

建設発生土のリサイクルによる CO₂排出削減効果の算定



京都大学大学院 地球環境学堂
勝見研究室 助教

加藤 智大

■ 研究背景と目的

- 2050年度までにカーボンニュートラルの達成が求められている
- CO₂排出量削減の取り組みとして、**リサイクル**を推進して資源循環を図ったり、**自然環境の保全**や、排出した**CO₂を固定化**する技術開発などが行われている
- 建設分野では掘削を伴う工事が集中しており、大量に発生する土の有効利用はリサイクルと自然環境の保全に貢献し、CO₂の排出削減につながる可能性
⇒ **建設発生土の搬出に伴うCO₂の発生状況**を整理する

■ 実施フロー

建設発生土の移動に伴う
CO₂発生量の推定方法検討

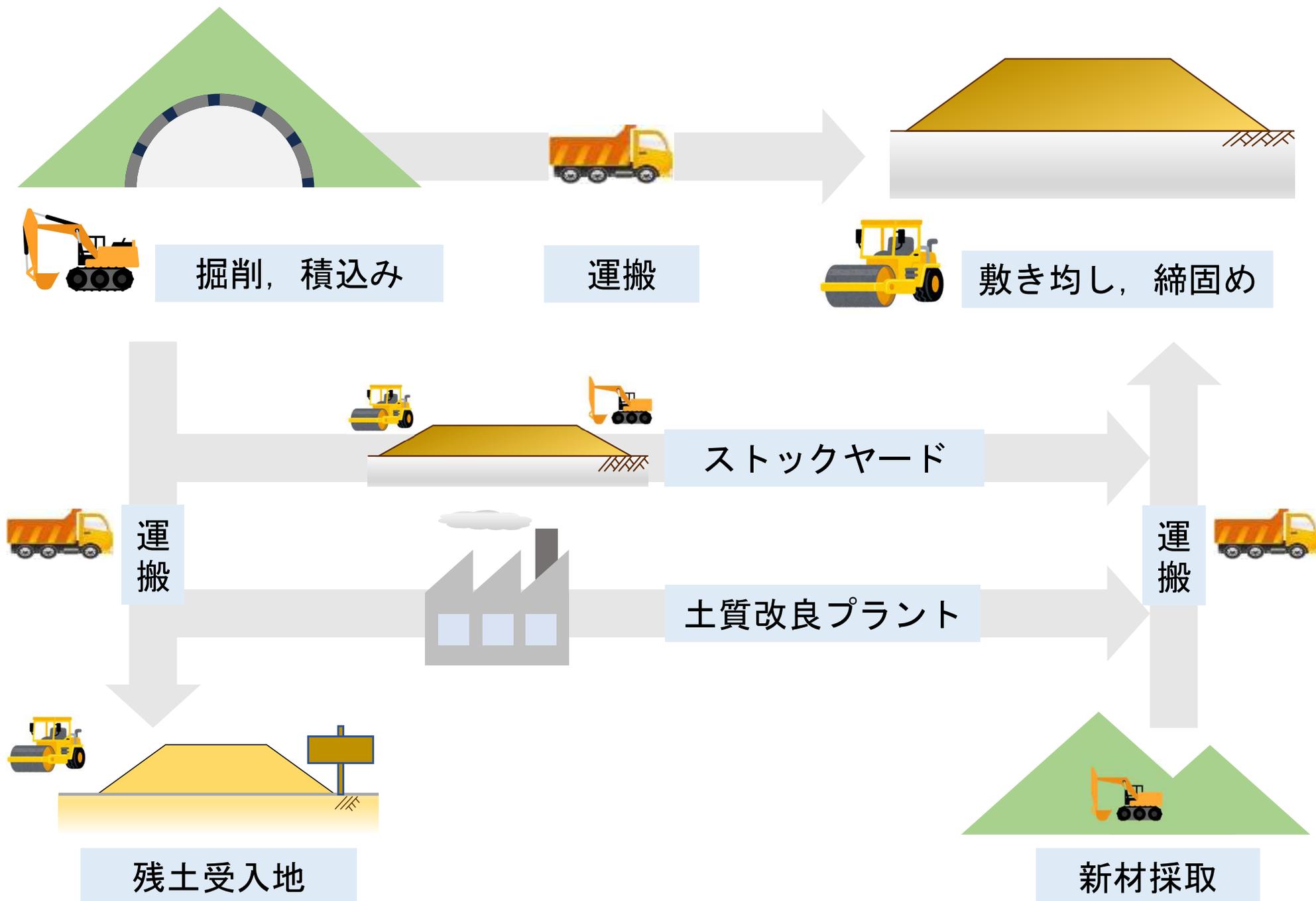
掘削, 運搬, 土質改良,
転圧, 新材採取 etc...

現状発生している
CO₂の質量を計算

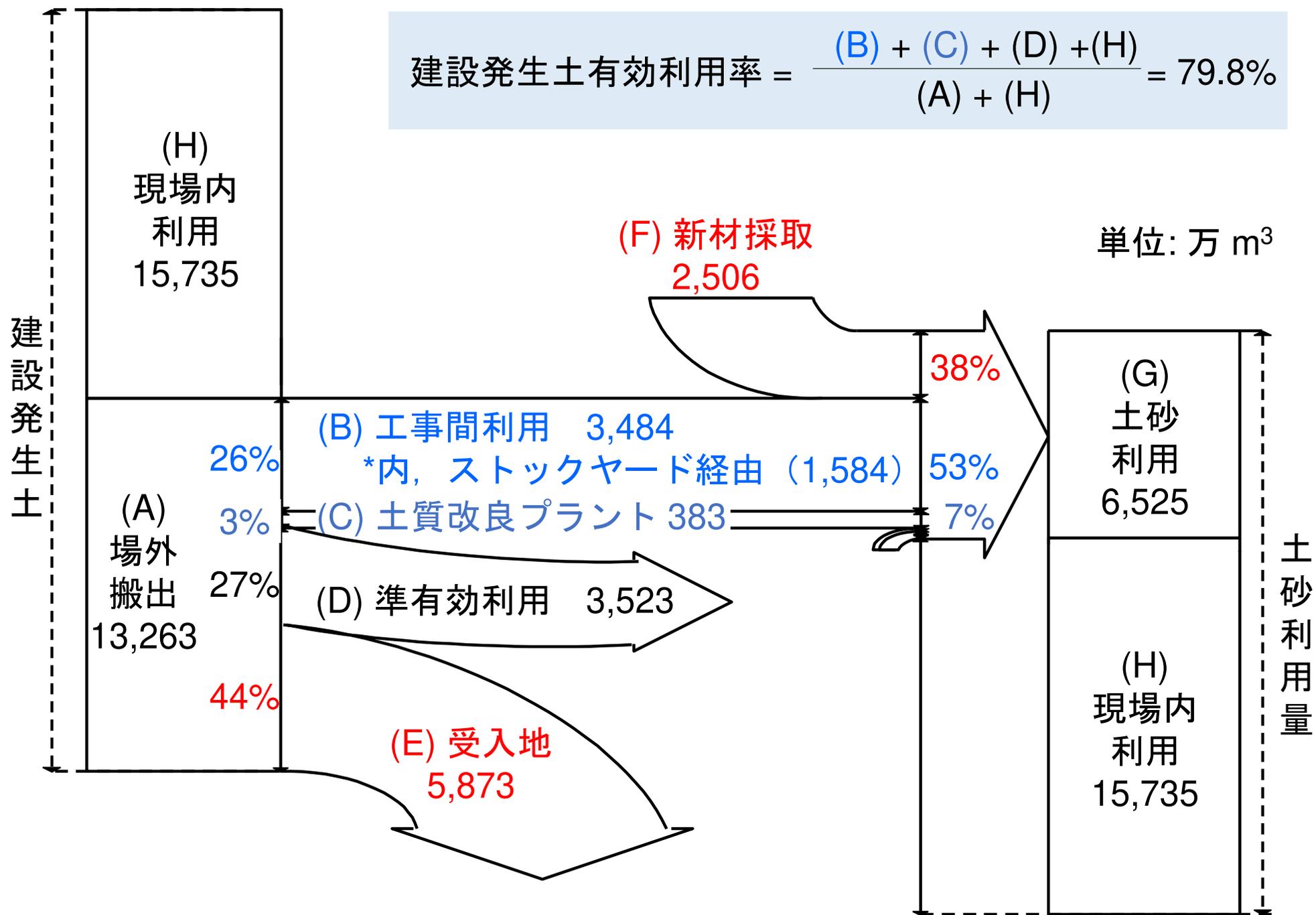
H30建設副産物実態
調査に基づき計算

リサイクルの効果を
評価する仮想計算

H30実態調査の値を
参考にして計算



$$\text{建設発生土有効利用率} = \frac{(B) + (C) + (D) + (H)}{(A) + (H)} = 79.8\%$$



自走式土質改良機（田中建設様）



固定式プラント（大坪GSJ様）



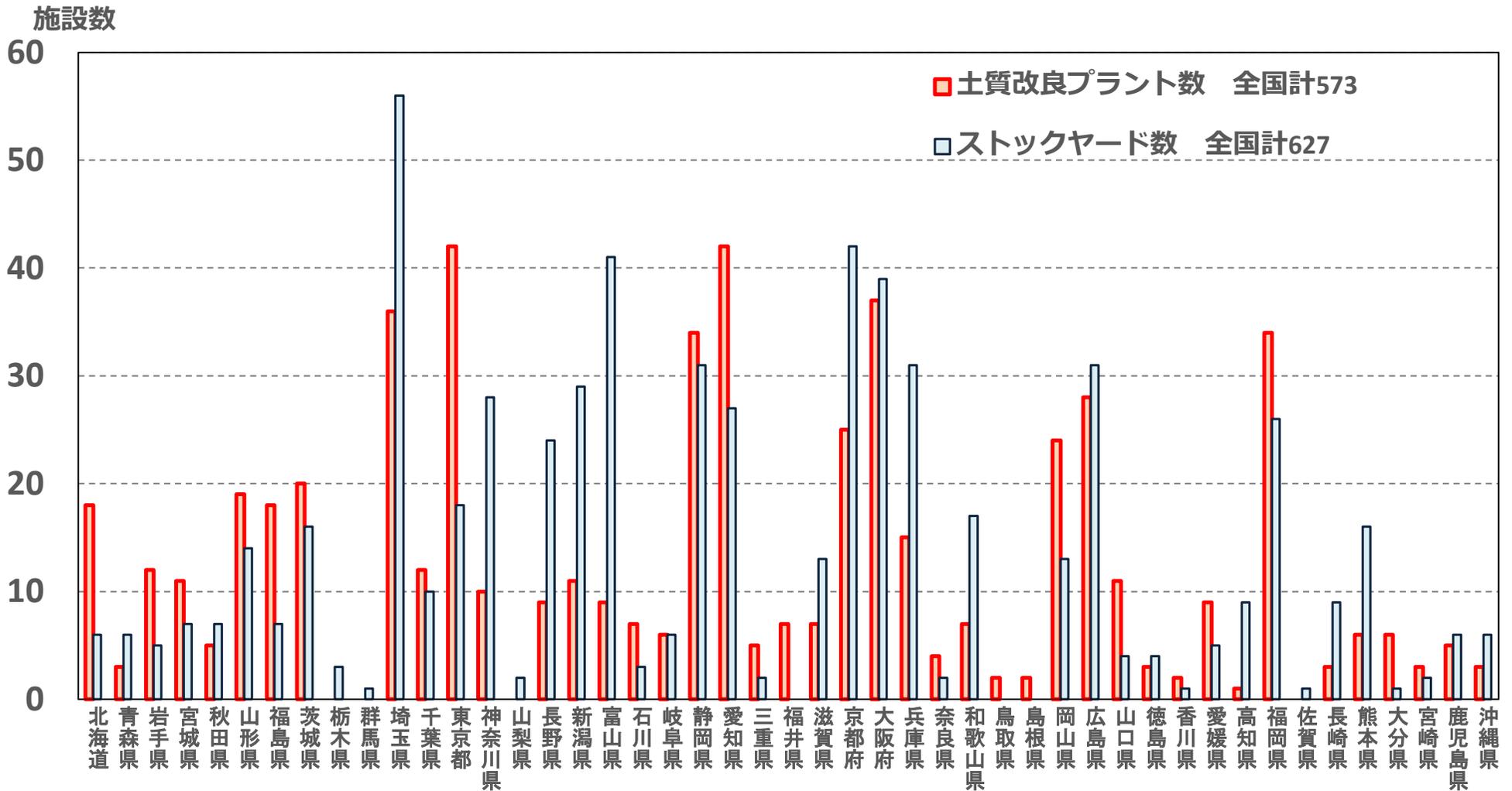
ストックヤードの例



改良材投入の様子



国交省「ストックヤード運営事業者登録制度」登録施設数（2024年9月16日時点）



資料 1) : 国土交通省地方整備局等の登録情報をもとに作成

https://www.mlit.go.jp/tochi_fudousan_kensetsugyo/const/tochi_fudousan_kensetsugyo_const_fr1_000001_00042.html (2024年10月10日アクセス)

ストックヤード，土質改良プラントの全国総数はそれぞれ573，627

■ 発生土受入地の例²⁾

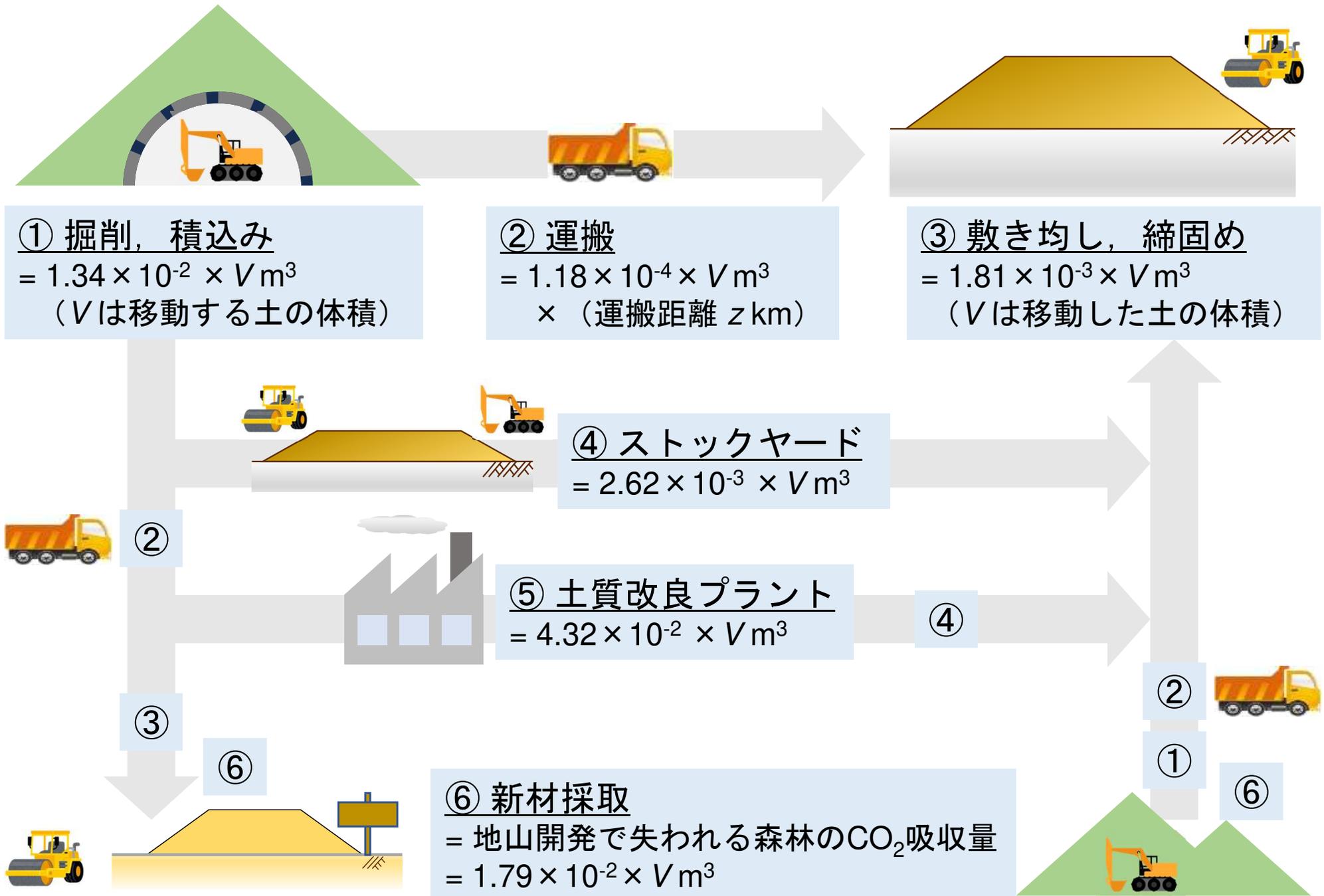


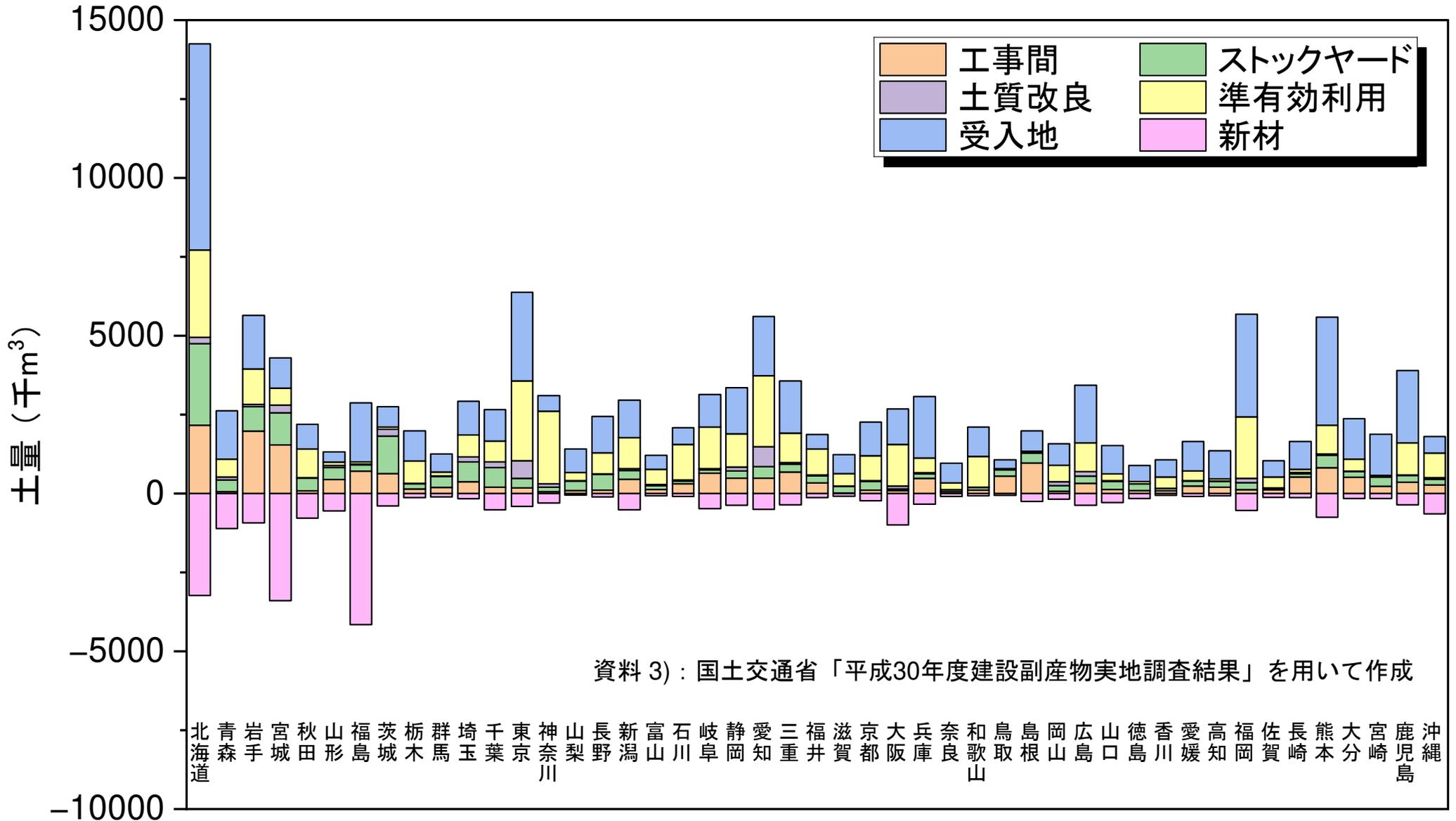
■ 山砂採取地の例²⁾



資料 2) 写真の引用：株式会社フジモト (<https://fujimotoeco.co.jp/>)

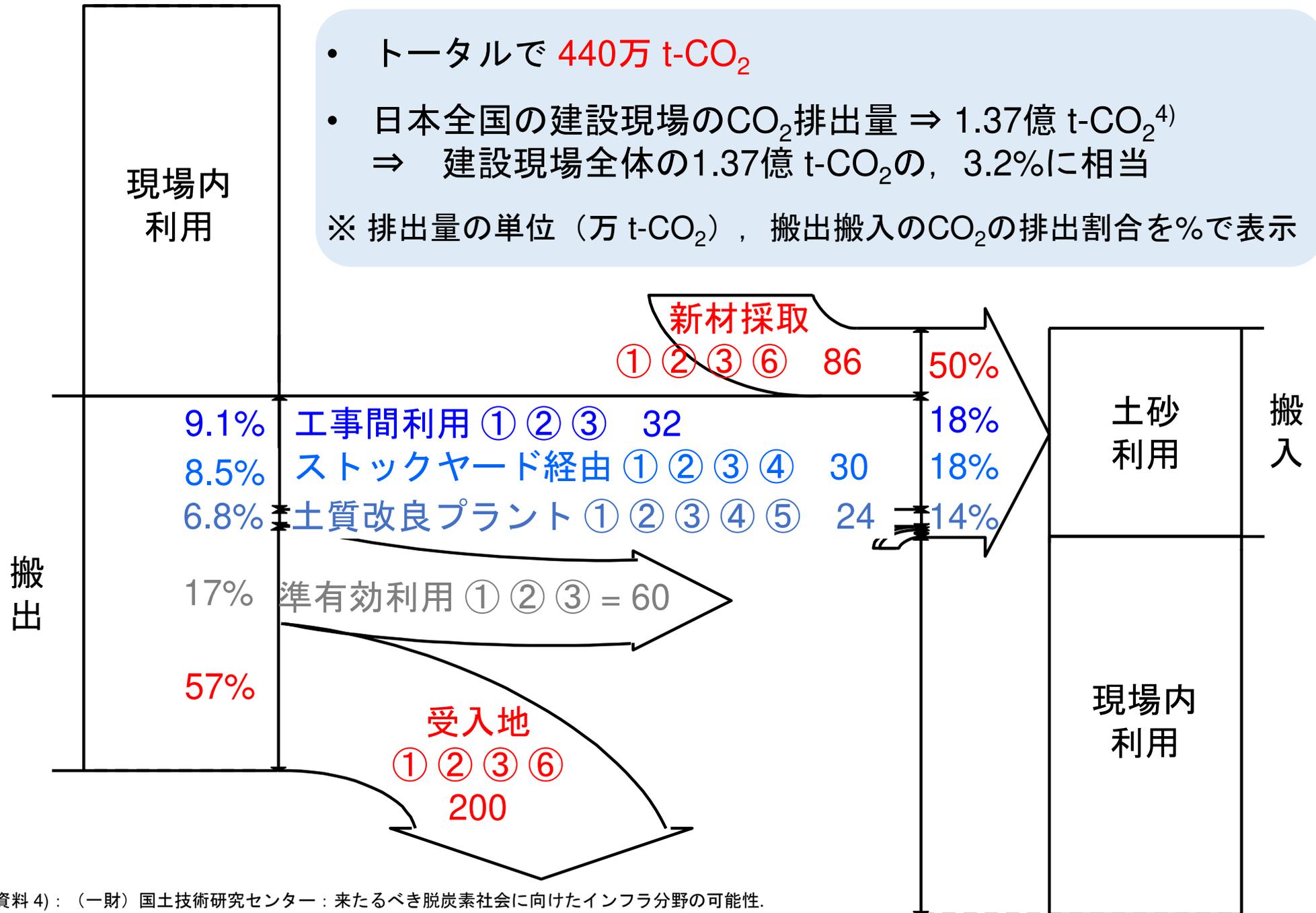
- 新材（山砂）を採取すると、森林伐採に伴うCO₂固定量が減少する可能性
- H30の調査では、44の都道府県で、「受入地搬出量」 > 「新材利用量」
- 建設発生土のリサイクルを進めて**受入地への搬出量を低減**できれば、**新材の利用量が少なくなり**、カーボンニュートラルの観点でも有用な可能性



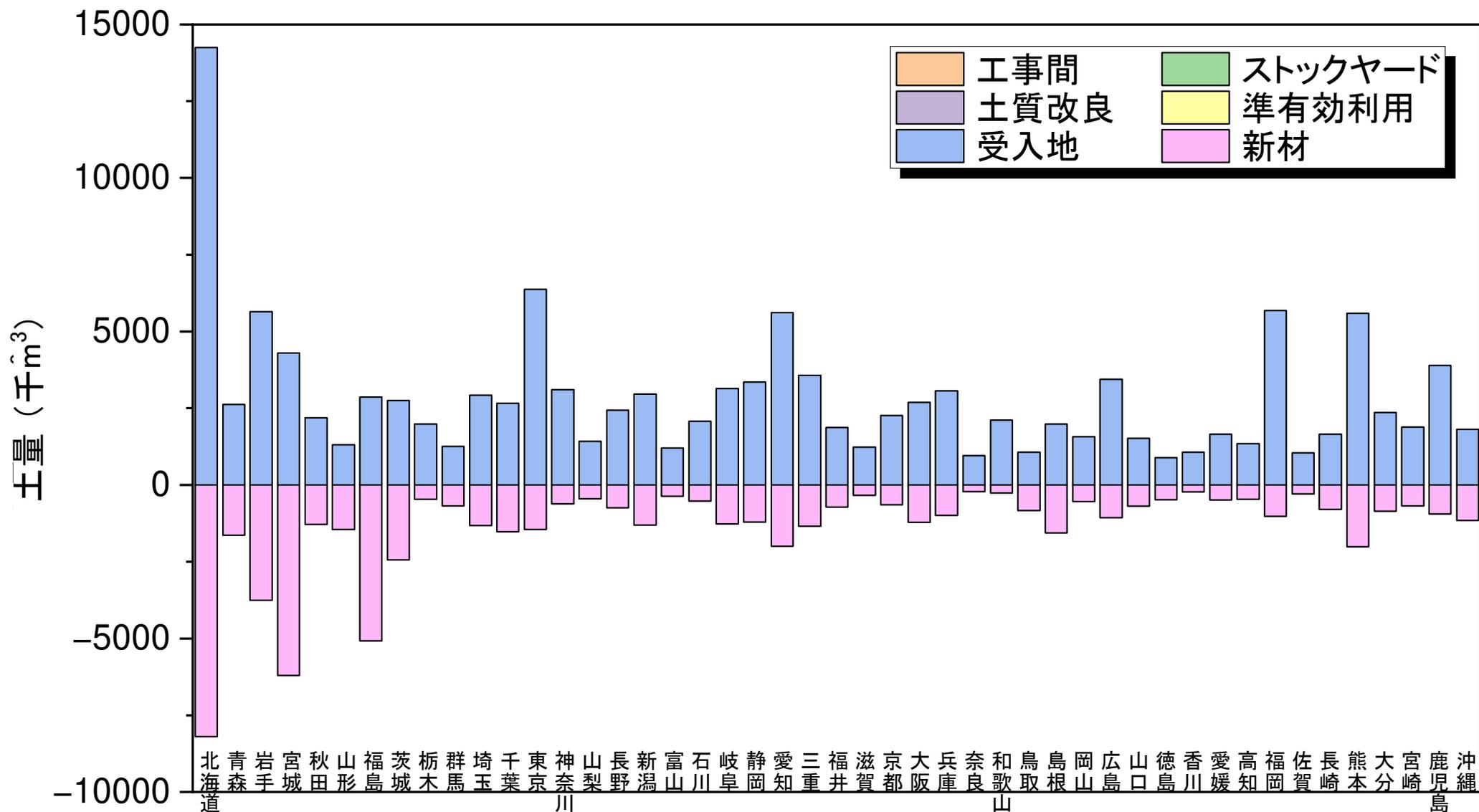


各都道府県の土量 $V \text{ m}^3$ を，スライド p.8 の式に代入し， CO_2 排出量を計算

- トータルで **440万 t-CO₂**
- 日本全国の建設現場のCO₂排出量 ⇒ 1.37億 t-CO₂⁴⁾
⇒ 建設現場全体の1.37億 t-CO₂の, 3.2%に相当
- ※ 排出量の単位 (万 t-CO₂) , 搬出搬入のCO₂の排出割合を%で表示

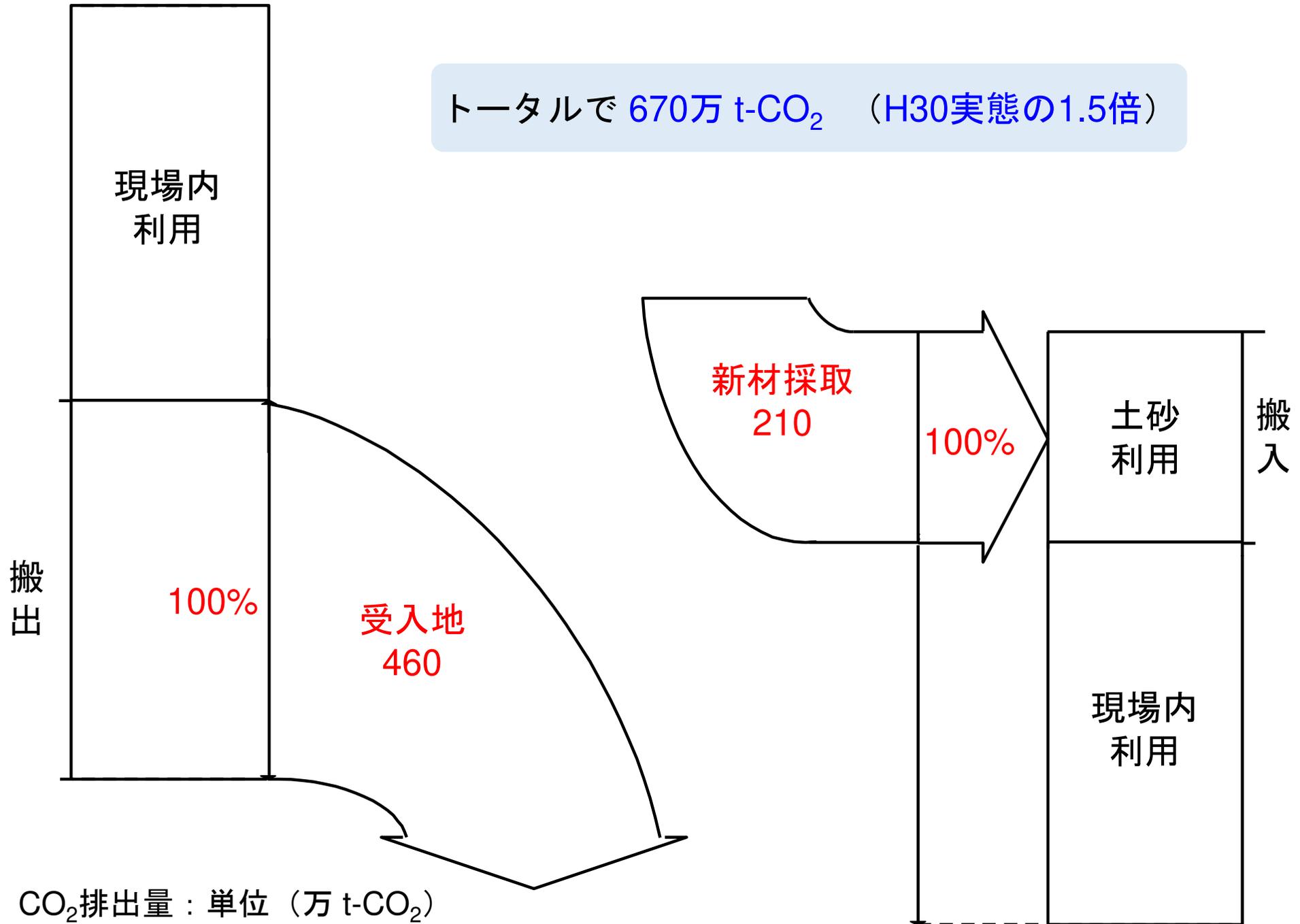


資料 4) : (一財) 国土技術研究センター : 来たるべき脱炭素社会に向けたインフラ分野の可能性.
https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/reports/43/jice_rpt43_02.pdf (2024年8月19日アクセス)

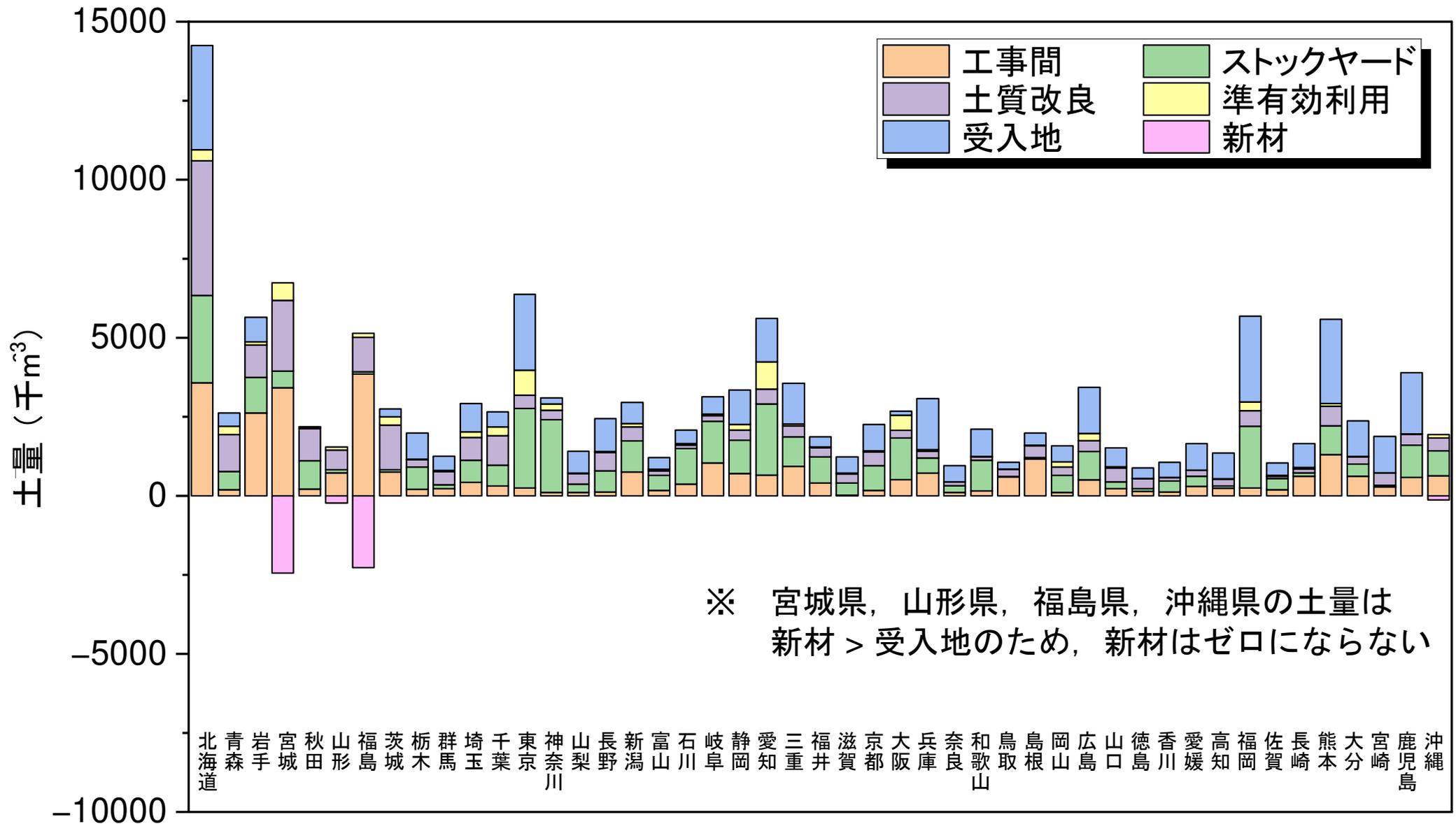


- 受入地搬出量 = H30実態の (工事間 + ヤード + 土質改良 + 準有効 + 受入地)
- 新材搬入量 = H30実態の (工事間 + ヤード + 土質改良 + 新材) と計算

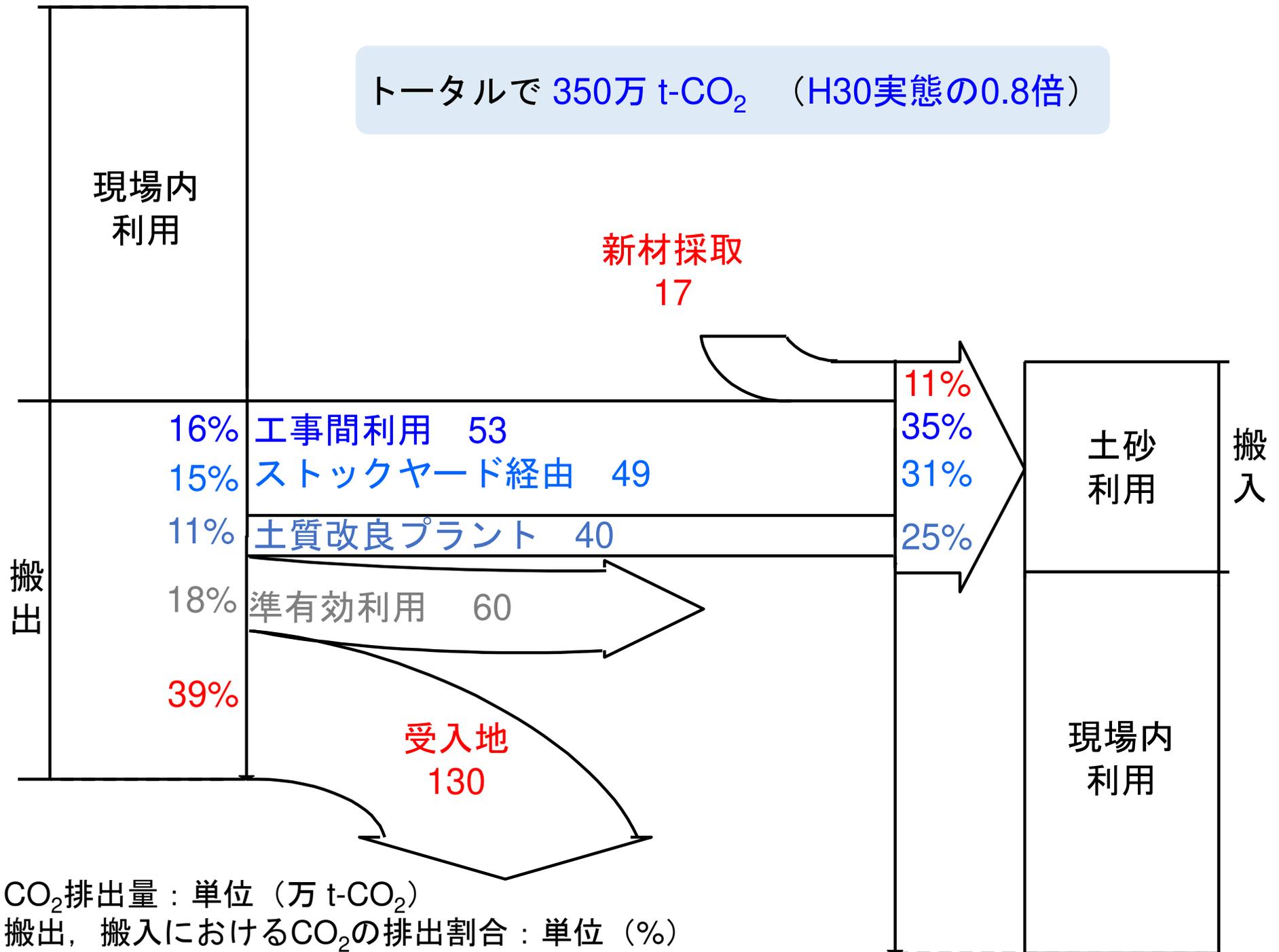
トータルで 670万 t-CO₂ (H30実態の1.5倍)



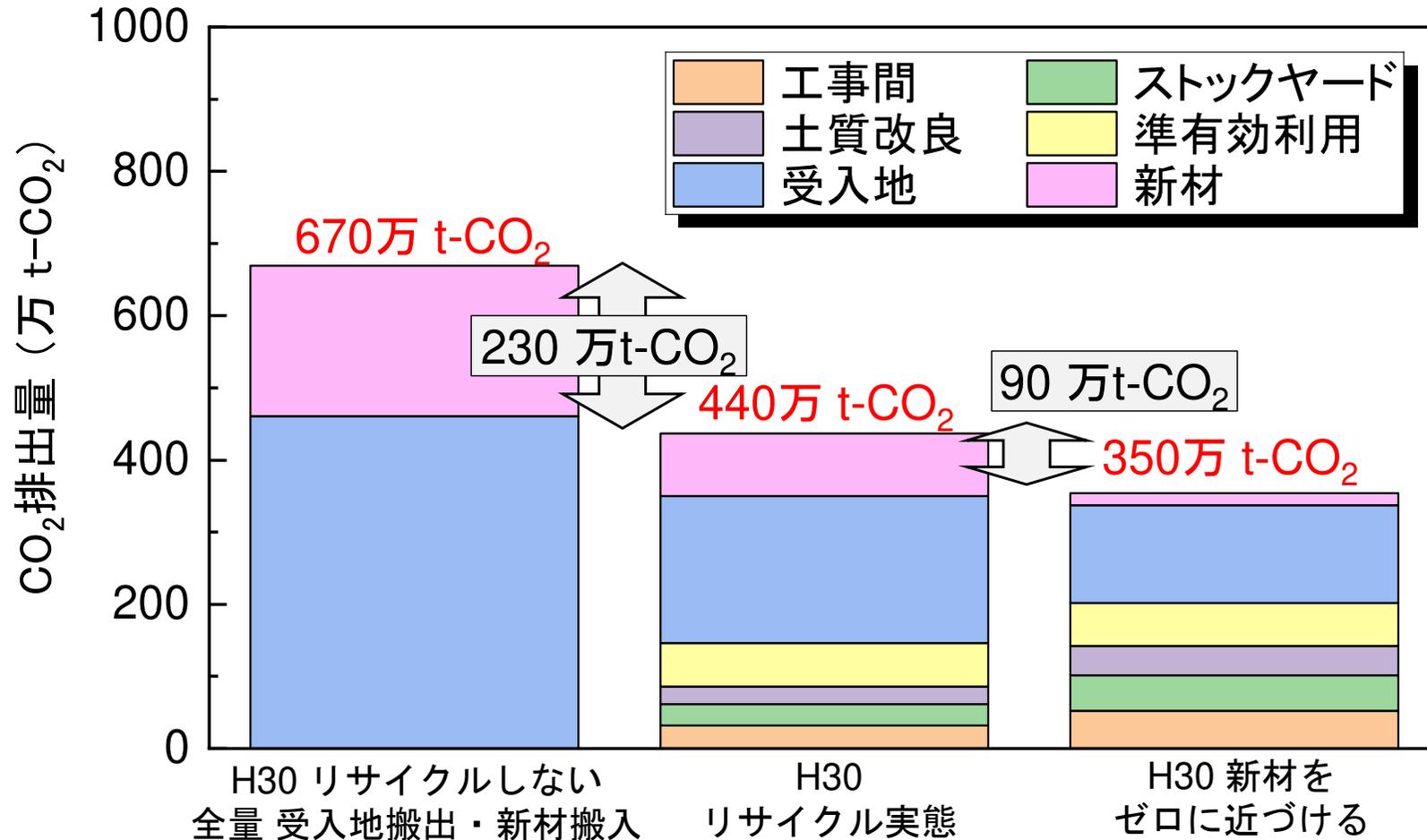
- CO₂排出量：単位 (万 t-CO₂)
- 搬出，搬入におけるCO₂の排出割合：単位 (%)



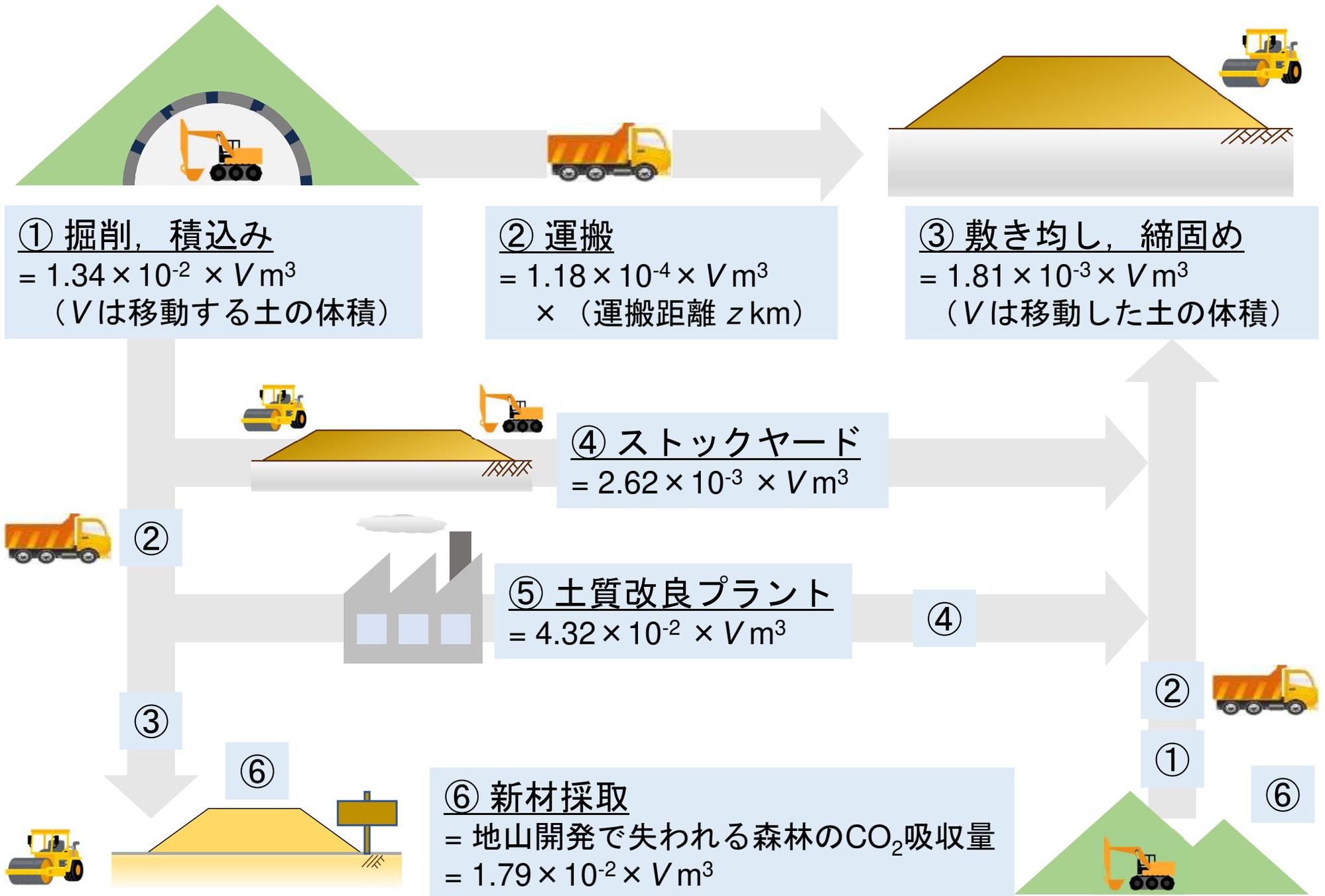
H30の新材搬入量を, リサイクル(工事間・ヤード・土質改良)に配分して加え, その分「受入地搬出量」を減少(3区分の増分はH30実態比率に基づき計算)つまり, 新材搬入量 → 0とし, 受入地 = H30実態の(受入地 - 新材)として扱う



- CO₂排出量：単位 (万 t-CO₂)
- 搬出, 搬入におけるCO₂の排出割合：単位 (%)



- 適切に手入れをした36～40年生のスギは1本あたり約 8.8 kg-CO₂を固定するとされており²⁾、スギ林は1 haあたり1000本程度と言われていることから²⁾、
- 230万 t-CO₂は、スギ2.6億本の森林面積≒東京ドーム 5.5万個分≒佐賀県の面積に相当
90万 t-CO₂は、スギ1億本の森林面積≒東京ドーム 2.1万個分≒大阪府半分の面積に相当
東京ドーム1個の面積を4.7 haで計算



■ ① 搬出元での掘削・積込み^{7) 9)}

「土量」 × 「1 m³を掘削 + 積込む際の燃料」 × 「燃料1 LあたりCO₂排出量」

■ ② 運搬^{6) 7) 8)}

「ダンプの燃費」 × 「燃料1 LあたりCO₂排出量」 × 「移動距離」 × 「台数」

■ ③ 搬入先での敷き均し^{7) 9)}

「土量」 × 「1 m³を敷均しする際の燃料」 × 「燃料1 LあたりCO₂排出量」

■ ④ スtockヤードでの敷き均し・積込み^{7) 9)}

「土量」 × 「1 m³を敷均し・積込む際の燃料」 × 「燃料1 LあたりCO₂排出量」

■ ⑥ 森林伐採に伴うCO₂吸収量の損失（本研究ではCO₂排出量としてカウント）

「森林が今後吸収するCO₂」 + 「森林に固定されていた炭素（CO₂）の放出」

【数値の根拠・引用元，計算プロセスは，末尾の参考資料をご覧ください】

改質土の製造に伴うCO₂排出 + プラント内での重機稼働 + 事務所の電力使用

■ x_5 = 生石灰を使用して改良する際のCO₂排出量 (t-CO₂)

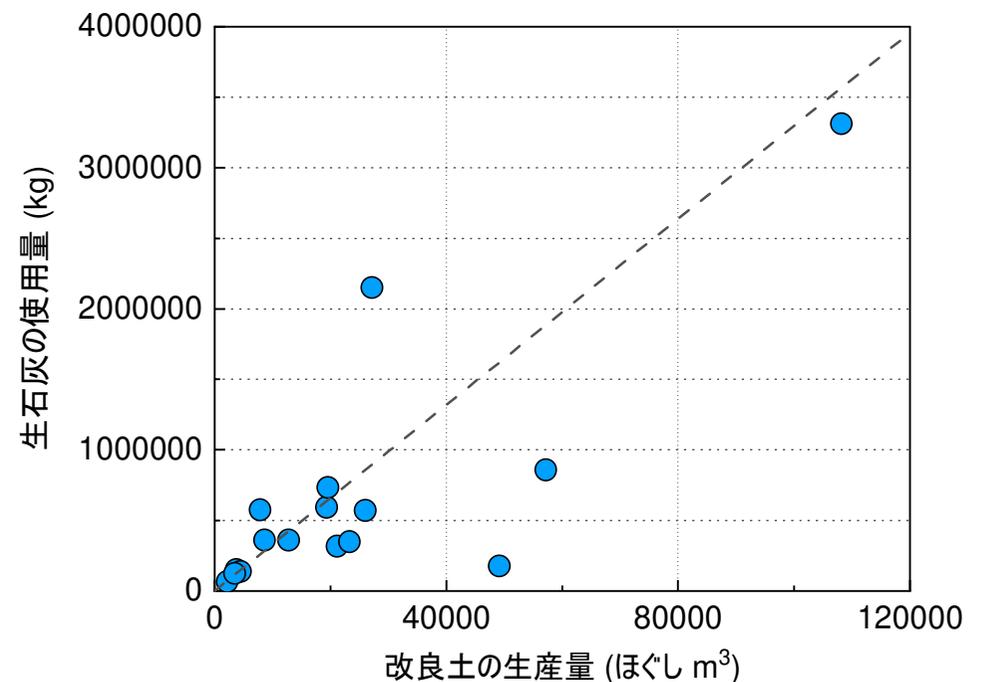
- 改質材として用いられることが多い, 生石灰について検討

$$x_5 = 0.748 \text{ (t-CO}_2\text{/t)} \times \text{改良土の生産量 (m}^3\text{)} \times 33.0 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 0.001 \text{ (t/kg)}$$

文献 10) : 環境省 (2024) : 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧, p. 3.
<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc> (2024年6月5日アクセス)

■ 生石灰投入量と改良土の生産量

- 会員企業にアンケートを実施
16社の回答結果をグラフに整理
- 平均 : **33.0 kg/m³**
- 最大 79.2 kg/m³, 最小 : 15.0 kg/m³
- 1 m³の改良土を生産するために必要な生石灰 ⇒ 33.0 kg/m³と推定



■ 工場式プラントでの燃料・電気使用量，改良土生産量（2023年4月～2024年3月）

	A社	B社	2社の平均
重機稼働に伴う燃料使用量 (L)	19,629	14,493	17,061
電気使用量 (kW / h)	33,955	34,356	34,156
改良土の生産量 (ほぐしm ³)	20,503	14,846	17,675

■ y_5, z_5 = 土質改良プラント内の重機の稼働，電力使用に伴うCO₂排出量 (t-CO₂)

①～④と同様に，軽油の単位発熱量などから計算される原単位⁷⁾を用いて，

$$y_5 = 0.00262 \text{ (t-CO}_2\text{/ L)} \times 17061 \text{ (L)} \div 17675 \text{ (m}^3\text{)} \times \text{改良土の生産量 (m}^3\text{)}$$

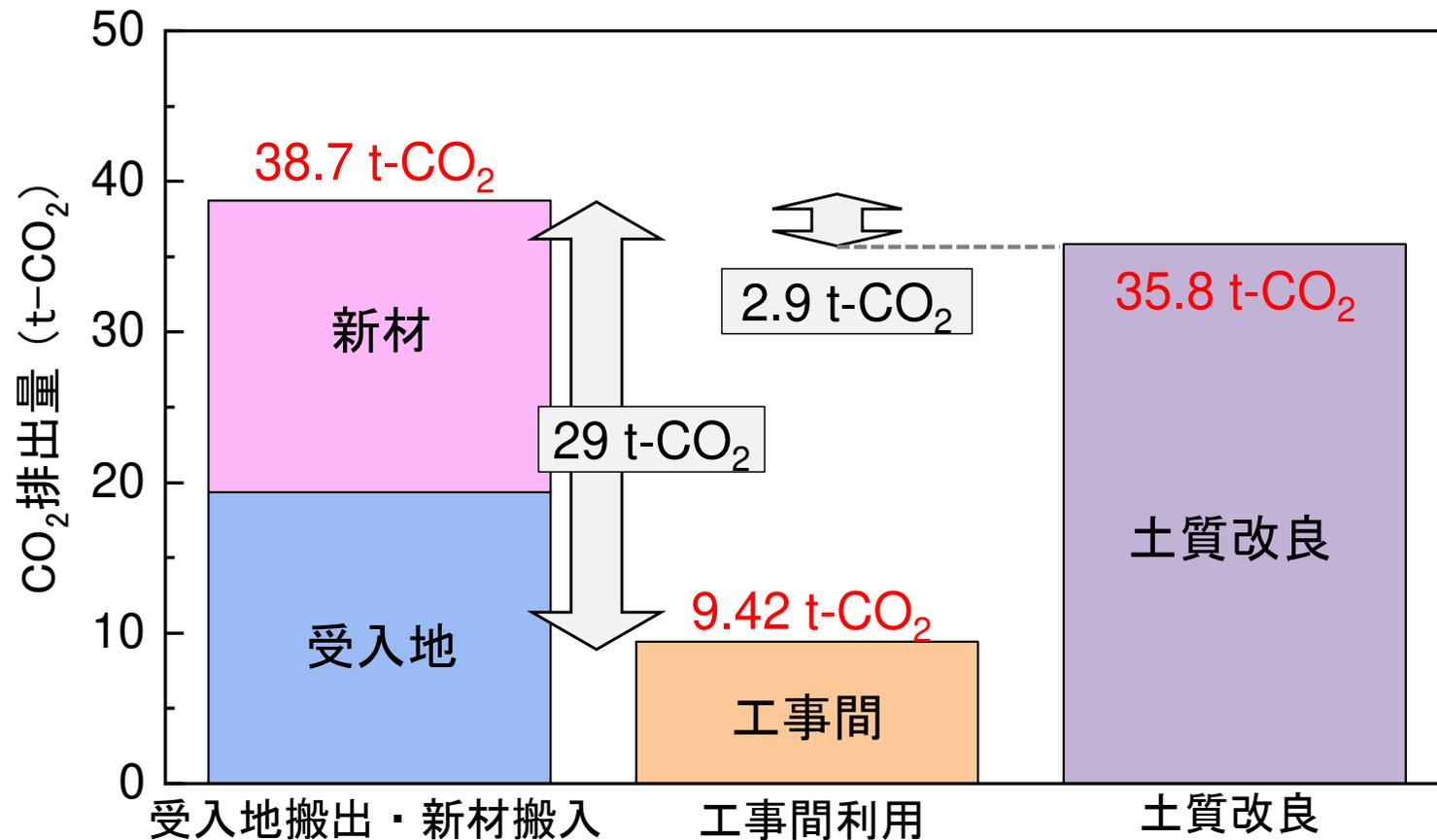
$$z_5 = 0.000438 \text{ (t-CO}_2\text{/ kW/h)} \times 17061 \text{ (L)} \div 34156 \text{ (kW/h)} \times \text{改良土の生産量 (m}^3\text{)}$$

■ A_5 = 土質改良に伴って排出されるCO₂の質量 (t-CO₂)

$$A_5 = x_5 + y_5 + z_5 = (0.025 + 0.0025 + 0.0085) \times \text{改良土生産量 (m}^3\text{)} = 0.036 \times 1.2V$$

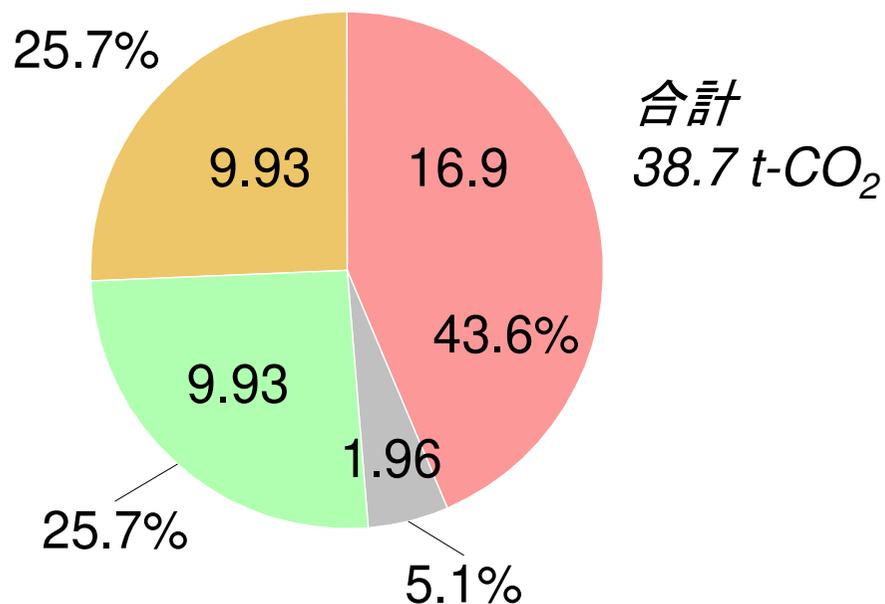
※H30建設副産物実態調査は土の体積を地山で計算するため，⑤を計算する際は実態調査の値，Vに1.2を乗じる

- 資源有効利用促進法による再生資源利用促進計画・実施書作成対象の工事規模（ $V = 500 \text{ m}^3$ 超）に該当する、ダンプ（積載量 5.55 m^3 ）100台分の土を「受入地搬出・新材搬入」「工事間利用」「土質改良」する時の CO_2 排出を比較

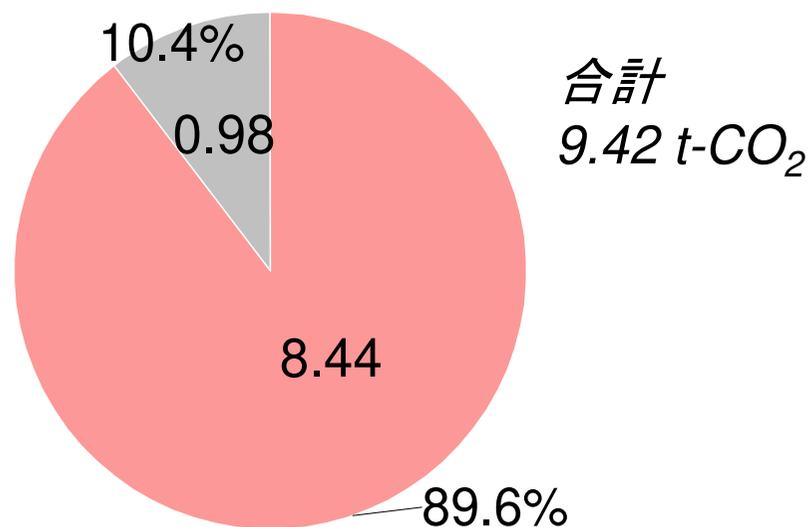


- 受入地に搬出して新材を搬入する場合に比べ、**全量を土質改良して有効利用してもCO₂排出量は小さく**、差異はスギ330本の森林（0.33 ha）に相当
- CO₂排出量を低減した土質改良材の開発が進んでおり、土質改良に伴う排出量低減が期待

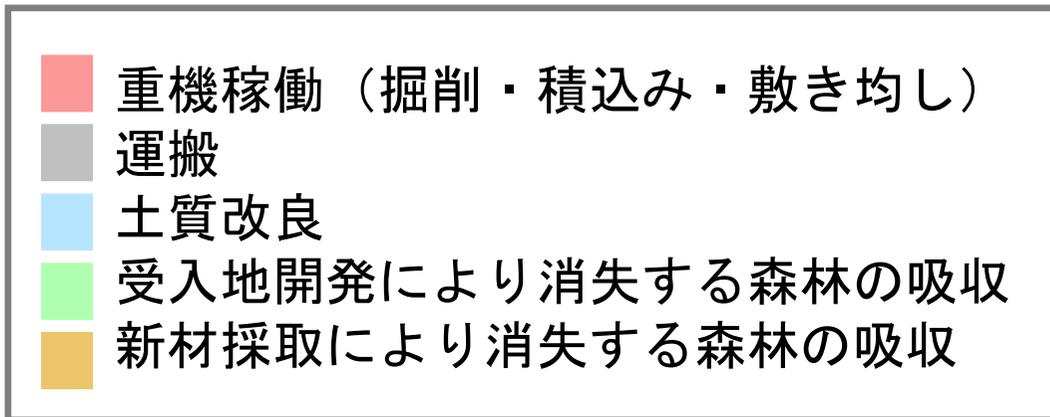
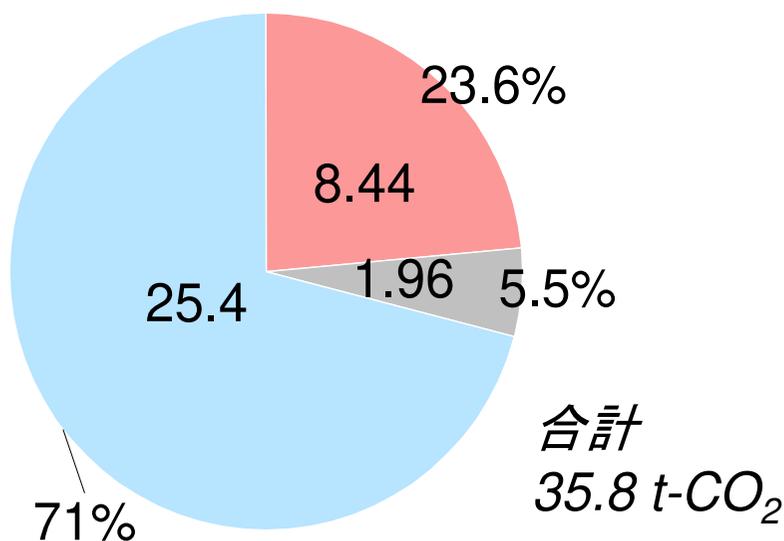
■ 全量を受入地に搬出し，新材を搬入



■ 全量を工事間利用



■ 全量を土質改良して利用



※工事間利用，土質改良経由，
受入地へ搬出，新材を搬入に関わる
土の運搬距離はすべて15 kmで計算

- H30 建設副産物実態調査に基づき，建設発生土の搬出・搬入に関わるCO₂排出量の推定方法を検討し，試算を実施
- 本研究の条件では，建設発生土の搬出・搬入に関わる日本全国でのH30のCO₂排出量は合計で，440万 t-CO₂程度と推定
- H30で新材の採取をゼロにする仮想計算を行うと，90万 t-CO₂程度を削減できる可能性が示唆され，これは東京ドーム約2.1万個のスギ林に相当
- 計算結果は速報値のため，各計算プロセスの精査が今後の課題
 今後は，前々回のH24の結果と比較して近年の排出量削減状況を計算したり，建設発生土の発生予測から，将来のCO₂排出量を予測することも課題
- 本研究の実施に際し，（一財）先端建設技術センターの高野昇様，株式会社サンエコセンターの小重忠司様，株式会社奥村組の大塚義一様には多大なご助言，ご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。
- 研究助成をいただいた，（一社）全国建設発生土リサイクル協会（JASRA）関係者の皆さま，および土質改良のアンケートにご協力頂いた皆さまにも御礼申し上げます。

參考資料

■ x_2 = 単位距離あたりの燃料の使用量 (L/km)

重量10 tクラス車両で燃費 4 km/L⁶⁾, つまり $x_2 = 0.25$ L/kmを仮定

文献 6) : 社団法人全日本トラック協会 : <https://jta.or.jp/ippan/hayawakari/14-sonota.html> (2024年8月16日アクセス)

■ y_2 = 単位当たりの燃料の使用で生じるCO₂の質量 (t-CO₂/L)

軽油の単位発熱量 38.0 GJ/kL, 炭素排出係数 0.0188 t-C/GJ⁴⁾

y_2 = 単位使用量当たりの発熱量 × 単位発熱量当たりの炭素排出量 × 44/12, なので,

$$= 38.0 \times 0.0188 \times 44/12 \div 1000 = 2.619.4666... \times 10^{-3} \doteq 0.00262 \text{ t-CO}_2/\text{L}$$

文献 7) : 環境省 (2024) : 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル(Ver5.0) (令和6年2月), pp. 56-57.
<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc> (2024年6月5日アクセス)

■ z_2 = トラックの移動距離 (km)

⇒ 各都道府県について, H30建設副産物実態調査 表12を使用⁸⁾

■ 土砂運搬に伴って排出されるCO₂の質量 (t-CO₂)

ダンプの燃費 × 燃料使用に伴うCO₂発生 × 移動距離 × 台数



$$= x_2 \times y_2 \times z_2 \times \text{土の体積 } V (\text{m}^3) \div \text{1台の積載量 } 5.55 (\text{m}^3) = 1.18 \times 10^{-4} z_2 \times V$$

■ z = トラックの移動距離 (km) ⇒ H30建設副産物実態調査 表12を使用⁸⁾

表12
建設副産物の運搬距離
建設副産物分類:【品目:建設発生土 単位:km】
搬出区分:【他の工事現場または土質改良プラントへの搬出】

工事場所 都道府県	新築・増改築計(km)			新築・増改築(木造)		
	単純 平均	加重 平均	最長 距離	単純 平均	加重 平均	最長 距離
北海道	12.2	13.5	34.0	7.5	8.2	9.0
青森県	8.2	7.2	25.0	-	-	2.0
岩手県	8.0	1.3	15.0	14.2	9.3	40.0
宮城県	11.4	12.1	21.0	9.0	9.0	9.0
秋田県	7.1	6.3	18.0	20.0	20.0	20.0
山形県	16.4	15.0	20.0	6.0	5.5	8.0
福島県	23.6	19.5	79.0	-	-	30.0
東北地域計	13.4	13.7	79.0	12.4	8.7	40.0
茨城県	13.4	14.0	41.0	12.0	16.1	20.0
栃木県	14.5	16.7	52.0	5.0	7.3	9.0

合計(km)		
単純 平均	加重 平均	最長 距離
11.5	9.7	88.0
7.1	8.7	60.0
12.6	17.3	145.0
11.3	9.8	85.0
8.0	7.6	113.0
9.4	7.1	59.0
9.5	10.3	80.0
9.9	11.8	145.0
11.1	10.9	100.0
10.5	14.6	160.0

各都道府県毎に、
建設発生土の
運搬距離が記載

トラックの移動距離は
「土木 + 建築」である
【建設工事合計】の
加重平均 (km) を使用

- 工事間で直接有効利用，ストックヤード・土質改良プラント経由で有効利用，受入地への搬出の距離は，それぞれ上記の表12に記載がある ⇒ 既知
- 【新材採取地 → 搬入工事】の距離に関する情報は提供されていないため，ストックヤード・土質改良プラント経由で有効利用の距離と同じとして計算

■ y_2 = 単位当たりの燃料の使用で生じるCO₂の質量 (t-CO₂/L)

②と同様に，軽油の単位発熱量と炭素排出係数から⁶⁾， $y_2 = 0.00262 \text{ t-CO}_2/\text{L}$

■ ① 掘削・積込みに伴って排出されるCO₂の質量 (t-CO₂)

- バックホウが1 m³を掘削する際に消費する燃料 = 4.8 L⁹⁾
- バックホウで660 m³を積込む際に消費する燃料 = 204.6 L⁹⁾
- ① = {4.8 + (204.6 / 660)} × V × 0.00262 = 1.34 × 10⁻² × V



文献 9) : インフラ分野における建設時のGHG排出量算定マニュアル案 <https://www.nilim.go.jp/lab/pcg/result.html>
(2024年8月16日アクセス) ⇒ 重機の稼働に関わる燃料の消費量(L)に関わる情報源

■ ③ 敷均し・締固めに伴って排出されるCO₂の質量 (t-CO₂)

- 1 m³を整地する際に重機が消費する燃料 = 0.69 L⁹⁾
- ③ = 0.69 × V × 0.00262 = 1.81 × 10⁻³ × V



■ ④ スtockヤードでの整地・積込みで排出されるCO₂の質量 (t-CO₂)

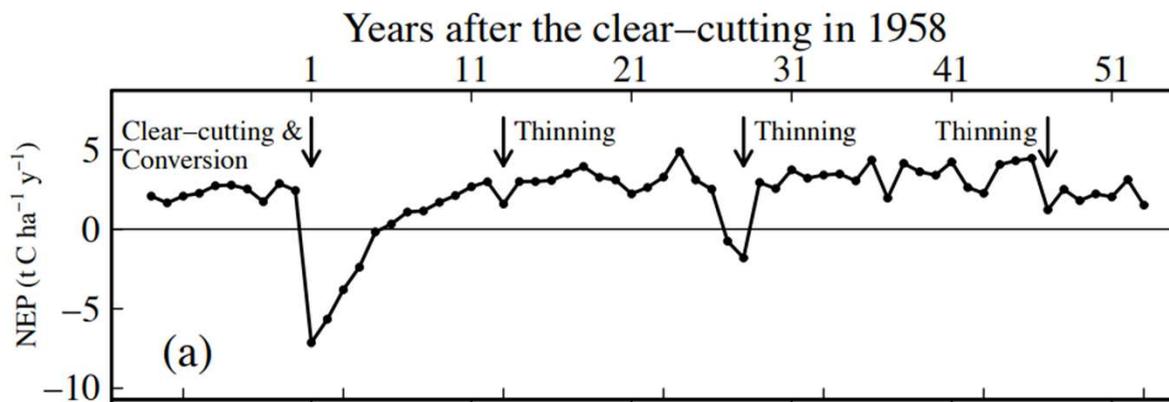
- ④ = {(204.6 / 660) + 0.69} × V × 0.00262 = 2.62 × 10⁻³ × V



■ 単位haあたりの森林のCO₂吸収量¹¹⁾

- 林野庁のデフォルト値（スギ林）と計算式を用いて仮想計算を実施
- x_6 = 森林1 haあたりの、年間CO₂吸収量 (t-CO₂ / ha / yr) = **23.3 (t-CO₂ / ha / yr)**
- スギ以外のヒノキ等でも、おおよそ10~20 (t-CO₂ / ha / yr) 程度

■ 森林の炭素吸収がポジティブに転じるまでの年数¹²⁾



- 森林を完全に伐採してからNetの炭素固定がポジティブに転じるまでの年数は**5年程度**だと報告
- 本研究では x_6 に5年を乗じて計算

文献 11) : 林野庁 : 森林による二酸化炭素吸収量の算定方法について, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kikaku/211227.html>. (2024年6月6日アクセス)

文献 12) : Hirata, R., Takagi, K., Ito, A., Hirano, T., and Saigusa, N. (2014): The impact of climate variation and disturbances on the carbon balance of forests in Hokkaido, Japan, *Biogeosciences*, 11, 5139–5154, <https://doi.org/10.5194/bg-11-5139-2014>.

■ y_6 = 地山体積 V の土を採取するのに伴って開発される森林の面積 (ha)

- 千葉県に残土条例¹³⁾を参考に、**森林面積と採取した土砂**の関係を計算
- グラフの傾き 2.77×10^{-5} ha / m³ に、新材体積 V m³ を乗じ、 $y_6 = 2.77 \times 10^{-5} \times V$

文献 13) : 千葉県許可特定事業場一覧表 (令和6年6月1日現在)

■ z_6 = 土地の転用に伴うCO₂ストック量低減に関わるパラメータ

- 森林, 枯木, リター, 土壌の炭素ストック量は「森林 → その他土地」を計算¹⁴⁾
- $z_6 = \{ (146.4 - 0) \times 0.5 + (14.9 - 0) + (76.0 - 20.1) \} \times 44/12$
= **528 t-CO₂ / haの損失**を考慮 *植物の乾物重の炭素割合は40~50%¹⁵⁾

文献 14) : 国立環境研究所 (2023) : 日本国温室効果ガスインベントリ報告書2023年 (CGER-I165-2023) , 6章, pp. 7-9.
<https://cger.nies.go.jp/publications/report/i165/> (2024年6月5日アクセス)

文献 15) : 松崎守夫 (2021 : 土壌有機物と農業生産との関係についての総説, 6号, pp. 1-9.
https://doi.org/10.34503/naroj.2021.6_1

■ ⑥ 新材採取によって消失する森林のCO₂吸収量

$$= (x_6 \times 5 + z_6) \times y_6 = 644.5 \times 2.77 \times 10^{-5} (\text{ha} / \text{m}^3) \times V (\text{m}^3) = \mathbf{1.79 \times 10^{-2} \times V}$$