカーボン
双方の増減・バランスを考慮して建築物の設計を行っていく必要がある。

なぜエンボディドカーボンが重要なのか？



将来的にエンボディドカーボンが占める割合の増加が予想
→対策を行う必要がある (まずは計算できるようにする)

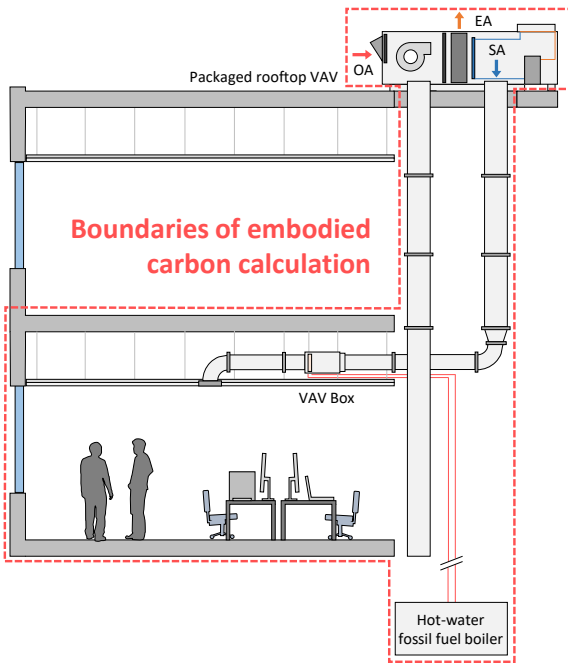
ホールライフカーボン: デンマーク (2022-2023)

デンマーク工科大学 **DTU** との共同研究プロジェクト

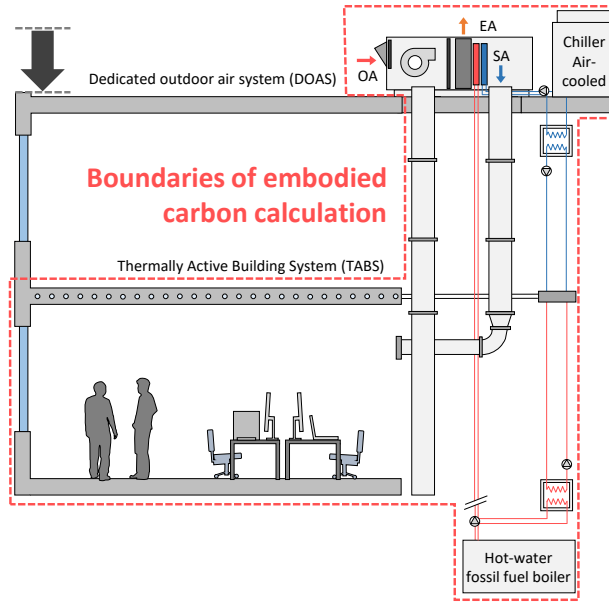
ホール・ライフ・カーボンで冷暖房システムを比較する手法を提案

(1) オペレーショナル・カーボン (ZEB, ZEH) : **B6**

(2) エンボディッド・カーボン (資材由来) : **A1-A3, B4, C3-C4**



対流空調
VAV



放射・輻射冷暖房
TABS

対流空調と放射・輻射冷暖房の比較

Energy and Buildings, 2023年10月掲載

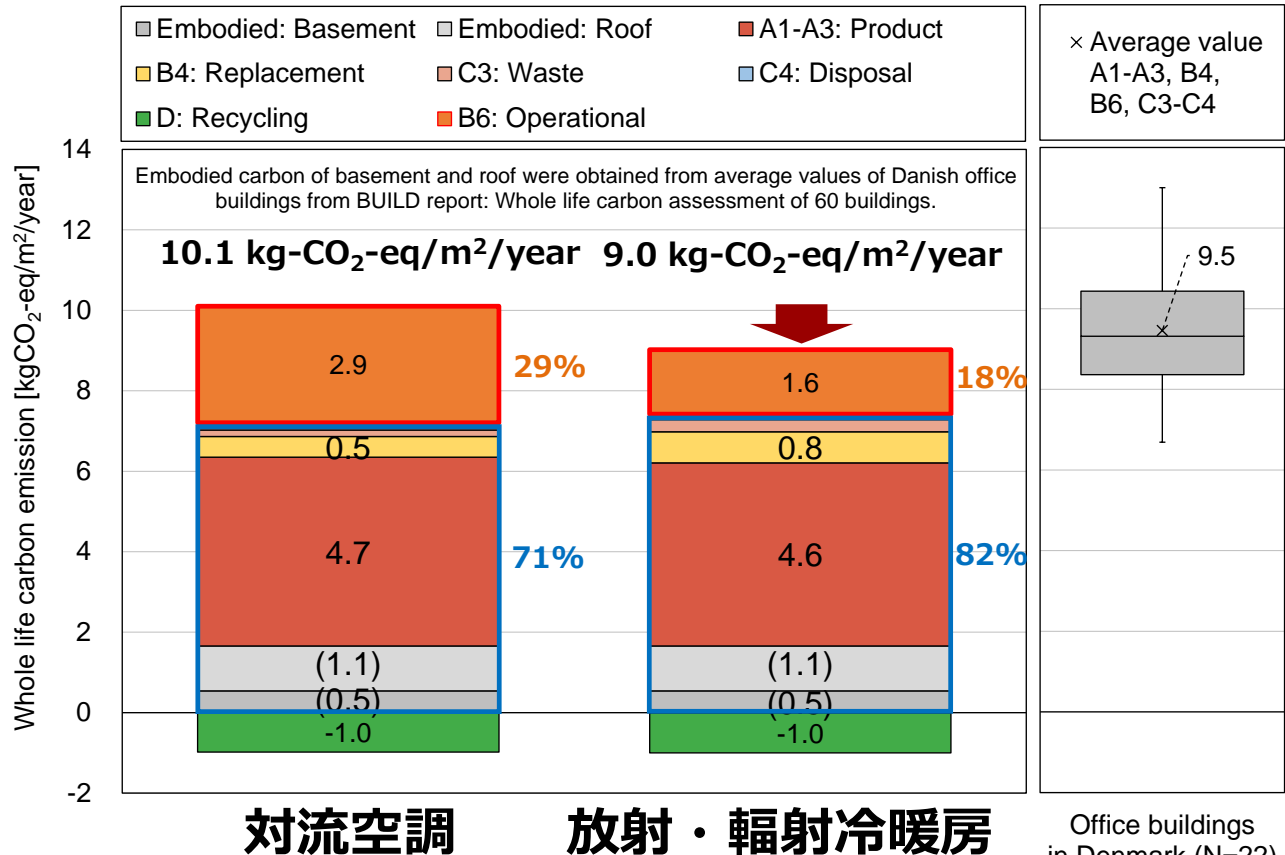
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.1136>



ホールライフカーボン: デンマーク

- 対流空調と比較して輻射冷暖房導入で**空調一次エネルギー消費34%削減**
- 対流空調と比較して輻射冷暖房導入で**ホールライフカーボン11%削減**
- 系統電力の換算係数、LCAの範囲、構法(例: 地震対応): 日本との違い
- A4-A5, B1等が算定に含まれていない

- デンマーク建築規制
BR18に準拠
- 系統電力の排出係数
0.187 kgCO₂-eq/kWh



日本での取組: IBECs ゼロカーボン推進会議 (2022.12~)

https://www.ibecs.or.jp/zero-carbon_building/

推進会議について

推進会議では、親委員会のもとに「ホールライフカーボン基本問題検討ワーキンググループ (WG)」並びに「ツール開発」、「データベース検討」及び「海外情報」の3つのサブワーキンググループ (SWG) を設け、2024年3月までの1年3か月にわたって精力的に検討を重ね、建築物ホールライフカーボン (WLC) 算定ツール (J-CAT) の開発などを行いました。

2024年度からは活動の第Ⅱ期として、J-CATの継続的な改良、データベース構築の支援、海外情報の継続的な収集等に加え、新たなSWGを設けてWLC算定の円滑運用支援についても検討を進めていきます。

<2024年度の体制>



※事務局は IBECs 及び JSBC

☑ 委員名簿

☑ ゼロカーボンビル推進会議報告書 (令和5年3月)

☑ ゼロカーボンビル推進会議報告書 (令和6年3月)

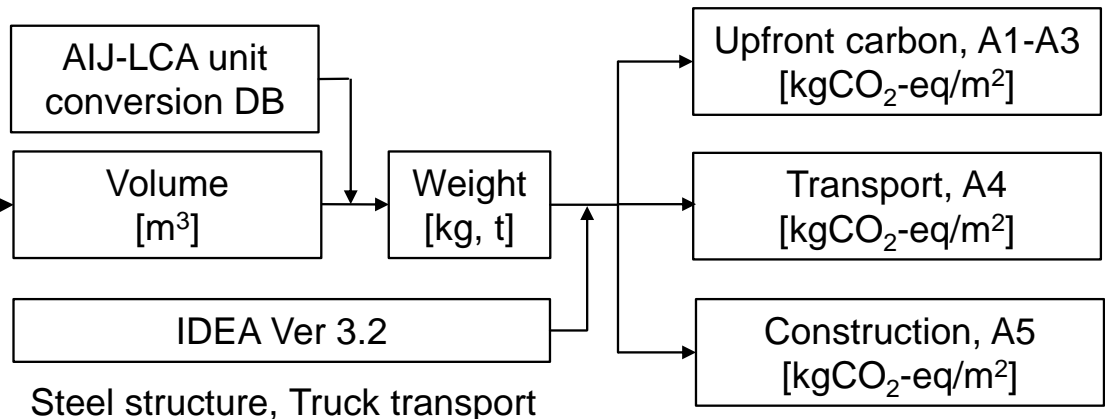
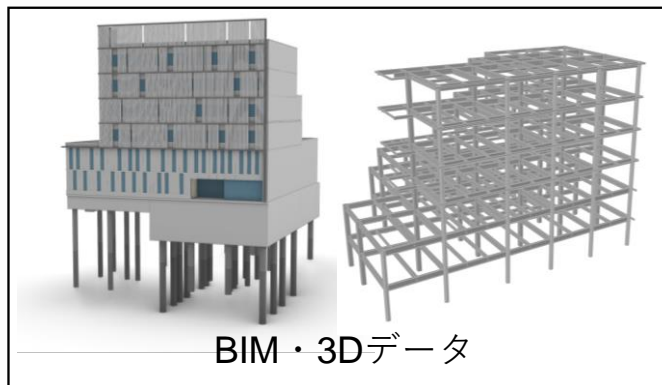
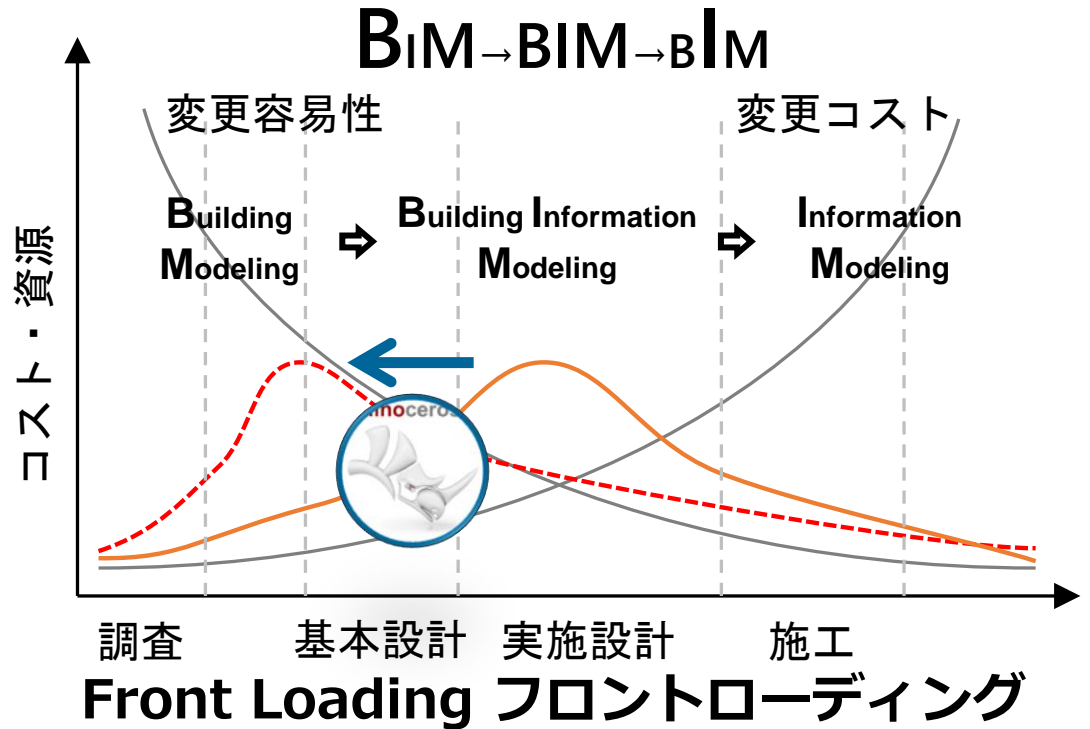


第1回推進会議の様様

J-CATにより、簡易に エンボディドカーボンの計算が可能に

エンボディドカーボンとコンピューテーション技術

エンボディドカーボンの大小は設計初期段階にほぼ決定される
→コンピューテーション技術の活用



エンボディドカーボン（アップフロント）の計算手順

J-CATでホールライフカーボン算定: BIM・コンピューテーション技術と連携



<https://www.waseda.jp/top/news/49172>

分類は
IDEA Ver3用
建物のLCA評価
ツール

1. 直接仮設

2. 土木・地業

3. 躯体

4. 外部仕上げ

5. 内部仕上げ

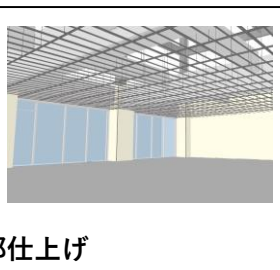
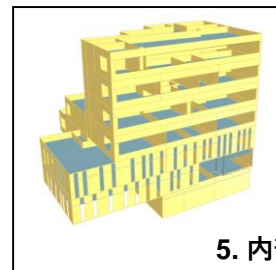
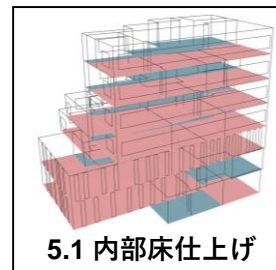
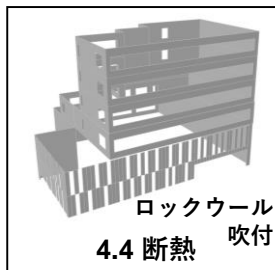
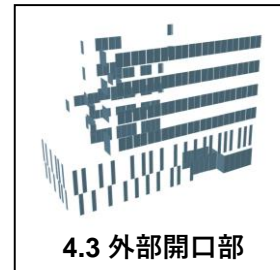
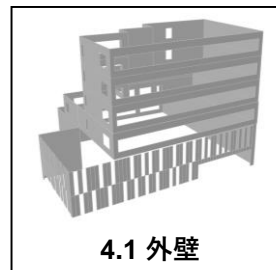
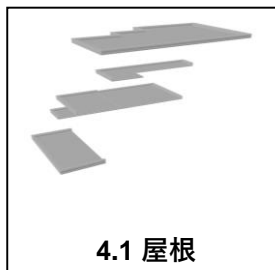
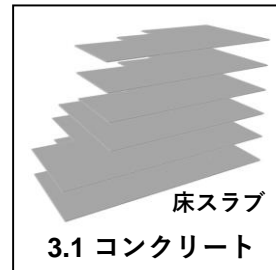
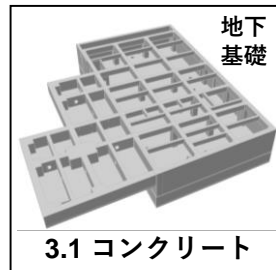
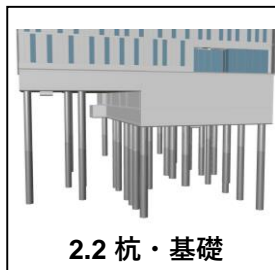
6. その他

7. 設備 (電気)

8. 設備 (空調)

9. 設備 (衛生)

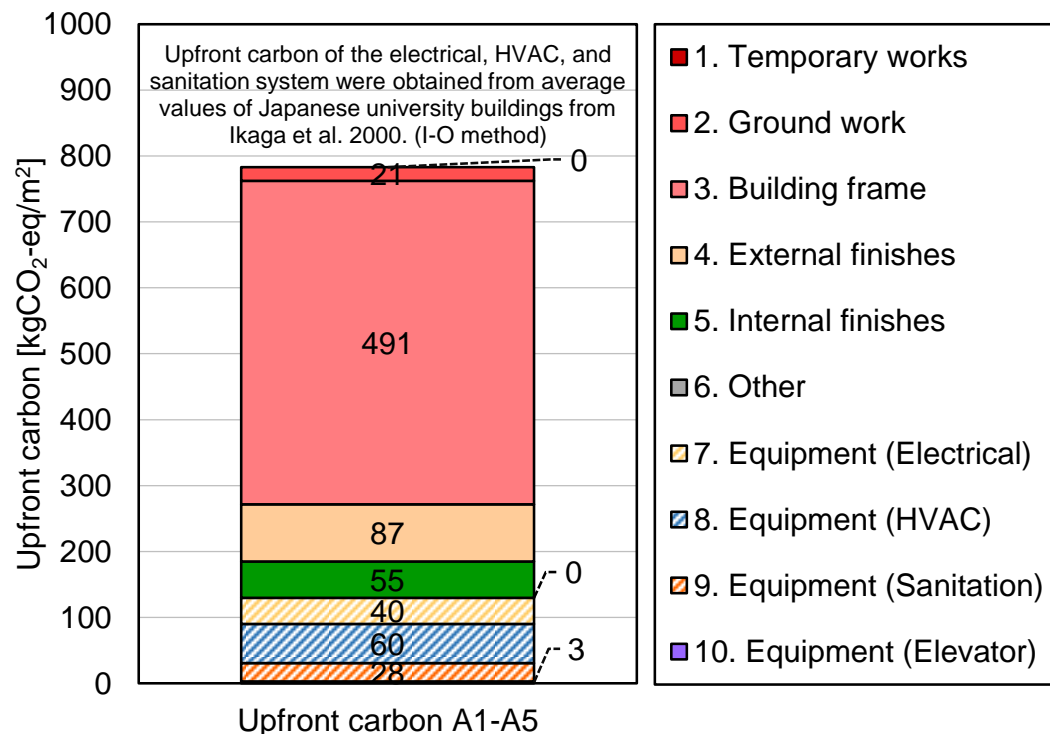
10. 設備 (昇降)



J-CATでホールライフカーボン算定: BIM・コンピューテーション技術と連携

- 基本的な分類方法は揃えて、異なる原単位データベースで比較、同じ資材数量
- アップフロントカーボンが783 kgCO₂-eq/m² (J-CAT: 890 kgCO₂-eq/m²)
- 左図の空調衛生電気部分の値は先行研究事例の大学施設の平均値を使用

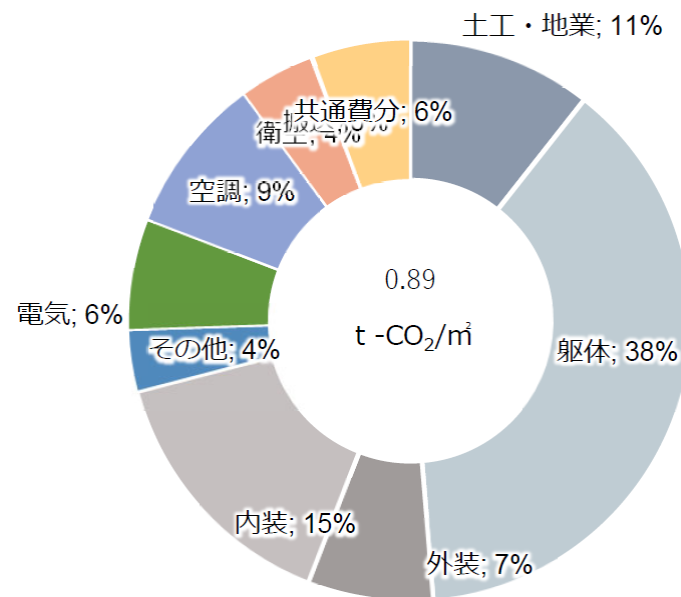
IDEAのデータベースを用いて計算



アップフロントカーボン (資材製造・施工A1-A5)

J-CATで試算

(建築時GHG排出量・標準算定法)



計算過程の違い等を理解した上で、積極的に活用していくべき

3D都市モデルを活用した場合

3D都市モデルを活用した2050年カーボンニュートラル街区実現可能性の検討
都心部の建築壁面を活用した太陽光発電によるCO2排出削減量の推計

対象建物情報

PLATEAU

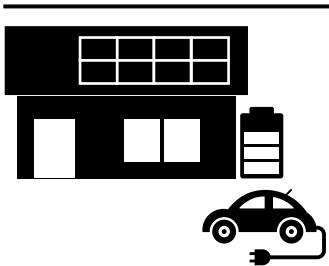
CityGML→3Dモデル

変換プラグインの開発

PVポテンシャルの算出

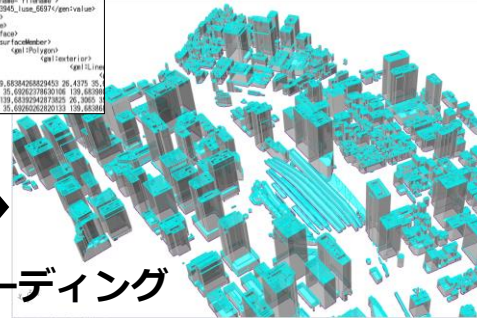
CO₂排出削減量の推計

住宅



```
<!-- Example CityGML snippet -->  
<gml:pos srsName="EPSG:31433" id="P1" x="1000000.0000000000" y="500000.0000000000" z="100.00000000000000" />  
<gml:pos srsName="EPSG:31433" id="P2" x="1000000.0000000000" y="500000.0000000000" z="100.00000000000000" />  
<gml:pos srsName="EPSG:31433" id="P3" x="1000000.0000000000" y="500000.0000000000" z="100.00000000000000" />  
<gml:pos srsName="EPSG:31433" id="P4" x="1000000.0000000000" y="500000.0000000000" z="100.00000000000000" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S1" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S2" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S3" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S4" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S5" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S6" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S7" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S8" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S9" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S10" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S11" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S12" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S13" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S14" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S15" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S16" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S17" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S18" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S19" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S20" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S21" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S22" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S23" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S24" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S25" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S26" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S27" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S28" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S29" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S30" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S31" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S32" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S33" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S34" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S35" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S36" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S37" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S38" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S39" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S40" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S41" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S42" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S43" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S44" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S45" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S46" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S47" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S48" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S49" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S50" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S51" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S52" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S53" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S54" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S55" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S56" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S57" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S58" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S59" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S60" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S61" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S62" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S63" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S64" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S65" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S66" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S67" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S68" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S69" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S70" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S71" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S72" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S73" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S74" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S75" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S76" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S77" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S78" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S79" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S80" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S81" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S82" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S83" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S84" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S85" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S86" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S87" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S88" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S89" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S90" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S91" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S92" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S93" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S94" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S95" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S96" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S97" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S98" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S99" />  
<gml:MultiSurface srsName="EPSG:31433" id="S100" />
```

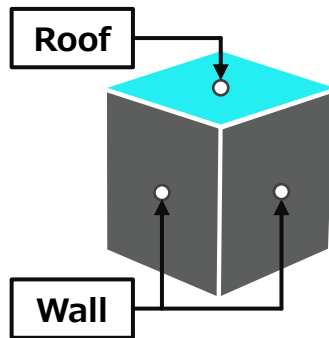
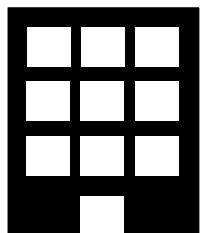
CityGML (文字列)



変換
C#でコーディング

文字列を変換→3Dモデル+属性情報

事務所ビル

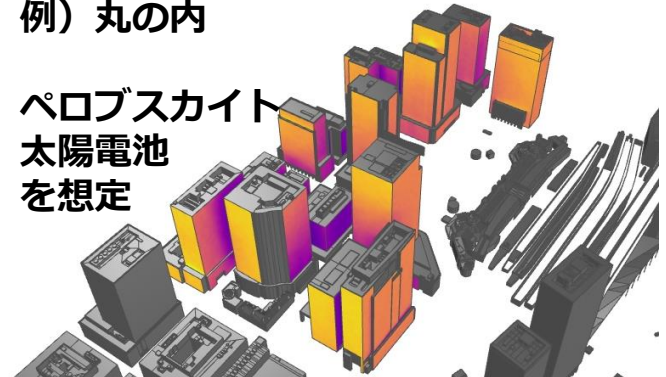


属性情報

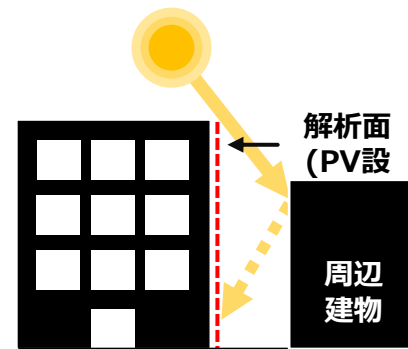
- ・ 地区情報
- ・ 住所
- ・ 建物高さ
- ・ ...

例) 丸の内

ペロブスカイト
太陽電池
を想定



周辺建物からの反射日射や影を考慮



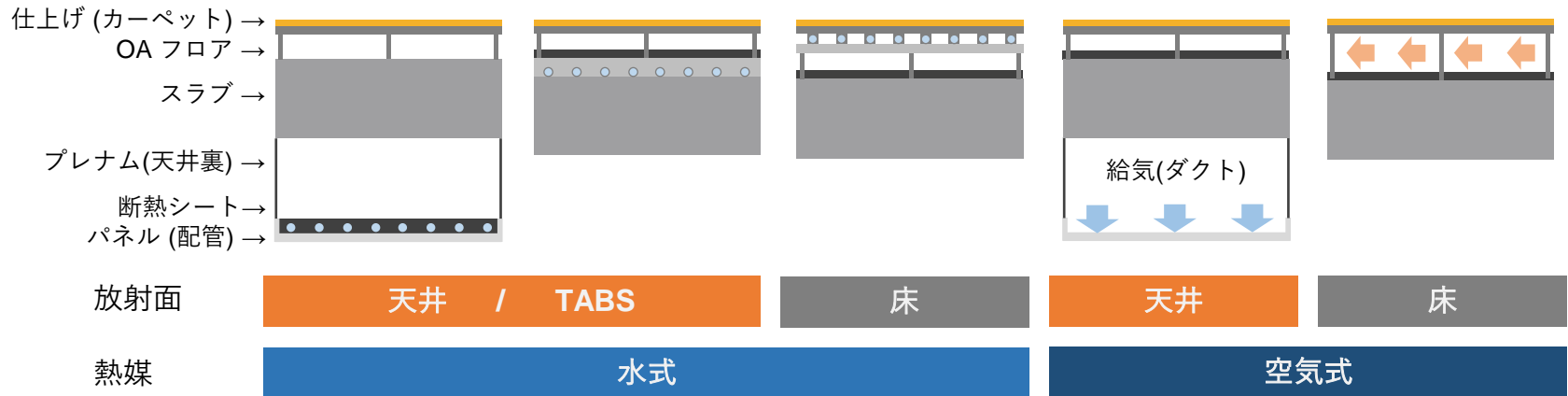
放射冷暖房に関する ホールライフカーボンについて

早稲田大学 創造理工学部 建築学科 助教

新藤 幹



放射冷暖房システムに関するヒアリング調査 (2021-2022)



Japan Architectural Review
Open Access

Architectural
Institute of Japan



Original Paper

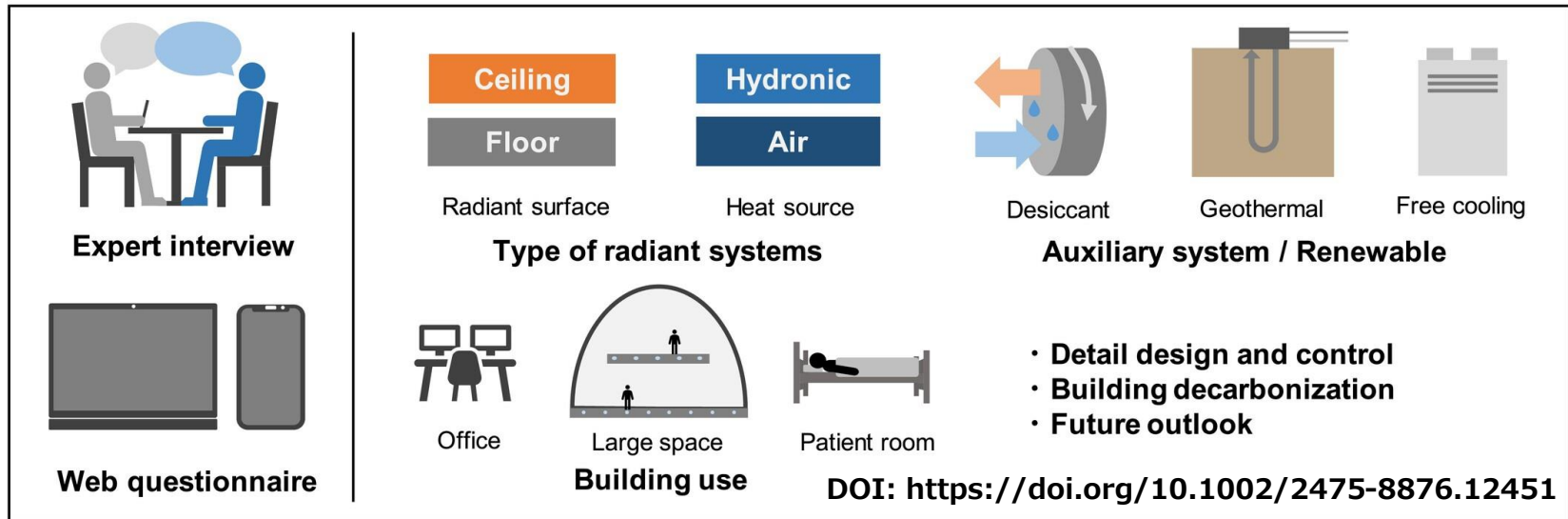
Design and control of radiant heating and cooling systems in Japan: Results from expert interviews

Kan Shindo,¹  Ken Ikai,² Jun Shinoda,³  Ryota Matsumura¹ and Shin-ichi Tanabe¹ 

¹Department of Architecture, Waseda University, Tokyo, Japan; ²Takenaka Corporation, Osaka, Japan; ³International Centre for Indoor Environment and Energy, Department of Environmental and Resource Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark

2024年6月に採録, DOI: <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12451>

放射冷暖房システムに関するヒアリング調査 (2021-2022)



2021~2022年にかけて、日本国内の放射冷暖房システムの設計経験がある、設備設計者や放射冷暖房メーカー、合計16社56名に対してヒアリング調査を実施。

- 全体の79%が今後も放射冷暖房の導入が進んでいくと回答
- 全体の54%が2010年代と比較して、現在では放射冷暖房の設計が容易と回答
- 「**建築物の脱炭素化が放射冷暖房の導入に影響するのか?**」という問いに対して全体の53%が「影響がある」と回答。

多くの建築設備設計者が放射冷暖房システムはオペレーショナルカーボン削減と室内の熱的快適性を高いレベルで両立できると期待していたことを明らかにしている。

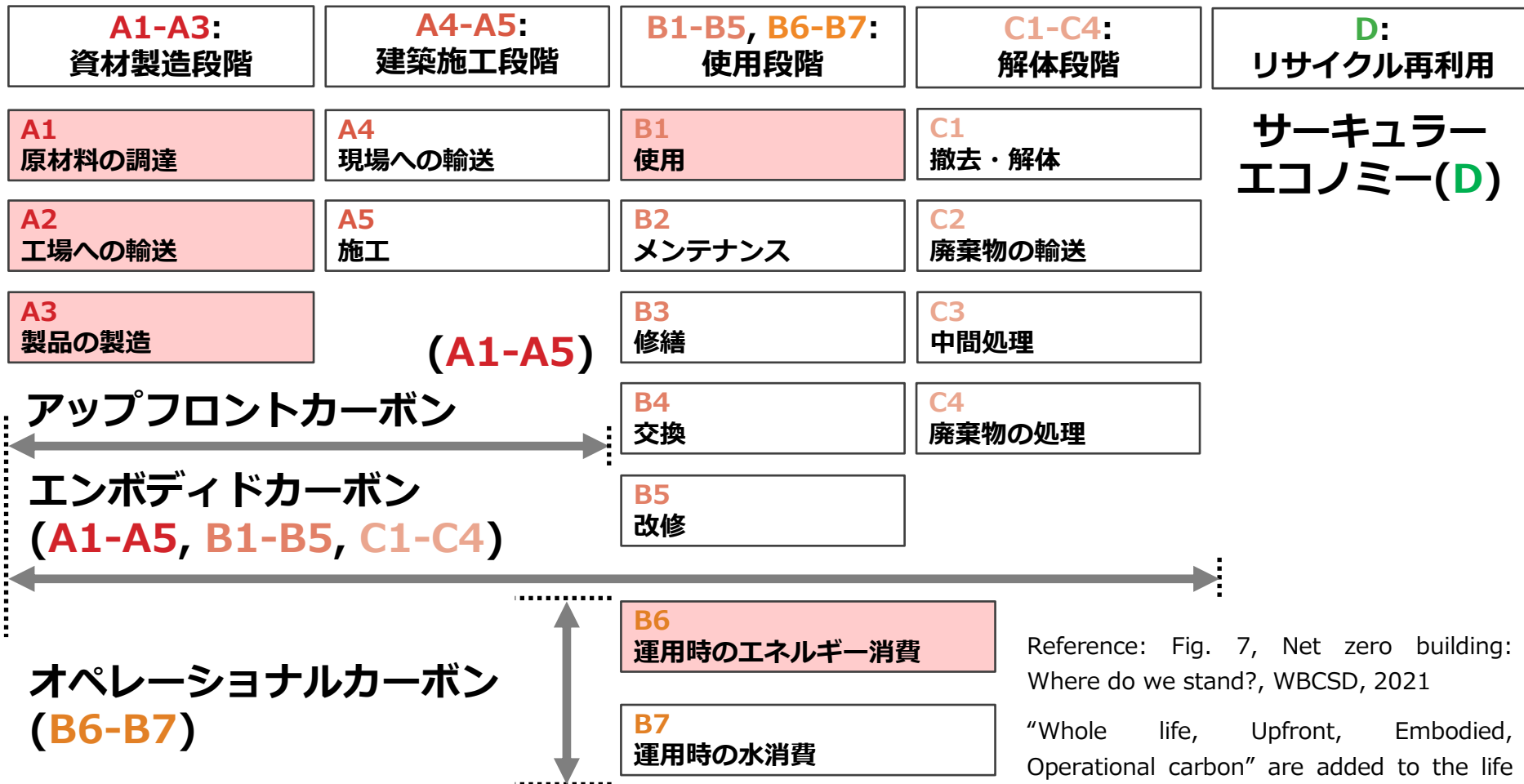
一方で、ホールライフカーボンの観点では有益か否かについて意見が分かれた。

放射冷暖房をホールライフカーボンの観点で検証

放射冷暖房に関するホールライフカーボンについて

ホールライフカーボン (A1-A5, B1-B5, B6-B7, C1-C4, D)

ISO21930, 2017



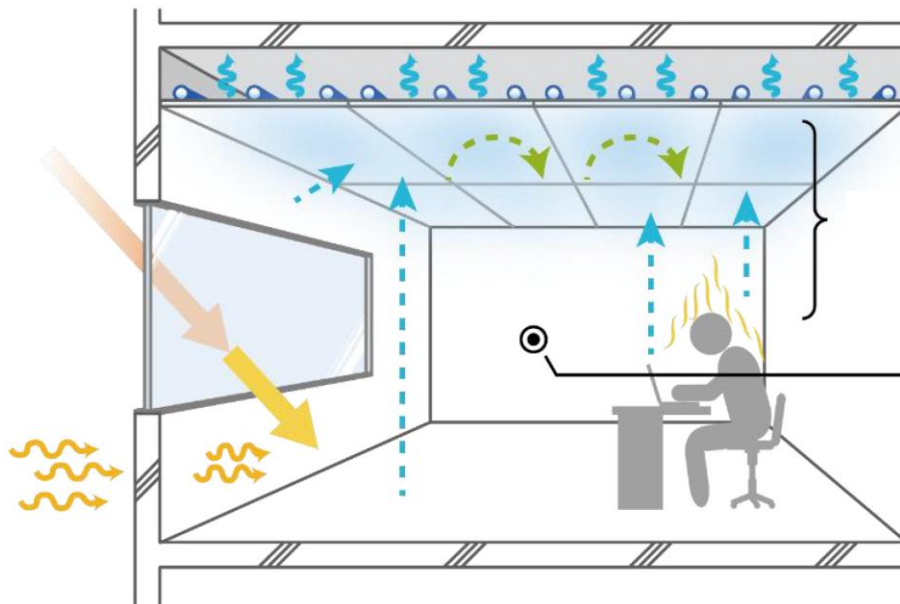
放射冷暖房: 各ライフサイクルの内、A1-A3, B1, B6 に注目

放射冷暖房システム: A1-A3 アップフロントカーボン

- 天井放射パネルの場合

→他の材料と比べて、アルミパネルは軽量である一方で単位重さ当たりの排出が他の材料と比べて大きいいため、何かしらの対策を行う、または他のライフサイクルも含めた総合的な評価が必要。

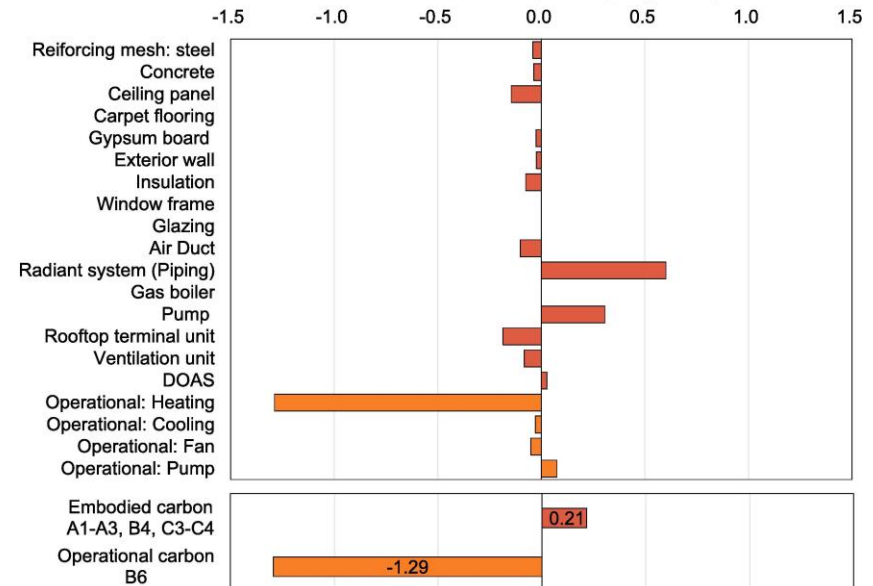
- 対流式と比べた場合、ダクト量の削減は期待
- TABSの場合、階高を低くすることが出来るため、副次的にアップフロントカーボン削減に貢献ができる。



早稲田大学レポジトリ <http://hdl.handle.net/2065/00081085>

VAVとTABSの比較

Difference in whole life carbon (A1-A3, B4, B6, C3-C4) of TABS compared to that of all-air system [kgCO₂-eq/m²/year]



Energy and Buildings, 2023年10月掲載

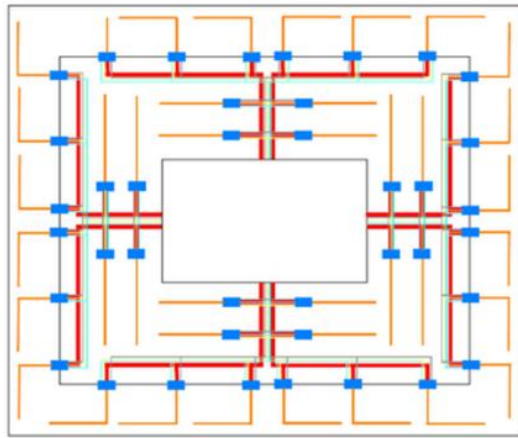
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113668> 17

放射冷暖房システム: B1 冷媒リーク量が少ない

(海外試算ケーススタディ: 米国シカゴ)

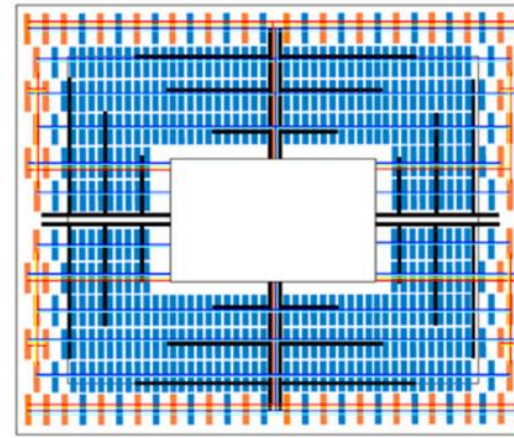
<https://doi.org/10.3390/en18020388>

Evaluating the Environmental Impact of Heat Pump Systems: An Integrated Approach to Sustainable Building Operations



建物平面: パッケージ式

B1 192,321 kgCO₂-eq/50年



建物平面: 放射冷暖房式

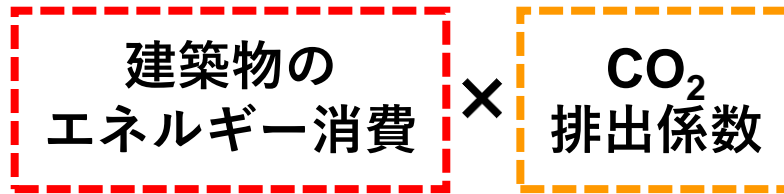
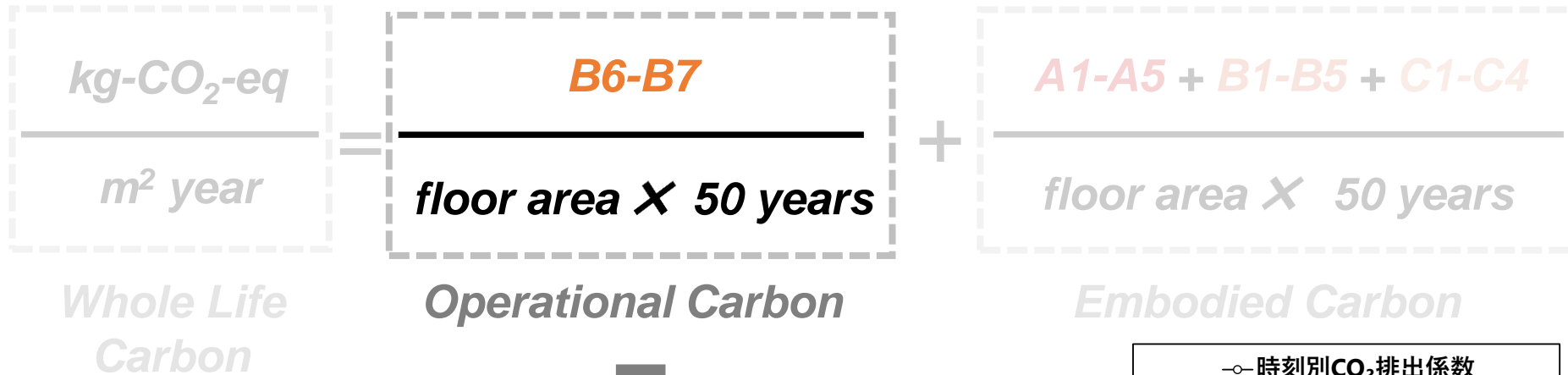
B1 37,198 kgCO₂-eq/50年

※冷媒種類に依る、基準階床面積: 2,100 m²

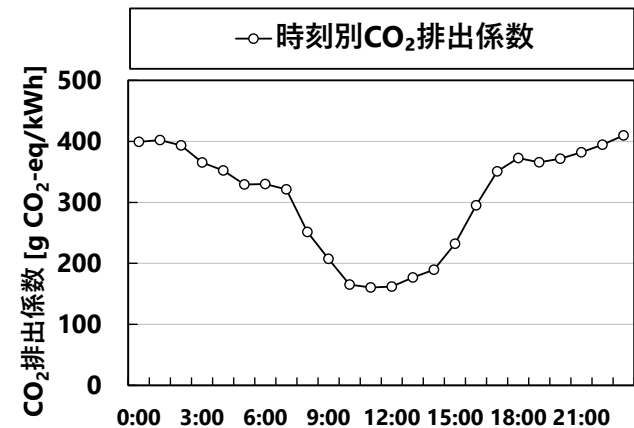
水搬送+冷媒管長さを短くするほど、冷媒GWPの削減に寄与
→放射冷暖房システムのメリット

放射冷暖房システム: B6 省エネ・動的CO₂排出係数

※単位・評価年数については国・地域ごとに異なる場合がある。



- ・ 電気
- ・ ガス
- ・ 地域熱供給



火力/再エネ/その他の電源構成によって、時刻別に排出価値が変化

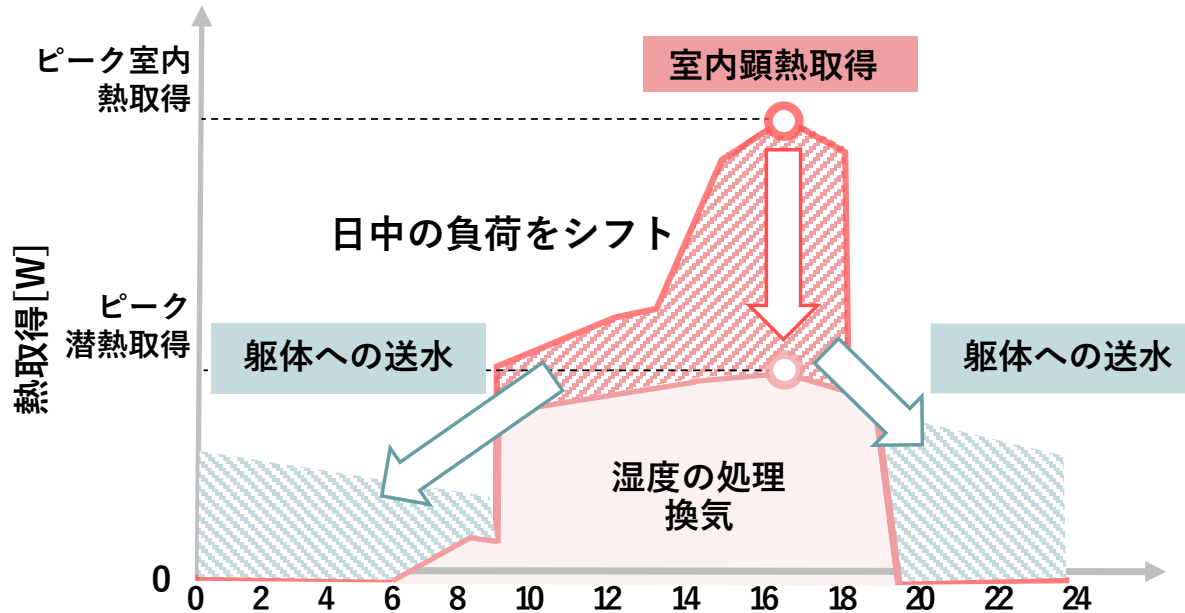
放射冷暖房のメリット:

- ・ 空気搬送(ファン)と比べて水搬送動力(ポンプ)の方が省エネルギー
- ・ 高温冷水(14-16℃)、低温温水(30-34℃)を使用可能→熱源を高効率運用
- ・ 潜顕熱分離空調の実現

躯体蓄熱放射冷暖房 (TABs)

- ・ 躯体に埋設された配管により、躯体に直接蓄熱
- ・ 配管への送水により躯体を加熱・冷却するため、送水と時間差で室内負荷が処理

負荷処理の概念図



例えば、執務時間外に冷熱・温熱を貯めて時間差で日中の熱負荷を処理

負荷の平準化により省エネルギー (蓄熱でDR対応も可能)

国内外でのTABS事例

新藤, 晝間, 動的CO2排出係数に基づく躯体蓄熱放射冷暖房の運用手法の検討 (第1報) (第2報), 空気調和・衛生工学会 大会学術講演論文集, 2024年9月

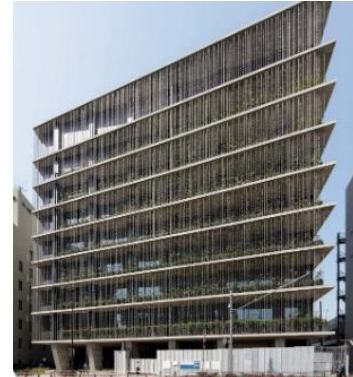
– 日本での事例



Tビル⁸⁻⁹, 2006年
送水: 日中、夜間



Tビル¹⁰, 2016年
送水: 早朝~夜間



Cビル¹¹⁻¹³, 2015年
送水: 日中のみ



Mビル¹⁴, 2020年
冷房: 日中

– 海外での事例



アメリカ¹⁵, 2013年
送水: 夜間



ドイツ¹⁶, 2002年
送水: 夜間



ベルギー¹⁶, 2009年
送水: 24時間



ベルギー¹⁶, 2008年
送水: 24時間

**事例毎に異なる送水条件
→TABS運用手法検討の余地**

TABSの送水条件の検討→DRにも蓄熱で対応できる可能性あり

TABSのガイドライン, ISO11855-4, Simplified sizing by diagrams

→躯体の蓄熱を活用することで、1日を通して同じ熱量を投入出来れば
送水時間・送水温度・送水時間帯を変更することが理論上可能

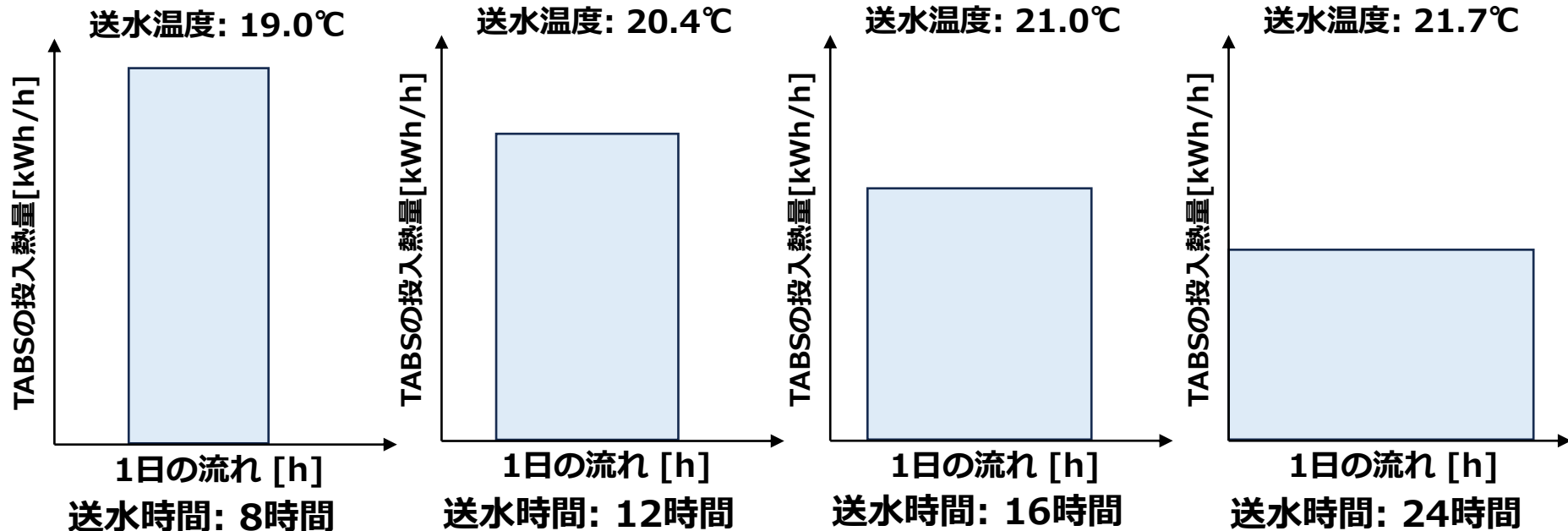
$$\theta_{Water,In}^{Setp} = \theta_{Slab}^{Av} - \left(\frac{E_{Day} \cdot 1000}{h} \right) (R_{int} + R_t)$$

TABS
送水温度

スラブ
平均温度

1日の熱取得
/送水時間

スラブ周りの
熱抵抗



※送水温度、送水時間は変わっても、1日当たりの投入熱量[kWh/day]は同じ値に設定 (イメージ図)

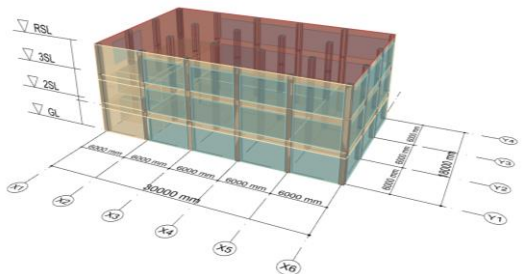
背景

- ・ 建築分野の脱炭素化を推し進めていく必要がある
- ・ 動的CO₂排出係数の適用によるオペレーショナルカーボンの更なる削減
- ・ TABSの送水条件の検討、ディマンドレスポンスにTABS(蓄熱)で対応

目的

動的CO₂排出係数に基づく躯体蓄熱放射冷暖房 (TABS) 運用手法の検討

手法



ZEBガイドライン
小規模事務所

構造：鉄筋コンクリート造
階数：地上3階建て
建築面積：564m²
延面積：1,706m²



WEBPRO
(パッケージ)



EnergyPlus
対流空調
VAVシステム
放射空調
TABS+DOAS

年間一次エネルギー消費量
[MJ/m² year]

対流空調と比較

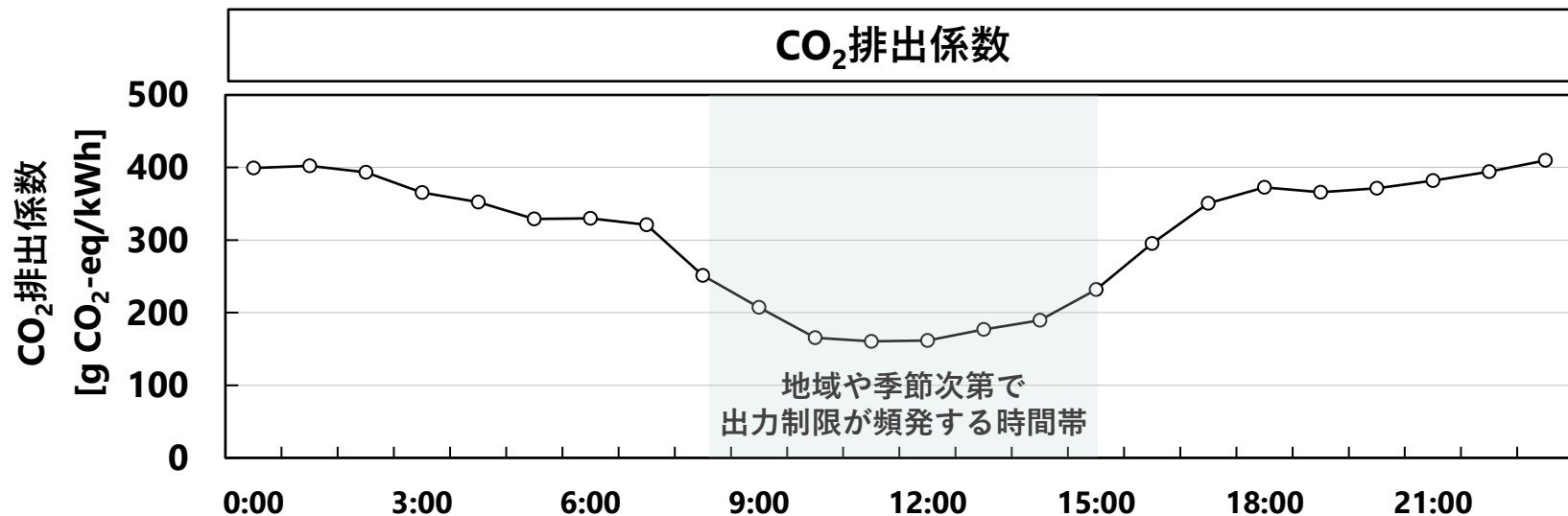
年間一次エネルギー消費量
[MJ/m² year]

年間CO₂排出量
[kgCO₂-eq/m² year]

室内作用温度 [°C]

放射冷暖房能力 [W/m²]

※年間一次エネルギー消費量: 空調(冷暖房熱源機器、ファン、ポンプ)、照明、機器



(例)

動的CO₂排出係数

CO₂排出係数 低

在室時間帯

在室時間

デマンド
レスポンス

上げDR

下げDR

熱源COP(冷房)

高効率

高効率

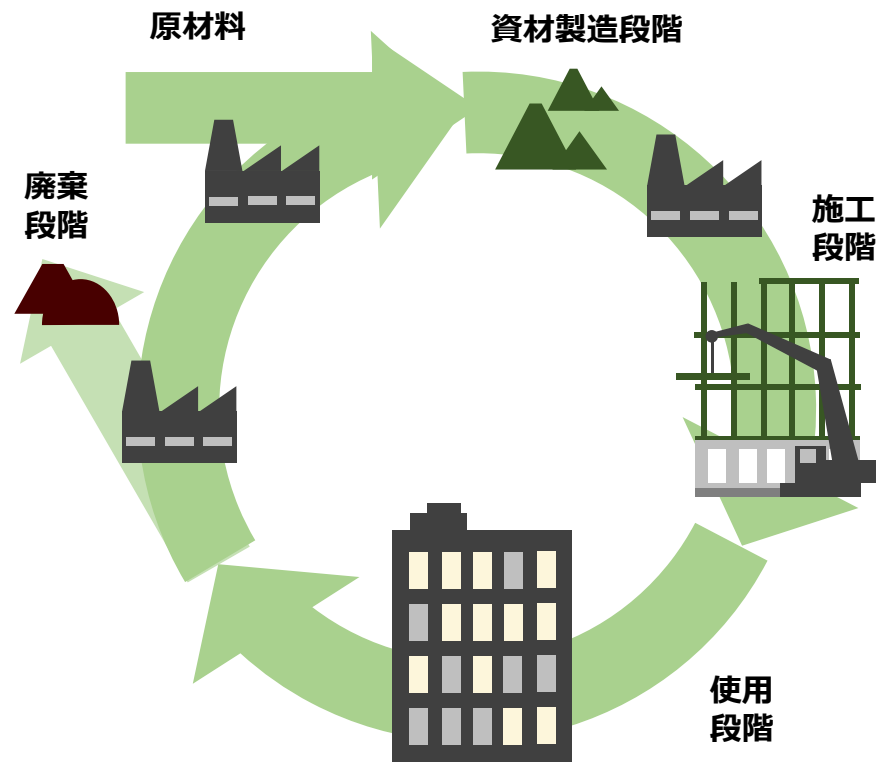
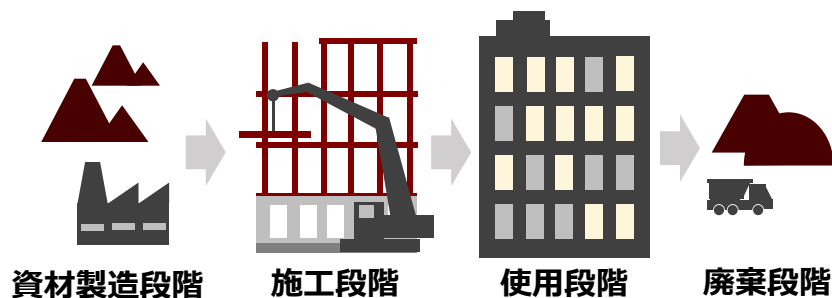
熱源COP(暖房)

※熱源: 空冷HPチラーをはじめとする
COPが外気温で変動する場合

高効率

運転時間帯をシフトできるTABBSの運用を最適化して省CO₂

今後の展望



リニアエコノミー(線型経済)

サーキュラーエコノミー(循環経済)

※参照: 環境省「環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書」第2節 循環経済への移行

資材レベルでのサーキュラーエコノミーの実現に加えて、
建築・都市をどのように更新(建替え・改修)していくか？

新築に加えて、改修時に放射冷暖房を導入するメリット・仕組みづくり？