

3. 冷鉄源の有効利用による鉄鋼の循環システムの評価 -銅の蓄積と転炉の有効利用に関するモデル分析-

Evaluation of the Steel-Recycling-System with effective utilization of scrap iron
-Model analysis about Cu-accumulation and exploitation of steel converter-

向井 肇*・恒見 清孝*・盛岡 通*
Hajime MUKAI, Kiyotaka TSUNEMI, Tohru MORIOKA

ABSTRACT;Low-quality system damage material's reusability in the future, therefore, it is indispensable for construction of a recycle-oriented society to improve the quality level of recycling process. This paper suggests the scheme which evaluates recycling systems through the effect of steel-recycling-system in comparison of two alternative way which avoid accumulating Cu-contamination in recycled steel which deteriorates in quality. The model of steel industry's activity in construction based on the economic theory and the result of analysed steel-material-flow shows that anti-impurities-process reduce approximately as twice environmental burden as the traditional process.

Key Words ; Steel-Recycling-System, CGE-model, Copper Accumulation,

1. 研究の背景と目的

産業革命以降 20 世紀においては、採掘されたバージン資源を精製して高品位の製品を製造することによって社会が発展してきた。この現在の産業社会における地球環境への影響を小さくするためには循環型社会に変革していくことが緊急の課題であり、資源の採取、素材加工、製造から利用、消費、廃棄、再生、再資源化にいたる物質サイクルにおいて、産業間の連携による化石燃料や金属資源の高次の循環システムを形成して、反復可能で持続的な再資源化手法を実現し、資源使用量や埋立処分量を削減する必要がある。

しかし、都市部で排出される使用済み製品やスクラップを再使用して製品を製造する現行の循環システムには、バージン資源にはありえない不純物の混入の問題が避けられず、不純物の将来的な蓄積問題も懸念される。使用済み製品の解体処理の際にできるだけ分別する方が品質に良いことは当然であるが、実際にはコスト優位のある低次のリサイクル・システムがバージン資源の使用削減量ではある効果が認められるために選好される傾向があり、特に大規模設備によって大幅な産業システム改善が期待しにくい鉄鋼産業に顕著である。この課題の克服には将来世代の便益と直近の追加コストを一体的に評価する必要がある、それは利潤最大化行動を規定する経済理論を用いたモデルによって物質循環を描くことで可能になる。

そこで本研究では、鉄鋼需要の部分均衡モデルと鉄鋼生産から製品廃棄・鉄スクラップ回収までの鉄鋼マテリアルフローモデルからなる効用モデルを構築し、再資源化手法の質を含めて定量的に評価する。

2. 鉄スクラップ利用の流れと課題

2. 1. 生産と鉄スクラップ利用の現状

鉄鋼は主に高炉転炉一貫工法と電炉法によって生産される。高炉で生産された銑鉄と鉄スクラップを利用して転炉・電炉が粗鋼を生産し、それが加工され最終鋼材になる。2000 年度においては、銑鉄と鉄スクラップを転炉で約 7,700 万 t と約 680 万 t、電炉で約 150 万 t と約 3,100 万 t 利用して、転炉では主に高品質が要求される薄板等を約 7,600 万 t、電炉では主に建築等向けの棒鋼など約 3,000 万 t が生産されている。鉄スクラップは鉄鋼製品の加工工程で発生する自家発生スクラップと市中で発生する市中スクラップに、市中スクラップはさらに製造業の加工工程で発生する加工スクラップと廃棄物から発生する老廃スクラップのに分類される。老廃スクラップの統計は存在しないが、2000 年度の推算では、自家発生 1,263 万 t、老廃 3,475 万 t が発生し、その他構物用に 629 万 t、輸出向けに 308 万 t が利用されている。

*大阪大学院工学研究科環境工学専攻 Department of Environmental Engineering Graduate School of Engineering Osaka University

2. 2. 鉄スクラップ利用の課題と対策

(A) 鉄スクラップ利用の課題

鉄鋼製品中に銅や錫などの物質が混入すると品質が劣化し、製品加工時にひび割れなど問題が発生する。こうした物質はトランプエレメントと呼ばれ、鉄鋼製品を生産する際にはこうした物質の混入を防ぐ必要がある。しかし、低級なりサイクル手法を用いた場合、廃棄物中に多く含まれる、銅線などに由来する銅が鋼材中へ混入し、こうしたリサイクル手法を繰り返すことによって、不純物としての銅が鋼材中に蓄積するという問題がある。銅が蓄積した鋼材のスクラップから新規製品を生産する際は、銑鉄等を希釈材として用いる必要が生ずる。近年、スクラップ発生量が増加傾向にある中で、主なスクラップ利用主体である建築用途の電炉鋼製品への需要が減少し、需給バランスがくずれてスクラップ価格が急落、静脈産業の経営を圧迫するといった傾向が見られる。こうした状況で銅蓄積が継続すれば、スクラップは余りつつもバージン資源よる希釈が必要で、そのための輸入と資源採掘を行うといった、循環型社会構築を目指す上で非常に非効率な行動の選択を余儀なくされてしまう。

(B) 銅蓄積対策

上記のような事態を防ぐ手段には2通りのアプローチが考えられる。一つは鋼材中の銅を分離除去する方法である。しかし、国家プロジェクト研究¹⁾でもこの手法は現時点で実現困難な点が多いと報告している。同研究では電炉で溶解されてしまう前に混入した銅を分離する方法も現実的な手法として研究を進めている。そこで本研究でも、後者の混入の未然予防を現時点で採用すべき施策と設定し、分析にあたることとする。

3. 分析手法

前章を受けて、本研究では混入の予防による効果を定量評価することで、再資源化手法の差異による環境負荷削減効果の違いの評価とそれを構築することを通して、循環型社会の高次化に資することを目的とする。そのためには、物質循環の将来予測を行い、さらには将来、再資源化の影響が顕在化した際の、各主体の行動の変化を描き出す必要がある。それは現在の鉄スクラップ利用率等を一定とせず、費用最小化などの生産者にとっての根本原則に即することで表現可能となる。そこで本研究では、基礎的な経済学の費用最小化行動理論を用いることで、鉄スクラップ発生量と銅蓄積濃度が増大する状況下

における国内鉄スクラップ循環関連主体の行動をモデル上でシミュレーションする。さらにこうしたモデルの背景として、鋼材需要量と鉄スクラップが発生量を産出するために、鉄鋼マテリアルフローを描写するモデルも併せて構築する。

本研究では、鉄鋼業の原料費用最小化行動を、Armingtonの合成財の概念を用いてCES型生産関数に従うものと仮定する。今回の分析は鉄スクラップの大量発生と銅蓄積という状況下での、鉄鋼業の費用最小化行動を部分均衡モデルで表現し、鉄鋼需要と鉄スクラップ発生量については別途独立したマテリアルフローモデルを構築、それぞれの結果を外生変数として受けて解答を導き相手に返す構造とした。

(A) 鉄鋼マテリアルフロー描写モデル

各シナリオで決定される産業活動量を起点として、各年度における製品部門別品種別鉄スクラップ排出量と製鋼法別の鉄源需要量が算出される。

(B) 鉄鋼業費用最小化モデル

マテリアルフローの結果を受けて、転炉電炉そして海外需要という3セクターによる、銑鉄と鉄スクラップの需要をそれぞれの費用最小化行動の原則に基づき決定する部分均衡モデルである。ここで求まる配合によって各鋼材の銅濃度が決定され、それが(A)のマテリアルフローに反映される。

4. 鉄鋼マテリアルフロー

4. 1. 分析の概要

鉄鋼製品の生産から廃棄、鉄スクラップの再利用に至るマテリアルフローを整理し、鉄鋼の需給とスクラップ発生の構造を描写する。また、そこから2001年度以降を予測するモデルを構築するためのパラメータ設定を行う。なお、鉄鋼循環の算出には、製品廃棄に関する考え方など日本鉄源協会等の各種既存調査²³⁾を参考とした。

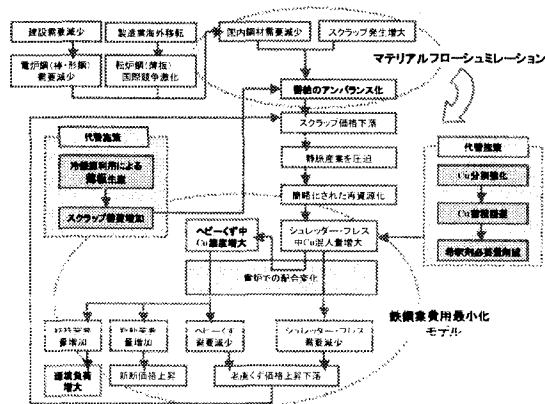


図1 銅蓄積問題と研究の全体像

4. 2. 各項目の算出法

(A) 生産－輸出－輸入

国内生産から輸出分を差し引き、輸入分を加えることで、ある年度における国内での鉄鋼製品利用量が算出される。また、普通鋼圧延鋼材の製鋼法別生産高は、事業所別生産高から製鋼法別シェアを求め、生産高をかけて導く。

(B) 産業別利用

生産された鋼材の行き先の内訳を鉄鋼連盟による「最終需要推計」をかけあわせることで算出する。こうして各年度における以下の産業毎の鉄鋼製品利用量が算出される。

(C) 自家発生スクラップと加工スクラップ

自家発生スクラップは、粗鋼と最終鋼の生産量の統計値差分をとり、原料投入量と粗鋼生産量の差は、スラグ等に混じって鉄循環系から流出するものと扱った。加工スクラップは各産業へのアンケート結果である既存研究⁴⁾の値を引用した。また、2001 年度以降も同じ比率で発生するものとする。

(D) 国内流出入

鉄鋼資源のマテリアルフローを描くには、把握する必要がある。産業連関表の逆行列係数表を用いて、国内産業が生産した各種製品に含有しながら輸出される鉄鋼の量を算出した。

(E) 廃棄と鉄スクラップ回収

鉄鋼を含有する各種製品の廃棄量は、生産年数から平均耐用年数後を中心とした正規分布に沿って数年かけて全量が廃棄されるものと仮定した。ただし、この方法の場合、本来経済活動による廃棄量の増減に対応していないため現実との乖離が起こりうる。そこで、より正確な値をストック方式と呼ばれる、前年末ストックに当年の新規増加分を加えた値から、当年末のストックを差し引いた分を当年の廃棄量として算出する方法を用いる。今回は、ストックデータの整っている建設・自動車部門についてはこの方法を、その他の財については耐用年数を用いる方法を用いた。

(F) 今後の鉄鋼生産

2001 年以降における鉄鋼生産量については、各産業が必要とする鋼材の構成比は 2000 年度の値が継続するものと仮定して、2000 年の国内各産業による需要を 1 とし、次章のシナリオ設計で詳述する国内産業動向をパラメータとして与える。

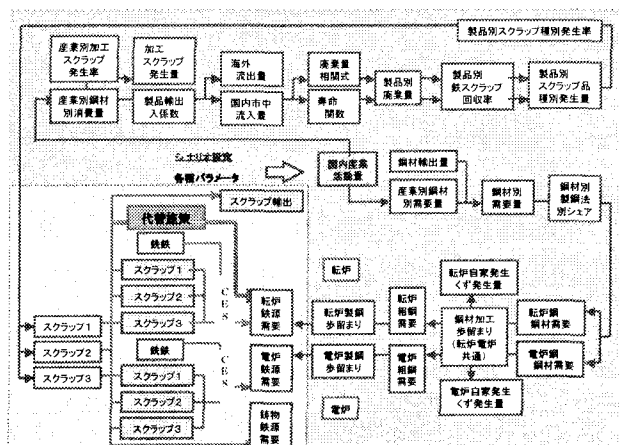


図2 モデル全体像とマテリアルフロー算出の流れ(3)

4. 3. モデルによる算出値

前節の算出条件の元に、現在のままの鉄鋼生産-消費の構造が継続するとした場合の鉄スクラップの発生予測を行うと図3のような結果となる。スクラップ発生の内訳を見ると、スクラップ発生量への寄与率の高い建築部門の着工需要変動が大きな影響を与えている。次に続くのは自動車、各種機械類で、これらの部門は銅線を多用いることから、鋼材中への銅蓄積の主要因となるものである。また、モデルによる算出値と実績値を比較した結果、図4のような傾向が見られた。これより、多少の誤差は見られるものの、概ね現実を反映していると言える。

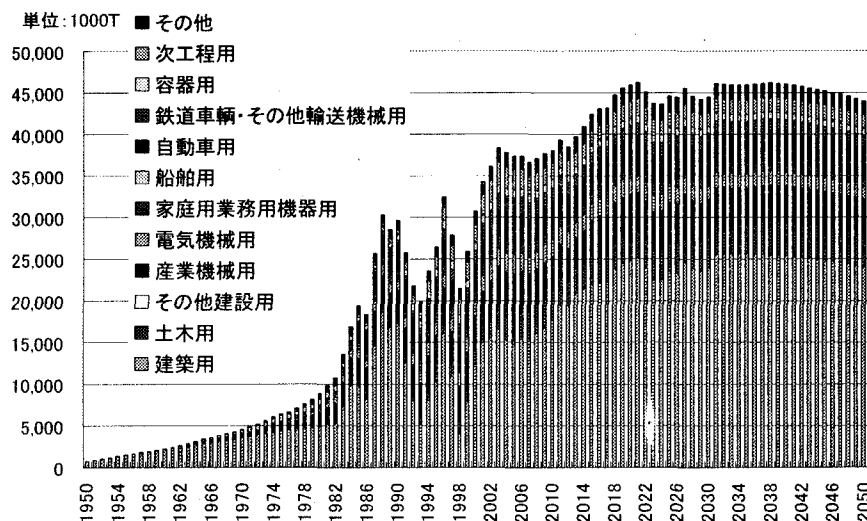


図3 老廃スクラップ発生量

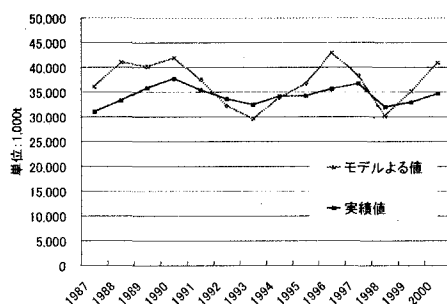


図4 モデル値と実績値

5. 鉄鋼業費用最小化モデル

5. 1. 分析の流れ

鉄鋼業を高炉業と電炉業の2者として代表させ、前節の鉄鋼マテリアルフローモデルの元で、それぞれの費用最小化行動を描き出すことで、鉄鋼循環の将来予測モデルを構築し、現時点での銅混入対策の将来における効果を分析する。

また、施策の評価にあたって、結果に大きな影響を与える事業環境の背景要因を、複数のシナリオとして設定して、それぞれの場合の結果を提示することで、モデルでは外生と扱われる不可抗力の要素変化に対しての、代替案の柔軟性検討と代替案の各将来における意義についても検討する。

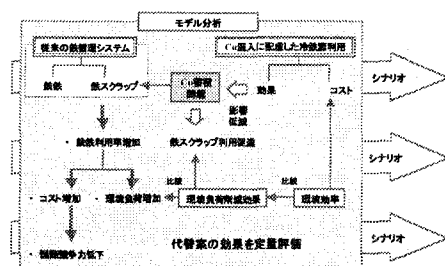


図5 鉄鋼業行動分析の枠組み

5. 2. シナリオ設定

将来シナリオに反映させるための推計を行う。今回はシナリオの要素として、鉄鋼業の海外移転を中心にとらえた国内産業動向、環境負荷内部化政策を取り上げ、その値の組み合わせでもって複数のシナリオを構築するものとする。

(A) 国内産業動向

近年の製造業の海外移転は、国内鉄鋼需要や加工スクラップ発生量に大きな影響を与える。そこで本研究では、現状のトレンドにロジスティック曲線をあてはめ、製造業の海外移転とそれらへの国内鉄鋼業による供給を合成した要素について、その予測値が現実化する場合、半分にとどまる場合、現状の需要が維持される場合の3ケースを設定することとする。

(B) 環境負荷内部化政策

環境負荷の内部化政策には様々な手法があるが、今回はCO2発生量に応じた直接課税を想定する。課税率については、既存研究⁶⁾を参考に極めて高い税率と課税なしという両極端を設定することで、まずは大きな傾向を把握することを念頭におき、15,000、3,000、0円/t-Cの3ケースを想定して分析を行う。

5. 3. 鉄鋼業費用最小化モデル

(A) モデルの全体像

全体として、スクラップ発生量と濃度に応じて転炉・電炉が各自の費用最小化行動を行い、その結果としてスクラップ価格やスクラップ輸出量が決定されるという構造を描く。各シナリオ下で後述の代替案施行による銅濃度や環境負荷削減量を算出し、代替案の有効性を分析する。

また、今回とりあげた問題の背景であるスクラップ中への銅混入を扱うには、その経路を明確に定義しておく必要がある。具体的には、銅が混入するのは老廃くずの中でもAプレスやシュレッダー、繰り返し利用により銅が蓄積してゆくのは主にヘビーくず他の老廃くずと呼ばれるものであることから、スクラップの種類別のように分類してモデル上では別の財として取り扱うことで、より正確なモデルの構築に取り組む。

- ・スクラップ1：加工くず・スクラップ2：H2以上のヘビー屑、Cプレス
- ・スクラップ3：その他Aプレス、各種シュレッダー等

また、各製品種別の廃棄物からのスクラップ種別の発生量は、鉄スクラップ規格⁶⁾を参考に、鋼材種別にスクラップ種が決定されるものとした。

(B) 各項目の定式化

(1) 製鋼法別鉄源需要量

各シナリオの国内産業活動量に2000年度の生産実績と鋼材別需要係数と鋼材別転炉電炉シェアをかけて製鋼法別鉄源需要量が求められる。シェアは、鉄鋼業界の実態から2000年度値が継続するものと仮定する。

(2) 鉄鋼生産者

転炉・電炉の鉄鉄-鉄スクラップ原料選択行動を、CES型生産関数に従うと仮定して定式化する。

(3) 鉄スクラップ輸出

輸出に関しては需要関数さえ把握できれば、その後の流れを追うことは必要ない。そこで今回は輸出に関する行動を簡略化し、ドル建て価格と輸出量から算出した需要関数に基づき海外への輸出量が決定されると仮定した。

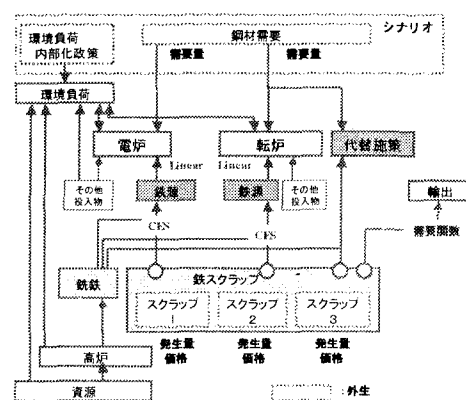


図6 鉄鋼業費用最小化モデル全体像

5. 4. 評価の枠組み

(A) 評価項目

LCA などにも用いられる、再生資源による代替品の生産に要する環境負荷を、環境負荷削減分とみなす方法は、再資源化の質を表現しきれないという点もある。例えば、今回扱う鉄鋼製品を例にとると、銅の混入を抑える場合、これまで論じてきた蓄積による希釈材としての鉄鉄の必要量は少なくてすむ。こうした効果を考慮しない場、単純に鉄鉄、つまり鉄鉱石を同量削減したものとして、不純物への配慮はカウントされない。

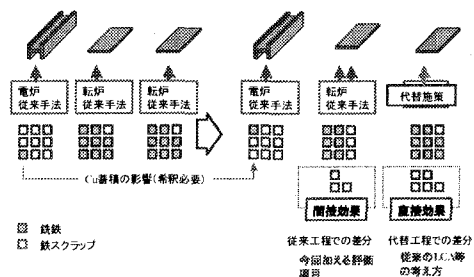


図7 直接効果と間接効果

そこで本研究では、冷鉄源利用による薄板生産が直接バージン資源を代替する「直接効果」と不純物蓄積回避等の効果によって可能となる冷鉄源利用生産分以外での、バージン資源の使用量削減量を指す「間接効果」といった概念で、再資源化手法の質の違いを表現する。前者の場合は直接当該年度にあらわれるが、後者分は、銅の蓄積回避による長期的効果、および鉄スクラップ需要増加による需給均衡の変化の影響などを含んだ複雑な要因の結びつきの上で長期的に顕れる。なお、実際の電炉では希釈材としては還元鉄などを用いるなどの方法もあり鉄鉄とは限らないが、本研究では銅濃度を薄めるために、必要とするバージン資源はすべて鉄鉄換算する。

(B) 代替案設計

鉄スクラップという都市に埋蔵する冷鉄源を、シュレッダー中に混入する銅などのトランプエレメントについて、分別を強化することによって、従来鉄鉄中心でしか生産してこなかった薄板を生産することを代替案として設定する。

(C) 環境負荷原単位 (LC-002)

本来、鉄鋼生産システムの環境側面を評価には、汚泥や大気汚染物質等の環境負荷の他、プラスチックの高炉原料化等の取り組みをも含めるべきであるが、今回は将来の鉄鋼生産・鉄源利用のあり方を問う端緒として、鉄鋼業に係わる環境負荷の中で最大のものである二酸化炭素を環境指標の代表として取り上げる。

今回対象とする鉄鋼原料の生産に伴うCO₂排出量は従来手法については既存研究⁴⁾のCO₂発生原単位を、代替案については共同研究企業から提供された原料使用量を用い、従来手法での考え方をあてはめ、同資料の原単位を用いて算出した。また、鉄スクラップについてはスクラップ加工工程の動力費⁸⁾と上記資料の原単位から算出した値を用いた。その結果を図8に示す。

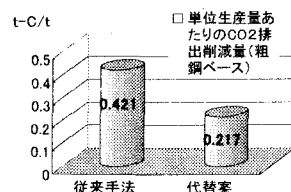


図8 従来手法と代替案のLC-002

5. 5. 分析結果

モデルによるシミュレーション結果を示す。銅濃度については、代替施策の施行によるスクラップ配合も変化が鋼材中の銅濃度に影響するため、スクラップ中の銅濃度ではなく、より直接的に許容濃度に関係する鋼材中の銅濃度に焦点をあてる。また、シナリオごとに、銅分別強化を通したスクラップ溶解プロセスが、転炉鋼需要に占める割合を10%、20%、30%と設定し、0%の時と比較して、どれほどの直接・間接効果があるかを定量評価した。ここではシナリオA-10%のケースを代表して掲載しておく。

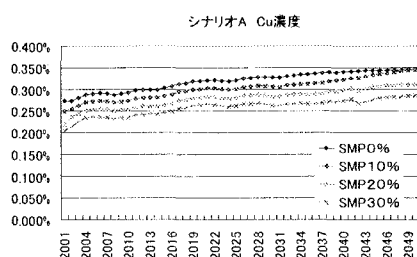


図9 電炉高銅濃度の推移

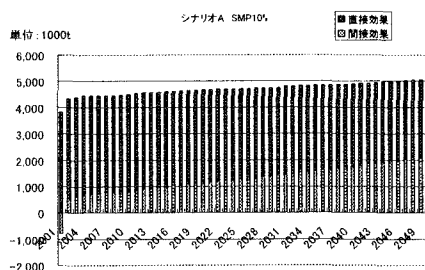


図10 シナリオA スクラップ溶解プロセス10%鉄鉄消費削減量

スクラップ溶解プロセスの対象となる薄板生産も、多くのシナリオでは減少傾向にあるにも関わらず、全体のCO₂削減効果は増加している。これは、図10からもわかる通り、間接効果が年々伸びているからで、銅対策が将来的に便益をもたらす様子が見て取れる。このように、どのシナリオでも銅分別の強化した上での冷鉄源利用による転炉鋼生産は、環境負荷削減効果を持つことがわかった。また、直接効果と間接効果はそれぞれは顕在化する際に時差が生ずることから、2001年～2050年の間の効果を総計しスクラップ溶解プロセスによる生産1tあたりに換算したCO₂排出削減効果は、前章で示したCO₂排出削減原単位をかけあわせてそれぞれのシナリオにおける結果を一覧すると図11のようになる。

ここから以下のような事柄が読み取れる。

- (1) 産業構造変化が大きいほど、代替施策の単位あたり効果は大きい
- (2) 炭素税高いほど単位あたり効果は微量ながら大きい
- (3) 炭素税の高低より需要の増減のほうが影響が大きい
- (4) スクラップ溶解プロセス比率増加に対して単位あたり効果は逓減する。

さらに、こうした手法に関して、コスト面での現実性の試算を行った。シナリオ A において、スクラップ溶解プロセスを薄板需要の 10% 導入した際に得られる CO₂ 排出削減効果は 1,456, 千 t-C で、スクラップ溶解プロセス単位生産量あたりでは 0.247t-C/t となる。一方で、従来手法と比較した場合の当手法の追加コストは未だ確定しきれない精密なシュレディンクの追加費用を α 円/t、スクラップ溶解プロセス炉での費用を転炉と同程度、と仮定した場合には $9,717 + \alpha$ 円/t-C となる。EU では、排出削減義務を遵守できなかった場合、1 約 12, 000 円/t-C あるいは、排出権市場価格の 2 倍の高いほうの罰則金、つまり最低 12,000 円/t-C を支払うこととされているから、当手法は CO₂ 排出削減義務を遵守するための手法としても、概ねコストに見合うものと考えることができる。

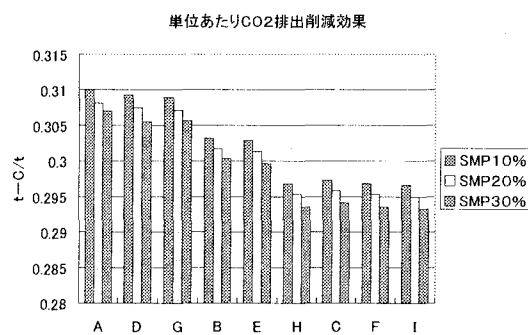


図 11 各シナリオでの代替施策による CO₂ 排出削減効果

6. まとめ

6. 1. 結論

前章の分析結果事柄より、今回取り上げた代替施策については次のようなことが言える。

第一に、鉄鋼業をとりまくどの事業環境においても、当施策が環境負荷削減施策として有為性のあるものである。

第二に、今回の分析では、直接的に規制する環境税のような手法よりも、新技術の投入とその効果的なマネジメントにより大きな効果を挙げることが確認された。今後の環境政策運用にあたってはこれら双方の手法の連携を念頭におき、今回のようにモデル等によってその効果の定量評価を行った上で、より効率的な施策実施にあたるべきである。

第三に、国内鉄鋼業への需要が少ないケースほど、鋼材中の銅濃度は高く、また、CO₂ 排出削減効果に関しても当施策実施の効果は大きいことがわかった。つまり、鉄鋼業の競争力が危機に瀕した時こそこういった手法の有用性が高まり、また、今後の環境負荷に配慮した企業のあり方が求められる中で、こうした施策を行うことによる競争力強化によって、鉄鋼需要を増大し、さらにそれが銅蓄積を回避してそれがもたらす悪影響を抑制することに繋がる。

以上のように、本文積の対象とした、銅混入に配慮した冷鉄源利用による薄板生産によって、循環型社会構築に貢献するとともに、その状況下での競争力強化にも貢献しうることが確認された。

このように、経済理論を用いたことによって、線形的な計量モデルと違い、将来影響があらわれた後の各主体の行動を表現することで、従来、定量的に評価されてこなかった再資源化手法の質の違いによる、将来世代における環境負荷削減効果の差を表現することができた。また、今回は対象として鉄鋼を取り扱ったが、本モデルの考え方は他の資源にも応用できるものであり、今後の拡張により循環型社会の構築に資することができる。

6. 2. 今後の課題

今回の研究では、スクラップの種類別の取引量と価格などについてのデータを揃えられず、仮想的に扱うにとどまった項目があった。今後はこうしたデータ収集を行った上で、さらに制度の高い分析を行うことが求められる。その上で様々な資源について同様の分析を行い、さらにそれらを統合してゆくことで、より現実に即したモデルの構築が可能になる。

参考文献

¹財団法人金属系材料研究開発センター The Japan Research and Development Center for Metals JRCMNEWS 第 168 号 2000

²経済産業省 鉄鋼統計年報 (各年版)

³林誠一 日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学会フォーラム資料「鉄鋼業と循環型社会の動態」 2003

⁴鉄鋼新聞社 鉄鋼年鑑 (各年版)

⁵環境省 温暖化対策の経済性評価

⁶日本鉄源協会 HP <http://www.tetsugen.go.jp/> 2003.05.02

⁷南斎規介, 森口祐一, 野達 国立環境研究所地球環境研究センター 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID) 2002

⁸日刊市況通信社 スクラップマンスリー(各月版)