

18. 資源転換を核にした地域の循環代謝モデルの分析

ANALYSIS OF RECYCLE-ORIENTED REGIONAL INDUSTRIAL METABOLISM MODEL WITH RESOURCE CONVERSION

吉田 登*・安田 宣夫**・盛岡 通***

Noboru Yoshida*, Norio Yasuda**, Tohru Morioka***

ABSTRACT; Since Earth Summit, Some concepts about cyclic systems, such as an eco-industrial park, have been appeared in order to solve serious global environmental problem, surplus consumption of resources and problems of solid wastes. Construction of recycle-oriented regional industrial metabolism model with minimum environmental load requires resource conversion facilities. In addition, there are some promotion factors to make the model, which can improve the efficiency and supply and demand balance. In this study, various conversion facilities and sectors are selected by a set of judgement process of cycle formation. The followed environmental performance is evaluated using account matrix including sectors varying from neighborhood of a factory to city-wide area. As a result of the analysis, various important factors were recognized in considering comprehensive efficiency, environmental load by the transportation, and the usefulness of this account matrix towards further progressing the complex.

KEYWORDS; metabolism, conversion technology, life cycle environmental load, eco-efficiency

1. はじめに

リオの地球サミット以来、「持続可能な発展」という概念から「産業エコロジー」や「ゼロエミッション」に代表される循環型社会の形成へ向けての概念が広がり、それに関する技術や政策も生まれてきた。その「循環」とは、あるセクターから発生する副産物を別のセクターの資源として利用するという過程を踏んで、地域内において最終的に完全な循環を目指す地域循環と、製品の再利用やリサイクルのシステムを形成する製品循環の2つに分けることができ、この2つのアプローチをもとにした循環形成のあり方を追究する研究が展

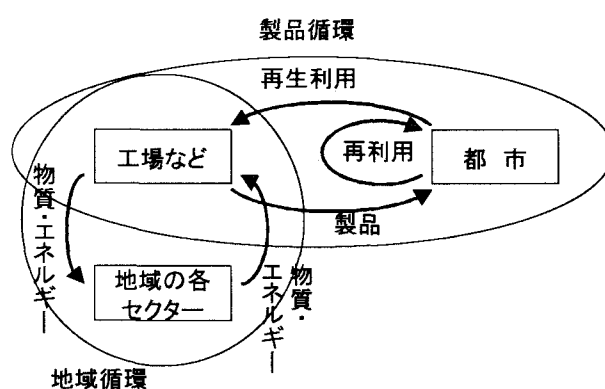


図1 製品循環と地域循環

開されている (Morioka et.al, 1999)¹⁾ (図1)。本研究では、住工混合地域の多い日本の都市的な地域における住(消費)セクターと工セクターが連携した地域循環を取り上げる。そのときに、同程度の地域活動、サービス水準に対していかにバージン資源使用量、廃棄物量、CO₂排出量等の環境負荷が少ない形で適切な循環を形成するかを考える必要がある。その際に、連携するセクターを適切な判断基準のもとに選択する必要があり、その判断をする評価システムを構築する必要がある。そこで、本研究において、住セクターと工セクターを含む地域の循環形成の判断プロセスとその評価システムを提示し、転換装置やセクターの選択

* ; 和歌山大学システム工学部 Dep. of Systems Eng. Wakayama Univ., ** ; 三機工業株式会社 Sanki Engineering CO.,LTD,

*** ; 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 Dep. of Environmental Eng., Graduate School of Eng. Osaka-Univ. (科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業研究代表 Research Representative of CREST, JST)

に際して必要な要素について考察することを目的とする。

2. 地域循環に関する現状の取り組み

前述の地域循環の代表的な事例として挙げられるのが、図2のデンマークのカルンボー(Kalundborg)における取り組みである。20年以上も前から、中心的な4つの工場・プラント(発電所、石油精製工場、製薬工場、石膏工場)と周辺の住居や農場も含めた循環複合体が形成されてきた。蒸気やスラッジ、灰、水などの交換が行われている。特徴として挙げられるのは、初めに固定化された計画のもとに形成されたのではなく、主に各会社の経済的な便益や環境の規制を守るための手段として自然な形で循環が発展したという点である。また、段階的に連鎖反応的に副産物の交換が行われるようになったことや、例えば脱硫装置からの副産物を別の工場の原料として利用するなど、利用度を高める装置を用いた循環形成が多いことも特徴として挙げられる。日本においても、通産省の「エコタウン事業」や環境庁の「ゼロエミッション企業団地事業」などの政策がある。民間では荏原製作所、国母工業団地、屋久島等で実験的に取り組みが始められている。

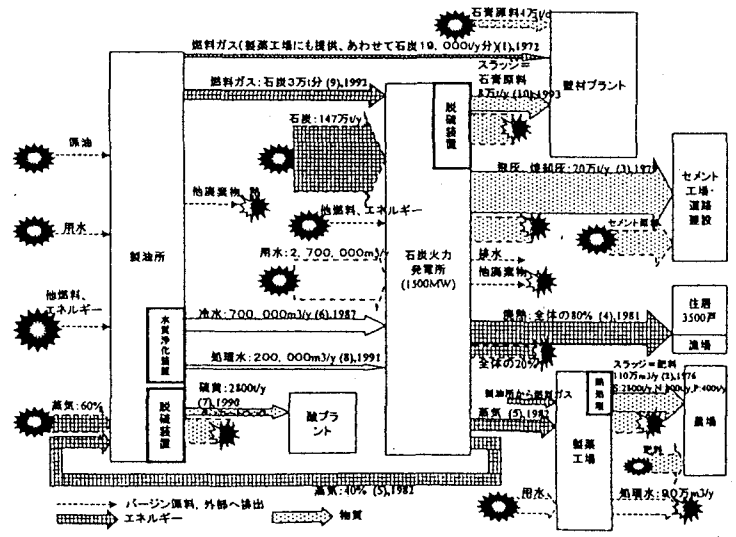


図2 カルンボーにおける地域循環
(文献2をもとに作成)

3. 環境負荷削減を目的とした地域循環の代謝モデルの形成に必要な要素

まず、地域循環において必要とされるのは、相対的に利用度の低い状態である物質やエネルギー、もしくは未利用エネルギーを物理的、または化学的、または生物学的な力によって、相対的に利用度の高い状態に転換する機能を備えた環境負荷低減型の機械、装置またはシステムである転換装置である。例えば、コンポスト、メタン発酵、ごみ発電、燃料電池等が挙げられる。

この転換装置を含んだ地域循環の基本モデルを図3に示す。評価項目については、バージン資源投入量と廃棄物量、そして環境負荷削減の意味合いからCO₂

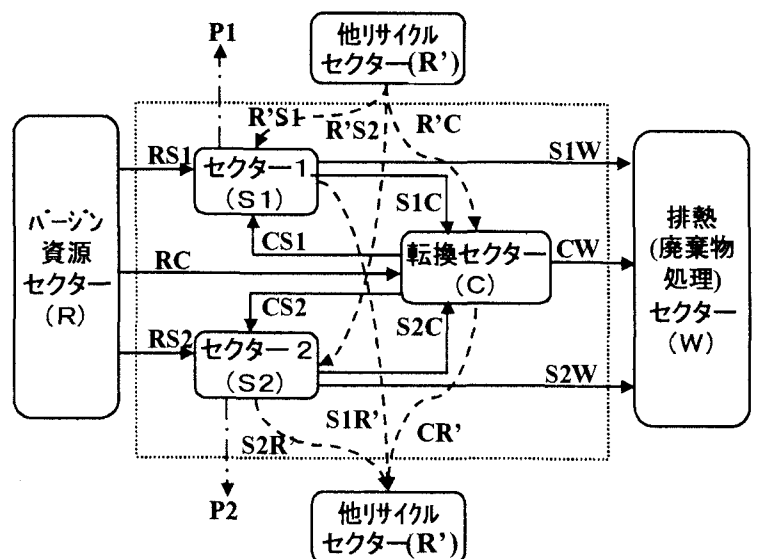


図3 地域循環基本モデル

排出量の3種類を挙げる。その中で、バージン資源投入量と廃棄物量にも相関が強いCO₂排出量を代表的な指標として考え、それに影響を与える促進要因をライフサイクル的な立場で検討する。

図3の基本モデルをもとに、余剰なCO₂排出量を生み出す要因を考えた結果、以下の要因が考えられる。まず、過剰なエネルギー消費や多量の廃棄物を出すなどの各主体そのものの環境負荷が挙げられる。そして、

転換装置の転換の効率が低いことや、転換装置の自身で消費するエネルギーが大きいこと、転換装置の建設時に生じる環境負荷も要因として挙げられる。転換装置の効率に影響を与える要因として、規模の大きさ、機器の種類、投入物質の種類などが挙げられる。例えばごみ発電であれば、焼却炉の規模が大きいほど発電効率や熱効率が高くなり、背圧タービンか復水タービンかによっても効率が変わってくる。また、発熱量の高いごみが入るほど取り出せる熱量も大きくなり、結果的に効率も上がる。

次に、複数の主体の関連に起因する要因としては、連携する主体間でやりとりする物質やエネルギーの需給バランスの違い、時間・季節変動の違い、熱電比率の違いが挙げられる。その違いが大きければ大きいほど、余剰な廃棄物やエネルギーが生み出される。さらに、各主体間の距離が大きいことにより、輸送による環境負荷が大きくなったり、多大な熱損失を生み出したりするということも要因として挙げられる。

転換装置の規模に関しては、大きければそれだけ効率が上がり環境負荷も削減できるが、大きすぎると熱損失等輸送による環境負荷が増大し、高効率による環境負荷の削減の限界的な効果は低減すると考えられる。

4. 評価システムと循環形成判断プロセス

4.1 評価システム

循環の状態を評価するツールとして、本研究では勘定マトリクスを用いる。表1、表2にエネルギー、CO₂排出に関するマトリクスを示す。例えば表1の「RS2」は、バージン資源セクターからセクター2に供給されるエネルギー量をあらわす。この勘定マトリクスを用いることによって、主体間の物質やエネルギーのやりとりが分かり、各主体、全体のバージン資源使用量や廃棄物量の計算が可能となるので、これをも

表1 エネルギーマトリクス

	セクター1	セクター2	転換セクター	他リサイクルセクター	排熱(廃棄物処理)セクター	総産出	指標	(指標の計算方法)
バージン資源セクター	RS1	RS2	RC			ΣOR	環境効率(バージンのエネルギー使用)(エネルギーマトリクスのみ)	サービス/ΣOR
セクター1	S11		S1C	S1R	S1W	ΣOS1	産出エネルギー有効利用率(再資源化率)	(ΣOS1-S1W)/ΣOS1
セクター2		S22	S2C	S2R	S2W	ΣOS2	産出エネルギー有効利用率(再資源化率)	(ΣOS2-S2W)/ΣOS2
転換セクター	CS1	CS2	CC	CR	CW	ΣOC	産出エネルギー有効利用率(再資源化率)	(ΣOC-S1C)/ΣOC
他リサイクルセクター	RS1	RS2	RC			ΣOR		
総投入	ΣIS1	ΣIS2	ΣIC	ΣIR	ΣIW	ΣI(ΣO)	総産出エネルギー有効利用率(総再資源化率)	(ΣO-ΣOR-ΣOR-ΣIW)/ΣI(ΣO-ΣOR-ΣOR)
指標	副産物利用率	副産物利用率	副産物利用率		環境効率(廃棄物処理)(物質マトリクスのみ)	総副産物利用率		
(指標の計算方法)	(ΣIS1-RS1)/ΣIS1	(ΣIS2-RS2)/ΣIS2	(ΣIC-RC)/ΣIC		サービス/ΣIW			

表2 CO₂排出マトリクス

	セクター1	セクター2	転換セクター	他リサイクルセクター	排熱(廃棄物処理)セクター	建設関連	運用計	輸送計	総CO ₂ 排出量	指標	(指標の計算方法)
バージン資源セクター	RS1	RS2	RC						ΣOR		
セクター1	S11		S1C	S1R	S1W	S1Cs	S1U	S1T	ΣOS1		
セクター2		S22	S2C	S2R	S2W	S2Cs	S2U	S2T	ΣOS2		
転換セクター	CS1	CS2	CC	CR	CW	CCs	CU	CT	ΣOC		
他リサイクルセクター	RS1	RS2	RC						ΣOR		
総投入	ΣIS1	ΣIS2	ΣIC	ΣIR	ΣIW	ΣCs	ΣU	ΣT	ΣO(ΣI)		
指標										環境効率(CO ₂ 排出)	サービス/全CO ₂ 排出量

とに代替案を比較評価できる。また代替案を決定した後、勘定マトリクスの各セルの値を知ることによって、次の段階においてどのように転換装置やセクターと連携すればよいか判断できる。評価項目については、再資源化率、排熱利用率、副産物使用率、環境効率（ $LC\text{CO}_2$ 、廃棄物量、バージン資源使用量）（サービスを環境負荷でわったもの）を用いる。すべて勘定マトリクス上で計算が可能な値である。

4.2 循環形成判断プロセス

前述したの地域循環に影響を与える要素を考慮に入れた循環形成の判断プロセスを図4に提示する。この判断プロセスに沿って、代替案の絞り込み、選択を行うとする。

(1)初期状態の評価

2セクターを決定し、その状態におけるフロー図を描き、勘定マトリクスを用いて評価をする。

(2)転換装置とその規模の選択の判断基準の提示

初期の状態から、導入する転換装置とその規模を決定するための判断基準を提示する。ただし、連携するセクターは仮に設定するとする。各規模ごとに、転換装置の CO_2 排出削減量（X）を計算し、一つのグラフの中に表し、規模、転換装置を決定する判断基準とする。Xの値が最小である規模と転換装置の組み合わせを決定するとする。Xは次式で表す。

$X=a+b-c-d-e$ ここで a,b,c,d,e の各値は単位投入物質あたりの a: バージンエネルギー使用削減による CO_2 排出削減量 b: 最終処分量の削減による CO_2 排出削減量 c: 転換装置の建設に伴う CO_2 排出量 d: 輸送に伴う CO_2 排出量 e: 転換装置の運用による CO_2 排出量 を表す。

(3)セクターもしくはセクターの組み合わせの選択の判断基準の提示

(2)で選択した転換装置を用いた状態において、連携するセクターもしくはセクターの組み合わせを選択するための判断基準となるグラフを示す。より環境負荷の少ない形で、副産物投入セクター、熱需要セクターを選択する判断基準を設定するために、選択した案における余剰 CO_2 排出量（Y）を計算し、それぞれを比較する。

$Y=f+g+h+i+j$ ここで f,g,h,i,j の各値は f: 余剰排熱分の埋め合わせのための都市ガス使用による CO_2 排出量 g: 必要熱量に達しない場合の補足の都市ガスの使用による CO_2 排出量 h: 配管の熱損失による分の埋め合わせの都市ガス使用による CO_2 排出量 i: 配管建設による CO_2 排出量 j: 副産物の搬送によるエネルギー消費による CO_2 排出量 を表す。

(4) 最終的に選択した代替案を適用した際の物質、エネルギー代謝の変化を物質、エネルギーフロー分析により計量する。それを勘定マトリクスを用いて評価し、これをもとに更なる地域循環形成へ向けた要因を抽出する。

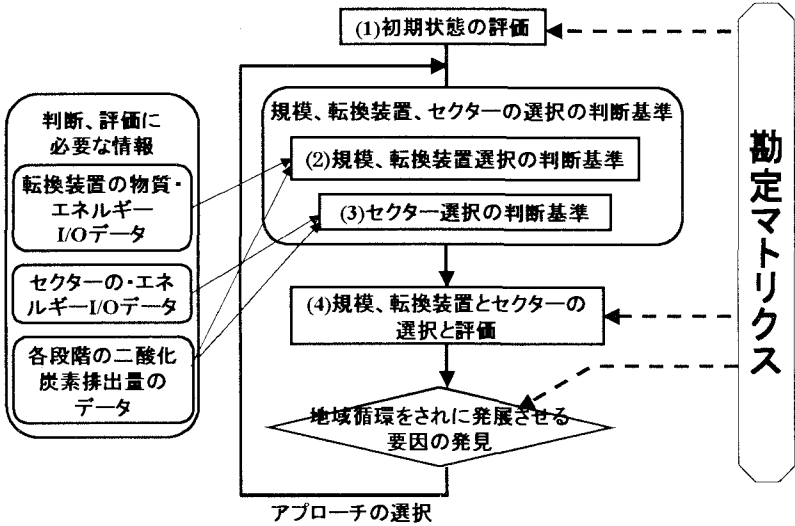


図4 地域の循環形成判断プロセス

5. 工場周辺地域を対象とした循環形成判断プロセスに基づいた評価

4. で提示した判断プロセスに基づいて、産業機械の製造工場及び周辺地域を対象に、実際に転換装置、セクターの選択をし、それらの評価を行った。まず、初期状態として工場と工場敷地内の住宅団地(面積 6ha、

2,000 人) のみの状態の勘定マトリクスを用いて評価を行った結果、エネルギーの排熱利用は少ないが、物質のリサイクルが全体で 2 割ほど行われており、各主体の投入側の副産物の利用は全くされていないことが分かった。

そして、転換装置、セクターの選択に移行する。まず、ガス化溶融炉における規模別の CO_2 排出削減量を計算した値を、転換装置ごとに結んだものを図 5 に示し、規模別の各転換装置 (ガス化溶融炉、RDF 投入ガス化溶融炉、触媒式湿式酸化装置、メタン発酵+燃料電池、メタン発酵+燃料電池+湿式酸化装置の 5

種類) の CO_2 排出削減量を計算した値を転換装置ごとに回帰曲線で結んだものを合成したグラフを図 6 に示す。すべての装置で発電、熱供給を行うものとし、電力は売電するとしている。また配管による熱損失があるものとし、1 %/km としている。そして、転換装置から直接排出される CO_2 については計算に入れていない。また、熱は熱需要密度が 1 Tcal/ha の周囲の地域に供給すると仮定している。

図 5 より、ガス化溶融炉の炭酸ガス排出削減量に大きく影響を及ぼしている

るのは、バージン資源使用削減によるものである。その値は装置の効率に比例する。ガス化溶融炉は規模の増加により、発電効率が増加するので、グラフも右上がりになっている。建設、輸送に関連する CO_2 排出量は、相対的に小さい値となった。しかし、輸送に関しては、規模が大きくなるにつれて、廃棄物の輸送距離、配管の損失による CO_2 排出量が増加しているため、効率による削減量増加を少し逓減させていることが分かる。輸送に伴う CO_2 排出量は、分析の結果より最大規模の場合でバージン資源使用の削減分と廃棄物処理の消費エネルギーの削減分の 9 % も占める。熱需要密度が低いところに供給するとさらにその割合が増えると考えられ、無視できない要素である。

最終的に図 6 より、全体で一番 CO_2 排出削減量が高いのは、最大の 600t/d 規模のガス化溶融炉である

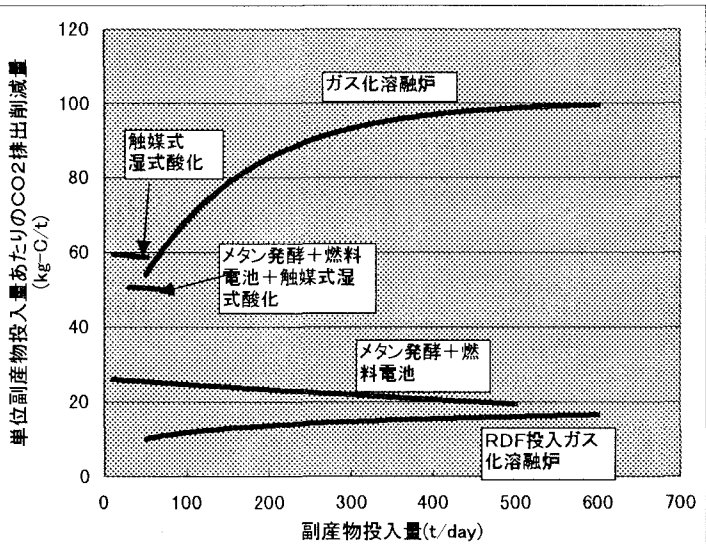


図6 各転換装置の規模と CO_2 排出削減量

という結果となった。しかし 600t/d レベルは廃棄物密度の高い大都市において経済的に成立すると考え、郊外で大都市と比べて廃棄物密度の低い藤沢市においては収集面積が広すぎるため、実現の可能性が低いと考えられる。よって、本分析では仮に現状と同じ規模である 200t/d のガス化溶融炉を導入する。

次に、種々の条件より 60t/d 以上の転換装置を導入できないと仮定する。その場合はスケールメリットの得られないガス化溶融炉に比較して触媒式湿式酸化装置のワンユニット (10.5t/d) が、一番削減量が高くなった。一番発電効率の高い RDF 投入のガス化溶融炉に関しては、 CO_2 排出削減

量が低くなった。RDF製造過程の脱水、乾燥等のエネルギー使用が大きいことがその原因となっている。分析の結果では、RDFの製造時に生じるCO₂排出量は、バージン資源使用の削減分と廃棄物処理の消費エネルギーの削減分のおよそ80%を占めた。また、メタン発酵装置関連の転換装置に関してもCO₂排出削減量が低くなった。しかし、メタン発酵装置からの熱回収及び燃料電池の発電の効率の向上による将来的な排出削減量の増大の可能性が期待される。

表3 勘定マトリクスの結果の比較

<初期状態>			<転換装置、セクターを選択した状態>		
指標		値	指標		値
環境効率	バージンエネルギー 使用量(m ² Gcal・y)	4.95	環境効率	バージンエネルギー 使用量(m ² Gcal・y)	10.52
	廃棄物量(m ² ・t・y)	156		廃棄物量(m ² ・t・y)	4,173.10
	CO ₂ 排出量 (m ² ・t・C・y)	26.7		CO ₂ 排出量 (m ² ・t・C・y)	33.9
	産出エネルギー有効 利用率	0		産出エネルギー有効 利用率	0.68
全体	副産物利用率 (エネルギー)	0	全体	副産物利用率 (エネルギー)	0.15
	再資源化率	0.26		再資源化率	0.96
	副産物利用率 (物質)	0		副産物利用率 (物質)	0.1
	再資源化率	0		再資源化率	0
A住宅団地	産出エネルギー有効 利用率	0	A住宅団地	産出エネルギー有効 利用率	1
	副産物利用率 (エネルギー)	0		副産物利用率 (エネルギー)	0.65
	再資源化率	0.21		再資源化率	1
	副産物利用率 (物質)	0		副産物利用率 (物質)	0
B工場	産出エネルギー有効 利用率	0	B工場	産出エネルギー有効 利用率	1
	副産物利用率 (エネルギー)	0		副産物利用率 (エネルギー)	0.18
	再資源化率(物質)	0.27		再資源化率(物質)	0.93
	副産物利用率 (物質)	0		副産物利用率 (物質)	0
他セクター	産出エネルギー有効 利用率	0	他セクター	産出エネルギー有効 利用率	1
	副産物利用率 (エネルギー)	0		副産物利用率 (エネルギー)	0
	再資源化率(物質)	1		再資源化率(物質)	1
	副産物利用率 (物質)	0		副産物利用率 (物質)	0
ガス化溶融炉 (200t/d)	産出エネルギー有効 利用率	0	ガス化溶融炉 (200t/d)	産出エネルギー有効 利用率	0.37
	副産物利用率 (エネルギー)	1		副産物利用率 (エネルギー)	1
	再資源化率(物質)	0.5		再資源化率(物質)	0.5
	副産物利用率 (物質)	1		副産物利用率 (物質)	1

次に、仮に 200t/d のガス化溶融炉を設定した状態

における、廃棄物提供セクターと熱需要セクターの選択の判断基準となる余剰CO₂排出量を周辺セクターをいくつかピックアップして計算した。その結果より、廃棄物投入が年間で一定であると仮定したこともあり、連携する主体間の需給バランスの影響が一番大きく、輸送に伴う環境負荷も無視できないことが分かった。

最後に、初期状態と 200t/d 規模のガス化溶融炉を含めた状態の前述の勘定マトリクスを用いた評価の結果の比較をした(表3)。その結果より全体の評価値は初期状態と比べて上がっている。しかし、再資源化率に比べて、特に副産物利用率の上昇が少ないことが分かった。各主体のエネルギー消費による環境負荷の割合が大きいので、次の展開としては、省エネや断熱構造の建物への更新などにより、消費エネルギー自体を少なくする必要があると考えられる。

6. 結論

本研究では、資源転換を核にした地域の循環代謝モデルの評価に関する基礎的な検討を行った。得られた結論を以下に示す。

- 1) ライフサイクルでみた転換装置の総合的な効率の上昇による環境負荷削減の判断が重要であること
- 2) 代謝スケールの増大に伴う輸送による環境負荷の検討の重要性
- 3) 勘定マトリクスは、循環形成の判断評価に有用であること

今後の課題として、転換装置選択の際に設定した熱需要密度を変化させた場合の削減量の変化の検討、太陽光発電、コージェネレーションの導入、断熱構造なども含めた他の代替案についての勘定マトリクスによる評価、大気、水質など他の環境指標やコストを加えた循環形成評価をおこなうことが挙げられる。

参考文献:

- 1) Proceeding of CREST International Workshop 1999 "Construction of Recycle-Oriented Industrial Complex Systems with Environmentally Sound Technology at Social Experimental Sites" Project / 1999
- 2) Industrial Ecology in Practice -The Evolution of Independence at Kalundborg- / John Ehrenfeld, Nicholas Gerrler / Journal of Industrial Ecology
- 3) 産業連関表を用いた我が国の生産活動に伴う環境負荷の実態分析ーデータ集ー／電力中央研究所／1998
- 4) 建築の光熱水原単位／尾島俊雄研究室／早稲田大学出版部／1995 他