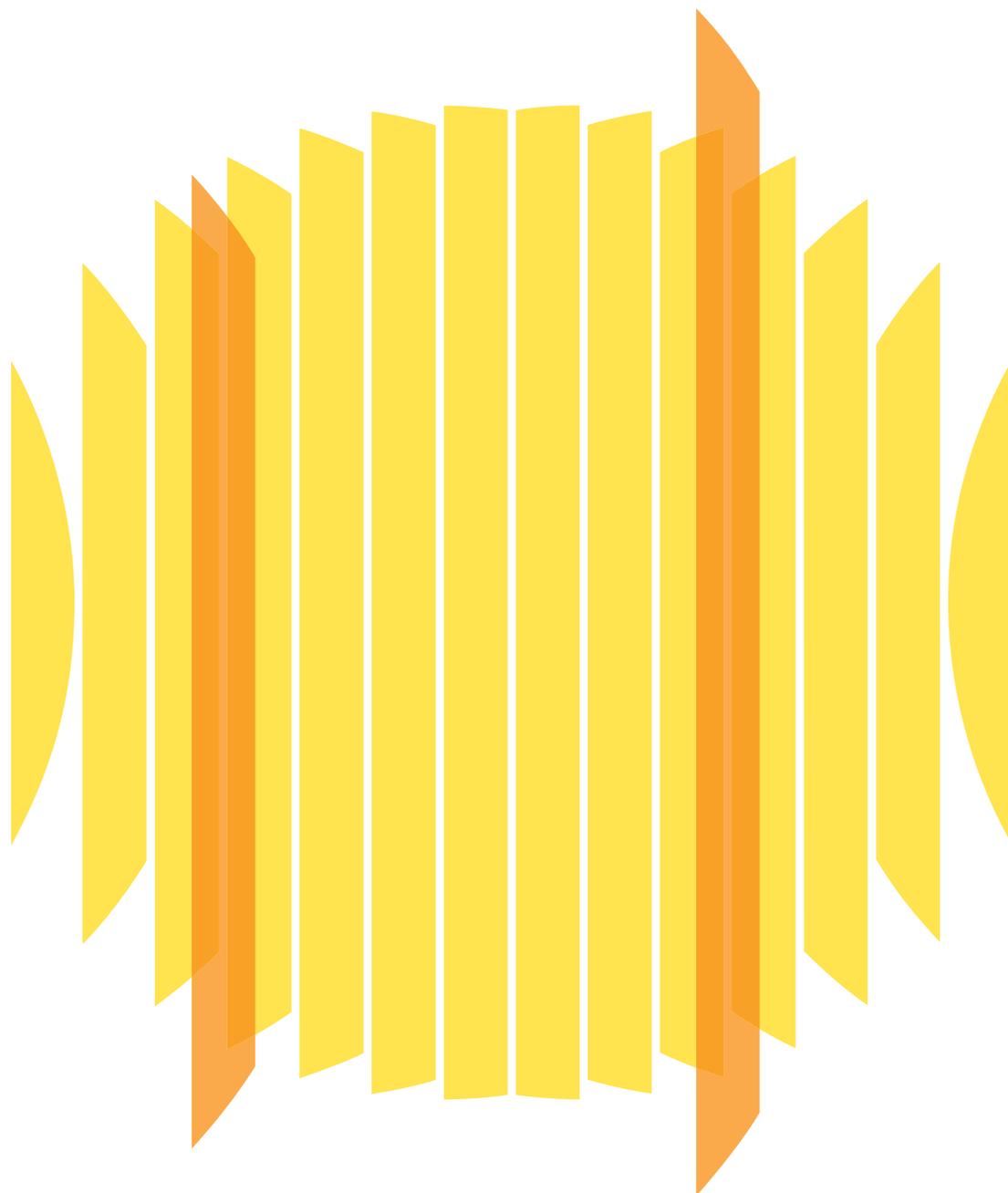


# 季報 エネルギー総合工学

Vol. 33 No. 3 2010.10.



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】

自動車の安全・環境に係る基準と認証制度の国際調和に向けて  
一般社団法人 日本自動車工業会 常務理事 中山 寛 治 …… 1

## 【寄稿】

船舶輸送で広がるCO<sub>2</sub>地中貯留の可能性  
- 圧入設備を装備したCO<sub>2</sub>タンカーによるシャトル輸送 -  
(財)電力中央研究所 地球工学研究所 客員研究員 大 隅 多加志 …… 3

## 【寄稿】

高性能二次電池の開発動向  
(独)産業技術総合研究所 ユビキタスエネルギー研究部門  
電池システム研究グループ長 境 哲 男 …… 9

## 【寄稿】

原子力リサイクル事業への道 元 東京工業大学教授 鳥 井 弘 之 …… 21

## 【調査研究報告】

セルロース系バイオ燃料の開発動向  
プロジェクト試験研究部 参事 浅 見 直 人  
プロジェクト試験研究部 副参事 山 田 富 明 …… 29

## 【調査研究報告】

GRAPEモデルによる持続可能なエネルギーシナリオの分析  
プロジェクト試験研究部 主管研究員 氏 田 博 士  
プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員 黒 沢 厚 志 …… 41

## 【訪問記】

三鷹光器(株)：集光式タワー型太陽熱発電の実証設備 IAE女性研究員 …… 52

【研究所の動き】 …… 56

【編集後記】 …… 59

# 巻頭言

## 自動車の安全・環境に係る 基準と認証制度の国際調和に向けて

中山 寛治 (一般社団法人 日本自動車工業会  
常務理事)



自動車産業の国際化と自動車の輸出入の活発化が、近年、急速に進展しております。そのような中で、世界における経済活動の円滑化等の観点から、自動車の安全・環境に係る基準と認証制度の国際調和の大きな動きが、始まっていますので、その内容についてご紹介したいと思います。

現在、世界には、国によって異なる多種多様な自動車の基準と認証制度が存在していますが、このことは、輸出入の円滑化の阻害等様々な面で望ましいことではありません。そこで、国際的に共通の基準と認証制度を作り、ある国がA車という自動車を認証すれば、他の国が試験等の実車審査をすることなくA車を自動的に認める相互承認制度を構築することを目指し、日本からの提案により、現在、国連の場で検討が進められています。

現在の国連の協定には装置及び部品の認証について加盟各国が相互に承認する制度はありますが、今般、創設を目指す制度は、車両そのものの政府認証を相互に承認するものであり、この制度が創設されることにより、各国毎に取得しなければならない車両の認証が不要となる画期的なものです。

これが実現すれば、技術開発、認証のために現在メーカーが行なっている、また、今後、モータリゼーションの進展が著しいアジア諸国等が認証制度を導入することにより増大が見込まれる、膨大な試験等が省略でき、エネルギーの節約、マンパワーの削減に大いに貢献できると思われれます。さらに、自動車ユーザー、行政、メーカーの3者にとって、次のようなメリットがあることから、持続可能なモビリティ社会の構築に貢献できると考えられます。

自動車ユーザーにとっては、より安全で環境に優しく、適正な価格の自動車が購入可能になるメリットがあり、行政にとっては、基準調和により、高度な安全・環境基準が国際的に普及すること、審査作業の効率化に資すること、途上国等における車両型式認証制度の整備促進になることのメリットがあります。また、

メーカーにとっては、上述のように仕向け地毎の基準への適合のための開発や認証手続きに係る費用や工数が削減でき、更なる安全・環境技術の開発に注力が可能になることのメリットがあります。

日本における検討の経緯としては、2007年4月、日本自動車工業会は、国土交通省及び自動車基準認証国際化研究センター（基準認証の国際化を官民が協力して支援する機構）とともに、「国際的な車両型式認証の相互承認制度」の創設を目指し、本格的な検討を開始しました。約3年の検討結果を踏まえ、2010年3月、日本政府から、国連の「自動車基準調和世界フォーラム」（欧州経済委員会傘下）において、その創設を提案し、参加国の満場一致で可決されました。それに至るまでの間、日本自動車工業会は、国際自動車工業会、国際二輪車工業会、欧州連合、中国政府及び業界等に説明し、本構想について賛同を得ております。特に、中国においては、今後、中国からの輸出が増加することもあり、相互承認制度に関心を強めつつあるのが現状です。

今後は、国連において、2011年11月までに、国際的な車両型式認証制度の基盤整備のための具体的なロードマップを作成することとなっており、第1段階の取り組みとして、統一すべき基準等制度創設に必要な要素について、2016年3月に国連で採択されることが想定されています。

日本自動車工業会は、国際的な車両型式認証の相互承認制度の早期創設を新成長戦略に位置付けている政府の活動を今後とも積極的に支援し、より高度な安全・環境基準を国際的に普及させ、限られたリソースを更なる安全・環境技術の開発に注力し、より安全で環境に優しい適正価格の自動車を広く世界のお客様に提供することに最大限の努力を傾注していくこととしております。

[寄稿]

## 船舶輸送で広がるCO<sub>2</sub>地中貯留の可能性

—圧入設備を装備したCO<sub>2</sub>タンカーによるシャトル輸送—

大隅 多加志 (財)電力中央研究所 地球工学研究所  
客員研究員



### 1. はじめに

大規模排出源からの二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出削減の課題に対し、わが国の産業界がCO<sub>2</sub>回収貯留 (CCS) 技術に期待して、具体的なアクションをとることを公に表明してから、まだ2年あまりしか経過していない。

国内CO<sub>2</sub>排出量の30%を占め、CCS最大の当事者である電力セクターは、洞爺サミット後の2008年7月、電気事業連合会の会長記者会見で、CCS研究開発に触れ、「日本CCS調査株式会社」(2008年5月に石油・電力・ガス・商社・エンジニアリング会社等の出資で設立)が実施する調査実証事業においてオールジャパン体制の一翼を担う旨を表明している。実証事業の課題として、同会見で指摘されたのは、「処理コストの低減 (現状で1トン当たり7000円以上と認識)」と「CO<sub>2</sub>貯留に関わる安全性や安定性の確認」であった。

本稿ではこの2つの課題に密接に関係していながら、これまで十分には検討がされてこなかったCO<sub>2</sub>の輸送技術に焦点をあて、緊急に取り組む必要のある研究開発課題を指摘したい。

CCSにおけるCO<sub>2</sub>輸送方法については、貯留の場所と方法が決まれば、それらに応じて既存技術がすぐにも適用可能となっているとの整理がなされ、特段の技術開発の対象として取り上げられてこなかった。この事情は、CO<sub>2</sub>の海洋隔離と地中貯留に共通する技術として輸送技術をレビューした2005年の気候変

動に関する政府間パネル (IPCC) の『二酸化炭素の回収貯留に関する特別報告書 (SRCCS)』でも同様であった。

2000年度から開始された地球環境産業技術研究機構 (RITE) による「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」では、2006年に、わが国でのCO<sub>2</sub>パイプライン輸送の技術ガイドライン作成までを5年程度と見込んだ工程表を提示<sup>(1)</sup>しているが、今のところ、日本CCS調査株式会社とRITEとの間で、技術ガイドライン作成作業が進んでいるとは聞いていない。

### 2. 輸送手段はCCS事業の要

1990年9月、電力中央研究所は世界初となるCO<sub>2</sub>貯留の現場実験を駿河湾で実施した<sup>(2)</sup>。そのときに貯留場所へと輸送されたCO<sub>2</sub>はドライアイスであったため、輸送手段は小型船舶 (借り上げた漁船) であった。これまで20年にわたるCCS技術開発の歴史の第1ページでの輸送手段は船舶であったことを想起したい。実験であっても野外試験であれば輸送の問題は避けて通れない。

輸送するCO<sub>2</sub>の形態が貯留のコンセプトと密接な関係にあることを、実適用段階について明示的に示したのは、SRCCSの構成の原型を示した米国のMeyer Steinberg<sup>(3)</sup>ではなかったろうか。また、CO<sub>2</sub>発生源施設の敷地内でのドライアイス貯蔵の概念<sup>(4)</sup>を提唱したドイツのWalter Seyfritzはかつて、陸上のCO<sub>2</sub>輸送パイプラインの敷設が社会的困難に直面する

であろうことを指摘して、鉄道によるドライアイス輸送を提案した。

CCSは大規模な導入で即効性を持つことを踏まえると、社会インフラとしてのCO<sub>2</sub>輸送手段の検討は決定的に重要である。

### 3. わが国での地中貯留の容量推定はパイプライン輸送を想定

RITEの「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」では、当初から実施項目の大きな柱として「地質調査」が挙げられていた。物理探査船によって地中貯留の適地を新たに同定することが、日本でのCCS実適用にとって重要であるとの認識があったからであろう。しかし、「シンクとソースのマッチングが重要であって、それが回収から貯留までのトータルコスト低減の近道である」という理解が力を得て、「地質調査」関連実施項目に新規の貯留地点同定を含むべく予算配分されなかったため、物理探査の実施は見送られた。

その代替として「地質調査」項目での作業として、

- 大規模ないし中規模排出源近傍に貯留適地が存在するようなソース=シンク・マッチング条件を満たした事例の抽出
- これら事例を対象とした、既存データ再整理によるCO<sub>2</sub>地中貯留ポテンシャル量推定
- 大偏距掘削技術の導入による輸送に関わる社会受容の問題の一部回避の検討

などへと努力が振り向けられることとなった。現在の日本CCS調査株式会社への経済産業省からの委託事業・補助事業も、その延長として実施されている。

「平成18年度成果報告書」<sup>(1)</sup>での、RITEによる日本での排出削減可能量とその経済性を明らかにするトータルシステムの検討は、結局、排出源と貯留有望地点とをパイプラインで結ぶ場合について実施され、その場合に「二酸化炭素地中貯留が高い経済性を有するこ

とが（中略）示された」との結論であった。

そこで指摘された今後の要検討課題の1つ目は、ポスト京都の枠組み・目標の動向次第で、経済性の前提となる削減への経済的インセンティブが導入されない可能性があることであり、2つ目は「石油増進回収などの機会がほとんど存在しない日本においては、地中貯留技術は、あくまで二酸化炭素排出削減に特化した技術であるという点」であった。後者について、「日本における地中貯留は、欧米などと異なり、石油増進回収などの機会がほとんど存在しないため、企業にとって初期導入の障壁が極めて高く、また、油ガス採掘とは別に実施することになるため、受容性の面でも海外よりも障壁が高い可能性があるという特殊性に配慮した技術戦略が必要である点を強調し」ているが、本稿で紹介する提案は、まさにこの点に関わっている。

### 4. 貯留海域の集中利用

#### (1) 欧州での先例

CCS技術開発における本格的な国際連携・交流は18年前にまでしかさかのぼれない。

1992年3月にアムステルダムで開催された「第1回二酸化炭素除去国際会議（ICCDR-1）」は、同年6月のリオデジャネイロでの国連環境開発会議（アースサミット）の3カ月前に設定されたものであった。

工業プロセスから発生するCO<sub>2</sub>を除去しそれを処分ないし利用する技術によって地球温暖化を防止しようと考えていた研究者たちが初めて一堂に会したのには、大きな意義があった。この国際会議シリーズは、その後、名前を「地球温暖化ガス制御技術国際会議（GHGT）」に変えたものの2年毎に場所を変えながら持ち回りで開催され続け、本年9月19日～23日に第10回会合（GHGT-10）が再びアムステルダムで開催される運びとなった。拙稿が読者の目に触れるころにはGHGT-10でのホットな情報が飛び交っているであろう。

米国ワシントンDCで2008年11月に開催されたGHGT-9では、各国とも早期のCCS実展開にはCCSインフラとしてのCO<sub>2</sub>輸送パイプラインの敷設が隘路になると懸念していたのが印象に残った。またその折、筆者にとって旧知のノルウェーの研究者Erik Lindeberg<sup>(5)</sup>が、海域集中型のCO<sub>2</sub>地中貯留を提唱したことは注目に値する(図1参照)。

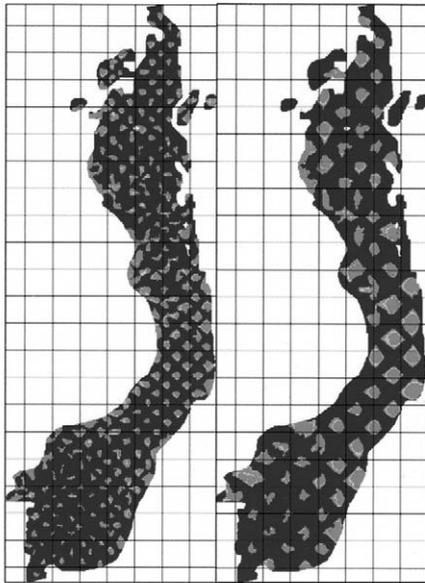


図1 北海ユトシラ層へのCO<sub>2</sub>帯水層貯留のシミュレーション例

この図は面積2万5,000km<sup>2</sup>の帯水層に累計130億トンのCO<sub>2</sub>貯留を圧入坑井数210本(左)と70本(右)によって実現した場合のCO<sub>2</sub>の地中分布平面図<sup>(5)</sup>である。なお、帯水層内での圧力増加を防止するため、それぞれ同数の圧力解放井戸を掘削した計算例である。

図1に示すような貯留では、個別にCO<sub>2</sub>発生源との地理的な近接性が意識されているわけではないことに注目したい。また最近英国で導入された火力発電所へのCCS-ready規制にも、集中立地に似た考え方が潜んでいるように思われる。英国では、CO<sub>2</sub>の地中貯留適地が集まる海域をいくつか示した上で、発生施設を保有する事業者がCCS-readyプラントの建設を要請しているからである。

(2) シャトル運航によるハブ方式CO<sub>2</sub>船舶輸送

海域でのCO<sub>2</sub>貯留域の集中立地に適合したCO<sub>2</sub>輸送システムを図2に示す<sup>(6)</sup>。このシステムの提案者は尾崎雅彦・東京大学教授である。ただし、図2のシステムはそれほど自明なものではない。

数年前までの筆者には、大型CO<sub>2</sub>輸送船と貯留操業(圧入基地)のための洋上プラットフォーム

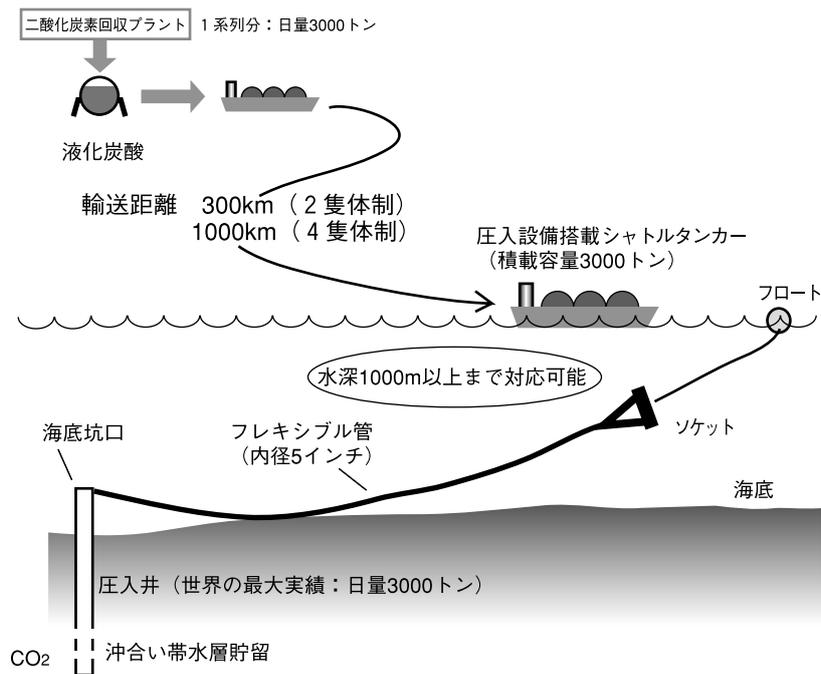


図2 提案する圧入設備搭載船舶によるCO<sub>2</sub>シャトル輸送の模式図

ホームの組み合わせという、CO<sub>2</sub>海洋隔離の深海底貯留方式（Lake type貯留とも）を説明する模式図と類似のものしかCO<sub>2</sub>船舶輸送でイメージできなかった。沖合洋上でのバッファ用のCO<sub>2</sub>貯蔵タンクの建設を不要とするのみでなく、圧入事業期間中には洋上プラットフォームの維持さえ不要にする本着想の鍵となるのは、輸送船にCO<sub>2</sub>の圧入設備を装備することである。

この着想にいたったCO<sub>2</sub>輸送事業についての所与の条件は、「我が国でCCSを実施する場合、高度利用された沿岸水域から離れた沖合海域に貯留サイトを設定し、任意の陸上プラントで回収されたCO<sub>2</sub>を輸送して海底下地層へ圧入し、これらが不確実性をともなう新技術開発や大きな追加的経済負担なしにできれば、商業規模の実展開を加速できる」（尾崎教授）であろう。

この考え方を筆者なりに整理すると、

- CO<sub>2</sub>輸送手段として船舶を用いることによって、ソース=シンク・マッチングという制約条件を大幅に緩和できる
- 洋上から垂下した圧入ラインを用いることによって水深の制限を緩和できる
- スケールメリットによる費用最小化を追わずにシステム要素のユニット化による柔軟性と拡張性を確保する

となる。

そもそもCO<sub>2</sub>船舶輸送は、CCSの実展開にあたって妥当なレベルの経済性を持っているとされてきた。この経済性についての判断はSRCCSの結論でもある。ちなみに、本稿で紹介するシステムの提案者である尾崎教授はSRCCS第4章「CO<sub>2</sub>の輸送」の執筆者でもある。実際、2008年10月にはCO<sub>2</sub>輸送に転用可能な加圧ガス輸送用の船隊を欧州で保有するノルウェーの船会社IM Skaugen社が日本CCS調査株式会社を訪問、売り込みを図ったと聞く。もちろん東アジアでのCO<sub>2</sub>輸送CCSビジネスに着目しているのである。

CO<sub>2</sub>に特化した輸送船の例をあげよう。世界には液化CO<sub>2</sub>輸送船は複数現存する。例えば、CORAL CARBONIC という船の諸元は、 $L_{pp} \times B \times d = 74m \times 13.8m \times 4m$ 、航海速度12.5knotであり、貨物タンクとして水平シリンダー型圧力容器を1基搭載している。その圧力容器は直径6.4m、長さ41m。容量は1,250m<sup>3</sup>、CO<sub>2</sub>の圧力は18barGである。

積載量3,000トン級のCO<sub>2</sub>輸送船を用いて毎日運航することを考えた図2に示すシャトル輸送例では1ユニットのシステムの圧入と輸送の流量を3,000トン/日（100万トン/年）としている。CO<sub>2</sub>回収量、輸送量なども3,000トン/日を1ユニットとし、必要に応じて並列化するとの考えは、システムの各要素について大きな柔軟性をもたらす。典型的には、港湾整備や回収装置の設置、当局によるCO<sub>2</sub>排出規制の動向などである。表1に長所と短所をまとめた。

図2の模式図に示した年間100万トンのCCS操業の単位ユニットは、自転車の車輪のスポークにあたる。束ねることでハブとなる単一海域に複数の貯留基地を設けて、各地のさまざまな事業体によるさまざまな規模の回収プ

図2の模式図に示した年間100万トンのCCS操業の単位ユニットは、自転車の車輪のスポークにあたる。束ねることでハブとなる単一海域に複数の貯留基地を設けて、各地のさまざまな事業体によるさまざまな規模の回収プ

表1 圧入設備搭載運搬船によるCO<sub>2</sub>のシャトル輸送方式の得失

長所	短所
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ルートや圧入可能流量などの計画変更に対する柔軟性がありプロジェクトの段階的拡張が可能</li> <li>○水深や輸送距離の増大に対応が可能</li> <li>○撤去の容易さ、移設・再利用の可能性</li> <li>○冗長性の確保が比較的容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○最適化されたパイプライン輸送（計画通りに完成した全体システム）に比べるとコスト高</li> <li>○海運関係の人手が必要</li> <li>○海象の影響を受ける</li> <li>○船の運航にともなう燃料消費から追加的なCO<sub>2</sub>排出が生じる</li> </ul>

ラントからCO<sub>2</sub>を海上輸送してくる構想へと発展できる。

現在、国際海運業界へのCO<sub>2</sub>排出規制の導入が検討されているが、現実性のあるエコシップとしてCCS船（内燃機関にCO<sub>2</sub>回収装置を装備した船舶）を想定すれば、そのままハブ貯留海域へ回航して、陸上プラントからのスポークとは別のスポークを構成することになる。

### （3）沖合ハブ構想の立地

そのようなCO<sub>2</sub>地中貯留のための沖合の海域が同定できるであろうか？ もちろんそれは日本で2, 3カ所は必要になる。

稼働開始されたCO<sub>2</sub>回収装置を止めることは経済的損失につながるので、CO<sub>2</sub>輸送のハブとなる沖合での貯留海域では、高い稼働率（波浪中での作業性）、台風などの異常海象に対する安全性などが要請される。これを考慮すると、圧入坑井が仕上がった後は洋上に常駐する人員が不要という技術提案の特徴は特筆されてよい。圧入設備のメンテナンスは、洋上でなくドックで実施される。輸送船舶の船体は規格化されなくとも、搭載される装備が標準化されるだけでも輸送船の建造費の低コスト化が実現されよう。積み荷であるCO<sub>2</sub>の輸送条件についても、圧力と温度の最適化を通じて日本発の世界標準を目指すことが可能である。

立地に関連してCO<sub>2</sub>輸送船に圧入設備を持つことの利点を強調したい。それは大水深への対応という点である。

2010年春の米国ルイジアナ沖でのBP社の洋上石油生産基地での事故をみると、万が一の事故時に海洋環境への影響を局限するための技術的な準備不足はいなめない。しかし、1,500mという大水深海域での石油生産が現実には実施されていること、また、そのような技術が現実のものになっていることに改めて思いをいたした読者も多いだろう。石油生産事業よりもCCS事業は、その期間が長期に及ぶ。CCSの事業展開では、回収設備の建設や輸送

手段の調達（パイプライン敷設や輸送用船舶の手配）が、圧入坑井掘削や海底坑口仕上げと並行して実施されなければならない。その後CO<sub>2</sub>貯留操業のフェーズが数十年以上も続く。もっとも長い期間を占める貯留操業で洋上常駐の作業人員を不要とする図2の提案は、もしCCS貯留海域を大水深海域に求めたときには大きなメリットとなる。

具体的な立地選定の作業には、大水深域も候補になる以上、新規の国家プロジェクトが必要かもしれない。先に述べたように、これは2000年に開始されたRITEの国家プロジェクトで積み残された部分でもあるからである。

たびたび言及される日本のCO<sub>2</sub>地中貯留容量推定値<sup>(7)</sup>は、水深200m以浅に限ったものであることを思い出してほしい。

大水深の海域に貯留サイトを求めた場合、貯留に伴う長期的な法的責任についても考え方を整理する必要がある。ドイツなどでは貯留サイトを陸地に求める結果として、国家に責任を移転するまで80年という長期の責任を事業者を求める方向で法制化が準備されているという。陸上は、ステークホルダーが現前しているケースだからであろう。英国や豪州のケースのようにあらかじめ貯留サイトを具体的に指定するような規制の在り方では、国家は貯留責任（long-term liability）を前倒しであらかじめ分担していると捉えることも可能である。その分、事業者の責任を軽減していることになる点、産業界としては取り組みやすいだろう。

また、IPCC報告書や国際エネルギー機関（IEA）がCCSについて発しているメッセージ、すなわち「今世紀後半までに世界からのCO<sub>2</sub>排出を半減するのであれば、相当部分はCCSが担うことになる」を、東アジアの文脈でも実現するには、韓国や中国とのCCSにおける協力が不可欠である。その場合の貯留責任は国家を超えた主体が担うことも想定され、また比較的長距離の輸送も必須となる。もともと欧州でのCCSは、欧州統合の今後の進展の

中で北海での地中貯留容量に期待していた面がある。東アジアでは、それが東シナ海や南シナ海であって悪い理由はなにもない。そのような方向性を追求するうえでも、CO<sub>2</sub>の船舶輸送技術の確立は鍵となろう。

## 5. おわりに

CCSに対する経済的インセンティブ付与によって、CO<sub>2</sub>排出削減を図るとしてきた欧州のCCS技術戦略は、ポスト京都の枠組み合意形成の頓挫やCCS実証プロジェクトに対する社会的受容の困難の現前化によって、最近その歩みに翳りが見えてきたように思われる。かわってCCS推進を規制によって進めようとする英国のやり方（火力発電所立地についてのCCS-readyの条件の導入）が注目されている。日本でのCCSの在り方を考えるとき本稿で述べた技術提案を基軸に、関連する技術開発やサイト同定と評価のプロジェクトを強力に進めるべきである。

## 参考文献

- (1) 地球環境産業技術研究機構, 平成18年度「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」成果報告書, 平成19年3月
- (2) Nakashiki, N., T. Ohsumi and K. Shitashima, “Sequestering of CO<sub>2</sub> in a deep-ocean - Fall velocity and dissolution rate of solid CO<sub>2</sub> in the Ocean,” CRIEPI Report EU91003 (1991)
- (3) Meyer Steinberg, “Recovery, Disposal, and Reuse of CO<sub>2</sub> for Atmospheric Control,” *Environmental Progress* 4 (2), 69-77 (1985)
- (4) 大隅多加志, 二酸化炭素の地中貯留, 『水素エネルギーシステム』34 (1), 33-37 (2009)
- (5) Erik Lindeberg, J.-F. Vuillaume, and A. Ghaderi, “Determination of the CO<sub>2</sub> storage capacity of the Utsira formation,” *Energy Procedia* 1, 2777 - 2784 (2009)
- (6) M. Ozaki and T. Ohsumi, “CCS from multiple sources to offshore storage site complex via ship transport” (2010) (accessible from <http://www.ghgt.info/>)
- (7) T. Takahashi et al., “Estimation of CO<sub>2</sub> Aquifer Storage Potential in Japan,” *Energy Procedia* 1, 2631 -2638 (2009)

[寄稿]

## 高性能二次電池の開発動向

境 哲男

(独)産業技術総合研究所 エビキタスエネルギー研究部門  
電池システム研究グループ長 (神戸大学大学院併任教授)



### 1. はじめに

最近、電気自動車 (EV) とそれに搭載するリチウムイオン電池が世界的に注目を集めており、各国の自動車メーカーや電池メーカー、政府まで巻き込んだ、大競争が行われている。このようなEVブームは、第1回目が1970年代に、第2回目が1990年代にあり、今回は3回目ということで、今度こそは「本物」になるのではないかと、大きな期待が寄せられている。

この20年間の状況変化としては、携帯電話やノート型パソコン、デジタルカメラなどの携帯機器が急速に普及して、これらに用いられる新型二次電池の高性能化と信頼性の向上、大量生産による低コスト化が大きく進展したということがある。そのため、電動車両分野でもどうにか利用できるレベルになってきたし、さらに大型化して、鉄道車両や産業機器の電力回生用などでの利用も進められている。また、太陽光発電や風力発電などの負荷変動の大きな自然エネルギーの大量導入も世界的に進められており、電力供給と需用を情報通信 (IT) 技術と大型蓄電設備の利用によって最適に制御する次世代送電網「スマートグリッド」の構築も重要となっている。

このように世界的な省エネルギー化と脱石油政策の追い風の中で、高性能蓄電池の利用分野は急速に拡大しており、2020年には世界で10兆円規模の基幹産業に成長するものと予想されている。わが国では、40年前からEV用や電力貯蔵用の新型蓄電池開発を、国家プロ

ジェクトで継続しており、やっと長年の夢が結実しつつある。

本稿では、過去も少し振り返りながら、現在の電池技術とその利用技術の進展を紹介し、将来に必要なとされる開発課題について述べたい。

### 2. 国家プロジェクトでの新型蓄電池開発

1970年代、米国での自動車排ガス規制 (マスキー法) を契機として、世界的にEVおよびこれに搭載する新型蓄電池の研究開発が活性化した。

わが国では、1971年から6年間、「通産省大型プロジェクト」で電気自動車開発が実施され、新型蓄電池 (空気 - 鉄電池, 空気 - 亜鉛電池など) の本格的な研究開発が行われた (図1参照)。引き続き、1978年からムーンライト計画 (省エネルギー技術) において、電力貯蔵用大型蓄電池 (ナトリウム - イオウ電池, 亜鉛 - 臭素電池など) の研究開発が行われ、その後、電力貯蔵用ナトリウム - イオウ電池の実用化が進められた。また、1975年からサンシャイン計画 (新エネルギー技術) 「水素エネルギー技術」の一環として、水素吸蔵合金やその電池利用技術の研究開発が行われ、1989年から5年間、太陽光発電用大型ニッケル - 水素 (Ni-MH) 蓄電池 (100Ahクラス) の研究開発が実施され、これによって大型Ni-MH用電池の基礎技術が確立された。1996年からは大型Ni-MH電池 (25kWh) を搭載した高性能EVの商品化が開始された。さらに、1997

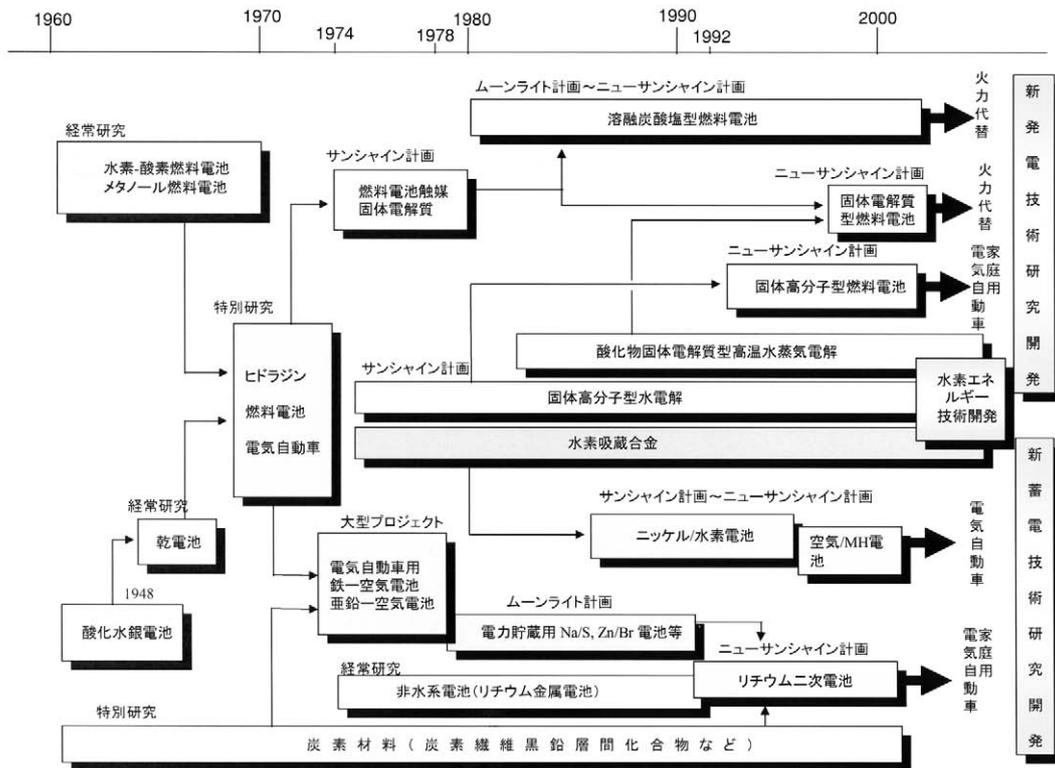


図1 電池・燃料電池の国家プロジェクトの経緯

年には、高出力化Ni-MH電池を搭載して、燃費を2倍以上に向上させたハイブリッド自動車（HEV）も商品化され、省エネルギー政策の中で普及が進んでいった。

1992年から10年間、ニューサンシャイン計画「分散型電池電力貯蔵技術」で、移動体・定置用大型リチウムイオン（Liイオン）電池（2～3 kWh）の研究開発が行われた。さらに、2002年から5年間、「燃料電池自動車等用リチウム電池技術開発」が実施され、高出力Liイオン電池（2.5kW/kg）の開発が行われた。こ

れらの成果をベースにして、2009年からはEV用Liイオン電池の商品化が開始され、2011年からはHEV用Liイオン電池の商品化が予定されている。

現在、国際的な蓄電池開発競争に対応するため、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「蓄電池開発室」にて、①系統連系円滑化蓄電システム技術開発、②次世代自動車蓄電システム技術開発、③革新型蓄電池先端科学基礎研究事業、が実施されている（表1参照）。

表1 NEDOの蓄電池研究開発事業と開発目標

	①系統連系円滑化蓄電システム技術開発 (平成18年度～22年度)	②次世代自動車蓄電システム技術開発 (平成19年度～23年度)	③革新型蓄電池先端科学基礎研究事業 (平成21年度～27年度)
総予算	約90億円(21年度17億円)	約110億円(21年度26億円)	約210億円(21年度30億円)
開発対象	自然エネルギーのメガワット級大型蓄電システム	数kW～数十kW級の自動車用小型蓄電システム	高度分析・解析技術等基礎・基盤的な技術の開発
電池系	Liイオン電池、Ni-水素電池など	Liイオン電池、空気電池など	Liイオン電池、空気電池など
主な開発目標	寿命(2030年に20年) コスト(2030年に1.5万円/kWh)	エネルギー密度 (2015年100Wh/kg 2030年500Wh/kg) 寿命(2015年に10年)コスト (2015年に4万円/kWh、 2030年に5000円/kWh)	高度な分析手法の開発 (Spring-8などの利用)電池の劣化メカニズムの解明(京都大学に研究拠点、22の参加企業・研究機関から50人以上が参加)

わが国では、この40年間、新型蓄電池開発に対し、長期戦略に基づいた継続的な支援が行われ、その成果として、20年前に世界に先駆けニッケル-水素電池やLiイオン電池などの新型二次電池を商品化することができた。これによって、携帯機器分野はもとより、電動車両や産業機器の電力回生、電力貯蔵などの分野でも、世界を大きくリードすることができた。これからは、電池の大量消費社会を迎え、資源戦略を踏まえて、日本発の新材料の発見とそれを用いた新型蓄電池の開発が求められる。

### 3. 携帯機器分野での新型二次電池の進化

携帯電話端末の世界生産量は12億台に、そして、ノート型パソコンのそれは2億台に拡大しており、「いつでも、どこでも、誰とでも」情報交換できるユビキタスネットワーク社会になってきた。わが国における小型二次電池販売数量の推移を図2に示すが、1980年代より携帯電話やノート型パソコン、ビデオカメラなどの携帯機器の普及が始まり、わが国の小型密閉形ニッケル-カドミウム (Ni-Cd) 電池の生産量が急増した。ただ、このNi-Cd電池では、電池が重い、通話時間が短い、使い捨て電池による環境汚染の懸念がある、などの課題があった。

1990年、有害物質を含有せず、かつ、従来の2倍の高容量化を実現したニッケル水素 (Ni-MH) 電池が商品化され、従来のNi-Cd電池に代替して広く利用された。さらに、1994年頃、4V系のLiイオン電池が商品化され、電池1セルで使用でき、電池重量も半減できることから、わが国の携帯電話で最初に採用されて以来、世界標準となって行った。ただ、2000年をピークに、韓国や中国メーカーとの低コスト化競争が激化し、わが国の世界シェアは急激に低下した。わが国の電池生産金額(2008年)をみると、Liイオン電池は携帯機器用途などを中心に4000億円で、また、ニッケル水素電池はHEV用や乾電池代替用途などを中心に1,300億円となり、これらの合計で全体の60%を占める(図3参照)。

Liイオン電池の世界生産個数は、2007年で約25億個(15GWh)、販売金額で8,000億円程度と推定される。その中でも、携帯電話用(シェア約50%)では、製造が容易なラミネート式が主流となっており、中国や韓国メーカーが中心になっている。一方、ノート型パソコン用(シェア約30%)では、円筒形電池(18650型)が使用されるが、まだ高度な生産技術が必要とされるため、日本メーカーが高いシェアを維持できている。この円筒形電池は、大量生産によって高品質化と高信頼性、

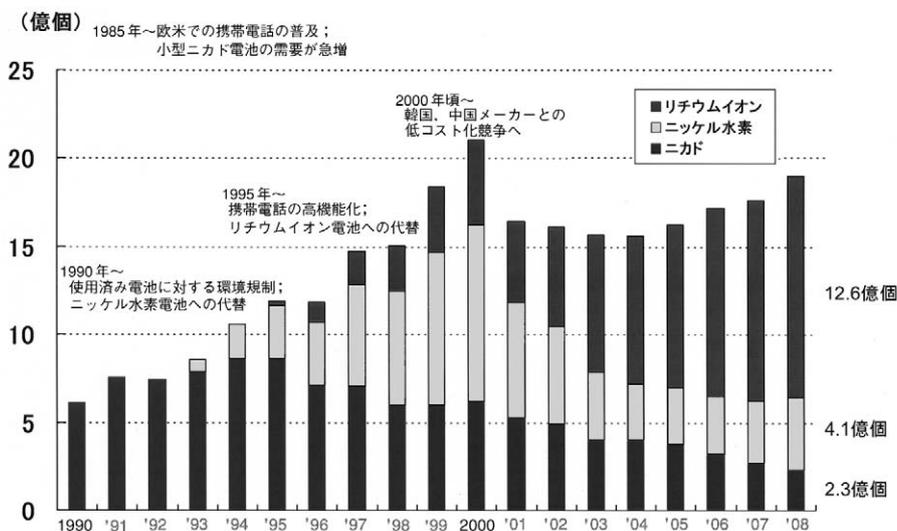


図2 わが国における二次電池販売数量の推移

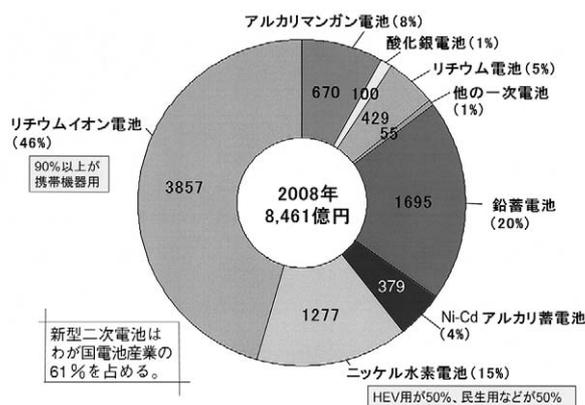


図3 国内電池別生産額（2008年）

低コスト化（～3万円/kWh）が進んでおり、これらをモジュール化して、数百個～数千個単位で、住宅の電力貯蔵用やEVなどに利用されつつある。

たとえば、米国のEVベンチャーのテスラ社では、これらパソコン用電池を6,000本モジュール化することで、1充電走行距離360km、最大速度230km/hのEV「テスラ・ロードスター」を商品化して、1,000台以上販売している。現在、トヨタからの資本参加も得て、2012年には、7人乗りで、走行距離480km、価格450万円の普及タイプの電気自動車を商品化する計画となっている。

このように、新型二次電池は、商品化の当初は高価で、電池性能も十分ではなかったが、携帯機器の短い商品サイクルの中で、高性能化と信頼性の向上、量産による高品質化と低コスト化が大きく進展したため、数千本を積層してEV用や家庭での電力貯蔵用などで利用することも可能となった。各家庭で蓄電設備を備えれば、太陽光や燃料電池で発電した電気を貯蔵して、直流電源として電化製品への利用や、EVの充電用などに利用できる。このように量産電池を多数積層して利用する方向では、家電とEVの垣根がなくなり、自動車産業に大きな変革を引き起こす可能性がある。

#### 4. 電動車両分野での商品化競争

1990年代、米国カリフォルニア州の自動車

排ガス規制（ZEV規制）を契機として、自動車メーカー各社でのEV開発競争が活発化して、1996年頃からNi-MH電池（トヨタ、ホンダ）やLiイオン電池（日産）を搭載した高性能EVの商品化が行われた。EVの高性能化は大きく進展し、1充電走行距離は250kmで、燃費は8-12km/kWhが達成され、運転コストはガソリンよりも低減できることが示された。ただ、車両価格がガソリン車の2倍以上で、充電に時間がかかるなどの課題があり、あまり普及は進まなかった。

1997年から、高出力Ni-MH電池をガソリンエンジンと併用することで、その燃費を2倍以上に向上させつつ、価格を抑えたHEVの商品化が開始された。同年に調印された「地球温暖化ガスの排出規制」（COP3 京都議定書）も追い風となり、HEVは二酸化炭素低減の切り札として普及が進んでいった（図4参照）。Ni-MH電池では、その高出力化が500W/kgから1300W/kgへと進展し、また、燃費も28km/ℓから35.5km/ℓ、最近では38km/ℓへと大きく向上している。2009年には、ホンダ「インサイト」とトヨタ「新型プリウス」との低価格化競争もあり、需要が一気に拡大して、2010年には100万台の生産が予想されている。HEVでのLiイオン電池の採用も始まりつつある。ホンダは、GSユアサとの合弁会社ブルーエナジーでHEV用Liイオン電池を量産して、2011年からの搭載を予定している。また、三洋電機は、2011年からフォルクスワーゲンにHEV

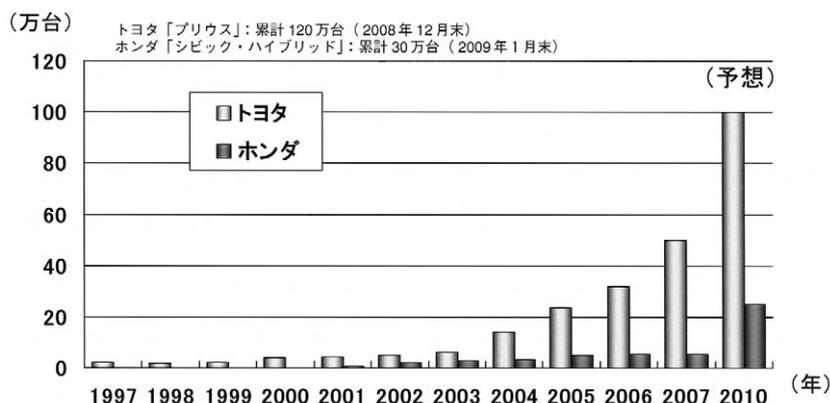


図4 ハイブリッド車の世界販売台数の推移

用Liイオン電池を供給する予定になっている。2020年には世界で700万台（自動車販売の10%）のHEV生産が見込まれ、現在の携帯機器市場と同じ規模の電池市場（10GWh）になるものと期待されている。

このHEVに数倍の容量のLiイオン電池を搭載して家庭用電源で充電し、近距離（20～50km程度）ではEV走行することで、省エネ化と脱石油化を図るプラグインハイブリッド車（PHEV）の商品化も進められている。トヨタは、5 kWhの電池を搭載して、20km程度のEV走行が可能な「プラグインHEV車」の販売を2011年から予定している。米国GMも韓国LG製電池を採用して、2012年から「シボレー・ボルト」の販売を予定している。

2009年から、Liイオン電池を搭載した小型EVの量産も始まり、政府の補助金を勘案すると実質300万円以下で販売されている（図5参照）。まだ、1充電走行距離が160km程度であることから、近距離の営業用や集配用、都市部での通勤カーとして利用されている。電力量1 kWh当たりで8～10kmの走行が可能なので、ガソリンに比べて経済的であるが、本格的な普及のためには現在の電池コスト（推定価格250万円）を100万円程度まで低減することが求められる。三菱自動車は、GSユアサとの合弁会社でEV用Liイオン電池を量産して、2009年からこれを搭載した小型EV「アイミーブ」の販売を開始して、2010年では9,000台、2012年には7万台の販売を予定している。2012

	2009年7月発売	2009年7月発売	2010年後半発売予定
車名	iMiEV (三菱自動車) 	プラグインステラ (富士重工業) 	リーフ (日産自動車) 
販売価格	398万円(実質284万円)	472万円(実質?円)	376万円(実質299万円)
乗車定員	4名	4名	5名
最高速度 (EV走行時)	130km/h	100km/h	140km/h
一充電走行距離 (10・15モード)	160km	80km	160km
モーター (最高出力)	47kW	47kW	80kW
電池種類	角型捲回式(Mn系正極)	Liイオン	ラミネート積層式(Mn系正極)
総電圧	330V	346V	345V
電池電力量	16kWh(50Ah*88セル)	9kWh	24kWh(35Ah*192セル)

図5 Liイオン電池搭載電気自動車の仕様比較

年には、プジョーシトロエングループ（PSA）とスペインでの共同生産も予定され、2020年には30万台の生産目標となっている。日産自動車では、NECとの合弁会社でEV用電池を量産して、これを搭載したEV「リーフ」の販売を2010年から開始し、2012年にはルノーとも共同で、日米欧で50万台の販売を予定している。EV50万台分の電池市場（10GWh）は、現在の携帯機器市場と同じ規模となる。これらEV用電池では、安全性やコストの観点から、マンガン系正極とハードカーボン系負極が利用されており、エネルギー密度は100Wh/kg程度と、携帯機器用途の半分程度でしかない。東芝では、チタン酸リチウム系負極を採用することで、エネルギー密度はさらに低下するものの、急速充放電特性やサイクル特性を飛躍的に向上させた新型Liイオン電池を商品化して、三菱自動車やフォルクスワーゲン、スカニア、フィアットなどに供給する予定になっている。

これら電動車両分野での主導権を握るべく、世界の自動車メーカーと電池メーカーのアライアンスによって、電池生産設備の大型投資が急ピッチで行われている（図6参照）。

ただ、現状のガソリン車やHEVと本格的に競争するためには、1充電走行距離500km以上（電池50kWh以上搭載）で、電池コストを100万円以下（2万円/kWh以下）とすることが必要で、電池の飛躍的な高容量化と低コスト化が求められる。また、燃料補給の観点からは、数分以内での充電が求められ、10C率充電（1/10時間充電）に耐えられる新規電極材料や電池構成も必要となる。従来の携帯機器用二次電池の延長ではなく、電動車両に必要な性能に特化した新型蓄電池を開発することも重要であろう。

### 5. 大型産業機器や電力貯蔵分野での展開

電池は、携帯機器用途（～Wh）で性能向上と量産技術の確立が行われ、次に、その千倍規模の電動車両分野（～kWh）では、高出力化と長寿命化、信頼性の向上が図られた（図7参照）。これによって、さらにその1,000倍規模の鉄道車両や産業機器などの電力回生用や、太陽光発電や風力発電などの負荷変動吸収用分野（～MWh）などでの利用も可能にな

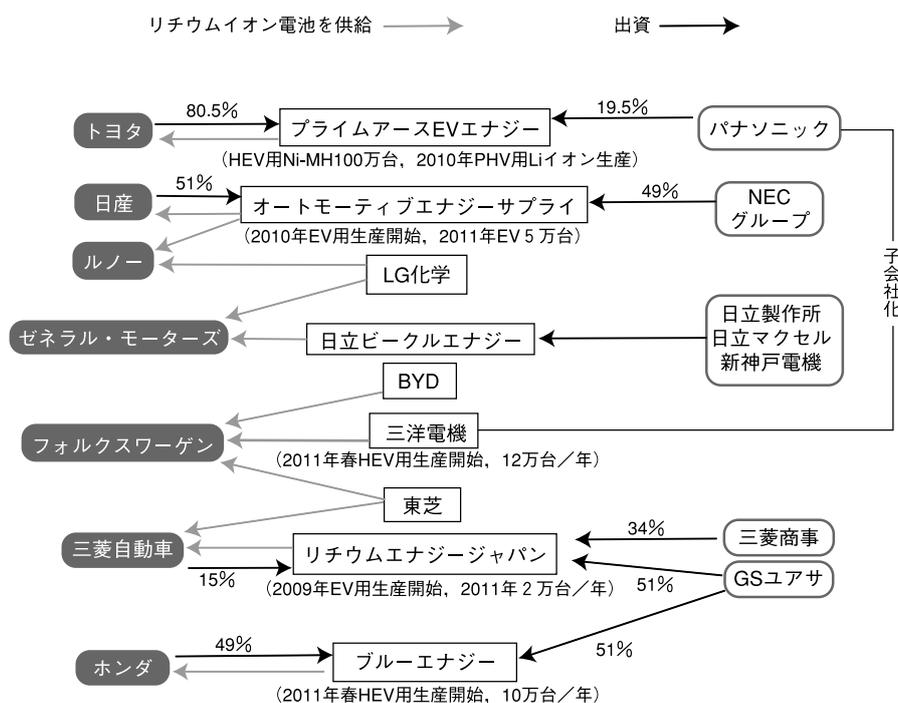


図6 電動車両用リチウムイオン電池の量産をめぐるメーカーの相関図

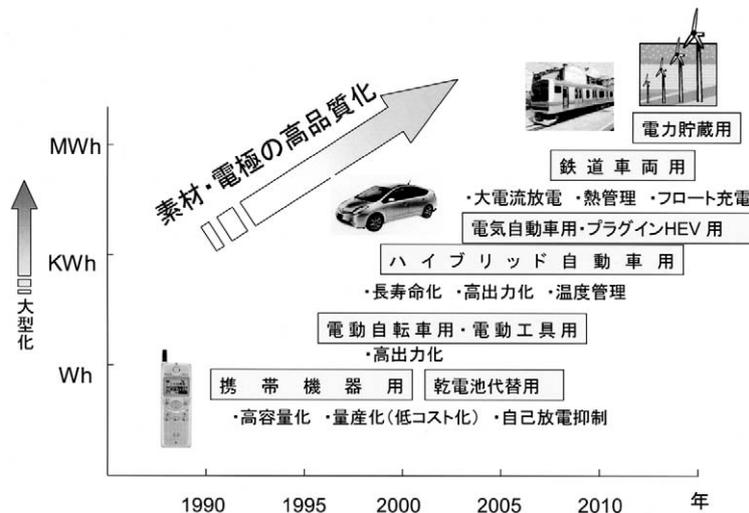


図7 新型二次電池の大型化と技術課題の推移

った。これら大型用途では、数千アンペアの大電流充放電や電池冷却技術などが重要となっている。また、大量の電極や電池を品質のバラツキなく製造することも必要となるため、わが国の「ものづくりの技術」も不可欠な分野でもある。

川崎重工では、数千アンペアの大電流放電が可能な電極構造と電極内空冷システムを有する大型Ni-MH電池（ギガセル）を開発して、鉄道システムに利用している（図8参照）。たとえば、地下鉄では、架線に直結した地上蓄電設備（750V）を変電所に併設し、減速する電車のブレーキ回生電力を蓄電し、これを加速する電車に利用することで、20～30%の省エネ化を図るとともに、ブレーキの回生失効を

防ぎ、また、停電時には、電車を最寄駅まで力行できる非常用電源としても利用している。

JR東日本では、発電用ディーゼルエンジンと大型リチウムイオン電池（15kWh）を併用したハイブリッド気動車を開発して、省エネ化（燃費10～20%向上）と、保守点検の電車との共通化、騒音の低減などを図っている。タワー・クレーンやエレベータなどでも、キャパシタやニッケル水素電池などの高出力蓄電デバイスを設置して、電力回生や停電時の非常用電源として利用することで、省エネ化と安全性の向上などが図られている。

最近、「グリーン・ニューディール政策」において、再生可能エネルギーの導入が、欧州連合（EU）や米国、中国、インドなどで活発で

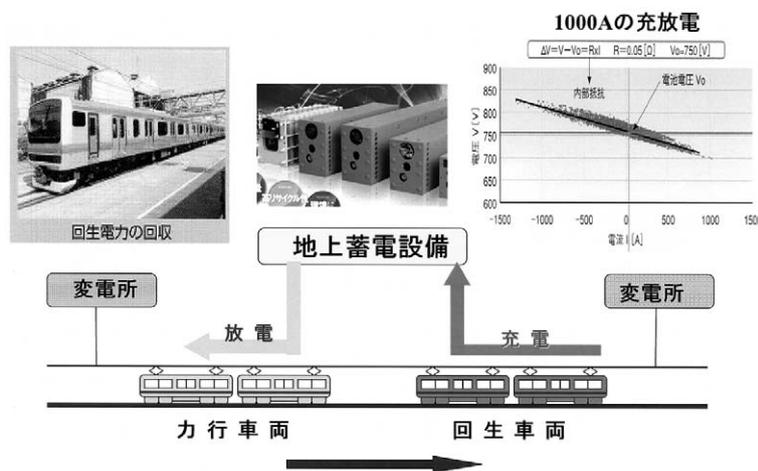


図8 地上蓄電設備を備えた鉄道システムの例

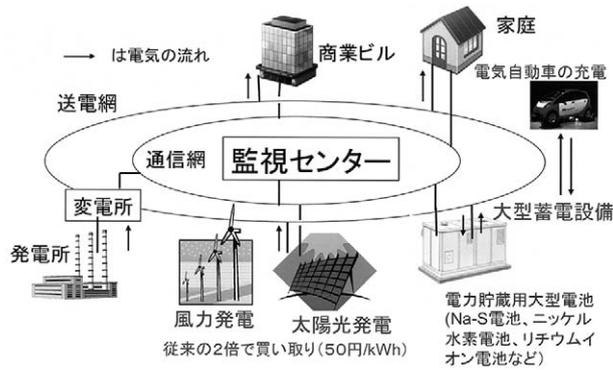


図9 次世代送電網（スマートグリッド）の開発

ある。2009年の世界の風力発電量は160GWで、太陽光発電量は1.3GWとなっており、これら負荷変動の大きな電力を最適に制御するために大型蓄電設備を備えたスマートグリッドの構築が必要となっている（図9参照）。これらの大型蓄電設備は、EVの充電ターミナルとしても利用できる。また、充電スタンドにつないだ多数のEVをネットワーク化して「大型蓄電設備」のように利用することも可能となる。

欧州連合（EU）では、全エネルギー供給量に対する再生可能エネルギーの導入量を、2020年までに20%まで高めることが計画されている。中国では、2020年には現在の2倍の発電量（1,600GW）が必要になり、スマートグリッドなどの電力供給体制の整備に50兆円を投資し、再生可能エネルギーの比率を10%以上に引き上げることを計画している。

わが国では、2020年に、再生可能エネルギーの比率を10%まで引き上げる目標となっている

る。これら大型蓄電設備に対する設備投資は、2020年までに世界で50兆円以上との試算もあり、大きな電池市場になることが期待されている。ただ、この電力貯蔵用途では、資源的な制約の少ない、低コスト（5,000円/kWh以下）な新型蓄電池を新たに開発する必要がある。

## 6. 次世代電池材料と資源問題

### （1）電池の開発ポテンシャルの推移

1980年代、携帯機器用途では密閉型Ni-Cd電池が利用されており、これに代替できるクリーンで高容量な新型二次電池の開発が求められていた（図10参照）。そこで、1980年代から水素吸蔵合金を負極材料に利用する研究開発が活発化して、1990年にわが国で、クリーンで高容量なニッケル-水素電池の実用化に成功した。さらに、電池の2倍以上の高容量化を図るために、Liイオンをその層間に高密度

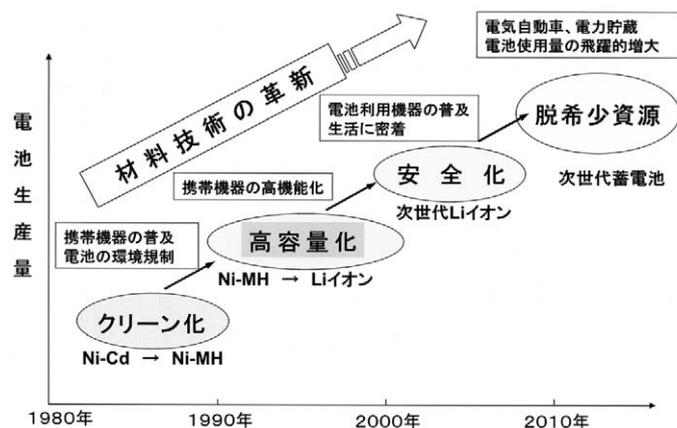


図10 電池利用技術の進展と開発課題

に貯蔵できるインターカレーション材料と有機溶媒系電解液の研究開発も活発に行われ、1994年にはLiイオン電池の本格的な商品化が開始された。このLiイオン電池は、携帯機器用途で社会生活の中で広く利用されるようになり、発火事故も多発した。そこで、いかなる使用条件でも発火しない安全性が求められ、安全性を担保するための新材料開発が大きく進展した。その結果、電動車両や大型産業機器にも利用できるようになり、電池生産量が飛躍的に増大することが予想され、電池材料の資源問題が大きくクローズアップされるようになった。今後の電池産業の持続的な発展においては、希少資源を使わない新規電池材料を探索することが重要となっている。

## (2) Ni-MH電池での資源戦略

従来、Ni-MH電池では、希土類系合金（希土類-Ni-Co-Mn-Al系）を負極に用いており、その微粉化を抑制するため、高価なコバルト（Co）を10%程度添加することが不可欠であった。このCoが合金コストの半分を占め、また、電解液中で溶解析出するため自己放電の要因ともなり、長い間Coフリー化が求められていた。

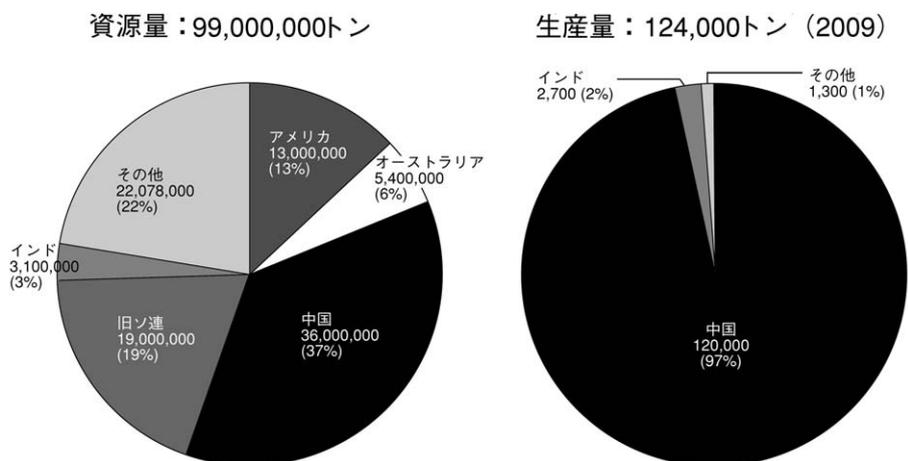
1996年、産総研で超格子構造を有する新合金（希土類-Mg-Ni系）が発見されたことを契機にして、従来の1.5倍以上の高容量で、かつ、Coフリーでも長寿命化できる新合金が開発さ

れた。これによって乾電池並に自己放電を抑制でき、かつ、1,000回以上の使用が可能な乾電池代替用充電電池が商品化され、世界の乾電池市場（販売金額約1兆円、約260億個）を代替すべく市場拡大している。さらに、HEV車での利用も開始されている。従来、Ni-MH電池は自己放電が大きいのが「常識」であったが、新合金の開発によりその「常識」が変わり、新たな充電電池としての利用分野が生まれたものである。また、ニッケル正極でも、導電助剤として10%程度のコバルト酸化物が添加されているが、これをコバルトフリー化する技術も開発されている。

負極合金に用いている希土類元素は、地球上に豊富に存在する元素ではあるが、この20年間で中国の寡占化が進み、世界生産量の97%を依存しており（図11参照）、大きな資源リスクとなっている。今後、生産国の多様化や電池の完全リサイクル化とともに、負極の希土類元素フリー化が求められている。

## (3) Liイオン電池の高性能化と安全性向上

携帯機器用途のLiイオン電池は、4V系正極材料（LiCoO<sub>2</sub>など）、と黒鉛系負極材料、ポリオレフィン系微多孔膜セパレータ、有機系電解液（リチウム塩LiPF<sub>6</sub>とエチレンカーボネートなど）などから構成される。円筒形電池（18650）の容量は、1994年に1200mAhであっ



(出所：米国地質調査所“MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2010”)

図11 希土類元素（レアアース）の資源量と生産量の国別比較

- ① 黒鉛負極上でLiデンドライトの析出などで微小短絡が起こり、温度が上昇する。
- ② 80℃付近で、負極表面皮膜と電解液が反応開始して温度が上昇し、安全装置であるPTC素子が作動して電流遮断される。
- ③ 80℃付近で、電解液分解が開始してガス発生し、安全装置である圧力弁が作動して電流遮断される。
- ④ 120℃以上で、ポリオレフィン系微多孔膜セパレータの微多孔が閉じることで、電気化学反応をシャットダウンして、電流遮断される。
- ⑤ 160℃以上では、セパレータがメルトダウンするので、完全短絡し、激しく発熱する。
- ⑥ 220℃以上では、正極材料（ $\text{LiCoO}_2$ 、 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ など）が熱分解して酸素放出して、有機溶媒と激しく反応して、熱暴走（1,000℃付近まで）に至る。

- 対策
- ・ 金属不純物の管理
  - ・ セパレータの耐熱性向上
  - ・ 正極の熱安定性向上
  - ・ 負極のLi析出防止
  - ・ 電解液の不燃化



図12 Liイオン電池の熱暴走メカニズム

たものが、2006年には2900mAhへと2倍以上に向上したが、充填密度向上により、内部短絡などによる発火事故が多発した。そこで、経産省では、電子情報技術協会や電池工業界と協力して、Liイオン電池の安全利用指針を策定し、また、JIS C8712「携帯電子機器用リチウムイオン蓄電池の単電池及び組電池の安全性試験」を改訂して、強制短絡しても発火・破裂しにくい設計と、安全に使用できる上限温度・上限電圧・上限電流の規定などを義務づけている。

充電時の発火メカニズムの一例を図12に示す。そこで、電動車両や鉄道車両、産業機器用などの大型用途では、電池の高性能化と安全性の両立が不可欠であり、新規電池構成材料（正極材料や負極材料、セパレータ、電解質など）に関する活発な研究開発が進められている（図13参照）。セパレータでは、200℃以上に耐熱性を高めるために、耐熱性繊維やセラミックなどを用いた材料の開発が進められている。負極では、従来の黒鉛系材料の数倍の高容量化が可能で、かつ、充電時にLi析

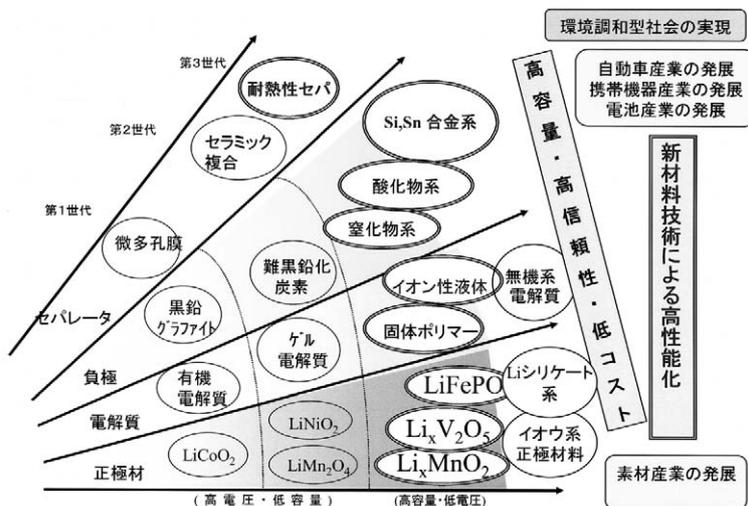
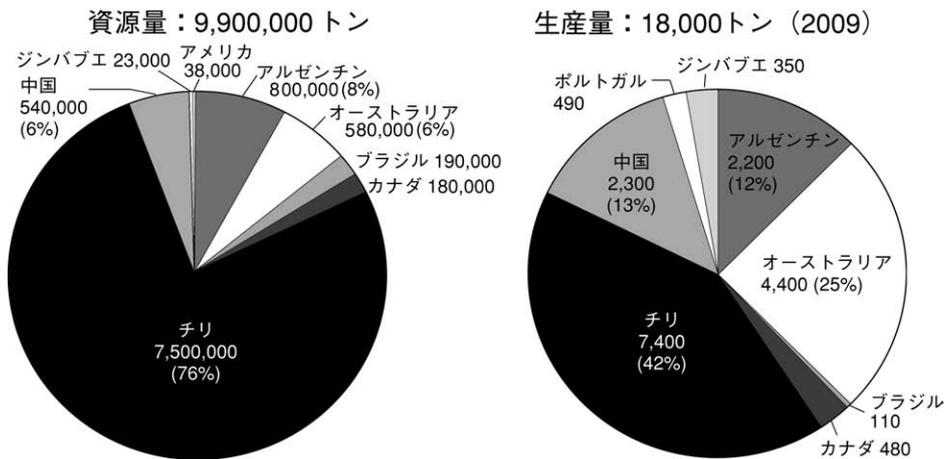


図13 次世代Liイオン電池材料の開発



(出所：米国地質調査所 “MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2010”)

図14 リチウムの資源量と生産量の国別比較

出しにくいシリコン系やスズ系などの合金系材料の開発が進められている。正極では、リン酸鉄リチウム ( $\text{LiFePO}_4$ ) やシリケート系 ( $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ ) など、高温でも酸素を放出しにくいポリアニオン系正極材料の開発が進められている。電解質では、難燃性で、かつ、Liデンドライトが生成しにくいイオン性液体系電解質の開発や、Liイオン導電性の高いLi硫化物系固体電解質材料の開発などが進められている。これら材料技術の革新によって、高容量で、かつ、安全性に優れた次世代Liイオン電池が実現できるものと期待されている。

Liイオン電池の用途としては、携帯機器が中心であり高容量なLiCoO<sub>2</sub>正極が使用され、2010年には18GWhの電池生産が予想され、Coは約2万トン（世界生産量の約30%）必要となる。そこで、電動車両用途では、資源やコスト、安全性の観点からマンガン系 ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) が広く利用されるが、高温での耐久性にまだ不安が残る。一方、リン酸鉄リチウム系 ( $\text{LiFePO}_4$ ) では、耐久性や高温特性には優れるが、そのエネルギー密度が3分の2程度に低下するので、電力貯蔵用や産業機器用途を中心に利用が進められている。

リチウムの使用量で見ると、2010年には電池用途のリチウムは約2,000トン（世界生産量の約10%）必要となるが、リチウムの埋蔵量の73%、生産量の44%をチリに依存しており、

資源の偏在が大きい（図14参照）。Liイオン電池は、多様な電極材料を利用できるため資源的なリスクは少ないが、リチウム自体が最大の資源的なリスクとなっており、ポストリチウムイオン電池の開発も急務となっている。

#### 4. おわりに

人類は、これまで100年にわたり有害元素を含んだ鉛電池やNi-Cd電池を利用してきた。1970年代に水素やLiを大量に貯蔵できる機能材料が発見され、1980年代にわが国でこれらの電池材料化が大きく進展し、1990年代には世界に先駆けNi-MH電池やLiイオン電池の商品化に成功した。これらの新型二次電池は、携帯機器分野はもとより、電動車両や鉄道車両、産業機器、電力貯蔵の分野でも利用されるようになってきた。材料技術の革新により、より高性能な新型二次電池が生まれ、環境とエネルギーが調和した未来社会の構築のために大きな貢献をしている。

現在、「材料技術を制するものが電池技術を制する」といわれ、電池材料の基本特許を押さえることが、欧米や中国の国家戦略ともなっている。今後ともわが国が電池技術の分野で世界をリードするためには、わが国が得意とする「ものづくりの技術」や「高度な解析技術」だけでは無理がある。困難ではあるが、

まだ誰も知らない新材料を発見して，基本特許を取得する「新物質戦略」を産学官連携で強力で推進しないと，製造技術はあっても「日本では電池を造らせてもらえない」時代がすぐに来るのではないだろうか？

#### 参考文献

- (1) 佐藤登，境哲男監修，「自動車用大容量二次電池」，シーエムシー出版（2003）
- (2) 境哲男，小林哲彦監修，「ユビキタスエネルギーの最新技術」，シーエムシー出版（2006）
- (3) 「電池革新が拓く次世代電源」，エヌ・ティー・エス（2006）
- (4) 金村聖志監修，「全固体二次電池-安全性と性能の両立」，サイエンス&テクノロジー（2007）
- (5) 境哲男，「リチウムイオン電池の高性能化と安全性—材料技術の革新—」，粉体と工業，Vol.39，No. 7，26-34，粉体と工業社（2007）
- (6) 「最新リチウムイオン二次電池～安全性向上および高機能化に向けた材料開発～」，情報機構（2008）
- (7) 「高性能蓄電池-設計基礎研究から開発・評価まで」，エヌ・ティー・エス（2009）
- (8) 「Liイオン新時代へ」，日経エレクトロニクス，1月11日号（2010）
- (9) 電気化学会電池技術委員会編，「電池ハンドブック」，オーム社（2010）

[寄稿]

## 原子力リサイクル事業への道

鳥井 弘之 (元 東京工業大学教授)



### 1. はじめに

原子力施設の運転、改修、廃止等に伴って種々の廃棄物が発生する。これらの廃棄物には、放射性廃棄物として特別の管理を要求される廃棄物、人工の放射性物質によって汚染された廃棄物、人工の放射性物質を含んでいない廃棄物 (NR: Non Radioactive Waste)、汚染のレベルが極めて低く放射性廃棄物で扱う必要のない廃棄物 (いわゆるクリアランス物) 等がある。廃棄物の処分問題の議論が本格化するにつれて、その管理方法について、かなり明確な指針が国内外において整備されてきている。

2004年9月、国際原子力機関 (IAEA) から「除外、免除及びクリアランスの概念の適用」(RS-G-1.7) という指針が提示され、これを参照して国際的に共有できる制度が各国から公表されている。

日本においても2004年9月、総合資源エネルギー調査会から「原子力施設におけるクリアランス制度の整備について」<sup>(1)</sup>が発行され、原子力安全委員会は、これらの結果をクリアランスレベルとして、国際的な整合性を考慮してIAEAの推奨値を採用することとし、原子炉等規制法についても本件を盛り込んだ改正を行った (第162国会2005年5月)。さらに、2007年10月、総合資源エネルギー調査会から「原子力施設における『放射性廃棄物でない廃棄物』の取扱いに関する報告書」<sup>(2)</sup>が公表されていることに鑑みれば、廃棄物の管理制度については議論が収束したと言える。

以上のような制度化により、原子力施設の管理区域内での廃棄物のうち「低レベル放射性廃棄物」は図1に示すような3つのカテゴリーに分類されることになった。

これにより、原子力施設からの廃棄物を単

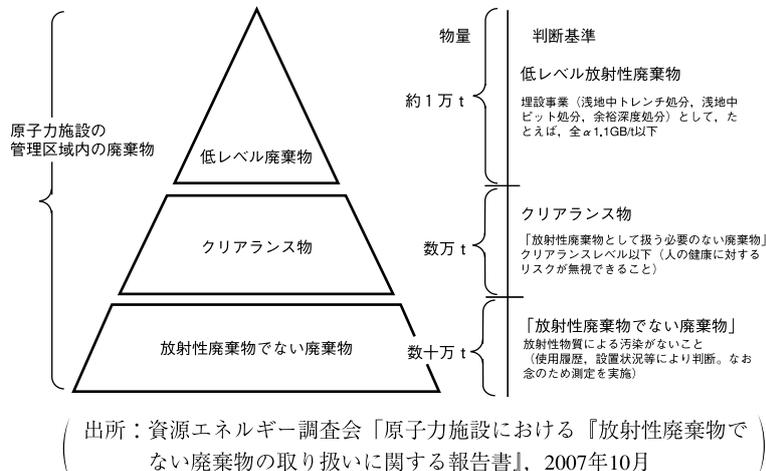


図1 放射性廃棄物クリアランス物、放射性廃棄物でない廃棄物の階層図

純に廃棄処分に持ち込むことなく、再資源化や再利用化を図り、資源の有効活用や廃棄物処理の経費負担の軽減に繋げる検討を進めることが可能になった。

このような環境条件を踏まえ、これらの廃棄物のなかで機器・材料等を再利用可能にする活用事業を展開することを前提に、諸課題の検討を行った。この検討では、国内外の低レベル放射性廃棄物の管理に関する諸制度、関連技術、事業展開、社会受容性等についての調査・分析、廃棄物の処理処分に関するビジネスモデルの構築を行った。本稿ではその概要を紹介する。

## 2. 資源リサイクルの国内外の背景

### (1) 原子力産業界における資源リサイクルの現状

海外では、IAEAのクリアランスに関するガイドライン発行後、OECD/NEAに加盟している主要国でクリアランス法令が制定されクリアランスレベル<sup>(3)</sup>が設定され、原子力施設で発生する低レベル放射性廃棄物のリサイクル事業が開始されている。米国では、Energy Solutions社が過去二十数年で鉄とアルミニウムを対象とした金属系廃棄物5万3,000トン以上を回収・リサイクルして原子力産業界にリサイクルしている。また、スウェーデンSydsvik社が原子力発電所の大型汚染コンポ

ーメントの処理の実績<sup>(4)</sup>がある。

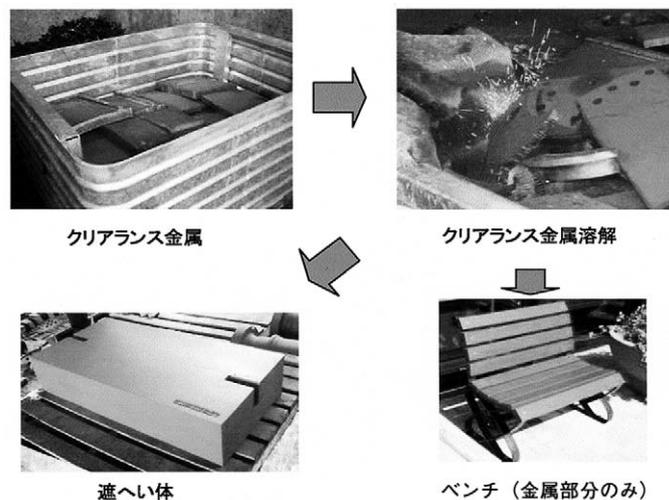
日本では、リサイクル例は多くないが、図2に示すように、日本原子力発電所(株)東海第一の一部解体物が遮へい体、ベンチ等の鋳造品に加工され、遮へい体は日本原子力研究開発機構の大強度陽子加速器施設J-PARCで再利用が図られている。

### (2) 一般産業界での資源リサイクルの現状

日本では平成17年度に年間4億2,200万トンの産業廃棄物が排出された。廃棄物全体のリサイクル率が39%のところ、非鉄金属鋳物系のリサイクル率は66%、金属系は97%と高い。

非鉄系の代表格であるコンクリート塊を含む建設廃棄物排出量は、平成7年度に9,910万トンで、再資源化率は55%程度で残りは埋め立て等の最終処分がなされていたが、平成12年に建設リサイクル法が制定され、平成17年度には再資源化率が85%以上に向上した。

金属系廃棄物としては、鉄と銅のスクラップが代表的で、アジアを中心とした資源需要が増大しており、日本も鉄スクラップで761万トン、銅スクラップで41万トン輸出している<sup>(5)</sup>。また、Ni, Mo, Ba等の希少金属に対する需要も増大して価格が高騰してきており、将来、再処理廃棄物の中にあるアクチノイド金属に含まれている多種の希少金属の再利用価値が高まると期待される。



(出所：日本原子力発電所(株)ホームページ)

図2 クリアランス対象物の再利用例

### 3. 原子力リサイクル事業の課題

#### (1) 技術的課題

原子力施設より発生する廃棄物をリサイクルしていくために必要な技術として、図3に示す廃棄物を可燃、難燃、不燃等に区分けする「分別」、放射能物質を除去する「除染」、建物・設備機器等を切断する「解体」、廃棄物の物量を減らす「減容」、放射能レベルを測定する「検認」、クリアランス以下のものを再使用可能とする「再生」等の個々の技術が挙げられる。個々の技術に関しては、昭和57年度から平成15年度にかけて原子力発電技術機構（NUPEC）が実施した「廃炉設備確証試験」<sup>(6)</sup>等で、開発中あるいは開発済で一部実用化しているが、個々の廃棄物としてのリサイクル化に向けたシステム実証は必要である。

#### (2) 制度的（法的）課題

低レベル放射性廃棄物のクリアランスに関しては、原子力委員会、原子力安全委員会にてウラン廃棄物のうちコンクリート廃棄物に関するものを除いてクリアランスに関する審議は終了したと考えられる。一方で、現行の原

子炉等規正法ではリサイクル化を図ろうとすると「廃棄の事業」が適用されることになるが、事業単位に指定・許可を受ける規制となっているため、複数の原子力施設を有する施設内で処理事業を行う場合には、その都度許認可が必要で、他規制との多重となり事務が煩雑で技術的齟齬を生じる可能性がある。従って、同一施設内では物質的包括規制とする法改正が有力な対策案となる。電力中央研究所報告「原子炉等規制法の構造的課題と改善のための立法試案」<sup>(5)</sup>によれば、原子炉等規制法の問題点克服に向けた基本的な考え方と改善点は以下の図4のように整理される。

さらに、クリアランスされた廃棄物は「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（廃掃法）では「産業廃棄物に分類され、今後、原子力分野からの廃材リサイクルを進展させるには、我が国の一般・産業廃棄物規制に詳しい専門家から意見を聴取した上で整理することが必要であり、ドイツのきめ細かく体系を構築した法体系が我が国の実情に近く、参考にすべき部分が多いと考えている。

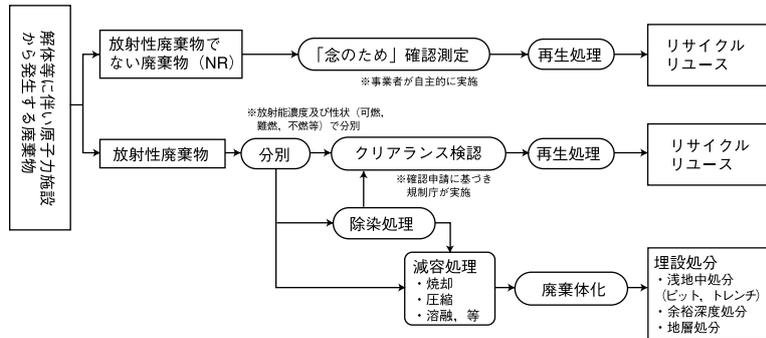


図3 リサイクル技術

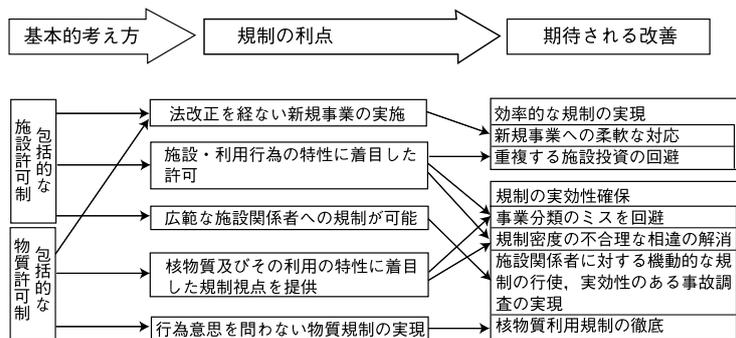


図4 原子炉等規制法の問題点克服に向けた基本的考え方

### (3) 社会的受容性の課題

わが国においては、原子力発電の持っている潜在的な大事故が原爆等を連想されることや、廃棄物については、処分の見通しがつかず施設内に大量に保管され事故等により外部に出てくるといった誤解等が背景にあるのが現状である。

多くの政府や報道機関などの長期間にわたる調査によれば、原子力に対する国民の賛否は、原子力の事故や不祥事によって影響をうけて変化してきた。ここ20年間では、チェルノブイリ事故以降、推進への反対が賛成の意見を上回ってきたが、最近では推進賛成が40%、推進反対が35%程度になっている。しかし、まだ原子力の黎明期の賛成の意見が60%、反対が20%といった状態にはなっていない。

このような国民の意識を変えていくためには、以下のような課題がある。

- 原子力関係者や行政担当者は原子力全般の理解活動を継続すると共に、地道な社会受容に関連した「原子力への親しみの醸成」に努力する必要がある。
- 原子力関係者が社会から信頼を得るためには、法令順守は勿論であるが、施設や作業者の安全管理の徹底や効果的な理解活動（体験型トレーニング等）の検討や事業遂行の透明性の確保が要求される。
- クリアランスレベルの確認や放射性廃棄物

でない廃棄物に認定（検認）の技術の信頼性の確保、物質の移動記録システム（原子力トレーザビリティ）制度の確立や運用の妥当性を評価する機関の設立等の社会的満足度を得る制度の確立が要求される。

## 4. 原子力リサイクル事業の概念

### (1) ビジネスモデルの確立に向けて

3章で述べた課題がある中で、廃棄物のリサイクル（再資源化）とリユース（再使用）を目的とした原子力リサイクル事業を展開してゆくために事業イメージを創出するビジネスモデルの検討を行った。

その結果、図5に示すように、まずニーズとしては、循環型社会の要求に応えるリサイクル・リユースを前提とし、技術的可能性と社会的な受容性（社会的アクセプタビリティ）の評価を行い、それらの結果を受けて、技術的、社会的な個別の課題について詳細に検討し、ビジネスモデル確立に必要な要件6項目を「制度・体制の構築」としてまとめた。

### (2) 社会の理解と協力を得た事業

#### ① 原子力全般の理解に向けた方策

3(2) 社会的受容性の課題で述べた理解活動を通じた「原子力への親しみの醸成」に向けた代表的な方法論として「リスクコミュ

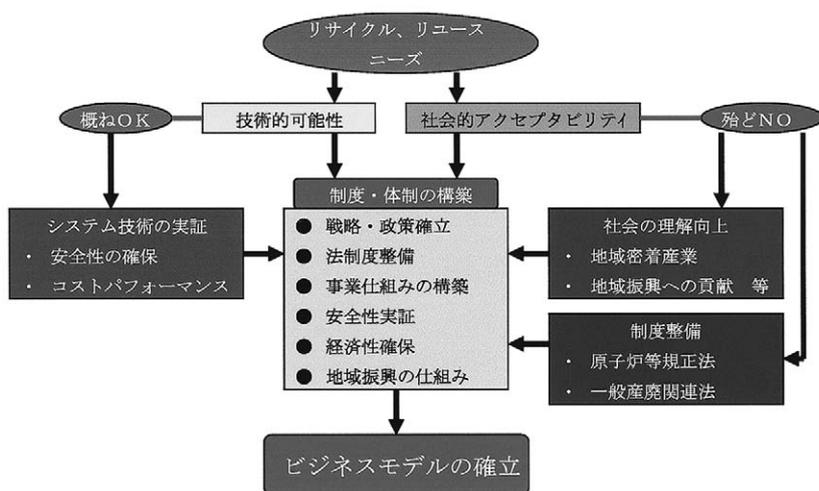


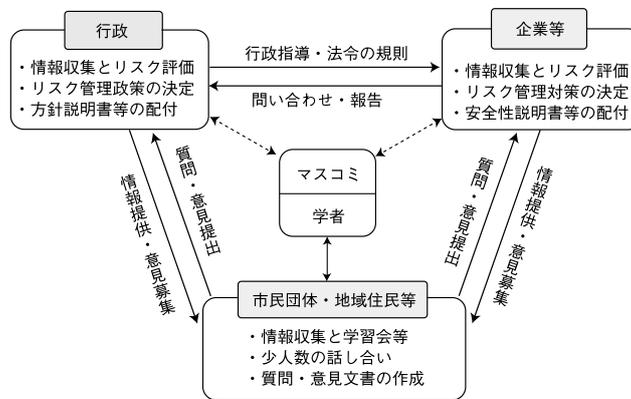
図5 原子力リサイクル事業制度の構成要件

ケーション手法」の適用がある。この手法は人間の健康や環境被害に対するリスクを持った事業や施策の社会受容を促進するために開発されたもので、図6に示すように、市民団体や地域住民の状況を理解し、事業者や行政との間に合意形成できるように意見交換を通しての理解や住民の合理的な要求を取入れる仕組みで、諸外国においてもコミュニケーションのツールとして取り組んでいる<sup>(7)</sup>。

② リサイクル事業の地域との共生に向けた提案

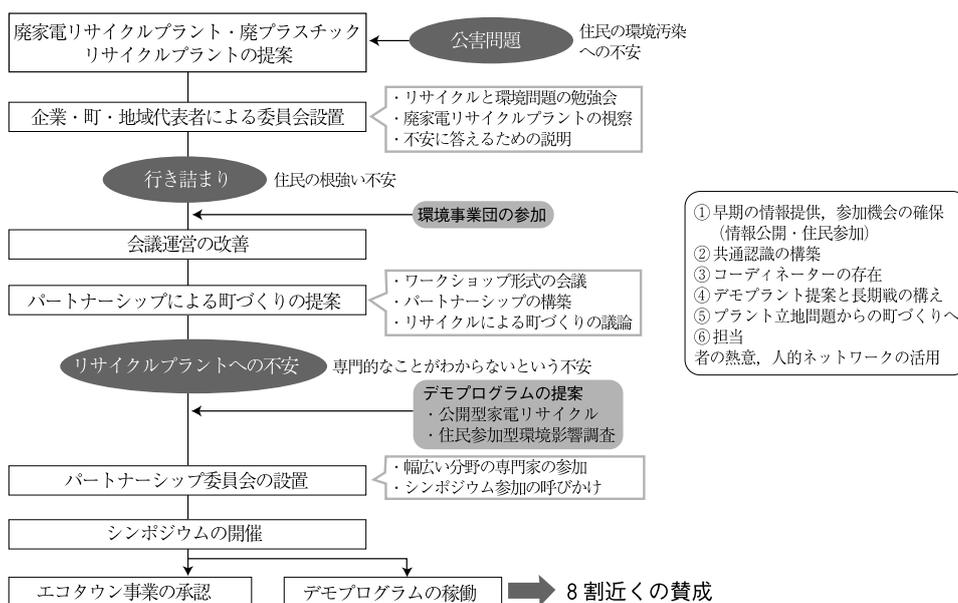
①で述べた「リスクコミュニケーション手法」

は一般の産業廃棄物処理事業においても有効な手段として認識されており、(社)全国産業廃棄物連合会が取りまとめた産業廃棄物処理業とリスクコミュニケーションに関する調査報告書<sup>(8)</sup>では、かつて鉾山町として栄えた宮城県鶯沢町に建設された廃家電リサイクルプラントにおけるリスクコミュニケーションの成功事例を紹介している。図7に示すように、廃家電リサイクルプラントの建設提案当初から地域住民から環境汚染の不安が寄せられていたが、提案企業が早い段階から情報公開と建設計画への住民参加を実施し、さらに地域



(出所：産業創造研究所「化学物質のリスクコミュニケーションの現状」, 2005)

図6 リスクコミュニケーション手法の概念



(出所：「日本化学会報告書」, 1988)

図7 宮城県鶯沢町の廃家電リサイクルプラントにおけるコミュニケーション事例

住民との橋渡し役として第三者の環境事業団をコーディネーターとして迎え入れる等、理解を促進させる措置を講じてきた。そして、住民からの不安に対し、プログラムによる公開型家電リサイクル実証試験等を行う等、プラント建設への不安解消に努めてきた。

原子力リサイクル事業化においても基本的な姿勢として ア) 世代をつなぐコミュニケーションの継続, イ) 小さい苦情段階での即日対応, ウ) 産廃受入管理の徹底, エ) 従業員教育, オ) 法律の遵守 等に立脚した地域共生を図っていく必要がある。

③ トレーサビリティを導入したクリアランス資源リサイクルの仕組

原子力リサイクル事業制度の確立には「地域共生」に加え、リサイクル資源のトレーサビリティ管理が重要となる。その中核組織と

なるのが図8の『情報管理センター』である。『情報管理センター』はリサイクルに関わる関係者からもたらされるプロセス管理やフロー管理の情報を管理し、各関係者間の情報共有を担う組織である。情報管理センター設置の目的は、関係者内のリサイクル関連情報や放射線計測などの情報等を一括管理・保管・共有し、リサイクルの安全性・安心感・確実性を高め、得られた情報を整理し必要に応じて国民や地域住民に公開してリサイクルの透明性を図ることである。さらに、万一汚染物が発見された際には、危機管理センターとして機能させ、過去のリサイクル履歴から汚染された可能性のある物を確認し、汚染された材料や機器を確認し、汚染の拡散を防ぐことを目的としている。情報管理センターは、原子力リサイクルの安全性・安心感・確実性を向上させる役割を果たす。

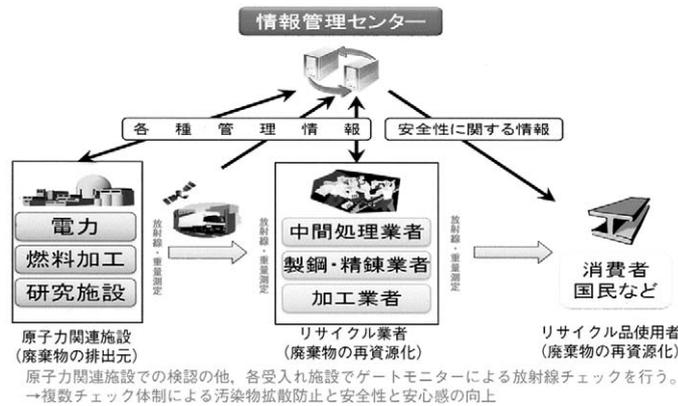


図8 クリアランス資源リサイクルの全体像

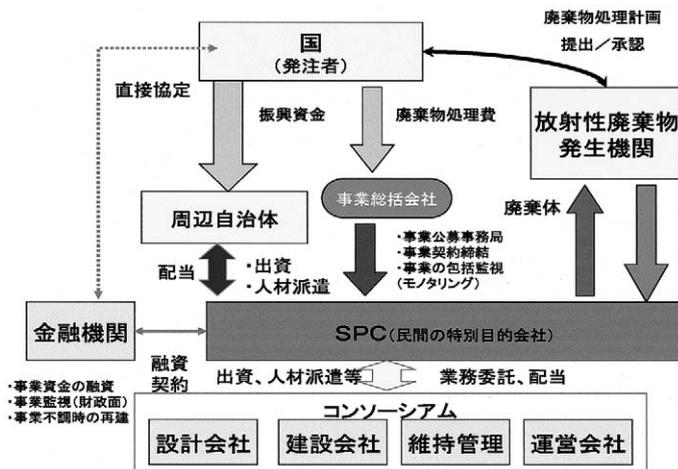


図9 民設民営 (PFI) 手法による事業スキーム例

### (3) 民間活力を想定した事業

(1) で述べたリサイクル事業を、主に公的機関の廃棄物の分別・除染、排出管理などを効率よく行うことを念頭において検討した中で、民間の事業能力を活用したアウトソーシングの手法がある。具体的手法として、① 公設公営（業務委託型）② 公設民営（管理業務委託型）③ 民設公営（施設買取、施設賃貸型）④ 民設民営（PFI）型を取り上げた。その結果、リサイクル・リユースのコストパフォーマンスの視点から民間の活力を活用したPFI型が有利であるという結論を得た。PFI型は図9に示すような体制で、公的な研究所などの廃棄物処理の計画を承認する国などの発注者とSPC（特別目的会社）の間に契約を結び、周辺自治体との協力による地域振興などの可能性を持った事業モデルであると言える。

## 5. おわりに — 今後検討が必要な課題

本検討では、原子力施設から排出される、廃棄物のうち、放射性ではない廃棄物（NR）や放射性廃棄物やのうちクリアランス物といわれる、放射性廃棄物として管理が必要ではない廃棄物の取り扱いの管理基準が明確化されたことに伴った廃棄物処理事業にかかわる現状についての調査・検討の結果をまとめた。

具体的には、放射性廃棄物として管理をする必要がない廃棄物を、リサイクルや再利用をすることで、廃棄物の最終処分の量の削減と、再利用による資源の有効利用を図ることで、原子力施設を持つ、廃棄物の発生事業者の負担軽減と新たな事業の振興に役立つスキームを検討し、課題はあるものの、将来に向けた方向性を示すことができた。

この事業のフィージビリティについては、欧米で先行している事業者や政府機関の活動の事例調査、日本で事業展開をする上で最大の課題であろうと思われる、廃棄物の再利用やリサイクルについての社会の受容性とその対応調査、安全に廃棄物を再利用・リサイクルに関連

した技術の調査、および原子力事業者からのアウトソーシングの制度や構造の調査、などをともに分析を行って見通しを立てた。

さらに、廃棄物を安全に取り扱うための種々の法制度の推移や外国の例なども調査を行い、今後の事業展開に必要な諸制度の構築のための資料の手がかりなどを整備した。

さいごに、事業展開を促進するために、今回の調査・分析では不十分であった事項を今後の課題として整理し、その解決に向けての素案を以下に示す。

- ① 資源リサイクル事業の現状調査
  - ・原子力鋼材や非鉄金属資材リサイクル事業の海外現状調査
  - ・コンクリートリサイクルや機器・部品再利用の海外調査
  - ・国内及び世界的な金属資源及び建設資材リサイクルの現状調査
- ② 技術調査
  - ・過去に実施されてきた原子力分野の廃棄物リサイクル技術開発実績調査
  - ・今後の原子力除染資源リサイクル・再利用に必要な技術開発・実証課題抽出
  - ・リサイクル資材のトレーサビリティ確保に係るシステム構築と検証試験による透明性・追跡性の技術的実証
- ③ 制度設計検討
  - ・現行法制度の問題点整理と新たな法制度整備・法規改正の可否の検討体制の設置
  - ・わが国の原子力クリアランス資源物のリサイクルに係る実施体制の整備促進
  - ・原子力クリアランス資源物のリサイクル・パスの制度化促進
- ④ 事業化検討
  - ・原子力資材のリサイクル事業形態に係る検討
  - ・原子力資材のリサイクル事業の経済性検討（損益シミュレーションの実施）
- ⑤ 社会的受容性向上の検討
  - ・一般鋼材リサイクル事業者及び地方自治体等のステークホルダーとの対話による受容性の調査
  - ・理解促進戦略構築に向けての具体的手法の選定ガイドラインの試作と実施
- ⑥ トレーサビリティ確保に係る検討
  - ・リサイクル資材の透明性・追跡性実証を目的とした簡易試験

### [謝辞]

本検討は、エネルギー総合工学研究所主管研究員・故鳥飼誠之氏、エネルギー計画コンサルタント代表・宮沢龍雄氏、三菱UFJリサーチ&コンサルティング主任研究員・梶田晋吾氏のご尽力によって完了したものであり、ここに深く謝意を表するものである。

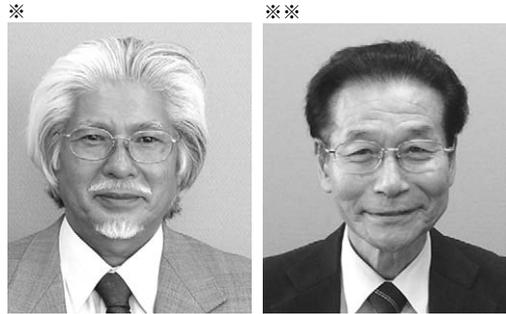
#### 参考文献

- (1) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 「原子力施設におけるクリアランス制度の整備について」, 2004年9月(2004年12月一部改訂)
- (2) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 「原子力施設における『放射性廃棄物でない廃棄物』の取扱いに関する報告書」, 2007年10月
- (3) OECD, “Release of Radioactive Materials And Buildings From Regulatory Control,” NEA No.6403, 2008
- (4) Gregor Krause, “Decontamination, melting and recycling of a full size, 310 t Steam Generator from a PWR,” KONTEC 2007, Dresden, 21-23 March 2007
- (5) 財電力中央研究所, 研究報告: Y04006 「原子炉等規制法の構造的問題と改善のための立法試案」(田邊朋行著)
- (6) 石倉 武, 「原子力発電の廃止措置廃棄物の再資源技術について」(パワーポイント資料), (財エネルギー総合工学研究所, 2008年12月5日)
- (7) 産業技術総合研究所, 「化学物質のリスクコミュニケーションの現状」, 2005年
- (8) (社)全国産業廃棄物連合会, 「リスクコミュニケーションマニュアルの調査」, 2003年

## セルロース系バイオ燃料の開発動向

浅見 直人 <sup>※</sup> (プロジェクト試験研究部 参事)

山田 富明 <sup>※※</sup> (プロジェクト試験研究部 副参事)



### 1. バイオマスエネルギー利用とバイオ燃料

バイオマスエネルギーは、石油市場との関連が深く、2度の石油ショックの時など、2000年代になる前から注目されてきた。温暖化ガス排出削減が喫緊の課題とされ、わが国では石油依存から脱却する方針が明らかになった2001年度に、バイオマスが新エネルギーの1つとして追加され、その本格的な技術開発と導入促進策が採られた。そうした意味では、今回の「バイオマスブーム」は約10年を経過したところである。

図1に、再生可能エネルギー導入量の2005年の実績値と2020年の試算例を示す。

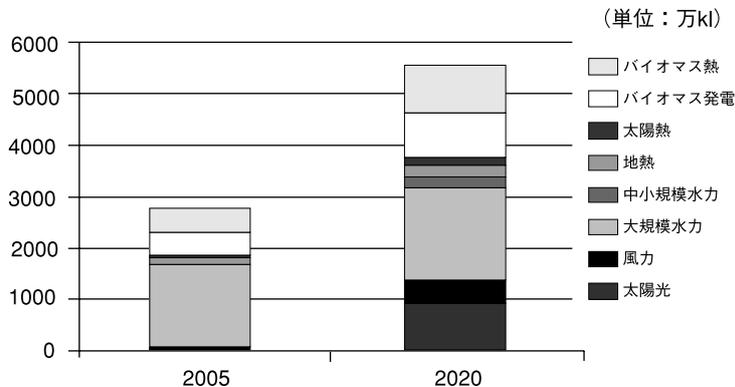
2005年度の導入実績では、再生可能エネルギー2,800万klで、この内バイオマスは熱利用と発電とで約35%を占めている。2020年の展望では、全体で5,500万kl、バイオマス関連で約32%が期待されている。

### (1) バイオマスエネルギーの特徴と利用法

バイオマスとは、「再生可能な形で利用できる生物由来の有機物」であり、バイオマスエネルギーとは、「バイオマス原材料を、エネルギー利用可能な形態に変換した、固体・液体・気体燃料及び電力・熱」の総称である。

バイオマスはその生立ちから多種多様な形で存在する。それに由来するバイオマスエネルギーは、次のような特徴を持っている。

- ① 発生分布が広く薄い上、容積当たりのエネルギー密度が低い。
- ② 基本的に水分を含有し易く、水分変動も大きい(約80%で低位発熱量“ゼロ”)。バイオマスエネルギー利用は、食糧・飼料、木材・パルプ等との競合が予想される。バイオマス資源の収集・運搬が必要でその負担が大きい傾向がある。
- ③ 小規模分散型の設備になりがちで、スケールメリットによる高効率化、低コスト化が難しい。



(出所: 経済産業省資料「21世紀の日本の復活に向けた21の国家戦略プロジェクト」, 2010年6月)

図1 再生可能エネルギー導入の2020年試算値

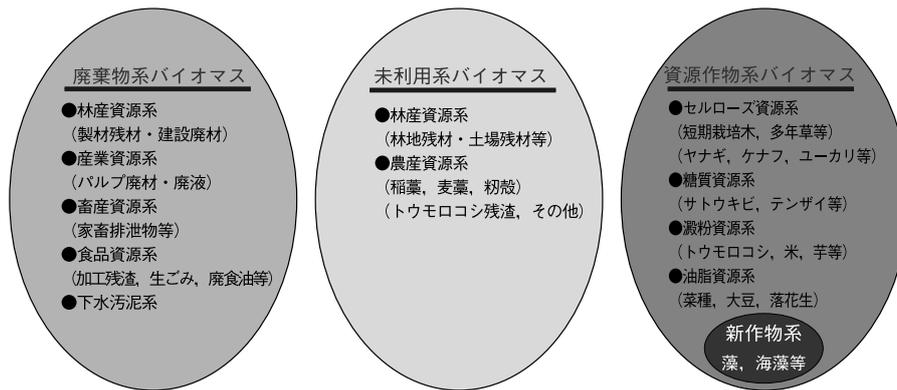


図2 エネルギー利用を考えたバイオマスの分類

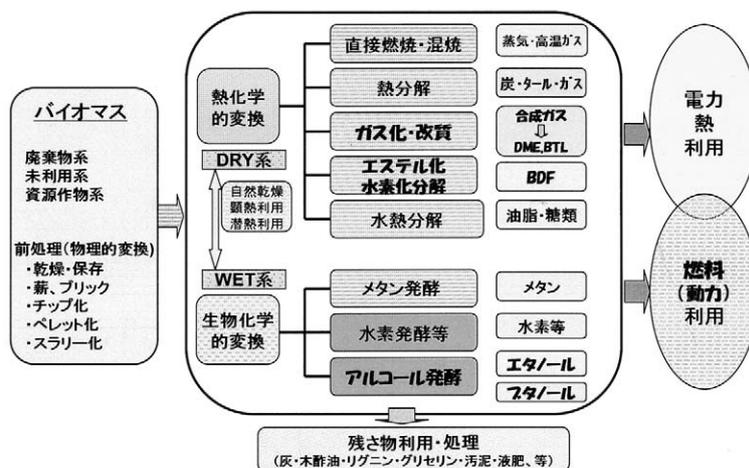


図3 バイオマスの多様なエネルギー変換・利用システム技術

バイオマスには様々な分類法がある。水分の多少で分ける (1) WET系とDRY系、一般的に前者は後述する生物化学的変換、後者は直接燃焼を含む熱化学的変換に適していると言われる。また、バイオマス発生源で分類する方法で、(2) 林産資源系、産業資源系、畜産資源系、食品資源系、下水汚泥系、等、さらに、(3) 廃棄物系、未利用系、資源作物系等利用のし易さで分ける方法等である。図2に(2)と(3)の組合せた分類法を示す。

多種多様な状況・性状で存在するバイオマスは、エネルギー変換技術も多様に存在する。図3に主要なものを体系的に示した。

(2) バイオ燃料とは

ここで対象となるバイオ燃料に関する変換技術は、自動車燃料等に利用される次の3つのカテゴリーに分類される。

- ① 糖・澱粉・セルロース系 ⇒ アルコール発酵技術 ⇒ エタノール、ブタノール生産
- ② 油脂 ⇒ エステル化、水素化分解技術 ⇒ バイオディーゼル油 (BDF)
- ③ 各種バイオマス ⇒ ガス化・改質 ⇒ FT合成等 ⇒ BTL (Biomass to Liquid)

また、バイオ燃料の開発・導入段階から見ると以下の呼び方をする場合が多い。

- ① 第1世代燃料：糖・澱粉類 ⇒ エタノール、および油脂 (エステル化) ⇒ BDF
- ② 第2世代燃料：セルロース系 ⇒ エタノール、および油脂 (水素化分解) ⇒ BDF
- ③ 第3世代燃料：ガス化・改質 ⇒ FT合成等 ⇒ BTL

既に実用化されている①を除いて、②、③を総称して、次世代燃料と呼ぶこともある。

第1世代燃料は、技術的には最も簡単であるが、問題は食糧・飼料との競合問題である。糖はサトウキビや甜菜などから、澱粉は、トウモロコシやコメ・麦、芋類から採れるが、人間の食料や飼料との競合があり、一般にも記憶に新しいと思われが、価格の高騰に繋がりが兼ねない問題を含んでいる。油脂類は菜種油やひまわり油、パーム油であるが、これもまさに食料との問題を含んでおり、日本では廃食油を利用しているので、地産地消的な小容量の利用に限られている。

そこで、第2世代燃料として、セルロース系の材料（草木系）からのエタノールやブタノールが注目されて、詳細は後述するように、先進諸国が競ってセルロースの発酵技術の開発を進めているところである。油脂のメタノール等によるエステル化はグリセリンをBDFとしての利用ができない形で発生してしまう問題があるが、水素化分解の技術を適用することで油脂の大半部分をBDF化できる技術もある。いずれにせよ日本では原料となる油脂が大量にはないので大きな期待は難しい分野である。

また、第3世代燃料として期待されるのが、熱化学的変換によりバイオマスをガス化・改質して一酸化炭素（CO）と水素（H<sub>2</sub>）に分解し、これを1対2に近い組成にして、メタノールやDMEに、またFT合成してBTLとしてバイオ液体燃料に変換する手法である。

工程は複雑化するため経済性向上のための技術開発とともにある程度の規模の大型化が不可欠となる。

## 2. バイオ燃料の動向

### (1) バイオ燃料の世界動向

世界のバイオエタノールとバイオディーゼルの生産量の推移を図4に示す。いずれも2004年頃より、急激な伸びを示しているのが分かるが、これが自動車燃料として使われ急激に普及し始めた時期に一致している。

表1にバイオ液体燃料の2006年の世界の生産量実績を示す。エタノールに関しては、米国（原料：トウモロコシ）とブラジル（原料：サトウキビ）で、354億ℓで、世界全体510億ℓの約70%を占めている。一方、バイオディーゼルについては、世界全体65億ℓの内、約75%の48億6,000万ℓをヨーロッパ連合が占めており、その重点の置き方が示されている。この時点におけるエタノールの日本の輸入量は約1%で自動車用燃料ではなく、一般産業用である。

バイオ燃料の導入に関して、日本は遅れていると言わざるを得ない現状であるが、現在の自動車保有台数から推定したバイオ燃料の国内需要ポテンシャル（表2参照）からすれば、バイオエタノール、バイオディーゼルとも相当量の導入が期待される。

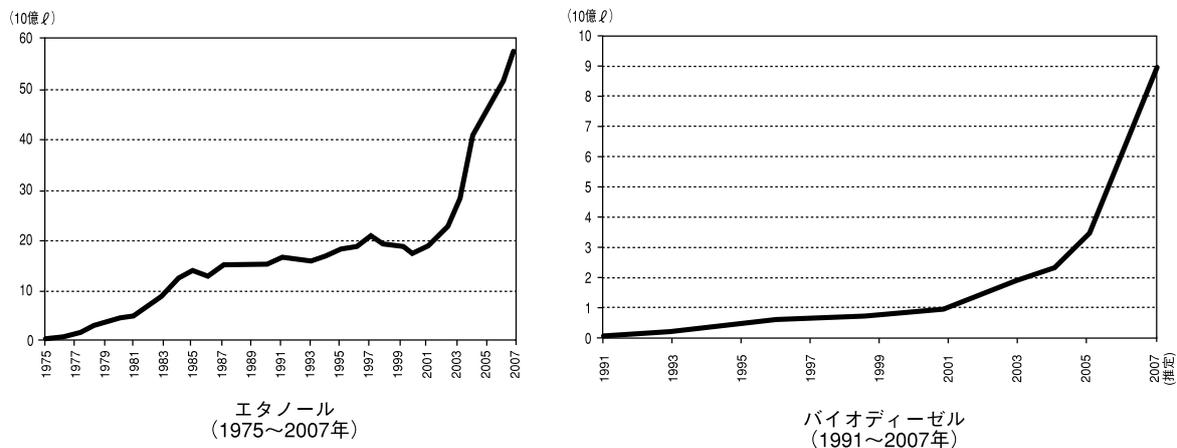


図4 世界のエタノールとバイオディーゼルの生産量推移

表1 世界のバイオ燃料生産量統計

地域・国	エタノール	バイオディーゼル
オーストラリア	148	82
カナダ（推定）	422	59
EU	1,592	4,859
スイス	1	10
米国	18,378	850
その他OECD加盟国	223	100
OECD計	20,764	5,960
世界のその他地域・国 （内ブラジル）	30,297 (17,000)	650 (68)
世界合計	51,061	6,510

表2 国内の自動車保有台数から推定したバイオ燃料需要ポテンシャル

		2010	2020	2030
燃料の想定		E3/B5	E10/B20	E10/B20
旅客	エタノール	165	463	311
	BDF	35	117	79
貨物	エタノール	28	93	86
	BDF	136	544	506
エタノール計		193	556	397
BDF計		171	661	584

(2) バイオ燃料の開発状況

表3にバイオ燃料主要生産国の開発・導入に関する目標、施策、研究開発の動向についてとりまとめた。広大な土地を背景に、米国ではトウモロコシを、ブラジルではサトウキ

びを原料としたバイオエタノールをすでに生産しており、これが食料・飼料との問題を引き起こしたことは記憶に新しい。その後、米国ではコーンストーバー、ブラジルではサトウキビの搾り滓であるバガス・葉などセルロ

表3 主要国のバイオ燃料への取り組み状況

	米国	EU	ブラジル
導入目標	大統領2007年頭教書 [20 in 10] : 2017年までにガソリン燃料20%削減（5%分自動車効率向上、15%分バイオ燃料に代替）	欧州首脳会議2007年3月： 2020年までにバイオ燃料割合を10%以上を加盟国に義務付け	ガソリンへのエタノール混合20~25%を義務付け
税制優遇措置	EtOH: US52¢/gal Federal Tax Credit. Blenders Tax 31¢/gal	（国別優遇措置は別途決定） 例 ドイツ：約91円/L フランス：約53円/L	EtOHにかかる税金の合計を化石燃料の50%（50%OFF）
利用方法	直接混合 主に10%（州により義務化） 一部85%	ETBE：ドイツ、フランス、スペイン等 直接混合：スウェーデン等	20~25%。義務化 100%も一部で導入
施策・動向	・6件のセルロース系バイオ燃料プロジェクトに3億8,500万ドル ・小規模バイオリファイナリー開発に5年間で2億ドル	・導入施策は国ごとに対応 ・ドイツでは第2世代バイオ燃料は非課税	・国営石油企業ペトロプラスがバガスでパイロットプラント建設（2008年稼働） ・Dedin社、2002年からバガスよりエタノール生産 現在価格27¢/L
研究開発導入動向	・セルロース系2012年までにガソリンと同等の価格競争力 ・3研究機関に2008~2013年の5年間で3億7,500万ドル	EUのバイオマスエネルギー開発投資の約40%がバイオ燃料の研究・実証（推計3,000万ユーロ/年）	ポトランチグループ（紙パルプ・セメント業）バガス・葉を原料にエタノール製造パイロットプラントを2010年までに立ち上げる会社設立

ース系のバイオ燃料の技術開発に注力して様々な開発施策が取られており、米国では2017年までに15%分をバイオ燃料に、ブラジルではエタノール混合割合を20～25%に義務づけている。EUでは、2020年までに加盟国にバイオ燃料割合10%以上を義務づけ、導入施策は各国にゆだねている。

これらは、バイオエタノールを生産している国の場合で、日本のように糖・澱粉などからのバイオエタノールの生産は多くは期待できない国では、導入遅れているのもやむを得ないと言えよう。日本では現在バイオエタノールのガソリンへの混合割合は3%（E3）相当まで法的に許可されおり、ようやく導入試験が行われている段階である。

### （3）わが国のバイオ燃料施策

前述のとおり、わが国のバイオマス利用に関する具体的な取組みは2001年に開始され、具体的には「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発」がスタートしたが、当初は地産地消型利用法が主体的であり、バイオマスの燃焼、ガス化、メタン発酵などの技術開発と導入が進められたが、一部に電力や液体燃料として利用する広域消費型利用（大規模型）も含まれていた。その中で、「セルロース系バイオマスを原料とするエタノール発酵技術等による燃料用エタノールを製造する技術の開発」（後にNEDO法と呼ばれる）が5カ年計画で進められていた。導入目標に対し地産地消型利用だけでは十分な導

入が進まないのも、化石燃料で多くのインフラができ上がったわが国のエネルギー需給構造からやむを得ないところである。

2006年に欧米でのバイオ燃料重視施策に呼応して、「新・国家エネルギー総合戦略」で運輸部門石油依存低減目標2030年80%とし、バイオ燃料供給促進と経済向上が指摘された。また、2008年には「バイオ燃料技術革新計画」が報告され、国内バイオマスを用い、年産1.5万ℓ規模を狙った「バイオマスニッポンケース100円/ℓ」と、早生広葉樹あるいは多収量草本をプランテーションして10万～20万ℓ規模を狙った「技術革新ケース40円/ℓ」具体的課題を明らかにしている。

現在技術開発として高効率転換技術事業の一環で進められている「加速的先導研究」（平成20～24年度実施予定）と「セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業」と（平成21～25年度実施予定）があり、いずれも技術革新ケース40円/ℓの線に沿った開発である。

2010年6月には、新たな「エネルギー基本計画」と「新成長戦略」が閣議決定され、これらがエネルギー開発の最も新たな基本方針となっている。

### 3. セロース系バイオエタノールの開発

バイオエタノールは、原料として糖類、澱粉類、セルロース類のどれからスタートするかで製造工程が複雑化して行く（図5参照）。

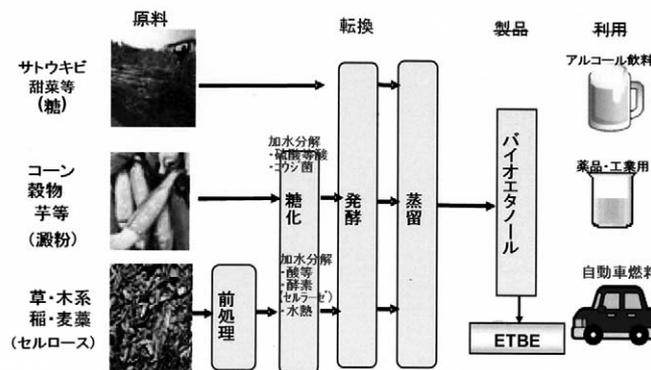


図5 原料によるバイオエタノール製造工程の差異

糖や澱粉からのエタノール発酵は、酒作りで代表されるごとく、古来からある技術として知られている。食料と競合しないものとしては、草本や木本類からなるが、これらはいわゆるセルロース系からなっている。

セルロース系と言っても、一般の植物ではセルロース (C6)、ヘミセルロース (C5)、リグニン、灰分その他からなっており、その割合も異なるが、例えば稲わらでは灰分を除いて3成分は、39%、33%、24%であり、スギでは42%、25%、32%である。このうちエタノールに変換できるのは、ホロセルロース (セルロース+ヘミセルロース) である。

### (1) 実証事業のあらまし

現在日本で進められているバイオエタノールの実証事業の概要を図6に示す。

全国で12の実証事業が進められ、この内、1.5万 $kl$ 規模の事業は、①、③であり、セルロ

ース系は⑥、⑧、⑨である。その多くは廃棄物系のものであってよいものである。

その後、次に述べる「バイオ燃料技術革新計画」が策定され、現在は沿った技術開発が進められている。

### (2) 革新的技術開発計画 (2008年3月)

2007年11月に経済産業省と農林水産省が連携して、石油業界、自動車業界と大学・独立行政法人等の研究機関からなる「バイオ燃料技術革新協議会」を設置し、具体的な目標、技術開発、ロードマップ等を内容とする「バイオ燃料技術革新計画」の策定を行うこととなった。

この中では、エタノール生産コストについて2015年に「バイオマス・ニッポンケース」として、バイオ由来燃料に係るガソリン税を免税したガソリンとの価格競争力を勘案し、製造コストを100円/ $l$ 、さらに、「技術革新ケース」と

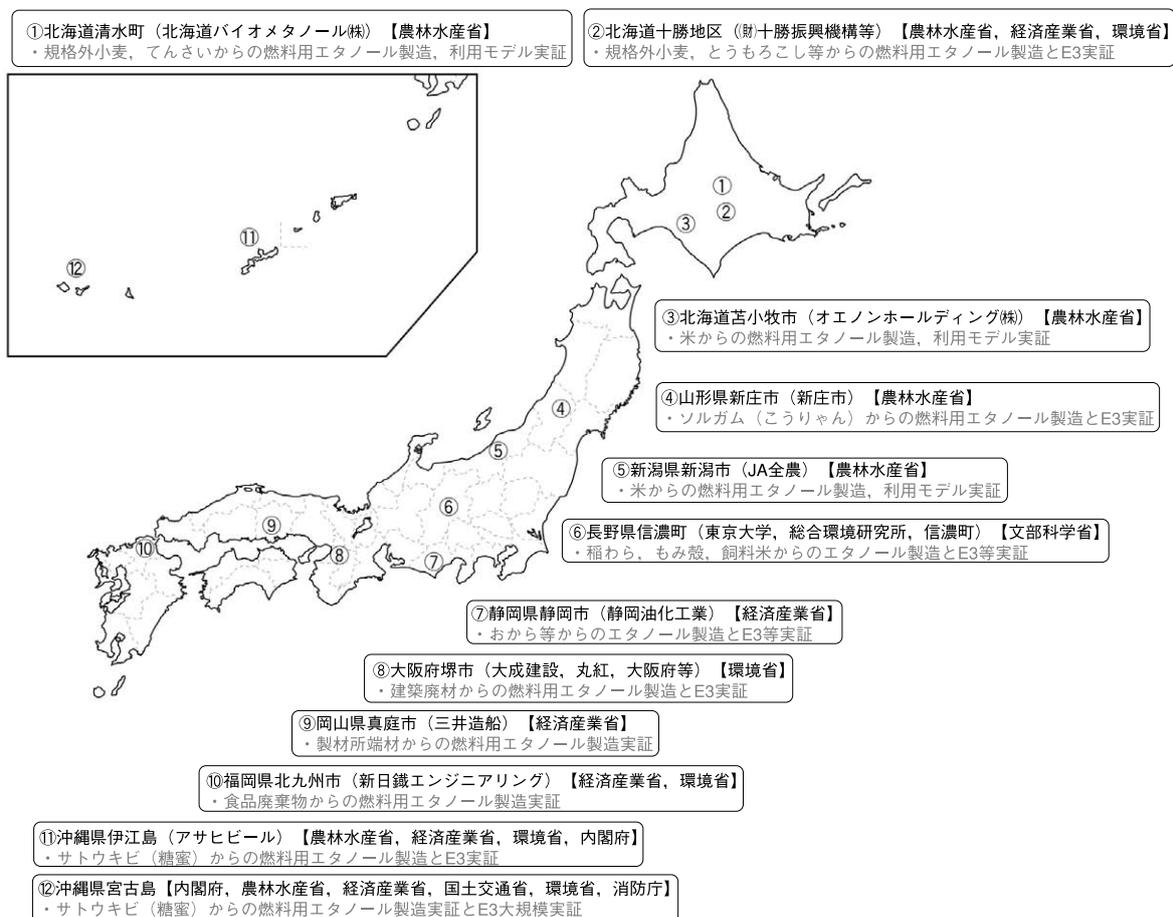


図6 国産バイオエタノールの生産技術実証事業の概要

して、ガソリンとの価格競争力や米国等の開発計画を勘案し、経済的かつ多量、安定的に生産が可能なバイオマスを利用し抜本的な技術革新を目指し、製造コストを40円/ℓと設定されている。また、「バイオ燃料技術革新協議会」では、この2つのケースを検討するにあたり、「バイオマス・ニッポンケース」については、国内の未利用バイオマスを原料とし、具体的な事業化を念頭に置きエタノールの生産規模は1.5万kl/年としており、「技術革新ケース」については、目的生産バイオマスを原料とし、国内外を問わずエネルギー産業として取り組む規模として10万～20万kl/年としている。

技術革新ケース40円/ℓの場合の対象原料と転換技術を表4に、開発ベンチマークを表5に示す。

このためには、食料等と競合しないセルロース系バイオマス由来のエタノールについて、2015～2020年頃に実用可能なバイオマスの総合利用技術を確立する必要がある。

### (3) 加速先導技術開発

NEDO技術開発機構では、加速的先導技術研究として研究開発を行うこととしており、①水熱処理技術とアーミング酵母による併行複発酵技術との組合せを中核としたプロセス

表4 技術革新ケース40円/ℓの場合の対象原料と転換技術

		技術革新ケース (40円/L)	
原料	生産地	国内外	
	バイオマス原料	(目的生産バイオマス) 多収量植物 (エリアンサス、ミスカンサス、ソルガム、サトウキビ、ススキ、ネビアグラスなど)、早生広葉樹 (ヤナギ、ポプラ、ユーカリなど) ※大幅なシステム革新があれば針葉樹 (スギなど) も活用できる可能性はある。	
製造	開発対象技術	生産規模	10～20万kl/年
		前処理	微粉砕処理、アンモニア処理、水熱処理、ソルボリシス、アルカリ処理、微生物処理
		酵素糖化	高活性酵素選択・創製、成分比較最適化、オンサイト酵素生産、酵素回収再利用、含水固体糖化リアクター、糖液濃縮技術
		エタノール発酵	連続発酵、5炭糖・6炭糖同時利用、高温耐性、含水固体発酵装置
		濃縮脱水	膜分離法、溶媒抽出法
		廃液処理	廃液処理—再利用 (膜分離法など)、発酵残渣・灰分の有効利用 (肥料、飼料)、処理エネルギー低減
原料～製造に係るLCAの視点		CO2削減率50%以上、エネルギー収支2.0以上	

表5 技術革新ケース40円/ℓの場合の開発ベンチマーク

		開発ベンチマーク (2015年) ※40円/Lに向けて個別技術の達成度を表わす指標	
原料	乾物収量	草本系：50 t/ha・年、木質系：17 t/ha・年	
製造	一貫プロセスとして	エネルギー使用量 6 MJ/kg バイオマス以内 (バイオマスで自立)、エタノール収率 0.3 L/kg バイオマス以上、エネルギー回収率35%以上	
	前処理	酵素糖化効率80%以上となる前処理	
	酵素糖化	酵素使用量 1mg/g 生成糖以下、酵素コスト 4円/L エタノール以下、糖収量 510g/kg バイオマス以上	
	エタノール発酵	エタノール収率 95%以上	
	濃縮脱水	エネルギー使用量 2.5MJ/kg バイオマス以下 (10%エタノール水溶液→無水エタノール分離回収)	
	廃液処理	エネルギー回収分を除いた処理コスト 5円/L エタノール以下	
環境・社会評価		<ul style="list-style-type: none"> <li>ライフサイクルを通じたCO2排出量やエネルギー収支の評価</li> <li>食料との競合、生態系への影響等環境・社会・経済的な持続可能性に関する評価</li> </ul>	

開発，②パルプ産業機械技術およびメカノケミカル処理を組合せた前処理技術と酵母によるC5とC6の同時発酵技術とを中核としたプロセス開発，③マイクロ波ソルボリシス前処理技術とダイモバクター菌等による併行複発酵技術を中核としたプロセス開発，さらに糖化後，④膜分離プロセス推進型アルコール（ブタノール）生産技術の研究開発を中心とした一貫プロセス開発を行うこととしている。

また，エタノール以外にも「セルロース系エタノールからプロピレンを製造するプロセス開発」，「酵素糖化・効率的発酵に資する基盤研究」，「バイオ燃料等測定・試験法の国際標準化研究」が行われることとなっている。

図7に加速先導技術の全体事業の構成と概要を示し，図8にこの総合調査研究の内容と実施概要を示す。当研究所は，この総合調査研究を担当している。

これらの各技術の情報を共有し，効果的に組合せることにより最適化を図るため総合調査研究が実施される。具体的には，①バイオ燃料チャレンジ委員会を運営し研究開発の総合的推進および調整を行う。②経済性・LCA評価・社会・環境・文化への影響検討を行うためにワーキンググループを設置する。（LCAは産業技術総合研究所，社会・環境・文化への影響検討は東京大学が担当），③有望バイオマス生産地域・事業モデルの検討を行う

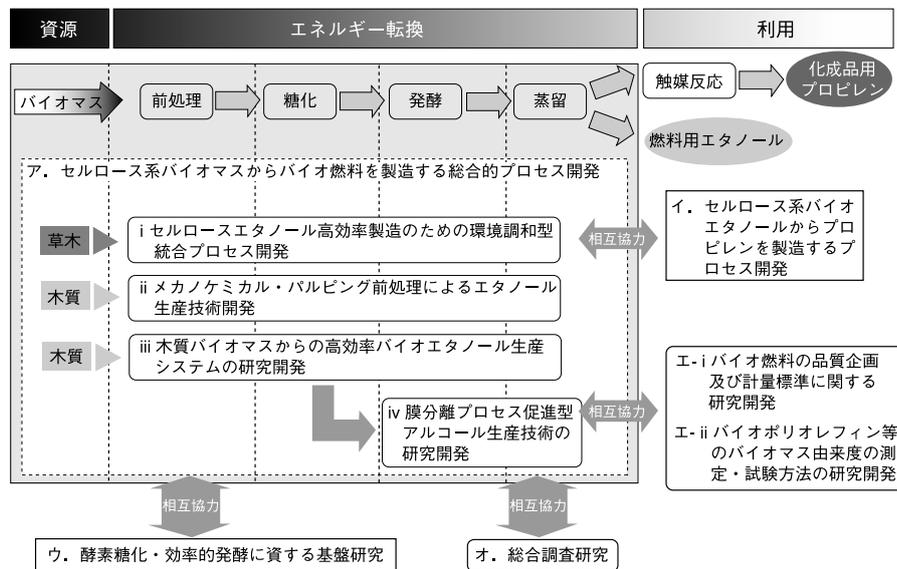


図7 加速先導技術の全体事業の構成と概要

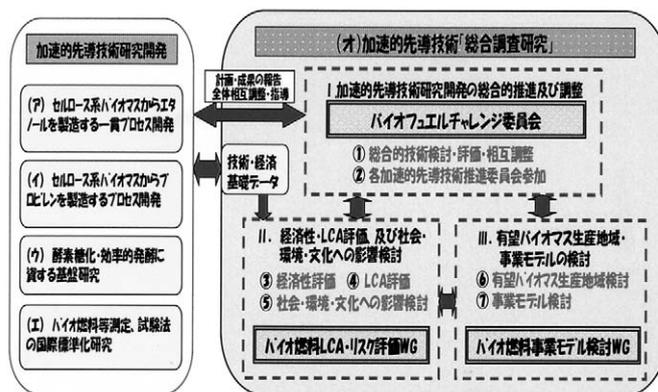


図8 総合調査研究の内容と実施概要

ためにワーキンググループを設置している。

本加速先導研究は、平成20年度より開始し22年度で中間評価を行い、24年度まで実施の予定で進められている。

#### (4) 革新的生産システム開発事業

上記に続いて、「セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業」が、事業期間として平成21年度～平成25年度が予定されている。本事業は、草本系または木質系バイオマス原料からのバイオエタノール生産について、大規模安定供給が可能なセルロース系バイオマスの栽培からエタノール製造プロセスまでの一貫生産システムを構築するもので、本プロジェクトの成果により、2015～2020年において事業ベースで数十万 $kl$ 規模単位でのバイオエタノールが生産されることが期待される。

この開発は、以下の2つの開発研究1つの調査研究からなっている。

##### ①セルロース系資源作物栽培技術開発

草本系または木質系バイオマスの栽培研究、収集運搬技術開発等

##### ②エタノール製造一貫プロセス技術開発

パイロットプラントを設置し、データ取得、経済性等の評価、システム改良

##### ③バイオ燃料の持続可能性に関する調査研究

LCA評価、生態系保全、食料競合回避などバイオ燃料の持続可能性検討

エタノール製造一貫プロセス技術開発では、

1つは産総研と王子製紙のグループが前述した加速先導研究から独立し、主に木質系から、新日本石油、三菱重工業、トヨタ自動車等6社が設立した研究組合を中心としたグループでは主に草本系から、セルロース系のバイオエタノール一貫生産の技術開発を行うべく開発に取り組んでいる。

## 4. バイオ燃料の展望

### (1) NEDO法の状況と酵素糖化法の状況

前述したNEDO法では濃硫酸を加水分解法に用いた方法で、日揮、アルコール協会が中心に、平成13年度から平成17年度に掛けて実施したものであり、その内容は、図9に示す。

このプロセスでは、加水分解による糖の生成量87w%、糖の発酵効率90%で、バイオマスからのバイオエタノール生成量は78.3%となっている。このプロセスでは、1日1,000トン（絶乾ベースから）の木質から、年10万 $kl$ のバイオエタノールが生産できることになる。また、同規模のプラント建設費は98億円である。生産規模と原料価格のエタノール製造コストに及ぼす影響を図示したのが図10である。「バイオ燃料技術革新計画」のベースはこれらの値が使われており、比較対象として意識する必要がある。

その意味から、新たな開発ではNEDO法とのコスト比較をその真実性と共に検証せねばならない。

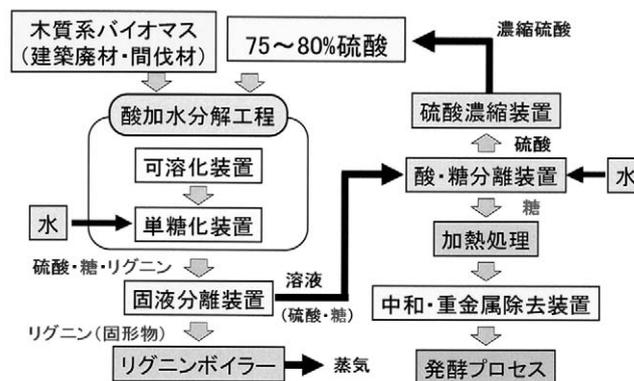


図9 濃硫酸法（NEDO法）による木質からのバイオエタノール製造プロセス

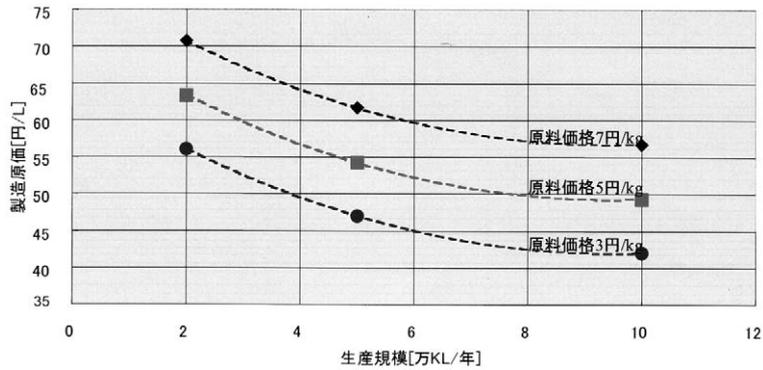


図10 生産規模と原料価格がエタノール製造コストに及ぼす影響

新たなリグノセルロースからの酵素糖化法によるエタノール製造プロセスの模式図を図11に示す。セルロース系バイオマスは多収量草本および早生広葉樹が主に対象であるが、針葉樹も対象である。そして次に前処理プロセスがあり、ここではセルロースを細分化して構造を壊す。すなわちセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンは主たる構成要素であるが、セルロースはC6単糖に、ヘミセルロースはC5、C6単糖に加水分解される。残りのリグニンは、主に熱源として熱利用、および電気利用される。ホロセルロースは酵素によって糖化され、発酵工程に入る。発酵したメタノールは脱水精製され無水エタノールとなる。

(2) 海外プランテーションと燃料生産

セルロース源からのエタノール生産を10万 $kl$ 規模と考えたとき、多収量草本で17万 $km^2$

の面積を必要とし、早生広葉樹では3年輪伐計画のプランテーションの考えから、その約3倍の面積を必要としている。こうした面積を確保した土地は日本ではすでに見当たらず、ASEAN等の海外の土地を目当てにしないと見当たらない。そこで技術と資金力を日本が提供し、ASEAN等が土地と労働力を提供するという図式が成り立つ。

(3) エネルギー基本計画 (2010年6月)

ーバイオ燃料への取組みー

図12にエネルギー基本計画のうち、バイオ燃料の取組みを示す。

エネルギー基本計画では、2015年に①セルロース系バイオエタノール技術確立を図る、②アジア域等でのセルロース系バイオエタノールの生産プロジェクトの展開、さらに、③バイオマスのガス化、液体化 (BTL)、および

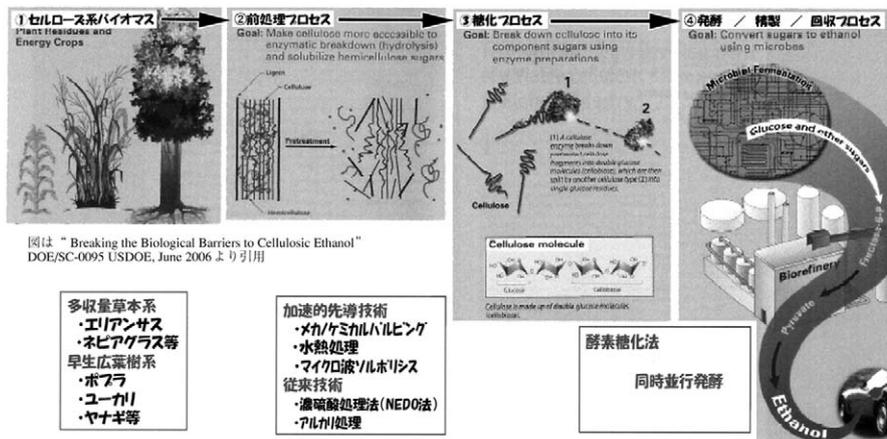


図11 リグノセルロースからの酵素糖化法によるエタノール製造プロセスの模式図

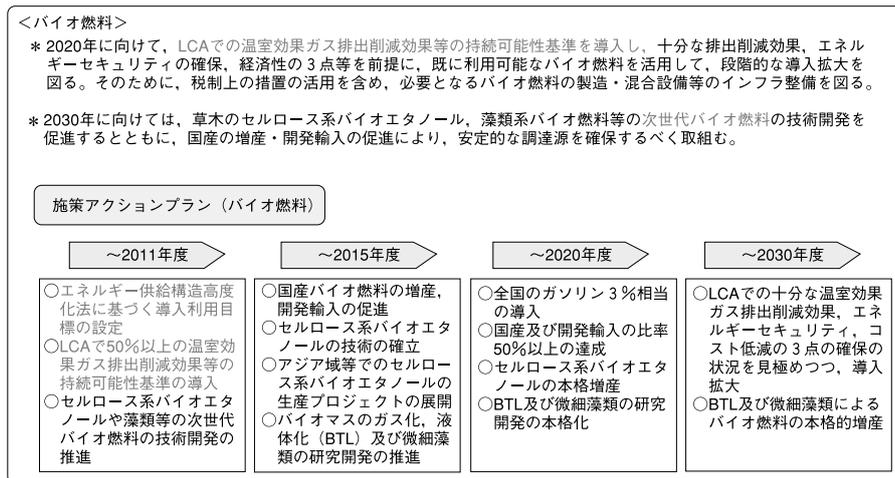


図12 バイオ燃料の取組み（新しいエネルギー基本計画より）

④微細藻類の研究開発の推進。

2020年には、①全国E3相当の導入、②国産/輸入比率50%、③セルロース系エタノールの本格的増産、④BTLおよび微細藻類の研究開発の本格化が計画されている。

さらに、2030年にはエネルギー政策の基本である3E、すなわち、LCAでの十分な温室効果ガス排出削減効果、エネルギーセキュリティ、コスト低減の確保の状況を見極めつつ導入拡大、BTLおよび微細藻類によるバイオ燃料の本格増産を期すことが明記されている。

5. おわりに

日本の税制優遇措置（2008年度より）は、バイオエタノール分についてガソリン税（揮発油税+地方道路税）を免除（53.8円/ℓ⇒E3燃料では1.6円/ℓ免除）、およびETBEを輸入する際の3.1%の関税を非課税（ETBEは100円/ℓ程度なので約0.2円引下げ）である。政府はバイオ燃料を約2円/ℓ減税したが、これだけではガソリン価格と戦うには十分ではない。価格競争力を高めるには、技術開発を進めるとともに、制度整備を拡充し、製造コストを引き下げることが必要である。

新しいエネルギー基本計画では、2020年までエタノール3%相当の導入を目指した開発を進めるとしており、当面は日本の生産能力

を考えると、やや世界には遅れているが、止むを得ない選択と言えよう。まえがきで触れたごとく食料自給率、および材木の自給率がいずれも先進国に比べて低い値であることから、当面はこれらの自給率を高めることがバイオマス確保のために必要である。しかしこれは、日本の産業構造の変革にも繋がる問題であり、一概に短期に解決することは難しく、長期的に取組む必要があると考える。

エタノールを100万ℓ確保しようとするればアジアなどの土地を利用せざるを得ず、国際協力の対象として考えなければ難しいと思われる。従って、国際開発投資し易い環境作りが重要となってこよう。

NEDO開発機構では平成22年度より「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」がスタートされる。そこでは40円/Lを目指したセルロース系エタノールと、BTLについては将来的に最大のシェアが見込まれている。

このBTLは、BTLにこだわるならばバイオマスと言う従来と類似の問題点に直面する。発想を変えて一般廃棄物に原料を戻すならば、都市型のGTL-BTLが成り立つ。一般廃棄物はバイオマスと化石起源の混合物である。これを分けるには相当のエネルギーを必要とする。従って両方をガス化することで解決を図ろうとするのである。例えば、1,200万都市の東京都は、1人1kg/日で1200万kgの一般廃棄物を

出すので、相当量の都市型燃料工場ができる可能性がある。但し、廃棄物行政は既にインフラができ上がっており、環境省の考えに大きく依存せねばならない。技術的には廃棄物のガス化技術を使えば、決してわが国は大きく遅れているわけではない。

以上、バイオ燃料に関してその動向と開発現状について述べたが、さらにBTLについて大胆な発想を述べた。

今後どのような開発が進められるか期待している。

## GRAPEモデルによる持続可能な エネルギーシナリオの分析

氏田 博士<sup>\*</sup> (プロジェクト試験研究部  
主管研究員)

黒沢 厚志<sup>\*\*</sup> (プロジェクト試験研究部  
部長 副主席研究員)



### 1. 背景

地球規模での3E問題—環境保全 (Environmental preservation), 経済成長 (Economic growth), およびエネルギーセキュリティ (Energy security)—を克服して世界で持続可能な発展 (Sustainable Development) を達成することは、21世紀最大の課題であろう。そのため、最近になり国家エネルギー政策にかかわる様々な提言が行われている。総合科学技術会議, 原子力委員会や資源エネルギー庁などから, 地球温暖化の問題における原子力や再生可能エネルギーの役割やその推進への期待が示されている。

鳩山前首相の国連総会におけるスピーチで, 「公平かつ実効のある国際枠組み」の構築が二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の1990年比25%削減という新中期目標の前提条件と述べている。麻生政権時代に行われた中期目標検討委員会での選択肢の検討においては, 日本が主張すべき国際的公平性の基準として, これまでの各国の省エネルギー努力を最も正確に示し, 追加対策を取る際のコストの相対的公平性を担保できる「限界削減費用均等化基準」を主とすべきと明確に認識されていた。長年にわたる産業界のコスト削減努力や家庭での「もったいない」文化が効を奏し, 簡単に低コストで実現できる省エネ機会は既に使い果たされているので, 日本の限界削減費用が大きい<sup>(1)</sup>。すなわち, 産業と民生の省エネ対策は重要であ

るがその効果を実効的にするには大きなコストがかかると予想され, このため無炭素のエネルギー構成 (発電構成や運輸方式) への抜本的な転換が期待される。

2009年12月の第15回気候変動枠組条約締約国会議 (コペンハーゲン会議, COP15) において, 国連を中心とした京都議定書のようなトップダウンで世界全体の協調を図る方式の限界が見えてきた。そこで, ボトムアップ・アプローチ, セクトラル・アプローチ, 技術志向が, 京都議定書を補完する国際協力の新たな動向として注目されている。すなわち多国間および二国間の協定により, 地球温暖化防止の協力を図るために発展途上国のCO<sub>2</sub>削減に効果のある技術を移管することにより途上国でCO<sub>2</sub>削減が進む方式である。その時, その効果が日本の技術貢献と看做される枠組みが必要であろう。

そのためには, 京都議定書のメカニズムとして採用されたクリーン開発メカニズム (CDM: Clean Development Mechanism) の実効性を高める制度設計 (単に技術移転するだけでなく, 運転から技術普及さらには国産化まで支援する) が必要であり, そのためには追加性の概念を変更すべき (原子力, 水力, 等のインフラそのものをCDMとして認める, また単純にBAU (Business As Usual) との比較で承認する) である。また, 検証方 (MRV: Measurement, Reporting, Verification) のシステム設計がポイントとなる<sup>(1)</sup>。

このような状況において, 日本の生き残る

道は、エネルギー環境技術をインフラ整備技術とセットで、途上国に移転することである。現時点における日本の課題は、地政学的な位置付けも考慮すると、京都議定書の適用範囲外である中国と京都議定書から脱退した米国の二大CO<sub>2</sub>排出国との連携が必要かつ有効であろう。

すなわち、エネルギー需要の伸びが小さい日本、新興国として需要が爆発的に伸びている中国、現在も需要が大きいが将来も伸び続けると想定される先進大国の米国という、エネルギー需要でみた場合の条件がまったく異なる3カ国の協調が必要とされる。

## 2. 分析の目的

最近、様々な機関から多くの将来のエネルギー構成を見通す報告が出されている。また、各国から温暖化ガス削減目標やそれに合わせたシナリオも発表されている。その中で最近刊行された国際エネルギー機関（IEA）の『エネルギー技術展望2010』（ETP2010）<sup>(2)</sup>では、「ブルーシナリオ」と呼ばれるシナリオ群において2050年CO<sub>2</sub>半減を念頭に置いた分析がなされている。

一般財団法人キヤノングローバル戦略研究所の依頼により、日本の25%削減目標に対し、世界との協調で日本のとるべき長期的な方策を検討している。検討用のツールとしては、当研究所が中心になって開発している統合評価モデル GRAPE（Global Relationship Assessment to Protect the Environment）のエネルギーモデルを用いて、2100年までの世界のエネルギーシステムシミュレーションを実施する。この予測に基づき、産業革命時からの大気温度上昇抑制を前提とした場合の、世界CO<sub>2</sub>排出量と整合する持続可能なエネルギーシナリオをバックキャストして描く。さらに、日本、中国、米国などの2030年、2050年のあるべきエネルギー構成を考察し、これに基づき3カ国の将来の協調のあり方を提言する<sup>(3)</sup>。

## 3. 従来分析と本分析の違い経緯

これまで我々は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が作成した、『排出シナリオ特別報告書』（SRES）のB2シナリオにおけるエネルギー需要を所与とし、CO<sub>2</sub>濃度550ppm安定化を達成するためのエネルギー需給システムの解析を実施してきた<sup>(4)</sup>。そこで用いた制約カーブはWRE-550と呼ばれる。

その結果、発展途上国、特にアジア、中でも中国に対する環境エネルギー分野の技術支援が、地球温暖化問題の解決において重要な役割を果たすことを明らかにした。原子力は導入によるCO<sub>2</sub>削減効果も大きいですが、大規模システムであることから、その開発に多大な費用と技術力を要し、導入支援の重要性が高い。このような研究を深め、どのような支援が有効かを評価し、その知見を発展途上国、特にアジア地域、中国に広めていくことが期待される。

また、最新のIPCC『第4次評価報告書』（2007年）では、特定の安定化目標の善し悪しについては判断をしていないが、温暖化ガス削減シナリオを安定化レベル別にカテゴリー化した。もっとも厳しい場合は、産業革命前からの大気温度上昇を2度以下に抑制するためには、CO<sub>2</sub>等価濃度で450ppm-eq.となり、少数ではあるものの、それを可能とする分析シナリオの例も示された。しかし、現実を踏まえつつ超長期的な目標も加味した対策として、今世紀末まではいったん安定化目標値からの超過（オーバーシュートと呼ばれている）を許容するが、それ以降の超長期では安定化目標に到達するシナリオが世界の研究機関で検討されている<sup>(5)</sup>。その場合は、世界のCO<sub>2</sub>排出は2030年頃にピークアウトし、それまでの間に途上国は経済成長しつつ環境技術を習得、その後は世界全体でCO<sub>2</sub>削減に邁進するというプロセスとなる。

以上を背景として、原子力の役割、オーバ

ーシュート型シナリオの実現可能性を包括的に検討するため、本分析を実施した。

#### 4. 前提条件とシナリオ設定

主要前提条件であるエネルギー需要設定およびCO<sub>2</sub>排出量制約、および試算シナリオについて述べる。

##### (1) エネルギー需要

世界各地域のエネルギー需要は、電力、運輸用、定置用（非電力の産業・民生部門）の3種類に分類した。ただし、運輸には電気自動車等に用いられる電力を含めた。安定化目標を実現するには、産業・民生部門の大幅な高効率化あるいは省エネの設定が必要である。2030年まではIEAの『世界エネルギー展望2009』（WEO2009）のCO<sub>2</sub>濃度450ppm等価シナリオを参考に需要を定め、その後は1人当りGDPをパラメータとして、世界各地域で1人当り需要が長期的な収束方向に向かうとして仮定した<sup>(6)-(9)</sup>。

##### (2) CO<sub>2</sub>排出量制約

CO<sub>2</sub>排出量制約の与え方の違いにより、3種類の基本シナリオを設定する。

##### ●省エネシナリオ（CO<sub>2</sub>制約無）

CO<sub>2</sub>排出量制約はないが、エネルギー需要は上記の省エネ型シナリオである。他の2シナリオでも需要は同等のものを用いる。

##### ●無炭素シナリオ（Z650）

世界CO<sub>2</sub>排出総量上限値として、短期オーバーシュートを許し、かつ超長期にCO<sub>2</sub>を大幅削減するシナリオである、Z650カーブを採用する<sup>(5)</sup>。21世紀中に放出する全CO<sub>2</sub>量を炭素量として表現して、これが650GtCにすることを想定して作成されたものである。その結果のCO<sub>2</sub>濃度は一時的には450ppmを超え480ppmになるが、その後下降し3000年には370ppmと現在より低くなる。

排出総量はエネルギー、土地利用変化などの合計であるため、エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出上限を別途シナリオとして与える（図1参照）。ただし、このシナリオは2150年でゼロ排出を想定しており、それは化石エネルギーが全くない社会で厳しい制約であるため、微量の炭素排出を認める。

##### ●先進国制約シナリオ（Z650+Annex1-80%）

Z650の制約に加え、先進国（京都議定書を締結したAnnex-1諸国）のみが2050年までに全体としてCO<sub>2</sub>を2005年比で80%低減する制約を加える。これを「先進国制約シナリオ」と呼ぶ。

#### 5. 試算結果の分析

##### (1) 一次エネルギー供給量の分析

##### (a) 世界の一次エネルギー供給量の時系列比較

世界の一次エネルギー供給量の「省エネシナリオ」と「無炭素シナリオ」の時系列比較を図2に示す。一次エネルギー利用が、化石

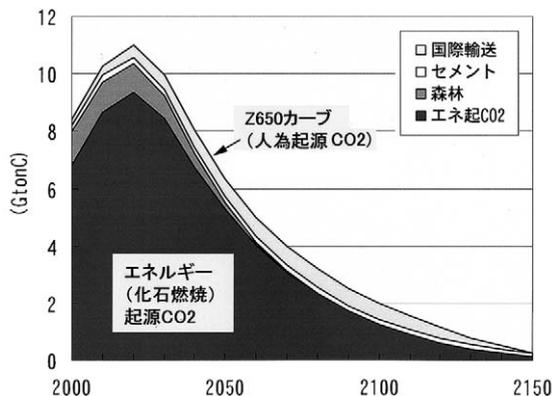


図1 CO<sub>2</sub>制約シナリオにおける排出量

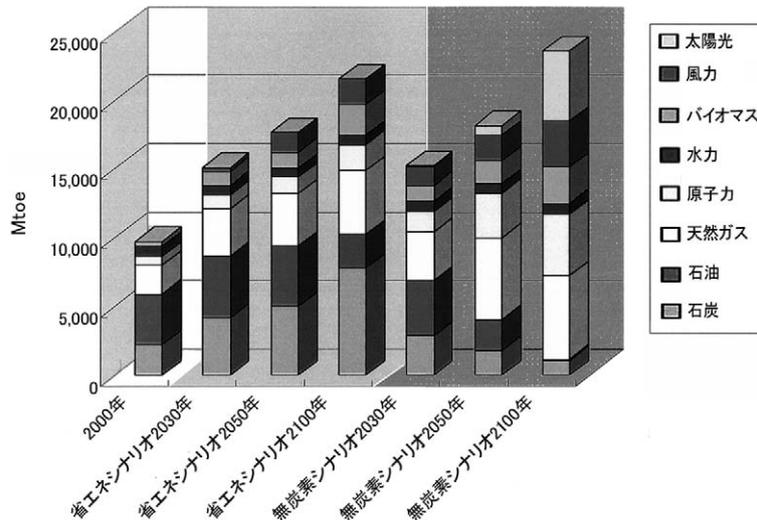


図2 世界の一次エネルギー供給量の時系列比較（「省エネシナリオ」と「無炭素シナリオ」）

燃料から原子力と再生可能エネルギーへシフトしていることが分かる。以下それぞれのシナリオの特徴を示す。

[省エネシナリオ（CO<sub>2</sub>制約無）]

化石中心の世界で途上国のCO<sub>2</sub>排出量が急増

[無炭素シナリオ（Z650）]

まず、原子力、天然ガスのシェアが増加し、化石は天然ガス+CO<sub>2</sub>回収隔離（CCS）や高効率火力であるIGCC+CCSで残り、乗用車はガ

ソリン車から、電気自動車（EV）、水素を利用する燃料電池車（FCV）へシフトする。再生可能エネルギーと原子力による電気社会と、再生可能エネルギーと天然ガスによる水素社会が実現している。

(b) 一次エネルギー供給量の日本・米国・中国の計画とZ650の比較

一次エネルギー供給量の日本・米国・中国の計画とZ650の比較を図3に示す。なお、米国はWaxman-Markey法案（ACESA）、中国は国家発

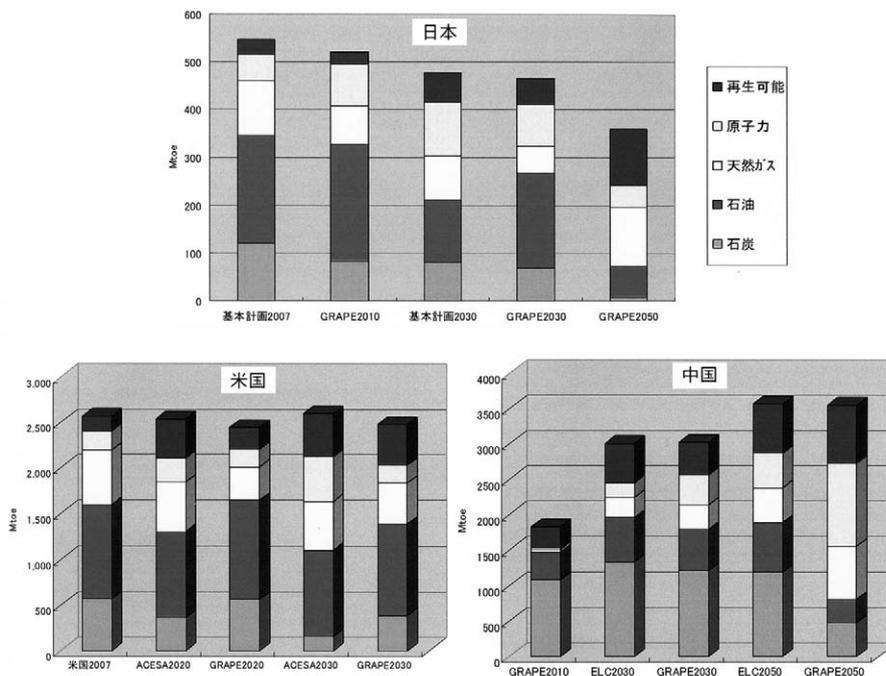


図3 日米中における一次エネルギー供給量の計画と「無炭素シナリオ」との比較

展改革委員会の低炭素シナリオ（ELC）から引用したものである。

日本の基本計画とGRAPEの相違は天然ガスと石油であり，米国家案の大幅削減ケースとGRAPEの相違は天然ガスと石炭であり，両国とも早急なエネルギー構成シフトは不要という結果である。

一方，中国計画の大幅削減ケースとGRAPEの相違は原子力と石炭であり，早急なエネルギー構成シフトが必要という結果となった。フォアキャストの計画とバックキャストの予測との相違であると考えられるが，中国は先進国と途上国の中間的存在の新興国として，大幅な温暖化対策が期待される結果となっている。

(c) 一次エネルギー供給量の「無炭素シナリオ」と「先進国制約シナリオ」の比較

図4に，日米中の一次エネルギー供給量の「無炭素シナリオ」と「先進国制約シナリオ」の比較を示す。

●日本は，「無炭素シナリオ」では石油から天然ガスそして再生可能エネルギーへシフトし，「先進国制約シナリオ」では，当初の原子力と天然ガスから再生可能エネルギーと原子力へシフトする。その相違は原子力の増加にある。

●米国は，「無炭素シナリオ」では当初の石油から再生可能エネルギーと天然ガス，原子力へシフトし，「先進国制約シナリオ」では当初の天然ガスと石油から再生可能と天然ガスと原子力へシフトする。その相違は天然ガスの増加である。

●中国は，「無炭素シナリオ」では石炭から再生可能エネルギーと原子力へシフトし，「先進国制約シナリオ」では石炭と石油から再生可能エネルギーと原子力，天然ガスへシフトする。その相違は少ないが，新興国である中国では短期的には化石エネルギーが増加している。

各国とも，化石燃料主体から，短期的には天然ガスと原子力そして長期的には再生可能エネルギーへのシフトが顕著である。

(2) 無炭素シナリオの発電電力量，定置用エネルギー，運輸用エネルギー，乗用車台数

図5には「無炭素シナリオ」(Z650)のエネルギーの三大用途である発電電力量，定置用（産業と民生を含む）エネルギー，運輸用エネルギーを示す。また，その内訳としての，乗用車台数を示す。

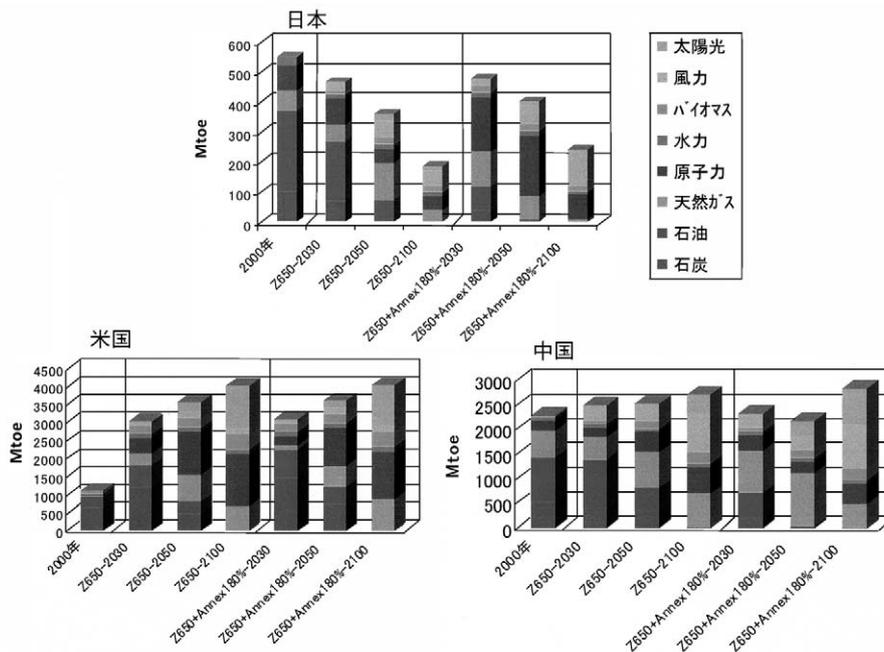


図4 日米中における一次エネルギー供給量の「無炭素シナリオ」と「先進国制約シナリオ」の比較

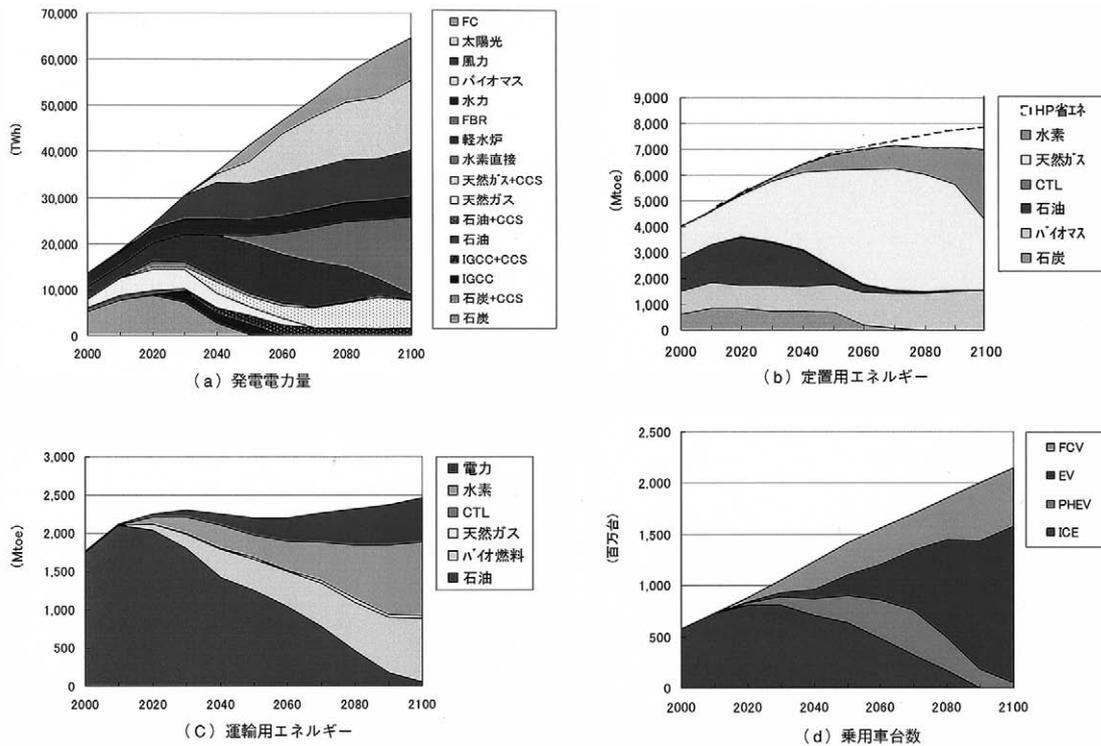


図5 「無炭素シナリオ」における世界の発電電力量、定置用エネルギー、運輸用エネルギー、乗用車台数

電力で見ると、化石は天然ガス+CCSとして生き残り、原子力は軽水炉からFBRにシフトしつつ21世紀中には主要な役割を果たし、2050年以降は再生可能エネルギーが大幅導入され2100年においては過半を占めるようになる。定置用は、電力のような無炭素化が果たせないために天然ガスが大幅導入され、21世紀後半から水素化および高効率のヒートポンプ（HP）導入が促進される。一方の運輸用は、石油（ガソリンエンジン内燃機関車）から、水素（燃料電池車）、バイオ燃料（内燃機関車）と電気（電気自動車）へとシフトする。乗用

車で見ると、21世紀後半から電気自動車が大幅導入されることになる。

### (3) 炭素排出量の分析

#### (a) 省エネシナリオ（CO<sub>2</sub>制約無）

化石中心の世界で途上国のCO<sub>2</sub>排出量が2050年で420億t-CO<sub>2</sub>と急増（2005年比で、2050年に2.5倍、2100年に4倍）

#### (b) 無炭素シナリオ（Z650）

「無炭素シナリオ」（Z650）の人為起源の炭素排出量の推移を図6に示す。

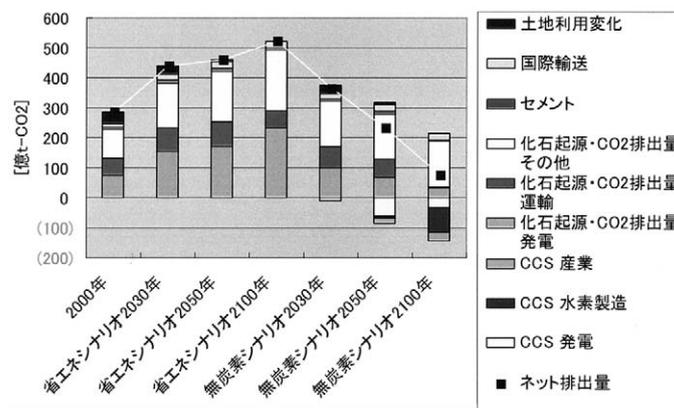


図6 「無炭素シナリオ」における世界の人為起源炭素排出量の推移

- 原子力，天然ガス，再生可能による電気社会・水素社会に実現により排出量削減
- 化石は，天然ガス+CCS (CO<sub>2</sub>回収隔離) や IGCC+CCSの形で残り，2100年時点では，排出量の過半をCCSで削減

(c) 各国の計画とGRAPEの炭素排出量の比較

図7に各国の計画とGRAPEの炭素排出量の比較を示すが，一次エネルギーで考察したように，日米の削減計画はGRAPE予測より少なくなり，一方で，中国の削減計画はGRAPE予測より多くなる。

(d) 「無炭素シナリオ」と「先進国制約シナリオ」の炭素排出量の比較

図8に「無炭素シナリオ」(Z650)と「先進国制約シナリオ」(Z650+Annex1-80%)の炭素

排出量の比較を示すが，先進国制約がかかることにより，先進国は2050年まで急激な削減が必要となるが，その一方で途上国は2050年まで排出量の増加が許されるが，2100年における削減量は結果的に同じであるため，2050年以降に大幅な削減が要求されることになる。

#### (4) コスト分析

(a) 世界のエネルギーコストの時系列比較

図9に世界のエネルギーコストの時系列を示すが，「無炭素シナリオ」に比べ先進国制約シナリオでは，先進国で高くなるが，途上国は安くならず，結果的に世界でも高価になる。また，無炭素エネルギー発電への転換のため，転換部門で高くなる。

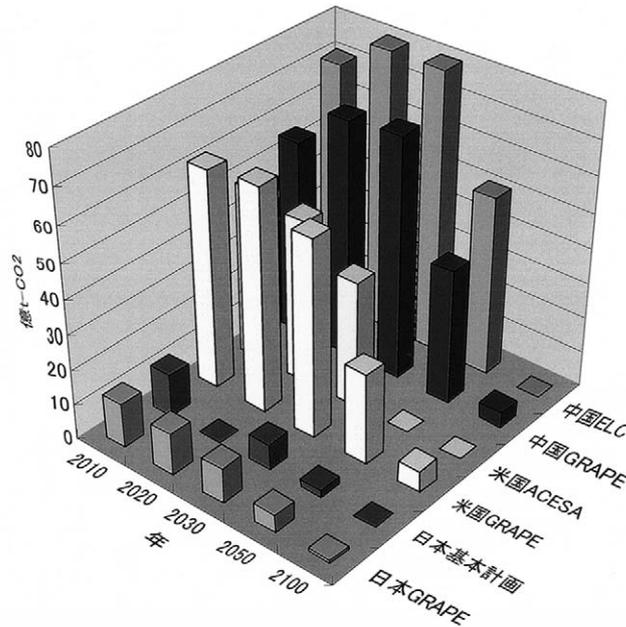


図7 各国の計画とGRAPEによる「無炭素シナリオ」の化石起源炭素排出量の比較

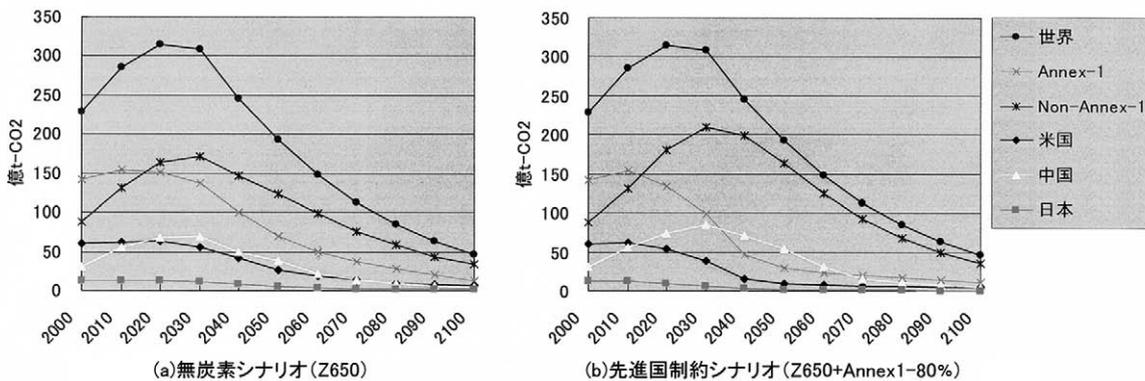


図8 「無炭素シナリオ」と「先進国制約シナリオ」の化石起源炭素排出量の比較

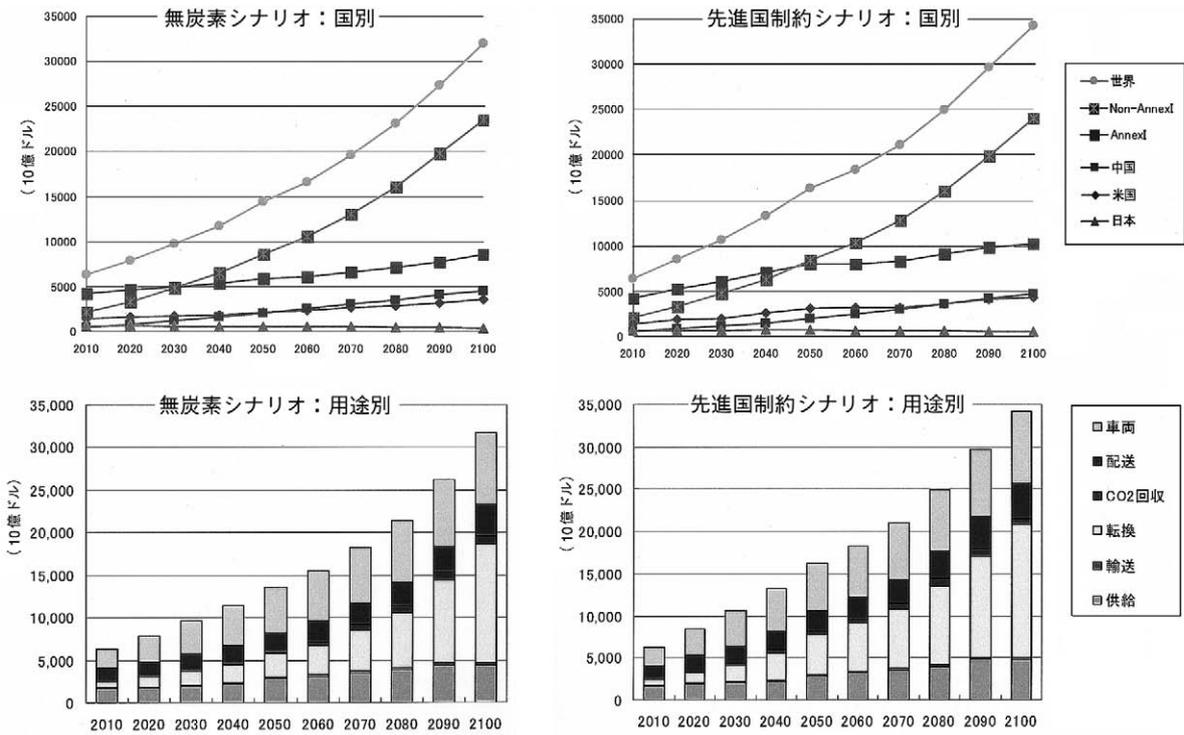


図9 「無炭素シナリオ」と「先進国制約シナリオ」でのエネルギーコストの時系列比較

(b) 世界のCO<sub>2</sub>平均削減費用

図10に (a) 世界のエネルギーコスト, (b) 追加エネルギーコスト, (c) CO<sub>2</sub>排出量, (d) CO<sub>2</sub>平均削減費用を示す。

エネルギーコストは「無炭素シナリオ」に比

べ、「先進国制約シナリオ」では今世紀末までに20兆ドルほど高価となる一方で、CO<sub>2</sub>削減効果はほぼ等価となる。このため、世界のCO<sub>2</sub>平均削減費用（CO<sub>2</sub>制約の無い「省エネシナリオ」からのエネルギーコスト増加とCO<sub>2</sub>削減効果の

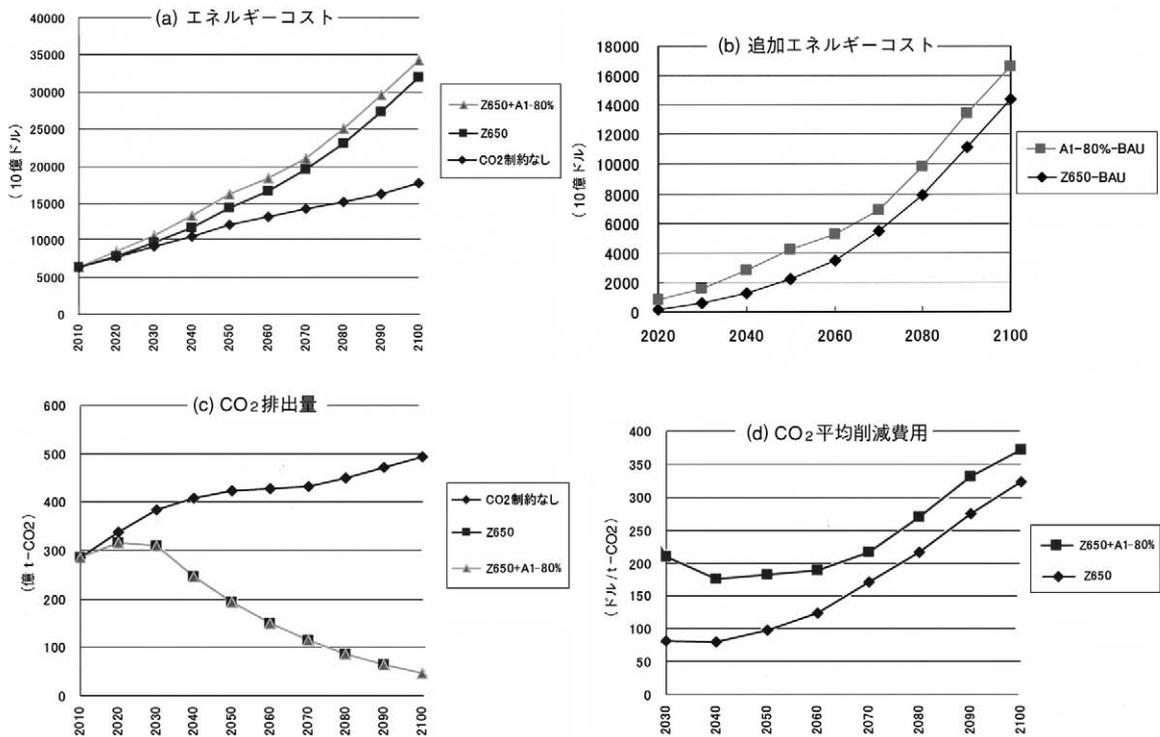


図10 世界のエネルギーコスト、追加エネルギーコスト、CO<sub>2</sub>排出量、CO<sub>2</sub>平均削減費用

比として計算される)で見ても、「無炭素シナリオ」に比べ「先進国制約シナリオ」では高価についている。この意味するところは、先進国のみでCO<sub>2</sub>削減を図るより全世界で協調することの重要性である。言い換えれば、先進国のみで大幅削減を行う場合の追加費用を途上国のCO<sub>2</sub>削減費用の支援に回すほうが結果的に有利となることを示唆している。

#### (5) 原子力の寄与

CO<sub>2</sub>制約有のケースにおいて、原子力は一次エネルギーの2割を、また発電電力量で見れば2050年から2100年まで3～4割近くを占める。2050年までは軽水炉中心だが、2100年時点ではほぼ高速増殖炉(FBR)に置き換わっている。中国とインドだけで世界の6割を占めている。

厳しいCO<sub>2</sub>制約のために、軽水炉が早期から大幅導入され、ウラン(U)資源を使い切る状況となる。一方で、FBRは、2050年からという遅い導入と、燃料となるプルトニウム(Pu)の倍增時間の長さ(35年)が原因で、2100年時点では大幅導入には至らなかった(20PWh程度)。

また、水素製造に対する原子力(FBR、高温ガス炉)の寄与は小さい。

他の研究機関の予測との比較を表1に示すが、一般的には、2030年の原子力の導入量は低く、2050年に伸び、2100年には大幅導入される、という傾向にある<sup>(2)(4)(10)</sup>。これは現状を見て考えれば、妥当な予測ともいえる。一方、今回の解析では、2030、2050年までに一気に伸び、その後2100年まではそのシェアを維持する傾向となった。2150年までという超長期の最適化計算であるため、遠い未来までの発電を考慮して、当初から導入可能な原子力が早期に導入され、長期的には将来の有望株である再生可能エネルギーが伸びる、という結果となっている。途上国の中国やインドでは初期から大幅導入される一方で、先進国の米国では再生可能エネルギーと原子力が均等に増加する結果となっている。長期の視点で地球温暖化対策を考えれば、ウラン資源制約がありプルトニウムの倍増に時間のかかる原子力は早期から導入すべきである。特に、中国やインドでは早期導入が望まれることを示唆している。

表1 世界の原子力発電容量の比較 - GRAPEによる予測と各研究機関の予測 -

単位：GWe (カッコ内はTWh)

	2030年	2050年 (WNAのみ2060年)	2100年
Z650 (GRAPE) - 世界	798 (5,939)	2004 (14,929)	3,074 (22,890)
中国	232 (1,726)	718 (5,346)	991 (7,379)
インド	136 (1,012)	381 (2,840)	761 (5,666)
米国	106 (791)	265 (1,977)	381 (2,835)
WRE-550 (GRAPE) - 世界	400 (3,000) ~1,880 (14,000)	1,340 (10,000) ~2,420 (18,000)	2,950 (22,000) ~3,890 (29,000)
ETP2010 (IEA) - 世界	430~720	520~1,310	—
WNA-世界	590~1,150	1,030~3,100	1,860~10,050
中国	50~150	150~750	500~2,800
インド	20~70	60~350	200~2,750
米国	120~180	150~400	250~1,200

\*2008年時点で、世界390GWe、中国9 GWe、インド4 GWe  
GWeはTWhに0.1343を乗じて算出。

## 6. 考察

### (1) エネルギー起源CO<sub>2</sub>以外の温暖化ガス

温暖化問題において、検討対象となる温暖化ガスの排出量として、大きく3種類を考えることができる。

- ① 先進国を中心とする、化石燃焼起源CO<sub>2</sub>排出量（石炭、石油、天然ガスの順）。現在はほぼ拮抗しているが、将来は途上国のシェアが上回る。
- ② 加えて、途上国を中心とする森林伐採（土地利用とも呼ばれる）により排出されるCO<sub>2</sub>（この寄与が大きい）、セメント生成過程で化学反応により発生するCO<sub>2</sub>などの人為起源の様々な放出も加味した、人為起源CO<sub>2</sub>排出量。ブラジルやインドネシアなどの森林伐採を加えると、人為起源CO<sub>2</sub>排出量に及ぼす途上国の寄与は先進国と同程度となる。
- ③ それに加え、メタン、亜酸化窒素、フッ化ガスなどの5つのガスの効果を加えた温暖化ガス（マルチガス）の総排出量。ただし、マルチガスは、温暖化ポテンシャル係数を加え合わせてCO<sub>2</sub>等価排出量として評価されることに加え、濃度計算ではCO<sub>2</sub>濃度と放射強制力の換算式を用いてマルチガス放射強制力から逆算したCO<sub>2</sub>等価濃度として評価することが行われている。

今回の試算では、エネルギーによるCO<sub>2</sub>排出量を主として計算するため、1番目の化石燃焼起源CO<sub>2</sub>排出量を評価している。なお、図1の一番外側の線が示す松野の提案する炭素換算排出量は、2番目の人為起源CO<sub>2</sub>排出量である<sup>(5)</sup>。

### (2) 先進国80%減

GRAPEによるZ650の制約の解析結果から、世界、ANNEX-I諸国とNonANNEX-I諸国、中国と米国の化石燃焼起源CO<sub>2</sub>排出量の2050年

までのパスを図8(a)に示す。2050年までで見ると2005年比で、世界では20%の削減、先進国で60%減、途上国ではほぼ同等、中国で20%減となっている。湯原が提唱した排出パスの先進国80%削減より緩い結果となっている<sup>(3)</sup>。先進国制約はこのカーブに基づくものであり、解析により大幅なエネルギーシステムの変革を前提とすれば実現可能な排出パスであることは分かったが、通常の無炭素シナリオに比べ、実効性と現実性に乏しいことが明らかとなった。

## 7. まとめ

GRAPEエネルギーモデルにより、2100年までの世界のエネルギー構成をシミュレーションした。

今回のCO<sub>2</sub>制約は、IPCC『第4次報告書』発行まで広範に行われてきた大気中CO<sub>2</sub>濃度550ppm制約と比べ、厳しめである（450ppmあるいはそれ以下）。しかし、省エネが進み、原子力と再生可能エネルギーが大幅導入され、化石燃料（特に石炭）にIGCCなどの効率的利用技術とCO<sub>2</sub>回収隔離を行うなどのオプションを総動員すれば、相当量のCO<sub>2</sub>削減が推進される可能性が示唆された。厳しい制約と考えられるZ650（長期的にはCO<sub>2</sub>濃度で370ppm相当）やWRE-450の排出シナリオでも、エネルギーシステムコストの大幅な増加や、関連インフラ、関連制度および社会受容などの諸条件が適切に整えば、長期的には対応策が得られる。先進国と比較して大幅なエネルギー需要の伸びが見込まれる途上国需要のために、化石燃料を短期的に大幅削減するのは難しく、石油や天然ガスはかなり高コストのレンジの資源まで消費されていることも明らかとなった。またウラン資源も想定資源量を使い切る状況となった。

主な結論を以下に列挙する。

- ① CO<sub>2</sub>大幅削減には、供給構造の大幅な変化が必須
- ② 供給では、再生可能エネルギーと原子力を重要な位置づけとすべき
- ③ 化石燃料に対しては、CCS（CO<sub>2</sub>回収隔離）が必須
- ④ 需要側においても、大幅な省エネが必要
- ⑤ 目標とする2050年に先進国で80%のCO<sub>2</sub>削減目標は、厳しいが実現可能
- ⑥ 世界の大幅なCO<sub>2</sub>削減のためには、米中の参加できるCO<sub>2</sub>削減枠組みが必要
- ⑦ 短期的にCO<sub>2</sub>排出増加を許容すると、CO<sub>2</sub>平均削減費用は2050年までは安いですがそれ以降は厳しくなる
- ⑧ 先進国が早めに削減努力すると、CO<sub>2</sub>平均削減費用は高くなる

## 9. 提言

大幅なCO<sub>2</sub>削減を前提とした場合、日米中の3カ国の協調のエネルギー構成として、日本は原子力と風力、米国は天然ガス+CCS、原子力、風力、中国は原子力と太陽光がシェアを伸ばすという結果が得られた。これらの技術の組合せは、経済性や各国のエネルギー・気候変動政策によって大きく変わり得るものである。

世界各地域、国の特徴を生かし、多極構造における日米中による多国間協力モデルの構築を図ることが大切である。その枠組みの中で、高効率石炭火力、CCS、原子力、再生可能、等に対するセクトラル・アプローチ（世界ではなく多国間のCDMや共同実施（JI）に相当する枠組み）による技術移転・利用促進を図ることが有効な政策であると考えられる。

### [謝辞]

本報告は、一般財団法人キヤノングローバル戦略研究所2009年度の依頼による研究成果の一部をまとめたものである。

### 参考文献

- (1) 澤昭裕, 「エコ亡国論」, 新潮新書 (2010)
- (2) ETP: Energy Technology Perspectives, 2010, OECD/IEA.
- (3) Y. Yuhara, Midterm and Longterm Japanese Vision—GHG emission reduction scenario and the role of Japan—, Canon Institute for Global Studies Symposium, 27 October (2009)
- (4) 池田一三, 田下正宣, 氏田博士, 松井一秋, 「環境, 経済性, エネルギーの持続的発展のための原子力の役割」, 日本原子力学会誌特集, Vol.49, No.5 (2007).
- (5) T. Matuno, Stabilization of the CO<sub>2</sub> Concentration via Zero Emission in the Next Century, Canon Institute for Global Studies Symposium, 27 October (2009)
- (6) World population prospects: The 2006 Revision Population Database, United Nations, 2007, <http://esa.un.org/unpp/>.
- (7) World Population to 2300 final (2004).
- (8) 国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口」(<http://www.ipss.go.jp:80/pp-newest/j/newest03/sh1.html>)
- (9) International Monetary Fund, World Economic Outlook Database, October (2008)
- (10) WNA (<http://world-nuclear.org/uploadedFiles/org/nco/NCO.pdf>)

## 三鷹光器(株)：集光式タワー型太陽熱発電の実証設備

### 1. はじめに

地球温暖化を防止するため二酸化炭素の排出を減らそうということで、再生可能エネルギーの導入や拡大に期待が高まってきています。「太陽光発電」、「風力発電」という言葉を耳にする機会も随分と増えました。そんな中、IAE女性研究員（高部）が訪問したのは太陽熱の利用設備を開発している三鷹光器(株)です。

同社とエネルギー総合工学研究所は、1999年4月から2004年3月にかけて、太陽熱エネルギーを導入して石炭と天然ガスから二酸化炭素を排出せずにメタノールを製造する「ソーラー・フューエル・プロジェクト」に関わりました。その時に開発した「ヘリオスタット」（太陽光集光装置）を組み込んだシステムを使って、このほどJFEエンジニアリング(株)との太陽熱発電の実証試験に成功したというので、記録的な猛暑日が続く9月2日、実証試験設備の見学に三鷹光器(株)のある東京都三鷹市へ出掛けました。

三鷹市は都会の便利さと緑が同居した住宅地です。三鷹光器(株)本社屋の近所には、文豪大宰治ゆかりの地や深大寺、神代植物公園、国立天文台などもあります。

### 2. 実証試験設備（新川サイト）

#### [実証サイトを訪ねて]

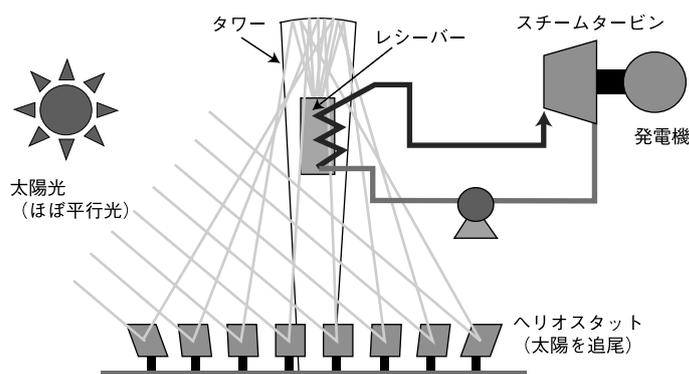
実証試験設備は本社から少し離れた、中央自動車道側にありました。最初に目に飛び込んで来たのは、規則正しく並んだ「四つ葉のクローバー」のような装置。近づいてみると、それがヘリオス



タットの鏡でした。遠くから見ると可愛らしく見えたヘリオスタットですが、高さ1.5mのところに直径50cmの鏡が4枚並び、結構、迫力があります。

[太陽光追尾を可能にした技術力]

ヘリオスタット (heliostat) は、ギリシャ語源のhelios (太陽) とstat (静止・固定) を組み合わせた用語で、太陽を同じ位置に固定するという意味です。今回実証試験に成功したシステムの概略図は上のおりですが、ヘリオスタットに当たった太陽光は正確にタワー上部の二次鏡に反射して、



太陽熱発電実証プラント概略図

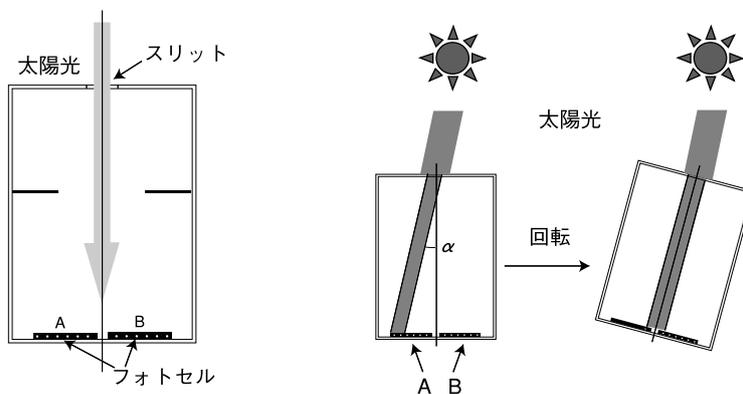
受熱部 (レシーバー) へ集まるのです。太陽は時々刻々と移動するもの。その光をどう固定するのか？ それを可能にしたのが三鷹光器(株)の技術力です。

センサー底部にある2枚の光電素子は、光が当たる面積に比例して起電力を生じます。センサー底部にある2枚の光電素子の起電力が等しくなるように反射鏡の角度を制御すれば、光がセンサーの方向に正確に傾くという仕組みです。



常に正確な位置への反射を保つヘリオスタット

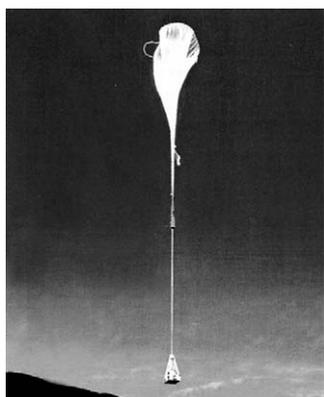
右下図のように、太陽光がセンサーの中心軸に対して傾き、2枚の光電素子A、Bに光が当たる面積が異なると、A、Bの起電力に差が生じます。センサーはこの差を読み取り、それがなくなるように装置を回転させます。こうして、ヘリオスタットが太陽を追尾し、正確にタワー上部の二次鏡に光を届けるのです。



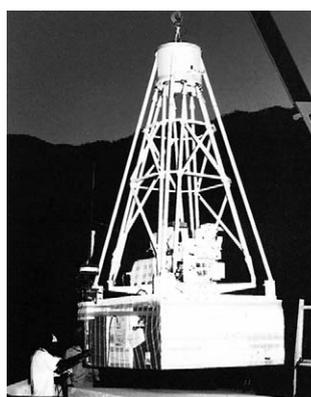
センサーの構造と動作原理

### 3. 宇宙に届く町工場の底力

三鷹光器(株)は、会社設立当初の昭和41年（1966年）に、東京大学宇宙航空研究所のバルーン観測に参入しました。バルーン用太陽観測装置は、成層圏近くの上空まで飛び太陽の静止画像を撮影。風による揺れやそれにとまなう綱のよじれ、 $-50^{\circ}\text{C}\sim+80^{\circ}\text{C}$ の温度変化にも耐えました。この時の太陽の位置を正確にとらえ、焦点を合わせる技術が前述のヘリオスタットのセンサー開発につながっているのです。



気球につり下げた太陽観測装置

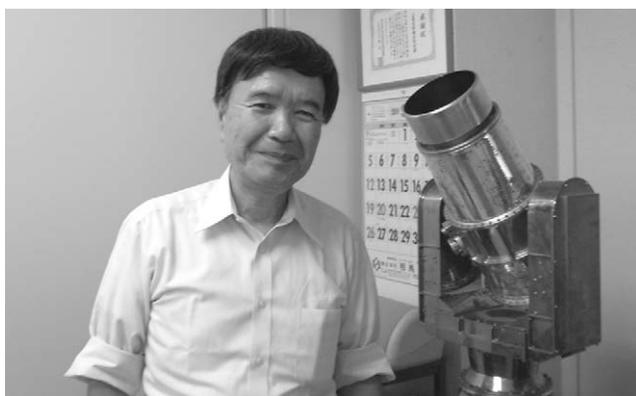


バルーン用太陽観測装置

三鷹光器(株)は望遠鏡も作っています。1985年ハレー彗星探査機「すいせい」(PLANET-A)に搭載され、大きな成果を挙げました。また、オゾン検出器、ブラックホールから飛んでくる素粒子の発見に貢献した望遠鏡、X線をとらえる望遠鏡など数々の望遠鏡の開発も手がけ、その技術はアメリカ航空宇宙局(NASA)にも認められています。NASAのスペース・シャトル「コロンビア」の打ち上げに伴い、1978年東京大学でオーロラ実験「SEPAC計画」が始まり、同社製特殊カメラがスペースシャトルに搭載されました。

### 4. アイデアの源泉

「三鷹のアイデアはどこから生まれてくるのかというと、現場です」と、中村勝重・代表取締役社長はおっしゃいます。特に、手術顕微鏡を始めとする医療機器の開発では現場の声が活かされたそうです。現在、手術顕微鏡は、ライカマイクロシステムズとパートナー契約が結ばれて23年経ち、出荷台数は毎月約20台。その出発点も現場からの「学び」だったそうです。

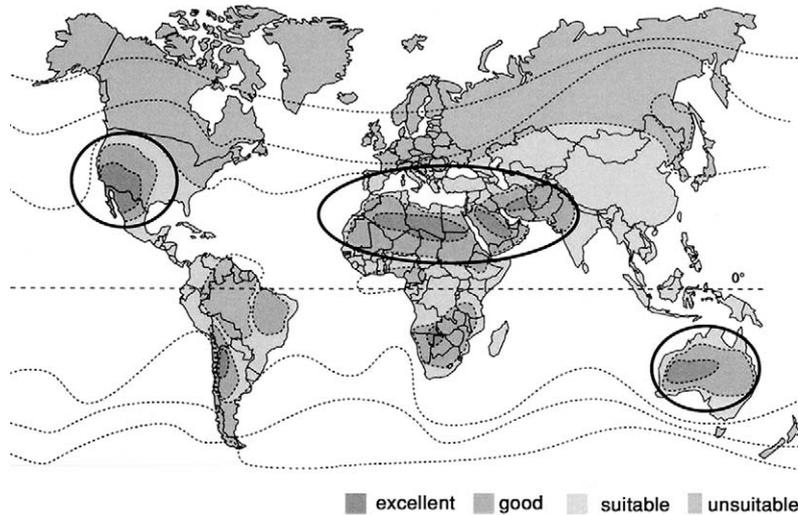


三鷹光器(株) 中村勝重・代表取締役社長

「手術の時、この重たい機械を看護師さんが倉庫から運んでくる。だから、重さを450kgから200kgにしました。手術室の傾斜した床に合わせて機械のバランスをとるのも、我々は当たり前の技術だと思っているんですが、看護師さんがやっていたことに気づき、『これは操作性が良ければいけるぞ』ということでライカとやりだしたんです」。

## 5. 太陽熱発電事業の可能性～世界へ

太陽から放射され地球に到達するエネルギーは膨大で、日本の年間最終エネルギー消費量がわずか83秒で賄えるほどです。太陽エネルギーは、①石油や石炭といった資源と異なり永続的なエネルギーである、②二酸化炭素等を排出しないクリーンなエネルギーである、かつ③地球外から注がれる未利用エネルギーであるため、地球の熱バランスを崩しません。



(出所：Solar Millennium社)

太陽熱発電に適した地域

太陽熱利用の商業発電、集光型太陽熱発電は1980年代から始まりました。効率よくエネルギーを回収できる地域が、乾燥し、ちりなどの微粒子の少ない「サンベルト」と呼ばれる地域などで、各国が技術を持ち寄って共同研究・開発が行われてきています。



“できたてホヤホヤ”の三鷹光器製天体望遠鏡(口径80cm)と筆者(左)

現在では熱エネルギー変換による発電、海水淡水化、水素や液体燃料の製造といった様々な構想が進められています。三鷹光器(株)の技術がこれらの大規模プロジェクトに適用され、大きく世界へ羽ばたくと思うと何か元気になります。

## 6. おわりに

お忙しい中、取材に快く応じてくださいました中村勝重・代表取締役社長、社内をご案内くださいました中村実専務取締役、様々にご協力くださいました事業開発部 知的財産部の小野村部長には大変お世話になりました。今回の取材を快く迎えて下さった皆様に厚く御礼申し上げます。

## 研究所のうごき

(平成22年7月2日～10月1日)

### ◇ 第36回評議員会

日時：7月16日(金) 11:00～12:05

場所：経団連会館(5階) 503号室

議題：

第一号議案 役員の一部改選について

第二号議案 評議員の増員および一部交替について

第三号議案 平成21年度事業報告書および決算報告書について

第四号議案 その他

### ◇ 第79回理事会

日時：8月20日(金) 11:00～10:30

場所：(財)エネルギー総合工学研究所 7階会議室

議題：

第一号議案 理事長の退任について

第二号議案 その他

### ◇ 第16回賛助会員会議

日時：9月30日(木) 16:00～19:30

場所：千代田放送会館

議事次第：

1. 最近の事業活動について
2. 調査研究活動について
3. 講演

世界エネルギー会議モントリオール大会  
を機に「エネルギーの潮流」を考える  
(社)日本動力協会会長 榎本 晃章 氏)

### ◇ 月例研究会

#### 第292回月例研究会

日時：7月30日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. セルロース系バイオマス燃料の開発動向  
(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト  
試験研究部 副参事 山田 富明, 参事  
浅見 直人)
2. ケミカルループ燃焼  
(神奈川工科大学 応用化学科 資源エネルギーシステム研究室 准教授 大庭 武泰 氏)

#### 第293回月例研究会

日時：8月27日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 高性能二次電池の開発動向—安全性と資源問題の解決に向けて  
(独)産業技術総合研究所 ユビキタスエネルギー研究部門 電池システム研究グループ長 哲男 氏)
2. 再生可能エネルギー由来水素の長距離輸送の経済性  
(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 副参事 村田 謙二)

### ◇ 外部発表

[講演]

発表者：内藤 正則, 内田 俊介, 岡田 英俊, 越塚 誠一(東京大学)

テーマ：Evaluation of Wall Thinning of PWR Feed Water Piping with the Coupled Model of Static Electrochemical Analysis and Dynamic Double Oxide Layer Analysis

発表先：米国機械学会 (ASME) ASMM Pressure Vessel & Pipin Conference 2010 (ASME PVP2010)

日時：7月22日

発表者：吉田 一雄

テーマ：集光型太陽熱発電システムの技術動向と展望

発表先：集光型太陽光発電・太陽熱発電システム・太陽熱利用システムの市場・技術動向とビジネスチャンス (主催：(株)メガセミナー・サービス)

日時：7月28日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：未来予測の手法と課題

発表先：ワークショップ “Forum or Foresight to the Future” (主催：科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター)

日時：7月28日

発表者：時松 宏治

テーマ：Cost-benefit analysis for assessing CDM activities for energy technologies in Asian Countries

発表先：1st Congress on The East Asian Association of Environmental and Natural Resource Economics (EAAERE), Hokkaido university

日時：8月18～20日

発表者：山田 英司

テーマ：Future of Nuclear Power in Japan  
-Development of Next Generation LWRs-

発表先：世界エネルギー会議 (The 21st World Energy Congress and Exhibition)

日 時：9月14日

発表者：笠井 滋、守屋 公三郎 (日立GE)、  
遠山 眞 (三菱重工)、飯倉 隆彦 (東芝)

テーマ：次世代軽水炉のプラント概念について

発表先：日本原子力学会 2010年 秋の大会 (北海道大学)

日 時：9月15日

発表者：坂田 興

テーマ：Domestic Use of Overseas Renewable Energy -Potentials Power Generating Fuel-

発表先：世界エネルギー会議 (The 21st World Energy Congress and Exhibition)

日 時：9月16日

発表者：内藤 正則、岡田 英俊、内田 俊介

テーマ：配管減肉予測および検査技術の高度化  
上記の主題の下で、3名の発表者がシリーズ講演する。

内藤：(3) FAC発生予測と減肉評価モデル

岡田：(4) LDI発生予測と減肉評価モデル

内田1 (5) FACおよびLDI評価モデルの標準化へのプロセス

発表先：日本原子力学会 2010年 秋の大会 (北海道大学)

日 時：9月16日

発表者：白川 典幸、油江 宏明

テーマ：新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発

(41) COMPASSコード構造力学部の開発と検証

(44) 金属燃料の共晶研究

発表先：日本原子力学会 2010年 秋の大会 (北海道大学)

日 時：9月17日

発表者：正田 知士

テーマ：化石燃料の将来動向と温暖化防止

発表先：第20回トップマネジメント懇談会・会員大会軽井沢大会 (主催：(社)長野県経営者協会)

日 時：9月17日

発表者：小野崎 正樹、上田 成 (石炭利用技術コンサルティング)、岡田 清史 (石炭利用技術コンサルティング)、荒牧 寿弘 (九州大学)、持田 勲 (九州大学)

テーマ：石炭液化NEDOLプロセスを基盤とした低品位炭からの超粘結炭の製造

発表先：日本エネルギー学会、第47回石炭科学会議

日 時：9月21日

発表者：内藤 正則

テーマ：Plant-Unique Procedures Applied to Mitigate Wall Thinning of PWR Feed Water Piping due to Flow Accelerated Corrosion

発表先：NUTHOS-8 (The 8th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety) (中国・上海)

日 時：10月13日

[寄稿]

発表者：坂田 興

テーマ：水素利用技術

発表先：日本機械学会誌 2010年8月号「機械工学年鑑」特集号

日 時：8月号

発表者：蓮池 宏

テーマ：自動車用エネルギーの長期展望

発表先：日立総研 (株)日立総合計画研究所発行)

日 時：8月号

[書籍]

発表者：小野崎 正樹

テーマ：石炭ガス化を中心としたクリーンコールテクノロジー

発表先：石炭資源開発の基礎Ⅱ (JCOAL発行)

日 時：9月

◇ 人事異動

○7月31日付

(出向解除用)

原田伸二 業務部長

矢野正高 プロジェクト試験研究部主任研究員

○8月1日付

(出向採用)

岡村秀彦 業務部長

(非常勤嘱託採用)

中村 進 原子力工学センター特別嘱託研究員

○8月16日付

(退任)

鈴木篤之 理事長

(採用)

森山 亮 プロジェクト試験研究部主任研究員

○9月1日付

(出向採用)

芝田圭市 プロジェクト試験研究部主任研究員

(非常勤嘱託採用)

鎌田光雄 事務局付嘱託研究員兼原子力工学センター

○9月30日付

(退職)

山崎 毅 企画部長兼プロジェクト試験研究部  
副主席研究員

○10月1日付

(出向採用)

鈴木洋明 原子力工学センター主管研究員

(兼務委嘱)

山田英司 企画部長

(異動)

都筑和泰 プロジェクト試験研究部兼原子力工学センター主任研究員

## 編集後記

一昔前に比べて、最近恐竜がいろいろな形で取り上げられる頻度が高くなったように感じる。恐竜に関する研究が進んで、話題が豊富になってきたということもあろうが、恐竜人気のベースは、何と言っても、人類とは比べ物にならない大きさと重さ、さらには圧倒的に長い繁栄の歴史が、我々に畏怖の念を起こさせ興味を持たせているということだろう。加えて、この偉大な存在が遠い昔に突如絶滅したこともまた、その魅力に拍車をかける。人類は、彼らが去った後の哺乳類が栄える地平に出現してきたということらしい。巨大な生き物のあとにきた小さなヒトは、しかし大きな脳を活用して恐竜とは全く別次元の発展を遂げる。もしも、今がそうでなければ良いが、人類の脳細胞の働きが衰える時が来たら、人類はただ小さいだけのみすぼらしい存在になってしまうことになる。

ところで、米Science誌の2010年4月9日号によると、National Science Board

が2010年版の「一般的アメリカ人の科学的知識レベル調査」の結果から、「進化」の部分を削除したとのことである。「今日人類は、より以前の動物から進化したものであるか否か」との設問に対し、イエスと答えたアメリカ人が45%、ノーが55%であった。(ちょっと驚きますね。)ちなみに、日本ではイエスが78%、ヨーロッパ70%、中国69%だそうである。言うまでも無く宗教的バイアスの影響だが、これをもってアメリカ人が科学的に無教養だと思われたくないということだろう。進化論という、本来もっと議論があっても良さそうなテーマを、ただ無感動に受け入れてしまって忘れ去るのも脳細胞劣化の一端かも知れず、日欧中でも肯定が70-80%しかいないという数字は、宗教の影響があるにせよ、意外と知能の健全性を示しているのかもしれない。

編集責任者 正田知士

季報 エネルギー総合工学 第33巻第3号

平成22年10月20日発行

編集発行

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(8F)

電話 (03) 3508-8894

FAX (03) 3501-8021

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

(印刷) 株式会社日新社

※ 無断転載を禁じます。