

# 海外におけるホールライフカーボン・ 放射・輻射冷暖房システムの最新動向

早稲田大学大学院 建築学専攻 特別研究員DC1  
新藤 幹



# はじめに

早稲田大学創造理工学部建築学科田辺新一研究室 HP  
<https://www.tanabe.arch.waseda.ac.jp/>



## 新藤 幹 Kan Shindo

早稲田大学大学院 建築学専攻 博士後期課程（2024年3月現在）

特別研究員DC1

デンマーク工科大学 ICIEEに留学（2022-2023）

建築物の脱炭素化、放射（輻射）冷暖房システム、建築環境設備のコンピューテーション技術に関する研究を行ってきた。

# 建築物の脱炭素化

気候変動への対応、化石燃料依存からの脱却のため  
建築物の脱炭素化 Building Decarbonizationが急務であり、  
関連する分野の知見が求められる

・ G7 気候・エネルギー・環境大臣会合 (2023.4 札幌) 以下、抜粋

[https://www.env.go.jp/earth/g7/2023\\_sapporo\\_emm/](https://www.env.go.jp/earth/g7/2023_sapporo_emm/)

## 産業・運輸・建築部門の脱炭素化

82. 建築物: 我々は、気候変動への対応において ライフサイクルで建物を脱炭素化 することの重要性に留意し、気温上昇を 1.5°C に抑えることを射程に入れ続けるために、建物のライフサイクル全体の排出量を削減する目標を推進することを推奨 する。我々は、気候変動に適応した建築設計の改善、建築物の省エネルギー性能の向上、支援措置、規制、国際協力の必要性を強調し、ゼロ・エミッションに近い、気候変動に強い建築物の新築・改修が、2050 年のネット・ゼロ目標達成への道筋となるようにする。省エネルギー性能の改善、燃料転換、電化、再生可能エネルギーによる冷暖房サービスの提供、持続可能な消費者の選択、建物のエネルギーマネジメントの柔軟性向上のためのデジタル化推進など、様々なアクションを実施する。我々は、ゼロ・カーボン対応／ゼロ・エミッションの新建築物を、理想的には 2030 年又はそれ以前に実現することを促進していく。我々は、新たな化石燃料による熱システムのフェーズアウトと、ヒートポンプを含むよりクリーンな技術への移行を加速させることを目指す。また、我々は、ライフサイクルを考慮した建物設計や、建物の改修・建設における循環性の考慮 によって、木材を含む持続可能な低炭素材料や最終用途の機器の使用を向上させることや、従来型材料の生産を脱炭素化することが重要であると認識する。

# サプライチェーン排出量 = Scope1 + Scope2 + Scope3

- ・ 事業活動に関係するあらゆる排出を合計した排出量
- ・ これまで排出量算定や排出量削減の取り組みがされてきたScope1・2に加えて、Scope3も注目されてきている。
- ・ 建築分野以外の金融機関、不動産分野からの要望（開示・評価・規制）



サプライチェーン排出量全般, 環境省

[https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply\\_chain/gvc/estimate.html](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/estimate.html)

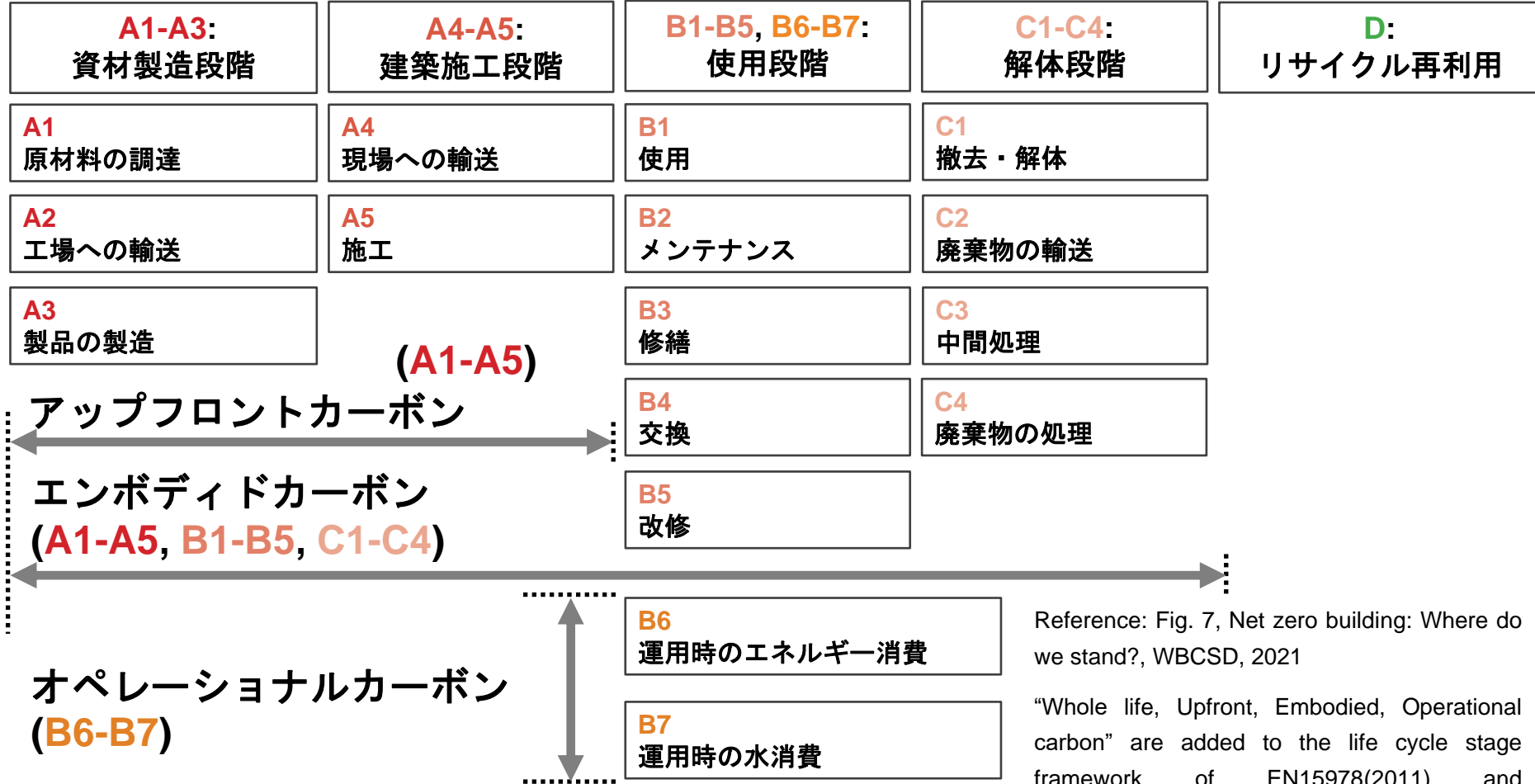
エネルギー使用の合理化、非化石エネルギーへの転換、  
ライフサイクルを考慮した建築設計  
→建築物のホールライフカーボン評価に脚光

# ホールライフカーボン評価

EN15978, 2011

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

ISO21930:2017



Reference: Fig. 7, Net zero building: Where do we stand?, WBCSD, 2021

“Whole life, Upfront, Embodied, Operational carbon” are added to the life cycle stage framework of EN15978(2011) and ISO21930(2017)

# ホールライフカーボン評価

EN15978, 2011

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

ISO21930:2017

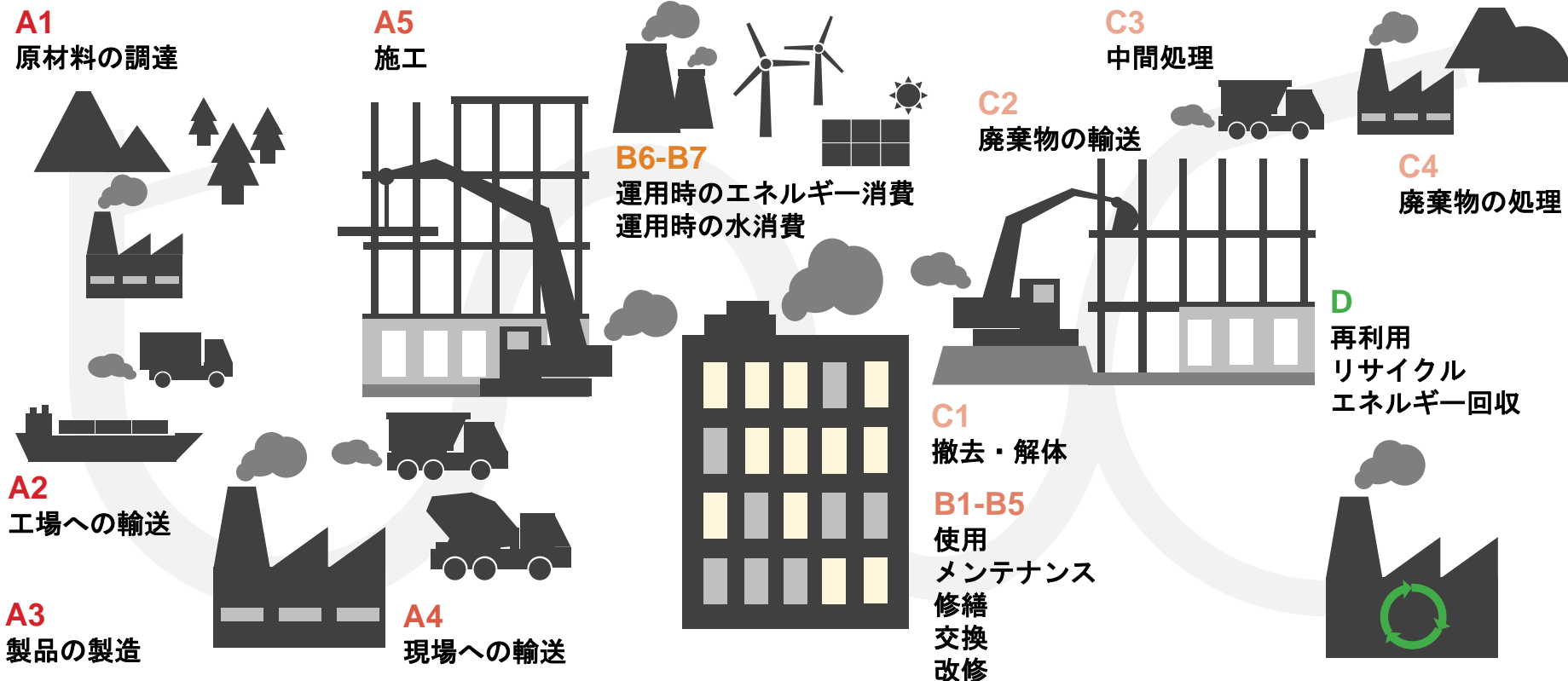
**A1-A3:**  
資材製造段階

**A4-A5:**  
建築施工段階

**B1-B5, B6-B7:**  
使用段階

**C1-C4:**  
解体段階

**D:**  
リサイクル再利用

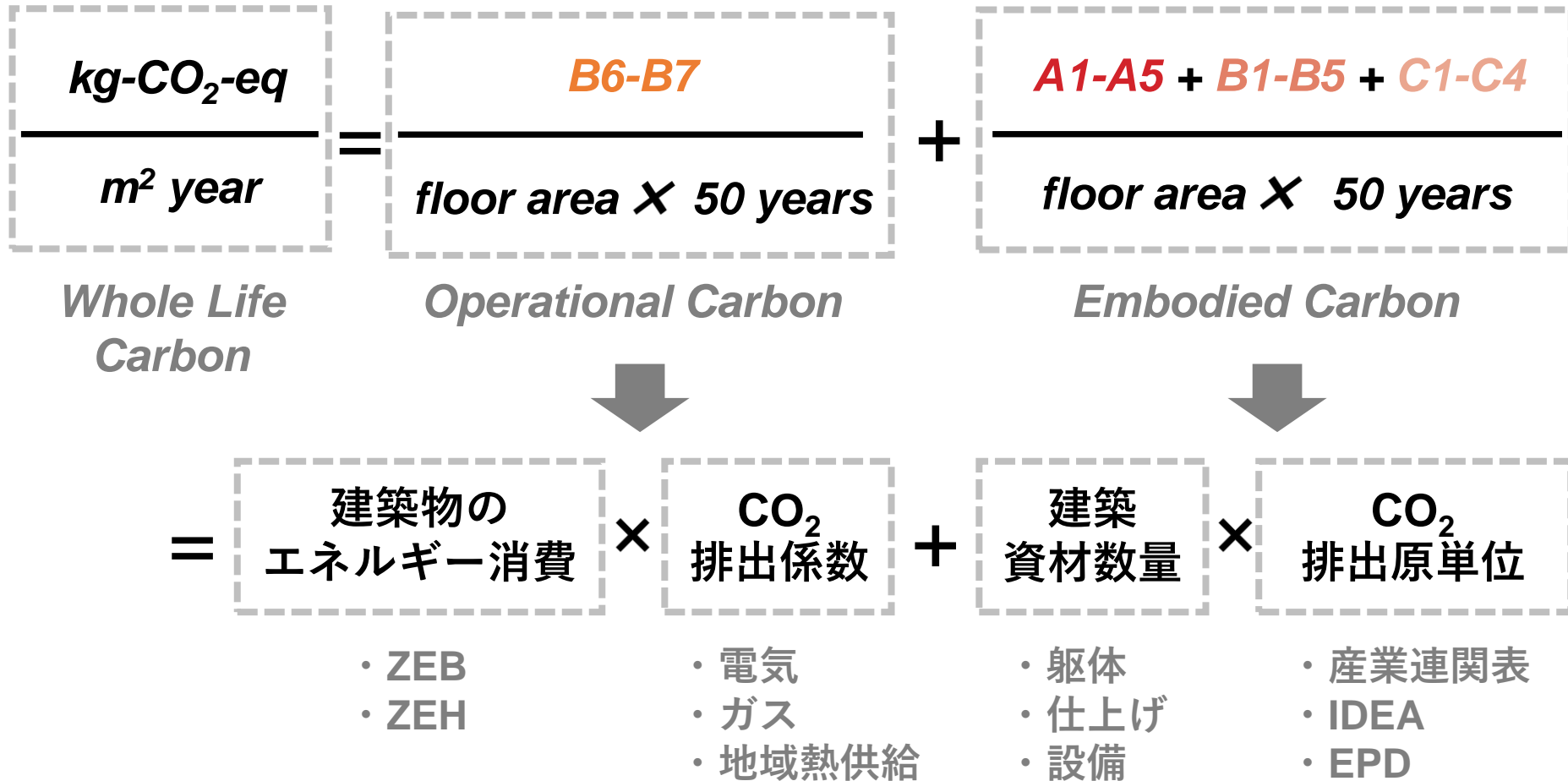


制作: 新藤

Kan Shindo, Waseda University, all right reserved 2024

# 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。

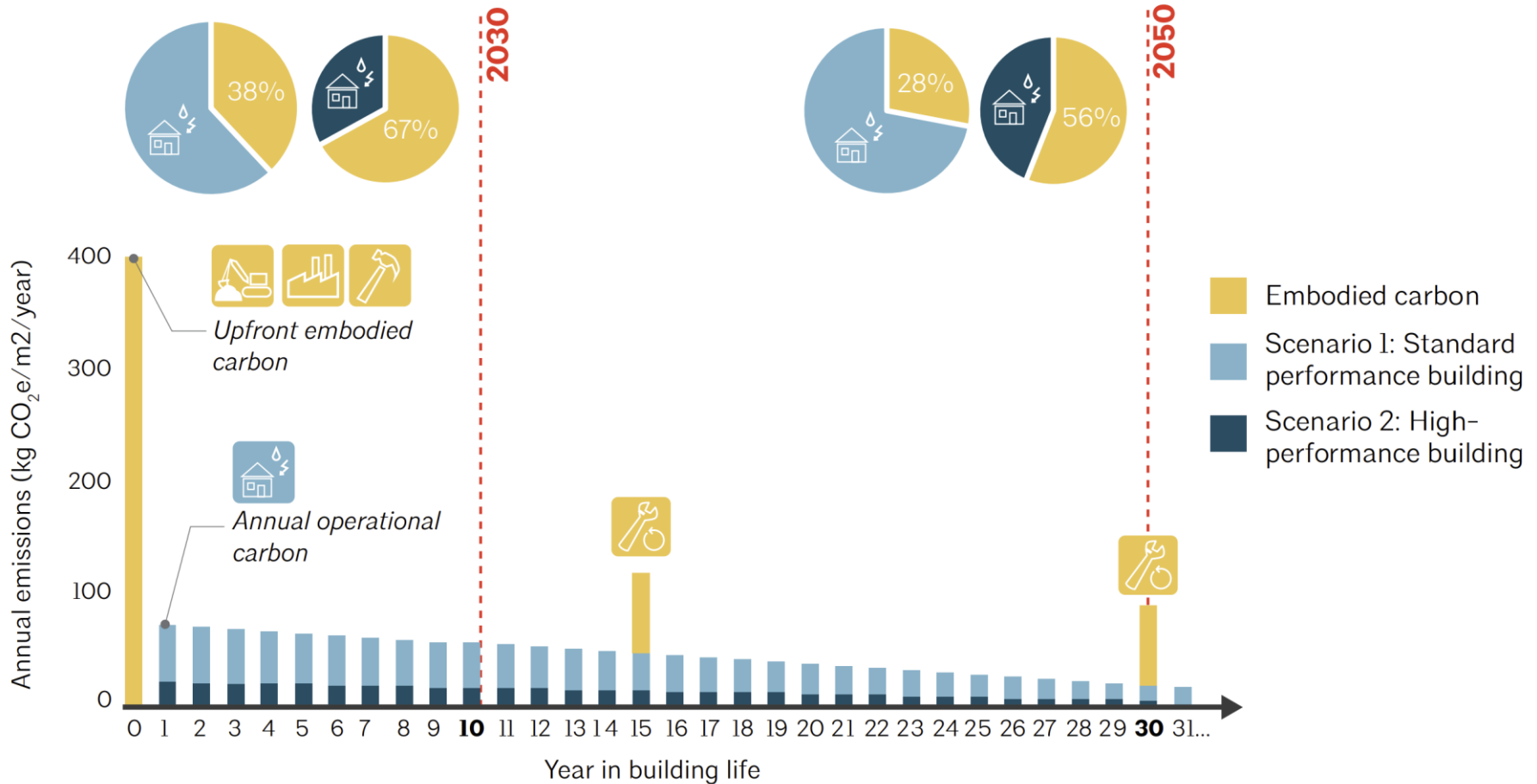


オペレーショナルカーボン、エンボディドカーボン  
双方の増減・バランスを考慮して建築物の設計を行っていく必要がある。

# ホールライフカーボン評価の特徴① 排出時期が異なる

- ・アップフロントカーボン: 先行排出が課題
- ・ダイナミックLCA: 排出時期が遅いほど、環境影響小 (将来の技術革新期待)

※ダイナミックLCAの考え方を適用した事例:



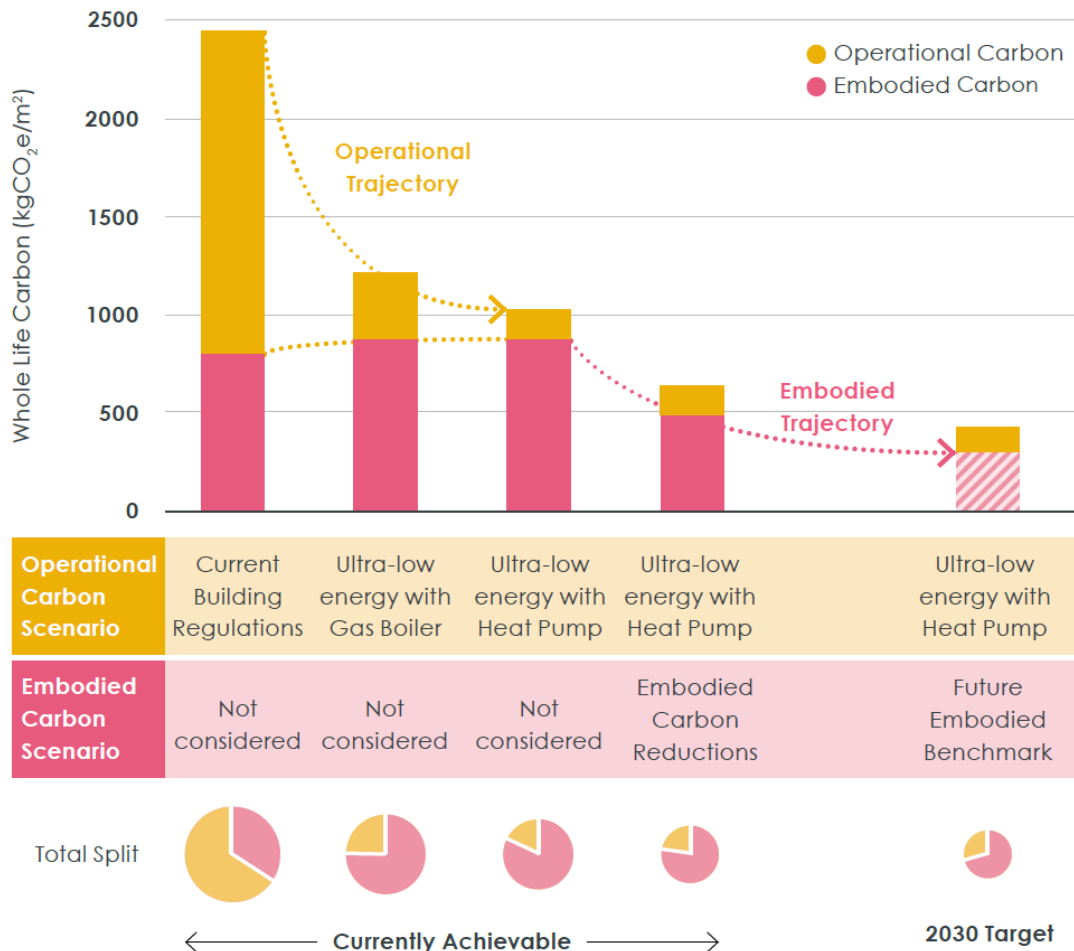
AIA-CLF Embodied Carbon Toolkit for Architects,

<https://www.aia.org/resources/6445061-aia-clf-embodied-carbon-toolkit-for-archit>



# ホールライフカーボン評価の特徴② 双方のバランスを考慮

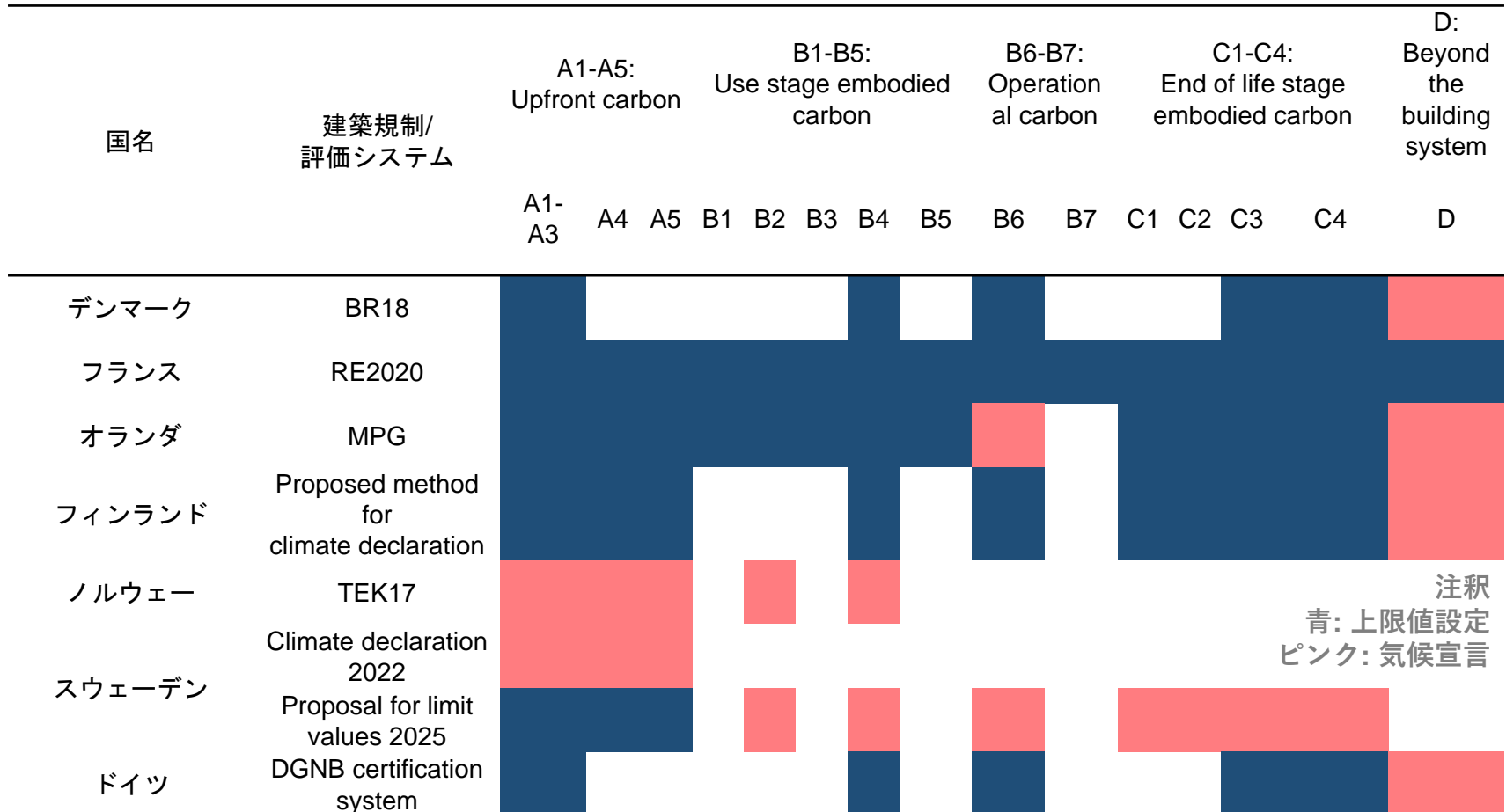
- ・ 最初はオペレーショナルカーボンの削減を優先 (ZEB・ZEH)
- エンボディドカーボンの削減方策を検討



Trajectories of operational and embodied carbon from LETI embodied carbon primer  
<https://www.leti.uk/ecp>

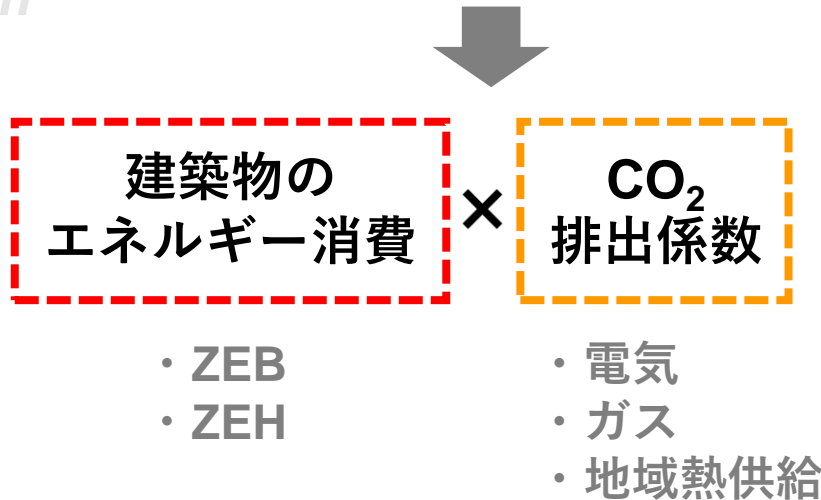
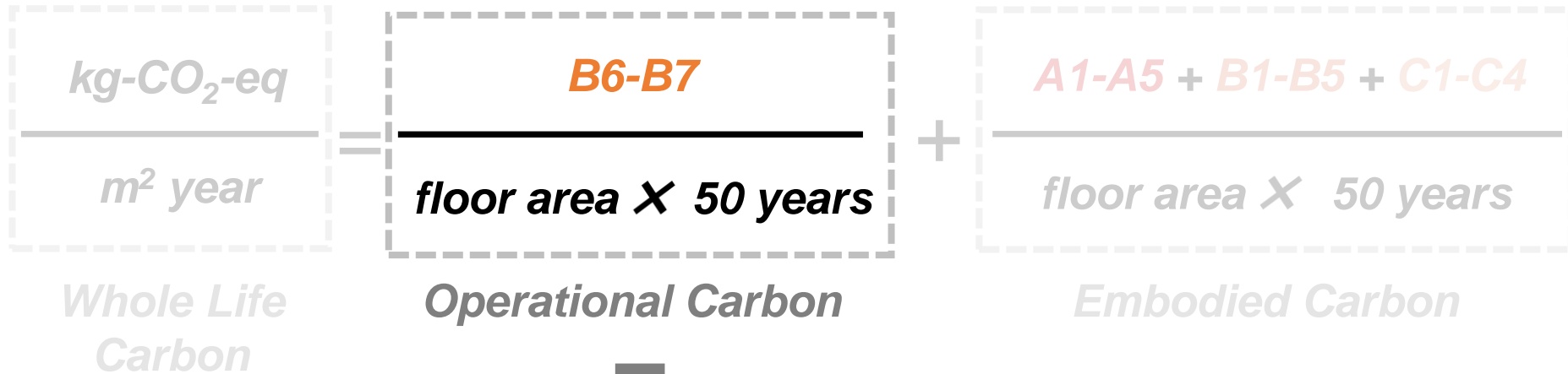
# ホールライフカーボン評価の特徴③各地域で異なる評価範囲

欧州諸国におけるホールライフカーボンに関する規制・環境宣言の状況（2023年時点）  
 B. Maria, B. Harpa, Analysis of new modules in connection with calculation of the climate impact of buildings, BUILD: Aalborg university, Denmark, 2023



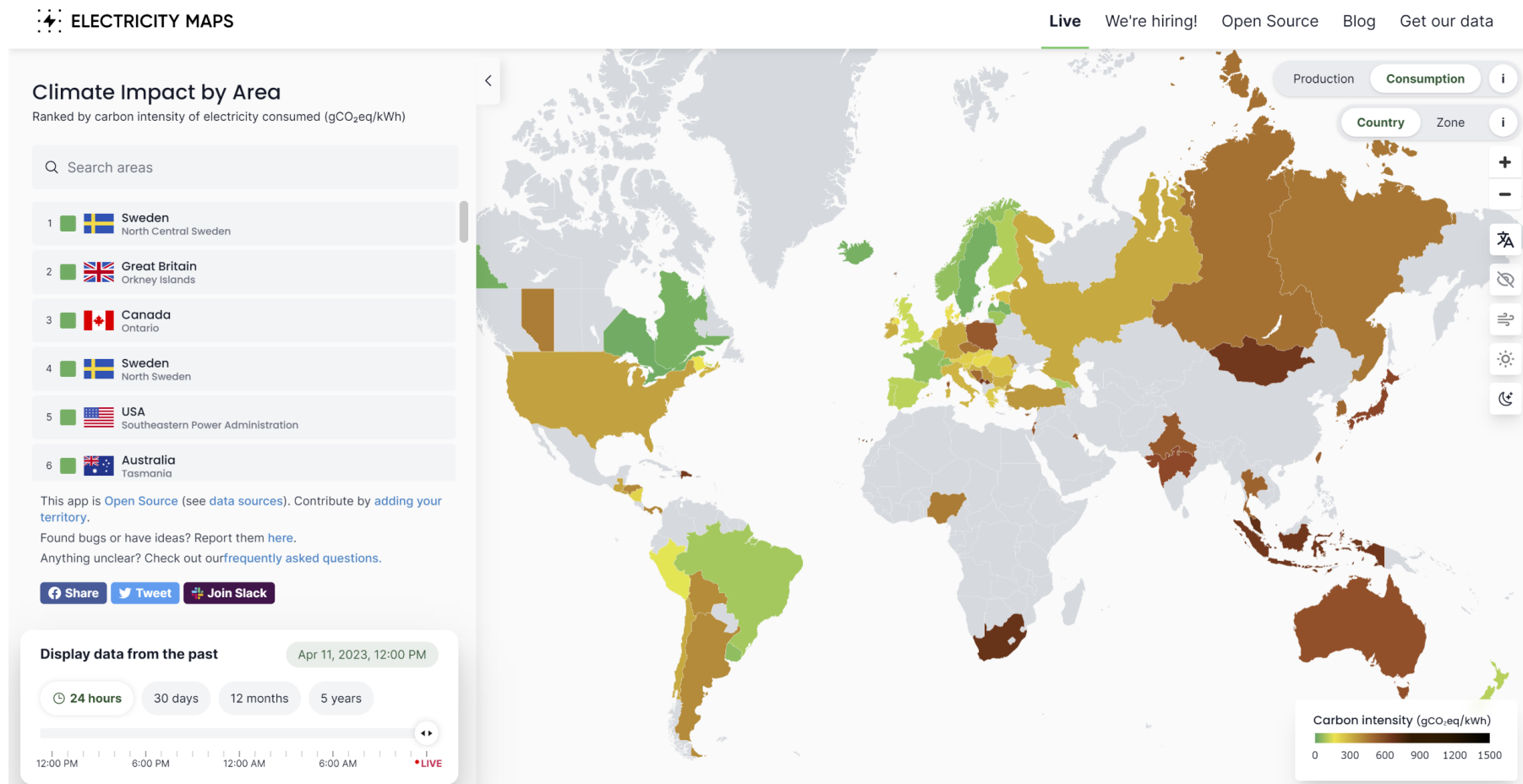
# オペレーショナルカーボン

※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。



# Electricity Map リアルタイム電力CO<sub>2</sub>排出原単位の可視化

- ・デンマーク コペンハーゲンのスタートアップ企業が開発、2016年創業
- ・動的CO<sub>2</sub>排出係数: 時間帯によって排出価値が変動 (主に再エネ由来)



<https://app.electricitymaps.com/>

# Electricity Map リアルタイム電力CO<sub>2</sub>排出原単位の可視化

例)

デンマーク

東京（関東）

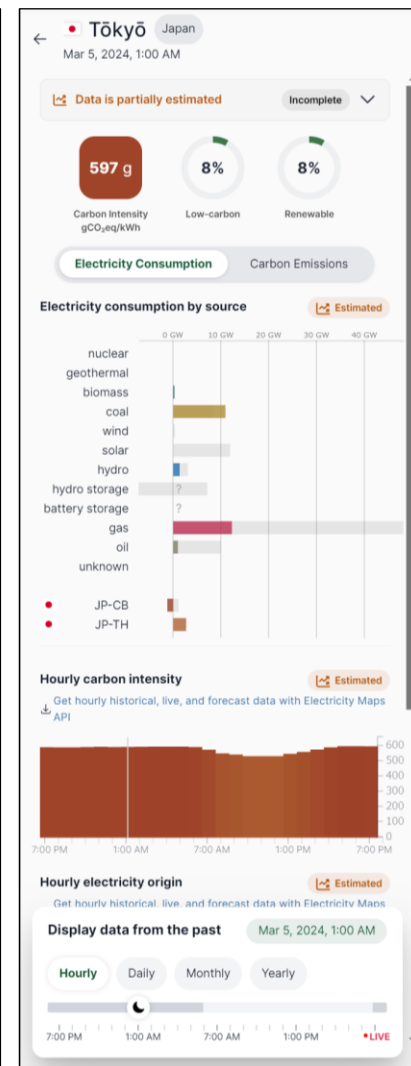
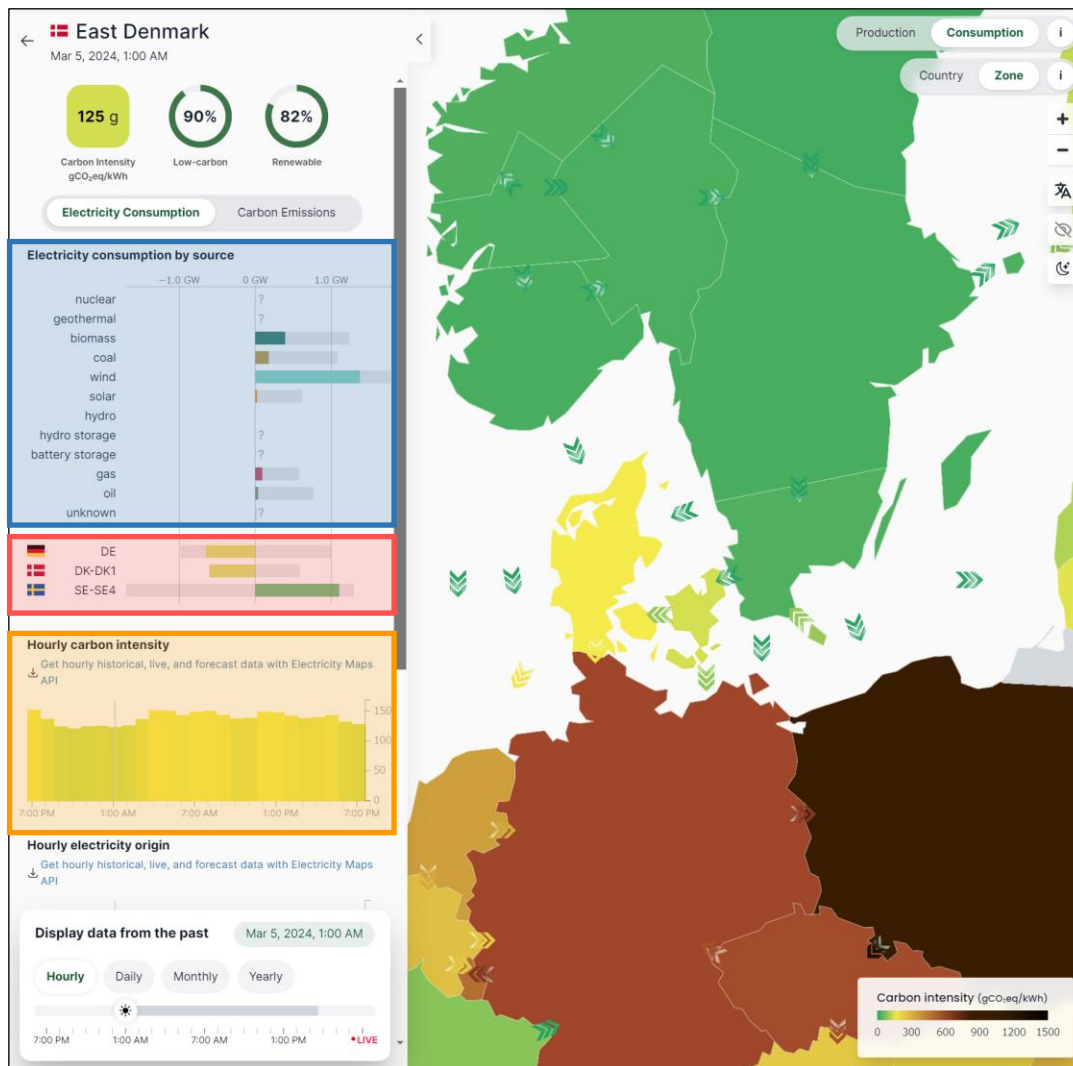
2024年  
3月6日

## 電力供給源

- ・ 風力
- ・ 太陽光
- ・ 火力

## 電力融通

## 動的CO<sub>2</sub> 排出係数



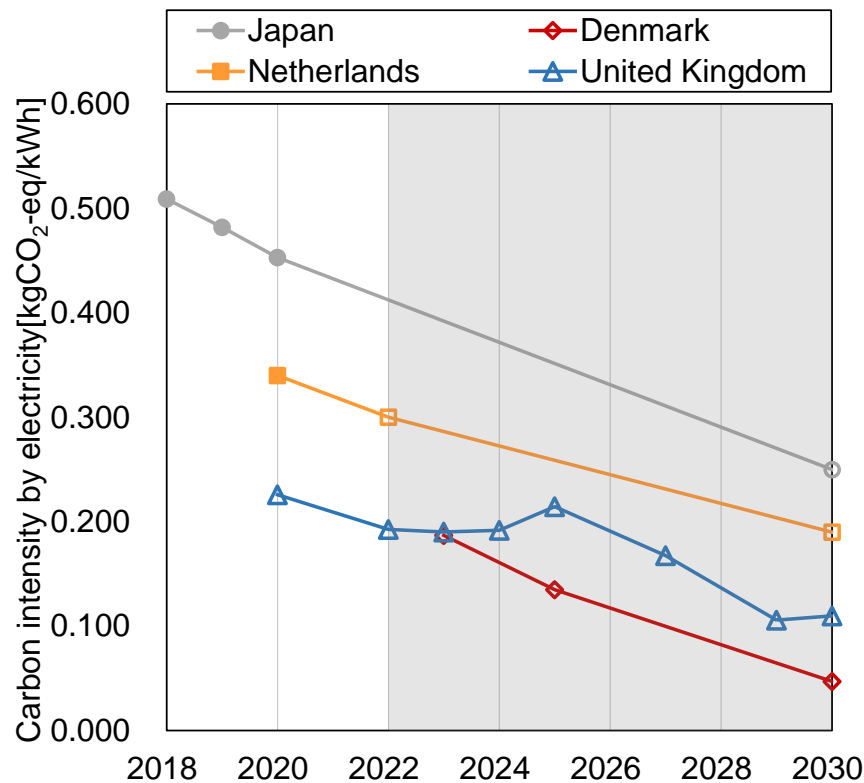
<https://app.electricitymaps.com/>

# 系統電力CO<sub>2</sub>排出係数の将来推移の比較（2030年まで）

- ・ 火力発電の高効率化や再生可能エネルギーの普及が進むほど、電気1kWhを発電するために必要なCO<sub>2</sub>排出量の低減が見込まれる。
- ・ 需要側の電化が進むほど、電気のCO<sub>2</sub>排出係数の大小によって、Embodied CarbonとOperational Carbonの比率が大きく変わり、結果として各国・各地域で示される建築物の排出量の基準値・上限値にも影響することが今後予想される。
- ・ 欧州諸国及び日本における電気CO<sub>2</sub>排出係数の実績値・将来推計値を比較

（4か国のみ着目したが）

どの国でも2030年までに系統電気のCO<sub>2</sub>排出係数を大幅に減らす想定であり、CO<sub>2</sub>排出係数の低減を想定した上で、建築物ライフサイクル全体の評価を行っていく必要がある

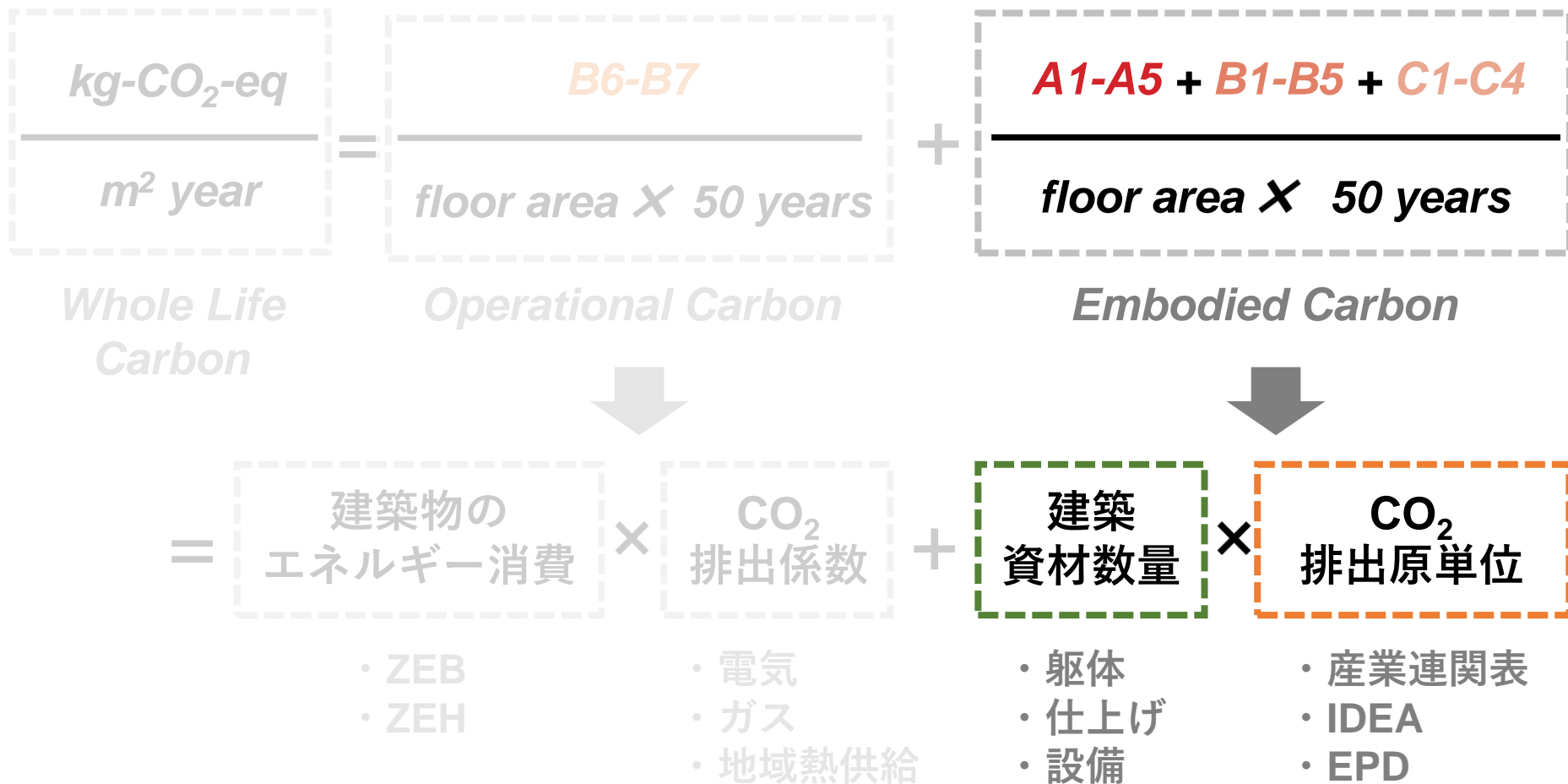


現在及び将来のCO<sub>2</sub>排出係数の推移

Energy and Buildings, 2023年10月掲載  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113668>

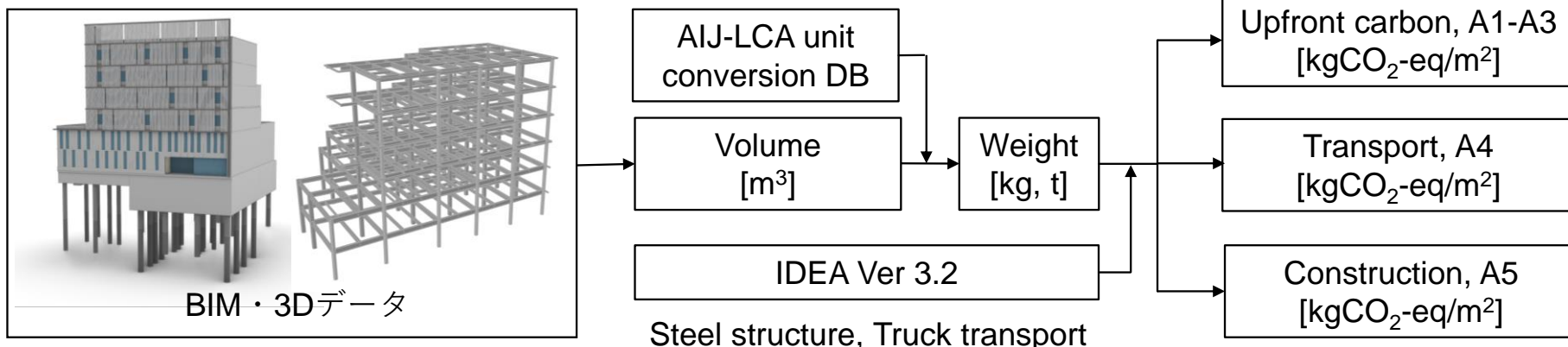
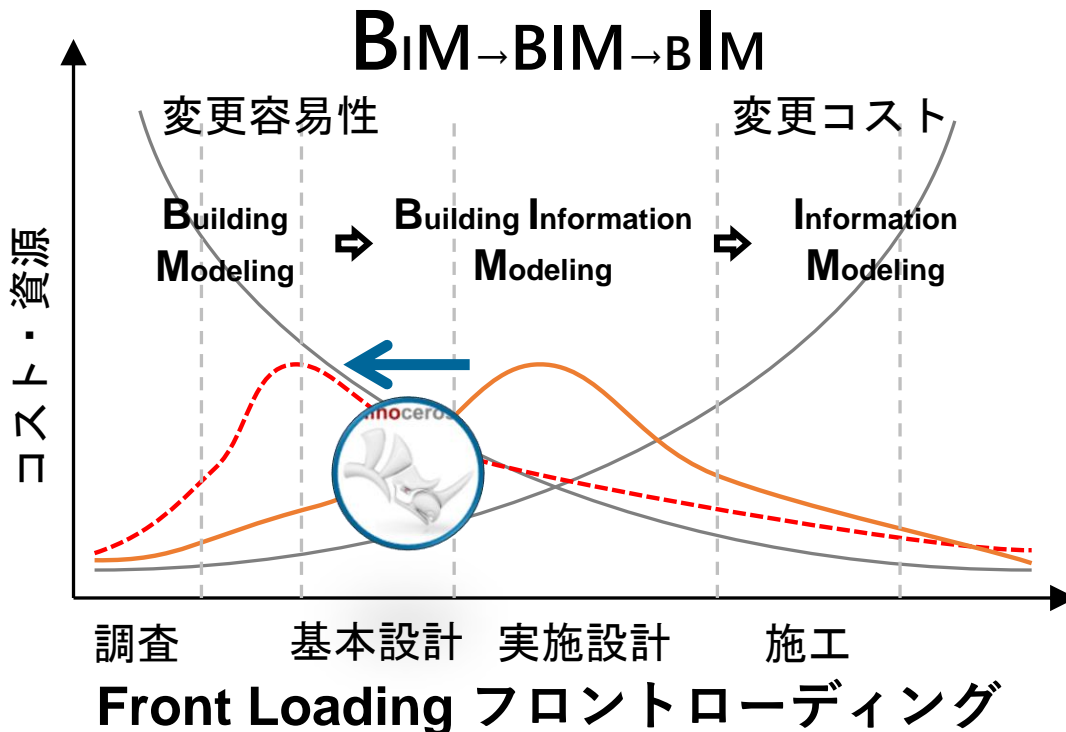
# エンボディドカーボン

※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。



# エンボディドカーボンとコンピューテーション技術

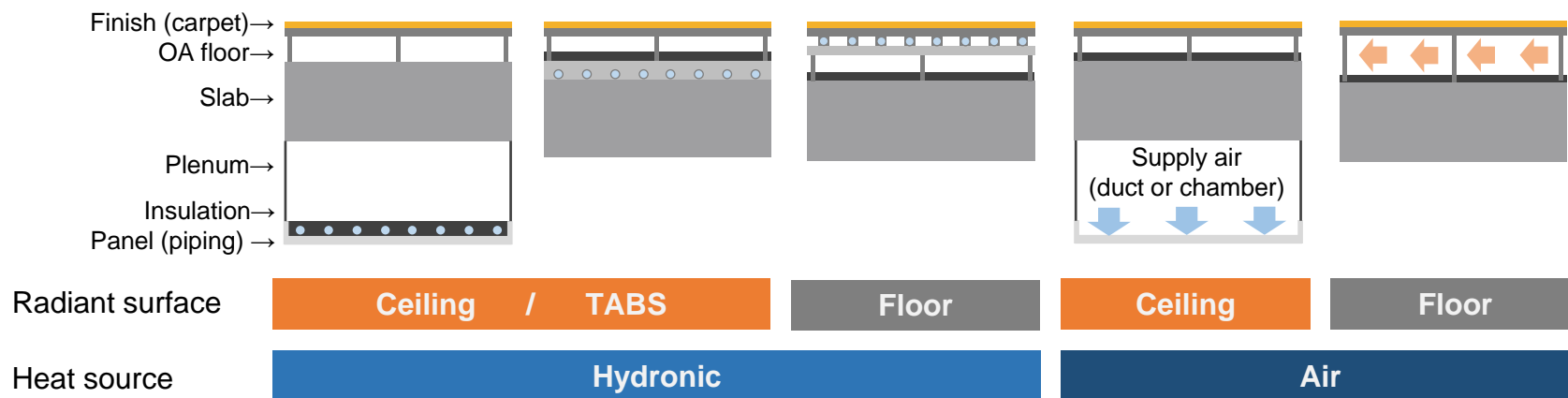
エンボディドカーボンの大小は設計初期段階にほぼ決定される  
→コンピューテーション技術の活用



エンボディドカーボン（アップフロント）の計算手順



# ホールライフカーボン・放射・輻射冷暖房システムの最新動向



## 放射・輻射冷暖房システムのホールライフカーボン評価

- ・ VAVと放射・輻射冷暖房の比較: デンマーク, 2023年 (共同研究内容)
- ・ ビルマルと放射・輻射冷暖房の比較: 米国, 2021年 (報告書, INTEGRAL)

## 放射・輻射冷暖房システムの冷暖房能力に関するWEB計算ツール

- ・ CBE Rad Tool: バークレー研究所

# Building Regulation BR18 デンマークでの建築規制

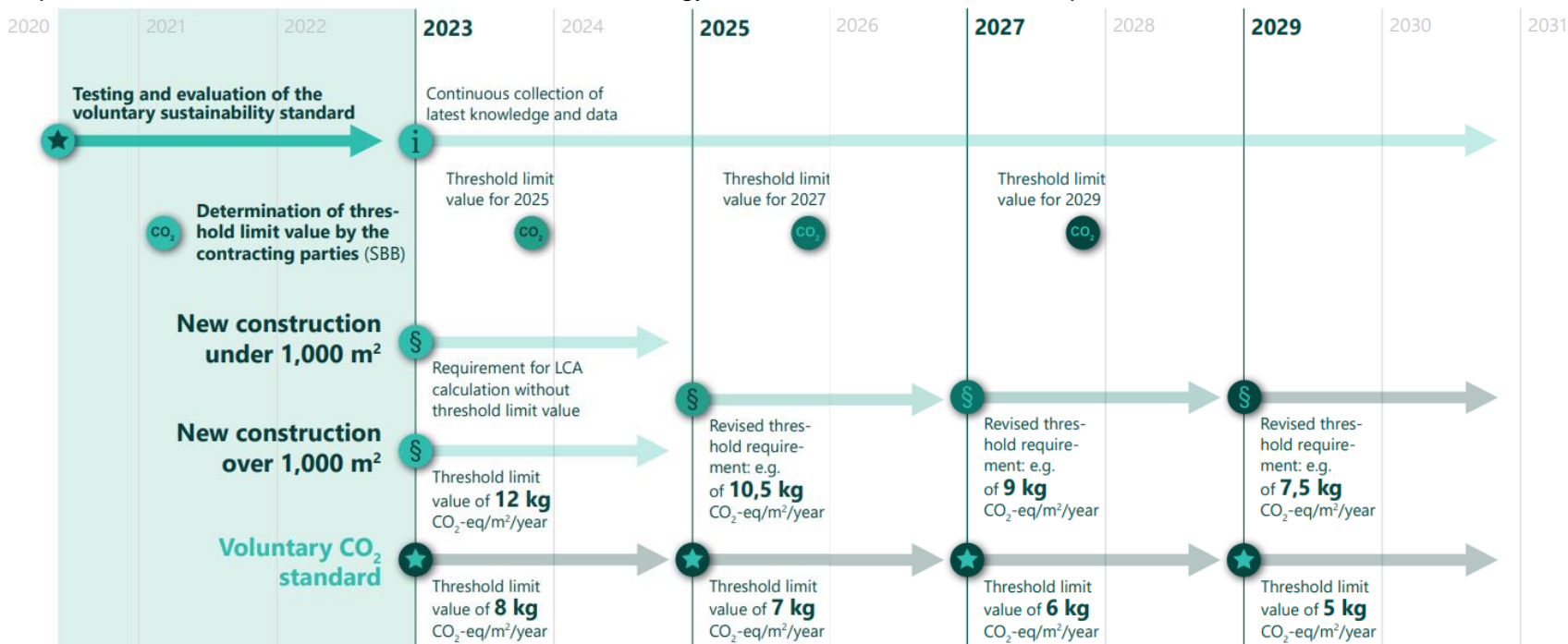
- ・ 2021年3月、デンマーク政府は議会の承認を得て、2023年から新たに施行される建築規制の中で、新築建築物に対する Whole life carbonに関する規制・要求事項を発表した。
- ・ 1000m<sup>2</sup>以上の新築建築物は2023年以降12 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/年以下、野心的な目標、自主規制では8 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/年
- ・ LCAに関する規制は2年毎に見直され、より厳しい新たな要件が設定される予定
- ・ 12 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/年 ≒ 600 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>
- ・ デンマーク住宅・計画庁(省)、建築規制の管理・策定を行う。

※デンマークの全建物ストックに対する建築着工数の割合は年1~2%程度


Energy renovation of buildings,

[https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/final\\_web\\_sog\\_wp\\_energyefficiencyinbuildings\\_210x297\\_v06\\_web.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/final_web_sog_wp_energyefficiencyinbuildings_210x297_v06_web.pdf)

[https://im.dk/Media/637602217765946554/National\\_Strategy\\_for\\_Sustainable\\_Construktion.pdf](https://im.dk/Media/637602217765946554/National_Strategy_for_Sustainable_Construktion.pdf)

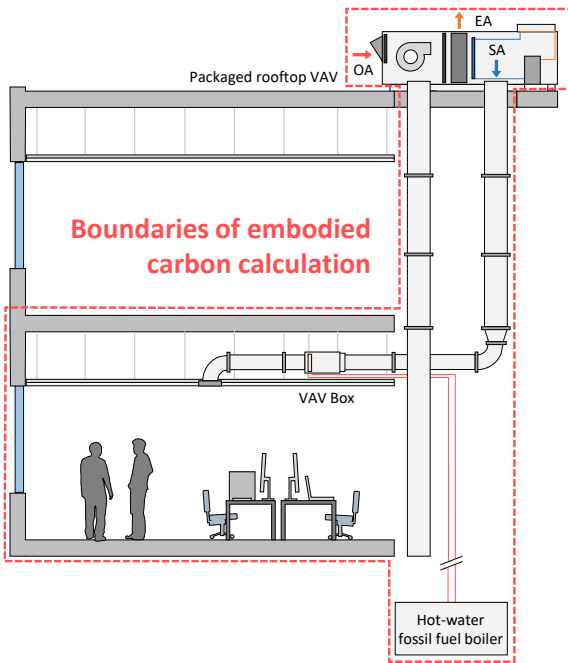


# ホールライフカーボン: デンマーク

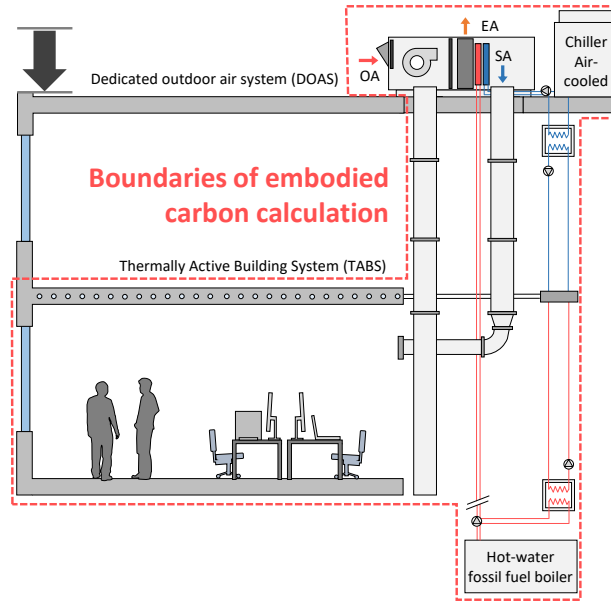
デンマーク工科大学  との共同研究プロジェクト  
 ホール・ライフ・カーボンで冷暖房システムを比較する手法を提案

(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

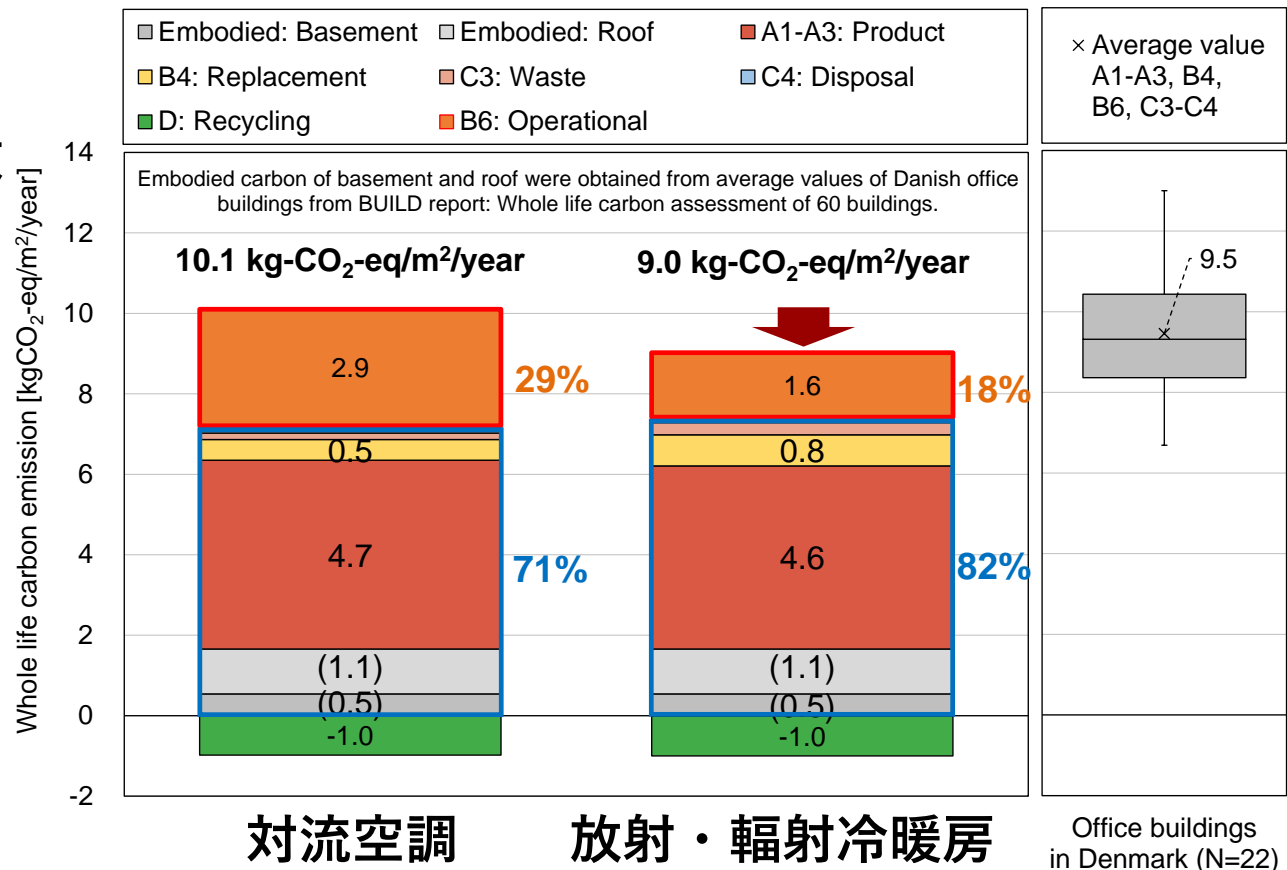
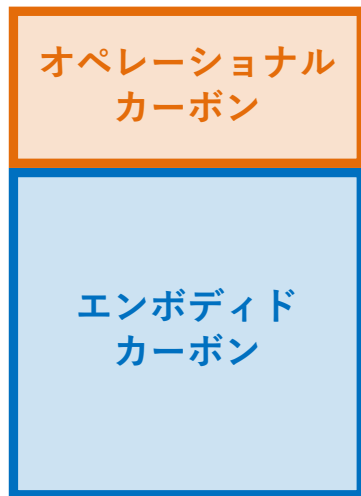


Energy and Buildings, 2023年10月掲載  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113668>

# 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

- ・デンマーク建築規制  
BR18に準拠
- ・系統電力の排出係数  
0.187 kgCO<sub>2</sub>-eq/kWh



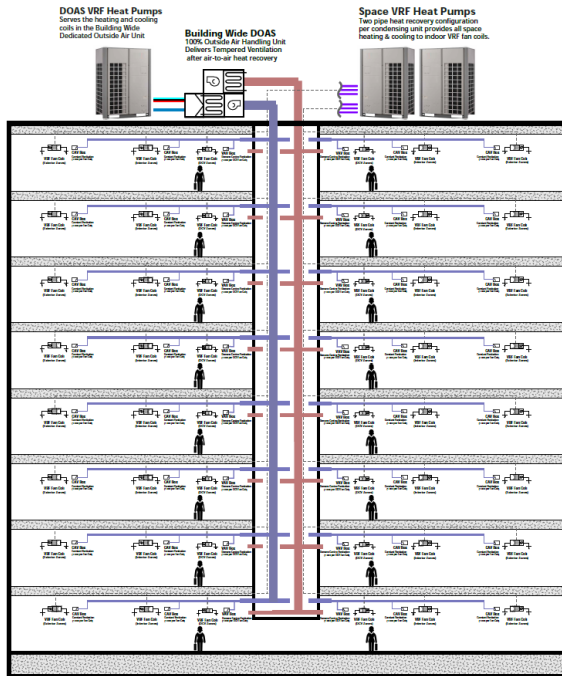
# ホールライフカーボン: 米国 (INTEGRAL Group)

## The Radiant Whole Life Carbon Study

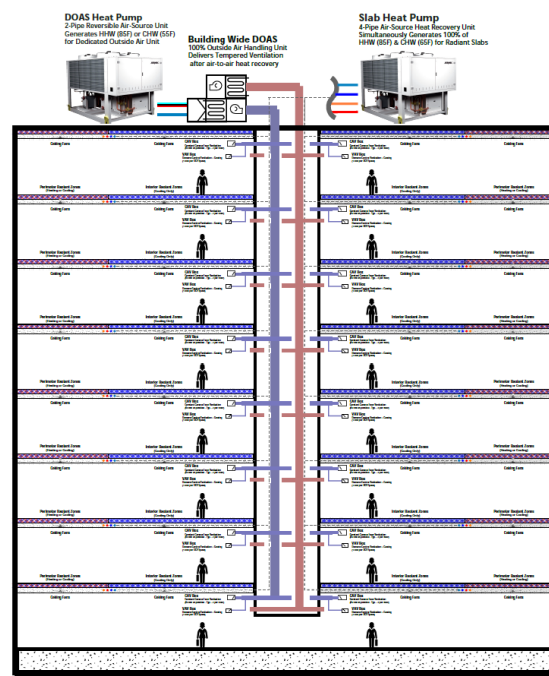
ビルマルと放射・輻射冷暖房の比較、カルフォルニア・8階建てオフィス

(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-A4, B1, B3-B4, C1-C4

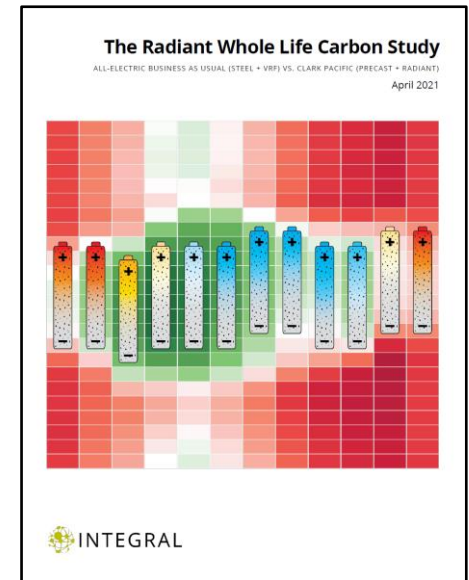


対流空調  
VRF+DOAS



放射・輻射冷暖房  
Radiant system + DOAS

対流空調と放射・輻射冷暖房の比較



<https://integralgroup.com/news/radiant-whole-life-carbon-study/>

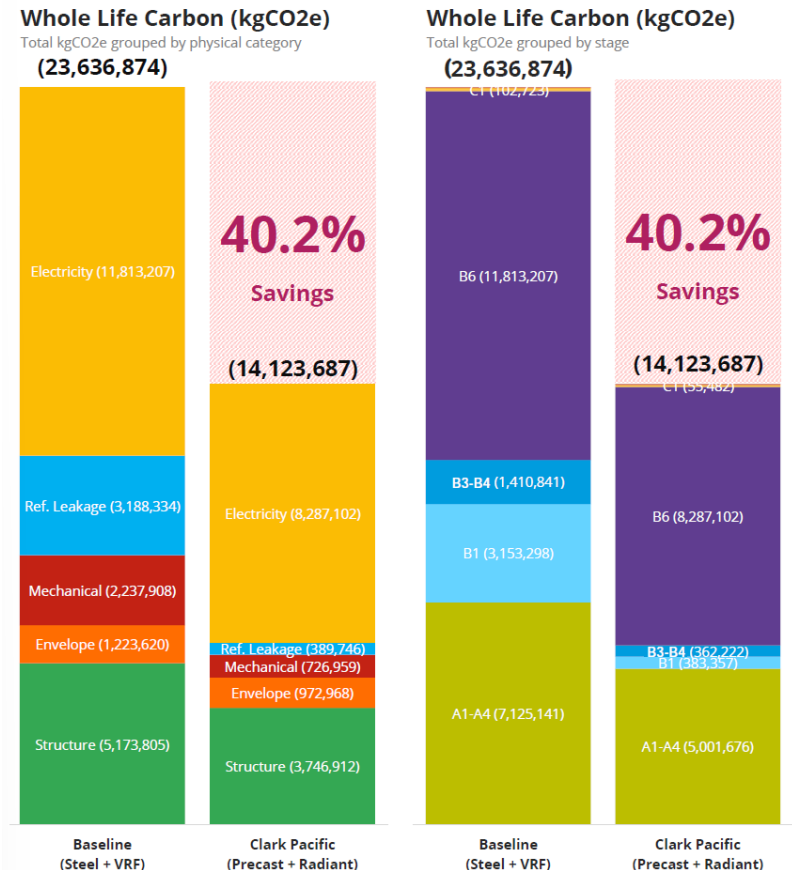
# ホールライフカーボン: 米国 (INTEGRAL Group)

- ・対流空調と比較して輻射冷暖房導入で**オペレーショナルカーボン30%削減**  
(冷暖房、照明、給湯、コンセントの合計値)
- ・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40%削減**
- ・対流空調: 17.7 kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>年、輻射冷暖房: 10.6 kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>年  
(評価期間: 60年、延床面積: 22297 m<sup>2</sup>)
- ・系統電力の排出係数  
0.205-0.218 kgCO<sub>2</sub>-eq/kWh

ホールライフカーボンで評価した際の  
輻射冷暖房導入のメリット

- ・ 省エネルギー (B6)
- 設備容量を小さくできる
- ・ 冷媒使用量 (B1)が少ない

※系統電力の換算係数、LCAの範囲、  
構法(例: 地震対応)が日本と異なる  
ことには留意する必要がある。



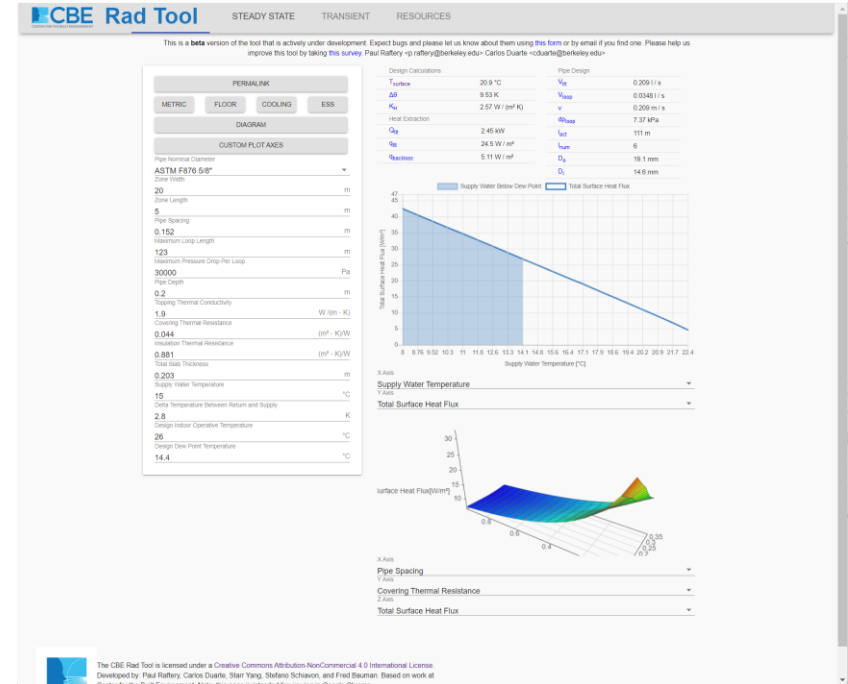
細分類

LCA範囲

# 放射・輻射冷暖房システム WEB計算ツール: CBE Rad Tool

- ・設計初期段階での躯体蓄熱型放射冷暖房システムのWEBベースの設計補助ツール
- ・Steady state (定常計算)及びTransient (非定常計算)を選択可能

- ・躯体への蓄熱を考慮して運転開始時間や運転時間の最適化を行うことが可能
- ・EnergyPlusで非定常熱収支計算を実施、計算結果をWEB上で見れるように
- ・更に詳細に計算したいユーザーには、EnergyPlusの入力テンプレートを提供



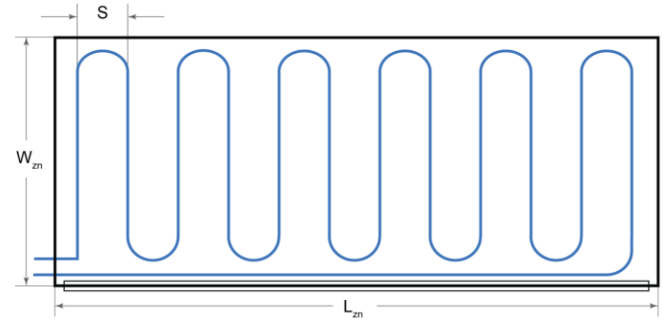
例)

- Add radiant control sequences to your model with Openstudio v2.9
- Single zone model with radiant control sequences example
- EnergyPlus EMS objects for radiant control sequences
- Three guidelines for controlling high thermal mass radiant systems

<https://radiant.cbe.berkeley.edu/resources>

# 放射・輻射冷暖房システム WEB計算ツール: CBE Rad Tool

- ・ 定常計算ツールでは、建物の設計条件やTABSへの送水条件を入力することで、各条件の放射冷暖房能力（表面側、水側）を見積もることが可能となる。



## 設計条件

ゾーン: 20m × 5m

放射面: 床, ESS

冷房想定

設計室内作用温度: 26°C

設計床表面温度: 20.9°C

設計温度差

(室温 - 送水温度): 9.53 K

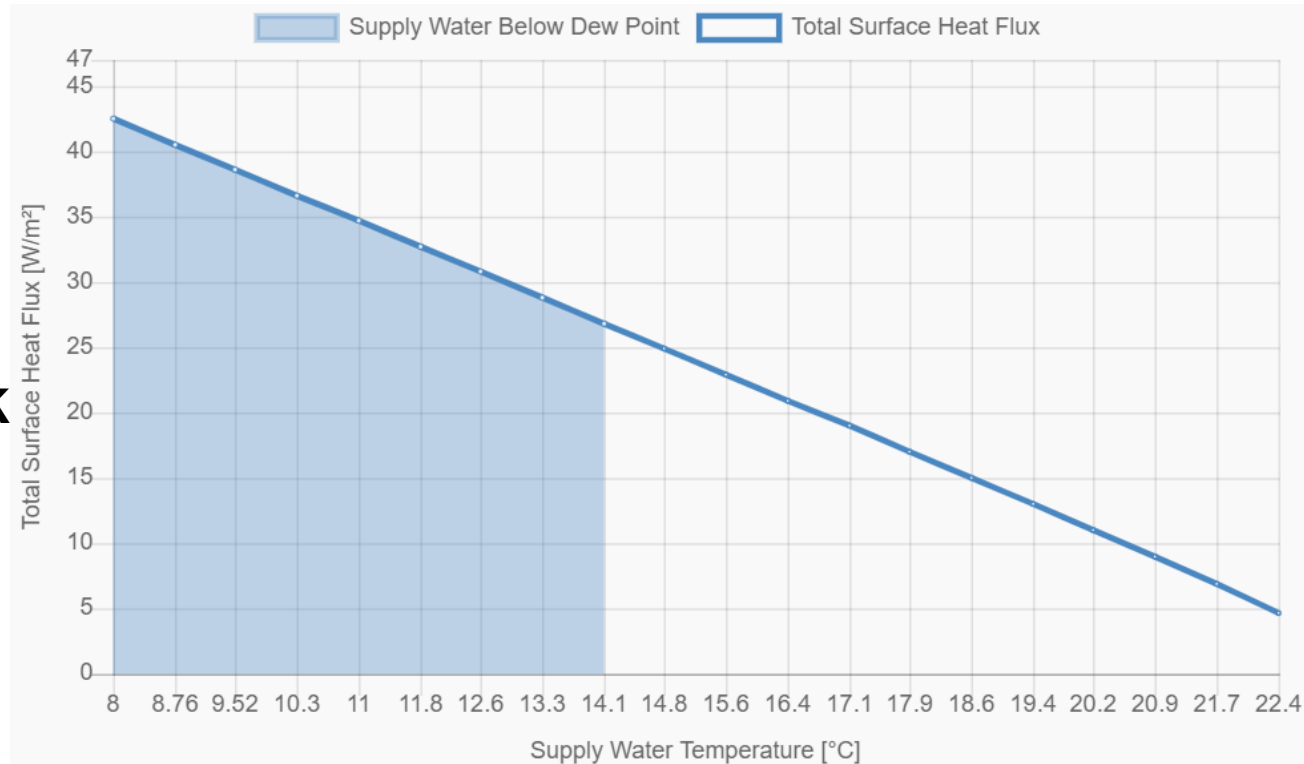
送水温度: 15°C

往還水温度差: 2.8°C

設計流量: 0.209 L/s

設計流速: 0.209 m/s

配管間隔: 0.152 m



[https://radiant.cbe.berkeley.edu/steady\\_state](https://radiant.cbe.berkeley.edu/steady_state), [https://radiant.cbe.berkeley.edu/resources/rad\\_tool\\_documentation](https://radiant.cbe.berkeley.edu/resources/rad_tool_documentation)