

2005 年時点のエネルギー効率の推計

(鉄鋼部門-転炉鋼)

平成 21 年 10 月 5 日

RITE システム研究グループ

RITE では、平成 20 年 1 月 11 日に「エネルギー効率の国際比較（発電、鉄鋼、セメント部門）」のレポート（http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison_EnergyEfficiency.pdf）において、2000 年時点における鉄鋼、セメント部門のエネルギー効率の国際比較に関する分析を行った（発電部門については 2005 年時点の比較）。

また、2005 年時点の鉄鋼部門の推計に関しては、上記 2000 年推計値を基にしたモデル分析結果を援用する暫定的試算にとどまっていた。（http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison_EnergyEfficiency2005temp.pdf）

本レポートは、最近入手可能になった実績データに基づき 2005 年時点の鉄鋼部門のエネルギー効率推計を行い、それについてまとめたものである。機器別・セクター別原単位アプローチの基礎データとして、そして具体的に実効性のある排出削減を促すためにも、ここで行ったような技術レベルをできる限り正しく反映した世界各国のエネルギー効率の推計は、大変価値の高いものであると考えられる。

1. 推計方法の概要

鉄鋼部門は、IEA[1]も指摘しているように、高炉転炉法とスクラップを鉄源とする電炉法で、特性が異なる。電炉法はエネルギー消費量が小さい特性があるものの、世界全体で見ると鉄スクラップの入手可能性に制約がある。また、転炉鋼でないと元来製造が難しいとされていた高級材の一部についても技術改良に伴い電炉鋼での製造が可能になりつつあるが、依然として多くの高級材については転炉鋼からの製造が技術的にも不可欠である。そのため世界全体の CO₂ 排出抑制という観点からも、高炉転炉法と電炉法のエネルギー効率を分けて推計することが必要である。

また、鉄鋼部門は各種エネルギーの受入・外販も盛んである（例えば、コークスの輸出入）。そのため、IEA エネルギーバランス表[2]に記載されている”Iron and Steel”という項目のエネルギー消費量のみ注目するのは誤りである（詳細については p.2 参照）。つまり、バウンダリーの調整を適切に行う必要がある。

以上の観点に基づき、本推計方法は次のような複数の推計法に基づくエネルギー効率を相互に比較し、国際比較が可能なエネルギー効率を推計した。

トップダウン的手法で参照した統計実績値

- ・ IEA 統計 (Energy Balances of OECD/Non-OECD Countries, 2008) [2]
- ・ 世界鉄鋼協会 (World Steel association) 集計の粗鋼生産量など ([3], [4])

ボトムアップ的手法で参照したデータ及び資料

- ・ 企業別国別のエネルギー効率、CO₂原単位、及びその補正
- ・ 個別プラントの実態調査 (NEDO 委託調査報告書)
- ・ 設備普及率を基に推計
- ・ 2000年推計のエネルギー効率を基に2005年を推計
- ・ 地域別還元材比
- ・ IEA[1]が試算した2005年の地域別CO₂削減ポテンシャル

なお、本推計の主な前提は次の通り。

- ・ 電力、蒸気などは一次エネルギーベースでカウント (電力については、全地域で1MWh=10.8GJとして換算、熱は地域別の効率でカウント)
- ・ 副生ガス、電力など、正味で消費したものをカウント

以下、トップダウン的手法及びボトムアップ的手法についてそれぞれ述べる。

2. トップダウン的手法

(1) IEA[2]に基づくエネルギー投入量及びバウンダリーの調整

IEA[2]において、鉄鋼生産のために投入したエネルギーは、表1に例示した通りエネルギー需要部門の一つとして記載されている”Iron and Steel”のみならず、エネルギー転換部門の中の”Coke Ovens”や”Blast Furnaces”にも記載されている。また、生産したコークスや副生ガス、電力などは一部、他産業、他地域で使用されており、バウンダリーの調整が必要となる。

表 1 IEA[1] に記載されている鉄鋼関連部分のエネルギーバランス表
[世界合計、2005年] (一部抜粋)

(PJ/yr)	Coal	Coke Oven Coke	Coke Oven Gas	Blast Furnace Gas	Oxygen Steel Furnace Gas	Elec	Total
Coke Ovens	-17,020	12,739	1,908			16	-2,391
Blast Furnaces	-841	-8,731	-49	3,400	132	1	-5,732
Iron and Steel	2,135	2,084	1,176	2,419	45	3,280	15,091

注1) ここで言う "Coke Ovens"、"Blast Furnaces"、"Iron and Steel"とは、IEA エネルギーバランス表[2]に記載されている項目を指す。従ってこの"Iron and Steel"は、本資料で定義した鉄鋼部門のバウンダリーとは全く異なる。

そこで本分析では、2000年推計と同様、バウンダリーについては図 1 の通りとした。

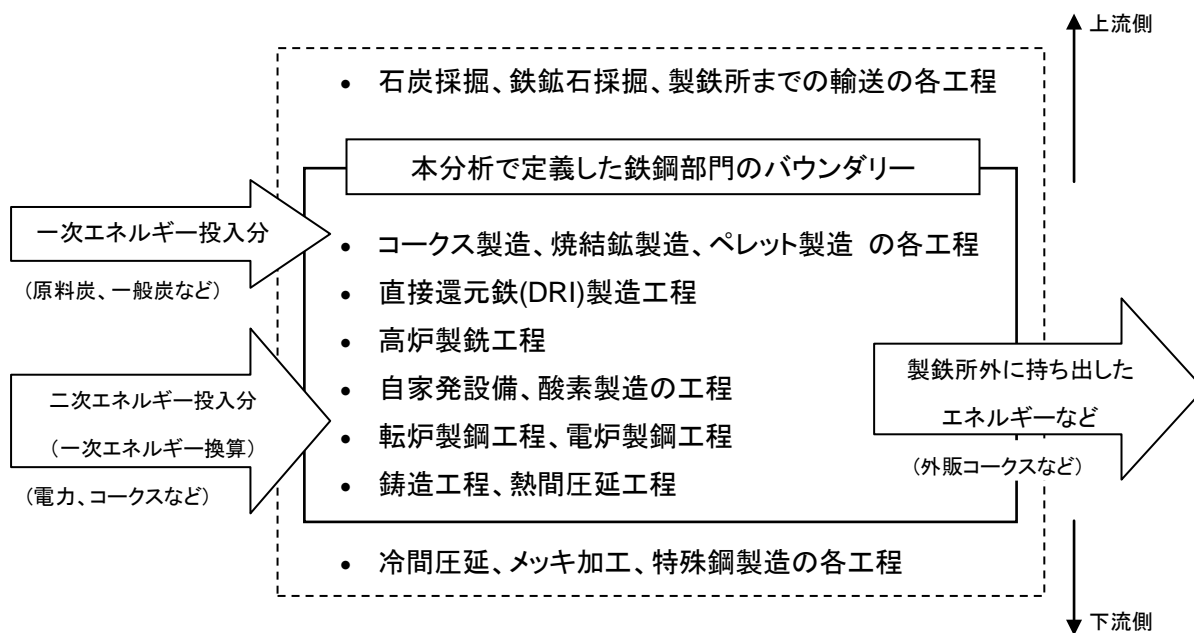


図 1 本分析で定義した鉄鋼部門のバウンダリー概略図

注1) 概略図では、分かりやすさを優先し、エネルギーのループ構造を省いて図示している。実際には、副生ガス、蒸気、電力など複雑なループ構造を持つが、本分析ではこれらエネルギーの正味の消費分をカウントしている。

図 1 では、鉄鋼製造における上流側の工程を図上部に記載し、図下部へ移動するに従い鉄鋼製造の下流工程となるよう記載した。とりわけ本分析では、鉄鋼製造の各工程に対し

次のようにバウンダリーを設定した

- ・ 上流側については、コークス、焼結鉱、ペレット製造に要したエネルギーからカウント
- ・ 下流側については、熱間圧延まで含み、冷延、メッキ類、特殊鋼などの加工に要したエネルギーは除く

また図 1 ではエネルギーが左から右へ流れるよう記載した。図 1 左側に記載した一次エネルギー投入分とは、製鉄所に持ち込まれた原料炭や、高炉吹き込み用一般炭などを意味する。図 1 左側に記載した二次エネルギー投入分（一次エネルギー換算）とは、購入した電力、コークス、蒸気などを意味する。図 1 右側の製鉄所外へ持ち出したエネルギーとは、外販されたコークス、副生ガス、蒸気、電力などを意味する。

鉄鋼生産の複雑なエネルギー収支に対し、（地域差異を許容することなく）このように世界の全ての地域で共通のバウンダリーを設定することにより、技術レベルを反映したエネルギー効率の国際比較を可能にした。

上記図 1 に基づいて、IEA[2]から読み解くことが可能な範囲で、鉄鋼生産のために投入した正味のエネルギー量を表計算ソフトなどで計算した。その結果を表 2 に示す。

表 2 鉄鋼生産のために投入したエネルギー（IEA[2]に基づき RITE 推計）[2005 年]

(PJ/yr)	非電力	電力	合計
US	1,064	869	1,933
Canada	204	116	319
UK	241	54	296
France	277	169	446
Germany	583	303	887
EU (15)	2,070	1,229	3,299
EU (27)	2,446	1,492	3,938
Japan	1,587	748	2,335
Korea	668	467	1,135
China	7,676	2,748	10,424
India	1,152	0	1,152
Russia	1,978	1,612	3,591
World	20,322	9,876	30,198

注1) 非電力 = 正味で投入した電力を除くエネルギー量、実際には石炭が多くを占める（一次エネルギーベースへ変換済）

注2) 電力= 正味で投入した電力量（一次エネルギーベースへ変換済；1[kWh]=3.6/(1/3)[MJ]=10.8[MJ]）

注3) MJ とは 10^6 J、PJ とは 10^{15} J のこと

注4) IEA[2]においてエネルギー量は 10^3 石油換算トン[ktoe]で記載されているが、本資料

ではジュール[J]を利用 (1[ktoe]=0.041868[PJ]として換算)

注5) 主要地域のみ記載

なお、高炉転炉法に要したエネルギーと、電炉法に要したエネルギーをこの段階では区分していない点に注意が必要である。

(2) 生産方式別の粗鋼生産量の調整

次に世界鉄鋼協会([3], [4])の資料を基に、粗鋼生産量などの物量データの整理を表 3 のように行った。転炉鋼は主に高炉で生産された銑鉄を鉄源とする転炉鋼、スクラップ電炉鋼は主にスクラップを鉄源とする電炉鋼、直接還元鉄(DRI)電炉鋼は主に直接還元鉄を鉄源とする電炉鋼をそれぞれ意味する。なお、DRI 生産国にて直接還元鉄電炉鋼を生産したものと計算している (エネルギー消費の過半は DRI 生産時に必要となるため)。

表 3 生産方式別の粗鋼生産量[2005 年]

(Mt/yr)	転炉鋼	スクラップ	直接還元鉄
		電炉鋼	電炉鋼
US	41.7	52.0	0.2
Canada	9.0	5.8	0.6
UK	10.6	2.7	0.0
France	12.2	7.3	0.0
Germany	30.9	13.2	0.5
EU (15)	97.9	66.8	0.5
EU (27)	120.5	74.5	0.6
Japan	83.6	28.8	0.0
Korea	26.7	21.1	0.0
China	314.0	41.5	0.3
India	21.0	12.4	12.4
Russia	55.3	7.4	3.4
World	781.6	305.7	59.5

注1) 転炉鋼には、平炉(OHF)による粗鋼生産量を含む

注2) 直接還元鉄 (DRI) 生産国において、直接還元鉄電炉鋼を生産したものとみなして計算

注3) 主要地域のみ記載

(3) トップダウン的手法のまとめ

表 4 は、IEA[2]を基にした鉄鋼部門のエネルギー消費量 (表 2) と、生産方式別の粗鋼生産量 (表 3) から、転炉鋼のエネルギー効率を推計したものである。いくつかの地域では、合理的な説明が困難なエネルギー効率となっているが (例えばロシア)、これは IEA[2]の統計上の不備が大きな要因であると考えられる。このように統計上の不備があることは、IEA 自身も認めているところである[5]。

表 4 トップダウン的手法に基づく転炉鋼のエネルギー効率[2005 年]

(GJ/tcs)	非電力を基に 推計した転炉 鋼の効率	合計を基に推 計した転炉鋼 の効率
US	30.9	35.5
Canada	27.5	30.0
UK	29.3	26.9
France	26.4	30.6
Germany	24.0	26.4
EU (15)	26.1	28.9
EU (27)	25.5	28.8
Japan	23.5	25.7
Korea	28.9	34.2
China	28.6	30.5
India	40.9	30.0
Russia	47.8	65.0
World	29.8	32.7

注1) 単位は、転炉鋼 1 トン当たりのエネルギー消費量[GJ/t crude steel]

注2) 主要地域のみ記載

次に、仮に統計上の不備が存在しないということを前提に考えると、電炉率の低い地域では非電力を基に推計した転炉鋼の効率（表 4 左項）及びエネルギー合計を基に推計した転炉鋼の効率（表 4 右項）が共に参考になると考えられる。

電炉率の高い地域では、電力消費量が電炉鋼の効率に左右されるため、電力を含むエネルギー合計を基に推計した表 4 右項よりも、非電力を基に推計した表 4 左項がより参考になると考えられる。

なお、表 4 の左項よりも右項の方が全般的に大きな数値になっているが、これは下工程で鋼材を最終商品に加工する際の電力消費の影響による。

3. ボトムアップ的手法

トップダウン的手法は、統計上は地域網羅的であるものの、地域別の（本質的な）エネルギー効率差異と統計上の不備の区分が困難であるという課題がある。

そのため、IEA 統計[2]に頼らないボトムアップ的な手法に基づく推計も合わせて整理する必要がある。本推計にあたっては、次のような複数のボトムアップ的手法を活用した。

(1) 企業別国別のエネルギー効率、CO₂原単位、及びその補正（OECD 諸国）

この手法は、企業や各国の鉄鋼協会が発表したエネルギー効率を補正し、地域別のエネルギー効率の推計を試みたものである。ただし、それぞれ提示されるエネルギー効率や CO₂ 原単位は、同一の条件とは限らず、またその条件が明示されていない場合もあり注意が必

要である。

企業別のデータとしては、ThyssenKrupp 社[6],[7])、Corus 社[8]、POSCO 社[9]、及び日本の高炉五社の数値が特に参考となる。各国の鉄鋼協会が発表した数値としては、American Iron and Steel Institute[10]発表の転炉鋼エネルギー効率が参考になる。

これらデータを国際的に比較可能な数値に補正するには、特に、電力を一次エネルギーベースでカウントしているのか、転炉鋼への溶銑比（あるいは銑鋼比）、上流側における原材料の購買・外販、下流側のエネルギー消費に関するバンダリーの調整などについて検討を行う必要がある。

(2) 中国におけるボトムアップ的推定法

2005 年時点で中国は世界合計の転炉鋼生産の 4 割以上を占める。そのため、中国についてはより詳細に見ていく必要がある。

ボトムアップ的な推計にあたっては、主要企業（重点大中型企業）と小規模企業に分けて、転炉鋼のエネルギー効率を推計した。これは、主要企業の情報量が多い一方、小規模企業の情報量は少ないといった情報量の差異もあるためである。

ここでは文献[11]に基づき主要企業、小規模企業別の銑鉄、転炉鋼、全粗鋼生産量について表 5 の通り整理した。表 5 に基づくと、2001 年以降、小規模企業の転炉鋼生産量も急増し、転炉鋼生産に占める小規模企業のシェアは 4 年間で 7%弱から 2 割近くへ飛躍的に増加している。

また、2001 年時点の小規模企業は、生産した銑鉄を電炉企業へ外販する割合が多かったが、2005 年には転炉鉄源とする割合が上昇したことが表 5 から推測される。

表 5 中国の主要企業、小規模企業別の生産量

		2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年
銑鉄生産量 (Mtpi/yr)	中国合計	131	147	171	214	257	345	408	471
	主要企業		119	139	155	208	260		
	小規模企業		28	32	59	48	85		
転炉鋼生産量 (Mtcs/yr)	中国合計	106	126	152	181	239	314	379	450
	主要企業		117	139	157	200	256		
	小規模企業		8	12	24	39	58		
粗鋼生産量 (Mtcs/yr)	中国合計	127	151	182	220	280	356	423	495
	主要企業		137	164	186	234	289		
	小規模企業		14	18	34	47	66		

出典：資料[11]

注1) 単位は、それぞれ Mtpi=million ton pig iron, Mtcs=million ton crude steel の略

なお、本エネルギー効率推計にあたっては、転炉鋼のエネルギー効率に注目しており、その転炉鋼製造に際し投入した銑鉄のみを「鉄鋼部門」として扱うこととしている。従って、本推計においても、また 2000 年時点の推計においても電炉鉄源用銑鉄生産に要したエネルギー消費（＝多くは小規模企業による）は扱っていない点に注意が必要である（つまり、文献[12]のように全ての銑鉄生産を鉄鋼部門とみなす扱いはしていない）。

次に、エネルギー効率であるが、資料([13]-[16])に基づき推計を行った結果、表 6 の通りとなった。表 6 は、銑鋼比の差異などの条件を揃えることで、全て比較可能な数値へ変換している。また、表 6 は主要企業における高炉容積別のエネルギー効率（表 7）などを積み上げ作成した。

表 6 集計したエネルギー効率

(GJ/tcs)		Coking	Sintering	BF	BOF	Rolling	total
中国平均	2004	4.6	2.1	14.2	1.0	3.6	25.2
	2005	4.5	2.1	13.8	1.0	3.7	24.7
主要企業	2004	4.2	1.9	13.7	0.8	2.7	23.3
	2005	4.1	1.8	13.2	0.8	2.7	22.6
小規模企業	2004	6.5	3.1	16.9	2.2	8.4	35.0
	2005	6.3	3.0	16.4	2.1	8.1	33.9

注1) 資料([13]-[16])を基に推計

表 7 主要企業の製銑工程（BF）のエネルギー効率（高炉容積別）

主要企業 2005年	銑鉄生産量 (Mt-pi/yr)	BF (GJ/t-pi)
>3,000m3	26	11.5
2,000-2,999m3	61	12.4
1,000-1,999m3	52	12.8
300-999m3	132	13.9
<299m3	18	14.1
total	289	13.2

注1) 資料([13]-[16])を基に推計

表 6 に基づくと、中国転炉鋼の 2005 年エネルギー効率は 25GJ/tcs 程度となる。ただし、この中国で行った計算法は本分析定義の計算法と異なる。中国で行った計算法を日本に適用した場合、21.2GJ/tcs となる。日本のエネルギー効率は本分析定義の手法に基づくと 23.1GJ/tcs であるので、相対的差異から本分析定義の中国のエネルギー効率は 27.2GJ/tcs となる。

(3) インドにおけるボトムアップ的推定法

インドは依然として転炉鋼生産量は小規模であるものの、経済離陸に伴い社会インフラ整備が本格化した場合の潜在的な鋼材需要ポテンシャルは極めて大きいものがある。そこで中国に続き、詳細に見ていくこととする。

インドの企業別のエネルギー効率、および特定のプラントの実態が資料[17]などにて示されている。企業別のエネルギー効率などを表 8 に整理する。

表 8 インドの企業別のエネルギー効率

	転炉鋼生産量	原単位	備考
インド鉄鋼 公社(SAIL)	10.9Mtcs[2000 年度][4]	33.5GJ/tcs[2000 年度]	・左記の原単位はインド側提出のデータ
	13.4Mtcs[2005 年度][4]	30.1GJ/tcs[2005 年度]	・ SAIL,Rourkela 製鉄所の原単位[2006 年度]
	13.5Mtcs[2006 年度][4]	29.9GJ/tcs[2006 年度] ([17], p.95)	は、インド側の計算によると 33.4GJ/tcs、インド側提供のデータに基づき日本側により再計算を行うと 36.1GJ/tcs ([17], p.46) ・「日本側の計算」と同様の計算手法によると 2006 年度の日本平均は 21.67 GJ/tcs
Rashtriya	2.66Mtcs[1999 年度]	31.4GJ/tcs[1999 年度]	・左記の 1999 年度のデータは、資料[18]に基づく
Ispat Nigam,	3.0Mtcs [2001 年度][4]	27.7GJ/tcs[2001 年度]	
Visag	3.4Mtcs[2005 年度][4]	25.5GJ/tcs[2005 年度] ([17],p.124)	
Tata Steel	n.a [2000 年度]	31.0GJ/tcs[2000 年度] [19]	・左記の原単位データは、([17], p.116)でも確認できる
	4.73Mtcs[2005 年度][4]	29.1GJ/tcs[2005 年度] [20]	

表 8 のデータに基づき、転炉鋼生産量にてエネルギー効率を加重平均し、各種補正（銑鋼比、計算法の差異[日本の効率との相対差異]）の結果、インド転炉鋼の 2005 年エネルギー効率を 33.3GJ/tcs と推計される。

(4) 2000 年推計データを基準とする方法

RITE では 2000 年時点の推計も行っている。そこで、2000 年以降に追加された省エネ設備や、副生ガス回収率の向上などを 2000 年推計値から差し引けば（理論的には）2005 年効率が求まる。この手法は、次のよう点で有効である。

- ・ 2000 年推計値は、高炉容積や立地年（ヴィンテージ）を明示的に考慮している
- ・ 2000 年推計値は、各種省エネ設備の普及率を明示的に考慮している
- ・ 技術普及による正味の努力分を時系列的に考察可能となる

いくつかの地域では、省エネ技術の普及率の変化や 2000 年以降のエネルギー効率の改善率が明示的に得られるが、そのようなデータは地域的に間欠的である。明示的に改善率が得られない地域は、表 4 を算出したのと同様の手法により 2000 年時点のトップダウン的手法に基づくエネルギー効率を算出し改善率を推定した。

(5) その他の手法

以上の推計方法をもってしてもなお、十分な情報が得られない地域がある（主に中国、インドを除く途上国）。そこで、次のような推計法による結果も参照した。

- ・ 資料([21],[22])に記載されている還元材比からの推計
- ・ IEA[1]に示された地域別の CO₂ 削減ポテンシャルを基に推計

4. まとめ

以上の各種推計法によるエネルギー効率を相互に比較しつつ、相対的な整合性や信頼性に基づき地域別の転炉鋼エネルギー効率の推計結果を図 2 に示す。また、図 3 に 2000 年推計値も合わせて示す（2005 年の値は再掲）。

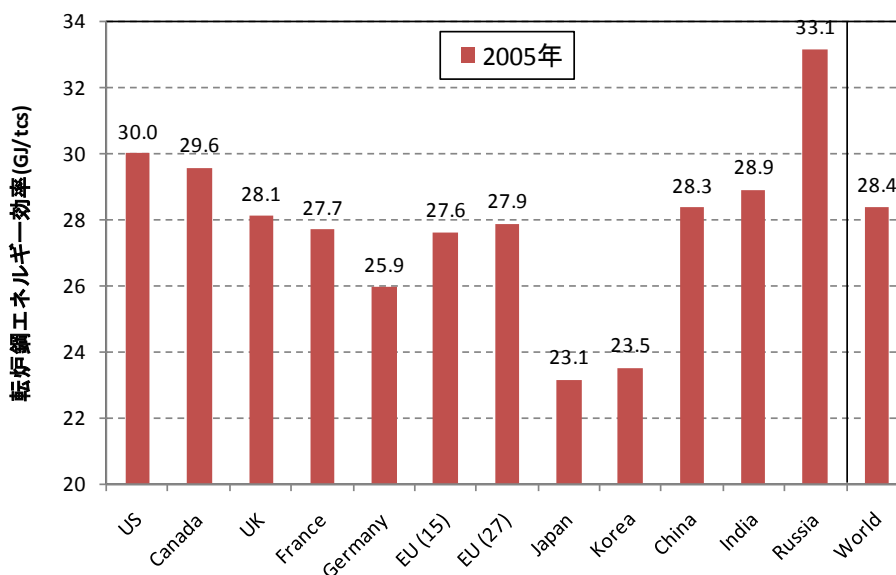


図 2 今回推計した転炉鋼エネルギー効率（2005 年）

注1) 地域別のエネルギー効率差異を明確にするため、縦軸目盛を 20GJ/tcs からとった。

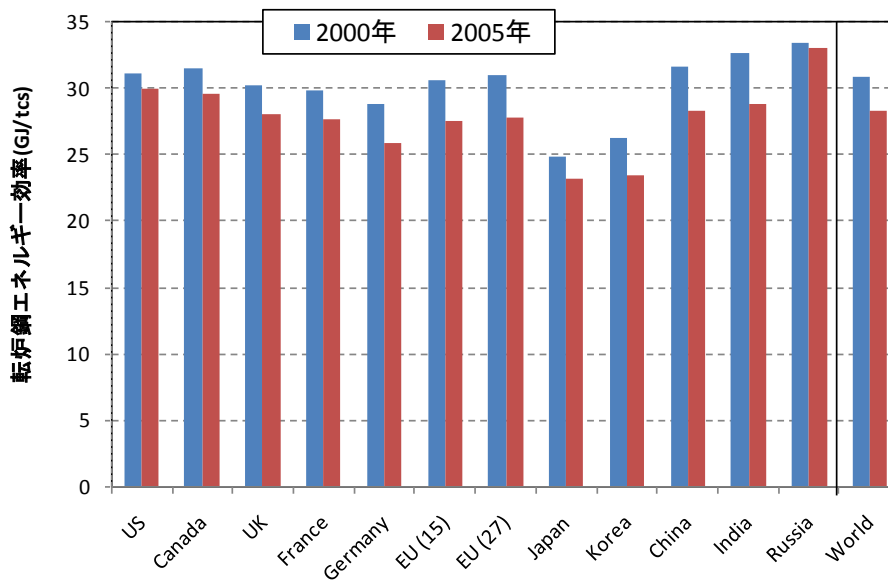


図 3 推計した転炉鋼エネルギー効率（2000年及び2005年）

図 2 及び図 3 から転炉鋼のエネルギー効率について次のことが示唆される。

- ・ 日本、韓国などの地域がエネルギー効率に優れている
- ・ これは、各種省エネ設備の普及率の差異や、副生ガスの回収率などの差異に起因する
- ・ 2000年から2005年にかけて、多くの地域でエネルギー効率の改善が進んだ
- ・ 中国、インドのエネルギー効率改善速度は、相対的に他の地域よりも大きい
- ・ 特に中国は、小規模企業乱立という負の影響があるものの、エネルギー効率に優れた大規模な新設備の大幅な追加と、既存設備に対する省エネ設備増強により、中国平均で見て効率改善が進んでいる
- ・ これに対し、ロシアのエネルギー効率改善速度は小さい

参考文献

- [1] IEA, Energy technology perspectives 2008, 2008.
- [2] IEA, Energy Balances of OECD/Non-OECD Countries 2008, CD-ROM, 2008.
- [3] World Steel association, Steel Statistical Yearbook, 2001-2008.
- [4] World Steel association, World Steel in Figures, 2002- 2009.

- [5] IEA, Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions, 2007.
- [6] ThyssenKrupp Steel, Sustainability Report 2004_2005, p.7.
- [7] ThyssenKrupp Steel, Supplement to the 2004_2005 Sustainability Report, pp.40, 41.
- [8] Corus, Corporate responsibility report 2006, Striving to make a difference Value, p.30, 2006.
- [9] POSCO, Sustainability Report 2008, p.39, 2007.
- [10] American Iron and Steel Institute, <http://www.steel.org/>
- [11] 通産資料出版会(株), 「中国の鉄鋼産業」, (株) シープレス, 2008.
- [12] Alliance for American Manufacturing (AAM), An Assessment of Environmental Regulation of the Steel Industry in China, 2009.
- [13] 中国鋼鉄工業年鑑編集部編, 「中国鋼鉄工業年鑑」中国鋼鉄工業, 2005.
- [14] 中国鋼鉄統工業協会編, 「中国鋼鉄統計」中国鋼鉄工業, 2005.
- [15] 外岡豊, 寧亜東, 朱徳志, 朱海峰, 高偉俊, 「中国鉄鋼業とセメント業におけるエネルギー消費構造の分析・予測」, 第 25 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 22-5, (2009).
- [16] 新日本製鐵株式会社, J F E スチール株式会社, 住友金属工業株式会社, 株式会社神戸製鋼所, 社団法人日本鉄鋼連盟, 「中華人民共和国における鉄鋼産業に係る省エネルギー・環境対策に関する基礎調査」, NEDO 委託, 管理番号 100011639, 2008 年 3 月.
- [17] 社団法人日本鉄鋼連盟, 「インド共和国における鉄鋼産業に係る省エネルギー・環境対策に関する基礎調査」, NEDO 委託, 管理番号 100011655, 2008 年 3 月.
- [18] 住友金属工業株式会社, 「インド国 RINL 社 Visak 製鉄所における省エネルギー調査」, 2002 年 3 月.
- [19] Tata Steel, 3rd Social Audit 1991-2001, p.133.
- [20] Tata Steel, Corporate Sustainability Report 2006-07, p.85, 2007.
- [21] Dieter Ameling, The Steel Industry in the European Union –strong, efficient and competitive, Critical Guidelines that Asia should implement. Steel Institute VDEh. Asian Steel Conference Singapore, January 11 -12, 2007.
- [22] Dieter Ameling, ABM's 63rd Annual Congress, Santos – SP – Brazil, July 28 – August 1, 2008.