令和 4 年3月10日（奇数月10日発行 第 43 巻 第 2 号・第252号） ISSN 0285-0494 CODEN : ENESEB

エネルギー・資源

ENERGY AND RESOURCES

特集

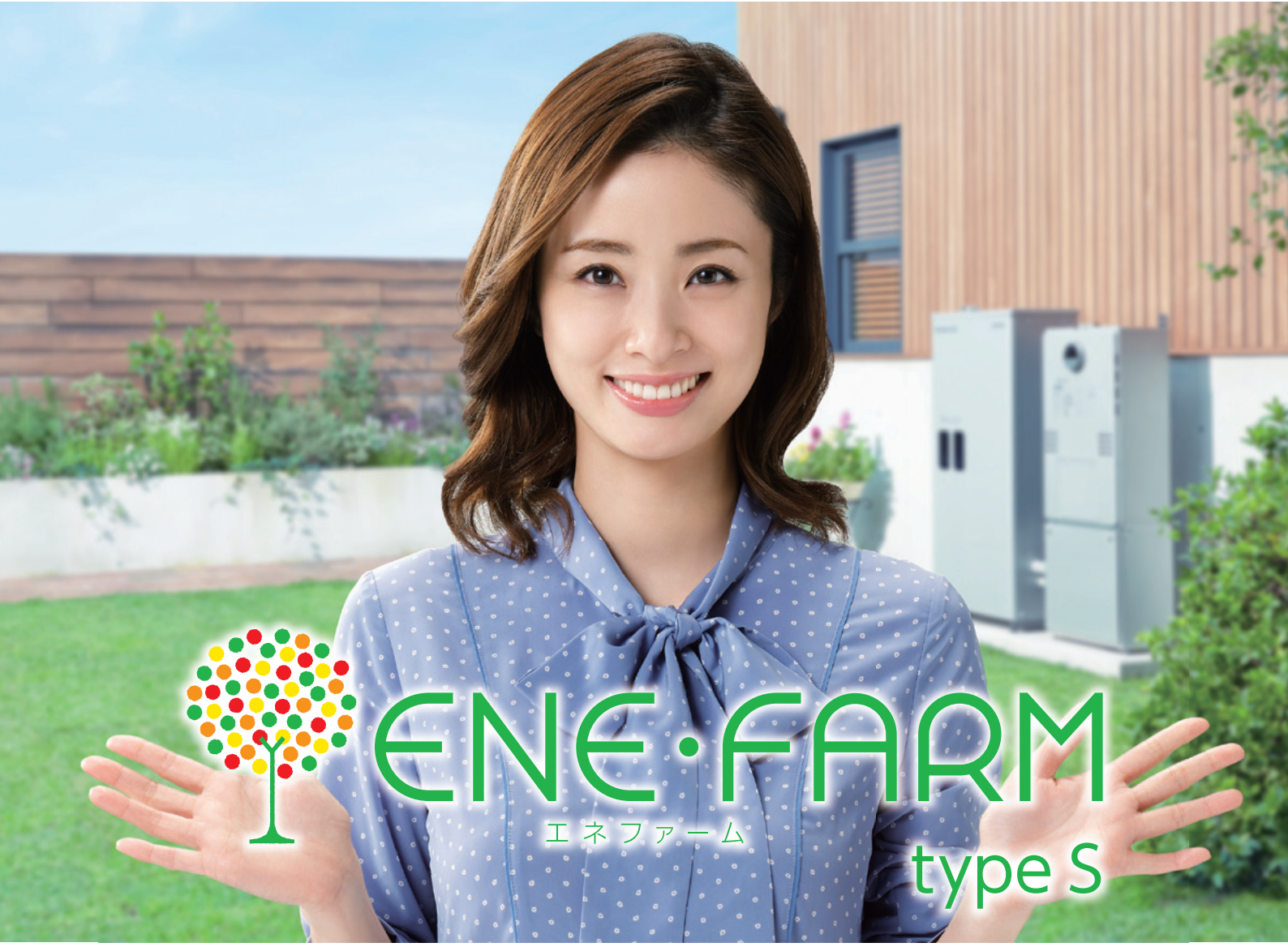
持続可能なまちづくり

2 Vol.43

2022年3月号

－エネルギー・資源と環境の調和を目指して－

一般社団法人
エネルギー・資源学会
JSER Japan Society of Energy and Resources
https://www.jser.gr.jp/



ENE・FARM
エネファーム
type S

電気の購入量 約75%削減

戸建住宅・4 人家族・購入電力量 5,400kWh/ 年の場合
(2020 年 3 月試算)

停電した時もお家で発電

自立運転機能付きエネファーム typeS に限り、専用コンセントから電気を使用できます。発電していない時に停電になった場合等、自立運転に切り替わらない場合があります。ガスが供給されていることが必要です。

大阪ガス

ぐっとそばで、ぐぐっとミライ。

Daigas Group

エネルギー・資源　2022年（令和4年）3月号　Vol.43　No. 2（通巻252号）

目　次

Information

論　説

アジアの視点を世界に …… 山下　ゆかり（日本エネルギー経済研究所）　1

展望・解説

カーボンニュートラルに向けた太平洋セメントの取り組み
…… 星野　清一 / 平尾　宙 / 林　康太郎 / 野村　幸治 / 上野　直樹（太平洋セメント）　3

第6次エネルギー基本計画における再生可能エネルギー導入量についての考察
…… 朝野　賢司（電力中央研究所）　9

特　集　持続可能なまちづくり

（1）特集にあたって …… 鷲津　明由（早稲田大学）/ 高瀬　香絵（CDP Worldwide-Japan）　16

（2）脱炭素化に向けた地方公共団体の取組について …… 澁谷　潤（環境省）　17

（3）自治体新電力の意義と課題 …… 稲垣　憲治（ローカルグッド創成支援機構）　20

（4）能勢・豊能町におけるエネルギーを軸としたまちづくりへの挑戦
…… 榎原　友樹（能勢・豊能まちづくり）　25

（5）生きるを楽しむ西粟倉村の持続可能なまちづくり …… 河野　有吾（エックス都市研究所）　29

（6）進化し続ける街「みなとみらい21」…… 古木　淳（横浜みなとみらい21）　34

（7）ネクステムズが宮古島で目指すカーボンニュートラルへの道 …… 比嘉　直人（ネクステムズ）　39

（8）電力と交通のセクターカップリングによる地域エネルギーマネジメント
ー宇都宮市での取組を中心にー …… 石井　英雄 / 藤本　悠 / 光岡　正隆 / 林　泰弘（早稲田大学）　44

シリーズ特集　明日を支える資源（177）

鉛の特性とその用途および国内循環における鉛二次精錬業の位置付け …… 道本　龍彦（大阪鉛錫精錬所）　49

研究論文要旨　全文は電子ジャーナル（J-STAGE）に掲載　https：//www.jstage.jst.go.jp/browse/jjser/-char/ja

再生可能エネルギーと原子力を用いた水素コジェネレーションの経済性評価
…… 田中　仁海 / 池田　裕一（京都大学）　55

洋上風力発電の出力変動を考慮した世界エネルギーモデルによるカーボンニュートラル実現可能性に関する分析
…… 吉武　宗浩 / 藤井　康正 / 小宮山　涼一（東京大学）　56

自動車部門における統合対策を考慮した長期CO_2排出量推計手法の開発
…… 金成　修一 / 平井　洋 / 鈴木　徹也 / 伊藤　晃佳（日本自動車研究所）　57

研究者・実務者のためのエネルギー・資源講座

＜連載：カーボンリサイクル②＞

CO_2からの燃料の製造 …… 水田　美能（エネルギー総合工学研究所）　58

見　聞　記

バイオマス発電所から排出されるCO_2を分離回収するBECCS対応設備の見学
…… 加藤　悦史（エネルギー総合工学研究所）　63

書　評

資源争奪の世界史 スパイス，石油，サーキュラーエコノミー …… 64

エネルギー産業2030への戦略　Utility3.0を実装する …… 64

技術・行政情報

カーボンニュートラルにおける原子力の役割 …… 福田　桂（三菱総合研究所）　65

談　話　室

オンライン講義 …… 斎藤　聡（東芝エネルギーシステムズ）　66

会報・次号目次　（ⅰ）〜（ⅳ）

ENERGY AND RESOURCES

March 2022　Vol.43　No.2（the 252nd issue）

Contents

Opinion

Let's Be Vocal and Deliver Asia's Voice to the World　Y. Yamashita　1

Prospects, Review

Efforts of Taiheiyo Cement towards Carbon Neutral　S. Hoshino / H. Hirao / K. Hayashi / K. Nomura / N. Ueno　3

A Review on Renewable Energy Scenario in Japan's Strategic Energy Plan　K. Asano　9

Special Issue

Sustainable Cities in Japan

（1）The Aim of the Special Issue “Sustainable Cities in Japan”　A. Washizu / K. Takase　16

（2）Measures by Local Governments for Decarbonization　J. Shibuya　17

（3）Significance and Issues of New Municipal Power Suppliers　K. Inagaki　20

（4）Challenges towards a New Town Development via Energy System Transition　T. Ehara　25

（5）Sustainable Development in Nishiawakura Village with the Aim of “Well-being”　Y. Kohno　29

（6）The Ever-evolving City “Minato Mirai21”　J. Furuki　34

（7）The Road to Carbon Neutrality that NEXTEMS Aims for in Miyakojima　N. Higa　39

（8）City Energy Management by Electricity-Transportation Sector Coupling
—Focusing on Activities in Utsunomiya-city—　H. Ishii / Y. Fujimoto / M. Mitsuoka / Y. Hayashi　44

Series of Special Issue　— Sustainable Resources for the Future（177）—

Lead, its Characteristics, Use, and the Role of Secondary Smelters in Material Circulation in Japan　T. Michimoto　49

Abstracts of Research Papers

Economical Evaluation of Hydrogen Cogeneration by Renewable Energies and Nuclear Energies　H. Tanaka / Y. Ikeda　55

Analysis of the Strategy for Carbon Neutrality with Global Energy Model considering Power Output Variability of Offshore Wind Power Generation　M. Yoshitake / Y. Fujii / R. Komiyama　56

Development of Analysis Method for Long-Term CO_2 Emissions to Consider Integrated Approach in Automotive Sector　S. Kanari / H. Hirai / T. Suzuki / A. Ito　57

Introduction to Energy and Resources for Researchers and Business

＜Carbon Recycle ②＞

Fuel Production from CO_2　H. Mizuta　58

Reports of International Conference, etc.

Field Trip to a Demonstration CO_2 Capture Facility from Biomass Power Plant　E. Kato　63

Book Review　64

Technical and Administrative Information　K. Fukuda　65

Saloon　S. Saito　66

掲載広告主

大阪ガス㈱……表 2　㈱KRI……色 2

ENEOS㈱……表 3　省エネルギーセンター……色 3

㈱NTTファシリティーズ……表 4　カネコ写真製版㈱……色 4

㈱関西電熱……色 1　㈱明電舎……本文対向

原稿種別と投稿に関するご案内

編集実行委員会では，エネルギー・資源・環境等に関わる学界，産業界の発展に寄与する原稿の，会員の皆様からの積極的な投稿を歓迎いたします．

（＊）印の付いている原稿種別について会員の皆様からの投稿を受けつけております．また，2019年１月より，電子ジャーナル「エネルギー・資源学会論文誌」を，国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）が構築した日本の科学技術情報のプラットフォームであるJ-STAGEに移行しました（バックナンバー（2008年１月号～）も全てJ-STAGEに移行しました）．

会誌に関するご意見・ご提案に関しましても事務局あてにお寄せ下さい．

・原稿の送付先：toko@jser.gr.jp（郵送による投稿も可）

・各種問合せ・ご意見等の送付先：webmaster@jser.gr.jp

なお，投稿の詳細については，本会Webサイト「投稿規則・執筆要項」をご覧下さい．

（原稿の種別）

種　　別	内　　容	１件につき基準頁数
論　　説	提案，意見，批評，時評	2
展望・解説（＊）	現状と将来の見通し，研究・技術の総合解説，レビュー	5
特　　集	価値あるトピックスの展望・解説など	5
シリーズ特集	特定のテーマについての展望・解説などを連載	5
研究論文（＊）	オリジナルな研究論文で本会の会誌に掲載するのが適当とみられるもの（本誌にはアブストラクト１頁のみ掲載，電子ジャーナルに本文を掲載）	5 －10
技術論文（＊）	オリジナルな論文で主としてエネルギー・資源・環境に関わる実験や調査の分析結果等を報告するもの（本誌にはアブストラクト１頁のみ掲載，電子ジャーナルに本文を掲載）	5 －10
研究者･実務者のためのエネルギー･資源講座	広範な分野に跨るエネルギー･資源･環境研究の基本的知識について，研究者･実務者を対象とした分かりやすい解説を提供	5 以内
歴史の散歩道	歴史に名を残す人物や出来事に関する読み物	4 以内
見　聞　記	国際会議の報告，内外の研究機関の見学記など	3
活動報告	エネルギー・資源学会で行った活動の報告など	3
書　　評	価値ある新刊図書の紹介	0.5
グループ紹介	企業，研究機関，大学等のグループ紹介	1
技術・行政情報	価値ある技術・行政情報の簡潔な解説	1
談　話　室	会員相互の情報交換，会員の自由な声，随想など	1

（注意事項）

１．原稿の採否については，編集実行委員会（原則として年６回，偶数月に開催）で審査の上，決定する．

２．研究論文および技術論文については，会誌へのアブストラクト掲載料ならびに電子ジャーナルへの本文掲載料を，細則に従い徴収する．別刷は，希望がある場合に実費で提供する．

３．研究論文および技術論文以外の投稿原稿については，細則に従い掲載料を徴収し，掲載原稿のPDFファイルを進呈する．別刷は，希望がある場合に実費で提供する．

４．原稿は，本会Webページ内に掲載されている「投稿規則」および「執筆要項･テンプレート（会誌掲載版，電子ジャーナル版）」に従って執筆するものとする．

編集実行委員長　藤　井　康　正
（東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻教授）

電気式熱風発生機の老舗が生み出した

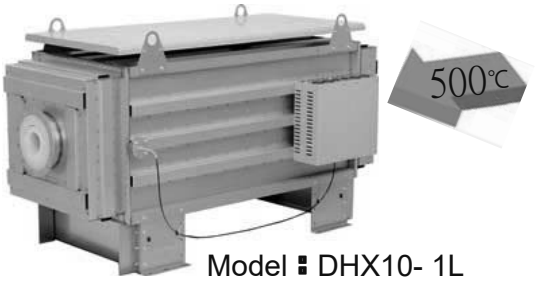
質実剛健 な製品と技術

あらゆる現場の要求に挑み続けます！
社内実験できます。
デモ機あります。

PAT. 申請中

唯一無二

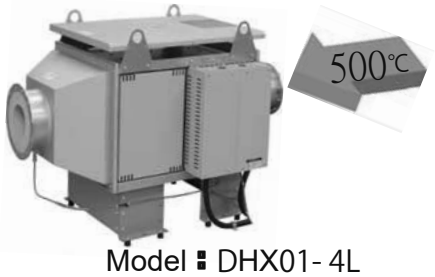
連続使用最高熱風温度 1200℃ DHX10 シリーズ 大容量タイプ



Model ▪ DHX10- 1L

◎ 専用制御盤にて 1000℃まで予熱運転が可能
安全かつ短時間で 1200℃到達できます。
◎ 充分な断熱構造：本体表面温度 80℃以下
◎ ラインナップ： 28kW ～ 720kW（８機種）
◎ 本体概略寸法：W850×D1550×H870 (DHX10-1L)
◎ 本体ケース耐圧：約 30kPa 以下

連続使用最高熱風温度 700℃ DHX01 シリーズ 大容量タイプ



Model ▪ DHX01- 4L

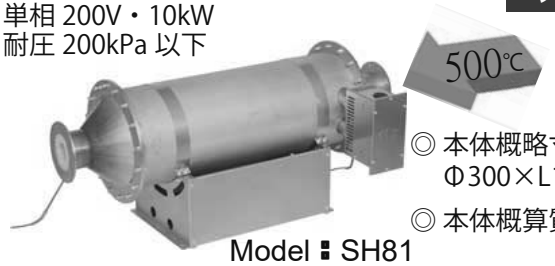
◎ 専用制御盤にて 600℃まで予熱運転が可能
安全かつ短時間で 700℃到達できます。
◎ 従来品ブロックヒータより軽量・コンパクト
◎ ラインナップ：20kW ～ 480kW (9 機種)
◎ 本体許容圧力：約 30kPa 以下

スポット加熱で
消費電力削減！

きっと見つかる豊富な選択肢

最高 1000℃ SH81 コンパクトタイプ

単相 200V・10kW
耐圧 200kPa 以下

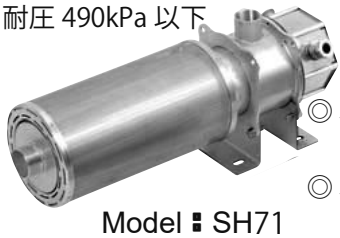


Model ▪ SH81

◎ 本体概略寸法：
Φ300×L1000 ※筒状部
◎ 本体概算質量：80 kg

最高 800℃ スーパーヒータ

3kW ～ 20kW
耐圧 490kPa 以下



Model ▪ SH71

◎ 本体概略寸法：
Φ140×L680 ※筒状部
◎ 本体概算質量：17 kg

最高 800℃ スポットヒータ

0.55kW ～ 3kW
490kPa 以下

Model ▪ SH31

最高 800℃ SHPヒータ

4.5kW ～ 10.5kW
200kPa 以下

Model ▪ SHP40

最高 750℃ スリムタイプ ペンヒータ

0.4kW ～ 0.8kW
490kPa 以下

Model ▪ PH22

豊富な販売実績と技術を、お客様の要望を満たすようにコンサルタントを提供します（無料）

お客様のニーズにすばやく対応 !!

MADE IN JAPAN

製造 販売元 株式会社 関西電熱

本　社：TEL06-6785-6001　〒577-8566 大阪府東大阪市高井田西5丁目4番18号
東京支社：TEL03-5710-2001　〒144-0035 東京都大田区南蒲田2丁目4番4号

http://www.kansaidennetsu.co.jp

資料№2022/01/05

KRI

Your Innovation Partner

電池・キャパシタ／蓄電システム開発
研究開発、評価、分析、調査を受託

KRIは、皆様の研究開発パートナーとして、研究開発・事業をサポートします。
まずは、お困りごとをお聞かせください。

■ リチウムイオン電池、リチウムイオンキャパシタ、蓄電システム及び関連デバイス・制御技術をテーマに、300社を超えるクライアント様からの受託実績

■ KRI保有の劣化解析技術、寿命（SOH）推定技術、安全性技術の有効利用により、使われ方に対する電池価値を判断します（リユース電池の付加価値を考える）

エネルギー変換研究部では、『WEB展示会』を開催しております。
さまざまな電池・蓄電システム技術を紹介しています。

http://www.kri-inc.jp/ecl-exhibition/

KRI エネルギー変換研究部 TEL：075-315-9259　mail: kri-energy@ml.kri-inc.jp

株式会社 ＫＲＩ　URL: http://www.kri-inc.jp　E-mail: inform@ml.kri-inc.jp

【本社・受託研究】　TEL 075-322-6830（代）　〒600-8813　京都市下京区中堂寺南町134　京都リサーチパーク

●新規テーマ提案型の研究開発　●問題解決型の研究開発

—主な研究領域—

燃料電池、環境、プロセス、蓄電デバイス、水素・バイオ燃料、触媒、システム評価
計測、制御、解析、シミュレーション、ナノ材料合成（ゾル-ゲル、ハイブリッド）
ナノ制御、ナノプロセス、機能材料、精密合成、光材料、光デバイス

【材料解析・分析評価】　TEL 06-6466-4555（代）　〒554-0051　大阪市此花区酉島6丁目19番9号　大阪ガス（株）

●問題解決型分析・試験・解析

●受託分析　：　環境分析、有機分析、無機分析、構造解析、バイオ分析、材料試験評価

事業者視点で解説した管理標準作成マニュアル、 **好評発売中!!**

新版 攻めの「管理標準」の作り方

管理標準の作成が事業者のエネルギー管理にとって、いかに大切か、意義、狙いを明確にし、事業者視点でその作成のポイントを豊富な事例とともにわかりやすく解説した。平成30年省エネ法改正に対応。

省エネルギーセンター編
●B5判　**216頁**　定価(**3,500**円+税)

第１章　エネルギー管理の基本
1．エネルギー管理の基本的なフローを理解する！
（1）エネルギー管理の流れ
（2）エネルギー管理、各ステップの概要
STEP 1　現状の把握、管理体制の基盤
STEP 2　エネルギー管理の実践
STEP 3　実績把握と分析①　並びに改善改造の実行
STEP 4　実績把握と分析②　並びに中長期計画の策定と実行
2．事業者におけるエネルギー管理各層の役割
3．エネルギー使用実態を知る
（1）エネルギー購入・使用実態の把握
（2）エネルギーフロー、エネルギーバランス整理の考え方
（3）エネルギーフローとエネルギーバランス作成の例
（4）より詳細な実績把握と分析

第２章　エネルギー管理規程の作成
1．管理規程と管理標準とは
2．管理規程作成の考え方
3．管理規程の構成と主たる内容
（1）管理規程の構成
（2）事業者全体の管理規程に定めるべき事項
（3）工場等の管理規程と判断基準
a．マネージメント部分の規程
b．個別設備・機器に関する規程
（4）個別設備・機器のまとめ方は？

第３章　管理規程の具体的作成例
1．事業者全体の管理規程例
●産業部門 全社エネルギー管理規程例
●エネルギー管理委員会規定
2．事業所エネルギー管理規程
事業所エネルギー管理規程例　事業所管理編
●神奈川事業所エネルギー管理規程
3．個別プロセス・設備の管理規程例
（1）代表的設備のエネルギー管理の考え方
（2）個別プロセス・設備の管理規程例
①燃焼式加熱炉，②蒸気式乾燥機，③射出成型設備，④鋳鉄溶解炉，⑤印刷乾燥機，⑥冷凍・冷蔵倉庫，⑦給食センター設備，⑧リネンサプライ設備，⑨受変電・配電設備，⑩圧縮空気設備，空気系統，⑪蒸気ボイラ，⑪-1 ボイラ空気比，⑪-2 ボイラ設備　保全基準，⑫真空式ボイラ給湯設備，⑬空調用EHPモジュールチラー，⑭ガス焚き吸収式冷温水機，⑮ターボ冷凍機，⑯GEコジェネレーション，⑰ポンプ，ファン設備，⑱工場照明設備
4．業務部門の管理規程例
●業務部門　全社エネルギー管理規程
業務部門　個別設備・機器管理規程例
①空気調和設備，②照明設備，③給湯設備，④ターボチラー設備

第４章　判断基準の内容を理解する
1．判断基準の構成
2．基準部分各項目の解説
【Ⅰ-1 すべての事業者が取り組むべき事項】
【Ⅰ-2 工場単位・設備単位で取り組むべき事項】
【Ⅱ-2「専ら事務所」の判断基準のポイント】
【Ⅱ-2「工場等」の判断基準のポイント】
3．判断基準におけるよくある質問

参考資料
1．工場等におけるエネルギーの使用の合理化に関する事業者の判断基準　平成30年3月30日経済産業省告示第59号
○Ⅰ エネルギーの使用の合理化の基準
○Ⅱ エネルギーの使用の合理化の目標及び計画的に取り組むべき措置
○別表第１ 空気比，○別表第２ 廃ガス温度，廃熱回収率，発電効率，○別表第３ 炉壁外面温度，○別表第４ 力率を向上すべき設備，○別表第５ ベンチマーク指標
2．工場等判断基準の項目番号記載例

〔付録／管理規程作成簡易チェックリスト〕

一般財団法人省エネルギーセンター　出版・コンテンツ部
〒108-0023　東京都港区芝浦2-11-5 五十嵐ビルディング
TEL.03-5439-9775　FAX.03-5439-9779　https://www.eccj.or.jp/book/

カネコ。
ネットワーク。
コミュニケーション。

私たちカネコ写真製版は、
印刷に関するさまざまな分野での
企画・制作／デジタル加工／印刷／配送まで、
トータルなサポートをさせて頂いております。

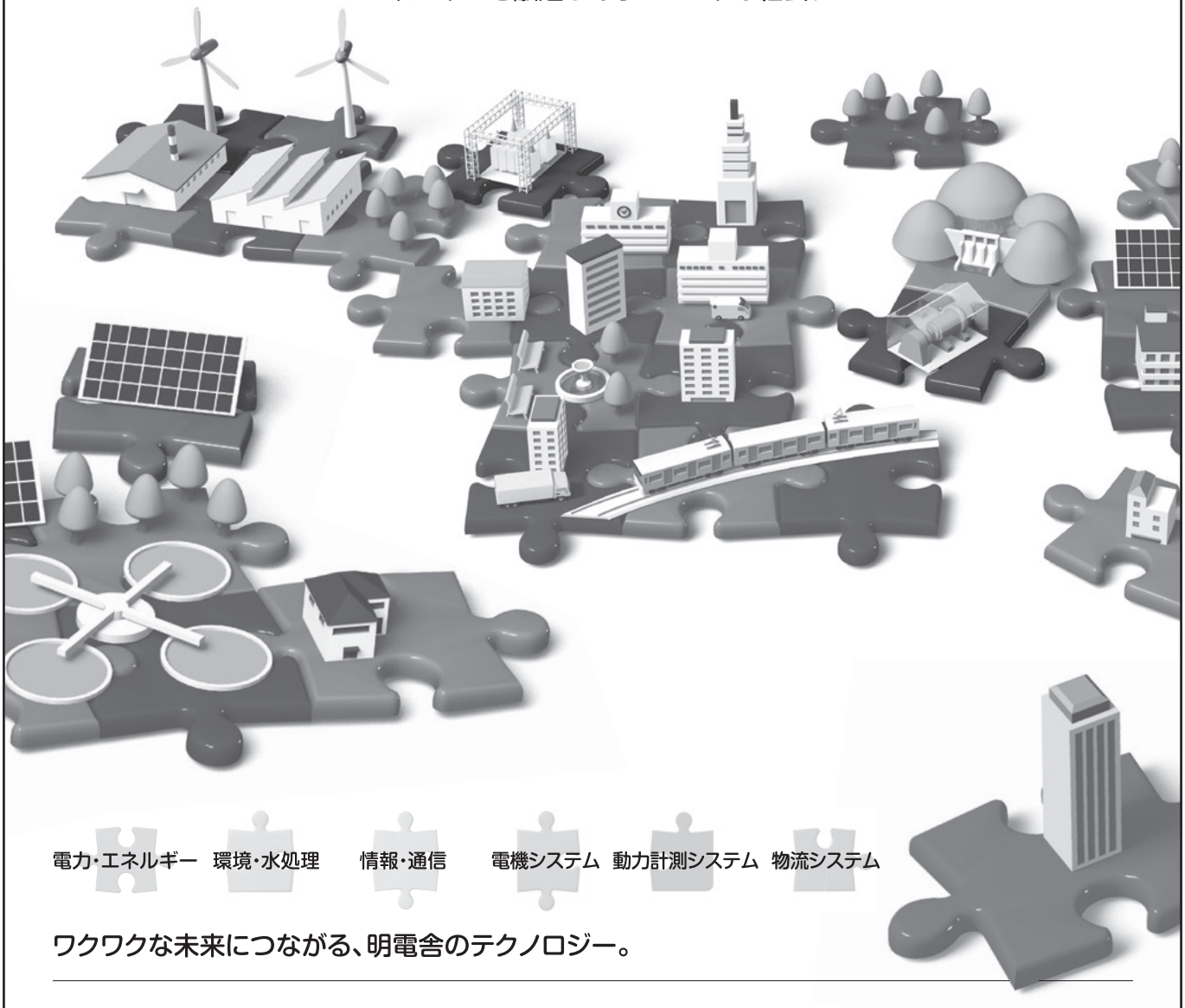
カネコ写眞製版株式会社

〒534-0027 大阪市都島区中野町2丁目2番4号
TEL 06-6352-4992　FAX 06-6352-4994
E-mail:kanesya@gold.ocn.ne.jp

MEIDEN
Quality connecting the next

ワクワクがいっぱい、明電舎のテクノロジー。

蛇口から流れるきれいな水。
今日も安全に街を走る自動車。
太陽光、水力などによる再生可能エネルギーの有効利用。
エネルギーを融通しあうスマートな社会。



電力・エネルギー　環境・水処理　情報・通信　電機システム　動力計測システム　物流システム

ワクワクな未来につながる、明電舎のテクノロジー。

株式会社　明電舎　〒141-6029 東京都品川区大崎2-1-1 ThinkPark Tower　明電舎　検索

Information

エネルギー・資源学会行事・会議予定（2022年3月10日以降）

3月18日（金）	第3回理事会
4月12日（火）	第1回編集実行委員会
4月25日（月）～26日（火）	2022年度エネルギー施設の災害・安全対策研究会（福島）（＊）
6月16日（木）	令和4年度定時社員総会/第1回エネルギー政策懇話会（大阪）（＊）
8月8日（月）～9日（火）	第41回エネルギー・資源学会研究発表会（東京）（＊）

（＊）は本号Informationで詳細ご案内しています．

「エネルギー・資源」最近の特集

246号（Vol. 42 No. 2）「脱炭素への道をつなぐ天然ガスの新規・高度利用」

247号（Vol. 42 No. 3）「2050年のエネルギー需給」

248号（Vol. 42 No. 4）「温暖化対策と電力系統安定化に寄与する水力発電」

249号（Vol. 42 No. 5）「アンモニア合成の新展開」

250号（Vol. 42 No. 6）「エネルギー分野におけるデジタル技術活用①（供給サイド）」

251号（Vol. 43 No. 1）「エネルギー分野におけるデジタル技術活用②（需要サイド）」

※会誌のバックナンバーを実費にて送付していますので，事務局までお申し込み下さい．

※会誌「エネルギー・資源」はWebからも閲覧いただけます．正会員・学生会員・特別会員（ご担当者）はMYページよりご利用下さい．特別会員でご担当者以外の方は，閲覧希望者に閲覧用パスワードを配信しています．

●複写，転載をご希望の方へ

本会は，本誌ならびにJ-STAGE上のエネルギー・資源学会論文誌に掲載している研究論文ならびに技術論文（以下，委託記事）の複写複製および転載複製に係る著作権の管理を一般社団法人学術著作権協会に委託しています．

本誌に掲載された委託記事の複写，転載をご希望の方は，学術著作権協会（https://www.jaacc.org/）が提供している複製利用許諾システムもしくは転載許諾システムを通じて申請下さい（直接本会へお問い合わせいただくことも可能です）．但し，企業等法人による社内利用目的の複写については，当該企業等法人が公益社団法人日本複製権センター（学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては，その必要はございません（社外頒布目的の複写については，許諾が必要です）．

権利委託先：一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F

TEL：03-3475-5618 FAX：03-3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

委託記事以外の本誌掲載物に関する著作権につきましては，本会へ直接お問い合わせ下さい．

一般社団法人 エネルギー・資源学会
令和４年度定時社員総会開催のお知らせ

会員の皆様には，平素より本会の活動に何かとご協力を賜り，厚く御礼申し上げます．

さて，来る６月16日（木），大阪科学技術センター（大阪市西区）にて，令和４年度定時社員総会を開催します．

また，総会に引き続き第１回エネルギー政策懇話会を開催します．

是非とも併せてご参加下さい．

〔日　時〕2022年６月16日（木）13：20～14：20

〔会　場〕大阪科学技術センター４階403号室（大阪市西区靱本町1-8-4）

＊技術交流会（エネルギー政策懇話会と合同開催）は未定．

〔同日開催行事〕（詳細は，本号会告３頁および本会Webサイト参照）

＊第１回エネルギー政策懇話会「本格化するVPP（バーチャルパワープラント）ビジネス」

〔日　時〕2022年６月16日（木）14：40～17：00　懇話会
17：00～18：30　交流会（未定）

〔会　場〕大阪科学技術センター４階404号室

2022年度第1回エネルギー政策懇話会参加ご案内
「本格化するVPP（バーチャルパワープラント）ビジネス」

世界的に求められている温室効果ガス排出の大幅な削減のためには，再生可能エネルギーの主力電源化を進めつつ徹底した省エネルギーを図る必要があります．その実現に向けて，分散型の多様なエネルギー需給リソースを活用するバーチャルパワープラント（仮想発電所，VPP）の重要性がますます高まっており，欧米では先行して諸制度が整備されて，エネルギーリソースを制御するアグリゲーション事業などが商用化に至っています．

日本においても，ハードとソフトの両面からの技術実証の段階を終え，さらに近年，ネガワット取引市場の創設，需給調整市場・容量市場のしくみの導入が行われるとともに2022年度からはFIP（Feed-in-Premium）制度が開始されるなど制度面の充実が図られたことから，VPP関連ビジネスが本格化することになります．そこで本エネルギー政策懇話会は，これまでの日本におけるVPP実証の成果と課題を振り返るとともに，先行する欧州等の事業環境や実績などを踏まえつつ今後のVPPビジネスの動向を展望する機会としたく思います．皆様方の多数のご参加をお待ちしております．（話題提供者の詳細は追って本会Webサイトでお知らせします）

なお，新型コロナウイルスの感染状況等によっては，オンライン開催とする場合，あるいはリアル開催でも交流会を行わない場合がありますことをご了承下さい．

〔主　催〕一般社団法人エネルギー・資源学会
〔日　時〕2022年6月16日（木）14：40〜17：00　懇話会
17：00〜18：30　交流会（未定）
〔会　場〕大阪科学技術センター4階404号室（大阪市西区靱本町1-8-4）
〔交　通〕大阪メトロ四つ橋線「本町駅」28番出口より北へ徒歩5分，
大阪メトロ御堂筋線「本町駅」2番出口より西へ徒歩8分
〔司　会〕立命館大学 政策科学部政策科学科教授　小杉　隆信
関西電力株式会社 研究開発室研究開発部長　冨岡　洋光
〔次　第〕＊14：40〜14：45　挨拶　エネルギー・資源学会副会長，懇話会世話人代表　下田　吉之
＊14：45〜15：00　参加者自己紹介
＊15：00〜15：30《話題提供（1）》
…東芝ネクストクラフトベルケ株式会社
＊15：30〜16：00《話題提供（2）》
…関西ＶＰＰプロジェクト関係者（調整中）
（16：00〜16：10　休憩）
＊16：10〜17：00　意見交換
＊17：00〜18：30　交流会
〔定　員〕40名程度
〔参加費（消費税込）〕参加は，本会の正会員・特別会員に限る．産業界11,000円，大学・官公庁5,500円
※交流会開催の場合　参加費　2,200円
〔支払方法〕①銀行振込　りそな銀行御堂筋支店（普）No.1024046　②郵便振替　00930-5-302948
〔申込方法〕本会Webサイト「各種行事」＞「懇話会」からお申し込み下さい．参加証はメールで，請求書などは郵送でお送りします．参加証は当日ご持参下さい．
また，話題提供資料は，参加者限定で事前に閲覧・ダウンロードのアドレスをお知らせしますので，申込時にE-mailアドレスをお知らせ下さい．
〔問合せ先〕〒550-0003 大阪市西区京町堀1-9-10（リーガルスクエア京町堀）
一般社団法人エネルギー・資源学会 事務局（https://www.jser.gr.jp/）
TEL 06-6446-0537　E-mail：gyoji@jser.gr.jp

2022年度 エネルギー施設の災害・安全対策研究会参加ご案内

「福島第一,第二原子力発電所の廃炉作業とエネルギー関連施設,および周辺地域の復興状況の見学」

2021年8月に取り纏められた第6次エネルギー基本計画では,「東日本大震災及び東京電力福島第一原子力発電所事故から11年を迎え,東京電力福島第一原子力発電所事故の経験,反省と教訓を肝に銘じて取り組むことが,エネルギー政策の原点」とし,「福島の復興・再生に全力で取り組むことは,これまで原子力を活用したエネルギー政策を進めてきた政府の責務であり,今後も原子力を活用し続ける上では,「安全神話」に陥って悲惨な事態を防ぐことができなかったという反省を一時たりとも忘れることなく,安全を最優先で考えていく」と明記されました.そのため,新たな基本計画では,エネルギー政策の視点をS+3EとSを最優先に考えると定義付け,より一層の安全性確保と,福島の復興・再生に取り組んでいく政府の姿勢が示されております.

今回は,震災から11年を経た現在,福島第一・第二原子力発電所の廃炉に向けた取り組みや,周辺地域における復旧,ならびにエネルギー関連事業等を含めた再生の状況を知ることで,今後の原子力技術活用のあり方について考える一助となる現地視察を実施致します.また,宿泊施設において東京電力スタッフと参加者との意見交換会も予定しておりますので,皆様方の参加をお待ちしております.

なお,今回は2月予定であった研究会の延期による開催であるため,先に申込されていた方に優先して参加いただきますので,予めご了承下さい.

〔日　時〕 2022年4月25日（月）～26日（火）　　**〔定　員〕20名**

〔見学先〕 ＊福島第一原子力発電所
＊福島第二原子力発電所
＊東日本大震災・原子力災害伝承館
＊東京電力廃炉資料館
＊JAEA楢葉モックアップセンター,とみおかアーカイブ・ミュージアム　等
（注）原子力発電所以外の見学先については,施設の状況によって変更になる可能性がありますが,ご了承下さい.

〔集合場所・時間〕JRいわき駅南口　10：30集合
※参考 ひたち3号 上野8：00発 → いわき駅10：23着

〔コーディネーター〕一般財団法人日本エネルギー経済研究所理事,
電力・新エネルギーユニット担任　工藤　拓毅

〔**スケジュール**〕※移動は，貸切バスを利用，時差は移動時間

4月25日（月）

10：40～11：30　バスで移動
11：30～12：45　昼食（楢葉町サイクリングターミナル）
13：00～15：20　福島第二原子力発電所見学
15：50～17：00　東日本大震災・原子力災害伝承館見学
17：50　Ｊヴィレッジ（到着後，施設見学，夕食，意見交換会）

4月26日（火）

8 ：30　Ｊヴィレッジ出発
9 ：00～12：40　福島第一原子力発電所見学
12：45～13：30　昼食（冨岡ホテル）
13：30～14：30　廃炉資料館見学
14：40～15：30　とみおかアーカイブ・ミュージアム見学
16：30　JRいわき駅前にて解散

※参考　JRいわき駅　17：21発　ひたち24号 → 東京駅　19：43着
※交通事情により到着が遅れる場合があります.

〔**宿 泊 先**〕　Ｊヴィレッジ（双葉郡楢葉町山田岡美シ森８，TEL 0240-26-0111）

〔**参加費（消費税込）**〕正会員・特別会員 40,000 円，学生会員 20,000 円，非会員50,000円
（宿泊代（１泊２食），貸切バス代，昼食代（２回）等含む）

〔**申込締切**〕 **2022年３月18日（金）（定員に達した時点で受付を終了します）**

〔**支払方法**〕 ①銀行振込　りそな銀行御堂筋支店（普）No.1024046　②郵便振替　00930-5-302948

〔**申込方法**〕 本会Webサイト「各種行事」>「安全対策研究会」からお申し込み下さい.参加証はメールで，請求書などは郵送でお送りします．参加証は当日ご持参下さい．なお，原子力発電所見学にあたり，書類提出のお願いおよび以下の事項を含めた注意事項について，お申込後改めてご案内いたします.

※注意事項
（１）原子力発電所を見学しますので，参加申込後，個人情報の提供をお願いします.
（２）身分証明書（①運転免許証，②パスポート，③マイナンバーカード（写真付き），④写真付き住民基本台帳カード（※有効時まで），⑤在留カード（特別永住者証明書含む）のいずれか）の原本（写しは不可）のご持参・携行をお願いします.
※社員証等では入構できませんのでご注意下さい.

〔**申込・問合せ先**〕〒550-0003 大阪市西区京町堀1-9-10（リーガルスクエア京町堀）
一般社団法人エネルギー・資源学会 事務局
TEL 06-6446-0537　FAX 06-6446-0559　E-mail：gyoji@jser.gr.jp

第41回エネルギー・資源学会研究発表会
研 究 発 表 募 集

本会は，エネルギー，資源，環境を巡る諸課題に長期的な視点から取り組むため，それら全般に通暁する幅広い知識を有する人材だけでなく，それぞれの領域的な専門分野で活躍する多くの研究者が，個別の専門領域や産官学の枠を越えて情報交換や議論を行う場を提供してきました．

そのような中，更なる研究の発展と技術交流を期す場として，第41回エネルギー・資源学会研究発表会を2022年8月に開催します．

なお，本会では，本研究発表会と1月のコンファレンスにおいて優秀な研究業績をあげた若干名（個人）に「茅賞」，「学生発表賞」を授与します．当該分野の研究・開発に携わっておられる大学，研究機関，企業等からの多数の発表をお待ちしております．

また，研究発表会およびコンファレンスの講演論文を，J-STAGEに掲載される「エネルギー・資源学会論文誌」の研究論文・技術論文として同時投稿できる制度を設けております．但し，受付の可否については査読委員会の事前審査で決定され，受付後は，研究論文・技術論文と同様の査読プロセスにより採否が決定します．同時投稿の受付が不可の場合でも，研究発表会の口頭発表には影響ありません．

2022年3月10日

一般社団法人エネルギー・資源学会　企画実行委員長　　松橋　隆治

1．研究発表会の概要

〔期　　日〕2022年8月8日（月）～9日（火）

〔会　　場〕東京（東京大学駒場Ⅰキャンパス）

※新型コロナウイルス感染症感染拡大防止のため，オンライン開催に変更になる場合があります．

2．研究発表の募集

〔研究内容〕

エネルギー・資源・環境に関する研究開発

（内容はオリジナルのものが望ましい．研究論文・技術論文として同時投稿する場合はオリジナルに限る）

①一般セッション

【資　　源】 1．化石燃料資源　2．原子力　3．再生可能エネルギー
4．廃棄物　5．その他資源

【エネルギー需給】 6．国際エネルギー需給（我が国を含む）　7．地域エネルギー需給
8．部門別エネルギー需要（民生，交通等）　9．エネルギー経済

【エネルギー変換・輸送システム】 10．電力システム　11．高効率発電（燃料電池含む）
12．液化・ガス化　13．水素　14．エネルギー貯蔵

【エネルギー利用システム】 15．コージェネレーション　16．ヒートポンプ　17．省エネルギー

【環　境　問　題】 18．地球温暖化　19．環境問題一般

【制　度　問　題】 20．エネルギー市場改革　21．エネルギー政策　22．循環型社会

【そ　の　他】 23．防災　24．エネルギー教育（ESDを含む）　25．その他（セッション名をご提案下さい）

※プログラム編成の参考にしますので，発表の希望セッションを上記より選択のうえ，発表申込の際，ご記入下さい．但し，プログラム編成や発表内容により希望セッション以外でお願いすることがあります．

②企画セッション

＊企画提案者としてのオーガナイザーを１名立て，セッション名，趣旨・目的，発表予定者と題目・発表内容要旨などを添えて発表申込をして下さい．発表件数は，４～６件程度としますので，周りの方に声をかけていただき，積極的にご応募下さい．

※これまでの企画セッションの例

・2050年に向けた日本のエネルギー需給　　・家庭部門のCO_2排出実態統計調査

・地域エネルギーシステムのデザイン　　・エネルギーチェーンによる環境性と経済性の評価

＊企画セッションとして採択されなかった場合は，一般セッションの個別発表に変更することもあります．

＊研究発表会参加費以外の費用は必要ありません．

〔発表資格〕

＊本会会員（正会員・学生会員・特別会員）とする．

（未加入の方は必ずご入会のうえお申込み下さい．研究発表の連名は特に制約を設けておりません）

〔講演論文〕

＊頁数は，申込受付後にご案内する作成方法のテンプレートでの枚数です．

・口頭発表のみの場合：刷り上がり２～６頁

・同時投稿をする場合：刷り上がり５～10頁

＊同時投稿を希望される場合，以下の原稿種別を参照の上，研究論文か技術論文かを選択下さい．

種　別	内　　容	基準頁数
研究論文	オリジナルな研究論文で本会の会誌に掲載するのが適当とみられるもの （会誌にはアブストラクト１頁のみ掲載，電子ジャーナルに本文を掲載）	5 －10
技術論文	オリジナルな論文で主としてエネルギー･資源･環境に関わる実験や調査の分析結果等を報告するもの （会誌にはアブストラクト１頁のみ掲載，電子ジャーナルに本文を掲載）	5 －10

＊講演論文集は，本会Webからのダウンロード方式としますが，希望者にはCD-ROM版も配布します．

＊発表申込時に提出いただく発表内容要旨（200文字以内）をプログラムを兼ねた形式で公開・配布しますので，申込時にはご留意下さい．

〔発表採否〕

＊採否は発表申込書の内容に基づき本会で決定します．なお，提出された原稿により採否を見直す場合があります．

〔発表時間〕 １件につき15～20分程度（質疑・討論を含む）

〔参 加 費〕 本会Webサイト「各種行事」＞「研究発表会」（５月末）並びに会誌2022年７月号掲載のinformation「研究発表会参加案内」でお知らせします．

〔発表申込方法〕 本会Webサイト「各種行事」＞「研究発表会」＞「研究発表募集」からお申し込み下さい．

〔発表申込締切日〕 2022年４月15日（金）（厳守）

〔原稿締切日〕 2022年６月15日（水）（厳守）

＊期日までに未提出の場合は，発表を取り消すこともあります．

〔申込・原稿送付先〕 一般社団法人 エネルギー・資源学会 事務局宛

〒550-0003大阪市西区京町堀1-9-10（リーガルスクエア京町堀）

TEL 06-6446-0537　FAX 06-6446-0559　E-mail：ken-happyo@jser.gr.jp

2022年度エネルギー政策懇話会
年間参加登録のご案内

「エネルギー政策懇話会」は，企業の経営層や各界の専門家の方々に参加いただき，エネルギー・資源・環境・経済分野に係わる諸課題を様々な角度から議論しつつ，会員相互の交流を図る場として，2007年度から開催して参りました．

2022年度も下記年間予定のとおり，当該分野に関連する様々なテーマの最新動向について話題提供をいただくとともに，参加者による自由闊達な議論と交流を行う懇話会として引き続き開催します．

なお，リアル開催を目指しておりますが，新型コロナウイルス感染症の状況，社会情勢を鑑み，オンライン開催になる場合があります．

会員各位におかれましては，趣旨にご賛同のうえ，多数ご参加いただきますようご案内申し上げます．

2022年3月吉日

一般社団法人 エネルギー・資源学会 副会長，懇話会世話人代表　　下田　吉之

〔**実施概要**〕＊年6回（東京3回，大阪2回，名古屋1回）開催．各地域の世話人により開催．コロナ禍が続いている場合は，オンライン開催となります．

＊原則15時から17時までに2名の方からの話題提供，そして参加者による意見交換．その後の交流会開催についてはコロナ禍の状況を見ながら実施を検討します．

〔**年間予定テーマ**〕**※開催テーマは，変更する場合があります**

第1回	**本格化するVPP（バーチャルパワープラント）ビジネス**	（6月16日（木），大阪）
第2回	**気候変動予測シミュレーション**	（7月，東京）
第3回	**脱炭素のLCAやWell to Wheel評価**	（9月，名古屋）
第4回	**洋上風力**	（11月，東京）
第5回	**グリーンイノベーション基金**	（1月，大阪）
第6回	**地域ベースのカーボンニュートラル戦略**	（3月，東京）

〔**定　　員**〕＊40名程度（本会の正会員および特別会員に限ります）

※但し，オンライン開催になった場合は80名

〔**参加費（消費税込）**〕

＊原則として年6回の年間申込で，1名55,000円（代理出席可）

（交流会開催が可能になった場合は，別途参加費をお願いします）

〔**申込方法**〕＊本会Webサイト「各種行事」＞「懇話会」からお申込み下さい．

〔**問い合わせ先**〕

〒550-0003 大阪市西区京町堀1-9-10（リーガルスクエア京町堀）

一般社団法人 エネルギー・資源学会　事務局

TEL 06-6446-0537　FAX 06-6446-0559　E-mail：gyoji@jser.gr.jp

論　説

アジアの視点を世界に

Let's Be Vocal and Deliver Asia's Voice to the World

山　下　ゆかり*
Yukari Yamashita

1．気候変動問題への対応と分断の拡大

2021年秋のCOP26では各国の炭素中立宣言が相次いだ一方で，先進国と途上国の分断が垣間見えた．持つものと持たざるもので命運がわかれるCOVID-19対応で進みつつある南北分断が，気候変動問題対応においても拡大する兆しを見せている．

そしてその分断は先進国対途上国にとどまらず，先進国間でも途上国間でも資源や技術力の有無，各国の中でもローカルなエネルギー供給システムの強弱や高価になりつつあるエネルギーを購入できるかできないかという個人レベルでの持てる者，持たざる者の分断が深刻化しつつある．

欧州が様々な域内ルール策定や金融界への働きかけでリードして，気候変動対策を押し進める中，企業は国際的な金融ルールに従う形で相次いでCN（炭素中立）宣言やTCFD（Task Force on Climate-related Financial Disclosures），RE100（Renewable Energy 100%）といった活動に参加しているが，国内の政策や体制支援が整わない中，欧州に翻弄される中での投資決定の難しさを実感している．

2．エネルギー安全保障を脅かす新たな火種

問題は，欧州が「再エネを持つ者」として再エネ重視の政策を推進するだけでなく，タクソノミーや国境調整措置の導入等で国際的な影響力を高めている点である．一方で，声高に主張することはないが，移行期において引き続き重要な化石資源を豊富に有するロシアや中東の影響力は大きい．投資家や金融セクターからのプレッシャーに応じ，消費国の選択肢を狭める形でメジャーズなどのエネルギー企業が上流投資から撤退し，同様のプレッシャーを受けない国営エネルギー企業による化石燃料資源の寡占化が進む状況はエネルギー安全保障の観点からも好ましくない．

図1は日本エネルギー経済研究所のIEEJ Outlook 2022の分析から石油上流への新規投資が停止されたと想定した場合の石油の需給バランスを示している．既存の石油資源は毎年4％のペースで減退するとして，アウトルックの「レファレンスシナリオ」及び想定される最大限のエネルギー・環境技術の導入を想定した「技術進展シナリオ」の石油需要と比較すると，足元では高水準の余剰生産能力があるものの，早ければ2024年には石油需要が徐々に減退する「技術進展シナリオ」においても世界の石油需給バランスは供給不足・需要超過になる．

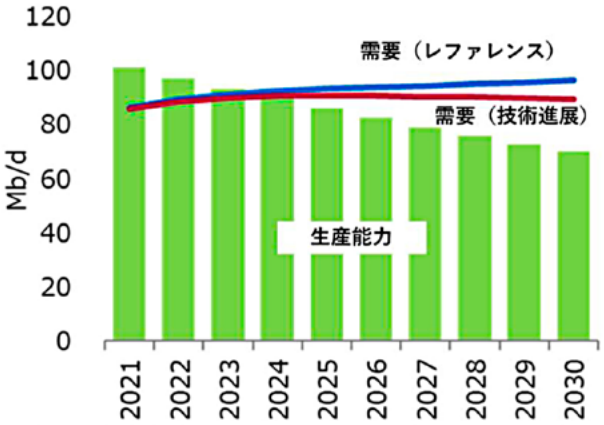


図1　新規投資停止時の原油生産能力と需要のバランス
（出所）日本エネルギー経済研究所；IEEJ Outlook 2022, p.134

これはあくまでも既存の生産能力をフルに活用した場合であるため，実際にはそれよりも早く需給逼迫化の影響が市場に現れる可能性がある．

LNGについても同様の分析をしたところ，アフリカやロシア，カナダなどで大型の供給能力の投資が決定していることから，新規投資が停止しても少なくとも2028年頃までは供給能力の拡大が続く．但し，LNGは原油と異なり新規能力の竣工までには長いリードタイムが必要であることから，投資決定済の案件の稼働開始が遅延するようなことがあれば需給バランスに影響を与える．需要についても2021年には中国が日本を抜き世界最大のLNG輸入国となるなど低炭素化の過程で天然ガス需要を増やしており，需給逼迫感が高まれば価格の持続的な不安定化を招く恐れがある．

欧州を利する再エネ偏重のエネルギー戦略は欧州だけでなく太陽光パネルや主要なクリティカルミネラルの加工能力の過半を占める中国を利することにもなる．中国は2050年までの再生可能エネルギー発電への投資額で北米

*一般財団法人日本エネルギー経済研究所 常務理事
〒104-0054 東京都中央区勝どき1-13-1（イヌイビル・カチドキ）
E-mail：yamashita@edmc.ieej.or.jp

に並ぶ規模で世界をリードすると見られる他，**図 2** に示したクリティカルミネラルの処理能力においてもその存在感が大きい．

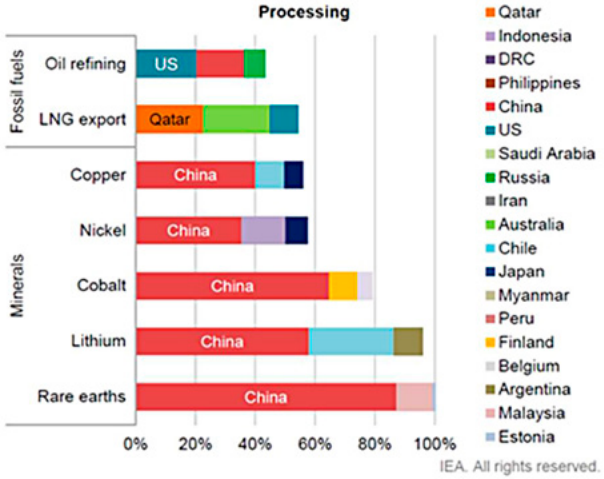


図 2　化石燃料とクリティカルミネラルの処理能力
（注）石油は精製能力，ガスはLNG輸出能力
（出所）IEA, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions

また，変動性再生可能電力の大量導入は（十分な新規インフラ投資なしでは）これまで培ってきた電力供給システムの安定性を脅かしつつ，自由化市場の新興エネルギー企業の経営破綻を招き，電力化が進む日々の生活を不安定化させる．さらには新たな電力供給システムへの追加投資，インフラ投資コストに加え，上流投資不足から高騰する化石エネルギーの継続的な利用でコストが増大することで，持たざる国の国際競争力を弱体化させる．

3．2021年のエネルギー危機が鳴らした警鐘

1 月に誕生した米国バイデン政権による強力な後押しもあって気候変動問題への対応の加速化を各国政府が競う中，2021 年は世界各地で電力不足をきっかけとしたエネルギー価格の高騰等，様々な形でのエネルギー危機が発生した．そしてその影響は国際エネルギー市場に波及した．背景にはコロナ禍からの経済活動再開によるエネルギー需要の増大もあるが，急激な石炭火力の廃止や再生可能電力への依存度の増大が進む中，寒波や熱波など季節要因をきっかけとした急激な需要増に安定的に電力を供給するための余力が低下しつつあるという課題がある．

1 月には日本を含む北東アジアの寒波による需給逼迫で短期間ではあるがLNG価格が高騰した他，中国では輪番停電が行われた．2 月には米テキサス州でも大寒波による供給不足から大規模な輪番停電が実施された．8 月には熱波の影響からトルコで停電が発生した他，ギリシャでは節電要請が発令された．また，ブラジルでは干ばつによる渇水で節電要請が出された．季節が逆のニュージーランドでは同月に寒波の影響で輪番停電が行われた．9 月になると政府による生産中止政策による石炭不足から中国で電力不足が生じ，停電による各種工場での生産停止が相次いだ．同じく 9 月には英国を中心とした風力発電の不調から火力発電用のガス需要が増大，パイプラインガスの供給制約もあり欧州大のガススポット価格の高騰（前年同月比 7 倍強），さらには卸電力価格高騰へと波及した．風力発電の不調によるガス価格及び電力価格の高騰は11月にも発生した．インドでは10月に石炭不足から電力危機が発生し，シンガポールではガス供給の減少でスポット価格が暴騰するなど，アジアにおいてもそれぞれの事情からエネルギー供給を脅かす事象が見られた．

このような短期的で地域的なエネルギー不足が，国際市場を通じた価格の高騰という形で他のエネルギー市場，地域に拡大したことは各国政府に警鐘を鳴らした．欧州議会は緊急の議題として高騰するガス価格への対応を議論すると共に，EU タクソノミーにおいて移行期の原子力と天然ガスの役割を認める方針転換をした．

脱炭素化の移行において，化石燃料で最も二酸化炭素排出量の少ない天然ガスは，電力に置き換えることができない工業プロセス熱の分野においても重要な代替エネルギーであり，脱炭素化を急ぐあまりに，エネルギー供給の多様性を失うことの怖さを垣間見たとも言えよう．

4．アジアを含む新興国・途上国の視点を世界に

アジアの視点からは引き続き移行期の化石燃料を安定して経済的に確保することが重要である．石炭から天然ガスへ，さらには燃料アンモニアや水素への移行で世界の成長センターである新興国の成長と脱炭素化をスムースに行い，技術革新とコスト削減を通じて世界全体での気候変動対策と成長の同時達成に貢献することが重要である．

水素と言えば再生可能電力の水電解によるグリーン水素しか認めない，石炭火力は即刻廃止，石油もガスも今後の開発は認めない，CCS は化石燃料利用の延命手段であるから論外といった欧州などで跋扈する再エネ至上主義がかえって経済社会を混乱させ，生活や命をも脅かす可能性があることを2021年の世界のエネルギー危機から学ぶべきだ．

世界はよりバランスのとれた包含的なアプローチを必要としている．アジアや日本では身近な問題として認識されている脱炭素化に向けたトランジション過程の重要性について欧州を含む世界に訴え続けることは，日本でエネルギー問題を扱う我々の使命であろう．

参 考 文 献

1）日本エネルギー経済研究所；IEEJ Outlook 2022,（2021.10）, pp.134-141.
2）IEA；The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions,（2021.5）, p.13.

展 望 ・ 解 説

カーボンニュートラルに向けた太平洋セメントの取り組み

Efforts of Taiheiyo Cement towards Carbon Neutral

星 野 清 一*・平 尾 宙**・林 康太郎***・野 村 幸 治*・上 野 直 樹*
Seiichi Hoshino Hiroshi Hirao Kotaro Hayashi Koji Nomura Naoki Ueno

1．はじめに

2020年10月の菅義偉前首相によるカーボンニュートラル宣言以降，我が国ではCO_2排出削減に向けた動きが一層本格化している．また昨今では，2021年10月に地球温暖化対策計画が改訂され，その中では2030年度の温室効果ガス排出削減目標がこれまでの26%から46%（2013年度比）へと引き上げられるとともに，部門別の削減計画においても産業部門では７％から38%へと大幅に引き上げられるなど，各産業や企業規模での取り組みも強く求められるようになっている．

このような中，当社ではより長期的な視点でCO_2排出削減を捉え，当社グループの目指すべき方向性や戦略を示すことが必要との認識のもと，2020年３月に，具体的な施策も含めた「2050年を展望したCO_2排出削減に係る長期ビジョン」[1)]（以下,長期ビジョン）を公表した．また，その後カーボンニュートラル宣言などの社会動向の変化も踏まえた中で，この長期ビジョンを整理した「太平洋セメント カーボンニュートラル戦略2050」を，「23中期経営計画」および太平洋セメントレポート（統合報告書）2021の中で公表している．

本稿では，セメント産業におけるCO_2排出削減に向けた動向や取り組みの例として，当社の「太平洋セメントカーボンニュートラル戦略2050」や長期ビジョンに基づくカーボンニュートラルに向けた取り組みについて，現在取り組んでいる技術開発の事例などを取り上げながら紹介する．

2．セメントの製造工程とCO_2排出

セメントの製造工程を**図１**に示す．セメントの製造は，原料調合・粉砕工程（以下，原料工程），焼成工程，仕上工程の３つの工程から成っている．原料には一般に，カルシウム（CaO）源としての石灰石，シリカ（SiO_2）源としての粘土，珪石，および酸化鉄原料が使用される．これらの原料は，原料工程において目標とする化学成分となるように調合された後，焼成工程においてロータリーキルンでおよそ1450℃の温度で焼成され，クリンカクーラーによって急冷されることにより，直径数cm程度のセメントクリンカ（以下，クリンカ）となる．製造されたクリンカは，仕上工程において，セメントとしての凝結特性を調整するための少量の石こうなどを加えたうえで仕上ミルにて粉砕してセメントとなる．

セメント産業では，これらセメントの製造工程において，他の産業から発生した廃棄物・副産物を多量に活用することで日本の資源循環に貢献しているといった側面も持っている．原料に関しては，石灰石を主原料とすることに変わりはないが，近年では天然の粘土に代わって，他の産業から発生した廃棄物が多く用いられており，天然原料の使用量は非常に限られたものとなっている．また，焼成工程ではセメント原料を高温で焼成することから熱エネルギー源が必要となるが，これには化石エネルギーのほか，その一部を代替する形で，廃プラスチックや木くず，廃油，廃タイヤ等の廃棄物が代替熱エネルギー源として利用されている．なお，本報では詳述しないが，セメント産業によるこれら原料や熱エネルギー源への廃棄物・副産物の活用量は，国内全体で年間2,600万tと非常に大きなものとなっている．

日本のセメント産業は，早くから省エネルギー設備の導入を進めてきた結果として，世界トップレベルのエネルギー効率を誇っている．このような中にはあるが，セメント製造では，高温で原料を焼成することから，熱エネルギー由来のCO_2が排出される．また，焼成過程において原料である石灰石が脱炭酸（$CaCO_3 \Rightarrow CaO + CO_2$）する化学プロセスによっても$CO_2$が排出される．セメント製造設備の運転に必要な電力を考慮すると，セメント製造によって発生するCO_2の約55%が石灰石の脱炭酸による原料由来，約35%がエネルギー由来，約10%が電力由来によるものとなっている．日本のセメント産業によるこれらCO_2の排出量は，国内総排出量の３～４％の割合となっている．

*太平洋セメント株式会社 カーボンニュートラル技術開発プロジェクトチーム
**太平洋セメント株式会社 中央研究所
〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2
***太平洋セメント株式会社 生産部
〒112-8503 東京都文京区小石川1-1-1 文京ガーデンゲートタワー

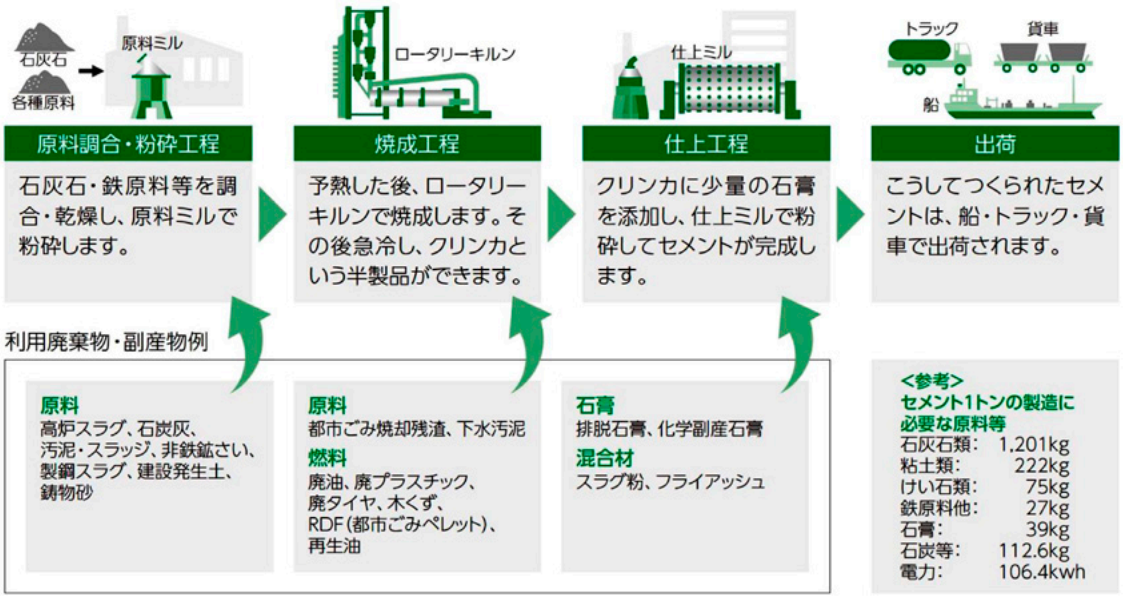


図1　セメントの製造工程

3．カーボンニュートラルに向けた取り組みの構成と概略

2050年カーボンニュートラルに向けたCO_2排出削減のイメージを**図2**に示す．当社ではこれまで「CSR目標2025」の中で，海外も含めた当社グループ全体におけるネットCO_2排出原単位を2025年度までに2000年度比で10%以上削減することを目標に掲げ，CO_2の排出削減に努めてきた．その結果，2020年度までに8.3%の削減を達成してきている．太平洋セメントカーボンニュートラル戦略2050は，さらにその先の2050年を見据えたものとなっており，エネルギー由来や原料由来のCO_2排出削減に加えて，従来にはない革新技術を創出し，それらを適切に組み合わせることで，その達成を目指そうとするものとなっている．

カーボンニュートラルに向けた技術施策を**表1**に示す．技術施策によって削減するCO_2の対象は，①エネルギー由来，②原料由来，③革新技術，④サプライチェーンを想定している．

以降では，この4つの対象領域について，現在実施している技術開発の例も織り交ぜながら，想定されるそれぞれの主な施策やその内容について紹介する．

4．カーボンニュートラルに向けた施策の内容と技術的取り組み

4.1　エネルギー由来のCO_2削減

エネルギー由来のCO_2排出削減の主な施策としては，省エネルギー設備の導入，化石エネルギー代替の推進，低CO_2エネルギーの活用および回収CO_2から製造したエネルギーの活用などを想定している．

省エネルギー設備の導入については，当社では2019年度に，大分工場5号キルンに従来型より熱回収効率が大幅に向上する高効率クリンカクーラーの導入を図っている．今後はこの高効率クリンカクーラーを全キルンに導入していくことで一層のCO_2削減を図っていく計画としている．

化石エネルギー代替の推進については，CO_2排出削減のみならず，循環型社会形成の観点からも非常に重要なものであり他産業では処理が困難な廃棄物も含めて利用率の拡大を図っていく予定である．当社では，既に廃プラスチックや廃タイヤなどの可燃性廃棄物の熱エネルギー源としての利用を行っているが，今後はさらにその拡大を図っていくことを想定している．この取り組みの一環として当社では，東京都，（公財）東京都環境公社，（一社）東京都産業資源循環協会との4者の間で，「廃プラスチックの国内有効利用に向けた実証事業」の協定を2020年に締結した．

廃棄物等の利用による熱エネルギー代替率の目標は50%を想定しているが，代替率の上昇に伴っては廃棄物由来による塩素の持ち込み量の増加が予想される．セメントへの一定量以上の塩素の残存は，品質上好ましくないものとなることから，その対策として，廃棄物の前処理による塩素の除去や塩素バイパス設備の能力向上のための技術開発にも取り組んでいく予定である．

低CO_2エネルギーの活用については，現在の熱エネルギー源を，より単位発熱量当たりのCO_2排出量が少ない熱エネルギー源へと置き換えていくことなどが挙げられる．また，回収CO_2から製造したエネルギーの活用については，現在CCU（Carbon dioxide Capture and Utilization）技術の一つとして挙げられているメタネーションによって生成されたメタンの活用などが挙げられる．当社では，

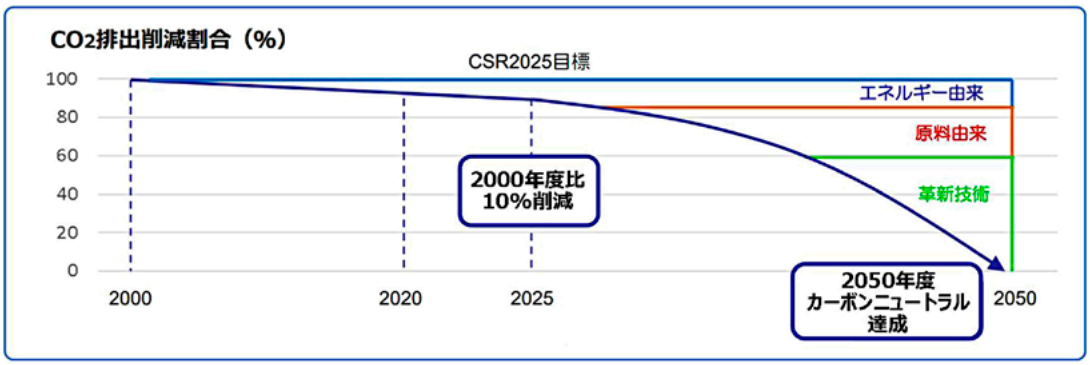


図 2　2050年カーボンニュートラルに向けたCO_2排出削減のイメージ

表 1　カーボンニュートラルに向けた技術施策（長期ビジョン[1]をもとに整理）

対象	主な施策
エネルギー由来	・省エネルギー設備の導入 ・化石エネルギー代替の推進 ・低CO_2エネルギー（天然ガス等）の活用 ・回収CO_2から製造したエネルギー活用
原料由来	・低CO_2セメント（クリンカ改良，混合材利用等）の設計
革新技術	・セメントキルンに適したCO_2回収 ・カーボンリサイクル・貯留
サプライチェーン	・CO_2削減に貢献するコンクリート技術開発 ・セメント製品によるCO_2吸収量評価 ・バイオマス発電，廃熱発電の利用 ・原燃料・製品輸送部門における省エネ装備・技術導入の推奨継続 ・生物多様性の保全・藻類増殖技術等のCO_2吸収施策・商材の展開

後述する**4.3**項の取り組みにおいて，セメント排ガス中のCO_2を分離･回収する実証試験設備を設置している．メタネーションによって製造したメタンの活用には安価なカーボンフリー水素の普及が前提にはなるが，CO_2分離･回収などによって得られたCO_2をメタン化し，それを焼成用のエネルギー源として利用していくことなどが想定される．これら新たな熱エネルギー源を利用していく際には，セメント焼成技術だけでなく，安定したセメント品質を確保することも重要な技術開発項目となってくる．

4.2　原料由来のCO_2削減

原料由来のCO_2削減の主な施策には，低CO_2クリンカや混合材の利用などによる低CO_2セメントの設計を想定している．

セメント製造工程で発生するCO_2の大部分は，クリンカの製造過程で発生することから，このクリンカを混合材で置き換え，クリンカ比率を低減することはCO_2排出量の低減につながる．現行のセメント規格内で対応できる方策としては，混合セメントにおいて現在と同一規格の混合材分量の範囲内で混合材の置換率を増加させることや，また混合材量が多い規格の製品を普及させることなどが考えられる．また，規格の改正や新設が必要な方策としては，現行よりも混合材量を増加させることが可能な規格への改正や，新規の混合材の適用などが考えられる．

規格改正を前提としたクリンカ比率の低減の一例としては，普通セメントの少量混合材の上限量を現行の５％から10％に増加させることを想定した技術開発を行っている．本検討は，2010年頃より開始し[2]，これまでの研究開発の中で，少量混合材の増量とクリンカ組成の最適化を適切に組み合わせることにより，現行の普通セメントの品質を維持できる可能性を示している．本技術は，単位セメント量当たりのCO_2削減量としては必ずしも大きくはないものの，最も生産量が多く，汎用的なセメントである普通セメントを対象としたものであることから，CO_2削減量としては大きな効果が期待できる．実用化に際しては，セメント規格の改正のほか，使用時におけるコンクリート関係の規格類や基準類の整備が必要となる．また，セメントの製造条件の確立やコンクリートとしての物性検証，供給体制の整備，ユーザーの理解を得ることなども必要となる．

4.3　革新技術によるCO_2削減

革新技術によるCO_2削減の主な施策では，セメントキルンに適したCO_2回収や，回収したCO_2の炭酸塩化・燃料変換などのリサイクルを想定している．また，CO_2の削減を可能とする従来にはない全く新たなセメント製造プ

ロセスの創出などが考えられる．

先述のとおり当社も含めた日本のセメント製造のエネルギー効率は世界的に見ても非常に高い水準にある．このような中，さらに大幅なCO_2の削減を実現していくためには，既存技術の延長線上の考え方だけではなく，従来にはない革新的な技術の創出や導入も必要不可欠になってくる．

革新技術に係る取り組みの例として，当社では，2020年7月より国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による課題設定型助成事業として「炭素循環型セメント製造プロセス技術開発」（JPNP20013）[3]を実施している．本事業の全体概略を**図3**に示す．本事業は，廃コンクリートやコンクリートスラッジ等の建設廃棄物の持つCO_2吸収能力を最大限活用することにより，CO_2のリサイクルを図っていくと同時に，併せて建設廃棄物の資源循環も促進していくことを目指した技術開発である．本事業では，セメントキルン排ガスからのCO_2を分離・回収設備にて回収し，その後回収したCO_2については建設廃棄物やコンクリート等を利用して有効利用を図っていくための一連のプロセスについて技術開発を行っている．

セメントキルン排ガスからのCO_2分離・回収では，日量10t規模のCO_2回収能力を持つアミン系化学吸収法による分離・回収実証試験設備を熊谷工場内に設置している（**図4**）．本設備では，運転条件の最適化やアミン吸収液の特性等に係る一連のデータ取得を進めることにより，実機セメントキルン排ガスからのCO_2回収技術の構築やノウハウの蓄積を目指している．

また，分離・回収したCO_2については，廃コンクリートやコンクリートスラッジ，さらにはコンクリート製品や生コンクリートを活用して有効利用を図っていくための技術開発を行っている．コンクリート構造物の解体に伴って発生する廃コンクリートには水和した状態のセメントが，また生コンクリート工場においてミキサー車の洗浄後などに残渣として発生するコンクリートスラッジには未水和および水和した状態のセメントが多く含まれる．また，生コンクリートには未水和のセメントが多く含まれる．これらはいずれもセメントによるカルシウム成分（CaO）を含んでいることから，CO_2と反応させることによって炭酸カルシウム（$CaCO_3$）を生成させ，将来にわたって安定的にCO_2を固定化することが可能となる．

本事業におけるCO_2の有効利用技術に関しては，前記の反応機構などを基にした以下の4技術について，開発やプロセスの構築，さらには実証試験機スケールでの実証を進めている[4]．

①廃コンクリートへのCO_2固定化およびセメント原料・建設資材としての利用技術

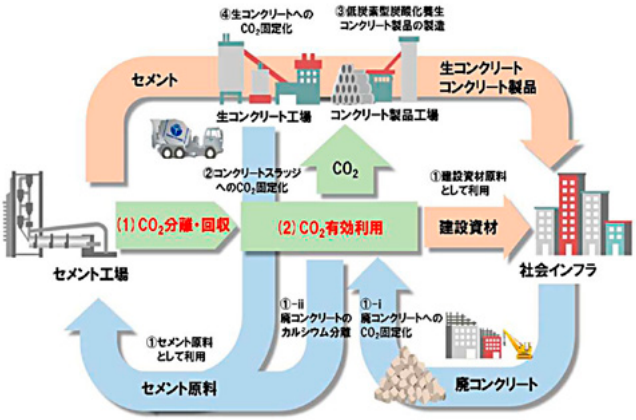


図3　炭素循環型セメント製造プロセス技術開発（NEDO助成事業）の概略

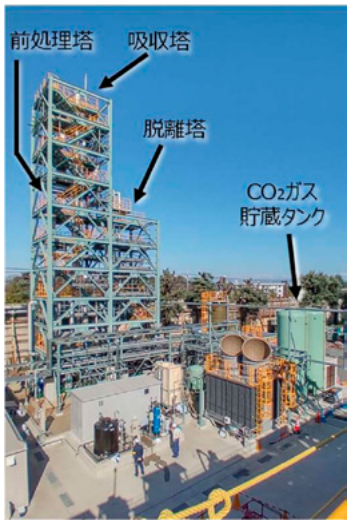


図4　CO_2分離・回収実証試験設備（熊谷工場）

②コンクリートスラッジへのCO_2固定化技術

③低炭素型炭酸化養生コンクリート製品の製造技術

④生コンクリートへのCO_2固定化技術

なお，これらCO_2の有効利用に係る一連の実証試験設備についても，前記のCO_2分離・回収設備と同様に熊谷工場内などに設置している．本事業は，これら一連の技術やプロセスを最適かつ最大限の効果が得られる形で組み合わせて展開させることにより，セメント工場を中心とした大規模スケールでのCO_2削減を目指すものとなっている．

また，革新技術によるCO_2削減の一つとしては，CO_2回収型セメント製造プロセスの創出を想定している．本技術において想定されるプロセスの概略を**図5**に示す．セメント原料はプレヒーターの上段から投入され，徐々に加熱されながら下段に位置する仮焼炉まで到達する．この仮焼炉において約850～950℃の温度で加熱されることにより石灰石の脱炭酸の大部分が行われる．原料由来のCO_2のほとんどはこの仮焼炉で発生することに加え，クリンカ焼成時に発生するエネルギー由来CO_2の一部もこ

の仮焼炉から発生する．そのため，この仮焼炉周辺のプロセスにおいてこれまでにはない全く新たなCO_2回収型のプロセスを創出し，開発していくことで，原料由来のCO_2に加えて，エネルギー由来のCO_2を高濃度で効率よく回収できると考えられる．また，高濃度のCO_2を直接回収できることから，従来の化学吸収法などによるCO_2分離・回収技術と比較して，設備の小規模化が可能になるものと考えられる．本製造プロセスは，従来からのサスペンションプレヒーターの優れた熱効率を損なうことなく，かつ従来と同等以上の廃棄物処理能力を兼ね備えており，既存のNSPキルンの利点を継承することが想定される．

本技術では，将来的な実機セメント製造設備への展開を視野に，実証試験設備などによって基本的な研究開発に取り組んでいくことなどが必要になる．

4.4 カーボンニュートラルに向けたサプライチェーンにおける取り組み

サプライチェーンにおける取り組みを**図6**に示す．セメントは，原料の採掘・物流や製造，製品の輸送はもちろんのこと，製品となった後はコンクリートとして使用されることから，このコンクリートの製造や構造物としての供用期間，供用後の解体，再利用といったプロセスが主なサプライチェーンとなる．将来のカーボンニュートラル社会を目指していくに当たっては，セメントを社会に提供する立場としてそのサプライチェーン全体のカーボンニュートラルに貢献していくことも重要な責務である．

サプライチェーンにおけるCO_2削減の主な施策としては，CO_2削減に貢献するコンクリートの技術開発や，セメント製品によるCO_2吸収量の評価，バイオマス発電・廃熱発電の利用，原燃料・製品輸送部門における省エネ装備・技術導入の推奨継続，生物多様性の保全や藻類増殖等に貢献する商材の展開などを想定している．

セメント製品によるCO_2吸収量の評価については，当社では2019年に外部審査機関による第3社レビューを経て「セメント及びセメント関連製品のバリューチェーンを通じた温室効果ガス削減貢献量算定・報告プロトコル」[5]を策定しており，各バリューチェーン段階でのCO_2削減量を評価する手法を整備している．また，当社では世界の主要なセメント・コンクリートメーカーが参画しているGlobal Cement and Concrete Association（GCCA）に所属し，その作業部会での活動を通じてセメント・コンクリートのライフサイクルの中で吸収される大気中のCO_2量を組み込んだカーボンニュートラルロードマップ策定にも取り組んだ（2021年10月公開）．コンクリートが使用時にCO_2を吸収することは古くから知られているが，コンクリートの社会的なストックは膨大であることからこのCO_2

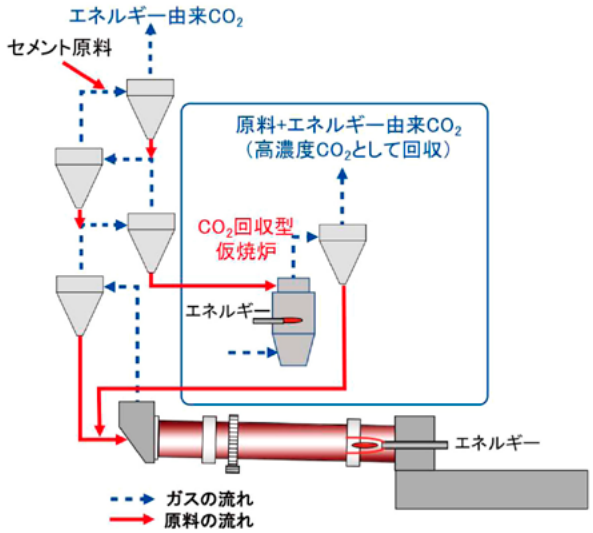


図5 CO_2回収型セメント製造プロセス

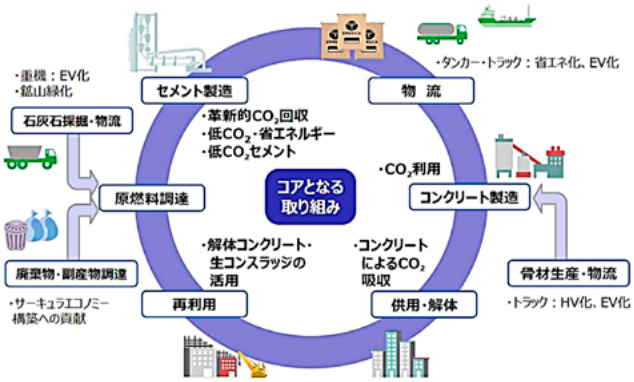


図6 サプライチェーンにおける取り組み

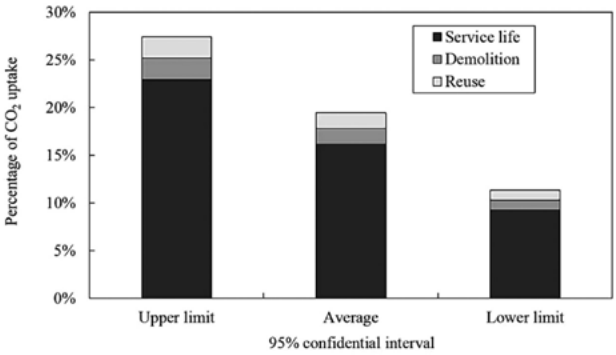


図7 セメント・コンクリートのライフサイクルを通じたCO_2吸収量[6]
（Upper limit，Lower limitは，計算で設定した値の不確かさを考慮した上限と下限）

吸収による貢献は大きなものである．当社で評価したセメント・コンクリートのライフサイクルを通じたCO_2吸収量の評価結果を**図7**に示す．本結果では，セメントはコンクリートのライフサイクルを通じて，その生産過程において排出した脱炭酸由来のCO_2排出量の約20%に相当する量を吸収，固定化するとの結果を示している．また，日本全体におけるコンクリートの供用期間中のCO_2吸収量は年間約

300万tになるとの評価結果を示している[6]．

バイオマス発電・廃熱発電の利用については，廃熱を活用した発電設備を国内全工場に設置することなどが挙げられる．また，CO_2の削減といった観点からはバイオマスの活用は効果的である．当社では，当社出資のもと大船渡工場内においてバイオマス発電事業を既に開始しており（**図8**），このような取り組みにより外部から電力を購入した場合に比べてCO_2排出の削減が見込まれる．

図8　大船渡市におけるバイオマス発電事業

5．おわりに

セメントにおける将来のカーボンニュートラルの実現に向けては，本稿でも述べた通り従来技術の延長線上だけではなく，いわゆる革新的な新たな視点からの製造技術やセメントのあり方，エネルギー活用の方法，CO_2有効利用のための他材料の活用やそのシステムの構築などが必要となる．時には，セメント産業内のみならず，他の産業とも連携，協力を図った中で取り組まなければならない課題も出てくるものと考えられる．

一方で現在のセメントは，他の産業から発生した廃棄物・副産物を原料や熱エネルギー源として多量に受け入れることで，我が国の資源循環に貢献しているといった大きな役割も担っている．新たなセメントや技術の創出に当たっては，これらCO_2の排出削減と廃棄物の活用は時としてトレードオフの関係になるケースもある．これらの両立は必ずしも簡単な道のりではないかもしれないが，従来の役割の一つである資源循環への貢献を維持，拡大しつつも，カーボンニュートラル社会に向けた新たな技術開発を積極的に推進していくことで，セメント産業として将来の社会に貢献していきたい．

参 考 文 献

1）太平洋セメント株式会社ホームページ；ニュースリリース，（資料）2050年を展望した温室効果ガス排出削減に係る長期ビジョン，（2020）；https://www.taiheiyo-cement.co.jp/news/news/pdf/200330_2.pdf（アクセス日2022.1.11）
2）経済産業省；革新的セメント製造プロセス基盤技術開発　評価用資料，第1回革新的セメント製造プロセス基盤技術開発事後評価検討会，資料6，（2015）．
3）一坪幸輝，平尾 宙，野村幸治，上野直樹；炭素循環型セメント製造プロセス技術開発（セメント工場を中心としたカーボンリサイクル社会の実現に向けた取り組み），コンクリート工学，59-9（2021），pp. 827-829.
4）太平洋セメント株式会社；二酸化炭素の炭酸塩固定技術に関する取組みについて，太平洋セメント ニュースリリース，（2020）．
5）太平洋セメント株式会社；セメント及びセメント関連製品のバリューチェーンを通じた温室効果ガス削減貢献量算定・報告プロトコル Ver.1.0，（2019），https://www.taiheiyo-cement.co.jp/other/gas/index.html（アクセス日2022.1.11）
6）兵頭彦次，星野清一，平尾 宙，野村幸治；ライフサイクルを通じたコンクリートのCO_2吸収量の算定に関する研究，セメント・コンクリート論文集，74（2020），pp. 333-340.

＜著者紹介＞

星野　清一（ほしの　せいいち）
カーボンニュートラル技術開発プロジェクトチーム 企画管理グループ．これまでセメントの研究開発やLCA，CO_2排出削減に係る業務などに従事．

平尾　宙（ひらお　ひろし）
中央研究所 第1研究部 部長．これまで中央研究所にて，エコセメントの開発など，主にセメントの成分設計，リサイクル活用に関する研究開発に従事．博士（工学）．

林　康太郎（はやし　こうたろう）
生産部 環境管理グループ リーダー．これまでセメント工場及び生産部にて生産管理，環境管理業務に従事．

野村　幸治（のむら　こうじ）
カーボンニュートラル技術開発プロジェクトチーム 企画管理グループ リーダー．これまでセメント・環境分野の研究開発の他，環境事業部門での営業・企画業務，セメント製造等の業務に従事．博士（理学）．

上野　直樹（うえの　なおき）
カーボンニュートラル技術開発プロジェクトチーム リーダー．これまで技術部，中央研究所にて，セメント，リサイクル活用に関する技術開発に従事．

展 望 ・ 解 説

第6次エネルギー基本計画における再生可能エネルギー導入量についての考察

A Review on Renewable Energy Scenario in Japan's Strategic Energy Plan

朝 野 賢 司*
Kenji Asano

1．2030年再エネ導入量推計議論の概要

2021年4月の気候変動サミットにおいて，菅義偉・内閣総理大臣（当時）が2030年度の温室効果ガス排出量を2013年度に比べ46%削減することを表明した．これを受けて，政府が2021年10月に公表した第6次エネルギー基本計画（6次エネ基）では，2030年度の再生可能エネルギー（再エネ）の導入目標を3,360～3,530億kWhとし，固定価格買取制度（FIT）等による再エネ買取総額は5.8～6兆円になるとした[1～3]．これらの数字は，政府が2015年に策定した長期エネルギー需給見通し（2015年長期見通し）においては，再エネ発電電力量を2,366～2,515億kWh，買取総額を3.7～4 兆円としていたこと[4]から，それぞれ約1,000億kWhと約2兆円が上積みされたことを意味する．

2021年3月頃から議論が始まった6次エネ基の再エネ2030年目標値見直しに向けた政府審議会（総合エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会，以下再エネ大量導入小委）において，筆者は2030年度までの太陽光発電（PV）と風力発電の導入見通しについてプレゼンする機会を得た[5,6]．ここでの数値は，前年の2020年3月に公刊した論考[7]に基づくもので，足元の導入・認定状況を踏まえると2015年長期見通しに比べて上振れすることにより，再エネ発電電力量は3,011億kWh，買取総額は4.57兆円とするものである．

その後，筆者らは6次エネ基策定を巡る議論の中で，再エネのみならず，経済成長・省エネ等も含めて，6次エネ基の議論を包括的に評価した[8,9]．特に6次エネ基確定後に分析した文献[9]にて示したように，6次エネ基に示された再エネ目標3,360～3,530億kWhのうち約400～500億kWh程度については，この達成について十分な根拠があるとは言えず，目標の達成は厳しいと結論づけている．これら数値の設備容量を**表1**，発電電力量を**図1**としてまとめた．

本稿の目的は，どのように6次エネ基の2030年再エネ目標が設定されたのか，明らかにすることである．

まず，再エネ大量導入小委において各機関から提出された2030年再エネ導入量の推計結果とその差異について示した上で（第2章），6次エネ基で示された2030年再エネ導入見通しについて検討する（第3章）．

以上の6次エネ基における再エネ目標を巡る議論を踏まえた上で，2030年に向けて何が重視されるべきか第4章において論ずる．

表1 再エネ導入量の現状と2030年推計（設備容量）

単位 GW	2019年度 実績	2015年 長期見通し	6次エネ基：野心的水準	6次エネ基精査[9]	筆者推計[7]
PV	55.8	64	103.5－117.6	100	92
陸上風力	4.8	9.2	17.9	15.9	15
洋上風力	0.01	0.8	5.7	3.7	5
地熱	0.6	1.4－1.6	1.5	0.7	0.7
水力	50	48.5－49.3	50.7	50.7	48
バイオマス	4.5	6-7	8	4	5

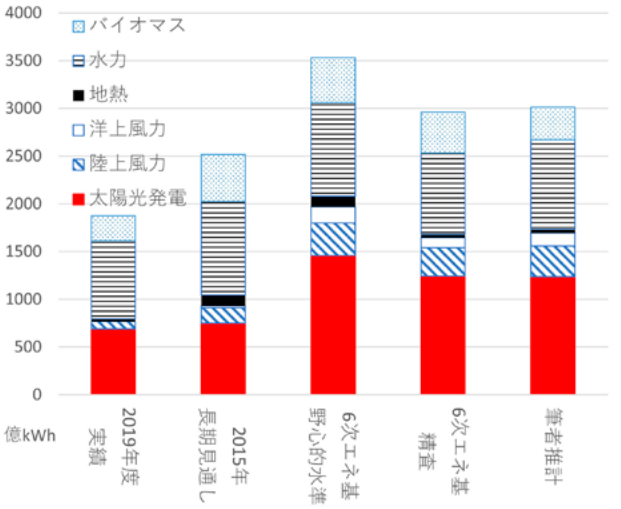


図1 再エネ導入量の現状と2030年推計（発電電力量）

2．再エネ大量導入小委における議論

2.1 事務局から示された基本的な見直しの考え方

2021年3月から再エネ大量導入小委において開始され

*一般財団法人電力中央研究所社会経済研究所上席研究員
〒100-8123 東京都千代田区大手町1-7-1
E-mail：k-asano@criepi.denken.or.jp

た2030年再エネ目標値を見直し議論では，事務局から，①現時点での導入量に，②認定済未稼働案件の稼働による増加，③これから2030年までの新規認定案件のうち2030年稼働分による増加について整理することで，検討を進めるとする方針が示されていた．

すなわち，

2030年再エネ導入量＝①現時点での導入量＋②既認定未稼働分の稼働＋③今後の新規認定分の稼働

として推計する．

この中で，③の考え方については議論が分かれる．当初，再エネ大量導入小委の事務局は，③について，「（A）毎年の導入ペース×（B）2030年に稼働が間に合う期間」と分解できる，とした上で，

（A）足元の導入ペースを前提にしつつ，今後どの程度このペースを加速化することができるか．

（B）の「稼働が間に合う期間」については，電源によっては案件形成から稼働までに相当の時間を要するものもあり，それぞれの電源毎に運転開始までにどの程度の期間を要するかを意識した議論が必要と整理していた．

2.2　筆者らによるPV・風力発電の導入推計

再エネ大量導入小委では，2030年再エネ見通しを公刊している各機関に対して，各電源についての導入算定の考え方，導入コスト見込み，設備利用率，系統制約考慮の有無等を提出させることとなった．

表2　筆者らによるPVの2030年導入量の推計結果

	屋根	地上
導入量	19GW 約150億kWh[注1)]	73GW 約1,090億kWh[注1)]
導入ペースやリードタイムの考え方	• 2018年度末時点の導入量（実績値） • 2019年度～2030年度：0.7GW/年 • リードタイム：考慮せず（認定と同年度に稼働）	• 導入想定（2021年度まで）2018年度末時点の導入量（実績値），未稼働案件等（計62.6GW） • 導入想定（2022～2030年度）1.3GW/年 • リードタイム：3年（2027年度までの認定分が2030年度までに稼働）
根拠	分析時点の直近1年間の認定量0.7GW	• 未稼働案件：事業者アンケート等を参考に，2,493万kWのうち2,071万kWが稼働と想定 • 1.3GW/年：10-50kW未満設備は分析時点の直近1年間の認定量0.4GW．50kW以上設備同0.7GWに，入札の募集量0.2GWと想定
コスト見通し	買取価格は分析時点で明らかだった2019年度までは実績値．2020年度以降は22円/kWhから段階的に低下し，2030年度11円/kWhと想定	買取価格は分析時点で明らかだった2019年度までは実績値．2020年度以降は12円/kWhから段階的に低下し，2030年度8.5円/kWhと想定

注1）屋根設置では自家消費分を除いた，余剰発電電力量の数値．地上設置の設備利用率については，年毎の値が公表されていないため，調達価格等算定委員会が公表している年別の過積載率（10kW以上）を基に，稼働年度別の設備利用率を推計．

表3　筆者らによる風力発電の2030年導入量の推計結果

	陸上	洋上
導入量	15GW 約320億kWh[注2)]	5GW 約139億kWh
導入ペースやリードタイムの考え方	○2018年度末時点の導入量（実績値） ○2019～30年度： • 分析時点最新（2019年9月）の未稼働案件約3.6GWの全てが稼働 • 同様に，環境アセス「方法書」送付済み案件[10)]の約8割に相当する約4.4GWが稼働 • 入札：計3.75GW（0.75GW/年×5年度）が稼働 ○リプレイス：20年経過設備．地元合意難航等により，その全てではなく，2030年度に8割約2GWがリプレイス ○リードタイム：環境アセスを除く施工期間は4年	○2020～2030年度 • 再エネ海域利用法の促進区域と有望な区域の検討状況（分析時点最新）を踏まえ2020年代中頃までに約2GWが稼働 • 2026年度以降，入札で約3GWが稼働 ○リードタイム：8年（認定後の稼働期限が環境アセス含む8年であるため）
根拠	○未稼働案件：改正FIT法前であり，環境アセス終了済と想定 ○環境アセス「方法書」案件の8割の根拠は文献[10)]	○海域利用法の協議会情報等をもとに約2GW ○3GWの根拠は，英国Round4では2年で1～2GWの入札であるため，導入初期の日本は約1GWを想定し，2026年度以降計3GWの稼働を想定
コスト見通し	買取価格は分析時点で明らかだった2020年度までは実績値．2021年度以降は16円/kWhから段階的に低下し，2025年度認定から12円/kWhと想定．リプレイスは16円/kWh	買取価格は分析時点で明らかだった2020年度までは実績値．2021年度以降は33円/kWhから毎年度3円ずつ低下と想定

注2）設備利用率は，調達価格等算定委員会による数値で，2011年度以前に導入された設備は16.3～18.6%，それ以降に導入された設備は2011～2016年設置設備の中央値であり，2019年度想定値である24.8%を用いた．

前述したように，再エネ大量導入小委で議論される前年（2020年3月）に公刊された文献[7]では，まさに筆者らは，事務局が提示した①②③の観点で数値を整理していた．同委員会において，筆者らが提出したPV・風力発電の推計は**表2**と**表3**にまとめられる．いずれも系統制約は一切考慮していない数字である．

再エネ大量導入小委において，筆者らが強調したのは次の2点である．第1に，筆者らが実施した「推計」とは，足元の導入・認定状況を踏まえた2030年時点の推計であり，いわばinertiaとしての数値である．必ず達成すべき目標としての数値ではない．

第2に，2015年長期見通しから数値を引き上げる際に留意すべきこととして，再エネ導入量が長期見通しを上回ること自体は歓迎すべきことであるが，「金額に見あう投資（Value for Money）」の視点で，立ち止まって考える必要がある．仮に引き上げるとしても，買取総額のコントロールと費用対効果を重視した制度の効率性は，重視すべきであり，2030年まで残された時間は約9年と僅かであり，その根拠はよくよく精査するとともに，その数値は見通しとしての推計なのか，必達の目標なのか，位置づけは明確にする必要がある．

2.3 各機関による推計値の比較

前述したように，再エネ大量導入小委では，2030年再エネ見通しを公刊している各機関に対して，**表2**と**表3**などを提出させた．PVについては，自然エネルギー財団，日本気候リーダーズ・パートナーシップ（JCLP），経済同友会，再生可能エネルギー長期安定電源推進協会（REASP），太陽光発電協会，電中研の6機関が見通しを示した．風力発電については，太陽光発電協会に代わり日本風力発電協会が加わり，その他の機関はPVと同じ機関となり，いずれも計6機関が提出した．

図2と**図3**は，それぞれPVと風力発電の設備容量について，2019年度実績値，2015年長期見通し，筆者らによる推計値，各機関提出の推計値，そして6次エネ基の数値を整理したものである（6次エネ基の幅は，後述する努力継続，政策強化，野心的水準を示す）．各機関が提出した推計値には大きな差が存在することがわかる．

設備容量に差が生ずる第1の理由は，推計方法の違いである．大まかに言えば，日本のポテンシャル等を踏まえてバックキャスト的に積み上げた機関と，足元の導入量やFIT認定状況を踏まえた数値の算出を行った機関との違いである．前者では，自ら検討した数値ではなく外部の諸機関が公開している試算資料を参考にPV120GW・風力発電60GWを示した機関や，再エネポテンシャル数値からPV222GW・風力発電41GW示した機関があった．**図2**と**図3**に示した各機関推計の中で，相対的に大きな設備容量を提出した機関であることがわかる．

第2の理由は，前述の事務局が示した再エネ導入推計の推計方法のうち，「③今後の新規認定分の稼働」についての考え方の違いである．PVについては，筆者らは前述（**表2**）のように既認定未稼働分が一定の割合で導入されることに加え，屋根・地上ともに直近の認定量を踏まえてそれぞれ年間0.7GW，1.3GW導入されると想定し，2030年に92GWと推計した．これに対して，カーボンプライシング等の追加政策の導入を想定した機関は145GWと推計した．また直近の認定量とは無関係に地上設置年間3～4GWと屋根設置同3GWと想定した機関は100～125GW，年間5GWから2030年10GWまで段階的に導入が拡大するとした機関は101.5～135GWとする推計を示した．

風力発電については，各機関で検討した時点において，環境アセスメントが準備書，方法書，配慮書のいずれの段階にあったのか，当該プロジェクトの成功確率をどの程度と見積もるのかによって導入量に差が生じている．筆者らは，文献[10]に基づき，方法書送付済案件の約80%が稼働すると想定し20GWと推計した．これに対して，準備書段階以降の案件は100%，方法書段階の案件は90%，転換促進ケースでは配慮書段階の案件は40%それぞれ稼働すると想定した機関は29.3GW，環境アセスメント手続きが2年以上停滞している案件は除外した上で手続き中の案件が全て稼働すると想定した機関は28～36GWと推計した．

図2 太陽光発電の2030年推計の比較（設備容量：GW）

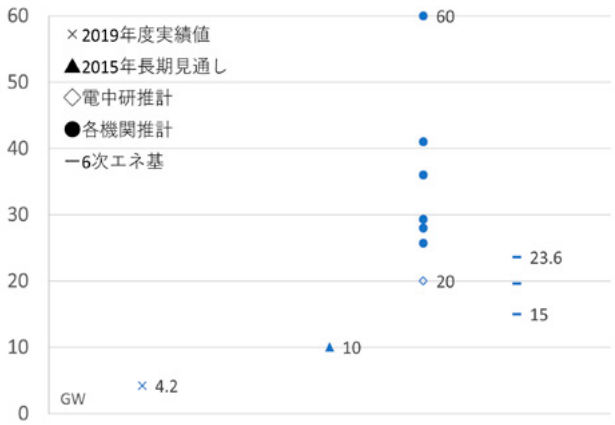


図3 風力発電の2030年推計の比較（設備容量：GW）

3．第6次エネルギー基本計画における再エネ見通し

3.1 今後の新規認定分の考え方

前述したように，以下の考え方に基づいて，2030年の再エネ導入量が推計された．

2030年再エネ導入量＝①現時点での導入量＋②既認定未稼働分の稼働＋③今後の新規認定分の稼働

このうち6次エネ基では，③今後の新規認定分については，以下の3つの考え方によって導入見込量が分析された．

A）現行政策努力継続ケース：適地が減少する中で，政策努力の継続により現行ペースを維持・継続した場合の見通し．

B）政策対応強化ケース：更なる政策対応を強化した場合の見通し（政策強化の動きがあり，定量的な政策効果が見通せているものの効果を織り込んだ試算）．

C）野心的水準：責任省庁による施策具体化・加速化を前提に，その効果が実現した場合の野心的な見通し．

中でも，「野心的水準」については，

・政府として目標設定しているものや具体施策により，具体的な導入量が見込まれるもの

・今後，官民が一体となって達成を目指していくもの

にわけて，明記されることとなった．

政府審議会における議論は，再エネ大量導入小委から総合資源エネルギー調査会基本政策分科会に場を移した．同会第40回会合（2021年4月13日開催）にて，再エネ発電電力量を「2,903億kWh＋更なる検討」とし[11]，第45回会合（同年7月13日開催）にて同「3,126億kWh」[12]を提示したものの，「46%削減に向けて，もう一段の野心的な取組が必要との指摘」を踏まえて，第46回会合（同年7月21日開催）において，前述の野心的水準に記載がある「責任省庁による施策具体化・加速化を前提に，その効果が実現した場合の野心的なもの」として，「約3,300～3,500億kWh（36～38%）の再エネ導入を目指す」[13]とした．

最終的に示された6次エネ基に示された再エネ導入見通し（設備容量）について**表4**として示す．これは，①現時点での導入量，②既認定未稼働分の稼働に，③今後の新規認定分の稼働として，「B）政策強化ケース」を加えた上に，「C）野心的水準」を加算することで求められる．例えば，PVについては，①27.9GW＋②18GW＋③B）26.2GW＋野心的水準3.5～17.6GW＝103.5～117.6GWとなる．

表4 6次エネ基における再エネ2030年見通し

単位 GW	①既導入量	②既認定未稼働分	③新規認定分 A）	③新規認定分 B）	野心的水準 C）
PV	27.9	18	13.8	26.2	3.5－17.6
陸上風力	4.2	4.8	4.4	6.9	2
洋上風力	0.01	0.7	1	3	2
地熱	0.6	0.02	0.05	0.857	
水力	50	0.2	0.5	0.5	
バイオマス	4.5	0.76	0.46	1.24	

3.2 既認定未稼働分と現行政策努力継続ケースの検討

②既認定未稼働分と③A）の現行政策努力継続ケースについては，事務局から示された考え方に，筆者は特段の違和感はない．特に風力発電の環境アセスメント情報は，エクセル等での一括したデータ形式として公開されていない上に，アセスメントの進展段階もwebサイトを閲覧するタイミングで異なる等，非常に煩雑な作業を要する状態にあったため，この点において事務局がとりまとめた資料は価値がある．

例えば，PVの②既認定未稼働分については，FIT認定済で未稼働の案件は24GWについては，2018年に未稼働措置を実施した際に，容量ベースで約75%の案件について運転開始が見込まれる結果であることを踏まえ，未稼働案件の75%が稼働すると見込むことで約18GWとした．また，③A）についても，直近の年間認定容量1.5GWが維持・継続すると想定すると，今後の新規案件の2030年導入量は14GW，①既導入量と②既認定未稼働分の合計74GWと併せた全体の導入量は合計88GWとした．

陸上風力の既認定未稼働分については，6次エネ基では，環境アセスメント段階別にみたプロジェクトの成功確率に基づいて推計した．2020年3月末時点において，既認定未稼働は680万kWのうち，法アセス対象外である1万kW未満が約82万kW，法アセス対象は約6GWとした上で，

・アセス開始から十分な期間が経過していると思われる2013年度，2014年度に開始した案件のうち，案件形成（評価書作成）に至った割合は，配慮書，方法書，準備書を開始した案件で，それぞれ約41%，約51%，約70%．方法書手続き開始以降にFIT認定を受けることができることを踏まえると，約51～70%程度の案件が稼働．

・ヒアリングにおいて，業界団体からは，2年以上停滞している案件を除いた既認定アセス案件を4.07GWとしており，これは，既認定案件の約68%に相当．

以上より，既認定案件のうち70%が稼働すると見込むと，既認定未稼働分の稼働は4.8GWとなるとした．

その上で，陸上風力の③A）努力継続ケースについては，2020年度の新規認定量は，速報値で約134万kW，直近3年度（2018～20年度）の平均認定量が約130万kWと指摘．その上で，年間130万kWペースを維持していくと仮定し，リードタイム（法アセス案件8年，法アセス対象外案件4年）を踏まえると，新規認定分による2030年の導入量は約4.4GWとした．

3.3 政策対応強化ケースと「野心的水準」の検討

他方で，政策対応強化ケースにおけるPV・地熱・一般廃棄物の想定と，「野心的水準」については，その想定の根拠が十分とは言えない項目も含まれている．換言すれば，これは46%減目標が整合的であるとするために，特にPVの政策対応強化ケースと野心的水準の数字を積み上げる必要が生じたことによる歪みである．

(1) PV政策対応強化ケースの問題点

第1に，PVの政策対応強化ケースでは以下3点を想定しているが，下記の1点目と3点目について，示された数値の根拠は十分とは言い難い．

1）改正温対法によるポジティブゾーニング（再エネ促進区域を指定して積極的な案件形成を行う取組）や自治体の計画策定に対する支援【環境省】4.1GW
2）温対法に基づく政府実行計画等に基づき，公共部門を率先して実行【環境省】6.0GW
3）空港の再エネ拠点化の推進【国交省】2.3GW

この中で，2点目の公共部門での導入は，設置する土地・設備等は公共部門であり，初期投資費用は税金投入を前提としていることから，達成できる可能性はあるだろう．

しかし，1）は十分な根拠があるとは言えない．1）では，市区町村のうち60%（約1,000市町村）が地方公共団体実行計画区域施策編を作成するとした上で，その全てに4.1MWのPVが導入されるとして，計4.1GWとしている．これは所沢市を先行事例として公有地に1.4MW導入されていること，（所沢市の事例ではなく）今後2030年度までに私有地に約2.7MWの導入が可能であるということを根拠としている．

ただ，地方公共団体実行計画区域施策編では必ずしも自治体に再エネ導入計画の策定を要請しているものでもない．また，公有地はともかく，私有地を活用するには時間を要することが予想される．したがって，ある程度の自治体に導入が進むことは想定されるものの，2030年までの限られた時間の中で，全1,000自治体に4.1MWずつ導入されるとする想定は過大である．

3）空港の再エネ拠点化については，既導入量と今後の新規導入分の峻別が明確でなく，2.3GWとする数値が新規導入分のみとは読み取れないことに加え，2.3GWという数値が求められた根拠も具体的には示されていない．また，紹介されている導入事例では，空港内敷地での全量売電を前提としたメガソーラー設備が複数示されている．現在一定規模以上のPVに対しては入札制度の導入や買取価格が低下している中で，全量売電で採算が得られるという経済性評価が必要である（むしろ屋根設置の自家消費を前提とするならば説得力は増すので，空港施設の屋根面積に基づいたシナリオを提示すべきだった）．

(2) 一般廃棄物・地熱発電の政策対応強化ケースの問題点

第2は，同様に，一般廃棄物と地熱発電の政策対応強化ケースの想定は十分に根拠があるとは言えない（それぞれ設備容量と発電電力量としては僅かであるものの）．

一般廃棄物発電は，再エネ大量導入小委第31回では，努力継続ケースの数値である6万kWが政策対応強化ケースにも使用されていた．しかし，6次エネ基では，「一般廃棄物でのエネミックスの達成率が低いこと」「一般廃棄物処理場に発電設備が現状30%程度しかゴミ処理設備に導入されていないこと」から，今後導入が進むとして76万kWに引き上げられた．一般廃棄物処理施設での発電設備の付帯は，通常リプレイスのタイミングで検討されることが主になるだろうが，「エネミックスの達成率が低いこと」を理由に，焼却施設をリプレイスするだろうか．既存の設備に後付けで設置するにしても，大半のゴミ処理設備に2030年までに発電設備が設置されることは考えにくい．

地熱発電では，努力継続ケースが5万kWであるのに対して，政策対応強化ケースは85.7万kWとした．引き上げた理由として，今後，JOGMECによるリスクマネー供給等により約0.31GWが，また環境省が公表した「地熱開発加速化プラン」と，国立・国定公園を中心とした地表調査を2022年度中に完了することを目指す中で0.5GWの導入が見込まれるとしているためである．しかし，地元調整や掘削失敗等の開発リスクが高く，リードタイムが8年と長い地熱開発が，2030年まで残された時間が僅かとなる中で，このようなペースで導入が進展するというのは，相当の規制緩和や，導入最優先についての地元理解が進展しなければ実現できないだろう．

筆者らの推計[7]では，大規模地熱は，運転開始に至るまでの計8段階分けられることから，その段階のいずれにあるのかに基づいて判断した．具体的には調査準備，地表調査，温泉モニタリング，掘削調査，噴気試験，事業化検討，環境アセス，建設の各段階に分けることができ，調査時点（2020年2月末）において噴気試験以上の段階にある設備計約0.12GWが2030年までに運転開始に至ると考え，中小規模を合わせて合計0.7GWと推計している．

(3) 野心的水準の問題点

前述のように，「野心的水準」は，関係官庁としての目標設定案件と，官民一体案件に分別される（**表5**）．しかし，具体的にどのような根拠に基づいて，これらの数字が求められるのか不明な点も多い．努力目標として記載するのならば，もはや根拠も不要と言えるのかも知れない．

例えば，**表5**の中で，④は前述した問題のあるPV政策対応強化ケースの数字を，そのまま焼き直したに過ぎない．⑤の民間企業による自家消費促進についても，再エネ大量導入小委では，補助金等の裏付け無しに導入が進むとは思

えないことや，民間での導入であるため追加的な導入なのか（既に見込んだ新規認定分と大半は重複しているのではないか）とする指摘がなされた項目である．

③の地熱発電については，地上から人工的に水を還元井に注入して地熱貯留層からの蒸気量を増やす「涵養技術」の確立・全国展開で設備利用率の向上を図るとしている．しかし，筆者らの推計[7]にて指摘しているように，そもそも既設の大規模地熱の設備利用率の実績値は，2015年長期見通しの想定に比べて，20%以上悪化している[注3]．確かに涵養により利用率は向上するだろうが，あくまで現実の低い設備利用率から向上するに過ぎず，2015年長期見通しに発電電力量が加算されることはない．

その他にも，①と②については，記載している内容については理解できるが，どのように算定された数字なのか具体的とは言えない．

表5　6次エネ基における再エネ「野心的水準」

政府として目標設定しているものや具体施策により，具体的な導入量が見込まれるもの（240億kWh程度）
①系統増強等を通じた風力の導入拡大【経済産業省】陸上風力：2.0GW（40億kWh程度）洋上風力：2.0GW（60億kWh程度） ②新築住宅への施策強化【経済産業省，国土交通省，環境省】太陽光：3.5GW（40億kWh程度） ③地熱・水力における現行ミックスの達成に向けた施策強化 地熱（50億kWh程度）水力（50億kWh程度）
今後，官民が一体となって達成を目指していくもの（～170億kWh程度）
④地域共生型再エネ導入の推進【環境省・農林水産省】太陽光：4.1GW（50億kWh程度） ※風力，地熱，水力，バイオマスも含まれうる ⑤民間企業による自家消費促進【環境省】太陽光：10.0GW（120億kWh程度）

4．再エネ見通しと今後の再エネ政策における論点

以上の6次エネ基における再エネ見通しの議論を踏まえた上で，筆者が今後の再エネ政策において留意すべきであると考えるのは以下3点である．

第1に，エネルギー基本計画における「目標」の性質が変わったことである．これまで削減目標や再エネ目標を「必達」としていたが，6次エネ基で掲げられた野心的な目標とは，その達成に向けて「最善を尽くす」ことが重視される．換言すれば目標の性質が変化したと言える．実際，パリ協定上も目標達成が義務ではなく，国内施策の追求が義務になっており，「目標達成に向けて最善を尽くす」ことが重要であることを認識すべきである．

第2に，改めて効率性の観点が重要になることである．前述したように目標達成に向けて最善を尽くすことは重要である．しかし，今後，エネルギー政策を具体化していく上では，目標達成に拘り，エネルギー政策が経済成長を制約するようなことは避けなければならない．費用対効果の高い対策から優先的に実施する効率性の観点が重要である．

その際に，重視されるのは，6次エネ基にも記載されている「再エネ最大限導入と国民負担抑制の両立」をどのように堅持するのかという点である．6次エネ基では，温室効果ガス削減目標を46%削減に引き上げたことに伴い，再エネ目標も引き上げられた．これを踏まえると，「再エネ最大限導入と国民負担抑制の両立」として問われるのは，温暖化対策としての費用対効果である．

筆者らの推計[7]では，FITのCO_2削減費用を概算すると3万円/t-CO_2を上回る．これはわが国の温暖化対策事業と比較しても費用対効果に劣るだけでなく，その累積負担が数十兆円におよぶ点で，わが国の温暖化対策の中で群を抜く非効率な政策であったと結論づけている[注4]．

前述したようにこの推計では，2030年における再エネ発電電力量は3,011億kWh，買取総額は4.57兆円としている．これに対して，6次エネ基で示された「野心的水準」が達成される場合，3,360～3,530億kWh，同5.8～6兆円とされている．ただし，買取総額の計算方法や根拠は提示されていない．筆者は本稿において論じたように政策対応強化ケースの一部と，「野心的水準」に対しては，FIT等の補助制度の拡充，各種規制緩和，立地地域の住民合意など大きな障壁があるものの，「再エネ最優先の原則」のもとでこれら障壁を乗り越えられるならば，年間買取総額は5.8～6兆円の規模となる．いずれにせよ，今後の再エネ導入では，改めて，効率性を高める不断の努力が求められると言える．

第3に，2030年まで増加していく再エネ買取総額について，どのようなコスト負担をすべきなのか，分配問題の

注3）2015年長期見通しでは既設の設備利用率を83%程度で計算している．しかし，実績値では，2010年以降の4年間の平均値で56%，2016年度54%，2017年度55.9%である（文献[7]参照）．

注4）筆者らの推計[7]では，まず買取総額から回避可能費用を減じたFIT追加費用（賦課金総額）を，買取発電量で除することで，再エネ1kWhあたりの追加費用単価（補助単価）を算定する．FITの補助単価は16～19円/kWh弱となる．この追加費用をもとに，CO_2削減費用を概算すると3万円/t-CO_2を上回ることになる．わが国の温暖化対策事業のCO_2削減費用は，1,000～3,000円/t-CO_2といった事業もあるものの，一部事業は数万円～10万円超と推計されている[14]．したがって，FITは費用対効果に劣る温暖化対策事業の一つに付け加えられるのみならず，その累積負担が数十兆円におよぶ点で，わが国の温暖化対策の中で群を抜く非効率な政策であったと言える．もちろん，再エネ導入にはCO_2削減だけでなく，雇用創出やレジリエンス対策といった他の政策目的も存在する．しかし，まずはCO_2削減の点について，異なる再エネ普及政策と比較して，FITの費用対効果が低いことを確認した上で，その低さを補うその他の効果が存在するのか，という点についての評価と検証が必要である．

検討が必要である．FIT等に要した買取総額は，回避可能費用を減じた賦課金として，電気料金に加算されているが，電気料金に占める賦課金の割合は既に一割を超えている．再エネ導入の負担が電気料金に偏重すると，電気料金の上昇を通じて，カーボンニュートラルの達成に向けて重要となる需要側でのエネルギー転換（電化）の阻害要因となりうる．例えば英国やドイツでは，こうした課題のために，エネルギー価格のリバランシング（再調整）に向けた制度改正に動き出している．我が国においても，カーボンニュートラル達成に向けて、再エネコストの分配問題について議論すべき時に来ていると言えよう．

参考文献

1）経済産業省　資源エネルギー庁；エネルギー基本計画，(2021)，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf.
2）経済産業省　資源エネルギー庁；エネルギー基本計画の概要，(2021)，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_02.pdf.
3）経済産業省　資源エネルギー庁；2030 年におけるエネルギー需給の見通し（関連資料），(2021)，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_03.pdf.
4）経済産業省 資源エネルギー庁；長期エネルギー需給見通し関連資料，(2015)，長期エネルギー需給見通し小委員会（第11回，7/16，資料 3）http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/011/pdf/011_07.pdf
5）朝野賢司・永井雄宇・尾羽秀晃；2030 年における太陽光発電導入量・買取総額の推計と今後の制度設計のあり方，(2021)，総合エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会（第26回，3/8，資料4）https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/026_04_00.pdf
6）朝野賢司・永井雄宇・尾羽秀晃；2030 年における風力発電導入量の推計，(2021)，総合エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会（第28回，3/15，資料 4）https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/028_04_00.pdf
7）朝野賢司・尾羽秀晃；2030年における再生可能エネルギー導入量と買取総額の推計，(2020)，電力中央研究所研究資料 ,Y19514 ,https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/source/pdf/Y19514.pdf.
8）間瀬貴之・朝野賢司・永井雄宇；2030年温室効果ガス46%削減目標の達成は可能か？，(2021)，電力中央研究所社会経済研究所ディスカッションペーパー ,SERC21001,https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/download/21001dp.pdf.
9）間瀬貴之・朝野賢司・永井雄宇；「第 6 次エネルギー基本計画」の定量的検証，(2022)，電力中央研究所研究資料,SE21502（近刊）
10）畦地啓太他；風力発電事業の計画段階における環境紛争の発生要因，エネルギー・資源学会論文誌．35-4（2014），pp.11-22.
11）経済産業省　資源エネルギー庁；2030年に向けたエネルギー政策の在り方，(2021)，総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第40回会合，4/13，資料 2）https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/040/040_005.pdf
12）経済産業省　資源エネルギー庁；2030年に向けたエネルギー政策の在り方，(2021)，総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第45回会合，7/13，資料3）https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/045/045_006.pdf
13）経済産業省　資源エネルギー庁；エネルギー基本計画（素案）の概要，(2021)，総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第46回会合，7/21，資料 1）https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/046/046_004.pdf
14）木村 宰；国の温暖化対策関連経費の推移と費用対効果，電力経済研究，65（2018）,pp.32-44，https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/pdf/periodicals65_03.pdf
（URLのアクセス日 2022.1.10）

＜著者紹介＞

朝野　賢司（あさの　けんじ）
（一財）電力中央研究所社会経済研究所 上席研究員・研究戦略担当（社会経済）．京都大学大学院地球環境学舎博士課程修了，博士（地球環境学）．電力システム改革下における再生可能エネルギー技術開発・普及政策の政策評価等に従事．

協賛行事ごあんない

第32回環境工学総合シンポジウム2022

〔会　　期〕2022年7月7日（木）～8日（金）
〔主　　催〕一般社団法人日本機械学会
〔場　　所〕レクザムホール（香川県高松市玉藻町9-10）
〔ＵＲＬ〕https://www.jsme.or.jp/event/22-14/
〔問合せ先〕日本機械学会　環境工学部門〔担当　橋口　公美〕E-mail：kankyosympo2022@jsme.or.jp

特　集　持続可能なまちづくり

特集にあたって

The Aim of the Special Issue “Sustainable Cities in Japan”

鷲津明由*・高瀬香絵**
Ayu Washizu　　Kae Takase

1．特集のねらい

持続可能な開発目標（SDG）11“Make cities inclusive, safe, resilient and sustainable”では，大気汚染や廃棄物の削減（11.6）の達成目標に加え，障がい者や高齢者など弱い立場にある人達をだれ一人取り残さないインクルーシブなまちづくりと交通機関や公共施設の整備（Targets 11.2, 3, 7），および，文化遺産や自然遺産の保護（Target 11.4），災害に対する備え（11.5），について言及されている．住環境の改善のために公害や資源循環に対する問題解決に取り組まれてきた歴史は比較的長いが，それに加え，インクルーシブ，レジリエンス，文化の継承などのキーワードが加わっていることに注目できる．また目標実現のための方法として，都市部とそのまわりの地域と農村部とが，経済的，社会的，環境的にうまくつながりあうこと（11.a），気候変動への対策や災害への備えをすすめる総合的な政策や計画をつくること（11.b）があげられている[1]．第５次環境基本計画で打ち出された「地域循環共生圏」の考え方，情報通信技術を活用して市民一人一人に寄り添ったサービスを提供し，各分野のマネジメントの高度化によって諸課題の解決を行おうとするスマートシティ関連事業の実施[2]は，SDG11の達成のための具体策といえるだろう．さらにまちの魅力を，新たなインフラ建設によって（ハード的に）生み出すのではなく，今あるインフラを生かしてそこから魅力あるあらたな価値サービスを付け加えることで（ソフト的に）生み出すというエリアマネジメントの考え方も定着している[3]．このような背景の下，各地で，持続可能でスマートなまちづくりの取り組みが進展している．

2．特集の構成

以下では，幅広いまちづくり目標の達成を目指すことを目的とする，地域循環共生圏の形成と情報通信技術等を活用したスマートシティの構築に関わる７報をご紹介する．

(1)「脱炭素化に向けた地方公共団体の取組について」では，地域循環共生圏や温対法における地方自治体の再生可能エネルギー促進策の現状等について国の立場からご解説いただく．（環境省・澁谷　潤氏）

(2)「自治体新電力の意義と課題」では，地域主体の再エネ開発のための自治体新電力の役割が紹介される．（ローカルグッド創成支援機構・稲垣憲治氏）

(3)「能勢・豊能町におけるエネルギーを軸としたまちづくりへの挑戦」では，地域に眠るデータを丁寧に掘り下げ学際研究を通じて，解を模索すべきことが紹介される．（能勢・豊能まちづくり・榎原友樹氏）

(4)「生きるを楽しむ西粟倉村の持続可能なまちづくり」では，データを活用した山村におけるまちづくり事業が紹介される．（エックス都市研究所・河野有吾氏）

(5)「進化し続ける街『みなとみらい21』」では，首都圏の大都市として多様な機能が集積している特性を生かしたカーボンニュートラルに向けてのイノベーションの創発が論じられる．（横浜みなとみらい21・古木　淳氏）

(6)「ネクステムズが宮古島で目指すカーボンニュートラルへの道」では，系統が分断された島しょ地域において，市民パートナーとして地域のエネルギーマネジメント事業者が再生可能エネルギーの最大利用に挑戦している実例が示される．（ネクステムズ・比嘉直人氏）

(7)「電力と交通のセクターカップリングによる地域エネルギーマネジメント－宇都宮市での取組を中心に－」は，電力・交通・人流のデータプラットフォームを通じて，ネットワーク型コンパクトシティ（NCC）の形成を目指す国家事業の紹介である．（早稲田大学・石井英雄氏／藤本　悠氏／光岡正隆氏／林　泰弘氏）

以上の７報により，今後の持続可能なまちづくりをよりよく進展させるために必要な，エネルギー・資源に関わる新たな技術開発の方向性についてのご参考としていただければ幸いである．本特集の趣旨に賛同し，ご執筆をご快諾くださった執筆者各位に深く感謝を申し上げる．

*エネルギー・資源学会編集実行委員
早稲田大学社会科学総合学術院
〒169-8050 東京都新宿区西早稲田1-6-1
E-mail：washizu@waseda.jp
**エネルギー・資源学会編集実行委員
CDP Worldwide-Japan
〒100-0004 東京都千代田区大手町2-2-1 3F　xLINK大手町

参 考 文 献

1）United Nations, Sustainable Development Goals https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/
2）内閣府，総務省，経済産業省，国土交通省；令和３年度スマートシティ関連事業の公募について，https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/r3_smartcity.html
3）内閣府；地方創生まちづくり―エリアマネジメント―，https://www.chisou.go.jp/sousei/about/areamanagement/areamanagement_panf.pdf

特　集　持続可能なまちづくり

脱炭素化に向けた地方公共団体の取組について

Measures by Local Governments for Decarbonization

澁　谷　　潤*
Jun Shibuya

1．地方公共団体の気候変動・エネルギー対策を巡る動向等

2015年にパリで開催された「国連気候変動枠組条約第21回締約国会議」（COP21）では，2020年以降の気候変動問題に関する国際的な枠組みである「パリ協定」が採択された．パリ協定では，国際条約として初めて「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つとともに，1.5℃に抑える努力を追求すること」などを掲げた．

また，2021年10月から11月にかけて，英国・グラスゴーにおいて，COP26が開催された．本会合内での決定文書では，最新の科学的知見に依拠しつつ，今世紀半ばでの温室効果ガス実質排出ゼロ及びその経過点である2030年に向けて野心的な緩和策，適応策を締約国に求める内容となっており，特にこの10年における行動を加速させる必要があることが強調されている．

2020年10月，我が国は，2050年までに，温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする，すなわち，2050年カーボンニュートラル，脱炭素社会の実現を目指すことを宣言した．翌2021年4月，地球温暖化対策推進本部において，2030年度の温室効果ガスの削減目標を2013年度比46%削減することとし，さらに，50パーセントの高みに向けて，挑戦を続けていく旨が公表された．

また，2021年5月，「地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を改正する法律（以下，改正地球温暖化対策推進法）」が成立し，2050年カーボンニュートラルが基本理念として法に位置づけられることとなった．

さらに，2021年6月，国・地方脱炭素実現会議において「地域脱炭素ロードマップ」が決定された．地域脱炭素ロードマップでは，5年の間に政策を総動員し，人材・技術・情報・資金を積極的に支援することで，2030年度までに少なくとも100か所の「脱炭素先行地域」をつくること，脱炭素の基盤となる重点対策を全国津々浦々で実施することとしている．

2021年10月には，地球温暖化対策計画の閣議決定がなされ，5年ぶりの改定が行われた．改定された地球温暖化対策計画では，2050年カーボンニュートラルの実現に向けて気候変動対策を着実に推進していくこと，中期目標として，2030年度において，温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目指し，さらに，50%の高みに向け，挑戦を続けていくという新たな削減目標も示され，2030年度目標の裏付けとなる対策・施策を記載した目標実現への道筋を描いている．併せて，政府の事務・事業に関する温室効果ガスの排出削減計画である政府実行計画の改定も行われ，2030年度までに50%削減という新たな目標や，その目標達成に向けた施策が位置づけられた．

また，「2050年までの二酸化炭素排出量実質ゼロ」を目指す地方公共団体，いわゆるゼロカーボンシティは，2019年9月時点ではわずか4地方公共団体であったが，2021年12月末時点においては514地方公共団体と加速度的に増加している．

2．気候変動対策による地域課題の解決，地域循環共生圏について

地球温暖化対策の実施が急務となっている一方で，多くの地域が，人口減少・少子高齢化への対応，地域経済の活性化，頻発・激甚化する災害に強い地域づくり，地域住民の健康の維持と暮らしの改善，デジタル技術に代表される科学技術の急速な進歩等への対応等，様々な社会経済的な課題に対応することを求められている．

このような課題に直面する中で，これからの地方における地球温暖化対策のあり方として，「地域循環共生圏」の考え方が重要である．地域循環共生圏とは，2018年4月に閣議決定した第五次環境基本計画において位置づけられた，各地域が美しい自然景観や地域に存在する再生可能エネルギー等の地域資源を最大限活用しながら自立・分散型の持続可能な社会を形成しつつ，地域の特性に応じて資源を補完し支え合うことにより，地域の活力が最大限に発揮されることを目指す考え方のことである．

地域の脱炭素化の取組は，我が国における地球温暖化対策に貢献すると同時に，それ自体が地域の成長戦略であり，再生可能エネルギーなどの地域が持つ様々な資源を活用して，地域が抱える様々な課題の解決と同時に地域経済循環

*環境省大臣官房環境計画課　課長補佐

や地方創生を実現する機会ともなり得る．従って，地域の脱炭素化の機会を捉え，地方公共団体・地域企業・住民など地域が主体となって積極的に取組を実施することが，これからの地域の持続的発展に重要となる．

また，地球温暖化対策は，中長期的な視点を持ち，インフラ設備や公共施設の整備のあり方の検討を含め，まちづくりの一環として実施することが重要である．地域の脱炭素化をできるだけ早期に実現することが，その地域のカーボンニュートラルを目指す企業への企業立地・投資上の魅力を高めるなど，地域の産業の競争力を維持向上させることにもつながる．

3．地方公共団体実行計画制度の概要

地球温暖化対策の推進に関する法律（平成10年法律第117号．以下「地球温暖化対策推進法」という）第21条に基づき，都道府県及び市町村は，国の地球温暖化対策計画に即して，地球温暖化対策の推進のための計画（地方公共団体実行計画）の策定を行うことが求められている．この「地方公共団体実行計画」については，策定する内容の違いから，「事務事業編」及び「区域施策編」の２つに分けることができる．

「事務事業編」は，地方公共団体自らの施設や事業からの温室効果ガスの排出削減等に関する計画であり，全ての地方公共団体に対して策定が義務づけられている．全国に多数存在する公共施設等からの排出削減を図ることは，我が国の温室効果ガス総排出量の削減を推進する上でも重要であることに加え，地球温暖化対策の推進に当たっては，国や地方公共団体が率先して取り組むことが重要であり，とりわけ住民生活にとって身近な公共施設において様々な対策を進めていくことは，住民等の地球温暖化対策をリードすることにも繋がりうる．原則として，地方公共団体が行う全ての事務事業が対象であり，対策の一例としては，外皮性能の向上や省エネ設備導入等による省エネ化，再エネ設備の導入，グリーン購入・グリーン契約の推進等が挙げられる．このため，策定に当たっては，全ての部局を巻き込んだ体制を整えること，とりわけ，管財部局や営繕部局などとの連携が不可欠であり，公共施設等総合管理計画など関連する行政計画との連携を図っていくことが必要である．

施策の推進に当たっては，温室効果ガスの削減だけでなく，光熱水費の削減，庁舎管理の高度化・効率化など，環境面以外のメリットも併せて創出していくことが重要である．例えば，地方公共団体が避難施設，防災拠点として位置づけている公共施設に再エネ設備と蓄電池などを併せて導入することで，平時はエネルギー利用の脱炭素化を図りつつ，災害等により大規模な停電が起きた際にエネルギー供給を可能とし，防災面でも役立つ施設とすることが可能である．

「区域施策編」は，地方公共団体の区域全体における排出削減対策等に関する計画であり，住民・事業者による取組も含む計画である．全ての都道府県，指定都市及び中核市（施行時特例市を含む）に対して策定が義務付けられている．また，後述する改正地球温暖化対策推進法において，それ以外の市町村についても策定することが努力義務となった．具体的な策定内容としては，区域の自然的条件に適した再生可能エネルギーの利用促進，住民，事業者などの省エネルギー活動の促進，都市機能の集約などの地域環境の整備，廃棄物等の発生の抑制の促進などに関する事項を盛り込むこととされており，非常に幅広い分野における施策の立案が求められる．このため，区域施策編の策定に当たっては，区域の気候や再生可能エネルギーの導入可能性，産業構造，人口動態などの区域の特性を整理し，得られた情報を基に重点的な施策について検討していくことが重要である．また，地方公共団体における総合計画，都市計画，農業振興地域整備計画，低炭素まちづくり計画，地域公共交通網形成計画等の温室効果ガスの排出の量の削減等と関係を有する施策について，地方公共団体実行計画と連携して温室効果ガスの排出の量の削減等が行われることが望ましい．

区域全体を対象とする施策を推進していく上では，事務事業編よりも更に多くの関係者との連携，共同が必要不可欠である．先進的に取組を進めている地方公共団体の多くは，再エネなどの地域の資源を活用しながら，気候変動対策を地域経済の活性化，災害に強いまちづくり，住民の健康増進など，他の地域課題の解決にもつなげるように取り組んでいる．このことは，気候変動対策を推進する上で，庁内の関係部局や，住民や事業者等の地域の関係者との円滑な合意形成を図っていくに当たっても非常に重要な点である．

4．改正地球温暖化対策推進法の概要

4.1 改正の背景

地域の脱炭素化のためには，地域資源である再エネの活用が重要であるが，十分な地域環境への配慮がなされない，あるいは周辺住民等との合意形成を経ない形で再エネが導入されることにより，景観悪化や騒音等の環境トラブルや地滑り等の災害が発生（又はその懸念が周辺住民等の側に存在）し，再エネ設備の導入を条例で制限する自治体も急増している状況にある．一方，地域で利用するエネルギーの大半は，輸入される化石資源に依存している中，地域の企業や地方自治体が中心になって，地域の雇用や資本を活用しつつ，地域資源である豊富な再エネ等のポテンシャル

を有効利用することは，地域の経済収支の改善につながる等のメリットが期待できる．

このため，地域への更なる再エネ導入に当たっては，地域環境に適切に配慮するとともに，地域経済の活性化や防災等社会面の課題の解決にも貢献する事業とし，地域における合意形成を図りながら推進していくことが重要であり，令和３年５月に成立した改正地球温暖化対策推進法において，区域の排出削減を一層促進するため，地域における合意形成を図りながら，地域の再エネ導入を促進していくための制度が創設されることとなった．

4.2 改正の内容

区域施策編において，地方公共団体が定める施策についてその実施目標を合わせて定めることが必要となった．条文上，これまでは施策ごとの目標は必須の記載事項ではなく，例えば，区域施策編において再エネ導入目標を設定している都道府県は約３割であったが，本改正により，区域の施策推進を図っていく上で有効と考えられる再エネ導入目標等の施策目標の設定が行われていくことが期待される．

さらに，市町村が，地域経済・社会の持続的発展に資する取組や，地域の環境保全に配慮した再エネ事業を認定する制度が創設された．

具体的な制度の流れとして，市町村は，実行計画において，地域脱炭素化促進事業（再エネ施設等の整備とその他の地域の脱炭素化のための取組を一体的に行う事業であって，地域の環境保全及び地域の経済・社会の持続的発展に資する取組を併せて行うもの）の促進に関する事項を定めることとする．具体的には，促進区域，地域の環境の保全のための取組，地域の経済及び社会の持続的発展に資する取組等を定めるよう努めることとする．

次に，地域脱炭素化促進事業を行おうとする者は，事業計画を作成し，地方公共団体実行計画に適合すること等について市町村の認定を受けることができる．この認定を受けた認定事業者が認定事業計画に従って行う地域脱炭素化促進施設の整備に関しては，関係許可等手続のワンストップ化等の特例を受けることができる．

また，都道府県は，その実行計画において，地域の自然的社会的条件に応じた環境の保全に配慮し，地域脱炭素化促進事業について市町村が定める促進区域の設定に関する基準を定めることができる．

これにより，地域課題の解決に貢献する再エネ活用事業については，市町村の積極的な関与の下，地域内での円滑な合意形成が図られやすくなるといった基盤が整うことが期待される．環境省としては，地方公共団体との連携の下，本制度の活用を通じ，地域に貢献する再エネ事業の拡大を図っていく．

5．地方公共団体実行計画制度の現状等について

環境省では，毎年，全国の地方公共団体を対象に「地球温暖化対策の推進に関する法律施行状況調査」を行っており，「地方公共団体実行計画」の策定状況等を調査し，地方公共団体の地球温暖化対策・施策への取組状況等を確認している．2020年10月時点においては，事務事業編は1,788団体中1,611団体が策定済である（策定率は90.1%）．また，区域施策編は585団体が策定済である（策定率は32.7%）．ただし，区域施策編については，策定義務のある団体の策定率は100%となっている．

計画を策定・改定していない理由としては，「計画を策定・改定するための人員がいないため」，「地球温暖化対策に関する専門知識が不足しているため」といった理由があげられている．

このため，地域における脱炭素化の取組を推進していく上では，地方公共団体の人員不足，専門的な知見の不足を補うことは大きな課題であり，環境省では各種の支援を行っているところである．具体的には，地方公共団体実行計画の運用指針などをとりまとめた「地方公共団体実行計画策定・実施マニュアル」の策定，事務事業編の運用に係る業務負担低減，排出算定作業の簡素化等を目的とした「地方公共団体実行計画策定・管理等支援システム」（Local Action Plan Supporting System；LAPPS）の整備，統計データなどを用いて作成した都道府県・市町村別の排出量データである「自治体排出量カルテ」の作成などの情報基盤整備を行っている．

更に，予算事業等においても，地域における2050年を見据えた再エネ目標等の策定，地域における再エネ導入に当たってのゾーニング，合意形成等の取組，地域の再エネ事業の実施・運営体制の構築などの取組に対する支援事業を行っているところである．

地方公共団体の地球温暖化対策をとりまく状況は大きく変化しており，2050年カーボンニュートラルに向けた地方公共団体の役割が期待されるとともに，地球温暖化対策による持続可能な地域づくりの重要性が高まってきている．環境省としては，地方公共団体における，野心的かつ実効性があり，そして地域の様々な課題解決にも資する地球温暖化対策を今後も支援し，地方公共団体の脱炭素化の取組を促進していく．

＜著者紹介＞

澁谷　潤（しぶや　じゅん）

東京大学経済学部卒業．環境省入省．現在，地方公共団体実行計画制度の運用等に従事．

特　集　持続可能なまちづくり

自治体新電力の意義と課題

Significance and Issues of New Municipal Power Suppliers

稲　垣　憲　治*
Kenji Inagaki

1．はじめに

自治体における地域脱炭素への機運は高まりを見せており，2050年までに二酸化炭素排出実質ゼロを表明する自治体は2021年12月時点で512に達している．また，地域脱炭素の取組を通じ，地域経済の活性化にもつなげようとする動きが活発化している．このような中，自治体が出資や協定で関与し，地域の再生可能エネルギーなどを電源として限定された地域を対象に電気販売を展開する「自治体新電力」の設立が全国で相次いでいる．現在，80以上が設立されており，今後の増加も見込まれる．本稿では，自治体新電力の事例を通じその意義と課題を考えたい．

2．自治体新電力の事例

自治体新電力の運営形態や事業内容は様々であるが，まず，特色ある自治体新電力の事例を紹介したい．いずれも地域人材による地域主体の取組である．

2.1　ローカルエナジー（鳥取県米子市）

ローカルエナジー株式会社は，鳥取県米子市及び地域企業により2015年12月に設立された．ローカルエナジーは，米子市のクリーンセンターや消化ガス発電からの電力や，民間事業が開発した太陽光発電，小水力発電，風力発電，地熱発電を調達し，米子市や境港市の公共施設に供給する．また，株主でもある中海テレビ放送（**図1**ではChukai電力）への卸売りを行い，中海テレビ放送が主力事業であるケーブルテレビの既存顧客を中心とした家庭・民間向けに電力販売するスキームになっている．

新しい取組にも積極的で，13の公民館に蓄電池（各9.8kWh）を設置し，VPPを構築している．具体的には，下水処理場に設置された消化ガス発電（24.5kW×2機）と避難所でもある公民館に設置された太陽光発電（4kW×4機）などを電源に各公民館に電力供給を行い，施設で使いきれない余剰電力は蓄電池に充電する．電力需要を遠隔監視して蓄電池の充放電を制御することで，電力卸売市場の価格の高い時間には蓄電池から放電して買電を減らし，JEPXの価格の安い時間に買電を増やして蓄電する．平時は蓄電池でこのようなVPP運用を行うとともに，非常時には非常用電源として活用し地域のレジリエンスにも貢献している．

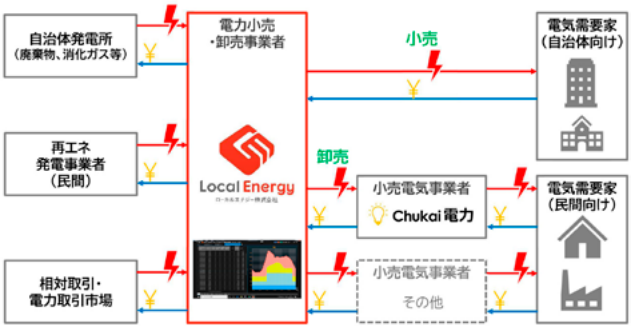


図1　ローカルエナジーの事業モデル

この他，再エネ100%電力の公共施設への供給やBEMSによる公共施設の省エネ管理なども手掛ける．人材育成にも力を入れており，小学校社会科見学（11件：324名），中学校・高校講演会（12件：3,500名），講演ワークショップ（50件）などを通じ，環境教育や自社の経験・知見の他地域への提供も行っている（カッコ内の数は2021年12月時点）．

ローカルエナジーは，地域雇用や地域経済循環を目的に，設立当初から需給管理を含めた様々な業務の多くを自社で内製化している．業務の内製化によって社内にノウハウが蓄積し，その後の様々な事業展開に結びついている．例えば，前述のVPP実証は，需給管理を内製化していることで得られた①各施設の消費電力量を30分値でリアルタイム把握できること，②需要予測ノウハウがあること，③JEPXとの売買ノウハウがあることなどが活かされている．

また，AIを用いてJEPXの価格を予測するシステムを同じ山陰地域の地域企業であるシステムアトリエブルーオメガ（島根県松江市）と共同開発し運用しているが，これらのシステム開発にもJEPXの入札実務ノウハウが十分反映されている．この他，業務の内製化により，独自の供給メニュー（地産電源の供給）が需要家に提供しやすくなったり，顧客の電力消費量がリアルタイムで把握できるため，省エネ提案に活用できたりと営業力・商品競争力の強化にもつながっている．

*一般社団法人ローカルグッド創成支援機構
〒108-0014 東京都港区芝5-26-30 専売ビル6F
E-mail：k.inagaki@localgood.or.jp

地域経済循環を目指し，自社でのノウハウ内製化を重視しつつ，様々な事業展開を行う同社の取組は，環境省グッドライフアワード環境大臣賞（自治体部門）や新エネ大賞（資源エネルギー庁長官賞）などそのコンセプトが高く評価されており，これまで75件：383名（2021年11月時点）の視察受け入れを行うなど，他の自治体新電力への影響も大きい．

2.2 三河の山里コミュニティパワー（愛知県豊田市）

株式会社三河の山里コミュニティパワー（以下，「MYパワー」という）は電力を手段として地域医療・福祉や交通などの地域課題解決を目指している．愛知県の豊田市は，７割を中山間地が占めるが他の全国の中山間地域同様に，公共交通が課題となっている．

そこで，豊田市などは2016年より高齢者世帯などを対象に，高齢者の見守りや移動支援等を行う「たすけあいプロジェクト」を開始した．同プロジェクトは2018年度で実証が終了し，その後は地域で自立的に運営しつつ，他の中山間地区にも拡大していくことが目指された．自立的な運営には財源が課題になる中，小売電気事業と併せた実施が計画され，2019年にMYパワーが設立されている．豊田市の中山間地域においては，年間約25.5億円[注1)]の電気代が地域から流出していたが，この資金を地域に循環させ，地域課題解決である移動支援などに活用する狙いである．

また，「たすけあいプロジェクト」の持続的な運営には一定の利用者数が不可欠だが，ドライバー登録数が頭打ちであったことや，利用者（乗客）が比較的少数のヘビーユーザーとなっていたことなどから，裾野拡大が課題となっていた．地域住民の当事者意識を育てていく必要があったが，MYパワーによる電力販売がその接点となることも狙いとされた．地域課題を地域住民が当事者意識を持って解決していくために，その活動財源を電力切替によって住民自ら獲得してもらいたいという地域自治の考えである．

たすけあいプロジェクトは，もともと地域の医療機関（足助病院）が中心となった団体が実施していたが，一般社団法人三河の山里課題解決ファーム，豊田市，中部電力の３者協定に基づき設立されたMYパワーがこれを引き継いでいる．なお，MYパワーは当時まだ少なかった大手電力と連携した自治体新電力としても注目された．

現在（2021年12月末時点），MYパワーは，豊田市内の公共施設，民間施設，家庭など約750施設に電気販売を行う．電気販売を通じた地域課題解決として，たすけあいプロジェクト以外も様々な取組を行う．例えば，自治区など地域単位で電気をＭＹパワーに切り替えてもらい，そこで得られた利益をその地域の課題解決に充てる「おたがいさま電力」を開始（**図２**）．草刈りで困っている地域は草刈りの費用に充填したり，積立ててまとめて神社やお社の修繕費用に充てることなどが想定されている．地域の自主財源を創出する取組である．

図２ おたがいさま電力のスキーム

また，MYパワーは，地域に小規模再エネの開発を進める方針をとっており，まずは地域出資・寄付により病院の駐車場に太陽光発電付のカーポートを設置．ＥＶやＰＨＶの充電が可能なほか，病院施設へも電力供給され災害時の非常用電源ともなっている．

同社は，地域課題を丁寧に把握するため地域住民へのアンケート調査も実施している．調査結果では，特に高齢者の困りごとは多様で，個別ニーズに応じた対応が重要であることが示された．また，これらの困りごとをシェアして対応することで助け合いが成り立つことも分かってきた．MYパワーでは，地域自治組織を支援する形で，これら困りごとを助け合って解決するマッチングスキーム構築も予定している．

MYパワーは，当初，三河の山里課題解決ファーム，あいち豊田農業協同組合，豊田信用金庫の出資で設立されたが，その後，増資と地域への株式譲渡がされており，2021年12月時点では，三河の山里課題解決ファーム（69.9%），あいち豊田農業協同組合（14.6%），豊田信用金庫（10.1%），地域住民（5.4%）となっている．今後，三河の山里課題解決ファームが持っている株式を順次地域に譲渡し，地域で運営していきたい考えだ．

MYパワーの設立時から一貫した「電力はあくまで手段で，目的は地域課題解決」との姿勢は共感を徐々に広げており，更なる拡大が期待される．

2.3 たんたんエナジー（京都府福知山市）

2018年12月に設立されたたんたんエナジー株式会社は，京都府福知山市と協定を結ぶ自治体新電力である．社名の由来は，京都府北部地域の「丹波（たんば）」，「丹後（たんご）」からくる．設立の発端は，京都府が地域エネルギー事業体設立について検討したことに始まる．この時の京都

注１）環境省「令和元年度地域低炭素推進事業体設置モデル事業」において㈱三河の山里コミュニティパワーが試算．

府の結論は，新電力を取り巻く状況が流動的として「すぐには設立せず継続検討」であった．しかし，設立の検討会に参画していた京都府地球温暖化防止活動推進センターのメンバーなどが集まり，「自治体新電力によって地域による，地域のための再エネ普及の基盤ができるのではないか」との熱い思いのもと，個人で出資金を出し合って設立に至っている．このような経緯から，同社は，特に再エネ利活用や地域脱炭素への思いが強い点が特徴である．

設立後の同社は，福知山市の本庁舎や公民館，小中学校，そして福知山城など40施設以上に100%再エネ電力を供給．城に100%再エネ電力を供給したのは全国初だったため，多くのメディアにも取り上げられ，地域のブランディングにも一役かっている．福知山城という地域のシンボルで100%再エネ電力が使われていることは，その自治体が地域脱炭素化に力を入れているというメッセージにもなるだろう．

また，同社は設置後10年が経過しFIT期間が終了した家庭用太陽光発電の余剰電力を各家庭から買い取って，福知山市の小中学校などへ供給している．卒FIT電気の買取価格は10円/kWh（税込）で関西電力より約20%高い．市民からは，「自分たちが発電した電気を，地元の学校で使ってもらえるなら，その方がいい」と好評だ．

加えて，たんたんエナジーと家庭用電気の契約をした全員に対し，丹波・丹後地域のストーリー性のある地産食品をプレゼントし，顧客と地域食品生産者とも結びつけるキャンペーンも実施．電気以外の地産地消も促進し，地域経済循環を促す取組となっている．

2021年11月には，たんたんエナジー100%出資の子会社による市民出資型太陽光発電でのオンサイトPPA事業[注2)]を開始．第一弾として，市の公共施設3箇所の屋根を借りて約350kWの太陽光発電を設置する．また，避難所に指定されている2箇所には蓄電池を，うち1箇所にはV2B（vehicle to building）を導入する．V2Bは，通常時は電気自動車の充電に，停電時には逆に電気自動車からの給電に利用できるため，地域の防災力向上にも寄与する．

たんたんエナジーは，設立後すぐに，福知山市に加えメインバンクとなる京都北都信用金庫，プラスソーシャルインベストメント，龍谷大学と5者協定を結んでいるが，プラスソーシャルインベストメントは社会的投資をサポートする会社であることからも分かるとおり，設立当初からこの市民を巻き込んだ再エネ開発が計画されていた．

市民に温暖化対策について考えてもらうことを目的にしていることから，参加しやすいように1口1万円からの出資を可能としている．また，3口以上の出資者には福知山城や動物園・植物園などの入場券セット，市内宿泊クーポン券などの特典がある．市内の観光振興にもつながる仕組みとなっている．なるべく多くの人に参加してもらえるように出資上限を30口に設定したが，募集総額の300万円は早期に達成されている．

まずは3施設でのパイロット実施だが，ノウハウを蓄積しつつ更なる拡大の検討を進めている．

図3　市民出資型オンサイトPPA実施発表の様子（2021年11月）

福知山市は2021年2月に，2050年までにCO_2排出量実質ゼロとするゼロカーボンシティを宣言．同年4月からはエネルギー・環境戦略課（4名体制）を新たに設置し，同課を庁内の司令塔として脱炭素を進めている．

同市によると，市内で再エネ開発を検討している事業者からたんたんエナジーへの売電についても打診があるという．小水力発電等のFIT認定要件の一部に自治体新電力への売電が入ったが，FITを使わない再エネ開発においても売電先の確保は事業実施上の重要な要素となる．市内に信頼できる自治体新電力がいると，地域の再エネ導入にもつながるといえるのではないか．

更に，たんたんエナジーは市の相談相手としての役割も発揮し始めている．例えば，中学校における省エネ教育についての相談を市が中学校から受けた際，たんたんエナジーを通じて専門家とつながり，断熱ワークショップが実現しそうだ．たんたんエナジーの専門知見やネットワークが活かされる形だ．

福知山市は，協定に基づき，たんたんエナジーを市のエネルギー施策をともに推進するパートナーとして位置づけており，前述のオンサイトPPAや再エネ100%電気供給以外にも同社と連携した公共施設への省エネ診断や環境教育など幅広い取組を行う．市は，ゼロカーボンを進めるにあたって，今後も様々な施策を予定しているが，たんたんエナジーとの連携により施策に実効性を持たせたい考えだ．

注2）発電事業者が需要施設の屋根等を借りて発電設備を設置し，その施設で使用された分の電気料金を受領する方式．需要施設側は，初期投資ゼロで太陽光発電の電気を使うことができる．PPAはPower Purchase Agreementで電力購入契約のこと．

3．自治体新電力の意義

3.1 地域脱炭素の担い手

脱炭素社会が志向される大きな流れの中，自治体はこれまで普及啓発や補助金といった手法でしか地域脱炭素化を目指せなかった．また，地域脱炭素のための地域のプレイヤーが特に中小規模自治体では存在しないといった課題もある．

そうした中で，地域に自治体新電力という地域の担い手がいると，自治体の地域エネルギー政策の幅は広がる．秩父市や生駒市などでは，地球温暖化対策の推進に関する法律に基づき自治体が策定する「地球温暖化対策実行計画」に自治体新電力を明記している．

前述での事例のように，自治体新電力による地域脱炭素に向けた取組は広がりつつあるが，今後特に，新電力業務と親和性のある再エネ開発への再投資拡大が期待される．現在，再エネ開発においては，地域との共生が全国的な課題となっているが，地域密着事業者である自治体新電力による実施は，地域との共生がなされやすいと考えられる．

また，自治体新電力による地域での丁寧な省エネ推進も期待できる．地域の事業者等に対し省エネルギー診断を行う自治体や国の機関もあるが，公平性の観点から具体的な省エネ機器提案まで踏み込めず，診断はしたが省エネ機器導入まで至らないことも多かった．この点でも，自治体新電力による具体的な機器提案の伴う省エネルギー事業が広まれば，実効性のある省エネルギー対策が図られるのではないか．

これら脱炭素事業を地域の担い手が手掛けることで，地域経済循環も増していく．地域脱炭素を地域活性化にもつなげていくことを目指す政府の方針とも合致する．

3.2 自治体の相談相手「地域コンサル」の役割も

地域人材の従業員を有し，知見・ノウハウを蓄積している自治体新電力への個別ヒアリングにおいて，複数から聞かれるのが，「自治体から地域脱炭素などの計画策定や個別政策について相談されるようになった」というものである．

小中規模の自治体では，これまで地域にこういった相談相手はおらず，地域脱炭素施策等については，コンサル会社（ほとんどは地域外企業）へ委託していた．当然，コンサル会社は調査や計画策定業務がミッションであるため，その後の脱炭素事業の実行までは担保しない．一方，自治体新電力には，専門的なことも計画策定後の実行段階のことも相談できる．これまで，ともすると自治体の計画は実行に結びつかないことも少なくなかったが，自治体新電力という地域の担い手がいると実行性が増すのである．自治体が自治体新電力という相談相手「地域コンサル」兼実行部隊を得た意義は大きいのではないか．

足元では，地域主体の自治体新電力による太陽光発電のオンサイトPPA，小水力開発，省エネ診断及び断熱改修といった地域脱炭素事業や，地域交通支援や特定送配電事業によるレジリエンス向上といった地域課題解決事業の展開が広がりつつある．これらは，地域人材により地域共生型で自走的になされており，自治体新電力が地域脱炭素化や地域経済循環，地域課題解決の「担い手」になりつつあることを示している．

4．自治体新電力の課題

2020年12月下旬から翌年1月中旬にかけて卸電力市場において記録的な高騰が発生した．短時間の「スパイク」でなく「高値張り付き」という事態になり，連日の高値が記録され，1日平均で100円/kWhを超える日も続いた．2015年度から2019年度までの5年間の市場価格平均が9円程度であるため，この高騰の程度が分かる．

この市場高騰は，自治体新電力を含めた新電力業界全体が大きな影響を及ぼした．自治体新電力では，かつのパワー（秋田県鹿角市等が出資）や塩尻市森林公社（長野県塩尻市出資）が相次いで事業休止を発表．自治体新電力以外でも新電力大手のF-Power が同年3月24日に会社更生法を申請．また，小売電気事業に加え，太陽光発電システムの製造事業を実施していたアンフィニも，太陽光発電システム価格の下落にJEPX市場高騰が加わり同年9月30日に民事再生を申請している．

なお，自治体新電力の経営状況については，市場高騰前の2020年2月から3月にかけて40地域新電力を対象に行った調査結果によると，①アンケート回収できなかったもの，②決算前であるもの，③直近決算時に電力供給開始前であったもの，④決算自体を非公開と回答したものを除く26社すべてで直近の決算で純利益が出ていた[1)]．この高騰で経営状況が一変している．

また，自治体新電力の特徴として，エネルギーの地産地消を目指し，地域のFIT電気の調達を重視することが挙げられる．しかし，FIT電源の調達単価は市場価格連動となるため，一連の高騰を受けて予定していたFIT電気調達を取りやめる，FIT電気比率の引き下げるといった自治体新電力の声も聞こえる（リスクヘッジ手段として先物取引等もあるが，売り玉が少ないといった課題がある）．一方で，相対電源の積み増しなどでリスクマネジメントしようとすると，地域新電力の訴求ポイントである地域のFIT電源の比率が下がってしまう．地域新電力各社は最適な電源構成を模索する．

2021年の1月下旬以降一旦落ち着いた卸電力市場であったが，同年10月からはLNG等の世界的な燃料価格高騰や，高値のインバランス料金を警戒した新電力による高値入札

等を受け，再び高騰．12月末現在も高値が続いている．

2022年度も供給力不足から需給ひっ迫が予想されており，地域新電力の事業環境は依然厳しい見通しとなっている．

事業環境は厳しさを増しており，電力関連の制度も頻繁に変更され，小規模で少人数の自治体新電力には大変難しい状況である．今後，生き残りをかけて地域での価値創出を継続していく必要があるが，ポイントになるのは自治体新電力間の連携ではないか．供給区域が限定している自治体新電力は競争相手ではなく，協力相手となれる．電源の共同調達や電力融通，そして非FIT電源の共同での開発など,単体では難しいことも連携すれば可能なことも多い．これら自治体新電力同士の連携は，電力市場の荒波を乗り越えていくための１つの重要な策と言える．

5．おわりに

電力業界の自治体新電力に懐疑的な方々からよく質問をいただく．一定の規模と範囲で最適化される電力システムにおいて，狭い地域で行う自治体新電力は最適解になり得ないのではないかという問である.確かに自治体新電力は，電力システム上の最適解にはなれないかもしれない．一方で，都市部の大企業が地域に大規模再エネ施設を開発し，売電収入は全て都市に流れてしまい地域は景観が悪くなるだけといった地域対再エネの現在の対立構造を和らげ，政府でも目指されている地域に裨益した再エネ開発・利活用や地域課題解決のための「主体形成」といった役割の一端を担えるのではないかとも考えている．バウンダリを「まちづくり」に広げると，自治体新電力が最適解になれる可能性があるのではないか．

本稿では，事例中心にというご依頼をいただいたためこのような内容になったが，自治体新電力による地域付加価値創造の定量分析[1)]や，74自治体新電力の事業形態等に係る定量調査[2)]も行っており，関心を持っていただける方は是非ご参照いただきたい．

謝辞

本稿の内容の一部は，公益財団法人トヨタ財団2018年度研究助成プログラムにご支援いただいたものを含みます．

参 考 文 献

1）稲垣憲治，小川祐貴；自治体新電力の現状と課題～アンケート調査及び地域付加価値創造分析を通して～，国際公共経済研究 第31号（2020），pp.15-23.
2）稲垣憲治，小川祐貴，諸富 徹；自治体新電力の現状と発展に向けた検討～74自治体新電力調査を踏まえて～，京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座ディスカッションペーパー，No.37（2021）.

＜著者紹介＞

稲垣　憲治（いながき　けんじ）
文部科学省，東京都庁を経て，自治体新電力・再エネ・まちづくりへの思いが高じ，2020年から（一社）ローカルグッド創成支援機構事務局長．これまで自治体の再エネ普及策の企画，新電力の設立・運営などに従事．現在は，地域新電力の価値創出，競争力強化に全力で取り組んでいる．
環境省，経産省，川崎市，練馬区．南阿蘇村等の各種検討会委員，総務省地域力創造アドバイザーなど．2005年３月東京大学大学院新領　域創成科学研究科修士課程修了，2021年９月京都大学大学院地球環境学舎博士後期課程単位取得認定退学.
自宅では，もちろん地域共生型再エネ由来のFIT電気比率の高い電気を使用.

協賛行事ごあんない

第９回「伝熱工学の基礎」講習会

〔会　　期〕2022年７月１日（金）
〔主　　催〕公益社団法人日本伝熱学会
〔場　　所〕東京品川インターシティホール（東京都港区港南2-15-4）
〔Ｕ Ｒ Ｌ〕https://ez-entry.jp/basic-lecture2022/entry/
〔問合せ先〕第９回「伝熱工学の基礎」講習会　運営事務局（株式会社プロアクティブ内）
E-mail：basic-lecture2022@pacmice.jp

特　集　持続可能なまちづくり

能勢・豊能町におけるエネルギーを軸としたまちづくりへの挑戦

Challenges towards a New Town Development via Energy System Transition

榎　原　友　樹*
Tomoki Ehara

1．能勢町・豊能町の社会背景

能勢町・豊能町は大阪府の北部に位置する人口１万人（能勢町）から２万人（豊能町）程度の町である．

環境省の「生物多様性保全上重要な里地里山」に多く選出されており，民間企業が実施した生物多様性に優れた自治体ランキングの生態系の豊かさと便益を評価する指標群では全国１位（能勢町），21位（豊能町）に選ばれるなど，田園風景が広がる自然豊かな地域である．

図１　能勢町・豊能町の概況

大阪府，京都府，兵庫県等の中心部からアクセスしやすい交通の要所に位置するが，能勢町には鉄道駅が存在しないなど，地域内での移動は自動車交通が主な手段となっている．

2．求められる新しいまちづくりのアプローチ

一方，両町ともに人口減少・少子高齢化が急激に進行してきている．国立社会保障・人口問題研究所の予測に基づくと，2020年から2045年までの25年間で，総人口はそれぞれ57%（能勢町），55%（豊能町）減少すると推計されている．さらに同期間中の生産年齢人口は８割近くも減少する推計となっている．

このように急速に人口減少が進む一方で，地域サービスへのニーズは高まる一方である．農家の減少や高齢化，そして林産物の需要の低下に伴い，管理や利用されずに放棄される里山が増加している．近年は獣害の顕在化も問題で，特にニホンジカによる食害が深刻さを増している．2018年に発生した台風21号では，10分間降水量の最大値が28mmという記録的な豪雨となり，地域内の多くの住宅が停電（最長３日間）するなど，自然災害が頻発している[1]．気候変動の影響が強まれば，こうした自然災害による被害はさらに増加する可能性が高い．自動車交通が中心の当該地域において高齢化による交通アクセスへの確保へのニーズも大きい．高齢者による事故の増加に対応して免許返納を進めれば，生活交通の確保もままならない．高齢者人口の増加に伴う医療や福祉サービスのニーズもさらに高まるだろう．老朽化したインフラの更新も自治体にとって大きな懸念材料である．

人材・予算といったインプットが減少する一方で，アウトプットとして求められるまちづくりへのニーズに対応するためには，これまでにないまちづくりのアプローチが求められている状況にある．

3．流出する富の地域還流を目指して

こうした課題への打開策のひとつとして，我々はエネルギーによって地域外に流出する富に着目した．環境省の試算によると，能勢町・豊能町からのエネルギー代の流出額はそれぞれ８億円，14億円に上ると試算されている．こ

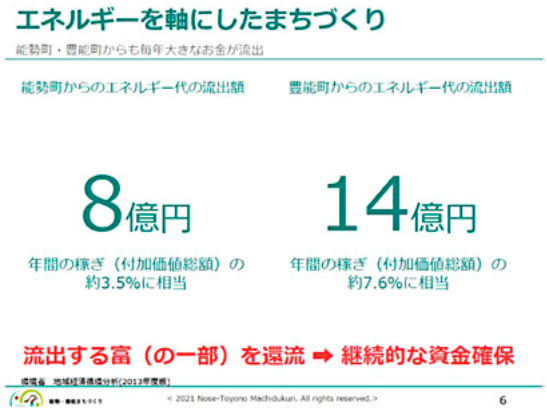


図２　エネルギーによる地域からの富の流出額[2]

*能勢・豊能まちづくり　代表取締役
〒563-0341 大阪府豊能郡能勢町宿野437-1
E-mail：tomoki.ehara@nose-toyono.com

れは，両地域における年間付加価値総額の3.5%～7.6%に相当する大きな金額である．

このように，これまで当たり前のように地域外に支払っている富の一部を地域内に還流させることで，まちづくりのための継続的な資金を確保でき，これまで後回しにされてきた地域サービスにお金がまわりはじめるのではないか．この仮説をもとに，私たちは2020年7月に地域新電力会社「能勢・豊能まちづくり」を設立した．

図3　「能勢・豊能まちづくり」の設立[3)]

4．エネルギーとまちづくり

4.1　公共施設のエネルギー利用方法の見直し

弊社の事業は能勢町・豊能町の公共施設への電力供給事業から開始した（2020年10月より供給開始）．ところが，電力供給を開始して3か月でJEPXの市場価格が高騰し，皮肉にも電力の調達額が販売額を超過する状態に陥ってしまった．

そこで，弊社では専門家の協力のもと，主要な公共施設をまわり，緊急対策として即時性のある省エネルギー対策を施設ごとに検討することとした．診断を行った結果，全熱交換タイプの換気機能があるにもかかわらず利用されていないケースや，空調温度が驚くほど高く設定されている一方で室温が均一化されていないケース，さらには，個別に職員が電気毛布やハロゲンヒータなどを多用しているケースなどがみられた．

そこで，機器の運用方法について施設運用者にその場でアドバイスを提供するとともに，改善メニューを後日レポートとしてまとめ，無理のない範囲での対応を依頼した．極めてアナログなエネルギーマネジメントである[7)]．

図4　豊能町の公共施設視察の様子

以下は，ある公共施設の省エネ診断実施前と実施後の電力消費量を比較したものである．外気温などの諸条件が異なるため，単純な比較はできないが，運用面で様々な工夫がなされた結果，診断前後で30～40%電力消費量が変わる施設があるなど，その効果は驚くほど大きかった．

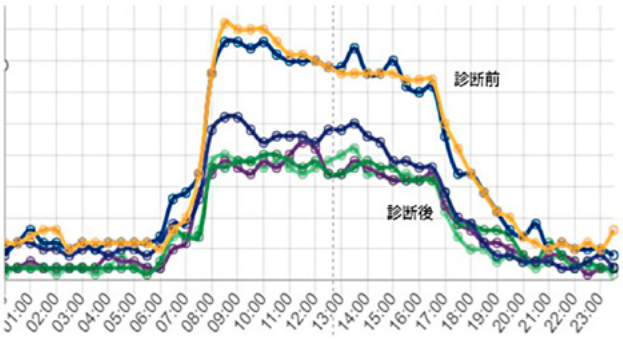


図5　省エネ診断前後の公共施設の電力需要変化

このままこれまで通りエネルギーを消費していた場合，エネルギーを介して地域の富は流出し続けたであろう．小売電気事業者として得られる各施設の電力消費データを活用し，エネルギーによる富の流出を抑制することは地域新電力の大きな存在意義のひとつになることを再認識した．

専門家による省エネ診断の取組はその後も夏季と冬季，半年に1度のペースで定期的に実施している．今後は，短期的な対策にとどまらず，設備更新も含めた対策の検討とソリューションの提案にも積極的に取り組んでいく計画である．

4.2　地域の再エネ資源開発と防災

地域の電源開発・調達は，地域新電力の重要な役割のひとつである．地域資源である再生可能エネルギーの比率を高めることは，会社設立時の目標のひとつであった．

ところが，能勢町・豊能町のような小さな自治体にとって，初期投資の大きい再生可能エネルギーの導入は容易ではない．そこで能勢・豊能まちづくりが設備導入の初期費用を担い，発電電力量相当分を電気代として回収することで投資回収を行う，いわゆる「オンサイトPPA（Power Purchase Agreement）」のスキームを開発し，その第1号を公共施設の屋根上に太陽光発電設備を導入した．導入施設は，地域の防災主要拠点であるため，災害時用として蓄電池も併せて導入することとした．

自治体としては，初期費用がゼロであること，設備導入前後で光熱費は実質的に変化しないにもかかわらず電源の脱炭素化が実現できること，加えて，蓄電池と太陽光発電によって災害時の電力供給インフラが強化されること，オンサイトPPA事業終了後は光熱費が大幅に下がることなど複合的なメリットが享受できる．

一方で，地域新電力会社としては，調達電源の多様化が図れること，平時の蓄電池を活用したデマンドレスポンスを実施できることなどのメリットがある．

図 6　PPA による太陽光発電設備の導入

今後は能勢町・能勢・豊能まちづくりが所有している電気自動車の運用も含め，最適なリソースの運用方法を実装していく計画であり，現在もそれに向けたシステムの開発を進めている．また，能勢町・豊能町といった自然豊かな地域においては，再生可能エネルギーと自然環境や景観との調和も大きな課題である．そこで，地域の温暖化計画等や各種条例などを参照しつつ，再エネの推進地と規制エリアのゾーニングをすすめ，時間をかけて住民との合意形成を目指していく必要があると考えている．

4.3　e-bikeによる通学課題へのアプローチ

地域の主要課題ひとつである交通課題にも取り組んでいる．最初に取り組んだのは若者の交通課題だ．

能勢・豊能地域に唯一存在する大阪府立豊中高等学校・能勢分校は，文部科学省のスーパーグローバルハイスクール（SGH）に指定されるなど，これまでもグローバルな視点から様々な教育活動に取り組んできた．

しかし，同校の課題として，「通学課題」が挙げられ，近年では進学希望者が通学を理由に入学を断念するなど，入学者の減少・定員割れが続いている．現在，徒歩や路線バス，自動車での送迎といった通学手段があるが，それ以外は自転車通学が最終的な手段となっている．ただし，自転車通学も中山間地域ならではの起伏の激しさや，自転車道路の整備状況，野生動物遭遇のリスクなどの多くの課題を抱えてきた．

こうした課題解決の手段について，同校の「地域魅力化クラブ」と協議を重ねたところ，e-bike（電動補助自転車）による通学支援事業のプロジェクトが立ち上がった[3, 6]．

現在は，国際交通安全学会の研究プロジェクトとして，東京大学をはじめとする研究者とともにe-bike10台を実証的に導入し，360度カメラや距離を計測する機器を取り付けて安全面も含めて様々な実証を行っている[5, 8]．利用するe-bikeの自転車の選定プロセスには，地域の自転車屋さんから購入し，地域内での経済循環にこだわった．

研究プロジェクトは現在進行中であるが，こうしたプロジェクトに高校生が主体的に関わることで，交通安全から地域経済循環，里山保全，地球温暖化といった様々な持続可能性課題に対してどのような変化が見られるかについても，計測を行う予定である．

図 7　町の自転車屋さん協力によるe-bike選定プロセス

4.4　公用車の有効活用とEV化

交通課題への解決策のひとつとして我々が注目しているのが「公用車」である．例えば，能勢町は公用車を40台以上保有しているが，2020年度の利用記録を調べてみると同時に使っているのはその半数にも満たないことがわかった．もちろん，利用用途が異なるケースや，保管場所が異なるケースもあるため，公用車を最小台数で運用することは現実的ではない．しかし，より効率的な運用を工夫することで，無駄な富の流出を抑制しつつ，地域の交通課題やエネルギー課題の解決策のひとつとして活用できるのではないか．加えて，公用車の買い替えのタイミングで，台数削減と電気自動車への代替を計画的に進めることができれば，EVをエネルギーマネジメントや災害時エネルギー供給のリソースとして活用することも可能になる．

こうした可能性について検討するため，弊社では役場とも連携しながら，様々な実証を行い，実データに基づいた公用車の有効利用方法を模索している．

2021年11月には，試験的にEV公用車（能勢・豊能まちづくりが保有するEVを仮想的に公用車と見立てて実施）

図 8　職員へのEV公用車の実証方法の説明の様子

を通勤用として職員に貸し出す実証を行った．

公用車が利用されない時間帯である夜間の有効活用，ガソリンの消費を減らし，町全体の温室効果ガス排出削減につなげるとともに，職員の経済メリットの確保や自動車保有台数の削減につながる可能性がある．

試乗した町職員のアンケート調査からはおおむね好意的な意見が見られているが，比較的通勤距離が長い職員からは，実電費に関する懸念の声も聞かれた．今後はこれらの実証結果を踏まえて，エネルギーマネジメントとしての活用方法も含めて，具体的なスキーム設計を行っていく予定である．

5．まとめ

能勢・豊能エリアにおけるエネルギーを軸としたまちづくりは，試行錯誤をしながら様々な可能性を模索している段階であり，「まちづくり」として住民に目に見える成果として示せるものは，現時点では限定的である．

能勢町や豊能町が誇る森林資源の活用も検討を進めているが，山からの材の切り出しの面など乗り越えるべき課題が大きく，もうしばらく時間がかかりそうだ．

一方で，地域に眠るデータを丁寧に掘り下げていくと，省エネ，再エネ活用，エネルギーマネジメントの大きな可能性が垣間見える．また，地域住民や役場などから丁寧に暮らしのニーズを拾うと，既にある技術で提供できるソリューションが驚くほど数多くあることに気づく．

実際，先述のe-bikeのプロジェクトでは，教育学，交通工学，経済学など様々な分野の研究者が学際的な研究を行っている．また，エネルギーマネジメントに関しては，エネルギー工学の専門家や複数の民間企業とも研究協力しながら進めている．ゼロカーボンが叫ばれる中，エネルギーの脱炭素化に向けた取組や人口減少が進む地域の持続的なまちづくりの取組はまったなしである．

筆者はいまこそ，様々な研究の社会実装が求められているときではないかと感じる．少なくとも地域側は研究者や企業等のプレーヤーの参画を強く望んでいるのではないか．読者の中に様々な技術シーズを持つ研究者，ソリューションを持つ企業で，社会実装フィールドを検討されている方がいれば，弊社に限らず地域新電力が活躍するフィールドでの実証・実装を一度，検討してほしい．そこにはいまだ活用されていない豊富な実データと山のような課題解決のニーズが待っているだろう．

弊社ではそれぞれの取組を，「社会実験」に終わらせず，しっかりと地域に根付くまでしぶとく試行錯誤を続けていくつもりだ．ともに汗をかいてくれる，覚悟を持ったパートナーの参画を待ち望んでいる．

参 考 文 献

1）能勢町；能勢町地球温暖化対策実行計画（事務事業編・区域施策編）強みを活かす，未来が変わる，(2021.3)，http://www.town.nose.osaka.jp/material/files/group/1/ondankataisakukeikaku.pdf
2）榎原友樹；エネルギーを軸にしたまちづくりへの挑戦，(2021.6)，国土交通省「ひと」と「くらし」の未来研究会（第３回）資料．
3）能勢・豊能まちづくり；大阪府の能勢町・豊能町は民間団体と協力しまちづくり会社を設立「エネルギーを軸とした地域の経済循環に取り組む」，(2020.8)．
4）稲垣憲治；地域新電力は市場高騰をどう乗り越える？先進事例に見る対策とリスク，(アクセス日 2022.1.1) 日経エネルギーネクスト，https://project.nikkeibp.co.jp/energy/atcl/19/feature/00007/00058/
5）朝日新聞；能勢の未来 担い手育て，(2020.11.17)．
6）朝日新聞デジタル；電動自転車の通学データ使い，高校生が東大の研究者らと地域課題探る，https://digital.asahi.com/articles/ASPD17F8WPCKPPTB006.html?fbclid=IwAR0S-bqw_6hMysWPOanLkg44o2dBwFvbBtTE_Kh7L9acjmT7Dur7hYZ17xM（アクセス日 2022.1.1）
7）蟹江憲史，佐久間信哉，高木 超；企業のリアルな事例でわかるSDGsの課題別推進方法，(2021.9)，第一法規株式会社．
8）能勢・豊能まちづくり；大阪府立豊中高校能勢分校において，東京大学，大阪大学らとの共同研究をスタート「生徒が主役，能勢町の交通課題の解決に取り組む」，(2021.6)．

＜著者紹介＞

榎原　友樹（えはら　ともき）

2002年京都大学大学院資源工学専攻中退，2003年University of Reading修士課程修了．民間コンサルティング会社に勤務後，2012年に独立，「株式会社イー・コンザル」設立．2020年に「能勢・豊能まちづくり」設立．代表取締役に就任．現在に至る．

特　集　持続可能なまちづくり

生きるを楽しむ西粟倉村の持続可能なまちづくり

Sustainable Development in Nishiawakura Village with the Aim of “Well-being”

河　野　有　吾*
Yugo Kohno

1．はじめに

地球規模の課題である気候変動問題の解決に向けて，2015年にパリ協定が採択され，世界共通の長期目標として，「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて２℃より十分低く保つとともに，1.5℃に抑える努力を追求すること（２℃目標），今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡を達成すること」等が合意された．

この実現に向けて，120以上の国と地域が「2050年カーボンニュートラル」という目標を掲げている．

我が国も，2020年10月に2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指すことを宣言したところである[1)]．

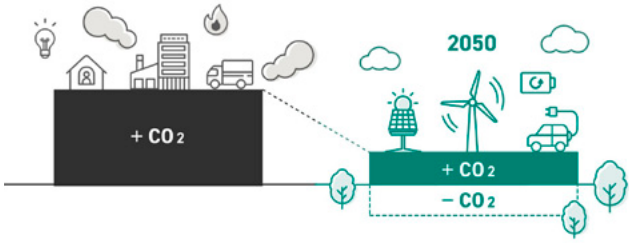


図１　2050年カーボンニュートラルのイメージ

カーボンニュートラルの実現に向けた地方自治体の取組みとして，SDGs未来都市である西粟倉村の「生きるを楽しむ」を標榜した持続可能なまちづくりの取組みについて紹介する．

2．西粟倉村の概要

2.1　概況

西粟倉村は岡山県の最東北端に位置し，周囲の大半は岡山県美作市と接している．また，1,000ｍを超える中国山地を介して，北は鳥取県智頭町，東の一部を兵庫県宍粟市と接する県境の村である．

標高は270～1,280ｍと起伏に富み，年間平均気温は約11℃，年間平均降水量は約2,000㎜の積雪寒冷単作地帯にある．地形的には，東西9.0㎞，南北に13.5㎞，総面積57.93㎢の峡谷型で，この峡谷型の中央を南に向かって清流・吉野川が流れ，これに沿って細長い平野部がひらけ，農地と集落が点在している．

一方，総面積の93%は森林であり，このうち人工林は84%を占めており，この豊かな森林は村の貴重な資源であり，中でも村の最北端に広がる「若杉天然林」は，標高1,200メートル，面積約83haの中国山地を代表する森林として，氷ノ山後山那岐山国定公園の特別保護地区に指定されている．

2.2　歩み

明治22年に現在の村が形づくられてからは，単独自治体として現在に至る．平成の大合併でも単独自治体として残ることを選択し，2008年に「百年の森林構想」を着想し，50年前に子や孫のためにと植林されたものの財産価値を失い放置されつつあった人工林をもう50年，村が責任を持って森林を整備し，「百年の森林に囲まれた上質な田舎」を実現するため，第１次産業の林業を主軸にした地域再生に取り組んでいる．

2009年から，50年後のあるべき森林の姿からバックキャスティングした「百年の森林事業」を開始，搬出される間伐材に付加価値をつけて販売する㈱西粟倉・森の学校を設立し，民間事業者と連携した独自の経済循環の創出に取り組んでいる．2011年から老朽化した小水力発電所のリニューアルを実施し，2013年に環境モデル都市，2014年にバイオマス産業都市の認定を受け，これまで市場流通すること無く山林に放置されていた材を，村内温泉施設の温泉を沸かすエネルギーや公共施設６ヵ所の熱エネルギーとして利用する循環を構築するなど，再生可能エネルギー事業にも取り組んでいる．

一方，「百年の森林構想」の理念に共感する若者達の移住が起き始め，この流れを加速させるため，2015年から「起業＋移住」をコンセプトとした「ローカルベンチャー（地方でのベンチャー的起業）スクール」プログラムを開始した．ローカルベンチャーとして起業する人や関係者の移住が増加し，これまでに50社が起業し，移住者の数は約200人で人口の約15%を占めている．

2019年には，SDGs未来都市（モデル事業都市）に選定され，木材生産だけでない森林価値の最大化を目的とし，

*株式会社エックス都市研究所
〒171-0033 東京都豊島区高田2-17-22 目白中野ビル6F
E-mail：kohno@exri.co.jp

モデル事業である「百年の森林構想Ver2,0」に取り組んでいる．

2.3　地域経済に関する分析

環境省が提供している「2015_地域経済循環分析ツールVer.4.1」を用いて，西粟倉村の所得循環構造を分析した．西粟倉村は，生産・販売に対して分配が大きく，通勤や財政移転から流入している．また，分配に対して支出は小さく，経常収支として域外に51億円流出している．エネルギー代金に着目すると，域外に約2.0億円流出している．

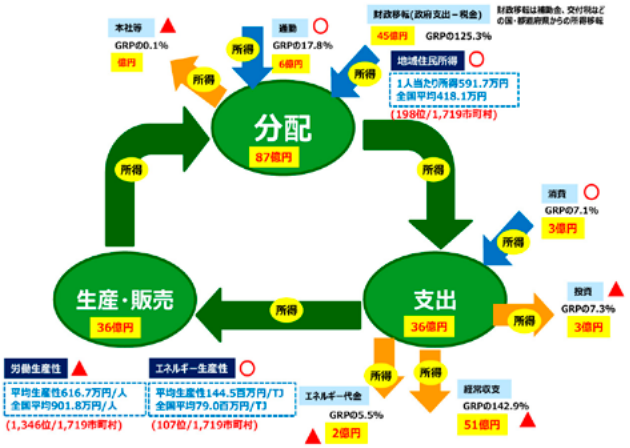


図 2　西粟倉村の所得循環構造（その 1）

2.4　再生可能エネルギーに関する取組み

表 1 に，西粟倉村の再生可能エネルギーに関する取組みを示す．小水力発電や太陽光発電，木質バイオマスボイラー・発電などが導入されている．

表 1　再生可能エネルギーの取組

年度	事業内容
平成25年度	市民協働発電所（太陽光発電：49.4kW）の整備
平成26年度～平成28年度	温泉施設 3 か所に間伐未利用材等を利用する薪ボイラー（625kW）の導入
平成26年度	西粟倉発電所（小水力発電：290kW）の整備
平成26年度～令和 2 年度	村内公共施設 5 ヶ所に太陽光発電（計105kW）の整備
平成28年度～令和 2 年度	公共施設 6 か所に地域熱供給を行うためのチップボイラー（530kW）の導入
平成28年度	影石水力発電所（5kW）の整備
平成31年度～令和 2 年度	地域の防災・減災のための木質バイオマス発電（50kW）システム整備
平成30年度～令和 2 年度	西粟倉第 2 水力発電所（199kW）の整備

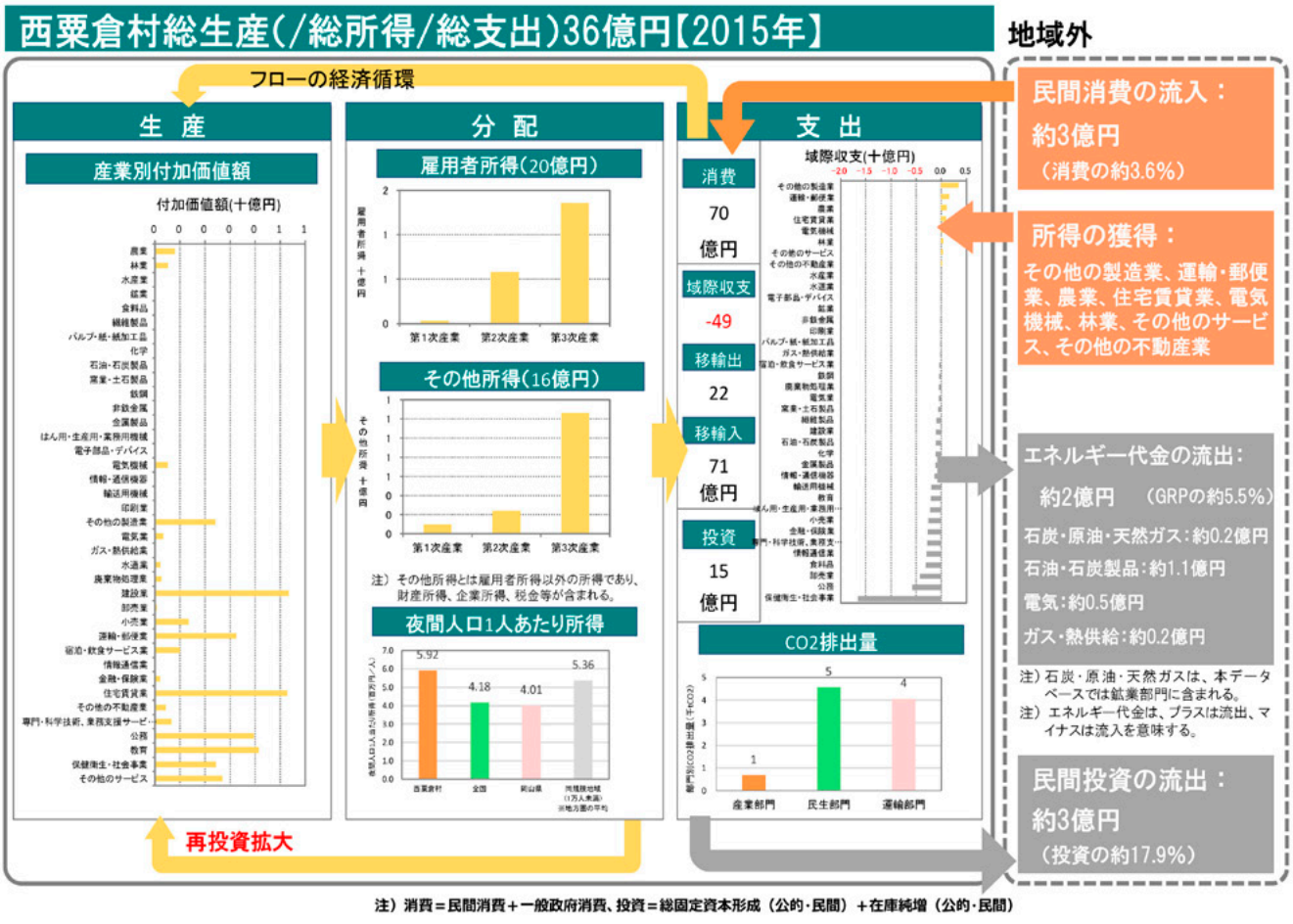


図 3　西粟倉村の所得循環構造（その 2）

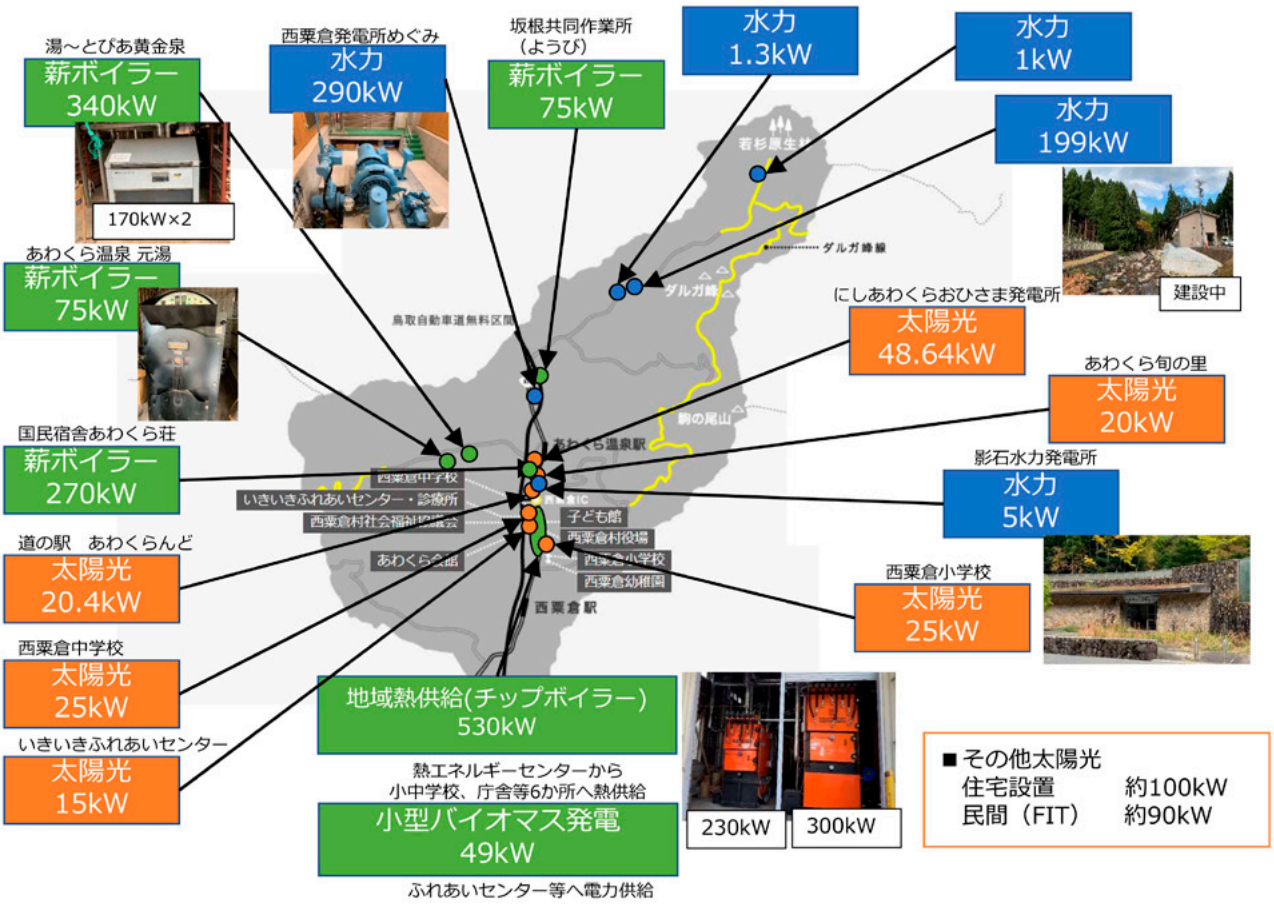


図 4　再生可能エネルギー設備の導入箇所

次に，再生可能エネルギー設備の導入箇所を**図 4** に示す．

また，導入されている再生可能エネルギー設備の容量と設備稼働率から，総発電量は約3,300MWh と推計された．

表 2　再生可能エネルギーの取組

	容量（kW）	設備稼働率	発電量（MWh）
太陽光発電	344	12%	361.655
水力発電	496	60%	2,608.553
木質バイオマス（発電）	49	80%	343.392
合計			3,313.600

3．西粟倉村の目指す姿

西粟倉村は，令和 3 年 6 月に「第 6 次西粟倉村総合振興計画」[2] を策定している．

3.1　むらの抱える地域課題

総合振興計画では，むらの抱える地域課題を次の通り整理している．

①少子高齢化社会を食い止める－子どもに帰ってこいと言える村に－

近年のローカルベンチャーなどの取組により，移住者は村人口の約15%となり，人口は10年前の将来推計を上回る結果となっている．また，近年は，Ｉターン者と地域の事業者との交流も進みつつある．一方，村からの転出先を見ると，岡山県内の転出者が多く，美作市への通勤・通学での流出が多い状況となっている．また，村民のアンケート調査結果では，約半数が「自分の子どもに帰ってこいと言える村」とは思わない（やや思わないを含む）と回答している．これまでのＩターン者を増やしていく施策を引き続き実施していくと共に，今後はＵターン者を増やしていく取組を行っていく必要がある．

②多様性を受け入れる

村民と移住者，多世代の交流の場を創出するワークショップやアンケートでの10年後の西粟倉村で大切にしたいことを問う中で，一人ひとりが「生きがい」を持って暮らせること，多様な関わりや生き方が可能なことを望む声が多く聞かれた．一方，それと同時に，地域で「支えあう」ことや「良好な関係づくり」を求める声も多く聞かれた．今後，「誰一人取り残さない」むらづくりを進めていくためには，自主性・自発性によりあらゆる分野で多様性の創出を受け入れていくと共に，地域内のつながりを育む場を公民で生み出していくことも求められている．

③ICTやIoTの進展による新たなつながり豊かさを生む社会を創出する

ICTやIoTに関する技術やサービスが日々進化し，社会

に投入されている．これらの進展は，距離や暮らしの中の不便さを乗り越え，新たな関係性や暮らしを創出する可能性を秘めている．村は，2017年に「生きるを楽しむ」（well-being）というキャッチコピーを創出し，一人ひとりの“生きるを楽しむ”を支えるためのスマートフォレストシティプラットフォーム構築を目指して「西粟倉むらまるごと研究所」を2020年に設立した．デジタルを活用し，誰もが健康で幸福な生活が送れるよう「誰一人取り残さない」社会を構築する必要がある．

④地域経済循環を創出する

近年のローカルベンチャーなどの取組により，「森林」を軸とした産業が生まれてきた．また，そのことが地域の雇用創出や地域のブランディングにもつながってきた．今後は，新型コロナウィルス感染拡大を契機とした過度なグローバリゼーション社会への見直し，持続可能な地域という視点から，地域内経済循環を創出していくことが求められている．具体的には，生産誘発額（各産業の消費や投資が100万円増加した時，域内の生産誘発効果）が高い，農業，その他の製造業，宿泊・飲食サービスへの投資と共に，地域産業の軸である「林業」について，生産誘発額を高める取組が求められる．

⑤統合的に取り組むことが可能な持続可能な行政運営へ

表3　むらづくりの基本理念

基本理念Ⅰ 全ての人の「生きがい」を育む　むらづくり	子どもから高齢者までの村民，そしてむらづくりを支える交流人口を含めた全ての西粟倉村に関わる人が，その人らしさを認め，活かし，活躍できるむらづくりを目指します． そして，西粟倉村だからこそ，生きがいを感じることが出来，住み続けたいと思えるむらづくりを目指します．
基本理念Ⅱ 豊かな自然とのつながりを育む　むらづくり	本村の大きな魅力であり資源でもある森林をはじめとした“自然”を今後も守り育てると共に，子どもから高齢者まで“自然”を身近に感じるむらづくりを目指します．
基本理念Ⅲ 将来への希望を育む　むらづくり	ICTやIoTなどの基盤を整えながら，村が抱える立地的な課題を解決し，未来志向の安全で安心な暮らしのできるむらづくりを進めていきます．
基本理念Ⅳ 村民が関わり合い，支えあう　むらづくり	多様性を尊重しながらも，村民，移住者，多世代が関わり，支えあう誰一人取り残さないむらづくりを目指します．自立した自治体として健全で安定した財政基盤を確立し，健全で柔軟な行政運営を行います．

SDGs推進のためには，統合的に課題を解決していく必要がある．これまで，行政運営はそれぞれの課が課題に向けて，取組を進めてきた．今後，複数の課が協働で取り組む，また，ひとつの取組が複数の課の課題を解決するなど，統合的な課題解決が可能となる仕組みをつくっていく必要がある．あわせて，新たな技術やあらゆる主体とも連携しながら持続可能な行政運営の体制づくりが必要となっている．

3.2　むらづくりの基本理念

総合振興計画では，西粟倉村のこれからのむらづくりにおいて，全ての分野にわたる基本的な考え方である“基本理念”を定めており，**表3**に示す．

3.3　西粟倉村のむらの未来像

総合振興計画では，むらの未来像を**図5**の通り整理し，将来像を「生きるを楽しむ　百年の森林に育まれたむら」と定めている．

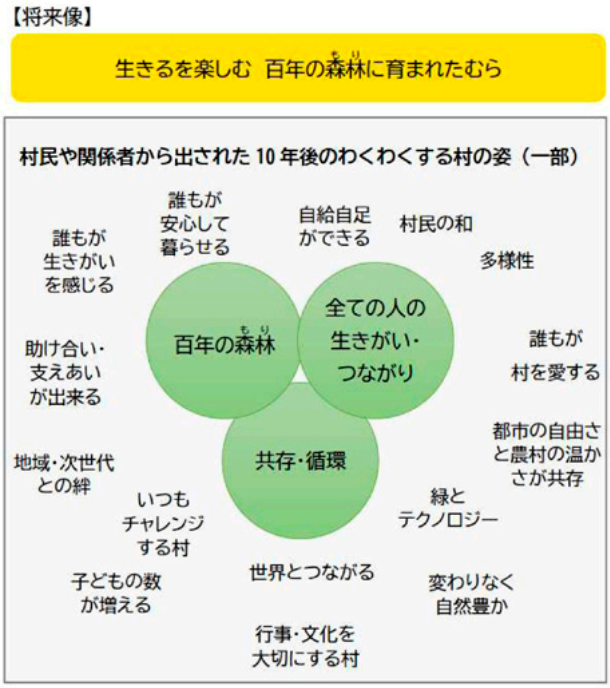


図5　むらの未来像

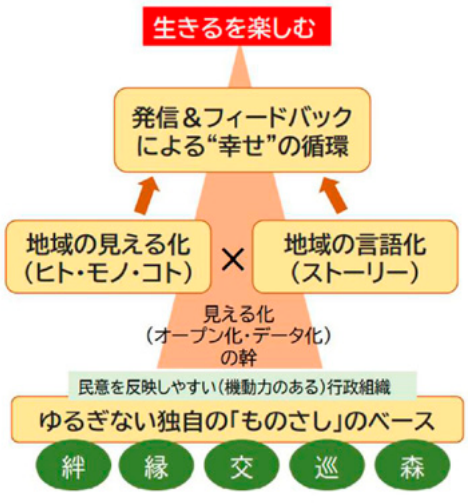


図6　「生きるを楽しむ」の実現に向けた仕組み

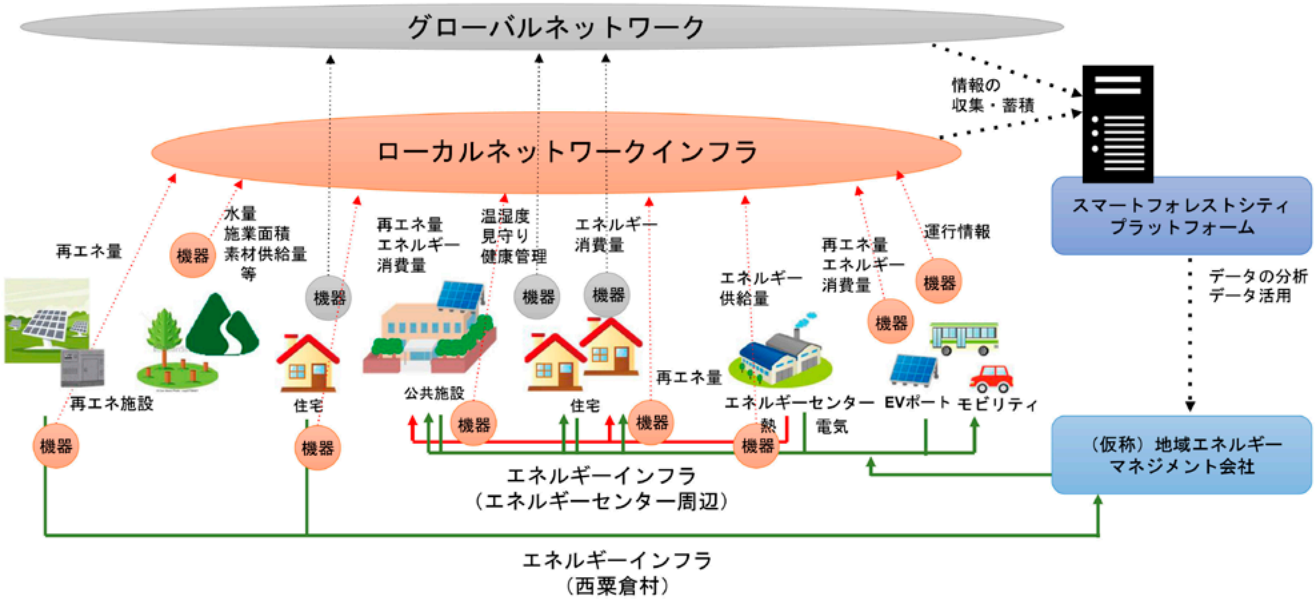


図 7　スマートフォレストシティプラットフォームによるデータ取得のためのインフラ整備イメージ

4．持続可能なまちづくりに向けて

西粟倉村の目指す姿の実現に向けては，「地域の現況と資源」と「地域のストーリー」を見える化し，その進捗を知る「ものさし」を共有することにより「自分ごと化」する仕組みの構築に取り組んでいる．

「ものさし」を設定することは，地域の「ヒト・モノ・コト」の「見える化」を行うことで，「現状の課題」と自分たちが目指す「“生きるを楽しむ”の将来イメージ」が見えるようになり，それによって「何故いまこの取組をしているのか」「なぜこの取り組みが必要なのか」という地域のストーリーの言語化に繋がる．また，このストーリーを村内に発信し，そこから派生した取組のフィードバックを行うことによって，村民や事業者が地域の課題に対して「自分ごと化」として捉え，地域の課題解決に向けた取組みを理解し，参画するようになることが期待される．合わせて，村の現状や取組みの進捗が，客観的な数値等で見えるようになることで，村そのものの魅力や特別感が見える化・定量化され，ビレッジプライドの醸成にもつながることが期待される．これらの重ね合わせによって，「生きるを楽しむ」に向かって進んでいくという「“幸せ”の循環」が生まれ，持続可能なまちづくりにつながる．

「地域の現況と資源」と「地域のストーリー」において，森林・健康・移動についての課題感とストーリーについての一定の理解・位置づけができているものの，エネルギー・脱炭素の取組みについては，共通の「ものさし」が確立できていない．「エネルギー」は，村民の日常生活に直結し，日々の取組み効果により定量化しやすく，他の課題・ストーリーとも相関関係があることから，「生きるを楽しむ」を実現する 1 つの要素として「RE100，ゼロカーボンの達成」を指標とし，その「ものさし」の 1 つを「RE100，ゼロカーボンの進捗度」と設定し，関連するデータの収集が可能になるインフラ整備に取り組んでいる．

また，データの取得により，以下の項目の見える化を通じ，「ものさし」としての評価方法の構築に向けて取り組んでいる．

・村内のエネルギー需給・コストの見える化
・村民の移動の見える化
・森林管理による CO_2 吸収効果・コストメリットの見える化　など

これらの取組みの継続により，「生きるを楽しむ」の実現を目指す西粟倉村の取組みの進捗を定量化・見える化し，村民や事業者の「自分ごと化」と村外への西粟倉村の魅力発信に取組み，持続可能なまちづくりを進めていく．

参 考 文 献

1）カーボンニュートラルとは；https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/（アクセス日 2021.10.10）
2）第 6 次西粟倉村総合振興計画．

＜著者紹介＞

河野　有吾（こうの　ゆうご）
東北大学大学院土木工学専攻修了．㈱エックス都市研究所入社．現在，主任研究員．地域エネルギーの利活用による地方創生に関する業務を担当．認定都市プランナー（環境・エネルギー）．
（一財）西粟倉むらまるごと研究所客員研究員として，西粟倉村で活動

特　集　持続可能なまちづくり

進化し続ける街「みなとみらい21」

The Ever-evolving City “Minato Mirai21”

古　木　淳*
Jun Furuki

1．まえがき

年間8,000万人（新型コロナ感染前）の来街者を受け入れ，1,800社もの企業が集積する街「みなとみらい21（以下MM21という）」は，街づくりの着手から約40年を経て，今もなお進化を続けている．

MM21では，目標とする都市像として①24時間活動する国際文化都市，②21世紀の情報都市，③水と緑と歴史に囲まれた人間環境都市を掲げ，ウォーターフロントを活かした緑のオープンスペースの整備や使用エネルギーの削減をはかる地域冷暖房システムの導入など，環境を重視した先進的な街づくりを進めてきた．

本稿では，これまでの街づくりの変遷を振り返るとともに，転換期を迎えつつある現在の状況と，将来に向けた持続可能な取組について説明する．

図1　ウォーターフロントの街　みなとみらい21

2．街づくりの変遷

横浜市は，長期間にわたる様々な検討・調整を進めるとともに，未来に向けた街のマスタープランをつくりあげ，1983年，土地区画整理事業の着工によりMM21事業をスタートさせた．

2.1　MM21事業の背景・目的

横浜市は，東京の南西に位置し，面積435.50㎢，人口約375万人を有する政令指定都市である．高度成長期，東京への人口流入の受け皿として急激な人口増加に見舞われ，道路・公園をはじめ，学校や市民利用施設などの公共施設等の整備に追われることになり，公共事業費の負担が激増するなど様々な問題を引き起こしていた．横浜市は，この状況を打破するため，1965年に「6大事業」を発表し，未来に向けた街づくりを始動させた．①都心部強化事業，②港北ニュータウン建設事業，③金沢地先埋立事業，④高速鉄道（地下鉄）建設事業，⑤高速道路網建設事業，⑥ベイブリッジ建設事業である．

MM21事業は，都心部強化事業の中核となる事業である．当時，郊外部への人口急増により横浜駅のターミナル化が進み，横浜駅周辺地区は急成長する一方で，開港以来の都心である関内・関外地区は賑わいが失われつつあった．また，二つの都心は，三菱重工業の造船所や国鉄のヤード等により分断され，街の成長を妨げていた．そこで，2つの都心を一体化し，新たな就業の場と賑わいを生み出す新しい都心づくりとしてMM21事業を計画したのである．

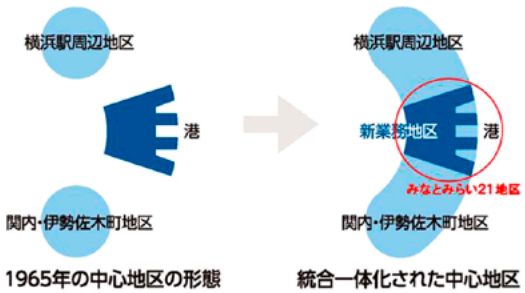


図2　都心部強化事業の基本概念

MM21事業は，①横浜の自立性の強化，②港湾機能の質的転換，③首都圏の業務機能の分担を目的とし，計画のフレームとして，地区面積186ha（埋立地を含む），就業人口19万人，居住人口1万人を設定した．

2.2　MM21事業の進め方

MM21事業においては，埋立事業により開発用地を確保するとともに，基盤整備は，港湾エリアを横浜市による港湾整備事業，それ以外を住宅・都市整備公団（現都市再生機構）施行の土地区画整理事業で行うこととし，両事業とも1983年に着手した．

一方，街区開発は民間が行うことになるので，事業目標を達成できるよう，当初に街づくりのマスタープランを策定し，それを実現するため，地権者間で街づくり基本協定を締結し，開発を誘導した．協定には，土地利用ゾーニン

*一般社団法人横浜みなとみらい21企画調整部長

グやスカイライン計画，3軸を中心とするペデストリアンネットワーク計画，コモンスペース・アクティビティフロアの確保などについて定めている．また，協定の内容を担保するため，都市計画法に基づく地区計画や景観法に基づく都市景観形成ガイドラインを，横浜市が定めている．

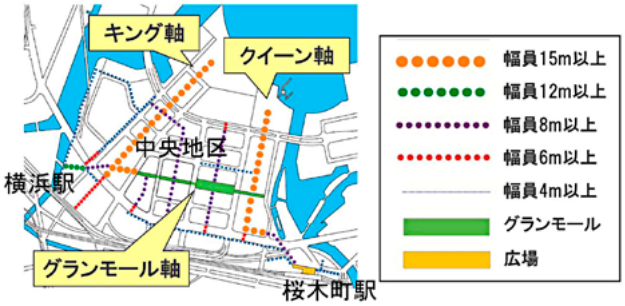


図3　ペデストリアンネットワーク

さらに，街づくりの誘導主体として，「株式会社横浜みなとみらい21」を，横浜市，住宅・都市整備公団，大規模地権者等が参画し，1984年に設立した．なお，街づくり業務は，2009年に株式会社を発展的改組した「一般社団法人横浜みなとみらい21」（以下YMMという）に引き継がれ，現在に至っている．

3．災害に強く環境に配慮した街づくり

MM21地区は，当初から，先端技術の粋を集め，災害に強く環境に配慮した都市基盤整備や街区開発を進めている．

3.1　災害に強い都市基盤整備

埋立事業においては，地盤沈下や地震による液状化に備えて，サンドドレーン工法や深層混合処理工法による地盤改良を行っている．また，埋立後の地盤については，護岸高さを標高2.7～3.1m，宅地高さを3.1～5.0mとし，高潮・津波対策を講じている．

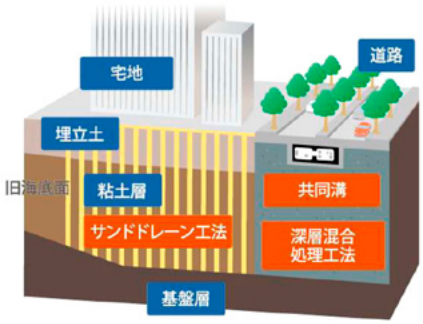


図4　地盤改良・液状化対策

また，地震等の災害時には，臨港パークに隣接する耐震バースが緊急物資輸送拠点として機能するとともに，新港地区の海上防災基地は災害応急対策拠点，中央地区のけいゆう病院は災害医療拠点として機能する．

さらに，公園等には災害用地下給水タンクを設置しており，50万人分の飲料水を三日分確保している．

3.2　地域冷暖房

地域冷暖房は，地区内の冷暖房・給湯などに利用する冷水・蒸気をプラントで集中的に製造し，導管を通じて24時間365日供給するシステムである．エネルギーを面的に利用することで，熱負荷の平準化や省エネを図ることが可能となる．

MM21地区では，事業開始当初から地域冷暖房システムの導入を行っており，現在では供給延床面積約393万㎡（2021年3月末）と国内最大の規模となっている．世界最大級の密閉式インバータターボ冷凍機（5,400RT），高効率吸収冷凍機（3,000RT）など，最新・大型の熱源機器を計画的に設置・更新することで，省エネ・省コストを実現している．

また，地区内にある2ヵ所のプラントの導管を常時連携し，1か所から集中的にコントロールすることで，高効率運転及び省力化を図っている．これらにより個別熱源方式と比較して約15%の省エネ効果があり，削減される二酸化炭素排出量は，森林およそ1,500ヘクタール（横浜スタジアム570個分）に相当する．

図5　インバータターボ冷凍機

3.3　共同溝

ＭＭ21地区では，災害の防止や景観の向上を実現するため，大容量の共同溝を設置し，都市を支えるライフラインを収容している．これにより，電柱のない快適な歩道空間や整然とした街路景観を実現している．

3.4　環境に配慮した道路舗装

地区内のさくら通り，けやき通りでは，舗装の表面に熱反射塗料等を塗布し，舗装路面の温度上昇を抑制する遮熱性舗装を実施している．この他，施設においても保水性舗装や透水性舗装が行われている．

3.5　太陽光発電等

地区内の複数の施設において太陽光発電や小型の風力発電が設置され，照明の電力等に利用されている．

3.6　緑のネットワーク

MM21地区では，「水と緑と歴史に囲まれた人間環境都市」を実現するため，ウォーターフロントには人々が憩える緑地を配置し，それらを結ぶプロムナードを整備すると

ともに，中央地区の軸となるグランモール公園と合わせて，緑のネットワークを形成している．また，道路などの公共空間や各施設のコモンスペース等にできる限りの緑化を行い，地区全体で四季を感じられる緑の創出に努めている．なお，2017年に完成したグランモール公園のリニューアル工事では，雨水貯留浸透基盤材の活用により，グリーンインフラを導入している．

さらに，街づくり基本協定に基づき，各施設に屋上緑化，壁面緑化，公開空地等への積極的な緑化を誘導しており，これらは，ヒートアイランド緩和，室内の熱環境の緩和，省エネなどの効果が期待できるとともに，来街者に安らぎを与えている．

図 6　歩行者空間の緑

3.7　環境に配慮した街区開発

MM21地区の街区開発では，省エネ対策や長寿命化，周辺のまちなみとの調和，緑化対策など総合的な環境配慮を実現し，CASBEE横浜のSやAランクを取得した建物が多く建設されている．

4．エリアマネジメントによる環境対策の取組

YMMは，2009年設立以降①街づくり調整事業，②環境対策事業，③文化・プロモーション事業の3つの柱をもとに，今日までエリアマネジメントの取組を進めてきている．

4.1　エリアマネジメント憲章の策定

YMMは，2012年，「エリアマネジメント憲章」を策定した．憲章における街の将来イメージとして，環境に関しては「環境に配慮した身近な活動から，世界をリードするような新たな環境技術の活用まで，地球環境に優しい，先進的な取組が展開される街」を掲げている．

これを受け，行動計画として「環境を重視した計画的な都市インフラの整備や，環境技術の積極的な導入，さらには次世代に向けた実証実験の取組など，環境面においても先進的な取組を展開する」「エリアマネジメント活動として，先進的環境づくりにチャレンジする街として，環境面でさらに新しい時代の要請に即した対応を行う」としている．

これをふまえ，YMMでは，会員（地区内企業等）で構成される環境対策委員会を設置し，議論しながら進めている．取組はその時々で変わるが，現在は①スマートシティの推進，②水環境向上・生物多様性に関する取組，③『緑・花』推進に関する取組，④身近なエコ活動の実施・検討，⑤地区内の清掃活動等に取り組んでいる．

4.2　水環境向上及び生物多様性に関する取組

YMMが主体となって，海草の一種で水質浄化と生物生息環境の改善が期待できる「アマモ」の育成により，MM21地区の大きな魅力である「海」の水質向上と生物多様性に向けた取組を行っている．

この取組では，段階的に海辺の生き物の生息に適した環境づくりを進め，生物の生息状況や水質調査を行うことにより効果を検証し，今後の水質浄化や生物の生息環境の確保に役立てていきたいと考えている．

4.3　『緑・花』推進

JR桜木町駅前広場で，季節感に合わせた花の植え替えを行い，潤いのある景観づくりに寄与するとともに，横浜市のイベントと連携した取組を進めている．

5．横浜スマートシティプロジェクト

横浜市は，2010年に経済産業省より「次世代エネルギー・社会システム実証地域」に選定され，横浜スマートシティプロジェクト（YSCP）実証事業を推進した．家庭や業務ビルをはじめ，既成市街地でのエネルギー需給バランスの最適化に向けたシステムの導入等を，エネルギー関連事業者や電機メーカー，建設会社など34社と連携して取り組んできた．

MM21地区においては，「横浜ワールドポーターズ」や「横浜ランドマークタワー」などをはじめ，6施設でビルエネルギーマネジメントシステム（BEMS）を活用したデマンドレスポンス（DR）の実証を行い，電力のピークカットの最大化を通じた地域レベルでのエネルギーの最適利用に取り組み，2013年夏季の実証で最大22.8%のピークカットを実現した．

2015年以降は，横浜市とMM21地区内の立地企業を含む民間事業者で，YSCP実証事業で培ったノウハウを生かし，防災性・環境性・経済性に優れたエネルギー循環都市をめざす新たな公民連携組織として「横浜スマートビジネス協議会」を設立している．これらの取組を通して，地域の熱供給を営む「みなとみらい二十一熱供給」や「パシフィコ横浜」などの施設では，電熱併給のガスコージェネレーションシステムを導入し，BEMSを活用したエネルギーの最適運用を図るとともに，電力事業者の行うDRによる電力需給の調整に貢献している．

YMMは，ガスコージェネレーションシステムの導入に際して，まちづくり基本協定の改定を行うなど，社会のニーズに合わせた街づくりのあり方について，見直しを図った．

6．新たなエリアマネジメントの推進

MM21地区は，事業着工から40年近くを経て，９割以上の街区で開発が進んだ結果，就業人口117,000人，居住人口8,800人を有し，オフィス・商業施設・住宅等に加え，R＆D（企業の研究開発部門）や音楽ホールなど多様な機能が集積する街となっている．しかし，街が完成した以後も人々・企業から選ばれる街となるには，継続的に街の魅力を高めていくことが必要である．そのため，2019年度，公募により地区内企業から参加者を募り，「エリアマネジメントのあり方検討会」を発足し検討を行い，新しいエリアマネジメントの取組として，新たに加えるべきビジョンと５つのテーマごとのアクションプランを決定した．

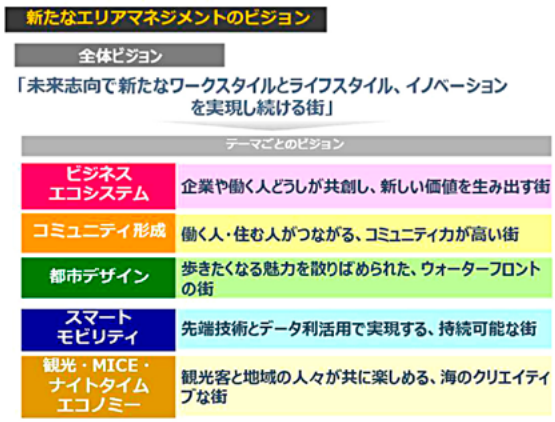


図７　新たなエリアマネジメントのビジョン

以下が，テーマごとの取組状況である．

①ビジネスエコシステム

「イノベーション都市・横浜」の実現をめざし，横浜発のイノベーションを生み出す産学公民の組織として，2021年３月に「横浜未来機構」を設立し，イノベーション創出のエコシステムの構築を進めている．機構には，MM21地区内はもとより，横浜市全域から大企業，中小企業，スタートアップ，大学等が参画しており，事務局はYMMが務めている．

また，「街を活用した実証実験」をテーマとするアクセラレーションプログラムとして，2019年度より『Minatomirai Activation Program』を実施し，MM21地区から新たなビジネスの創出をめざしている．

②コミュニティ形成

働く人や住む人がつながるコミュニティ力が高い街をめざし，コミュニティの場づくりを進めている．

③都市デザイン

コモンスペースやアクティビティフロアなどの公共的空間を活かし，オープンカフェやイベントなどの賑わいを創出している．2021年度，公共的空間の活用をさらに促進するため，ポータルサイトの設置など利用する際の利便性の向上に取り組んだ．

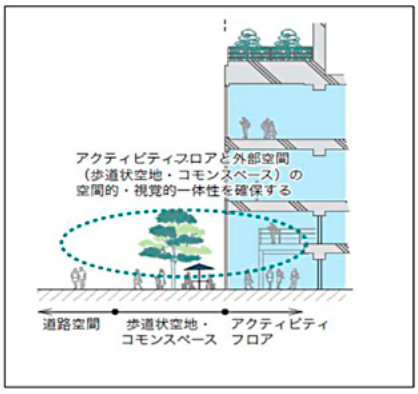


図８　コモンスペース・アクティビティフロア

④スマートシティ・スマートモビリティ

「環境未来都市」とその新たな展開をはかる「SDGs未来都市」や「イノベーション都市・横浜」の実現をめざし，地区内企業や行政・研究機関等と連携して，５Ｇなどの先端技術やデータ利活用によるスマートなまちづくりを推進している．なお，2019年，MM21地区は国土交通省のスマートシティモデル事業の重点事業化促進プロジェクトに位置づけられている．

また，来街者が楽しく，ストレスなく，快適に移動できる環境をめざし，スマートモビリティの検討を行い，回遊性の高いまちづくりを推進している．なお，2021年４月，桜木町駅と赤レンガ倉庫のある新港地区をつなぐ新たなモビリティサービスとして，新たな都市型ロープウェイ「YOKOHAMA AIR CABIN」が開通した．

図９　YOKOHAMA AIR CABIN

⑤都市観光・MICE[注)]・ナイトタイムエコノミー

地区内の，MICE施設をはじめとした多様な機能の集積やナイトタイムコンテンツを含む魅力的なコンテンツを活かしながら，街のにぎわい創出を促進している．

また，ミュージックシティの実現をめざし，地区内に立地する大小の音楽ホール等の集積を活かし，様々な音楽活

注）MICE：Meeting，Incentive Travel，Convention，Exhibition/Eventを総称した用語．

動やイベント，国内外への情報発信等に向けた取組を行っている．

7．脱炭素化に向けた取組

2015年の国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）でのパリ協定の合意，さらに2050年にカーボンニュートラルを実現させるという2020年10月の菅前総理の所信表明演説など，脱炭素化に向け状況が加速している．これをふまえ，MM21地区内の企業も，各々がカーボンニュートラルに向けて動き始めている．また，横浜市では，YMMや地区内企業と連携し，都心部の脱炭素化モデル創出をめざして「ゼロエミッション分科会」を立上げ，街全体を巻込んだ脱炭素化の取組の検討を始めている．

2020年度からMM21地区内企業にエネルギー使用量アンケートを行っており，2019年度の二酸化炭素排出量は約29万tで，電気に伴うものが約7割，熱利用に伴うものが約3割であった．ゼロカーボンに向けた取組は，電気，熱の両面での取組が必要であることを再確認した．

8．今後の展望：サスティナブルシティへ

今後，MM21地区がサスティナブルシティへと進化するためには，大きく二つの取組が必要であると考えている．一つは街の価値創造を継続することである．MM21地区の当初の完成は2000年をめざしていたが，バブルの崩壊やリーマンショックなどを経て，予定より20年以上経過し，今まさに完成を迎えようとしている．しかし，街づくりに時間を費やしたことが，逆に単一的な街になることを免れ，当初想定していなかった多様な機能が集積し，街のポテンシャルを高める結果となっている．今後は，これらの多様な機能どうしを「つなぐ」，また周辺地域と「つなぐ」ことが新たな付加価値を生み，次のステージへのステップアップに結びつくと考えている．それにより形成できるステージは「有機的な連携活動」であり，さらに「継続的な価値創造」であると考えている．

二つめは地球環境への貢献である．将来にわたり人が住み続けられる環境を維持することは我々の義務である．温室効果ガスの削減は急務であり，2021年11月に開催されたCOP26では，各国の取組計画では不十分であることが課題となった．では，街として何ができるのか．

MM21地区では，これまで述べてきたように，インフラ整備において様々な環境対策を行っている．また，最近では，地区内の大企業を中心に各社がRE100を表明し，率先してカーボンニュートラルに向け取り組んでいる．一方で，MM21地区は，多くのR&Dが集積しており，先端技術をはじめとする様々な実証実験を誘致しているところである．「横浜未来機構」の会員に行ったアンケートでは，可能性を見出したい領域・分野として6割の企業が「脱炭素・環境エネルギー」を挙げている．これらの環境対策へのポテンシャルをつなぐことにより，新たな技術の開発・実証実験・実装に結び付け，イノベーション創発を促したいと考えている．

そのためには，街としてのカーボンニュートラルに向けた取組のビジョン明確に示していくことが重要である．取組が，単に再生可能エネルギーによる電力の購入やカーボンオフセットだけでは，パイの食い合いに終わる可能性が大きい．したがって，オンサイトでの再エネ創出の余地が少ないのであれば，オフサイトPPA（Power Purchase Agreement）など他地域も巻き込んだ取組を模索する必要がある．さらには，世界にも視野を広げる必要があると考えている．

具体的な取組については，前出の「ゼロエミッション分科会」で十分議論し，MM21地区ならではの取組を生み出し，進めることにより，サスティナブルで地球環境に優しい街をめざしたいと考えている．

＜著者紹介＞

古木　淳（ふるき　じゅん）
東京理科大学工学部建築学科卒業．横浜市へ入庁し都市整備局，建築局等を歴任．退職し，現在，一般社団法人横浜みなとみらい21企画調整部長．

特　集　持続可能なまちづくり

ネクステムズが宮古島で目指すカーボンニュートラルへの道

The Road to Carbon Neutrality that NEXTEMS Aims for in Miyakojima

比　嘉　直　人*
Naoto Higa

1．まえがき

宮古島市島嶼型スマートコミュニティ実証事業は，2020年度をもって10年間の事業に幕を下ろした．本事業は宮古島の気候や地形，地質などの自然的特性，地理的特性，産業構造や市民性等の社会的特性などを前提に，エネルギーの使い方に着目し，島の特性における弱点を克服しながら，島の優位性を最大限に活用して持続可能な社会システムの実現に挑戦するものであったが，念願だった本格事業化が実現でき，事業目的に達したため，円満終了となった．

宮古島は沖縄本島から南西約300kmに位置し，大小6つの島から構成される．隆起珊瑚礁の島は全体が平坦で低い台地状を呈し，山や河川はなく，降雨は石灰岩層に浸透するため生活用水や農業用水等を地下水に頼っている．人口は約5万5千人で，産業構造は農水産業と観光業に大別され，農業ではさとうきびを中心に果樹や野菜類が栽培されている．世界的にも類を見ない規模の地下ダムで灌漑施設が整備され，さとうきびやマンゴー等の高付加価値な農作物を生産している．観光業では海や海岸線などの美しい自然景観や温暖な気候を活用し，各種イベントが開催され，コロナ禍以前は年間100万人以上の観光客が訪れていた．

図1　宮古島の自然

宮古島市は，エコアイランド政策を進めている．生活様式の変化や経済活動の活発化によって地下水質影響や，珊瑚白化現象など自然環境影響など環境保全対策の課題がある．このような事情から2008年にエコアイランド宮古島宣言を行い，2019年に2.0版に更新した．とりわけエネルギー自給率は，2016年現在2.88%を2030年に22.05%，2050年に48.85%の高い目標を掲げており，そのためには，太陽光発電を2016年現在22MWであるところを2020年に128MW，2030年に208MWまで引き上げる必要がある．

現状制度や技術では，このような導入量を達成することは困難であるため，エネルギー需給一体化となり得る実現方法を模索し，いま本格的に社会実装普及を進めている．

2．実証事業から獲得した成果

2016年度～2017年度の2年間で系統負荷率向上と再生可能エネルギー最大利用を実現するための技術実証を行った．市販されている家電機器の標準仕様を逸脱しない範囲で，どこまで制御できるか検証を重ねて，よりシンプルで広い範囲の機器に適用可能な方法で，翌日の島内電力需要を形成するため持続的で低廉な技術的方法を得ることを目的に太陽光発電（PV）とエコ給湯機（EQ），住宅用蓄電池（BESS），EV充電器（EVC）を主な制御対象機器とした．

図2　実証サイトの外観（2016年頃）

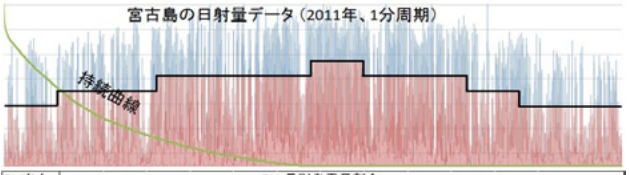
まず着手したのはエコ給湯機（EQ）で，既に多くの機種で実装されているECHONET Lite規格による手動沸き上げ機能を利用した．制御方法はEQが沸き上げる時間帯，つまり電力消費タイミングを任意に変更する手法をとった．実証試験では8機種のEQを導入した．湯切れもなく高い効率性を発揮するために学習機能も伴った高度な制御をEQは実装している．それを外部から沸き上げるため，機器によって様々な反応に違いがあり，当初は苦戦を強いられたが，一部工夫した制御設定を行うことで目標量沸き上げになることを確認できた．結果的に月間消費電力量の差異は±10%以内に収まり，この差異であればビジネスとして織り込むことは可能との判断に至った．

旧式の電気温水器（WH）も手掛けた．WHは機器側で

*株式会社ネクステムズ NEXTEMS 代表取締役社長
〒901-2102 沖縄県浦添市前田4-5-3
E-mail：info@nextems.co.jp

信号を受けることが出来ないので200Vヒーター電源の回路ブレーカーを８時間セットでON-OFF制御することで，EQ同様に電力消費タイミングを任意に変更することができた．EQと違い電熱ヒーター方式のWHでは原理的に高速で消費電力の増減が可能であると考えられ，住宅用PVの出力変動分を打ち消すように稼働させることによって，効果的な需給一体化が図られると考えている．WHはEQに代替されると目されているものの国内生産量は年間10万台程度が残存するとも言われている．前述の提案のような需給一体化となるような新たな機能実装が望まれる．

次に太陽光発電（PV）の制御方法である．PVは変動性電源と言われており，宮古島では系統影響度が増している状況である．このような状況下で，どのような手段であれば更なるPV導入拡大に繋がるかを検討した結果，蓄電池併設無くPVのみの場合は「常時出力制限運転」が効果的であると考えた．例えば**図３**は１分周期の年間PV発電電力を示し，グラフ中に持続曲線を記載しているが，PV発電では出力50%以上の機会が少なく全体の15%未満となっている．この傾向は全国的にもあまり差異はない．そうであれば変動成分の多い高位出力帯は交流電気に変換せず，常時抑制してしまうことでPV発電出力の安定化を図りたいと考えた．PVに対する期待は不確定な出力kWではなく，より安定した発電量kWhである．気象予測に基づいて日別で常時出力制限値を変更して，電力系統負荷が大きくPV発電量が多い日は出力制限値を緩和し，冬期など電力系統の軽負荷期は出力制限値を引き下げる措置を講じる計画である．この運用で年間発電量を極端に損ねることなく，PVの予見性を高め，安定電源化を目指すことができると考える．例えば夏期は70%制限，冬期は40%制限した場合でも年間を通じてPV発電量は90%以上を確保できる見込みである．



PV出力制限率	PV 月別発電量割合												
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	計
100%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
90%	100.0%	100.0%	99.9%	99.8%	99.7%	99.8%	99.6%	99.8%	99.9%	100.0%	100.0%	100.0%	99.8%
80%	100.0%	99.9%	99.3%	98.7%	98.7%	98.3%	97.5%	98.4%	99.1%	99.9%	100.0%	100.0%	98.9%
70%	99.8%	98.9%	97.7%	95.6%	96.5%	95.2%	93.2%	95.0%	96.2%	99.2%	99.6%	99.9%	96.4%
60%	98.7%	95.8%	94.6%	90.4%	92.9%	90.2%	87.1%	89.9%	91.0%	96.2%	98.3%	99.4%	92.3%
50%	95.4%	90.2%	89.7%	83.1%	87.7%	83.0%	79.0%	83.1%	83.8%	90.9%	95.0%	97.1%	86.1%
40%	90.6%	82.3%	82.6%	73.7%	80.2%	73.4%	69.1%	74.2%	74.0%	83.1%	89.4%	92.7%	77.7%
30%	83.3%	71.3%	72.1%	61.6%	69.4%	60.9%	56.7%	62.8%	61.4%	71.9%	80.1%	85.3%	66.4%
20%	70.5%	55.3%	56.6%	45.9%	53.6%	45.1%	41.6%	47.3%	45.3%	55.5%	65.3%	72.2%	51.0%
10%	47.7%	32.8%	34.9%	25.9%	31.3%	25.0%	22.9%	26.7%	25.2%	32.4%	40.9%	47.1%	29.8%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

図３　PV常時出力制限

EV充電器（EVC）は充電用電源の回路ブレーカーのON-OFF制御で充電タイミングを指令することでPV余剰電力を効果的に吸収することができると考える．また，パナソニック社は充電電力を適宜制御できる機能を搭載したEVCを販売している，この機能でPV出力変動やデマンドコントロールに応じた制御を指令することができる．

その他の宅内リビングにある家電機器の多くは，赤外線リモコン経由で制御できることは確認できているが，これらのオンタイム利用の機器については制約が多く，実装は今後検討の余地を残している．

次に制御技術である．実証段階でのシステム構成の簡略図は**図４**の通りである．制御対象機器はクラウド制御システムから，HEMSゲートウェイ（Home Energy Management System - Gateway）（**図５**）を介してMQTT（Message Queuing Telemetry Transportの略称．Open ADRも併用可能）で制御される．マルチベンダーを意識して，HEMSゲートウェイから機器間はECHONET Liteで制御している．制御対象機器の多くが屋外にあるため屋外設置可能なHEMSゲートウェイが必要であったが，㈱日新システムズが本事業で開発し，市販に至っている．同社HEMSゲートウェイは，屋外設置でメンテナンスフリー，居住者による誤操作防止，エネルギーリソースとの安定した通信等を実現するため，各種通信インタフェースを具備して，防水防塵の保護IP66に対応したエッジコンピュータである．

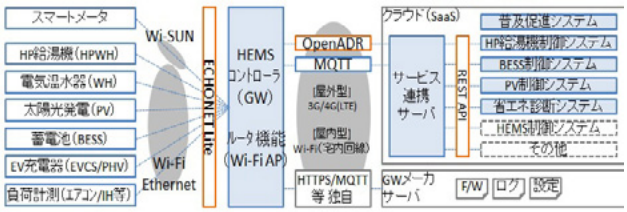


図４　マルチベンダー制御方法

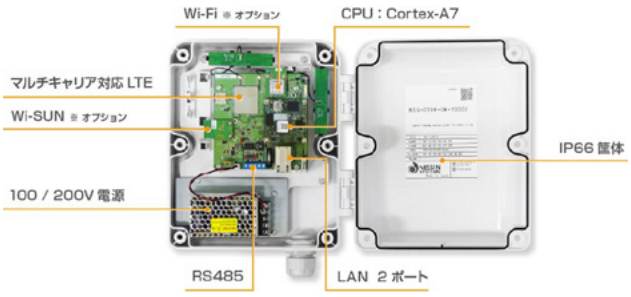


図５　HEMSゲートウェイ

個別の検証・開発を経て，統合的な制御検証を幾度も行った．１つの例として，PVは気象予測に基づき常時出力制限運転を行い，電力会社の出力抑制指令に優先的に反応する運用を実施する．また，EQやEVCはPVの余剰電力に応じて稼働時刻シフト制御を行うなどである．

このような個別機器を分散型電源として，地域面的にグループ制御して，翌日の島内需要形成を行うことや，電力系統ネットワークの要請等に応じてVPP等を行うことなどを目指している．それを我々はエリアアグリゲーション

（Area aggregation）と呼んでいる．その目的は，電力系統負荷率の向上と再生可能エネルギーの最大利用である．

3．完成したエリアアグリゲーション

エリアアグリゲーションを実行するためのクラウドシステムはHEMSゲートウェイを介して，需要家に設置されたエネルギーリソースの遠隔監視，各種制御や故障通知機能を具備している．このシステムを㈱日新システムズがSPSS-Hの名称で提供しており，各種機能（**図6**）を有する．

図6　日新システムズ「SPSS-H」システム構成

(1) 需要家ごとのエネルギーリソースの可視化

エネルギーリソースの状況をトレンドグラフ，メッセージ等でリアルタイムに確認できる機能である．特に低圧PV出力変動が把握出来ていなかったため，可視化により電力系統の需給調整に役立つと考えられる．

(2) 太陽光発電電力予測（PV発電予測）

PV発電予測とは，取得した翌日日射量予測からエリアごとのPV電力を予測する機能（**図7**）である．過去2週間の発電実績等から学習に基づき導くことで精度を高めている．

(3) 蓄電池制御（BESS制御）

BESS制御とは，エリアごとのPV発電予測に基づいて，余剰電力が多くなる時間帯に充電スケジュールを作成し，充電制御を行う機能（**図8**）及び電力会社による出力制御機能である．また，電池残量を設定することで，災害時に備えた蓄電池残量を確保することができる．

(4) エコ給湯機制御（EQ制御）

EQ制御とは，エリアごとのPV発電予測に基づいて，余剰電力が多くなる時間帯にEQ沸き上げスケジュールを作成し，沸き上げ制御を行う機能である（**図9**）．また，残湯

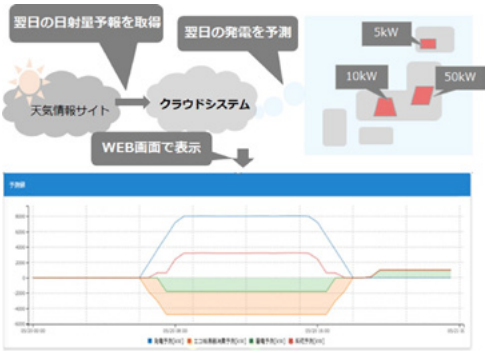


図7　太陽光発電電力予測

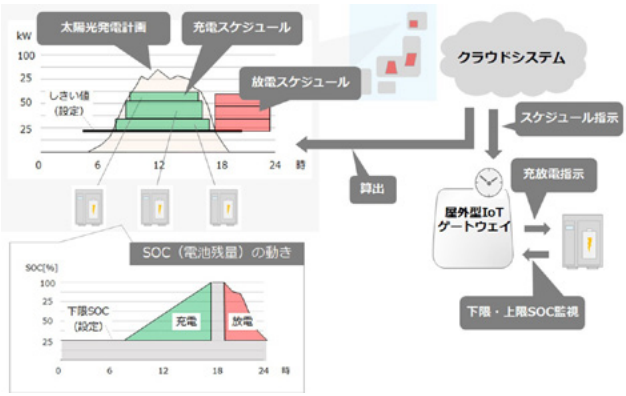


図8　蓄電池制御

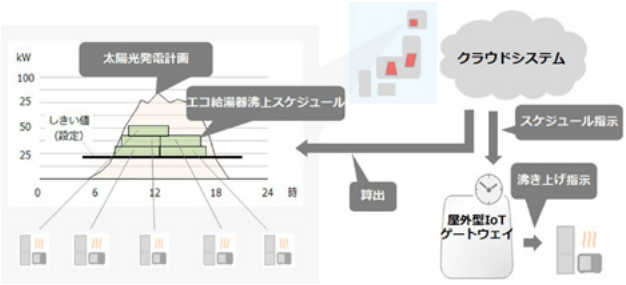


図9　エコ給湯機制御

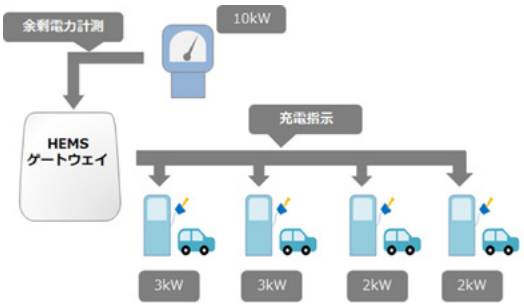


図10　EV充電器制御

量を1分周期で監視し，指定湯量を下回った際に自動的に一定量の沸き上げを行う湯切れ防止機能も具備している．

(5) EV充電器制御（EVC制御）

EVC制御とは，PV発電予測に基づいて余剰電力が多くなる時間帯にEVC充電制御を行う機能である（**図10**）．また，契約電力を超過しないよう充電電力の抑制ができる．

(6) 各機器の故障通知機能

故障通知とは，エネルギーリソースの故障状態をリアル

タイムに監視し，故障検知時にLINE WORKSで，スマートフォンへ通知する機能である．機器の故障状況をリアルタイムに把握することで，エネルギー供給のサービス強化とメンテナンス性の向上を図ることができる（**図11**）．

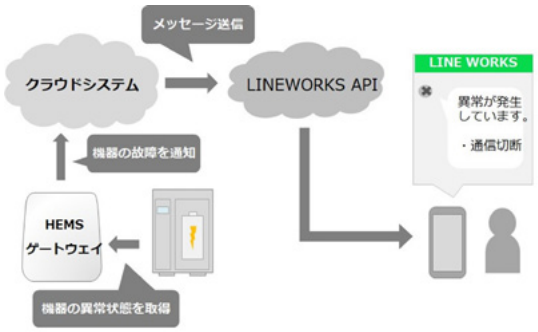


図11　故障検知

4．本格普及

本格普及は2018年度から開始．2018年度は宮古島内の市営住宅40棟にPV1,217kWとEQ120台を設置した．2019年度は福祉施設11箇所に，PV467kWとEQ38台を設置した．2020年度は来間島を対象にPV303kW，BESS44台とEQ19台を設置した．2021年度は戸建住宅や事業所に普及展開して，年度内には宮古島における設置総数は約700件（PV5,011kW/BESS562台/EQ230台/EVC19台）に到達する．

台風停電の多い宮古島では，場所によっては4日間も停電が長期化する．そのため無料設置の蓄電池は普段通りに生活できると島内の利用者の方々に評価を受けており，EQは停電時も給湯が可能であるため，光熱費が安価になった上に便利だとの評価を受けている．

2018年や2019年の普及モデルは，当時採算性が見込まれた屋根置きPVとEQを組合せた第三者所有モデル（TPO：Third-Party-Ownership）で実施した．エリアアグリゲーションのためにPV余剰電力の制御が必要なためエンドユーザーが所有せず，PV自家消費が実現できるよう工夫した．

TPOは最近ではオンサイトPPA（Power Purchase Agreement）という呼び方が主流であるが，需要家は設置費無料となり，事業者側が設備を所有して管理運営する．設備投資は，自家消費売電，温水熱販売，余剰売電，非化石価値収入などで回収していく．

2020年からは住宅蓄電池（BESS）を組み入れることができ，以降はPV＋BESSを主要機器としてEQやEVCも増設可能なメニューで展開している．

設置方法については屋根置きPVには既設住宅に負担が少なくなるよう傾斜角5度未満の架台を使用した．BESSはPV-PCS（Power Conditioning System）と組合せて自立式架台に取付けるなどして施工費を引き下げた．幾度か設計変更を繰り返し，金具類や電材類に至るまで調達方法を工夫して，恐らく国内初となるストレージパリティに到達した．ストレージパリティとは「蓄電池を導入しないよりも蓄電池を導入した方が経済的メリットがある状態」を指し，PVで安価な電気を作りだし，蓄電池に充電して，それを夜間等に放電利用した際に，全体的なコストが既に系統電力よりも安価になる状態をいう．

図12　市営住宅への導入実績

但し，ストレージパリティモデルは**図13**に示すような所定のペルソナに合致する場合に発揮できるものであり，独居老人宅にもサービス提供を実施するために国補助などを受けながら，その不利性を克服している．

図13　ストレージパリティの内容

5．地域マイクログリッド構築

宮古島市来間島（島内需要電力50kW～250kW）で，㈱宮古島未来エネルギーが住宅PV蓄電池やエコキュート・EMS機器などを住宅建物や小規模店舗などに設置し，それらの住宅PV蓄電池等を㈱ネクステムズが需要側EMSで監視制御，沖縄電力㈱が島内配電系統にMG蓄電池を設置してMG-EMSで監視制御するとともにそれらをエネルギーマネジメントシステム（EMS）で統合制御することにより，災害時にも自立的な太陽光発電の活用が可能な地域マイクログリッド（MG）を2021年度末までに構築し，

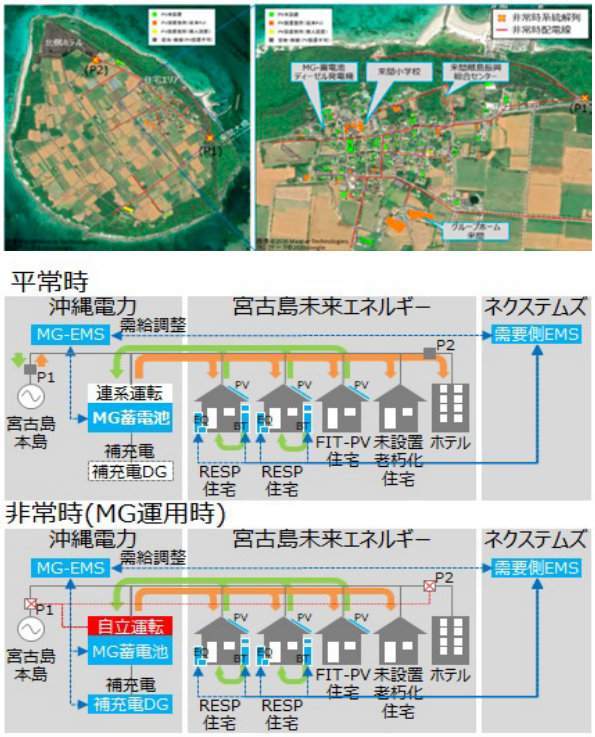


図14 来間島MGの概要

前述の3社と宮古島市を含むコンソーシアムでMG運用を行う実証事業を展開している（**図14**）．

来間島は系統の末端で，橋梁添架ケーブルで電力供給を受けており，台風停電時の復電が比較的遅延の傾向にある．そこで，住宅用のPV+BESS + EQ，EMS機器などを住宅建物等に設置して需要側EMSで制御し，併せて島内にMG蓄電池と補充電用ディーゼル発電機を設置してMG-EMSで制御しつつ，それらを統合制御することにより，台風停電等の非常時にも自立的な電源活用が可能な地域MGを目指すものである．MG対象区域は2ヵ所の指定避難場所を含む来間島の世帯数96世帯（人口165人），店舗等10箇所程度の住宅エリア全体（開閉器P1-P2範囲）としている．既設PVも含み，主に自家消費型PVを再エネ電源として，平常時は，再エネ自給率向上及び経済性向上を優先して，MG対象区域と他系統との潮流制御を実施し，非常時は，停電時間最小化を優先して，MG運用の監視制御を実施する．

・戸建住宅PV + BESS + EQ：5.5kW − 5.6kWh × 34台
・店舗団地PV + BESS + EQ：5.5kW − 13.5kWh × 10台
・既設FIT-PV：合計380kW
・MG蓄電池：400kW − 800kWh（実効容量）
・補充電用ディーゼル発電機：100kW

6．おわりに

これまで述べてきた宮古島での取組みは島嶼地域に合致するものであると考えているが，系統負荷率向上と再エネ余剰電力吸収によって，エネルギー供給コスト低減が望まれるのは宮古島に限ったことではない．沖縄地域には沖縄本島を含めて11の電力系統があるが，我々は全ての地域に普及拡大し，年間を通じてコンスタントな電力負荷を形成したいと考えている．また，このように需要家に分散設置された設備を安定して自在に制御できることが分かってきたため，制御の高度化を目指し，地域マイクログリッドを沖縄県内の他地域に広く展開していきたいと考えている．

これらの技術開発は既に進んでいるが，どのような機能をどのように活用することで，誰が受益者となるのかが，現状では整理できていないと捉えている．宮古島では実装普及した機器を用いて，技術面や制度面の課題を解決しつつ，最良なゴールを導き出したいと考えている．その上で，様々な課題はあるものの，エネマネ事業者が市民・コミュニティの代表としての立場で公益性を重視し，送配電事業者等のエネルギー事業者に対して影響力のあるステークホルダーであり，協調性のあるパートナーとなることで持続可能な社会システムの実現に挑戦し続けたい．

そのため，沖縄電力㈱と資本提携を結び沖縄本島での普及を開始した．更に久米島では地元ガソリンスタンド会社と共同出資して．㈱久米島未来エネルギーを設立して普及の準備を始めている．石垣島や小規模離島などでの事業開始準備も進めている．需給調整や電圧調整などの全てを電力系統側で実施することは，電気料金の増加を招き兼ねないと考えている．そのため，分散電源が需給調整や電圧調整の一助となる機能を実装して，それを適正に運用することが求められる時代となると考えている．

脱炭素や気候変動への抜本的対策が実施される中，地域の主電源としてPV等の再生可能エネルギーの大量普及は不可逆的に進行していくと考えており，カーボンニュートラルやSDGs達成への貢献など様々な価値を提供できると考えている．同時同量を強く求める電力運営によって，系統負荷率が向上してコンスタントな電力負荷になれば，様々な課題解決の糸口になり得ると考えており，国内にも広く普及することを望んでいる．

＜著者紹介＞

比嘉　直人（ひが　なおと）
琉球大学工学部機械工学科卒業（1994）．沖縄電力グループの㈱沖縄エネテックに入社．沖縄県内の各種の再生可能エネルギー事業に従事，2016年に退職．㈱宮古島未来エネルギー，㈱久米島未来エネルギー，㈱ネクステムズ代表取締役社長．

（注）ECHONET Liteはエコーネットコンソーシアム，OpenADRはOpenADR Alliance，Wi-SUNはWi-SUN Alliance，LINE WORKSはLINE㈱の商標または登録商標です．

特　集　持続可能なまちづくり

電力と交通のセクターカップリングによる地域エネルギーマネジメント －宇都宮市での取組を中心に－

City Energy Management by Electricity-Transportation Sector Coupling
－ Focusing on Activities in Utsunomiya-city －

石井英雄*・藤本悠*・光岡正隆*・林泰弘*
Hideo Ishii　Yu Fujimoto　Masataka Mitsuoka　Yasuhiro Hayashi

1．まえがき

本稿では，人が生活し活動する街の基本である電力と交通の2大インフラをとりあげ，今後の脱炭素による持続可能な街づくりの根幹として重要な要素になると考えられる「電力と交通のセクターカップリングによる地域エネルギーマネジメント」について，宇都宮市を舞台に進めている研究をもとに紹介する．

2020年10月，日本は2050年までに温暖化ガス排出を実質ゼロにする「カーボンニュートラル」を目指すことを宣言した.その鍵は電力の創出を再生可能エネルギーなどカーボンフリー電源に転換していくとともに，エネルギーの最終利用を極力電化することである．日本のエネルギー起源CO_2排出量10.3億トンのうち，約2億トンを排出する運輸セクターでは，車両の電動化を中心に，カーボンフリーのバイオ燃料や水素の利用への転換を目指すとされている[1)]．

一方，カーボンニュートラルに向けては，環境省が進める「2050年ゼロカーボンシティ」に多くの自治体が名乗りを上げ，それぞれの地域の特性に基づく構想を掲げ，ボトムアップの取組みの機運も高まってきている[2)]．

我々は，再生可能エネルギーの導入量を可能な限り増やし，電力の消費と効果的に結びつけるエネルギーマネジメントの手法を街レベルに発展させる方法論に取組み，電力システムを忠実にモデル化し，太陽光発電や電気自動車の導入等のシナリオに応じたCO_2削減効果等を定量的に評価する「デジタルプラットフォーム」を構築した．本プラットフォームは，スマートシティの基本的なデザインを行うことが可能であり，我々は今後電化が進むことが想定される交通分野を取込んだエネルギーマネジメントである「電力と交通のセクターカップリング」に発展させる研究を進めている．研究を進めるにあたっては，交通システムの再構築によってネットワーク型コンパクトシティを目指す宇都宮市と連携し，電力や交通に係わる実データをもとに検討を進めており，その現状と今後の展望について述べる．

*早稲田大学スマート社会技術融合研究機構
〒162-0041 東京都新宿区早稲田鶴巻町513

2．宇都宮市のビジョンと取組み

2.1　ネットワーク型コンパクトシティ

北関東に位置する栃木県の県庁所在地である宇都宮市は，「第6次宇都宮市総合計画」のもと，今後の人口減少を踏まえ，ネットワーク型コンパクトシティ（Network Compact City，以下NCC）を未来像に掲げている[3)]．

NCCとは，大きく2つの要素を含む都市のデザインの一概念である[4)]．一つ目の要素は，分散する拠点と人の集積である．街の中心部と各地域に拠点を形成し，人の生活の基本である「住まう・働く・学ぶ・憩う」に応じて拠点を機能化し，居住・活動の拠点に人の集積をはかる“コンパクト化”である．二つ目は，拠点間を結ぶ公共交通網や道路網など交通ネットワークの整備であり，各拠点が相互に連携・補完し合うようにすることである．NCCは人口減少，少子高齢化が進む日本において，コンパクトなエリアで日常生活に必要な機能が充たされ，市民生活の質，都市の価値・活力を高める都市空間を形成するための方法論であり,行政コスト低減の観点からも,将来の人口に見合った今後の都市設計の基本を提示するものである．

2.2 「未来都市うつのみや」をめざして

宇都宮市では，2018年の52万人をピークに人口が減少に転じているものの，北関東の中核都市として新幹線，JR，東武鉄道が東京と直結しており，さらに長らく検討されてきた市の東西の基幹公共交通として，LRT（Light Rail Transit）の建設が2023年4月の営業運転開始を目指して進められている．これに合わせ宇都宮市では，これまで形成されてきた商業地域，工業地域，観光地域を活かしながら拠点化を構想し，公共交通空白地域の解消と拠点間の連携強化を図るため，LRTと重複するバス路線の振り分けを含め公共交通網を再編することを構想している．さらに，郊外部における移動手段（地域内交通）の導入や，LRT，バス，地域内交通，自動車，自転車等の乗り継ぎ施設の整備，各公共交通機関共通の交通ICカード導入等，利便性の高い階層型交通システムの構築を計画している．

こうした街の基本設計,交通インフラの整備と並行して，

NCCに基づく街づくりを加速するために，ICTの利活用と各分野のデータ統合・共有化による街全体を最適化するマネジメントの確立を目指し，産官学が連携するUスマート推進協議会を2019年7月に設立した．一例として，観光拠点である大谷地域で，観光用グリーンスローモビリティや顔認証，デジタルサイネージ，交通予約・配車システムなど，老若男女の利便性・快適性を高め，回遊促進・滞在時間拡大を目的とする実証が行われている．

このように，宇都宮はスマートシティの具現化や電力と交通のセクターカップリングによるシナジー効果を実証・検証する格好の舞台であるといえ，2018年度より共同で研究を行うこととなった．

3．都市レベルの電力システムのデジタル化手法

我々の研究グループでは，太陽光発電を中心とする再生可能エネルギーの大量導入に伴う課題を技術的に解決することによって導入可能量を極力増やし，健全な導入促進に貢献する電力ネットワークマネジメントに関する研究を推進してきた．また，需要家に様々なエネルギー資源が導入される今後の世界では，個々の需要家における最適なエネルギーマネジメントを基本としつつ，ディマンドリスポンス（Demand Response：DR）やバーチャルパワープラント（Virtual Power Plant：VPP）等の電力価値の取引を通じて，ネットワークのエネルギーマネジメントと協調する全体最適化の視点が重要であり，関連する研究に取組んできた．最適化の指標としてはエネルギーコスト等の経済性に加え，CO_2排出削減量が重要な指標となっていくと想定される．政策や投資の意思決定において，ある施策を実行する前後でこれらの指標を定量的に比較評価することは，益々重要性を増していくと考えられる．

このような社会ニーズに応えていくため，我々は太陽光発電（Photovoltaic Generation：PV）や分散エネルギー資源の大量導入，電力ネットワークと需要家のエネルギーマネジメントシステム（Energy Management System：EMS）の相互協調といった要素を取り込み，所望のシナリオに対応して，街レベルで面的に広がる電力ネットワークがどのような挙動を示すかを算出し，潮流（電気の流れ）分布，電圧分布，エネルギー損失密度といった電気的指標とCO_2排出量等を定量的に評価するデジタルシミュレーション手法（デジタルプラットフォーム）を構築した[5,6]．

図1にその概要を示す．対象とする地域に対応して電力ネットワークを設定し，土地利用に関する公表データや需要家の電力消費パターンの既往研究成果などを活用して，デジタルデータとして都市レベルでのリアルな電力システムを構成する．ここに，PVや電気自動車のような脱炭素に貢献する新たな機器がどのように導入されるかを設定し，電気現象を模擬する．太陽光発電設備の発電量については，気象衛星ひまわり8号により2.5分毎に1km区画で提供される地表日射データを利用し，発電量に変換する．さらに，各需要家にはEMS（住宅はHEMS，商業ビルにはBEMS）を設置し，取得できるデータや系統側のEMS（GEMS）とのデータ共有，協調などもシナリオとして設定する．**図1**の右側に，配電線の電圧分布，ならびに配電線に発生する電力損失分布の計算例を図示している．

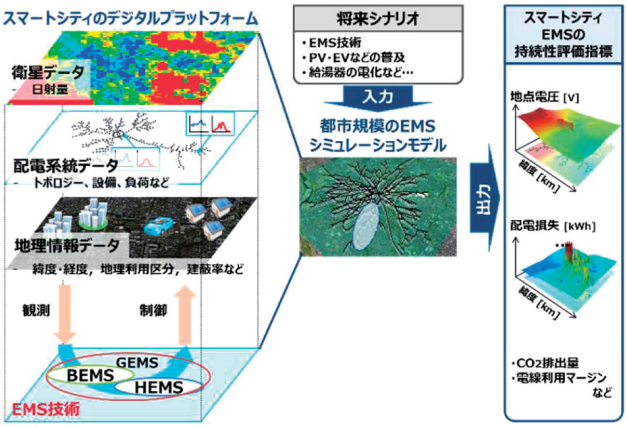


図1　デジタルプラットフォーム

電気現象を正確に扱うには，電線の諸元（太さ，長さ，インピーダンス，最大許容電流等），開閉器位置，柱上変圧器個数等が必要となるが，東京電力パワーグリッド，関西電力（現，関西電力送配電），中部電力（現，中部電力パワーグリッド）の協力により，実在している123のフィーダーについて，電力の負荷が最大になる日ならびに最小になる日の30分刻みの電流値（各48点）とともに実際の数値を得ている．なお，これらのデータに基づく配電線モデルは，早稲田大学スマート社会技術融合研究機構（ACROSS）のホームページを通じて公開している[7]．

4．電力と交通のセクターカップリング

宇都宮市のビジョンに見るように，電力と並んで交通は都市にとって重要なインフラであり，その革新は脱炭素のみならず，地域の活性化の観点からも期待が大きい．

本章では，全需要家の電力消費データを計測しているスマートメーターのデータを活用し，今後の電化が見込まれる交通分野と電力分野のセクターカップリングによる最適化に関する“E-MaaS構想”について紹介する．

4.1　電力スマートメーターの展開とそのデータ活用

日本においては，2014年度より電力のスマートメーターの導入が始まり，2024年度に全重要家への設置が完了する．スマートメーターの導入によって，人手によって月単位に行っていた検針が自動化され，30分毎の消費電力量（kWhが単位）が一般送配電事業者が保有するメーターデータマネジメントシステム（Meter Data Management System：

MDMS）に収集される．この仕組みによって，時間帯別料金やDRなどの導入が可能となる．

スマートメーターの導入によって，単に効率的に細やかな料金精算ができるだけでなく，需要家のエネルギー使用の効率化や高齢者の見守りサービス，災害時の自治体による避難誘導など，様々なデータ活用が考えられている．一方，電力消費データは，需要家に電気を確実に届け，その使用量を確定するために取得されていること，また，このようなデータは，需要家の生活パターンや在・不在などの情報につながることから，データ活用においてはプライバシー保護を含めルール整備が必要となる．

電力消費データの社会的な活用価値が高いことから，その活用を可能とするため2020年6月に成立した改正電気事業法において，自治体等の災害対応への活用については電気事業法上の目的外利用の例外とすること，また，高齢者見守りや犯罪防止など社会的課題の解決やイノベーション創出のため，消費者保護確保のもと利用者にデータ提供する制度が整備された．前者は，経済産業大臣から一般送配電事業者への要請により既に可能となっており，後者については，中立的な認定協会（認定電気使用者情報利用者等協会）を設立するとともに，データ提供するルールと仕組みを構築することが決められ，2022年の施行に向け準備が進められている[8]．

これに先立ち，東京電力パワーグリッド，中部電力，関西電力送配電，NTTデータ4社が組合員として運営するグリッドデータバンク・ラボ有限責任事業組合（以下GDBL）が2018年11月に発足し，電力データ活用促進を進めている[9]．

図2に，宇都宮市，及び隣接する芳賀町において2020年時点で設置されている約25万台のスマートメーターのデータをもとに作成した電力消費量ならびに太陽光発電からの逆潮流電力量の分布の夏の日中の一例を示した．これはGDBLが提供するサービスを活用し，250m角のエリアで統計化した電力データの分析によって得たものである．このような30分毎の空間分布の時系列情報を把握し，これを予測[10]しながら街レベルのエネルギーマネジメントを論じていくことは基盤として大きな意味を持ち，ここで述べるE-MaaS構想の根幹となる．

4.2　電力と交通のセクターカップリングの意義

電力と交通は，人間の生活に不可欠な基本社会インフラであるが，これまで連携して考えられることはほとんどなかったといえよう．しかし，近年，脱炭素化に向けて自動車の電動化が進んできており，世界的なカーボンニュートラル宣言においてさらに加速することは必至であることから，両者の関係は急速に密になってきている．

自動車の主要なエネルギー源であるガソリンが電気に転

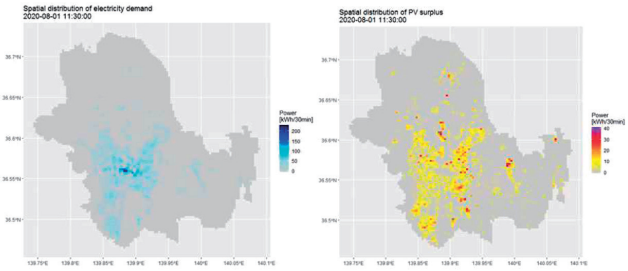


図2　ある時間断面におけるスマートメーターデータ（左）電力消費量　（右）太陽光発電の逆潮流量（それぞれ30分の積算値）

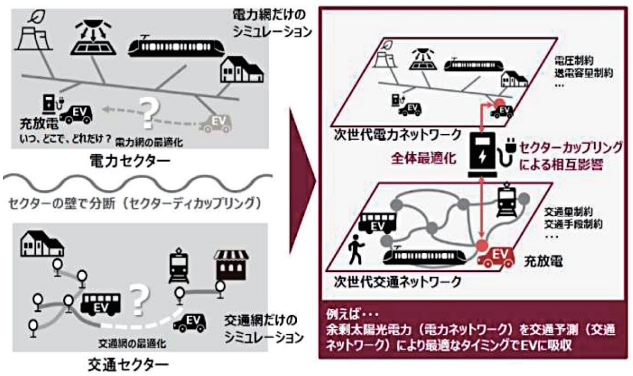


図3　電力と交通のセクターカップリングの概念図

換することになると，電力設備へのインパクトは非常に大きい．特に，電気自動車（Electrical Vehicle：EV）への充電をガソリン自動車への給油と同等の時間で済ませるためには急速充電器が必要であり，日本では1充電器当たり50kWが標準的な容量として採用され，その後のEV航続距離延伸のため搭載電池容量が増大したことに対応して，150kWまで増容量されてきている．一般家庭の契約電力が3kW～6kWであることと対比すると25～50軒分に対応する大きなものだ．ポイントは，充電器等，EV化に係わる整備はこれから本格化するということである．

一方，電力設備については，一般的に電力を供給する電力ネットワークを新しく建設することは少なく，極力既存設備を効率的に活用する視点から対応していくことになる．近年の大きな変化要素は，PVの大量導入であり，今後さらに進んでいくことは間違いない．PV普及によって，**図2**に見るように，需要家の電力消費量を上回る発電量があると逆潮流が電力ネットワークに流れ込むため，3章で述べたように電圧の上限逸脱が起こり，場合によっては設備増強などの対策が必要となる．

以上を踏まえ，電力と交通のそれぞれのセクターが直面する状況を考えると，両者を結び付けるメリットが見えてくる．即ち，PVからの逆潮流が顕著な場所と時間帯においてEVの充電がなされるようにできれば，太陽光発電由来の電力を有効に使い，かつ電力ネットワークへの負担を軽減できることが想定される（**図3**）．

このように，従来は異なる領域としてそれぞれの中で最

適化されてきた複数のセクターを，相互に連携させることで相乗的に新たな価値を生み出すことをセクターカップリングといっている．我々は，NCCを目指して，LRTの新規建設やバス路線の抜本的見直しによって公共交通網の再構築を計画している宇都宮市と連携し，EVバスの導入と再生可能エネルギー活用をコアとした電力と交通のセクターカップリングに取組んでいる．

4.3 E-MaaS構想

我々の研究チームでは，上述したスマートメーターのデータ等電力セクターのデータ，バスの走行情報（バスロケーション）や交通・道路状況等交通セクターのデータ，さらには携帯電話から取得できる人流データを統合的に活用し，電力と交通のセクターカップリングによって，宇都宮市が目指す交通革新を核とするNCCの実現と再生可能エネルギーの地産地消を有効に結びつけるE-MaaS（Electricity, Environment and Mobility as a Service）構想を提唱している．

そのベースとなるのは3章で述べた街レベルの電力システムのデジタルシミュレーション技術であり，同様に交通のシミュレーションモデルを構築し，両者を結合する研究に取り組んでいる．これを活用して，電力システムと交通システムの相互作用・制約条件を確実に取り込みながら，エネルギー消費と人の移動をダイナミックに評価し，再生可能エネルギーの導入，EV交通導入，充電インフラの整備，公共交通の運行などを総合的に検討することを目指している．それぞれをどのようにすれば環境負荷が小さく，移動ストレスのない公共交通を核とする交通網を実現できるか，シミュレーションによってCO_2排出量や公共交通機関利用率等の指標を定量的に評価することによって，政策立案に資する技術を構築することが目的である（**図4**）．このような機能を持つ電力・交通統合評価プラットフォームは，電力・交通・人流の各ビッグデータの取得・分析・予測に基づき，街の挙動をデジタルシミュレーションによってサイバー空間上に再現することを目指すものであり，「時空間マルチダイナミクス予測エンジン」と称している．

電力と交通の基本的社会インフラの最適な設計を目指す上では，“人”目線で地域社会に役立つ観点が欠かせない．宇都宮市では，公共交通の充実によって高齢者・児童をはじめ交通弱者を支えること，観光やイベントによって地元はもとより外部から訪れる人の快適性・利便性を高め，賑わいのある街づくりを目指している．さらに，災害に強い，高いレベルのレジリエンスによって人の安全・安心を確保する視点も重要な要素である．EVは自動車としての機能に加え移動可能な蓄電池の性格を持ち，災害によって電力の供給が途絶えるような非常時に避難所等にEVを配備できれば，ある程度の電気の使用が可能になる．CO_2削減と

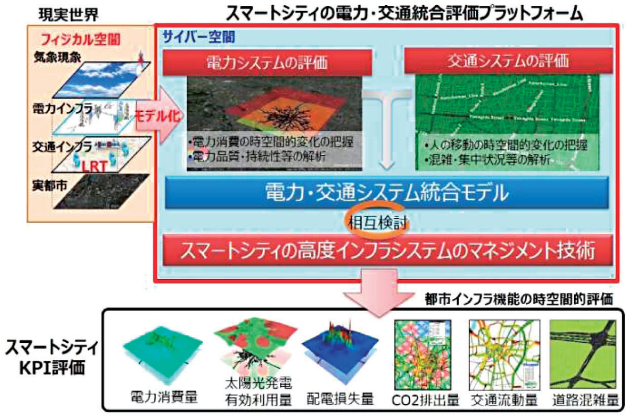


図4 電力・交通統合評価プラットフォームの概要

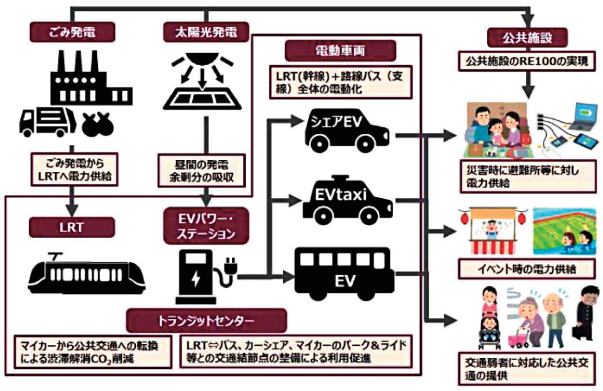


図5 E-MaaSが目指す社会像

公共交通分担率向上を実現しながら人の生活空間を充実させること，この総体がE-MaaSが目指すことである（**図5**）．

4.4 データプラットフォームとデータ連携

電力・交通・人流のデータを収集し，分析・予測を行うことは，これを扱うデータプラットフォームが必要となる．このようなデータプラットフォームは，電力システムや交通システムの管理・運用を最適化するだけでなく，様々な社会的サービスに活用するべきである．自治体行政や住民サービスを展開しようとする企業がデータを活用できるようにするとともに，他にも多数存在するデータベースや管理システムと連携させることで，価値を高めていく視点が重要となる．

本プラットフォームの実設計へ向けては，宇都宮市の協力のもと，都市OSを中心としたプロトタイプの構築を通して，将来的な本格的プラットフォーム構想へ向けた技術やノウハウの蓄積とともに，ステークホルダーの整理やコストシェアリングの在り方などについても検討を進めているところである．

5．おわりに

本稿では，宇都宮市を舞台に研究を進めている「電力と交通のセクターカップリングによる地域エネルギーマネジメント」を基盤とする街づくり，E-MaaSについて述べた．

その実現には，電力・交通・人流などの基本となるビッグデータを収集する仕組み，データを分析する方法，電力消費，太陽光発電量，人の動き等の予測手法とその精度向上といった技術的課題に加え，関連するシステムの設計や構築へ向けた技術面，リソース面の検討，産業との連携など多くの事項が残っているが，2023年のLRT開通に関連させながら精力的に検討を進めている．

とかく技術先行になりがちであるが，宇都宮市は「住めば愉快だ宇都宮」をスローガンに，人目線で未来都市の構築を目指している．宇都宮市の取組みとこれを支える諸技術は，今後様々な都市づくりの一つのモデルとなっていくであろう．

本稿で述べた研究成果は，本稿はJST CRESTの助成JPMJCR15K5，及びJST未来社会創造事業の助成JPMJMI17B5，内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「IoE社会のエネルギーシステム」（管理法人：JST）の下で実施されている内容を紹介したものである．

参 考 文 献

1）内閣官房，経済産業省他；2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略，（2020），https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf
2）環境省；2050年二酸化炭素排出実質ゼロ表明自治体（2021年12月28日時点），（2021），https://www.env.go.jp/policy/zero_carbon_city/01_ponti_211228.pdf
3）宇都宮市；ネットワーク型コンパクトシティ形成ビジョン，（2015），https://www.city.utsunomiya.tochigi.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/007/653/vision.pdf
4）森本章倫；ネットワーク型コンパクトシティを創る－都市計画学の視点から，国際交通安全学会誌，39-2（2014），p.96
5）Y. Hayashi, Y. Fujimoto, H. Ishii, Y. Takenobu, H. Kikusato, S. Yoshizawa, Y. Amano, S. Tanabe, Y. Yamaguchi, Y. Shimoda, J. Yoshinaga, M. Watanabe, T. Koike, H.-A. Jacobsen, K. Tomsovic：“Versatile Modeling Platform for Cooperative Energy Management Systems in Smart Cities”, Proceedings of the IEEE, 106（2018）594.
6）石井英雄，藤本 悠，林 泰弘；分散協調EMS導入の汎用評価手法の開発スマートシティ検討のためのデジタルプラットフォーム，クリーンエネルギー，28-10（2018）32.
7）早稲田大学スマート社会技術融合研究機構（ACROSS）：地域特性を都市規模で捉えた配電系統モデルを国内外で公開，http://www.waseda.jp/across/news/2536/
8）経済産業省資源エネルギー庁，電力データ活用の在り方勉強会及び検討会，https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/shiryo_joho/electricity_data.html
9）山口哲生；グリッドデータバンク・ラボの取組みについて～電力データの活用に向けた環境整備～，（2020），https://www.soumu.go.jp/main_content/000683154.pdf
10）A. Miyasawa, S. Akira, Y. Fujimoto, Y. Hayashi：“Spatial Demand Forecasting Based on Smart Meter Data for Improving Local Energy Self-Sufficiency in Smart Cities”, IET Smart Cities, 3（2）：107-120（2021）.

＜著者紹介＞

石井　英雄（いしい　ひでお）
1988年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了，東京電力入社．1989年～1991年マサチューセッツ工科大学客員研究員．2014年より早稲田大学スマート社会技術融合研究機構にて研究院教授兼事務局長（現職）．バーチャル・パワー・プラント構築等，再生可能エネルギー主力電源化に向けた研究活動に従事．2020年8月より，国際標準化団体IECのSC 8C（Network Management）議長．エネルギー・資源学会，電気学会，IEEE会員．博士（工学）．

藤本　悠（ふじもと　ゆう）
2007年3月早稲田大学大学院先進理工学研究科博士課程修了．現在，早稲田大学スマート社会技術融合研究機構研究院准教授．博士（工学）．統計モデルに基づくデータ解析，機械学習を専門とする．現在，主としてエネルギーマネジメントシステム構築のための統計的データ解析，再生可能エネルギー導入に際した電力変動の統計的予測等に関する研究に従事．情報処理学会，IEEE会員．

光岡　正隆（みつおか　まさたか）
早稲田大学スマート社会技術融合研究機構主任研究員．1986年東京工業大学電気電子工学科卒業．同年より三菱電機㈱にて電力系統保護制御システムの設計に従事．2004年よりABB㈱，2006年よりアドソル日進㈱，2013年よりシーメンス㈱に勤務．2014年4月より現職．再生可能エネルギーの大量導入に向けた技術開発，スマートシティ対応技術開発を推進．

林　泰弘（はやし　やすひろ）
1994年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了．博士（工学）．茨城大学，福井大学を経て2009年より早稲田大学先進理工学研究科電気・情報生命専攻教授（現職），2014年よりスマート社会技術融合研究機構機構長（兼任）．2020年より電気学会東京支部長．主に，環境に適した電気エネルギーの安定供給，都市のエネルギーマネジメントシステムなどの研究に従事．2019年文部科学大臣表彰・科学技術賞（研究部門）受賞．

シリーズ特集

明日を支える資源（177）

鉛の特性とその用途および国内循環における鉛二次精錬業の位置付け

Lead, its Characteristics, Use, and the Role of Secondary Smelters in Material Circulation in Japan

道本龍彦*
Tatsuhiko Michimoto

1．概要

鉛は，重くて柔らかい金属で，その独自の特性を活かして，古来より様々な用途に使われてきた．約150年前に発明された鉛蓄電池への用途は注目すべきものがある．環境への影響から他の用途は消滅してゆく中で，今では鉛蓄電池への用途が大部分を占めるに至っている．鉛は元来リサイクルの容易な金属で，日本国内での鉛蓄電池を中心とした鉛リサイクルの現状とマテリアルバランス，その循環の一端を担う二次精錬業の位置付けにも触れる．

2．はじめに

鉛はその特性を活かして古来より様々な用途に使われてきた．しかしながら，鉛の用途は時代とともに変遷があり，現在では「鉛蓄電池への用途」がほぼ主流の状態になっている．ここでは，前半部にて鉛の基本物性と古来からの用途および生体への影響にあらためて触れる．後半部では，用途の大部分を占める鉛蓄電池のリサイクルを中心とした我が国における鉛地金の循環およびそのリサイクルの担い手の一つである二次精錬業の位置付けを紹介する．なお，後述するように弊社は二次精錬業の一員で，モータリゼーションが本格化した1965年代（昭和40年代）頃から他社に先駆けて鉛蓄電池のリサイクルを始めた[1]．

3．鉛の基本物性

皆様は「鉛（なまり）」という言葉を聞かれたら，何を想像されるだろうか？「軟らかい金属」，「重い金属」，「環境には良くないのでは？」，（古い世代の方なら）「水道管，活字，はんだ」，（工芸品に詳しい方なら）「七宝の原料」，「クリスタルガラス」等，人さまざまであろう．

鉛は周期律表で82番目に位置し，原子量は207.2，結晶構造はfcc（面心立方格子）[2]の金属である．折角なので，鉛の基本的な物性値を掲載する．**表1**に掲載したように鉛の密度は銀の密度（10.5）に比較的近く，よく使われている金属である鉄（密度7.87），銅（密度8.93），アルミニウム（密度2.7）等と比べてかなり重い金属と言える．融点は同じくよく使われている金属である鉄（融点1536℃），銅（融点1083℃），アルミニウム（融点660℃）等と比べてかなり低く，溶かすのが容易な金属である．引張強さは1.2～1.4kg/mm^{2}に過ぎず（純度99.73%の例[3]），鉄の引張強さ[4]（鉄鋼材料や熱処理によって異なるが）100kg/mm^{2}前後と比較して分かるように，非常に軟らかい金属である．

鉛は空気中で表面に安定な酸化被膜を形成し，これが保護被膜となって比較的高い耐食性を示す．また，標準電極電位は－0.126V[5]で，この数字をそのまま解釈すると酸に容易に溶解するように思われるが，実際には1V以上もの水素過電圧[3]※のために酸に溶解しにくく，耐食性も優れていると言える．

表1　鉛の基本的な物性値[3]

密度（20℃） g/cm^3	融点 ℃	沸点 ℃	比熱 cal/g・℃
11.337	327.4±0.1	1740±10	0.031
比電気抵抗（0℃） $\mu\Omega^{-1}$・cm	熱伝導度（20℃） cal/cm・s・℃	線膨張係数 10^{-6}（℃）$^{-1}$	
19.3	0.083	29.3	

※水素過電圧とは

鉛の電位が標準電極電位である－0.126Vに到達してもPb^{2+}＋2e＝Pbの反応が平衡状態にあるだけで，この反応が左向き（Pbがイオン体になって溶出す方向）にどんどん進むのではない．相撲に喩えれば，土俵際に追いやられても，まだ踏ん張っている状態である．この標準電極電位よりもさらに上積みの電位をかけて，ある上積みの電位になると，これが駆動力となってPbの実質的な溶解が始まる．これが過電圧である．同じく相撲に喩えれば，土俵際に追い詰められた後に，さらに押出を受けて土俵外に出てしまうことになる．この押出が過電圧に相当するのである．鉛の場合は1Vの過電圧であるから，－0.126＋1で0.88V付近から実質的な溶解が始まることになる．では過電圧の頭に「水素」が付いている．これはなぜだろうか？上記の反応が左向きに進んで，Pbが失った電子（e）を，水中のプロトン（H$^+$）が受取る．すなわち2H$^+$＋2e＝H$_2$の反応が右向きに進んで水素ガスが発生する（Pb＋2H$^+$＝Pb^{2+}＋H$_2$（g））．水素ガスが発生するので頭に「水素」が付くのである．

*株式会社大阪鉛錫精錬所　酉島事業所
〒554-0051 大阪市此花区酉島5-11-117

4．鉛の用途とその変遷

「重くて，軟らかい」という特性ゆえに，鉛は構造用材料としては極めて不向きな金属である．しかしながら，鉛は鉛としての独自の特性を活かして古来から現代に至るまでさまざまな用途に使われてきた．

(1) 水道管の材料

前記のように優れた耐食性を活かして使用されていた．

(2) 電線の被覆材料

同様に優れた耐食性を生かして使用されている．加工に当り，鉛の高い展性も有利な点である．今では陸上の被覆材料には樹脂が使われているが，比重が大きい（すなわち水に浮かばない）利点を生かして，海底ケーブルの被覆材には鉛が使われている．

(3) 活字合金

鉛単独ではなくアンチモン，錫との合金して使用されていた．鉛単独よりもさらに融点が低くなるので，鋳造性がよいという特性が活かされていたのである．

(4) はんだ

はんだは鉛と錫の合金で，これも鉛単独よりも融点が低いという特性を活かしたもので，電気基盤に使われている．

(5) 錘

前述のように重い金属なので，魚釣りの錘やヨットのバランス材に使われていた．

(6) 釉薬，各種顔料

これも鉛単独ではなく各種化合物になると美しい色を出すという性質が活かされていた．

(7) 放射線遮蔽材

鉛は透過力の高いX線やγ線の遮蔽にも有効である．

(8) 免震材料

高い減衰性能を生かして，建築物の免震材料（鉛ダンパー）に使用されている．

(9) 銃弾

低融点で加工しやすいという特性から，銃弾の材料に使用されている．

(10) アンチノックス剤

四エチル鉛という成分で，ガソリンに添加してエンジンのノッキングを防止するのに使われていた．

(11) 鉛蓄電池の材料

鉛蓄電池の電極板や各種部品は鉛合金で成り立っている．電極反応に不可欠な活物質も鉛粉や鉛の酸化物である．

上記に用途を紹介したが，鉛の環境への影響を考慮して(1)，(3)，(4)，(5)，(6)，(10) の用途は既に消滅または消滅の方向に向かっている．これに対して，(2)，(7)，(8)，(9)，(11) の用途は依然として健在である．他の多くの用途は消滅ないしは消滅しつつあるので，特に「(11) 鉛蓄電池の材料」の用途のシェアーが高く，ほぼ90%を占めるようになっている．後述するように，鉛は金属の中ではリサイクルがよくされている金属と言えるのであるが，「鉛蓄電池の材料」のシェアーが特に高いため，「鉛のリサイクル≒鉛蓄電池のリサイクル」と言っても過言ではないだろう．

5．鉛蓄電池の電池反応（その放電と充電）

世の中にはさまざまな電池が存在するが，その基本は酸化反応と還元反応が同時に起こることによる電子の授受である．この電子の授受が電流になって，私たちはその電気を利用することができるのである．この基本は，いかなる電池でもまったく同じである．

鉛蓄電池は1859年にフランスの科学者ガストン・プランテ（Gaston Plante 1834～1889）によって発明[6]された．この電池は充放電が可能な二次電池の一種である．鉛の化学反応を実に上手く利用したものと言える．発明から150年以上経っておりいろいろな改良が加えられ性能も向上しているが，基本原理そのものは少しも変わっていない．この電池の反応は後述のリサイクルおよびリサイクルの一環としての廃鉛蓄電池を原料とした精錬の難易と深く関わっているので，ここでは電池反応の紹介をする．

前述のように電池反応は全て酸化反応と還元反応から成立つと申したが，鉛蓄電池の場合はどうだろうか？電極板には活物質として，正極については二酸化鉛（PbO_2）が，負極には鉛粉（Pb）が塗り付けられている．もう一つ基本となる電解液には硫酸が使われている．放電反応について教科書では以下のように記載されている．

●正極反応

$$PbO_2 + H_2SO_4 + 2H^+ + 2e = PbSO_4 + 2H_2O$$

●負極反応

$$Pb + H_2SO_4 = PbSO_4 + 2H^+ + 2e$$

以上の反応から判るように

①放電によって正極の活物質である二酸化鉛および負極の活物質である鉛（粉）いずれもが，硫酸鉛（$PbSO_4$）に変化する．

②負極の酸化反応（$Pb \rightarrow PbSO_4$）で奪われた電子が導線を通して正極に流れ込み，ここで還元反応（$PbO_2 \rightarrow PbSO_4$）に使われる．

③2電子の授受によって正負極合わせて2分子の硫酸が失われる．一方，2分子の水が生成される．したがって，放電によって電解液の硫酸濃度はどんどん薄くなってゆく．

以上の放電反応を**図1**に示した．

充電の場合は，正極，負極に外部電源を接続して上記の

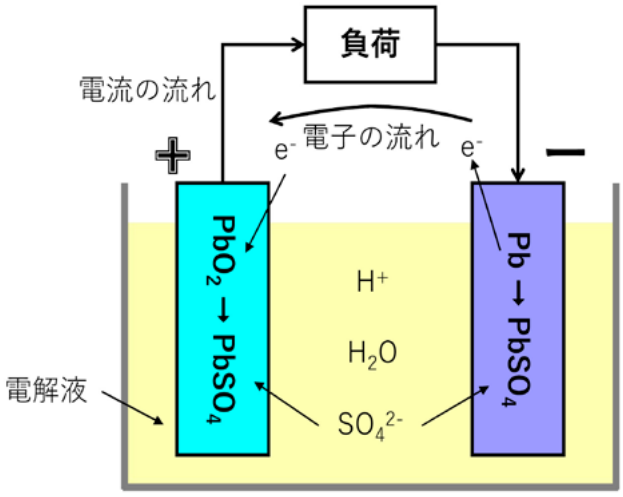


図1 鉛蓄電池の放電反応

反応とまったく逆の反応を起こさせることになるのである．すなわち，それぞれ正極，負極で生成した硫酸鉛が元の活物質である二酸化鉛，鉛（粉）に回復，合わせて失われた硫酸も回復する．

余談になるが，筆者が修士課程の大学院生時代の研究テーマは上記の酸化・還元反応を利用した硫酸水溶液中における硫酸イオンの活量（activity）測定[7]であった．

他の電池の反応でもそうであるが，前記の電池反応における化学反応式は一見すると難しそうに思える．しかしながら，決して難しいものではなく，ましてや丸暗記する必要はまったくない．そのためには，「電池反応によって酸化（正確に言えば電子を失う）や還元（正確に言えば電子を受取る）を受けた元素（element）はどれか？」に注目することである．鉛蓄電池の放電反応で正極について言えばPbO_2から$PbSO_4$に変化している．Pbの元素に注目すると＋4価から＋2価に変化，すなわち2電子を受取って還元されている．一方，負極について言えばPbから$PbSO_4$に変化している．Pbの元素に注目すると0価から＋2価に変化，すなわち2電子を奪われて酸化されている．以上のように，反応の本質は「Pbの＋4価から＋2価への還元とPbの0価から＋2価への酸化」が同時に起こっているだけである．反応式に硫酸や水などがゴチャゴチャと登場するのは物質収支のための辻褄合わせに過ぎない．このような目で電池反応を見れば，ことの本質が見えてきてすっきりする．

6．鉛の生体への影響

鉛は水銀，カドミウム，6価クロムと並んでよく知られた有害性のある金属の代表格である．鉛中毒の症状としては，腹部の疝痛，運動神経の麻痺，貧血，腎臓障害，中枢神経障害等[8,9]さまざまである．そのメカニズムは鉛が赤血球に侵入しやすく，硫黄を含むタンパク質と結合するため，酸素と赤血球中のヘモグロビンとのヘム合成を妨げるため[8]とされている．

古代ローマ時代からその毒性は知られていたためか，鉛鉱山の採掘には奴隷を使っていたとのことである．それにもかかわらず，ローマ帝国では身の回りに多くの鉛が使用され，驚いたことにワインを貯蔵する容器にも鉛が使用され，しかもワインの味がマイルドになる（実は酢酸鉛の生成）ので，これから甘味料を取出して料理にも用いていたのである．このような大量の鉛の使用と摂取が住民の健康を蝕み，ローマ帝国滅亡の一因になったと言われている．

中世以降も鉛の使用は続けられ，鉛中毒の悲劇は起きている．有名人で言えば，画家のゴッホの精神障害によるピストル自殺も作曲家ベートーベンを悩ませた聴力障害も鉛中毒が原因と指摘されている．

以上のように，鉛は生体に対し良くない影響を及ぼす元素ではあるが，あくまでも溶融している状態で発生するヒュームや粉塵を吸引したり，飲食物とともに摂取して消化器から吸収，血液中に移行して体内に蓄積した場合の話である．地金を手で触れる程度では，表面が酸化被膜で覆われているので，特に問題はない（もちろん常識的に言って，後で手をよく洗うべきであるが）．

7．鉛の二次精錬業の位置付け

国内で鉛地金を生産しているのは歴史的に一次製錬業（一次の場合は慣習として「製錬」の文字使用）と二次精錬業（二次の場合は慣習として「精錬」の文字使用）に分類される．一次製錬業は伝統的に自社の鉱山産出の鉛鉱石からの製錬を主体としたものである．生産した鉛地金は未だ不純物元素を多く含んでいるので，そのままでは使用に不向きで，後工程として不純物元素を取除く操作が必要である．これを「精製」と呼んでいる．一次製錬業では精製工程のために電解精製設備を備えている．鉛鉱石については，以前は35箇所あった国内鉱山[10]が2006年には全て閉山され[11]，現在では全量海外からの輸入である．「伝統的に鉛鉱石からの製錬を主体」と申したが，現状では，一次製錬業と後述する二次精錬業を合わせた全生産量のうち70%強がリサイクル原料によるものである．

一方，二次精錬業は，鉱石製錬とは無縁で，伝統的にリサイクル鉛すなわち市中の所謂「都市鉱山」で回収される鉛原材料による生産のみである．精製工程については一般的に電解精製設備は備えておらず，ほぼ乾式法[12]のみで行っている．精製工程がまったくなく，リサイクル原料からの粗地金（粗鉛）の生産のみの会社もある．リサイクル原料から粗鉛を生産するだけではなく，これを材料として乾式精製さらには合金元素を添加した合金製造も行って製品に付加価値を持たせている．申し遅れたが，弊社は乾式

精製と合金製造も行っている二次精錬業の一員である．

以上を整理すると**表 2** のようになる．

表 2　一次製錬業と二次精錬業の比較

項目	一次製錬業	二次精錬業
事業規模	大手企業	中小企業
鉛製錬の位置付け	非鉄金属製錬業の一つとして	鉛精錬のみの単一業務または主要業務
製錬の原料	鉱石，リサイクル原料	リサイクル原料のみ
精製	電解精製	乾式精製が一般的または精製工程なし
合金製造	あり	行っている会社もあれば，行っていない会社もある

注）前記のように「一次製錬業と二次精錬業を合わせた全生産量」に対する「リサイクル原料（一次製錬の担当分と二次精錬の全て）による生産量」の比率は70%を超えている．

前述のように一次製錬だろうが，二次精錬だろうが，鉛蓄電池を原料とした製錬では当然ながら使い古された廃電池が原料となるから，活物質として放電で生成した硫酸鉛（$PbSO_4$）が含まれている．もちろん放電前の元の活物質である二酸化鉛（PbO_2）と鉛粉（Pb）も残っている．その他活物質を支えている電極板や各種部品類も含まれている．これらを溶錬炉（smelting furnace）で鉛の地金に変えるのが製錬である．上記のうち鉛粉（Pb）および鉛合金で作られている電極板と各種部品類は単に溶解するだけであるから簡単に地金になる．製錬の基本は溶錬炉の形式こそ違えど，「コークスの不完全燃焼で発生したCOによる還元反応」であるから，二酸化鉛（PbO_2）は簡単に熱分解してPbOを生じた後に容易にPbまで還元される．ここまでは何の問題もないのであるが，曲者は硫酸鉛（$PbSO_4$）である．これはCOによる還元を受けても硫化鉛（PbS）に変化するだけで地金（Pb）にはならない．また，このような硫酸塩化合物を溶錬炉内に持込むことによって，複雑な反応を経て亜硫酸ガス（SO_2）を生成する．以上のように原料に含まれる成分のうち硫酸鉛（$PbSO_4$）はPbの回収率を悪くしたり，亜硫酸ガスに対する排ガス処理が大きな負担になったりするので，歓迎されない物質と言える．当然ながら，亜硫酸ガスに対しては大気汚染防止の観点から，アルカリ吸収剤を用いた湿式脱硫処理等の排ガス処理が必要になる．

8．鉛（地金，化合物）の国内における循環

前述のように「鉛のリサイクル≒鉛蓄電池のリサイクル」が現状で，廃鉛蓄電池で純鉛換算にして年間約20万tを中心に循環している．この数字は近年それほど大きな変化はない．**図 2** は廃鉛蓄電池に含まれる鉛量（純鉛換算値）を100%とした場合の収支を示している．あくまでも概数であるが，弊社（日本鉛協同組合）が日本鉱業協会とともに収集した諸データを基に試算したものである．循環図の中で主な箇所の収支を確認しておく（**図 2** 参照）．桁の丸めの関係で小数点以下１の位が0.1程度前後はするが．

（以下　%は省略）

(1) Waste LAB（100）→LAB Collection & Resource Recirculation（94.4）の収支

●Output

①City Waste LAB Inventory　5.5

②Waste LAB Export　0.1

以上から 100 − 5.5 − 0.1 = 94.4

(2) LAB Collection & Resource Recirculation（ 94.4）→Total Pb Production（134.7）の収支

○Input

①Pb Ore Import　34.2　②Pb Slag　6.1

以上から 94.4 + 34.2 + 6.1 = 134.7

(3) Total Pb Production（134.7）→LAB Industries（133）の収支

○Input　Pb Import　21.3

●Output

①Pb Export　2.5　②Bullion Export　8.9

③Other than LAB　11.4

以上から 134.7 + 21.3 − 2.5 − 8.9 − 11.4 = 133.2

なお，一次製錬業と二次精錬業の生産量の比率はほぼ２：１と推定される．

9．鉛の製錬は今後どのようになってゆくのか？

前述のように「鉛の用途≒鉛蓄電池」であるから，鉛蓄電池の先行きが，鉛製錬の将来を決めていると言っても過言ではないだろう．

鉛蓄電池の良い点は「安価である」こと，「使用環境の影響を受けにくい（一例として，低温での高率放電特性[13]）」こと，「リサイクルしやすい」ことが挙げられるだろう．反面，良くない点として「環境には良くない金属を使用している」ことと「（用途によっては）重い」ことが挙げられる．鉛蓄電池には良くない点があるものの，良い点を活かして１世紀半の長きに渡って使われてきた．現在でも使われている．

昨今，リチウムイオン電池等，新しいメタルを使った二

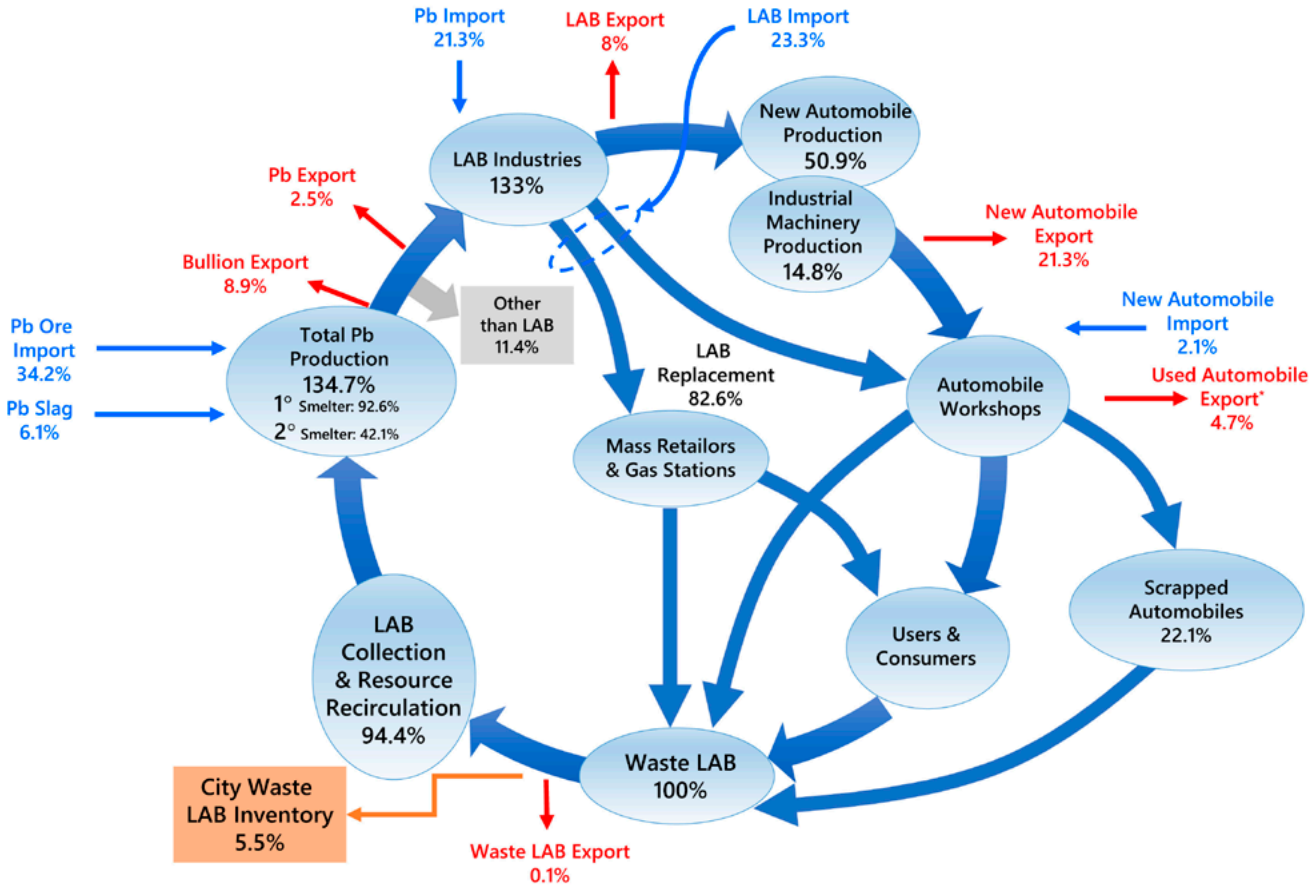


図 2　国内鉛・鉛蓄電池循環フロー

注 1）掲載した数値は廃鉛蓄電池の鉛量を 100% とした場合の比率を示す.
注 2）電池を交換してから中古車を輸出することを前提としている.
注 3）LAB は Lead acid battery（鉛蓄電池）を示す.

次電池が開発，実用化されている．新たに登場してきた二次電池には，それぞれに長所，短所[14] があるだろう．今後，鉛蓄電池の持つ良い点を全て凌駕する二次電池が登場するかもしれない．そうなれば，「環境には良くない鉛を使った電池はもうやめよう」ということになり，鉛の需要は激減することになる．それでも，一次製錬業が電解を通じて取組んできた貴金属の回収媒体としての鉛の役割[15] は無くならないし，今後温室効果ガス削減の観点から原子力発電が見直されることになれば，放射線遮蔽材としての需要はむしろ増加することになるだろう．そうは申しても，全体としての事業規模が縮小することは避けられない．鉛製錬（精錬）業界の在り方も，高い技術力と環境に十分配慮された再生，精錬設備を持合わせた企業が生き残ってゆくよう業界の再編がなされることだろう．

しかしながら，「鉛蓄電池の使用が否定された」からといって，明日にでも事業規模の縮小や業界再編が起こるというものではないだろう．喩えは良くないかもしれないが，1 億 2 千万年もの長きに渡り繁栄してきた恐竜は，今から約 7 千万年前の白亜紀の終わりに滅亡した．原因は現在のメキシコ湾付近に落下した巨大隕石による環境の激変と言われている．この環境の激変によって極めて短期間で恐竜は滅び去った．鉛蓄電池を凌駕する二次電池の登場は，まさに巨大隕石の落下による環境の激変に相当するものであるが，鉛製錬業は，たとえ事業規模は小さくなるものの，恐竜のように急激に滅びるものではない．なぜだろうか？仮に「鉛蓄電池はもうやめよう」となったとしても，その時点でも今まで世界中で生産，供給されてきた鉛蓄電池は存在している．これをどうするのかである．使わないからといって放置することは許されない．放置しておけば，やがて有害な鉛成分は環境に出て行くことになる．使うことのできない鉛蓄電池は全て回収して，製錬工程によって含まれる鉛成分は安定な地金にしておく必要がある．鉛を含んだ電解液（廃硫酸）も無害化する必要がある．これらの処理は誰がするのだろうか？これらの適正な処理が出来るのは，やはり鉛製錬を担ってきた一次製錬業と二次精錬業である．これらの最後の処理を終えた時に，「鉛蓄電池のリサイクル」という意味での鉛製錬業は終わりを迎えるのである．しかしながら，前述のように鉛の需要がまったく無くなるという意味ではない．鉛製錬業は，恐竜のように環境の変化に耐えられずに滅亡するのではなく，環境の変化に適応しながら社会の中で生存し続けてゆくだろう．

謝辞

当該執筆に当り，「８．鉛（地金，化合物）の国内における循環」におけるデータの入手と整理に御協力下さいました同じく弊社従業員でありますRajesh Kumar氏（PhD. Physics）に感謝申し上げます．また，執筆全般に渡って御指導賜りました弊社の廣末雅昭会長，廣末幸子社長（ScD. Medical Engineering and Medical Physics），技術・品質保証部長三好良彦氏に御礼申し上げます．

参 考 文 献

1）株式会社大阪鉛錫精錬所；五十年のあゆみ，(1997)，p.78.
2）金属便覧，(1971)，p.49，丸善.
3）村上陽太郎，亀井 清；非鉄金属材料学，(1978)，pp.146-147，朝倉書店.
4）荒木，金子，三本木，橋口，盛；鋼の熱処理技術，(1969)，p.55，朝倉書店.
5）化学便覧，(1966)，p.1061，丸善.
6）日本電池株式会社編；最新実用二次電池，(1995)，p.1，日刊工業新聞社.
7）Y. Awakura, T. Michimoto, Y. Takeshima and H. Majima；51-3（1983），pp. 302-309，Denki Kagaku.
8）渡邉 泉；重金属の話，(2012)，pp.143-161，中央公論新社.
9）増本 健；金属なんでも小事典，(2000)，p.273，講談社.
10）独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）；金属資源レポート，11（2007），p.552.
11）北海道新聞 2006.03.31付け
12）日本金属学会編；非鉄金属製錬，(1982)，p.266.
13）日本電池株式会社編；最新実用二次電池，(1995)，p.15，日刊工業新聞社.
14）日本電池株式会社編；最新実用二次電池，(1995)，p.8，日刊工業新聞社.
15）日本金属学会編；非鉄金属製錬，(1982)，p.265.

＜著者紹介＞

道本 龍彦（みちもと たつひこ）
1958年生まれ 大阪府出身
1980年 京都大学工学部冶金学科卒業
1982年 京都大学大学院工学研究科修士課程冶金学専攻修了
学位 博士（工学）関西大学大学院工学研究科材料工学専攻
技術士（金属部門）
2000年㈱大阪鉛錫精錬所入社
現在 素材技術担当マネージャー

協賛行事ごあんない

第26回動力・エネルギー技術シンポジウム

〔会　　期〕2022年７月13日（水）～14日（木）
〔主　　催〕一般社団法人日本機械学会
〔場　　所〕アバンセ（佐賀県立男女共同参画センター・佐賀県立生涯学習センター）
（佐賀県佐賀市天神3-2-11）
〔ＵＲＬ〕https://www.jsme.or.jp/event/22-10/
〔問合せ先〕第26回動力・エネルギー技術シンポジウム　実行委員会
幹事　有馬　博史（佐賀大学）E-mail：pesymp2022@jsme.or.jp

研 究 論 文 要 旨

全文は電子ジャーナル（J-STAGE）に掲載

再生可能エネルギーと原子力を用いた水素コジェネレーションの経済性評価

Economical Evaluation of Hydrogen Cogeneration by Renewable Energies and Nuclear Energies

田 中 仁 海*・池 田 裕 一*
Hitomi Tanaka Yuichi Ikeda

（原稿受付日2021年 3 月19日，受理日2022年 2 月16日）

1．はじめに

水素はエネルギーの輸送・貯蔵から産業利用まで様々な用途における次世代のクリーンなエネルギー源や貯蔵法として注目されている．本研究では，再生可能エネルギーと電気分解法を組み合わせた水素生成，および高温ガス炉HTGRと熱化学法を組み合わせた水素生成を検討した．HTGRの出力を発電用と水素生成用の二つに分けて，電力需要が少ない時間に多くの水素生成を行う．このような発電と水素生成を水素コジェネレーションと呼ぶ．東京電力管内を対象として，水素の利用を考慮して，CO_2削減を制約とした全コスト最小化による経済性評価から，将来の実現可能かつ理想的な電源構成を解析した．

2．解析方法

東京電力管内における2030，2040，2050年度の 1 年間の電源の運用のコストを最小化した．この運用計画に対して線形計画モデルを定式化して，各年度の解析を行なった．定式化においては，電力充足式，ピーク時における設備利用可能率，ピーク時における予備力，運転出力，水素生産，揚水用動力，建設設備上限，設備利用率上限，燃料消費量，水素充足式，水素出力の条件，水素・LNG・石炭の発電量と原料の関係，CO_2排出量の制限，軽水炉の一定運転，原子力の再処理，安全対策，政策コスト，水素生成法 1 ：HTGR-熱化学法，水素生成法 2 ：太陽光-電気分解法を制約条件として考慮した．

3．結果と考察

水素製造法の違い，CO_2排出量制限の有無に応じて 4 つの将来シナリオを設定した．設定した 4 つの将来シナリオごとに，全コストとCO_2排出量の比較を行った．

●シナリオ 1 ：HTGR－熱化学法，排出量制限なし

化石燃料による発電は2030年度から2050年度にかけて発電量が59%，30%，12%と減少した．2040年度からは水素の生産が行われた．水素・LNG混合発電による水素消費はほぼ一定運転である点に特徴がある．

●シナリオ 2 ：HTGR－熱化学法，排出量制限あり

火力は2030年度に34%に減少した．排出量制限なしシナリオでは2030年度の火力は約49%であるので，制限ありの場合には火力発電を大幅に減らさなければならない．水素を用いた発電量は必ずしも大きくないが，需要の鋭いピーク部分をカバーすることによって，水素は既存の火力に変わる調整力になりうることを示している．

●シナリオ 3 ：太陽光－電気分解法，排出量制限なし

全期間を通して水素生産は行われなかった．需要の高い時間に水素を用いて発電するよりも，HTGRを用いた発電の方が安価であることによると考えられる．水素プラントは利用可能な年数を10年と設定しているため，一年当たりの建設費が高くなっている．

●シナリオ 4 ：太陽光－電気分解法，排出量制限あり

2030年度においては軽水炉が43%で，火力は34%であった．排出量制限なしシナリオで軽水炉は28%，火力が48%であったため，CO_2排出量の制限をかけることによって，火力の14%が主に軽水炉に変更されたことがわかる．

4．結論

2050年度にCO_2排出量を 0 にする場合の投資コストは約1.42兆円であった．水素の製造方法については，HTGR-熱化学法を導入する方が，太陽光-電気分解法よりも400億円コストが低く見積もられた．2050年度はHTGR-熱化学法，太陽光-電気分解法いずれにおいてもCO_2排出量制限ありの方が2,000億円ほど高額になる．CO_2排出量制限の有無で2050年に年間2,000億円のコスト差があり，CO_2排出量を 0 とする目標を達成するための経済的な負担は決して小さくない．HTGRの導入により，2030年と同じ程度の全コストでCO_2排出量 0 を達成できることが分かった．HTGRの導入については，様々な利害関係者の間で十分な検討が必要であろう．

Corresponding author；Yuichi Ikeda,
E-mail：ikeda.yuichi.2w@kyoto-u.ac.jp
*京都大学大学院総合生存学館
〒606-8306 京都市左京区吉田中阿達町1 東一条館

研究論文要旨

全文は電子ジャーナル（J-STAGE）に掲載

洋上風力発電の出力変動を考慮した世界エネルギーモデルによるカーボンニュートラル実現可能性に関する分析

Analysis of the Strategy for Carbon Neutrality with Global Energy Model considering Power Output Variability of Offshore Wind Power Generation

吉武宗浩*・藤井康正*・小宮山涼一*
Munehiro Yoshitake　Yasumasa Fujii　Ryoichi Komiyama

（原稿受付日2021年6月30日，受理日2022年2月16日）

1．はじめに

気候変動問題に対処するため脱炭素化は世界共通の課題と認識され，日本を含む多くの国々が2050年までのカーボンニュートラル（CO_2排出ネットゼロ）を掲げている．洋上風力発電は陸上と比較して風況や土地利用の条件の良いため注目される一方，その出力は陸上と同様に風速の3乗に比例して激しく増減する．本研究では世界約2,400地点の洋上風力発電の出力変動を明示的に考慮に入れた世界エネルギーモデルを開発し，カーボンニュートラル実現を前提として洋上風力発電の導入可能性について分析した．

2．評価手法

本研究で使用した地域細分化型世界エネルギーモデルは，エネルギーシステムの統合的評価を行うことができる，線形計画法による最適化型モデルである．世界を54の国と地域に分割し，それぞれの地域においてエネルギーの生産，変換，利用，及び地域間でのエネルギー輸送や送電を考慮している．エネルギー需給バランスや設備容量制約等の制約条件のもと，世界全体システム総コストが最小となるエネルギー構成を求める．本研究は世界エネルギーモデルに対して世界各地の洋上風力発電の設備稼働率の変動を導入することにより評価・分析を行った．

本モデルでは，カーボンニュートラルの達成のために化石燃料は採取できないように設定している．また，最終エネルギー需要シナリオ（固体燃料需要，液体燃料需要，気体燃料需要，電力需要）は外生的に与えているおり，カーボンニュートラル実現を前提としてこれらの燃料需要を満たすため，合成燃料を製造するシステムを設定している．

洋上風力発電を含む自然変動電源の余剰電力の影響を正確に分析するため，本モデルでは電力部門の時間解像度を3時間値に設定した．また 計算時間を短縮化するため，計算対象期間は2050年の1年間のみとした．

Corresponding Author：Munehiro Yoshitake,
E-mail：yoshitake@esl.t.u-tokyo.ac.jp
*東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

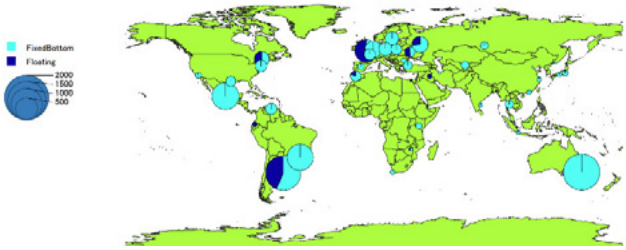
3．結果と考察

本研究は以下の3シナリオを設定した．

- 基準シナリオ（CO_2排出制約を課さないシナリオ）
- 洋上風力シナリオ（CO_2排出ゼロ制約を設定）
  - （a）HCケース：洋上風力のコスト低下を想定しない
  - （b）LCケース：洋上風力のコスト低下を想定

洋上風力シナリオでは基準シナリオと比較して，1次エネルギー供給は4～4.3倍に，エネルギーシステム総コストは2.5倍に，電力部門のコストは4.8～5.0倍になる．洋上風力は**図1**のように中緯度の浅海域を中心に導入され，HCケースで404GW，LCケースで9,265GW導入される．いずれも着床式が中心で，浮体式の導入はコストが低下した場合に限られる．余剰電力は合成燃料製造のための水素製造（水の電気分解）により緩和される．

（a）HCケース



（b）LCケース

図1　世界各地域の洋上風力発電導入量

4．結論

本研究はカーボンニュートラル実現のために注目される洋上風力発電の詳細な出力変動を考慮し，その導入可能性を分析した．コストが低下した場合に着床式を中心に大量導入の可能性があり，余剰電力は水電解で緩和されることがわかった．

研究論文要旨

全文は電子ジャーナル（J-STAGE）に掲載

自動車部門における統合対策を考慮した長期CO_2排出量推計手法の開発

Development of Analysis Method for Long-Term CO_2 Emissions to Consider Integrated Approach in Automotive Sector

金成修一*・平井洋*・鈴木徹也*・伊藤晃佳*
Shuichi Kanari Hiroshi Hirai Tetsuya Suzuki Akiyoshi Ito

（原稿受付日2021年8月20日，受理日2022年2月16日）

1．はじめに

2021年に開催された気候サミットにて菅 義偉首相は2030年に46%削減，2050年までに国内の温室効果ガス排出量を実質ゼロまで削減することを表明した．日本における自動車部門のCO_2排出量は2割弱を占め，自動車の平均使用年数は12年以上と比較的長く，新規技術の導入に時間が必要であることを考慮すると，目標達成に向けて早期の対策実施が必要である．本研究では，2050年までを対象とした自動車部門の統合対策（燃費改善，次世代車普及，自動運転普及（エコドライブ効果含む），交通流改善，カーシェアリング普及）を考慮したCO_2排出量推計モデルを開発した．さらに開発したモデルを用いて，筆者らが検討した複数のシナリオを想定することで，自動車技術進展および今後，導入する可能性がある施策の効果について検討した．

2．調査方法

本研究で開発したCO_2排出量推計モデルは，単体対策と交通流対策などのその他の対策を評価するように，サブモデルを構築し，必要に応じてリンクする形とした．単体対策推計モデルは，輸送量，物流量を推計し，交通機関配分モデルにて，輸送機関別の値を計算し，さらに，技術選択モデルを用いて従来車と次世代車の普及率を推計する．その他の対策モデルでは，道路改善効果，自動運転普及効果，シェアカー普及効果を対象とし，それぞれ道路延長の増加や技術普及率等をコストやWebアンケート結果より推計し，普及率に伴う各種効果（速度，加減速の改善，移動量の変化など）を推計した．

3．結果と考察

本研究では以下の3つのシナリオを想定し，2050年までの施策効果を検討した．1点目は，現状規制ケースとし，このケースは新車の燃費改善や次世代車の価格低下等を基準年である2013年で固定したケースとした．2点目は，技術進展ケースとし，単体対策である従来車の燃費改善，次世代車の効率向上や大量生産効果による価格低下を考慮した．3点目は統合対策ケースとし，技術進展ケースに加え，道路改善，自動運転普及，カーシェアリング普及を考慮した．各シナリオにおけるTank to Wheel CO_2排出量は現状規制ケースでは2050年のCO_2排出量は2013年比で27%，技術進展ケースでは54%，統合対策ケースでは2050年では58%削減された．現状規制ケースでは古い車両の代替と保有台数の減少に伴う影響であり，技術進展ケースでは，前者の影響に加え，従来車の燃費改善，次世代車普及効果による影響である．統合対策ケースでは，技術進展ケースの影響に加え，道路改善，自動運転普及，カーシェアリング普及による影響が加味された．

4．結論

本報では長期における統合対策を考慮した自動車部門のCO_2排出量推計手法について開発した．既往モデルの多くは自動車部門単体の評価を主体とし，かつ，対象車種は四輪車である乗用車，バス，トラックであった．本報で検討した手法は四輪車に加え，二輪車も追加したことで自動車部門の全ての車両を対象とした評価が可能となった．また，交通流対策，自動運転，カーシェアリングの効果を定量的に評価できるようにしたことで，自動車部門の温暖化における統合対策の評価が可能となった．本手法では，現状の評価対象はTank to Wheelを主眼に置いているが，近年ではライフサイクルアセスメントでの評価が求められており，今後は車両製造や廃棄・リサイクルの影響も考慮できるようデータ整備を進めていき，さらに，2050年カーボンニュートラルに向けたシナリオについて検討をしていきたい．

Corresponding author；Shuichi Kanari,
E-mail：skanari@jari.or.jp
*一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部
〒305-0822 茨城県つくば市苅間2530

研究者・実務者のためのエネルギー・資源講座

＜連載：カーボンリサイクル②＞

CO_2からの燃料の製造

Fuel Production from CO_2

水　田　美　能*
Haruyoshi Mizuta

1．まえがき

我が国の一次エネルギーの供給状況は**表1**に示したエネルギーフロー（2020年度エネルギー白書[1]より）によれば約85%は化石燃料である天然ガス・石油・石炭によって賄われている．

表1　我が国のエネルギー供給（2018年）[1]

	PJ	%
原子力	553	2.8
水力・再エネ	2,303	11.7
天然ガス	4,509	22.9
石油・石油製品	7,415	37.6
石炭	4,947	25.1

これらの化石燃料のうち固体である石炭は，気体・液体の燃料と比較すると輸送・利用の利便性が悪い．また，今回のテーマであるCO_2からの燃料転換技術としては，次に示すBosch反応があるがこの反応は600℃程度の高温で収率も10%程度であり，とても固体の炭素燃料の製造技術として利用はできない．しかし，次項で説明するサバティエ反応とともに宇宙船内のCO_2からの酸素の回収手段の一つとして研究されていた．

$$CO_2 + 2H_2 \rightarrow C(\text{固体}) + 2H_2O$$

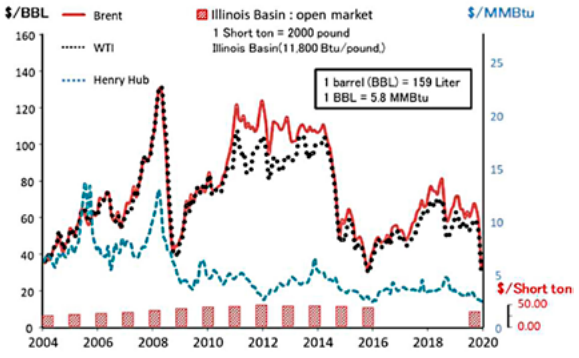


図1　原油（Brent，WTI），天然ガス（Henry Hub），石炭（Illinois Basin）価格の推移
米国エネルギー省のデータをもとに作成
（グラフの縦軸は，発熱量当たりの価格に統一）

*一般財団法人エネルギー総合工学研究所 参事・工学博士
〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2　新橋SYビル
E-mail：h-mizuta@iae.or.jp

石炭は**図1**に示したように他の天然ガス，石油と比較して安価で主に発電用に利用されているが，今後CO_2から石炭の製造は考えられない．したがって，今回の燃料製造技術では，家庭等でも広く利用されている天然ガス（メタン）と，輸送用として重要な液体燃料の製造技術を中心に紹介する．**表2**に現在我が国で製造されている燃料の性状と年間製造量（輸入量）を示した．

表2　炭化水素燃料の性状と生産量（2020年）

		密度（15℃）g/cm³	蒸留性状（90℃流出温度）	燃焼特性 オクタン価	年間量a)（輸入量）
ガス	LNG(メタン)	液：0.425	沸点−161.5℃	～130	(1020億㎥)
石油系燃料	ガソリン レギュラー ハイオク	0.783以下	180以下	89.0以上* 96.0以上*	44,135KL
	ジェット	0.73～0.85程度	民間用は灯油と同じ（析出点-47℃以下）	セタン指数* 45以上	8,034KL
	灯　油	0.78～0.85程度	270～300以下*		13,252KL
	軽　油	0.86以下*	330～360以下*		34,214KL
含酸素系	メタノール	0.7918	沸点：64.7℃	112	(160万トン)
	DME	液：0.67	沸点：-25.0℃	セタン価 55-60	−

a)生産量、輸入量（年間）は2020年統計　*JIS規格より（セタン指数はセタン価と値は同じ）

（石油連盟資料及び統計情報等から作成）

2．CO_2から炭化水素燃料を合成

現在製油所等の水素製造装置では，ブタン等の水蒸気改質で水素が製造されているが，副生する一酸化炭素（CO）は，シフト反応と呼ばれる下記の反応式（→）によってCO_2と水素に変換される．

$$CO + H_2O \rightleftarrows H_2 + CO_2 \quad \Delta H = -41\,kJ/mol$$

このためCO_2の水素による還元（反応式では←）は，逆シフト反応と称せられることが多い．

このようにして生成する一酸化炭素（CO）は，石炭ガス化や天然ガスの改質などで得られる合成ガス（CO＋水素の混合ガス）として，いろいろな炭素化合物の製造に利用されている．本稿ではまず，CO_2は水素による逆シフト反応によって反応性の高いCOに変換することを前提として，合成ガスを原料とする燃料製造について紹介する．

2.1　ガス燃料（メタン）製造

合成ガスから直接合成される最も簡単な炭素燃料がメタン（CH_4）であろう．

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O \quad \Delta H = -206\,kJ/mol$$

このメタン生成反応は，水素製造装置においてシフト反応の後に，水素リッチガス中に微量残存するCOを完全に除去するため，大量に存在する水素によって無毒のメタンに変換するメタネーション工程として行われる．

図1に示したように，化石燃料のうち価格の変化の激しい天然ガスや石油は，第1次，第2次オイルショックで価格が高騰したので，価格が安定な石炭から製造される合成ガスを原料に，メタン（代替天然ガス，SNG）を製造する技術の開発が行われた．

前述の反応式のように，このメタン生成反応は発熱反応であり**図2**のような多段リアクターを採用し，後段になるほどリアクターの出口ガスの温度を低めに保つことで平衡反応を右に進ませ，さらに，生成したメタンを原料系に戻すことで基質（$CO + H_2$）の濃度を低下させることで反応熱を抑えるプロセスが開発された．このような多段リアクター方式のメタン製造プロセスは，**図2**に示したTopsoe社のほかに，JM Process Technologies社，Air-Liquids-Lurgi社のプロセスなどが開発されている．

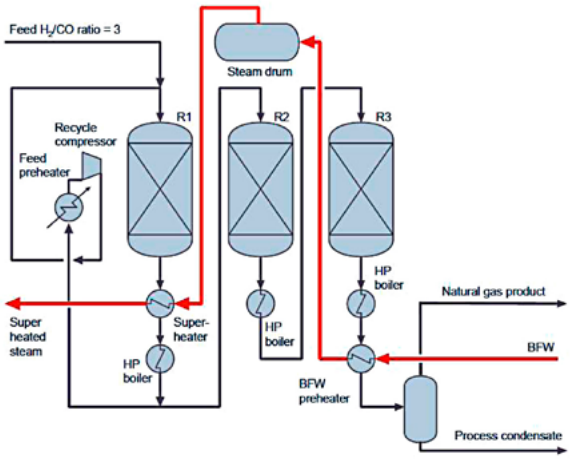


図2 合成ガスからのメタン製造プロセス
（出典）Topsoe社「TREMPプロセス」[2)]

ほとんどのSNG製造プロセス開発は，オイルショックの鎮静化により商業化されることはなかったが，唯一Dakota Gasification Companyが，隣接する露天掘り褐炭を原料としたGreat Plains Synfuels Plantを1984年に商業化し，現在も運転されている．なお，水素を製造したシフト反応の副生CO_2は米国北部のCO_2パイプラインに供給され，カナダのWeyburn-Midale油田の石油増進回収（EOR）に利用されている[3)]．

一方，CO_2から直接メタンを生成する反応は，1912年にノーベル賞を受賞したフランスの化学者Paul Sabatierによって，ニッケル触媒が見出され，その後の研究では高活性なルテニウム触媒が報告されている[4)]．

この反応はサバティエ反応と称せられておりCO_2の有効利用（CCU）が活発になるまでは，前述のボッシュ反応と同様に，宇宙船内で乗員が出すCO_2の除去方法として開発されていた．燃料として搭載されている水素によってCO_2から合成されたメタンは，宇宙空間の強力な太陽熱と太陽光発電を利用することで，下記の反応式の様に熱分解で固体の炭素と水素にされる．生成した水は電気分解で酸素と水素になるので，貴重な水素と酸素は失われることはない．

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

$$CH_4 \xrightarrow{\text{熱分解}} C + 2H_2$$

$$2H_2O \xrightarrow{\text{電気分解}} 2H_2 + O_2$$

2.2 石油系液体燃料

石炭から石油系炭化水素を合成する技術（石炭液化）は第二次世界大戦以前にドイツで発明され，その後，白人と非白人の人種隔離政策（アパルトヘイト）のために欧米各国から石油の禁輸制裁を受けていた南アフリカ共和国で商業化された．この合成反応は発明者のFranz FischerとHans Tropschの名を冠してFT合成反応と呼ばれる．

南アフリカ共和国のSasol社（South African Coal Oil and Gas Corporation）は，豊富にある低品質石炭からの合成ガスを原料としたFTプロセスにより石油や石油化学原料の製造を行うために設立された会社で，触媒系の異なる2種類のFTプロセスを開発していた．鉄系触媒を用いた比較的高温のFTプロセスからは，LPGやガソリン・灯油・軽油留分等の液体燃料が合成される．一方コバルトを触媒とする比較的低温のFTプロセスでは，高分子量のパラフィンが合成され，水素化分解によって低分子量の液体燃料が製造される．

低温FTによって製造される炭化水素化合物は直鎖パラフィン（ワックス）であり，水素化分解とともに異性化反応を行って主に灯油留分（ジェット燃料）・軽油分が製造される．生成油は，融点が高く融点降下剤等の添加剤が必要である，また，直鎖状のためガソリン留分はオクタン価が低いが逆にディーゼル燃料のセタン価は高い．

FT合成は，当初の石炭を原料とするプロセスに代わって，天然ガスからの合成ガスを原料として液体燃料を製造するGas to Liquid（GTL）プロセスとして商業化されている．

コバルト系FT触媒の開発に成功したShell社が，マレーシア ボルネオ島のビントゥル（Bintulu）に世界最初のGTLプラント（14,700バレル/日）を建設し，1993年より商業ベースの生産を行っている．

FT反応もメタネーションと同様，かなりの発熱反応である．Shell社のGTLプロセスは固定床なので，触媒層内での局所的な発熱防止のため，**図2**に示したメタン製造プ

ロセスと同様の，複数リアクターシステム及び生成ワックスを原料系に戻すプロダクトリサイクル方式で行われているとされている．

Shell社は世界有数の天然ガス産出国である中東のカタール（2020年の天然ガス輸出，世界第2位）との合弁会社で，世界最大のGTLプラント（Pearl GTL：140,000バレル/日）を建設し2012年から商業運転を行っている．

一方FT合成プロセスの先駆者であるSasol社もカタールとの合弁会社でGTLプラント（Oryx-GTL：約34,000バレル/日）を建設し，2008年に試運転を開始した．Oryx-GTLはFT反応の大きな発熱に対応するために流動床（約17,000バレル/日）方式を採用し，2008年から2トレインでの運転を予定していたが，設備の一部を改良し，2011年より商業運転を開始している．Sasol社はその後ナイジェリア，ウズベキスタンでも石油会社と合弁プロジェクトでGTLプラントを建設している．

Shell社以外の石油メジャーもGTL技術を，200～400バレル程度の実証化プラントで開発していた．我が国でも，以前よりGTL技術の開発が行われており，複数の石油会社，資源開発会社及びエンジニアリング会社が研究組合を設立し，JOGMECの支援で新潟市に日量500バレルの実証化プラントを建設し，2009～2011年の3年間の実証運転（JAPAN - GTL 実証プロジェクト）を達成している．

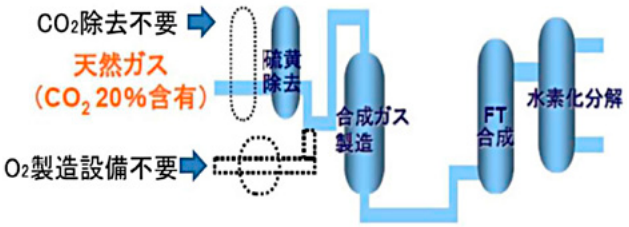


図3　Japan-GTLプロセスの概要[5)]

なお，**図3**に示したように，他社のGTLプロセスは深冷分離により製造される純酸素による自己熱改質や部分酸化反応によって，メタンから合成ガス（$CO + H_2$）を製造しているので，通常天然ガス生産に随伴するCO_2を事前に除去する必要がある．一方，Japan-GTLプロセスは合成ガスを製造するプロセスとして，炭酸ガス/水蒸気改質法という，CO_2も原料として利用する方式を採用しており当時すでに一種のCCUプロセスを達成していた．

GTL油の実際の使用としては，カタール航空が国際的燃料油規格であるASTM International（旧称 American Society for Testing and Materials：米国試験材料協会）に働きかけ，GTLジェット燃料を既存の石油系ジェット燃料に50%まで混合可能とする新規格が制定され，2009年にGTLジェット燃料によるロンドン－カタール間のフライトを実現している．

2.3　メタノール

石油精製によって製造されている直接的な化石燃料ではないが，石炭や天然ガスより輸送や貯蔵が簡単な液体燃料として，合成ガスから製造されるメタノールがある．最近ではシェールガスの増産によって米国の天然ガス価格が安定しており，一時，南米で稼働していた大規模メタノール製造プラントが米国における製造を再開している．

メタノールは，リサーチ法オクタン価（RON）が112と日本のプレミアムガソリン（規格：RON 96以上，実態：RON = 98～100）より高いので，石油価格の高騰時にガソリンに混合し自動車用燃料として利用されてきた．一般には3%混合（M3）が多いが最大15%混合（M15）程度は特にエンジンの仕様変更なく利用されている．また，イソブテンとの反応で製造されるMethyl t-Butyl Ether（MTBE）は米国等で広くオクタン価向上添加剤として利用されていた（日本でも無鉛ガソリン販売開始時に使用）が，メタノール自身の毒性による地下水の汚染等の問題から現在では利用を中止されている[注)]．

また，メタノール2分子から合成されるDimethyl Ether（DME）はセタン価が55と高いので軽油代替のディーゼル燃料として実証化されたこともある．

このようにメタノールは単独であるいは簡単なエーテル誘導体としても燃料として利用されているが，ExxonMobil社は1975年に，ゼオライト触媒によるメタノールからガソリンの製造プロセスを開発し1983年にはMobil法Methanol to Gasoline（MTG）として特許が公開されている．このプロセスは高ガソリン収率（約80%）であり，芳香族成分が多いのでオクタン価も高くそのままガソリンとして利用が可能とされた．ExxonMobil社はニュージーランドの低価格天然ガスを原料とする商業プラント（約15,000バレル/日）を建設し，1986～1996年まで操業したが，ニュージーランド産天然ガスの供給が途絶えて中止となった[6)]．

このようにメタノールは自身が燃料であるばかりでなく，既存のガソリンに近い炭化水素化合物（特に芳香族化合物）を製造するプロセスや，オレフィン化合物の製造プロセス（Methanol to Olefine，MTO）が開発されている．

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$
$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH$$

天然ガスの水蒸気改質による合成ガスからのメタノール製造プロセスにおいては，上記のように，生成するH_2とCOの比は3：1である．メタノール合成で必要なH_2とCOの比は2：1であるため，H_2が1 mol余る状態となる．

注）米国等ではMTBEの添加中止によりエタノールの混合が行われているが，日本ではエタノールの誘導体のETBEがオクタン価向上剤として使用されている．

そこで，余剰のH_2に見合う量のCO_2を別途プラント内の排ガスから回収して導入し，以下の反応によってメタノールの生産量を増大させるプロセスが開発されている[7]．

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O \quad \Delta H = -58\,kJ/mol$$

しかし近年，水を完全に除いた純粋なCO + H_2では反応が進まないことや，放射性同位体（^{14}C）を用いた解析等によって，メタノールはCO_2から直接合成されており，合成ガス中のCOは原料ガス中に存在するH_2Oとのシフト反応によってCO_2となっていることが明らかとなっている[8, 9]．

このことは，CO_2の有効利用を検討する条件として，水素が十分に供給可能な環境においてはCO_2から直接にメタノールが製造可能であることを示している．

3．バイオ系燃料

植物は光合成によってCO_2からデンプン等の炭水化物を合成している．これらの炭水化物を原料とする発酵によるエタノール生産は古くから行われており，バイオ資源の豊富な北米やブラジルなどでは石油価格の高騰に対応してバイオエタノール混合ガソリンが供給されている．

我が国ではバイオエタノールの直接混合ではなく，Ethyl t-Butyl Ether（ETBE）として7％（上限）混合されている．

また植物や一部の光合成微生物が生産する油脂も，エステル交換等の処理によって灯油や軽油と同等の燃料に変換することが可能である．オイルショック以降の原油価格の高止まり状況において技術開発が盛んにおこなわれ，バイオディーゼル燃料として市場に盛んに供給されていた時期もあったが，現在はCO_2フリー燃料としての価値が高まっている．また微生物による油脂の培養生産として，ユーグレナ（和名ミドリムシ）が生産する油分からバイオディーゼル，バイオジェット燃料を供給する開発が行われている．

4．CO_2有効利用の技術開発動向とプロジェクト

CO_2から逆シフト反応によってCOが製造可能であることから，合成ガス（CO + H_2）を原料とする炭化水素燃料の製造技術について述べてきたが，そのうちメタンの製造（メタネーション）とメタノールはCO_2から直接合成される燃料であることを紹介した．

4.1 メタネーションの技術開発とプロジェクト

CO_2からメタネーションによってメタンを製造するプロジェクトとしての代表例は“Power-to-Gas（P to G）”があげられる[10]．

P to Gは，風力等の再生可能エネルギーを利用して発電した電力のうち，余剰分や変動抑制分を利用した水の電気分解による水素の生産のことであるが，さらに水素を利用したメタネーションによって，利用しやすいメタン（天然ガス）を製造して既設のパイプライン等で輸送するプロジェクトである．このP to GプロジェクトはCO_2削減に積極的な欧州で盛んでありその代表例として，“Horizon2020”の支援を受けた27機関が，欧州内の3地点で行っている“Store & Go”プロジェクトがあげられる[11]．

このプロジェクトの総事業費は約4年間で2,800万ユーロ，ドイツのFalkenhagen，スイスのSolothurn，イタリア南部のTroinにおいて実証が行われている[12]．

わが国では，新潟県上越市に大規模太陽光発電設備（約530万kWh/年）[13]を持つ国際石油開発帝石㈱（INPEX）が，日立造船㈱の開発した触媒を用い自社の長岡鉱場において，天然ガス生産に随伴するCO_2を，水の電気分解により得られる水素を用いたメタネーションによってメタンガス（8 Nm^3/h）を生産する実証事業を，NEDOのCO_2有効利用技術開発事業として2019年に行っていた[14]．

日立造船㈱はメタネーション装置の開発を継続しており2021年には東京ガス横浜テクノステーション内にメタネーション装置（12.5Nm^3/h）を設置して，メタン製造の安定性評価，並びに製造ガスをガス消費機器への供給検証プロジェクトを発表している[15]．

日本ガス協会は，2020年11月に，「カーボンニュートラルチャレンジ 2050」を策定し，2021年6月にはアクションプランの策定および「カーボンニュートラル委員会」を設置してメタネーション技術の開発に取り組む姿勢を明らかにしている．

また，メタンはP to Gによる既存のインフラで天然ガスとして利用されるばかりでなく，CO_2の排出の多い鉄鋼産業において新規に開発されている「メタン製鉄」に利用することも検討されている．

JFEスチール㈱は高炉から排出されるCO_2をメタネーションによってメタンとし，コークスの代わりに還元工程で利用する技術について2024年を目途に実証設備の建設を検討していると発表している[16]．

4.2 メタノール合成プロジェクト

一方，CO_2からのメタノール製造プロジェクトの例はまだ少ないが，前回（1月号）でも触れられているアイスランドの例が有名である．

同国のCarbon Recycling International（CRI）は，CO_2からメタノールの製造設備を世界で初めて建設し，2012年から商業生産を行っており，地熱発電の随伴ガスであるCO_2（約6,000トン/年）から4,000トン/年のメタノールを製造しe-fuelとして国内に供給している[17]．

CRIはその後も再生可能な，e-methanolとリサイクルcarbon methanolの両方を製造するために必要な技術開発を継続しており，パイロットプラントにおける実証を経

て，2020年に高炉オフガスを利用する最初のプラントが試運転を開始し，2021年には年間11万トンのリサイクルcarbon methanolの商業生産が予定されている[17]．

4.3 ビジネスモデル

下図に化学反応によるCO_2から燃料への反応をまとめたが，発酵生産可能なバイオ燃料と異なりすべて水素の供給が不可欠であることが明らかである．この水素はカーボンフリーであることが前提となるので，太陽光や風力発電等の再エネ電力による水の電気分解が最も可能性の高い入手先と考えられるが，我が国のエネルギー状況では再エネ電力を燃料生産にまで回すことは難しいと思われる．

例えば，2019年度のLNG輸入は7,650万t/年で，この量のメタンをCO_2から合成するには半量3,825万tの水素が必要となる．資料[18]によれば2004年当時であるが，我が国の産業界での水素製造量が約270億Nm^3/年（約241万t）であることからも容易に類推可能であろう．よって再エネ資源の豊富な外国，例えば豪州等で生産しLNGとして輸入するビジネスモデルならば，豪州のLNG生産基地も我が国の既存の輸入インフラも利用可能と考えられる．

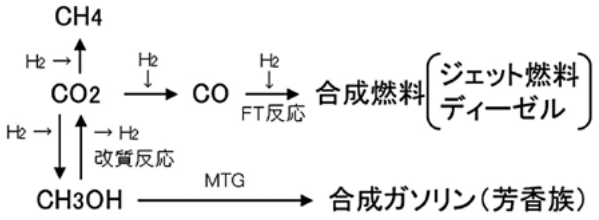


図4　CO_2を原料とする燃料合成フロー

なお合成ガスの製造に関しては水素が必要な逆シフト反応だけではなく直接CO_2と水の共電解による合成ガス（CO＋H_2）の技術開発も行われている[19]．

また，メタノールは改質反応によって容易に水素を発生させることが可能であり，常温で液体であるから，水素やメタンガスに比べて運搬の容易な水素キャリアとしての可能性も考えられる．

5．まとめ

近年，自動車産業はEV車等へシフトする報道が多いが，産業用や長距離輸送，航空機等においては効率的なエネルギー源である液体燃料の利用が継続すると思われる．このため当面は，CO_2から直接製造可能な燃料である，メタンとメタノールを中心に技術開発が行われると思われるが，本稿で紹介した逆シフト反応で得られるCOを経由するプロセスの開発が重要であると思われる．

参 考 文 献

1）経済産業省資源エネルギー庁；令和元年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2020），https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/2-1-1.html
2）https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/24th-Annual-International-Pittsburgh-Coal-2007-Wix.pdf
3）（一財）エネルギー総合工学研究所；図解でわかるカーボンリサイクル，（2020），pp.132-134，技術評論社．
4）島 明日香，桜井誠人，曽根理嗣，大西 充，米田晶子，阿部孝之；宇宙実用化を目指したサバチエ反応触媒の開発，Int J. Microgravity Sci. Appl., 30-2（2013），p.86.
5）末廣能史，中村 新；石油技術協会誌，78-2（2013），pp.125-134.
6）ScienceDirect “Methanol-to-Gasoline Process”より，Synthesis Gas-Based Fuels M. Brownstein, in Renewable Motor Fuels, 2015，https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/methanol-to-gasoline-process
7）ボトルネック課題研究会 公開ワークショップ開催報告（2018年 2 月18日） 添付報告，https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/20180221bottleneck.html
8）成書「二酸化炭素を用いた化学品製造技術」監修 杉本裕 S&T出版，「第1節 二酸化炭素を用いた化学品製造における触媒技術」アイシーラボ 室井高成より．
9）Leon G.A. van de Water, Sam K. Wilkinson, Richard A.P. Smith, Michael J. Watson, J. Catalysis, 364 57-68（2018）
10）（一財）エネルギー総合工学研究所；図解でわかるカーボンリサイクル，（2020），p136，技術評論社．
11）みずほ情報総研レポート Vol.20 社会動向レポート「CO_2有効利用（CCU）の国内外動向」，https://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2020/pdf/mhir20_ccu.pdf
12）Store & GoのWebサイト https://www.storeandgo.info/
13）https://www.inpexlogistics.co.jp/business/mega_solar.html
14）https://www.inpex.co.jp/news/assets/pdf/20191016.pdf
15）https://www.hitachizosen.co.jp/newsroom/news/release/2021/20210707_001114.html
16）https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC257J30V20C21A5000000/
17）https://www.carbonrecycling.is/CO_2-methanol
18）早内義隆，石倉雅裕；水素社会に向けた石油業界と石油化学コンビナートからの水素供給システム，圧力技術，42-3（2004），p.26.
19）燃料電池，14-4（2015），p.81.

＜著者紹介＞

水田　美能（みずた　はるよし）
一般財団法人エネルギー総合工学研究所
参事，東京大学工学系研究科博士課程修了後日本石油（当時）根岸製油所勤務，中央研究所副所長，石油産業活性化センター（現：石油エネルギー技術センター），日本GTL技術研究組合，勤務の後現職．近著に「図解でわかるカーボンリサイクル」（共著）（技術評論社）．

見聞記

バイオマス発電所から排出されるCO₂を分離回収するBECCS対応設備の見学

Field Trip to a Demonstration CO_2 Capture Facility from Biomass Power Plant

加 藤 悦 史*
Etsushi Kato

1．見学会について

今回，エネルギー・資源学会の研究会「バイオマス発電所から排出されるCO₂を分離回収するBECCS対応設備の見学」に参加させて頂いた．新型コロナウイルスの第5波が落ち着き，オミクロン株の感染が拡大する前の2021年12月中旬に開催され，私としては，久しぶりの出張となった．訪問先は，㈱シグマパワー有明の三川発電所に併設するCO₂分離回収の実証設備である．当日は，あいにくの天候ではあったが，福岡空港からバスで1時間半ほどかけ，福岡県大牟田市の現地に到着した．

2．CO₂分離回収設備

現地に到着後，実証設備の概要について，東芝エネルギーシステムズ㈱の柴田氏と長谷川氏より説明を頂いた．CO₂分離回収実証については，2016年度から2020年度における環境省の「環境配慮型CCS実証事業」の一部において実施されたということである．実証事業の詳細については「エネルギー・資源」41巻6号の「特集 カーボンリサイクルの最新動向」の記事に詳しいが，50MW のバイオマス発電所からのCO₂排出量の半分である600t CO₂/日以上を分離回収する大型設備となっている．お二方からアミンを用いた化学吸収液による回収方法について解説を頂いた．また，回収分離にかかるエネルギーやプロセス詳細など，参加者からの多岐にわたる質問に丁寧に回答を頂いた．

3．プラント見学

実証設備の事前説明の後，雨模様ではあるものの，大規模回収設備とその横にある分離回収パイロットプラントを見学させて頂いた．**図1**に実証設備の外観を示すが，高さ50mほどの巨大な吸収塔が右奥に，その左手前に少し低い再生塔が存在感を示している．また，排気ガスの消音装置，SOxを除去する前処理装置，CO₂分離回収後の洗浄塔，熱交換器などが，約100m × 50mの敷地にうまく配置され，CO₂分離回収のシステムとして稼働していた．2020年11月の実証開始から，各年度の試験計画に応じて運転を行っているとのことである．

図1 大規模CO₂分離回収設備の外観

一方，その横の10t CO₂/日の回収能力を持つパイロットプラントは，研究用途として，プロセスを詳細に測定するために複雑に配管が設置されていた．同じCO₂分離回収設備とはいえども，スケール・外観ともかなり違った印象を与えていた．

4．おわりに

回収したCO₂の利用と隔離に向けた展開も動いているとの説明もあり，本実証設備見学は，ネットゼロ排出の達成に向けて必要となるネガティブエミッション技術のスケールアップの一つとして，非常に期待を抱くことができる貴重な機会であった．

当日ご案内を頂いた，東芝エネルギーシステムズ㈱の柴田氏と長谷川氏に改めて感謝する次第である．

*一般財団法人エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 副部長 主管研究員
〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2 新橋SYビル
E-mail：e-kato@iae.or.jp

書評　資源争奪の世界史 スパイス，石油，サーキュラーエコノミー

著者：平沼　光　　発行：日本経済新聞出版（2021年5月発行）　　定価：2,750円（税込）

評者：**馬場　好孝**（東京ガス）

本書は，資源エネルギーの争奪戦を過去から現代にわたり紐解くとともに，未来に向かって資源エネルギーがどのように移り変わるかを考察するものである．第1章では資源としてのスパイス，第2章は近代化に貢献した石炭，第3章は二度の世界大戦にかかわった石油，第4章，第5章では持続可能な社会構築に必要なエネルギー転換，第6章ではサーキュラーエコノミーに関して解説している．

第1章で取り上げたスパイス戦争は，造船技術の進化に始まり苗の移植技術の進化により終焉を迎え，また第2章の石炭も蒸気機関の技術により発展するなど，すべての資源エネルギーにおいて技術が通底している．人間が利用可能なものはすべて資源になりうるが，この技術と時代背景・課題によって，スポットライトの当たる「資源」が決まってくる．同時に国際標準化などのルールメイキングを主導して初めて，資源の争奪戦に勝ち残ることができる．

現代では，気候変動問題や持続可能な社会の構築という課題に対応するため，再生可能エネルギーや脱化石燃料などのエネルギー転換，サーキュラーエコノミー構築に関する競争が本格化している．日本も乗り遅れないように，日本の高い技術力を発揮できるような資源エネルギー政策の立案が必要と説く．

第4章以降に筆者の思いが込められている印象がある．現在注目されている資源エネルギーや技術に関して詳説しているため，それらを俯瞰したい方は一読されたい．また世界史という学科をイメージさせるタイトルからは，資源エネルギーの獲得について過去から学び，未来を自分なりに考えてみてはどうか，というメッセージが読み取れる．資源争奪の世界史を振り返って得られた教訓は，例えば技術やルールメイキングの重要性と思われるが，エネルギー転換やサーキュラーエコノミー構築以外の打ち手や，さらに将来スポットライトを浴びそうな「資源」について，本書をヒントに考えてみてはいかがだろうか．

書評　エネルギー産業2030への戦略　Utility3.0を実装する

編著：竹内　純子　　著者：伊藤　剛・戸田　直樹　　発行：日本経済新聞出版（2021年11月発行）　定価：1,870円（税込）

評者：**西　順也**（関西電力）

本書は「エネルギー産業の2050年Utility3.0へのゲームチェンジ」（2017年9月発行）の続編にあたる．前書では，これからの日本社会を動かす変革ドライバーを「5つのD」（Depopulation 人口減少，Decarbonization 脱炭素化，Decentralization 分散化，Deregulation 自由化，Digitalization デジタル化）として整理したうえで，それらによってエネルギー産業がエネルギー供給システムにとどまらず，エネルギー，インフラ，データという3つのプラットフォーム間での融合が起きるUtility3.0への進化を求められることを提示した．本書は，Utility3.0を「1人ひとりが多様な価値を実現できる，持続可能な世界」と定義し，それを実現するための具体的道筋，視点を提示するものである．

内容は，まず前書から約4年が経過する中での状況変化を踏まえて，エネルギーと日本の社会課題を気候変動，人口減少，国土強靭化の観点で整理し，将来のエネルギー産業のパラダイムシフトを，クルマに限らずあらゆるもののCASE化（Connected ネットワーク接続，Autonomous 自動運転，Shared/Service シェアリング／サービス，Electric 電動化）の中でのユーザエクスペリエンス（UX）提供として提示している．続いて，エネルギーサービス事業者がUXを提供するサービス事業者「UXコーディネーター」に進化するためのビジネスモデル，世界の脱炭素化を牽引する日本企業のテクノロジー，パラダイムシフトを実現する政策について述べている．その後，ゼロカーボン社会実現に向けて「需要の電化」と「発電の脱炭素化」を両輪として進める中での，太陽光，洋上風力，原子力の3つの脱炭素電源の産業化や市場整備に必要なこと，分散型リソースの積極活用を前提とした地域社会のエネルギー産業における役割について述べている．

全体を通して，エネルギー産業の現状や課題を様々な角度から把握し，未来を考えるうえで大変興味深く示唆に富む内容となっており，輝かしい将来をイメージし，そのためにどういう選択をし，行動するかを考えるきっかけになると思う．本書で触れられていない部分や，今後起こり得る様々な状況変化については，読者各人が自ら考え続ける必要があると思うが，著者らの続編にも期待したい．

技術・行政情報

カーボンニュートラルにおける原子力の役割

Role of Nuclear in the Carbon Neutral World

1．背景

欧州ではエネルギー価格の高騰やエネルギー安全保障の懸念，脱炭素化の要請等を背景に，原子力発電に対する機運が高まっている．

フォンデアライエン欧州委員長は2021年10月のEU首脳会議後の記者会見において，EUの脱炭素化に向けては再生可能エネルギーの拡大が必要であることは当然として，安定的なエネルギー源としての原子力や移行期のエネルギー源としての天然ガスの必要性に言及している．また，フランスのマクロン大統領は2021年11月に，エネルギーの自給保証やカーボンニュートラル（以降CN）達成のために，原子力発電の建設を再開することを発表した．

2．EUタクソノミー等における原子力の位置付け

このような背景もあり，欧州委員会は2022年１月１日のプレスリリースにおいて，EUタクソノミーに原子力や天然ガスを含める方向で検討を開始したと発表した．原子力について，新設設備は2045年以前の認可取得，既存設備は2040年以前に稼働延長許可を取得することを条件としている．

EUタクソノミーでは①気候変動の緩和，②気候変動への適応，③水と海洋資源の持続可能な利用と保護，④循環経済への移行，⑤汚染の防止と管理，⑥生物多様性と生態系の保護と回復のうち，少なくとも一つの環境目的に貢献するとともに，他の環境項目に重大な影響を与えない，人権・労働に関する最低限の基準を満たす，技術的審査基準を満たすことが求められる．

原子力が気候変動の緩和に貢献することはEU内でも一定のコンセンサスが得られていたが，放射性廃棄物が他の環境目的に重大な影響を与えないかの判断は困難として保留されてきた．2021年４月に発表された委任法令では気候変動の緩和に関して９産業88活動，気候変動への適応に関して13産業95活動の「グリーン・リスト」を規定しているが，同リストには原子力は含まれなかった．

欧州委員会は委任法令案をサステナブル・ファイナンスに関する加盟国の専門家グループとサステナブル・ファイナンス・プラットフォーム[注)]に諮問し，１月中に法令を採択する予定である（ただし，2022年１月末時点で未採択）．その後，欧州議会と欧州閣僚理事会による審議・承認を経て，適用開始される．

なお，サステナブル・ファイナンス・プラットフォームが１月21日に発表した回答では，原子力は前述の③～⑥の環境目的に重大な影響を与えないとは言えず，また一部の新設設備は2050年までの運転期間が短く1.5℃目標達成への累積的な貢献が限定的となる懸念があることから，「グリーン・リスト」に原子力を含めることに反対の意を示している．EUタクソノミーにおける原子力の扱いは加盟国の中でも意見が分かれ，原子力依存度が高いフランス，フィンランド，チェコなどは脱炭素化のために原子力が不可欠と主張する一方，ドイツやスペイン，オーストリアなどは反発している．今後，欧州委員会や欧州議会，欧州閣僚理事会における審議状況について注視が必要である．

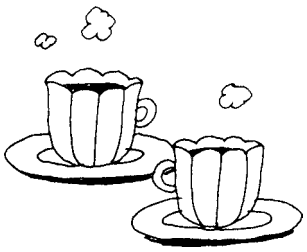
3．日本のCNにおける原子力の位置付け

我が国では，2020年12月に発表された「グリーン成長戦略」において原子力は重点14分野の一つに位置づけられ，2021年10月に閣議決定された第６次エネルギー基本計画では「原子力については，国民からの信頼確保に努め，安全性の確保を大前提に，必要な規模を持続的に活用していく」と記載されている．他方，震災後再稼働した原子力発電は10基に留まり，2030年の20～22%目標達成は見通しが立っていない．また，新増設についてはエネルギー基本計画等において言及されておらず，このままでは既設電源の大半が2050年以前に運転期限を迎え，2050年CNにおける原子力の貢献は限定的となる．

日本原子力研究開発機構等は2022年１月に米国の高速炉開発計画に参加することを発表しているが，次世代炉の活用も含め，我が国のCN達成に向けて原子力をどのように位置づけるか，踏み込んだ検討が望まれる．

（株式会社三菱総合研究所　サステナビリティ本部
主任研究員　福田　桂）

注）民間企業や団体，シンクタンク，EU諸機関などの有識者からなる欧州委員会の諮問機関



談話室

オンライン講義

Online Lecture

斎藤 聡*
Satoshi Saito

ご縁があって母校にて，材料工学環境論なる講義で一コマ担当させていただいている．その中で「電力セクタの低炭素化と二酸化炭素回収技術」なる講義をしている．本日は誌面を借りて講義にまつわる，加えて講義を通じて感じたことを記したい．

講義内容の概要であるが，最初に地球規模で温暖化が進んでいるという事実の共有とそれに対処するための国際的な合意；パリ協定について紹介することから始まる．次に，発電における基幹電源の火力発電システムの高効率化の歴史（主蒸気温度圧力の変遷や蒸気タービンの長翼化，ガスタービンコンバインド発電システム）について紹介し，それを材料の進歩（高強度，高耐熱，高耐食）が支えた点を解説する．高効率化しても排出されるCO_2については，その排出抑制手段として排ガス中からのCO_2分離回収技術について紹介を行い，分離回収の仕組みの説明と鍵となる吸収液についての解説，最後に国内外でのCO_2分離回収プロジェクトを紹介するものになっている．学生の所属は材料系，化学（工学）系が多く，金属／有機の材料が重要な役割を担うと学生たちをエンカレッジできるし，手前みそになるが蒸気タービン発電機サプライヤーとしてもCO_2分離回収技術プロバイダーとしても弊社の技術開発力をアピールする上で好都合の内容に仕立てている．

火力発電の高効率化により排出原単位を下げる努力を行い，いずれはCCSという話の流れは国内で2020年の夏頃までは常識的な考え方だったと私個人は勝手に思っている．ところが，事件が起こった．2021年度の講義では大改訂が必要になった．理由は菅前首相の「2050年カーボンニュートラルに挑戦」と「2030年温室効果ガス削減目標の引き上げ（46%）」である．とどめが2021年6月のG7サミットでの，温室効果ガス排出削減対策が講じられていない石炭火力発電への国際的支援の終了の合意であった．

2021年度講義では，火力高効率化についてのボリュームを減らし「石炭火力発電への風当たりが強くなっています．社内でも蒸気タービン高効率化研究の重要性が減るし，事業自体も厳しくなっていくことが予想されます」と，火力発電に関してトーンダウンした内容に変更せざるを得なくなった．学生からは，「東芝のような大会社でも大変なのですね」と同情のコメントがあるなど，最近の大きな脱炭素の動きに会社の事業が大きく揺さぶられることを知ってもらうことになった．

さて，学生には課題としてA4 1枚のレポートを出してもらっている．2050年のカーボンニュートラルの社会を想定しつつ，考えていること／行動していることを記述するというものだ．学生さんにとっては何とも的の絞りにくいレポートテーマなのかもしれないが，学生がどんなことを考えているのかを知るために，あえて正答の無い課題設定とさせてもらっている．様々な意見があって大変興味深い．真向からカーボンニュートラルなど無理という主張から始まるレポートも少数だがあるし，異常気象を地球温暖化と結びつけて受け止めなければという意見など，それぞれだ．気づいたのだが，多くの学生が実施中の取組みとしてレジ袋（エコバック持参）の話を書いてくる．水筒／マイ箸持参の話もある．学生にとっては，エコバッグを使うのは最も身近な脱炭素の行動なのだ．待てよ．レジ袋はマイクロプラスチックの海洋ゴミの話じゃなかったか？環境省のHPを拝見すると温暖化防止に役に立つと明確な記載はないが，ワンウェイプラのReduceの視点からすれば脱炭素の行動なのだ．納得．

受講者の多くは，修士の学生である．大部分の学生が研究室で遂行中の研究が地球環境やカーボンニュートラルに何らかの関連があることを意識しているように見える．多くの学生が卒業後はその道で活躍したいと表明してくれている．大変心強い．

学生さんと直接触れ合えないことは誠に残念だ．寝ている学生がいれば講義内容がよろしくないことが直ぐにわかるし，頷いてもらえれば励みになる．オンラインでは冗談を言う気にはならないし一人一人の反応を確かめながら伝え方を変えることもできない．前述の学生さんの言葉「東芝でも大変なのですね」．それは勘違いです．「電力，自動車，製鉄，石油化学，等々ほぼ全ての業種が脱炭素に向けて筆舌に尽くしがたい苦労を味わっている最中です」と目を見て伝えたいのが本当のところなのだ．コロナの影響はしばらく続くだろう．オンラインのメリットは色々あると思う．それでもただただ残念である．

*東芝エネルギーシステムズ株式会社

会 報

◆委員会開催報告◆（全てオンライン開催）

第 3 回総務委員会

［日　時］ 令和 4 年 2 月24日（木）
［出席者］ 11名
［座　長］ 藤岡　直人

第 5 回企画実行委員会

［日　時］ 令和 4 年 2 月17日（木）
［出席者］ 19名
［座　長］ 松橋　隆治

第 6 回編集実行委員会

［日　時］ 令和 4 年 2 月16日（水）
［出席者］ 20名
［座　長］ 藤井　康正

◆行事等開催報告◆

第 5 回エネルギー政策懇話会（オンライン開催）

［日　時］ 令和 4 年 1 月11日（火）14：50～17：00
［参加者］ 33名
［テーマ］「これからのガス事業～2030年，50年に向けて」
［話題提供者］ 1．野田　太一（経済産業省資源エネルギー庁）
2．坂梨　　興（大阪ガス㈱）
［司　会］ 秋元　圭吾（地球環境産業技術研究機構），西田　亮一（大阪ガス㈱）

第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（オンライン開催）

［開催日］ 令和 4 年 1 月25日（火）～26日（水）
［主　催］ エネルギー・資源学会
［共　催］ 電力中央研究所，日本エネルギー経済研究所，エネルギー総合工学研究所，地球環境産業技術研究機構，
コージェネレーション・エネルギー高度利用センター
［後　援］ 新エネルギー・産業技術総合開発機構
［協　賛］ 化学工学会，電気学会，日本エネルギー学会，日本機械学会，日本原子力学会，日本シミュレーション学会，
公益事業学会，三菱総合研究所，日本エレクトロヒートセンター
［発表時間］ 1 題目20分（講演15分，討論 5 分）
［発表件数］ 128件
［参加者］ 25日220名，26日245名
＊特別講演会
［日　時］ 令和 4 年 1 月25日（火）15：50～17：00
［次　第］ ＊会長挨拶
＊特別講演「IPCC WG1 第 6 次評価報告書（自然科学的根拠）の概要」
国立研究開発法人国立環境研究所 地球システム領域副領域長　　江守　正多
［司会者］ 松橋　隆治（東京大学）
（技術交流会は中止）

2021年度エネルギー施設の災害・安全対策研究会（新型コロナウイルス感染拡大防止のため，開催延期）

［開催日］ 令和 4 年 2 月21日（月）～22日（火）
［場　所］ ＊福島第一原子力発電所
＊福島第二原子力発電所
＊東日本大震災・原子力災害伝承館
＊東京電力廃炉資料館
＊JAEA楢葉モックアップセンター，とみおかアーカイブ・ミュージアム　等
［テーマ］「福島第一，第二原子力発電所の廃炉作業とエネルギー関連施設，および周辺地域の復旧･復興状況の見学」
［コーディネーター］工藤　拓毅（日本エネルギー経済研究所）

一般社団法人 エネルギー・資源学会新入会員紹介

（令和３年６月26日～令和４年１月31日）　　＊順不同，敬称略

〈特別会員〉

合同会社ポスト石油戦略研究所
東芝三菱電機産業システム株式会社

〈正 会 員〉

井上　勝司		堀内　一希	
今井　浩吉		本部　和彦	
岩崎　裕典		松井　信正	長崎総合科学大学
内田　英明	大阪大学	三宅　　寛	
奥村　英之	京都大学	村橋　喜満	
金澤　紘行		森重　晴雄	
岸田　真一		森田　賢治	日本自動車研究所
小林　　覚	東京工業大学	山本　　昂	
小林　　暢		柳　　依然	
小林　　浩		張　　冲	
髙橋　忠男		任　　洪波	上海電力大学
竹田　　恒		王　　楠	
千田　　誠		XUE JING	
富樫　孝夫		早稲田大学理工学図書館	
中井　智章	三菱重工パワーインダストリー		
中島　みき		（学生会員から）	
長山　浩章		後藤　良介	
西村　　顕	三重大学	SIEED Jubair	
馬場　博幸	東京大学		

〈学生会員〉

阿彦　貴規	東北大学	中村　美友	名古屋大学
飯田　惇子	横浜国立大学	中本　健太	筑波大学
石村　真也	茨城大学	鳴川　公彬	大阪大学
今川　敦博	早稲田大学	西澤　一輝	大阪大学
植田　和樹	大阪大学	西田　啓人	福井大学
上野　泰聖	芝浦工業大学	長谷山光代	東北大学
内田　文也	名古屋大学	深澤　　栞	横浜国立大学
桶屋　太志	東京理科大学	藤原みさき	大阪大学
川田健太郎	筑波大学	細淵　江美	東京理科大学
岸本　一将	大阪大学	水野　眞子	東京工業大学
小林　祐太	同志社大学	村上　勇雅	大阪大学
坂中　稔基	大阪市立大学	山之口雄大	東京農工大学
佐々木健人	筑波大学	渡邊　崇史	大阪市立大学
塩田　啓造	熊本県立大学	渡辺　武志	東京農工大学
正野　景大	大阪大学	孫　　永逸	名古屋大学
鈴木　敦志	名古屋大学	張　　博雲	大阪府立大学
武田佳次朗	大阪大学	田　　康	立命館大学
豊田　舜介	名古屋大学	雒　　梓程	立命館大学
内藤　友介	東京農工大学	劉　　孟達	東京大学
中西　利樹	大阪大学	Jiang Yuhan	京都大学

次号予定目次「エネルギー・資源」5月号（253号）（刊行：2022年5／10）

〔論　説〕……甲斐沼　美紀子（地球環境戦略研究機関）

〔展望・解説〕

IPCC WG1 第6次評価報告書（自然科学的根拠）の概要……江守　正多（国立環境研究所）

廃棄物･資源循環分野における低炭素と循環経済への移行……山田　浩司（環境省）

〔特　集〕　再生可能エネルギーを貯蔵するための水電解水素製造技術

(1) 特集にあたって……安田　和明（産業技術総合研究所）

(2) 水電解技術総論……光島　重徳／黒田　義之（横浜国立大学）

(3) 水電解水素製造・技術開発政策……大平　英二（新エネルギー・産業技術総合開発機構）

(4) 水電解水素製造・世界の動向……米田　雅一（みずほリサーチ&テクノロジーズ）

(5) 大型アルカリ水電解システムの開発……藤田　泰宏／内野　陽介（旭化成）

(6) 固体高分子型水電解……中尾　末貴（神鋼環境ソリューション）

(7) 高効率固体酸化物型水電解……長田　憲和（東芝エネルギーシステムズ）

(8) 産業技術総合研究所における水電解水素製造技術の研究開発

……五百蔵　勉／五舛目　清剛／小島　宏一／伊藤　博／岸本　治夫（産業技術総合研究所）

〔研究論文要旨〕

〔研究者・実務者のためのエネルギー・資源講座〕

＜連載：カーボンリサイクル③＞

CO_2から化学品の製造……塙　雅一（エネルギー総合工学研究所）

〔歴史の散歩道〕

日本の水電解技術開発……竹中　啓恭（元産業技術総合研究所）

〔見聞記〕

COP26参加報告……堀尾　健太（電力中央研究所）

〔書　評〕

データドリブン脱炭素経営

亡国の環境原理主義

鬼の血脈

〔技術・行政情報〕

電気事業における市場リスクマネジメントに関する指針……遠藤　操（電力中央研究所）

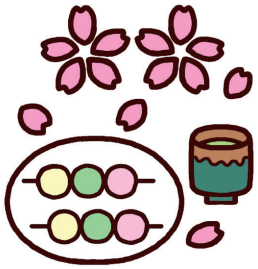
〔談話室〕……Benjamin C. McLellan（京都大学）

〔会　報〕

〔次号目次〕

◆ 編集後記 ◆

ウイルスは果たして本当に知能を持たない【無生物】なのでしょうか？



オミクロン株による新型コロナの第6波で，改めてウイルスの手ごわさや恐ろしさを感じられた方も多いかと思います．この2年間，人類は，画期的なmRNAワクチンを筆頭に，ロックダウン，高性能・高機能な各種のマスク，アルコール消毒，アクリル製のパーティション，テレワークやAIなど，全人類の知恵を結集して新型コロナに対抗してきましたが，そんな人類の知恵をあざ笑うかのように，新型コロナは変異を繰り返して進化し，第4波，第5波，第6波とますます感染者の数を増加させ，その存在感を高めています．改めて，生命とは何か，文明とは何かを考えさせられたwithコロナの2年間でした．

エネルギーと資源の場合も，その存続や枯渇が文明を脅かす存在であることは周知の通りです．エネルギー・資源学会は，その解決のため，会員の皆様の知恵を結集する場として役立てるよう関係者一同，力を尽くします．会員の皆様の引き続きのご支援，ご協力をお願いします．（編集実行委員　K.M.）

一般社団法人 エネルギー・資源学会 編集実行委員

＊藤井　康正　東京大学
＊＊永田　　豊　電力中央研究所
＊＊岡島　敬一　筑波大学
＊＊光田　憲朗　三菱電機
砂野　耕三　川崎重工業
大塚　浩文　大阪ガス
斎藤　　聡　東芝エネルギーシステムズ
坂口　佳史　竹中工務店
炭谷　順一　大阪府立大学
高瀬　香絵　CDP Worldwide-Japan
近本　智行　立命館大学
内藤　康幸　パナソニック
中塚　記章　大阪大学
西　　順也　関西電力
馬場　好孝　東京ガス
福田　　桂　三菱総合研究所
藤岡　恵子　ファンクショナル・フルイッド
Benjamin C. McLellan　京都大学
増渕　修司　東京電力ホールディングス
松尾　雄司　立命館アジア太平洋大学
村上　進亮　東京大学
安田　和明　産業技術総合研究所
安田　　誠　大阪大学
山末　英嗣　立命館大学
吉田　　聡　横浜国立大学
吉田　好邦　東京大学
鷲津　明由　早稲田大学

＊　委員長　　＊＊　副委員長

エネルギー・資源
ENERGY AND RESOURCES

VOL. 43 NO. 2

令和4年3月10日発行
（奇数月10日発行）

発行人　手　塚　哲　央
発行所　一般社団法人 エネルギー・資源学会
〒550-0003 大阪市西区京町堀1－9－10
（リーガルスクエア京町堀）
TEL（06）6446－0537　FAX（06）6446－0559
E-mail：webmaster@jser.gr.jp
https://www.jser.gr.jp/
表紙デザイン：菓子井　組人
印刷所　カネコ写眞製版㈱
〒534-0027 大阪市都島区中野町2－2－4
TEL（06）6352－4992㈹

ENEOS水素で、未来を動かそう。

水素は、使う時にCO_2を出さないクリーンエネルギーです。
ENEOSは、燃料電池自動車(FCV)用に、
水素ステーションを全国で展開。
今後は水素発電など幅広い産業分野での
水素利用の拡大に応えるため、水素の製造から供給まで、
より強固なサプライチェーンづくりを目指します。
また再生可能エネルギーを使って製造する
CO_2フリーのグリーン水素の供給にも積極的に取り組み、
ENEOS水素の普及を通して低炭素社会の実現に貢献します。

ENEOS

NTTファシリティーズ

新しい未来をつくり、
守りつづける。

建築×エネルギー×ICTの統合エンジニアリング力で
企画から設計、構築、保守・維持管理まで
トータルでサポート。

日本の通信施設・設備を支えてきた
実績と経験を活かし、
社会と企業のさまざまな課題を解決します。

NTTアーバンソリューションズグループ
株式会社 NTTファシリティーズ
代表取締役社長　松原　和彦
〒108-0023 東京都港区芝浦3−4−1
https://www.ntt-f.co.jp

エネルギー・資源
令和四年三月十日発行（奇数月十日発行）
発行所　一般社団法人 エネルギー・資源学会　〒五五〇―〇〇〇三　大阪市西区京町堀一丁目九番一〇号（リーガルスクエア京町堀）
発行人　手塚哲央　電話（〇六）六四四六―〇五三七