

課題名 1RF-1301 日本およびアジアの鉄鋼産業の中長期的な低炭素化実現へ向けた研究

課題代表者名 倉持 壮（公益財団法人地球環境戦略研究機関 気候変動とエネルギー領域主任研究員）

研究実施期間 平成25～26年度

累計予算額 15,330千円（うち26年度8,068千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード CO₂、温暖化対策、費用対効果、鉄鋼、スクラップ、プロセス分析

研究体制

サブテーマはない。

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

国際社会では、産業革命以降の地球温暖化を2°C以下に抑制する観点からの大幅な温室効果ガス(GHG)排出削減の必要性が認識されている(2°C目標)。地球温暖化を66%以上の確率で2°C以下に抑えるための残りのCO₂排出許容量は、現在の排出レベルが続けば約25年で超えてしまうため、早急かつ大胆な対策が求められている。

国際気候変動対策では、各国は2015年のできるだけ早い時期に、中期将来(2025-2030年)の排出削減目標案を提出する必要がある。福島原発事故を受け、原子力推進による温暖化対策が見込めない中、日本が今後一層の温暖化対策を進めるには、世界最高レベルのエネルギー効率を誇る鉄鋼部門からも更なるCO₂排出削減が求められる可能性がある。2020年以降の国内鉄鋼部門からのGHG排出削減については、2012年の「革新的エネルギー・環境戦略」策定の際などに議論されており、利用可能な最良の技術(BAT: Best Available Technology)の導入による省エネの他、将来の粗鋼生産量想定と粗鋼生産に占める電炉鋼の割合(「電炉鋼シェア」)の拡大の2項目について議論がなされた。

しかし、これらが議論された際には、2030年に向けて世界の鉄鋼業がどう展開・発展していくかという視点は十分に反映されていなかった。世界の鉄鋼業は中国やインド等の途上国を中心に常にダイナミックに動いている。同時に、世界の鉄鋼蓄積量は着実に増えており、2030年に向けては鉄スクラップ発生量が急増する見通しであり、鉄源の大規模なシフトも想定される。さらに、日本が高級鋼材に特化しているように国際的な分業化が進む一方、一部の国々での排出量取引制度の本格導入によるCO₂排出削減の動きもある。このような状況において、国内の鉄鋼部門における必要な温暖化対策は将来の生産活動レベルやマーケティング戦略次第で大きく変わらう。

2. 研究開発目的

本課題では、国内鉄鋼部門の2030年CO₂排出削減ポテンシャル分析および海外における政策事例の分析を行い、世界の鉄鋼業の今後の動向を踏まえて、日本およびアジアの鉄鋼部門の中長期将来(2030年以降)における低炭素化実現へ向けた政策提言を行うことを目的とした。国内CO₂排出削減ポテンシャル分析においては、製鉄技術に関する最新の知見を踏まえるだけでなく、日本の鉄鋼生産量の将来見通しに関する不確実性など、世界の鉄鋼業のダイナミックな国際動向と様々な制約要因を考慮しつつ、CO₂排出削減ポテンシャルを定量的に評価した。

本研究は3つのコンポーネントにより構成され、2年計画で実施した。

1. 国際動向および資源・技術制約等の要因とそれらの不確実性を考慮した、日本を中心としたアジアの鉄鋼部門におけるエネルギー・CO₂排出削減ポテンシャルのボトムアップ計算モデル分析
2. 海外における鉄鋼部門の省エネ・低炭素化・リサイクル政策の事例分析およびセクター別アプローチを含む国際的な省エネ・低炭素化の最新動向分析
3. 上記コンポーネント1、2の結果を基にした、日本の鉄鋼部門の省エネ・低炭素化を実現するための具体的な政策提言、及び国内対策で培った技術の途上国支援や海外展開に活用するための提言

この研究の意義は、鉄鋼部門における将来のCO₂排出削減の可能性について、不確実性に注目して定量的な学術研究を行うだけでなく、その成果を国際的な産業の動向も考慮して具体的な政策提言につなげる点である。ダイナミックに動く世界の鉄鋼市場の一プレイヤーとしての日本の鉄鋼部門の将来を既存の理論に基づき将来を予測することは難しく、将来の排出削減策を議論するには様々な要因の横断的比較・分析に基づく、大きな不確実性を考慮した幅広い検討が特に重要になる。本研究は、政策担当者を含む幅広いステークホルダーが議論するための共通のナレッジ・プラットフォームを構築する。

3. 研究開発の方法

3.1 国内鉄鋼部門におけるエネルギー・CO₂排出削減の技術・経済ポテンシャル分析

本課題では、国内鉄鋼部門におけるCO₂排出削減ポテンシャルについて2通りのボトムアップ計算モデル分析を行った。分析Aでは、2030年における粗鋼生産量想定を120 Mtとし、2010年時点での操業条件を前提とした設備能力設定の下における、CO₂排出削減の技術・経済的ポテンシャルを算出した。経済的ポテンシャルの評価においては、各CO₂排出削減策の限界削減費用を算出した。分析Bでは2030年における粗鋼生産量が不確実性を持つ中で、最低限必要な設備能力設定の下、操業可能な条件におけるCO₂排出量を算出した。両分析

において、粗鋼生産に占める電炉鋼の割合(「電炉鋼シェア」)は2030年まで2010年レベルにとどまるという想定で分析を実施した。なお、CO₂回収・貯留(CCS)については、2030年時点での商用化の見通しが不確実なため、両分析において検討していない。

3.2 海外における鉄鋼部門の低炭素化政策の事例調査研究

本コンポーネントでは、日本同様に先進国でありながら転炉鋼生産量が大きく、気候変動対策分野でも世界をリードしている欧州連合(EU)や、日本の主要競争国である中国および韓国における、鉄鋼部門の低炭素化に関する政策や鉄スクラップのリサイクル政策の最新動向について、ヒアリングを含む調査研究を行った。上記3カ国・地域について、主に次の3つの項目に関するヒアリングを含めた調査研究を実施した(1)排出量取引制度(ETS)や炭素税など、炭素価格付け政策の現状と今後の展開、(2)鉄スクラップ回収および利用の拡大へ向けた方策、(3)革新的製鉄技術の研究・開発。その上で、分析・評価した諸政策について、日本へのインプリケーションと日本における適用可能性についても検討した。

3.3 鉄鋼部門の低炭素化へ向けたインセンティブ付け施策の評価

鉄鋼部門におけるインセンティブ付け施策について、温暖化対策政策の産業競争力への影響と炭素リーケージについて包括的なレビューを行ったZhang(2012)にて引用されている文献や、多国間政策協調について分析したその他の文献について、(1)炭素リーケージ率の規模、(2)インセンティブ付け政策の一国実施と多国間共同実施による国内鉄鋼部門への影響の差、(3)炭素リーケージ対策の効果、を中心に論点整理を行った。

4. 結果及び考察 ※4.のうち、結果についてはサブテーマごとに記載すること。

4.1 国内鉄鋼部門からのCO₂排出に関する削減ポテンシャル分析

4.1.1 分析A

国内鉄鋼部門の2030年における総CO₂排出量と各種対策による排出削減量を図1に示す。REFシナリオとBATシナリオでは2030年のCO₂排出量はそれぞれ基準年比1400万トンと1000万トン増加している。しかし、廃プラスチック利用およびPCIを拡大するとそれぞれ約400万トンと約300万トンの追加的CO₂排出削減につながる。さらに、転炉でのスクラップ利用拡大により約900万トンの追加的CO₂排出削減が可能であることが示された。本分析では、粗鋼生産量が2030年まで1億2000万トン/年という高いレベルで推移する場合、電炉鋼シェア拡大やCCSに依存することなくCO₂排出量を基準年レベル以下に低減させるには、転炉でのスクラップ利用の拡大が必要なが示唆された。また、本分析で想定した2030年の老廃スクラップ回収量の下では、転炉のスクラップ配合比を最大化するだけで、電炉鋼シェアを拡大せずとも回収老廃スクラップのほぼ全量を国内で消費することができるが示された。

なお、日本鉄鋼連盟の「対炭素社会実行計画フェーズII」(日本鉄鋼連盟 2014)では、CCSを除いた場合、2030年にベースライン比でCO₂排出量を640万トン削減するとしている。本分析はBAT導入およびコークス代替還元材利用最大化だけでも、日本鉄鋼連盟の見積もりを大きく上回る1100万トンの削減が可能であることを示した。

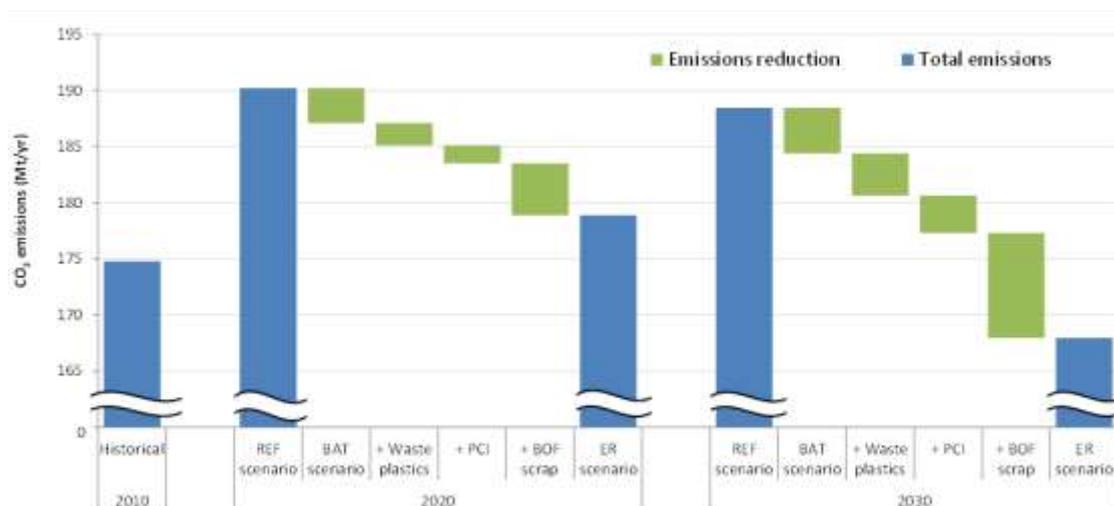


図 1: 国内鉄鋼部門からの2030年におけるCO₂排出量

ERシナリオについて2030年における対BATシナリオ比での追加的CO₂排出削減に係る費用を図 2に示す。高炉へのPCI拡大と転炉でのスクラップ配合率拡大の2つの追加的対策について、PCI拡大は300万トン以上のCO₂排出削減をマイナスのコストで実現できることが示唆された。この結果はRibbenhed et al. (2008)などの先行研究の結果と一致しており、近年高炉メーカーがPCI関連の設備能力を強化していることの説明がつく。

一方、転炉でのスクラップ配合率拡大によるCO₂排出削減費用は1トン当たり約US\$110(約9,700円)という結果を得た。この結果はスウェーデンの一貫製鉄プロセスにおけるスクラップ利用拡大に関する先行研究の結果(\$38/t-CO₂)(Wang et al. 2009)よりは高くなっているが、その理由として各種前提条件の違いや、我が国の一貫製鉄プロセスのエネルギー効率が非常に良いために銑鉄の代替による省エネ効果が小さいことが挙げられる。また、この結果は「エネ環」策定にあたり4つのモデルにより算出された(NPU 2012)、GHG排出量を2030年に1990年比20-25%削減させる場合の限界削減費用のレンジ(5886-56183円/t-CO₂:原子力の割合0-20%)と比べても、十分検討するに値するレベルであるといえる。

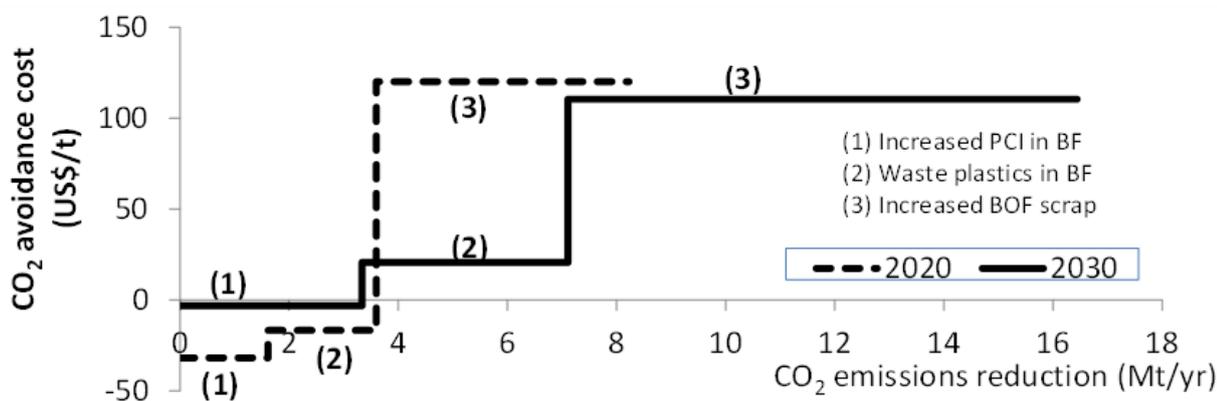


図 2: 2030年におけるERシナリオの追加的CO₂排出削減に係る費用(対BATシナリオ比)

転炉でのスクラップ利用拡大による転炉鋼中の平均銅濃度の変化を図 3に示す。高級鋼材とされる製品の中で最も基準が厳しい製品では銅混入率を0.06質量%以下に抑える必要があるが(Takeuchi 2009)、本分析では老廃スクラップが転炉で多く消費される場合でもそのレベルには達しないことが示唆された。

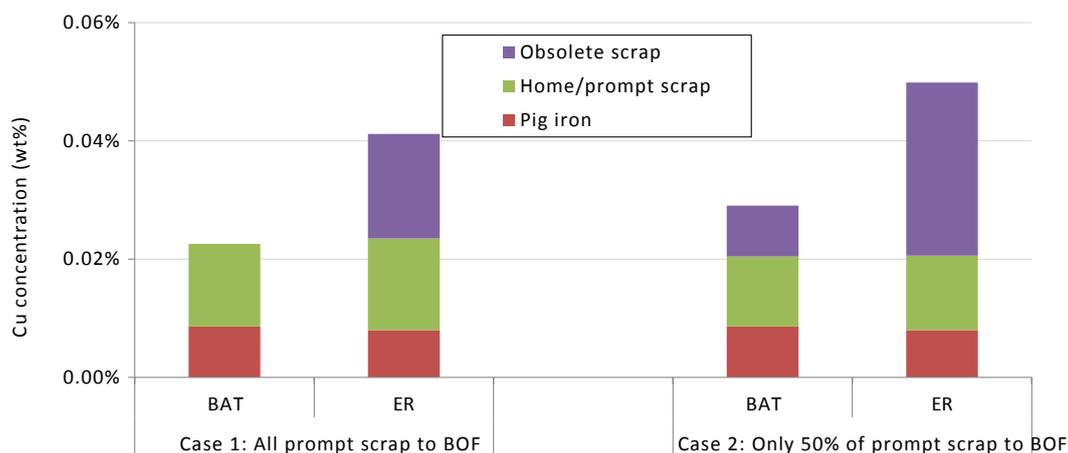


図 3: 転炉スクラップ利用拡大による転炉鋼中の銅濃度(混入源別)の変化

4.1.2 分析B

2030年時点での最低限必要な高炉およびコークス炉能力の試算に関して、高炉については、2010年の90 Mt/年から1割弱減の82.9 Mt/年と算出された。一方、コークス炉については2010年の44 Mt/年(鉄鋼業消費分相当)から約3割減の29.1Mt/年と算出された。コークス炉設備能力の減少幅が大きいことについては主に2つの

理由が考えられる。一つは現状でコークス炉の設備利用率が70-80%程度で推移しているなど、設備能力が余剰になっていることが挙げられる。二つ目は、コークス消費の削減は代替還元材の利用拡大のみならず、転炉スクラップ利用の拡大によっても実現可能であるなど、削減の余地が大きいことである。

必要最低限の高炉およびコークス炉の設備能力の下での操業可能性を考慮した、各シナリオの主要結果を表 1に示す。粗鋼生産量が120 Mt/年と高レベルで推移する場合、設備能力の制約から、転炉でのスクラップ利用の拡大やコークス代替還元材の利用拡大は、CO₂排出削減に関係なく最大化させる必要があることが明らかになった。一方、粗鋼生産量が90 Mt/年まで低下する場合、最低限の設備利用率(本分析では85%に設定)を維持するために転炉でのスクラップ利用を最小に抑える必要があると同時に、コークス不足とならないようコークス代替還元材の利用は最大化させる必要があることが明らかになった。その結果、2030年に想定しうるCO₂排出量は2010年比でマイナス4-21%であることが明らかになった。なお、粗鋼生産量が105 Mtの場合のCO₂排出量は、2010年比でマイナス11-16%となると算出された。同時に、粗鋼生産量が90 Mt/年レベルまで低下する場合、電炉鋼シェアを上げない限り国内スクラップ余剰が17.4 Mt/年まで増加する可能性が示唆された。

表 1: 必要最低限の高炉およびコークス炉の設備能力の下での各シナリオの主要結果

粗鋼生産量/シナリオ	120 Mt	105 Mt		90 Mt	
	ER	High Emission scenario	Low Emission scenario	High Emission scenario	Low Emission scenario
転炉スクラップ投入 (t/t-粗鋼)	0.221	0.155	0.221	0.104	0.104
PCI (t/t-銑鉄)	0.200	0.174	0.200	0.140	0.196
コークス炉設備利用率	100%	100%	87.1%	100%	85%
高炉設備利用率	100%	94.1%	87.7%	85%	85%
一次エネルギー原単位 (GJ/t-粗鋼)	18.7	19.5	18.7	20.2	19.9
CO ₂ 排出量 (Mt)	168	156	147	143	138
CO ₂ 排出量 (2010年比)	-4%	-11%	-16%	-18%	-21%
CO ₂ 排出原単位 (t/t-粗鋼)	1.67	1.78	1.67	1.91	1.84
国内スクラップ余剰 (Mt)	0.4	10.1	4.8	17.4	17.4

要設備の寿命パラメータ設定がCO₂排出削減量と2030年までに必要な設備導入量にどのような影響を与えるかについて、感度分析を行った。設備寿命を5年(コークス炉は10年)延長させた場合の、2010年から2030年間に必要な設備導入量(新設・更新)の変化を図 4に示す。寿命延長により2030年までに必要な設備導入量が、高炉については72 Mt/年から46 Mt/年に、コークス炉については26 Mt/年から4 Mt/年に、それぞれ減少することが明らかになった。

一方、主要設備の寿命延長によるCO₂排出削減量の減少は、いずれのシナリオにおいても1 Mt-CO₂/年以下にとどまることも明らかになった。この理由としては主に2つが考えられる。1つ目は、省エネの大きい発電設備の大半の更新時期が2025年以前に集中しているため、5年の寿命延長を実施しても2030年の結果にほとんど影響しないことである。2つ目は、他の主要設備においては設備更新による省エネ効果がもともと小さく、寿命延長による影響が限定的なことである。

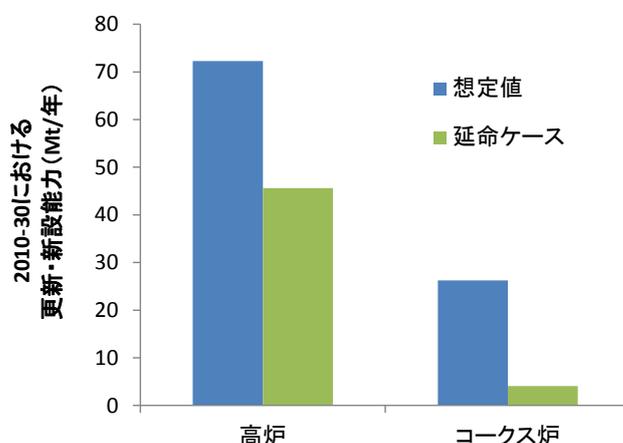


図 4: 高炉およびコークス炉の設備寿命を既定値よりそれぞれ5年と10年延命させた場合の、2010年から2030年間に必要な設備導入量(新設・更新)の変化

4.2 欧州およびアジアの鉄鋼業における、低炭素化へ向けた政策事例研究

- ETS や炭素税については、中国や韓国などのライバル鉄鋼生産国でも本格導入の流れができてきた。これら炭素価格付け政策が直ちに両国の鉄鋼部門に影響を及ぼす可能性は低いが、これまで省エネ技術普及でリードしてきた国内高炉メーカーも低炭素化の国際ルール作りでは主導権を握られる可能性がある。EU ETS からは、本来推進されるべき電炉メーカーが高炉メーカーより経済影響を受けたことが明らかになっており、日本で炭素価格付けが実施される際は十分留意せねばならない。
- 低炭素製鉄技術開発においては、日本は比較的規模の大きい CCS 技術開発支援を継続しており、できるだけ早い時期の実用化に向けて今後一層の支援拡大が求められる。一方、韓国はスクラップ配合率 50% 以上が可能な転炉技術を開発していることは注目に値する。日本も JFE スチールなどが 2030 年 30% 配合を目指して技術開発を行っているが、今後の東アジアでの鉄スクラップ供給の急増を考えると技術開発をより強化すべき分野であるといえる。
- 2030 年に向けては東アジアで鉄スクラップ回収が急増し、日本・中国・韓国がいずれもスクラップ(大)輸出国となる可能性が示唆される。地域的なスクラップの需給ミスマッチを回避するためにも、東アジア諸国はできる限り地域内で鉄スクラップ消費を拡大するよう政策協調すべきであり、同時に東アジアの余剰スクラップが確実に需要地に届けられるよう、遠隔地への輸出インフラ整備でも協調していく必要が出てくるかもしれない。
- EU、韓国ではスクラップ回収および利用拡大を目的とした政策は特に実施していない。一方、中国では大規模な政策展開を行っているのは中国であり、老廃スクラップ回収率にもまだ改善の余地があるとみられることから、今後日本による技術やインフラ面での協力が期待される。

4.3 鉄鋼部門の低炭素化に向けたインセンティブ付け施策の評価

炭素価格付けによる産業への影響分析の文献レビューを実施した Zhang (2012) によると、リーケージの影響については、一般均衡モデルと鉄鋼部門に特化した部分均衡モデルの間で結果が異なることが示唆されている。具体的には、一般均衡モデルを用いた場合、経済全体での炭素リーケージ率はパラメータ設定によっては 100% を超える(世界全体での総排出量が増加する)結果もみられたものの、全体的には鉄鋼部門に特化した部分均衡モデルにおけるリーケージ率の結果より低かった。その一方で、部分均衡モデル分析においても 100% 以上の炭素リーケージ率を報告する文献はなかった。

鉄鋼部門に特化した分析における炭素リーケージ率については、10-25\$/tCO₂と比較的低いレベルでも 35-45% の高いリーケージ率が報告されており、100\$/tCO₂ を超える場合は 70% 以上に達する可能性が示唆されている。低炭素化のインセンティブ付け政策を一国で実施した場合と先進国が協調して共同実施した場合では、共同実施の方が国内鉄鋼部門への影響は小さいことが示唆されている。

炭素価格付けによる産業競争力低下や炭素リーケージへの対策としては、生産量ベースの還付(output-based allocation)や国境税調整などが挙げられる。これら対策の効果については、文献によって見解が分かれるため、どちらの対策がより効果的かについては、目的や対象となる部門および国・地域によって異なる。鉄鋼部門における国境税調整については、炭素リーケージ率を大幅に抑制する効果が報告されている。両政策を比較した場合、炭素価格付けの対象となる部門全体として見ると、生産量低下を抑制するのが主目的であれば生産量ベースの還付、炭素リーケージの抑制が主目的であれば国境税調整の方が効果的であることが示唆されており、税収還流と国境税調整の効果を比較した別の研究論文も、同様の結果を示唆している。

4.4 日本およびアジアの鉄鋼部門における低炭素化実現へ向けた提言

国内鉄鋼業からの中長期的な GHG 排出削減

「エネ環」および日本鉄鋼連盟の想定である 2030 年の粗鋼生産量 120 Mt/年において、2010 年時点での操業条件での生産が可能な設備能力を 2030 年まで維持することを前提とした分析 A では、転炉でのスクラップ利用拡大を通じた CO₂ 排出削減の費用は \$110/t-CO₂ と算出された。しかし、120 Mt という生産量想定は、既往研究における想定の中でも最大値であることが明らかになった。将来粗鋼生産量の不確実性が大きい中(90-120 Mt/年)で大型の設備投資を最小化させるべく、必要最小限の設備能力の維持を想定した分析 B では、転炉スクラップ利用の最大化しない限り、120 Mt/年の粗鋼生産を実現することができないことを示している。この 2 つの結果からは、CO₂ 排出削減費用として算出された \$110/t-CO₂ の一部または全部が、2030 年頃における国内鉄鋼業の立ち位置が不透明な中、経営上の各種リスクを最小化するための必要コストとして見なうることが示唆される。同様のことがコークス代替還元材利用の拡大についても言える。今後スクラップやコークス代替還元材の利

用拡大について検討する際には、単にCO₂排出削減の効果だけではなく、中期将来に向けた経営リスク分散への貢献についても十分に考慮すべきであるといえる。一方、分析Bでは国内高炉の改修・更新に係る設備費用等について信頼性の高いデータがなかったことから詳細な経済性分析を実施することはできず、今後の課題である。

また、分析Bより、2030年における粗鋼生産量が90-120 Mtの幅の中で必要最小限の設備能力の維持を想定した場合、CO₂排出量は2010年比で4-21%削減の幅に収まると算出され、粗鋼生産量105 Mt/年ではCO₂排出量は2010年比11-16%削減と算出された。近年の粗鋼生産量はおおよそ105-110 Mt/年で推移してきたことから、2030年まで国内鉄鋼業が現在と同レベルの国際競争力を維持するならば、この値は今後日本の2030年GHG排出削減目標案を精査するに当たって一つのベンチマークとなりうる。

技術開発

技術開発の観点からは国内対策として(1)電炉以外のスクラップ大量消費技術の開発・導入と(2)CCS大規模導入が、今後の国内鉄鋼業における低炭素化の鍵を握る。これら2つの技術は、韓国も研究開発を進めており、日本としても遅れを取らないよう支援を強化していくことが重要である。(1)については、日本・環境省はこれまで主に電炉業における高級鋼材生産技術の開発を支援してきたが(Tokyo Steel 2013)、今後はスクラップ大量消費型転炉とその関連技術(銅除去技術など)の研究開発も支援していくべきであろう。今後世界的に温暖化対策が強化されていく流れの中で、電力価格は世界各地で上昇していく可能性が高い。よって、鉄スクラップ大量消費利用技術についても、電炉以外の技術が商用化されることは意義があり、市場のニーズも今後高まっていくものと考えられる。また(2)については、分析Bでは主要設備の寿命延長によるCO₂排出削減量の減少は限定的であることが明らかになっており、2030年以降の大幅なCO₂排出削減を達成するにはBAT技術を最大限導入するより既存設備をできる限り延命し、2030年頃の実用化が期待されるCCS付低炭素高炉などの先端技術に投資を集中させる方が効果的である可能性を示唆している。その前提として、CCS技術が2030年までに確実に商用化されている必要がある。日本政府も鉄鋼プロセスに特化したCCSロードマップを作成し、これまで以上に研究開発を支援していくことが重要である。韓国は2020年頃のCCS商用化を目指しており、また中国には巨大なCCSは市場ポテンシャルがあることから、国内鉄鋼業としても市場参入で出遅れないよう今から対策を進めていくべきである。政府および国内鉄鋼業としては、現在の研究開発ペースを加速させながら必要なインフラおよび法整備を進め、国内での商用化を前倒して国際的なCCS大規模導入に備えるべきであろう。また、(1)と(2)では同じCO₂排出削減を実施するにしてもそのインプリケーションは大きく異なる。(1)は鉄鉱石からスクラップへの鉄源の大きなシフトを意味する一方、(2)は引き続き鉄鉱石を主要鉄源とした鉄鋼生産体制を維持することを意味する。今後の輸入鉄鉱石の更なる品質劣化の可能性も考慮しながら、バランスの取れた戦略を練ることが重要になる。一方、これら技術は今後海外でもその重要性は増すことから、国内対策で開発・導入したものを海外で展開していく流れが理想であろう。

スクラップ回収および利用拡大

分析Bにおいては、2030年の粗鋼生産量が90 Mt/年に低下した場合、国内鉄鋼部門は転炉鋼生産の設備利用率を最大化させるために転炉スクラップ利用を抑制するため、老廃スクラップ回収量の増加と相まって、国内のスクラップ余剰が14 Mt/年近くに達する可能性が示唆された。将来の中国や韓国のスクラップ需給状況も考慮すると、日本は2030年には今日のスクラップ市場のほぼ全てを失うと同時に、これまで以上に厳しいスクラップ輸出市場競争に晒される可能性がある。東アジアでスクラップがだぶつければ価格が低下すると同時にスクラップ回収率も低下するため、資源循環促進の観点からも温暖化対策の観点からも決して好ましい状況ではない。国内および東アジアで回収された老廃スクラップが確実に全量消費されるには、国内および域内でできるだけ多くを消費することを検討するだけでなく、東アジア地域内で消費仕切れない分をインド等の遠隔の需要地に確実に届けるため、東アジア内の貿易とは異なるインフラ整備が必要になる。

低炭素化のインセンティブ付け政策

2030年に向けて国内鉄鋼業の低炭素化を進めるには、明確なGHG排出削減目標とそれに整合した炭素価格付けが必要になる。フェアな国際競争環境を維持するには他の鉄鋼生産国と連携して実施する必要があるが、連携する国々で一斉に価格付け制度を導入するのは難しい上、国境税調整や補助金などの施策はその実効性について見解が分かれているだけでなく、WTOルールに抵触する可能性もある。日本としては、中国や韓国を含む東アジア諸国ならびにIEAやWBCSDなどの国際機関にも働きかけ、まずは東アジア数カ国の主要高炉メーカー間での炭素価格付け協定を策定する道を模索すべきであろう。同時に、輸入鋼材との価格競争に晒されていない一部の国内向け鋼材については、スクラップ多使用材を含む低CO₂排出製品の間接税減税などの税制優

遇を短期的な施策として検討する価値はあると考えられる。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

これまで2030年という国際気候変動対策の文脈で重要な将来断面に焦点を当て、国内鉄鋼業の低炭素化実現について東アジアの鉄鋼業および鉄リサイクルの動向および見通しも考慮した包括的な分析は実施されていなかった。また、温暖化対策、資源循環および競争力の維持という3つの重要な論点について、それぞれを深掘りした研究はこれまでもあったが、これらを包括的に分析した研究は少ない。

鉄鋼部門の低炭素化についてはこれまで、「高CO₂排出な高炉転炉法」対「低CO₂排出な電炉法」という二項対立がしばしば見られたが、本研究の結果は2030年へ向けてこの二項対立からの脱却の必要性を示唆している点で、近年実施された他の研究と一線を画する。本課題で検討した鉄スクラップ利用とCO₂排出削減およびトランプ・エレメントに関しては、過去にも検討されているが（原田 2004; Mukai et al. 2003）、現在の国内鉄鋼業を取り巻く環境および技術進展状況も考慮した上で、中期将来のインプリケーションを議論した研究は少ない。また、2030年においても120 Mtの高い粗鋼生産量が維持される場合、国内回収スクラップは電炉鋼シェアを拡大させずとも転炉での消費拡大によりほぼ全量国内で消費できることや、老廃スクラップの利用を拡大しても、転炉鋼の銅濃度は高級鋼材生産に影響を与えない程度にとどまるといった分析結果は、政策形成上も新しく有益なものである。

さらに、将来の粗鋼生産量見通しの不確実性が大きい中、最低限必要な設備能力に焦点を当て、スクラップ利用やコークス代替還元材利用についてCO₂排出削減だけでなく、将来の投資リスク回避のための方策としても検討した既往研究は少ない。鉄スクラップ利用についても、既往研究ではいかに国内消費を拡大するかに注目してきたが、本課題ではシナリオによっては現在よりはるかに多量の老廃スクラップを現時点でほとんど取引のない遠隔地に輸出しなければならない可能性があることも示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

本報告書提出時点で行政が既に活用した成果はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本課題より得られた成果は、間接的ながら2020年以降の温暖化対策目標の策定の議論に貢献している。2020年以降の温暖化対策目標策定に関する経産省・環境省の約束草案検討合同小委員会（以下、「INDC合同小委」）では、国内鉄鋼部門からのGHG排出削減については経団連の低炭素社会実行計画フェーズIIの内容がそのまま反映され、議論の余地がなかったことから、成果は環境省とも共有されていたものの実際に行政に活用される機会は得られなかった。しかし、本課題のアドバイザーであり、またINDC合同小委の委員でもある、国立環境研究所の藤野純一主任研究員には、本課題より得られた成果が全て報告されている。また、環境省の下で2020年以降のGHG排出削減シナリオの作成を行っているみずほ情報総研へは、講師としてお招きいただいた際に本課題より得られた成果の詳細を紹介している。

さらに、各国の2020年以降の温暖化対策目標案（INDC）は今後、UNFCCCを含む国際的なプロセスにおいてその内容が検証・協議される見込みであり、その結果によっては日本のINDCも修正される可能性がある。本課題の研究成果はそれら国際プロセスにおいて引用・活用されることが期待される。

6. 研究成果の主な発表状況（別添報告書作成要領参照）

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Kuramochi, T., in press. “Assessment of midterm CO₂ emissions reduction potential in the iron and steel industry: a case of Japan”. In press for publication in Journal of Cleaner Production.

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 倉持壮; 「2030年における国内鉄鋼部門のCO₂排出削減ポテンシャル評価～電炉に頼らない排出削減の可能性～」、環境経済政策学会2014年大会投稿論文. 2014年9月14日、法政大学多摩キャンパス、東京。

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 倉持壮;「エネルギーミックスと温暖化対策目標～長期目標の観点から～」, 環境経済・政策学会20周年記念シンポジウム「エネルギーミックスと温暖化目標」, 2015年5月8日, 東京・明治大学.
- 2) 倉持壮;「2°C目標達成へ向けた日本の温暖化対策の方向性～カーボン・バジェットと資源循環の観点から～」, Deep Decarbonization Pathways Project報告セミナーおよび環境研究総合推進費2-1402報告会、2014年10月7日、東京工業大学蔵前ホール、主催: 国立環境研究所。
- 3) 倉持壮;「2030年における国内鉄鋼部門のCO₂排出削減ポテンシャル評価～電炉に頼らない排出削減の可能性～」, 環境経済政策学会2014年大会気候変動(3)分科会、2014年9月14日、法政大学多摩キャンパス、東京。
- 4) 倉持壮;「2030年における国内鉄鋼部門のCO₂排出削減ポテンシャル評価～電炉に頼らない排出削減の可能性～」, 環境省「平成26年度2050年温室効果ガス排出削減達成に向けた経路等調査検討委託業務」講師、2014年7月29日、航空会館、東京。

7. 研究者略歴

課題代表者: 倉持 壮

東京大学工学部卒業、オランダ・ユトレヒト大学大学院修了、博士、ユトレヒト大学・コペルニクス研究所研究員を経て現在、公益財団法人地球環境戦略研究機関 気候変動とエネルギー領域主任研究員

研究分担者: なし(平成25年度に研究協力者1名)

1RF-1301 日本およびアジアの鉄鋼産業の中長期的な低炭素化実現へ向けた研究

公益財団法人 地球環境戦略研究機関

気候変動とエネルギー領域

倉持 壮

気候変動とエネルギー領域

金 振（研究協力者、平成 25 年度）

平成 25(開始年度)～26 年度累計予算額：15,330 千円

(うち、平成 26 年度予算額：8,068 千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本課題では、国内鉄鋼部門の 2030 年 CO₂ 排出削減ポテンシャル分析および海外における政策事例の分析を行い、世界の鉄鋼業の今後の動向を踏まえて、日本およびアジアの鉄鋼部門の中長期将来（2030 年以降）における低炭素化実現へ向けた政策提言を行うことを目的とした。国内 CO₂ 排出削減ポテンシャル分析においては電炉鋼シェア拡大に頼らない方策を検討した。

モデル分析からは、2030 年粗鋼生産量を政府想定 of 1.2 億トンとした場合、CO₂ 回収・貯留（CCS）を利用せずとも技術固定シナリオ比で約 12%の排出削減（2010 年比約 4%の削減、業界団体目標の 2 倍以上）が \$ 110/t-CO₂ 程度の価格で実現可能と算出された。また、転炉スクラップ消費拡大により国内回収スクラップはほぼ全量国内で消費でき、転炉鋼の銅濃度も高級鋼材生産に影響を与えない程度に止まる。一方、2030 年の粗鋼生産量見通しは不確実性が大きく、0.9-1.2 億トンの不確実性を想定した場合、大型設備への投資を最小限にするには、CO₂ 排出削減策でもある転炉でのスクラップ利用やコークス代替還元材利用の拡大が有効で、2030 年の高炉およびコークス炉能力はそれぞれ 2010 年比約 9 割と約 7 割に抑制できる。この設備能力の下で操業可能なシナリオを考慮すると、CO₂ 排出量は上記の生産量の幅において 2010 年比 4-21%削減となる。生産量が 0.9 億トンまで低下すると、高炉の設備利用率を維持するべく転炉スクラップ利用を抑制する必要があるため、今日の倍近いスクラップを輸出する必要がある。さらに、主要設備の寿命を 5-10 年延長しても排出削減量への影響は限定的で、2030 年以降の大規模排出削減には、既存設備を延命して投資を将来の CCS 付低炭素製鉄技術に集中させることも検討すべきである。

低炭素化政策については、中国や韓国が本格的な炭素価格付けに向けて動き出した一方、欧州では電炉業が高炉業より経済影響を受けた等の事例もある。国際貿易ルールも考慮すると、輸入鋼材と競合しないスクラップ多使用材を含む低 CO₂ 排出鋼材については間接税減税など税制優遇、その他製品については日本として東アジア諸国に働きかけ、主要高炉メーカー間での炭素価格付け協定の策定が考えられる。

[キーワード]CO₂、温暖化対策、費用対効果、鉄鋼、スクラップ、プロセス分析

1. 研究開発背景

気候変動対策はかつてないほどに喫緊の課題となっている。2010年にメキシコ・カンクンで行われた国連気候変動枠組条約（UNFCCC）第16回締約国会議（COP16）では、産業革命以降の地球温暖化を2℃以下に抑制する観点からの大幅な温室効果ガス（GHG）排出削減の必要性が認識されている（2℃目標）。地球温暖化を66%以上の確率で2℃以下に抑えるためには、産業革命以降の累積CO₂排出量を3.67兆トン以下に抑制する必要があるが、人類は既にその半分以上のCO₂を排出しており、CO₂以外のGHGの温室効果も考慮すると、残りのCO₂排出許容量は約1兆トンとなる（IPCC 2013）。現在の排出レベルが続けば排出許容量を約25年で超えてしまうため、早急かつ大胆な対策が求められている。国際社会の取り組みとしては、2015年末に2020年以降の気候変動対策の国際枠組みが構築される予定になっており、各国は2015年のできるだけ早い時期に、中期将来（2025-2030年）の排出削減目標案（Intended Nationally Determined Contribution: INDC）を提出する必要がある。

日本の鉄鋼部門は現在、世界第2位の粗鋼生産量を誇り、そのためエネルギー消費およびCO₂排出も大きく、全温室効果ガス排出量の約13%（2010年）に相当するCO₂を排出している。日本が今後一層の温暖化対策を進めるには、世界最高レベルのエネルギー効率を誇る鉄鋼部門からも更なるCO₂排出削減が求められる可能性がある。国内鉄鋼部門からの2020年以降のGHG排出削減については、2012年に発表された「革新的エネルギー・環境戦略」（以下、「エネ環」、（EEC 2012a））策定の際などに議論されており、利用可能な最良の技術（BAT: Best Available Technology）の導入による省エネの他、将来の粗鋼生産量想定と粗鋼生産に占める電炉鋼の割合（「電炉鋼シェア」）の拡大の2項目について議論がなされた^{1,2}。

しかし、これらが議論された際には、2030年に向けて世界の鉄鋼業がどう展開・発展していくかという視点は十分に反映されていなかった。世界の鉄鋼業は中国やインド等の途上国を中心に常にダイナミックに動いている。世界の総粗鋼生産量は、文献間で程度の差はあるものの2013年の16.5億トン/年から着実に増加し続ける見通しで、2030年見通しとしては18-25億トン/年が示唆されている（BHP Billiton 2014; Oda et al. 2013; Pauliuk et al. 2013）。同時に、世界の鉄鋼蓄積量も着実に増えており、2030年に向けては特に東アジアにおいて鉄スクラップ発生量が急増する見通しであることから、鉄源の大規模なシフトも想定される。さらに、日本が高級鋼材に特化しているように国際的な分業化が進む一方、一部の国々での排出量取引制度の本格導入によるCO₂排出削減の動きもあり、日本の鉄鋼業が将来どのように発展していくかを見通すのは難しい。このような環境において、国内の鉄鋼部門における必要な温暖化対策は将来の生産活動レベルやマーケティング戦略次第で大きく変わりうるが、これらを踏まえて温暖化対策を検討した研究は少ない。

¹ 環境省; 中央環境審議会地球環境部会「中長期ロードマップ小委員会」第8回会合, 中長期ロードマップ小委員会（第2回～第7回）におけるヒアリング結果について, 2010. <http://www.env.go.jp/council/06earth/y0611-08/ref01a4.pdf>

² 環境省; 中央環境審議会地球環境部会「2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会」第13回会合, 各事業者へのヒアリング議事概要及びヒアリング資料, 2012. <http://www.env.go.jp/council/06earth/y0613-13/ref02-1.pdf>

2. 研究開発目的

本課題では、国内鉄鋼部門の2030年CO₂排出削減ポテンシャル分析および海外における政策事例の分析を行い、世界の鉄鋼業の今後の動向を踏まえて、日本およびアジアの鉄鋼部門の中長期将来（2030年以降）における低炭素化実現へ向けた政策提言を行うことを目的とした。国内CO₂排出削減ポテンシャル分析においては、製鉄技術に関する最新の知見を踏まえるだけでなく、日本の鉄鋼生産量の将来見通しに関する不確実性など、世界の鉄鋼業のダイナミックな国際動向と様々な制約要因を考慮しつつ、CO₂排出削減ポテンシャルを定量的に評価した。

本研究は3つのコンポーネントにより構成され、2年計画で実施した。

1. 国際動向および資源・技術制約等の要因とそれらの不確実性を考慮した、日本を中心としたアジアの鉄鋼部門におけるエネルギー・CO₂排出削減ポテンシャルのボトムアップ計算モデル分析
2. 海外における鉄鋼部門の省エネ・低炭素化・リサイクル政策の事例分析およびセクター別アプローチを含む国際的な省エネ・低炭素化の最新動向分析
3. 上記コンポーネント1、2の結果を基にした、日本の鉄鋼部門の省エネ・低炭素化を実現するための具体的な政策提言、及び国内対策で培った技術の途上国支援や海外展開に活用するための提言

この研究の意義は、国内鉄鋼部門における将来のCO₂排出削減の可能性について、様々な不確実性に注目して定量的な学術研究を行うだけでなく、その成果を国際的な産業の動向も考慮して具体的な政策提言につなげる点である。ダイナミックに動く世界の鉄鋼市場の一プレイヤーとしての日本の鉄鋼部門の将来を既存の理論に基づき将来を予測することは難しく、将来の排出削減策を議論するには様々な要因の横断的比較・分析に基づく、大きな不確実性を考慮した幅広い検討が特に重要になる。本研究は、政策担当者を含む幅広いステークホルダーが議論するための共通のナレッジ・プラットフォームを構築する。

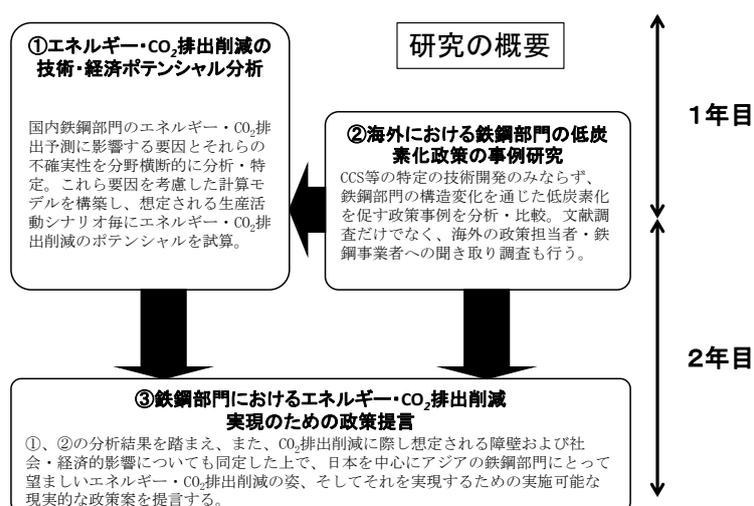


図 1：本課題の全体概要図

3. 研究開発手法

3.1. 国内鉄鋼部門におけるエネルギー・CO₂排出削減の技術・経済ポテンシャル分析

2030年の粗鋼生産量については、「エネ環」策定においては過去最高レベルの120 Mtを想定していたが、将来見通しは不確実性が高い。将来の生産量見通しが不透明な中では、粗鋼生産量が想定より大きく落ち込んだ場合でも各設備の生産能力余剰を最小限に抑え、コスト競争力を維持できる生産体制の構築が一層重要になる。このように2030年時点の粗鋼生産量設定の高低に関する議論はあったが、高炉やコークス炉などの主要設備の生産能力に関する議論は少なかった。

本課題では、国内鉄鋼部門におけるCO₂排出削減ポテンシャルについて2通りのボトムアップ計算モデル分析を行った。分析Aでは、2030年における粗鋼生産量想定を120 Mtとし、2010年時点での操業条件を前提とした設備能力設定の下における、CO₂排出削減の技術・経済的ポテンシャルを算出した。経済的ポテンシャルの評価においては、各CO₂排出削減策の限界削減費用を算出した。分析Bでは2030年における粗鋼生産量が不確実性を持つ中で、最低限必要な設備能力設定の下、操業可能な条件におけるCO₂排出量を算出した。両分析の基準年は2010年とし、期間を2030年までとした。経済性分析は全て2010年米ドルベースで実施し、基準年における為替レートは1米ドル=87.8円とした。

また、両分析において、粗鋼生産に占める電炉鋼の割合（「電炉鋼シェア」）は2030年まで2010年レベルにとどまるという想定で分析を実施した。前述の通り、「エネ環」策定の議論では、2030年時点の電炉鋼シェアの割合が議論された。電炉法では鉄鉱石をほとんど使用しないためコークス等の還元材が不要なため、CO₂原単位は高炉転炉法に比べ1/3から1/4と低い。日本では現在、国内で回収された鉄スクラップを一部輸出（5-9 Mt/年）していることから、これら輸出分を全て国内消費に回せば2030年頃には電炉鋼シェア拡大を通じたCO₂排出削減が可能である。しかし、日本では銅などの不純物（トランプ・エレメント）濃度の厳しい管理が要求される鉄鋼製品の需要が大きく、不純物濃度の高い老廃スクラップを主要鉄源とする電炉鋼では生産できない製品も多い。また、再エネ電力の増加や化石燃料の輸入増加などによって今後も電力価格の上昇し続ける場合、電炉業の経営環境は一層厳しくなる可能性もあり、国内鉄鋼部門において2030年に向けて電炉鋼シェアを大幅に上げていくことは想定しにくい。

以下にモデル分析の方法論の概要を簡潔に示す。

3.1.1. システム・バウンダリー

本分析において定義したシステム・バウンダリーを図2に示す。日本では粗鋼の約8割が鉄鉱石を主要鉄源とした高炉転炉法（BF-BOF route）で生産され、残りの2割が鉄スクラップを主要鉄源とした電炉法（EAF route）で生産されている。高炉転炉法ではまず、ペレットや焼結鉱に加工された鉄鉱石を高炉に投入し、鉄鉱石に含まれる酸素分をコークスや微粉炭を使って除去（還元）することにより銑鉄を作る。銑鉄は炭素含有率が高いため、硬く脆い。よって転炉では酸素を吹き込むことにより銑鉄中の炭素を除去し、同時にその他の成分調整も行うことにより、粗鋼が作られる。一方、電炉法では電炉内にある黒鉛の電極に電流を通して鉄スクラップとの間で放電を起こし、その放電熱でスクラップを溶解して粗鋼を作る。本稿では以下、高炉転炉法で作られた粗鋼を「転炉鋼」、電炉法で作られた粗鋼を「電炉鋼」と呼ぶことにする。本分析では、各種低炭素化オプションによる副生ガス発生量等のエネルギー・

物質フローの変化による影響を公平に比較するため、副生ガスによる発電ならびに売電・買電による一次エネルギー消費および CO₂ 排出もシステム・バウンダリー内を含めている。

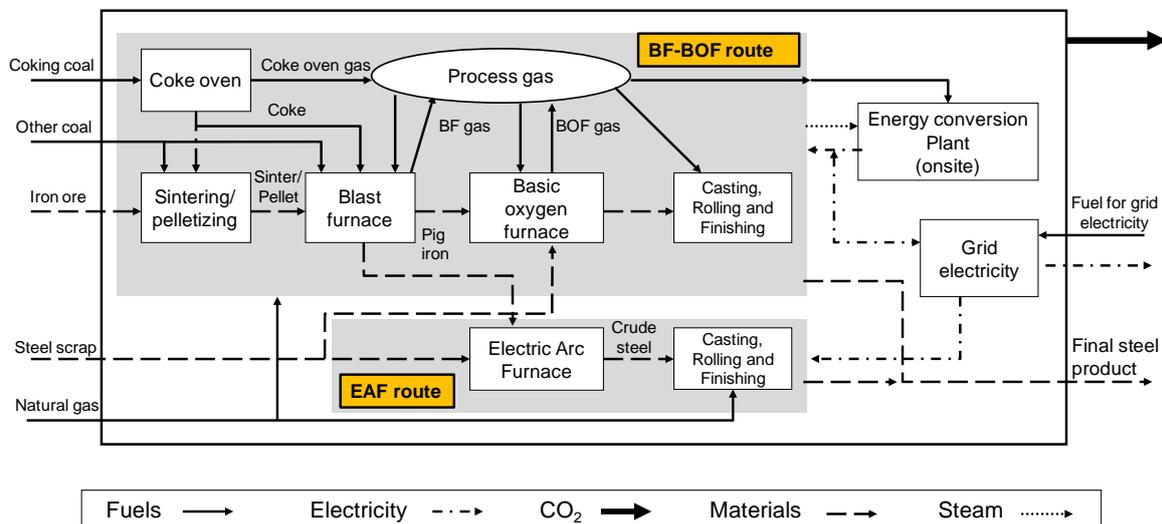


図 2：本分析において定義したシステム・バウンダリー概略図

3.1.2. 検討した CO₂ 排出削減策

本課題では、CO₂ 排出削減策として、(1) 省エネ設備の導入、(2) コークス代替還元材の利用拡大、(3) 転炉でのスクラップ利用拡大、の 3 つの方策を検討した。なお、CO₂ 回収・貯留 (CCS) については、2030 年時点での商用化の見通しが不確実なため、両分析において検討していない。

コークス代替還元材の利用拡大

コークス炉は寿命が 40-50 年と長いですが、国内ではその多くが今後 10-15 年以内に寿命を迎える (Tekko Shimbun 2012)。しかし、設備費用の大きさや寿命の長さ、そして国内鉄鋼業の将来に関する不透明性の大きさから、設備の更新は容易には進まない可能性が高い。2030 年に向けては、温暖化対策も兼ねてコークス代替還元材の利用を拡大してコークス消費をできる限り減らしていくことが期待される。本分析では、コークス代替還元材として CO₂ 削減効果が高いとされる微粉炭吹き込み (Pulverized coal injection: PCI) と廃プラスチックの 2 つを検討した。

転炉でのスクラップ利用拡大

東アジアでは 2030 年に向けて老廃スクラップ発生量が急増する見込みである。現在の日本の鉄スクラップ輸出の 9 割以上を中国と韓国に輸出しているが (JFRMA 2015)、2030 年には中国、韓国共に純輸入国から卒業する見込みのため、日本は今日のスクラップ市場のほぼ全てを失う可能性が示唆されており (Steel Recycling Research 2013)、国内で老廃スクラップを最大限消費しなければならない状況も考慮する必要がある。

前述の通り、国内鉄鋼業は高級鋼材生産に注力しており、2030年に向けて電炉鋼シェアの拡大は期待できない。その一方で、鉄スクラップの利用拡大は電炉だけでなく転炉でも可能である。スクラップ利用を1トン拡大させる場合、電炉と転炉のいずれで消費しても、CO₂多排出の主要因である銑鉄生産を約1トン減らすという点では同じなので、転炉で利用した場合のCO₂排出削減効果は電炉利用の場合と同程度となる。

3.1.3. 分析 A および分析 B で検討したシナリオ

分析 A

分析 A で検討した4つのシナリオの概要を表 1 に示す。BAT シナリオは設備更新および能力増強時の利用可能な最高の技術 (Best Available Technology: BAT) 導入を想定している。BAT 技術レベルは経団連の2020年へ向けた自主行動計画である「低炭素社会実行計画」の延長を想定し、2012年度環境省中央環境審議会報告書(MOE 2012)を参考にした。ER シナリオではBAT 技術の導入に加え、微粉炭吹き込み (PCI : Pulverized Coal Injection) 拡大および廃プラスチック利用拡大によるコークス代替と転炉でのスクラップ利用拡大という、2つの操業条件の変化を通じた排出削減を想定している。また、参照シナリオとしてエネルギー原単位および物質収支が2030年まで基準年と同等で推移する REF シナリオについても分析した。全シナリオにおいて、各設備の生産能力はBAT シナリオのそれらに等しいと想定した。

表 1 : 分析 A で検討したシナリオ一覧

シナリオ名	電炉鋼シェア	導入技術レベル	BF-BOF 操業条件	
			コークス代替還元材利用拡大	転炉スクラップ配合比拡大
Reference (REF)	基準年レベル	基準年レベル	基準年レベル	基準年レベル
BAT	基準年レベル	BAT	基準年レベル	基準年レベル
Enhanced Reduction (ER)	基準年レベル	BAT	最大化	最大化

分析 B

分析 B では、2030年に想定しうる幅広い粗鋼生産量に柔軟に対応しうる必要最低限のコークス炉および高炉設備能力を算出し、算出された設備能力の下で操業可能なシナリオについて、CO₂排出量を粗鋼生産量別に算出した。必要最低限必要なコークス炉および高炉設備能力 ($C_{k,t,opt}$) は以下の式を用いて算出した :

$$C_{k,t,opt} = \max(C_{k,t,max,LoCS}, C_{k,t,min,HiCS}) \quad (1)$$

ここで、 $C_{k,t,max,LoCS}$ は t 年に想定しうる低位粗鋼生産量 ($LoCS$) の下でのプロセス k (コークス炉、高炉) の最大生産量 (Mt/年)、 $C_{k,t,min,HiCS}$ は t 年に想定しうる高位粗鋼生産量 ($HiCS$) の下でのプロセス k (コークス炉、高炉) の最小生産量 (Mt/年) である。 $C_{k,t,max}$ と $C_{k,t,min}$ は、それぞれ分析 A に定義した BAT シナリオと ER シナリオにおけるプロセス生産量に相当する。低位および高位粗鋼生産量の幅において、最低 1 シナリオで操業を可能にするために最低限必要な設備能力を算出した。

LoCS と HiCS は、既往研究の比較からそれぞれ 90 Mt と 120 Mt と想定した（図 4）。既往研究の比較から、「エネ環」で想定された 2030 年粗鋼生産量 120 Mt を超える想定をした文献は見当たらなかった。また、分析 B で検討した操業シナリオの一覧を表 2 に示す。分析 B では、コークス炉および高炉の最低設備利用率について 85%以上という制約を設けた。操業シナリオによってはコークス炉および高炉の設備能力設定と設備利用率制約により、転炉スクラップ利用やコークス代替還元材利用が必ずしも最大化されない可能性もある。コークス代替還元材利用の拡大については、日本鉄鋼連盟がその利用拡大を目標として掲げていることから、廃プラスチック利用が PCI に優先されるとした。

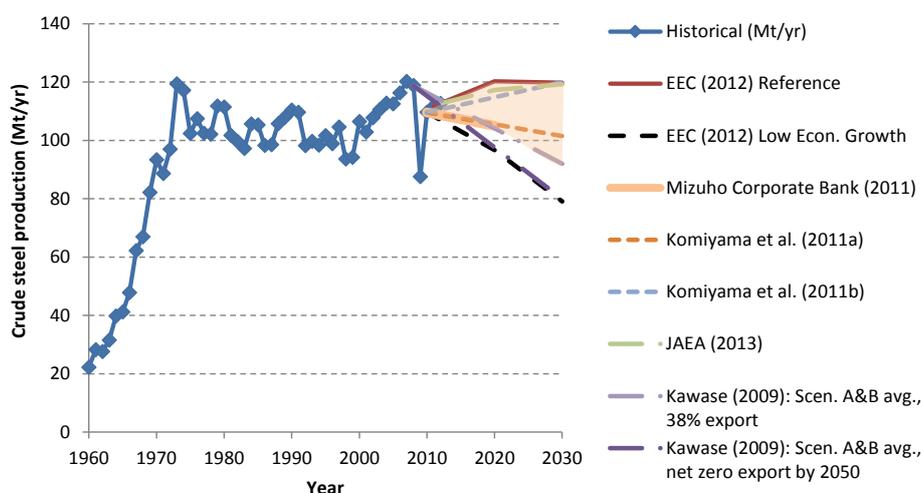


図 3：粗鋼生産量の実績値および将来予測。

出典：(Kuramochi 2015). 実績値は日本鉄鋼連盟(JISF 2012)、将来予測は以下の諸文献 (Komiyama et al. 2011b; Komiyama et al. 2011a; Mizuho Corporate Bank 2011; Tatematsu 2013; Kawase 2009; EEC 2012b)。

表 2：分析 B で検討したシナリオ

シナリオ名	導入技術 レベル	電炉鋼シェア	BF-BOF 操業条件		
			コークス代替還元材利用拡大		転炉スクラップ 配合率拡大
			廃プラスチック	PCI	
High Emission	BAT	基準年レベル	基準年レベル	基準年レベル	基準年レベル
Low Emission	BAT	基準年レベル	最大化	コークス炉および高炉設備利用率が 85%以上に維持される範囲内で最大化	コークス炉および高炉設備利用率が 85%以上に維持される範囲内で最大化

3.1.4. 分析フローおよび主要想定

本分析における計算ステップの概要ならびに分析に用いた各種データの収集方法について以下に概要を示す。分析の実施にあたり、設備導入は既存設備の寿命によるリプレイス時または生産能力増強による新設の場合のみと想定した。また、公開されているデータからは既存設備について設備毎のエネルギー・物質効率を把握できないため、リプレイスされる既存設備のエネルギー・物質収支は全国平均値を想定した。さらに、各工程における設備更新・新設は製鉄所別でなく国内鉄鋼業全体での需給バランスで決定されると想定した。各種詳細データについては Kuramochi (In Press) の Supporting Information (参考資料 1、巻末に添付) を参照されたい。

① 基準年（2010 年度）における粗鋼生産のエネルギー消費・CO₂ 排出量（総量および原単位）の算定

基準年における粗鋼生産に係るエネルギー消費および CO₂ 排出量を算定するため、まずシステム・バウンダリー内の各工程における主要製造品の単位量当たりのエネルギー・物質収支を推計した。エネルギー収支データは資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」（高位発熱量ベース）(METI 2013) を用い、CO₂ 排出係数については「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」(GIO 2013) を参考にした。国内鉄鋼部門における物質収支については「鉄鋼統計要覧」(JISF 2012)、「鉄鋼年鑑」(Tekko Shimbun 2012)、日本鉄源協会等の文献を参考にした。次に、各工程のエネルギー・物質収支を基に粗鋼生産 1 トン当たりのエネルギー・物質収支を算定した。

② 基準年時点における既存設備のビンテージ構造の推計

基準年時点で既存の設備能力の更新時期を把握するため、システム境界内の主要工程について既存設備のビンテージ構造を推計した。各工程の寿命については、コークス炉のみ 50 年、その他の工程は 20 年と想定した。一貫製鉄プロセスの工程については、コークス炉は「鉄鋼年鑑」から、高炉については「鉄鋼統計要覧」からそれぞれ設備別データを得た。転炉等その他の工程については設備毎のデータが公開されていないため、高炉と同じ割合で設備更新時期を迎えると想定した。電炉については経済産業省「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報」に報告されている過去 1990 年から 2010 年までの設備能力データと RITE (2012) を参考に推計した。また自家発電（共同火力を含む）については、資源エネルギー庁「電力需給の概要」に報告されている共同火力発電所のデータを参考に推計した。

③ t 年（2011-2030）における各工程の設備ビンテージ構造の推計

分析 A と分析 B について、将来断面における各工程の設備能力を 3.1.3 節で示した方法で決定した。次に、シナリオ変数「導入技術」とステップ②で推計した基準年時点での設備ビンテージ構造を基に、2011 年から t 年までの各将来年における必要な設備導入量および設備能力を算出した。これを基に t 年時点の設備ビンテージ構造を推計した。

④ t 年における粗鋼生産のエネルギー消費・CO₂ 排出量（総量および原単位）の算定

ステップ③で算出した t 年における設備ビンテージ構造と各対策シナリオで考慮されている CO₂ 排出削減策の諸元を基に、 t 年における各工程での主要製造品の単位量当たりエネルギー・物質収支を算定し、これを基に粗鋼生産 1 トン当たりのエネルギー・物質収支を算定した。

⑤ t 年における各 CO₂ 削減オプションの CO₂ 削減費用の算定（分析 A のみ）

各 CO₂ 削減オプションの CO₂ 削減費用の算定については、BAT シナリオ比で行った。各工程の設備能力は全シナリオにおいて BAT シナリオとしたため、粗鋼生産におけるコスト差は原材料コストおよびエネルギーコストのみに依存する。

エネルギー価格の基準年実績および将来見通しについては、化石燃料価格は IEA World Energy Outlook 2013 の新政策シナリオを参考にした。産業用電力の購入価格は、原子力政策 1980 年から 2012 年までの間で実質価格の推移 (IEA 2013) を参考に、2030 年には基準年比 10% 上昇すると想定した。自家発電所から一般電気事業者への売電価格は最近年の卸電気事業者からの購入価格を参考に基準年価格を設定し (9.3 円/kWh)、2030 年へ向けて産業用電力価格同様 10% 上昇すると想定した。

原材料価格について、廃プラスチック価格は将来見通しが報告されていないため、日本容器包装リサイクル協会が報告しているケミカルリサイクル用廃プラスチックの 2010 年の入札価格レベルが 2030 年まで続くと想定した。鉄スクラップ価格見通しは Hatch Associates (2012) より、鉄鉱石や石灰石等その他原材料の価格見通しは (Moya & Pardo 2013; World Bank 2014) などを参考にした。

表 3：各種価格想定

	単位	2010 年実績	2020 年想定 (感度分析幅)	2030 年想定 (感度分析幅)
原材料				
鉄鉱石	\$/t	127	120 (96 – 144)	108 (86 – 130)
鉄スクラップ	\$/t	350	340 (280 – 400)	280 (224 – 336)
コークス炭	\$/t	169	160 (140 – 170)	150 (140 – 170)
石灰石	\$/t	27	27	27
電力				
産業用電力価格	\$/MWh	154	185 (162 – 208)	195 (171 – 218)
電力網への売電価格	\$/MWh	111	133 (116 – 150)	140 (123 – 156)
その他エネルギー				
天然ガス	\$/GJ _{HHV}	10.4	13.8 (13.1 – 14.3)	14.0 (11.9 – 15.5)
石油製品	\$/GJ _{HHV}	13.0	18.8 (18.3 – 20.0)	20.1 (17.3 – 22.6)
コークス炭以外の石炭	\$/t	107	109 (104 – 115)	106 (88 – 121)
廃プラスチック (落札価格)	\$/GJ _{HHV}	-14.2	-10.6 (-14.2 – -7.1)	-7.1 (-10.6 – 0)
その他				
コールタール	\$/GJ _{HHV}	6.2	6.4	6.7
人件費	\$/時	30	36	40

老廃スクラップ回収の実績値と将来予測を図 4 に示す。既往研究での報告値には幅があるが、本分析では 2030 年の老廃スクラップ回収量を 34 Mt/年と想定した。

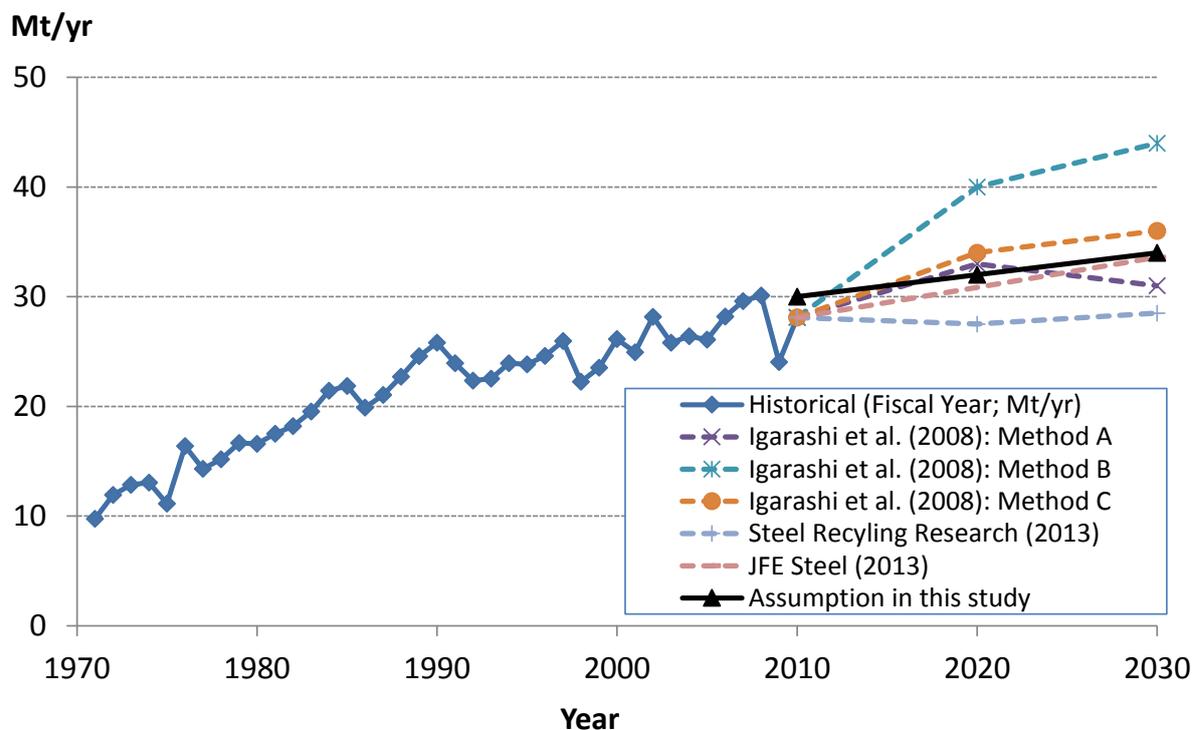


図 4：老廃スクラップ回収量の実績値および将来予測。

出典：実績値は JFRMA (2013)、

将来予測は(Igarashi et al. 2008; Steel Recycling Research 2013; JFE Steel 2013)

3.1.5. 検討した CO₂ 排出削減策の技術・経済性評価

各対策の技術・経済性の諸元については学术论文のみならず内閣府・環境省・経産省の審議会資料を幅広く調査した上で決定した。本節では転炉でのスクラップ利用拡大およびコークス代替還元材の利用拡大による CO₂ 排出削減の技術・経済ポテンシャルについて詳しく説明する。省エネ設備等その他の CO₂ 排出削減策の諸元については Kuramochi (In Press)の Supporting Information (参考資料 1、巻末に添付)を参照されたい。

表 4：本研究で検討した CO₂ 排出削減策とその技術・経済性評価

対策タイプ・ 工程	対策とパラメータ		技術ポテンシャル		追加費用（対 BAT シナリオ比）		対策の適用*		
			値	単位	設備費用	維持管理			
BAT 技術導入による排出削減									
高炉転炉法： プロセス横断	電力需要設備の効率改善	2020 年	1.6%	2010 年平均比	0 (BAT シナリオで考慮)		(2)		
	熱エネルギー回収	2030 年	0.27	GJ 蒸気/t 粗鋼			(2)		
コークス炉	次世代コークス炉 (SCOPE21)	ガス燃料消費削減	0.84	GJ/t コークス (2010 年平均比)					(1)
		追加蒸気回収	0.04						
		電力消費削減	-0.14						
副生ガス発電	BAT 発電効率	コンバインドサイクル：2030 年	47.5	% HHV					(1)
		蒸気タービン：2030 年	43						(3)
電炉	スクラップ予熱	電力消費削減：2030 年	30	kWh/t 粗鋼 (2010 年平 均比)					(3)
	直流炉+スクラップ予熱	電力消費削減	55		(1)				
操業条件の変化による排出削減									
高炉	微粉炭吹き込み (PCI) (2010 年：0.14 t/t-銑鉄)	2030 年	0.20	t/t-銑鉄	USD\$158/(t-PC/yr)	0	(3)		
		コークス代替率	0.9	t/t-PCI					
		追加電力消費	0.38	GJ/t-PCI					
	廃プラスチック利用 (2010 年：計 0.42 Mt)	合計：2030 年	1.5	Mt/年	US\$1350/(t- 廃 プ ラ /yr)	US\$240/t-廃プラ	(3)		
コークス代替率		1	t/t-廃プラ						
転炉	スクラップ配合率拡大 (2010 年：14 質量%)	2030 年配合率	20	質量%	0	0	(3)		
		追加エネルギー消費	4.2	GJ _{th} /t-スクラップ					

* (1)：2010 年以降に導入された設備のみに適用；(2)：2010 年以降に導入された全設備に適用。2010 年時点で既存の設備については、省エネ・CO₂削減量を 2030 年へ向けて目標レベルまで直線的に増加させる；(3) 全設備において省エネ・CO₂削減量を 2030 年へ向けて目標レベルまで直線的に増加させる。

転炉におけるスクラップ利用の拡大

2010年の転炉への鉄源投入量に占める鉄スクラップの割合は14% (JISF 2012)であったが、既存の転炉でも20%程度までの増加は熱化学的には可能とされ (JFE Steel 2011)、他の文献も同様の見解を示している (NIMS 2004; Moya & Pardo 2013)。また、JFE スチールは鋼材中の銅濃度を適切に管理できるならスクラップ配合率30%も可能であることを示唆している (JFE Steel 2013)。よって本稿では、転炉におけるスクラップ配合率が2010年から2030年に向けて直線的に20%まで上昇すると想定した。2010年レベルからわずか6ポイントの増加であるが、日本では転炉鋼生産量が8割を占めるので相当なスクラップ消費拡大につながる。

一方、転炉でのスクラップ利用拡大は銅などの不純物混入率上昇にもつながる。特に、国内高炉で多く製造される自動車用の薄板高級鋼などでは銅許容値が0.06-0.1質量%と厳しい (Takeuchi 2009; JFE Steel 2013)。よって、本分析では各シナリオの転炉鋼中の平均銅濃度を計算した。原材料および中間製品の銅濃度について、銑鉄は0.01質量%、自家発生スクラップと加工スクラップは0.1質量%、そして老廃スクラップは0.4質量%と想定した (JFE Steel 2013)。

コークス代替還元材利用の拡大

2010年におけるPCI比と還元材比はそれぞれ142 kg/t-銑鉄と510 kg/t-銑鉄であった。PCI比は理論的には270-290 kg/t-銑鉄まで増加させることができるが、高PCI比ではコークスを効率よく代替できない。PCI比が180-200kg/t-銑鉄ではコークス代替率が0.85-0.95 kg/kg-PCIと高いが (IPPC 2011)、PCI比の増加に伴いコークス代替率は低下する (IEA 2007; Nozawa et al. 2011)。Nomura and Callcott (2011)も既存の高炉で操業可能なPCI比は190-210 kg/t-銑鉄としている。中国の最新型の高炉ではPCI比を平常時で220 kg/t-銑鉄で操業しているものもあるが (Bao Steel 2013)、このような高いPCI比は新設の高炉でないと達成は難しく、既存高炉の改修が中心となる日本では達成するのは難しい。廃プラスチック利用については、国内ではコークス炉でも利用されているが、CO₂排出削減効果が変わらないことと、高炉での受け入れ能力がコークス炉よりはるかに大きいことから、今後の利用拡大分は全て高炉で消費されるとした。

本分析ではPCI比が2030年に向けて直線的に200 kg/t-銑鉄まで増加すると想定した。コークス代替率は0.9 t/t-PCI (Worrell et al. 2008) を使用した。PCI比増加に伴うエネルギー消費は表4に示している。また、廃プラスチック利用については、「エネ環」策定における想定同様、2030年までに現在の42万トンから150万トンに増加すると想定した (MOE 2012)。現在のレベルからの増加分については全て高炉で消費されるとし、コークス代替比は諸文献を基に1 t/t-廃プラとした (Sekine et al. 2009; IPCC 2011)。

3.2. 海外における鉄鋼部門の低炭素化政策に関する事例調査

本コンポーネントでは、日本同様に先進国でありながら転炉鋼生産量が大きく、気候変動対策分野でも世界をリードしている欧州連合 (EU) や、日本の主要競争国である中国および韓国における、鉄鋼部門の低炭素化に関する政策や鉄スクラップのリサイクル政策の最新動向について、ヒアリングを含む調査研究を行った。上記3カ国・地域に日本を含めると、2013年における世界の粗鋼生産量の7割、また総転炉鋼生産量の8割以上をカバーする (図5)。

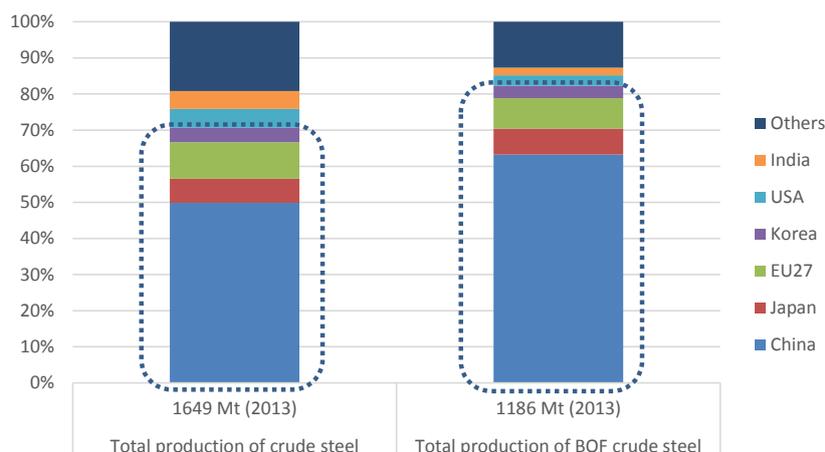


図 5：2013 年の総粗鋼生産量および転炉鋼生産量の国別内訳。

出典：世界鉄鋼協会（World Steel Association 2014）

上記 3 カ国・地域について、主に次の 3 つの項目に関するヒアリングを含めた調査研究を実施した（1）排出量取引制度（ETS）や炭素税など、炭素価格付け政策の現状と今後の展開、（2）鉄スクラップ回収および利用の拡大へ向けた方策、（3）革新的製鉄技術の研究・開発。その上で、分析・評価した諸政策について、日本へのインプリケーションと日本における適用可能性についても検討した。

欧州に関するヒアリング調査については、2013 年 6 月から 2014 年 2 月にかけて、以下の諸機関の関係者に対して実施した。

- 世界鉄鋼協会（Worldsteel Association：ブリュッセル）：Henk Reimink 安全・技術・環境部長
- 欧州鉄鋼連盟（EUROFER：ブリュッセル）：Danny Croon 環境部長
- 欧州委員会気候行動総局（European Commission DG Climate Action：ブリュッセル）：Hans Bergman (EU ETS ベンチマーク課、課長), Ismo Ulvila (EU ETS ベンチマーク課)
- 欧州委員会共同研究センター・ペッテン研究所（EU Joint Research Centre Petten、オランダ）：Evangelos Tzimas 主任研究員、Jose Moya 研究員

東アジアに関するヒアリング調査については、2014 年 9 月から 2015 年 3 月にかけて、以下の諸機関の関係者に対して実施した。

- 中国国家発展改革委員会エネルギー研究所：姜克隽（Jiang Kejun）研究員
- 世界資源研究所（WRI）在北京事務所：宋然平（Song Ranping）研究員
- 韓国・GHG インベントリー・研究センター（ソウル）：Nuri Kim、Seung-Eon Lee 両研究員
- 韓国・POSCO 研究所（ソウル）：Jisun Kim 研究員

なお、本報告書では関係者へのインタビューを実施した後も可能な限り情報をアップデートするよう努めたが、政策検討・実施に関する一部の情報については 2015 年 5 月時点の最新のものとなっていない可能性もあることに留意されたい。

3.3. 鉄鋼部門の低炭素化へ向けたインセンティブ付け施策の評価

経済活動の低炭素化実現のためのインセンティブ付け施策としては、炭素税や排出量取引制度（ETS）に代表されるカーボン・プライシングや、鉄鉱石への天然資源税課税やスクラップ利用材への課税減税などの資源税制のグリーン化が挙げられる。これら施策については、鉄鋼業など国際競争の激しい産業に及ぼす影響が大きな懸念事項として指摘されてきた。そのため、上記の EU や韓国のように一国・一地域で ETS を導入するにあたっては、鉄鋼業はその影響が最小限にとどまるよう配慮されてきた。

本節では鉄鋼部門におけるインセンティブ付け施策について、温暖化対策政策の産業競争力への影響と炭素リーケージについて包括的なレビューを行った Zhang (2012) にて引用されている文献や、多国間政策協調について分析したその他の文献について、（1）炭素リーケージ率³の規模、（2）インセンティブ付け政策の一国実施と多国間共同実施による国内鉄鋼部門への影響の差、（3）炭素リーケージ対策の効果、を中心に論点整理を行った。

4. 結果及び考察

4.1. 国内鉄鋼部門からの CO₂ 排出に関する削減ポテンシャル分析

4.1.1. 分析 A

マテリアルおよびエネルギー収支

粗鋼、銑鉄生産およびスクラップ収支に関して、2010 年実績および 2030 年シナリオ別試算結果を表 5 に示す。REF および BAT シナリオでは 2030 年の銑鉄生産量が 2010 年に比べ 7% 増加する。また、両シナリオでは積極的なスクラップ利用拡大がないことから 2030 年の国内余剰スクラップは 6.5Mt/年となり、近年の実績値と同水準となった。仮にこれら余剰スクラップを全て電炉で消費する場合（High-EAF シナリオ）、電炉鋼シェアを 28% まで上げる必要がある。これは 2000 年以降見られない高水準である。一方、ER シナリオのように転炉でのスクラップ利用を拡大した場合、銑鉄生産量は REF、BAT 両シナリオに比べ 6Mt/年減少し、2010 年レベルにとどまる。同時に、国内余剰スクラップはほぼ解消される結果となった。

転炉鋼生産のエネルギー・バランス

転炉鋼生産における 2030 年 CO₂ 排出削減シナリオ別のエネルギーバランス試算結果を表 6 に示す。ER シナリオでは REF シナリオと比較して、粗鋼 1 トン当たりの一次エネルギー消費原単位と CO₂ 排出原単位はそれぞれ 10% と 12% 削減する結果となった。また、ER シナリオでは、コークスの総消費量が REF および BAT シナリオに比べ 22% 減少した。一方、銑鉄およびコークス生産量が減少するために高炉転炉法からの副生ガス生成も減少し、ER シナリオでは発電に回せる副生ガスの量が REF および BAT 両シナリオに比べ、それぞれ 15% と 20% 少なくなる結果となった。

³ ここでは、OECD 諸国での CO₂ 排出削減量に対する非 OECD 諸国での CO₂ 排出増加量の割合を意味する。

表 5:粗鋼および銑鉄生産と鉄スクラップ収支に関する 2010
年実績および 2030 年シナリオ別試算結果。

指標/単位		年/シナリオ	2010 年実績	2030 年：試算結果		
				REF, BAT	ER	High-EAF
粗鋼生産 (Mt)	合計		110.8	119.8	119.8	119.8
	高炉転炉法		86.3	93.3	93.3	86.0
	電炉法		24.5	26.5	26.5	33.8
	電炉鋼シェア		22.1%	22.1%	22.1%	28.2%
銑鉄生産 (Mt)	合計		83.3	89.0	82.9	82.2
鉄スクラップ消費	合計 (Mt) ¹⁾		45.5	48.7	54.8	55.2
	高炉転炉法		13.4	14.5	20.6	13.4
	電炉法		25.6	27.7	27.7	35.3
	高炉転炉法での消費原単位 (t/t-粗鋼)		0.155	0.155	0.221	0.155
鉄スクラップ回収 (Mt)	合計		51.1	55.2	55.2	55.2
	自家発生		14.2	15.2	15.2	15.2
	加工		6.9	6.0	6.0	6.0
	老廃		30.0	34.0	34.0	34.0
国内スクラップ余剰 (Mt)			5.4	6.5	0.4	0

¹⁾ 合計値は鋳物用の消費（6.5 Mt/年）も含む。

表 6： 転炉鋼生産における 2030 年 CO₂ 排出削減シナリオ別のエネルギーバランス

指標/単位		2030 年シナリオ	REF	BAT	ER
銑鉄生産における燃料投入原単位					
コークス	t/t-銑鉄		0.365	0.365	0.299
微粉炭 (PCI)	t/t-銑鉄		0.140	0.140	0.200
廃プラスチック	t/t-銑鉄		0.0015	0.0015	0.014
粗鋼生産における燃料消費原単位					
燃料					
コークス炭	t/t-粗鋼		0.562	0.562	0.440
微粉炭	t/t-粗鋼		0.133	0.133	0.177
その他石炭	t/t-粗鋼		0.030	0.030	0.027
廃プラスチック	t/t-粗鋼		0.005	0.005	0.016
天然ガス	GJ/t-粗鋼		0.416	0.416	0.409
石油製品	GJ/t-粗鋼		0.838	0.838	0.775
電力、蒸気および副生ガス					
蒸気消費 (総計)	GJ/t-粗鋼		0.96	0.96	0.92
電力消費 (総計)	GJe/t-粗鋼		1.75	1.75	1.71
エネルギー回収	蒸気	GJ/t-粗鋼	1.08	1.37	1.29
	電力	GJ/t-粗鋼	0.18	0.18	0.17
正味蒸気消費	GJ/t-粗鋼		-0.13	-0.41	-0.37
正味電力消費	GJe/t-粗鋼		1.57	1.58	1.54
正味副生ガス生成	GJ/t-粗鋼		4.91	5.22	4.16
総計					
一次エネルギー消費原単位	GJ/t-粗鋼		20.8	19.7	18.7
CO ₂ 排出原単位	t-CO ₂ /t-粗鋼		1.89	1.85	1.67
コークス総消費	Mt/年		37.1	37.1	29.1
廃プラスチック総消費	Mt/年		0.45	0.45	1.5
発電用副生ガス生成	PJ/年		458	487	389

図 6 に転炉鋼生産 1 トンあたりの副生ガス収支を CO₂ 排出削減対策導入ケース別に示す。BAT シナリオと ER シナリオを比較した場合、低熱量の高炉ガスの生成量はあまり変わらないものの、高熱量のコークス炉ガスの生成量が大きく異なることが分かる。この結果、表 6 に示したように高炉転炉法からの発電用副生ガス総生成量が変わるだけでなく、副生ガスの体積あたりの平均熱量も低下するため、副生ガスからの発電において、より厳しいガス・ミックスの管理が必要になることが示唆される。

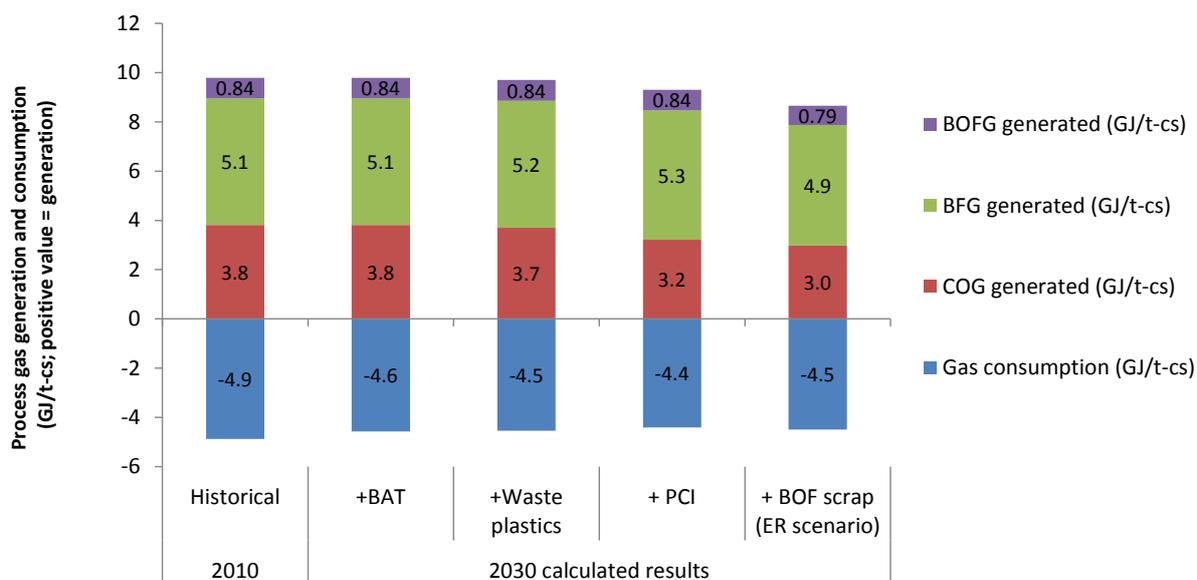


図 6：転炉鋼生産 1 トンあたりの副生ガス収支

4.1.1.1. CO₂ 排出量

国内鉄鋼部門の 2030 年における総 CO₂ 排出量と各種対策による排出削減量を図 7 に示す。REF シナリオと BAT シナリオでは 2030 年の CO₂ 排出量はそれぞれ基準年比 14 Mt と 10 Mt 増加している。しかし、廃プラスチック利用および PCI を拡大するとそれぞれ約 4 Mt と約 3 Mt の追加的 CO₂ 排出削減につながる。さらに、転炉でのスクラップ利用拡大により約 900 万トンの追加的 CO₂ 排出削減が可能であることが示された。本分析では、粗鋼生産量が 2030 年まで 120 Mt/年という高いレベルで推移する場合、電炉鋼シェア拡大や CCS に依存することなく CO₂ 排出量を基準年レベル以下に低減させるには、転炉でのスクラップ利用の拡大が必要なが示唆された。また、本分析で想定した 2030 年の老廃スクラップ回収量の下では、転炉のスクラップ配合比を最大化するだけで、電炉鋼シェアを拡大せずとも回収老廃スクラップのほぼ全量を国内で消費することができるが示された。

なお、日本鉄鋼連盟の「対炭素社会実行計画フェーズ II」(日本鉄鋼連盟 2014)では、CCS を除いた場合、2030 年にベースライン比で CO₂ 排出量を 640 万トン削減するとしている。本分析は BAT 導入およびコークス代替還元材利用最大化だけでも、日本鉄鋼連盟の見積もりを大きく上回る 11 Mt の削減が可能であることを示した。

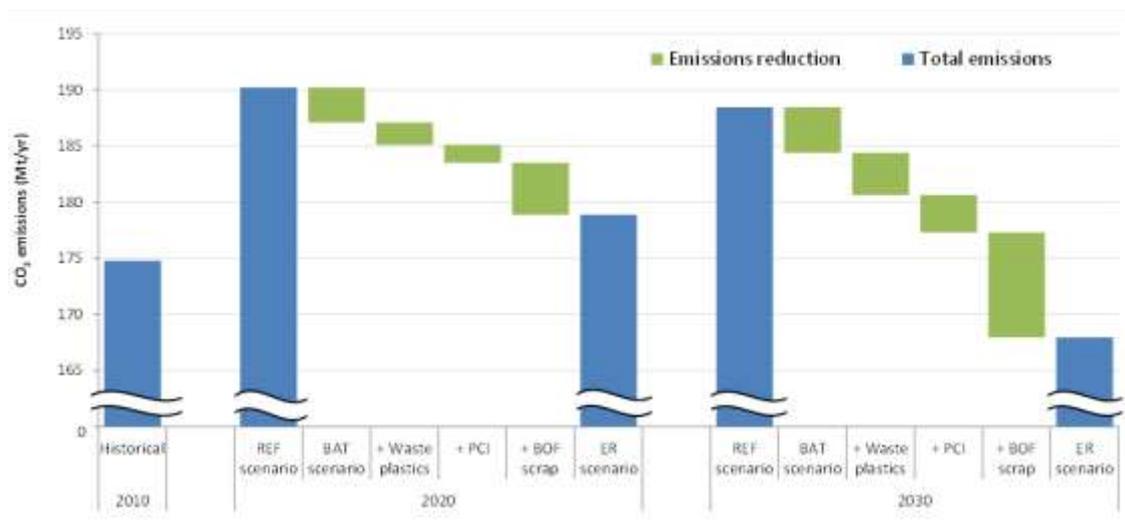


図 7：国内鉄鋼部門からの 2030 年における CO₂排出量

CO₂ 排出削減費用

ER シナリオについて 2030 年における対 BAT シナリオ比での追加的 CO₂ 排出削減に係る費用を図 8 に示す。高炉への PCI 拡大と転炉でのスクラップ配合率拡大の 2 つの追加的対策について、PCI 拡大は 300 万トン以上の CO₂ 排出削減をマイナスのコストで実現できることが示唆された。この結果は Ribbenhed et al. (2008)などの先行研究の結果と一致しており、近年高炉メーカーが PCI 関連の設備能力を強化していることの説明がつく。

一方、転炉でのスクラップ配合率拡大による CO₂ 排出削減費用は 1 トン当たり約 US\$110 (約 9,700 円) という結果を得た。この結果はスウェーデンの一貫製鉄プロセスにおけるスクラップ利用拡大に関する先行研究の結果 (\$38/t-CO₂) (Wang et al. 2009)よりは高くなっているが、その理由として各種前提条件の違いや、我が国の一貫製鉄プロセスのエネルギー効率が非常に良いために銑鉄の代替による省エネ効果が小さいことが挙げられる。また、この結果は「エネ環」策定にあたり 4 つのモデルにより算出された(NPU 2012)、GHG 排出量を 2030 年に 1990 年比 20-25%削減させる場合の限界削減費用のレンジ (5886-56183 円/t-CO₂：原子力の割合 0-20%) と比べても、十分検討するに値するレベルであるといえる。

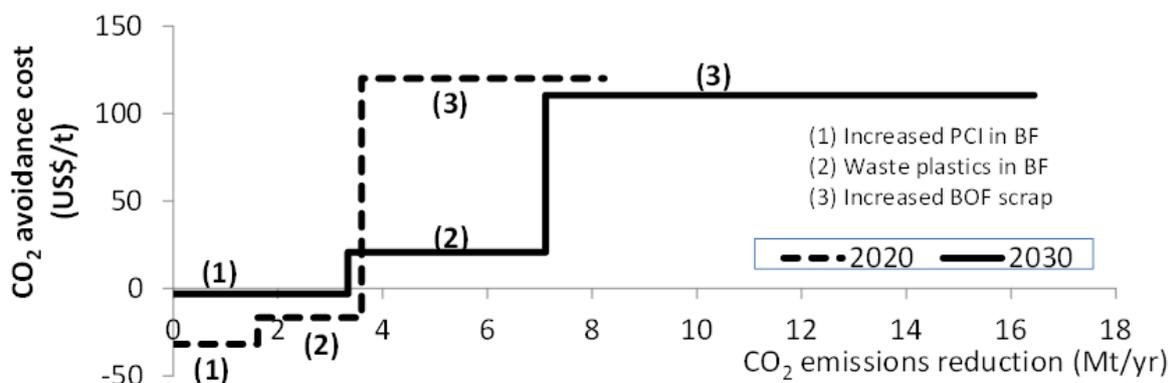


図 8：2030 年における ER シナリオの追加的 CO₂ 排出削減に係る費用 (対 BAT シナリオ比)

CO₂削減費用試算結果について、(a) 割引率、(b) 電力のCO₂排出原単位、(c) 電力価格、(d) 原材料価格、(e) エネルギー価格に対する感度分析の結果を図9に示す。コークス代替によるCO₂排出削減は原材料価格やエネルギー価格だけでなく、設備費用が比較的大きいことから割引率想定に対する感度が高いことが示唆された。特に廃プラスチック利用拡大については、将来の需給状況とそれに伴う落札価格が不透明なため、CO₂排出削減費用の不確実性が大きい。転炉でのスクラップ利用拡大については、コークス炉ガスや高炉ガスなど、発電に利用される副生ガスの生成量に比較的大きな変化を与えるため、電力の価格やCO₂排出原単位に対する感度が高い結果となった。

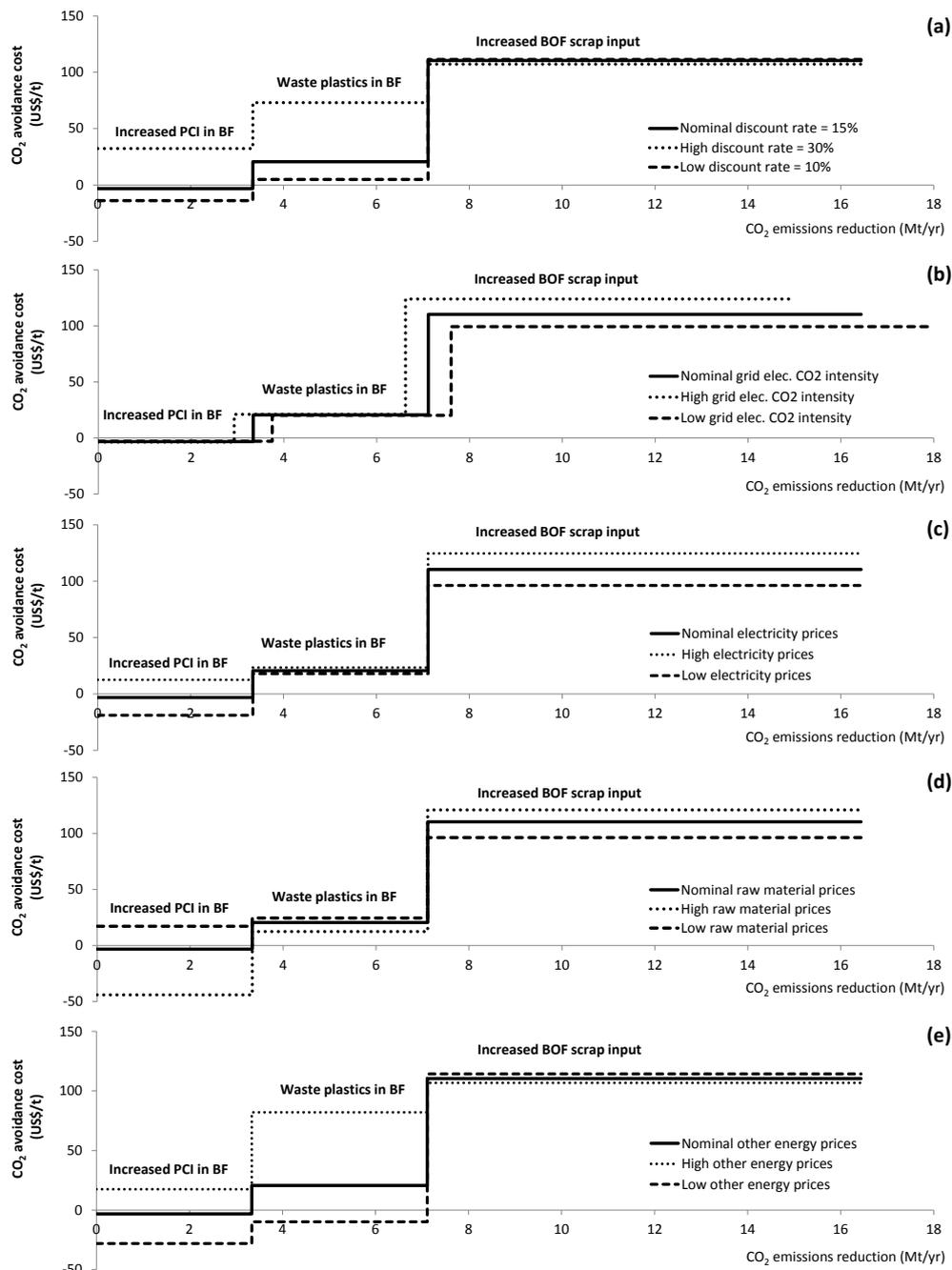


図9：CO₂削減費用試算結果の主要パラメータに対する感度分析

スクラップ利用拡大による転炉鋼中の銅濃度の変化

転炉でのスクラップ利用拡大による転炉鋼中の平均銅濃度の変化を図 10 に示す。高級鋼材とされる製品の中で最も基準が厳しい製品では銅混入率を 0.06 質量%以下に抑える必要があるが(Takeuchi 2009)、本分析では老廃スクラップが転炉で多く消費される場合でもそのレベルには達しないことが示唆された。

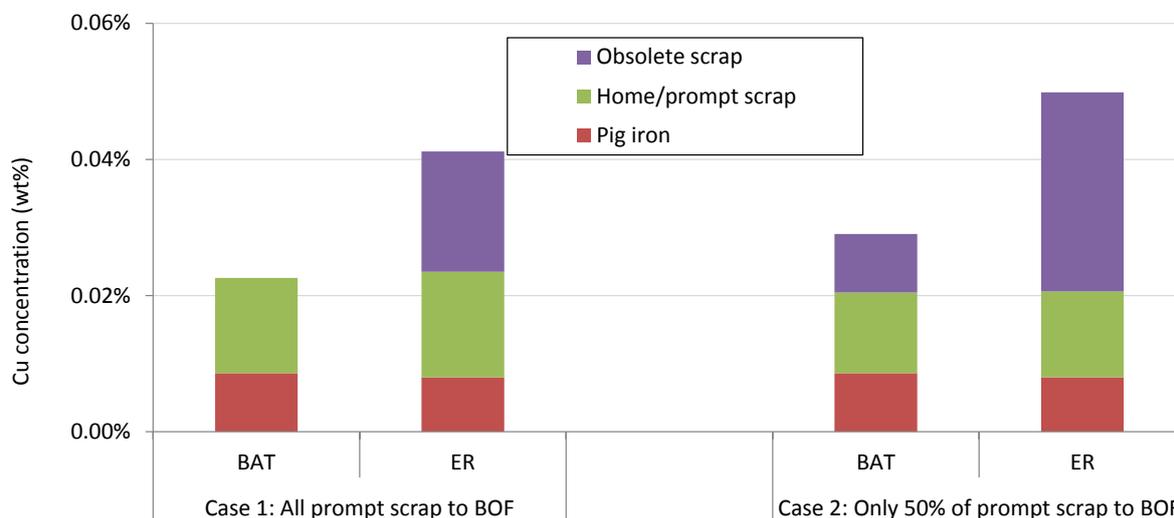


図 10：転炉スクラップ利用拡大による転炉鋼中の銅濃度（混入源別）の変化

分析 A のまとめ

- 2030 年においても 1 億 2000 万トンの高い粗鋼生産量が維持される場合、CO₂回収・貯留（CCS）を利用せずとも技術固定シナリオに比べて約 2100 万トン/年の CO₂ 排出削減が \$ 110/t-CO₂ 程度で実現可能であることが明らかになった。2010 年排出量と比較すると、約 4%の削減に相当する。
- 算出された削減ポテンシャルは、低炭素社会実行計画フェーズ II の目標値（900 万トン/年、CCS を含む）の 2 倍以上である。鉄スクラップ利用拡大と CCS を除いて比較した場合でも、約 2 倍の削減ポテンシャルがあることが明らかになった。
- 国内回収スクラップは電炉鋼シェアを拡大させずとも転炉での消費拡大によりほぼ全量国内で消費できることが分かった。また、電炉鋼シェア拡大の場合と同等の CO₂ 排出削減効果が得られることを確認した。また、老廃スクラップの利用を拡大しても、転炉鋼の銅混入率は高級鋼材生産に影響を与えない程度にとどまることが明らかになった。
- しかし、高い粗鋼生産量想定の下では CCS の大規模導入またはスクラップ利用の更なる拡大を実現しない限り、CO₂ 排出量の大幅削減は困難であることが改めて示された。

4.1.2. 分析 B

必要最低限の高炉およびコークス炉設備能力

2030年時点での最低限必要な高炉およびコークス炉能力の試算結果を表7に示す。高炉については、2010年の90Mt/年から1割弱減の82.9Mt/年と算出された。一方、コークス炉については2010年の44Mt/年（鉄鋼業消費相当分）から約3割減の29.1Mt/年と算出された。コークス炉設備能力の減少幅が大きいことについては主に2つの理由が考えられる。一つは現状でコークス炉の設備利用率が70-80%程度で推移しているなど、設備能力が余剰になっていることが挙げられる。二つ目は、コークス消費の削減は代替還元材の利用拡大のみならず、転炉スクラップ利用の拡大によっても実現可能であるなど、削減の余地が大きいことである。

表7：必要最小限のコークス炉および高炉設備能力の算出

	銑鉄 (k = 高炉)		コークス (k = コークス炉)	
	高粗鋼生産－ 転炉スクラッ プとコークス 代替の最大化	低粗鋼生産－ BATのみ導入	高粗鋼生産－ 転炉スクラッ プとコークス 代替の最大化	低粗鋼生産－ BATのみ導入
2010年実績値	89.8		43.8（鉄鋼業消費相当分）	
2030年生産量（計算値）	82.9	66.9	29.1	27.9
2030年生産能力 ($C_{k,2030,opt}$: 計算値)	82.9		29.1	

主要結果

必要最低限の高炉およびコークス炉の設備能力の下での操業可能性を考慮した、各シナリオの主要結果を表8に示す。粗鋼生産量が120Mt/年と高レベルで推移する場合、設備能力の制約から、転炉でのスクラップ利用の拡大やコークス代替還元材の利用拡大は、CO₂排出削減に関係なく最大化させる必要があることが明らかになった。一方、粗鋼生産量が90Mt/年まで低下する場合、最低限の設備利用率（本分析では85%に設定）を維持するために転炉でのスクラップ利用を最小に抑える必要があると同時に、コークス不足とならないようコークス代替還元材の利用は最大化させる必要があることが明らかになった。その結果、2030年に想定しうるCO₂排出量は2010年比でマイナス4-21%であることが明らかになった。なお、粗鋼生産量が105Mtの場合のCO₂排出量は、2010年比でマイナス11-16%となると算出された。同時に、粗鋼生産量が90Mt/年レベルまで低下する場合、電炉鋼シェアを上げない限り国内スクラップ余剰が17.4Mt/年まで増加する可能性が示唆された。

表 8：必要最低限の高炉およびコークス炉の設備能力の下での各シナリオの主要結果

粗鋼生産量/シナリオ	120 Mt	105 Mt		90 Mt	
	ER	High Emission scenario	Low Emission scenario	High Emission scenario	Low Emission scenario
転炉スクラップ投入 (t/t-粗鋼)	0.221	0.155	0.221	0.104	0.104
PCI (t/t-銑鉄)	0.200	0.174	0.200	0.140	0.196
コークス炉設備利用率	100%	100%	87.1%	100%	85%
高炉設備利用率	100%	94.1%	87.7%	85%	85%
一次エネルギー原単位 (GJ/t-粗鋼)	18.7	19.5	18.7	20.2	19.9
CO ₂ 排出量 (Mt)	168	156	147	143	138
CO ₂ 排出量 (2010 年比)	-4%	-11%	-16%	-18%	-21%
CO ₂ 排出原単位 (t/t-粗鋼)	1.67	1.78	1.67	1.91	1.84
国内スクラップ余剰 (Mt)	0.4	10.1	4.8	17.4	17.4

主要設備の寿命延長に関する感度分析

主要設備の寿命パラメータ設定が CO₂ 排出削減量と 2030 年までに必要な設備導入量にどのような影響を与えるかについて、感度分析を行った。設備寿命を 5 年（コークス炉は 10 年）延長させた場合の、2010 年から 2030 年の間に必要な設備導入量（新設・更新）の変化を図 11 に示す。寿命延長により 2030 年までに必要な設備導入量が、高炉については 72 Mt/年から 46 Mt/年に、コークス炉については 26 Mt/年から 4 Mt/年に、それぞれ減少することが明らかになった。

一方、主要設備の寿命延長による CO₂ 排出削減量の減少は、いずれのシナリオにおいても 1 Mt-CO₂/年以下にとどまることも明らかになった。この理由としては主に 2 つが考えられる。1 つ目は、省エネの大きい発電設備の大半の更新時期が 2025 年以前に集中しているため、5 年の寿命延長を実施しても 2030 年の結果にほとんど影響しないことである。2 つ目は、他の主要設備においては設備更新による省エネ効果もともと小さく、寿命延長による影響が限定的なことである。

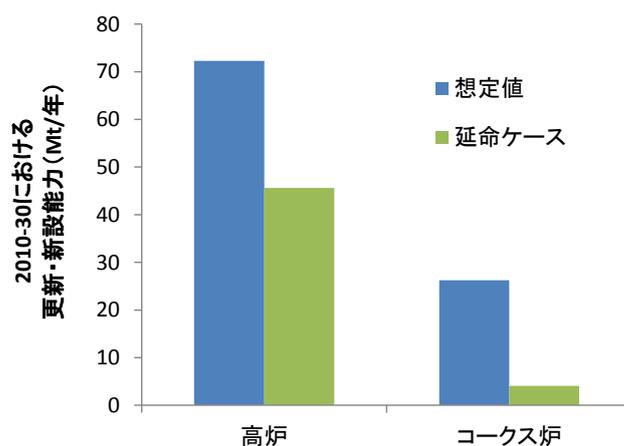


図 11：高炉およびコークス炉の設備寿命を既定値よりそれぞれ5年と10年延命させた場合の、2010年から2030年の間に必要な設備導入量（新設・更新）の変化

4.1.2.1. 分析Bのまとめ

- 2030年へ向けた将来粗鋼生産量の不確実性が大きい中（90-120 Mt）、設備投資を最小化させるべく転炉スクラップ利用やコークス代替還元材利用を最大限活用した弾力的な操業を目指す場合、最低限必要な高炉およびコークス炉の設備能力は、それぞれ83 Mt/年（2010年比7 Mt/年減）および2900万トン/年（2010年比14 Mt/年減）となることが明らかになった。
- 2030年の粗鋼生産量が120 Mt/年と高いレベルに維持される場合、設備能力の制約から、転炉でのスクラップ利用の拡大やコークス代替還元材の利用拡大は、CO₂排出削減に関係なく最大化させる必要があることが明らかになった。
- 粗鋼生産量が90 Mt/年まで低下する場合、最低限の設備利用率（本分析では80%に設定）を維持するために転炉でのスクラップ利用を最小に抑える必要があると同時に、コークス需要が供給能力を上回らぬよう、コークス代替還元材の利用を2010年レベルより大きく増加させる必要があることが明らかになった。
- 算出された高炉およびコークス炉の設備能力想定の下で操業可能なシナリオのみを考慮すると、2030年におけるCO₂排出量は2010年比で4-25%削減の幅に収まると算出された。粗鋼生産量105 Mt/年では、CO₂排出量は2010年比11-16%削減と算出された。
- 主要設備の寿命を5年（コークス炉は10年）延長してもCO₂排出削減量への影響は限定的であることが明らかになった。

4.2. 海外における鉄鋼部門の低炭素化政策に関する事例調査

4.2.1. EU

EU27 の 2013 年粗鋼生産量は 166Mt であり、うち 6 割の 100Mt が転炉鋼であり、電炉鋼の占める割合が日本に比べ高くなっている。欧州鉄鋼連盟は 2030 年に向けて、粗鋼生産量が 204Mt まで増加すると見込んでいる (Ghenda 2013)。

EU は GHG 排出量を 2020 年までに 1990 年比 20%削減させ、他の先進国が同等の排出削減目標を掲げ、また途上国が各々の責任と能力に従った適切な貢献をする場合は、目標を 1990 年比 30%削減に引き上げるとしている (UNFCCC 2012)。また、2020 年以降の温暖化対策目標については、1990 年比で 40%削減させる約束草案 (INDC) を UNFCCC 事務局に提出している (EU 2015)。

ETS および炭素税の現状と今後

EU については、鉄鋼業への影響が大きいとされる EU-ETS の動向について調査を実施した。2005 年に開始した EU-ETS は現在、第 3 フェーズ (2013–2020 年) に入っている。第 1 フェーズ (2005–2007 年) および第 2 フェーズ (2008–2012 年) では、一貫製鉄所の排出枠の全てがフリーアロケーション^{4,5}となっており、排出枠の売却によって利益を上げた高炉メーカーすらあった。このことについて、国内高炉メーカー関係者は、EC による形を変えた欧州鉄鋼業への補助金に過ぎないとして、EU-ETS のあり方を批判している (Anonymous 2015)。

一方、電炉鋼メーカーについては EU-ETS による電力価格の上昇により粗鋼 1 トン当たりの追加費用が転炉鋼のそれより大きくなるという事態が発生した (CEPS 2013)。このような間接コストの上昇について加盟国政府は補償金を出すが、対応は国毎に大きく異なっている。このような事情から EU-ETS は鉄鋼部門からの GHG 排出削減にはあまり貢献していないことが伺えた。ヒアリングを行った EC 担当者は、EU-ETS 導入による鉄鋼部門での設備投資促進の効果は限定的であったと述べており、また 2008–9 年の世界金融危機以前の好景気時に省エネ投資が進まなかったことは排出量削減の点からは痛手であったとも述べている。

第 3 フェーズからは高炉メーカーにもより厳しい排出枠が課されることになっている。排出枠を決める際に使用される排出量ベンチマークが EU 域内のベスト・パフォーマーでも未達であり、ETS 指令に反する過度な厳しさであるとして、EUROFER は欧州委員会を欧州司法裁判所に提訴している (Eurofer (2011)、結果は却下 (Reuters 2012))。その一方、電炉メーカーの場合に見られる間接費用の問題については特段対応する予定はないようである。このことから、EUROFER は EU 域内において健全な競争が全くできない環境になっていると、EC を批判している (Croon 2013)。

⁴ フリーアロケーションとは、排出枠について「無償割当を行うことによって特定のセクター、部門に対する影響力を相殺するというもの」(環境省地球環境局国内排出量取引制度検討会第 4 回会合 (2008 年 4 月 22 日開催) 議事録より抜粋)。

⁵ International Emissions Trading Association; “The EU’s Emissions Trading System”, 2014. http://www.iet.org/assets/3-Minute-Briefings/phase%203%20eu%20ets_final.pdf, accessed 10 November, 2014.

鉄スクラップ回収および利用の拡大へ向けた方策

EU27において老廃スクラップ回収量は2050年に向けて着実に増加する見込みで、欧州鉄鋼連盟は2011年の65Mtから2030年には77Mt、2050年には98Mtに増加するとしている（Ghenda 2013）。同時に、欧州では電炉鋼シェア拡大のために特段の政策を実施してはいないことが明らかになった。上記のEU ETSにおける間接コスト増加の補償制度も不十分であるが、鉄スクラップ価格の安定化のための制度等は特に存在しないとのことだった。

転炉鋼と電炉鋼のバランスについては、長期的には高炉転炉法から電炉法へのシフトは止まらないだろうというのがECおよびEUROFER共通の見解であった。将来にわたり鉄鋼市場における国際競争が厳しさを増し、環境規制の強化やエネルギー・CO₂価格の上昇ならびに鉄スクラップ回収の増加が見込まれる中、多大な設備投資を要する高炉の更新・新設はリスクが大きく、今後も厳しい状況が続くだろうとの見解が示された。

革新的製鉄技術の研究・開発

EUの中長期GHG排出削減目標の下では、鉄鋼部門において革新的製鉄技術の大規模導入が確実に必要になるにも係わらず、そのための研究・開発支援体制が不透明になってきている。これまでCCSを含む革新技術の研究開発を担ってきたULCOSプロジェクトにおいても、中期将来に有望とされてきた炉頂ガス循環CO₂回収高炉技術の実証試験について公的支援の目途が立っていない。

一方、日本における革新的製鉄技術の研究開発（COURSE50）については、世界中の同様の事業の中で最も政府の着実な支援を受けている事業の一つであり（Reimink 2012）、CO₂分離技術の研究・開発と同時に既存の高炉技術をベースに製鉄におけるエネルギー消費量の大幅削減も同時に目指している点が評価されていた。日本の方向性は正しく、今後も政府支援が継続することを期待している。ただ、CO₂分離技術自体の研究開発については欧州の方がリードしているとの見方がある（Reimink 2013）。

その他

環境汚染物質の管理については、Integrated Pollution Prevention and Control（IPPC）指令に基づくBAT技術導入を条件とした操業許認可制度が、これまで大きな役割を果たしてきた。このIPPC指令は2011年に産業排出指令（IED: Industrial Emissions Directive）によって引き継がれたが、IEDの下では操業許認可条件としてのBAT技術導入が環境汚染物質管理だけでなくエネルギーを含む資源効率についても適用される可能性がある。このようにEUでは気候変動対策について、ETS等温室効果ガス排出を直接ターゲットにする政策のみならず環境規制を拡大する形でも進めていることが伺える。

CO₂排出削減に関するセクター別アプローチについては、2009年に本格的に検討されたものの方法論について合意が得られず頓挫した。その後議論は下火になり、今後も検討される見込みは薄いとのことである。「エネルギー効率向上に関する国際パートナーシップ」（GSEP: Global Superior Energy Performance Partnership）のように、産業部門全体をカバーするスキームの方がより現実に即しており、また実質的な効果が得られるのではないかと見解が示された。ただし、実効性の確保には地域レベルでの合意と取り

組みが不可欠であるとの見解が示された。

4.2.2. 中国

中国は世界最大の鉄鋼生産国であり、2013年の生産量は全世界の総生産量の50%に当たる822Mtであり、そのうち9割以上の750Mtが転炉鋼であった。将来の粗鋼生産量見通しについては非常に幅が大きい。世界の2大鉱業会社であるBHP BillitonとRio Tintoは2020年代半ばに1000-1100Mtでピーク達し、その後2030年に向けて同水準で推移するとしている(BHP Billiton 2014; Rio Tinto 2015)。しかし、この見通しについては過大であるとの指摘が多く上がっており(Australian Financial Review 2015)、今後は現在の生産レベルで2020年代半ばまで推移し、その後は減少する可能性も示唆されている。Hatch AssociatesやWorld Steel Dynamicsも同様に、2025年に向けて850Mtまで増加する見通しを立てている(Hatch Associates 2012; World Steel Dynamics 2013)⁶。最近では国内需要の低迷も相まって鉄鋼生産能力の余剰が深刻化している(OECD 2015)。

世界最大のCO₂排出国である中国は2020年までに、GDP当たりのCO₂排出量を2005年比で40-45%削減することなどを掲げている(NDRC 2010)。この目標を達成するために、第12次5ヵ年計画(2011-2015:「十二五」)において、GDP当たりのCO₂排出原単位を2015年までに2010年比で17%削減させる目標を立てている⁷。また、2030年へ向けては、2014年11月に発表された米中合意文書の中で、2030年以前のできるだけ早い時期にCO₂排出量を頭打ちにさせる目標を立てている(The White House 2014)。

大気汚染問題も相まって、鉄鋼部門における石炭消費の抑制およびCO₂排出削減は重要な課題となっている。「十二五」においては、大手企業を対象とした「一万社省エネ低炭素プロジェクト」や、「非効率生産設備の強制淘汰プロジェクト」などを通じて、国内鉄鋼業の生産効率改善およびCO₂排出削減を進めている。また、GHG排出量削減そのものが政策目標ではないが温暖化対策に寄与する施策としては、北京市、天津市、河北省、山東省の4つの地域に対し、2012年の石炭消費量を基準に、2017年まで計8,300万トンの石炭消費量の削減義務を課した大気汚染防止行動計画などがある⁸。また、廃鋼鉄産業“十二五”発展規則では、鉄鋼生産におけるスクラップ原単位を2010年の136kg/t-粗鋼から2015年までに200kg/t-粗鋼に引き上げ、過去最高水準(227kg/t-粗鋼)にできるだけ近づける目標を設定している。

ETS および炭素税の現状と今後

中国では現在、2省5市⁹において排出量取引制度(ETS)が試行されている。これら試験的ETSから得られた教訓を踏まえ、中国政府は2016年に全国版ETSをスタートさせる予定である。しかし、当面の間は測定・報告・検証(MRV)のためのインフラ整備などに重きが置かれ、EU ETSの第1・2フェーズ

⁶ Pauliuk et al. (2012)では国内鉄鋼需要が500Mt以下にとどまるシナリオも報告されている。

⁷ 2014年11月25日に行われた中国気候変動白書の発表記者会見で、国家発展改革委員会の解振華副主任は、2020年までの40-45%削減目標に関しては、2013年までに28.56%の削減を達成したこと、第12次五ヵ年計画の17%削減目標達成には、今年と来年でさらに3.9%から4%の削減が必要だが、今年は第三四半期までに既に4.6%削減を実現しており、来年末までの目標達成は問題ないと表明した。http://qhs.ndrc.gov.cn/gzdt/201411/t20141126_649481.html

⁸ 金振「中国の法律事情：中国の大気汚染防止の法制度および関連政策(VII)」(独)科学技術振興機構 http://www.spc.jst.go.jp/experiences/chinese_law/13028.html

⁹ 北京市、天津市、上海市、深圳市、重慶市、広東省、湖北省において実施。

のように実際の CO₂ 排出削減効果は限定的だろうと見られている。よって、鉄鋼部門への経済的影響は今のところ限定的と見られており、この点については日本の高炉メーカー関係者も同様の見解を示している (Anonymous 2014)。

同時に、中国政府は今年中にも環境税を導入することを表明している (New York Times 2015)。課税レベルについては公式な発表はないが、20 人民元/t-CO₂ (約 380 円/t-CO₂) で始まり、2020 年には 100 人民元/t-CO₂ (約 1900 円/t-CO₂) まで引き上げる計画が示唆されている (Jiang 2015)。IEA World Energy Outlook (WEO) 2014 の 450 シナリオでは、中国における 2020 年の炭素価格は 10 米ドル/t-CO₂ と想定されているが (IEA 2014)、これと比べると中国の環境税は野心的な取り組みと言える。

鉄スクラップ回収および利用の拡大へ向けた方策

鉄スクラップ市場については今後、中国を中心に東アジアでの鉄スクラップ発生が急増する見込みである。2013 年の中国における鉄スクラップ供給量は、(主に日本からの) 約 5 Mt の輸入も含めて約 92 Mt であった。約 87 Mt の国内供給のうち、自家発生スクラップと市中スクラップ (加工スクラップと老廃スクラップの合計) がほぼ半分ずつであった。老廃スクラップ回収量は、鉄鋼蓄積量の増加と共に着実に増えているものの、2013 年時点では 44 Mt 程度にとどまっている (Wübbeke & Heroth 2014)。しかし、1990 年頃からの急激な経済成長により急増した鉄鋼蓄積が今後徐々に寿命を迎え始めるため、2030 年時点では相当量の利用可能な老廃スクラップが排出される可能性が示唆されている。World Steel Dynamics は 2025 時点で 220 Mt の使用済み鋼材が排出されると算出しており (World Steel Dynamics 2013)、Pauliuk et al. (2012) も 2025 年には使用可能な老廃スクラップ供給が 120-200Mt に達すると算出している。

2030 年へ向けて中国国内でスクラップ供給余剰になるかどうかについては、不確実性が大きいものの、その可能性は低くないと見られ、その規模も相当大きくなる可能性がある。現在の中国の粗鋼生産に占める電炉鋼の割合は 10%前後、かつ電炉鋼においてもスクラップ配合率は 5 割程度 (Kawabata & Chou 2014) と、国内のスクラップ消費能力には大きな余裕がある。また、鉄鋼需要や使用済み鉄鋼材排出量の見通しだけでなく、使用済み鋼材排出のうちどの程度が利用可能なスクラップとして回収されるかについても文献間で想定に大きな開きがあるため、中国の老廃鉄スクラップ需給の将来予測は文献報告値の幅が非常に大きい (World Steel Dynamics 2013; Pauliuk et al. 2012; Hatch Associates 2012)。2025 年時点における老廃スクラップの供給余剰見通しの文献値はゼロから 90 Mt まで非常に幅が大きい、ゼロ予測を報告している Pauliuk et al. (2013) は電炉鋼シェアを 20%、電炉および転炉におけるスクラップ配合率をそれぞれ 100%と 18%まで上げることを前提としている。2030 年時点の見通しは Pauliuk et al. (2013) のみ報告しており、この中でも電炉鋼シェアを 40%、電炉および転炉におけるスクラップ配合率をそれぞれ 100%と 20%まで増加させない限り中国は国内で回収される老廃スクラップを全量消費することはできず、仮に電炉鋼シェアが現在のレベル (9%) で留まる場合は 90-150 Mt の老廃スクラップが供給余剰になると算出している。2030 年の電炉シェアについては中国・冶金工業規劃研究院 (Li 2014) が 18-29%の見通しを示すなど、現在のレベルにとどまることは考えにくいとはいえ、年間数千万トンレベルで老廃スクラップの供給余剰が発生する可能性は十分に考えられる。

中国では使用済み鉄鋼排出量に対する老廃スクラップ消費率が現在 40-50%に止まっている (Guo & Zhang 2014)。中国での老廃スクラップ回収量が比較的少ない理由としては、使用済み鉄鋼材の排出量が

まだ少ないことや、スクラップ回収・流通システムが成熟していないことが挙げられている (Kawabata & Chou 2014)。スクラップ回収・流通システムの脆弱性についてはまず、国の産業基準 (2010 年公布) に適合したスクラップ加工・運送事業者 (認定事業者) が、2013 年時点で 50 社前後、加工能力は 25-30 Mt/年と小さいことが挙げられる (張伯玲 2013)。中国には国の産業基準に適合しない零細企業も多数存在しており、これら不法業者は不当利益を背景に認定企業よりスクラップ買取価格を高く設定しているケースが少なくなく、認定事業者の経営を圧迫している。結果として、認定企業にはスクラップが集まりにくい状況を招き、経営コストを押し上げている。上記のような不当取引量は 30 Mt/年以上にのぼると見積もる指摘もある (張伯玲 2013)。自動車については、廃棄予定のものが中古車としての販売目的で不法業者に買い取られたり、所有者が自ら解体してリサイクル鉄を売りさばくケースも多く、寿命を迎えた自動車が正規のルートで回収・解体される割合は全体の 38%から 48%にとどまる (Wübbecke & Heroth 2014)。第 12 次 5 ヵ年計画における「中国鉄スクラップ産業 2011 年～15 年の発展計画」では、2015 年までに 20 万トンから 30 万トンの加工能力を持つ業者を新たに 100 社増やし、市中発生スクラップの 50%を加工できる能力を整備する計画である。一方、中国政府は 2002 年よりスクラップ産業発展のためにスクラップ業者への税制優遇政策を実施してきた。しかし、優遇政策そのものに一貫性がなかったため、脆弱なスクラップ産業の経営は不安定になりやすく、結果としてスクラップ回収の長期的なコスト改善を阻害している。例えば、2012 年にスクラップ国内消費が初めて減少に転じた背景には、高炉の生産能力余剰だけでなく、中国政府が 2002 年から導入したスクラップ関連減税措置を 2011 年に打ち切った影響もあると考えられる。その後、減税措置の再発動に関する議論はあるが、スクラップ産業の補助金体質からの脱却には時間がかかる見通しである (張伯玲 2013)。

革新的製鉄技術の研究・開発

中国政府はアジア開発銀行の支援等の下で CCS ロードマップを策定中であるが (ADB 2012)、これまで公式に発表されたものはない。中国・科学技術省の 2011 年報告書によると、公的支援の下での製鉄プロセスにおける CCS 技術開発・実証事業は 1 件のみ 2011 年から 2014 年の間実施されていた (MOST 2011)。CCS 技術開発は宝山鋼鉄も独自に行っているが、具体的な技術や開発状況については公開されている情報が少ない (Jiang 2015)。

4.2.3. 韓国

韓国は世界第 6 位の粗鋼生産国である。2013 年の総粗鋼生産量 66 Mt のうち、61%の 40 Mt が転炉鋼であった。韓国鉄鋼業のエネルギー効率性は日本と並び世界最高レベルと算出されている (RITE 2012)。気候変動政策について、韓国は 2020 年までに GHG を Business-As-Usual 比で 30%削減させる自主目標を UNFCCC 事務局に提出している (Ministry of Foreign Affairs and Trade Republic of Korea 2010)。2030 年の温暖化対策目標 (INDC) については現在政府内で検討中であり、公開されている情報は少ない。

ETS および炭素税の現状と今後

韓国では 2015 年より ETS がスタートした。韓国 ETS は総 GHG 排出量の 66%を占める 525 の事業所を対象にしている。鉄鋼部門に関しては、2017 年までの第 1 次計画期間は無償割当の割合が 100%となっている (International Carbon Action Partnership 2015)。国内鉄鋼メーカー関係者も韓国の高炉メーカーが ETS

導入により不利な状況に陥るといふ話は確認していないことから¹⁰、当面はEU ETSの第1・2フェーズのように、鉄鋼部門から大規模なCO₂排出削減が求められることはないと考えられる。2030年へ向けては、韓国は現在INDCを策定中であり、ETSが2030年へ向けてどのように展開していくかは未知数である。

鉄スクラップ回収および利用の拡大について

現在韓国は鉄スクラップの純輸入国であり、2013年には日本から4.7 Mt輸入している(JFRMA 2015)。韓国では経済成長に伴い、鉄鋼蓄積量が2010年の540 Mtから2030年には940 Mtまで増加すると予測されている。その結果、老廃スクラップ回収量は2010年の10.7 Mtから2030年には20.7 Mtへと大幅に増加する見通しで、2025-30年頃には韓国はスクラップ自給に転ずるとみられている(Steel Recycling Research 2013)。なお、韓国政府として特段のスクラップ利用拡大策は取っていない(Kim & Lee 2015)。

革新的製鉄技術の研究・開発

韓国最大の高炉メーカーであるPOSCOは、以下の5つのCO₂ブレイクスルー技術開発（（1）スクラップ大量消費転炉技術、（2）CO₂分離技術、（3）スラグ熱回収技術、（4）回収廃熱による熱電子発電技術、（5）水素還元製鉄技術）を進めている(POSCO 2013)。このうち、（1）のスクラップ大量消費転炉技術はドイツ・Saarstahlとの共同開発によるもので、転炉でのスクラップ配合率を50%以上にすることが可能である。粗鋼生産能力75万トン/年の炉の建設が2013年に完成した。スクラップ大量消費の際のエネルギー消費削減やCO₂削減効果については記載されていない。（2）のCO₂回収技術については、浦項に導入したアンモニア溶媒による回収設備を2015年までに商用化させるとしている。CO₂回収量は約30万トン/年になる予定である。なお、CCSの研究開発について韓国は、2009年に2020年の商用化を目指したCCSロードマップを策定しており、産業CCSも含まれている。また、2010年には「緑の成長に関する大統領諮問委員会」と関係5省がNational CCS master action planを発表しており、韓国CCS協会が発足している(Han 2014)。

4.2.4. まとめ

- ETSや炭素税については、中国や韓国などのライバル鉄鋼生産国でも本格導入の流れができつつある。これら炭素価格付け政策が直ちに両国の鉄鋼部門に影響を及ぼす可能性は低いが、これまで省エネ技術普及でリードしてきた国内高炉メーカーも低炭素化の国際ルール作りでは主導権を握られる可能性がある。EU ETSからは、本来推進されるべき電炉メーカーが高炉メーカーより経済影響を受けたことが明らかになっており、日本で炭素価格付けが実施される際は十分留意せねばならない。
- 低炭素製鉄技術開発においては、日本は比較的規模の大きいCCS技術開発支援を継続しており、できるだけ早い時期の実用化に向けて今後一層の支援拡大が求められる。一方、韓国はスクラップ配合率50%以上が可能な転炉技術を開発していることは注目に値する。日本もJFEスチールなどが2030年30%配合を目指して技術開発を行っているが、今後の東アジアでの鉄スクラップ供給の急増を考えると技術開発をより強化すべき分野であるといえる。

¹⁰ 国内高炉メーカー関係者への聞き取り調査。2015年

- 2030年に向けては東アジアで鉄スクラップ回収が急増し、日本・中国・韓国がいずれもスクラップ（大）輸出国となる可能性が示唆される。地域的なスクラップの需給ミスマッチを回避するためにも、東アジア諸国はできる限り地域内で鉄スクラップ消費を拡大するよう政策協調すべきであり、同時に東アジアの余剰スクラップが確実に需要地に届けられるよう、遠隔地への輸出インフラ整備でも協調していく必要が出てくるかもしれない。
- EU、韓国ではスクラップ回収および利用拡大を目的とした政策は特に実施していない。一方、中国では大規模な政策展開を行っており、老廃スクラップ回収率にもまだ改善の余地があるとみられることから、今後日本による技術やインフラ面での協力が期待される。

4.3. 鉄鋼部門の低炭素化に向けたインセンティブ付け施策の評価

鉄鋼部門のみに焦点を当てて多国間政策協調の効果を分析した既往研究は、特に近年実施されたものが少なかった。比較的古い既往研究については、分析当時と比べて鉄鋼部門を取り巻く世界的な状況が大きく変化しているため、分析結果の定性的な部分についてのみ有効であると OECD は忠告している (Braathen 2008)。今後更なる研究の進展が期待される分野であるが、ここでは Zhang (2012)によってまとめられている文献について、定量的な結果も参考までに示しつつ、その概要を紹介する。

鉄鋼部門のような特定のエネルギー集約型産業における炭素リーケージをより正確に評価するには、GTAP などの一般均衡モデルにおける産業区分から更に踏み込んで詳細な産業データベースの構築を行う必要があると指摘されている (Monjon & Quirion 2011; Mathiesen & Maestad 2004)。炭素価格付けによる産業への影響分析の文献レビューを実施した Zhang (2012) によると、リーケージの影響については、一般均衡モデルと鉄鋼部門に特化した部分均衡モデルの間で結果が異なることが示唆されている。具体的には、一般均衡モデルを用いた場合、経済全体での炭素リーケージ率はパラメータ設定によっては 100% を超える（世界全体での総排出量が増加する）結果もみられたものの、全体的には鉄鋼部門に特化した部分均衡モデルにおけるリーケージ率の結果より低かった。その一方で、部分均衡モデル分析においても 100%以上の炭素リーケージ率を報告する文献はなかった。

鉄鋼部門に特化した分析における炭素リーケージ率については、10-25\$/tCO₂ と比較的低いレベルでも 35-45%の高いリーケージ率が報告されており、100\$/tCO₂ を超える場合は 70%以上に達する可能性が示唆されている。Gielen and Moriguchi (2002) は、日本と EU で 10,000 円 (83\$) /tCO₂ の炭素税を導入した場合¹¹、2030年における日本と EU での CO₂ 排出量は約 80 Mt-CO₂/年程度削減されるが、炭素リーケージ率も 70%近くに達すると算出した。また、Gielen and Moriguchi (2002)では炭素リーケージ率は 1200 円 (10\$) /tCO₂ の場合でも 35%と高い結果となっているが、同様の結果が別のモデル分析でも示されていることから、炭素リーケージ率は低い税率であっても炭素税導入に敏感に反応することが示唆されている (Oikonomou et al. 2006)。OECD では 2003 年に、OECD 鉄鋼部門における 25\$/tCO₂ の炭素税導入の影響分析を実施している (Maestad 2003)。国境税調整や税収の還流を考慮しない場合、OECD 諸国における転炉鋼生産は 12.2%減少する一方、非 OECD 諸国では 5.5%増加し、世界全体では 3.1%減少する。世界の総粗

¹¹ 2000年から2020年に向けて徐々に税率を上げていく想定となっている。

鋼生産量は2.2%減少する（OECD 諸国：-8.6%、非 OECD 諸国：+4.5%）。OECD 諸国における鉄鋼業からのCO₂排出量は19.3%減少し、非 OECD 諸国では6.4%増加し、結果世界全体で4.6%の削減となる。炭素リーケージ率¹²は45%に達する。

低炭素化のインセンティブ付け政策を一国で実施した場合と先進国が協調して共同実施した場合は、共同実施の方が国内鉄鋼部門への影響は小さいことが示唆されている（Maestad 2003）。上記の OECD による分析では（Maestad 2003）、日本単独で鉄鋼部門に25\$/tCO₂の課税を実施した場合の転炉鋼生産量の減少率が25%であったが、OECD 諸国と政策協調する場合には半分程度の12.9%であった。また、炭素リーケージ率については、一国実施の場合は平均で60%（国別結果の記載なし）となり、OECD 諸国との政策協調の場合（45%）より高かった。

炭素価格付けによる産業競争力低下や炭素リーケージへの対策としては、生産量ベースの還付（output-based allocation）や国境税調整などが挙げられる。これら対策の効果については、文献によって見解が分かれるため、どちらの対策がより効果的かについては、目的や対象となる部門および国・地域によって異なる。鉄鋼部門における国境税調整については、Maestad（2003）は45%からマイナスに（つまり非 OECD 諸国でも排出が減少）、Kuik and Hofkes（2010）は35%から2%に、それぞれ炭素リーケージ率を抑制する効果が示唆されている。両政策を比較した場合、Zhang（2012）は複数の文献を比較検討した上で（Fischer & Fox 2009; Monjon & Quirion 2011; Rivers 2010）、炭素価格付けの対象となる部門全体として見ると、生産量低下を抑制するのが主目的であれば生産量ベースの還付、炭素リーケージの抑制が主目的であれば国境税調整の方が効果的であることが示唆されると結論づけている。Maestad（2003）における税込還流と国境税調整の効果の比較も、同様の結果を示唆している。しかし、鉄鋼部門への影響については文献により見解が異なる（Fischer & Fox 2009; Monjon & Quirion 2011）。

この他、スクラップ利用の促進を目的としてスクラップ利用商品に係る税に注目した研究もある。電炉メーカーの経営環境悪化に対する国内鉄リサイクル産業の維持策として、スクラップ輸出関税と電炉鋼（間接税）減税の2つの政策のどちらが好ましいかについて、山崎（2009）が日中2国間一般均衡モデル（CGE）を用いて分析を行っている。輸出関税および減税は、電炉の粗鋼生産量をベースラインの水準（2000年の生産水準）から1%増加させるレベルに設定されている。分析の結果、輸出関税は国内スクラップ価格とスクラップ回収率の低下を引き起こすだけでなく、中国でのスクラップ価格を大きく上昇させることが明らかになった。一方、電炉鋼減税は国内スクラップ回収率を上昇させるだけでなく中国スクラップ価格への影響が小さいことが分かった。上記の結果から、山崎は輸出関税よりも間接税減税措置の方が、国内の鉄リサイクルを維持する政策としては望ましいと結論付けている。また、鉄鉱石に対する天然資源税課税の環境および経済への影響については、環境省「環境経済の政策研究」において分析がなされている（小嶋ほか 2015）。日本単独での天然資源税導入は産業流出の影響などもあり、世界全体ではCO₂排出量が増加するが、先進国が協調して天然資源税を導入する場合は世界全体でもCO₂排出量が削減されるだけでなく、鉄鋼輸出国のオーストラリア以外の国・地域では厚生水準（一人当たり等価変分）が改善することが示唆された。

しかし、上記はあくまで生産量とCO₂排出の変化のみを扱ったモデル分析上の結果であり、政策導入

¹² ここではOECD 諸国でのCO₂排出削減量に対する非OECD 諸国でのCO₂排出増加量の割合を意味する。

にあたっては様々な面からメリットとデメリットを検討する必要がある (Asuka et al. 2009; Zhang 2012)。また、本節で扱ったこれら国境税調整や補助金交付などの炭素リーケージ防止策は、WTO 規則に抵触する可能性がある (WTO & UNEP 2009)。

4.4. 日本およびアジアの鉄鋼部門における低炭素化実現へ向けた提言

4.4.1. 国内鉄鋼業からの中長期的な GHG 排出削減

「エネ環」および日本鉄鋼連盟の想定である 2030 年の粗鋼生産量 120 Mt/年において、2010 年時点での操業条件での生産が可能な設備能力を 2030 年まで維持することを前提とした分析 A では、転炉でのスクラップ利用拡大を通じた CO₂ 排出削減の費用は \$110/t-CO₂ と算出された。しかし、120 Mt という生産量想定は、既往研究における想定の中でも最大値であることが明らかになった。将来粗鋼生産量の不確実性が大きい中 (90-120 Mt/年) で大型の設備投資を最小化させるべく、必要最小限の設備能力の維持を想定した分析 B では、転炉スクラップ利用の最大化しない限り、120 Mt/年の粗鋼生産を実現することができないことを示している。この 2 つの結果からは、CO₂ 排出削減費用として算出された \$110/t-CO₂ の一部または全部が、2030 年頃における国内鉄鋼業の立ち位置が不透明な中、経営上の各種リスクを最小化するための必要コストとして見なしうることを示唆される。同様のことがコークス代替還元材利用の拡大についても言える。今後スクラップやコークス代替還元材の利用拡大について検討する際には、単に CO₂ 排出削減の効果だけではなく、中期将来に向けた経営リスク分散への貢献についても十分に考慮すべきであるといえる。一方、分析 B では国内高炉の改修・更新に係る設備費用等について信頼性の高いデータがなかったことから詳細な経済性分析を実施することはできず、今後の課題である。

また、分析 B より、2030 年における粗鋼生産量が 90-120 Mt の幅の中で必要最小限の設備能力の維持を想定した場合、CO₂ 排出量は 2010 年比で 4-25%削減の幅に収まると算出され、粗鋼生産量 105 Mt/年では CO₂ 排出量は 2010 年比 11-16%削減と算出された。近年の粗鋼生産量はおおよそ 105-110 Mt/年で推移してきたことから、2030 年まで国内鉄鋼業が現在と同レベルの国際競争力を維持するならば、この値は今後日本の 2030 年 GHG 排出削減目標案を精査するに当たって一つのベンチマークとなりうる。

4.4.2. 技術開発

技術開発の観点からは国内対策として (1) 電炉以外のスクラップ大量消費技術の開発・導入と (2) CCS 大規模導入が、今後の国内鉄鋼業における低炭素化の鍵を握る。これら 2 つの技術は、韓国も研究開発を進めており、日本としても遅れを取らないよう支援を強化していくことが重要である。(1) については、日本・環境省はこれまで主に電炉業における高級鋼材生産技術の開発を支援してきたが (Tokyo Steel 2013)、今後はスクラップ大量消費型転炉とその関連技術 (銅除去技術など) の研究開発も支援していくべきであろう。今後世界的に温暖化対策が強化されていく流れの中で、電力価格は世界各地で上昇していく可能性が高い。よって、鉄スクラップ大量消費利用技術についても、電炉以外の技術が商用化されることは意義があり、市場のニーズも今後高まっていくものと考えられる。また (2) については、分析 B では主要設備の寿命延長による CO₂ 排出削減量の減少は限定的であることが明らかになっており、2030 年以降の大幅な CO₂ 排出削減を達成するには BAT 技術を最大限導入するより既存設備をできる限り

延命し、2030年頃の実用化が期待される CCS 付低炭素高炉などの先端技術に投資を集中させる方が効果的である可能性を示唆している。その前提として、CCS 技術が 2030 年までに確実に商用化されている必要がある。日本政府も鉄鋼プロセスに特化した CCS ロードマップを作成し、これまで以上に研究開発を支援していくことが重要である。韓国は 2020 年頃の CCS 商用化を目指しており、また中国には巨大な CCS は市場ポテンシャルがあることから、国内鉄鋼業としても市場参入で出遅れないよう今から対策を進めていくべきである。政府および国内鉄鋼業としては、現在の研究開発ペースを加速させながら必要なインフラおよび法整備を進め、国内での商用化を前倒して国際的な CCS 大規模導入に備えるべきであろう。また、(1) と (2) では同じ CO₂ 排出削減を実施するにしてもそのインプリケーションは大きく異なる。(1) は鉄鉱石からスクラップへの鉄源の大きなシフトを意味する一方、(2) は引き続き鉄鉱石を主要鉄源とした鉄鋼生産体制を維持することを意味する。今後の輸入鉄鉱石の更なる品質劣化の可能性も考慮しながら、バランスの取れた戦略を練ることが重要になる。一方、これら技術は今後海外でもその重要性は増すことから、国内対策で開発・導入したものを海外で展開していく流れが理想であろう。

4.4.3. スクラップ回収および利用拡大

分析 B においては、2030 年の粗鋼生産量が 90 Mt/年に低下した場合、国内鉄鋼部門は転炉鋼生産の設備利用率を最大化させるために転炉スクラップ利用を抑制するため、老廃スクラップ回収量の増加と相まって、国内のスクラップ余剰が 14 Mt/年近くに達する可能性が示唆された。将来の中国や韓国のスクラップ需給状況も考慮すると、日本は 2030 年には今日のスクラップ市場のほぼ全てを失うと同時に、これまで以上に厳しいスクラップ輸出市場競争に晒される可能性がある。東アジアでスクラップがだぶつければ価格が低下すると同時にスクラップ回収率も低下するため、資源循環促進の観点からも温暖化対策の観点からも決して好ましい状況ではない。国内および東アジアで回収された老廃スクラップが確実に全量消費されるには、国内および域内でできるだけ多くを消費することを検討するだけでなく、東アジア地域内で消費仕切れない分をインド等の遠隔の需要地に確実に届けるため、東アジア内の貿易とは異なるインフラ整備が必要になる。

4.4.4. 低炭素化のインセンティブ付け政策

2030 年に向けて国内鉄鋼業の低炭素化を進めるには、明確な GHG 排出削減目標とそれに整合した炭素価格付けが必要になる。フェアな国際競争環境を維持するには他の鉄鋼生産国と連携して実施する必要があるが、連携する国々で一斉に価格付け制度を導入するのは難しい上、国境税調整や補助金などの施策はその実効性について見解が分かっているだけでなく、WTO ルールに抵触する可能性もある。日本としては、中国や韓国を含む東アジア諸国ならびに IEA や WBCSD などの国際機関にも働きかけ、まずは東アジア数カ国の主要高炉メーカー間での炭素価格付け協定を策定する道を模索すべきであろう。同時に、輸入鋼材との価格競争に晒されていない一部の国内向け鋼材については、スクラップ多使用材を含む低 CO₂ 排出製品の間接税減税などの税制優遇を短期的な施策として検討する価値はあると考えられる。

日本およびアジアの鉄鋼部門における低炭素化実現へ向けた、技術開発とインセンティブ付けに関する政策提言を図 12 にまとめた。

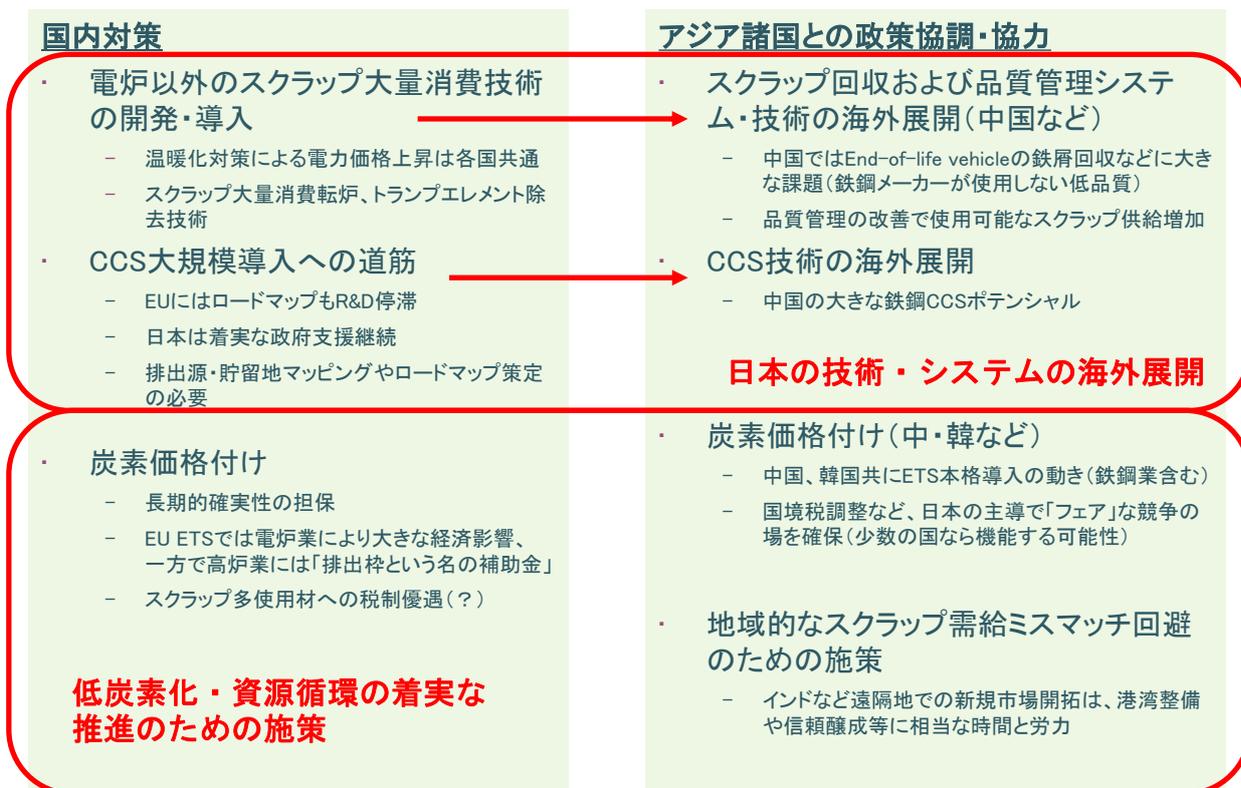


図 12：日本およびアジアの鉄鋼部門における低炭素化実現へ向けた、技術開発とインセンティブ付けに関する提言

5. 本研究開発により得られた成果

5.1. 科学的意義

これまで 2030 年という国際気候変動対策の文脈で重要な将来断面に焦点を当て、国内鉄鋼業の低炭素化実現について東アジアの鉄鋼業および鉄リサイクルの動向および見通しも考慮した包括的な分析は実施されていなかった。また、温暖化対策、資源循環および競争力の維持という 3 つの重要な論点について、それぞれを深掘りした研究はこれまでにあったが、これらを包括的に分析した研究は少ない。

鉄鋼部門の低炭素化についてはこれまで、「高 CO₂ 排出な高炉転炉法」対「低 CO₂ 排出な電炉法」という二項対立がしばしば見られたが、本研究の結果は 2030 年へ向けてこの二項対立からの脱却の必要性を示唆している点で、近年実施された他の研究と一線を画する。本課題で検討した鉄スクラップ利用と CO₂ 排出削減およびトランプ・エレメントに関しては、過去にも検討されているが (原田 2004; Mukai et al. 2003)、現在の国内鉄鋼業を取り巻く環境および技術進展状況も考慮した上で、中期将来のインプリケーションを議論した研究は少ない。また、2030 年においても 120 Mt の高い粗鋼生産量が維持される場合、国内回収スクラップは電炉鋼シェアを拡大させずとも転炉での消費拡大によりほぼ全量国内で消費できることや、老廃スクラップの利用を拡大しても、転炉鋼の銅濃度は高級鋼材生産に影響を与えない程度にとどまるといった分析結果は、政策形成上も新しく有益なものである。

さらに、将来の粗鋼生産量見通しの不確実性が大きい中、最低限必要な設備能力に焦点を当て、スクラップ利用やコークス代替還元材利用について CO₂ 排出削減だけでなく、将来の投資リスク回避のための方策としても検討した既往研究は少ない。鉄スクラップ利用についても、既往研究ではいかに国内消費を拡大するかに注目してきたが、本課題ではシナリオによっては現在よりはるかに多量の老廃スクラップを現時点でほとんど取引のない遠隔地に輸出しなければならない可能性があることも示した。

5.2. 環境政策への貢献

本課題より得られた成果は、間接的ながら 2020 年以降の温暖化対策目標の策定の議論に貢献している。本課題のアドバイザーであり、また 2020 年以降の温暖化対策目標策定に関する経産省・環境省の約束草案検討合同小委員会の委員でもある、国立環境研究所の藤野純一主任研究員には、本課題より得られた成果が全て報告されている。また、環境省の下で 2020 年以降の GHG 排出削減シナリオの作成を行っているみずほ情報総研へは、講師としてお招きいただいた際に本課題より得られた成果の詳細を紹介している。

さらに、各国の 2020 年以降の温暖化対策目標案 (INDC) は今後、国際的なプロセスにおいてその内容が検証・協議される可能性が高く、本課題の研究成果はそれら国際プロセスにおいて引用・活用されることが期待される。

6. 国際共同研究等の状況

弊機関では、米国の環境シンクタンク、世界資源研究所（World Resources Institute: WRI）と、2020年以降の気候変動対策に関して、2030年 GHG 排出削減シナリオの共同研究を実施している。本課題の成果は、WRI との共同研究を通じて共有・活用されている。

- ◇ 研究計画名：Open Climate Network（OCN、WRI が事務局）
- ◇ カウンターパート氏名：Jennifer Morgan (Global Director, Climate Program; WRI)
- ◇ 参加・連携状況：2012年から現在まで、日本の気候変動対策に関する4本の共同研究報告書を発表している。また、OCNに参加している気候変動対策に関する世界の主要研究機関およびシンクタンク（Ecofys, NewClimate Institute, ポツダム気候影響研究所など）と随時研究成果を共有している。
- ◇ 国際的な位置づけ：OCNはUNFCCCの締約国会議（COP）などの国際会議において、毎回研究成果を発表している。

7. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

Kuramochi, T. “Assessment of midterm CO₂ emissions reduction potential in the iron and steel industry: a case of Japan”. In press for publication in *Journal of Cleaner Production*.

<査読付論文に準ずる成果発表>

倉持壮；「2030年における国内鉄鋼部門のCO₂排出削減ポテンシャル評価～電炉に頼らない排出削減の可能性～」、環境経済政策学会2014年大会投稿論文、2014年9月14日、法政大学多摩キャンパス、東京。

<その他誌上発表（査読なし）>

倉持壮；「2020年以降における国内鉄鋼部門からのCO₂排出削減：可能性と課題」、クライメート・エッジ21号、地球環境戦略研究機関気候変動とエネルギー領域。

（2）口頭発表（学会等）

倉持壮；「2030年における国内鉄鋼部門のCO₂排出削減ポテンシャル評価～電炉に頼らない排出削減の可能性～」、環境省「平成26年度2050年温室効果ガス排出削減達成に向けた経路等調査検討委託業務」講師、2014年7月29日、航空会館、東京。

倉持壮；「2030年における国内鉄鋼部門のCO₂排出削減ポテンシャル評価～電炉に頼らない排出削減の可能性～」、環境経済政策学会2014年大会気候変動（3）分科会、2014年9月14日、法政大学多摩キャンパス、東京。

倉持壮；「2℃目標達成へ向けた日本の温暖化対策の方向性～カーボン・バジェットと資源循環の観点

から～」、Deep Decarbonization Pathways Project 報告セミナーおよび環境研究総合推進費 2-1402 報告会、2014 年 10 月 7 日、東京工業大学蔵前ホール、主催：国立環境研究所。

倉持壮；「エネルギーミックスと温暖化対策目標～長期目標の観点から～」、環境経済・政策学会 20 周年記念シンポジウム「エネルギーミックスと温暖化目標」、2015 年 5 月 8 日、東京・明治大学。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

(1) の誌上発表については、査読付国際学術誌への投稿をあと 2 本準備している。

8. 引用文献（一部抜粋）

ADB, 2012. News Release 14 August 2012: ADB Helps People's Republic of China Plan Carbon Capture and Storage Road Map. Asian Development Bank: Manila, the Philippines. Available at: <http://www.adb.org/news/adb-helps-peoples-republic-china-plan-carbon-capture-and-storage-road-map> [Accessed March 30, 2015].

Anonymous, 2015. *Closed meeting with senior members from the Japanese steel manufacturers. 6 February, 2015*, Tokyo, Japan.

Anonymous, 2014. *Personal communication with an anonymous expert from a Japanese integrated steelmaker. 31 October, 2014*, Tokyo, Japan.

Asuka, J., Kanemoto, K. & Lu, X., 2009. "Haishutsuryou torihiki to kokusai kyousouryoku" (Emissions trading and international competitiveness). In Japanese. In *2009 Annual Meeting of the Society for Environmental Economics and Policy Studies*. Chiba, Japan, pp. 1–104.

Australian Financial Review, 2015. How did Rio and BHP get China so wrong? 25 April. Available at: <http://www.afr.com/business/mining/how-did-rio-and-bhp-get-china-so-wrong-20150424-1mps5q> [Accessed April 28, 2015].

Bao Steel, 2013. PCI for blast furnace. Available at: <http://bsee.baosteel.com/english/tech3.htm> [Accessed January 20, 2015].

BHP Billiton, 2014. *Safely growing production while lowering costs. Presentation by Jimmy Wilson, President Iron Ore, for Iron Ore briefing and a Western Australia Iron Ore site tour, 6 October*, BHP Billiton.

Braathen, N.A., 2008. *Carbon-related Border Tax Adjustments: Work at OECD. Comments at Brookings Climate Change, Trade and Investment Conference. 9 June.*, Washington DC, USA.

CEPS, 2013. *Assessment of cumulative cost impact for the steel industry. A report for the European Commission*, Centre for European Policy Studies: Brussels, Belgium.

Croon, D., 2013. *Personal communication with Danny Croon, EUROFER, 20 February*, Brussels, Belgium.

EEC, 2012a. *Innovative Strategy for Energy and the Environment (provisional translation)*, Energy and Environment Council, the Government of Japan: 14 September 2012.

EEC, 2012b. "Shinario shousai deta (seichou kesu teiseichou kesu tsuika)" (Detailed scenario data (with high and low growth cases added)). In Japanese. ncil, National Policy Unit, Government of Japan: Tokyo, Japan. Available at:

http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/sentakushi/database/shousai-data_shincho+seicho+teiseicho.xls
[Accessed January 20, 2015].

EU, 2015. Intended Nationally Determined Contribution of the EU and its Member States. Submission By Latvia and the European Commission on Behalf of the European Union and its Member States. Latvia and the European Commission on behalf of the European Union and its Member States. Available at:
<http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published Documents/Latvia/1/LV-03-06-EU INDC.pdf>
[Accessed April 28, 2015].

EUROFER, 2011. PRESS Statement: Steel industry goes to European Court on EU Emissions Trading Scheme Unachievable steel benchmark infringes ETS directive. 21 July, 2011. Available at:
http://www.eu-nited.net/cms/upload/news/Press_Release_-_EUROFER_goes_to_Court_on_EU_ETS1.pdf
[Accessed April 28, 2015].

Fischer, C. & Fox, A.K., 2009. *Combat Emissions Adjustments versus Rebates. RFF Discussion Paper 09-02*, Resources For the Future: Washington DC, USA.

Ghenda, J.T., 2013. A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050. In *IEA Global Industry Dialogue and Expert Review Workshop. 7 October*. International Energy Agency: Paris, France.

Gielen, D. & Moriguchi, Y., 2002. CO₂ in the iron and steel industry: an analysis of Japanese emission reduction potentials. *Energy Policy*, 30 , pp.849–863.

GIO, 2013. *National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN (2013)*, Greenhouse Gas Inventory Office of Japan (GIO), Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Japan: Tsukuba.

Guo, H. & Zhang, T., 2014. Sinks of steel in China-addition to in-use stock, export and loss. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*.

Han, C., 2014. Carbon Capture & Storage in Korea. In *CSLF Technical Group Meeting 2014. 25 March, 2014*. Seoul, Republic of Korea.

Hatch Associates, 2012. Prospects for the Global Scrap Market. In *Latin American Steel Congress (Alacero-53). October 28-30, 2012*. Santiago, Chile.

IEA, 2013. *Electricity Information 2013*, International Energy Agency: Paris, France.

IEA, 2007. *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions*, International Energy Agency: Paris, France.

IEA, 2014. *World Energy Outlook 2014*, International Energy Agency: Paris, France.

- Igarashi, Y., Kakiuchi, E., Daigo, I., Matsuno, Y. & Adachi, Y., 2008. Estimation of Steel Consumption and Obsolete Scrap Generation in Japan and Asian Countries in the Future. *ISIJ International*, 48(5), pp.696–704.
- International Carbon Action Partnership, 2015. Korea Emissions Trading Scheme. Last Update: 5 February, 2015. Available at: https://icapcarbonaction.com/index.php?option=com_etsmap&task=export&format=pdf&layout=list&system_s%5B%5D=47 [Accessed March 30, 2015].
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* T. F. Stocker et al., eds., Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPPC, 2011. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*, European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau: Sevilla, Spain.
- JFE Steel, 2013. “Nanriyou tetsukei sukurappu no riyoukakudai no tame no kenkyuu kaihatsu” (Research and development for enhancing the use of low-quality ferrous scrap). In *NEDO Energy Efficiency Technology Forum 2013*. New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).
- JFE Steel, 2011. “Tairyuu no tetsu sukurappu wo mochiita tenro seikou houhou” (Basic oxygen furnace steelmaking method using large amount of steel scrap). In Japanese.
- JFRMA, 2015. *Supply and demand statistics*, Tokyo, Japan.
- Jiang, K., 2015. *Personal communication. Communicated on 25 January.*, Tokyo, Japan.
- JISF, 2012. “*Tekkou Toukei Youran 2012*” (*Iron and steel statistics handbook 2012*), Japan Iron and Steel Federation: Tokyo, Japan.
- Kawabata, N. & Chou, Y., 2014. “Chuugoku tekkougyou ni okeru shouenerugii to CO2 haishutsu sakugen taisaku” (Energy efficiency and CO2 mitigation efforts in the Chinese iron and steel industry). In Japanese. *Asia keizai*, 55(1), pp.97–127.
- Kawase, R., 2009. Future Estimation of Iron Stock & Flow in Japan and China. In *14th AIM International Workshop*. National Institute of Environmental Studies (NIES), Japan: Tsukuba, Ibaraki, Japan.
- Kim, N. & Lee, S.-E., 2015. *Personal communication With Nuri Kim and Seung-Eon Lee of the Korea Greenhouse Inventory and Research Center. Communicated throughout February 2015.*,

- Komiyama, R., Suzuki, K., Nagatomi, Y., Matsuo, Y. & Suehiro, S., 2011a. *Analysis of carbon mitigation to 2050 in Japan through integrated energy economic model*, Institute of Energy Economics, Japan (IEEJ): Tokyo, Japan.
- Komiyama, R., Suzuki, K., Nagatomi, Y., Matsuo, Y. & Suehiro, S., 2011b. “*Fukushima genpatsujiko wo fumaeta 2050 nen madeno nihon no genshiryoku shinario ni kansuru bunseki*” (*Analysis on future nuclear scenarios up to 2050 considering the Fukushima nuclear accident*). In Japanese., Institute of Energy Economics, Japan (IEEJ): Tokyo, Japan.
- Kuik, O. & Hofkes, M., 2010. Border adjustment for European emissions trading: Competitiveness and carbon leakage. *Energy Policy*, 38(4), pp.1741–1748.
- Kuramochi, T., 2015. Assessment of midterm CO2 emissions reduction potential in the iron and steel industry: a case of Japan. *In press for publication in: Journal of Cleaner Production*.
- Kuramochi, T., Techno-economic assessment of CO2 emissions reduction potential in the Japanese iron and steel industry in 2030. *In press for Journal of Cleaner Production*.
- Li, X., 2014. *Consumption and Development of China’s Steel Market. Presentation at the 76th Session of the OECD Steel Committee. 5-6 June, 2014*, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): Paris, France.
- Maestad, O., 2003. *Environmental policy in the steel industry: using economic instruments. COM/ENV/EPOC/DAFFE/CFA(2002)68/FINAL*, Organisation for Economic Co-operation and Development: Paris, France.
- Mathiesen, L. & Maestad, O., 2004. Climate Policy and the Steel Industry: Achieving Global Emissions Reductions by an Incomplete Climate Agreement. *Energy Journal*, 25(4), pp.91–114.
- METI, 2013. *Comprehensive Energy Statistics. Fiscal Year 2010*. Agency of Natural Resource and Energy (ANRE), Ministry of Economy, Industry and Trade (METI): Tokyo, Japan. Available at: http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/xls/stte_034.xls [Accessed January 25, 2015].
- Ministry of Foreign Affairs and Trade Republic of Korea, 2010. *Nationally Appropriate Mitigation Action of the Republic of Korea*. 25 January, 2010. Seoul, Republic of Korea. Available at: http://unfccc.int/files/meetings/cop_15/copenhagen_accord/application/pdf/koreacphaccord_app2.pdf [Accessed April 28, 2015].
- Mizuho Corporate Bank, 2011. *Mizuho Industry Focus Vol.94. “Shinnittetsu Sumikin no gappei wo keikitoshita sangyousaihen eno kitai” (Expectations for accelerated industrial reorganization following the merger of Nippon Steel and Sumitomo Metal)*, Tokyo, Japan.

- MOE, 2012. “2013 nen ikou no taisaku sesaku ni kansuru houkokusho (Heisei 24 nen 6 gatsu). chikyuu ondankataisaku no sentakushi no gen-an ni tsuite” (Report on the global warming countermeasures beyond 2013. Proposal of options. June 2012). In Japanese. Global Environment Committee, Central Environment Council, Ministry of the Environment, Japan. Available at: <http://www.env.go.jp/earth/report/h24-03/index.html> [Accessed January 25, 2015].
- Monjon, S. & Quirion, P., 2011. Addressing leakage in the EU ETS: Border adjustment or output-based allocation? *Ecological Economics*, 70(11), pp.1957–1971.
- MOST, 2011. *Carbon Capture, Utilization and Storage: Technology development in China*, Ministry of Science and Technology (MOST), China: Beijing, China.
- Moya, J.A. & Pardo, N., 2013. The potential for improvements in energy efficiency and CO2 emissions in the EU27 iron and steel industry under different payback periods. *Journal of Cleaner Production*, 52, pp.71–83.
- Mukai, H., TSUNEMI, K. & MORIOKA, T., 2003. Evaluation of the Steel-Recycling-System with effective utilization of scrap iron-Model analysis about Cu-accumulation and exploitation of steel converter. *Proceedings of the Global Environment Symposium*, pp.29–34.
- NDRC, 2010. Appendix II of the Copenhagen Accord (Nationally appropriate mitigation actions of developing countries): China. Submitted to UNFCCC. Department of Climate Change National Development and Reform Commission of China. Available at: http://unfccc.int/files/meetings/cop_15/copenhagen_accord/application/pdf/chinacphaccord_app2.pdf [Accessed April 28, 2015].
- New York Times, 2015. Chinese Premier Vows Tougher Regulation on Air Pollution. 15 March, 2015. Available at: http://www.nytimes.com/2015/03/16/world/asia/chinese-premier-li-keqiang-vows-tougher-regulation-on-air-pollution.html?_r=0 [Accessed March 30, 2015].
- NIMS, 2004. *NIMS-EMC MDE Report No.4 LCA-Based Investigation of Technological Scenarios of Expanding Use for Iron Scrap in Converter and Electric Furnace and the Consumption Trend of Iron Scrap*, EcoMaterials Center, National Institute for Materials Science.
- Nomura, S. & Callcott, T.G., 2011. Maximum Rates of Pulverized Coal Injection in Ironmaking Blast Furnaces. *ISIJ International*, 51(7), pp.1033–1043.
- Nozawa, K., Kasai, A., Matsui, Y., Kitayama, S., Kitano, S. & Shibata, K., 2011. Combustion Behaviors of Fine Coal and Its Impact on Gas Permeability at Lower Part of Blast Furnace under High Pulverized Coal Rate Operation. *ISIJ International*, 51(8), pp.1336–1343.

- NPU, 2012. “*Enerugii kankyou ni kansuru sentakushi: Keizai eikyou bunseki kekka ichiran*” (*Options for energy and the environment: Economic impact assessment results*). In Japanese., Energy and Environment Council, National Policy Unit, Cabinet Office: Tokyo, Japan.
- Oda, J., Akimoto, K. & Tomoda, T., 2013. Long-term global availability of steel scrap. *Resources, Conservation and Recycling*, 81, pp.81–91.
- OECD, 2015. *Excess Capacity in the Global Steel Industry and the Implications of New Investment Projects. OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, No. 18*, OECD Publishing: Paris, France.
- Oikonomou, V., Patel, M. & Worrell, E., 2006. Climate policy: Bucket or drainer? *Energy Policy*, 34(18), pp.3656–3668.
- Pauliuk, S., Milford, R.L., Müller, D.B. & Allwood, J.M., 2013. The Steel Scrap Age. *Environmental Science & Technology*, 47(7), pp.3448–3454.
- Pauliuk, S., Wang, T. & Müller, D.B., 2012. Moving toward the circular economy: the role of stocks in the Chinese steel cycle. *Environmental science & technology*, 46(1), pp.148–54.
- POSCO, 2013. *POSCO Carbon Report 2013*, POSCO: Seoul, Republic of Korea.
- Reimink, H., 2012. CCS – Challenges for the Steel Industry. Presentation by the Worldsteel Association. In *11th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT11). Presentation at the plenary session, 21 November*. Kyoto, Japan.
- Reimink, H., 2013. *Personal communication with Henk Reimink, Worldsteel Association, 20 February.*, Brussels, Belgium.
- Reuters, 2012. UPDATE1-Steelmakers say top EU court rejects carbon case. 7 June, 2012. Available at: <http://www.reuters.com/article/2012/06/07/eu-steel-carbon-idINL5E8H78QQ20120607> [Accessed April 28, 2015].
- Rio Tinto, 2015. Optimising business value through the cycle. Presentation by Andrew Harding, chief executive, Iron Ore, China, Korea and Japan. In *Global Iron Ore and Steel Forecast Conference.10 March*. Perth, Australia.
- RITE, 2012. “*2010 nen jitenno enerugii gentan-i no suikei (tekkou bumon - tenrokou)*” (*Estimation of specific energy consumption for integrated steelmaking process in 2010*), Kizugawa, Kyoto, Japan.
- Rivers, N., 2010. Impacts of climate policy on the competitiveness of Canadian industry: How big and how to mitigate? *Energy Economics*, 32(5), pp.1092–1104.

- Sekine, Y., Fukuda, K., Kato, K., Adachi, Y. & Matsuno, Y., 2009. CO2 reduction potentials by utilizing waste plastics in steel works. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(2), pp.122–136.
- Steel Recycling Research, 2013. “2030 nen no tetsu sukurappu jukyuu tenbou” (*Steel scrap demand and supply outlook for 2030*), Steel Recycling Research: Tokyo, Japan.
- Takeuchi, M., 2009. “Sozai sangyou ga ninau risaikuru no genjou to sono seiyaku youin” (The status of recycling in the basic materials industry and the limiting factors). In Japanese. *Kagaku Gijutsu Doukou*, February.
- Tatematsu, K., 2013. *Choice Evaluation of Power Supply Composition Using the Mapping Method of the Long-Term Energy Demand-and-Supply Scenario. JAEA-Research 2012-042*,
- Tekko Shimbun, 2012. “*Tekkou Nenkan 2012*” (*Iron and steel yearbook 2012*), Tekkou Shimbun Corp.: Tokyo, Japan.
- The White House, 2014. U.S.-China Joint Announcement on Climate Change. Beijing, China, 12 November 2014. The White House: Washington DC, USA. Available at: www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/11/11/us-china-joint-announcement-climate-change [Accessed April 28, 2015].
- Tokyo Steel, 2013. “*Heisei 24 nendo tetsu sukurappu no koudo riyouka chousa gyomu houkokusho*” (*FY2012 Research report on the high-level application of steel scrap*). In Japanese., Ministry of the Environment, Japan: Tokyo, Japan.
- UNFCCC, 2012. Outcome of the work of the Ad Hoc Working Group on Further Commitments for Annex I Parties under the Kyoto Protocol. Draft decision proposed by the President. Draft decision -/CMP.8. FCCC/KP/CMP/2012/L.9. United Nations Framework Convention on Climate Change. Available at: <http://unfccc.int/resource/docs/2012/cmp8/eng/109.pdf> [Accessed April 28, 2015].
- Wang, C., Ryman, C. & Dahl, J., 2009. Potential CO2 emission reduction for BF–BOF steelmaking based on optimised use of ferrous burden materials. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(1), pp.29–38.
- World Bank, 2014. *World Bank Commodities Price Forecast. Released January 30, 2014.*, World Bank: Washington DC, USA.
- World Steel Association, 2014. *Steel Statistical Yearbook 2014*, World Steel Association: Brussels, Belgium.
- World Steel Dynamics, 2013. Battle metallica. In *IIMA Annual General Meeting. October 18, 2013*. World Steel Dynamics: Miami, Florida.

- Worrell, E., Galitsky, C., Masanet, E. & Graus, W., 2008. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. , p.121.
- WTO & UNEP, 2009. *Trade and Climate Change*, World Trade Organization and United Nations Environment Programme.
- Wübbecke, J. & Heroth, T., 2014. Challenges and political solutions for steel recycling in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, pp.1–7.
- Zhang, Z., 2012. Competitiveness and Leakage Concerns and Border Carbon Adjustments. In C. Carraro, ed. *Climate Change and Sustainable Development Series*. Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM): Milan, Italy.
- 原田幸明, 2004. 社会技術研究システム・公募型プログラム、研究領域「循環型社会」、研究課題「マテリアルリース社会システム構築のための総合研究」研究実施終了報告書, RISTEX 社会技術研究開発センター.
- 張伯玲, 2013. 「废钢退税政策重启」财新 新世纪周刊、2013 年 8 号,
- 日本鉄鋼連盟, 2014. 日本鉄鋼業の地球温暖化問題への取組: 低炭素社会実行計画フェーズII について, 日本鉄鋼連盟.

**Research on the Realization of Mid-Long Term Low-Carbon Pathways
for the Iron and Steel Industry in Japan and Asia**

Principal Investigator: Takeshi KURAMOCHI

Institution: Institute for Global Environmental Strategies (IGES)

2108 Kamiyamaguchi, Hayama, Kanagawa, 240-0115 JAPAN

Tel: +81-46-826-9613 / Fax: +81-46-855-3809

E-mail: kuramochi@iges.or.jp

[Abstract]

Keywords: CO₂, Iron and steel industry, Global warming, Cost effectiveness, steel scrap, process analysis

This project aimed to identify low-carbon pathways for the Japanese steel industry toward midterm future (around 2030), taking into account the dynamic developments of the global steel industry and steel recycling.

An up-to-date techno-economic assessment was conducted on CO₂ emissions reduction potential in the Japanese steel industry for 2030. The following mitigation measures were investigated: (i) maximized installation of best available technologies, (ii) increased use of coke substitutes in blast furnaces (BFs), and (iii) increased use of obsolete steel scrap. For measure (iii), the obsolete scrap use in the integrated steelmaking (BF-BOF) route was assessed rather than increasing the electric arc furnace steel production. Carbon capture and storage was not considered. The first analysis assumed a fixed high 120 Mt-crude steel (cs)/yr production and the second analysis assumed that the coke oven and BF capacities would be minimized to account for the future uncertainty on the production levels (90-120 Mt-cs/yr in 2030).

For the first analysis, the results showed that 20 Mt-CO₂ of emissions reductions, equivalent to 12% of the industry's total emissions in 2010, can be achieved in 2030 compared with a frozen technology scenario. More than 9 Mt-CO₂ was attributable to the enhanced scrap use in the BF-BOF route. The industry's emissions reduce by about 7

Mt-CO₂ or 4% below 2010 levels. Almost all domestically recovered obsolete scrap can be fully consumed solely by increasing the scrap use in BOF. Moreover, the increase in average copper concentration in the BF-BOF steel due to the increased obsolete scrap use was found unlikely to limit the production of high-quality steel products. CO₂ mitigation cost curves for 2030 showed that the costs were below US\$₂₀₁₀ 20/t-CO₂ for measure (ii) and around US\$₂₀₁₀ 110/t-CO₂ for measure (iii).

For the second analysis, optimized coke oven and BF capacities were found to be about 30% and 10% below 2010 levels, respectively. Under these capacities and the aforementioned steel production range, CO₂ emissions in 2030 will range between 4-21% below 2010 levels. For a 105 Mt/yr-cs, consistent with the production levels observed in recent years, CO₂ emissions were 11-16% below 2010 levels.

Literature reviews and interviews were also conducted on low-carbon policies for the steel industry observed or considered in Europe and East Asia as well as the outlook on future global steel scrap supply. Based on these analyses, this project provides policy-relevant recommendations to realize significant decarbonization in the Japanese steel industry.