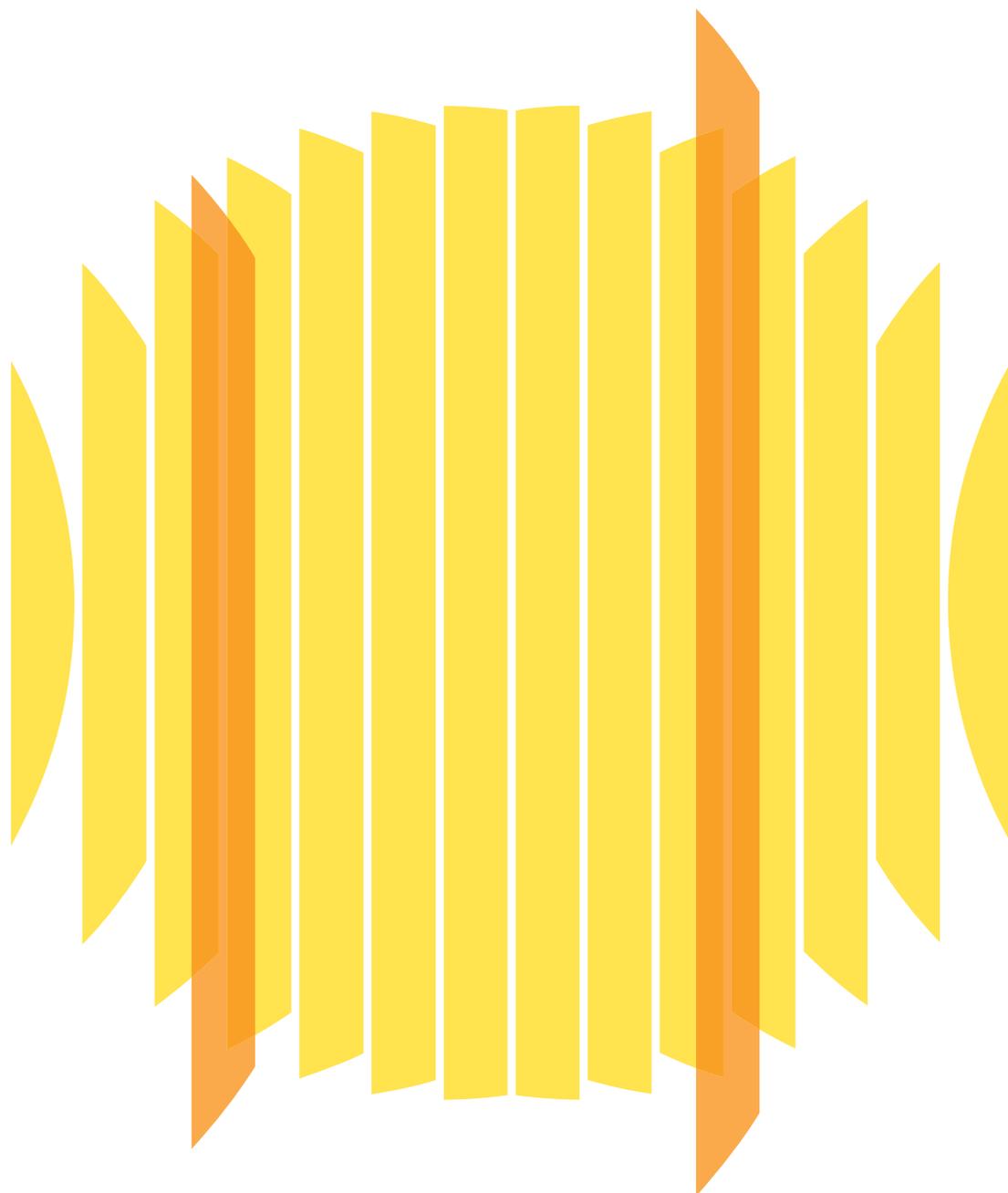


季報 エネルギー—総合工学

Vol. 39 No. 3 2016.10.



一般財団法人 エネルギー—総合工学研究所
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

目 次

【巻頭言】

エネルギー事業の「5つのD」と非連続な進化

東京電力ホールディングス(株) 常務執行役
経営技術戦略研究所長

岡本 浩 …………… 1

【座談会】

電力貯蔵の展望と課題～技術面および制度面からの検討～

明星大学 理工学部 電気電子工学系 教授

伊庭 健二

(一財)電力中央研究所 次世代電力需給マネジメント
特別研究チーム 研究戦略・推進担当

池谷 知彦

(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)

スマートコミュニティ部 総括研究員

諸住 哲

(一財)日本エネルギー経済研究所 戦略・産業ユニット

電力・ガス事業グループ 兼 省エネルギーグループリーダー
(株)日立製作所 IoT 推進本部

小笠原潤一

グローバルプロジェクト推進本部 担当本部長

杉田 博昭

司会 (一財)エネルギー総合工学研究所

プロジェクト試験研究部 部長

蓮池 宏 …………… 3

【寄稿】

セルロースナノファイバーの展望～基礎・応用・課題～

(国研)産業技術総合研究所 中国センター

機能化学研究部門 セルロース材料グループ グループ長

遠藤 貴士 …………… 23

【寄稿】

バイオエネルギー活用による水素社会構築の意義

九州大学 水素エネルギー国際研究センター 客員教授

田島 正喜 …………… 35

【調査研究報告】

新しい再生可能エネルギー：風力熱発電 (WTES)

プロジェクト試験研究部

新エネルギーグループ 主管研究員

岡崎 徹 …………… 44

【調査研究報告】

諸外国の電源開発計画と電力事情および石炭火力を巡る動向

プロジェクト試験研究部 化石燃料グループ 主管研究員

橋崎 克雄

参事

入谷 淳一

主管研究員

酒井 奨 …………… 57

【研究所のうごき】 …………… 69

【編集後記】 …………… 71

巻頭言

エネルギー事業の「5つのD」と非連続な進化



岡本 浩 (東京電力ホールディングス(株) 常務執行役
経営技術戦略研究所長)

エネルギー市場の全面自由化、再生可能エネルギーやデジタル技術の急速な進展など、エネルギーを巡る環境は激変しており、事業者も過去の延長上にはない非連続な進化を迫られつつある。筆者の勤務する東京電力ホールディングス(株)経営技術戦略研究所では、その主要ドライバーである以下の5要因を「5つのD」(5 D's)と呼んでいる。

- ・自由化 (Deregulation)
- ・分散化 (Decentralization)
- ・脱炭素化 (De-carbonization)
- ・デジタル化 (Digitalization)
- ・人口減少・過疎化 (De-population)

自由化・分散化については、あらためて説明を要しないだろう。気候変動枠組条約第21回締約国会議 (COP21) で合意された今世紀末までの脱炭素化に向けて取り得る選択肢は、茅陽一・地球環境産業技術研究機構 (RITE) 理事長も指摘される通り、①最終エネルギー消費における化石燃料の電気・水素・バイオマス燃料による代替、②化石燃料使用の場合のCO₂のCCS処理 (あるいは回収したCO₂の利用) に絞られる。二次エネルギーである電気の生成には再生可能エネルギー・原子力・CCSなどの技術を活用し、水素も主に電気から製造することが必要となる。ドイツでPower-to-Xと呼ばれるシナリオは、一次エネルギーを専ら再生可能エネルギーに限定しているが、同様の方向を目指している。

わが国で進む人口減少は、エネルギーなど国内需要を縮小させつつ、過疎化とメガシティへの集中などコミュニティの変化をもたらす。高度成長期に建設され経年の進むインフラ

(交通・通信・エネルギー・水道など)の維持が大きな課題となるが、IoTやAIなどデジタル技術の進展による交通・物流の電動化・自動化などを通じて、インフラ間の相互補完性が高まり、すべてのインフラを総合してコミュニティを支えるための最適な配置や運用を考えることが重要になる。

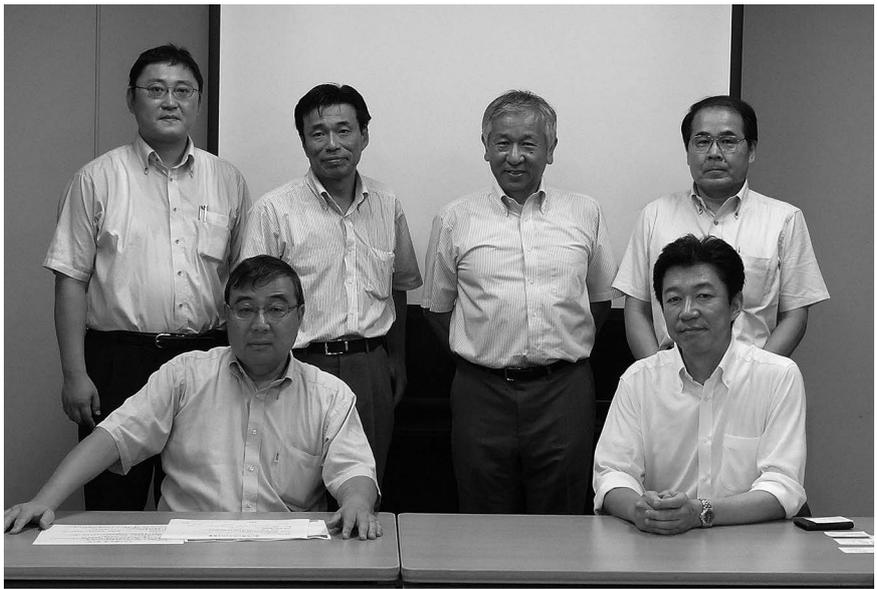
変革期にこそ事業草創の原点を振り返ることが必要である。朝岡大輔氏の「企業成長と制度進化：戦前電力産業の形成」によれば、エジソン電灯会社から遅れること5年で個人株主11人によって設立された東京電燈などの企業群が、M&A・事業分離などの財務判断を通じて、顧客基盤の拡大、エジソン式の直流から交流への事業モデル転換のための技術獲得、大規模設備投資のための資本調達手段の確保を果たして有数の基幹産業に成長していく過程は、変化し続ける環境における企業にとってのダイナミック・ケイパビリティ（資源基盤を創造、拡張、変更する能力）の獲得と公共政策の制度進化の重要性を示している。

エネルギーとその周辺領域を俯瞰しながら、総合工学の視点で調査・研究を行うエネルギー総合工学研究所の役割はますます重要であり、この場を活用した産・学・官の関係者によるビジョンの共有と一層の連携を期待したい。

座 談 会

電力貯蔵の展望と課題～技術面および制度面からの検討～

- 伊庭 健二 (明星大学 理工学部
電気電子工学系 教授)
- 池谷 知彦 (一財)電力中央研究所 次世代電力需給マネジメント
特別研究チーム 研究戦略・推進担当
- 諸住 哲 (国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)
スマートコミュニティ部 総括研究員
- 小笠原潤一 (一財)日本エネルギー経済研究所 戦略・産業ユニット
電力・ガス事業グループ 兼 省エネルギーグループリーダー
- 杉田 博昭 (株)日立製作所 IoT 推進本部
グローバルプロジェクト推進本部 担当本部長
- 蓮池 宏 (一財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長



はじめに

蓮池 本日は「電力貯蔵の展望と課題」と題した座談会ということで、この分野に詳しい専門家の方々にお集まりいただきました。まず、ご出席の皆様には電力貯蔵との関わりなどを含めた自己紹介をお願いしたいと思います。

池谷 電力中央研究所の池谷と申します。電力会社の研究所ですので、電力貯蔵は非常に重要だと思っています。私は最初、二次電池の部署に配属されまして、リチウム電池、鉛電池、ニッケル水素電池、その後に応用として電気自動車や電力貯蔵の研究を行いました。一時期、NEDOにおりまして水素貯蔵などの開発を担当しました。

小笠原 日本エネルギー経済研究所の小笠原です。最近、特にアンシラリーサービス（周波数調整）の動向調査を行っています。特に、蓄電池や揚水発電の活用方法とかが注目を浴びているので、そこら辺のことで呼ばれることが増えてきています。

伊庭 明星大学の伊庭と申します。長らく電機メーカーで電力系統の安定度や系統計画の仕事に携わっておりました。今は大学で、電池に関係するスマートグリッドの運用について研究をしています。

諸住 NEDO の諸住です。スマートコミュニティ部というところで国際実証を行っています。これまで実証段階に進んだプロジェクトが12件ありますが、そのほとんどが電気自動車（EV）や電力貯蔵が絡む内容になっています。今回は、その辺りの話を色々させていただこうと思います。

杉田 日立製作所の杉田です。IoT を推進する部署で、スマートコミュニティ、スマートグリッドの経験から、特にハワイでEVを使った再生可能エネルギーとのバランスについての実証を行いましたので、実証とか実業とかの話ができればと思います。

蓮池 エネルギー総合工学研究所の蓮池です。私は、当研究所が受託した研究プロジェクトの中で電力貯蔵に関わってきたわけですが、現在は、VPP（バーチャル・パワープラント）、それから風力発電と電力貯蔵を組み合わせてどう制御するかという研究を行っています。

再生可能エネルギー対策としての電力貯蔵

蓮池 電力貯蔵のニーズが色々あります。1980年代は「負荷平準化」が一番大きなニ

ーズでした。それと裏腹の関係ですが、原子力発電を増やし夜間の安い電力を貯蔵して昼間のピーク時に使う形がありました。2000年頃からは大型の風力発電所が動き始め、昨今は太陽光発電が増加してきており、これに対応して電力貯蔵が注目されてきています。また東日本大震災後、電力システム改革が進められ、制度が変わることで電力貯蔵の使い方も多様化してきています。このように、電力貯蔵には色々な使い道がありますが、本日はその中でどれが有効なのか、あるいは有望なのかという点についてディスカッションしてみたいと思います。

まず、出力が不安定な再生可能エネルギー（再エネ）の対策としての電力貯蔵を取り上げたいと思いますが、これにも色々なものがあります。例えば、風力発電所に併設するという形、再エネ増加による周波数変動対策として、さらには、送配電容量が不足する問題や電圧問題についても電力貯蔵を使う考え方があります。

伊庭 再エネ対策として電力貯蔵が有効であるというのは当然だと思います。ただ、どのくらいの系統規模を対象とするかによって随分話が変わってくると思います。

私が気になっているのは、電力系統全体を考えて、変電所に置く電力貯蔵を中心に考えるべきか、それとも需要家で電池を持ってもらって末端の方から系統を支えるのが良いのか、ということです。その話をすると、誰がコストを負担するのか、という話になってしまうのですが、その前に、どこに電力貯蔵を配置すれば社会益が最大になるのか、ということを考えておく必要があると思います。「こういう配置をすれば一番経済的なメリットがある」ということが出せれば、それに従って制度ができ上がって行く。その後、そのコストを皆でどう負担して行くかを考えれば良いわけです。市場が形成される前に、最適配置の問題を考えるべきではないかと思います。

小笠原 系統側か事業者側か、という話ですが、社会的便益を考えるのに、自由化されていなければ考えやすいのですが、自由化した場合は、電力貯蔵のようなシステムは非常に相性が悪いのです。まず、うまく使われていません。例えば、アメリカの独立系統運用機関 PJM でも揚水発電は市場から切り離して、PJM が運用することになっています。ドイツでも揚水発電は再エネの変動対策には使われず、昼と夜の負荷平準化運転に使われているだけです。取引が15分、30分、1時間といった細切れで行われるので、貯蔵のように時間をまたぐものと非常に相性が良くない。普通のエネルギー取引では成立しないので、アンシラリーとして高い付加価値の付く系統側で使う用途に落とし込んで行くということのかなと思います。ただ、アンシラリーの場合は、火力発電を想定して商品設計されているのですが、蓄電池は応答性が良いので火力よりも細かいシグナルの商品設計をして価値を高めることでようやく使えるようになってきたと言う状況です。

伊庭 電力会社を発電部門と送電部門に分けて考えてみます。発電部門には揚水や蓄電池を運用するメリットが全くないので利用しない。他方、送電部門が蓄電池を流通設備として捉え、混雑解消のために必要最小限となるよう運用しようとしても判断が難しい。また、発電設備や送電設備の建設を繰り延べできるというメリットを発電部門と送電部門のどちらが判断するのか。垂直統合の電力会社の中で総合的に判断できたことが、2つの部門を分離してしまえば、それを判断するところが無くなるわけです。

諸住 送電会社では、昔やっていた経済揚水をやる場面はなくなり、必要揚水しか使われなくなる。つまり、系統上の制約がある時だけ動くという形ですから、稼働率が落ちてしまいます。



伊庭 健二氏

(明星大学 理工学部 電気電子工学系)
教授

我々がやっている実証事業は海外で展開していますが、多分、自由化している国では、電力会社（送配電会社）が電力貯蔵を設置するということは有り得ないと思います。電池は需要家の方に置くという形になりそうです。ところが、日本の電池メーカーは、蓄電池を電力会社に売りたいがりますので、実証をやるにしても非常にストレスがたまります。

需要家側に設置する蓄電池と電気自動車

杉田 ハワイでは、蓄電が非常に急速に立ち上がりました。背景として、ルーフトップ型の太陽光発電が沢山入っていて、それが急速に伸びています。ネットメータリング制度（NEM 制度）が終わり、今、2つの制度があります。1つは電池も使って自家消費する。もう1つは、逆潮できるけれども電力会社は通常の電力単価よりも安い価格で買い取るというものです。それでもハワイ電力は困っていて、太陽光の使い方は自家消費だけとなる方向にあります。

諸住 ハワイでは、去年11月に逆潮が禁止になりましたね。

杉田 はい。基本的に禁止になりました。

蓮池 ドイツでは2011年に余剰買取価格が家庭用電気料金を下回るようになり、現在の買取価格は電気料金の2分の1以下になっています。これだと電力貯蔵した方が得という状況だと思います。

一方、日本の場合は、電気料金が震災後に上がっていますが、図1に示すように10kW以下のPVの買取単価は、まだ電気料金と同等にはなっておらず、電気料金より大きく下回るようになるのはいつになるか見通せません。

固定価格買取制度（FIT）では、10kW以下は余剰電力を10年間買い取ってもらえますが、それが終わったら買取価格はいくらになるのか。平成28年度の調達価格等算定委員会の報告書には、卸電力市場価格相当（11円/kWh）という例が示されています。太陽光発電を電力会社に売るよりも貯蔵して自家消費するパターンは、FIT終了後に広まっていくのではないかと思います。

諸住 太陽光については、沢山入っているイタリアなどの例を見ると、順方向の潮流に対して逆潮は4～5倍になります。日本の太陽光はほとんどが高圧配電線につながっているので、変圧器や配電線の熱容量の問題があって逆潮できなくなります。配電系統の太陽光の余剰は送電系統に持ち上げられないので、揚水発電が太陽光の役に立つとは思っていません。そういう意味では、分散型電力貯蔵を

するのか、それとも系統側を強化するのか、という選択が出てくると思います。

電力会社の人と話をしたのですが、例えば、電池が30万円/kWhなら流通設備を強化した方が安いだけでなく、2万円/kWhであれば電池を入れた方が安いと言っていました。

杉田 そういう意味ではEVを使う可能性があります。単に電池としてではなく、乗り物としての価値があるので。ハワイでは、太陽光とEV、充電器を組み合わせた「PV プラスEV」が経済的に成り立っています。マウイ島では、今、700台くらいEVが走っていますが、急速に「PV プラスEV」という自家消費型のモデルが広がっています。

蓮池 EVに貯めた電力は家庭内で使えるようになっていませんか？

杉田 はい。V2H（Vehicle to Home）、そしてマウイ実証ではV2G（Vehicle to Grid）まで行きます。

池谷 V2Gについてですが、現在使用されている電力変換器は効率が低いという問題があります。自動車会社は、プラグインハイブリッド車（PHV）やEVを普及させるためにコスト優先で安い技術を使っていると思いますが、V2Gとして使うのであれば、ここの改善が必要です。

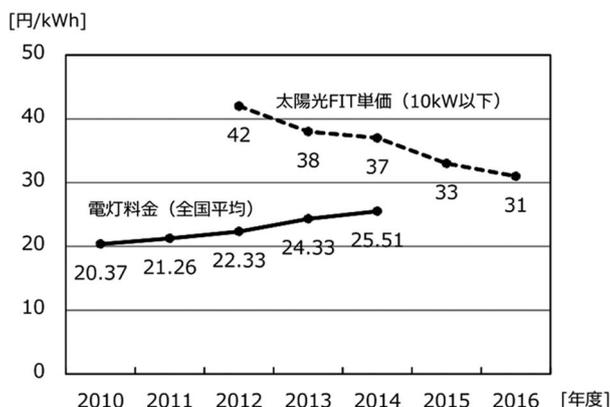


図1 日本の電気料金と太陽光 FIT 単価

蓮池 EVの電池は走行のため使うのが本来の目的であり、V2HやV2Gを行ったために電池が劣化してEVとしての性能が落ちては本末転倒、という指摘もあると思いますが。

池谷 劣化は心配ないと思います。満充電で放置しておく方がむしろ劣化します。

杉田 V2Hの場合は、走行時に比べてとても緩やかな使い方です。劣化の不安はそれほどありません。

伊庭 家庭内で使う電池だと、ステラモーターズが考えている7kWhのタイプがあります。日産リーフの電池は一般家庭2日分のエネルギーを蓄えられます。エネルギー容量からみて、EVの電池は使いでがあると思います。

電気自動車用電池の再利用（リユース）

蓮池 EVで使用した後の電池を、定置用としてリユースするという提案がありますが、これについてはどのようにお考えですか。

諸住 EVの電池をリユースする最大の目的は、EVの減価償却後の残存簿価を高くすることだと思います。我々の実証で200台の車をスペインで使わせるのにリースしたのですが、3年で全部償却するようなリース契約しつかせませんでした。リースやレンタカーというのは、何年か使った後で車を中古市場に流すという前提でコストをはじくものです。今、EVはそれができないので採算がとれないという状況にあります。そういう意味で、中古の電池をわざわざ使わなくても良いのですが、自動車側の理由で電池のリユースを謳ったのだと思います。

杉田 リユースするとき、そのままでは使い

にくいので、車から電池を取り外して再パッケージしないと行けません。また、どういう使い方してきたのかも評価しないと行けません。第三者の評価機関がないと、どれくらい残存価値があるか非常に不透明です。そういう評価機関ができて、車から取り外した時に再パッケージしやすいような作りになっていけば、可能性が出てくると思います。一方、中古で出てくるまでに7~8年かかります。その間に、新品電池の価格が下がってくるので、それなら新品を使った方が良いんじゃないか、という視点もあると思います。

伊庭 リユースというのは、電池コストを下げるという点では非常に有効だと思います。セカンドユースなので安全面が心配だと思いますが、1個1個の電池の応動を監視し、消防設備も整えて、静止型の蓄電ステーションとして使うのは有望だと思います。

池谷 リユースは難しい問題ですね。電池をパッケージから外してバラバラにすると、1つ1つに癖がついているので、充電レベル(SOC)を揃えるだけでも大変な作業になります。今のところ、日産や三菱はパッケージのままリユース使用していると聞きます。残存価値の評価は、ICチップに使用履歴を全部記録して、ということかも知れませんが、その評価も難しいでしょうね。これは永遠の課題として研究テーマにしていこうと思います。

杉田 EV用電池というのはガタッと寿命が来るのではなく、じりじりと死んで行くので、何をもって「寿命」とするのか、結構難しいです。

伊庭 蓄電池のどれを最小モジュールと見るかにも依りますが、NAS電池は沢山の単電池が直列接続されており、300本の中の1、2本が故障を起こしてもシステム全体で性能が低下します。平積みして配線の自由度を高め、

劣化した電池はバイパスして健全な電池とつなぎ替えたり容易に交換できるようにすると、性能を維持しながら安全に運用することが可能だと思います。広いスペースで、そういう切替可能な配線ができて、安全管理がしっかりできれば、リユースの適用範囲ももっと広がるのではないのでしょうか。

池谷 都会のど真ん中に、可燃物などを利用する蓄電池システムのためにスペースを確保するのは難しいでしょうね。

伊庭 風力のポテンシャルが沢山ある北海道などで、その風力エネルギーをどうしようという発想であれば、スペースの問題は関係ないと思います。都会は再エネがあまり取れない所なので、あえて都会に大きな電池ステーションを置く必要はありません。郊外に置くことは十分可能だと思います。

分散型設備の利用と課題

小笠原 V2Gにもデマンド・レスポンス(DR)にも言えることですが、系統用に使おうとすると、確実に何kW使えるか事前認証しておかないと市場に参加できません。火力の場合、信頼性の高い設備を対象に、定期点検も入れて能力を保証する仕組みの中での制度設計になっています。DRであってもリユースの蓄電池であっても、必ずエネルギーを提供できるわけではないと思います。こういうものを電気事業にどう取り込んで行くのかというのは大きな課題だと思います。ヨーロッパは、DRや蓄電池を使って行こうということですが、技術開発の中で確率論的な制御をどの程度系統で扱えるのか、受け入れ難いところもかなりあります。

アンシラリー側でも制御の正確性による価格付けで差別化したり、だんだん、そういう

土壤はできていると思います。ただ、あまりにも複雑なので、このような制度設計にプレーヤーが対応できるか疑問です。

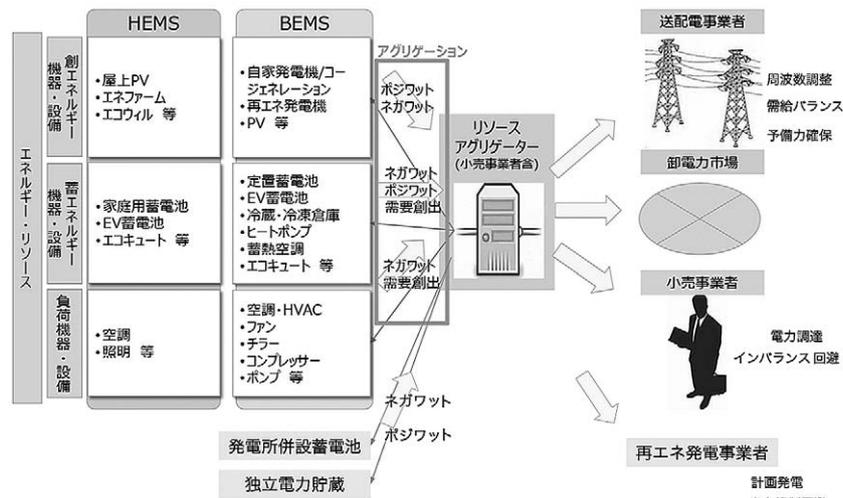
蓮池 1つ1つの電池の応答が明確に決まらないという点は1つの論点だと思います。EVは何台かに1台は走っていますから、使えない場合があります。一方で、日本の自動車の94%は車庫に停まっているという話もあります。そういう話をどう考えるかということだと思います。

これはVPPにつながる話でもあります。図2に示すように、需要家側に創エネルギー(発電)、蓄エネルギー、負荷機器があって、これらを集めれば、色々な調整力になるのではないかと、という考え方です。大型の蓄電ステーションでも良いのですけれども、沢山つなぐと、1つ1つに信頼を置けなくても沢山集まればある確率で信頼性が高くなるのではないかと、ということです。

そして、調整力の使い先には送配電事業者、卸電力市場、小売事業者、再エネ発電事業者が考えられます。その時々によって、調整力を買ってくれる人を選びながらやっていくというのがポイントです。何か専用の用途のものを作ると、利用率が低くなって高がつきます。例えば、余剰電力が発生するのはゴールデンウィーク辺りの僅かな時期ですが、それ専用貯蔵設備を作ったら採算はとれません。それに使っても良いけれども、他の時期は別のことに使う、というマルチユースなら、稼働率が上がってくる。売り先を選ぶことに長けた「リソース・アグリゲーター」の登場を想定しています。

このように、1つ1つは信頼性が掴みにくいものですが、沢山集めて使えるようすることが、色々な国で試みられるようになっています。

池谷 電力系統側から言わせてもらえば、皆が一斉に応答すると「横ブレ」してしまうと



(出所：第1回アグリゲーションビジネス検討会資料に加筆)

図2 バーチャルパワープラント (VPP) の考え方

という問題があります。また、回転機器を使っている火力や原子力は、慣性力（イナーシャ）を持っていますので、揺れに対して強いです。これらが減っていくと、その機能が減ります。イナーシャがないインバータ電源が増え過ぎて、いつか破綻するのではないかと懸念されます。

計画値同時同量とインバランス回避

伊庭 経済学者の方々から見ても、アメリカの PJM などがやっているアンシラリーサービスのやり方に対して、技術的にこんなのができるのか？という疑問が出てきています。

僕らから見ても、あのようにサービスを細分化しても、サービスを提供できる機器は限られているので、うまく運用できないと思います。

しかも、予備力などのアンシラリーサービスはスタンバイによる、機会損失コストを金銭で補うものなので、出力して下さいという時に出せなくても、ペナルティを払えば済みます。みんな年に1回くらいはペナルティを払う覚悟で契約しているので、いざという時にみんなが「出せません。ペナルティを払い

ます」と言えば、電力が足りなくなってしまう。

小笠原 中長期的に見ますと、容量メカニズムの話とリンクするのですが、少なくとも調整用電源の確保のためにインバランス料金が高くなって行くと思います。アンシラリーの値段も高くすると思います。それでないとサービスを提供する側にも魅力がないので。

アメリカでは、緊急時、「スキャーシティ・プライシング」と「ショーテージ・プライシング」という、停電コストまでインバランス料金を引き上げる仕組みが一般化しつつあります。そのためには緊急時手続きをちゃんと定めてないといけません。ヨーロッパでは、それがちゃんと定まっていないので、発動が難しいです。

緊急時にはインバランス料金を停電コストまで引き上げると、蓄エネルギーというのは緊急時に発令されて余剰インバランスがものすごく儲かる。それで、短期で供給力拠出が増え、緊急時から回復することになる。という流れは、恐らく日本にも来るだろうと思います。インバランス料金のプライシングの仕方によって、緊急時に自発的に節電してくれる人達に対価を払うとか傾向は間違いなく広がると思います。

蓮池 今おっしゃった方向に行くと、電力貯蔵の必要性、有効性は高まるのですか？

小笠原 どの市場をどれだけとったり提供するのか難しい場合でも、インバランスを通じて、付加価値を高めることはできます。特に緊急時が年に1回起きたらぼろ儲けという形です。そのかわり、予備力をきっちり提供するのは難しいのですが、調整力を高めるとい方向にきています。

蓮池 もう1つ、計画値同時同量は小売り会社として達成するのですけれども、その下にぶらさがる太陽光、風力も計画値同時同量の網がかかってくると、電力貯蔵が必須になってくるとい気がしますが、いかがですか？

小笠原 再エネ事業者が同時同量義務を負う場合には必須になるといいます。

諸住 結局は、再エネを増やして行くと、ゲートクローズする前に予想して売るしかないですね。その予想が狂った時にどうするのか？ 系統運用者が自分でインバランスを作るような制度になってしまうので、そこをどうするのかですね。

小笠原 ドイツも元々は、送配電事業者が買い取ったFIT電気でバランシング・グループを作って、需給運用をしようとしていたのですが、当日の市場で計画値の変更をやり取りしても、とても間に合わない。予測誤差がインバランスになってしまうので、FIT用に予備力を調整して、不足分は当日マーケットでやり取りをして、同時同量を達成しようとしたのですが。今は、系統インバランスと一緒に、系統運用者が需給調整をしています。

FITが終了した後、再エネ事業者が自分のバランシング・グループを形成して取引所で売買することは、理屈としてはできますが、実務上はできません。

蓮池 電池を沢山持っていればできるのですが、それ以外ではできませんね。

諸住 FITが終わった後、再エネ電力は市場でのダイレクトセールになります。形から言うと、青森県六ヶ所の二又風力のように、風力から送電会社に送電はしない。出力抑制がなくなって、顧客がついた風力しか送電できないふうルールが変わって行くでしょう。そうすると、同時同量よりもっと長い、1日の間の需要とのマッチングというニーズが増えてくると思います。

小笠原 しかし、FITが終了した時点では機器も劣化しています。その更新費用と蓄電池を付けてやろうというのは、経済的になかなか見合わないと思います。

蓮池 そうすると、むしろ系統事業者側でインバランスの手当てをするニーズがより大きくなる。系統事業者に対して電力貯蔵がインバランス解消・回避を提供する、というような形でしょうか？

諸住 日本の制度設計の議論では、系統事業者が揚水発電を持たせることで、そのインバランスを解消させようと考えているようです。ヨーロッパなどを見ていると、バランシング・グループに責任を持たせる方向に行っている感じがします。

蓮池 揚水は充放電の切り替えに時間がかかり、可変速揚水も限られていますので、インバランス解消には使いにくいかも知れません。蓄電池であれば上手く対応できると思います。

小笠原 別の問題として、ヨーロッパは揚水動力が電力消費扱いになっていて、充電電力に託送料金が課されます。ですから、託送料金分だけ不利になります。アメリカでは、揚水は蓄エネルギー扱いになっているので託送

料金がかかりません。

蓮池 制度の問題で、電力貯蔵が経済的に成立するかしないかを左右するのですね。

小笠原 蓄エネルギーの価値を最大化するには、複数の時間にわたって再エネの変動がどうなるのか、この時間帯が過剰でこの時間帯が不足するといった系統全体のインバランス状態についての情報が市場参加者で共有できること、そしてその時間帯にまたがって価値をやりとりするということ。この2つが担保されていないと蓄エネルギーに価値を持たせるのは難しいと思います。今のところ、世界のマーケットでできているのはスペインくらいです。

伊庭 スペインでそれができているのは、風力の中央管理をやっていて、その中で予測の精度が高いと言うことがあるんですよ。

小笠原 はい。日本でも何時くらいにどういう状態になっているのか、情報を共有化した方が色々な人達に市場機会を提供しますし、平準化に効くと思います。そうした情報共有ができれば、揚水や蓄電池が使えると思います。

蓮池 ダックカーブ対策に電力貯蔵が使えるようになる可能性がありますか。

諸住 ダックカーブの対応では、カリフォルニアの1.3MWの蓄電池調達は、エネルギーシフトではなく、基本的にはダックカーブの立ち上がり時の調整力を確保するためのものです。電力貯蔵の入札は単純な価格入札ではなく、コスト効果性入札です。需給解析や系統解析を全部やって、電池が系統にどう貢献ができるかを提案書に書かなければいけません。今、日本の電池メーカーは、それができなくて困っているという状態です。



小笠原 潤一 氏

(一財) 日本エネルギー経済研究所
戦略・産業ユニット 電力・ガス事業グループ 兼
省エネルギーグループ グループリーダー

杉田 ハワイでもダックカーブの問題は大きくなっています。ハワイ電力は、夕方の急速な立ち上がりを回避するために、DRプログラムを導入し始めています。エアコンを切るわけにはいかないので、生活にあまり支障のない電気温水器の温度を下げるとか、EVからの放電機能を使うとかいった内容です。

蓮池 EVが車庫に戻って充電を始める時間と重なりませんか。

杉田 夕方、職場から帰ってくるとSOCは少なくなっていると思うかも知れませんが、実証でデータをとってみると、6割以上電力が残っているのです。帰って来てからも6kVAで出力の場合、約1時間は放電できる状態で、実際に放電してDRに貢献しています。

諸住 アメリカの場合、需要のピークが日没前後に来るので、夕方、太陽光の発電量が落ちた後に負荷を落すことは辻褃が合います。しかし、日本の場合は、需要のピークも太陽光のピークも昼間に来るので、太陽光に余剰がでる時には、需要ピークに更に上積みして使えということになり、かなり難しいので、電力貯蔵を仕込まざるを得ないと思います。

また、太陽光に余剰が出るのは、自宅には車がない時間になります。群馬県太田市での実証試験で550軒に太陽光を入れましたが、その時、昼間、家に車が存在している確率は25%でした。家庭の太陽光が発電している時に家には車がないので、単なるV2Hでは太陽光の余剰吸収にはなりません。職場まで託送して職場でEVを充電するということが必要になります。

アンシラリーサービス

池谷 アンシラリーとしては、ガスタービンがとても良いですが、ここに地球温暖化ガスのCO₂の排出規制を入れると、蓄電池も入ります。制約がなければ、アンシラリーは全部ガスタービンになってしまいます。ガスタービンは早くて価格も安いからです。また、アンシラリーは継続的に対応しないとイケない場合がありますので、そのバックアップをどうするかという問題があります。今、電力会社の変電所などに設置された4つの電池は、ほとんどがガスタービン、あるいは火力が動くまでの一時凌ぎに使うことも、単独での周波数安定化に加えて試みられています。

蓮池 需給逼迫時の数時間を蓄電池で対応するというのは、なかなか難しいと思いますが、LFC用では数秒から数分で充電と放電が行われるので、それほど容量は必要ないのではないかと思います。そうした用途に蓄電池を使うというのは、日本ではどうなのでしょう？

諸住 我々もアンシラリー用の蓄電池の提案をいくつか受けています。ガバナフリーだと、電池のSOCを50%に戻す制御がやりやすいと思いますが、周波数調整(LFC)の場合はSOCの上限と下限にすぐ引っかかります。SOCを戻すのを他の電源にやってもらわない

といけません、電池と火力を組み合わせは技術的に結構難しいのではないかと思います。ドイツでも、電池単独でのセカンダリーのアンシラリー供給はダメとされています。

アメリカのPJMが蓄電で実験的にやっているのは、ある局面で、火力がLFC能力を提供できない問題が出てくるからなのです。もしも、火力がLFC能力を十分供給できる状態だと電池での出番はなかなか回ってこないという感じがします。

小笠原 現状の火力を前提にしたようなLFCのシグナルですと、数時間にわたって一方方向の指示が来ることがあり、蓄電池は対応できませんが、シグナルを別に分けた場合、偏差が上下に来るのに応じて指示を出すパターンになり、それには電池は有効だと言われています。それに加えて、応答の正確性によって支払い単価を変えて、性能の良い電池は対応できるということで、アメリカでは実験しているところです。

それを日本でもできるようにする、ということ、しばらく時間をかけて検討するのだろうと思います。日本は、そこまでの細分化の随分手前のところにあります。まだ、ガバナフリー、LFC、EDC(経済負荷配分制御)をまとめた募集になっています。

諸住 ただ、再エネが増えるとLFC能力も増やさないといけないというのは、多分、誤解です。風力も太陽光も20分より短い周期の変動は、互いに連動性がないということが分かっています。10年くらい前にデンマークの系統を見に行ったのですが、風力が増えたからといって周波数のブレが悪化したという証拠は全くありませんでした。

小笠原 周波数の乱れについては、同時同量義務のために、15分、30分、1時間毎にインバランスを決済することに伴う周波数変動は強烈に起きていますが、再エネに伴う常時の周波数変動はそれほど増えていません。

諸住 電力貯蔵のニーズは、再エネが増えることによって増えてきています。しかし、当面の問題として、電池の寿命自体が社会的に信頼されてないために、電池のプロジェクトに融資してくれないという問題があって、大きな電池の展開ができない状態にあります。それと、小さな電池が扱いやすいということもあって、当面、家庭用太陽光に併設するような買切りモデルからスタートするだろうなと思っています。

蓮池 信用されないというのは、ファイナンスがつかないということですか？

諸住 つきません。理由は電池の寿命が実証されていないからです。電池メーカーは「10年もちます」と言うのですが、「本当に10年もった実績があるのか？」と訊かれます。また、お金を出す方もよく勉強していて、電池は置いている環境によっては突然寿命が尽きることがあるということを知っているのです。だから、実際に動いて実績を積んで行かないと電池プロジェクトにはファイナンスが付かないということがあります。

池谷 それは僕の永遠のテーマでもあります。電池の寿命はだいぶ延びて来ましたが、寿命の話をするときには少し注意が必要です。電力業界は電力システムの寿命を30～40年と見ています。ただしその間、放ってある訳ではありません。例えば、火力発電所も原子力発電所も定期点検があります。その度に老朽化した部品を新品と入れ替えますから、30年後には10年前のものはありません。そうしたメンテナンスの仕組みを作ってこなかったのが電池業界の失敗だったと思います。

電力システムは「1個止まっても大丈夫」という運用をしています。それは、1個は必ずメンテナンスするというので、そうしたビジネスを実現できれば、電力貯蔵システムも長期に使えると思います。



諸住 哲 氏

(国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)
スマートコミュニティ部 総括研究員

定置用のマーケット

小笠原 マーケットとして見た場合、ヨーロッパ、アメリカ、日本、周辺アジアのマーケットがあって、皆さんはどのようなスコープで考えているのでしょうか。

アメリカは卸電力市場において5分単位でエネルギー取引することを許容するようになり、エネルギー取引とアンシラリーの時間区分を揃えながら最適運用をしています。ですから、アンシラリーだけではなく、エネルギー取引にも蓄電池が参入しやすくなっています。ヨーロッパは逆に、系統の方がぐちゃぐちゃになってしまったので、むしろ再エネは自家発として使って行くことに決め、その時に蓄電池を付けて最適化する方向に政策的に誘導しようとしています。このように、全然、動きが違ってきます。

日本は、今後アメリカのような制度を作って系統で使いやすいようにするのか、ヨーロッパのように自家消費にもっていくのか。その時にEVを系統用に使うのか、自家用に使うのかによって、海外展開のマーケットの繋がり方が変わると思います。

蓮池 電力貯蔵の使い方はどのようになるのでしょうか？

小笠原 ヨーロッパの方向ですと、自家消費用として再エネ電力を貯蔵して使うとか、ターゲットが見えやすいです。アメリカの方向ですと、余剰をどう制御するのか、他電源とどう連携するのか、というところがとても大事になると思います。制御の仕方がかなり変わると思います。

一方、系統側に蓄電池を付けるという話というのは、料金の審査側に構造的な問題があります。スマートグリッド開発とか技術開発側面で蓄電池を付けた方が良いという場合があったとしても、見かけ上、電気料金の上昇要因なので、料金審査上は辛くなります。そのため、なかなか電力会社側に先進的な技術を導入するインセンティブが起きないという問題があります。スマートグリッド実証とか再エネ対策で設備投資をする場合には、自動的に原価に乘せられる規制が普通なのですが、日本ではそれが認められていません。

蓮池 日本では、系統運用者が蓄電池のコストを転嫁できないので、系統用はほとんど期待できないということでしょうか？

伊庭 コスト回収の理由が見つからない、すなわち、蓄電池を買うことで得られる利便性やメリットの受益者がだれだかはっきりしない。みんな蓄電池は必要だとは思っているけど、コスト負担はしたくない。託送コストが上が

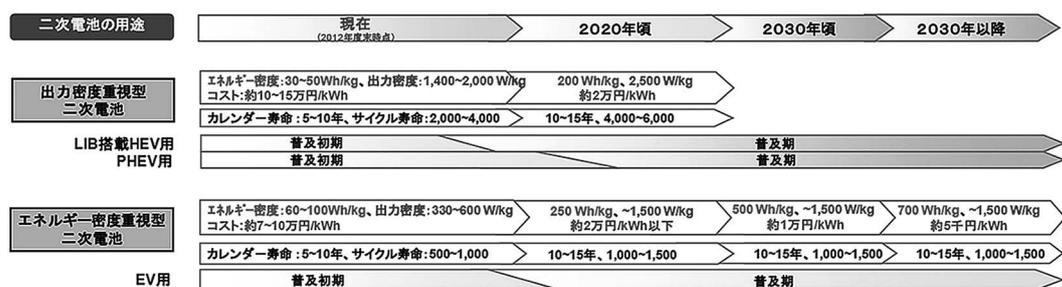
るからいけない、という話になると手を出せないということですかね。

池谷 蓄電池の導入拡大を図る時に、何が本当にモチベーションになるのか、よく分からない。今度の温暖化防止の合意がまとまれば、それがモチベーションになるかも知れません。産業政策としてやる場合も、それが日本の産業を興すのか、海外で興すのかは良く分からない。国に返ってくるメリットを明確にして、CO₂でもエネルギー多様化でも、そこにつながるような政策を打ち出さないと、最後には「無駄な税金を使いましたね」となりかねません。そうならないためには、何をモチベーションにするかが重要で、その時に量産効果が出るような政策が良いのかなと思います。

蓄電池のコスト

蓮池 電力貯蔵設備のコストは徐々に安くなってきていると思います。具体的にどのくらいのkWh単価になっているのか。利用側から求められる単価はどのくらいか。その目標への到達の見込みといった話をしていきたいと思います。

蓄電池のコストについて、『NEDO 二次電池技術開発ロードマップ2013』（平成25年8月）に、自動車用と定置用に分けて、現状と目標値が示されています。図3、図4がそれです。



(出所:『NEDO 二次電池技術開発ロードマップ2013』)

図3 自動車用二次電池ロードマップ

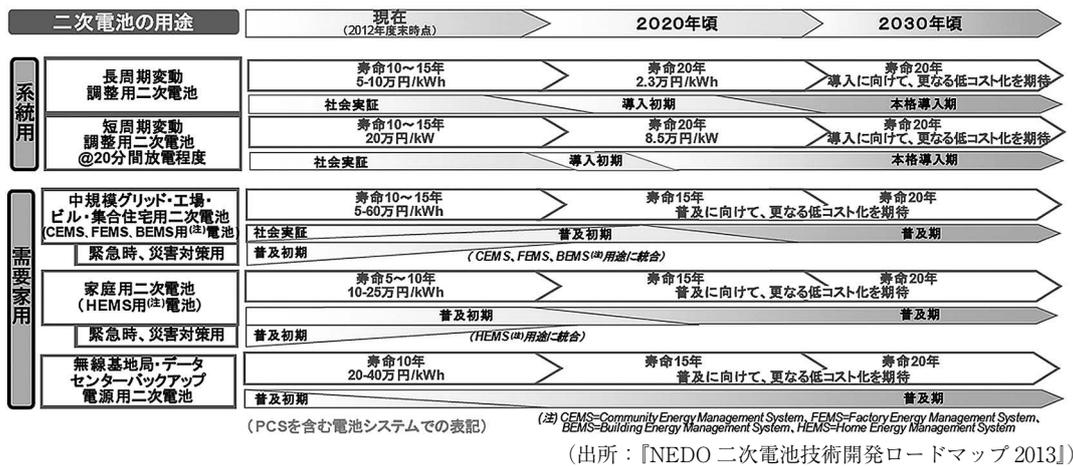


図4 定置用二次電池ロードマップ

諸住 このロードマップは2年くらい前に作ったものです。その後、少し情勢も変わってきていますが、EV用も定置用も2020年で約2万円/kWhが目標になっています。そうでないと、風力の出力抑制を吸収して採算がとれないからです。また、EV用も2万円/kWhならガソリン車と競争できるところまでEVの値段が下がるということで、これが目安になっています。

韓国製の定置用やテスラ社製の家庭用で単価が5万円/kWhと発表されており、これがリチウムイオン電池のスタート台みたいな位置づけになっています。早ければ今年か来年に175ドル/kWhという数字が出るのでないかという話も聞きます。

性能(エネルギー密度)については、EVの1回当たりの平均走行距離というのは市内では40km程度なので、性能を上げたところで、どれくらいユーザーが増えるか疑問です。充電インフラの整備の方が電池性能向上よりも効果的ではないかという話があるくらいです。今は、性能を上げるよりもコスト低減に重点を置いた方が良いだろうというのが、皆が感じているところです。

長期変動調整用では、2020年に寿命20年、2.3万円/kWhのところを目指しています。2.3万円/kWhというのは、NAS電池が経済産業省にコミットしている値段ですが、レドッ

クスフロー電池陣営もリチウム電池陣営もそれくらいのところを目指して行かないといけないのだろうと思っているところです。

ただ、リチウム電池は、生産ロットが多いところほど電池の単価が安くなるという傾向があります。日本のリチウム電池メーカーは数が多く、1社当たりの生産数が少なく、それが原因で韓国勢や中国勢に対して競争力がないというのが今の問題です。最近、いくつかのメーカーが電池事業を売却するようなことが起こっています。これから先は「淘汰の時期」に入るだろうというのが専らの見解になっています。

私が講演で良く使う言葉が「電池も太陽光も蠱毒(こどく)みたいだ」なんです。蠱毒というのは、占いで毒虫を1つ壺の中に入れて、生き残ったのが最強の毒虫になる、という話で、中国は完全にそういう産業政策です。太陽電池でも、潰れた会社の生産ラインを生き残った会社が引き取るので、どんどん大きくなります。そういう時に、日本の企業が中小の状態競争していると、みんな食われるだけで終るんじゃないかなという懸念があります。

蓮池 今、値段が2.3万円/kWhに近い電池はどれですか？

諸住 鉛電池などは3~5万円/kWhです。

杉田 電池は設備産業です。材料からセルを造り、最後はエイジングしたりして、非常に長い製造プロセスを持っていますので、コストを下げるには大量に造ることが必要です。そうなると、自動車用で量を確保するのが先行しないと価格が下がっていかないと思います。ですから、PHV用でもEV用でも良いのですが、まずそこで量産効果を得て、それが産業用電池や定置用電池に反映される。ロードマップではリンクしていますが、段階的に波及していくのだと思っています。

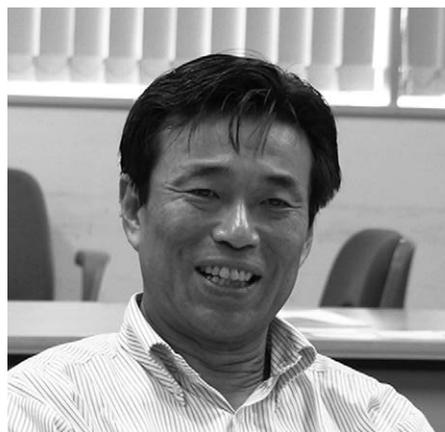
蓮池 家庭用もある程度日本で売れたのですが、1台が数kWhです。EVの3分の1くらい。やはり、蓄電池の量産に一番効くのはEVかなという感じがします。

杉田 電池メーカーから見ると、定常的に月に何千台か蓄電池が出ないと、コストダウンにはならないですね。自動車メーカー向けに定常的に月何千台かあって、その周りに産業用があると言う構造であれば、値段が下がってくると思います。

池谷 量産効果というのは大きいと思います。18650型リチウムイオン電池が安くなったのもそのお蔭です。東芝が南相馬変電所に入れた蓄電池も、三菱i-MiEVに搭載している蓄電池も同じ電池系と聞きます。同じ材料を使って多用途化していくことが必要でしょう。

蓮池 色々な調査会社が累積生産量を横軸にとってグラフにすると、対数関数的にコストが下がってくるという評価をしています。これからも量産効果で下がっていくということでしょうか。

伊庭 EVメーカーとしては、自分が電池を作らなくても、電池メーカーに造らせて安い製品が出てくれば、それを買えば良いという発想があるようです。しかし、電池を造る側



池谷 知彦氏

(一財) 電力中央研究所
次世代電力供給マネジメント
特別研究チーム 研究戦略・推進担当

から見れば、市場が醸成されなければ投資リスクが大きくなります。日本の電力会社は、自分の変電所に自分のお金では蓄電池を置くことはないと言っています。そうなると、電池の市場が見えて来ません。しかしそれは、「要らない」と言っている訳ではなくて、今の発送分離の発想で考えた時に、電池のコストを負担する部門がなくてストーリーが描けないから「やらない」と言っているだけです。

技術的に蓄電池があれば、彼らも有効利用を考えるとと思います。そこで、今、電池産業が苦しんでいるのではないかと思います。

電池システムのエンジニアリング

諸住 電池産業を見ていますと、今まで鉛蓄電池は自動車メーカーに納入してきたので、ほとんどBtoB（法人向け事業）のビジネスしかやっていなくて、BtoC（個人向け事業）の経験がありません。そこも電池メーカーが電力会社に売りたいという指向を強める背景だという感じがしています。電力会社としては、変電所に電池を置くコストが回収できないという理由もあるのですが、池谷さんがおっしゃ

るように、物理的に置く場所がないというのが致命傷です。都市部ではほとんどの変電所が地下にあってコンパクトにできているので、そこに電池と変換器を押し込む場所はないと思います。

蓮池 今のお話は、電池メーカーはBtoCでもっと売れるんじゃないか、ということですか？

諸住 家庭用蓄電池は、そちらに近いビジネスモデルです。電池メーカーは、電池を納入するという経験はありますが、電池を使ってシステムを作るという経験はありません。実証事業で、日本の電池メーカーは電池を置くだけで、コントロールしているのは外国側だし、インバータも外国製だったら、「これは何のための実証なのか」と疑問に思うケースがあります。

蓮池 電池本体でなくて、電池システムを構築するようなエンジニアリング会社というのではないのですか？

諸住 現段階ではないですね。インバータメーカーと1対1でつながっている訳ではないし。自動車の場合には、自動車メーカーという相手がありますが、電力系では1対1対応になっていません。性能あつての電池なのでインバータが重要なのですが、そちらの方は自社の中にノウハウを持っていなかったりします。

蓮池 アメリカですとAES、ドイツにはユニコスという電池プラントのエンジニアリング会社があります。

伊庭 今、日本の電気学会でも「電力システムにおける蓄電池利用・制御技術調査専門委員会」を設置しています。おっしゃられたように、電池の使い方のエンジニアリングの話がよく出てきます。電力会社は電力について詳しい

のですが、電池については今まで使いこなしてはいません。電力系統の中で電池をどう使ったら良いのか分からない。メーカー側としては、どう使われるかが分からないのでエンジニアリングとして高いレベルで技術を提供できない。そこのやりとりをちゃんとして、「こういうものが必要」「じゃあ、こういうふうで作って行きましょう」と、メーカー側と使い手側とで情報交換して、どう使ったら良いか勉強しないとイケません。そこにまだ大きなギャップがあるという感じがします。

杉田 そこは電池の寿命にも非常に関係してくるところです。使い方によっては、コストがもっと安くなることもあると思います。

蓮池 日本の総合電機メーカーも、関係部署を集めれば、そういう役割が果たせるのではないのでしょうか？

伊庭 日本のメーカーの中も昔ほど連携を取りあっていなくて、部門毎の独立採算制になっていますし、以外と冷淡だったりすることがあつたりします。

杉田 蓄電池のセル単体での商売というのは、どこも儲かっていません。セル単体で自動車メーカーに収めるところでは、韓国勢に大きく水をあけられています。

諸住 唯一システム売りに近い形になって来ていると思われるのが、一部のハウスメーカーがやっているHEMS+電池のシステムでしょうか。あるハウスメーカーも国内で2万軒くらいに家庭用電池パッケージが入っていると書いていました。

蓮池 家庭の安い深夜電力で充電し、また非常用電源としても使えるということかと思いますが、この用途の見通しはどうでしょうか？

池谷 新築住宅に付けているのだと思いますが、どれだけ使われているか疑問です。

小笠原 東京都の補助金事業の実績では、太陽光を付けている家の30軒に1軒くらいは追加で蓄電池を付けています。非常用に使います、という申請です。また、自治体の方は、「PVの電力を系統に入れないのであれば自家消費を」ということを政策的に考えていて、彼らはそこのところで非常に熱心です。

池谷 年に1回あるかどうかの停電に対処するだけですよね。医療機器などのために本当に非常用電源が必要であれば分かりますが、他に経済的メリットがないので一般家庭には新規に入り難い。ただし、まもなく、FIT制度による太陽光発電の買い取りが終了します。蓄電池の活用があるかも知れません。

蓮池 家庭用蓄電池に対しては、過去2、3年、かなりの補助金が投入されてきました。それでもまだkWh当たり10万円以上します。

伊庭 確かに、エネルギーを生み出す機器ではないので、今の価格ではよほど工夫をしないと採算がとれないことは明らかです。

安全性

伊庭 あとは日本の電池の優位性を高めて行く時の切り札は安全性だと思います。国内の電池メーカーは、かなり安全性に関して気を使っていて、諸外国に比べてレベルが随分高いですね。走っている車が後ろから火を噴いたとか、家の横にある電池が火災を起こしたとかいうことは普及の過程で出てくる可能性があると思います。そういう点で、日本の技術をうんと高めておいて、色々な実証試験を日本国内で繰り返して、課題は実証の中で出



杉田 博昭氏

(株)日立製作所 IoT推進本部
グローバルプロジェクト推進本部 担当本部長

尽させて、普及段階では極めて性能の良い、安全性の高い電池を供給する。それを国策としてもサポートして、日本の電池産業の優位性をキープするというのが1つの方向だと思います。

諸住 安全性って実績なんです。「安全だ」とか「20年もちます」とか言うだけでは信用されません。実証しなければいけません。安全性というのは、ある程度、量をこなしてからでないと評価できません。

杉田 製造過程で色々な電池が出てきますからね。沢山作ってチャンピオン電池だけ集めれば、安全性は高くなるのですけれど、何万本か作った時に、そっくり安全性を担保できるかというところかなり難しいです。製造技術として。

池谷 先ほど伊庭先生がNAS電池の話がされましたが、NAS電池だって火災事故を起しましたが、その後に設計を変えました。隔壁板を置いて延焼しないようにするといった安全策を取ったと聞きます。

伊庭 IoTを使って、ユニットに対して安全監視をするという技術、突然温度が上がったとか、電流値がおかしいというのを検知する

技術というのは、電池単体の技術とは別に安全管理をする意味で必要になると思います。

池谷 日産リーフも自分でセル1個1個の温度と電圧を見ているからね。

蓄電池以外の貯蔵技術

蓮池 最後の論点ですが、蓄電池以外の貯蔵技術についてコメントをお願いいたします。

揚水は別格として、エネルギーを貯められるものとして残っているのは、CAES（圧縮空気エネルギー貯蔵）と水素。それから量は貯められませんが非常に急峻な状況で貯蔵することができるキャパシタ辺りが効率が良いのではないかと思います。

CAESについては、実は今、私どもの研究所が伊豆で実証機を作っています。従来のCAESというのは、ガスタービンと組み合わせるものですが、燃料は使わずに圧縮と膨張だけで充放電させるので、燃料インフラの制約がなくなります。そこで、図5のように圧縮の時に出る熱を大気に逃がさずに貯蔵して再利用します。効率は65%と蓄電池に比べると見劣りしますが、長寿命であることが特長です。コスト的にはある程度の規模以上で蓄電池と競争できる見込みです。

伊庭 設置場所は炭坑跡みたいな所ですか？

蓮池 空気の貯槽については、この実証機は地上置きの鋼鉄製タンクです。地下にうまく作れると安くなる可能性があります。アメリカやドイツでは、天然の岩塩坑がありますが、日本にはありません。

伊庭 岩塩坑だと空気は抜けやすいですね。日本の石炭を掘った後は使えませんか。

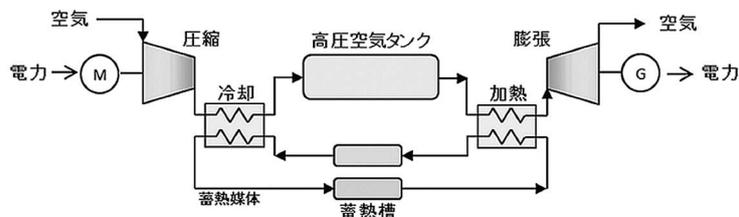
池谷 北海道砂川で、国プロで実施しているのを見学しましたが、ゴム材を貼って、すごくコストもかかったんですけど、それでも漏れたようです。

諸住 岩塩坑があるドイツでもまだ普及していません。再エネの貯蔵として有望と言われながら10年経っても建つ気配がありません。

蓮池 地下空洞を作る技術も1つの課題で、天然ガスの地下貯蔵も共通の技術なので、技術開発が進むことを期待します。

諸住 次に水素ですが、電力に戻すのに水素を造るというのは、あまり得策ではありません。ドイツがやっているパイプラインに水素を混ぜるのも回収効率が30%ですね。

蓮池 電気に戻す場合、電解と発電が別々の装置になると、そこでのコストもかさんで厳しいと思います。水素を造ったら、電気に戻さずに、車に使えるなら車で使う方が良くと思います。電解だけの場合には、貯蔵と言う



- ◆ 空気を短時間(～1/500秒)で圧縮すると断熱圧縮となり、圧縮機出口では高温になる。
- ◆ この熱を回収してコンパクトな蓄熱器に蓄えておき、高压空気を膨張させる前に加熱する。
- ◆ ガスタービンとの組合せのような燃料インフラが不要で、立地制約が少ない。

図5 Adiabatic (断熱) CAES

よりも需要設備の1つようになりますが。

諸住 一般の人に「水素は二次エネルギーである」という認識があまりないのも、問題なような気がします。

池谷 水素は三次エネルギーです。水素への転換は、系統に流せない電力を使うのであれば問題はないと思います。揚水にも電池にも貯められなくて、その次に水素。そして、水素は運んではダメです。造ったその場で使わないといけません。例えば、風力発電などの余剰電力で作った水素は、運ばずにその場で使う（燃料電池自動車に充填する）。

また、水素貯蔵よりも炭化水素が良いと思います。火力発電で混焼というのは、石炭にダイヤモンドを入れて燃やすようなものですから、あれほどバカな話はありません。高純度の水素なので、化学合成用にすれば良い。水素貯蔵は難しい。だったらもう少し進めて、炭化水素を作るのは如何でしょうか？ドイツも多分、余った水素で他に入れるところがないので、ガスパイプラインに入れているんじゃないでしょうか。メタンなどに変換すれば貯蔵の心配は要らなくなります。ガスパイプラインに入れることもできます。

もう1つは、水電解による水素製造も安定的な電気がないと動かないです。変動する電気では動きません。蓄電池が不可欠になります。

伊庭 蓄エネルギーという観点で言えば、熱に関してはもう少し活用できると思いますね。ヒートポンプを含めてとか。風力、太陽光が作ったあまり品質が良くない電気を熱にしてしまう、というのも悪いアイデアではないと思います。インバータも要りませんし、あやしい周波数の電気をそのまま流してお湯でも沸かすという手もあります。そういう品質の悪い電気の使い方についての議論が足りないような気がします。

蓮池 ヨーロッパのように、スポット価格がゼロとかマイナスになるような状況だと、確かに熱に変えるだけでも良いでしょう。日本では、まだそのような状況は見えてこないかなと思います。

小笠原 いいえ。連系線の制約もあるので、九州や東北は早めにスポットがゼロになると予想しています。

諸住 イギリスのマンチェスターでヒートポンプの実証をやっていますが、600台入れたら配電線が満杯になって配電線を増強しなければいけないという状況になってしまいました。単純にヒートポンプを置けば良いという話ではありません。また、熱には熱の品質というものがあって、使える熱と使えない熱があります。使えない熱をいくら作っても何の役にも立ちません。

池谷 ヒートポンプで給水温度を若干上げてから、ガス給湯器に入れた方が良いです。そうすると効率が上がります。そういった多段階で行くという考え方もあると思います。捨てるゴミなら集めても良いじゃないかという考え方もある。本当に系統のために使う電気なのか、余ってしまっただろうしどうしようもない電気なのか色分けがあるのかなと思っています。色分けして要らない方の電気に対しては、何をやっても良い。

オランダではマイナス価格が出てきているので、「マイナス価格でEVの充電に要りませんか？」というアプリが作り出されたようです。充電するとお金がもらえるというEVの利用にとっては美味しい提案もあるようです。オランダでは、国策もあって、EV/PHVが大量に導入されています。

蓮池 他の貯蔵技術、キャパシタやフライホイールについて何かありませんか？

池谷 電車の回生電力の吸収にはキャパシタやフライホイールが良いですね。電車は効率が良いので、大きな回生電力が発生します。より瞬発力のあるフライホイールやキャパシタなどに貯めて、使っているようです。

まとめ

蓮池 終りの時間が迫って来ました。皆さんから一言ずつ頂いて締めたいと思います。

池谷 今日は楽しい話を色々ありがとうございました。電力貯蔵というのは、系統から見ると、やはりまだ小さいです。大電力を支えてきているという観点からすると。その時に、先ほど申し上げたようにインバータ電源がだんだん入ってくると、この系統をどうやって安定させていけるのかが結構悩みで、これに蓄電池が入って来ても同じです。どれくらいどの容量 (kW・kWh) が導入されてくるのか想定できていません。

もう1つは、系統容量が足りない。配電系統容量が足りなくなるのではないかと懸念があります。電気料金収入が減り、インフラ投資が進まなくなる懸念があります。米国やオーストラリアのように自家発電で逃げて行く人が出てきて、その結果どんどん細くなって行って、今までのような信頼性の高い電力インフラを作れなくなって来て、「すみません」ということが頻繁に起きるようになるのではと懸念されます。そうすると、またまた電池技術開発が必要という状況になるなど、将来に向けて、系統のあり方、展開が読めないという状況です。

究極の課題として、安定した電気が本当に要るのか、というのもあります。

小笠原 蓄電池は、アンシラリー系を中心に海外で事業展開が始まっています。エネルギー利用というのが世界的に難しくなっていて



蓮池 宏氏

(一財) エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長

る中で、これまで日本では、電力貯蔵は、昼夜の負荷平準化用に考えられてきました。今後、再エネ導入拡大を踏まえて、更なる最適利用が期待されています。蓄電池もそれに貢献できる、と言うのが一般的な方々のイメージですけれども、制度設計が逆の方向に走っているというところもあります。そういうところの改善については誰にもアイデアがないというのが現状だと思います。何とかそこを突破できるようにして行きたいというのが個人的な今後の課題です。その際、1日をどう見通すかとか、計画をどう見通すかとか、そういうところを、うまく情報通信技術を使いながらやって行くことになると思います。日本では需給制約で再エネが問題になっていて、系統制約ではないので、そこが他のマーケットとの違いではないかと思っています。その辺を整理しながら、蓄電池の使い勝手が良いような制度を作れないかなと思っています。

伊庭 今日は蓄電池の話を中心にしてきたのですけれども、系統技術者から考えた時に、日本の電力系統の中での蓄電池の使い方が良く分かっていないところがあります。

蓄電池メーカーと電力会社が協力しあって、利用の仕方を良く考えて、どのように電力系統に使えるのか。再エネの普及拡大にも良い

し、系統安定化にも良い、という使う技術を考えて欲しいと思います。

その中で、制度設計にフィードバックできるような重要な技術を出していき、コストの問題も反映して、「技術的にこういうことであるから、こういう形で使って行きましょう」ということで、正しい制度設計にフィードバックできるように、ユーザーの方も努力して行かないといけないと思いますし、視野を広げて行く必要があると思います。

再エネは元々品質が良くないものですがけれども、品質の悪い電気の使い方や扱い方も別途あるので、それを最高級品質に上げて使おうという必要はないはずで。電源の品質が悪いことに対して「悪いから使えない」というのではなく、それなりの使い方をして行こうという議論があって良いのかなと思います。

諸住 電池の利用方法の話をする時に、話している人同士で話が噛み合っていないという感じがします。欧米などではスマートグリッドの検討においては、Use Case というのを作って登録して、それを共通のたたき台として、ビジネス的に評価したり、技術的に何が足りないかといった議論をしたりしています。これを日本ではできていないのが、話がなかなか先に進まない、堂々巡りする大きな原因かなと思っています。そういう対応も NEDO としてやっていくべきかな、という感じを持っています。

杉田 日本の蓄電池産業は、ずっとトップポジションを走ってきて、今でもそうだと信じていますけれども、やはり、レドックスフローがあったり、NAS 電池があったり、非常に競争上優位だと思います。そしてコストだけではなくて、使い方も含めた日本の優位性を創り出し、また自動車産業が幸いに日本のトップ産業ですから、そこの組み合わせによる競争力の強化といったことで、発展する余地があると思います。あまりガチンコでコスト、

コストで戦うのではなく、日本の特徴を生かした戦い方ですね。まだまだ電池そのものも進化すると思います。鉛電池にしても少しずつ進化していますし、リチウムも色々な材料の組み合わせが益々進化すると思います。蓄電池産業には将来性があると思っています。

蓮池 電力貯蔵は「このように使える」という話が色々語られますが、本当に使おうとすると難しい、ということがあります。その難しさの1つは、制度にかなり影響されることです。制度を見据えながら、どういうところで成り立つのかを見ていないといけないと思います。先ほどの Use Case も、制度が変わると成立性が影響されますので、常にブラッシュアップしていかないとけないと思います。電力貯蔵というのは難しけれども、途中で出てきた2万円/kWh できちんとした寿命の貯蔵デバイスが本当に出て来れば、使い道が大きく広がるのではないかなと思います。

今日は大変貴重なお話を伺いまして、誠にありがとうございました。

[寄稿]

セルロースナノファイバーの展望 ～基礎・応用・課題～

遠藤 貴士 ((国研) 産業技術総合研究所 中国センター
機能化学研究部門 セルロース材料グループ グループ長)



1. はじめに

近年、木質等の植物系バイオマスから得られるセルロースナノファイバー (CNF) が大いに関心を集めている。図1に我々の研究グループで製造したCNFの高分解能走査型電子顕微鏡写真を示す。CNFを紹介するフレーズとして「鋼鉄の5倍の強度がありながら、5分の1の軽さ」という特徴がよく言われている。サイズが同じであれば鋼鉄の5倍の引っ張り強度 (3～8GPa) で、比重は5分の1 (1.5g/cm³) である。弾性率は150GPa程度ある。このような、軽量、高強度、高弾性の特長を生かし、樹脂等に複合化することによる高性能材料の開発が活発に進められている。また、繊維幅が可視光の波長より微細であることから、透明材料への応用も進められている。さらに、石英ガラス並みの低熱膨張 (温度変化

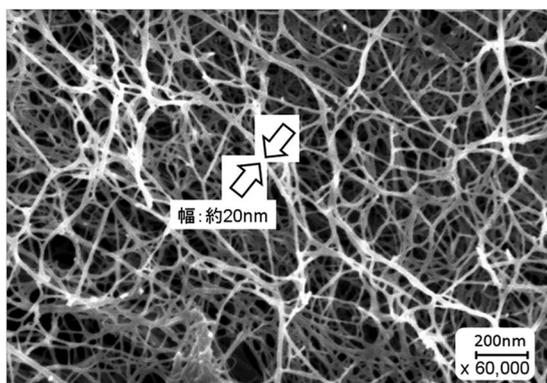


図1 セルロースナノファイバーの高分解能走査型電子顕微鏡写真

による膨張・収縮度合いが低い)、木質等の再生型資源から製造可能等、他の素材にはない特徴を持っている。CNFはその名前の通り、ナノサイズの超微細な繊維であるが、最近では、酸処理等で製造されるセルロースのナノ結晶であるセルロースナノクリスタル (CNC) も含めて、ナノセルロースとも呼ばれている。

我々の研究グループでは、木質からのバイオエタノール製造技術の開発を進める中で、木質の酵素糖化性を向上させる前処理技術として、木質組織をナノサイズの超微細繊維にほぐし、酵素との接触面積と機会を増大させる、水熱メカノケミカル処理技術を開発している^{(1), (2)}。得られた超微細繊維は、セルロースとともに他の木質主要成分であるリグニンやヘミセルロースも含有したリグノセルロースナノファイバー (LCNF) である。現在、当研究グループでは、このLCNFを用いた高性能樹脂複合材料の開発を中心に進めている⁽³⁾。

2. セルロースナノファイバーの応用分野

CNFおよびLCNFは、軽量、高強度、高弾性、低熱膨張等の高い物性を持っており、それらの特徴を活用して、様々な製品への応用が研究されている。既に実用化・製品化されたものもある。表1にCNFの特徴と応用製品例を示した。CNFはその高い機械的物性の他に、大表面積や特殊な流動特性等も特徴である。

CNFの用途として最も注目されているのは、

表1 セルロースナノファイバー（CNF）の特徴と応用製品例

特 徴	応用製品例（※：既に製品化）
軽量, 高強度, 高弾性	樹脂やゴムの補強材, 自動車や家電の部材
可視光の波長より微細	透明材料, 透明シート, ディスプレイ材料, 太陽電池
低熱膨張	電子部材, 電子基板
無味, 無臭, 無毒	増粘剤, 食品添加物, 機能的食品
チクソトロピー性	粘度調整剤, 化粧品, ボールペン※
凝集性, 緻密性	ガスバリア材, 食品包装材
大表面積	ろ過・吸着剤, 機能素材担持, 抗菌消臭紙おむつ※
ネットワーク形成	塗料やモルタルのひび割れ防止剤, 耐久性向上
高剛性・高減衰	音響材料, 高音質スピーカー※

樹脂等の補強材料である。自動車等の部材は、高い強度物性が必要なためガラス繊維やタルク等の無機物を添加して補強されている。しかし、これらは比重が大きい（ガラス繊維：約2.5g/cm³、タルク：約2.7g/cm³）ため、より軽量のCNF（1.5g/cm³）を用いて補強できれば、部材を軽量化することができる。自動車部材の軽量化は、燃費改善に繋がり、地球温暖化対策として重要である。

昨年より、大手企業を中心に100トン規模でのCNF製造プラントの建設が新聞報道等されており、コストも1,000円/kg程度で可能とされている。早期に実用化できるターゲット製品として化粧品への応用も期待されている。水に分散した状態のCNFは、繊維が微細なほど粘性が高くなり、クリームあるいはゲル状になる。しかし、力やせん断力を印加すると、急激に粘性が低下する特性を持っている（チクソトロピー性）。CNFスラリーは、見かけ上は粘性物のようなものであるが、肌につけても、ベタつき感はない。これは、一般的なCNFスラリーにおいて固形分濃度は高くても数%で、そのほとんどが水であり、糊状の物質は含んでいないためである。その他、増粘剤や分散剤として食品用途も研究されているが、CNFのナノ物質としてのリスク評価は完了しておらず、安全性が担保されていないため、研究開発や試作は進められているものの市場には出ていない。しかし、紙や衣類、食品（野菜等の食物繊維）等としてセルロースは古くから利用されており、その安全性は確

認されていることから、CNFの健康リスクは低いとされている。

3. セルロースナノファイバーとは

CNFは、木質等の植物が持っている組織構造（後述）を基本として製造されており、全ての植物（木、竹、草等）のほとんどの部位（幹、枝、葉、花弁等）から製造することができる。現在、種々の方法でのCNF製造技術が研究あるいは実用化されているが、製造プロセスは、大別すると、図2のように3種に分類することができる。

[プロセスA] 精製したパルプを原料として、湿式での化学的処理（TEMPO触媒酸化や有機酸誘導体化処理）と機械的処理を組み合わせる方法^{(4), (5)}

極めて微細な3～5nm幅のナノファイバーが得られる。繊維長は長い。

[プロセスB] パルプ（精製）を原料として、湿式での機械的粉碎・解繊処理による方法⁽⁶⁾

10～20nm幅のナノファイバーが得られる。ディスクミル（グラインダー、電動石臼）等の粉碎力を利用する場合は、ナノファイバーの繊維長は短めになる。高圧ホモジナイザーを用いた圧力変化で解繊する場合は、繊維長が長いナノファイバーが得られる。

[プロセスC] 木粉を直接的原料として、水熱

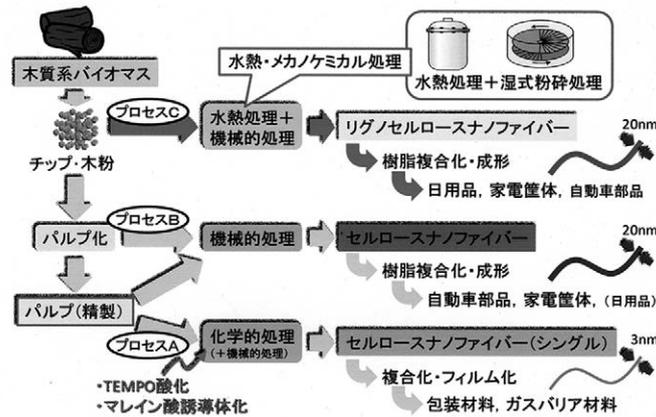


図2 セルロースナノファイバーの各種製造プロセスと特徴

処理や湿式での機械的粉碎・解繊処理を組み合わせる方法^{(1),(2),(7),(8)}

10～20nm幅のナノファイバーが得られる。繊維長は短めになる。

以上のように、製造方法によって得られるナノファイバーの幅に違いがあるが、繰り返し処理等により、プロセスBおよびCでも3～5nmのナノファイバーが得られる。しかし、ファイバーへのダメージは大きくなり、結晶性の低下などが起きる⁽⁹⁾。

前述のプロセスCの場合、その製造プロセスにおいて精製等は行っていないため、得られたCNFは、リグニンやヘミセルロースを含有している。そのためLCNFとも呼ばれる。我々の研究グループでは、プロセスCを中心に、木質等からの直接的LCNF製造技術(水熱・メカノケミカル処理技術)、樹脂等との複合化技術およびLCNFの特性評価技術を中心に研究開発を進めている。

木質組織では、後述のように、生合成されたセルロース分子の自己集合体である幅3～5nmのセルロースマイクロフィブリルが、CNFの基本である。つまり、10～20nm幅のCNFは、幅3～5nmのセルロースマイクロフィブリルが数本集合した構造である。この集合力は強く、シングルナノファイバーまでほぐすためには、化学的処理が必要となる。前述のTEMPO触

媒を用いた酸化処理では、セルロースの6位を選択的にカルボキシル化することができる。カルボキシル基をマイクロフィブリル表面に導入することで、静電的反発により、マイクロフィブリル1本まで分離させることができる⁽⁴⁾。

4. セルロースナノファイバー製造技術

木質等からのCNF製造では、木質の本質的な組織構造を利用して製造されており、また、CNFの利活用では、木質組織と木質成分の特徴把握も重要であるため、本項では、木質の基的特徴からCNFの製造原理や効率化などについて解説する。精製したパルプを原料とすればCNF、木質から直接的に製造すればLCNFが製造できるが、基本的事項は同じであるため、ここではCNFに用語を統一して解説する。

(1) 木質組織構造とセルロースナノファイバー製造メカニズム

木質の主要成分は、セルロース、ヘミセルロースおよびリグニンである。木質成分中、セルロースの割合が最も多く、約50%を占めている。セルロースおよびヘミセルロースは、分子が糖で構成されているが、リグニンは、ベンゼン環を持つ芳香族系化合物である。

植物体内で生合成されたセルロース分子は

直ちに、規則正しく自己集合してセルロースマイクロフィブリルと呼ばれる分子集合体を形成する。植物の場合、6×6本のセルロース分子から構成されると言われている。このセルロースマイクロフィブリルがヘミセルロースやリグニンを接着剤のようにしてさらに集合・積層することで細胞壁や木質組織が形成されている。このマイクロフィブリルは幅3～5nm、長さ数μmと超微細なナノ繊維であり、CNFの基となっている。木質組織は、マイクロフィブリルが水素結合や分子間力で集合・積層したナノ構造体であるため、適切な方法で木質組織をほぐせばCNFを製造することができる。

木質の主要成分中、セルロースのみが結晶構造を持っているが、このマイクロフィブリルがセルロース結晶の本体である。このマイクロフィブリルは数μmの長さがあり、その途中には、分子配列のそろった結晶部分と乱れた非晶質（アモルファス）部分が存在している。木質組織は、マイクロフィブリルが集合・積層した構造であることから、別の表現で言えば、木質組織はマイクロフィブリルと言うセルロースナノ結晶の集合体である。

木質は、建物等の構造材や建材、桶などの道具として古くから利用されている。法隆寺の金堂は現存する世界最古の木造建築と言われており、木質の強靱、高強度、高耐久性という特性は歴史的にも実証されている。そのため、木質組織をほぐしてCNFを製造するの

は簡単ではない。その特性はセルロース分子が本質的に持っている物性とともにも木質細胞壁の構造にも由来している。

図3に示すように、木質の細胞壁は、外側から細胞間層、一次壁、二次壁と続いている。二次壁ではマイクロフィブリル（CNF）が同一方向に並んで層状に積層し、その層は大きく3層（S1, S2, S3）に分かれている。この中でもS2層が最も厚くセルロース含有量も多い。二次壁の各層では、マイクロフィブリルの方向が90度近く異なっており、それらの層が積層することで木質は高強度・高靱性の特性を発揮している。二次壁の最も外側のS1層は内側のS2層の周囲をバンドのように取り囲んだ構造で、樽や桶におけるタガに相当している。ヘミセルロース等によるマイクロフィブリル（CNF）の接着と、タガに相当するような組織構造が、木質の強靱化要因である。木質から効率的にCNFを製造するためには、木質が本質的に持つ、強靱化要因を部分的にでも破壊・除去する必要がある。

(2) バイオエタノールと木質のナノ解繊

近年、地球温暖化対策やエネルギーセキュリティの観点から、カーボンニュートラルな再生可能資源であるバイオマスを原料としたバイオ燃料製造が世界的にも重要な課題となっている。現在、トウモロコシ（デンプン）やサトウキビ（搾汁液中のショ糖）を原料と

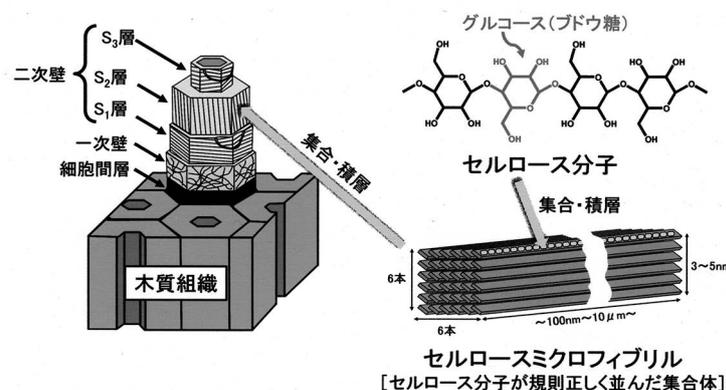


図3 木質組織の構造モデル

して、アメリカやブラジルでは大規模に自動車用燃料となるバイオエタノールが製造されている。しかし、これらの原料は可食性バイオマスであり、様々な弊害が起こっている。そのため、食料と競合しない木質や稲ワラ等の非可食性バイオマス（リグノセルロース）を原料としたバイオエタノール製造技術に関する研究開発が世界的に行われている。バイオエタノール製造技術開発は、長い歴史があるが、古くから研究されている硫酸を用いた酸糖化法に替わって現在は、収率や環境負荷の点から、酵素糖化法が主流である。

木質等のリグノセルロース原料からバイオエタノールを製造するためには、木質を構成している、セルロースやヘミセルロースをセルラーゼ等の酵素で加水分解して糖に変換（糖化）し、酵母等（必要に応じて、遺伝子組み換え菌）で発酵する必要がある。しかし、木質は極めて安定かつ強靱なため、事前に処理（前処理）を施さないと、酵素ではほとんど糖化できない。我々の研究グループでは、木質からのバイオエタノール製造技術開発において、木質の酵素糖化前処理技術として、木質のナノ解繊技術を開発している^{(1),(2)}。セルロース等の木質成分を効率的かつ効果的に酵素糖化させるためには、酵素がセルロースに接近しやすくする必要がある。木質をナノサイズにすることで、酵素との接触面積と接触の機会（アクセシビリティ）を向上させることができる。

(3) 木質の機械的粉碎処理

物質を機械的な粉碎処理で微細にしようとした場合、実験室的にはボールミルは取り扱いが容易である。木質からのバイオエタノール製造のための前処理技術としてボールミルを用いた乾式粉碎の有効性は古くから知られている⁽¹⁰⁾。

基盤試験として、木質チップを、200 μm 程度に粗粉碎した木粉を原料として、ボールミル処理試験を行った。その結果、1時間粉碎

後には平均粒径約 20 μm の微粒子が得られたが、さらに粉碎時間を延長しても到達できる平均粒径は 20 μm 程度のままであった。一般的に、粉碎処理で得られる粒子サイズは、原料、装置、処理条件に依存し、単純に粉碎時間を延長しても乾式粉碎では 1 μm の木質微粒子を得ることはほとんどできない⁽¹¹⁾。これは、粉碎時に、物質の微細化と同時に生成微粒子の再凝集が起こり、両者のバランスで最終的な到達粒径が決まるためである。条件が最適で無い場合は、長時間粉碎により、1次粒子の再凝集による造粒が起こる場合もある。図4にパルプを原料として乾式ボールミル粉碎した場合の、粉碎時間と生成粒子の粒度分布の関係を示した。粉碎初期では、時間と共に微細化が進行するが、長時間粉碎では大きな粒子が生成している。

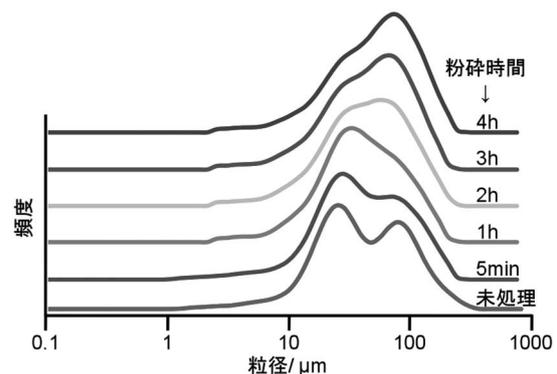


図4 ボールミル粉碎時の微細化と凝集

機械的粉碎は、比較的操作が容易なため、様々な場面で利用されている。木質やパルプの微細化方法として、ボールミル処理はよく行われている。しかし、これまでに、「木粉の粉碎を試みたが微細化が進行しない」等の質問を何度か受けたことがある。粉碎処理は、比較的簡単に考えられている場合も多いが、粉碎と化学反応は関係している。ある物質を微細化しようとした場合、その物質を構成している要素間には何らかの化学結合（共有結合や水素結合等）が存在している。微細化するためには、その化学結合を切断する化学反

応が必要となる。物質Aが物質Bに変換される化学反応では、物質Aが持つエネルギーと物質Bが持つエネルギーの差以上のエネルギーを印加する必要がある。このエネルギーは活性化エネルギーと言われている。活性化エネルギーは反応のしきい値である、エネルギーの印加量が少ない場合、反応は進行しない。この考え方は、粉碎でも同様である。図5のように、遊星型ボールミル（自転公転運動により容器内のボールに運動エネルギーを与えて物質を粉碎する装置）を例に考えると、装置の回転数が低い場合、物質はほとんど微細化しないが、しきい値を超えた回転数で運転すると、微細化が進行する。つまり、化学結合を切断できるだけのエネルギーを回転によりボールに与えることができれば、物質は微細化する。このしきい値の考え方は、粉碎では重要である。さらに、粉碎装置には、最適な、原料の特性やサイズがあり、1台の装置で、無理矢理に微細化をしようとするより、サイズに応じて複数の装置を多段階で用いる方が、処理効率が高い場合も多くある。

前述のように、木質原料を乾式ボールミル処理しても、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の微粒子はほとんど得られないが、得られた $20\ \mu\text{m}$ 程度の微粒子を詳細に解析すると⁽¹⁾、さらに微細な 5nm 程度の塊（ドメイン）から構成されていることが分かった。この結果から、木質をナノサイズにすれば、酵素糖化性を向上できるとの結論に至った。さらに、種々の解析から、セルロー

ス成分の結晶性やリグニンの有無は酵素糖化性に影響する本質的な因子ではなく、木質をナノサイズにして、酵素がアクセスできる表面積を増大させることが重要であることも明らかにした^{(1), (2)}。次項で解説する比表面積（ナノ解繊の程度）と酵素糖化性には高い相関があることも確認している⁽¹²⁾。

(4) 木質の湿式粉碎によるセルロースナノファイバー製造

前述のように、木質の乾式粉碎では、ナノサイズの生成物を得ることは困難であった。種々の方法を検討した結果、木質をナノサイズにする方法として、紙パルプ分野で行われている、叩解（こうかい）処理が有効と考えられた。紙の強度物性を向上させるためには、太いパルプ繊維をさらに微細な繊維にしたり、表面を毛羽立たせたりすることが必要となる。微細な繊維や毛羽立ちにより、繊維同士の絡まり合いや繊維間の水素結合による接触点が増大し、紙の物性が向上する。叩解プロセスでは木質等から製造したパルプ原料を水とともに、機械的にせん断力や圧力を印加して、木質組織をほぐす方法である。製紙分野では、フィブリル化とも言われている。このプロセスにおいて、水は、組織の内部に浸入して、クサビのような作用をし、組織を繊維状にほぐす。また、水はほぐされた繊維同士の再凝集も抑制している。

叩解と類似の処理は、操作が容易なボール

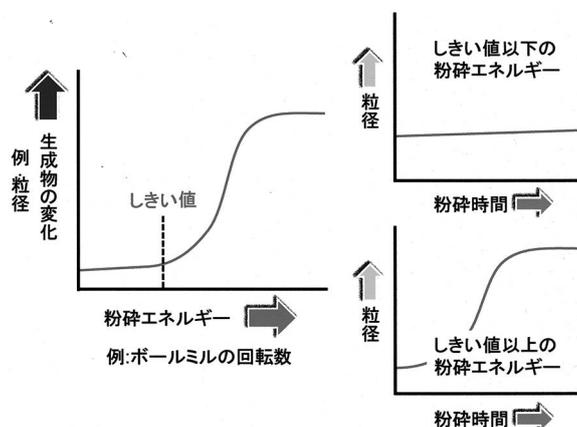


図5 機械的粉碎としきい値

ミルを用いた湿式粉碎処理により実施することができる。我々が行った試験では、粗粉碎により得た木粉(200 μ m)を、固形分濃度5wt%になるように水に浸漬し、湿式ボールミル粉碎を行った。2時間程度(試料量や装置に依存する)処理することで、木粉の形状はなくなり、クリーム状の生成物が得られた。水をアルコール置換後に凍結乾燥し、乾燥物を高分解能走査型電子顕微鏡で調べた結果、幅10~100nm程度の超微細繊維が生成していることを確認した。

CNFの生成度合いの評価方法としては、高分解電子顕微鏡等による直接的な形態観察が一般的である。しかし、試料の一部しか観察できず、また、全体を平均化して数値化することも困難である。そこで、ガス吸着法(BET法:ブルナウアー・エメット・テラー法)を用いた比表面積測定による評価を行った。比表面積測定では、乾燥試料が必要となるが、大量の水を含んだCNFをそのまま凍結乾燥した場合とアルコール置換して凍結乾燥した場合で、比表面積を比較した結果、水から直接乾燥の場合は、16m²/g、アルコール置換の場合は、174m²/gと、10倍以上の違いがあった。つまり、CNFの製造時には大量の水が必要であるが、CNFの凝集力は極めて強く、利用時にCNFの凝集を抑制して水を除くためには、様々な工夫が必要となる。

5. 木質からの効率的リグノセルロース ナノファイバー製造

前項では、ボールミルを用いた湿式粉碎処理によるCNF製造について述べたが、ボールミルは、ラボ等での基盤的試験としては実施しやすいものの、大量・連続処理は困難である。そこで種々の湿式粉碎装置について検討を行った結果、ディスク型(石臼型)粉碎機(増幸産業㈱のマスコロイダー)が効果的であった。しかしながら、ディスクミル処理ではボールミル処理ほどのせん断力や圧力が印加でき

ず、広葉樹のような硬質な木質ではナノ解繊の効率化低下した。

そこで、木質組織を脆弱化して湿式粉碎による解繊処理を効率化させるプロセスについて検討を行った。その結果、予備的粉碎処理と水熱処理を組みあせることで木質組織を脆弱化できることが分かった。これらの複合処理を水熱メカノケミカル処理と呼んでいる。予備的粉碎処理としては湿式高速カッターミル(増幸産業㈱のマイクロマイスター)が効果を示した。水熱処理とは、圧力容器などを用いて100℃以上にした加圧熱水による加水分解作用を利用する処理である。140℃程度から、ヘミセルロースの加水分解が起こり、セルロースは230℃程度から加水分解する^{(13), (14)}。この処理では、化学的な薬品を添加することなく、温度を変化させることで水のみで選択的な加水分解処理を行うことができる。

前述したように、木質の強靱化要因として、内側の組織を縛り付けている細胞壁構造とヘミセルロース等の接着作用がある。上記の、予備粉碎処理は、強固な組織構造(タガの構造等)を部分的に破壊する。水熱処理では、ヘミセルロースが部分的に加水分解され、接着剤の作用が弱まる。これらプロセスにより、木質の強靱化要因は部分的に破壊や分解され、木質組織は大きく脆弱化する。最終段階として、ディスクミル処理を行うことで、効率的かつ効果的に木質組織がほぐされてCNFが製造できる。このプロセスでは、脱リグニン等の精製操作は行っていないため、得られるCNFはリグニンやヘミセルロースを含有したLCNFである。共存しているリグニンやヘミセルロースはセルロース表面に付着している⁽¹⁵⁾。図6に水熱メカノケミカル処理のモデルを示した。

精製工程を経たパルプからは、比較的容易にCNFが製造可能であるが、これは、木質チップなどのパルプ化の工程で、強靱化要因である組織構造の破壊とヘミセルロースやリグニンの分解・除去が行われているためである。

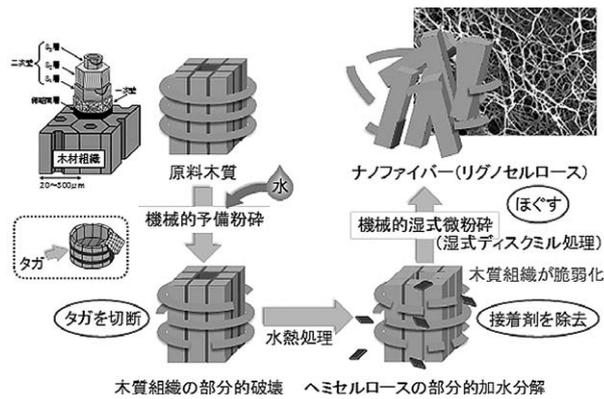


図6 水熱メカノケミカル処理によるリグノセルロースナノファイバー製造モデル

6. セルロースナノファイバー製造装置

CNFの製造では、化学処理を併用する場合でも、機械処理は必須である。前述のディスクミル（電動石臼）は、CNFの研究開発を行っている企業や大学にはほぼ導入されている。ディスクミルは、元々、豆腐製造時の大豆のすり潰しや野菜ジュース等の食品用の粉碎装置として開発されたが、セラミックディスクのすり合わせが精密であるため、CNFの製造でも有効である。他のCNF製造装置としては、高圧ホモジナイザーもよく用いられている。この装置は、セルロース原料の水分散スラリーに高圧をかけて、細いスリットから大気圧に噴出させることによる圧力変化と衝撃力で、組織をほぐしてCNFを製造する。ディスクミルはディスク間のクリアランスを調節することで、原料のサイズの自由度は比較的高いが、

高圧ホモジナイザーでは、原料サイズが大きいと、詰まり等の原因にもなる。我々の研究グループでは、均一なCNFおよびLCNFが必要な場合には、最初にディスクミル処理し、次に高圧ホモジナイザーを用いて均質化処理を行っている。図7に一般的な機械処理によるCNFおよびLCNF製造プロセスを示した。その他の装置としては、機械式ホモジナイザーや超音波ホモジナイザーも用いられているが、CNF製造よりは均質化処理としての利用が多い。図8には、我々が用いているディスクミルおよび高圧ホモジナイザーを示した。

ディスクミルおよび高圧ホモジナイザーのいずれの方法でもCNFおよびLCNFの製造では、大量の水が必要であり、得られたCNFも大量の水に分散した状態（固形分濃度は1～5 wt%程度）となる。そのため、利用時には目的に応じて水の除去が必要となる。

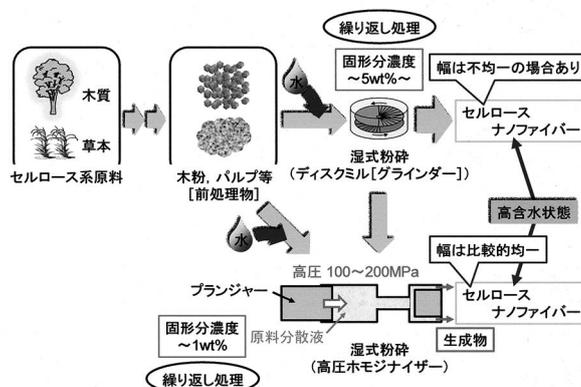


図7 一般的な機械処理によるセルロースナノファイバー製造プロセス

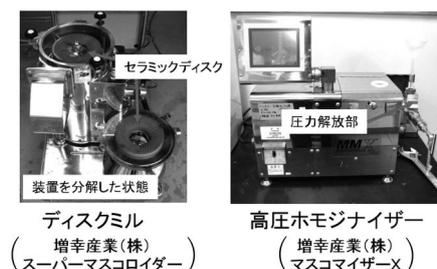


図8 セルロースナノファイバー製造装置の例

7. リグノセルロースナノファイバー複合化技術

(1) ナノセルロース複合化における課題

我々の研究グループでは、これまでに木粉やパルプ粉末と樹脂との複合材料に関する研究開発を進めてきた。このような複合材料はWPC（木材プラスチック複合材，樹脂含侵型と区別するため混練型WPCとも呼ばれる）と呼ばれており，国内市場は年間4万トンあると言われている。

前述のように，セルロースは230℃程度から加水分解するため，木粉を複合化できる樹脂の種類にはある程度の制限がある。一般的には，熔融温度が200℃程度以下のポリプロピレン等のオレフィン樹脂との複合化に関する研究開発が中心である。この点は，CNFの樹脂複合化においても同様である。

CNFおよびLCNFの樹脂複合化では，木粉系では，大きな課題ではなかった脱水・乾燥が重要となっている。CNFの製造工程では，クサビ様の働きをして木質組織をほぐすために「水」が必須である。そのため，生成物は大量の水（90wt%以上）に分散した状態で得られる。ポリプロピレン等は疎水性樹脂であり，複合化工程では水を除去・乾燥する必要がある。しかし，CNFは凝集性が極めて高く，単純な加熱乾燥等では，強度に凝集する。凝集したCNFは，再度，元のナノ繊維状態に戻すことは困難である。また，CNFの凝集塊は，それがミクロンサイズであっても，複合材料の欠陥となり，物性低下を招く。

CNFを用いた高性能複合材料開発では，CNFの凝集抑制とマトリックス樹脂中への均一分散が極めて重要である。さらに，セルロースとオレフィン等樹脂の化学的性質が異なっているため，お互いを化学的に結びつける界面活性剤や相容化剤などを用いた界面制御も重要である。

(2) 均一モデル系での複合化試験

CNFの樹脂複合化材料の開発初期（約10年前）では，10wt%以上樹脂に複合化しないと，補強効果が発現しないと言われていた。10wt%以上のCNF複合化では，複合材料中でCNF同士の接触とネットワーク構造が形成されて，複合材料の物性は向上する。しかし，CNFは高い物性を持っていることから，少ない添加量でも物性向上効果を得られると考えられた。我々は，CNFの補強効果を確認する目的で，水系均一モデル系試験を実施した。試験では，ポリビニルアルコール（PVA）水溶液に，CNFを攪拌器や超音波ホモジナイザーを用いて均一分散させた後，キャスト法によりシートを成形し，切り出したダンベル型試験片の強度を評価した。その結果，わずか1wt%CNF添加で，引張り強度は20%以上，10wt%添加では40%以上向上した。また，水系ポリウレタンヘナノセルロースを複合化した場合も，1wt%添加で引張り強度および弾性率が大きく向上し，伸び率もナノセルロース未添加の原料と同等以上であった。これらの結果から，CNFをマトリックス樹脂に均一分散させれば，少量添加でも樹脂補強効果が発現できることが確認できた。

(3) ポリプロピレンへの複合化試験

大量の水に分散している CNF をポリプロピレンに複合化させる方法として、CNF を凍結乾燥して樹脂と複合化させる基盤試験はよく実施されている。我々も、ヒノキを原料としてディスクミルにより直接的に調製した LCNF を凍結乾燥した後、ポリプロピレンと複合化を行った。その結果、凍結乾燥ナノセルロースを 30wt% 添加した複合材料では、CNF 未添加のポリプロピレン単体と比較して引っ張り強度は 37% 向上した。さらに、CNF のスラリーに 0.2wt% ステアリン酸ナトリウムを添加した後に凍結乾燥した系では、さらに 10% 以上強度物性が向上した。この結果は、前述のように、凍結乾燥でも CNF の凝集抑制は十分でないが、ステアリン酸ナトリウム添加により、凍結乾燥時の CNF 同士の凝集が抑制され、樹脂への分散性が向上したためと考えられる。しかし、0.2wt% 以上のステアリン酸塩を添加すると逆に強度物性は低下した。これは、ステアリン酸塩自身が樹脂と混合することで強度を低下させたためと考えられた。CNF の利用では、他の物質の添加などはよく行われるが、添加した物質が最終的な材料の物性を低下させることも多いため、注意が必要である。

前述のように、凍結乾燥法の利用は、基盤試験としては実施しやすいものの、基本的には高コストな方法であり、最終製品が凍結乾燥物によって特別に高性能化できる場合でなければ、実用化は難しい。

そこで、高含水 CNF の脱水・乾燥と樹脂複合化を同時進行させる、マスターバッチ法について検討を行った⁽¹⁶⁾。ポリプロピレン等の樹脂の溶融温度は 180～200℃であり、この溶融状態で高含水 CNF をそのまま複合化させようとする、急激な水の蒸発により、CNF は強度に凝集する。凝集体は、複合材料の物性低下を引き起こす。そこで、融点が 100℃以下の特殊樹脂を用いてマスターバッチを作製することとした。特殊樹脂としては、オレフィンの物性改良用樹脂（三井化学㈱のタフマー等）を用いた。比較的低温で溶融させた特殊樹脂に高含水 CNF を少量ずつ添加し、ゆっくりと水を蒸発させながら均一に混練した。最終的な CNF 濃度を 50wt% とした。このマスターバッチは、次いでポリプロピレンと溶融混練することで所定濃度まで希釈した。図 9 にヒノキ由来 LCNF を用いて作製した複合材料の強度試験結果を示す。ポリプロピレン単独と比較して、マスターバッチ法および凍結乾燥法の利用法とも、複合材料の強度物性

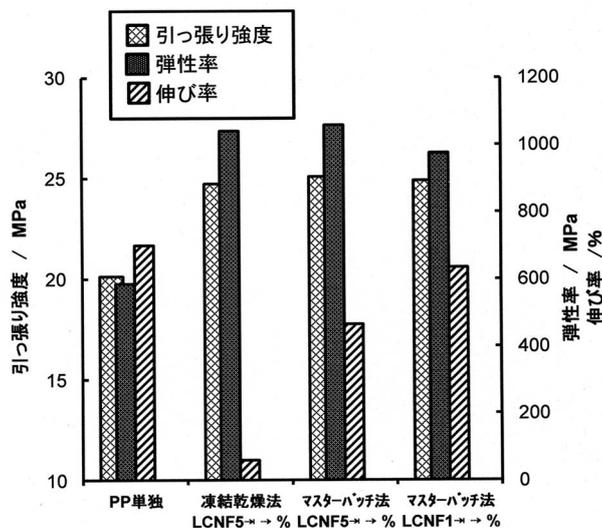


図 9 ヒノキ由来リグノセルロースナノファイバーを用いた複合材料の強度

(引っ張り強度，弾性率)は向上し，凍結乾燥よりもマスターバッチ法の方が，高い結果であった。しかし，物性値の中で伸び率は特徴的であった。ポリプロピレン単体は700%程度の伸び率を示したが，凍結乾燥ナノセルロースでは5 wt%添加で，60%程度まで大きく低下した。一方，マスターバッチ法では，5 wt%添加で400%以上の伸び率を保持していた。このことは，LCNFがマトリックス樹脂中で均一に分散していることを示している。セルロース自身は伸びる特性が極めて低い物質であるため，LCNFが凝集していたりLCNF同士が接触していたりすると伸び物性は低下する。この結果は，高純度のCNFを用いた場合も同様であった。

我々の研究グループでは，上記の方法の他，界面活性剤によるナノセルロースの表面コート法による疎水性付与および樹脂複合化⁽¹⁷⁾や目的とする樹脂に直接的に固相状態でナノセルローススラリーを複合化させる固相せん断法⁽¹⁸⁾の開発も行っている。これまでに開発してきた，マスターバッチ法や固相せん断法では，少ないCNFおよびLCNF添加で，強度を向上させ，伸び物性にも優れた複合材料を製造することができた。これらの複合材料は，他の系では困難とされている耐衝撃性も向上している。

8. おわりに

我々の試験では，リグニンやヘミセルロースを含有したLCNFの樹脂補強効果は，高純度CNFと比較して樹脂補強効果が高い結果を得ている。他の研究機関でも同様の結果が得

られていることが報告されている。その理由として，LCNFが持つ，疎水性のリグニンによる疎水性樹脂との界面接着性の向上が言われているが，LCNFはCNFと比較して凝集しにくいことも理由として考えられる。高純度CNFは，大量の水に分散した状態でも放置していると凝集することがある。

また，実用化の面から考えると，木質等からの直接的に製造できるLCNFは，製造時の精製等のプロセスが必要なく，コスト面での優位性もあると考えられる。LCNFは，様々な原料から製造することができるが，ナノサイズにすることで，原料のマクロ的な特性はキャンセルされる。そのため，従来廃棄されていた未利用資源(例えば，稲わらやもみ殻等)や残渣などからも，利用性の高いLCNFが製造可能である。

我々が参画していたプロジェクト⁽¹⁹⁾では，ヒノキ等の未利用材を原料として，直接的なLCNF製造装置の開発，LCNFの樹脂複合化・成形材料化技術開発等を進めた。このプロジェクトでは，LCNFの効果的かつ実用的な複合化技術を開発し，参加機関の連携により，既存の設備・金型を用いて，図10のようなLCNF複合化製品の千個単位での試作も達成している。

現状，CNFの大量生産が進められて，近い将来，コストは1,000円/kg程度も実現可能と言われている。これまでの樹脂添加剤としては，1,000円/kg程度のものも多くあるが，最終製品のコストから添加できる量は限界がある。CNFおよびLCNFを複合化させる相手側のオレフィン樹脂は，200～300円/kg程度であるため，最終製品の市場コストから考慮すると，添加できる量は数%までである。

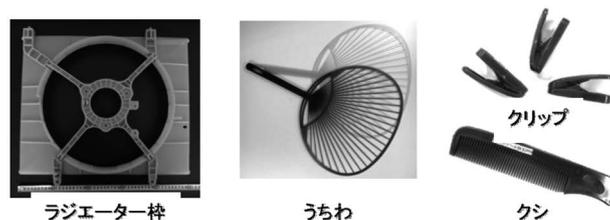


図10 ヒノキ由来リグノセルロースナノファイバーを用いた複合材料成形品試作例

従来から用いられている、汎用的なタルク等の無機フィラー系複合材料と、単純に強度面のみで競争するとコスト面もあり勝ち目はない。そのため、無機フィラーでは実現困難であるが、CNF および LCNF を用いることで初めて達成できる特性を見いだす必要がある。例えば、無機フィラー系複合材料は、低い熱流動性から成形加工性が低下する場合があるが、CNF および LCNF では、熱流動性が向上する系も報告されている。この特徴を利用して、従来の無機フィラーでは成形が困難であった部素材への応用が考えられる。

現在、CNF を用いた自動車用部素材の開発が注目されているが、自動車分野は性能とともにコスト要求も厳しい。将来的に、自動車への応用を想定しながらも、現状では、性能重視で市場展開可能な製品への応用も進める必要がある。今後、CNF および LCNF を基幹素材として、日用品から自動車等の高性能材料まで幅広く応用展開できれば、世界的な重要テーマとなっているバイオマスリファイナリー技術の発展にも大きく寄与できるものと期待される。

参考文献

- (1) 遠藤貴士, シンセシオロジー, 2(4), 310-320 (2009).
- (2) 遠藤貴士, 李 承桓, 寺本好邦, 田中紀子, 角谷直美, 特許第 5206947 号 (平成 25 年 3 月 1 日登録)
- (3) 遠藤貴士, 工業材料, 62(10), 40 - 44 (2014)
- (4) T. Saito, Y. Nishiyama, J.L. Putaux, M. Vignon, A. Isogai, *Biomacromolecules*, 7 (6) , 1687-1691 (2006)
- (5) S. Iwamoto, T. Endo, *ACS Macro letters*, 4 (1) , 80-83 (2015)
- (6) A.N. Nakagaito, H. Yano, *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 78 (4) , 547 - 552(2004)
- (7) SH. Lee, Y. Teramoto, T. Endo, *Bioresource Technology*, 100 275 - 279 (2009)
- (8) SH. Lee, Y. Teramoto, T. Endo, *Bioresource Technology*, 101, 769-774(2010)
- (9) S. Iwamoto, A.N. Nakagaito, H. Yano, *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 89 (2) , 461- 466 (2007)
- (10) R. Tanaka, F. Yaku, E. Murai and T. Koshijima, *Cell. Chem. Technol.*, 14, 859 - 868 (1980)
- (11) 遠藤貴士, 北川良一, 細川純, 高分子論文集, 56 (3) , 166-173 (1999)

- (12) M. Ishiguro, T. Endo, *Bioresource Technology*, 153, 322-326(2014)
- (13) H. Ando, T. Sasaki, T. Kokusho, M. Shibata, Y. Uemura and Y. Hatate, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 39 (10) , 3688-3693 (2000)
- (14) T. Sakaki, M. Shibata, T. Sumi, S. Yasuda, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 41 (4) , 661-665 (2002)
- (15) A. Kumagai, SH. Lee, T. Endo, *Biomacromolecules*, 14 (7) , 2420-2426 (2013)
- (16) S. Iwamoto, S. Yamamoto, SH. Lee, H. Ito, T. Endo, *Materials*, 7 (10) , 6919-6929 (2014)
- (17) S. Iwamoto, S. Yamamoto, SH. Lee, T. Endo, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 59, 26-29 (2014)
- (18) S. Iwamoto, S. Yamamoto, SH. Lee, T. Endo, *Cellulose*, 21 (3) , 1573-1580 (2014)
- (19) 文部科学省・気候変動に対応した新たな社会の創出に向けた社会システムの改革プログラム「森と人が共生する SMART 工場モデル実証 (平成 22-26 年度)」

[寄稿]

バイオエネルギー活用による水素社会構築の意義

田島 正喜 (九州大学 客員教授 水素エネルギー国際研究センター)



1. はじめに

近年、地球温暖化対策の1つとしてカーボンニュートラルとみなされているバイオマスの利活用推進が図られているが、その利活用を妨げる要因の1つとして、バイオマスの収集・運搬に対する経済的課題がある⁽¹⁾。一方、化石燃料の枯渇化および地球温暖化にみられるエネルギーの環境影響への社会的要請の高まりによって、将来有効な二次エネルギー形態として、水素エネルギーが注目されている^{(2) (3) (4)}。水素は自然界での賦存量はほとんどないが、様々な一次エネルギーから製造しうる。また、電気と相互変換可能な唯一のガス体エネルギーであり、燃焼しても水のみしか生成しない点、非常にクリーンなエネルギーであると言える。水素社会を構築するアプリケーションとして、燃料電池自動車(FCV)の開発が進められており、FCV用の燃料としての水素供給体制の構築が、国内外にて開始されている^{(5) (6)}。FCVへの水素供給を考察するに、現在のガソリンスタンドが将来水素ステーションへ転換していくと想定されるが、ガソリンスタンド同様に全国に広く賦存するバイオマスをその原料にできれば、バイオマスの収集・運搬の課題は軽減されることが予想され、再生可能エネルギーの地産地消の観点でも非常に有効な活用方法と言える。加えて、バイオマスからの水素製造は、再生可能エネルギーであるバイオマスを用い

ることで様々な水素製造方法に比較してLCA(Life Cycle Assessment)でみて極めて有利な手法であり、多大な二酸化炭素(CO₂)削減効果が期待できる⁽⁷⁾。

2. 水素ステーション構築モデル

水素ステーションに適用するためのバイオマス収集の評価を行う。

ここに、Q:バイオマス利用可能量 (t/y) は、

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad \dots\dots (1)$$

で与えられる。但し、iはバイオマス種別を表わす。

木質バイオマスの利用可能量をQ_wとすれば(1)式は

$$Q_w = \sum_{i=1}^4 Q_i \quad \dots\dots (2)$$

となる。ここに、i(木質バイオマス種別)として、林地残材、製材廃材、果樹剪定、公園剪定の4種を算入する。また、畜産廃棄物の利用可能量(Q_e)では同様に、畜産廃棄物種別として、乳牛排泄物、食肉排泄物、豚排泄物、鶏糞の4種を算入し、農業残渣の利用可能量(Q_a)では、農業残渣種別として、稲わら、籾殻、麦わらの3種を算入、下水汚泥の利用可能量(Q_s)では、下水汚泥の1種を算入する。

以上のごとく、バイオマス種ごとの利用可能量 Q は定義される。

ここで、 S : 市町村面積 (km^2), N : 既存ガソリンスタンド数 (カ所), ρ : 水素ステーション転換割合 (分数) とすると、水素スタンド1カ所あたりのバイオマス利用可能量 q (t/d) は、

$$q = \frac{Q}{360 \times N \times \rho} \quad \dots\dots (3)$$

で与えられる。但し、360日: 水素製造プラントの年間稼働日数 (365日, 定期修理1日, 年間休業4日) とした。

また、水素スタンド1カ所あたりのバイオマス収集面積 s (km^2) は、

$$s = \frac{S}{N \times \rho} \quad \dots\dots (4)$$

となり、バイオマスの収集半径 L (km) は、

$$L = \sqrt{\frac{S}{N \times \rho \times \pi}} \quad \dots\dots (5)$$

で与えられる。

ここでの L とは図1のごとく、ある市町村に水素ステーションを建設する場合、バイオマス供給エリアを市町村の面積より平均分割しその半径として算出するもので、市町村内のバイオマス密度は均一と仮定している。また図1は、ある自治体に20カ所の既設ガソリンスタンドがあり、このうち10% ($\rho = 0.1$) にあたる2カ所が水素ステーションに転換された場合の L を示している。

3. バイオマスからの水素製造

木質バイオマス、畜産廃棄物、農業残渣、下水汚泥からの水素製造量を以下の式によって算出する。これらバイオマスに対して採用した水素製造方法は、現在実用化に近い技術より選定した。

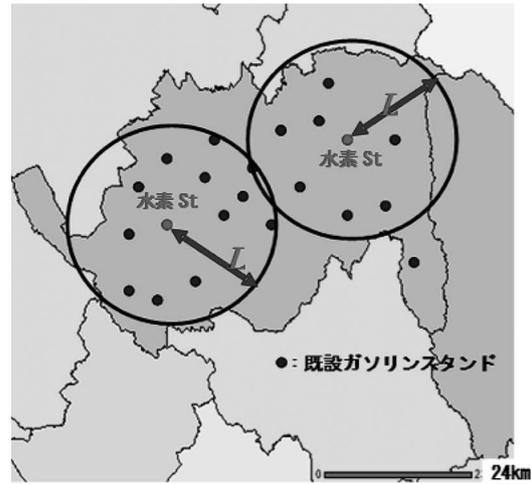


図1 バイオマス輸送距離 L

(1) 木質バイオマスからの水素製造

ドイツにて開発されたバイオマスの水蒸気改質手法である、ブルーターシステムの実証データをもとに計算する⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

水素製造量を H_w (Nm^3/h), 木質バイオマス利用量を q_w (wet-t/d) とすると、

$$H_w = \frac{1}{1.4 \text{ wet-t/d}} \times \frac{24\text{h}}{10\text{h (運転時間)}} \times 17 \text{ Nm}^3/\text{t} \times q_w \quad \dots\dots (6)$$

となる。

(2) 畜産廃棄物からの水素製造

含水率の高い畜産廃棄物から水素を製造する手法としては、湿式メタン発酵により生成するメタンを水蒸気改質しPSA (Pressure Swing Adsorption) 等にて精製し製品水素を得る方法が実用的である⁽¹⁰⁾。

水素製造量を H_l (Nm^3/h), 畜産廃棄物利用可能量を q_l (dry-t/d) とすると、

$$H_l = \frac{15.4 \text{ MJ/dry-kg (糞尿発熱量)}}{12.8 \text{ MJ/Nm}^3 \text{ (水素発熱量)}} \times 0.4 \text{ (メタン発酵効率)} \times 0.67 \text{ (水蒸気改質効率)} \times 0.8 \text{ (PSA 水素回収率)} \times \frac{1000 \text{ kg (単位換算)}}{10 \text{ h (運転時間)}} \times q_l \quad \dots\dots (7)$$

で与えられる。

(3) 農業残渣からの水素製造

農業残渣からの水素製造手法として、近年実績がある乾式メタン発酵⁽¹¹⁾で生成したメタンを水蒸気改質し、PSAにて精製する前提で計算する。

水素製造量を H_a (Nm³/h)、農業残渣利用可能量を q_a (wet-t/d) とすると、

$$\begin{aligned} H_a &= 150 \text{ Nm}^3/\text{t}(\text{ガス発生量}) \\ &\times \frac{21.5 \text{ MJ/Nm}^3(\text{発生ガス熱量})}{12.8 \text{ MJ/Nm}^3(\text{水素発熱量})} \\ &\times 0.67(\text{水蒸気改質効率}) \times 0.8(\text{PSA 水素回収率}) \\ &\times \frac{1}{10 \text{ h}(\text{運転時間})} \times q_a \quad \dots\dots (8) \end{aligned}$$

で与えられる。

(4) 下水汚泥からの水素製造

下水汚泥からの水素製造方式は、下水汚泥のメタン発酵により生成したメタンを水蒸気改質し、PSAにて精製する前提で試算する。

水素製造量を H_s (Nm³/h)、水汚泥利用可能量を q_s (dry-t/d) とすると、

$$\begin{aligned} H_s &= \frac{15.9 \text{ MJ/Nm}^3(\text{下水汚泥熱量})}{12.8 \text{ MJ/Nm}^3(\text{水素発熱量})} \times 0.4(\text{メタン発酵効率}) \\ &\times 0.67(\text{水蒸気改質効率}) \times 0.8(\text{PSA 水素回収率}) \\ &\times \frac{1000 \text{ kg}(\text{単位換算})}{10 \text{ h}(\text{運転時間})} \times q_s \quad \dots\dots (9) \end{aligned}$$

で与えられる。

(5) ステーションにおける必要水素製造能力

商用化水素ステーションの必要水素製造量は、既存ガソリンスタンドにて充填するガソリン車と同量の水素充填の必要量として定義され、通常のガソリンスタンド規模を想定すると、200～300 Nm³/h 規模で採算性が取れるレベルにあるとの試算がなされている⁽¹²⁾。そこで平均的なガソリンスタンド規模(1ステーションあたり約1,000台の車に対する営業規模)に相対する水素ステーション能力200 Nm³/hを、以降、水素ステーション構築の基

準となる必要水素製造能力として議論を進めることとする。

4. 日本全国での水素ステーション構築実現性検討

(1) 検討の前提

水素ステーションの転換割合 ρ は、 $\rho = 0.1$ (既存車の10%がFCVに転換される)とした。地方区分として、北海道、東北、関東、中部、北陸、近畿、中国、四国、九州、沖縄の10地方域に分けて評価した。

平成に入り、地方自治体間で市町村合併(平成の大合併)が推進していた。1999年では全国に3,232あった市町村は、2009年3月には1,779と約半減される計画となっており、本検討は、その途上でのデータを取り扱っている。

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、電力中央研究所が提供する全国バイオマスデータ、「バイオマスの賦存量・利用可能量推計データ」⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾は、原則、旧市町村(自治体数:2,218)でのデータである。一方、全国ガソリンスタンド数のデータは、東京ガス(株)、(株)価値総合研究所の調査⁽¹⁵⁾によったが、このデータには、一部合併後のデータが含まれる。本検討ではデータメッシュを細分化する観点で、NEDO、電力中央研究所のバイオマスデータを基準として評価を行うこととし、合併後のガソリンスタンドデータは、旧市町村の人口比率でスタンド数を割り振って合併前のデータとして評価している。

(2) 結果および考察

木質バイオマス、産廃棄物、農業残渣ごとに、本結果の水素製造量と輸送距離の関係を、北海道を代表例として、図2、図3、図4に記す。また、下水汚泥に関しては、関東地方を図5に示した。図中の分数表示は、水素製造量200Nm³/h以上を基準として、(水素ステーション構築可能自治体数)/(対象自治体数)を示している。バイオマス種ごとに対象自治体数

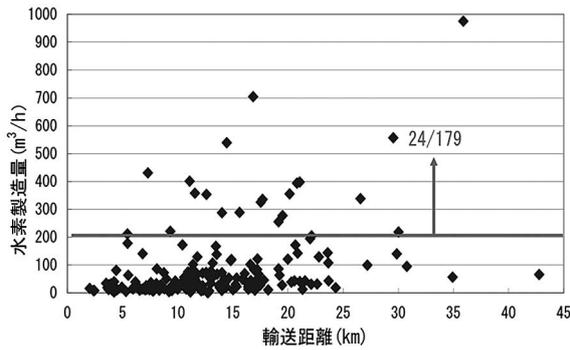


図2 水素製造量と輸送距離
(北海道での木質バイオマス)

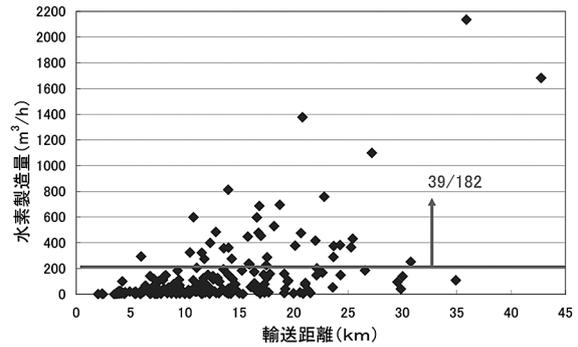


図3 水素製造量と輸送距離
(北海道での畜産廃棄物)

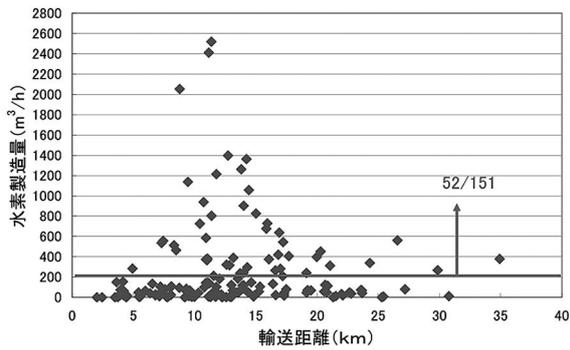


図4 水素製造量と輸送距離
(北海道での農業残渣)

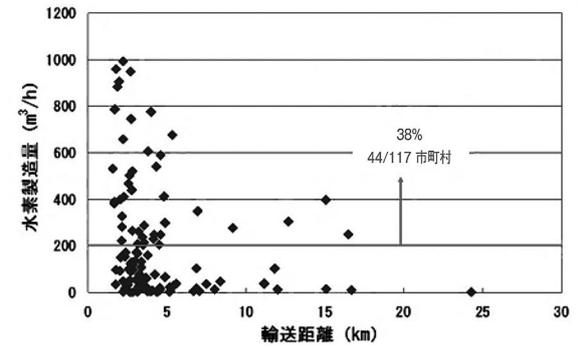


図5 水素製造量と輸送距離
(関東地方での下水汚泥)

が異なるのは、バイオマス種によっては賦存しない自治体があることによる。

関東地方の例で示す下水汚泥に関しては、他の3種のバイオマスの対象自治体数約360に比べ117自治体と極端に少ないことが特徴である。しかしながら、関東地方の大都市圏では多量の水素製造が期待できる自治体が多いことがうかがえる。これは、エネルギー利活用可能な下水汚泥が、下水処理場を有する

市町村のみに偏在していることを意味している。下水汚泥は収集・運搬システムが既に整っている都市型バイオマスであることを考慮すれば、その水素への利活用は他の3種のバイオマスとは別に議論する必要があるだろう。下水汚泥については、個別に取り上げ後述する。

地方ごとに、また3バイオマス種ごとに纏めた全国集計を表1および図6に示す。全国で水素製造量200Nm³/h以上を基準とし、3

表1 水素ステーション形成の可能性

地方	木質			畜産廃棄物			農業残渣			バイオマス計		
	構築可能自治体数	対象自治体数	比率 (%)									
北海道	24	179	13	39	182	21	52	151	34	115	512	22
東北	11	281	4	28	269	10	89	281	32	128	831	15
関東	4	364	1	29	331	9	34	330	10	67	1,025	7
中部	5	330	2	8	292	3	10	323	3	23	945	2
北陸	0	110	0	1	98	1	23	109	21	24	317	8
近畿	12	242	5	2	191	1	15	240	6	29	673	4
中国	5	121	4	4	114	4	2	116	2	11	351	3
四国	9	122	7	6	114	5	2	121	2	17	357	5
九州	29	352	8	49	337	15	36	340	11	114	1,029	11
沖縄	0	39	0	1	38	3	0	10	0	1	87	1
全国計	99	2,140	5	167	1,966	8	263	2,021	13	529	6,127	9

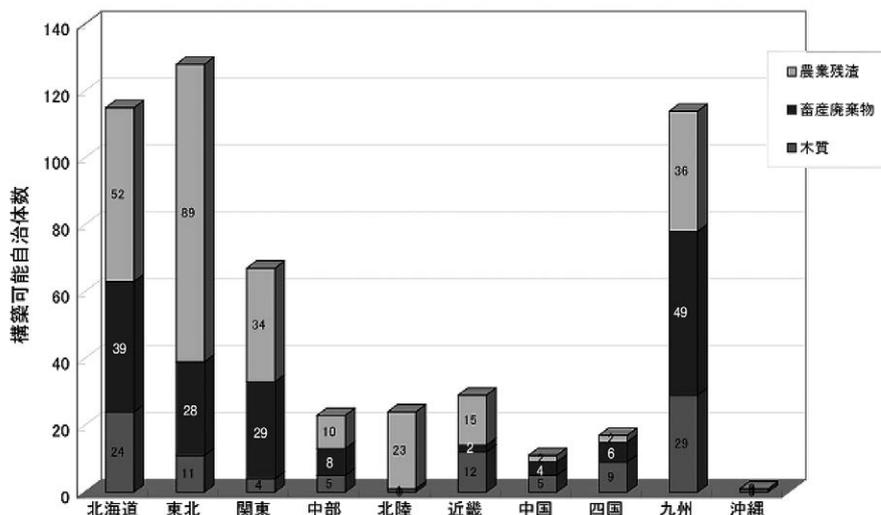


図6 水素ステーション形成の可能性

バイオマス種によって異なる水素ステーションが同時構築可能とした場合の構築可能自治体数は529カ所にのぼり、評価対象自治体を2,042カ所（のべ自治体数6,127ヶ所／バイオマス3種×2,042）と見積もれば、全国の約26%の自治体が、本手法によって水素ステーションを構築できることが判明した。

地方によっては構築可能な自治体数に偏りが見られる。バイオマスの賦存に応じて、東北地方で最も構築可能な自治体が多い（128カ所）。次に、北海道（115カ所）、九州（114カ所）が同程度であり、関東では北海道、九州の約半数（67カ所）程度の自治体で水素ステーションが構築できる。他の地方（中部、北陸、近畿、中国、四国、沖縄地方）は、これら4地方に比べると構築可能自治体数は少なくなる。

沖縄地方はいずれのバイオマス種からの水素ステーションも構築し難い結果となった。農業残渣に計上したバイオマス種別が、稲わら、籾殻、麦わらの3種であったため、沖縄地方特有に賦存するバガス（さとうきび残渣）のデータが算入されていない。沖縄地方ではバガスからの水素ステーション構築の可能性を、個別に検討する必要があると思われる。

これら水素ステーションが構築可能な自治体では、3種のバイオマスともその輸送距離の平均値は10km以内であった。バイオマス

のエネルギー利用の課題とされている収集運搬の問題も、水素ステーションでの水素製造の原料としての利用を図れば、解決できる可能性がある。

5. 水素ステーション形成黎明期におけるバイオマスの活用

燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）では、2015年よりFCVの普及を開始するという「FCVと水素ステーションの普及に向けたシナリオ」を発表している⁽¹⁶⁾。また、これに合わせ、水素ステーション構築事業者と自動車各社は、2015年までに4大都市圏（首都圏、中京圏、関西圏、福岡・北九州圏）を中心に100カ所程度の水素ステーションを建設することを共同発表している。都市部から普及が開始されるFCVに対して水素ステーション形成初期の段階では、石油や都市ガス等化石燃料からの製造水素を用いることが、コスト、供給安定性等から現実的とみられている。

前章までは、木質バイオマス、農業残渣、畜産廃棄物から水素ステーションを構築する可能性について議論を進めてきた。十分な可能性があることが示唆されたが、これら3種のバイオマスは、山間部や丘陵部、農村部に賦存するバイオマスであり、このコンセプトは水素ステー

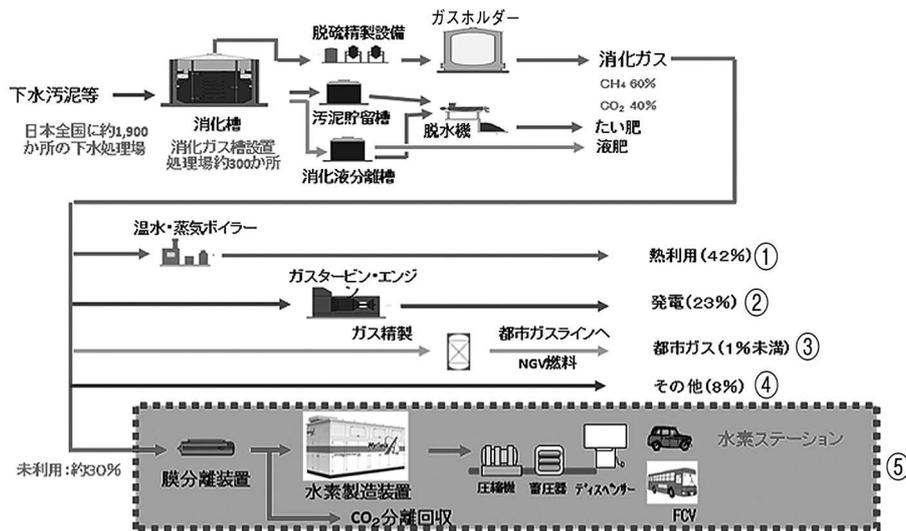


図7 下水汚泥からのエネルギー利用の現状と水素ステーションモデル

ション形成黎明期にはあまり有効ではない。

これに対して都市型のバイオマスである下水汚泥は、首都圏を初めとする大都市部において多量の水素を製造するポテンシャルがあることを前述した。

6. 下水汚泥消化ガス—水素ステーション構築プロジェクトの背景

下水汚泥消化ガスのエネルギー活用の現状と水素ステーション構築のモデルを図7にまとめる。現状、下水汚泥の湿式メタン発酵による消化システムを採用する下水処理場は、約1,900カ所の全国の処理場のうち、約300カ所である。消化システムを採用する下水処理場では、その採用目的が汚泥残渣物の減容化が第一義であることから、消化ガスのエネルギー利用率は約70%程度となっている。発生した消化ガス（メタン含有率約60%）のうち、42%が熱利用に、23%が発電利用に用いられているが、約30%は利用されずにある。この未利用消化ガスを主に活用し、消化ガス中のメタンから水素を製造、水素ステーションによりFCVに供給できれば、水素ステーション形成黎明期における都市部でのバイオマスからの水素供給モデルが構築できる（図7中、⑤のケース）。加えてこのシステムは、将来的には、水素製造の際に生成する

CO₂を分離回収（CCS：Carbon Capture and Storage）すれば、カーボンニュートラルなバイオマス利活用を、更にカーボンポジティブ化（大気中のCO₂濃度を減少させる）でき、温室効果ガスの大幅な削減に寄与する可能性を秘めている。

7. 下水汚泥消化ガスの分析と不純物対応

下水汚泥消化ガスを用いた水素ステーションを構築するにあたり、消化ガスの増量計画のある福岡市中部水処理センターを対象に、消化ガス成分の詳細分析を、2011年9月～2013年2月の3年間において、年間変動を見越して計6回、10サンプルのデータを蓄積し

表2 消化ガス成分の変動

成分	単位	含有量
二酸化炭素	%	35.9～39.4
メタン	%	53.3～57.8
硫化水素	mg/Nm ³	0.2未満
シロキサン(D3,D4,D5,D6)	mg/Nm ³	1.7～490
オクタン	mg/Nm ³	0.4～6.8
ノナン	mg/Nm ³	0.02～0.85
デカン	mg/Nm ³	0.09～3.5
テトラデカン	mg/Nm ³	0.06～2.4
エチルベンゼン	mg/Nm ³	0.07～0.82
リモネン	mg/Nm ³	0.24～3.9

た。表2に示すように、消化ガス中にはシロキサンをはじめ、オクタン、ノナン、デカン、テトラデカン、エチルベンゼン等、高沸点炭化水素が含まれ、その成分も変動していることがうかがえた。

そこで、触媒上で炭素析出し触媒毒になる可能性のある、これらオクタン～エチルベンゼン各高沸点炭化水素に対し、最大含有量の約2～350倍濃度の模擬消化ガス（標準ガスとして濃度検定済）を作製し、工業触媒を用いたマイクロリアクター（流通系触媒試験装置）で水素製造実験を行い、工業条件下の温度、圧力において水素製造が持続的に可能であることを確認、操業条件を確定した。

また、触媒を被毒する硫化水素は、酸化鉄で吸着除去した後、更に触媒層前段で水素添加脱硫法によって精密除去する。シロキサン

は活性炭を用い吸着除去するプロセスとした。メタンの水蒸気改質法は吸熱反応であるため、効率向上を考慮し、消化ガス中の不活性なCO₂は、2段の膜分離によって原料ガスより予め分離することとした。

8. プロセス設計と水素リーダー都市プロジェクト

上記不純物への対応を考慮し、計画した概略フローを図8に、システム構成を図9に示す。

メタン約60%の消化ガス2,400m³/日より水素3,300m³/日を製造するプロセスで、将来のカーボンポジティブ化を想定して、一段目で分離されたCO₂は圧縮し液化炭酸としてポンベ出荷され、レタスのハウス栽培場にて光合成促進剤として利用される。将来的にはこのCO₂

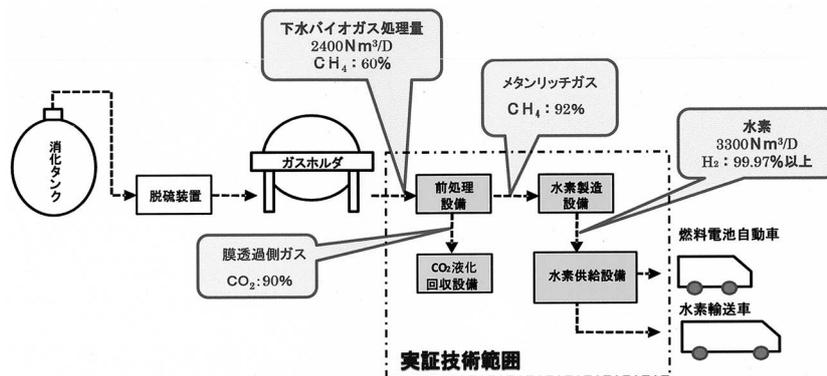


図8 概略フロー図

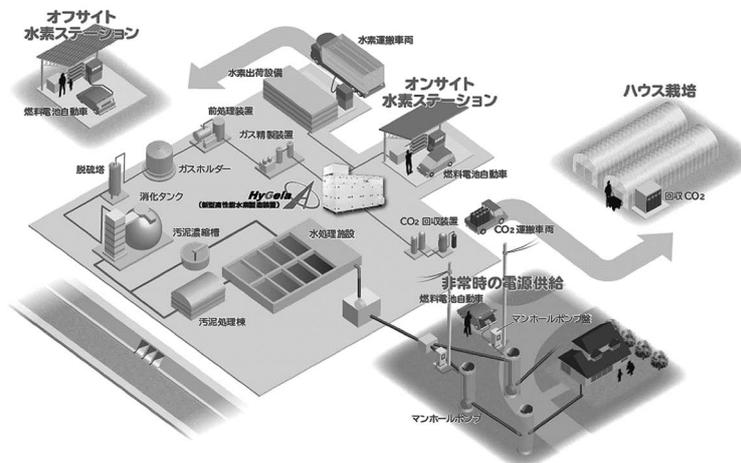


図9 水素リーダー都市プロジェクトのシステム

をCCSによって地中あるいは海中隔離すれば、大気中のCO₂濃度を減少させカーボンポジティブとなるシステム（BECCS：Bioenergy with CCS）に移行できる。下水汚泥を含むバイオマスからのエネルギー変換におけるBECCSシステム概念を、図10に示す。

製造された水素はコンプレッサーで昇圧、蓄ガス器に導入された後、ディスペンサーでFCVに70MPaの最高圧力で充填される。-40℃対応のプレクーラーが設置されており、急速充填時のガス温度上昇を抑え、空から満タン充填まで3分間程度で充填完了とできる。1日にFCV65～70台分の充填能力を持ち、商用水素ステーションとして採算性に十分な能力がある。水素普及期に対応するため、近隣のオフサイトステーションへの供給用等として、水素ポンペの出荷設備を併設している。また、大型車両（バス等）への水素充填も可能な設計となっている。

本設計仕様をもとに、福岡市（消化ガス供給他）、九州大学（技術解析、評価他）、三菱化工

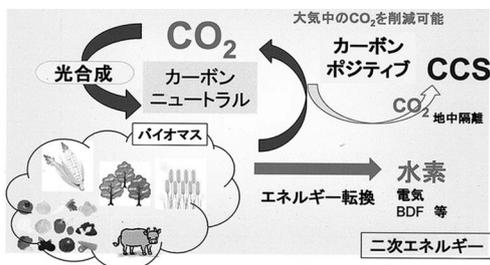


図10 BECCS システムの概念

機（設備建設、運転管理他）、豊田通商（事業性評価）らの共同体は、2014年度の国土交通省下水道革新的技術実証事業（通称B-DASHプロジェクト）に採択され、国土交通省国土技術政策総合研究所からの委託事業として本プロジェクトを実施している。福岡市が水素のリーダー都市となるよう、本プロジェクトを「水素リーダー都市プロジェクト」と命名、福岡市中部水処理センター内に水素ステーションを建設、2015年3月末に開所し、FCVへの充填を開始した。図11は開所した水素ステーション遠景とFCV「MIRAI」である。

9. おわりに

本プロジェクトは、下水汚泥消化ガスから製造した水素を商業規模でFCVへ充填できるステーションとして、国内はもとより、世界的にも初めての試みである。

平成27年3月31日の開設以来、FCV充填回数は実験充填を含めて約330台、水素製造量約21万m³、CO₂出荷量約2,600kgの実績がある。（2016年7月末）充填実績の詳細は、実証研究の評価委員会の取りまとめをもって順次公表していく予定である。

この世界初の商用規模下水汚泥消化ガス－水素ステーション構築事業に対して、内閣府の産学官連携功労者表彰の国土交通大臣賞を本年8月末に受賞した。



図11 水素リーダー都市プロジェクトの水素ステーション

今後は本コンセプトの水素ステーションを日本全国に、また海外への展開をも視野に入れて拡大推進していく予定である。更に、再生可能エネルギー水素ステーション建設がなかなか進展しない中であって、前述した下水汚泥以外のバイオマス種からの水素ステーション構築構想も実施していくことが期待されており、自動車会社等と協議を進めながら、鋭意研究・開発していくことを計画している。

参考文献

- (1) 小宮山宏, 『バイオマス・ニッポンー日本再生に向けて』, 日刊工業新聞社, pp.156-168 (2003)
- (2) 最首公司, 『水素社会宣言ー“減炭”政策のために』, (株)エネルギーフォーラム, pp.14-24 (2005)
- (3) Jeremy Rifkin, 『水素エコノミー エネルギー・ウェブの時代』, NHK 出版, pp.236-286 (2003)
- (4) Joseph J. Romm, 『水素は石油に代わるか』, オーム社, pp.15-25 (2005)
- (5) 経済産業省, 燃料電池実用化戦略委員会資料, (2004)
- (6) JHFC セミナー資料, 平成 19 年度 水素・燃料電池実証プロジェクト, p.15 (2008)
- (7) (財)日本自動車研究所, JHFC 総合効率検討結果報告書, 2006, 33-37
- (8) (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構パンフレット, バイオマスエネルギー高効率転換技術開発, p.3 (2005)
- (9) 山地憲治他, 水素エネルギー社会, 資源エネルギー学会, pp.63-65 (2008)
- (10) (社) 日本エネルギー学会, 平成 13 年度新エネルギー等導入促進基礎調査 (バイオマスエネルギー高効率転換技術に関する調査) 報告書, pp.132-173 (2001)
- (11) (株) タクマホームページ, 高温乾式メタン発酵, (コンポシステム) の特徴, <http://www.takuma.co.jp/product/waste/general/08biogas01.html> (アクセス 2007.3)
- (12) (財) 日本自動車研究所・(財) エンジニアリング振興協会, 固体高分子形燃料電池システム実証等研究 (第 1 期 JHFC プロジェクト) 報告書, pp.70-71 (2006)
- (13) (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ, バイオマス賦存量・利用可能量の推計 GIS データベース, <http://www.nedo.go.jp/> (アクセス 2008.4)
- (14) 井内正直, (財) 電力中央研究所, バイオマスエネルギー利用計画支援システムの開発ー賦存量データベース及び収集コスト評価モデルー, pp.1-7 (2004)
- (15) (株) 価値総合研究所・東京ガス(株), 関東圏における水素インフラ展開シナリオ検討基礎調査, pp.13-20 (2007)
- (16) 平成 21 年度 JHFC セミナー資料集, 基調講演 2015 年の一般普及に向けた取組の現状と今後の課題, 石谷 久, p.22 (2010)

新しい再生可能エネルギー：風力熱発電（WTES）

岡崎 徹（プロジェクト試験研究部
新エネルギーグループ 主管研究員）



1. はじめに

出力が不安定な風力、太陽光などの再生可能エネルギー（再エネ）の大量導入が喫緊の課題となっている。しかし、主力となる太陽光や風力などの再エネは不安定なため、導入に課題があることは以前から指摘されていた⁽¹⁾。その対策として、電力システムの強化・柔軟な運用や蓄エネルギーの導入など様々な手段が挙げられている。いずれも技術的に可能であるが、どの手段が経済的な電力安定供給を実現できるかが次の課題となってきた。

風力発電について風車タワーの建設から電力システムまでの全体最適の観点から検討すると、風力熱発電（WTES：Wind-powered Thermal Energy System）という革新的システムが有利であると分かった⁽²⁾。これは、オンデマンドで必要時に発電あるいは24時間発電する。本稿では、まず、これを説明する。

しかしながら、WTESは現在の日本の制度に合致しない。なぜなら、現行制度では再エネのオンデマンド発電に価値を認めていないからである。これまでは、再エネ導入量を増やすことが第一義であったためこれで良かった。しかし、導入量が増えた現在、発電抑制が行われるなど歪みが出てきており、今後の制度変更が必要である。既に、海外の一部ではオンデマンド発電に価値を認めている。

しかし、このオンデマンド発電の有用性を認める制度変更にはまだ時間がかかる。この現状に対応し、本稿の後半では現行制度に合

致し、かつ経済性の高い分散型風力熱発電について述べる。これは、コジェネレーションイメージで設備稼働率を上げることでエネルギーコストを下げ、かつ、余剰再エネの吸収・有効利用も図るものである。

太陽熱発電に様々なバリエーションがあるように、WTESにも様々なバリエーションがある。そこで、本稿の最後には現時点で考え得るバリエーションを示した。その1つをシーメンス社が開発開始した⁽³⁾。現在の再エネの主力である風力発電、太陽光発電、太陽熱発電はそれぞれ既に長い歴史を持つ。これに対して、風力熱発電は新しい概念で、今後様々な形態や用途が出てくるであろう。

2. WTES の概要

基本タイプのWTESは、非常にシンプルである。図1に示すように、風車タワー頂部で回転エネルギーを発熱機により直接熱に変換する。その熱は、1基あたり数百MWの規模で

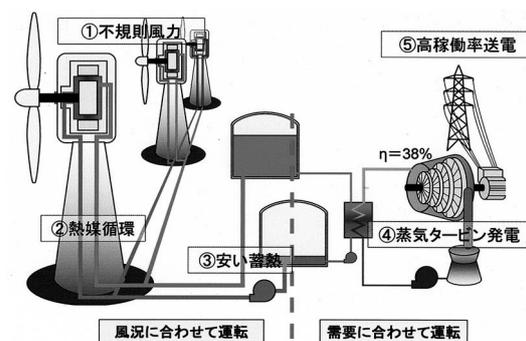


図1 風力熱発電（発熱特化）の基本構成

稼働実績を積みつつある太陽熱発電と同じシステムを用いて高温蓄熱（例えば600℃）にて安定化させる。その後、熱交換器と蒸気タービンで風況に関係なく需要に応じたオンデマンド発電、あるいは24時間安定発電を行う。

特徴を表1にまとめ、以下に補足する。項目1について。熱機械はカルノー効率に制限されるため、エネルギー効率が電池の2分の1程度になってしまう。この明らかな欠点により、これまで世界的にも風力熱発電が検討されることはなかった。しかし、項目2～6の効果を定量的に評価すると、この欠点を補ってあまりあるということが分かった。

項目2について。2MWのダイレクトドライブ風車では100トンを超える重い発電機を採用する。そのため、ギア式と比べて建設コストは約40%も大きくなるが、ギアロスがなく故障停止時間および補修費用が少ないため発電コストはギア式と同等か安い。ここに電磁ブレーキの原理を用いる簡素な構造の発熱機を採用すると、約10分の1の重量にまで軽量化でき、建設コストを30%程度削減できる。

項目3について。太陽熱発電の運用により蓄熱システムが安価な事が証明されておりkWhあたりコストが電池に比べて20分の1（～100分の1、リサイクル考慮）である⁽⁴⁾。電池については将来的なコストダウンの期待はあるが、電力用途には様々な追加設備が必要で現状からの大きな低コスト化は難しいと思われる。例えば、2016年までに系統接続された大型システムの建設例で中国を含めても設備コスト600ドル/kWhを切った例はなく⁽⁵⁾、電気

自動車（EV）用電池等の現状コストより相当に高価である。中国、チリ、ドバイ、南アフリカなど太陽光と電池の組み合わせを選択せず太陽熱発電を選択した傍証もある。さらに、前述のようにシーメンス社も開発に着手した電池は、後述のように短時間補正に向いている。

項目4について。良風況地域は僻地にあることが多く、送電線の新規建設とその低利用率が問題となっている。欧州と比べて日本の風力導入量が少ないのはこれが影響している可能性がある。項目5、6については後述する。

3. 風力（再エネ）大量導入条件調査

従来型風力との経済性比較条件を決めるため、諸外国のシステムについて調査した。電力系統は地域によって成り立ちが異なり多種多様であるが、再エネという新たな要素に関してはある共通の特徴が見出された。

(1) スペイン

スペインの2014年発電量は、24万3,000GWhでほぼ東京電力並の発電量である。半島にも関わらず他国との電力融通量は数%もない。その厳しい状況にも関わらず、発電量ベースで20%を風力が占めるといふ、非常に大きな再エネ導入率を誇る。しかし、設備内容を見ると図2に示すように、需要以上に従来型電力設備の裕度を強化しており、全ての風力発電が停止しても全く支障のないシステムを維持している。電源構成を見ると、図3に示すように2000年から風力設備の増加に伴いほぼ同量のコンバ

表1 風力熱発電の特徴

	特徴	コストへの影響	理由
1	熱機械の採用	効率が悪くコストアップ	安価な高温蓄熱採用のため敢えて採用
2	回転機に超軽量発熱機を採用	ダイレクトドライブ化コストを30%削減	発熱機は発電機の10分の1重量となり、構造体含めた全設備が経済的に建設可能
3	安価な高温蓄熱採用	蓄エネルギーコスト20分の1	太陽熱発電にて大規模な実績あり
4	高い送電線利用率	数倍の利用率向上	発電場所で安定化して送電するため
5	風車稼働率の向上	稼働率30%向上	風況と発電とを切り離せるため
6	風車の高密度配置	土地利用率の向上	風車の相互乱流影響が少ないため

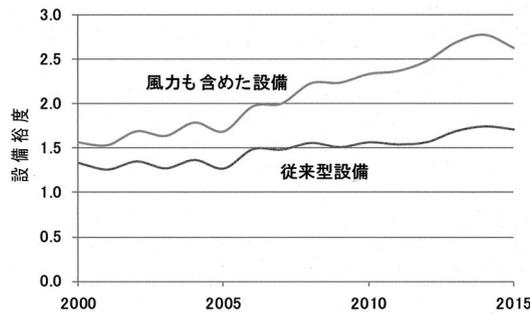


図2 スペインの電力設備裕度

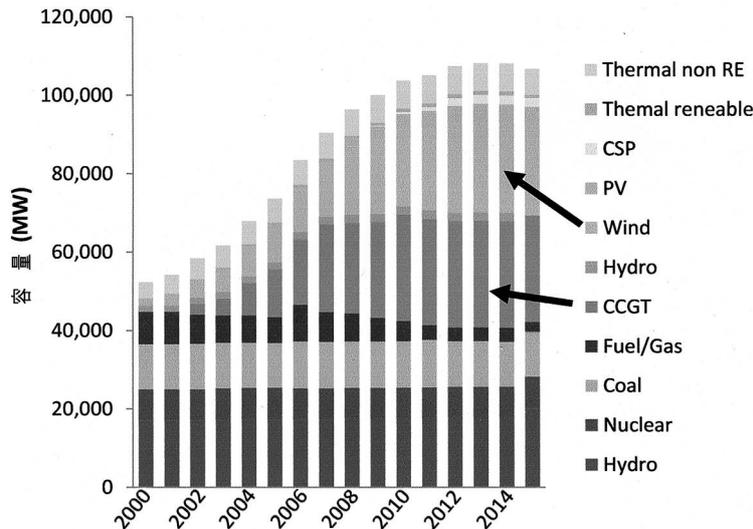


図3 スペインの電力設備構成 (2000年～2015年)

インドガス火力 (CCGT) を導入している⁽⁶⁾。

(2) デンマーク

デンマークは、スペインより早く風力の大量導入に乗り出している。しかし、自国の火力設備を削減できたのはごく最近で、2010年までは風力の導入によっても全く火力を削減できていなかった。2014年になりようやく火力の漸減傾向が見えてきている。これは周辺国との電力融通可能量が近年100%となったことも影響している。この状況下、風力由来電力は安価な時に周辺国に売り、需要時には高い電力を購入するため世界で最も電力コストの高い国となった⁽⁷⁾。

(3) ドイツ、米国

ドイツエネルギー機構 (dena) は風力発電の系統連携について詳しく検討している。ドイツ

では、2020年には2008年比8%の電力消費量削減しつつ、全発電量の30%と相当な量の自然エネルギーを導入する目標がある。しかし、発電設備容量計画では、従来型の発電設備はほとんど削減しない⁽⁸⁾。現に、ドイツの全風力設備を合算した場合、24時間安定して30GW近い発電を行う日もあれば、ゼロ出力の日もある。このため従来型発電設備の削減は難しい。

「風力などの不安定電源でも強固に接続された電力系統においては蓄エネルギー設備なしに大量の再エネを導入できる」との研究結果がある。これは技術的には確かに可能であっても、従来型設備、特に柔軟な運用が可能な火力発電 (待機火力とも呼ばれる) を削減せずに維持する必要がある。すると、風力が導入されない時よりも待機火力の設備稼働率が低くなる一方、設備償却費は変わらず、保守費は増加し、さらには出力調整に伴う燃費悪化などのため、化石

燃料を削減できても発電コストが増加する。また、広域の系統強化なども必要である。よって、これらの増加費用も込みで経済性を検討する必要がある。さらに、そもそも二酸化炭素（CO₂）排出量の根本的な削減のためには火力設備は削減すべきである。そのため蓄エネルギーによる再エネの安定化・大量導入が検討されるようになってきた。例えば、米国エネルギー省（DOE）の2009年度報告書では、欧州などと同様、理想的な電力系統があれば20%程度までの再エネ導入には蓄エネルギー設備は一切不要、と記されていたが、2013年の報告書では再エネ導入には蓄エネルギー設備が必要である、と方針が変わっている⁽⁹⁾。

（4）チリ、アラブ首長国連邦（UAE）

チリでは2016年時点で太陽光発電の買い取り価格は3円/kWhまで下がっている。時間帯によってはゼロ円である。風力は3.8円/kWhと少し高いが日本の現状より相当に安い。これらはチリが日照と風況の両方に恵まれているためでもある。これに対して、オンデマンド発電が可能なガス・石炭火力、水力などは5～7円/kWhと再エネより高価な価格設定がなされている⁽¹⁰⁾。ここに、15円/kWhと高コストであるにも関わらず太陽熱発電を導入しようとしている。その理由は、安価で信頼のおける蓄熱を利用して安定発電できることである。

UAEのドバイも同様な方針である。電力系統は地域性があり、再エネはさらに地域性が強いいため直接の参考とはならないが、この状況を認識しておくのは重要であろう。

4. 経済性検討

前項の事実を踏まえ、3つの手法で電力系統全体を俯瞰しての風力発電の経済性を検討した。1つ目は思い切った風況の単純化を行い、2つ目は実際風況を想定した。3つ目はまた別の観点からマクロな手段で検討した。

（1）単純化風況での経済性検討⁽²⁾

ここでは思い切った簡略化により経済性を推定した。図4に示すように、6、24、48、96、168時間毎に風が間欠的に定格条件で吹き、全体としては同じ稼働率30%となる場合において、そのいずれの時間周期でも一定電気出力を要求されるという条件を設定した。

この条件で、従来の風力と待機火力を用いた従来型風力、風力+電池、WTESの3つについて、LCOE（均等化発電原価、Levelized Cost Of Energy）に準じた発電コストを試算した。LCOEと異なるのは保守費、金利を省略した点である。また、系統全体を俯瞰して経済的なシステムを検討するため、送電コストを追加で考慮した。

従来型風力の場合、前述のように安定した系統運用には待機火力が必要である。よって、火力の設備償却費のうち、風力が稼働している時間分（この場合は設備償却費の30%）を算入した。また、大量導入時には需給のミスマッチにより発電抑制が見込まれるため、これも勘案した。

「風力+電池」およびWTESでの試算は単純である。風の間隔に応じた蓄エネルギー設備を準備し、風が吹いている間は発電しつつ

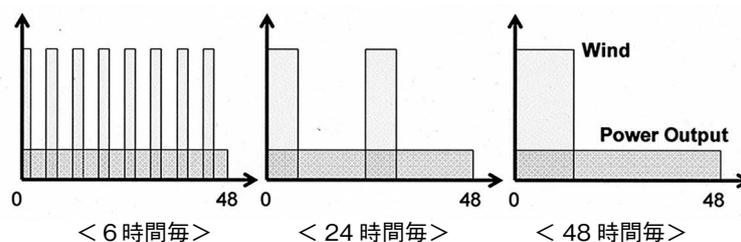


図4 想定した風況（96時間毎、168時間毎は省略）

蓄エネルギーを行い、風が止まれば電池もしくは蓄熱から出力する。

試算に用いた主な数値を表2に示す。数値は欧州データを基本としている。円高時に換算したため現状よりかなり安いですが、中国の実勢より高い。従来型風力は、ダイレクトドライブ型を想定しているため発電機コストが全体の中で大きくなっている。

WTES用の発熱機の重量は、従来型風力の発電機の10分の1程度と予測されているが、まだ製作実績がないためコストは2分の1にするに留めた。タワー建設費やその他の建設費も含めると全体で30%の建設費削減が期待されるが、これについてもまだ建設例がないためコストに算入していない。熱電変換効率38%はタービン部分のみの効率で、スペインの太陽熱発電所(20MW)の例を参考にした。通常の火力の効率はボイラ効率などが入るためもう少し低くなる。

表2の右端にはそれぞれの要素部品の設備利用率(Capacity Factor)も記載した。経済性には効率や設備コストも重要であるが、設備利用率も大きく影響するからである。この意味で、従来型風力は送電線も含めてすべてが30%の稼働率であり、高コスト化の要因となっている。

一方、風力+電池とWTESは、送電線を常時使うため送電線コストを大きく下げられる。蛇足ながら、欧州における送電線コストは0.5

円/kWh程度と見積もられており日本に比べて相当に低い。欧州の電力網はメッシュ状であること、地形が異なることが影響していると思われる。ただし、近年は景観問題などで地中線とする例が増えてきており、もう少し高くなっている可能性がある。

試算結果を図5に示す。横軸の小さな数字はそれぞれ風の吹く時間間隔を示す。右端の168は168時間周期、すなわち一週間周期で風が吹く場合となる。従来型風力の場合は、風が止まれば火力を運転するだけのため、いずれの周期でも同じ発電コストとなる。一方、蓄エネルギーシステムを利用する場合は長周期になるほど蓄エネルギーコストがかさむ。

WTESは、蓄エネルギーコストが相対的に小さいため168時間周期の風況となっても従来型風力より小さなコストとなった。ただ、これ以上の周期になると蓄エネルギーコストの割合が大きくなるため、さらなる蓄熱コスト削減が重要となる。潜熱蓄熱、化学蓄熱や燃料製造などが期待される。風力+電池は、6時間周期では最も安く、現在短周期補正用に一部実用化されている現状を裏付けている。

以上を考慮すると、短時間の揺らぎには電池(kWh補正として利用)、長時間の揺らぎには蓄熱を利用するのが経済的システム実現へのポイントと考えられる。送電線コストを考えると、遠隔地ではWTES、都市近郊では従来型風力とするのが全体としての最適解にな

表2 試算に用いた要素部品の設備コスト、効率、設備利用率

要素部品		設備コスト	効率(%)	設備利用率(%)
タワー/ブレード(共通)		9,000万円/2MW	-	30
従来型風力	発電機-15rpm	4,000万円/2MW	93	30
	AC/DC, DC/AC	2万円/kW	95	
	送電線	10円/kWh	-	
風力+電池	発電機-15rpm	4,000万円/kWh	93	30
	AC/DC	2万円/kW	95	
	電池(NaS)	4万円/kW	83	
	DC/AC	2万円/kW	95	100
	送電線	3円/kWh	-	
WTES	発熱機	2,000万円/2MW	96	30
	蓄熱	2,000円/kWh-t	93	70
	蒸気タービン	10万円/kW	38	100
	発電機-3600rpm		96	
	送電線	3円/kWh	-	

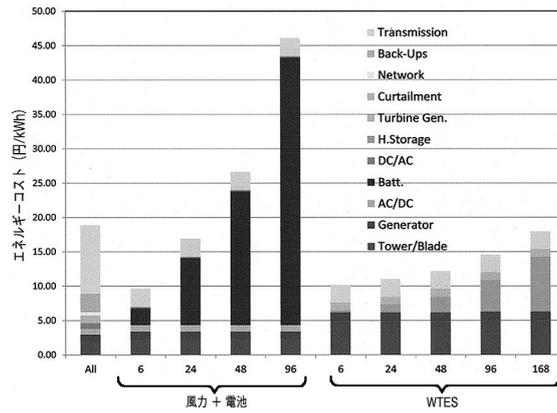


図5 風の間隔による発電コスト変化

るであろう。この従来型風力とのベストミックスも今後検討すべきである。

(2) 実データ利用しての経済性試算

次に、実際の風況を用いて試算した。ここでは、計算を簡単にするため全てのエネルギーは一旦蓄電もしくは高温蓄熱されてから電力に変換されるとした。従来型風力は、設備利用率だけでコストが変化するので、ここでは計算しなかった。

計算では、まず1週間の風況データ（パワー、kW）を与える。需要変化が主に24時間サイクルと1週間のサイクルから成り立っているからである。季節変化は長すぎるのでまだ考えない。さらに、天候予測により風況が完全に予測できるとした。

すると、1週間の全エネルギー（kWh）が分かり、平均風力（kW）が計算できる。これを元の風況から引いた状態で再び時間で積算すると、エネルギー（kWh）の時間変化が求められる。風況によってはエネルギーがマイナスに振れるが、最大値との差が必要な蓄エ

ネルギー容量となる。現実には、例えば予めこのマイナス分を充電（高温蓄熱）してから運用を始める。さらに単純化のために週毎に蓄エネルギー設備以降の設備容量を変えた。現実には年間を通じての最適容量を設定する必要があるが、今後の課題とした。

1年間を通じての試算の中から、ほぼ同等な設備利用率24%となった例について比較してみた。稼働率が同じなので平均出力も同じとなる。図6 (a), (b)はその週の風況で、図7 (a), (b)はそれぞれの蓄エネルギー量の変化である。一週間を通しての設備利用率が同じにも関わらず風のパターンが異なるため必要な蓄エネルギー量が大きく異なっている。

1年間の設備利用率と必要蓄エネルギー量の関係は図8のようになり、設備利用率と必要蓄エネルギー量の関係はかなりばらついた。設備利用率と発電コストのグラフは図9のようになった。WTESは若干のばらつきがあるものの、全体に占める蓄エネルギーコストの割合が小さいため、ある曲線に乗るような形になった。

風力+電池では、毎週の蓄エネルギー量が

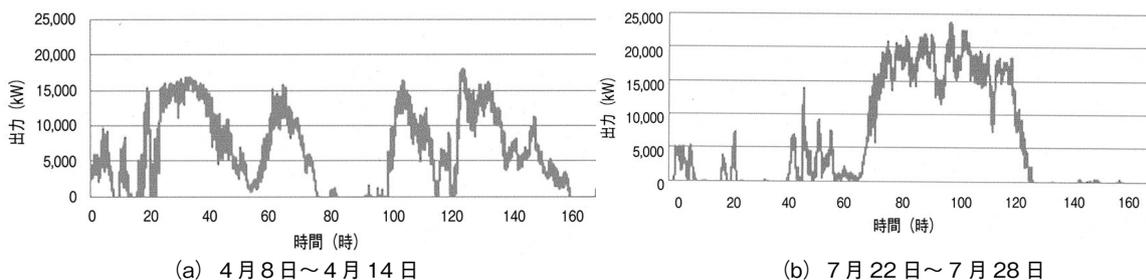


図6 1週間の風況

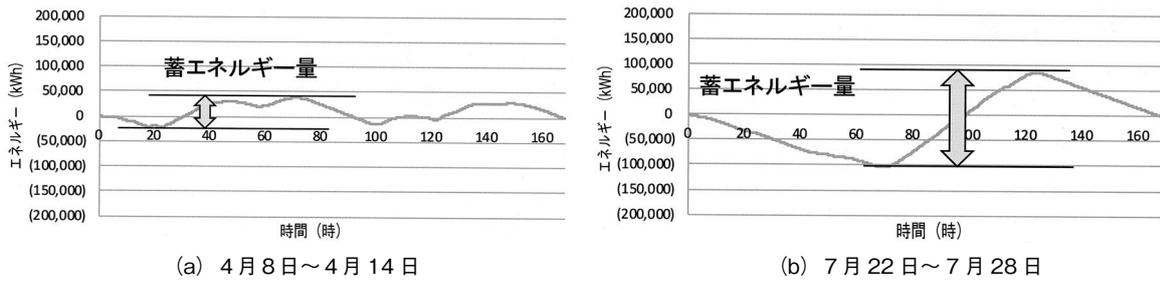


図7 蓄エネルギー量の変化

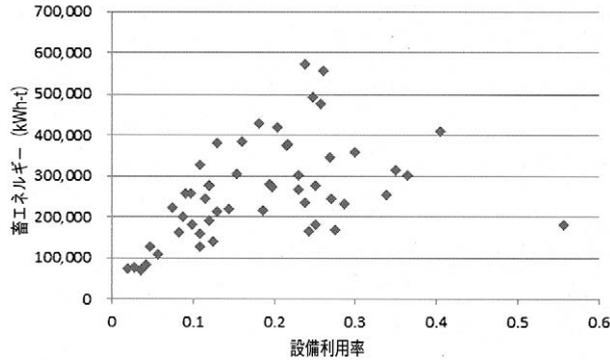


図8 風車設備利用率と必要蓄エネルギー量

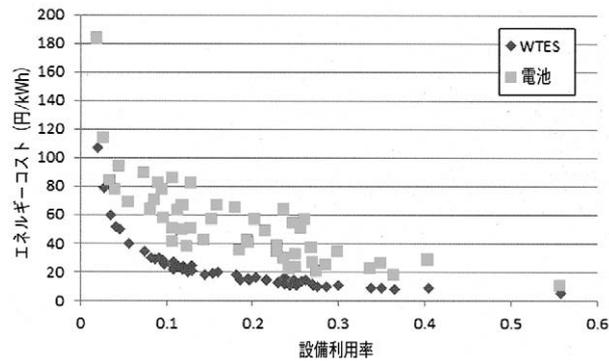


図9 風車設備利用率とエネルギーコスト

設備利用率だけでなく風況にもかなり依存するため発電コストはかなりばらついた。同じ設備利用率で見ると風力熱発電の方が必ずコストが安くなっている。風は様々なパターンで吹くため、多様なパターンに対しても安定して安価な高温蓄熱が有利である。

(3) 米国の主電源化条件を参考にした試算

米国では州によっては、電力の25% (kWhベース) を風力で賄っており、主電源化も視野に入りつつある。米国風力産業展(AWEA2016: 2016年5月23日～26日開催、於ニューオーリンズ)で、GE社は風力発電が主電源となる条

件を表3のグレー部分のように発表している。

GE社が示した現状値で、従来型風力の最終的な安定電力コストを試算すると、充電のための電力費と蓄エネルギー設備の1回あたりのコストの合計となり、現状、約20セント/kWhと高い。やはり、高い蓄電コストがネックとなっている。しかし、GE社が示した将来値が達成できれば、これが5.3セント/kWhとなり、現状5～8セント/kWhのガスコンバインドサイクル(CCGT)発電と十分対抗できる。ただし、前述のように現状の蓄電設備費で600ドル/kWhを切る例はまだ報告されていない。

表3 風力が米国の主電源となる条件

	単位	GE資料 従来型風力		WTES		シーメンス
		現状	将来	現状	将来	将来
発電(発熱コスト)	セント/kWh	4.5	2.5	3.1	1.8	2.5
蓄電設備費	ドル/kWh	350	100	20	10	10
設備寿命	回	3,000	10,000	10,000	10,000	10,000
系統柔軟性	-	かなり達成		-		-
蓄エネルギーコスト	セント/kWh	11.7	1.00	0.2	0.1	0.1
変換効率	-	0.70	0.75	0.38	0.45	0.5
充電電力	kWh	1.4	1.3	2.6	2.2	2
充電電力費	セント/kWh	6.4	3.3	8.3	3.9	5.0
変換器	セント/kWh	1.4	1	1.5	1.0	1
安定電力コスト	セント/kWh	19.5	5.3	10.0	5.0	6.1

これに倣い、WTESで試算した結果も表3に併記した。ダイレクトドライブが安価にできる効果を考慮し、発電コストは、GE資料よりさらに30%削減した。蓄電(蓄熱)設備費は現状値と将来値とを示した。また、WTESの変換器コストとしてLNG火力の設備費1.5セント/kWhを採用した。すると、現状でも10セント/kWh、将来コスト5.0セント/kWhとなり、CCGTと対抗しうるコストになった。同じく、シーメンス社のシステムも将来的にCCGT対抗しうるようになった。

従来型風力と組み合わせるのが電池になるのか高温蓄熱になるのか、今後の技術開発により動向が定まるであろう。

5. 風車の稼働率向上と高密度配置

WTESのコスト削減要因のうち、風車稼働率向上と高密度配置について説明する。

(1) 風車稼働率の向上

風力発電事業者は電力系統に対して予め30分毎の出力を通知し、遵守する必要がある。未達にはペナルティもある。そのため例えば図10に示すように常に発電出力は実際の回収可能な風エネルギーから少なく設定することになる。また需要がない時間帯には発電抑制も行われるため、発電機会を逃すこともある。

WTESは風況と発電出力の切り離しが可能であるため、風況予測のずれを気にすることなく全ての風エネルギーを吸収できる。その程度は場所や風の予測精度により変化しうるため経済性予測には一部しか考慮しなかった。

(2) 風車高密度配置

ウィンドファームの場合、風向によっては前列の風車からの乱流が後列の風車に重なる場合がある。するとこの乱流により回転系は不規則な負荷を受け軸やギアの損傷が進む。さらに、電気出力も40%程度急変する。これ

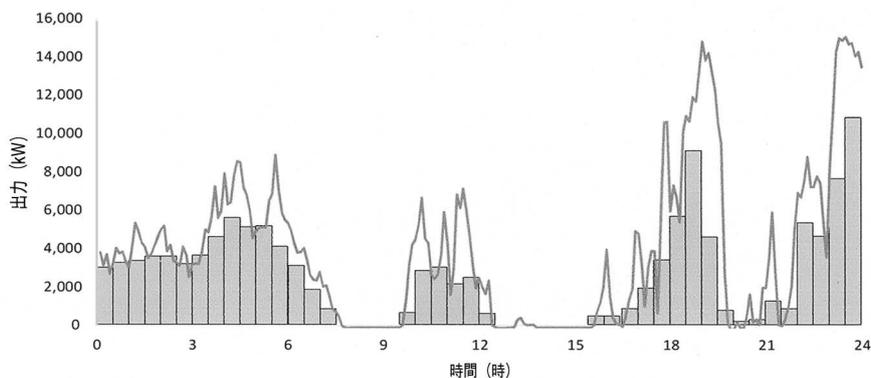


図10 実際の風況(実線)と発電量(グラフ)の例

は望ましくないので、風車は卓越風に対して横方向に羽根直径の3倍、縦方向には10倍の距離をとり、乱流に巻き込まれる確率を減らしている。このため風車間スペースが大きい。

WTESは風況と電気出力に直接の関係がなく乱流による電気出力の変化もない。また、堅牢な発熱機でダイレクトドライブを実現するため回転系の損傷も生じにくい。よって、狭い面積に多数の風車を配置することが可能となり、より多くのエネルギーを回収できる。このため、狭い日本に好適である。

6. 発熱機と発電発熱機

WTESにおいてほとんどの要素部品は既にあるが、タワー頂部に配置される発熱機、あるいはここで新たに述べる発電発熱機には容量や大きさなどで開発課題がある。

(1) 発熱機

発熱機は、回転エネルギーを熱に変え熱媒で外部に取り出す装置で、若干異なる構成だがトラック補助ブレーキのリターダで実用化されている。原理はIHクッキングヒータなどと同じで渦電流加熱を用いる。

具体的には、永久磁石もしくは電磁石を鉄板に近づけ相対的に動かして磁場を変動させると、鉄板に渦電流が発生し加熱される。リターダでは発生した熱を空气中に捨てているが、空气中ではなく熱媒体に熱を吸収させ外部に取り出す部分（自動車エンジンの冷却イメージ）、および保温・断熱や熱膨張対策の最適設計などが必要である。規模の点でも開発課題がある。

発熱機には軽量化という利点がある。発電機で必要な複雑で嵩張る電機子巻線が不要な上に、渦電流発生部分を高電流密度にできるため、原理的にも発電機より軽くなり、試算では従来型発電機の10分の1程度になると予測される。

(2) 発電発熱機

発熱機は発熱動作のみを行うが、発電発熱

機は、発熱動作と発電動作の両方を行う。これには誘導回転機を転用する。

誘導回転機は、図11に示すように、制御によってモータにも発電機にもなる。誘導回転機の定格トルクは、始動トルクや停動トルクより数分の1と小さい。

通常の誘導回転機は、始動時には図11の曲線上を過渡的に通過し、定格値にて定常運転を行う。しかし、定格以外で、例えば停動トルクにて運転を行うと発熱が激しくなり継続的に使用できない。これに対し、発電発熱機は、誘導回転機本体に適切な抜熱構造を持たせることでこの特性曲線内のどの条件でも定常運転可能な状態にしたものである。例えば、風車により軸が強制的に回転させられている状態で界磁に直流を印加すれば（滑り=1）、発熱機となる。滑りを調整すると、発電および発熱の割合を特性曲線内で自由に調整できる。

定格で利用される誘導回転機と比べ、同体格で数倍の回転エネルギーを電力または熱に変換することができる、究極のエネルギー変換密度を実現することになる。このため小型軽量化が期待できる。

さらに、このシステムでは再エネ余剰電力、あるいは石炭火力や原発の余剰電力を吸い込んでヒータによって蓄熱することも可能となる。別途ヒータを設けて余剰電力を吸収するアイデアが出されているが^{(3),(11),(12)}、それぞれの部材の設備稼働率が小さくなり、その

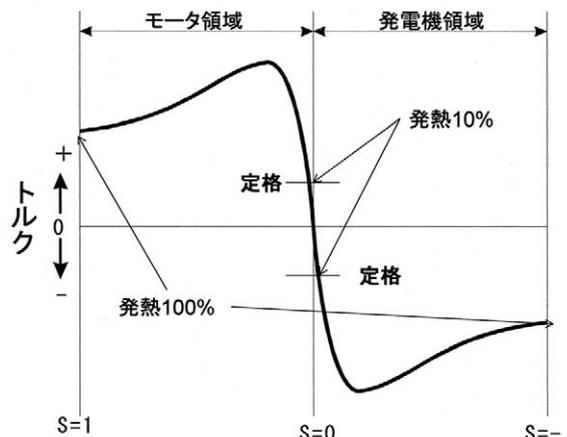


図11 発電発熱機による回転誘導機特性

上ダイレクトドライブが安価に建設できるという特徴がなくなる。

発電発熱機の課題は、発熱に特化したものと比べて構造が複雑となり、軽量化の程度も限定的になることである。定格トルクよりはるかに大きな停動トルクを利用できる上に、通常の誘導発電機と異なり発電効率を追求する必要がないため軽量化に主眼を置いた設計が可能ではあるが、それでも発熱に特化したものほどの軽量化は難しく、電機子巻線も必要となる。この電機子巻線は、一般の誘導発電機では正弦波に近づけるため複雑な分布巻き線を採用するが、この場合には単純な集中巻き線などにして軽量化を目指すことも考えられる。

(3) ヒータシステムとの比較

安価な高温蓄熱の特徴を生かし、発電してから電気ヒータを用いるシステムを組み合わせた従来型風力と WTES の比較では、その優劣は容量で変わる。WTES の熱機械は規模(容量)により単位出力あたりのコストが決まり、大型化するほど経済的になり、小型では経済性が悪くなる。同じ構成であれば、容量の変化に従って 0.6 ～ 0.7 乗で設備コストが変化するという経験則がある。太陽熱発電でのコスト予測から外挿した結果を図 12 に示す。WTES の熱媒循環コストは 2 本の曲線の間にある。風車 1 基当たり 100kW 辺りを境に WTES (熱媒循環) の方が経済的になることが分かる。

ただし、この推定は高温の熔融塩を前提としたシステムを想定しているため、別の熱媒を利用した温度帯の異なるシステムでは結果が異なってくる。

(4) 高効率化に超電導

熱機械は動作温度を上げることで高効率化する。WTES も動作温度の高温化が望ましい。しかし、鉄はキュリー温度 7 ～ 800℃ 以上になると磁性が消失するため、鉄による磁気回路を利用する発熱機はこの温度以上では動作しなくなる。

しかし、超電導は非磁性空間にも大きな磁場を形成できるため、超高温の発熱機を実現することができる。すでに、銅を赤熱 (1,000℃ 弱) させるまで加熱した超電導炉が稼働している。この温度では熱化学による燃料製造、天然ガスの改質などが可能となる。また、700℃ の入力、10MW 電気出力で熱効率 50% を目指して、超臨界二酸化炭素クローズドブレイトンサイクル・ガスタービンの開発が行われている⁽¹³⁾。

7. 分散型 WTES

以上のように、WTES は電力系統全体として見た場合に最も経済的なシステムとなる。しかし、前述のように日本の現状制度と合わないという欠点がある。すなわち、日本ではオンデマンド発電に対する価値を認めていない。このため、安定化機能を内包する WTES はどうし

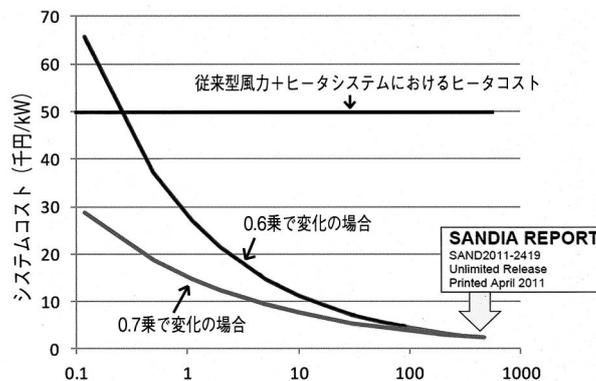


図 12 ヒータシステムとの優劣比較

でもコスト的に不利になる。さらに、熱機械であるため大きな規模を必要とするので WTES の開発着手はなかなか難しい。

これに対して、新たに提唱されたのが分散型 WTES である。これは、現行制度と合致した従来型風力と同等の発電を行いつつ、安定な熱供給を風車周囲に行うことでコージェネレーションのようにシステムの高稼働率化を実現して、経済的エネルギー源を実現するものである。

分散型 WTES の運用例を図 13 に示す。風車としては数百 kW 程度の容量を選定し、増速ギアにより誘導回転機を駆動する。この容量であればギアも軽く修理が容易になるためダイレクトドライブ化はあまり必要ではない。また、制限はあるものの、市販の誘導回転機をそのまま採用することも視野に入る。誘導回転機は、前述の発電発熱機として動作する。運転モードは次のようになる。

①良風況かつ高需要時

誘導発電機を発電機として従来風力と同等の発電を行う。また、風況予測の誤差によって発生した余剰風力エネルギーは、この誘導発電機にて 200 ～ 300℃ 程度の熱に変換し、風車位置における風のエネルギーを全て吸収する。

②良風況かつ低需要時

系統側で電力を受け取れない際は、100% 熱に変換し蓄熱する。

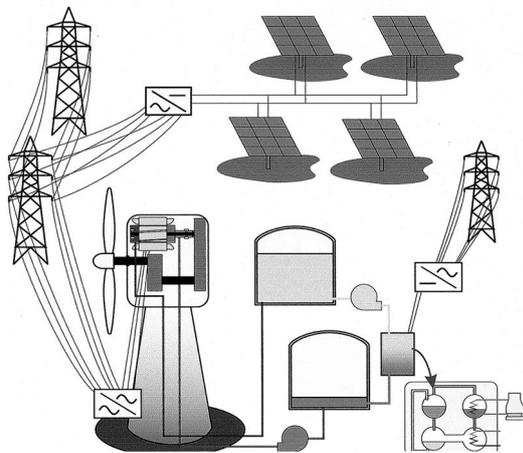


図 13 分散型風力熱発電の構成 (例)

③系統電力余剰時

系統電力余剰時には、その電力を吸収して熱に変換し蓄熱することで、他の再エネの発電抑制を回避させ、kWh ベースでの総合的な再エネ導入量の増加を実現する。この動作には図 10 のモータモードにおける始動状態を利用する。

発生させた熱は蓄熱し、熱需要に対して風況と関係なく必要時に供給する。この熱は熱電素子にて発電したり、吸収型冷暖房機にて空調出力としたり、あるいは直接暖房給湯、工場作業用熱源として用いる。

発熱時にどの程度の温度で放熱して蓄熱するかは重要な点である。高温になるほど各種用途が広がるため好ましいが、回転機そのものを発熱させるため電機子の絶縁が課題となる。放熱は回転機の冷却でもあるので、電機子から熱媒を入れて電機子そのものは温度を低くし、二次側にて所望の温度にまで加熱するなどの工夫が必要である。

また、高温になるほど放熱も大きくなる。数百 kW 程度の容量を考慮するとあまり高温での利用は現実的でないと考え、今回は 2 ～ 300℃ までの温度帯を目標とした。この温度帯であれば、熱媒循環などからの放熱も少ない。一方、100℃ より高温のため大きな温度差を取れるために蓄熱材も少なくなる。

吸収型冷凍機を利用して冷熱を利用する際には、この高温により効率が向上する。数百 kW 程度であれば数十軒の熱需要に相当するため長大な配管も不要で現実的である。よって、小型風車を各地に展開して利用する際の支障が少ない。ドイツやデンマークなどでは、発熱だけをする発熱機で地域暖房用に風力熱（発電）を試験する動きも出てきており⁽¹⁴⁾、この熱利用のシステムにも十分需要がある。蛇足ながらデンマークでは暖房給湯用に各家庭に熱供給配管が巡らされている。コペンハーゲン周辺だけでも 200km 近い長さの配管が敷設されている。

8. WTES の種類まとめ

WTESは、熱を介することで不安定な再エネを安定化して様々な用途に利用するもので、その容量、温度域によって用途や必要な技術が変わる。まだまだ不完全ではあるが、これらをまとめた物を表4に示す。状況に応じた選択が重要である。

また、WTESで重要な役割を果たす高温蓄熱技術の現状については表5の通りである。GWh規模で実用化されているのは560℃までの2タンク式・熔融硝酸塩を採用した顕熱蓄熱技術である。硝酸塩は硝酸ナトリウムと硝酸カリウムを6：4の割合で混合した物で、極めて安価である。解体時にはそのまま次の高温蓄熱設備に転用するか、肥料として販売できる。多数の太陽熱発電所で取り扱い方法が確立されており、配管も一般的配管材料で十分な耐久性があることが確認されている。

これ以外の蓄熱技術はまだテストプラントレベルであるが、使用材料の削減やさらなる経済性を求めて検討が進められている。特に、

人工燃料製造も含めた化学蓄熱は、移動体向け燃料製造や季節間のエネルギー蓄積などへの期待が大きい。

9. おわりに

WTESという日本で提案された新しい概念の発電システムを紹介した。電力系統は地域性もあり、また、再エネにも地域性がある。これを勘案しつつ、従来型風力あるいは太陽光など出力制御としては抑制しかできない再エネとのベストミックスで経済的な再エネシステムの構築が可能となる。要素部品の発熱機に開発要素が残っているが、既存技術の組み合わせで実現可能である。

2016年3月にはドイツ航空宇宙センター(DLR)と共催でWTESに関するワークショップが盛況のうちに終了し、国際協力体制も構築した⁽¹⁵⁾。

WTESは100年以上の歴史がある風力発電、数十年の歴史の太陽光・太陽熱発電と比べて新しい技術であるため今後様々な知的財産権

表4 WTESの温度別・容量別組み合わせ

容量	温度域	用途	必要要素技術例・応用先
100MW超 (単機1MW超)	～400℃	発電,(余剰電力吸収)	発熱機, 発電発熱機, 熱媒油, CSP併設
	～560℃	発電	発熱機, 熔融硝酸塩, CSP併設
500kW～10MW	-	熱の直接利用(農業温室,工場,鉱山,リサイクル他),バイオマスガス化(発電用), 発電,(余剰電力吸収)	発熱機, 発電発熱機, 熔融炭酸塩, CSP併設
500kW以下	～300℃	分散型風力熱, 熱の直接利用(蒸発式淡水化,地域冷暖房,温室加温,農産・海産物加工・保管, 道路加温, 防雪林代替), 発電,(余剰電力吸収)	発熱機, 発電発熱機, 吸収式冷凍機(集合住宅など大規模冷暖房), バイナリ発電, 熱電素子発電, ヒートポンプ
	～560℃	熱の直接利用(淡水化,工場熱需要,給食等熱源), 発電	発熱機, 発電発熱機, 熱電素子発電
-	700℃～	発電,水素製造, アンモニア製造, 燃料製造など熱化学	超電導発熱機, 超臨界二酸化炭素タービン, 熱電素子

表5 各種高温蓄熱技術

	蓄熱材料	エネルギー密度	技術到達程度
顕熱蓄熱	硝酸塩混合熔融塩	70kW-h/m ³	GW-h規模で実用化
	煉瓦,コンクリート,砂,砕石	ほぼ同上	高炉向けは実用化
潜熱蓄熱	硝酸塩混合物など	顕熱の2倍程度	開発段階
化学蓄熱	多種多様	200kW-h/m ³	研究段階

が得られる可能性があり，各界の積極的な関与が望まれる。世界的には巨大な市場があり2014年には40GW，2MW機換算で2万基建設されている⁽¹⁶⁾。前述のように，シーメンス社は開発着手した。地球温暖化対策に貢献するためにも日本での技術開発開始が急がれる。

参考文献

- (1) M. Arita, A. Yokoyama, Y. Tada, "Evaluation of Battery System for Frequency Control in Interconnected Power System with a Large Penetration of Wind Power Generation" Int. Conf. on Power System Tech., pp.22-26, Chongqing, Chi (2006.10)
- (2) Toru Okazaki, Yasuyuki Shirai, Taketsune Nakamura, "Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage," Renewable energy, 83, pp. 332-338 (2015)
- (3) <http://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2016/windpower-renewables/PR2016090419PEN.pdf> (アクセス日：2016.10.3)
- (4) Matthieu Jonemann, "Advanced Thermal Storage System with Novel Molten Salt" NREL/SR-5200-58595 (2013.5)
- (5) <http://www.energystorageexchange.org/projects>
- (6) Statistical Series of RED Electrica (<http://www.ree.es/en/publications/indicators-and-statistical-data/statistical-series>) (アクセス日：2016.9.12)
- (7) CEPOS, "Wind Energy - The Case of Denmark," p25. Center for Polotiske Studier (2009.9)
- (8) dena, "dena Grid Study II - Integration of Renewable Energy Sources in the German Power Supply System from 2015 - 2020 with an Outlook to 2025," German Energy Agency (2011.4)
- (9) U.S. Department of Energy, "Grid Energy Storage" (2013.12)
- (10) <http://social.csptoday.com/markets/solarreserve-eyes-chile-csp-wins-surplus-pv-disrupts-markets> (アクセス日：2016.9.15)
- (11) Yongliang Li, Hui Cao, Shuhao Wang, Yi Jin, Dacheng Li, Xiang Wang, Yulong Ding, "Load shifting of nuclear power plants using cryogenic energy storage technology," Applied Energy, Vol. 113, pp.1710-1716 (2014.1)
- (12) Charles Forsberg, "Strategies for a Low-Carbon Electricity Grid With Full Use of Nuclear, Wind and Solar Capacity to Minimize Total Costs" MIT-ANP-TR-162, (2015.8)
- (13) Olumide Olumayegun, Meihong Wang, Greg Kelsall, "Closed-cycle gas turbine for power generation: A state-of-the-art review," Fuel, Vol.180, pp.694-717 (2016.9.15)
- (14) Alejandro Nitto "Wind powered thermal energy systems (WTES) A techno-economic assessment of different configurations," Master Thesis, University of Oldenburg (2016.2)

(15) <http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/JGworkshop/index.html>

(16) 牛山泉：「風力発電が世界を救う」日経プレミアシリーズ (2012年11月)

[調査研究報告]

諸外国の電源開発計画と電力事情
および石炭火力を巡る動向

橋崎 克雄[※] (プロジェクト試験研究部
化石燃料グループ 主管研究員)



入谷 淳一^{※※} (プロジェクト試験研究部
化石燃料グループ 参事)



酒井 奨^{※※※} (プロジェクト試験研究部
化石燃料グループ 主管研究員)

1. はじめに

世界の石炭生産・消費量は近年一貫して増加傾向にあり、世界全体のエネルギー需要の約30%を担っている。国際エネルギー機関(IEA)の予測によれば、今後新興国における石炭消費量の増加により、2035年の世界の石炭消費量は現状の1.2倍にまで拡大すると見通されている。また、現在、世界の発電電力量の約40%は石炭火力発電により供給されているが、2035年には現状の1.3倍にまで増大するとされている。これは、安価で安定した電力を大容量で供給可能な石炭火力発電が、多くの新興国にとって今後も重要な電源であることを示していると言える。

一方で、地球温暖化防止対策として省エネルギーの推進と共に、二酸化炭素(CO₂)など温室効果ガスの排出量削減に向けた取り組みもなされている。2015年11月末から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、パリ協定が採択され、全ての条約締約国が参加する温室効果ガス削減の法的枠組みにわが国も合意し、より一層排出削減に努めていくこととなった。

日本の石炭火力発電技術は、過去40年にわたり環境負荷低減のための技術開発が行なわ

れ、特に、クリーンコール技術(CCT)については世界最高水準にある。また、発電所の運転保守技術の高度化により、発電効率の経年劣化などは最小限に抑えられている。

前述の通り、世界の石炭火力は今後も重要な電源として導入されると予想されるが、世界には既設の古いものも含めて環境対策が十分でない石炭火力発電所も多くあり、日本の持つ高度な環境対策技術の輸出支援により、世界的な石炭需要、および石炭火力の増加と、環境汚染抑止やCO₂などの温室効果ガス排出量削減とのジレンマ解決に大いに貢献できると考えられる。

そこで、環境対策技術に関する海外支援を目的に、アジア諸国として、インド、スリランカ、インドネシア、タイ、フィリピン、ベトナム、マレーシア、ミャンマー、中国、パキスタン、北南米諸国として、米国、カナダ、ブラジル、チリ、欧州諸国として、ドイツ、フランス、イタリア、ポーランド、英国、チェコ、セルビア、ボスニア、ウクライナ、ブルガリア、その他の国として、トルコ、南アフリカ、オーストラリアを加えた計27カ国の今後の発電電力量予想、石炭火力発電所の特徴、環境規制の動向、およびわが国の石炭火力発電設備の輸出状況などについて調査した。

本稿は、そこで得られた成果について紹介する。

2. 各国の電源開発計画と電力事情

主に国際エネルギー機関 (IEA) の資料をベースとし、27カ国の将来の発電電力量を予想した(1)～(7)。その一部を図1～5に示す。アジア諸国は総じて安価に大容量で電力供給可能な石炭火力が今後も増えていくことが伺える。

[インド]

インドでは、慢性的な電力不足から各地で停電が発生している。現在、7割以上を石炭火力が占める総発電電力量は、2040年にはさらに2013年の約3.5倍になる見通しである。今後、再生可能エネルギーを2022年までに1億7,500万kW導入することも目指している。なお、環境対策については、2017年以降に稼働する石炭火力に対し、日本とはほぼ同水準の環境基準値が要求される見通しである。

[インドネシア、フィリピン]

インドネシア、フィリピンも現在、石炭火力

が主力であり、今後も電力需要が伸びるとともに石炭火力の需要も伸びると予想されている。インドネシアでは、家庭用、工業用の電力需要が多く、電力不足が深刻化している。商業用が高い伸びを示すフィリピンでは、現状約43%を占める石炭火力の導入比率を再生可能エネルギーと同じ30%まで縮小しようとしているが、コスト面から思うようには進んでいない。

[タイ、マレーシア]

タイ、マレーシアは、ガス火力が主であるが、今後、石炭火力の需要も伸びると予想されている。電力供給が逼迫しているタイでは、再生可能エネルギーの導入を進めているほか、石油使用量の削減を目的としたSPP (Small Power Producers) プログラムというのがあり、タイ王国発電公社 (EGAT) が9万kWまでの電力の買取りを保証し、それを超える電力および熱 (蒸気・冷却水) を事業者等に独自に販売できる制度もある。

[ベトナム]

ベトナムは、2011年7月に策定された国家電力開発計画 (第7期電力計画) において、

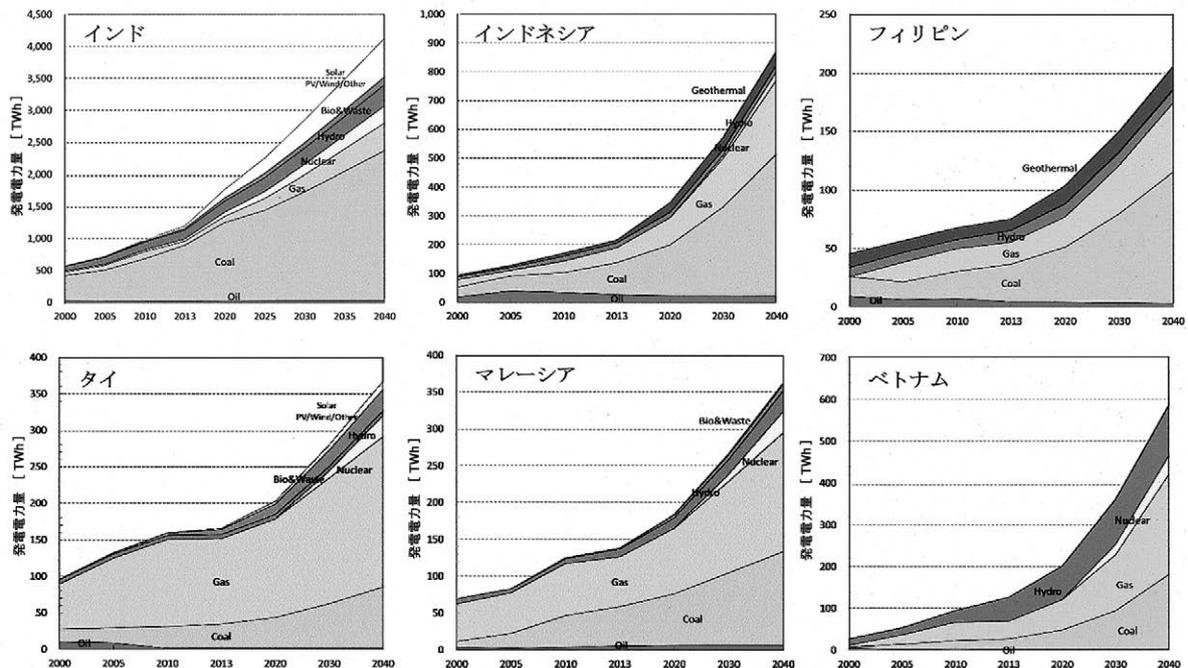


図1 電源構成と推移 (インド、インドネシア、フィリピン、タイ、マレーシア、ベトナム)

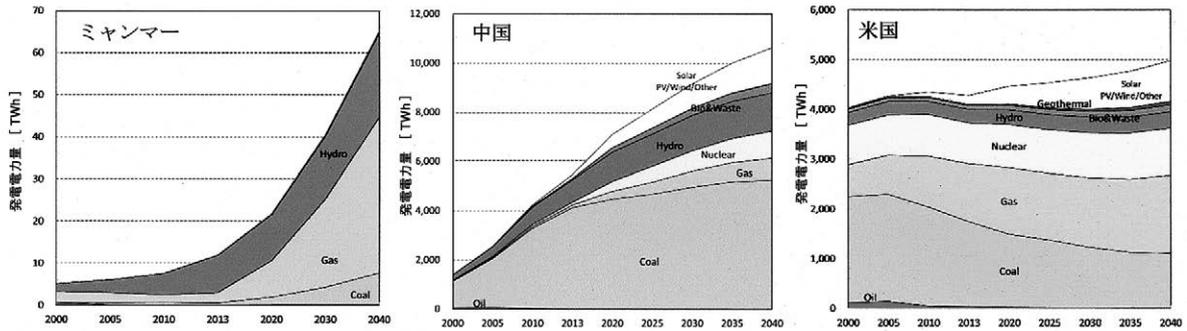


図2 電源構成と推移（ミャンマー，中国，米国）

2011～2020年の間に電力需要が年率13%程度増加し、2030年には2010年の7.1倍となるなど、今後も著しい電力需要の増加が予想されている。さらに2030年までに、水力への依存度を軽減し、再生可能エネルギーや原子力を増強するとしている。

[ミャンマー]

ミャンマーでは、2013年の販売電力量が、2001年比の3倍以上となり、ガス火力の導入が著しく伸びると予測されている。政府は、豊富な水力・石炭・天然ガス・石油資源、風力、太陽光による潜在発電量を活用し、2030年までに発電容量2,400万kWの確保を目指している。しかし、法整備が不十分なこと、住民らの反対運動により電力整備は停滞している。

[中国]

中国では、発電量が1980～2013年の33年間で約18倍に増加し、2011年には米国を抜き世界最大の電力消費国となった。総発電電力量の約7割が石炭火力、2割が水力であり、今後、ガス火力、原子力、風力、水力などの伸びが期待されているが、導入はなかなか進んでいない。さらに、現在は経済成長率が鈍化し、電力需要の増加率も下がりつつある。電力消費の4分の3は工業用で、その消費地は東部沿岸部が中心である。一方の発電は、石炭産地の山西省・内モンゴル自治区などが、水力は湖北省・雲南省・四川省が中心であり、消費地と発電地域が遠隔であることが供給を不安定化させている。

[米国]

米国では、2015年8月に米国環境保護局（EPA）が発表したクリーン・パワー・プラン（CPP）によるCO₂排出規制により、2030年までに2005年比32%のCO₂削減を目指している。これにより石炭火力比率は2014年の39%から2030年には27%に減少し、逆にガス火力が伸びると予想されている。また、シェール革命の影響で天然ガス価格が10年前に比べ約3分の1に下落し、ガス火力の競争力が高まっている。2016年には、風力・天然ガス火力・太陽光の3つが主力電源になると米国エネルギー情報局（EIA）は予測している。米国では、大手企業が固定価格で長期に大口電力を直接調達できるようになったため、コストの最も安い風力発電の導入が増えており、テキサスを中心に年率約50%のペースで成長している。

[ブラジル，チリ]

南米のブラジル、チリは、豊かな水資源による水力が中心となっているが、ブラジルでは、今後、ガス火力や太陽光などの再生可能エネルギーの導入が期待されている。チリは、2011年から2020年にかけて年率6～7%で電力需要が増加するとされ、2030年には2010年比で約2.5倍になると予測されている。2012年には石炭火力が水力を上回り、今後も石炭火力は増加していくと予想されている。

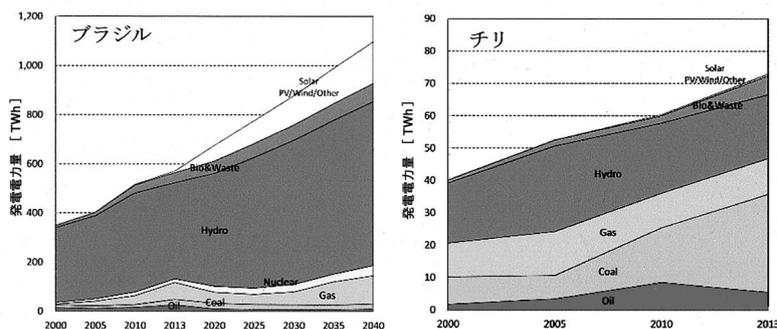


図3 電源構成と推移（ブラジル，チリ）

欧州では、再生可能エネルギーの導入が進んでいるが、各国とも課題を抱えている。

[ドイツ]

ドイツは、2022年までに全ての原子力発電を停止する予定で、これにより石炭火力の比率が増している。消費電力量自身は横ばい状態であるが、2050年に1990年度比で温室効果ガス（GHG）80～90%削減を目標としており、これにより2050年の褐炭石炭火力は、現状の10分の1以下まで減少すると予測されている。

しかし、固定価格買取制度（FIT）による補助を受けた再生可能エネルギー電源や安価な褐炭石炭火力に対し、ガス火力は発電コストが高いため、逆に、老朽褐炭石炭火力を稼働するという、環境面では矛盾した状況も発生している。また、2022年までに電力需要の10%を風力でまかなうとしているが、設置反対運動などでその達成は困難と見られている。

[イタリア]

イタリアは、水力を除きエネルギー資源に乏

しく、また、2011年に原子力開発を中止したことで、エネルギーの8割以上を輸入に依存している。主力電源は、コンバインド・サイクル・ガス火力で、4割弱程度とその割合が最も多い。近年、再生可能エネルギー導入の増加に伴い、火力発電は建設の延期や停止を余儀なくされる傾向にある。再生可能エネルギーの導入比率を2020年までに26.39%に引き上げるとしているが、系統利用賦課金の割合が2012年に約20%に達し、需要家負担が増大したため、2013年に新設太陽光に対するFITは廃止されている。

[英国]

英国のGHG排出量削減目標は、2030年までに1990年比60%減であり、英国エネルギー・気候変動省（DECC）が2015年10月に、国内のCO₂回収・貯留施設のない全ての石炭火力を2025年までに閉鎖すると発表している。しかし、全体の30%を占める石炭火力の全廃は容易でなく、また、原子力やガス火力などを加えた全発電設備の4分の1が老朽化しており、2020年頃には深刻な電力不足が懸念されてい

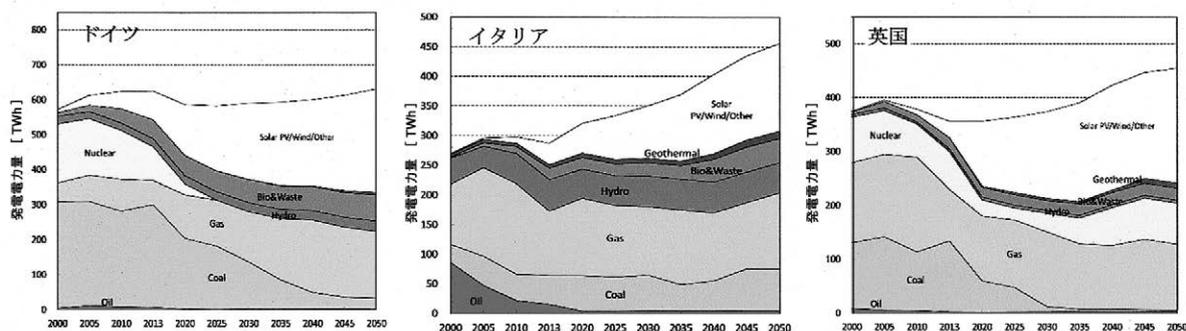


図4 電源構成と推移（ドイツ，イタリア，英国）

る。2030年には、天然ガスの輸入依存度が現状の約50%から75%まで高まることを懸念し、電力の20%を原子力で対応する計画も見られる。英国では太陽光の発電量が、月間ベースで石炭火力を上回る月もあると言われているが、欧州連合（EU）離脱により、現存石炭火力を引き続き利用していく可能性もある。

[ポーランド]

ポーランドの消費電力量は、過去約40年間でほぼ倍増している。石炭火力が主力であり、2013年時点で全発電電力量の約85%を石炭火力が占めている。今後の予想については、EUのGHG削減目標（2030年に40%減）を達成するために原子力などのCO₂排出量の少ない電源導入が不可欠と見られている。

[ウクライナ]

ウクライナでは、2030年の消費電力量が2015年比約37%増と見込まれ、今後も電力需要は増加することが予想されている。同国では原子力が主力だが、近年では石炭火力の導入量が増している。

[ルーマニア]

ルーマニアの電源構成は、2013年時点で石炭火力が約29%、水力が約26%、原子力が約20%、再生可能エネルギーが約8%となっている。2050年においても各々導入が進み、現状に似た電源構成で推移すると予想されている。

[トルコ]

トルコは、ガス火力および石炭火力が主力電源であり、水力とともに総発電電力量は伸びていくと予想されている。

[南アフリカ、豪州]

南アフリカ、豪州の主力電源は石炭火力であり、南アフリカでは、2013年時点で総発電電力量の約94%が石炭火力である。今後、エネルギーの多様化は進むと予想されるが、2040年～2050年においても石炭火力の割合は60%以上になると予想されている。

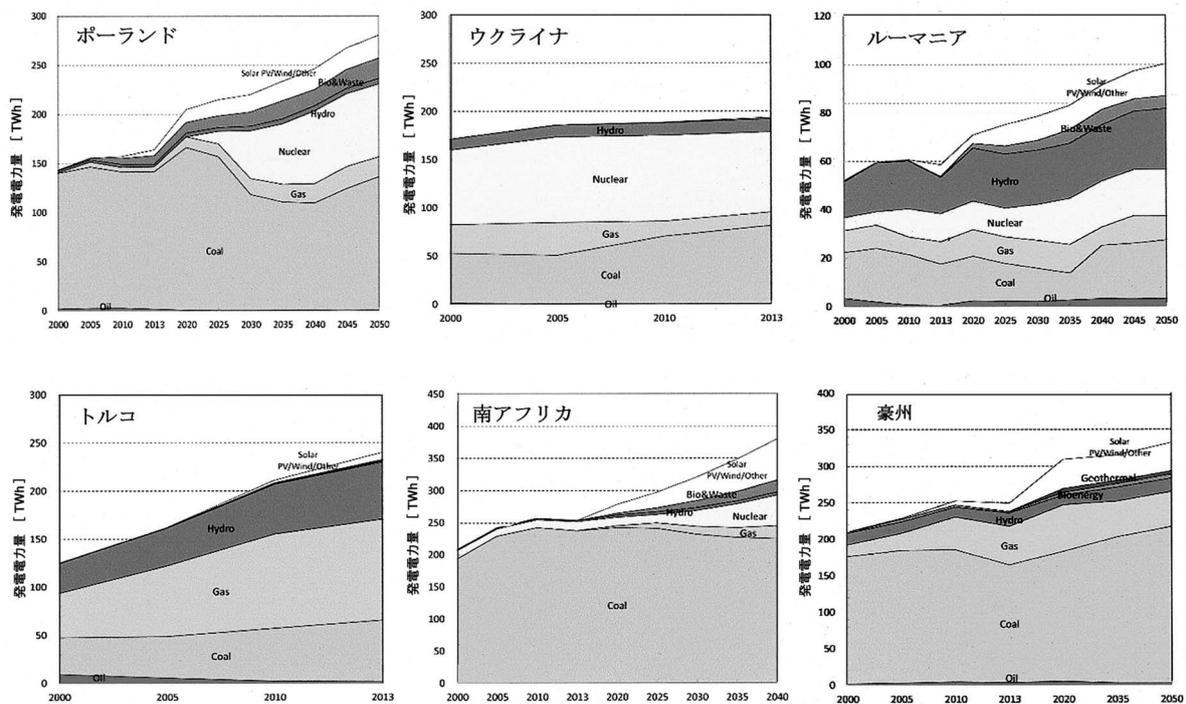


図5 電源構成と推移（ポーランド、ウクライナ、ルーマニア、トルコ、南アフリカ、豪州）

3. 各国の電力価格動向

表1に各国の平均的な電気料金の一覧を示す。アジア諸国は、概して消費電力量の増大に伴い慢性的な電力不足に陥っており、すべての国で電気料金は上昇傾向にある。特に、ミャンマーは2006年に大幅な上昇が見られた。インドネシア、ベトナムの電気料金上昇も大きい。2015年10月時点では、フィリピンがアジアで最も電気料金が高いとされている。マレーシアの電気料金は、月当たりの電力使用

量により設定されており、一般利用者の料金については比較的安定している。

北米諸国も徐々にではあるが、電気料金は上昇基調にある。カナダは、電力消費量や電力輸出量の大きな州は電気料金が安く、人口密度の低い地域は非常に電気代が高くなるなど地域性がある。

南米諸国は、水力比率が高く比較的電気料金は安定しているが、チリは、隣国アルゼンチンからのガス供給制限などにより電気料金が上昇することがある。

欧州諸国では、再生可能エネルギーの導入や石炭火力の閉鎖などに因るとされる電気料金の上昇がドイツや英国で見られる。イタリアは、輸入天然ガスの依存から電気料金が高くなっている。

南アフリカ、豪州でも2000年代に入り、電気料金が3～4倍になっており、電力市場の改革などが求められている。

表1 各国の電力料金一覧⁽⁸⁾⁽⁹⁾

国名	電気料金 (US cents/kWh)	日付
インド	0.1~18(平均7)	2013.01.01
インドネシア	11	2015.07.21
タイ	6~13	2013.07.01
フィリピン	18.22	2015.10.07
ベトナム	6.20~10.01	2011.
マレーシア	7.09~14.76	2013.04.01
ミャンマー	3.6	2014.02.28
中国	4~45	2014.
米国	8~17: 37 [ハワイ]	2012.09.01
カナダ	6.52~11.71 [オンタリオ州トロント]	2014.02.09
ブラジル	25.00	2016.07.07
チリ	23.11	2011.01.01
ドイツ	32.04	2015.02.01
イタリア	28.39	2011.11.01
英国	22	2015.05.01
ポーランド	9.63~15.90	2015.
ウクライナ	2.6~10.8	2014.
ブルガリア	9.15~13.40	2011.11.01
ルーマニア	18.40	2013.01.26
トルコ	7.84~13.66	2015.
南アフリカ	13	2015.09.29
豪州	22.02~39.85	2012.08.23

4. 各国の石炭火力発電計画

各国で計画中の250MW以上の石炭火力発電所の計画数と容量を図6に示す。

中国、インドは他国に比べ桁違いにその容量が大きく、今後も引き続き多くの石炭火力が建設されていくことが伺える。ベトナム、インドネシア、トルコなどがこれに続いている。

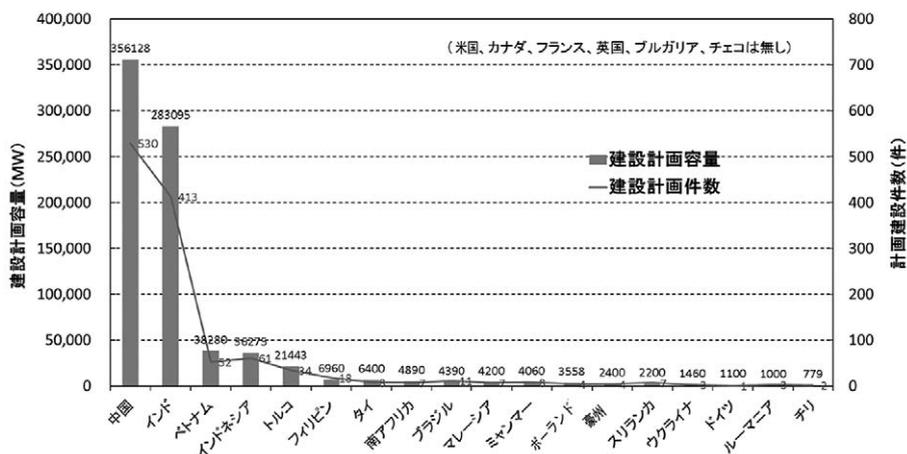


図6 各国の石炭火力建設計画数と容量⁽¹⁰⁾

5. 各国の石炭火力発電所の調査

ここでは、主要国で稼働している 250MW 以上の石炭火力の「運開年代別容量」, 「技術別容量 (亜臨界, 超臨界 (SC), 超々臨界 (USC))」, 「炭種別発電容量」についてまとめた。また、インド、中国、日本における石炭

火力発電の技術別運開容量の年別推移についてもまとめた。

(1) 運開年代別発電容量

運開年代別の総発電容量 (MW) と、その割合を図 7 に示す。2000 年以降に運開した石炭火力発電所が容量ベースで 50% 以上を占めるの

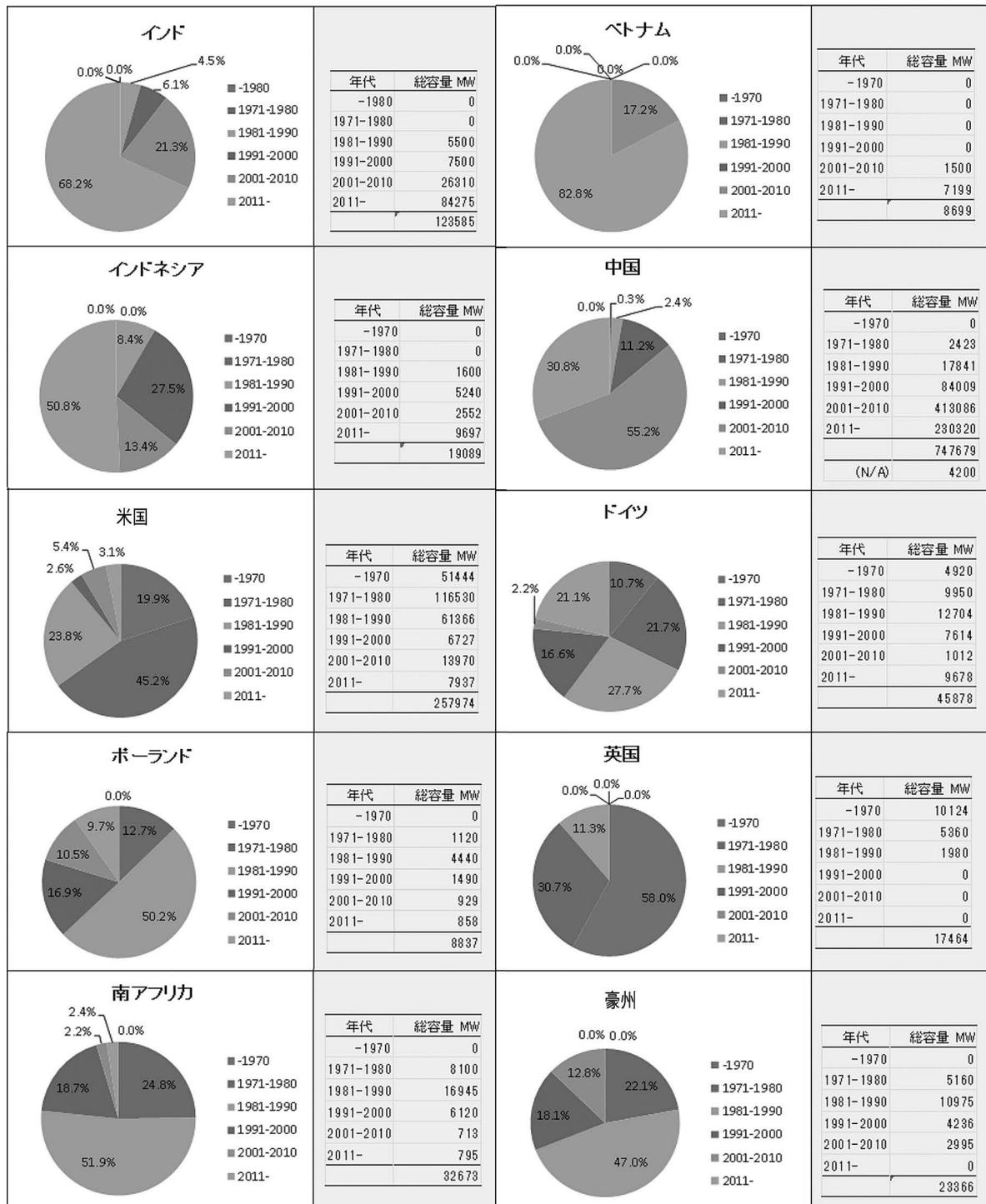


図 7 運用年代別の総発電容量 (MW) の割合 (10)

は、フィリピンを除くアジア諸国である。特に、経済成長が著しい中国、インドでは、それぞれ86%、89.5%と高い。インド、ベトナムなどは、2011年以降に運開した石炭火力が大半である。

一方、2011年以降に新規稼働の無い国が、オーストラリア、英国などである。石炭資源の豊富な米国、豪州、ドイツ、ポーランドなどは、1970年代以前から2000年代までの各年代に逐次運開した石炭火力が現在も運用されているのが特徴である。

(2) 技術別発電容量

石炭火力の発電技術（亜臨界、超臨界、超々臨界）別の容量を図8に示す。亜臨界技術のみの国のフィリピン、ブラジル、チリ、フランス、英国、ルーマニアなどは省略した。

超臨界を導入しているのは、インド、マレーシア、中国、米国、イタリア、ドイツ、トルコ、ウクライナの他、インドネシア、タイ、ベトナム、豪州、カナダ、ポーランド、南アフリカであった。

超々臨界を導入している国は、マレーシア、中国、米国、ドイツ、イタリアの5カ国に限られる。

(3) 炭種別発電容量

石炭には、無煙炭、瀝青炭、亜瀝青炭、褐炭および廃石炭などがあり、単独または混焼で利用している。図9に各国の炭種別発電容量を示す。

瀝青炭を主に利用する国は非常に多く、インド、タイ、フィリピン、中国、トルコ、豪州、米国、ドイツの他、チリ、イタリアであった。なお、図にないマレーシア、英国、南アフリカは、瀝青炭のみの利用であった。

亜瀝青炭の利用は、インドネシア、米国、豪州、ウクライナの他、カナダ、ポーランドで多かった。

褐炭産出国は東欧に多く、ルーマニアなどは100%褐炭焚きであり、ドイツ、タイ、トルコでもその利用率が高い。

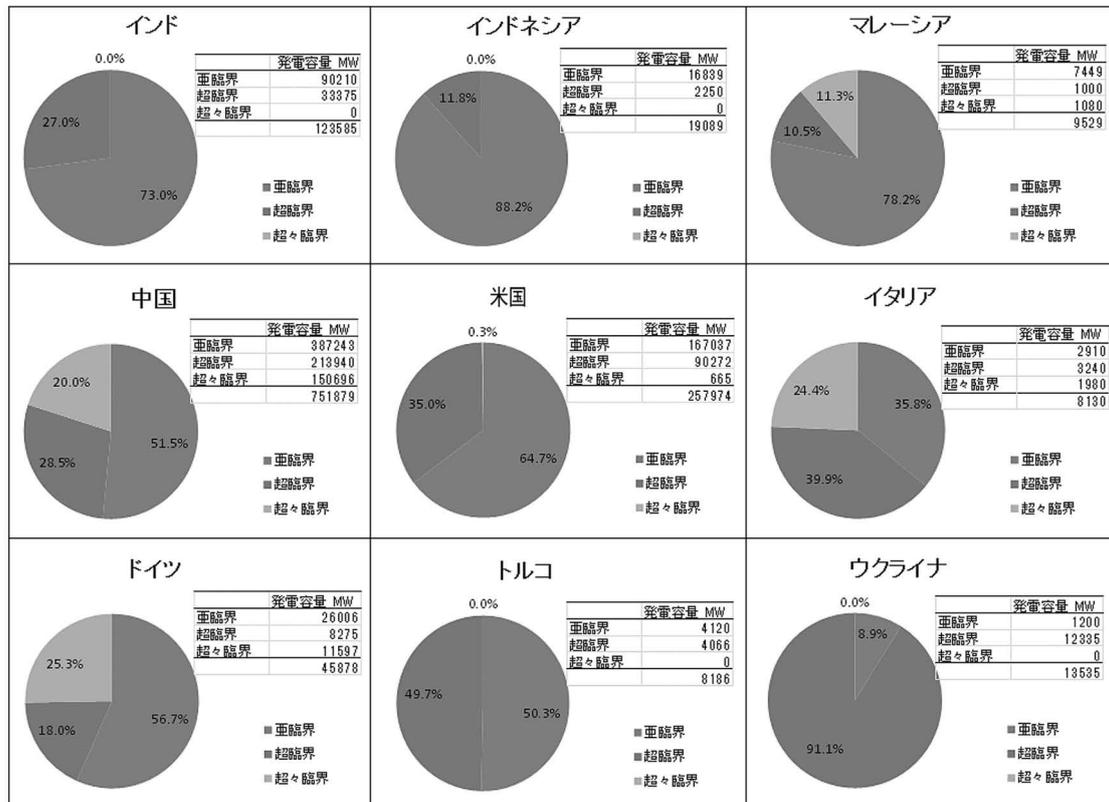


図8 技術別発電容量の割合 (10)

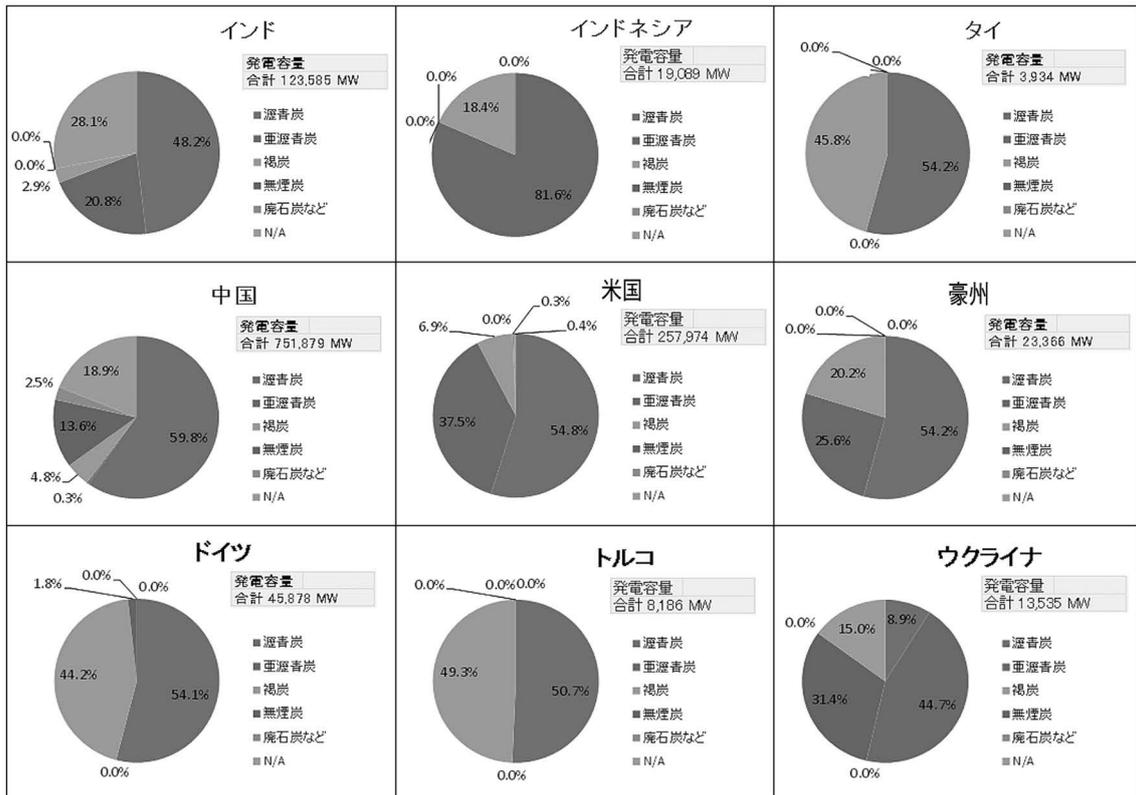


図9 炭種別発電容量の割合 (10)

無煙炭の利用は、中国、ベトナム、ウクライナに限られていて、ベトナムは、すべて無煙炭焚きを採用している。

東南アジア新興国は、石炭輸出国のオーストラリアとインドネシアに近いので輸入炭の確保が容易である。マレーシア、フィリピンは瀝青炭・亜瀝青炭の輸入に依存している。成長著しいインドは、ほぼ国内炭に依存しているが、沿岸部で一部インドネシア炭を採用している。

(4) 石炭火力発電技術の年別推移

本節では、インド、中国、日本に焦点を絞り、各国内の250MW以上、稼働・建設中の石炭火力の「技術別容量（亜臨界、超臨界、超々臨界）」の年々の推移をまとめた。その結果を図10～12に示す。

インドでは、亜臨界ボイラは2000年代に入り、超臨界ボイラは、2010年より稼働し始めている。超々臨界ボイラは、2016年より稼働

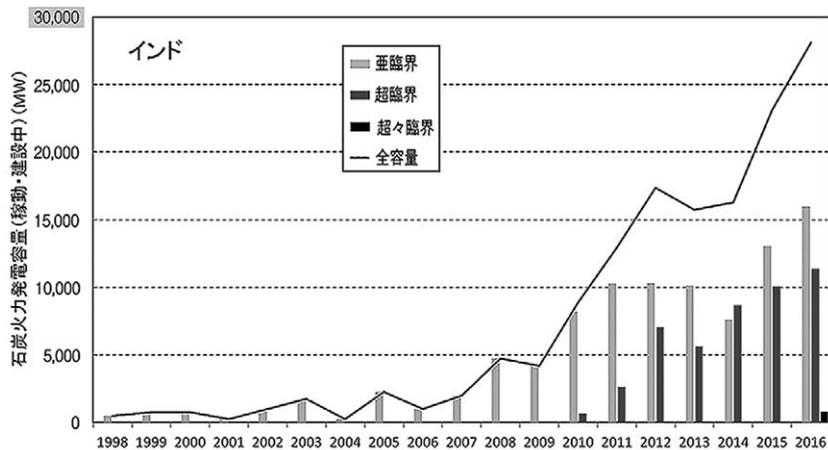


図10 インドの石炭火力発電の技術別運開・建設中容量の推移 (10)

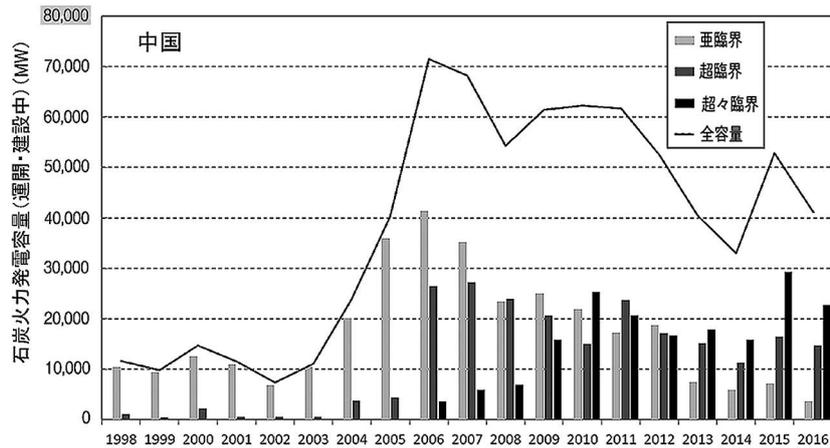


図 11 中国の石炭火力発電の技術別運開・建設中容量の推移 (10)

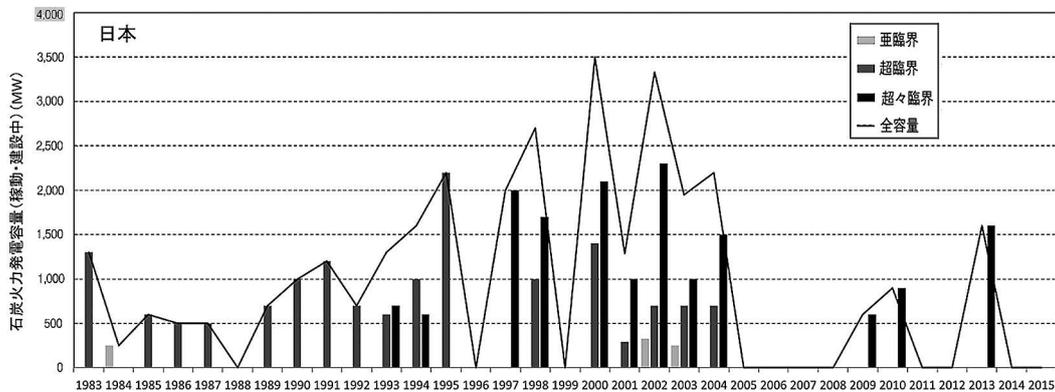


図 12 日本の石炭火力発電の技術別運開・建設中容量の推移 (10)

し始める予定で現在建設中である。今後、超臨界ボイラの増加とともに亜臨界ボイラは減少し、さらに超々臨界ボイラの増加とともに、超臨界ボイラは減少すると予想される。

中国は、2002年まで亜臨界ボイラが中心で1,000万kW/年程度の市場であったが、その後、急激に市場が拡大し、超臨界ボイラの稼働も合わせると2006年には7,000万kW/年の市場に成長している。超々臨界ボイラもこの年より稼働し始め、今では、ほぼ半分以上が超々臨界ボイラとなっている。

日本の石炭火力市場では、1980年代にはすでに超臨界ボイラが稼働しており、超々臨界ボイラも1993年に稼働し始めているが、総容量は平均して100～150万kW/年であり、インドの30分の1、中国の60分の1程度の市場の大きさである。

6. 各国の環境規制

各国における石炭火力に係る環境規制値(SO_x, NO_x, Dust(煤塵))の動向調査を行い、主要各国の各規制値の一覧を表2にまとめた。

欧州諸国とその近隣国は、ほぼ欧州委員会の規制値を踏襲し、近年はCO₂削減問題も絡み厳しい環境規制値が敷かれるようになってきた。

アジア新興国諸国も、近年の急激な経済発展の下、電力需要の増大とともに大気汚染問題が顕在化し、各国とも規制値が厳しくなり始めている。なお、日本の場合は、本規制値より厳しい値の協定値を地方自治体と締結し環境基準を厳守している。

表2 各国の石炭火力に対する環境規制値 (SOx, NOx, Dust (煤塵)) (11)

	SOx	NOx	Dust
世銀グループレベル	700ppm	365ppm	50mg/m ³ N
インド	2003.1.1~2016.12.31 ≤500MW 210ppm >500MW 70ppm	2003.1.1~2016.12.31 146ppm	2003.1.1~2016.12.31 50mg/m ³ N
	2017.1.1~ 35ppm	2017.1.1~ 48.7ppm	2017.1.1~ 30mg/m ³ N
インドネシア	既設/新設:263ppm	既設:414ppm 新設:365ppm	既設:150mg/m ³ N 新設:100mg/m ³ N
タイ	≤50MW 126ppm >50MW 63ppm	97.4ppm	80mg/m ³ N
フィリピン	既設:350ppm 新設:70ppm	既設:487ppm 新設:243.5ppm	150mg/m ³ N
ベトナム	既設:525ppm 新設:175ppm	既設:487ppm 新設:317ppm	既設:400mg/m ³ N 新設:200mg/m ³ N
中国	新設:35ppm 既設:70ppm Key region:17.5ppm	48.7ppm Key region:48.7ppm	30mg/m ³ N Key region:20mg/m ³ N
米国	180ppm gross output ; 90% reduction	195ppm gross output	51.5mg/m ³ N gross output 18.3mg/m ³ N heat input. or 37.2mg/m ³ N input and 99.8% reduction
EU	既設 50~100MW 140ppm 100~300MW 87.5ppm ≥300MW 70ppm	既設 50~100MW 146ppm 100~300MW 97.4ppm ≥300MW 97.4ppm	既設 50~100MW 30mg/m ³ N 100~300MW 25mg/m ³ N ≥300MW 20mg/m ³ N
	新設 50~100MW 140ppm 100~300MW 70ppm ≥300MW 52.5ppm	新設 50~100MW 146ppm 100~300MW 97.4ppm ≥300MW 73ppm	新設 50~300MW 20mg/m ³ N ≥300MW 10mg/m ³ N
日本	$q = K \times 10^{-3} \times He^2$ q: 排出量(m ³ N/h), K: 係数, He: 煙突高(m) Q=1000000m ³ N/h, He=170m, K=3(Tokyo, general)で 86.7ppm	200~250ppm	100mg/m ³ N

7. 石炭灰の処理状況

石炭火力では、排出される灰処理について、各国で環境保護の観点からその有効利用の検討が行なわれている。表3に主要な国の有効利用率とその用途先について例示する。わが国の有効利用率は、電気事業で96%程度、一般産

業で98%、全体として96%程度となっている。利用先としては、セメント分野が7割程度を占め、他に土木、建設、農林分野と続く。

表3には、産廃処理や急激な排出量の増大に因るとみられる低い利用率の国もあるが、今後、利用率の向上を期待するところである。

表3 主要国の石炭灰処理状況 (2013年) (12) ~ (18)

国名	石炭使用量(2013)		出灰量		有効利用率	有効利用用途
	(千トン/年)		(千トン/年)			
	全体	内電力	全体	内電力		
インド	803,809	574,946	該当なし	184,140 (2014) Fly Ash のみ	55.69% (2014) Fly Ash のみ	セメント:42.26%/土木分野:24.40%/建築材料:11.78%/その他:21.56% (2014)
タイ	37,634	23,109	該当なし	3,000 (2004)	90% (2004)	セメント・コンクリート
ベトナム	28,066	10,892	該当なし	2,172 (2010)	<20% (2010)	土木分野
中国	4,022,432	1,951,774	該当なし	480,000 (2010) Fly Ash のみ	67% (2010)	セメント:38%/コンクリート:14%/建築材料:26%/その他:22% (2010)
米国	839,949	782,388	該当なし	117,648 (2014)	48% (2014)	セメント:32%/建築材料:13%/石膏ボード:18%/その他:37% (2014)
EU15	456,439	356,026	68,670 (2012)	48,327 (2010)	52% (2010)	セメント:28%/土木材料:10%/石膏ボード:13%/その他:49% (2010)
南アフリカ	181,879	122,400	該当なし	35,000 (2014)	7% (2014)	セメント
豪州	121,185	113,405	該当なし	11,020 (2012)	49% (2012)	セメント関連:67%/その他:33% (2012)

8. まとめ

石炭火力は、新興国にとって今後も重要な電源とあり続けられると思われる。日本も過去40年にわたりCCTを磨きながら石炭火力を利用し経済発展を遂げてきた。日本が培ったこの高度な環境対策技術を海外へ技術輸出を図ることで、新興国も経済発展を遂げながら環境汚染抑止、CO₂など温室効果ガス排出抑止に貢献できることから、各国と協調しながら環境対策支援に取り組むことこそ、今、日本に求められていることではないかと考える。

[謝辞]

本稿は、平成27～28年度NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）委託事業「クリーンコール技術海外普及展開事業／石炭高効率利用システム案件等形成調査事業／可能性調査」での成果を基にしたものであり、執筆に当たりご協力頂いたNEDO、および関係各位の皆さまに心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) IEA World Energy Outlook 2015 (2015.11)
- (2) IEA Energy Balances of OECD/non-OECD countries 2015 (2015.7)
- (3) IEEJ Asia/World Energy Outlook 2015 (2015.10)
- (4) Canada's Energy Future 2016 (2016.1)
- (5) EU Energy, Transport and GHG emission trend to 2050 (2013.12)
- (6) BREE 2034-2035 (2011.12) , 2049-2050 (2014.11)
- (7) Energy outlook for Asia and the Pacific 2013 (Asian development bank) (2013.10)
- (8) https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_pricing
- (9) eurostat Statistics Explained
- (10) GLOBAL ENERGY OBSERVATORY など
- (11) IEA CLEAN COAL CENTER DATABASES など
- (12) "Fly Ash Utilization : A Brief Review in Indian Context", IRJET Vol.03 Issue: (2016.4.4)
- (13) DEVELOPMENT OF FLY ASH USAGE IN THAILAND
- (14) "Current Status of and Prospect of Fly Ash Utilization in China", Zhenhua Tang and et al.
- (15) "2014 Coal Combustion Product (CCP) Production & Use Survey Report", American Coal Ash Association
- (16) "Production and Utilization of CCPs in 2010 in Europe (EU 15)", ECOBA

(17) "Coal Ash in South Africa", Richard A Kruger, WOCA 2015

(18) "COAL ASH matters 15 NOVEMBER", Ash Development Association of Australia

研究所のうごき

(平成 28 年 7 月 2 日～9 月 30 日)

◇ 月例研究会

第 358 回月例研究会

日 時：7 月 29 日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. エネルギーハーベスティングの動向とエネルギー産業（電気、ガス、石油）への応用可能性
(株)NTT データ経営研究所 社会・環境戦略コンサルティングユニット シニアマネージャー 竹内敬治 氏)
2. 安定発電を実現する風力熱発電と熱応用
(一財) エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 主管研究員 岡崎 徹)

第 359 回月例研究会

日 時：8 月 26 日 (金) 14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 廃止措置のプロジェクト管理
(日本原子力発電(株) 執行役員 廃止措置プロジェクト室長 山内豊明 氏)
2. 廃止措置管理のための人材育成
(一財) エネルギー総合工学研究所 原子力工学センター 耐震・廃止措置グループ 参事 田中健一)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：石倉 武

テーマ：日本の原子力発電所の廃止措置の現状と今後の展望

発表先：日本－スペイン廃止措置セミナー（主催：(一社) 日本原子力産業協会，スペイン大使館）

日 時：7 月 11 日

発表者：坂田 興

テーマ：COP21 の概要と低炭素社会への水素の貢献

発表先：天然ガス高度利用研究会

日 時：7 月 13 日

発表者：塙 雅一

テーマ：A-SCC 実用化の課題とその対策

発表先：(一財) 石炭エネルギーセンター CCT
ワークショップ 2016

日 時：7 月 20 日

発表者：坂田 興

テーマ：CO₂ フリー水素の意義と経済的成立性の検討

発表先：燃料電池実用化戦略協議会 (FCCJ)
CO₂ フリー水素セミナー

日 時：7 月 29 日

発表者：飯田 重樹

テーマ：World Hydrogen Energy Conference (WHEC) 2016 概要

発表先：(一社) 水素エネルギー協会 第 151 回
定例研究会

日 時：9 月 6 日

発表者：水野 有智

テーマ：World Hydrogen Energy Conference (WHEC) 2016 各国政策

発表先：(一社) 水素エネルギー協会 第 151 回
定例研究会

日 時：9 月 6 日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：気候工学研究の現状

発表先：(公社) 化学工学会 第 48 回秋季大会（於
徳島大学）

日 時：9 月 6～8 日

発表者：黒沢 厚志，杉山 昌広（東京大学），増田
耕一（海洋研究開発機構），森山 亮，石
本 祐樹，加藤 悦史

テーマ：気候工学研究の現状

発表先：環境経済・政策学会 2016 年大会（於
青山学院大学）

日 時：9 月 10～11 日

発表者：相澤 芳弘

テーマ：Prospects of Hydrogen Energy System
towards the Low Carbon Society

発表先：13th Annual NH₃ Fuel Conference 2016

(主催：NH3 Fuel Association)

日 時：9月18日

発表者：坂田 興

テーマ：CO₂ フリー水素の大陸間輸送～持続可能
社会構築への貢献～

発表先：(公社) 日本船舶海洋工学会

日 時：9月29日

[論文]

発表者：加藤 悦史

テーマ：Regional carbon fluxes from land use and
land cover change in Asia, 1980-2009

発表先：Environmental Research Letters

日 時：7月8日

発表者：Ryo Moriyama, Masahiro Sugiyama, Atsu-
shi Kurosawa, Kooiti Masuda, Kazuhiro,
Tsuzuki, Yuki Ishimoto

テーマ：The cost of stratospheric climate engi-
neering revisited

発表先：Mitigation and Adaptation Strategies
for Global Change

日 時：9月15日

[寄稿]

発表者：岡崎 徹

テーマ：風力熱発電

発表先：『電気評論』7月号

発表者：坂田 興

テーマ：平成27年の水素利用技術

発表先：『日本機械学会誌』8月号（「機械工学年
鑑」特集号）

発表者：岡崎 徹

テーマ：安定発電を実現する風力熱発電の可能性
と期待される材料技術・周辺技術

発表先：『マテリアルステージ』8月号（㈱技術
情報協会）

発表者：岡崎 徹

テーマ：風力熱発電とその超電導化などバリエー
ション

発表先：『日本冷凍空調学会』9月号

発表者：松井 一秋, 楠野貞夫, 笠井 滋, 林道 寛,
藤井 貞夫

テーマ：平成27年における重要なエネルギー関
係事項「原子力」

発表先：『日本エネルギー学会誌』9月号（Annual
Energy Review-2015）

発表者：坂田 興

テーマ：平成27年における重要なエネルギー関
係事項 水素分野

発表先：『日本エネルギー学会誌』9月号（Annual
Energy Review-2015）

発表者：蓮池 宏

テーマ：運輸部門における再生可能エネルギー利
用

発表先：『日本太陽エネルギー学会誌』9月号（特
集：100%再生可能エネルギーを利用す
る社会に向けた可能性を考える）

発表者：笹倉 正晴

テーマ：DOE's 2016 Annual Merit Review and
Peer Evaluation Meeting

発表先：『水素エネルギー協会（HESS）会誌』
第41巻第3号（9月発行）

◇人事異動

○7月6日付

（嘱託採用）

Richard Finger 原子力工学センター 嘱託研究
員

○8月1日付

（嘱託採用）

Alexandre Ezzidi 原子力工学センター 参事

○9月30日付

（退職）

佐藤 優美子 経理部 研究員 兼 プロジェク
ト試験研究部

編集後記

近年、IoTや人工知能、ビッグデータ等に関する技術開発が急速に進められており、これらにより、世界の産業構造や人々の生活、社会のあり方が大きく変わろうとしている。とりわけ最近では、世界的なIT企業の参入により激しい競争が繰り広げられている自動運転車開発が世間の耳目を集めている。これが実用化すれば、人の移動や物流などが大きく変わり、社会の様相が一変することになるであろう。

エネルギー分野においても、多くの設備機器に組み込まれたセンサーにより収集されたビッグデータをクラウドで管理・処理し、設備の予防保全や効率的・経済的な運用管理を目指す取り組み、人工知能を再エネの発電予測や電力取引等に应用する動きなどが活発化している。

将棋や囲碁のプロ棋士に勝ったことが大きなニュースとなった人工知能だが、人工知能が膨大なデータを整理・統合し

てある案件を処理する場合、彼（彼女）は何をすべきかを理解していなければならない、そのためには自分が今何をしようとしているかを知っている必要があり、これはまさに人が物事を判断・決定する際の「意識」と同じであって、人工知能も「意識」を持つことが可能であると、ある本で読んだ。

エネルギー分野の二酸化炭素排出削減に向けた有望な手段として省エネルギーにも大きな期待が寄せられているが、例えば人の日常生活においては、何かを行うために必然的にエネルギーを利用しているのであり、エネルギー利用それ自体が目的ではない。そういう意味では、何かを行うのに「意識」することなく省エネが図られていることが理想であり、人工知能が人に代わって省エネ「意識」を持って人の生活を支えてくれることが望まれる。

編集責任者 重政弥寿志

季報 エネルギー総合工学 第39巻第3号

平成28年10月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

FAX (03) 3501-1735

<http://www.iae.or.jp/>

(印刷) 株式会社日新社

※ 無断転載を禁じます。

