

DNE 21 + モデルの概要 鉄鋼、セメント、アルミ部門

1. 鉄鋼部門

(1) 鉄鋼部門のモデル構造

コークス製造、焼結鉱製造などの原料加工工程から、熱間圧延までの工程に注目し、これらを「鉄鋼部門」として明示的にモデル化。

技術レベルとしていくつかの技術群（ルート）に集約化してモデル化。高炉転炉法4ルート、スクラップ電炉法3ルート、直接還元法2ルートを想定。

外生的に地域別の粗鋼生産量を与え、既存設備のヴィンテージや、設備費用、エネルギーコスト（モデル全体で内生的に決まる）などから、コストが最小となるような技術選択を求める（図1）。

市中スクラップ回収量、及び地域別のスクラップ電炉法の利用量については、外生的に下限シナリオ、上限シナリオを設定した（その範囲内において、自由度があるという設定）。

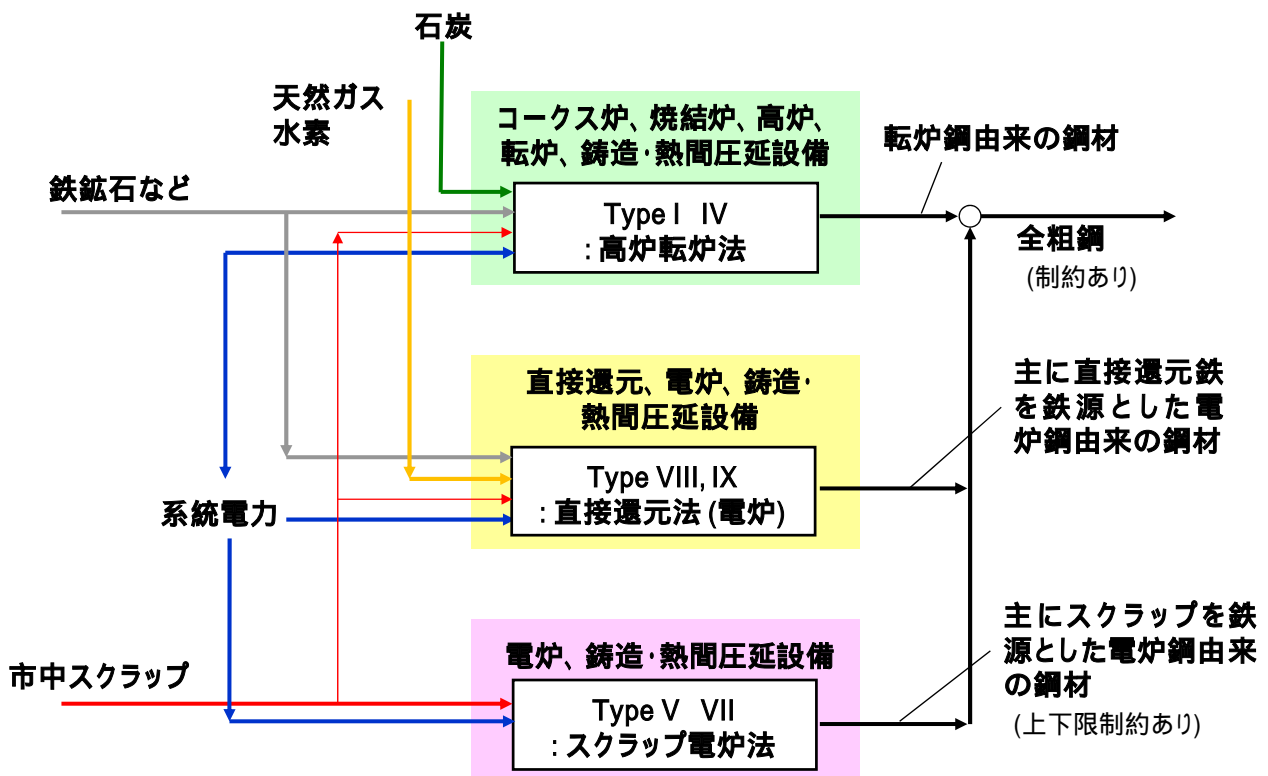


図1 鉄鋼部門のモデル概略図

(2) 設定した鉄鋼技術群（ルート）

製鉄所全体のエネルギー効率は、各種生産技術、省エネ技術の利用度合のみならず、設備規模やヴァインテージ、使用している原材料の性状など、様々な要因に依存すると考えられる。それらをモデル化するにあたり、技術レベル別にいくつかの技術群（ルート）へ集約化した。これらルートのエネルギーフロー、コスト想定は、表1の通り。

表1 各ルート・後付可能とした技術のエネルギーフローと設備コスト

	エネルギー投入量 及び回収量 ^{注1)} (t粗鋼当たり)	設備コスト (US\$/ (t粗鋼/年))
高炉転炉法 (BF-BOF)		
Type I: 低効率設備(平炉,野焼きコークス含む)	石炭 29.9GJ,重油 1.2GJ, 電力 490kWh	276.2
+コークス炉ガス回収設備	I ^{粗鋼} * -回収 1.9GJ,他は同上	+11.6
Type II: 中効率設備	石炭 26.9GJ,重油 0.2GJ, 電力 465kWh(正味)	295.4
+コークス炉ガス回収設備	I ^{粗鋼} * -回収 2.2GJ 追加,他は Type II と同じ	+9.3
+転炉炉ガス回収設備	I ^{粗鋼} * -回収 0.9GJ 追加,他は Type II と同じ	+16.2
+コークス乾式消火設備 (CDQ)	電力回収 63kWh 追加,他は Type II と同じ	+16.1
+高炉炉頂圧発電 (TRT)	電力回収 48kWh 追加,他は Type II と同じ	+13.6
Type III: 高効率	石炭 24.1GJ,電力 364kWh(正味) I ^{粗鋼} * -回収:4.5GJ	386.5
+廃プラ・廃タイヤ利用設備	石炭 23.8GJ,他は同上	+1.54
Type IV: 高効率設備 (+ 次世代コークス炉)	石炭 22.5GJ,電力 364kWh(正味) I ^{粗鋼} * -回収:4.5GJ	377.1
+炭素回収貯留設備(0.6tCO ₂ /t粗鋼)	石炭 22.5GJ,電力 472-451kWh ^{注2)} I ^{粗鋼} * -回収:3.5-4.1GJ ^{注2)}	+30.0-25.8 ^{注2)}
スクラップ電炉法 (scrap-EAF)		
Type V: 低効率設備 (誘導炉を含む)	重油 3.6GJ,電力 623kWh	143.0
Type VI: 中効率設備	重油 2.5GJ,電力 551kWh	174.0
Type VII: 高効率設備	重油 2.4GJ,電力 513kWh	183.7

直接還元法 (DRI-EAF)

Type VIII: 中効率設備	天然ガス 15.9GJ, 電力 705kWh	374.3
Type IX: 高効率設備	天然ガスもしくは水素 12.1GJ, 電力 695kWh	438.1

注 1) エネルギー投入量は、廃プラ・廃タイヤ、バイオマスを含まない数値。エネルギー回収量は、副生ガス、蒸気などの合計。

注 2) 二酸化炭素回収貯留設備の追加的エネルギー消費量、設備コストは時点の経過と共に改善。30.0–25.8(US\$/t 粗鋼/年)は、66,900–57,600 (US\$/tC/day)に相当。

技術群(ルート)作成にあたり、考慮した技術は表 2 の通りである。表 2 で示したこれら個別技術は相互に連関があるため、細かい部分まで考慮した上で、総合的な視点に立ってモデル化する必要がある。

例 1: 微粉炭吹き込み量を増加させると、トン粗鋼当たりのコークス消費量[t-coke/t-CS]は一般に低下する。そのため、コークス製造工程における乾式消火設備(CDQ)の省エネ効果が単位コークス製造量あたりで、ある一定値である場合でも、微粉炭吹き込み量を増加させると、トン粗鋼当たりで見た CDQ の省エネ効果は小さくなる。

例 2: 高炉の高圧操業によって熱風炉のエネルギー消費量が増大するが、その一方、高圧操業により炉頂圧発電(TRT)の発電量は増加する。

表 2 鉄鋼部門で考慮した技術

A. コークス製造工程	
1 プラスチック投入(原料炭代替)	2 廃タイヤ投入(原料炭代替)
3 石炭乾燥調湿機	4 コークス炉ガス回収設備
5 コークス炉ガス 及び 炉ガスの顕熱回収設備	
6 従来型湿式コークス消化設備	
7 低効率(ロシア型)コークス乾式消火設備(CDQ)	
8 高効率コークス乾式消火設備(CDQ)	
9 自動燃料制御装置[コークス炉]	
10 野焼きコークス製造法	11 コークス炉(従来型)
12 次世代型コークス炉(SCOPE21 など)	
B. 焼結工程	
13 焼結原料偏析装入改善装置	
14 従来型手動燃料制御点火装置	
15 自動燃料制御点火装置[焼結炉]	
16 主排風顕熱回収装置	17 焼結鉦クーラ排熱回収装置
C. 製鉄工程	
18 小容量 微粉炭吹き込み装置(PCI)	
19 大容量 微粉炭吹き込み装置(PCI)	
20 湿式高炉炉頂圧発電(TRT)	21 乾式高炉炉頂圧発電(TRT)
22 熱風炉排熱回収装置	
23 小型の高炉	24 中型及び大型の高炉
25 高炉の高圧操業	26 吹込みガスの酸素富化
D1. 転炉製鋼工程	
27 転炉ガス回収設備	
28 転炉ガス 及び 転炉ガスの顕熱回収設備	
29 蓄熱式バーナ取鍋加熱装置	
30 純酸素上吹転炉	31 平炉
D2. 電炉製鋼工程	
32 原料予熱装置	33 蓄熱式バーナ鍋加熱装置
34 直流式水冷炉壁アーク炉	35 三相交流アーク炉
36 小型の誘導炉	

E. 圧延成型工程	
37 造塊/分塊圧延設備	38 低効率連続鋳造設備
39 高効率連続鋳造設備	40 非熱片装入
41 熱片装入設備	42 直送圧延設備
43 従来型加熱炉	44 蓄熱式バーナ加熱炉
45 低効率熱間圧延設備	46 高効率熱間圧延設備
F. その他、工程横断的な技術	
47 コークス炉ガス水素増幅・利用技術	
48 高炉ガス中炭素回収貯留技術(化学吸収法)	
49 高炉スラグ顕熱回収利用技術(炭素回収エネルギーへ利用)	
50 直接還元法に関する技術 (天然ガスの水蒸気改質技術・CO ₂ 改質技術など)	

(3) ヴィンテージの設定

地域別のヴィンテージ(新設年)と設備の耐用年数(鉄鋼部門は40年)を考慮しつつ、技術選択を行うモデル構造としている。

設定したヴィンテージから算出した2000年時点の地域別エネルギー効率を図2に示す。

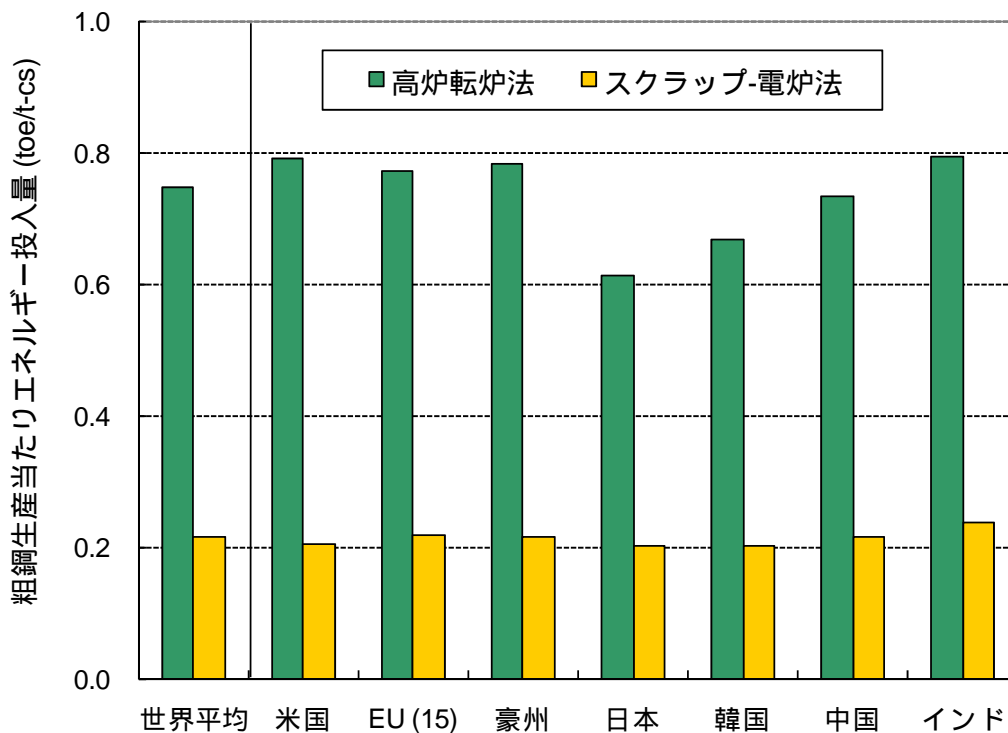


図2 推計された地域別のエネルギー効率 (2000年)

注1) toeは石油換算トンと呼ばれ、1toeは、 1×10^7 kcal及び41.868 GJと等価のエネルギー量。原料炭1kgを6,904 kcalとすると、1toeは1.448tの原料炭と等価。

注2) 電力は、一次エネルギーへ換算(1MWh = 0.086/0.33 toe)。

(4) 地域別の粗鋼生産シナリオ

地域別の粗鋼生産量を外生的にシナリオとして与えた(既述の通り)。主要国の粗鋼生産量は、図3の通り。

シナリオ作成にあたり、一人当たりGDP推移と一人当たり見掛粗鋼消費量の連関、地域別の産業構造の動向、政府発表の計画などを参考にした。

主要地域におけるスクラップ電炉率の実績、シナリオを図4に示す。スクラップ電炉率については、下限シナリオと、上限シナリオを地域別に作成している。これら上下限シナリオの平均値を図4に示す。

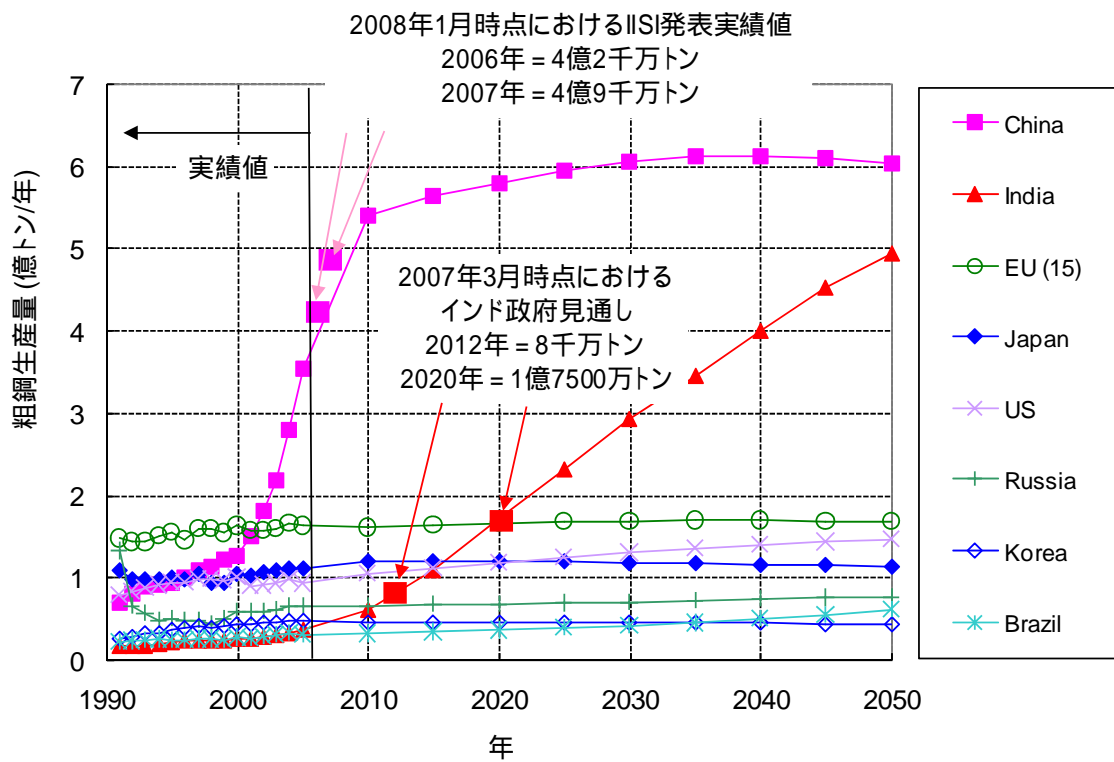


図3 主要地域における粗鋼生産量(実績、シナリオ)

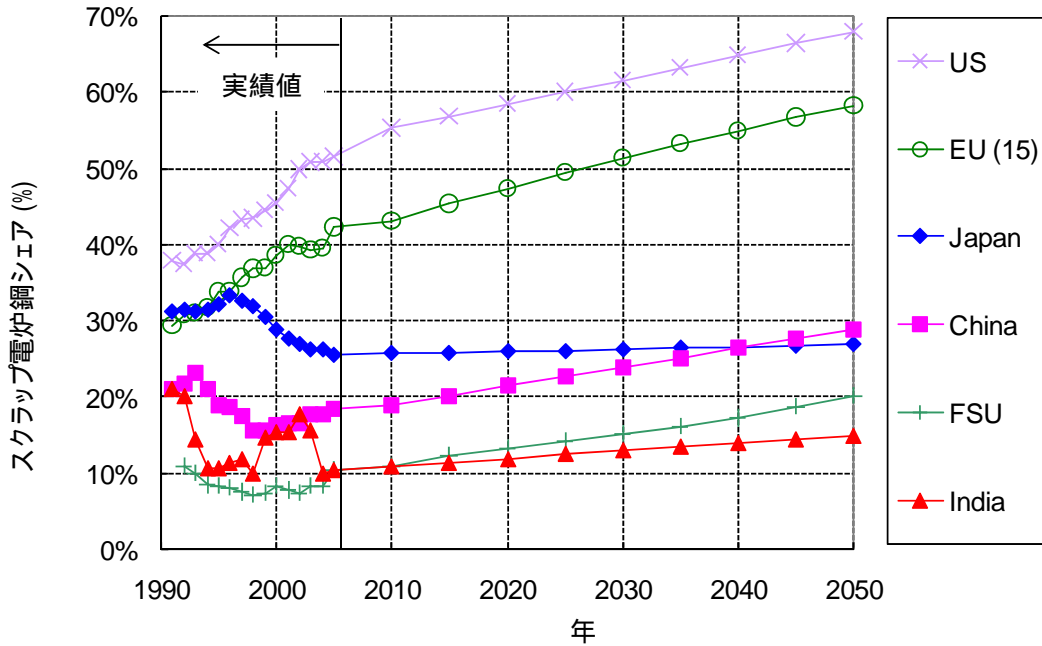


図 4 主要地域におけるスクラップ電炉鋼シェア（実績、上下限シナリオの平均）

2. セメント部門

(1) セメント部門のモデル構造

原料加工から仕上までの各工程に注目し、これらを「セメント部門」として明示的にモデル化。規模によりエネルギー効率や、採用可能な技術が異なるため、小型設備(1,000t-clinker/day 以下)、大型設備(2,000t-clinker/day 以上)別にそれぞれに、選択可能な技術群(ルート)と生産シナリオを想定。地域別のセメント生産量、クリンカ・セメント比を外生的に与え、既存設備のヴィンテージや、設備コスト、エネルギーコスト(モデル全体で内生的に決まる)などから、コストが最小となるような技術選択を内生的に求める(図 5)。

(2) 設定した技術群(ルート)

セメント製造に関しては、焼成工程での燃料消費が過半を占める。また焼成様式により、大きくエネルギー効率が異なる。

焼成様式の差異で特徴付けられる技術群を作成した(表 3)。

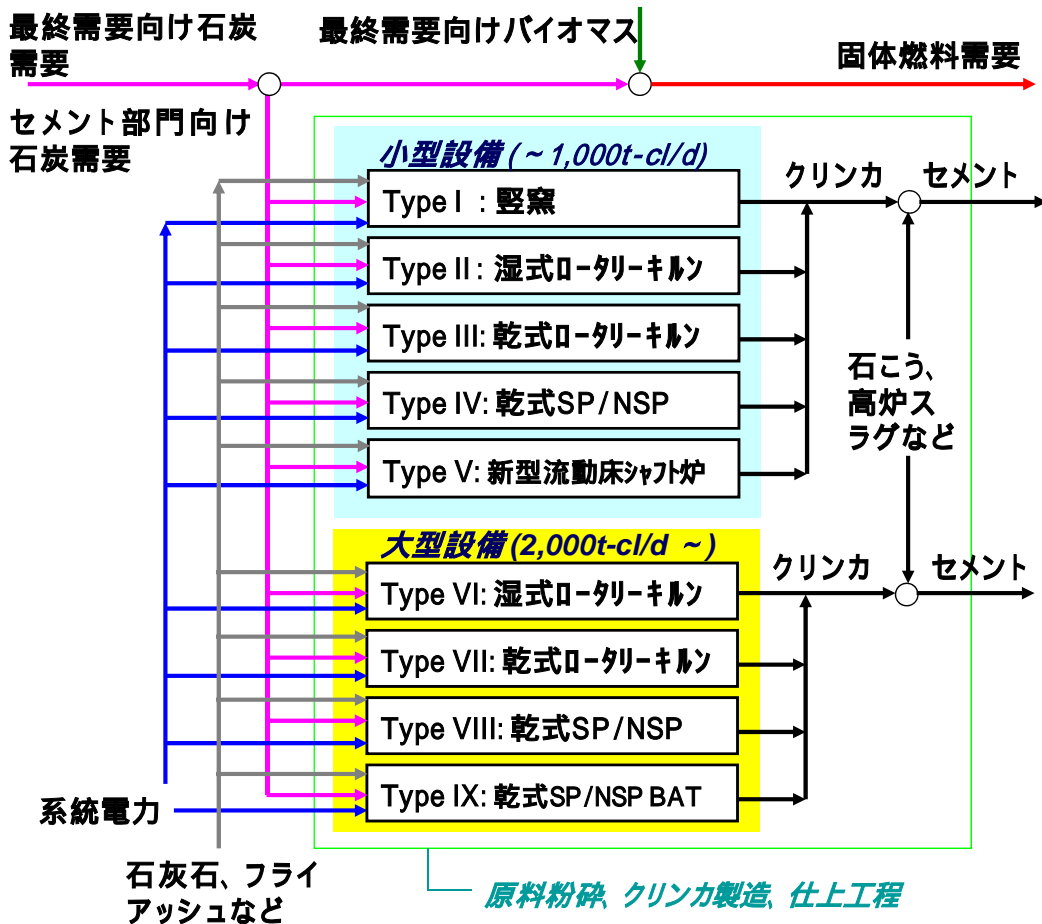


図 5 セメント部門のモデル概略図

表 3 各種ルートのエネルギ-消費量と設備コスト

	エネルギー消費量		設備コスト (US\$/ (t クリンカ/年))
	化石燃料消費 量(GJ/t クリンカ)	電力消費量 (kWh/t クリンカ)	
小規模設備			
Type I: 竖窯	5.45	148	324.9
Type II: 湿式ロータリーキルン	6.20	146	438.5
Type III: 乾式ロータリーキルン	4.00	146	526.9
Type IV: 乾式ロータリーキルン(SP/NSP)	3.50	141	501.7
Type V: 新型流動床シャフト炉	2.99	110	473.3
大規模設備			
Type VI: 湿式ロータリーキルン	4.95	146	409.1
Type VII: 乾式ロータリーキルン	3.58	139	542.8
Type VIII: 乾式ロータリーキルン(SP/NSP)	2.98	134	267.9
Type IX: 乾式ロータリーキルン(SP/NSP) BAT	2.41	88	307.8

Type IX の BAT は、2005 年現在で実用化されている最もエネルギー効率に優れた設備を全て導入したケースである。Type IX は廃プラ・廃タイヤもかなり利用しているため、Type VIII との化石燃料消費量の差が大きい。また、Type IX は大規模設備の中でも特にプラント規模が大きく、クリンカクーラ排熱及び SP/NSP からの廃熱を利用した排熱回収発電電力量も大きく、正味の電力消費量に関しても Type VIII との差が大きい。

また、Type IX は石灰石などの原材料制約、廃棄物・副産物の受け入れに関する制約が緩く、エネルギー効率にとって有利な条件を前提としている。このように、Type IX は、数多くの現実的な障壁を克服した場合の（理想的な）ルートであることに注意が必要である。

技術群（ルート）作成にあたり、考慮した技術は表 4 の通り。

表 4 考慮した技術

A. 原料粉砕工程	
1	ボールミル(チューブミル)
2	縦型ローラミル
3	縦型ローラミル排石外部循環システム
4	高炉スラグ粉砕用縦型ローラミル
B. 焼成工程	
5	完全手動式窯(20~100t-cl/d)
6	機械式窯(300t-cl/d)
7	小規模湿式ロータリーキルン(1,000t-cl/d)
8	大規模湿式ロータリーキルン(3,000t-cl/d)
9	湿式ロータリーキルンの1~2段プレヒータ付加
10	小規模乾式ロータリーキルン(1,000t-cl/d)
11	大規模乾式ロータリーキルン(3,000t-cl/d)
12	乾式ロータリーキルンへの1~2段プレヒータ付加
13	乾式ロータリーキルンへの4段SPの導入
14	直接仮焼方式 4段SP(NSP)
15	4段SPの5,6段化
16	低圧損型SP
17	新型流動床シャフト炉
18	焼成炉における廃タイヤ燃焼(丸タイヤ投入方式)
19	焼成炉におけるプラスチック燃焼
20	クリンカクーラ排熱, SP/NSP 廃熱を利用した発電設備
21	高効率クリンカクーラ(フルエアビーム方式)
22	新型クリンカクーラ(CCS)
C. 仕上工程	
23	低効率ボールミル(チューブミル)
24	高効率ボールミル(チューブミル)
25	縦型ローラミル
26	クリンカ予粉砕機(ローラプレス)
27	クリンカ予粉砕機(プレクラインダ)
28	高効率セパレータの導入

(3) ヴィンテージの設定

地域別のヴィンテージ（新設年）と設備の耐用年数（セメント部門は40年）を考慮しつつ、技術選択を行うモデル構造としている。

設定したヴィンテージと統合的な2000年時点の地域別エネルギー効率を図6に示す。

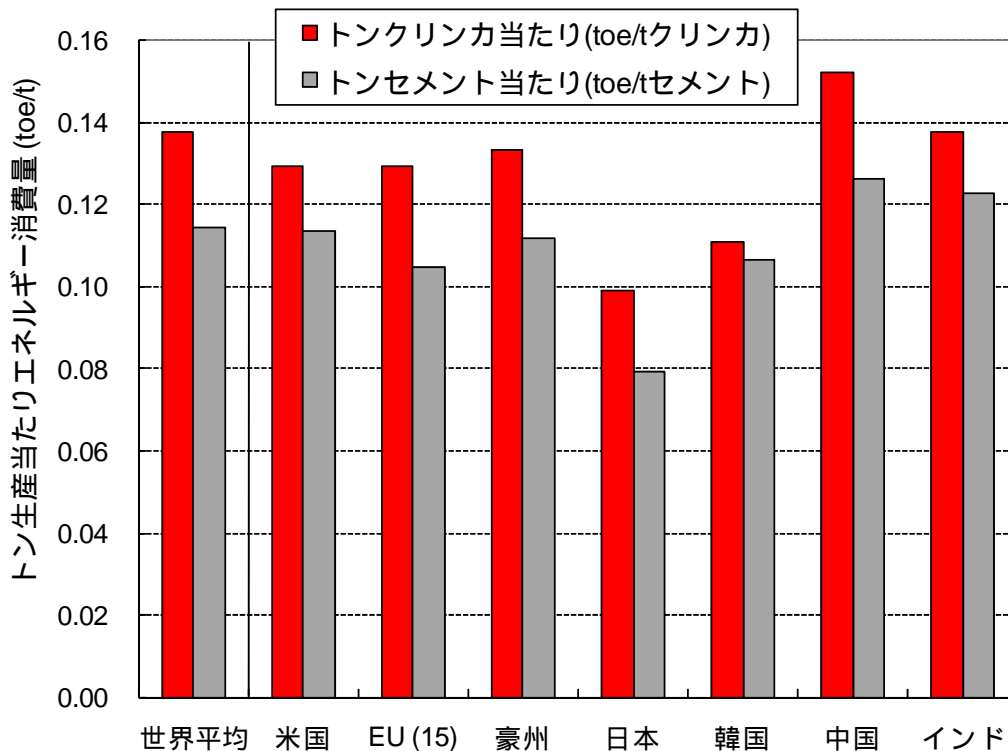


図6 推計された地域別のエネルギー効率(2000年)

注1) toeは石油換算トンと呼ばれ、1toeは 1×10^7 kcal及び41.868 GJと等価のエネルギー量。一般炭1kgを6,354 kcalとすると、1toeは1.574tの一般炭と等価。

注2) 電力は、一次エネルギーへ換算(1MWh = 0.086/0.33 toe)

(4) 地域別のセメント生産シナリオ

地域別のセメント生産量、クリンカ・セメント比を外生的にシナリオとして与える(既述の通り)、主要国のセメント生産量は図7の通り。

セメント生産量は、一人当たりGDPが小さい時点・地域で、GDP総額に依存し、一人当たりGDPが大きくなると人口規模に依存するとし、過去のトレンドから推計。

なお、クリンカ・セメント比は、分析対象期間に渡り一定とした。

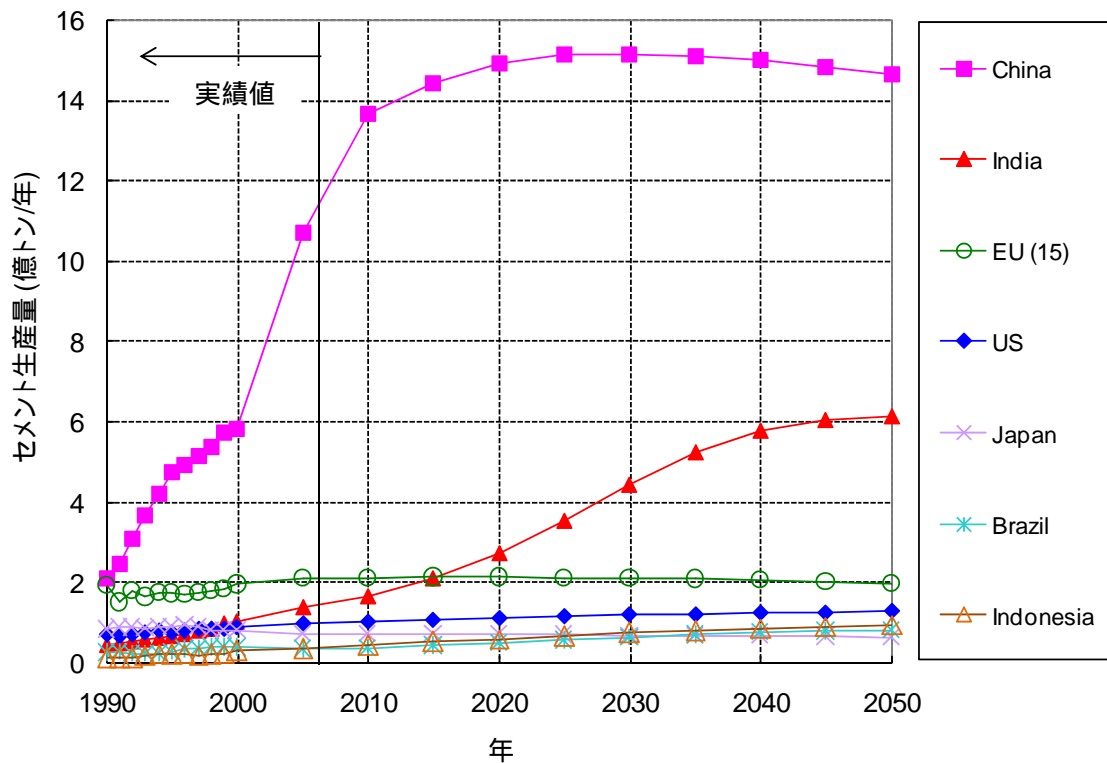


図 7 主要地域におけるセメント生産量（実績、シナリオ）

3. アルミ部門

(1) アルミ部門のモデル構造

アルミ部門として、アルミ新地金製造プロセスに注目しモデル化。

参考：アルミ部門のエネルギー消費は、1) ボーキサイトを原料としアルミナを製造する過程に必要な燃料（2005年世界平均で 11.6GJ/t アルミナ）、2) アルミナを精錬しアルミ新地金を製造する際に必要な電力（約 15MWh/t アルミ新地金）、3) 市中アルミスクラップを用いたアルミ再生地金製造時に必要な電力（約 0.45 - 0.75MWh/t アルミ再生地金）などからなる。これらのエネルギー消費の比率は、単位生産重量当たり約 2 : 25 : 1 となる（電力を一次エネルギー換算した場合の比率）。つまり、2) 「アルミ新地金製造時の電力消費」がアルミ部門のエネルギー消費の多くを占める。

市中アルミスクラップの回収量や、各種貿易量を所与とし、地域別のアルミ新地金生産量を外生的に与える。

そのアルミ新地金生産シナリオを満たしつつ、コストを最小とする技術選択を求めるモデル構造とした。

(2) 設定したプロセス

アルミ新地金製造プロセスとして、商用利用されているものには次のようなプロセスがある。

ゼータベルグ式：

1. 水平型(Horizontal Stud Söderberg)
2. 縦型(Vertical Stud Söderberg)

プリベーク式：

1. サイドワーク型(Side Work Prebake)
2. センターワーク型(Center Work Prebake)
3. ポイントフィーダー型(Point Feeder Prebake)

ここでは、図 8 に示す通り、Type I のゼータベルグ式、Type II のプリベーク式の 2 通りを選択可能とした。またそれぞれの設備コストは表 5 の通りとした。

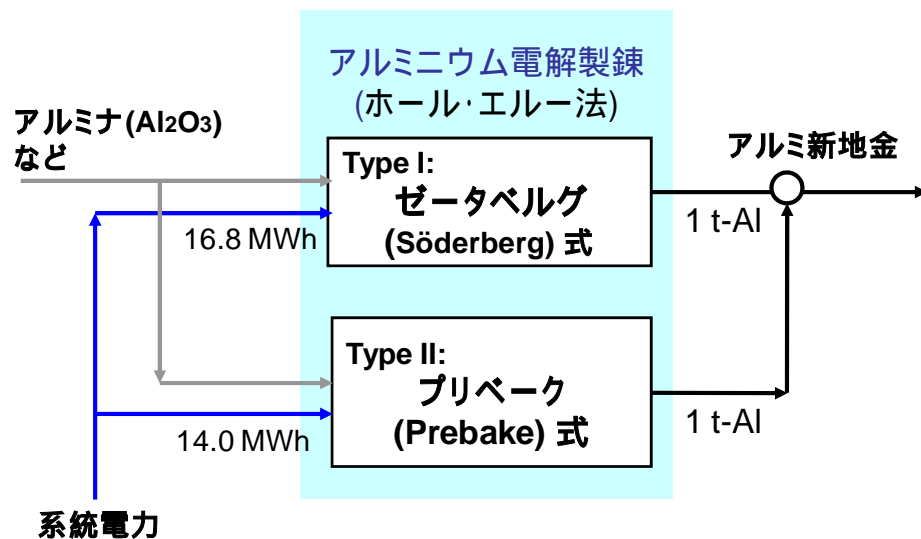


図 8 アルミ新地金生産プロセスのモデル化

表 5 各ルートでの設備コスト

	設備コスト (US\$/(t アルミ新地金/年))
Type I: ゼータベルグ式	1980
Type II: プリベーク式	2640

(3) 地域別のアルミ新地金生産シナリオ

設定した地域別のアルミ新地金生産シナリオを図9に示す。世界全体の市中アルミスクラップの回収量見込み、世界全体のアルミ需要量、各地域の電力価格、今後の増産見通しなどを基にアルミ新地金生産シナリオを設定した。

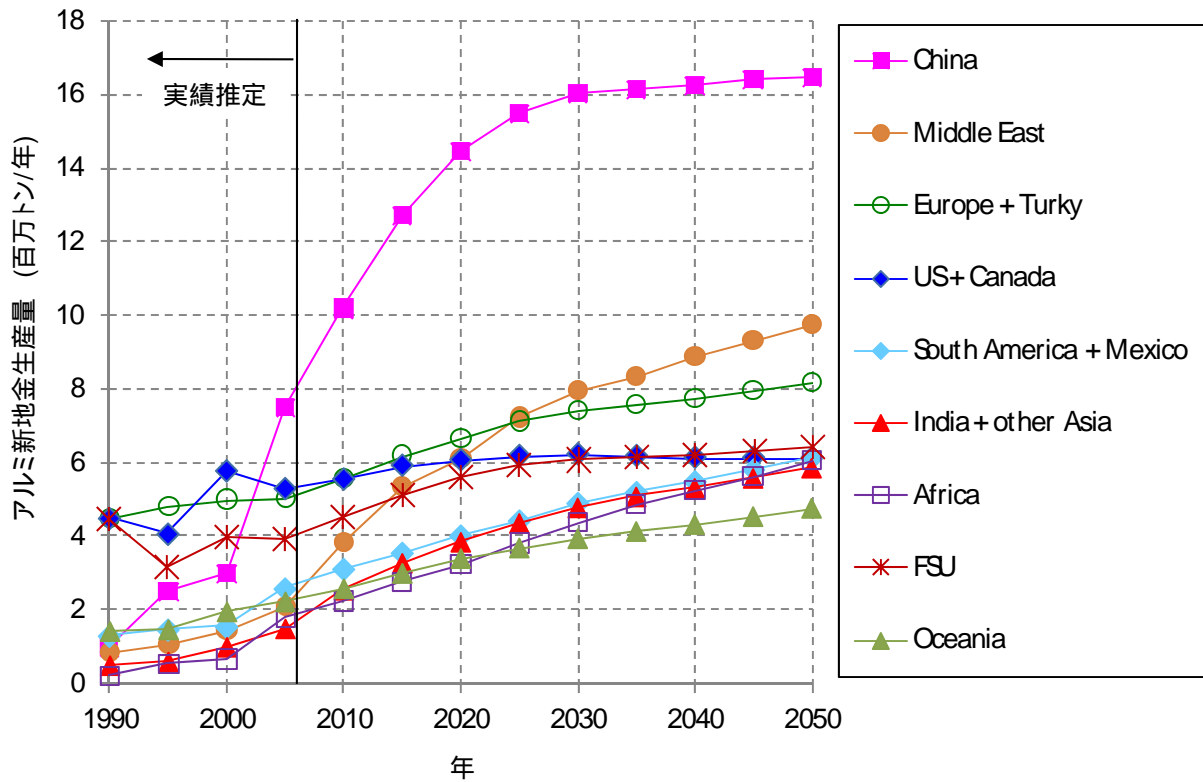


図9 地域別アルミ新地金生産量（実績推定、シナリオ）