

- ・研究課題名＝国外リサイクルを含むシナリオ間のライフサイクル比較手法と廃プラスチックへの適用
- ・研究番号 ＝K1822, K1951、K2063

・国庫補助金精算所要額（円）78,331,459

・研究期間（西暦）2006-2008

・代表研究者名 森口祐一（国立環境研究所）

・共同研究者名 寺園 淳、藤井 実（国立環境研究所）、  
匂坂正幸、田原聖隆（産業技術総合研究所）、平尾雅彦、村上進亮、中谷 隼（東京大学）

#### ・研究目的

近年、日本で消費された物品がリサイクルを目的としてアジアの近隣諸国に輸出される事例が増加している。こうした二次資源の国際循環は、アジア諸国の急速な経済成長とともに急増する資源需要を緩和し、リサイクルコストを軽減する一方、国内でのリサイクルを前提に設計されてきた各種の循環政策の実施に歪みを生じるとともに、不十分な環境管理の下でリサイクルが行われた場合には、環境負荷の増大が懸念される。そこで本研究では、国内完結型のリサイクルシナリオと、国外での工程を含むリサイクルシナリオについて、ライフサイクル分析による環境負荷やコストの比較を行うための評価手法の枠組みを設計する。また、これを事例分析対象（廃プラスチック）に適用し、シナリオ間の得失の比較を行い、開発した評価手法の有効性を検証するとともに、国際資源循環を考慮したリサイクル制度の設計等のための知見を得ることを目的とする。

#### ・研究方法

##### (1) 事例研究対象に関する動向調査

わが国におけるプラスチックリサイクルの現状を概観するため、容器包装リサイクル法の対象であるPET（ポリエチレンテレフタレート）ボトルおよびその他容器包装プラスチックを中心にとりあげ、文献・資料収集、専門家や事業者からのヒアリングなどにより、マテリアルフロー、コスト、制度面・技術面での課題などに関する情報を収集・整理した。

日本から中国へ輸出される廃プラスチックのマテリアルフローについては、貿易統計などのデータの収集、日本および中国の関係機関へのヒアリング調査を行った。

また、今後の再生プラスチックの需給動向を把握するため、中国における廃プラスチックを含む石油化学製品の需給展望について、日本および中国の関係者へのヒアリングなどにより、情報収集を行った。

##### (2) プラスチックリサイクルの評価の枠組み

プラスチックはその有機物としての性質から、リサイクル方法がマテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、エネルギー回収と多様である。同じマテリアルリサイクルの中にも、元の製品と同じ用途にリサイクルする水平リサイクルと、異なる用途にリサイクルするカスケードリサイクルが存在する。リサイクルによって代替される新規資源を設定して評価する従来のLCAによる評価でも、マテリアルリサイクルと

エネルギー回収の差であれば、プラスチックの製造エネルギーを含めて代替されるか否かの差異として評価された。しかし、同じマテリアルリサイクルで、水平リサイクルとカスケードリサイクルを比較する際には、これらの差が結果に反映されない場合が多い。国内のリサイクルは、海外でのリサイクルに比べて質の高いリサイクルを行っている場合があるが、本研究では、カスケードリサイクルとの相対的な水平リサイクルの効果を過不足なく適正に評価する方法を検討する。このため、従来よりもシステム境界を広げた評価を実施する必要がある。

リサイクルの評価では、投入と効果との比較が重要となる。このとき、経済的費用の削減効果を高めながら、環境負荷も減少できるような指針が得られる評価体系となっていることが望ましい。そこで、リサイクル効果の評価方法には、置き換えられる新規資源や半製品（オリジナル原料）の種類と量を、リサイクル原料とオリジナル原料との間の、歩留まりや原料性能の差異を考慮した上で算出し、そこから、リサイクルに要する資源投入を引き算する方法を採用した。一方、グローバルな影響をもたらす CO<sub>2</sub> 排出などの環境負荷に比べ、経済的費用についてはどの主体に負担が掛かり、どの主体が利益を得ているかが一層重要である。そこで、リサイクルの費用と効果について、主体ごとにその内訳を整理する枠組みを作成した。

### (3) PET ボトルの国内・国際リサイクルのライフサイクル評価

使用済 PET ボトルの国内および日中間リサイクルと処理処分について、評価対象となる 10 シナリオを実態調査に基づいて設定し、これらの評価シナリオにおける CO<sub>2</sub> 排出量および化石資源消費量を、(2) で述べたライフサイクル評価の枠組みに沿って、(4) (5) で述べる日本および中国におけるインベントリを用いて試算した。

リサイクルシナリオの設定のために、日本および中国における使用済 PET ボトルのリサイクルフローの実態調査を行った。国内リサイクルでは、マテリアルリサイクル業者 4 社、ケミカルリサイクル業者 1 社、および再生 PET 樹脂を原料とした製品化業者 2 社へのヒアリング調査等を実施した。日中間リサイクルでは、これに関連する市の廃棄物処理担当や、日本および中国の業者 2 社へのヒアリング調査、中国において再生樹脂を製造または利用する業者 8 社の現地調査を通して、実態を調査した。

ライフサイクル評価で使用するインベントリデータのうち、日本におけるリサイクルプロセスおよび新規製品の製造プロセスについては、文献およびデータベースから引用した。日中間マテリアルリサイクルのプロセスのうち、中国におけるフレック化については、日本におけるフレック化の単位プロセスごとのインベントリデータを、実態調査によって確認された中国におけるフレック化の単位プロセスの有無に当てはめることで、燃料使用量と歩留まり、異物混入率を推計した。ただし、中国におけるフレック化では、A 重油の代わりに同じ熱量の石炭が使用されるものとし、除去されなかった異物は再生短繊維の製造プロセスで残渣になるものと仮定した。中国におけるバックグラウンドデータのうち、公共電力、石油製品、石炭、用水、廃棄物処理などについては (4) (5) における調査結果を用いた。中国における繊維製造や新規樹脂製造のプロセスについては、燃料使用原単位や歩留まりを日本のインベントリデータで代用した。リサイクルプロセスおよび置き換えられる新規製品の製造プロセスについて、インベントリデータを資源採掘まで遡及計算し、各シナリオにおけるライフサイクルでの CO<sub>2</sub> 排出量と化石資源消費量を試算した。

リサイクルプロセスおよび置き換えられる新規製品の製造プロセスについて、インベントリデータを資源採掘まで遡及計算し、各シナリオにおけるライフサイクルでの CO<sub>2</sub> 排出量と化石資源消費量を試算した。また、日本国内および中国国内における地域ごとの電力供給の原単位について CO<sub>2</sub> 排出量と化石資源消費量を試算し、各シナリオにおける評価結果の変動性を解析した。

(4) 石油製品及びプラスチックの生産・リサイクルプロセスのインベントリ整備

石油製品のライフサイクルは原油生産・輸入、製油所への輸送、精製、石油製品の需要家への輸送および消費の段階によって構成される。表 1 に示す統計および文献によって、中国の石油産業の動向を調査し、石油製品のそれぞれの段階においてのインベントリデータを試算した。また中国の石油製品品質によって消費段階の CO<sub>2</sub> 排出係数等を調査した。石油精製段階の試算では、製油所の装置構成と処理原油性状および石油製品生産量から精製フローを想定することによって、石油製品の精製工程に従った石油製品ごとのインベントリを試算した。

データの精度を高めるために現地調査を行った。2007 年度は王廣一氏から中国の統計データの解釈および省エネルギーの状況を聴取し、2008 年度は SINOPEC 北京燕山分公司および天津分公司を訪問して中国の製油所における電力・熱（蒸気）の供給・消費の実態を精査した。

表 1 石油産業に関する資料の収集

統計	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 中国能源統計年鑑、</li> <li>・ ENERGY STATISTICS OF NON-OECD COUNTRIES(IEA)</li> <li>・ 石油等消費動態統計年報（日本）</li> </ul>
文献	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 中国省能手冊、中国可持續能源項目參考資料（2006 能源数据）、</li> <li>・ 中国の石油産業と石油化学工業（(株)東西貿易通信社）</li> <li>・ 中国港湾概況（第 5 版）（日本国際貿易促進協会）</li> <li>・ A Twelve Year Record of National and Global Gas Flaring Volumes Estimated Using Satellite Data</li> </ul>

石油化学製品製造、廃プラスチックの再生処理加工、プラスチック製品加工の各段階については、2006 年から 2008 年の 3 年度にわたって中国現地調査を実施した。訪問地域（図 1）は、廃プラスチックの輸入が活発な臨海部を中心に合計 43 都市（複数年次にわたって訪問した場合も 1 都市としてカウント）である。

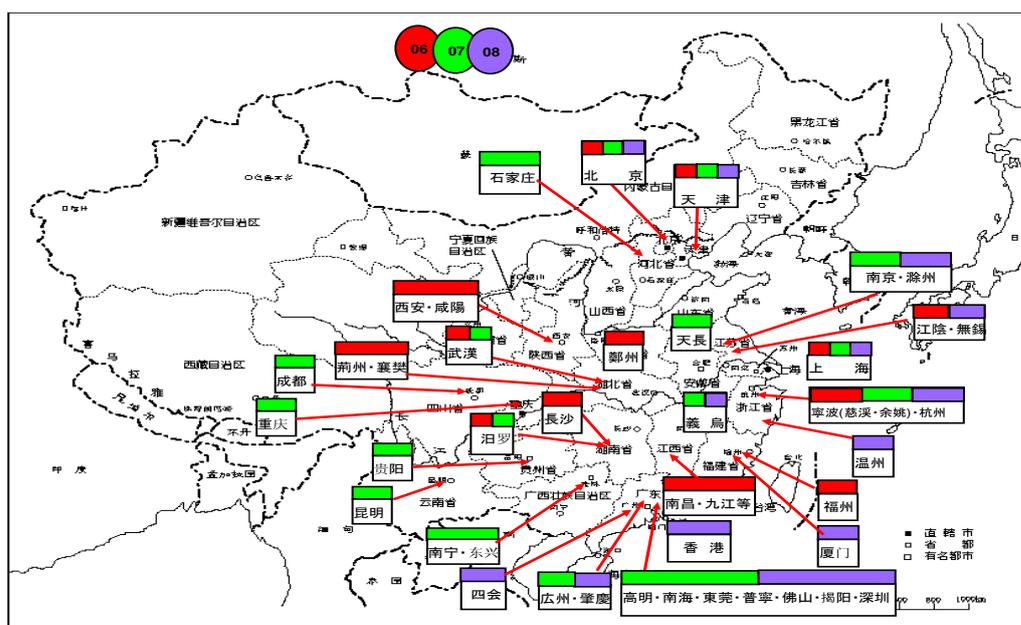


図 1 現地調査の訪問地域

現地調査では、再生処理企業、成果物利用企業、新規樹脂を使用する樹脂加工企業、石油化学企業等を対象にヒアリングを実施したほか、関係政府機関、関係協会、関係団体、エネルギー関係の専門家と面談し、情報を収集した。訪問先を業種、組織性格等で分類し、表 2 に示した。

表 2 中国訪問調査・訪問件数（2008年2月作成）

年次	処理・加工・回収業者等	貿易	行政・大学・研究機関・協会	石油化学・樹脂・繊維
2006年度	58（加工7・市場4・回収所2・埋立地1・新規1）	2	10（大学1・研究機関3・図書館1）	0
2007年度	53（加工17・回収所9・交易市场/基地3・港1・排水1）	2	8（大学2，研究機関1）	1 （面談）
2008年度	37（加工9・回収所1・交易市场/基地2・港2・倉庫1）	9	1（図書館）	3 （面談）
合計	148	13	19	4

注1：「処理・加工・回収業者等」の欄のカッコ内の加工は再生処理業者を除く、樹脂加工、再生繊維等の企業の数。

注2：再生繊維の件数は「石油化学・樹脂・繊維」の欄ではなく、「処理・加工・回収業者等」の欄のカッコ内の加工に含まれる。

また、公表されている学術論文、業界団体等による報告書等を対象とした文献調査によって、PET ボトルリサイクルのライフサイクル評価に関する 30 文献を得た。これらの文献について、データ記載の有無とデータの出典元をまとめ、国内における PET ボトルリサイクルのインベントリデータを整理した。

#### (5) 中国におけるバックグラウンドプロセスのデータベース構築

リサイクルの効果を評価するには、電力、輸送、水関連、化学工業製品、廃棄物処理など評価において共通性の高いバックグラウンドプロセスのデータも必要となる。中国国内のこれらのインベントリデータは殆ど整備されていないため、本評価に必要な中国のインベントリデータベースを構築した。

インベントリデータは、基本的に中国の統計データを利用する方法、現地実態調査によってデータを収集する方法によって作成した。統計データは、中国環境年鑑、中国能源統計年鑑、中国電力年鑑、中国煤炭工業年鑑、中国化学工業年鑑など様々な統計を活用した。また現地実態調査は、石炭火力発電所、水関連施設、廃棄物処分施設、化学工業製品製造工場などを視察し、実態を捉えた。なお現地実態調査におけるデータ収集は、中国科学院山西煤炭研究所（山西省太原市）、蘇州科技学院（江蘇省蘇州市）、四川大学（四川省成都市）に委託した。

また、データの品質（精度など）や、データ利用時の留意点（年次差や地域差などの考慮）に関する分析も十分ではない。そこで、インベントリデータの中でもほとんどの評価において必要不可欠となる電力のデータを中心にこれらに関する分析を行った。まず、作成時に利用した統計データについて他の参考となるデータと比較することで、精度検証を行った。また、2000 年ごろから直近年までの年次別、地域別（省市別）のデータを作成し、それらがどの程度の差異を及ぼすのか、また、差異を生じさせる要因について分析するなどした。

## (6) ワークショップ及び公開セミナーの開催

PET ボトルの国内・国際リサイクルの評価手法に関して、専門家や関連団体の参加によるワークショップを毎年1回、計3回開催した。また、公開セミナーを開催し、本研究の成果を広く紹介するとともに、今後の望ましいリサイクルの方向性に関して、パネル討論を行った。

### ・結果と考察

#### (1) 事例研究対象に関する動向調査

プラスチック処理促進協会の調査によると、2007年における国内の廃プラスチックの発生量は約1,000万トンであり、一般廃棄物と産業廃棄物が半々程度の内訳となっている。有効利用率は、マテリアルリサイクルが輸出分を含めて21%、ケミカルリサイクルが3%、エネルギー回収が48%の、合計72%とされている。但し、手法によって残渣量や熱効率が異なるため、「有効利用」の度合いは別途評価が必要である。

容器包装リサイクル法のもとでのプラスチックのリサイクルについてみると、2007年度の分別収集量の実績値はPETボトル28.3万トン、その他プラスチック64.4万トンの計92.7万トンであり、一般廃棄物としての容器包装の廃棄量推定値353万トンに対して約26%が回収されている。指定法人（日本容器包装リサイクル協会）を介して入札で決まる再商品化費用は、資源価格の上昇を背景として、PETボトルについては2006年度からマイナス（再商品化事業者が、市町村が分別収集したPETボトルを有償で買い取る状況）となり、市町村が指定法人を介さずに独自のリサイクルルートに有償で引き渡す傾向が強まった。マイナス入札が始まった2006年度をその前年度と比較すると、市町村の分別収集量は25.2万トンから26.8万トンに増加したのに対し、市町村から指定法人への引渡し量は、17万トンから14.3万トンへ減少し、再商品化製品の量も14.3万トンから10.6万トンへ減少した。再商品化の原料に対する製品の収率は増加を続けていたが、この期間には約84%から約74%に低下しており、市町村の独自処理の増加が、指定法人ルートでの再商品化の量だけでなく質の低下にもつながった可能性がある。

改正容器包装リサイクル法の基本方針が指定法人への円滑な引渡しを求めたことで、2007年度は指定法人への引渡し量が下げ止まりを見せていたが、2008年秋の世界経済の急変に伴って、資源価格の下落、再生樹脂の需要低下が生じ、国際リサイクルの流れが滞る状況が見られた。2009年度の指定法人への再商品化申込量は前年より大きく増加しており、独自処理から指定法人ルートへの回帰がみられる。

従来、PETボトルについては、回収率がリサイクル率と表現される場合が多く、その向上のみが注目されがちであったが、再商品化を経て、最終的にどのような製品に再生利用されているかの用途の把握が必要との指摘が本研究の実施期間中に高まりを見せた。用途の把握は、リサイクルの効果を評価するうえでも重要である。指定法人ルートでは、再商品化事業者からの製品の販売先は国内の利用事業者に限定されているが、製品の用途は、繊維、シート、ボトル、成型品、その他の5分類で把握されているのみであり、その先の最終用途については、定量的な管理は行われていない。再商品化物のうち、ボトルやシートは再生樹脂特有の用途に利用される場合が多く、用途の把握が比較的行きやすいが、繊維については、新原料に配合して利用されていると推定され、再商品化製品だけに着目した把握は現時点では困難である。市町村の独自処理は、指定法人ルートに比べてリサイクルの実態の体系的な把握がより困難である。破碎、洗浄の後、指定法人ルートにおける再商品化に比べて加工度の低い状態で輸出されているものが含まれていると推定されるが、業界団体調査による国内の再商品化事業者の処理実績に照らせば、必ずしも大半が輸出されているともいえない状況であり、用途の透明化までは困難であるとしても、フローの体系的な把握が課題である。

日本貿易月表によると、日本からの廃プラスチックの輸出量については、2000年には30.0万トンであったが、2008年には151.3万トンに達しており、2008年は2000年の5.05倍に増大した。しかし、2007年に対して実質微減の1.00倍と概ね横ばいに終わった(図2)。廃PETは、2008年で36.2万トンとなっており、これは廃PETの輸出統計品目分類が日本で設定された2006年の27.2万トンの1.33倍となっている。

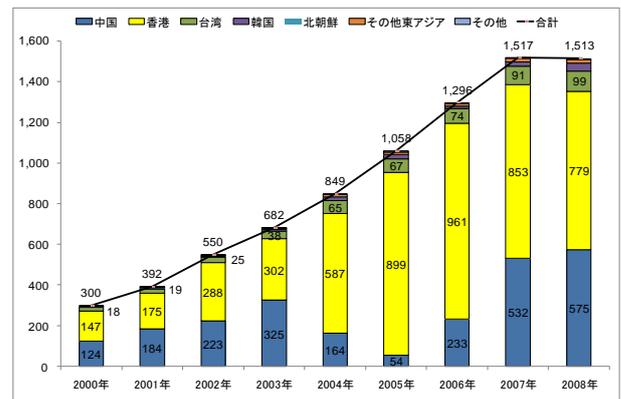


図2 日本からの廃プラスチックの輸出量

廃PETの中国の輸入は、香港由来7.6万トンに対して、北米由来25.4万トン、日本・香港以外のアジア由来29.4万トンなど、欧米・アジアから直接原料を確保する動きもみられる。中国の再生樹脂の供給ソースは、輸入および国内回収による廃プラスチックであり、工場ロスが少ない。これらのうち、中国の国内回収による廃プラスチックの量的動向は不明である。定性的には、政府が循環経済路線を打ち出して以降、国内の回収量も増加傾向にあるとみられている。また廃プラスチックの総輸入量は、過去4年間に2.3倍に増加し、約708万トンに達した(図3)。

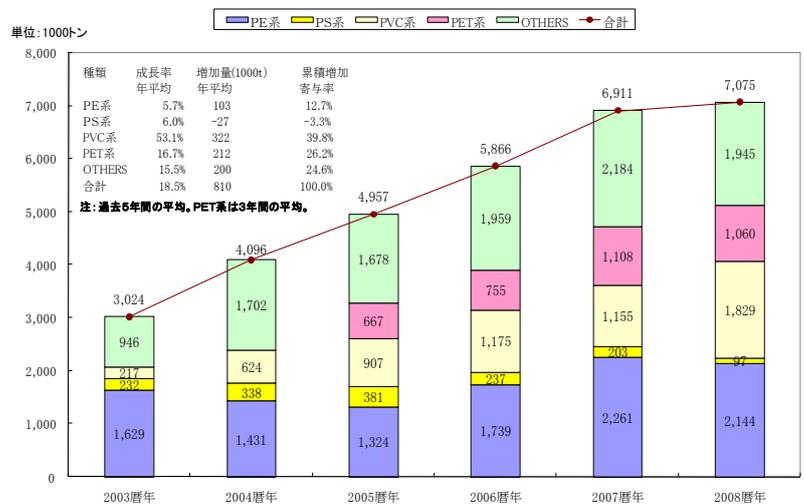


図3 中国の廃プラスチックの輸入推移

中国における合成繊維の中長期需給展望について、中国化繊工業協会は、i)

安定したゆるやかな成長を持続、ii)原料のボトルネックの解消、iii)技術的進展の加速による工業の質的向上の推進、iv)市場経済の一層の推進と化学繊維産業の合併買収の促進、v)リサイクル経済の推進と持続可能な産業構造の構築、vi)対外貿易における産業の自主規制の継続、を掲げている。

一方、PETボトル以外の容器包装プラスチックについては、PETボトルに比べて材質が多様であるうえ、汚れや異物の混入が多いため、材料リサイクルおよび4種類のケミカルリサイクルによる再商品化は全て逆有償であり、PETボトルのように資源的価値に起因する指定法人ルート以外への流出は生じていないと考えられる。従来適用されてきた材料リサイクルへの優遇措置は次第に弱められ、平成20年度契約分からは、はじめて材料リサイクルに関する品質基準が設定されたが、再商品化に占める材料リサイクルのシェアはなお増加傾向にある。適切な再商品化手法の選択・適用のために、異なるリサイクル手法間での環境負荷や資源消費のLCA(ライフサイクルアセスメント)による比較が環境省の設置した研究会において行われており、本研究班の班員が参画して本課題で得た知見を反映させている。

## (2) プラスチックリサイクルの評価の枠組み

廃PETボトルの水平リサイクルを行う場合と、カスケードリサイクルを行う場合を模式的に示したのが図4である。カスケードリサイクルは水平リサイクルに比べて容易に、即ちエネルギーや物質収支の点で効率的に行うことが出来るのが利点である。しかし、カスケードリサイクルされた製品は、十分な需要が

存在しない場合がある。一方水平リサイクルの場合、消費と廃棄の量が一定である限り、必ずリサイクル製品に需要が存在するのが利点である。循環型社会のビジョンを検討するような、中長期的な展望でリサイクル方法の良否を検討する際には、リサイクル製品の需給構造の変化についても視野に入れておく必要がある。PET 樹脂を新規に製造し、廃 PET 樹脂となったものを発電効率 40%でカスケードリサイクルした場合と、最小限のプロセスエネルギーで PET 樹脂に水平的にマテリアルリサイクルし、発電は効率 50%のガス火力発電で行った場合、後者の方が PET 樹脂 1kg 当たり 30MJ 程度、エネルギー消費量が少なくなる。これは水平リサイクルを極限まで推進した際の、カスケードリサイクルを行う場合との潜在的な効率の差である。(3)で実施しているペットボトルのリサイクルの評価は、現時点の評価であるためこのような観点は反映されていないが、今後の循環型社会のあり方も含めて、国内・国際リサイクルの比較を実施する際には、システム境界を必要な範囲で拡大した、俯瞰的な視点での評価が必要になると考えられる。

### 従来のLCAでは水平リサイクルの効果が見えにくい

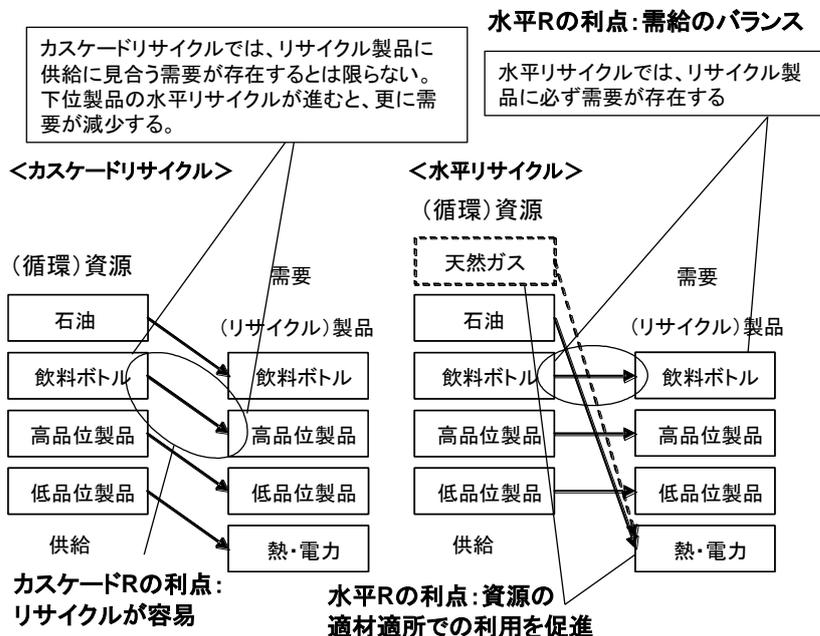


図 4 水平・カスケードリサイクルの比較 (模式図)

リサイクルによる CO<sub>2</sub> 削減量は、代替される原料又は燃料の調達と、その酸化に伴う CO<sub>2</sub> 排出量 ( $M_o$ ) の他、歩留まり比 ( $y_A/y_o$ )、性能比 ( $f_A/f_o$ )、追加的 CO<sub>2</sub> 排出 ( $\Delta P$ ) の 4 要素で表すことができる。同様に、経済的費用 (ライフサイクルコスト) の削減効果についても、 $M_o$  と  $\Delta P$  を価格や費用に変更することで整理できる。図 5 に示した事例は、プラスチック製容器包装をマテリアルリサイクルして、ペレット化 (残渣は単純焼却) した場合のものである。CO<sub>2</sub> と費用のいずれの場合も、歩留まりの低さがリサイクルの効果を低下させている。利用していない樹脂の利用や、あるいは分別収集方法の変更などによって改善されれば、CO<sub>2</sub> 排出とライフサイクルコストの両面で削減に繋がる可能性がある。

図 6 は、主体ごと、あるいは全体の経済的費用と効果の関係を示したものである。図中の直線の傾きが費用対効果を表している。各主体がそれぞれメリットの得られる構造となるようなシステムとすることが、リサイクルの推進にとって重要であると考えられる。一方、リサイクル製品が安価に供給されると製品需要が増大し、結果的にリサイクルによる資源消費や環境負荷の削減効果が低下する可能性がある。新規原料と遜色ない価格で販売できる適切な用途にリサイクルし、図中に示す“価格差”をなくすという視点も重要であると考えられる。

■CO<sub>2</sub>削減 [kg-CO<sub>2</sub>/kg-AM]

$$\Delta S = M_o^{PP} \cdot \begin{matrix} y_A & f_A \\ y_o & f_o \end{matrix} - \Delta P$$

0.5    1.0

■ライフサイクルコスト削減 [円/kg-AM]

$$\Delta S' = M_o^{PP'} \cdot \begin{matrix} y_A & f_A \\ y_o & f_o \end{matrix} - \Delta P'$$

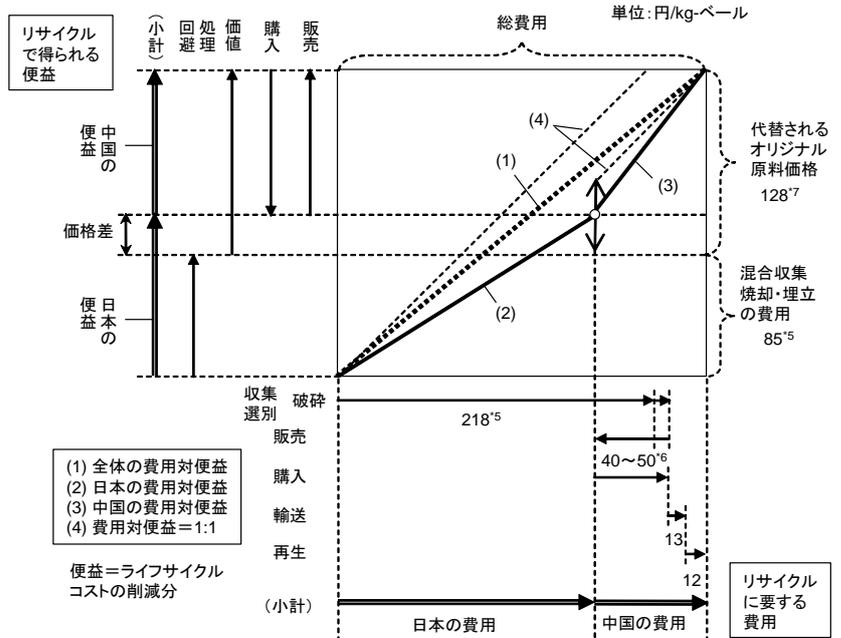
0.5    1.0

ΔS は値が正のときに削減効果がある

- \*1: JLCA-LCA database, 2005
- \*2: 藤井ほか(2007)
- \*3: 経済産業省: 化学工業統計月報
- \*4: 環境省調査値など

図5 リサイクルの費用対効果  
(プラスチック製容器包装)

<事例>PETボトルの国際リサイクル



\*5: 環境省調査値、\*6: 財務省貿易統計、\*7: 化学工業統計

図6 費用対効果の内訳 (PETボトルの日中間リサイクル)

(3) PETボトルの国内・国際リサイクルのライフサイクル評価

評価対象となるシナリオは、実態調査に基づいて、表3に示す10シナリオを設定した。全ての評価シナリオにおいて、日本国内で発生して市町村が分別収集（焼却発電および直接埋立シナリオでは混合収集）した使用済PETボトル1kgのリサイクルまたは処理処分を機能単位とした。使用済ボトルの収集から、リサイクルによって得られた再生製品が新規製品を代替したと見なせる段階までを評価範囲として、代替された新規製品の製造プロセスからの負荷を控除した。

表3 評価シナリオの概要

シナリオ	リサイクルプロセス / 処理処分プロセス	代替される新規製品
国内 MR A	使用済ボトル ⇒ ベール ⇒ フレーク ⇒ 短繊維	日本の新規短繊維
国内 MR B	使用済ボトル ⇒ ベール ⇒ ペレット ⇒ 長繊維	日本の新規長繊維
国内 MR C	使用済ボトル ⇒ ベール ⇒ フレーク ⇒ 短繊維 ⇒ 衣料	日本の新規衣料
国内 CR A	使用済ボトル ⇒ ベール ⇒ PTA ⇒ ボトル用樹脂	日本の新規ボトル用樹脂
国内 CR B	使用済ボトル ⇒ ベール ⇒ DMT ⇒ 繊維用樹脂 ⇒ 長繊維	日本の新規長繊維
日中間 MR A	使用済ボトル ⇒ 粗破砕品 ⇒ [輸出] ⇒ フレーク ⇒ 短繊維	中国の新規短繊維
日中間 MR B	使用済ボトル ⇒ ベール ⇒ フレーク ⇒ [輸出] ⇒ 短繊維	中国の新規短繊維
日中間 MR C	使用済ボトル ⇒ 粗破砕品 ⇒ [輸出] ⇒ フレーク ⇒ 短繊維 ⇒ 衣料	中国の新規衣料
焼却発電	使用済ボトル ⇒ [混合収集] ⇒ [焼却発電 (発電効率 10%)] ⇒ 電力	日本の公共電力
直接埋立	使用済ボトル ⇒ [混合収集] ⇒ [直接埋立]	

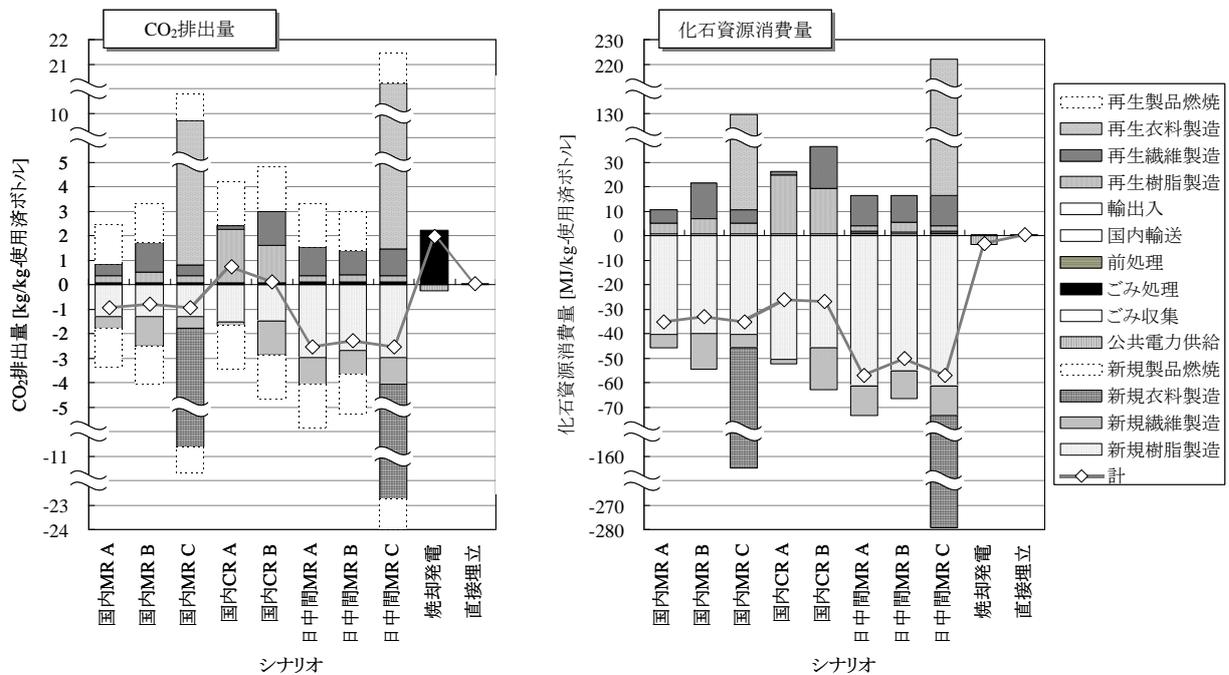


図7 ライフサイクル評価によるCO<sub>2</sub>排出量と化石資源消費量の試算結果

ライフサイクル分析の評価結果は図7に示したとおりである。全てのリサイクルシナリオにおいて、CO<sub>2</sub>排出量および化石資源消費量は焼却発電シナリオよりも小さく、使用済PETボトルをリサイクルすることの意義が確認された。ただし、ケミカルリサイクルについては、マテリアルリサイクルと比べてCO<sub>2</sub>排出量および化石資源消費量が大きく、CO<sub>2</sub>排出量については直接埋立シナリオよりも大きくなった。

国内MRシナリオA・Cと日中間MRシナリオA・Cを比較すると、CO<sub>2</sub>排出量、化石資源消費量ともに後者の方が小さい。その要因は、リサイクルプロセス自体の差異よりも、日本と中国における電力供給、原油採掘および石油精製の原単位の差によって、置き換えられる新規樹脂・繊維・衣料の製造プロセスの負荷が異なることの寄与が大きい。特に、日本と中国での石油製品のインベントリに差がある（例えば、新規PET樹脂の原料となるナフサについて、1l当たりの原油採掘から石油精製までのCO<sub>2</sub>排出量の原単位は、日本：0.19 kg、中国：0.71 kg）ことから、リサイクルによって新規樹脂を置き換えることの効果は、日本よりも中国の方が大きくなっている。

電力供給の原単位に対する変動性の解析の結果、国内MRシナリオCと日中間MRシナリオC以外のシナリオでは相対的に評価結果の変動は小さいため、焼却発電シナリオよりもケミカルリサイクルの負荷が小さく、それよりもマテリアルリサイクルの負荷が小さいという結果については、その頑健性が示された。衣料にリサイクルする国内MRシナリオCと日中間MRシナリオCについては、相対的に評価結果の変動が大きく、他のシナリオよりも大幅に負荷が小さくなる可能性がある反面、ケミカルリサイクルや処理処分シナリオよりも負荷が大きくなる可能性もあることが分かった。

ここまでの評価では、品質の差異を含めた再生製品と新規製品の代替関係の不確定性の問題や、中国におけるインベントリを日本のもので代用している有効範囲外使用の問題など、残された課題は多い。また、CO<sub>2</sub>排出量および化石資源消費量の他にも、洗浄過程の廃水に由来する水圏への影響など、考慮しなければならない重要な環境側面も残されていることから、結果の解釈は慎重に行う必要がある。

#### (4) 石油製品及びプラスチックの生産・リサイクルプロセスのインベントリ整備

中国における原油生産は、従来からの大慶、勝利、遼河などの主力油田が老朽化しているため水攻法、

ポリマー攻法等の 2 次回収の採用により、また新規油田探鉱を西域地区および海洋で行うことにより、何とか生産量を微増する状態である。原油の 2 次回収では蒸気・化学製品等が使用されるため、中国の油田においての原油生産に要するエネルギーは大きい。2003～2005 年の IEA 統計によると原油の約 7～8%のエネルギーを消費し、CO<sub>2</sub> 排出量は 250～350kg-CO<sub>2</sub>/ton-原油となった。また原油生産に係わるエネルギー消費とは別に、原油の約 1%相当量を燃焼後フレアスタックから大気放出する。これに伴う CO<sub>2</sub> 排出量は約 30kg-CO<sub>2</sub>/ton-原油となる。一方、経済成長に伴う石油製品需要増加を賄うために原油輸入量は急激に増大している。

原油はパイプライン、船舶、鉄道等で輸送されるが、中国の北部、西部等で生産された原油は主に原油パイプラインによって輸送される。原油パイプラインの 2004 年時点での敷設距離は 13,680km、輸送量は 1 億 9 千万トンで、原油処理量 2 億 7800 万トンの 68%であり、平均輸送距離は 340km である。一方、輸入原油量の急増に伴い 2003 年度末までに 15 の港で大型タンカーが着岸できる埠頭の整備が行なわれた。船舶、鉄道等による原油輸送量、エネルギー原単位等に関する中国のデータは収集できなかったが、文献（アメリカ等）によるエネルギー原単位を用いて試算した原油輸送に要するエネルギーは、国産原油の国内輸送に関して 0.15%、輸入原油に関して 2.4%となった。CO<sub>2</sub> 排出量はそれぞれ 0.005kg-CO<sub>2</sub>/ton-原油、0.074kg-CO<sub>2</sub>/ton-原油となる。

2005 年の中国の製油所で精製される原油は、国産が約 60%、輸入が約 40%である。IEA 統計によると中国の石油精製プラントで消費されるエネルギーは約 600 千 kcal/ton-原油、原油の持つ燃焼熱量の約 6%である。その結果、CO<sub>2</sub> 排出量は約 410kg-CO<sub>2</sub>/ton-原油となる。なお、石油製品は製品毎に異なった精製工程を経るが、精製工程に従った石油製品ごとの精製段階の CO<sub>2</sub> インベントリを試算した結果、ナフサ、ガソリン、軽油、重油は、それぞれ 450 kg-CO<sub>2</sub>/ton-ナフサ、270 kg-CO<sub>2</sub>/ton-ガソリン、390 kg-CO<sub>2</sub>/ton-軽油および 510 kg-CO<sub>2</sub>/ton-重油となった。

統計によると、中国の製油所は日本のその 1.3~1.4 倍位のエネルギーを消費するが、それには以下の要因があると考察した。

- ・中国の冬季の気温は多くの地域で、日本の製油所のある地域より低く、加熱スチーム需要が日本のそれに比べて大きい。
- ・日本の製油所においては、スチームは 100%自ら製造し、電力の 90%以上を自家発電で供給するのに対して、中国の製油所は廃熱回収等で製造される比較的少量のスチーム、電力以外には基本的に近傍の会社から供給を受ける。コージェネシステムとなる日本のスチーム・電力の効率は中国のそれを上回ると考えられる。

しかし、中国の製油所の電力、スチーム効率は中国の産業全体の平均値を使用しているため、規模が小さなプラントも含まれ、過小評価している可能性がある。また電力・蒸気生産のための主要エネルギーが石炭であることも CO<sub>2</sub> インベントリを大きくする要因である。今後のさらに詳細なデータによって検証することが望ましい。

石油製品の需要家への輸送データは収集が困難でインベントリデータが数値化できなかったが、数値は小さいと思われる。

中国の石油製品の CO<sub>2</sub> 排出係数は IGCC ガイドラインによっており、ガソリン、軽油、重油は、それぞれ 3,100kg-CO<sub>2</sub>/ton-ガソリン、3,200kg-CO<sub>2</sub>/ton-軽油および 3,100 kg-CO<sub>2</sub>/ton-重油である。

石油製品消費段階の硫酸化物排出は、石油製品品質規格から推定できる。中国においてのガソリンの硫黄分規格は 50wtppm であるが、北京、上海等の大都市では 50wtppm である。市場に流通するガソリン硫黄分は規格よりも大きいと考えられる。軽油の硫黄分規格は全土で 500～2,000wtppm、大都市では 50wtppm とされているが、ガソリン同様、市場に流通する製品はそれ以上の硫黄分のものであると思われる。

る。

窒素酸化物あるいは水質汚濁物質に関するインベントリデータの収集はさらに困難であり、インベントリデータは作成できなかった。

中国の石油製品のインベントリデータを作成するための基本データはまだ収集不十分であるため、今後も各種データの収集に努め、データの精度を上げることが必要と考える。

中国における石油化学製品の新規製造におけるインベントリデータは、2006年度に中国石油化工集团公司（China Petrochemical Corporation：Sinopec）、中国石油天然気集团公司（China National Petroleum Corporation：CNPC）の2大石油・石油化学企業にアプローチしデータ構築および基礎データの提供を打診した。また、精華大学教授、日中友好環境保全センター研究者にコンタクトし、インベントリデータ試算の可能性について意見交換を試みた。この結果、SINOPEC、CNPCには現状においてデータ構築の計画はなく、基礎データの提供で協力を得ることも難しいとの結論に至った。一方、学識経験者や研究機関の研究者の見解は、SINOPEC、CNPCの協力を得ずに中国の石油化学製品のインベントリデータを試算することは事実上不可能とのことであった。さらに、文献調査の結果も踏まえ、中国のLCA（LCI）研究の現状が文献調査を中心とする手法研究とケーススタディの検証をテーマとするに留まり、自国のデータ構築をテーマとする研究および行動計画がないことが判った。2007年度も引き続き、中国関係者の協力を得るべく上海および天津の石油化学コンビナートの識者、国家環境保護局の研究者、中国能源協会技術顧問など、広範に亘ってアプローチし、意見交換を図った。

この結果、産業レベルのエネルギー統計から中国の石油化学製品のインベントリデータを試算することはできないとの結論に至った。また、エチレンや合成アンモニアについて国産品を対象としていると思われるエネルギー原単位データを入手したが、これらのデータは前提・手法等が明確でなくかつ標準石炭換算による熱量ベースで記述されていることなどから、資源の国際循環といったテーマでLCIデータとして使用するには適性を欠いていると判断せざるを得ない実情にある。

このため2008年度は、PET系に重点を置き、文献調査を含めてデータ探索は継続しつつ、中国への技術輸出実績のある国内石油化学企業の専門家に意見を求め、日本のインベントリデータを補正して中国の石油化学製品のインベントリデータを推算した。

一方、リサイクル段階のインベントリデータについては、2006年度～2008年度の現地訪問調査で合計48件、この間に並行実施した文献調査の情報10件を含め総計58件の事例データを収集、整理した。本調査で重点項目に掲げていた廃PET系は再生原料15件、再生短繊維7件の合計22件である。再生処理に供される原料ソースでは輸入、国内回収ともに28件であった。残る2件は、新規原料を使用した樹脂加工製品企業で使用している国産樹脂である。表4に、これらを含めてデータの性質を一括整理した。

表4 訪問調査および文献調査で収集したライフサイクルインベントリデータの性質・内容

訪問年次	件数	事業内容	件数	原料ソース	件数	成果物	件数
2006年度	25	再生処理企業	46	国内回収	28	再生PET（専業）	15
2007年度	20	再生処理企業（再生繊維）	6	輸入	28	再生短繊維	7
2008年度	3	樹脂加工企業（再生）	4	国産（新材）	2	その他	36
その他	10	繊維製品製造企業	2	-	-		
合計	58	合計	58	合計	58		58

PETボトルのライフサイクル評価に関する既往文献調査では、データの記載があった23文献のうち、14文献から独自の出典元（実績値など）のデータが得られた。

## (5) 中国におけるバックグラウンドプロセスのデータベース構築

中国の現地実態調査では、石炭火力発電所、水関連施設、廃棄物処理施設、化学工業製品の製造工場などの調査を行い、製造・処理のフロー、製造・処理における課題など多くの有益な情報を得ることができた。これらの情報を踏まえながら、インベントリデータの作成を行った。

まず、データベースを作成するにあたって、電力のデータを例にとり、統計データの精度や、作成原単位の年次差地域差などについて分析した。データの精度は、出所の異なる統計間のデータ比較や、作成過程および作成データを他の参考となるデータと比較分析した。その結果、統計から作成したデータは、他のデータと比較して概ね 1 割程度の差異となり、高い精度を必要としなければインベントリデータベースとして十分に活用できることがわかった。

原単位の年次差は、CO<sub>2</sub>、石炭灰等の原単位はそれほど大きく変わっていなかった。一方、煤塵放出量は年々減少傾向だった。また、SO<sub>2</sub>は、脱硫に関する法整備に伴って、2005 年頃から減少傾向に転じていた。スラグの再利用率なども年々上昇してきていることがわかった。地域性（省市別の差異）は、火力発電について分析すると、CO<sub>2</sub> 排出量では最も大きい省は最も小さい省の 2.4 倍程度、SO<sub>2</sub> では 17 倍程度となった。さらに、電源構成や送電ロスを考慮した受電端ベースの発電に関わる原単位は、CO<sub>2</sub> 排出量で 3 倍（図 8）、SO<sub>2</sub> で 11 倍となった。このように、非常に大きな地域差があるため、データ利用の際には十分な考慮が必要である。なお、地域性の原因には、発電効率、脱硫設備などの設置状況、石炭の品質、電源構成、送電ロスなどの違いが考えられる。

また、現地での実態調査等により、上・下水等の水関連、廃棄物処理、化学工業製品などのインベントリデータを作成した。エネルギー消費原単位や CO<sub>2</sub> 排出原単位を作成し、日本のデータと比較分析した。その結果、殆どの場合中国の原単位の方が大きい結果となった。中には、塩酸のように日本のデータの数倍程度になるケースも見られた。このような日中間の差異が生じる原因を考察すると、エネルギー消費量（エネルギー効率）、電力原単位の違い、また、使用燃料の差異（中国は石炭利用が多い）などが大きく影響していると考えられる。

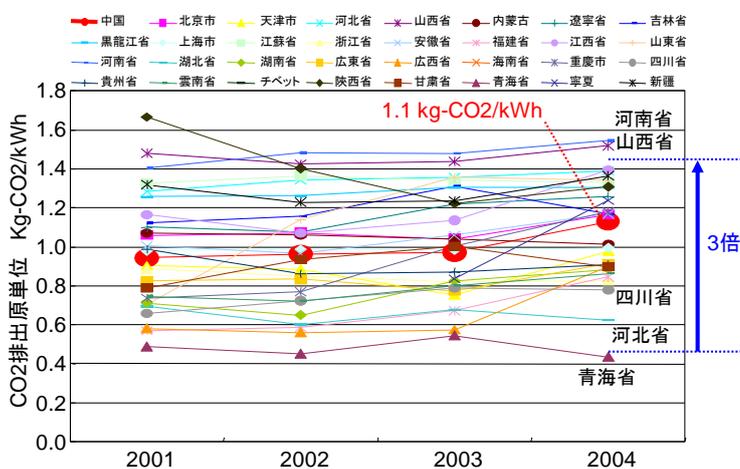


図 8 中国の省市別・年次別の発電・送電に伴う CO<sub>2</sub> 排出量

## (6) ワークショップ及び公開セミナーの開催

ワークショップでは、リサイクル製品の品質や節約される資源の価値の反映方法、適切なシステム境界と使用する原単位の妥当性、石油消費量や CO<sub>2</sub> 排出量以外に取り入れるべき評価軸、労働と資本の評価方法などが議論された。更に、廃 PET ボトルの海外輸出分を含むマテリアルフローの未捕捉分についての意見交換や、サイクル製品の品質や、廃 PET ボトルが最終製品になるまでのトレーサビリティについての議論などが行われた。

公開セミナーでは、目指すべきリサイクルの将来像として、「環境影響の面で安心で、資源消費の面で効率的」、「社会全体のコスト負担がなるべく小さく、かつ公平」、「質（価値）が高くかつ需給が安定的な用途」の三点を提示し、これと比較した現在の問題点や改善すべき課題について、各主体の立場から多くの示唆的発言を得た。関連業界や報道関係者も含め約 130 名の参加を得るなど高い関心を集め、今後のリサ

イクルの方向性についての共通認識を深める意味でも、意義のある企画であった。

#### ・結論

- 廃プラスチックの貿易、中国の繊維製品の需給展望についてデータを収集した。また、中国のリサイクル施設のプロセスフローやインベントリデータを調査した。
- 国内、国際リサイクルにおいて、各主体及び全体の費用対効果を示す枠組みを設計し、プラスチックのリサイクルに適用した。水平リサイクルとカスケードリサイクルの効果を過不足なく適正に評価する方法を提示した。
- 主として PET ボトルについて典型的な国内、国際リサイクルのシナリオを複数設定した。
- 上記シナリオについて、これまでに検討した評価方法を踏まえて、調査データを基に LCA による資源消費、環境負荷面での評価を実施した。
- 石油精製、石油化学など新規樹脂製造に関わるインベントリ調査を実施した。
- データの精度、地域差・年次差などの分析を踏まえつつ、石炭生産・電力、水（上水・工業用水・下水・廃水処理）、廃棄物処理、複数の化学工業製品など、本プロジェクトにかかわるインベントリデータベースを構築した。
- ワークショップ及び公開セミナーを開催し、前者では研究者、業界団体、行政担当者を交えて、後者では更に一般参加者も交えて PET ボトルのリサイクルについて議論を行った。

#### 英語概要

・研究課題名 「Life-cycle assessment of domestic and international recycling scenarios – methodological framework and application to waste plastics」

・研究代表者名及び所属 Yuichi Moriguchi (NIES: National Institute for Environmental Studies)

・共同研究者名及び所属 Atsushi Terazono, Minoru Fujii (NIES), Masayuki Sagisaka, Kiyotaka Tahara (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Masahiko Hirao, Shinsuke Murakami, Jun Nakatani (The University of Tokyo)

#### ・要旨

This project aims to develop a methodological framework for assessing life-cycle environmental impact and life-cycle cost of recycling scenarios, which include domestically closed scenarios and scenarios accompanying with processes in foreign countries.

The information about the current situation of plastic recycling in Japan and China, recent trend of plastic trade between the two countries and prospective demand of plastic products in China was investigated through literature survey and field survey.

The methodology to clarify the economical cost-benefit relationship of each actor or the whole system of plastic recycling was developed and applied to a PET bottle recycling scenario. In addition, the method to evaluate both a horizontal recycling and a cascade recycling appropriately was proposed.

Life-cycle assessment was applied to the comparison of PET bottle recycling scenarios. Ten scenarios including domestic recycling, transboundary recycling between Japan and China, incineration and landfill were set. The results showed that all the domestic and transboundary recycling scenarios had smaller environmental burdens than the

incineration scenario, and that the chemical recycling scenarios had larger burdens than the other recycling scenarios from the viewpoint of CO<sub>2</sub> emission and fossil fuel consumption. The domestic material recycling scenarios have larger CO<sub>2</sub> emissions and fossil resource consumptions than the transboundary material recycling scenarios. This difference results from the relatively large burdens of the manufacturing processes of virgin products in China, mainly because of the difference in background parameters for electricity supplies and petroleum refinery between Japan and China.

Inventory data of petroleum refinery process and plastics recycling were collected and analyzed through field surveys in Japan and China, as well as literature surveys for academic papers, reports and databases open to the public. However, it did not result in collection of the general inventory data of the petrochemicals of the China domestic production whose trial calculation was made based on actual production. This is a future subject.

The background database was developed utilizing statistical data published and our field survey conducted in China. The database covers coal production, power generation, water supply, waste-water treatment, waste treatment, chemical products and so on. In this study, some analyses were made as deeply as to touch upon yearly and regional differences. Based on those analyses, the factors most strongly affecting the results on LCI were clarified.

・キーワード（5語以内）＝International material cycles, plastics, PET bottle, recycling, Life Cycle Assessment