

木材と循環型社会 – 研究と産業の動向

Dr. Yutaka Goto

Chalmers University of Technology / Tohoku University

2023.09.08 「CLT等木造建築の企画・設計支援ツール開発」講演会

後藤 豊



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

日本

木質材料, 木質構造

スイス

建築物理, ライフサイクル工学

スウェーデン

上記全て + コンサルタンシー

ETH zürich



Empa

Materials Science and Technology



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



TIMBER HUB



TOHOKU
UNIVERSITY

2003

2009

2013

2016

2022

研究+教育+ビジネスの焦点



様々な方法で、様々な材料の使い方ができるが、それぞれの与えるサステナビリティ・インパクトは異なる。どのように最適化する？何を以って最適化する？

- 構造安全性
- 省エネルギー性と耐朽性
- 環境的、経済的、社会的インパクト



3

木材と循環型社会 – 研究と産業の動向



- 木材とサステナビリティ
- 木質構造の環境性評価
- 循環経済と木材利用
- 今後の課題とまとめ

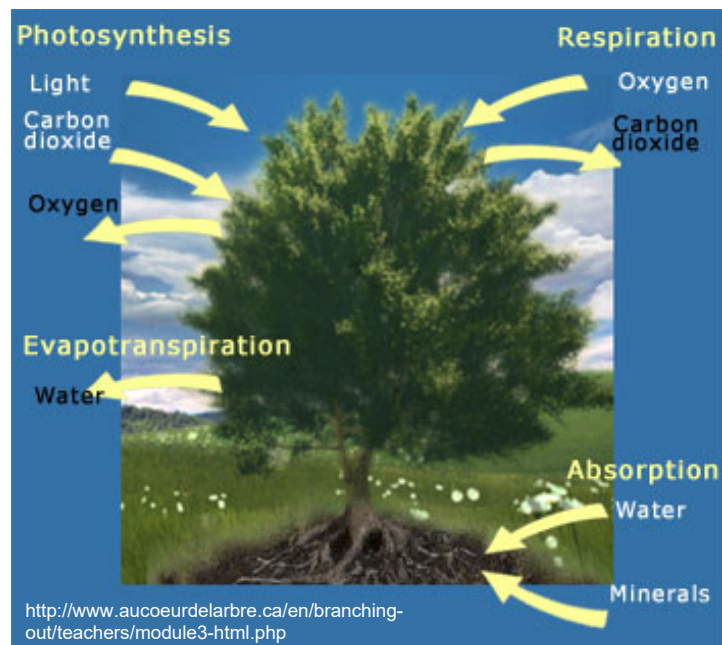


4

木材とサステナビリティ

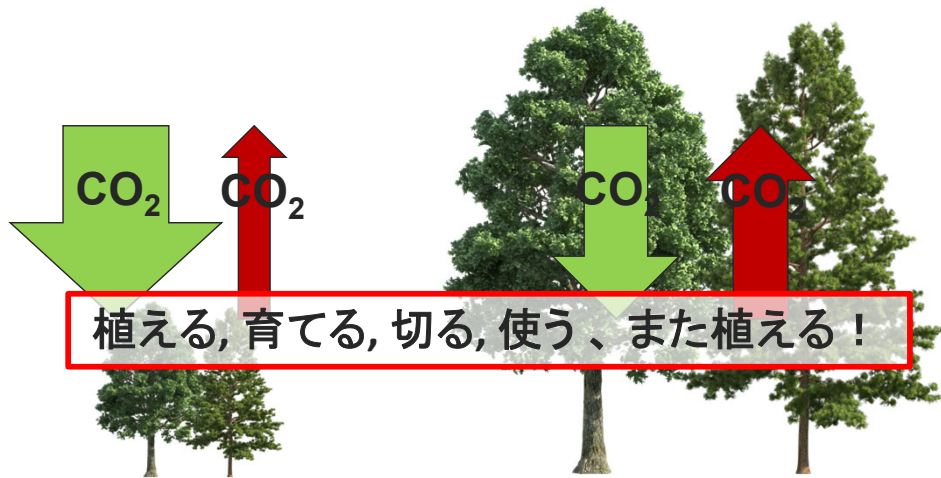
5

木とCO₂



6

木とCO₂



サステナブルな生産サイクルである限り、木材は再生可能でサステナブルな資源。
若い木の方がより旺盛にCO₂を固定する。

7

木のカーボンニュートラル性



Fduerq Qhxwudo

P dnkj qr qhwuhdvdh rifduerq glr {lgh wr wkh dwp rvs khuh/hvshfdw} wkurxjk riivhwqj
hp lwlrqve | sduqwj wnhvl-r {irug glfwlrqdu|,
二酸化炭素の大気中への正味排出量がゼロの状態(特に植林によるオフセットにより)。



すべての木製品に炭素は固定されているが、製品の寿命によって温暖化抑止の程度は異なる。

バイオジェニック炭素

8

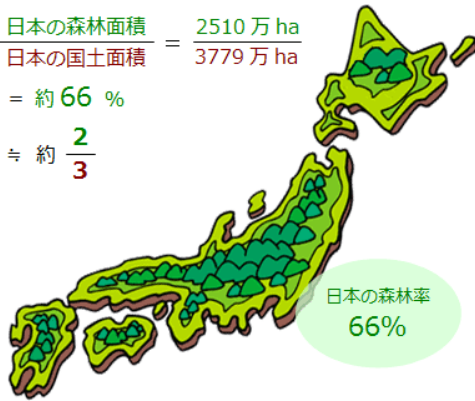
日本の木材資源

- 豊富な森林資源
- 林業経済の疲弊

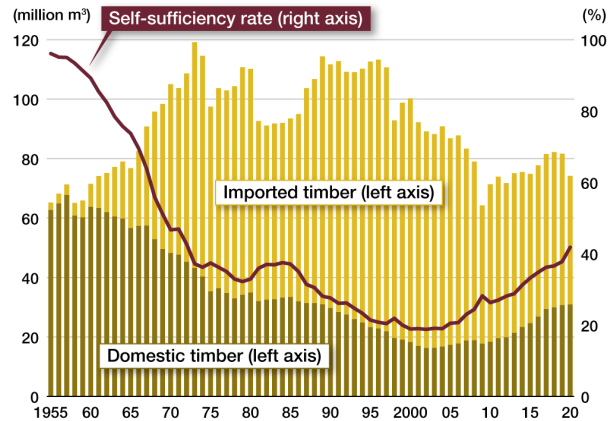
$$\frac{\text{日本の森林面積}}{\text{日本の国土面積}} = \frac{2510 \text{ 万 ha}}{3779 \text{ 万 ha}}$$

= 約 66 %

$$\approx \text{約 } \frac{2}{3}$$



Timber Self-Sufficiency Rate in Japan

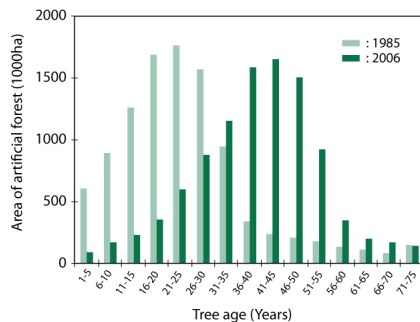


Created by Nippon.com based on data from the Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries.

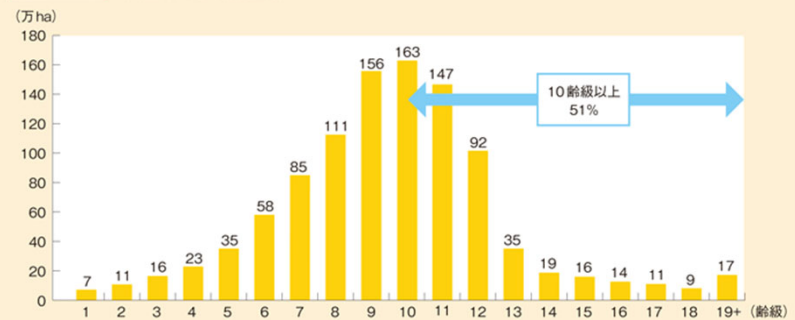
nippon.com

日本の木材資源

- どのように森林産業、建築産業をサステナブルにできる？
- 短期的、長期的両方のアプローチが必要。



資料 I-3 人工林の齢級別面積



注 1：齢級は、林齢を5年の幅でくくった単位。苗木を植栽した年を1年生として、1～5年生を「1 齢級」と数える。
 注 2：「森林法」（昭和26年法律第249号）第5条及び第7条の2に基づく森林計画の対象森林の面積である。
 資料：林野庁「森林資源の現況」（平成24（2012）年3月31日現在）

木材とサステナビリティ

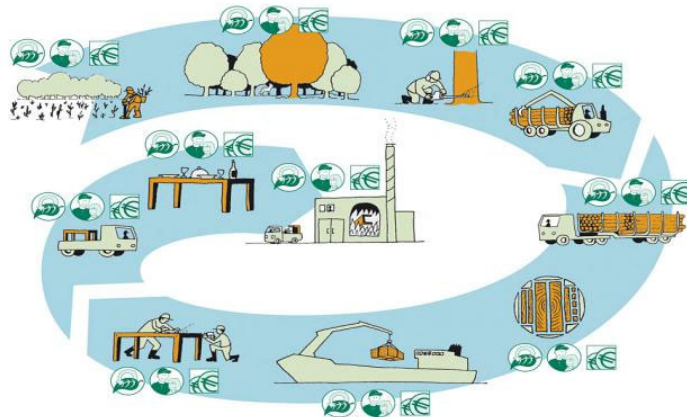
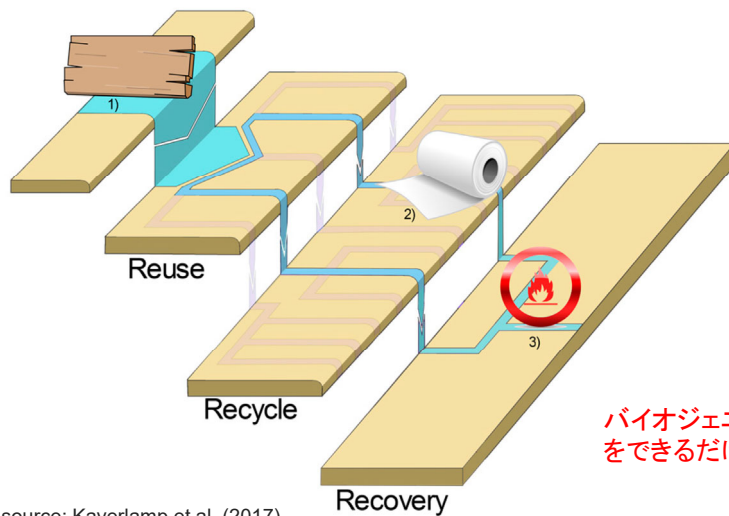


Figure source: European Forest Institute

各地域、あるいは世界規模で、どの程度の木材資源がサステナブルに利用可能かを知り、その中でより効率的かつ効果的な木材利用をすることが重要。

"世界中全ての新築建物を木造とすることはできない。"

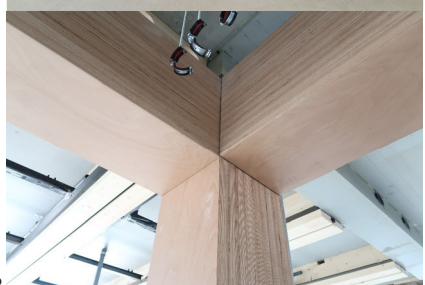
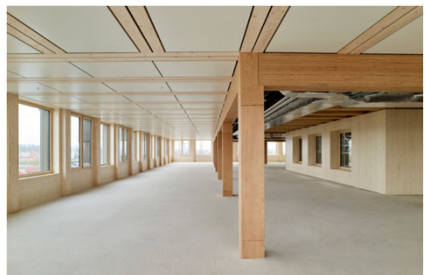
木材のカスケード利用



バイオジェニック炭素を大気中へ戻すまでの時間をできるだけ長くする。その間に森林を育てる。

Figure source: Kaverlamp et al. (2017)

木材資源 – その他の木質資源



13



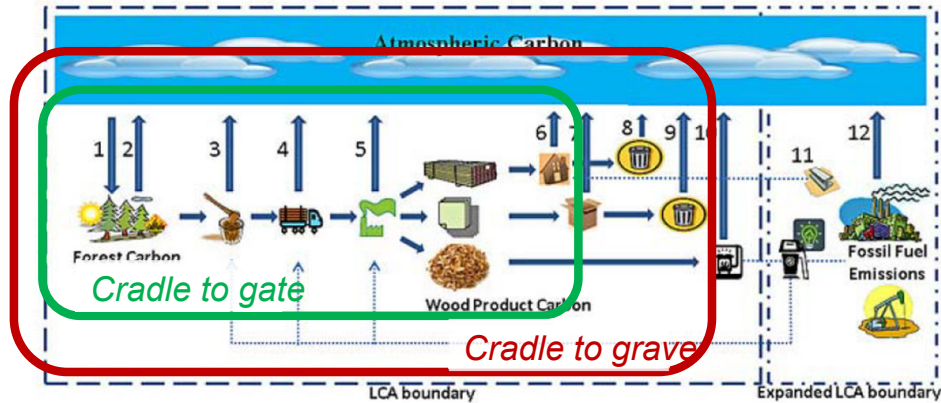
木質構造の環境性評価

14

ライフサイクルアセスメント - LCA

既存のサステナブル建築認証の枠組みに囚われないカーボンフットプリントの検討を行う場合に有用。

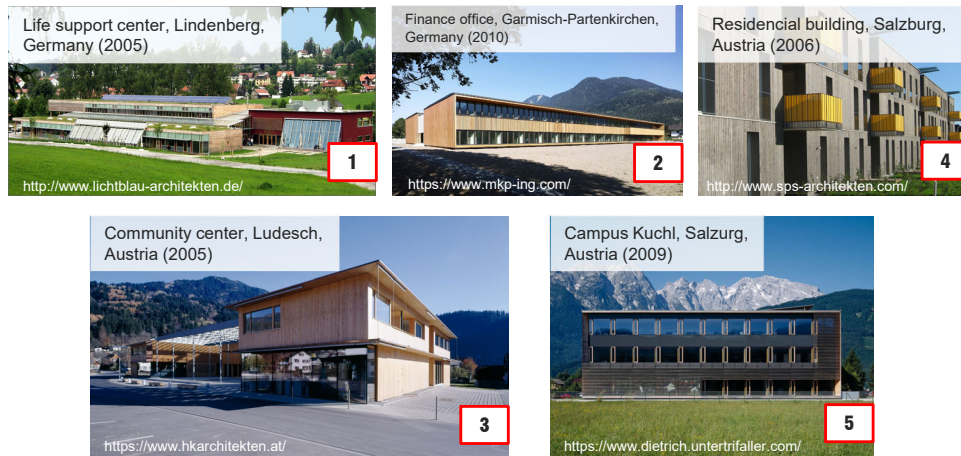
(LCA自体はサステナブル建築認証の施行される前から、70年代より多分野で行われている。)



15

ISO 14040:ライフサイクルアセスメント—原則及び枠組み

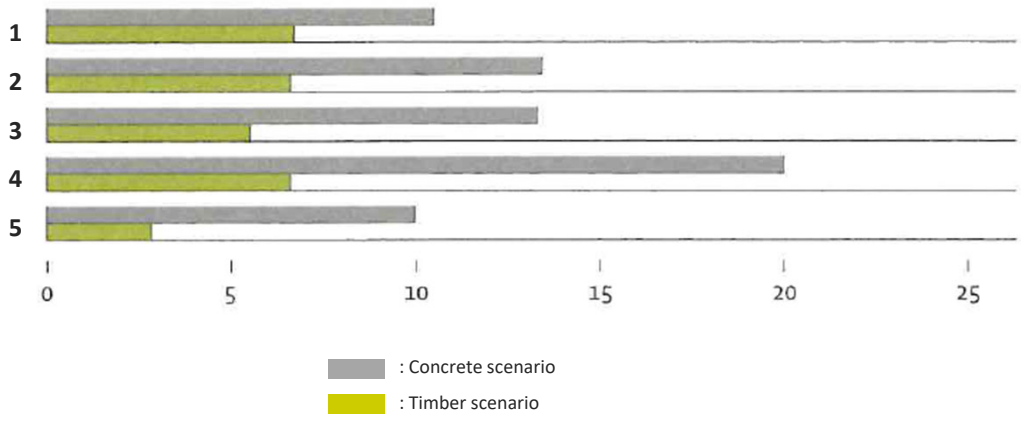
木造建築の環境負荷



(Kaufmann et al. 2012)

16

木造建築の環境負荷 – 温室効果ガスの排出

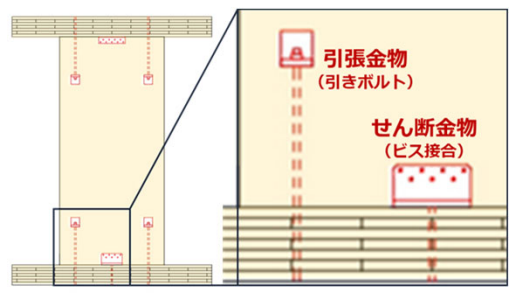


温室効果ガスの排出(50年) (kgCO₂eq/m²) (Kaufmann et al. 2012)

事例 – CLT+Sハイブリッドユニット

従来のF_oパネル工法の課題

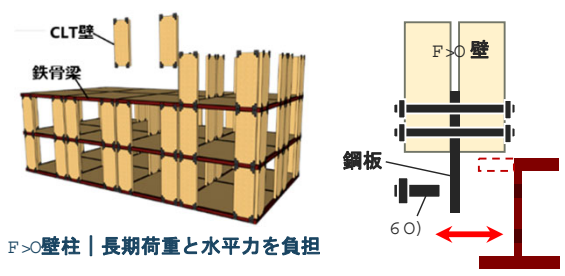
厳しい耐震基準を満たすために、構造システムが複雑
→コスト・施工難易度が高く、普及が進まない



複雑な従来の構造システム (引きボルト形式)

2020年度開発した構造システム

接合に有利な鉄骨と組み合わせることで、
強くて施工のしやすい、かつ、環境によい
F_o壁柱+鉄骨梁による構造システム



F_o壁柱 | 長期荷重と水平力を負担

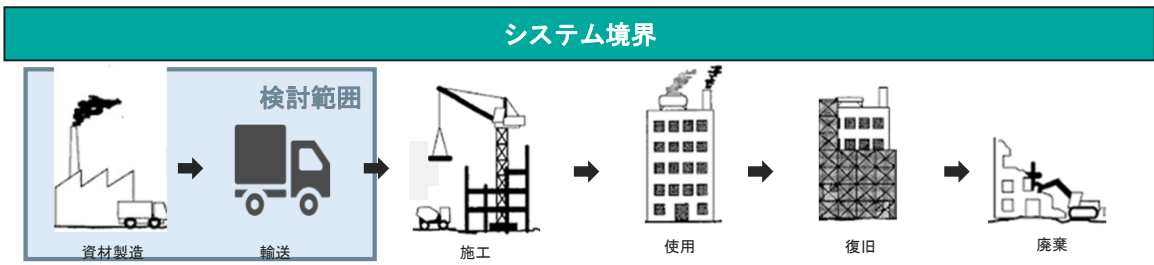
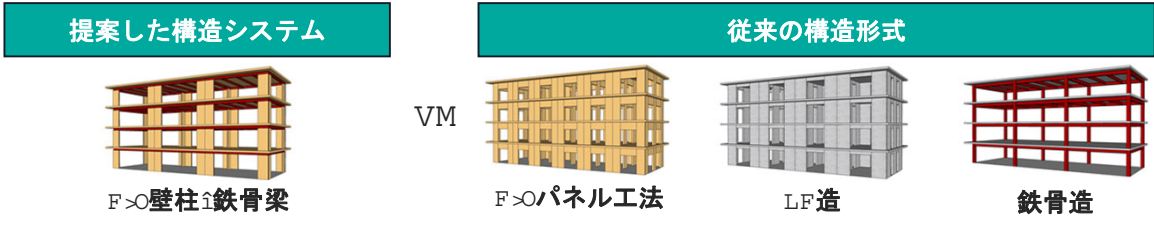
提案したF_o壁柱+鉄骨梁による構造システムと
鋼板とボルトによるシンプルな接合方法

事例 – CLT+Sハイブリッドユニット



√F>O壁柱∧鉄骨梁による構造システムの環境負荷を検討するために、>F!の検討を行った

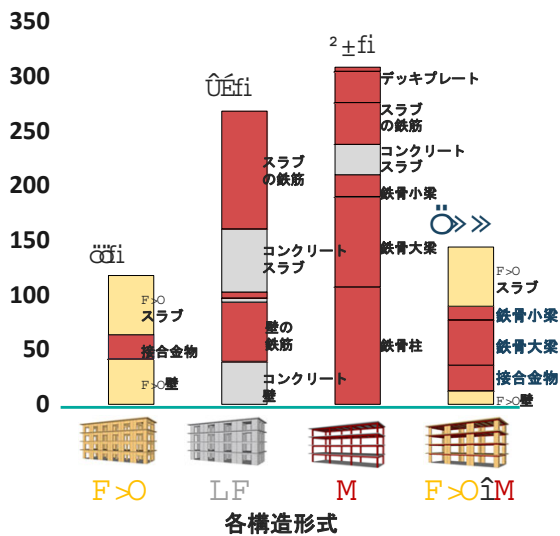
対象とした建物 | >つの>階建て集合住宅



事例 – CLT+Sハイブリッドユニット



各構造形式の565排出量



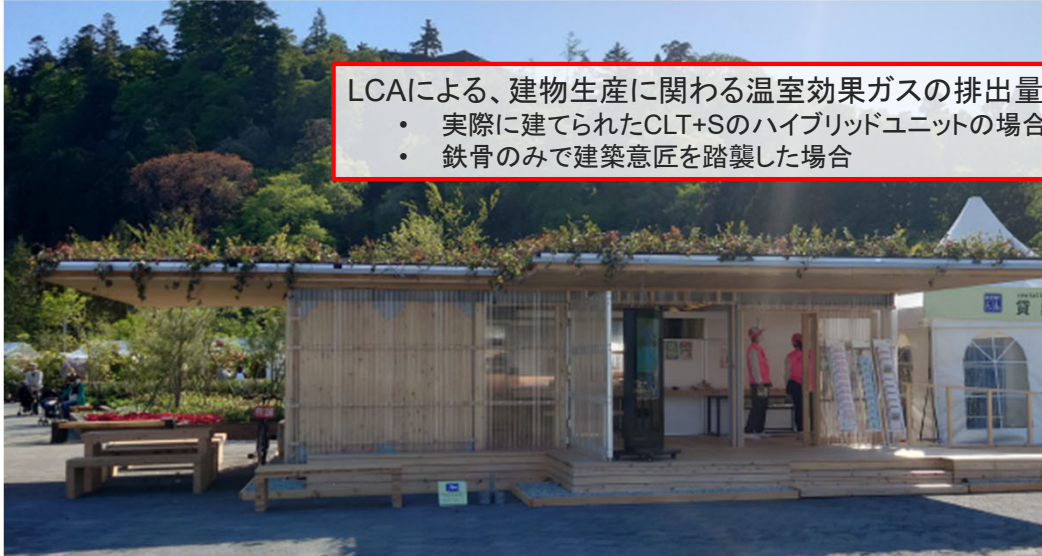
565排出量の算定結果



F>O壁柱∧鉄骨梁造の環境負荷について

鋼材（高炉法による製造）が主要な環境負荷

事例 – 可変型CLTユニット もりの案内所



LCAによる、建物生産に関わる温室効果ガスの排出量の比較

- 実際に建てられたCLT+Sのハイブリッドユニットの場合
- 鉄骨のみで建築意匠を踏襲した場合

21

事例 – 可変型CLTユニット もりの案内所

CLT 部材	仕様	単位重量	重量[kg]	仮定した輸送ルート	距離[km]	輸送車
CLT壁	S60-3-3 90mm厚	412.0	kg/m ³	石巻→登米→現場	121	4tトラック
CLT屋根	S60-3-4 120mm厚	412.0	kg/m ³	石巻→登米→現場	121	4tトラック
鉄骨柱	L-90x90x10	13.30	kg/m	愛知県豊橋市→現場	650	10tトラック
鉄骨大梁	[-200x90x8x13.5	30.30	kg/m	愛知県豊橋市→現場	650	10tトラック
鉄骨小梁	H-100x100x6x8	16.90	kg/m	兵庫県姫路市→現場	942	10tトラック
壁の接合金物	鋼板9mm厚	7874	kg/m ³	愛知県名古屋→現場	660	10tトラック
屋根の接合金物 1	フィクステンプレート190x70x0.6	7874	kg/m ³	愛知県名古屋→現場	660	10tトラック
屋根の接合金物 2	せん断金物140x280x4.5	7874	kg/m ³	愛知県名古屋→現場	660	10tトラック

鉄骨 部材	仕様	単位重量	重量[kg]	仮定した輸送ルート	距離[km]	輸送車
鉄骨柱	□-100x100x6	17.00	kg/m	愛知県豊橋市→現場	650	10tトラック
鉄骨梁	H-175x90x5x8	18.00	kg/m	愛知県姫路市→現場	942	10tトラック
胴縁	C-100x50x2.3	5.170	kg/m	愛知県豊橋市→現場	650	10tトラック
屋根下地	石膏ボード 9.5mm厚	7.000	kg/m ²	仙台市郊外→現場	30	2tトラック
鉄筋(ブレース)	SD295 D10	0.560	kg/m	愛知県名古屋→現場	660	10tトラック
壁の仕上げ(内外装)	ガルバリウム鋼板 0.27mm厚	7874	kg/m ³	愛知県名古屋→現場	660	10tトラック

22

事例 – 可変型CLTユニット もりの案内所

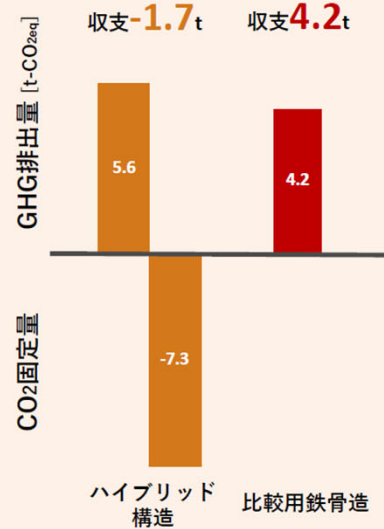


「もりの案内所」と同じ機能を持つ鉄骨造の建築物を設計し、環境負荷を比較した(右図)

CLTハイブリッド構造を採用することで

▶▶ 収支で**5.9t**のGHG排出量の削減効果

自家用乗用車を1人で「地球1周」
運転したときに発生するGHG排出量に相当



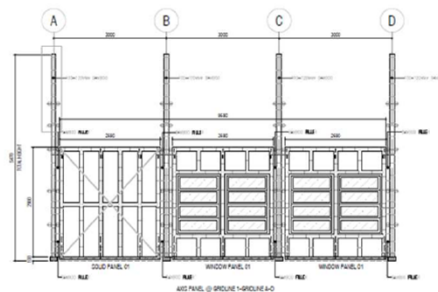
23

国土交通省 ホームページ参照
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html

事例 – フィリピンの竹材フレーム構造の工場



低所得者層に向けて開発された、
低予算で高耐風性の構造システム

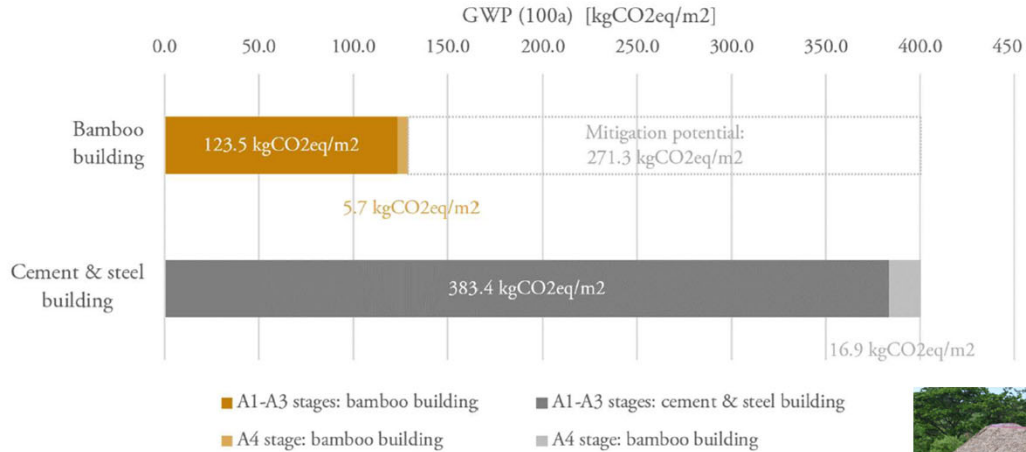


LCAによる、建物生産に関わる温室効果ガスの排出量の比較

- 実際に建てられた竹材フレーム構造の場合
- コンクリートブロック壁の場合

24

事例 – フィリピンの竹材フレーム構造の工場

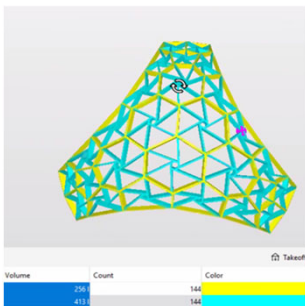


25

事例 – スウェーデンでの広葉樹材の活用



- 木造のパビリオン
- ヨーテボリ市市政400周年祭の展示
- 実質の木材材積: 0.67 m³
- 必要な丸太材積: 1.16 m³

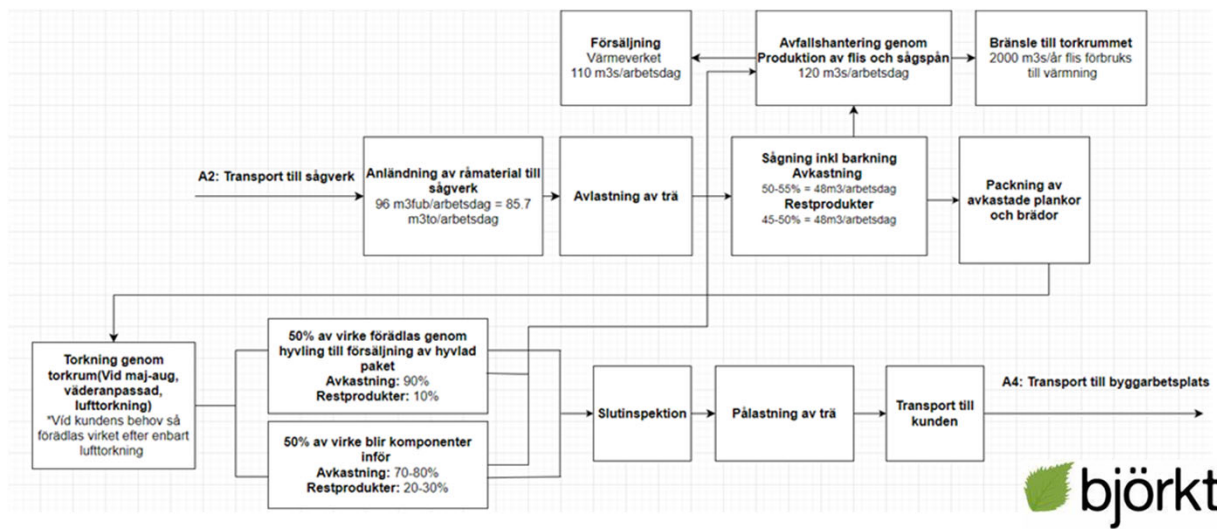


LCAによる、建物生産に関わる温室効果ガスの排出量の比較

- 従来の針葉樹材で生産する場合
- 広葉樹材(カバ)で生産する場合

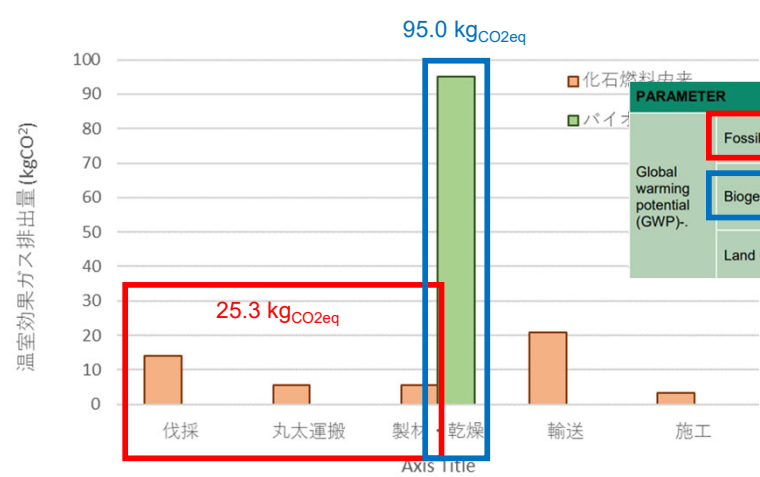
26

事例 – スウェーデンでの広葉樹材の活用

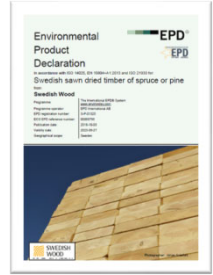


27

事例 – スウェーデンでの広葉樹材の活用



PARAMETER	UNIT	TOTAL A1-A3	Range* A1-A3
Fossil	kg CO ₂ eq.	3.16E+01	2.38E+01 - 3.69E+01
Biogenic	kg CO ₂ eq.	1.06E+02	7.61E+01 - 8.97E+01
Land use and land transformation	kg CO ₂ eq.	4.72E-01	4.10E-01 - 4.40E-01



パビリオン生産・施工に関わる温室効果ガス排出量

28

LCAに関わるマーケットの動向



欧州各国における建築サステナビリティ関連の取組み事例	
国名	取組内容
デンマーク	現在新築のLCA義務化の準備段階。 2023年からは、単位床面積当たりに許容される二酸化炭素排出量（operationalとembodiedの両方）の上限値も含めた基準が施行される予定。
オランダ	2017年以来、床面積が100㎡を超える新築建物は、国の定めるLCAの手法に基づいてembodied impactの評価を行わなければならない。 2018年以降は、新築建物の環境負荷に許容上限値が与えられている。
フィンランド	現在新築のLCA義務化の準備段階。 2025年からは、単位床面積当たりに許容される二酸化炭素排出量の上限値も含めた基準が施行される予定。
スウェーデン	2022年1月より新築建物の建築申請の際にLCAの添付が義務化された。 2027年からは、単位床面積当たりに許容される二酸化炭素排出量の上限値も含めた基準が施行される予定。
フランス	現在新築のLCA義務化の準備段階。
ドイツ、スイス、イギリス	公共建物にはLCAが義務として課せられている。

出典: CLT建築物の事業性開発 事業報告書、CLT協会

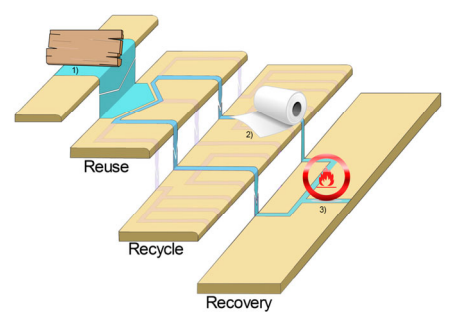
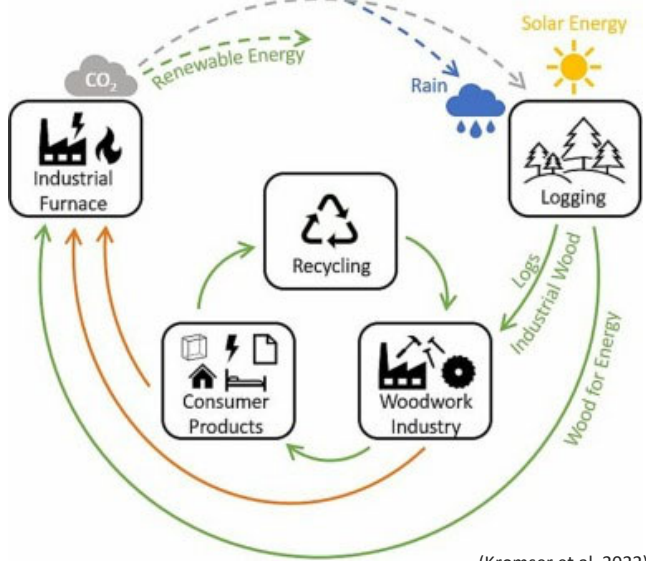
29



循環経済と木材利用

30

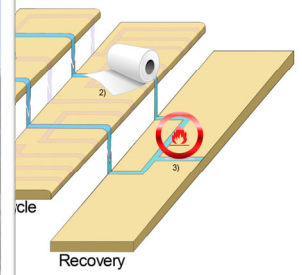
木材をめぐる循環経済モデル



31

(Kromser et al. 2022)

木材をめぐる循環経済モデル

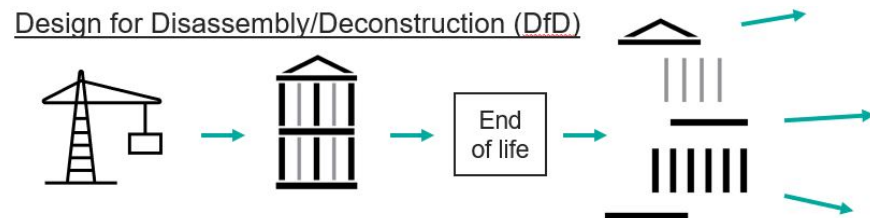


32

(Kromser et al. 2022)

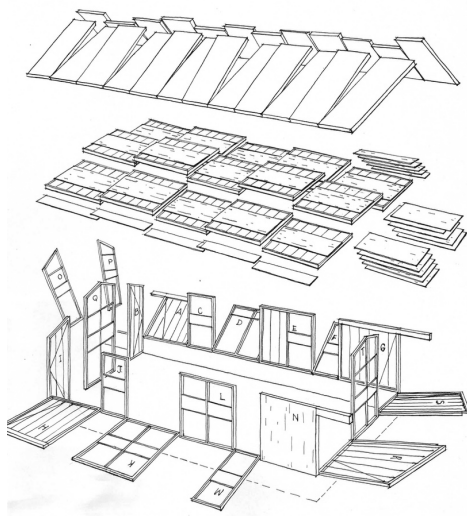
Design for Deconstruction (DfD)

- 部材の長期利用に着目した設計施工の考え方
- 建築の解体を容易にすることで、部材の再利用・カスケードを促進



33

DfD 事例



<https://thetechbuilt.com/>

Techbuilt ダイアグラム (1954) と interior Shikoku Techbuilt houseの内装

34

DfD 事例



35 Bullitt Center (Seattle), 2013

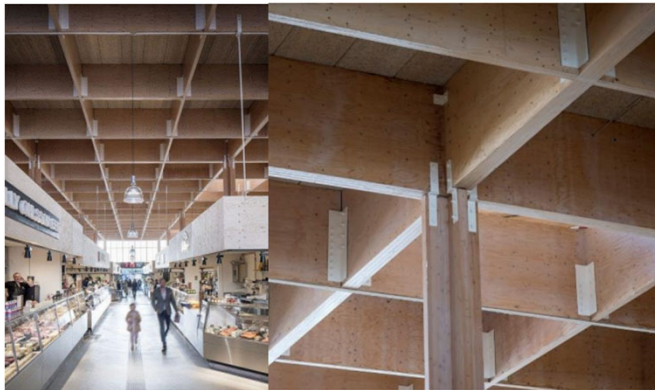


2012-3-8 0210_442_460 Glulam column caps at the Bullitt Center photos: John Stamets

(Sandin et al. 2020)



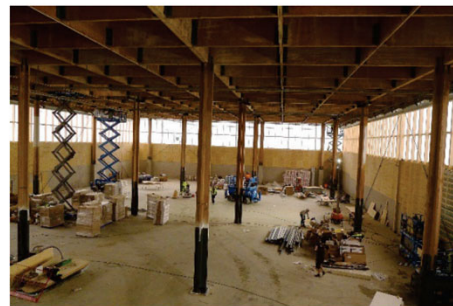
DfD 事例



(Sandin et al. 2020)

仮設マーケットホール (ストックホルム), 2016-2020
と、その解体およびスポーツホールとしての移築 (メルンリッケ)

36



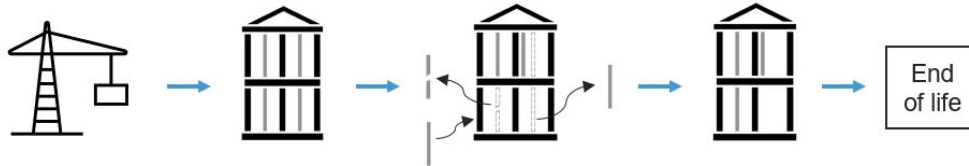
(Sandin et al. 2023)



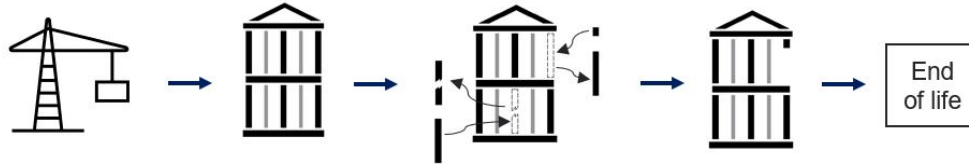
Design for Adaptation (DfA)

- 建築の長寿命化に着目した設計施工の考え方
- 建築に可変性を与えることで、建築の長期利用と部材の再利用・カスケードを促進

Design for (functional) Adaptation



Design for (structural) Adaptation



37

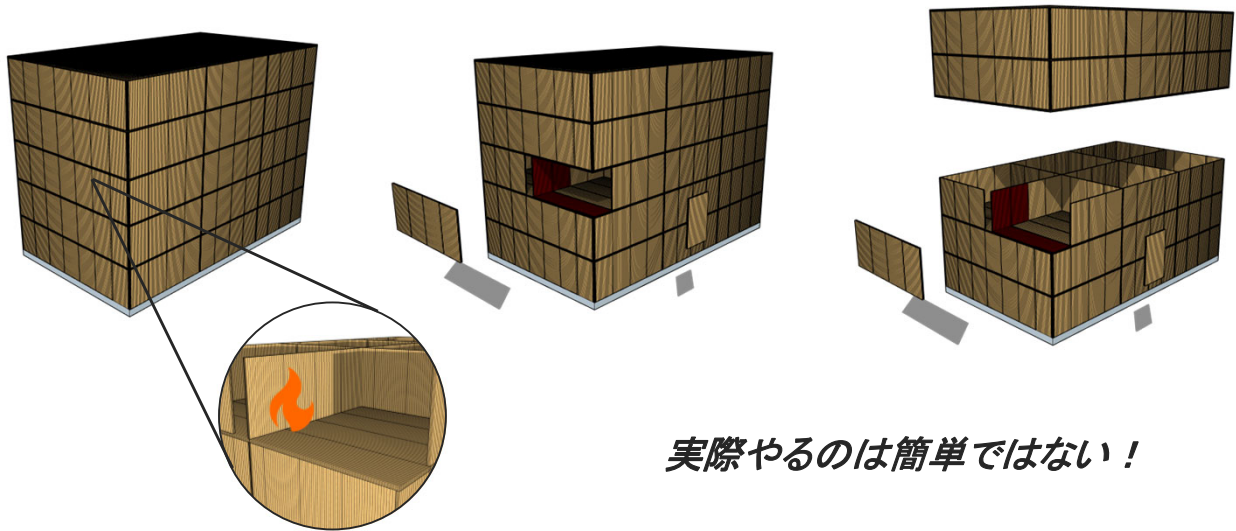
Design for Adaptation (DfA)



16 世紀の山間部の住宅 (Evolène, スイス)
中層階が18世紀に追加された

38

Design for Adaptation (DfA)



実際やるのは簡単ではない！

Design for Adaptation (DfA)

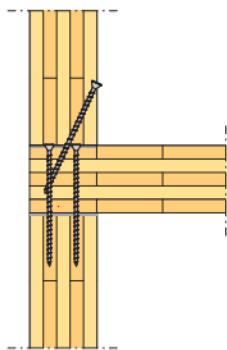


Figure 4.19 Joint between wall panel and floor slab using long wood screws.

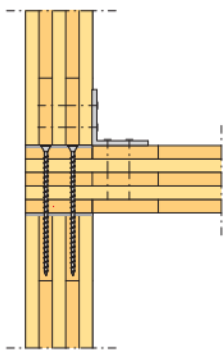


Figure 4.20 Joint between wall panel and floor slab using angle bracket.

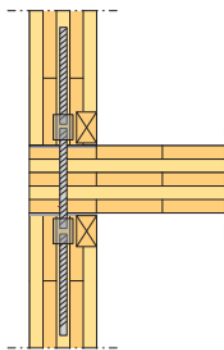


Figure 4.21 Joint between wall panels and floor slab using fully threaded screws and dowels.

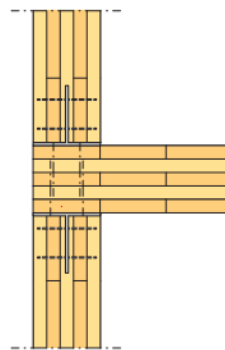


Figure 4.22 Joint between wall panels and floor slab using slotted-in steel plates.

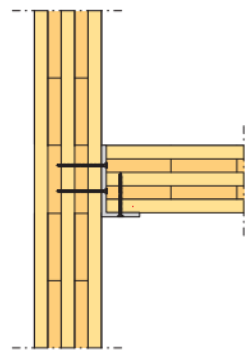


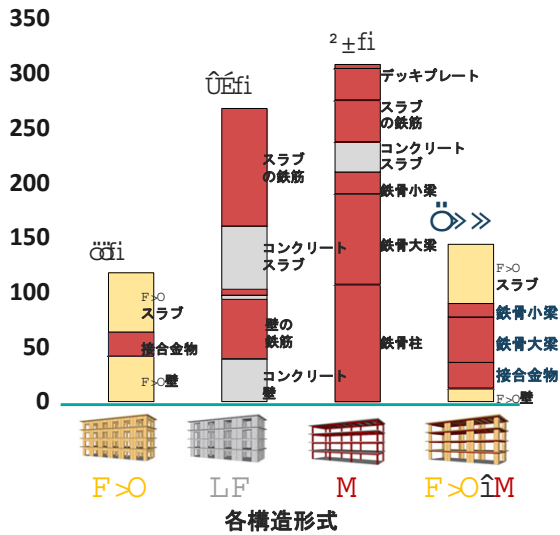
Figure 4.23 Joint between wall panel and floor slab using angle bracket.

Svenskt Trä. (2019). *The CLT Handbook*. Föreningen Sveriges Skogsindustrier.

DfD 事例 – CLT+Sハイブリッドユニット



各構造形式の565排出量



565排出量の算定結果



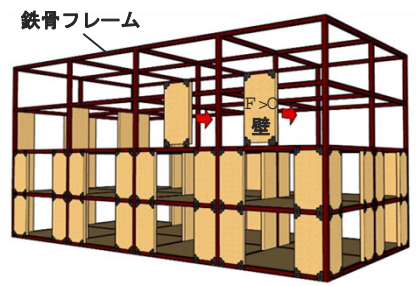
F>O壁&鉄骨梁造の環境負荷について

鋼材（高炉法による製造）が主要な環境負荷

DfD 事例 – CLT+Sハイブリッドユニット

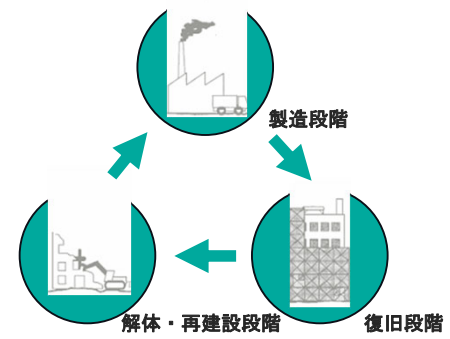


① 適応性のあるF>O壁&鉄骨フレーム構造システムの提案



F>O壁が移動可能
将来の変化に対応できる構造システム

② 建物ライフサイクルにおける環境負荷の検討

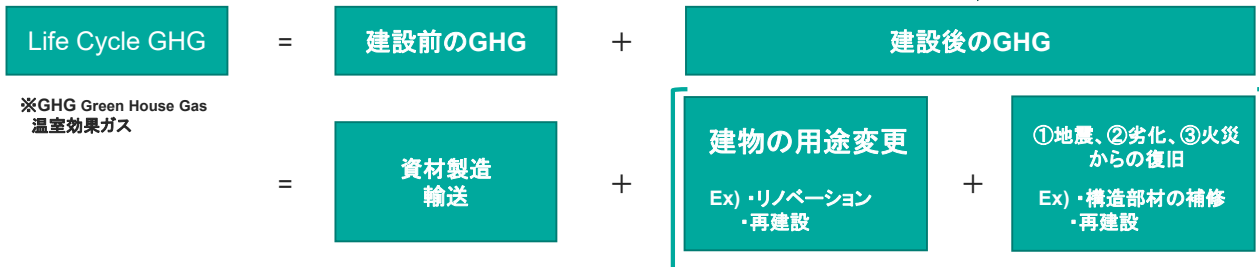
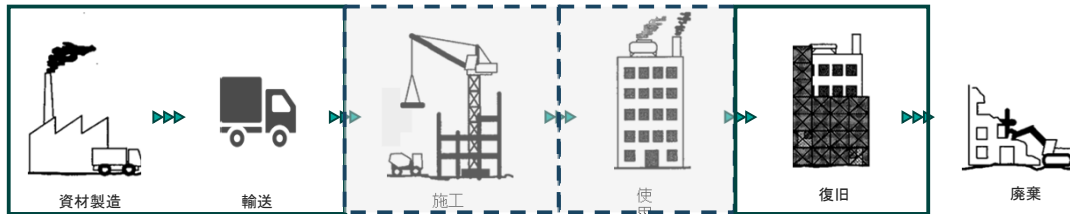


建物のライフサイクルにおいて
定量的な環境負荷を算出できる評価方法

DfD 事例 – CLT+Sハイブリッドユニット



LCAの目的 | 構造システムの違いによる環境負荷の分析



今後の課題とまとめ

従来のLCA手法



材料の循環や複数世代に渡る利用の環境負荷をどう評価する？

従来の一般的なLCAは製品・部材の循環を十分に考慮しない評価枠組

その他のサステナビリティ評価の関わるマーケットの動向 - EU タクソミー



企業の経済活動が地球環境にとって持続可能であるかどうかを判定し、グリーンな投資を促す仕組み



その他のサステナビリティ評価の関わるマーケットの動向 -EU タクソミー



- エネルギー、運輸、製造業、建設・不動産分野等の中大規模企業(従業員500名以上)、金融系企業のサステナビリティへの取り組みの数値化と公表
- グリーン投資へのマーケットの誘導
- 経済成長とエネルギー消費の切り離し

2023年現在における情報開示義務の内容

対象	情報開示義務の内容
金融商品	<p>環境的にサステナブルな金融商品</p> <ul style="list-style-type: none"> 金融商品による投資が貢献する「環境目的」に関する情報 「環境的に持続可能な経済活動」が、投資額に占める割合(トランジショナルな活動と可能にする活動の内訳を含む)を含む形で、環境目的にどのように、どう貢献するかの情報 <p>環境的側面を考慮した金融商品</p> <ul style="list-style-type: none"> 環境目的への貢献を意図している部分について、上に準じて開示 <p>その他の金融商品</p> <ul style="list-style-type: none"> 「環境的に持続可能な経済活動に関するEUの基準を考慮していない」旨を表示することで、開示対象から除外
企業*1	<p>非金融の企業</p> <ul style="list-style-type: none"> 売上げおよび費用(資本的支出および運営費、5年間の資本的支出計画)に占める、タクソミー適合の製品・サービスの割合 <p>金融機関</p> <ul style="list-style-type: none"> 投融资や保険料等収入に占める、タクソミーに適合する経済活動の割合(政府・中央銀行・超国家組織の発行体、金融派生商品、指令2013/34/EUに基づく非財務情報の開示義務を負わない発行体へのエクスポージャーは除外)

今後追加されるタクソミーの評価項目には循環経済に関する具体的な指標も予想される。どのように競争力を維持・増進する？

47

<https://project.nikkeibp.co.jp/>

まとめ



- 木材の利用の促進によるサステナブルな社会への貢献が期待される。
- 木材の利用には利用効率(省資源、未利用材)の観点も重要になる。
- 部材や建築の環境負荷の評価の重要性は今後ますます増加する。
- 木質部材や木質構造を“使い捨て”せず循環経済への貢献を可能とする技術の開発・適用が重要となる。
- 循環経済への貢献を適切に評価する手法・社会的枠組み作りも必要となる。
- 欧州では企業のサステナビリティへの貢献の“見える化”が始まっている。
- 企業の中長期的な維持・成長戦略にもサステナビリティ(省エネ、省資源、循環経済 etc.)の考慮が必要となる。

48

ご清聴ありがとうございました！

yutaka@chalmers.se



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY