

2010年時点のエネルギー原単位の推計

(セメント部門)

平成26年9月2日

RITE システム研究グループ

RITE はこれまでに世界主要国のセメント部門エネルギー原単位推計を行ってきた。RITE [1]では2000年時点の推計値、Oda et al[2]では2005年時点の推計値を示した。

本レポートは、最近入手できるようになったデータに基づいて、2010年時点のセメント部門のエネルギー原単位の推計を実施しまとめたものである。具体的で実効性のある排出削減策を促すためにも、技術レベル実態をできる限り正しく反映した世界主要国のエネルギー原単位推計値（本レポートにて提示）は、大変重要であると考えられる。

1. はじめに

(1) セメント部門の概要

セメント製造プロセスは、大きく「原料工程」「焼成工程」「仕上工程」の3つに区別される。「原料工程」では主原料である石灰石に加え、粘土、けい石、高炉スラグなどを粉砕・混合する。次の「焼成工程」ではこれら原料を、予熱器（プレヒータ）に投入しロータリーキルンを経てクリンカを製造する¹。クリンカはセメントの主原料となる中間生産物であり、セメント製造プロセスの中核をなす。これはセメント製造プロセス全体に必要なエネルギーの多くが「焼成工程」、即ちクリンカ製造に投入されるためである。最後の「仕上工程」ではクリンカの粉砕、さらに石こうとの混合を経てセメントとなる（普通ポルトランドセメントの場合）。高炉セメントを製造する際は、「仕上工程」で高炉スラグを40%程度利用する場合が多い²。

セメント製造の基本的な流れは以上の通りであるが、実際には原料や燃料として多様な副産物・廃棄物が投入されている（表1参照）³。これら副産物・廃棄物を合計すると、セメント1tあたり481kgにもものぼる（平成24年度における日本の場合）[3]。このように大量の副産物・廃棄物を利用している地域もあり、エネルギー原単位推計の際には十分注意する必要がある。

¹ NSP（予熱炉・仮焼炉付きロータリーキルン）の場合、仮焼炉にて過半の焼成がなされ、ロータリーキルンでの焼成割合の方がむしろ少ない。

² 高炉セメントの種類によって5%から70%の高炉スラグ比率となる。

³ クリンカの原料として投入した副産物・廃棄物により石灰石追い出し効果があれば、CaCO₃の分解に伴うプロセス由来CO₂排出の削減となる。

表 1 セメント製造プロセスに投入される副産物・廃棄物の例（日本）

役割	「原料工程」「焼成工程」 (クリンカ製造までに投入)	「仕上工程」 (クリンカ製造後に投入)
原料	汚泥、スラッジ、製鋼スラグ	フライアッシュ、高炉スラグ
燃料	廃油、廃プラスチック	
原料・燃料の両方	廃タイヤ、木くず、肉骨粉	

(2) 推計方法の概要

評価対象は、クリンカ製造 1t 当たりの熱エネルギー投入量とする。これは、セメント製造プロセスにおいてクリンカ製造がエネルギー消費の観点から見て中核をなすためである。クリンカ製造に要する熱エネルギーに続き大きなエネルギー消費となるのは、「原料工程」、「焼成工程」、「仕上工程」の電力消費である。主に原料やクリンカなどの粉碎、混合、輸送のために電力投入が必要となる。この電力消費はクリンカ製造熱エネルギーより小さく⁴、また一般にデータ入手がより困難であるため、本レポートではクリンカ製造熱エネルギー (GJ/t クリンカ) に注目する。

クリンカ製造当たりの熱エネルギー原単位を推計するべく、本レポートでは大きく 2 つの手法を用いる。一つ目は WBCSD Cement Sustainability Initiative (CSI)[4]等を参照する手法である。WBCSD CSI は設定されたバウンダリーに基づき各企業が報告した数値を、国別、あるいは地域別に集約し公表したものである。その数字自体はロバストなものと考えられる。IEA Energy Technology Perspectives 2012[5]も WBCSD CSI[4]を参照しつつ、世界地域別の省エネポテンシャルを示している⁵。その一方、WBCSD CSI[4]にてカバーされていない生産規模も地域によっては大きく（詳細後述）、他の手法と組み合わせることが必要である。

二つ目は、個々の情報を広く集め積み上げることにより各地域のクリンカ製造熱エネルギーを推計する手法である。用いた手法は具体的に次の通りである。

- ・ 生産方式や生産規模等を基に推計する手法
- ・ 企業の環境報告書等を参照する手法
- ・ 各地域のセメント協会発表資料等を参照する手法
- ・ 査読論文（地域別のエネルギー原単位データ等）を基に算定する手法

⁴ WBCSD Cement Sustainability Initiative (CSI) [4]によると、世界から広く収集した CSI 会員企業平均で電力消費は 104kWh/t セメントである (2012 年時点)。これは $1\text{kWh} = 3.6\text{MJ} \div 0.333 = 10.8\text{MJ}$ にて一次エネルギー換算すると 1.12GJ/t セメントに相当する。一方、CSI 平均のクリンカ製造熱投入量は 3.53GJ/t クリンカであり、CSI 平均のクリンカ・セメント比 74.7%で換算すると、熱投入量は 2.64GJ/t セメントに相当する (2012 年時点)。つまり一次エネルギー基準で見て、熱投入量は電力消費の 2.4 倍程度あり、セメント製造プロセス全体で見てクリンカ製造熱投入量がエネルギー消費の主軸となっている[4]。

⁵ IEA Energy Technology Perspectives (ETP)[5]は、世界の広い地域をカバーしているものの、欧州を集約して表示しており、欧州内の国別データについては他の方法により推定する必要がある。

次に「WBCSD CSIに基づく手法」及び「データ積み上げによる手法」について具体的にそれぞれ述べる。

2. 参照した中間推計値

(1) WBCSD CSI 等に基づく手法

WBCSD Cement Sustainability Initiative (以下 CSI)は、世界の主要セメント企業が自主的に参加、運営する民間組織である。CSIは持続可能な発展を目的としており、活動の一つに燃料消費や CO₂ 排出に関する社会的責任も挙げられている。基本的に CSI 会員企業は、CSIにより定められたフォーマットに従い、自らの燃料消費量や CO₂ 排出量を報告することになっている[4]。

CSI[4]によると、CSI 会員企業のクリンカ生産当たりの熱投入量は図 1 及び図 2 となっている。図 1 は世界主要地域別、図 2 は欧州の国別の推移を示す。日本、オーストラリア、ニュージーランドは CSI 会員企業数が限られ国別に提示すると個々の企業の数値が明らかとなるため、CSI は日本・オーストラリア・ニュージーランド 3 カ国平均の推移のみ提示している。これら 3 カ国は、インドの CSI 会員企業よりは劣るエネルギー効率であるが、欧州の CSI 会員企業よりも優れたエネルギー原単位となっている。

欧州の国別 CSI 会員企業の推移を図 2 に示す。ポーランド、英国は 1990 年以降のエネルギー原単位改善が大きく進んでいる。一方、より近い時点の 2000 年あるいは 2005 年以降の推移を見ると、欧州の多くの国でエネルギー原単位はむしろ悪化する方向となっている。図 1 から欧州、日本・オーストラリア・ニュージーランド平均の CSI 会員企業は 2005 年以降、エネルギー原単位は若干ながらむしろ悪化する傾向が見られる。これは、副産物・廃棄物の受け入れをより積極的に行ってきたことに起因すると考えられる⁶。

⁶ より正確に記載すると、エネルギー原単位は受け入れた副産物・廃棄物の量に加え、その質に影響を受ける。つまり、前処理を別サイトで行い乾燥した副産物・廃棄物をセメント工場で受け入れたのであれば、ロータリーキルンの熱原単位の悪化はあまり生じない。その一方、前処理を行わず水分の多い副産物・廃棄物を受け入れると、熱原単位の悪化は大きくなる。

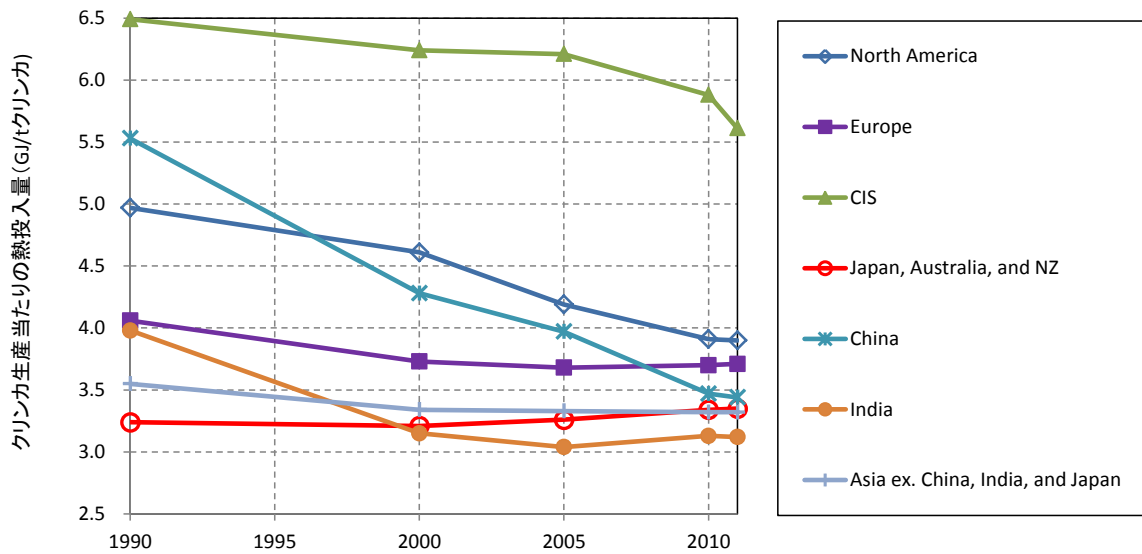


図 1 CSI 会員企業のクリンカ生産当たりの熱投入量（世界主要地域別）

出典) WBCSD CSI[4]

注) 熱投入量には化石燃料のみならず、投入した副産物・廃棄物の熱量を含む。

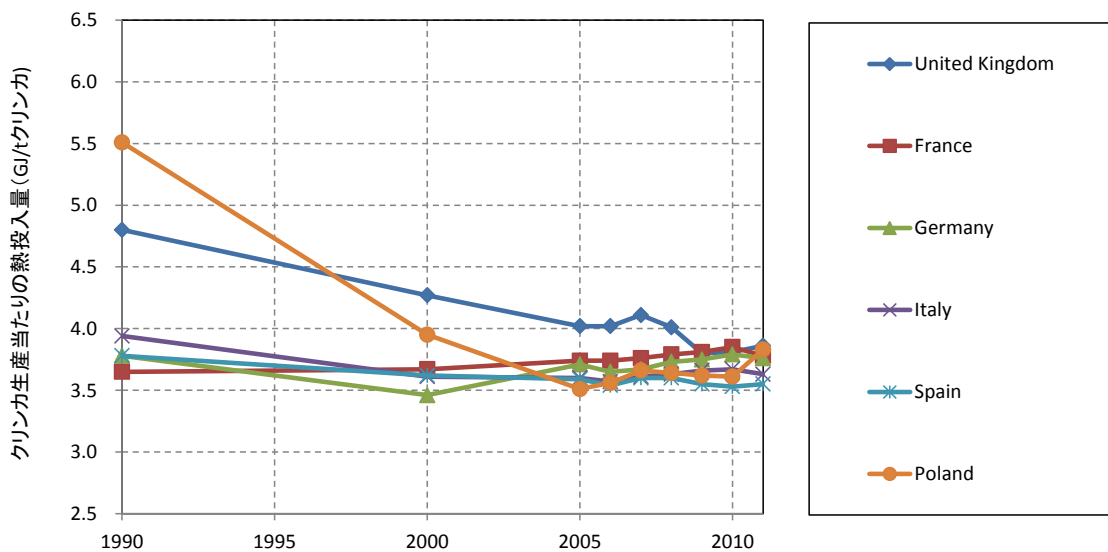


図 2 CSI 会員企業のクリンカ生産当たりの熱投入量（欧州地域の国別）

出典) WBCSD CSI[4]

注) 熱投入量には化石燃料のみならず、投入した副産物・廃棄物の熱量を含む。

図 1 及び図 2 に示した CSI 会員企業のデータは CSI 設定のバウンダリーに基づく値であり、その数字自体はロバストなものと考えられる。IEA ETP (2012) [5] も CSI[4] を参照しつつ、世界地域別の省エネポテンシャルを示している。

これら文献は大変参考となる一方、CSI 会員企業のセメント生産量カバー率は、図 4 に

示す通り地域によっては低位にとどまる。中国などのアジア地域、中東、旧ソ連は5%から50%程度、北米、ラテンアメリカ地域も60%から70%にとどまる。IEA ETP 2012[5]は世界全地域をカバーしているが、欧州をひとくくりにして表示していることから、別途、国別の状況について推定を行う必要がある。

Figure 12.11 Current energy savings potential for cement, based on best available technologies

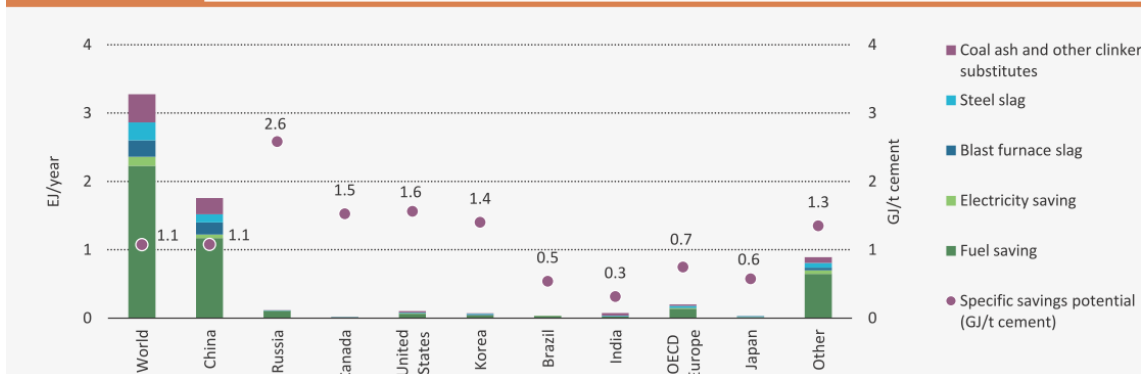


図 3 IEA ETP 2012 による世界主要地域の省エネポテンシャル

出典) IEA ETP 2012[5]

注) IEA ETP 2012[5]は、クリンカ製造後に高炉スラグを混入し、クリンカ・セメント比を低下させる方策も省エネポテンシャルとしてカウントしており、本レポートの枠組みとは異なるため注意が必要である。

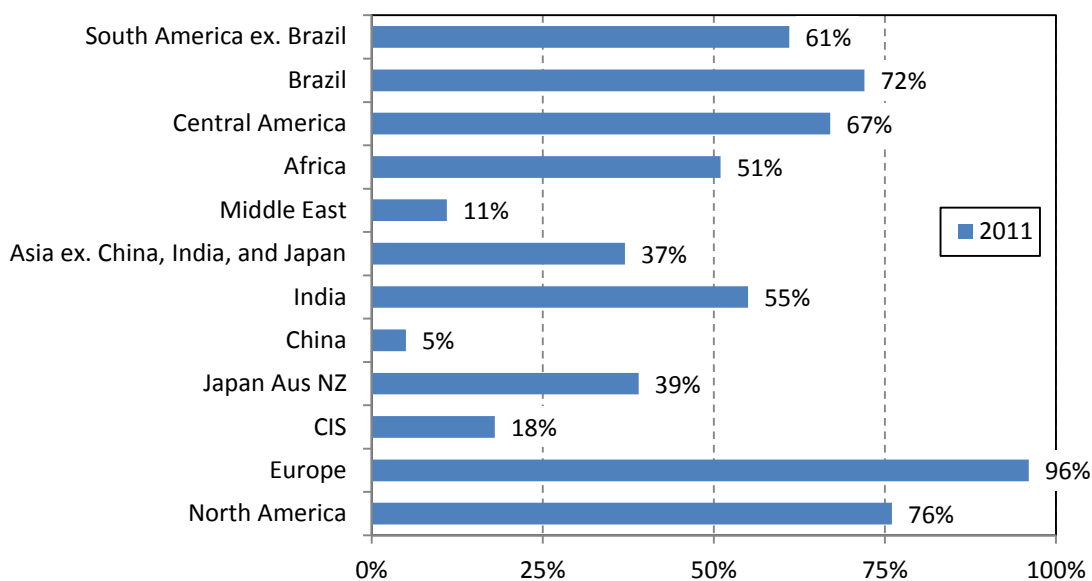


図 4 CSI 会員企業のセメント生産量地域別カバー率 (2011 年時点)

出典) WBCSD CSI[4]

(2) データ積み上げによる手法

本手法は個々の情報を広く集め積み上げることにより各地域のクリンカ製造熱エネルギー原単位を推計する手法である。このデータ積み上げによる手法は地域別のエネルギー原単位の推移とその具体的理由を把握する上で有益な情報であるが、算定手法（生産プロセスのバウンダリーなど）が文献間で異なる可能性があるため注意が必要である。参照した具体的な手法は次の通りである。

- ・ 生産方式や生産規模等を基に推計する手法
- ・ 企業の環境報告書等を参照する手法
- ・ 各地域のセメント協会発表資料等を参照する手法
- ・ 査読論文（地域別のエネルギー原単位データ等）を基に算定する手法

データ積み上げによる手法として参照した文献は多数にのぼるが、その中でも特に地域別の実態を把握する上で有効であった文献データ、及びそれに基づく中間推計値について以下に示す。

図 5 及び図 6 にインドの個々のクリンカ製造生産設備容量と基数をそれぞれ示す。これは CEMBUREAU[6]のデータを基に RITE が整理したものである。評価対象年は 2002 年とかなり以前にさかのぼるが、この情報に基づくと(1) 2000~4000t クリンカ/day のプラントが主軸であること、(2) 300 t クリンカ/day 以下の小規模生産設備について、数が多いが生産容量で見て大きな比重を占めていないこと、(3) 湿式（または半湿式の）ロータリーキルンも、生産容量で見て一部にとどまること、などが分かる。CEMBUREAU[6]に基づくと、このようにインドの状況は、中国とは大きく異なり、小型設備が少ない、堅釜や湿式が少ない状況と言える。

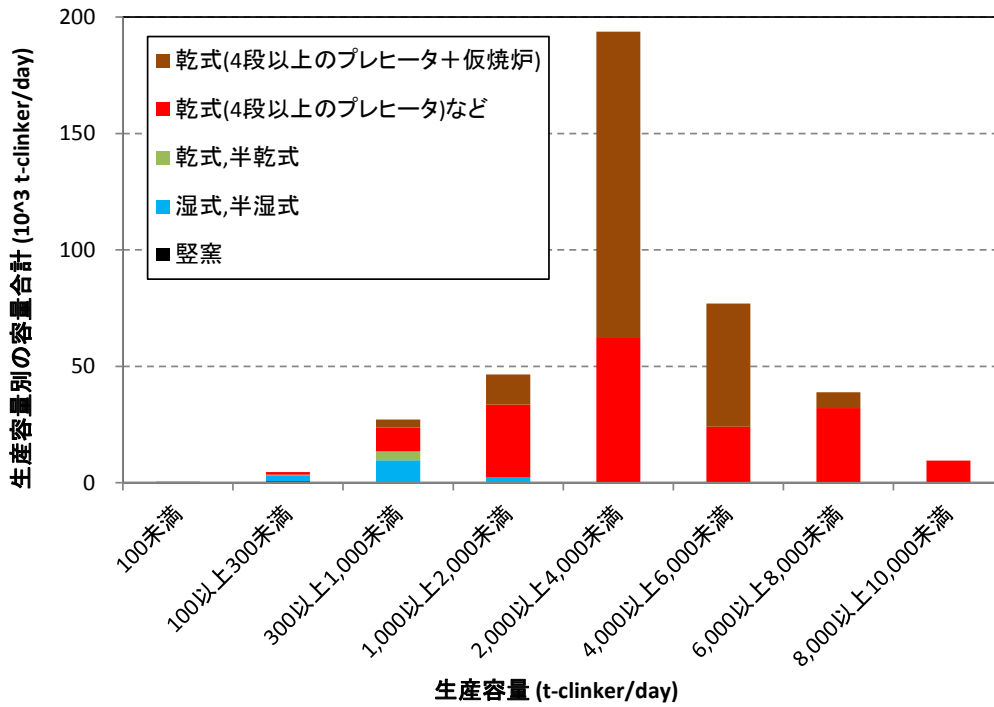


図 5 インドの生産容量別の容量合計 (2002 年時点)

出典) CEMBUREAU[6]を基に RITE 整理。

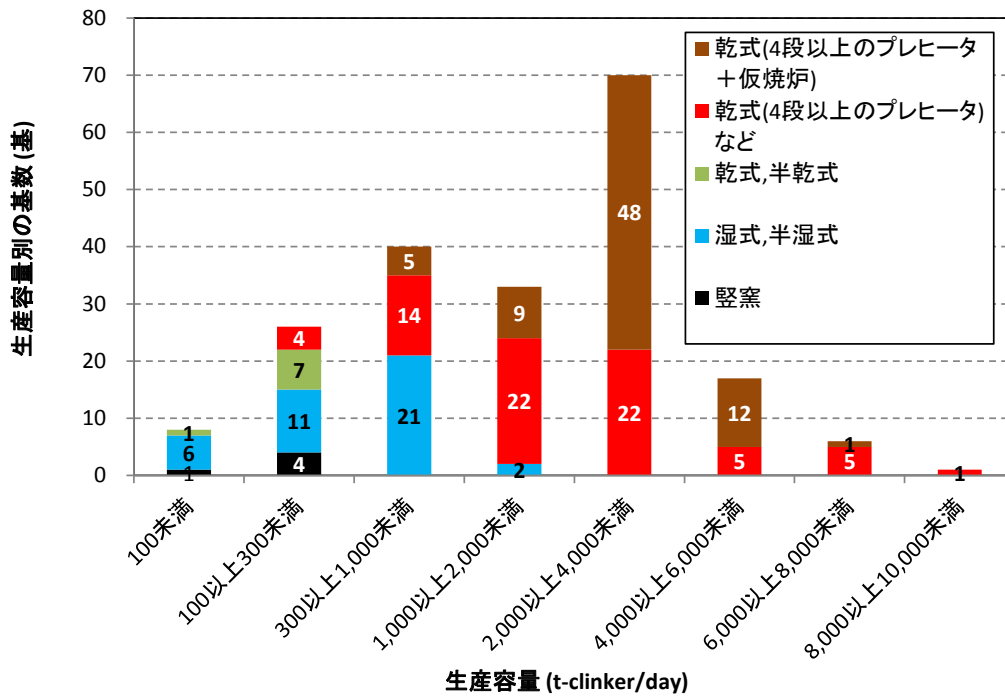


図 6 インドの生産容量別の基数 (2002 年時点)

出典) CEMBUREAU[6]を基に RITE 整理。

企業の CSR レポートに基づくデータの一例として、図 7 に太平洋セメント株式会社のエネルギー原単位を示す (t クリンカ生産当たりの熱投入量)。図 7 は化石燃料と化石燃料以外の代替燃料を分けて記載しており参考となる⁷[7]。

また各国セメント協会発表のデータの一例として、図 8 に一般社団法人セメント協会が提示した日本のエネルギー原単位を示す (t セメント当たりのエネルギー投入量) [8]。セメント協会資料によると、「2008 年度から 2012 年度の平均で 3.428GJ/t セメントを達成」したとのことである。クリンカ当たりの数値ではなくセメント当たりの数値であるが、本情報も有効な情報の一つである。

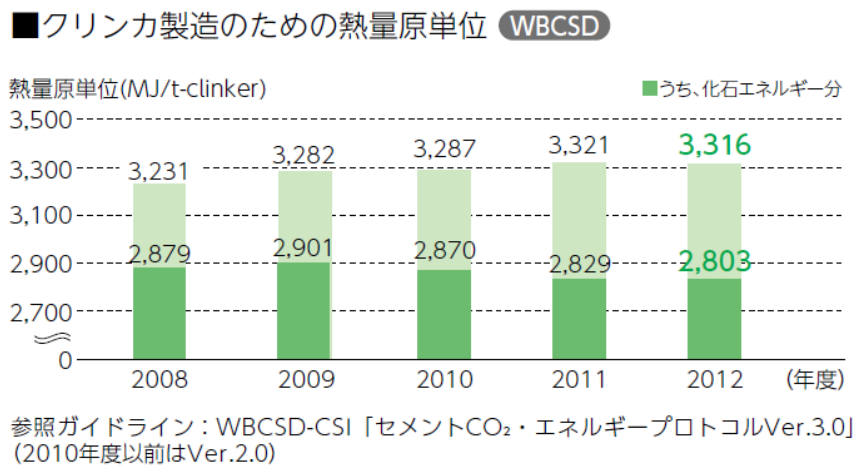


図 7 太平洋セメント株式会社のクリンカ製造のための熱量原単位

出典) 太平洋セメント株式会社[7]

⁷ ただし、図 7 は日本国内のセメント工場のみならず、太平洋セメントグループが保有運営する米国やアジア各国のセメント工場を含む (可能性がある) ため、他の資料と合わせて整理する必要がある。

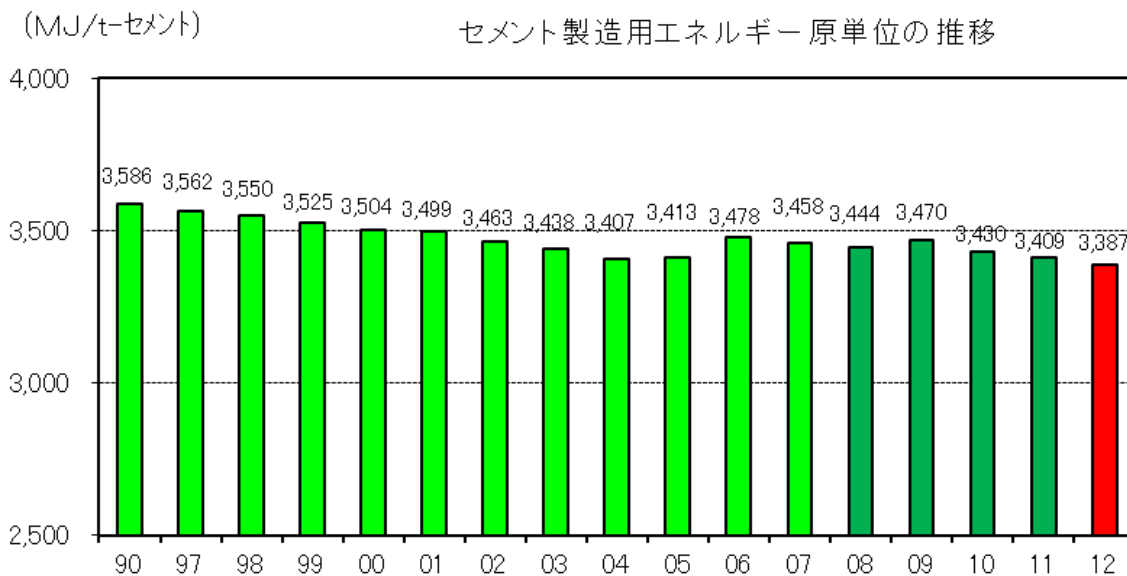


図 8 セメント製造のための熱量原単位 (日本)

出典) セメント協会[8]

査読論文の中で参考とした文献の一つに Hasanbeigi et al[9]があげられる。同文献に基づく、中国山東省の 16 プラント (全て NSP⁸) の燃料原単位は、最小約 3.3GJ/t クリンカ、平均約 3.7GJ/t クリンカ、最大約 4.3 GJ/t クリンカと整理できる (2008 年時点)。また張ら[10]によると、中国のセメント製造における燃料起源 CO₂ 排出は、2000 年の約 330 kg CO₂/t セメントに対し、2005 年、2008 年は約 270~280kg CO₂/t セメントとなっている。

以上の中国に関するデータを基に、生産方式別燃料消費量を RITE にて整理・推計したのが表 2 である。中国は、新規セメント工場の建設が相次いでおり、このような生産方式別のエネルギー原単位 (中間推計値) は有効な情報となる。

表 2 中国の生産方式別シェアと燃料消費原単位 (中間推計値)

	クリンカ生産量シェア	燃料原単位
乾式ロータリーキルン	73.6%	3.7 GJ/t クリンカ
湿式ロータリーキルン	1.8%	5.7 GJ/t クリンカ
その他のロータリーキルン	3.9%	3.9 GJ/t クリンカ
縦窯	20.7%	5.1 GJ/t クリンカ
中国平均	100%	4.0 GJ/t クリンカ

⁸ NSP とは、New suspension preheater の略。予熱炉・仮焼炉付きロータリーキルン。仮焼炉のない既存設備に対し本 NSP へ改造した場合、生産容量拡大とエネルギー効率向上が同時に見込める。

出典) 文献[9][10]に基づき RITE 推計。

3. まとめ

以上の各手法によって得られたクリンカ製造熱エネルギー原単位 (GJ/t クリンカ) の中間推計値を相互に比較しつつ、整合性や相対的な信頼性に基づき最終的な熱エネルギー原単位の推計を行った。結果を図 9 に示す。また図 9 にはこれまで行ってきた 2005 年時点の既存推計値[2]も合わせて示す。

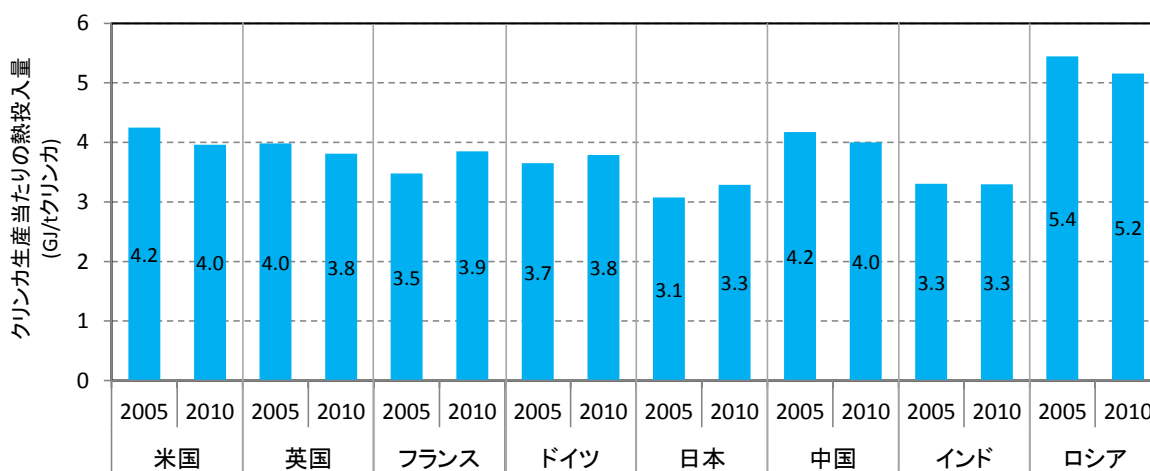


図 9 クリンカ製造の熱エネルギー原単位推計値 (2005 年、2010 年)

注 1) 熱投入量には化石燃料のみならず、投入した副産物・廃棄物の熱量を含む。

注 2) 地域によっては、クリンカクーラ排熱やプレヒータ (予熱炉) 排熱によって発電も行われている。このように有効利用された排熱も本図は含む(「投入熱量から有効利用排熱を差し引く」という補正なし)⁹。

図 9 (及び以上の全分析) からクリンカ製造の熱エネルギー原単位について次のことが示唆される。

- ・ 世界を広く見れば、熱エネルギー原単位が劣っていたいくつかの地域について改善の兆しが見える (米国、中国、ロシアなど)。
- ・ これは従来型の湿式ロータリーキルンの廃棄、及び最新鋭の乾式ロータリーキルンの

⁹ クリンカクーラ排熱、プレヒータ (予熱炉) 排熱などにより、セメントプラントで消費する全電力の 30%程度をまかうことができる。プレヒータ排熱を発電に利用する場合、サスペンション・プレヒータ (SP) の段数を 4 段に抑えることが経済合理的である (そうでない場合は SP を 5、6 段とした方がエネルギー効率の面で望ましい)。日本は排熱発電を積極的に行っているが、図 9 において「排熱発電に利用された熱を投入熱量から差し引く」という補正を行っていない (つまり日本にとって不利な見せ方の図となっている)。にもかかわらず図 9 において日本の熱エネルギー原単位は良好となっているため、事実上、日本のエネルギー原単位は世界でトップレベルであると言える。

普及拡大によるものと考えられる。

- ・ 日本、ドイツ、フランスなどは相対的に優れた熱エネルギー原単位であり、これは世界に先駆けて乾式ロータリーキルンを導入するなど省エネに取り組んできたためと考えられる。
- ・ ただし、2005年以降は、副産物・廃棄物の受け入れの積極化の影響がより顕著となり、熱エネルギー原単位は若干ながら悪化したと考えられる。

今後ともセメント部門はエネルギー原単位改善や燃料代替などによる CO₂ 排出削減と、副産物・廃棄物のさらなる受け入れ¹⁰という2つの社会的要求に対応していくことが求められる。ただし、原料としての副産物・廃棄物の大量受け入れは、燃料としての副産物・廃棄物の受け入れをより難しくするというトレードオフが存在する¹¹。

このようなトレードオフにも配慮しつつ、世界のどのような地域に省エネポテンシャル余地があるのか、またどのような具体策をとれば CO₂ 排出削減となりうるのかについて、今後とも広く検討していくことが重要である。

参考文献

- [1] RITE, エネルギー効率の国際比較（発電、鉄鋼、セメント部門）, 2008.
http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison_EnergyEfficiency.pdf
- [2] Junichiro Oda, Keigo Akimoto, Toshimasa Tomoda, Miyuki Nagashima, Kenichi Wada, Fuminori Sano, International comparisons of energy efficiency in power, steel, and cement industries, *Energy Policy*, 44, pp.118-129, 2012.
- [3] 一般社団法人セメント協会. <http://www.jcassoc.or.jp/>
- [4] WBCSD Cement Sustainability Initiative (CSI) <http://www.wbcscement.org/>
- [5] IEA, *Energy Technology Perspectives 2012*, 2012.
- [6] CEMBUREAU, *World Cement Directory 2002*, 2003.
- [7] 太平洋セメント株式会社, *CSR レポート 2013*, p.42, 2013.
- [8] 一般社団法人セメント協会, *セメント業界の低炭素社会実行計画*, (2013)
- [9] Ali Hasanbeigi, Lynn Price, Hongyou Lu, Wang Lan, Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants, *Energy*, 35(8), pp.3461-3473, 2010.

¹⁰ 副産物・廃棄物の受け入れにより、クリンカの主原料である石灰石の追い出し効果があれば、プロセス由来 CO₂ 排出の削減につながる。

¹¹ 規定の品質（セメントの種類によって求められる各種特性、具体的には施行時の流動性、初期強度や長期強度、化学的抵抗性、耐海水性、水密性等）を持つセメント製品を製造するために、このようなトレードオフが存在する。

- [10] 張文字, ディニル プシュパラル, 重野芳人, 外岡豊, 「LCAに基づく中国における地域別のセメント産業の環境負荷の定量化と影響評価」, エネルギー・資源学会論文誌, 33(1), 2012.

【問い合わせ先】

(公財) 地球環境産業技術研究機構 システム研究グループ

小田潤一郎、徳重 功子、秋元 圭吾

〒619-0292 京都府木津川市木津川台 9-2

電話 : 0774-75-2304、FAX : 0774-75-2317、E-mail : sysinfo@rite.or.jp