

Title	未来技術のCO2削減評価
Sub Title	
Author	早見, 均(Hayami, Hitoshi) 松橋, 隆治(Matsushashi, Ryuji) 正田, 浩一(Hikita, Koichi) 溝下, 雅子(Mizoshita, Masako) 中野, 諭(Nakano, Satoshi) 吉岡, 完治(Yoshioka, Kanji)
Publisher	慶應義塾大学産業研究所
Publication year	2000
Jtitle	KEO discussion paper. G : 『アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究』(KEO discussion paper. G : "Inter-disciplinary studies for sustainable development in Asian countries"). No.G-69
JaLC DOI	
Abstract	概要この論文は、未来技術のCO2削減ポテンシャルを評価するための展望を与えることである。CO2削減の評価をする場合、対象となる技術をどのようなカバレッジで評価したものなのか、あるいは比較のベースラインとなる技術をどのように設定しているかによって結果の解釈は異なる。まず、CO2の削減効果を評価する場合の方法論的な整理を、特に産業連関分析を利用した場合について解説している。つぎに、個別の研究ごとにどの程度CO2の削減が見込まれるかについての展望を与えている。カバーしている分野は、産業から民生まで包括的であるが、今後よりいっそう代替技術の種類を増やすとともに、共通の評価基準でCO2の削減量を整理することが求められている。
Notes	表紙上部に"日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業複合領域「アジア地域の環境保全」"の表示あり
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000069-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

未来技術の CO₂ 削減評価

早見均
松橋隆治
疋田浩一
溝下雅子
中野諭
吉岡完治

No.G-69

学振未来 WG2-28

未来技術の CO₂ 削減評価

早見 均, 松橋隆治, 疋田浩一, 溝下雅子, 中野 諭, 吉岡完治

2000 年 1 月

キーワード

産業連関分析, LCA, CO₂, 未来技術, LCCO₂

概要

この論文は、未来技術の CO₂ 削減ポテンシャルを評価するための展望を与えることである。CO₂ 削減の評価をする場合、対象となる技術をどのようなカバレッジで評価したものなのか、あるいは比較のベースラインとなる技術をどのように設定しているかによって結果の解釈は異なる。まず、CO₂ の削減効果を評価する場合の方法論的な整理を、特に産業連関分析を利用した場合について解説している。つぎに、個別の研究ごとにどの程度 CO₂ の削減が見込まれるかについての展望を与えている。カバーしている分野は、産業から民生まで包括的であるが、今後よりいっそう代替技術の種類を増やすとともに、共通の評価基準で CO₂ の削減量を整理することが求められている。

未来技術の CO₂ 削減評価

早見 均*, 松橋隆治**, 疋田浩一**, 溝下雅子***, 中野 諭***, 吉岡完治*

2000年1月

1. 未来技術評価のフレームワーク

ここでは、未来技術の CO₂ 削減効果の評価する方法論的なフレームワークについて簡単にまとめておきたい。評価方法としてわれわれが主に利用しているのは、産業連関分析を利用した CO₂ の波及効果の計算である。技術の環境評価(Environmental Assessment)というと、多くの文献が示しているように計算のベースラインによっては評価の値が大きく異なることがありうる¹。

誰が計算してもほぼ同じ数値が得られる単純な段階から、包括的ではあるが多くの仮定が必要となる段階まで多くのケースが考えられる。ここでは産業連関分析を用いた場合に限定して、技術プロジェクトの CO₂ 発生についての評価方法の鳥瞰してみたい。

単純に産業連関分析による CO₂ の波及効果といっても少なくとも5段階のカバレッジが考えられる。カバレッジが広がると、より包括的にそのプロジェクトを評価することができるが、逆に得られた CO₂ の排出量、その削減効果の数値は誤差が増大することになる。

1.1 第一段階は、評価したい技術メニューで製造する部門で排出される直接効果とそれに必要な原材料の調達プロセスで排出される間接効果である。これは、CO₂ の排出係数の計算を除けば、もっとも単純な産業連関分析の応用例の一つである。公表されているもっと

* 慶應義塾大学産業研究所

** 東京大学大学院工学系研究科

*** 慶應義塾大学大学院商学研究科

¹ たとえば、Ellis[1]では、京都メカニズムの一つである AIJ(activities implemented jointly)のプロジェクトをサーベイしているが、直接効果の評価だけでもベースラインの技術の設定によっては、9倍近く CO₂ のクレジットの値が異なる場合があることを実例でしめしている。ここでは CO₂ の排出量のみ限定しているため、一般の環境評価が抱えている基準の多様性はとりあえず問題にはならない。評価基準の方法については、技術プロジェクトあるいは開発プロジェクトなどに付随する環境の経済価値だけを考えた場合でも、少なくとも Cost Benefit Analysis, Contingent Valuation, Dose-response Valuation, Option Valuation, Quasi Option Valuation, Revealed Preference, Travel Cost Technique, Hedonic Pricing Technique がある。これらの手法は、プロジェクトによって失われる環境や逆に保護される環境を金額評価する場合に広く利用されている。CO₂ の場合、その増加によって何が失われるかについての影響(impacts)が必ずしも明確ではないため利用しにくい。ただし、森林の価値を求めて CO₂ を吸収するコスト面からの CBA アプローチはなされている。CO₂ の排出削減評価のみに限定するならば、環境評価する際に考慮するプロジェクトの構成要素 input-output-outcome-impact のうち、impact 面の指標については評価しないことになる。

も詳細な部門の産業連関表基本表を利用すれば、誰もが同じ波及計算になる。そのためここで数値の異なる原因は、(1) CO₂の排出係数が異なるか、(2) 評価したい技術メニューをどのように格付けし金額評価するかのいずれかによる。もちろん波及過程の計算に、競争輸入型か非競争輸入型かその他のモデルが利用されたかで結果は異なる。この段階は一般には最もカバレッジが狭く技術全体の CO₂ 排出にあたる評価とはいいいにくい。

1.2 第二段階は、その技術が運用・利用される場合の CO₂ 排出量の計算である。この場合、極端な考え方としては二通りある。第一は技術の採用・普及をマージナルなものとする場合である(松橋[2])。第二は技術が普及した状態を考えるものである。この両者の違いを産業連関分析のオープンモデルで示すと以下ようになる。技術導入がされる前の産業連関表のオープンモデルでは、つぎの状態が成立しているとする。

(1) 事前状態: $X=(I-A)^{-1}f$, $CO_2=E X+E_f f$

ここで、 f : 最終需要ベクトル, X : 産出量ベクトル, A : 投入係数行列, CO_2 : CO₂ 排出量ベクトル, E : CO₂ 排出係数行列(対角), E_f : おもに家計で燃料などを最終消費する場合の CO₂ 排出係数行列(対角)。

技術導入後にはつぎの状態になったとする。

(2) 事後状態: $X+dX=(I-(A+dA))^{-1}(f+df)$, $CO_2+dCO_2=(E+dE)(X+dX)+(E_f+dE_f)(f+df)$
各状態で右の式の差が技術導入前後の CO₂ 排出量の差 dCO_2 になる。

(3) $dCO_2=dE X+ E dX+ dE f+ E_f df+ dE_f df$

(4) $dX=[\{I-(A+dA)\}^{-1}-\{I-A\}^{-1}]f+[\{I-(A+dA)\}^{-1}-\{I-A\}^{-1}]df$

この式(3)で評価する場合は、 df にあたる数量がこれまでの技術を完全に代替してしまうことを想定するならば、技術が完全普及した場合とベースライン時の CO₂ 排出量の差となる。マージナルな影響を把握するには、(4)式を以下のように変形する²。

$$dX=(I-A)^{-1} dA [I-(I-A)^{-1} dA]^{-1} X + [I-(I-A)^{-1} dA]^{-1} (I-A)^{-1} df$$

マージナルな効果を考えるとすると、 dE , df , dA , dE_f の2次項を無視することになるので、つぎのようになる³。

$$dCO_2=dE X+ E dX+ dE_f f+ E_f df$$

$$dX=(I-A)^{-1} dA X+(I-A)^{-1} df$$

dX を代入すると、

² $(I-(A+dA))^{-1} = ((I-A)-dA)^{-1} = (I-A)(I-(I-A)^{-1}dA)^{-1}$
 $= (I-(I-A)^{-1}dA)^{-1} (I-A)^{-1}$,
 および

$(I-(I-A)^{-1}dA)^{-1} = I + (I-A)^{-1}dA + [(I-A)^{-1}dA]^2 + \dots$
 を利用している。

³ ここでも $(I-(I-A)^{-1}dA)^{-1} = I + (I-A)^{-1}dA + \dots$ の関係を利用している。

$$(5) dCO_2 = [E(I-A)^{-1}]df + E(I-A)^{-1}dAX + dEX + dE_f f + E_f df$$

となり、三つの構成要因に分解できる。

(i) 新技術製造時の CO₂ 排出: $E(I-A)^{-1}df$ これは第一段階の CO₂ 排出影響評価そのものである。(ii) 新技術導入の効果: $E(I-A)^{-1}dAX$, および(iii) 新技術の運用による CO₂ 排出: $dEX + dE_f f + E_f df$ である。技術の運用による CO₂ 排出量の変化は、3つの項にさらに分解されているが、第一の効果がベースラインの状態にあたる排出係数の影響であり、これは生産物の効果: dEX と最終需要として消費される際の効果: $dE_f f$ からなっている。第二の効果は新技術が最終需要として消費される場合の効果: $E_f df$ である。この後者の効果はたとえば水素ガス利用で自動車を動かした場合 df には水素ガスの使用量がカウントされ、水素の燃焼で直接 CO₂ 排出はないため E_f はゼロになる。新技術導入の効果には、 $E(I-A)^{-1}dAX$ を用いずに、単純に技術導入前後で同じ最終需要を実現する際に減らすことのできる CO₂ 排出量: $E\{I-(A+dA)\}^{-1}f - E(I-A)^{-1}f$ を利用している場合もある。

$$(5') dCO_2 = [E(I-A)^{-1}]df + [E\{I-(A+dA)\}^{-1}f - E(I-A)^{-1}f] + dEX + dE_f f + E_f df$$

この(5')式利用の場合は、一部のみ2次以上の効果を考えていることになる。

1.3 第三段階は、海外への波及である。最も安直な計算方法として、国内投入係数を競争輸入モデルの仮定のもとに推定し、海外でも国内と同じ技術が採用されていると仮定して推定する場合がある。すなわち、

$$\text{国内投入係数 } Ad: Ad = (I - M)A$$

ただし、 M は輸入係数行列、 A は投入係数行列である。

$$\text{海外への波及: } dX_a = (I - A)^{-1}df - (I - Ad)^{-1}df$$

ここで、新技術メニュー df はすべて国内財で調達されるとする。

その CO₂ 排出量は、国内の排出係数行列 E で代用する。あるいは、世界の平均値をもちいることなどが考えられる。すなわち、

$$dCO_2 = E dX_a = E(I - A)^{-1}df - E(I - Ad)^{-1}df$$

より正確には、海外への輸入波及は、競争輸入型の場合、 $Mx = M(AX + df)$ で計算されるため、この輸入を海外波及させなければいけない。さらに、海外でも同じ産業連関による波及があるので、その結果また国内の輸出に影響することもある。こうした国間の相互依存を表現しつつ、技術を評価するには国際産業連関表を利用することになる。

しかし、国際産業連関表には、海上輸送は明示的にとりあげておらず、新技術を製造するために必要な資材が、どこからどの経路でどのくらいで CO₂ を排出し、各国にどの程度その燃料調達のために波及しているかについては、現時点では整理がついていない。

分析的には、難しい点はないが、各国の部門別の CO₂ 排出係数が必要となるので、デー

データを収集することには大きな困難がともなう⁴。二国三地域の国際産業連関表の形式はつぎのようになっている(Leontief[4])。

⁴ たとえば、カナダは比較的详细な産業連関表とそれに対応する CO₂ 排出係数が得られる。この両国の産業連関表を両国の貿易統計利用してリンクした結果がある([3])。もしカナダと日本が貿易をしていなければ、各国内でその分を生産したとき、追加的に発生する CO₂ の量は、日本では 6, 523 キロトン(CO₂ 換算)、カナダでは 5, 342 キロトンである。したがって、両国は貿易をつうじて CO₂ 排出を 1000 万トン強セーブしていることになる。貿易することで減らしている CO₂ の量は全体からするとわずかではあるが、貿易金額(両国の取引金額合計で約 1. 7 兆円)当りで考えるとその削減効率は高い(100 万円当り 7 トン)ことになる。

また、日本で生産者価格で 100 万円の乗用車 1 台を生産し、輸出すると(海上輸送からの CO₂ 発生は日本に含めると)、日本では 4, 580kg(CO₂ 換算)の CO₂ が発生し、カナダでは 7. 8kg の CO₂ が発生する。この計算は両国間にかぎっているが貿易のやり取りをすべて計算にいられたものである。すなわち、乗用車を生産するために部品を生産するがその材料調達の各段階でカナダから原材料や部品など輸入をする。その結果、自動車部品、アルミ、パルプなどがカナダで生産されて、カナダでは電力、パルプ、アルミ、石炭などの部門で CO₂ が誘発されて排出されている。

逆に、カナダで同じ金額のパルプが生産されて輸出されると(海上輸送からの CO₂ 発生はカナダに含めると)、カナダでは 17, 210kg の CO₂ が発生し、日本では 7. 7kg の CO₂ が発生する。日本では、タイヤの生産、熱間圧延鋼材、卸売、自動車部品などの生産が誘発され、その結果、電力、鉄鉄、海上輸送、石炭製品、自家発電などで CO₂ が発生する。

ここで重要なことは、いったん海外に波及したものが自国からの輸入を生み、さらに自国の輸出による生産誘発が起こる可能性も考慮していることである。しかも、計算の結果をみると両国の貿易取引で、こうした貿易のやり取りによる波及プロセスは、収束が著しく急速であることがわかった。つまり、日本とカナダの場合、いったん海外に波及するとその自国へのフィードバックはほとんど無視できる程度であることである。これは、日本とカナダの場合、それぞれの主要輸出品についてはすみわけがほぼ完全になっていることを示している。

	中間需要		最終需要		その他への輸出
	i 国	j 国	i 国	j 国	
i 国	$X_{a_{ii}}$	$X_{a_{ij}}$	$X_{f_{ii}}$	$X_{f_{ij}}$	X_{ir}
j 国	$X_{a_{ji}}$	$X_{a_{jj}}$	$X_{f_{ji}}$	$X_{f_{jj}}$	X_{jr}
運賃・保険	B_i	B_j	B_{fi}	B_{fj}	
その他の地域	$X_{a_{ri}}$	$X_{a_{rj}}$	$X_{f_{ri}}$	$X_{f_{rj}}$	
関税	D_i	D_j	D_{fi}	D_{fj}	
付加価値	V_i	V_j			
総生産	X_i	X_j			

図 1-1: 国際産業連関表の形式

ただし,

$X_{a_{ii}}$: i 国から i 国の中間需要への財・サービスの投入

$X_{f_{ij}}$: j 国から i 国の最終需要への財・サービスの投入

$X_{a_{ri}}$: その他から i 国の中間需要への財・サービスの投入

B_i : 運賃・保険の i 国への投入

D_i : 関税の i 国への投入

V_i : i 国の付加価値

X_i : i 国の総生産

1.4 第四段階は、新技術を製造する設備の建設からの CO₂ 排出である。設備の建設の評価には、設備を構成している投資財を製造する際の CO₂ 排出を計算することになる。もし既存の設備で新技術を実現できるならば、その必要はない。たとえば、省エネルギー住宅のようなものであれば、そこにもちいられている素材はすでに流通しているものである。しかし、発電のようなものであれば、発電設備そのものが新技術を体化していることになるため、設備からの CO₂ 排出を計算しなければならない。

必要な資材や建設に必要な燃料などを最終需要ベクトルに割り当てれば、設備の建設から直接・間接発生するCO₂排出量が計算できる。ただし、通常こうして得られたCO₂排出量は、建設時に1度大きなものになるが、その後はほとんど発生しない可能性がある。そこで、問題になるのは、設備の耐用年数である。

現在、必要な資材の数量が入手できたとしても、耐用年数が何年になるかは、実際のところわからない。また、その設備の維持に必要な補填資材の推計も必要になる。設備が耐用年数期間の間、同じ効率で稼働するかどうかも考慮すると、必然的につぎの時間要素の考慮をしなければ、十分扱うことができない問題であることがわかる。

1.5 第五段階は、時間要素の考慮である。時間要素を考慮すると、耐用面だけをとって考えても、新技術によって製造された製品の耐用年数、新技術を装備している設備の耐久年数、新技術を製造する設備の耐用年数、新技術を運用する場合に生じうる効率の劣化、さらにはより効率的な新技術との代替までの年数、などが考慮される必要がある。

さらに、技術の普及速度を考慮すると、経済全体の発展過程のなかでCO₂排出を評価することになる。

レオンチェフの動学体系を参照すると、最終需要に含まれる投資ベクトルを資本係数行列Bで表現し、バランス方程式をつぎのように表している⁵。

$$X_t - A_t X_t - B_{t+1} (X_{t+1} - X_t) = c_t$$

あるいは、

$$G_t X_t - B_{t+1} X_{t+1} = c_t$$

ここで、 $G_t = I - A_t + B_{t+1}$ である。

これを、m+1年間ならべると、

$$\begin{pmatrix} G_{-m} & -B_{-m+1} & & & \\ & G_{-m+1} & -B_{-m+1} & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & G_1 & -B_0 \\ & & & & G_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{-m} \\ x_{-m+1} \\ \vdots \\ x_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{-m} \\ c_{-m+1} \\ \vdots \\ c_0 \end{pmatrix}$$

となる。この左辺の行列の逆行列が、レオンチェフのdynamic inverseである⁶。

新技術の投資期間、耐用年数期間をすべて考慮したものをm年とすると、まさに土から生まれて土にかえるまでの、環境負荷が計算可能になる。もちろん、このdynamic inverseに輸出・輸入の海外部門を付け加えることで、空間的な広がりも表現することができる。

1.6 最後に、単純な形式の産業連関分析では扱いにくい問題として、リサイクルや結合生

⁵ 松橋[2]では、比例成長ケースではあるが、結合生産を含む定式化を試みている。

⁶ Leontief[5]

産物の扱いがある。これに関しては、石川他[6]は既存の基本表にもとづく投入係数行列を拡張したシナリオ・レオンチェフ行列の考え方を提示している。単純な形式の産業連関では、ひとつのアクティビティでひとつの商品が前提になっている。しかし、レオンチェフ自身、最初の環境分析用産業連関表を考案した際に、汚染除去アクティビティを導入している。汚染因子という副産物の利用と処理についてあたりに通常の産業連関表の外側にアクティビティを追加している。このレオンチェフの環境分析用産業連関表は、つぎのような形式になっている(Leontief[7][8])。

	産業	汚染除去活動	最終需要		計
産業	財の投入(+) X_{ij}	除去に必要な財の投入(+) 除去活動による産出(-) X_{ik}	財の最終需要への調達		総産出 汚染除去活動による産出を除く
汚染因子	産業から排出される汚染因子の量(+) X_{gi}	汚染除去量(-) 汚染除去活動から排出される汚染因子(+) X_{gk}	最終需要財の消費による汚染排出量(+) Cf_{gi}	最終需要天然資源の消費による汚染排出量(+) Df_{gi}	純汚染排出量(+)
天然資源	天然資源の産業への投入(+) R_{fi}	天然資源の汚染除去活動への投入(+) R_{fk}		天然資源最終需要への調達(+)	天然資源の総投入量(+)

図 1-2: レオンチェフの環境分析用産業連関表の形式

これに対して、シナリオ・レオンチェフは、環境負荷の処理のみにとどまらず、またその都度アクティビティとそれに付随したシナリオを追加して分析するようになっている。

		メインセクター		サブセクター		最終 需要	余剰 ストック	生産額
		1,2,3,...,j,...,n	1,2,3,...,g,...,m					
メインセクター	1,	X^{11}_{ij}	X^{12}_{ig}	f^1_i	0	x^1_i		
	2,							
サブセクター 主産物	3,	X^{21}_{lj}	X^{22}_{lg}	f^2_l	0	x^2_l		
	...							
副産物 投入	i,	X^{31}_{vj}	X^{32}_{vg}	f^3_v	s_v	x^3_v		
	...							
副産物 産出	n,	0	$-X^3_{\rho}$	0	0	$-x^3_{\rho}$		
	1,							
付加価値	2,	V^1_j	V^2_g					
	3,							
生産額	...	X^1_j	Z_g					
	k,							

図 1-3: シナリオ・レオンチェフの形式

[余剰ストックを利用した主産物に換えていくアクティビティが現存するケース]

ただし,

X^{11}_{ij} : 第 i メインセクターから第 j メインセクターへの財・サービスの投入

X^{12}_{ig} : 第 i メインセクターから第 g サブセクターへの財・サービスの投入

X^{21}_{lj} : 第 l サブセクターから第 j メインセクターへ主産物の投入

X^{31}_{vj} : 第 j メインセクターへ第 v 副産物の投入

これに対して、吉田他[9]は、結合生産を扱うことのできるように産業連関表を三次元に拡張している。

2 これまでの研究の鳥瞰

われわれはこの未来開拓ワーキング・グループ 2 において各種の未来技術の CO₂ 負荷低減効果を研究してきた。環境分析用産業連関表を用いていわばトップダウン LCA という共通のフレーム・ワークで極力比較可能なように CO₂ 低減の効果を見てきたわけである。その結果ディスカッションペーパー数はこの 3 年間で 27 種類に及ぶ結構の量であった。それらがどのような位置に属しているかを整理してみるのが本章の目的である。次に示す表は位置づけを

- (0) 全体のフレームワーク
- (1) エネルギー変換部門
- (2) 素材産業部門
- (3) 運輸部門
- (4) 民生部門
- (5) 廃棄物・廃熱
- (6) 農林水産業

と 6 つに分割して既発表の論文を整理したものである⁷。未来技術の CO₂ 負荷を評価する場合その生産プロセスのみの CO₂ 負荷ではことたりない。その素材の負荷またその素材の負荷と製品の土から生まれて土に戻るまでを勘案しなければいけない。このことは LCA の考え方が定着した現在では誰もが認めることである。環境分析用産業連関表なるマクロのデータベースと技術者の積み上げの利点を考慮してハイブリッド方式を採用した。しかし現実にはいろいろな課題を分析する際、またそれをプラクティカルに考えるにはいろいろなバリエーションがでてくることはやむを得ない。例えば既存の素材を合成して資本設備をつくり活動するような課題を研究する場合は通常産業連関表つまり 1 生産プロセス 1 商品の考え方でことたりる場合が多いが、副産物や廃棄物の有効利用が CO₂ 負荷にどう影響するかを分析する場合は通常オープンモデルではだめである。この場合 1 生産プロセスマルチプロダクト、マルチプロセス 1 プロダクトなどが扱えるような分析フレームワークに拡張すべきである。この場合また技術者の積み上げ計算に使われるような基礎データが必要である。さらに方法論についてもひと工夫が必要である。この点については線形計画の端点を追跡するやり方に基づく東大方式と産業連関表をマルチアクティビティマルチコモディティに拡張しシナリオをレオンチエフ逆表列に組み込んだ形で分析する慶應方式が必要に応じて用いられている。目的とするところは同じでありしたがって結果も同じであるが問題の所在によって使い分ける工夫がなければならない。また LCA を行うためには原料→製品→廃棄の動的プロセスを考える必要がある。これらの課題をあつかっ

⁷ 未来技術の CO₂ 低減効果を評価するわれわれの試みはこの 3 年以前からスタートしてきている。そこでその一部については*印でリストを付け加えた。また WG 2 のディスカッションペーパーを経由しないで WG 2 の研究協力者が研究発表したものも含まれている。該当論文に関しては○印をつけて示してある。

たものは松橋他[10][11][12]疋田他[13]である。そのようなフレームワークを適宜使い分け分析した研究結果が（0）から（6）に示されている。このような視点から7つの部門に分けて何を行ったかを次の章で整理してみよう。

WG2 Discussion Paper List

	それ以前の研究成果 およびDiscussion Paper以外の研究	平成9年度	平成10年度	平成11年度
0. 全体の フレーム ワーク		WG2-6 技術評価のためのライフサイクルアセスメント手法の基本的枠組みとその問題点[10] WG2-7 リサイクルを含む場合の環境負荷の産業連関表による分析手法 シナリオ・レオンティエフ逆行列の構築[6]	WG2-15 技術評価のためのライフサイクルアセスメント手法の基本的枠組みとその問題点 第二編[2] WG2-18 資源・環境・社会の持続可能性に関する一考察[11]	WG2-25 動学ライフサイクルアセスメントの概念とその発電システムへの適用[12]
1. エネルギー 1.1 電力部門	* 電力生産によるCO ₂ 排出 [14] ○ 発電プラントの温暖化影響分析[15]	WG2-1 宇宙太陽発電衛星のCO ₂ 負荷計算[16] WG2-5 宇宙太陽発電衛星のCO ₂ 負荷一若干のシミュレーション[17] WG2-9 LNG受入基地建設のCO ₂ 負荷計算[18]	WG2-16 宇宙太陽発電衛星のCO ₂ 負荷計算[16] WG2-17 宇宙太陽発電衛星のCO ₂ 負荷一若干のシミュレーション[17] WG2-20 LNG受入基地建設のCO ₂ 負荷計算[18]	WG2-21 LCAのためのデータベース構築の開発[13] WG2-27 コージェネシステムのライフサイクルアセスメント[19]
1. 2 ガス、石油、その他				
2. 素材産 業部門	* 鉄くず・高炉スラグ・フライアッシュのリサイクル[20] * 故紙リサイクルの分析 [21]	WG2-2 鉄くず・高炉スラグ・フライアッシュのリサイクル[20] WG2-4 故紙リサイクルの分析 [21]	WG2-10 バイオマスエネルギーの導入可能性に関する評価(1)[38]	
3. 運輸部 門	* 自動車のLCA[22]	WG2-3 自動車のライフサイクルアセスメント[23] WG2-13 自動車導入による環境改善効果[24] WG2-19 Life cycle assessment of gasoline vehicles and electric vehicles[25]	WG2-13 自動車導入による環境改善効果[24] WG2-19 Life cycle assessment of gasoline vehicles and electric vehicles[25]	WG2-13 自動車導入による環境改善効果[24] WG2-19 Life cycle assessment of gasoline vehicles and electric vehicles[25]
4. 民生部 門	* 環境家計簿作成のためのCO ₂ 排出点数表	WG2-4 プロセス連関分析によるガス・ジェネシスのライフサイクルアセスメント[30] WG2-14 家計簿計算を用いたオフィスにおけるCO ₂ 削減策の評価[29]	WG2-23 家計簿調査に基づく環境家計簿分析[26]	WG2-23 家計簿調査に基づく環境家計簿分析[26]

WG2 Discussion Paper List

	平成9年度	平成10年度	平成11年度
それ以前の研究成果 およびDiscussion Paper以外の研究	池田 明由 菅 幹雄 藤原 浩一 徳崎 美貴 早見 均 吉岡 完治		WG2-24 家庭の消費構造とCO ₂ 排出に関する時系列分析—1985年と1990年の環境分析用産業連関表による—[27]
* 省エネルギー住宅の分析 [28]			
5. 廃棄物・5.1 排熱利用	○ 熱輸送媒体に着目した各種排熱輸送システムの折衷的検討 [35] 長谷川 秀夫 石谷 久 吉岡 理文	WG2-12 日本の製造業における排熱利用可能性の評価[34] 西 裕志 松浦 隆治 吉田 好伸 石谷 久	
5.2 金属リサイクルの最適リンクの最適配分	○ 産業廃棄物リサイクルによる環境負荷の低減効果分析[37] 廣部 祐司 内山 洋司		
5.3 その他	WG2-6 一般廃棄物回収における産業間の負担配分に関する研究[36] 茂木 源人 安達 敏 小谷 明生 山富 二郎		
6. 農林水産業		WG2-16 Contributions of rice production to Japanese greenhouse gas emissions applying life cycle assessment as a methodology[39] Meinhard Breiling, Tatsuo Hoshino, Ryuji Matsuhaash	WG2-26 共同簿のライフサイクルアセスメント—規模の経済性および範囲の経済性分析—[31] 秋澤 厚 柏木 孝夫
		WG2-17 米作のライフサイクルアセスメント[40] 松浦 隆治 豊野 達夫 Meinhard Breiling, 吉岡 完治	

3 未来技術の展望

前章で説明した各種の論文の中から主だった結果について節を分けて紹介しよう。

3.1 エネルギー変換部門

まずエネルギー変換部門についてであるが、そのなかでどこの国の中でも CO₂ 排出量のおそらくトップを占める電力部門からはじめよう。

発電方式別に CO₂ 排出原単位をわれわれが環境分析用産業連関表に基づいた（以下トップダウン方式と呼ぶ）で推計した値と電力中央研究所が積み上げ法で推計した値を比較したのが図 3-1-1 である。これによれば積み上げ法には波及が途中で切断されている可能性が高いので過小評価されることを注意していただきたい。

両者とも CO₂ 排出原単位の大きさは石炭火力がトップでわれわれが 334.09g-C/kWh、電中研では 261.76g-C/kWh となっている。次いで石油火力は 230.73g-C/kWh、電中研では 230.73g-C/kWh、LNG 火力は 172.09g-C/kWh、電中研では 164.65g-C/kWh となっている。

以上のように化石燃料利用による 3 種類の発電方式からの CO₂ 排出原単位が非常に大きい。さらに設備の建設と運用を比較すると、設備建設からは 0.2~0.3%と極めて少なく、ほとんどが経常運転からの排出となっている。石炭火力、石油火力、LNG 火力の 3 つはトップダウン式で推計した結果の方が積み上げ法で推計した結果より CO₂ 排出原単位が若干大きく、その差は石炭火力で 1.27 倍、石油火力では 1.15 倍、LNG 火力は 1.04 倍トップダウン式の方が過大となっている。

このように化石燃料火力発電からの CO₂ 排出は他に比較して圧倒的に高いこと、また原子力、水力の負荷が非常に低いことその中間に現在新エネルギーとして着目されている地熱、風熱、波力、太陽光などの発電が位置していることがわかる。近年では熱と電力を同時に供給するコージェネレーションシステム（CGS）の導入がすすめられている。小型電源であり従来の大型発電所とは規模が大きく異なるためその評価には LCA による評価が必要である。この分析を行ったのが秋澤、柏木[18]であり、ガスタービンコージェネレーションシステムについてボイラや冷凍機などの構成素材量に基づき設備の投入されたエネルギーを推計し CGS と従来型システムとの LCA 比較を行っている。ガスタービンコージェネレーションプラントの出力当たり設備エネルギーは従来の LNG 火力発電所に比べて 20%から 10%程度である。

太陽光発電とは、太陽電池を地球上に設定するやり方ではあるが、超未来技術として宇宙に太陽電池を設置しマイクロウェーブによって地上に輸送するという宇宙太陽発電衛星（Solar Power Satellite 以降 SPS）の考え方もある。この点について吉岡他[16]に基づいて少し解説してみよう。この考え方は 70 年代に NASA と DOE が提案したものであるが、5km×10km の巨大な太陽電池パネルを静止衛星軌道に打ち上げる。そしてマイクロウェーブによって地上へ送信する。それを大掛かりなアンテナ（正式にはレクテナ 直径

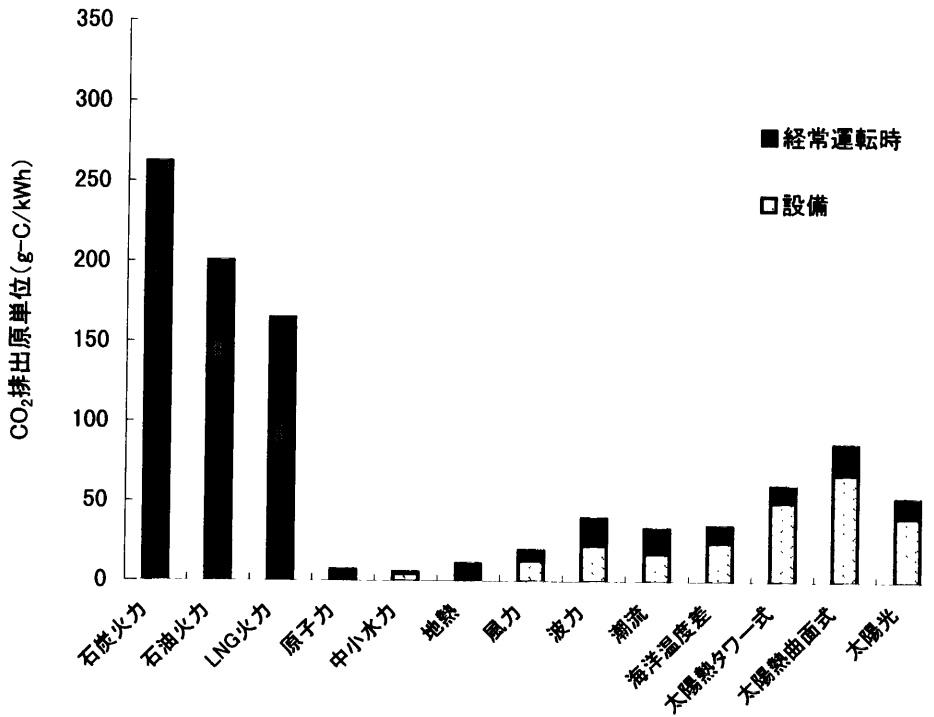


図3-1-1：発電プラントのCO₂排出原単位(耐用年数 30年)
出所：参考文献[15]

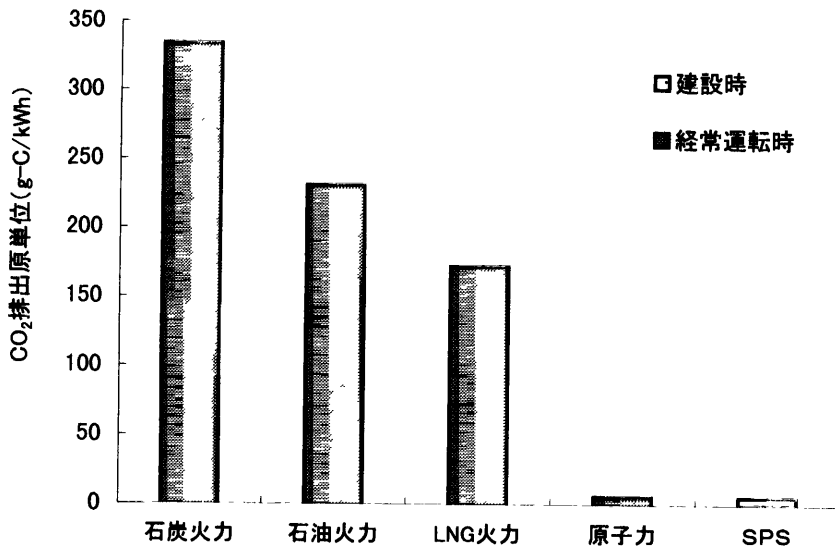


図 3-1-2：発電プラントのCO₂排出原単位
出所：参考文献[14][16]

10km 程度)によって受け取るというものである。従って太陽電池（レクテナ）の製造に大幅な CO₂ 負荷がかかるだけでなく宇宙基地をつくったりすることを含めて何度もロケットを打ち上げなければならない。そこからも CO₂ 負荷がかかるということが容易に推測できる。

表 3-1-1: リファレンスシステムで提案された規模のSPSによるCO₂排出量

太陽発電衛星60基		(単位: 万t-CO ₂)
宇宙輸送機		
1	大量打ち上げロケットの製造	412
2	人員打ち上げロケットの製造	12
3	軌道間貨物輸送機の製造	9192
4	軌道間人員輸送機の製造	4
宇宙基地		
5	低軌道基地の資材製造	5
6	静止軌道上の建設基地の資材製造	19
太陽発電衛星		
7	衛星の製造	1424
8	宇宙用太陽電池の製造	90393
その他		
9	レクテナの資材製造、建設	38688
10	宇宙輸送機の推進燃料の製造、燃焼	17332
計		157482

主要な計算結果は表 3-1-1 に示されているが、SPS を 60 基打ち上げる、つまり DOE/NASA リファレンスシステムで提案された規模の SPS の建設から運用に至る CO₂ 排出量は 15.7 億トンとなっている。その内訳をみると太陽電池製造からの排出が最も多く 9 億トンと全体の約 6 割を占めている。次いでレクテナの資材製造、建設から 3.8 億トン、さらに宇宙輸送機の燃料から 1.7 億トンとなっている。ロケットの製造からの CO₂ 負荷は意外に少ないことがわかる。このような大掛かりなものであるが g-C/kWh 当たりになると普通の太陽光に比べて非常に負荷が少なく、原子力発電並みの排出量になることがわかる。

次にこの SPS 作成のために発生する CO₂ が既存のどの産業から発生するのかをみると、驚くべきことに SPS という発電プラントを作るには大半が既存の発電プラントのエネルギーを使い、したがって事業用発電の CO₂ 排出量が多くなる。他の産業についてはアルミニウムと鉄がそれぞれ 1 割弱と比較的小さいことがわかる。したがってまず SPS を 1 基つくりそこからでてきた電力を利用して次の 1 基をつくる、足りない電力は他から

表 3-1-3: 財・サービス別1単位当たり誘発CO₂排出量

(単位: kg-CO₂/1990年生産者価格表示百万円)

部門番号	部門名	計	生産過程	最終消費過程
2111-01	揮発油	29423	3200	26223
2111-01	灯油	96998	3200	93798
2111-01	軽油	54816	3200	51616
2111-01	A重油	108036	3200	104836
2111-01	LPG	102586	3200	99386
2111-01	コークス	199267	37425	161842
5111-00	事業用発電	23952	23952	0
5121-01	都市ガス	21539	1651	19888

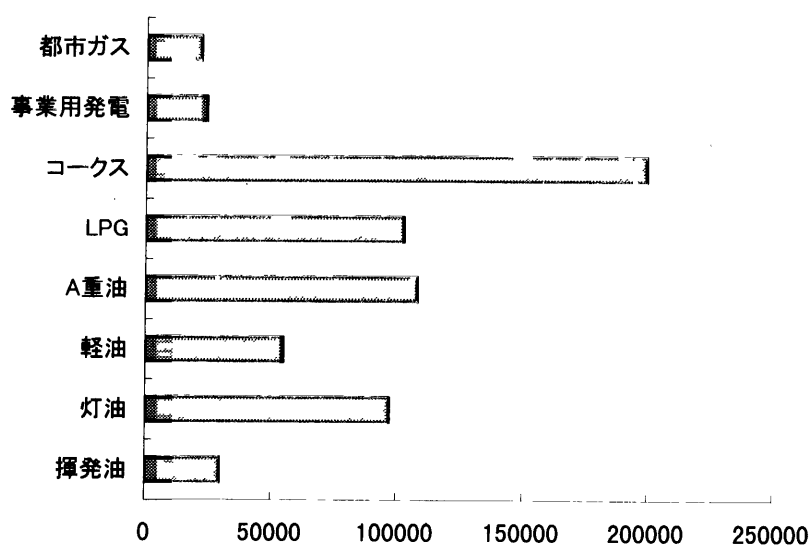


図 3-1-3: 財・サービス別1単位あたり誘発CO₂排出量

(単位: kg-CO₂/1990年生産者価格表示百万円)

出所: 「1990環境IO」より作成

まかなうという、いわゆるソーラーブリーディング方式が可能となる。これに基づく若干のシミュレーションを行ったのが吉岡他[17]である。

表3-1-2: SPSによってSPSを建設する場合のCO₂負荷

期	SPS建設に必要な電力(億kWh)			CO ₂ 負荷	稼働中のSPS		SPSの余剰電力とCO ₂ 負荷の帰属計算		
	SPSからの電力供給 (a)	既存電力からの電力供給	計	万トン (b)	数	発電量 億kWh (c)	余剰電力 億kWh (c)-(a)	CO ₂ 負荷 億トン (d)	総合効果 億トン (b)-(d)
1	0	276.9	276.9	3201	0	0	0	0	0.3
2	246.8	0	246.8	1388	1	438	191.2	0.1	0.0
3	246.8	0	246.8	1388	2	876	629.2	0.3	-0.2
4	246.8	0	246.8	1388	3	1314	1067.2	0.5	-0.4
5	246.8	0	246.8	1388	4	1752	1505.2	0.7	-0.6
6	246.8	0	246.8	1388	5	2190	1943.2	0.9	-0.8
7	246.8	0	246.8	1388	6	2628	2381.2	1.1	-1.0
8	246.8	0	246.8	1388	7	3066	2819.2	1.4	-1.3
9	246.8	0	246.8	1388	8	3504	3257.2	1.6	-1.5
10	246.8	0	246.8	1388	9	3942	3695.2	1.8	-1.7
11	246.8	0	246.8	1388	10	4380	4133.2	2	-1.9
12	246.8	0	246.8	1388	11	4818	4571.2	2.2	-2.1
13	246.8	0	246.8	1388	12	5256	5009.2	2.4	-2.3
14	246.8	0	246.8	1388	13	5694	5447.2	2.6	-2.5
15	246.8	0	246.8	1388	14	6132	5885.2	2.8	-2.7
16	246.8	0	246.8	1388	15	6570	6323.2	3	-2.9
17	246.8	0	246.8	1388	16	7008	6761.2	3.2	-3.1
18	246.8	0	246.8	1388	17	7446	7199.2	3.4	-3.3
19	-	-	-	-	18	7884	-	-	-
計	4195.6	276.9	4472.5	26797			62818.4	30	-27.3203

表 3-1-2 にはシミュレーションの計算結果が示される。第 1 期目は SPS の立ち上げの時点で SPS からの電力供給は存在せず既存の電源設備から建設される。第 2 期目は第 1 期目に建設された SPS と既存の電源設備の電力によって SPS が建設されるが、シミュレーションの結果では第 1 期目に建設された SPS の電力だけで第 2 期目の SPS 建設に必要な電力が総てまかなわれ、余剰電力が発生することがわかる。その結果ブリーディング方式での CO₂ 負荷は次表のようにさらに半減することになる。

エネルギー変換部門の主だったものはこの電力に加えて都市ガス供給部門、石油製品製造部門が重要である。そういうものを購入して家計が消費したらどれだけ CO₂ が出るかをまず比較してみよう。(表 3-1-3, 図 3-1-2) それら 3 部門は家計において異なった用途で用いられるからカロリーあたりの CO₂ 負荷よりもむしろ購入金額当りの CO₂ 負荷のほうがわかりいいであろう。

1990 年生産者価格表示 100 万円から誘発される CO₂ 排出量をガス、電力、石油製品について比較すると事業用発電からは 23.9t-CO₂、都市ガスからは 21.5t-CO₂ と石油石炭製品

に比べて相対的に少ない。誘発される CO₂ 排出量が最も多いのはコークスで 199.2 t-CO₂ である。次いで A 重油の 108.0t-CO₂、LPG102.5t-CO₂ となっている。ただ削減という問題になると化石燃料を使わないということからバイオマス資源が着目を浴びている。バイオマスは CO₂ を吸収したものを燃やすわけだから環境負荷削減につながる。

3.2 素材産業部門

CO₂ 固定発生源のワースト 3 にあげられる鉄鋼、セメント、電力からの CO₂ 排出量は日本全体 12 億トンの約半分を占める。したがってそれを削減することがまずもって重要であることはいうまでもない。ただこれらの産業はオイルショック以降、個別に省エネルギーを徹底した産業であり諸外国と比べて改善の余地が少ないといわれている。しかし、鉄鋼の副産物スラグや石炭火力のアッシュは原料となってセメントの石灰起源の CO₂ を排出しないことが知られている。また、鉄鋼の副産物コークス炉ガスや高炉ガスは自家発電の重要なエネルギーとして利用されている。

そこでわれわれは個別産業ではなく複数の産業のシステムとして、どれだけの省エネが可能であるかということに関心をもった。慶大産研環境問題分析グループ[20]では 3 大固定発生源の副産物や鉄くず、高炉スラグ、フライアッシュをミックスしてどれだけの省エネルギー、環境負荷削減効果があるのかというシミュレーションを行った。

表3-2-1: 各シミュレーションのCO₂排出量, 1次エネルギー消費量減少率

	CO ₂ 排出量 1次エネルギー	
	減少率	消費量減少率
高炉スラグをフルに利用	0.71%	0.20%
フライアッシュをフルに利用	0.07%	0.02%
電気炉の粗鋼生産シェアを51%に変更	1.95%	2.28%
市中鉄くずを25%投入する転炉の粗鋼生産シェアを20%に変更	0.77%	0.91%

その結果鉄鋼プロセスの副産物高炉スラグをフルに利用すると CO₂ 排出量が日本全体の 0.71%減少し、1 次エネルギーは 0.2%減少する。また石炭火力の灰フライアッシュをフルに利用すると CO₂ 排出量が 0.07%減少し、1 次エネルギーは 0.02%減少する。電気炉の粗鋼生産シェアを 1990 年時点の 31%から 51%に変更すると CO₂ 排出量が 1.95%減少し 1 次エネルギー消費量は 2.28%減少する。市中鉄くずを 25%投入する転炉の粗鋼シェアを 1990 年時点の 0%から 20%に変更すると CO₂ 排出量が 0.77%減少し 1 次エネルギー消費量は 0.91%減少する。また複数の副産物を同時に動かしたシミュレーションについては、高炉スラグとフライアッシュをフルに利用し、電気炉の粗鋼生産シェアを 1990 年時点の 31%から 51%に変更すると日本全体の CO₂ 排出量が 2.43%減少し 1 次エネルギー消費量は 2.42%減少することが示されている。高炉スラグとフライアッシュをフルに利用し、市

日本の総排出量(単位:百万 t-CO₂)

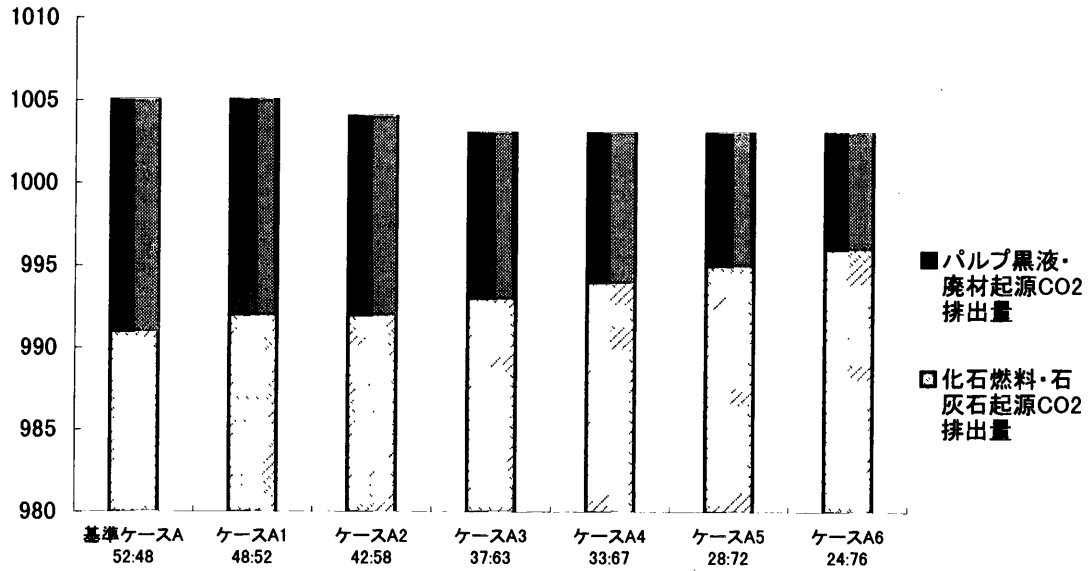


図 3-2-1: 紙の生産に投入された製紙パルプと故紙パルプの比率を変えたときのCO₂排出量
出所:参考文献[21]

日本の総排出量(単位:百万 t-CO₂)

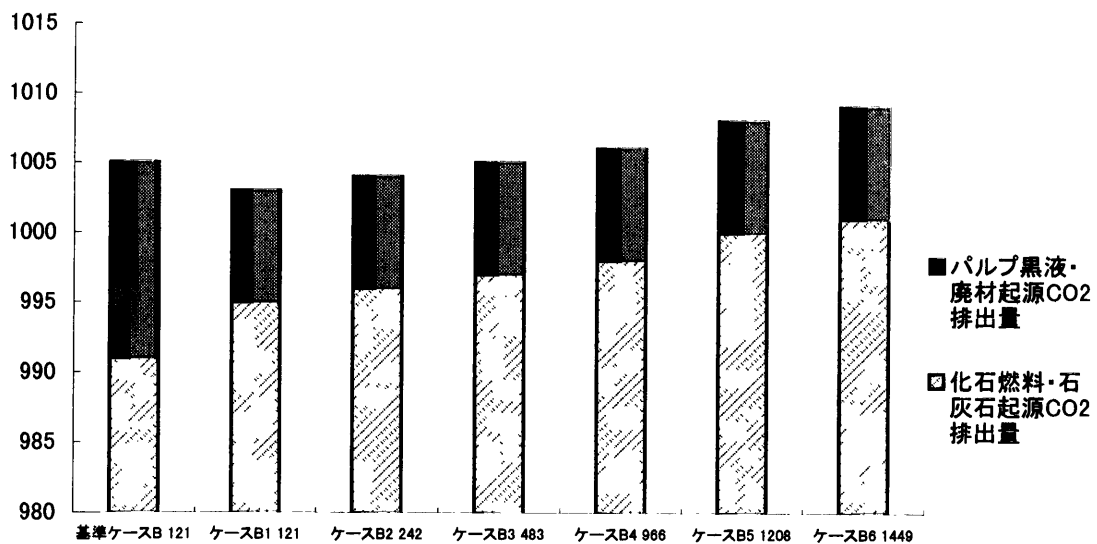


図 3-2-2: 故紙1tあたりの輸送エネルギー消費量を変えたときのCO₂排出量
出所:参考文献[21]

中鉄くずを 25%投入する転炉の粗鋼生産シェアを 1990 年時点の 31%から 51%に変更すると CO₂ 排出量が 2.43%減少し 1 次エネルギー消費量は 2.42%減少する。このように 3 大固定発生源の副産物利用は CO₂ 削減の余地を残していることがいえそうである。

さらに CO₂ の以外に無駄のない省エネ社会づくりとして紙のリサイクルも重要な位置を占めている。現在故紙リサイクルに多くの人々の関心が集まっている理由のひとつに、廃棄物一般の問題として廃棄処分場の問題がある。工場地や住宅地や農地として使用することができる土地を廃棄処分場として使用することは社会的なコストが大きい。しかし、故紙リサイクルは紙ゴミを減らす効果があるかもしれないが、他の環境負荷を増大させるかもしれない。その理由として故紙をリサイクルするためには故紙を収集運搬しなければならないこと、故紙リサイクルが化石燃料と代替性を有するパルプ黒液の発生量を減らすことの 2 点が考えられる。故紙リサイクルは紙ゴミという廃棄物を減らす一方で CO₂ 排出量を増加させてしまうのではなかろうか、また紙の単価を上昇させてしまうのではなかろうか、こういう疑問に答えるために故紙リサイクルが CO₂ 排出と紙のシャドウプライスに及ぼす効果を分析したのが慶大産研環境問題分析グループ[21]である。

紙の生産に投入された製紙パルプと故紙パルプの比率を変えたときの CO₂ 排出量を示したのが図 3-2-1 である。紙の生産に投入された製紙パルプと故紙パルプの比率を変えるシミュレーションを行った結果、故紙リサイクルは CO₂ 排出量全体を減らす効果はあるが、パルプ黒液・廃材起源の CO₂ 排出量を減らし、化石燃料起源の CO₂ 排出量を増やす効果があることが明らかになった。すなわちリサイクルをすればするほど化石燃料の消費量は増大し、その燃焼による CO₂ 排出量も増大していくことになる。

また、故紙 1 トンあたりの輸送距離が変わったときのシミュレーションを行った結果が図 3-2-2 に示される。故紙 1 トン当りの輸送エネルギー消費量が 725 (Mcal/t) を超えると基準ケース B1 の CO₂ 排出量を上回ることが明らかになった。この値は貨物自動車輸送の 360km に相当するが、輸送距離がこれほど長くなるとは考えられないので故紙のリサイクルは CO₂ 排出量を削減する効果があるといえる。

3.3 運輸部門

運輸部門から排出される CO₂ 排出量は 1990 年の推計によると約 1 億 7 千万トンと日本の総排出量の約 15%を占め、電力・ガス熱供給部門に次いで 2 番目に排出量が多い部門となっている。したがって運輸部門における CO₂ 負荷削減の努力は重要な位置を占めているといえる。

ここではまずわれわれに身近でかつ CO₂ 負荷の大きい自動車を取り上げてみたい。自動車は大きく分けて生産するときと運用するときから CO₂ が排出されるが、これを LCA の概念である「土から生まれて土に戻るまで」に基づいて産業連関表を用いたトップダウン分析を行ったのが慶大産研環境問題分析グループ[22]である。この分析では以下 3 つの点

を拡張して計測を行っている。(1)産業連関表を乗用車に関してさらに細かく分類する(2)自動車の生産工程からの波及に加えて自動車生産のための資本設備からの波及、自動車補修・補填部品からの波及、走行からの波及を加える。(3)外用輸送からの波及をより精度の高いものにする。

表3-3-1 : 車種別1年・1台あたりCO₂負荷(kg-CO₂)

	軽乗用車	小型乗用車	普通乗用車
国内のエネルギー・マテリアル波及による排出	2391	3499	4871
外洋輸送による排出	662	966	1377
海外のエネルギー・マテリアルによる排出	199	282	376
計	3252	4747	6624

計測結果をまとめると軽乗用車1台・1年あたりのCO₂負荷は3.3t程度である。そのうち走行の燃料からのCO₂負荷が2.4t程度と圧倒的に多く次いで軽乗用車生産のためのマテリアル波及が0.7t程度となっている。小型乗用車1台・1年あたりのCO₂負荷は4.7t、普通乗用車は6.6t程度となっている。

近年エネルギー消費の急速な拡大とこれに伴う地球環境問題の顕在化により、エネルギー効率が現行の内燃機関よりも高く、CO₂排出量の少ない石油代替燃料車の開発が進められている。その1つである電気自動車(EV)を従来のガソリン乗用車(GV)と比較してその環境改善効果を分析したのが松橋他[23]、工藤他[24]である。

[23]ではEVとGVの製造、走行を含めたライフサイクルCO₂発生量が算定され、走行モードによる相違も示されている。(図3-3-1)

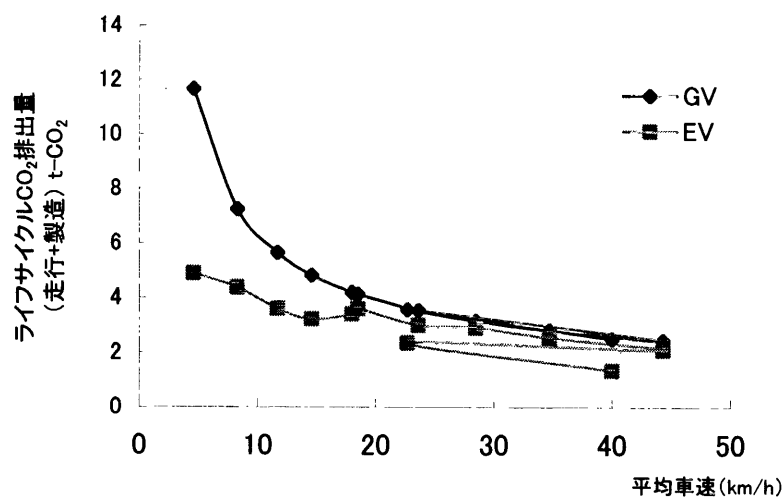


図3-3-1: GVとEVの平均車速別1年あたりCO₂排出量(総合効果)の比較結果
出所: 参考文献[24]より作成

この図からどの平均速度で走行した場合でも、電気自動車の方が CO₂ 排出量が少ないこと、また平均車速が上がるにつれて排出量が減少することがわかった。EV と GV を比較すると平均車速度が 8.3km/h では 1 年あたり CO₂ 排出量が GV は 7.2t-CO₂ であるのに対して EV は 4.3t-CO₂ と約 6 割となっている。ここで平均車速度が上昇して 34.7km/h になると 1 年あたり CO₂ 排出量は GV で 2.8t-CO₂、EV で 2.5t-CO₂ とその差は非常に小さい。

[24]では自動車単体としてのエネルギー消費特性・LC(Life Cycle)CO₂ 排出量の比較を行った。特に渋滞が発生している状況での EV の GV に対するエネルギー消費量・LCCO₂ 排出量についての優位性がわかる。また東京近郊の交通システム全体に EV を導入した場合の環境改善効果を試算した結果、EV 導入により NO_x 排出量は最低でも 24%、LCCO₂ は最低でも 17.2%削減可能であることがわかった。さらに大型車、特に普通貨物車からの NO_x 排出量、LCCO₂ 排出量の影響が大きいことがわかった。

3.4 民生部門

民生部門のエネルギー消費は、1980 年から 1997 年にかけて 54.2Mtoe から 91.9Mtoe へと大幅な増加を示している。家計調査と環境分析用産業連関表をリンクした鷺津[26]によると、1985 年から 1990 年への 5 年間で構成比が大きく伸びたものは、交通・通信費とレクリエーション、娯楽・教育・文化サービス費である。家計の消費費目のなかで CO₂ 排出の構成比が大きいものは、光熱・水道・家賃と交通・通信である。

家計の消費活動からどの程度 CO₂ が排出されているかは、環境家計簿によってより詳細に知ることができる。鷺津[27]によれば、大都市家計では排出される CO₂ の 50%が光熱・水道の消費からである。大都市にくらべ町村単位になると、交通・通信からの CO₂ の排出量が多く、大都市が 10%であるのに対し、16%になる。各消費大費目ごとの内訳は、食費のなかでは魚介類からの CO₂ の排出が 23%(大都市で食費計を 100 とした場合)と高く、ついで外食(17%大都市)となっている。光熱・水道の内訳は、大都市では電力使用からの CO₂ の排出が多く、ガスや灯油などの比率は町村に比較すると非常に小さくなっている。これに対して、水道利用による CO₂ の排出の比率は大都市が高い。交通・通信の内訳をみると、大都市でも町村でもガソリンの比率が圧倒的に高いが、町村は一人あたりのガソリン利用から排出される CO₂ は大都市(169kg per capita pa)の倍以上(404kg per capita pa)である。当然のことであるが、民生部門から排出される CO₂ は光熱費と交通費が主な要因である。ただし、一人あたりでみると、光熱利用では大都市は電力から、町村は灯油からの比率が高くなっている。交通は大都市よりも町村での排出量が倍以上になっているという違いがある。

3.4.1 省エネルギー住宅とエコオフィスの CO₂ 削減効果

省エネルギー住宅の CO₂ 削減効果については、『環境分析用産業連関表』([28])のなかで評

価をおこなっている。それによると、年間一戸あたりで従来住宅にくらべ 587kg の削減効果がある。この評価方法は、従来住宅と省エネ住宅との製造に必要な資材の差と従来住宅と省エネ住宅それぞれに一年間暮らした場合の燃料節約の差から得られたものである。もし、これが全国の住宅に普及するとすると日本全体の 2.2% の CO₂ を削減する換算になる。

エコオフィスでは、よりドラスティックな省エネ効果が得られている(井原他[29])。井原他は国立環境研究所のエコオフィス区域の実測データをもとに省エネ効果のモデル計算を行っており、外部からのエネルギー供給量を対策なしの場合の 35% 程度に削減されることを示している。その対策手段としては、太陽電池、太陽熱システム、断熱材などが大きなエネルギー削減効果をもたらしている。

対費用効果を考えると、年間 1,200 kg-C の CO₂ 削減を行う場合には、断熱材と太陽熱システムの導入が、比較的安上がりになることが計算されている。この計測は電力の CO₂ 削減評価に、現状の火力発電の熱効率を利用してベースラインを計測している。

省エネ住宅との比較で考えると、省エネ住宅は、断熱材と窓が中心であったが、これらの効果は、エコオフィスでも一割程度となっており、ベースラインが火力発電であることを考えると、省エネ住宅の結果(ベースラインは現状のエネルギー・電源構成)と比較してやや大きいがそう異ならない数値である。

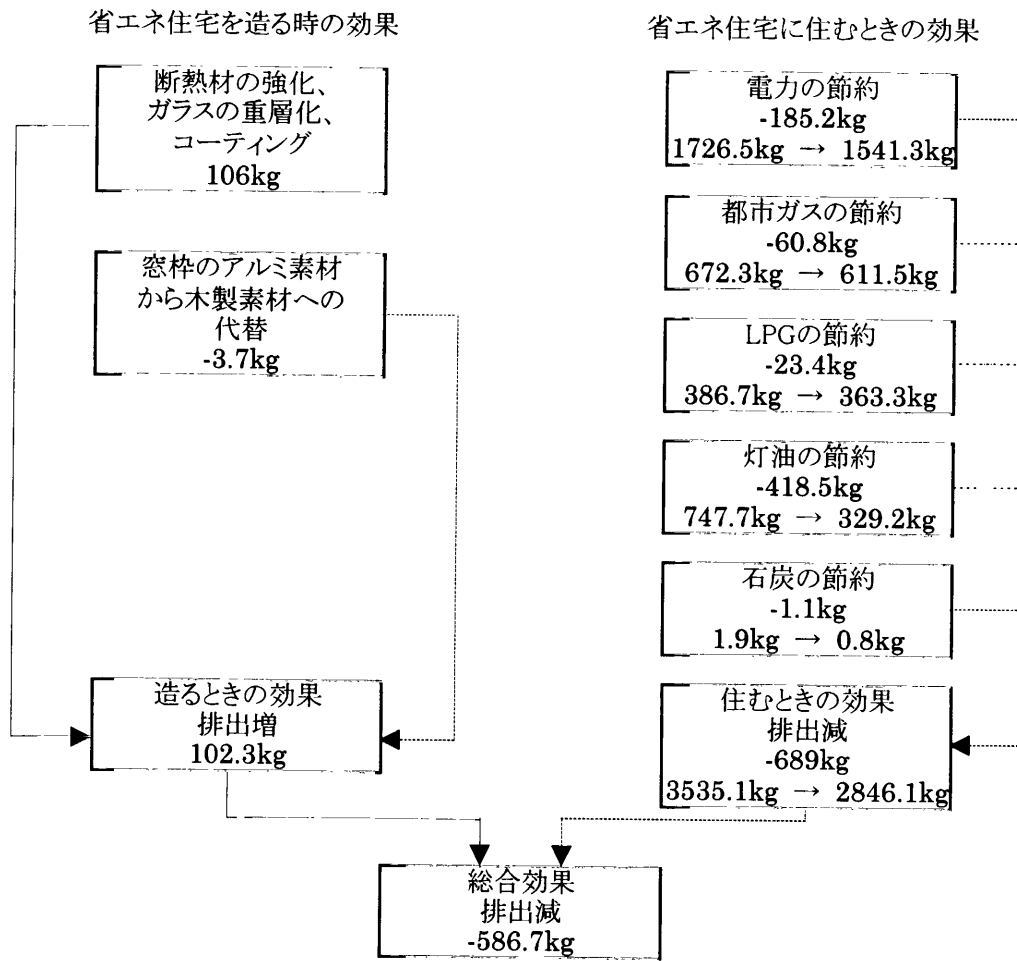


図 3-4-1: 省エネルギー住宅への移行による CO2 排出の総合効果

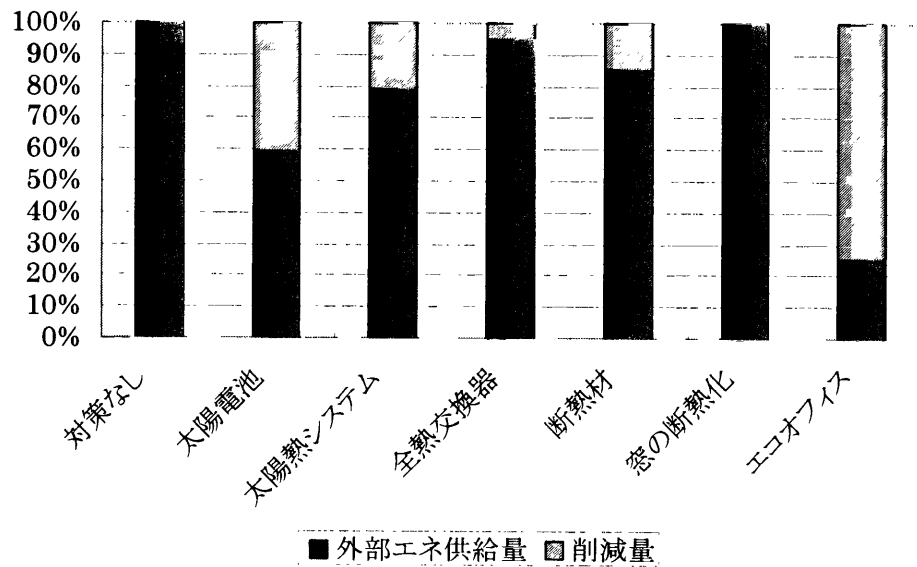


図 3-4-2: 省エネ材導入による外部エネルギー供給の削減率

3.4.2 ガスコジェネによる CO₂ 削減効果

疋田他[30]は、従来までの電力とガスの併用されている熱供給システムを、ガス一本にして電力はガスタービンでまかない、排熱は温水・暖房に利用するシステムにリプレースする場合を考えている。このようなシステムはとくにホテルでの需要に適しているとされている。これによると、既存の電源構成で評価した電力利用では原子力の比率が 30%あるために CO₂ 削減効果としては、ガスコジェネは劣っている。しかし、現実的に発電所で稼働が停止し代替されるものは火力発電であることを考慮すると、ガスコジェネは従来の電力 + ガスよりも、CO₂ 排出量は削減できることが示されている。また、平均の電源構成を想定した場合、CO₂ 発生が同じ程度になるには、コジェネのガスエンジンの発電効率が 2.8% 上昇すれば実現できる。このときコジェネのガスエンジンの発電効率は、29%程度であればよい。最大効率が 31%であることを考えると、運用の仕方改善による可能性はある。

3.4.3 共同溝による CO₂ 削減効果

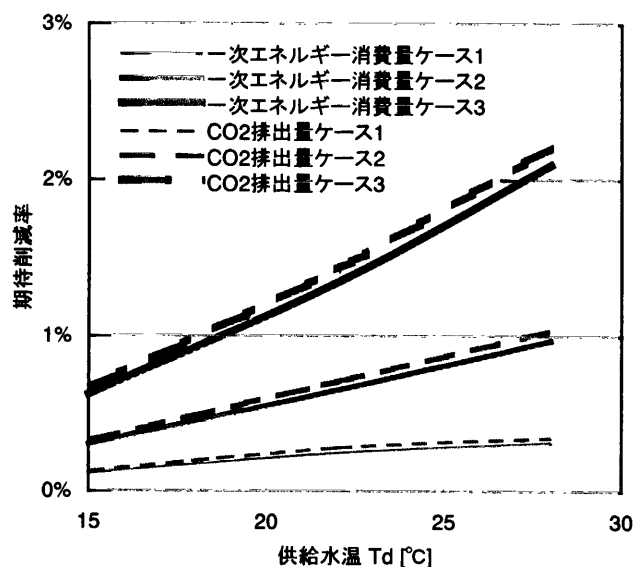
公益事業者によって各家庭・事業所に配電、ガス管、水道管、電話線などのネットワークが築かれている。これらを共同溝に集積してしまえば、それぞれの建設に必要な資材の調達から発生する CO₂ を削減できるものと考えられる。秋澤他[31]は、その影響を評価している。CO₂ 削減効果の評価には、共同溝の建設資材から波及発生する CO₂ の量を評価の基準にしている。設備の設置に必要なエネルギーを各配管の断面積で回帰分析して求めている。その結果共同溝にすることによる規模の経済性の効果が確認されている。規模の効果が大きいのは、ガス・水道の配管系で、電気・通信のケーブル系にくらべて弾力性が 2 倍

大きい。共同溝内部の各配管の配置によって、設置エネルギー削減効果は、単独の場合の14%減から、4%減とわかれている。効果が少ない配置は、共同溝内部を区画に分けて配管した場合である。

3.5 廃熱・廃棄物利用による CO₂ 削減効果

3.5.1 排熱利用による CO₂ 削減効果

発電所や製造業の工場から排出される低温の排熱を家計の温水として再利用するアイデアがある。疋田他[32,33]では、東京近郊の火力発電所から排出される温水を、浄水場に送水し、それを一般家庭に配水するシステムを考えている。これによれば、送水管に特別な工夫をしなくても、熱損失は5%以下にとどまっている。当然のことながら太い配管の方が熱損失は少なく、また送水する際にかかる圧力に必要なエネルギーのロスも少ない。高温で配水すると発電所が熱回収しているものが失われるので、その損失も無視できなくなる。



[注] 管径(D) ≤ 3m
 ケース1: 家庭用風呂向け
 ケース2: ケース1 + 家庭での炊事向け
 ケース3: ケース2 + 業務部門での給湯向け

図 3-5-1: 1次エネルギー消費量及び CO₂ 排出量の期待削減率

また、輸送する熱量を一定にしようとする、低温であるほど多量の温水が必要になり、熱損失と発電ロスは少なくなるものの、圧力ロスが無視できなくなる。こうしたことから、送水管の径を一定にすると供給したい目的の水温に対して最適な配水温度が求められる。22℃程度を想定すると、送水管の径が3m程度の場合には、最適配水温度は25℃以下になり、熱損失率も10%以下に押さえることができる。2mの場合には、最適配水温度は35℃近くなり、熱損失率も15%を超えている。一方、期待できる省エネルギー効果は、家庭用の風呂水、炊事用温水およびオフィス業務部門での給湯利用がある。風呂水利用が最も確実な効果であるが、送水管の径が3mの場合だと、省(1次)エネルギー効果は東京都の場合で0.1から0.3%で、CO₂削減も同程度となる。風呂水利用に加えて、炊事やオフィスの給湯も加えると、効果としては風呂の半分程度と想定すれば、全体で0.5から1%程度のCO₂削減効果となる。

西他[34]では、配送された熱エネルギーを完全利用するものと想定した場合を考察している。送水源としては火力発電、窯業・土石、鉄鋼業、石油・石炭製品製造業に限って、60℃の温水を90cm程度の配管で送水することを想定している。この場合、熱輸送効率は配管の距離が長くなると低下して、1kmであれば99.3%であるのに対し、20kmになると86.1%に低下する。排熱エネルギーの利用方法については、完全利用を前提としているだけで、具体的設備等は無視されているが、CO₂削減効果は全体の2から3%まで見込むことができる。実際には、疋田の計算のように設備をつけない場合は、給湯利用に限定されるので効果は低下する。同様の計算は、長谷川他[35]でも行われており、ここでは温水以外の可能性として、水素、メタノール改質熱(水素とCOをパイプで送る)、蒸気が検討されている。効率的には水素は輸送距離には関係せず、ロスが少ないが、コスト面では高くなる。排熱源はコンバインドサイクルを導入した清掃工場の排熱を想定している。CO₂削減効果はメタノール改質熱がもっとも有望であると結論されている。CO₂削減効果のボリュームの計算には、ベースラインとしては、既存の一般住居の熱需要とガス・灯油・電力などのエネルギー構成を利用している。排熱輸送の利用やコンバインドサイクルで自家発電を行った場合に得られる暖房熱供給は、エネルギー削減効果としては35%程度、CO₂削減効果としては13%から17%が期待できるとしている。

3.5.2 回収廃棄物の利用によるCO₂削減効果

重要性が認識されながらも、廃棄物のリサイクルの分析は、データの制約からなかなか行われてこなかった。研究例としては、一般廃棄物については茂木他[36]、産業廃棄物については廣部他[37]がある。CO₂削減効果に注目すると廣部他は、リサイクルによって重油や電力のエネルギーを代替するとかえってCO₂が1.6から2.4%増加することを示している。

3.6 農林水産部門の CO₂ 削減効果

3.6.1 バイオマス利用ライフサイクルアセスメント

農業関係のアクティビティによる CO₂ 削減効果は、今後もっと注目されてよい分野である。堂脇他[38]は、成長の速いユーカリをパプアニューギニアに植林する場合のバイオマスエネルギーの評価を行っている。比較するベースラインの技術は、石炭を加圧流動床ボイラ+蒸気タービン(PFBC)で発電するものである。対象となる技術は、ユーカリの植林からチップを経て、やはり内部循環流動床ボイラ+蒸気タービン(ICFB)での発電するものと、ガス化炉を経由してガスと蒸気のコンバインドサイクル(IGCC)による発電である。

シミュレーションは、降水量と、原料の乾燥によるエネルギー効率の改善である。降水量は、ユーカリの成長をはやめると同時に、土壌の流出・肥料の流出をまねき、そのために肥料・土壌を再投入するエネルギーが必要になる。ユーカリの乾燥には乾燥室で処理することを想定している。たしかに、ユーカリを原料にして発電する場合は、石炭にくらべエネルギー変換効率は低くなっている。しかし、バイオマスから発生する CO₂ はカウントされないために、ユーカリ原料の発電は原料の製造過程からのものに限られる。この場合、ユーカリ発電は、最小で発電量 GJ あたり 9.14kg-CO₂ となり、石炭の加圧流動床ボイラの 221kg-CO₂ に比較して著しく低くなっている。

3.6.2 稲作のライフサイクルアセスメント

米作のライフサイクルアセスメントでは、松橋他[39,40]は米作から発生する CO₂ は機械の利用よりも、製造プロセスで大きいことを明らかにした。図 3-6-1 参照。その傾向は、耕地面積が小さい方がより顕著になる。稲作農家の大規模化は、CO₂ 削減にも効果がある。0.3ha では、百万円生産当たり 2.6 t-CO₂ 排出するが、5ha 以上では、1.5 t-CO₂ の排出量にとどまっている。

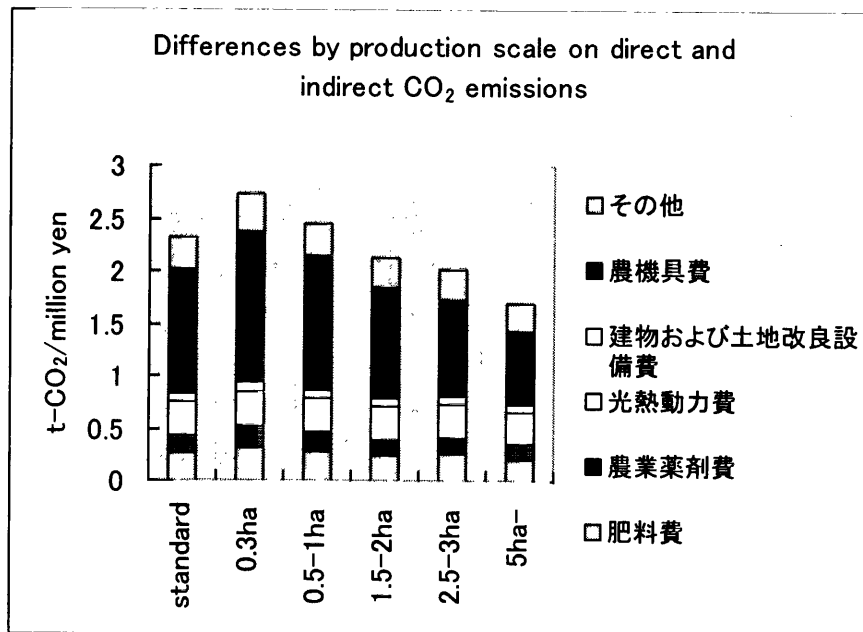


図 3-6-1: 生産規模別の米作百万円当りの CO₂ 発生量

参考文献

- [1] J. Ellis; Options for project emission baselines, *OECD and IEA information paper*, October, (1999).
- [2] 松橋隆治, 技術評価のためのライフサイクルアセスメント手法の基本的枠組みとその問題点その2, KEO Discussion Paper No.37, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1998).
- [3] H. Hayami, M. Nakamura, K. Asakura and K. Yoshioka; The global warming gases from trade between Canada and Japan, paper presented at the 1999 Conference of Canadian Economic Association, University of Toronto, May 1999.
- [4] W. Leontief; Structure of the world economy: Outline of a simple input-output formulation, *Swedish Journal of Economics*, 76 (1974), also reprinted in W. Leontief; *Input-Output Economics* 2nd ed., Oxford University Press, (1986), 321-337.
- [5] W. Leontief; The dynamic inverse, in *Contributions to Input-Output Analysis*, North-Holland, (1970), 17-46, also reprinted in W. Leontief; *Input-Output Economics* 2nd ed., Oxford University Press, (1986), 294-320.
- [6] 石川雅紀, 藤井美文, 高橋邦雄, 中野諭, 吉岡完治; リサイクルを含む場合の環境負荷の産業連関表による分析方法—シナリオ・レオンティエフ逆行列の構想—, KEO Discussion Paper No.18, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1998).
- [7] W. Leontief; Environmental repercussions and the economic structure: An input-output approach, *Review of Economics and Statistics*, 52-3, (1970), also reprinted in W. Leontief; *Input-Output Economics* 2nd ed., Oxford University Press, (1986), 241-260.
- [8] W. Leontief; National income, economic structure, and environmental externalities, in M. Moss ed., *The Measurement of Economic and Social Performance*, (1973), also reprinted in W. Leontief; (1986), 261-272.
- [9] 吉田好邦, 石谷久, 松橋隆治; 鉄屑リサイクルシステムへの三次元産業連関分析の応用, エネルギー・資源 19-6, エネルギー・資源学会, (1998).
- [10] 松橋隆治; 技術評価のためのライフサイクルアセスメント手法の基本的枠組みとその問題点, KEO Discussion Paper No.19, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1997).
- [11] 松橋隆治; 資源・環境・社会の持続可能性に関する一考察, KEO Discussion Paper No.43, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1998).
- [12] 松橋隆治, 疋田浩一; 動学ライフサイクルアセスメントの概念とその発電システムへの適用, KEO Discussion Paper No.59, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).
- [13] 疋田浩一, 石谷久, 松橋隆治, 吉田好邦, 吉岡完治; LCAのためのデータベースツールの開

- 発. KEO Discussion Paper No.52, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).
- [14] 慶應義塾大学産業研究所環境問題分析グループ; 電力生産によるCO₂排出, 環境分析用産業連関表(改訂版), 慶應義塾大学産業研究所, (1998), 99-126.
- [15] 内山洋司,山本博巳; 発電プラントの温暖化影響分析,電力中央研究所研究報告Y91005, (1992).
- [16] 吉岡完治,菅幹雄,野村浩二,朝倉啓一郎; 宇宙太陽発電衛星のCO₂負荷, KEO Discussion Paper No.2, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1997).
- [17] 吉岡完治,菅幹雄,野村浩二,朝倉啓一郎; 宇宙太陽発電衛星のCO₂負荷-若干のシミュレーション-, KEO Discussion Paper No.14, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1997)
- [18] 秋澤淳, 柏木孝夫; コージェネシステムのライフサイクルアセスメント, KEO Discussion Paper No.62, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).
- [19] 菅幹雄,内田晴久,鷺津明由; LNG受入基地建設のCO₂負荷計算, KEO Discussion Paper No.21, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1997).
- [20] 慶應義塾大学産業研究所環境問題分析グループ; 鉄くず・高炉スラグ・フライアッシュのリサイクル, 環境分析用産業連関表(改訂版), 慶應義塾大学産業研究所, (1998), 127-154.
- [21] 慶應義塾大学産業研究所環境問題分析グループ; 故紙リサイクルの分析, 環境分析用産業連関表(改訂版), 慶應義塾大学産業研究所, (1998), 155-174.
- [22] 慶應義塾大学産業研究所環境問題分析グループ; 自動車のLCA, 環境分析用産業連関表(改訂版), 慶應義塾大学産業研究所, (1998). 175-190.
- [23] 松橋隆治,菅幹雄,吉岡完治,足田浩一,吉田芳邦,石谷久; 自動車のライフサイクルアセスメント, KEO Discussion Paper No.8, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1997).
- [24] 工藤祐揮,石谷久,松橋隆治,吉田好邦; 交通量を考慮した電気自動車導入による環境改善効果, KEO Discussion Paper No.35, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1998).
- [25] R. Matsushashi, H. Ishitani, K. Hikita, H. Hayami, and K. Yoshioka; Life cycle assessment of gasoline vehicles and electric vehicles, KEO Discussion Paper No.45, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1998).
- [26] 鷺津明由; 家計調査に基づく環境家計簿分析, KEO Discussion Paper No.56, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).
- [27] 鷺津明由; 家計の消費構造とCO₂排出に関する時系列分析-1985年と1990年の環境分析用産業連関表による-, KEO Discussion Paper No.57, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).
- [28] 慶應義塾大学産業研究所環境問題分析グループ; 省エネルギー住宅の分析, 環境分析

用産業連関表(改訂版), 慶應義塾大学産業研究所, (1998), 79-97.

[29] 井原智彦, 石谷久, 松橋隆治; 熱負荷計算を用いたオフィスビルにおける CO₂ 削減策の評価, KEO Discussion Paper No.36, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).

[30] 足田浩一, 石谷久, 松橋隆治, 吉田芳邦; プロセス連関分析によるガスコジェネシシステムのライフサイクルアセスメント, KEO Discussion Paper No.13, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1998).

[31] 秋澤淳, 柏木孝夫; 共同溝のライフサイクルアセスメントー規模の経済性および範囲の経済性分析ー, KEO Discussion Paper No.61, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).

[32] 足田浩一, 松橋隆治, 石谷久, 吉岡完治; 既存の水道設備と大規模発電所を利用した簡易温水供給システムのLCA(2), KEO Discussion Paper No.51, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).

[33] 足田浩一; 既存の水道設備と大規模発電所を利用した簡易温水供給システムのLCA, KEO Discussion Paper No.4, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1998).

[34] 西裕志, 松橋隆治, 吉田好邦, 石谷久; 日本の製造業における排熱利用可能性の評価, KEO Discussion Paper No.34, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).

[35] 長谷川秀夫, 石谷久, 松橋隆治, 吉岡理文; 熱輸送媒体に着目した各種排熱輸送システムの分析, エネルギー・資源 18-1, エネルギー・資源学会, (1997).

[36] 茂木源人, 安達毅, 小谷明生, 山富二郎; 一般廃棄物回収における産業間の負担配分に関する研究, KEO Discussion Paper No.17, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1998).

[37] 廣部祐司, 内山洋司; 産業廃棄物リサイクルによる環境負荷の低減効果分析, エネルギー・資源 20-5, エネルギー・資源学会, (1999).

[38] 堂脇清志, 石谷久, 松橋隆治; バイオマスエネルギーの導入可能性に関する評価(1), KEO Discussion Paper No.24, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1998).

[39] M. Breiling, T. Hoshino and R. Matsuhashi; Contributions of rice production to Japanese greenhouse gas emissions applying life cycle assessment as a methodology, KEO Discussion Paper No.38, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).

[40] 松橋隆治, 星野達夫, M. Breiling, 吉岡完治; 米作のライフサイクルアセスメント, KEO Discussion Paper No.39, 慶應義塾大学産業研究所未来開拓プロジェクト, (1999).