

平成26年度 環境経済の政策研究

物質利用に伴うライフサイクル環境影響評価手法の開発及び  
国際資源循環の推進に関する研究

最終研究報告書

平成27年3月

公益財団法人地球環境戦略研究機関  
東京大学  
秋田大学  
同志社大学

## 目次

### I 研究計画・成果の概要等

1.	研究の背景と目的	1
2.	研究計画及び実施方法	2
3.	3年間における実施体制	5
4.	研究の実施内容 概要	6
5.	本研究の成果	8
6.	行政ニーズとの関連及び位置付け	12
7.	研究成果による環境政策への貢献	13
8.	対外発表等の実施状況	14

### II 研究の実施内容

要約	19
Summary	24

1.	序論	
1.1	研究の背景	29
1.2	研究全体の概観	31
2.	持続可能な資源利用政策の環境影響評価	
2.1	はじめに	34
2.2	政策影響評価ツールの開発	36
2.3	持続可能な資源利用政策シナリオの策定	45
2.4	シミュレーション結果	49
2.5	結論	74
3.	物質利用に伴うライフサイクル環境影響評価	
3.1	はじめに	83
3.2	TMRの動学的な展開	85
3.3	個別鉱山の特徴を反映したCO <sub>2</sub> 排出量の推定	88
3.4	レアアース製錬過程の環境影響：マレーシアと中国でのケーススタディと エコロジカル・フットプリント指標の拡張版への試み結論	92
3.5	銅鉱山を用いた手法比較のためのケーススタディ	108
3.6	結論	113
4.	国際資源循環の推進に関する研究	
4.1	はじめに	119
4.2	廃電気電子機器の持続可能性評価（WEEE）枠組みの開発	121
4.3	日本における廃電気電子機器（WEEE）管理の持続可能性評価	133

4.4	他のアジア諸国におけるWEEE管理の持続可能性評価	150
4.5	シナリオ分析、比較、ギャップ分析、政策メッセージ、将来の研究へ向けて	167
4.6	結論	175
5.	結論	
5.1	本研究の成果	180
5.2	本研究の政策的意義	185

## I. 研究計画・成果の概要等

## 1. 研究の背景と目的

---

世界全体としての持続可能な開発を進めるためには、生存基盤を提供している生態系サービスを持続可能な範囲で利用しつつ、富めるものの過剰消費と持たざるものの過少消費の両方を解決するという難題に取り組む必要がある。このような取組を進める上で、資源消費に伴う環境影響・健康影響を資源採取から製造・消費、さらにリサイクル・廃棄にいたるライフサイクル全体について定量的に評価する手法・指標の開発が重要であるとの認識が、国連環境計画（UNEP）国際資源パネルや、経済開発協力機構（OECD）持続可能な物質管理イニシアチブなどの国際的政策プロセスで共有されている。

現在使用されている資源利用量、あるいは資源効率性といった物質フロー指標は、物質フロー分析の結果を直接利用できるという利点があるが、レアアースのように利用量は微量でも採掘に伴う環境影響が甚大なものなど、物質利用のライフサイクル全体の環境影響を適切に反映することができない。また、有害物質など物質重量当たりの環境影響・健康影響が極めて大きい物質の環境影響を反映することもできない。採掘から最終処分に至るライフサイクル全体の評価手法の開発については、関与物質総量（TMR）がドイツのブッパータール研究所や我が国の物質材料研究機構により推計されているが、詳細なプロセスに影響するような政策の効果を評価することが難しいという問題を抱えている。また、TMRは環境影響を直接示すものではない。このような現状に鑑み、製品使用に伴うライフサイクルにわたる環境影響の定量的評価手法を開発することは、世界的な持続可能な資源利用の観点から極めて重要である。さらに、我が国の循環型社会を促進する観点からも、このような評価を通じて、我が国の3R政策によりライフサイクル上流側である資源採取国で生じるであろう環境保全・生態系保全便益の見える化、あるいは第二次循環基本計画に盛り込まれた国際循環型社会形成への貢献の見える化を行うことは重要である。国際循環型社会形成への具体的取組みとして、国境を越えたトータルとしての環境影響の低減効果を示すことは、物流効率化などの経済的効果の定量的評価とともに追い風になると期待される。

本研究は、このような問題意識のもと、我が国の資源循環システムの環境・経済・社会的視点からの評価に基づく国際循環型社会形成への具体的取組みに関する研究を行い、そのような取組みの便益提示に貢献することを目的として実施した。また、世界的な持続可能な資源利用の促進への貢献を念頭に、製品利用に伴うライフサイクル環境影響・生態系への影響を定量的に評価する手法・指標の開発を試みた。後者については、経済全体を対象とするマクロ経済的手法が適しているCO<sub>2</sub>排出量や貿易に伴う資源フローを考慮した製品ライフサイクル全体の環境影響に関する評価と、マクロ経済的手法では扱うことが難しいレアアース、レアメタルなどの特定の物質に絞り込んだ鉱山レベル、工場レベルでの分析に基づく、より詳細なライフサイクル環境影響評価の両方の手法を開発し、それぞれの手法の限界を補完することを念頭に研究を実施した。すなわち、多量に消費される鉄などの一次資源に関する持続可能な資源利用についてはカーボンフットプリントや資源フットプリント（製品ライフサイクル全体に体化した資源利用）によるマクロ経済的評価を行い、レアメタルなどの使用量は少ないものの環境影響が大きい資源については、採掘による生態系破壊なども考慮したライフサイクル環境影響評価を行うことで、持続可能な資源利用政策策定に有効な情報を多面的に提供することを試みた。

## 2. 研究計画及び実施方法

研究全体の構成を図1のフローチャートに示す。

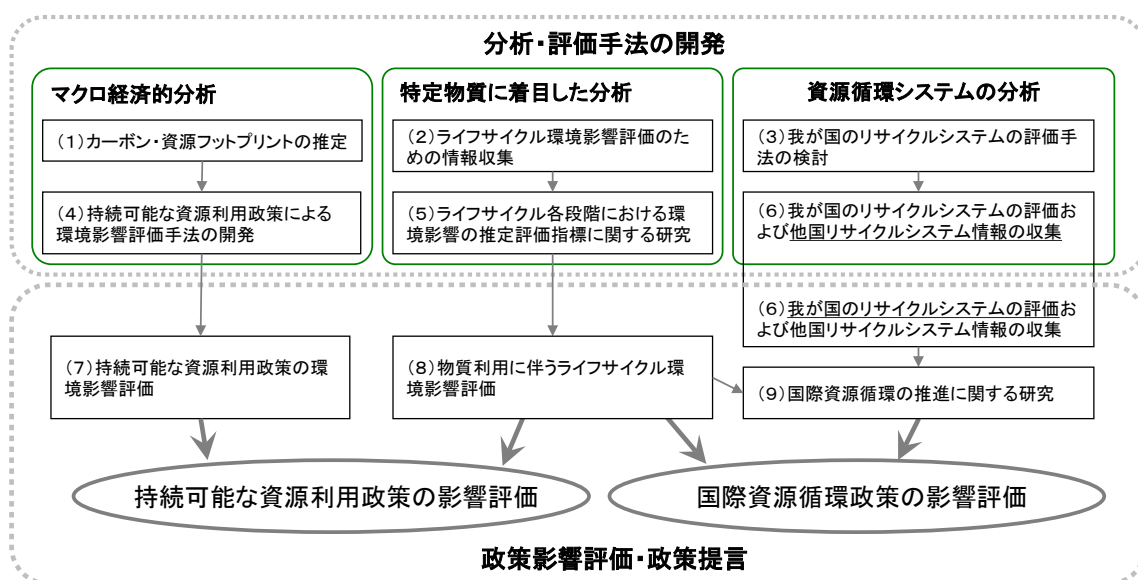


図1 研究全体の構成

以下、研究項目毎に研究計画および実施方法を記述する。

### (1) カーボン・資源フットプリントの推定（平成24年度）

本研究項目では、天然資源税や炭素税などの持続可能な資源利用政策による環境影響を製品のライフサイクルを通じて評価するための指標として、多地域産業連関表（MRIO）を用いて資源利用に伴うカーボンフットプリントおよび資源フットプリントを推定する。類似研究の蓄積がある欧州の推定値との比較を行うために、本研究では世界全体をカバーしているGTAPデータベースを用いた世界多地域産業連関表を作成し、カーボン・資源フットプリントの推定を行う。一次資源投入の対象資源としては、鉄をとりあげる。

### (2) ライフサイクル環境影響評価のための情報収集（平成24年度）

今後急速に普及すると予想され、リサイクルシステムの観点で重要であるハイブリッド車、電気自動車などのエコカーに着目し、環境影響評価に必要なデータの入手可能性および国際資源循環との関連を考慮し調査対象とする物質を特定する。当該物質の採掘段階から国内でのリサイクルまでを視野に入れて、物質の採掘、製錬・加工等の各段階における物質フローに関する情報を収集すると共に、TMRのようなマテリアルフロー関連の指標についての調査を行う。また、特に環境影響が大きいと見込まれる採掘段階における環境影響を評価するために、温室効果ガス排出量、および生態系サービスへの影響を評価する手法について、欧州委員会が開発中の環境負荷反映物質消費量（EMC）指標やエコロジカル・フットプリント（EF）を用いた手法、あるいは欧州環境庁による生態系サービスへの影

響評価手法などについて情報を収集するとともに、水汚染、森林破壊、土地利用改変など主な影響要因についての情報を収集するための現地調査先の特定を行う。

### **(3) 我が国のリサイクルシステムの評価手法の検討（平成24年度）**

我が国のリサイクルシステム全体の循環資源の流通・利用状況を評価する上で、環境・経済・社会的影響が大きく、比較的データの揃っていること、および特定物質に着目した分析においてエコカーに着目した研究を予定していることも踏まえ、使用済自動車および廃家電・電子製品のリサイクルを対象とする。分析に必要な基本データとしては、環境統計、貿易統計、および中央環境審議会・産業構造審議会のリサイクル法関連部会の最近の資料など、既存の公式資料の活用が可能かどうかを検討する。流通・利用状況については、静脈物流（その種類やシステムの違いごとのコスト）・処理（手法ごとのコスト）に関わる経済コストおよび環境影響、さらには社会影響として雇用を想定し、対象リサイクルシステムごとの特性を類型化する。その上で、これらのリサイクルシステムについて、環境・経済・社会的影響の評価手法の検討を行う。また、分析の対象とする有用素材の絞り込みを検討する。

### **(4) 持続可能な資源利用政策の環境影響評価手法の開発（平成25年度）**

前年度に引き続き、資源利用に伴うカーボンフットプリント・資源フットプリントの推定作業を、必要に応じ対象とする資源を追加して実施する。推定値の妥当性を検証するために、欧州での推定値との比較・検証を行う。その上で、検証した推定値を価格変化の影響を反映できる経済モデルに推定値を組み込み、持続可能な資源利用政策のカーボンフットプリント・資源フットプリントへの影響を評価する手法を開発する。

### **(5) ライフサイクル各段階における環境影響の評価指標に関する研究（平成25年度）**

前年度までに収集された情報から、当該物質の土地改変量を含めた鉱石・ズリの採掘量、選鉱時に発生する尾鉱量ならびに金属生産の各プロセスにおける温室効果ガス排出量を推定する。資料収集からデータが得られない鉱山については生産・開発時におけるコスト推定データベースを用いた環境負荷物質量の推定を行う。データベースの推定精度に留意しつつも、特に公表データが乏しいレアメタル鉱山についてはこの手法が適していると考えられる。さらに、金属の利用、廃棄段階における環境負荷物質の推定も合わせて行うことで、ライフサイクルの各段階におけるインベントリの集計を行うことを目標とする。また、採掘段階での生態系への影響に関し、前年度に特定した対象地で現地調査を行いデータ収集を行う。これらの推定値と物質フロー分析を組み合わせ、当該物質の利用によるライフサイクル全体での環境影響評価手法を開発する。

### **(6) 我が国のリサイクルシステムの評価および他国リサイクルシステム情報の収集（平成25年度）**

前年度に開発した手法により、環境・経済・社会的な視点からの評価を日本のリサイクルシステムについて行う。さらに、先進国（日本）とデータの整備状況が似ていると考えられる新興国（台湾を想定）を選定し、対象国研究機関と連携して、同様の手法の開発を行う。また、発展途上国をモデルに導入する上で必要な関連情報を収集し、リサイクルインフラの設置コストも検討した上で先進国、新興国、発展途上国を中心とした循環資源の経済・貿易モデルを開発する。

#### **(7) 持続可能な資源利用政策の環境影響評価（平成26年度）**

前年度までに開発された手法を用いて、天然資源税や資源キャップなどの持続可能な資源利用政策によるカーボンフットプリント・資源フットプリントへの影響を評価する。評価対象となる政策シナリオは、効果的な持続可能な資源利用政策の策定に資する目的で、複数の政策ツールを組み合わせた政策パッケージや、政策実施国の異なる組み合わせ（資源生産国と資源消費国の組み合わせなど）など複数のシナリオを検討する。

#### **(8) 物質利用に伴うライフサイクル環境影響評価（平成26年度）**

前年度までに開発した物質利用に伴うライフサイクル環境影響評価手法を用いて、選定した物質の生産・使用等のライフサイクルにわたる環境影響の評価を行う。手法の妥当性の検証を行うために、欧州委員会のライフサイクル環境影響に関する業務委託を受けているイタリアのJRCなどの海外の研究機関の協力を得て、評価結果の比較および手法について検討する。ライフサイクル環境影響評価によって、対象物質の利用効率の改善や、代替による使用抑制といった企業努力によるライフサイクル環境影響上の便益の定量化を試みる。本項目の成果は、上述（7）の成果と併せて2017年度の第四次循環型社会形成推進基本計画の物質フロー指標改定の議論にインプットしていく。

#### **(9) 国際資源循環の推進に関する研究（平成26年度）**

前年度までに開発した先進国、新興国、発展途上国を中心にした循環資源の経済・貿易モデルを活用し、使用済自動車および廃家電・電子製品のそれぞれに関して有用素材の絞り込みを行った上で、資源循環の流通の特性、リサイクルや処理に活用されている主要技術に応じて、どのような資源循環（近接循環、広域循環、国際循環の組み合わせ方）が、リサイクルの経済性を確保するための規模の経済性、雇用および環境保全という観点から評価する。また、将来エコカーの急速な普及が予想される中で発生量の増大が考えられる使用済みバッテリーの効率的な再利用・リサイクルの検討に、上記のライフサイクル環境影響評価の手法を適用し、環境上適正でかつ経済的にも効率的な静脈物流のあり方を検討する。研究成果については環境省の静脈産業海外展開促進有識者会合へインプットしていく。



### 3. 3年間における実施体制

3年間における研究参画者と分担項目を以下に示す。

氏名	所属機関	参画年度	担当する分担項目
小嶋 公史	IGES	H24-H26	持続可能な資源利用政策の環境影響評価 (H26) 持続可能な資源利用政策の環境影響評価手法の開発 (H25) カーボン・資源フットプリントの推定 (H24)
周 新	IGES	H24-H26	持続可能な資源利用政策の環境影響評価 (H26) 持続可能な資源利用政策の環境影響評価手法の開発 (H25) カーボン・資源フットプリントの推定 (H24)
アンビリア・アブドゥラ	IGES	H25-H26	持続可能な資源利用政策の環境影響評価 (H26) 持続可能な資源利用政策の環境影響評価手法の開発 (H25)
ムスタファ・モイステイン	IGES	H25	持続可能な資源利用政策の環境影響評価手法の開発 (H25)
矢野 貴之	IGES	H24	カーボン・資源フットプリントの推定 (H24)
村上 進亮	東京大学	H24-H26	物質利用に伴うライフサイクル環境影響評価 (H26) ライフサイクル各段階における環境影響の推定評価指標に関する研究 (H25) ライフサイクル環境影響評価のための情報収集 (H24)
安達 毅	秋田大学	H24-H26	物質利用に伴うライフサイクル環境影響評価 (H26) ライフサイクル各段階における環境影響の推定評価指標に関する研究 (H25) ライフサイクル環境影響評価のための情報収集 (H24)
和田 喜彦	同志社大学	H24-H26	物質利用に伴うライフサイクル環境影響評価 (H26) ライフサイクル各段階における環境影響の推定評価指標に関する研究 (H25) ライフサイクル環境影響評価のための情報収集 (H24)
堀田 康彦	IGES	H24-H26	国際資源循環の推進に関する研究 (H26) 我が国のリサイクルシステムの評価および他国リサイクルシステム情報の収集 (H25) 我が国のリサイクルシステムの評価手法の検討 (H24)
ニルマラ・メニプラ	IGES	H24-H25	我が国のリサイクルシステムの評価および他国リサイクルシステム情報の収集 (H25) 我が国のリサイクルシステムの評価手法の検討 (H24)
三戸 篤史	IGES	H24-H26	国際資源循環の推進に関する研究 (H26) 我が国のリサイクルシステムの評価および他国リサイクルシステム情報の収集 (H25) 我が国のリサイクルシステムの評価手法の検討 (H24)
蒲谷 景	IGES	H24	我が国のリサイクルシステムの評価手法の検討 (H24)

## 4. 研究の実施内容 概要

---

### 4.1 持続可能な資源利用政策の環境影響評価

本テーマでは、資源利用削減・資源効率改善を目的とした天然資源税と、資源循環政策としてのスクラップリサイクル補助金を持続可能な資源利用政策と位置付け、これらの政策がマクロレベルで経済に与える影響および対象資源直接利用、化石燃料由来のCO<sub>2</sub>直接排出量に与える影響について、価格効果や代替効果を反映できる応用一般均衡（CGE）モデルを用いて評価した。さらに環境影響を製品のライフサイクルを通じて評価するための指標として、資源フットプリント（消費に伴うライフサイクルでの資源利用量）およびカーボンフットプリントを採用した。これらの指標を推計する目的でCGEのシミュレーション結果を用いて多地域産業連関表（MRIO）を更新し、フットプリント推計を行う手法を開発した。しかし、政策影響評価の逐次動学化を進める上で、タイムステップ毎に排出係数・資源投入係数をCGE分析の結果を用いて更新するした上でフットプリント推計を迅速に行うためにはMRIOを更新する方法では作業量が膨大になることが判明した。そこで、タイムステップ毎のCGEシミュレーション結果から作成される産業連関表（IO）を用いた効率的なフットプリント推計手法を開発した。

対象資源としては、本研究の先行研究において日本を含む4カ国を対象に、鉄と銅に関連する部門について部門細分化を行ったCGEモデルを用いた知見の蓄積を活用できること、および特に新興国・開発途上国におけるインフラ整備など経済発展の基盤整備のために需要の大幅な増加が見込まれる資源であることなどを勘案し、鉄鉱石を主な対象資源とした。さらに、政策含意の比較目的および特定物質に着目した事例研究で銅鉱山を扱うことから、銅鉱石を対象とした分析も行い、対象資源の違いによる含意を得た。

### 4.2 特定物質に伴うライフサイクル環境影響評価

本テーマでは、環境影響評価に必要なデータの入手可能性および国際資源循環との関連を考慮し、調査対象とする物質を銅およびレアアースとした。当該物質の採掘段階から国内でのリサイクルまでを視野に入れて、物質の採掘、製錬・加工等の各段階における物質フローに関する情報を収集すると共に、TMRのようなマテリアルフロー関連の指標について調査を行った。また、特に環境影響が大きいと見込まれる採掘段階における環境影響を評価するために、温室効果ガス排出量、および生態系サービスへの影響を評価する手法について、欧州委員会が開発中の環境負荷反映物質消費量（EMC）指標やエコロジカル・フットプリント（EF）を用いた手法、あるいは欧州環境庁による生態系サービスへの影響評価手法などについて情報を収集した。その上で、水汚染、森林破壊、土地利用改変など主な影響要因について現地調査を行い情報を収集した。

収集した情報から、当該物質の土地改変量を含めた鉱石・ズリの採掘量、選鉱時に発生する尾鉱量ならびに金属生産の各プロセスにおける温室効果ガス排出量を推定するとともに、資料収集からデータが得られない鉱山については生産・開発時におけるコスト推定データベースを用いた環境負荷物質量の推定を行った。さらに、金属の利用、廃棄段階における環境負荷物質の推定も合わせて行うことで、ライフサイクルの各段階におけるインベントリの集計を行った。また、採掘段階での生態系への

影響に関し、現地調査を行いデータを収集した。これらの推定値と物質フロー分析を組み合わせ、当該物質の利用によるライフサイクル全体での環境影響評価手法を開発した。

これらの手法を3つの銅鉱山に適応し手法の検証を行うとともに、今後の改善の方向性について検討した。

### 4.3 国際資源循環の推進に関する研究

本テーマでは、我が国のリサイクルシステム全体の循環資源の流通・利用状況を評価する上で、環境・経済・社会的影響が大きく、比較的データの揃っていることから、廃家電・電子製品のリサイクルを対象として研究を行った。分析に必要な基本データとしては、環境統計、貿易統計、および中央環境審議会・産業構造審議会のリサイクル法関連部会の最近の資料など、既存の公式資料を活用するとともに、流通・利用状況については、静脈物流（その種類やシステムの違いごとのコスト）・処理（手法ごとのコスト）に関わる経済コストおよび環境影響、さらには社会影響として雇用を想定し、対象リサイクルシステムごとの特性を類型化した。その上で、これらのリサイクルシステムについて、環境・経済・社会的影響の評価手法の検討を行った。また、分析の対象とする有用素材の絞り込みを行った。

この環境・経済・社会的影響の評価手法を用いて、日本のリサイクルシステムの持続可能性評価を実施した。さらに、先進国（日本）とデータの整備状況が似ていると考えられる新興国（台湾）について、対象国研究機関と連携して、同様の手法の開発を行った。また、発展途上国をモデルに導入する上で必要な関連情報をインドにおける現地調査を通じて収集し、リサイクルインフラの設置コストも検討した上で先進国、新興国、発展途上国を中心にした循環資源の経済・貿易モデルの開発を試みた。これらの検討を踏まえ、資源循環の流通の特性、リサイクルや処理に活用されている主要技術に応じて、どのような資源循環（近接循環、広域循環、国際循環の組み合わせ方）が、リサイクルの経済性を確保するための規模の経済性、雇用および環境保全という観点から優れているか評価することを試みた。

## 5. 本研究の成果

---

### 5.1 持続可能な資源利用政策の環境影響評価

持続可能な資源利用政策の環境影響評価に関する研究では、先進国が持続可能な資源利用政策として資源利用抑制策を実施することにより、厚生水準と資源利用の強いデカップリングを実現する可能性について検討を行った。この目的で、応用一般均衡（CGE）モデルと産業連関分析（IO）の連携に基づく評価手法を開発した。さらに複数年にわたる評価期間に対して各年の影響評価を行うことが可能な逐次動学モデルとすることで、評価期間合計値に対する目標設定を可能とし、さらにそのような政策目標に対して政策導入が遅れることによるコストの検討も行った。

持続可能な資源利用政策シナリオとして、日本一国でグリーン経済を目指すシナリオ、日本の最大の鉄鉱石輸入元であるオーストラリアと協調してグリーン経済を目指すシナリオ、さらに先進国が協調して資源利用抑制政策を導入することにより、政策導入国におけるグリーン経済の確立に加え、対象資源をめぐる国際競争を緩和することで新興国・途上国の経済発展側面支援を目指す持続可能な開発シナリオを策定し、定量的影響評価を行った。

日本一国でグリーン経済を目指すシナリオについては、鉄鉱石中間投入への天然資源税と鉄スクラップリサイクルの中間財投入に対する定率補助金を組み合わせた政策シナリオにより、日本の厚生水準がわずかに上昇した。すなわち日本の厚生水準と鉄鉱石直接利用量との間に強いデカップリングが成立した。一方、日本の鉄鉱石フットプリントはわずかに増える結果となり、消費者ベース指標である資源フットプリントで評価した場合には、厚生水準との強いデカップリングが成立しない結果となった。また日本の実質国内総生産（GDP）はわずかに減少したため、経済成長と鉄鉱石利用量との強いデカップリングは成立しない結果となった。

日本とオーストラリアが協調してグリーン経済を目指すシナリオでは、日本単独で天然資源税を上流側（鉄鉱石中間投入）に課税する場合と比べ、オーストラリアとの協調政策実施により目標達成に必要な税率は大幅に下がった。また、同じ政策を同じ税率で導入したにも関わらず、日本とオーストラリアの間で政策影響に大きな差が出る結果となり、対象国の特性が政策効果に大きく影響することが明らかとなった。

先進国が協調して資源利用抑制政策を導入する持続可能な開発シナリオでは、日本、韓国などOECD加盟国である先進6か国・地域で上流側天然資源税と鉄スクラップリサイクルを組み合わせた政策を実施することにより、オーストラリアを除く5つの政策導入国・地域で厚生水準と鉄鉱石利用量の強いデカップリングが実現した。また世界全体でも厚生水準上昇と鉄鉱石利用抑制の両立（強いデカップリング）が実現した。対策導入国の鉄鉱石利用量の減少幅は世界合計の減少幅を上回っており、資源競争の緩和を通じて対策を導入していない国々（主に新興国・開発途上国）の資源利用を促進する結果となった。また、鉄鉱石利用抑制のコベネフィットとしてCO<sub>2</sub>排出量抑制の効果が見られた。世界全体でCO<sub>2</sub>排出量が減少しており、厚生水準とCO<sub>2</sub>排出量との強いデカップリングも実現した。このように、本研究が先進国のグリーン経済に期待する役割の実現可能性について、肯定的な示唆が得られた。

その他、持続可能な開発シナリオを基準として、対策導入が遅れることによる影響や、対象資源を銅鉱石とした場合の政策含意について検討した。例えば、持続可能な開発シナリオと同じ政策ツールを1年遅らせて導入し、かつ同じ削減目標を達成する場合、世界全体の実質GDPが約27億ドル（2004

年USD) 減少する結果となったが、対策導入国・地域での厚生水準は上がる結果となった。これはより強力な(資源税率の高い)政策の導入により対策導入国で強いデカップリングがさらに促進されるとともに、資源競合緩和効果もさらに強まることで、新興国・開発途上国での便益も大きくなったと考えられる。また、対象資源を銅鉱石とした場合には、鉄鉱石対象の場合に実現した厚生水準-鉱石利用量の強いデカップリングは見られなかった。

## 5.2 特定物質に伴うライフサイクル環境影響評価

特定物質に伴うライフサイクル環境影響評価に関する研究では、環境負荷の代表的なものとしてよく見られるCO<sub>2</sub>排出量、最近の議論においてマテリアルフロー指標から転じて環境影響評価指標としての期待がかかる関与物質総量(TMR)、そして網羅的な環境影響指標として設計されているエコロジカルフットプリント(EF)という、3つの全く異なるタイプの指標について手法の改良を進め、改良した手法を特性の異なる3つの銅鉱山に適用した。

鉱山毎の事例研究では主に以下のことが明らかとなった。

EFについては二酸化炭素吸収地が圧倒的に大きくなるために、CO<sub>2</sub>排出量の計算結果と近い値を示す。ただし、地域別の係数を用いることで、ある程度はその国の生産性を反映することになる。鉱山開発について、生態系へのインパクトを理由に土地改変面積の大きさが懸念材料に上がることは非常に多い。しかし、現時点でのEFの推計手法を用いる限りにおいては相対的には大きなものではない。

TMRについてはEFやCO<sub>2</sub>排出量とは必ずしも一致するとは限らない。大規模な拡張工事や、廃さいダムを新たに建設した場合、非常に大きくなる可能性がある。この点については土地改変面積についても同様であるが、EFに変換する際に生産能力阻害地の影響は小さめに見えることから、結果に与える影響は大きくない。

これらのことから、TMRとCO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ別個に推計する価値があること、またEFの推計結果が二酸化炭素吸収地の面積に支配される傾向にあり、係数によって各国の実情が多少は反映されるにしても鉱山開発についてはそれほど有意義ではない可能性が明らかとなった。

一方、EFがより様々な影響を考慮できる方向で拡張されれば、係数による各国の実情反映は意味を持つと考えられる。例えば国によっては尾鉱の海洋投棄が認められている場合があり、海洋生態系に対して影響を与えていると予想される。また、TMRの拡張に際して検討項目とした酸性坑排水(AMD)による被害地域を生産能力阻害地に該当すると考えるならば、結果が変わるであろう。

本研究で対象とした3つの指標を精緻な分析に応用しようとした際に生じる主な問題点として、以下が挙げられる。

TMRについては、データが公表されることがまれであり、今回のケーススタディにおいては、鉱石とズリだけを検討対象とした。これはこの二つのデータは相対的に信頼性があるものと考えたからである。しかしAMDを固体物の重量に換算して評価しようとした場合、水質を知る必要がある。さらに、現時点でAMDが止まっていない鉱山について評価するのであれば、将来の水質を予測しなければならない。

CO<sub>2</sub>排出量についても、詳細な操業データが精緻化には必要となるが、そうしたデータは入手が難しい。

EFについては、生産能力阻害地を勘定するのであれば、鉱山関連施設の面積を把握しなければならない。今回は画像解析によりこれを得たが、厳密にはその検証には現場調査が必要になる。

鉱山における環境影響とは極めて現場に依存するものであり、幾つかの代表的な鉱山について計算された値を原単位として用いることは極めて危険である。そのため、正確なデータを作るためには鉱山業界の協力が不可欠であるが、そのような協力を得ることが難しいことが大きな課題であることが、本研究を通じてあらためて浮き彫りとなった。

### 5.3 国際資源循環の推進に関する研究

国際資源循環の推進に関する研究では、環境・経済・社会的影響を定量的に比較評価可能にする持続可能性評価の手法を開発した。使用済み家電の管理に関わる環境排出と資源利用に関わる環境影響を測るために、温室効果ガスの正味排出量、資源効率とリサイクル率、資源の回収率を重要な指標として同定した。また、社会・経済的便益を測るために、環境関連産業での雇用の創出と収入に基づいた福祉を同定した。その上で、福岡県の事例からのデータを活用して、家電リサイクル法の下での対象家電4品目を対象として、収集などの物流過程を含めた家電リサイクルチェーンからの温室効果ガス排出量の定量化を行うとともに、天然資源から製品を生産する場合からの資源（化石燃料、金属資源）節約および環境負荷（温室効果ガス排出量）削減効果を定量化した。また家電リサイクルによる雇用創出効果を推計し、これらの指標を用いた家電リサイクルシステムの持続可能性評価手法を開発し、日本、インド、台湾の事例分析に応用した。

事例分析の結果、使用済み家電のリサイクルが持続可能性への貢献という観点から、資源の節約に貢献するだけではなく、温室効果ガスの削減へも貢献する可能性があることを示すことが出来た。日本の事例では、廃電気・電子機器のリサイクルによって循環資源を回収し利用することで、同量の資源を天然資源から生産した場合に比べて50%以上の温室効果ガス（GHG）排出の発生が抑制できるという推計結果となった。また、洗濯機、冷蔵庫、エアコンのリサイクルは、75-80%の化石燃料使用の抑制効果があると推計できた。テレビについては、55%程度の化石燃料の使用の抑制が出来るといふ推計結果となった。インドと台湾の事例では、廃電気・電子機器管理に使用される化石燃料は日本よりも少ないとの調査結果となったが、いずれの場合においても、リサイクルはGHGの排出抑制、化石燃料の節約に貢献するということが分かった。今回調査した事例では、適廃電気・電子機器リサイクルプログラムの結果、常勤の雇用が生み出されているおり、社会経済的な便益も生み出すことが分かった。

また3か国の分析結果を用いて国際比較を行うことで、特にインドの事例からは途上国のリサイクルが、労働集約型であり、エネルギー非集約型のリサイクルであることを定量的に明らかにすることが出来た。すなわち国際的には、安価な労働力に依存した労働集約型のリサイクルと、比較的エネルギー消費型の労働非集約型のリサイクルが併存していることを、定量的に明らかにすることが出来た。このことは、先進国で収集された使用済み機器やその部品の一部などが、中古品として合法的に、もしくは一部非合法的に途上国へと移転し、環境上不適正であると考えられながらもリサイクルが行われている要因の一部を示しているものと考えられる。

しかし、データ入手上の課題から、途上国の労働集約型、エネルギー非集約型のリサイクルが、先進国のリサイクルよりも健康上もしくは環境面で、重金属などの不適切な処理により、負の影響があるという点については、定量的に示すことが出来なかった。また、途上国で行われる労働集約型のリサイクルと分散型の資源回収と、日本で行われている専門解体工場と高度な精錬施設の連携による資

源回収との間に存在するであろう、資源回収技術の違いによる資源回収効率の差についても今回の分析に取り入れることが出来なかった。

こうした重金属汚染などによる環境・健康面での影響、使用されている資源回収技術の差による資源回収効率の差を組み入れれば、国際資源循環オプションの評価も可能になると考えられる。本研究では、日本における家電4品目の回収率が50～60%であるのに対し、以下のようなシナリオ想定し、国際資源循環オプションの違いによる日本及び途上国での影響の差を示すことを企図したが、結果としては上記の理由により国際資源循環オプションの比較分析には至らなかった。

このような国際資源循環オプションの比較分析は、環境政策への貢献可能性としては、興味深い結果をもたらすことが期待される。その一方で、途上国のリサイクルに関する現状のデータのみで実施した場合には、誤解を招く結果になりかねない。少なくとも今回の研究成果で得た定量的データでは、エネルギー、GHG排出、雇用の創出という側面からの評価となると、途上国でのリサイクルの方がより効果的という結論となってしまいかねない。そのため、重金属汚染などによる環境・健康面での影響だけでも今回の評価手法に取り入れることが今後の課題である。

本研究が、アジア太平洋地域での廃電気・電子機器の適正な管理に貢献するためには、基本的なデータの入手が欠かせない。今回の研究では、経済的な持続可能性や、健康影響に関する分析が不十分であったが、これらの側面についての研究をより進化する必要がある。これらの経済的持続可能性と健康影響は、廃電気・電子機器の国際的な移動も含めた国際的な管理を考慮に入れる上で必要不可欠である。

今回の研究を活用して、ウェブベースの簡易的な廃電気・電子機器管理の影響評価ツールを公開することを目指すことが、ひとつの方向性として考えられる。関係者の協力を得るためにも、廃電気・電子機器の適正な管理などに関心を有するUNEPや国連工業開発機関（UNIDO）といった国際機関と連携し、こうしたツールの公開をするというのは、有効なアプローチであると考えられる。

## 6. 行政ニーズとの関連及び位置付け

---

本研究では、UNEP国際資源パネルでの議論、特に環境影響作業部会での議論、あるいはOECDのCIRCLE（Costs of Inaction and Resource scarcity: Consequences for Long-term Economic growth）プロジェクトなどに貢献することを念頭に実施した。アジア3R推進フォーラムおよびその専門家グループに成果を発信することで、アジア地域での物質フロー・環境影響評価指標の普及への貢献を行うとともに、静脈メジャー国際展開に関連する政策示唆については、共同研究者および研究アドバイザーが、環境省の静脈産業海外展開促進有識者会合に参加していることを活かし、政策形成への貢献を図った。具体的な貢献としては、以下が挙げられる。

- 2014年10月に開催されたOECD CIRCLEプロジェクト第2回技術ワークショップにおいて、6つの評価分野の1つである資源希少性による経済成長への影響に関連し、本研究の成果の一部を提供した。
- OECDにおいて、現在、2001年に策定された拡大生産者責任（EPR）に関するガイドンスマニュアルのアップデート作業が行われている。2014年6月に開催されたOECDのEPRに関するグローバルフォーラムでは、関係者からは、拡大生産者責任政策の多面的な便益を示すための評価手法やデータが不足しているとの指摘があった。そうした中で、日本の家電リサイクル法の効果として、本研究成果の一部を日本からの事例分析として提出した。



## 7. 研究成果による環境政策への貢献

---

本研究は、資源利用フローのグローバル化が進む中で、持続可能な資源利用の促進を目的として資源利用に伴うライフサイクルでの環境影響評価手法の開発を進めるとともに、国際資源循環システム構築への貢献を目的として、使用済み製品の適正処理および環境負荷の低減、省資源・資源効率、環境産業の育成の3つの観点からリサイクルシステムの持続可能性評価を行う手法の開発を試みた。リサイクルシステムの持続可能性評価の成果は、すでに検討が進められている環境政策への直接的な貢献につながると期待される。

また、特定物質に着目した物質利用に伴うライフサイクル環境影響評価に関する研究は、資源採掘段階での負の環境影響、とくに生態系への負の影響について定量的に評価することを試みた。データ制約などの問題があり手法の確立にはいたらなかったものの、方法論の整理を行うとともに、拡張した指標による影響評価を試みており、今後の研究の進展が見込めれば企業が一層の省資源・省エネ対策を進めるインセンティブにつながる環境政策の設計にも貢献すると考えられる。

マクロ経済レベルでの資源利用に伴うライフサイクル環境影響評価に関する研究については、すでに欧州で検討が始まっている資源利用抑制あるいは絶対的デカップリングを目指す政策につき、遅かれ早かれ我が国でも検討する必要があることが予想されるが、そのような検討に定量的な裏付けを提供するツールの開発を行った。対象とした天然資源税などについては、我が国ですぐに採用される可能性は低いと思われるものの、将来的な環境政策への貢献が期待されるとともに、現在国連で議論が続いている持続可能な開発目標（SDG）に関する国際プロセスにおいて、我が国が議論をリードする材料の提供が期待される。このように、我が国の国際政策プロセスへの貢献の支援につながることが期待される。

## 8. 対外発表等の実施状況

---

### (1) 論文等

#### 1) 査読付論文

大塚 啓司, 村上進亮, 山富二郎, 小出 瑠, 所 千晴 (2014) 「統計解析と地球科学コードを用いた酸性坑廃水処理の将来予測に関する研究」 *Journal of MMIJ*: 488-493.

Menikpura S.N.M., Santo A. and Hotta Y. (2014). Assessing the Climate Co-benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Recycling in Japan. *Journal of Cleaner Production* (in press).

Zhou X., Yano T., and Kojima S. (2013). Addressing the hidden inequality in accounting for trade-related emissions: National GHG inventory adjustment for trade in the presence of border carbon adjustment. *Energy Policy* Vol. 63: 1098-1110.

和田喜彦 (2012) 「ウラン鉱山・製錬所による環境影響と課題」『化学物質と環境』No.113: 8-10.

Zhou X., Shirakawa H., and Lenzen M. (2013). Chapter 3 Aggregation Effects in Carbon Footprint Accounting Using Multi-region Input-Output Analysis. In Yu T., Chawla N., and Simoff S. (Eds.): *Computational Intelligent Data Analysis for Sustainable Development*. Taylor and Francis Group: NW.

Zhou X. Yano T., and Kojima S. (2013). Direct versus embodied emissions: criteria for determining the carbon coverage for border carbon adjustment. *Carbon Management* 4(3): 261-273.

#### 2) 査読無論文

和田喜彦 (2015) 「マレーシアでのレアアース資源製錬過程による環境問題 —エイジアンレアアース(ARE) 事件の現況とライナス社問題」『環境情報科学』第43巻 第4号: 32-38.

和田喜彦 (2014) 「レアアース製錬に伴うトリウム等の放射性廃棄物管理に関する一考察 —エイジアンレアアース (ARE) 社事件, ライナス社問題を事例として—」『経済学論叢』(同志社大学) 第65号第3号

和田喜彦、伊波克典 (2013) 「限りある資源②: エコフット分析の考え方、計算方法、できることとできないこと」『ビオシティ』56号: 26-35.

和田喜彦 (2013) 「基調論文: エコロジカル・フットプリント開発の背景とその意義」『ビオシティ』56号: 13-19.

伊波克典, 清野比咲子編集, Pati Poblete, David Moor, 和田喜彦, 伊波克典, 岡安直比著 (2012) 『日本のエコロジカル・フットプリント2012』. WWFジャパン、グローバル・フットプリント・ネットワーク.

Iha, Katsunori, Sakiko Kiyono eds. Pati Poblete, David Moor, Yoshihiko Wada, Katsunori Iha, and Naobi Okayasu. (2012). Japan Ecological Footprint Report 2012. WWF Japan, Global Footprint Network.

和田喜彦 (2012) 「環境評価とエコロジカル・フットプリント」名古屋大学エコトピア科学研究所編。『エコトピア科学概論：持続可能な環境調和型社会実現のために』コロナ社。113-124.

### 3) 学会発表など

Menikpura, S.N.M., Atsushi Santo and Yasuhiko Hotta (2015). Assessing Full Scale Sustainability of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Recycling. Conference Proceeding, International Conference on Sustainable Build Environment (ICSBE), 13-14 December 2014. Sri Lanka.

和田喜彦 (2014) 「マレーシア・レアアース製錬工程に起因するトリウム等の放射能汚染問題の最新動向」エントロピー学会秋の研究集会 2014年11月23日 京都：キャンパスプラザ京都.

Murakami S., Adachi T., Wada Y. and Kojima S. (2014). "Indicators for environmental impacts at mine sites -case studies for large-scale underground mines" The 11th International Conference on EcoBalance, Tsukuba, Japan, 27-30 October 2014

小嶋公史、アンビヤ・アブドラ、周新 (2014) 「CGEモデル-MRIOモデル連携による資源利用のライフサイクル環境影響評価手法の開発」第19回環境経済・政策学会、2014年9月13日—14日、法政大学.

三戸篤史、ニルマラ・メニプラ、堀田康彦 (2014) 「リサイクルシステムの持続可能性評価定量化に関する試み：我が国リサイクルシステムの評価から国際比較へ。」第19回環境経済・政策学会、2014年9月13日—14日、法政大学.

和田喜彦、村上進亮、安達毅 (2014) 「レアアース資源開発の環境汚染とその影響評価:マレーシアと中国での事例研究」第19回環境経済・政策学会、2014年9月13日—14日、法政大学.

Wada Y. (2014). "Case Studies of Radioactive Pollution due to Rare Earth Refinery Processes in Malaysia." The Fifth International Conference "Present Problems of Region Development" organized by the Institute for Complex Analysis of Regional Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences. Birobidzhan, Russian Federation. September 10, 2014.

和田喜彦 (2013) 「レアアース製錬工場における放射性廃物管理の課題：マレーシアのエイジアンレアアース社 (ARE) 事件とライナス社問題」第18回環境経済・政策学会2013年次大会。2014年9月13日—14日、神戸大学.

Wada Y. (2013). "A Radioactive Thorium Pollution Case in Malaysia: Asian Rare Earth Incident Revisited." Presentation at the "Rare Earth Symposium," held at University of Queensland, Brisbane, Australia, on May 31.

Wada Y. (2013). "Taking Advantage of Japanese Government's 'Environmental and Social Guidelines' and 'HSE Policy' to Prevent 'Pollution Export': Lynas Refinery Radioactive Thorium Controversy in

Malaysia.” Presentation at the "Symposium: Building a Safer Malaysia," held at Mandarin Court Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia, on November 24.

Otsuka H., Murakami S., Yamatomi J., Tokoro C., and Koide R. (2012). “Long Lasting Material Flows of Mining after mine closure - Focused on Acid Mine Drainage Treatment” Proceedings of International Conference of Ecobalance 2012, P-036.

Moore, David, 和田喜彦, 伊波克典 (2012) 「福島原発事故による被害のエコロジカル・フットプリント分析：バイオキャパシティ（生物生産力）損失を中心に」 エントロピー学会秋の研究集会 口頭研究発表11月18日東京：国学院大学。

#### 4) 政策プロセスへの貢献

Hotta Y., Santo A., and Tasaki T. (2014). EPR-based electronic home appliance recycling system under home appliance recycling act of Japan, Case study prepared for the OECD, available at [www.oecd.org/env/waste/gfenv-extendedproducerresponsibility-june2014.htm](http://www.oecd.org/env/waste/gfenv-extendedproducerresponsibility-june2014.htm)

#### (2) 対外的発表

対外的発表などの実施状況については、以下の通りである。

- 平成27年3月11日に、本研究の成果に基づき以下の公開シンポジウムを開催した。

持続可能な資源利用シンポジウム—人々の福利向上と資源利用・環境影響削減の両立を目指して

日時：2015年3月11日（水）13:30～16:30

場所：コクヨホール 多目的ホール

参加者数：68名

アジェンダ：

成果発表

- 三戸篤史「廃家電リサイクルの持続可能性評価：日本の事例と国際比較」
- 和田喜彦「レアアース製錬過程の環境影響：マレーシアでのケーススタディを中心に」
- 小嶋公史「先進国による資源利用抑制の効果：厚生水準と資源利用のデカップリングは可能か」

パネルディスカッション

- テーマ：「持続可能な資源利用に向けて我々は何をなすべきか」
- モデレーター：堀田康彦
- パネリスト：原田幸明（物質・材料研究機構 元素戦略材料センター NIMS招聘研究員）、三戸篤史、和田喜彦、小嶋公史

- 平成26年9月に東京で開催された環境経済・政策学会2014年大会で、「資源利用に伴うライフサイクル環境影響に関する研究」と題する企画セッションを以下の通り主催し、本研究の研究報告を行った。

環境経済・政策学会2014年大会（2014年9月13日）

企画セッション：資源利用に伴うライフサイクル環境影響に関する研究

座長：小嶋公史（地球環境戦略研究機関）

討論者：安部竜一郎（立教大学）、田崎智宏（国立環境研究所）、伊坪徳宏（東京都市大学）

1. 和田喜彦、村上進亮、安達毅レアアース資源開発の環境汚染とその影響評価:マレーシアと中国での事例研究の検証

和田喜彦（発表者）、村上進亮、安達毅

2. リサイクルシステムの持続可能性評価定量化に関する試み—我が国リサイクルシステムの評価から国際比較へ—

三戸篤史、ニルマラ・メニプラ、堀田康彦（発表者）

3. CGEモデル-MRIOモデル連携による資源利用のライフサイクル環境影響評価手法の開発

小嶋公史（発表者）、アンビヤ・アブドラ、周新

- 平成24年9月に仙台で開催された環境経済・政策学会2012年大会で、「持続可能な資源利用に関する研究」と題する企画セッションを以下の通り主催し、本研究の研究報告を行った。

環境経済・政策学会2012年大会（2012年9月16日）

企画セッション：持続可能な資源利用に関する研究

座長：小嶋公史（地球環境戦略研究機関）

討論者：加川茂美（九州大学）、山崎雅人（名古屋大学）

1. 資源供給制約の経済影響評価とマテリアルバランスの検証

村上進亮（発表者）、安達毅、矢野貴之

2. 日本CGEモデルを用いたレアアース供給制約の経済影響に関する研究

小嶋公史、矢野貴之（発表者）

3. 4カ国CGEモデルを用いた資源循環・資源利用抑制政策に関する研究

小嶋公史（発表者）、矢野貴之

- 国際資源パネル、統合シナリオ作業部会ワークショップ（2013年2月、米国ニューヘブーン）に招聘講演者として参加、カーボンフットプリント・資源フットプリントに関する研究成果を発表

### (3) ミーティングの開催

研究者間の意見交換および進捗報告の場として、研究会合を以下の通り開催した。

#### 平成24年度

開催日時	会合内容
第1回（7月27日）	研究項目のデータ、方法論について議論。
第2回（9月19日）	各研究項目の進捗報告。特にカーボンフットプリント推計手法と、CGEモデルとの連携手法について議論。
第3回（11月13日）	各研究項目の進捗報告。特にレアメタル、レアアース鉱山活動の環境影響評価のデータ・方法論について議論。
第4回（12月20日）	研究項目毎の成果報告書ゼロドラフト発表。報告書目次案および報告書作成スケジュールの確認。
第5回（1月21日）	成果報告書ドラフトにつき議論。

#### 平成25年度

開催日時	会合内容
第1回（7月1日）	研究項目のデータ、方法論について議論。
第2回（7月24日）	各研究項目の進捗報告。特にカーボンフットプリント推計手法と、CGEモデルとの連携手法について議論。
第3回（11月19日）	各研究項目の進捗報告。特にレアメタル、レアアース鉱山活動の環境影響評価のデータ・方法論について議論。
第4回（1月15日）	成果報告書ドラフトにつき議論。

#### 平成26年度

開催日時	会合内容
第1回（6月13日）	研究項目のデータ、方法論について議論。テーマ間での連携強化につき、手法拡張の方向性と合わせ議論。
第2回（9月13日）	各研究項目の進捗報告。最終成果とりまとめに関する議論。
第3回（1月9日）	成果報告シンポジウム開催についての打合せ、および成果報告書ドラフト作成につき打合せ。

## II. 研究の実施内容

## 要約

---

持続可能な開発は、環境持続可能性を損なうことなく貧困を撲滅する開発であるが、現在の世界の開発経路は世界総生産でみると成長しているものの、環境持続性を大きく損なうとともに、貧困撲滅についても課題が山積している。世界全体としての持続可能な開発を進めるためには、生存基盤を提供している生態系サービスを持続可能な範囲で利用しつつ、富めるものの過剰消費と持たざるものの過少消費の両方を解決するという難題に取り組む必要がある。

本研究は、この難題に対する持続可能な資源利用の観点から、以下の3つの研究課題に取り組んだ。

1つめはマクロレベルでの政策影響評価を通じて、富めるものの過剰消費と持たざるものの過小消費の解消に有効と考えられる先進国での資源消費抑制政策の影響評価である。この目的で、鉄鉱石を主な対象資源とし（一部銅鉱石を対象資源とした比較分析を実施）、持続可能な資源利用の環境影響評価の研究を実施した。

2つ目の課題は、資源消費に伴う環境影響・健康影響を資源採取から製造・消費、さらにリサイクル・廃棄にいたるライフサイクル全体について定量的に評価する手法・指標の開発である。この目的で、特にレアアースのように利用量は微量でも採掘に伴う環境影響が甚大なものなど、現在使用されている資源効率性などの物質フロー指標ではライフサイクル全体の環境影響を適切に反映することが難しい物質に着目した、特定物質に伴うライフサイクル環境影響評価の研究を実施した。

3つ目の課題は、我が国が進める国際循環型社会形成への取り組みに関し、国境を越えたトータルとしての環境影響の低減効果の定量的評価や、物流効率化などの経済的効果の定量的評価を行う手法を開発すること、このような評価手法を活用して国際資源循環システム構築による資源効率改善への提言を行うことである。この目的で、使用済み家電リサイクルに着目した国際資源循環の推進に関する研究を実施した。

持続可能な資源利用の環境影響評価に関する研究では、先進国における持続可能な資源利用政策の政策手段として、天然資源税とリサイクル補助金を想定し、これらの政策手段を適宜組み合わせるとともに、政策導入国についても日本一国の場合、他の先進国と協調する場合など、複数の政策シナリオを策定した。これらの政策シナリオを経済面、厚生面、環境面から定量的に評価するツールとして、天然資源税などの価格効果の影響分析に適した経済モデルである応用一般均衡（CGE）モデルと、ライフサイクル環境影響指標の一つであるカーボンフットプリント、あるいは資源フットプリントの推計に適した産業連関表を組み合わせた政策影響評価手法を開発した。開発した評価手法を用いて策定した政策シナリオから想定した効果が得られるかどうか、すなわち政策実施国あるいは世界全体での厚生水準向上と資源利用・環境負荷の削減（強いデカップリング）が実現可能かどうかについて検討を行った。主要な結論は以下の通りである。

- 日本一国でグリーン経済を目指すシナリオについては、鉄鉱石中間投入への天然資源税と鉄スクラップリサイクルの中間財投入に対する定率補助金を組み合わせた政策シナリオにより、日本の厚生水準がわずかに上昇した。すなわち日本の厚生水準と鉄鉱石直接利用量との間に強いデカップリングが成立した。一方、日本の鉄鉱石フットプリントはわずかに増える結果となり、消費者ベース指標である資源フットプリントで評価した場合には厚生水準との強いデカップリングが成立しない結果となった。また日本の実質国内総生産（GDP）はわずかに減少したため、経済成長と鉄鉱石利用量との強いデカップリングは成立しない結果となった。



- 日本とオーストラリアが協調してグリーン経済を目指すシナリオでは、日本単独で天然資源税を上流側（鉄鉱石中間投入）に課税する場合と比べ、オーストラリアとの協調政策実施により目標達成に必要な税率は大幅に下がった。また、同じ政策を同じ税率で導入したにも関わらず、日本とオーストラリアの間で政策影響に大きな差が出る結果となり、対象国の特性が政策効果に大きく影響することが明らかとなった。
- 先進国が協調して資源利用抑制政策を導入する持続可能な開発シナリオでは、日本、韓国など経済開発協力機構（OECD）加盟国である先進6か国・地域で、上流側天然資源税と鉄スクラップリサイクルを組み合わせた政策を実施することにより、オーストラリアを除く5つの政策導入国・地域で厚生水準と鉄鉱石利用量の強いデカップリングが実現した。また世界全体でも厚生水準上昇と鉄鉱石利用抑制の両立（強いデカップリング）が実現した。対策導入国の鉄鉱石利用量の減少幅は世界合計の減少幅を上回っており、資源競合の緩和を通じて対策を導入していない国々の資源利用を促進する結果となった。また、鉄鉱石利用抑制のコベネフィットとしてCO<sub>2</sub>排出量抑制の効果が見られた。世界全体でCO<sub>2</sub>排出量が減少しており、厚生水準とCO<sub>2</sub>排出量との強いデカップリングも実現した。このように、本研究で先進国のグリーン経済に期待する役割が裏付けられる結果となった。

その他、持続可能な開発シナリオを基準として、対策導入が遅れることによる影響や、対象資源を銅鉱石とした場合の政策含意について検討した。例えば、持続可能な開発シナリオと同じ政策ツールを1年遅らせて導入し、かつ同じ削減目標を達成する場合、世界全体の実質GDPが減少する結果となったが、対策導入国・地域での厚生水準は上がる結果となった。これは、より強力な（資源税率の高い）政策の導入により、対策導入国で強いデカップリングがさらに促進されるとともに、資源競合緩和効果もさらに強まることで、新興国・開発途上国での便益も大きくなったと考えられる。また、対象資源を銅鉱石とした場合には、鉄鉱石対象の場合に実現した厚生水準-鉱石利用量の強いデカップリングは見られなかった。

特定物質に伴うライフサイクル環境影響評価に関する研究では、化石燃料資源などにくらべ、金属鉱物資源の鉱山現場ごとの質の違いは非常に大きいことから、特に天然資源採取に関する環境影響の評価について現場ごとの質の違いを反映できるような形で研究を進めた。具体的には関与物質総量（TMR）改良版、個別鉱山に対するCO<sub>2</sub>排出量、エコロジカル・フットプリント（EF）の3つのアプローチで取り組みを進めてきた。

3つの手法は、基本的にはスナップショット的な分析であるため、ライフサイクルアセスメント（LCA）的な評価に際しては、鉱山の操業以前の負荷、閉山後の負荷といったものが反映されていない。この点に着目し、それぞれのアプローチに対し改良を試みた。

- TMRにおいては、特に閉山後の酸性鉱排水（AMD）をその処理のために必要となる物質の重さに変換することで、マテリアルフローとして捉えることを試みた。
- CO<sub>2</sub>排出量に関しては、精緻な勘定を行うべき項目の同定、および精緻化に際して入手しにくいデータの同定を行った上で、鉱山特性を反映した推計を実施した。
- EFについては、より概念的な地理空間的・時間的な利用者拡大責任論について、議論を深めた。本研究では、推定の難しい事例としてレアアースの問題を取り上げているが、その理由はケーススタディ対象の鉱山並びに精錬所が扱っている鉱石に放射性物質が含まれていることにある。こうした非常にインパクトの大きいタイプの環境影響を評価するのにあたり質的な要素を完全に反映することが難しいTMRで評価することは困難であり、そうした意味でEFのような指標に期待がかかる部分でもあ

る。実際に、本研究で検討したような詳細なEFの勘定を行えるのであれば、有意義な結果が導き出せることが判明した。

最後に、3つの大規模銅鉱山について、TMR、CO<sub>2</sub>排出量、EFを実際に計算し、検討を行った。その結果得られた示唆は以下の通りである。

- EFについては二酸化炭素吸収地が圧倒的に大きくなるために、CO<sub>2</sub>排出量の計算結果と近い値を示す。ただし、地域別の係数を用いることで、ある程度はその国の生産性を反映することになる。
- 鉱山開発について、生態系へのインパクトを理由に土地改変面積の大きさが懸念材料に上がることは非常に多い。しかし、現時点でのEFの推計手法を用いる限りにおいては相対的には大きなものではない。
- TMRについてはEFやCO<sub>2</sub>排出量とは必ずしも一致するとは限らない。これは、年によって大規模な拡張工事がある、廃さいダムを新たに建設した、などが起これば起こりうることである。実は土地改変面積についても全く同様のことが言えるが、EFに変換する際に、いずれにせよ生産能力阻害地の影響は小さめに見えることから結果に与える影響は大きくない。

この3点から言えることは、TMRとCO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ別個に推計する価値があるという点である。他方で、EFがこれだけ二酸化炭素吸収地の面積に支配されるのであれば、係数によって各国の実情が多少は反映されるにしても、鉱山開発についてはそれほど有意義ではないかもしれない。しかし、EFのもつ可能性を思えば、本研究で整理したEFの拡張に関して、より実証的な研究を進める必要がある。

国際資源循環の推進に関する研究では、リサイクルシステムの多面的な効果を反映した持続可能性評価手法を日本の事例に基づき開発し、その手法を新興国・発展途上国に対して適用し、発展段階に応じたリサイクルシステムの特性に配慮した国際資源循環システムの構築のために有用な情報の提供を試みた。

この目的で、使用済み家電の管理に関わる環境排出と資源利用に関わる環境影響を測るために、温室効果ガス（GHG）の正味排出量、資源効率とリサイクル率、資源の回収率を重要な指標として同定した。また、社会・経済的便益を測るために、環境関連産業での雇用の創出と収入に基づいた福祉を同定した。その上で、福岡県の事例からのデータを活用して、家電リサイクル法の下での対象家電4品目を対象として、収集などの物流過程を含めた家電リサイクルチェーンからのGHG排出量の定量化を行うとともに、天然資源から製品を生産する場合と比較した資源（化石燃料、金属資源）節約および環境負荷（GHG排出量）削減効果を定量化した。また、家電リサイクルによる雇用創出効果を推計し、これらの指標を用いた家電リサイクルシステムの持続可能性評価手法を開発し、日本、インド、台湾の事例分析に応用した。

事例分析の結果、持続可能性への貢献という観点から、使用済み家電のリサイクルは資源の節約に貢献するだけでなく、GHGの削減へも貢献する可能性があることを示すことが出来た。インドと台湾の事例では、廃電気・電子機器管理に使用される化石燃料は日本よりも少ないとの調査結果となったが、いずれの場合においても、廃電気・電子機器リサイクルはGHGの排出抑制、化石燃料の節約に貢献するということが分かった。今回調査した事例では、適切な廃電気・電子機器リサイクルプログラムの結果、常勤の雇用が生み出されているおり、社会経済的な便益も生み出すことが分かった。

また3か国の分析結果を用いて国際比較を行うことで、特にインドの事例からは途上国のリサイクルが、労働集約型であり、エネルギー非集約型のリサイクルであることを定量的に明らかにすることが出来た。すなわち、国際的には、安価な労働力に依存した労働集約型のリサイクルと、比較的エネルギー消費型の労働非集約型のリサイクルが併存していることを、定量的に明らかにすることが出来た。この

ことは、先進国で収集された使用済み機器やその部品の一部などが、中古品として合法的に、もしくは一部非合法的に途上国へと移転し、しばしば環境面、健康面での問題が生じているにも関わらず、リサイクルが行われている要因の一部を示しているものと考えられる。

しかし、データ入手上の課題から、途上国の労働集約型、エネルギー非集約型のリサイクルが、重金属などの不適切な処理により、先進国のリサイクルよりも健康上もしくは環境面で負の影響があるという懸念については、定量的に示すことが出来なかった。また、途上国で行われる労働集約型のリサイクルと分散型の資源回収と、日本で行われている専門解体工場と高度な精錬施設の連携による資源回収との間に存在するであろう、資源回収技術の違いによる資源回収効率の差についても、今回の分析に取り入れることが出来なかった。

こうした重金属汚染などによる環境・健康面での影響、使用されている資源回収技術の差による資源回収効率の差を組み入れれば、国際資源循環オプションの評価も可能になると考えられる。本研究では、国際資源循環オプションの違いによる日本及び途上国での影響の差を示すことを企図したが、結果としては上記の理由により国際資源循環オプションの比較分析には至らなかった。

このような国際資源循環オプションの比較分析は、環境政策への貢献可能性としては、興味深い結果をもたらすことが期待される。その一方で、途上国のリサイクルに関する現状のデータのみで実施した場合には、誤解を招く結果になりかねない。少なくとも今回の研究成果で得た定量的データでは、エネルギー、GHG排出、雇用の創出という側面からの評価となると、途上国でのリサイクルの方がより効果的という結論となってしまいかねない。そのため、少なくとも重金属汚染などによる環境・健康面での影響について、評価手法に取り入れていくことが今後の課題である。

本研究の政策的な意義として、以下が挙げられる。

- 先進国を対象とした天然資源利用抑制のための政策については、分析結果にも見られるように実質GDPベースでの経済成長に負の影響が出る可能性があり、金融システムや社会保障システムが経済成長に依存する形で制度設計されている現状ではすぐに実現する政策ではない。しかし成長のジレンマの呪縛のもと、先進国を中心に資源生産性や環境効率の向上は見られるものの、資源利用量・環境負荷発生量の絶対量の増加に一向に歯止めがかからない状況を鑑みるに、政策議論を開始する必要性は極めて高いと思われる。そのような議論を行う上で、本研究の成果は有用なものであろう。特に日本一国グリーン経済モデルにおいて厚生水準と資源消費（ここでは鉄鉱石）の強いデカップリングの実現可能性が示唆されたこと、および先進6か国・地域の政策協調による持続可能な開発モデルにおいて、オーストラリアを除く5か国・地域と世界全体として厚生-資源消費の強いデカップリングの実現可能性が示されたことは、貴重な情報と考える。
- 特定物質に伴うライフサイクル環境影響評価に関する究の政策的意義は、持続可能な資源利用を考える上で必要となる生産時の環境影響に関し、これまで欠如していた情報を補う手法開発を進めたことである。本研究によるCO<sub>2</sub>排出量以外を含めた鉱山業からの環境影響を定量化する手法は、どの資源は比較的環境に優しいのか、また同じ資源であってもどのような現場が環境に優しいのかを知る手立てを提供するものであり、また環境に比較的易しい鉱業を目指した努力を正当に評価することにもつながり、我が国の資源政策に対しても貢献するものと考えている。
- 国際資源循環の推進に関する研究では、廃電気・電子機器の管理の影響をGHGの排出削減ポテンシャル、資源節約、雇用創出という観点からの評価を行うと同時に、日本以外の他のリサイクルシステムにも応用可能な評価手法を開発した。この持続可能性評価の枠組みを用いて、廃電気・電子機器の適正管理から得られる持続可能性に向けた便益を明らかにすることが出来る。その一方で、廃電気・電

子機器の管理およびリサイクルの関係者が、廃棄物の処分、リサイクル品からの経済的利益という側面以外の便益について理解していることは稀有である。本研究では、廃電気・電子機器管理の持続可能性について包括的なライフサイクルアセスメント（LCA）に基づいた分析手法の開発に、一定の貢献を行うことが出来たと考える。データの入手可能性という課題はあるものの、本研究で開発した手法は複雑なものではなく、どのような国や経済の状況においても応用可能であることから、新興国・発展途上国を含め、各国が持続可能な資源循環政策を策定する上で有用なものであり、政策的意義の高いものと考えられる。

## Summary

Sustainable development means development that eradicates poverty without compromising environmental sustainability. Currently the gross world product is growing but the current development pattern significantly undermines environmental sustainability and leaves serious poverty problems. To promote sustainable development at the global level it is necessary to tackle the highly challenging task of simultaneously achieving sustainable use of ecosystem services, which provide us with a basis for survival, and addressing both overconsumption of the rich and underconsumption of the poor.

This study undertook the following three themes of sustainable resource use that addresses this challenging task.

The first theme is macro level impact assessment of resource consumption reduction policies in developed countries for addressing both overconsumption of the rich and underconsumption of the poor. For this purpose, iron ore (and copper ore for comparison purposes) was selected as the subject of sustainable resource use.

The second theme is the development of quantitative environmental and health impact assessment method and indicators associated with the whole material life cycle. For this purpose the study focuses on materials such as rare earth metals for which the material flow indicators such as resource productivity have difficulty in appropriately reflecting life cycle environmental impacts because of the very small quantity of usage with significant environmental impacts at the resource extraction process.

The third theme is the development of sustainability assessment of international resource circulation efforts promoted by the government of Japan, which can quantitatively evaluate environmental impact mitigation effects in terms of total impacts across national borders and economic benefits of improvement of logistic efficiency. This theme also aims to develop recommendations for resource efficiency improvement through establishment of international resource circulation system, based on the developed sustainability assessment method. For these purposes we carried out the study on promotion of international circulation focusing on waste electrical and electronic equipment.

The study on environmental impact assessment of sustainable resource use employs natural resource tax and subsidy for scrap recycling as policy instruments. Several policy scenarios were developed by combining these instruments as well as by assuming several patterns of implementing countries such as Japan only or coordinated implementation among developed countries. For evaluating these policy scenarios in terms of economic, environmental and social impacts, a policy impact assessment tool was developed by combining computable general equilibrium (CGE) model, which is suitable to conduct impact analysis of price effects such as natural resource tax, and input-output analysis which is suitable to estimate life cycle environmental impact indicators such as carbon footprint and resource footprint. The developed tool was applied to see whether the policy scenarios can achieve strong decoupling of welfare improvement from resource use/environmental impacts in the policy implementing countries or at the global level.

The main conclusions are as follows:

- The Japan unilateral green policy scenario, in which only Japan introduces natural resource tax on iron ore use as well as ad valorem subsidy for use of steel scrap against the pre-specified resource

(iron ore) use reduction target (5% reduction from the business-as-usual case), will slightly improve welfare level of Japan. It means that strong decoupling of welfare improvement from iron ore use can be achieved. On the other hand, this policy scenario will slightly increase Japanese iron ore footprint. It means that strong decoupling of welfare improvement from iron ore use does not hold in terms of life cycle resource use associated with Japanese consumption. This policy scenario will slightly reduce Japanese real gross domestic product (GDP) and consequently strong decoupling of economic growth from iron ore use will not be achieved.

- The scenario of Japan-Australia coordinated action for green economy, the rate of natural resource tax to achieve the pre-specified iron ore use reduction target (with respect to the total iron ore use of two countries) is much lower than that of the Japan unilateral green policy scenario. The magnitude of iron ore use reduction in two countries differs significantly regardless of the identical natural resource tax rate, and it demonstrates that characteristics of the policy implementing country significantly influence policy performance.
- The sustainable development scenario, in which advanced countries/region (six OECD member countries/region, i.e. Japan, the Republic of Korea, Australia, the United States, Chile, and the European Union) jointly introduce natural resource tax on iron ore use as well as ad valorem subsidy for use of steel scrap against the pre-specified iron use reduction target (with respect to the total resource use of six countries/region), will achieve strong decoupling of welfare improvement from iron ore use in 5 among 6 policy implementing countries/region (except for Australia) as well as at the global level. Significant reduction in iron ore use in the advanced six countries/region will mitigate international resource competition over iron ore and will moderately increase iron ore use outside these six countries/region. As a co-benefit, this scenario will reduce CO<sub>2</sub> emissions at the global level and consequently strong decoupling of welfare improvements from CO<sub>2</sub> emissions will be achieved. These results illustrate the potential of coordinated actions of advanced economies towards green economy.

Several variants of the sustainable development scenario were also examined. For example, the scenario of 1-year delaying policy implementation with the same iron ore reduction target will further reduce gross world product but the welfare level will be further improved. This welfare improvement would be the results of stronger policy (higher tax rate) in the policy implementing countries and of further mitigation of international resource competition which benefit emerging/developing economies. When the target resource is copper ore instead of iron ore, strong decoupling of welfare improvement from resource (copper ore) use was not observed.

The study on life cycle environmental impact assessment associated with usage of specific materials tries to reflect the diversity of characteristics of individual mines depending on the location, looking at evaluation of environmental impacts related to natural resource collection. In practical terms, work has been done using three approaches: an improved version of Total Material Requirement (TMR), CO<sub>2</sub> emissions for individual mines, and Ecological Footprint (EF).

There is an issue that these three approaches are basically a snapshot analysis. When carrying out evaluation from a life cycle assessment (LCA) perspective, there needs to be understanding of, for

example, the impact of the mine before operations and after the mine closed, but actually this is not often carried out. Noting these points, we tried to improve these approaches and to address this issue.

- For TMR, we tried to reflect the material flow of post-closure Acid Mine Drainage (AMD) by converting it to the weight of substances necessary for disposal.
- For CO<sub>2</sub> emissions, we identified what kind of detailed calculations are necessary, or hard-to-obtain data in a detailed manner, and carried out estimation with reflecting specificities of individual mines.
- For EF, we deepened the conceptual discussion on how to extend user responsibility in a geographical, spatial and timely sense. We took up the issue of rare earth minerals as an example of something that is difficult to estimate. The reason for this is that the ore dealt with by the mines and refineries in the case studies contains radioactive materials. Trying to evaluate such a huge environmental impact is problematic using TMR assessment which makes it difficult to fully reflect any qualitative elements. In this sense, there are some expectations for an index such as EF. In fact, if detailed calculations can be made as have been examined in this research, then it is understood that a meaningful result could be reached through EF analysis.

Finally, TMR, CO<sub>2</sub> emissions and EF were all actually calculated for three large scale copper mines. The suggestions based on the results are as follows:

- For EF, because carbon dioxide absorption is carried out over a huge area, an approximate amount is shown for the results of CO<sub>2</sub> emissions. However, by using a coefficient for each area, it is possible to approximately reflect the productivity for that country.
- For mine development, there are a great many cases where the size of the area of land for modification is given as a matter of concern due to the impact on the ecosystem. However, at this point in time, this is not a particularly major concern as far as using estimation approaches for EF.
- For TMR, EF and CO<sub>2</sub> emissions do not necessarily correspond. This is due to inevitable occurrences such as large scale expansion work depending on the year, or construction of a new tailing slurry dam. Whichever the case, there is very little impact on the land inhibiting productivity, with no major impact on results.

What can be said from these three points is that it is probably worth estimating TMR and CO<sub>2</sub> emissions separately. On the other hand, if EF is influenced to such an extent by the area of carbon dioxide absorption, then even if the actual state of each country is more or less reflected depending on the coefficient, an application of EF to mine development is probably not so meaningful. However, if the potential for EF is considered, it is necessary to conduct further empirical studies on the expansion of EF along with the discussion deepened by this research.

In the study on the promotion of international resource circulation, a methodology for sustainability assessment that reflects the multifaceted effect of recycling systems was developed based on examples in Japan, and this methodology was applied in newly emerging and developing countries, providing useful information so that they could build international resource circulation systems that consider the characteristics of recycling systems responding to the various stages of development for each country.

For this purpose, the study identified net emissions of greenhouse gases (GHG), recycle efficiency, and rate of resource recycling as the important indicators to measure the environmental impact related to management of waste electrical and electronic equipment (WEEE) and resource use. In addition, employment opportunities in the environment-related business community and income-based well-being were identified to measure the socio-economic benefits. Using data from a study in Fukuoka prefecture, the study quantified GHG emissions as well as resource saving (fossil fuels and metal resources) from the lifecycle management (including collection etc.) of four appliances under the home appliances recycling law, compared to production of goods from natural resources. Furthermore, employment opportunities in the appliance recycling business were estimated. The methodology for life cycle sustainability assessment of home appliances were developed using these indicators, and it was applied to case studies in Japan, India and Taiwan.

The results of the analysis show that recycling WEEE contributes not only to resource saving but also to GHG emissions reduction. In case studies in India and Taiwan, the fossil fuel used for WEEE management was found to be less than that used in Japan, and WEEE recycling was found to contribute to emissions reduction and fossil fuel saving. These case studies show that appropriate WEEE recycling can provide employment opportunities and can generate socioeconomic benefits.

By carrying out an international comparison using the results from analysis of the three countries, from studies in India in particular, it was quantifiably seen that recycling in developing countries is labour-intensive but not energy-intensive. In other words, internationally, it can be shown that there is both labour-intensive type recycling that depends on existence of a cheap labour force, and recycling that is not labour-intensive with relatively higher energy consumption. This would be a part of the reason why end-of-life appliances or extracted materials from WEEE in developed countries are legally, or sometimes illegally, transported to developing countries as second-hand goods, despite emerging environmental and health concerns.

Labour-intensive recycling with low energy consumption as seen in developing countries would have a heavier impact on human health and the environment than recycling in developed countries, but this study could not demonstrate this concern in a quantitative manner due to difficulty in data acquisition. In addition, it was not possible to analyse the gap in resource collection efficiency due to differences in resource collection technology such as labour-intensive recycling and decentralised resource collection as carried out in developing countries, and resource collection such as that carried out in Japan linking specialized dismantling and refining facilities.

If the study incorporated the environmental and health impacts due to heavy metal pollution etc., and looked at the gap in resource efficiency due to differences in resource collection technology, it would be possible to evaluate international resource circulation options. This study planned to show the difference between impacts in Japan and developing countries based on the differences in international resource circulation options but as a result, it was not possible to carry out comparative analysis of international resource circulation options due to the reasons above.

A comparative analysis of international resource circulation options would be expected to have a significant contribution to environmental policy. On the other hand, if it was carried out using only current data on recycling in developing countries, the results may well invite misunderstanding. At the



very least, if the quantitative data gained through this study can serve as evaluation from aspects of energy, GHG emissions and employment opportunities, then recycling in developing countries may be regarded as more efficient. The future challenge will be to include environmental and health impacts of heavy metal pollution in assessment methodology.

The policy implications of this research are outlined below.

- For policies on natural resource use reduction in developed countries, as can be seen in the analysis results, there is potential for negative impact on economic growth in terms of real GDP growth. Any such policies are unlikely to be implemented immediately under the current system whereby financial and social security systems are in a form designed to depend on economic growth. However, it is thought that there is a very strong need to start this kind of policy discussion, if we recognise the reality that an increase in absolute amounts of resource use and environmental impact cannot be stopped, under the influence of the growth dilemma, even though we can see an improvement in resource productivity and environmental efficiency mainly in developed countries. This research provides material to hold such discussions. In particular, it is shown that strong decoupling of welfare improvement from resource consumption (in this case, iron ore) would be feasible through Japan's unilateral green economy policy as well as through advanced economies' joint efforts to promote sustainable development model, which would be a very valuable policy implication to start the discussion.
- The policy implications of the study on life cycle environmental impact assessment associated with usage of specific materials is to promote development of methodologies to supplement information that has been lacking up to now, related to necessary environmental impact at the time of production having thought about sustainable resource use. Methodology to quantify the environmental impact from mining including CO<sub>2</sub> emissions and other indicators according to this study, provides a means to know which resource is comparatively environmentally-friendly, or for the same resource, in what sites is it environmentally-friendly, and it also links to proper assessment of efforts on comparatively eco-friendly mining industry, so that consideration is made on contributions to Japan's resource policy.
- The study on promotion of international resource circulation conducted impact assessment of WEEE management from the point of view of potential GHG emissions reduction, resource saving and generation of employment opportunities and at the same time, developed applicable assessment methodology for recycling systems other than those in Japan. Using this framework for sustainability assessment, it is possible to clarify the benefits for sustainability gained from proper management of WEEE. Conversely, it is rare for people involved in WEEE management and recycling to understand the benefits apart from the economic benefits of recycled goods. This study could give a certain contribution to the development of an analysis methodology based on comprehensive life cycle assessment (LCA) of sustainability of WEEE. Whilst there is an issue on data acquisition, the methodology developed in this study is not complicated, and it can be applied when any country, including emerging and developing countries, formulates policies on sustainable resource circulation, which would have strong policy implications.

## 1. 序論

---

### 1.1 研究の背景

持続可能な開発がブルントラント報告書（WCED 1987）によって提唱されてから、すでに四半世紀が経過した。また、持続可能な開発を国際政策のトップアジェンダとして定着させたリオ地球サミットから20年が経過した。この間、持続可能な開発を促進するために様々な努力がなされてきた。例えば、2000年の国連ミレニアムサミットで合意されたミレニアム開発目標（MDG）の達成に向けた様々な努力の結果、極端な貧困の解消、初等教育の普及などいくつかの目標で大幅な改善がなされた（United Nations 2012）。また、気候変動問題や生物多様性保全に対する国際的取組に加え、持続可能な資源利用についても国際資源パネルが2007年に設立されるなど、地球環境問題に対する取り組みにも進展がみられる。このような持続可能な開発に向けた努力に加え、冷戦の終結とも相まって経済のグローバル化が急速に進み、BRICs諸国をはじめ急速な経済発展と貧困人口の大幅な減少に成功した国もある。

このような成果がみられる一方、現在の社会経済システムがいまだに持続可能を開発とはかけ離れており、かつ状況は悪化しつつある可能性も指摘されている。国連統計によると、リオ地球サミットが開催された1992年からの20年間で世界総生産は約78%増加、一人あたり国内総生産（GDP）で見ても40%以上増加しているにも関わらず、極端な貧困はいまだに深刻な問題である。最新のミレニアム開発目標報告書（United Nations 2012）によると、貧困ライン（1日1.25ドル）以下の人口は2008年時点で14億人、安全な水にアクセスできない人口は8億人にのぼっている。

このように持たざるものの過少消費が相変わらず深刻である一方、富めるものの過剰消費も持続可能な開発を脅かしている。地球の環境容量に対する人類活動の環境負荷を評価する指標であるエコロジカル・フットプリントで見ると、2006年時点で世界全体のエコロジカル・フットプリントは地球の環境容量を40%以上超えており、先進国においては日本で地球環境容量の2.2倍、米国で地球環境容量の5倍のエコロジカル・フットプリントとなっている（WWFジャパン、グローバル・フットプリント・ネットワーク 2010）。また、Rockstrom et al. (2009) が提唱するプラネタリー・バウンダリーは、人間の活動の基盤として不可欠な生物物理学的プロセスのうち、最も重要と考えられる気候安定化や窒素循環などのいくつかのプロセスについて、地球の環境容量の限界を定量化し人類が安全に活動できる領域（safe operating space）を定義しようとするものであるが、プラネタリー・バウンダリー研究の最新の知見によると、気候変動に加え、窒素循環、リン循環および生物多様性に関するプロセスですでに限界を超えている（Wijkman and Rockstrom 2012）。

持続可能な開発は、環境持続可能性を損なうことなく貧困を撲滅する開発であると考えられるが、現在の世界の開発経路は世界総生産については成長しているものの、環境持続性を大きく損なうとともに、貧困撲滅についても課題が山積している。世界全体としての持続可能な開発を進めるためには、生存基盤を提供している生態系サービスを持続可能な範囲で利用しつつ、富めるものの過剰消費と持たざるものの過少消費の両方を解決するという難題に取り組む必要がある。

本研究は、この難題に対し持続可能な資源利用の観点から取り組むものである。特に、循環資源を含めた資源利用の国際化は、環境負荷の国際移動といった新たな問題をもたらす可能性がある一方、国際資源循環システム構築による資源効率改善などの機会をもたらす可能性があることに着目する。

前者については、資源消費に伴う環境影響・健康影響を資源採取から製造・消費、さらにリサイクル・廃棄にいたるライフサイクル全体について定量的に評価する手法・指標の開発が重要であるとの認識が、国連環境計画（UNEP）国際資源パネルや経済開発協力機構（OECD）の持続可能な物質管理イニシアチブなどの国際的政策プロセスで共有されている。現在使用されている資源利用量、あるいは資源効率性

といった物質フロー指標は、物質フロー分析の結果を直接利用できるという利点があるが、レアアースのように利用量は微量でも採掘に伴う環境影響が甚大なものなど、物質利用のライフサイクル全体の環境影響を適切に反映することができない。また、有害物質など物質重量当たりの環境影響・健康影響が極めて大きい物質の環境影響を反映することもできない。採掘から最終処分にいたるライフサイクル全体の評価手法の開発については、関与物質総量（TMR）がドイツのブッパータール研究所や我が国の物質材料研究機構により推計されているが、詳細なプロセスに影響するような政策の効果を評価することが難しいという問題を抱えている。また、TMRは環境影響を直接示すものではない。また、マクロ経済レベルでのライフサイクル環境影響評価も重要である。持続可能な資源利用政策として、中国などいくつかの国がすでに天然資源税を導入しているが、中国の天然資源税の例に見られるように、資源の囲い込み関する懸念を周辺国へと引き起こす可能性や、イギリスの骨材・砂利などに対する資源税が、イギリスにおける資源採掘量の減少とアイルランドでの資源採掘量増加という天然資源採掘の移転を生じた例に見られるように、国際的な波及効果の重要性が指摘されている（European Environment Agency 2008）。したがって、資源利用に伴うライフサイクルにわたる環境影響を、詳細な製品レベルおよびマクロ経済レベルの両方に対し定量的評価手法を開発することが極めて重要な課題となっている。

後者の資源利用の国際化がもたらす新たな機会については、我が国が進める国際循環型社会形成への取り組み、特に我が国の静脈産業のアジア太平洋地域への展開による広域資源循環システム構築に関し、国境を越えたトータルとしての環境影響の低減効果の定量的評価は、物流効率化などの経済的効果の定量的評価とともに重要な役割を果たすと考えられる。したがって、資源循環システムによってもたらされる多面的な影響を扱うことのできる持続可能性評価手法の開発が重要な課題となっている。

## 1.2 研究全体の概観

このような問題意識のもと、本研究は、マクロ経済レベルでの資源利用に伴うライフサイクル環境影響、特定物質に着目した資源利用に伴うライフサイクル環境影響、および資源循環システムの持続可能性評価の3つのテーマについて研究を進めた。

本研究では、これら3つのテーマを相互関連したものとして一体的に扱うことに留意して研究を実施した。すなわち、マクロレベルでのライフサイクル環境影響の評価手法の開発にあたっては、資源循環システムによる効果・影響の観点を組み込むとともに、国際循環型社会への具体的取組みの検討にあたっては、物流過程からの環境影響を反映したライフサイクル環境影響評価の活用を試みた。またマクロレベルの分析では扱うことが難しいレアアースを対象とした分析や、地域特性により大きく異なる鉱山からの環境影響などについて、特定物質に着目した事例研究を行うことで補完することとした。

それぞれのテーマの概要は以下の通りである。

### (1) 持続可能な資源利用政策の環境影響評価

本テーマでは、資源利用削減・資源効率改善を目的とした天然資源税と、資源循環政策としてのスクラップリサイクル補助金を持続可能な資源利用政策と位置付け、これらの政策がマクロレベルで経済に与える影響および対象資源直接利用、化石燃料由来のCO<sub>2</sub>直接排出量に与える影響について、価格効果や代替効果を反映できる応用一般均衡（CGE）モデルを用いて評価した。さらに環境影響を製品のライフサイクルを通じて評価するための指標として、資源フットプリント（消費に伴うライフサイクルでの資源利用量）およびカーボンフットプリントを採用した。これらの指標を推計する目的でCGEのシミュレーション結果を用いて多地域産業連関表（MRIO）を更新し、フットプリント推計を行う手法を開発した。しかし、政策影響評価の逐次動学化を進める上で、タイムステップ毎に排出係数・資源投入係数をCGE分析の結果を用いて更新する手法を採用した結果、フットプリント推計を迅速に行うためにはMRIOを更新する方法では作業量が膨大になることが判明した。そこで、タイムステップ毎のCGEシミュレーション結果から作成される産業連関表（IO）を用いた効率的なフットプリント推計手法を開発した。

対象資源としては、本研究の先行研究において日本を含む4カ国を対象に、鉄と銅に関連する部門について部門細分化を行ったCGEモデルを用いた分析を行っており、そこで得られた知見の蓄積を活用できること、および特に新興国・開発途上国におけるインフラ整備など経済発展の基盤整備のために需要の大幅な増加が見込まれる資源であることなどを勘案し、鉄鉱石を主な対象資源とした。さらに、政策含意の比較目的および特定物質に着目した事例研究で銅鉱山を扱うことから、銅鉱石を対象とした分析も行い、対象資源の違いによる含意を得た。

### (2) 特定物質に伴うライフサイクル環境影響評価

本テーマでは、環境影響評価に必要なデータの入手可能性および国際資源循環との関連を考慮し、調査対象とする物質を銅およびレアアースとした。当該物質の採掘段階から国内でのリサイクルまでを視野に入れて、物質の採掘、製錬・加工等の各段階における物質フローに関する情報を収集すると共に、TMRのようなマテリアルフロー関連の指標について調査を行った。また、特に環境影響が大きいと見込まれる採掘段階における環境影響を評価するために、温室効果ガス排出量、および生態系サービスへの影響を評価する手法について、欧州委員会が開発中の環境負荷反映物質消費量（EMC）指標やエコロジカル・フットプリント（EF）を用いた手法、あるいは欧州環境庁による生態系サービスへの影響評価手

法などについて情報を収集した。その上で、水汚染、森林破壊、土地利用改変など主な影響要因について現地調査を行い情報を収集した。

収集した情報から、当該物質の土地改変量を含めた鉱石・ズリの採掘量、選鉱時に発生する尾鉱量ならびに金属生産の各プロセスにおける温室効果ガス排出量を推定するとともに、資料収集からデータが得られない鉱山については生産・開発時におけるコスト推定データベースを用いた環境負荷物質量の推定を行った。さらに、金属の利用、廃棄段階における環境負荷物質の推定も合わせて行うことで、ライフサイクルの各段階におけるインベントリの集計を行った。また、採掘段階での生態系への影響に関し、現地調査を行いデータを収集した。これらの推定値と物質フロー分析を組み合わせ、当該物質の利用によるライフサイクル全体での環境影響評価手法を開発した。

これらの手法を3つの銅鉱山に適応し手法の検証を行うとともに、今後の改善の方向性について検討した。

### (3) 国際資源循環の推進に関する研究

本テーマでは、我が国のリサイクルシステム全体の循環資源の流通・利用状況を評価する上で、環境・経済・社会的影響が大きく、比較的データの揃っていることから、廃家電・電子製品のリサイクルを対象として研究を行った。分析に必要な基本データとしては、環境統計、貿易統計、および中央環境審議会・産業構造審議会のリサイクル法関連部会の最近の資料など、既存の公式資料を活用するとともに、流通・利用状況については、静脈物流（その種類やシステムの違いごとのコスト）・処理（手法ごとのコスト）に関わる経済コストおよび環境影響、さらには社会影響として雇用を想定し、対象リサイクルシステムごとの特性を類型化した。その上で、これらのリサイクルシステムについて、環境・経済・社会的影響の評価手法の検討を行った。また、分析の対象とする有用素材の絞り込みを行った。

この環境・経済・社会的影響の評価手法を用いて、日本のリサイクルシステムの持続可能性評価を実施した。さらに、先進国（日本）とデータの整備状況が似ていると考えられる新興国（台湾）について、対象国研究機関と連携して、同様の手法の開発を行った。また、発展途上国をモデルに導入する上で必要な関連情報をインドにおける現地調査を通じて収集し、リサイクルインフラの設置コストも検討した上で先進国、新興国、発展途上国を中心にした循環資源の経済・貿易モデルの開発を試みた。これらの検討を踏まえ、資源循環の流通の特性、リサイクルや処理に活用されている主要技術に応じて、どのような資源循環（近接循環、広域循環、国際循環の組み合わせ方）が、リサイクルの経済性を確保するための規模の経済性、雇用および環境保全という観点から優れているか評価することを試みた。

## 1 章 参考文献

- European Environment Agency (2008). Effectiveness of environmental taxes and charges for managing sand, gravel and rock extraction in selected EU countries. EEA Report 2/2008. Copenhagen: EEA.
- Raworth K. (2012). A safe and just space for humanity: Can we live within the doughnut? Oxfam Discussion Papers.
- Rockstrom J., Steffen W., Noone K., Persson A., Chapin F.S. and Lambin E.F. (2009). A safe operating space for humanity.' Nature, 461, 472–5.
- United Nations (2012). The Millennium Development Goals Report 2012. United Nations, New York.
- WCED (1987). Our Common Future. Cambridge University Press: London. 邦訳『地球の未来を守るために』。
- Wijkman A. and Rockstrom J. (2012). Bankrupting Nature: Denying Our Planetary Boundaries. Report to the Club of Rome. Routledge: London.
- WWFジャパン, グローバル・フットプリント・ネットワーク (和田喜彦監修) (2010) 『エコロジカル・フットプリント・レポート日本2009 : 限りある資源で幸せに暮らすために』 WWF International. Gland: Switzerland.

## 2. 持続可能な資源利用政策の環境影響評価

---

### 2.1 はじめに

本章では、先進国による持続可能な資源利用政策に2つの役割を期待している。一つは全世界の規範となりうるグリーン経済モデルへの転換であり、もう一つは国際的な資源競合の緩和を通じた新興国・発展途上国の経済発展に対する側面支援である。

前者でいうグリーン経済モデルとは、世界各国が模倣しても地球環境容量を超えることなく、かつ幸福な社会を実現できる社会・経済モデルを意味している（小嶋、蒲谷、矢野 2011）。第1章で述べたように、エコロジカル・フットプリント推計（WWF and GFN 2012）あるいはプラネタリー・バウンダリー推計（Rockstrom et al. 2009）によると、現在の先進国あるいは途上国富裕層の消費パターンは、地球環境容量を超える持続不可能なものであると考えられる。

このような現状を克服する方向性として、国連環境計画（UNEP）国際資源パネルや経済開発協力機構（OECD）では、経済成長と資源消費のデカップリングについて活発な議論を行っている（OECD 2002、UNEP 2011）。すなわち、低炭素技術、エネルギー効率改善といった技術革新により資源生産性あるいは環境効率を劇的に改善することによって、環境負荷あるいは資源消費の削減と経済成長の両立を図ることができるとする議論である。たしかに先進国、新興国、途上国を問わず、世界の多くの国が高い経済成長率の実現を最優先政策目標と位置付けている現状において、このアプローチは政治的な意味で現実的と言えるだろう。また、理論的にも、技術革新による資源生産性・環境効率の成長率が経済成長率を上回ることができない、すなわちそのように急速な技術革新は起こらないとする根拠もないように思われる。しかしOECDあるいは国際資源パネルでは、大きな流れでとらえた場合、これまで強いデカップリングは起こっていないと結論づけている。なぜ強いデカップリングが起こらないのかについて、ティム・ジャクソンが提唱する「成長のジレンマ」は説得力のある仮説を提供している（Jackson 2011）。

成長のジレンマとは、先進国が経験してきたような経済成長は地球環境容量から考えて持続可能ではないが、一方で人為的な環境影響を地球環境容量内に収めるために必要となるであろう「脱成長」は社会システム、経済システムを不安定にしてしまう、というジレンマである。このジレンマのもとでは、すでに「持てる」人々や豊かな先進国においては消費の増加やそれに必要な生産の増加のために経済成長が必要なのではなく、金融システムや社会保障制度の破綻を防ぐために、すなわちシステムの安定性のために経済成長が必要となる。このような安定性を担保するためには、経済成長率が高ければ高いほど安全マージンが確保できることとなり、社会的により望ましいとされるのである（小嶋、栗生木 2013）。

このような状況下では、資源生産性や環境効率の向上による果実は何よりも経済成長をさらに加速するために利用されることとなり、弱いデカップリング（資源生産性・環境効率改善）へのインセンティブは働いても、それは決して資源消費量あるいは環境負荷の絶対量の削減（すなわち強いデカップリング）にはつながらないのである（小嶋、栗生木 2013）。

このように考えると、グリーン経済モデルへの転換を図る上で、経済システム・社会システムの経済成長依存性を解消した上で、政策目標を経済成長ではなく、より直接的に人々の幸福、すなわち厚生水準の向上（あるいは十分な水準の維持）に焦点をあてる必要があると考えられる。そこでは、持続可能な資源利用政策が実現すべき政策目標は、厚生水準と資源消費量・環境負荷の強いデカップリングとなる。

もう一つの役割は、新興国や発展途上国でのインフラ整備や経済成長に伴う資源需要の急増に対して、先進国が資源消費を抑制することにより資源競合を緩和することで、新興国・発展途上国が利用可能な資源の確保に貢献し、経済発展を側面支援することである。UNEP（2010）は社会における金属蓄積量の

推計値を報告しているが、それによると表2.1に示すとおり先進国と開発途上国の値に大きな開きが見られる。

表2.1 社会の金属蓄積量（一人あたり蓄積量）

金属種類（蓄積量単位）	1人あたり蓄積量 （先進国）	1人あたり蓄積量 （開発途上国）
アルミニウム（kg）	350-500	35
銅（kg）	140-300	30-40
鉄（kg）	7000-14000	2000
鉛（kg）	20-150	1-4
ステンレス鋼（kg）	80-180	15
亜鉛（kg）	80-200	20-40

出典：UNEP（2010）より筆者加工。

鉄の社会蓄積量を例にとると、先進国では一人あたり7トン～14トンの範囲であるのに対し、開発途上国では一人あたり2トン程度にとどまっている。鉄の社会蓄積量は交通インフラを始め様々なインフラ整備の状況を反映しており、新興国・開発途上国が経済発展を遂げる上で先進国の水準に向けて急速に蓄積量が増えていくこととなる（Huang et al. 2013）。先進国が持続可能な資源利用政策を通じて資源利用を抑制するとともに幸福度の高いグリーン経済を確立することは、新興国・開発途上国のキャッチアップすべき先進国の資源利用水準（例えば金属蓄積量）を下げることによりキャッチアップしやすくするとともに、限られた資源をより多く新興国・途上国の利用に回すこととなる。

本章では以上の2つの役割を持つ先進国における持続可能な資源利用政策の政策手段として、天然資源税とリサイクル補助金を想定する。これらの政策手段を適宜組み合わせ、また政策導入国も日本一国の場合、他の先進国と協調する場合など、複数の政策シナリオを策定し、想定した効果が得られるかどうか、経済面、厚生面、環境面での定量的影響評価を通じて検討する。

天然資源税については、中国などいくつかの国がすでに導入しているが、中国のレアアース輸出に対する天然資源税の例に見られるように、資源の囲い込みに関する懸念を周辺国で引き起こす可能性や、イギリスの資源税がイギリスにおける天然資源採掘量の減少とアイルランドでの天然資源の採掘量増加という天然資源採掘の移転を生じた例に見られるように、国際的な波及効果の重要性が指摘されている（European Environment Agency 2008、Dodson et al. 2012）。このため、世界モデルなどの多地域経済モデルを用いたマクロ経済レベルでのライフサイクル環境影響評価を行うが重要と考えられる。本研究の先行研究の成果などを踏まえ、天然資源税などの価格効果の影響分析に適した経済モデルである応用一般均衡（CGE）モデルにより政策影響評価を行う。さらにライフサイクル環境影響指標の一つであるカーボンフットプリント、あるいは資源フットプリントの推計には産業連関表を用いた。

対象資源としては鉄鉱石を中心に分析をすすめるが、対象資源の違いによる政策含意を得るために比較対象として銅鉱石も扱う。



## 2.2 政策影響評価ツールの開発

本研究では、持続可能な資源政策として、資源効率改善・資源利用抑制を目的とした天然資源税、あるいは資源循環政策としてのスクラップリサイクル補助金を想定し、これらの政策による経済影響およびライフサイクル環境影響を評価する手法を開発した。政策による経済影響、厚生水準への影響および資源直接利用量、化石燃料由来のCO<sub>2</sub>直接排出量への影響については、価格効果や代替効果を反映できる応用一般均衡（CGE）モデルを用いて評価を行い、消費に伴うライフサイクルの環境影響である資源フットプリントおよびカーボンフットプリントへの影響については産業連関表を用いて評価した。後者については、貿易に体化した資源利用・CO<sub>2</sub>排出量のより詳細な分析に適している多地域産業連関表（MRIO）を活用し、CGEモデルのシミュレーション結果を用いてMRIOを更新し、ライフサイクル環境影響評価を行う手法を開発した。一方、この連携手法は静学分析には適しているものの、動学分析を行う際にはタイムステップ毎の更新を行ううえで望ましい自動プログラム化が困難であることが判明した。CGEモデルの結果を用いたフットプリント推計の逐次動学化を行う上での利点を考慮し、最終的な政策影響評価についてはCGEモデルの結果を用いて投入係数・排出係数と産業連関表投入係数行列を作成し、それらを用いて国内需要、輸出、輸入のそれぞれに体化した資源量・排出量を推計する評価手法を採用した。

以下、手法の詳細を説明する。

### 2.2.1 多地域 CGE モデル

#### (1) モデル概要

本研究で開発した多地域CGEモデルの概要を以下に説明する。

市場構造については完全競争を仮定している。生産関数は、中間財投入と付加価値を要素とするレオンチェフ型生産関数で表現される。中間財の財別需要もレオンチェフ型で決定されるが、鉄鋼の中間財投入については、電炉鋼と転炉鋼の間の代替関係をCES型関数によって表わす。なお、高級鋼の使用比率が高い自動車部門、輸送機器部門などについては代替弾力性を低めに設定し、建設部門など電炉鋼の使用が容易である部門については代替弾力性を高めに設定した。付加価値の生産関数は、資本ストック、熟練労働、非熟練労働、天然資源、土地を生産要素とするCES型関数である。そして、このCES型関数を制約条件として費用最小化問題を解くことで、生産要素需要を決定する。各生産要素の地域間移動はないものと仮定した。

生産関数に関し、鉄スクラップリサイクル部門から転炉鋼、電炉鋼部門への中間投入につき、電炉鋼部門への銑鉄投入は調整剤としての役割が強いこと、また転炉鋼生産への鉄スクラップ投入量が無視できないことから、転炉鋼部門においてのみ銑鉄中間投入との代替を仮定した。また、付加価値財とエネルギー財（原油、石炭、天然ガス、石油石炭製品、電力、ガス供給の6部門の製品）の間にCES型関数によってあらわされる不完全代替を仮定した。図2.1に生産関数の構造を示す。

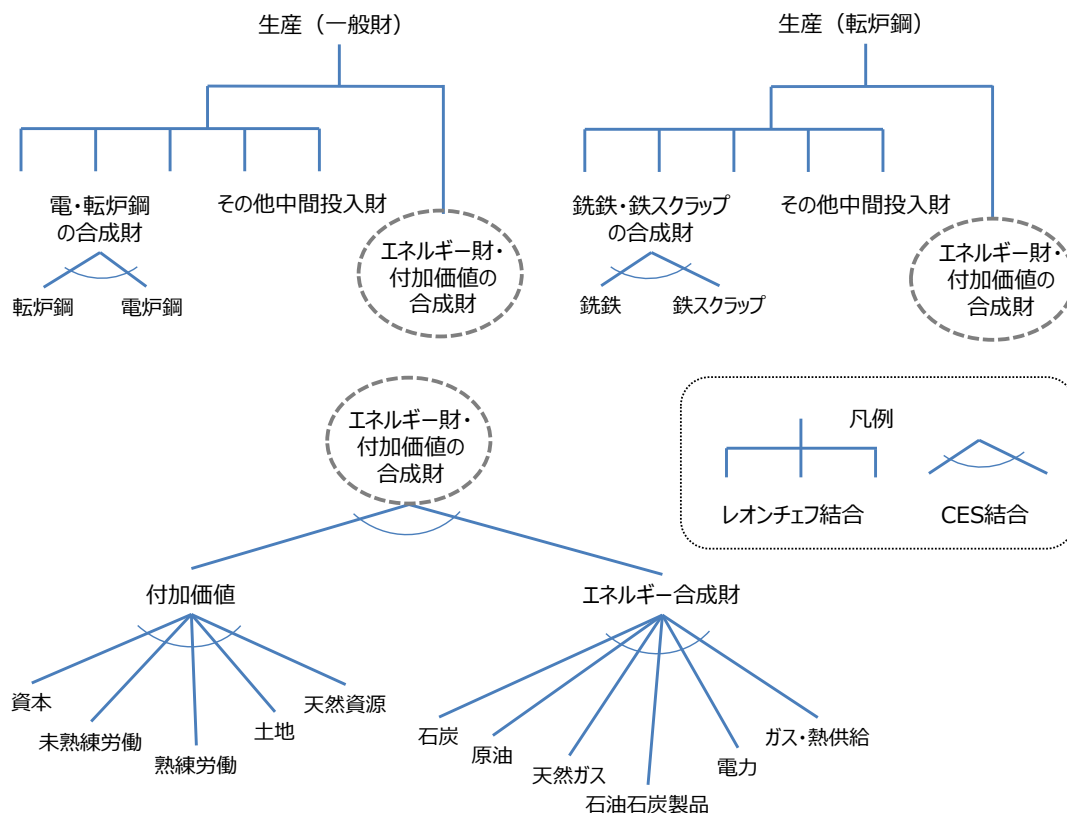


図2.1 生産関数の構造

家計は、企業に生産要素を貸し出し、その対価を受け取ることで所得を得る。そして、その所得により家計消費がなされる。家計の効用関数はコブ＝ダグラス型で、その効用関数を制約条件とする費用最小化問題を解くことで、財別の消費を決定する。貯蓄については、GTAPモデルの方法に準拠し、消費に加えて貯蓄も構成要素の一つとなっているコブ＝ダグラス型効用関数を用いている。これは、所得に対する貯蓄率一定の仮定を置くことに等しい。

政府消費については効用への影響をモデル化していないため、財別消費量を固定した。生産や貿易などにおいて課せられた租税を収入とし、レオンチェフ型関数でもって財別の政府支出を決定する。

全ての財ならびに生産要素の価格は、それぞれの市場において需要と供給が均衡するように決定される。マクロクロージャーについては、政府収支均衡を達成するように政府収支余剰（または不足）を政府から家計へ一括移転した。また、国際収支が基準年水準で一定となるように為替レートが内生的に決定される。

二国間貿易についてはGTAPモデルの方法に準拠し、輸入と輸出が表裏一体である性質を利用し、輸入側について国内市場に供給された財・サービスは同じ区分の輸入財・サービスとCES型関数で記述される不完全代替であるとするArmingtonの仮定を採用し、さらに異なる輸入元からの輸入財・サービスもCES型関数で記述される不完全代替であるとする2段階CESアプローチを仮定した。輸出側については、二国間の輸出フローは対応する輸入フローで決定されると仮定した。貿易財の価格についても均衡価格が存在しないため、輸出国の国内価格に輸送費、関税などを反映して輸入価格が決まると仮定した。国際運輸マージンについては、需要側は輸入需要の一定比率として決定され、供給側については国・地域別のシェアを一定として各国・各地域の運輸部門が供給すると仮定した。

標準的なCGEモデル（例えば単一国モデルとしてはLofgren et al. 2002、多地域モデルとしてはMcDonald et al. 2007）が利潤最大化による企業行動や効用最大化に基づく家計行動をベースにするのに対し、本研究で開発したモデルでは企業も家計も費用最小化問題を解く形で定式化した。

ニューメーブルは米国（USA）の為替レートとした。

## (2) モデルの逐次動学化

フランスのCEPIIがGTAPモデル用に公表している人口、労働力（熟練労働、非熟練労働）および国内総生産（GDP）に関する将来予測値（Fouré et al. 2012）を用いて、CGEモデルの逐次動学化を行った。なお資本蓄積については、家計所得に対する貯蓄率が基準年水準で一定であると仮定することで内生的に求まるため、CEPIIによる将来予測値は使用しなかった。また、マクロレベルでの生産技術水準を反映する総要素生産性（TFP）についてはCEPIIによる予測値を使用することも可能であるが、本研究ではTFPを内生変数とし、外生変数として与えたGDP将来予測を再現できる各タイムステップのTFPを決定するキャリブレーションを行った。政策シミュレーションにおいては、このTFP将来予測を外生変数として与え、GDPを内生変数として扱う。シミュレーション対象期間は、基準年（2004年）から2020年までとした。

## (3) 部門別資本蓄積の導入

標準的なCGEモデルでは単一の資本財を仮定し、各期の貯蓄がすべて資本財への投資に使用されると仮定し、資本の減価償却分を差し引いた上で次期の資本ストックが決定される。各部門への資本財の配分は、各部門の資本収益率が等しくなる最適条件に基づく。CGEモデルにおける資本は主に固定資本を想定しており、現実には工場や大型機械など一度設置されると他部門への転用が難しいものが多いと考えられることから、資本ストック全体が部門間で最適配分されるという仮定にはリアリティの点で問題がある。そこで本研究では以下の仮定に基づき部門別資本蓄積メカニズムを導入した。

まず期初における各部門の資本ストックは所与であり、各部門別の資本収益率はゼロ利潤条件と当該部門の投資財（新規資本財）の受給バランス条件によって決まる。投資財（新規資本財）は貯蓄総額を投じて生産されるが、部門毎の投資財がCET（Constant Elasticity of Transformation）関数で記述される不完全代替であるという仮定に基づき、生産された投資財は各部門の資本収益率に基づいて各部門に配分されると仮定した。すなわち部門の資本収益率が当該地域の平均資本収益率を上回る場合はそれだけ多くの投資財が配分されると仮定した。これにより期末の各部門の資本ストックが決定され、次期において期初の各部門資本ストックを所与として同じプロセスが繰り返される。

## (4) 限界採掘費用上昇による資源制約の検討

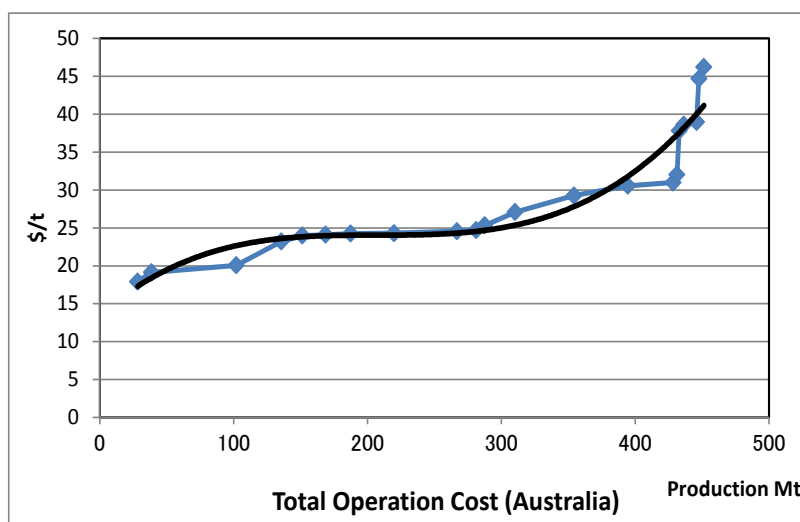
本研究の先行研究において、発展途上国と新興国の急速な工業化に伴う鉱物資源の需要急増に起因する資源価格高騰の経済影響について検討する試みとして、鉄鉱石鉱山及び銅鉱山の費用構造ならびに限界採掘費用曲線を反映した世界CGEモデルを開発した（村上、安達、矢野 2012）。これは、世界の個々の鉱山の生産量、操業費およびその内訳を、世界の68の鉄鉱石鉱山、147の銅鉱山についてまとめたWorld Mine Cost Data Exchange Inc. (<http://www.minecost.com>) 社によるMine Costデータベースを用いて、費用の低い鉱山から順に生産量の累積をプロットすることで総費用曲線を求め、そこから限界費用曲線を推計し世界CGEモデルに導入することで資源制約を反映したものである。ただし、Mine Costデータベースの費用データは、各鉱山の実績ではなくWorld Mine Cost Data Exchange社独自の費用推定式から推定したものであること、また費用は採掘から選鉱、運搬、製錬までを合計した操業費のみであり、設備投資等の

資本費は含まれていないことから、実績データおよび資本費データの拡充による精緻化が望まれるものである。

このようなデータの信頼性および精度の問題から、本研究の基本CGEモデルには限界採掘費用曲線は反映していないが、資源価格高騰という形での資源制約の政策含意を得る試みとして、一部の政策シナリオについて鉄鉱石鉱山の限界採掘費用曲線を反映したCGEモデル（資源制約CGEモデル）と基本CGEモデルの2つのモデルの評価結果について比較した。

限界採掘費用曲線の推計について簡単に説明する（詳細については村上、安達、矢野 2012参照）。

鉄鉱石生産について主要生産地であるオーストラリア、ブラジル、北米と、その他地域の4地域に分割し、各地域の総費用曲線をプロットする。例としてオーストラリアの鉄鉱石鉱山総費用曲線を図2.2に示す。



出典：村上、安達、矢野（2012）

図2.2 オーストラリア鉄鉱石鉱山操業費曲線（3次関数近似）

各地域の総費用曲線は、最もフィッティングが良く、総費用がS字カーブを描くとする経済理論とも合致する3次関数を用いて最小二乗法で推定を行っており、その結果限界費用曲線は2次関数となる。これらの限界費用曲線を、基準年における1トン当たりの鉄鉱石採掘費用および鉄鉱石生産量（重量）で基準化することで、以下の数式が得られる。

$$c = \alpha x^2 + \beta x + \gamma$$

$c$ : 基準年からの限界採掘費用変化（基準年=1とする）

$x$ : 基準年からの鉄鉱石生産量変化（基準年=1とする）

本研究で使用した係数を表2.2に示す。

表2.2 鉄鉱石鉱山限界採掘費用曲線係数

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
日本	2.612	-2.021	0.409
中国	2.612	-2.021	0.409
オーストラリア	64.984	-115.039	51.056
韓国	2.612	-2.021	0.409
インドネシア	2.612	-2.021	0.409
マレーシア	2.612	-2.021	0.409
インド	25.738	-40.294	15.556
米国	5.604	-7.422	2.818
ブラジル	5.730	-7.248	2.518
EU	2.612	-2.021	0.409
チリ	2.612	-2.021	0.409
その他原油・ガス主要輸出国	2.612	-2.021	0.409
その他地域	2.612	-2.021	0.409

出典：村上、安達、矢野（2012）をもとに筆者推計

資源制約CGEモデルにおいては、採掘費用の増加を生産量あたり投入量（資本投入、中間投入）の増加と見なした。すなわち限界採掘費用（基準年＝1）の逆数を、対応する鉱山部門の全要素生産性（基準年＝1）と見なした。この方法で採掘費用増加に伴う鉱山生産性の低下として資源供給制約を反映している。

### 2.2.2 社会会計行列（SAM）

本研究で用いるCGEモデルの基礎データベースである社会会計行列（SAM）として、米国パーデュー大学世界貿易分析センターが作成している2004年基準のGlobal Trade Analysis Project（GTAP）データベース第7版を以下のように13地域、52産業分類に統合したものを用了。

地域分類については、主要鉄鉱石輸出国としてオーストラリアとブラジルの2か国、主要銅鉱石輸出国としてチリ、主要製鉄・鉄鋼生産国として日本、中国、韓国、インド、EU、米国の6か国・地域、また主要な原油・天然ガス輸出国としてアジアにおける主要輸出国としてインドネシアとマレーシアをそれぞれ1地域とし、それ以外の原油・天然ガス輸出国主要輸出国を1地域（EOG）として、その他地域（ROW）と併せて表2.3に示す計13地域とした（GTAP地域分類との対応については別表1参照）。

表2.3 地域分類

No.	国・地域	No.	国・地域
1	日本 (JPN)	8	米国 (USA)
2	中国 (CHN)	9	ブラジル (BRA)
3	オーストラリア (AUS)	10	欧州 (EUC)
4	韓国 (KOR)	11	チリ (CHL)
5	インドネシア (IDN)	12	その他原油・ガス主要輸出国 (EOG)
6	マレーシア (MYS)	13	その他地域 (ROW)
7	インド (IND)		

産業分類は、鉱業部門を鉄鉱石 (iro)、銅鉱石 (cop)、その他鉱業 (omn) の3つの部門に、製鉄・製鋼部門を鉄鉱石を主原料とする銑鉄 (pio)、銑鉄を主原料とする転炉生産による鉄鋼 (csb)、鉄スクラップを使用する電炉生産による鉄鋼 (cse) の3つに分割した。また非鉄金属部門を銅 (com) およびその他非鉄金属 (nfm) に分割した。資源循環政策の観点からスクラップリサイクルへの補助金についても政策オプションに加える目的で、その他製造業 (omf) から鉄スクラップリサイクル部門 (ssr)、銅スクラップリサイクル部門 (csr) とその他スクラップリサイクル部門 (osr) の4部門に分離した。

農業関連部門については適宜集約するとともに、運輸サービスを集約し、表2.4に示す計52産業分類とした (GTAP産業分類との対応については別表2参照)。

表2.4 産業分類

No.	産業	No.	産業
1	農業 (agx)	27	転炉鋼 (csb)
2	林業 (frs)	28	電炉鋼 (cse)
3	漁業 (fsh)	29	銅 (com)
4	石炭 (coa)	30	その他非鉄金属 (nfm)
5	原油 (oil)	31	金属製品 (fmp)
6	天然ガス (gas)	32	自動車・部品 (mvh)
7	鉄鉱石 (iro)	33	その他輸送機械 (otn)
8	銅鉱石 (cop)	34	電子機器 (ele)
9	その他鉱業 (omn)	35	その他機械・装置 (ome)
10	と畜 (cmt)	36	その他の製造工業製品 (omf)
11	畜産食料品 (omt)	37	鉄スクラップリサイクル (ssr)
12	油脂 (vol)	38	銅スクラップリサイクル (csr)
13	酪農品 (mil)	39	その他リサイクル (osr)
14	加工米 (pcr)	40	電力 (ely)
15	砂糖 (sgr)	41	ガス・熱供給 (gdt)
16	その他の食料品 (ofd)	42	水道 (wtr)
17	飲料・たばこ (b_t)	43	建設業 (cns)
18	繊維工業製品 (tex)	44	商業 (trd)
19	衣服・その他繊維製品 (wap)	45	輸送 (tpx)
20	なめし革・毛皮・同製品 (lea)	46	通信業 (cmn)
21	製材・木製品 (lum)	47	金融業 (ofi)
22	パルプ・紙・板紙・加工紙 (ppp)	48	保険業 (isr)
23	石油製品・石炭製品 (p_c)	49	その他事業所サービス業 (obs)
24	化学・ゴム・プラスチック (crp)	50	娯楽・その他サービス (ros)
25	その他鉱物製品 (nmm)	51	公務・防衛・保健・教育 (osg)
26	銑鉄 (pio)	52	その他サービス (dwe)

鉄鉱石、銑鉄といった新設産業部門の分割は以下のように行った。

GTAPデータベースの既存部門を分割するために必要な情報は、以下の金額に対する配分比率である。

- 生産
- 中間財投入 (国産財、輸入財)
- 付加価値財投入
- 最終消費 (国産財、輸入財)

このうち、輸入財の配分比率については、二国間貿易マトリックスの配分比率につきアジア経済研究所のWorld Trade Atlasデータベースに基づき推計したが、このデータベースではリサイクリング部門は1部門となっているため、リサイクリング部門の分割（鉄スクラップリサイクル、銅スクラップリサイクル、その他リサイクル）については国連Comtradeデータベースの比率を用いた。ただし、鉄鋼についてはどちらのデータベースも転炉鋼と電炉鋼の分類に対応していないため、この分類についてはWorld Steel Statistical Yearbook（World Steel Association 2011）の物量ベースデータに国連Comtradeデータベースから推計した輸出価格を掛け合わせて金銭ベースに換算した上で比率を推計した。

輸入財以外の配分比率の推定は、日本の2005年版産業連関表（JIO）および2005年版廃棄物産業連関表（JWIO）、米国2002年産業連関表（USIO）、およびシドニー大学レンツェン教授らにより開発された世界187か国をカバーするEORA多地域産業連関モデル（EORA）に基づいて行った。対応する適当なデータが存在しない場合には、技術水準（開発水準）および鉄鋼製造技術（転炉鋼中心、あるいは電炉鋼中心）を考慮して、日本、米国あるいはブラジルのうち、当該国と似た特性を持つものを選び、同じ比率であると仮定した。すなわち、転炉鋼中心の先進国として日本、オーストラリアおよび欧州が、転炉鋼中心の後発国としてブラジル、中国、その他世界が類似しており、電炉鋼中心の先進国として米国、韓国、その他石油・ガス主要輸出国、電炉鋼中心の後発国としてインド、インドネシアおよびマレーシアが類似していると見なした（表2.5参照）。

表2.5 鉄鋼生産技術に関するグルーピング

	転炉鋼中心	電炉鋼中心
先進国	日本、オーストラリア、欧州	米国、韓国、その他石油・ガス主要輸出国
後発国	ブラジル、中国、その他地域	インド、インドネシアおよびマレーシア

日本については、リサイクリング部門の分割（鉄スクラップリサイクルとその他リサイクル）以外の部門新設に必要な比率はJIOに基づき、リサイクリング部門の分割（鉄スクラップリサイクルとその他リサイクル）についてはJWIOの数値を使用した。JIOにおいては製鉄・鉄鋼部門は圧延鋼材、鋼管などの鉄鋼製品あるいは鋳鉄管などの鋳鍛造品についても部門として分割されているため、これらについてはそれぞれの部門に対する銑鉄、転炉鋼、電炉鋼の投入比率を求め、その比率を用いて銑鉄、転炉鋼、電炉鋼に分配した。EORAもブラジルについては銑鉄、転炉鋼、電炉鋼を含め製鉄・鉄鋼部門が細分化されているため、同様の推計を行った。

米国については基本的にUSIOの数値を使用した。USIOでは鉄鋼部門が一部に統合されているため、鉄鋼部門の分割（転炉鋼と電炉鋼）についてはJIOの比率を使用した。同様に、中国、オーストラリア、インド、インドネシアおよびマレーシアについては基本的にEORAの各国の数値を使用した。製鉄・鉄鋼部門を銑鉄、転炉鋼、電炉鋼の3部門に分割するうえで、中国についてはブラジルの比率を、それ以外については日本の比率を用いた。

それ以外の国・地域については、表2.3の分類に基づき、韓国とその他石油・ガス主要輸出国については、米国の比率を、欧州については日本の比率を、またその他世界についてはブラジルの比率を使用して部門分割を行った。

それ以外の国・地域については、表2.3の分類に基づき、韓国とその他石油・ガス主要輸出国については米国の比率を、欧州については日本の比率を、またその他世界についてはブラジルの比率を使用して部門分割を行った。

なお輸入財以外の部門分割に用いたデータ一覧については、別表2.3にまとめた。



### 2.2.3 フットプリント推計手法

MRIOを含む標準的な産業連関表ではすべての取引は金額で評価されており、産業連関表を用いて資源フットプリント・カーボンフットプリント推計を行う場合、資源投入係数・環境負荷（本研究ではCO<sub>2</sub>）排出係数を単位生産額あたりの投入量・排出量で表現する必要がある。産業連関表では価格変化の影響を考慮しないとともに、中間財投入間の代替も反映していないため、一般にはこれらの係数は変化しないものとして推計に使用する。

一方、CGEモデルによるシミュレーションでは、生産額の変化は価格変化寄与分と生産量変化寄与分を掛け合わせたものとして得られる。さらにCGEモデルでは中間財投入間の代替を反映することも可能である。このためCGEモデルによるシミュレーション結果を活用して産業連関表を用いたフットプリント推計を行う場合、単位生産額あたりの投入係数・排出係数が変化しないという仮定には問題がある。特に、価格変動や代替の影響が政策ショックだけではなく時間の経過とともに発生する逐次動学モデルを用いる場合には、係数の更新を考慮する必要がある。

そこで本研究では以下のような手法で投入係数・排出係数の更新をタイムステップ毎に行う。

#### 鉄鉱石・銅鉱石に関する投入係数

- 基準年における各国・地域の鉱石生産量および鉱石輸出量、輸入量を各種統計（生産量についてはUSGS Minerals Yearbook、貿易量については国連Comtradeデータベースを使用）から重量ベースで推計し、国内での鉱石利用量を「国内生産+輸入-輸出」として推計する。以降、鉱石国内生産量、輸出量、輸入量のそれぞれをCGEモデルによるシミュレーション結果を用いて更新し、各年の国内鉱石利用量（重量ベース）を推計する。
- 各年の部門別鉱石利用シェアをCGEモデルのシミュレーション結果（当該鉱石の部門別中間投入量）を用いて推計する。これらのシェアを各年の国内鉱石利用量にかけて各年の部門別鉱石利用量（重量ベース）を推計する。
- 各年の部門別鉱石利用量（重量ベース）をCGEモデルのシミュレーション結果から得られる当該年の部門別生産量（金額）で割って、当該年の部門別直接投入係数を推計する。

なお、鉄鉱石は生産量データ、国連Comtradeデータベースによる貿易データともにグロス重量ベースと見なせるが、銅鉱石については生産量データは銅含有量ベース、貿易データについてはグロス重量ベースと含有量ベースが混在している可能性がある。そこで、Copper Bulletin 2007に基づく世界全体の銅鉱石生産量、輸出量、輸入量の比率を再現できるよう各国一律の補正係数を用いて補正した。

#### 化石燃料由来CO<sub>2</sub>直接排出係数

- 基準年における各国・地域の部門別CO<sub>2</sub>排出量（化石燃料由来、重量ベース）をGTAPデータベースに含まれるエネルギーデータおよびLee (2008)の手法を用いて推計する。
- 各年の部門別排出量（重量ベース）を、CGEモデルのシミュレーション結果から得られる当該年の部門別生産量（金額）で割って、当該年の部門別直接排出係数を推計する。

一方、産業連関表投入係数行列（A行列）についても、CGEモデルのシミュレーション結果（部門別中間投入財別の投入額と当該部門生産額）から各年で更新する。

このように、資源投入係数・直接排出係数およびA行列のすべてを各年のCGEシミュレーション結果で更新することにより、価格変化および中間財代替を反映した逐次動学フットプリント推計を行った。

## 2.3 持続可能な資源利用政策シナリオの策定

本章冒頭に述べたように、持続可能な資源利用政策に期待する2つの役割、すなわち先進国におけるグリーン経済モデルへの転換、および資源利用削減の効果としての国際資源競合の緩和、さらにその効果としての新興国・途上国の経済発展側面支援という2つの側面を中心として、複数の政策シナリオを策定した。また、対策導入時期が遅れることの影響、対象資源を銅鉱石にした場合の含意、および資源需要増に伴う資源制約の影響について検討するシナリオを含め、表2.6に示す8シナリオについて評価を行った。

表2.6 各シナリオ概要

	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3	シナリオ4
政策含意	日本一国グリーン経済	日本一国グリーン経済	日本一国グリーン経済	日本-オーストラリア協調グリーン経済
天然資源税	日本：鉄鉱石中間投入に課税（推計結果：127%）	日本：鉄鉄中間投入に課税（推計結果：20.5%）	日本：鉄鉱石中間投入に課税（推計結果：30%）	"日本、豪州：鉄鉱石中間投入に課税（推計結果：54%）
スクラップ補助金	なし	なし	日本：鉄スクラップ補助金（設定：20%）	なし
政策目標（評価期間累積鉄石使用量対象）	日本：鉄鉱石使用量5%削減（BAU比）	日本：鉄鉱石使用量5%削減（BAU比）	日本：鉄鉱石使用量5%削減（BAU比）	日豪合計でシナリオ1の日本削減量達成
政策導入時期	2015年	2015年	2015年	2015年
鉱山費用曲線	なし	なし	なし	なし
	シナリオ5	シナリオ6	シナリオ7	シナリオ8
政策含意	先進国協調持続可能な開発	対策の遅れによる影響	対象資源の違いによる含意	資源制約による影響
天然資源税	先進国・地域：銅鉄石中間投入に課税（推計結果：54%）	先進国・地域：鉄鉄石中間投入に課税（推計結果：73%）	先進国・地域：銅鉄石中間投入に課税（推計結果：75%）	なし
スクラップ補助金	先進国・地域：鉄スクラップ補助金（設定：20%）	シナリオ5に同じ	先進国・地域合計：銅スクラップ中間投入補助金（設定：20%）	なし
政策目標（2015-2020累積鉄石使用量対象）	先進国・地域合計鉄鉄石使用量5%削減（BAU比）	シナリオ5に同じ	先進国・地域合計、銅鉄石使用量5%削減（BAU比）	なし
政策導入時期	2015年	2016年	2015年	政策なし
鉱山費用曲線	なし	なし	なし	鉄鉄石鉄山費用曲線を導入

各シナリオの詳細を以下に記述する。なお、政策影響の評価に使用した指標とその含意は以下の通りである。

- 一人当たり等価変分：厚生水準への政策影響を評価する。等価変分が正であれば政策により厚生水準（幸福度）が上がったと判定する。
- 実質GDP：新興国・発展途上国における貧困削減、過少消費解消と関連する経済発展指標であるとともに、過剰消費の懸念がある先進国については金融システムや社会保障制度などの社会経済システムの安定性指標として採用する。
- 鉄鉱石・銅鉱石国内使用量：資源利用抑制政策のターゲット指標であるとともに、先進国の資源利用抑制が新興国・途上国での資源供給に与える影響の指標とする。
- 資源（鉄鉱石・銅鉱石）フットプリント：上述の鉱石国内使用量が生産者ベース資源消費指標であるのに対し、消費者ベース資源消費指標として採用する。
- 銑鉄・鉄鋼生産量、銅生産量：資源消費削減対象資源の直接利用者への影響を見る。
- CO<sub>2</sub>直接排出量：環境持続可能性への政策影響指標として各国の化石燃料由来のCO<sub>2</sub>排出量を採用する。
- カーボンフットプリント：CO<sub>2</sub>直接排出量に対応する消費者ベース環境影響指標として採用する。
- 資源生産性、環境効率：国連で議論が進んでいる持続可能な開発目標（SDG）において、持続可能な消費と生産に関する指標の候補として資源生産性（通常は資源投入量あたりGDP）あるいは環境効率（環境負荷あたりGDP）が挙げられている（Griggs et al. 2013）。また国連環境計画のグリーン経済指標、OECDのグリーン成長指標でも資源生産性指標、環境効率指標が採用されている（OECD 2014）。これらの国際政策議論の観点から、資源生産性および環境効率を生産者ベース資源利用量と消費者ベース資源利用量のそれぞれについて推計する。
- 部門別生産量：資源利用抑制政策により大きな影響をうける部門を同定する。

### 2.3.1 日本一国グリーン経済シナリオ

日本が単独で持続可能な資源政策を導入し、国内鉄鉱石利用量をそれらの政策を導入しなかった場合（BAU）に比べ評価期間累計で5%削減するという削減目標を達成するシナリオである。

#### シナリオ1

鉄鉱石利用量の削減という政策目標に合致し、かつ課税方法がシンプルな上流側での天然資源税として、日本国内での鉄鉱石中間投入に対する天然資源税を2015年から評価期間最終年（2020年）まで導入する。税率は2015年以降一定とし、5%削減目標を達成しうる税率を設定する（税率推計結果：127%）。

#### シナリオ2

本研究の先行研究において、天然資源税は課税対象を上流側にするほど資源抑制効果が出にくいことが指摘されている（小嶋 2011）。本シナリオでは、シナリオ1よりも一段下流側の銑鉄中間投入に対し

天然資源税を2015年から評価期間最終年まで導入する。税率は2015年以降一定とし、5%削減目標を達成しうる税率を設定する（税率推計結果：20.5%）。

### シナリオ3

鉄スクラップリサイクル財の中間投入消費に対し負の消費税に相当する補助金（補助金率20%に設定）を2015年から評価期間終了年まで導入するとともに、鉄鉱石中間投入に対する天然資源税を2015年から評価期間最終年まで導入する。税率は2015年以降一定とし、5%削減目標を達成する税率を設定する（税率推計結果：30%）。

#### **2.3.2 日本-オーストラリア協調グリーン経済シナリオ**

日本グリーン経済シナリオの資源利用削減目標と同量（重量ベース）の資源利用削減を、日本とオーストラリアの2国で分担するシナリオである。オーストラリアは日本の鉄鉱石輸入の主要供給源であり、資源利用に関して大きく異なる役割を果たしている両国において政策含意がどのように異なるかについても検討する。

### シナリオ4

日本とオーストラリアの両国で、同率の鉄鉱石中間投入に対する天然資源税を2015年から評価期間最終年まで導入する。税率は2015年以降一定とし、両国合計での鉄鉱石利用量をシナリオ1における日本の鉄鉱石利用量削減量と同量削減する税率を設定する（税率推計結果：54%）。

#### **2.3.3 持続可能な開発シナリオ**

先進国・地域が一斉に持続可能な資源政策を導入し、地域合計での国内鉄鉱石利用量をそれらの政策を導入しなかった場合（BAU）に比べ評価期間累計で5%削減するシナリオである。国際資源競合の緩和を通じて新興国・途上国の経済発展に寄与し、資源利用に関する国際的なContraction and Convergenceを促進することが期待される。

### シナリオ5

先進国・地域（OECD加盟国を念頭に、日本、オーストラリア、韓国、米国、EU、チリの6か国・地域）が同率の鉄鉱石中間投入に対する天然資源税と鉄スクラップリサイクル財中間投入に対する補助金（補助金率20%に設定）を2015年から評価期間最終年まで導入する。税率は2015年以降一定とし、6か国・地域合計の国内鉄鉱石利用量を政策を導入しなかった場合（BAU）に比べ評価期間累計で5%削減する税率を設定する（税率推計結果：54%）。

#### **2.3.4 対策の遅れによる影響**

評価期間の累積資源利用量削減目標を達成するうえで、対策導入時期が遅れることによる含意を検討する。

## シナリオ6

先進国・地域（6カ国・地域）が天然資源税率を除きシナリオ5と同じ政策を1年遅い2016年から導入する。税率は2016年以降一定とし、6カ国・地域合計の国内鉄鉱石利用量を政策を導入しなかった場合（BAU）に比べ評価期間累計で5%削減する設定する（税率推計結果：73%）。

### 2.3.5 対象資源を銅鉱石とした場合の含意

持続可能な資源利用政策の対象鉱石を銅鉱石にして評価を行い、鉄鉱石を対象とした評価結果と比較し対象資源の違いによる含意を検討する。政策としては持続可能な開発シナリオ（鉄鉱石対象の場合シナリオ5）と対象鉱物を変えて同じ政策手段を用いる。

## シナリオ7

先進国・地域が同率の銅鉱石中間投入に対する天然資源税と銅スクラップリサイクル財中間投入に対する補助金（補助金率20%に設定）を2015年から評価期間最終年まで導入する。税率は2015年以降一定とし、6カ国・地域合計の国内銅鉱石利用量を政策を導入しなかった場合（BAU）に比べ評価期間累計で5%削減する税率を設定する（税率推計結果：75%）。

### 2.3.6 資源需要増に伴う資源価格高騰の影響

限界採掘費用曲線を反映した資源制約CGEモデルとベースCGEモデルの結果を比較し、資源需要増に伴う資源価格高騰という形での資源制約の含意を検討する。

## シナリオ8

資源制約CGEモデルとベースCGEモデルのBAUシミュレーション結果を比較し、資源制約の影響を検討する。

## 2.4 シミュレーション結果

本節では、前節で記述したシナリオに対する政策影響評価結果を説明する。政策影響評価期間は政策を導入する2015年から2020年までとする。

政策による影響は政策シナリオを導入することにより評価指標がBAUからどれだけ変化したかで評価する。また、評価期間を通じた合計値（例えば評価期間各年の等価変分の合計値）で評価している。

### 2.4.1 日本一国グリーン経済シナリオ

#### (1) 国内影響

日本一国グリーン経済シナリオ（シナリオ1～3）における最大の関心事は、厚生水準と資源消費量の間のデカップリングの実現可能性である。資源消費量については政策目標として、国内鉄鉱石消費量の評価期間累計値をBAUから5%削減することを担保しているため、厚生水準への政策影響が正であれば、厚生水準と対象資源消費量の間で強いデカップリングが実現したことになる。

シミュレーション結果によるシナリオ1～3の一人あたり等価変分（評価期間の合計）を表2.7に示す。

表2.7 日本の厚生水準への影響：一人あたり等価変分（評価期間合計）

[単位：2004年USD/人]

シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
-101.4	-106.8	10.9

出典：シミュレーション結果

天然資源税のみによる資源利用抑制を目指したシナリオ1、2では、等価変分（政策を実施した結果、政策の物価への影響を調整した家計所得の変化に相当）が年平均で一人あたり2000円程度減少するが、天然資源税と鉄スクラップ利用への補助金を組み合わせたシナリオ3では、わずかではあるが厚生水準が上がる結果となった。なお、実質GDPで評価した場合には、表2.8に示すように3つのシナリオともわずかに減少する結果となった。

表2.8 日本の実質GDPへの影響（評価期間合計）

[単位：%]

シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
-0.0053	-0.0098	-0.0023

出典：シミュレーション結果

実質GDPへの影響が非常に小さいことから、評価期間合計では5%の資源利用量削減は5.3%の資源生産性向上となる。一方評価期間終了時の2020年時点で評価すると、シナリオによる違いが見られる。表2.9に、鉄鉱石利用量と鉄鉱石フットプリントの2つの消費指標に対する資源生産性への影響を示す。

表2.9 日本の鉄鉱石資源生産性への影響（2020年）

[単位：％]

	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
GDP/鉄鉱石利用量	8.7	5.2	5.3
GDP/鉄鉱石フットプリント	-1.6	-0.7	0.6

出典：シミュレーション結果

鉄鉱石フットプリントで評価した場合、シナリオ1と2では資源生産性が下がっており、資源消費が増える結果となった。シナリオ3についてはかろうじて資源生産性が改善しているものの、鉄鉱石直接利用量で評価した場合に比べて低下しており、日本のような資源輸入の多い国では消費に伴うライフサイクル資源利用の削減が難しい傾向が読み取れる。

天然資源税の課税段階が異なるシナリオ1と2を比較すると、上流で課税するシナリオ1は資源利用削減効果が限定的なため、5%削減目標を達成するために税率が127%と極めて高くなったが、厚生水準と実質GDPの双方において負の影響がシナリオ2よりも若干小さくなった。これは、上流側で課税するほど輸入による代替が容易になるため、資源削減効果が出にくい一方で経済への負の影響が小さくなることを示唆している。実際にシミュレーション結果によると、シナリオ1では銑鉄輸入が30%以上増加している。

鉄鉱石の直接利用者である製鉄・鉄鋼部門の生産量への影響を表2.10に示す。

表2.10 日本の製鉄・鉄鋼部門生産量への影響（評価期間合計）

[単位：％]

部門	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
銑鉄	-2.79	-5.08	-4.93
転炉鋼	-0.97	-1.91	-0.05
電炉鋼	-0.01	-0.03	0.63

出典：シミュレーション結果

鉄鉱石への天然資源税課税により鉄鉱石を主原料とする銑鉄部門生産量の減少が最も大きく、銑鉄を主原料とする転炉鋼生産量への影響は比較的小さい。鉄鉱石あるいは銑鉄の中間投入に対する天然資源税は鉄スクラップを主原料とする電炉鋼の生産量にはほとんど影響がなく、鉄スクラップ投入に対し補助金を交付するシナリオ3においては電炉鋼生産量が増加する結果となった。シナリオ3は銑鉄中間投入への天然資源税率がシナリオ1（税率127%）よりはるかに低い30%であるが、鉄スクラップリサイクルの効果でシナリオ1よりも銑鉄生産量が減少している。

生産量変化率でみた場合、増加率、減少率のそれぞれで最も影響を受ける産業部門を表2.11に示す。

表2.11 最も影響を受ける部門（評価期間合計）

		部門	1位	2位	3位
シナリオ1	増加	部門	ssr	tex	lea
		生産量変化率	2.14%	0.08%	0.05%
	減少	部門	pio	iro	csb
		生産量変化率	-2.79%	-2.38%	-0.97%
シナリオ2	増加	部門	ssr	tex	lea
		生産量変化率	4.45%	0.15%	0.10%
	減少	部門	pio	iro	csb
		生産量変化率	-5.08%	-4.44%	-1.91%
シナリオ3	増加	変化率	ssr	cse	nfm
		生産量変化率	7.03%	0.63%	0.04%
	減少	部門	pio	iro	omn
		生産量変化率	-4.93%	-3.78%	-0.52%

出典：シミュレーション結果

いずれのシナリオでも銑鉄（pio）部門の生産量減少率が最も大きい。鉄鉱石（iro）部門については減少率は2番目に大きいですが、非常に規模の小さい部門である。シナリオ1、2において3番目に転炉鋼（csb）部門の生産量減少率が高い。一方、生産量増加率が最も大きいのは3つのシナリオともに鉄スクラップリサイクル（ssr）部門となった。鉄スクラップリサイクル補助金を導入するシナリオ3で最も大きい7%増となっているが、補助金がない場合でも鉄鉱石利用削減により転炉鋼と電炉鋼の代替が起きることで鉄スクラップ需要が増加する結果となった。

製鉄・鉄鋼部門は炭素集約型産業であり、特に銑鉄部門の炭素集約度は極めて高いことから、鉄鉱石利用抑制策はCO<sub>2</sub>排出量削減効果が期待できる。表2.12に示すように、シナリオ1～3により、国内CO<sub>2</sub>直接排出量は減少する結果となった。一方、カーボンフットプリントで見ると排出量の変化は小さくなっており、鉄鋼製品をはじめとする炭素集約度の高い製品の輸入代替、あるいは鉄鋼製品輸出減少などにより直接排出量との乖離が生じている。

表2.12 日本のCO<sub>2</sub>排出量への影響（評価期間合計）

[単位：100万トン - CO<sub>2</sub>]

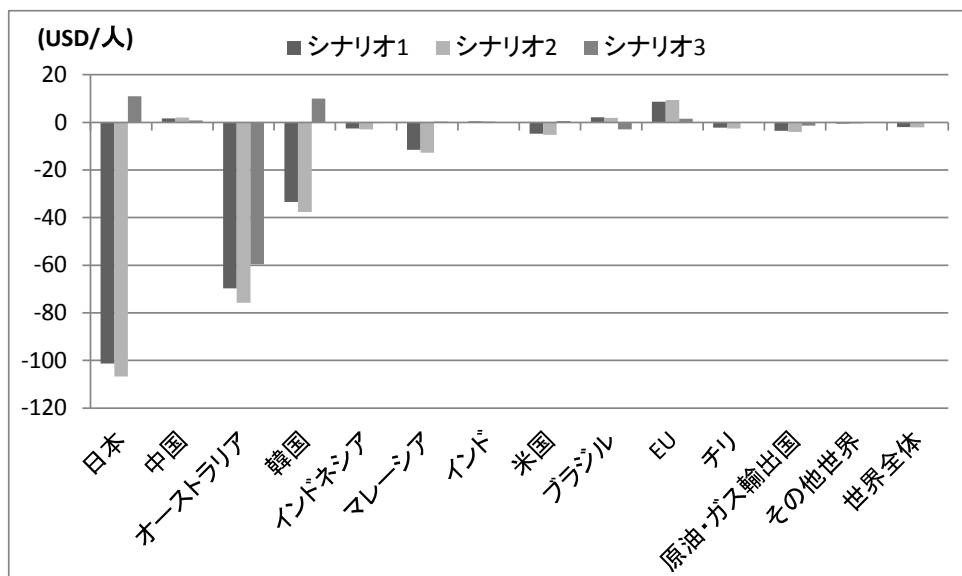
	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
直接排出量	-48.7	-51.9	-15.1
カーボンフットプリント	-1.8	-13.2	-4.2

出典：シミュレーション結果

## (2) 各国・地域への影響

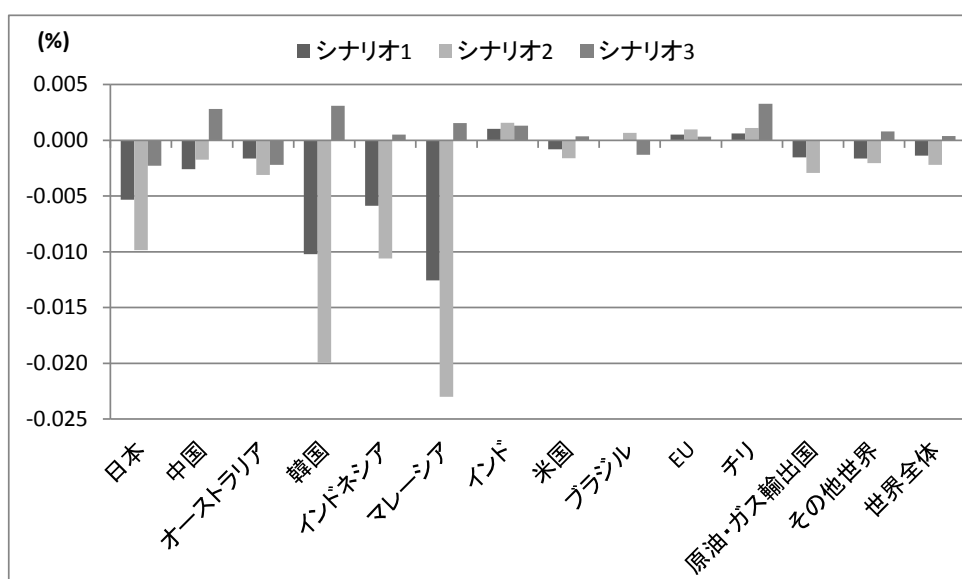
政策の国際波及効果を見るために、各国・地域の等価変分を図2.3に、また実質GDPへの影響を図2.4に示す。





出典：シミュレーション結果

図2.3 各国・地域の厚生水準への影響：一人あたり等価変分（評価期間合計）

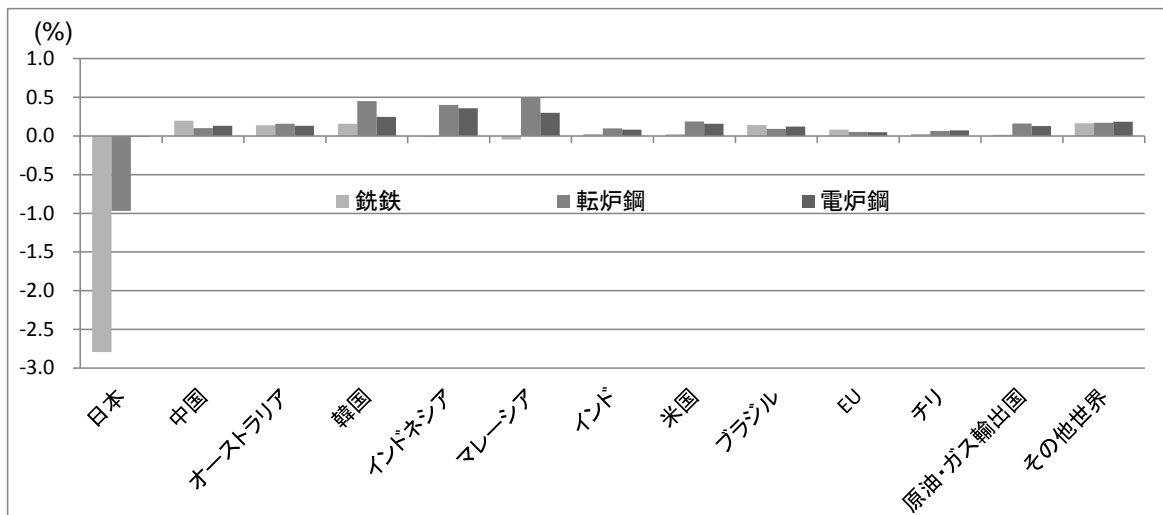


出典：シミュレーション結果

図2.4 各国・地域の実質GDPへの影響（評価期間合計）

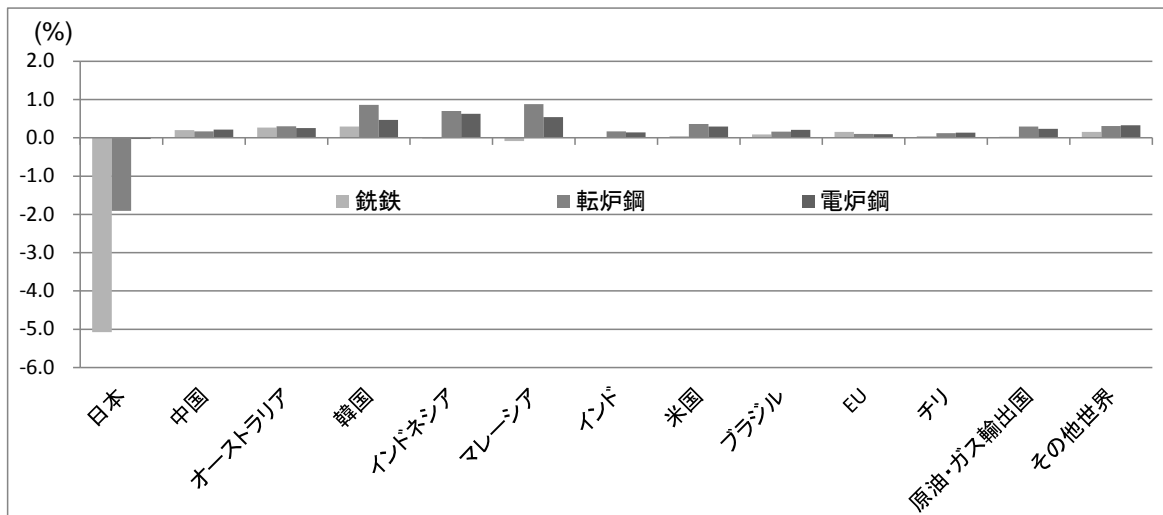
例えばオーストラリアの等価変分、実質GDPともにすべてのシナリオで負の影響が見られることから、日本の鉄鉱石利用抑制が鉄鉱石主要供給国であるオーストラリアなどの経済に影響を与える可能性がないとは言えないが、各国・地域の実質GDPへの影響は非常に小さいと言える。

各国・地域の製鉄・鉄鋼部門へのシナリオ毎の影響を図2.5～図2.7に示す。



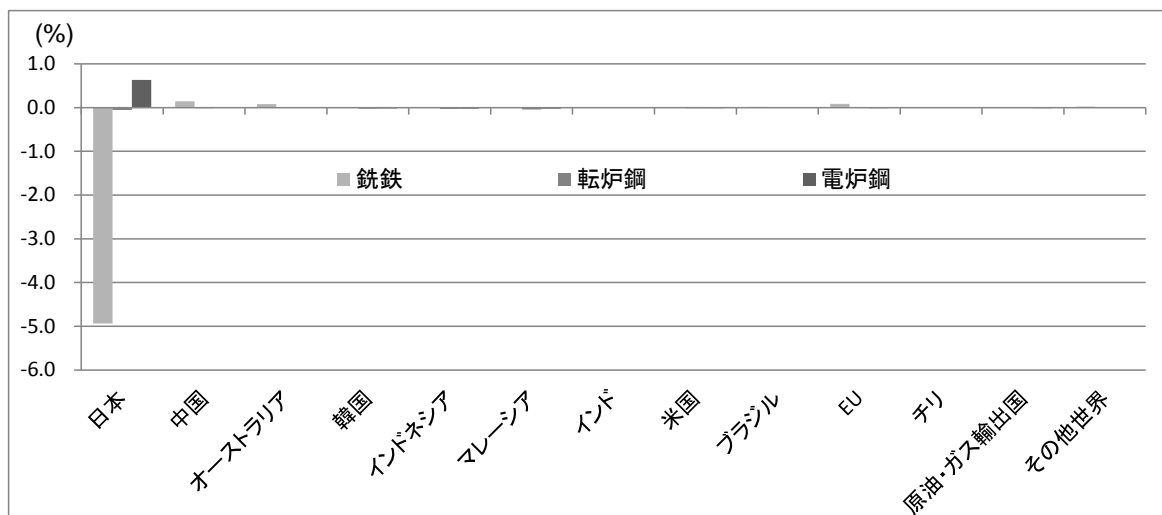
出典：シミュレーション結果

図2.5 シナリオ1による各国・地域の製鉄・鉄鋼生産量への影響（評価期間合計）



出典：シミュレーション結果

図2.6 シナリオ2による各国・地域の製鉄・鉄鋼生産量への影響（評価期間合計）

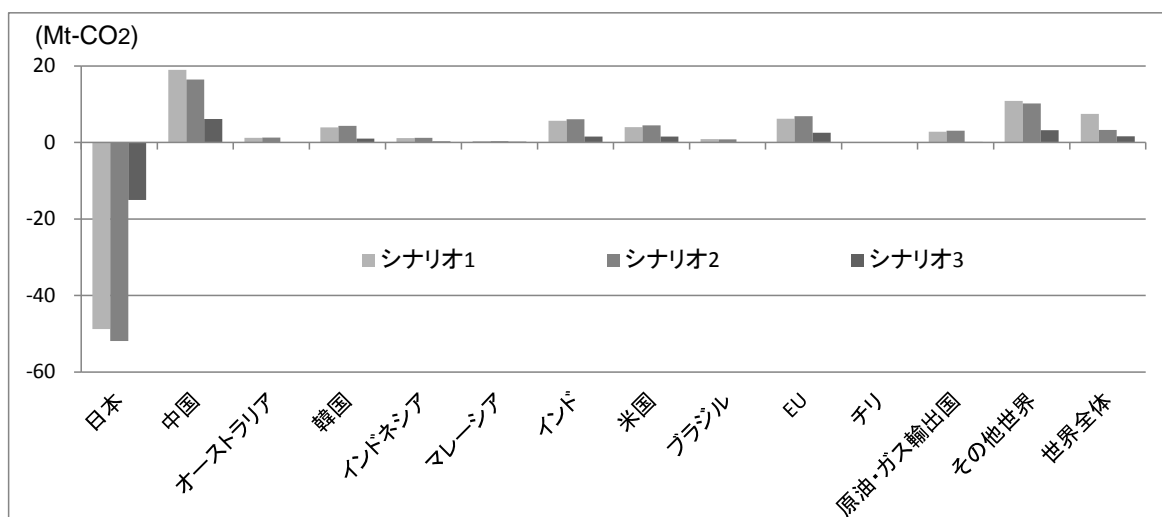


出典：シミュレーション結果

図2.7 シナリオ3による各国・地域の製鉄・鉄鋼生産量への影響（評価期間合計）

シナリオ1と2では傾向はほぼ同じで、日本以外の国・地域の製鉄・鉄鋼生産が増加するが、一段下流側で課税するシナリオ2は2倍程度大きい影響となった。またシナリオ1と同じ段階で天然資源税を課税するシナリオ3は、鉄スクラップ補助金の効果で天然資源税率がシナリオ1の四分の一程度（シナリオ1の127%に対して30%）であるが、他国の製鉄・鉄鋼生産量への影響はほとんど見られなかった。

炭素集約型産業である製鉄・鉄鋼生産量への国際波及効果は各国・地域のCO<sub>2</sub>排出量にも影響を与えることが予想される。図2.8に示す通り、日本の排出削減効果は他地域への漏出効果で打ち消され、世界全体のCO<sub>2</sub>排出量を増加させる結果となった。



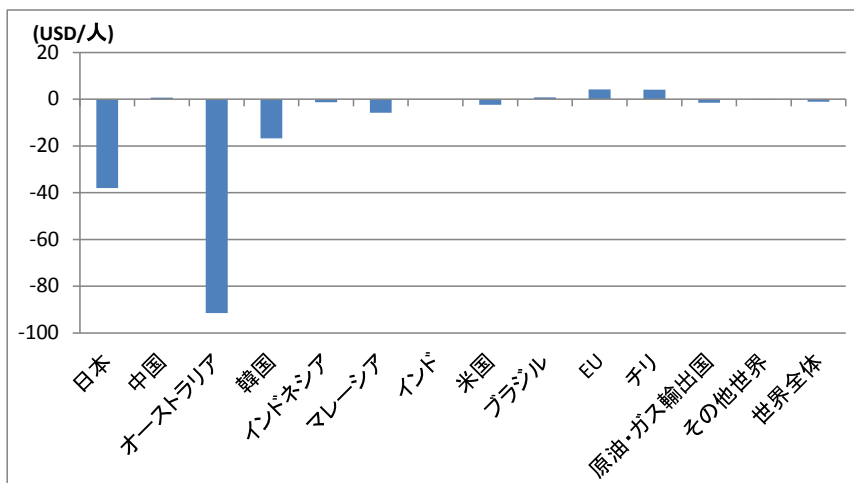
出典：シミュレーション結果

図2.8 各国・地域のCO<sub>2</sub>排出量への影響（100万トン-CO<sub>2</sub>：評価期間合計）

#### 2.4.2 日本-オーストラリア協調グリーン経済シナリオ

シナリオ4では、日本のみが鉄鉱石中間投入に対する天然資源税により鉄鉱石利用抑制を図るシナリオ1に対し、重量ベースでシナリオ1と同じ鉄鉱石利用削減目標を、日本とオーストラリアの2国で分担して

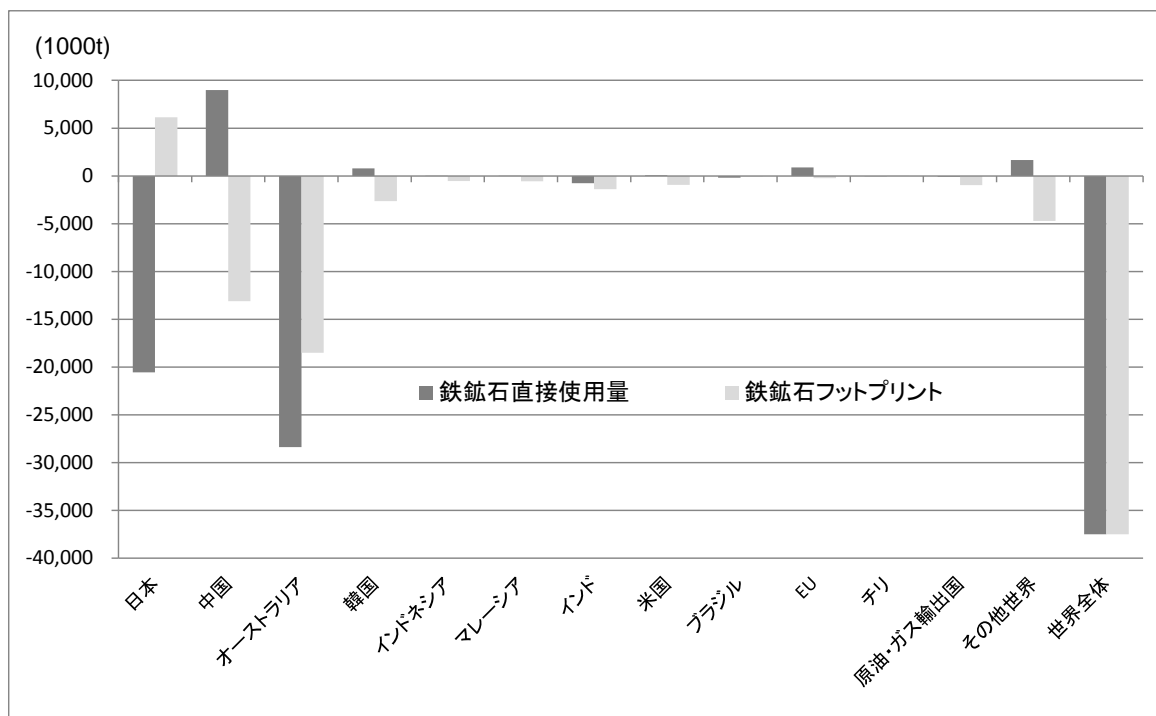
達成することにより、オーストラリアの厚生水準が低下し日本の厚生水準低下が緩和される結果となった。これはシナリオ1での日本の税率が127%だったのに対し、シナリオ4での両国の税率が54%となっていることから予想された傾向と言える。図2.9に各国・地域の厚生水準への影響として評価期間合計の等価変分を示す。



出典：シミュレーション結果

図2.9 各国・地域の厚生水準への影響：一人あたり等価変分 (評価期間合計)

図2.10にシナリオ4による各国・地域の鉄鉱石消費への影響を示す。



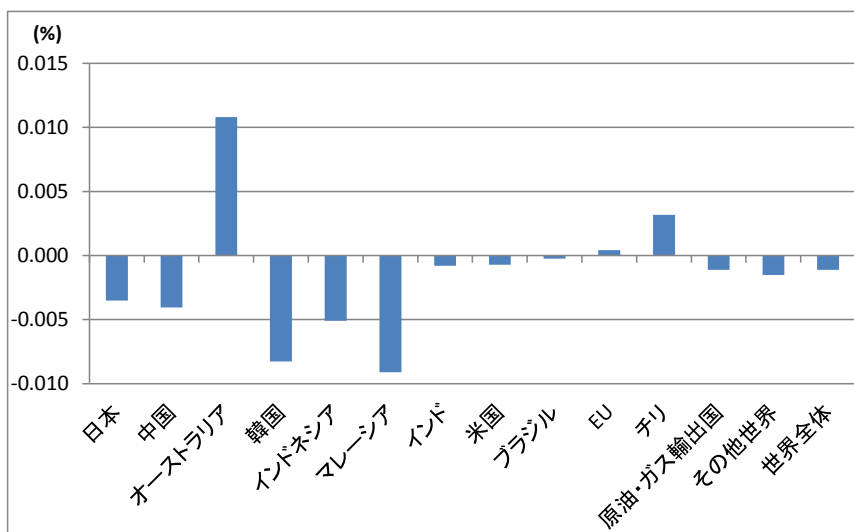
出典：シミュレーション結果

図2.10 各国・地域の鉄鉱石消費への影響 (評価期間合計)

鉄鉱石直接消費量（評価期間合計）で見ると、天然資源税を導入した日本とオーストラリアで併せて4893万トン削減され、それ以外の地域では合計で1142万トン増える結果となった。特に中国の消費量が約900万トン増える結果となった。

一方、鉄鉱石フットプリントで見ると、日本の消費量は614万トン増え、中国の消費量が1311万トン減る結果となっており、日本が鉄鉱石集約型の財を中国から多く輸入していることがうかがえる。

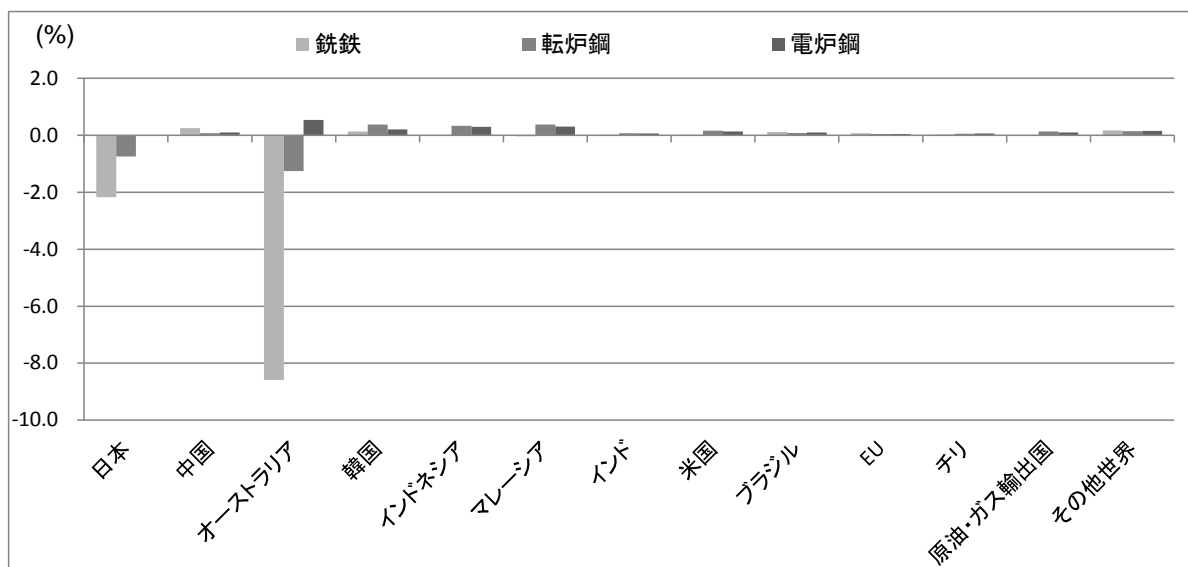
一方、図2.11に示すように、等価変分のマイナスが日本よりも大きいオーストラリアにおいて実質GDPが増加する結果となった。最も変化率の大きいオーストラリアでも実質GDPへの影響は0.01%と極めて小さく、さらにオーストラリア以外の国・地域における影響は正負を問わずさらに小さいことから、実質GDPへの影響はほとんどないと言える。



出典：シミュレーション結果

図2.11 各国・地域の実質GDPへの影響（評価期間合計）

各国・地域の製鉄・鉄鋼部門への影響を図2.12に示す。



出典：シミュレーション結果

図2.12 各国・地域の製鉄・鉄鋼生産量への影響（評価期間合計）

オーストラリアの銑鉄生産量が8.6%減少している他は、シナリオ1と比較して小さな影響となっている。生産量変化率でみた場合、増加率、減少率のそれぞれで最も影響を受ける産業部門を表2.13に示す。

表2.13 最も影響を受ける部門（評価期間合計）

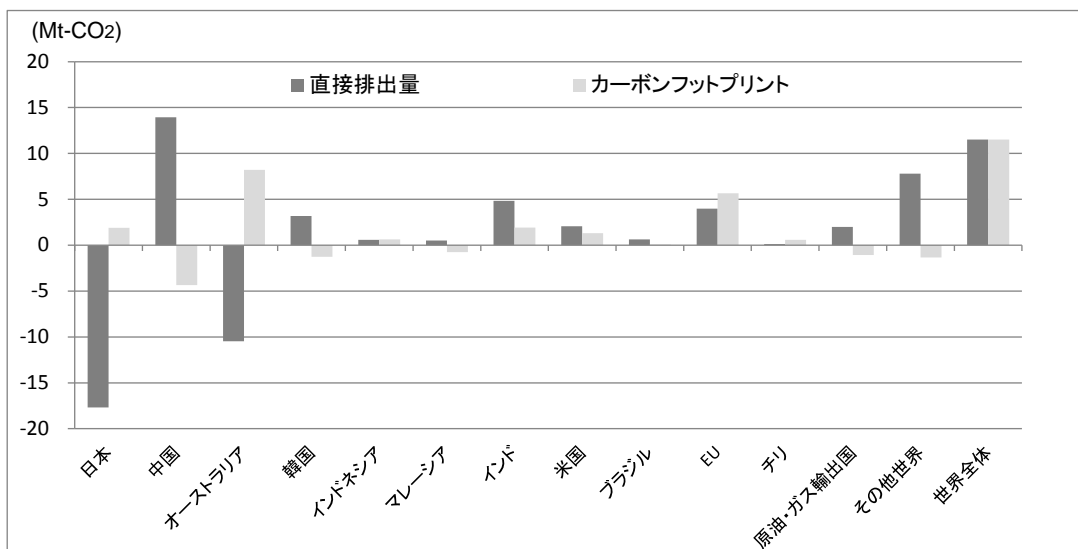
		部門	1位	2位	3位
日本	増加	部門	ssr	tex	lea
		生産量変化率	1.67%	0.06%	0.04%
	減少	部門	pio	iro	csb
		生産量変化率	-2.19%	-2.17%	-0.74%
オーストラリア	増加	部門	cse	lea	tex
		生産量変化率	0.54%	0.11%	0.11%
	減少	部門	pio	osr	csb
		生産量変化率	-8.58%	-5.12%	-1.26%

出典：シミュレーション結果

日本についてはシナリオ1とまったく同じ部門・順位であるが、変化率が減少している。オーストラリアにおいては、増加率が最大である電炉鋼（cse）部門でも0.54%に過ぎないが、減少率が最大の銑鉄（pio）部門ではマイナス8.6%にも達しており、次に減少率が大きいその他リサイクル（osr）部門でも5.1%減少している。

これらの結果から、同じ種類の天然資源税を同じ税率で導入しても、国により影響が大きく異なる結果となった。

図2.13に示すように、日本とオーストラリア双方でCO<sub>2</sub>排出量は削減される結果となったが、世界全体の排出量は増えており、増加幅についてもシナリオ1を上回る結果となった。なお、直接排出量とカーボンフットプリントへの影響を比較すると、シナリオ4による中国への影響は直接排出量では約1400万トン増加しているのに対し、カーボンフットプリントでは430万トン以上減少する結果となった。日本およびオーストラリアの銑鉄・転炉鋼生産量が減少するのに対し中国での生産が増加するため、直接排出量は押し上げられるが、一方でカーボンフットプリントでみると製品輸出に伴い他国に排出量が移転していることから、このような結果になったと考えられる。このことは、日本とオーストラリアのカーボンフットプリントが増加していることからもうかがえる。



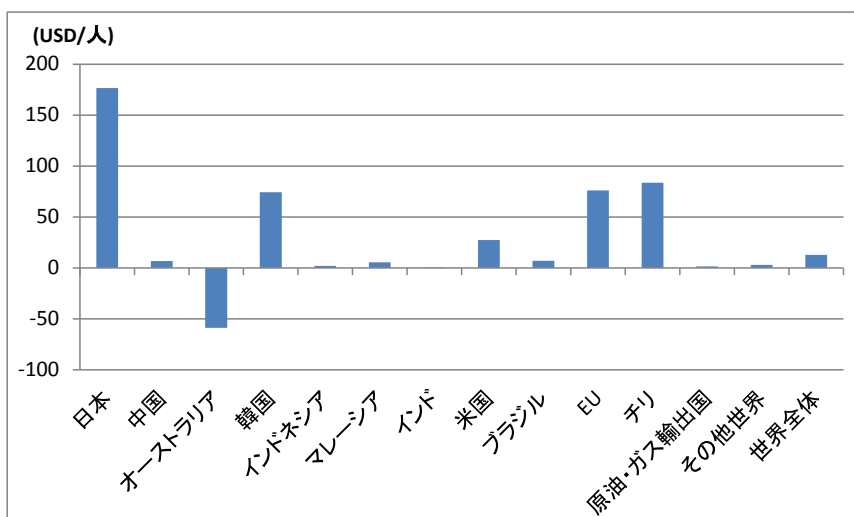
出典：シミュレーション結果

図2.13 各国・地域のCO<sub>2</sub>排出量への影響（100万トン-CO<sub>2</sub>：評価期間合計）

### 2.4.3 持続可能な開発シナリオ

持続可能な開発シナリオ（シナリオ5）では、先進国・地域が一斉に資源利用抑制政策を導入することで、これらの国・地域で厚生水準と資源消費のデカップリングを目指すことに加え、資源競合の緩和を通じて新興国・途上国の経済発展に寄与することが期待される。

シナリオ5による各国・地域の厚生水準変化を図2.14に示す。

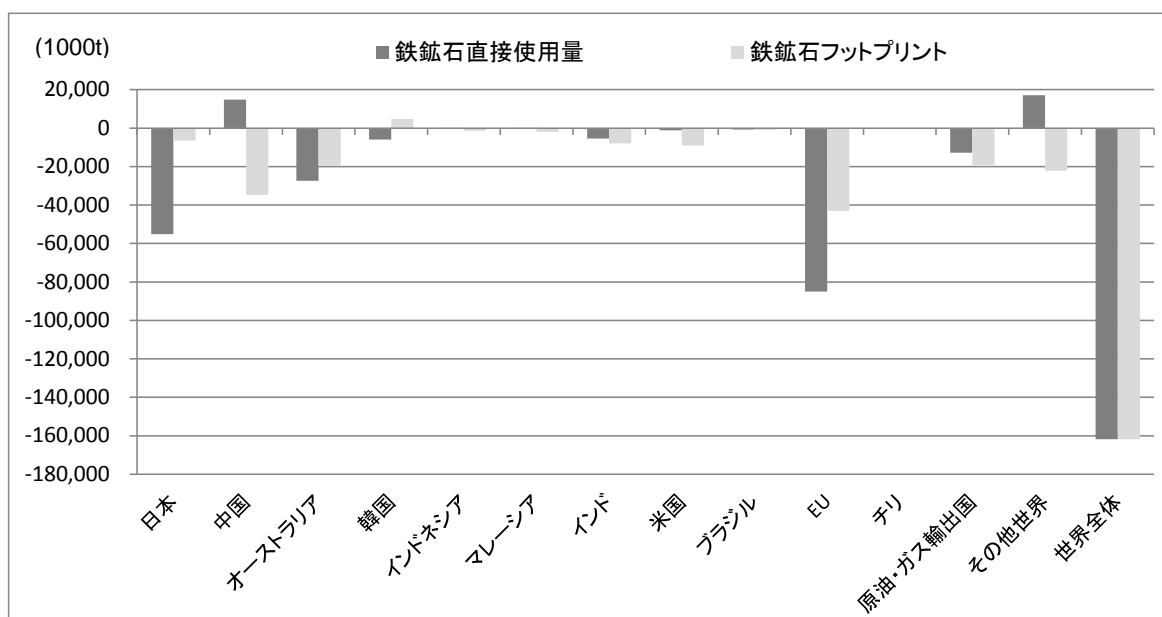


出典：シミュレーション結果

図2.14 各国・地域の厚生水準への影響：一人あたり等価変分（評価期間合計）

政策実施国の一つであるオーストラリアの厚生水準が低下することを除き、すべての国・地域で厚生水準が上がる結果となった。世界全体としても、評価期間合計で一人あたり等価変分が13ドル/人と無視できない厚生水準改善を示している。

図2.15にシナリオ5による各国・地域の鉄鉱石消費への影響を示す。



出典：シミュレーション結果

図2.15 各国・地域の鉄鉱石消費への影響（評価期間合計）

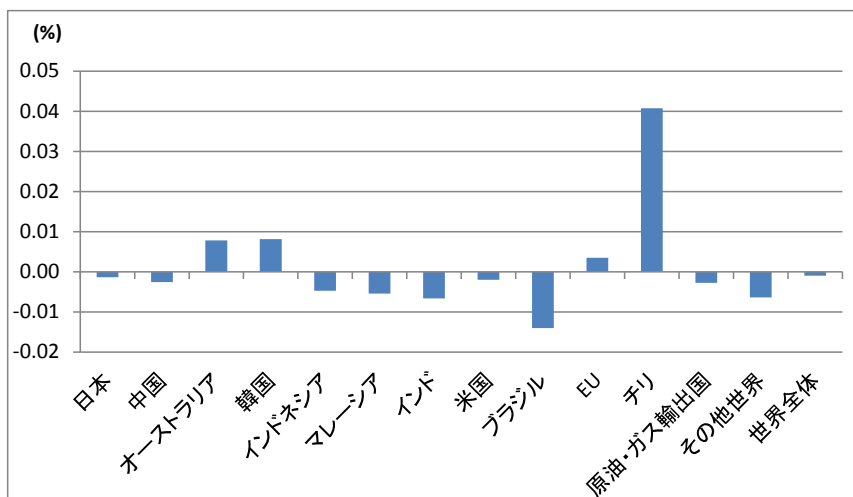
世界全体の鉄鉱石消費量は1億6200万トン削減されることから、世界全体の一人当たり等価変分が13ドル/人であることと併せて、世界全体として厚生水準改善と鉄鉱石消費量削減という強いデカップリング実現の可能性が示唆される結果となった。また、政策を導入した先進6か国・地域での鉄鉱石消費削減量の合計が1億7500万トンに達しており、それ以外の新興国、途上国を多く含む地域では鉄鉱石消費が1300万トン増加する結果となった。すなわち、一人あたり資源消費量の多い先進国の資源消費を縮小（contraction）し、資源競合緩和を通じて一人あたり資源消費量の少ない新興国・途上国の資源消費量増加を可能にし、その結果先進国と新興国・途上国の消費レベルが収束（convergence）する、Contraction and Convergenceの可能性が示唆される結果が得られた。

鉄鉱石直接使用量と鉄鉱石フットプリントの比較から得られる含意としては、中国では鉄鉱石直接使用量が増加しているがフットプリントでみた場合には資源消費が3400万トン以上減っており、逆に資源集約型の商品の多くを輸入している日本やEUでは直接使用量の削減幅に比べフットプリントではあまり減っておらず、消費ベース指標を用いた場合、先進国での資源消費削減は容易ではないことを示唆している。

なお、日本の観点からみると、シナリオ5はシナリオ3における日本の資源利用抑制策を、先進国・地域が協調して実施する設定である。シナリオ3と比較すると、日本にとって天然資源税率は30%から54%に上がり、鉄鉱石利用削減量も評価期間累積で4864万トンから5518万トンに増えているにも関わらず、一人あたり等価変分が評価期間合計で10ドル/人から177ドル/人に大幅に増加しており、厚生水準と鉄鉱石消費量のデカップリングが一段と進む結果となっている。

一方、実質GDPへの影響は図2.16に示す通り極めて小さい結果となった。



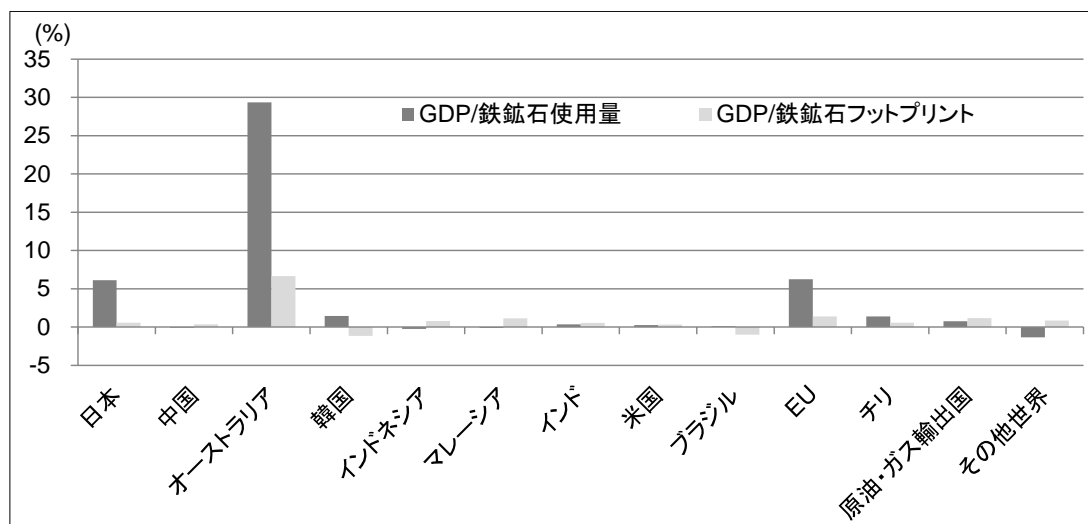


出典：シミュレーション結果

図2.16 各国・地域の実質GDPへの影響（評価期間合計）

対策を導入した先進6か国・地域のうち4か国・地域で実質GDPがわずかに増えているが（増加率が最大であるチリで0.04%）、それ以外の国・地域ではわずかに減少している。これらの数字はあくまでBAUにおける実質GDPからの変化であり、負の影響が最も大きいブラジルの減少率でもマイナス0.014%と極めて小さいことから、経済成長率に影響を与えるような数字ではない。シナリオ5による新興国・途上国の経済成長への実質的な貢献は見られないものの、先進国も含め各国・地域の社会経済システムの安定性を損なうようなマイナス影響もないと考えられる。

また、実質GDPへの影響が小さいことから、資源利用抑制が資源生産性向上につながることになる。図2.17に、評価期間最終年である2020年における鉄鉱石利用量と鉄鉱石フットプリントの2つの消費指標に対する資源生産性への影響を示す。



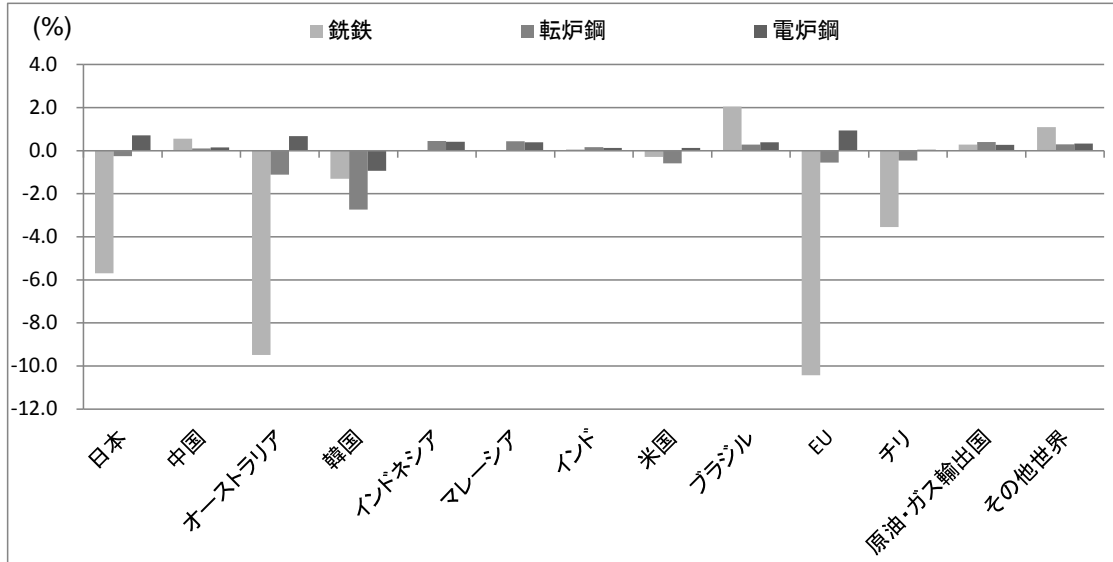
出典：シミュレーション結果

図2.17 各国・地域の鉄鉱石資源生産性への影響（2020年）

鉄鉱石直接使用量が大幅に削減されたオーストラリアで最も大きな資源生産性改善が見られるが、鉄鉱石フットプリントに対する資源生産性の上昇率はずっと低い数字となっている。これは、オーストラ

リアの資源消費量がフットプリントベースで見た場合に直接消費量よりも大きいため、変化率で見た場合に小さくなるためである。

鉄鉱石の直接利用者である各国・地域の製鉄・鉄鋼部門生産量への影響を図2.18に示す。

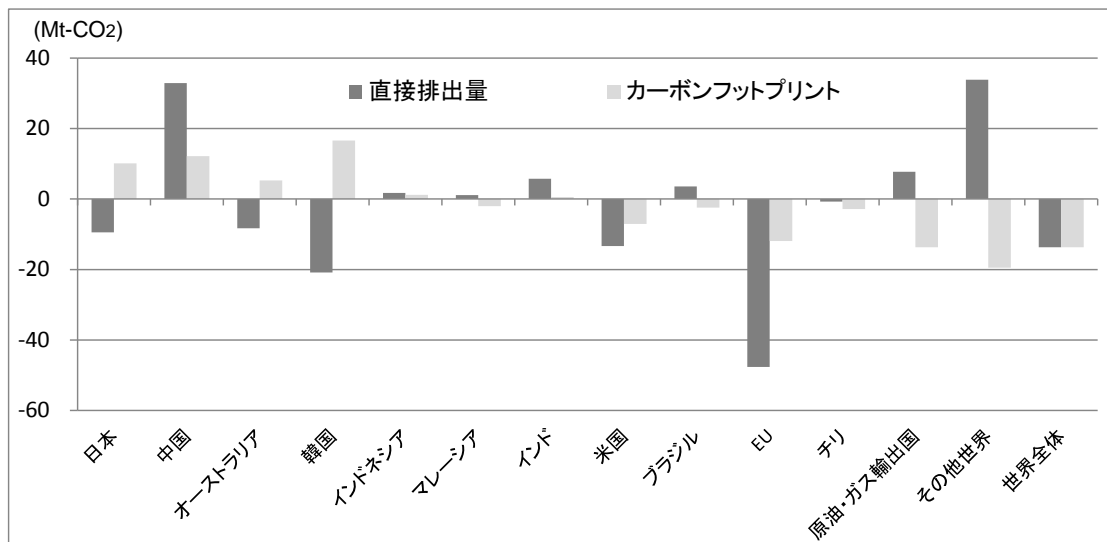


出典：シミュレーション結果

図2.18 各国・地域の製鉄・鉄鋼生産量への影響 (評価期間合計)

鉄鉄生産量が10%以上減少するEUをはじめ、オーストラリア、日本、チリの鉄鉄生産量が大幅に減少するのに対し転炉鋼生産量の減少は限定的であり、鉄スクラップリサイクルへの補助金の恩恵を被る電炉鋼の生産量は、韓国以外の先進5か国・地域でわずかではあるが増加している。

シナリオ5の環境持続可能性への影響として、CO<sub>2</sub>排出量への影響を図2.19に示す。



出典：シミュレーション結果

図2.19 各国・地域のCO<sub>2</sub>排出量への影響 (評価期間合計)

直接排出量ベースでは、政策を導入した先進6か国・地域においてCO<sub>2</sub>排出削減のコベネフィットが見られる結果となった。また世界全体としてもCO<sub>2</sub>排出量が1400万トン削減される結果となり、厚生水準とCO<sub>2</sub>排出量についても強いデカップリングの実現可能性が示唆された。一方、カーボンフットプリントで見るとチリを除く先進5か国・地域においてCO<sub>2</sub>排出量削減効果は減るか、あるいは排出量増加につながっており、製品ライフサイクル全体の環境影響で評価した場合には強いデカップリングが困難になる傾向が裏付けられた。

#### 2.4.4 対策の遅れによる影響

シナリオ6では、シナリオ5と同じ政策（ただし天然資源税率は再度推計）を導入時期を1年遅らせて2016年から導入し、シナリオ5と同じ鉄鉱石利用削減目標（先進6か国・地域合計、評価期間合計で5%削減）を達成する。推計された天然資源税率は、シナリオ5では54%であったが、シナリオ6では73%となった。

シナリオ5とシナリオ6の実質GDPへの影響を比較することにより、対策導入時期が遅れることによる経済コストを推計した（表2.14参照）。

表2.14 対策導入の遅れによる経済影響（評価期間合計）

[単位：百万2004年USD]

国・地域	A. シナリオ5	B. シナリオ6	対策遅れの経 済コスト (B-A)
日本	-432	-757	-325
中国	-869	-1,520	-651
オーストラリア	415	472	57
韓国	498	403	-95
インドネシア	-148	-173	-26
マレーシア	-65	-88	-23
インド	-663	-682	-19
米国	-1,770	-2,027	-256
ブラジル	-827	-850	-22
EU	3,288	2,295	-993
チリ	349	380	32
その他原油・ガス主要輸出国	-889	-762	126
その他地域	-2,161	-2,660	-499
世界合計	-3,275	-5,969	-2,694

出典：シミュレーション結果

対策導入が1年遅れることにより、オーストラリア、チリ、その他原油・ガス主要輸出国の3か国・地域で経済便益が発生しているが、それ以外の国・地域ではすべて経済費用が発生しており、世界全体では約27億ドル（2004年USD）の経済費用が発生する結果となった。

一方、厚生水準への影響では表2.15に示すとおり、対策導入が1年遅れることで、むしろすべての国・地域で厚生水準が向上するという結果となった。

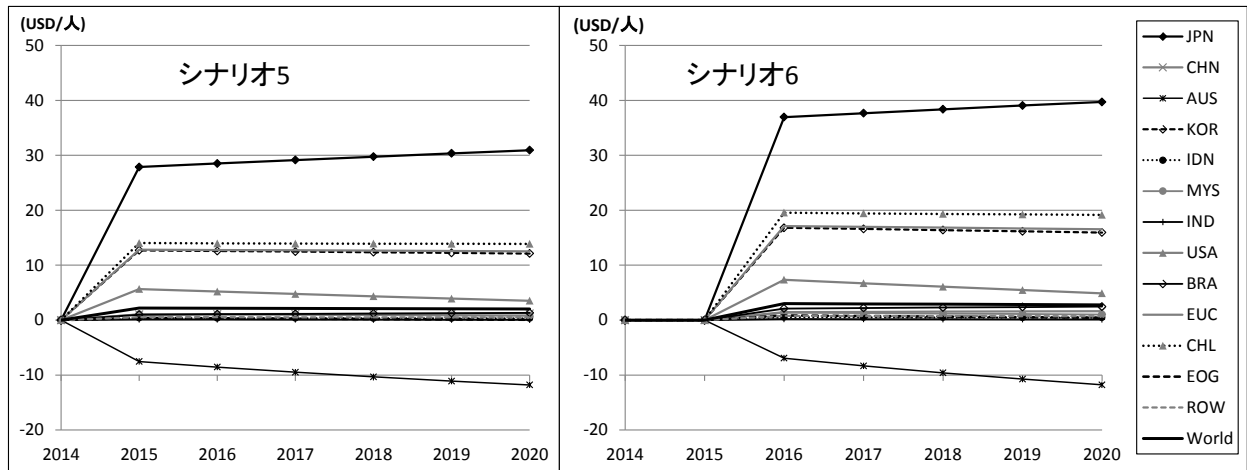
表2.15 対策導入の遅れによる厚生水準への影響：一人あたり等価変分（評価期間合計）

[単位：2004年USD/人]

国・地域	A. シナリオ5	B. シナリオ6	対策遅れの 影響 (B-A)
日本	176.6	191.8	15.2
中国	6.8	7.7	1.0
オーストラリア	-58.8	-47.3	11.4
韓国	74.5	81.9	7.4
インドネシア	2.1	2.4	0.3
マレーシア	5.6	6.0	0.4
インド	0.6	0.8	0.2
米国	27.4	30.5	3.1
ブラジル	7.0	11.5	4.5
EU	76.1	84.2	8.1
チリ	83.6	96.7	13.1
その他原油・ガス主要輸出国	1.4	3.2	1.8
その他地域	3.1	3.7	0.6
世界合計	12.7	14.5	1.7

出典：シミュレーション結果

厚生水準に関しては、シナリオ5においてオーストラリアを除くすべての対策導入国で厚生水準が向上する結果であったが、導入時期の遅れに対応するためより思い切った（税率の高い）政策を導入することで、さらに厚生水準が改善した可能性がある。また、新興国・途上国では先進国・地域がより効果の高い資源利用抑制策を導入することにより、一層の資源競合緩和による便益を享受している可能性がある。図2.20に示すように、シナリオ5で正の等価変分である国・地域は、政策評価期間における等価変分の増加分が政策期間が1年短縮される合計等価変分の減少分を上回っていること、オーストラリアについては評価期間中の等価変分に大きな差がないため、政策期間の短縮がほぼ1年分の負の等価変分の解消につながった結果であることが分かる。



出典：シミュレーション結果

図2.20 各国・地域の一人あたり等価変分経年変化

対策導入の遅れによる各国・地域の鉄鉱石利用量への影響を表2.16に示す。

表2.16 対策導入の遅れによる各国・地域の鉄鉱石利用量への影響（評価期間合計）

[単位：1000トン]

国・地域	鉄鉱石直接利用量			鉄鉱石フットプリント		
	A. シナリオ5	B. シナリオ6	対策遅れの 影響 (B-A)	C. シナリオ5	D. シナリオ6	対策遅れの 影響 (D-C)
日本	-55,183	-51,955	3,228	-6,478	-4,073	2,406
中国	14,878	19,473	4,596	-34,719	-36,387	-1,668
オーストラリア	-27,426	-30,549	-3,124	-19,593	-20,822	-1,229
韓国	-5,897	-6,563	-666	4,735	6,491	1,757
インドネシア	66	68	1	-1,449	-1,406	43
マレーシア	47	61	14	-1,862	-1,803	59
インド	-5,361	-4,965	396	-8,002	-7,529	472
米国	-1,182	-1,291	-109	-8,992	-7,171	1,821
ブラジル	-725	-169	556	-791	-1,350	-559
EU	-84,983	-84,155	828	-43,019	-39,111	3,908
チリ	-397	-446	-49	-381	-366	15
その他原油・ガス主要輸出国	-12,769	-12,386	383	-19,171	-18,728	443
その他地域	17,116	18,639	1,523	-22,094	-21,983	111
世界合計	-161,815	-154,239	7,577	-161,815	-154,239	7,577

出典：シミュレーション結果

対策遅れにより、世界全体の鉄鉱石利用量が約758万トン増加しているが、先進6か国・地域ではシナリオ5と6で同一削減目標を設定していることから、計算誤差により先進国・地域で約10万トン増加した以外は新興国・途上国の利用量の増加分となっている。この結果は、シナリオ6の先進国・地域における

より強力な資源利用抑制が国際資源競争を緩和し、新興国・途上国の資源利用増大に貢献する可能性を示唆している。

一方、鉄鉱石フットプリントで評価すると、対策遅れにより先進6か国・地域の鉄鉱石利用量は868万トン増加し、新興国・途上国では逆に110万トン減少している。製品ライフサイクル全体の資源利用指標であるフットプリント指標の方が、生活の質に直結する家庭の最終消費を表す指標であることから、より効果的な資源利用の世代内衡平を目指すためには、先進国が資源フットプリントの削減に取り組む必要を示唆する結果と言えよう。

対策導入の遅れによる各国・地域のCO<sub>2</sub>排出量への影響を表2.17に示す。

表2.17 対策導入の遅れによる各国・地域のCO<sub>2</sub>排出量への影響（評価期間合計）

[単位：100万トン - CO<sub>2</sub>]

国・地域	直接排出量			カーボンフットプリント		
	A. シナリオ5	B. シナリオ6	対策遅れの 影響 (B-A)	C. シナリオ5	D. シナリオ6	対策遅れの 影響 (D-C)
日本	-9.4	-10.2	-0.7	10.1	12.0	2.0
中国	32.9	38.0	5.1	12.2	11.3	-0.9
オーストラリア	-8.3	-9.5	-1.2	5.3	7.1	1.8
韓国	-20.9	-23.9	-3.0	16.6	19.0	2.4
インドネシア	1.7	2.0	0.3	1.1	1.7	0.5
マレーシア	1.1	1.2	0.1	-2.0	-2.2	-0.2
インド	5.8	6.7	0.9	0.6	0.4	-0.2
米国	-13.3	-15.7	-2.4	-7.1	-8.1	-1.0
ブラジル	3.6	4.3	0.8	-2.4	-2.5	0.0
EU	-47.6	-51.8	-4.1	-11.9	-6.5	5.4
チリ	-0.7	-0.8	-0.1	-2.9	-3.3	-0.5
その他原油・ガス主要輸出国	7.7	10.8	3.1	-13.7	-14.2	-0.6
その他地域	33.8	40.3	6.5	-19.5	-23.1	-3.6
世界合計	-13.7	-8.4	5.3	-13.7	-8.4	5.3

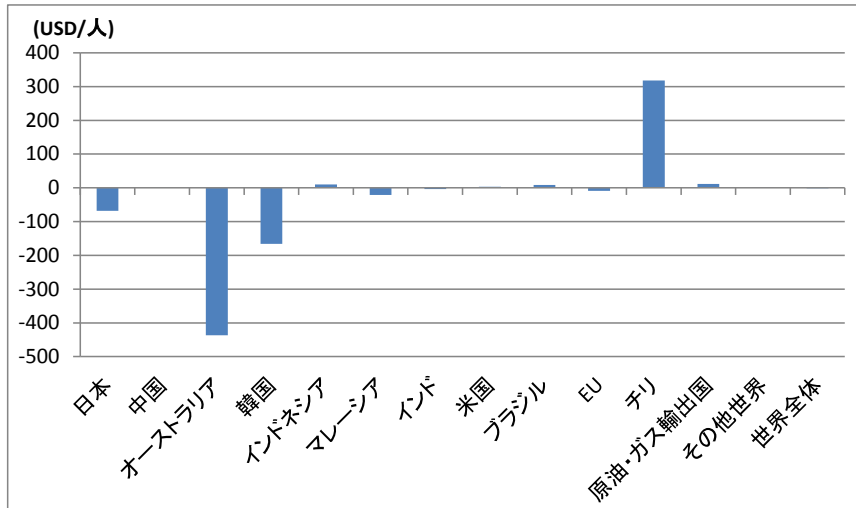
出典：シミュレーション結果

直接排出量ベースでは、政策を導入した先進6か国・地域においてCO<sub>2</sub>排出削減のコベネフィットがより強化されており、シナリオ5で実現した厚生水準と環境影響の強いデカップリングがさらに強化される結果となった。しかし世界全体のCO<sub>2</sub>排出量は増加する結果となった。

カーボンフットプリントで評価した場合、シナリオ5、6ともに政策導入国合計でCO<sub>2</sub>排出量が増えており、対策導入の遅れによりCO<sub>2</sub>排出量が1000万トン上乗せされる結果となった。消費に伴うライフサイクルでみた場合、先進国による資源利用削減と環境影響低減の取り組みが容易ではないことがあらためて示唆される結果となった。

#### 2.4.5 対象資源を銅鉱石とした場合の含意

シナリオ7では、シナリオ5の持続可能な資源利用政策の対象鉱石を銅鉱石に変更して評価を行った。シナリオ5では政策を導入した先進国・地域の多くが厚生水準と資源消費のデカップリングを実現し、かつ新興国・途上国の対象資源利用の増加につながる結果が得られた。しかし対象を銅鉱石に変更したシナリオ7では、図2.21に示すようにチリの一人あたり等価変分が評価期間合計で約300ドル/人（2004年USD）と厚生水準が大きく改善し、米国もわずかに厚生水準が改善するものの、残りの4カ国・地域では厚生水準が下がる結果となった。

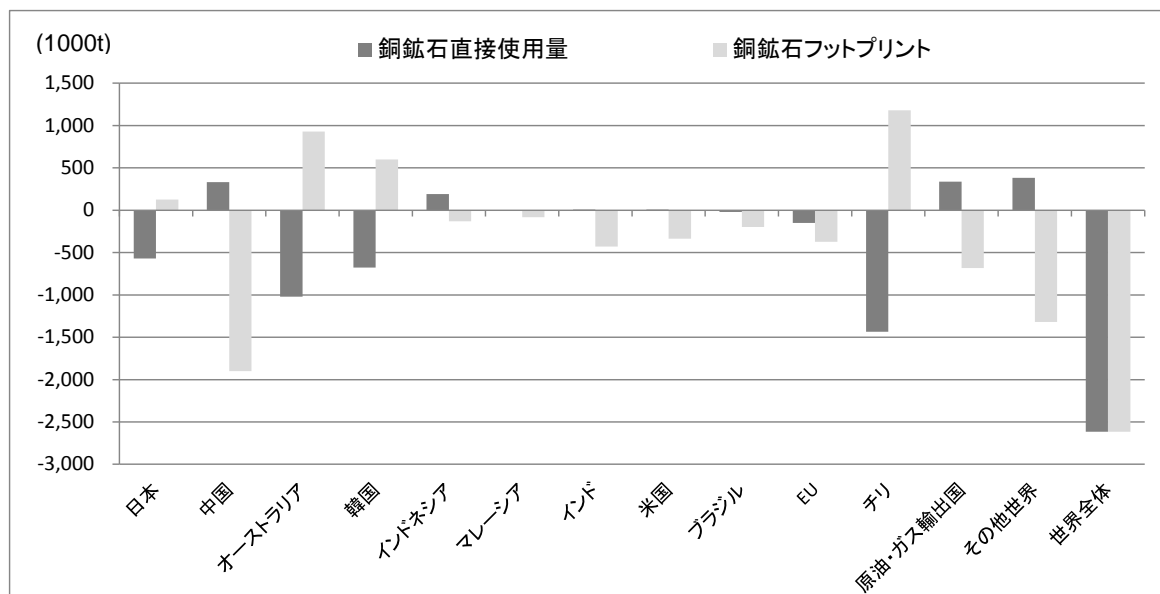


出典：シミュレーション結果

図2.21 各国・地域の厚生水準への影響：一人あたり等価変分（評価期間合計）

世界全体としても、評価期間合計で一人あたり等価変分がマイナス1.5ドル/人となり、厚生水準の改善にはつながらなかった。

図2.22にシナリオ5による各国・地域の銅鉱石消費への影響を示す。



出典：シミュレーション結果

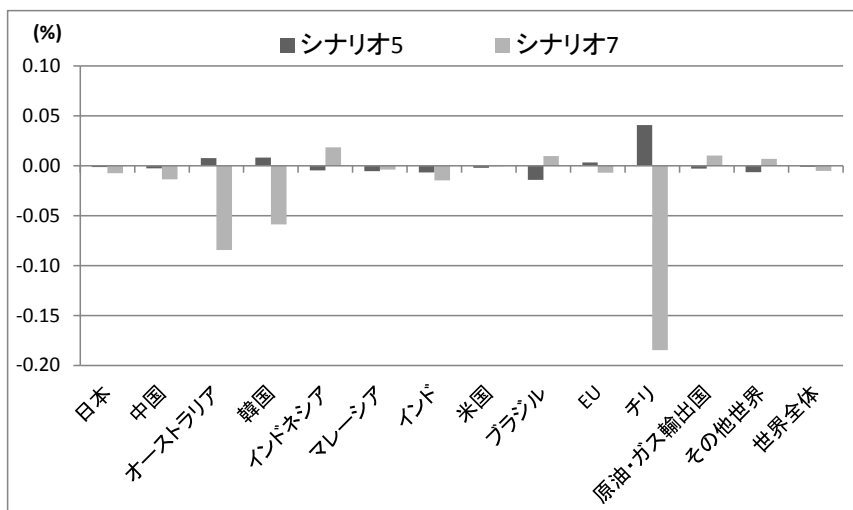
図2.22 各国・地域の銅鋳石消費への影響（評価期間合計）

世界全体の銅鋳石消費量は262万トン削減されるのに対し、政策を導入した先進6か国・地域での銅鋳石直接使用量が合計で384万トン削減されており、それ以外の新興国、途上国を多く含む地域での銅鋳石直接使用量が122万トン増加する結果となった。この点では、鉄鋳石を対象としたシナリオ5と同じく先進国と新興国・途上国の資源利用レベルが収束（convergence）する、Contraction and Convergenceの可能性が示唆される結果が得られた。

銅鋳石直接使用量と銅鋳石フットプリントの比較から得られる含意についても、鉄鋳石を対象としたシナリオ5とおおむね同様の結果が得られた。すなわち、資源集約型の財を輸出を通じて世界に供給している中国などで、消費ベース指標を用いた場合に資源利用が大きく削減される一方、日本、オーストラリア、チリなどでは資源直接利用を抑制する政策を導入したにも関わらず、銅鋳石フットプリントは増加する結果となり、これらの国では厚生と資源消費の強いデカップリングは容易ではないことを示唆している。

実質GDPへの影響については、図2.23に示す通り鉄鋳石を対象としたシナリオ5と比べて影響が大きくなった。



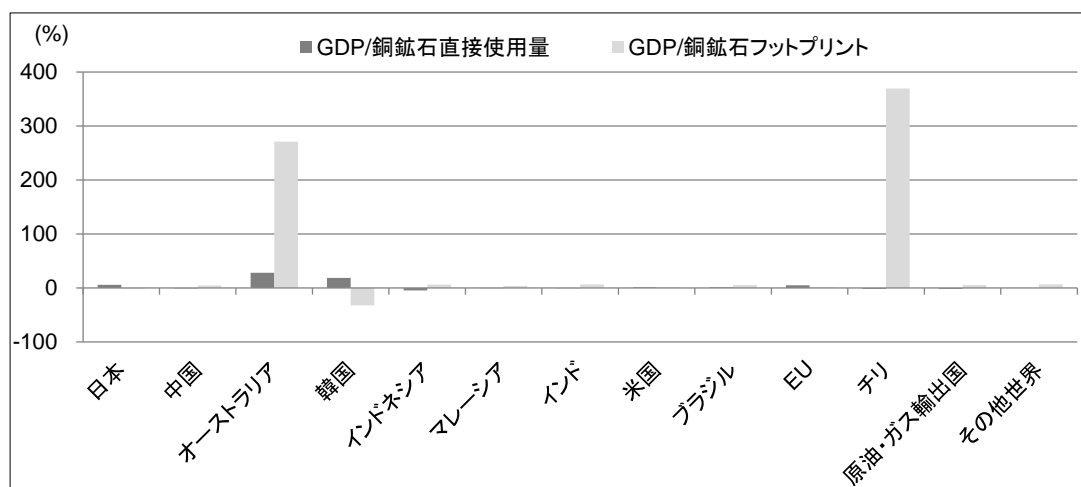


出典：シミュレーション結果

図2.23 各国・地域の実質GDPへの影響（評価期間合計）

特に対策を導入した先進6か国・地域のうち、チリで0.18%と無視できない実質GDP減少率となっており、社会経済システムの安定性を損なうようなマイナス影響の懸念も否定はできない結果となった。

図2.24に、評価期間最終年である2020年における銅鉱石直接利用量と銅鉱石フットプリントの2つの消費指標に対する資源生産性への影響を示す。

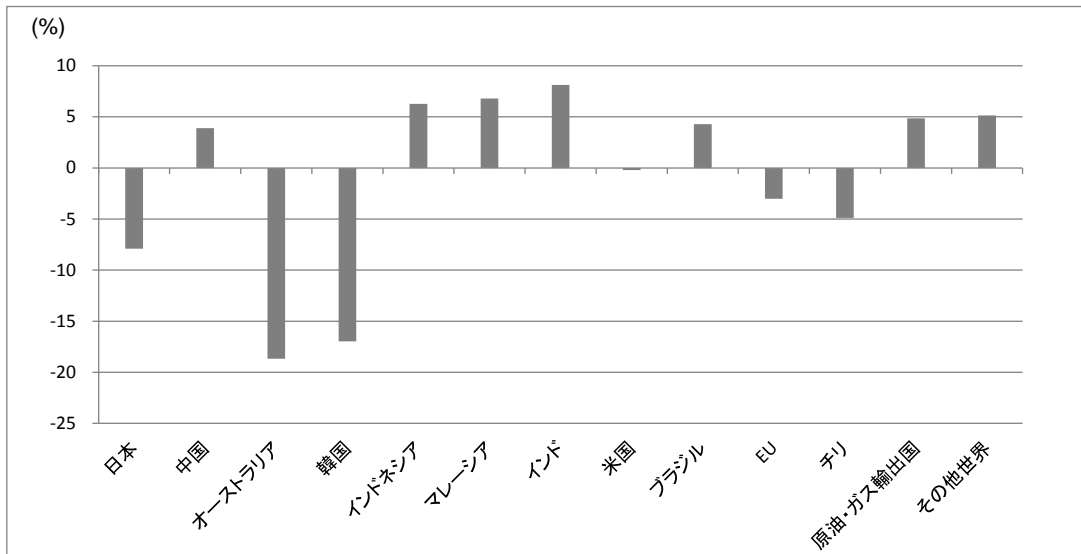


出典：シミュレーション結果

図2.24 各国・地域の銅鉱石資源生産性への影響（2020年）

銅鉱石フットプリントが増加したオーストラリアとチリにおいて、フットプリントでみた資源生産性が大幅に上昇しているが、両国は銅鉱石の主要輸出国であり、もともとの銅鉱石フットプリントがマイナスであったことからこのような結果となっている。

銅鉱石の直接利用者である各国・地域の銅部門生産量への影響を図2.25に示す。

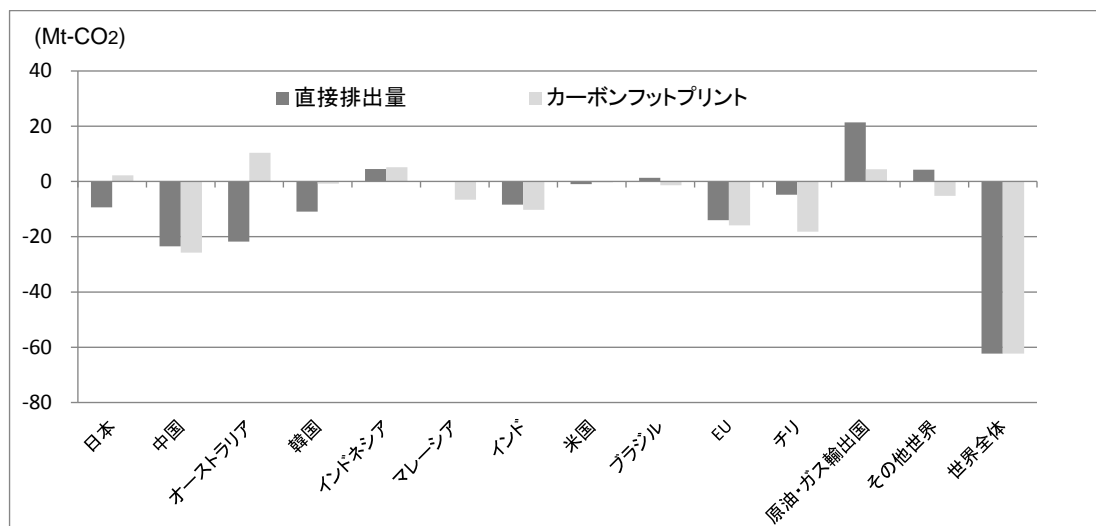


出典：シミュレーション結果

図2.25 各国・地域の銅部門生産量への影響（評価期間合計）

対策を導入した先進6か国・地域のすべてで銅部門の生産量が減少し、それ以外の国・地域のすべてで銅部門の生産量が増加する対象的な結果となった。鉄鉱石から銑鉄を生産し、銑鉄が鉄鋼生産の投入として使用される製鉄・鉄鋼部門に対し、銅部門は銅鉱石から直接銅生産を行っていることから天然資源税導入国・地域からそれ以外の地域に生産がシフトする傾向が明確に出た。

シナリオ9の環境持続可能性への影響として、CO<sub>2</sub>排出量への影響を図2.26に示す。



出典：シミュレーション結果

図2.26 各国・地域のCO<sub>2</sub>排出量への影響（評価期間合計）

直接排出量ベースでは、鉄鉱石を対象とした場合と同様に、政策を導入した先進6か国・地域においてCO<sub>2</sub>排出削減のコベネフィットが見られる結果となった。世界全体としてもCO<sub>2</sub>排出量抑制効果については、鉄鉱石を対象としたシナリオ5で1400万トンのCO<sub>2</sub>排出削減であったのに対し、シナリオ7では6200万トンのCO<sub>2</sub>排出削減となった。世界全体での厚生水準は一人あたり等価変分がマイナス1.5ドルとわずかに

減少したため、シナリオ5で実現した厚生水準とCO<sub>2</sub>排出量の強いデカップリングはシナリオ7では実現しなかった。カーボンフットプリントで見た場合、日本、オーストラリアは排出増に転じているが、EUやチリではさらに削減される結果となった。

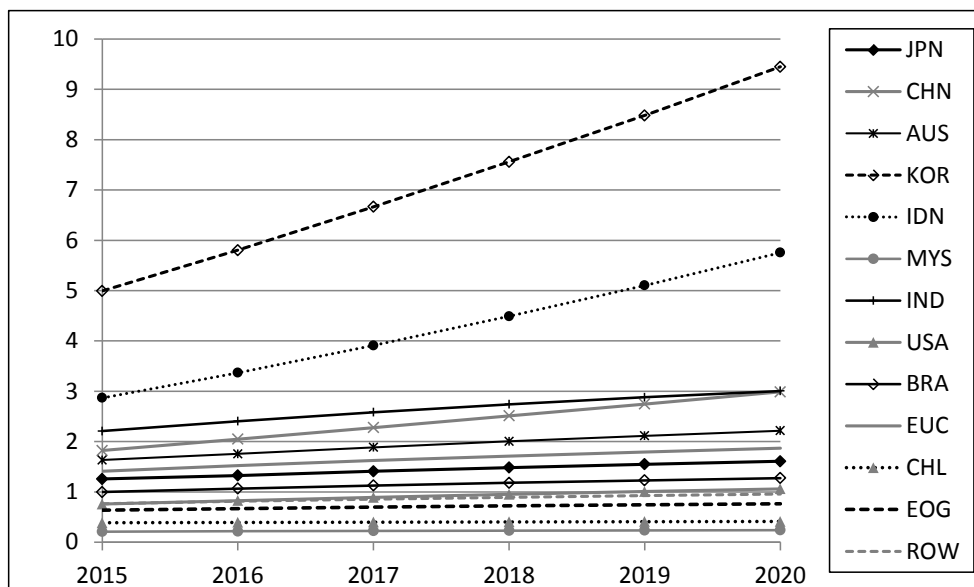
#### 2.4.6 資源価格高騰の影響

シナリオ8として鉄鉱石鉱山に限界採掘費用曲線を反映した資源制約CGEモデルを用いて政策を入れないBAUシナリオを走らせ、限界採掘費用曲線を反映しないベースCGEモデルによるBAUシナリオのシミュレーション結果と比較した。表2.18に2020年における各国・地域の鉄鉱石の限界生産費用（限界生産費用に等しい）変化率を、また図2.27に各国・地域の鉄鉱石の生産者価格変化率の経年変化をそれぞれ示す。

表2.18 2020年における各国・地域の鉄鉱石生産者価格変化率（ベースモデルBAU価格=1）

国・地域	変化率
日本	1.7
中国	3.2
オーストラリア	2.3
韓国	10.4
インドネシア	6.4
マレーシア	0.2
インド	3.1
米国	1.1
ブラジル	1.3
EU	1.9
チリ	0.4
その他原油・ガス主要輸出国	0.8
その他地域	1.0

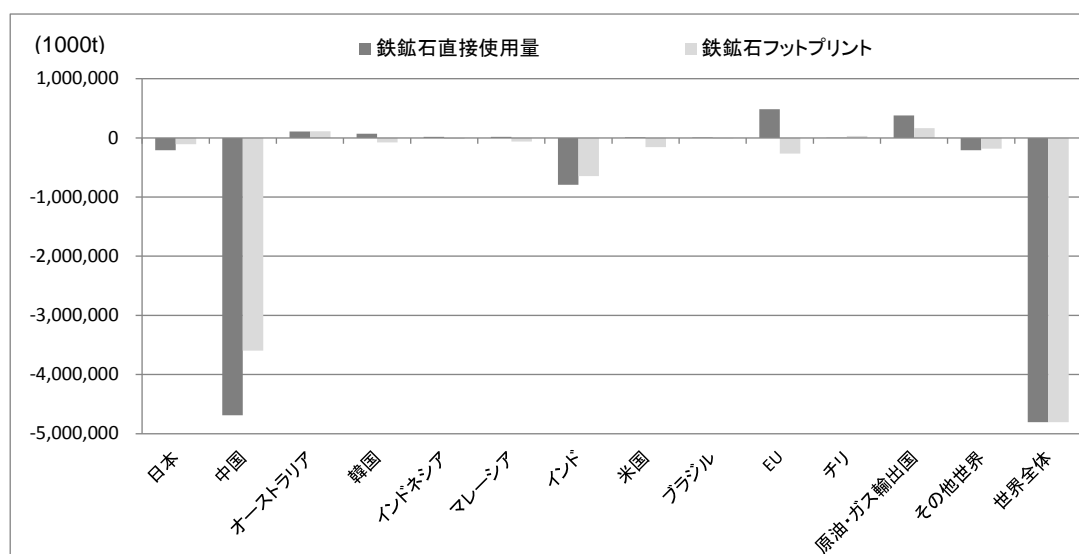
出典：シミュレーション結果



出典：シミュレーション結果

図2.27 各国・地域の鉄鉱石生産者価格変化率経年変化（ベースモデルBAU価格=1）

鉄鉱石価格高騰は年々進行する傾向にあること、また主要鉄鉱石生産国のうち、オーストラリアでは2020年時点でベースモデルでの価格の2.3倍、中国およびインドでは3倍以上に達しており、図2.28に示すように世界全体の鉄鉱石利用量が大幅に減少する結果となった。



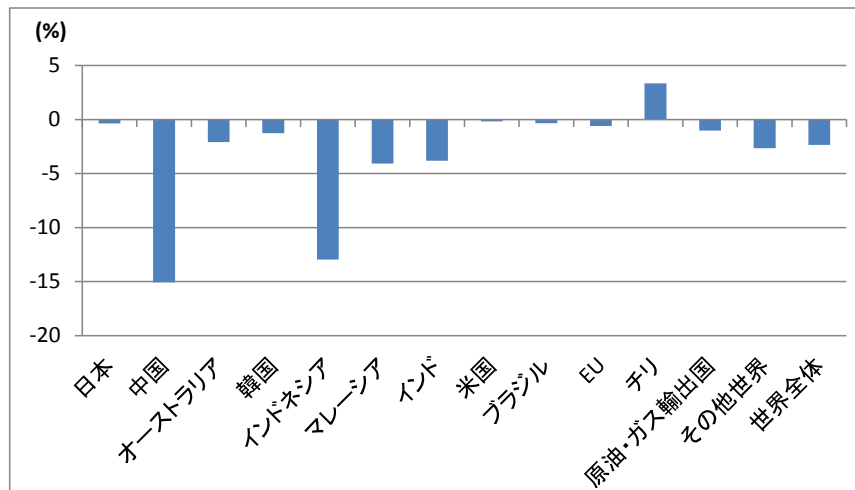
出典：シミュレーション結果

図2.28 各国・地域の鉄鉱石使用量への影響（評価期間合計）

基準年における世界の鉄鉱石使用量が年間約13億7千万トンであったのに対し、評価期間の平均値として、資源制約がない場合に比べ世界の鉄鉱石利用量が年間約8億トン減少することとなり、かなり過大推計となっている印象はぬぐえない。特に中国一国で世界全体の減少量に匹敵する大幅な減少となっている。原因として限界費用曲線を作成するデータの信頼性などの問題が考えられる。

このように資源制約影響がかなり過大に評価されている可能性に留意しつつ、このような資源価格高騰および資源消費抑制による様々な影響を検討する。

図2.29に示すように、実質GDPへの影響は中国でマイナス15%、インドネシアでマイナス13%と極めて深刻な影響となっており、世界全体でも実質GDPを2.4%押し下げる結果となった。



出典：シミュレーション結果

図2.29 各国・地域の実質GDPへの影響 (評価期間合計)

一方、厚生水準への影響（一人あたり等価変分）を表2.19に示す。

表2.19 各国・地域の一人あたり等価変分 (評価期間合計)

国・地域	一人あたり等価変分 (2004年USD/人)
日本	-7,982
中国	-1,662
オーストラリア	16,250
韓国	-7,617
インドネシア	-530
マレーシア	-1,765
インド	-296
米国	-321
ブラジル	1,038
EU	-1,264
チリ	43,736
その他原油・ガス主要輸出国	236
その他地域	-112
世界合計	-503

出典：シミュレーション結果

鉄鉱石主要生産・輸出国であるオーストラリアで、実質GDPがマイナス2%超の大幅減少でありながら、一人あたり等価変分が1万6千ドル（2004年USD）にも達しているのは、鉄鉱石価格の高騰から価格変動の影響を除いた実質ベース（この場合鉄鉱石生産量・輸出货量など）では鉄鉱石生産、輸出の落ち込みの

影響が大きくなり実質GDPを押し下げるが、一方価格高騰のため生産額、輸出額としては大幅増収となり、家計所得を大幅に押し上げる。等価変分の計算にあたっては物価の変化を考慮して調整するものの、等価変分の計算に用いる物価指数と、鉄鉱石価格などの個別価格の変動には大きな乖離があるため、このような結果になったと考えられる。

シナリオ8による検討結果からの含意としては、急速な需要増、あるいは供給が何らかの場合で大幅に減少するなどして資源価格の高騰が起きた場合には深刻な影響がある可能性が示唆された。しかし本モデルで想定したように、鉱山採掘費用の上昇のみでこのような劇的な資源価格高騰および大幅な資源利用抑制が起きるかについては大いに疑問である。資源制約の影響が反映されていない評価ツールを用いることの限界については十分留意しておく必要があるが、我々のアプローチでは現時点でのデータ信頼度、方法論の熟度では資源制約を反映したモデルをベースモデルとして採用する段階ではないと言わざるを得ない。

## 2.5 結論

本章では、先進国が持続可能な資源利用政策として資源利用抑制策を実施することにより、全世界の規範となりうるグリーン経済モデルの実現を図るとともに、国際的な資源競合の緩和を通じて新興国・発展途上国の経済発展に対する側面支援を行うことの意義を明らかにする目的で、先進国資源利用抑制政策シナリオを策定し、政策を実施した場合の厚生水準への影響、経済への影響および環境への影響について定量的評価を行った。その際、現状の経済成長依存型の社会・経済システムのもとで経済成長を優先政策目標としている限り弱いデカップリング（資源生産性・環境効率の向上）に対するインセンティブは働いても、強いデカップリング（経済成長と資源利用・環境負荷の削減の両立）にはつながらないことから、一般的な経済成長と資源利用量・環境負荷の強いデカップリングではなく、厚生水準と資源利用・環境負荷の強いデカップリングを政策目標と位置付けた。対象資源としては、本研究の先行研究の成果の活用、社会にとっての重要性およびデータ入手可能性の観点から鉄鉱石を中心とし、一部銅鉱石を対象資源とした場合との比較を行った。

持続可能な資源利用政策の評価ツールとして、天然資源税などの経済手法の影響評価に適している応用一般均衡（CGE）モデルと、資源フットプリント・カーボンフットプリントなどの製品ライフサイクルを通じた環境影響評価指標の推計に適した産業連関分析（IO）の連携に基づく評価手法を開発した。さらに複数年にわたる評価期間に対して各年の影響評価を行うことが可能な逐次動学モデルとすることで、評価期間合計値に対する目標設定を可能とし、さらにそのような政策目標に対して政策導入が遅れることによるコストの検討も可能となった。なお、鉄鉱石鉱山の限界採掘費用曲線を用いて鉄鉱石に関する資源価格高騰を通じた資源制約を反映したモデルを開発したが、データ信頼性の問題などからベースモデルとして採用することは断念し、資源制約を反映していないモデルの結果と比較をすることで、資源制約のコストを推計するとどめた。しかしこのような方向でのモデル改善の必要性について問題提起をしたことは、今後の環境政策議論に貢献するものであると考えている。

持続可能な資源利用政策シナリオとして、日本一国でグリーン経済を目指すシナリオ、日本の最大の鉄鉱石輸入元であるオーストラリアと協調してグリーン経済を目指すシナリオ、さらに先進国が協調して資源利用抑制政策を導入することにより、政策導入国におけるグリーン経済の確立に加え、対象資源をめぐる国際競合を緩和することで新興国・途上国の経済発展側面支援を目指す持続可能な開発シナリオを策定し、定量的影響評価を行った。

これらの政策シナリオに加え、持続可能な開発シナリオの資源利用削減目標は同一のまま、対策導入時期を1年遅らせることにより発生するであろう追加的コストの検証、あるいは政策対象資源を銅鉱石に変更した場合の含意についても検討を行った。

政策シナリオ影響評価の主な結論は以下の通りである。

### 日本一国グリーン経済

- 日本の鉄鉱石利用量を評価期間合計で政策なし（BAU）シナリオから5%削減するという目標に対し、鉄鉱石中間投入（シナリオ1）あるいは一段階下流側の銑鉄中間投入（シナリオ2）に対する天然資源税のみを政策手段とした場合、厚生水準が減少する結果となった。そのため、厚生水準と資源消費の強いデカップリングにはつながらなかった。
- 天然資源税の課税点が下流であるシナリオ2は、シナリオ1に比べはるかに低い税率で削減目標を達成した。一方、厚生水準の低下、実質GDPへの負の影響はシナリオ2の方が高かった。
- 鉄鉱石中間投入への天然資源税と鉄スクラップリサイクルの中間財投入に対する定率補助金を組み

合わせた場合（シナリオ3）では、わずかではあるが厚生水準が上昇した。すなわち厚生水準と鉄鉱石利用量との間に強いデカップリングが成立した。日本の実質GDPはわずかに減少したため、経済成長と鉄鉱石利用量との強いデカップリングが成立していない。鉄鉱石利用量を鉄鉱石フットプリントで見た場合、日本の鉄鉱石利用量の削減幅は直接利用量でみた場合に比べて小さくなるが、厚生水準改善、資源利用削減の双方とも極めてわずかではあるが、強いデカップリングが成り立つ可能性が示唆された。

### 日本－オーストラリア協調グリーン経済シナリオ

- 日本単独で天然資源税を上流側（鉄鉱石中間投入）に課税する場合と比べ、オーストラリアとの協調政策実施（シナリオ4）により目標達成に必要な税率は大幅に下がった。
- 同じ政策を同じ税率で導入したにも関わらず、日本とオーストラリアの間で政策影響に大きな差が出た。

### 持続可能な開発シナリオ

- 日本、韓国などOECD加盟国である先進6か国・地域で上流側天然資源税と鉄スクラップリサイクルを組み合わせた政策を実施することにより（シナリオ5）、オーストラリアを除く5つの政策導入国・地域で厚生水準と鉄鉱石利用量の強いデカップリングを実現した。また世界全体でも厚生水準上昇と鉄鉱石利用抑制の両立（強いデカップリング）が実現した。
- 対策導入国の鉄鉱石利用量の減少幅は世界合計の減少幅を上回っており、資源競合の緩和を通じて対策を導入していない国々（新興国・途上国が中心とみなすことができる）の資源利用を促進する結果となった。すなわち先進国資源利用の縮小と新興国・開発途上国による資源利用の増加により *Contraction and convergence* が実現した。
- 鉄鉱石利用抑制のコベネフィットとしてCO<sub>2</sub>排出量抑制の効果が見られた。世界全体でCO<sub>2</sub>排出量が減少しており、差が出た。厚生水準とCO<sub>2</sub>排出量との強いデカップリングも実現した。

### 対策遅れによる影響

- 持続可能な開発シナリオ（シナリオ5）と同じ政策ツールを1年遅らせて導入し、かつ同じ削減目標を達成する場合（シナリオ6）、世界全体の実質GDPが約27億ドル（2004年USD）減少する、すなわち経済費用が発生する結果となった。
- 一方、対策遅れにより天然資源税率が上がった結果、対策導入国・地域での厚生水準がシナリオ5よりもさらに上がる結果となった。また資源競合緩和効果もさらに強まったことから、新興国・開発途上国での便益もシナリオ5よりも大きくなった。

### 対象資源を銅鉱石とした場合の含意

- 持続可能な開発シナリオ（シナリオ5）と同じ政策ツールを対象資源を銅鉱石に変えて実施する（シナリオ6）場合、世界全体の厚生水準はわずかに減少する結果となった。鉄鉱石では実現した厚生水



準-鉄鉱石利用量の強いデカップリングが銅鉄石では見られなかった。

- 銅鉄石フットプリントを見た場合、政策導入国のうち日本、オーストラリア、チリで銅鉄石利用量が増加する結果となった。

### **資源価格高騰の影響**

- 鉄鉄石鉄山の限界採掘費用曲線を組み込んだ資源制約を反映したモデルと、資源制約を反映していないモデルによる政策なし（BAU）シナリオ評価を行い、資源価格高騰の影響を評価した。結果は世界全体の鉄鉄石利用量を平均年間8億トン削減する結果となった。これはかなり資源制約を過大評価している可能性があり、限界採掘費用曲線による資源制約反映は現時点では難しいと判断した。

本章で取り上げた先進国を対象とした天然資源利用抑制のための政策については、分析結果にも見られるように実質GDPベースでの経済成長に負の影響が出る可能性があり、金融システムや社会保障システムが経済成長に依存する形で制度設計されている現状ではすぐに実現する政策ではない。しかし成長のジレンマの呪縛のもと、先進国を中心に資源生産性や環境効率の向上は見られるものの、資源利用量・環境負荷発生量の絶対量の増加に一向に歯止めがかからない状況を鑑みるに、政策議論を開始する必要性は極めて高いと思われる。そのような議論を行う上で、本研究の成果は有用なものであろう。特に日本一国グリーン経済モデルにおいて厚生水準と資源消費（ここでは鉄鉄石）の強いデカップリングの実現可能性が示唆されたこと、および先進6か国・地域の政策協調による持続可能な開発モデルにおいて、オーストラリアを除く5か国・地域と世界全体として厚生-資源消費の強いデカップリングの実現可能性が示されたことは貴重な情報と考える。短期的な行政ニーズにこたえるというよりは、むしろ今後必要となるであろう新しい環境政策の潮流への貢献を目指した研究と言えよう。

別表 2.1 地域分割対応表

No	本研究での11地域	対応するGTAPデータベース地域
1	JPN	JPN
2	CHN	CHN
3	AUS	AUS
4	KOR	KOR
	IDN	IDN
	MYS	MYS
5	USA	USA
6	IND	IND
7	BRA	BRA
8	EUC	AUT, BEL, CYP, CZE, DNK, EST, FIN, FRA, DEU, GRC, HUN, IRL, ITA, LVA, LTU, LUX, MLT, NLD, POL, PRT, SVK, SVN, ESP, SWE, GBR
9	CHL	CHL
10	EOG	XWS, RUS, IRN, NGA, XNF, MEX, VEN, CAN, NOR
11	ROW	上述以外のすべての地域

別表 2.2 部門対応表 (1/2)

GTAP 7における57部門			本研究での52分類		
No.	Sector Code	Sector Description	No.	Sector code	Sector description
1	pdr	Paddy rice	1	agx	Agriculture
2	wht	Wheat			
3	gro	Cereal grains nec			
4	v_f	Vegetables, fruit, nuts			
5	osd	Oil seeds			
6	c_b	Sugar cane, sugar beet			
7	pfb	Plant-based fibers			
8	ocr	Crops nec			
9	ctl	Cattle, sheep, goats, horses			
10	oap	Animal products nec			
11	rmk	Raw milk			
12	wol	Wool, silk-worm cocoons			
13	frs	Forestry	2	frs	Forestry
14	fsh	Fishing	3	fsh	Fishing
15	coa	Coal	4	coa	Coal
16	oil	Oil	5	oil	Oil
17	gas	Gas	6	gas	Gas
18	omn	Minerals nec	7	iro	Iron ore mining
			8	cop	Copper ore mining
			9	omn	Other mining
19	cmt	Meat: cattle,sheep,goats,horse	10	cmt	Meat: cattle,sheep,goats,horse
20	omt	Meat products nec	11	omt	Meat products nec
21	vol	Vegetable oils and fats	12	vol	Vegetable oils and fats
22	mil	Dairy products	13	mil	Dairy products
23	pcr	Processed rice	14	pcr	Processed rice
24	sgr	Sugar	15	sgr	Sugar
25	ofd	Food products nec	16	ofd	Food products nec
26	b_t	Beverages and tobacco products	17	b_t	Beverages and tobacco products
27	tex	Textiles	18	tex	Textiles
28	wap	Wearing apparel	19	wap	Wearing apparel
29	lea	Leather products	20	lea	Leather products
30	lum	Wood products	21	lum	Wood products
31	ppp	Paper products, publishing	22	ppp	Paper products, publishing
32	p_c	Petroleum, coal products	23	p_c	Petroleum, coal products
33	crp	Chemical,rubber,plastic prods	24	crp	Chemical,rubber,plastic prods
34	nmm	Mineral products nec	25	nmm	Mineral products nec
35	i_s	Ferrous metals	26	pio	Pig iron
			27	csb	Blast furnace steel
			28	cse	Electric arc furnace steel
			29	cop	Copper
36	nfm	Metals nec	30	nfm	Metals nec
37	fmp	Metal products	31	fmp	Metal products
38	mvh	Motor vehicles and parts	32	mvh	Motor vehicles and parts
39	otn	Transport equipment nec	33	otn	Transport equipment nec
40	ele	Electronic equipment	34	ele	Electronic equipment
41	ome	Machinery and equipment nec	35	ome	Machinery and equipment nec

別表 2.2 部門対応表 (2/2)

GTAP 7における57部門			本研究での52分類		
			36	omf	Other manufacturing
			37	ssr	Steel scraps recycling
			38	csr	Copper scraps recycling
42	omf	Manufactures nec	39	osr	Other recycling
43	ely	Electricity	40	ely	Electricity
44	gdt	Gas manufacture, distribution	41	gdt	Gas manufacture, distribution
45	wtr	Water	42	wtr	Water
46	cns	Construction	43	cns	Construction
47	trd	Trade	44	trd	Trade
48	otp	Transport nec			
49	wtp	Sea transport			
50	atp	Air transport	45	tpx	Transport
51	cmn	Communication	46	cmn	Communication
52	ofi	Financial services nec	47	ofi	Financial services nec
53	isr	Insurance	48	isr	Insurance
54	obs	Business services nec	49	obs	Business services nec
55	ros	Recreation and other services	50	ros	Recreation and other services
56	osg	PubAdmin/Defence/Health/Educat	51	osg	PubAdmin/Defence/Health/Educat
57	dwe	Dwellings	52	dwe	Dwellings

別表 2.3 部門分割に用いたデータソース

Sector Name	Japan	China	Australia	Korea	USA	India	Brazil	EU_25	Indonesia	Malaysia	Oil Exporting Countries	Indonesia and Malaysia	Rest of the World
Iron Ore (iro)	JIO	EORA	EORA	USIO*	USIO	EORA	EORA	JIO*	EORA	EORA	USIO*	EORA	EORA* (Brazil ratio)
Copper ore (cop)	Australia	Australia	EORA	Australia	Australia	EORA	India	Chile	India	India	India	EORA	Chile
Other Mining (omn)	Australia	Australia	EORA	Australia	Australia	EORA	India	Chile	India	India	India	EORA	Chile
Pig Iron (pio)	JIO	EORA* (Brazil ratio)	JIO*	USIO*	USIO	EORA	EORA	JIO*	EORA* (India ratio)	EORA* (India ratio)	USIO*	EORA* (India ratio)	EORA* (Brazil ratio)
Blast furnace steel (csb)	JIO	EORA* (Brazil ratio)	JIO*	USIO*	USIO**	EORA**	EORA	JIO*	EORA* (India ratio)	EORA* (India ratio)	USIO**	EORA* (India ratio)	EORA* (Brazil ratio)
Electric arc furnace steel (cse)	JIO	EORA* (Brazil ratio)	JIO*	USIO*	USIO**	EORA**	EORA	JIO*	EORA* (India ratio)	EORA* (India ratio)	USIO**	EORA* (India ratio)	EORA* (Brazil ratio)
Other Manufacture (omf)	JIO	EORA	JIO*	USIO*	USIO	USIO*	EORA	JIO*	USIO*	USIO*	USIO*	USIO*	EORA
Steel Scrap Recycling (ssr)	JWIO	EORA***	JWIO*	USIO*	USIO	USIO*	EORA***	JWIO*	USIO*	USIO*	USIO*	USIO*	EORA***
Copper Scrap Recycling (csr)	JWIO	JWIO*	JWIO*	JWIO*	JWIO*	USA	JWIO*	JWIO*	USA	USA	USA	USA	JWIO*
Other Recycling (osr)	EORA	EORA*	JWIO*	JWIO*	EORA*	USA	EORA*	EORA*	USA	USA	USA	USA	EORA*

Note: JIO = Japan Input-Output Table, JIO\*= the same ratio as JIO, JWIO = the ratio between omf and composite recycling is based on JIO and the ratio between ssr and osr is based on Japan Waste Input-Output Table, JWIO\* = the same ratio as JWIO, USIO = US Input-output Table in 2002, USIO\* = the ratio based on USIO, EORA = Global multi-region Input-Output table compiled by Manfred Lenzen under EORA project, USIO\*\* = the ratio between pio and composite steel is based on USIO, and the ratio between csb and cse is based on JIO, EORA\* = the same ratio as EORA (in specified country), EORA\*\* = the ratio between pio and composite steel is based on EORA, and the ratio between csb and cse is based on JIO, EORA\*\*\* = the ratio between other manufacturing and recycling is based on EORA, and the ratio between steel scrap recycling and other recycling is based on JWIO.

## 2 章 参考文献

- Dodson J. R., Hunt A. J., Parker H. L., Yang Y., and Clark J. H. (2012). Elemental sustainability: Towards the total recovery of scarce metals. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 51, 69-78.
- European Environment Agency (2008). Effectiveness of environmental taxes and charges for managing sand, gravel and rock extraction in selected EU countries. EEA Report 2/2008. Copenhagen: EEA.
- Fouré, J., A. Bénassy-Quéré and L. Fontagné (2012). The Great Shift: Macroeconomic projections for the world economy at the 2050 horizon. Paris, CEPII.
- Griggs D., Stafford-Smith M., Gaffney O., Rockström J., Öhman M. C., Shyamsundar P., and Noble I. (2013). Policy: Sustainable development goals for people and planet. *Nature*, 495(7441), 305-307.
- Huang T., Shi F., Tanikawa H., Fei J., and Han J. (2013). Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 91-101.
- Jackson T. (2011). *Prosperity without growth: Economics for a finite planet*. Routledge.
- Lofgren H., Harris R. L., and Robinson S. (2002). A standard computable general equilibrium (CGE) model in GAMS (Vol. 5). Intl Food Policy Res Inst.
- McDonald S., Thierfelder K., and Robinson S. (2007). *Globe: A SAM based global CGE model using GTAP data*. United States Naval Academy.
- OECD (2014). *Green Growth Indicators 2014*. OECD: Paris.
- OECD (2002). *Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth*. Sustainable development, OECD: Paris.
- Rockstrom J., Steffen W., Noone K., Persson A., Chapin F.S. and Lambin E.F. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-5.
- UNEP (2011). *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. UNEP: Nairobi.
- UNEP (2010). *Metal Stocks in Society. A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel*. UNEP: Nairobi.
- USGS (2014). *Mineral Commodities Summary*. ([http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_ore/mcs-2014-feore.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore/mcs-2014-feore.pdf))
- World Steel Association (2011). *World steel in figures 2011*. World Steel Association.
- World Trade Organization (2011) *International Trade Statistics 2011*. Geneva: World Trade Organization.

WWF and GFN. (2012). Living planet report 2012. Biodiversity, biocapacity and better choices. WWF, Switzerland.

小嶋公史（2011）持続可能な社会構築に向けた資源消費抑制政策ーアジアを中心とした資源循環システムの環境的、経済的、社会的影響評価に関する研究ー、環境研究 No.161：77-86.

小嶋公史、蒲谷景、矢野貴之（2011）持続可能な開発につながるグリーン経済：日本は世界の貧困撲滅を重視した政策への転換を、IGESポリシーブリーフ12、IGES：葉山.

小嶋公史、栗生木千佳（2013）資源利用の効率性・公平性～プラネタリーバウンダリーの視点から～、環境経済・政策学会2013年大会、2013年9月21-22日、神戸大学.

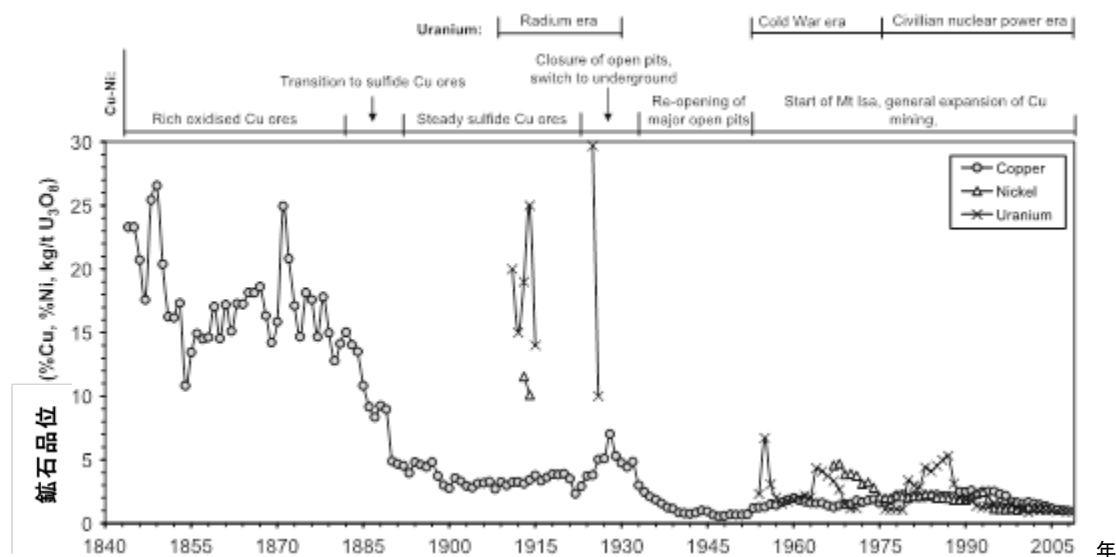
村上進亮、安達毅、矢野貴之（2012）資源供給制約の経済影響評価とマテリアルバランスの検証、環境経済・政策学会2012年大会、2012年9月15-16日、東北大学.

### 3. 物質利用に伴うライフサイクル環境影響評価

#### 3.1 はじめに

国連環境計画（UNEP）国際資源パネルをはじめ、資源の持続可能な利用に対する興味関心は広がりを見せている。これは資源需要が拡大の一途を辿っていることに加え、資源開発現場の環境が徐々に難しいものになっていることを反映している（Mudd 2010、Mudd 2009）。化石燃料資源などにくらべ、金属鉱物資源の鉱山現場ごとの質の違いは非常に大きいものである。

一般に、より採算性の高い、アクセスしやすい資源から開発されるため、資源需要の増大に伴い、鉱石品位が低下するとともに（図3.1参照）、鉱床は深く、周辺の環境もより厳しい現場へと向かうことを強いられている。この事実は、我々に天然資源開発の環境影響を適切に評価することを求めていると言えよう。



出典：Mudd 2010

図3.1 豪州における鉱石品位の低下傾向

本研究では、ライフサイクルの各段階、特に天然資源採取にかかる環境影響の評価についての研究の深化を目的とし、研究を進めた。具体的には3つのアプローチ、すなわち関与物質総量（TMR）改良版、個別鉱山に対するCO<sub>2</sub>排出量、エコロジカル・フットプリント（EF）について取り組みを進めてきた。3つのアプローチをもって取り組む理由を明確にするため、それぞれの特徴および関連性を整理しておく。

TMRは重量ベースの物質フロー指標である。TMRは当該資源を得るために人間が環境中から取り出した物質の総量であり、我々の社会経済の環境に対する介入量と考えることができる。しかし、介入の結果として生じる環境影響の詳細については論じることはできない。介入の結果として懸念される環境影響は、土地改変や水質の悪化による生物多様性への影響などであり、介入する場所に大きく依存することにも注意が必要である。環境影響の種類によっては、介入量とある程度相関がある場合もあると考えられるため、TMRが環境影響に対する非常に粗い指標として機能するかどうか、本研究



の論点の一つである。ただし、資源開発の現場は往々にして長期プロジェクトである場合が多く、また発生する環境影響も長く続く場合が多い。これに対して、TMRを含む分析手法であるマテリアルフロー分析とは、基本的にスナップショット的な分析であり、時間的な概念が含まれにくい。この懸念を解決することが、本研究におけるTMRの改良のもう一つの視点である。

CO<sub>2</sub>排出量は、ライフサイクルアセスメント（LCA）における最も良く知られた指標の一つである。ただし、資源採取にかかるCO<sub>2</sub>排出量は、多くの場合がバックグラウンドデータとして用意された代表値を用いる場合が多い。他方で、例えば金属鉱山の場合、同じ金属を採掘していたとしても採掘手法は様々であり、CO<sub>2</sub>排出量も鉱山毎に大きく異なる。これを改めて検証することが、本研究におけるCO<sub>2</sub>排出量検討の重要な課題の一つである。その上で、例えば上述のTMRと同じ鉱山についてのケーススタディをすることで、TMRとCO<sub>2</sub>排出量との相関関係を検討することが出来る。特に近年話題となっているブロックチェーンに代表される大規模坑内掘と、大規模露天掘のそれぞれについてCO<sub>2</sub>排出量とTMRを比較することは、興味深い試行である。

最後にEFであるが、人間活動の環境に対する負荷を、その再生産と廃棄物等の浄化に必要な面積として表すものであり、環境容量に対する環境負荷指標である。EFについてはかなり多くの研究蓄積が進んでいるところではあるが、その推定は非常に難しいものである。本研究では、推定の難しい事例としてレアアースの問題を取り上げているが、その理由はケーススタディ対象の鉱山並びに精錬所が扱っている鉱石に放射性物質が含まれていることにある。こうしたものに由来する非常にインパクトの大きいタイプの環境影響を評価するにあたり、TMRで評価することは恐らく無意味であり、そうした意味でEFのような指標に期待がかかる部分でもある。つまりTMRに期待できない部分についてEFによる評価が機能することを期待してこのような選定となっている。

各指標に関する研究成果を説明した上で、最後に3つの手法を同じケーススタディに用いることでそれぞれの得意不得意について検討する。

### 3.2 TMRの動学的な展開

#### 3.2.1 手法の改良

昨今我が国において言及されることの多いTMRは、隠れたフローを含めた物質強度（MI）のような原単位的な意味で使われていることが多い。本来、TMRは国レベルでの物質フロー分析（EW-MFA）における指標であり、ある時点（例えば年度）での経済社会システムにおける隠れたフローを含めた物質総投入量を求めるものである。EW-MFAは静学的なスナップショット的分析手法であり、その一指標であるTMRでは、基本的には異時点間での隠れたフローの時間的配分を行うことは出来ない。TMRとは、当該時点における、我々の経済社会のために環境から移動させた物質総量、すなわち環境に対する介入の程度を求めるものであり（地理的な境界を設定すれば、経済同士の貿易などもフローとして捕捉される）、本来環境影響指標ではないにも関わらず、環境影響指標として機能することが大きく期待されている状況である（Bringezu 2003）。

MIやTMRの考え方、特に資源開発に係る部分とその異時点間での配分問題を以下に整理する。図3.2に、鉱山開発の各段階においてどのような量の物質の移動（棒）とキャッシュフロー（線）が発生するのかを模式的に示した。

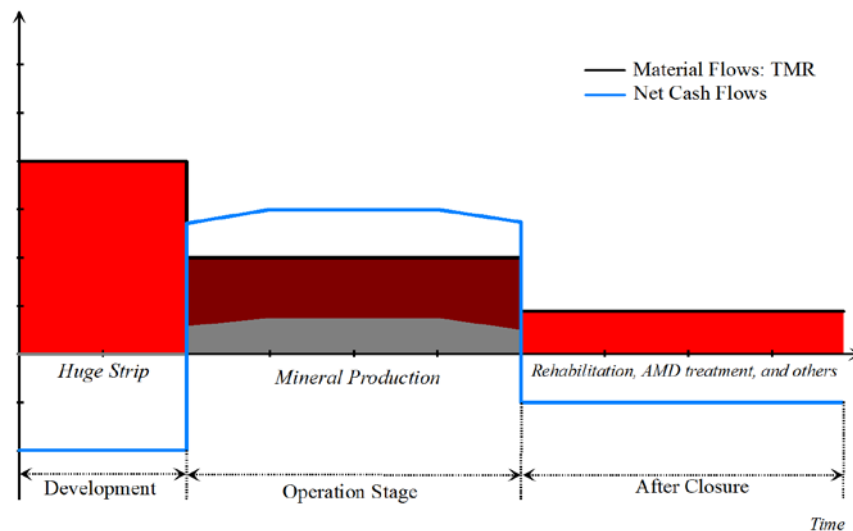


図3.2 ライフサイクルを通してのTMRの推移

鉱山開発を大きく開発、操業、閉山後の3段階に分けることとする。正確には開発前に探査の段階があるが、この段階ではサンプルを獲得するためのボーリングが行われる程度であり、これに起因するマテリアルフローはあまり大きな値ではないと考えられるため、省略した。

操業前の開発段階における剥土による隠れたフローや、閉山後の鉱排水処理等による物質投入量はしばしば勘定されない。関係する研究者へ問い合わせ等を行った結果、可能な場合にはこうした量も計算した上で異時点間配分する場合もある、と言った回答を得たが、具体的な計算手法については多くの情報を得ることは出来なかった。つまり、図3.2で言えば黒色部（操業中の隠れたフロー）+ 灰色部（生産量）のみがTMRとして計上され、赤色部分が勘定されないケースが多いと考えられる。

そこで本研究では、赤色、特に閉山後の部分に関する分析を行った。手法としては、閉山後排出される酸性坑排水（AMD: Acid Mine Drainage）の水質を予測した後、その中和処理等を行うために必要になる物質の投入量と、発生する中和澱物の量（これは正確には中和澱物を埋め立てるためのダムの掘削量の代理指標である）を計算している。手法についてはKoide et al. (2012)、ケーススタディについては大塚他 (2014) に詳しいためここでは割愛するが、重要な点は、水質汚染をそれを改善するために誘発されるマテリアリフローの一部として捉えることでTMRの中で統合的に捉えることを可能としている点である。

### 3.2.2 ケーススタディ

2つの硫黄鉱山に対する分析を実施し比較を行った（表3.1中の鉱山A、鉱山B）。

表3.1 鉱山のライフサイクル全体でのTMR推定

	鉱山A	鉱山B
<b>操業期間中のフロー [ton]</b>		
総採掘量 (A)	28,484,816	5,760,803
硫黄生産量 (B)	2,259,917	1,463,000
<b>閉山後のAMD処理のためのフロー [ton]</b>		
中和剤投入量 (C)	468,462	910,930
澱物発生量 (D)	307,745	275,059
<b>資源生産性<sup>-1</sup> [TMR[ton]/Production[ton]]</b>		
A / B	12.6	3.93
D / B	0.136	0.62
C / B	0.207	0.19
C+D / B	0.343	0.81
TMR (A+C+D) / B	12.94	4.74
<b>時間の流れ</b>		
操業開始年	1914	1906
操業終了年	1969	1973
中和処理終了予測	2113	2313

まずA/Bとしている量を見ると、操業中の硫黄生産量と総採掘量の比がそれぞれ12.6と3.93であることが分かる。鉱山Aはそもそもの採掘量が非常に大きいこともあり、閉山後のAMD処理に由来するTMRの影響はC+D/Bが0.343であることから小さいことが分かる。ただしこれはBすなわち総採掘量が大きいからだけではなく、分子が小さいことにもよる。最下段の中和処理終了予測時点を見れば、鉱山Aは鉱山Bの2313年に比べ、2113年とはるかに早く処理が終了すると予測されていることが分かる。

### 3.2.3 TMRの指標としての評価

前節の結果を見つづTMRが環境影響評価のための一次近似的な代理指標として機能するかを考察する。まず表3.1におけるC+DとAを比較する。特に鉱山Aにおいてはこの両者の比率は3：10程度である。他方でこのC+Dは酸性坑排水という、そのままにしておけば非常に大きな影響をもたらす環境負荷に対する処理である。つまり、鉱山操業がもたらした閉山後のAMDと言う環境負荷を浄化するために必要な物質投入量である。

そこで、これまで考えてきたAのみで推計されたTMRはAMD問題を無視しており、これを勘定するためにC+Dを更に加えたTMR=A+C+Dと言う指標を考えたと理解するならば、C+Dのシェアは小さすぎる。こうした意味において、全ての環境負荷を一括で評価する指標としてTMRを用いることには無理がある。ただし、鉱山Bをみると、C+Dの値は鉱山Aよりも大きい。これは処理が必要な期間が長いことを考えれば非常に自然な結果である。つまりC+D同士で比べた場合の大小関係にはある程度意味があると考えられる。

よってここではTMR、より正確には今回推定した鉱山のライフサイクルを通してのTMRについて、ある特定の活動（掘削やAMD処理）に関する大小関係を評価する指標としては機能する可能性があるが、異なる環境影響を全て含めて評価する指標として十分だとは言いがたいと結論できる。

もう一点、EW-MFAの分野で良く用いられる資源生産性の概念を用いて、このTMRの異時点間配分、すなわち異時点間での責任分担の問題を考察しておきたい。AMD問題の本質は、鉱山操業によって閉山後長期にわたって環境負荷が生じ、その顕在化を回避するための処理費用が発生するという外部性にある。鉱山操業の収益は基本的にはTMR(=A+C+D)をもたらす活動の内、Aに関する活動においてもたらされる。ここでデータの得られた鉱山Aについて議論しておく、この鉱山は現在価値にしてRA=47億円程度の売り上げをもたらしている。他方で、閉山後のAMD処理によっておおよそRC+D=5億円程度の費用が発生すると考えられる。この費用は付加価値でもある。ここで、資源生産性をどう見積もるか考える。

① 鉱山という地域境界の中で生じた総額をライフサイクル全体のTMRで割る

$$(RA + RC+D) \div TMR(A+C+D) = 52 / 29 = 1.8$$

② 鉱山という事業主体がAMD処理まで行ったとして考える

$$(RA - RC+D) \div TMR(A+C+D) = 42 / 29 = 1.4$$

③ それぞれ別の主体だと捉える

$$RA \div TMR(A) \text{ と } RC+D \div TMR(C+D) \quad 47 / 28 \text{ と } 5 / 1 \rightarrow 1.7 \text{ と } 5$$

ここでの論点は、TMRで表されたマテリアルフローが誰の行為に起因するものとして考えられるのかという視点である。なお、RAの値が付加価値ではなく売り上げになってしまっているために、数字はあくまで仮のものである。この3つの資源生産性のいずれのものが正しいと考えるかは仮定に依存するが、もし仮にTMRを環境影響指標とみなし、環境影響は鉱山という事業主体がもたらしめているのだとすれば、②が正しいように思われる。

最後に勘定（Accounting）の上での問題点を指摘しておく。ここで紹介した手法により水質予測を行うことで、閉山後のAMDといった時間的な意味での隠れたフローを明らかにしTMRの一部として計算することが可能であることは示した。ただし、鉱山排水の水質データをすべての鉱山について入手することはほぼ不可能である。特に我々が懸念するような、環境基準の比較的緩やかな地域ではほぼ不可能であろう。今回のケーススタディからは、本手法によって求められるTMRについて言えば、閉山後のTMRはそこまで大きなものではなかった。そうした意味で言えば、操業中のこれまで計算されてきたようなTMRをまずは計算し、ただしここで検討したような情報が欠落していることを認識しておくことが重要であるといえよう。

### 3.3 個別鉱山の特徴を反映したCO<sub>2</sub>排出量の推定

本節では、鉱山における環境負荷量の把握を目的としたときに、その第一段階となるCO<sub>2</sub>排出量の推定を行うことを目的とした場合、各鉱山の生産方法を反映した生産プロセスのCO<sub>2</sub>排出量の推定方法について述べる。これは金属生産全体もしくは金属のライフサイクルを考えたときに、各生産、利用のプロセスでどれだけの環境負荷を課しているかは、地球温暖化への影響を考えたときには特にCO<sub>2</sub>排出量の比較の必要性が高く、また評価事例も多いためである。

日本は資源のほとんどを海外の資源国に依存しているため、海外の資源産出国におけるエネルギー・資材消費に関する統計がほとんど公表されていないことに排出量の評価は制約を受けている。またこれまでに公表されている各種LCAデータベースによる鉱山活動のCO<sub>2</sub>排出量は、1～3鉱山のデータが他の鉱山にも同様に当てはまるとして値が出されている。しかしながら、鉱山の生産方法は多様であり、少数の鉱山の例を採用するには無理がある。また、その鉱山が選択された理由が明らかにされている必要があるが、そのような理由の記載はなく、十分な情報公開がなされていない欠点もある。

一方で、これまでに鉱山開発におけるフィージビリティスタディ（F/S）の段階で費用概算を行うシステムとして、費用推定システムが開発されてきた。これは推定鉱量や鉱床の位置、想定される採掘法などから、開発の初期費用や操業費を見積もり、投資の際の意思決定に利用するものである。著者らはかつて、この費用推定システムをデータベース化することによって、基本的な情報から鉱山の生産方法に準じ、鉱山の特徴を反映した採掘・選鉱プロセスのCO<sub>2</sub>排出量を推定するモデルを構築した（安達ら2005、安達ら2006）。このモデルをMLED（Mining LCI Estimating Database）と呼んでいる。

なお、本来のライフサイクルインベントリ分析もしくはLCAの意味では、鉱山を対象とした場合、排水処理や重金属汚染、土地改変も重要な環境負荷項目であると指摘されるが、現段階でのMLEDはこれらを扱うまでにはいたっておらず、本研究では資源開発活動によるエネルギーと資材の消費量ならびにCO<sub>2</sub>排出量のみを対象としている。

#### 3.3.1 費用推定システムとデータベースの概要

推計に用いたデータベースの概要を述べる。MLED内部の計算手順は、始めにデータベース化した費用推定システムからエネルギーと資材の費用を算出し、その費用を単価で割ることで消費量を算出する手法をとる。各プロセスで排出されるCO<sub>2</sub>量は、消費量に排出係数を掛けて算出される。費用の推定式は、アメリカ鉱山局（USBM）が開発したCES（Cost Estimating System）に基づく（USBM 1987a、USBM 1987b、USBM 1995）。CESは、34の鉱種についてアメリカの約250鉱山から収集されたデータをもとに、鉱山開発に関わる細分化されたあらゆる工程ごとに費用曲線と費用に占める各投入物のシェアを推定している。内容は、大きく分けて採掘プロセスと選鉱プロセスからなり、それぞれが生産前の資本投資段階と操業段階に分けられた構成となっている。

本研究では銅鉱山を対象とするが、採掘と選鉱の工程を経る鉱山開発であるならば、他の金属鉱山でもMLEDによってCO<sub>2</sub>排出量を推定できる。すなわち、ベースメタルのみならず、レアメタルや貴金属を採掘対象としている鉱山であっても、特殊な採掘法や選鉱法を用いておらず、かつ生産規模が費用曲線の有効範囲内であれば、MLEDを用いたインベントリ分析が行える。

費用の推定式の多くは、式(1)のようなベキ乗型の関数で定義されている。

$$C = M \cdot A \cdot X^B \quad (1)$$

ここで、 $C$ は対象とする工程の総費用で、容量やサイズ等の入力データ $X$ の関数である。 $A$ および $B$ は、USBMが推定したパラメータで、 $M$ は単位あたりの数量で表された費用を総費用に変換するための乗数である。費用曲線は実際の鉱山のデータと比較されており、一般的にF/S段階で要求される25%以内の誤差に収まることが確かめられている。各式には有効範囲が定められ、その範囲内ではとくに高い信頼性があるとしている。MLEDで推定する投入物の消費量はこの費用曲線に全て依存するため、推定されるCO<sub>2</sub>排出量も25%以内の誤差となることが期待される。

データベース作成にあたり、1984年版のCESを基本に、1994年版で更新された項目を補い、LCIの計算に必要な式を約1,100本選択した。各式をグループに分け、さらに推定式を相互に関連づける作業を行い、マイクロソフト社のAccess上でデータベース化を行った。主な構成は、露天掘、坑内掘、選鉱、それぞれについて資本費と操業費の6つのデータテーブルからなり、また、それぞれのデータ入力と計算結果出力のアプリケーション化をはかり利便性を高めている。鉱山データの入力画面例を図3.3に示す。

図3.3 MLEDの鉱山データ入力画面例

### 3.3.2 生産プロセスの概要とシステム境界

はじめに、非鉄金属を念頭において金属が地金として生産されるまでのプロセスを整理する。金属は通常、大きく分けて採掘、選鉱、製錬の三段階を経て生産される。採掘（採鉱）は、鉱山において鉱床から鉱石を掘り出すプロセスを指す。採掘方法には主に、地表をスリ鉢状に開削することで鉱床を採掘する露天掘と、地中にトンネル坑道を掘進し鉱床に到達することで、主に鉱床部分を採掘する坑内掘とに分類できる。どちらの採掘方法が選択されるかは、鉱床の位置や形状などに依存する。さ

らに鉱床とその周囲の力学的強度を勘案して細分化された具体的な採掘法が選択される。通常は鉱床を爆薬で発破することで起砕した鉱石をローダーやショベルですくい上げ、トラックなどで運搬する。

採掘された鉱石は、選鉱所に運搬される。選鉱所では、まず鉱石をクラッシャー等の機器によって100 $\mu$ m以下まで細かく砕く（破碎・粉碎工程）。その後大まかに、鉱物と岩石を分離する選鉱プロセスによって精鉱が産出される。この代表的な方法として浮遊選鉱法（浮選）があり、銅の場合では鉱石の段階で1%前後である品位（重量比）を、25~35%程度まで高めることができる。最後に沈殿濃縮・脱水・乾燥させた精鉱が、鉱山からの製品として出荷されるのが一般的である。

日本の場合、海外の鉱山でこのように製造された精鉱を海上輸送によって輸入し、日本国内の製錬所で金属地金を生産するのが供給の大半をしめる。精鉱を熔鉱炉で熔融させ、さらに転炉や精製炉で不純物を取り除く処理を加えて粗金属（品位 99.5%程度）を作り、最終的にはさらに電解工程を経て金属地金は製造される。

今回は、採掘プロセスの操業時段階のみをインベントリ分析のシステム境界とする。採掘プロセスには、採鉱プロセスと選鉱プロセスが含まれる。

操業中の採掘プロセスは、発破孔のさく孔および発破による起砕から、鉱石が貯鉱所まで運搬されるまでを範囲とする。排水処理、廃滓処理の操業に関する範囲も含むこともできるが、データが揃わないため今回は除外している。また、重機や施設自体の生産や廃棄については除外しているほか、施設やインフラについては現地での建設に関するインベントリも対象外となっている。

採掘プロセスにおいては、燃料（軽油）・電力・火薬類・潤滑油・鋼材・木材・タイヤの7種類がMLEDの投入物の項目として扱われている。ただし、鋼材や木材などの投入資材については、その種類が特定できないことから、資材の原材料のインベントリが集計されている。システム外への環境負荷物質としては、すでに述べたように今回はCO<sub>2</sub>排出量のみを対象としている。

選鉱プロセスにおいては、燃料（軽油）・電力等のエネルギーに加えて化学薬品もMLEDの投入物として項目になっている。例えば、銅鉱山の選鉱工程において、浮遊選鉱法が採用されている場合、そのプロセスへ投入される鉱石量から、推計式を用いてCO<sub>2</sub>排出量が推定される。これには、鉱石を数十ミクロンまで細かく砕く破碎粉碎工程での消費エネルギーも含まれている。

最後に、CO<sub>2</sub>排出量の算定に用いた投入物の排出係数を表3.2に示す。これらは基本的に三種類の文献（LCAJ 2004、NIRE 1996、Nansai et al. 2002）から引用し、単位の換算を行っている。電力については、わが国に精鉱輸入の実績のある、カナダ、オーストラリア、インドネシア、ペルー、チリおよびアルゼンチンについて調査した。発電種別の発電量およびエネルギー投入量をIEAの資料（IEA 2004a、IEA 2004b）から参照し、受電端側における排出係数を求めた。この際、発電時の燃料燃焼についてのCO<sub>2</sub>排出係数は、IPCCの資料（IPCC 1997）に従った。また、発電設備・運用についての係数は、JLCA Databaseの日本の発電所の値を用いた。

表3.2 投入エネルギーと材料のCO<sub>2</sub> 排出係数

	CO <sub>2</sub> Emission Factor	Unit	Source
Fuel	2.64	kg- CO <sub>2</sub> /liter	a)
Explosive	0.60	kg- CO <sub>2</sub> /kg	b)
Lubricant	3.06	kg- CO <sub>2</sub> /liter	b)
Tires	2.89	kg- CO <sub>2</sub> /kg	c)
Steel	1.32	kg- CO <sub>2</sub> /kg	c)
Steel Pipe	1.49	kg- CO <sub>2</sub> /kg	c)
Timber	7.46	kg- CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	b)
Gas	70.6	kg- CO <sub>2</sub> /Mcf	c)
Sulfuric	0.590	kg- CO <sub>2</sub> /kg	d)
Cement	0.786	kg- CO <sub>2</sub> /kg	c)
Electricity			
Country	CO <sub>2</sub> Emission Factor	Unit	Year
Argentina	0.357	kg- CO <sub>2</sub> /kWh	2002
Australia	1.126	kg- CO <sub>2</sub> /kWh	2002
Canada	0.291	kg- CO <sub>2</sub> /kWh	2002
Chile	0.349	kg- CO <sub>2</sub> /kWh	2002
Indonesia	0.946	kg- CO <sub>2</sub> /kWh	2002
Peru	0.187	kg- CO <sub>2</sub> /kWh	2002

Source: a) K. Nansai et al. (2002)、 b) NIRE LCA Database (1999)、 c) JLCA-LCA Database (2004)、 d) N. Narita et al. (2001)

これまで各種LCAデータベースによる鉱山活動のCO<sub>2</sub>排出量は、1種類もしくは数種類の鉱山のデータが他の鉱山にも当てはまるとして推計されてきたが、鉱山の生産方法により結果は大きく変わってくることから、典型的なパターンの抽出を行い整理したうえで、生産方法に応じたエネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出量の推定を行うべきであろう。そのためには、さらに多くの鉱山で調査・推計を行うことで総合的な比較が行えるものとする。

また、厳密さをより求める場合には、採掘プロセスの開発段階に相当する探査や地表の伐採・表土除去から坑道や立坑の掘削など、操業に必要な準備のための開発、修理工場や事務所の建設、アクセス道路などのインフラ整備も含まなければならない。MLEDではデータベース内にこの開発段階でのCO<sub>2</sub>排出量の推定式も保持しているものの、今回はデータ取得の困難さからシステム境界外として設定したため、計算に含まれていない。しかしながら今後の課題として、このような開発段階での環境負荷も無視できるものではなく、計算に含めることは重要である。これを実現させるためには、鉱山開発時の計画およびその後の拡張計画について調査する必要があるが、これは一般的に操業段階の基本的なデータを得るよりもデータの取得はたいへん困難になるため、さらに時間と労力をかけた調査が必要になってくる。



### 3.4 レアアース製錬過程の環境影響：マレーシアと中国でのケーススタディとエコロジカル・フットプリント指標の拡張版への試み

#### 3.4.1 はじめに - 問題提起 -

現代物質文明を謳歌する我々の暮らしを豊かにするために、多種多様な商品（モノ）が生産者から提供されている。消費者にとって、商品のライフサイクル全体を俯瞰する場合、商品の製造加工業（第二次産業）と、商品を販売する商業（第三次産業）という部門は身近な存在でもあり、イメージが湧きやすく、関心を寄せやすい。一方で、ライフサイクルの最上流に当る部門である（ア）農林水産業と（イ）鉱業はどうであろうか。（ア）農林水産業（特に食に関連する産物）については、消費者たちは、毎日食事でお目に掛かるものであり、身近な存在であろう。しかし、（イ）の鉱業については、消費者にとって馴染みの薄い分野である。鉱山開発や製錬工程に伴って発生する環境問題や人権問題は深刻さを増しているとされるが、一般消費者にとって、関心は低く、かつ、鉱山にまつわる問題の深刻さは一般に伝わりにくい構造となっている。それが問題の解決を阻害している。その理由は何なのだろうか。

##### (1) 遠隔地に在ることによる監視の困難さ

鉱業という産業の実態について、一般の理解の程度が低い理由のひとつとしては、その現場が、山奥や砂漠地帯など、一般消費者の居住地域から遠く離れた場所に存在するケースが多いからであろう。そうすると監視の目が行き届きにくい。海外の鉱山、製錬所に至っては、なおのこと情報が入りにくくなる。また、鉱物資源は、製造業者たちによって加工されるため、一般人には鉱物資源そのものが見えにくくなっているという事情もあるだろう。いずれにせよ、鉱山開発や製錬加工という業種は、一般消費者にとって、また鉱山学や資源工学以外の研究者にとっては、情報アクセスが簡単ではなく、それゆえに興味・関心を持ちにくく、監視の目が行き届きにくい業種と言えよう。

##### (2) 主流の新古典派経済学が天然資源に関心を払ってこなかったこと

鉱業への監視の目が十分に行き届かないのは、以上の理由だけではない。エコロジー経済学者たちは、現在主流となっている新古典派経済学の「分析以前のビジョン」（世界観）と分析手法そのものが持つ欠陥が、鉱業などの資源産業への関心を薄れさせ、結果的に環境破壊の根源的な原因となっているとして問題視している。たとえば、アメリカ人でエコロジー経済学の泰斗、Daly (1996) は、「彼 [アルフレッド・マーシャル] 以後の経済学者たちは、新しい効用すなわち付加価値を強調する際に、自然がすでに提供してきた価値について考察することを全面的に無視してきた (邦訳p. 92)。・・・生産関数として最も普及しているのがコブ-ダグラス型生産関数だ。生産は、しばしば資本と労働だけの関数として扱われ、資源は完全に除外されている (邦訳p. 93)」として、新古典派経済学の分析以前のビジョンと分析ツールの両方が、天然資源を無視もしくは軽視してきたことを指摘している。

鉱山分野における豊富な調査と実務経験を有する谷口 (2014a) も、付加価値を重視する主流経済学にとって、製造業や商業は原材料に付加価値を付与する産業であるので注視したが、「価値が付加される側の天然資源については、単なるモノであって議論に値しないものでした」と批判し (p. 132)、「付加価値至上主義」からの脱却と、自然資本重視のパラダイムへのシフトを提言している。以上のように、情報が入りにくいという構造と同時に、現代社会の形成に圧倒的な影響を与えている主流経済学が鉱物資源を無視または軽視してきたことの両方が、サプライチェーン最上流である鉱山開発や

製錬工程に対する監視の目を行き届かなくさせてきたと言える。以上の状況が背景にあり、世界的な鉱物資源需要の急速な高まりと相まって、鉱山開発に伴う環境破壊や反対派住民の強制移住や殺戮を含む人権侵害等の問題が世界各地、とりわけ発展途上国において深刻化している。その実態は、谷口（2008）、畑（2001）、あるいは、アムネスティ・インターナショナル、A SEED JAPAN、エシカルケータイキャンペーン、FoE JapanなどのNGOによって指摘されている。

### (3) 巨大多国籍鉱山会社によるロビー活動

住民の不当逮捕等の人権侵害や自然破壊を発生させているもうひとつの理由として、巨大な多国籍の鉱山会社が、莫大な資金力を背景に強力なロビー活動を展開し、公的機関からの干渉を回避しているケースがある。たとえば、2009年カナダ連邦議会において、カナダに本拠地を置く鉱山会社が海外で鉱山開発を行う際においても、カナダ国内と同じ環境・人権基準を遵守させるための法案が提案された（提案者は自由党のジョン・マッケーン議員）。ところが、業界団体の強いロビー活動に遭い、賛成134票、反対140票で否決される結果となった（谷口 2014b）。

### (4) 結果としての実態調査蓄積の浅さと環境評価手法の不備

鉱山開発に伴って発生する問題は厳しさを増しているが、上に掲げた3つの理由により、実態が一般の認知度は低いままに留まっている、すなわち、社会学的・環境学的なアプローチからの実態調査研究は圧倒的に不足しているのである。また、環境影響評価手法が確立していない実態がある。研究が不足しているうえ、評価軸が曖昧であり、問題が解決に向かわない。

そこで本節では、レアアースをテーマとし、レアアース鉱山と製錬所の現場の実態把握を試みた。環境マネジメントが劣悪と考えられるケースを3件取り上げ、その影響を検証した。1つ目のケースは、マレーシアのエイジアンレアアース（ARE）社の事例である。約30年前に、日本の三菱化成工業（現・三菱化学）とその子会社がペラ州イポー市近郊で深刻な放射能汚染を引き起こしたとされる。2例目は、同じく、マレー半島で起きている事案であるが、オーストラリアのライナス社（Lynas社）がパハン州クワンタン市近郊に最近建設したレアアース製錬工場のケースである。以上の2箇所については現地調査を実施した。3つ目のケースは中国の包頭市のレアアース鉱山のケースであるが、こちらは、文献調査のみに留まった。最後に、エコロジカル・フットプリント指標の拡張版への初期的な試みを行った。

## 3.4.2. エイジアンレアアース（ARE）社問題

### (1) エイジアンレアアース（ARE）社問題の概要

ARE社問題とは、30年ほど前に三菱化成工業の子会社のエイジアンレアアース（ARE）社がマレーシア国内で引き起こした放射能汚染である（和田 2014）。以下に概要を示す。

概要：1979年、ARE社設立。1982年7月操業開始。モザナイトからイットリウムを抽出する工程。1983年11月パハンでの放射性廃棄物投棄場の建設が発覚。住民の反対運動開始。その後もAREは操業を続け、工場脇の空き地と池、道路脇などにトリウム廃棄物を投棄したとされる。1984年9月、国際原子力機関（IAEA）がパハンの廃棄物処分場の調査。安全性を否定。1984年12月、市川定夫氏招聘。AREに隣接する空き地で許容量の730倍の放射線レベルを計測。1985年、イポー高裁で、ARE操業停止命令。

マレーシア原子力委員会は操業停止命令を無視し、AREの操業再開を許可。1987年4月10日、14名の海外から専門家が招聘さる（ロザリー・バーテル博士ら）。専門家らAREははなはだしい健康被害をもたらしていることで一致。1987年9月18日住民側、1985年の高裁の操業停止命令を破ったことでAREを法廷侮辱罪で提訴。1992年イポー高裁で、操業中止命令。住民側の全面勝訴。しかし、1993年の最高裁判決では逆転敗訴。加害責任は否定される。1994年、ARE社工場閉鎖（中国で生産したほうが経済的という理由）。AREと三菱化学は、放射性物質の除染と保管業務を自主的に実施しているが、放射性廃棄物と病気や先天性異常との因果関係と加害責任は認めていない。

ARE社の放射性廃棄物発生量は、年間328トンのトリウム、ウラン酸化物は13トン、バリウム、ラジウムが40～80トン、全体で毎年平均400トンと推定されている。

## (2) ARE 社製錬工場による健康被害

この工場の不適切なトリウムの管理の結果、周辺住民や従業員に健康被害が現れた。たとえば、全国平均の3倍の異常出産率。40倍以上の発生率で子どもたちが白血病や癌に罹患した。水爆実験の被害に遭ったマーシャル諸島ビキニ環礁周辺の子どもの白血球の減少と類似の症状がブキメラ村の子どもたちにも現われたとされる（Dr. T. Jabalayan、小島 1992が引用）。

## (3) 三菱化成による自主的な除染・汚染物質管理と未除染地区の存在

三菱化成工業（現・三菱化学）は、放射性汚染物質の除染、および長期保管場の建設と管理のために、100億円以上を支出したと言われている。しかし、違法投棄されたと疑われている箇所、放射性汚染物質の未回収・未除染箇所が存在する可能性が住民から指摘されていた。そこで、2013年11月に現地調査を実施した。土壌分析の結果は以下の図3.4の通りである（和田 2015）。

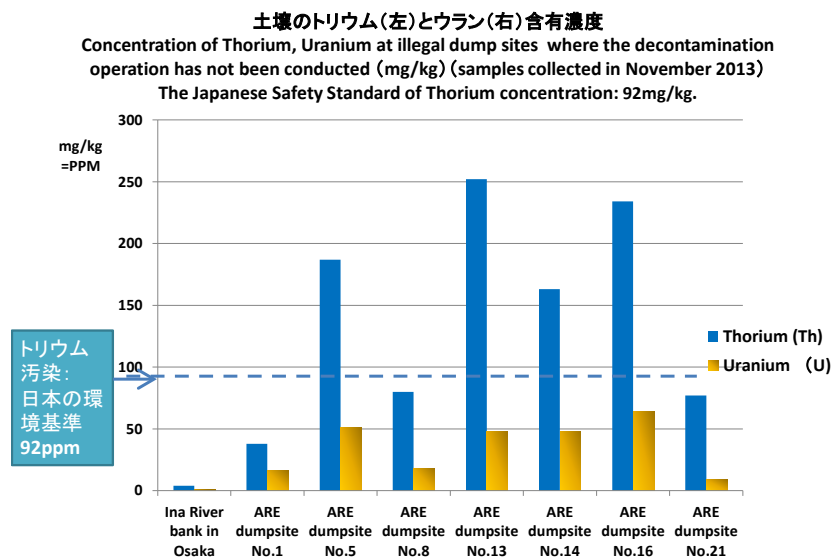


図3.4 AREによる放射性廃棄物の不法投棄が行われた場所の土壌分析結果

ARE社によって不法投棄された場所の土壌分析を実施した結果、7つの土壌サンプルの内、4つのサンプルについて日本のトリウムに関する環境基準を上回っていた。ARE社による放射能汚染の現場に

において未除染箇所が30年を経た現在も存在することが判明した。周囲には、一般住民の住宅が至近距離にある。新たな被害者を生まないために、早急な除染作業が必要であろう。

### 3.4.3 ライナス社レアアース製錬工場（LAMP）問題

#### (1) ライナス社製錬工場の概要

ライナス社のレアアース製錬工場は、中国以外のレアアース供給源として注目されているプロジェクトのひとつである。オーストラリアの鉱山会社・ライナス社（Lynas社）が、西オーストラリア州・マウント・ウェルド鉱山でレアアース鉱石を採掘し、選鉱処理を施したのち、それをマレーシアへ運び、自社の製錬工場（Lynas Advanced Materials Plant : LAMP）で分離・製錬を開始（2012年12月7日）。LAMPは、中国以外では最大級の規模を誇るレアアース製錬施設である。日本政府も、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）を通じ、約200億円の出融資を行っている。

#### (2) ライナス社・LAMPの放射性廃棄物管理の問題

ライナス社は、2012年5月よりLAMPの操業を開始する予定であった。しかし、工場の建設が始まる2年前から、トリウム廃棄物の漏えいによる放射能汚染と健康被害の可能性が指摘され、地元周辺の住民による反対運動が開始された。

住民らの懸念に対し、ライナス社の工場責任者は、「現在作ってある鉱滓ダム（粘土層とHDPE層、放射能漏えい検知器が付いている）で充分管理できる」と主張した（和田 2014）。しかし、粘土層はわずか30cm、HDPEは1mmの厚みしかない。ドイツの研究所の指摘では、ドイツの一般有害廃棄物でも許可が降りないという（Oeko-Institut 2013、Schmidt 2013）。オーストラリアのGavin Mudd博士は、「このような場合、3重の層にする上、砂層も追加するのが普通である」と述べている（Mudd 2013）。

国際原子力機関（IAEA）も、長期的放射性廃棄物管理施設の問題点など11項目の問題点を指摘する改善勧告を公表した（IAEA 2011）。

#### (3) 操業開始直前と、操業開始1年後の周辺土壌の分析結果

ライナス社レアアース製錬工場の廃棄物管理体制は汚染を防止できているのであろうか。この点を検証するために、排水口の5km下流の漁村で土壌を採取し分析を行った。図3.5に示すように、操業前と操業後1年経過後では、放射性トリウムやウランの濃度が、7倍程度に増加している結果が出た（和田 2015）。

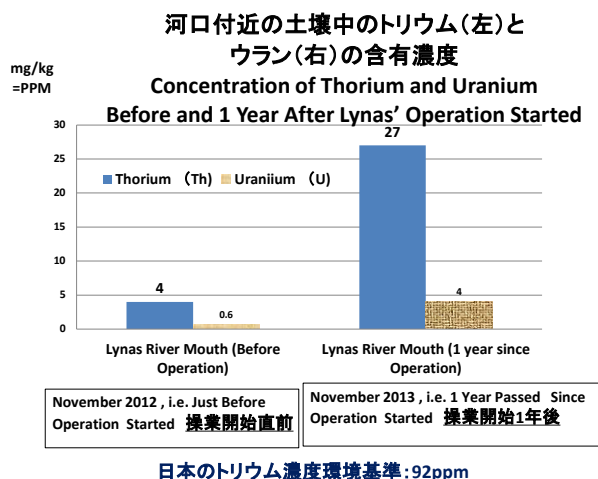


図3.5 ライナス社レアアース製錬工場の下流5km・河口付近の漁村の土壌分析結果(1)

その他、表3.3に示すように、マグネシウム、亜鉛、砒素、セリウムなどの物質も、5倍～9倍程度に増加している。

表3.3 ライナス社レアアース製錬工場の下流5km・河口付近の漁村の土壌分析結果(2)

**土壌分析の暫定結果**  
(排水口から5km下流の河口付近の漁村  
Preliminary Results of Soil Sample Analysis  
Fishing Village, 5km from LAMP discharge site)

	稼働直前 2012年11月28日 November 28 ppm (mg/kg)	稼働開始 1年後 2013年11月27日 November 27 ppm (mg/kg)	変化率 Change Rate
Manganese (Mn)	107.0	621.0	580%
Zinc (Zn)	29.0	151.0	521%
Strontium (Sr)	78.0	-	-
Vanadium (V)	11.0	57.0	518%
Copper (Cu)	16.0	54.0	338%
Arsenic (As)	11.0	63.0	573%
Cerium (Ce)	8.5	75.0	882%

また、表3.4に示すように、稼働前には検出されなかったランタン、ネオジウム、ガドリニウム、ジスプロシウム、ビスマス、鉛などの物質が、新たに検出されている。

表3.4 ライナス社レアアース製錬工場の下流5km・河口付近の漁村の土壌分析結果(3)

	稼働直前 2012年11月28日 November 28	稼働開始 1年後 2013年11月 27日 November 27	変化 率 Change Rate
	ppm (mg/kg)	ppm (mg/kg)	
Lanthanum (La)	-	31.0	-
Neodymium (Nd)	-	27.0	-
Gadolinium (Gd)	-	5.0	-
Dysprosium (Dy)	-	3.0	-
Bismuth (Bi)	-	6.0	-
Lead (Pb)	-	106.0	-
Thorium (Th)	4.0	27.0	675%
Uranium (U)	0.6	4.0	667%

サンプル数が少ないので、結論を出すには至らないが、汚染が実際に始まっている可能性が示唆される。

#### (4) ライナス社製錬工場をめぐる 2014 年の新たな動き

マレーシア原子力発電認可局 (Atomic Energy Licensing Board: AELB) からライナス社に発給されていた2年間の暫定運転免許 (Temporary Operating Licence: TOL) は2014年9月2日に失効期限を迎えた。同日、AELBはライナス社に対して2年間の期限付きの本格運転免許 (Full Operating Stage Licence: FOSL) を付与した (Ng 2014)。今回、2年間に限定した免許しか付与しなかったということは、マレーシア政府がライナス社の廃棄物管理体制は問題を抱えていると認識している証拠である可能性がある。

同年10月には、IAEAがライナス社製錬工場にフォローアップチームを派遣し、現地調査を行った。10月17日に調査結果が簡単なプレスリリースとして発表された (IAEA 2014)。報告書はいまだ開示されていないため詳細は不明であるが、プレスリリースから読み取れる内容は以下の通りである。① 2011年のIAEA勧告に対して、ライナス社は改善を行いつつある。②しかし、長期放射性廃棄物管理計画が非現実的で、特に最終処分場をどこにするかが未定である。③廃水等の環境モニタリング方法が改善されなければならない。④長期的な廃棄物管理、工場の廃棄を適切に行うための財政的基盤についての情報を明確に開示すべきである。⑤公衆や利害関係者とライナス社との間における問題認識のギャップを埋める努力が必要である。IAEAは、改善が行われていることは認めつつ、放射性廃棄物管理や環境モニタリングなどに問題があると指摘している。

#### 3.4.4 内モンゴル自治区・包頭市のバヤンオボー・レアアース鉱山

中華人民共和国の内モンゴル自治区内にある包頭市バヤンオボー鉱山は、ランタンやセリウムなどの軽希土類元素に富む世界最大級のレアアース鉱床である。「包頭鋼鉄」という事業体によりレアアース鉱石の露天掘り採掘・選鉱・製錬が行われている。尾鉱の累計堆積量は約1.5億トン。尾鉱ダム面積は約11km<sup>2</sup>、堤底には漏出防止措置も講じられておらず、乾燥し強風が吹き荒れる地域であるため風塵が発生しやすく、最大の潜在的放射能汚染源とされる。尾鉱ダムの風下 (東南) の周辺土壌中の<sup>232</sup>Th

比放射能は100～800Bq/kgであり、他の方角よりも数値が高い。尾鉦ダムの南側を測定した結果、牧草のトリウム232の比放射能は142.8Bq/kgで、対照地点より56倍高く、草地土壌のトリウム232は278.3Bq/kgで、対照地点より7.6倍高かった。尾鉦ダム風下を中心に放射能汚染地域が存在し、その面積は、4.94km<sup>2</sup>とされる（李ら 2013）。包頭では、がん患者が急速に増えているという（『新唐人』2010）。

### 3.4.5 エコロジカル・フットプリント指標の拡張版

#### (1) エコロジカル・フットプリント指標の定義

生態系は人間が生きていくために必要な様々な資源（食料や森林資源など）を再生産している。さらに人間が排出する廃棄物を吸収するなどのサービスを提供している。こうした人間の生活を支えるために必要とされる生態系による資源再生産・廃棄物処理サービス（フロー）は、「生態系サービス」と呼称されている。人間の経済活動を支えるために必要となっている生態系サービスを持続的に産み出す生態系（ストック:陸地と水域にあるもの両方）の合計面積がエコロジカル・フットプリント（EF）の大きさである。

EFの提唱者のひとりであるリースは、EFを次のように定義している（Rees 1996）。

「ある特定の地域の経済活動、またはある特定の物質水準の生活を営む人々の消費活動を永続的に支えるために必要とされる生産可能な土地および水域面積の合計（ある地域で必要とされる資源を永続的に産み出し、且つそこで排出される廃棄物質を継続的に吸収処理するために必要となる生態系・水土の面積の合計 [それらが地域内に存在するか外に存在するかは無関係]）」。

以上を要約すれば、エコロジカル・フットプリントとは、経済活動を持続するために生態系に負わせている負荷の大きさを土地・水域の面積で表したものと言える。

#### (2) エコロジカル・フットプリントの一般的計算方法

以下は、「国別」のエコロジカル・フットプリントの計算方法であるが、製品別のエコロジカル・フットプリントについても、同じ要領で計算できる。ただし、ライフサイクルを通じての投入物質の材質と投入量、廃棄物量を把握する必要がある。

##### 1) 再生可能資源

実際の計算では、データや計算上の制約から、環境負荷すべてを含むことは困難である。数ある資源の内、まず、生態系が産み出す再生可能資源（バイオマス資源）の年間消費量を統計データから入手する。年間消費量を土地生産性で除して、消費量に相当する（あるいは、その量を産み出している）土地面積を計算する。そして、以下の土地カテゴリー別に合計する（単位：ヘクタール：①「耕作地」、②「牧草地」、③「森林地」、⑥「海洋・淡水域」 表3.5参照）

表3.5 エコロジカル・フットプリントの6つの土地カテゴリー

①「耕作地」	食料（穀物、野菜、食用油等）と非食料（綿花、イグサなど）、飼料等を生産するための土地
②「牧草地」	食肉、酪農製品、羊毛等の原料を生産するための土地
③「森林地」	建築用木材、家具製品、パルプ製品などの木質材料を生産する土地
④「エネルギー関連地」または「二酸化炭素吸収地」	消費される化石燃料を補充するバイオマスエネルギーを生産するための土地、または、二酸化炭素を吸収するための土地。
⑤「生産能力阻害地」	生産能力があるにもかかわらず、住宅、社会インフラ、鉱山等によって覆われている土地
⑥「海洋・淡水域」	魚類、海藻類、海草類など水産資源を産み出す水域

## 2) 非再生資源

非再生資源の「化石燃料」については、④「エネルギー関連地」または「二酸化炭素吸収地」として計上する。また、非再生資源の「金属」資源については、その加工のためのエネルギー（化石燃料）消費量、または、二酸化炭素排出量として間接的に計上する。いずれについても、エネルギー消費量（または、二酸化炭素排出量）を統計データから入手し、それを原単位を用いて土地面積に変換する。

## 3) 生産能力阻害地

バイオマス資源生産能力の阻害となっている土地面積も加える。これを⑤「生産能力阻害地」と呼称する。

## 4) 純消費

EF計算では、通常、域内での「純消費」に係わる土地水域面積を計算する。国（地域）外で生産されたモノでも、貿易を通して輸（移）入され、域内で消費されたモノについては、その国（地域）の責任としてその土地水域面積を加算するのである（バーチャル・ランド、バーチャル・オーシャン）。逆に域内で生産されたモノでも輸（移）出され、域外で消費されたモノの生産に係わった土地水域面積は除外する。

## 5) 食物連鎖の上位に位置する生物種の消費

食物連鎖の上位に位置する生物種の消費に関するエコロジカル・フットプリントは、第一次生産者（Primary Producers＝緑色植物や植物プランクトン等）の生産量に換算して面積を産出する。食物網が複雑で、食物連鎖が長い水産資源の場合、以下の式で必要一次生産量（Primary Producer Required、PPR）を求め、PPRの値を水域の生産性で除すことで面積を算出する<sup>1</sup>。

<sup>1</sup> 漁船の格納スペースには限界があるため、目的魚以外の魚種が網に掛かった場合（＝混獲）は海洋投棄される。国連農業食糧機関（FAO）によれば、混獲率の世界平均値は、27%で無視できない率であるが、場合によっては800%になるものもある（エビトロール漁）。漁獲量と混獲量の合計を9で除するのは、水分を含む漁業資源量を炭素量に変換するためである。TLとは、食物連鎖の栄養段階を示し、植物プランクトンのような第一次生産者のTLは1で、動物プランクトンのTLは2となる。TL-1とは、第一次生産者からの変換回数を示す。動物プランクトンの変換回数は1回となる。水棲生物の場合、食物連鎖の変換効率は、10%である。魚たち



$$(\text{必要一次生産量、PPR}) = \{ (\text{漁獲量} + \text{混獲量}) / 9 \} \times 10^{(\text{TL}-1)}$$

## 6) エコロジカル・フットプリント (EF) とバイオキャパシティ (BC、生産可能な土地・水域面積) との比較

地球上の生産可能な土地(水域)面積の合計は119億グローバル・ヘクタール(gha)(沙漠、高山、遠洋などを除外)である(2008年データ)。これは地球表面全体の約22%にあたる。こうした生産可能な土地・水域の面積をバイオキャパシティ(Biocapacity: BC)と呼ぶ。この面積を世界人口で除するとバイオキャパシティの一人当たり面積が計算でき、それは1.8 ghaとなる。需要サイドであるEFの値が、供給サイドであるBCの値を超えていない場合は、持続可能性の必要条件のひとつを満たしていると言える。

次に、グローバル・ヘクタールという単位の意味を詳しく見てみたい。

## 7) 比較を公平に行うための平準化の工夫: グローバル・ヘクタール

2000年代前半以降、標準的なエコロジカル・フットプリント計算では、土地生産性が違う土地を単純に加算することによる歪みを補正するための工夫が施されている。すなわち、全世界の生産可能な土地水域の平均的な生産力を持った仮想的な土地を、世界標準の単位として利用する。この単位が、グローバル・ヘクタール(global hectare、gha)である。つまり、1グローバル・ヘクタールとは、世界平均の土地生産性を持つ土地1ヘクタールのことで、生産性という基準でウェイト付けされた面積である(Ewing、et al. 2008)。生産性の高い土地は、加重され、生産性の低い土地は割り引かれる。そうすることにより、エコロジカル・フットプリント計算では、同量同種の農産物(たとえば小麦)の資源消費は、生産元の土地が肥沃か否かに関係なく、同じ面積として表わされる。このような補正を行わないならば、モンゴル草原など生産性の低い土地に依存する人々のエコロジカル・フットプリントは過大に計上され、生産性の高い土地に依存する人々のエコロジカル・フットプリントは小さく計上されてしまい、公平な比較は難しくなってしまう。

ヘクタール(ha)をグローバル・ヘクタール(gha)に換算するための第一ステップは、ある資源の消費量に対応する実際の土地面積に対して「収量係数(Yield Factor、YF)」を掛け合わせる。これは、国毎に差異がある同種土地カテゴリー(たとえば耕作地)の生産性の差を標準化するための係数である。すなわち「収量係数」とは、ある国の耕作地の生産性と世界の耕作地全体の平均生産性との比率のことである。生産性の高い耕作地を有する国の耕作地は、エコロジカル・フットプリント計算では、実際面積よりも広く計上されるのである。たとえば、日本の耕作地は、2005年データで世界平均の1.7倍、アルジェリアは、0.6倍であったが、これらがそれぞれの国の耕作地の収量係数である。2005年時点の日本の収量係数は、耕作地:1.7、牧草地:2.2、森林地:1.1、漁場:0.8と計算されている(Ewing、et al. 2008)。

---

は自らのからだを維持するために、自らのからだの10倍の重量分の栄養段階一つ下の魚種またはプランクトンを食しているのだ。栄養段階が3の魚種は、第一次生産者から数えて、変換回数が2回であるため、その魚種の消費量に10の2乗(=100)を掛けることによって、その魚種を育てるために必要となった植物プランクトン量(PPR)が算出できる。

次に、上で得た数値（実際の作付面積×収量係数）に「等価係数（Equivalence Factor：EQF）」を乗ずることにより、グローバル・ヘクタール（gha）に換算される。「等価係数」は、（耕作地と森林地などといった）異なる土地カテゴリーの生産性の差を平準化するための係数である。たとえば、世界平均的な耕作地は、世界のすべての生産可能な土地の生産性との比較で、2.65倍と計算された（2005年時点）。これが耕作地の等価係数に当たる。他の等価係数は、牧草地：0.50、森林地：1.33、漁場：0.40、淡水域：0.40、生産能力阻害地：2.64である（Ewing、 et al. 2008）。

以上の2つの係数をヘクタール表示の土地面積に掛け合わせることで、生産性が異なる土地同士や、土地カテゴリーが異なる土地同士の面積の加算が可能となり、相互比較が公平となるのである。

### (3) 進むエコロジカル・フットプリントの普及

エコロジカル・フットプリント分析は、世界各地で啓発目的や政策評価・技術評価手法としての応用が広がりを見せている。日本政府は、この指標を環境基本計画の進捗を測るための指標として公式採用することを2006年4月に閣議決定している（和田 2009、WWFジャパンら 2010）。最近の動きとしては、アラブ首長国連邦、フィリピン、インドネシアが積極的に活用を開始している（伊波 2013）。フィリピンでは、アキノ三世大統領がその動きをリードしている。ちなみに、フィリピンでの普及活動に対し、日本経団連が資金を供与している。

奈良市においては、『奈良市環境基本計画』（改訂版）に、エコロジカル・フットプリントを紹介している（奈良市 2012）。

栃木県と栃木県教育委員会は、『明日をつくる子どもたちの環境学習』（中学生・高校生編・平成25年度改訂版）の中でエコロジカル・フットプリントを詳細に解説し、ウェブ上に掲載されている個人の「エコロジカル・フットプリント診断クイズ」（エコロジカル・フットプリント・ジャパンHP）の受診を奨励している（栃木県総合教育センターHP 2013）。

企業としての利用も広がりつつある。アウトドア用品製造のパタゴニア社が、2007年から「The Footprint Chronicles」を開始し、サプライチェーン全体の環境負荷を消費者に詳細に開示し、負荷の低減を目指している（パタゴニアHP）。化学工業大手の花王は、製品の製造過程でアブラヤシ油を大量に使用するが、製品のライフサイクル全体の環境負荷をエコロジカル・フットプリントで計測し、結果を開示している（藤井2013）。

また、富士通が総務省の予算を使って、義務教育用のエコロジカル・フットプリント教材をWWFジャパンと共同で開発した（WWFジャパン 2014）。タブレット端末を利用して、エコロジカル・フットプリントの概念と計算方法を学ぶことができるものである。2014年より全国の学校で使われ始めている。

### (4) エコロジカル・フットプリント指標の問題点

以上のように、このエコロジカル・フットプリントの普及・利用が進む一方で、この指標では表現し難い環境負荷もある。たとえば、水資源の需要と供給の問題である。これについては、「ウォーター・フットプリント」という補助的指標が考案され、広く認知されつつある。

## 尾鉱ダムや汚染地帯などの「生産能力阻害地」への計上が不十分

レアアースの選鉱・製錬・分離工程で大量に発生する尾鉱の占める面積、および尾鉱の管理コストは、かならずしも十分にエコロジカル・フットプリントの「生産能力阻害地」として取り込まれていないと思われる。

## 時間軸の考慮が不十分：事後継続的影響管理（PIM）コストの反映が未整備

エコロジカル・フットプリント分析には、もうひとつ決定的な弱点がある。それは時間軸に関することである。国別エコロジカル・フットプリント勘定（NFA）という国際的なエコロジカル・フットプリントのデータベースがグローバル・フットプリント・ネットワーク（GFN）という研究機関によって維持管理されているが、このエクセル上の計算式はすべて単年度式である。ある国で、道路・インフラの建設がなされた際、そのために使用されたエネルギー量は、その国のその年の二酸化炭素排出量として計上される。たとえ、道路やインフラが40年使用され続けたとしても、その年のエコロジカル・フットプリントが増えることになる。すると急成長しているアラブ首長国連邦などの国のエコロジカル・フットプリントは勢い大きくなる。しかし、よく考えてみると、それらのインフラの寿命が以後40年だとすれば、建設のためのエネルギー消費、そしてそこから二酸化炭素排出量は40年に割って責任を割り振るほうが、世代間の公平性が確保されるという意味で理に適っている。実際、製品や技術のライフサイクル分析（LCA）手法ではそのようにしている。

逆に、今年の人間の経済活動が将来世代に影響を与えるような場合、つまり、現在の経済活動の結果として、10年・20年先になって環境負荷や環境管理コストが発生する場合、エコロジカル・フットプリント計算では今年のエコロジカル・フットプリントには反映されない。製品や技術のLCAでも、この点は疎かになっている。

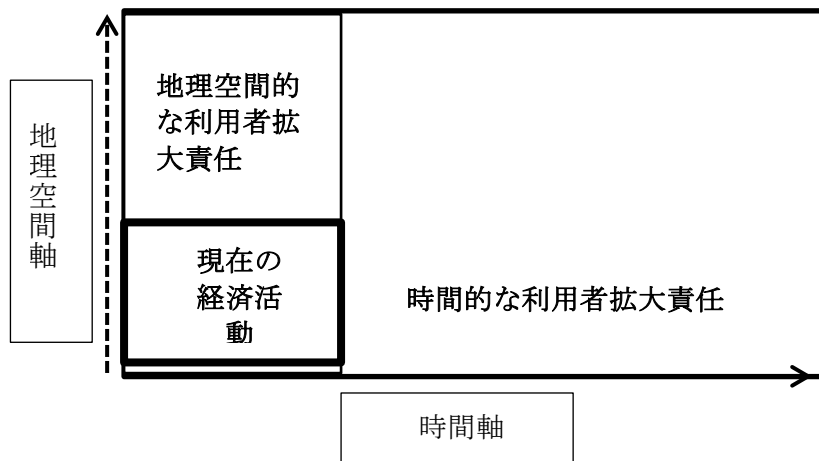
たとえば、各種鉱山の、鉱山の閉山後にも不可欠とされる水質・尾鉱などの長期的管理コストや、原子力発電の使用済み核燃料などの高レベル放射性廃棄物の超長期的管理コストなど、あるいは、原発事故や核関連施設の放射能汚染事故が発生場合に将来世代におわす環境負荷、このような将来的に超長期に渡って発生する環境管理コストや環境負荷については、エコロジカル・フットプリント計算でもLCAでもほとんど入れていない。

こうした後から発生する費用を「事後継続的影響管理コスト」あるいは、Prolonged Impact Management (PIM) Costsと呼ぶことにした（和田 2007）。たとえば、ウラン鉱山の尾鉱や水質の管理は、最低でも1万年必要であるとする証言がある（Wassen et al. 1998、Authority of the Senate 2002）。レアアース鉱山についても放射性物質のトリウムやウランを含有する場合が多いので、同様な対応が必要となるであろう。

使用済み核燃料の天然ウランに対する相対毒性は一旦下がるが70万年後に最大化する。そのため、必要な管理期間は100万年とする見解も説得的であり、実際、オバマ米大統領は100万年管理が必要だと述べている。日常的な放射能漏れ管理、原発労働者の放射能被曝、原発などのテロ攻撃への防御、原発事故による放射能汚染、プルトニウムや劣化ウランの兵器利用による影響も考慮されねばならない。

エコロジカル・フットプリント分析の原則は、ある国・地域の資源利用のために必要とされる土地水域が国内・地域内にあるが国外・地域外にあるが無関係に、その国・地域の責任として計上することとなっている（「地理的な意味での利用者拡大責任論・帰属論」と言えよう）。事後継続的影響

響管理は、現世代の資源利用が、次世代に負わせているコストである。このコストを現世代の責任として計算することが必要であろう。つまり地理的な意味での利用者拡大責任論が採用されるのであれば、「時間的な利用者拡大責任論」も成り立つと思われる（図3.6参照）。



出典：和田（2007）

**図3.6 資源利用にともなう「地理空間的な利用者拡大責任論」と「時間的な利用者拡大責任論」の概念図**

レアアースについては、鉱床の種類にもよるが、多くの場合、放射性物質であるトリウム232を含んでいる。従って、採掘・製錬過程で大量の放射性廃棄物質が発生するのである。毒性の強いこうした放射性廃棄物の環境負荷の「見える化」の手法は十分に確立されたとはいえない状況である。

本研究では、以下において、レアアース利用の環境負荷をエコロジカル・フットプリント指標の枠組みの中でどう計測すべきかについて検討を行った。

#### (5) 改善へ向けた試み、ならびに実際の勘定（データの入手、推計、計算）の課題

##### 尾鉱ダムや放射能汚染地帯などの「生産能力阻害地」への計上

類似の既存研究としては、福島原発事故に伴う「放射能フットプリント」（Moore et al. 2012、伊波ら 2012、和田2013）がある。これは、放射能汚染強度のデータ、土地カテゴリーの区分、そして土地生産性のデータ等を重層的に地理情報システム（GIS）ソフトに取り込んで集約・解析したものである。詳細なデータが入手可能であったため計算が可能であった。しかし、レアアース鉱山・製錬・分離の場合、データはかなり制約されている。単純な方法とならざるを得ないであろう。実際、本論考の冒頭でも述べたように、鉱山に関する情報は非常にアクセスが難しいことが多い。内蒙古自治区出身の人類学者によると、近年中国政府は、レアアース鉱山、製錬所への立ち入りを厳しく制限しており、中国人の研究者や記者でさえ立ち入り許可が降りない場合が多いとのことである。外国人の研究者が立ち入ることは極めて難しい。ましては、GISソフト等で分析可能な解像度を持つデータの入手は困難であった。

しかし、幸いにも李ら（2013）がまとめた報告書には、内蒙古自治区内にある包頭市バヤンオボー鉱山の環境汚染の状況についての情報がある程度盛り込まれている（尾鉱ダムの面積、放射能汚染された土地の面積、尾鉱（鉱滓）の量など）。この報告書のデータを元に、バヤンオボー鉱山で生産された酸化希土類（REO）製品1トン当たりの汚染係数を試算してみた。

それらは、（1）単位REO製品量当たりの汚染物質の発生量（尾鉱として尾鉱ダムに留められるもののみ）並びに、（2）単位REO製品量当たりの尾鉱ダム面積と放射能汚染地帯の合計面積である。（2）は、「生産能力阻害地」を計算する際に便利である。

表3.6 酸化希土類（REO）製品1トン当たりの汚染係数の計算結果

	前提	計算結果
(1)	尾鉱発生原単位（李・周・常ら（2013）p. 49）RE 精鉱（REO50%）12トンを使用した場合	酸化希土類（REO）製品1トン当たりの尾鉱堆積量：24トン
(1)	50年間の尾鉱累積堆積量 1.5億トンと製品製造量累計推計値（5万トン×50年）を使用した場合	酸化希土類（REO）製品1トン当たりの尾鉱堆積量：60トン
(2)	酸化希土類（REO）製品1トン当たりの尾鉱堆積量：24トンと仮定した場合	酸化希土類（REO）製品1トン当たり尾鉱ダム面積と放射能汚染地帯の合計面積：2.6m <sup>2</sup>
(2)	酸化希土類（REO）製品1トン当たりの尾鉱堆積量：60トンと仮定した場合	酸化希土類（REO）製品1トン当たり尾鉱ダム面積と放射能汚染地帯の合計面積：6.4m <sup>2</sup>
(2)	酸化希土類（REO）製品1トン当たりの尾鉱堆積量：24トンと仮定した場合と60トンと仮定した場合の平均値	酸化希土類（REO）製品1トン当たり尾鉱ダム面積と放射能汚染地帯の合計面積：4.5m <sup>2</sup>

計算の根拠：尾鉱の累計堆積量は約1.5億トン。尾鉱ダム面積は約11km<sup>2</sup>、尾鉱ダム風下を中心に放射能汚染地域が存在するが、その面積は4.94km<sup>2</sup>である。この面積は、風によって粉塵が汚染を拡げた面積であり、水によるものを含まない（李ら 2013）。

上表は、二つの別の仮定を基に計算してみた結果であるが、平均値は、4.5m<sup>2</sup>となり、面積としては、非常に小さいものに思われる。ただし、面積は小さくとも尾鉱ダムの深さ（厚み）は、5.5mという計算となるが、これは決して小さな値ではない。

なお、エコロジカル・フットプリント指標は、エコロジカル・フットプリント（EF）とバイオキャパシテイ（BC）のバランス関係を見る指標であると前節で書いた。以上の説明では、EFの一部としての「生産能力阻害地」の増加分として計上すると説明した。一方で、バイオキャパシテイ（BC）の減少として扱うことも可能である。実は、福島原発事故に伴う「放射能フットプリント」の研究（Moore et al. 2012、伊波ら 2012、和田2013）においては、放射能に汚染された地域の面積を、バイオキャパシテイ（BC）の減少として扱った。

ところで、以上で扱ったもの以外にも考慮すべき視点がある。例えば、（1）尾鉱ダムから地下水脈を通じて、あるいは、（2）洪水時などにダムの堤防を越えて環境中に流出してしまう放射性汚染物質や重金属や有害化学物質についても着目しなければならない。これらの汚染物質の流出が周辺環境にどの程度影響を与えているかについても把握し、「生産能力阻害地」の増加分として、または、バイオキャパシテイ（BC）の減少として計上すべきである。

## 時間軸の考慮: 事後継続的影響管理 (PIM) コストの反映

類似の既存研究としては、原子力発電利用に伴って発生する放射性廃棄物の「事後継続的影響管理 (PIM) コスト」(和田 2007)がある。この研究では、日本国内の原子力発電所を稼働させた時に付随する様々な環境負荷やエネルギー量をできるだけ広い範囲で集計した。短期的なものだけでなく、超長期的なもの、海外で発生するものも含めた。例えば、ウラン鉱山の尾鉱(鉱滓)ダムの監視と管理を1万年間継続して実施すると仮定したり、使用済み核燃料の保管管理を100万年間継続するなどの前提条件を設定した。それらに必要なエネルギーコスト、いわゆる「事後継続的影響管理 (PIM)」のためのエネルギーは、発電量の16倍となった(最終的には、これらをEFの大きさに換算した)。

レアアース開発の環境影響を評価する際にも、同じ手法が使えるはずではある。PIMコストとして計上すべき要素は、たとえば、(1) 尾鉱ダムの監視・水質管理、(2) 汚染された施設の除染や汚染された土壌の除染・修復などが考えられる。

そこで、中華人民共和国、内蒙古自治区包頭市バヤンオボー鉱山をケースとして取り上げることとし、計算に必要なデータの収集を試みた。その結果は以下の表の通りである。

表3.7 バヤンオボー鉱山レアアース開発に伴う事後継続的影響管理 (PIM)

コスト計算用の要素データ収集結果

要素	単位	数値 (出典)
(1) 尾鉱ダムからの有害物質が漏洩防止と監視、周辺環境の水質の管理に必要なエネルギー原単位 (尾鉱 1 トン当たりのエネルギー量)	GJ/ton	存在せず
(2) 酸化レアアース (REO) 製品 1 トン当たりの尾鉱の発生量	ton/ton-REO	24 トン、または 60 トン (李・周・常ら (2013) より計算)
(3) 酸化レアアース (REO) 製品の生産量 (年毎、または、累積)	ton/year または、ton	存在するが、3 年間のみ (『工業レアメタル』 (2014))
(4) 汚染された施設や汚染された土壌の除染・修復に必要なエネルギー原単位 (汚染地域 1m <sup>2</sup> 当たりのエネルギー量) ← 汚染の程度により差異があると思われるので、以下の (5) のほうが望ましい。	GJ/ m <sup>2</sup>	存在せず。福島を除染のデータを援用できる可能性がある。ただし、核種が異なる。
(5) 土壌・施設の汚染の程度毎の除染修復のエネルギー原単位 (土壌の単位重量当りベクレル毎の 1m <sup>2</sup> 当たりのエネルギー原単位)	GJ/Bq/kg <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	存在せず。福島を除染のデータを援用できる可能性がある。
(6) 土壌・施設の汚染状況毎の面積 (GIS 地理情報システムソフトで使える汚染マップがあるとなお望ましい。)	ha または m <sup>2</sup>	尾鉱ダムの風下の土壌中のトリウム 232 の放射能は、100~800Bq/kg などの断片的な情報は ある (李・周・常ら (2013))。しかし、詳細なデータは存在せず。
(7) 1 年間にどれだけの面積が除染可能か。	m <sup>2</sup> /year	鉱山会社の意思・資金力、政府の意思と規制内容、住民意識などに依存する。
(8) 以上のペースで除染が行われると仮定した場合、すべての汚染地域を除染するために何年かかると予想されるのか。	year	以上の情報に依存する。

以上のように、エコロジカル・フットプリント拡張版を開発するために必要なデータは、現時点では非常に限定的にしか存在しない。中国政府、現地の自治体、鉱山会社、現地の研究者、住民組織などと協力関係を構築し、文献調査と聞き取り調査、土壌分析などの様々な調査を実施していく必要があることが今回の調査で明らかになった。

### 3.4.6 総括

#### (1) ケース・スタディとエコロジカル・フットプリント拡張版への試みのまとめ

ARE社によって引き起こされた放射能汚染については、未除染箇所が存在することが判明した。被曝を防止するための措置を早急に講ずる必要がある。

ライナス社製錬工場LAMPの放射性トリウム等の放射性廃棄物管理は不十分である可能性を示唆する数値が出てきた。第三者による客観的、詳細かつ広範な環境影響調査が実施されるべきである。

内蒙古自治区内の包頭市バヤンオボー鉱山の汚染状況と健康被害の実態はベールに包まれている。政府や企業による情報公開が必要であり、その上で、包括的な客観的な環境調査がなされなければならないであろう。

レアアース開発の環境影響をより十分に認識するためにエコロジカル・フットプリントの拡張版を開発しようとするれば、計算に必要なデータが入手可能とならなければならない。中国、マレーシア政府や自治体、鉱山企業、科学者、住民たちの協力を得つつ、広範かつ徹底した文献調査と現地調査を行う必要がある。

## (2) トリウム原発開発の試み

レアアース製錬過程で発生する大量のトリウム<sup>232</sup>を有効活用し、エネルギーを取り出す技術を復権させようとする動きが始まっている。この技術は、第二次世界大戦後にワインバーグなどによって開発が進められたが、ウラン原発との競争に敗れ、開発が停止されたという経緯がある（室田 2011、マーティン 2013）。2011年の福島原発事故によって、ウラン燃料を使用する原子力エネルギー技術が安全性の面で問題があることが表面化した。そのため、ウラン燃料に代わるものとしてトリウム<sup>232</sup>の核分裂連鎖反応により発生する熱エネルギーを利用する技術（トリウム熔融塩炉）をもう一度見直そうとする動きである。

亀井（2011）によれば、トリウム熔融塩炉は、圧力を比較的強く抑えることができるため、安全であり、またプルトニウムが生成されないのがテロ対策としても好都合であるという。また、小型化も可能で、価格も安いとして、幾つものメリットを挙げている。

しかし、トリウムを核分裂した後にはウランの場合と同様、有毒の多種多様な核分裂生成物質が産み出され、それらの廃棄物は超長期間厳重に行われなければならない。プルトニウムが生成されないとしても、それらの物質は放射性的有毒物質である。悪意を持った者が入手すれば、「汚い爆弾」という放射能兵器として利用する可能性がある。したがって、トリウム原発を安全で有望なエネルギー源と位置付けるには無理があると思われる。



### 3.5 銅鉱山を用いた手法比較のためのケーススタディ

本研究のこれまでの検討の整理を目的に銅鉱山を対象とし、TMR、CO<sub>2</sub>排出量、EFをそれぞれ推計し手法についての検討を改めて行った。

#### 3.5.1 対象とする鉱山とそれぞれにおいて想定される環境負荷

これまでの整理を受けて3つの鉱山を対象に選んだ（表3.8参照）。主産物は全て銅である。

表3.8 ケーススタディ対象鉱山

	鉱山A	鉱山B	鉱山C
所在地	チリ	チリ	インドネシア
年間生産量 [ton-Cu]	約450,000	約450,000	120,000
採鉱法	坑内掘（Block Caving）	露天掘	露天掘
所在地周辺の植生	Evergreen broadleaf forest	Barren	Barren
特記事項			副産物としての金の量が多いため、銅鉱山としてはやや低品位

鉱山Aと鉱山Bはともにチリにあり、周辺の環境もよく似ている。ただし、鉱山Aは昨今大規模坑内掘手法として注目を浴びているBlock Cavingを採用している。また、鉱山Bと鉱山Cはともに露天掘の大規模銅鉱山であるが、周辺の環境が異なる。鉱山Cは鉱山周辺が比較的緑豊かな地域であるのに対し、鉱山Bはほぼ植生のない地帯である。

ここでまず採鉱法の違いにより、環境負荷にどのような違いが起こるのかを予想したものを表3.9に示しておく。

表3.9 採鉱法の違いにより予想される環境負荷の違い

	CO <sub>2</sub> 排出量	AMD	固体廃棄物	土地利用変化	その他
露天掘	トラック等のピット内輸送	サイト依存（表面水と坑内）	大量（剥土比に依存）	大きい	斜面崩落等が起きる可能性
坑内掘	コンベヤ等の坑内運搬	水の両方が影響する）	相対的に少ない	少ない	保安上の懸念は大きめ？

CO<sub>2</sub>排出量については、発生源が違うが、大規模露天掘鉱山におけるトラック輸送の距離を考えれば露天掘の方が大きくなる事例は多そうに思える。AMD（酸性坑廃水）については、現場により全く異なる問題であるために、採鉱法の種類と直接関係しているわけではない。固体廃棄物に関してはいうまでもなく露天掘の方が大きいことが予想される。特に、採掘が進行しピットの深度が深くなればなるほど剥土比の悪化という形で現れる。ちなみに、この剥土比というパラメーターは鉱山経営にと

って非常に重要であり、その悪化が大規模坑内堀への移行を検討させる要因でもある。最後に土地利用の変化について考えるが、これも坑内堀の方が小さくなるであろうことは予想に難くない。

こうして考えたとき、ほぼすべての環境負荷について、露天掘の方が大きいとされる結果が予想される。ただし、こうしたいわゆる環境負荷だけではなく、現地住民の生活に与える影響や、現場の労働者の保安環境等も考えなければならないことを忘れてはならない。こうした違いについて定量的に検証することを目的とし、鉱山Aと鉱山Bを取り上げることとした。

土地利用の変化は面積を測定することで定量的に求めることができるが、そのインパクトの大小と面積の大小は必ずしも等しくはない。そこで、ともに大規模露天掘り鉱山である鉱山Bと鉱山Cを比較することでその検討を行うこととした。

### 3.5.2 評価の前提

今回はEFのように、面積を計算する指標が存在するために、地理的なシステム境界を考えるための設定は重要である。今回は鉱山企業のアクティビティ、より具体的には採鉱と選鉱に限定することとした。

TMRについては、今回は3.2.1で触れたようなAMDなどを考慮した分析はデータの入手可能性から不可能であった。そこで、鉱石とズリの総採掘量に限定し、ある一年間での操業に伴う鉱山エリア内でのTMRを計算することとする。エネルギー投入の背後にあるTMRについては今回は計算しない。

次にCO<sub>2</sub>排出量であるが、先の定義に基づき、採鉱・選鉱二つの活動に伴うCO<sub>2</sub>排出量を推定することとした。

最後にEFであるが、今回の分析においてEFの勘定において必要となるものは、直接土地利用改変による生産能力阻害地の拡大と、二酸化炭素吸収地の二つである。二酸化炭素吸収についてはCO<sub>2</sub>排出量に係数を乗じることで求められるために特に問題はない。問題は前者であるが、今回は衛星画像を解析することで直接求めることとした。

本研究の主要なテーマではないため簡単に触れるに止めるが、衛星画像解析は、第三者が中立的な立場で土地利用変化面積を求めるほぼ唯一の手法である。大規模鉱山開発についてこれを適用することの問題点があるとすれば、画像解析の結果の妥当性の検証として最も一般的であろう現地における調査が難しいことが挙げられる。それは、大規模露天掘の大きさが一つ、そして操業中の鉱山に立ち入ることが必ずしも容易でないことがもう一つの理由である。しかしながら、第三者がこうした面積を求めるための手法は他には見当たらないため、今回はLandsat画像及びGoogle Earthの画像の2種類の画像を中心に、鉱山操業に伴い拡大した裸地の面積と、逆に当該箇所の操業が終了したのち緑化が行われたことで再度自然が戻った量などをArcGISを用いて計測することを試みた（図3.7参照）。

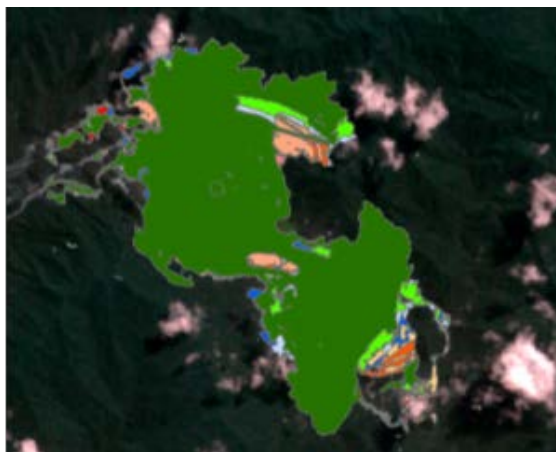


図3.7 土地利用改変面積の推定例（鉱山C）

TMRの場合と同様、ここで用いたEFの計算手法は通常のものである。ただし前節で問題定義されている尾鉱ダムについてはその面積を把握している。

### 3.5.3 評価の結果

単位銅量あたりの評価結果を表3.10に示す。ただしここではEFではなく、土地改変面積をまず記し、EFについては後述する。

表3.10 評価の結果の要約（2012年）

	CO <sub>2</sub> 排出量 [kg-CO <sub>2</sub> /kg-Cu]			TMR [ton/Cu-ton]	土地改変面積 [km <sup>2</sup> /Cu-ton]
	採掘プロセス	選鉱プロセス	合計		
鉱山A	0.825	0.335	1.160	123	174
鉱山B	1.014	0.371	1.385	352	1,953
鉱山C	1.445	0.876	2.321	2,491	2,973

まず鉱山Aと鉱山Bの比較からわかるように、採鉱法による違いは非常に大きい。予想された結果だとはいえ土地改変面積の違いは歴然としている。その違いに比べればTMRがそう大きく異なるわけではない。

次に鉱山Bと鉱山Cを比較すると鉱山Cの方が非常に悪い値を示す。ただし鉱山CのTMRは極端に悪い年であることを付記しておく。図3.8にこの値の推移を示した。

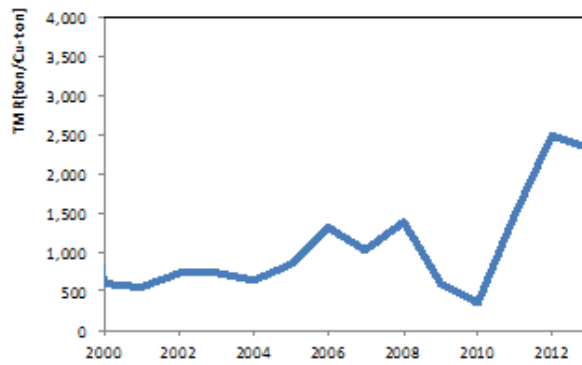


図3.8 鉱山CのTMRの推移

ここからもわかるように鉱山CのTMRは大きく変化して行っている。この理由の一つは、非常に険しい山の尾根周辺に大きなピットを開削しているという地形上の特異性がある。またこのような数値であるにもかかわらず操業できている理由は、表3.8にも示した、副産物の金の存在であると考えられる。なお、ここに示したTMRの値については特にアロケーションは実施していない。すべてのTMRは銅が背負うものと仮定している。

またTMRは突出して悪いものの、土地改変面積やCO<sub>2</sub>排出量については、そこまで大きな違いはないこともわかる。なお、この土地改変面積は累積値ではなくあくまで当該期間の変化量である。EFの計算における生産能力阻害地の算定においては累積された値（単純にその時点での生産力を奪われている土地の面積）が必要であることを記しておく。

この図3.8は様々な示唆を与えているが、ある一年の計測結果を用い、原単位を算出、これをLCA目的で利用し続けることがいかに危険なことがよくわかる事例であるといえよう。

ここまでの、CO<sub>2</sub>排出量と土地改変面積が得られたことからEFの推計を行った結果を図3.9に示しておく。比較を容易にするために単位銅生産量あたりの原単位にして示した。

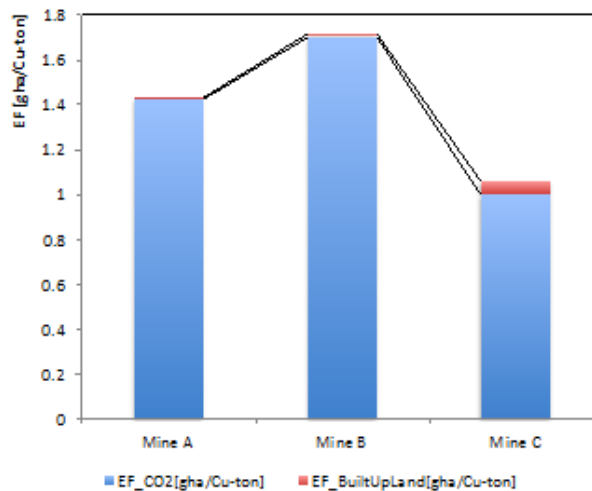


図3.9 EFの推計結果

図からもわかるように、二酸化炭素吸収地がほとんどすべてを占めており、生産能力阻害地は全体の推計結果にはほぼ影響を与えない。つまり、露天掘りと坑内掘の違いは、土地改変面積そのものに

比べればあまり大きな影響を与えないことが明らかになった。鉱山Cの二酸化炭素吸収地がCO<sub>2</sub>排出量の大きさを思えば小さく見えるが、これはインドネシアの森林の収量係数<sup>2</sup>がチリのそれよりも小さいことに起因するものである。

---

<sup>2</sup> 係数についてはGlobal Footprint Networkが提供する2010年度のデータを用いている。

### 3.6 結論

本章で示した3つの手法については、昨今マテリアルフロー指標から転じて環境影響評価指標としての期待がかかる関与物質総量（TMR）、環境負荷の代表的なものとしてよく見られるCO<sub>2</sub>排出量、そして網羅的な環境影響指標としてそもそも設計されているエコロジカル・フットプリント（EF）と、全く異なるタイプの指標を横並びで鉱山開発に適用してみることにした。

その結果得られた結果は以下のように整理できよう。

- EFについては二酸化炭素吸収地が圧倒的に大きくなるために、CO<sub>2</sub>排出量の計算結果と近い値を示す。ただし、地域別の係数を用いることで、ある程度はその国の生産性を反映することになる。
- 鉱山開発について、生態系へのインパクトを理由に土地改変面積の大きさが懸念材料に上がることは非常に多い。しかし、現時点でのEFの推計手法を用いる限りにおいては相対的には大きなものではない。
- TMRについてはEFやCO<sub>2</sub>排出量とは必ずしも一致するとは限らない。3.5節で説明したケーススタディにおける鉱山Cのように非常に大きく見える場合がある。これは、大規模な拡張工事や廃さいダムの新設などがあつた年には起こりうることである。実は土地改変面積についても全く同様のことが言えるが、EFに変換する際に、いずれにせよ生産能力阻害地の影響は小さめに見えることから結果に与える影響は大きくない。

この3点から言えることは、TMRとCO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ別個に推計する価値があるという点である。一方、EFがこれだけ二酸化炭素吸収地の面積に支配されるのであれば、係数によって各国の実情が多少は反映されるにしても、鉱山開発についてはそれほど有意義ではないかもしれない。

しかしながら、EFが拡張され、より様々な影響を考慮できるようになれば、これは別の問題である。例えば、国によっては尾鉱の海洋投棄が認められている場合がある。これは明らかに海洋生態系に対して影響を与えているはずである。また、TMRの拡張に際して検討項目とした酸性坑廃水（AMD）の問題は、その結果がもたらす被害地域を生産能力阻害地に該当すると考えるならば、結果は違ったものになるろう。

最後に、各指標を、今回検討したレベルの精緻な分析に応用しようとした際に現れる、勘定における問題点を整理しておきたい。

- TMRについては、そもそものデータが滅多に表に出ないものである。今回のケーススタディにおいては、鉱石とズリだけを検討対象としたが、これはこの二つのデータは相対的に信頼性があるものと考えたからである。<sup>3</sup>今回3.2.1で整理したように、AMDを固体物の重量に換算して評価しようとした場合、水質を知る必要がある。さらに、現時点でAMDが止まっていない鉱山について評価するのであれば、将来の水質を予測しなければならない。研究担当者らのモデル（Koide et al 2012、大塚ら 2014）ではある程度の予測は可能であるが、非専門家に容易に使えるレベルにはない。
- CO<sub>2</sub>排出量についても、詳細な操業パラメーターがあればあるほど結果は正確になるが、そうしたデータの入手は困難である。

---

<sup>3</sup> 既に述べた通り、剥土比は鉱山経営上重要なパラメーターであり、何かの形で公開されていることも多い。

- EFについては、生産能力阻害地を勘定するのであれば、鉱山関連施設の面積を把握しなければならない。今回は画像解析によりこれを得たが、厳密にはその検証には現場調査が必要になる。
- これまで述べたすべての点に関わる問題でもあるが、鉱山における環境影響とは極めて現場に依存するものであり、幾つかの代表的な鉱山について計算された値を原単位として用いることは極めて危険である。そのため、正確なデータを作るためには鉱山業界の協力が不可欠であるが、現実には協力を得ることは難しい。

最後に本研究の政策的な含意に触れておきたい。持続可能な資源利用を考えるにあたっては、その生産時の環境影響に関するある程度の知見は必要不可欠になる。CO<sub>2</sub>排出量に関しては、これまでの多くのLCAの試みの中で少しずつ明らかになってきているところである。また、昨今の生物多様性に関する関心の高まりから、土地改変を扱う研究事例は少しずつだが出てくるようになってきている。これらに対し、AMDのような問題は、環境問題としても極めてローカルな問題であり、鉱山現場をあまり持たない我が国の一般市民には存在そのものが知られていないような側面もあろう。

鉱山業は、環境中に存在する鉱物を採掘し、利用する産業であり、環境負荷が発生することは不可避である。それでも環境に比較的易しい鉱業を目指し日々努力がなされているところでもある。また先にも述べた通り、鉱山開発における環境影響は、現場によって大きく異なるものである。

今回の研究を通して、CO<sub>2</sub>排出量以外のものを含め、鉱山業からの環境影響を定量化する事を試みた。まずこうした試みを通して得られた結果を、持続可能な資源利用の一部に生かすべく、どの資源は比較的環境に優しいのか、また同じ資源であってもどのような現場が環境に優しいのかを知る手立てとして政策担当者には活用していただきたい。また、環境に優しい資源開発技術を持つことは、資源を持たない我が国にとっては大きな強みとなるはずでもある。その証明として、本研究で開発を進めているような手法を用いれば、我が国の資源政策に対しても貢献するものであると考えている。

### 3章 参考文献

- Authority of the Senate. (2002). Official Committee Hansard. Senate Environment, Communications, Information Technology and the Arts References Committee held on Tuesday, 1 October 2002. Canberra: Senate, Commonwealth of Australia.
- Bringezu S., Schutz H., and Moll S. (2003). "Rationale for and Interpretation of Economy- Wide Materials Flow Analysis and Derived Indicators" *Journal of Industrial Ecology* 7 (2): 43-64.
- Daly H. 1996. *Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development*. Beacon Press, Boston. (邦訳：デイリー、ハーマン (2005) 『持続可能な発展の経済学』みすず書房。)
- Ewing B., Goldfinger S., Wackernagel M., Stechbart M., Rizk S., Reed A. and Kitzes J. (2008). *The Ecological Footprint Atlas 2008*. Oakland, California : Global Footprint Network.
- IAEA (2011). *Report of the International Review Mission on the Radiation Safety Aspects of a proposed Rare Earths Processing Facility (the Lynas Project) 29 May – 3 June 2011, Malaysia*. – NE/NEFW/2011, Vienna.
- IAEA (2014). "IAEA Concludes Follow-up Review of Malaysia Rare Earth Plant." <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-concludes-follow-review-malaysia-rare-earth-plant> 2014.12.24 .取得。
- IEA (2004a). *Energy Balances of OECD countries*, International Energy Agency: Paris.
- IEA (2004b). *Energy Balances of non-OECD countries*, International Energy Agency: Paris.
- IPCC (1997). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Workbook Vol.2*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC):
- Koide R., Tokoro C., Murakami S., Adachi T., and Takahashi A. (2012). "A Model for Prediction of Neutralizer Usage and Sludge Generation in the Treatment of Acid Mine Drainage from Abandoned Mines: Case Studies in Japan", *Mine Water and the Environment* 31 (4): 287-296.
- JEMAI (2004). *Life Cycle Assessment Society of Japan (LCAJ): JLCA-LCA database 2004*. 2nd Edition. Japan Environmental Management Association for Industry.
- Lynas Corporation (2013). "Financial report for the year end of June 30, 2013." (<http://www.lynascorp.com/Annual%20Report/Lynas%20Corporation%20Ltd%2030%20June%202013%20Annual%20Report%201255840.pdf>) 2013.9.17 取得。
- Mudd G.M. (2009). "The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future," Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute.
- Mudd G.M. (2010). "The Environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints," *Resource Policy* 35(2).



- Mudd G.M. (2013). Personal Communication on June 4.
- Nansai K., Moriguchi Y., Tohno S. (2002). Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using Input-Output Tables -Inventory Data for LCA-. CGER, NIES.
- Ng E. (2014). "Lynas gets full operating licence before TOL expiry date." *The Malaysian Insider*. September 2, 2014.<http://www.themalaysianinsider.com/malaysia/article/lynas-gets-full-operating-licence-before-tol-expiry-date> 2015年1月20日取得。
- NIRE (1996). NIRE-LCA ver.2.
- Oeko-Institut (2013). Description and critical environmental evaluation of the REE refining plant LAMP near Kuantan/Malaysia. (<http://www.oeko.de/oekodoc/1628/2013-001-en.pdf>), 2013.2.22 取得。
- Rees W.E. (1996). "Revisiting Carrying Capacity: Area-Based Indicators of Sustainability." *Population and Environment*. 17(3), 195-215.
- Schmidt G. (2013). "Environmental Impacts of Lynas's LAMP Plant: A Short Summary of Relevant Issues and Their Current Status. " A Presentation at the Workshop, "Building a Safer Malaysia-Let's Work with the Experts." Held at Kuala Lumpur, Malaysia, November 24.
- USBM (1987a). Bureau of Mines Cost Estimating System Handbook, 1. Surface and Underground Mining, (BuMines IC 9142)
- USBM (1987b). Bureau of Mines Cost Estimating System Handbook, 2. Mineral Processing, (BuMines IC 9143)
- USBM (1995). The USBM Cost Estimating System, Economic Analysis Tools for the Mineral Industry, SP17-95, CD-ROM (US Geological Survey)
- Wackernagel M. and Rees W. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island, B. C., Canada: New Society Publishers.
- Wada Y. and Kishi M.. (2006). Environmental and Social Impacts of Uranium Mining: A Case Study of Ranger and Jabiluka Minesites in Kakadu National Park, Australia. Doshisha University Research Center of Social Common Capital Discussion Paper No. 14.
- Wassen R.J., White I., Mackey B. and Fleming M. (1998). *The Jabiluka Project: Issues that Threaten Kakadu National Park*. Submission to the UNESCO delegation World Heritage Committee Delegation to Australia, October 1998. 22p.
- Moore, D., 和田喜彦、伊波克典 (2012) .「福島原発事故による被害のエコロジカル・フットプリント分析：バイオキャパシティ（生物生産力）損失を中心に」. エントロピー学会秋の研究集会での口頭発表。11月18日。

- 安達毅、茂木源人（2005）費用推定データベースによる採掘・選鉱プロセスのライフサイクルインベントリの推計、資源と素材121(12)、 pp.590-596.
- 安達毅、茂木源人（2006）鉱山費用推定システムによる採掘・選鉱プロセスを考慮した銅地金生産のCO2排出に関するインベントリ分析、日本LCA学会誌2(3): 238-245.
- 伊波克典（2013）「エコロジカル・フットプリントの実践① 持続可能な未来創造のために」『バイオシティ』56号。pp. 64-69.
- 伊波克典、清野比咲子編, Pati Poblete, David Moor, 和田喜彦, 伊波克典, 岡安直比著（2012）『Japan Ecological Footprint Report 2012』.（日本語版）. WWFジャパン、グローバル・フットプリント・ネットワーク。
- エコロジカル・フットプリント・ジャパン HP. 「診断クイズ」 <http://www.ecofoot.jp/quiz/index.html> 2015.1.25.取得。
- 大塚啓司、村上進亮、山富二郎、小出瑠、所千晴（2014）「統計解析と地球科学コードを用いた酸性坑廃水処理の将来予測に関する研究」 Journal of MMIJ: 488-493.
- 亀井敬史（2011）「トリウム溶解塩炉 安全, 安価で小型: 軽水炉と太陽光の弱点補うトリウム原子炉(2)」『Wedge』09月27日。（<http://wedge.ismedia.jp/articles/-/1509?page=1>）, 2013.5.13 取得。
- 小島延夫（1992）「日系企業AREによる公害の悲劇: マレーシア」土生長穂・小島延夫編『アジアの人びとを知る本① 環境破壊とたたかう人びと』大月書店, pp. 45-65.
- 『工業レアメタル』（2014）. Annual Review 2014. 130号, アルム出版社。
- 谷口正次（2008）『メタル・ウォーズ: 中国が世界の鉱物資源を支配する』東洋経済新報社。
- 谷口正次（2014a）『自然資本経営のすすめ』東洋経済新報社。
- 谷口正次（2014b）「自然資本経営のすすめ」『京都大学 自然資本経営論講座設立記念シンポジウム』における講演。2014年11月30日@京都大学芝蘭会館。
- 栃木県総合教育センター（2013）『明日をつくる子どもたちの環境学習』（中学生・高校生編・平成25年度改訂版） <http://www.tochigi-edu.ed.jp/center/cyosa/jissenshiryou/kankyo/chu-kou/index.htm> 2015.1.27.取得。
- 奈良市（2012）『奈良市環境基本計画』（改訂版）  
<http://www.city.nara.lg.jp/www/contents/1337232600428/index.html> および、  
<http://www.city.nara.lg.jp/www/contents/1337232600428/files/6syoun.pdf> 2015.1.27.取得。
- 『日本経済新聞』ウェブ版（2013）。「レアアースの米モリコーブ、赤字転落 10～12月」 2013年3月16日 10:22 [http://www.nikkei.com/article/DGXNASGM15048\\_W3A310C1NNE000/](http://www.nikkei.com/article/DGXNASGM15048_W3A310C1NNE000/) 2014年1月29日取得。

- パタゴニアHP 「フットプリント・クロニクル」 <http://www.patagonia.com/jp/patagonia.go?assetid=67369>  
2015.1.27. 取得
- 『新唐人』 (2010) 12月24日 <http://www.ntdtv.com/xtr/b5/2010/12/24/atext472062.html> 2014.12.14.取得。
- 畑明郎 (2001) 『土壌・地下水汚染—広がる重金属汚染』 (有斐閣選書) 有斐閣。
- 藤井靖之 (2013) 「エコロジカル・フットプリントの実践④ 企業の環境負荷を視る指標」 『ビオシティ』 56号。 pp. 82-87。
- マーティン、リチャード (2013) . 『トリウム原子炉の道 世界の現況と開発秘史』 朝日新聞出版。
- 室田武 (2011) . 「温暖化をめぐるワインバーグの亡霊」 UTCPシンポジウム「脱原発シナリオをアセスメントする」 (10月2日、東京大学) における発表。
- 李冬激・周新・常杪 (2013). 「中国におけるレアアース採掘・生産の環境影響に関する調査報告書」。  
公益財団法人・地球環境戦略研究機関。
- 和田喜彦 (2007) 「エコロジカル・フットプリント指標の応用動向と今後の課題：事後継続的影響管理 (PIM) コストの算入について」 『日本LCA学会誌』 Vol. 3, No.1, pp. 3-10。
- 和田喜彦 (2009) 「『地球一個分の経済』達成状況を可視化するエコロジカル・フットプリント指標」 『環境研究』 152号。 pp. 14-24。
- 和田喜彦 (2013) 「基調論文：エコロジカル・フットプリント開発の背景とその意義」 『ビオシティ』 56号。 pp. 13-19。
- 和田喜彦 (2014) 「レアアース製錬に伴うトリウム等の放射性廃棄物管理に関する一考察 —エジアンレアアース (ARE) 社事件, ライナス社問題を事例として—」 『経済学論叢』 (同志社大学) 第65号第3号。 (2014年3月発行) pp. 241-263。
- 和田喜彦 (2015) 「マレーシアでのレアアース資源製錬過程による環境問題—エジアンレアアース (ARE) 事件の現況とライナス社問題」 『環境情報科学』 (2015年1月発行) 第43巻第4号。 pp. 32-38。
- WWFジャパン、グローバル・フットプリント・ネットワーク。和田喜彦監修。(2010) 『エコロジカル・フットプリント・レポート日本2009：限りある資源で幸せに暮らすために』 WWF International. Gland: Switzerland。
- WWFジャパン (2014) 「環境教育教材『地球1個分で暮らすために ～エコロジカル・フットプリントから考える～』が完成」 (記者発表資料) 2014年5月7日。  
<http://www.wwf.or.jp/activities/2014/05/1200407.html> 2015.1.25.取得。

## 4. 国際資源循環の推進に関する研究

---

### 4.1 はじめに

廃電気電子機器 (WEEE) 管理は、世界的に年間3~5%の増加率で急速に増加しつつある廃棄物の流れとして (Afroz et al. 2013)、また潜在的な持続可能性への最大の課題として (Qu et al. 2013) の認識が広がりつつある。世界規模では、毎年約3000~5000万トンのWEEEが廃棄されている。現在の増加率に基づけば、WEEEの排出は2015年までに毎年4000万~7000万トンに到達すると予想される (IIWM、2013年)。電子製品の製造と廃棄が増加すれば、採鉱、化石燃料抽出、精製も増加し、これらのプロセスに伴う1次的2次的なあらゆる環境および健康への影響が生ずる (Grossman 2005)。これらの金属および原料が、巨費を投じて抽出され精製される一方で、電子機器に組み込まれる金属と原料の大半は、最終的には埋め立て処理場、焼却炉、または主に発展途上国の廃棄物投棄場内に廃棄される。

WEEEには、環境と健康にとって有毒で潜在的に危険な多数の物質が含まれている (Oguchi et al. 2012)。残念ながら、ほとんどの発展途上国の人々は、これらの健康への影響にも、WEEEの危険な処理および管理に関連する他の環境への影響にも気づいていない (Afroz et al. 2013)。実際、発展途上国の人々は生計を立てる1つの手段としてWEEEの流れから金属および原料を抽出することを選択してきた。彼らは、非公式のスキャベンジング (ゴミ拾い) や原油リサイクル活動に従事しているため、自分自身と自分たちの地域社会を深刻な危険にさらしている。さらに、これらの活動を通して環境を汚染している。不法な越境移動とそれに続く猛毒物質を含むWEEE品の無差別投棄や不適正処分は、環境および発展途上国の貧しい人々に対するゆゆしき行為である。したがって、地域レベル、越境レベル、国際的なレベルでの適切なWEEE管理は、日常管理の点からも毒性管理の点からも重要な目標となっている (Oguchi et al. 2012、Qu et al. 2013)。

日本のような一部の先進国では、WEEEをうまく管理してリサイクルするために様々な戦略が採用されており、包括的な政策機構 (家電リサイクル法など) が実施されている (経済産業省 2013)。最近、寿命に達した電気電子製品は、金属の2次資源として広く注目を集めており、物質サイクルの管理、資源の保全、環境汚染制御に寄与しながら、開発途上国と先進国の双方で金属の安定供給を確保するために使用されている (Oguchi et al. 2012)。リサイクルは、環境に優しい戦略であり、かなりの量の物質を回収しながらWEEEの流れを管理するための最も適切な方法であることが以前から知られている。WEEEから回収された金属と物質は、これらがなかった場合に未使用資源から生産しなくてはならない同等量の資源に代替できる (Menikpura et al. 2012)。したがって、これらの未使用生産プロセスから生ずる温室効果ガスなどの環境排出を避けることができる。したがって、環境影響に関する限り、WEEEリサイクルは、世界的な気候変動安定化目標に大きく寄与する。適切なリサイクル方法を採用することにより、(貴金属およびあまり一般的ではない金属を含む) かなりの量の物質をWEEEの流れから回収することができる。さらに、適切なリサイクルプログラムから様々な種類の社会経済的便益が期待できる。

WEEE管理の意味に関する研究を実施することへの関心は、ますます高まっている。しかし、日本を含むアジア地域では、WEEEリサイクルが全体的な持続可能性に与える効果を評価する研究がほとんど行われていない。一般に、どのレベルのステークホルダー間でも、WEEE管理が環境保護と社会

経済的便益に与える影響についての知識は限られている。したがって、本研究では、本格的な持続可能性評価に関して、ライフサイクルに基づく定量的評価を開発することを目指している。

本研究の目的は以下の3つである。

- WEEEリサイクルプロセスチェーンの持続可能性を評価するためのライフサイクルアセスメント (LCA) ベースの手法の開発
- 日本国内のリサイクルシステムの持続可能性の評価
- 他の国々との比較および国際的資源循環を促進するための政策提言の提供

本研究の成果は、日本および他の国々の意思決定者および政策決定者が、適切な法律や政策を強化して実施する際に有益なものとなる。そしてこの調査結果により、発展途上国の人々に対して適切なWEEEリサイクルシステムのコベネフィットに関する教育を行うことができると期待される。

## 4.2 廃電気電子機器の持続可能性評価（WEEE）枠組みの開発

### 4.2.1 手法の概要

実用的な観点からみて、リサイクルシステムの持続可能性評価においては、環境・経済・社会の3つの持続可能性分野を考慮すべきである（Singh et al. 2009）。これらの持続可能性の3つの柱に関する長期的な政策を構想するにあたり、持続可能性評価の定量的指標を特定することが不可欠である。持続可能性評価のための「ツール」としては、ライフサイクルアセスメント（LCA）手法を用いることができる。同手法を通じて、環境・経済・社会的側面およびライフサイクルのすべての段階について、リサイクルシステムのライフサイクルにおけるインプット（投入）とアウトプット（生産排出）の特定が容易となるためだ。同手法によるライフサイクルの考え方に通じた廃電気・電子機器（WEEE）の持続可能性の評価、およびそのための指標特定の基本的な枠組みを図4.1に示した。

同手法は基本的に、研究対象地の選定、WEEE管理システムのライフサイクルインベントリ分析（ライフサイクルのインプットおよびアウトプットに基づいた優先問題を認識するため）、インベントリ分析結果からの最適指標特定、この指標群を用いた持続可能性評価、そして政策提言の5つの主要な手順からなる。

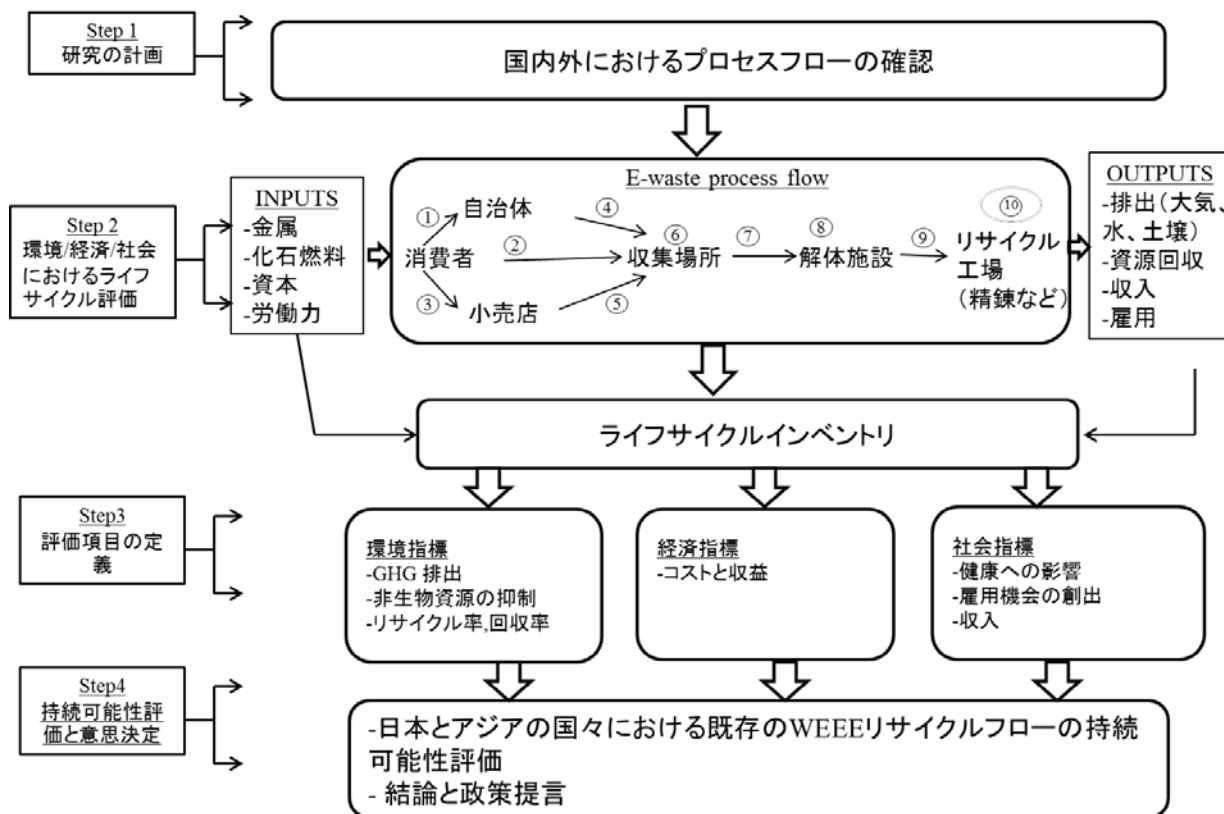


図4.1 研究手法の基本的枠組み

### 4.2.2 研究対象地の選択

国内外のWEEEリサイクルシステムについてライフサイクルのインプットおよびアウトプットを特定することは、持続可能性評価における重要な側面となる。しかし、家電製品の用途種類、発生率、

リサイクルシステムの処理能力、エネルギー構造、経済発展度、人口密度などの違いにより、WEEE管理のライフサイクルのインプットとアウトプットに期待されるものは国によって大きく異なっている。したがって、国外の研究対象地の選定は慎重に行い、アジア開発途上国全体を代表するような結果が得られるようにするべきである。

日本におけるWEEE管理の持続可能性評価については、WEEEフローの多様性や、異なるWEEE管理についてのより信頼性が高く最新のデータの入手を念頭に置き、表4.1に示す代表的な対象地3カ所を選定した。

**表4.1 研究対象地のWEEE管理フローの一般的な背景**

研究対象地	WEEE管理の内容
福岡県	福岡県は、日本の高人口密度地域におけるWEEE排出状況の代表例となる県である。人口密度は、1,020人/km <sup>2</sup> である。
岡山県	岡山県は、日本の中人口密度地域におけるWEEE排出・管理状況の代表例となる県である。人口密度は274人/km <sup>2</sup> である。
秋田県	秋田県は、日本の最低WEEE排出状況の代表例となる県である。人口密度は、95人/km <sup>2</sup> である。

#### 4.2.3 WEEE 管理の持続可能性評価手法の検討

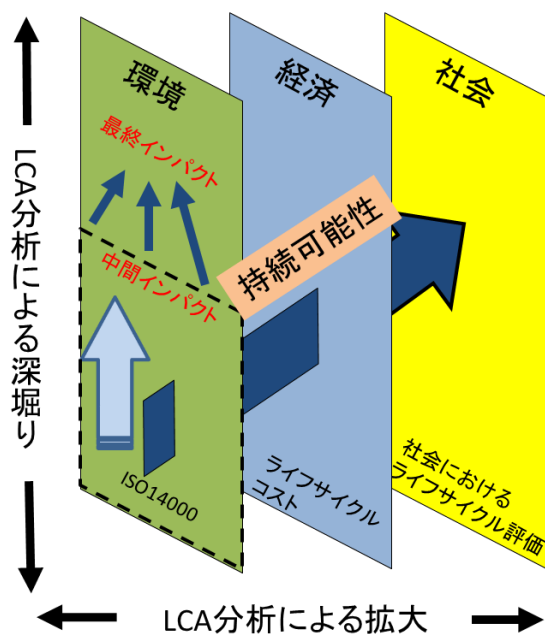
本研究ではライフサイクル手法にしたがい、環境・経済・社会的側面からみたWEEE管理システムの優先的指標の特定、そしてWEEEリサイクル手法の持続可能性評価を行う。したがって、持続可能性の3つの柱について「ゆりかごから墓場まで」、包括的なライフサイクルアセスメント（LCA）手法を実施する。同手法では、収集、1次・2次運搬、予備処理（解体）、リサイクル、資源回収など、WEEE管理のライフサイクルにおけるすべての段階を含む。

ライフサイクルインベントリ分析は持続可能性評価における重要な手順のひとつとなる。同手順においてはデータ収集と算出処理を行い、機能単位ごとのライフサイクルにおけるインプット（エネルギーと物質、コスト、労働力）およびアウトプット（排出、回収した資源、収益、地域への便益）を定量化する。ライフサイクルの次の段階である影響評価においては、インベントリ分析の段階で特定された物質とエネルギーの流れ、財源、ステークホルダー関与などに関わる環境・経済・社会的影響／負荷を分析する。したがって、WEEE管理システムのライフサイクルインベントリ分析の結果に基づき、3つの側面における持続可能性を評価するうえで最適の影響指標を特定することができる。

##### (1) 持続可能性評価のための LCA の評価範囲の「拡大」および「深掘り」

本研究においては、ライフサイクルの考え方をを用いて、日本ならびに選定したアジア諸国におけるWEEEリサイクルプロセスの持続可能性評価を行うにあたり、適切な環境・経済・社会指標を特定する。Menikpura (2011) が述べているとおり、「従来の環境LCAの評価」範囲は、全体的なライフサイクルの持続可能性評価のために拡大および深掘りされることとなる。LCAの評価範囲の「拡大」は、持続可能性の3つの柱を共通のLCA枠組みにより良く組み込むことよって行う。LCAの評価範囲の「深掘り」は、最終的な損害／影響を測定する方法の追加、および（または）測定の高度化によって行う。こうしたLCAの概念範囲の修正を通じて、その適用性が改善され、3つの側面からの持続可能性

評価の信頼性や有用性が向上する。LCAの評価範囲の「拡大」および「深掘り」を図式化したものを図4.2に示す。



出典：Menikpla 2011

図4.2 従来のLCAの評価範囲からの「拡大」および「深掘り」を示した図式

## (2) 機能単位

機能単位は、LCA手法の目的・評価範囲の段階の一部として定められる。機能単位の主な目的は、インプット・アウトプットデータを（数学的な意味で）標準化するための基準を設けることだ。また、様々なWEEEリサイクルフローの比較も、同一の機能単位を基にして行うことが可能である。したがって、WEEE管理における機能単位は、WEEEの種類、発生総台数、各機器別の構成素材割合、国内および国外における機器別の総資源リサイクル量などの主要指標を考慮して設定すべきだ。本研究では、エアコン、テレビ、冷蔵庫、洗濯機の4種類の主要WEEEを検討する。

なお、WEEE製品は製品の寸法（長さ・幅）、質量、および製造のための素材用途の面でそれぞれ異なる。機器の分類別に機能単位を定めた場合、分析が困難となる。したがって、本研究では機能単位を、各年度における上記4機器の「WEEEリサイクルの平均単位重量」と定義する。各機器グループの機能単位を推計できれば、選定した国の年度ごとの全体的な環境・経済・社会影響を容易に算出することが可能となる。

## (3) システム境界/LCA 枠組みの設定

WEEEリサイクルの「ライフサイクル持続可能性評価」を行うにあたり、従来のLCAにおけるシステム境界を拡大し、適切なLCA枠組みとなるようにした。この枠組みには、収集（消費者～集積所）、1次・2次運搬、予備処理（解体）、リサイクル、および資源回収など、WEEE管理のライフサイクルにおけるすべての段階が含まれる。



また、システム境界の設定は、所要のライフサイクルシステムに入る環境・経済・社会的側面からみたインプット、およびそこから出るアウトプットを特定するうえで重要である。以下で述べるように、ライフサイクルにおける中心的なインプットおよびアウトプットの特定は、以下の主要な点について行う。

#### 収集および運搬

WEEEの収集と運搬は膨大なエネルギーを必要とし、環境への排出を伴うことは、良く知られた事実である。収集と運搬の方法によって、収集車両の効率性、運搬ルート、環境影響の深刻さは、アジア諸国間で相当異なってくる。WEEE収集と運搬に必要となるエネルギーは、非生物資源の枯渇やその他様々な社会経済・環境影響の原因となる。現在、WEEEは相当量が処理コストの安価な途上国に輸出されている。したがって、WEEEの収集、および収集済WEEEの国内または国外の処理施設への運搬は評価プロセスに含まれるとみなされる。収集と運搬による影響を算出する基礎として、LCA手法を通じた物質フロー分析とエネルギー収支を行う。運搬方法、運搬距離、使用する車両の種類および燃料効率、廃棄物収集の頻度などの基本データを、各研究対象地について収集する。

#### WEEEの解体/リサイクル

解体とリサイクルは国内ばかりでなく国外で行われる場合がある。したがって、各機器分類の平均単位重量ごとのすべての素材の解体およびリサイクルプロセスは、その場所を問わずシステム境界に含まれるべきである。処理/加工場所を踏まえ、解体/リサイクルに関する資源利用データおよびその詳細を考慮に入れるべきである。

#### 電力消費

電力は、WEEEのリサイクルプロセスの様々な段階における設備や機械の稼働に求められる最も重要なインプット資源のひとつである。したがって、選定した国での（系統連系型）発電プロセスにおける排出や化石資源消費は、インベントリ分析段階で考慮すべきである。その一方で、WEEEのリサイクルを通じて、相当量の物質を回収することができ、未使用の物質の代わりに利用することが可能となる。したがって、発電のための化石資源利用およびそれによる排出、つまり未使用の資源を消費する生産プロセスを回避することができる。各国の発電による資源の消費と排出は、WEEEリサイクルの環境影響を左右する指標のひとつとなる。一部のアジア諸国におけるグリッド電力生産のための様々な種類の化石燃料の使用およびその排出を表4.2にまとめる。

表4.2 日本および一部のアジア諸国における発電による資源消費と排出

国	日本	タイ*	インド***
発電エネルギー源別割合	LPG/LNG -35% 原子力 -23% 石油-15% 石炭-6% 天然ガス -2% 水力-19%	天然ガス 73.4% 石炭/褐炭 -20.2% 燃料油&軽油-0.70% 水力と再生可能エネルギー -5.40%	石炭 -53.3% 天然ガス 10.5% オイル -0.90% 水力-24.7% 原子力 2.90% 再生可能エネルギー源-7.7%
1 MWhを生産するための化石燃料の消費量 (1MWhの電力生産からの) 排出量		褐炭 -197 kg 燃料油&軽油 -2.03L 天然ガス -173 m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> -566 kg CO -0.461 kg NO <sub>x</sub> -1.77 kg CH <sub>4</sub> -0.0475 kg SO <sub>2</sub> -2.39 kg PM <sub>10</sub> -0.542 kg	石炭 -305 kg 天然ガス -24.3 m <sup>3</sup> オイル -2.18 kg CO <sub>2</sub> -648kg CO -0.147 kg NO <sub>x</sub> -1.64 kg CH <sub>4</sub> -0.0525 kg SO <sub>2</sub> -4.18 kg PM <sub>10</sub> -0.00578kg

出典：\*エネルギー省代替エネルギー・省エネルギー局（DEDE）・2008年、タイ発電公社（EGAT）・2008年、\*\*\* 電力省・2009年、Chakraborty・2008年、Kannan・2005年

#### 熱エネルギー必要量

熱エネルギーは、WEEEの解体/リサイクルで必要となる主要インプットのひとつである。したがって、化石エネルギー消費の種類、必要となる化石資源量、火炉の効率性、燃焼による排出などのデータは、WEEEリサイクルの機能単位に関するシステム境界において考慮すべきである。化石燃料の燃焼による国別の排出データは、本研究の評価対象国すべてについては入手できない可能性がある。リサイクルの単位プロセスに必要とされる熱エネルギーを求めるうえでオンラインデータベース（エコインベントなど）が使用されている場合は、同量の熱エネルギーの生成に必要な利用可能な追加エネルギー源に基づき、各国の状況に調整する必要がある（データベースの値は欧州の状況を反映している）。また、インベントリ分析において、各国の燃料源の燃焼による排出を考慮すべきである。こうした調整は、分析作業の不確実性を回避するうえで有用となる。

#### ライフサイクルインベントリ分析

インベントリ分析の段階では、ライフサイクルの連鎖全体を調べるうえで、必要となるすべての環境・経済・社会関連データを活用する。環境インベントリ分析に関しては、物質、エネルギー消費、大気、水、土壌への環境排出といった、すべてのインプットおよびアウトプットを考慮すべきである。また、WEEEリサイクルプロセスに関わるすべての費用と収益を、財務面での持続可能性評価の実績に含めるべきである。財務情報を収集するには、1次集積所、2次集積所、運搬事業者、解体施設など様々なステークホルダーからの協力が必要となる。WEEE管理に伴う主要な社会問題としては、所得創出（主に途上国におけるWEEE販売）、雇用機会の創出、健康被害のおそれなどが挙げられる。したがって、社会的影響を定量化するための関連データは、現場データ（1次・2次集積所およびリサイクル事業者）、文献データ、プラントの記録、および推計/算定として収集すべきである。持続可能性評価に必要なデータの種類を表4.3にまとめた。

表4.3 ライフサイクルインベントリ分析に必要なデータ種類

持続可能性 評価	ライフサイ クルの段階	必要なデータ	(満たすべ き) データ源
環境 評価	WEEEの 収集と輸送	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1次・2次集積所の1日当たりWEEE取扱能力、化石燃料消費量、および電力消費量</li> <li>・WEEEの運搬に必要な化石燃料消費量、および収集車両の燃料燃焼による排出量</li> <li>・車両の仕様（積載量、運搬 距離）</li> </ul>	
	WEEEのリサ イクル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各機器の構成素材割合、回収率、各素材のリサイクル性</li> <li>・WEEEのリサイクルに必要な単位重量当たりの電力および熱エネルギー、ならびに排出量</li> <li>・リサイクルプロセスに必要な補助原料、およびその排出量</li> </ul>	
	回収不可 能な微細破 片の処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・回収不可能な微細破片に含まれる物質の種類および量</li> <li>・回収／リサイクル不可能な微細破片の処理に用いる技術の種類</li> <li>・回収不可能な微細破片の処理に必要な電力および熱エネルギー、ならびに排出量</li> <li>・回収不可能な物質（プラスチックなど）の燃焼による排出</li> </ul>	
経済的 評価	WEEEの収集 と運搬	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コスト</li> <li>・1次・2次集積所の機械類および車両のコスト</li> <li>・1次・2次集積所の稼働・維持管理コスト</li> <li>・長距離運搬車両の操作・維持管理コスト</li> <li>・収集車両の耐用性／耐用年数、車両の積載容量</li> </ul>	
	WEEEのリサ イクル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リサイクル施設の年間設備投資（用地費用、設備コスト）</li> <li>・総稼働・維持管理コスト（人員、燃料、電力、水、補助原料、およびその他の設備コスト）、保険、税</li> <li>・回収資源の販売能力および価格</li> </ul>	
	回収不可 能な微細破 片の処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処理施設の設備投資（用地費用、機械コストなど）</li> <li>・稼働・維持管理コスト（燃料、人員、設備、機械維持管理コスト）</li> </ul>	
社会的 評価	WEEEの収集 と運搬	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1次・2次 収集に必要な労働力</li> <li>・長距離運搬に必要な労働力</li> <li>・収集と運搬活動による健康問題のおそれ</li> <li>・WEEE販売を通じた地域住民の所得創出</li> </ul>	
	WEEEのリサ イクル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高技能・低技能人材の雇用機会の創出</li> <li>・従業員の福利厚生</li> <li>・解体／リサイクルにより生じるおそれのある健康問題</li> </ul>	
	回収不可 能な微細破 片の処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・従事者／労働者の所得創出の可能性</li> <li>・高技能／低技能人材の雇用機会の創出</li> <li>・従業員の福利厚生</li> <li>・回収不可能な微細破片の処理による健康問題のおそれ</li> </ul>	

#### 4.2.4 持続可能性評価のための最適指標の特定

持続可能なWEEE管理には、環境・経済・社会影響の定量化および比較を助けるための手法やツールが必要である。持続可能性の指標は、環境、経済、社会、技術的進歩といった分野で様々な国や企業業績に関する情報伝達においての政策決定やパブリック・コミュニケーションにとって有用なツールとして認識されつつある。本研究では、環境に配慮した使用済み製品の管理、資源効率、およびグリーンジョブと国際的なリサイクル産業振興といった研究目標を達成するための優先的指標群を特定した。

##### (1) 環境に配慮した WEEE 管理

環境的持続可能性とは、資源の合理的消費と環境汚染の低減に集約される。環境評価に関する優先的問題は、各国の規則や規制、基準によって異なる。しかし、WEEE管理による環境排出に伴う主要環境負荷を計測する際、リサイクルによる物質回収を通じた環境負荷の軽減可能性も含まれるよう、以下の2つの主要指標を特定した。

##### 温室効果ガス (GHG) の正味排出量

廃棄物管理手法ごとの温室効果ガス (GHG) 排出可能性は、持続可能性の評価において重要となりつつある。現在、地球温暖化は最も大きな環境的脅威のひとつであり、WEEE管理も人為的GHG排出における相当大きな原因となっている。WEEE管理は一方において、すべての段階において相当量の化石エネルギー(化石燃料、電力など)を消費し、様々なGHG(二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)、メタン(CH<sub>4</sub>)など)の排出原因となっている。そのため、ライフサイクルの各段階において、すべてのGHG排出可能性を推計すべきである。その一方で、WEEEリサイクルを通じた物質回収により、未使用資源の生産や利用を代替できるため、これらの生産・利用プロセスに伴うGHG排出は回避することができる。したがって、WEEE管理によるGHG排出回避/削減可能性を考慮すべきである。全体としての気候への影響やWEEE管理の便益は、ライフサイクル全体を通じた排出と間接的かつ最終段階におけるGHG排出削減の両方を含めた、GHGの正味排出量によって決定される。したがって、意思決定や政策提言を行うにあたり、GHGの正味排出量を算出すべきである。

本研究ではGHGによる気候影響の集計において、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が推奨するGHG等価係数を使用する(CO<sub>2</sub>: 1、CH<sub>4</sub>: 25、N<sub>2</sub>O: 298)(Forster et al. 2007)。

WEEE管理によるGHGの総排出量および正味排出量は、それぞれ以下のように計算する。

$$GHG_{Gross} = \sum(Q_i C \times EF_i) + \sum(Q_i T \times EF_i) + \sum(Q_i TF \times EF_i)$$

$$GHG_{Net} = GHG_{Gross} - \sum(Q_i PA \times EF_i)$$

(注) Q<sub>i</sub> : 物質*i*の量、C : 1次・2次収集、T : 運搬、TF : 処理施設、PA : 回避可能量、EF<sub>i</sub> : *i*番目の物質の等価係数

## 健康への正味の影響

健康被害はWEEE管理に伴う最大の問題のひとつである。健康問題はWEEEの取り扱い、処理、および処分のすべての段階に直接的（有害物質への曝露など）または間接的（汚染された水、土壌、食品の摂取など）に関わっている。WEEEには毒性の強い化学物質が含有されている（鉛、カドミウム、水銀、ベリリウム、臭素系難燃剤（BFR）、ポリ塩化ビニル、リン化合物など）。これらの化学物質の多くはガンや呼吸器疾患、生殖系問題を引き起こすとして知られている。事実、過去のいくつかの研究では、電子産業に従事する労働者の肺ガンや咽頭ガン、鼻腔ガン、乳ガン、膀胱ガン、脳腫瘍のリスクが相当高かったことが示されている。WEEEリサイクルに従事する労働者は、WEEEの粉砕や処分中に重金属や毒性のある難燃性化学物質に曝露している。リサイクル・処分が適切に行われなかったためにこうした危険が生じる場合も多い。

健康への総インパクトを定量化する指標として、世界保健機関（WHO）と世界銀行が開発した障害調整生存年数（DALY）の考え方を採用することができる（PRé Consultants 2001）。なお、「健康被害」は環境排出が原因となって生じるものの、健康保護は社会全体の利益となるため、同指標は社会的指標とみなすこともできる。

様々な種類の健康被害を集計するにあたり、障害の比較による重み付けを行うためのツールが必要となる。これは、毒性物質の排出影響による生命損失年数（YOLL）および障害生存年数（YLD）によって示される。実際の健康インパクトは、自然環境中の汚染物質の運命、およびそれが人間の福利に及ぼす影響によって決定される。DALYは総健康被害を推計するためのツールとして使用でき、複数の健康インパクト経路の最終的な影響を説明することができる。

被害係数は、死亡率／深刻な罹患率から導くことができ、疾病別の罹患率は同一または異なる汚染物質により求めることができる（Steen 2000）。したがって、同モデルを用いて、影響の深刻度を恒久的な損失生存・障害年数として容易に説明することが可能となる。

個別の健康インパクトによる総健康被害は以下のように計算することができる。

$$\text{DALY (人数-年数)} = \text{死亡率 (YOLL)} + \text{深刻な罹患率 (YLD)} + \text{罹患率 (YLD)}$$

WEEE管理によって生じ得る健康インパクトを考慮した総健康被害の一般計算式は以下となる。

$$\text{DALYs} = \sum_i (G_i \sum_a H_{\text{mortality-}a} + G_i \sum_a H_{\text{severe morbidity-}a} + G_i \sum_a H_{\text{morbidity-}a})$$

$G_i$  : ライフサイクル全体を通じて排出される汚染物質*i*の量

$H_{\text{mortality(死亡率)} a}$ 、 $H_{\text{severe morbidity (深刻な 罹患率)} a}$ 、 $H_{\text{morbidity (罹患率)} a}$  : 汚染物質 *i* が原因となった疾病経路*a*による健康への被害係数

## (2) 資源効率

多様な物質への需要は新興国をはじめとして世界中で高まっており、金属の安定供給確保は重要な問題とみなされていることから、WEEE管理は重要な役割を果たす（Oguchi et al. 2011）。適切なWEEE

管理は、準備賦存量とみなすことのできる2次資源量の最大化に寄与する。したがって、収集、事前選別、予備処理、およびリサイクルは、各種類のWEEEの2次金属資源としての特徴を考慮し、秩序立てて行うべきである。選定した国の資源利用効率におけるWEEE管理の総寄与を算出する際は、以下の指標を用いる。

### 資源の正味消費抑制量

化石エネルギーおよび金属資源は一国の発展にとって極めて重要だが、これらは限りある資源であり、持続可能性に欠ける。事実、世界の石油・金属賦存量は、高い消費率を背景に急速に枯渇している。WEEE管理プロセスも、1次・2次収集、運搬、およびリサイクルをはじめとして化石エネルギーの消費と関わりがあり、その意味で限りある資源の枯渇に加担している。その一方で、WEEEのリサイクルを通じて相当量の資源抽出に寄与することも可能である。最近では、WEEEは貴金属やレアメタルを含む様々な金属を含有していることから、こうした多様な金属資源の第2の源とみなされつつある。さらに、プラスチックやゴムといった素材も相当量回収できる可能性がある。リサイクルによるレアメタルなどの物質回収により、未使用物質・金属の使用を代替できるため、未使用資源の消費抑制に寄与する。したがって、WEEEからの物質回収は、非生物資源の枯渇抑制のために未使用の化石燃料・金属消費を代替する良い解決策となる。本研究では、WEEEリサイクルによる資源の正味消費抑制量は、リサイクルプロセスに使用される資源と回収される資源の両方を考慮して算出する。

非生物資源の総使用量および正味使用量は以下のように計算する。

$$AR_{Gross(i)} = AR_{C(i)} + AR_{T(i)} + AR_{TF(i)}$$

$$AR_{Net(i)} = AR_{Gross(i)} - AR_{RM(i)} = m_i$$

ARGross (i) : 非生物資源 iの総量

ARC (i) : 1次・2次収集における非生物資源の使用量

ART : 運搬における非生物資源の使用量

ARTF : 処理施設における非生物資源の使用量

AR RM (i) : 物質回収による非生物資源 i の保存量

mi : 資源 i の抽出／消費抑制の正味数量

非生物資源 iの枯渇可能性は以下のように計算できる (Guinée 2001)。

$$ADP_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \times \frac{(R_{ref})^2}{DR_{ref}}$$

ADP<sub>i</sub> : 非生物資源 iの枯渇可能性

R<sub>i</sub> : 資源 iの究極賦存量 (kg)

$DR_i$  : 資源  $i$ の抽出率 ( $\text{kg}\cdot\text{y}^{-1}$ )

$R_{\text{ref}}$  : 基準資源の究極賦存量 (アンチモン  $\text{kg}$ )

$DR_{\text{ref}}$  : 基準資源の抽出率 ( $\text{kg}\cdot\text{yr}^{-1}$ )

$$ADP = \sum_i ADP_i \times m_i$$

非生物資源の正味消費抑制量を計算する際は、重み付けの段階において様々な資源について集計すべきである。これは極めて主観的なものとなり得る。

### リサイクル率および資源回収率

WEEEリサイクル率もしくは資源回収率は、資源の効果的利用を定量化するための適切な目安となる。これにより、単位重量当たりのリサイクル済みWEEEが、新たな鉱石の採掘を回避するうえで、どの程度寄与しているかを知ることができる。さらに、同指標はリサイクルプラントの性能を評価し、「リサイクルプラントがいかにうまく機能しているか」を示す。個別の品目別にリサイクル率を設定することにより、すべてのステークホルダー層の目標達成意欲を向上させ、それにより国全体の資源効率を高める。また、各国間のリサイクルシステムの効率性を比較するうえでも、これは適切な指標である。WEEEの種類別のリサイクル率は以下の数式を使って算出する。

$$\text{リサイクル率} = \frac{\text{リサイクル済み量もしくはリサイクル可能な資源量}}{\text{総リサイクル量}} \times 100$$

### 関与物質総量 (TMR)

関与物質総量 (TMR) には、「直接」フローと「間接」フローで製造に使用される主要物質が含まれている。リサイクルの補償として世界資源の抽出を低減する可能性を推定することは、意思決定プロセスにおける有形情報となる。リサイクルによる物質の回収の重要性を理解するため、日本における様々な物質のTMR値を使用することにより、リサイクルの報酬として回避できるTMRが計算された。

$$\text{TMR} = \text{DMI (直接物質インプット)} + \text{HF (隠れたフロー)}$$

### (3) グリーンジョブおよび国際的なリサイクル産業振興

グリーンジョブの創出を通じた貧困軽減や経済発展は、国際的なリサイクル産業振興を目指すうえで重要な側面のひとつとなるだろう。現在、多くの途上国において地域における失業が個人の心身の健康に何らかの影響を及ぼしている。また、失業は、家族の緊張や対立の増加、心身の健康悪化、家庭内暴力、社会における犯罪増加などをもたらす場合もある (Jørgensen et al. 2008)。

適切なWEEE管理システムを導入することにより、雇用機会やその他の所得機会の創出が促され、それによる地域経済成長を通じて生活水準を向上させることが可能となる。先進国では消費者は、有

料または無料で廃機器の引き渡しをする。しかし、途上国ではWEEEは潜在的価値のある資源と見なされているため、消費者や企業はWEEEの引き渡しと引き替えに対価を得ようとする。したがって、途上国では廃棄物が収集事業者、加工事業者、中古販売業者、および消費者の間で販売・取引されることから、WEEE 産業は個人と企業の両方に所得創出機会をもたらす得る (Hicks et al. 2005)。また、集積所、運搬事業者、解体・リサイクル施設における高技能および低技能労働者の雇用機会をもたらすことで、世帯所得の増加やそれによる貧困削減が進み、個人およびその家族の生活水準の向上が可能となる。このように実際、雇用機会の創出および世帯所得の増加は、衣食住や公衆衛生、健康、識字レベル、および幸福度などの福利を測る指標と相互に関連している。

## 雇用機会

質の面（安全な労働環境、健康保険、職場での訓練）および量の面での雇用機会向上は、持続可能なWEEE管理を目指すうえで適切なアプローチといえる。個別のWEEEリサイクルシステムによるグリーンジョブ創出の可能性を推計することは、将来の社会的福利やそれによる経済発展を知るうえで適切な指標といえる。潜在的な雇用機会創出は、すべてのWEEE管理段階を考慮した社会的ライフサイクルアセスメントの考え方に基づいて開発された一般式によって算出される。この式では、WEEEリサイクルの平均単位当たりの必要労働時間に着目している。

$$PEO \text{ (working hours/Unit)} = \frac{(LR_c \times TC)}{TU_c} + \frac{(NTV \times LR_{per\ vehicle})}{TU_T} + \frac{LR_{TF}}{TU_{TF}} + \frac{LR_I}{TU_I}$$

PEO： 潜在的雇用機会

LR<sub>c</sub>： 1次・2次収集に必要な労働量（集積所当たり労働時間）

TC： 個別の研究対象地における集積所の総数

TU<sub>c</sub>： 1日当たりの集積所ごとの総取扱単位数

NTV： 運搬車両の台数

LR<sub>per vehicle</sub>（車両1台当たり）： 車両1台当たりに必要な高技能・低技能労働量（車両1台当たり労働時間）

TU<sub>T</sub>： 1日当たりの総運搬単位数

LR<sub>TF</sub>： 処理（解体およびリサイクル）施設に必要な高技能・低技能労働量（1日当たりの労働時間）

TU<sub>TF</sub>： 施設で処理された1日当たり総単位数

LR<sub>I</sub>： 間接的活動（事務など）に必要な高技能・低技能労働量（1日当たりの労働時間）

TU<sub>I</sub>： 間接的に取り扱いされた1日当たり総単位数（1日当たりの労働時間）

## 所得に基づいた福利

福利は、グリーンジョブおよび間接的な所得創出機会の創出の結果として向上する。技能水準に基づく様々な賃金帯の有給雇用の時間数は、個人およびその家族の基礎的ニーズを満たすのに十分となる。適切なWEEE管理活動による福利に基づく所得向上の結果、「より良い生活」を手に入れた人の数は、WEEE管理1単位による潜在的所得創出要因を平均生活費で除すると算出できる。



$$\text{生活水準の向上（単位当たり人数）} = \frac{\sum_i (PEO_i \times TW_i) + I_{indirect}}{COL}$$

PEO<sub>i</sub> : i番目の水準の潜在的雇用機会（単位当たり労働時間）

TW<sub>i</sub> : i番目の水準の賃金レート（1時間当たり金額）

I<sub>indirect (間接)</sub> : 間接的活動による所得創出（単位当たり金額）

COL : 生活費（1人当たり金額）

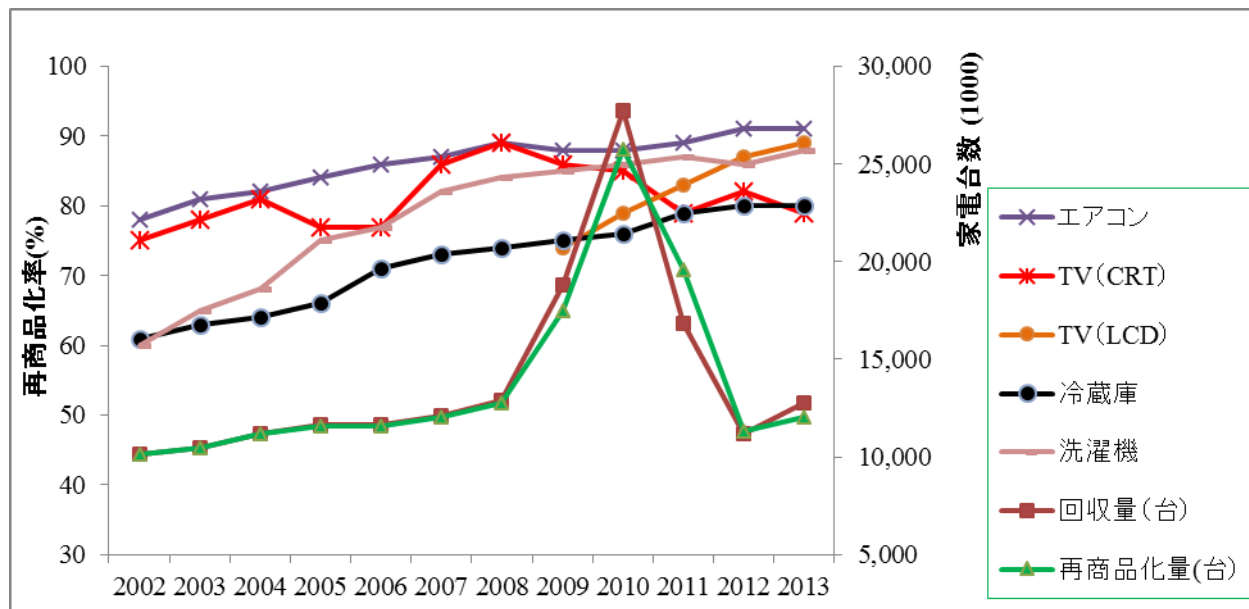
#### 4.2.5 持続可能性評価手法改善のためのさらなる研究

より包括的な持続可能性評価を行うためには、WEEE管理における持続可能性の柱である環境・経済・社会的側面のすべてを、図4.1に示した単一の概念枠組みの下で評価すべきである。これまでに開発された手法は、WEEE管理の環境および社会的問題に関する重要な問題しか網羅していない。経済はWEEE管理において非常に重要な要素であり、それゆえLCAを用いて、環境と同様に秩序だった形で分析することが重要である。このように、ライフサイクル全体を考慮してWEEE管理プロセスの経済的実現性を定量化するには、プロジェクトの次段階で関連経済指標を特定し評価するべきであろう。費用便益分析やライフサイクル費用計算は、WEEE管理の経済的特性を測るための指標となり得る。

### 4.3 日本における廃電気電子機器（WEEE）管理の持続可能性評価

#### 4.3.1 日本における WEEE 管理の一般的状況

日本のリサイクルプロセスは単一のシステムではなく、4つの主要なルートがある。1つ目は、最初の家電リサイクル法の下での正式なルートである。2つ目は、再利用のための中古市場である。3つ目は、非公式セクターによる未使用品の収集である。4つ目は、自治体による収集と一般廃棄物としての処理である。本研究では、日本の家電リサイクル法の下での正式なルートを検討した。この経路により最終リサイクルプロセスまで移動するWEEEの割合が最も高いためである（収集されたWEEE台数の67%以上）（AEHA 2013）。図4.2.1は、家電リサイクル法に基づく正式なルートを通じて行われたWEEE回収およびリサイクルの10年間の動向をまとめたものである。例えば、2013年には、エアコン、冷蔵庫、洗濯機、テレビ（ブラウン管 - CRT）の日本におけるリサイクル率は、それぞれ91%、80%、88%、79%であった。図4.3は、日本におけるWEEEのリサイクル率の推移を示したものである。



出典：AEHA 2013

図4.3 日本におけるWEEEの回収とリサイクルの動向および再商品化率の推移

本研究では、日本における家電リサイクル法に基づく正式なルートによる平均的状況のデータは、2005年のデータに対応していると考えた。なお、使用済み家電データフローの全体的な推定値（非公式ルート、再利用のための中古市場など）は、2006年から2008年の期間については入手できなかった。2008年後には、より新しいデータが入手できたものの、エコポイントの導入やテレビ向け放送システムの変更など（現行法以外の）の様々な要因が使用済み家電の流れに影響を与えた。これらすべての理由により、本研究を継続することにより、日本のシステムを評価して、これを非公式ルートおよび発展途上国のスクラップ貿易と比較するという意図においては、2005年が最も適切な年であると考えられた。

### 4.3.2 研究対象地の選択

日本の高人口密度地域は、WEEEの主要な排出源である。日本の都市化された高人口密度地域でWEEEリサイクルチェーンを評価するために、福岡県を研究対象地として選択した。福岡県は、日本の47都道府県のうち7番目に人口密度の高い県である（人口密度は1,021人/km<sup>2</sup>）（Statistics Japan 2012、GIA 2012）。したがって、福岡県は高人口密度地域のWEEE発生状況の代表例となる研究対象地と考えられた。家電リサイクル法の下では、WEEEが主に小売店によって収集された後、指定のストックヤードに運搬された。消費者が直接ストックヤードまたは近くの自治体に寿命末期のWEEEを持ち込む場合もある。後者の場合、自治体はWEEEをストックヤードに運搬する責任を持つ。福岡県では、利用できる指定の収集場所（ストックヤード）が10箇所ある。指定収集場所（ストックヤード）では、収集されたWEEEの90%以上が家電リサイクル工場（解体施設）に運搬される。ここでは、すべての廃棄された4種類のWEEE（テレビ、エアコン、冷蔵庫、洗濯機）を県内で収容して解体する能力がある（パーソナル・コミュニケーション）。この後、解体リサイクル可能品（主に金属）が、福岡や近県（大分、山口など）にある各種製錬施設に送られる。日本の家電リサイクル法の下でWEEEの解体および製錬プロセスを行う際の典型的な物流フローを図4.4に示す。

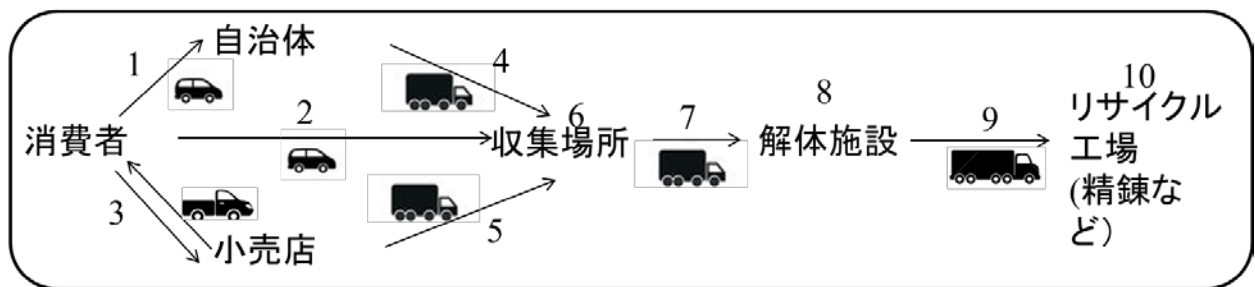


図4.4 福岡県の正式なルートによるWEEE処理の物流フロー

なお、日本の低人口密度地域におけるWEEE管理の持続可能性を評価するため秋田県を選択した。秋田県は、日本でのWEEE排出量が最低レベルである県の代表例である。人口密度は、95人/km<sup>2</sup>である。

### 4.3.3 環境に配慮した WEEE 管理に関する評価結果

#### (1) WEEE の物流過程からの温室効果ガス排出量

WEEE管理の物流チェーンは、温室効果ガス排出量のかなりの量を占める重要な側面である。そのため、WEEEの物流により発生した温室効果ガスに関する詳細な評価が行われた。表4.4は、特定の運搬ルート、運搬された家電の種類、運搬手段、運搬距離、異なった種類の車両の燃料効率、およびこれらの車両の積載能力をまとめたものである。

表4.4 WEEEの物流チェーンの評価、洗濯機 (WM)、冷蔵庫 (RE)、エアコン (AC)、テレビ (TV)

物流チェーン	運搬ルート	品目/物質の種類	運搬手段	平均運搬距離 (km/片道)	燃料効率 (km/L)	積載能力/移動
1次集積所	顧客から小売店	WM、RE、AC	4輪トラック	3.5	ガソリン - 15.0km/L	1台
		TV	個人の車	3.5	ガソリン - 10.0km/L	1台
	小売店からストックヤード	WM、RE、AC、TV	ヘビーデューティトラック	12	ディーゼル - 3.5km/L	<sup>4</sup> WM - 120台 RE - 50台 AC - 150台 TV - 200台
2次集積所	ストックヤードから解体施設	WM、RE、AC、TV	ヘビーデューティトラック <sup>5</sup>	62	ディーゼル - 3.5km/L	<sup>6</sup> WM - 120台 RE - 50台 AC - 150台 TV - 200台
スクラップ運搬 <sup>7</sup>	解体工場から精錬工場 <sup>8</sup>	鉄 (Fe)	10トントラック	12	ディーゼル - 3.0km/L	10トン
		銅 (Cu)	10トントラック	165	ディーゼル - 3.0km/L	10トン
		アルミニウム (Al)	10トントラック	180	ディーゼル - 3.0km/L	10トン
		非鉄金属 (Mg、Ti、Co、Sn、Pb)	10トントラック	165	ディーゼル - 3.0km/L	10トン

この情報に基づいて、WEEE運搬により発生した温室効果ガス排出量が推定された。すべての推定は、機能単位「日本における各種の家電の平均単位重量」ごとに行われた（テレビ - 28kg/台、エアコン - 43kg/台、冷蔵庫 - 58kg/台、洗濯機 - 32kg/台）（Kaden recycle Annual report 2011）。表4.4に示す物流仕様を考慮して、表4.5に示すような異なった物流段階の化石燃料の消費量を推定した。WEEE運搬中の化石燃料（ディーゼルおよびガソリンなど）の燃焼は、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oなど様々な温室効果ガスを排出する可能性がある（Waldron et al. 2006）。IPCC排出係数によれば、CH<sub>4</sub>およびN<sub>2</sub>O濃度は、無視できると仮定できる。

<sup>4</sup> この片道当たりの能力は、1つの品目の運搬を説明するものである。

<sup>5</sup> これらの種類のトラックの最大積載量は10トンであるが、家電は大きな収納スペースが必要なため、運搬されるWEEEの平均負荷は片道4トンである（指定解体工場とのパーソナル・コミュニケーション）。

<sup>6</sup> この片道当たりの能力は、1つの品目の運搬を説明するものである。

<sup>7</sup> 鉄スクラップは福岡県で精錬される。アルミニウムスクラップは山口県に運搬され、銅やその他の非鉄金属は大分県に運搬されて精錬される。

<sup>8</sup> プラスチックスクラップの運搬は考慮されない。なぜなら、樹脂含有量によるプラスチックの分別、洗浄、およびプラスチックペレット/顆粒への加工は、解体施設で行われるためである。日本ではリサイクルガラスの需要はないため、ガラスの破片は埋め立て地で処分される。

表4.5 WEEEの物流チェーンによる化石燃料の消費量と温室効果ガス排出量

項目	顧客から小売店		小売店からストックヤード		ストックヤードから解体施設		解体工場から精錬工場		総化石燃料消費量 (L/台)	物流による温室効果ガスの総排出量 (kg CO <sub>2</sub> -eq/台)
	燃料消費量 (L/台)	(kg CO <sub>2</sub> -eq/台)	燃料消費量 (L/台)	(kg CO <sub>2</sub> -eq/台)	燃料消費量 (L/台)	(kg CO <sub>2</sub> -eq/台)	燃料消費量 (L/台)	(kg CO <sub>2</sub> -eq/台)		
WM	0.233 <sup>a</sup>	0.542	0.057	0.148	0.295	0.765	0.025	0.065	0.611	<b>1.519</b>
RE	0.233 <sup>a</sup>	0.542	0.137	0.355	0.709	1.835	0.131	0.340	1.210	<b>3.072</b>
AC	0.233 <sup>a</sup>	0.542	0.046	0.118	0.236	0.612	0.170	0.440	0.685	<b>1.712</b>
TV	0.700	1.625	0.034	0.089	0.177	0.459	0.019	0.048	0.930	<b>2.220</b>

注記：<sup>a</sup>小売業者は新しい家電を持参し、古い家電を持ち帰るので、片道運搬のための燃料消費量が考えられている。<sup>b</sup>解体後、WEEEから発生したガラスは、近くの埋立地で処分され、生産されたプラスチックペレットは、新製品を製造するための原料として使用される。したがって、ガラスとプラスチックペレットを運搬するための化石燃料の消費は含まれていない。

日本におけるディーゼルおよびガソリン燃料のエネルギー含有量は、それぞれ37.7 MJ/L、34.6MJ/Lである。ディーゼルおよびガソリン燃料の燃焼によるCO<sub>2</sub>排出係数は、それぞれ0.0687 kg CO<sub>2</sub>-eq/MJ、0.0671 kg CO<sub>2</sub>-eq/MJである（NIES、2013年）。燃料の燃焼による温室効果ガス排出量を定量化するためにIPCC tier 1手法が使用された（Waldron他、2006年）。物流の様々な段階からの推定温室効果ガス排出量を表4.2.2に示す。本分析によると、洗濯機（WM）、冷蔵庫（RE）、エアコン（AC）、テレビ（TV）の運搬による推定温室効果ガス排出量は、それぞれ1.519 kg CO<sub>2</sub>-eq/台、3.072 kg CO<sub>2</sub>-eq/台、1.712 kg CO<sub>2</sub>-eq/台、および2.220 kg CO<sub>2</sub>-eq/台である。長距離運搬（解体工場からストックヤードまで）が、物流による最大温室効果ガス排出を引き起こす重要な段階である。冷蔵庫で平均単位重量当たりの最高の総温室効果ガス排出量が計算された。これは、冷蔵庫では長距離運搬の間貯蔵用の大量のスペースを必要とするため、片道当たり最小台数しか運搬できないためである。2番目に高い温室効果ガスの排出量は、テレビの物流によるものであった。これは、テレビを小売店に運搬するのに顧客が個人のガソリン車を使用したのが主な原因であった。

## (2) WEEEの解体による温室効果ガス排出量

毎年約30,000トンのWEEEが福岡の指定解体施設でリサイクルされている（関係者からの聞き取り）。解体プロセスでは、運び込まれた電子廃棄物は、まず、洗濯機、テレビ、冷蔵庫、エアコンなどの区分に分別される。そして、これらの家電は解体および分別プロセスで別々に処理される。異なった種類のツールで実施される解体プロセスと自動化プロセスは、大量のエネルギーを消費する。解体処理中に、有害/危険物質を含む部品、貴重な物質を含み簡単に取り出せる部品は除去され、鉄金属、非鉄金属、プラスチックは、機械的分離および磁気分離により分離される。この段階での温室効果ガス排出量は、主に機械を操作するための化石燃料の使用により発生している。主要なエネルギー源は、グリッド電力、軽油、液化石油ガス（LPG）である。福岡工場での約3万トンのWEEEの解体に毎年使用

される軽油、LPG、および電力の量は、それぞれ10,000 L、70,000 kg、4,280 MWhである（関係者による情報）。異なった区分のWEEEの年間エネルギー消費量に関するデータはない。したがって、各家電の平均単位重量当たりの解体プロセスに必要な燃料を定量化するため、質量ベースの配分を使用した。これを表4.6に示す。

表4.6 解体プロセスによるエネルギー消費量と温室効果ガス排出量

内容	洗濯機	冷蔵庫	エアコン	テレビ	合計
<b>(a) 福岡の指定工場で解体された WEEE 台数の推定</b>					
(i) 2005年に日本で解体された機器の総重量 (トン)	93,000	162,000	86,000	108,000	449,000
(ii) 質量に基づく各家電の割合	21%	36%	19%	24%	
(iii) 質量に基づく福岡のWEEE総量の配分 (トン)	6,214	10,824	5,746	7,216	30,000
(iv) 1台の平均重量 (kg/台) (日本の平均)	32	58	43	28	
(v) 福岡での年間解体台数 (v) = (iii) ×1000 / (IV)	197,105	187,550	132,962	257,372	774,989
<b>(b) WEEE の異なった区分間でのエネルギー消費の配分</b>					
(vi) 家電製品間での総ディーゼルの配分 (L/年)	2071	3608	1915	2405	10,000
(vi) = 10,000L/30,000 × (iii)					
(vii) 1台当たりのディーゼル消費量 (L/台) (vii) = (vi) / (v)	0.0105	0.0192	0.0144	0.0093	
(viii) 家電間での総電力量の割り当て (kWh/年)	886,526	1,544,272	819,799	1,029,514	4,280,111
(viii) = 4,280,111 kWh/30,000 × (iii)					
(ix) 1台当たりの電力消費量 (kWh/台) (ix) = (viii) / (v)	4.50	8.23	6.17	4.00	
(x) 家電間でのLPG量の配分 (kg/年) (x) = 70,000 kg/30,000 × (v)	14,499	25,256	13,408	16,837	70,000
(xi) 1台当たりのLPG消費量 (kg/台) (xi) = (x) / (v)	0.0736	0.1347	0.1008	0.0654	

さらに、福岡の指定工場におけるWEEEの組成物は、日本の平均に類似していると仮定した。福岡の指定工場で解体された各分類の家電の年間総重量は、日本でWEEEの平均組成（質量ベース）を用いて推定した。日本での正式なルートにより収集されたWEEE年間総量によれば、テレビ、エアコン、洗濯機、冷蔵庫の解体質量はそれぞれ24%、19%、21%、36%であった（Kaden recycle Annual report 2011）。上記の組成を使用して、各分類の家電の推定総質量に基づき同工場での年間消費電力量を4つの区分間で配分した（表4.6参照）。

解体段階による温室効果ガス排出量を定量化するため、各種のWEEEの単位重量当たりのエネルギー消費量に燃料のエネルギー含量および対応するCO<sub>2</sub>排出係数を乗じた。例えば、ディーゼルとLPGのエネルギー含有量はそれぞれ37.7MJ/L、50.8MJ/kgであり、ディーゼルとLPGのCO<sub>2</sub>排出係数はそれぞれ0.0687 kg CO<sub>2</sub>-eq/MJ、0.0598 CO<sub>2</sub>-eq/MJである（NIES 2013）。日本でのグリッド電力の生産による温室効果ガス排出量は0.555 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWhである（NIES 2013）。解体施設（表4.6参照）での業務

活動中のあらゆる種類のエネルギー消費から生ずる温室効果ガス排出量を考慮に入れて、総温室効果ガス排出量を計算した（表4.7参照）。

**表4.7 異なった種類のWEEEの解体による温室効果ガスの排出量**

内容	洗濯機	冷蔵庫	エアコン	テレビ
ディーゼルの利用による温室効果ガス排出量 (kg CO <sub>2</sub> -eq/台) 例 (vii-表4.2.3) (L/台) × 37.7 (MJ/L) × 0.0687 (kg CO <sub>2</sub> -eq/MJ)	0.027	0.050	0.037	0.024
電力消費による温室効果ガス排出量 (kg CO <sub>2</sub> -eq/台)	2.496	4.570	3.422	2.220
LPG消費による温室効果ガス排出量 (kg CO <sub>2</sub> -eq/台)	0.224	0.409	0.307	0.199
解体による総温室効果ガス排出量 (kg CO <sub>2</sub> -eq/台)	2.747	5.029	3.766	2.443

分析によると、温室効果ガス排出量は、冷蔵庫のリサイクルによるものが一番多く（5.029 kg CO<sub>2</sub>-eq/台）、次いでエアコン（3.766 kg CO<sub>2</sub>-eq/台）、洗濯機（2.747 kg CO<sub>2</sub>-eq/台）、テレビ（2.443 kg CO<sub>2</sub>-eq/台）の順番となっている。

### (3) 精錬スクラップによる温室効果ガス排出量

これは、解体されたりリサイクル可能なスクラップが運搬され、様々な精錬施設でリサイクルされるWEEE管理プロセスの最終段階である。4つの家電の解体プロセスから回収されたりリサイクル可能な物質の割合は、洗濯機75%、冷蔵庫67%、エアコン84%、テレビ77%である（表4.8参照）（Kaden recycle Annual report 2011）。

**表4.8 WEEEの解体から回収された物質の量と組成**

	単位	洗濯機	冷蔵庫	エアコン	テレビ
平均単位重量	kg/台	32	58	43	28
平均物質回収率	%	75	67	84	77
解体から回収される物質の量	kg/台	23.61	38.58	36.47	21.68
回収された物質の組成 (%)					
鉄		74.35	82.82	63.58	11.03
銅		2.72	2.27	19.82	5.08
アルミニウム		1.08	0.71	8.49	0.33
ガラス		0.00	0.00	0.00	64.32
プラスチック		21.80	13.85	6.53	18.95
鉛および亜鉛		0.04	0.35	1.58	0.29
合計		100.00	100.00	100.00	100.00

これらの回収された破片は運搬され、精錬工場でリサイクルされる。回収された物質は、鉄 (Fe)、銅 (Cu)、アルミニウム (Al)、非鉄金属 (金属の混合物)、ガラス、およびプラスチックという6つの主要グループに分類できる。非鉄金属は、鉄、銅、アルミニウム、鉛、亜鉛などの混合物から構成される。日本の平均によれば、洗濯機、冷蔵庫、エアコン、テレビから回収された非鉄金属の割合は、それぞれ19.68%、19.08%、46.74%、1.24%である (Kaden recycle Annual report 2011)。回収された個々の物質の実際の量を定量化するために、各家電の製造に使用された金属のオリジナル組成に比例して、非鉄金属の重量を様々な種類の回収された金属間で分割した。解体プロセスから回収された金属および物質に由来する組成を表4.8に示す。言い換えれば、表4.8は、最終リサイクル施設に送られた各家電から得られた解体物質の量を示すものである。

個々の物質の精錬により排出される温室効果ガス排出量は、物質のリサイクル性を考慮することにより定量化される。推定は、機能単位に焦点を当てて行われた。製錬会社は会社のデータを開示することに消極的であったため、製錬/リサイクルによる化石エネルギー消費量または関連する温室効果ガス排出量に関する工場の具体的なデータを入手することは困難であった。したがって、日本でのスクラップの製錬/リサイクルによる物質の平均リサイクル性や温室効果ガスの排出係数など必要なデータは、LCA日本フォーラム (JLCA) のデータベースから入手した (JLCA 2013)。回収される物質の量は、各種の金属/物質の「リサイクル性」によって異なる。この「リサイクル性」とは、リサイクル可能品の単位インプット当たりで回収できる物質の正確な量のことである。本研究では、すべての金属のリサイクル率は95%、プラスチックのリサイクル率は不純物のため90%であると考えた (Menikpura et al. 2012)。

洗濯機を例にとると、この段階での温室効果ガス排出量の詳細な評価は表4.9に示されている。同様に、他の家電の単位重量当たりの温室効果ガス排出量を推定した。洗濯機、冷蔵庫、エアコン、テレビから回収された物質の精錬による温室効果ガス排出量は、それぞれ12.31 kg CO<sub>2</sub>-eq/台、20.64 kg CO<sub>2</sub>-eq/台、19.30 kg CO<sub>2</sub>-eq/台、3.56 kg CO<sub>2</sub>-eq/台である。

表4.9 洗濯機の解体により回収された金属/物質の製錬/リサイクルによる温室効果ガスの排出量

回収された物質	解体された物質の組成 (%)	リサイクルされた量 (kg/台)	物質のリサイクル性 <sup>1</sup> (%)	回収された物質 (kg/台)	リサイクルによるCO <sub>2</sub> の排出量 (kg CO <sub>2</sub> -eq/物質の質量 (kg))	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg CO <sub>2</sub> -eq/台)
鉄	74.35	17.56	95.00	16.68	0.59	9.91
銅	2.72	0.64	95.00	0.61	0.59	0.36
アルミニウム	1.08	0.26	95.00	0.24	0.31	0.08
鉛および亜鉛	0.04	0.01	95.00	0.01	0.59	0.01
プラスチック	21.80	5.15	90.00	4.63	0.42	1.97
<b>合計</b>	<b>100.00</b>	<b>23.61</b>		<b>22.18</b>		<b>12.31</b>

出典：<sup>1</sup>JLCA 2013年、<sup>2</sup>鉛が50%、亜鉛が50%の混合物であると仮定して推定。



(4) WEEEのリサイクルプロセスによる全体的な温室効果ガス排出量

WEEEのリサイクルプロセスによる全体的な温室効果ガス排出量を定量化するため、図4.5のようにライフサイクルの異なった段階での推定排出量を集計した。

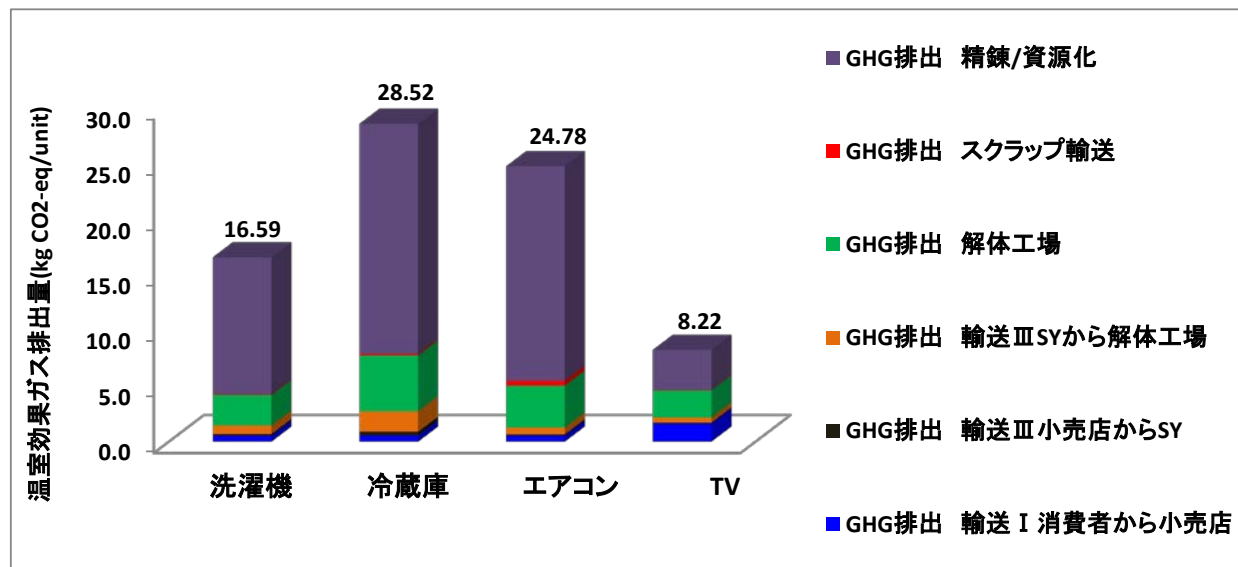


図4.5 WEEEリサイクルによる温室効果ガスの排出総量

リサイクルによる温室効果ガスの排出総量は、冷蔵庫のリサイクルからのものが一番多く、次いでエアコン、洗濯機、テレビの順番となっている。さらに、図4.6に示すように、異なったライフサイクル段階の温室効果ガスの排出総量への寄与が評価された。

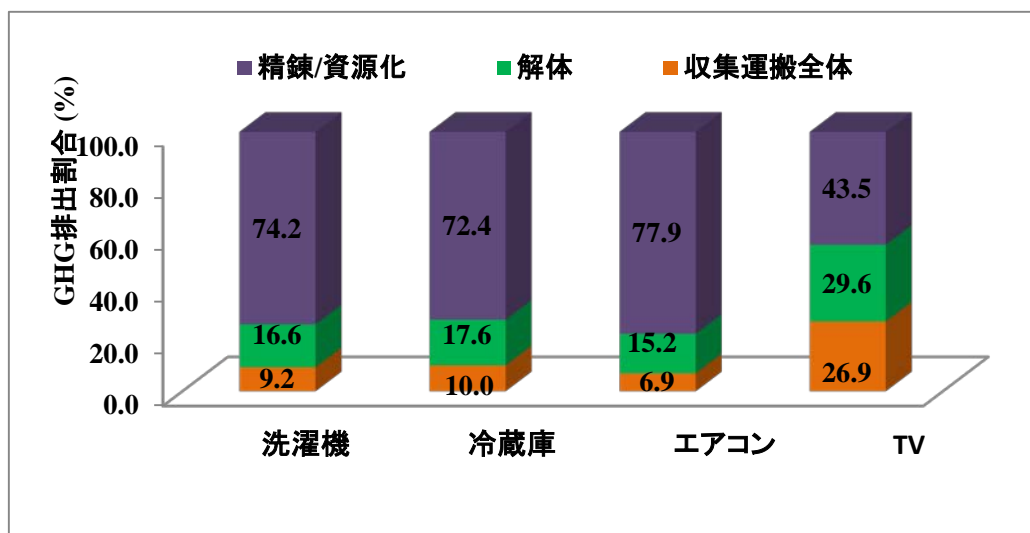


図4.6 異なるライフサイクル段階の温室効果ガスの排出総量への影響

テレビ以外のすべての家電は、温室効果ガスの排出総量の70%以上が製錬/リサイクル段階から生ずる。これは、このプロセスが溶融、成形などで多量の化石燃料に基づくエネルギーを消費するため

ある。たとえ物流が複雑なプロセスであっても、WEEE管理のライフサイクル中に発生する温室効果ガス排出量への影響はほとんどない（図4.6）。リサイクルの正味影響を推定するため、日本で天然資源からの生産プロセスによって生産される物質や金属の量と同等量を使用することにより温室効果ガス排出を回避する可能性を確認した。

WEEEのリサイクルから取り戻された物質は、天然資源の利用率を最小限にするために繰り返し使用できる。このことは、かなりの量のエネルギーと天然資源の使用が回避でき、同時に環境の悪化を最小限に抑えられることを意味している。再生不可能資源のリサイクルは、供給が制限される可能性がある天然資源への解決策としてしばしば提唱されていることはよく知られた事実である。温暖化との共便益に関してWEEEのリサイクルの有効性を説明するため、リサイクルプロセスによるライフサイクル温室効果ガス排出量は、日本で同量の物質を天然資源から生産した場合と比較された。

異なった種類の金属/物質を天然資源から生産することに関するインベントリデータは、LCA日本フォーラム（JLCA）のデータベースから入手した（JLCA 2013）。この分析によると、同量の天然資源からの生産による温室効果ガスの総排出量は、洗濯機1台当たり34.29 kg CO<sub>2</sub>-eq/単位重量、冷蔵庫1台当たり55.94 kg CO<sub>2</sub>-eq/単位重量、エアコン1台当たり70.40 kg CO<sub>2</sub>-eq/単位重量、テレビ1台当たり11.87 kg CO<sub>2</sub>-eq/単位重量である。リサイクルを行うことにより、これらの物質を天然資源から生産するプロセスによる温室効果ガス排出を回避することができる。

全体としての気候への影響やWEEE管理の便益は、リサイクルによる排出と下流での間接的な温室効果ガス排出削減の両方を含めた温室効果ガスの正味排出量によって決定される。そこで、意思決定や政策提言のための具体的な数字となる温室効果ガスの正味排出量が計算された。洗濯機、冷蔵庫、エアコン、テレビの単位重量当たりのリサイクルによる温室効果ガスの正味排出量は、それぞれ、-17.70、-27.34、-45.62、-3.61 kg CO<sub>2</sub>-eqと推計できた（図4.7参照）。

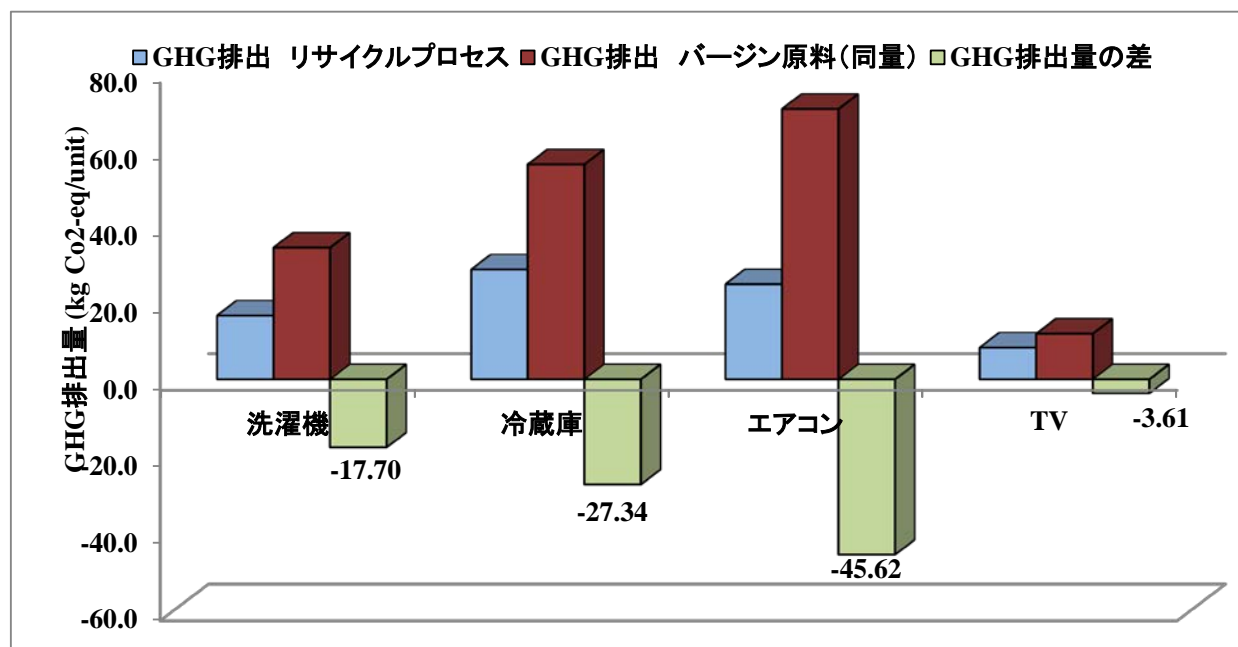


図4.7 WEEEリサイクルによる温室効果ガス正味排出量

温室効果ガスの正味排出量が負の値になったことは、すべての種類のWEEEのリサイクルが温室効果ガス排出量の緩和に大きく寄与していることを示している。このリサイクルがなかった場合、これらの温室効果ガス排出は、天然資源からの生産プロセスを通じて起こるであろう。これは、WEEEのリサイクルが温暖化との共便益に与える影響を示す非常に良好な指標である。

さらに、毎年福岡県で解体されるWEEEの台数に基づいて温室効果ガスの総削減量を推定したところ、その値は15,611トンのCO<sub>2</sub>に相当するものであった（表4.10参照）。

**表4.10 福岡県でのWEEEリサイクルによる温室効果ガスの削減可能性の合計**

内容	洗濯機	冷蔵庫	エアコン	テレビ	温室効果ガス削減の合計
福岡県で毎年解体される台数	197,105	187,550	132,962	257,372	
単位重量当たりの温室効果ガスの正味削減量 (kg/台)	-17.701	-27.421	-45.621	-3.613	
福岡県でのWEEEのリサイクルによる温室効果ガス削減可能性の合計	-3,488.95	-5,142.73	-6,065.81	-929.76	<b>-15,611.75</b>

#### 4.3.4 WEEE リサイクル資源効率の評価結果

多様な物質への需要は新興国をはじめとして世界中で高まっており、金属の安定供給確保は重要な問題とみなされていることから、WEEE管理は重要な役割を果たす（Oguchi et al. 2011）。適切なWEEE管理は、準備賦存量とみなすことのできる2次資源量の最大化に寄与する。福岡県の状況についてWEEEリサイクルプロセスの資源効率が推定された。

##### (1) 正味資源節約の定量化

化石燃料は、WEEEリサイクルのライフサイクル全体を通して消費されている。分析によれば、化石燃料の消費量は冷蔵庫のリサイクルからのものが一番多く、次いでエアコン、洗濯機、テレビの順番となっている（図4.8参照）。

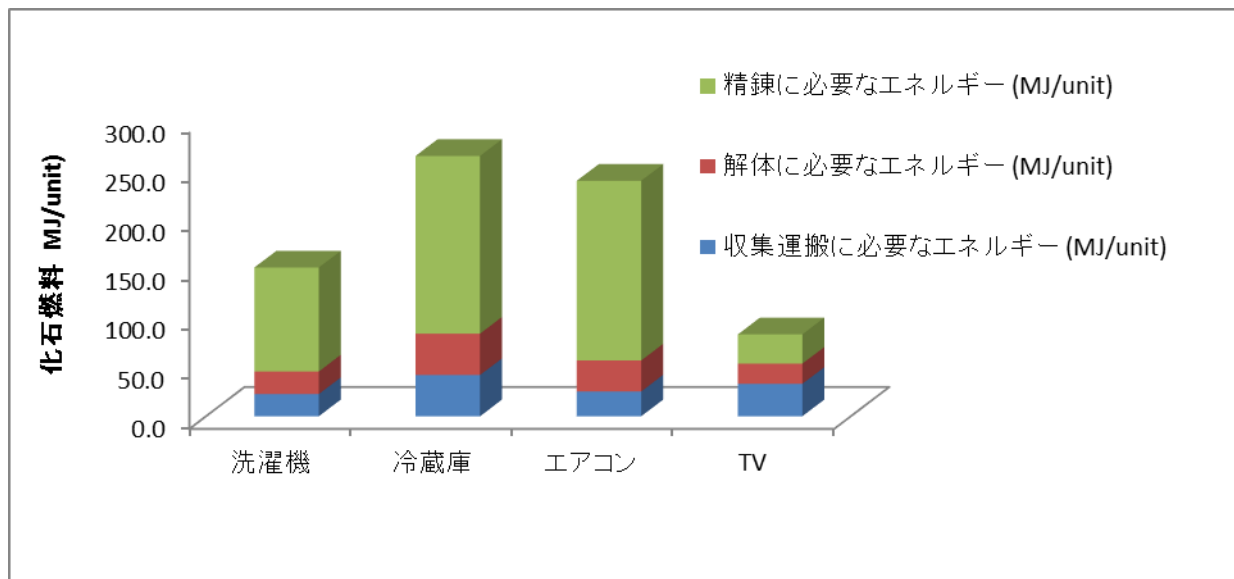


図4.8 日本でのWEEEリサイクルで消費される化石燃料

この分析によれば、テレビを除き、化石燃料のほぼ70%が、エネルギー集約的プロセスであるスクラップの精錬のために消費される。解体段階では、総化石エネルギーのわずか15~25%しか消費されておらず、物流では最小限の化石エネルギーしか利用されていない。

WEEEリサイクルから取り戻された物質は、天然資源の代わりに利用できる。したがって、リサイクルプロセスのライフサイクル化石エネルギー消費量は、日本の同量の物質の天然資源からの生産のための化石エネルギー利用率と比較された。

異なった種類の金属/物質の天然資源からの生産に必要な電力または1次エネルギー（ディーゼル、ガソリン、LPG、天然ガスによる熱エネルギー補完）に関する総化石燃料量を、LCA日本フォーラムのデータベースから入手した（JLCA、2013年）。発電所の効率は50%であると仮定して、1kWhのグリッド電力生産に必要な総化石エネルギー量が推定された。推定された化石燃料必要量は、4.18 MJ/kWhのグリッド電力生産である。また、日本におけるディーゼル、ガソリン、天然ガス、LPGのエネルギー含量はそれぞれ37.7 MJ/L、34.6 MJ/L、50.6MJ/kg、50.8 MJ/kgであると考えられた（NIES 2013）。

この分析によると、同量の天然資源からの物質生産に必要な総化石燃料消費量（電力または1次エネルギー換算）は、洗濯機1台当たり607.89 MJ/単位重量、冷蔵庫1台当たり986.50 MJ/単位重量、エアコン1台当たり1198.87 MJ/単位重量、テレビ1台当たり184.20 MJ/単位重量となる。リサイクルを行うことにより、天然資源からの生産プロセスによるこの量の化石エネルギー消費を回避することができる。

WEEEリサイクルの化石エネルギー削減への寄与に関する決定を行うため、化石燃料の正味消費量として、リサイクルのための化石燃料の消費量と天然資源からの生産を通しての化石燃料削減の可能性の両方が計算されるべきである。WEEE管理のための化石燃料の正味消費量は、意思決定や政策提言の過程において有形の情報となる。この分析によると、同量の素材を天然資源から生産した場合、洗濯機、冷蔵庫、エアコンのリサイクルシステムからの資源回収と比較して、4~5倍の化石燃料を消費するということが分かった。テレビについては、天然資源からの生産とリサイクルを比較すると2倍の化石燃料を消費するということが分かった。洗濯機、冷蔵庫、エアコン、テレビの単位重量当た

りのリサイクルによる化石燃料の推定正味消費量は、それぞれ、-457.18、-722.80、-960.30、-101.22 MJの化石燃料に達した（図4.9参照）。

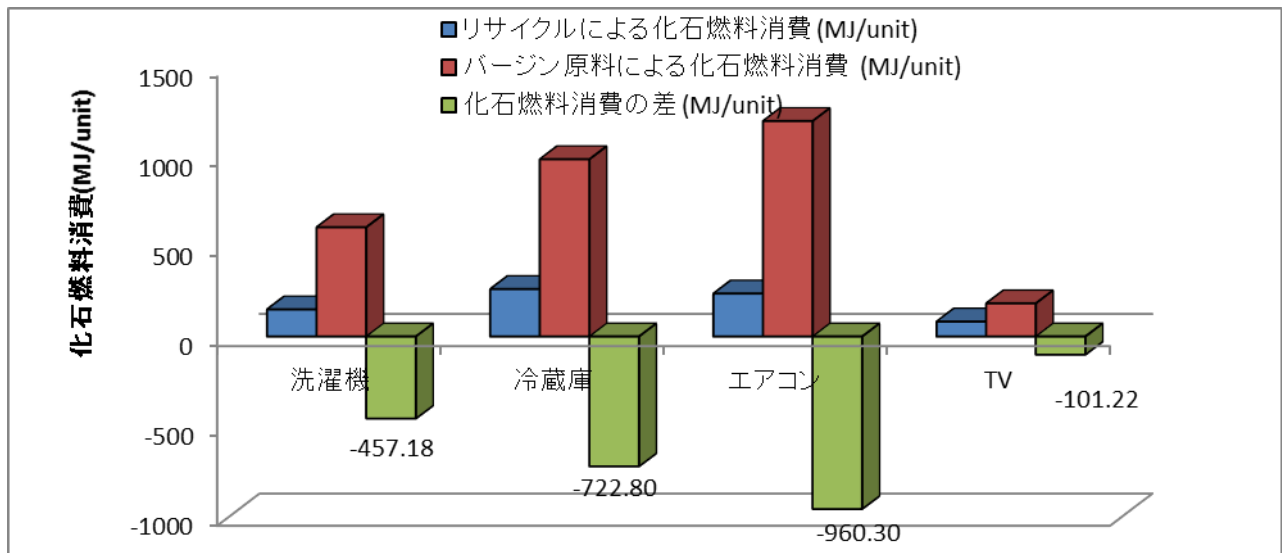


図4.9 WEEEリサイクルに必要な化石燃料量、同量の物質の天然資源からの生産、正味消費量

化石燃料消費量が負の値になったことは、WEEEリサイクルの化石燃料節約への可能性を示している。このリサイクルがなかった場合、同量の物質を天然資源から生産するために大量の化石燃料が必要となるであろう。例えば、洗濯機、冷蔵庫、エアコンから物質をリサイクルして抽出することにより、化石エネルギーの75～80%が節約できる。テレビの場合には、同量の物質を天然資源からの生産する場合と比較して、化石エネルギーの55%が節約できる。

さらに、リサイクルを行う場合と、同量の物質を天然資源からの生産する場合の両方について全非生物枯渇可能性（ADP）の大きさを理解するために、化石燃料、金属、および鉱物の総消費量がアンチモン当量の点から計算された。すべての種類のWEEEのリサイクルという点では、ADPはプロセスチェーン全体での化石燃料の利用が原因で発生している。同量の物質を天然資源から生産する場合、化石エネルギー消費だけでなく、金属や鉱物の採鉱や抽出が原因でADPが発生する。例えば、表4.11および図4.10に示すように、ADPの90%以上が化石燃料の消費により発生し、残りのADPは、同量の物質を天然資源から生産するために様々な種類の金属と鉱物を採鉱し抽出することにより発生する。

表4.11 同量の物質を天然資源から生産するために発生するADP

	洗濯機	冷蔵庫	エアコン	テレビ
化石燃料消費によるADP	98.85 %	98.88%	93.33%	93.54%
金属/鉱物消費によるADP	1.15%	1.12%	6.67%	6.46%

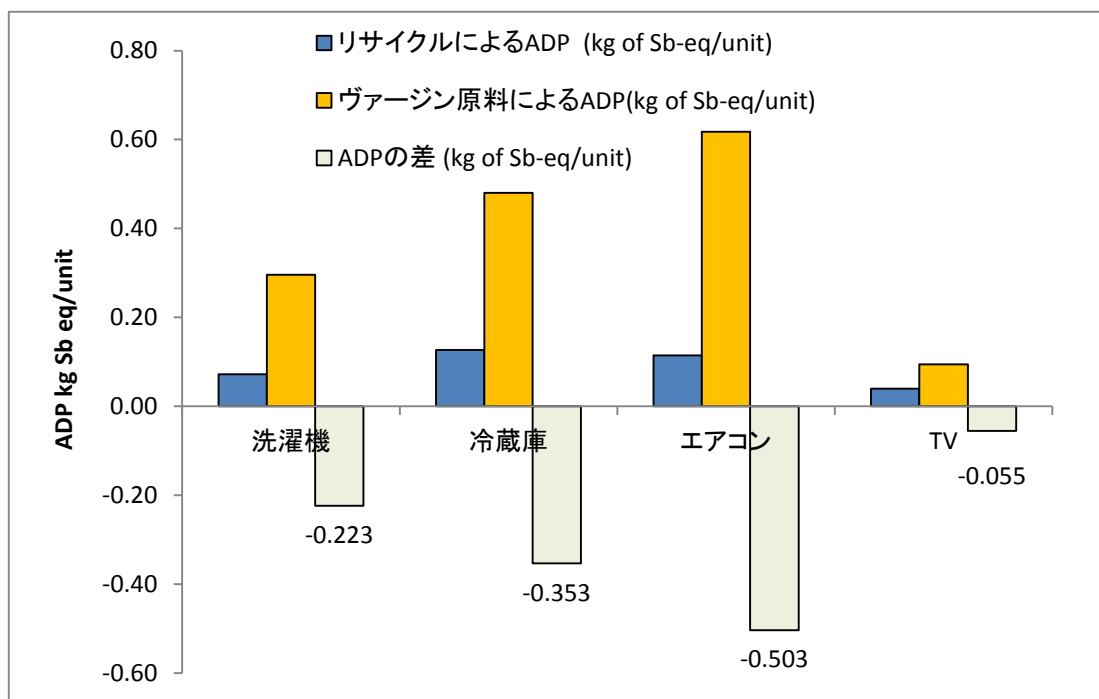


図4.10 WEEEリサイクルの総ADP、同量の物質の天然資源からの生産、正味ADP

## (2) 関与物質総量 (TMR)

リサイクルの補償として世界資源の抽出を低減する可能性を推定することは、意思決定プロセスにおける有形情報となる。リサイクルからの物質の回収の重要性を理解するために、リサイクルの結果回避できるはずの関与物質総量(TMR)を日本の文脈での様々な物質のTMR値で計算した(NIMS-EMC 2009)。

図4.11は、WEEEリサイクルがなければ同量の物質を天然資源から生産することにより発生したはずであるが、WEEEリサイクルを行うことにより物質を回収した結果回避されたTMRを示している。

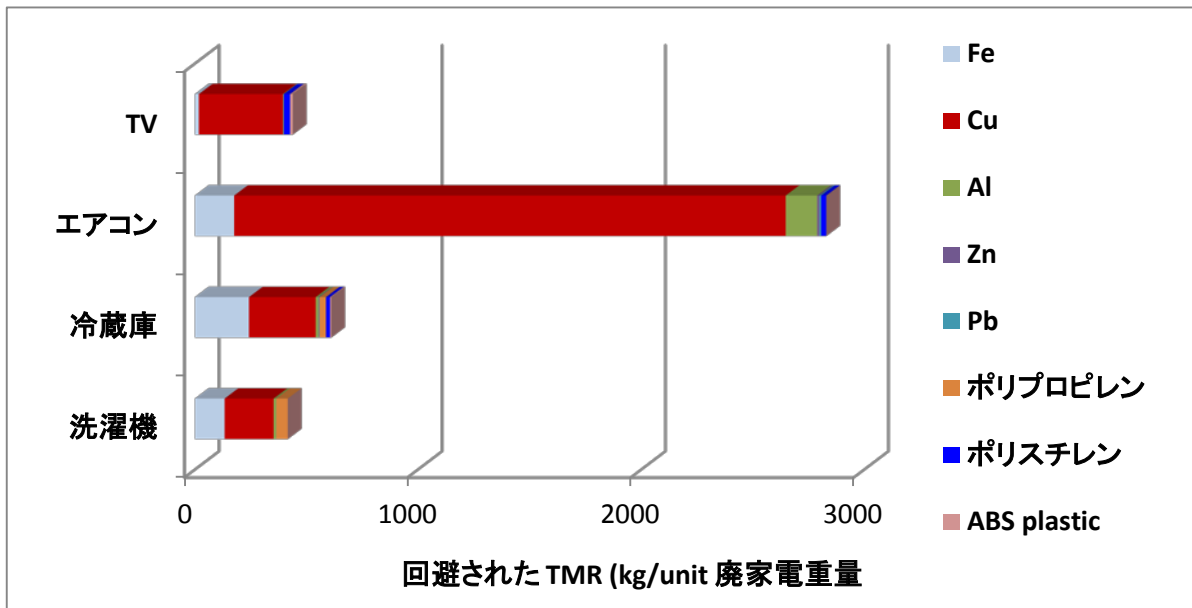


図4.11 WEEEリサイクルにより物質を回収した結果回避されたTMR

リサイクルによって、回避できるTMRとしては、エアコンのリサイクルによるものが一番大きく、次いで冷蔵庫、洗濯機、テレビの順番となっている。ただし、本推計は、WEEEのリサイクルによる主要な回収物質のみについて行われており、金、銀、プラチナなどの貴金属についてはデータが入手できないため本研究には反映されていない。

### (3) リサイクル率と資源回収率

WEEEリサイクル率もしくは資源回収率は、資源の効果的利用を定量化するための適切な目安となる。これにより、単位重量当たりのリサイクル済みWEEEが、新たな鉱石の採掘を回避するうえで、どの程度寄与しているかを知ることができる。

本研究では、年間リサイクル量と、2005年のWEEE排出量に基づいて日本でのWEEEの平均リサイクル率を検討した。洗濯機、冷蔵庫、エアコン、テレビのリサイクル率は、それぞれ75%、67%、84%、77%である（図4.12参照）。

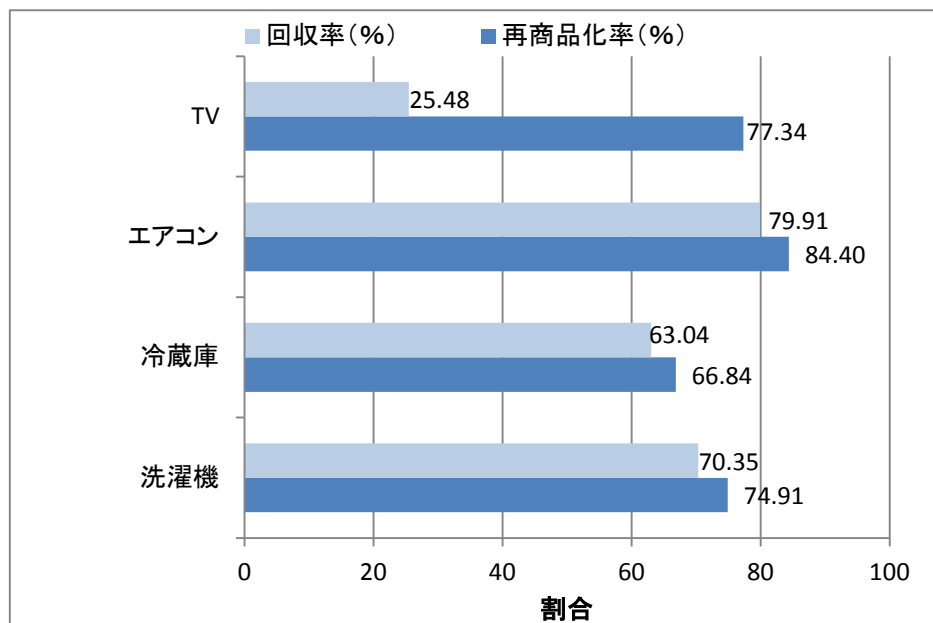


図4.12 WEEEのリサイクル率および回収率

物質の解体後、物質の破片（約10～15%）は、精錬前に廃棄される。したがって、実際の回収率は、リサイクル率よりも比較的低い。テレビの場合、回収率は25%に限られている。これは、CRTガラスが解体された物質の質量の64%を占めており、リサイクルガラスには需要が存在しないためである。したがって、この破片は福岡に埋め立てられている。しかし、日本では家電リサイクル法の下でブラウン管テレビの回収率を50%～55%に維持しようとしている。この率を達成するため、寿命末期のテレビからガラスの一部を回収する必要がある。実際、ブラウン管テレビから回収したガラスをガラス繊維に変換することの妥当性に関する研究も行われている。

#### 4.3.5 社会的持続可能性の評価評価

適切なWEEE管理システムを設定することは、適正な雇用機会を生み、地域社会の生活水準の向上にもつながる可能性がある。適切に設計されたWEEE管理システムが熟練労働を生み出す可能性を推計することは、その地域の他の発展途上国にWEEE管理システムによる将来の社会的便益のことを納得させるうえで適切な指標となりうる。例えば、熟練労働者に雇用機会を提供すれば、家族の収入を増加させ、貧困を低減するのに役立つため、個人およびその家族の生活水準を高めるであろう。このように実際、雇用機会の創出は、社の変数の関数である衣食住や公衆衛生、健康、識字レベル、および幸福度などと正の相関を持っている。

福岡の場合、雇用機会は、日本の家電リサイクル法に基づきWEEE管理の正式なルート全体について推定された。小売店からストックヤード、そしてストックヤードから解体施設までの物流については、かなりの数の雇用機会が創出されており、それぞれ8件および17件のフルタイムの雇用が生み出された。解体施設で創出された雇用機会が最大であり、138件に達している。また、異なった精錬施設へのスクラップの運搬については、別に2件のフルタイムの雇用を割り当てることができる。本研究では、精錬所では具体的な仕事の機会は創出されないと仮定している。なぜなら、電子廃棄スクラップは、



日本の精錬所では2次物質にすぎず、追加労働力を割り当てられないためである。全体から見ると、福岡のWEEE管理活動の結果として創出された総雇用機会は165件に達している。そこで、賃金ベース所得創出の可能性を、様々な仕事階層にある労働者の平均給与体系を考慮して計算した。ライフサイクルの異なった段階における所得創出の可能性を図4.13に示す。

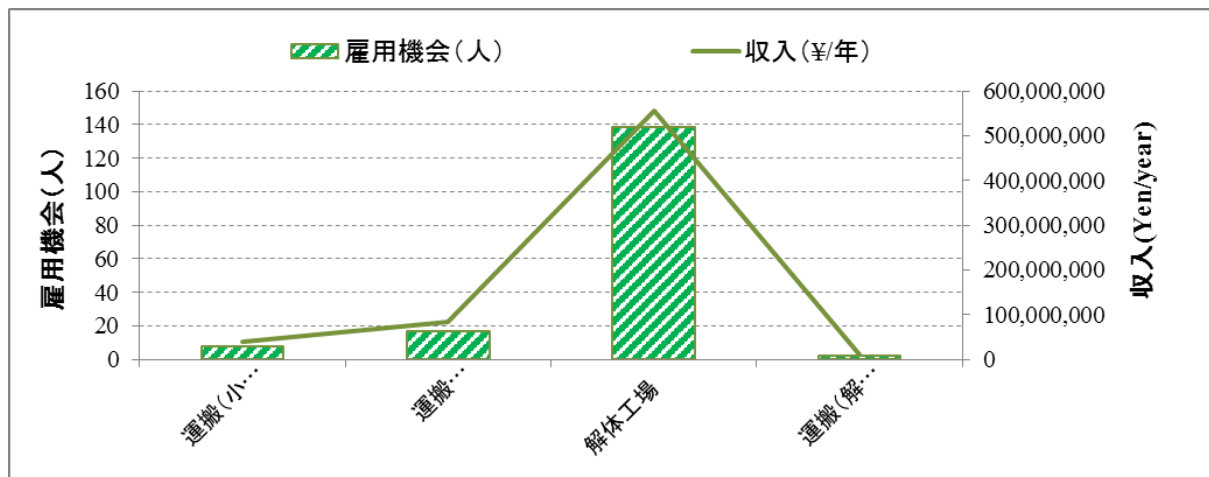


図4.13 福岡県におけるWEEE管理による雇用機会および賃金に基づく所得創出の可能性

70万台のWEEEを処理して管理することにより、これらすべての雇用機会に支払われる合計年間総所得創出の可能性は、6億8600万円となる。さらに、従業員一人当たりの平均所得創出は、348,000円/月となるが、この金額は労働者だけでなく家族の毎月の支出を賄うのに十分であるため、生活の質を向上させうる。

#### 4.3.6 秋田県と福岡県におけるWEEEリサイクルの持続可能性問題の比較

##### (1) WEEE 排出率に関する両県の特徴

日本でのWEEE排出率は、都道府県の人口密度によって異なる。日本の高人口密度地域におけるWEEE排出状況については、代表例となる福岡県（人口密度は1,020人/km<sup>2</sup>）の状況を評した。日本の最低WEEE排出県の状況を理解するために、人口密度が95人/km<sup>2</sup>で総人口が108万人の秋田県を選択した。この県の人口密度では、WEEE排出の可能性は約85,000台となる。秋田県も、福岡県に似たWEEE管理プロセスチェーンに従っている。しかし、福岡県に比べて運搬距離が長いため、物流移動が持続可能性問題の大きな相違となっている。WEEEの解体と製錬活動は、両県でほぼ同じであると考えることができる。

物流移動に関する限り、運搬の方法、異なった種類の車両の燃料効率、これらの車両の積載能力は、福岡の場合と同様である。平均運搬距離は、物流チェーンに大きな違いをもたらすであろう。例えば、顧客から小売店や市役所への平均距離は、福岡の場合より長く、およその距離は6km（片道）である。これら寿命末期の製品は、新しいものに置き換えられ、テレビを除けばミニトラックを利用して運搬される。小売店からストックヤード、ストックヤードから解体施設までの平均距離は、福岡県の

場合よりもはるかに長く、それぞれ13kmと116kmに達している。したがって、秋田県での物流のための燃料消費量は、福岡県よりもはるかに多い。

## (2) 物流移動による温室効果ガス排出量の比較

秋田県の物流のための化石燃料の消費量が高いため、福岡県の場合と比べて、温室効果ガス排出量も高くなっている。実際、洗濯機、冷蔵庫、エアコンの物流による温室効果ガス排出量は、福岡の状況の2倍以上である（図4.14参照）。

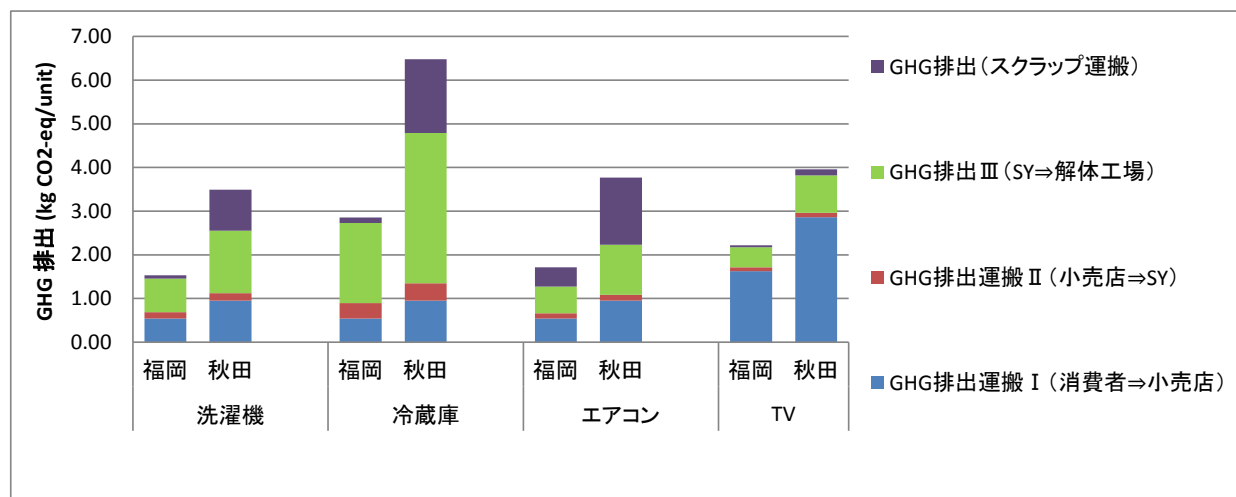


図4.14 秋田県と福岡県のWEEEの物流過程による温室効果ガス排出量の比較

秋田県では小売店やストックヤードの分布が散在していることが、物流過程による温室効果ガス排出量が高いこと的主要原因となっている。非生物資源の枯渇の可能性や物流コストなどにも同様の傾向が予想される。

さらに、温室効果ガスの総排出量は、解体施設と精錬施設での化石燃料の利用率や技術効率がこの2県で同様であるという前提で推定された。その結果、秋田県のWEEEの全体的なリサイクルプロセスチェーンによる温室効果ガスの総排出量は、物流の違いの影響により、洗濯機で12%、冷蔵庫で13%、エアコンで8%、テレビで21%となり、物流の相違の影響で福岡県よりも高いことが明らかになった。

### 4.3.7 日本における WEEE 管理持続可能性評価の結論

日本におけるWEEE管理について持続可能性評価を行った結果、適切なWEEEリサイクルプログラムの設定は、世界の資源の節約と国内の温室効果ガス削減目標に大きく寄与することが明らかになった。さらに、かなりの数の雇用機会が創出されるため、地域社会の生活水準を向上させるのに好ましい影響を与える。日本の最優良事例を通じた本研究の結果は、アジア太平洋地域の国々で適切な法律と政策を強化して実施するだけでなく、WEEE管理の体系的手法と安定した物質リサイクルを向上させるのにも非常に役立つであろう。

## 4.4 他のアジア諸国における WEEE 管理の持続可能性評価

### 4.4.1 はじめに

エレクトロニクス産業は、世界で最も規模が大きく、最も急速に成長している製造業部門であり、廃電気電子機器（WEEE）の管理は、現代世界の顕著な問題となっている。発展途上国のほとんどでは、WEEE管理が不適切であり、システムを評価するための適切な手法がない。そこで本研究では、インドと台湾を対象に、WEEE管理システムの持続可能性を評価するためのWEEE評価枠組みを適用し、WEEE管理が社会経済と環境に与える効果を評価した。

### 4.4.2 インドにおける WEEE 管理の持続可能性評価

#### (1) インドにおける WEEE 管理の状況

業界の推定によれば、インドは2005年に約15万トンの電子廃棄物を発生して以来、2012年までに80万トン以上の電子廃棄物を発生した。6つの主要品目（パソコン、テレビ、携帯電話、エアコン、洗濯機、冷蔵庫）による電子廃棄物インベントリは、2018年までに215万トンを上回り、2020年までに300万トンを上回ると推定されている。米国での年間一人当たりの電子廃棄物の発生が7kgであり、EUでは15kgであるのに対し、インドでの年間一人当たりの電子廃棄物の発生は0.7kgである。そのため、廃棄物発生のプロセスが加速し、最近では廃棄物発生が前年比でほぼ2倍となっている。

2014年2月時点におけるインドの登録済電子廃棄物解体/リサイクル能力の合計は、年間約344,047トンである。このうち、最大能力を持つ地域は北部地区であり、次が南部地区、西部地区、東部地区の順である（表4.12参照）。

表4.12 インドのWEEE解体/リサイクル能力の合計（2014年2月現在）

地区	解体/リサイクル能力の合計(トン/年)	解体業者およびリサイクル業者の数
南部地区（アンドラプラデシュ州、カルナタカ州、タミルナードゥ州）	110,097	64
北部地区（ハリヤナ州、ラジャスタン州、ウッタラプラデシュ州、ウッタラーカンド州）	175,580	31
東部地区（チャッティースガル州）	900	1
西部地区（グジャラート州、マハラシュトラ州、マディヤプラデーシュ州）	57,470	24
合計	344,047	120

しかし、2次データが示すところによれば、西部地区で最大の電子廃棄物が発生しており、次いで南部地区、北部地区、東部地区の順となっている。現在、120箇所の電子廃棄物解体業者とリサイクル業者があり、そのうち南部地区に64箇所、北部地区に31箇所、西部地区に24箇所、東部地区に1箇所ある。

業界の推定によれば、発生した可能性のあるWEEEのうち正式な解体／リサイクル部門に持ち込まれたものはわずか5%である。これは、現在の解体／リサイクル能力の利用率レベルは約14%であることを示している。

インドでの潜在的電子廃棄物リサイクル収益は、2013年に約15億米ドルであったと推定されるが、2018年までには倍増すると予想されている。したがって、規模を拡大し、市場の期待に応えるには、電子廃棄物管理全体に様々な介入が必要である。現在のインベントリ推定値とリサイクル能力の分析により、インドには国内に電子廃棄物のリサイクルのインストールベースがあり、これは国内の総電子廃棄物の発生可能性の35%であることが明らかになった。

## (2) インドの持続可能性評価のためのデータ検証とケーススタディの選択

インドの様々な地方でのWEEEの持続可能性を評価するための1次データの収集は、現地業者（IRG Systems South Asia Pvt. Ltd）に委託した。この委託調査では様々な地域の多数の企業からデータを収集したが、アンケートで提供された情報は企業ごとに異なっていた。ある企業は非常に大まかな情報（物流情報のみなど）を提供し、面接した企業の中には主要家電のリサイクルに従事していないところもあった。このような困難のため、同じ分析対象地域であっても、平均的な値を取得することは不可能であった。現地調査を通じて収集したすべてのデータを慎重に評価した後、インドの代表的な事例として、Earth Sense Recycle Pvt. Ltd（Earth Sense社）によって提供された情報を全体的な持続可能性の分析に使用した。Earth Sense社は、インド初のバイオ医療廃棄物を管理して取扱う会社である。Earth Sense社では、包括的な電子廃棄物管理と処理のサービスを提供しており、解体された資産や時代遅れとなった電気電子機器などあらゆる種類の電子廃棄物を収集している。

Earth Sense社は、電子廃棄物の安全な収集、運搬、解体、分離&処分のための州および中央政府の公害規制委員会（State Pollution Control Boards & Central Pollution Control Board）によって、認可され、免許を与えられている。同社は、デリー（グルガオン州、ハリヤナ州）、ムンバイ、ハイデラバード、チェンナイ&ケララなどインド全体でサービスを展開している。Earth Sense社は、「リデュース、リユース、リサイクル（Reduce, Reuse and Recycle）」のためのプライマリーコールを設置しており、このサービスは、経済と環境の両方で持続可能なソリューションを提供することを目的としている。

同社のサービスは、天然資源を保全し、顧客に知的財産保護を提供し、資産回収サービスを拡張し、静脈物流を可能にし、電子廃棄物の100%リサイクルを確保することに重点を置いている。Earth Sense社は、「リデュース、リユース、リサイクル」を究極の目的としている。

同社が収集した引退電子製品の重量の97%以上が、解体されて原料に分離され、新製品を製造するためにさらに処理されている。

部品が再販または再利用の段階を超えている場合、Earth Sense社はこれらの部品をリサイクルに回す。この目的のため、同社は人々の安全とエコシステムにとって最も環境にやさしい技術が展開される場所にリサイクルプロセスを展開して、最大量の原料が回収できるようにすることにより、最適なリサイクル性を実現している。

Earth Sense社のサービスには、電子廃棄物の分別と解体、CRTの破壊、ガラスのリサイクル、現場でのハードディスクの破壊、データ破壊、金属とプラスチックのリサイクル、物流サービス、環境と健康と安全のシステムが含まれる。

Earth Sense社は、調査から得られた情報範囲から1次運搬と解体に関連する物流情報を提供した。しかし、2次運搬（解体会社から製錬工場へのスクラップ運搬）およびスクラップの製錬に関連する情報が不足しているため、これらのライフサイクル段階は持続可能性評価に含めることができなかった。しかし、他のリサイクル企業とは異なり、同社は雇用機会と所得創出の可能性に関連する情報を提供しており、本ケーススタディではこのデータを社会経済的影響評価に使用している。

### (3) インドにおける廃電気電子機器（WEEE）リサイクルによる温室効果ガス排出量の定量化

Earth Sense社は、バルク&個人ベースの両方で直接WEEEを収集している。一般に収集は半径200km～300km以内の地域に制限されている。すべて収集ルートを通じて、毎月約200トンのWEEEが収集されている。図4.15にEarth Sense社のWEEEリサイクルのプロセスチェーンを示す。

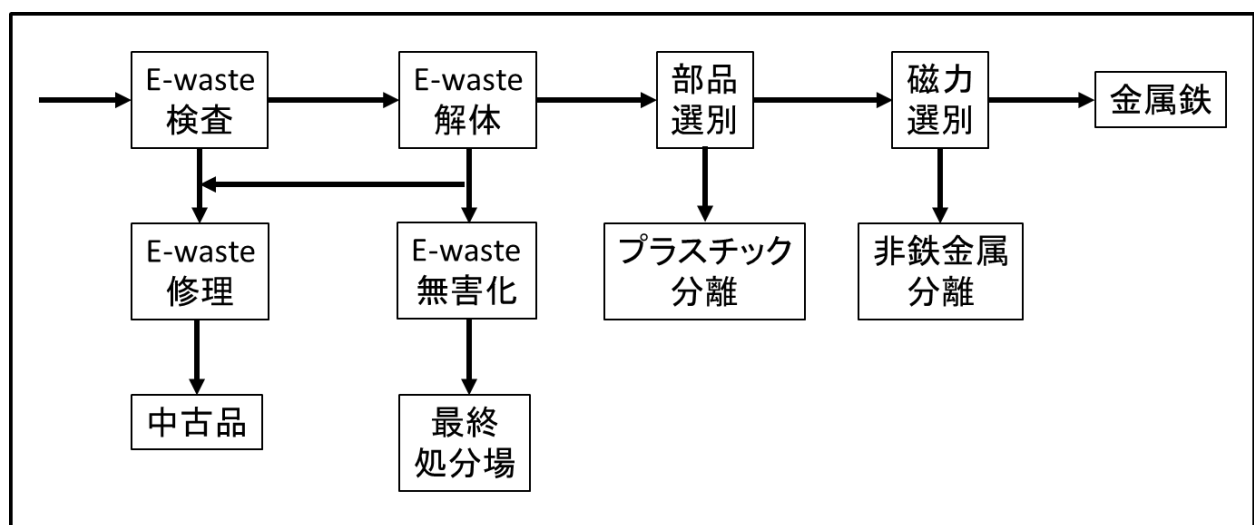


図4.15 Earth Sense社における電子廃棄物リサイクルプロセス

### WEEE 運搬による温室効果ガス排出量

日本とは異なり、WEEEの物流制度には国家計画がないため、WEEE運搬による温室効果ガス排出量は州ごとに異なっているかもしれない。本研究では、Earth Sense社が提供する情報に従い、大型トラック（32フィート）によりWEEEを運搬した場合に発生する温室効果ガス排出量を評価する。運搬されるWEEEの平均積載量は15トン/片道であり、この種のトラックの燃料効率、往復で約6 km/Lである（Earth Sense社）。解体工場のあるHyderabadにおける往復の推定平均運搬距離は600kmである。これらの情報に基づき、WEEE運搬用ディーゼル燃料の燃焼による温室効果ガス排出量をIPCC-tier1の手法を用いて算出した。

すべての推定は、Earth Sense社によって収集された各種の家電の平均単位重量当たりで行われている。同社が報告したように、主要家電製品の平均重量は、テレビが43.00kg/台、エアコンが44.02kg/台、冷蔵庫が87.65kg/台、洗濯機が37.8kg/台である。本分析によると、テレビ、エアコン、洗濯機、冷蔵庫の運搬による推定温室効果ガス排出量は、それぞれ0.82kg CO<sub>2</sub>-eq/台、0.84kg CO<sub>2</sub>-eq/台、0.72kg CO<sub>2</sub>-eq/台、1.67kg CO<sub>2</sub>-eq/台である（図4.16参照）。

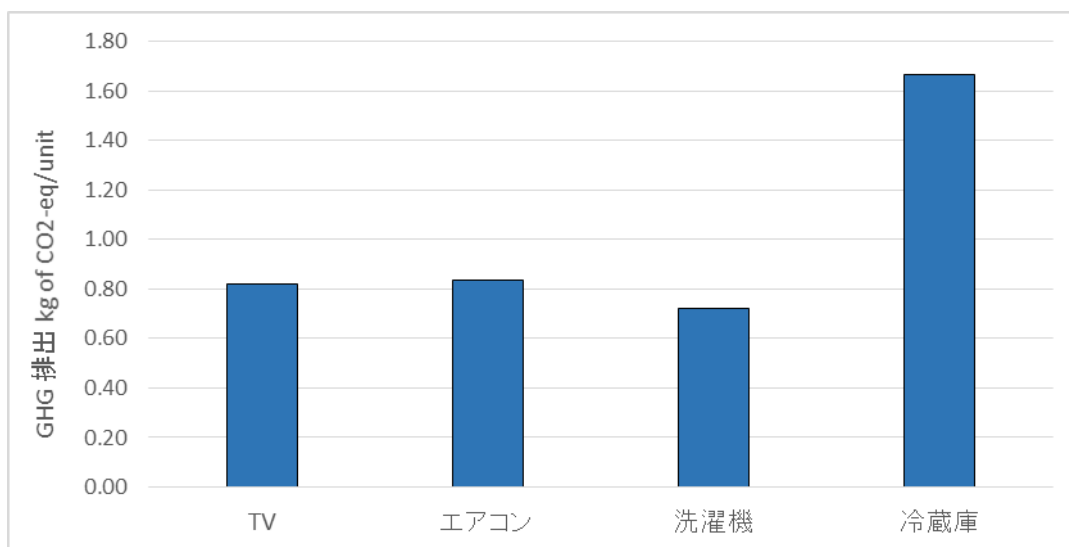


図4.16 インドにおいてWEEEの運搬により発生する可能性のある平均温室効果ガス排出量

#### WEEE の解体による温室効果ガスの排出

Earth Sense社によると、毎月200トンのWEEEが解体されている。この段階での温室効果ガス排出量は、主として機械の運転活動のための化石燃料とグリッド電力の利用によるものである。電力およびディーゼル燃料は、運転活動のための主要エネルギー源として使用される。毎月のエネルギー利用費用は同社が負担している。表4.13に示すように、電力やディーゼルの単価に基づいて、エネルギーの総消費量を推定した。

表4.13 毎月のエネルギー使用データ

エネルギーの種類	費用 (INR/月)	単価 (INR/kWhorL)	量 (kWhまたはL) /月
電力	65,000	7.00	9,286
ディーゼル	30,000	60.00	500

家電区分ごとのエネルギー消費量を推定するために質量ベースの配分を行った。毎月の平均データによると、テレビ、エアコン、洗濯機、冷蔵庫の解体質量は、それぞれ11.64%、13.10%、13.22%、13.11%であった。残りは、PC（10.6%）と混合電子機器（38.2%）である。家電製品の種類ごとに毎月のエネルギー消費量を導き出すために、毎月の総エネルギー消費量が家電の各区分の総質量に基づき解体区分間で配分された（表4.14参照）。

表4.14 WEEE解体の単位重要当たり電力・ディーゼル消費量配分

WEEEの種類	トン/月 (概算値)	電力の配分 (kWh/月)	1か月当 りに解体 された台 数	1台当 たりの電 力消費 量(kWh/台)	ディーゼル 消費量の配 分(L/月)	1台当 たりのデー ゼル消費 量(L/台)
テレビ	23.289	1081.3	542	2.00	58.22	0.11
エアコン	26.2	1216.4	595	2.04	65.50	0.11
洗濯機	26.45	1228.0	700	1.76	66.13	0.09
冷蔵庫	26.23	1217.8	299	4.07	65.58	0.22
PC	21.255	986.8	該当なし	該当なし	53.14	該当なし
混合電子廃棄物	76.576	3555.3	該当なし	該当なし	191.44	該当なし
合計	<b>200</b>	<b>9,286</b>			<b>500.00</b>	

該当なし: 本研究では、PCおよび混合電子廃棄物のリサイクルを対象としていない。

グリッド電力は、解体プロセスの主要なエネルギー源である。各種のエネルギー利用による温室効果ガス排出量は、グリッド電力生産とディーゼル燃焼のCO<sub>2</sub>排出係数に基づいて推定した。例えば、ディーゼル燃焼によるCO<sub>2</sub>排出係数は0.0743 kg CO<sub>2</sub>-eq/MJ (IPCC、2006年)である。インドでのグリッド電力の生産による平均温室効果ガス排出量は0.897 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWhである (IGES 2014)。これらのデフォルト値に基づき、各種家電のリサイクルのための様々なエネルギー利用から温室効果ガス排出量を計算した。リサイクル施設での運転活動のためのあらゆる種類のエネルギー利用による温室効果ガス排出量を考慮に入れ、温室効果ガス総排出量を推定した (図4.17参照)。

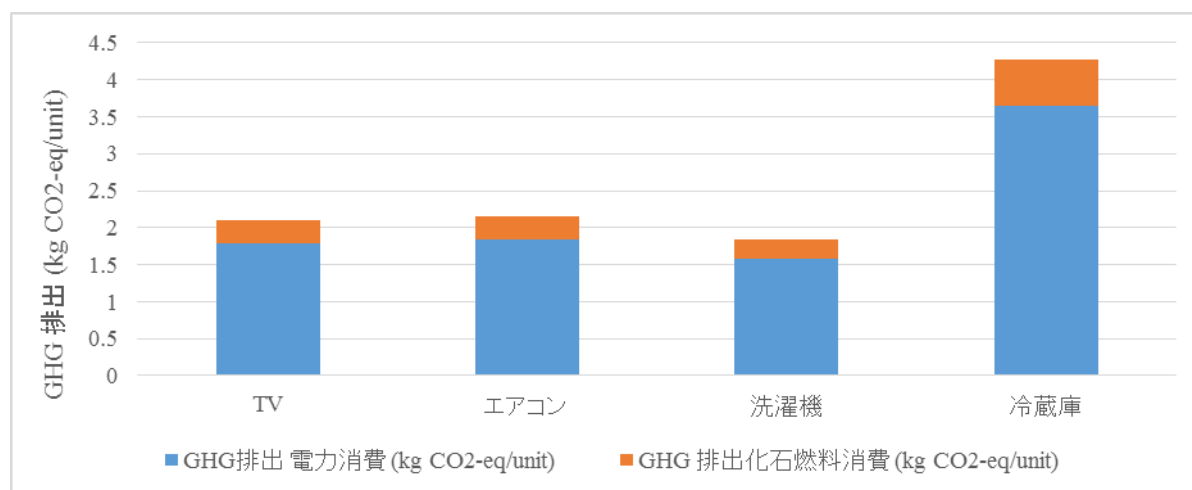


図4.17 解体による温室効果ガス排出量

分析によると、温室効果ガス排出量は、冷蔵庫の解体により生ずるもの (4.72 kg CO<sub>2</sub>-eq/台) が最も大きく、次にエアコン (2.14 kg CO<sub>2</sub>-eq/台)、次いでテレビ (2.09kg CO<sub>2</sub>-eq/台)、洗濯機 (1.84 kg CO<sub>2</sub>-eq/台) の順となっている。

## 精錬およびリサイクル活動

インドの解体業者の技術プロファイルが示すところによれば、その事業による川下製品は現地市場に投入されるか、ヨーロッパ、日本、香港、および米国へ輸出される。しかし、彼らは輸出された物質の価値がわかっていない。したがって、インドでは2008年から、原産品の試験的金属抽出技術開発活動に重点を置いた研究開発の取り組みが開始された。Ecoreco Pvt Ltdは、日本磁力選鉱株式会社による前処理技術移転を開始するため、科学技術研究庁から資金提供を受け、このような取り組みの1つを行っている。

アンケート調査で面接した企業のうち、本研究で検討対象となっている主要家電製品に関して、解体された金属/物質の物流および回収された資源の精錬に関連するデータを提供した企業はなかった。したがって、解体された金属は運搬されて海外でリサイクルされていると仮定した。解体された金属や物質の一部は日本に輸出されているため、推定には日本の製錬データが用いられた。解体された品目の日本における物流や精錬に関連するデータは、シナリオ分析と同時に次節4.5で考察する。

## インドの WEEE リサイクル活動による全体的な温室効果ガス排出量

Earth Sense社によるWEEEのリサイクル活動による全体的な温室効果ガス排出量を定量化するため、ライフサイクルの各段階での推定排出量を合算した。WEEEのインドから日本などの他国へ輸送時に発生するGHGや海外でのスクラップリサイクル時に発生するGHGは、ライフサイクル全体からのGHG発生を定量化するために計算されることに留意すべきである。この評価については、国内リサイクルと海外でのリサイクルにおける影響を比較する次節4.5において考察する。この段階では、各家電の単位重量当たりの総温室効果ガス総排出量の推定は、物流チェーンでのWEEEの運搬およびEarth Sense社での解体作業による温室効果ガス排出の可能性を追加することにより行った（図4.18参照）。

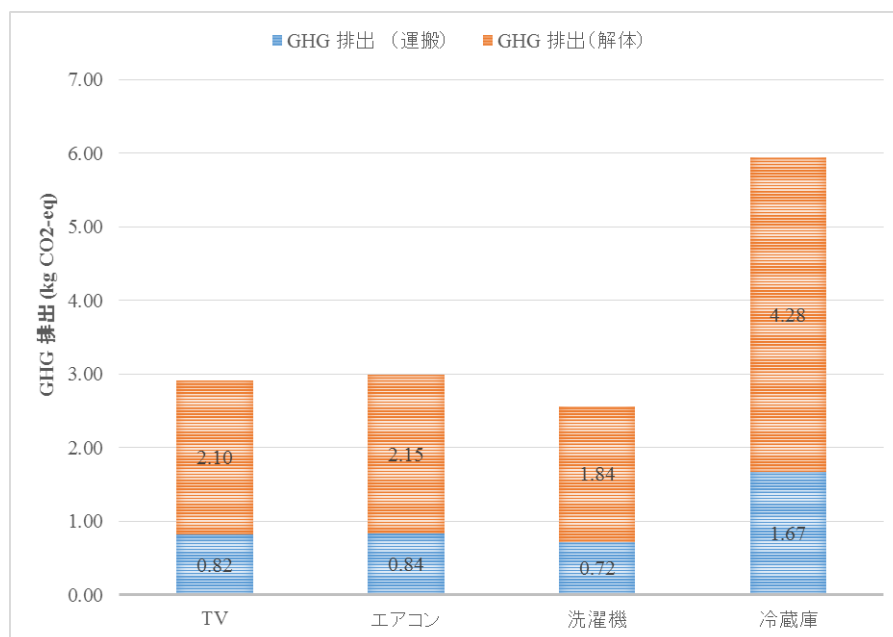


図4.18 各家電の単位重量当たりの温室効果ガス排出量



冷蔵庫のリサイクルによる温室効果ガスの総排出量が最も高く、エアコン、テレビ、洗濯機がこれに続いた。温室効果ガス排出量が最も大きいのは、家電製品解体のための化石燃料消費が主な原因である。

WEEEのリサイクルが温室効果ガスの削減に与える実際の影響を評価するには、リサイクルによる排出量を、同量の物質を天然資源から生産する場合に発生する排出量と比較すべきである。残念ながら、インド環境での天然資源生産に関するデータは見つからなかったため、このような分析を行うことはできなかった。しかしながら、前節の日本のケーススタディの結果が示すように、適切なWEEEリサイクルプログラムは、温室効果ガスの削減に大きな寄与をするであろうし、インドの事例においても、同様の結果を期待することができるであろう。

#### (4) WEEEのリサイクルによる資源効率の推定

リサイクル活動が処理と加工に大量の化石燃料を消費する一方で、WEEEを適切に管理すれば、準備賦存量とみなすことのできる2次資源量の抽出に寄与するであろう。インドのリサイクル活動に関してWEEEのリサイクルプロセスの資源効率を推定した。

#### 正味資源節約の定量化

様々な種類の化石燃料が、WEEEの処理とリサイクルのライフサイクル全体を通して消費される。主要4家電のリサイクル活動のための化石燃料の総消費量を、Earth Sense社が提供するデータに基づいて推定した。ディーゼル燃料消費による化石エネルギーの利用率は、インド環境でのディーゼルの発熱量を考慮して1台当たりのMJで推定した（38.4 MJ/L）。解体活動でグリッド電力とディーゼルの形でさらに消費される化石燃料の消費量を計算した。インドの電力ミックスには69.7%の化石エネルギーが含まれており、残りは水力、原子力、およびその他の再生可能エネルギーである。発電所の効率は50%であると仮定して、1kWhのグリッド電力生産に必要な総化石エネルギー量を推定した（熱電併給）。必要な化石燃料は、5.02 MJ/kWhのグリッド電力生産であると推定した。これらの事実に基づいて、主要家電の解体作業のための総化石エネルギー消費量を計算した（図4.19参照）。この解析によると、化石燃料の約56%がWEEEの解体時に消費されており、残りは、運搬時に使用されている。

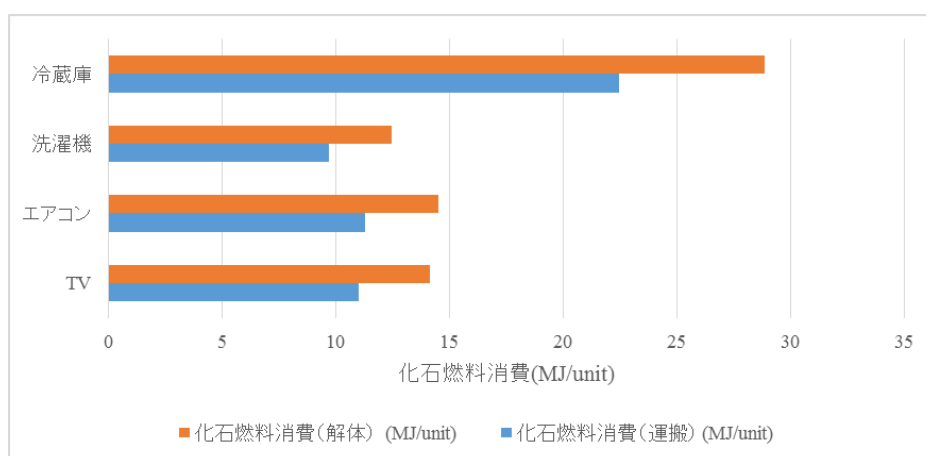


図4.19 インドでのWEEEのリサイクル活動のための化石燃料消費量

本分析によると、国内のリサイクル活動の総化石燃料消費量は、冷蔵庫が最も多く、エアコン、テレビ、洗濯機がこれに続く。本分析によると、約89%の化石エネルギーが、WEEEの物流のために消費され、残りのエネルギーは、解体作業のために利用されている。

さらに、WEEEのリサイクルが実際どのくらい化石エネルギーの節約に寄与しているのかを理解するには、全体のリサイクルプロセスのためのエネルギー消費量および同量の物質を天然資源から生産する場合の化石エネルギー消費量を比較する必要がある。しかしデータ不足のために、本研究ではこのような比較を行うことができなかった。前節の日本での事例研究によれば、WEEEリサイクル活動は、かなりの量の化石燃料の節約に寄与していることが証明されており、インドの場合でも有効であると考えられる。

### 関与物質総量 (TMR)

TMRには、国内の領土から抽出したものと、輸入に関連して必要となった資源から抽出したものが含まれている。前述したように、リサイクルの補償として地域および世界の資源の抽出をどれだけ削減できるかを推定することは、意思決定過程における有形情報となる。異なった種類のWEEEの解体のリサイクル活動による物質の回収可能性が、Earth Sense社によって提供された。物質の解体後、物質の破片（約10～15%）は、精錬前に廃棄される。各家電製品からの物質の回収可能性の計算結果を表4.15に示す。

表4.15 異なる種類のWEEEからの物質の回収可能性

WEEEの種類	鉄	銅	アルミニウム	亜鉛	鉛	プラスチック
洗濯機	16.34	2.09	0.3515	0	0	15.57
冷蔵庫	56.905	1.615	3.515	0.000	0.299	9.8280
エアコン	20.140	6.935	2.233	0.000	0.000	8.865
テレビ	0.511	1.065	0.066	0.006	0.034	5.3280

リサイクルによる物質の回収の重要性を理解するために、リサイクルの結果回避できる関与物質総量 (TMR) を、様々な物質のTMR値および物質回収の可能性を用いて計算した。

図4.20は、WEEEリサイクルがなければ同量の物質を天然資源から生産することにより発生したはずであるが、WEEEリサイクルにより物質を回収した結果回避されたTMRを示している。

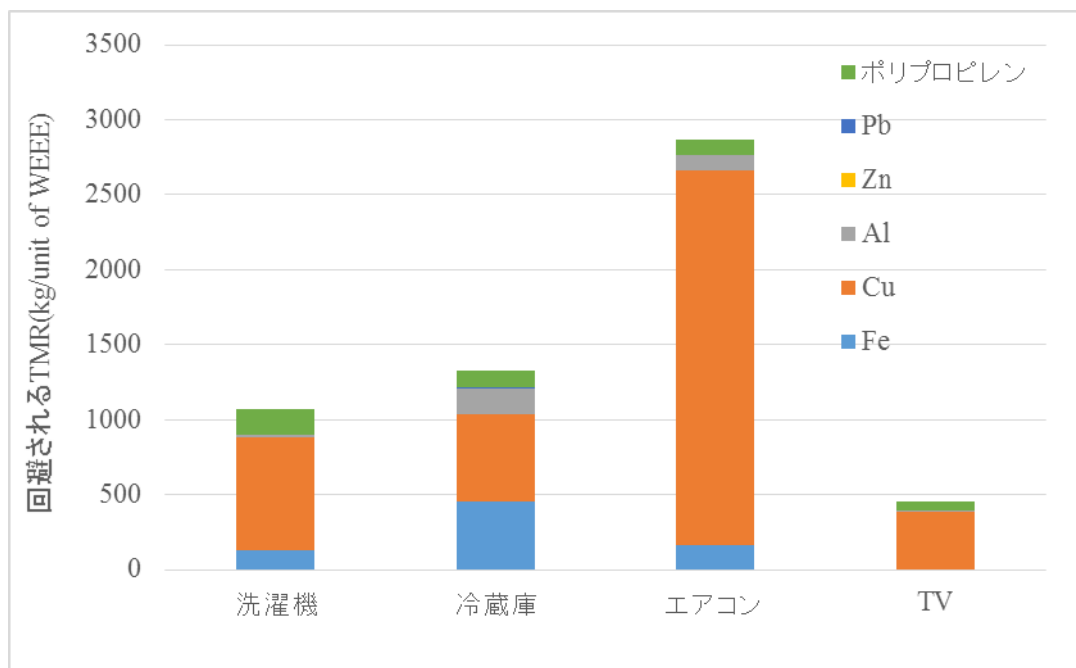


図4.20 インドでWEEEリサイクルの結果回避される可能性のあるTMR

リサイクルによって、回避できるTMRとしては、エアコンのリサイクルによるものが一番大きく、次いで冷蔵庫、洗濯機、テレビの順となっている。ただし、本推計は、表4.15に示すようにリサイクルによる主要回収物質のみについて行われている。貴金属および金、銀、プラチナなどのレアメタルは、データが入手できないため本研究には反映されない。最も多く回避できたTMRは、すべての家電で銅の抽出に起因するものである。

##### (5) 社会的持続可能性の評価

適切なWEEE管理システムが導入されると、適正な雇用機会が創出されるため、地域社会の生活水準を向上させることができる。したがって、熟練労働を生み出す可能性を推計することは、WEEE管理から社会的便益を測定するための理想的な指標となる。地域社会の人々のために適正な雇用機会を創出すれば、家族の収入を増加させ、貧困を低減するのに役立つため、個人およびその家族の生活水準を高めるであろう。雇用機会の創出は、衣食住や公衆衛生、健康、識字レベル、および幸福度などの福利を測る指標と相互に関連している。

本ケーススタディでは、Earth Sense社によって提供されたデータに基づいて雇用機会を推定した。物流移動や工場での運転と管理活動について、また監督者のような熟練労働者としてかなりの数の雇用機会が創出された。Earth Sense社が作成した合計の雇用機会は45件となった。しかし、WEEE処理総量によれば、重量の約50%は、PCや他の電子機器など他のWEEEに属している。そのため、工場で創出された総雇用機会は、各区分の質量に基づき（本研究の焦点である）4つの主要家電および他の電子機器間で配分された。4つの主要家電102トンの収集と運搬により、3件のフルタイムの雇用機会が創出された。解体施設で創出された雇用機会が最大であり、20件に達している。また、国内外の製錬設備のスクラップの運搬により別のフルタイムの仕事が創出されるであろう。この情報は、Earth Sense社

によって提供されたものではない。さらに、製錬工場での雇用機会は無視できると仮定できる。これらの物質は、単に精錬工場での2次物質として使用されており、追加労働力が割り当てられないためである。

全体から見ると、Earth Sense社での4種類の家電のみのWEEE管理活動の結果として創出された合計のフルタイムの仕事の機会が23件である。そこで、賃金に基づく所得創出の可能性を様々な仕事階層にある労働者の平均給与体系を考慮して計算した。物流プロセスに参与している運転手の平均給与体系は15000INR（インドルピー）である。WEEEの手作業による分離、処理、および加工に参与している解体施設の労働者の平均給与体系は約8000INRである。解体施設における監督者の平均給与体系は約1万INRである。ライフサイクルの異なった段階での所得創出の可能性を図4.21に示す。

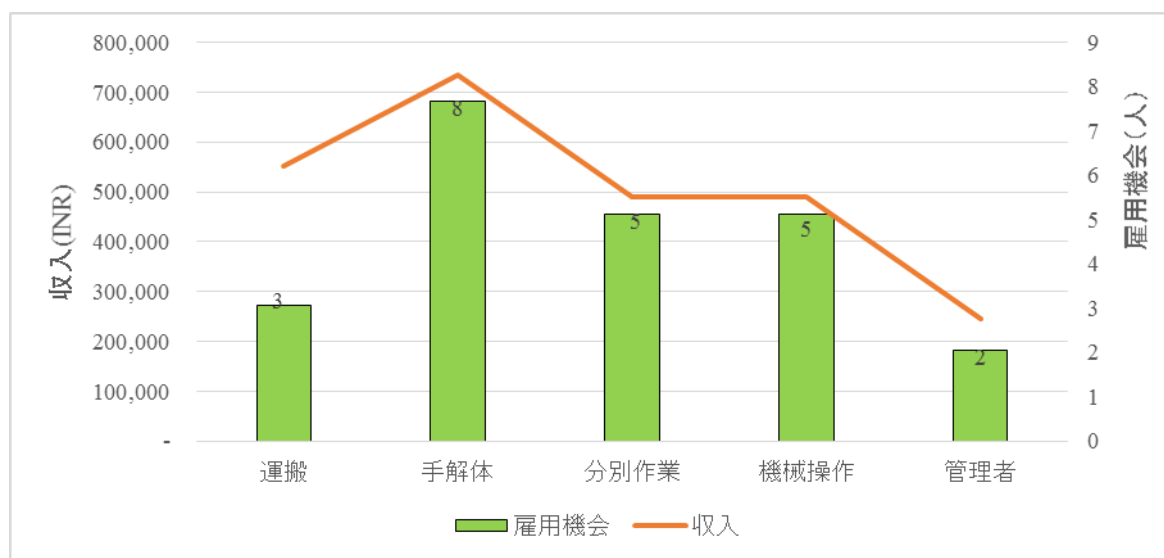


図4.21 102トンのWEEEの処理と管理によるフルタイムの雇用機会と所得創出の可能性

毎月102トンのWEEE（2,135台）を処理して管理することにより、これらすべての雇用機会が生み出す合計年間総所得の可能性は、251万INRとなる。この金額は労働者だけでなく家族の毎月の支出を賄うのに十分であるため、生活の質を向上させられるであろう。

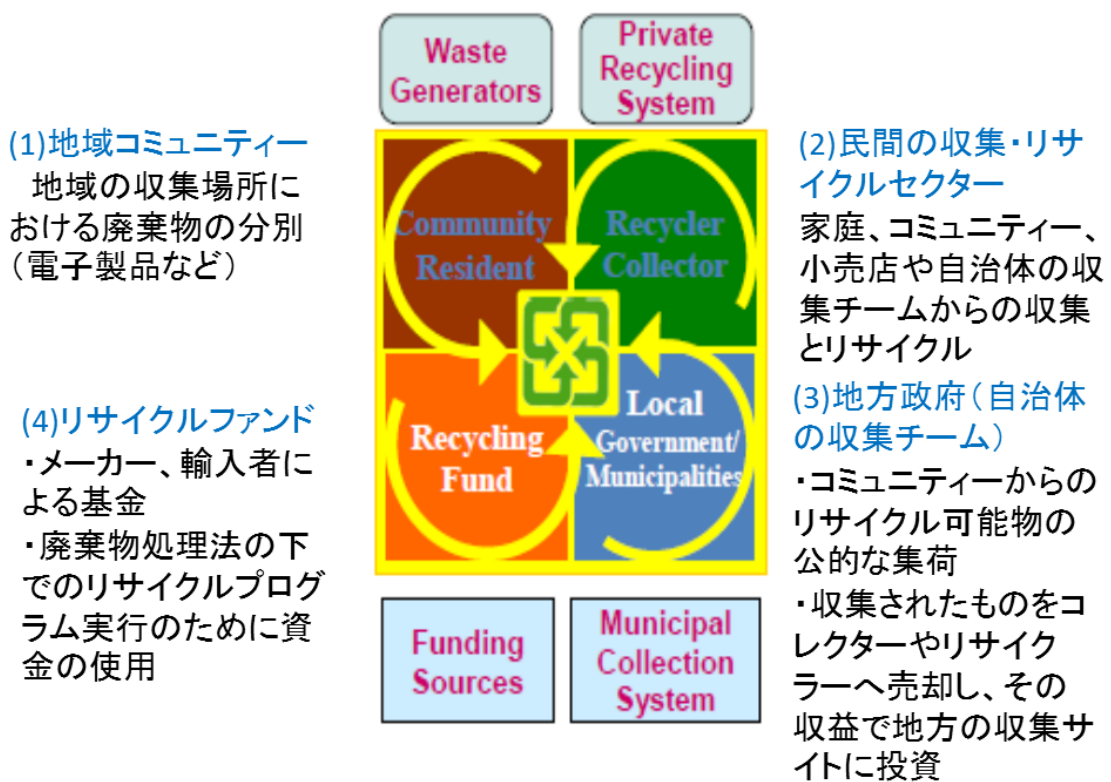
#### 4.4.3 台湾の WEEE 管理の持続可能性評価

##### (1) 台湾における WEEE 管理の一般的状況

台湾では近年の廃棄物電気電子製品の量が劇的に増加している。「廃棄物処理法」と「資源リサイクル法」の実施は、台湾のリサイクル政策の精神と適用範囲の両方が国際基準に合致していることを実証した。これらの製品のリサイクル率は現在50%を超えている。民間リサイクルシステム、政府の収集作業員、個々のリサイクル業者、およびメーカーからの直接的手段を通して廃棄電気電子製品が収集されている。これらの製品は、その後2次汚染が生ずるのを慎重に回避しながら、構成物質を解体、粉碎、分離する施設と手段を持つ免許を持った作業員に送られる。再利用可能な物質は製造業者に送

り返される。リサイクルおよび廃棄物管理における他の先進国同様、台湾の中央政府の資源回収において重点がおかれ積極的に実施されているのは、リサイクルの促進である。

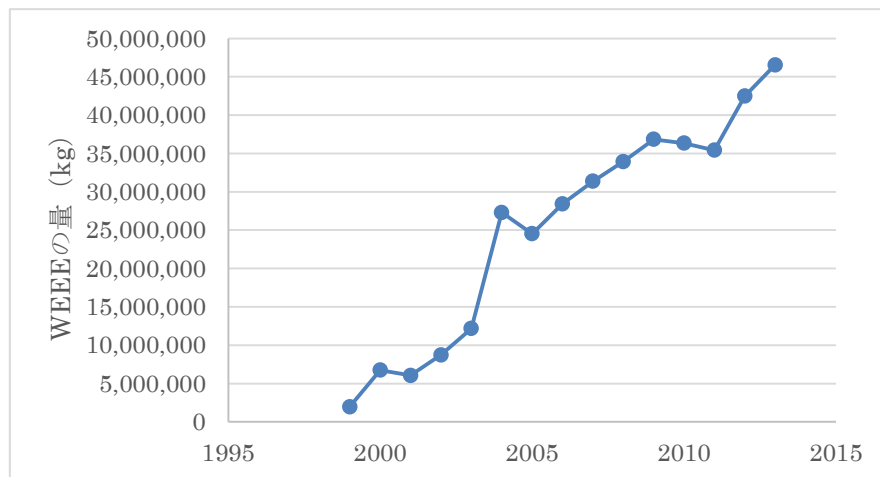
EPAは、拡大生産者責任（EPR）システムを完全実施して、リサイクル目標の達成をより容易にするための取り組みを行いながら、製造業者が自己管理のリサイクル、クリアランス、および処理のシステムを設定するよう積極的に指導している。日本とは異なり、台湾の家庭は使用済みの電子製品を処分する際にリサイクル費を支払わない。むしろ、彼らは寿命末期の家電を合理的な価格で販売する。例えば、EPAは1997年から、地域住民、民間収集業者、リサイクル業者、自治体の回収チーム、および（電子製品の製造業者および輸入業者に請求される料金に基づく）リサイクル基金による4-in-1リサイクルプログラムの実施を開始した（図4.22参照）。



出典：EPA（2012）

図4.22 台湾における4-in-1リサイクルシステム

この制度は、大量の物質を回収する一方で、できる限り電子廃棄物をリサイクルするのに役立ってきた（図4.23参照）。この考え方は、台湾において寿命末期の家電の回収率を高める効果があった。



出典：EPA（2013）

図4.23 台湾の政府機関によってリサイクルされた家電の量

## (2) 台湾の持続可能性評価のためのデータ検証とケーススタディの選択

台湾環境における寿命末期の家電のリサイクルの持続可能性を調査するため、E&E recycling（緑電再生）、Sus Recycling technology Inc、FGD Recycling Industrial Co.Ltdなどいくつかの大手リサイクル企業に対しアンケート調査を行った。また、データ収集を目的として、これらの選択された解体施設や製錬施設を訪問した。Sus Recycling technology IncおよびFGD Recycling Industrial Co.Ltdから提供されたデータは、WEEEの全体的な持続可能性評価には適していない。したがって、E&E recyclingから提供されたデータを、台湾でのWEEEの持続可能性評価のための代表的なケースとして使用した。

E&E recyclingは、現在台湾の北部地域で優位に立っており、完全なサプライチェーンを形成するために日本のシステムおよび地元台湾のリサイクル設計と再製造品の家電製造業者のための主要株主投資である北市場を持っている。また、処理装置設計を行い、ドイツから技術を購入している。

E&E recyclingによると、台湾のWEEE発生率は1355トン/月である（図4.24参照）。

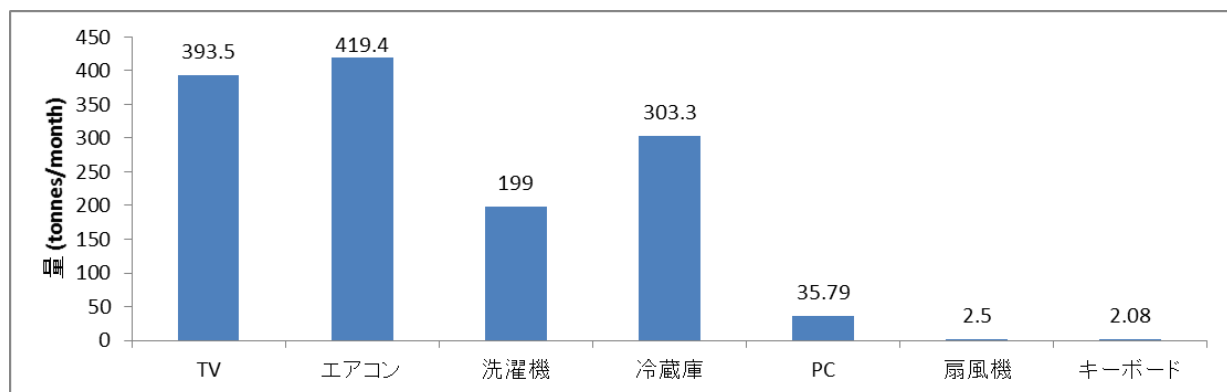


図4.24 台湾における総WEEE発生量

これには、テレビ (29.0%)、エアコン (30.9%)、洗濯機 (14.7%)、冷蔵庫 (22.4%)、PC (2.6%)、電気ファン (0.2%)、キーボード (0.2%) が含まれる。これらのデータを使用して詳細な分析を行い、台湾の持続可能性の側面を定量化した。

E&E recyclingは、アジア初の廃棄家電処理工場である。同社は、1998年に設立され、台湾の台北市に本社を置いている。同社の目標は、回収と処理のための実験工場を設立し、環境汚染のない物理的プロセスチェーンを完成し、完全な処理技術と設備を世界中に輸出することであった。同社は、テレビ、エアコン、冷蔵庫、洗濯機などの主要家電製品を扱っている。さらに、ファン、コンピュータ、モニタ、LCD、キーボード、プリンタ、ラップトップなどの電子機器もリサイクルしている。現在、約140万個の廃家電が毎年台湾地域のE&E recyclingによって処理されており、市場シェアは約30%である。

E&E recyclingは、機器の調達是非常に容易であるが、技術と経験が中核的な価値であると信じている。同社は、7つの機器工場を輸出した後、合弁会社、コンサルティング、および施設の運営委託を通じて海外事業に参加している。

廃家電を処理するには、主に物理的処理を行っている。廃家電を細断した後、鉄を磁気分離によって分離する。物理的処理は、汚染制御装置が必要なく、水の消費量を削減することができるので、化学処理よりも優れている。E&E recyclingは環境保護を最優先としているため、「完全循環型」開発のライフサイクルアセスメント (LCA) の考え方を継続的に実践している。同社は、電子廃棄物管理の分野で環境保護、安全性、有効性、保守、および持続的な発展に貢献するため、アジア太平洋地域での拠点を拡大していくつもりである。

台湾では、日本と異なりWEEEの収集のための明確な経路がない。4-in-1リサイクルプログラムの中で、消費者は、小売業者、自治体の収集、民間収集業、また免許を持ったリサイクル業者にWEEEを販売する慈善団体への寄付を通じてリサイクル用WEEEを送付できる。E&E recyclingは、台湾の全領土からのWEEEを受け付けている。同社が受け付けたWEEEの量を表4.16に示す。

**表4.16 E&E recyclingが受け付けたWEEEの量**

家電の種類	量 (トン/月)	家電の種類	量 (トン/月)
テレビ	393.5	PC	35.79
エアコン	419.4	家庭用電気ファン	2.5
洗濯機	199	キーボード	2.08
冷蔵庫	303.3		

### (3) WEEE 運搬による温室効果ガス排出量

人口から考えると、主要なWEEE発生地域は、台北 (270万)、桃園 (200万) と新台北 (400万) であろう。消費者はWEEEを送るために小売業者、自治体の収集、民間収集、免許を持ったリサイクル業者など様々なルートを使用している。しかし、E&E recyclingからは、物流に関してどのような情報も提供されなかった。したがって、本研究では以下のような仮定を置いた。

大部分の家庭はWEEEを自宅から市役所 (市の交通アクセスがよく、皆に知られている場所としての仮定の場所) に持ち込んでおり、市役所に来るまでの短距離運搬による排出量は非常に少なく無視

できるものであると仮定した。台北、桃園、ニュー台北市の市役所からE&E recyclingまでの距離を推定したところ、それぞれ59.5km、27.0km、46.6kmであった。これらの距離に基づいて、WEEE移動の平均運搬距離を計算したところ46.1kmであった。

大型トラックにより市役所からE&E recyclingまでWEEEを運搬することによる温室効果ガス排出量を評価した。運搬されるWEEEの平均積載量は10トン/片道であり、この種のトラックの燃料効率は、往復で約3.5 km/Lである。往復の推定平均運搬距離は92.2kmとなる。ディーゼル燃料の発熱量は38.4 MJ/Lであり、ディーゼル燃料の燃焼による温室効果ガス排出量は0.0743キロ/MJである。E&E recyclingによって収集され処理された各種の家電の平均単位重量は、テレビが32.5 kg/台、エアコンが49.3 kg/台、冷蔵庫が58.8 kg/台、洗濯機が41.7 kg/台である。これらの情報に基づき、WEEEの運搬用ディーゼル燃料の燃焼による温室効果ガス排出量を、IPCC-tier 1の手法を用いて算出した。

本分析によると、テレビ、エアコン、洗濯機、冷蔵庫の運搬による推定温室効果ガス排出量は、それぞれ0.24 kg CO<sub>2</sub>-eq/台、0.37 kg CO<sub>2</sub>-eq/台、0.31 kg CO<sub>2</sub>-eq/台、0.44 kg CO<sub>2</sub>-eq/台である（図4.25参照）。

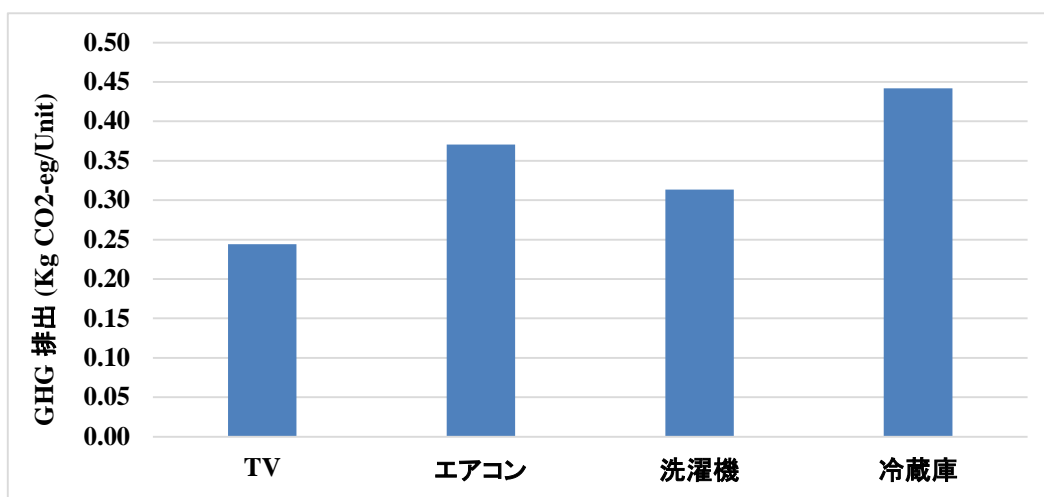


図4.25 WEEE運搬による温室効果ガス排出量

#### (4) WEEE リサイクルによる資源効率の推定

E&E recyclingは、解体およびリサイクル活動のエネルギー消費データを提供しなかった。したがって、本ケーススタディでは、資源効率を測定するための指標として化石資源消費/節約の正味量を推定することが非常に困難であった。しかし、各家電からの物質の回収可能性の合計が同社から提供されており、このデータは台湾でのWEEEリサイクルの結果回避されたTMRの可能性を定量化するのに有用であると思われる。

E&E recyclingは、異なる種類のWEEE解体活動のリサイクル活動による物質の回収可能性に関するデータを提供した。物質の解体後、物質の破片（約10~15%）は、精錬前に廃棄される。各家電製品の実際の物質回収可能性を計算し、表4.17に示す。



表4.17 E&E recyclingにおける異なる種類のWEEEからの物質の回収可能性

WEEEの種類	鉄	銅	アルミニウム	亜鉛	鉛	プラスチック
洗濯機	22.580	0	0	0	0	12.685
冷蔵庫	33.516	1.676	0.000	0.000	0.000	9.790
エアコン	30.443	9.367	0.000	0.000	0.000	0
テレビ	3.116	0.061	0.052	0.000	0.027	4.621

リサイクルによる物質の回収の重要性を理解するために、様々な物質のTMR値およびその回収率を用いてリサイクルの結果回避できる関与物質総量（TMR）を計算した。図4.26は、WEEEリサイクルがなければ同量の物質を天然資源から生産することにより発生したはずであるが、WEEEリサイクルにより物質を回収した結果回避されたTMRを示している。

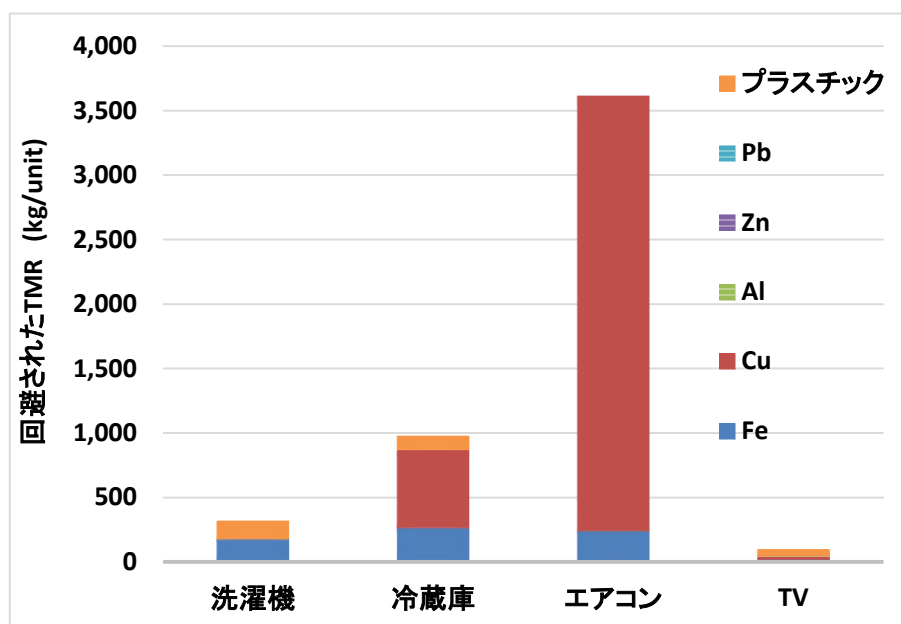


図4.26 台湾でのWEEEリサイクルの結果回避されたTMRの可能性

リサイクルによって、回避できるTMRとしては、エアコンのリサイクルによるものが一番大きく、次いで冷蔵庫、洗濯機、テレビの順となっている。ただし、本推計は、表4.17に示すようにリサイクルによる主要な回収物質のみについて行われており、金、銀、プラチナなどの貴金属についてはデータが入手できないため本研究には反映されていない。テレビ内のPCBから金属を抽出する可能性は推定したが、他の家電内のPCBからの金属抽出に関するデータは入手できなかった。

##### (5) 社会的持続可能性の評価

地元の人々にかかりの量の適正な雇用機会を創出することは、リサイクル施設が与える最大の社会的恩恵の1つであろう。本ケーススタディでは、E&E recyclingによって提供されたデータに基づいて雇用機会を推定した。WEEEの物流（主に集積所から解体施設まで）や工場での運転と管理活動（機械

操作、物質の処理、不純物の手動分離など) のため、そして熟練労働者 (監督者など) として、様々な活動のために、かなりの数の雇用機会が創出された。完全にフルタイムの雇用機会がE&E recyclingの楊梅工場で創出された。毎月1,489トンのWEEEの処理と管理を行うのに必要な従業員は88人であった。しかし、WEEE処理の総量によれば、質量の約12%はPCや他の電子製品など他のWEEEのものである。そのため、工場で創出された合計の雇用機会は、4つの主要家電および各区分の質量に基づく他の電子機器の間で配分された。本研究で検討した4つの主要家電の処理や管理について推定された雇用機会は、77件に達した。4つの主要家電1317トンの収集と運搬により、6件のフルタイムの雇用機会が創出された。解体施設では、図4.27に示されているさまざまな管理および運転活動のために最大の仕事機会 (71件の仕事) が創出された。

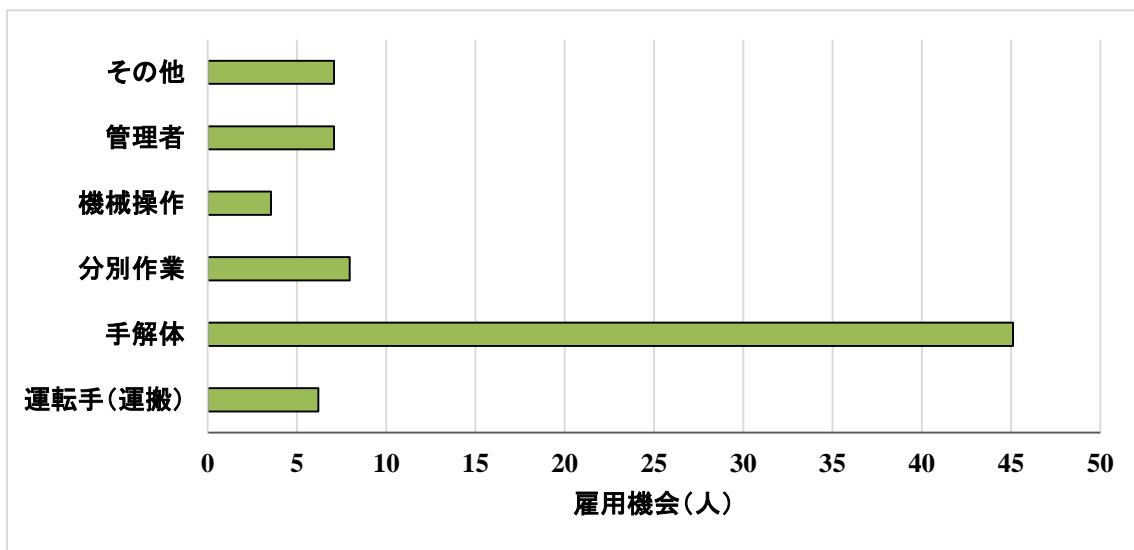


図4.27 1317トンの4種類の家電製品の処理と管理からフルタイムの雇用機会と所得創出が生ずる可能性

また、国内外の製錬施設のスクラップの運搬により別のフルタイムの仕事が創出された。これらの情報は、E&E recyclingによっては提供されなかった。他のケーススタディ同様、精錬工場での雇用機会は無視できると仮定できる。これらの物質は、単に精錬工場での2次物質として使用されているため、追加的な労働力を割り当てられないためである。

E&E recyclingでのWEEE管理活動の結果創出されたこれらすべての仕事機会は、従業員だけでなくその家族の生活水準も高めるであろう。しかし、同社は労働者の給与情報を提供していないので、収入ベースの地域社会の福祉を計算することは不可能であった。

#### 4.4.4 インドと台湾における WEEE 管理持続可能性評価の結論

本節では、インドと台湾におけるケーススタディを使用して、日本以外の国でのWEEE管理の状況を分析した。

主な制約は、WEEE管理のライフサイクル全体からの影響を推定するためのデータ (2次運搬、製錬活動など) が入手できないことであった。

リサイクルの利点を評価するには、リサイクルの効果を、天然資源から生産するプロセスチェーンにより同量の物質を生産する場合と比較する必要がある。しかしながら、日本の事例が示すとおり、温室効果ガス削減や化石資源節約などの重要な環境上の利点は、適切なリサイクルプログラムにより達成できるものである。そして同様の傾向は、これらのケーススタディからも期待できる。

インドと台湾のケーススタディが示すように、解体により物質を回収することは、これを行わなかった場合に天然資源生産チェーンに必要となるTMRを回避するのに大きな効果があるであろう。どちらのケーススタディも、WEEEリサイクルが、地域の人々への適正な雇用機会を創出するのに大きく寄与しており、地域社会の福祉を向上させる上で好ましい影響を与えていることを示している。

これら2つの国々におけるケーススタディを通して行われた本研究の結果は、アジア太平洋地域の国々で適切な法律と政策を強化して実施するだけでなく、WEEE管理の体系的手法と安定した物質リサイクルを向上させる上でも非常に役立つであろう。WEEE管理のすべての段階でデータの監視とデータの記録を行うことは、非常に重要である。なぜなら、これは現在のシステムの持続可能性評価のためだけでなく適切なリサイクルプログラムによる進捗状況を測定するためにも重要な検討事項となるためである。

## 4.5 シナリオ分析、比較、ギャップ分析、政策メッセージ、将来の研究へ向けて

### 4.5.1 はじめに

前節4.4では、各国の持続可能性評価の結果をまとめた。持続可能な廃電気・電子機器管理システムに向けた適切な政策と法制度を形成するためには、国内リサイクルシステムおよび国際資源循環を考慮に入れた比較分析を実施することが有用であると考えます。そのため、各国（日本、台湾、インド）の事例分析の結果を比較することで、最も適切なりサイクルに向けたアプローチおよびそれを支援する政策形成の在り方を同定することを試みた。ただし、台湾、インド、日本の比較において、同じ評価手法を使用したものの、前提が異なる点もあり、比較分析の結果についてはより慎重な精査が必要である。

### 4.5.2 比較の単位：各家電製品の1台当たりの平均重量

廃電気電子機器の持続可能性評価を実施するための、「基本となる単位」として、主要家電4品目の1台当たりの平均重量を活用した。今回比較に活用したインド、日本、台湾の、テレビ、エアコン、洗濯機、冷蔵庫の平均重量は、日本は統計で入手可能なデータ、インドと台湾は聞き取り調査などを活用して推計しているが、その重量はかなり異なっている（図4.28参照）。

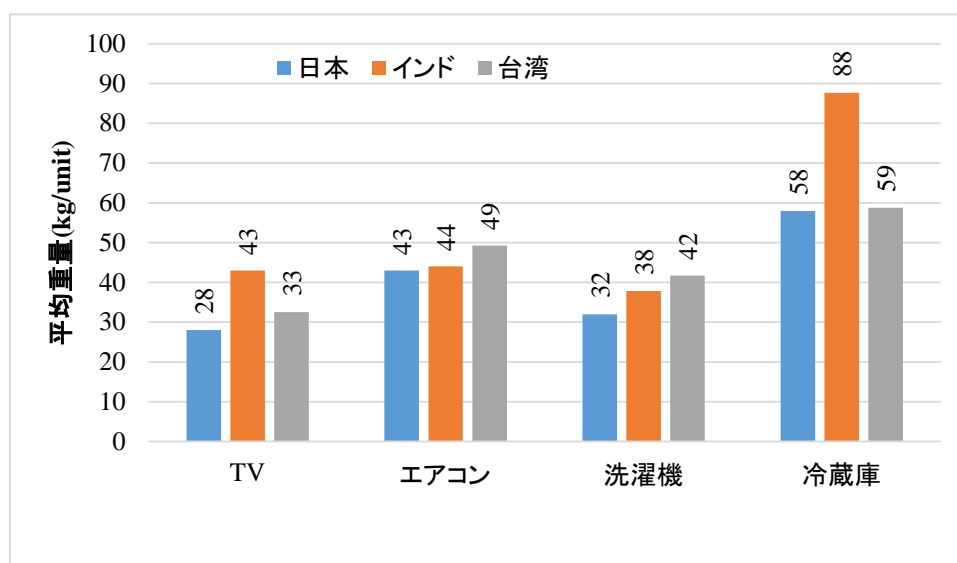


図4.28 各国の家電の1台当たりの平均重量

日本の家電製品の重量が平均的に軽いことが指摘できる。これが、家電リサイクル法の結果によるものなのかは、より分析が必要である。インドのテレビと冷蔵庫の平均重量が今回の3事例の中では一番重く、エアコンと洗濯機については台湾のものが重いという推計となった。日本の家電リサイクルシステムでは、リサイクル率の改善が継続的に行われている。

#### 4.5.2 廃電気・電子機器のリサイクルからのGHG排出：比較分析

##### (1) 輸送からのGHG排出

廃電気・電子機器の輸送は、リサイクルチェーンのGHG排出に大いに貢献していることが分かってきた。こうした排出の影響は、車両の種類、収集ポイントから解体施設までの距離、輸送物流に使用される化石燃料の種類により変化する。これらの3つの事例では、輸送に利用する主要な燃料はディーゼルであるとの前提に基づいている。

日本は、家電リサイクル法の下での物流フローが比較的組織化されている（4.3節参照のこと）。インドと台湾では、廃電気・電子機器は、異なる県・州に位置する収集ポイントから解体施設まで、大型トラックを利用して輸送されている。各国の1次輸送（収集ポイントから解体施設までの輸送）からのGHG排出を比較するために、使用済み家電の種類ごとに1トン为单位に比較を行った（図4.29参照）。

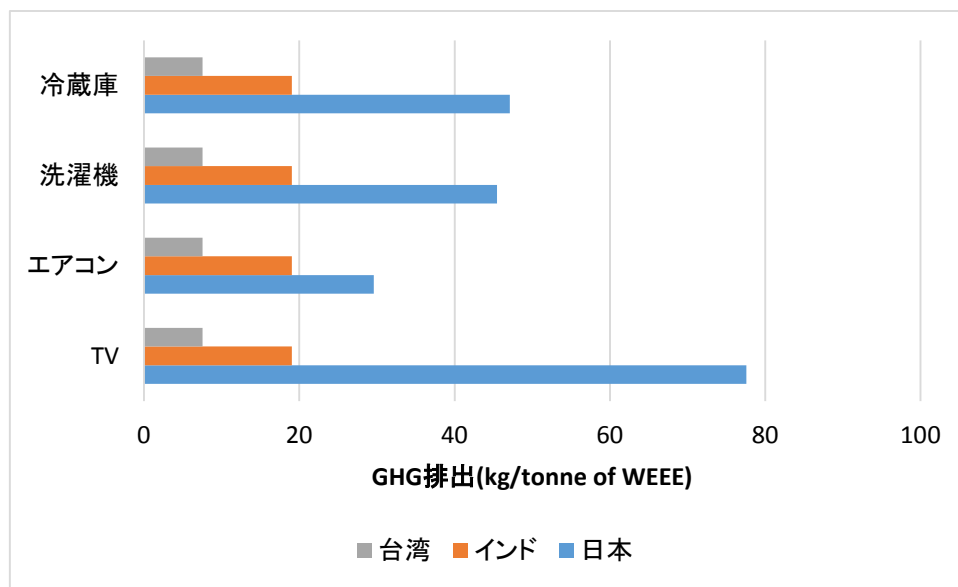


図4.29 各国の使用済み家電の物流輸送に伴うGHG排出の比較

図4.29に示すように、GHGの排出量は、日本、インド、台湾の順に多い。日本は輸送に（消費者から小売店、小売店から収集所、収集所から解体施設まで）、様々な大きさのトラックを使用し多くの化石燃料を消費している。日本の主要なトラックのサイズは5-6トン車だが、インドは15トン、台湾は10トンとなっている。そのため1次輸送では、日本のGHG排出が高くなっている。ただし、2次輸送（解体施設～精錬施設）に関するインドと台湾のデータを確保できなかったため、2次輸送を含むすべての輸送に関わるGHGの推計は出来なかった。

##### (2) 解体活動からの排出

解体活動は、ディーゼル、電力という形態で、非常に多くの化石燃料を使用する。解体プロセスに伴うエネルギー効率を理解することは、持ちと続可能なリサイクルを国際資源循環も含めて考える上で有用であろう。これらの3つの地域の中では、台湾からは解体に伴うGHG排出のデータの提供を受

けることが出来なかった。そのため、インドと日本の事例を比較した。使用済み家電のそれぞれの種類ごとに1トン为单位として比較を行ったのが、図4.30である

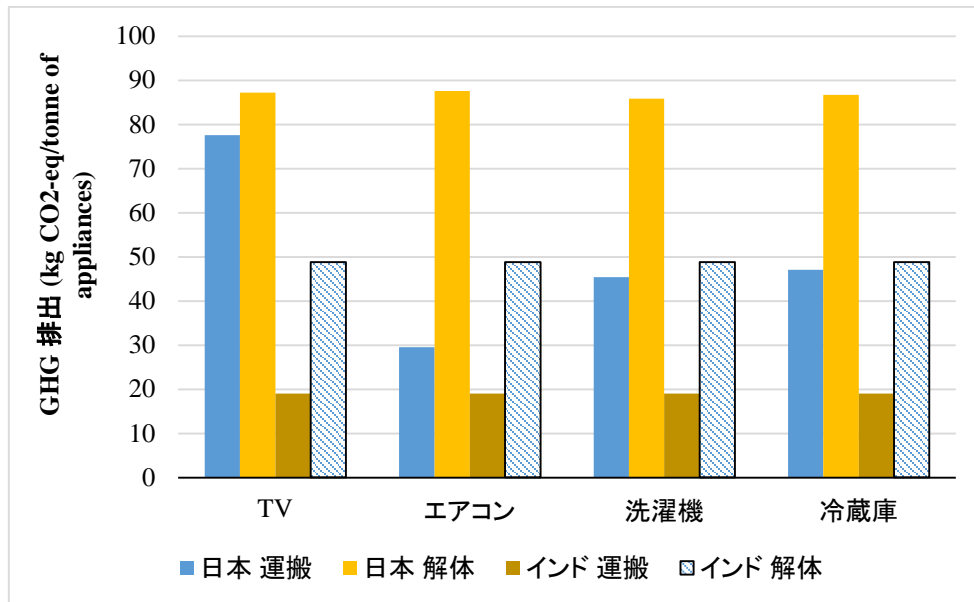


図4.30 日本とインドの1次輸送と解体活動からのGHG排出

この分析によれば、解体に伴うGHG排出はいずれの種類の家電においても、日本の方が高いということが分かった。解体に伴うGHGの排出量は、日本はインドの1.7倍程度ということが分かった。これは、日本がより機械を利用した自動化されたプロセスを導入していることにより、化石燃料の消費が多いためと考えられる。

輸送と解体の両面において、日本のGHG排出が高いということが分かった。しかし、インドにおいては、解体の後、処理された物質は中国や日本といった他国へ輸送される傾向にある。こうした海外輸送は、追加的なGHG排出を生むことになる。しかし、海外輸送に伴うGHG排出は、精錬プロセスにおけるGHGが大きい余り大きな影響を与えない。こうしたことを考えると、使用済み電気電子機器の管理に伴うGHG排出は、インドが日本よりも低いと推定できる。

その一方で、インドから輸入された物質が、例えば日本でリサイクルされた場合には金属・物質の回収効率がより良いとも考えられる。そのため、リサイクルを通じて、天然資源からの生産に伴うGHG排出を回避できると考えることが出来る。

日本の事例では、リサイクル活動からのGHG排出量にも関わらず、循環資源のリサイクルを通じて、天然資源からの製造を回避したと想定することで、GHG排出の50%を抑制したと想定することが出来る。インドにおいては、リサイクル活動からのGHG排出は日本よりも低いため、日本におけるリサイクルよりもGHGの排出抑制効果という面ではより効果が高いと考えられる。

### 4.5.3 関与物質総量の節約による貢献：比較分析

すでに議論してきたように、TMR（関与物質総量）の回避量を推計することは、使用済み電気・電子機器リサイクルの効果を示すうえで有用な指標だと言える。というのも、回収・再生された資源により、国内採掘もしくは輸入に伴う資源とその採掘に伴う環境影響を回避できたと解釈できるからである。そのため、3事例のリサイクル活動からの報酬として、国内・グローバルレベルでの資源採掘の削減可能性についての比較分析を行った（図4.31参照）。

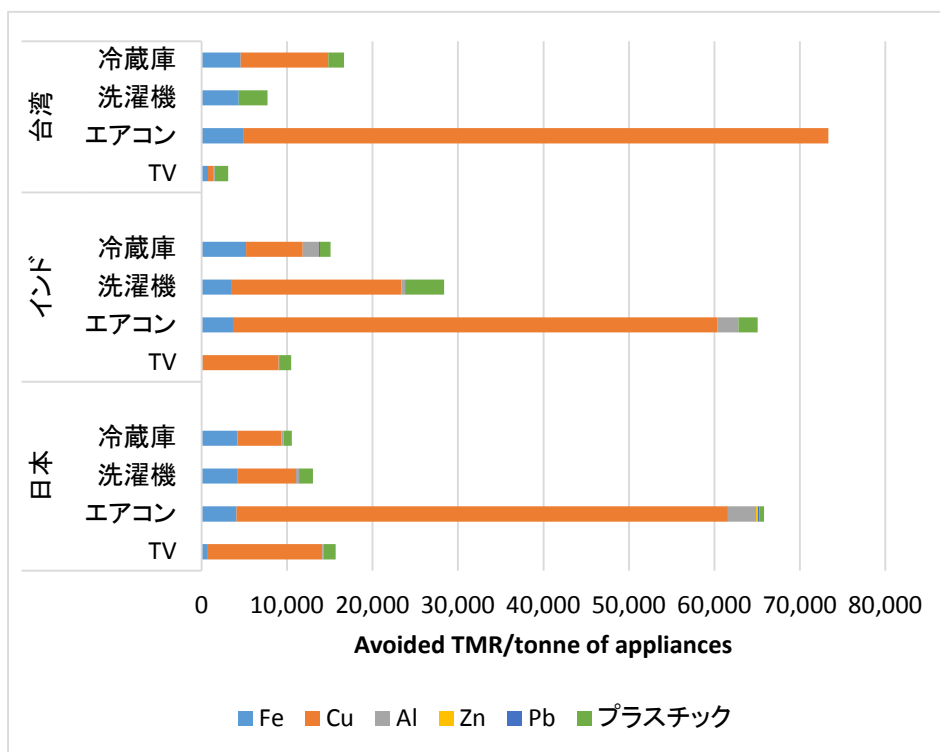


図4.31 使用済み電気・電子機器からの物質の回収・再生に伴うTMR回避の推計

図4.32は、日本、台湾、インドにおける家電それぞれの種類の1トン当たりの回避できたTMRを推計したものである。いずれの事例でも銅の採掘に伴うTMRを回避できることによる貢献が大きいことが分かった。台湾のシステムでは、他の2事例に比べて、冷蔵庫とエアコンからの物質回収が大きい。インドでは、洗濯機からの物質回収に伴うTMRの回避が大きく、日本はテレビからの物質回収が大きいことが分かる。

### 4.5.4 廃電気・電子機器管理に伴う社会便益：比較分析

すでに議論してきたように、廃電気・電子機器管理システムの適正化は、雇用機会を創出する効果もあると考えられる。雇用の創出は、地域コミュニティの福祉の改善にも貢献すると考えられる。社会的便益を比較するために、日本、インド、台湾の廃電気・電子機器の管理によって生み出された雇

用機会の比較を行った。比較のために、WEEEの1トン当たりの管理に伴い、何人の常勤雇用が生み出されたかを推計した（図4.32参照）。

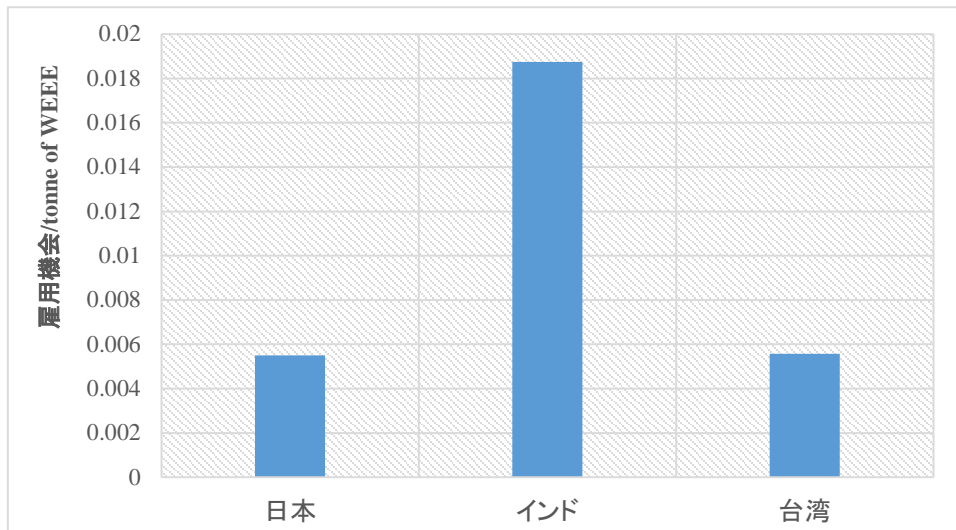


図4.32 3地域の雇用創出機会の比較分析

この結果、インドの雇用創出が非常に大きいことが分かる。日本においては、洗練された機械と自動化システムを組み合わせたリサイクルが行われているために、労働力は少なくてもすむ。対照的に、インドでは手解体に基づくリサイクルが主体的なので、雇用創出の多い労働集約型のリサイクルが行われていることになる。台湾の場合は、その中間から日本よりの雇用創出機会を提供している。前節4.4で説明したように、台湾は、四合一制度により、廃電気・電子機器の管理を様々な関係者が関与する形で行われている。このことが、雇用創出機会があまり大きくならなかった要因である可能性がある。また、台湾は新興経済として、リサイクルの自動化の方向性に進んでおり、雇用創出機会が比較的少ない結果になったと考えられる。しかし、収入レベルという意味では、日本もインドも、比較的安定的な収入レベルを提供する職を提供していると言える。

#### 4.5.5 廃電気・電子機器管理の健康影響

廃電気・電子管理は、電気電子機器の廃棄量の増大及び不適正な処理による健康・安全影響への懸念から多くの途上国で重要な課題となっている。実際、廃電気・電子機器の取り扱い、処理のすべての段階において、直接的な影響（資源回収やリサイクル活動への従事による有害物質への曝露）および間接的な影響（汚染された水、土壌、食料の吸入による）を含む健康問題が関係している。

廃電気・電子機器に含まれる有害物質として一般的なのは、バリウム (Ba)、カドミウム (Cd)、クロム(Cr)、鉛 (Pb)、水銀 (Hg)、そしてアンチモン(Sb)である。実際、CRTテレビには、バリウム、鉛、アンチモンといった有害物質が非常に高濃度で大量に含まれている。テレビの適正なリサイクルと処理は、廃電気・電子機器の中に含まれる有害物質の管理の改善に貢献すると言われている。しかし、多くの国で、廃電気・電子機器からの重金属と有害物質管理に向けて環境上適正なアプローチが実施されていない。



労働者や関係者への潜在的な健康影響の定量化は、廃電気・電子機器管理を改善する上で重要な要素であり、適正なリサイクルプログラムの企画には欠かせない。健康影響の定量化については、4.2節で議論したように、排出および重金属からの影響による損失生存年数と、障害生存年数を加算することで計算できる障害調整生存年 (DALYs) という概念がWHOと世界銀行によって開発されており、廃電気・電子機器からの健康被害の定量化に活用できる。しかし、インドおよび台湾でのケーススタディーからは、廃電気・電子機器からの有害物質・重金属に関する詳細な情報を得ることは出来なかった。

不適切なリサイクルに伴う重金属と有害物質の放出は、主に基盤 (PCB: Printed Circuit Board) のリサイクルに由来すると考えられる。Oguchi et al. (2012) は、この点に注目してPCBからの有害物質・金属の放出可能性について推計を行っている。水銀は、廃電気・電子機器のリサイクルで問題になるが、この研究は基盤を扱っているために含まれていない。基盤などの重量に基づいて、どれくらいの有害金属が含まれているか推計したのが、表4.18である。これらの有害金属の適正な処理が欠けている場合には、何らかの環境及び健康影響があるものと想定できる。

表4.18 異なる家電の種類ごとの重金属含有の推計値

国	家電の種類	有害物質 (g/unit weight of appliance)				
		Ba	Cd	Cr	Pb	Sb
日本	TV(LCD)	9.744	0.000	0.000	55.216	5.846
	エアコン	0.372	0.003	0.013	6.734	0.360
	洗濯機	0.035	0.000	0.021	1.197	0.082
	冷蔵庫	0.024	0.025	0.008	6.090	0.783
		Ba	Cd	Cr	Pb	Sb
インド	TV (CRT)	8.978	0.045	0.213	5.237	11.971
	エアコン	0.380	0.004	0.013	6.894	0.368
	洗濯機	0.042	0.000	0.025	1.414	0.096
	冷蔵庫	0.036	0.037	0.012	9.203	1.183
		Ba	Cd	Cr	Pb	Sb
台湾	TV (CRT)	11.310	0.000	0.000	64.090	6.786
	エアコン	0.426	0.004	0.015	7.720	0.413
	洗濯機	0.046	0.000	0.028	1.560	0.106
	冷蔵庫	0.024	0.025	0.008	6.174	0.794

DALYsに基づいて総合的な健康影響を推計するには、生存年数、深刻な障害、障害への影響をすべての重金属について推計し、それを合算する必要がある。Steen (2000) によると、特定の有害金属の健康影響の推計値は、表4.19のように示される

表4.19 重金属からの健康影響の特徴づけ

健康影響	健康影響 (years of life loss-YOLL or Years of Life Disable-YLD/kg of substances)				
	Ba	Cd	Cr	Pb	Sb
致死量 (YOLL/kg)	NA	0.0000955	0.000205	NA	NA
罹患率 (YLD/kg)	NA	0.00000223	0.0000262	0.291	NA
致死量 (YLD/kg)	NA	0.000192	NA	NA	NA

\*NA- Not Available

しかし、バリウム、アンチモンには、そうした有害金属からの健康影響の推計値は見つけることが出来なかった。そのため、廃電気・電子機器の処理に伴う環境、健康影響を全体で推計することは困難であった。しかし、推計のための方法論は存在するので、廃電気・電子機器のリサイクルの適正化に向けては重要な分析手法であると考えられる。鉛の不適正な取扱い・処理が、大きな環境・健康影響の要因になりうるということが、表4.19からは推測できる。

#### 4.5.6 ギャップ分析および本研究の制約

政策形成過程において、具体的な定量的な分析結果を示すことは重要な戦略であると言える。そのため、本研究では、廃電気・電子機器管理の政策形成に向けて、具体的な社会経済および環境影響を定量化するための分析アプローチを導入することを試みてきた。これまでに、ライフサイクル分析の手法を活用し、日本及びアジア地域の一部について、廃電気・電子機器管理の持続可能性に関する定量分析を開発することを試みてきた。しかし、本研究を実施する中で、以下のようないくつかの課題に直面することとなった。

- ライフサイクル分析手法を活用して、総合的な持続可能性分析を行うには、大量のデータが必要となる。
- 関係者の間に、データを正確に記録し、データの品質を維持することの有用性に関する意識が欠如している。
- 廃電気・電子機器の発生量、リサイクル量、物流に関する情報、エネルギー消費など、持続可能性を評価する上で最も重要なデータについての関係者の理解が不足していた。
- リサイクル関連企業において、関係者によるデータの記録がほかの要素に比べて、優先度が高いため、データを収集・維持することへの関心の低さ。
- データが記録されている場合にも、リサイクル企業などが秘密保持のためにデータを公開することをためらうケースが見られた。そのため、経済的な持続性を評価することが非常に困難。
- データ収集プロセスそのものに、時間と労力がかかえる。インドにおいて、データを収集するために聞き取り調査も実施したものの、限定的なデータの提供しか得られなかったため、総合的な評価を行うことが困難になった。

- 廃電気・電子リサイクル活動の物質回収・再生の全体の便益を評価するためには、同量の天然資源の生産の影響との比較を行うアプローチが有効である。しかし、こうしたデータを各国ごとに得ることは非常に困難であった。日本のみがこうしたデータを維持していた。
- こうしたデータを共有し、解釈することの重要性について、途上国の関係者から理解を得る上で、困難に直面した。

そのため、当初、分析を予定していたライフサイクルでのリサイクルによる資金面でのコスト比較、健康影響などを、各国の特定のデータを活用して比較することが出来なかった。

しかし、これらの障害を乗り越えることは可能である。ライフサイクル分析が有用であるとの認識は、途上国の政策担当者の間にも広まってきている。LCA的な手法は、各国の持続可能な開発に関する目標を評価する上でも有用であろう。

廃電気・電子機器に関する限り、今回開発したアプローチをより政策担当者に操作が容易なものとしたうえで、ウェブ上で公開される簡易ツールとして活用することも考えられる。

## 4.6 結論

先進国、途上国双方において、廃電気・電子機器の管理の影響を評価するための調査研究への関心が広がりつつある。その一方で、本研究で実施したような定量的な分析をアジア地域において実施した例はこれまでにないと言ってよいだろう。こうした分析は、廃電気・電子機器の適正管理から得られる持続可能性に向けた便益を明らかにすることが出来る。その一方で、廃電気・電子機器の管理およびリサイクルの関係者が、廃棄物の処分、リサイクル品からの経済的利益という側面以外の便益について理解していることは稀有である。本研究では、廃電気・電子機器管理の持続可能性について包括的なLCAに基づいた分析手法の開発に一定の貢献を行うことが出来たと考える。データの入手可能性という課題はあるものの、本研究で開発した手法は、複雑なものではなく、どのような国や経済の状況においても応用可能であると考えられる。その上で、本研究手法を、具体的に日本、インド、台湾の事例分析に応用した。

本研究では、使用済み家電のリサイクルが持続可能性への貢献という観点から、様々な側面からの便益があることが明らかになった。拡大生産者責任に基づくリサイクル関連法の効果として、現状、リサイクル率や資源回収率、また限定的ではあるが環境配慮設計への貢献という観点からの評価がほとんどである。そうした中で、本研究ではGHGの排出削減ポテンシャル、資源節約、雇用創出という観点からの評価を行うと同時に、日本以外の他のリサイクルシステムにも応用可能な評価手法を開発することが出来たと考える。

本研究からは、リサイクルによって資源の節約に貢献するだけでなく、温室効果ガスの削減へも貢献する可能性があることを示すことが出来た。実際、日本の事例では、廃電気・電子機器のリサイクルによって循環資源を回収し利用することで、同量の資源を天然資源から生産した場合に比べて50%以上のGHG排出の発生が抑制できるという推計を行うことが出来た。また、洗濯機、冷蔵庫、エアコンのリサイクルは、75-80%の化石燃料使用の抑制効果があると推計できた。また、テレビについても、55%程度の化石燃料の使用の抑制が出来るという推計結果となった。インドと台湾の事例では、廃電気・電子機器管理に使用される化石燃料は日本よりも少ないとの調査結果となったが、いずれの場合においても、リサイクルはGHGの排出抑制、化石燃料の節約に貢献するということが分かった。適正な廃電気・電子機器リサイクルは、社会経済的な便益も生み出す。今回調査した事例では、リサイクルプログラムの結果、常勤の雇用が生み出されていることが分かった。そうした雇用の創出は、社会の福祉を改善し、地域経済の成長にも貢献する。

OECDにおいて、現在、2001年に策定された拡大生産者責任に関するガイドンスマニュアルのアップデート作業が行われている。2014年6月に開催されたOECDのEPRに関するグローバルフォーラムでは、関係者からは、拡大生産者責任政策の多面的な便益を示すための評価手法やデータが不足しているとの指摘があった。そうした中で、日本の家電リサイクル法の効果として、上記のような効果を、日本からの事例分析として提出 (Hotta et. al. 2014) できたことは本研究からの大きな成果だったと言えるだろう。

その一方で、国際比較を行うことで、特にインドの事例からは途上国のリサイクルが、労働集約型であり、エネルギー非集約型のリサイクルであることを定量的に明らかにすることが出来た。すなわち国際的には、安価な労働力に依存した労働集約型のリサイクルと、比較的エネルギー消費型の労働非集約型のリサイクルが併存していることを、定量的に明らかにすることが出来た。このことは、先

進国で収集された使用済み機器やその部品の一部などが、中古品として合法的に、もしくは一部非合法的に途上国へと移転し、環境上不適正であると考えられながらもリサイクルが行われている要因の一部を示しているものと考えられる。

しかし、データ入手上の課題から、途上国の労働集約型、エネルギー非集約型のリサイクルが、先進国のリサイクルよりも健康上もしくは環境面で、重金属などの不適切な処理により、負の影響があるという点については、定量的に示すことが出来なかった。また、途上国で行われる労働集約型のリサイクルと分散型の資源回収と、日本で行われている専門解体工場と高度な精錬施設の連携による資源回収との間に存在するであろう、資源回収技術の違いによる資源回収効率の差についても今回の分析に取り入れることが出来なかった。

こうした重金属汚染などによる環境・健康面での影響、使用されている資源回収技術の差による資源回収効率の差を組み入れれば、国際資源循環オプションの評価も可能になると考えられる。

本研究では、日本における家電4品目の回収率が50～60%であるのに対し、以下のようなシナリオ想定し、国際資源循環オプションの違いによる日本及び途上国での影響の差を示すことを企図したが、結果としては上記の理由により国際資源循環オプションの比較分析には至らなかった。

シナリオI：(現状) 20～30%が海外に流出し、利用、もしくは処分されている状態(国内総処理量1200万台)

シナリオII：(今後) 回収率目標が定められ、回収率が向上し、国内処理量が70～80%になった場合(総処理量1500万台ほど)

シナリオIII：シナリオIIにさらに海外の廃家電を日本に輸入した場合(総処理量2000万台ほど)

以上のシナリオ分析を行うことは、環境政策への貢献可能性としては、興味深い結果をもたらすことが期待される。その一方で、途上国のリサイクルに関する現状のデータのみで実施した場合には、誤解を招く結果になりかねない。少なくとも今回の研究成果で得た定量的データでは、エネルギー、GHG排出、雇用の創出という側面からの評価となると、途上国でのリサイクルの方がより効果的という結論となってしまいかねない。そのため、重金属汚染などによる環境・健康面での影響だけでも今回の評価手法に取り入れることが今後の課題である。

本研究が、アジア太平洋地域での廃電気・電子機器の適正な管理に貢献するためには、基本的なデータの入手が欠かせない。今回の研究では、経済的な持続可能性や、健康影響に関する分析が不十分であったが、これらの側面についての研究をより進化する必要がある。これらの経済的持続可能性と健康影響は、廃電気・電子機器の国際的な移動も含めた国際的な管理を考慮に入れる上で必要不可欠である。今回の研究を活用して、ウェブベースの簡易的な廃電気・電子機器管理の影響評価ツールを公開することを目指すことが、ひとつの方向性として考えられる。関係者の協力を得るためにも、E-wasteの適正な管理などに関心を有するUNEPやUNIDOといった国際機関と連携し、こうしたツールの公開をするというのは、有効なアプローチであると考えられる。

#### 第 4 章 参考文献

- AEHA (2013). *Annual Report*, Association for Home Appliances, Japan. Available in [http://www.aeha.or.jp/recycling\\_report/pdf/kadennenji25.pdf](http://www.aeha.or.jp/recycling_report/pdf/kadennenji25.pdf).
- Afroz, R., Masud, M.M., Akhtar, R., Bt Duasa.J. (2013). Survey and analysis of public knowledge, awareness and willingness to pay in Kuala Lumpur, Malaysia - a case study on household WEEE management. *Journal of Cleaner Production* 52, 185-193.
- EPA (2012). Recycling and Waste Electrical and Electronic Equipment management in Taiwan. Environmental protection administration, Executive Yarn. Available in [http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/taiwan\\_iemn\\_case\\_study\\_12.7\\_final.pdf](http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/taiwan_iemn_case_study_12.7_final.pdf)
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G.M.S., Van Dorland, R. (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In S. Solomon et al. (Eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Geospatial Information Authority (GIA) (2012). Heisei 24 nen Zenkoku Todoufuken Shicho-son Betsu Menseki Cho. National Survey on Land Area of Each Prefecture and Municipality in Japan in 2012. Available in <http://www.gsi.go.jp/>. Accessed 26 June 2013.
- Grossman, E. (2005). High tech trash: digital devices, hidden toxics, and human health. *Washington: Island Press*, p 133-134.
- Guinée, J.B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A.D., van Oers, L., Sleeswijk, A.W., Suh, S. and Udo de Haes, H.A. (2001). Life Cycle Assessment—An Operational Guide to the ISO Standards. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), and Centre of Environmental Science, Leiden University (CML): The Netherlands.
- Hotta, Y., Santo, A., Tasaki, T. (2014) EPR-based electronic home appliance recycling system under home appliance recycling act of Japan, Case study prepared for the OECD, available at [www.oecd.org/env/waste/gfenv-extendedproducerresponsibility-june2014.htm](http://www.oecd.org/env/waste/gfenv-extendedproducerresponsibility-june2014.htm) Hicks, C., R. Dietmar, R., and Eugster, M. 2005. The recycling and disposal of electrical and electronic waste in China—legislative and market responses. *Environmental Impact Assessment Review* 25; 459– 471.
- IGES (2014). GHG emissions from grid electricity production. Available in <http://www.iges.or.jp/en/climate-energy/mm/publication.html>
- IIWM (2013). Capacity building on E-waste management. International Institute of Waste Management (IIWM), Bhopal, India. Available in <http://www.iiwm.in/index.php?fun=capacity> (accessed 20 June 2013)

- JLCA (2013). LCA database, Life Cycle Assessment Society in Japan. Available in <http://lca-forum.org/database/> (accessed 20 January 2013)
- Jørgensen, A., Bocq, A.L., Nazarkina, L. and Hauschild, M. (2008). Methodologies for Social Life Cycle Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), 96 – 103.
- Kaden recycle Annual report (2013). Association for Electric Home Appliances, Japan. Available in <http://www.aeha.or.jp/about/outline.html>.
- Menikpura, S.N.M. (2011). Development Sustainability Indicators for Evaluating Municipal Solid Waste Management Systems- LCA Perspective, PhD thesis, The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.
- Menikpura, S.N.M., Gheewala, S.H., Bonnet, S., Chiemchaisri, C. (2012). Evaluation of the effect of recycling on sustainability of municipal solid waste management in Thailand. *Journal of Waste Management and Biomass Valorization* 4, 237–257.
- METI (2013). Home Appliance Recycling Law. Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan. Available in <http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/english/law/home.html> (accessed 3 July 2013)
- NIES (2013). Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using input-output Tables. Center for Global Environmental research, National Institute for Environmental Studies, Japan.
- NIMS-EMC (2009). Total Materials Requirement (TMR). Available in <http://www.nims.go.jp/genso/0ej00700000039eq-att/0ej007000000391d.pdf>
- Oguchi, M. Sakanakura, H., Terazono, A. (2012). Toxic metals in WEEE: Characterization and substance flow analysis in waste treatment processes. *Science for the Total Environment*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.078>
- Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A., Kameya, T. (2011). A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *Waste Management*, 31, 2150–2160.
- PRé Consultants. (2001). The Eco-indicator 99 - a damage oriented method for life cycle assessment. Methodology report. The Netherlands; 2001. Available in <http://www.pre.nl/>. Accessed on 20 November 2009.
- Qu, Y., Zhu, Q., Sarkis, J., Yong Geng, Y., Zhong, Y. (2013). A review of developing an e-wastes collection system in Dalian, China. *Journal of Cleaner Production* 52, 176-184.
- Singh, R.K., Murty, H.R., Gupta, S.K. and Dikshite, A.K. (2009). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 9, pp. 189-212.

Statistics Japan (2012). Statistics Bureau, Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan. Available in <http://www.stat.go.jp/english/index.htm>. Accessed 10 June 2013.

Steen B. (2000). A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS) version 2000 - Models and data of the default method, CPM report 1999, Chalmers University of Technology, Environmental Systems Analysis.

Waldron, C. D., Harnisch, J., Lucon, O., McKibbin, R. S., Saile, S. B., Wagner, F., Walsh, M. P., Maurice, L. Q., Hockstad, L., Hohne, N., Hupe, J., Lee, D. S., et al. (2006). "Mobile Combustion" Chapter 3 of Volume 2: Energy, for the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Available in <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> accessed 03 October 2012.



## 5. 結論

---

### 5.1 本研究の成果

現在の世界の開発経路は、世界GDPについては成長しているものの、環境持続性を大きく損なうとともに、貧困撲滅についても課題が山積している。世界全体としての持続可能な開発を進めるためには、地球環境容量の枠内に人類の社会・経済活動のインパクトを抑えるために富めるものの過剰消費の問題を解消すると同時に、生活の質を確保できていない持たざるものの過少消費を解決する必要がある。

本研究は、この難題に対し持続可能な資源利用の観点から以下の3つの課題に取り組んだ。

1つめの課題は、国連で議論が進められている持続可能な開発目標（SDG）や、国連環境計画によるグリーン経済イニシアチブ、あるいは経済開発協力機構（OECD）によるグリーン成長イニシアチブなど、持続可能な資源利用の問題に取り組んでいる国際的な政策プロセスに対し、厚生水準と資源利用の強いデカップリングの重要性につき問題提起することである。

これらの国際政策プロセスにおける現行の議論は経済成長と資源利用のデカップリングに焦点を当てており、その中でも資源利用絶対量の削減が要求されない資源効率性改善（弱いデカップリング）アプローチが中心である。しかし、現状の経済成長依存型の社会・経済システムのもとで経済成長を優先政策目標としている限り、弱いデカップリング（資源生産性・環境効率の向上）に対するインセンティブは働いても、効率改善による利益はさらなる経済成長に使用されるため、強いデカップリング（経済成長と資源利用・環境負荷の削減の両立）にはつながらないと考えられる。この仮説は、国際資源パネル報告書のデカップリング報告書の結論である、これまで先進国を中心に弱いデカップリング（資源生産性・環境効率向上）は起こっているものの、強いデカップリングは起こっていないという現実と一致している。

この現状に対する本研究の政策提案は、経済成長と資源利用量・環境負荷の強いデカップリングではなく、厚生水準と資源利用・環境負荷の強いデカップリングに政策目標を切り替えることである。この提案を念頭に、世界多地域応用一般均衡モデルと産業連関表を用いて、マクロレベルでの持続可能な資源利用政策、特に先進国における資源利用抑制政策を通じて、厚生水準と資源利用・環境負荷の強いデカップリングの可能性について検討を行った。

2つ目の課題は、生産活動における投入財の選定、あるいは消費者による商品選択などにおいて、持続可能な資源利用を促進する意思決定に必要となる情報が欠如している現状に対し、情報提供のための手法を開発することである。現在、このような情報提供を目的として、製品のカーボンフットプリント推計および推計結果の情報開示（ラベリングなど）の取り組みが進められているが、例えば金属資源の採取過程における環境影響など個々の事例で環境が大きく異なり、かつ推計に必要なデータ入手が難しいものについては情報が欠如しており、これらの情報を含めたライフサイクル環境影響推計が困難である。

本研究ではこの課題を克服する試みとして、資源を得るために人間が環境中から取り出した物質の総量である関与物質総量（TMR）の改良、資源採取過程環境影響の精緻化の試みとして鉱山特性に考慮した資源採取過程からのCO<sub>2</sub>排出量推計、および人間活動の環境負荷を地球環境容量に対して評価するエコロジカルフットプリントのレアアース利用に関するライフサイクル環境影響評価への応用、の3つのアプローチによる研究を実施した。

3つ目の課題は、持続可能な資源利用を促進するうえで大きなポテンシャルを持つ資源循環システムの改善、特に持続可能な国際資源循環システムの構築である。廃電気電子機器（WEEE）リサイクルに見られるように、新興国・発展途上国の経済成長とともに急速に増加しつつある廃棄物を適切に管理するのみならず、再生資源として活用していく資源リサイクルは、適切な制度設計のもとで適切に運用される場合には、1次資源の節約による資源保全、1次資源採取に伴う環境影響の回避、廃棄物管理、雇用創出による社会経済的便益など、多面的な効果を通じて持続可能な資源利用に対して重要な貢献が期待できる。一方、廃棄物には環境と健康にとって有毒で潜在的に危険な多数の物質が含まれていることが多く、中国などの新興国・発展途上国における不適切なWEEEリサイクルによる環境被害・健康被害がしばしば報告されている。

本研究ではこのような現状に対し、リサイクルシステムの多面的な効果を反映した持続可能性評価手法を日本の事例に基づき開発し、その手法を新興国・発展途上国に対して適用し、発展段階に応じたリサイクルシステムの特性に配慮した国際資源循環システムの構築のために有用な情報の提供を試みた。

それぞれの課題に対する研究成果は以下の通りである。

#### (1) 厚生水準と資源利用・環境負荷の強いデカップリングへのパラダイムシフト

持続可能な資源利用政策の環境影響評価に関する研究では、先進国が持続可能な資源利用政策として資源利用抑制策を実施することにより、厚生水準と資源利用の強いデカップリングを実現する可能性について検討を行った。この目的で、応用一般均衡（CGE）モデルと産業連関分析（IO）の連携に基づく評価手法を開発した。さらに複数年にわたる評価期間に対して各年の影響評価を行うことが可能な逐次動学モデルとすることで、評価期間合計値に対する目標設定を可能とし、さらにそのような政策目標に対して政策導入が遅れることによるコストの検討も行った。

持続可能な資源利用政策シナリオとして、日本一国でグリーン経済を目指すシナリオ、日本の最大の鉄鉱石輸入元であるオーストラリアと協調してグリーン経済を目指すシナリオ、さらに先進国が協調して資源利用抑制政策を導入することにより、政策導入国におけるグリーン経済の確立に加え、対象資源をめぐる国際競争を緩和することで新興国・途上国の経済発展側面支援を目指す持続可能な開発シナリオを策定し、定量的影響評価を行った。

日本一国でグリーン経済を目指すシナリオについては、鉄鉱石中間投入への天然資源税と鉄スクラップリサイクルの中間財投入に対する定率補助金を組み合わせた政策シナリオにより、日本の厚生水準がわずかに上昇した。すなわち日本の厚生水準と鉄鉱石直接利用量との間に強いデカップリングが成立した。一方、消費者ベース指標である資源フットプリントで評価した場合には資源削減効果はわずかとなり、かろうじて厚生水準との強いデカップリングが成立したものの消費者ベース指標での資源利用削減の困難さが浮き彫りとなった。また日本の実質GDPはわずかに減少したため、経済成長と鉄鉱石利用量との強いデカップリングは成立しない結果となった。

日本とオーストラリアが協調してグリーン経済を目指すシナリオでは、日本単独で天然資源税を上流側（鉄鉱石中間投入）に課税する場合と比べ、オーストラリアとの協調政策実施により目標達成に必要な税率は大幅に下がった。また、同じ政策を同じ税率で導入したにも関わらず、日本とオーストラリアの間で政策影響に大きな差が出る結果となり、対象国の特性が政策効果に大きく影響することが明らかとなった。

先進国が協調して資源利用抑制政策を導入する持続可能な開発シナリオでは、日本、韓国などOECD加盟国である先進6か国・地域で上流側天然資源税と鉄スクラップリサイクルを組み合わせた政策を実施することにより、オーストラリアを除く5つの政策導入国・地域で厚生水準と鉄鉱石利用量の強いデカップリングが実現した。また世界全体でも厚生水準上昇と鉄鉱石利用抑制の両立（強いデカップリング）が実現した。対策導入国の鉄鉱石利用量の減少幅は世界合計の減少幅を上回っており、資源競合の緩和を通じて対策を導入していない国々の資源利用を促進する結果となった。また、鉄鉱石利用抑制のコベネフィットとしてCO<sub>2</sub>排出量抑制の効果が見られた。世界全体でCO<sub>2</sub>排出量が減少しており、厚生水準とCO<sub>2</sub>排出量との強いデカップリングも実現した。このように、本研究で先進国のグリーン経済に期待する役割が裏付けられる結果となった。

その他、持続可能な開発シナリオを基準として、対策導入が遅れることによる影響や、対象資源を銅鉱石とした場合の政策含意について検討した。例えば、持続可能な開発シナリオと同じ政策ツールを1年遅らせて導入し、かつ同じ削減目標を達成する場合、世界全体の実質GDPが約27億ドル（2004年USD）減少する結果となったが、対策導入国・地域での厚生水準は上がる結果となった。これはより強力な（資源税率の高い）政策の導入により対策導入国で強いデカップリングがさらに促進されるとともに、資源競合緩和効果もさらに強まることで、新興国・開発途上国での便益も大きくなったと考えられる。また、対象資源を銅鉱石とした場合には、鉄鉱石対象の場合に実現した厚生水準-鉱石利用量の強いデカップリングは見られなかった。

## (2) 持続可能な資源利用を促進する意思決定に必要となる情報の提供

特定物質に伴うライフサイクル環境影響評価に関する研究では、環境負荷の代表的なものとしてよく見られるCO<sub>2</sub>排出量、最近の議論においてマテリアルフロー指標から転じて環境影響評価指標としての期待がかかるTMR、そして網羅的な環境影響指標として設計されているエコロジカルフットプリント（EF）という、3つの全く異なるタイプの指標について手法の改良を進め、改良した手法を特性の異なる3つの銅鉱山に適用した。

鉱山毎の事例研究では主に以下のことが明らかとなった。

- EFについては二酸化炭素吸収地が圧倒的に大きくなるために、CO<sub>2</sub>排出量の計算結果と近い値を示す。ただし、地域別の係数を用いることで、ある程度はその国の生産性を反映することになる。
- 鉱山開発について、生態系へのインパクトを理由に土地改変面積の大きさが懸念材料に上がることは非常に多い。しかし、現時点でのEFの推計手法を用いる限りにおいては相対的には大きなものではない。
- TMRについてはEFやCO<sub>2</sub>排出量とは必ずしも一致するとは限らない。大規模な拡張工事や、廃さいダムを新たに建設した場合、非常に大きくなる可能性がある。この点については土地改変面積についても同様であるが、EFに変換する際に生産能力阻害地の影響は小さめに見えることから、結果に与える影響は大きくない。

これらのことから、TMRとCO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ別個に推計する価値があること、またEFの推計結果が二酸化炭素吸収地の面積に支配される傾向にあり、係数によって各国の実情が多少は反映されるにしても鉱山開発についてはそれほど有意義ではない可能性が明らかとなった。

一方、EFがより様々な影響を考慮できる方向で拡張されれば、係数による各国の実情反映は意味を持つと考えられる。例えば国によっては尾鉱の海洋投棄が認められている場合があり、海洋生態系に対して影響を与えていると予想される。また、TMRの拡張に際して検討項目とした酸性坑排水(AMD)による被害地域を生産能力阻害地に該当すると考えるならば、結果が変わるであろう。

本研究で対象とした3つの指標を精緻な分析に応用しようとした際に生じる主な問題点として、以下が挙げられる。

- TMRについては、データが公表されることがまれであり、今回のケーススタディにおいては、鉱石とズリだけを検討対象とした。これはこの二つのデータは相対的に信頼性があるものと考えたからである。しかしAMDを固体物の重量に換算して評価しようとした場合、水質を知る必要がある。さらに、現時点でAMDが止まっていない鉱山について評価するのであれば、将来の水質を予測しなければならない。
- CO<sub>2</sub>排出量についても、詳細な操業データが精緻化には必要となるが、そうしたデータは入手が難しい。
- EFについては、生産能力阻害地を勘定するのであれば、鉱山関連施設の面積を把握しなければならない。今回は画像解析によりこれを得たが、厳密にはその検証には現場調査が必要になる。

鉱山における環境影響とは極めて現場に依存するものであり、幾つかの代表的な鉱山について計算された値を原単位として用いることは極めて危険である。そのため、正確なデータを作るためには鉱山業界の協力が不可欠であるが、そのような協力を得ることが難しいことが大きな課題であることが、本研究を通じてあらためて浮き彫りとなった。

### (3) 持続可能な国際資源循環システムの構築

国際資源循環の推進に関する研究では、環境・経済・社会的影響を定量的に比較評価可能にする持続可能性評価の手法を開発した。使用済み家電の管理に関わる環境排出と資源利用に関わる環境影響を測るために、温室効果ガスの正味排出量、資源効率とリサイクル率、資源の回収率を重要な指標として同定した。また、社会・経済的便益を測るために、環境関連産業での雇用の創出と収入に基づいた福祉を同定した。その上で、福岡県の事例からのデータを活用して、家電リサイクル法の下での対象家電4品目を対象として、収集などの物流過程を含めた家電リサイクルチェーンからの温室効果ガス排出量の定量化を行うとともに、天然資源から製品を生産する場合からの資源(化石燃料、金属資源)節約および環境負荷(温室効果ガス排出量)削減効果を定量化した。また家電リサイクルによる雇用創出効果を推計し、これらの指標を用いた家電リサイクルシステムの持続可能性評価手法を開発し、日本、インド、台湾の事例分析に応用した。

事例分析の結果、使用済み家電のリサイクルが持続可能性への貢献という観点から、資源の節約に貢献するだけでなく、温室効果ガスの削減へも貢献する可能性があることを示すことが出来た。日本の事例では、廃電気・電子機器のリサイクルによって循環資源を回収し利用することで、同量の資源を天然資源から生産した場合に比べて50%以上のGHG排出の発生が抑制できるという推計結果となった。また、洗濯機、冷蔵庫、エアコンのリサイクルは、75-80%の化石燃料使用の抑制効果があると推計できた。テレビについては、55%程度の化石燃料の使用の抑制が出来ると推計結果となっ

た。インドと台湾の事例では、廃電気・電子機器管理に使用される化石燃料は日本よりも少ないとの調査結果となったが、いずれの場合においても、リサイクルはGHGの排出抑制、化石燃料の節約に貢献するということが分かった。今回調査した事例では、適廃電気・電子機器リサイクルプログラムの結果、常勤の雇用が生み出されているおり、社会経済的な便益も生み出すことが分かった。

また3か国の分析結果を用いて国際比較を行うことで、特にインドの事例からは途上国のリサイクルが、労働集約型であり、エネルギー非集約型のリサイクルであることを定量的に明らかにすることが出来た。すなわち国際的には、安価な労働力に依存した労働集約型のリサイクルと、比較的エネルギー消費型の労働非集約型のリサイクルが併存していることを、定量的に明らかにすることが出来た。このことは、先進国で収集された使用済み機器やその部品の一部などが、中古品として合法的に、もしくは一部非合法的に途上国へと移転し、環境上不適正であると考えられながらもリサイクルが行われている要因の一部を示しているものと考えられる。

しかし、データ入手上の課題から、途上国の労働集約型、エネルギー非集約型のリサイクルが、先進国のリサイクルよりも健康上もしくは環境面で、重金属などの不適切な処理により、負の影響があるという点については、定量的に示すことが出来なかった。また、途上国で行われる労働集約型のリサイクルと分散型の資源回収と、日本で行われている専門解体工場と高度な精錬施設の連携による資源回収との間に存在するであろう、資源回収技術の違いによる資源回収効率の差についても今回の分析に取り入れることが出来なかった。

こうした重金属汚染などによる環境・健康面での影響、使用されている資源回収技術の差による資源回収効率の差を組み入れれば、国際資源循環オプションの評価も可能になると考えられる。本研究では、日本における家電4品目の回収率が50~60%であるのに対し、以下のようなシナリオ想定し、国際資源循環オプションの違いによる日本及び途上国での影響の差を示すことを企図したが、結果としては上記の理由により国際資源循環オプションの比較分析には至らなかった。

このような国際資源循環オプションの比較分析は、環境政策への貢献可能性としては、興味深い結果をもたらすことが期待される。その一方で、途上国のリサイクルに関する現状のデータのみで実施した場合には、誤解を招く結果になりかねない。少なくとも今回の研究成果で得た定量的データでは、エネルギー、GHG排出、雇用の創出という側面からの評価となると、途上国でのリサイクルの方がより効果的という結論となってしまいかねない。そのため、重金属汚染などによる環境・健康面での影響だけでも今回の評価手法に取り入れることが今後の課題である。

本研究が、アジア太平洋地域での廃電気・電子機器の適正な管理に貢献するためには、基本的なデータの入手が欠かせない。今回の研究では、経済的な持続可能性や、健康影響に関する分析が不十分であったが、これらの側面についての研究をより進化する必要がある。これらの経済的持続可能性と健康影響は、廃電気・電子機器の国際的な移動も含めた国際的な管理を考慮に入れる上で必要不可欠である。

今回の研究を活用して、ウェブベースの簡易的な廃電気・電子機器管理の影響評価ツールを公開することを目指すことが、ひとつの方向性として考えられる。関係者の協力を得るためにも、E-wasteの適正な管理などに関心を有するUNEPやUNIDOといった国際機関と連携し、こうしたツールの公開をするというのは、有効なアプローチであると考えられる。

## 5.2 本研究の政策的意義

### 5.2.1 持続可能な資源利用政策の環境影響評価

持続可能な資源利用政策の環境影響評価に関する研究は、短期的な行政ニーズにこたえるというよりは、むしろ今後必要となるであろう新しい環境政策の潮流への貢献という点で政策的意義があると考えられる。先進国を対象とした天然資源利用抑制のための政策については、分析結果にも見られるように実質GDPベースでの経済成長に負の影響が出る可能性があり、金融システムや社会保障システムが経済成長に依存する形で制度設計されている現状ではすぐに実現する政策ではない。しかし成長のジレンマの呪縛のもと、先進国を中心に資源生産性や環境効率の向上は見られるものの、資源利用量・環境負荷発生量の絶対量の増加に一向に歯止めがかからない状況を鑑みるに、政策議論を開始する必要性は極めて高いと思われる。そのような議論を行う上で、本研究の成果は有用なものであろう。特に日本一国グリーン経済モデルにおいて厚生水準と資源消費（ここでは鉄鉱石）の強いデカップリングの実現可能性が示唆されたこと、および先進6か国・地域の政策協調による持続可能な開発モデルにおいて、オーストラリアを除く5か国・地域と世界全体として厚生-資源消費の強いデカップリングの実現可能性が示されたことは貴重な情報と考える。

### 5.2.2 特定物質に伴うライフサイクル環境影響評価

特定物質に伴うライフサイクル環境影響評価に関する究の政策的意義は、昨今注目を集める持続可能な資源利用を考える上で必要となる生産時の環境影響に関し、これまで欠如していた情報を補う手法開発を進めたことである。

CO<sub>2</sub>排出量に関しては、これまでの多くのLCAの試みの中で少しずつ明らかになってきているところである。また、昨今の生物多様性に関する関心の高まりから、土地改変を扱う研究事例は少しずつ出てくるようになってきている。一方、酸性坑排水（AMD）のような問題は、環境問題としても極めてローカルな問題であるとともに、鉱山現場をあまり持たない我が国においては存在そのものがあまり知られていない。この現状に対し、本研究によるCO<sub>2</sub>排出量以外を含めた鉱山業からの環境影響を定量化する手法は、どの資源は比較的環境に優しいのか、また同じ資源であってもどのような現場が環境に優しいのかを知る手立てを提供するものであり、また環境に比較的易しい鉱業を目指した努力を正当に評価することにもつながり、我が国の資源政策に対しても貢献するものであると考えている。

### 5.2.3 国際資源循環の推進に関する研究

先進国、途上国双方において、廃電気・電子機器の管理の影響を評価するための調査研究への関心が広がりつつあるが、本研究で実施したような定量的な分析をアジア地域において実施した例がないため、本研究による知見の提供は大きな政策的意義を持つと考える。

拡大生産者責任に基づくリサイクル関連法の効果として、現状、リサイクル率や資源回収率、また限定的ではあるが環境配慮設計への貢献という観点からの評価がほとんどである。そうした中で、本研究ではGHGの排出削減ポテンシャル、資源節約、雇用創出という観点からの評価を行うと同時に、日本以外の他のリサイクルシステムにも応用可能な評価手法を開発することが出来たと考える。

本研究で開発した持続可能性評価の枠組みを用いて、廃電気・電子機器の適正管理から得られる持続可能性に向けた便益を明らかにすることが出来る。その一方で、廃電気・電子機器の管理およびリ

サイクルの関係者が、廃棄物の処分、リサイクル品からの経済的利益という側面以外の便益について理解していることは稀有である。本研究では、廃電気・電子機器管理の持続可能性について包括的なLCAに基づいた分析手法の開発に一定の貢献を行うことが出来たと考える。データの入手可能性という課題はあるものの、本研究で開発した手法は、複雑なものではなく、どのような国や経済の状況においても応用可能であることから、新興国・発展途上国を含め、各国が持続可能な資源循環政策を策定する上で有用なものであり、政策的意義の高いものである。

OECDにおいて、現在、2001年に策定された拡大生産者責任に関するガイダンスマニュアルのアップデート作業が行われている。2014年6月に開催されたOECDのEPRに関するグローバルフォーラムでは、関係者からは、拡大生産者責任政策の多面的な便益を示すための評価手法やデータが不足しているとの指摘があった。そうした中で、日本の家電リサイクル法の効果として、上記のような効果を、日本からの事例分析として提出できたことは、本研究の政策意義を高める大きな成果だったと言えるだろう。