

防腐処理木材のライフサイクルアセスメント ～ 木橋のケーススタディー ～

橋本征二¹・広池秀人²・山中勇司³・貫上佳則⁴
角田邦夫⁵・今村祐嗣⁵・小松幸平⁵・川井秀一⁵

¹正会員 工博 (独) 国立環境研究所 循環型社会形成推進・廃棄物研究センター
(〒305-8506 つくば市小野川16-2 hashimoto.seiji@nies.go.jp)

²工修 (株) 数理計画 PCサービス部 (〒101-0064 千代田区猿樂町2-5-4)

³トリスミ集成材 (株) 建築本部設計部 (〒637-0014 五條市住川1297)

⁴正会員 工博 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

⁵農博 京都大学 木質科学研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

クレオソート油処理木材, CCA処理木材を用いて建設された木橋を題材としてLCAを実施し, これをコンクリート橋, 鉄橋と比較しながら, 防腐処理木材の環境パフォーマンスについて検討し, 以下の結論を得た. 1) 気候変動, 光化学オキシダント生成, 酸性化, 富栄養化では, 木橋 (クレオソート, CCA) が優位なシナリオとなったが, 人間毒性, ほとんどの生態毒性では, 木橋 (CCA) が最も劣位なシナリオとなった. 2) 木橋 (CCA) を最も劣位なシナリオとしている原因は, CCA処理木材の使用期間中に, また, CCA処理木材が焼却された際に, 環境中へ排出されるヒ素, クロム, 銅である. 3) CCA処理木材の毒性影響を効果的に削減するためのターゲットは, 焼却時におけるCCA成分の捕集である.

Key Words: preservative-treated wood, creosote, CCA, life-cycle assessment(LCA), wood bridge

1. はじめに

近年, 環境問題が声高に叫ばれる中で, 木質材料は, エネルギー面で他の材料より優れていること, 再生可能な資源であることなどから注目を浴びている. 鉄やコンクリートなどの材料と比較したとき, 木質材料はその製造過程でのエネルギー消費量が小さく, このため二酸化炭素の発生量も少ない. 加えて, 木質材料は, それが使用され廃棄された後, 分解されれば主に二酸化炭素と水になるが, 森林が持続的に管理されている限りにおいては, 排出された二酸化炭素は再び森林によって吸収される. 木質資源は, 森林が持続的に管理されている限り, 持続的に利用することのできる再生可能な資源である.

このように, エネルギー問題を含む資源枯渇の問題, エネルギー問題の裏返しでもある気候変動の問題に対する, 木質材料の有効性は事実であるが, 一方で, 近年の木質材料には様々な物質が用いられるようになり, 問題はそれほど単純ではない. 接着

剤, 木材防腐剤, 塗料, プラスチックなどが, 木質材料の機能を高めるために用いられているが, こうした物質は, 木質材料全体としての環境パフォーマンスに影響を与えるものと考えられる.

本稿は, ライフサイクルアセスメント (LCA) を用いて防腐処理木材の環境パフォーマンスの評価を試みたものである. これまでも, LCAを用いて木質材料の有効性を示す研究はなされてきたが^{1) - 4)}, それらは主にエネルギー使用量や二酸化炭素排出量をその評価指標としており, そうした指標に基づく木質材料の有効性が示されるにとどまっている. しかし, 木材防腐剤の影響を含めて木質材料の有効性を検討しようと思えば, これだけの指標では不十分であろう. 例えば, 人への毒性や生態系への毒性などが, 重要な評価対象として認識される. 防腐処理木材を用いた電柱, 枕木等のLCA研究も既にいくつか見られる^{5) - 9)}.

本稿は, クレオソート油処理木材, CCA処理木材を用いて建設された木橋を題材としてLCAを実施

表-1 想定したシナリオ

	木橋 (クレオソート)	木橋 (CCA)	コンクリート橋	鉄橋
形式	上路7-チ橋	上路7-チ橋	中空床版橋	鋼プレートガーダー橋
主構	クレオソート油処理木材	CCA 処理木材	鉄筋コンクリート	鋼材
床版	クレオソート油処理木材	CCA 処理木材	鉄筋コンクリート	鉄筋コンクリート
舗装	なし	なし	7スファルト舗装	7スファルト舗装
寿命	30年	30年	30年	30年

し、これをコンクリート橋、鉄橋と比較しながら、防腐処理木材の環境パフォーマンスについて検討したものである。

2. 目的と評価範囲

(1) 目的

本研究の目的は、橋をその題材として、防腐処理木材のLCAを行うことである。木質材料は一般に環境に優しいとされるが、一方で木材防腐剤も使用されており、その環境への影響（毒性）についても検討する必要がある。また、木材防腐剤の環境への影響が多大な場合には、これを削減するための方策を検討することも必要である。本研究は、そのための基礎的知見を得ようとするものであり、同じ機能を持つ製品間の優劣の比較自身を目的とするものではない。

本研究は、(社)日本木材保存協会・製品ライフサイクル評価部会の自主的な研究として、1997年より行ってきたものである。本研究の利用者および本研究の利害関係者は、木材防腐剤の製造業者、防腐処理木材の製造業者、およびその利用業者、一般市民である。

なお、本稿では、紙面の関係で実施したLCAの詳細を記すことはできないが、利用したデータなどは別冊子にて公開するので、希望者は本稿の第一執筆者に連絡されたい。

(2) 評価範囲

木材防腐剤の環境への影響を評価する場合には、同時に木材防腐剤に関係のない他のプロセスで発生する有害物質の環境への影響も評価の中に含める必要がある。そのためには、個々のプロセスについての詳細なプロセスデータが必要となる。現在のところ、本研究で対象とするような分析に耐えうるインベントリーデータが日本では整備されていないため、本研究では主としてヨーロッパのデータを用い、可能な部分については日本のデータを用いた。データは主として1990年代のものであり、平均的な技術によるものである。

影響評価には、影響の連鎖の途中で評価を行うミッドポイントアプローチと、最終的な影響で評価を行うエンドポイントアプローチとがある¹⁰⁾。本稿では、最終的な影響は見られないが、不確実性の低いミッドポイントアプローチを採用し、気候変動、人間毒性、生態毒性、光化学オキシダント生成、酸性化、富栄養化について影響評価を行った。

(3) 機能単位とシナリオ

機能単位は橋長21.5 m、有効幅員4.0 mの二等自動車橋（14 t 荷重）とした。この機能単位は1997年に北海道で実際に建設された木橋をもとに設定したものである。

この機能を満たすシナリオとして、木橋の他に、コンクリート橋、鉄橋を想定した。その概要は表-1のとおりである。木橋については、クレオソート油処理とCCA処理を想定した。日本におけるCCA処理木材の生産量¹¹⁾は、1997年以降急激に減少し、現在ではほとんど生産されなくなったが、廃棄されるCCA処理木材の量は今後増加するものと予想される¹²⁾。LCAでは廃棄の段階も評価に含まれ、また、後述するように廃棄の段階の負荷が全体の環境影響に大きく寄与することから、CCA処理木材を用いた木橋もシナリオに含んでいる。各橋の寿命はいずれも30年としたが、寿命は結果に大きな影響を与えることから、寿命に関する感度分析を行った。

3. インベントリー分析

(1) フロー図とシステム境界

木橋、コンクリート橋、鉄橋の各ライフサイクルに関する主要なプロセスのフロー図は図-1～図-3のとおりである。後述するように、表-2のプロセスについてデータを収集したが、ここでは主要プロセスのみを抜き出している。詳細は前述した別冊子のプロセスデータを参照されたい。

木材を取り扱う際に問題となることの一つに、立木を生産するプロセス、すなわち林業が、環境から何を採取しているか、という点がある。これは、環境と経済プロセスの間のシステム境界の問題であ

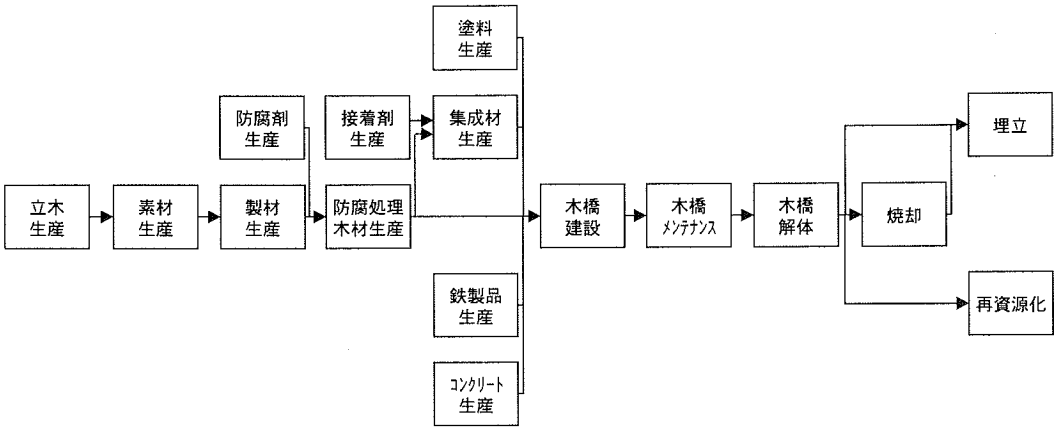


図-1 木橋のライフサイクルにおける主要なプロセスのフロー図

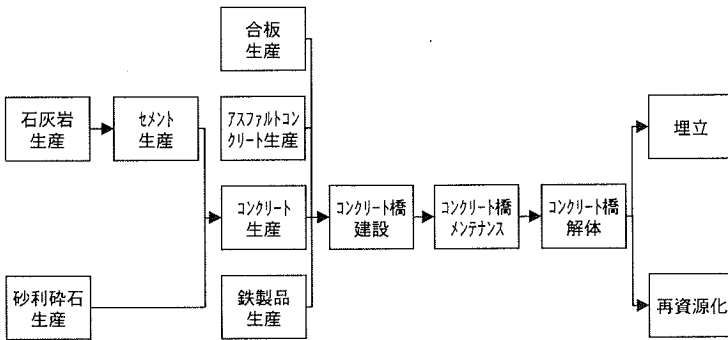


図-2 コンクリート橋のライフサイクルにおける主要なプロセスのフロー図

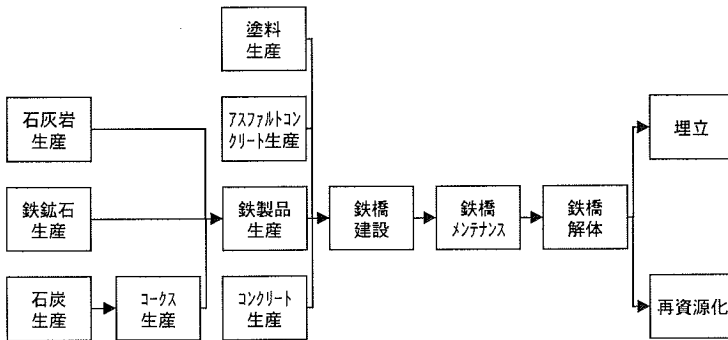


図-3 鉄橋のライフサイクルにおける主要なプロセスのフロー図

る。天然林を伐採する経済活動は、環境からの木材の採取と考えられるが、人工林を育成し伐採する経済活動は、天然林の場合と少し様相が異なる。すなわち、例えば冒頭で述べた二酸化炭素の問題を考えたとき、人工林の育成は大気からの二酸化炭素の除去とも考えられるからである。もっとも、人工林を育成するとは、木の生長は基本的に自然のプロセスであり、人工林の伐採も環境からの木材の採取と考えられよう。木質材料の気候変動問題上の有効性を検討する際には、大気からの二酸化炭素の除

去をシステム境界内に置くことも考えられるが、本研究では、この検討を主たる目的としていないため、立木生産のプロセスをシステム境界外とした。

一方、伐採した木材から生産される木製品は、やがて寿命を迎え廃棄され、焼却や埋立によって、二酸化炭素やメタンを排出することとなる。しかしながら、森林が持続的に利用されている限りは、排出された量に相当する二酸化炭素が、再び森林によって大気中から除去されるであろう。そこで、本研究では、木材等のバイオマス起源の二酸化炭素を化石

表-2 データ収集を行ったプロセス

番号	プロセス	データの出典	番号	プロセス	データの出典
1	鉄道輸送（電気）	文献 8	46	鉄板生産	文献 8
2	鉄道輸送（ディーゼル）	文献 8	47	合金生産	文献 8
3	自動車輸送（高速）	文献 8	48	鍛造品生産	文献 8
4	自動車輸送（農村部）	文献 8	49	締め金、かすがい生産	文献 8
5	自動車輸送（都市部）	文献 8	50	亜鉛メッキ	文献 8
6	パイプライン輸送	文献 8	51	エチレン生産	文献 8
7	船舶輸送（沿海・内水面）	文献 8	52	エチレン・アルコール生産	文献 8
8	船舶輸送（外洋）	文献 8	53	ベンゼン生産	文献 8
9	電力（石炭火力）生産	文献 8、15	54	スチレン生産	文献 8
10	電力（石油火力）生産	文献 8、15	55	無水マレイン生産	文献 8
11	電力（LNG 火力）生産	文献 8、15	56	無水フタル酸生産	文献 8
12	電力（原子力）生産	文献 8、15	57	ポリエチレン樹脂生産	文献 8
13	電力生産		58	素材生産	文献 8
14	石炭（地下）生産	文献 8	59	木くずチップ生産（利用）	文献 13
15	石炭（露天）生産	文献 8	60	製材生産	文献 8
16	原油生産	文献 8	61	合板生産	文献 13
17	石油燃料生産	文献 8	62	防腐処理木材（クレオソート）生産	文献 8
18	石油製品生産	文献 8	63	防腐処理木材（CCA）生産	
19	天然ガス生産	文献 8	64	集成材（クレオソート）生産	
20	ウラン生産	文献 8	65	集成材（CCA）生産	
21	石膏生産	文献 8	66	アスファルトコンクリート生産	文献 16
22	カルク生産	文献 8	67	廃アスファルトコンクリート（利用）	文献 16
23	銅生産	文献 14	68	廃アスファルトコンクリート（再資源化）	文献 16
24	銅くず（利用）		69	生コンクリート生産	文献 14
25	ヒ素生産		70	コンクリート製品生産	文献 14
26	亜鉛生産	文献 8	71	廃コンクリート（再資源化）	文献 17
27	ニッケル生産	文献 8	72	木橋（クレオソート）建設	
28	硫酸生産	文献 8	73	木橋（クレオソート）メンテナンス	
29	苛性ソーダ生産	文献 8	74	木橋（クレオソート）解体	
30	砂利砕石生産	文献 8	75	木橋（CCA）建設	
31	粘土生産	文献 8	76	木橋（CCA）メンテナンス	
32	石灰岩生産	文献 8	77	木橋（CCA）解体	
33	石灰生産	文献 8	78	コンクリート橋建設	
34	ポルトランドセメント生産	文献 8	79	コンクリート橋メンテナンス	
35	鉄鉱石生産	文献 8	80	コンクリート橋解体	
36	コークス生産	文献 8	81	鉄橋建設	
37	コークス生産	文献 8	82	鉄橋メンテナンス	
38	コークス炉ガス生産	文献 8	83	鉄橋解体	
39	ナフサレン生産	文献 8	84	木くず焼却	文献 13
40	瀝青生産	文献 8	85	木くず焼却（CCA）	
41	クレオソート生産	文献 8	86	安定型埋立	文献 17
42	CCA 生産		87	管理型埋立	文献 17
43	鉄くず（利用）	文献 8	88	管理型埋立（クレオソート）	
44	鉄くず（再資源化）	文献 8	89	管理型埋立（CCA）	
45	鉄筋生産	文献 8	90	管理型埋立（CCA 焼却灰）	

燃料等起源の二酸化炭素と区別し計上することとした¹³⁾。

(2) プロセスデータとアロケーション

表-2 のプロセスについてデータを収集した。多くは Imperial College⁸⁾ がクレオソート油を用いた電柱についてLCAを行ったときに収集したものである。Imperial Collegeが対象としなかったその他のプロセスのうち、一部のプロセスについては既存の

データベースを用い、本研究に関連するプロセスについては、独自のデータ収集を行った。従って、多くのデータが英国もしくはヨーロッパにおける、1990年代のものである。また、インベントリーは、消費される資源について16項目、大気への排出物について51項目、水域への排出物について55項目、土壌への排出物について14項目である。詳細は前述した別冊子のプロセスデータを参照されたい。

以下、主要なプロセスについて、データの出所及

表-3 CCA木材防腐剤の品質 (JIS K1570:1998) (単位: %)

		1号	2号	3号
有効成分 の 配合比	クロム化合物 (CrO ₃ として)	59~69	33~38	45~51
	銅化合物 (CuOとして)	16~21	18~22	17~21
	ヒ素化合物 (As ₂ O ₃ として)	15~20	42~48	30~38

びアロケーション等について述べる。

a) 輸送, 資源採取, 一次製品製造 (表-2, 番号1~8, 14~23, 25~41, 45~58, 60)

輸送, 多くの資源採取, 一次製品製造について, 文献8)のデータを用いた。このうちアロケーションの行われているプロセス(複数の製品が生産されるプロセス)が, 石油精製, コークス生産, コールタールの蒸留である。石油精製では, いくつもの製品が生産されるが, 表-2では石油燃料(番号17), 石油製品(番号18)がこれにあたる。文献8)では, 燃料についてはエネルギー量で, 石油製品については重量でアロケーションを行っており, 本研究でもこれを用いた。コークス生産では, コークス(番号37)の他, コールタール(番号36), コークス炉ガス(番号38)が得られる。文献8)では, これらの価格でアロケーションを行っており, 本研究でもこれを用いた。また, コールタールの蒸留では, ナフサレン(番号39), 瀝青(番号40), クレオソート(番号41)などが生産される。文献8)では, 重量でアロケーションを行っており, 本研究でもこれを用いた。銅の生産については, 文献14)のデータを用いた。また, ヒ素の生産についてはデータ収集できなかったため, データ収集できたプロセスの中でも, よりヒ素の生産に近いものとして, 仮に銅の生産プロセスを用いた。

b) 発電 (表-2, 番号9~13)

4つの発電方法について, 文献15)(原材料の輸送については文献8))のデータを用いた。これは, ヨーロッパにおける平均的な発電技術についてのデータである。また, 日本全体の電源構成(石炭火力11%, 石油火力17%, LNG火力26%, 原子力35%, 水力他12%, 1999年実績)を用いて, 単位電力(番号13)とした。

c) CCA生産 (表-2, 番号42)

CCAの組成は, 日本の場合, JISK1570:1998「木材防腐剤」によって, 表-3の3種類が標準組成となっている。1号はクロムが多く, ヒ素が少ないタイプ, 2号はヒ素が多く, クロムが少ないタイプ, 3号は両者の中間にあたる。本研究では, 最もよく用いられる3号を対象として計算を行った。CCA生産のプロセスについては, 仮にこれら3成分を配合するだけのプロセスとしている。

表-4 クレオソート油の成分⁸⁾

成分	比率 (%)
acenaphthene	5
anthracene	1.8
benzo(a)pyrene	0.003
fluoranthene	5
naphthalene	28
phenanthrene	14
	53.803

d) 鉄くずの選別 (表-2, 番号24, 43, 44)

鉄くずの選別について, 文献8)のデータを用いた。鉄くずを選別するプロセスは, 鉄くずを排出する側からは廃棄物処理のプロセス, 鉄くずを利用する側からは原材料生産のプロセスと考えられる。このようなオープンループリサイクルではアロケーションが必要となるが, 文献8)では, 選別前のくず(番号44)と, 選別後のくず(番号43)の重量でアロケーションを行っており, 本研究でもこれを用いた。

銅の生産(番号23)には銅くずが用いられているが, 銅くずの選別(番号24)についても鉄くずと同じデータを用いた。

e) 木くずチップ生産, 合板生産 (表-2, 番号59, 61)

木くずチップ, 合板の生産について, 文献13)のデータを用いた。

木くずチップ生産のプロセスも鉄くず選別のプロセスと同様にオープンループリサイクルのプロセスである。選別の前後で重量に大差がないため, 木くずチップ生産にかかる負荷は半々にアロケーションした。

合板に使用する接着剤は熱硬化性樹脂であるが, データ収集できなかったため, データ収集できたプロセスの中でも, より接着剤の生産に近いものとして, 仮に熱可塑性であるポリエステル樹脂の生産プロセスを用いた。

f) 防腐処理木材生産 (表-2, 番号62, 63)

クレオソート油処理木材の生産については, 文献8)のデータを用いた。なお, クレオソート油の主要な成分について, 文献8)は表-4の比率を用いており, 製品の使用中に溶脱するクレオソート油成分は, これを用いて算出した。

CCA処理木材の生産については, ジデシル・ジメチル・アンモニウム・クロライドの加圧注入, 人工

乾燥に関するデータを収集し、CCAの加圧注入についても同じと考え、これで代用した。針葉樹の構造用製材の日本農林規格では、外気及び湿潤環境に常時露出され接地条件で一定の耐用を期待される製材のCCA吸収量を6.0kg/m³以上18.0 kg/m³以下としている。そこで、固定されるCCA量を12.0kg/m³とした。

g) 集成材生産 (表-2, 番号64, 65)

集成材生産工場のデータを収集した。また、合板と同様、集成材に使用する接着剤は熱硬化性樹脂であるが、データ収集できなかったため、ここでは仮に熱可塑性であるポリエステル樹脂の生産プロセスを用いた。

h) アスファルトコンクリート生産と廃アスファルトコンクリート (表-2, 番号66~68)

アスファルトコンクリートの生産について、文献16)のデータを用いた。再資源化される廃アスファルトコンクリートについては、そのまま再生アスファルトコンクリートの生産に使用されるものとし(クローズドループリサイクルと考え)、負荷のアロケーションは行わないこととした。

i) 生コンクリート生産、コンクリート製品生産と廃コンクリート (表-2, 番号69~71)

生コンクリート、コンクリート製品の生産については、文献14)のデータを用いた。

廃コンクリートから再生骨材を生産するプロセスも、鉄くず選別のプロセスと同様にオープンループリサイクルのプロセスである。再生碎石生産のプロセスについては、文献17)のデータを用い、木くずと同様に、再生碎石生産にかかる負荷は半々にアロケーションした。

j) 橋の建設 (表-2, 番号72, 75, 78, 81)

【木橋】 必要な資材、燃料等について、データを収集した。これには工場での仕口加工も含まれる。また、防腐処理木材の表面に塗布される塗料の生産にかかる負荷を、ポリエステル樹脂の生産にかかる負荷で代用することとした。資材は50km運搬されるものとした。

【コンクリート橋】 必要な資材、燃料等について、データを収集した。橋の架設に必要な燃料については鉄橋と同じとした。資材は50km運搬されるものとした。

【鉄橋】 必要な資材、燃料等について、データを収集した。資材は50km運搬されるものとした。

k) 橋のメンテナンス (表-2, 番号73, 76, 79, 82)

【木橋】 床版となる防腐処理木材の10分の1を5年おきに交換するものとし、防腐処理木材、鋼材の

塗料も5年おきに塗布し直すものとした。この間、木材防腐剤の一部が溶脱する。木材防腐剤の溶脱率についてはいくつかの報告¹⁸⁾⁻²⁵⁾があるが、木橋の寿命を30年とすれば、クレオソート油成分で50%以上¹⁸⁾、CCA成分で10%以上²²⁾の溶脱が見込まれる。溶脱率は木材防腐剤の処理条件や環境条件によって大きく異なるため、本稿ではクレオソート油について50%、CCAについて10%の溶脱率を基本とし、溶脱率に関する感度分析を行った。

【コンクリート橋】 アスファルトの舗装を1回行うものとした。舗装に必要な燃料については、鉄橋の建設時のデータを用いた。

【鉄橋】 アスファルトの舗装を1回行うものとした。舗装に必要な燃料については、鉄橋の建設時のデータを用いた。また、鋼材の塗料は5年おきに塗布し直すものとした。

l) 橋の解体 (表-2, 番号74, 77, 80, 83)

解体に伴う現場での燃料の消費量は建設時と同じとした。

建設リサイクル法に基づいて定められた基本方針では、「CCA処理木材については、それ以外の部分と分離・分別し、それが困難な場合には、CCAが注入されている可能性がある部分を含めてこれをすべてCCA処理木材として焼却又は埋立を適正に行う必要がある」としている。橋の解体時に発生する木くずについては、焼却後に埋立するケースを基本とし、直接埋立についても検討を行った。

m) 木くず焼却 (表-2, 番号84, 85)

木くずの焼却については、文献13)のデータを用いた。CCA処理木材を含む木くずについては、焼却によってCCA成分が排ガスとして大気中に排出される可能性がある。CCA成分の排ガスへの移行率についてはいくつかの報告²⁶⁾⁻³⁰⁾があるが、焼却温度を800度前後とすると、ヒ素の50%程度が排ガス中へ移行する可能性があると考えられる。また、ほとんどの研究で、クロム、銅は排ガス中に移行しないとしているが、10%程度が排ガス中に移行するとの報告もある²⁷⁾。さらに、排ガス処理が適切に行われていれば、実際に大気へ排出されるヒ素は5%程度と報告されている²⁹⁾。本稿では、排ガス処理が適切に行われているものとして、CCA処理木材に残存するヒ素の5%、クロム、銅の1%が大気へ排出される場合を基本とし、大気への排出率に関する感度分析を行った。

n) 埋立 (表-2, 番号86~90)

埋立について、文献13)のデータを用いた。管理型で用いられる各種の薬剤については、pH調整剤としての塩化鉄、苛性ソーダ、最終処理としての活

性炭の負荷を、いずれも苛性ソーダ（番号29）の負荷で、凝集剤としてのポリアクリルアミドの負荷をポリエステル樹脂（番号57）の負荷で代用した。

また、CCA処理木材を含む木くずを焼却した後に埋め立てられる焼却灰については、焼却灰に残留したCCA成分のそれぞれ50%が、浸出水として環境中に排出されるものとした。なお、浸出水や焼却灰の処理状況によって、CCA成分が浸出水として排出される可能性は大きく異なることから、埋立地からのCCA成分の浸出率に関する感度分析を行った。

4. 影響評価

(1) 影響評価の方法と対象とする影響領域

影響評価は、ミッドポイントアプローチ¹⁰⁾を採用し、気候変動、人間毒性、生態毒性（淡水、海洋、淡水底質、海洋底質、陸上）、光化学オキシダント生成、酸性化、富栄養化について行った。

(2) 各影響領域における特性化手法

a) 気候変動

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が開発した地球温暖化ポテンシャル（GWP）³¹⁾を用いて、様々な温室効果ガスを二酸化炭素等量に換算し、その合計を気候変動の領域指標とした。なお、IPCCは、20年後、100年後、500年後のGWPを提供しているが、本研究では100年後のGWP₁₀₀を用いた。

b) 人間毒性

Huijbregts らが開発した人間毒性ポテンシャル（HTP）³¹⁾を用いて、様々な化学物質を1, 4-ジクロロベンゼン（1,4-DCB）等量に換算し、その合計を人間毒性の領域指標とした。なお、Huijbregts らは、20年後、100年後、500年後、無限年のHTPを提供しているが、本研究では無限年のHTP_∞を用いた。なお、安全側で評価するため、水域への排出は淡水への排出とし、土壌への排出は農業土壌への排出とした。

c) 生態毒性

Huijbregts らが開発した生態毒性ポテンシャル（ETP）³¹⁾を用いて、様々な化学物質を1,4-DCB等量に換算し、その合計を生態毒性の領域指標とした。Huijbregts らは、生態毒性を、淡水生態毒性、海洋生態毒性、淡水底質生態毒性、海洋底質生態毒性、陸上生態毒性に分けており、また、それぞれについて、20年後、100年後、500年後、無限年のETPを提供している。本研究ではそれぞれ無限年のFAETP_∞（淡水生態毒性）、MAETP_∞（海洋生態毒性）、FSETP_∞（淡水底質生態毒性）、MSETP_∞

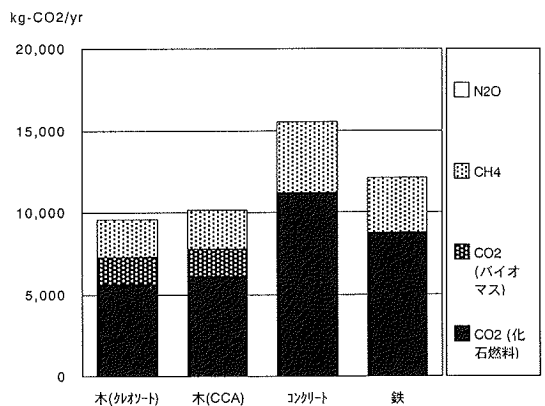


図-4 気候変動

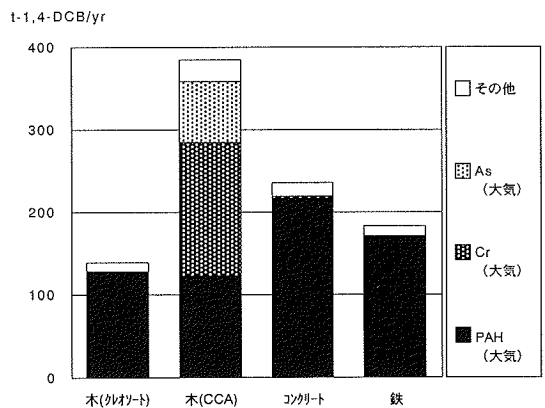


図-5 人間毒性

（海洋底質生態毒性）、TAETP_∞（陸上生態毒性）を用いた。なお、人間毒性と同様、水域への排出は淡水への排出とし、土壌への排出は農業土壌への排出とした。

d) 光化学オキシダント生成

Derwent ら、Derwent ら、Jenkin と Hayman、Andersson-Skold らが開発した光化学オキシダント生成ポテンシャル（POCP-high, POCP-low）³¹⁾を用いて様々な揮発性有機物質をエチレン等量に換算し、その合計を光化学オキシダント生成の領域指標とした。

e) 酸性化

Huijbregts らが開発した酸性化ポテンシャル（AP）³¹⁾を用いて、様々な酸性化物質を二酸化硫黄等量に換算し、その合計を酸性化の領域指標とした。

f) 富栄養化

Heijungs らが開発した富栄養化ポテンシャル（EP）³¹⁾を用いて、様々な富栄養化物質をリン酸塩等量に換算し、その合計を富栄養化の領域指標とし

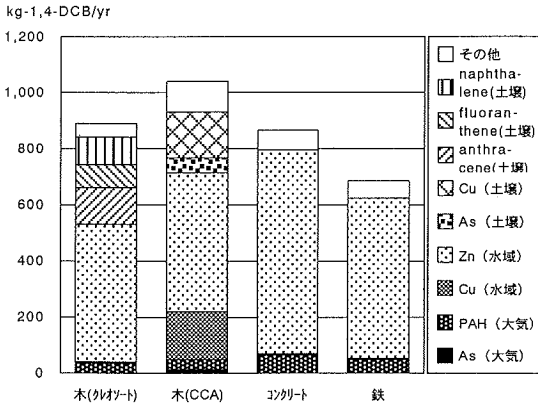


図-6 淡水生態毒性

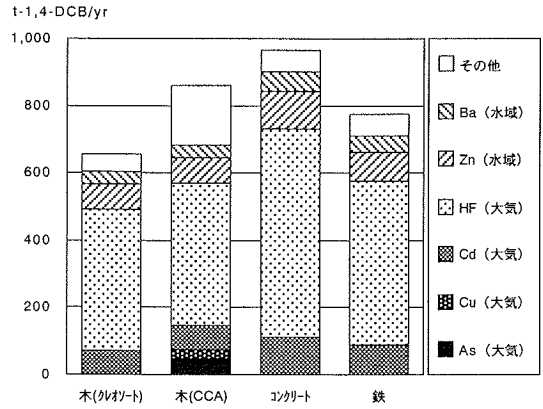


図-7 海洋生態毒性

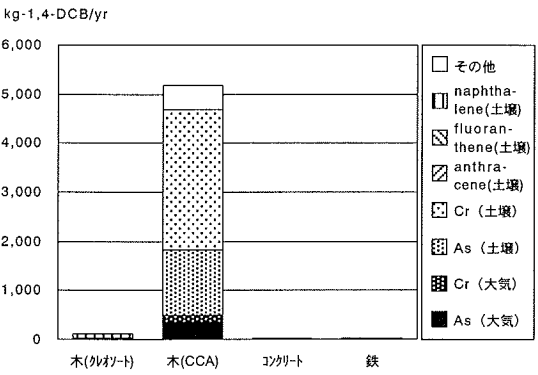


図-8 陸上生態毒性

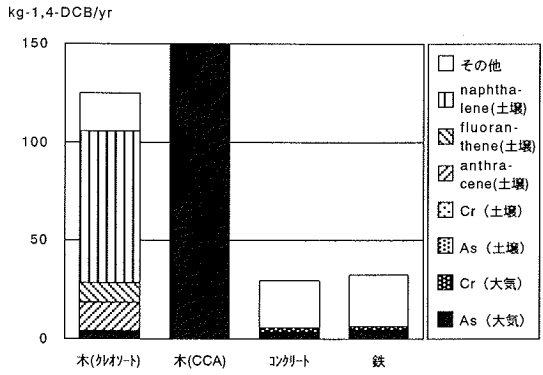


図-9 陸上生態毒性 (拡大)

た。

5. 解釈

以下の検討においては、ライフサイクルの影響を寿命で除した1年あたりの影響を用いる。

(1) 各影響領域に対する寄与分析

a) 気候変動

結果は図-4のとおりである。コンクリート橋>鉄橋>木橋の順に影響が大きい結果となった。内訳を見ると、木橋ではバイオマス起源の二酸化炭素が10%程度を占めるが、これが森林の再生によって循環していると考えられる。また、木橋では化石燃料起源の二酸化炭素の半分程度が、木橋の基礎に用いられるセメントの生産と鉄筋の生産によるものである。

b) 人間毒性

結果は図-5のとおりである。木橋 (CCA) が大

きな値となった。内訳を見ると、焼却時に大気中へ排出されるヒ素とクロムの影響が大きい。また、これらの影響を除けば、多環芳香族炭化水素 (PAH) の影響が大きい。PAHの約70%は、原子力発電用のウラン採掘の過程で排出されるものであるが、本研究ではこのプロセスデータの信頼性を確認できていない。ただし、ウラン採掘のPAHに大きな変化がない限り、相対的な評価は変わらない。

c) 生態毒性

淡水生態毒性についての結果は図-6のとおりである。内訳を見ると、水域に排出される亜鉛の影響が大きくなっている。この亜鉛のほぼ100%が、ウラン採掘の過程で排出されるものであるが、本研究ではこのプロセスデータの信頼性を確認できていない。ウラン採掘の亜鉛に大きな変化があれば、相対的な評価は変わりうる。木橋 (クレオソート) では、これにクレオソート油に含まれる成分の影響が加わり、木橋 (CCA) では、CCA成分の影響が加わる。淡水底質生態毒性についても同様の傾向が見られた。

海洋生態毒性についての結果は図-7のとおりで

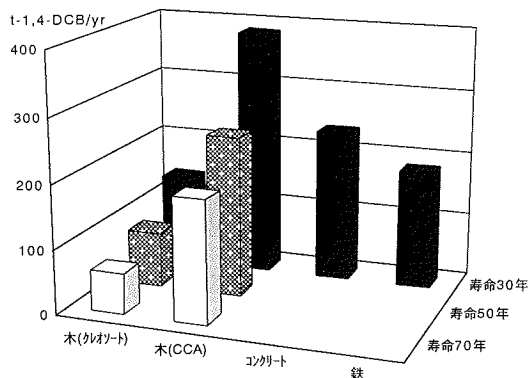


図-10 人間毒性への寿命の影響

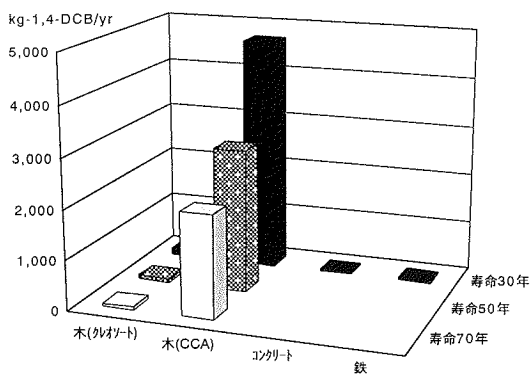


図-11 陸上生態毒性への寿命の影響

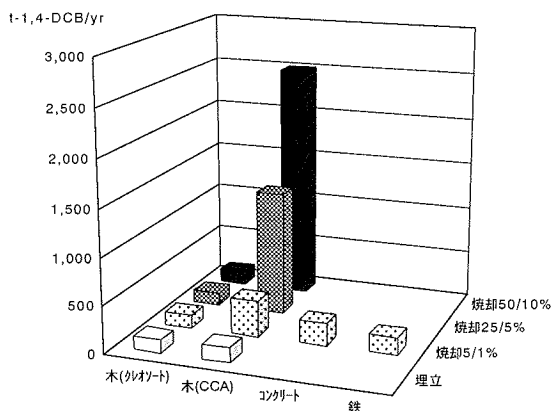


図-12 人間毒性への廃棄物処理の影響

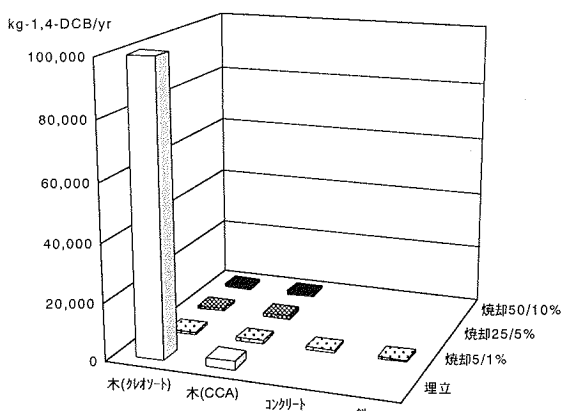


図-13 淡水生態毒性への廃棄物処理の影響

ある。内訳を見ると、フッ化水素（HF）が大きな割合を占めているが、これは発電（石炭）からの排出がほとんどである。バリウムも発電（石炭、石油、天然ガス）の影響である。海洋底質生態毒性については、海洋生態毒性と比較してHFの影響が小さくなった。

陸上生態毒性についての結果は図-8、9のとおりである。内訳を見ると、木橋（クレオソート）ではクレオソート油成分（図-9）、木橋（CCA）ではCCA成分（図-8）が、その影響のほとんどを占めている。

d) 光化学オキシダント生成、酸性化、富栄養化

データは示していないが、いずれもコンクリート橋>鉄橋>木橋の順に影響が大きい結果となった。エネルギー起源の負荷がほとんどを占めることから、温室効果と同様の傾向である。以下の感度分析でも、温室効果と同様の傾向を示した。

(2) 感度分析

a) 寿命の影響

本研究では、全ての橋について30年の寿命を基準

としたが、木橋のみの寿命を50年、70年とした場合の計算を行った。ただし、これは木橋のみに長寿命の可能性のあることを意味するものではなく、感度分析のためであることに注意されたい。木橋の環境影響がコンクリート橋や鉄橋より大きい毒性関係の影響領域については、寿命の変化によって木橋の相対的な評価が変わらないものと良くなるものがあった。

人間毒性については、寿命が70年となることで、木橋（CCA）の環境影響が、コンクリート橋や鉄橋と同程度となった（図-10）。淡水生態毒性、海洋生態毒性、淡水底質生態毒性、海洋底質生態毒性については、シナリオ間の差が小さいことから、寿命が50年となることで、木橋の環境影響がコンクリート橋や鉄橋と同程度か下回った。陸上生態毒性については、木橋（CCA）はもともと大気や土壌へのCCA成分の排出が大きな影響を与えていることから相対的な評価は変わらなかった（図-11）。

b) 廃棄物処理の影響

橋の解体時に発生する木くずについて、本稿では、焼却後に埋立するケースを基本とした。また、

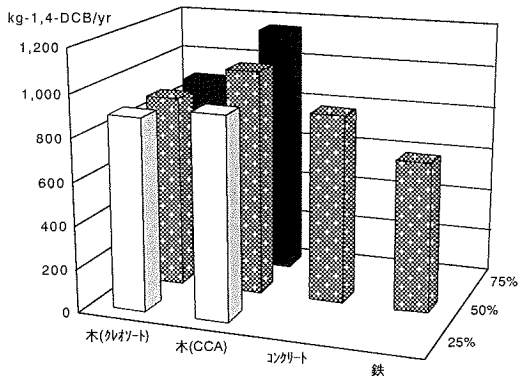


図-14 淡水生態毒性への浸出率の影響

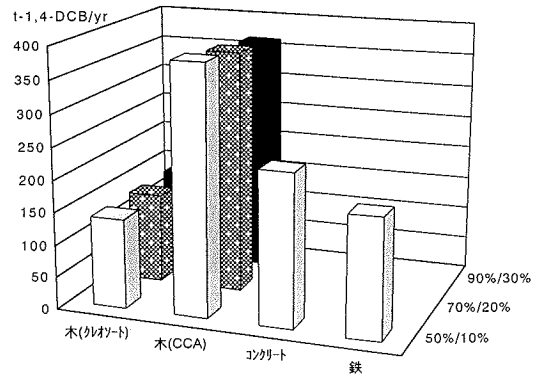


図-15 人間毒性への溶脱率の影響

焼却によってヒ素の5%，銅，クロムの1%が大気に排出されるものとした。そこで，直接埋立した場合，排ガス処理によって大気に排出される比率をそれぞれ（ヒ素/銅とクロム），25%/5%，50%/10%とした場合の計算を行った。

人間毒性（図-12），陸上生態毒性については，大気へ排出されるCCA成分の影響が大きく，その環境への排出率によって木橋（CCA）の環境影響が大きく変化した。また，人間毒性については埋立の環境影響がもっとも小さくなった。一方，その他の生態毒性については，埋立地からの浸出水に含まれる木材防腐剤の成分が増えることによって，埋立の環境影響も大きくなった。淡水生態毒性（図-13），淡水底質生態毒性については，埋立地からのクレオソート油成分の浸出の影響が大きく効いた。

さらに，本稿では，CCA処理木材を含むの木くずを焼却した後に埋め立てられる焼却灰について，焼却灰に残留したCCA成分のそれぞれ50%が浸出するものとしたが，これを25%，75%とした場合の計算を行った。これについては，淡水生態毒性（図-14），淡水底質生態毒性で若干の変化が見られる以外，相対的な評価が変わるような大きな変化は見られなかった。

c) 溶脱率の影響

本稿では，木橋の共用中にクレオソート油成分の50%，CCA成分の10%が溶脱するものとしたが，これをそれぞれ（クレオソート油/CCA），70%/20%，90%/30%とした場合の計算を行った。

人間毒性（図-15）については，CCAの溶脱率が大きくなると影響が小さくなる結果となった。CCAで影響が小さくなったのは，人間毒性のほとんどを支配する焼却による大気へのヒ素，クロムの排出が減少するためである。溶脱率が大きくなることによって，環境に排出されるCCA成分の総量は増加するが，大気へ排出されるより土壌へ排出される方

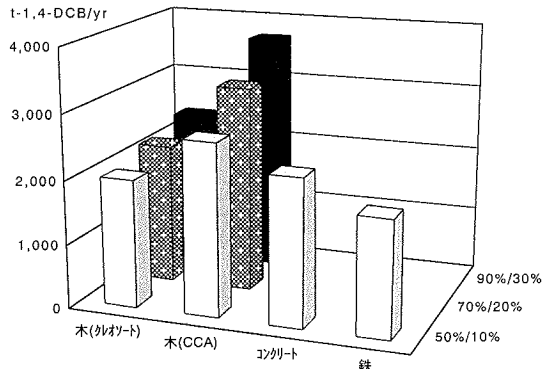


図-16 淡水底質生態毒性への溶脱率の影響

が，人間毒性への影響は小さいことになる。これは，大気に排出したときのHTP₀より，土壌へ排出したときのHTP₀が小さいためである。

淡水生態毒性，淡水底質生態毒性（図-16），海洋生態毒性，海洋底質生態毒性，陸上生態毒性については，クレオソート油，CCA共に溶脱率が大きくなると影響も大きくなる結果となった。環境に排出されるクレオソート油成分，CCA成分の総量が増加することもあるが，人間毒性とは逆に，大気に排出されるより土壌へ排出される方が，生態毒性への影響が大きいためである。

(3) 総合評価

気候変動，光化学オキシダント生成，酸性化，富栄養化では，木橋が優位なシナリオとなった。逆に，人間毒性，ほとんどの生態毒性では，木橋（CCA）が最も劣位なシナリオとなった。木橋（CCA）を最も劣位なシナリオとしている原因は，人間毒性においては，CCA処理木材が焼却される際に大気へ排出されるヒ素，クロムであり，生態毒性においては，これに銅が加わるとともにCCA処理木材の使用期間中に溶脱するヒ素，クロム，銅が加わ

る。木橋（クレオソート）が、コンクリート橋、鉄橋に比較して圧倒的に劣位となるのは、陸上生態毒性である。

寿命は全ての影響領域の結果に対して感度がよいことから、圧倒的に木橋（CCA）が劣位となる陸上生態毒性を除いては、木橋の相対的な優劣は各橋の寿命によって変化しうる。焼却時におけるCCA成分の大気への排出率は、木橋（CCA）の毒性影響領域の結果に対して感度が高い。

したがって、木橋（CCA）の毒性影響を効果的に削減するためのターゲットは、第一に焼却時におけるCCA成分の捕集であり、廃棄処理時の管理が重要となる。また、使用期間中の溶脱率の低下も重要なターゲットとなる。一方、木橋（クレオソート）のターゲットは、使用期間中の溶脱率の低下である。

6. おわりに

本稿では、LCAを援用して防腐処理木材の環境パフォーマンスの評価を試みた。木材防腐剤を使用する場合、木質材料は必ずしも環境にやさしいとは言えない。

一方、LCAで行う毒性影響の評価はあくまでも潜在的な影響の評価であり、実際の影響を必ずしも表現しない点を念頭に置いておく必要がある。LCAは、ある製品やサービスに着目して、その製品やサービスの環境パフォーマンスの向上のためのターゲットを見つけてだすことを目的として利用するのが基本であり、本稿の結果もそのように利用することが望ましい。

本稿においては、検討の結果、CCA処理木材の環境影響を低減するためのターゲットとして、それが廃棄物になったときの処理が重要であることが認識された。今後、住宅等として社会に蓄積されたCCA処理木材が、多量の廃棄物として発生することが見込まれることから¹²⁾、CCA処理木材の影響が顕在化することも考えられる。したがって、これを適正に処理するシステムを構築することが重要である。

謝辞：本研究でシナリオとして設定したコンクリート橋、鉄橋の設計はそれぞれ、（株）富士ピーエス真鍋英規氏、（株）長大植野芳彦氏によるものである。また、研究成果をまとめるにあたっては、京都大学大学院平井康宏氏、越井木材工業（株）稲井淳文氏より貴重なコメントを頂いた。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 酒井寛二, 漆崎昇: 建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定, 環境情報科学, 21-2, pp.130-135, 1992.
- 2) Buchanan, A.H. and Honey, B.G.: Energy and carbon dioxide implications of building construction, *Energy and Buildings*, 20, pp.205-217, 1994.
- 3) 酒井寛二, 漆崎昇, 相賀洋, 山下真人; 建築物のライフサイクル二酸化炭素排出量とその抑制方策に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 484, pp.105-112, 1996.
- 4) Buchanan, A.H. and Levine, S.B.: Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions, *Environmental Science and Policy*, 2, pp.427-437, 1999.
- 5) Erlandsson, M., Odeen, K. and Edlund, M.-L.: Environmental consequences of various materials in utility poles; a life cycle analysis, The international research group on wood preservation document IRG/WP3726-92, 1992.
- 6) Kunniger, T. and Richter, K.: Life cycle analysis of utility poles; a Swiss case study, *Proceedings of 3rd International Symposium on Wood Preservation*, pp.71-81, 1995.
- 7) Hillier, W., Murphy, R.J., Dickinson, D.J. and Bell, J.N.B.: LCA examination of preservative treated timber products and alternatives; initial results, *Proceedings of 3rd International Symposium on Wood Preservation*, pp.57-63, 1995.
- 8) Imperial College: Life cycle assessment of distribution pole alternatives: timber, steel, GRP and concrete, Imperial College, London, 1997.
- 9) Kunniger, T. and Richter, K.: Comparative life cycle assessment of Swiss railroad sleepers, The international research group on wood preservation document IRG/WP98-50117, 1998.
- 10) Bare, J. C., Hofstetter, P., Pennington, D.W. and Udo de Haes, H.A.: Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(6), pp.319-326, 2000.
- 11) 林産行政研究会: 木材需給と木材工業の現況, 各年版.
- 12) 橋本征二, 寺島泰: 建築物解体廃棄物の発生予測, 廃棄物学会論文誌, 11 (5), pp.271-279, 2000.
- 13) 橋本征二, 小原卓巳, 寺島泰: 解体木くずリサイクルの環境面からの評価, 土木学会論文集, 643 / VII-14, pp.37-48, 2000.
- 14) Pre Consultants: SimaPro 5.0 (IDEMAT2001のデータ), 2001.
- 15) Pre Consultants: SimaPro 5.0 (BUWAL250のデータ), 2001.
- 16) 中野加都子, 三浦浩之, 和田安彦: 廃アスファルト

- コンクリートの再資源化による環境インパクト低減化の評価, 土木学会論文集, 559/VII-2, pp.81-89, 1997.
- 17) 橋本征二, 広池秀人, 寺島泰: コンクリートがらりサイクルの環境面からの評価, 土木学会論文集, 657/VII-16, pp.75-80, 2000.
 - 18) Baileys, R. T. and Webb, D.A.: 1958 cooperative creosote project-XII: an analysis of creosotes from posts after 26 years in test. *Proceedings of American Wood-Preservers' Association*, 83, pp.163-171, 1987.
 - 19) Nurmi, A. J.: Leachability of active ingredients from some CCA treated and creosoted poles in service: a progress report after 10 years testing, The international research group on wood preservation document IRG/WP 3627, 1990.
 - 20) Hudson, N. J. and Murphy, R.J.: Losses of CCA components and creosote from treated timber to soil, The international research group on wood preservation document IRG/WP 97-50098, 1997.
 - 21) Hedley, M.: Relative performance of copper-chrome-boron (CCB) and copper-chrome-arsenate (CCA) in ground contact, The international research group on wood preservation document IRG/WP 3694, 1992.
 - 22) Evans, F. G. and Edlund, M.-L.: Leaching from field test stakes: results from two different methods of analysis, The international research group on wood preservation document IRG/WP 93-50013, 1993.
 - 23) Yamamoto, K., Motegi, S. and Inai, A.: Comparative study on the leaching of wood preservatives between natural exposure and accelerating laboratory conditions, The international research group on wood preservation document IRG/WP 99-50134, 1999.
 - 24) Yamamoto, K., Motegi, S. and Inai, A.: Leaching amount of wood preservatives from treated wood in different size during outdoor exposure for 6 months, The international research group on wood preservation document IRG/WP 00-50160, 2000.
 - 25) Kennedy, M. J. and Collins, P.A.: Leaching of preservative components from pine decking treated with CCA and copper azole, and interactions of leachates with soils, The international research group on wood preservation document IRG/WP 01-50171, 2001.
 - 26) Dobbs, A. J. and Grant, C.: The volatilization of arsenic on burning copper-chrome-arsenic (CCA) treated wood, *Holzforschung*, 32(1), pp.32-35, 1978.
 - 27) McMahon, C. K., Bush, P.B. and Woolson, E.A.: How much arsenic is released when CCA treated wood is burned?, *Forest Product Journal*, 36(11/12), pp.45-50, 1986.
 - 28) Pasek, E. A. and McIntyre, C.R.: Treatment and recycle of CCA hazardous waste, The international research group on wood preservation document IRG/WP 93-50007, 1993.
 - 29) 西谷隆司, 福永勲, 伊藤尚夫: CCA処理木材の燃焼による金属の挙動に関する基礎実験, 大阪市立環境科学研究所報告, 56, pp.46-52, 1994.
 - 30) Lindroos, L.: Recycling of impregnated timber: Part 2 Combustion trial, The international research group on wood preservation document IRG/WP 99-50132, 1999.
 - 31) Guinee, J.B.(ed.): *Handbook on life cycle assessment; operational guide to the ISO standards*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.

(2003.3.12受付)

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PRESERVATIVE-TREATED WOOD: A CASE STUDY OF WOODEN BRIDGE

Seiji HASHIMOTO, Hideto HIROIKE, Yuji YAMANAKA, Yoshinori KANJO
Kunio TSUNODA, Yuji IMAMURA, Kohei KOMATSU and Shuichi KAWAI

LCA was applied to the wooden bridges constructed by creosote- and CCA-impregnated wood. Results were compared with those of concrete and steel bridges, and environmental performance of preservative-treated wood was discussed. Conclusions obtained in the current assessment are as follows: 1) Wooden bridges (creosote and CCA) are most advantageous scenarios for climate change, photo-oxidant formation, acidification, and eutrophication. However, wooden bridge (CCA) is disadvantageous scenario for human toxicity and ecotoxicity; 2) Main reason of disadvantage of wooden bridge (CCA) is the discharges of As, Cr, and Cu to the environment in service and when CCA-impregnated wood is incinerated; 3) Effective reduction in toxic impacts of CCA-impregnated wood can be achieved by collection of CCA components at the incineration site.