

石炭の科学と技術

～未来につなぐエネルギー～

日本エネルギー学会 編

コロナ社

編集機構

編集委員長 林 潤一郎 (九州大学)

編集幹事 荒牧 寿弘 (九州大学)

編集委員 則永 行庸 (九州大学)

編集委員 松下 洋介 (東北大学)

執筆者 (50 音順)

あらまき としひろ
荒牧 寿弘 (九州大学) : 2.3 節, 4.1 節,
8.1 節, 8.2 節, 付録 1, 付録 2

ありま たかし
有馬 孝 (新日鐵住金株式会社) : 6.1 節
あんどう たかし
安藤 隆 (元 出光興産株式会社) :
4.2 節, 付録 3

おおつか やすお
大塚 康夫 (東北大学 名誉教授) : 7.3 節
おかだ きよふみ
岡田 清史 (元 JCOAL) : 2.4 節, 付録 2
おのぎまさき
小野崎正樹 (エネルギー総合工学研究所) :
7.4 節

かじたに しろう
梶谷 史朗 (電力中央研究所) : 7.1 節

かねこ しょうぞう
金子 祥三 (東京大学) : 7.2 節

こじま としのり
小島 紀徳 (成蹊大学) : 8.3 節

さいとう こうじ
齋藤 公児 (新日鐵住金株式会社) : 3.2 節

さかぐち ひろし
坂口 寛 (東京大学) : 7.2 節

たかのほし としまさ
鷹 鶯 利公 (産業技術総合研究所) : 3.1 節

のだ なおき
野田 直希 (電力中央研究所) : 5.3 節

のむら せいじ
野村 誠治 (新日鐵住金株式会社) : 6.1 節

のむら まさかつ
野村 正勝 (大阪大学 名誉教授) : 2.1 節

のりなが こうよう
則永 行庸 (九州大学) : 3.4 節

はやし じゅんいちろう
林 潤一郎 (九州大学) : 5.1 節, 8.1 節

ひらじま つよし
平島 剛 (九州大学) : 4.2 節

ふくだ のりよし
福田 典良 (JFE ケミカル株式会社) :
6.2 節

まきの ひさお
牧野 尚夫 (電力中央研究所) : 5.3 節

まつおか ひでいち
松岡 秀一 (出光興産株式会社) : 付録 3

まつした ようすけ
松下 洋介 (東北大学) : 5.4 節

みうら こういち
三浦 孝一 (京都大学) : 3.3 節, 4.3 節,
5.2 節

むらた さとる
村田 聡 (富山大学) : 2.1 節

もちだ いさお
持田 勲 (九州大学) : 1 章, 7.4 節,

8.2 節

やまうち のりあき
山内 敬明 (九州大学) : 2.2 節

ゆん せんぼ
尹 聖昊 (九州大学) : 6.3 節

わかむら おさむ
若村 修 (新日鐵住金エンジニアリング
株式会社) : 7.4 節

わたなべ ひろあき
渡邊 裕章 (電力中央研究所) : 5.5 節

(所属は 2013 年 10 月現在)

ま え が き

2011年3月11日の東日本大震災は、東日本太平洋沿岸に甚大な被害をもたらすと同時に、福島第一原子力発電所の機能を停止させ、原子炉冷却が不能に陥り、水素爆発、放射能物質の放出と深刻な汚染をもたらす結果となった。一日も早い復旧と復興を祈っている。この災害は、原子力エネルギーへの不信を引き起こし、日本のエネルギーをいかに考えるかの議論を活発化させ、政策を再構築する必要に迫らせている。現時点では、原子力を代替する化石資源の輸入増大のため、大きな貿易赤字と電気料金の値上げが不可避となっている。こうした状況の中、石炭を中心とするテーマを再考察し、そこに浮かび上がるエネルギー技術を俯瞰し、今後のわが国の“石炭利用技術”の指針となるべく再考する意義は大きいと考える。

本書は日本エネルギー学会誌に連載した「石炭基礎講座」をベースとし、3.11後のエネルギー情勢変化を踏まえて、わが国の石炭利用技術の再構築を目指すものである。石炭の成因、組織、構造、灰やヘテロ元素とトレース元素の存在、乾燥、脱灰、熱分解、ガス化、液化、コークス製造、などの利用における科学と技術、石炭利用に伴う温暖化問題を解説し、石炭に関する科学と技術の基礎をカバーすることにより、上記の現状に求められている課題解決の基盤を提供することを目指している。これらの基盤に立って現実的な課題の解決に向けた発想が生まれることを期待している。わが国ではこれまで使用されなかったような低品位の石炭にも目を向けなければならない。

しかし、一ステップ、一プロセス、一技術の個別最大利益の追求は必ずしも一連のプロセス産業、産業コンプレックス全体の最大利益に連結しない。世界と特定地域のエネルギー環境、経済が強く結び付いている中で、立地しなければならない一連のコンプレックス全体の最大利益追求のためには、一ステップに始まる技術の個別最大利益ではなく最適化をつねに発想して全体の最大利益を目指さなければならない。このことは、特にわが国としては、経済産業構造

の異なる産炭国で日本人がその能力を発揮しながら敬意をもって遇せられ、ともに最大の利益を享受するのに必要な発想であろう。さらには、産炭国における国際競争力を有する産業構築が、エネルギー環境政策の実現には不可欠であることを強調したい。

改めて、わが国の高い実績に誇りをもつことは当然ではあるが、まったく新しい境地の開拓を目指す挑戦も合わせもつことが欠かせないことも強調しておきたい。

こうした産業および産業技術の構築に向けて努力と説得を積み上げる過程で、一連のエネルギー環境の中の石炭の基盤に通じ、エネルギー資源全体としてバランスのとれた開発と、その結果としての展開を考えながら、重要な key technology への切り込みについてその時代の最適解を、忍耐をもって、追求しなければならない。わが国のこれからを支える若者達が、基盤科学の知識と経験の強化、知識を組織化・体系化する論理力、問題を抽出し、回答を探し出す解析力、そして夢を抱き、現実とする構想力を我がものとしてほしい。そのために本書が一助となることを期待しつつ、石炭を通してエネルギーと環境の分野で、わが国と世界に貢献を志す人々が、認識・思想・意識を共有する場が準備できることを祈念している。

2013年9月

持田 勲

目 次

1 章 石炭の今日的認識

1.1	21世紀のエネルギー環境・経済の見通しと化石資源の位置付け	1
1.1.1	産業革命からオイルショックに至るエネルギー変遷の経過	1
1.1.2	20世紀末からの新興国の成長	3
1.2	わが国のエネルギー将来見通し	5
1.3	石炭利用の見通し	8
1.4	石炭への期待と特徴の再認識	10
1.5	石炭利用の技術、技術開発の方向	13
	引用・参考文献	14

2 章 基礎知識

2.1	石炭とは	15
2.1.1	石炭の歴史	16
2.1.2	石炭の性質	23
2.2	石炭の起源	31
2.2.1	歴史的背景	31
2.2.2	地質時代についての概説	32
2.2.3	植物進化と気候変動	35
2.2.4	石炭の形成——植物から有機物、石炭への変化	38
2.3	石炭の種類と分類	40
2.3.1	背景	40
2.3.2	分類・用途に関する分析	42
2.3.3	産業用分類（燃焼用、コークス用）	46
2.3.4	石炭の品位	54

2.4 石炭組織	56
2.4.1 マセラル	56
2.4.2 マセラルの由来	56
2.4.3 顕微鏡による観察と測定	57
2.4.4 マセラルの分類と特徴	58
引用・参考文献	65

3章 物理化学的構造

3.1 石炭の分子構造モデル	68
3.1.1 石炭分子構造モデルの変遷	69
3.1.2 二つの分子構造概念	76
3.1.3 三次元の分子構造モデル	77
3.2 固体NMRによる構造解析	79
3.2.1 石炭と固体NMRの関わり	79
3.2.2 固体NMR法の特徴と基本となる測定法	80
3.2.3 多核固体NMR法の魅力と石炭への応用	83
3.2.4 炭素の詳細構造と高コークス強度発現因子の相関説明	87
3.3 石炭の溶剤抽出の基礎	90
3.3.1 石炭の溶剤抽出の歴史	90
3.3.2 石炭の溶剤抽出技術の進歩	101
3.3.3 3.3節のまとめ	103
3.4 石炭中の水	104
3.4.1 石炭含有水の形態	104
3.4.2 乾燥に伴う石炭構造の変化	111
引用・参考文献	115

4章 石炭の事前処理

4.1 石炭利用の前に	122
4.1.1 物理的処理	122
4.1.2 化学的処理	123

4.2 石炭前処理	124
4.2.1 コールクリーニングの目的	124
4.2.2 コールクリーニングの原理	125
4.2.3 選別技術	126
4.2.4 低石炭化度炭の脱水	131
4.2.5 コールクリーニングが微粉炭燃焼システムに及ぼす効果	133
4.2.6 コールクリーニングによる環境汚染物質の除去の可能性	136
4.2.7 コールクリーニングの課題	138
4.3 溶剤抽出	139
引用・参考文献	146

5章 燃焼と熱分解

5.1 熱分解反応の特徴と制御	149
5.1.1 熱分解の概要	149
5.1.2 熱分解特性の実験的な把握	151
5.1.3 熱分解特性	158
5.2 熱分解モデル	160
5.2.1 石炭基礎物性と熱分解反応	160
5.2.2 石炭熱分解の総括的モデル	162
5.2.3 石炭の構造に立脚したモデル	172
5.3 燃焼特性とその評価技術	178
5.3.1 石炭の燃焼過程	178
5.3.2 石炭の各種燃焼技術	180
5.3.3 試験炉による微粉炭の燃焼特性評価	186
5.4 燃焼モデル	190
5.4.1 微粉炭の燃焼モデル	191
5.4.2 単一微粉炭粒子の燃焼挙動の計算	197
5.5 燃焼の数値シミュレーション	202
5.5.1 燃焼場の解析方法	202
5.5.2 シミュレーションによる燃焼特性評価	209
5.5.3 微粉炭燃焼の large-eddy simulation	214

引用・参考文献	219
---------	-----

6章 乾 留

6.1 コークス	226
6.1.1 乾留とは	226
6.1.2 乾留反応	227
6.1.3 乾留反応に伴う物理挙動	229
6.1.4 コークス製造プロセス	235
6.2 コールタール	238
6.2.1 コールタール利用の歴史	239
6.2.2 コールタールの生成	239
6.2.3 化学原料としてのコールタール	242
6.2.4 コールタール製品の高度利用	247
6.2.5 結 言	249
6.3 コールタールを用いた先端炭素材	250
6.3.1 炭素材のヒエラルキー的構造認識	250
6.3.2 液相炭化反応機構と炭素構造組織の決定	252
6.3.3 コールタールの高純化	256
6.3.4 コールタールを用いた先端炭素材の調製	258
6.3.5 結 言	261
引用・参考文献	262

7章 ガス化・液化

7.1 石炭ガス化反応機構	267
7.1.1 石炭ガス化技術の歴史	267
7.1.2 ガス化炉内での反応	268
7.1.3 ガス化反応機構	273
7.1.4 ガス化反応モデル	277
7.2 石炭ガス化複合発電 (IGCC)	283
7.2.1 IGCC の背景と意義	283
7.2.2 IGCC の構成と機能	285

7.2.3	稼働中の IGCC プラント	290
7.2.4	IGCC の今後の動向	291
7.2.5	IGCC の将来展望	292
7.3	触媒ガス化	293
7.3.1	目的と意義	293
7.3.2	触媒添加方法	294
7.3.3	触媒効果と作用状態	296
7.3.4	石炭からメタンの直接製造	305
7.4	石炭液化	308
7.4.1	液体燃料の重要性	308
7.4.2	石炭液化の歴史と現状	309
7.4.3	石炭液化の原理	313
7.4.4	石炭液化プロセス	318
7.4.5	技術革新と開発の可能性	326
	引用・参考文献	327

8 章 展 望

8.1	石炭利用の展望	334
8.1.1	石炭利用の課題とわが国による技術展開の方向	334
8.1.2	一次エネルギー資源としての石炭	336
8.1.3	二次エネルギー供給に資する石炭	337
8.1.4	次世代産業にインパクトを与える石炭	338
8.1.5	産業のツールとしての石炭	339
8.1.6	近未来における技術開発対象としての石炭	339
8.1.7	物質科学、燃料科学の対象としての石炭	340
8.2	石炭利用の地球環境への影響	340
8.2.1	燃料と森林破壊と食料	340
8.2.2	石炭と公害	342
8.2.3	(広義の) 地球環境問題、越境問題の典型としての酸性雨	344
8.2.4	気候変動の問題	345
8.2.5	京都議定書とそれ以降の動向	348
8.2.6	石炭利用と CCS	352

引用・参考文献	356
---------	-----

付録 石炭の分析方法

付録 1. 基本的な石炭分析・試験	357
-------------------	-----

付 1.1 分析の前処理	357
付 1.2 水分分析	357
付 1.3 工業分析 (JIS M 8812)	358
付 1.4 元素分析 (JIS M 8813)	358
付 1.5 発熱量 (JIS M 8814)	358
付 1.6 灰組成 (蛍光 X 線法)	359
付 1.7 灰の融点 (JIS M 8801)	359
付 1.8 ハードグローブ粉砕性試験 (JIS M 8801)	360
付 1.9 石炭の粘結性試験	360

付録 2. 顕微鏡観察	363
-------------	-----

付 2.1 石炭組織分析	363
付 2.2 コークス組織	366
付 2.3 蛍光顕微鏡による観察	366

付録 3. 特殊試験	367
------------	-----

付 3.1 燃焼性試験	367
付 3.2 自然発熱性試験	380

引用・参考文献	383
---------	-----

索引	384
----	-----

1. 石炭の今日的認識

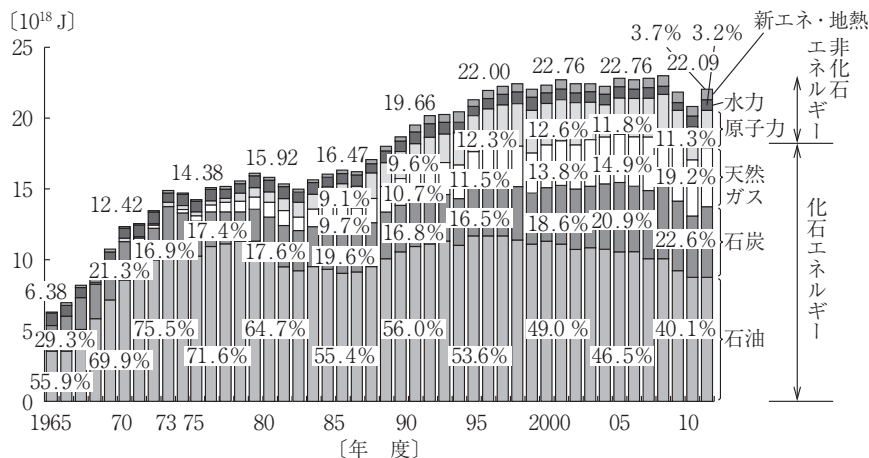
1.1 21世紀のエネルギー環境・経済の見通しと化石資源の位置付け

1.1.1 産業革命からオイルショックに至るエネルギー変遷の経過

21世紀はエネルギー資源の供給と利用が大きく遷移する世紀になろう。エネルギー利用において、太陽エネルギーの直接利用と薪炭から石炭への移行によって、第一次産業革命が達成された。大幅に増大するエネルギー需要を石炭で賄い、イギリスにおいて森林の伐採に歯止めがかけられた。一方、産業都市に深刻な大気や水の汚染をもたらした。その解決には、結局のところ、200年を要した。20世紀に入って、液体燃料である石油の利便性が認められた。航空機や自動車が発達し、20世紀の2度の大战は石油争奪の一面を有していた。第二次大战後のアラビア半島における大油田の発見と、その大量生産、大量供給は世界にエネルギー革命をもたらし、当時の人類が必要とするエネルギー需要を賄い、さらに自動車や航空機での旅行が先進国において普及する、第二次産業革命と巨大な経済成長を可能にした。石油メジャーが支配する、中東産油国からの石油供給のボックスメジャーズの安定は結局のところ、25～30年で崩れた。石油と、その支配価値を認識した産油国は、石油を富の源泉と悟り、コストの圧倒的強さを利用した価格形成カルテルを結成して、石油支配を実行した結果、コストとは無関係の石油価格が大高騰する石油（価格）ショックが世界に衝撃を与えて、世界経済が停滞した。

2 1. 石炭の今日的認識

大幅に上昇した石油価格に対処すべく、先進需要国で組織された OECD も国際機関（IEA）を作って、石油消費の削減と石油代替エネルギーの開発を開始した。削減は産業・民生の省エネルギーの向上による達成を目指し、自動車については燃費向上が至上命題となって、その後の自動車産業の命運が決まった。石炭火力の再稼動と効率向上、液化天然ガスやパイプライン輸送の国際化、原子力発電の稼動、重質油田の開発、さらに石炭、天然ガスからの石油代替燃料油の開発が進められた。こうした積み重ねで、石油消費は少しずつ削減され、石油価格は低落し、いわゆる化石資源ベストミックス形成が追求された。図 1.1 に示すように^{1)†}、わが国における一次エネルギー国内供給に占める石油の割合は、2009 年度には 42.1%と第一次オイルショック時（1973 年度）における 75.5%から大幅に改善され、その代替として、石炭（21.0%）、天然ガス（19.0%）、原子力（11.5%）の割合が増加するなど、エネルギー源の多様化が図られた。



(注) 「総合エネルギー統計」では、1990 年度以降、数値について算出方法が変更されている。
 (出典) 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」をもとに作成

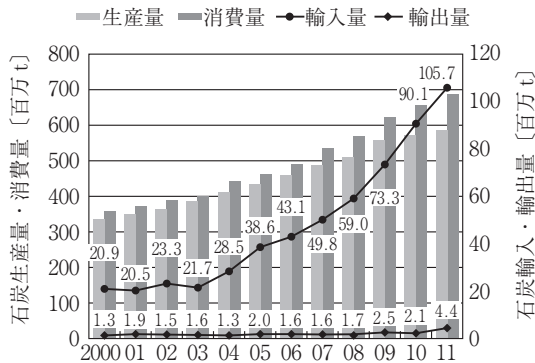
図 1.1 一次エネルギー国内供給の推移¹⁾

† 肩付番号は、章末の文献番号を示す。

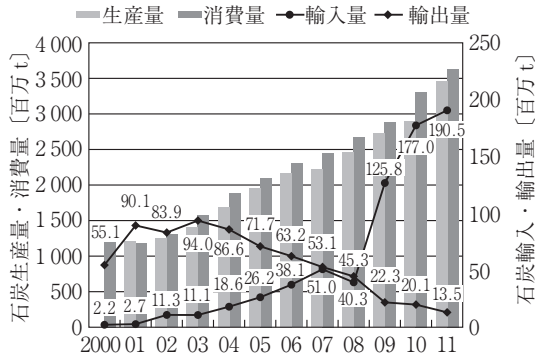
1.1.2 20世紀末からの新興国の成長

その後石油は低価格となり、20世紀の最後から21世紀に入った頃まで続き、エネルギーベストミックス追求は継続されたものの、コストと価格の競争によって石油代替燃料油開発は中止、あるいは停滞した。豊富なエネルギー供給に支えられた豊かな生活が復活したが、先進国の成長はITやサービス、特に金融が牽引した。この頃から人為的なCO₂排出が大気中のCO₂濃度を上昇させ、地球温暖化をもたらすとの環境科学者の主張が国際政治の中で徐々に認められ、エネルギー安定供給と大気中CO₂濃度を上昇させないためCO₂排出削減が政治経済の課題になって今日に至っている。この主張の是非に対する議論が起り始めているが、国際政治の場に、今のところCO₂排出大幅削減を目指す潮流に表立った変化は起こっていない。一方、最近の国際的経済不況の中、エネルギー消費が減ってCO₂削減目標が達成されにくいことや、CO₂への配慮が冷め始め、CO₂排出削減の気運がヨーロッパで希薄になった感もある。

20世紀末から今世紀にかけて冷戦がソビエトの崩壊で終了、アメリカの一国覇権が、各所での局地戦での消耗にもかかわらず確立し、世界的には安定した時期を迎えた。この安定により、新興国としてブラジル、インド、加えて共產主義の束縛を解いた中国とロシアが経済成長を開始した。いずれも巨大人口国、巨大資源国であるため、その成長が世界経済に大きな影響を与え、21世紀の今日、世界の実質経済成長は、こうした新興国の消費拡大と大量生産輸出のバランスによって支えられているといっても過言ではない。そこに必要なエネルギー需要と、今後の増大は巨大であり、資源国で増産しているものの、すでに中国、インドは、石油はもちろん、石炭についても図1.2に示すように実質輸入に至っている²⁾。結果として、エネルギー需要の増大がエネルギー価格を引き上げ、かつ消費拡大の速度から、化石資源の枯渇が現実味を帯び始めており、多くの化石資源の22世紀内での枯渇は避けられないと想像できる。一方、先進国における実体経済の成長停滞と年金資金をはじめとする余剰資金の膨張は、グローバルな金融工学と投機の結合を生み、エネルギー価格の高騰の一因となっている。



(a) インド (褐炭を含む)



(b) 中国 (褐炭を含む)

(注) 2011 年見込み値

(出典) IEA : Coal Information 2012

- インドの輸入量は、2003 年から 2011 年までの 7 年間で約 5 倍に増加。
- 中国は、2003 年以降、国内消費量が急増。輸入量は同期間で約 17 倍に急増。一方、輸出量は、2003 年当時の 2 割半程度に減少。
- 中国は、2011 年、約 1.9 億 t の輸入超過 (純輸入国) になる (日本を抜いて世界第 1 位の石炭輸入国)。
- 今後も、両国の経済成長は続くと思われ、石炭火力発電の割合の高い両国の石炭輸入量は増加の見込み。

図 1.2 石炭資源開発をめぐる中国とインドの状況²⁾

1.2 わが国のエネルギー将来見通し

欧州の経済危機があった2012年は石炭価格の顕著な低下があり、多数の資源会社が赤字を計上した。翌2013年になって経済の上向きが認められ、石炭価格は再び上昇し始めている。特にわが国のかなりの円安傾向と原子力を代替する化石資源の輸入増大により、購入価格は大幅に上昇する可能性がある。

一方、CO₂排出削減の国際協定は、まず京都議定書としてまとめられ、欧日に参加して2008～2012年の実施が約束された。米中の参加はなく、新興国の義務もないため、この協定の地球上でのCO₂削減への実質的貢献は無視できる。しかも、国内の削減努力で目標が達成できる可能性はわが国では低い。そのためCO₂排出削減の容易な国や地域でのCDMやJI[†]の資金を使用する削減も約束達成の手段として認められている。わが国は京都議定書で1990年度比6%の削減を約束した。1990年比6%削減は最終的に達成される目論見であった。そのうち1.6%に相当分を国際的な排出権購入によるものとしていた。すでに2006～2009年に電力会社を中心に数千億円の巨額を支出し、経営利益捻出に影響し始めている。この期間の経済の低迷もあって、わが国は6%減を達成できた。

図1.3に示す東日本大震災前のエネルギー戦略によれば、2030年には電力供給の過半を原子力に依存する計画になっていた³⁾。3.11以降は東日本大震災、大津波の被害によって、このような原子力発電依存のシナリオが成立せず、CO₂削減計画の大幅見直し、京都議定書からの脱離を余儀なくされた。つまり、白紙からの戦略提案が必要になった。この結果、CDM/JIによる削減も見直さざるを得なくなった。しかし、相手国とわが国の両者が利益を享受できる方法を追求することの意義はいささかも減じていない。

一方いくつかの受入国において、これまでのわが国へのCO₂排出権販売による利益は、将来の成長、産業強化、軍事力の整備向上に利用されていること

† CDM：クリーン開発メカニズム
JI：共同実施

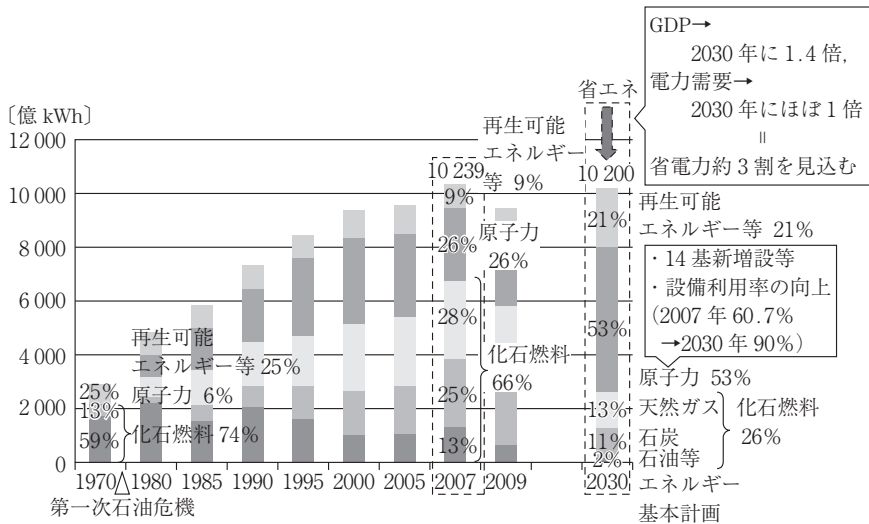


図 1.3 東日本大震災前のエネルギー戦略³⁾

は明らかで、わが国の成長と結びつかない CO₂ 排出権購入は政治政策の愚かさの象徴となろう。2012 年以降の協定成立は困難な状況にあり、わが国も愚行を繰り返さない方向にあるが、歴史を総括しないまま愚行を繰り返す危惧のあることに留意したい。

現在、2030 年を目処とするエネルギー革新技術の選定と同時に足元のエネルギー環境目標と産業育成法が議論されている。2012 年の革新的エネルギー環境戦略における化石資源の位置付け⁴⁾ を踏まえて一次エネルギーの将来を透視すれば

- ① 化石資源は最も低コストなエネルギーとして重要であるが、供給は世界の主要エネルギーとして大幅に増大すると予想できるのに対して、生産の大きな拡大とその供給は 2030 年頃からタイトになり、枯渇も現実問題となる。2100 年頃までには、供給はきわめて制限されよう。
- ② 化石資源の利用が世界に拡大する中、CO₂ に加えて SO_x、NO_x、粒子状物質への対策も強化する必要がある。
- ③ これに対して原子力利用は世界で拡大する。わが国でもそれに対処すべ

きである。

- ④ 自然エネルギーも供給増加が期待されるが、コストの大幅な削減がこれからも続く課題であろう。

これから22世紀に向けて、一次エネルギーの研究開発の規模、適切な時期における産業の主役としての位置付けは、早くても遅くても損失を招くので、投資と経済実体とにずれが生じないようなタイミングをみることはきわめて大切である。いたずらに空想に近い理念を強調することは愚かである。ウランについては供給限界が明確であり、増殖炉、核融合の先端技術と核廃棄物の最終処分、使用限界を超えた廃炉の処分の実施とコストにも配慮しなければならないことがすでに顕在化している。

ここで一次エネルギーの使い方が変化することも注視しなければならない。二次エネルギーについては、わが国においては、現在の電気、液体燃料（ガソリン、灯油、軽油）、気体燃料（都市ガス、プロパン）から、今後電気が圧倒的になり、輸送用燃料として液体燃料がどこまで残るかは、電池自動車の普及にかかっている。もちろん、電池が自動車の究極の動力系ではなく、液体燃料の直接燃料電池が実用化され、移動動力として利用される日が到来すれば、液体燃料が石油枯渇後も輸送用二次エネルギーとしての位置を保つ。一方、二次エネルギーとしての気体燃料は天然ガス、さらに化石資源の枯渇後の石炭ガス化ガスは、きわめて限定的であろう。最近シェールガス、シェールオイル開発が商業化され、天然ガスの低価格化、アメリカのエネルギー供給の自立を目指して生産を大幅に拡大し、国際的エネルギー供給に大きなインパクトを与えている。アメリカでの天然ガス価格は、急速な供給過剰のため大幅に値下がりしており、かつアメリカへのLNG輸入が見込めないことから、ロシアの天然ガス増産が抑えられる結果になっている。しかし、いずれ国際マーケットに組み込まれ、生産者利益の追求が強化され、市場価格が落ち着くであろう。シェールガスは従来型天然ガスと比較して生産コストも大きいことから、大幅な低価格でわが国に供給されることはあり得ない。一方、わが国を除く世界、特に新興国の動きは、成長を重視しエネルギーの供給と需要の経済性に対してバラ

索引

【あ】		褐炭	9	【け】	
アルカリ金属炭酸塩	294	カーボンブラック油	243	蛍光強度	64
亜瀝青炭	9	環境規制	136	ゲスト-ホストモデル	76
アレニウス型反応モデル	192	含浸ピッチ	253, 259	ケロジェン	38
アレニウスプロット	163	間接ガス化	268	原子力発電	342
【い】		間接石炭液化	308	【こ】	
易黒鉛化性	250	官能基成分	70	高圧蒸気機関	21
一次エネルギー	7	官能基の分析法	25	高温乾留タール	240
易動性水素	113	乾留反応熱	228	公害問題	342
イナナーチニット	58	【き】		光学顕微鏡	56
【え】		気候変動	345	光学的異方性組織	53
液相炭化反応	253	気候変動枠組条約	346	高濃度石炭・水スラリー燃料	312
エクジニット	58	気孔率	233	高分子量成分	141
エーテル結合	28	擬重液	127	高膨張圧炭	233
エネルギー貯蔵	338	機能性炭素材	145	黒鉛結晶子	252
エネルギー密度	308	キノリン不溶物	256	コークス化性	23
【お】		キノリン不溶分	245, 259	コークス組織	58
重み付き灰色ガスモデル	207	揮発性有機化合物	343	コークス炉上部空間	240
温室効果ガス	34, 349	気泡膜	231	固体酸化物型燃料電池	285
【か】		球晶	248	固定層	180
化学的相互作用	151	球晶黒鉛	249	固定炭素	43
化学反応律速領域	280	キュリーポイント反応器	152	コーナ燃焼型	183
架橋	29	共炭化作用	53	コールチェーン	124
核磁気共鳴法	25	京都議定書	5, 348	コールバンド	39
確認埋蔵量	9	京都メカニズム	350	根源植物	15
可採年数	9	共有結合	29	混合溶剤	101
可採埋蔵量	8	極性溶剤	98	コンバインドサイクル	285
ガス化剤	270	気流層	180	コンピュータ支援分子設計法	72
ガス境膜内拡散律速領域	280	【く】		コンピュータを用いた流体	16
片刃産物	131	空気吹き	268	力学	
		グラフェン	250		
		クリンカ	134		
		クリーンコール	131		

【さ】

細孔内拡散	194
細孔内拡散律速領域	280
サーマル NO _x	99
残渣	142
三次元の構造概念	73
酸性雨	344
酸素官能基	72
酸素吹き	268

【し】

シェールオイル	7
シェールガス	7
示差走査熱量測定	104
指数型モデル	207
室炉式コークス炉	226
脂肪族成分	70
脂肪族側鎖	29
循環流動床方式	286
蒸発法	131
初期熱分解	150
触媒活性	297
植物進化	37
親水性官能基	107
森林枯渇	17
森林破壊	340

【す】

水蒸気吸着等温線	106
水性ガス	20
水性ガスシフト反応	272
水素化精製	317
水素供与性溶剤	320
水素結合	29
随伴ガス	308
スラッキング	134

【せ】

成型炭配合コークス製造法	235
精炭	131
生物起源説	31

赤外分光法	25
石炭化学	239
石炭化作用	15
石炭ガス化燃料電池複合発電	285
石炭化度	43
石炭石油混合燃料	312
石炭のランク	57
石炭部分水素化熱分解技術	268
セミコークス	233
前面燃焼型	183

【そ】

送電端発電効率	291
ソックスレー抽出	71
ソフトカーボン	261

【た】

大気汚染	343
大気汚染防止法	343
対向燃焼型	183
対流伝熱	198
多環芳香族化合物	16
多層水	106
脱 QI 処理	245
脱アルキル反応	28
単位ユニット	174
単層水	106
炭素転換率	269
炭素六角網面	250
単体分離	125

【ち】

地下ガス化	336
地球温暖化	3
窒素構造	84
チャー転化率	296
チャー燃焼	178
調湿炭装入技術	236
超々臨界圧ボイラ	284
超臨界流体	101
直接数値計算	203

直接石炭液化	308
--------	-----

【て】

低温乾留タール	240
低石炭化度炭	9
低品位炭	54
低分子量成分	141
ディレドコーカー	245
鉄内装コークス	337
テーリング	131

【と】

トランスアルキル化反応	28
トリプル複合発電	292

【な】

生コークス	245
軟化点	259
難黒鉛化性	250
難動性水素	113

【に】

二酸化炭素回収・貯留	289
二次エネルギー	7
二次的気相熱分解	150
二次分解	240
二段燃焼用空気	184
二段燃焼率	187

【ぬ】

濡れ性	126
-----	-----

【ね】

熱膨張係数	246
粘結材添加法	53
燃料電池	7
燃料比	43

【は】

灰色解析	207
バイオフィューエル	308
バイオマス廃棄物	144
煤塵	136

廃石	131	フミン酸	91		
灰中未燃分	184	フムス炭	92	【や】	
排熱回収ボイラ	288	フェエル NO _x	49	冶金用コークス	226
バインダピッチ	253, 259	フライアッシュ	134	【ゆ】	
発生炉ガス	20	分子間相互作用	74	有害重金属元素	136
ハードカーボン	261	粉末 X 線結晶回折	26	油母	38
パフイング	259	噴流層	180	【よ】	
針状コークス	245	【へ】		溶解パラメータ	96
バルク水	106	平均分子構造	68	容積反応モデル	194
反応器	154	ベストミックス	2, 3	溶融スラグ	272
反応熱	198	【ほ】		【ら】	
【ひ】		芳香族核	176	ラージ・エディ・	
非極性溶剤	98	芳香族クラスタ	150	シミュレーション	203
微細組織成分	41	——のスタッキング	29	ラジカルフラグメント	161
非在来原油	308	芳香族成分	70	ランキンサイクル	284
非蒸発法	131	膨潤現象	90	乱流燃焼場	186
尾炭	131	【ま】		【り】	
ビチューメン	91	マジックソルベント	75	離散要素法	200
ピッチコークス	244	マスキー法	343	粒子状物質	342
非定常解析法	204	マセラル	43	流動床ガス化	21
ビトリニット	58	【み】		流動接触分解法	22
——の反射率	39	ミドリリング	131	流動層	180
非灰色解析	207	【む】		流動層反応器	154
微粉炭塊成化技術	236	無触媒ガス化	279	【れ】	
微粉炭吹き込み	48	【め】		冷ガス効率	269
非溶剤静置沈降法	256	メゾカーボンマイクロビーズ	261	レイノルズ平均ナビエ・	
【ふ】		メソフェーズ小球体	248	ストークス法	203
ファウリング	134	メソフェーズピッチ	251	瀝青質	91
ファンデルワールス結合	29	メタプラスチック	228	連結気孔	231
風化炭	55	【も】		連続式成形コークス製造技術	237
副産物回収型コークス炉	20	毛細管凝縮水	106	【わ】	
輻射伝熱	198			ワイヤメッシュ反応器	151
腐植酸	91				
浮選	129				
部分酸化	268				
部分酸化反応	194				
フミン	92				

	[D]		
[A]			Flux 法 206
advanced ultra-super critical 284	DAEM 192		formed coke process 237
air blown 268	DAPS 236		FT-IR 26
Air Pollution Control Act 343	DEM 200		F-T 合成 267
A-USC 284	Deposit 141		[G]
	differential scanning calorimetry 104		gas to liquid 308
[B]	direct numerical simulation 203		GTL 308
BCL プロセス 312	discrete element method 200		[H]
brown coal liquefaction プロセス 312	Discrete Ordinates 法 206		heat recovery steam generator 288
	Discrete Transfer 法 260		HRSG 288
[C]	Distributed Activation Energy Model 192		humic acid 91
CAA 343	DNS 203		humin 92
CAMD 72	DO 法 206		[I]
carbon capture and storage 289	drop-tube reactor 154		IGFC 285, 292
CCS 289	dry-cleaned and agglomerated precompaction system 236		indirect gasification 268
CDM 5	DSC 104		integrated coal gasification fuel cell combined cycle 285
CFD 16	DTR 154		IPCC 345
Chemical Percolation Devolatilization Model 192	DT 法 206		IR 25
clean coal technology 16	[E]		[J]
cleaned coal 131	EAGLE ガス化技術 268		JI 5
coal oil mixture 312	ECOPRO 268		[L]
coal water mixture 312	EFR 154		large eddy simulation 203
coefficient of thermalexpansion 246	Enhanced Oil Recovery 354		Leckner 線図 207
COM 312	entrained-flow reactor 154		LES 203
computer-aided molecular design 72	EOR 354		Lewis 塩基 94
computerized fluid dynamics 16	[F]		LIB 用負極材 252
Conference of the Parties 349	FBR 154		Li-ion 電池用負極材 252
COP 349	FC 43		[M]
CPD 192	FCC 22		macromolecular phaseand mobile phase 76
CPR 152	FCP 237		magic angle spinning 法 83
CTE 246	Fischer-Tropsch synthesis 267		Maskie Act 343
Curie-point reactor 152	FLASHCHAIN 192		MAS 法 83
CWM 312	flotation 129		MCMB 261
	fluid catalytic cracking 22		
	fluidized bed reactor 154		

MGS	129	Residue	142	USC	284
middlings	131	reynolds-averaged navier-			
MM 相	76	stokes 法	203		[v]
Multi-Gravity Separator	129	RF	161	VOC	343
		π - π 相互作用	29	volatile organic compounds	343
				volumetric reaction モデル	194
[N]		[S]		VR モデル	194
NEDOL プロセス	312	scalar similarity filtered			
NMR	25	reaction rate モデル	215		
NO _x 生成モデル	209	SCOPE21	236	[w]	
		secondary gas-phase		wiremesh reactor	151
		pyrolysis	150	WMR	151
oxygen blown	268	Six Flux モデル	206	WSGG モデル	207
		SOFC	285		
[P]		solid oxide fuel cell	285	[x]	
P1 モデル	206	Soluble	141	XPS	27
partial oxidation	268	sp2 炭素	250	XRD	26
partially stirred reactor		SSFRR モデル	215	X 線光電子分光法	27
モデル	215				
particulate matter	342	[T]		[記号・数値]	
PaSR モデル	215	Tabulated-Devolatilization-		1 相構造モデル	76
PCI	48	Process モデル	192	2 相構造モデル	76
PM	342	tailings	131	95% ナフタレン	243
primary pyrolysis	150	TDP モデル	192		
[Q]		[U]			
QI	245, 256	ultra-super critical steam			
		condition	284		
[R]		Unsteady RANS 法	204		
RANS 法	203				

石炭の科学と技術 ～未来につなぐエネルギー～

Coal Science and Coal Technology

© 一般社団法人 日本エネルギー学会 2013

2013年11月25日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 一般社団法人
日本エネルギー学会
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛 来 真 也
印 刷 所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06629-6 (柏原) (製本：牧製本印刷)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたしません