

# 博士論文

経済発展に伴う需給の変化を考慮した  
鉄鋼生産に関する気候変動緩和策の分析

行木 美弥

# 博士論文

## 経済発展に伴う需給の変化を考慮した鉄鋼生産に関する気候変動緩和策の分析

### 目次

#### 略語集

#### 第1章 序論

1. 1 研究の背景	1
1. 2 先行研究の整理と本研究の位置付け	5
1. 2. 1 鉄鋼のライフサイクルと環境負荷	5
1. 2. 2 経済発展に伴う鉄鋼の消費・蓄積と温室効果ガスの排出	6
1. 2. 3 鉄鋼の需給とカーボンリーケージ	8
1. 2. 4 本研究の対象と位置づけ	8
1. 3 研究の目的	9
1. 4 研究の方法と構成	9

#### 第2章 経済発展と鉄鋼の需要変化に伴う温室効果ガスの排出

2. 1 気候変動をめぐる状況と重要な排出源	17
2. 1. 1 気候変動の影響予測と国際交渉の動向	17
2. 1. 2 気候変動の原因と主な温室効果ガスの発生源	18
2. 1. 3 条約制定時の“先進国”と主要排出源の変化	19
2. 2 アジアの経済発展と鉄鋼需要の変化	20
2. 2. 1 新興経済国, 特にアジア諸国の経済発展	20
2. 2. 2 経済発展に伴う鉄鋼需要の増加	20
2. 3 主要国における鉄鋼生産に関連する温室効果ガス排出の状況	22
2. 3. 1 主要国の鉄鋼生産の状況	22
2. 3. 2 鉄鋼生産の原料・プロセスとエネルギー消費	23
2. 3. 3 主要国の鉄鋼生産とエネルギー消費	24
2. 3. 4 主要国の鉄鋼生産とCO <sub>2</sub> の排出	26
2. 3. 5 気候変動抑制において特に重要な国々	27

2. 4	本章において明らかとなったこと	29
------	-----------------	----

### 第3章 鉄鋼生産に関連する温室効果ガス排出削減技術と政策

3. 1	対象とする温室効果ガス排出削減技術・政策と分類	35
3. 2	鉄鋼生産の概要	36
3. 2. 1	鉄鋼生産の流れ	36
3. 2. 2	原料とプロセスの違い	37
3. 3	鉄鋼生産に関連する温室効果ガス排出削減技術	39
3. 3. 1	エネルギー効率を上げる技術	41
3. 3. 2	温室効果ガスの排出を下げる技術	53
3. 3. 3	物質をより効果的に利用する技術	56
3. 4	鉄鋼生産に関連する温室効果ガス排出削減政策	57
3. 4. 1	地域・国内において対策技術の導入を促す取組	57
3. 4. 2	国外への技術普及を促す取組	62
3. 5	本章において明らかとなったこと	65

### 第4章 スクラップの活用による鉄鋼業の温室効果ガス排出削減の可能性と限界

4. 1	中国とインドにおけるスクラップの活用による鉄鋼業の温室効果ガス排出削減の意義	71
4. 2	鉄鋼需要の中長期的な予測	72
4. 2. 1	推計手法	72
4. 2. 2	一人当たりストックの推計	76
4. 2. 3	人口とGDPの推計	78
4. 2. 4	推計結果	82
4. 2. 5	製品寿命等の感度分析	88
4. 3	鉄鋼の需要予測を踏まえた温室効果ガスの排出量の推計	91
4. 3. 1	製鉄プロセスおよび原料	91
4. 3. 2	転炉鋼と電炉鋼の割合の実績と今後の見通し	92
4. 3. 3	国ごとの鉄鋼製造時のエネルギー効率を踏まえたCO <sub>2</sub> 排出原単位	96
4. 3. 4	電炉鋼の活用用途の設定	98

4. 3. 5	CO <sub>2</sub> 排出量の推計	99
4. 4	結果と考察	100
4. 4. 1	需要の増加とスクラップの活用	100
4. 4. 2	温室効果ガス排出量の低減策	105
4. 5	本章において明らかとなったこと	110
<b>第5章 炭素強度の高い財の需給に着目した温室効果ガス排出削減策の比較分析</b>		
5. 1	炭素強度の高い財の需給と温室効果ガス排出削減策の必要性	115
5. 1. 1	炭素強度の高い財の需給の気候変動への影響	115
5. 1. 2	既往研究	115
5. 2	炭素強度の高い財に関する排出削減策に関する専門家へのインタビュー：調査手法	116
5. 2. 1	調査対象者と調査実施状況	116
5. 2. 2	対象とした排出削減策	117
5. 2. 3	削減策の評価項目	121
5. 2. 4	クラスター分析の実施とその手法	122
5. 3	炭素強度の高い財に関する排出削減策に関する専門家へのインタビュー調査：結果	123
5. 3. 1	回答結果と単純統計解析	123
5. 3. 2	各排出削減策の同一評価項目に対する符号付順位検定結果	124
5. 3. 3	クラスター分析の結果	127
5. 3. 4	クラスター分析によるグループ毎の分析結果	128
5. 4	インタビューで得られた知見も加味した政策含意についての考察	131
5. 4. 1	排出削減策1「上流炭素税」について	132
5. 4. 2	排出削減策2「消費ベース排出」について	132
5. 4. 3	排出削減策3「国際認証」について	133
5. 4. 4	排出削減策4「JCM」について	134
5. 5	本章において明らかとなったこと	135

<b>第6章 鉄鋼業における温室効果ガス排出削減策に関する考察</b>	
6. 1 鉄鋼製造時の温室効果ガス排出削減技術の効果	141
6. 1. 1 鉄鋼製造時の温室効果ガスの排出に影響する要素	141
6. 1. 2 中国・インドにおけるこの先の技術導入を巡る状況	143
6. 2 鉄鋼製造に関する温室効果ガス排出削減技術導入の課題	145
6. 2. 1 スクラップの活用と発電時の温室効果ガスの排出	145
6. 2. 2 温室効果ガス排出削減技術導入の障壁	147
6. 3 鉄鋼生産に関する気候変動緩和策	149
6. 3. 1 鉄鋼生産に関する気候変動緩和策の考察	149
6. 3. 2 戦略的な計画を立てるために	152
6. 4 本章において明らかとなったこと	153
<b>第7章 結論</b>	
7. 1 研究の総括	157
7. 2 今後の課題	160
<b>謝辞</b>	163

## 略語集

APP	Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate
AR5	(IPCC) 5 <sup>th</sup> Assessment Report
BACT	Best Available Control Technology
BAT	Best Available Technology
BF	Blast Furnace
BOCM	Bilateral Offset Credit Mechanism
BOF	Basic Oxygen Furnace
BRICs	Brazil, Russia, India and China
CCM	Continuous Casting Machine
CCS	Carbon Capture and Storage
CDAIC	Carbon Dioxide Information Analysis Center
CDM	Clean Development Mechanism
CDQ	Coke Dry Quenching
CMC	Coal Moisture Control
COG	Coke Oven Gas
COP	Conference of the Parties
COURSE50	CO <sub>2</sub> Ultimate Reduction in Steelmaking process by Innovative technology for cool Earth 50
DOIS	Direct Iron Ore Smelting
DR	Direct Reduction process
DRI	Direct Reduced Iron
EAF	Electric Arc Furnace
EC JRC	European Commission Joint Research Centre
EEPRC	Environment and Economic Policy Research Centre
EMS	Environmental Management System
EPA	(United States) Environment Protection Agency
ESEG	ENERGY STAR® Guide for Energy and plant managers
EU	European Union
(EU)ETS	European Union Emissions Trading System
EY	Ernst & Young Global Limited
FSC	Forest Stewardship Council
GDP	Gross Domestic Product
G7	Group of Seven
GHG	Greenhouse Gas

HBI	Hot Briquetted Iron
IEA	International Energy Agency
IGES	Institute for Global Environmental Strategies
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
IRR	Internal Rate of Return
ISO	International Organization for Standardization
ITMK3	Ironmaking Technology Mark Three
JCM	Joint Credit Mechanism
LS	Liquid Steel
MRV	Measurement, Reporting and Verification
NDRC	National Development and Reform Commission (China)
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
NPO	Nonprofit Organization
ODA	Official Development Assistance
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries
PCI	Pulverized Coal Injection
PFE	Sweden Programme for Improving Energy Efficiency in Energy Intensive Industries
POSCO	Pohang Iron and Steel Company (Korea)
PPP	Purchasing Power Parity
PSH	Paired Straight Hearth
RITE	Research Institute of Innovative Technology for the Earth
SCOPE21	Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21 <sup>st</sup> century
SEC	Specific Energy Consumption
SOACT	the State-of-the-Art Clean Technologies
SPH	Scrap Pre-Heating
SR	Smelting Reduction process
SRES	Special Report on Emission Scenarios
SSERC	Spark Steel & Economy Research Center
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
TGR-BF	Top Gas Recycling Blast Furnace process
TRT	Top Pressure Recovery Turbine

ULCOS	Ultra-Low Carbon Dioxide Steelmaking
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization
UNDP	United Nations Development Programme
UNSTAT	United Nations Statistics Division
USEPA	United States Environment Protection Agency
WSA	World Steel Association
WTO	World Trade Organization





## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

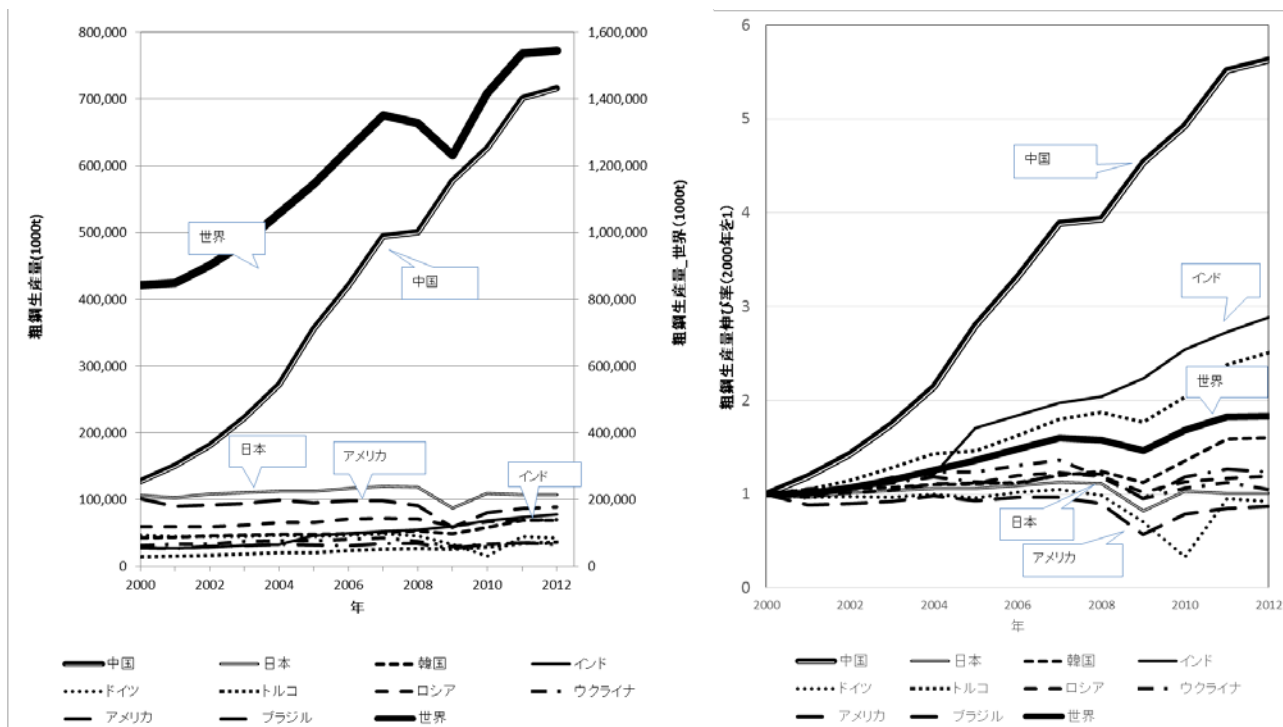
人間の歴史の進歩は金属の使用によって支えられてきた。それを示す一例が先史時代の区分である。先史時代として青銅器時代、鉄器時代が位置づけられているのは、それまでの石器を用いた暮らしから、鉱物から金属を取り出し加工する技術が大きく社会を発展させたことによる。鉱物の採掘や、その利用を可能にした火を操る技術、冶金技術の開発は、人間が使用できる道具を多様にし、社会を大きく発展させた。一部の国が植民地支配を成功させた重要な要因の一つには、鉄を代表とする高度な金属利用技術があるとする指摘もある(Diamond, 1997)。国連環境計画(United Nations Environment Programme, UNEP)の国際資源パネルは、経済発展は、金属を建築、交通、機械や通信システムなどに用いることと密接に関連していることを指摘している(UNEP, 2012)

他方、金属の利用は様々な形で環境問題を起こすことともなった。日本における公害の原点とも呼ばれる足尾銅毒事件は、銅鉱の採掘と精錬過程からの排水・排ガスにより広範な被害がでた事例である。日本の四大公害のうち、三つが金属による健康被害である。熊本と新潟で発生した水俣病は化学工場における排水に起因する有機水銀の汚染により起きたものであり、イタイイタイ病は神岡銅業所から排出されたカドミウム等を含む廃水、堆積された鉱滓から浸出する廃水等の汚染から起きたものである(環境庁, 1972; 富山地方裁判所, 1971)。

金属の使用に伴う環境負荷には様々なものがある。UNEPの国際資源パネルは、環境負荷としては、ローカルなものと同グローバルなものがあるとし、金属の採掘と精錬等を通じた周辺環境への地域的な影響(ローカルな環境負荷)と、製品製造のプロセスでの化石燃料の消費による温室効果ガスの排出という世界的な影響(グローバルな環境負荷)があるとしている(UNEP, 2013)。上述の日本での公害経験はローカルな環境負荷の一例であり、グローバルな環境負荷に関しては、金属製造のためのエネルギー消費量は、現在では世界全体でのエネルギー供給量の1割近くともされている。また、金属の使用に伴う環境影響はさらに大きくなるとみられている。UNEPの国際資源パネルが2013年に公表した報告書では、経済活動の発展に伴い、金属需要の急増に伴って将来的な金属の環境影響が増大し、金属のライフサイクル全体を通じた環境と人間の健康に対する負荷が高まると予測されるとしている(UNEP, 2013)。

金属には多様な種類があるが、最も身近な金属の一つが鉄である。鉄鋼は金属の中で最も生産量が多く、日本で生産される金属製品の98%近くは鉄鋼製品である(総務省, 2014。製品生産量(重量)より算出)。地球は質量の1/3ほどが鉄ともいわれ、地球の上部大陸地殻の平均で4%程度含まれていることから賦存量としても多く、比較的安価で加工性も高く強度もあることから様々な用途に用いられている(田中, 2009; 国立天文台, 2014)。鉄鋼の全世界での生産量は近年大きく伸びており、図1-1左に示すとおり、2000年から2012年の間に世界全体で2倍近く増加している。また図1-1右に示すように2000年を1とした増加率で世界で粗鋼生産量の多い上位10か国をみると、先進国では増加の割合は横ばいか微増にとどまるのに対し新興経済国で大

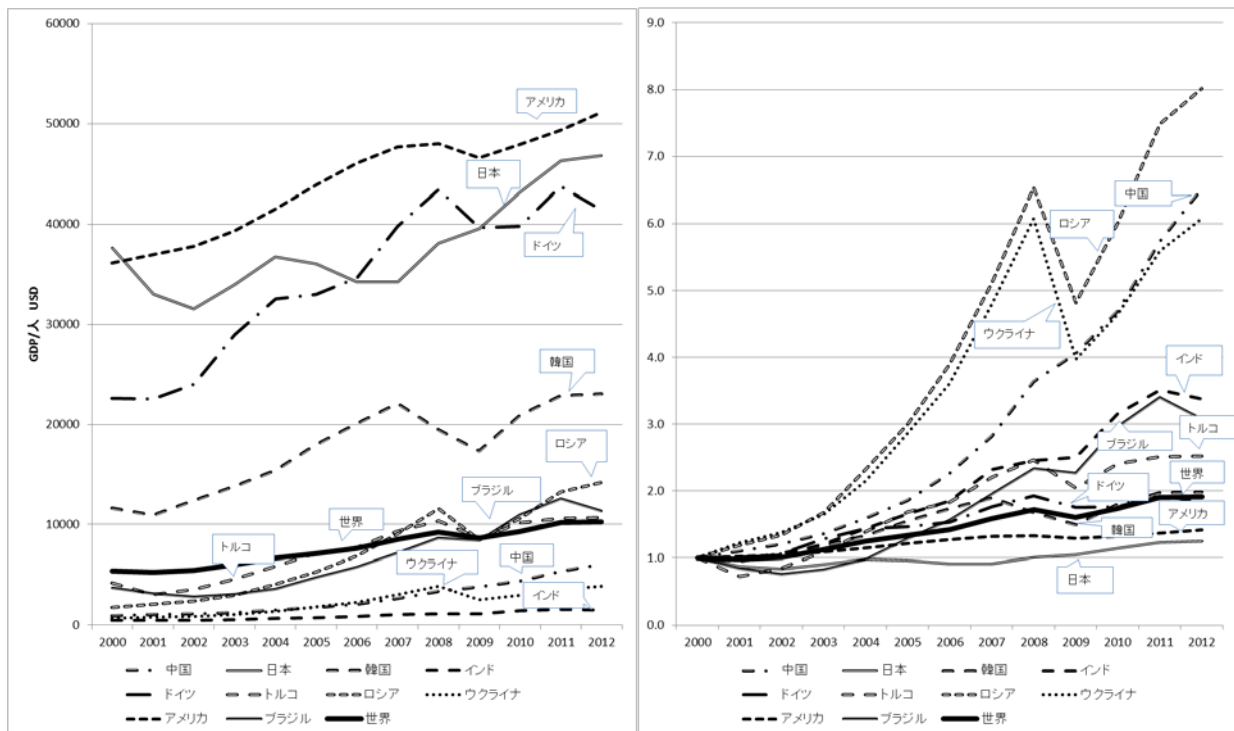
大きく伸びており、とりわけ5倍を超える増加を示す中国、3倍近い増加を示すインド、トルコが世界の鉄鋼生産を牽引していることがわかる。



左図:左軸は主要国, 右軸は世界の粗鋼生産量  
 右図:2000年の粗鋼生産量を1として生産量の変化を表示  
 データは World Steel Association (2013) による

図 1-1 主要国と世界の粗鋼生産量

鉄鋼の需要は経済成長に伴い増加し、鉄鋼の社会への累積の蓄積量は、一定量に達するまでは一人当たりのGDPとともに増えると指摘されている (Müller et al., 2006) . 図1-2に粗鋼主要生産国の一人あたりGDPの変化を示す. 先進国では増加の割合は横ばいか微増にとどまるのに対し、中国・インド・トルコといった新興経済国で増加しており、とくに中国、インド、トルコの3か国の伸びが大きくなっている. 特に伸び率の大きい中国とインドは、図1-2に示すとおり、現状では一人あたりGDPが世界の平均に達していない状況にある. 両国は2012年時点で10億人を越える人口を擁しており (世界全体では71億人) , Müllerらの指摘を踏まえると、この先も経済成長が続けば、一人当たりのGDPの増加に伴い鉄鋼の需要は当面増加していくと考えられる.



左図:世界の一人あたり GDP(単位 USD)

右図:2000 年の一人あたり GDP を 1 として変化を表示

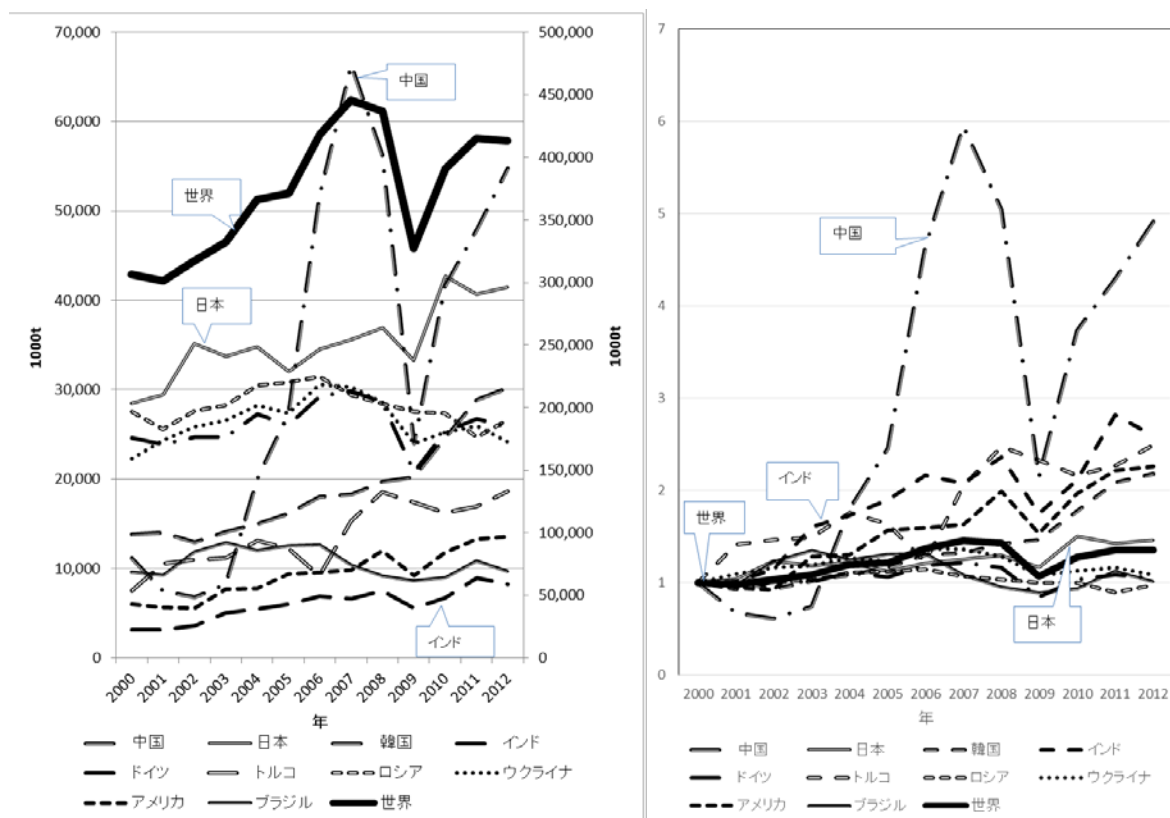
データは国連統計による

図 1-2 主要国と世界の一人あたり GDP

また、鉄鋼は盛んに貿易がなされる財でもあるが、図1-1のとおり世界でも突出して粗鋼生産量が急増している中国では、図1-3に示す通り鉄鋼の輸出量も増加しており、生産された鉄鋼は国内の需要増加を満たすのみならず他国へも供給されている状況にある。

UNEP の国際資源パネルは、金属は多様であり、単位重量あたりの環境への影響も様々であるが、流通する量からみて、優先的に考えるべきものは鉄鋼とアルミニウムであるとしている(UNEP, 2010)。上述の通り、金属の中で最も生産量が多いのは鉄鋼であるが、鉄鋼の製造・使用に伴う代表的な環境負荷は、化石燃料の消費に伴う温室効果ガスの一つである二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出である。鉄鋼業は製造業のうち最大のエネルギー消費産業であり、鉄鋼の生産に伴う温室効果ガスの排出は世界全体の排出量の1割近くを占める(Carbon Dioxide Information Analysis Center, CDAIC のデータより算出)。2013 年から 2014 年にかけて、気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)は、気候変化、影響、適応と緩和の方策に関する包括的な評価の取りまとめとして、一連の第 5 次評価報告書を公表した。この報告書では、これまでの観測結果から気候システムの温暖化には疑う余地がないこと、また、気候変動をもたらす要因として最も寄与しているのは 1750 年以降の大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の増加であることについて、これまでよりも強い表現で示されたほか、将来の確信度の高い主要なリスクの提示や、気候変動の

原因となる温室効果ガスの排出削減(緩和)を進めなければ、高い確信度で、世界の地上平均気温は、2100年において産業革命前の水準と比べ3.7~4.8度(中央値. 気候の不確実性を考慮すると2.5~7.8度の幅がある。)上昇する等との報告がなされた(IPCC, 2013).



左図:左軸は主要国, 右軸は世界の鉄鋼製品・半製品輸出量  
 右図:2000年の輸出量を1として変化を表示  
 データは World Steel Association,2013 による

図 1-3 主要国と世界の鉄鋼製品・半製品輸出量

これらを背景に、特に途上国における急激な経済成長による鉄鋼の需給変化に伴う温室効果ガス(CO<sub>2</sub>)の排出を抑制し、気候変動を緩和するための対策を講ずることは重要な課題となっている。

## 1. 2 先行研究の整理と本研究の位置付け

本研究に関連する先行研究を以下に整理する。なお、鉄鋼の利用に伴う温室効果ガス排出の

状況、その気候変動への影響の重要性、気候変動による影響・国際交渉に関する状況、鉄鋼の需要の変化等については続く第2章において詳述する。

また、鉄鋼生産に関する省エネルギー技術を含め炭素強度の高い財の対策に関する先行研究の整理は、第3章において取り上げる。

### 1.2.1 鉄鋼のライフサイクルと環境負荷

金属の使用にはライフサイクルの各段階で様々な環境負荷が生ずる。例えば、金属の採鉱段階では、鉱山からの排水が周辺の環境汚染を引き起こす場合がある。上述の神岡鉱業所から排出されたカドミウム等を含む廃水はイタイタイ病を引き起こし、足尾銅毒事件では銅鉱山による汚染が原因となった(環境庁, 1972)。鉱山活動では、汚水の漏出や、表土等の管理の問題によって水・地下水が汚染することが指摘されている(Kapur, 2006)。

鉱石採掘の段階では、大量の副生物が発生することも知られている。一定の量の金属を掘り出すためには、目的の金属をほとんど含まない不要な土砂や岩石を採掘する必要がある。金属の量に対する不要な岩石の量は、金属の種類により様々であり、金では 1,800,000 倍にも至るとされているが、鉄であっても 5 倍も不要な土砂や岩石が発生する(片桐ら, 2009)。鉄鉱石は 2011 年の全世界の生産量で約 30 億tにも達し(日本鉄鋼連盟, 2013)、仮に鉄の純度が 60%とすると、関連して採掘される岩石量は 90 億 t 程度ともなる。また、金属の採掘では有害物質が副産物として排出されることがあるが、副次的に採掘される物質の鉱石中の濃度は親物質の濃度に関連する場合がある(例:鉛採掘に伴うビスマス)。従ってそのような物質の排出量は採掘される鉱石の親物質の品位に左右される(Graedel, 2002)。鉄鉱石についても従来は鉄の含有量の高い高品位の鉱石が主として使われてきたが、世界的に鉄鉱石の需要が高まる中で、より低品位の鉄鉱石を使用せざるを得なくなってきており(野村ら, 2014)、不要となる物質の排出はさらに増えると考えられる。

また、鉱山では貯蔵していた選鉱くずの決壊等により環境汚染を伴う大規模の災害が生ずることもある。例えばフィリピンの銅鉱山で発生した硫黄の選鉱くずの放出事故は、フィリピンの歴史上、最大の環境事故ともみられている(ランビーノ, 2006)。

金属の精練の段階では、鉱石中の不純物や使用する燃料等により大気汚染を生ずることがある。高炉・転炉を用いる鉄の精練過程では、大量に石炭を使用することから、排ガス技術が十分でない場合には硫黄酸化物、窒素酸化物やばいじん等による大気汚染が報告されている(Remus et al., 2013a,b)。日本においても、鉄鋼生産は大気汚染を引き起こしてきた。経済発展の牽引力として 1901 年に設立された官営八幡製鉄所は、設立の頃より周辺の大気を汚染したことが報告されており、第二次世界大戦後は経済成長とともに各地で製鉄が盛んとなり、酸化鉄を含む赤黒い煙により空も青く見えなくなり、洗濯物を汚し器物を腐食するなど周辺住民に大きな影響を及ぼした(海外環境協力センター, 1998)。鉄鋼生産に起因する大気汚染は、硫黄酸化物、窒素酸化物、一酸化炭素、浮遊粒子状物質等様々であり、イランでは鉄鋼圧延工場の浮遊粒子状物質の濃度の差と労働者の循環器系疾患等の健康影響に関連がみられたことが報告されている(Rafiei et al., 2009)。また、イタリアではコークス製造に伴う多環芳香族炭化水素の汚染により工場内のみならず

周辺地域への健康被害が示唆されることが報告されている (Zannetti, 2006)。

また、金属の精練の過程では、鉍石を還元するため多くのエネルギーも消費される。生産のため消費された一次エネルギー量が最も大きい非鉄金属はアルミニウムである。アルミニウムの生産では 2004 年に、5,285PJ の一次エネルギーが消費されており、また、アルミニウムの一次生産は、リサイクルに比べて 20 倍エネルギーを消費することが知られている (International Energy Agency, IEA, 2007)。鉄鋼は精練に必要なトン当たりのエネルギー消費量でいえば、他の金属と比して決してとびぬけて高いわけではないが、生産量が圧倒的に多いことから、コークス製造や高炉も含めると 2004 年には 21.4EJ (EJ=10<sup>9</sup>GJ) という製造業全体のエネルギー消費量の 27% ともなる莫大なエネルギーが消費されている (IEA, 2007)。鉄鋼のエネルギー消費量は原料とプロセスによって大きく異なるが、スクラップを活用した電炉での製鉄法は、鉄鉍石を用いた平均的な高炉・転炉での製鉄法に比して 25% 程度まで CO<sub>2</sub> の排出を抑えることができることが知られている (IEA, 2007)。

また、金属は還元・精練時に廃棄物が発生する。鉄鋼では、スラグと称される残りが発生する。鉄鋼スラグは日本においては主として路盤材等として使用されているが、量が多く場合によっては環境負荷となる事例もある。欧州の事例では、高炉スラグは溶鋼 1t あたり 170-350kg 排出されるが、その 7 割ほどはセメント製造に使用され、3 割近くは路盤材として活用される (Remus et al., 2013a)。同様に欧州の事例では、転炉スラグは溶鋼 1t あたり 85-165kg 排出されるが、その 5 割ほどは路盤材として使用され、その他肥料等にも利用されるが一部は廃棄されている。また再利用へ仕向けられたものであっても市場の状況により予定の用途に用いられず処分されるものと報告されている (Remus et al., 2013b)。

## 1. 2. 2 経済発展に伴う鉄鋼の消費・蓄積と温室効果ガスの排出

### (1) 鉄鋼の消費・蓄積と経済発展

Van Vuuren ら (1999) や Tilton (2002) は、過去の金属の製造・使用のフローと GDP 等経済指標の関係に着目した分析を行い、先進国による経年的なデータをもとに、金属の使用は経済指標と関連があることを明らかにした。ただし、使用 (消費) を考える際に、長期間の製品寿命を持つ鉄鋼では、使用されつつ社会にストックとして蓄積されるものがあることについて考慮を行っていない。

Malenbaum (1978) は、一人あたり GDP と一人あたり資源使用量との間の関連性を提唱し、経済成長の初期段階では経済成長とともに資源の利用量も増加するが、経済成長が一定程度進めば資源の利用は抑えられるとし、将来の資源の利用の変化を予測できるとした。他方、Bringezu ら (2004) の研究によると、一人当たり GDP が増えるとともに一人当たり資源使用量も増えており、北米等多くの国では、一人当たり GDP の増加にともない、経済成長の初期段階以降も割合は低くなるものの、資源使用量は引き続き伸びていると報告されている。

Müller ら (2006) は使用中のストックに着目し、ビル等構造物や使用されている製品中の鉄鋼が物質の循環のドライビングフォースになるとし、ストックと老廃スクラップ (obsolete scrap) を関連付けた分析を行った。先進国を対象とした分析の結果、鉄鋼の需要は経済成長に伴い増加すること、先進国では一人あたり蓄積量をみると経済成長に伴い増加するが一定の増加の後に飽和すること

を報告した。Pauliuk ら(2013)は Müller ら(2006)の研究を発展させて 200 か国を対象に分析を行い、主要な用途として交通、機械、建築、その他製品の4つも考慮し、使用中のストックについて継続的に推計を行い、使用中のストック量は全体の鉄鋼材による社会へのサービスのレベルの指標となると報告した。

中国とインドに関しては、Pauliuk ら(2012)は中国を対象とし、Müller ら(2006)の研究成果を踏まえて鉄鋼の需要推計を実施し、2050 年時点での老廃スクラップの利用可能性について分析を行い、最大 80%の一次資源をスクラップで代替することができる可能性があるとした。しかしこれらの研究では、温室効果ガスの排出抑制についての検証は行われていない。

## (2) 鉄鋼の需給に関連した温室効果ガスの排出

温室効果ガスの排出源について、部門別にみても最も寄与度が高いのは産業部門であり、2010 年には産業部門の排出量は全体の温室効果ガス排出量の 30%を超えている(IPCC, 2014a)。IPCC 第三作業部会の分析によると、2000 年から2010年の温室効果ガスの排出の増加の6割は収入が中位から上位の国のエネルギー部門と産業部門での排出によるものとされている(IPCC, 2014b)。産業部門の中でも、重要となるのは製造時に温室効果ガスを多量に排出する財(炭素強度の高い財)の製造である。このような財には鉄鋼、セメント、紙パルプといったものが含まれるが、そのなかでも最もエネルギーを消費するのは鉄鋼である(IEA, 2007)。

鉄鋼の主要な用途ごとに2050年までを対象とした鉄鋼需要量、鉄鋼ストック量、CO<sub>2</sub>の排出量を推計した研究には、様々なものがある。Fulton と Eads (2004)、IEA (2009)の研究においては、鉄鋼需要に基づくCO<sub>2</sub>排出推計が行われているが、鉄鋼ストックに関する分析は含まれていないか、含まれているとしても限定的である。Hatayama ら(2011)の研究においては中国・インドを含む諸国の鉄鋼需要量・ストック量の推計が行われているが、CO<sub>2</sub>の排出量の推計は含まれていない。Wang と Hashimoto (2012)は Müller ら(2006)と Pauliuk ら(2012)らの研究を踏まえ、先進国で得られた知見をもとにストックの伸びと鉄鋼需要の推計を行い、中国とインドに着目しアジアの鉄鋼業において主要な温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の排出削減と21世紀の中ごろにおいてアジア地域で低炭素の鉄鋼サイクルを確立するための選択肢を検証した。ただし、これらの研究では、鉄鋼の用途も含めたスクラップの利用可能性とCO<sub>2</sub>の排出削減の関連についての検証は行われていない。河瀬ら(2012)は鉄鋼を素材として含むすべての財を対象とした詳細なボトムアップ式の推計を行い鉄鋼需要推計とCO<sub>2</sub>の排出量の関連付けを行っている。ただし、この研究の対象としては中国とインドは含まず、また、転炉鋼と電炉鋼の割合については、2009年の米国の61.8%、EU27か国の43.5%より高い値として2050年に鉄鋼生産量の最大70%を電炉で生産するとしているが、その理由についての言及はない。

一方、鉄鋼製造のプロセス、原料、国ごとのエネルギー効率に着目した温室効果ガスの排出量の推計に関してもIEA(2007,2009,2013)やAkimotoら(2010)等様々な研究がある。鉄鋼製造時のエネルギー効率は、主としてプロセス・原料の違いにより異なり、一般にスクラップを用いた電炉による製鋼のほうが、鉄鉱石を用いた高炉・転炉による製鋼よりも粗鋼生産量当たりのエネルギー消費量・CO<sub>2</sub>排出量が低くなるが、全世界的にも重要な新興国である中国とインドの双方を対象とし、



スクラップの利用可能性を検証したうえで、中長期的な温室効果ガスの排出抑制の可能性について検証するという観点から取り組まれたものはほとんどない。

### 1. 2. 3 鉄鋼の需給とカーボンリーケージ

グローバリゼーションが進み、財の国際貿易が盛んな現在では、どこの国での財の生産活動に伴う活動なのか、という視点のみならず、どこの国の需要を満たすための生産活動なのか、という視点が重要であることが指摘されている。Ahmad と Wyckoff(2003), Peters(2008) 等多くの研究者により、途上国の排出増加の要因には、先進国に輸出される製品の製造活動が寄与していることが指摘されている。これは、貿易を通じて生産拠点が移転することから、削減義務のかかっている国に排出が移ることを指し、既存の枠組みの延長では削減すべき炭素排出源が捉えられない、いわゆるカーボン(炭素)・リーケージが生じてしまうことを意味する。2004 年のデータでは全世界の二酸化炭素 CO<sub>2</sub> 排出量のうち 23%は貿易される財に伴うものであり、中国では排出量の 23%が輸出される財に伴うものとする指摘もなされている(Davis and Caldeira, 2010)。IPCC の第 3 作業部会は、製造に伴う温室効果ガスの排出量(その国の地域内で実際に排出された温室効果ガスを算定したもの。現在、気候変動枠組条約に基づき各国に提出を求めている算定方法による排出量。地域的な排出量とも呼ばれる。)と、消費に伴う排出量(どの国の需要のために排出された温室効果ガスか、という観点から算定された排出量)は、重要な違いがあることを指摘した。国連気候変動枠組条約の附属書 I 国の先進国(1990 年時点で先進国とみなされた、経済協力開発機構(Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)加盟国であった国および旧ソ連・東欧諸国)をみると、1990 年から 2010 年の間に CO<sub>2</sub> の製造に伴う排出量は 8%減少しているが、同じ時期に消費に伴う排出量で見ると 5%増加していることが報告されている(IPCC, 2014b)。このような貿易によって間接的に導かれる消費に基づく排出量と、製造に基づく排出量には地域によって大きな差が出つつあり、途上国での化石燃料の燃焼による CO<sub>2</sub> 排出量のうち少なからぬ量が先進国へ輸出するための製造によるものとなっている(IPCC, 2014b)。

CO<sub>2</sub> の排出は、今後単位エネルギーあたり排出される炭素量を下げることかまたはエネルギー強度(単位生産量あたりの製造に必要とされるエネルギー量)を下げない限り増加し続けるとされている(Schipper et al., 1997)。

### 1. 2. 4 本研究の対象と位置づけ

1.2.1 でみたとおり、鉄鋼の生産はライフサイクルの様々な過程において環境負荷を生ずるものであるが、本研究においては、世界の製造業の中でも最大のエネルギー消費産業であることを踏まえ、その中でも特に地球規模で影響する負荷(グローバルな汚染)をとりあげ、エネルギー消費に伴う温室効果ガスの排出に着目することとする。なお、鉄鋼生産をより効率よく行うことができれば付随して発生する地域的な負荷(ローカルな汚染)も結果として抑制することにつながると期待される。

1.2.2 でみたとおり、鉄鋼の消費や社会の蓄積は経済発展の度合いと密接に関わりがあることが

報告されており、用途も踏まえた需要の推計やそれに基づくスクラップの排出量に関する研究にも様々なものがある。また、鉄鋼の需給に関連するエネルギー消費量やCO<sub>2</sub>の排出量に関する既往研究にも様々なものがあり、第3章で詳述するとおり鉄鋼製造に関連する省エネルギー技術をレビューした文献にも様々なものがある。しかし、経済成長の著しいアジアの途上国に焦点を置き、スクラップの利用可能性を検証したうえで、省エネルギー技術の効果も含めて温室効果ガスの排出抑制の可能性について検証を行った既往研究はほとんどない。

また、1.2.3 で触れたとおり炭素強度の高い財について国際的な需給の考慮が重要視されつつあり、この先の気候変動の国際的な枠組みは様々な主体が対策を取るアプローチもより重要となろうとしている。この先世界全体で効果的な気候変動緩和策を実施するためには、排出量の多いセクターを対象とし、製造時に多量の温室効果ガスを排出する財(炭素強度の高い財)の国際的な需給に着目した排出削減策の導入には一定の合理性があると考えられる。

なお、鉄鋼の製造に伴う温室効果ガス排出削減を図るためには、鉄鋼の需要を減らすというアプローチもある。具体的には鉄鋼製品の寿命を長くする、リサイクル率をあげるといったことを通じて新たな鉄鋼製品の需要を抑える手法が含まれるが、このアプローチに関しては、Allwood と Cullen(2011)がまとめていることから、本研究では取り上げないこととする。

### 1.3 研究の目的

本研究では、経済成長を背景とした鉄鋼の需給の変化に伴う温室効果ガスの排出増加を研究対象として取り上げ、特に鉄鋼の需要増加が著しい中国・インドに焦点をおいて、温室効果ガスの排出削減策(気候変動緩和策)を取り上げ、効果的な技術を明らかとしたうえで、技術導入の課題を同定する。そのうえで、技術導入に有効な政策を整理し、政策の導入の際の留意点を明らかにすることを目的とする。

### 1.4 研究の方法と構成

研究にあたり、既往文献をもとに、研究の対象とした鉄鋼の利用に伴う温室効果ガスの排出について現状や要因等につき整理を行った。具体的には、まず、気候変動に関する影響評価の最新の動向と、国際的な議論を整理し、次に鉄鋼製造に伴う温室効果ガスの排出に関する現状をまとめ、次に、近年の鉄鋼の急激な需要の増加とアジアの経済発展の関連について記述した(第2章)。

次に、鉄鋼業に関する温室効果ガスの排出削減策について既往文献のレビューを行った。具体的には、排出削減策の類型化と分類を行い、そのうえで、文献レビューとして、①製造時の設備等技術的な排出削減対策(技術的側面からの対策)、②地域・国内において設備等対策技術の導入を促す取組、③国外への対策技術普及を促す取組(政策的側面からの対策)をとりあげた(第3章)。

そのうえで、温室効果ガス排出削減策の技術的な側面のうち、鉄鉱石の還元に必要なエネルギー消費等を低減することができるスクラップの活用に着目し、中国とインドにおいて、鉄鋼の将来需要とスクラップの排出量を主要な用途毎に推計し、排出される老廃スクラップの活用による温室効果ガスの削減ポテンシャルを推計した(第4章)。

また、対策の政策的な側面に着目し、製造時のエネルギー消費の高い財(炭素強度の高い財)の需給に関連する4つの対策案を取り上げ、気候変動政策あるいは炭素強度の高い財に関連する専門家に対しインタビュー調査を実施し、得られたデータをクラスター分析等により統計的に解析し、効果的な対策の検討において重要となる事項について分析した(第5章)。

そのうえで、第2～5章で得られた知見をもとに、鉄鋼業に関する温室効果ガス排出削減策に関する考察を示した(第6章)。

最後に本研究の総括と今後の課題を整理した(第7章)。各章の関連は図1-4のとおりである。

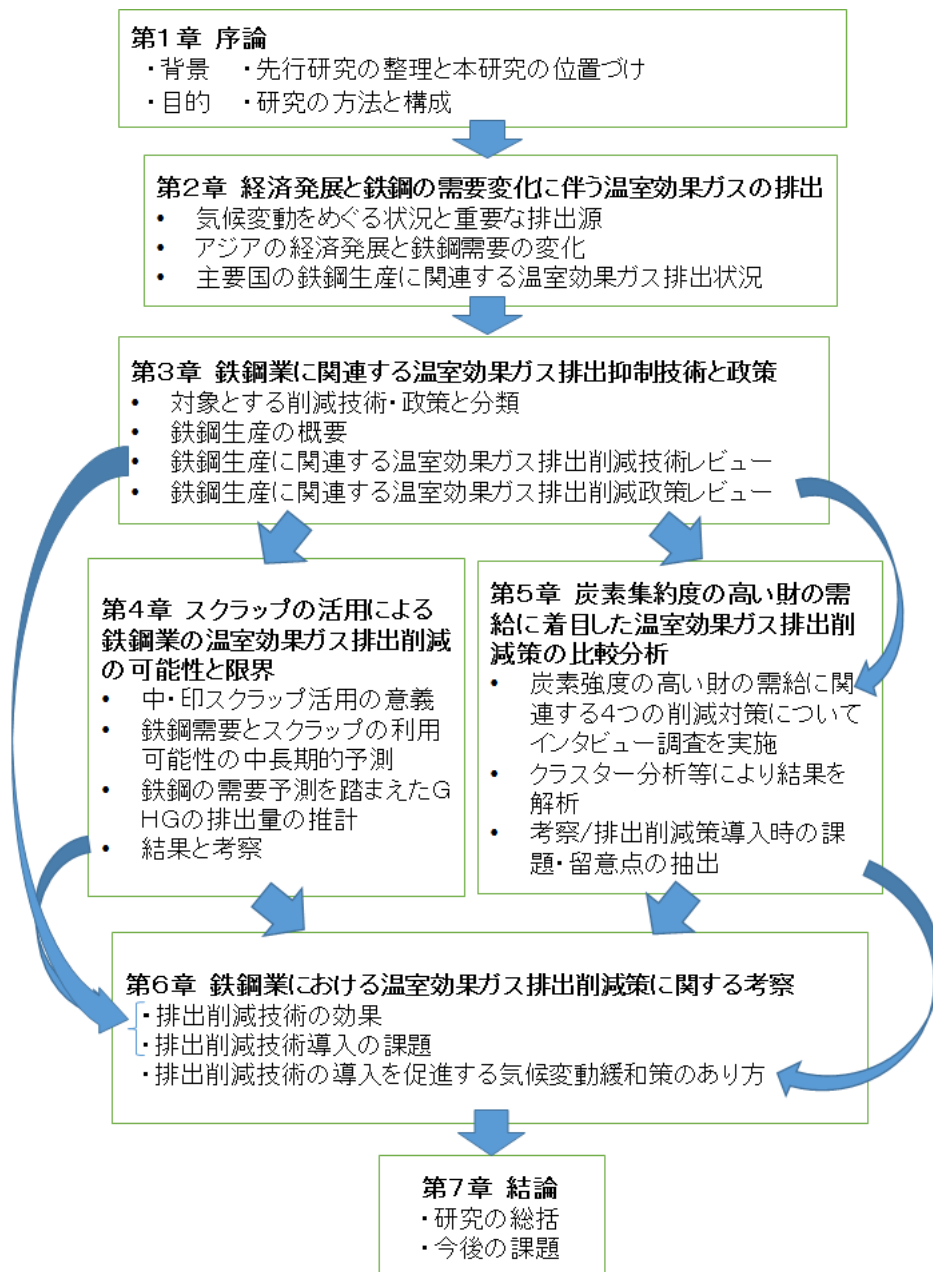


図 1-4 本論文の構成(各章の関連)

<参考文献>

- Ahmad, N., Wyckoff, A. (2003) Carbon dioxide emissions embodied in international trade and goods, OECD Science, Technology and Industry Working Papers, 15, OECD Publishing.
- Akimoto, K., Sano, S., Homma, T., Oda, J., Nagashima, M, Kii, M. (2010) Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost, Energy Policy, 38, 3384-3393.
- Allwood, J., Cullen, J. (2011) Sustainable Materials - with Both Eyes Open: Future Buildings, Vehicles, Products and Equipment - Made Efficiently and Made with Less New Material, UIT Cambridge Ltd.
- Bringezu, S., Schqtz, H., Steger, S., Baudisch, J. (2004) International comparison of resource use and its relation to economic growth, The development of total material requirement, direct material inputs and hidden flows and the structure of TMR, Ecological Economics, 51, 97-124.
- CDIAC (N.D.) 7.2 Carbon dioxide emissions.  
<http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Search.aspx?q=CO2%20world>
- Davis, S.J., Caldeira, K. (2010) Consumption-based accounting of CO<sub>2</sub> emissions, PNAS, 107, no.12, 5687-5692.
- Diamond, J. (1997) Guns, Germs, and Steel. The fates of human societies. W. W. Norton & Company, Inc., New York.
- Fulton, L., Eads, G. (2004) IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection.
- Graedel T. E. (2002) Material substitution: a resource supply perspective, Resources, Conservation and Recycling 34, 107-115.
- Hatayama, H., Daigo, I., Adachi, Y. (2011) Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics, Environmental Science and Technology, 44, 6457-6463.
- IPCC (2013) Summary for Policymakers, In: Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)].Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.(日本語訳:気象庁 (2014).  
[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc\\_ar5\\_wg1\\_spm\\_jpn.pdf](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf))
- IPCC (2014a) Summary for policymakers. Edenhofer, O., R., Pichs-Madruga., Y, Sokona., E, Farahani., S, Kadner., K, Seyboth., A, Adler., I, Baum., S, Brunner., P, Eickemeier., B,Kriemann., J, Savolainen., S, Schlömer., C, von Stechow., T, Zwickel and J.C. Minx (eds.), Climate change 2014: mitigation of climate change, Contribution of Working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,

- Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.
- IPCC (2014b) Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change (The version released on 13 April 2014, subject to copy-edit and final layout) , Chapter 5, Cambridge, UK and NY, USA.
- IEA (2007) Tracking industrial energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions, Paris.
- IEA (2009) Energy technology transitions for industry, Paris.
- IEA (2013) CO<sub>2</sub> Emissions from fuel combustion, Paris.
- 海外環境協力センター(社団法人) (1998) 大気環境保全技術研修マニュアル(総論), 平成 9 年度環境庁委託持続可能な開発支援基盤整備事業.
- Kapur, A. (2006) The future of the red metal: discards, energy, water, residues, and depletion, *Industrial Ecology*,3(3), 209-236.
- 片桐望, 中島謙一, 原田幸明(2009)概説資源端重量 (Total Material Requirement; TMR) NIMS-EMC 材料環境情報データ, no.18
- 河瀬玲奈, 東章吾, 松岡譲(2012)日本における低炭素社会と脱物質化社会構築の可能性について—鉄鋼を例として—, 土木学会論文集 G, I68(6), II\_371-II\_381.
- 環境庁(1972)昭和 47 年版環境白書 第 3 章.
- 国立天文台(自然科学研究機構)(2014)理科年表 平成 27 年(机上版), 丸善出版株式会社
- Malenbaum, W. (1978) World demand for raw materials in 1985 and 2000, Mc Graw-Hill, New York.
- Müller, D. B., Wang, T, Duval B, and Graedel, T. E. (2006) Exploring the engine of anthropogenic iron cycles, *PNAS*, 103(44), 16111-16116.
- 日本鉄鋼連盟(一般社団法人)(2013) 鉄鋼統計要覧(2013 年度版)富士美術印刷株式会社
- 野村 勉, 山本範人, 藤井武志, 滝口裕太(2014)低品位鉱石活用のための選鉱プラント及びペレットプラントの動向, 神戸製鋼技報, 64(1), 8-13.
- Pauliuk, S., Wang, T., Müller, D. B. (2012) Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle, *Environ. Sci. Technol*, vol.46, 148-154.
- Pauliuk, S., Wang, T., Müller, D. B. (2013) Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries, *Resources, Conservation and Recycling*, vol.7, 22-30.
- Peters, G. (2008) From production-based to consumption-based national emission inventories, *Ecological economics*, 65, 13-23.
- ランピーノ・ジョン (2006) フィリピン マーコツパー鉱山事故の事例, 資本と地域, 3, 42-43.
- Rafiei, M., Gadgil, A.S., Ghole, V.S., Gore, S.D., Jaafarzadeh, N., Mirkazemi, R. (2009) Assessment of air pollution and its effects on the health status of the workers in beam rolling mills factory (Iran National Steel Industrial Group) from Ahvaz-Iran, *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 13(1), 20-22.

- Remus, R., Monsonet, M. A. A., Roudier, S., Sancho, L.D. (2013a) Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Industrial Emissions Directive 2919/75/EU, Integrated Pollution Prevention and Control, Chap.6, European Commission.
- Remus, R., Monsonet, M. A. A., Roudier, S., Sancho, L.D. (2013b) Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Industrial Emissions Directive 2919/75/EU, Integrated Pollution Prevention and Control, Chap.7, European Commission
- Schipper, L., Ting, M., Khrushch, M., and Golove, W. (1997) The evolution of carbon dioxide emissions from energy use in industrialized countries: and end-use analysis, *Energy Policy*, 25 (7-9), 651-672.
- 総務省 (2014) 日本の統計, 第 8 章 (<http://www.stat.go.jp/data/nihon/08.htm>, 2014 年 11 月アクセス)
- 田中和明 (2009) 図解入門 よくわかる最新「鉄」の基本と仕組み—性質、技術、歴史、文化の基礎知識, 秀和システム.
- Tilton J. E. (2002) On borrowed time? Assessing the threat of mineral depletion, *Resources for the Future*, Washington D.C., U.S.
- 富山地方裁判所 (1971) 第 1 次訴訟控訴審判決主文および判決理由要旨, 昭和 46 年(ネ)第 103 号, 第 120 号, 第 137 号(原審富山地方裁判所昭和 43 年(ワ)第 41 号).
- UNEP (2010) Assessing the environmental impacts of consumption and production: Priority products and materials, A report of the working group on the environmental impacts of products and materials to the international panel for sustainable resource management. Hertwich, E., van der Voet, E., Suh, S., Tukker, A., Huijbregts, M., Kazmierczyk, P., Lenzen, M., McNeely, J., Moriguchi, Y., Paris.
- UNEP (2012) Responsible resource management for a sustainable world: Findings from the international resource panel, Paris.
- UNEP (2013) Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles, A report of the working group on the global material flows to the international resource panel. Van der Voet, E.; Salminen, R.; Eckelman, M.; Mudd, G.; Hischier, R., Paris.
- Van Vuuren, D. P., Strengers, B.J., De Vries H.J.M. (1999) Long term perspectives on world metal use – A system-dynamics model, *Resource Policy*, 25 (4), 239-255.
- Wang, T., Hashimoto, S. (2012) Forging a low carbon steel cycle in Asia, Proc. of 12th Ecobalance Congress, CD-ROM.
- WSA (2013) Steel Statistical Yearbook 2013 .  
(<http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/statistics-archive/yearbook-archive>)

/Steel-Statistical-Yearbook-2013/document/Steel-Statistical-Yearbook-2012.pdf)

Zannetti, P. (2006) Air pollution from a large steel factory: Polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from coke-oven batteries, Journal of the Air and Waste management Association, 56, 255-260.





## 第2章 経済発展と鉄鋼の需要変化に伴う温室効果ガスの排出

### 2.1 気候変動をめぐる状況と主要な排出源

#### 2.1.1 気候変動の影響予測と国際交渉の動向

2013年から2014年にかけて、気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)は、気候変化、影響、適応及び緩和の方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価の取りまとめとして、一連の第5次評価報告書を公表している。作業は三つの作業部会に分かれて進められ、2013年11月には、気候システム及び気候変化の自然科学的根拠についての評価を行う第1作業部会による第5次評価報告書(IPCC, 2013)が公表された。当該報告書では、これまでの観測結果から、気候システムの温暖化には疑う余地がないとし、また、気候変動をもたらす要因として最も寄与しているのは1750年以降の大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度の増加であり、多くのシナリオにおいて予測した結果21世紀末の世界平均地上気温は1.5°Cを上回る可能性が高く、乾燥地帯と湿潤地帯の、そして乾季と雨季の降雨量の差はさらに広がる等と報告した(環境省, 2013a)。2014年3月には、気候変化に対する社会経済と自然システムの脆弱性、気候変化がもたらす影響、気候変化への適応のオプションについての評価を担うIPCC第2作業部会による第5次評価報告書(IPCC, 2014a)が公表された。この報告書では新たな知見をもとに、観測された影響と将来の影響と脆弱性について地域・分野別に評価し、世界全体の気候変動による主要リスクの抽出とその評価等を行い、将来の確信度の高い主要なリスクとして、海面上昇、沿岸での高潮、洪水による被害や、熱波による健康への影響、気温上昇・干ばつ等による食料生産への影響等8つを掲げ、現在すでに温暖化の影響が広範囲に観測されていること等を示すとともに、気候の変動性に対する生態系や人間システムの著しい脆弱性やばく露を明らかにした(環境省, 2014a)。2014年4月には温室効果ガスの排出削減など気候変化の緩和のオプションについての評価を担うIPCC第3作業部会による第5次評価報告書(IPCC, 2014b)が公表され、気候変動の緩和をより進めなければ、高い確信度で、世界の地上平均気温は、2100年において産業革命前の水準と比べ3.7~4.8度(中央値であり、気候の不確実性を考慮すると2.5~7.8度の幅)上昇する等との報告がなされた(環境省, 2014b)。

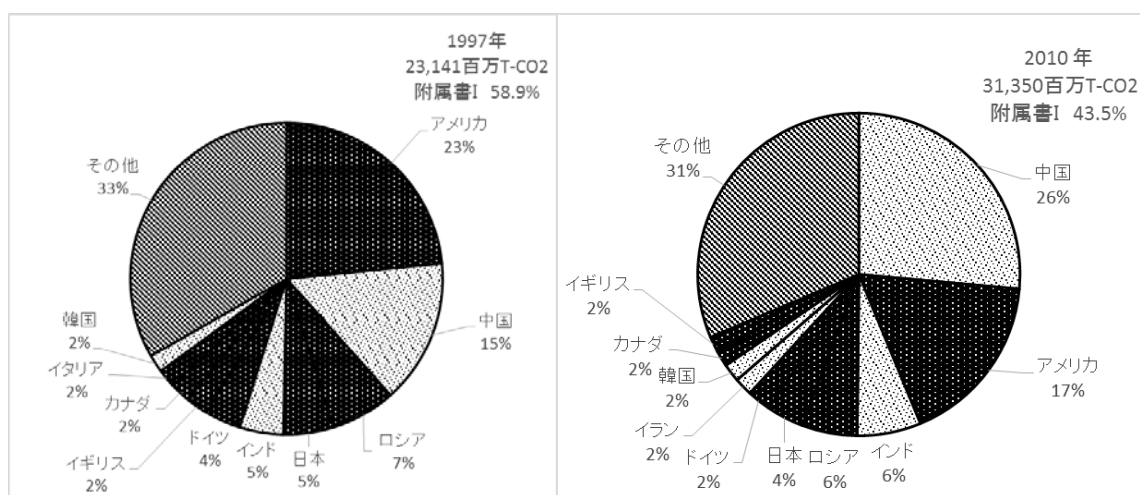
一方、気候変動への対応は十分とは言い難い状況にある。国連環境計画(United Nations Environment Programme (UNEP), 2011)によると、2020年までに42の先進国と44の途上国が約束した(Pledge)気候変動対策が全て確実に実施されたとしても、地球の平均気温を産業革命前から2度までの上昇に抑えるのに必要な温室効果ガスの削減量からみるとCO<sub>2</sub>の量に換算して6から11Gtのギャップがある。また、2009年に排出されている世界全体の温室効果ガス排出量は約50Gtと推計されており、このギャップは現時点での世界全体の年間の排出量の2割程度にあたる量である。UNEPはこのギャップを埋めることは可能ではあるが速やかな行動が必要であるとしている。

また、現行の京都議定書の第二約束期間以降、つまり2020年以降の気候変動対策を国際的にどのように行っていくかについての国際交渉も迅速に進んでいるわけではない。2013年の気候変

動枠組条約第 19 回締約国会合 (19<sup>th</sup> Conference of the Parties, COP19) では、2020 年以降の枠組みについては、各国 (全ての国が対象となる) がそれぞれ決める貢献 (nationally-determined contribution) について、2015 年の COP21 の前に草案を示すことが合意されたところであり (環境省, 2013b), 具体的な議論は緒に就いたところである。

### 2. 1. 2 気候変動の原因と主な温室効果ガスの発生源

温室効果ガスには様々なものがあるが、主要なのは人為的な化石燃料の燃焼等により排出される CO<sub>2</sub> であり 2010 年には全体の排出量の 76% を占めた (IPCC, 2014c. Chap.5). 国連気候変動枠組条約に基づく京都議定書が制定された 1997 年と直近のデータとして 2010 年の CO<sub>2</sub> の世界の排出量を国別に示したのが図 2-1 である。図 2-1 のとおり、上位 10 か国の排出量が世界全体の 7 割近くを占めている状況はどちらの年も同様であるが、2010 年には新興経済国である中国が 1 位、インドが 3 位を占め、この二か国だけで全体の 3 割を超える量を排出していることとなる。



注: 米国 Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) のデータを元に作成

排出上位 10 か国まで国名を明示。図中、その他以外の黒地は附属書 I 国、白地はそれ以外を示す。

図 2-1 世界の CO<sub>2</sub> 排出量 (1997 年と 2010 年)

しかし、温室効果ガスの排出は、必ずしも、その国の消費活動のために行われているわけではない。第 1 章 (1.2.3) で述べたとおり、貿易によって間接的に導かれる消費に基づく排出量と、製造に基づく排出量には地域によって大きな差が出つつあり、途上国での化石燃料の燃焼による CO<sub>2</sub> 排出量のうち少なからぬ量が先進国へ輸出するための製造によるものとなっている (IPCC, 2014c. Chap.5).

温室効果ガスの排出源について、部門別にみても最も寄与度が高いのは産業部門であり、2010 年には産業部門の排出量は全体の温室効果ガス排出量の 30% を超えている (IPCC, 2014b). IPCC 第 3 作業部会の分析によると、2000 年から 2010 年の温室効果ガスの排出の増加の 6 割は収

入が中位から上位の国のエネルギー部門と産業部門での排出によるものとされている (IPCC, 2014c. Chap.5) 産業部門の中でも、重要となるのは製造時に温室効果ガスを多量に排出する財 (炭素強度の高い財) の製造である。このような財には鉄鋼、セメント、紙パルプといったものが含まれるが、そのなかでも最もエネルギーを消費するのは鉄鋼である。鉄鋼業は 2004 年のデータでは製造業の排出の 27% を占めた (International Energy Agency (IEA), 2007)。コークス製造や高炉等統計上間接的に取り扱われる場合があるものも含め、鉄鋼業の直接または間接的な温室効果ガスの排出量は 2006 年で 2.6Gt とされており (IPCC, 2014c. Chap.10)、2006 年の世界全体の温室効果ガスの排出量の 9% を占める (Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDAIC) のデータより算出)。

### 2. 1. 3 条約制定時の“先進国”と主要排出源の変化

気候変動に関する国際的な対応の枠組みについての国際交渉は、国という単位に基づき、先進国と途上国の義務に差をつけることを基本として進められている。これは主要な国際交渉は 1992 年に採択された国連気候変動枠組条約の締約国会議と、条約に基づき 1997 年に採択された京都議定書の締約国会議において進められており、気候変動枠組条約においては、原則として「共通だが差異のある責任」が規定された。この原則は、人類共通の問題に対しその発生の寄与に差のある諸国がそれぞれの責任分担に差異をつけながら対応するとされていること、また、その原則に基づき、先進国と開発途上国の義務は差異化され、各国共通の義務と先進国の義務と双方が定められていることに基づく (清水, 2005a)。なお、ここでの先進国とは、気候変動枠組条約附属書 I に掲げられた締約国であり、当時の経済協力開発機構 (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) 加盟国とロシアと東欧諸国とされている。京都議定書は、これらの先進国に対し、温室効果ガスの排出の抑制または削減に法的拘束力のある数値目標を定めるものである (関谷, 2005b)。この議定書の議論の背景には、気候変動枠組条約のみでは十分な削減が進まない状況を見て、途上国から先進国に追加的な義務を課す議定書が必要とする声があったことが指摘されている (川島, 1998)。

一方、気候変動枠組条約ができてから今日まで、排出源の状況は大きく変わった。図 2-1 に見られるとおり、京都議定書が採択された 1997 年当時と 2010 年の各国の温室効果ガスの排出量を比較すると、排出量自体は増えているのに対し、1997 年当時は 6 割近くを占めていた先進国の排出の割合は 2010 年には 4 割程度と小さくなっている。このような急激な新興国の成長は条約制定当時誰も予想できなかったとする意見もある (山口, 2013)。IPCC 第 3 作業部会の分析によると、ここ 10 年の温室効果ガスの排出量増加の主要因は GDP と人口の増加であり、これらに比べると低い寄与度となるが続いてエネルギーの炭素強度があげられている (IPCC, 2014c. Chap.5)。これは途上国、特に新興国での人口増加と経済成長が大きく寄与しており、また、特に中国・インドではエネルギー源として炭素強度の高い石炭を多用することを反映したものである。しかし、現在の気候変動枠組条約も京都議定書も附属書 I 国に含まれない国の排出削減を強制力をもって縛ることはできない。また、附属書 I 国であっても数値的な削減義務を担う国はそもそも一部の先進国の

みであったが、さらに、2012 年以降 2020 年の第二約束期間では、当初から京都議定書に不参加の米国・カナダに加え、日本・ロシア・ニュージーランドが対象外となることから、数値の明確な削減義務を負う国は全体に対し限定的となっており、現状では野心的な排出削減が期待できる状況とは言い難い。また、上述のとおり先進国の消費のために排出された温室効果ガスであっても、その国の域内からの排出でなければ責任は問われない状況となっている。

## 2. 2 アジアの経済発展と鉄鋼需要の変化

### 2. 2. 1 新興経済国, 特にアジア諸国の経済発展

新興経済国の急激な経済成長が目されるようになったのは 2000 年代頭の頃からであり、O'Neill(2001)は BRICs という表現を用い、特に経済成長が目覚ましい新興国であるブラジル、ロシア、インド、中国(BRIC はこれらの国の頭文字をつなげたもの)に注意を促し、2001-2002 年にはこれら新興国の GDP 成長は G7(主要先進国 7 か国, 日, 米, 英, 仏, 独, 伊, 加)を超え、これらの国の経済成長は特に中国を中心に次の 10 年間も成長するという予測を示し、G7 のような枠組みにこれら新興経済国の代表も含める必要があると提言した。実際、2000 年以降、前章の図 1-2 に示したとおり、新興国、特に中国は目覚ましい発展を遂げており、2000 年の一人あたり GDP のレベルを 1 とすると、2012 年に中国では 6.5、インドでは 3.4 ともなる成長を果たしている(世界平均では 1.9、他の先進国では 1~2 程度)。

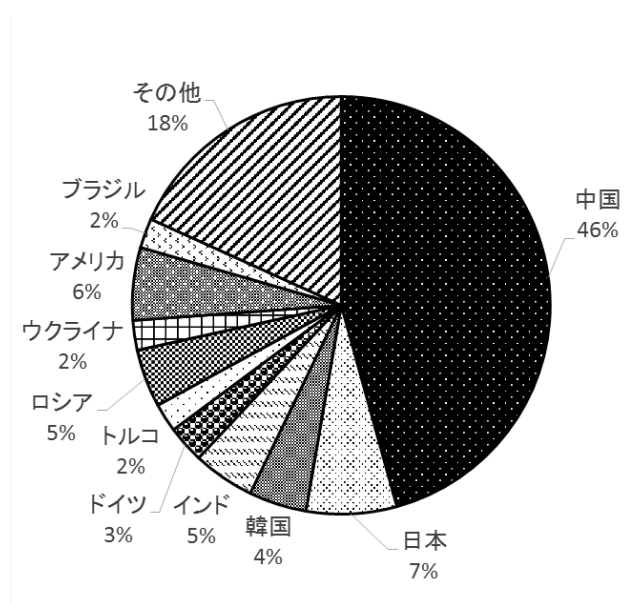
ただし、同じアジアに位置する新興経済国といえども、中国とインドでは経済成長には大きな差がある。一人あたり GDP でみると、1980 年代頃はどちらも 200 ドル程度であったが、2012 年に中国は 6,000 ドルにまで伸びたのに対し、インドは 1,500 ドルに留まった(United Nations Statistics Division(UNSTAT), 2013)。どちらも 10 億を超える人口を抱える大国であるが、この経済成長の違いは、歴史と社会構造の違いにあり、共産党の一党支配体制が取られている中国に対し、インドでは議会制民主主義に基づき合意形成を図るという違いにより意思決定に時間がかかるということがまずあげられる。さらに、インドではカースト制度を禁止して下層階級の社会的地位を確保しようとする社会的な流れがある一方、識字率はまだ 7 割程度に留まることに示されるように下層階級は未だ貧困から脱却し難い状況にある。中国では富裕層と貧困層の差が大きく開くことも容認して大幅な経済成長を遂げたが、インドでは下層階級にさらに負担を強いることはなかなか容易ではないことも経済成長を緩やかにすることにつながるという指摘もある(平塚, 2013)。

### 2. 2. 2 経済発展に伴う鉄鋼需要の増加

鉄鋼は、我々の生活を支える基本的な素材の一つである。鉄鋼は、橋梁や線路、道路、ダムや水道設備といった社会の基盤を支えるものから、ビルなど建築物、船や自動車、様々な機械、食品や飲み物の缶と、様々な用途に使用されている(日本鉄鋼連盟, 2013)鉄鋼の需要は経済成長に伴い増加することが知られている(Müller et al., 2006)。鉄鋼の全世界での生産量は近年大きく伸びており、2012 年と 2002 年を比較すると 10 年で 1.7 倍増加した。この背景には新興経済国、とり

わけ中国での需要の急激な伸びがある。2002年に中国の粗鋼生産量は182百万tであったが、2012年には716百万tと4倍近く増加している。世界の粗鋼生産量の割合を図2-2に示す。鉄鋼の生産は少数の国が大半を占め、上位10か国による生産で全体の8割以上となっているが、特に中国はたった一国で世界の生産量46%程度を占めている。主要な用途として交通・機械・建築・その他に分類し最近の中国の鉄鋼消費量をみると、経済成長にそって急激に増加しているとともに、特に建築用途(ビルや橋梁等構造物のための素材としての利用)の消費が大きな割合を示すことが報告されている(Pauliuk et al., 2012)。

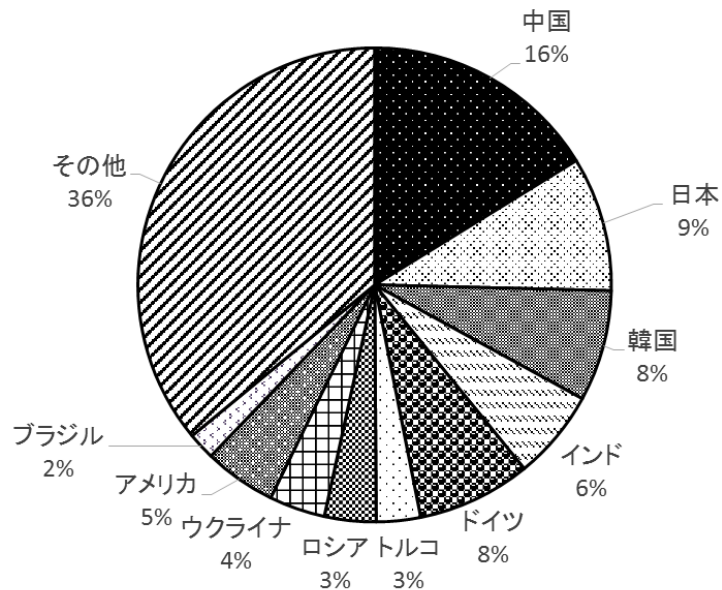
また、産業部門に関するシナリオの多くは、2050年までに鉄鋼やセメント等の需要は2010年比で45から60%増加するとしており(IPCC, 2014c. Chap.10)、鉄鋼等の炭素強度の高い財の製造に伴う温室効果ガスの排出削減はますます重要となっている。



注:世界鉄鋼協会(World Steel Association, 2013a)のデータを元に作成

図2-2 2011年の世界の粗鋼生産量

前節で、温室効果ガスの排出において製造に伴う排出と消費に伴う排出では貿易に内包されるものがあるため、両者には地域差があることについて触れた。鉄鋼の消費を考える際にも貿易財としての視点が重要である。鉄鋼は、セメントや紙パルプといった他の炭素強度の高い財と比べても、より貿易が盛んな財であり、鉄鋼製品・半製品といった形で貿易されるほか、自動車や機械等の素材という形で国際的に取引される。図2-3に世界の鉄鋼の輸出量の割合を示す。中国は自国内での鉄鋼消費も非常に大きい一方、図2-3からわかるとおり、鉄鋼の輸出国としても世界トップレベルとなっている。



注: 世界鉄鋼協会 (World Steel Association, 2013a) のデータを元に作成

図 2-3 2011 年の世界の直接・間接鉄鋼輸出货量

## 2. 3 主要国における鉄鋼生産に関連する温室効果ガス排出の状況

### 2. 3. 1 主要国の鉄鋼生産の状況

現在, 世界の鉄鋼生産は一部の国に集中している. 2011 年の世界の鉄鋼生産がどの国でどれだけ行われているかを図 2-4 に示す. 主要な生産国の 10 か国程度で, 2011 年の世界全体の粗鋼生産量 1,535 百万t の 82% を占める. 第 1 章で述べたとおり, 鉄鋼生産は製造業の中でもエネルギー消費量が最も多い. 世界鉄鋼連盟の調査による 2011 年の世界の鉄鋼生産に関連するエネルギー消費量に占める鉄鋼主要生産国の割合を図 2-5 に示す. エネルギー消費量を求めるにあたっては, IEA のデータ (IEA, 2013a,b) を基に, 鉄鋼部門での最終消費エネルギー (Total Final Consumption, Iron and steel) と, 高炉でのエネルギー転換 (Total Primary Energy Supply, blast furnace) に消費されたエネルギーを加え, そこにコークス製造用にエネルギー転換として投入された石炭の量のみを加えて算出した. 図 2-5 のとおり, 主要生産国 10 か国で世界の鉄鋼生産に関連するエネルギーの 87% を消費しており, 特に中国一国で半分を占めることがわかる.

### 粗鋼生産量(2011)

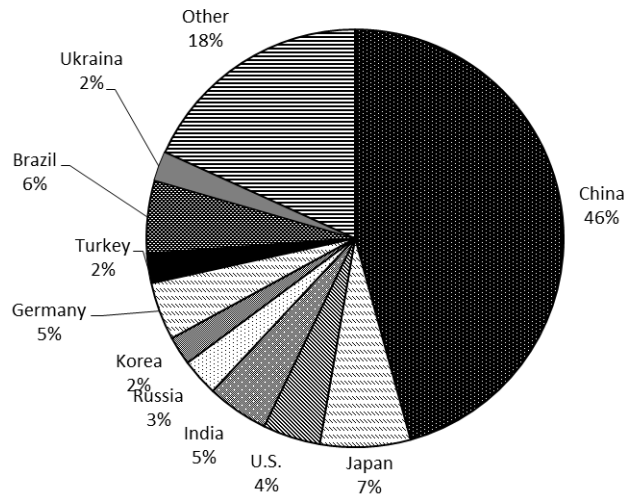


図 2-4 世界の鉄鋼生産に占める主要生産国の割合(2011年)

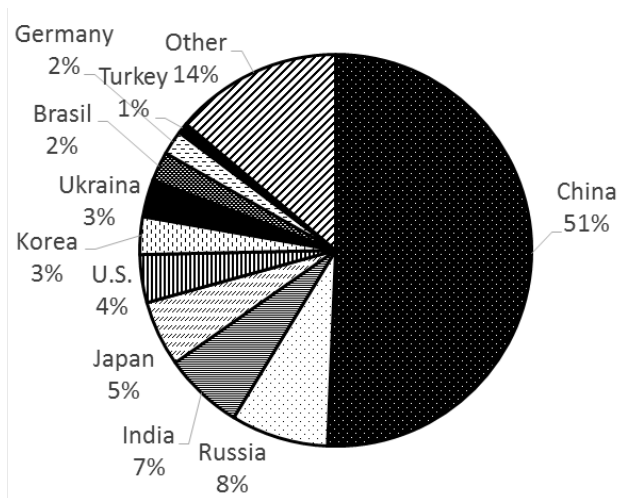


図 2-5 世界の鉄鋼生産関連エネルギー消費量に占める主要生産国の割合(2011年)

図 2-4 と図 2-5 を比較すると、鉄鋼生産量の割合と鉄鋼生産に関連するエネルギー消費量の割合は、例えば生産量で第 2 位の日本は、エネルギー消費量では第 4 位となっていることから、単純比例しているわけではないことがわかる。

#### 2.3.2 鉄鋼生産の原料・プロセスとエネルギー消費

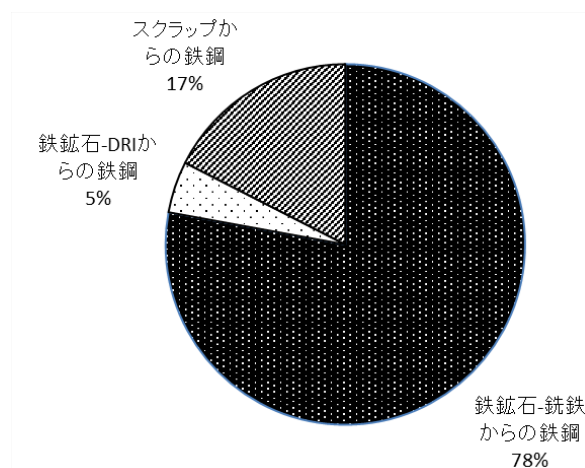
鉄鋼の生産は主として 2 つの手法がある。まずはコークス炉・高炉・転炉プロセスを用いる手法で、



原料としては主として鉄鉱石を使用する(スクラップも少量使用する)。もう一つは電炉プロセスを用いる手法で、原料としてはスクラップ、直接還元鉄(Direct Reduced Iron (DRI)、スポンジ鉄とも呼ばれ鉄鉱石を比較的低温で直接還元したもの)、銑鉄(鉄鉱石を高炉で還元して作られるもの)が用いられ、主としてスクラップが使用される。第一の手法は鉄鋼生産の7割近くを占め、第二の手法は3割近くを占める。プロセスとしてはその他以前使用されていた平炉等もあるが3%程度にしか過ぎない(IEA,2007)。

鉄鉱石を還元して作られる過程でできる鉄には主に銑鉄とDRIの2種類がある。2011年にはほぼ8割の鋼が銑鉄から作られており、DRIは増加傾向にあるものの5%程度にしか過ぎない。残りの約2割程度はスクラップから作られている(World Steel Association (WSA), 2013a; IEA, 2007)。

図2-6に鉄鋼生産の原料ごとの割合を示す。なお、第3章において原料とプロセスの違いについて詳述する。



注: 銑鉄・DRIについてはそれぞれの生産量を用いて粗鋼生産量とした<sup>1</sup>。

図2-6 原料ごとの世界の鉄鋼生産(2011)

### 2.3.3 主要国の鉄鋼生産とエネルギー消費

鉄鋼生産において最もエネルギーが必要となるのは鉄鉱石の還元の過程である。スクラップを活用した場合は還元の過程を省くことができるため、2.3.2でみた原料とプロセスの違いはエネルギー消費において大きな違いをもたらす。公益財団法人地球環境産業技術研究機構(Research Institute of Innovative Technology for the Earth, RITE)によると、2010年時点での世界平均での鉄鉱石-転炉鋼生産のエネルギー原単位は27.1GJ/tとされ(RITE, 2012a)、スクラップ-電炉鋼生産のエネルギー原単位は8.8GJ/tとなり、スクラップ-電炉鋼は必要とするエネルギー消費量が鉄鉱石-転炉鋼の3分の1程度となる(RITE, 2012b)

<sup>1</sup> スクラップによる粗鋼生産量は、粗鋼生産量全体から銑鉄生産量とDRI生産量を引いて推計した。IEA(2007)より本来はスクラップによる粗鋼生産の割合の寄与度がもう少し高くなると考えられるが算出に必要なデータが得られないため上記の推計とした。

また、各原料・プロセスごとのエネルギー消費量は国においても異なる。図 2-7 に、2010 年の粗鋼生産主要国と世界の主要原料・プロセスのエネルギー原単位を示す。各国のデータは RITE によるものを用い(RITE, 2012a,b), 原単位の記載のない国については、技術レベルが近いと考えられる国のデータを活用し推計を行った。例えば、ウクライナのスクラップ・電炉鋼のエネルギー原単位については、ウクライナにおけるスクラップ・電炉鋼のエネルギー原単位と鉄鉱石・転炉鋼のエネルギー原単位の比がロシアの比と同等と仮定し、ロシアのこの 2 つの原単位の比と、ウクライナの鉄鉱石・転炉鋼のエネルギー原単位から計算した。図 2-7 より同じ原料・プロセスであっても技術レベルからエネルギー消費量は様々であり、主要生産国の中ではどちらの原料・プロセスともに日本、韓国の効率では高く、また、ウクライナ、ロシア、インドの 3 国がどちらの原料・プロセスにおいても他国に比べて特にエネルギー効率が悪いことがわかる。

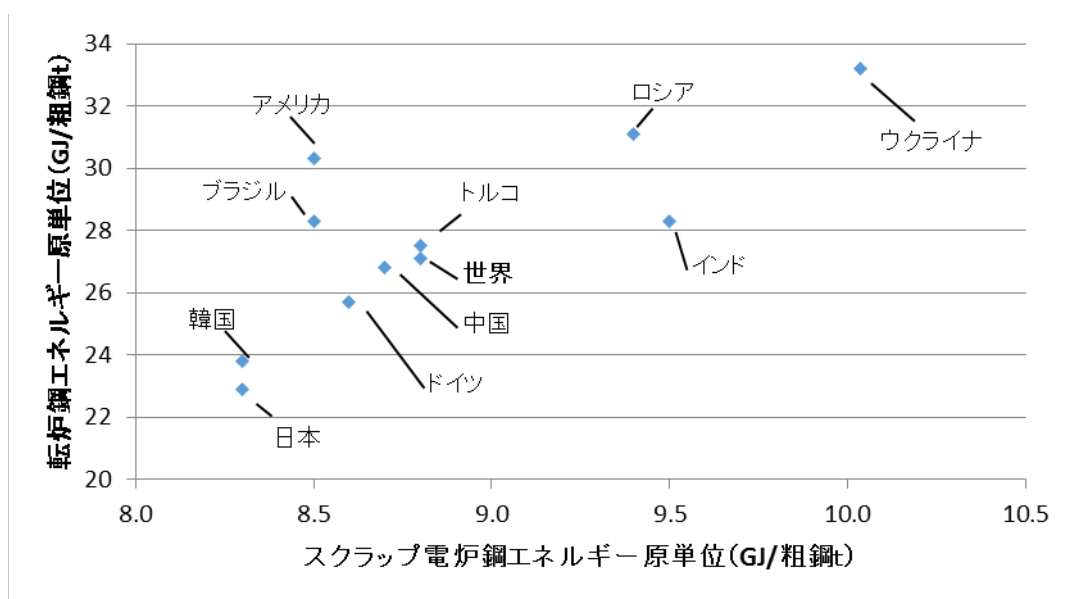


図 2-7 粗鋼生産主要国と世界の主要原料・プロセスのエネルギー原単位 (2010)

上述のとおり、鉄鋼生産においては原料とプロセスの組み合わせでエネルギー消費量が大きく異なり、スクラップ・電炉鋼の方が鉄鉱石・転炉鋼よりも必要とするエネルギー消費量は小さい。しかしスクラップはその入手可能性に制約があり、国によって鉄鋼生産の原料に主として何を用いるかは大きく異なる。図 2-8 に主要生産国の銑鉄比と、鉄鋼生産エネルギー原単位の関係を示す。鉄鋼生産エネルギー原単位は、図 2-7 で用いた各国の原料・プロセスごとのエネルギー原単位と、各国の粗鋼生産量及び転炉、電炉による生産割合 (WSA, 2013a) より算出した。鉄鋼生産のエネルギー原単位は、粗鋼生産量に対する銑鉄生産量の割合と相関がみられ ( $R=0.88$ )、銑鉄の割合が高い、つまり原料として鉄鉱石の使用割合が高い国では鉄鋼生産全体でのエネルギー原単位は大きくなる。図 2-8 からは、ウクライナ、ブラジル、中国、ロシアの 4 か国が世界と比べても鉄鋼生産エネルギー原単位が大きく効率が悪いことがわかる。図 2-9 に各国の鉄鋼生産全体でのエネルギー消費量と粗鋼生産量の関係を示す。粗鋼生産量の多さから中国がとびぬけてエネルギー

消費量が多いことがわかる。

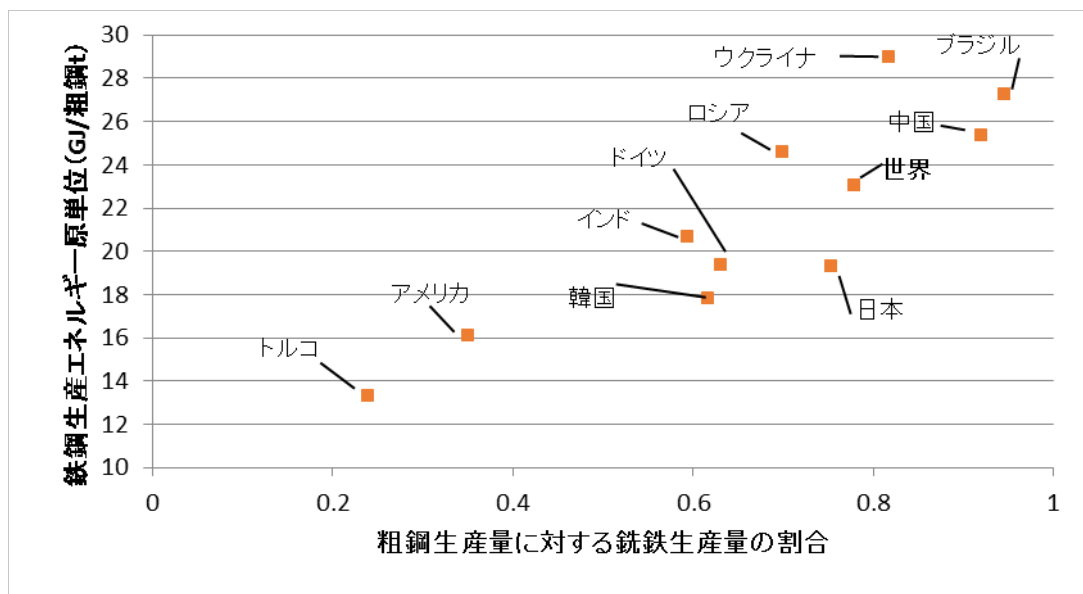


図 2-8 主要生産国の銑鉄比と鉄鋼生産エネルギー原単位(2010)

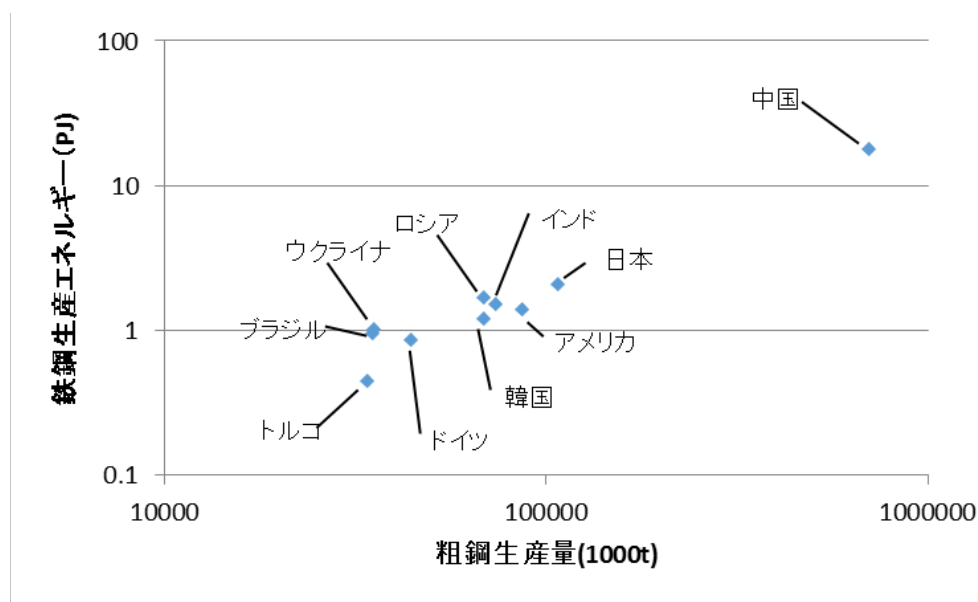


図 2-9 主要生産国の粗鋼生産量と鉄鋼生産エネルギー(2010)

#### 2. 3. 4 主要国の鉄鋼生産と CO<sub>2</sub> の排出

次に、化石燃料の消費に伴う CO<sub>2</sub> の排出に着目する。エネルギー消費量が同一であっても燃料の種類によっては CO<sub>2</sub> の排出量は異なる。同じエネルギー量に対し、CO<sub>2</sub> の排出は化石燃料の中でも石炭が最も多くなり、天然ガスが最も低くなる(IEA, 2013)。図 2-10 に主要生産

国の鉄鋼生産のエネルギー原単位と CO<sub>2</sub> 排出原単位の関係を示す。図 2-10 より、CO<sub>2</sub> 排出でみると、インドは特に効率が悪いことがわかる。これは、エネルギー源・還元剤として石炭を多用しており、また特に効率のわるい鉄鉱石を、石炭を使って DRI とし電炉で鉄鋼を生産する手法が、特異的に多用されていることによると考えられる(IEA, 2007)。またブラジルではエネルギー原単位では効率が悪いのに、CO<sub>2</sub> 排出では効率がよくなっている。これは、IEA のエネルギー統計から、ブラジルは水力発電を多用していることから電力に起因する CO<sub>2</sub> の排出係数が低いことと、鉄鋼生産に木炭を多用していることによる(IEA, 2013)。なお、鉄鋼生産の歴史をたどるとそもそも高炉が使用されるようになった初期段階では木炭が使用されており、森林資源の豊富ではないイギリスでは森林破壊が問題となり石炭による高炉法が開発された経緯がある(田中, 2009)。鉄鋼生産への木炭の使用は CO<sub>2</sub> 排出量を抑えるという点に限っては効果的であるが、長期的には他の環境負荷も含めて検証されるべきである。

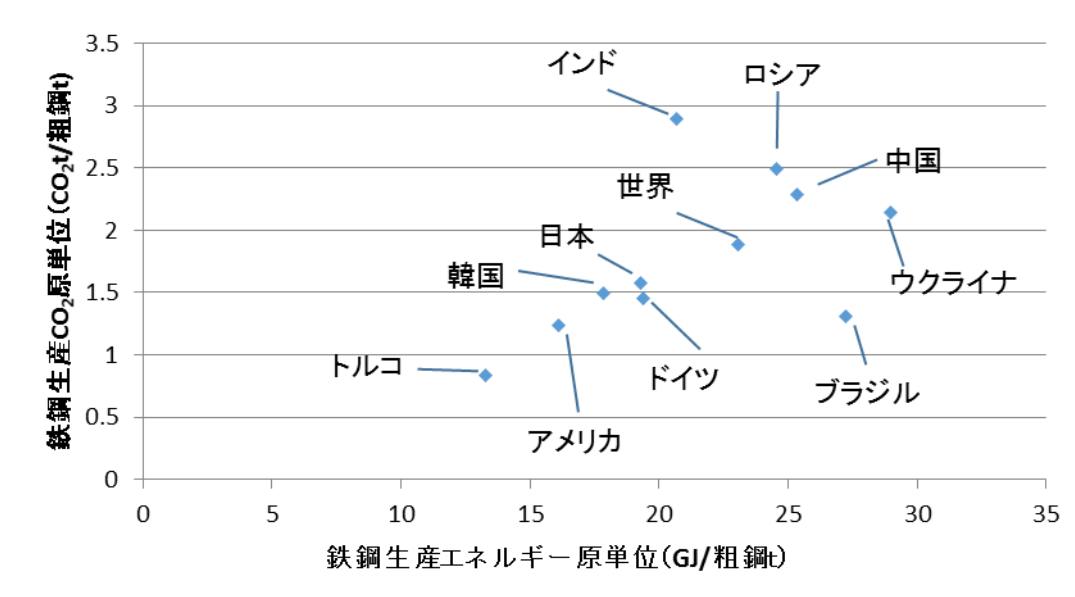
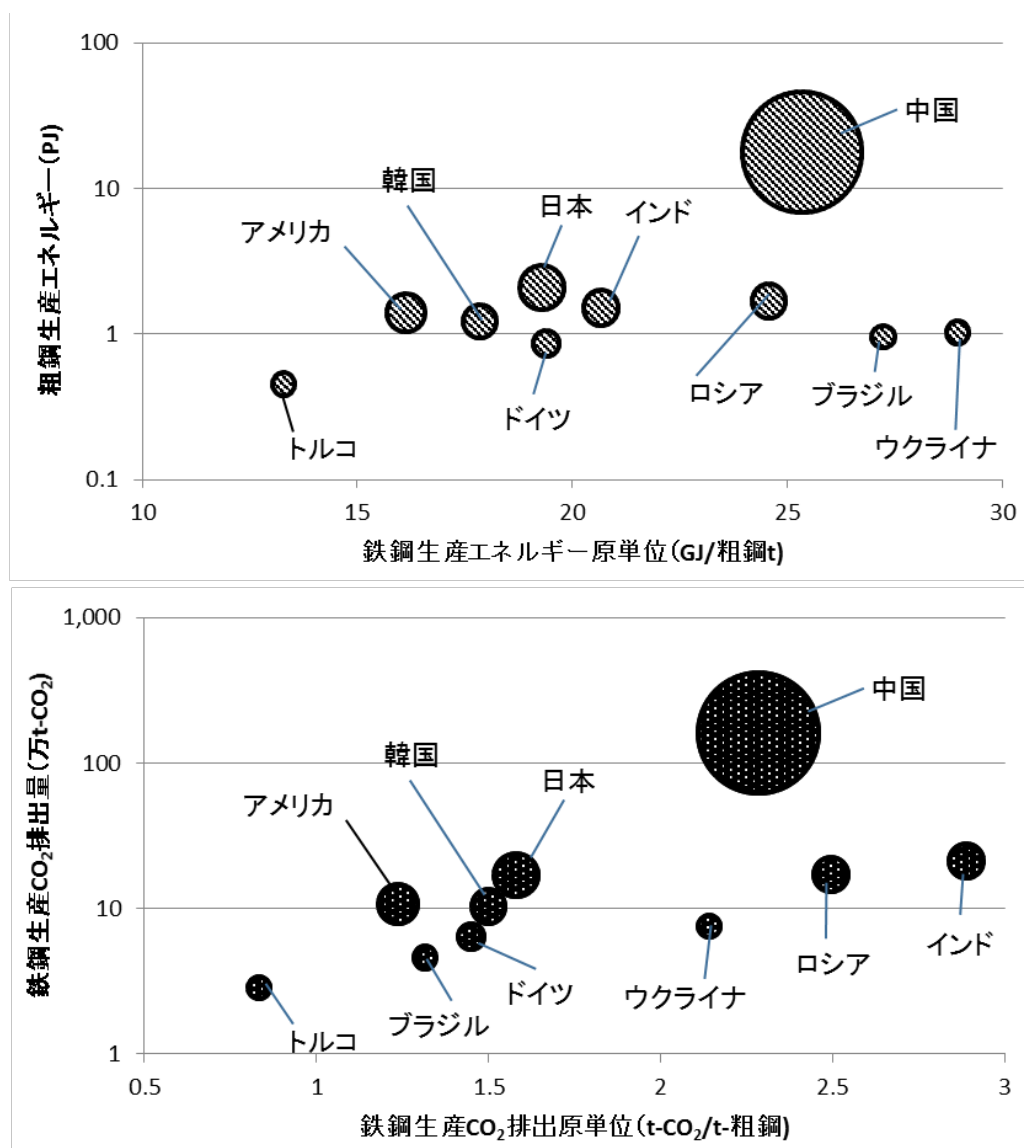


図 2-10 主要生産国の鉄鋼生産のエネルギー原単位と CO<sub>2</sub> 排出原単位 (2011)

### 2. 3. 5 気候変動抑制において特に重要な国々

図 2-11 に主要国の鉄鋼生産時のエネルギー原単位 (GJ/t 粗鋼) とエネルギー量、CO<sub>2</sub> 排出原単位 (粗鋼生産 1t あたりに排出される CO<sub>2</sub> の重量(t)) と排出される CO<sub>2</sub> 総量、粗鋼生産量の関連を示す。鉄鋼生産時のエネルギー消費量については、RITE による鉄鉱石—転炉とスクラップ—電炉のエネルギー消費原単位と WSA による各プロセスによる粗鋼生産量のデータを基に算出した (RITE, 2012a,b; WSA, 2013a)。CO<sub>2</sub> の排出量の計算にあたっては、IEA の統計を用い (IEA, 2013c,d,e)、鉄鋼製造過程と高炉での還元段階で消費された化石燃料消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出を合計した (鉄鋼用のコークス製造は IEA の統計において切り分けて整理することが困難であるため含めていない)。本来、コークス製造もエネルギーを消費する工程であり、中国ではコークスの輸出も

多く行っていることから国内の鉄鋼生産で必要とされる分よりもさらに相当量エネルギーが消費されていると考えられる(2014年著者による鉄鋼メーカーへの聞き取り調査の結果に基づく)。



注: 図中の円の大きさは粗鋼生産量を示す  
(最大: 中国の7億t, 最小: トルコの3千万t)

図 2-11 主要国の鉄鋼生産エネルギー, CO<sub>2</sub> 排出量の原単位と総量, 鉄鋼生産量の関係

図 2-11 から, 中国は鉄鋼生産の CO<sub>2</sub> 排出原単位で見ればインド, ロシアよりは単位生産当たりの CO<sub>2</sub> 排出量は低いが, 生産量が大いことから鉄鋼生産全体で費やすエネルギーはとびぬけて大きくなっていることが分かる。また, インド, ロシアは現状では日本よりも粗鋼生産に費やすエネルギーは小さいが, 鉄鋼生産 CO<sub>2</sub> 排出原単位が高いことからこの先鉄鋼生産量が増えるとエネルギー消費量が増えることが分かる。また, ウクライナ, ブラジルではエネルギー効率は悪いが, 鉄鋼生産において石炭への依存度が低いため CO<sub>2</sub> 排出原単位としては低くなっている。

現段階で鉄鋼生産関連の温室効果ガスの排出量を減らしていくうえでは、主要鉄鋼生産国の中でも飛びぬけて粗鋼生産量が多く、そのため鉄鋼生産に起因する温室効果ガスの排出量の多い中国、それから粗鋼生産あたりの CO<sub>2</sub> 排出量が特に高いインドの二か国が重要である。さらに、第 1 章の図 1-1 で示した世界の粗鋼生産量の近年の伸びが世界平均よりも大きいのは主要生産国のなかでも中国、インド、トルコの三か国であり、これらの国は今後も一定の経済成長が予想されているため少なくとも当面は鉄鋼生産量が増加すると考えられる。このことから、中国とインドは今後の気候変動緩和策を考える上で重要であると考えられる。

2.3.3 で述べたとおり、RITE によると日本は副生ガスの回収有効利用率、各種省エネ設備の普及率の差異などに起因し、鉄鉱石を用いた転炉法、スクラップを用いた電炉法ともに粗鋼生産1tあたりのエネルギー消費量は世界でも最も少ない(RITE, 2012a,b)。仮に世界の鉄鉱石-転炉、スクラップ-電炉が全て日本と同等のエネルギー効率となった場合には、世界全体の鉄鋼生産に伴うエネルギー消費量は 5PJ、現在より約 15%削減が可能と試算される。これに伴う温室効果ガス(CO<sub>2</sub>)削減量は各国の使用エネルギー種別が様々であるため一概には推計できないが、中国・インドは石炭への依存度が特に高いため全て石炭で削減されたとすると温室効果ガス同等レベルの削減が可能と考えられる。

なお、上述のとおり、日本は主要な原料とプロセスの 2 つの組み合わせにおいて、粗鋼生産1tあたりのエネルギー消費量は世界で最も少ないが(図 2-7)、原料として鉄鉱石を使用する割合が高いため、粗鋼1tあたりに消費するエネルギー量、CO<sub>2</sub> 排出量で見ると世界で最も効率が高いというわけではない(図 2-8)。このことからエネルギー消費量を抑え CO<sub>2</sub> 排出量を削減するという観点からはスクラップを活用した電炉をでき得る限り活用することが重要であり、この先鉄鋼需要が大きく増えるであろう途上国ではスクラップの活用を進めることが重要といえる。

## 2.4 本章において明らかとなったこと

本章では、続く章で着目すべき国、考慮する要素を明確にするため、気候変動をめぐる国際交渉等の状況と、主要排出源の変遷、現在の国際的な排出削減策による主要排出源の捕捉状況等を整理するとともに、経済発展と鉄鋼需要の変化を整理し、気候変動対策上重要な国の同定を行った。また、主要国の鉄鋼生産に関連する主要な温室効果ガスである CO<sub>2</sub> の排出状況を整理し、CO<sub>2</sub> の排出につながる主要な要素の把握を行った。

世界全体の鉄鋼生産の原料とプロセスの組み合わせは、銑鉄-転炉(生産の約 8 割)、スクラップ-電炉(約 2 割)が主要であり、この両者の CO<sub>2</sub> 排出量は 4:1 となっており、スクラップを電炉で活用することは、鉄鉱石の還元に必要な化石燃料の消費を抑えることができるため大幅に CO<sub>2</sub> 排出量を抑えることが可能である。

しかし、同じ原料とプロセスの組み合わせ(銑鉄-転炉等)であっても国によって効率は様々であり、この違いには効率の良い技術導入の度合いが影響している。

気候変動対策上、今後特に重要な国は、近年鉄鋼生産量が増えており、経済成長からこの先も当面鉄鋼生産が伸びると考えられる国(中国、インド、トルコ)であって、粗鋼生産量がとびぬけて

多いため、鉄鋼生産に費やされるエネルギー量が多く、CO<sub>2</sub> 排出量の多い中国と、単位鉄鋼生産あたり CO<sub>2</sub> 排出量が特に多いインドである。

<参考文献>

CDIAC (N.D.) 7.2 Carbon dioxide emissions.

<http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Search.aspx?q=CO2%20world>

平塚宏和(2013)中国とインドの差異について考える-異国に向き合う視点-, みずほリサーチ.

<http://www.mizuho-ri.co.jp/publication/research/pdf/research/r130601point.pdf>

IEA (2007) Tracking industrial energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions, IEA/OECD, Paris, France

IEA (2013a) Energy balance of OECD countries (2013), OECD Publishing, Paris, France

IEA (2013b) Energy balance of non-OECD countries (2013), OECD Publishing, Paris, France

IEA (2013c) Energy statistics of OECD countries (2013), OECD Publishing, Paris, France

IEA (2013d) Energy statistics of non-OECD countries (2013), OECD Publishing, Paris, France

IEA (2013e) CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion (2013), OECD Publishing, Paris, France

IPCC (2013) Summary for policymakers. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.(日本語訳:気象庁 (2014), [http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc\\_ar5\\_wg1\\_spm\\_jpn.pdf](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf))

IPCC (2014a) Summary for policymakers In: Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability, contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.

IPCC (2014b) Summary for policymakers. Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B.Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.), Climate change 2014: mitigation of climate change, Contribution of working Group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.

IPCC (2014c) Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (The version released on 13 April 2014, subject to copy-edit and final layout) Cambridge, UK and NY, USA.

環境省 (2013a) 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書 第1作業部会報告書(自然科学的根拠)の公表について(お知らせ)報道発表資料(平成 25 年 9 月 27 日公表).



- 環境省 (2013b) 国連気候変動枠組条約第 19 回締約国会議(COP19)及び京都議定書第 9 回締約国会合(COP/MOP9)について(結果概要) (お知らせ) 報道発表資料(平成 25 年 11 月 25 日公表).
- 環境省 (2014a) 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書 第2作業部会報告書(影響・適応・脆弱性)の公表について(お知らせ)報道発表資料(平成 26 年 3 月 31 日公表).
- 環境省 (2014b) 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書 第3作業部会報告書(気候変動の緩和)の公表について(お知らせ)報道発表資料(平成 26 年 4 月 14 日公表).
- 川島康子 (1998) 気候変動枠組条約第 3 回締約国会議——交渉過程, 合意, 今後の課題, 国立環境研究所研究報告 R-139-'98,国立環境研究所.
- Müller, D. B., Wang, T, Duval B, and Graedel, T. E. (2006) Exploring the engine of anthropogenic iron cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 103 no. 44, 16111-16116.
- 日本鉄鋼連盟 (2013) 鉄鋼統計要覧(2013 度版)富士美術印刷株式会社.
- O'Neill, J. (2001), Building better global economic BRICs, *Global Economics Paper no.66*, Goldman Sachs Global Research Centres, Goldman Sachs.
- Pauliuk, S., Wang, T., and Müller, D. B. (2012) Moving toward the circular economy: the role of stocks in the Chinese steel cycle. *Environ. Sci. Technol*, vol.46, 148-154.
- RITE (2012a) 2010 年時点のエネルギー原単位の推計(鉄鋼部門-転炉鋼).  
[http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison\\_EnergyEfficiency2010steel.pdf](http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison_EnergyEfficiency2010steel.pdf)
- RITE (2012b) 2010 年時点のエネルギー原単位の推計(鉄鋼部門-スクラップ電炉鋼).  
[http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison\\_EnergyEfficiency2010steelEAF.pdf](http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison_EnergyEfficiency2010steelEAF.pdf)
- 清水康弘 (2005a) 地球環境条約-生成・展開と国内実施 第 9 章 気候変動枠組条約, 西井正弘 編 有斐閣, 191.
- 関谷毅史 (2005b) 地球環境条約-生成・展開と国内実施 第 10 章 京都議定書, 西井正弘 編 有斐閣, 220.
- 田中和明 (2009) 図解入門 よくわかる最新「鉄」の基本と仕組み—性質, 技術, 歴史, 文化の基礎知識, 秀和システム.
- UNEP (2011) Bridging the emissions gap, A UNEP Synthesis Report. The United Nations Environment Programme, Nairobi.
- UNSTAT (2013) Per capita GDP at current prices - US dollars, National Accounts Estimates of Main Aggregates, <http://data.un.org/>(2014 年 9 月アクセス)
- WSA (2013a) Steel Statistical Yearbook 2013.  
(<http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/statistics-archive/yearbook-archive/Steel-Statistical-Yearbook-2013/document/Steel-Statistical-Yearbook-2012.pdf>)

山口光恒 (2013) 実現可能な気候変動対策—政策・経済・技術・エネルギーのバランス—, 第 2 章, 山口光恒 監訳, 丸善出版, 41.



### 第3章 鉄鋼業に関連する温室効果ガス排出削減技術と政策

#### 3.1 対象とする鉄鋼製造に関連する温室効果ガス排出削減技術・政策と分類

本章では鉄鋼業に関連する温室効果ガス排出削減のための技術と政策を取り上げ、続く章における考察の基礎とすべく、その概要と活用にあたり留意すべき点や判明している場合には効果等を既往文献よりレビューし整理を行う。対象は現在使用されている主要なものと、この先の導入・活用をめざし検討が進められているものの双方とし、まず 3.2 において鉄鋼生産の概要として鉄鋼製造の流れと原料とプロセスの違いを概観し、そのうえで 3.3 において鉄鋼生産に関連する技術を、続いて 3.4 において政策を取り上げる。

3.3 で取り上げる技術は、鉄鋼生産の温室効果ガス削減対策の設備や技術として現在使用でき得る技術の中で最良なもの (Best Available Technology, BAT) と、現在研究が進んでおり実用化が期待される技術 (Emerging Technology) 双方を対象とし、主として、自国内・域内の優れた技術のレビュー結果をまとめた資料のレビューを実施し、整理を行った。レビュー結果をまとめた資料として特に参考とした資料は Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate (クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ, APP) の鉄鋼タスクフォースによる The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook と (APP, 2010)、小島 (2009)、米国環境保護庁 (United States Environment Protection Agency, USEPA) の BACT (Best Available Control Technology) と (USEPA, 2012)、Remus らによる欧州 IPPC—鉄鋼業 BAT レファレンス・ドキュメント (Remus et al., 2013) と、Worrell らによる米国の Energy Star プログラムのガイド (Worrell et al., 2010)、(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による Global Warming Countermeasures: Japanese Technologies for Energy Savings/GHG Emissions Reduction (2008 Revised Edition) である。

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の第 5 次評価報告書 (AR5) の第 3 作業部会による報告書では工業に関する章において鉄鋼を取り上げ、エネルギー効率、排出効率、物質効率、製品・サービスの需要削減の 4 つに分けて評価を行っている (IPCC, 2014a)。これを参考に、3.3.1 では「エネルギー効率を上げる技術」を、3.3.2 では「温室効果ガスの排出を下げる技術」を、3.3.3 では「物質をより効果的に利用する技術」を取り上げることとした。なお、IPCC AR5 では製品・サービスの需要削減も取り上げているが、第 1 章で記した通り、本研究では対象外としているため、ここでも割愛した。

3.4 では鉄鋼の温室効果ガス排出削減に寄与する政策を取り上げた。IPCC の第 5 次評価報告書 (AR5) の第 3 作業部会による報告書では、国内・地域内の政策と国際的な取組をそれぞれ第 3 章、第 6 章と異なる章においてまとめ、また気候変動に関連する政策として、その第 3 章において (1) 経済的インセンティブ、(2) 直接規制によるアプローチ、(3) 情報プログラム、(4) 政府の公共財・サービスに対する規定と調達、(5) 自主的な行動の 5 つに分類している (IPCC, 2014b)。これを参考とし、3.4.1 では国内・地域内の政策をとりあげ、鉄鋼生産への対策促進に寄与する「経済的手法」、「規制的手法」、「情報的手法等」と「自主的な取り組み」に分けて整理した (IPCC, 2014b)。

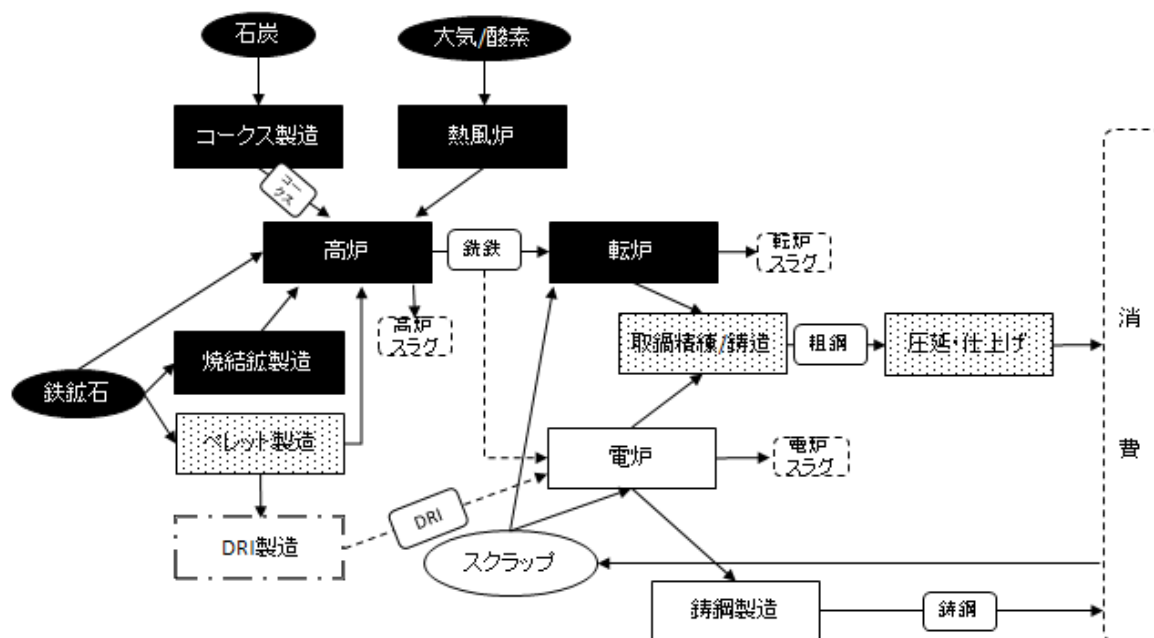
なお、鉄鋼生産に関しては「情報プログラム」と「政府の公共財・サービスに対する規定と調達」に関する事項はあまり多くないことから IPCC の AR5 では分けて分類されているが「情報的手法等」として一つに取りまとめることとした。また、国際的な取組は、3.4.2 において整理し、現在既に実施されている国境をまたいで実施されている温室効果ガス排出削減の取組として、気候変動に関する国際交渉の状況を踏まえ、以下の 3 つを取り上げることとした。一つ目は既に公式に認められたものの代表である気候変動枠組条約に基づくクリーンディベロップメントメカニズム (Clean Development Mechanism, CDM) である。残りの二つは国際交渉においてこの先の枠組みの一つの可能性として議論されている様々なアプローチに位置づけられるものを取り上げることとし、まず二つ目としては現在日本国政府が提唱し取組を進めているジョイントクレジットメカニズム (Joint Credit Mechanism, JCM) とし、三つめとしては鉄鋼業界による自主的な取り組みとした。

### 3.2 鉄鋼生産の概要

#### 3.2.1 鉄鋼製造の流れ

鉄鋼の製造にはいくつかの原料・プロセスがあるが、プロセスの数、原料の種類はどちらもそれほど多くはなく、世界全体で同様のエネルギー資源や原料が使用されている (International Energy Agency (IEA), 2007a)。

鉄鋼製造の主要なプロセスを図 3-1 に示す。鉄は原料として鉄鉱石を還元することにより作られ、その後精錬を経て求められる用途に応じた成分に調整される。一般に利用される鉄の多くは、炭素濃度が低く強靱で加工性の高い鋼鉄と呼ばれる合金である (田中, 2009)。



注： IEA (2007a) を基に作成

図 3-1 鉄鋼製造の流れ

鉄鋼の生産方法は主として高炉法、電炉法、直接還元法の3つに分けることができる(田中, 2009)。鉄鉱石の還元の主要な方法である高炉法では、鉄鉱石の他、コークス、石灰石、石炭が主な原料として用いられる。世界の鉄鋼の約7割がこの手法によって生産されている(世界鉄鋼協会(World Steel Association, WSA), 2013a)。石炭を蒸し焼きにして作るコークスは、還元剤としての役割の他、鉄鉱石・石灰石を溶かす熱源としての役割、高炉の中で還元ガスと溶鉄の通路を確保する役割を担う。石灰石は鉄鉱石中の鉄以外の成分と化合して高炉スラグとして除去できるようにするために入れられるものであり、目詰まりを防ぐため鉄鉱石とともに焼結したうえで高炉に投入される。この過程によりできあがるのが銑鉄である。その後、転炉により精錬され成分の調整を行う。転炉では銑鉄と生石灰等を入れ酸素を吹き込むことで酸化熱を活用する精錬法が主流である(川鉄21世紀財団, 1994他)。

電炉法は、主としてスクラップを用い、電気の熱で溶解して鋼を作る手法である。スクラップが入手しやすく電力が安価な地域でよく用いられる(田中, 2009)。現在世界の鉄鋼の約3割がこの手法によって生産される。

直接還元法は、鉄鉱石を還元してスポンジ鉄とし、それを溶かす方法である。鉄鉱石を還元してスポンジ鉄にする原料(天然ガス、石炭等)が豊富で、スポンジ鉄を溶かす電力が安価な地域で採用されている(田中, 2009)。直接還元法の場合、コークスを使用しないためコークス製造に伴う環境負荷を抑えることができるというメリットがある。また還元剤として天然ガスを用いる場合には高炉法よりも高いエネルギー効率で生産することもできる。ただし、スポンジ鉄は大気中で再度酸化され、質の低下と場合によっては自然発火する等取扱が容易ではない側面がある。最近ではスポンジ鉄を扱いやすく加工する技術が実用化されている(Kaushik and Fruehan, 2006)。現在、直接還元法による製鋼は限定的であるが、近年増加の傾向にある。また、インドでは還元剤として石炭を用いるエネルギー効率のわるい直接還元が世界でも特異的に多用されている(WSA, 2013a; Krishnan et al., 2013他)。

精錬された鋼は鋼材の形に固めるため鋳造される。通常板などの鋼材を溶鋼から直接作ることはできず、まず連続鋳造設備によって鋼片といった半製品に加工される。

その後圧延により必要とされる鋼材の形状に整える。厚板にする場合は熱間圧延のみで仕上げられるが、薄板(通常3mm未満を指す)に仕上げる場合には続けて冷間圧延が行われる(日本鉄鋼連盟, 2013)。

### 3.2.2 原料とプロセスの違い

鉄鋼生産の主だった工程ごとのエネルギー消費量は図3-2に示す。鉄鋼業はエネルギーを多く使用する産業であるが、特にエネルギーを使用する過程は鉄鉱石の還元である。原料として鉄鋼スクラップを用いて製造する場合にはこの鉄鉱石の還元の過程を省略することができる。また同じ還元を行う場合であっても還元剤や燃料の種類によってエネルギー消費量は大きく異なる。

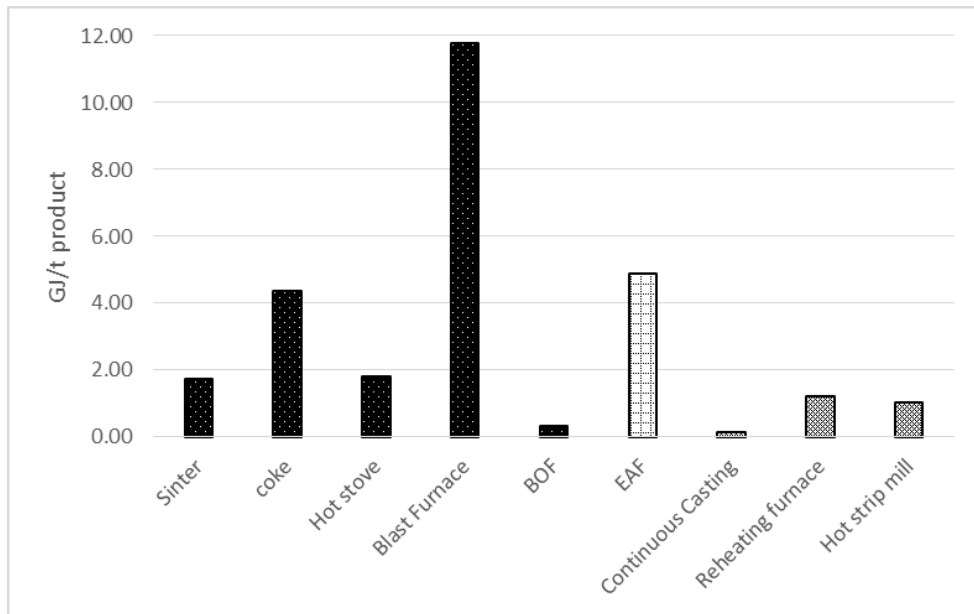
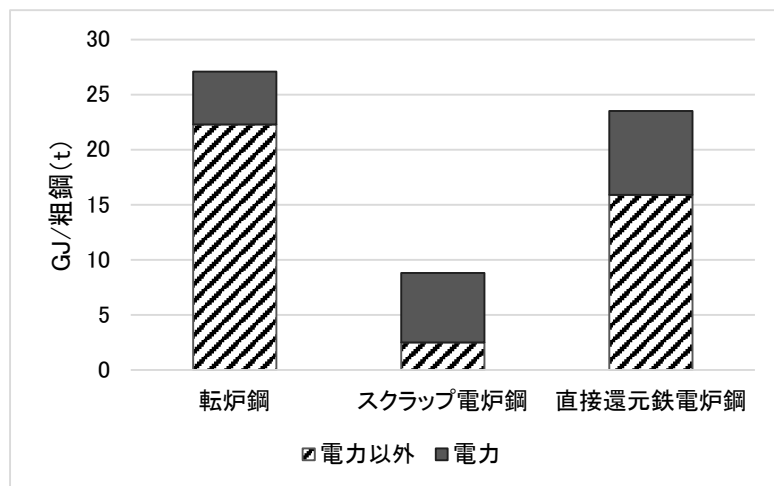


図 3-2 主だった工程ごとの製造物あたりエネルギー消費量  
(出典: Worrell et al, 2010 のデータを基に作成)

現在世界の鉄鋼生産の多くは鉄鉱石を還元して製造した銑鉄を用いた高炉－転炉によるものとなっている。鉄鉱石を用い、高炉－転炉を用いる工程は図 3-2 において黒で示される。スクラップを用いて電炉で製造する場合には、図 3-2 の白地で示される電炉 (Electric Arc Furnace, EAF) の過程となる。どちらの場合でも、 casting (casting) 以降のエネルギー消費は基本的に同様である。代表的な原料とプロセスによるエネルギー原単位を図 3-3 に示す。



注: RITE<sup>1</sup> (2012) より作成

図 3-3 鉄鋼の主要な原料・プロセス別エネルギー原単位

<sup>1</sup>公益財団法人地球環境産業技術研究機構, Research Institute of Innovative Technology for the Earth

図 3-3 では各工程の製品あたりのエネルギー消費量で整理されているため、各工程の単純な比較はできないが、用いる原料とプロセスによりエネルギー原単位は大きく異なる。

IEA は鉄鋼業において、よりエネルギー効率を高くするためには、原料としては製鉄時の銑鉄の代わりにスクラップか直接還元鉄を活用し、プロセスとしては高炉・転炉、または平炉から、電炉へ移行することも一つの方法としている(IEA, 2013)。

高炉から電炉へのプロセスの変更は、高炉・転炉による製鉄の割合が高く、原料としてスクラップが入手できる国において特に重要である(IEA, 2013)。電炉による鉄鋼の製造は、高炉・転炉によるエネルギー効率よりも効率がよく、鋼の大方の種類は現在電炉で製造することが可能である(IEA, 2013 他)。他方、電炉を使用するかどうかにはエネルギーコスト、環境への配慮も影響するが、スクラップの入手可能性と求められる鋼質は特に重要である(IEA, 2013)。

平炉による製鋼は、過去、多くの国で用いられてきたが現在は先進国ではほとんど使用されていない。平炉は転炉(Basic Oxygen Furnace, BOF)と比較し様々な欠点があり、日本で平炉から転炉への切り替えが進んだ背景には、原料を当時不足していた鉄くず(スクラップ)によらなくていいという点に加え、設備費・操業費を抑えて高い生産性を発揮するという点があった。同じ量の鋼を作る場合、転炉では平炉の 44.4%の燃料・動力消費ですむとする報告もある(中村, 2007)。日本では 1945~1960 年頃まで平炉が 7~8 割を占めていたが 1970 年以降は転炉が取って代わっている(中村, 2007)。現在、ロシア・ウクライナ等で使用されている平炉のエネルギー効率は定かではないが、仮に平炉と転炉のエネルギー消費量の違いを上記の日本の事例と同等とし、図 3-2 で示す転炉鋼とスクラップ電炉鋼の原単位を用いると、原料にスクラップを用いた平炉からスクラップを用いた電炉による生産に切り替えたとした場合、エネルギー原単位を 1/7 程度に小さくすることができることになる。

### 3.3 鉄鋼生産に関連する温室効果ガス排出削減技術

本節においては、鉄鋼生産に関する技術に関する既往研究を基に、各工程において必要とするエネルギー量やエネルギー削減量の情報が得られた技術を整理する。各資料において対象としていた工程とそれぞれの技術の数は表 3-1 のとおりである。

各資料に掲げられた技術のうち、エネルギー削減量について定量的なデータがあるものを抽出し、各工程の製造物トン当たりの GJ として(必要に応じ換算して)整理を行った。さらに情報が得られる場合には設備と建設に係る費用(キャピタルコスト(Capital cost))と費用回収に係る年数(Pay-back time)についても整理を行った。エネルギー削減効果については、製造プロダクトあたりのトン数で整理を行い、工程で用いるエネルギーからの削減率(例えば 10%削減など)で記載されている場合は、欧州の鉄鋼製造に係る工程ごとの平均的なエネルギーから削減された場合と仮定して推計した。また削減量に幅がある場合には、その平均値を用いて整理した。表 3-2 に各レビュー集のエネルギー削減量を定量的に把握することができる技術の数を示す。



表 3-1 主要技術レビュー集における工程と技術の整理<sup>2</sup>

	APP	USEPA, ESEG	EC	NEDO
鉄鉱石準備:焼結	11	9	6	3
鉄鉱石準備:ペレット化	2	2	1	
コークス製造	8	7	1	3
高炉製鉄	10	13	9	3
その他製鉄(DR, SR)	11		2	
転炉製鋼	8	4	4	2
電炉製鋼	10	16	2	2
製鋼-準備等	3			
取鍋精練	1	1		
鑄造	3	2	1	1
圧延	1	16	1	1
仕上げ		2		
共通システム	11	3		8
省エネ/環境管理一般	5	4		

<sup>2</sup> APP: The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook (APP, 2010), USEPA: BACT (Best Available Control Technology) (USEPA, 2012), ESEG: ENERGY STAR® Guide for Energy and plant managers (Worrell et al., 2010), EC: 欧州 Integrated Pollution Prevention and Control - 鉄鋼業 BAT レファレンス・ドキュメント (Remus et al., 2013), NEDO: Global Warming Countermeasures: Japanese Technologies for Energy Savings/GHG Emissions Reduction (2008 Revised Edition) (NEDO, 2008)

表 3-2 エネルギー削減量の把握可能な対策技術<sup>2</sup>

	APP	USEPA, ESEG	EC	NEDO	計
鉄鉱石準備:焼結	2	7	3	2	14
鉄鉱石準備:ペレット化	2	2	1	0	5
コークス製造	3	4	1	3	11
高炉製鉄	3	4	1	2	10
その他製鉄(DR, SR)	4	0	2	0	6
転炉製鋼	1	4	1	2	8
電炉製鋼	5	16	2	2	25
製鋼-準備等	0	0	0	0	0
取鍋精練	0	0	0	0	0
鑄造	1	2	1	1	5
圧延	0	11	0	1	12
仕上げ	0	0	0	0	0
共通システム	0	3	0	0	3
省エネ/環境管理一般	0	3	0	0	3

### 3.3.1 エネルギー効率を上げる技術

鉄鋼製造の主だった工程ごとに、原料や技術に関する説明、エネルギー消費に関連する現状をまとめ、エネルギー効率の良い技術とその削減効果等について以下に整理する。

#### (1) 鉄鉱石の塊成

鉄鋼石の塊成とは鉄鉱石を還元する際に目詰まりを起こさないよう粉鉱石を一定の大きさに固めることである。塊成は焼結かペレット化により行われる。なお、焼結については燃料の融通や出来上がったものは輸送時に劣化すること等から基本的に製鉄所内で行われるが、ペレット化については単独の工場で製造されることもある(Worrell et al., 2009 他)。なお、鉄鉱石のうち、品質が良く強度がありそのまま使用できるものは塊鉱としてそのまま高炉に投入することも可能であり、その場合は塊成に必要なエネルギーを省略することができる(戒能, 2006)。塊鉱の使用は、反応速度を制限し、不純物の含有量によっては不要物の処理が必要になる等のおそれがあるが(原, 1960)、日本の場合は高品質鉱の購入や制御技術面での努力により対応してきており、塊鉱の直接投入は2割程度を推移しつつ1990年より微増傾向となっている(戒能, 2006)。

また、選鉱プロセスでは鉱石を粉砕して不純物を分離するため、低品位鉱の利用が増えれば製品鉱石はより細くなるが、焼結プラントで扱える細かさには限度があるため、今後はペレットプラ

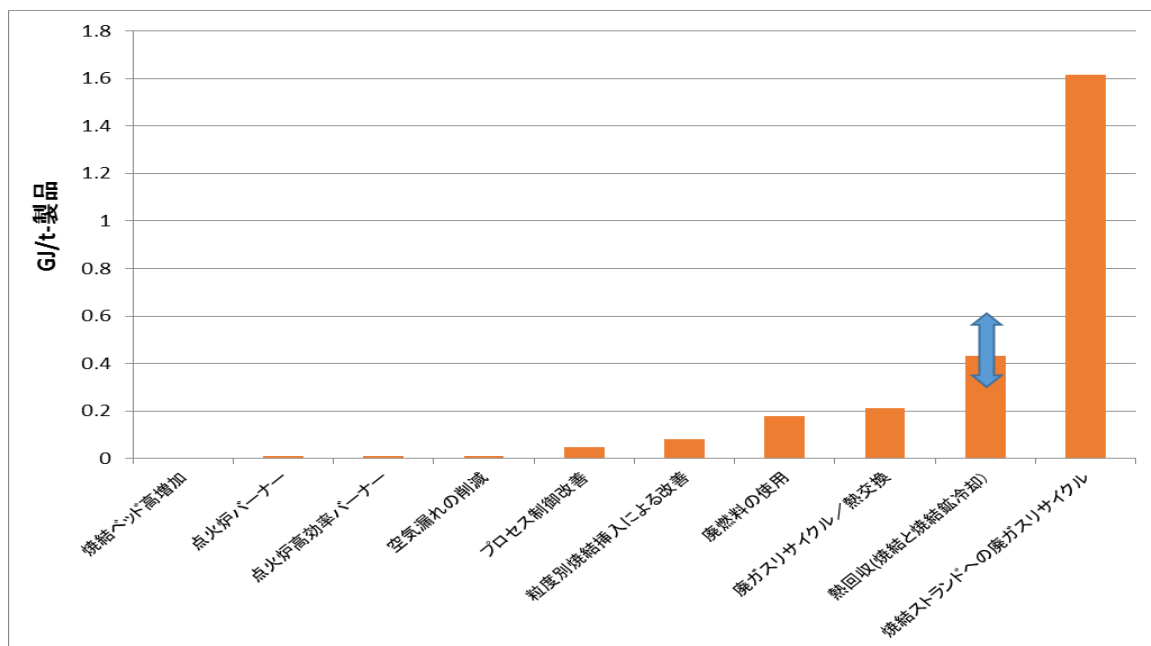
ント建設が増えるとされている(野村ら, 2014).

世界の7つの効率のよい焼結プラントでの平均的なエネルギー強度と焼結に必要な理論値には0.6MBtu/t(0.63kJ/t)程度の差がありエネルギー改善のポテンシャルがあると考えられる(Worrell et al., 2009 他). 焼結時のエネルギーの使用量は, 理論的な最小量は 1.2GJ/t-sinter とされている(USEPA, 2012)一方, 実際の値としては, 2004年の欧州での平均的な値として1.55GJ/t-sinter とされている(Remus et al., 2013). また, ペレット化のエネルギー消費量としては0.42GJ/t-pellets が報告されている.

この段階での主要な省エネルギー技術は, 焼結時またはペレット生成時の廃熱回収となる. EUの現段階で使用できる最善の技術(BAT)としては, 焼結では, a) 焼結の際の冷却ガスからの顕熱の回収, b) 可能である場合, 焼結火格子排ガスからの顕熱の回収, c) 顕熱の使用のための排ガス再循環の最大化, があげられている. また, 熱エネルギーとして使用するためとしては, a) 硬結ストランドの異なる部位からの顕熱の統合的な再利用をできる限り可能とするプロセスをいれること, b) 第三者の需要があれば, 内部または外部のヒーティングネットワークでの余剰廃熱を使用する排ガス再循環の最大があげられている. なお, 回収時に用いる場合には費用が非常に高くなる場合もあるとされている.

また, その他の技術としては, 原料の投入等を効率化するための技術や設備等がある.

図 3-4, 3-5 に焼結とペレット化に関する技術ごとのエネルギー削減量を示す.



(注) 図中矢印は文献によるエネルギー削減量の幅を示す)

図 3-4 焼結における技術のエネルギー削減量

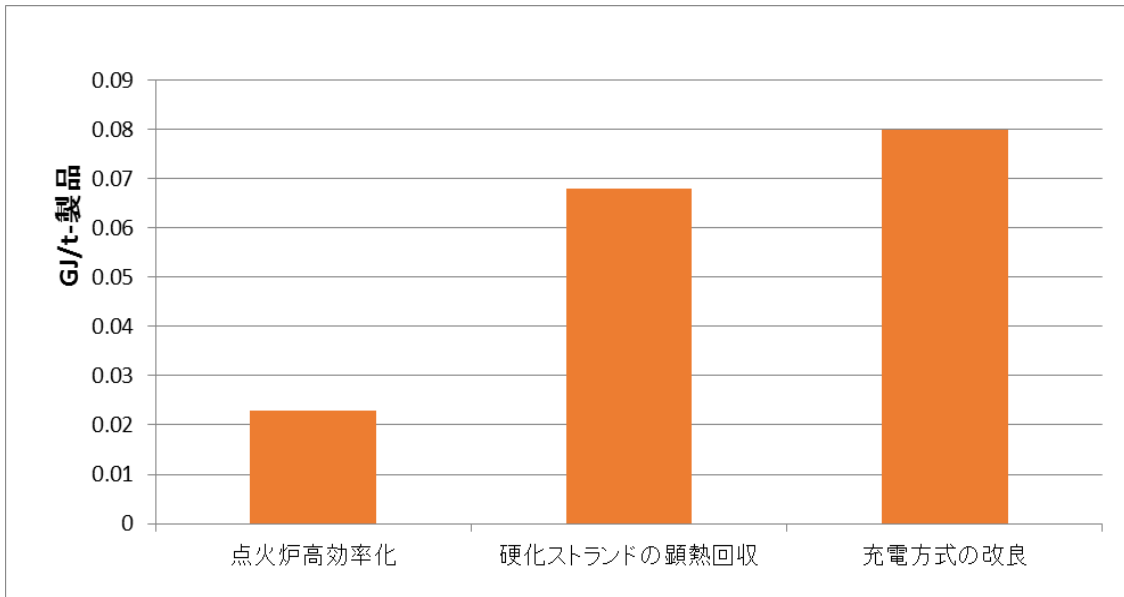


図 3-5 ペレット化における技術のエネルギー削減量

図 3-6 に焼結における技術のエネルギー削減量とのキャピタルコストの関係を示す(ペレット化についてはキャピタルコストに関するデータを得ることができなかった)。

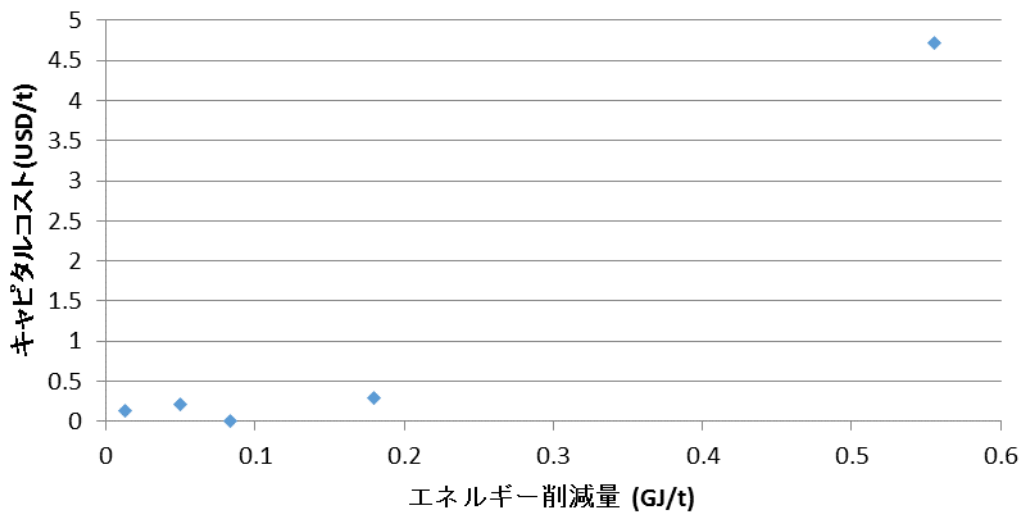


図 3-6 焼結関連技術のエネルギー削減量とキャピタルコストの関係

## (2) コークス製造

コークスは鉄鋼製造時の還元剤、および熱源として使われるものであり、石炭を蒸し焼きにして作られるものである。コークス製造時の平均的なエネルギー消費量は、46.09GJ/t-coke と報告されている(Remus et al., 2013)。この段階での主要な省エネルギー技術は、コークス炉での副生ガス

を回収し活用する技術となる。

EUのBATでは、コークス製造時に発生するコークス炉ガス(Coke Oven Gas, COG)を取り出し、a)燃料、b)還元剤またはc)化学物質の製造に用いることとされている。a)に関する代表的な技術は、焼きあがったコークスを水を使わずに不活性化ガスで消火・冷却し、そのガスから熱を回収して発電などに利用するコークス乾式消火設備(Coke Dry Quenching, CDQ)である。この技術は、日本ではコークス炉の炉室数ベースで約93%普及している(コークス工学研究部会, 2013)。また、その他石炭の調湿に関する技術(Coal Moisture Control, CMC)も含まれる。

現在開発中の技術としては、スーパーコークス炉の開発に関する日本のSCOPE21(Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21<sup>st</sup> century)プロジェクトがある。現在プロジェクトは終了し、実用化に向けた準備が進められている。より品質の高いコークスを効率よく製造することが可能であるとともに、コークス製造に伴うエネルギーを20%下げられるとされている(Remus et al., 2013)。

その他の新たな技術には、コーク炉ガスの新たな活用がある。エネルギーとしての活用については、従来の廃熱回収ではなく、冷却されてないコーク炉から約800℃のガスを排出し、燃焼または部分的な酸化システムへ導入するものである。この手法は個々の炉室の圧力コントロールが技術的にまだ可能でないため工業化はされていない。他の活用手法としては、高炉にCOGを吹き込み補助還元剤として活用するもの(既に実用もされている)と、COGをDRI(直接還元鉄, Direct Reduced Iron)またはHBI(Hot Briquetted Iron)製造時の還元剤とするものがある(Remus et al., 2013)。図3-7に技術ごとのエネルギー削減量を示す。

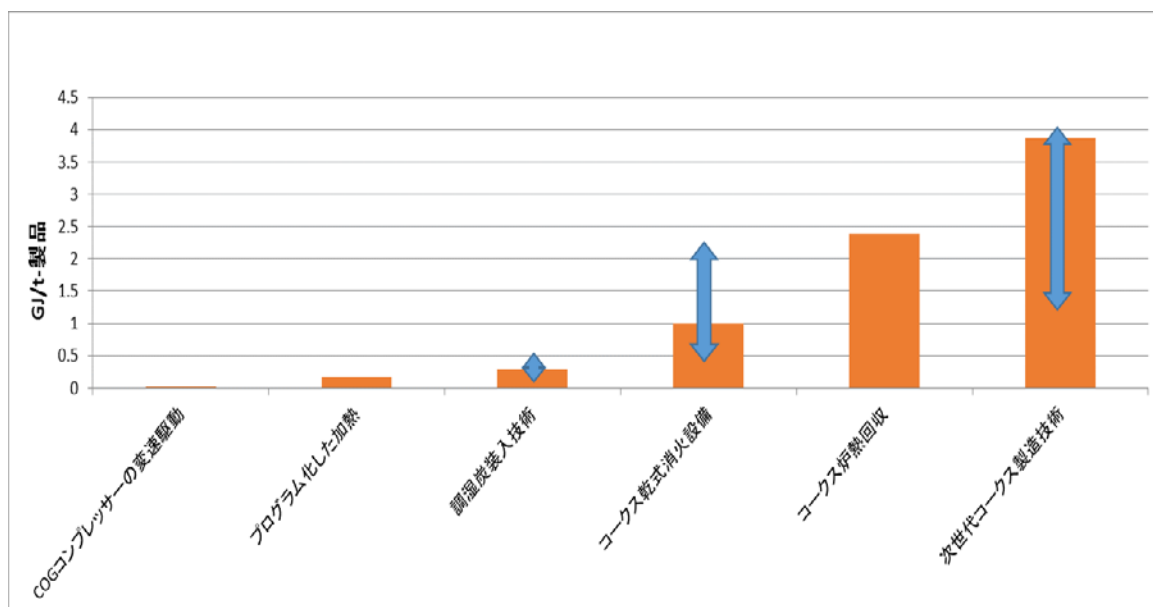


図3-7 コークス製造における技術のエネルギー削減量

図3-8にこの工程における技術のエネルギー削減量とのキャピタルコストの関係を示す。

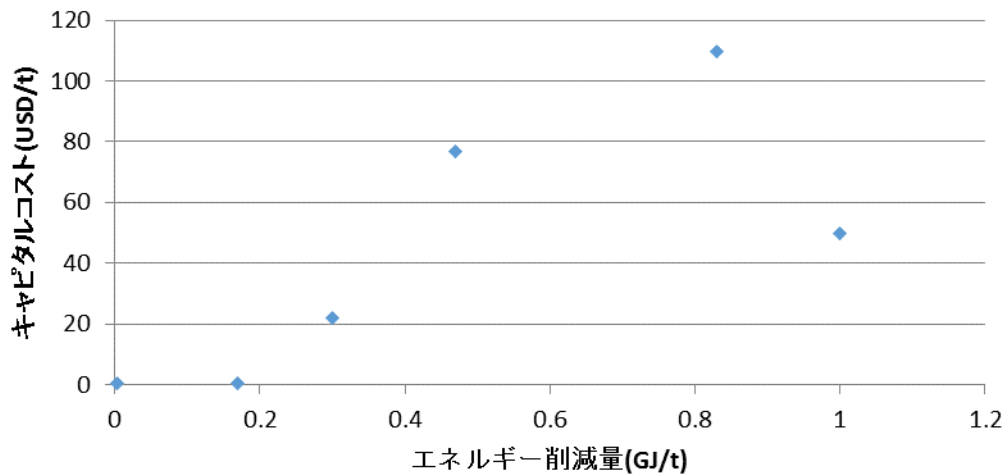


図 3-8 コークス製造関連技術のエネルギー削減量とキャピタルコストの関係

### (3) 製鉄: 高炉

鉄鉱石を還元し銑鉄を製造する主要な役割を果たすのが高炉(溶鉱炉)である。高炉での平均的なエネルギー使用量は 18.67GJ/t-hotmetal とされている (Remus et al., 2013)。

この段階での主要な省エネルギー技術は、高炉ガスの熱源としての活用や、炉頂の高炉ガス圧力のエネルギー回収等である。EU の BAT では、a) 負荷となるスリップ(高炉内の装入物が急速に崩れること)の可能性を減らし、生成を最小化するため、安定した高炉のスムーズな連続操作を維持すること、b) 高炉ガスを回収し燃料として使用すること、c) 十分な圧があり、アルカリ濃度が低い場合に、炉頂の高炉ガス圧力のエネルギーを回収すること、d) 熱風炉においては熱風炉の排ガスを活用して燃料ガスや燃焼空気を余熱することと及び燃焼プロセスを最適化すること、とされている。

c) の関連では、日本では炉頂圧発電 (Top Pressure Recovery Turbine, TRT) を省エネルギーを主目的として導入し、効果を上げてきた実績がある。

これら以外の高炉に関する技術としては、高炉スラグからの廃熱回収、微粉炭吹込み、石炭吹込み率の向上、廃プラスチックの還元剤としての活用 (Gielen and Moriguchi, 2002) 等がある。

図 3-9 にこの工程において、技術レビュー集より得られた技術ごとのエネルギー削減量を示す。

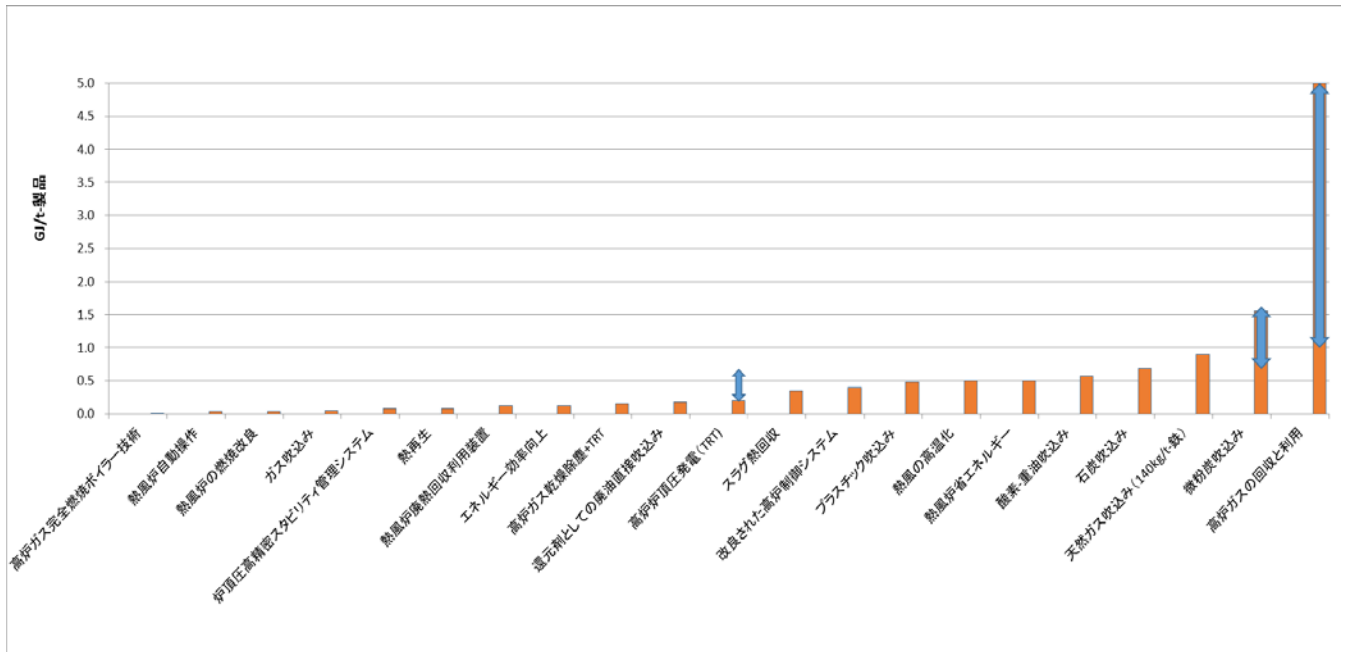


図 3-9 高炉における技術のエネルギー削減量

図 3-10 にこの工程における技術によるエネルギー削減量とのキャピタルコストの関係を示す。

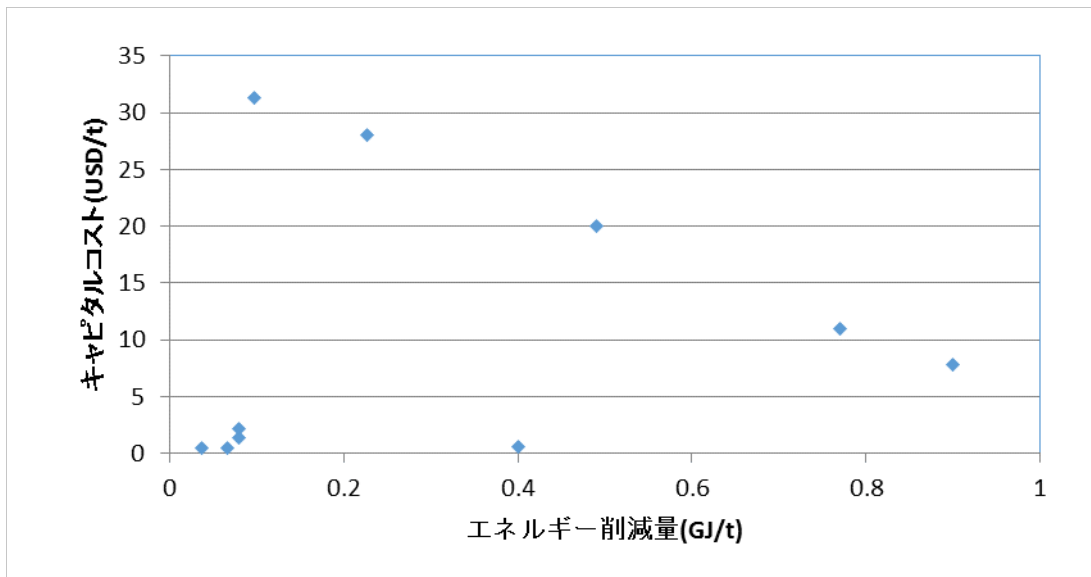


図 3-10 高炉関連技術のエネルギー削減量とキャピタルコストの関係

#### (4) 製鋼: 転炉

転炉は、主として溶鉄を精錬し炭素濃度を下げるために用いられる。平均的なエネルギー消費量は、欧州で 0.13GJ/t-hotmetal (溶鋼)、米国で 0.30GJ/t-hotmetal とされている。この過程はリカバリが適切になされればエネルギー製造プロセスとしてみることができる。

EU の BAT としては、a) 転炉ガスを集め、浄化し、燃料として使用すること、b) Ladle-lid システムを使用してエネルギー消費量を減らすこと、c) 吹き込みの後、直接 **direct tapping** を使用することによりエネルギー消費量を減らし、プロセスを最適化することとされている(さらに連続する工程としてニアネットシェイプストリップキャストイングがあげられている)。

日本においては、生産性向上とコスト削減を主眼として、平炉から転炉への切り替えと転炉ガス回収法(OG 法)が進められ、これが大きくエネルギー消費削減に寄与したことが報告されている(加治木, 2010)。

図 3-11 にこの工程において、技術レビュー集より得られた技術ごとのエネルギー削減量を示す。

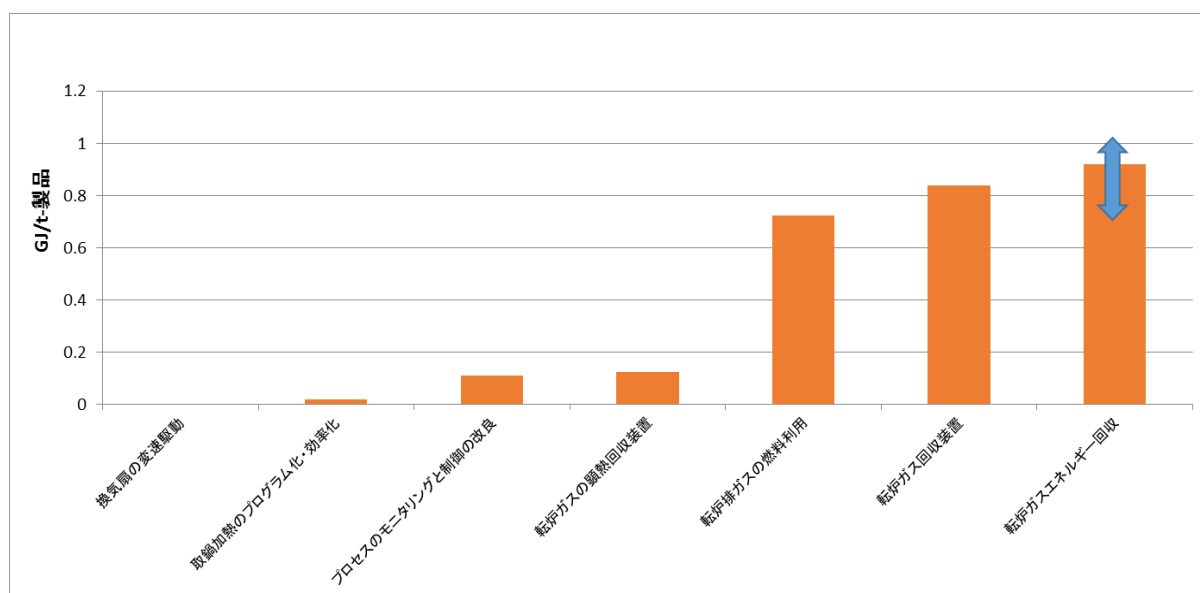
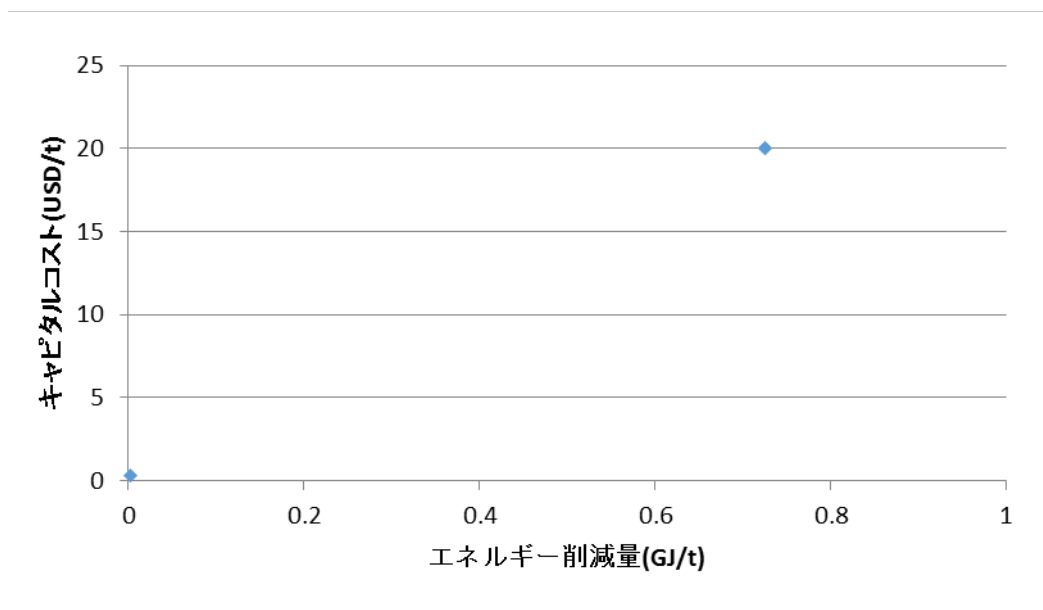


図 3-11 転炉における技術のエネルギー削減量

図 3-12 にこの工程における技術のエネルギー削減量とのキャピタルコストの関係を示す(キャピタルコストについては一部の技術のみ情報が得られた)。





注:対象技術は3つ

図 3-12 転炉関連技術のエネルギー削減量とキャピタルコストの関係

#### (5) 製鋼:電炉

電炉は、電気エネルギーにより加熱する炉であり、原料としてスクラップ、冷銑や DRI などの冷鉄源を 100% 使用できるのが特徴である(森田, 江見, 1998)。エネルギー消費量は、4.74GJ/t-hotmetal とされている(Worrell et al., 2010)。

EU の BAT では、直接この過程に関わる技術はあげられていない(連続する工程としてニアネットシェイプストリップキャスティングがあげられている)。

その他、この過程での省エネルギー技術としては、電炉スクラップ予熱、スクラップの連続投入、ツインシェル炉があげられる。

なお、スクラップを活用した製鋼にあたっては、Cu, Sn といった老廃スクラップに含まれる非揮発性不純物元素(トランプエレメント)が濃縮され製品の品質への制約とあることが指摘されている。このような元素の除去するための混合している銅線等やめっきされたもの等の除去は工業的にいくつかの手法があるが、鋼中の合金化した元素を取り除く手法については経済性の側面から工業としての実用化までにはいたっていない(森田, 江見, 1998)。

図 3-13 にこの工程において、技術レビュー集より得られた技術ごとのエネルギー削減量を示す。

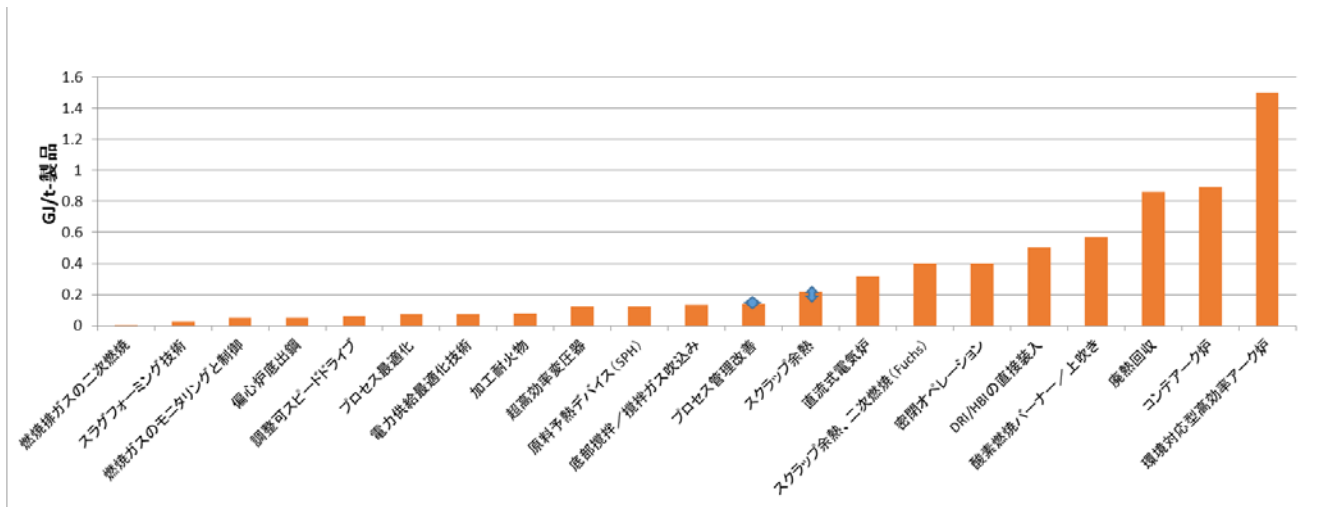


図 3-13 電炉における技術のエネルギー削減量

図 3-14 にこの工程における技術のエネルギー削減量とのキャピタルコストの関係を示す(キャピタルコストについては一部の技術のみ情報が得られた).

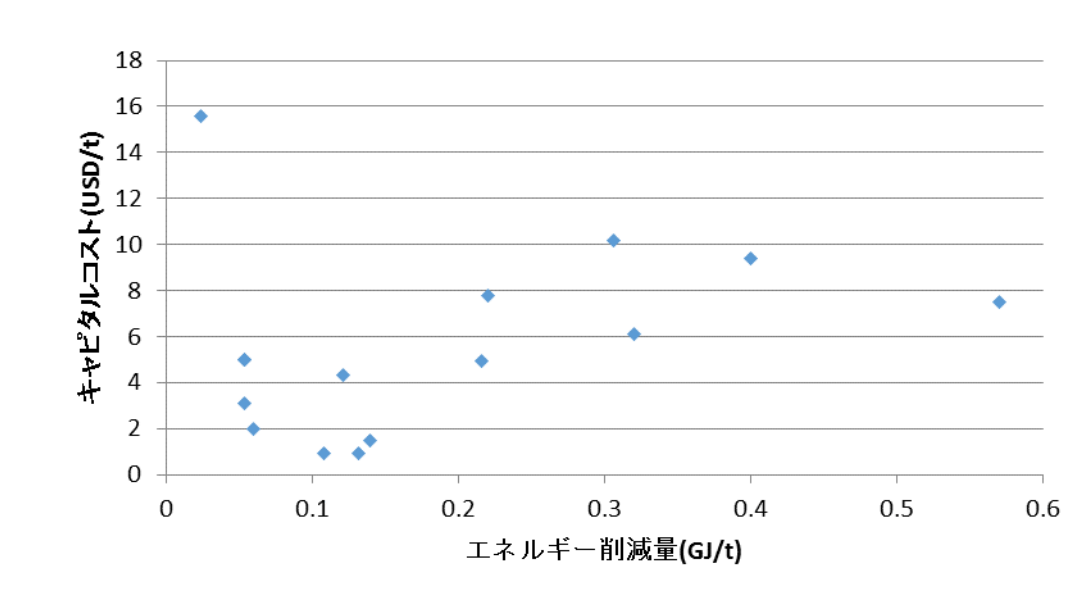


図 3-14 電炉関連技術のエネルギー削減量とキャピタルコストの関係

### (6) 鑄造・圧延と仕上げ

精錬された鉄鋼は、製品として形を整えるため、鑄型に流し入れて固めたり、圧延を経て製品として仕上げられる。この段階での平均的なエネルギー消費量は、鑄造では、連続鑄造で 0.02GJ/t-hotmetal, 厚いスラブ材としての伝統的な鑄造は 1.8GJ/t-hotmetal, また熱間圧延では 1.2GJ/t-hotmetal とされている (Remus et al., 2013)。

圧延・再加熱時の工夫としては、既に多くの国で連続鋳造が導入されている(連続としない場合、鋼材を再加熱して鋳造する必要がある)。その他、鋳造時に軽度の仕上げ加工で製品とすることができる半製品まで仕上げるニアネットシェイプキャストイングと呼ばれる技術がある(Gielen and Moriguchi, 2002)。EUのBATでは、製造する鉄鋼のグレードの製品ミックスと品質が適切であれば、連続ニアネットシェイプストリップキャストイング(15mmよりも薄い板という製品に近い状態に直接鋳造すること)によりエネルギー消費量を減らすことがとりあげられている。

図 3-15, 3-16 に鋳造と圧延・仕上げにおいて、技術レビュー集より得られた技術ごとのエネルギー削減量を示す。

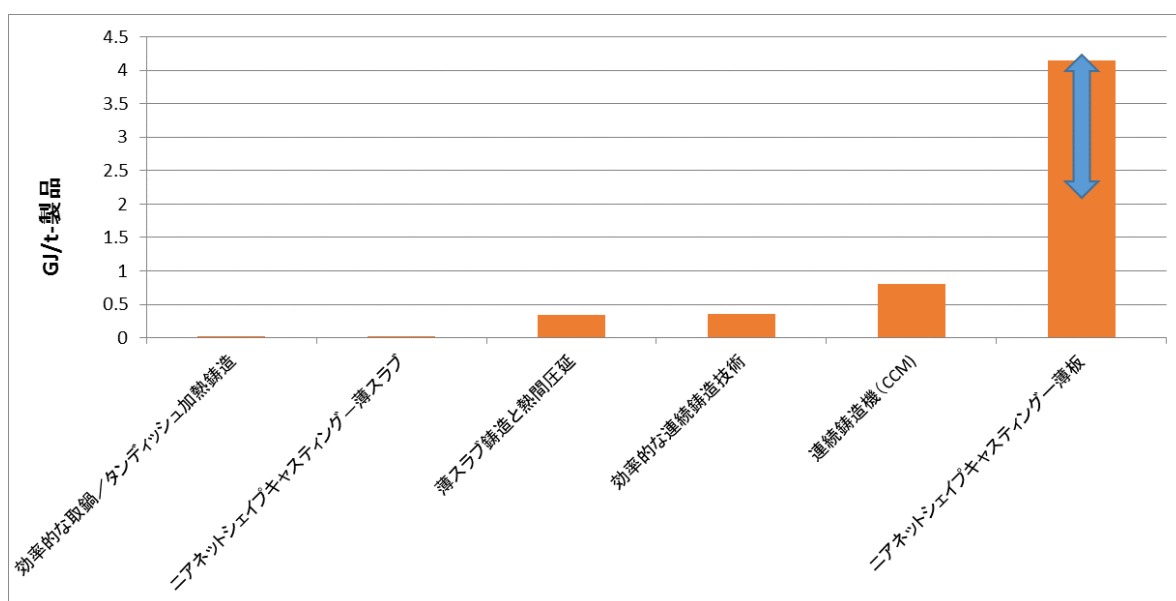


図 3-15 鋳造における技術のエネルギー削減量

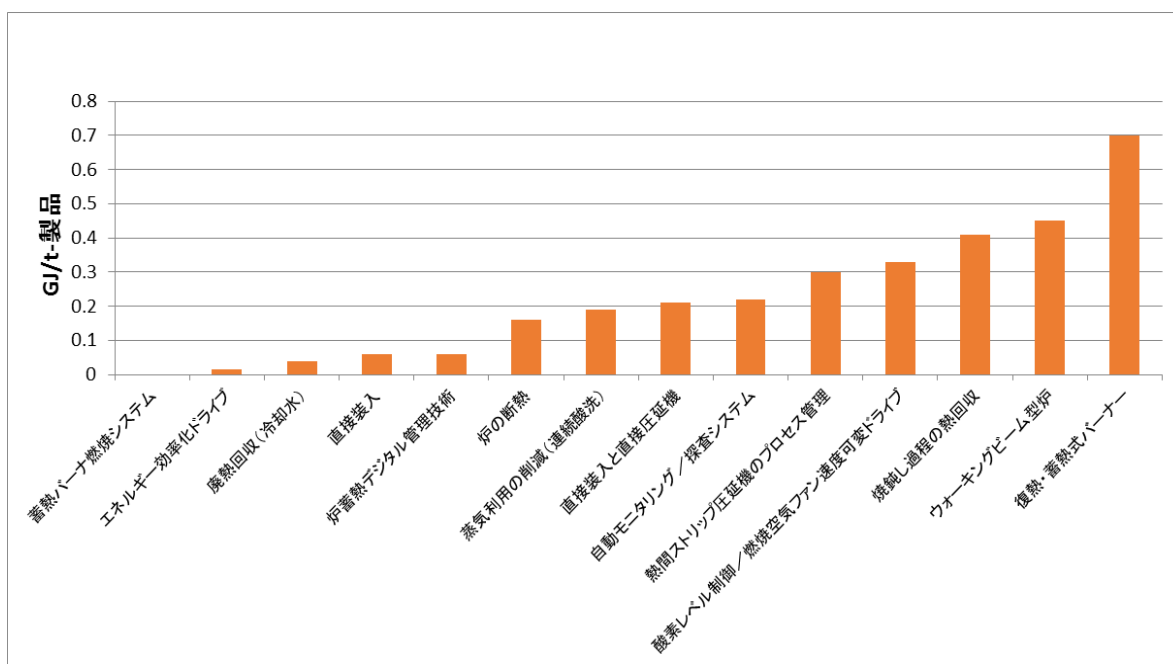


図 3-16 圧延・仕上げにおける技術のエネルギー削減量

図 3-17 にこの工程における技術のエネルギー削減量とのキャピタルコストの関係を示す( casting についてはキャピタルコストに関する技術が得られなかった).

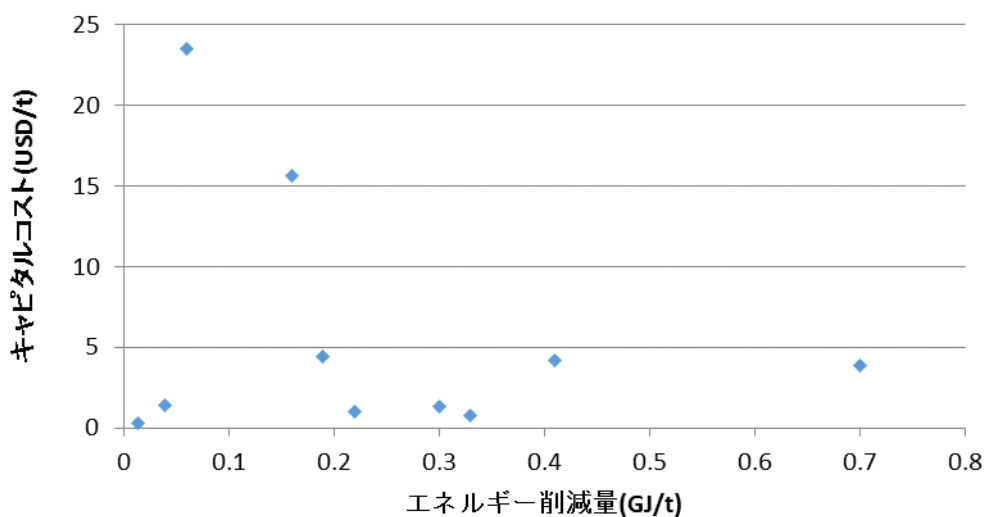


図 3-17 圧延・仕上げ関連技術のエネルギー削減量とキャピタルコストの関係

### (7) システムの最適化と管理

鉄鋼製造において共通システムとして用いる省エネルギー技術としては、工場のエネルギー管

理システム等の導入によるシステムの管理及び最適化や、様々な工程において高効率設備を用いることなどがある。例えば高効率モーターの使用では 0.35GJ/t 程度の効果があるとされている。

## (8) まとめ

上記のとおり各工程の、エネルギー削減量のデータを具体的に得ることのできる技術を対象にエネルギー消費量等の整理を行った。各工程について表 3-3 に整理した結果を示す。

表 3-3 工程毎の対策技術によるエネルギー削減量

工程	最小	最大	技術数	GJ/t-製品	
				中央値	平均値
焼結	0.002	1.6	12	0.1	0.2
ペレット生成	0.023	0.1	3	0.1	0.1
コークス製造	0.007	3.9	6	0.7	1.3
高炉製鉄	0.002	5.0	21	0.2	0.6
転炉製鋼	0.003	0.9	7	0.1	0.4
電炉製鋼	0.004	1.5	23	0.1	0.3
鋳造	0.020	4.1	6	0.4	0.9
圧延	0.000	0.7	14	0.2	0.2

表 3-3 に記載した数値は各工程の製品当たりのエネルギー削減量であって、異なる工程について比較はできないが、この結果を、Remus ら(2013)による欧州の平均的な各工程のエネルギー消費量と比較して、各工程での削減率を求めると、転炉鋼の場合、対策技術の平均値で 17%、中央値で 7%の削減が、電炉鋼の場合、対策技術の平均値で 24%、中央値で 12%の削減が可能という結果となった<sup>3</sup>。

エネルギー削減量とキャピタルコストの関連では、エネルギー削減量が大きい技術はキャピタルコストが大きくなる傾向がみられた。なお、一部エネルギー削減量は小さいがキャピタルコストが大きいものがあるがこれはエネルギー削減量以外に技術導入の主目的(生産効率の向上等)があるものと考えられる。

以上により、主要な工程ごとにエネルギー消費削減(したがって温室効果ガス排出削減)に効果的な技術について定量的に整理し、これらの技術の導入により一定の削減効果が期待されることが明らかとなった。

ただし、具体の技術の導入にあたっては単純にここで整理した削減効果が見込まれるというものではない。筆者が 2013 年に行った日本の鉄鋼メーカーに対して行ったヒアリングの結果によると、各工程での技術の普及率は、個々の国や施設によって様々である。例えば、日本では大型高炉のほぼすべてに導入されている CDQ は、欧米ではあまり浸透していない。また高炉や転炉等からの副生ガスや熱回収も日本や欧州では盛んに行われているが、米国ではあまり進んでいない。中

<sup>3</sup> なお、塊鉱を使用している場合は焼結またはペレット化の工程は必要ない。削減率の推計は、塊鉱の使用も考慮した値となっている。

国とインドについては、どの技術がどれだけ浸透しているかについての情報はあまり明らかとなっておらず、現在進められている鉄鋼メーカー間での技術協力の際も、個別にどのような技術が有益かリストを作って検討しているとのことである。また、OdaとAkimotoは、エネルギーの改善見込みとCO<sub>2</sub>排出削減余地は、省エネ設備・技術のみならず、個々のプラントが調達可能な原材料の性状、既存設備の状況(プラント規模、操業管理技術、稼働率、既存設備配置位置、空きスペース等)、環境規制等にも依存すると指摘している(Oda and Akimoto, 2007)。また、USEPA(2012)によると、産業界のコメントによれば、取り上げた技術の適用にあたっては、技術オプションのうちいくつかについては(a)費用と技術仕様の実現性は個々のプラントによる可能性があること、(b)エネルギー効率は改善し温室効果ガスの排出削減は進む可能性はあるが、他の汚染物質の排出が増加する可能性があること、(c)多くの既存の施設で既に広く実施されているものもあること、(d)新たなユニットでしか使用可能でないものもあること、(e)まだパイロット段階にあるか研究段階が成熟していない技術・実践取組であること、(f)特定の装置の構造やタイプにしか技術的に適用できない特別なプロセスである、とされていることにも留意が必要とされている(USEPA, 2012)。さらに、実際の技術導入にあたっては費用回収期間(Payback time)も重要である。第5章で詳述するが、著者が実施した気候変動対応策等についての様々な専門家に対するインタビューの結果、多くが費用回収に係る年数が2-3年以内でないと実際の導入はなかなか容易ではないと回答した。USEPAによると、産業界からは費用回収に三年以上かかる場合には経済的に可能とは考えられないことが多いという意見も得られたとされている(USEPA, 2012)。キャピタルコストが高いと当然Payback timeも長くなり、上記より対策効果の高い技術の導入は、費用の面からなかなか導入が容易ではないといえる。したがって、本章においてまとめた技術の適用については、各工程で報告されたエネルギー削減量の最大値をもって、途上国でのその工程での削減ポテンシャルと見なすことは難しいと考えられる。

### 3.3.2 温室効果ガスの排出を下げる技術

温室効果ガスの排出を下げる技術としては、従来とは異なる還元手法を用いるものと、発生するCO<sub>2</sub>を捉え貯留することで温室効果ガスの排出を抑制するCCS(Carbon Capture and Storage)と呼ばれる技術がある。

#### (1) 新たな還元手法

現在主流である高炉法以外の製鉄方法として活用されているものには主として直接還元(Direct reduction process: DR)と直接製錬(Smelting reduction process: SR)がある。(Remus et al., 2013)

直接製錬は、鉄鉱石のペレットと石炭から直接行う製鉄方法であり、ペレットの代わりに鉄鉱石の粉末を使用する場合もある(Remus et al., 2013)、代表的な手法はCorex, FinexとHIs meltがある(Xu and Cang, 2010)。

溶融還元法は高炉とは異なり鉄鋼石の溶融状態での還元量が固体状態よりも大きい方法であり、CO<sub>2</sub>排出量を削減できること、他、鉄鉱石を塊状化せず使用できる、非粘結炭、弱粘結炭をコーク

ス化せずに直接使用できる、操業の開始・停止が高炉に比べて容易といった特徴がある(森田, 江見, 1998). Corex 法と Corex プロセスによる Off-gas を活用した直接還元では製鉄1tあたりに必要なエネルギーを半分近くにすることができる(Gielen and Moriguchi, 2002).

Finex は Corex 法をさらに発展させたものであり, 主要な違いは, Finex では直接細かい鉄鉱石を使用できることである. Finex プロセスでは四段の流動床システムがガス化溶融炉の上流におかれている. 粉末鉄鉱石を流動床で還元したのちに, ガス化溶融炉へ投入する前に高温焼成される(Remus et al., 2013).

その他の新しい製鉄法が, 日本(Direct Iron Ore Smelting: DIOS 法), オーストラリア(HIs melt 法), アメリカ・オランダ(AISI-DOE/CCF 法), ロシア(ROMELT 法)として検討されている(Remus et al., 2013). これらのプロセスは主に, 溶融状態での還元量が固体状態のそれより大きい溶融還元法を利用しており, 高炉法のそれとは異なっている. これらのプロセスは, (a) 鉄鉱石を塊状化せずに使用できる, (b) 非粘結・弱粘結炭をコークス化せずに直接使用できる, (c) 操業の開始止が高炉に比べて大変容易である, (d) CO<sub>2</sub> の発生量を削減できるとされている(森田, 江見, 1998). これらの方式ではいずれも鉄鉱石の事前処理施設(焼結炉, ペレット焼成炉)とコークス炉は不要となるためそのためのエネルギーは不要となる. また, 製造される鋼1tあたりのエネルギー消費量も削減すると予測されている. HIs melt では高炉と比較して燃料は10%削減されると推計されていて, 現在オーストラリアで実際に建設が予定されている. DIOS 方式では高炉と比較して5~10%のエネルギー消費量が抑えられるとされ, パイロットプラントは1994年より操業している. また, その他の方式として, AISI-DOE/CCF はサイクロン反応炉を中心としたものであり, サイクロンの出口で発生する1800°Cの燃料ガスが使用可能と考えられている. 現在 CCF プロジェクトとしてパイロットプラントで操業されている. ROMELT 方式では, 現在パイロットプラントが操業している(Remus et al., 2013). しかし, これらのプロセスには, その商業化までには解決すべき多くの問題があり, この解決には, かなりの研究・開発が必要とされている(森田, 江見, 1998).

なお, 高炉では, コークスは負荷を支えるという機能も有するため, 決してすべてを他のものに替えることはできない. 最小の高炉コークス率は1tの溶鉄あたり260kgとされている(Remus et al., 2013).

直接還元(DR)は鉄鉱石と還元剤(天然ガスや石炭)を用いて直接還元鉄(DRI)と呼ばれる固形の製品を作ることであり, 主として電炉の原料としてDRIを使用する. 電炉を用いた製鋼では, スクラップが原料であることによる質の問題があるが, DRIを原料とすることにより, 電炉による製鋼の可能性が広がっている(Remus et al., 2013).

DRIの使用は以下の状況においてリーズナブルであるとされている(Remus et al., 2013).

- ・ 良質のスクラップが足りず, 製品である鋼の質が落ちてしまうことから原料の質を上げる必要がある場合
- ・ 小さなミルが作られている地域でスクラップのような鉄源を輸送するのが容易ではない場合, または, 需要からいって高炉が必要ではない場合
- ・ 高炉であって, 溶鉄のアウトプット容量を増やす必要がある場合

高炉と比して DRI が優れているのはコークス炉が必要ないところであり、これによりダストの排出も水の消費量もおさえられる。また、天然ガス(メタン)を用いた DRI であれば石炭を用いたものより大幅に CO<sub>2</sub> 発生量が低い(Remus et al., 2013)。しかしながら、DRI は 3-6% の不要な鉍石を含み、DRI の投入の増加は電炉でのエネルギー消費量を増やすことにつながる。なお、ITmk3 技術は副生ガスの潜熱を回収し熱を空気の余熱に使用することでエネルギー消費量を転炉より 20~25% 抑えることができると試算されている(Remus et al., 2013)。

図 3-18 に技術ごとのエネルギー削減量を示す。

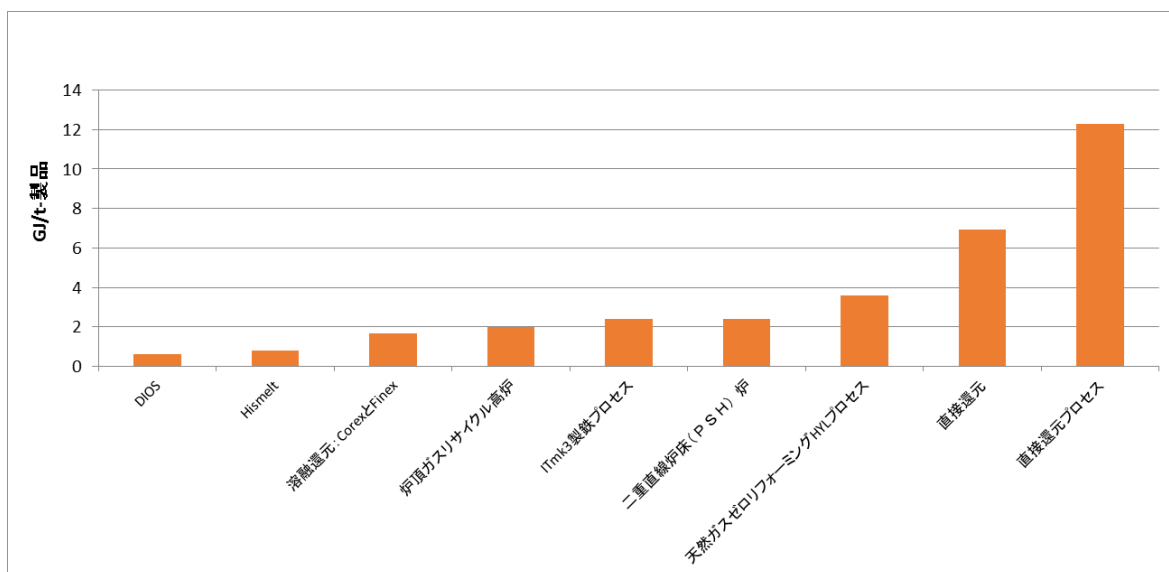


図 3-18 新たな還元手法のエネルギー削減量

その他、鉄鋼生産時に副生する水素を還元剤としての活用する検討も進められている。

## (2) CCS

CCS とは発生する炭素を固定し、安定的に貯留することで地上の CO<sub>2</sub> 濃度を下げる技術である。この技術は産業分野においては最も費用対効果の高い選択肢となるとされており、いくつかの産業では大きな排出削減は CCS 以外では達成が難しいとされている(IEA and United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 2011)。これは鉄鋼製造における直接的な対策ではないが、鉄鋼業では製造業の中でも最大規模の排出を行う業種の一つであり、一つの事業所から大量に CO<sub>2</sub> が排出されるという特徴から CCS の活用も十分意義あるものと考えられる。IEA と UNIDO は、CCS の技術ロードマップにおいて5つの主要産業の一つとして鉄鋼業を取り扱っている。

CCS については、Pires ら(2011)が 2006 年以降の知見についてレビューを実施しており、現状では巨額の費用が必要となる CCS を大規模に実際に用いるためには、必要な費用の 6 割から 8



割を占める炭素を捕捉する技術についてコスト削減に向けた研究開発が必要であるとしている。また、CO<sub>2</sub>の運搬と貯留する技術については安全面とキャパシティに関する研究が必要としている。

鉄鋼業でのCCSの活用については、CO<sub>2</sub>の直接の排出はサイトごとに状況が大きく異なり、どのようなプロセスが使用されているかに依存する。現在、欧米を中心にプロセスからのCO<sub>2</sub>の捕捉に関する研究が進められおり、欧州では15か国、48の会社と組織が参加し連携した研究開発プロジェクトである、ULCOS (Ultra-Low Carbon Dioxide Steelmaking) プロジェクトが進められている (Remus et al., 2013)。

ULCOS プロジェクトでは、①CO<sub>2</sub>の捕捉、固定、さらに場合によっては輸送と貯留、②炭素に基づかないエネルギーと還元剤の使用(水素、電力と少量のガス)③ユーカリのプランテーション等によるバイオマスの活用の3分野で検討が進められている (Remus et al., 2013)。特にCO<sub>2</sub>の捕捉については、鉄鋼業では、CO<sub>2</sub>分離にたけたプロセスを持つ業種とは異なり、炉や直接還元プロセスにおいてCO<sub>2</sub>を濃縮したうえで分離する技術が必要とされ、技術の実用化には2020~2030年頃までかかるとされている。現状では、短期的には高炉の炉頂ガスのリサイクル(TGR-BF)がCCS導入にもっとも効果的と思われ、DRIや製錬に関する技術を含む新たな生産プロセスへのCCS導入は投資と研究開発が引き続き必要である (IEA and UNIDO, 2011)。RubinらはCO<sub>2</sub>捕捉技術と政府と民間組織によるロードマップ、研究開発プログラム等についてレビューを行い、CCS技術を改善するための鍵となるのは大幅な費用削減が必要であるが、そのためにはCO<sub>2</sub>捕捉技術の市場を伴う技術の商業的な普及が必要であるとし、その実現のためには政府によるCO<sub>2</sub>の大気への排出を大きく制限する取組が必要としている (Rubin et al., 2007)。PiresらはCO<sub>2</sub>の捕捉については、投資に必要な負担を減らすために追加的なインセンティブが必要であり、大気への排出を避けることに対し支払いを得るという形で対応することも可能としている (Pires et al., 2011)。

CCS技術の鉄鋼業への活用については、2050年という時点を考えてみると、経済協力開発機構 (Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)加盟諸国では生産量が減るため大幅には伸びないが、それ以外の各国、特に中国とインドにおいて鉄鋼の生産は大幅に伸びると予想されており、これらの国の鉄鋼業におけるCCS技術の活用が重要となる (IEA and UNIDO, 2011)。

CCSの活用にあたっては、政府はセクター別のアプローチを検討し、特に鉄鋼業等ではCCSの技術移転や規制に関する政策を検討すべきである。また、炭素リーケージへの考慮が必要であり、活用を進めるためには排出への課金やCCS導入の義務付けにあたってはより規制の緩い国や地域へ生産が流れないよう配慮する必要がある (IEA and UNIDO, 2011)。

### 3.3.3 物質をより効果的に利用する技術

本項では、物質をより効果的に利用する技術として、副生物の他分野への活用事例をまとめる。これらの技術は直接鉄鋼生産に関連する温室効果ガスの排出削減につながるものではないが、鉄鋼製造時に生成される副産物を他分野で用いることで、そこでの温室効果ガスの排出削減に寄与するものである。直接鉄鋼生産時の排出削減につながるものではないため、本論文においては

技術を列記するに留める。

- ・ コークス製造時の副産物の活用 (IEA, 2007a)
- ・ 高炉スラグ, その他のスラグのセメントでの活用 (IEA, 2007a; Gielen and Moriguchi, 2002)
- ・ 高炉ガスの発電での活用 (IEA, 2007a)
- ・ コークス炉ガスの発電での活用 (IEA, 2007a)
- ・ その他電力, 蒸気, 熱の活用 (IEA, 2007a)
- ・ 酸素生成時の副生物としての窒素の活用 (IEA, 2007a)
- ・ 副生水素の他分野(燃料電池等への活用)

### 3. 4 鉄鋼生産に関連する温室効果ガス排出削減政策

#### 3. 4. 1 地域・国内において対策技術の導入を促す取組

##### (1) 経済的手法

経済的手法は仕組みが単純であり, スcopeが広く, 全ての技術や燃料をカバーできることから, 費用を最小化したうえで生産・消費の段階を変化させ得る. これが直接規制等より効率的であるとされる理由である (IPCC, 2014c). 経済的手法は「価格」に関するものと「量」に関するものに分けられる. 取引可能な排出枠を導入する手法は, 汚染を許容する総量がキャップとして定められ, その中で取引が認められることから「量」に関する政策と分類され, 排出の量に関わらず一定量の排出に対し排出者に決まった価格の負担を求める税や罰金は「価格」に関する政策とされる (IPCC, 2014a). 経済的手法は規制的手法より経済的に効率的であり, 利潤を追求する利益団体にも比較的受け入れられやすいと考えられ, 経験的にも, 全般的に規制的手法より効果をあげているとされる (Anthoff and Hahn, 2010).

##### ア) 排出権取引

排出権取引は排出税とともにどちらも価格シグナルを排出削減のインセンティブとするものであり, いくつかのセクターから経済全体までを対象とすることができる (Gupta et al., 2007; IPCC, 2014a). 多くの分析により, セクターのみを対象とするよりも経済全体を対象とする方が, 限界費用を均質にするためより優れていることが報告されている (Gupta et al., 2007). 排出を可能とする枠をどのように分配するには, 無償で分配するか, 競売にかける方法がある. ベースラインを定めクレジットを与えるタイプの排出権取引では, 排出者はベースラインレベルよりも排出を抑えることで, 排出削減クレジットを得ることができるとするものである (IPCC, 2014c).

現在, 排出権取引をその域内で実施している国は 35 か国にのぼり, 中国, 韓国, 南アの 3 か国では 2013 年~2015 年の間に開始することを検討している (IEA, 2014). また, 2014 年 11 月には, 中国北京での記者会見において国家発展改革委員会 (National Development and Reform Commission (NDRC)) の職員が, 中国政府は 2016 年より排出権取引を開始すると述べたことを

複数のマスメディアが報道している<sup>4</sup>。中国では既に排出量取引制度のためのパイロット事業が、2012-2013年より7つの主要地方政府において実施されている(環境省, 2012)。世界の温室効果ガスの30%近くを排出する中国で排出権取引が始まれば、欧州の市場を超えて世界最大となるとされている。他方で、世界で最も大規模であり28か国が参加するEUの排出権取引システム(European Union Emissions Trading System, EUETS)では、価格が低落しており、2013年の平均価格は1tあたり約3.5ユーロとなっている。これは2008年初めの1tあたり20ユーロという価格より大幅に小さくなっている(IEA, 2013a,b)。

2008年のEUETS規制の改正により、欧州委員会は産業部門の炭素リーケージのリスクを同定することが求められることとなった。基本的な鉄鋼業はリスクの高い業種の一つとされており、第3フェーズの排出権取引においては、対象外とはならないが他業種よりも多くの無償であたえられる排出権(フリーアローアンス)が分配されることとなる(IEA and UNIDO, 2011)。

排出権取引の魅力の一つは、排出枠を無償で与えられる場合産業界からの反対が小さいということがあげられる。また、炭素税の場合は小さい政府を好む立場の者から反対されやすいという点もある。また、国境を越えて適用する場合には、共通の税率について合意するよりも、排出スキームを調整する方が容易であるという点も挙げられる。しかしこの点について合意はなく、税制を調整する方がより容易であるとする研究結果もある(IPCC, 2014c)。

#### イ) 排出に対する税

税や罰金は理想的には単位当たり排出される温室効果ガスに対してかけられるものと定義される。気候変動では、特定のサービスに対する規定とは一般に関係づけられておらず、したがって罰金ではなく、税として知られている(IPCC, 2014c)。上記のとおり、排出に対する税は排出権取引同様に、価格シグナルにより排出削減のインセンティブを与えるものである。税と排出権取引ではどちらがよいかということでは、経済理論上は、排出削減の限界費用に不確実性がある場合であって、CO<sub>2</sub>は蓄積して問題を起すタイプの汚染物質であることを踏まえると、税の方がより経済的に効率がよいということとなる。炭素の排出にかかる税は、環境保全上の効果からも、費用対効果の点からも優れている。税の使用にあたる真の障壁は分配と、いくつかの国については、制度的なものであり、特に途上国では多様な排出源から必要な税を徴収することが難しい場合もあると考えられる(Gupta et al., 2007)。また、新たな税の導入は政治的に好まれない。

実際に炭素税を導入したノルウェーの事例では、1988～1997の期間において、排出総量は増えたものの、使用するエネルギーミックスの変更やプロセスあたりの排出量減少により、GDPあたりの排出は大きく下がったことが報告されている(Bruvoll and Larsen, 2004)。自動車を対象とした研究では(国内の路上交通は国際的な競争を考慮する必要がないためより政策の効果を判断しやすい)、特に初期段階では規制よりも税の方が低い費用で目的を達成されることが示されている

---

<sup>4</sup> 2014年11月25日付 Reuter, Bloomberg 等による報道, (例: <http://www.bloomberg.com/news/2014-11-25/china-plans-national-carbon-market-by-2016-amid-emission-pledge.html>)

(Austin and Dinan, 2005). また、排出権取引を新たに導入する場合は制度的なインフラストラクチャーを導入する必要があるが、税であれば、それは不要であるという側面もある。これは途上国にとっては特に重要であるとも考えられる(IPCC, 2014c)。

近年、温室効果ガスやエネルギーに対する税金は、その収入を他の適正ではない税制の影響を減らすために活用するようになってきている(グリーン税改正)が、その他の収入の活用も重要となってきた。上述のとおり、経済的手法である炭素税はシンプルで、全ての技術や燃料を対象とすることができ、費用を最小とすることも可能である。しかし、現時点では導入している国は一部に限られ、北欧諸国、オランダ、イギリス、カナダのブリティッシュコロンビア州のみが、大きな領域において、一般的かつ意味のあるレベルでの炭素税(少なくともCO<sub>2</sub> 1tあたり米ドルで10ドル以上)を課している。この理由は完全に明らかとなっていないわけではないが、まず、他の一部のセクターに対する規制と異なり、化石燃料に関連する利益団体がより激しいロビー活動を行い反対することがあげられ、次に規制よりも必要となる支払額がより明瞭であることから、税がもつメリットを知らない一般市民はより受け入れにくくなること、さらに、このような政策は競争力や雇用、費用の分配に対しリスクと取られることがあると考えられる。相当大きな額の炭素税を導入している国はさらに少ない。スウェーデンではCO<sub>2</sub> 1tあたり米ドルで165ドルとEU 排出権取引の価格よりも高い設定をしている。このような税率が高い国ではしばしば他国との競争の観点から一定規模の事業者への免除が行われる。スウェーデンにおいてもEU 排出権取引に参加している大規模エネルギー消費者は税の二重取りになるという観点から免除されている。

なお、炭素税が排出削減技術の導入に効果的かどうかはその国のエネルギーに対する補助金や関連する電力料金等のエネルギーの価格に左右される。日本や韓国では90%を超える高い割合で導入されているCDQはEUや米国ではほぼ導入されていない。これは電力料金や企業の金融に関する状況が異なるためであり、仮に追加的にCO<sub>2</sub> 1tに対し米ドルで25ドル程度のインセンティブが何らかの形で加わっただけではCDQの導入は経済的に意味をなさないとする報告もある(IEA, 2007a)。したがって効果的及び国際的に効果を持つ税を導入する場合は、エネルギーに対する補助金等も調和させる必要があると考えられる。

#### ウ) 国境調整税(Border tax adjustment)

国境調整税とは、財に内包される温室効果ガスの排出に対してかけるのと同レベルの税を、輸入する財にかけることを指す。世界中の様々な気候変動規制の機能不全を改善することを狙った手法であり、炭素リークエッジの抑制効果やより広い気候変動緩和策の促進に役立つとする研究や、最適の政策とはならずむしろリークエッジを増加させるとする研究もある(IPCC, 2014c)。この手法には、World Trade Organization(WTO)によるルールと整合的ではないという点や、途上国が新たに市場に参入する際の妨げともなるとも指摘されている。後者については徴取された税を国際的な利益に使用することで対応することも提案されている(IEA and UNIDO, 2011 他)。

国境調整税の炭素リークエッジ抑制効果については議論の余地があるが、最近のモデルによる比較によると炭素リークエッジは8-12%抑制が可能とする研究も報告されている(IPCC, 2014c)。

#### エ) 補助金・交付金 設備導入の支援策(省エネ法)

補助金は、税制などの収入を伴う中立的な経済的な手法と異なり、公共の資金を必要とする。補助金は低炭素技術や製品を広める上での市場の失敗を修正することによる緩和策の手法として使用することができる。また、省エネルギーや再生可能エネルギーの活用を刺激する手法として活用することもできる。しかし、炭素税や排出権取引ほど効率的ではない。エネルギーへの補助金はしばしば化石燃料の製造や消費に導入されており、排出量を増やし、公的な予算上も重い負担となっている。このような補助金を撤廃すれば排出削減につながるが、これらの補助金を除去することは難しいことが明らかとなっている(IEA et al., 2011)。

再生可能エネルギーや他の政府による緩和策への支出に対する補助金は他の形の欠点もある。まずこのような支出に対応するために、公共の負担は挙げられなければならないが、これはしばしば税による経済的な非効率を伴う。また、補助金は市場の失敗を訂正するような形でなければ、産業に対し、過剰または不十分な形で適用されることになってしまう。さらに、補助金は、受益者のロビー活動により政治的に固定的な形となり社会全体の負担となる場合がある(IPCC, 2014a)。

補助金と罰金を組み合わせるような仕組みも実用化されている。再生可能エネルギーの認証システムはエネルギー消費に対する課金制度であり、かつ、再生可能エネルギー生産への補助金とみることができる(Amundsen and Mortensen, 2001)。このような場合、課金を補助金の財源として活用することもできる(IPCC, 2014a)。

### (2) 規制的手法

規制と基準は第一段階の環境政策の中心的なものであり、世界中で今でも環境・気候変動政策において重要なものである(IPCC, 2014c)。規制的手法は、排出者が規則を順守できない場合に罰則を適用するといったルールを定めるものである。例えば、特定のプロセスや活動からの温室効果ガスの最大排出許容量を定めるようなパフォーマンス基準や、特定の排出削減技術や生産手法を義務付けるタイプの技術基準や、建物・工場・交通に関する設備へのラベル表示といった一定の排出につながりうる製品の特長を規定するような製品基準がある(IPCC, 2014a,c)。このような規制的手法は、経済的手法の効果や範囲が、例えばエネルギーセクターのような排出量の多いセクターについて市場が成り立たないといった制度的な要素から限定されるような場合により適している(IPCC, 2014a)。規制により、民間企業に負の費用(利益)を与えつつエネルギー効率を上げることも可能であるのは明らかであるが、それがどの程度かについては研究による結論は様々である(IPCC, 2014c)。

### (3) 情報的手法等

典型的な環境に関する市場の失敗は、関連する情報が企業や消費者の間で欠落しているか、または偏っていることによる。質の高い情報は、意識向上や環境上の課題の特定、環境政策の影響把握やデザイン、消費・生産時の決定に関連する情報提供に欠かせないものである(IPCC,

2014c). 温室効果ガスの排出削減は、正確で総合的な情報を提供することでも達成することができる。政府の研究や公共統計への財源の投入、消費や生産に関する選択肢につながる啓蒙活動も情報的手法に含まれる(IPCC, 2014a)。代表的な情報的手法にはエコラベルや製品や技術への認証、主要な排出者の温室効果ガス排出量のデータを収集し公表することがあげられる(IPCC, 2014c)。省エネルギーに関しては、情報的手法が最も広く用いられており、次いで経済的手法、規制的手法と自主的な手法という順で用いられている。

その他、政府の公共財・サービスに関する規定や調達も一つの手法として考えられる。例えば、政府による、よりエネルギーを効率よく使うことのできるインフラストラクチャーや公共交通への投資、気候変動緩和につながる革新的な調査研究の促進、制度的または法的な排出削減に対する障壁を除去すること等も効果的な手法として考えられる(IPCC, 2014a,c)。植林プログラムや行政が保有する森林保全も重要な一例である(IPCC, 2014c)。

#### (4) 鉄鋼業界の自主的な取り組み

政府と民間企業の間で自主的な合意を結ぶことも、環境上の目標を達成することや、規制的な義務の順守を超えて環境に関するパフォーマンスを向上させるうえで役に立つ手法の一つとなり得る(IPCC, 2014a)。自主的な取組は、特定の条件下では規制の代わりまたは規制で求められること以上に、汚染排出者が集合的に自ら対策にコミットすることができるとする考えに基づくものである(IPCC, 2014c)。自主的な取組には、産業界の合意、自主的な認証、環境マネジメントシステム、自主的な目標等がある(IPCC, 2014a)。自主的な取組は様々な形で形成され、多くの場合は規制者と排出者が交渉をする結果として合意される。他のケースでは、将来的な規制を避けるための手法として自発的に発生する場合もある。また、企業の費用と効果を推計し、標準的な環境に関する合意を推進する場合もある(IPCC, 2014c)。なお、既往研究では、このような自主的な手法によって追加的な環境保全上の効果が得られているかについては、明確な知見は得られていない(IPCC, 2014a)。自主的な取組が成功するのは、政府と企業が密接な協力を行う伝統のある国であることが報告されている(IPCC, 2007, 2014c)。

自主的な合意は政府による気候変動緩和計画において主要な政策手法として用いられることもできる。このような自主的な合意は、日本、台湾、中国の一部の省で用いられている。

日本の鉄鋼業界では、日本経済団体連合会の取組の一環として1997年より自主行動計画を定めて取り組みを進めている。計画は政府の委員会において毎年検証され、独立した第三者委員会が実施状況を監視している。2008年から2012年の日本鉄鋼連盟による目標は、『粗鋼生産量1億トンを前提として、2010年度の鉄鋼生産工程におけるエネルギー消費量を、基準年の1990年度に対し、10%削減する(上記目標は、2008～2012年度の5年間の平均値として達成する)』としており、2013年の達成状況のフォローアップ結果ではこの目標は達成したことが報告されている(日本経済団体連合会, 2014)。

エネルギーコストは鉄鋼生産費用の大部分を占めることから、エネルギーを効率化する手法は鉄鋼生産業者の関心事項である(USEPA, 2012)。そのため関連業者間においてエネルギーの効

率化に関し連携が図られている。なお、鉄鋼業界におけるエネルギー効率を上げるための連携は様々な形で進められているが、効率の向上は商売上の有利な点となることから競争力の一部であり、企業秘密である部分もある。一方で、業界内のある企業の努力が業界全体で取り組むことでより効果を発し、個々の企業や施設の特徴に関連なく適用できる場合もあり得る。したがって、個別の企業のエネルギー効率を上げるための取り組みは公には知られておらず、許可を得る過程においては秘密としておこななければならない場合もある。しかし、多くの企業が使用し、費用削減に役立っているシステムの多くは、業界の構成員全てが購入可能なものである(USEPA, 2012)。

### 3.4.2 国外への技術普及を促す取組

鉄鋼製品については貿易財としての性質を持つため、早期かつ実質的な排出量削減のためには、グローバルな視点での対策検討が有効と考えられる(小田, 秋元, 2009)。

#### (1) クリーンディベロップメントメカニズム(CDM)

CDM とは京都議定書に基づくもので、温室効果ガス(Greenhouse Gas, GHG)の排出目標を有する先進国が途上国でGHG 排出削減につながるプロジェクトを実施し、得られた削減量をクレジットとして獲得し自国の目標達成に計上できる仕組みである(関谷, 2005)。

2014 年 2 月末の段階で、鉄鋼業関連で既にクレジットが発行されている CDM の案件数は 76 件にのぼる。多くは中国(44 件)とインド(28 件)を対象としたものであり、排熱・排ガスを活用したものが大半を占め、コークス炉ガスを利用するものが 35 あり、そのうち CDQ に関するものは 13 件あった<sup>5</sup>。2014 年 2 月末の時点で登録されている CDM プロジェクトは 7,448 件であり 76 件という数は決して多いとはいえない。また、ここまで発行済みのクレジットは全体で 14 億 t-CO<sub>2</sub> 程度であるが、鉄鋼関連のものはそのうち 4% 程度となる。

排熱・排ガス関連のプロジェクトは CO<sub>2</sub> 削減効果も高く十分に投資回収も可能な事業であるため、CDM 開始当初は盛んであったが、実施された CDM プロジェクト(鉄鋼に限らない)において追加性の観点から問題が指摘されたことから(Schneider, 2009)、CDM 理事会では方法論・追加性の審査条件を厳しくした。その結果、省エネ関連のプロジェクトは、業界に省エネルギー技術等に関するガイドラインがあるような事例は、プロジェクトがなくても当然技術導入が実施されるものであるという理由から、現在は新規で省エネルギーに関する案件が認められることは難しくなっている。

また、CDQ については、場合によっては 100 億円を超えることもあり途上国での導入は容易ではなかったが、近年は中国製の設備等安価なものもでてきている(上野, 本部, 2013)。(著者による 2013 年の鉄鋼メーカーからの聞き取り)。

<sup>5</sup>公益財団法人地球環境戦略研究機関(Institute for Global Environmental Strategies, IGES)の CDM プロジェクトデータベース(<http://pub.iges.or.jp/modules/envirolib/view.php?docid=967>)を基に、データベースの「プロジェクトの補足説明」において高炉ガス等製鉄に関連する排熱・排ガスの利用に関する記載があるものと、「プロジェクトの種類」が「排ガス・排熱利用」及び「省エネ」であって steel, sinter, smelter といった製鉄にも関連する用語を含むものを抽出し、Project Design Document の内容により製鉄に関連するものを抽出した。

鉄鋼の生産は国ごとに技術の種類や効率、CO<sub>2</sub> 排出量が大きく異なる。この違いの一つの鍵となるファクターはエネルギー価格であり、例えば米国のように石炭と電力価格が低いことにより、より効率の良い技術の導入が進まないこともあり、その結果、ベストプラクティスについての情報共有が技術適用につながらないこともある。このような経済的なギャップを埋めるためには CDM でクレジットを作るといった方法をとることも考えられる (IEA, 2007b)。

## (2) ジョイントクレジットメカニズム (JCM)

上記のとおり鉄鋼に関連する CDM は限定的なのが実情であり、その大きな要因としては CDM の審査において追加性を示すことが難しい点であることがあげられる。一般に、追加性は内部収益率 (Internal Rate of Return, IRR) 計算で論証することが多く、省エネルギー系は IRR が高くなりがちなため論証することは容易ではない。また、CDM の審査は、厳密なチェックを行うがために、大量の事務作業と長期の時間がかかり迅速に対策を進めるうえでは障壁となる部分がある。CDM について岡崎 (2013) は、表 3-4 を課題としている。

表 3-4 鉄鋼業に関する CDM の課題

審査の硬直性	先進国・途上国両政府の審査・承認 第3者機関による事前審査 CDM理事会による審査 第3者機関による検証・認証 CDM理事会によるクレジット発行
追加性判断の難しさ	(クレジットがあつて初めて収益性が成立することを証明する) 経済的追加性の偏重 (CO <sub>2</sub> クレジットによる収益の改善に過大な期待ができず、鉄鋼の省エネ案件がCDM不適格となる)
クレジット検証と発行の 手続き	操業実績に対して第3者による検証が必要とされるので、手続きの遅延やクレジット量の減少が発生

このような CDM の欠点を補うためジョイントクレジットメカニズム (Joint Credit Mechanism (JCM), 以前は二国間オフセットクレジットメカニズム Bilateral Off-set Credit Mechanism (BOCM)とも呼ばれた)を日本政府が提唱しており、2013 年には国連に意見書として具体的な案を提出している (Government of Japan, 2013)。現在、具体的なプロジェクトとするための検討・準備が進められており、鉄鋼製造業への省エネ技術の導入に関連しては、アジアを中心に中国・インドを含め 13 件のフィージビリティスタディが進められている (著者による 2014 年の環境省からの聞き取り結果に基づく)。

中国については経済成長を背景に、日本の政府開発援助 (Official Development Assistance, ODA)のうち円借款の対象国とはしないことが 2007 年に合意されており、現在は無償資金協力と技術協力を絞って行われている (外務省, 2013)。一方、無償協力の扱いについては、行政事業改革の一環として見直しが指摘されており、それを受けて、外務省国際協力局の第 14 回開発協力適正会議 (2014)において外部有識者の間で議論しまとめられた「所得水準が相対的に高い国に



対する 無償資金協力の効果的な活用について」では、所得水準が相対的に高い国については無償資金協力による実施が十分に説明可能な効果の高い事業に限って実施することとされ、案件の性質・日本の対外政策・供与先途上国の状況から複合的に検討することとされた。考慮すべき案件の性質としては広域性と地球規模課題があげられており、中国との関係は一般的に良好とはなっていないこと、中国では劣悪な環境汚染が問題となっていることを鑑みると、環境分野での取り組みは中国も対象とし得ると考えられる、

ただし、実際に JCM を実施するにあたっては中国では既に鉄鋼製造は供給過剰となっていること、経済力は十分あることを考えるべきである。

### (3) 鉄鋼業界による自主的な取り組み

鉄鋼業の国際的な業界団体である世界鉄鋼協会 (World Steel Association) は、鉄鋼の製造と使用に関する二酸化炭素排出削減のためのフレームワークとして次の 4 点に合意している。

- a) 社会における鉄鋼製品のエネルギー効率を改善するため新たな鉄鋼の開発と適用を行うこと、
- b) 鉄鋼製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出を大幅に下げることができる可能性のある技術の同定と研究開発に高額な投資の行う必要があること、
- c) ベンチマーキングや技術移転を通じて現時点で使用可能な技術により全ての鉄鋼プラントのパフォーマンスレベルを最上のもthingとすることが重要であること、
- d) 鉄鋼プラントの CO<sub>2</sub> 排出量について共通の算定と報告方法を用いること。共通の手法は国際標準化機構 (International Organization for Standardization, ISO) による基準 (ISO14404) として 2013 年 3 月に発行されている。(WSA, 2013b)

その他、WSA では、大幅な CO<sub>2</sub> 排出削減につながる革新的なプログラム (breakthrough programme) として多様な国、地域の研究開発プログラム (欧州委や欧州の鉄鋼業界が進める ULCOS プログラム、日本の COURSE50 (CO<sub>2</sub> Ultimate Reduction in Steelmaking process by Innovative technology for cool Earth 50) プログラム、米国鉄鋼業界とエネルギー省によるエネルギープログラム、韓国の POSCO (Pohang Iron and Steel Company) プログラム等) に関するフォーラムを提供している (WSA, 2013b)。

世界鉄鋼協会では、気候変動対策に関する様々な取組を行っており、その一環として非会員企業を含む各国の製鉄所から排出される CO<sub>2</sub> 量のデータを 2007 年より収集し解析を行っている (WSA, 2013b)。その手法を基にした鉄鋼の CO<sub>2</sub> 排出量・原単位計算方法は、上述のとおり、2013 年 3 月に国際規格 ISO14404 として正式に発行されている。この規格では直接製鉄所内で使用される化石燃料による直接的な排出のみならず、中間素材を外部から購入する場合の間接排出も含めることとされている。購入電力も同様に間接排出の考え方が適用され、世界平均の電力の CO<sub>2</sub> 排出係数を用いることとし、製鉄所が存在する場所の電力の電源構成による影響がでないように配慮されている。これは ISO で初の生産プロセスにおける GHG 排出量の規格化となった (中野, 2014a,b)。

APP は、2005 年 7 月に立ち上げられた地域協力のパートナーシップであり、参加国は日本、豪州、カナダ、中国、インド、韓国、米国の 7 ヶ国(カナダは 2007 年より参加)である。APP ではクリーンで効率的な技術の開発、普及、移転を行うことによって GHG 排出削減等を効果的に実施するため、官民による 8 つの部門別タスクフォースを設けており、鉄鋼に関するタスクフォースもその一つである。鉄鋼タスクフォースは、クリーンな技術に関する情報を共有し省エネルギーと GHG 排出削減を行うため、上述の優良な技術を集めたハンドブックの公表や、代表的な技術についての情報交換を実施している。なお、APP 参加国は世界全体の鉄鋼製造の 60%を占めている(小島、2009)。

また、APP 鉄鋼タスクフォースでは、代表的な省エネルギー技術として、以下の 12 技術を選び、各国の事業所プロセス毎に実態調査を実施している。

- ・ 副生ガス回収(高炉・コークス炉・転炉の3つ)
- ・ CDQ・TRT・CMC・微粉炭吹込(Pulverized Coal Injection, PCI)
- ・ 排熱回収(焼結・熱風炉・転炉・ペレット製造の4つ)
- ・ 電炉スクラップ予熱

### 3.5 本章において明らかとなったこと

本章では、続く章における考察の基礎として活用するため、鉄鋼生産に関連する温室効果ガス排出削減のための技術と政策を取り上げ、その概要と、活用にあたり留意すべき点、効果等を既往文献より整理した。

効果的な技術として先進国で既に活用されている技術について整理を行い、欧州の平均的な各工程のエネルギー消費量と比較して削減率を求めると、転炉鋼の場合、対策技術の平均値で 17%、中央値で 7%の削減が、電炉鋼の場合、対策技術の平均値で 24%、中央値で 12%の削減が可能という結果となった。削減効果は各工程で様々であるが、例えば最もエネルギーを消費する高炉では、最大 21~27%の削減効果が期待されることが明らかとなった。

また、効果的な気候変動緩和策としてエネルギー削減量の大きい技術は、導入に必要な費用も高額となる傾向があった。今回整理した技術による効率改善には 10 億円(中央値)程度、費用回収年数 3 年(中央値)の程度の高額の投資が必要であることが明らかとなり、技術の導入によるエネルギーコストは抑えられるというメリットはあるものの、費用回収年数が長いため、特に中小企業のみでの導入は容易ではないことがわかった。

国際的な需給を勘案した気候変動緩和のための政策は、国内・地域内向けの手法として主として経済的手法、規制的手法、情報的手法、自主的な取り組み等に分類され、省エネルギー分野では情報的手法が最も広く用いられ、その次が経済的手法、その次が規制的手法他であった。経済的手法は環境保全上の効果と費用対効果の観点から他の手法より優れており、税や排出権取引では比較的簡便な手法により経済全体を対象とすることも可能である一方、使用にあたっての課題は税収や排出権の分配や実施するための制度的なものである。規制的手法は経済的手法の効果

や範囲が限定されるような場合に適している。気候変動緩和策として効果を出すためには、他の主体からの温室効果ガスの排出、いわゆる炭素リーケージを抑制することが当然必要である。できるだけ対象を広くすることは対策の限界削減費用を小さくするうえでも有効である。国際的に流通する財では、対策は国際的に調和されていなければ、その導入により、排出削減技術があまり入っておらず製造コストがより小さい地域に生産が移り、むしろ排出量が増加することになり兼ねない。国際的な技術普及には京都議定書に基づく CDM 等があるが、鉄鋼業の省エネルギー技術の普及としてはあまり機能しておらず、その問題点を打開するため JCM が新たに提案されている。鉄鋼業では業界の自主的な取り組みにより、温室効果ガスの算定方法の規格化等国際的な取り組みが盛んに進められていることがわかった。

<参考文献>

- Amundsen, E.S., Mortensen, J.B. (2001). The Danish Green Certificate System: some simple analytical results, *Energy Economics* 23 pp.489–509. (DOI: 10.1016/S0140 - 9883(01)00079 - 2), (ISSN:0140 - 9883).
- Anthoff, D., Hahn, R. (2010) Government failure and market failure: on the inefficiency of environmental and energy policy, *Oxford Reviews of Economic Policy*, vol.26., pp.197-224.
- APP (2010) *The State-of-the-Art Clean Technologies(SOACT) for Steelmaking Handbook* (2nd edition).
- Austin, D., Dinan, T. (2005) Clearing the air: The costs and consequences of higher CAFE standards and increased gasoline taxes, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol.50, pp.562–582.
- Bruvoll, A. Larsen, B.M. (2004) Greenhouse gas emissions in Norway: Do carbon taxes work? *Energy Policy*, vol.32,pp.493-505.
- 外務省 (2013) 政府開発援助(ODA)国別データブック 2013.  
[http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/shiryo/kuni/13\\_databook/index.html#l](http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/shiryo/kuni/13_databook/index.html#l)
- 外務省 (2014) 所得水準が相対的に高い国に対する無償資金協力の効果的な活用について.  
[http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/about/kaikaku/tekisei\\_k/pdfs\\_2014/shotoku.pdf](http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/about/kaikaku/tekisei_k/pdfs_2014/shotoku.pdf)
- Gielen, D., Moriguchi, Y. (2002) CO<sub>2</sub> in the iron and steel industry: an analysis of Japanese emission reduction potentials, *Energy Policy*, vol.30, pp.849-863.
- Government of Japan (2013) Submission by Japan on various approaches, including opportunities for using markets, to enhance the cost-effectiveness of, and to promote, mitigation actions.  
[http://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/pdf/20130426FVA\\_JP\\_submission\\_set.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/pdf/20130426FVA_JP_submission_set.pdf)
- Gupta, S., Tirpak, D.A., Burger, N., Gupta, J., Höhne, N., Boncheva, A.I., Kanoan, G.M., Kolstad, C., Kruger, J.A., Michaelowa, A., Murase, S., Pershing, J., Saijo, T., Sari, A. (2007) Policies, instruments and Co-operative arrangements. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.
- 原善四朗 (1960) 最近の直接製鉄法, *生産研究*, vol.12, no.10, pp.46-49.
- IEA (2007a) *Tracking industrial energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions*, OECD publishing, Paris, France.
- IEA (2007b) *Sectoral approaches to greenhouse gas mitigation, Exploring issues for heavy industry*, information paper.

- [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/sectoral\\_approach\\_info\\_web.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/sectoral_approach_info_web.pdf)
- IEA (2013a) World Energy Outlook, OECD publishing, Paris, France.
- IEA (2013b) Re-drawing energy-climate map, World Energy Outlook Special Report, OECD publishing, Paris, France.
- IEA (2014) CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion (2014), OECD Publishing, Paris, France.
- IEA, OECD, OPEC, World Bank (2011) Joint Report by IEA, OPEC, OECD and World Bank on Fossil - fuel and other energy subsidies: An update of the G20 Pittsburgh and Toronto Commitments. <http://www.oecd.org/env/49090716.pdf>
- IEA, UNIDO (2011) Technology roadmap, Carbon capture and storage in industrial applications, OECD publishing, Paris, France.
- IPCC (2007) Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer(eds) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014a) Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (The version released on 13 April 2014,subject to copy-edit and final layout), Chap.10, Cambridge, UK and NY, USA.
- IPCC (2014b) Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (The version released on 13 April 2014,subject to copy-edit and final layout), Chap.3, Cambridge, UK and NY, USA.
- IPCC (2014c) Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (The version released on 13 April 2014,subject to copy-edit and final layout), Chap.15, Cambridge, UK and NY, USA.
- 戒能一成 (2006) 日本の鉄鋼業の省エネルギー対策の費用対効果分析. RIETI Discussion Paper Series, 06-J-059, (独)経済産業研究所.
- 加治木紳哉(杉山大志監修) (2010) 戦後日本の省エネルギー史 電力, 鉄鋼, セメント産業の歩み, pp.16-93,エネルギーフォーラム, 2010.
- 環境省 (2012) 中国 排出量取引制度の概要.  
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/det/os-info/mats/cn20121025.pdf>
- Kaushik, A., Fruehan, R.J. (2006) Behavior of direct reduced iron and hot briquetted iron in the upper blast furnace shaft: Part I. Fundamentals of kinetics and mechanism of oxidation, vol.37, no.5, pp.715-725.

- 川鉄 21 世紀財団(財団法人) (1994) 鉄鋼プロセス工学入門.
- コークス工学研究部会 (2013) 3.1.5 コークス(3.1 転換エネルギー,3.エネルギー需給に関する  
業界の動向,I エネルギー需給の現状,平成 24 年における重要なエネルギー関係事項),日本エ  
ネルギー学会誌, vol.92, no.9, pp.725-727.
- 小島彰 (2009) 鉄鋼業の温暖化対策とセクトラル・アプローチ, 科学技術動向, May, pp.8-18.
- Krishnan, S.S., Vunnam, V., Sunder, P.S., Sunil, J.V., Ramakrishnan, A.M. (2013) A study of  
energy efficiency in the Indian iron and steel industry, Center for Study of Science,  
Technology and Policy Bangalore, India.
- 森田善一郎(江見俊彦監修) (1998) 鉄鋼プロセス工学入門, 財団法人川鉄 21 世紀財団.
- 中村豪 (2007) 戦後日本における技術導入と普及:鉄鋼業における BOF の受容, 東京経大学  
会誌第 253 号, pp.177-214.
- 中野直和 (2013a) 日本初の ISO 規格“鉄鋼 CO<sub>2</sub> 排出量・原単位計算方法”発行される((1))ISO  
初の生産プロセス CO<sub>2</sub> 排出強度算定手法, 国際環境経済研究所, 解説, 4 月 23 日公表.
- 中野直和 (2013b) 日本初の ISO 規格“鉄鋼 CO<sub>2</sub> 排出量・原単位計算方法”発行される((2))欧州  
排出権取引(EU-ETS)の影と温暖化対策への貢献, 国際環境経済研究所, 解説, 4 月 24 日公  
表, 2013.
- NEDO (2008) Global warming countermeasures Japanese technologies for energy  
savings/GHG emissions reduction (2008 revised edition), Kawasaki-city, Kanagawa,  
Japan.
- 日本経済団体連合会 (2014) 環境自主行動計画〔温暖化対策編〕ー2013 年度フォローアップ  
調査結果(2012 年度実績)ー<個別業種版>.  
[https://www.keidanren.or.jp/policy/2013/101\\_kobetsu.pdf](https://www.keidanren.or.jp/policy/2013/101_kobetsu.pdf)
- 日本鉄鋼連盟(一般社団法人) (2013) 鉄ができるまで Making of iron & steel,編集・発行,  
(一社)日本鉄鋼連盟.
- 野村勉, 山本範人, 藤井武志, 滝口祐太 (2014) 低位品位鉱石活用のための選鉱プラント及び  
ペレットプラントの動向, 神戸製鋼技報 vol.61, no.1, pp.8-13.
- Oda, J., Akimoto, K., Tomoda, T., Nagashima, M., Wada, K., Sano, F.(2007) Diffusion of  
energy efficient technologies and CO<sub>2</sub> emission reductions in iron and steel sector,  
Energy Economics, 29,pp.868-888.
- 小田潤一郎, 秋元圭吾(2009) 鉄鋼部門の地域別エネルギー効率の評価, 日本エネルギー学会  
学会誌, vol.88, no.11, pp.1009-1016.
- 岡崎照夫 (2013) 二国間オフセット・メカニズムを通じた鉄鋼省エネ・環境技術の世界への普及促  
進, 国際環境経済研究所, 解説, 2013 年 2 月 26 日公表.
- Pires, J.C.M., Martins, F.G., Alvim-Ferraz, M.C.M., Simões, M. (2011) Recent developments  
on carbon capture and storage: An overview, Chemical Engineering Research and  
Design, vol. 89, no.9, pp.1446-1460.

- Remus, R., Monsonet, M.A.A., Roudier, S., Sancho, L.D. (2013) Best Available Techniques (BAT) reference document for iron and steel production, Industrial Emissions Directive 2919/75/EU, Integrated Pollution Prevention and Control, European Commission.
- RITE (2012) 2010年時点のエネルギー原単位の推計(鉄鋼部門-転炉鋼).
- Rubin, E.S., Chao, C., Anand, B.R. (2007) Cost and performance of fossil fuel power plants, Energy Policy, vol. 35, no.9, pp.4444–4454.
- Schneider, L. (2009) Assessing the additionality of CDM projects: practical experiences and lessons learned, climate policy, vol.9, 242-254.
- 関谷毅史 (2005) 地球環境条約-生成・展開と国内実施 第10章 京都議定書, 西井正弘 編有斐閣, 220.
- 田中和明 (2009) 図解入門 よくわかる最新「鉄」の基本と仕組み—性質、技術、歴史、文化の基礎知識, 秀和システム.
- 上野貴弘・本部和彦(編著) (2013) 狙われる日本の環境技術, エネルギーフォーラム.
- USEPA (2012) Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the iron and steel industry. (<http://www.epa.gov/nsr/ghgdocs/ironsteel.pdf>)
- Worrell, E., Blinde, P., Neelis, M., Blomen, E., Masanet, E. (2010) Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry An ENERGY STAR(R) guide for energy and plant managers, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-Report.
- WSA (2013a) Steel Statistical Yearbook 2013.  
<http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/statistics-archive/yearbook-archive/Steel-Statistical-Yearbook-2013/document/Steel-Statistical-Yearbook-2012.pdf>
- WSA (2013b) Steel's contribution to a low carbon future, worldsteel position paper (<http://www.worldsteel.org/publications/position-papers/Steel-s-contribution-to-a-low-carbon-future.html>)
- Xu, C., Cang, D. (2010) A brief overview of low CO<sub>2</sub> emission technologies for iron and steel making, Journal of iron and steel research international. vol.17, no.3: pp.01-07.

## 第4章 中国とインドにおける鉄鋼需給に関連する温室効果ガス排出の中長期予測 —スクラップの利用可能性と限界—

### 4.1 中国とインドにおけるスクラップの活用による鉄鋼業の温室効果ガス排出削減の意義

鉄鋼は我々の生活基盤を支える重要な素材であり、土木構造物や建物、機械など様々な用途に用いられている。中国は1996年に日本を抜いて以降、世界最大の粗鋼生産国となっており、2010年現在、全世界の粗鋼生産量の45%を生産している。インドについても同年に全世界の粗鋼生産量の5%に達している(日本鉄鋼連盟, 1964-2012)。

第2章で述べたとおり、鉄鋼の製造過程においては鉄鉱石の還元剤として主に石炭を使うことから大量の温室効果ガスを排出する。鉄鋼生産は製造業の中でも最大の温室効果ガスの排出源となっている(World Steel Association (WSA), 2008; Yamaguchi, 2012)。

発展途上国、とりわけ新興経済国では鉄鋼の需要が今後も大きな増加を続けると考えられ、これに伴う温室効果ガスの排出増加が懸念されている。温室効果ガスの排出全体で見ても、今後先進国よりも途上国からの排出量が多くなると予測されており、また、中国・インド等の新興経済国は気候変動の国際交渉において、非先進国の中の大国として重要な位置を占めている。このため、これらの国の温室効果ガスの排出量は、地球の気候変動に与える物理化学的な影響という意味でも、気候変動に対応するための交渉をまとめる政治的な影響という意味でも極めて重要である。

鉄鋼の生産に伴う温室効果ガスの排出削減対策には様々な技術があるが、その一つとしてスクラップの活用がある。第2章、第3章で述べたとおり、スクラップを活用した電炉による製鋼の場合、鉄鉱石の還元に必要なエネルギーを省略できることから、平均的な転炉鋼と比較して温室効果ガスの排出は4分の1程度で済むとされている(WSA, 2008)。しかしながらスクラップの発生時期は使用する製品の使用年数に依存し、また、製品の使用年数は用途によって様々であることから、スクラップの発生量、すなわち利用可能量は、いつどれだけの鋼材がどの用途に投入されたかに依存する。そのため、鉄鋼の生産にあたり排出される温室効果ガスの排出を抑制するという視点から最適なスクラップの利用を検討するためには、用途ごとの鉄鋼需要推計、スクラップ量とその排出時期、鉄鋼生産に起因する温室効果ガスの排出を関連付けた検証が重要である。

そこで本研究では、Pauliuk ら(2013)をはじめ先行する研究成果をもとに、中国とインドを対象とし、先進国での一人あたりの鉄鋼蓄積量と主要な用途の変化の実績から鉄鋼の中長期的な需要推計を行った。また、鉄鋼の二次原料であるスクラップの利用可能性と、鉄鋼製造プロセスと原料の違い、国別の製鉄のエネルギー消費効率も参照した温室効果ガス排出原単位を用いた推計によって、スクラップの活用による温室効果ガスの排出抑制がどの程度効果的かを分析した。

なお、分析にあたっては、まず2000年に公表された気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)の排出シナリオに関する特別レポート(Special Report on Emission Scenarios, SRES)によるシナリオ(後述)に基づくGDPと人口の将来推計を用い、先進国の過去のデータをもとに一人あたり鉄鋼のストック量は一人あたりGDPと直線で回帰するとみなして推計を行った。次に、より直近の状況を反映し適切な推計とするため、IPCCの第5次



評価報告書の検討に当たり用いられた、国際応用システム分析研究所 (International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)) による共通社会経済シナリオ (Shared Socioeconomic Pathways (SSP)) による GDP と人口の将来推計を用い、一人あたりストック量と一人あたり GDP の回帰手法等を変更して推計を実施した。先に実施した推計で用いた手法では、特に中国における 2000 年以降の急激な経済発展が反映できておらず大幅に過小推計となるおそれがあった。また、中国・インドの一人あたり鉄鋼のストック量の推計を先進国の過去のデータを用いて一人あたり GDP と直線回帰とみなして推計したが、この手法ではある程度社会に鉄鋼が蓄積された後には需要の伸びが落ち着くという過去の先進国の状況を反映できておらず、特に中国では既にある程度鉄鋼が蓄積されていることから、将来の需要推計として過大となっているおそれがあった。より詳細な推計ではこれらの問題に対応するものである。

以降、先に実施した推計については「推計 1」、より詳細な推計については「推計 2」と表記して分けて記載する。断りがない部分は両方に共通の事項である。

また、第 4 章の 4.5 以降はより詳細な推計の結果のみについて記載した。

## 4. 2 鉄鋼需要の中長期的な予測

### 4. 2. 1 推計手法

Müllerら (2006) 及び Pauliukら (2012, 2013) の研究成果を踏まえ、以下の式(1)~(5)による物質ストック・フローモデルを構築し、次項で述べる人口とGDPの将来予測結果と、先進国における一人あたりの鉄鋼蓄積量と一人あたりのGDPの回帰式(式9-1,9-2, 4.2.2に詳述)から、鉄鋼の需要推計を行った。ここでSはストックであり、 $\Delta S(t)$ はt年1年間に蓄積される量とした。F<sub>in</sub>は流入するフローとして製造量と輸入量の和から、F<sub>out</sub>は流出するフローとして輸出量と老廃スクラップ(O)の和から求められる。また、ここでは各年の統計値を使用することから、t年とは該当する年の期末を示す。老廃スクラップについては、発生してから直ちに回収ができるわけではないので、ここでは1年前に発生したものを考慮する形とした。Cは見かけの消費量であり、製造量と輸入量の和から輸出量を差し引いて求められる。なお、本来製品の輸入量・輸出量も考慮すべきであるが、中国・インドについては過去のデータ把握が困難であることから、ここでは取り上げないこととした。

見かけの消費量には、鉄鋼製品に加えて鉄鋼を利用した最終製品も含む。推計のフローを図4-1に示す。

$$C(t) = \Delta S(t) + O(t-1) \quad (1)$$

$$S(\tau) = S(\tau_0 - 1) + \sum_{k=\tau_0}^{\tau} \Delta S(k) \quad (2)$$

$$\Delta S(t) = F_{in} - F_{out} \quad (3)$$

$$O(t) = \int_{t_0}^t L_s(t, t') \cdot P_{New}(t') \cdot dt' \quad (4)$$

$$L_s(t, t') = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-t'-\tau_s)^2}{2\sigma_s^2}} \quad (5)$$

C: 見かけの消費量

O: 老廃スクラップ発生量(時間t'に使用開始された製品が時間tに使用されている確率)

$\Delta S(t)$ : t年における蓄積変化量

$S(\tau)$ : t年期末時点 $\tau$ におけるストック量

$\tau_0-1$ : 観測開始年の前年末時点

$F_{in}$ : 流入するフロー, 製造量と輸入量の和

$F_{out}$ : 流出するフロー, 輸出量と老廃スクラップ(O)の和

$L_s$ : 用途カテゴリー毎の製品寿命分布

$P_{new}$ : 用途カテゴリー毎の新たに投入された製品量, 見かけの消費量に用途毎の鉄鋼消費割合を乗じる

$\tau_s$ : 平均寿命,  $\sigma_s$ : 平均寿命の標準偏差

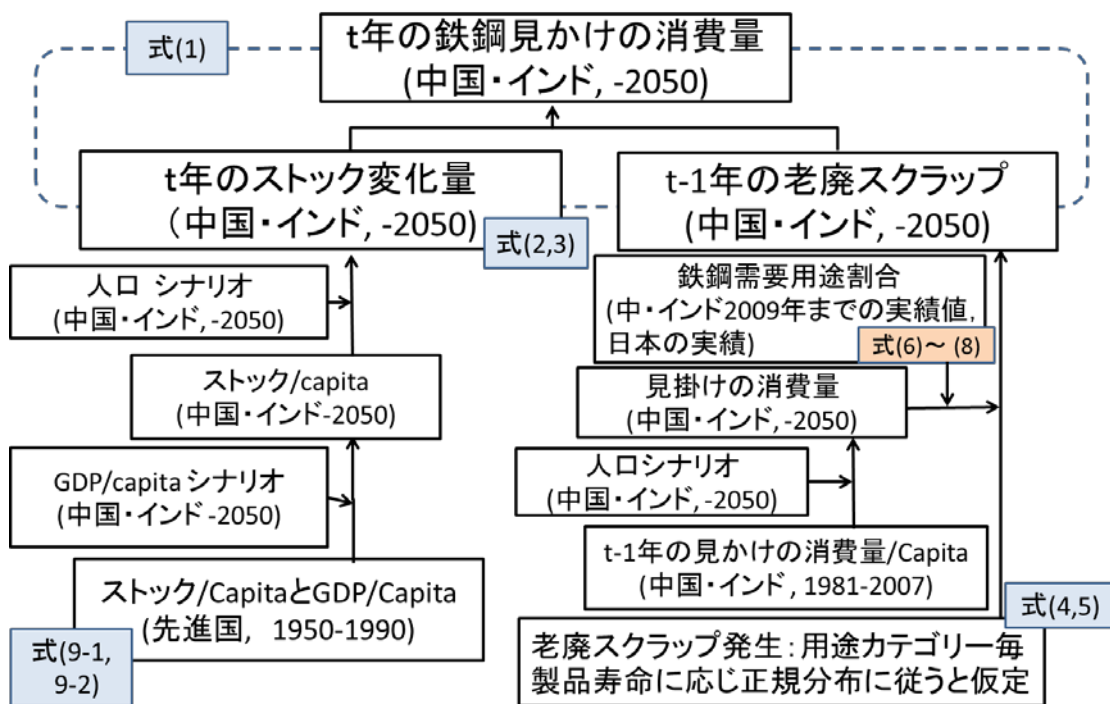


図4-1 ストック, スクラップ, 消費量の推計フロー

スクラップには、鉄鋼・鋳物工場で発生する自家スクラップ、製造業の生産段階で発生する加工スクラップと鉄鋼製品が社会に蓄積され利用された後に廃棄されて生ずる老廃スクラップに大別される。自家スクラップと加工スクラップ(新スクラップとも呼ばれる)は混合物も少なく含有成分も把握

が容易であるためほぼ100%が利用されているが(日本鉄鋼連盟, 1964-2012; 金属系材料研究開発センター, 2004), 老廃スクラップに関しては, 不純物の選別除去等にかかるため, その利用は市場価格等により流動的である. 本来, これらのスクラップの違いを考慮した推計・考察が必要であるが, 現状では, 日本においても比較的経路が明確な加工スクラップであっても循環ルートも発生量も把握されていない(中島ら, 2005). 中国とインドを対象にした場合には, さらに推計は困難であるため, ここでは既に循環利用が十分なされている自家スクラップ・加工スクラップは除き, 老廃スクラップを「スクラップ」としてとらえ, その利用可能性を検証することとした.

老廃スクラップ発生量(O)の推計は式(4)を用いて行った. ここで $L_s$ は用途カテゴリ毎の製品寿命分布(時間 $t'$ に使用開始された製品が時間 $t$ において使用されている確率)である. また,  $P_{new}$ は用途カテゴリ毎の新たに投入された製品の量である. 推計においては鉄鋼の用途として建築・土木(建設), 交通, 機械, その他の4つを対象とした. すべての用途において, 製品寿命分布は正規分布に従うと仮定した. 式(5)において,  $\tau_s$ は平均寿命であり,  $\sigma_s$ は標準偏差である. また, それぞれの用途の使用年数については, WangとHashimoto(2012)の用いた値を用い,  $\tau_s \pm \sigma_s$ として建築・土木では $50 \pm 15$ 年, 交通では $20 \pm 7$ 年, 機械では $30 \pm 10$ 年, その他では $15 \pm 5$ 年を用いた.

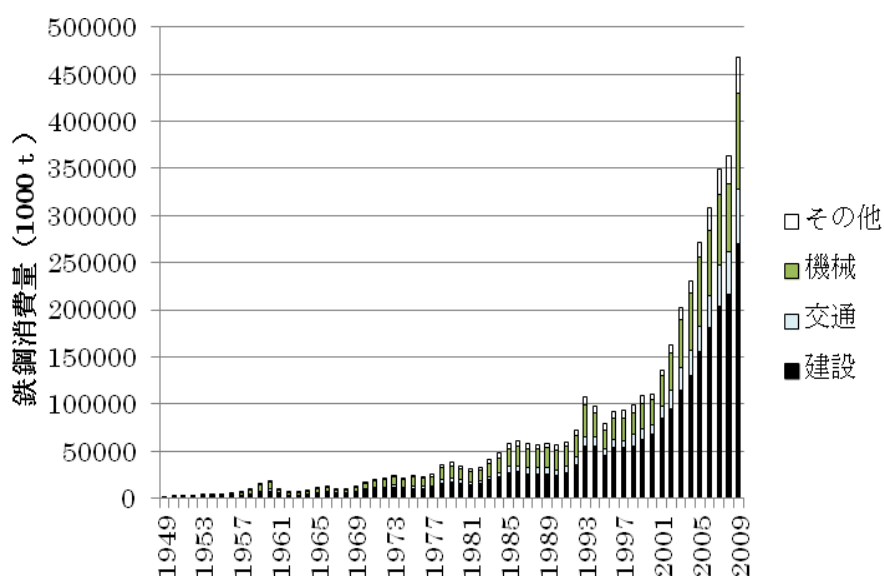


図4-2 中国の用途別鉄鋼消費量  
(Pauliukら(2012)の参考資料をもとに図化)

用途カテゴリ毎の新たに投入された製品の量 $P_{new}$ は見かけの消費量に用途毎の鉄鋼消費割合を乗じて求めた. 2010年以降のスクラップ量を求めるため, それぞれの用途での鉄鋼の消費割合は, 中国についてはPauliukら(2012)の研究から1949年から2009年の用途毎の見かけの消費量の値を用い(図4-2), それ以降は, 日本における一人あたりGDPと用途別鉄鋼割合の変化率と同様に変化すると仮定し(図4-3), 日本における1965年から2010年までの建築・土木, 交通, 機械そ

それぞれの用途への鉄鋼の投入量を用い(日本鉄鋼連盟, 1967-2012), 建築・土木については式(6), 交通については式(7), 機械については式(8)を用い, その他については前述の3つの用途の割合との差分として推計を行った. インドについては, インド国家経済調査委員会(1960)による1960年の用途別需要量推計値と, 2012年のSpark Steel & Economy Research Center(SSERC)による2008年と2012年の消費実績及び2020年時点の需要推計を用いて1950年から2020年の間は線形で推移すると仮定し(図4-4), 2020年以降は, 中国と同様に日本における一人あたりGDPと用途別鉄鋼消費量の変化率を用いて用途割合が変化すると仮定して推計を行った(式(6)~(8)).

$$U_{const} = -1 \cdot 10^{-9} (G(t))^2 + 2 \cdot 10^{-5} G(t) + 0.35 \quad (6)$$

$$U_{trans} = 8 \cdot 10^{-10} (G(t))^2 - 2 \cdot 10^{-5} G(t) + 0.28 \quad (7)$$

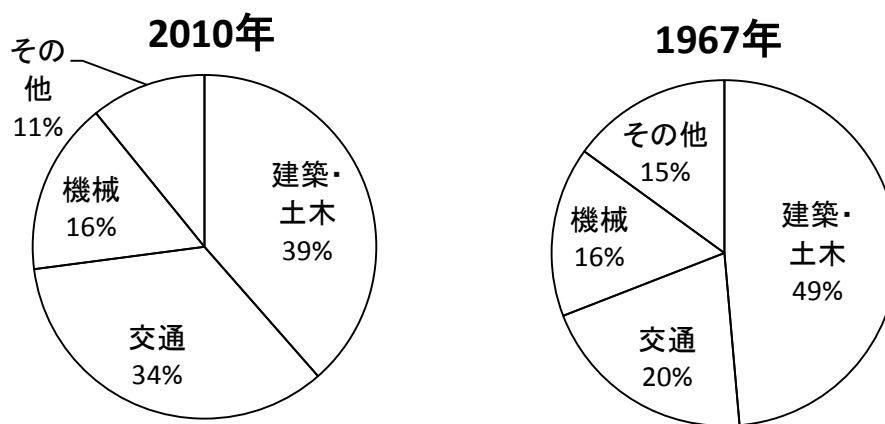
$$U_{machi} = 2 \cdot 10^{-7} G(t) + 0.14 \quad (8)$$

$U_{const}$ :建設用途での鉄鋼の消費割合

$U_{trans}$ :交信用途での鉄鋼の消費割合

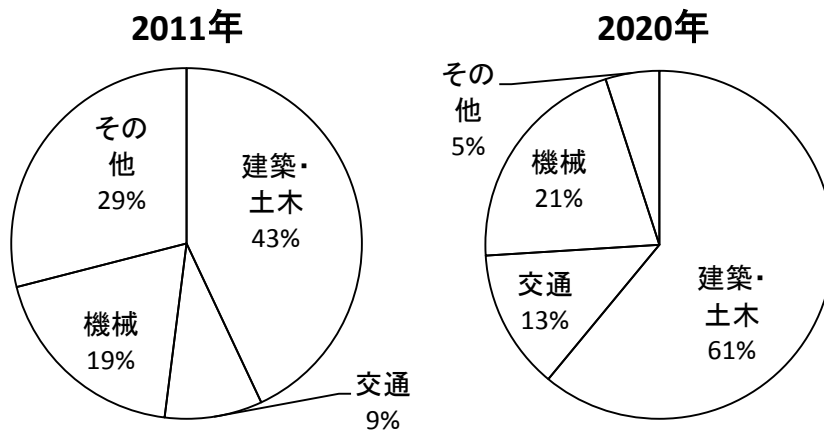
$U_{machi}$ :機械用途での鉄鋼の消費割合

$G(t)$ :一人あたりGDP



1967年の消費量は約8百万t, 2010年の消費量は約58百万t

図4-3 日本の用途別鉄鋼消費量



2011年の消費量は約8百万t, 2020年の消費量は約155百万t

図4-4 インドの用途別鉄鋼消費量推計値

#### 4. 2. 2 一人当たりストックの推計

##### (1) 推計1

先進国における一人あたりの鉄鋼蓄積量と一人あたりのGDPの回帰式(式9-1)から、鉄鋼の需要推計を行った。先進国での一人あたりGDPと鉄鋼蓄積量の関係は図4-5のとおりである。ここでは、現状の中国での急速なストックの増加を踏まえ、先進国の中でもストックの増加率の高いドイツの回帰式を用いた。

$$S / Capita(t) = 0.0006 \cdot GDP / Capita(t) + 0.21 \quad (9-1)$$

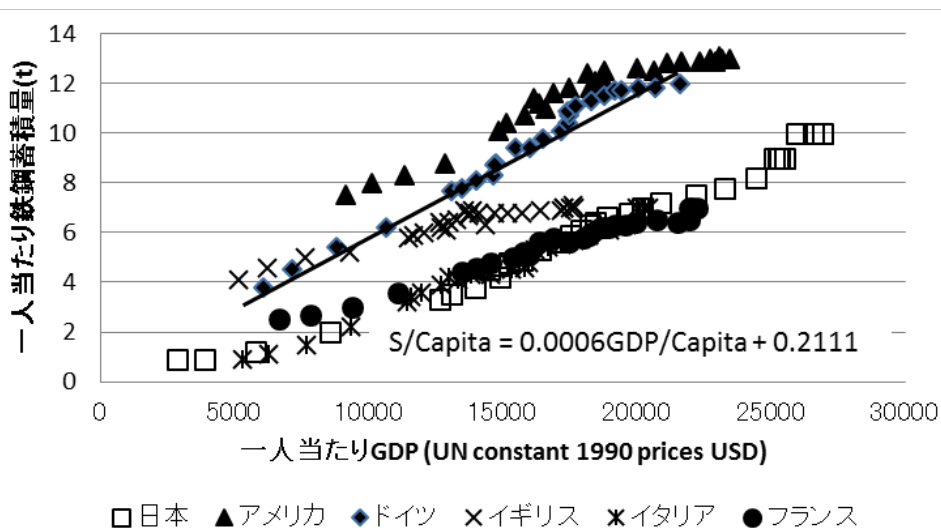


図4-5 先進国のGDPと鉄鋼蓄積量

## (2) 推計2

先進国における一人あたりの鉄鋼蓄積量と一人あたりのGDPの回帰式として、式(9-2)を用い、**図4-6**に示すとおり、主要先進国と中国の一人あたりGDPと鉄鋼蓄積量の関係から、ゴンペルツ曲線による回帰を用いた。なお、ロジスティック曲線を用いた推計も検討したが、より誤差が小さくなることからゴンペルツ曲線をここでは選択した。

$$S/Capita(t) = -S_{min} - (S_{min} - S_{max}) * (EXP(-EXP(-a * (GDP/Capita(t) - b)))) \quad (9-2)$$

S: ストック量

S<sub>min</sub>: ストック下限の収束値

S<sub>max</sub>: ストック上限の収束値(ストック飽和量)

a, b: 係数

S<sub>min</sub>, a, bについては、主要先進国(日本, アメリカ, ドイツ, イギリス, フランス)と中国について、一人あたりGDPは IIASA<sup>1</sup>による2005年USD換算(PPP)を用い、一人あたりストックのデータについては主要先進国については日本鉄鋼連盟(1964-1993(日本については1997まで))による値を、中国についてはPauliukら(2012)による値を用い、推計値の誤差が最小二乗法により最も小さくなる値をマイクロソフト社のExcelのソルバーを用いて求めた。また、S<sub>max</sub>についてはPauliukら(2013)による飽和レベルである一人あたり13±2tを参考としてその中で最も中国に関する近年のストック量の再現がよかった一人あたり15tとした。本推計において使用した値を表4-1に示す。

---

<sup>1</sup> IIASA の SSP データベース(ver.0.93)の 2013 年 3 月の修正を反映したのものを用いた。また、人口については IIASAWic, GDP については OECDEnv-growth を用いた。  
<https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>

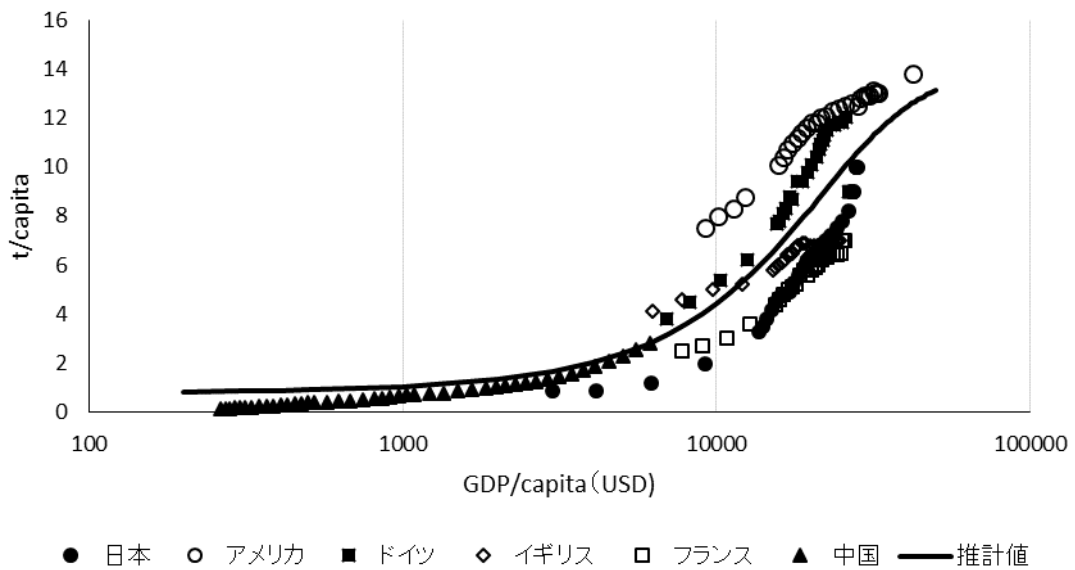


図 4-6 各国のGDP/Capita(2005USD)とストック/Capita

表 4-1 推計に用いた値

$S_{min}$	15
$S_{max}$	0.64
a	0.000080
b	-15000

#### 4. 2. 3 人口とGDPの推計

##### (1)推計1

人口・GDPの推計についてはSRES, 国別のデータについては, [http://sres.ciesin.org/final\\_data.html](http://sres.ciesin.org/final_data.html)に公開されているものを使用)の4つのシナリオ(A1, A2, B1, B2)による結果を用いた(Nakicenovic and Swart ed., 2000) (図4-7). 各シナリオの概要は表4-2のとおりである(森田(2001)より抜粋).

表4-2 SRES各シナリオ概要

	基調をなすテーマ	人口	経済成長
シナリオ A1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地域間の収斂, 能力の強化, 文化および社会の相互作用の拡大, 地域間格差の減少によるひとり当たり国民所得の増大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・21 世紀半ばでピークに達した後に減少(人口の増加は抑制される)</li> <li>・2050 年に 87 億人に達した後減少し, 2100 年の時点で 71億人(IIASA の人口予測低位推計に基づく)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高度経済成長が続き, 2100年までの年平均経済成長率は 2.9%</li> <li>・GDP の総計が 2100 年の時点で550 兆US ドル</li> </ul>
シナリオ A2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地域主義および地域の独自性の保持(地域経済圏の強化:資源の域内依存, 国際的相互依存が進展せず)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・出生パターン地域間収斂は非常に緩やかであるため, 世界人口は増加を続ける</li> <li>・2100 年の時点で 150 億人(IIASA 人口予測高位推計に基づく)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済発展は地域指向であり, ひとり当たり国民所得の増加は他のシナリオに比較して散発的かつ緩慢である</li> <li>・GDP の総計が 2100 年の時点で250 兆US ドル</li> </ul>
シナリオ B1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済, 社会, 環境持続性に対しては地球的解決に重点がおかれ, これには公平性の改善は含まれるが, 追加的な温暖化対策は含まれない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・21 世紀半ばでピークに達した後に減少(A1 シナリオと同様, 人口の増加は抑制される)</li> <li>・2050 年に 87 億人に達した後減少し, 2100 年の時点で 71億人(IIASA の人口予測低位推計に基づく)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済構造はサービス・情報経済へと急速に変化(脱物質経済)</li> <li>・GDP の総計が 2100 年の時点で350 兆US ドル</li> </ul>
シナリオ B2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経済, 社会, 環境持続性に対しては地域的解決に重点がおかれる. 本シナリオも環境保全や社会的公平性の実現を指向するものであるが, 地域レベルでの解決に重点がおかれる</li> <li>・経済発展は中間的なレベルにとどまる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・A2 シナリオよりは緩やかに増加を続ける</li> <li>・2100 年の時点で 104 億人(1998 年国連長期人口予測中位推計)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GDP の総計が 2100 年の時点で 250 兆 US ドル</li> </ul>



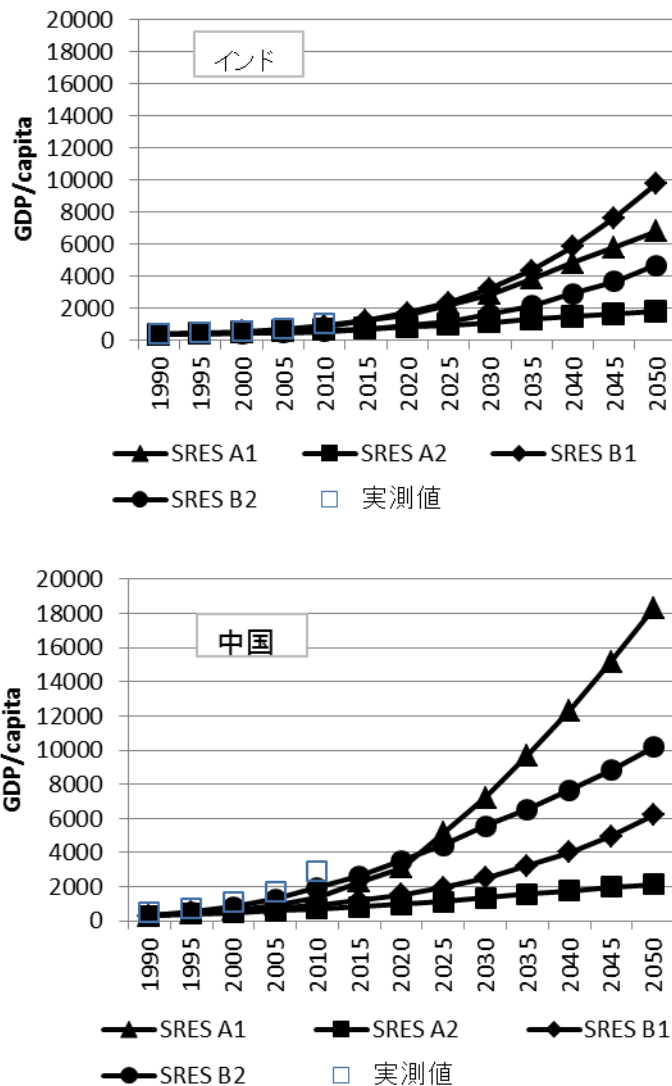


図4-7 SRESレポートによるGDPと人口の推計

## (2)推計2

(1)において用いたSRESによる人口・GDPの推計値は2000年に公表されたものであり、その後の中国・インドの急激な経済成長を反映できていないという欠点がある。その結果、鉄鋼の需要が過小推計となることに対応するため、SSPによる人口とGDPの推計を用いた。使用した各国の人口、GDPの値は、IIASAのSSPデータベース(ver0.93)を用いた<sup>1)</sup>。また、このデータベースによる推計値は5年ごとの値となっているが、スプライン補間により各年の値を求めた。なお、補間にあたっては、対象とする5年間の5年前から5年後までの15年間、4点のデータを使用した。

SSPによる中国・インドの一人あたりGDPの推計結果を図4-8に示す。SSPでは、5つの異なる社会経済シナリオが設定されており、各シナリオの概要は表4-3のとおりである(藤森(2011)より抜粋)。

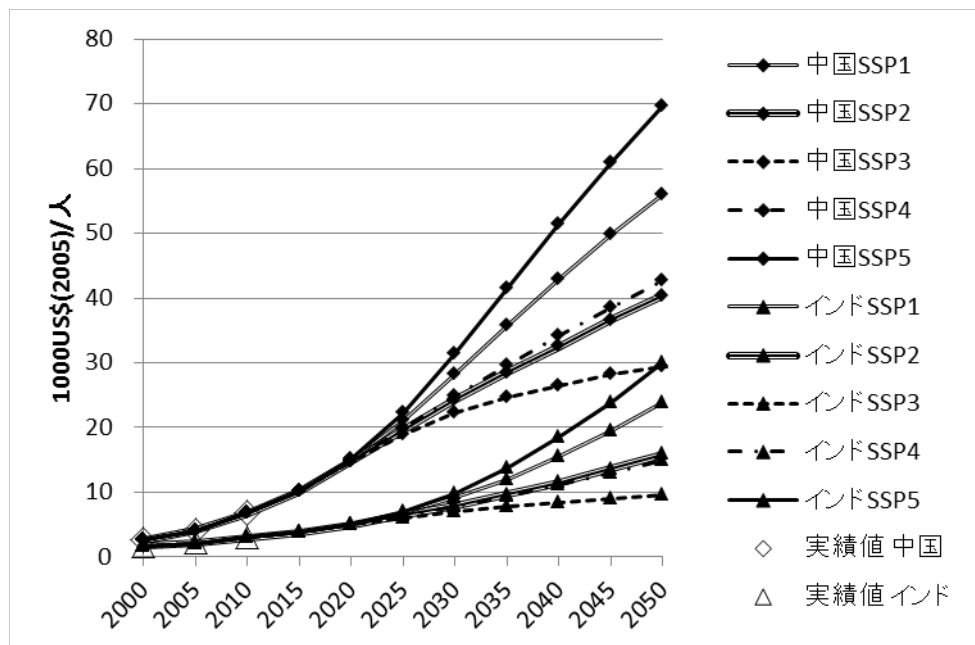


図4-8 SSPにおけるGDP/Capitaの推計

表4-3 SSP各シナリオ概要

シナリオ名称	概要
SSP1	教育水準、ガバナンスともに高水準であり、国際的に協調し、その結果技術進歩も高い。教育水準の向上に伴い出生率は下がり、人口は低位で推移する。高い教育水準は適応策を容易にするとともに、高い技術水準が GHG 排出量を低下させ、緩和策も比較的容易に行える。
SSP2	SSP1 と SSP3 の間に位置する中庸的な世界
SSP3	教育水準、ガバナンスともに低水準であり、途上国と先進国の格差は拡大する。技術水準は低く、国際社会は分断されている。出生率は下がらず人口は 21 世紀を通して増加する。適応策は困難であり、かつGHG 排出量も増大し、緩和策の導入は困難となる。
SSP4	国際的、各国内で社会的格差が開く分断された世界。先進国は一部の高水準教育を受けたエリートに支配される。技術進歩は高く、エネルギー効率は改善するため緩和策のチャレンジは小さくなる。一方、途上国では貧困は改善されず、温暖化影響に対して脆弱な地域に住む貧困層は経済成長の恩恵から取り残される。
SSP5	途上国、先進国ともに高度に技術発展、経済成長する。人口は低位に推移する。しかし、高い割引率により非化石系エネルギーの導入は進まず、エネルギー源として化石燃料に強く依存する。途上国の教育水準は高いため適応策は容易となる。

#### 4. 2. 4 推計結果

##### (1) 推計1

推計の結果, SRES各シナリオでの鉄鋼の老廃スクラップの変化を図4-9に示す.

図4-10に, SRESに基づく需要推計により求められた一人当たりGDPと見かけの消費量に対する老廃スクラップの割合の関係を示す.

老廃スクラップは全て回収されるわけではなく, 特に建築・土木では土木構造物の基礎など地盤と一体となる形で使用されたもの等寿命がきても実際には回収されないものも存在するが, ここでは, 回収時の歩留まりを考慮せず老廃スクラップ発生量として扱うこととした. また, 本来, 中古製品の輸出入についても考慮すべきであるが, 定量的な捕捉が困難であることからここではとりあげていない. 経済発展の度合いの影響をみるため, 図 4-10 をもとに, 中国において 2050 年時点での一人あたり GDP が最大になる A1 と最小になる A2 シナリオでの分析結果を比較してみると, 2050 年について中国では老廃スクラップの割合は A2 では 72%, A1 では 47%となり, インドでは, A2 で 52%, A1 では 42%であった. また, 2000 年から 2050 年での累積では, 鉄鋼消費量に対する老廃スクラップの割合は中国は 34~66%, インドでは 28~40%であり, 両国ともに急激な経済成長がおこる A1 シナリオよりも経済成長が緩やかな A2 シナリオの方が消費量に対する老廃スクラップの割合が高くなる結果が得られた. この結果より, 経済成長がより緩やかな方がその国で発生するスクラップの活用可能性が高まるといえる.

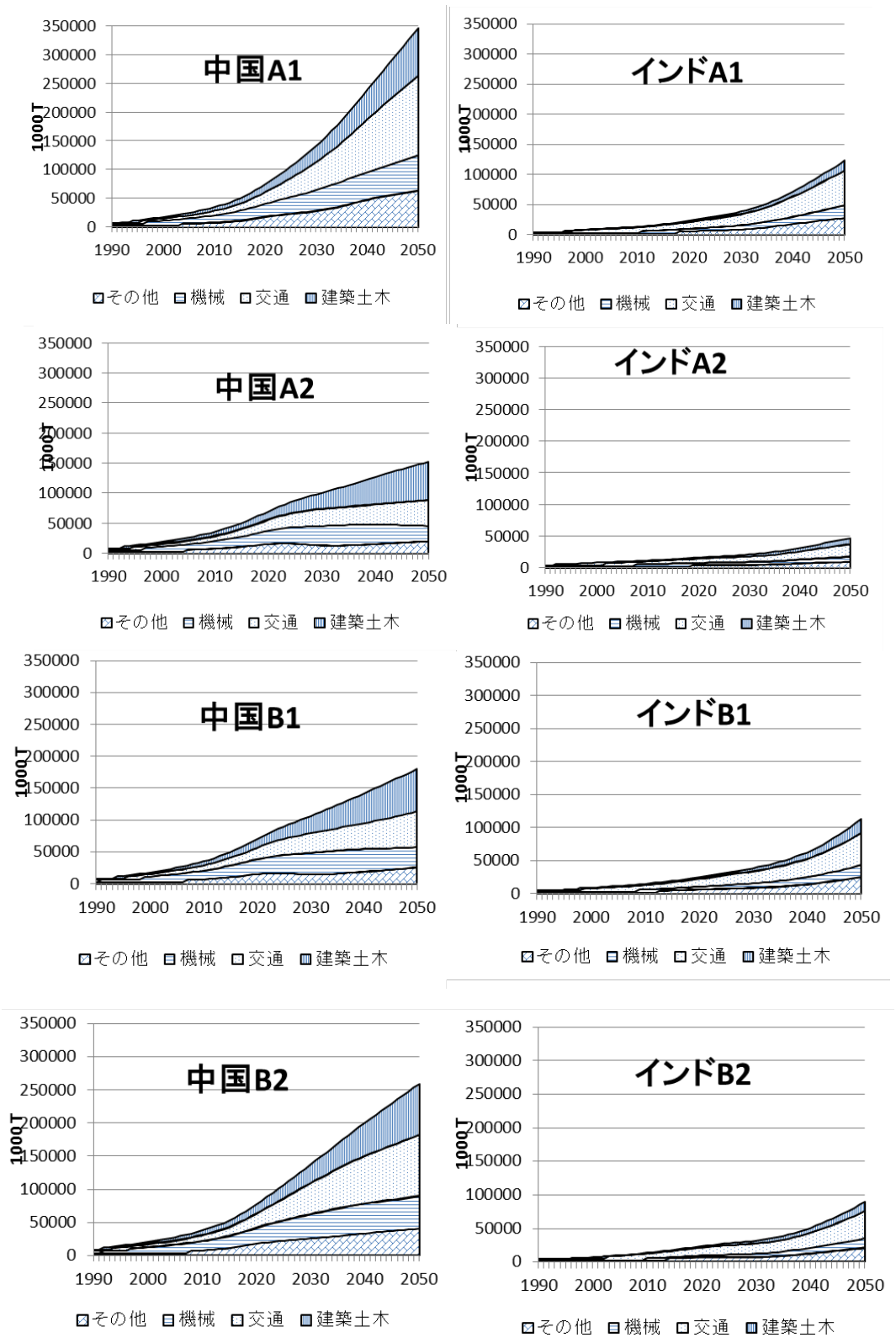


図4-9 各シナリオの老廃スクラップの排出量推計結果(SRES)

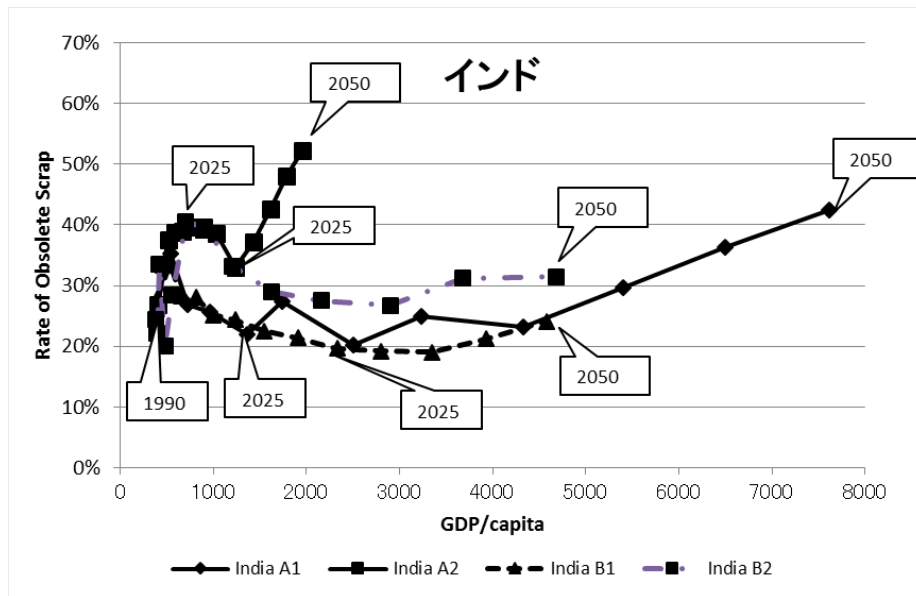
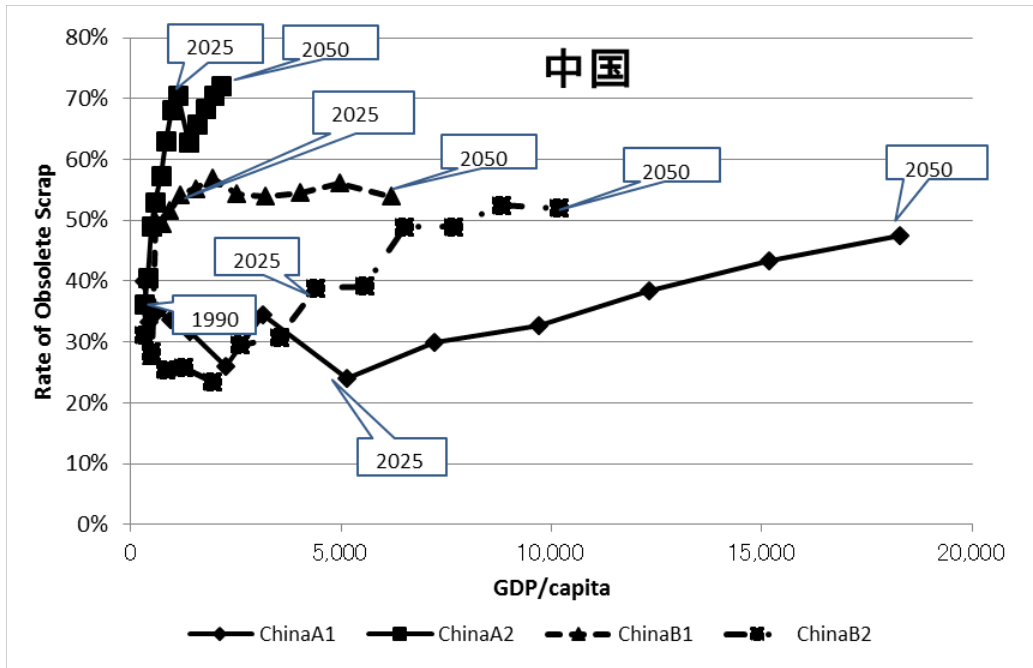


図4-10 一人当たりGDPと見かけの消費量に占める老廃スクラップ割合(SRES)

(2)推計2

SSP各シナリオに基づく、各シナリオの鉄鋼の見かけの消費量と老廃スクラップの変化を図4-11に、5つのシナリオの代表として、中庸的なものとして設定されたSSP2シナリオでの用途毎の老廃スクラップの変化を図4-12に、SSPに基づく需要推計により求められた一人あたりGDPと見かけの消費量に対する老廃スクラップの割合の関係を図4-13に示す。

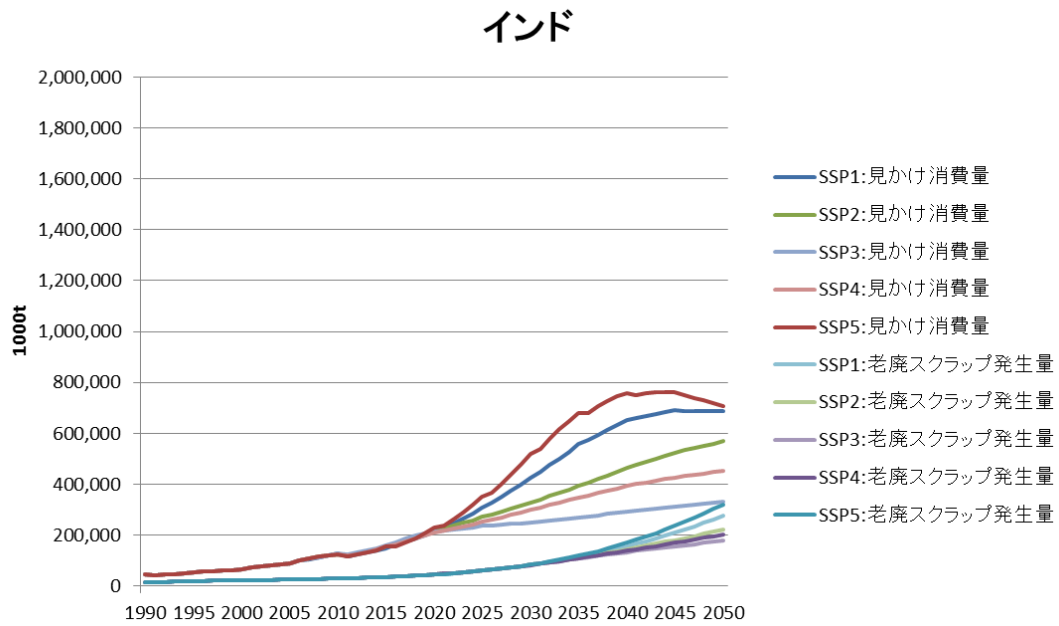
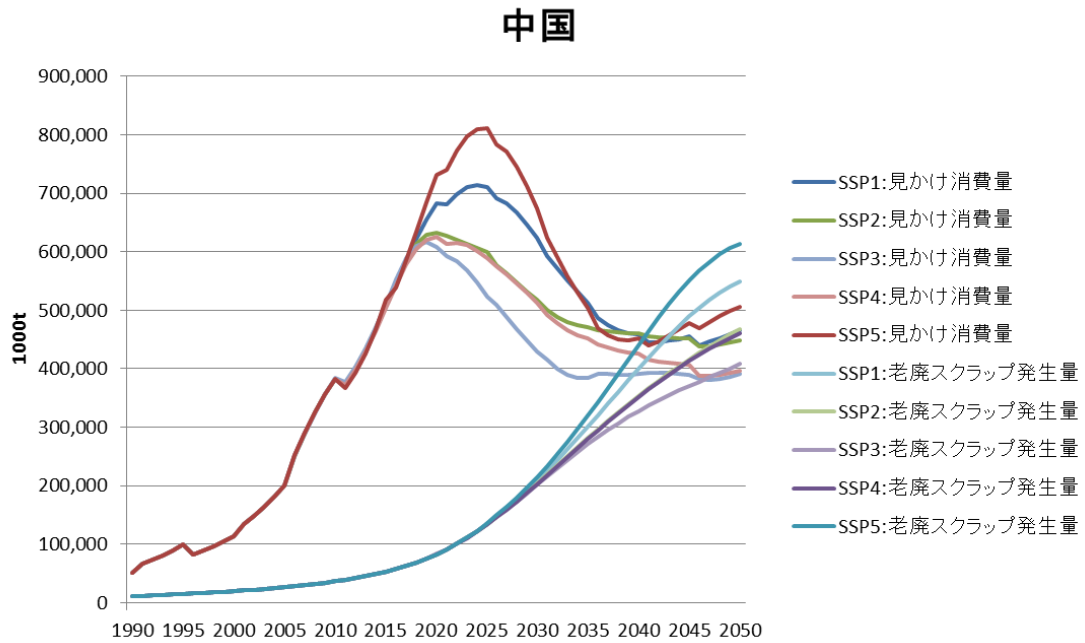


図4-11 SSP各シナリオの見かけの消費量と老廃スクラップ割合

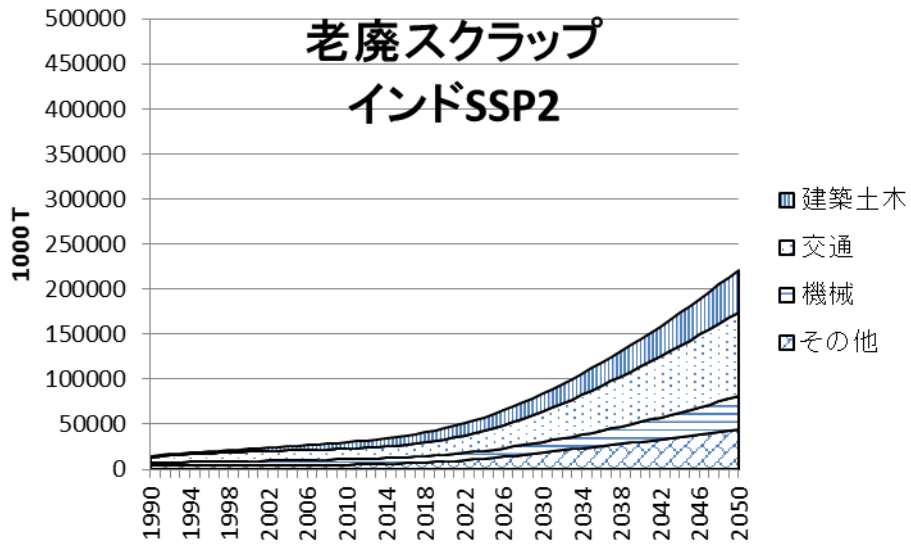
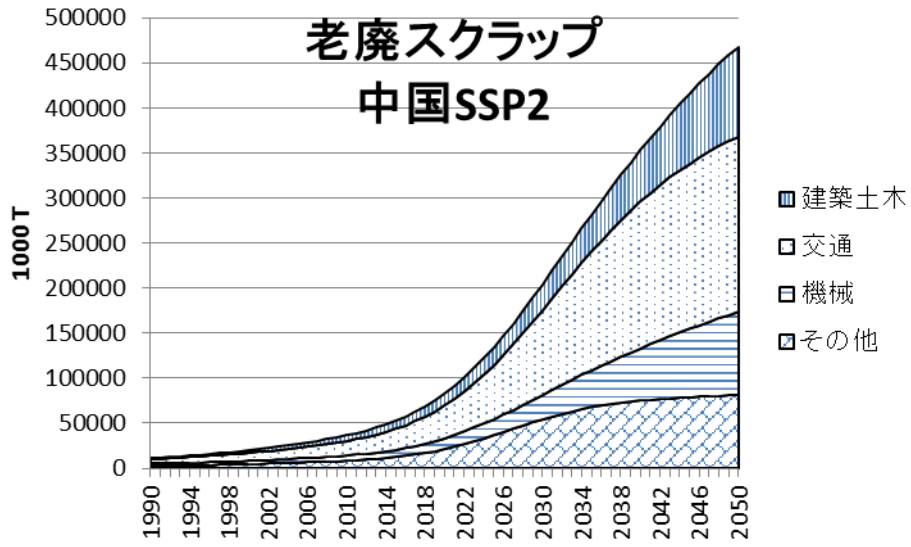


図4-12 SSP2シナリオの老廃スクラップの排出量推計結果(SSP)

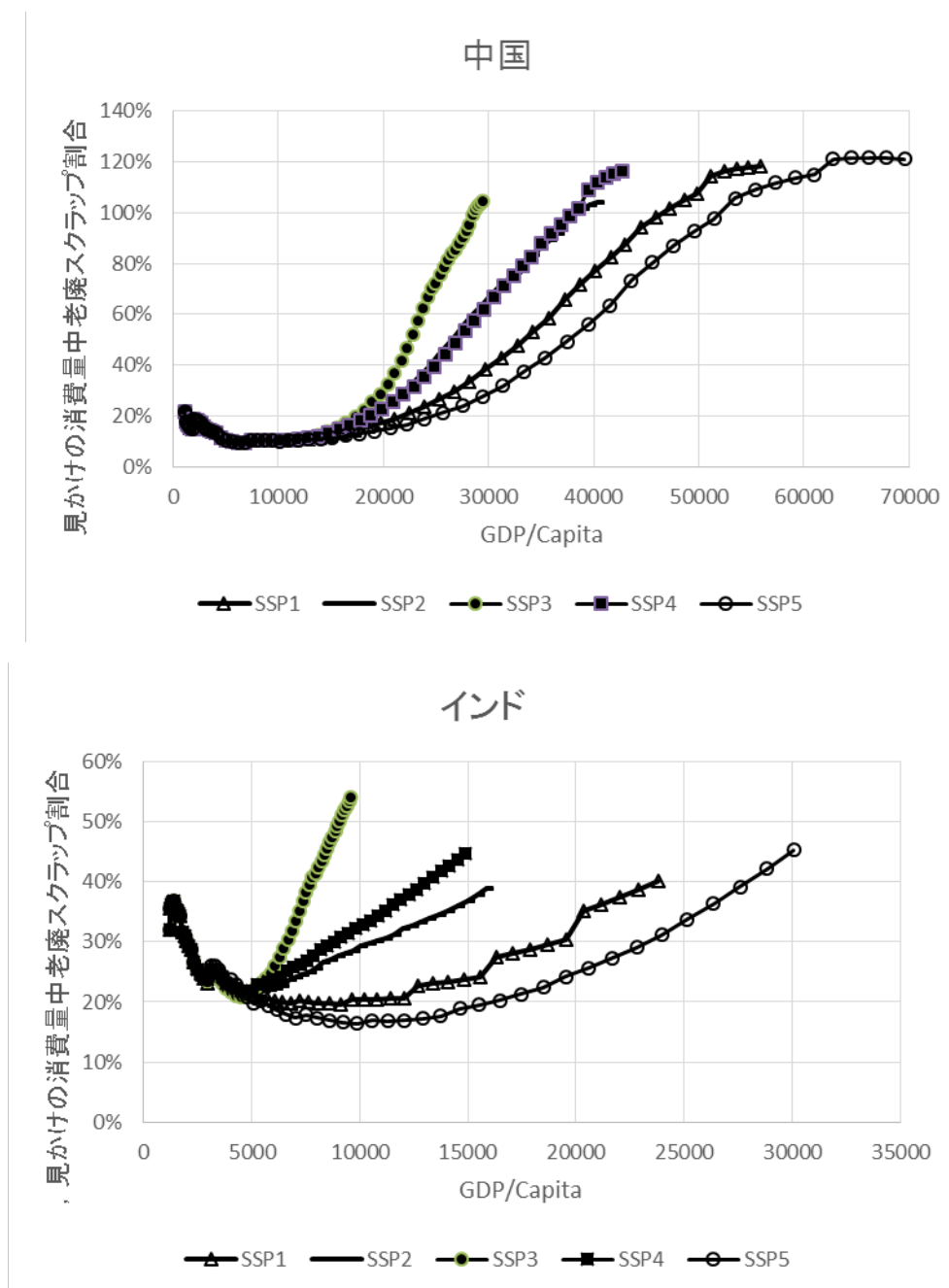


図4-13 SSPシナリオでの一人当たりGDPと見かけの消費量に占める老廃スクラップ割合

図 4-11 より、中国においては見かけの消費量のピークは 2019 年から 2025 年程度となり、インドにおいては 2044・2045 年あたりにピークを迎えるケースと 2050 年までは増加し続けるケースがみられた。見かけの消費量がピークを越えた後、インドより早く見かけの消費量が増加する結果となった中国では、2050 年より前に各シナリオにおいて老廃スクラップの量が見かけの消費量を超える結果となった。

最も多く鉄鋼が用いられたのは建築・土木(建設)であるが、用途毎の老廃スクラップの排出量を



みた図 4-12 より、2050 年の段階では建設用途の老廃スクラップの排出は限定的となった。これは建設用途では製品の使用年数が長いためこの期間の中では排出が限定的であったことを示す。

また、図 4-13 により、SSP の各シナリオにおいて見かけの消費量における老廃スクラップの割合が一人あたり GDP の伸びとともにどのように変化するかを比較すると、両国・各シナリオともに、経済成長に伴い一度老廃スクラップの割合は減少するが、その後再び増加に移る。その際、一人あたり GDP が最も低い段階で老廃スクラップの量が増加しはじめるのは SSP3 の場合となり、逆に老廃スクラップの増加が最も一人あたり GDP が高い段階で始まるのは SSP5 の場合となった。SSP3 は、2050 年時点で最も一人あたり GDP が低く推計されているシナリオであり、逆に SSP5 は最も一人あたり GDP が高く推計されているシナリオである。この結果より、経済発展の度合いが緩やかである方が、見かけの消費量の絶対量も抑えられ、さらに見かけの消費量に対する老廃スクラップ発生量の割合も高く、よりスクラップ活用の可能性があがるといえる。

#### 4. 2. 5 製品寿命等の感度分析

老廃スクラップ発生量の推計は、各用途での製品の寿命を考慮し、上述の式(5)を用いて行ったが、平均寿命 $\tau_s$ と、平均寿命の標準偏差 $\sigma_s$ が変動した場合について、どの程度結果に差異がでるかを検証した。それぞれの用途の使用年数については、上述のとおり平均寿命 $\tau_s$ は建築・土木で50年、交通では20年、機械では30年、その他では15年とし、標準偏差 $\sigma_s$ はそれぞれの平均寿命の30%を用いたが、まず標準偏差 $\sigma_s$ について表4-4のとおり、平均寿命の20%とした場合、40%とした場合を推計し、どの程度差が出るかを検証した。

中国・インドにおいてSSP2を用いた推計結果を図4-14に示す。標準偏差を変更した場合の差異は、中国・インドの見かけの消費量と老廃スクラップ発生量について基本ケースと比較すると、0.1%から4.7%の範囲となった。

表4-4 検証に使用した標準偏差

	交通	機械	建築	単位:年 製品
基本ケース(30%)	7	10	15	5
40%	8	12	20	6
20%	4	6	10	3

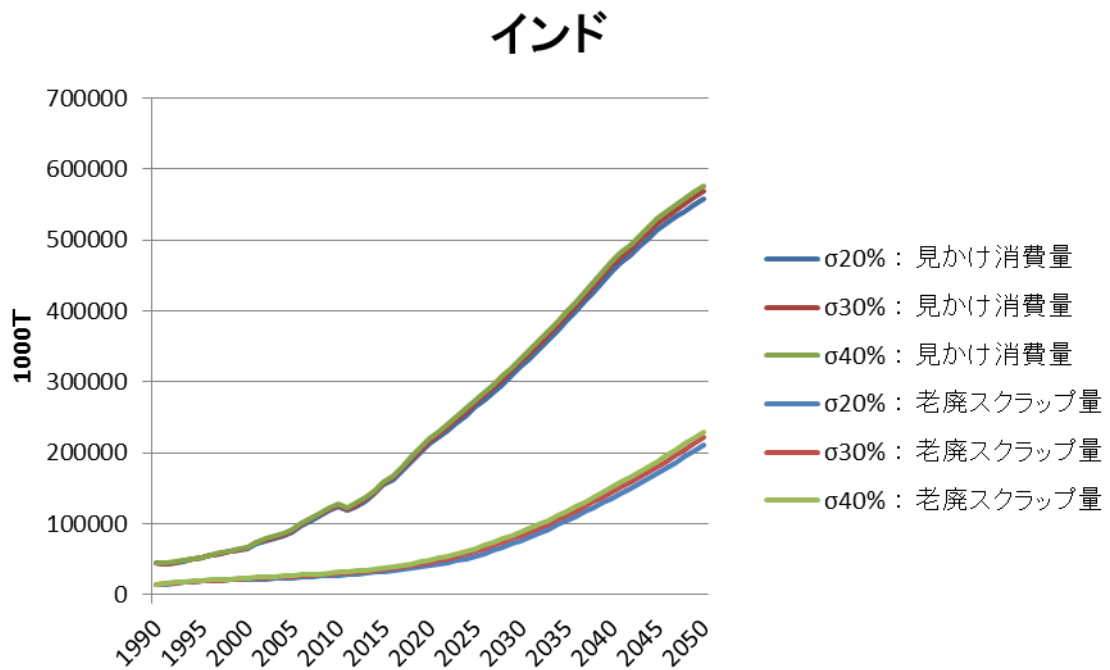
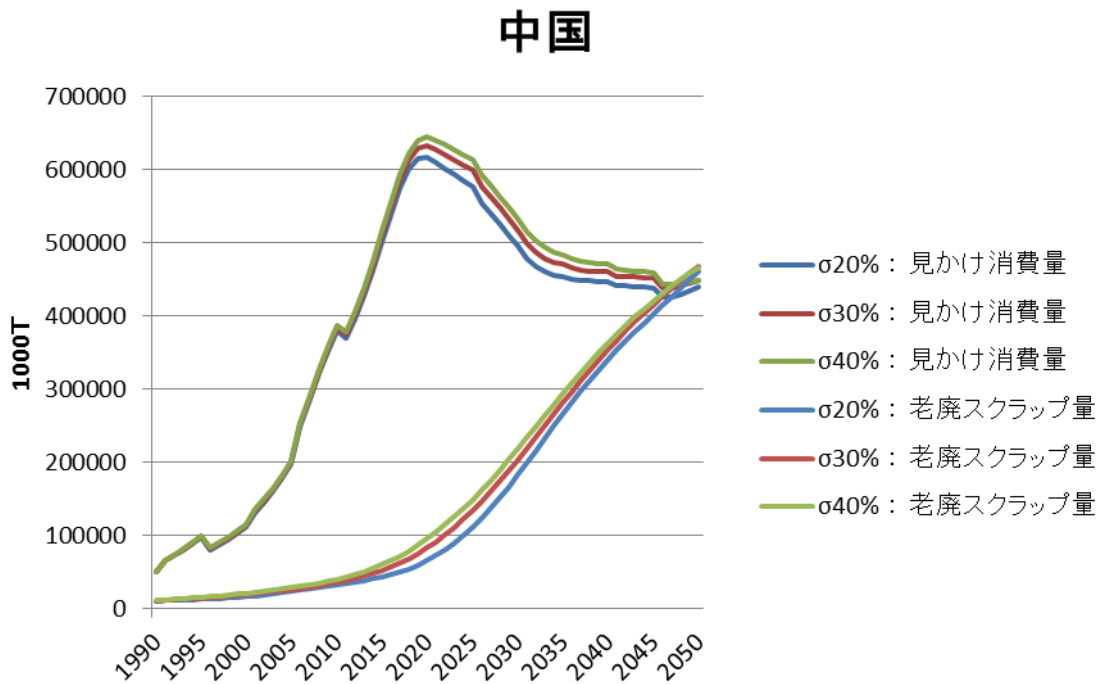


図4-14 平均寿命の標準偏差の差による見かけの消費量・老廃スクラップ発生量の推計結果への影響 (SSP2)

次に、平均寿命について、表4-5のとおり、基本ケースと比較し、全て30%長い場合(長寿命)と、全て30%短い事例(短寿命)について推計を行い、どの程度差がでるかを検証した

表4-5 検証に使用した平均寿命

	交通	機械	建築	製品	単位:年
基本ケース	20	30	50	15	
30%長寿命	26	39	65	19.5	
30%短寿命	14	21	35	10.5	

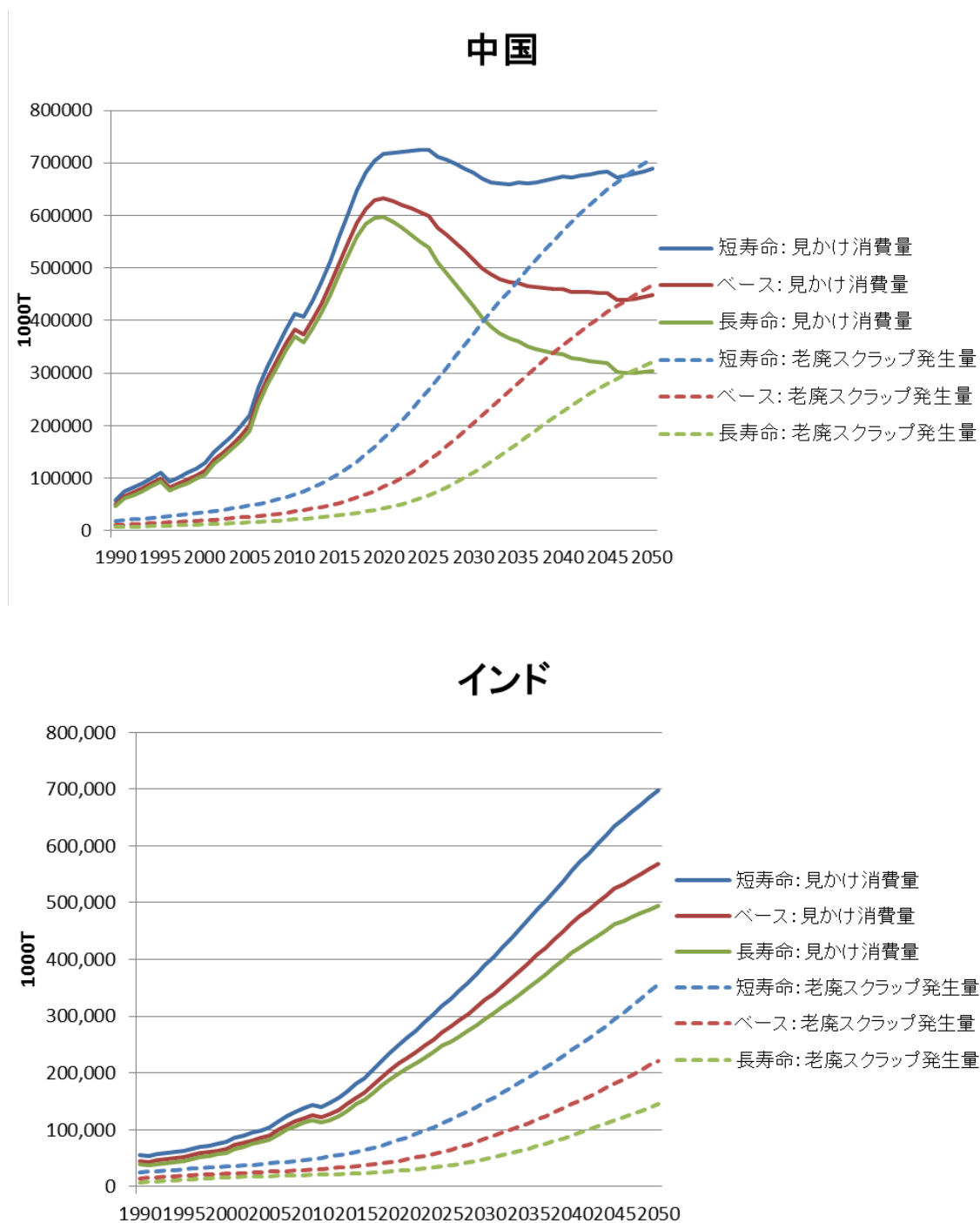


図4-15 平均寿命の差による影響 (SSP2)

中国・インドでのSSP2を用いた推計結果を図4-15に示す。図4-15のとおり、両国ともに平均寿命が短い場合は、長い場合に比較し見かけの消費量、老廃スクラップともに発生量が増える。また、各ケースの見かけの消費量と老廃スクラップ量の差を比較すると、中国の長寿命の場合は基本ケースと比較して12%程度、それ以外の中国の短寿命、インドの長寿命・短寿命の場合は基本ケースと比較して1%程度の違いとなった。

なお、すべての用途において、製品寿命の分布は上述のとおりPauliukら(2012, 2013)の研究にない、正規分布に従うと仮定したが、Pauliukら(2013)は、老廃スクラップの推計を正規分布、対数正規分布、ワイブル分布と変更した場合を検証し、分布による違いはわずかであることを報告している。

#### 4. 3 鉄鋼の需要予測を踏まえた温室効果ガスの排出量の推計

##### 4. 3. 1 製鉄プロセスおよび原料

前節において鉄鋼需要とスクラップの活用可能性について示したが、鉄鋼製造に伴う温室効果ガスの排出は、主にプロセス(高炉-転炉法、電炉法)と原料(鉄鉱石、スクラップ)に依存する。

プロセスと原料の違いを踏まえた世界の平均的な粗鋼1t当たりの二酸化炭素排出量は表4-6の通りである(International Energy Agency (IEA), 2007)。高炉-転炉による製鋼はエネルギーを多く消費するが、大量の生産に適し不純物の除去と成分調整に優れ、より高い品質の鉄鋼を生産するに適した製法である。他方、電炉は、高炉-転炉法による製鋼と比較して粗鋼1tあたりに必要なエネルギー消費量が小さく、初期の設備投資費用と運転時のエネルギー費用が抑えられるという利点もある。ただし、電炉鋼は電力を多量に消費するため、電力が高価な国では運転時のエネルギー費用が必ずしも低くはない。現在、日本では、高張力鋼は精密な生産管理のもと高炉-転炉で製造されることが多く(河瀬ら, 2012)、電炉鋼は主に建設用途などの熱間圧延鋼材に用いられている。しかしながら、技術革新が進み高品質の電炉鋼生産も可能となっており、将来的にはより高品質の鋼材生産における電炉鋼の割合が増加する可能性がある(Oda et al., 2007)。なお、電炉鋼においても直接還元鉄(Direct Reduced Iron, DRI)を用いた製鋼の場合において、燃料に石炭を用いる場合は、転炉鋼よりも粗鋼1t当たりの二酸化炭素排出量は高くなる。実際、Odaら(2012)はインドにおいて、DRIを用いた電炉による製鋼が広く使われていることに言及している。

表4-6 プロセスと原料の違いによる粗鋼製造時のCO<sub>2</sub>排出量

	平均	下限	上限
電炉(スクラップ)	0.4	0.3	0.5
電炉(鉄鉱石/DRI・石炭)	2.5	2.3	3.0
電炉(鉄鉱石/DRI・ガス)	1.1	0.7	1.3
転炉(鉄鉱石, 平均)	1.4	1.3	1.6
転炉(鉄鉱石, 先端)	1.6	1.5	1.9

単位: 粗鋼生産1tあたりCO<sub>2</sub>排出量(t)

#### 4.3.2 転炉鋼と電炉鋼の割合の実績と今後の見通し

途上国の経済成長期の推計を行うため、経済復興・成長期の日本の状況を検証する。日本では、1940年初頭では平炉を使用し、安価であったスクラップを多用して製鉄を行っていた。しかし、戦後の復興期に鉄鋼の需要が大幅に伸びる中、鉄くずの価格の高騰と供給不足にぶつかり、転炉を中心とする生産システムへ転換した(加治木, 2010)。1957年の転炉第一号基の操業開始以降、10年間で転炉製鋼の割合は大きく増加し、全体の約7割に達した(図4-16)。その結果、1958年から1962年の間に日本の粗鋼生産量は12百万tから62百万tと5倍に増加している一方、その間の鉄くず消費量は8.5百万tから29百万トンと3倍増加にとどまっている(日本鉄鋼連盟, 1969)。

本研究による鉄鋼の需要推計では、後の節において詳述するとおり、中国では鉄鋼の需要に対し、老廃スクラップの供給量は不足しているという結果が得られた。2008年において、中国では粗鋼の生産量は512百万tに達し、同年の鉄くずの消費量は66百万tと13%程度にとどまっている。なお、同年の鉄くずの輸入量は3.6百万t、輸出量は0.2百万tとなっており鉄くずの供給元は大半が自国内となっている。同年、インドでは消費量・輸出量のデータはないが、粗鋼生産量は57百万t、鉄くず輸入量は4.6百万tとなっている(日本鉄鋼連盟, 1964-2012)。このデータは、中国では、鉄鋼の需要に対しスクラップの供給は大幅に不足しているという推計結果と整合的である。

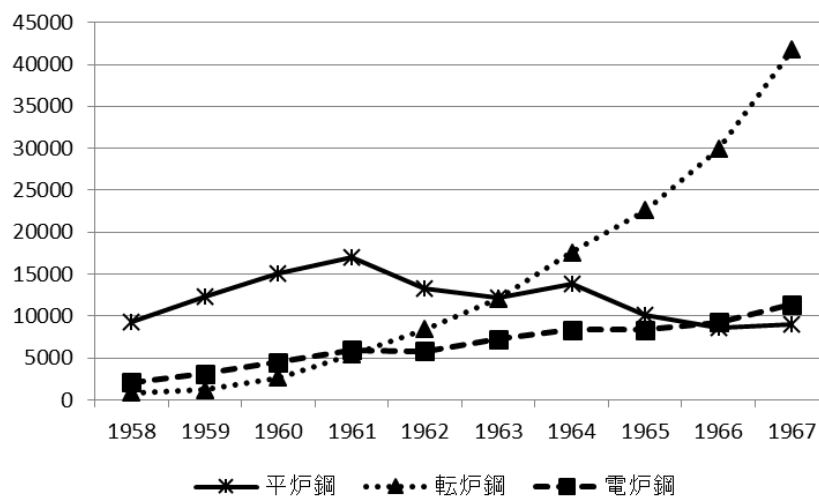


図4-16 日本の経済復興期の鉄鋼生産量の炉別推移

図4-17に2011年における41か国の一人あたりGDPと電炉比率の関係を一人あたり粗鋼生産量のレベルで3つのグループに分けて示した。データは、一人あたりGDPは、国連統計局(UNSTAT)による2005年のUSD換算のものを用い<sup>2</sup>、電炉比率はWSAによるものを用いた(WSA, 2011)。一人あたり粗鋼生産量が0.2tを下回る国の中では、8割近くの国で電炉率が50%を越え、一方、0.5tを

<sup>2</sup> National accounts main aggregate database, 2013年3月18日アクセス  
<http://unstats.un.org/unsd/snaama/dnllist.asp>

上回る国では、フィンランド以外の国は全て電炉率が50%を下回った。また、一人当たり粗鋼生産量が0.5tを超える国では、一人あたりGDPの増加につれて電炉率が上がるが、それ以外の国では、逆に一人あたりGDPの増加につれて電炉率が下がる傾向がみられた。なお、2005年のデータにおいても同様の傾向が認められた。ただし、本来このような分析は、より多くの年のデータを用い貿易財の影響を取り除いたうえで行うべきである。また、この結果は、その国での鉄鋼の蓄積量や、電力価格にも影響を受けていると考えられるが、簡便のため、本稿では、一人あたり粗鋼生産量で0.5tを境界とし、高粗鋼生産量国と低粗鋼生産量国の2つに分け、電炉比率は一人あたりGDPと電炉率の回帰式に従って変化すると仮定して推計を行った(図4-18, 図4-19)。なお、回帰式を求めるにあたっては、豊富な水力による電力により電力価格が低いため突出して電炉率が高いと考えるフィンランドを除いた。

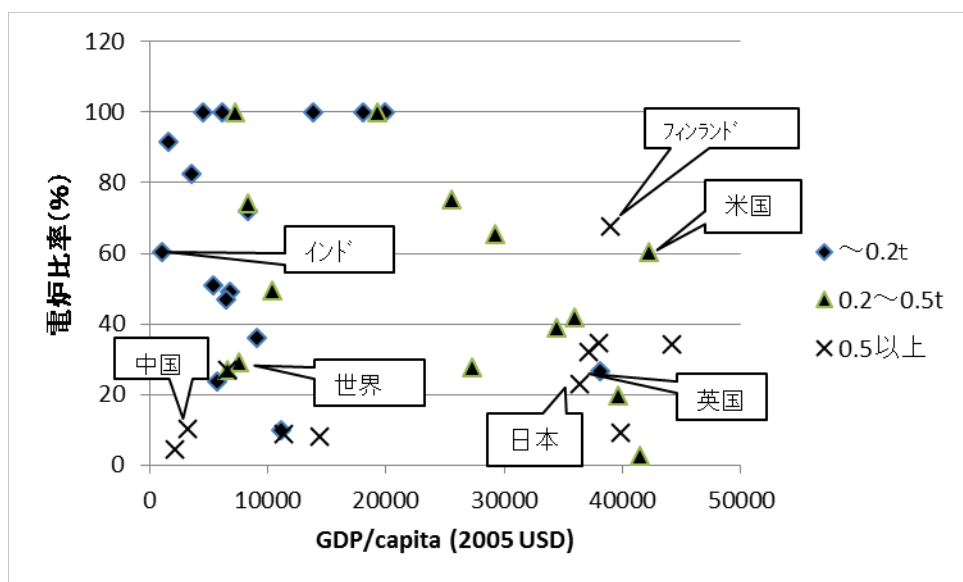


図4-17 一人当たり粗鋼生産量によるグループ毎のGDP/Capitaと電炉比率の関係

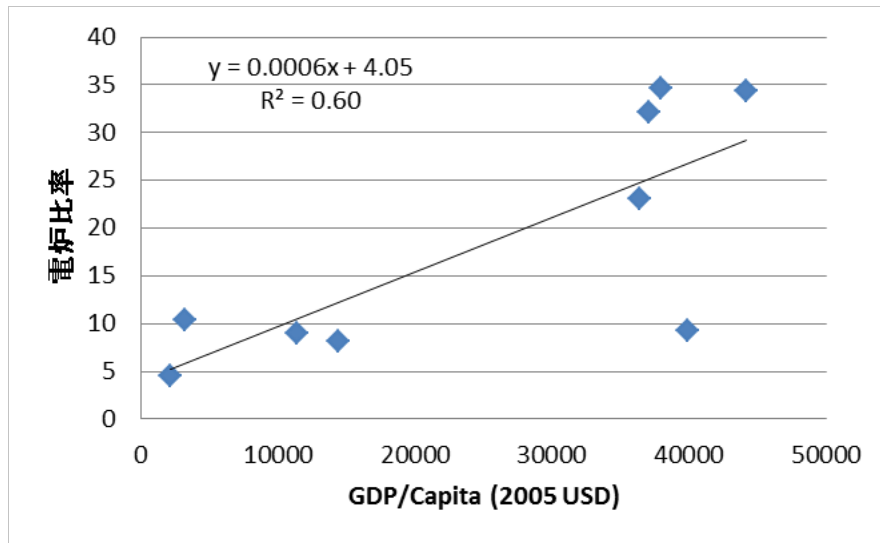


図4-18 高粗鋼生産量国の一人当たりGDPと電炉比率の関係

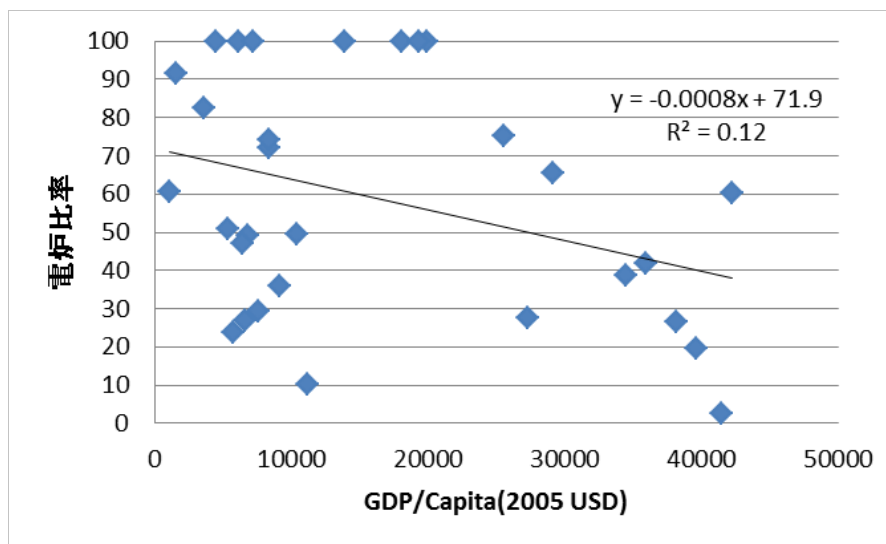


図4-19 低粗鋼生産量国の一人当たりGDPと電炉比率の関係

(1)推計1

2050年時点の一人当たり粗鋼生産量は、見かけの消費量を粗鋼生産量と仮定すると、中国A1は0.58t、中国A2は0.11t、インドA1は0.2t、インドA2は0.05tとなった。中国A1については高粗鋼生産量国として、中国A2とインドA2については低粗鋼生産量国として、一人あたりGDPと電炉率の高い相関が得られなかったが、図4-19による回帰式を用いて推計を行った。インドA2については、0.2tと低粗鋼生産量国と中粗鋼生産量の境界の値となったため現状の比率で推移すると仮定した。

本稿で用いたSRESシナリオに基づく2050年時点での電炉(スクラップ)鋼と高炉鋼の割合は表

4-7のとおりである。なお、高炉を使用せず鉄鉱石を還元するDRIを用いた電炉鋼の生産は現在急激に増加しつつあり、粗鋼生産量の5%に達し(日本鉄鋼連盟, 1964-2012)インドは世界のDRI生産量の30%を占める(SSERC, 2008-2012)。2010年の実績を元に(WSA, 2011)インドについては電炉鋼のうちの70%はDRIを活用したものとして扱った。

表4-7 2050年の転炉鋼と電炉鋼の割合(SRES)

		転炉鋼	電炉鋼
中国	A1	82%	18%
	A2	49%	51%
インド	A1	39%	61%
	A2	46%	54%

## (2)推計2

老廃スクラップを活用した電炉鋼の推計は、以下のとおりSSPの5つのシナリオにつき、中国では2ケース、インドでは3ケースに分けて実施した。具体的には、中国では、回収した老廃スクラップを全て電炉鋼に活用するケースと、電炉鋼の割合は各国の実績に従うとしたケースである。インドについては、排出する老廃スクラップの量も限定的であり、またDRIも存在するため、転炉鋼の割合は各国の実績に従うとして、回収した老廃スクラップを全て電炉鋼に活用し、残りをDRIとするケース(ケース1)と、転炉鋼の割合は各国の実績に従うとして、残りの生産量のうち、現状と同様に7割はDRIによるとしたケース(ケース2)と、さらに現在の効率の悪いDRIを増やさないとした場合の効果をみるため、ケース1と同様に回収した老廃スクラップは全量を電炉鋼とし、DRIは2013年以降に徐々に廃止され、他は転炉鋼が増加するとしたケース(ケース3)である。

各国の実績を用いた電炉鋼・転炉鋼の割合については、2010年時点での転炉鋼・電炉鋼比と整合的であることから、中国については高粗鋼生産量国として図4-18による回帰式により、インドについては低粗鋼生産量国として、図4-19による回帰式により推計を行った。

老廃スクラップについては30%程度は、製品の使用後、回収されず最終処分として埋め立てられるか、あるいは、土木建造物の一部としてそのまま遺棄される等により失われてしまうとするPauliukら(2013)を基に、老廃スクラップ発生量の3割は回収されないと仮定し、老廃スクラップ発生量の7割が回収され、鉄源として電炉で使用すると仮定して推計した。

本稿で用いたSSPシナリオに基づく2050年時点での電炉(スクラップ)鋼と転炉鋼の割合は表4-8のとおりである。



表4-8 2050年の転炉鋼と電炉鋼の割合(SSP)

			SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5	
中国	老廃スクラップ全量電炉	電炉	83%	73%	73%	81%	85%	
		転炉	17%	27%	27%	19%	15%	
電炉割合各国実績		電炉	38%	28%	22%	30%	46%	
		転炉	62%	72%	78%	70%	54%	
インド	老廃スクラップ全量電炉	電炉	28%	27%	38%	31%	32%	
		DRI	25%	32%	26%	29%	16%	
		転炉	47%	41%	36%	40%	52%	
	電炉割合各国実績		電炉	16%	18%	41%	18%	14%
			DRI	37%	41%	18%	42%	34%
			転炉	47%	41%	36%	40%	52%
	DRI転炉移行		電炉	28%	27%	38%	31%	32%
		DRI	0%	0%	0%	0%	0%	
		転炉	72%	73%	62%	69%	68%	

#### 4. 3. 3 国ごとの鉄鋼製造時のエネルギー効率を踏まえた CO<sub>2</sub> 排出量の原単位

上述の表4-6のとおり、鉄鋼製造時の実際のエネルギー効率は、主としてプロセス・原料の違いにより異なり、一般にスクラップを用いた電炉では粗鋼生産量当たりのCO<sub>2</sub>排出原単位は低くなる。一方、電炉においては電力を大量に消費するが、CO<sub>2</sub>排出量は発電に使用するエネルギー源で大きく異なる。中国とインドは、2006-2008年の平均として、電力に用いるエネルギー源のうち石炭が占める割合が、中国では約97%、インドでは85%程度と非常に高くなっている(Oda et al., 2012)。

Odaら(2012)による転炉鋼と電炉鋼の粗鋼生産1tあたりに消費されるエネルギー(Specific energy consumption, SEC)を表4-9に示す。鉄鋼業のエネルギー種別消費量は、表4-10に示すとおり、2010年の日本においても大半を石炭系が占める(日本鉄鋼連盟, 1964-2012)。中国・インドにおける同様のデータは得られないが、両国ともに石炭産出国でありエネルギー源として石炭に強く依存していることを踏まえ、発電を含め全てのエネルギーを石炭で賄うと仮定した場合には、転炉鋼と電炉鋼(スクラップ)の単位生産当たりのCO<sub>2</sub>排出量の割合は表4-4のSECの割合と同一となり、粗鋼1t生産にあたり排出されるCO<sub>2</sub>排出量は、電炉鋼が約三分の一程度ということとなる。表4-6のIEAの値よりは高くなるが、それでも電炉鋼(スクラップ)の方が転炉鋼より炭素強度は低い。

表4-9 SEC推計の代表値

	単位: GJ/粗鋼t		
	電力以外	電力	計
転炉鋼	26.2	6.7	32.9
電炉鋼(スクラップ)	2.9	7.3	10.2
電炉鋼(DRI)	18.1	8.6	26.7

表4-10 鉄鋼業のエネルギー種別消費量(日本, 2010)

	消費量(PJ)	構成(%)
石炭系	1,944	85.5
電力系	207	9.1
石油系	124	5.5

注: 鉄鋼統計要覧による。石炭系とはコークス・原料炭・自家発電用の石炭, 電力系とは系統電力, 石油系とは圧延・鋼管用や自家発電・ボイラー用の重油やガスを含むと思われるが, 原典に記載はない。

また, 鉄鋼製造時の実際のエネルギー効率, プロセス・原料の違いに加えて, 省エネルギー技術の活用度合い等によりプラント毎に大きく異なる。本稿で使用したOdaら(2012)による共通の計算手法等を用いたスクラップを用いた電炉鋼, 転炉鋼の2005年時点でのエネルギー消費量の国際比較を表4-11に示す。なお, WSAにおいて検討され, 国際標準化機構(International Organization for Standardization, ISO)の規格となった鉄鋼生産過程のエネルギー消費量の各国共通の算定手法があるが, 表4-11の算出手法は基本的に同一のものである(2013年3月公益財団法人地球環境産業技術研究機構秋元氏より聞き取り)。

本稿では中国・インドのCO<sub>2</sub>排出量の推計にあたり, IEA(2007)によるCO<sub>2</sub>排出量の原単位を用い(表4-6), 中国・インドの発電における石炭依存度の高さを踏まえた補正と, Odaらによるエネルギー消費量の世界平均とそれぞれの国の比を用いた補正を行い, 転炉鋼とスクラップを用いた電炉鋼について表4-12のとおりCO<sub>2</sub>排出原単位を設定した。なお, インドのDRIについてはデータが限定的であることからIEA(2007)の下限值を用いた。

表4-11 2005年のSEC推計値

	単位: GJ/粗鋼t	
	電炉鋼(スクラップ)	転炉鋼
中国	8.66	30.5
インド	9.64	30.0
日本	8.36	25.7
米国	8.41	35.5
EU(27)	8.93	28.8
世界	8.78	32.7

注: 転炉鋼の値はマクロ統計的手法による全消費量での推計値

### (1)推計1

技術の改善によりエネルギー効率が高くなった場合の効果を検証するため、転炉鋼と電炉鋼(スクラップ)について、表4-11より中国・インド両方に、2005年時点で、世界で最も効率のよい日本のSECと同様のレベルにエネルギー効率改善された場合のCO<sub>2</sub>排出原単位を設定した(表4-12)。その際、使用されるエネルギーの種別の構成は変わらないと仮定した。

表4-12 推計で用いたCO<sub>2</sub>排出原単位

		単位:t-CO <sub>2</sub> /t-粗鋼	
		中国	インド
電炉鋼(スクラップ)	現状	0.50	0.56
	技術改善	0.48	
電炉鋼(DRI)石炭		-	2.3
転炉鋼	現状	1.53	1.50
	技術改善	1.29	

### (2)推計2

技術の改善によりエネルギー効率が高くなった場合の効果を検証するため、転炉鋼と電炉鋼(スクラップ)について、表4-11より中国・インド両方に、2005年時点で世界で最も効率のよい日本のSECと同様のレベルにエネルギー効率改善された場合のCO<sub>2</sub>排出原単位を設定し、さらに3章のエネルギー削減対策技術の整理結果から、中央値に相当する対策技術が各工程に導入した場合を想定し、転炉鋼は7%、電炉鋼の場合、12%さらに削減するとした。なお、中国・インドにおいては、製鋼・発電ともに使用されているエネルギー源は石炭が主であることから、CO<sub>2</sub>排出原単位はエネルギー削減量と同じ割合で減るとした。使用したCO<sub>2</sub>排出原単位は表4-13のとおりである。

表4-13 推計で用いたCO<sub>2</sub>排出原単位

		単位:t-CO <sub>2</sub> /t-粗鋼	
		中国	インド
電炉鋼(スクラップ)	現状	0.50	0.56
	技術改善	0.43	
電炉鋼(DRI)石炭	現状/改善	2.3	
転炉鋼	現状	1.53	1.50
	技術改善	1.20	

#### 4.3.4 電炉鋼の活用用途の設定

経済成長の過程では鉄鋼需要量における用途の割合が変化し、初期段階では建築・土木用途の需要が中心であるが、それ以降では交通・機械等より高品質の鋼材が必要となる需要が増える(Hatayama et al., 2011)。

#### (1)推計1

スクラップを全量電炉鋼として用いた場合と、スクラップを電炉鋼の原料として活用する場合は建築・土木用途では100%，それ以外の用途では原料の30%までを上限と設定した場合の2つについて推計を行い合わせて考察した。

#### (2)推計2

老廃スクラップについては 上述のとおり，30%程度は回収されないとし，残りは制限を設けず回収された全量が電炉鋼の原料として用いられたとして推計した。

### 4. 3. 5 CO<sub>2</sub>排出量の推計

#### (1)推計1

上記によるCO<sub>2</sub>排出原単位，電炉鋼・転炉鋼の割合，電炉鋼の用途の仮定を用いてCO<sub>2</sub>排出量の推計を行った結果を表4-13に示す。

表4-13 CO<sub>2</sub>排出量推計結果(SRES, 2050年)

			2050年	技術改善による
			排出量(百万t-CO <sub>2</sub> )	排出量改善率
中国	A1	現状	987	
		技術改善	840	14.9%
	A2	現状	213	
		技術改善	186	12.6%
インド	A1	現状	485	
		技術改善	457	5.8%
	A2	現状	147	
		技術改善	137	6.7%

#### (2)推計2

上記によるCO<sub>2</sub>排出原単位，電炉鋼・転炉鋼の割合，電炉鋼の用途の仮定を用いてCO<sub>2</sub>排出量の推計を行った結果を2050年時点で示したものを表4-14，2010～2050年の累積で示したものを表4-15に示す。

表4-14 CO<sub>2</sub>排出量推計結果(SSP, 2050年時点)

		SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
中国	老廃スクラップ全量電炉	316	350	305	274	333
	電炉割合各国実績	532	556	511	485	536
インド	老廃スクラップ全量電炉	986	854	447	650	941
	電炉割合各国実績	1,132	948	554	756	1,155

表4-15 CO<sub>2</sub>排出量推計結果(SSP, 2010~2050年累積)

		SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
中国	老廃スクラップ全量電炉	26,507	24,909	22,194	23,740	27,554
	電炉割合各国実績	29,024	27,676	25,318	26,566	29,859
インド	老廃スクラップ全量電炉	29,066	22,792	15,739	19,630	32,665
	電炉割合各国実績	29,733	23,468	17,067	20,557	33,645

#### 4. 4 結果と考察

##### 4. 4. 1 需要の増加とスクラップの活用

###### (1) 推計1

2050年のSRESの4つのシナリオによる推計結果を図4-20に示す。推計の結果、そもそも見かけの消費量に対する自国内での老廃スクラップの発生量は限定的であり、2050年時点で中国では47%~52%、インドでは42%~52%にとどまった。一方、スクラップは不純物が多くなることから、日本では高品位鋼の生産に現状ではあまり使用されず、主な用途は建築・土木向けとなっている。

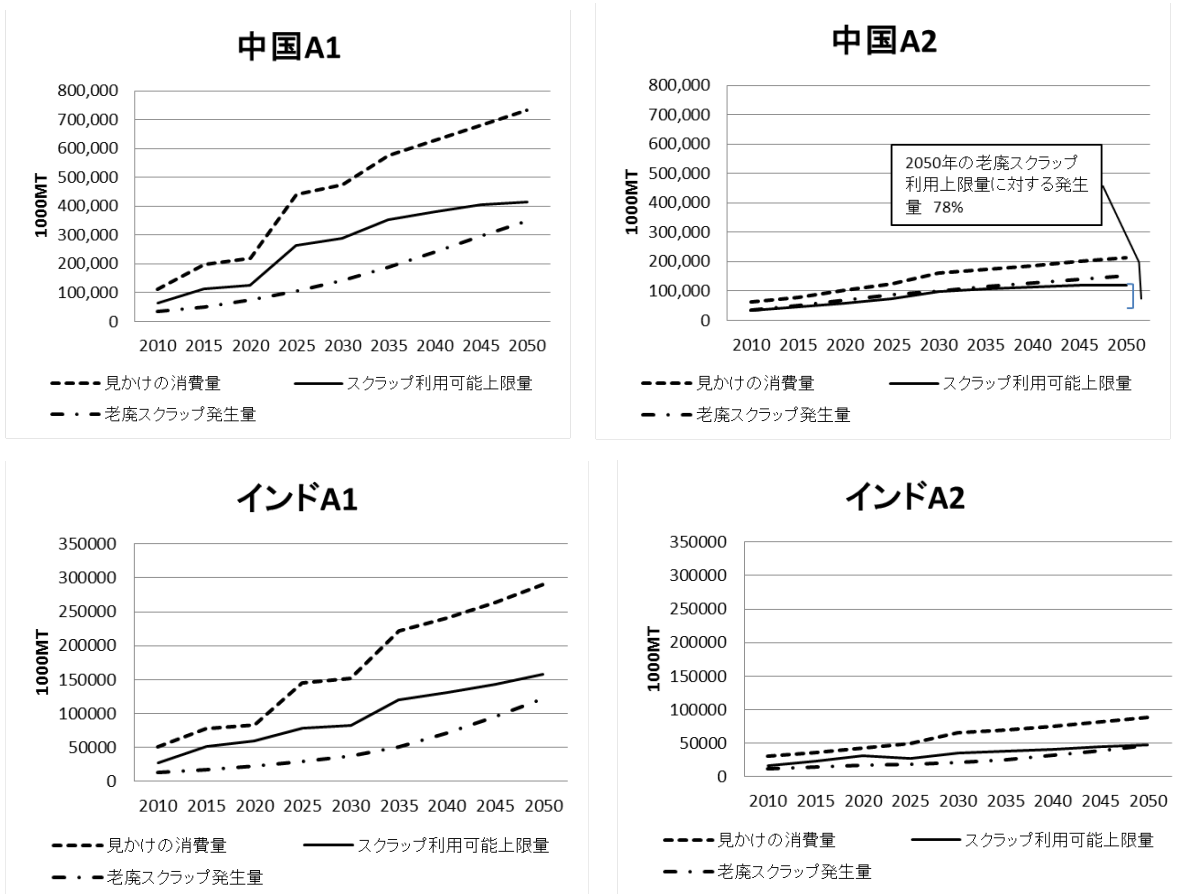


図4-20 各シナリオの見かけの消費量・老廃スクラップ発生量・スクラップ利用可能上限量の関係 (SRES)

これを踏まえ、上述の4.3.4のとおり、用途とスクラップで生産可能な鋼材の品質の関係を考慮すると、図4-20のとおり、中国A2のケースのみ、老廃スクラップの発生量はスクラップ利用可能上限量を上回る結果となり、2050年時点で実際利用できると考えられる老廃スクラップは発生量の78%に留まる結果となった。

2010年から2050年までの累積で見ると、鉄鋼の需要(みかけの消費量)に対する自国で発生する老廃スクラップによる鉄源の供給率は、用途を考慮した利用上限を踏まえ、図4-21に示すとおり、中国で34%~59%、インドにおいて28%~41%にとどまる結果となった。

鉄鋼の用途については、今回は日本の過去の値を用いて推計を実施したが、例えば自動車への異素材の活用等素材代替が進み、大きく用途の割合が変わる可能性もある。また、電炉鋼においてスクラップを活用しつつも品質の高い鉄鋼を生産する技術開発が進んでいる。本稿では、建築・土木用途では需要の100%、それ以外の用途では需要の30%までがスクラップの活用の上限としたが、この仮定についてさらに検証する必要がある。

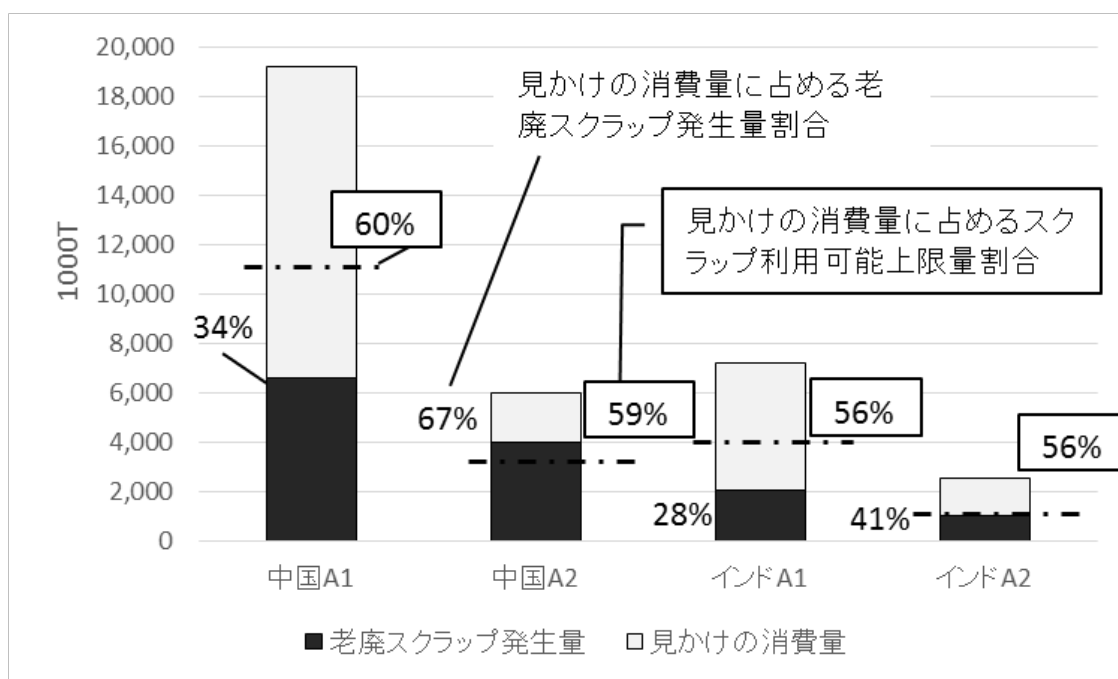


図4-21 2000年から2050年までの累積でみた見かけの消費量・老廃スクラップ発生量・スクラップ利用可能上限量の関係(SRES)

## (2)推計2

2050年までのSSPの5つのシナリオによる推計結果を図4-21に示す。推計の結果、鉄鋼の需要は経済発展の初期は製品寿命の長い建築・土木用途が中心であることから、見かけの消費量が多い段階では老廃スクラップの発生量が見かけの消費量に追い付かず、自国内で発生する老廃スク

ラップでは、経済成長時に多くなる見かけの消費量を満たすことは困難という結果となった。

中国については、どのシナリオにおいても2020年前後に見かけの消費量はピークを迎え、2040年以降は自国内での老廃スクラップの発生量が見かけの消費量を超過する結果となった。ただし上述のとおり、発生した老廃スクラップの全てが回収されるわけではないので、3割は回収できないとすると、中国・インドとも、どのシナリオにおいても回収できる老廃スクラップの量は見かけの消費量を下回る結果となった。

インドについては、SSP5シナリオを除き、中国より経済発展の速度が緩やかであることから、鉄鋼の見かけの消費量の伸びも緩やかであり、2050年段階では見かけの消費量はピークを超えない結果となった。最も経済成長が激しいSSP5シナリオでもピークは2040年前後という結果であった。また、SSPシナリオの1, 2, 5ではインドの2050年頃の見かけの消費量は、同じシナリオでの中国の見かけの消費量と同等程度まで伸びる結果となった。インドではどのシナリオにおいても老廃スクラップの発生量は見かけの消費量を下回る結果となった。

また、中国では2050年以降、発生した老廃スクラップの回収可能量が見かけの消費量を上回ることになっていくと考えられる。これに対し、インドの経済成長が緩やかに進むSSPシナリオ2, 3, 4の場合であれば、インドでの鉄鋼の需要が高まる段階に中国で発生し回収される老廃スクラップを活用し、鉄鉱石からの鉄鋼生産量を減らすことができると考えられる。

(1)の推計1と同様に、用途とスクラップで生産可能な鋼材の品質の関係を考慮すると、2050年時点での利用可能上限量(建築・土木用途では需要の100%、それ以外の用途では需要の30%までをスクラップの原料への活用の上限とする)と、老廃スクラップ回収可能量(老廃スクラップ量の30%は回収不能とする)の関係は、図4-22のとおりとなった。両国ともに、2050年では老廃スクラップ回収可能量はスクラップ利用可能上限量に達しなかった。ただし、中国の場合では両者はかなり近接する結果となった。

スクラップの活用にあたっては、求められる鋼材の質によっては不純物の含有量が問題となり、使用ができなくなることが指摘されているが(醍醐ら, 2005; 小杉, 2006 他), この推計では、中国・インドとも2050年までは、スクラップの発生量の不足がその活用の律速となり、スクラップの活用上質が問題となる段階には至らない結果となった。

2010年から2050年までの累積で見ると、鉄鋼の需要(みかけの消費量)に対する自国で発生し回収可能な老廃スクラップによる供給率は、図4-23に示すとおり、中国で31%~33%、インドにおいて17%~26%にとどまるという結果となった。

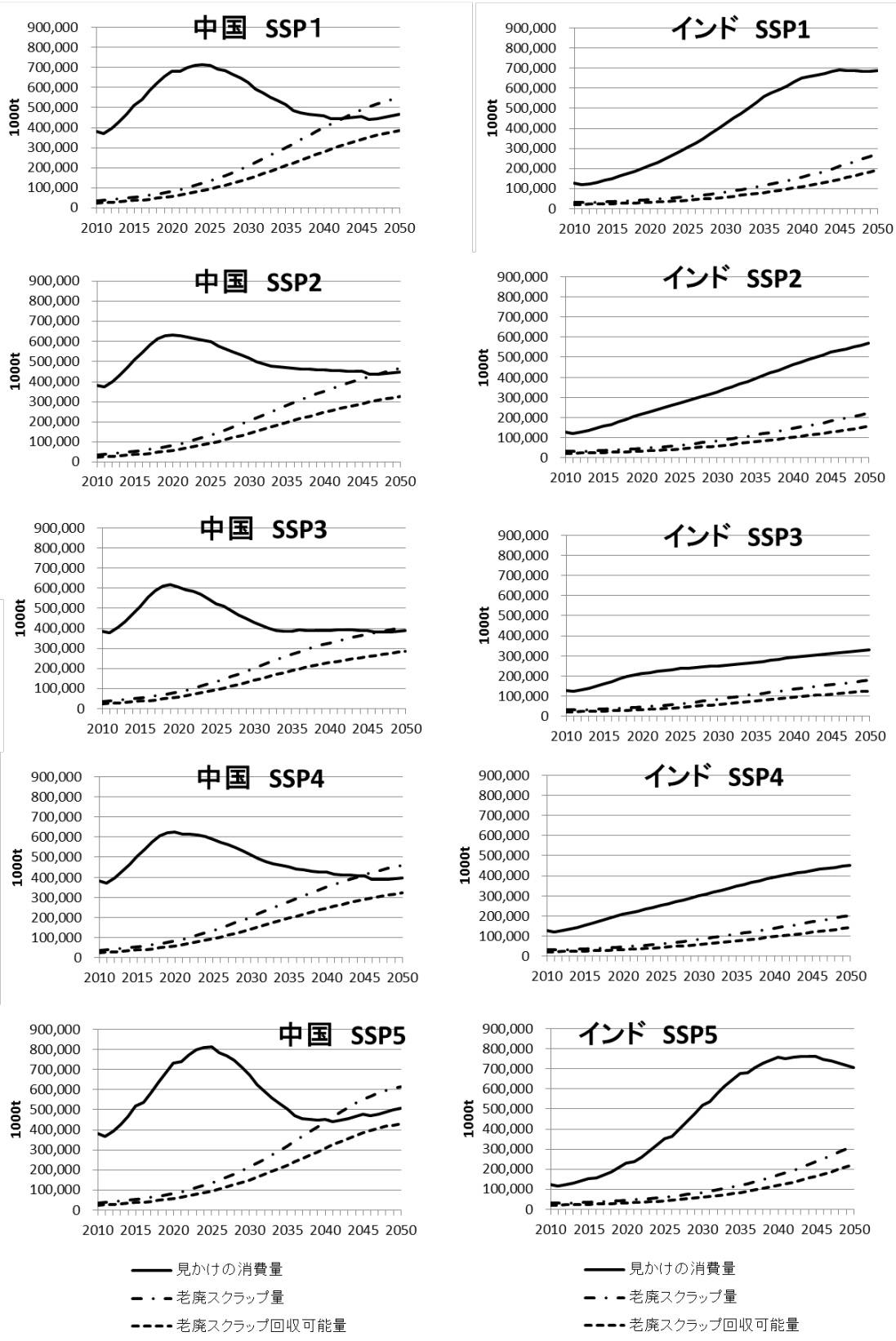


図4-21 見かけの消費量・老廃スクラップ発生量・老廃スクラップ回収可能量の関係 (SSP)



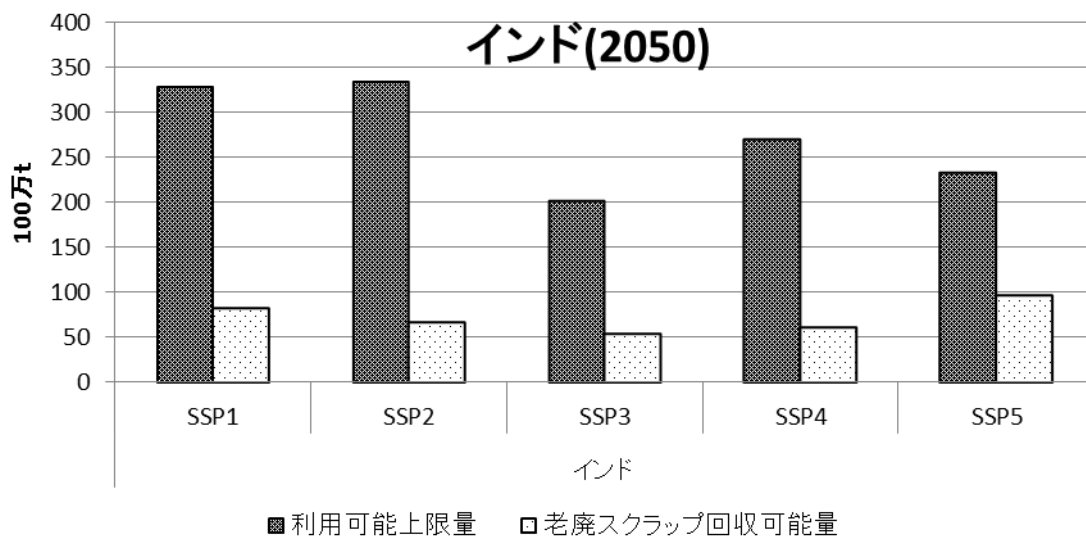
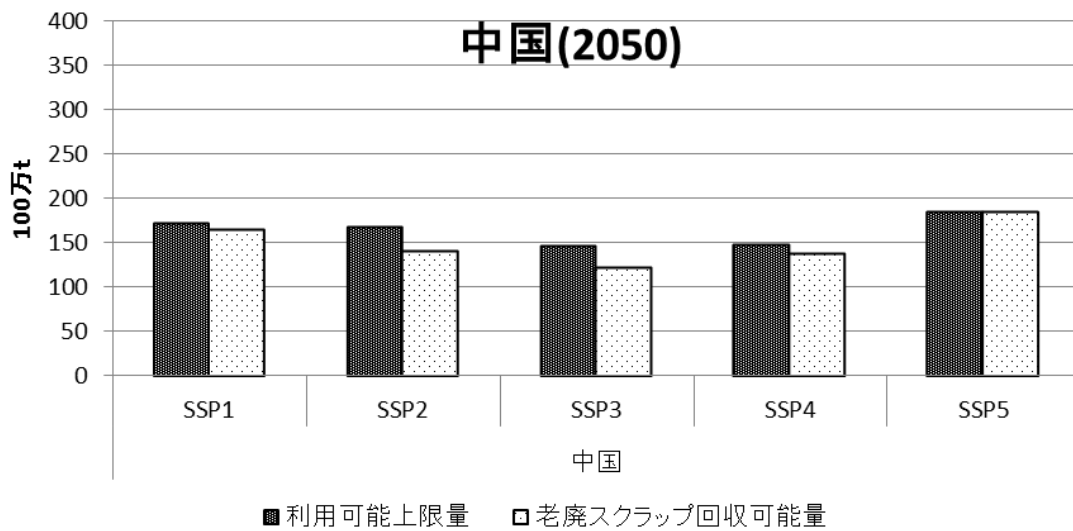


図4-22 2050年時点の各シナリオのスクラップ利用可能上限量と老廃スクラップ回収可能量の関係の関係(SSP)

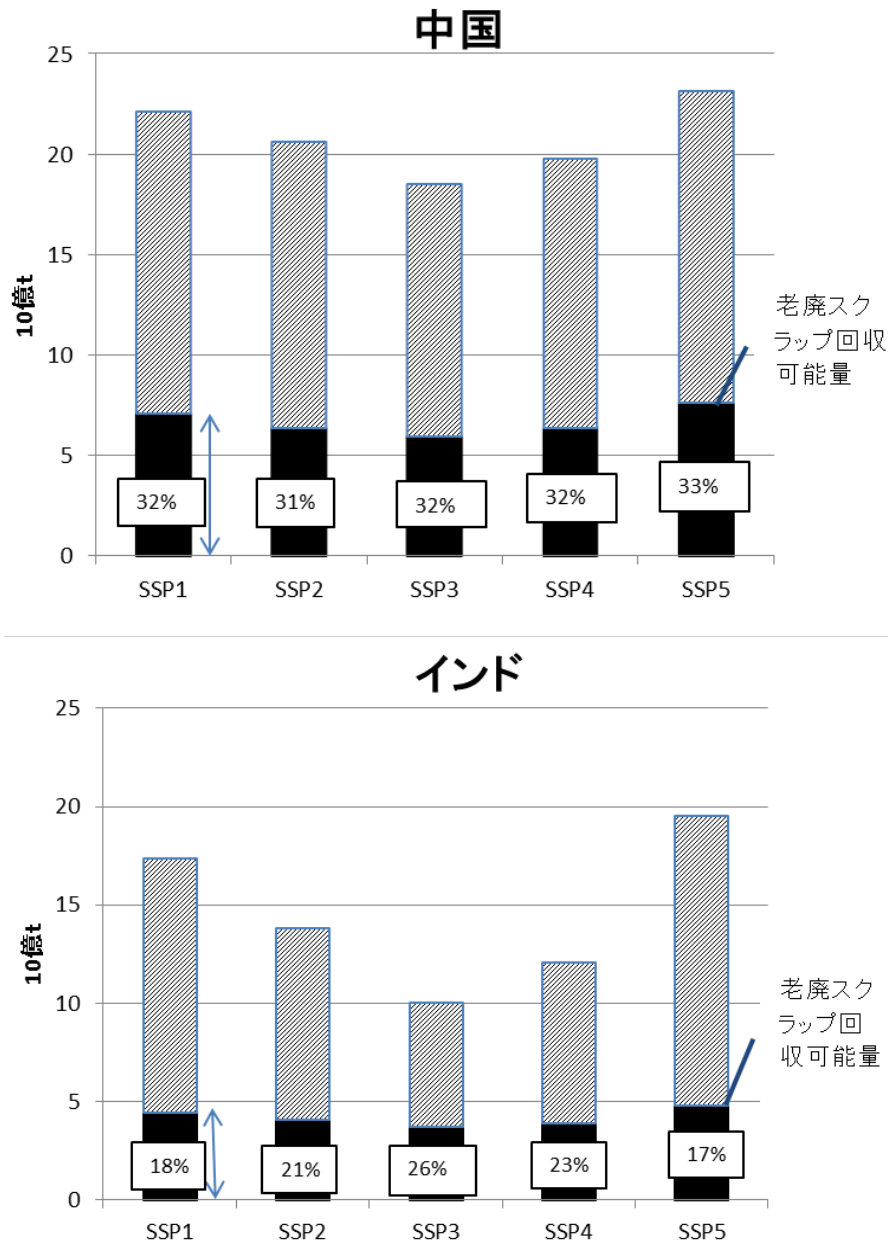


図4-24 2010-2050年累積の見かけの消費量と老廃スクリップ回収可能量 (SSP)

#### 4. 4. 2 温室効果ガス排出量の低減策

##### (1) 推計1

推計の結果、2050年において温室効果ガスの排出量(CO<sub>2</sub>)は、各国の実績から求められる上記表4-7に示す転炉鋼と電炉鋼の割合を用いた場合、2010年との比較で中国ではA1シナリオで6.2倍、A2シナリオで2.4倍、インドでは同様に5.7倍、2.8倍となった。2050年において自国内で排出されるスクラップをスクラップ利用上限量まで電炉鋼で活用する場合は、中国ではA1シナリオで4.8倍、A2シナリオで2.3倍、インドでは同様に3.8倍、1.7倍となった(図4-24)。

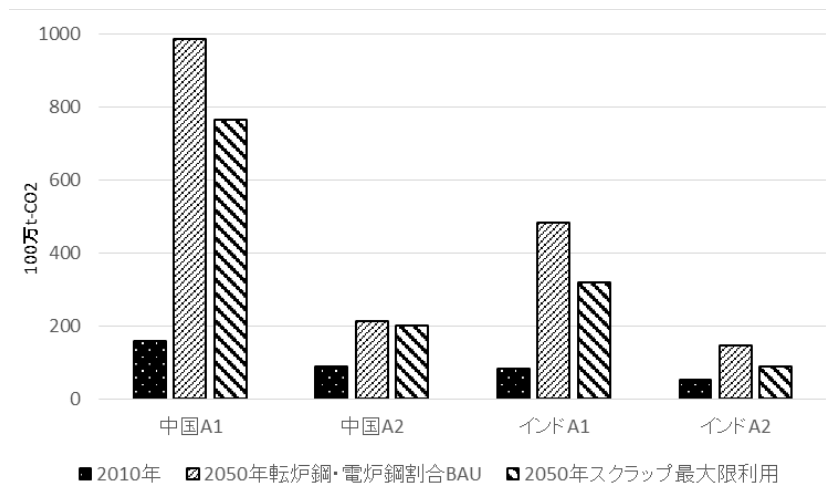


図4-25 2050年のCO<sub>2</sub>排出量推計値(転炉/電炉の割合を各国の実績から定めた場合とスクラップを最大限利用した場合の比較)

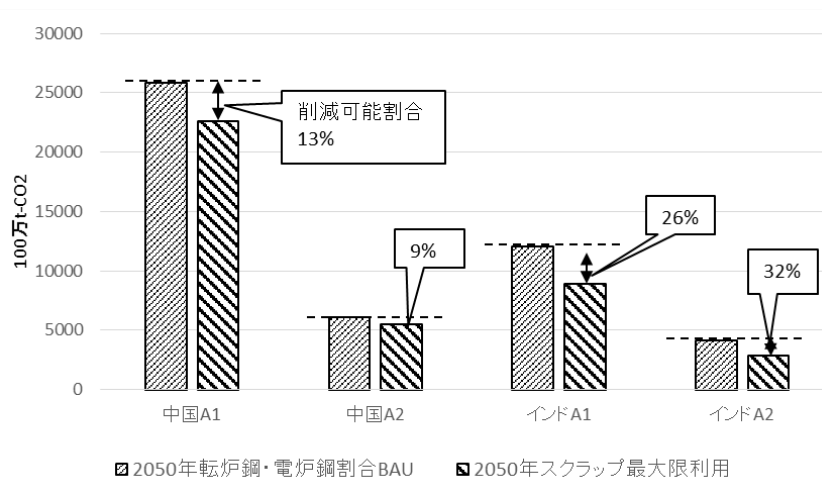


図4-26 2010年から2050年の累積のCO<sub>2</sub>排出量推計値(転炉/電炉の割合を各国の実績から定めた場合とスクラップを最大限利用した場合の比較)

2010年から2050年までの累積で評価した場合、温室効果ガスの排出量(CO<sub>2</sub>)について表4-7に示す転炉鋼と電炉鋼の割合を用いた場合(インドについては2010年と電炉鋼に対し、同様の割合でDRIを含むとする)と、自国内で排出されるスクラップをスクラップ利用上限量まで電炉鋼で活用する場合を比較すると、中国ではスクラップを最大限使用した場合の削減量はA1シナリオで13%、A2シナリオで9%となり、インドではA1シナリオで26%、A2シナリオで32%となった(図4-26)。

また、中国・インド両国の製鋼過程において、現在先進国で既に活用されている製鋼に関する温室効果ガス排出低減技術を導入しエネルギー消費量を改善した場合には、表4-12を用いた推計の結果、これらの技術を導入しない場合(現状の技術のままの場合)と比較して2050年時点で、

中国で13～15%程度、インドで6～7%程度の排出低減効果が得られることがわかった。特に炭素強度の高い高炉/転炉鋼の温室効果ガスの排出量を下げることが有効であり、先進国の効率のよい省エネルギー技術を導入する取り組みが重要と考えられる。

## (2)推計2

2050年時点の鉄鋼生産に伴う温室効果ガスの排出量(CO<sub>2</sub>)の推計結果を図4-27に示す。推計に当たっては、老廃スクラップの回収可能量全量(発生する量の3割は回収不能とする)を電炉で使用すると仮定した場合と、老廃スクラップの電炉での活用割合は(1)と同様に各国実績に従うと仮定した場合の2ケースを想定して実施した。図4-26のとおり、中国では老廃スクラップの回収可能量全量を電炉で使用した場合は、2010年との比較としてSSP1~SSP5シナリオで、0.5倍～0.6倍となり、老廃スクラップの電炉での活用割合を各国実績に従うとした場合は、0.9倍から1.0倍となった。回収可能な老廃スクラップを全量電炉で活用した場合は、電炉の割合が各国実績に従うとした場合と比較して、37～43%の削減効果があるという結果となった。インドでは、老廃スクラップの回収可能量全量を電炉で使用した場合は、2010年との比較としてSSP1~SSP5シナリオで、2.1倍～4.7倍となり、老廃スクラップの電炉での活用割合を各国実績に従うとした場合は、2.6倍～5.5倍となった。回収可能な老廃スクラップを全量電炉で活用した場合は、電炉の割合が各国実績に従うとした場合と比較して、10～19%の削減効果があるという結果となった。

2010年から2050年までの累積でみた場合、温室効果ガスの排出量(CO<sub>2</sub>)は図4-28に示すとおり、老廃スクラップの回収可能量全量を電炉で使用した場合は、老廃スクラップの電炉での活用割合を各国実績に従うとした場合を比較すると、後者では中国で8～14%、インドでは2～8%排出量が増える結果となった。

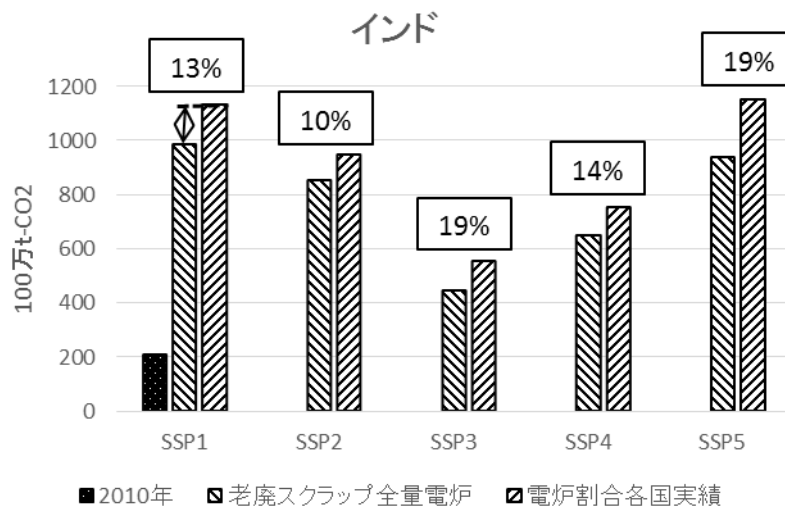
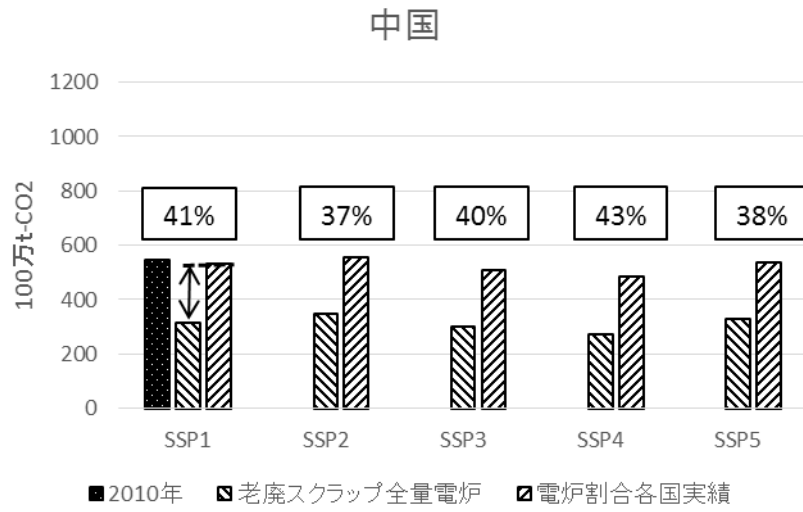


図4-27 2050年の鉄鋼生産に伴うCO<sub>2</sub>排出量推計値

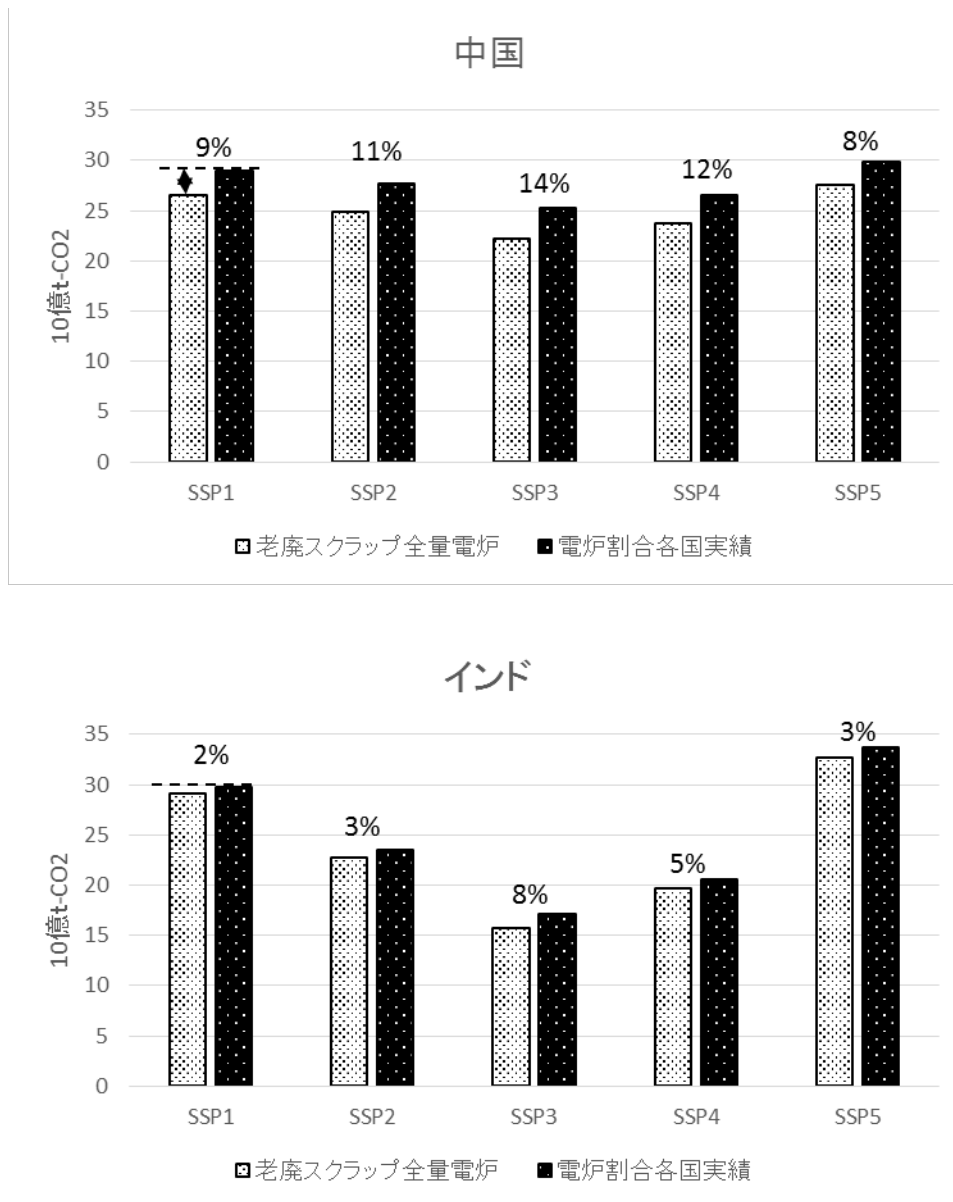


図4-28 2010年から2050年の累積のCO<sub>2</sub>排出量推計値(老廃スクラップを活用した電炉鋼での生産を中心とした場合と、転炉鋼での生産を中心とした場合の比較)

また、中国・インド両国の製鋼過程において、現在先進国で既に活用されている製鋼に関する温室効果ガス排出低減技術を導入しエネルギー消費量を改善した場合には、表4-6を用いた推計の結果、これらの技術を導入しない場合(現状の技術のままの場合)と比較して、2010～2050年累積で、中国で21%程度、インドで8%程度の排出低減効果が得られるという結果となった。

また、インドについては、効率の悪いDRIを2050年までに徐々に廃止していくとした場合、21～24%の削減効果があった。

特に炭素強度の高い高炉/転炉鋼の温室効果ガスの排出量を下げることが有効であり、先進国

の効率のよい省エネルギー技術を導入する取り組みが重要と考えられる。また、特にインドにおいては現状の効率の悪いDRIを用いた生産を速やかに削減することが重要である。

なお、Odaら(2012)が指摘するように、CO<sub>2</sub>の排出原単位の設定に用いたSECについては、2005年時点の各国の値を用いている。特に中国ではその後新たな大型の高炉の建設が進んでおり、実際のSECはより改善されている可能性がある。

また、鉄鋼の製造・使用に伴う温室効果ガスの排出削減には、使用年数の延長や素材代替といったアプローチもある(Allwood, Cullen, 2011)。これらのアプローチによる排出削減の効果も比較検証していくことが望ましい。

#### 4.5 本章において明らかとなったこと

鉄鋼の需要が大きく伸びつつある中国とインドについて、2050年までの鉄鋼需要の中長期予測を行い、スクラップの利用可能性とそれに伴う温室効果ガスの排出抑制効果を検証した。推計においては、製鋼のプロセス・原料、用途の他、両国の製鋼業のエネルギー効率の違いも考慮した。

推計の結果、2010年から2050年までの累積で見ると、鉄鋼の需要(みかけの消費量)に対する自国で発生する老廃スクラップによる供給率は、排出される老廃スクラップの3割が回収できないと仮定して、中国で31%~33%、インドにおいて17%~26%にとどまるという結果となった(GDPと人口はIIASAのSSPシナリオによる推計結果を使用)。この結果には、経済成長の結果鉄鋼需要は増加する一方、経済成長の初期に必要なとされるのは使用年数の長い建築・土木用途であり、スクラップの排出にはタイムラグがあることが影響していると考えられる。しかし、中国においては2020年前後に鉄鋼需要のピークがあり、その後は需要は減退し、スクラップの排出は増加するため、2050年以降は自国で回収されるスクラップが需要を上回ると予測された。インドにおいては、中国より緩やかではあるが経済成長に伴い鉄鋼需要は大きく伸びるという推計結果となったが、2050年までには鉄鋼需要のピークが訪れる可能性は高くはないと考えられる。

鉄鋼製造による二酸化炭素の排出は、2010年から2050年までの累積で見ると、老廃スクラップの回収可能全量を電炉で使用するとした場合と、老廃スクラップの電炉での活用割合を各国実績に従うとした場合を比較すると、前者では中国で8~14%、インドでは2~8%排出量を抑えることができるという結果となった。2010年と2050年を比較すると、中国では、スクラップの活用割合を各国の電炉率の実績に従うとした場合には、0.9~1.0倍となることを、スクラップを最大限活用した場合には、0.5~0.6倍に抑えることが可能である。インドでは、スクラップの活用割合を各国の電炉率の実績に従うとした場合には、2050年には2.6~5.5倍に増加となることを、スクラップを最大限活用した場合には、2.1~4.7倍に抑えることが可能とする結果となった。

また、中国・インド両国に、現在先進国で既に活用されている製鋼に関する温室効果ガス排出低減策を導入した場合には、これらの技術を導入しない場合(現状の技術のままの場合)と比較して、2050年時点で、中国で14%程度、インドで6%程度の排出低減効果が得られることがわかった。また、インドについては、効率の悪いDRIを2050年までに徐々に廃止していくとした場合、21~

24%の削減効果があった。

なお、スクラップの利用可能性に関しては、今回は現状及び今後の鉄鋼の需要が大きいため国際的にも重要と考えられる中国・インドを対象としたことから、『対象とした国における需要を、その国で発生したスクラップをもってどれだけ満たせるか』、ということに着目したが、スクラップは国際的に流通するものでもあり、同時期に他国で発生し流通するスクラップの活用、また発生するスクラップが他国の需要に与える影響についても考察すべきであり、この点は今後の課題である。



<参考文献>

- Allwood, J., Cullen, J. (2011) Sustainable materials - with both eyes open: Future buildings, vehicles, products and equipment - Made efficiently and made with less new material, UIT Cambridge Ltd.
- 醍醐市朗, 藤巻大輔, 松野泰也, 足立芳寛 (2005) 鋼材循環利用における環境負荷誘発量解析のための動態モデルの構築, 鉄と鋼, vol.90, no.1, pp.171-178.
- 藤森真一郎 (2011) IPCC 第5次評価報告書に向けた将来シナリオの検討, 日本からの貢献とその意義, 環境研究総合推進費 A-1103, 統合評価モデルを用いた世界の温暖化対策を考慮したわが国の温暖化政策の効果と影響, 環境研究総合推進費戦略的研究プロジェクト 一般公開シンポジウム, 『持続可能なアジア低炭素社会に向けた日本の役割』(発表資料).  
[http://2050.nies.go.jp/sympo/111122/file/1\\_fujimori.pdf](http://2050.nies.go.jp/sympo/111122/file/1_fujimori.pdf) (2014.12 アクセス)
- Hatayama, H., Daigo, I., Adachi, Y.(2011) Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics, Environmental Science and Technology, vol.44, pp. 6457-6463, IEA (2007) Tracking industrial energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions.
- インド国家経済調査委員会(翻訳 社団法人鋼材倶楽部, 日本鉄鋼輸出組合) (1960) インドの鉄鋼需要の見通し—第三次及び4次計画を背景とした需要予測—.
- 加治木紳哉(杉山大志監修) (2010) 戦後日本の省エネルギー史 電力, 鉄鋼, セメント産業の歩み, pp.16-93, エネルギーフォーラム.
- 河瀬玲奈, 東章吾, 松岡譲 (2012) 日本における低炭素社会と脱物質化社会構築の可能性について—鉄鋼を例として—, 土木学会論文集 G, 68(6), II\_371-II\_381.
- 金属系材料研究開発センター(財団法人) (2004) 平成15年度環境問題対策調査等に関する委託事業報告書(自動車リサイクルに係る処理技術等の調査), 平成15年度経済産業省委託事業報告書.
- 小杉隆信 (2006) 世界の鉄鋼業におけるリサイクルとエネルギー消費に関する長期シミュレーション分析, 政策科学, 13-2, Feb. pp.1-10.
- 森田恒幸 (2001) IPCC 排出シナリオ(SRES)に関するサーベイ, 4つの社会・経済シナリオについて—温室効果ガス排出量削減シナリオ策定調査報告書—(環境省地球環境局). 第2章
- Müller, D. B., Wang, T., Duval, B., Graedel, T. E. (2006) Exploring the engine of anthropogenic iron cycles, PNAS, 103(44), pp.16111-16116.
- 中島謙一, 原田幸明, 林誠一 (2005) 産業連関表を用いた鉄加工スクラップ量の推計, 鉄と鋼, vol.91, no.1, pp.154-158.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds) (2000) Special report on emissions scenarios: A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K..599.
- 日本鉄鋼連盟 (1964-2012) 鉄鋼統計要覧 1964年度版-2012年度版, 富士美術印刷株式会社.

- 日本鉄鋼連盟(鉄鋼10年史編集委員会編集) (1969) 鉄鋼10年史—昭和33年~42年—, 凸版印刷株式会社, pp.16-93.
- Oda, J., Akimoto, K., Tomoda, T., Nagashima, M., Wada, K., Sano, F. (2007) Diffusion of energy efficient technologies and CO<sub>2</sub> emission reductions in iron and steel sector, *Energy Economics*, 29, pp.868-888.
- Oda, J., Akimoto, K., Tomoda, T., Nagashima, M., Wada, K., Sano, F. (2012) International comparisons of energy efficiency in power, steel and cement industries, *Energy Policy*, 44, pp.118-120.
- Pauliuk, S., Wang, T., Müller, D. B. (2012) Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle, *Environ. Sci. Technol*, 46, pp.148-154.
- Pauliuk, S., Wang, T., Müller, D. B. (2013) Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries, *Resources, Conservation and Recycling*, 7, pp.22-30.
- SSERC (2008-2012) *Steel Scenario Yearbook 2008-2012*, SSERC.
- Wang, T., Hashimoto, S. (2012) Forging a low carbon steel cycle in Asia, *Proc. of 12th Ecobalance Congress*, CD-ROM.
- WSA (2008) *2008 Sustainability Report of the World Steel Industry*.
- WSA (2011) *Steel Statistical Yearbook 2011*.
- Yamaguchi, M. (Ed) (2012) *Climate change mitigation a balanced approach to climate change*, pp.179-197, Springer.



## 第5章 炭素強度の高い財の需給に着目した温室効果ガス排出削減策の比較分析

### 5.1 炭素強度の高い財の需給と温室効果ガス排出削減策の必要性

#### 5.1.1 炭素強度の高い財の需給の気候変動への影響

第1章、第2章でみたとおり、気候変動の影響に対する懸念が高まる中、国際的な枠組みに基づく取組が十分とはいえず、温室効果ガスの排出削減を強く求められる国は限定的であるのに対し、それ以外の国からの排出が増加しつつある状況にある。他方、気候変動に関する対策を巡る国際交渉の動向をみると、上記の通り、国ごとの取組としては野心的な削減が早急に推進される状況にはない一方、2009年の第15回締約国会議(15<sup>th</sup> Conference of the Parties, COP15)を契機に、様々な主体が自主的な目標を基に対策を取るアプローチが重要な役割を果たすようになると考えられる(山口, 2013, 第2章)。このようなアプローチの一つに、産業のセクターでまとまって取り組むという考え方がある。産業セクターの中には、鉄鋼やセメント等化石燃料を多く消費し温室効果ガスの排出量の多い財(炭素強度の高い財)の製造に関わるものがある。また、上記のとおり盛んな貿易により財の需給は国境を越えて進んでいる状況を鑑みると、財が生産された国の排出のみをみるのではなく、財がどの国の需要を満たすために生産されており、その結果全体での排出量がどのように変化しているのか考える必要がある。したがって、世界全体で排出量を減らしていくためには、主要な排出源である炭素強度の高い財を生産するセクターに着目し、その財の需給を考慮した排出削減策の導入を検討することには一定の合理性があると考えられる。

上記を踏まえ、本章では、地球全体での実質的な削減を実施するための一助として、炭素強度の高い財と、その需給を通じて排出を引き起こす主要な関係主体に着目した温室効果ガスの排出削減策の実現可能性と効果を高めるための留意点を明らかにすることを目的とした。そのため、企業・行政・研究者・非営利組織(Nonprofit Organization, NPO)を含む専門家に対してインタビューを行うこととし、排出削減策と評価項目を提示して評価を求め、その結果を統計解析により比較分析を行った。以下、次節(5.2)にて調査方法を説明し、5.3節にて結果を説明し、5.4節ではインタビュー調査で得られた意見を踏まえながら、4つの排出削減策の特徴や優劣についての政策的含意を考察する。

#### 5.1.2 既往研究

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)の第3作業部会(2013)は、産業部門に関するシナリオの多くは、2050年までに鉄鋼やセメント等の需要は2010年比で45~60%増加するとしており、鉄鋼等の炭素強度の高い財の製造に伴う温室効果ガスの排出削減はますます重要としている。また、産業部門の温室効果ガスの排出削減ではエネルギー効率を上げることに加え、連携した取組やシステムティックなアプローチが重要とされている(IPCC, 2014)。Nappら(2014)はいくつかのエネルギー強度の高い製造業を対象とした技術や政策のレビューを行い、技術の導入はコストの増加を伴い、財は一般に広く地球規模でやりとりされることから、政策の計画・実施は、削減策が弱い地域よりも製造コストが高くなってしまわないよう行われる必要があるとした。

炭素強度の高い財もしくはエネルギー強度が高い産業に着目した排出削減策に関する研究には多数があるが、Lund(2007)、Enevoldsenら(2007)、DemaillyとQuirion(2008)、Bassiら(2009)等多くは排出削減策によるエネルギー価格の変動等による競争力へのインパクトと、エネルギー効率や温室効果ガスの排出の変化に着目して分析するもの、または、Zhengら(2009)をはじめとする個別の財に着目した対策技術に関する分析の報告となっており、対策技術の導入につながる排出削減策について様々な専門家の評価や意見を調査した事例は多くはない。炭素強度の高い財に関し専門家を対象にインタビューを実施した研究の事例では、StenqvistとNilsson(2012)がスウェーデンのエネルギー強度の高い産業に対するエネルギー効率改善プログラム(PFE、電力税を免除する代わりにエネルギー効率改善策を取ることを求めるもの)の影響を、政策文書と事前評価の調査と、行政と企業の担当者に対する聞き取りにより分析した。その結果、このプログラムは成功と評価できるとしたうえで、プログラムの実施にあたっては並行して包括的な評価プランを進めることで必要なデータの収集が進むうるとした。MiklertとHarrison(2013)はオーストラリアの炭素強度の高い財に関連する企業を対象にインタビューを実施し、それぞれの企業において現在進められている気候変動対策や政府の役割、関連する内部のコミットメント(internal commitment)について聴取を行い、企業は政府による、より強く、明確かつ戦略的で長期的な支援を求めていることを明らかにした。これらの研究は、特定の国内での対策とその効果に焦点をおいていることから国外を含めた炭素強度の高い財の需給に着目した研究ではない。また、Gasbarroら(2013)は、炭素強度の高い財のうち紙パルプ製造に着目し、EUETS(欧州排出権取引スキーム)が企業の環境マネジメントシステム(EMS)にどのように影響しているかをイタリアの企業を対象としてインタビュー調査をし、ETSとEMSをうまく統合している組織は、関連する環境モニタリングと順守についての基準と手法を確立している傾向があること、一方で全てのETSに関する活動がEMSに統合されているわけではないこと等を報告した。また、Zhangら(2012)は、中国の鉄鋼業界を対象としたアンケートとインタビューによりCO<sub>2</sub>排出削減対策とその決定因子と効果の関係を調査し、経済的な効果が明瞭ではなくとも環境効果が高い対策がとられていることもある一方、企業に排出削減を自主的に進めさせるためには経済的な便益を動機付けとして活用すべきであると報告した。これらの研究では、炭素強度が高い財の中でも特定の製造業を取り上げており、また、国外を含めた炭素強度の高い財の需給に着目した政策を検討するものとは視点が異なる。

## 5.2 炭素強度の高い財に関する排出削減策に関する専門家へのインタビュー:調査手法

### 5.2.1 調査対象者と調査実施状況

インタビューを行った日本国内の気候変動政策あるいは炭素強度の高い財に関する専門的な研究・職務に従事する専門家の詳細を表5-1に示す。回答は44名から得ることができたが、解析にはそのうちすべての評価項目について回答のあった42名分を用いた。回答者の選定にあたっては専門性が特定分野に偏らないよう考慮した。企業については温室効果ガスの排出削減策に詳しいコンサルティング業の他、主要な炭素強度の高い財を製造する立場と使用する立場の双方の専門家が含まれるよう留意して選定し、気候変動対策に詳しい方に対応いただいた。なお、調査は

2013年3～7月に実施した。インタビューにおいては、全ての対象者に同じ説明資料を用いて排出削減策・評価項目について説明を行ったうえで回答を得た。

表5-1 インタビューを行った専門家の所属・専門等

政府関係者	4人(環境省2人・経産省2人)
企業	18人(素材メーカー・業界団体(鉄鋼, セメント, 紙パルプ, 化学)6人, 最終製品メーカー5人, コンサルタント3人, 金融1人, リサイクル1人, エネルギー2人)
研究者	20人(環境政策4人, 国際政治1人, 国際学1人, 資源経済学2人, 経済学1人, エネルギー経済学2人, エネルギー工学1人, 素材工学3人, 土木工学1人, 環境システム工学3人, 環境工学1人)
NPO	2人

### 5.2.2 対象とした排出削減策

本研究では、提示する削減策として、炭素強度の高い財の製造時の炭素強度を下げるインセンティブとなるもの(一部の策は財の消費を抑制するインセンティブともなる)を選定することとし、選定にあたっては、義務的に実施するものと参加自由度が高いものを2つずつ取り上げることにした。また、従来導入された場合に効果が大きいと考えられている策に加え、炭素強度の高い財への対策として関連する事項に最近新たな提案や研究がなされていることも踏まえて策を選定した。

インタビュー調査で提示した4つの排出削減策を表5-2に示す。

第3章において述べたとおり、IPCCの第5次評価報告書(5<sup>th</sup> Assessment Report, AR5)の第3作業部会による報告書では、国内・地域内の政策として、(1)経済的インセンティブ、(2)直接規制によるアプローチ、(3)情報プログラム、(4)政府の公共財・サービスに対する規定と調達、(5)自主的な行動の5つに分類している(IPCC, 2014)。これをふまえ、本研究では、国内・地域内の政策として代表的な経済的インセンティブである炭素税を、直接規制によるアプローチとして消費ベースでの排出算定に基づく各国の義務的な規制を、情報プログラムと政府の公共財・サービスに対する規定と調達に関する政策として政府調達を伴う国際認証を、排出削減策として選定した。さらに、AR5において別途整理されている国際的な取組から、国際交渉においてこの先の枠組みの一つの可能性として議論されている様々なアプローチに位置づけられるものを取り上げることとし、現在日本国政府が提唱し取組を進めているジョイントクレジットメカニズム(Joint Credit Mechanism, JCM)をもう一つの排出削減策として選択した。

この他にも、温暖化の対策としては様々なものが提案・研究されているが、炭素強度の高い財の需給を考えた場合に効果的なものを選定するという観点と、回答者への負担を抑えるため提示する案をある程度限定したいことからこれらの4つの策とした。それぞれの策の具体的な選定理由と、説明は以下のとおりである。

#### a) 排出削減策1「上流炭素税」

一つ目の排出削減策(以下、「上流炭素税」と呼ぶ)はいわゆるトップダウン的な枠組みの代表的なものである。経済学的な観点から理論上は最も効率がよく、費用対効果も環境保全効果も高い(Gupta et al., 2007; Stiglitz, 2006)。

表5-2 4つの温室効果ガスの排出削減策案

排出削減策 1 (上流炭素税)	化石燃料について、当該燃料を産出・輸出する <u>最上流で炭素税として課税</u> する。課税分は価格に転嫁される仕組みとし、これを通じて、化石燃料を直接または間接的に使用する下流の全ての主体が応分に負担するようにする。課税は化石燃料の燃焼に伴う温室効果ガスの排出が抑制されるのに十分なレベルで設定するものとする。
排出削減策 2 (消費ベース排出算定)	国ごとに、その国での実際に排出された温室効果ガスの量ではなく、 <u>その国での消費に伴う温室効果ガスの排出量を算定</u> する(e. g. 他国から輸入した製品を作るために排出された温室効果ガスや、貿易の際に必要な輸送燃料分もカウントする。逆に輸出する製品を製造するための排出はカウントしない。)。つまり、その国での需要が誘発する他の国での温室効果ガスの排出につながる生産活動も含めてその国の責任分とする。そのうえで、 <u>各国ごとに一人当たりの温室効果ガスの排出量に応じて一定の削減を義務的に行う</u> (対象としては、先進国・途上国を含め全ての国に削減を求める)。
排出削減策 3 (国際認証)	炭素強度が高い財、つまり、製造に当たり多くの二酸化炭素を排出する物(鉄鋼、紙・パルプ、セメント等)に着目し、 <u>生産地または生産工場毎に国際的な炭素強度の認証制度</u> を設ける。合わせて、まずは先進国のみとしても、政府調達の際にはこれらの製品については炭素強度にも配慮するような仕組みを設け、より炭素強度が低いものが販売されるようにインセンティブをつける。
排出削減策 4 (JCM)	<u>他国の炭素強度が高い財の製造過程を改善</u> することにより、得られた削減分をクレジットとして自国の排出削減に組み込めるようにする。なお、実施に当たっては、 <u>二国間での取り決めに基づいて行うものとする</u> が、第三者による検証も実施して信頼性を確保する(日本政府提唱の二国間オフセットクレジットメカニズム/ジョイントクレジットメカニズムを用いて炭素強度が高い財の対策を進めるとするもの)。

山口(2013, 第7章)は、国際排出権取引について全ての国が参加し、有効な罰則条項によって国際的に履行措置が確保され、条件が整った場合のみとしつつその場合には最善の政策の一つとし、国際協調炭素税(各国が同率の炭素税を課す)は情報が完全な社会において、国際排出権

取引と同じ目標を達成可能とした。また、両者ともに現実問題としては実施が困難とし、削減コストに不確実性がある場合の効果に限定的であると論じているが(山口, 2013, 第7章), 本研究では様々な専門家の視点を得るため、理論的に最も効果的なものとして経済的手法である国際排出権取引か国際協調炭素税のいずれかを選定することとした。また、排出権取引は既に欧州をはじめ様々な国や地域等で導入の実績があるが(International Energy Agency (IEA), 2013), 他方、現状では炭素強度が高い業は適用除外であったり、枠が緩やかに設定される等の配慮が行われていることが多く(IEA and United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 2011; Helem, 2013), 今回の目的である炭素強度の高い財に対する削減策の検討という意味ではあるべき姿とは異なる形での導入実績がかえって導入した場合の想定がしづらい側面もあると判断し炭素税を選定することとした。

この対策をもっとも効率的に機能させるためには、全ての関係者(最低でも主要国)が同じ税率に同意し実施することが必須となるものであり(山口, 2013, 第7章), この策の導入により、中間財であれ最終財であれ、炭素強度が高い財の製造は経済的な負担が高くなることから、財の製造時の炭素強度、さらに財の消費を下げるインセンティブが働くと考えられる。また、税の設定レベルによっては途上国の経済成長を大きく損なうことなく途上国からの炭素強度の高い財の輸出を抑え、カーボン・リーケージを抑制することも可能であることも示唆されている(Li et al., 2012)。加えて、化石燃料の消費量に応じて全ての関係者が負担するように実施するものであれば公平性が高いと捉えることもできる。ただし、各国での導入・実施にあたっては税の導入が政治的に好まれるものではなく、またその税の負担はしばしば低収入層に集中し悪影響を引き起こすこと、特に途上国など制度がしっかりしていないところでは正しく関係者から税の徴取ができないおそれがあることが指摘されている(Gupta et al., 2007; Stiglitz, 2006)。

#### **b) 排出削減策2「消費ベース排出量算定」**

炭素強度の高い財の需給に働きかける対策として効果があり、近年研究が盛んに進められているものとして、消費ベースの排出量算定を活用した対策に着目した。消費ベースの排出量は、国際的な排出削減努力の共有における排出責任を踏まえた方法論の一つであり、途上国の排出増加の要因には他国向けの製品製造が寄与していることを踏まえたものである。消費ベースの排出量については必要データの入手可能性等技術的な難しさが指摘されていること等から(Ahmad, Wyckoff, 2003), 以前は製造ベースの排出量に基づく議論が中心であったが、最近では、例えば、Helem(2013)が消費ベースの排出量に着目し、EU諸国では温室効果ガスの排出量が減少したとされる一方で中国等途上国において先進国の需要を満たすために排出量が増加しており、地球全体ではむしろ状況は悪化していることに言及して必要な対策を論ずる等、様々な研究結果が報告されている。上記を踏まえ、本研究では、規制的手法として、消費ベースの排出量を従来の京都議定書型の枠組みに組み合わせる対策を選定した。

この策の優位性としてカーボン・リーケージを抑えること、途上国の排出に関するコミットメントの重要性が減ること、削減オプションが増えること、環境比較優位性を促進すること、競争力に関する懸念へ対応し得るものであること、技術革新を促進することがあると指摘されている(Ahmad,



Wyckoff, 2003). 他方, 必要となるデータや, 計算が多くなり, 実測ではなく推計による部分も多くなることが指摘されている. この策も, 一人あたりの消費ベースでの排出量に応ずる形ではあるが, 全ての関係者が義務的に対象となることを前提とするものであり, 財の製造時の炭素強度や消費量を下げるインセンティブが働くと考えられる. また, 全ての国が対象であるが, 実際にその国が消費する財に関連する温室効果ガス排出量に応じた負担を負うこととなるため, 公平性も高いといえる. なお, 排出量の把握を消費ベースで行うべきとする提案は, 国際交渉において中国が主張したものである. ただし, 2000年以降の急激な経済成長をもとに中国では内需も増えてきており, この方策をとることは中国にとって将来的に必ずしも有利ではないとする意見もある(2014年に著者が実施した政府交渉担当者へのインタビュー結果に基づく).

### c) 排出削減策3「国際認証」

排出削減策1と2は, 主要関係者の参加を前提とした法的拘束力のある義務的なものとなる. 次に, より自由度の高いアプローチから二つ選定することとした.

まず, いわゆるセクター別アプローチに着目し, 既に特定の業界の中で進められている取組をベースとしさらに発展させた手法として, 情報的手法である認証制度を取り上げることとした.

この策は一定の環境効率を満たすか否かの情報を示すことにより, 調達する者がより環境負荷の少ない商品を選択できるようにするためのものである. 情報的手法は気候変動の分野としては効果についてまだあまり明らかになっていないが, 環境政策手法として効果的とする研究もあるとされている(Gupta et al., 2007). 現状では素材について炭素強度に関する認証が用いられた例は筆者が知る限り存在せず, 認証を導入するための前提となる, 特定の産業の温室効果ガスの排出量算定手法を国際的に調和し同一の範囲・手法を用いて求めようとする動きも, 鉄鋼等一部に限定されている. 鉄鋼についても既に国際的に統一した算定手法(2013年3月に関連し鉄鋼のCO<sub>2</sub>排出量・原単位計算方法が国際標準規格ISO14404として発行(中野, 2013))を用いた排出量のデータが集積されているが, 算定結果は一般には公開されておらず製品の購入時に炭素集約強度を基にした比較は現状では不可能である. この点に着目し, 既存のデータを基に炭素強度が低い財を購入者が選択しやすいよう認証を用いて情報を明らかにする削減策を選定した. 認証制度については, 家電等のエネルギー効率等に対して国レベルで導入された事例も多い(Brown et al., 2000). また, 国際的には, 炭素強度そのものに関する認証ではないが, 環境分野で木材について導入された事例もあり(Forest Stewardship Council (FSC), 2014), 認証の消費者による受け止められ方について様々な報告がある(Shoji et al., 2014).

国際認証の導入は, 認証を行っている製品間の比較を可能とし, より炭素強度の低い製品の購入が促進されることが期待される. なお, 制度設計にあたっては同じ工場や, 会社, ましてセクターのレベルでも炭素強度の異なる種類の製品が作られることもあるため対象範囲を適切に定める必要がある(Fischer, Fox, 2012).

### d) 排出削減策4「JCM」

もう一つの自由度の高い排出削減策としては, 日本国政府が2011年に国連に提案し, 実施に向け調整を進めている二国間クレジットメカニズム(JCM)を取り上げた(UNFCCC, 2011). 炭素強度

の高い財に関するプロジェクトは、従来のクリーン開発メカニズム(Clean Development Mechanism, CDM)では省エネ対策等の取組み等が実際にあまり実施できなかったことや、審査等手続きに長期間が必要であること等が課題となっていたが、JCMは、二国間でのプロジェクトベースで実施することでこれらの課題を解消することを狙ったものである(日本国政府, 2013)。JCMについては未だ実証段階であることもあり、まだあまり既往研究は多くないが、そもそもこのメカニズムはCDMの課題に対応することを狙って検討されたものであり、炭素強度の高い財に着目するとCDMでの課題とされていた事項を排除し効果を出し得ると考え、排出削減策の一つとして選定することとした。

この策は限界削減費用の低い途上国で対策を講ずることでより経済的で効率的に対策を実施することを狙うものである。本研究では、このスキームを、特に炭素強度の高い製品製造過程の効率改善に用いることとした。したがって、いうまでもなく、この排出削減策は製造時の炭素強度を下げる効果を期待するものである。

### 5. 2. 3 削減策の評価項目

本調査で使用した削減策の評価項目は表5-3のとおりであり、5つの分類で10項目となる。本調査では、各評価項目について、各回答の傾向をより明確にするため、中立に近い場合にあっても支持的・消極的のいずれがより考えに近いかを選択するように「大変そう思う」、「ややそう思う」、「ややそう思わない」、「大変そう思わない」の四段階で回答を得た。結果の解析にあたっては、回答それぞれを、「3」、「1」、「-1」、「-3」としてスコアリングを行ったうえで実施した。

Guptaら(2007)は、多くの研究結果に共通するものとしたうえで、政策評価の基本的なクライテリアとして、環境効果、費用効果、分配効果(衡平性を含む)、制度的・実務的实施可能性の4つを挙げている。山口は、上記4つに加えて技術普及・開発効果が重要と挙げている(山口, 2013, 第7章)。

これらを踏まえて本研究では、環境保全上の効果として「温室効果ガスの排出削減」と「炭素リーケージの抑制」の2点、「実施費用負担」として1点、実務的な実施可能性の観点から「煩雑さ」と「データ入手可能性」の2点、制度的な実施可能性の観点から「既存の制度との組み合わせの矛盾の有無」の1点、各国の受け入れの可能性として全体的な「国際合意の蓋然性」と「途上国の参加可能性」の2点、技術革新・普及として「技術普及」と「技術革新」の2点を取り上げることとした。なお、分配効果については、国際的な共通の定義がなく曖昧な概念であり(山口, 2013, 第7章)、何が最適な分配の構成要素かの合意はなく比較が困難であることから(Gupta et al., 2007)、本研究では、直接的な評価項目は含めないこととした。なお、対策導入による環境便益の分配としては、間接的に「炭素リーケージの抑制」が関わり、負担の分配に関しては、間接的に国際的な実施可能性に関する項目、とりわけ「途上国の参加可能性」の項目が関連すると考えられる。

表5-3 調査で使用した評価項目

<p><b>1・環境保全上の効果</b>            (※この項目については『<u>主要な参加者が合意して実施された場合</u>』という前提で回答を求めた)</p> <p>① 温室効果ガス排出の削減に結び付くか            ② 貿易を通じて、炭素リーケージを抑制することができるか</p>
<p><b>2・経済効率(費用対効果)</b>            制度自体の実施にかかる費用を、過度の負担とせずに実施可能か</p>
<p><b>3・実行性(※実務的・制度的な実施可能性)</b></p> <p>① 煩雑で手続きに時間がかかりすぎる等の問題が無く実際運用可能か.            ② 制度運用にあたり必要なデータは容易に入手できるか.            ③ 既存の国連気候変動枠組条約の下の制度と矛盾なく組み合わせることができるか.</p>
<p><b>4・国際的な実施可能性(※各国の受け入れ可能性)</b></p> <p>① 積極的な対策にあまり乗り気ではない国が強く反対することがなく、国際合意にいたる蓋然性は高いか.            ② 途上国でも無理なく参加できるか.</p>
<p><b>5・技術革新・普及</b></p> <p>① 新たな技術革新を促進することができるか.            ② 優れた技術の普及・移転を進められるか.</p> <p>※部分は本稿において注記したもので、調査時には提示なし.</p>

また、検討する排出削減策の一つには上述のとおり日本政府による提案に基づくものを含むが、本研究では、特定の国の政府が提案することを前提とはせず、提案者に関わらず国際的な議論がなされた場合として評価を求めた。

#### 5.2.4 クラスタ分析の実施とその手法

回答にあたっては、回答者が自身の専門知識や所属組織の温室効果ガス排出削減対策との関わり方の違い(例えば対策により直接何らかの対応が必要)等により、評価項目間の関連性を想定している可能性があるが、これは複数の回答者の回答を単純に集計した結果のみでは把握することができない(亀山, 2009)。また、一般市民を対象とした研究結果ではグループにより温暖化対策や排出枠の利用に関する関心や支持傾向が異なることが示されている(中村・加藤, 2011)。そのため、スコアリングした専門家毎の各評価項目への回答に対してクラスタ分析を実施して回答者のグループ分けを行い、特定の排出削減策に対し支持的な傾向を有する、または批判的な傾向を有する等のグループ毎の特徴を分析した。その際、回答者の属性と支持的または批判的な排出削減策案、その評価につながる項目の関係を検証した。個体間の距離の定義には平方ユークリッド

距離を、またクラスター間の距離の測定には完全連結法(最長距離法)を用いた。なお、クラスターの構成データが2以下となったものはグループより省いた。

### 5.3 炭素強度の高い財に関する排出削減策に関する専門家へのインタビュー調査:結果

#### 5.3.1 回答結果と単純統計解析

4つの削減対策についての各評価項目への回答結果は図5-1のとおりである。特徴を把握しやすくするため、スコアリングした回答結果は図5-2のとおりである。4つの排出削減策で回答の傾向は様々であり、排出削減策1では評価項目「途上国の参加可能性」、「国際合意の蓋然性」以外では支持的な回答が多く、排出削減策2では評価項目「実施費用負担」、「煩雑さ」、「データ入手可能性」等で批判的な回答が多かった。排出削減策3・排出削減策4では、批判的・支持的な回答ともに中程度のものが多かった。

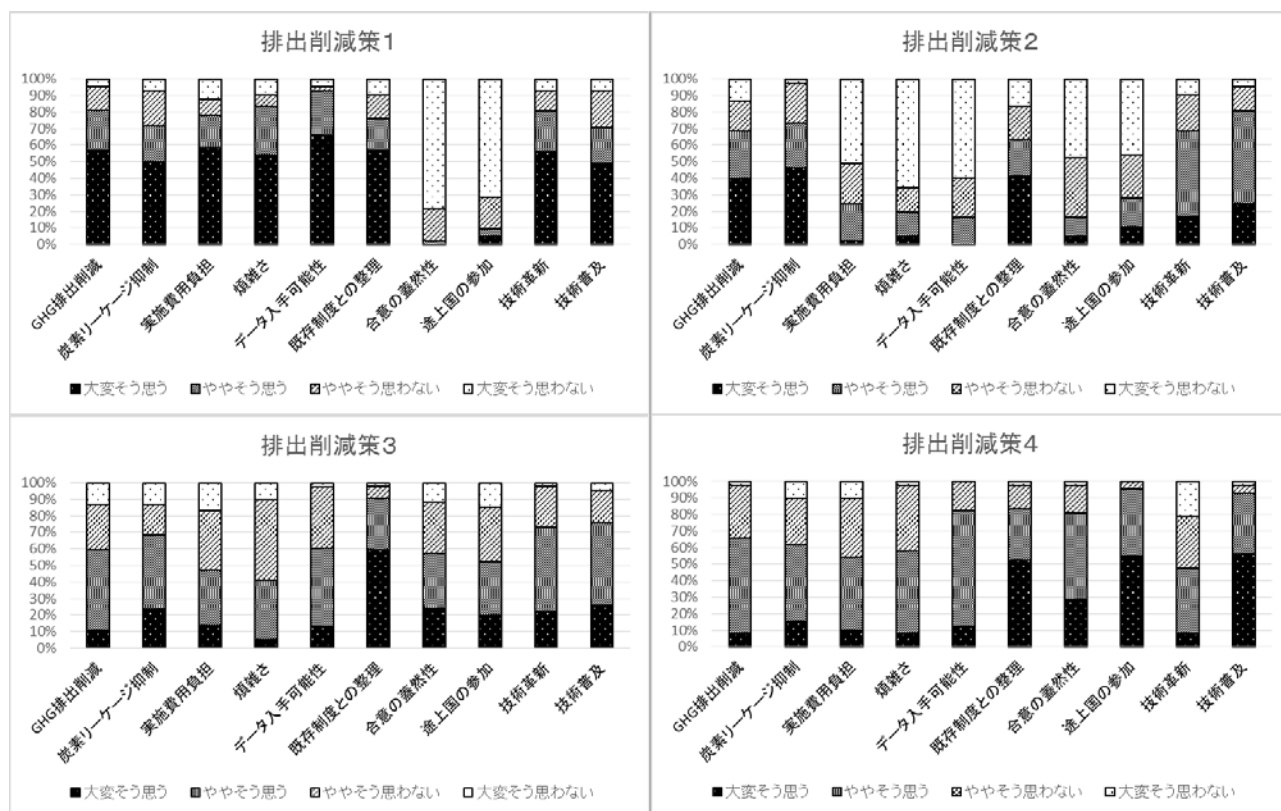


図5-1 各評価項目に対する回答の分布

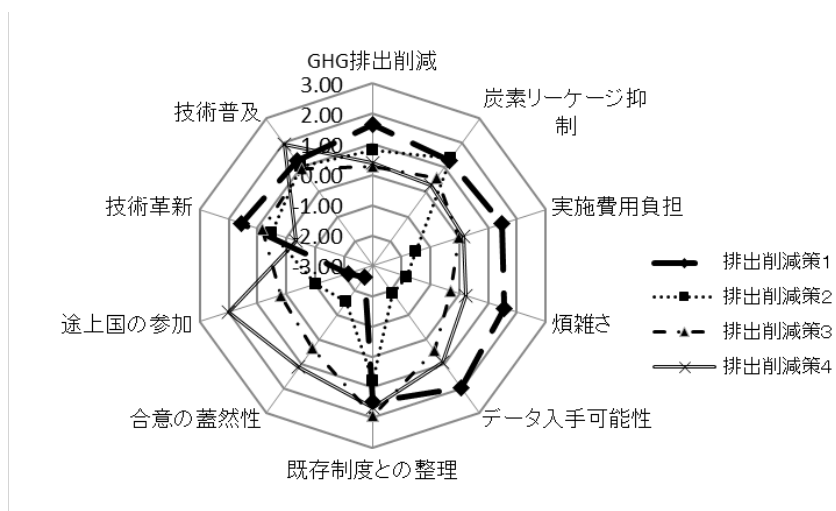


図 5-2 スコアリングした各排出削減策についての回答

### 5.3.2 各排出削減策の同一評価項目に対する符号付順位検定結果

排出削減策の10の評価項目への回答について、他の3つの排出削減策の該当する評価項目に対する回答と比較し、統計的に有意な回答の差があるかを検定した。対応のある2群の non-parametricな検定であるため、符号付順位検定 (Wilcoxon signed-rank test) を行った。検定に統計ソフトR (ver. 3.0.2)<sup>1</sup>を用い(以下同様)、有意水準としては5%、1%、0.5%を用いた結果を表5-4に示す。以下に表5-4より見いだせることを4つの排出削減策それぞれについて述べる。

#### a) 排出削減策1「上流炭素税」

評価項目「温室効果ガスの排出削減」、「実施費用負担」、「煩雑さ」と「データ入手可能性」について他の3つの排出削減策の同じ項目への回答と比して有意差のある(信頼区間95%、以下同様)高い点数の回答を得ており、他方、国際的な合意の可能性に関する二つの評価項目である「国際合意の蓋然性」と「途上国の参加可能性」については、どちらも他よりも有意に低い点数の回答となった。また「技術革新」についても排出削減策2、4よりは有意に高い点数の回答となった。つまり、他の排出削減策と比較しても、対策導入のそもそもの目的である温室効果ガスの排出削減に対する効果は高く、技術革新も促進し、実行にあたる問題も少ないが、合意の可能性は低いという回答が多かった。

#### b) 排出削減策2「消費ベース排出量算定」

「実施費用負担」、「煩雑さ」、「データ入手可能性」について他よりも有意に低い点数の回答となり、また「国際合意の蓋然性」と「途上国の参加可能性」への回答も有意に低かった。対策実施にあたっての実行性を考えると課題があり、制度に必要なデータが多く、収集と整理の作業負荷が高いということが、必要な費用の高さにもつながり、合意の蓋然性を低くすると判断をした回答者が多かったと考えられる。

<sup>1</sup> coin パッケージの wilcoxsign\_test を実施。

#### **c) 排出削減策3「国際認証」**

評価項目「温室効果ガスの排出削減」については排出削減策1よりも有意に低く、「炭素リーケージの抑制」については排出削減策2よりも有意に低い回答となった。一方、「国際合意の蓋然性」と「途上国の参加可能性」についての回答は排出削減策1と2よりも有意に高い点数となり、排出削減策4よりは低い結果となった。導入による環境保全上の効果については限定的であるが、国際的な合意の可能性は排出削減1と2よりは高いと判断する回答者が多い結果となった。

#### **d) 排出削減策4「JCM」**

「合意可能性」に関する評価項目二つについての回答はどの排出削減策よりも有意に高く、一方「技術革新」への回答はどの排出削減策よりも有意に低かった。また、「技術普及」については、排出削減策1「上流炭素税」には劣るが他の2つの排出削減策よりは有意に高い点数の回答となった。導入による環境保全上の効果は限定的であるが、国際的な合意の可能性は高く、技術革新はひき起こさないが、技術普及の効果はあるとした回答者が多かったことが窺える。

表5-4 4つの排出削減策の同一評価項目に対する符号付順位検定の結果

評価項目	策1-策2	策1-策3	策1-策4	策2-策3	策2-策4	策3-策4
温室効果ガス排出の削減に結び付くか	>	>>>	>>>	-	-	-
貿易を通じて、炭素リーケージを抑制することができるか	-	-	>	>	>>>	-
制度自体の実施にかかる費用を、過度の負担とせず実施可能か	>>>	>>>	>>>	<<<	<<<	-
煩雑で手続きに時間がかかりすぎる等の問題が無く実際運用可能か	>>>	>>>	>>>	<<<	<<<	-
制度運用にあたり必要なデータは容易に入手できるか	>>>	>>>	>>>	<<<	<<<	-
既存の国連気候変動枠組条約の下の制度と矛盾なく組み合わせることができるか	-	-	-	<<	<<	-
積極的な対策にあまり乗り気ではない国が強く反対することがなく、国際合意にいたる蓋然性は高いか	<<<	<<<	<<<	<<<	<<<	<
途上国でも無理なく参加できるか	<	<<<	<<<	<<	<<<	<<<
新たな技術革新を促進することができるか	>>>	-	>>>	-	>	>>>
優れた技術の普及・移転を進めることができるか	-	-	-	-	<<<	<<<
	不等号の数が一つ:5%水準で有意に差がある 不等号の数が二つ:1%水準%で有意に差がある 不等号の数が三つ:0.5%水準で有意に差がある 不等号の向き:どちらの政策の評価がより高かったかを示す -:有意差なし					

### 5.3.3 クラスタ分析の結果

クラスタ分析の結果、クラスターの数は図5-3のとおり、AからEの5グループとした。

なお、クラスタ分析では、評価項目「既存の国連気候変動枠組条約の下の制度と矛盾なく組み合わせることができるか」については、グループ分けにおいて除外して整理した。これは、表5-4に示す符号付順位検定結果より、他の排出削減策との間で有意差がないものが多くグループ分けにおいて寄与が低いと考えられたためである。各グループの回答者の属性は表5-5のとおりであり、特定の属性の回答者のみとなったグループはなかった。

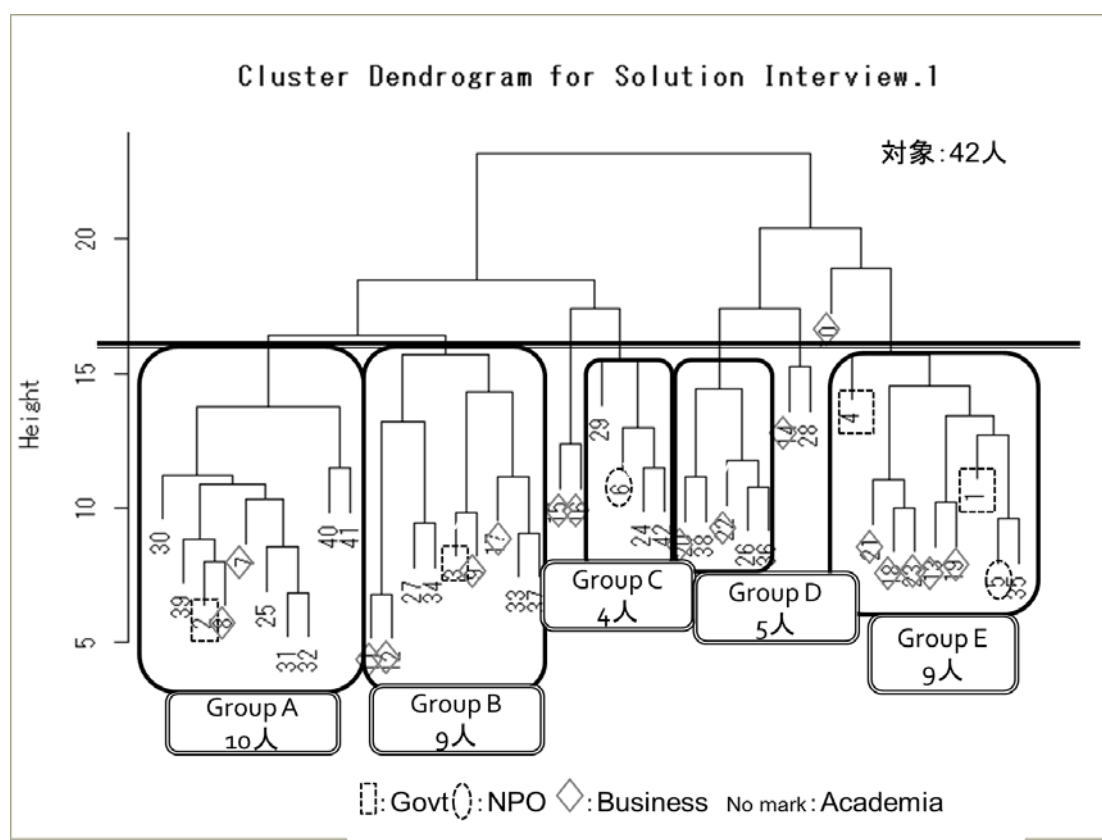


図5-3 クラスタ分析によるグループ別排出削減策の評価

表5-5 各グループの回答者の属性

	行政官	NPO	企業	研究者	計
グループ A	1	0	2	7	10
グループ B	1	0	4	4	9
グループ C	0	1	0	3	4
グループ D	0	0	2	3	5
グループ E	2	1	5	1	9
計	4	2	13	18	37



### 5.3.4 クラスタ分析によるグループごとの分析結果

各グループの評価項目ごとの回答結果を図5-4に、各グループの4つの排出削減策毎の評価結果を図5-5に、各グループの排出削減策ごとの回答をスコア化したものの平均と分散を表5-6に示す。

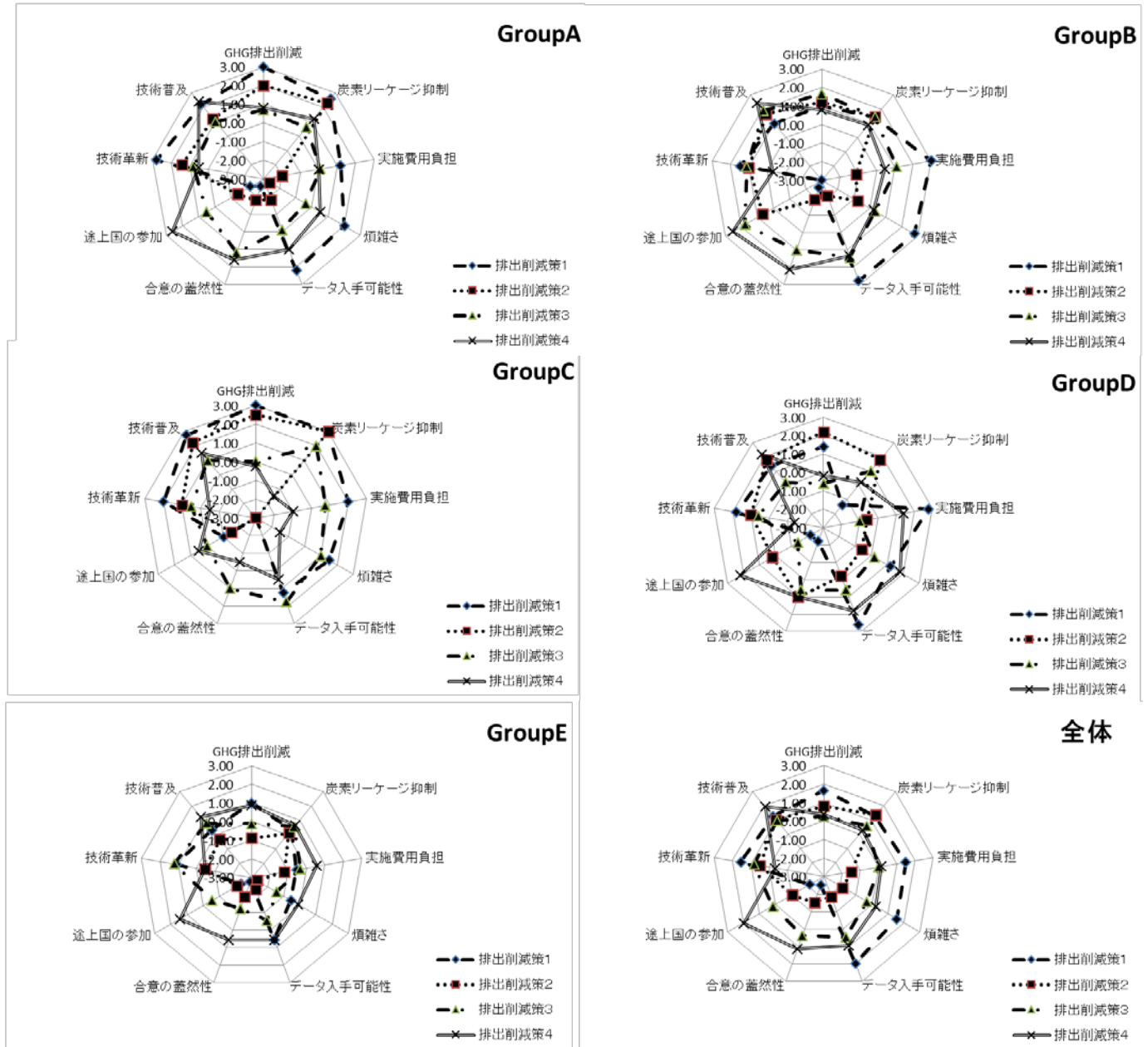


図 5-4 各グループの 4 つの排出削減策の評価結果(個別評価項目)

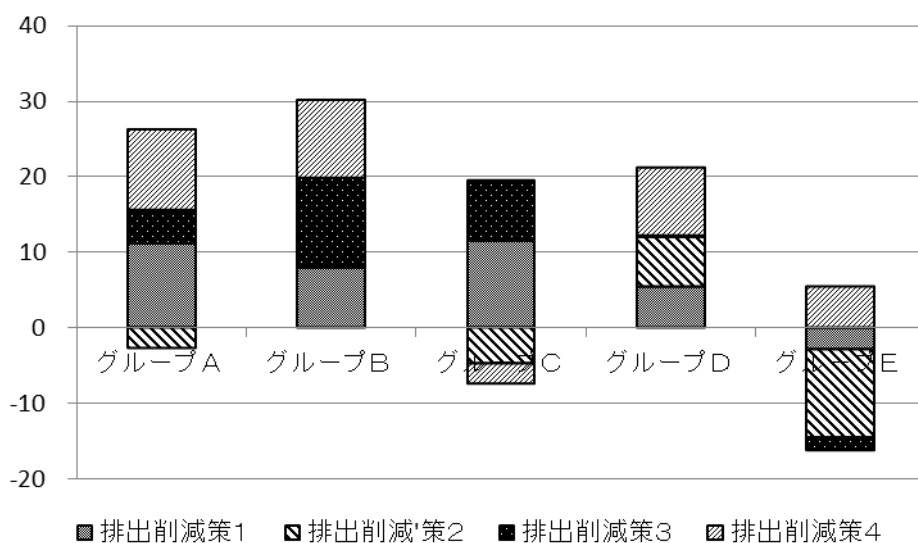


図 5-5 各グループの 4つの排出削減策毎の評価結果(全体)

表5-6 各グループの排出削減策ごとのスコアの平均値

	全体平均	分散	GroupA	GroupB	GoupC	GroupD	GroupE
排出削減策1	0.68	3.80	1.24	0.88	1.28	0.60	-0.32
排出削減策2	-0.45	3.18	-0.30	0.01	-0.53	0.73	-1.31
排出削減策3	0.37	0.74	0.49	1.31	0.89	0.02	-0.19
排出削減策4	0.75	1.14	1.18	1.16	-0.31	1.00	0.59
排出削減策1-4平均	0.34		0.65	0.84	0.33	0.59	-0.31
分散			2.50	2.12	3.41	1.75	1.36

限られた人数を対象としているため評価は慎重であるべきであるが、各グループの人数は表5-5のとおりであり、人数ではグループAが最大であり、グループA、グループB、グループEはそれぞれ全体の25%程度を占めた。したがって、多数派となるグループは存在しなかった。一方、グループCとDは、他の3グループの半数程度の人数となった。

表5-6のとおり、4つの排出削減策の回答をスコア化した値で見ると、グループEが突出して低い点数の回答となった。グループEは、表5-5のとおり、9名のうち半数を超える5名が企業となり、その他の構成員は行政官2名、NPO1名、研究者1名となる。このグループは、エネルギー多消費産業

(鉄鋼業を除く)に関わる者、あるいはその意見をよく知る者により構成されていた。

5つのグループは表5-6と図5-4、図5-5で見られるとおり、それぞれ支持的または批判的に捉える排出削減策は異なり、排出削減策1「上流炭素税」、排出削減策3「国際認証」と排出削減策4「JCM」については、5グループのうち消極的な回答となったのは1つのグループであり(グループC)、残りの4グループは支持的な傾向となったが、排出削減策2「消費ベース排出量算定」については、5グループのうち3つ(グループA、C、E)が消極的な回答傾向を示した。

4つの削減策の中で排出削減策1を最も高く評価したのはグループAとCであり、排出削減策4を最も高く評価したのはグループDとEであった。グループBは排出削減策3を最も高く評価した。一方、最も低い評価は排出削減策2に集中し、唯一グループDが排出削減策3を最低評価とした。

グループAは、表5-5のとおり、10名のうち、7名が研究者となり、企業が2名、行政官が1名という構成であった。企業2名は1名がエネルギー多消費産業(鉄鋼業(高炉-転炉))、もう1名は金融コンサルタント業であり、研究者は環境政策2名、環境システム工学、土木工学、素材工学、環境システム工学、資源経済学、エネルギー経済学各1名と様々であるが鉄鋼に関連する研究を行う者2名を含む。このグループでは環境政策に詳しい者と特に転炉での鉄鋼業に詳しい者が多かった。

グループBについては、9名の内、企業が4名、研究者が4名、残り1名は行政官という構成であった。企業では4名のうち、最終製品製造業2名、鉄鋼業(電炉)1名、リサイクル業1名であり、研究者はエネルギー工学、資源経済学、素材工学、環境システム工学であった。このグループでは、環境対策に積極的な企業に関わる者、あるいはその意見をよく知る者が多かった。

グループCは、4名の内、研究者が3名、NPOが1名となった。研究者は国際環境政策、国際政治、エネルギー経済を専門とする者であり、国際政治に詳しい者が多かった。

グループDは、5名の内、研究者が3名、企業が2名となった。研究者は、金属工学、環境システム工学、環境工学を専門とする3名、企業はコンサルタントと最終製品製造業1名であった。消費ベースでの排出算定や関連して部品の調達に詳しい者が多かった。

排出削減策を導入した場合に最も影響を受けるのは、炭素強度の高い財の製造業である。本研究では、上述のとおり主要な高炭素強度財製造業を含めてインタビューを実施したが、排出削減策に対する評価は大きく二つに分かれ、鉄鋼製造業は転炉による製鋼に関わる者あるいは詳しい者がグループA、電炉による製鋼に関わる者あるいは詳しい者はグループBと排出削減策全体を積極的に評価するグループと位置付けられ、その他の高炭素強度財製造業(セメント、紙・パルプ、化学工業、電力)に関わる者あるいは詳しい者は全て排出削減策全体を消極的に評価するグループEとなった。我が国の工業部門は、他国と比してエネルギー効率が高いとされており(RITE, 2014)、国際的な需給を考えると排出削減策の導入は他国に対して比較優位性を有しているはずであるが、鉄鋼製造業以外の高炭素強度財製造業はJCM以外の排出削減策に対しては消極的となった。鉄鋼製造業のみが他の企業と異なる傾向を示したのは、今回実施したインタビュー結果によると、このような排出削減策の導入は自国内の関連企業にとって有利に働く側面があると捉えていることが効いている。この背景には、鉄鋼製造業では各国の製鉄所のCO<sub>2</sub>排出量の算定方法をISOによる規格を用い国際的に調和させるとともに、既にその方法に基づく各製鉄所の算定結果を

国際業界団体において定期的に収集・解析していること(第3章, 3.4(3)に詳述)が大きく, 炭素強度の比較で日本企業が優れていることが国際的に共有されていることがある。また, 業界内のみでの共有とはいえ, 国際的に同じ尺度で炭素強度を比較し議論する素地が既にできていることは, 他の製造業とは排出削減策の実施にあたる難易度が大きく異なると考えられる。他の高炭素強度財製造業ではこのような状況とはなっていないが, その理由には製造した財の国際的な流通状況も影響していると考えられる。鉄鋼は第2章等でも述べたとおり, 国際的に流通されているが, セメント・電力については, 日本の場合は島国であることもあり国際的にやり取りはあまり行われておらず, 紙・パルプについても国際的に流通する製品は一部の高級品質のものに限られているとのことであった。化学工業については国際的に広く流通しているものの, 製品の種類が鉄鋼とは比較にならないほど多種・多様であり, また同じ製品であっても原料や工程が様々であり, それによってエネルギー消費量も大きく異なるため, 炭素強度の算定を調和させることは極めて困難とのことであった。これらを背景に, 鉄鋼業以外では, 同じ業種内の国際的な議論の場でも, 現状では各国・各施設のCO<sub>2</sub>排出量を統一の方法で測定し結果を共有するということが現状では行われていないとのことである。

転炉での鉄鋼業に詳しい回答者が多かったグループAでは, 表5-6のとおり, 「上流炭素税」と「JCM」がほぼ同じ点数で高い評価となり, 次いで「国際認証」が続き, 「消費ベース排出」のみがマイナスの評価となった。「上流炭素税」については国際的実施可能性以外は全て高い評価となり, 「JCM」は特に環境保全上の効果に現れるように「上流炭素税」には劣る評価であったが, 技術革新を除いて評価項目全般に高めの評価となった。「国際認証」が低くなったのは, 実行性に関する評価項目と国際的実施可能性に関する評価項目が極めて低かったためであるが, インタビューでは, 消費を考える場合, 鉄鋼製品は素材として貿易された後, 最終製品に加工されて貿易されることがままあり, どの段階をもって消費と捉えるかが困難であること, 特に鉄鋼生産量の多い中国は国際的な議論において重要なプレイヤーとなるが, 他国への輸出も多いが自国内の消費量も大きいいため強く反対すると予想されることをその理由とする意見があった。

各排出削減策に対するグループ毎の回答結果については次章において考察と合わせて述べる。

#### 5.4 インタビューで得られた知見も加味した政策含意についての考察

前章の分析結果から導出される政策的含意と, インタビューで得られた定性的な情報と併せて得られた示唆を以下にまとめる。

なお, この研究ではインタビューの対象はすべて日本人としたが, 炭素強度の高い財は, 例えば鉄鋼やセメント等, 経済成長時に多用されるものが中心となっていることから, 回答者が所属する国における当該財の需要の動向や輸出入の状況が変われば異なる回答が得られる可能性もあり, 結果の解釈は日本人のみであることに留意する必要がある。

#### 5. 4. 1 排出削減策1「上流炭素税」について

排出削減策1については、表5-6に示したとおり、グループEと他の4グループにおける評価項目「国際合意の蓋然性」と「途上国の参加可能性」への回答以外は強めの支持が顕著であった。クワスター分析の結果、最も各削減策に対して消極的な回答をしたグループEにおいても評価項目「温室効果ガスの排出削減効果」については4つの排出削減策のうち排出削減策1に最も高い点数をつけ、逆に図5-4より最も排出削減策1を評価していたグループCにおいても「国際合意の蓋然性」については排出削減策1に最も低い点数をつけ消極的な回答をしていた。

ただし、インタビューにおいては、理論上は最も望ましいが実際には政治的な調整の負荷が非常に高く合意は難しいとする意見が多かった。また、低い税率ならば合意の可能性はあり得るが、それでは結局導入した対策が意図した効果は得られず、効果が得られるような程度の税率であれば資源生産国を中心に強い反発が予想されること、国際的に全ての国を対象に調和された税の導入は例がなく資源生産国を除いても各国間の調整は困難と考えられること、国内でも経済活動への悪影響を懸念することから炭素強度の高い財を製造・使用する企業を中心に反発が強く合意の蓋然性が低いとする意見が多かった。

また、他のグループでは「国際合意の蓋然性」と「途上国の参加可能性」以外については支持的な回答が中心であったが、グループDでは「炭素リーケージの抑制」について消極的な回答がなされていた。この評価項目に関しては、実際網羅的にカバーされ、適切に価格が転嫁されるよう運用されることは難しく、結局新しく他の形で炭素リーケージが起こることになるのではないかとする意見が目立った。他方、合意は極めて難しいだろうが、この方策は合理的であり様々な事項にわたりメリットは大きいことから粘り強く交渉を続けることが重要とする意見もあった。

このようなことから、この方策の検討にあたっては、期待される効果を実現するために適切な運用を行うための制度設計とその効果を確実にするための検証と見直し等に加え、利害関係者への他の方策と比した利点に着目した粘り強い働きかけが重要と考えられる。

また、同じ経済的手法である排出権取引も、第3章に記したとおり、炭素税と同様に他の政策と比較すると仕組みが単純であり、価格シグナルを排出削減のインセンティブとする仕組みで経済全体を対象とすることができる。そのため、費用を最小化したうえで生産・消費の段階を変化させ得る。排出権取引であれば、第3章に述べたとおり中国・南アといった国も参加の方向であることを考えると、今回多くのグループが「国際合意の蓋然性」と「途上国の参加可能性」に消極的な評価を行ったが、この評価が変わる可能性もある。その他の評価項目に関しては、排出権取引は第3章から炭素税と共通と考えられ、主要な主体が参加しなければ狙った通りの効果は出せず、炭素リーケージをきちんと抑制できるよう制度設計を行い、その効果を確実にするための検証と見直しが重要と考えられる。

#### 5. 4. 2 排出削減策2「消費ベース排出」について

この策に対し、最も消極的な回答をしていたのはグループEであり、全てのグループの全ての排

出削減策に対する回答の中でも突出して低い点数となる回答となった。一方、このグループEでも「炭素リーケージの抑制」については他のグループと同様に支持的な回答がなされていた。評価項目「温室効果ガスの排出削減」「技術革新」「技術普及」についてはグループE以外は皆支持的な回答となった。グループEに対するインタビューでは、実行上サプライチェーンを遡っての必要な情報の把握が過大な負担になることを懸念する意見が多かった。

また、この排出削減策2については表5-4のとおり「実施費用負担」、「煩雑さ」と、「データの入手可能性」に関する評価項目について他のすべての排出削減策より有意に低い点数となる回答となった。最も支持的な回答をしていたのはグループDであるが、このグループであっても上記三つの評価項目については他のグループ同様に消極的な回答がなされていた。他方、このグループDでは他のグループでは消極的な回答が中心となった「国際合意の蓋然性」については支持的な回答となった。なお、グループDは上述のとおり人数では5つのうち比較的小さいグループとなる。また、インタビューの結果、このグループについては消費量に基づく算定に関し専門的な知見がある者が多かった。グループDの回答者からは、消費量に基づく温室効果ガスの算定はどこまでを対象に整理するのかが実行性は大きく異なり、現行の排出算定手法のような精度をもとめるのではなく、簡略化した算定方法や推計手法を用いて実施することとすれば、煩雑になりすぎず、データの入手や推計を含め十分に実行可能であり、この手法は最も公平であるため長期的には一番望ましいとする意見があった。この意見は、AhmadとWyckoff(2003)等による、途上国を含め各国のデータ整備は進む方向にあり、推計手法の改善も研究されつつあることから、現状では他の手法と比べて実行性に欠けるとしても、将来的には実行性の低さが導入の妨げとはならなくなる可能性も期待されるという意見と一致する。

このようなことから、排出削減策2については、実行性を高めるため正確性については多少劣ることを許容して簡便化した算定を行うこととし、その具体的な手法や、必要なデータが欠損している場合の代替推計手法等も明示する等を行うことによって算出にあたる負担を軽減することが重要と考えられる。

#### 5.4.3 排出削減策3「国際認証」について

最も消極的だったのはグループEであるが、このグループでは「煩雑さ」と「国際合意の蓋然性」の評価項目についての回答が特に低いスコアとなった一方、「炭素リーケージの抑制」、「技術革新」と「技術普及」については一定の効果があるとする弱い支持的な回答となった(図5-4)。全般的に弱い支持的な意見が多かったが、その中では「煩雑さ」については最も問題とはならないと評価したグループCでも策全体については弱い支持に留まり、それ以外のグループでは消極的な回答が中心となった。また「実施費用負担」についてはグループBとCが弱い支持的な回答をしたが他は消極的な回答となった。インタビューにおいて聴取したところ、財の種類にもよるが、ルールを決めるまでの調整が大変という意見や、第三者認証を導入するのであれば他国との調整も求められ煩雑な作業が必要と考えられ、実施費用の負担にもつながるといった意見があった。

また、「国際合意の蓋然性」についてはグループE以外は弱い支持的な回答となり、「途上国の

参加可能性」についてはグループEとグループDの二つが消極的な回答を行った。インタビューにおいて聴取した結果、条件によっては一部の財に限れば合意の可能性も低くないとする意見もあった。具体的には、財の種類によって状況はまちまちであり、炭素強度の高い財の中にも国際流通があまりないものもあれば、既に排出算定方法について国際的な調和が進んでいる財（例えば鉄鋼）もあり、国際的な調和が進んでいるものに限定すれば可能とする意見や、対策を進める資金がない等により反対する国はあるだろうが、まずはそれらの国を除いて開始し徐々に参加者を増やすことも考えられるといった意見、さらに参加を考える国は自国の事業所が対象とならなければインセンティブは働かないが、他方、効果を出すためにはその時点での最も高いレベルの技術とすることが望ましく、例えば鉄鋼では大量に生産する中国のその時点での最高レベルの技術をもって認証することがよいといった意見である。これらの意見を踏まえると、一定の財を対象とした認証とし、ある程度その財を生産する少数の国から始めて適用国を拡大していくことも一案と考えられる。ただし、排出削減策3についてグループEに次いで全般的に評価の低かったグループDでは、認証制度については、認証を得る条件が固定化してしまい、認証を得た企業がそれを「免罪符」として技術改善を進めなくなることや、虚偽の報告をもとに認証を得る等誠実な運用が妨げられる可能性を危惧する意見がみられ、削減策の実施に当たってはこの点の考慮も必要と考えられる。また、一部の財については、炭素強度の他に、含有する成分の安全性や強度等他の製品の質に関する認証も重要とする意見があった。

このようなことから、この方策の検討にあたっては、該当する財の製造に関する温室効果ガス排出削減対策の普及や国際調和の動向等から対象とする財を定め、煩雑さを軽減するためにルールを明確に提示し、認証を行う取組のレベルの設定の際には狙った効果が得られるように該当する財の主要な生産国の状況を考慮したうえで、認証への参加のインセンティブが働き、かつ一定の効果も確保できるようにすることが重要と考えられる。

#### 5.4.4 排出削減策4「JCM」について

全般的にやや弱い支持的な意見が多かったが、他の排出削減策については消極的であったグループEが唯一支持的な回答をしたのがこの策である。このグループでは「煩雑さ」と「技術革新」については弱い消極的な回答となったが他は皆弱い支持的な回答となった。

また、「技術普及」と「途上国の参加可能性」については最も消極的なグループを含めても支持的な回答となり、強い支持をする回答も目立った。さらに、最も支持的なグループ（グループB）でも唯一消極的な評価となったのが「技術革新」であり、全体的に消極的な回答となった。この策についてはグループCが突出して消極的な評価を行っていた。なお、グループCは上述のとおり人数では5つのうち比較的小さいグループとなる。また、インタビューの結果、このグループについては国際的な政策に専門的な知見がある者が多かった。グループCの構成員にインタビューにおいて聴取したところ、この排出削減策については他の対策が主流であることからニーズがない場合や、CDMと同等とみなされるようなしっかりした制度になるかを懸念視する場合があります、日本以外の他の先進国が積極的には取り組まず広がり限定的事となることを懸念する意見や、日本の取組につ

いてもどのレベルの排出削減を目指すか次第でこの策に費やすリソースも決まってくるという意見、途上国に対して義務的なキャップがかかるようならば効果は大きく上がるであろうがそうでない範囲ではあまり期待できないという意見があった。また、CDMの問題点に対応するとして提案された方策であるが、着実な成果を得るためにはCDM同様の継続したモニタリング等の検証が必要であり、CDMではあまり対象とならなかった国・技術をカバーできるのであれば効果に一定の期待はできるとする意見があった。

このようなことから、この方策の検討にあたっては、効果的な取組を広げるための配慮が重要であり、一定の温室効果ガスの排出削減効果はあるものの既存のCDMではあまり対象となっていない国や技術を捉えて実施し、信頼性を確保するために測定・報告・検証 (Measurement, Reporting and Verification, MRV) を確実なものとするような仕組みとすること等が重要と考えられる。

また、合意の可能性が低いとされた対策は、長期的には時間をかけた調整により合意に至る可能性も否定できないが、少なくとも短期的には合意を得て実施される可能性は低いと考えられる。より効果的な対策を進めるためには効果的な技術を用いることが重要であるが、技術の実用化には一定の時間が必要であり、短中期的には既存技術の向上と普及が重要で、中長期的に実用化が見込まれる技術は、将来の普及を視野に入れた体制を取りつつ技術開発に注力することが必要とされている(総合科学技術会議, 2013)。このように考えると、本来、温室効果ガスの排出削減効果が高く技術の革新に貢献する策を優先すべきであるが、短期的には合意が容易で、現存する優れた技術の普及に貢献する対策を進めることが効果的と考えることができ、そのような立場からは、当面、JCMのような排出削減策をより重視することには一定の意義があると考えられる。

## 5.5 本章で明らかとなったこと

炭素強度の高い財に着目した温室効果ガスの排出削減策4つを取り上げ、温室効果ガスの排出削減効果や実行性等の評価項目について、我が国の専門家より評価を得るためインタビュー調査を実施し、Wilcoxonの符号付順位検定統計解析とクラスター分析を行った。

その結果、提示した排出削減策の中では、環境保全上の効果と国際的な合意の可能性に関する評価がトレードオフの傾向を示し、とびぬけて全般的に高い評価を受けた削減策はみられなかった。また、クラスター分析により専門家は5つのグループに分けられたが、炭素強度の高い財の製造業に関わる者、あるいは詳しい者については、鉄鋼業とそれ以外の業に分かれた。鉄鋼業に関する専門家は排出削減策に最も積極的なグループに、それ以外の業に関する専門家は最も消極的なグループに属する結果となった。この背景には、鉄鋼は炭素強度の高い財の中でも国際的な流通が盛んであり、かつ、温室効果ガス排出量の把握について国際的に取組が進められていることが影響していると考えられる。

4つの策それぞれの排出削減策の実現可能性と効果を高めるために留意すべき点あるいは解決すべき点として以下が示唆された。

まず、排出削減策1「上流炭素税」については、この策に最も消極的なグループであっても他の3



つの排出削減策より温室効果ガスの排出削減効果の評価は高く、煩雑さやデータの入手可能性といった実行性に関する課題も少ないが、この策に最も支持的なグループであっても合意の可能性は低いと考えるとの結果となった。この方策の検討にあたっては、期待される効果を実現するため適切な運用を行うための配慮と、利害関係者への他の方策と比した利点に着目した働きかけが重要と考えられる。

排出削減策2「消費ベース排出算定」については、他グループよりも排出削減策全般に対し消極的な回答をするグループが特に消極的な評価を行い、「実施費用負担」や「煩雑さ」、「データ入手可能性」といった実行性に関する事項について懸念が示された。この方策の検討にあたっては、実行性を高めるため簡便化した算定を行うこととし、具体的な算定手法等の明示により実行にあたる負担を軽減することが重要と考えられる。

排出削減策3「国際認証」については、比較的支持的な回答が多かったが、財によって大きく状況は異なるという指摘や、ルール調整などによる「煩雑さ」を課題とする意見がみられた。この方策の検討にあたっては、国際調和の状況等から対象とする財を定め、煩雑さを軽減するためにルールを明確に提示し、狙った効果が得られるよう考慮して認証を行う取組のレベルを定めることが重要と考えられる。

排出削減策4「JCM」については、一つのグループを除き、全体に弱い支持的な回答が目立った。また、他の策3つと比して「技術革新」は有意に低い点数となったが、技術普及と合意の可能性に関する評価項目への回答は高い点数となった。全般的に消極的な評価をした専門家グループが唯一支持的な回答をしたのもこの策となった。他方、効果が限定的となる点を懸念する意見もみられた。この方策の検討にあたっては、効果的な取組を広げるための配慮が重要であり、既存のCDMでは主要な対象となっていない国や技術を捉えて実施し、測定・報告・検証(MRV)の徹底により効果を確実にすること等が重要と考えられる。なお、この方策は合意の蓋然性については4つの策のなかで最も高い評価となっており、本来、温室効果ガスの排出削減効果が高く技術の革新に貢献する策を優先すべきであるが、短期的には合意が容易く、現存する優れた技術の普及に貢献する点には一定の意義があると考えられる。

なお、この研究ではインタビューの対象はすべて日本人としたが、炭素強度の高い財は、例えば鉄鋼やセメント等、経済成長時に多用されるものが中心となっていることから、回答者が所属する国における当該財の需要の動向や輸出入の状況が変われば異なる回答が得られる可能性もあり、結果の解釈は日本人のみであることに留意する必要がある。

<参考文献>

- Ahmad, N., Wycjiff, A. (2003) Carbon dioxide emissions embodied in international trade and goods, OECD Science, Technology and Industry Working Papers, vol.15, OECD Publishing.
- Bassi. M.A., Yudken, J. S., Ruth, M. (2009) Climate policy impacts on the competitiveness of energy-intensive manufacturing sectors, Energy Policy, vol.37, pp.3052-3060.
- Brown, R.E., Webber, C. A., Koomey, J. G. (2000) Status and future directions of the ENERGYSTAR program. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Demilly, D., Quirion, P. (2008) European emission trading scheme and competitiveness: a case study on the iron and steel industry, Energy Economics, vol.30, pp.2009-2027.
- Enevoldsen. M.K., Ryelund, A.V., Andersen, M. S. (2007) Decoupling of industrial energy consumption and C-emissions in energy-intensive industries in Scandinavia, Energy Economics, vol.29, pp.665-692.
- Fischer, C., Fox, A.K. (2012) Comparing policies to combat emissions leakage, Border carbon adjustments versus rebates, Journal of Environmental Economics and Management, vol.64, pp.199-216.
- FSC (2014) Global FSC Certificates Type and Distribution, May 2014.  
<https://ic.fsc.org/preview.facts-and-figures-may-2014.a-3162.pdf>(retrieved 15 June 2014)
- Gasbarro, F., Rizzi, F., Frey, M. (2013) The mutual influence of Environmental Management Systems and the EU ETS: Findings for the Italian pulp and paper industry, European Management Journal, vol.31,no.1, pp.16–26.
- Gupta, S., Tirpak, D.A., Burger, N., Gupta, J., Höhne, N., Boncheva, A.I., Kanoan, G.M., Kolstad, C., Kruger, J.A., Michaelowa, A., Murase, S., Pershing, J., Saijo, T., Sari, A. (2007) Policies, instruments and co-operative arrangements. In climate change 2007: Mitigation. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Helem, D. (2013) The carbon crunch, how we're getting climate change wrong and how to fix it, Yale University Press.
- IEA (2013) World Energy Outlook, Paris.
- IEA, UNIDO (2011) Technology Roadmap, Carbon Capture and Storage in Industrial Applications.
- IPCC (2013) Summary for Policymakers, In: Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge,

- United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014) Climate change 2014: Mitigation of climate change. contribution of Working Group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chap.10 (The version released on 13 April).
- 亀山康子 (2009) 気候変動対処を目的とした次期国際枠組みの構造分析—デルファイ手法およびクラスター分析を用いたアンケート調査結果—, 環境経済・政策研究, vol.2, no.2 pp12-21.
- Li, J.F., Wang, X., Zhang, Y.X. (2012) Is it in China's interest to implement an export carbon tax?, Energy Economics, vol.34, pp.2072-2080.
- Lund, P. (2007) Impacts of EU carbon emission trade directive on energy-intensive industries – indicative micro-economic analysis, Ecological Economics, vol.63, pp.799-806.
- Micklert, J., Harrison, N. E. (2013) Climate Innovation: Australian Corporate Perspectives on the Role of Government, Australian Journal of Politics & History, Special Issue: The Politics of Climate Change in Australia, vol. 59, no.3, pp. 414–428.
- 中野直和 (2013) 日本初の ISO 規格“鉄鋼 CO<sub>2</sub> 排出量・原単位計算方法”発行される(1)ISO 初の生産プロセス CO<sub>2</sub> 排出強度算定手法, 国際環境経済研究所, 解説, 4 月 23 日公表.<http://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/sannkou.pdf> (2013 年 2 月 14 日アクセス)
- 中村秀規, 加藤尊秋 (2011) 自治体による環境国際協力に対する市民の支持構造—地球温暖化に関する国際都市連携への示唆—, 環境科学会誌, vol.24, no.2, pp.89-102.
- Napp, T.A., Gambhir, A., Hills, T.P., Florin, N., Fennell, P.S. (2014) A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonizing energy-intensive manufacturing industries, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.30, pp.616-640.
- 日本国政府 (2013) 日本国政府:二国間クレジット制度(Joint Crediting Mechanism (JCM))の最新動向, 2013 年 10 月 4 日発表.[http://www.mmechanisms.org/document/20131004\\_JCM\\_goj\\_jpn.pdf](http://www.mmechanisms.org/document/20131004_JCM_goj_jpn.pdf) (2013 年 12 月 6 日アクセス)
- RITE (2014) 世界主要国のエネルギー効率ランキング報告の検証,—ACEEE 報告の解釈について—.  
[http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Ranking\\_energyefficiency\\_ACEEEreport2014.pdf](http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Ranking_energyefficiency_ACEEEreport2014.pdf) (2015 年1月アクセス)
- Shoji, Y., Nakao, N., Ueda, Y., Kakizawa, H., Hirai, T. (2014) Preferences for certified forest products in Japan: A case study on interior materials, Forest Policy and Economics, vol.43 pp.1–9.
- 総合科学技術会議 (2013) 諮問第 15 号「環境エネルギー技術革新計画の改定について」に対する答申.

- Stenqvist, C., Nilsson, L.J. (2012) Energy efficiency in energy-intensive industries – an evaluation of the Swedish voluntary agreement PFE, Energy Efficiency, vol.5, pp.225-241.
- Stiglitz, J.E. (2006) A New Agenda for Global Warming, The Economist's Voice, 3(7), article three, Berkeley Electronic Press.
- UNFCCC (2011) Views on the elaboration of market-based mechanisms Submissions from Parties, FCCC/AWGLCA/2011/MISC.2.
- 山口光恒 (2013) 実現可能な気候変動対策－政策・経済・技術・エネルギーのバランス－, 丸善出版株式会社.
- Zhang, B., Wang, Z., Yin, J, Su, L. (2012) CO<sub>2</sub> emission reduction within Chinese iron & Steel industry: practices, determinants and performance, Journal of Cleaner Production, vol. 33, pp.167-178.
- Zheng, S., Lan, Y., Huang, J. (2009) Mitigation paths for Chinese iron and steel industry to tackle global climate change, International Journal of Greenhouse Gas Control, vol.3, pp.675-682.



## 第6章 鉄鋼業における温室効果ガス排出削減策に関する考察

### 6. 1 鉄鋼製造時の温室効果ガス排出削減技術の効果

#### 6. 1. 1 鉄鋼製造時の温室効果ガスの排出に影響する要素

これまでの章で述べてきたとおり、鉄鋼製造には様々な原料・プロセスがあり、その組み合わせによって消費されるエネルギー種・量も様々である。国際エネルギー機関(IEA)は代表的な原料とプロセスの組み合わせ毎に、粗鋼生産1tあたりの代表的な温室効果ガスである二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出量を整理した(IEA, 2007)。これにより、鉄鋼生産のCO<sub>2</sub>の排出量は、原料(鉄鉱石、スクラップ、直接還元鉄)とその還元剤(石炭・ガス等)、使用するプロセス(高炉-転炉と電炉)により大きく異なり、また、同じ原料・還元剤を用いた高炉-転炉法であっても平均的な設備のものとは先進的な設備のものでは排出量が異なることがわかる。第3章において鉄鋼生産に関するエネルギー効率改善技術を整理したが、原料とプロセスの特定の組み合わせに固有の技術や、様々な組み合わせに共通して適用される技術が存在した。これらから、鉄鋼の製造に伴う温室効果ガスの排出量は、図6-1に示すとおり、主として3つの要素により左右されると整理することができる。

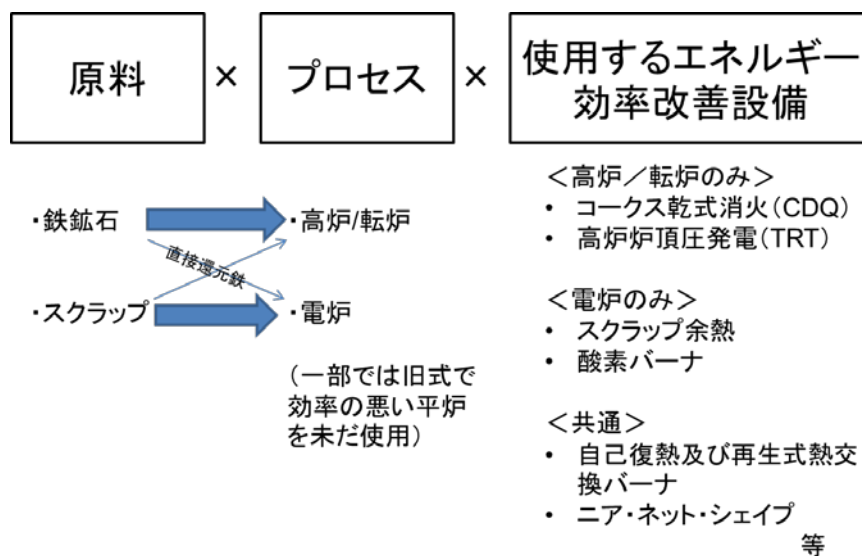


図 6-1 鉄鋼製造時の温室効果ガス排出に影響する主な要素

原料とプロセスによるエネルギー消費量の違いを示すため、Worrell らによる実際稼働している施設の各工程での最も効率のよいデータをもとに、精錬後は熱間圧延で棒鋼を製造した場合のエネルギー消費量を整理し図6-2に示す。図に示す通り、スクラップ-電炉以外では電力等ではなく燃料によるエネルギー消費が圧倒的であり、鉄鉱石を原料とする高炉-転炉とスクラップを原料とする電炉では4倍程度の差がある。またインドで多用されている鉄鉱石を直接還元鉄とし電炉を用い

る方法では最もエネルギー効率が悪くなる (Worrell et al., 2008)。

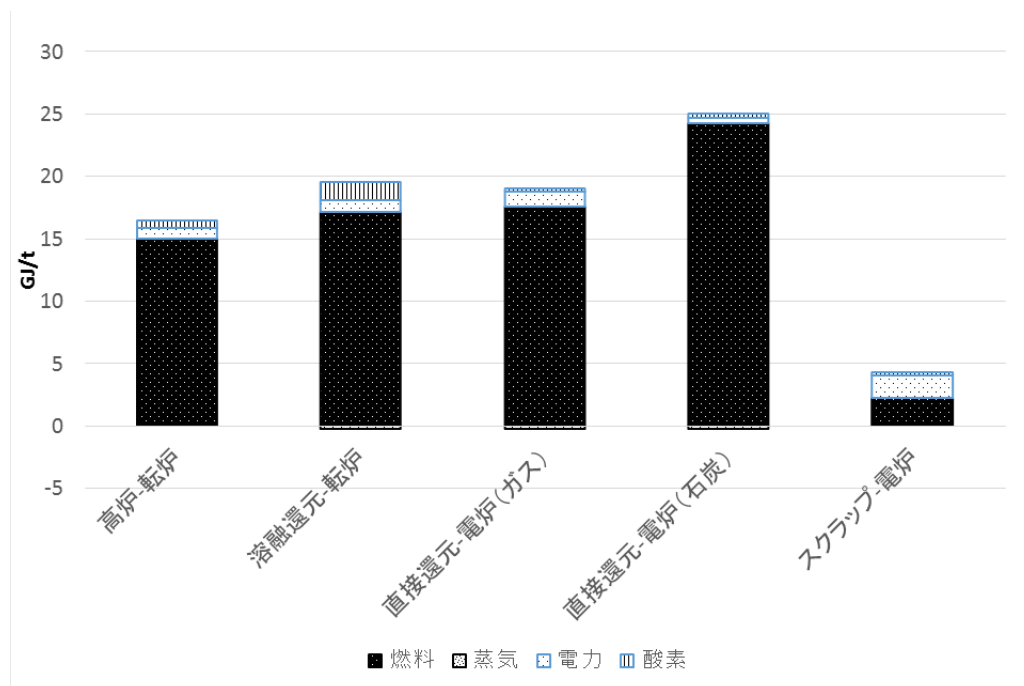


図 6-2 原料とプロセスによるエネルギー消費量の違い

それぞれの要素をどのように選択するかは、様々な社会的な状況により変化する。原料とプロセスについていえば、一般に安価な原料の入手可能性や、必要とする原料の量(または鉄鋼製品の需要)に左右される。例えば、日本では、1940 年初頭では平炉を使用し、安価であったスクラップを多用して製鉄を行っていたが、戦後の復興期に鉄鋼の需要が大幅に伸びる中、鉄くずの価格の高騰と供給不足にぶつかり、鉄鉱石を用いた転炉を中心とする生産システムへ転換した(加治木, 2010)。インドでは直接還元鉄を用いた電炉での小規模な製鋼が中心となっているが、鉄鋼需要の増加を背景に、より効率よく製鋼を可能とする高炉-転炉による製鉄所が増えつつある(2013 年に著者が実施した鉄鋼メーカーへの聞き取り結果に基づく)。急激に鉄鋼需要が伸びる際に原料としてスクラップを活用するには、その確保がまず課題となる。第 4 章の分析では、中国・インドともに 2050 年という段階では、自国で発生するスクラップだけでは鉄鋼の需要を満たすことはできず温室効果ガスの排出削減効果としては一定量にとどまるという結果が得られた。

一方、エネルギー効率改善設備については、エネルギー価格や、必要とされる省エネルギー対策の度合いなどにより導入が左右される。例えば日本では石油危機により、燃料価格の高騰や、エネルギー安全保障上の観点からも省エネルギー対策が社会的に求められ、熱管理法(1959～1979)やエネルギーの使用の合理化等に関する法律(いわゆる省エネ法, 1979～)といった法律が導入された歴史を有し、その結果、鉄鋼製造においてはコークス乾式消火設備(Coke Dry Quenching, CDQ)や高炉炉頂圧発電(Top Pressure Recovery Turbine, TRT)といった設備が省エ

エネルギーを達成するために開発・導入されたとされている(加治木, 木村, 2009)<sup>1</sup>.

また、エネルギー効率改善設備が経済的に意味を成すかどうかは、使用する資源・原料の質とエネルギーの価格により左右される。例えば、鉄鉱石中の鉄の含有量はスラグの発生量に関連し、鉱石中の化学成分は転嫁される石灰石の量に関連し、これらにより高炉での製鉄において1-2GJ/tの違いをもたらす。石炭の質はスラグの発生量や発生するCO<sub>2</sub>の量にも関連する(IEA, 2007)。エネルギーの価格についていえば、例えばコークス炉におけるCDQは効果的にエネルギー消費量を下げることができ、日韓ではかなり普及している技術であるが、欧米では普及率は非常に低い。CDQは消費するエネルギー量を下げ、回収した熱により発電も可能とする技術であるが、設備導入に一定の金額がかかるため、電力価格が安く、利益率が高い国では経済的にはあまり魅力がないこともある(IEA, 2007)。

なお、第3章に述べたとおり、現在着目され開発が進んでいる新たなプロセスに熔融還元がある。熔融還元は、現在実際使用されている設備でのエネルギー消費量としては、優れた高炉-転炉法よりも少々劣るが(図6-2)、コークス製造を必要としないといった利点があり、還元剤の工夫等この先技術開発が進めば高炉-転炉法よりもエネルギー消費量の削減が可能と期待される。

### 6.1.2 中国・インドにおけるこの先の技術導入を巡る状況

第2章2.3等において述べたとおり、鉄鋼生産に関する温室効果ガス削減が特に重要となる国は、中国・インドと考えられる。両国それぞれについて、鉄鋼生産設備の導入を巡る状況を以下に整理する。

#### (1) 中国

中国では、図6-3のとおり、既に稼働中の大型高炉(炉内容積が2,000m<sup>3</sup>を越えるもの)の数が105基と世界でも最大の大型高炉所有国となっている。第二位の日本の基数は27基、第三位のインドは18基となっており、中国の数はその3~5倍ととびぬけて多い(日本鉄鋼連盟, 2013)。

中国ではここまで爆発的に鉄鋼の生産量を増やしてきており、2000年から2010年までの間に社会への蓄積量も相当増加したため、その先の鉄鋼の需要はこれまでのような急激な増加とはならず、第4章における推計では一人当たりの鉄鋼の見かけの消費量は2020年頃をピークに緩やかに減少していくとする結果となった。これはEY(2014)等による推計結果とも整合的である。中国においては、2050年までは回収し利用できるスクラップの量は見かけの消費量を上回らないものの、その後スクラップによる供給量が需要を上回ると考えられる結果となった(第4章)。関連し、河瀬ら(2014)はスクラップの供給のポテンシャルは高いと推計し、スクラップの利用においては、電炉での製鋼技術があがったとすれば老廃ス

<sup>1</sup> その他社会的な要請から必要となる設備によりエネルギー効率が変化する場合もある。例えば、環境対策として集塵・脱硫・脱窒設備を導入した場合は電力消費量が多くなり、その結果として製鉄所のエネルギー効率は悪化する。その他、生産品種構成や稼働率もエネルギー効率に影響することが知られている(加治木・木村, 2009)



ラップの回収率のみが制約となると報告している。

既に中国では、現状において2億t(世界全体3.3億tの供給過剰に対し、6割を占める)の供給過剰となっているともされる(Morgan Stanley, 2013)。そのため、この先の新たな施設設置はこれまでほどの急激な増加はみられないと考えられ、新設設備において革新的な最新設備を導入していく余地はそう大きくはないと考えられる。その一方、古い設備はまだ稼働しておりその効率改善が大きな課題となっている。中国では7億tを超える粗鋼生産量のうち6億tは大型の最新設備により、残り1億tが旧式の施設によるといわれている(著者による2014年の鉄鋼メーカーによる聞き取り結果に基づく)。大型の最新施設のエネルギー消費量はかなり低くなってきており、先進国のレベルと比しても遜色ないものもでてきているが、旧式の施設によるエネルギー消費量は相当程度劣ると考えられる。IEAはコークス炉に関し、中国の先進的な施設では2004年の段階でOECD(経済協力開発機構)諸国とそう変わらないエネルギー効率である4.2GJ/tまでエネルギー消費量が落ちてきているとされているが、これは生産量で14%ほどを占める老朽施設のデータを含めていないものであり、古い施設によるデータは明らかではないとしている(IEA, 2007)。Sunらによる1980年時点での中国の粗鋼生産量と全体および大・中規模の企業による粗鋼1tあたりのエネルギー消費量(Sun et al., 2013)を元に、1980年当時の中国の小規模の企業による粗鋼1tあたりのエネルギー消費量を推計すると、大・中規模の企業による粗鋼生産の割合を40~70%とした場合、大・中規模に比して小規模の企業では1.4~1.7倍エネルギー消費量が多いという結果が得られる。なお、大・中規模の企業のエネルギー消費量は、Sunらによると1980年から2010年でほぼ倍に効率があがっているとされている一方、小規模のものについては情報が無い。

そのため、鉄鋼生産に関する温室効果ガスの排出量を抑えていくためには、まず鉄鋼の生産をできる限り新しい施設に集中させ、老朽施設を廃止または補修をして改善技術を導入することが重要といえる。中国においても老朽施設の廃止の必要性は認められており、第11次五か年計画の期間(2006~2010年)において、2500万トン程の老朽化した鉄鋼製造設備が廃止されたとされている(Environment and Economic Policy Research Centre (EEPRCs), 2010)。しかし2013年の老朽施設の廃止目標は800万トンほどとされており現在の設備の1%にも満たない量に過ぎず、これでは更新に十分ではないとする指摘もある(Morgan Stanley, 2013)

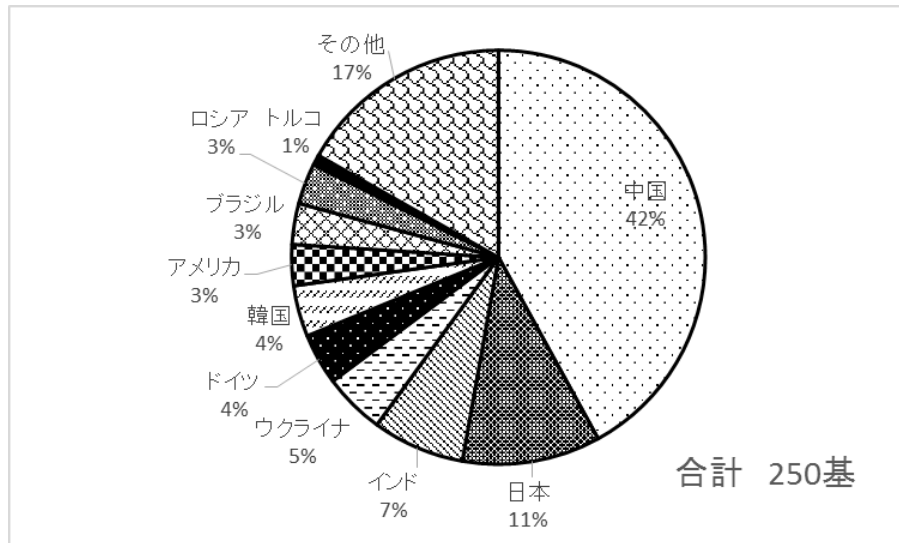


図 6-3 世界の大型高炉設置状況(2012 年)

## (2) インド

インドについては、この先 2050 年まで大幅に鉄鋼の需要が伸びていくと推計され(第 4 章), そのため新規設備をこの先相当数導入していくことと予想される。インドの場合は、未だに効率の悪い平炉も使用されており、まずこれを廃止することが重要である。また、平炉以外のプロセスについても、中小企業による旧式の設備を用いたかなり効率の悪い製鋼が多いと報告されており、石炭を用いた直接還元鉄(DRI)生産割合が高いことが知られている他(第 4 章), スクラップを活用したこのような小規模の老朽施設は、棒鋼や線材等主として建材等に消費される鋼材を年間 19.4 百万 t 生産しており、施設の数 は 1,800 にのぼり、エネルギー消費量の改善が課題となっている(UNDP, 2013)。

インドにおいては現状では供給過剰は問題となっておらず、この先も需要は堅調に伸びていくと予想されている(Morgan Stanley, 2013)。この先設置される新規施設については、できるかぎり原料とプロセスの組み合わせを考慮し、エネルギー消費量が低い選択がなされる必要がある。なおインドでは、第 4 章でも述べたとおり、他国と異なり、安価に入手できる石炭を用い、設備投資のあまりかからない小さな施設において直接還元鉄を用いた製鋼が世界の中でも特に多くなっている(Krishnan et al., 2013 他)。この石炭を用いた直接還元鉄を使った鉄鋼生産はエネルギー消費量が非常に悪いことが知られており(次節参照)、この先はこのプロセスを他に切り替えていくことが重要と考えらえる。

## 6. 2 鉄鋼製造に関する温室効果ガス排出削減技術導入の課題

### 6. 2. 1 スクラップの活用と発電時の温室効果ガスの排出

第 4 章の結果から、大量に鉄鋼を消費する中国・インドでは自国内の鉄鋼の需要とスクラップの

供給が時期的にずれることから、いずれスクラップが大量排出される際に自国内では消費できないこととなると見込まれる。特に中国では 2050 年以降、建設用途に大量に投入されたスクラップが排出されると考えられる。

一方、鉄鋼生産時に排出される CO<sub>2</sub> 排出量は第 2 章で述べたとおり、各国でまちまちであるが、電炉での製鋼を考える際には、発電に使用されるエネルギーの種類や効率に左右される電力の温室効果ガス排出係数が重要となる。2012 年の地球環境産業技術研究機構(RITE)による 2005 年時点の主要国のスクラップ-電炉のエネルギー消費原単位を用い、Worrell ら(2008)をもとに電炉での製鋼の際のエネルギー消費は 45%が電力で 55%が燃料によると仮定し、IEA(2013)による 2011 年の各国の電力の排出係数と、燃料の排出係数(燃料としては石油関連が消費されたと仮定し、73.3 kgCO<sub>2</sub>/GJ を係数に使用)を用いて推計した、主要生産国のスクラップ-電炉での製鋼1tあたり排出される CO<sub>2</sub> 排出量を図 6-4 に示す。

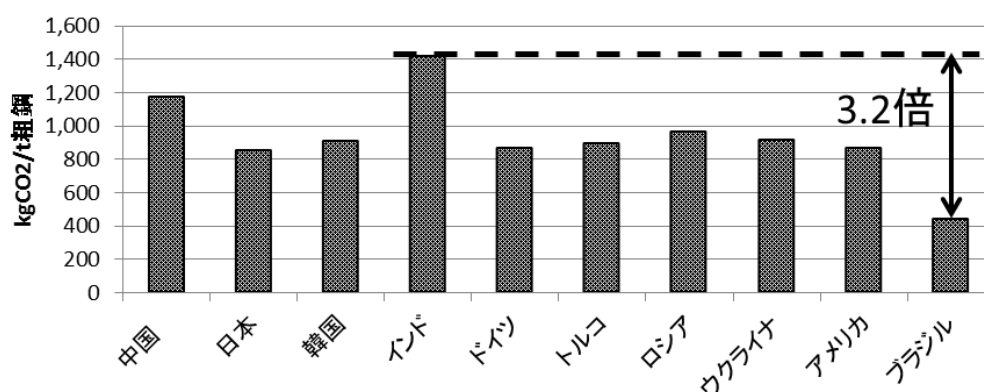


図 6-4 電炉での製鋼1tあたりとして排出される CO<sub>2</sub> 排出量

図 6-4 のとおり、最も排出量が多いインドと最も少ないブラジルでは鉄鋼生産 1t あたり 3.2 倍の違いがある。鉄鋼生産時の気候変動緩和策としては、前述のようにスクラップを活用し、鉄鉱石を還元する際のエネルギーを省略することが重要であるが、スクラップの活用の際には国ごとの効率の違いを踏まえ、CO<sub>2</sub> 排出原単位が小さい国で生産することが重要であり、これを促す政策が必要である。各国の排出削減能力の向上も、次項以降に述べるとおり無論重要であるが、世界全体での鉄鋼生産能力は既に過剰であるとする報告もあることから(Morgan Stanley, 2013)、追加の投資・設備改善が不要である現状で、CO<sub>2</sub> 排出原単位が小さい設備での生産をまずは優先すべきである。

なお、これまではバイオマスや水力等化石燃料以外のエネルギーの活用により CO<sub>2</sub> 排出原単位が小さい国であっても、新たに電炉を増設する際には、従来のエネルギー構成では賅えず、より、炭素強度の高いエネルギーを多く消費するようになる可能性もある。そのため、厳密には、電炉による電力需要の増加分も低炭素強度の電力で賅えるかどうかの確認、また、電炉増設とそれに伴う電力需要増へ対応するための様々なコスト(経済的な視点のみならず、環境的・社会的な視点で

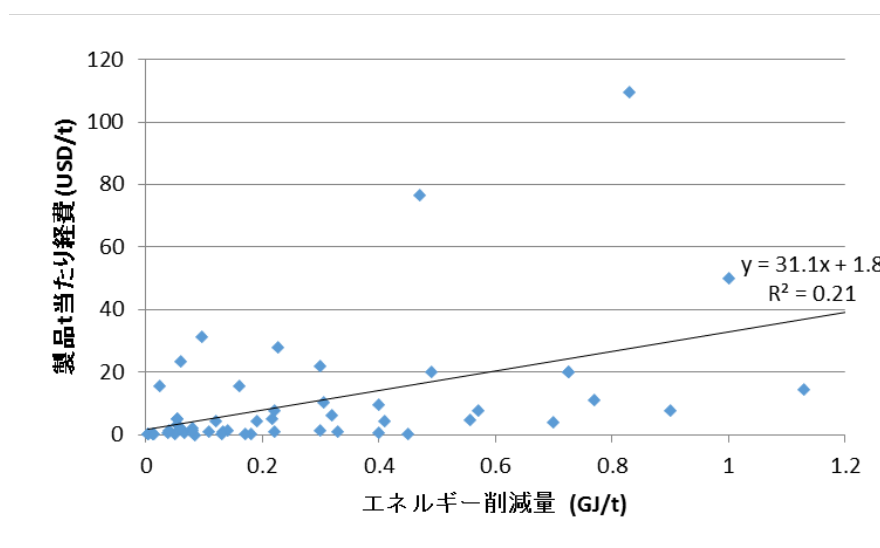
のコストも含め)を検証する必要がある。

### 6.2.2 温室効果ガス排出削減技術導入の障壁

前節で述べたように中国・インドとも現在使用されている省エネルギー技術の導入が進めば、鉄鋼生産に伴う温室効果ガスの排出削減に一定の効果が期待できる。

しかし、技術の導入には資金が必要である。第3章に記述した温室効果ガス排出削減に寄与する技術の整理により得られたデータをもとに、エネルギー消費削減量と製品1t当たりの削減技術に関する設備導入に必要な費用の関係を図6-5に示す。図6-5に示されるようにエネルギー削減効果の高い技術は導入に必要な費用も高い傾向にある。

次に、表6-2に鉄鋼生産時の省エネルギー技術のレビューの結果得られた、実際技術を導入した際の費用回収年数に関するデータを示す。



※各工程の技術を対象としたが、エネルギー削減量に対し、製品t当たりの経費がとびぬけて高いニアネットシェイプのみ除外して表示。

図6-5 エネルギー削減量と製品t当たり導入経費の関係

表6-2 鉄鋼生産時の省エネルギー技術の費用回収年数

(単位:年(標本数を除く))

標本数	30.0
最小値	0.5
最大値	25.8
平均値	6.3
中央値	3.2

技術導入によりエネルギー消費量が減ればその分燃料費を削減することはできるが、投資した費

用を回収できる年数は、その技術導入に必要な金額と燃料削減により得られる金額に左右される。表 6-2 のとおり、費用回収年数の得られた 30 の事例について、費用回収年数は平均値で約 6 年、中央値で約 3 年となっている。米国環境保護庁 (USEPA) によれば、企業が投資できる新たな技術の費用回収年数は 3 年程度とされていることを鑑みると (USEPA, 2012)、民間企業のみで導入されるエネルギー削減技術はある程度効果が限界的なものが中心となると考えられる。さらに、上記のレビューの結果から得られた技術導入に必要な金額を表 6-3 に示す。技術導入に必要な最小の金額でも 60 万ドル (2014 年 10 月 1 日現在のレートで約 6,700 万円) を超え、平均値で約 3,200 万ドル (約 35 億円)、中央値で 1,100 万ドル (約 11 億円) であり、仮に 3 年で費用を回収できるとしても、民間企業のみ資金を投入すると考えると中小企業であればそう容易なことではない。Zhang らは、中国の鉄鋼業界を対象とした CO<sub>2</sub> 排出削減策とその決定因子等に関する調査の結果、経済的な効果が明瞭でなくても環境効果が高い対策が導入されることもある一方、企業に排出削減を自主的に勧めさせるためには経済的な便益を動機づけとして活用すべきと指摘している (Zhang et al., 2012)。この調査はある程度規模の大きい企業を対象としたものであるが、中国・インドで特に改修が必要な老朽施設は上述のとおり中小企業に多いと推定されることから自主的な導入は困難と考えられる。したがって技術導入を進めるには何らかの経済的なインセンティブの付与や支援につながる取組が必要と考えられる。

表 6-3 鉄鋼生産時の省エネルギー技術の導入費用

(単位: 100 万 USD (標本数を除く))

標本数	39
最小値	0.6
最大値	500.0
平均値	31.5
中央値	10.6

また、原料プロセスの切り替えについては、既に大型の高炉－転炉が導入されている場合には、新たに設備設置を伴う切り替えは容易ではないと考えられる。そもそも高炉－転炉の大型の一貫施設は生産効率から選定されたものであり、企業は鉄鋼生産量が年間 100 万 t を超えると一貫型の高炉－転炉の導入を考えるという<sup>2</sup>。また高炉－転炉を大型の一貫施設の建設費・設備投資額は、1,000 から 10,000 百万 USD という規模の費用の掛かるものであり (梅澤, 2002)、そのため、企業は一度設置すればできるだけ長期間活用し、費用回収を行いたいと考えられる<sup>2</sup>。また、施設の廃止は多くの労働者が職を失うということともつながるため、政治的な判断によりあまり進まないとする指摘もある。Morgan Stanley は、供給過剰改善の主要な課題として、施設廃止はコスト負担を伴うことに加え、雇用数が多いため政府が解雇を抑制しようとすることを掲げている。特に中国では、世界全体の鉄鋼業界の労働者 700 万人のうち 400 万人の雇用を抱えるとされており、施設の廃止に伴う解雇を政府が容認する確率は低いと考えられる (Morgan Stanley, 2013)。したがっ

<sup>2</sup>著者による 2013 年に実施した鉄鋼業界に対するヒアリング結果

て一度導入すると高い排出がかなりの年数継続してしまう、いわゆるロック・イン効果が大きいということとなる。

鉄鋼製造設備は国家の経済成長時に欠かせないものであることから施設の設置には公の資金が導入されることがしばしばある。日本では経済発展を支える重要産業として鉄鋼生産が官営の八幡製鉄所を中心に進められた時期があったこともその一例であり、戦後復興期の日本では、石炭と鉄鋼の生産は、経済の牽引力としてみなされ、石炭の生産は鉄鋼生産への使用を重視し、鉄鋼生産は石炭増産向けへの使用を重視して相互に調整して進められた時期もあった(加治木, 2010)。また、中国では大型の施設は公営のものが中心となっている(日本鉄鋼連盟, 2013)。インドでは民間企業を中心となって鉄鋼生産が進んできた歴史があるが、鉄鋼業を専門とする省庁である鉄鋼省があり、従前より国策として鉄鋼生産の五か年計画を立ててきていることから国策として鉄鋼生産は重要視されていると考えられる(鋼材倶楽部他, 1960)。上記のとおり鉄鋼生産設備は初期投資金額が大きく、雇用への影響も大きいことから、現状でも老朽施設の撤廃は進んでおらず、この先国内での需要が減退した後も政策的に鉄鋼の生産が続けられる可能性もあると考えられる。現在でも中国で過剰に生産された鉄鋼は、東南アジア等の市場に流入しているとする指摘もあるが<sup>2</sup>、今後その量はさらに増え、結果として炭素強度の高い鉄鋼が国際的に流通する量が増える恐れもあると考えられる。

また、現在鉄鉱石から鉄鋼を生産する場合の主要な還元剤かつ燃料源とされているのは石炭である。石炭は特に産出国であれば安価に使用することが可能である。中国・インドの二国は、どちらも主要な石炭産出国であり、何らかの国際的な措置がなければ自国の安価な石炭を使い続ける可能性が高いと考えられる。

なお、国連開発計画(UNDP)によるインドの中小の鉄鋼製造企業に対し省エネ技術を普及させようとしたプロジェクトでは、技術導入のネックは費用ではなく、人材であるという指摘もある(UNDP, 2013)。省エネルギー技術の重要性と、経済的にも一定の時間が経てば投資を回収できるメリットがあることを理解し、これまで慣れ親しんできたやり方を改変し、導入を成功させるために汗をかく人が必要である。途上国への技術普及のためには技術導入支援がまずは重要と考えるが、技術をうまく定着させるためには人材育成も重要と考えられる。関連し、大企業であればエネルギー効率に関する情報を集め分析するリソースがあるが、中小企業の場合はそれが可能ではないとする指摘もある(IPCC(気候変動に関する政府間パネル), 2014)。対象とする国において十分必要な情報が中小企業を含む関係者に行き渡るようにする工夫も重要と考えられる。

## 6.3 鉄鋼生産に関する気候変動緩和策

### 6.3.1 鉄鋼生産に関する気候変動緩和策の考察

中国・インドでは、経済成長を背景に鉄鋼の需要が伸び、鉄鋼生産に伴う温室効果ガスの排出が増加すると見込まれる。経済成長時には鉄鋼の需要が急激に伸びるが主な用途は製品寿命の長い建設・土木であり、スクラップとして排出されるまでは時間がかかることから、見かけの消費量が

急激に伸びる段階では自国内で回収され供給できるスクラップの量は限定的となった(第4章)。一方、経済発展はより緩やかな方が鉄鋼の需要と鉄鋼生産に使用できるスクラップ供給の乖離が少ない結果となった。中国においては、鉄鋼の見かけの消費量は2050年までに増加のピークを迎え、その期間内では回収し利用できるスクラップの量は見かけの消費量を上回らないものの、その後はスクラップによる供給量が需要を上回ることを示唆する結果となった(第4章)。また、中国では現段階でも生産能力が過剰であることが指摘されている。鉄鋼生産設備は初期投資金額も大きく、雇用への影響も大きいことから、国内での需要が減退した後も政策的に鉄鋼の生産が続けられる可能性もあり、その場合、炭素強度の高い鉄鋼が国際市場に流れる恐れもある(第6章)。

スクラップを用いて電炉で鉄鋼を生産する場合、炭素強度は電力の排出係数に依存する。今後、インドでは経済発展を背景に鉄鋼の需要が大きく伸びると予想され、その際中国から排出されるスクラップをインドで用いることも考えられるが(第4章)、現在のインドの電力の排出係数は国際的にみて高いことから、例えば電力の排出係数が低い国であるブラジルで生産した場合と比較して、温室効果ガスの排出は3倍も高い結果となる(第6章)。

炭素強度を下げるために効果的な技術には既に実用されているものでも様々なものがあるが、効果が高いものは導入費用が高い傾向にある(第3章)。炭素強度を下げることはエネルギーコストを下げることにつながり、そのため日本では石油ショックによるエネルギー価格高騰などを背景に様々な技術が導入されてきた歴史がある。しかし、中国・インドでは、安い化石燃料を産出することから、そのままでは技術の導入は困難と考えられる(第6章)。これらにより、鉄鋼生産時の炭素強度を下げるインセンティブとして働く国際的な排出削減策が必要と考えられる。

第5章で述べたとおり、鉄鋼の場合、財としてしばしば貿易もなされるため、その生産には国際的な需給がからむ。Nappらは、炭素強度の高い製造業を対象とした研究を行い、財は一般に広く地球規模でやりとりされるが、技術の導入はコストの増加を伴うため、対策の導入にあたっては、必要な経費により、削減策が弱い地域よりも製造コストが高くなってしまうと、結果として削減技術があまり導入されていない国に需要が移ることにつながりかねないことを指摘している(Napp et al., 2014)。炭素リーケージを避けるためには、対策は国際的な需給を視野にいれて検討され、少なくとも主要な国間で調和されたものである必要がある。

炭素強度を下げる排出削減策については、国内の専門家に評価を得た結果(第5章)、排出削減策として最も環境保全上の効果が高く、費用対効果もよいとされる経済的手法の一つである「上流炭素税」が、提示した4つの策の中でも最も環境保全上の効果や費用対効果等実行性、技術革新・普及についての項目において高い評価を得た。その一方で、国際的な合意の蓋然性と途上国の参加については低い評価結果となった。同様の効果が期待される経済的手法には排出権取引があるが、排出権取引については、近い将来中国等の導入も決まってお(第3章)、主要な主体の参加を含む国際的な合意の蓋然性が高いことから、上流炭素税よりも導入の障壁は低いと考えられる。いずれの策であっても第3章及び第5章の結果から、期待される効果を実現するため適切な運用を行うための配慮を行い、他の策と比した利点に着目した利害関係者への働きかけが重要となる。

鉄鋼等炭素強度の高い財は、生産が先進国から途上国へと移りつつあり、先進国の消費のために炭素強度のより高い途上国で生産が惹起されているとする指摘がある(第2章)。これに対応する手法として考えられるのが、「消費ベース排出算定」を行い各国に義務的な規制をかけるとする手法である。この手法はそもそもは国際交渉において中国が提案したものであるが、この手法の導入は先進国の消費がより炭素強度の低い国への移行を促進すると期待され、炭素強度を下げるインセンティブとしては効果的であり、特に炭素強度の高い財の中でも国際的に流通する鉄鋼には適した手法と考えられる。一方、鉄鋼は素材として流通し、最終製品としても貿易がなされるため消費をどのように捉えるかが難しく実行性が低いとする指摘もあり、また、自国の消費も増加すると推計される中国・インドでは(第4章)導入に反対する可能性も高いと考えられる。

情報的手法の一つである「国際認証」については、特に低い評価であったのは煩雑さに関する評価項目であったが(第5章)、鉄鋼については既に国際的な温室効果ガスの排出算定手法が国際規格となっているため(第3章)、他の炭素強度の高い財とは異なり導入の際の実行性は高いと考えられる。一方、特にインドでは老朽施設や効率の悪い石炭を用いたDRIが多用されており、今後伸びると予想される鉄鋼需要も国内生産による供給が中心である土木・建設用途であることを踏まえると(第4章)、この策のみでは対策導入の効果は低いと考えられる。この策は、経済的手法や規制的手法より環境保全上の効果は劣るとする評価が多かったが(第5章)、この策については単独で活用するよりも、経済的手法や規制的手法の効果を狙いどおりに出すために、総合的で正確な情報を提供するツールとして(第3章)他の策と併せて活用すべきと考えられる。

鉄鋼生産のように高額な設備投資が必要となる産業では、一度設備が導入されてしまうと長期間使用されるため不十分な設備を用いた場合は高い排出が長期間続くロック・イン効果が生じてしまうため、短期的に効果をもたらす策も重要である。「JCM(ジョイントクレジットメカニズム)」については、中国・インド両国で必要となる老朽施設の効率改善に働きかけることも可能であり、途上国の参加や国際的な合意の蓋然性も高く技術移転には効果的であることから(第5章)、既存の技術を活用し短期的に効果を出すことが可能という利点がある。JCMで扱うプロジェクトだけで中印全ての老朽施設の補修を進めることは困難であるが、技術の効果が認められればその国の中で技術の導入が進むこともあると考えられる。中国におけるコークス炉でのCDQ導入の事例では、設置には30～130百万USDと相当の費用がかかり、費用回収年数も4～40年とかかるとする報告もあるが(第3章のレビュー結果に基づく)、2000年頃までに日本のイニシアティブにより20基弱を導入した後、日中の合弁会社による設置を経て中国独自の企業でも設備がつくられるようになり、2013年にはほぼ150基近い導入がなされるに至った。これによる中国での普及率は国全体では5割程度、大企業に限れば8割程度ともいわれる(著者による2014年に実施した鉄鋼業界による聞き取り結果)。他の技術についても経済的な体力のある大企業を中心に同様の波及効果が期待される。とはいえ、この策は、二国間のプロジェクトベースの取組ということから対象が狭く、炭素強度を下げるという意味での効果は万能ではなく、特に技術革新にはつながらない(第5章)。そのため、長期的に環境保全上の効果を出すために他の策と併せて実施すべきであり、単独で実施する際には、効果的な取組を広げるための努力が必要であり、二国間の取組であることにより、測定・報告・検証



の徹底が損なわれないような配慮が重要である(第5章)。

### 6.3.2 戦略的な計画を立てるために

これまで述べたとおり鉄鋼をいかに生産するかということは、長期にわたって、相当量のエネルギーの消費が固定化することにつながるものであり、世界全体の温室効果ガスの排出量を考えるうえで極めて重要な事項の一つである。鉄鋼の消費は国の経済成長と密接にかかわるものであるため、経済成長を果たす段階では多くの国において鉄鋼の生産については各国で国家プロジェクトとして計画が立てられ、需要に対し供給が十分足りよう工夫がなされてきた(例えば前述の日本における戦後復興期の石炭と鉄鋼の生産相互調整、インドにおける鉄鋼製造に関する国家五か年計画等)。しかし、経済成長が緩やかになり国内での需要の増加が落ち着いてきた後、どのように鉄鋼を生産するかということも企業のみならず国策としてとらえるべき課題と考えられる。鉄鋼の生産はエネルギーを多量に使用するため、国家のエネルギー政策上も重要であり、エネルギー政策はしばしば3Eとして語られるように経済、安全保障、環境に深く関わる重要事項である。そのためスクラップの需給をみこした鉄鋼の生産戦略を立てることは、利益とつながらない場合もあるため、企業のみでなし得ることはない。また、実際のスクラップの活用にあたっては、効率の良い活用には国の関与が必要な場合もあると考えられる。多くの電炉メーカーは企業の規模としては小さいことから現状では原料が入手しやすく、売り先も近くにある都市部に多いとされている(UNDP, 2013)。このような現状から判断すると、企業のみでは原料であるスクラップを入手し、運搬する範囲に限界がある可能性がある。特に中国やインドといった広い国土を有する国では、物流にある程度国が関与し、効率よくスクラップが供給できるような仕組みも必要と考えられる。

現在、鉄鋼生産に関する気候変動緩和策に関する国際的な議論の場としては、第3章にあるとおり鉄鋼業団体が行っているものと、政府として経済省庁が関わるものがある。先に述べたとおり鉄鋼の生産時のエネルギー消費は、原料とプロセスにより大きく異なり、スクラップの需給も踏まえて検討する必要がある。現存の議論の場は様々な過程に対する優れた技術に着目した情報交換が中心であるが、原料とプロセスの組み合わせを付与のものとして固定化して扱うのではなく、関連する資源の中長期的な入手可能性なども視野にいれ、国際的な戦略をたてることが重要である。そのためには経済界と経済所掌省庁のみならず、幅広いステークホルダーの参加できる議論の場が有益と考えられる。第5章で実施した専門家に対するインタビューでは、多くの専門家が、より効率的に排出削減策を実施するために改善すべき点について意見を述べていた。Anthoff と Hahn は経済の専門家に対し効率を求めるためにロビー活動を行うことを提唱しているが(Anthoff and Hahn, 2010)、鉄鋼のように広く社会を支えるために使用され、エネルギーを消費する重要な財については、特定の産業に関する関係者のみならず、広く様々な専門的知見を有する者が、今後の戦略について議論することが有益と考えられる。

また、広く専門家が集まり議論をする必要性は他の観点からも重要である。第1章で述べたように、鉄鋼の生産は、エネルギーを大量に消費し温室効果ガスを排出すること以外にも環境負荷を生じさせる。代表的なものは大気汚染である。鉄鋼生産時の温室効果ガスの排出削減策は大

気汚染への負荷削減という意味でも効果的なものもある。Liuらは大気汚染対策とCO<sub>2</sub>排出対策はしばしば異なる部局が担当し連携が十分ではないが、双方の対策を同時に進めるという視点で統合的に政策策定を行わなければ、効果が損なわれる可能性を指摘している(Liu et al., 2011)。なお、資金以外の課題として挙げられた人材育成に関連し、2014年9月23日の国連気候サミットにおいて、安倍総理は我が国の新たな途上国支援策として、気候変動分野で1万4千人の人材育成を約束すると宣言した。どのような分野での人材育成をどのような形で行うかについてはまだ明らかとなっていないが、UNDP(2013)が指摘するとおり、人材育成は非常に重要であり、特に炭素強度が高い財の生産にも着目した教育がなされるべきである。これも一国のみの力でなし得るのではなく国際的な調和のもと進められることが望ましい。

#### 6.4 本章において明らかとなったこと。

本章では、温室効果ガス排出削減技術について影響する要素、中国・インドにおける技術導入の状況・課題を整理し、スクラップの効率的な活用について発電の際の温室効果ガスの排出を含めて検討したうえで、第3章から第5章までの研究結果を基に統合的な考察を行った。

鉄鋼の製造に伴う温室効果ガスの排出量は、主として、原料(鉄鉱石・スクラップ)、プロセス(高炉/転炉・電炉)、使用するエネルギー効率設備の3つの要素に左右される(第3章)。

中国・インドによる鉄鋼の需要とスクラップによる供給の推計の結果、中国においては、鉄鋼の見かけの消費量は2050年までに増加のピークを迎え、その期間内では2050年までに回収し利用できるスクラップの量は見かけの消費量を上回らないものの、その後スクラップによる供給量が需要を上回ると考えられる(第4章)。また、中国では現段階でも生産能力が過剰であることが指摘されているが、鉄鋼生産設備は初期投資金額も大きく、雇用への影響も大きいことから、国内での需要が減退した後も政策的に鉄鋼の生産が続けられる可能性もあり、その場合、炭素強度の高い鉄鋼が国際市場に流れる恐れもある(第6章)。

また、スクラップを用いて電炉で鉄鋼を生産する場合、炭素強度は電力の排出係数に依存する。今後、インドでは経済発展を背景に鉄鋼の需要が大きく伸びると予想され、その際中国から排出されるスクラップをインドで用いることも考えられるが(第4章)、現在のインドの電力の排出係数は国際的にみて高く、例えば電力の排出係数が低い国であるブラジルで生産した場合と比較して、スクラップ・電炉鋼の生産は粗鋼1tあたりの温室効果ガスの排出は3倍も高い結果となる(第6章)。

炭素強度を下げるために効果的な技術には既に実用されているものでも様々なものがあるが、効果が高いものは導入費用が高い傾向にある(第3章)。中国・インドでは、安い化石燃料を算出することから、何らかの策を講じなければ排出削減技術の導入は容易には進まないと考えられる(第6章)。

これらの理由により、鉄鋼生産時の炭素強度を下げるインセンティブとして働く国際的な排出削減策が必要である。

炭素強度を下げる排出削減策については、国内の専門家に評価を得た結果(第5章)、経済的

手法である「上流炭素税」は、提示した4つの策の中でも最も環境保全上の効果や費用対効果等実行性、技術革新・普及についての項目において高い評価を得た。その一方で、国際的な合意の蓋然性と途上国の参加については極めて低い評価結果となった。同様の効果が期待される経済的手法には排出権取引があるが、排出権取引については、近い将来中国等の導入も決まっており（第3章）、主要な主体の参加を含む国際的な合意の蓋然性が高いことから、上流炭素税よりも導入の障壁は低いと考えられる。いずれの策であっても第3章・第5章の結果から、期待される効果を実現するため適切な運用を行うための配慮を行い、他の策と比した利点に着目した利害関係者への働きかけが重要といえる。

「消費ベース排出算定」を行ったうえでその結果に応じて各国に義務的な規制をかける排出削減策は、先進国の消費のための炭素強度の高い財の生産が途上国で行われていることに対応すると期待され、炭素強度を下げるインセンティブとしては効果的と考えられる。一方、鉄鋼は素材として流通し、最終製品としても貿易がなされるため消費をどのように捉えるかが難しく実行性が低いとする指摘もあり、また、自国の消費も増加すると推計される中国・インドでは（第4章）導入に反対する可能性も高いと考えられる。

情報的手法の一つである「国際認証」については、特に低い評価であったのは煩雑さに関する評価項目であったが（第5章）、炭素強度の高い財の中でも鉄鋼については既に国際的な温室効果ガスの排出算定手法が国際規格となっているため（第3章）、導入の障壁は低いと考えられる。一方、特にインドでは老朽施設や効率の悪い石炭を用いた DRI が多用されており、今後伸びると予想される鉄鋼需要も国内生産による供給が中心である土木・建設用途であることを踏まえると（第4章）、この策のみでは効果は低いと考えられ、経済的手法や規制的手法の効果を出すための総合的で正確な情報を提供するツールとして（第3章）、他の策と併せて活用すべきと考えられる。

鉄鋼生産のような高額な設備投資が往々にして必要となる産業では、一度設備が導入されてしまうと長期間使用されてしまうため、合意に時間を取られず短期的に効果をもたらす策も重要である。「JCM」については、中国・インド両国で必要となる老朽施設の効率改善に働きかけることも可能であり、途上国の参加や国際的な合意の蓋然性も高く、技術移転には効果的であることから（第5章）、既存の技術を活用し短期的に効果を出すことが可能という利点がある。一方でこの策は、炭素強度を下げるという意味での効果は限定的であるため、長期的に環境保全上の効果を出すために他の策と併せて実施すべきである。実施の際には、効果的な取組を広げるための努力が必要であり、二国間の取組であることにより、測定・報告・検証の徹底が損なわれないような配慮が重要である（第5章）。

上記のような気候変動緩和策を効果的・効率的に進めていく上では、鉄鋼メーカー・経済界以外のステークホルダーも参加する国際的な議論の場が必要と考えられる。

<参考文献>

- Anthoff, D., Hahn, R.W. (2010) Government failure and market failure: on the inefficiency of environmental and energy policy, Oxford Reviews of Economic Policy, vol.26, pp.197-224.
- EEPRC, Ministry of environmental protection of China (2010) A green credit guide for China's steel and iron industry, sponsored by British FCO global prosperity fund, supported by department of statistics, China banking regulatory commission, Department of integrated services of environmental Engineering assessment centre, Ministry of environmental protection, China, SynTao, CERI eco Technology Co., LTD.
- EY (2014) Global Steel 2014, Planning to profit from opportunity: preparing for future demand, Ernst & Young Global Limited.  
[http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY\\_-\\_Global\\_steel\\_2014/\\$FILE/EY-Global-steel-2014.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY_-_Global_steel_2014/$FILE/EY-Global-steel-2014.pdf)
- IEA (2007) Tracking industrial energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions
- IEA (2013) CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion (2013), OECD Publishing, Paris, France
- IPCC (2014) Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (The version released on 13 April 2014, subject to copy-edit and final layout), Chap.10, Cambridge, UK and NY, USA.
- 加治木紳哉(杉山大志監修) (2010) 戦後日本の省エネルギー史 電力, 鉄鋼, セメント産業の歩み, 30, エネルギーフォーラム.
- 加治木紳哉, 木村幸(2009)わが国の鉄鋼業における省エネルギーの歴史的分析, 電力中央研究所報告, 研究報告 Y08044.
- 河瀬玲奈, 松岡譲 (2014) 2050年における世界の鉄鋼部門からのCO<sub>2</sub>排出量削減ポテンシャルの推計, 土木学会論文集 G, vol.70(6), II\_239-II\_248.
- 鋼材倶楽部(社団法人)・日本鉄鋼輸出組合 (1960) インドの鉄鋼需要の見通しー第三次及び四次計画を背景とした需要予測ー.
- Krishnan, S.S., Vunnam, V., Sunder, P.S., Sunil, J.V., Ramakrishnan, A.M. (2013) A study of energy efficiency in the Indian iron and steel industry, Center for Study of Science, Technology and Policy Bangalore, India.
- Liu, Z., Mao, X., Liu, S., Tu, K.J. (2011) Co-control of air pollution and GHGs in China's iron and steel sector: an integrated modeling assessment of policy and technology options, research report No.2011-RR6, EEPSEA.
- Morgan Stanley (2013) Steeling for oversupply, Morgan Stanley Blue Paper.
- Napp, T.A., Gambhir, A., Hills, T.P., Florin, N., Fennell, P.S. (2014) A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonizing energy-intensive

- manufacturing industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.30, pp.616-640.
- 日本鉄鋼連盟(一般社団法人) (2013) 鉄鋼統計要覧 2013 年度版(平成 25 年), 富士美術印刷株式会社.
- RITE (2012) 2010 年時点のエネルギー原単位の推計(鉄鋼部門-スクラップ電炉鋼).[http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison\\_EnergyEfficiency2010steelEAF.pdf](http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison_EnergyEfficiency2010steelEAF.pdf)
- Sun, W., Cai, J., Ye, Z. (2013) Advances in energy conservation of China steel industry, *The Scientific World Journal*, vol. 2013, Article ID 247035.
- 梅澤修 (2002) 低環境負荷・資源循環型対応の製鉄プロセス, *ふえらむ* vol.7, No.7 pp27-36.
- UNDP (2013) Energy-Efficient Steel Re-rolling, How a pioneering project is transforming the Indian secondary steel sector, Srinivas. S.N., A.C.R.Das, Srinivasan Iyer (Edit)
- USEPA (2012) Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the iron and steel sector, 2012.  
(<http://www.epa.gov/nsr/ghgdocs/ironsteel.pdf>)
- Worrell, E., Price, L., Neelis, M., Galitsky, C., Nan, Z. (2008) World best practice energy intensity values for selected industrial sectors, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-62806 Rev.2.
- WSA (2013) Steel Statistical Yearbook 2013.  
<https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/statistics-archive/yearbook-archive/Steel-Statistical-Yearbook-2013/document/Steel-Statistical-Yearbook-2012.pdf>
- Zhang, B., Wang, Z., Yin, J., Su, L. (2012) CO<sub>2</sub> emission reduction within Chinese iron & Steel industry: practices, determinants and performance, *Journal of Cleaner Production*, vol. 33, pp.167-178.

## 第7章 結論

### 7.1 研究の総括

本研究では、経済成長を背景とした鉄鋼の需給の変化に伴う温室効果ガスの排出増加を研究対象として取り上げ、特に鉄鋼の需要増加が著しい中国・インドに焦点をおいて、温室効果ガスの排出削減の手法として有効と考えられるスクラップの活用と省エネルギー技術の導入について、効果と導入時の課題の検証を行った。そのうえで、これらの手法を推し進めるための策について、課題や留意点を整理し、望ましいあり方について分析し、効果的な気候変動緩和策の検討に資することを目的とした。

第1章においては、研究の背景をまとめ、先行研究の整理と本研究の位置づけを提示し、研究の目的と、研究の方法と構成を示した。

第2章においては、続く章で着目すべき国、考慮する要素を明確にするため、気候変動をめぐる国際交渉等の状況と、主要排出源の変遷、現在の国際的な排出削減策による主要排出源の捕捉状況等を整理するとともに、経済発展と鉄鋼需要の変化を整理し、気候変動対策上重要な国の同定を行った。また、鉄鋼生産に関連する主要な温室効果ガスである二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)について主要国の排出状況を整理し、CO<sub>2</sub>の排出につながる主要な要素の把握を行った。

鉄鋼生産の原料・プロセスの組み合わせは、銑鉄-転炉(世界全体での生産の約8割)、スクラップ-電炉(約2割)が主要であるが、CO<sub>2</sub>排出量は、銑鉄-転炉によるものとスクラップ-電炉によるものでは、4倍程度と大きく異なっており、スクラップを電炉で活用することは、鉄鉱石の還元に必要な化石燃料の消費を抑えることができるためCO<sub>2</sub>排出量の抑制に効果的である。しかし、同じ原料とプロセスの組み合わせ(銑鉄-転炉等)であっても国によってCO<sub>2</sub>排出の効率は様々であり、この違いには効率の良い技術導入の度合いが影響していた。

鉄鋼業は製造業の中でも最大の温室効果ガスの排出源であるが、鉄鋼生産のうえで気候変動対策上今後特に重要な国は、近年鉄鋼生産量が急増しており、経済成長からこの先も当面鉄鋼生産が伸びると考えられる国(中国、インド、トルコ)であって、世界の粗鋼生産の約半分と、粗鋼生産量がとびぬけて多いため、鉄鋼生産に費やされるエネルギー量が多く関連するCO<sub>2</sub>排出量の多い中国と、単位鉄鋼生産あたりCO<sub>2</sub>排出量が特に多いインドであることが明らかとなった。

第3章においては、続く章における考察の基礎として活用するため、鉄鋼生産に関連する温室効果ガス排出削減のための技術と政策を取り上げ、その概要と、活用にあたり留意すべき点、効果等を、既往文献より整理した。

効果的な技術として先進国で既に活用されているものについて整理し、欧州の平均的な各工程のエネルギー消費量と比較して削減率を求めると、転炉鋼の場合、対策技術の平均値で17%、中央値で7%の削減が、電炉鋼の場合、対策技術の平均値で24%、中央値で12%の削減が可能という結果となった。削減効果は各工程で様々であり、実際の効果は他の技術の導入状況や原料や土地の制約等様々な要因もからむため一概にはいえないが、例えば最もエネルギーを消費する高炉では、対策技術により、最大21~27%の削減効果が期待されることが明らかとなった。

また、気候変動緩和策として効果的なエネルギー削減量の大きい技術は、導入に必要な費用も高額となる傾向があり、技術の導入によるエネルギーコストは抑えられるというメリットはあるものの、特に途上国では中小企業のみでの自主的な導入は容易ではないことがわかった。

国際的な需給を勘案した気候変動緩和のための政策は、国内・地域内向けの手法として主として経済的手法、規制的手法、情報的手法、自主的取組等に分類された。省エネルギー分野では情報的手法が最も広く用いられ、使用頻度としては次点となる経済的手法が環境保全上の効果と費用対効果の観点から他の手法より優れているとされる。気候変動緩和策として効果を出すためには、他の主体からの温室効果ガスの排出、いわゆる炭素リーケージを抑制することが必要であり、そのためには、国際的に流通する財では、国際的に調和された対策が必要である。国際的な技術普及には京都議定書に基づくCDM(Clean Development Mechanism)等があるが、鉄鋼業の省エネルギー技術の普及としてはあまり機能しておらず、その問題点を打開するため日本政府よりJCM(Joint Credit Mechanism)が新たに提案されていた。鉄鋼業では業界の自主的な取り組みにより、他の炭素強度の高い財よりも、温室効果ガスの算定方法の規格化等国際的な取り組みが進められていることがわかった。

第4章においては、第2章で整理した原料としてのスクラップの活用に着目し、経済発展を背景に鉄鋼の需要増加の著しい中国とインドにおいて、鉄鋼の需要の変化に対し、自国におけるスクラップによる鉄源の供給量と、その活用による温室効果ガスの排出抑制効果について推計し考察した。その結果、経済発展により鉄鋼需要は増加する一方、経済成長の初期に必要なとされるのは使用年数の長い建築・土木用途でありスクラップの排出にはタイムラグがあることから、2050年までの期間では両国ともに鉄鋼の需要を自国のスクラップの供給が上回ることはない結果となった。しかし、中国においては2020年前後に鉄鋼需要のピークがあり、その後、需要は減退する一方、スクラップの排出は増加するため、2050年以降自国で回収されるスクラップが需要を上回ると予測された。インドにおいては、中国より緩やかではあるが経済成長に伴い鉄鋼需要は大きく伸びるという推計結果となったが、2050年までには鉄鋼需要のピークが訪れる可能性は高くはないと考えられる。鉄鋼の需要増加に関連するCO<sub>2</sub>の排出は、老廃スクラップの回収可能量全量を電炉で使用した場合と、老廃スクラップの電炉での活用割合を各国実績に従うとした場合を比較すると、2010年から2050年までの累積で、中国で8～14%、インドでは2～8%排出量を抑えることができるという結果となった。また、中国・インド両国に、現在先進国で既に活用されている製鋼に関する温室効果ガス排出低減策を導入した場合には、これらの技術を導入しない場合(現状の技術のままの場合)と比較して、2050年時点で、中国で14%程度、インドで6%程度の排出低減効果が得られることがわかった。また、インドについては、効率の悪い直接還元鉄(Direct Reduced Iron, DRI)を2050年までに徐々に廃止していくとした場合、21～24%の削減効果があった。

第5章では、炭素強度の高い財の需給に着目した温室効果ガスの排出削減策の比較分析を実施した。第3章の鉄鋼生産に関連する排出削減を促す政策の整理を基に炭素強度の高い財に着目した温室効果ガスの排出削減策4つを取り上げ、温室効果ガスの排出削減効果や実行性等の評価項目について、我が国の専門家より評価を得るためインタビュー調査を実施し、得られた回答

に対し Wilcoxon の符号付順位検定統計解析とクラスター分析を行った。その結果、提示した排出削減策の中では、環境保全上の効果と国際的な合意の可能性に関する評価がトレードオフの傾向を示し、とびぬけて全般的に高い評価を受けた削減策はみられなかった。クラスター分析の結果、回答の傾向により専門家は5つのグループに分けられたが、炭素強度の高い財の製造業に関わる者、あるいは関連する専門家については、鉄鋼業とそれ以外の業に分かれ、鉄鋼業に関する専門家は排出削減策に最も積極的なグループに、それ以外の業に関する専門家は最も消極的なグループに分類された。この背景には、鉄鋼は炭素強度の高い財の中でも国際的な流通が盛んであり、かつ、温室効果ガスの排出の把握について国際的な取り組みが進められていることが影響していると考えられる。統計解析の結果とインタビューによる情報を加味した考察により、提示した4つの策である「上流炭素税」、「消費ベース排出算定」、「国際認証」、「JCM」それぞれの排出削減策の実現可能性と効果を高めるために留意すべき点あるいは解決すべき点が示唆された。

第6章では、温室効果ガス排出削減技術について影響する要素、中国・インドにおける技術導入の状況・課題を整理し、スクラップの効率的な活用について発電の際の温室効果ガスの排出を含めて検討したうえで、第3章から第5章までの研究結果を基に、統合的な考察を行った。

中国・インドによる鉄鋼の需要とスクラップによる供給の推計の結果、中国においては、鉄鋼の見かけの消費量は2050年までに増加のピークを越え、その期間内では回収し利用できるスクラップの量は見かけの消費量を上回らないものの、その後スクラップによる供給量が需要を上回ると考えられる(第4章)。また、中国では現段階でも生産能力が過剰であることが指摘されているが、鉄鋼生産設備は初期投資金額も大きく、雇用への影響も大きいことから、国内での需要が減退した後も政策的に鉄鋼の生産が続けられる可能性もあり、その場合、炭素強度の高い鉄鋼が国際市場に流れる恐れもある(第6章)。

また、スクラップを用いて電炉で鉄鋼を生産する場合、その際排出される温室効果ガスの量は電力の排出係数に依存する。今後、インドでは経済発展を背景に鉄鋼の需要が大きく伸びると予想され、その際中国から排出されるスクラップをインドで用いることも考えられるが(第4章)、現在のインドの電力の排出係数は国際的にみて高く、例えば電力の排出係数が低い国であるブラジルで生産した場合と比較して、温室効果ガスの排出は3倍も高い結果となる(第6章)。

さらに、炭素強度を下げるために効果的な技術には既に実用されているものでも様々なものがあるが、効果が高いものは導入費用が高い傾向にある(第3章)。中国・インドでは、安い化石燃料を算出することから、何らかの策を講じなければ排出削減技術の導入は容易には進まないと考えられる(第6章)。

これらにより、鉄鋼生産時の炭素強度を下げるインセンティブとして働く国際的な排出削減策が必要である。

炭素強度を下げる排出削減策については、国内の専門家に評価を得た結果(第5章)、経済的手法である「上流炭素税」は、提示した4つの策の中でも最も環境保全上の効果や費用対効果等実行性、技術革新・普及についての項目において高い評価を得た。その一方で、国際的な合意の蓋然性と途上国の参加については極めて低い評価結果となった。同様の効果が期待される経済



的手法には排出権取引があるが、排出権取引については、近い将来中国等の参加も決まっており(第3章)、主要な主体の参加を含む国際的な合意の蓋然性が高いことから、上流炭素税よりも導入の障壁は低いと考えられる。第3章・第5章の結果から、期待される効果を実現するため適切な運用を行うための配慮を行い、他の策と比した利点に着目した利害関係者への働きかけが重要といえる。

「消費ベース排出算定」を行ったうえでその結果に応じて各国に義務的な規制をかける排出削減策は、元来中国が提案したものであるが、先進国の消費のための炭素強度の高い財の生産が途上国で行われていることに対応すると期待され、炭素強度を下げるインセンティブとしては効果的と考えられる。一方、鉄鋼は素材として流通し、最終製品としても貿易がなされるため消費をどのように捉えるかが難しく実行性が低いとする指摘もあり、また、自国の消費も増加すると推計される中国・インドでは(第4章)導入に反対する可能性も高いと考えられる。

情報的手法の一つである「国際認証」については、特に低い評価であったのは煩雑さに関する評価項目であったが(第5章)、炭素強度の高い財の中でも鉄鋼については既に国際的な温室効果ガスの排出算定手法が国際規格となっているため(第3章)、導入の際の実行性が高いと考えられる。一方、特にインドでは老朽施設や効率の悪い石炭を用いた直接還元鉄(DRI)が多用されており、今後伸びると予想される鉄鋼需要も国内生産による供給が中心である建築・土木用途であることを踏まえると(第4章)、この策のみでは効果は低いと考えられ、経済的手法や規制的手法の効果を出すための総合的で正確な情報を提供するツールとして(第3章)、他の策と併せて活用すべきと考えられる。

鉄鋼生産のような高額な設備投資が往々にして必要となる産業では、一度設備が導入されてしまうと長期間使用されてしまうため、短期的に効果をもたらす策も重要である。「JCM」については、中国・インド両国で必要となる老朽施設の効率改善に働きかけることも可能であり、途上国の参加や国際的な合意の蓋然性も高く、技術移転には効果的であることから(第5章)、既存の技術を活用し短期的に効果を出すことが可能という利点がある。一方でこの策は、炭素強度を下げるという意味での効果は限定的であるため、長期的に環境保全上の効果を出すために他の策と併せて実施すべきである。実施の際には、効果的な取組を広げるための努力が必要であり、二国間の取組であることにより、測定・報告・検証(Measurement, Reporting and Verification, MRV)の徹底が損なわれないような配慮が重要である(第5章)。

## 7.2 今後の課題

本研究に関する今後取り組むべき課題は以下のとおりである。

鉄鋼生産に関する気候変動緩和策を検討するうえでは、鉄鋼の需要を抑えるための施策として、鉄鋼製品をより長期的に使用する、鉄鋼製品のスクラップとしての回収率をあげる、鉄鋼をより炭素強度の低い素材へと代替するといった方法もあるが、本研究においては、別途既往研究があることから対象の外と整理した。本来は中国・インドといった特定の気候変動緩和策を検討するうえでは

各国の状況に応じたこれらの策についても検討を行うことが望ましい。

第 3 章において、温室効果ガス排出削減対策技術のレビューを行った際、各工程の技術について削減効果等の整理を行ったが、残念ながら各国において各工程にどれだけエネルギーが実際消費されているか、どの技術がどれだけ普及しているかについて十分な情報を得ることが適わず、具体的にどの技術をどの工程に導入すべきかについての検証を行うことはできなかった。今後途上国において実際に技術導入を検討する際には、個別に詳細を検証することが必要と考えられる。

第 4 章において、スクラップの利用可能性について検証を行ったが、スクラップの活用には鉄鉱石とスクラップの価格も大きく左右すると考えられ、スクラップの発生量の推計に加え、経済モデルによる価格変動の考慮も含めた検証が行われることが望ましい。また、本論文では、現状及び今後の鉄鋼の需要が大きい国際的にも重要と考えられる中国・インドを対象としたことから、『対象とした国における需要を、その国で発生したスクラップをもってどれだけ満たせるか』、ということに着目したが、スクラップは国際的に流通するものでもあり、同時期に他国で発生し流通するスクラップの活用、また発生するスクラップが他国の鉄鋼の需要に与える影響についても考察することが望ましい。



## 謝辞

本研究を進めるにあたっては多くの方々のお力添えをいただきました。

まず、主査を務めていただいた、森口祐一先生には、社会人として博士課程への入学を検討する段階から多岐にわたるご助言をいただき、休学もはさみ遅々として進まない研究を忍耐強く見守り、時に優しく、時に厳しく、きめ細かなご指導をいただきました。途中で研究を断念せず、ここまで続けてこられたのは、先生のご指導があっはじめてできたことでした。

副査を務めていただいた、大島義人先生、吉田好邦先生、醍醐市朗先生には貴重なご助言を多数いただきました。これらのご助言がなければ、この論文を本審査を受けるに足る質に高めることは不可能でした。

副査を務めていただき、また連携講座でもご指導をいただいた亀山康子先生には、入学当初から長期にわたりご指導をいただきました。多くのことをお教えいただき、研究のうえでも、仕事と育児と研究を、曲がりなりにも、ともに進める力を与えていただきました。

連携講座でご指導をいただきました、橋本征二先生、田崎智宏先生、松橋啓介先生には、御専門に基づくご助言から、研究への心構えまで広くご教示いただきました。

研究の一環として行ったインタビュー調査へは多くの方々のご協力をいただきました。長い時間をいただき丁寧にご意見をお聞かせ伺いましたことに改めまして御礼申し上げます。

また、研究を続けるにあたっては、家族と友人、とりわけ両親と夫の力に大いに助けられました。当初の予想をはるかに超えた長期間となりましたが、辛抱強く日々支えてくれたことが大きな力となりました。

最後に、研究の途中で授かった娘にお礼を述べたいと思います。色々と我慢してくれてありがとう。その笑顔がなければ、ここまで到達することはできませんでした。

支えてくださった全ての方に心より感謝を申し上げます。