

特集

実装可能なエネルギー技術で築く未来 —骨太のエネルギーロードマップ2— ～化学工学に基づくCO₂削減への提言～

「骨太のエネルギーロードマップ第2版」は、化学工学を基礎として、将来において実現可能なエネルギー技術開発の道筋を示すことを目的に編集作業が進められ、2010年に単行本として出版された。

出版に際して、執筆と編集はエネルギー部会を中心に熱工学部会やその他の部会も含め、化学工学会として幅広く横断的な活動としておこなわれた。そこで、この活動の成果を広く知っていただくため、今回特集を組むことを企画した。

(編集担当：中川二彦)[†]

実装可能なエネルギー技術で築く未来の概要

加藤 之 貴

1. はじめに

エネルギーの重要性は社会に共有されているが、エネルギー技術、利用社会は多様化しており、エネルギーの合理的な将来展望の提示が重要になっている。

実装可能なエネルギー技術で築く未来—骨太のエネルギーロードマップ2—¹⁾(実装骨太)は化学工学の視点から、理想のエネルギー利用社会の提示を目指し、さまざまなエネルギー技術の将来の可能性を示すために企画された。

本書の特徴では、各エネルギー技術の専門家が、個人の自由な視点から個々の技術論を展開している点である。エネルギー技術開発、またエネルギー利用の上で、多様な候

補のなかから、将来に真に必要なものを選ぶ必要がある。そのためには世情に流されず、大局的な観点から本質的な考察が求められる。本書では個々の研究者が個性を磨いて得た知見を集大成することで、本質的な考察に基づく明るい将来にいたるロードマップを示すことを目指した。本書タイトル、“実装可能なエネルギー技術で築く未来”には出版から2040年を目安にした未来のエネルギー利用社会と技術の予測を目指し、工学的に成立しえる実装可能なエネルギー技術の貢献の意を込めた。本稿では本書の背景、構成と成果の概要を示す。

2. 出版準備

2.1 出版経緯

2001年の化学工学会エネルギー部会発足を機会に、エネルギーロードマップの必要性が指摘され、部会による出版プロジェクトをもとにその構成が議論された。その結果、2005年に骨太のエネルギーロードマップ第1版²⁾(第1版)が、34件の技術ロードマップ(骨太論文)を収めて出版され



Executive Summary of the Energy Vision Beyond 2020

Yukitaka KATO (正会員)

1991年 東京工業大学大学院理工学研究科
化学工学専攻博士課程修了(工学博士)

現在 東京工業大学原子炉工学研究所
准教授

連絡先；〒152-8550 東京都目黒区大岡山
2-12-1-N1-22

E-mail yukitaka@nr.titech.ac.jp

2010年12月6日受理

[†] Nakagawa, T. 平成21, 22年度化工誌編集委員(3号特集主査)
岡山県立大学情報工学部

た。第1版の特徴は各骨太論文技術のエネルギー分野への貢献について5年後と30年後を予測した点、さらにそれらの貢献を二酸化炭素(CO₂)削減量で整理した点にある。技術予測をもとに、理想のエネルギー利用社会「骨太夢タウン」を提案し、この成果をもとに5項目からなる骨太提言を示した。幸い、この新たな試みは対外的に好意的に受け止められ、わが国のエネルギーロードマップの一マイルストーンになったといえる。その後、骨太提言を元に革新的エネルギー材料に関する国際会議³⁾(IMPRES2007, 京都, 2007)が開催され、第1版についての論文報告⁴⁾がなされた。国際会議は第2回⁵⁾(IMPRES2010, Singapore, 2010)に継承されている。また内容の数値、表現などの見直しと修正をおこない、2009年に第1版改訂版が出版された⁶⁾。

第1版では5年後(2010年)を予測しており、5年後において予測への反省が望まれた。また、骨太提言で示した指針に変化はないが、過去5年の技術の変化を反映した新たなロードマップ作り、未来予測は有意義であると考え、第2版出版プロジェクトが2010年秋出版を目標に2009年夏から準備が進められた。

2.2 出版目的

本書は化学工学会エネルギー部会編として部会員を中心に編纂が進められた。第1版に続き、第2版も化学工学を基礎とした将来のエネルギー技術開発の道筋を示すことを目的にした。各著者の専門分野からの自由な視点でエネルギー技術の未来予測をおこない、これを集約する点が第1版の特徴であった。この点も継承し、各著者の個性を活かした技術提案を期待した。

一方で、執筆の方向性を一致させるためには対象地域、対象期限の設定が必要である。また、全論文の提案を統合するため、技術に対する一定の評価指標が必要である。これらは準備会合を通して内容を新たに吟味し、結果として、執筆の方向として対象地域をわが国とし、未来予測年として5年、10年、30年を設定した。また、技術の統合的な評価のため「CO₂削減効果」に加え「普及にあたっての技術リスク」を示すことにした。

2.3 編集過程

本書出版のために骨太のエネルギーロードマップ第2版製作委員会が組織され、編集幹事が中心となり本書の編纂がおこなわれた。

出版に向けて4回の製作会合が持たれた。第1回製作会合(2009年7月)では、参加者より第1版の再検討からはじまり、ロードマップのあり方、第2版の構成に至るまで自由に討論された。第2版編集方針として、化学工学としての個性を活かす、専門書や技術書として国・地方など対外的にアピール可能なものにする、上記の未来予測年の設定などについて合意された。これと平行して、著者の公募を進

め、第1期の著者陣容が形成された。

第2回製作会合では執筆依頼の内容について、第1版を参考に討議され、各論文(骨太論文)の章構成が検討された。さらに、著者候補より、各自の骨太論文の予定執筆構想について発表があり、各内容を皆で検討し、論旨の明確化と著者間相互の意思疎通を深めた。討論を通して本書にとり重要な技術要素について、著者依頼を進めた。第1版では技術のCO₂削減効果を評価したが不慣れな部分があったので、より客観的な整合性あるCO₂削減効果評価を目指した。また技術普及の困難な点を明示するため技術の“プロブレム”と“リスク”を記述項目に加えた。これらの検討を元に、執筆要領が作成された。第3回製作会合では、執筆された骨太論文について各著者がその内容を説明し、参加者一同で論文を検討した。全体の検討を通して本書が目指す「骨太」を以下のキーワード5点で定義した⁷⁾。

- 「流行・皮相でなく国民の利益の本質を確保」
- 「短期でなく中長期ビジョン」
- 「倫理主義・悲壮感でなく現実的」
- 「技術ロマン主義でなく「適性技術」を志向」
- 「市民的批判に耐えられる論理性」

本キーワードが、本書の編纂にむけての共通認識となり、この定義を反映した技術の“実装可能性”を本書の重要な編集指針とした。これを背景に本書名が命名された。

第4回製作会合では、骨太論文をもとにしたまとめの作業が進められ、「CO₂削減効果」の集計報告がなされた。各技術の分類、体系化がおこなわれ、各技術のCO₂削減効果を分析し、総合評価を進めた。これと合わせて全7回の幹事会を進め、編集方針の整備、“実装可能性”を主眼とした論文査読、まとめ作業がなされた。これらの活動をもとに本書は発刊に至った。

3. 本書の構成

36件の骨太論文を61名の著者から得た、うち17件が新規著者によるものであり二次電池、農業、森林、自動車、バイラーほかを新規に包含した。

3.1 骨太論文

各骨太論文の構成は、およそ第1章イントロダクション、第2章スタート、第3章ゴール、第4章プロブレム&リスク、第5章ロードマップ、第6章ベネフィット、第7章ドリーム、まとめ、となるよう著者に依頼した。

第4章プロブレム&リスクでは、解決すべき技術課題を提示し、また、普及にあたっての、技術リスク、経済リスクを示すこととした。さらに、「プロブレム&リスク アンケート」を別途作成し、これに記入を求めた。また、第6章ベネフィットでは、ロードマップで示された新技術・対

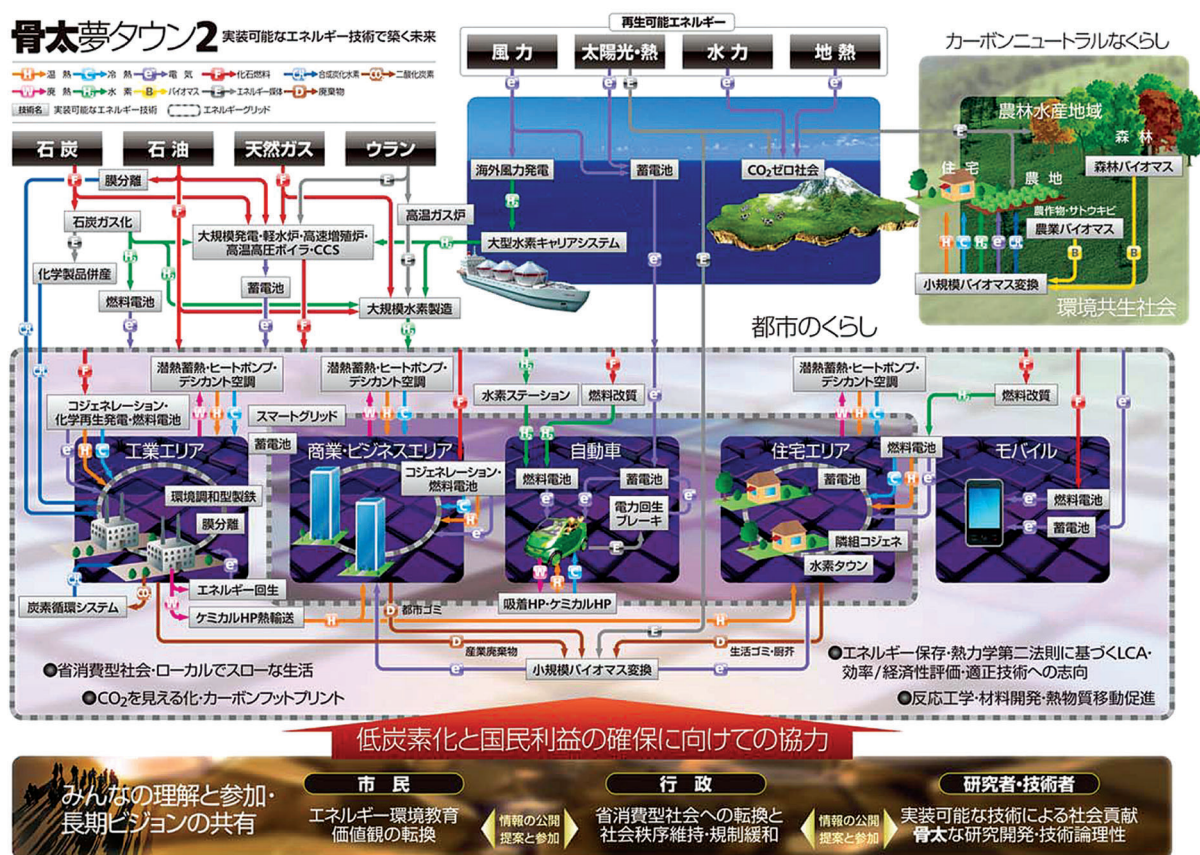


図1 骨太夢タウン2¹⁾

策の期待できる効果を定量的に示すとした。現在の実システムに対する優位性をCO₂換算，エネルギー換算で比較検討することを依頼した。提案技術の導入により電力の消費量が減少した場合のCO₂削減量はLNG火力発電のCO₂排出原単位：0.478 kg-CO₂/kWhを基準として算出するなど、定量的根拠に基づくCO₂排出削減量[kg-CO₂/y]，消費化学物質の削減量[kg/W]などの記載を依頼した。さらに各論文の末尾に論文内容を総括したロードマップシート図の作成を依頼した。

3.2 全体構成

本書は3章で構成され、第2章に骨太論文が5節に分類され各骨太技術のロードマップが示された。

- 第2.1節 社会とエネルギー
- 第2.2節 暮らしとエネルギー
- 第2.3節 ものづくりとエネルギー
- 第2.4節 エネルギーを届ける
- 第2.5節 エネルギーレビュー

第1章には骨太論文の成果を集約し，骨太提言，骨太技術のCO₂削減効果とリスク，骨太のエネルギーロードマップ第1版成果と反省を，第3章には付録を収めた。

4. 成果概要

4.1 骨太夢タウン2

得られた骨太技術の社会貢献を明示するため，技術関連図である骨太夢タウン2が作成された(図1)。図は一次エネルギーから利用社会までのエネルギー・物質の流れを示し，利用社会は「都市のくらし」と「カーボンニュートラルなくらし」に分割している。図中に，本書で取り上げた骨太技術の社会における位置と，技術同士の関係性を整理して表現した。次節で示すCO₂削減効果は，このマップをもとに検討がなされた。なお，技術リスク解析も材料制約などの観点から整理されているが，詳細は本書を参照していただきたい⁸⁻¹⁰⁾。

4.2 技術の導入にともなうCO₂削減効果

本書第2章で提示された各骨太技術による我が国のCO₂削減効果を評価した⁸⁾。

4.2.1 評価方針；第2章において詳細に記述されている各技術のロードマップは，分野ごとに分類されている。それぞれの応用分野対象は複数の技術ロードマップで共通する場合がある。たとえば，ヒートポンプ技術のロードマップは家庭の冷房効率の上昇や分散電源の排熱利用などを目的としている。このとき，分散電源を導入するシナリオで

あれば利用できるが、導入しない場合には排熱が存在せず、CO₂排出削減とはならない。分散電源は、事業電力と比較してコージェネレーションによりエネルギー効率を高めてCO₂排出を削減することができる。このとき、原子力発電や太陽光発電により事業電力の排出原単位(kg-CO₂/kWh)が小さくなると分散電源を導入する効果は小さくなる可能性がある。このような技術同士の競合や重複を考慮しながらCO₂排出削減量を評価する必要がある。

本評価においては、まず、排出分野ごとの日本の温室効果ガス排出量データ¹¹⁾を収集し、これに総合エネルギー統計データ¹²⁾から得られる排出分野ごと・燃料ごとのエネルギー消費量のデータを用いて、排出分野ごと・燃料ごとのCO₂排出量を概算した。これにより、CO₂排出の統計値を燃料ごとに分割した。同時に、燃料ごとのエネルギー消費量に対し、骨太技術を適用することで削減できるエネルギー消費量を概算して、2040年における当該分野の当該燃料の排出削減率を2007年ベースで概算した。この比率を用いて、2040年におけるCO₂排出量を計算した。本評価においてはCO₂排出に関わるいくつかの仮定をおいている。

(1)技術の包含、複合、競合、前提を考慮した評価とする

技術導入のリスクに関しては前述のとおり、骨太技術同士の関係を考慮する。競合する技術に関しては、技術がどのようなシナリオで導入されるかを考慮して評価する。この仮定により、技術同士の関係を整理した実装可能性を考慮した。

(2)2007年時点でのエネルギー需要・供給構造が維持される

エネルギー需要は一人あたりのエネルギー消費量×人口で決定される。将来需要の予測をおこなうためには、経済成長や人口推移を精査する必要があるが、本評価では、2040年のエネルギー需要は2007年の需要と同じであることを仮定して評価した。また、産業部門ごとのCO₂排出量は産業構造に依存するが、2040年の産業構造も現在と変化がないことを前提とした。

(3)スマートグリッドが整備されている

分散型エネルギー変換・貯留システムの導入や太陽光発電の導入にともなう一般事業電力における分散電源からの電力の利用が可能になっていることを想定している。これにより、SOFCや太陽光発電システムなどが導入された場合、適宜スマートグリッドによって電力が相互利用できるようになっている。

(4)都市ガスインフラが全国規模で導入されている

分散電源を利用するための都市ガスなどのインフラが全国規模で導入されていることを想定している。

(5)灯油による暖房機器が撤廃されている

2040年時点では撤廃していることを想定して評価する。

なお本評価におけるリスクやCO₂削減シナリオの策定を

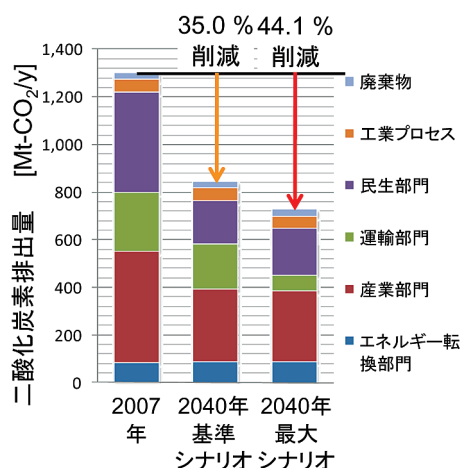


図2 実装骨太における二酸化炭素排出削減量の評価結果⁸⁾(2040年における基準シナリオと最大シナリオ)〔燃料からの漏えい〕におけるCO₂排出量は38 Mt-CO₂/yと小さいため省略した)

議論し⁹⁾、2007年のCO₂排出内訳、基準シナリオと最大シナリオに関するシナリオの設定値を定義した¹⁰⁾。

4.2.2 評価結果と解釈; 図2に、わが国における2007年のCO₂排出実績量と、2040年における本書の骨太技術におけるCO₂排出削減量の評価結果を示す⁹⁾。

排出量は百万トン/年(Mt-CO₂/y)で示している。2040年においては、実装可能性が十分に高い技術を導入し、基準となるシナリオに沿って2040年を迎えた場合(基準シナリオ)と実装可能と考えられる技術の組み合わせのなかから、CO₂排出削減率が最大となるような技術セットを選んで進んだ場合(最大シナリオ)¹⁰⁾の結果を示している。

まず、くらしのエネルギーに関して、基準シナリオでは分散電源を導入せず、一部電化がすすんだ状態を想定した。最大シナリオでは家庭、業務いずれも100%が固体酸化燃料電池(SOFC)による分散電源を導入している状態を想定した。なお、産業のエネルギーに関しては、基準シナリオおよび最大シナリオで同じ設定を採用した。また、運輸部門における各車種の導入率シナリオでは、基準シナリオについては既存のロードマップ¹³⁾を参考とし、最大シナリオにおいては、すべてが電気自動車に変更されると想定した。

事業発電に関しては電源構成と総発電量、電力のCO₂排出原単位に着目してシナリオを検討した。2040年の電源構成は既存のロードマップ¹⁴⁾を参考に設定し、それぞれの発電方式における原単位を乗じていくことで事業電力の原単位を得た。

結果は基準シナリオで35.0%、最大シナリオで44.1%CO₂排出が削減されるとなった。最大シナリオは、分散電源の導入を実施しており、事業電力に加えて分散電力によっても発電をおこなうとしている。よって、分散電源の燃料である都市ガスの使用量は増大する。一方で、家庭の電化や

電気自動車の導入率が遠距離走行、域内走行において100%としており、事業電力分野のCO₂排出削減の寄与も大きいことが結論づけられた。

5. 考察

本書の成果を考察する¹⁵⁾。まず、第1版では豊かな持続的暮らしの実現に向けて、エネルギー利用について以下の骨太提言を示した²⁾。

骨太提言 1. 自然サイクルのなかにある人類を自覚し、天賦であるエネルギーを効率的に利用する。

骨太提言 2. エネルギーをうまく変え、うまく流す技術開発でビジネスチャンスを生み出す。

骨太提言 3. エネルギーを「変える」、「貯める」、「運ぶ」の3点を効率的に実現するエネルギー材料をつくる。

骨太提言 4. エネルギーを質的に使いきる。エネルギー相互連携ができる社会ハードを作る。

骨太提言 5. 暮らしのソフトを整備し、楽しくエネルギー社会に生きる。

これら5項目の提言は、2010年の今日においてもエネルギー社会に生きる我々の行動規範として正当なものである。第2版となる実装骨太が挑戦したのは、第1版でおこなわれた提言を、社会への実装可能性を吟味しつつCO₂削減技術の将来像を検討することによって具体化し、技術開発による我が国の未来をできるだけ定量的に示す作業であった。

結論は、CO₂削減量は2007年を基準年として最大で40%程度であるということであった。40%程度までのCO₂削減を目指すならば、現在考えられている技術の研究開発を公正に競い、経済的・社会的受容性のある実装可能な技術を構築することができれば、CO₂削減は可能と言えた。同様にエネルギー効率の改善を目指した新技術の開発を進めれば、“楽しく暮らしつつ”CO₂を削減できる量は40%まで見通すことができる、といえた。ただし、家庭ではオール電化となる、高温ガス炉が導入されるなど、大胆に新技術の導入と普及を想定しており、技術の経済性・社会的受容性から考えて40%削減は容易に達成できるレベルではないことはここで指摘しておかなければならない。

6. おわりに

技術の集積によってCO₂削減が40%程度までは可能としても、考えるべきことは、開発と普及にかかる時間と対費用効果である。技術開発の費用が企業の自己負担である限りにおいては各研究開発主体が独自の判断によって実施す

ればよい。これに対して、国費を投じて研究開発を実施するならば、CO₂削減量と産業競争力の強化、技術の実現までの時間を評価軸とした対費用効果によって順位づけをおこない、かつ技術開発の進捗状況に応じて、どのような技術にどの程度の国費を投じるべきかを、継続的に見直しつつ機動的に判断することが重要である。本書には、上で述べたCO₂削減量の推算の手法や、個々のCO₂削減技術の将来像が具体的に登場している。夢タウン2(図1)を参照されつつ、新しい技術がもたらす我が国の未来像として本書を読み進んで頂ければ幸いである。

なお、エネルギーに関わるテーマは多様であるが、本書は全テーマを網羅することは目指していない。よって本書で網羅できていないテーマも多々あり、これらは今後の出版活動であらためて検討されるべきである。この方針をご留意頂きながら、内容を厳しく吟味願いたい。

本書が希望あふれる未来社会への一つの道標となり、読者諸氏の将来展望をより明るくするものであれば幸いである。

(謝辞)本書出版は化学工業会エネルギー部会員、関係諸氏のご理解とご協力により成った。各位に深甚なる感謝の意を表す。とくに骨太のエネルギーロードマップ第2版製作委員会編集幹事である梶川裕矢氏(東大)、菊池康紀氏(東大)、窪田光宏氏(名大)、古山通久氏(九大)、鈴木健雄氏(国際再生可能エネルギー機関(IRENA))、中垣隆雄氏(早大)、福島康裕氏(台湾国立成功大学)、藤岡恵子氏(ファンクショナル・フルイット)、松方正彦氏(早大)の献身的な貢献は重く、ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 加藤之貴、安永裕幸、柏木孝夫監修;化学工業会エネルギー部会・骨太のエネルギーロードマップ第2版製作委員会編「実装可能なエネルギー技術で築く未来—骨太のエネルギーロードマップ2—」,化学工業社(2010)
- 2) 亀山秀雄監修,加藤之貴編集;化学工業会エネルギー部会編,「骨太のエネルギーロードマップ」,化学工業社(2005)
- 3) IMPRES2007, web-page, <http://www.nr.titech.ac.jp/impres/>
- 4) Kato, Y.; *J. Chem. Eng. Japan*, **40**, 1141-1149 (2007)
- 5) IMPRES2010, web-page, <http://impres2010.org/>
- 6) 亀山秀雄監修,加藤之貴編集;化学工業会エネルギー部会編,「骨太のエネルギーロードマップ」改定版,化学工業社(2009)
- 7) 堀尾正毅;実装可能なエネルギー技術で築く未来, pp.49-55, 化学工業社(2010)
- 8) 菊池康紀, 梶川裕也, 福島康裕;実装可能なエネルギー技術で築く未来, pp.17-22, 化学工業社(2010)
- 9) 菊池康紀, 梶川裕也, 福島康裕, 古山通久;実装可能なエネルギー技術で築く未来, pp.23-42, 化学工業社(2010)
- 10) 菊池康紀, 梶川裕也, 福島康裕;実装可能なエネルギー技術で築く未来, pp.313-331, 化学工業社(2010)
- 11) 温室効果ガスインベントリオフィス, 日本の温室効果ガス排出量データ, <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>
- 12) 経済産業省・資源エネルギー庁;総合エネルギー統計, <http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/index.htm>
- 13) エネルギー総合工学研究所;分野別ロードマップ概要, http://www.iae.or.jp/2100/02_RM-j.pdf
- 14) 環境省;低炭素社会構築に向けたロードマップに関するシンポジウム 日本の低炭素社会実現に向けて, http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mlt_roadmap/sympo/sympo100331/mat13.pdf
- 15) 松方正彦;実装可能なエネルギー技術で築く未来, pp.13-16, 化学工業社(2010)