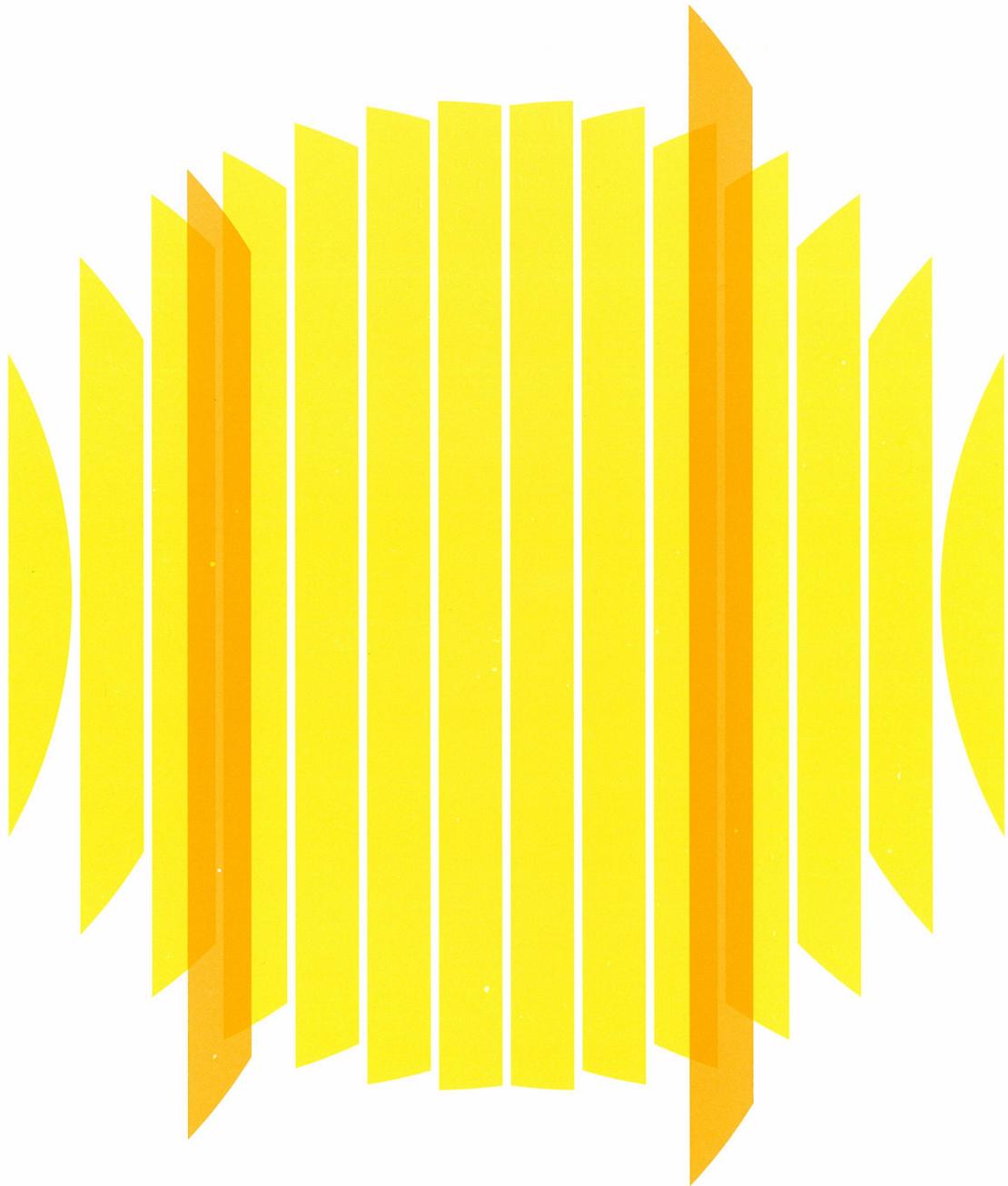


# 季報 エネルギー総合工学

Vol. 28 No. 3 2005.10.



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】石油業界の直面する課題	石油連盟 専務理事	山 浦 紘 一	1
【理事長対談】			
江戸に学ぶ ―普遍的な人間のあり方とエネルギー問題― 作家、江戸のエネルギー、テクノロジー紹介者 (財)エネルギー総合工学研究所 理事長		石 川 英 輔 秋 山 守	4
【寄稿】 エネルギー分野の技術戦略マップの策定について 経済産業省 資源エネルギー庁 長官官房 総合政策課 課長補佐		蘆 田 和 也	17
【調査研究報告】			
エネルギー分野の技術戦略マップ策定の背景 (財)エネルギー総合工学研究所 主管研究員		角 本 輝 充	34
【寄稿】			
京都議定書目標達成計画と地球温暖化対策 経済産業省 産業技術環境局 環境対策課 課長補佐		豊 島 厚 二	42
【寄稿】			
バイオマスへの期待と現実 ―森林バイオマスのエネルギー利用をどう進めるか― 岐阜県立森林文化アカデミー 学長		熊 崎 實	51
【寄稿】 バイオマスエネルギーの技術動向と展望 東京大学大学院 農学生命科学研究科 生物・環境工学専攻 教授		横 山 伸 也	61
【寄稿】 農畜産業系バイオマスの利用と課題 (独)農業工学研究所 地域資源部 資源循環研究室 室長		柚 山 義 人	69
【調査研究報告】			
「バイオマスエネルギーテクノロジー・ ロードマップ策定に関する調査」について (財)エネルギー総合工学研究所 主任研究員		田 村 隆 之	79
【調査研究報告】			
次世代原子力技術開発とわが国の取組の概況 (財)エネルギー総合工学研究所 主管研究員		小 泉 真 範	88
【調査研究報告】			
ディーゼルエンジンの排出ガス規制と対応技術について ―ディーゼル車の復権なるか― (財)エネルギー総合工学研究所 主管研究員		横 山 昌 宏	94
【研究所の動き】			103
【編集後記】			104

# 巻頭言

## 石油業界の直面する課題

山 浦 紘 一 (石油連盟 専務理事)



### 1. 石油のクリーンな有効利用

石油価格の高騰を受けて、反射的に「脱石油」を唱える風潮が目につくが、短絡的反応であり、そこには戦略的視点が欠けている。

2002年に議員立法された「エネルギー政策基本法」を受け総合資源エネルギー調査会等において、わが国の「エネルギー基本計画」が審議されたが、その中で、これまでの「脱石油」や「脱中東」を続けることは誤りであると委員始め広く国民の皆様理解をいただいていた。

「エネルギー基本計画」には、「石油は、経済性、利便性の観点から、今後とも重要なエネルギーである」と記され、今年4月に定められた「京都議定書目標達成計画」においても、「石油については、今後とも一次エネルギー供給の重要な位置を占めるエネルギー源として、環境に配慮しつつ効率的に利用してゆく」と謳われている。

現に、電力について言えば、概ね「脱石油」は終えており、ピーク時、トラブル時以外に石油火力発電は殆ど稼動していない。一方、自動車のガソリン代替燃料については、バイオ燃料の供給力は微々たるもので非経済的である。自然エネルギーにしても、その研究開発は推進していくべきものではあるが、経済性・供給安定性においては、はるかに石油に及ばない。50年先、100年先ならともかく、今「脱石油」をしたら、国民生活基盤を崩壊させ、膨大な国民経済負担を強いることは明白である。

また、「脱石油」を世界に向けて発信することは、わが国のエネルギー安全保障に重大な支障をきたす。中国を始めとする各国が国をあげて資源確保に躍起となっている時に、無資源国のわが国がわざわざ「脱石油」を掲げることが賢明なことであろうか。国の根幹に関わる大問題である。

これからのエネルギー政策において最も大切なことは「エネルギーを大事にしよう」という国民全体の意識改革を行い、世界のトップレベルといえるわが国の「省エネ技術」を一層推進し、あらゆるエネルギーを徹底的に有効利用、高度化利用していくことである。

これは、日本が世界に向けて発信できる数少ないグローバル価値基準の1つである。これならば経済成長を期する途上国からも賛同を得られるにちがいない。

## 2. 環境税反対

石油業界は、今年1月より世界に先駆けて、全国規模でサルファーフリー化したガソリン、軽油の供給を開始した。

これによって、高効率なガソリン車及びディーゼル車の普及が進み、2010年時点では年間120万トンのCO<sub>2</sub>削減が期待される。まさにエネルギーのクリーンな効率的な使用モデルであり、石油業界は今後とも環境先進産業として環境対策に邁進してゆく。

全ての日本企業は、このような企業哲学を有しており、日本経団連の「自主行動計画」の原動力となっている。しかるに、環境省は再三に亘り環境税なるものを提案している。

欧州の地球温暖化関連の税の導入動機、導入目標は日本と異なる。欧州各国は、既に付加価値税率が15～25%に達しており、これ以上の引上げは、EU指令上あるいは政治的にも困難であった。しかし、所得減税あるいは社会保険料の軽減を行わなければならない、その一般財源を確保するために国民に受けの良い名称を使って税が創設された経緯がある。

消費税が未だ5%のわが国とは議論すべき状況がまったく異なっている。この点を環境省も国民に十分知らせていないし、また、環境のためには少額の税金は喜んで払いますという善意の人々に悪乗りしているといつて過言でない。

加えて、導入の経済分析を行った中央環境審議会関係委員会は多くの学者から成り立っているが、そこでは、「経済理論における環境税の位置付け」と称して、ピグー税<sup>\*</sup>、ボーモル＝オーツ税<sup>\*\*</sup>の考え方が提示され、さらに汚染者負担原則に基づく財源調達が提唱されている。いずれも、学説として学界で述べるのは結構であるが、国が国民に徴税する根拠として軽々しく使うのは、納税者にとって迷惑な話である。

国が新税を国民にお願いする時には、納税者に対して、果たすべき最低の条件、即ち租税の中立、公平、簡素の原則を踏まえて議論すべきである。

また、汚染者負担原則も、地球環境にあてはめることは、地球上に住む全人類が汚染加害者であり同時に受益者であるという現実からして税一般論としても馴染まない。

60年代から70年代における原状回復や被害者救済に関する費用負担の原則として汚染者負担原則が機能したのであって、その場合ですら、課徴金あるいは負担金という形が一般的であり、汚染者負担原則に基づく課税というものは聞いた事

\* 外部不経済（例えば環境汚染）をもたらす活動を当事者間の交渉で得られるのと同じ効率的な結果に誘導するために課される税

\*\* 試みに決めた税率に対する外部不経済の水準の観察を通じて、目標水準に導く税率を課す税

がない。地球規模問題に拡大解釈し、それを税として徴収する新税の実験に使われるのは、納税者は納得しない。

この他、税によるアナウンスメント効果という委員の中でも定義が分かれる説を創設の理由にしたり、本来経済活動に中立であるべき課税が、産業構造をかえる価格効果を期待するなど、支離滅裂なものとなっている。

税収の支出についても、国全体の借金が700兆円にのぼる時代に新規補助金数千億円を対策としてばらまくことになっており、税金の乱費と財政の硬直化、行政の肥大化を招くものである。これは時代に逆行する「大きな政府」を提案しているのである。補助金で21世紀の環境先進産業が誕生するというのは、企業の厳しい競争を知らぬ机上の空論である。

石油業界としては環境税には、断固反対している。

### 3. 石油税制問題

環境税の先途を示す前例が道路特定財源であるガソリン税・軽油引取税である。10数次の5カ年計画で300兆円に近い道路予算支出の結果、全国の道路整備がほぼ終了し、当たり前であるが、道路特定財源の余剰が発生している。このため、本州四国連絡橋公団の債務処理、地下鉄インフラ、電柱地下化などに用途を拡大する一方、さらには環境税への振替えなども一部議論されている。

道路財源は、制度創設の趣旨や受益者負担の原則から本来の道路整備事業に全額充当すべきであり、余裕があるならば、その分、税率を引き下げ納税者の負担軽減を図るべきである。これが国民との約束事であり、財政の節度というものである。

また、二重課税問題（いわゆるTAX ON TAX）についても触れておきたい。

現在、ガソリン税等の石油諸税の上に課せられている消費税額は1,900億円にのぼる。このTAX ON TAXに関わる調整は消費税導入時に酒やタバコ等でなされ、電力、ガス税は廃止されたが、唯一、石油だけが放置されている。納税者としては、感情的にも納得の行かない点であり、解消を要望している。

## 江戸に学ぶ —普遍的な人間のあり方とエネルギー問題—

石川英輔 (作家、江戸時代のエネルギー、テクノロジー紹介者)

秋山守 (財団法人エネルギー総合工学研究所 理事長)



### はじめに

秋山 私たちは、江戸時代から実に多くの贈り物をいただいております。衣食住に始まり、書画等の美術、歌舞伎等の芸能、さらには言語文化など、枚挙に暇がありません。

確かに、現代は科学技術の発達で便利な生活を享受していますが、その一方で、エネルギー・環境問題を初め大きな問題に直面しています。そこで、①普遍的な倫理観、価値観、人間としての姿勢などの観点から評価すべきこと、あるいは、歴史に残る貴重な文化として評価すべきものがあれば、それらを敬意をもって理解し記憶に留めたい、②私たちが現在ないし将来

### 石川英輔氏 略歴

1933年(昭和8年)京都府生まれ。国際基督教大学、東京都立大学理学部中退。1961年ミカ製版(株)創業。1985年より専業作家。1985~2004年武蔵野美術大学講師として印刷学を教える。

主な著書に『大江戸神仙伝』(講談社、79年)、『ボンコロボット太平記』(評論社、93年)、『大江戸えねるぎー事情』(同、90年)、『大江戸リサイクル事情』(同、94年)、『数学は嫌いです!』(同、2004年)など。

1976年、カラー製版技術の研究で(社)日本印刷学会の第1回技術賞を受賞。2004年4月よりNHKテレビ番組『道中のごذور』に江戸専門家としてレギュラー出演中。

に直面する問題を回避、または緩和していく上で参考となることがあれば、学び、かつ取り入れていきたい、ということから今回の対談を企画させて頂きました。

江戸の町は栄えたけれど、特に米、野菜等を

供給する地域で大飢饉にも見舞われ、一揆が何回も起こるなど、日本全体としてはかなり構造的に問題があったということも背景に、江戸のエネルギー、リサイクルに焦点を当てて、色々教えていただければと思っております。

秋山 まず、先生が江戸時代にご興味をお持ちになられた経緯についてお話をお願いいたします。

石川 私は50歳近くになってから江戸のことを書き始めました。学校では化学の勉強をしましたが、20代後半に自分で写真製版の会社を始めたんです。30代末からはSF小説をこつこつ書いて講談社から2、3冊出しました。45歳の時に、もっと誰も今まで書いたことのない新しいジャンルのSFを書いてみないかと担当者と言われ、現代人が江戸時代にタイムスリップして脚気を直す商売で大儲けする話を書こうと思ったのが始まりです。

脚気の原因はビタミンB1不足であると大正時代になって判明したのですが、江戸の食生活は白米を多食するためビタミンB1が不足し、結核や天然痘を除くと江戸の病気で一番死亡率が高かったんです。脚気のことを「江戸患い」と呼んだ程です。ビタミンB1は生の米糠に大量に含まれていて、水に溶けやすいものです。私の小説の主人公は、生の米糠を水に



石川英輔

(作家、江戸時代のエネルギー、  
テクノロジー紹介者)

溶け込ませた濃縮液で脚気の薬を作ります。この治療法は、実際に東京大学病院の内科で行われたものなんです。

この小説では、江戸時代に登場する人物の言葉は全部江戸語にしました。そのために、江戸関連の文献を140冊以上買い込んで読み、1年近くかけて『大江戸神仙伝』(講談社)を書き上げたのです。それで、すっかり江戸の専門家みたいになってしまいました。

すると、今度は作家として来る仕事が江戸のことばかりなんです。それで、どんどん景気がよくなってきて、50歳になったのをきっかけに創業社長を辞め専業作家になったんです。

秋山 ご紹介ありがとうございます。江戸時代に多かった脚気に着目されて、それから次々と幅広く江戸関係のお仕事が発展してこられたわけですね。

---

## 江戸時代の実像

---

エネルギー消費量はほぼゼロ

秋山 江戸時代から色々学び、それ

を基に現代に対して、幾つも警鐘を鳴らしておられますけれども、現代から将来に向けての先生の問題意識をエネルギー、環境を軸に言えばどうということになるでしょうか。

石川 簡単に言いますと、エネルギーの消費量は、決して人間の幸福度に比例しないということです。今、化石燃料だけでも日本人が毎日10万kcal（石油で10ℓ）ぐらい使っていますが、江戸時代のエネルギー使用量を現代の基準で計算すればゼロです。全部天然物を使い、地上動力の99%は人力だと思えます。畜力、水力（水車）は、どこでも使えるわけではないのでごくわずかです。海洋に出ますと帆かけ舟でかなりの重量を運べますが、地上動力の99%は人力でした。結果として江戸時代のエネルギーの消費量は今の規格でいえば限りなくゼロなのです。それでも当時の人達は生活に不便さを感じていなかったようです。

秋山 おっしゃるように、エネルギー消費量に比例して私たちが幸福になるというものはありません。例えば、100倍のお金なりエネルギーを投入することで、医学の進歩などにもよって寿命は何年か延びてきたと言えるでしょうが、それと生活の満足感とは別問題ですからね。

石川 江戸時代の平均寿命が短いのは乳幼児の死亡率が高かったからです。乳幼児期で人口の半分近くが死んでいました。ですから、極端な話、生まれた日に死ぬ人が人口の半分で、残り半分が100歳まで生きる国があったとしますと、平均寿命は50歳です。実際、江戸時代は、中年まで生きると平均余命が長かったのです。

現代はエネルギー消費量が増えて豊かになったはずですが、豊かになってから悪くなったことが沢山あるんです。まず、昭和40年頃の医学辞典を見ますと「老人病」というのがあります。60代以上に現われる高血圧、動脈硬化の諸症状とあります。昭和50年ぐらいに

なりますと、同じ病気を40代以上の中高年に現われる「成人病」というようになりました。昭和60年ぐらいになりますと、10代以上に現われる成人病の諸症状ということで「小児成人病」というんですね。平成8年には、ついに年齢不問で「生活習慣病」と言うようになった。

2002年に群馬県の医師会が、群馬県内の5歳児1,000人を対象に検査を行っています。肥満児が8.2%、動脈硬化の初期症状が5.2%、高血圧が4.3%です。5歳児で既に「生活習慣病」が現われているんです。

秋山 確かに近頃では、子供の頃から栄養の摂りすぎと運動不足に起因する病気が増えていますね。現代は民主的で自由ですが、では江戸時代と比べて現代が優れているかどうかとなると、これは見方によっては、江戸時代の暮しから現代人が学ぶべきことは幾つもあると思います。

石川 民主主義で環境破壊が防げますか？ 江戸時代の生活の方が、私は動物としてまともだと思うんです。なぜかと言いますと、最近のDNA解析で、人類とチンパンジーが分かれたのが700万年ぐらい前といわれています。その700万年の間に地球上の生存競争で生き残ったホモサピエンスの末裔である私たちホモサピエンスサピエンスだけが人類として生き残っているわけです。ですから、今生きている私たちは700万年の風雪に耐えて生きた超名門の種なんです。その間に自動車に乗っている期間や食べただけ食べられる時代なんて、私が覚えている限りでもこの40年ぐらいのものです。

秋山 この40年で特にアメリカから凄い勢いで西洋文明が入ってきました。でも確かに、この40年間の出来事というのは、何百万年かの非常に長い歴史に比べればほんの一瞬のことだと思いますね。

秋山 ところで、先生の本にお書きになっておられる江戸時代は年号でいいますと、どの辺りなのでしょう？

石川 先ほど紹介した『大江戸神仙伝』の舞台は1822年（文政5年）です。恐らく江戸時代を通じて最も豊かで安定していた時代で、文政5年の日本に一揆は1件も起きていません。

一揆が一番多かったのは天明年間（1781～89年）の年平均25件です。この25件には無理矢理という感じで「不穏」「未遂」も勘定されています。暴動型一揆だけだと年平均4～5件ぐらいのものだったんです。

秋山 池波正太郎さんの『剣客商売』（新潮文庫）の舞台が1700年代の末ですね。先生の本はそれよりももう少し後の江戸期が対象なのですね。

石川 そうです。私の小説の舞台は松平定信による「寛政の改革」に嫌気がさし、人々がだらーとしていた文化・文政期（化政期）です。恐らく江戸時代でも呑気な時代だったと思います。

皆さんに言うとびっくりなさるんですが、江戸の町をパトロールする警察官<sup>\*</sup>は、12人しかいないんです。大阪は4人です。江戸の非武士住民は55万人前後でしたが、治安維持は警察官12人で間に合ったわけです。

江戸時代法の専門家に聞くと、法律はあっても執行する人間がいなかったんだそうです。文政12年、『大江戸神仙伝』の時代の6年後に初めてロンドンに警視庁（ニュースコットランドヤード）ができています。その時、一般職員を除いた、警察官だけで3,235人いたので

元号	西暦	備考
慶長	1596-1615	江戸開府（1603年）
元和	1615-1624	
寛永	1624-1644	島原の乱（1637年）
正保	1644-1648	
慶安	1648-1652	慶安の御触書（1649年）
承応	1652-1655	
明暦	1655-1658	徳川光圀『大日本史』（1657年）
万治	1658-1661	
寛文	1661-1673	山鹿素行『聖教要録』（1665年）
延宝	1673-1681	
天和	1681-1684	
貞享	1684-1688	生類憐れみの令発布（1685年）
元禄	1688-1704	赤穂浪士討ち入り（1702年）
宝永	1704-1711	
正徳	1711-1716	
享保	1716-1736	吉宗、享保の改革（1716年）
元文	1736-1741	
寛保	1741-1744	「公事方御定書」制定（1742年）
延享	1744-1748	
寛延	1748-1751	
宝暦	1751-1764	
明和	1764-1772	鈴木春信、錦絵創始（1765年）
安永	1772-1781	「田沼時代」（1772年）
天明	1781-1789	天明の大飢饉（1782年）
寛政	1789-1801	棄捐令（1789年）
享和	1801-1804	
文化	1804-1818	
文政	1818-1830	
天保	1830-1844	大塩平八郎の乱（1837年）
弘化	1844-1848	
嘉永	1848-1854	ペリー来航（1853年）
安政	1854-1860	
万延	1860-1861	桜田門外の変（1860年）
万久	1861-1864	生麦事件（1862年）
元治	1864-1865	四国艦隊下関砲撃事件（1864年）
慶応	1865-1868	大政奉還（1867年）

す。江戸よりはるかに小さいにもかかわらず、ロンドンでは3,000人以上の巡査がいないとどうしようもないほど治安が悪かったと考えられます。

\*都庁、警視庁、裁判所を兼ねたような町奉行所は、南と北が番番制であったが、正式職員は、全部で与力50騎、同心240人で、万事取り仕切っていた。このうち、警察官としての業務をしていたのは、28人の同心だけで、しかも、毎日、江戸市中をパトロールしていた警官（常町廻り同心）は、南北合わせて僅か12人に過ぎなかった。それぞれが中間（ちゅうげん）1人と数人の小者（こもの）いわゆる岡っ引を連れて歩いていたが、表向きは、12人の警察官で大江戸55万市民の治安維持に当たることができた。（『大江戸神仙伝』より）

秋山 警察官というと、池波正太郎さんの時代小説『鬼平犯科帳』に「火付盗賊改」が登場しますね。

石川 「火付盗賊改」というのは、加役、加える役とって、常にある役職ではないんです。例えば、歌舞伎『青砥稿花紅画（白波五人男）』の頭領・日本駄衛門のモデルと言われる大泥棒・日本左衛門（1719～47年）が手下30人を従えて東海道を荒らしていると、幕府は「火付盗賊改」の腕の立つ旗本に命じて手下と共に罪人を追わせるのです。結局、幕府に目を付けられたら終わりだということが分かって、日本左衛門は京都奉行所に自首し、故郷の遠州見附で処刑されるのです。

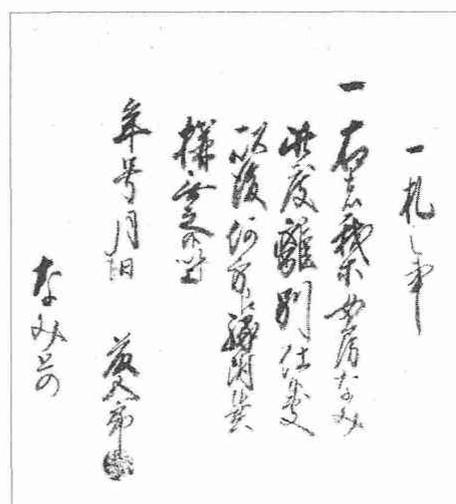
たった30人ほどの強盗団ですら、江戸から特別の討伐隊を設置して追わなければならないぐらい、ほとんど犯罪のない世界だったんです。「時代物」では、江戸でしょっちゅう押込強盗があったように書かれていたりしますが、実際はそうではなかったんです。

秋山 小説では連日のように押込み強盗や殺人が起きる話になっていますが、実際には今おっしゃったように、平安な良き時代であったということですかね。

石川 自転車も電信も伝書鳩もない時代ですから、やろうと思えば何でも起こせる時代です。それが、わざわざ起こすほどのこともない平穏な時代だったと考えるほかありません。

#### 結婚にみる江戸時代の男女

秋山 江戸時代には「士農工商」という身分思想があって、それぞれが諦めに近い認識で日々を暮らしていたという面と、しかし、それなりに満足感をもっていたという両面があるのではないかと思います。そういう身分思想とは別に、婦女子がかなり下に見られていたと思いますが、その点はいかがでしょうか？



高木侃「泣いて笑って三下り半」（教育出版）より  
三下り半（離縁状）

石川 専修大学法学部の高木侃（たかぎ・ただし）教授が10年ぐらい前から徳川時代の「離婚」の研究をなさっています。それで、江戸時代の離婚というのは夫側が妻に対して「三下り半」（離縁状）を渡すと成り立つ。法律的には「夫専権離婚」と言うらしいです。

高木先生は、その「三下り半」の実物を1,000通以上集めて、その裏づけの実態調査をされたんです。それでびっくりしたことに、夫が「三下り半」をたたきつけずに女房を追い出したりしたらひどい目に遭うということが分かってきたそうです。「御定書百箇条」という法律があり、女が離縁状をもらわずに再婚すると重婚罪で丸鬚を結っている元取りの先を切った格好（後家さんスタイル）で実家に返されます。ところが、その1つ前の条文では、夫が「三下り半」を渡さずに女房を追い出して、後妻を引き入れた場合には、所払い（追放刑）に処せられたんです。どっちが差別されていたのか分かりませんね。

そこでどうするかと言うと、夫は「三下り半」を渡す時に、当人から「私は確かにあなたより離縁状をもらいました」と書いてサインした「返り一札」をもらうのが安全です。そういう実物が沢山残っています。

それで見ると、女性が6回結婚するなんて普通だと言うんです。つまり、結婚は愛でするん

## 江戸のエネルギー事情

エネルギー供給の中心は

薪炭、水力、畜力、風力

秋山 現代の主なエネルギー資源は、石炭、石油、ガスといった化石資源、それから原子力や水力ですが、最近になって太陽エネルギーやバイオマスの有効利用の重要性が増えています。

エネルギー消費で見ますと、特に化石資源は埋蔵資源を掘り出して、最終的に炭酸ガスにして大気中に排出しているわけですから減る一方です。それから植物資源も使い方が激しくて、生育が追いつかず土地が荒れてくると言われています。水力、畜力、人力は、全体に占める割合としては、ほとんどゼロに近くなってきています。

このような現状ですが、植物資源にしても、風力、水力などの自然エネルギーにしても、できるだけ賢明に取り入れていかなければいけないわけです。

秋山 ところで、江戸時代の主なエネルギー資源は、家庭用の燃料では薪、あとはわずかな水力と畜力、そして輸送も人力ですね。



高木侃『泣いて笑って三下り半』(教育出版)より  
返り一札(離縁状の領収書)

じゃないんです。キリスト教式の結婚観ではありませんから、江戸時代では処女性は尊重されていません。結婚は「やってみて、だめなら別れよう」と言うものだったようです。もっとひどいケースになりますと、「離縁状をくれたら一緒になってやる」という格好で「先付け離縁状」をもらう。今の法律では無効だそうですが、当時は有効です。だから両方でいつでも別れられるように「離縁状」と「返り一札」とを交換して結婚するなんてこともやっていたんです。

秋山 そうですか。実態は現代人が思っている以上に自由で、したたかだったんですね。

石川 それと同時に、かなりの契約社会でもあったそうです。高木先生が沢山集めていらっしゃるのですが、色々なことについて夫婦間で契約書を作っているんです。離縁したときの財産分与について事細かに書いた結婚の契約が交わされていました。現代人は、そんなことしません。史実を調べてみると、もうびっくりします。

石川 はい。ただ、舟は帆船を使いましたから、舟での輸送にはかなり風力エネルギーを利用したということになります。

秋山 自然エネルギーで需給バランスを取ってきた江戸時代に、現代の言葉で言う「エネルギー・セキュリティ」の視点で何か特別な政策的な配慮はあったのでしょうか。例えば、計画的に植林をして、薪炭供給を安定させるとかしたのでしょうか。

石川 材木用は別ですが、薪炭用の材の場合は、ほとんど植林の必要がなかったと思います。私の家は300坪の庭にコナラ、ブナなど、色々な木が生えているので、それを見てよく分かるんですが、非常に成長が速いんです。そして、ある所までくると成長が止まってしまう。武蔵野の薪炭用の造林ですと根元から伐採せず、3尺（1m）ぐらいのところで斜めに切るらしいんです。斜めに切りますと、カルス<sup>\*\*</sup>が水平に上がってこないのが溜まって木が腐ることがなく、根が生きています。その根から「ひこ生え」がいっぱい出てきます。一番大きな「ひこ生え」を選んで育てますと、10年くらいで薪炭に適当な大きさの材が採れるわけです。そこで切って、同じことを繰り返しますから、雑木の場合には、植林はあまり必要なかったと思います。

現代のエネルギー消費量は江戸時代の数百倍

秋山 先生の『大江戸えねるぎ事情』を拝読していますと、現代と江戸時代の1人当たりのエネルギー消費量はまさに2桁ぐらい違いますね。

石川 比べようがないということだと思います。

秋山 アメリカ人の書いた文献で調べたところ、現代は世界平均で1人当たりのエネルギー

消費量が産業革命の直前の10倍くらいに増えています。江戸と比べて今の日本は大体50倍くらいと認識していたのですが、先生の本を拝読しますと、どうも200倍ほどの差があるように思いました。

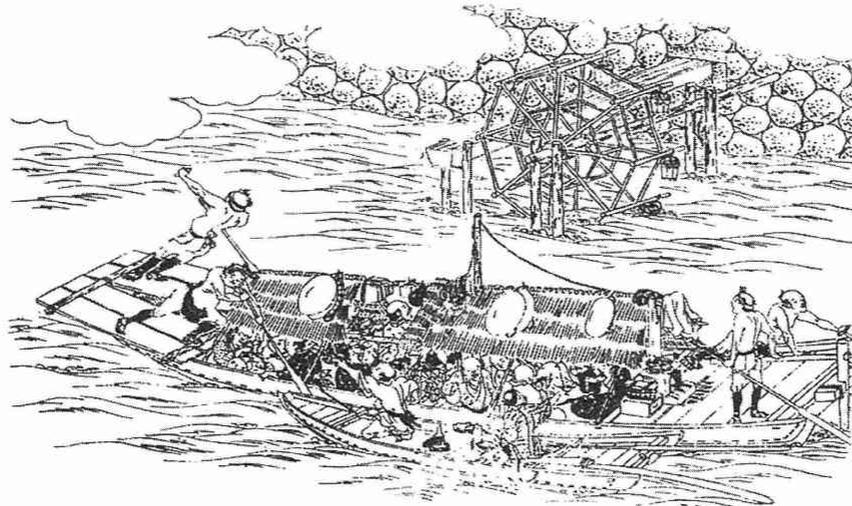
石川 『大江戸えねるぎ事情』の中では、江戸時代の人力を1日1人1,000kcalとして計算する一方で、現代のエネルギー消費量の計算では人力を無視しました。現代のエネルギー消費量は江戸時代より2桁は多いので、人力などはほとんど誤差のうちに収まってしまいうからです。

石川 現代では、自然動力の水力を利用するにしても、石油燃料の動力を使って水力発電所を造らないといけません。ところが、昔の水車は大した力が出ない代わりに、水車大工が人力でその辺の木を切って組み立てて回してるわけですから、エネルギーの先行投資がゼロなんです。今は、風力、太陽光にしる、まず化石燃料を大量に投資して機器を作ってから利用する格好になっています。

ですから、例えば、太陽光パネルを屋根の上に乗せる方式の正確なエネルギーペイバックタイム（発電装置が装置自身の製造に要するエネルギーと同じ電力を発電する年数）をどうやって計算するのか、本当に黒字になるのか分かりませんね。

秋山 確かにエネルギーペイバックタイムについての見解には、導入に肯定的な人と否定的な人との間で幅があります。先生の今おっしゃるエネルギー収支については、ライフサイクルアセスメント（LCA）で極めて綿密な評価が、原子力、化石、太陽、バイオ等々についてなされています。エネルギーの収支がどれほどの期間で均衡するのか。さらに、それを超える便益がどれくらい入ってくるのかといった計算です。

\*\* 植物体に傷をつけた時、傷口にできる不定形の癒傷組織。



【都名所図会】より

### 揚水用の水車

### 菜種油を燃やした行灯

秋山 現代と江戸時代とでエネルギー消費の倍率は、家庭用照明の場合、約10倍という感じでしょうか。先生の本によりますと、燃料となる菜種の消費量は年間24リットルですから、エネルギージュールに換算して $450 \times 10^6 \text{J}$ になります。現代で600Wの照明を1日5時間つけるとして、年間1,095kWh ( $3,940 \times 10^6 \text{J}$ )ですから、両者を比較するとそれくらいの差となりますね。



【絵本風俗往来】より

### 行灯の前での針仕事

石川 行灯1つの明るさは60W電球の100分の1ぐらいしかないものですが、おっしゃるように、行灯を灯すエネルギーの消費量だけを比較するとそうなるでしょう。しかし、菜種油は太陽エネルギーで育ったものを人力で搾っていますから、製造のためのエネルギーは発電と違ってほとんどゼロです。

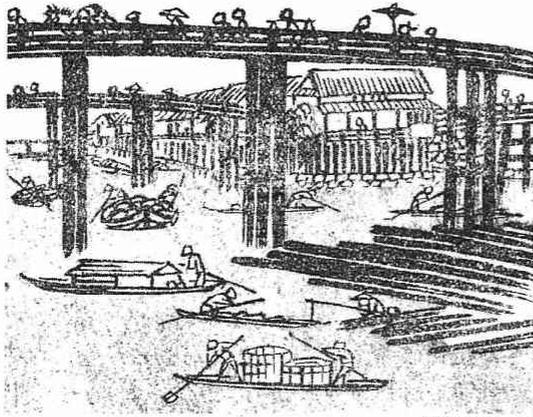
秋山 物理的なエネルギーでの比較ではそうだけれど、菜種油の製造エネルギーコストは、ほとんど「ゼロ」だと言うことですね。

石川 環境に対する負荷もゼロです。菜種は、種を撒いて、小さいうちに肥料をやり、あとは放っておけばお日様で育ちますから。

### 飲料水は汲んだ川の水

秋山 水についても、江戸時代はコストゼロですかね。現代はエネルギーもコストも沢山かけて供給していますが。

石川 江戸の町では大規模な水道を掘ったので、人力を計算すればかなりのエネルギーがかかっていますが、大阪などは八百八橋の下の水が飲めたんです。私が持っている江戸時代後期の大阪の風景画に、川の真ん中に大きな桶を積んだ船を出し、川の水を汲んでいるところとか、堂島の米相場の喧騒の横でおかみさんが手桶で水を汲んでいる姿があったりするんです。あれはみんな飲み水なんですよ。



『浪華の賑ひ』より

### 大阪市中の四ツ橋での水汲み

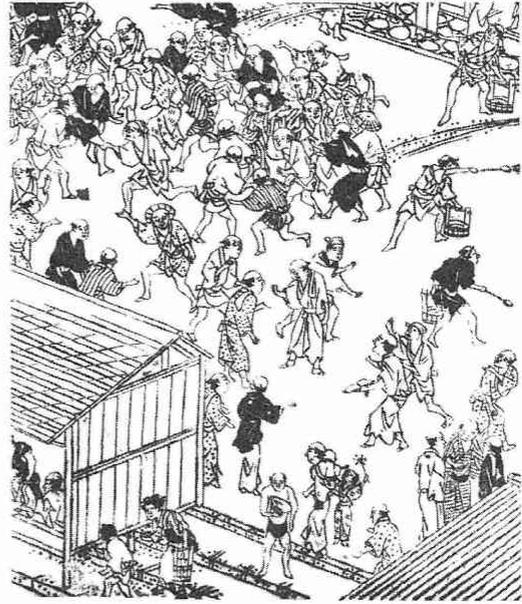
石川 喜田川守貞という絵師が著した『守貞謄稿』という幕末期の記録によると、大阪の民家の台所には水がめが2つある。1つは雑用水で洗濯だの掃除に使うもので埃が入って構わないから蓋をしていない。1つは上水、飲み水だから埃が入らないように蓋がしてある。私たちが読んでびっくりするのは、その上水は朝早く、店なら店の男が川へ行行って汲んでくるって書いてあるんですよ。だから大阪には水道がないんです。大阪の上水は水くみの労力以外は、まさに投入エネルギーゼロだったんです。

### 投入エネルギーが少ない米作り

秋山 野菜は現在のハウス栽培でほとんど石油を食っているような傾向がありますが、現代でもお米は、投入エネルギーに対して得られる食料エネルギーの比率はカロリーベースで1.5倍程度だそうですね。

石川 江戸時代に人力で行う米作りは、代掻きに始まり、苗作りから田に水を張る作業、田植え、草取り、刈取り、乾燥、脱穀、舂すり、俵詰めから運搬と手間はかかりましたが、投入エネルギーと食料エネルギーの比率は15倍だったと考えられます。

現代の米作りについては、一番多く投入エネルギーを使うという研究者などは、その比率が1を下回って0.3ぐらいだと言っています。



『摂津名所図会』より

### 大阪堂島 米相場立会場下へ水汲みに来た女性

秋山 使用する農薬まで入れてででしょうか？

石川 それも入れますし、農機具の製造エネルギーの償却まで入れて計算します。それでやって、投入エネルギーと食品エネルギーが同じぐらい（比率は約1）というおとなしい説を私は採用しています。



『北斎漫画』より

### 江戸時代の米作り風景

## 江戸のリサイクル事情

### ほとんど何でもリサイクル

秋山 江戸のゴミの量は総じて、現代の100分の1以下ではなかったかと思います。先生の『大江戸リサイクル事情』を拝読しますと、使い捨てはなく、草鞋から何から全部リサイクルに近かったのですね。

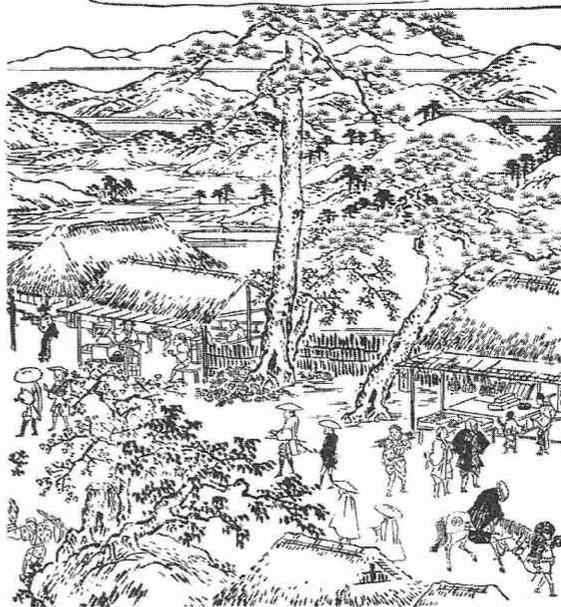
石川 東海道の絵を見てますと、こっちの村で作った草鞋を旅人が買って来て、こっちで捨てて、それをまた堆肥にして、ぐるぐる回ってるんですね。現代のリサイクルというのは化石燃料を使わないとできないですから本当のリサイクルではないですが、江戸時代は全部太陽エネルギーだけで動いていますから本当のリサイクルだったんです。

秋山 そうですね。現代の廃棄物は、一般廃棄物が年間1人当たり約400kg（1日1.1kg）、また、それと同じくらいの排泄物が出ていますが、江戸時代はどうだったのでしょうか。

石川 江戸時代の廃棄物は年間1人当たり0.5kg



江戸の村にあり  
武蔵相模の  
境多し故よ  
傍の  
枕を建  
らる故ふ  
此名あり



【江戸名所図会】より

東海道の古草鞋集積所



【張替行灯】より

下肥を桶から部切舟に空けている図

でした。排泄物は農家の人が先を争って買って行ってしまいました。従って、し尿は商品でした。『張替行灯』という江戸時代の絵本には、部切舟（へきりぶね）という下肥運搬船が描かれています。

### アメリカの真似した大量消費のツケ

秋山 日本全体で一般廃棄物が年間5,000万トン、その大部分が焼却処理されています。私は、



秋山 守

(財)エネルギー総合工学研究所  
理事長

武蔵野に住んでおり、その焼却場でも大量焼却が進められているのですが、焼却できない物はどこかの最終処分場に持って行っているんでしょう。その最終処分場もほとんど満杯で、新しい場所を開発しながら処分能力の残り年数を何とか少しずつ確保していると聞いています。

石川 産業廃棄物については、東京都の場合、49.8%が下水汚泥だと4年くらい前の資料で読んだことがあります。今どうなっているかわかりませんが、同じような数値ではないかと思えます\*\*\*。

秋山 産業廃棄物については、40%ずつリサイクルと減量化処理が行われ、最終処分に戻るのには1割くらいになっています。自動車部品やコンピュータ部品はほとんどリサイクルしていますが、産業廃棄物の最終的な行き場も厳しくなっています。

石川 アメリカなんか廃棄したパソコンを町外れに大きな穴を掘って埋めちゃうんだそうですね。平地面積の少ない日本のような国がアメリカのような広大な国の真似をしちゃいけないからですね。

## 今後のエネルギー・環境問題に対して

超長期のビジョン、そして創資源、創エネへ

秋山 私どもの研究所では、エネルギー・環境問題について総合工学の立場から幅広く、しかも長期的な視野で調査研究に取り組んでいます。最近では超長期のエネルギー技術戦略とロードマップの取り纏めについても、国に協力をしています。

その作業では、石油や天然ガスの生産量がいずれピークを迎えるとする前提と、2100年時点での国民総生産当たりの二酸化炭素排出量を現状の10分の1以下に抑えるといった前提を置いて、現在までをバックキャスト（逆算）しながら、民生、運輸、産業、転換の各分野で期待される技術の姿を詳しく描き出しました。

その際、エネルギー構成としましては、①石炭などの化石資源の最大利用と二酸化炭素の回収・隔離、②原子力の最大利用、そして③再生可能エネルギーの最大利用と究極の省エネ、の3つの極端ケースに目を上げながら作業を進めました。

いずれにしましても、今後ますます「省資源・省エネ」を心がけていくことが極めて大切です。新しい視点で資源やエネルギーを掘り起こす、いわば「創資源」、「創エネ」にも期待がかかります。

以上は、これから先の遠い未来に向けたビジョンや期待ですが、私たちはご先祖の江戸時代の人々の智慧と努力を一層理解しながら努めていく必要がありますね。

石川 江戸時代のようにエネルギー消費ゼロ、人口を3,000万人に抑え、経済成長も1%以下にして、みんなが満足して暮らすなんて無理

\*\*\*平成17年1月の発表資料によると、14年（2002年）の全国の廃棄物排出量3億9,300万トンのうち下水汚泥は46.4%（1億8,200万トン）で第1位。

でしょう。たとえ日本という世界の局地が江戸時代のようなエネルギーゼロ社会に戻ったとしても、日本以外の国々で自動車を沢山走らせ、化石燃料を燃やしては大勢に影響を及ぼすことはできません。

しかし、そんなことを言い始めたら「やりたいようにやってしまう」というのと同じですから、何か考えなきゃいけませんね。

やはり、地球上の動物としてもっとまともな暮らしをしたいものです。あまりにも勝手に、目先の便利さというものだけを追いかけいていますから。目先便利なものというのはほとんど時間がたつとボロが出てきて、「あんなことしなきゃよかった」と気付いた時にはもう手遅れになることが多いものです。

### 自給自足の実験

秋山 「環境実験都市」と言うのがインドのオーロヴィルにあります。宗教哲学者とフランスの画家兼音楽家が意気統合して、1968年頃から始めた一種の閉じた環境実験空間です。今、35カ国から1,700人余がボランティアで住んでいるそうです。有機農法で集約的な土地利用をし、エネルギーは再生利用で賄う。その中に、郵便局や銀行といった公益ユニットもあり、住宅も自分で作る、水道工事も自分でやっているそうです。商店は100ぐらいあり、生活用品はもとより、加工食品、電気製品、コンピュータも売られていると言うんです。しかし、完全に閉じた生存環境というのは保たれなくて、コンピュータや最新医薬品といったハイテク製品は外部から買ってくるそうです。

石川 やはりそういう実験には、白人のロマンチズムが強くあると思います。外部から電源を引かないなら褒めてあげますけど、パソコンショップなんてあったらまやかしいですよ。江戸時代の人たちが閉鎖空間で、270年間も自然を食いつぶすことなく安定した社会を



『春告鳥』より

### 『春告鳥』巻頭の挿絵

維持したのは全く違うんです。

江戸時代の人たちは鎖国という状況の中で、他に暮らしようがないからエネルギー消費ゼロの社会を作り上げたわけですが、中にいる人たちは仕方がないからやってるとは思わないわけです。江戸時代だって、その時々最新のものは常にあるし、天保7年（1836年）に出た為永春水の小説『春告鳥』の最初の挿絵には、「流行矢の如く。昨日の新奇も今日は古し」という言葉が出てくるんですよ。秋葉原のパソコンのアンテナショップの話みたいなことを言っていたんです。

### 日本人に残っている希望

秋山 2004年にノーベル平和賞を受賞したケニアの環境副大臣ワンガリ・マータイさんが「もったいない」という言葉を提唱していますね。今後のエネルギー・環境問題に取り組む上で、大事な思想と言えるかも知れません。

私たちには馴染みのある「もったいない」という思想が世界に広がっていくのは非常に嬉しいことです。ここいらで、私たちがもっと主体的に世界に向けて発信することを考えていく必要がありますね。

石川 日本人の場合、まだ私はいくらか望みがあるという気がします。1995年1月の阪神淡路大震災の時に、復興するまで暴走族が暴

走行行為をやめ機動力を活かして必需品を運ぶのを手伝おうとか。暴力団が復興するまで暴力行為をやめてボランティアをやっていましたでしょう。『この国はこれだけの大災害が起きてても略奪が起きない』とアメリカ人がびっくりした』というのを聞いて私はびっくりしました。

「ああ、先進国になるには、こういう時はちゃんと略奪しなきゃいけないのか」と思いました。この国は全く逆ですね。そこがアメリカあたりと随分キャラクターが違うところです。

また、最近の帰農ブームで、30代ぐらいの夫婦が、かろうじて生活できる所得を確保しておいて、帰農しようという人がポツポツ出てきていますね。いざとなったら、そういう素養のある人たちを中心に村を作れば何とかかなと思います。

秋山 そうですね。私の近所にも1坪農園があります。月3,000円くらいの借地です。そう

いうところで実体験して、自分で植物を育てられますね。私も中学の頃は田舎で少しは大根などを作ったことがあります。なかなかまともなものはできなかったのですが、作ったものはやはり愛着がありますしね。

秋山 今日は、江戸時代に生きた先祖の方々も素晴らしい人生を送られたであろうこと、エネルギー消費がほぼゼロでも1つの文明を立派に維持できたことなど、大変参考になるお話を楽しく聞かせて頂きました。今日の話題を世の中の人々が受け止めて、今後のエネルギー・環境問題を考える上で役に立てて下さればと期待しています。また、引き続き色々ご指導、ご助言をお願いいたします。ありがとうございました。



『白木屋阿駒清書冊子』より

#### 葉茶屋の店先にある火鉢

[寄稿]

## エネルギー分野の技術戦略マップの策定について\*

蘆田 和也 ( 経済産業省 資源エネルギー庁  
長官官房総合政策課 課長補佐 )



### はじめに

経済産業省は、「新産業創造戦略」(平成16年5月)の実現に必要な技術目標や製品・サービスの需要を創造するための方策として、表1の21分野で「技術戦略マップ」を策定しているところです。20分野については、既に策定が完了しておりますが、エネルギー分野については現在策定中でその概略版がまとまってきたところです。7月には産業構造審議会の研究開発小委員会に報告をいたしましたので、今日はその内容について説明したいと思います。

「エネルギー分野技術戦略マップ」は、他分野が2015年、あるいは2020年を見据えて作られているのに対して、2100年を見据え、「超長期」にわたって、資源制約や環境制約の下でどういう技術が必要になるかという視点で作っています。2100年を見据えて検討した理由は、後述するように、石油および天然ガスの生産ピークが過ぎた後までを視野に入れ、真に持続可能なエネルギー需給構造を実現していくために必要と

なる技術的な備えを示そうと考えたからです。現在、その詳細版を作っているところですが、詳細版ができたところで一旦公表しようと思っています。その後、足元の検討を加え、長期の視点、あるいは短中期の視点を入れた形で最終的な「エネルギー分野技術戦略マップ」をまとめていこうと考えています。

マップの策定にあたり、エネルギー総合工学研究所に事務局をお願いし、「超長期エネルギー技術研究会・超長期エネルギー技術戦略研究会委員会」(秋山守委員長)でここまでまとめて頂きました。

### エネルギー分野技術戦略マップの考え方

#### 基本認識と検討のスタンス

マップの基本的な考え方を表2に示します。(1)～(4)までを基本認識に、(5)にあるように、人類の「効用」(経済の活動量、生活の質)レベルを落とさず、資源制約、環境制約

表1 技術戦略マップの策定対象分野

情報通信分野 半導体、ストレージ・不揮発性メモリ、コンピュータ、ネットワーク、ユーザビリティ(ディスプレイ等)、ソフトウェア	環境・エネルギー分野 CO2固定化・有効利用、脱フロン対策、化学物質総合管理、3R、エネルギー
ライフサイエンス分野 創薬・診断、診断・治療機器、再生医療	製造産業分野 ロボット、航空機、宇宙、ナノテク、部材、MEMS、グリーンバイオ

\*本稿は、今年8月26日の当所月例研究会(第238回)におけるご講演を本誌掲載用にテープ起こしたものです。

表2 マップ作成にあたっての基本的考え方

- (1) エネルギーは、全ての人類の活動の基礎となるもの。エネルギーに対する制約は、人類の効用（経済活動量、生活の質）のレベルに直結。
- (2) 将来のエネルギー需給構造を考える際には、資源制約、環境制約の両方を視野に入れることが必要。
- (3) 長期的視野から真に持続可能なエネルギー需給構造を実現する鍵は、技術。（技術がない状況で実現することは不可能。）
- (4) ただし、技術の確立には、研究開発、導入普及、関連インフラの整備などに係る長期の期間を要し、また、実際の社会では様々な選択肢が取られるなど、高い不確実性が存在。
- (5) 本検討では、効用を落とすのではなく人類が豊かになるとの前提で、資源制約、環境制約を、技術の開発・利用によって長期的に解決するために、技術に求められる将来の姿を描き出した。  
この際、上記期間を考慮しつつ制約条件から逆算（バックキャスト）することにより、必要となる技術スペック、時期等を整理した。

を技術で解消することを想定し、そのために技術に求められる将来像を描き出しています。

挑戦的な技術の姿

マップの技術ビジョンは、3つの点でかなり挑戦的な姿になっています。

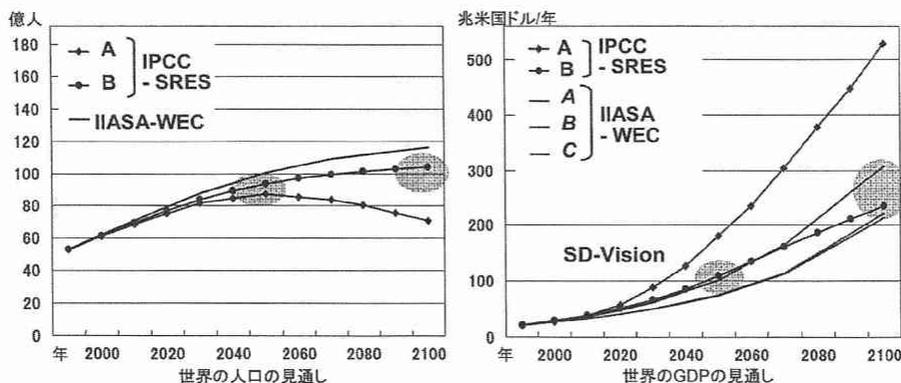
①技術によるすべての解決を前提。資源制約、環境制約の下で、ライフスタイルが変化しなくても、技術だけで制約を解消できるようにという形で考えました。②厳しい制約条件。かなり将来の話をしていきますので、資源制約、環境制約には高い不確実性がありますが、今どういった技術的な備えが要るかとい

う観点から、あえて厳しい制約条件を仮定しました。③エネルギー構成に関する極端な条件設定。技術の不確実性を考慮して、最大限の備えを講じるということでも最も厳しい技術スペックを選んで検討しました。結果として、すべてを達成した場合には今回想定している制約を大きく超えて達成できる形を描き出しています。

制約条件

世界の人口と経済

2100年までの将来見通しを紹介いたします。



※ IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)のSRESシナリオや、IIASA(International Institute for Applied Systems Analysis)のWECの試算では、シナリオによる幅があるものの、中位的な見通しとして、経済成長は2050年に3倍程度、2100年に10倍程度と想定できる。

【IPCC-SRES】 A：高度経済成長が続き、新技術や高効率技術は早期導入が進む。地域格差が縮小するケース B：中庸なケース  
【IIASA-WEC】 A：高成長ケース、B：中庸ケース、C：エコロジー投資ケース

図1 世界の人口と経済に関する予測

表3 世界の化石燃料生産

	標準的なシナリオ	悲観的なケース	楽観的なケース
1996年1月1日時点の在来型石油の残存究極可採埋蔵量(百万バレル/日)	2626	1700	3200
在来型石油生産量のピーク(年)	2028—2032	2013—2017	2033—2037
在来型石油のピーク時の世界的需要(百万バレル/日)	121	96	142
非在来型石油の2030年の生産量(百万バレル/日)	10	37	8

\* 標準的なシナリオは米国地質研究所(USGS)の試算(究極可採埋蔵量3.4兆バレル)をベースとしている。

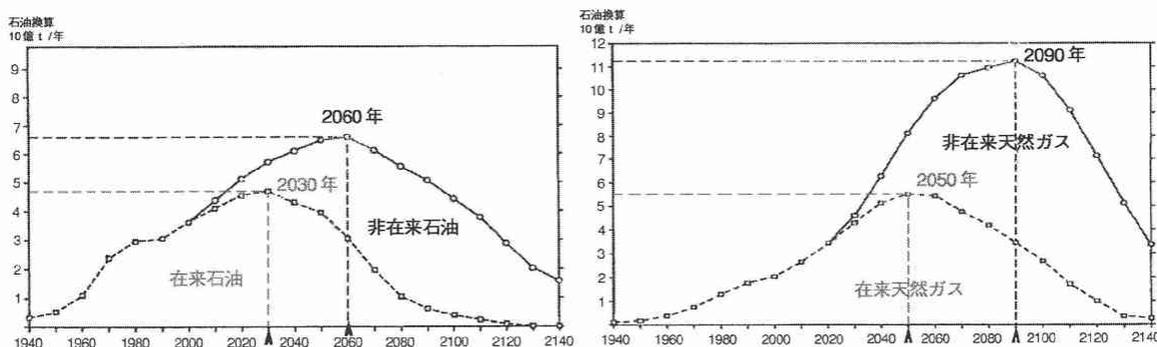


図2 化石エネルギーの生産ピーク予測

1つ目が世界の人口と経済です。図1は、IPCC、IIASAという世界のエネルギー研究機関が出している数字をベースに見ています。本検討では、中位推計を採用しましたが、基本的に、図1に見られるように今後とも人口は増加し経済規模の拡大も続き、1人当たり国内総生産(GDP)が上がると考えられます。今回の検討にあたり、世界のGDPは2050年に現在の3倍、2100年に10倍になると想定しています。

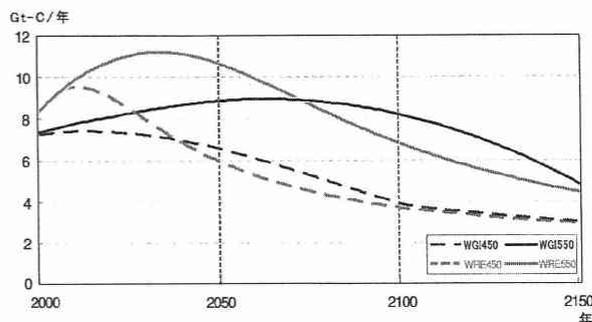
#### 石油、天然ガスの生産ピーク

人口、経済ともに伸びていきますから、当然、エネルギー消費も増加していくと考えられます。表3はIEAのデータですが、在来型の石油生産量は、標準的なシナリオで2030年、楽観的なシナリオで2040年あたりでピークになると言われています。また、図2に示したオランダ・エラスムス大学のOdell教授の試算では、非在来型も含めた石油生産量は2060年にピークを迎え、非在来ガスも含めた天然ガスも2090年頃に

ピークを迎えます。こういったことを参考に、今回の検討では、石油は今世紀半ば頃、天然ガスは今世紀末頃にピークを迎えると仮定しました。

#### CO<sub>2</sub>排出量の抑制

図3は世界の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出シナリオです。将来、大気中のCO<sub>2</sub>濃度を安定させる場合、今世紀中にはCO<sub>2</sub>排出量を減少基調にしないと行けません。この検討会では



※ 550ppm、450ppmで安定化させるケースについても様々な試算がされており、IPCCにおいて検討されたWG Iシナリオ(Working Group Iにおける試算)、WREシナリオ(Wigley, Richels, Edmondsの3氏による試算)の試算を示す。

図3 世界のCO<sub>2</sub>排出シナリオ

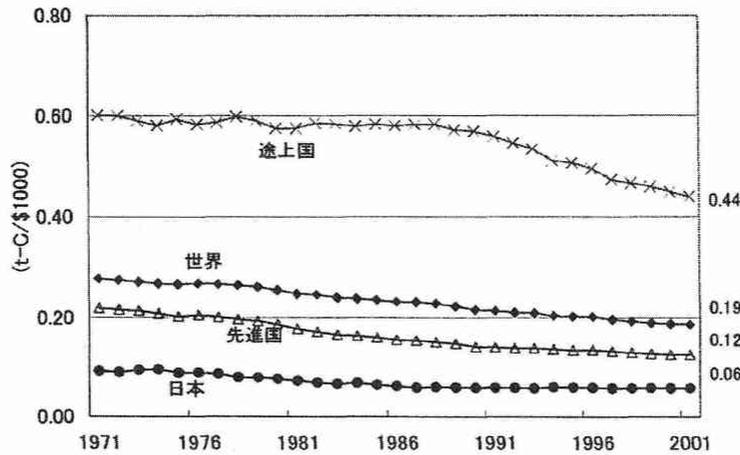


図4 CO<sub>2</sub>排出原単位の推移

2050年、2100年ともに現状と同程度に抑えないといけないと仮定しました。経済が大きく伸びていく中での話ですから、排出量の原単位（CO<sub>2</sub>/GDP）の改善が必要になってきます。

図4にあるように、現在、日本のCO<sub>2</sub>排出原単位は、他の先進国の約2分の1、世界平均の約3分の1、途上国に対しては約8分の1とかなり高い効率をもっています。こういった技術を世界に普及させていくことと、さらに技術力を伸ばしていくことで、将来にわたって国際競争力を保持しながら、資源制約、環境制約の解消について国際貢献ができるのではないかと見ています。

に現在の3倍、2100年に10倍となる一方で、世界のCO<sub>2</sub>排出量を現在と同程度に抑えるためには、CO<sub>2</sub>排出量原単位を2050年に3分の1、2100年に10分の1以下に、2100年以降はCO<sub>2</sub>排出量そのものを半減させないといわれています。わが国のCO<sub>2</sub>排出量原単位は既に世界平均の3分の1ですが、将来にわたって世界をリードし続けるために、世界全体に求められるのと同程度の改善率を条件にして検討を行ってきました。

#### 極端なエネルギー構成でのケーススタディ

この検討会では、図5のような極端な条件のエネルギー構成で、上記の資源制約と環境制約

### 技術戦略の検討

#### 資源制約と環境制約

検討会では、まず、資源制約として、世界の石油生産量のピークを2050年、天然ガスは2100年と仮定し、そこまでに他のエネルギーと代替できる状態にしておこうと考えました。2050年、2100年というのは仮定ですので、今回描いた姿は、ピークの時期がずれれば伸び縮みすると考えています。

環境制約については、世界のGDPが2050年

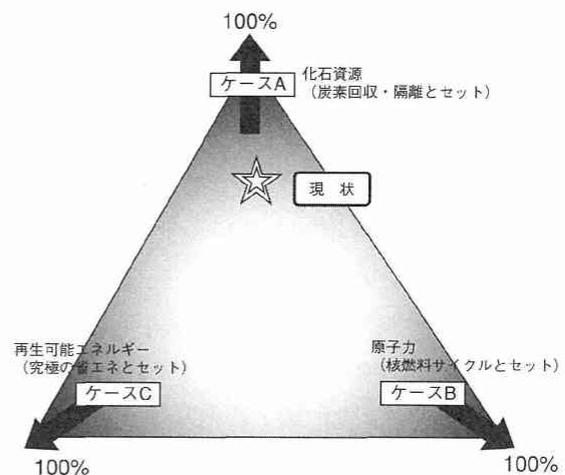


図5 極端なエネルギー構成のケーススタディ

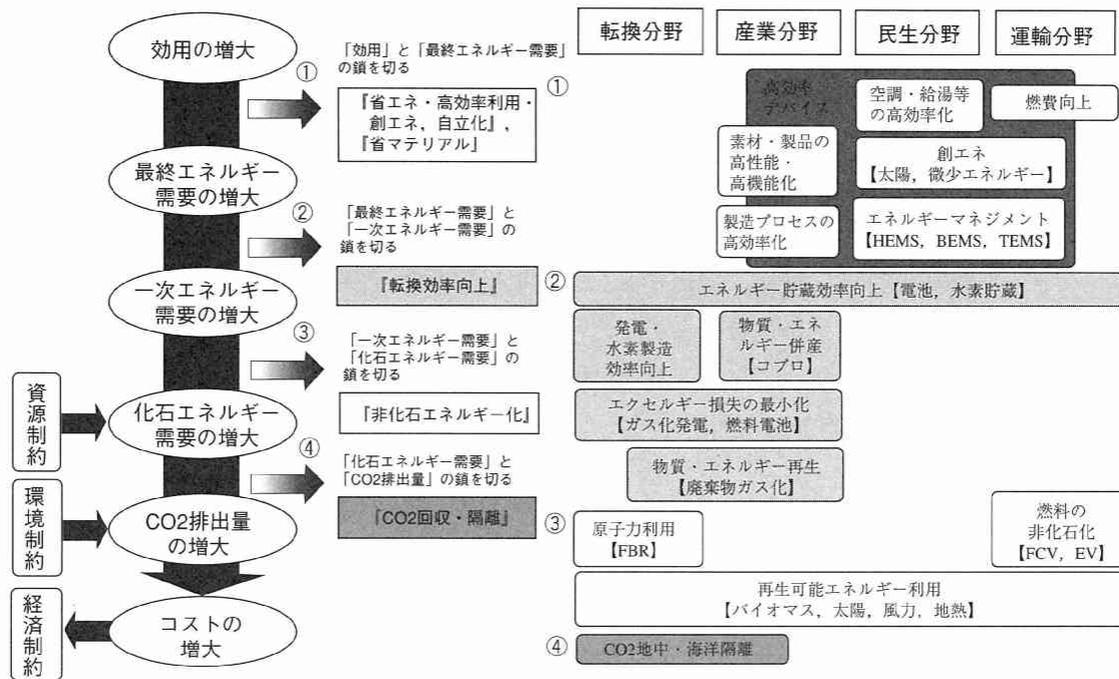


図6 制約克服のための連鎖脱却と技術の全体像

を解消するケーススタディを行いました。

あえて極端な条件でということ、ケースA、Bを省エネが期待できない場合として検討しました。これらのケースにおいて、産業、民生(家庭・業務)、運輸、転換の分野で必要となる原単位改善を想定し、それを実現する技術スペックを整理してマップに書き起こしました。

### 制約克服と連鎖脱却

「効用」(経済の活動量、生活の質)は伸びるけれども、資源制約、環境制約を解消していくという考え方を図6に示しました。この鎖を切っていくという考え方が基本になります。効用が大きく伸びる場合でも、最終エネルギー需要が増えないよう、省エネ、あるいは高効率利用、民生部門などでの太陽光発電のような身の周りのエネルギーで需要を賄います。

再生可能エネルギーの転換効率を向上させ、化石エネルギー需要の増大につながらないようにしていきます。どうしても化石エネルギーに頼る部分は、大気中へのCO<sub>2</sub>排出量を抑制するために、CO<sub>2</sub>の回収隔離も選択肢として出てきます。

従来の連鎖の構造のままだと、効用が増大するとCO<sub>2</sub>排出量が増大し、また、資源制約、環境制約も顕在化するのでコスト増となり、経済に制約がかかります。今回、資源制約や環境制約によって増大するであろうコスト分を技術開発に回すことで、鎖を切っていると考えています。その時に重要になる技術を図6の右側に示しました。

### 技術戦略マップの概要版

#### 基本構成

「技術戦略マップ概要版」は、産業、家庭・業務、運輸、転換の分野ごとに「主な技術目標と技術的備えの考え方」、「技術的備えに対応する主要技術」の2枚構成になっています。

世界全体のGDPが2000年の3倍、10倍になった時に、日本はそれぞれ1.5倍、2.1倍になると仮定しました。得られる効用がそれに比例して増大することが全分野共通の前提です。その上で、連鎖脱却に向け、必要エネルギー

量（転換分野からのエネルギー供給量）を最小化するために必要な技術を備えておくことを検討しました。

### 各分野の技術戦略マップ

検討会では、産業、民生、運輸、転換の各分野で、2100年までの目標値を掲げ、その達成に向けた将来展望と技術ロードマップを策定しました。将来展望と技術ロードマップは、本稿末尾に示すとおりです。ロードマップ中、研究開発段階は点線で、実用化以降は実線で示してあります。

#### [産業分野]

産業分野の目標値を表4に示します。2100年で必要エネルギー量の70%削減が目標です。

70%削減していく時に3つの考え方があります。それは「うまくつくる」、「良いものをつくる」、そして「上手につくる」の3つです。「うまくつくる」は、製造プロセスにおいてエネルギーをあまり使わない、あるいはうまくエネルギーを取り出すことです。

「良いものをつくる」は、作ったもの自身の高度化を図ることです。これは、素材、部材自身の高機能化、高性能化で、製品から得られる効用を上げながら、必要な材料やエネルギーを減らす、少ない資源で製品製造を図るという考え方です。

「上手につかう」は、産業分野、特に化学などでは、製造時に消費するエネルギーだけではなく製品に含まれるエネルギーを最後まで搾り取ろうという考え方のことです。

これらを組み合わせて、必要エネルギー量を大きく減らし、資源制約、環境制約を解消していこうというのが産業分野での基本的な考え方です。

#### [民生分野]

民生分野の目標値を表5に示します。2100年で必要エネルギー量の80%削減が目標です。80%削減は、「省エネ」で使用機器の効率向上や建築物の効率向上を図りつつ、必要エネルギーを極力減らすこと、あわせて創エネで、転換分野とは違った身の周りにあるエネルギーを取り出していくことで実現しようと考えています。

表4 産業分野での目標値

	2000年	2030年	2050年	2100年
製造量×製品の価値	1倍		1.5倍	2.1倍
必要エネルギー量※	—	25%削減	40%削減	70%削減
(1) 製造エネルギー原単位改善	—	20%削減	30%削減	50%削減
(2) 物質エネルギー再生率		50%	60%	80%
(3) 高機能化（強度等） （機能／物質量）	1倍	2倍	3倍	4倍

※各年代におけるエネルギー量（省エネによる削減および物質エネルギー再生分を含まない）を基準にしたとき、転換分野からの供給が必要なエネルギー量

表5 民生分野での目標値

	2000年	2030年	2050年	2100年
全必要エネルギー量	1倍		1.5倍	2.1倍
転換分野からの供給が必要な エネルギー量※（家庭・業務）		45%/35%削減	60%/55%削減	80%/80%削減
CO <sub>2</sub> 原単位（家庭）(t-CO <sub>2</sub> /世帯)	3.5 (1倍)	1.9 (1/2倍)	1.1 (1/3倍)	0
（業務）(kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	118 (1倍)	77 (2/3倍)	40 (1/3倍)	0

※各年代におけるエネルギー量（省エネによる削減および創エネ分を含まない）を基準にしたとき、転換分野からの供給が必要なエネルギーの削減量

「創エネ」では、転換機器の効率向上や耐久性向上などを図りながら、色々な所に設置できるようにしていく。「省エネ」技術と併行して「創エネ」技術が進んだ場合、モバイル機器は、微小エネルギーで作動可能になってきます。その微小エネルギーは身の周りにある圧力、温度、震動など現在ではエネルギーと呼べないようなものから取り出せる。例えば、今日では一般的になっているソーラー電卓のように、微小エネルギーで動くモバイルが沢山出てきて、コンセントに差さなくて済めば、生活の質を向上させながら消費エネルギーを増やさずに済むのではないかとということで、「機器の自立化」を掲げています。

そういう機器ベースでの自立化から、例えば屋根に太陽光パネルを置くなどのように、創エネが進んでいくと、住宅レベルでのエネルギーの自立化が可能になります。さらに、創エネが進むと、今度は家庭部門でエネルギーが余ってきます。そういった余剰エネルギーをうまく融通できれば、「民生部門の自立化」が目指せるのではないかと。その時に必要なのがエネルギーマネジメントだということで、ビルベース、家庭ベースのBEMS、HEMSを、街ベースでやろうというTEMS (Town Energy Management System) という「地域の自立化」まで視野に入れていけば、家庭・業務での80%削減も達成可能と考えています。

#### [運輸分野]

運輸分野の目標値を表6に示します。全体で必要エネルギー量を70%削減しようと考え

ています。運輸の中では自動車とその他で分けて考え、自動車で80%削減を検討しています。それとは別に、転換分野で石炭を使って炭素の回収隔離をするというケースAの場合、運輸はどうしても小規模なCO<sub>2</sub>排出源になるので回収は無理だろうと思われれます。ケースA、あるいは原子力がメインのケースBでは、転換分野で製造する水素が電気で動く自動車が普及しないと大幅な必要エネルギー量の削減はできないだろうということで、電化・水素化率100%という技術スペックが別途出てくることになります。自動車では、80%削減、あるいは電化・水素化率100%を目指していこうということで整理しました。

そうなった場合、自動車では現在の内燃機関系のものから、2030年30%削減、2050年60%という目標達成は、当面のハイブリッド化の進展だけでは厳しいだろうということで、動力源が電気か水素かは別にして、モーターで動く自動車になっていくと考えています。そこで、ここでは電化率および水素化率を2050年で40%とし、4割ぐらいそういう車が入ってきてCO<sub>2</sub>制約を乗り越えていくと考えています。他方、石油生産のピークが2050年と仮定していますので、燃料転換は当面石油にバイオマスや合成燃料を混合していきながら、将来は、水素・電気で動く自動車になっていくと考えています。

2100年には電気自動車か、燃料電池自動車が100%になると考えます。どちらになるかは、水素・電気の貯蔵技術で左右されると思います。蓄電池の能力向上がうまくいけば電気自動車が大きく伸びるでしょうし、それが難し

表6 運輸分野での目標値

	2000年	2030年	2050年	2100年
効用 (人・km, トン・km)	1倍		1.5倍	2.1倍
必要エネルギー量 <sup>※</sup> (運輸全体)		20%削減	50%削減	70%削減
自動車 必要エネルギー量		30%削減	60%削減	80%削減
電気・水素化率	0%	1%以上	40%	100%
CO <sub>2</sub> 原単位 (g-CO <sub>2</sub> /km)	160 (1倍)	100 (2/3倍)	50 (1/3倍)	0
航空機・船舶・鉄道 必要エネルギー量		10~20%削減	20~35%削減	30~50%削減

※各年代におけるエネルギー量 (省エネによる削減および創エネ分を含まない) を基準にしたとき、転換分野からの供給が必要なエネルギーの削減量

い場合には水素を燃料とする燃料電池車が伸びると考えました。いずれの場合もインフラが整備されていき制約条件を解消していこうというのが運輸分野の考え方です。

### [転換分野]

転換分野の日標値を表7に示します。求められるエネルギーの供給は、当面、化石資源を有効に活用していきながら、原子力を活用、あるいは再生可能エネルギーを併用していくというのが転換分野の考え方です。再生可能エネルギーが大きくなってきた場合、供給側が不安定になっていきますので、供給と需要をマッチングさせるためにかなり大きな蓄エネルギーが必要になると考えています。

蓄エネルギーについては、2050年では1日、あるいは数日間分を貯める「日間の負荷平準化」

を、2100年ぐらいで再生可能エネルギーがかなり増えてきた場合は、季節間の調整が行えるぐらいの大容量の貯蔵が必要になると思います。この検討会では、こういうエネルギー貯蔵のために、化学エネルギーで貯めた水素を色々なところに使っていくというのもストーリーとしてありうると考えています。

図7は、今回の技術スペックが実現されたエネルギー需給構造の一例です。もともと将来のエネルギー需給構造の選択は幅広くなされると想定していますが、ここでは1つのシナリオを考えた場合のイメージを整理したものです。2050年、2100年での「効用」を得るための必要エネルギー量を最終需要削減、転換効率向上等によって削減された供給量が#1の部分で、さらに省エネで大きく減らすというのが#2の部分です。「創エネ」で民生部門の需要を減らし、残

表7 転換分野での目標値

	2000年	2030年	2050年	2100年
需要端での全エネルギー需要 (最大ケース)	1倍		1.5倍	2.1倍
電化・水素化率	1倍		2倍	4倍
CO <sub>2</sub> 原単位 (g-CO <sub>2</sub> /kWh)	370 (1倍)	270 (2/3倍)	120 (1/3倍)	0*

\* CCS併用化石燃料使用時110g-CO<sub>2</sub>/kWh (1/3倍)

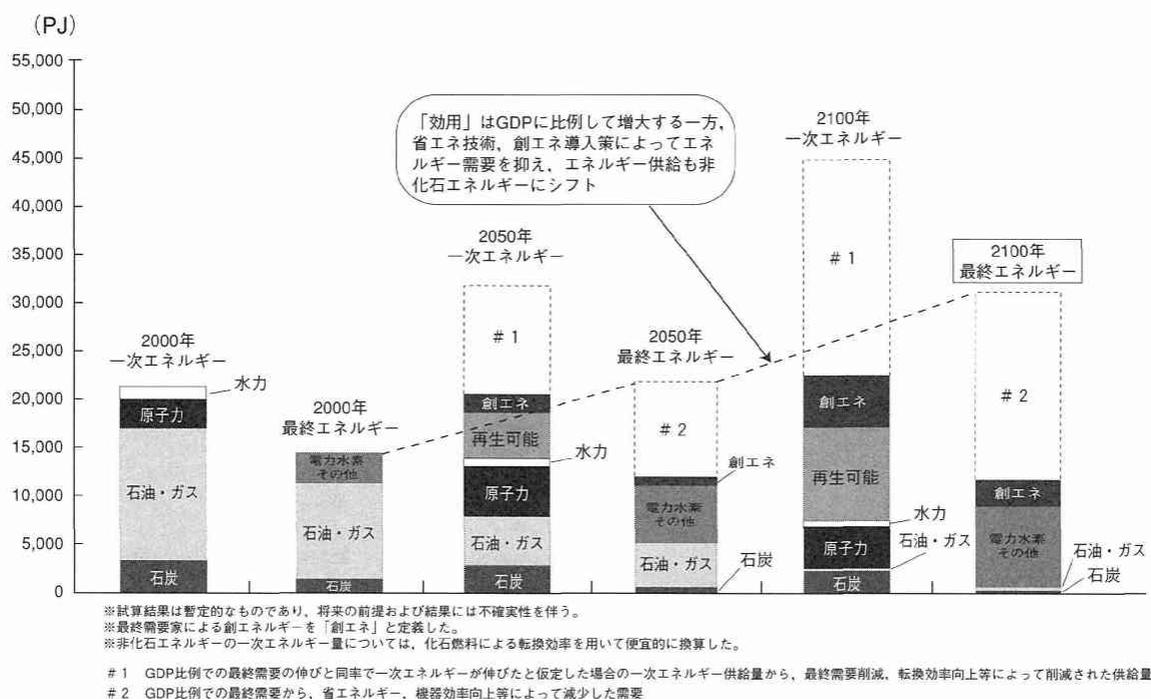


図7 エネルギー需給構造の一例

った需要は電力や水素、産業分野では原料用の石炭で賄っていくことを期待したものです。この電力水素が再生可能エネルギーや原子力等で賄われる形になっています。

### 分野に共通する技術

省エネ技術は鎖を切る部分でもエネルギーの貯蔵技術のところでも重要になってくると思います。その他、各分野に共通的な技術の例を表8に示しました。パワーエレクトロニクス技術には、今後増えるエネルギー需要を横断的に減らせるという期待がかかります。

ガス化技術は、特に産業の分野で、石油生産がピークを迎えた場合、ナフサや石炭、天然ガス、あるいは、バイオマスを原料にガスを作っていくことになるだろう。その時にガス化技術が色々なところで重要になってくると思います。

これから需要供給両方が変動していき、エネルギー貯蔵もかなり膨大な量を貯蔵していくことになると、マネジメントの技術も非常に共通的に重要になると思います。

---

### さいごに

---

超長期の「エネルギー技術戦略マップ」で

表8 各分野に共通する技術の例

(エネルギー貯蔵技術) 大規模集中発電・水素製造施設からの供給効率向上(時間的(日間、季節間)、地域的な調整機能)、再生可能エネルギー等の不安定な発電・水素製造施設からの供給安定化、民生分野での電気・水素の有効利用、電気・水素自動車等の燃料貯蔵等に横断的に有効。
(パワーエレクトロニクス技術) ケース横断的に、電力輸送(送配電)技術の効率化技術、電力の高効率利用、高効率貯蔵等に有効。
(ガス化技術) 転換分野の発電・燃料(液体燃料・水素)製造効率の向上やバイオマス、廃棄物等の有効利用、産業分野の生産プロセスの省エネルギー、創エネルギーに有効。
(エネルギーマネジメント技術) エネルギー貯蔵所間の制御、供給・需要の変動による影響制御、異なるエネルギー間の最適利用制御等に有効。

は、かなり挑戦的な技術の将来像を示すことで、わが国みならず、世界の資源制約、環境制約の解決に貢献していけると考えています。また、その中でわが国の強みである技術力を伸ばし、将来にわたって国際競争力を維持発展させることにつながると考えています。

ただ、このマップ\*\*は、かなり不確実性を内包していますので、今後、将来見通し、あるいは技術動向に関する新たな知見に応じて、随時見直されていくことで、精緻化され、また、より適切にされていくと期待しています。

今回のマップについては、長期を見据えた研究開発の重点化に活用すること、もう1つは、長期的な視野で技術の色々な原単位改善をしていくことで、ポスト京都議定書などの国際枠組を考えていく時の重要な考え方として、世界に発信していくことに活用していきたいと考えています。

さらに、今回のバックキャスト(逆算)という手法で予測した場合、技術スペックは現在に近いところが一番不確実になっていますので、足元の研究開発マネジメントのインフラとして活用していくべく、次はフォアキャスト手法で検討していこうと考えています。

以上で説明を終わらせていただきます。ご静聴ありがとうございました。(拍手)

\*\*本マップの最終版は、10月5日の産業構造審議会研究開発小委員会に報告され、以下のHPにて公開されております。

<http://www.meti.go.jp/committee/materials/g51013aj.html>

**製造プロセスにおけるエネルギー利用の高度化 『うまくつくる』**

(製造プロセスの省エネ)      革新的製造プロセスの開発  
バイオ・ナノ触媒の利用等      ゼロエミッション型プロセス

コージェネ・熱のカスケード利用

物質・エネルギーの連携・統合

コプロダクション(物質とエネルギーの併産)

(化石資源利用)

バイオマス/水素利用

**物質エネルギーの再生 『上手につかう』**

物質再生プラントの効率向上

資源循環型生産プロセス

クロスバウンダリーの取組

分離・分別化容易設計  
耐久性向上

製品の省素材化(構造・機構の高度化等)

素材・部材の高機能化・高性能化(高強度化等)

**少ない資源での製品製造によるエネルギー削減 『良いものをつくる』**

分野を越えた  
物質・エネルギー  
の再生利用

図8 産業分野の将来展望



図9 産業分野の技術ロードマップ

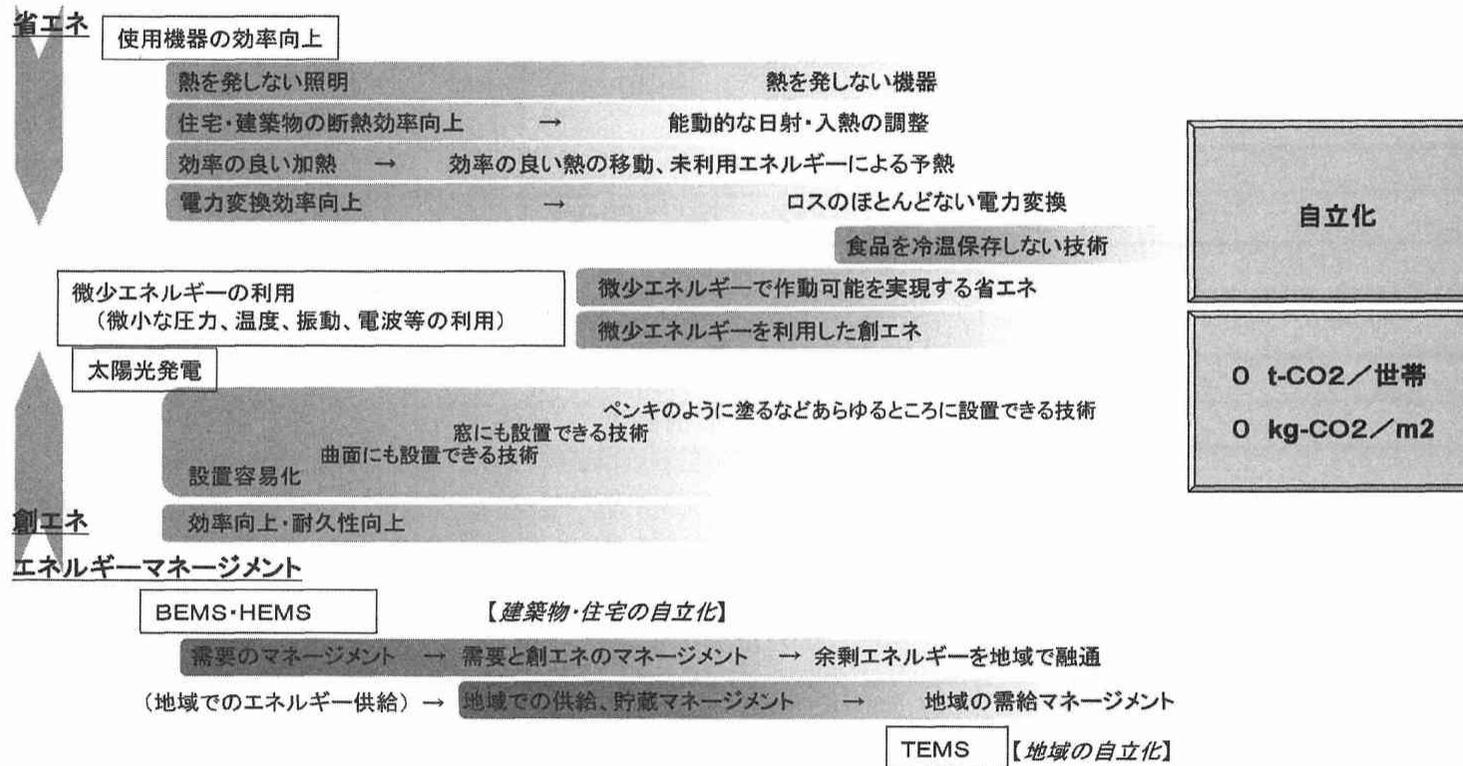


図10 民生分野の将来展望



図11 民生分野の技術ロードマップ

省エネ

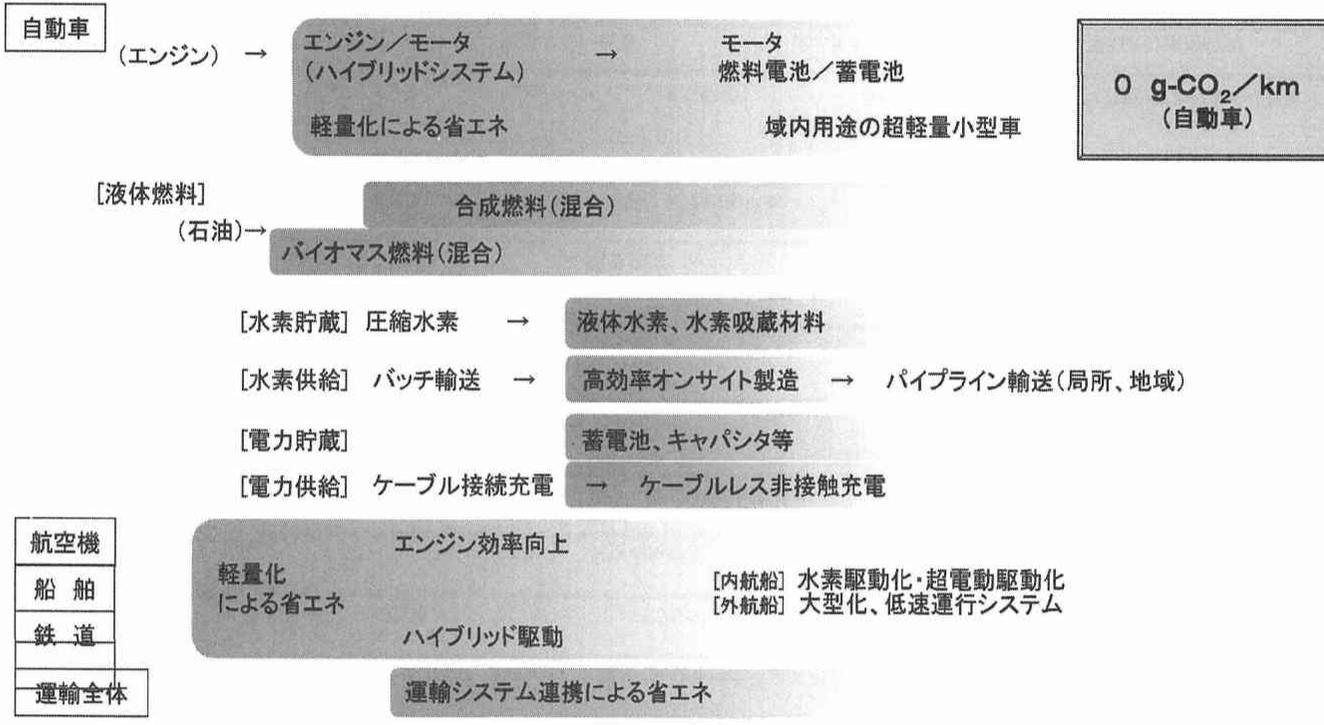


図12 運輸分野の将来展望



化石使用量の削減

化石資源利用の効率向上

燃料転換

(石油) →

天然ガス

(石炭) →

石炭(クリーン・コール・テクノロジー+二酸化炭素回収・隔離(CCS))

原子力の活用

核燃料サイクル

負荷追従運転

効率向上

再生可能エネルギー

太陽

道路・ダムなどあらゆる場所に設置できる技術

地熱

風力

陸上

→

海洋

バイオマス

木質・バイオマス  
(廃棄物系・未利用系)

→

燃料作物生産

効率向上

設置容易化

蓄エネ

非化石エネルギーの導入

0 t-CO<sub>2</sub>/kWh

図14 転換分野の将来展望

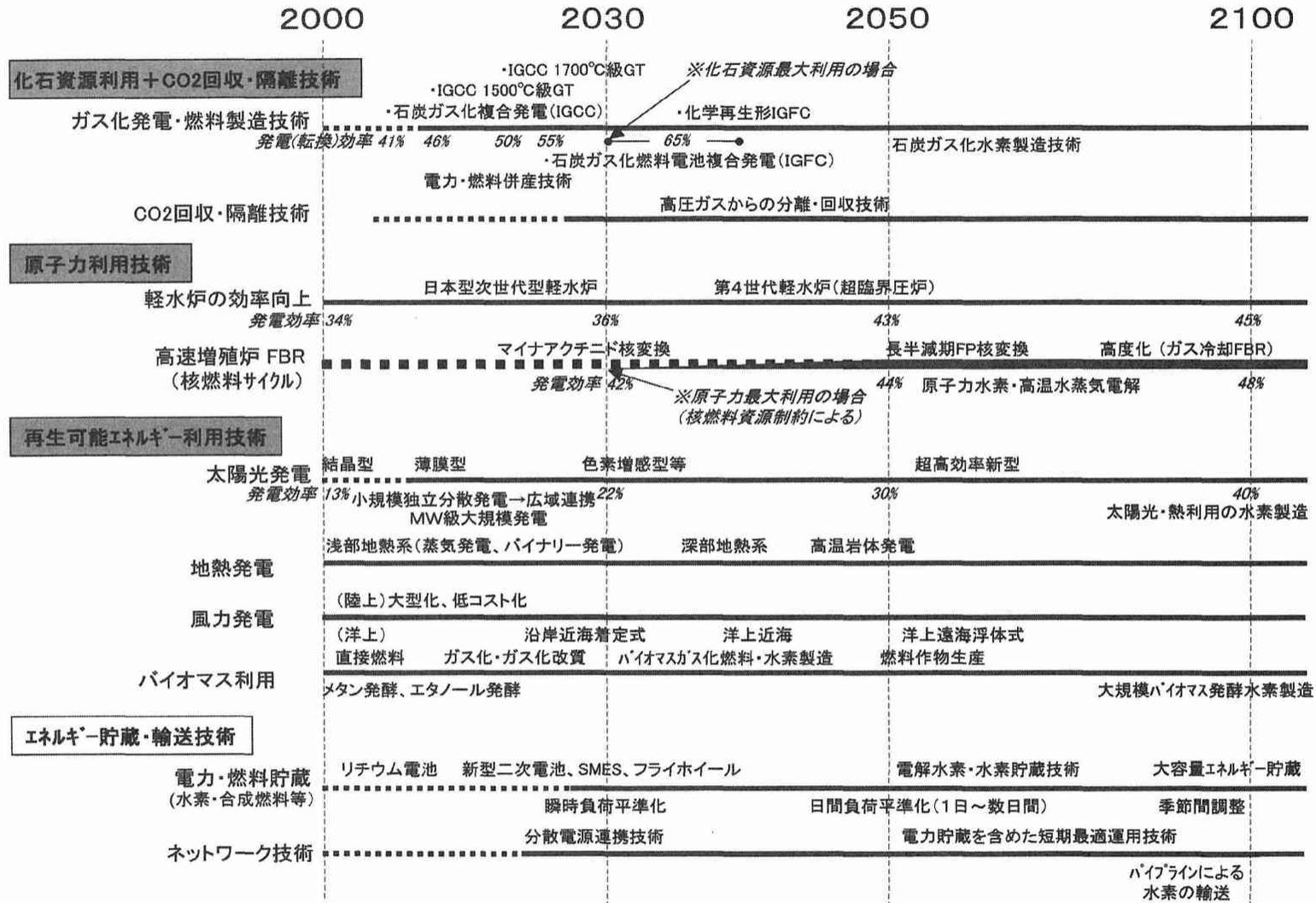


図15 転換分野の技術ロードマップ

## エネルギー分野の技術戦略マップ策定の背景

角本輝充 (財)エネルギー総合工学研究所  
主管研究員



### 1. はじめに

今回、2100年という遠い将来を見据えてエネルギー技術戦略を策定するというあまり前例のない試みを行った。本稿では、関係者の参考に資するため、約1年間、委員の方や多くの関係者の方々と、試行錯誤的に「ああでもない、こうでもない」と議論しながら策定した過程をなるべく時系列的に述べる。なお、策定した「エネルギー分野技術戦略マップ」の内容については、本誌に掲載されている蘆田和也氏の寄稿を参考にして頂きたい。

2004年夏頃から、経済産業省の「新産業創造戦略」中のエネルギー分野の戦略策定の必要から、資源エネルギー庁総合政策課主導の下、(独)産業総合研究所の赤井誠氏らを中心に、わが国がエネルギー技術の先進国として世界のエネルギー・環境問題の解決に貢献するとともに、長期的視野に立った技術の重要性を世界に積極的にアピールし、次期温暖化防止

枠組み交渉等で世界をリードするために、国内外で共有可能な長期のエネルギー技術ビジョンを策定する必要性について検討が始められた。その際、既に色々な技術分野で策定されているロードマップのように現在の状況に基づく予測ではなく、将来のエネルギーシステムが全体として達成すべき目標を定めた目標設定型のビジョンの必要性があるとの議論がなされていた。

具体的な検討に先立ち、2004年8月に「ミニワークショップ」が開催された。東京大学の西尾茂文教授、加藤信介教授、東洋大学の小川芳樹教授、(株)システム技術研究所の榎屋治紀氏、日本原子力研究所の佐藤治氏、(財)日本エネルギー経済研究所の伊藤浩吉氏、岐阜大学の小澤由行助教授、東京大学の湯原哲夫教授による7件のプレゼンテーションとともに、どのような目標を設定するか、どのようなシナリオを描くべきか、などの活発な議論がなされた。出席者は42名。

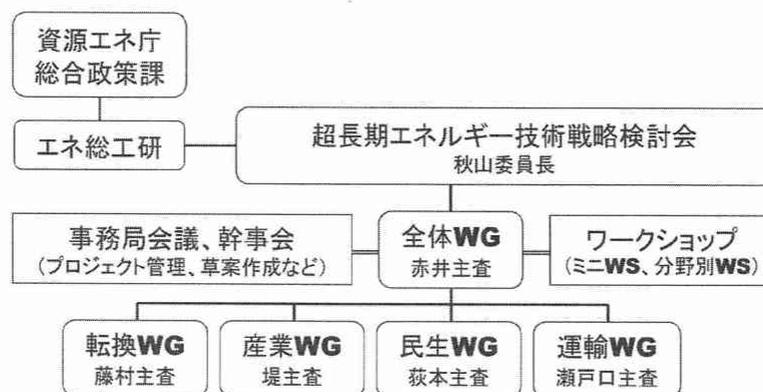


図1 エネルギー環境総合戦略調査検討体制



図2 エネルギー分野技術戦略マップの策定手順

その後、10月から研究会および全体ワーキンググループ（WG）を設置し、本格的に検討を開始した。図1に検討体制を、図2に今回のエネルギー分野技術戦略マップの策定手順を示す。

1. 基本的考え方および検討の枠組み

本検討においては、未来（例えば2100年）から現在に至る「バックキャスト」\*（逆算）手法が採られた。バックキャストでは、最初

表1 将来のあるべき社会像

「人類の新たな挑戦」の達成に向けた世界の範となるJapan Modelの構築	
①経済が発展し・生活の質が向上する社会	<b>Welfare</b>
②必要なエネルギー量が量的に充足でき、安定的に得られる社会	<b>Security</b>
③住みよい地球環境を保持した社会	<b>Environment</b>
④国際協力して技術革新・先進技術の利用を進めている社会	<b>Innovation</b>
⑤国・地域の特性を活かした選択を通じた柔軟な社会	<b>Flexibility</b>

表2 マップ作成にあたっての基本的考え方

- (1) エネルギーは、全ての人類の活動の基礎となるもの。エネルギーに対する制約は、人類の効用（経済活動量、生活の質）のレベルに直結。
- (2) 将来のエネルギー需給構造を考える際には、資源制約、環境制約の両方を視野に入れることが必要。
- (3) 長期的視野から真に持続可能なエネルギー需給構造を実現する鍵は、技術。（技術がない状況で実現することは不可能。）
- (4) ただし、技術の確立には、研究開発、導入普及、関連インフラの整備などに係る長期の期間を要し、また、実際の社会では様々な選択肢が取られるなど、高い不確実性が存在。
- (5) 本検討では、効用を落とすのではなく人類が豊かになるとの前提で、資源制約、環境制約を、技術の開発・利用によって長期的に解決するために、技術に求められる将来の姿を描き出した。  
この際、上記期間を考慮しつつ制約条件から逆算（バックキャスト）することにより、必要となる技術スペック、時期等を整理した。

\*バックキャストは、スウェーデンの環境NGO「ナチュラル・ステップ」の創始者Dr. Karl-Henrik Robertによって提唱された考え方。

にビジョンあるいはメッセージがあるべきであり、表1に示す5つの要素を掲げた。これらは、「①経済発展を通じ技術が進展し技術的挑戦によって各種制約を克服した、だれもが生活の質を向上できる社会。②社会経済活動に必要なエネルギーが適正価格で安定的に入手可能で、特定のエネルギー資源への依存度が低く、エネルギーセキュリティが確保された社会。③誰もが生活の質を向上させつつも、地球環境への負荷が少なく、経済と環境が両立した社会。④技術革新を進め、先進技術が広く利用される社会。この中で、資源小国であるわが国は、先導的役割を果たして貢献する。⑤歴史的・文化的・経済的特性に応じた先進技術の活用や国際ネットワークの活用など、各国が自由な選択を行うことが相互に尊重される柔軟な社会」をメッセージに込めた。

これらのビジョンを実現するために、表2の基本的考え方、つまり、技術の開発・利用によって資源制約および環境制約を長期的に解決するために必要となる技術スペックおよび時期等をバックキャスト的に整理した。バックキャストには表3のような特徴がある。化石資源の制約や二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）濃度変化は100年のオーダーで考える必要があること、さらに発電施設や大規模インフラの構築には数十年のリードタイムを考える必要があることから2100年を見据えたわけであるが、従来のフォアキャスト的手法では2100年まで検討することは無理があると思われる、今回はバックキャスト的な手法を用いた。

## 2. 制約条件の想定

今回の検討の制約条件として、主に資源制約および環境制約の2つを考えた。

資源制約として悲観的なものから楽観的なものまで様々な化石資源生産のシナリオがあるが、石油生産のピークとして2050年、天然ガス生産のピークとして2100年を仮定した。なお、生産量は、経済的要因や国際情勢など

表3 フォアキャストとバックキャスト

	Forecasting	Backcasting
目的	どのような将来になる？	どのような将来であるべき？
手法	過去の趨勢を基にした現在からの延長(予測)	将来のあるべき姿からのからの逆算。
有効性	不連続な変化が生じない場合に有効。短・中期的。	将来のビジョンが明らかである場合。
課題	外挿した将来と目的とする将来の整合性をいかにとるか。	具体施策の「荒唐無稽」さの見極め、いかにリアリティを高めるか。

様々な要因によって左右されるものである。それらの状況によっては、2050年あるいは2100年の目標を実現するための技術の開発を前倒し、あるいは後倒し、時間軸は幅を持って考える必要がある。より具体的には2050年頃には石油を使用しなくてもよい技術を、2100年には天然ガスも使用しなくてもよい技術を備えろと考えることができる。

環境制約は次のように考えた。産業革命以前のCO<sub>2</sub>濃度の2倍（550 ppm）で安定化させるためには、「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）のシナリオを参考に、CO<sub>2</sub>排出量を2050年、2100年ともに現状並みに抑える必要がある。ここで、世界全体で共通の目標を掲げるため、国内総生産（GDP）当たりのCO<sub>2</sub>排出量（CO<sub>2</sub>/GDP）を指標にした。世界のGDPの伸びを2050年に2000年の3倍、2100年に同10倍程度と想定し、CO<sub>2</sub>/GDPを2050年に2000年の3分の1、2100年に同10分の1とする。これは、2050年には世界全体の平均が現状の日本並み、2100年には現在の途上国が現状の日本並みになることに相当する。目標指標をGDP当たりとしたため、今後、10倍以上にGDPが伸びる国はCO<sub>2</sub>排出量の増大を許容することになる。逆に日本は今後の大きなGDPの伸びが期待できないが、CO<sub>2</sub>/GDPを同じだけ改善する。日本のGDPの伸びを2050年に1.5倍、2100年に2.1倍と想定しているため、CO<sub>2</sub>排出量としてはそれぞれ50%削減、80%削減の必要があるが、技術革新によってそれを達成する。それは、将来にわたって世界を技術でリードすることにつながるものと思われる。

表4 2100年のエネルギー需給構造：3つのケース

ケースA： (石炭)	比較的資源量の豊富な石炭を用いて電力あるいは水素を供給する。ただし、CO <sub>2</sub> 排出を伴うため、発電設備や産業分野の大規模設備ではCO <sub>2</sub> の回収・隔離を行う。
ケースB： (原子力)	原子力を最大限に利用して電力あるいは水素を供給する。
ケースC： (再生可能エネルギー)	再生可能エネルギーを最大限に利用して電力あるいは水素等の燃料を供給する。ただし、再生可能エネルギーでは全需要量を賅うことが困難なため、需要側での省エネルギーを実施することが必要。

### 3. 3つの極端ケースの設定

2100年でのエネルギー需給構造を想定することは困難である。そこで、表4に示す3つの極端なケースを設定した。つまり、いずれも極端なケースであり、後述するように単独で考えるとかなり無理がある。しかしながらあえて極端なケースを想定することにより、厳しめの技術スペックを明らかにし、将来どのようなエネルギー供給構造になっても備えられるよう技術を洗い出した。したがって幾分過剰スペックになっている。しかしながら、海外をも視野に入れ、柔軟な選択ができる社会を目指すためには意味があるものと思われる。技術以外の要因をも加味して、今回洗い出した技術から重要技術を選択するのは今後の課題である。

今回の検討では、「あえて具体的な社会像、例えば、水素社会、バイオマス社会、あるいは、分散型か都市集中で集合住宅が増えるなどいくつかの社会像を描いて、そこからバックキャストすべき」という意見もあったが、想定する社会にならなければ制約を克服できない危険性がある。どのような社会になっても、制約を克服できるような技術をできるだけ備えておこうという姿勢で検討を行った。

### 4. 分野の設定と分野ごとの特徴の整理

全体目標を3つのケースで実現するためのエネルギー技術の検討を、産業、民生、運輸、および大規模な発電や燃料の製造・供給を行う転換分野の4分野に分けて進めた。既存のロードマップは技術分野ごとに整理されることが多いが、必要な技術群の見落としを少なくすること、分野ごとの将来イメージを描きやすいこと、および、統計データを利用しやすいことから需要分野ごとに検討することとした。

全体目標であるCO<sub>2</sub>/GDP改善は、下式の考え方で分野ごとに必要な技術群を整理した。

ここで、「効用」とは、生活・福祉の質、物質・知識の蓄積など、人類が経済活動によって享受する便益の量の概念を表し、本来は質的なものであるが、分野ごとに量的なもの置き換えた。例えば、民生分野では将来の家電機器などの増大による生活の質の向上と考えて「エネルギー需要」に、運輸分野では輸送量「人・km」あるいは「トン・km」に、産業分野では業種によって異なるため、「製造量×製品の価値」とした。より良い指標の検討が必要かも知れないが、ここでは世界全体で共通に考えることができ、できるだけ簡単

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{GDP}} = \frac{\text{CO}_2}{\text{一次エネルギー需要}} \times \frac{\text{一次エネルギー需要}}{\text{最終エネルギー需要}} \times \frac{\text{最終エネルギー需要}}{\text{効用}} \times \frac{\text{効用}}{\text{GDP}}$$

非化石エネルギー化、 CO <sub>2</sub> 回収・隔離	転換効率向上	省エネ・高効率利用、 省マテリアル	
-------------------------------------	--------	----------------------	--

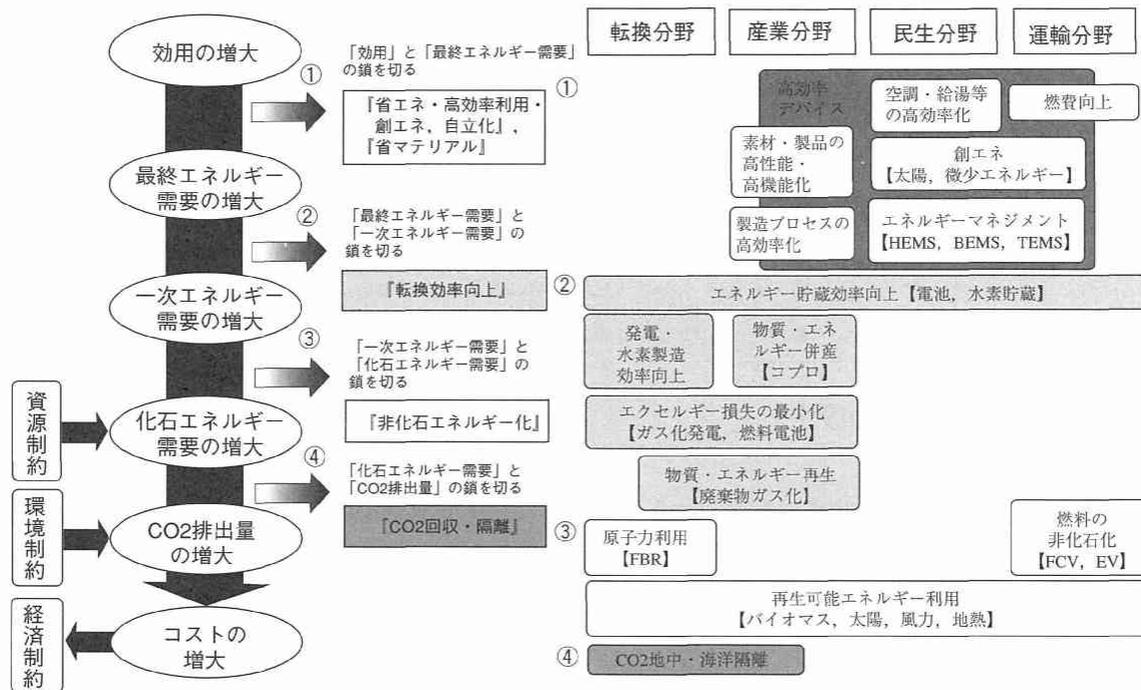


図3 制約克服のための連鎖脱却と技術の全体像

な指標ということで選んだ。

また、省エネルギーや高効率化を考えないBaU (Business as Usual, 趨勢的) な最終エネルギー需要はGDPが伸びる割合と同じ割合で伸びる(正比例する)と仮定した。つまり、エネルギー需要のGDP弾性値を1とおいたことになる。現実には、先進国は1以下であることが多いが(最近のわが国の最終エネルギー弾性値は0.8程度)、ケースA, Bのように省エネルギーに依存しないケースでは1に近いと思われること、先進国以外では1以上の国が多いことから、世界全体で共通の前提として「1」とおいた。ちなみに、1979~1986年の日本のエネルギー弾性値は-0.14で、GDPの増大にもかかわらず最終エネルギー需要は減少した。これは主に産業界での省エネルギー等の努力によるものである。この弾性値で計算すると、2100年にGDPが2.1倍になると最終エネルギー需要は2000年の0.9倍(=2.1<sup>-0.14</sup>)となり、(最終エネルギー/GDP)は0.43倍(=0.9÷2.1)となる。つまり、革新的な技術の開発により、この7年間以上のドラスティックなエネルギー需要削減を図るとともに、非化石化や転換効率向上なども行わなければ、2100年時点のCO<sub>2</sub>/GDPを2000年の

CO<sub>2</sub>/GDPの10分の1にする目標は達成できない。これらの観点で分野ごとの特徴を整理したものが図3である。

### 5. 分野ごとの検討

以上のような検討の枠組みを作成し、2005年1月に分野別のワークショップを開催し、2月から本格的に分野別の検討に移った。分野ごとの特徴を整理するとともに、全体目標(化石資源の生産ピークおよびCO<sub>2</sub>/GDP)を各分野にブレークダウンした。表5に3つのケースの分野ごとの特徴をまとめる。

ケースA, Bは、主に転換分野での努力により資源制約・環境制約を克服するものである。転換分野からのエネルギー供給量は、GDPが約2倍になり、電化・水素化率を約4倍(2000年では約20%)にする必要があるため、2×4で約8倍が必要となる。全体の電気・水素化率を100%としていないのは、産業界での原材料としての化石資源の使用および航空機燃料など電化・水素化が困難と思われる分野を考慮している。産業、民生、運輸の需要分野は、石油・天然ガスから電気ある

表5 3つのケースの分野毎の特徴

	ケースA 石炭等の化石資源と CO <sub>2</sub> 回収・隔離の最大 利用ケース	ケースB 原子力の最大利用 ケース	ケースC 再生可能エネルギー の最大利用と究極の 省エネルギー実施 ケース	
転換分野	発電・水素量 (現状総発電量比)	約8倍	約8倍	約2倍
	CO <sub>2</sub> 回収・隔離量 (産業分野含む)	約40億t-CO <sub>2</sub> /年	—	—
産業分野	化石資源消費時 には8割以上を炭 素回収・隔離	原材料・還元材 以外は、全て電 気・水素で賄う	エネルギー需要を 70%低減	
民生分野	電気・水素で 100%供給	電気・水素で 100%供給	省エネ・創エネ等 によりエネルギー 需要を80%低減	
運輸分野	電気・水素で 100%供給	電気・水素で 100%供給	省エネ・燃料転換 によりエネルギー 需要を70%低減	

いは水素にシフトする技術を備える。ただし、産業分野の製鉄や石油化学など化石資源を用いる場合にはCO<sub>2</sub>の回収・隔離技術が必要となる。

困難なのはケースCの場合である。省エネなどによるエネルギー需要の削減がなければ、再生可能エネルギーにより8倍の供給が必要となる。しかし、太陽光、バイオマスなどの賦存量をある程度試算しても、8倍ものエネルギーを供給することは困難であり、70～80%のエネルギー需要の削減が必要となる。分野別の需要構造があまり変わらないとの想定を行い、エネルギー需要の削減を各分野でほぼ同程度実施するとした。また分野内でも、例えば、民生分野の家庭と業務の割合や、運輸分野でモーダルシフト\*\*による自動車のシェア減少などは想定せず、各セクターではほぼ同程度の削減率として検討を始めた。ただし、産業分野においては既に高い効率で生産活動が行われているため、業種の垣根を越えた技術が必要である。

分野間での整合性を取りつつ、分野ごとに検討した目標値が蘆田氏寄稿の表4～7である。産業分野では、製造エネルギー原単位の改善、業種の垣根を越えた物質エネルギー再生などに

より、必要エネルギーの70%削減を、民生分野では、省エネとともに太陽光発電や身の回りの微小エネルギーによる創エネなどで80%削減を、運輸では省エネと水素または電気への転換などにより70%削減となっている。

また、再生可能エネルギーは時間的変動が大きいこと、供給と需要のパターンが一致しないこと、および立地が需要地と離れていることなどから、分野間で共通な技術として、エネルギー貯蔵や系統制御等のエネルギーマネジメントなどが重要となってくる。

以上の目標は2100年におけるものであるが、2050年あるいは2030年もマイルストーンとして目標値を設定して、その目標を達成するために必要な効率等の技術スペックの検討を行い、さらに、その技術スペック実現のための技術群、あるいは個別技術の検討を行った。

表5に示した3つのケースについて見ると、ケースAでは、発電および水素製造設備の確保およびCO<sub>2</sub>隔離量の確保が問題となる。また、このケースでは石炭の資源量も無視できなくなる。ケースBでは原子力発電所の立地の問題がある。ケースCは再生可能エネルギーをどこまで導入できるか、およびエネルギー需要をどこまで削減できるかなどの課題が

\*\* モーダルシフトとは、貨物輸送をトラック輸送から列車輸送に切り替える（またはその逆）こと。

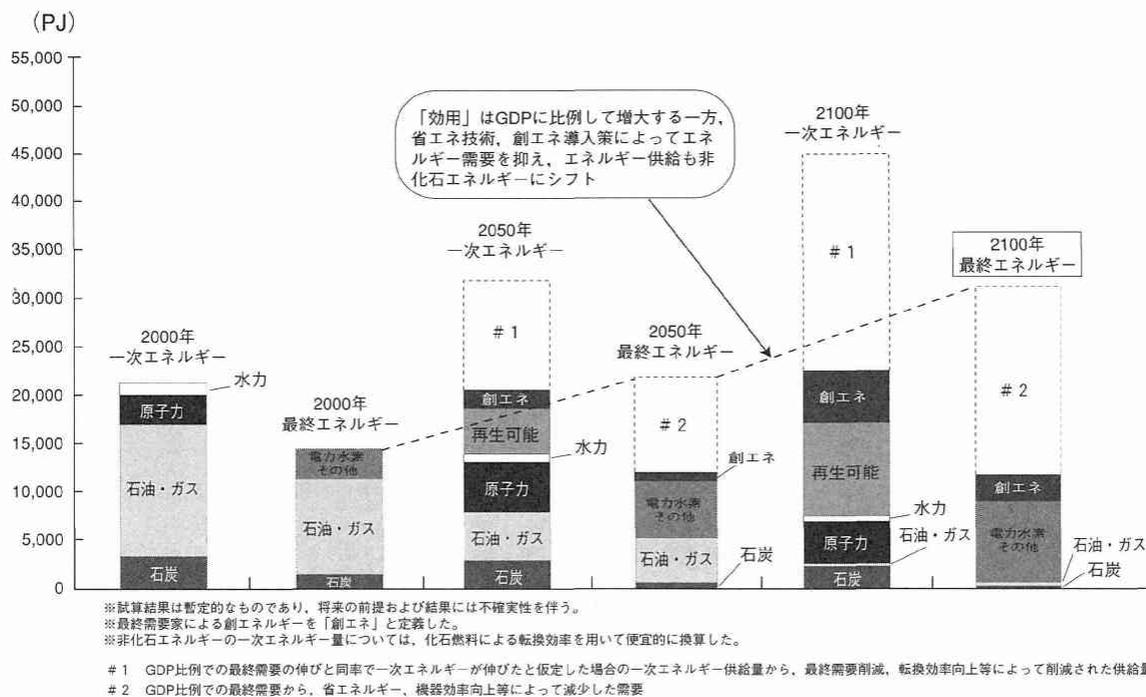


図4 エネルギー需給構造の一例

あり、それぞれ単独で考えると無理な部分がある。3つのケースの技術が融合したイメージ、例えば、短中期的には必要に応じてCO<sub>2</sub>回収・隔離により大気中CO<sub>2</sub>濃度増大を回避し、長期的に見れば再生可能エネルギーを最大限活用しつつ、省エネを究極的に行い（ケースC）、原子力を安定的に運転していく（ケースB）ことが持続的な社会としては望ましい組み合わせと考えられる。ただし、このような各ケースの評価、組み合わせは今後の情

勢等によって変わり得るものであり、技術的な備えとしては、将来の各時点における社会経済情勢、技術の進展状況等を見つつそれぞれの研究を進めていくことが重要である。

## 6. その他

今回検討した各分野の技術スペックにより全体目標を達成することができるかは、モデル計算によってラフな検証を行っている。結

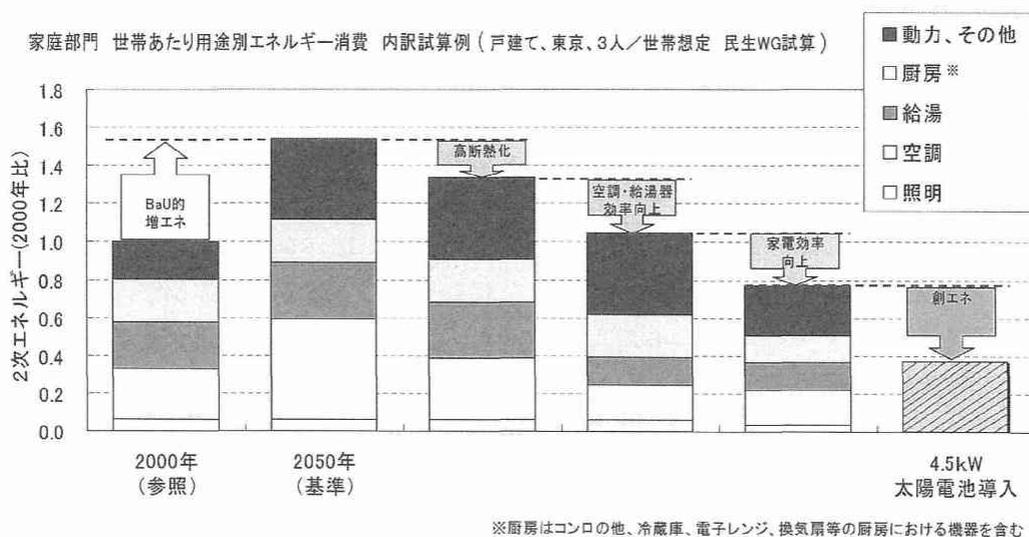


図5 目標達成のための技術スペックの検証例

果の一例が図4である。また、分野内でもある程度検証を行いながらロードマップの作成を行った。民生分野での検討例を図5に示す。2050年にBaU的に増大したエネルギー需要を、建物の高断熱化、空調・給湯器等の効率向上、照明や種々の家電機器の効率向上により約50%削減し（目標値は35%削減）、太陽電池導入による創エネでさらに25%削減し（目標値は25%削減相当）、転換分野に依存するエネルギー必要量の60%削減を達成している。

今回の検討では「核融合」など、資源制約・環境制約を一挙に解決しうる技術を取り上げていない。技術的な不確実性があるとともに、今回想定した制約条件の解消のために必ずしも必須とはならなかったためである。しかしながら、こうした技術が将来実現した場合には、将来のエネルギー供給源の選択肢となる可能性を有している。その他にも、今回取り上げることができなかった技術の研究開発により、新たな線がロードマップに加わることを期待する。

## 7. おわりに

図6に、今回の検討で行った委員会等の会議の開催状況を示す。約1年間で、委員会8回、全体WG20回、分野別WGが計33回と、週1回以上のペースで会議が開催された。さらに、事務局会議や幹事会などの打ち合わせを含めると数え切れない。また、現在パソコンに残っている「超長期」とタイトルが付いているメールだけでも4,000通近い。

赤井誠全体WG主査を初めとした委員の方々、関係業界や省庁の方々など、連絡用リストは200名を超える。また、研究所内でも半数以上の研究員の協力を頂いた。本来であれば全員の名前を列挙して感謝すべきであるが、紙幅に限りがあるので、本誌面での感謝の言葉で換えさせて頂きたい。今回策定した技術戦略マップが、今後の研究開発マネジメントの「インフラ」として関係者の方々に活用され、さらに将来時宜を得て改訂して頂けることを願う。

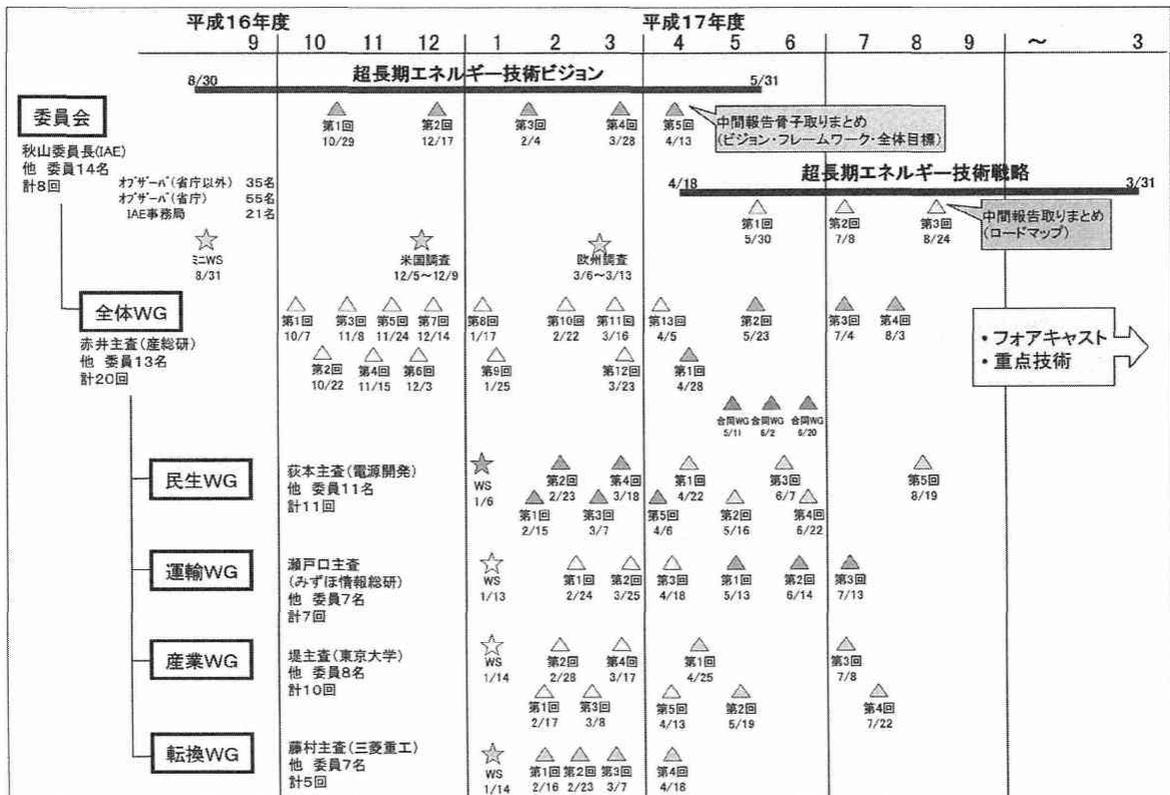


図6 検討会議の開催状況

[寄稿]

## 京都議定書目標達成計画と地球温暖化対策\*

豊島厚二 (経済産業省 産業技術環境局 環境対策課 課長補佐)



### はじめに

京都議定書が今年2月に発効し、日本は第1約束期間(2008年~2012年)の平均で、温室効果ガスの排出量を1990年比-6%にする義務が発生しました。これを受け、2005年~2007年の3年間にどのような対策を講じて第1約束期間での削減準備をしていくかという観点で、「京都議定書目標達成計画」が4月28日に閣議決定されました。

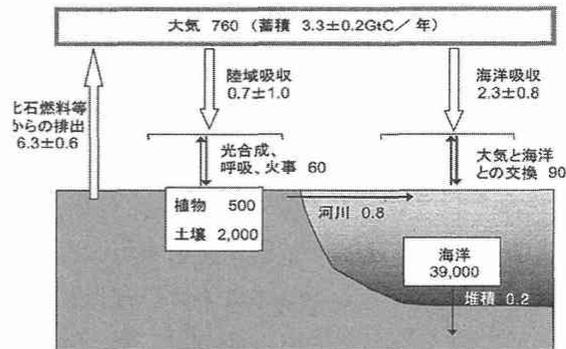
本日は、この「目標達成計画」の内容を一通り紹介したいと思います。

### 地球温暖化問題の展望と京都議定書

#### 温暖化問題の中長期的展望

地球温暖化を引き起こす炭素の循環を図1に示します。二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を主とする化石燃料等からの温室効果ガスの排出量(炭素換算)は、6.3ギガトンカーボン(GtC)/年です。このうち、陸域に吸収されるものが0.7GtC/年、海洋に吸収されるものが2.3GtC/年で、この2つを差し引いた3.3GtC/年が大気に蓄積されているわけです。

根本的には、温室効果ガスの排出量を半分



注1) 枠内の数字はGtC、矢印の数字はGtC/年を表す  
注2) ±の幅は90%信頼区間を表している。

(出所: A Special Report of the IPCC "Land Use, Land-use Change, and Forestry" (2000))

図1 炭素循環

ぐらい減らさないと根本的な解決にはなりません。しかし、いきなり半分にするのは難しいので、まずは試みとして6つの温室効果ガスを対象に、各国に削減義務を課しその達成を図ることになりました。それが97年12月に第3回国連気候変動枠組条約締約国会議(COP3)で採択された京都議定書です。概要を表1に示します。

表1 京都議定書の概要

●対象ガス(6種類): 二酸化炭素(CO <sub>2</sub> )、メタン(CH <sub>4</sub> )、一酸化二窒素(N <sub>2</sub> O)、 代替フロン等3ガス(HFC、PFC、SF <sub>6</sub> )
●基準年:1990年(代替フロン等3ガスは1995年)
●約束期間:2008年~2012年の5年間
●主要各国の削減率(先進国全体の目標は-5%) 日本:▲6%、米国:▲7%、EU:▲8%、ロシア:±0%
●発効要件 ・条約締約国の55カ国以上が批准 ・排出義務を負う国(先進国)のうち、1990年の排出量の55%を占める国が批准

\*本稿は、今年5月26日の当所月例研究会(第235回)におけるご講演を本誌掲載用にテープ起こしたものです。

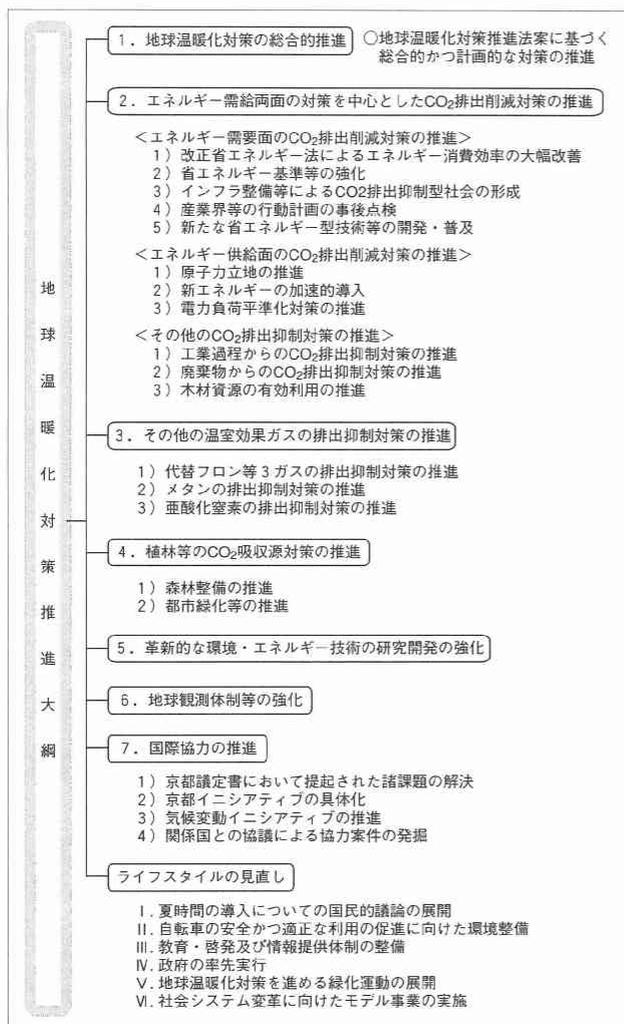


図2 98年大綱に基づく施策の体系

わが国の対応

日本はその翌年（1998年6月）に「地球温暖化対策推進大綱—2010年に向けた地球温暖化対策について—」（以下、98年大綱）を策定し、基本的な方向性を示しました。98年大綱に基づく施策の体系を図2に示します。

ところが、翌99年のわが国の温室効果ガスの総排出量は13億1,400万t-CO<sub>2</sub>となり、98年大綱

表2 京都議定書に関わる主な出来事

1994年	国連気候変動枠組条約が発効
1995年	第1回締約国会議（COP1）～ベルリン
1997年	第3回締約国会議（COP3）～京都 →「京都議定書」を採択
1998年	「地球温暖化対策の推進に関する法律」制定 「地球温暖化対策推進大綱」（98年大綱）を決定
2001年	第6回締約国会議（COP6再会合）～ボン 第7回締約国会議（COP7）～マラケシュ
2002年2月	米ブッシュ政権が「地球温暖化政策」を発表 →京都議定書から離脱
3月	98年大綱を改定 →「地球温暖化対策推進大綱」（02年大綱）を決定
6月	日本が「京都議定書」を批准
6月	「地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を改正する法律」の公布
2004年11月	ロシアが京都議定書を批准
2005年2月	京都議定書が発効（16日）
4月	「京都議定書目標達成計画」を閣議決定（28日）

に基づく諸対策では、2010年時点での総排出量が基準年比で約7%増になると予想されました。京都議定書で約束した-6%を達成するには、約13%相当分の追加的排出を削減する必要が出てきました。そこで、2002年3月、様々な追加対策を盛り込んだ「温暖化対策推進新大綱」（以下、02年大綱）が策定され、02年大綱に基づいて色々な対策を進めてきました。02年大綱の対象が2004年度までであることと京都議定書が発効したことを受け、02年大綱を見直し、より具体的になったのが今回の「京都議定書目標達成計画」というわけです。

-6%達成の厳しさ

日本の世界での排出量の位置づけについて見ます。二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）等については、他の先進国に比べて優秀です。日本の国内総生産（GDP）は世界の16%ですが、CO<sub>2</sub>排出量はわ

表3 CO<sub>2</sub>排出量の国際比較

	日本	EU15	米国	中国	ロシア	インド
世界全体のGDPに占める割合（2001年）	16%	29%	26%	4%	1%	1%
世界全体のCO <sub>2</sub> 排出量に占める割合（2001年）	5%	13%	24%	13%	6%	4%
同じGDPを生むために排出するCO <sub>2</sub> （日本を1とした場合）	1	1.6	3.2	12.2	20.1	10.3

（出所：GDPはOECD2003、CO<sub>2</sub>はIEA2003）

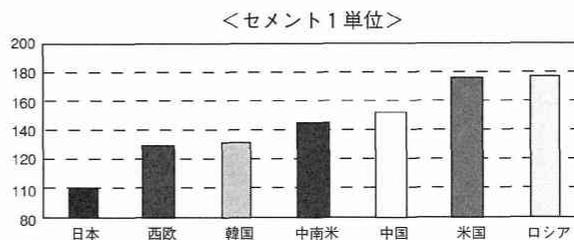
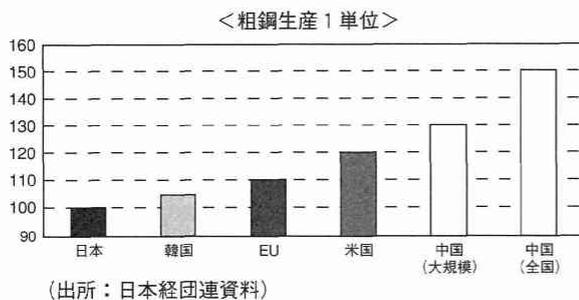


図3 生産に関わるエネルギー効率の国際比較

ずか5%程度です。GDPに対するCO<sub>2</sub>排出量の比率は16分の5(0.31)となります。米国はGDPが世界の約25%、CO<sub>2</sub>排出量も約25%で、GDPに対するCO<sub>2</sub>排出量の比率は1です。これは日本の3.2倍です。他方、中国、ロシアが日本と同じだけのGDPをあげようとする、表3に示すように中国は日本の12.2倍、ロシアは20.1倍のCO<sub>2</sub>を排出することになります。

図3に示すように、粗鋼生産およびセメント生産に必要な諸外国のエネルギー消費量は、日本よりもかなり多いです。

このように省エネ、効率化が非常に進んだ日本においてこれ以上の対策推進はかなり厳しい部分があります。しかし、-6%という国際公約もあるので、それを達成できる姿を何とか描こうということで「京都議定書目標達成計画」ができあがっています。

ことです。長期的・継続的な排出削減にも現段階から取り組んでいく必要があるという認識で作られています。

## (2) 基本的な考え方

基本的な考え方は、環境と経済の両立です。経済を抑制して、温室効果ガスを減らすという極端なことはやりません。その時に一番重要になってくるのが技術革新です。つまり、経済活動のレベルを維持しつつ技術で温室効果ガスを削減していこうということです。

進め方としては、あらゆる削減ポテンシャルを顕在化させるために、すべての主体の参加連携を促進していき、多様な政策手段を活用していきます。こういった計画を着実に進めていくために、評価見直しプロセスの重視を初め、最終的には、米国や途上国が加入していない現状を変えるための国際的連携の継続ということが目標達成計画に整理されています。

## 目標達成計画の概要

### 目標達成計画のポイント

「目標達成計画」は大きく4つに分かれています。まず、「国として目指すべき方向」、「基本的な考え方」、「対策と施策」(ガスごとの個別対策、横断的施策、基盤的施策)、最後に、「推進体制」です。

#### (1) 国として目指すべき方向

目指すべき方向は、-6%を確実に達成する

## (3) 対策と施策

### ① ガス毎の対策と施策

#### [エネルギー起源のCO<sub>2</sub>削減策]

技術革新を活用して、エネルギー関連の機器対策、省エネを中心とした対策、そして今までの温暖化大綱などでもあまりうたわれてきていなかった事業所など施設主体単位の対策で、より削減の可能性が高まるのではないかと思います。

従来からの機器単位の対策に加え、もう少し広い目で見たとときの削減ポテンシャルということで、CO<sub>2</sub>排出量の少ない地域社会経済

構造への転換を図ることをうたっています。

例えば、六本木ヒルズなどでは天然ガスを使った地域冷暖房を導入することで、CO<sub>2</sub>を通常より2割以上削減しています。これは、熱と電気と両方、熱の方も階層的に利用してトータルでの熱効率を上げることで実現できているということです。

また、省CO<sub>2</sub>型物流体系への転換も可能と考えられています。これまでは荷主の都合で、物流業者は必ずしも荷物がいっぱいにならなくても運ばなければいけないとか、色々な場所に別々に運ばなければいけないなど様々な障害がありました。これを荷主と物流業者が連携することで少しでも効率的な物流体系を作っていけるのではないかということです。

新エネルギーをうまく組み合わせ、エネルギーをある程度地域で需給することにより、エネルギーの利用効率を高める地域的な広がりを持った対策も進めていきます。

さらに、都市や地域の構造、公共交通インフラを含む社会経済システムを省CO<sub>2</sub>型に変えることで、新たな削減ポテンシャルが出てくるとも考えられます。

#### [非エネルギー起源のCO<sub>2</sub>削減策]

例えば、セメントの生産工程で出てくるCO<sub>2</sub>などを、混合セメントを利用することで減らしていくなどの対策が盛り込まれています。

#### [メタン]

メタンについても廃棄物の最終処分量の削減などによって減らしていく対策が盛り込まれています。

#### [一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O)]

下水汚泥の焼却施設における焼却の高度化によって排出量を減らしていくことが盛り込まれています。

#### [代替フロン等3ガス]

温室効果の係数が非常に大きいので、今産

業界の方で自主的な計画を作って削減を進めています。そういった取り組みをさらに進めるとか、代替物質の開発などに努めて削減していこうという形になっています。

#### [森林吸収源]

これは農林水産省が中心に森林を整備していくことになっています。京都議定書上、ただ単に森があればいいというわけではなく、それが管理され吸収量が把握される状況にないと、吸収源としてカウントされないからです。

#### [京都メカニズム]

ガスごとの対策が位置づけられています。

#### ② 横断的施策

#### [国民運動の展開]

京都議定書の発効、あるいは今年の夏が非常に暑かったこともあって、温暖化問題がかなり一般の国民の方々にも浸透してきている状況にはありますが、まだ個人が具体的に対策に取り組むという状況には至っていません。産業部門は比較的対策が進めやすいというのもあって、エネルギー起源CO<sub>2</sub>が減少傾向にあります。ところが、民生部門は、2002年度で+33%と大幅に増えています。2010年度に向けて何とか減らしていくための重要な柱が国民運動の展開なのです。

国民運動を起こすために政府ができる方策の1つは国民行動のための目安を提示することです。例えば、自分と似たような生活環境の人が一体どのぐらいのエネルギーを消費しているのか、平均的な数値との比較を示すことをイメージしています。例えば、戸建てで3人家族の電気代やガス代は通常何円なのかが分かれば、自分のCO<sub>2</sub>排出量が多いか少ないか認識できるようになるでしょう。少なくともそれが分かれば少しはCO<sub>2</sub>排出削減運動につながるのではないかと考えています。

広報面でも、各省が連携して戦略的な広報活動をしていこうということで、今、年間スケジ

ユールを検討しているところです。これまでも夏と冬に行ってきた「省エネキャンペーン」などに代表される「温暖化対策キャンペーン」、あるいは、環境省が中心に年末にやっている「地球温暖化対策推進月間」といったイベントともうまくリンクさせようとしています。

さらに、例えば愛知万博みたいなどころを活用するとか、国全体で集中キャンペーンを張っていく形で、1年間を通して温暖化対策を常に意識できるようにしていこうと考えています。

さらには、例えば産業界の方々に協力いただいて、公共交通機関の利用促進を進めたり、企業や学校等における環境教育、地域における対策を進めるための体制整備などの取り組みを通じて、国民の方々の意識を高めて、一種の国民運動につながっていけばいいのではないかと思います。

こういう国民運動を展開するに当たっても、まずは、政府、地方自治体が率先して模範となるよう取り組んでいくことを掲げています。公的機関の率先的取り組みは、目標達成計画と同じ4月28日に「率先実行計画」が閣議決定されています。政府が率先して社会全体の普及を牽引することで、平成17年度には政府の事務事業から排出される温室効果ガスの総量を13年度比7%削減する計画を掲げています。それを受け、各省庁も18年度の7%削減の達成を目指して計画を作っているところです。その中では、新エネルギーの導入、電力

のCO<sub>2</sub>排出量が少ないエネルギー源の選択、電力の使用量を減らすためのESCO\*\*の導入、公用車の低公害車比率の向上といった取り組みを盛り込むことになっています。「率先実行計画」については進捗状況の確認、評価結果を公表することになっています。

#### [排出量の算定報告公表制度]

温暖化対策推進法、今度改正する省エネ法を活用してと事業所からの排出量の算定報告公表制度を作っていくことが掲げられています。

#### [ポリシーミックスの活用]

あらゆる政策手段を活用しようということで、環境税についても引き続き検討していくことが目標達成計画に盛り込まれています。

### ③ 基盤的施策

温室効果ガスごとの横断的施策を展開するに当たって、さらに基盤となる部分ということで、排出量や吸収量を算定できる体制の整備、あるいは長期的な視点を含めて技術開発や調査研究の推進が盛り込まれています。それから、国際的な連携を確保していこうということが過去やられています。

### (4) 推進体制

進捗状況を毎年点検します。目標達成計画は3年間の計画で、最後の2007年度には定量

表4 排出量の評価方法

	2010年度見通しの根拠 (追加対策ケース)				
	エネルギー供給CO <sub>2</sub> 排出原単位	×	エネルギー消費原単位	×	活動量
産業部門	・新エネルギー導入により 1910万k <sub>0</sub> 削減 ・電力の使用端CO <sub>2</sub> 排出原単位を 90年度比20%改善	×	産業活動 (IIP) 当たり 7.3%改善	×	鉱工業生産指数 (IIP)
民生部門					
家庭部門		×	一世帯当たり 18.0%改善	×	世帯数
業務部門		×	床面積当たり 16.3%改善	×	床面積
運輸部門		×	輸送量当たり 16.6%改善	×	輸送量

活動量の単位ごとに分類

\*\*ESCO (Energy Service Company) とは、エネルギー効率改善のためのニュービジネスで、省エネルギー改善に必要な技術・設備・人材・資金などを包括的に提供し、顧客の省エネルギーメリットの一部を報酬として享受する事業。ESCO事業者は、事業の遂行にあたり、顧客との間でエネルギーサービス契約を締結し、一定の省エネルギー効果を保証する。

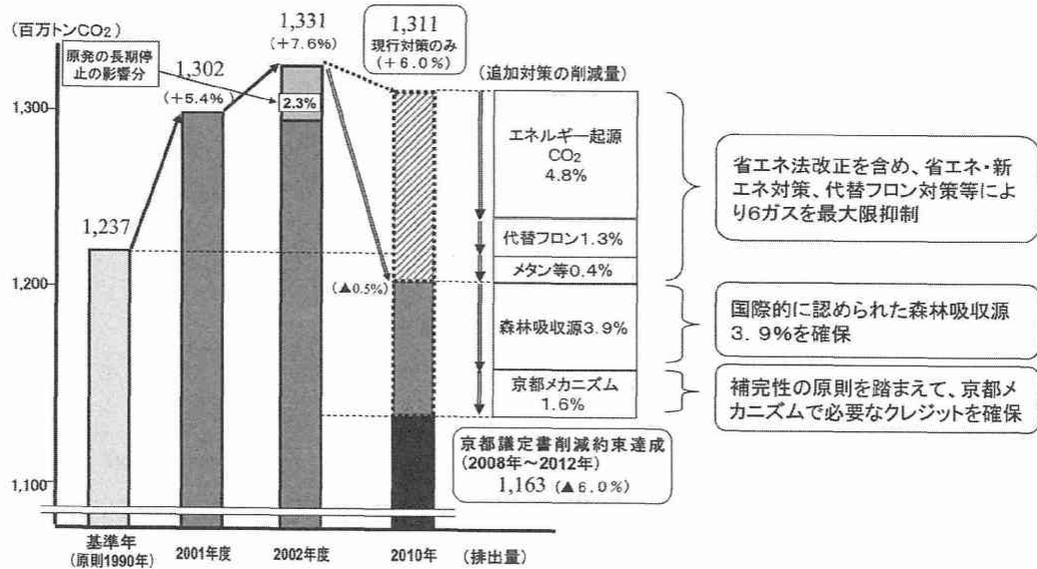


図4 温室効果ガス削減へ向けて

的な評価見直しを行い、2008年度からの第1約束期間に突入していくことになっています。国を挙げてということで、地球温暖化対策推進本部（本部長は小泉総理）を中心に各省が連携をとりながら、国民、産業界も巻き込んで進めていくことを掲げています。

その施策の評価が行えるよう、目標達成計画では対策評価指標を設定しています。必ずしもすべてがCO<sub>2</sub>排出量に換算できるわけではありませんが、表4のように、最終的なCO<sub>2</sub>排出量というのは、供給段階でのCO<sub>2</sub>排出原単位、エネルギーを消費する段階での原単位（エネルギ

ー消費効率、省エネ度）、それに活動量をかけて算出されます。原則としてエネルギー供給段階なり消費段階での原単位の改善が対策になってきます。ですから、このあたりを対策の指標として掲げて、しっかり削減できているか測るわけです。削減できていても活動量が大幅が増えてCO<sub>2</sub>排出量が増えた場合には、追加対策を検討していこうということです。

それらの対策を全体積み上げて数字を見てもみますと、図4で示すように、温室効果ガス全体で2002年度に13億3,100万トン（基準年より+7.6%）という状況にあります。2003年度

表5 温室効果ガスの排出抑制・吸収量の目標

区分	目標		追加対策の削減量
	2010年度排出量 (百万 t-CO <sub>2</sub> )	1990年度比 (基準年総排出量比)	2010年度現状対策ケース (基準年比+6%)からの 削減量
温室効果ガス	1,231	▲0.5%	▲6.5%
①エネルギー起源CO <sub>2</sub>	1,056	+0.6%	▲4.8%
②非エネルギー起源CO <sub>2</sub>	70	▲0.3%	
③メタン	20	▲0.4%	
④一酸化二窒素	34	▲0.5%	
⑤代替フロン等3ガス	51	+0.1%	
森林吸収源	▲48	▲3.9%	(同左) ▲3.9%
京都メカニズム	▲20	▲1.6%	(同左) ▲1.6% <sup>※</sup>
合計	1,163	▲6.0%	▲12%

※削減目標(▲6.0%)と国内対策(排出削減、吸収源対策)の差分

は13億3,900万トン（図には未表示）ですから、基準年の90年と比べ8.3%と増加してきています。ただし、2002年度の数字には原子力発電所の長期停止の影響分（2.3%）があります。同じく2003年度はその影響が4.9%あります。

その状況から、2010年度を予測しますと「現行対策のみ」の場合、13億1,100万トン（基準年より+6.0%）と見込まれますが、これに「追加対策」としてエネルギー起源CO<sub>2</sub>の対策ということで省エネ、新エネ対策を講じ（-4.8%）、代替フロンやメタン等の排出抑制（-1.7%）を図る。それから森林吸収（-3.9%）、京都メカニズム（-1.6%）の対策を講じる。これらにより、2010年11億6300万トン（基準年より-6%）までもっていきけるのではないかとというのが「目標達成計画」です。これらの削減目標値については、基本的には従来の大綱と変わっていません。上記2010年の目標値のうち、温室効果ガスの部分を取り上げると、12億3100万トン（基準年より-0.5%）となります。この0.5%削減を達成するために表5に示す諸々の対策（主に国内対策）が考えられています。②、③、④を足すと-1.2%です。これらの部分は、元は-0.5%だったのですが、①を+0.6%と見た関係上、-1.2%まで必要ということで若干の強化をしています。

それから一番強化したのが代替フロン等3ガスの部分です。従来の大綱では+2%という目標を掲げていたのですが、削減が現状でも予想以上に進んでいることから+0.1%ぐらいまで抑えられるのではないかとということになりました。このエネルギー起源CO<sub>2</sub>の部分が従来の大綱と比べて大きく伸びてしまうところを、他の部分で吸収するという形で、国内対策-0.5%削減を何とか維持しようということで計画が積み上がっています。

#### 具体策の例

「目標達成計画」の別表で、エネルギー起

源CO<sub>2</sub>や代替フロンなど、ガスごとに個別具体的な対策と、それらの対策について具体的にどのような施策を講じていき、それによってCO<sub>2</sub>削減が何万トンぐらいできるのか示してあります。この別表は、ほとんどの対策について個々の対策ごとのCO<sub>2</sub>削減量を積み上げていくと、-6%になるという一覧表です。

#### 〔産業部門〕

大分対策が進んできているものの、さらに減らせる部分がないかということで、日本経済団体連合会などを中心に取り組んでいる「自主行動計画」がCO<sub>2</sub>削減量で4千数百万トンというの見込む対策を掲げています。「目標達成計画」では、これに加えて、省エネ法の改正によって省エネ義務がかかる工場の範囲を広げるとか、工場で使うさまざまな省エネ設備の導入を促進していこうという話が掲げられています。あと、産業部門では、面的な取り組みとして、複数事業者の連携などを進めていこうという話を新しく入れています。

#### 〔民生部門〕

「目標達成計画」では、これまで大きく増えてきてしまっている民生部門についても何とか排出量を減らしていこうということで、民生用の機器のトップランナーの強化、家庭で消費量の多い給湯器について高効率給湯器を普及していこう。省エネ法改正によって家電小売業者がその省エネ情報をちゃんと提供するようにしよう。あるいは、エネルギー事業者が情報をちゃんと提供するようにしようという話を盛り込んでいます。現行対策にこういった省エネ改正等の新たな対策を加えることによって、これまで3割くらい増えていた民生部門の排出量が10.8%増まで抑えられるという絵姿を描いています。それから、民生部門では省エネ法の改正で、例えば住宅建築物などについても省エネの取り組み義務を強化していこうとしています。

#### 〔運輸部門〕

省エネ法を改正し、これまで対象外だった

物流業者に省エネ義務を課すことによってモーダルシフトの推進を進めていこう。あるいは、新しく物流総合効率化法を制定して、物流の効率化を支援していこうという取り組みを進めていきます。

国土交通省中心ですが、運輸部門の対策として、自動車単体の対策に加え交通流対策などをしっかりやっていく。物流でも、人の運搬に伴うCO<sub>2</sub>削減と公共交通の利用促進といった取り組みを進めていくことが盛り込まれています。

#### [代替フロン]

代替フロンなどについても、フロンの回収強化を盛り込んでいます。自動車リサイクル法に基づくカーエアコン、家電リサイクル法に基づく家庭用エアコン、冷蔵庫、それからフロン回収破壊法に基づく業務用冷凍空調機器からの回収を強化しようということです。あるいは、工業プロセスなどでの排出量を減らしていこうという対策を掲げています。

#### [非エネルギー起源CO<sub>2</sub>やメタン等]

ゴミの処分量を減らすとか、下水汚泥の発

生量を減らしていこうということを掲げています。

#### [原子力発電の推進]

2003年度で見ると総排出量の4.9%が原発の長期停止の影響という状況です。これは安全の確保を大前提にしっかりと回復していったら、さらに稼働率を上げていこうということを盛り込んでいます。

#### [京都メカニズム]

6%削減のうちの1.6%分は京都メカニズムによって確保していこうとしています。これは従来の大綱と変わりません。京都議定書の第1約束期間が近づいてきましたが、実際に海外の削減量が日本の削減クレジットとして出るまでに3年～5年程度はかかるため、早急に事業を動かし始めなくてはいけないということで、既に表6に示すだけの事業を政府が承認し、さらに国連機関にも登録された事業も出てきています。

引き続きプロジェクトを発掘していくため、例えばプロジェクトの形成支援や案件発掘のための調査、情報提供を、また、実際のクレ

表6 日本政府が承認した京都メカニズムに基づくプロジェクト

平成17年4月21日現在

承認年月	種別	申請者	実施国	プロジェクトの概要	削減予測量 (万トンCO <sub>2</sub> /年)	支援担当 省 庁	プロジェクトの進捗状況
1	H14年12月	JI NEDO	カザフスタン	熱電併給所において高効率コージェネ設備を導入	6.2	経済産業省	受入国承認済み
2	H14年12月	CDM 豊田通商(株)	ブラジル	バイオマスを利用した鉄鋼生産	113	経済産業省	
3	H15年5月	CDM 電源開発(株)	タイ	ゴム木廃材を利用したバイオマス発電	6	経済産業省 農林水産省	
4	H15年7月	CDM イネオス ケミカル(株)	韓国	代替フロン(HFC23)の回収・破壊	140	経済産業省 環境省	登録済み
5	H15年7月	CDM 関西電力(株)	ブータン	未電化の村に小規模水力発電所を建設	0.05	経済産業省	登録審査中
6	H15年12月	CDM 日本ベトナム石油(株)	ベトナム	油田における随伴ガスを回収・利用	68	経済産業省	第三者機関審査中
7	H16年5月	CDM 住友商事(株)	インド	代替フロン(HFC23)の回収・破壊	338	経済産業省 環境省	登録済み
8	H16年6月	CDM 中部電力(株)	タイ	もみ殻を利用したバイオマス発電	8.4	経済産業省 環境省	
9	H16年7月	CDM 電源開発(株)	チリ	食品製造工場において燃料転換	1.4	経済産業省	登録審査中
10	H16年10月	CDM 東京電力(株)	チリ	豚のし尿から放出されるメタンガスを回収・燃焼	7.9	経済産業省	第三者機関審査中
11	H16年10月	CDM 東京電力(株)	チリ	豚のし尿から放出されるメタンガスを回収・燃焼	8.4	経済産業省	第三者機関審査中
12	H16年10月	CDM 東京電力(株)	チリ	豚のし尿から放出されるメタンガスを回収・燃焼	24.9	経済産業省	第三者機関審査中
13	H17年1月	CDM 昭和シェル石油(株)	ブラジル	廃棄物処理場から排出されるメタンガスを回収・発電	87	経済産業省	第三者機関審査中
14	H17年1月	CDM NEDO	ベトナム	ビール工場における蒸気システム等の省エネ	1	経済産業省	受入国承認済み
15	H17年1月	CDM 鹿島建設(株)	マレーシア	廃棄物処理場から排出されるメタンガスを回収・発電	6	経済産業省 国土交通省	
16	H17年2月	CDM 清水建設(株)	アルメニア	廃棄物処理場から排出されるメタンガスを回収・発電	13.5	環境省 経済産業省 国土交通省	第三者機関審査中
17	H17年4月	CDM 昭和シェル石油(株)	ブラジル	製紙工場の廃材によるバイオマス発電	18	経済産業省	

合計 年間 約850 万トン

ジットの獲得ということでは、まず、率先的に進めようとする事業者に対して政府が補助などを行い、クレジット取得に移っていくことに取り組む形にしています。

#### [技術開発の促進]

政府レベルでは日本はアメリカに次いでエネルギー分野の研究開発投資が多いです。引き続きエネルギー関連の研究開発投資を進めていくことにしています。

#### [法律的な手当]

法律的な手当の主なものは3つです。1つは温暖化対策推進法の改正。これによって温室効果ガスの排出量算定報告公表制度を作ろうと。これは平成18年度から施行するというので、今国会で議論しているところです。排出者自らが排出量の算定をすることによって自主的な取り組みの基盤を確立しようということで、一定の裾切りを設定する予定です。その裾切り以上の事業者について、事業所単位で6つのガスごとに排出量を算定し、それを毎年度国に報告する。国はそれを企業や業種、都道府県単位で取りまとめて公表することになっています。ただし、企業単位の情報などのうち社外秘の可能性のあるものについては、公表しないようにしていくことにしています。

省エネ法の改正によって、工場の省エネを強化します。対象となる事業所を1万カ所から1万3,000カ所程度（割合では7割から8割程度）に引き上げていこうということです。

運輸部門についても、計画を策定するとか、定期報告をするような義務を新たに設定しています。

住宅や建築物についても、特に住宅などを中心に若干省エネ措置の義務の範囲を広げるようなことをしております。

流通業務の総合化及び効率化の法律ということで、物流を効率化してCO<sub>2</sub>を削減しようという事業者に対して、支援措置として事業許可の一括取得、あるいは税制上の特例措置、資金の提供を受け易くする措置など、支援措置を講じる法律を国会に提出しているところです。

#### [環境税]

環境税については、政府税調や与党税調でも引き続き温暖化対策全体の中で検討を進めていくという形で終わっています。京都議定書目標達成計画の中でも、地球温暖化対策全体の中での位置づけ、その効果、国民経済や産業の国際競争力に与える影響、諸外国における取り組みの現状などを踏まえて、国民、事業者等の理解と協力を得るよう努めながら引き続き検討を進めていくべき課題ということになっています。説明は以上で終わります。（拍手）

[寄稿]

## バイオマスへの期待と現実

—森林バイオマスのエネルギー利用をどう進めるか\*—

熊 崎 實 (岐阜県立森林文化アカデミー学長)



### はじめに

#### 技術開発とバイオマス利用との距離

私が森林・林業に関わり始めて半世紀ぐら  
いになりますが、研究開発、技術開発という  
局面と実際に未利用バイオマスを使っていく  
こととの間には距離があると感じています。  
研究開発の方は、バイオマスを普及させてい  
くうえでネックとなっている技術面でのプレ  
ークスルーという話になるのでしょうか、私  
は、開発済みの技術がなぜ日本にうまく適用  
できないかという問題意識が先にあるわけ  
です。

十数年間、バイオマス研究に携わってき  
ていつも痛感するのは、バイオマスのエネルギ  
ー変換に関する限り、研究開発がすぐに事業  
化に結びつくわけではないということです。  
2年ほど前から『木質エネルギー』という季  
刊誌を作り始めました。既存技術を紹介し、  
それがどういう条件のもとで普及しているの  
か。これから普及させるにはどうしたらいい  
か。そういうところを狙いながら、学会での  
関心とは別の世界があるということを皆さん  
にも知ってもらおうと思ったからです。今日  
はそういうことにも触れながらお話をさせて  
いただきたいと思っております。

### バイオマスへの期待の変遷

#### 石油価格高騰と地球温暖化で脚光

1970年代半ばまでは、「木材をエネルギーに  
使うのは資源の浪費だ」と世界的に言われて  
いました。木材需要が増えていく中で安い化  
石燃料が流通していたからです。私が森林総  
合研究所へ入った1958年頃は、燃料として使  
われている木材をどうやって化石燃料に置き  
換えていくかという意味での「木材利用の合  
理化」がよく言われていたのです。

1970年代に石油危機が起き、原油価格が1バ  
レル35ドルから50ドルになるという予測がな  
される事態となり、木材がエネルギー源として注  
目されるようになったわけです。1981年にはバ  
イオエネルギーを見直す「新・再生可能エネル  
ギー国連会議」(ナイロビ)が開かれました。

ところが、その会議が開かれた直後から石  
油価格がどんどん下がっていき、1986年には  
1バレル10ドル以下にまで下落してしまいま  
した。それでバイオエネルギーへの関心が急  
速に薄らいでいったわけです。

それが1990年代になってから、地球温暖化の  
観点から再びバイオエネルギーが脚光を浴び  
る。私にとって忘れられないのは1995年発行の  
「気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第二  
次評価報告書」の「第二部会報告書」です。こ

\*本稿は、今年7月29日の当所月例研究会(第237回)におけるご講演を本誌掲載用にテープ起こししたものです。

の報告書にはバイオエネルギーを非常に重視したエネルギーシナリオが示されています。近未来ではバイオマスによる高効率発電、長期的には水素、メタノールの生産が中心となり、エネルギープラントがこれを支えるというシナリオです。

## 小規模燃焼技術の改善と普及

### IPCC予測とは異なった技術の推移

表1に示すように、バイオマスのエネルギー変換技術は3つに大別できます。不完全燃焼と非効率な熱利用を特徴とする昔ながらの薪や炭を燃やす在来型の変換が改良型へ向いました。木質でチップであるとか、ペレットのような燃料に形を変え、そこで完全燃焼と効率的な熱利用が実現してきたわけです。チップは、製材端材や間伐材を粉砕した木片の

表1 エネルギー変換技術の種類

<b>在来型</b> 木質燃料（薪や炭）の不完全燃焼と非効率な熱利用
<b>改良型</b> 木質燃料（チップ、ペレット）の完全燃焼と効率的な熱利用により熱効率、低エミッション、利便性において化石燃料の燃焼に劣らない
<b>近代型</b> 木材のガス化、液化などにより、電気、ガス、輸送用液体燃料などに変換

ことです。ペレットは、チップやおが屑、プレーナ屑などをさらに粉砕、乾燥、圧縮し、円柱状に成形した固形燃料です。

改良型は、燃料の直接燃焼ということについては在来型とほとんど変わりません。ただ熱効率と利便性が大幅に改善されました。今、ヨーロッパで主流になっているのは、この改良型だと思います。

近代型は木材のガス化や液化などですが、まだ十分に定着できる状況ではありません。私も十数年前、近未来では高効率発電ということで、木材をガス化し、コンバインドサイクルで発電する方式（効率40%以上）に期待していました。1990年代半ばには、西暦2000年を超えたら実用化しているという予測もありました。それなら何としてでも日本に導入しなければというのが私の考えだったわけです。ところが、それがなかなか実現しません。いくつかの大きなプロジェクトでデモンストレーションがなされもしましたが、まともに動いているのは1つもないと思います。

これは、木質燃料の供給源とも関係しています。図1に示すように、昔は、薪炭林から燃料用の木材を採っていました。それが、現在では建築材やパルプ材などの生産工程から出てくる残材や廃材を全部使うという形での利用になってきています。

「第二部会報告書」では、エネルギー作物を作ることが予想されていました。もしエネルギー植林が本格的に行われるということに

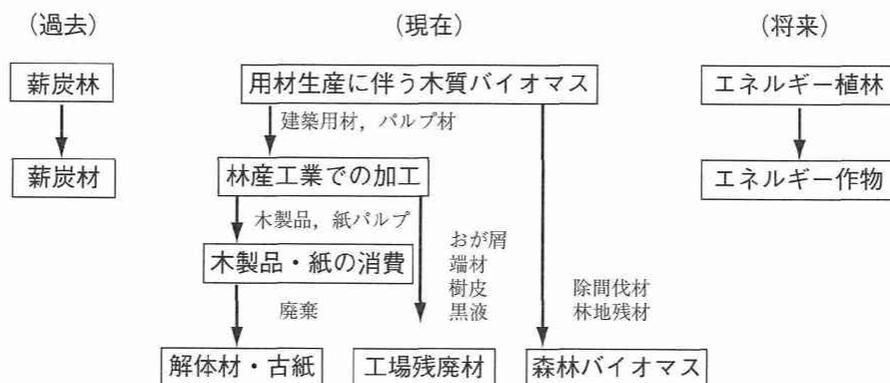


図1 木質燃料の供給源

なりますと、非常に均質なエネルギー材料が大量に集まってきて、色々な新しい変換技術が適用され、経済的にも成り立つようになります。ところが、木材生産や木材加工など色々なところから出てくる残材、廃材を使うことになると、出てくるバイオマスは非常に多様になります。これをうまく利用できるかは、林業・林産業がどういう格好でバイオマスを出してくれるかということが非常に大きな意味を持ち、それに強く制約されるというのが、現代の状況です。

### 欧州における小規模燃焼技術の大幅な改善

予想外だったのは、欧州でチップやペレットなどを燃料とする小規模直接燃焼の効率が大幅に改善されたことです。大規模燃焼なら、色々な仕掛けで木材が完全燃焼するようにできます。一酸化炭素(CO)などの排出も非常に少なくなるようにコントロールできますが、小規模燃焼ではそれが難しいと言われていたのです。それが小規模燃焼技術が進んだおかげで変わりました。典型例がオーストリアの

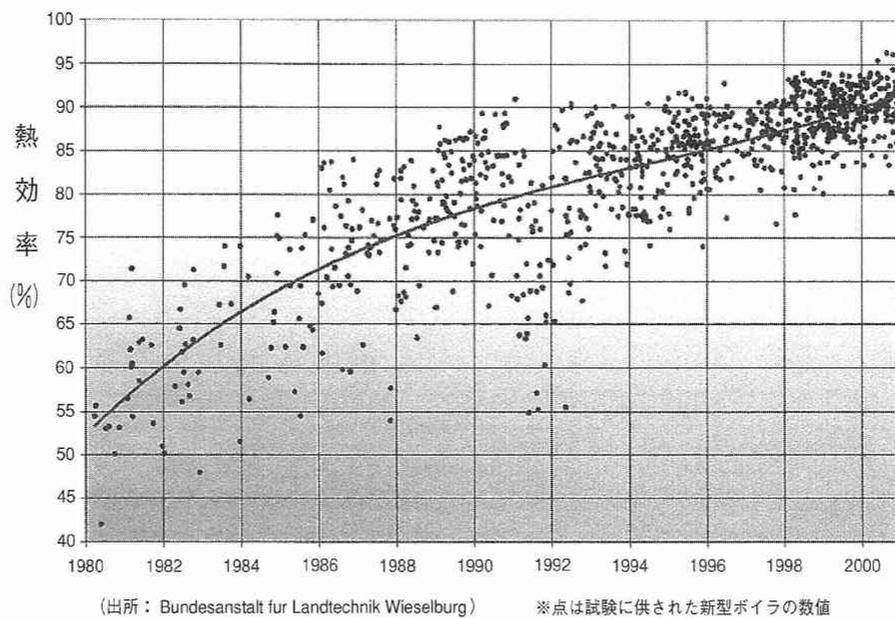


図2 オーストリアの家庭用木質ボイラにおける熱効率の改善

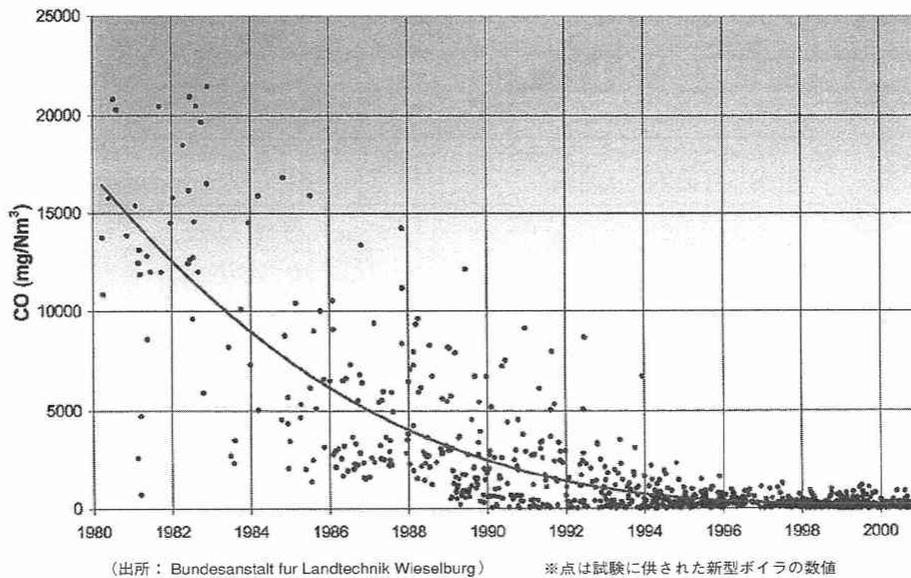


図3 オーストリアの家庭用木質ボイラにおけるCO排出量の減少

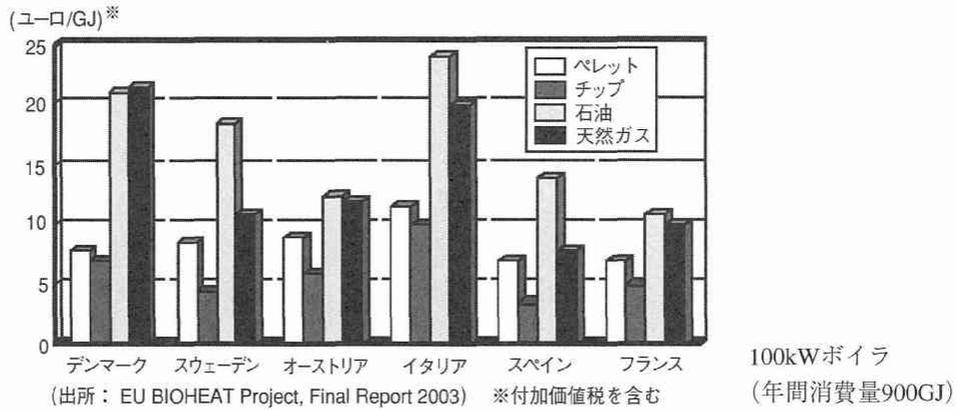


図4 EUにおける暖房用燃料の価格 (2001年6月)

家庭用木質ボイラです。チップやペレットを燃料とするこのボイラの熱効率は大変な勢いで改善されてきています。

図2で示すように、1990年頃の熱効率は50%ぐらいでしたが、2000年を超えたあたりから90%を超え、今や95%ぐらいになっています。図3はCO排出量です。CO排出量がゼロに近いところ、つまり完全燃焼するところまで引き下げることができています。そういうことから、チップやペレットを使った小規模の直接燃焼がかなりの勢いで普及していくことになるわけです。ヨーロッパの場合、これらは経済的にある程度成立し始めたということです。

図4で見ますと、どこの国でも熱量当たりの燃料価格 (ユーロ/ギガジュール) では、ペレット、チップが非常に安くなっています。これは2001年6月時点での価格ですので、石油と天然ガスの価格が上がっている現在では、

差はもっと開いていると思います。

#### 競争力を持つ木質チップ暖房

ギガジュール当たりの単価は木質系燃料が安くなっていますが、一番の問題は、燃焼器具の価格です。石油ストーブや重油ボイラ、ガスストーブなどに比べるとこのバイオマスの燃焼器具はかなり高くなります。

図5は木質チップ暖房と石油暖房との比較です。家庭で使う小さいボイラだと石油に対抗できないのですが、100kWぐらいの大きめのボイラになってきますと、石油と十分太刀打ちできるレベルまでいきます。石油よりも高くなっているのはギリシアだけです。ヨーロッパの場合はもう石油以下でできるという格好になっているわけです。図5も少し前のデータですから、石油価格が上がっている今

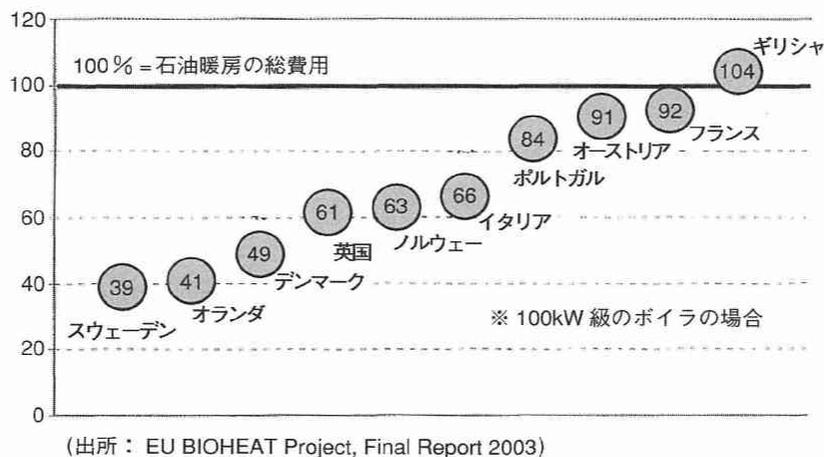
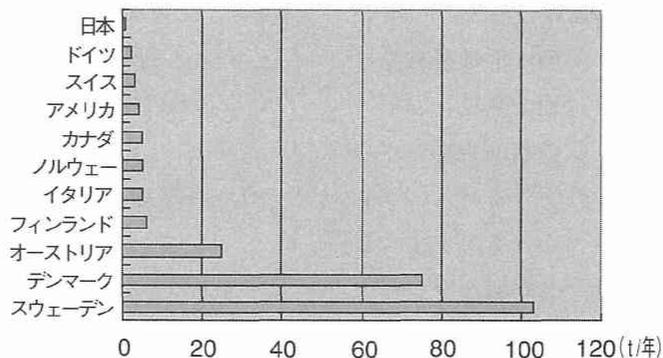


図5 木質チップ暖房と石油暖房とのコスト比較



(主所：Sun Wind Energy Magazine from the European Pellet Conference in 2004)

図6 人口1,000人当りのペレット消費量(2003年)

だと木質チップ暖房の方がもっと安くなっていると思います。

日本ではほとんど普及していないペレットですが、ヨーロッパでは非常に普及してきています。図6は人口1,000人当たりのペレット消費量です。ヨーロッパで一番早くペレットの工業化に成功したのはスウェーデンです。それからデンマーク、オーストリアに広がりました。オーストリアも新興国です。5年ぐらい前は2万トンぐらいだったペレット製造量が今では30万~50万トンになると言われるくらい急速に伸びてきています。それに応じて、ペレットストーブ、ペレットボイラが普及してきています。フィンランド、イタリア、ノルウェー、カナダ、アメリカは、これから伸びてくると思います。

#### 伐採からペレット製造までの一貫体制

##### —オーストリアの巨大製材工場の例

ペレットがある時間がたってから急速に普及するには理由があります。ペレットが製造されても、それを燃やすストーブが各家庭に入らないと普及しません。各家庭にストーブが入るには、ストーブの据え付け、メンテナンスをしてくれる業者が出てこないといけません。そういう体制、いわゆる「ペレットチェーン」が完成していないといけません。この完成までに時間がかかりますが、ペレットチェーンが完成したと思われるのはスウェーデン、デンマーク、オーストリアであ

り、他の国でもチェーンができればペレット消費量が急速に伸びると思います。

実は、今年1月にオーストリアに行き、ストラエンソー社の製材工場を見学しました。これはヨーロッパ最大の工場で、年間原木130万 $m^3$ を処理できるという工場です。図7に示すように、製材品の一部は板にし乾燥させてプレーナにかけます。そこでプレーナ屑が出てきます。プレーナ屑と製材工場から出てくるおが屑はペレット製造に使います。この工場だけで、年間7万5,000トンのペレットを作っています。また、この工場では、入ってくる丸太の皮だけで

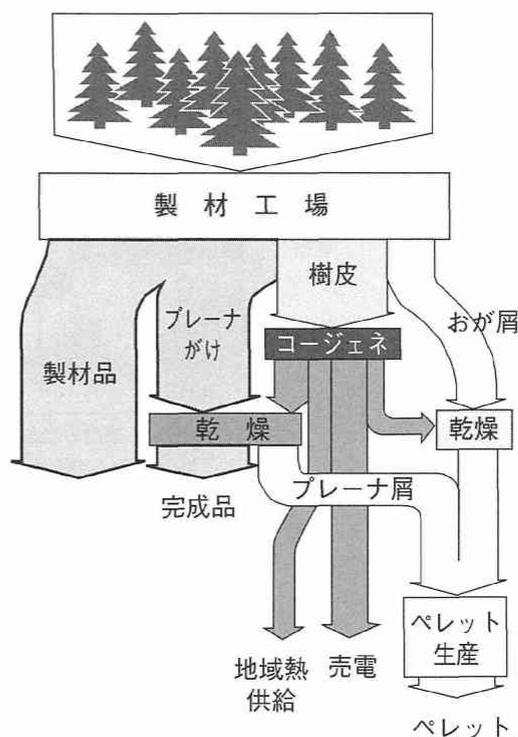


図7 木材加工とペレット生産の流れ

5,000kWの電気と2万7,000kWの熱を作っています。電気は外部に売り、熱の一部は製材品とおが屑の乾燥に使い、残りは地域熱供給の形で販売しています。ペレットは含水率を10%ぐらいまでに落とさないと製品になりません。プレーナ屑はよく乾いていますから、そのままペレットにできます。乾燥させたおが屑とプレーナ屑で、非常に上質なペレットが安いコストで製造できるわけです。

ストラエンソー社の製材工場では丸太を工場に入れています。北欧では工場自体が沢山の山を持っていて、山で木を切るときに出てくる枝葉なども丸太と一緒に下りてくるシステムができています。山で木を切った段階からカスケード利用、全部利用するというスタイルができ上がっているのです。

一旦こういうシステムができ上がると、発電するにしても、ペレットを作るにしてもみんな安くできて、普通だったら廃棄物になるものがエネルギー利用されながら回っていき

ます。この循環がうまくできるかどうかバイオマス利用の非常に重要なポイントになってくるわけです。

ペレット販売から暖房システム構築サービスまで

ストラエンソー社の製材工場に隣接して、エコヴェルメ社のペレット製造工場があります。エコヴェルメ社は、ペレットの生産、間伐木や製材残材を使ったチップの生産、そしてエネルギーサービス事業も行っています。エネルギーサービス事業では、木質エネルギーをベースにして、最適な暖房システムを提案した上で、燃焼装置の据え付け、燃料補給から燃焼の制御、メンテナンス、修理などの一切を請負うわけです。木質燃料を生産するだけでなく、それに付随したエネルギーサービス全部をカバーして、今まで使っていた石油ストーブや石油ボイラを木質系燃料のシステムに換えていっています。石油価格の上昇

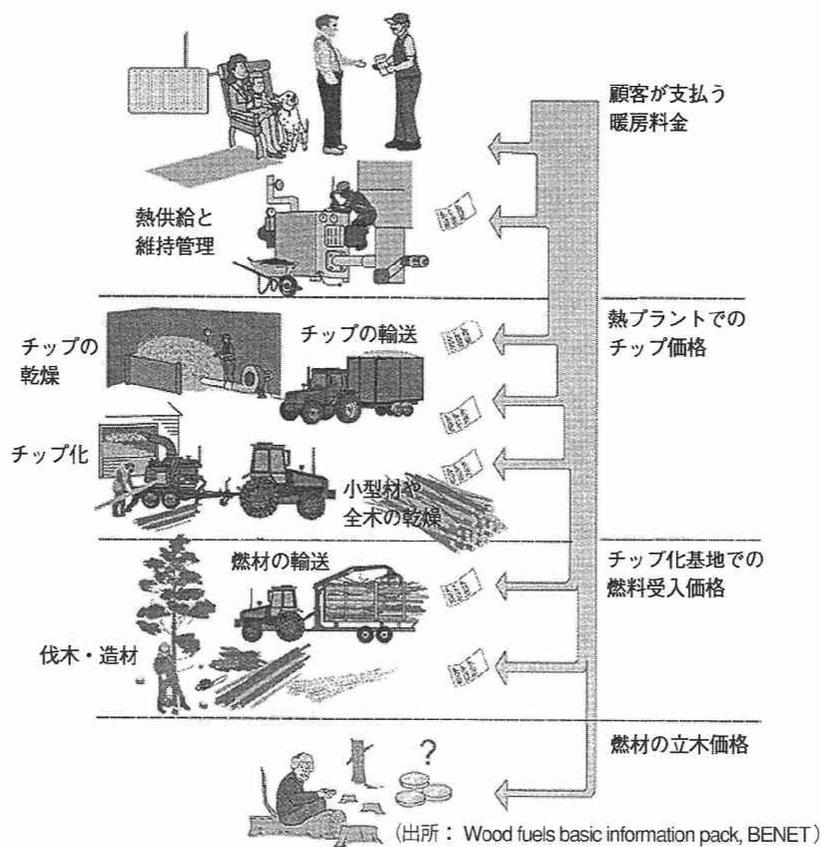


図8 木質チップによる熱供給ビジネスの流れ（フィンランドの例）

ということもあって、結構いいビジネスに成熟していているわけです。

図8はフィンランドの木質チップ暖房ビジネスの例ですが、エネルギーサービス事業の流れを示しています。チップの生産・供給からメンテナンスまで一括契約し、使った熱の量に応じて料金をいただく形になっています。

#### 森林所有者グループによる木質エネルギー契約

エコヴェルメ社のエネルギーサービスと同じようなもので、「木質エネルギー契約」と呼ばれるものがオーストリアにあります。これは、例えば森林所有者のグループが熱供給プラントを設置し、それを運営しながらメンテナンス、燃料供給など全てに責任を負うようなやり方です。こういうビジネスは結構広がっています。この背景には、従来、パルプ用材だったヨーロッパ高緯度地域の小径木が、ブラジルのユーカリとかの安いパルプ用材に押されて競争力を失う一方で、燃料チップの方が高く売れる状況になってきたことがあります。

森林所有者が集まって作ったバイオヴェルメ社は150戸に地域熱供給を行っています。私たちが行って非常に感心したのは、ボイラの性能が非常に良くなっていることです。1日に1回見に来るだけで十分に運転できるので、常駐している必要が全くありません。これも1つの大きな進歩だと思います。バイオヴェルメ社の資料(2003年)によりますと、パルプ材料として売ると実材積1m<sup>3</sup>当たり6.8ユーロの損だけれども、チップにすると11.3ユーロの儲けが出るということです。

#### 日本のペレット生産の課題

日本が木質バイオマスの利用で非常に遅れをとった理由は、木材の生産レベルでの機械化やシステム化が遅れたこと、木材工業も統合集約化が遅れたために非常に零細な木材工業ばかりとなり出てくる木屑をボイラを入れ

てエネルギー変換するだけの規模になっていないということにあります。

最近、日本でもペレットの本格製造への取り組みがなされています。ヨーロッパの場合、ペレット製造は大量に出てくるおが屑やプレーナ屑の処理に困った製材工場が「苦肉の策」として思いついたものです。日本の場合には、山から切ってきた間伐材をおが屑製造機で細かくしてペレットを作っているところもあります。それではコストが高くて普及は無理になってくるわけです。

オーストリアの場合、ペレットはバラで16円/kgぐらい、袋詰めでも23円/kgぐらいでできます。日本では、どうしても40円~60円/kgになってしまい、カナダやロシアから輸入するほうが安上がりとなります。このあたりにも大きな問題があります。

---

### 欧州における直接燃焼技術の進歩

---

#### 自動化が進む火格子炉

直接燃焼技術の開発目標は、変換効率の向上と低排出です。問題は、山から下りてくる多種多様なバイオマスに最適な燃焼炉を選ぶということと、最適な支援技術で更なる改善を目指すということです。表2にそれを整理しました。

図9はヨーロッパでよく使われている最新の火格子炉です。沢山のセンサーで炉の温度やCO排出量、酸素量などを計測し、最適に燃えるように燃料と空気を送ります。バイオマ

表2 バイオマスと燃焼炉、支援技術

燃料の種類	燃焼炉のタイプ	支援技術
丸棒チップ、全木チップ、樹皮、おが屑、プレーナ屑、廃木材	下込めストーカー、火格子火炉、バブリング流動床、循環流動床、ダスト燃焼	燃料の予備乾燥、燃料補給、燃焼プロセスのコントロール、フルーガスからの熱回収、エミッションの除去技術など

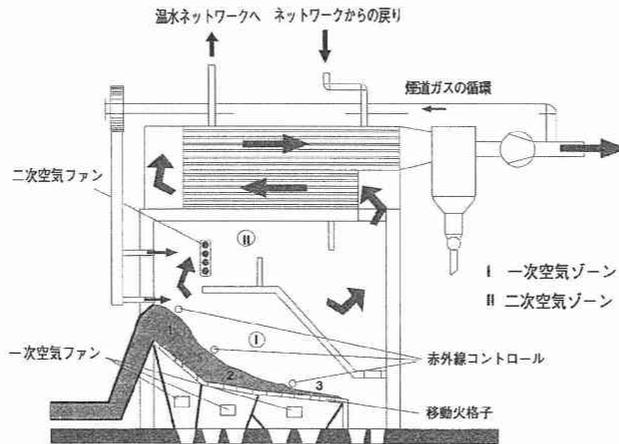


図9 ヨーロッパで普及している火格子炉

スがじりじり押されながら炉内に入り、最初のところで乾燥され、次にガス化され、チャーの燃焼を行うという仕組みです。二次空気のファンも色々なセンサーで得た情報に基づいてコントロールしますから、完全燃焼が非常に上手にできるようになっています。

#### 標準化された小型コージェネ（CHP）プラント

比較的小規模のCHPプラントを製造しているフィンランドのワルチラ社が2001年からバイオマス発電プラント市場に参入してきました。その概念が非常に面白くて、①火格子炉で含水率65%ぐらいまでの雑多なバイオマスを効率的に燃やす、②エネルギー変換プロセスは可能な限り自動化し無人運転する、③それからプラントをモジュール化し、シリアルプロダクションでコストを減らす、を基本コンセプトとしています。

ワルチラ社製CHPプラント（蒸気サイクル）には、表3のように、発電出力で2,000kWクラス（BioPower 2）と5,000kW（BioPower 5）の2つがあります。さらに、それぞれ地域熱供給と結びつくタイプ（DH）、高温水供給と結びつくタイプ（HW）、プロセス蒸気（ST）と結びつくタイプの3つのタイプがあります。これらのプラントを標準化してコストを下げ、簡単に組み立てられるプラントにしていこうというわけです。

表3 ワルチラ社製の標準化CHPプラント

CHPプラント名	電気出力	熱出力	供給するもの
BioPower 2DH	1.7MWe	7.7MWth	(50/90℃地域熱供給)
2HW	1.3MWe	8.0MWth	(90/115℃高温水)
2ST	1.0MWe	11.5t/h	(蒸気4バール)
BioPower 5DH	3.5MWe	13.0MWth	(50/90℃地域熱供給)
5HW	2.9MWe	13.5MWth	(90/115℃高温水)
5ST	2.3MWe	20.5t/h	(蒸気4バール)

※ 1 MW=1000kW, eは電気, thは熱を表す。  
「50/90℃地域熱供給」とは、出る時の熱が90℃、戻りの熱が50℃の意味。

また、ワルチラ社は比較的低温の熱で発電するORC（オーガニック・ランキンサイクル）による「ミニCHPプラント」も製造することにしています。ここで使っている回転火格子というのは非常に特殊な火格子です。

#### ドイツのバイオエネルギー政策

##### 森林バイオマス利用の促進に動いたドイツ

2004年7月にドイツの「再生可能エネルギー源法」が改正され、バイオマス電気の買い取り価格がかなり上昇しました。

表4に示すように、発電容量が150kWの小規模なバイオマス発電プラントでも、買い取り価格の基本レート（11.5ユーロセント/kWh）に材料割増、CHP割増、技術割増があります。自生原料（農林業で副次的に出てくる植物性のもの）

表4 ドイツのバイオマス発電による電気の買取り価格（ユーロセント/kWh）

発電プラントの容量 (kW)	基本レート	材料割増		CHP割増	技術割増
		自生	木材		
150	11.50	6.00	6.00	2.00	2.00
150~500	9.90	6.00	6.00	2.00	2.00
500~5000	8.90	4.00	2.50	2.00	2.00
5000~20000	8.40	—	—	2.00	—
廃木材~20000	3.90	—	—	—	—

注1) 効率の上昇とコストの低下を見込んで、ベースのレートは年率1.5%の割で逓減する。割増はその限りではない。  
 注2) 廃木材は有機ハロゲン化合物を含むもの(AⅢ)と防腐剤を含むもの(AⅣ)である。

なら6セントの割増，コージェネプラントなら2セントの割増，ガス化，スターリングエンジンなど新技術を使ったら2セントの割増となり，電気の買取り価格は全部で21.5セント（約27円）/kWhにもなるわけです。

1 kWh当たりの買い取り価格は，廃材を燃料とする発電の場合は，3.9ユーロセント（約5円）/kWhですから，ドイツの新エネルギー政策の特徴は，山から切ってきたバイオマスの利用を大幅に促進する点にあると言えます。ドイツの場合，廃材はほぼ使い尽されたとして，今後は山のバイオマスを利用するしかないのです，廃材以外のバイオマスを燃料とする発電の買取り価格を思い切って高くしたわけです。こうなってくると，比較的発電容量が小さい発電事業者でも山からのバイオマスを高く買うようになります。熱を利用しながら電気も売って，山からのバイオマスを利用できるシステムにしていると言えます。

## 日本の課題

### 木材のカスケード利用と木質エネルギー

山から下ろしてきたものを全部使おうと思ったら基本的には，ペレット，良質チップ，低質チップの3つが揃っていて，これらの木質燃料の全部が使えるシステムになってい

なければいけません。

ペレットは都市向けです。今これが世界的に急速に増えています。恐らく，これから10年の間に日本でも増えると思います。そのペレットは本来木材加工場のおが屑や切削屑で作るべきものです。

良質のチップは小型ボイラに使います。低質の小丸太（枝を落とした小さい丸太）をチップにして使うわけです。

木の皮や枝葉から作られる低質チップは，比較的規模の大きいボイラで使うわけです。

### 山から木材が下りてこない今のシステム

日本では，山から安定して木材が下りてこないシステムになってしまいました。日本の森林所有者は比較的零細で，木材の市場価格が低下したために，山の管理を放棄してしまったことが原因の1つです。「補助金をあげるから間伐をやれ」と言っても反応しません。地域で一括利用権みたいなものを設定して放棄された山の木材資源を利用できるようにする以外に方法がなくなっているわけです。

小規模な森林所有者たちが山を管理できなくなったことはヨーロッパにも共通しています。今のように機械化した時代に，小さい山を持っていて，そこから個別に丸太を出してきたらコストが高くて割にあわないからです。そこで，ヨーロッパの場合は，小規模な森林所有者に代わって木材資源の利用を可能にす

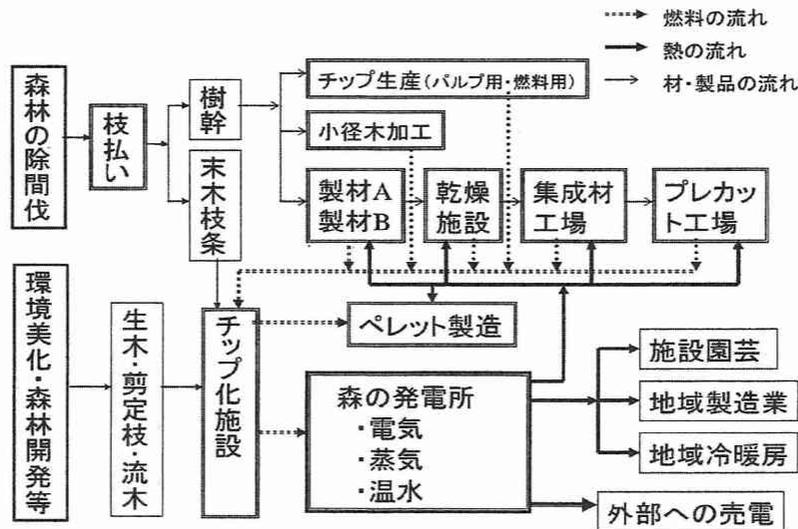


図10 木質バイオマスのカスケード利用

る担い手がいるわけです。例えば、スウェーデンでは大きな森林組合が代行しています。それ以外の国では、コンサルタント会社、林業請負会社がやっています。

ところが、日本ではまだそのシステムができていません。森林組合は、基本的に小規模森林所有はそのままに、「間伐をやりたい」という所有者がいたら現場へ行って木を切っ出てくるというスタイルです。コストも下がらないし、量もまとまりません。量がまとまらないと、製材工場の規模を大きくして、山から来るものを全部利用する木材加工もできなくなるわけです。

#### 日本でも大規模製材工場による一貫体制を

私がいつも言っているのは、山から下りてくるものを全部使えるシステムができないかということです。ストラエンソー社の製材工場ほど巨大でなくても、日本でできる最大規模の工場を作る必要があります。図10に示すように、例えば、森林で除伐や間伐をする。幹の部分と枝葉の部分は切り離して製材工場に持ってくる。枝葉の部分は製材工場に払っていき、払った枝はバイオマス発電所へ行くわけですが、小さい丸太は製材工場にパルプ用チップや燃料用チップにすることもできるわけです。

とにかく山で切ったものは枝も幹も全部製材工場へ持ってくるということが1つのポイントです。加工工程で出てくる木屑やおが屑、プレーナ屑はペレット生産に使うわけです。使いものにならない部分だけを発電所に持ってきて、電気や熱エネルギーに変えます。そのエネルギーで木材乾燥やペレット原料の乾燥を行うわけです。熱は周囲の施設園芸や地域製造業に供給したり、地域冷暖房に回すこともできます。そうすると、山から下りてきたものが全部利用できるシステムができるわけです。

そういうシステムをこれから日本で作っていくことが非常に大事です。ペレットだけ生産してはコスト高になります。木屑だけ集めて発電しようとしてもこれまたコスト高でどうにもなりません。ですから、いいところは用材として利用しながら、木質エネルギーを利用していくスタイルを作っていくことがどうしても必要だと思います。

例えば、ペレット製造は製材工場の片隅でも十分にできるわけです。そして、木材団地のペレットは、プレカット工場から来る乾いた木屑で製造するという格好で、木材加工と一体化することが非常に大事になってくるわけです。

私の話はこれで終わらせていただきます。ご静聴ありがとうございました。(拍手)

[寄稿]

## バイオマスエネルギーの技術動向と展望

横山 伸也

( 東京大学大学院 農学生命科学研究科  
生物・環境工学専攻 教授 )



### 1. はじめに

持続的な発展は21世紀の大きな課題であり、持続性なくして社会の安定的な発展も生物の生存もあり得ない。持続性を担保する要因は色々あるが、エネルギーの確保は重要な要因の1つであろう。環境に負荷を与えないあるいは負荷の低いエネルギーは、再生可能エネルギーであることは疑いの余地はない。再生可能エネルギーの中で、バイオマスは適切な管理により再生的に利用できる唯一の有機性資源である。反面、エネルギー密度が低い、食糧と競合する、一般にコストが高いなどの欠点がある。わが国では、紙・パルプ産業から排出される黒液やゴミ発電を除けば、量的には導入があまり進んでいないのが実情である。

バイオマスを循環的に利用すれば、化石エネルギーの代替にもなり地球温暖化対策に寄与でき、持続的な社会の実現の一助になることができる。また、バイオマスは地域的な性格が強いことから、地域社会や農山間地の活性化、森林環境の保全などにも貢献できる。本稿では、バイオマスを巡る最近の話題やエネルギー変換技術の課題、導入・普及を進めるための方策や海外戦略について述べる。

### 2. バイオマス利用の現状

わが国では、バイオマスをはじめとするいわゆる新エネルギーは、一次エネルギー消費量の約1.2%である。欧州連合(EU)では風力

やバイオマスなどの再生可能エネルギーが一次エネルギーに占める割合が6%で、この内3分の2がバイオマスで賄われている。米国ではバイオマスエネルギーだけで一次エネルギーの3.5%を占めているが、2010年までに10%までに増やそうとしている。

わが国では、新エネルギーの内、バイオマスエネルギーは70%以上を占めており、紙・パルプ産業で排出される黒液と都市ゴミによる発電が主である。しかし、平成14年12月に「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定されて以来、バイオマスの利用が徐々にではあるが拡大しつつある。

経済産業省は平成17年8月に、温室効果ガスの増加を抑えるバイオマス熱利用を促すために、平成18年度に新たな補助事業を創設する方針を固めたと報じられている<sup>(1)</sup>。すなわち、京都議定書の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)削減目標の達成には、バイオマス熱利用を約4倍程度に拡大する必要があるとあり、企業や自治体の取り組む実証試験の半額を負担する狙いで、平成18年度の概算要求に40億円を盛り込むことになった。政府が今年4月に閣議決定した「京都議定書目標達成計画」によれば、平成22年度の新エネルギー導入目標は原油換算で1,910万 $kl$ であるが、このうちバイオマス熱利用は308万 $kl$ と16%を占めている。平成15年度の導入量は79万 $kl$ と4%にとどまっております、これを加速するためである。官民一致したバイオマスエネルギーの導入・普及への一層の努力が求められている。

### 3. バイオマスのエネルギー変換技術

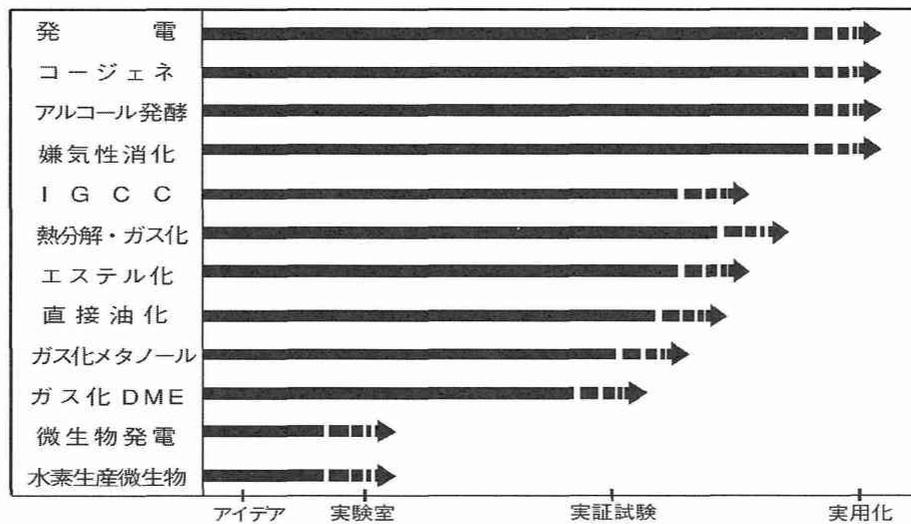
図1はバイオマス変換技術の成熟度を示したものである。バイオマスはその物理的な性質や化学的な性質が多岐にわたるために、これに応じて変換技術も多種多様である。

比較的乾燥した木質系バイオマスは燃焼、ガス化、あるいはガス化を経由した間接液化が適当であろうし、家畜排泄物や汚泥は含水率が高いのでメタン発酵が適している。一方、糖分を多く含むものはエタノール発酵してア

ルコール生産に使用するのが妥当であり、廃食用油、パーム油、菜種油のような植物油はエステル化してバイオディーゼルに変換するのが適当である。以下、発電、バイオディーゼル燃料、エタノール発酵、メタン発酵の各技術について現状を紹介し課題を示す。

#### (1) 発電

利用技術の体系として木質バイオマスの種類ごとに処理規模との関連をとりまとめると図2のようになる<sup>(2)</sup>。実線で示される分布が国内



※ IGCC (石炭ガス化複合発電), DME (ジメチルエーテル)

図1 バイオマスエネルギー変換技術の成熟度

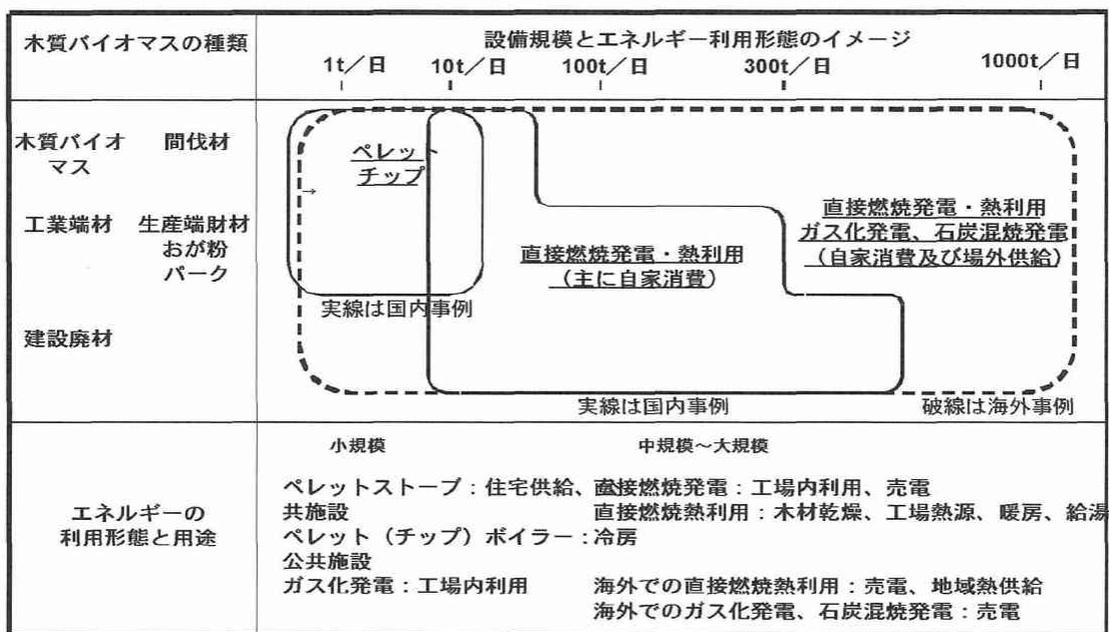


図2 木質バイオマスエネルギー利用事例の設備規模と利用形態

事例、破線が海外事例での事例を示している。

利用されている木質バイオマスの種類としては、大きく分けると間伐材、工場端材、建設廃材に分けられる。量的には、間伐材は少なく、工場端材、建設廃材の順に処理規模が大きくなっている。間伐材については、水分量や収集費用、処理費用の点から、間伐材単独での利用は現状では難しいようで工場端材等とあわせて利用されている。処理量については、小規模な場合はペレット利用、チップボイラーでの利用、一部ガス化発電による利用がある。中～大規模については、直接燃焼発電・熱利用が行われており、国内では最大で数百t/日の規模までが存在する。電力・熱の利用方法としては、主に自家消費である。しかし、最近の傾向としては、小規模から大規模のものでもガス化発電が採用されてきている。

将来的には、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の実証事業等において検討行われている小規模なガス化施設や、海外において行われているような大規模（最大1,000 t/日規模）直接燃焼発電・熱利用、ガス化発電、石炭混焼発電等が国内でも導入される可能性がある。なお、海外、特に北欧では熱需要が多いという背景があり、売電や地域熱供給等が行われていることから大規模化が可能となっている。

現状で木質系発電が成功しているのは、製材工場などで廃材を産業廃棄物として有償で引き取っているものを利用して発電する場合、あるいは森林組合などの組織が適正な価格で間伐材や未利用材を引き取っている場合であるが、安定的に一定量を確保することが困難なことも多く、事前の検討が大事である。

平成14年度からNEDOの実証事業として、中外炉工業株式会社が山口県の協力を得て、木質系バイオマス5 t/日規模のガス化発電システムの研究開発を行っている。これは、木材チップ等を外熱式多塔型キルンによりガス化し、酸素付加による部分燃焼などによりクリーンなガスに改質する技術を用いたガスエ

ンジン発電機によるコジェネレーションシステムである<sup>(3)</sup>。

このシステムは、外熱式多塔型キルンによる間接ガス化方式を用いて原料バイオマスを効率よく可燃性ガスが取り出せること、排熱を利用して温水あるいは蒸気として回収できること、間接ガス化の未燃分のチャーを燃焼してガス化の燃料として再使用することができるなどいくつかの特長がある。純酸素を微量供給することで、タール分を含んだ熱分解ガスと反応させて改質でき、下流のエンジンや配管系統への悪影響を防止している。発電までを含んだ500時間の連続運転に成功しており今後の展開が期待される<sup>(4)</sup>。

NEDOのバイオマスエネルギー高効率転換技術開発の一環として、川崎重工業(株)とエネルギー総合工学研究所は小規模分散型かつ高効率のガス化発電システムを開発している。このシステムの特徴は、加圧流動層とガスタービンを組み合わせて、ガス化で発生するタールを燃料使用している。原料として用いる木質系バイオマスの含水率が生木に近くても、未乾燥で利用できる可能性があり期待が大きい。商用規模は650kW以上を想定しているが、発電効率は20%程度が期待できるとしている。製材工場や合板工場での稼働を想定し、熱需要とのマッチングがポイントとなる<sup>(5)</sup>。

## (2) バイオディーゼル燃料製造

バイオディーゼル燃料（BDF）は軽油と性状が似ており、ディーゼル車で利用可能な輸送用バイオ燃料である。図3に示すように、菜種油のような植物油や廃食品油に水酸化カリウムなどのアルカリ触媒の存在下で、メタノールを加えてエステル化しBDFを作ることができる。エステル化するのは粘性を低下させるためである。わが国では滋賀県や京都市などが良く知られているが、最近ではで菜種油や廃食用油から数多くの市町村で作られている。

ドイツでは現在、年間で約100万klのバイオディーゼル燃料を菜種油から製造しており、

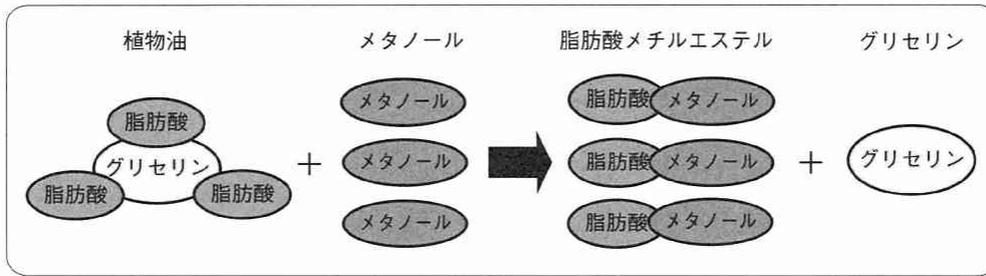


図3 植物油のメチルエステル交換反応によるBDF製造

国内に2,000カ所近いスタンドが設置されている。100%のバイオディーゼル燃料を軽油の代替燃料として使うこと（ニート利用）が一般的で、使用上特に深刻な問題はない。一方、副生するグリセリンの有効利用にはいたっていないようである。この副生グリセリンの、エネルギー変換やグリーンポリマーなどのマテリアル製造を含めた環境負荷の低い利用技術が求められている。

わが国では、菜種油から製造する場合はコスト高になることは避けられないが、地域起こし、環境教育、化石燃料の削減、菜の花を観光資源とする各種のイベントなどを行うことにより地域住民の意識を高め循環型社会の形成に大きく貢献している。

### (3) エタノール発酵

エタノールはガソリン代替として利用される。ブラジルでは100%エタノールを使うエタノール車も走っているが、ガソリンに10%エタノールを混ぜた「E10」は、ブラジルや米国で通常ガソリン車（E10対応車）で利用されている。日本国内で走っている通常ガソリン車の場合は、3%混合までは利用可能となった。

従来から糖やデンプンからエタノール発酵することは、良く知られ商業化していることはいままでもない。ブラジルやインドではサトウキビから、米国ではトウモロコシから発酵によりエタノールを生産している。これは農業支援の側面もあり、バイオ燃料を利用することで、雇用の確保が図られている。

最近では、木質系、草本系バイオマスなどのリグノセルロース系バイオマスからのエタノール

生産が開発目標となっている。米国ではエネルギー省傘下のベンチャー企業が、リグノセルロースを硫酸で糖化して、エタノール発酵を行う技術を開発した。また、ヘミセルロースからの五単糖（キシロースなど）からの発酵技術も開発されている。米国は「バイオマスリファイナリー」構想の中心課題として、酵素によるセルロース糖化技術を中心にエネルギー省が研究開発に取り組んでいる最中である。わが国でもNEDOの支援を受けて、月島機械株式会社や日揮株式会社が開発に取り組んでおり、その成果が期待されている。

最近、京都大学の坂教授はリグノセルロースの糖化を超臨界条件で行う技術を開発中で、その成果が注目されている<sup>(6)</sup>。また、わが国では地球環境産業技術研究機構（RITE）が米国とは違ったコンセプトでエタノール生産の研究に着手し始めている<sup>(7)</sup>。いずれにせよ、食糧と競合しないセルロース系資源を原料としたエタノール製造は極めて重要な技術である。

### (4) メタン発酵

メタン発酵は生ゴミなどの含水率の高いバイオマスを、嫌気条件で発酵することによりバイオガスに変換するものである。図4はメタン発酵のプロセスの概要である。わが国ではバイオガスを発電に利用することが主流であるが、生成するバイオガスの約60%がメタンで、残りがCO<sub>2</sub>で微量の硫化水素とアンモニアが含まれる。従って、スクラバーで水洗するだけで98%程度の純度のメタンガスが得られる。これを200気圧に圧縮すれば輸送用燃料に使用できる。スウェーデンの都市では市バスの半数をバイオ

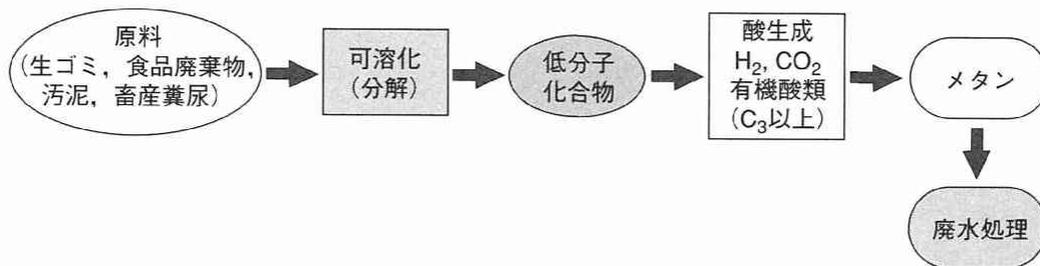


図4 メタン発酵プロセスの概要

ガスからのメタンガスで運転している。国内では天然ガス自動車はそれほど普及していないものの、発電以外のバイオガスの利用も視野にいれるべきと考える。

メタン発酵は発酵温度により、中温 (35℃)、高温 (55℃) と分類される他、発酵形式により二槽式やUASBなどと分けられる。エタノール発酵と並び長い歴史があり、実用化技術である。課題としては、全量を変換できず、発酵廃液やスラッジが出てしまうことであり、収率を上げるための高温処理、粉碎前処理などが検討される一方、発酵廃液やスラッジのコンポスト利用の検討などが行われている。廃液を処理しなければならない場合は、その処理費がかさみ経済的な負担になることが多い。わが国でのメタン発酵の成功事例を見ると、発酵廃液を農場に液肥として還元でき、発電で生じた電気や排熱が工場内で利用できれば優位性がでる。最近の新しい技術としては、「水素-メタン二段発酵」や「乾式メタン発酵」がある。

#### 4. バイオマスエネルギーの導入・普及策

経済同友会環境グループがわが国の林業について調べた研究会の資料によれば、林家の所有規模が小さいこと、これらの小規模所有林をまとめて伐採し大規模需要に結びつけるメカニズムが不在であることその他に、流通経路が複雑であることなど理由により、立木価格が異常に高くなっている。立木価格3,600円が工務店では64,000円にまで上昇している<sup>(8)</sup>。間伐材については、経済産業省資源エネルギー

庁の調査によれば、立木価格が5,900円が伐採・集材コスト、運搬コストを含めると、エネルギー供給施設までに18,300円かかる。この値は間伐材の補助がある場合であり、補助がなければ更にコストは高くなる。従って、小規模経営の所有林を有機的に結びつけるメカニズムや、流通経路を簡素化にして中間経費を省く仕組みを作らなければならない。

小規模所有をまとめるにはいくつかの条件があるが、所有者、伐採対象地域の樹種、樹齢、蓄積量、森林蓄積量、伐期などの調査を行い情報をデータベース化する必要がある。これに基づき、所有者ごとの長期計画を立て、需要に応じた伐採を可能にする条件を明らかにしなければならない。しかし、収益があがらないと事業意欲が高まらないので、収益を確保するには伐採コストを如何に圧縮するかが問題になる。伐採コストの削減にはある程度の規模がまとまった上でまず路網整備を行い、さらに機械化して高稼働率にすることが前提である。林野庁の資料によれば、路網整備につれてコストが下がることがわかる<sup>(8)</sup>。伐採コストは、日本が4,000円から15,000円に対して、オーストリアの山間地では2,000円から3,500円である。

最近では全国各地で、森林が荒廃するのを防ぐために森林税を課す自治体が増えている。山口県では「やまぐち森林づくり県民税」として、3億8,000万円の税を徴収し、その内2億5,000万円を年間500haの間伐費用にあてている。平成17年度段階で同様の制度を立ち上げているのは、高知県、岡山県、島根県、鳥取県、愛媛県、熊本県、鹿児島県である。このような森林保護や利活用に熱心な自治体と

林家や製材業者などの連携により、林業が経営として成立することを期待するものである。バイオマスエネルギーの有効利用は、結局のところ健全な林業経営が基本であると考えられているからである。

廃棄物系については、ある程度まとまった量を集める必要がある。このためには地域コミュニティのネットワークを活用するなどの仕組み作りが必要である。

また、多種多様な廃棄物系バイオマス資源を同一の処理システムで処理することで、過剰投資の回避、エネルギー生産性の向上を図ることができる。従って、廃棄物の複合化処理を推進することがバイオマス資源の有効利用に繋がってくる。

廃棄物系バイオマスの利活用で問題になるのは、廃棄物の処理及び清掃に関する法律、いわゆる廃掃法との関係である。民間企業が生ゴミを原料としてメタン発酵を行い、生成したメタンで発電を行う事業などの場合、ゴミ収集にかかるコストが、自治体の処分手数料を超えてはならないなどの制限があるために、事業化が進まないことなどが生じる。法律の改正や弾力的な運用が図られなければ、バイオマスの利活用が進まないことがある。これは一例ではあるが、関係者の一考をお願いする次第である。

## 5. バイオマス・アジア海外戦略

わが国でのバイオエネルギー導入は、まず廃棄物処理という観点からのアプローチがまず最初、次いで未利用バイオマスの導入であろうと思われ、エネルギー作物の利用は相当将来のことと予想される。しかし、資源量の確保という点で、わが国と地理的に近い東南アジアのバイオマス資源を視野に入れるとどうなのであろうか。資源エネルギー庁の調査によれば、アジア地域におけるバイオマス資源量は、林業系、農業系、畜産系の廃棄物バイオマスが49万EJ（エクサジュール： $10^{18}$ ジュール）、エネルギー作物で38EJ、総量で87EJと推定されている。これは現在の世界の一次エネルギー消費量の約20%に相当する。この量がすべてエネルギーに利用できるというのは、いささか楽観的に過ぎようが、やはり相当量の未利用バイオマスのポテンシャルがあることに注目すべきである。

1990年から2000年の約10年間の、世界のバイオエネルギー関連特許出願数を調べた特許庁の調査によると、わが国は52%を占めており、米国の16%、EUの30%を凌駕している。もとより技術の優劣は特許出願数だけではないが、この分野は、わが国が競争力を持った分野といえるのではないかと。図5は、バイオ



図5 バイオマス・アジア戦略構想のイメージ

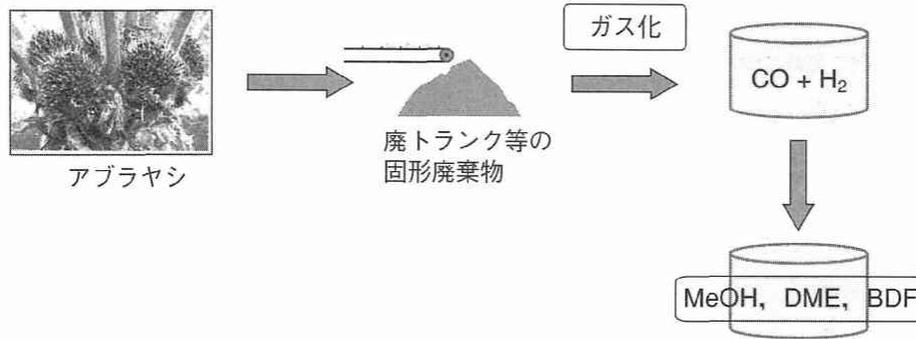


図6 廃棄物系バイオマスからの輸送用燃料の製造

マス・アジア戦略構想のイメージである。わが国とアジア諸国が協力しあってバイオマス・アジア戦略を構築することは、双方にとって便益のある仕組みである。

わが国の技術により東南アジア諸国の技術と資源が生かせるのであれば、非石油産出国が多く人件費の安い東南アジア諸国は、わが国の最適のパートナーと考えられる。この地域でわが国が、バイオマスを利用してエネルギー生産やマテリアル生産に戦略的に取り組みれば、双方にとって便益が得られることになる。わが国にとって、化石燃料の節約、セキュリティの確保、温暖化ガスの削減、排出権の確保などがあり、また国際貢献とリーダーシップが確立できる。一方、アジア諸国も、先端技術の導入、一次産業の育成、新規産業の創生、温暖化ガス排出権の確保、人材の育成などが期待できる。

フィリピン政府は昨年4月に、MC (Memorandum Circular) -55という大統領令でディーゼル燃料を使う官用車に1%のCME (ココヤシオイルのメチルエステル) の導入を義務付けている。フィリピン全体では年間で7万QのCME燃料の生産が見込まれが、現在新規プラントを増設してこの目標達成に向けて進行中である。タイ政府も試行的に「E10」を使ってエタノール車を走らせたり、韓国もBDF燃料 (B20) の導入を決め、2002年に年産10万トンのプラントを建設した。アジア諸国でもバイオマス由来の輸送用燃料の導入に踏みきっている中、一刻も早くわが国がバイ

オマス・アジア戦略を具現化することが重要である。

また、注目すべきはアジアで石油の輸入が輸入量が大幅に増加していることである。石油の消費量が2003年に10億410万トンであるのに対して、純輸入量は6億5,500万トンである。アジアの石油需給の推移を見ると、石油需要が1990年では6億1,800万トンから年平均3.8%で増加し、2003年には10億410万トンに達している。アジアでは中国、インドネシア、マレーシア、インドなどが産油国であるが、基本的には生産量が横ばいであり、石油消費の伸びに追いつかない状況にある<sup>(9)</sup>。このために石油需給の逼迫やコスト高が予想され、CO<sub>2</sub>の増大も懸念されている。このような状況の下、再生可能エネルギーであるバイオマスから石油代替燃料の製造が強く期待されている。

1つの提言として、図6に示すように廃棄物系の固形バイオマスをガス化して合成ガスを製造し、これからメタノール、DME、ディーゼル代替燃料など輸送用の液体燃料を製造する技術の確立を急ぐべきと考える。アジア地域の石油依存度を低下させ、石油価格の高騰をヘッジする意味でも、また地球温暖化現象を抑制する意味でも、わが国がリーダーシップをとって戦略的プロジェクトを構築すべきであろう。

## 6. おわりに

以上、思うところを述べたが、バイオマスと

一口で言っても、国内の廃棄物系バイオマスとアジア諸国を視野に入れたエネルギー作物の利用とは自ずと戦略が異なってくるのはいうまでもない。また、バイオマスの種類によってもその利用技術が大きく違っている。まず、国内においては廃棄物系バイオマスの処理という観点からのアプローチがある。廃棄物は環境保全から規制が強化される方向にある。すなわち、「家畜排泄物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」や「食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律」が施行されている。一方、電力については、徐々に規制が緩和されている。すなわち、電気事業法が改正され大口需要家に対して電力小売が自由化され、電力会社以外の供給者が電気の小売りをできるようになった。このような規制強化と規制緩和の接点にビジネスチャンスが生まれる。森林系バイオマスについては、前述したように、林業関係者の一層の自助努力がまず求められる。林業をビジネスとして再生することが肝要であり、そのために間伐材、林地残材を色々な形で利用し、その利用のオプションとしてエネルギー利用があると考える。

アジア諸国との連携が前提の「バイオマス・アジア戦略」は国内バイオマスの利用とは全く異なった視点が必要である。将来のアジア地域の環境とエネルギー問題はわが国とも密接な関係がある中で、双方にとって便益の期待できる枠組みの設定が重要である。アジア諸国といっても国毎に多様であり、きめ細かい対応が求められる。

#### 参考文献

- (1) 産経新聞，平成17年8月27日朝刊
- (2) 平成14年度「バイオマスエネルギー導入ガイドブック」，新エネルギー・産業技術総合開発機構
- (3) 笹内謙一，「バイオマスの熱分解ガス化による発電利用」，日本燃焼学会誌，47巻（139号），31-39（2005）
- (4) 朝日新聞，平成17年2月5日朝刊
- (5) 平成15年度バイオマスエネルギー高効率転換技術開発成果報告会予稿集，11-12，平成16年12月3日（川崎）
- (6) 日本エネルギー学会大14回日本エネルギー学会大会講演予稿集，166-167，平成17年8月5日（大阪）
- (7) JITAセミナー「バイオマスからの自動車用液体燃料製造の展望」予稿集，47-50，平成15年10月8日（東京）
- (8) 平成15年「森林再生とバイオマスエネルギー利用促進21世紀グリーンプラン」，経済同友会環境委員会資料
- (9) 田辺靖雄編著，アジアエネルギーパートナーシップ，16-17，エネルギーフォーラム（平成16年10月）

## 農畜産業系バイオマスの利用と課題

柚山 義人 (独)農業工学研究所 地域資源部  
資源循環研究室 室長



### 1. はじめに

バイオマスの利活用は、資源循環や環境保全に貢献し、農業と工業分野の協働を含む産学官・市民の連携による持続可能な地域社会の構築に大きな役割を果たす。2000年5月の「循環型社会形成促進基本法」の制定や2002年12月の「バイオマス・ニッポン総合戦略」<sup>(1)</sup>の策定等がその取組みを後押ししている。同戦略では、2010年までに500以上の市町村がバイオマスの利活用を推進することを目標としている。バイオマスのエネルギー変換は地球温暖化防止対策になる場合があり、京都議定書が2005年2月16日に発効したのを受けて進むと思われる。開発した技術を外国へ導入して施策を講じると、京都メカニズム<sup>(2)</sup>に基づき、共同実施 (JI: Joint Imprementation), クリーン開発メカニズム (CDM: Clean Development Mechanism) の対象となり、温室効果ガス削減量としてカウントされる。しかし、変換方法そのものとともに、原料バイオマスの収集方法や副産物の処分が適切でないと、かえって地球温暖化を促進してしまうという危険性をはらんでいる。

バイオマスの利活用は、現在の経済的価値基準で必ずしも採算がとれなくとも、外部不経済の解消が必要な時代にあって環境保全に資する方法で進める必要がある。これまでのバイオマスに係る事業制度は、ソフト、ハード事業とも多岐にわたっていたが、例えば農林水産省関連分は平成17年度から「バイオマ

スの環づくり交付金」に一本化された。これにより、地域に柔軟な裁量が委ねられるとともに、より確実な成果が求められる。

本稿では、わが国で発生・生産されるバイオマスの中で圧倒的に量が多い農畜産業系のバイオマスに焦点をあてて、筆者が関係している研究の内容を中心に紹介する。なお、本稿では、「バイオマス」をバイオマス・ニッポン総合戦略により「再生可能な、生物由来の有機性資源で化石資源を除いたもの」と定義する。この定義は、人間による利用に力点をおいたものと言える。具体的には、家畜糞尿、食品廃棄物、生活系廃水汚泥、農作物非食用部、林地残材、資源作物等をバイオマスと呼ぶ。これらは、ポテンシャルとしてのバイオマス資源と理解すべきである。人間が介在したバイオマスは、収集、変換して価値が生じ、実用上の資源と呼べる状態になる。

### 2. バイオマス利活用と農村振興

バイオマス利活用の推進<sup>(3)</sup>にあたっては、持続的な地域資源の管理、信頼できる運営組織、確実な再生資源の需要及び輸送が重要である。構想や計画づくりの主体 (推進役, 担当者) は多様であり、多くの機関・組織が関わることになる。バイオマスの利活用は地域特性に大きく委ねられ、地域独自の創意工夫や合意形成を図っていくプロセスが大切である。行政が主体の場合もあるし、企業やNPOが主体の場合もある。対象とするバイオマス

の種類、変換の方法も千差万別である。先行事例に学び、情報をうまく活用しつつ、オンリーワンの構想を立てるといった気概が必要である。構想・計画づくり、バイオマス変換プラントの建設、運営の各段階において中心となる主体は異なり、先の長い活動となる。このため、構想づくりの段階から、目標年次、スケジュール、後継者、達成感を味わせるインセンティブの維持を意識することが望まれる。このように、バイオマス利活用は、農村振興（地域づくり）の中にしっかりと位置づけて進める必要がある。

バイオマスの利活用は、地域の自然条件、社会基盤、産業社会構造を色濃く反映したものになる。利活用法によるが、輸送や地縁・生活圏の問題から、概ね30km以内の空間規模で議論が進むことが多い。どのような構想や計画の提案についても、提案・企画者自ら、または地方自治体等の担当部署は、現状を正しく認識した上で、構想や計画の効果や正負の影響を早い段階で分析する必要がある。筆者は、この作業を「地域診断」<sup>(4)</sup>と呼んでいる。地域診断の目的は、バイオマスの利活用が持続的で健全であることを見極め、何か問題があれば別の方法の検討につなげることにある。このため、複数案の比較、対象地域の範囲の検討、変換方法や組合せの検討、変換施設の規模・配置及び機能分担の検討、需要と供給の量及び時空間バランスの確認などを行う。

### 3. 適用性の高いバイオマス変換技術とその評価

バイオマス利活用には、いわゆる廃棄物処分の側面が強いものと新たなマテリアル・エネルギー生産の側面が強いものがある。個別変換技術については、堆肥化、メタン発酵、炭化などの従来技術が需要者ニーズに合うように改良されてくるとともに、各種の新しい技術が開発され実証試験が始まっている。農畜産業系バイオマスは、飼料、堆肥、液肥、

表1 農畜産分野における技術開発例

- |   |
|---|
| ① 臭気対策のための吸引通気方式堆肥化技術                             |
| ② 成分調整型成型肥料（堆肥ペレット）化技術                            |
| ③ 豚舎汚水からのリン酸アンモニウムマグネシウム（MAP）方式によるリン回収技術          |
| ④ エネルギー自立型乾式メタン発酵技術                               |
| ⑤ 家畜糞の過熱水蒸気式炭化と食品廃棄物の乾燥・飼料化を組み合わせた多段階利用エネルギー化システム |
| ⑥ 廃糖蜜やビール廃液から水素発酵バイオリアフターにより燃料電池原料物質を製造する技術       |
| ⑦ 微粉碎したバイオマスからのメタノール生成技術                          |
| ⑧ ナタネやひまわりからのBDF製造技術                              |
| ⑨ さとうきび、小麦、牧草からのバイオエタノール製造技術                      |

炭化物などのマテリアル利用を主とするが、地域にこれらの需要がない場合にエネルギー化を考えるとというスタンスが一般的である。農畜産業分野が、ここ数年にわたってバイオマス利活用のために開発してきた技術には表1のようなものがある<sup>(5)</sup>。

ここでは、各種のバイオマス変換技術について、性能とコストの試算を行った研究結果の一部を紹介する。この研究では、まず、原料となるバイオマスの性状をとりまとめている。性状設定の項目は、熱的変換技術の熱量計算に含水率が、生物的変換技術の性能計算に分解率が必要であることから、大きく「水分」と「固形物」に、固形物は「有機物」と「無機物」に、さらに有機物は「微生物分解性」と「難分解性」に分類している。これにより各種のバイオマス原料を混合して変換しようとする場合にも必要な性状の情報が得られる。また、エネルギー収支や再生資源を農地施用した場合の肥効を検討できるよう、C（炭素）、N（窒素）、P（リン）、K（カリウム）の含有率についても設定している。家畜排せつ物、食品加工残さ、生ごみ、汚泥類及び農林業残さに対して、適用性の高いバイオマス変換技術は表2に示すように整理された。

バイオマスの変換技術は、再生資源をマテリアル利用するものとエネルギー利用するものに大別できる。表3は、バイオマスのエネルギー化技術のうち、実用段階にあるもの、

表2 適用性の高いバイオマス変換技術

対象バイオマス			変換技術								
			堆肥化	湿式 メタン発酵	乾式 メタン発酵	炭化	飼料化	BDF化	直接燃焼	熔融ガス化	固形燃料化
家畜排せつ物	肉牛糞尿	混合	○	○	○	○					
	乳牛糞尿	分離	○	○	○						
		混合	○	○	○						
	豚糞尿	分離	○	○	○						
		混合	○	○	○						
鶏糞	プロイラー	○			○			○			
食品加工残さ	おから(豆乳粕)		○	○	○		○				
	焼酎粕(芋)		○	○	○		○				
	精糖残さ(バガス)		○	○	○		○				
ゴミ	廃食用油			○	○			○	○		
	生ごみ		○	○	○	○				○	
	可燃ゴミ		○		○	○				○	
汚泥類	下水汚泥		○	○		○					
	し尿		○	○		○					
	浄化槽汚泥		○	○		○					
農林業残さ	林産残さ(木くず)							○		○	
	農産残さ(もみ殻)					○		○			

表3 バイオマスのエネルギー化技術

種類		変換によって得られるエネルギー または生成物	対象バイオマス	段階
熱的 変換 技術	炭化, 固形燃料化	炭, 木質ペレット, RDF	木質系 食品廃棄物	実用
	エステル化による バイオディーゼル油合成	メチルエステル (ディーゼル機関用燃料)	廃食用油	実用
	直接燃焼	熱 (ストーブ, ボイラー), 電気・熱 (蒸気タービン発電)	木質系	実用
	ガス化 (部分酸化)	電気・熱 (蒸気タービン・ガスタービン発電), 合成メタノール (自動車用燃料)	木質系	実証
生物 的 変換 技術	メタン発酵	電気・熱 (ガスエンジン発電)	家畜排せつ物 食品廃棄物	実用
	エタノール発酵	エタノール (自動車用燃料)	糖・でんぷん系 木質系	実用 実証
	嫌気性発酵による水素生産	電気・熱 (水素ガス→燃料電池)	糖・でんぷん系 家畜排せつ物	研究
	光合成による水素生産			

(出所: 日本農業土木総合研究所, 2003 (6) を基に作成)

実証や研究の段階であってもその導入の必要性が高いと思われるものについて整理したものである。

バイオマスの変換に関する情報としては、何を原料に、どのくらいの量から、何がどのくらい生成できるか、そのために必要なエネルギーはいかほどか、環境への負荷はいかほどかなどが重要である。この研究では表2に示した各種変換技術について、技術の特徴と物質・エネルギー収支に関わる情報をとりま

とめている。熱収支の試算は、主として施設規模25t/dについて検討し、1t/d当りに換算している。この場合、施設規模が小さくなれば体積当りの表面積が大きくなり放熱量が増大し、その対策として保温のための建設費がかかったり、加温のエネルギーが必要となったり、適当な大きさの発電機が無かったりする。このため、試算結果は、任意の施設規模に対する1t/d当りの熱収支を表現するものではない。図1はメタン発酵技術について、乳牛糞

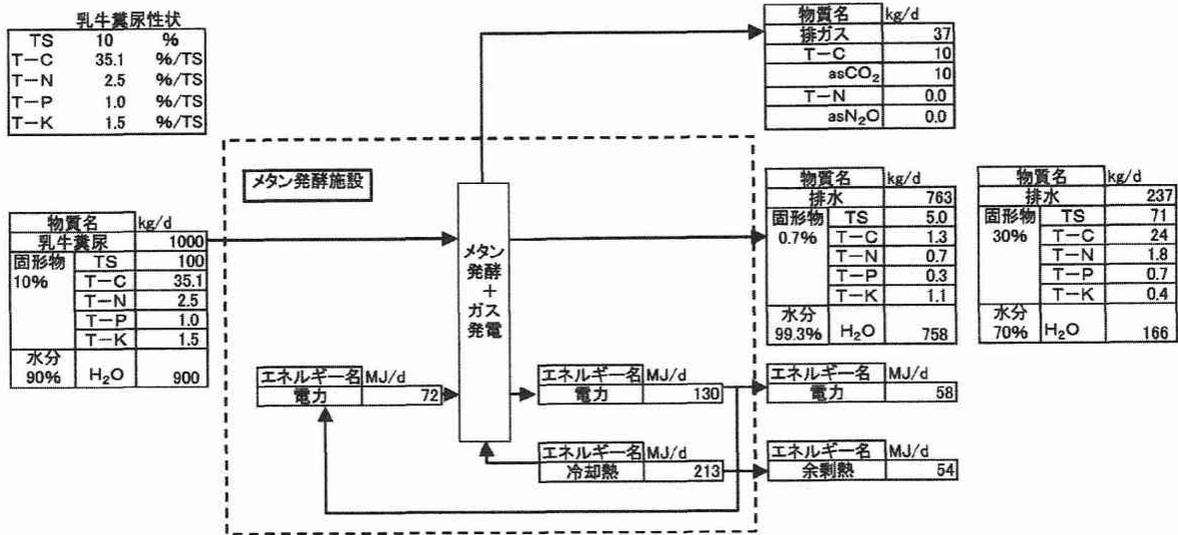


図1 乳牛糞尿を原料とするメタン発酵（25t/d規模）の特性評価

尿1トンを原料とした場合の物質・エネルギー収支を求めた例である。メタン生成効率や必要エネルギー等は、原料の種類や温度によって変化する。

コストの試算は、乳牛糞尿と食品廃棄物（生ごみ等）を対象に行っている。乳牛糞尿については、メタン発酵（消化液を液肥利用する場合と固液分離後に堆肥化及び水処理する場合の2通り）、炭化及び堆肥化について試算された。食品廃棄物については、メタン発酵

（同上）、炭化、溶融ガス化、固形燃料化及び堆肥化について試算された。検討した施設規模は基本的にバイオマス原料量25、50および100t/dの3ケースであった。総コストは、変換施設の建設費、維持管理費及び処理受託費や製品販売利益等の収入を考慮し、20年間での必要経費として算出している。例として、メタン発酵に関するコスト試算結果を表4に示す。

表4 メタン発酵に関するコスト試算結果

原料 (タイプ)	規模 (t/d)	支出		収入			総コスト 計 (百万円)
		建設費 (百万円)	維持管理費 (百万円/y)	販売利益 (百万円/y)	処理受託費 (百万円/y)	合計 (百万円/y)	
乳牛糞尿 (液肥利用)	25	540	24.25	9.43	4.56	13.99	1,015
	50	940	33.47	19.22	9.13	28.34	1,512
	100	1,637	46.37	39.02	18.25	57.27	2,238
生ごみ (液肥利用)	25	1,090	33.33	18.51	136.88	155.38	-806
	50	1,898	49.93	38.62	273.75	312.37	-2,402
	100	3,304	76.21	80.11	547.50	627.61	-6,072
乳牛糞尿 (堆肥利用+ 水処理)	25	900	51.77	12.46	4.56	17.02	2,045
	50	1,567	86.13	25.20	9.13	34.33	3,387
	100	2,728	143.46	50.49	18.25	68.74	5,586
生ごみ (堆肥利用+ 水処理)	25	1,350	53.71	11.43	136.88	148.31	133
	50	2,350	89.62	26.48	273.75	300.23	-687
	100	4,092	146.39	58.80	547.50	606.30	-3,060

※総コスト=建設費×1.5+（維持管理費-収入）×20年

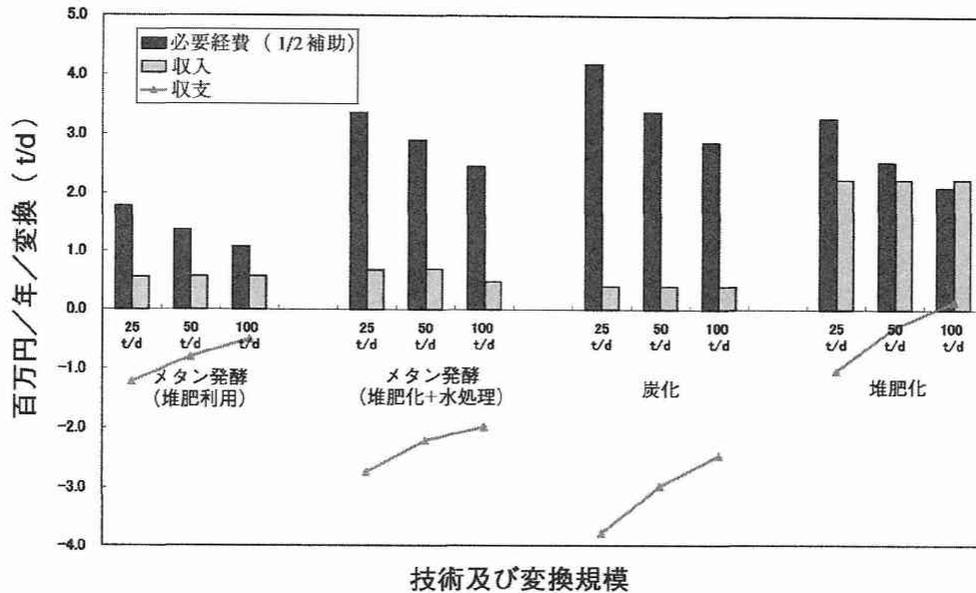


図2 乳牛糞尿の変換技術とコスト（建設費2分の1補助の場合）

乳牛糞尿を原料として、湿式メタン発酵（「液肥利用」と「堆肥化+水処理」の2ケース）、炭化及び堆肥化を適用した場合のコストの試算結果を図2に示す。必要経費は、建設費の負担分（補助を受けない金額）を耐用年数と考えられる20年で割った額と年維持管理費の和である。100t/d規模の堆肥化を除き、いずれの場合も収支はマイナスとなっている。スケールメリットについては、施設規模の拡大によって採算性の改善傾向があると判断できる。なお、ここでは各種変換施設単独の試算を行っており、収集・運搬費を考慮していないこと、製品は100%販売できるとしていること、売電価格は買電電力の削減とみなし買電価格と等価と設定していることなどにより、それでも現実より採算性が見込める設定となっていることに注意する必要がある。

#### 4. バイオマス多段階利用の地域実証研究

地域においてバイオマスを持続的に利活用していくためには、その生産・収集・変換・利用を有機的につなぎ、地域の実情に即したシステムを構築することが必要である。また、収集・変換効率の高い技術の開発、バイオマ

スから得られる製品としての物質や燃料の多様化や付加価値を高める技術の開発、製品価値の高い順にできるだけ長く繰返し利用し、最終的にはエネルギー利用するといった多段階的な利用技術の開発などにより、全体として効率の高いシステムを開発・実用化していくことが重要となっている。「バイオマス・ニッポン総合戦略」においても、地域の中で発生するバイオマスを原料として多種多様な有用物質や燃料を体系的に生産・利用するバイオマス多段階利用システムの構築を技術開発の1つの方向性としている。

農林水産省農林水産技術会議事務局のプロジェクト研究「農林水産バイオリサイクル」において、筆者がユニットリーダーを務める「システム実用化千葉ユニット」<sup>(7)</sup>は、平成16～18年度の3カ年計画で、「千葉県北東部におけるバイオマス多段階利用システムの構築及び実証」を進めている<sup>(8)</sup>。本実証研究は、「農林水産バイオリサイクル研究」において、全国5カ所で実施されているバイオマス多段階利用システムの実証のうち、「都市近郊農畜産業型」として、千葉県香取郡山田町を中心とする地域を対象に、「地域モデル」の作成と、実際に試作・設置したバイオマス変換プラン

表5 「農林水産バイオリサイクル」の参画機関

- ① 独立行政法人農業工学研究所  
地域資源部資源循環研究室・農地整備部畑整備研究室
- ② 国立大学法人東京大学生産技術研究所（迫田研究室）
- ③ バイオマス研究開発組合（代表：荏原製作所）  
（荏原製作所、大阪ガス、中国メンテナンス、日東高圧、農事組合法人和郷園）
- ④ 千葉県農業総合研究センター・畜産総合研究センター・森林研究センター
- ⑤ 千葉県環境生活部資源循環推進課バイオマス・プロジェクトチーム
- ⑥ 千葉県香取郡山田町

ト群を用いた実証を行うものである。

具体的には、産官学・地元の協働により、多段階利用システムの構想作成、推進・運営体制の整備、諸手続の実施、プラント群の設計・試作・設置・運転・性能試験、物質・エネルギー収支の解析、経済性の検討、環境への影響評価などを行い、システムの有効性、課題及びその解決方向を明らかにしていくことにしている。要素技術としては、メタン発酵、メタン吸蔵、炭化、水蒸気爆砕、堆肥化

を用いる。これらのプロセス間における中間生成物や駆動エネルギーのやりとりによって、化石資源を極力使わず原料バイオマスを使いつくすことを基本コンセプトとしている。たとえば、製造したメタンは、炭化及びバイオマス輸送用の軽トラックの燃料として使用する。参画機関は表5のとおりである。

現時点でのプラント群の構成を図3に、プラント群の全景を図4に示す。プラント群の規模は、試験研究のための予算額と協力が得られる範囲を考慮し、山田町全体の最大ポテンシャルと比較すると約100分の1である。メタン発酵プラントへ牛糞尿や食品加工残渣などの原料バイオマスを生重量ベースで1日当たり約5トン投入する規模である。この量は、約100頭の牛の糞尿量に相当する。メタン発酵消化液を常識的なコスト、エネルギー投入で有用な農業生産資材に変換する技術開発は、重点事項の1つである。平成17年度はプラント群の設置を終えて、性能試験、環境への影響調査、再生資源の活用試験を実施する予定である。

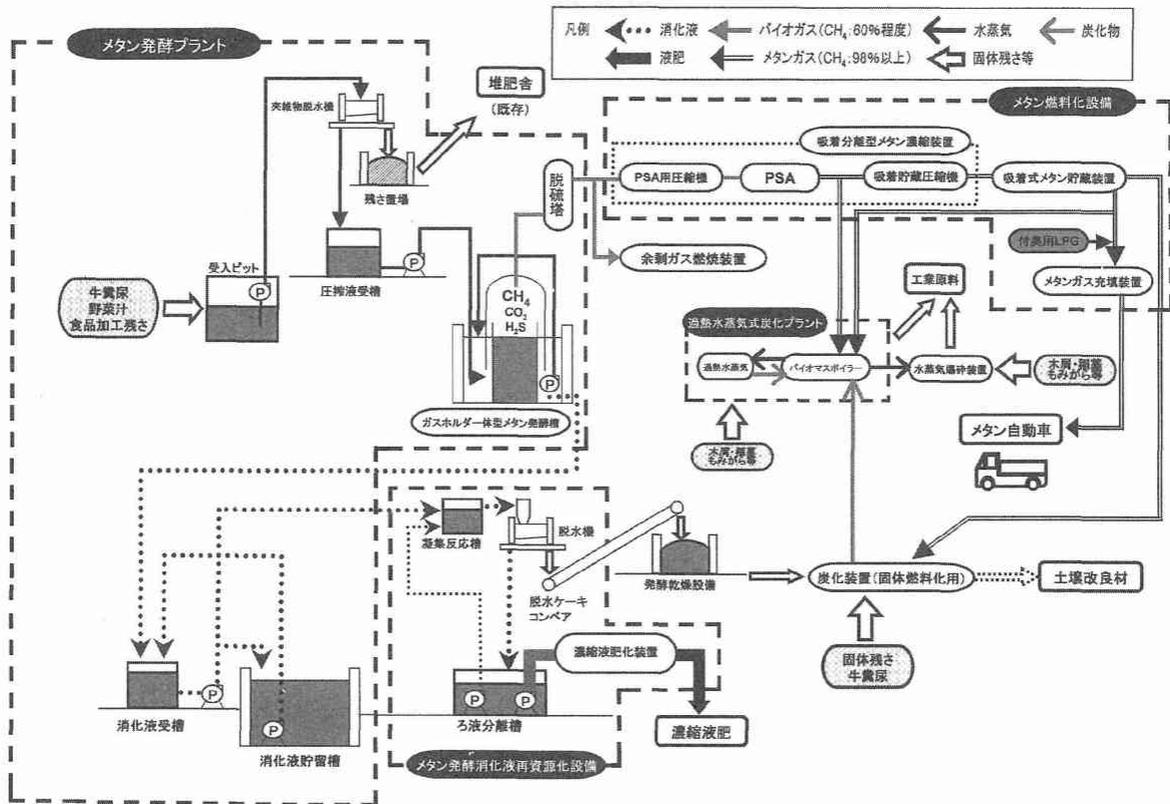


図3 山田バイオマスプラントの概要

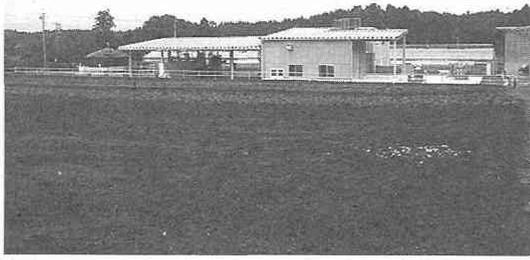


図4 山田バイオマスプラントの全景

## 5. バイオマス利活用の評価手法

公的資金を用いてバイオマスの利活用を推進する場合には、説明責任を果たして社会的合意を得ること、施策の達成度を定量的に評価することが求められる。施策の実施は、物質収支、エネルギー収支、環境への影響、安全性、経済性、運営組織からみた妥当性、地域の社会・経済への波及効果などから総合的に判断する必要がある。評価に際しては、評価目的、比較対象及び手順を明確にしておく必要がある。

バイオマス利活用に関わる評価指標群には、表6の条件が含まれていることが望ましい。

持続性は根本的な評価指標といえる。経済性は、建設費、減価償却費、維持管理費を全て含むライフサイクルコストで評価すべきである。近年では、さらに環境負荷回収コストを加えたフルコストで評価すべきという考え方も出てきている。地域での負担という観点からは、国や県からの補助金を差し引いて計算する場合がある。農業を軸として考えた場合の評価指標としては、単位面積当りの堆

表6 評価指標群に求められる条件

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>①評価目的に適合し、わかりやすい。</li> <li>②持続性（時間的、空間的）が検討できる。</li> <li>③ライフサイクルコストが比較できる。</li> <li>④常識的な信頼度をもつデータが入手できる。</li> <li>⑤外部経済促進や外部不経済解消への貢献（環境改善、健康予防）が評価できる</li> </ul> |
|--|

肥・液肥による化学肥料代替度，土壤の適正肥沃度，有機性廃棄物の最終処分量の減少度及び再資源化率の増加度，農地・畜産施設から水域への流出負荷量の減少度及び温室効果ガス発生量の減少度，耕種農業への投入化石資源の減少度，地域内食料・飼料自給率の上昇度などが考えられる。効率的な投資を考えるならば，前記項目を経費で割ればよい。評価に際しては，バイオマス利活用システムの境界設定の妥当性が常に問題となる。

## 6. バイオマス利活用推進に向けての課題と方策

バイオマスの利活用を推進するための課題とその解決方策<sup>(3)</sup>は，以下のように整理される。

### (1) 政策による誘導方向と制度設計

採算がとれるバイオマスには市場が競合し，その先行取得により結果として変換しづらいバイオマスは放置または廃棄せざるを得なくなり，地域全体で考えると循環型社会の形成に資さない事象が起こり得る。政策による適正な誘導により産学官の連携がとれてはじめて健全なバイオマスの利活用が実現する。利活用システムの構築に当っては，発生（生産）・収集・変換・配送・利用の全プロセスを通して化石資源使用と環境負荷が小さいシステムが選択される必要がある。長距離輸送のために膨大な化石資源が消費されたり，再生資源（変換によって得られる製品やエネルギー）の保存のためによりやっかいな廃棄物となる添加物が用いられたりするようでは仮に循環が進んだとしても持続性という観点からはマイナスの活動となる。バイオマス利活用の方法が不適であると，せっかくバイオマスが吸収したCO<sub>2</sub>やN<sub>2</sub>をCH<sub>4</sub>やN<sub>2</sub>Oの形態で大気へ放出し，地球温暖化を促進してしまう。バイオマスの生産（発生），輸送，変換，サービスにもエネルギーが使用される。今後は，

LCA（ライフサイクルアセスメント）や経済・環境統合勘定による解析が進み、環境への負荷の小さい利活用システムが指向される。有機性廃棄物の減量化を軽んじた循環量の増大は本末転倒である。

施策の推進に当っては、運営組織づくりなどを支援するソフト事業の先行、再生資源の需要と流通ルートの確保、公共性の高いシステムのランニングコストの一部公的負担、バイオマス発電普及のためのさらなる売電価格の上昇、堆肥等の農地還元利用に係わる環境保全のためのルールづくりなどが不可欠である。また、実績の少ない変換技術を適用する場合には、性能設計の導入が効果的である。変換施設の耐用年数が技術の完成度や施設の使用予定期間に応じて設定できると経費を削減できる可能性がある。地域特性を考慮したシステムを構築するためには、交付金（補助金）要件や設計基準が柔軟に設定されている必要がある。

## （2）変換方法の選択と施設規模・配置

地域レベルでバイオマスの利活用を検討するに当っては、まず対象地域においてバイオマス資源となり得る原料の発生場所及び質・量、移動量、既存変換施設の位置及び性能、再生資源の需要場所及び量を把握するなどの地域診断が必要である。変換の方法は、再生資源の需要が確実なものでなければいけない。

公的資金を用いたバイオマス資源利活用システムは、行政区域が単位対象範囲となることが多いが、変換の方法と地域特性によって適正空間規模は異なる。大規模集中と小規模分散のどちらが優位かを見極める必要がある。1カ所で原料から再生資源の完成品を製造する場合、複数箇所で中間生成物を製造し1箇所で作上げる場合、1カ所で中間生成物を製造し数多くの末端利用場所で仕上げる場合のいずれが適切かについても検討する必要がある。施設は固定式であることが一般的であるが、移動式についても比較検討する価値がある。

1種類の変換技術施設で効果的なバイオマスの利活用を見込めない場合には、数種類の施設を組み合わせることで中間生成物やエネルギーをやりとりし、より価値の高い再生資源を製造したり、環境負荷や化石資源の消費を少なくしたり、バイオマス資源を利用し尽くすことにより最終廃棄物量を少なくするという方法がある。ただし、複雑すぎるシステムはリスクを高めるので注意が必要である。また、地域に存在するバイオマスの全てを利活用することは不可能なので、埋め立て処分を資源管理の中で適切に位置づける必要がある。

原料としてのバイオマスから資源の回収を進めたとしても、河川への直接放流には適さない濃度の排水が発生する場合には、農業集落排水処理施設などの汚水処理システムとの連携が効果的である。

事業の採算性については、厳密な計算が必要である。メタン発酵によるエネルギー回収を例にとると、用地費、施設建設費、補助率、事業規模、処理単価、売電単価、発電効率、堆肥単価、人件費、廃棄物の引受け単価、環境への負荷の許容度、液肥の農・牧草地利用の有無が支配的な要因となる<sup>(9)</sup>。

## （3）ガイドラインの整備と情報の体系化

バイオマスの利活用を推進するためには、地域診断の結果を受けて、資源循環施策シナリオを作成していくことになる。このために、地域内での合意形成を図りながらあるべき循環を実現していく手順を示す参考手引書のようなガイドラインの整備が望まれている。また、情報があふれる時代にあって、スクリーニングされた良質の情報の体系化と公開が求められている。

土壌診断に基づく堆肥・液肥施用マニュアルの整備について考えてみよう。堆肥の品質は多様であり、その種類別、気象別、土壌別、作物別、連用の程度別に施用基準を作成することは容易なことではない。堆肥は化学肥料に比べると、肥効時期に関する安定性が小さいが、様々な条件変化に対する緩衝性は大きい。

い。域内で生産される堆肥が化学肥料にとってかわる分は、確実に化学肥料施用量が減少する。堆肥の生産量が時期的にはほぼ一定であるのに対して、堆肥利用は時期が限られている。堆肥や液肥をいつ、どのくらい農地へ施用すべきか、あるいは農地は受入可能かを十分に検討しておかなければならない。堆肥を連続して施用すると作物への肥効率が上昇するため、継続的なモニタリングに基づく土壌診断により化学肥料とのバランスを含む施肥設計が修正されていくことが良質の土づくりや地下水の硝酸汚染防止の前提となる。

#### (4) 輸送の担い手と手段

バイオマス利活用上のネックの1つは輸送である。輸送には、輸送手段の確保が必要であるとともに、エネルギー、コスト、時間がかかる。例えば、畜産糞尿由来の堆肥や液肥の利用を考えると、畜産農家、耕種農家とも、糞尿や堆肥・液肥の輸送に時間をさけなかったり、重労働に耐えられなかったりする状況にある。堆肥・液肥の需要を推進するためには農地への散布サービスの付加が不可欠になりつつある。輸送のためのエネルギーに化石資源が大量に使われるのは望ましくないので、できるだけバイオマスの変換で得られるエネルギーを燃料として使うことを考える必要がある。

車での輸送とともに、肥培灌漑、生ごみディスポーザー、集落排水のパイプライン真空圧送技術の応用、既存の用排水システムの活用なども検討の余地がある。

#### (5) 生物機能の維持増進と営農方法の選択

バイオマスの利活用を進める上では、生物機能の維持増進、太陽の恵みを活かせる生態系の保全が前提となる。営農に関しては、窒素固定菌、ラン藻の生息場所拡大による空中窒素固定量の増大、休耕田を活用した飼料稲の栽培、生産速度の大きいトウモロコシ、サトウキビ、ソルガム、熱帯牧草、ケナフなどの資源作物の生産、農地を裸地にしないため

のカバークロップの作付け、2毛作や地域輪作の実施、有機農業への転換、有害物質除去のためのクリーニングクロップの作付け、などが望ましい方向である。

#### (6) 技術水準の向上と新ビジネス

個別変換技術においては、さらなる変換効率の向上、廃棄物発生量の最小化、減量化のための脱水技術や再生資源の取扱い性向上に資する前後処理技術の充実、移動式変換施設の開発等が求められている。希少資源であるリンの効率的回収、液肥（メタン発酵消化液）の活用、日本の道路、農地の基盤整備状況、営農体系にあった輸送・散布用の機械、資源循環を前提とした基盤整備などは特に待ち望まれている技術である。

地方公共団体、水土里ネット、農業改良センター、廃棄物処理業者、JAなどには、資源循環を新たな重要任務と位置づけることが期待される。再生資源の新用途開発は、新たな需要を創出する上で重要である。例えば、事故や自然災害に備えた燃料電池の配備は社会資本の整備にも貢献する。

資源管理や信頼関係のネットワーク構築支援は、新ビジネスとなり得る。トレーサビリティ機能付きリアルタイム資源管理システム、環境・資源循環健全度評価システム、バイオマス・リファイナリーの企画・運営支援、再生資源の需要予測、廃棄物・再生資源マッチング用顧客仲介などは、貢献度が大きいと考えられる。

#### (7) リスクコミュニケーション

有機性廃棄物を変換し、飼料や堆肥として利用するにはリスクを伴う。重金属、環境ホルモン、ダイオキシン、BSEなど生き物の安全を脅かす物質の生成が危惧される現在、資源の利活用は安全と安心を支える信頼関係の構築無しには成立しない。運命共同体としての信頼性とコスト高を覚悟したトレーサビリティによる安全性検証の実施のバランスを検討すべき時期にきている。作業者の安全・

衛生の確保も重要である。ISO14001\*や HACCP\*\*など品質管理やリスク管理の考え方が参考になる。また、バイオマス変換施設にもトラブルは起こり、近隣の者にとっては迷惑施設という現実を直視する必要がある。

#### (8) 市民の自覚と役割

市民が世の中を動かす時代である。農業を軸にバイオマスの利活用を考えると、消費者の行動により大幅な食料・飼料自給率の上昇、有機農業の飛躍的推進、「地産地消」、「旬産旬消」運動の展開が図られることが不可欠である。また、ごみの発生量を抑制するとともに、利活用システムが確立された後には生ごみを分別して一定の鮮度を保持した状態で収集場所に持ち寄るなど、ボランティアを含めて元々は税金である行政コストを小さくしていくことが大切である。

### 7. おわりに

バイオマスの利活用は、気運が高まり、産学官の連携が強化されつつある今、一気に制度設計を行い、研究資源や資金を投入して道筋をつけたい。様々な機関が掲げている上位目標は、バイオマス・ニッポン総合戦略で示されている目標と共通点が多いが、各々の機関の思惑は多様であり、競争も激化してきている。バイオマスの利活用に係わる施策や活動が、心の豊かさ、時間のゆとりの確保、健康増進につながり、循環型社会の形成に真に貢献することを祈りたい。

本稿作成に当っては、筆者が関わっているプロジェクト研究で得られつつある経験のほか、バイオマスに関わる数多くのシンポジウム、会合、委員会等で収集した情報や討議を

参考にした。実証研究は、農林水産バイオリサイクル研究「施設・システム化チーム」リーダーである農業工学研究所の高橋順二部長のもとで実施している。チームリーダーと委託元の農林水産技術会議事務局の御指導に感謝申し上げる。バイオマス研究開発組合に参加頂いているメーカー等の方々には、本研究の推進のために大きな役割を担って頂いている。また、地元の方々の御理解と御協力、千葉県バイオマス・プロジェクトチームおよび山田町の主体的な参画なしに、実証を目的とし、通常の事業とほぼ同様の法規制を受ける本研究は成立しない。関係者全員の惜しみない努力の積み重ねに敬意を表する。

#### 引用文献

- (1) バイオマス・ニッポン総合戦略HP:<http://www.maff.go.jp/biomass/index.html>(2005年8月26日最終確認)
- (2) 岸本吉生：京都議定書の発効と京都メカニズム活用の推進に向けて、産業と環境、34(2), pp.25~30, 2005
- (3) 柚山義人・森 淳・中村真人・清水夏樹：有機性資源の利活用推進方策、農業土木学会誌、72(8), pp.13~18, 2004
- (4) 柚山義人：バイオマス利活用のための地域診断、講座「バイオマス利活用」(その1)、農業土木学会誌、73(6), pp.37-42, 2005
- (5) 市戸万丈：農林水産分野における取り組み、総合科学技術会議環境担当議員・内閣府政策統括官共編「ゴミゼロ社会への挑戦」、日経BP社、pp.47~49, 2004
- (6) 日本農業土木総合研究所：平成14年度地域資源リサイクル等における事業効率化推進検討調査報告書、第3章pp.1~2, 2003
- (7) 農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」HP: (<http://www.nkk.affrc.go.jp/kenkyu/pro/baioresaikuru/chiba/index.html>)
- (8) 柚山義人・迫田章義：バイオマス多段階利用システムの構築及び実証試験、シンポジウム「地域のバイオマス利活用推進に向けたチャレンジ」、農林水産バイオリサイクル研究「施設・システム化チーム」、東京、pp.97-110, 2004
- (9) エックス都市研究所：平成14年度バイオマス利活用事業導入モデル検討調査報告書、2003

\* ISO14001とは、国際標準化機構 (ISO) が定めた「環境マネジメントシステム規格」。組織が自主的に環境方針および目的を定め、その実現のための計画 (Plan) を立て、それを実施及び運用 (Do) し、その結果を点検及び是正 (Check) し、さらに次のステップを目指した見直しを行う (Act) というPDCAサイクルを確立することによって、環境マネジメントシステムを継続的に向上させ、環境に与える有害な負荷を減少させることを狙いとする。

\*\*HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point: 危害分析及び重要管理点) とは、原材料の生産から、製造・加工、流通、更に調理・消費に至る食品の各段階における安全性を確保する自主的な取組のこと。

## 「バイオマスエネルギーテクノロジー・ ロードマップ策定に関する調査」について



田村 隆之 (財)エネルギー総合工学研究所  
主任研究員

### 1. はじめに

バイオマスは様々な表現されるが、「再生可能な生物由来の有機性資源で化石資源を除いたもの」と定義され、原理的には太陽エネルギーの恵みであることから薄く広く分布する特性を有している。このため、エネルギー利用を考えると収集・運搬・処理の経済性から地産地消が有効であり、分散型エネルギー源としての宿命を背負うことになる。

バイオマス普及の鍵を握ると見られるのが「バイオマスエネルギー変換技術」の開発・実用化であり、それには更なる技術の改良・開発が必要と考えられる。その状況を把握し今

後の戦略的展開を図るためロードマップ策定の必要性が資源エネルギー庁より発案された。当所では、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の指導の下に、「バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ策定に関する調査」(平成16年1月～6月)を実施し報告書\*を取りまとめた。

### 2. 日本のバイオマスエネルギー利用の可能性と現状

賦存量とは、利用の可否に関係なく理論的に算出する年間あたりの生産可能なバイオマスの量である。エネルギー利用可能量とは

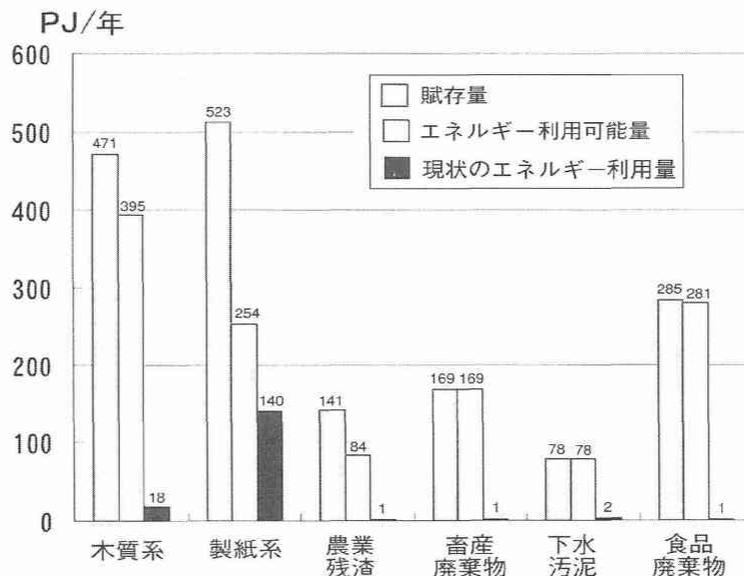


図1 バイオマスのエネルギー利用可能量と現状 (2002年)

\*内容は「平成15年度成果報告書 バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ策定に関する調査」(平成16年6月)としてNEDOから公開されている。

賦存量のうち技術的・経済的に収集可能な全ての量であり、現在行われている堆肥化、飼料利用等の資源利用量も含まれる。現状のエネルギー利用量とは、実際にエネルギー源として使用している量を指す。

日本のバイオマス賦存量は、1,667PJ\*\*/年（原油換算量4,300万 Q）、エネルギー利用可能量はその76%の1,261PJ/年（原油換算量3,300万 Q）である。一次エネルギー供給量に占める割合はそれぞれ7%と5%であるが、現状のエネルギー利用量は、黒液利用を含めても利用可能量の13%、含まないと4%ときわめて低調と言える。

図1に賦存量、エネルギー利用可能量、現状のエネルギー利用量を示す。農業残渣、畜産廃棄物、下水汚泥、食品廃棄物ではほとんどエネルギー利用がなされていない。

### 3. バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ

#### (1) 整理・評価方法

バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ（以下、本ロードマップ）は、経済性の

表1 エネルギー転換技術の検討条件

● バイオマス：	「木質」「食品」「蓄ふん」「下水汚泥」の4種類
● 変換技術：	「熱化学」「生物化学」「その他」の3種類
● エネルギー形態：	「電気・熱」「気体燃料」「液体燃料」「固体燃料」の4形態
● 時間軸：	「2010年」「2020年」の2つ



図2 検討・評価の概念図

制約から普及していない新エネルギーの導入を目標として、エネルギー変換技術を整理・評価しているが、その際、「バイオマス種」、「関連技術（エネルギー転換技術、前処理、後処理）」、さらに時間軸（現状、2010年頃、2020年以降）を加味した。表1に主な検討条件を、図2に検討の概念図を示す。

#### (2) 技術ロードマップと特性ロードマップ

本ロードマップは、技術ロードマップと特性ロードマップの2つで構成される。さらに技術ロードマップは、要素技術ロードマップとシステム技術ロードマップから成る。

##### ① 技術ロードマップ

###### 「要素技術ロードマップ」

バイオマスエネルギー変換システムの開発を実施しているメーカーを対象にヒアリングを行い、図3に示す「バイオマス種-変換プロセス-最終エネルギー形態」に適合した、前処理技術、変換技術、後処理技術、周辺技術までを網羅的に調査して、「要素技術ロードマップ」を作成し、要素技術で整理したシステムフロー図も整理した。表2に要素技術ロードマップの例を示す。

###### 「システム技術ロードマップ」

システム技術ロードマップは、要素技術ロードマップが各要素技術に焦点を当てているのに対して、バイオマスエネルギー変換の前処理からエネルギー形態までを通したエネルギー変換システムそのものに関するロードマップである。木質バイオマスから電力を得るシステム技術ロードマップの例を表3および図4に示す。

\*\*1PJ（ペタジュール）=2.58258×10<sup>4</sup>原油換算量

1. 木質—直接燃焼—電力・蒸気
2. 木質—熱分解ガス化改質—電力・メタノール(蒸気)
3. 木質—エタノール発酵—エタノール
4. 下水汚泥—水熱ガス化改質—電力(改質ガス)
5. 下水汚泥—熱分解ガス化改質—電力(水素)
6. 下水汚泥—メタン発酵—電力・メタン含有ガス
7. 食品廃棄物—メタン発酵—電力・メタン・水素
8. 食品廃棄物—熱分解ガス化改質—電力・メタノール(蒸気)
9. 生ゴミ—メタン発酵—電力・メタン・水素
10. 畜産廃棄物—メタン発酵—電力・メタン
11. その他

図3 検討したエネルギー変換システム

表2 要素技術ロードマップの例(木質—直接燃焼—電力)

技術内容		現状	開発要素等	2010年	開発要素等	2020年	特徴
前処理	・破砕 数十mm以下に破砕(チップで受入の場合は不要)。	商用化済み					<p>廃熱を利用するなど、全体システムの最適化を図ることによって、高効率な乾燥が可能となる。</p> <p>バイオマス発熱量を石炭並に高めることが可能となる。また、バイオマススラリー化が容易であることから、液体燃料としても提供可能となる。</p> <p>既存の微粉炭火力で混焼した場合、インフラの有効利用が可能で、電気事業での利用促進が図られる。</p> <p>加水分解及び油中乾燥技術により、脱水・脱酸素が可能であり、バイオマス発熱量を石炭並に高めることが可能となる。また、バイオマススラリー化が容易であることから、液体燃料としても提供可能となる。</p>
	・廃熱・熱風乾燥 発電発熱(GE排気等)、熱風発生炉を用いて、含水率20%程度まで乾燥。 真空乾燥：真空炉で乾燥。	商用化済み					
	・水熱改質 加水分解により、脱水・脱酸素を行う。約70%の熱分解で脱水可能。	実証試験	商用化				
	・微粉砕(混焼) 微粉砕機を用いて、微粉炭火力での混焼用に粉砕する。	実証試験	商用化				
	・油中改質 約90%の熱効率で改質できる見込み。褐炭の脱水事業を実証中/食品加工残渣で基礎研究中。	基礎研究	商用化				
エネルギー変換	・ストーカ燃焼 直径250mmの木片も燃焼可能。	商用化済み					<p>燃費費食への対応。SH材料や配置の最適化が必要。</p> <p>部分燃焼部と熱分解ガス化を分離するため、精製ガスの後発熱量(3000~400kcal/m<sup>3</sup>N)化が可能</p> <p>高効率な既存火力設備を利用可能であるが、立地点が限られるため、バイオマスの収集に課題が残る。</p> <p>排ガスの浄化で広く普及しており、技術の成熟度は高い。</p> <p>清浄なバイオマスの場合に適応可能。バグフィルタよりもコストが安い。</p> <p>排ガスの浄化で広く普及しており、技術の成熟度は高い。</p> <p>重金属類を多く含んだ建設廃材を処理する場合に、必要となる場合あり。</p> <p>大規模施設は、効率・コスト・信頼性面で有利。成熟した技術である。</p> <p>小規模施設でも採用可能であるが、蒸気の供給先の存在が必須である。</p>
	・気流流動層燃焼 木屑粒径：440℃×5MPa 木屑化燃料混焼：540℃×13MPa	商用化済み					
	・外部循環流動層燃焼 塩素系食対策のため、最終段のSHは、循環砂の中に設置する。 蒸気：525℃×12MPa	実証試験	商用化				
	・混焼(微粉炭ボイラ等) 微粉炭ミルへの投入、または専用粉砕機による混焼。	実証試験	商用化				
	・バグフィルタろ布を用いて脱じんを行う。差期の散布により脱塵も可能。	商用化済み					
後処理	・電気集じん器 静電気力により、脱塵のみを行う。	商用化済み					<p>自己燃焼熱による灰溶解技術(廃棄物のガス化溶解技術の応用)</p>
	・脱酸設備 触媒脱酸(SCR)の採用	商用化済み					
	・焼却灰溶解 別置き灰溶解炉	商用化済み					
	・蒸気タービン発電 大規模で効果大。小規模ではタービン効率が悪く低下する傾向あり。	商用化済み					
	・蒸気供給 熱帯用のみならず、10t/d規模からでも適用可能。	商用化済み					
周辺	・燃料利用	商用化済み					<p>大規模施設は、効率・コスト・信頼性面で有利。成熟した技術である。</p> <p>小規模施設でも採用可能であるが、蒸気の供給先の存在が必須である。</p>
	・蒸気タービン発電 大規模で効果大。小規模ではタービン効率が悪く低下する傾向あり。	商用化済み					
システム	エネルギー効率	発電率：15% 送電率：12% SMWクラス		2010年 発電率：20-25% 送電率：17% SMWクラス 但し塩素濃度1ppm		2020年 発電率：20-25% 送電率：17% SMWクラス 但し塩素濃度3ppm	特徴
	経済性	1500万円/t/d		1200万円/t/d		1200万円/t/d	

表3 システム技術ロードマップ (木質—電力)

バイオマス種	主エネルギー	エネルギー形態	前処理	エネルギー変換	後処理	周辺	燃料利用	現在	2010年	2020年～	技術開発要素・課題等 長所・短所等	
木質	電力 (蒸気・改質ガス)	蒸気・電力 300 t/d規模	・破砕	・流動層ボイラー燃焼による蒸気発生 ⇒木屑専焼：440℃×6MPa 木屑化石燃料混焼：540℃×13MPa	・バグフィルター			実用化済み			・製紙工場等 ・外部循環型流動層の採用によるSH 燃焼腐食防止で、蒸気条件向上	
		電力・蒸気 100 t/d以上	・不要 (チップにて受入れ)	・外部流動層ボイラー燃焼による蒸気発生 ⇒最終段のSHは、循環砂の中に設置する。 蒸気：525℃×12MPa	(担当外)	(担当外)	(担当外)	実証試験 排ガス NOx：100ppm SO2：130ppm	発電効率が25% 燃料中塩素許容：1% 排ガスNOx：30ppm SO2：130ppm	発電効率が25% 燃料中塩素許容：3% 排ガスNOx：10ppm SO2：10ppm	・外部循環型流動層の採用によるSH 燃焼腐食防止で、蒸気条件向上	
	電力(改質ガス) 100vd以下	木屑の破砕	熱分解ガス化 固定移動床 1000℃ 改質 900-1000℃ 酸還元ガス化の利用	触媒フィルター 備じん、有害物質 除去			ガスエンジン/2010 水素生成/2020 燃料電池/2020	実証試験(NEDO) NOx：100ppm 建設費：2千万円(t/d) 発電コスト：40円/kWh	NOx：130ppm 建設費：1.5千万円(t/d) 発電コスト：15円/kWh 送電効率：25/20% 冷ガス効率：70%	NOx：10ppm 建設費：1千万円(t/d) 発電コスト：15円/kWh 送電効率：35/25%	下水汚泥処理場隣接地域	
	電力(燃焼) 50 t/d以上	・破砕(50-250mm) ストロカの場合や台 形物がない場合には、 破砕不要	・ストロカ燃焼 または ・流動層燃焼	・触媒腐蝕 ・バグフィルターまた はEP ・灰溶融(重金属対策)	・耐食SH/2010 ⇒塩素による腐食 防止	・蒸気タービン発電		実用化済み ボイラ効率：80% 発電効率が15%(1MW級) 建設費：3千万円(t/d) 発電設備：10-20万円/kW バグ=ばいじん除去： 99%、SOx：80% 脱硝：80%	ボイラ効率：80% 発電効率が20%(1MW級) 建設費：1.5千万円(t/d)		・SH開発等による蒸気条件の向上 ⇒HC1濃度90 ppm以下なら、腐食なし	
	電力(熱) 30-50 t/d程度	破砕(16-100mm)	・固定床ガス化 ⇒含水率30-55%程度の木質バイオマス が対象。100℃程度で空気供給により、 ガス化。フットドラフトタイプで、 高含水率バイオマスを供給するため、 生成ガスがガス化炉出口温度は、 7.5℃程度である。発熱量は、1300- 1400kcal/m <sup>3</sup> N。冷ガス効率70-80%程 度。	・タール除去 ⇒タールは、重質と軽 質を分けて除去する。 重質分については、ガ ス化炉へ再度供給。 軽質分は、燃焼させ、 燃焼熱で水を蒸発さ せて、無排水とする。 ・ばいじん除去 ⇒湿式電気集塵機			ガスエンジン	実用化済み(海外導入技術) 発電効率が30% 送電効率が22% NOx：250ppm(脱硝なし) 建設費：2500万円(t/d) 発電コスト：11円/kWh (建設補助60%を考慮)	発電効率が35% 送電効率が30% タール処理の高度化によ る効率向上		・排ガス処理の簡素化のため、不純物を含ま ない木質を想定。将来は、建廃等にも対 応する技術を考えるが、今は未定である。 ・熱分解ガスの熱量を直接電気に利用する ため、乾燥機が不要。また、ガス冷却器も 不要である。ただし、低含水率の場合には、 水分調整が必要。	
	改質ガス(電力等) 20 t/d以上	・破砕(50-100mm) ・乾燥 40-60%→10-30% GE廃熱(400℃)利用	・流動層熱分解 ⇒ガス化流動層。流動 化剤O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O ・改質(約1000℃)	・生成ガスの利用形態 により、選定 ⇒改質炉、スクラバ、 精製等を組み合わせ	・ガスエンジン/2004 ・燃料電池/2020		実証試験(NEDO(産業物)) G E発電 NOx：50ppm	実用化 G E発電 NOx：50ppm 送電効率：25/14% H2S：100ppm			・乾燥効率向上のため、ガスエンジン燃焼の 高温化技術が必要 ⇒バルブ材質、冷却機構の開発により400→7 00℃程度まで高温化。乾燥効率が80→90%へ ・廃棄物ガス定価発電の応用 ・直接燃焼より小規模でも発電可能	
	電力(改質ガス) 10-300 t/d程度	・破砕 (50-100mm)	・内部循環流動層による熱分解ガス化 ⇒700℃程度による熱分解ガス化。高 発熱量ガスの生成が可能。 3000-4000kcal/m <sup>3</sup>	・バグフィルター ・スクラバ/2004 ・乾式精製/2010			・発電利用 ・燃料利用 ・合成ガス製造 ・液体燃料製造		実証試験(NEDO技術開発) G E発電 発電効率が20% 送電効率が15% NOx：30ppm 建設費：100百万円(t/d) 発電コスト：50円/kWh	G E発電 発電効率が30% 送電効率が25% NOx：30ppm 建設費：50百万円(t/d) 発電コスト：15円/kWh	F C発電 NOx：10ppm 送電効率が35/24% H2S：燃料電池による	・改質炉の小型化による熱損失の低減 ⇒改質ガス+酸素供給バーナによる高効率 改質
	電力(熱) 20 t/d以上	・破砕(12mm) ・乾燥(30%以下)	・固定床ガス化 ⇒1000℃程度で空気供給により、ガ ス化。生成ガス発熱量は、千数百kcal/ m <sup>3</sup> N。冷ガス効率60-70%程度。 ・生成ガスを多段階完全燃焼。 ⇒サーマルNOxの生成防止 ・排ガスボイラーで蒸気を発生させ、 タービン発電	・バグフィルター ⇒排ガスボイラー出口に 設置			・蒸気タービン	実用化済み(海外導入技術) 発電効率が28% 送電効率が24% NOx：50ppm(脱硝なし) 建設費：12百万円(t/d) 発電コスト：4.5円/kWh ↑以上の値は、200dクラスの 場合。	発電効率が29% 送電効率が25.5% NOx：40ppm(脱硝なし) 建設費：11百万円(t/d) 発電コスト：4.1円/kWh	発電効率が30% 送電効率が26.5% NOx：30ppm(脱硝なし) 建設費：11百万円(t/d) 発電コスト：3.0円/kWh	・排ガス処理の簡素化のため、不純物を含ま ない木質を想定。将来は、建廃等にも対応す る技術を考えるが、今は未定である。 ・小規模では、完全燃焼させず、GE等も必 要である	
	電力(水素) 10 t/d以上	・乾燥 (60%→30%)	・キルンガス化 ・ガス改質	・スクラバ ・バグフィルター	・ガスエンジン/2010 ・MCFC,SOFC/2020			実証試験(NEDO未活用) G E発電 発電効率が20% 送電効率が15% NOx：30ppm 建設費：100百万円(t/d) 発電コスト：50円/kWh	G E発電 発電効率が30% 送電効率が25% NOx：30ppm 建設費：50百万円(t/d) 発電コスト：15円/kWh	F C発電 発電効率が40% 送電効率が35% NOx：30ppm 建設費：30百万円(t/d) 発電コスト：9円/kWh		
	電力 0.5-10 t/d以上	・破砕 ・乾燥	・流動層熱分解	・石灰火力設備使用	・ガスタービン発電			実証試験(NEDO技術開発) 建設費：100万円/kW	建設費：50万円/kW 発電効率が20%	建設費：25万円/kW		・冷ガス効率向上のため、ガス化炉の中にフ ィルターを組み込む技術が必要 ・所内率低減・簡素化のため、常圧タービン が必要 ・小型化=不特定多数のユーザーが想定され る ⇒安全性の確保が重要視される。 (ガスタール技術等)
電力	・破砕	・粉砕機ボイラーへ投入 ⇒システム1：石灰ミルへの投入。 5%上段? システム2：専用粉砕機・ バーナーの設置。20%上段?	・サイクロン ・フィルタ				実証試験	実用化				



図4 エネルギー転換技術システムフロー図の例(木質—直接燃焼—電力)

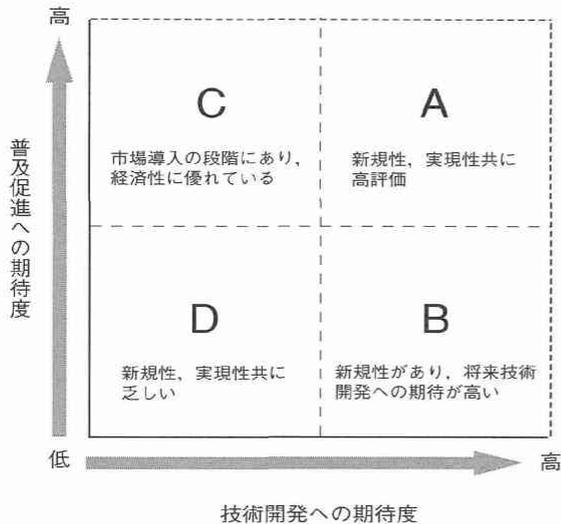


図5 2010年断面

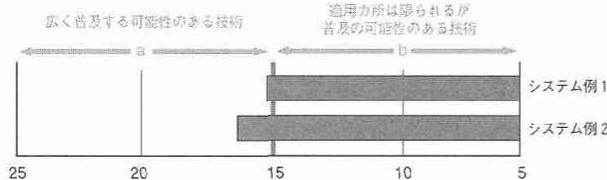


図6 2020年以降

## ② 特性ロードマップ

特性ロードマップは、バイオマスエネルギー変換技術の特性を示すものである。作成法であるが、まず、現在、2010年、2020年以降の時間軸で、木質系、下水汚泥系、食品・畜産系のバイオマス毎に整理した。次に、前処理からエネルギー変換、後処理に至るまでの41種類のシステム技術ロードマップについて、2010年時点での評価軸として、「エネルギー効率」、「環境特性」、「経済性」、「実現性」、「新規性」の5つについて評価した。他方、2020年時点での評価軸ではシステムの将来性について、◎、○、△の3段階評価を実施した。

実施結果をもとに、2010年断面での「エネルギー変換効率」、「環境特性」、「新規性」に優れたものを「開発を推進すべき技術」とし、「実現性」、「経済性」に優れたものを「技術導入・普及に注力すべき技術」として図5のよ

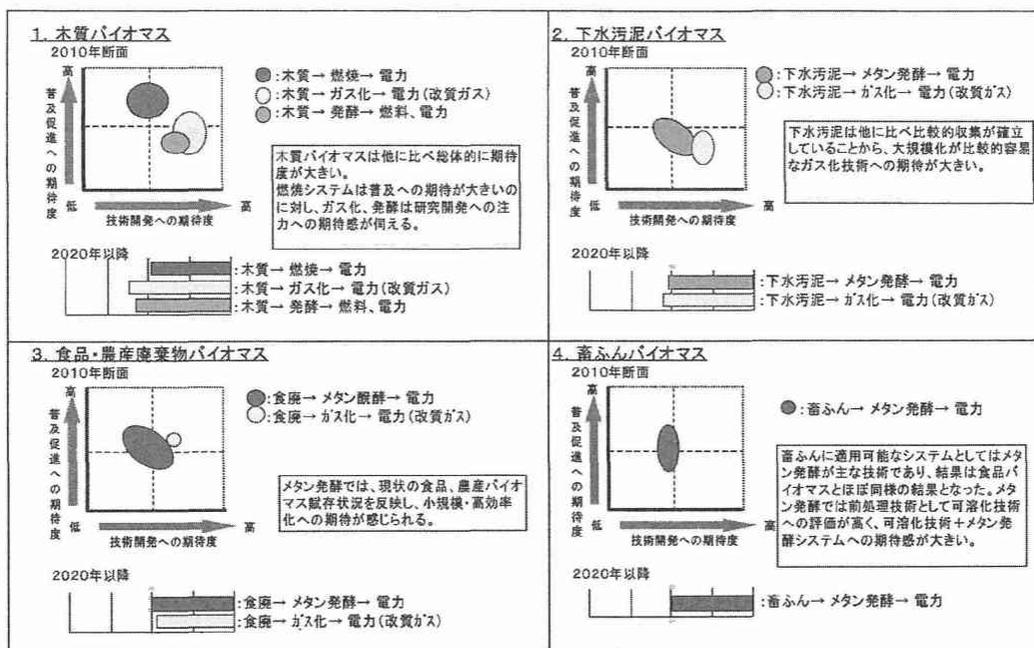


図7 特性ロードマップ

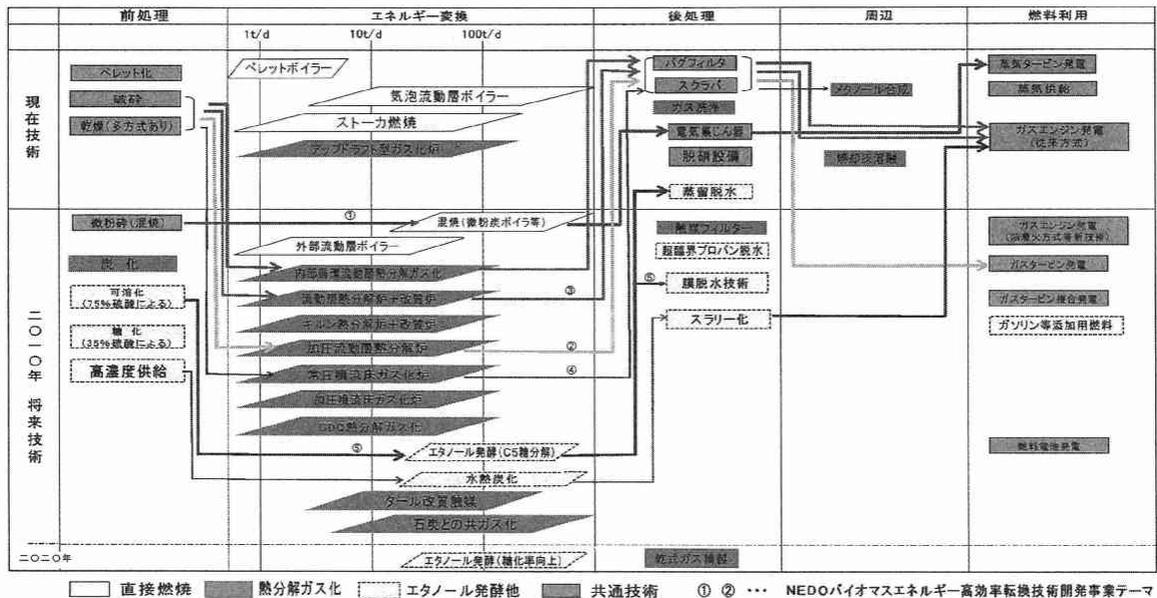


図8 バイオマス技術集約図（木質）

うに整理した。また、2020年以降については、図6のように将来性の検討から「広く普及する可能性のある技術」、「適用箇所は限られるものの普及の可能性のある技術」の2つに整理した。それらの結果である「特性ロードマップ」の例を図7に示す。

### (3) ロードマップ技術集約図

前処理から周辺技術に至るまでの要素技術及びシステムの調査技術を基にバイオマス種毎にエネルギー変換システムの各要素を加味し整理したロードマップ技術集約図を技術ロードマップの一環として作成した。木質の例を図8に示す。

## 4. 分析結果

エネルギー変換効率、諸特性の分析を踏まえ検討した結果、全体としては、木質、下水汚泥バイオマスを適用対象とした変換システムに高い評価が得られる傾向があった。これは評価基準にバイオマス種賦存量を勘案していないものの、評価を行った有識者に木質、下水汚泥バイオマス種への期待感が現れていると見受けられる。

また、2020年への期待感として、「バイオガス→燃料電池原料ガス」の構図が色濃い。しかし、水素リッチガス製造のためにはメタン改質が必要なこともあり、その場合でも「ガス化→メタン発酵」の傾向が伺える。

液体燃料製造はどちらかと言うと2010年より2020年への期待が大きい。これは変換エネルギーの多様化の観点から重要な技術とする認識によるものであろう。

下記にバイオマス種-変換システム毎の考察を述べる。

### ① 木質から電力への変換

適用規模をみれば、ガス化システムはガス化炉の特性から中規模処理に適するのに対し、石炭混焼システムは大規模への適用に期待が寄せられる。特にガス化システムについては、将来燃料電池への適用可能性を見出せる点からも重要なシステムであると見受けられる。これに対し数t/d規模の小規模システムについては、「燃焼+熱利用」もしくは固形燃料生成が有利であり、設備費用、効率の点から、技術開発要素はほとんど無いと見られるものの、経済性向上面の更なる検討が必要であると考えられる。

## ②木質からエタノール、メタノール他への変換

2020年においては、エタノール製造システムは混焼システムと同程度の評価となった。これは、木質利用の主流となるガス化から電力への変換システムに加え、エタノール製造は液体燃料としての有意な特徴（生成エネルギーの貯蔵が可能、及び発電はもちろんのこと車両燃料への適用が可能）に期待が大きいことが反映されていると見受けられる。

## ③下水汚泥から電力への変換

下水汚泥バイオマスへの期待は木質から電力への変換ほどは高くない。これは、賦存量、利用可能エネルギーの差によるものと考えられる。

2010年においては、熱化学変化によるガス化システムがメタン発酵システムより期待が高い。これは、下水汚泥は他バイオマスと比べ収集システムが確立していることから、大量処理が可能なガス化システムへ期待が寄せられているためと見受けられる。

2020年においては、下水汚泥の流動層ガス化から燃料電池、ガスエンジンでの発電に関して期待されるシステムとされている。

## ④食品廃棄物、食品残渣から電力、熱への変換

2010年においてはメタンガス化システムが高い期待となった。これはバイオマスから直接水素生成が可能な点が高く期待されたものと見受けられる。

2020年においては、ユーザーからの期待としては小規模処理への要求は大きいものがあることから、比較的小規模システムの構築が容易なメタン発酵システムはその適用に期待がかかる。

総体的に見て水素ガス→燃料電池は期待されている結果となった。これは燃料電池普及への期待の現れと考えられるが、ガス化に比べメタン発酵ではガス改質工程が追加になるなど、生成ガスに見合った最適システム構築が必要であると考えられる。

以上より、図9にバイオマス利用技術ロードマップ検討結果を取り纏めた概念図を示す。

## 5. 今後の課題

### (1) バイオマス利用に関するモデル事業の必要性

今回の検討では、エネルギー変換技術を中心とした技術の分類・整理を行ったが、今後はエネルギー変換技術の上流にあたる収集・運搬および、下流にあたるエネルギー利用までを含めたトータルシステムにおける検討が求められている。このことは自治体アンケート調査からも事業として成り立つモデルの構築と国の施策による「目に見える形でのバイオマス事業例」への期待が非常に大きいことを示している。

### (2) 2030年を見据えたバイオマスエネルギー先導研究の必要性

今回の調査は2010年～2020年の実用化を目指した技術について実施した。しかし大学・研究機関のアンケート結果よりさらに長期的視野（例えば、2030年）に立った先進的かつ革新的な技術の「シーズ」の探索、育成に資するバイオマスエネルギー利用技術の先導研究を推進することが指摘されている。

### (3) 総合システム解析・検討

現実的な自治体のバイオマス利用に関わる事例を調査し、バイオマス種と規模を定め、上流から下流までの流れの中で、技術面を中心とし、それに流通、社会体制面等も考慮したシステム検討（ケーススタディ）を行う必要がある。

また、それにより全体の熱・物質収支、構成技術、環境特性について検討するとともに、導入のキーとなる経済性の感度解析を行い、事業性を見通しをあきらかにする。バイオマスの供給、利用、その最終出口である廃棄物処理迄の流れが長期に安定して行なえるかどうかの見通しを明らかにすることが事業化には肝要である。

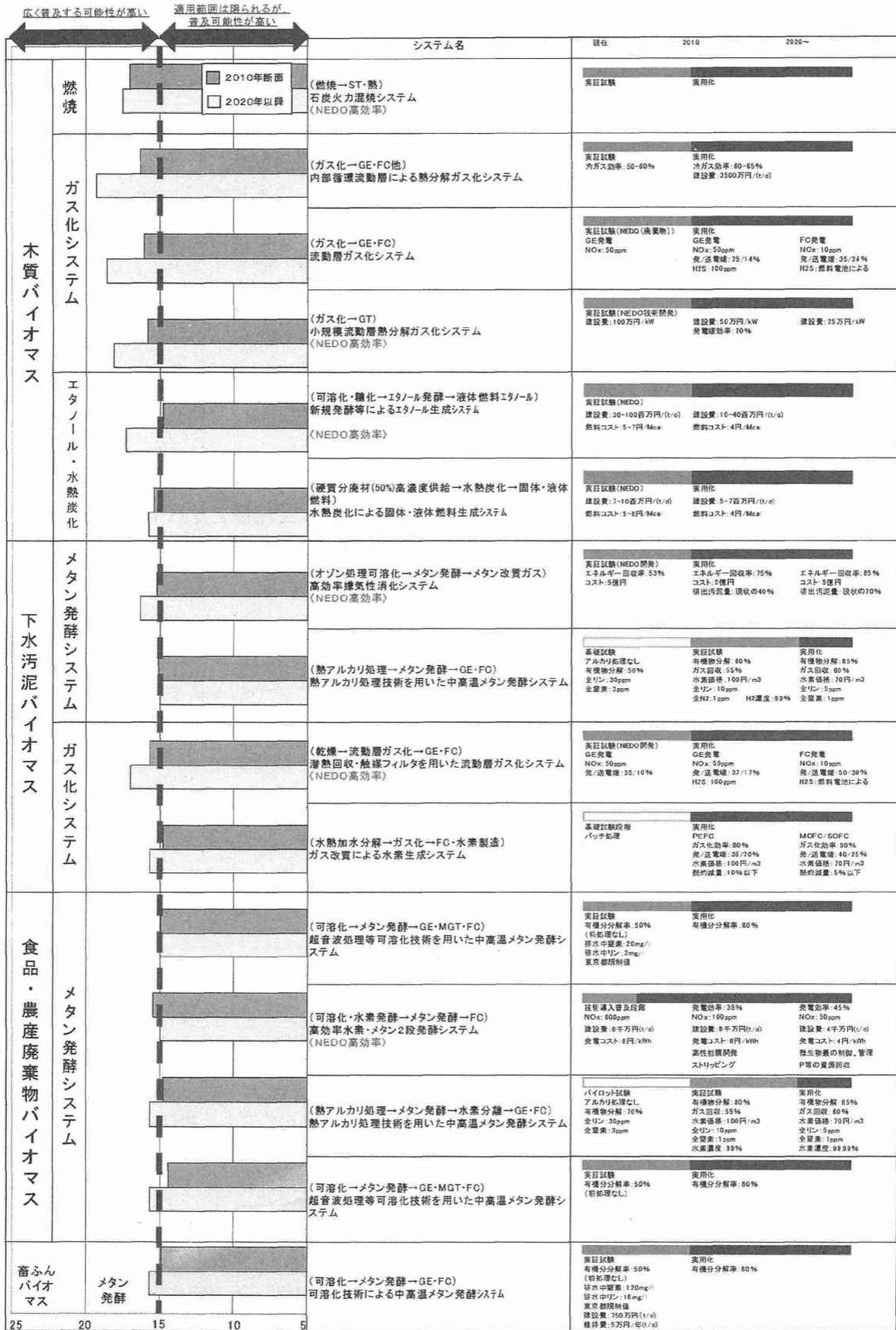


図9 バイオマス利用技術ロードマップ検討結果

これらを踏まえ、NEDOの委託を受け、冒頭調査研究の次段階研究として、「バイオマスエネルギー導入システムおよびロードマップ等に関する調査」（平成16年11月1日～平成17年8月29日）を実施した。同調査では、収集・運搬からエネルギー利用までを含めたバイオマス種毎のトータルシステムモデルの作成を行った。成果については、現在取りまとめ中である。

#### 謝辞

本プロジェクトで行った技術ロードマップの作成に関し、資源エネルギー庁（新エネルギー対策課）およびNEDOを初め、委員会の委員の方々、ワーキンググループの委員の皆様のご指導とご協力に感謝を申し上げ、ここに謝意を表します。

## 次世代原子力技術開発とわが国の取組の概況



小泉 真 範 ( 財)エネルギー総合工学研究所  
主管研究員

### 1. はじめに

将来、アジアの発展途上国を中心とした経済成長と人口増加に伴うエネルギー需要の大幅な増加が見込まれると共に、わが国や欧米主要各国の原子力プラントが2030年頃に大量リプレースの時代を迎えるといわれている。これらに対応するため、第4世代国際フォーラム (GIF: Generation IV International Forum) という国際的な枠組みの下に、高い経済性と安全性、放射性廃棄物発生量の抑制、核拡散抵抗性等を備えた第4世代原子力エネルギーシステムの研究開発が進められている。2005年2月には、米国ワシントンのフランス大使館にて「第4世代原子力エネルギーシステム技術開発」に関する包括的な協定がGIFメンバー国の日米英仏加の政府代表者によって調印された。

一方、これとは別にわが国においては、中長期的な原子力発電の技術開発について、本年6月に資源エネルギーの「原子力発電の技

術開発のあり方」研究会において、「今後の原子力の技術開発の対応について」がまとめられている。

以下では、原子力開発に関して、第4世代原子力エネルギーシステムとこれに関連する米国の研究開発およびわが国における原子力技術開発に関する動きについて、その概要を述べる。

### 2. 第4世代原子力エネルギーシステムの開発

第4世代原子力エネルギーシステムの開発は、現在6つのシステムが研究開発候補に挙げられている。今後、2030年迄の導入を目標に、実現可能性評価および性能評価が実施される。

現在、検討が進められている6つの原子力エネルギーシステムを概念を表1に示す<sup>(1)</sup>。4つの概念が高速炉システムであり、残りの

表1 第4世代原子力エネルギーシステムの候補

	中性子スペクトル	燃料サイクル	容量	利用目的	主要な研究開発項目
ナトリウム冷却高速炉 (SFR)	F	C	中型～大型	発電、AM	先進的燃料リサイクル
鉛合金冷却高速炉 (LFR)	F	C	小型～大型	発電、水素製造	燃料、材料両立性
ガス冷却高速炉 (GFR)	F	C	中型	発電、水素製造、AM	燃料、材料、安全性
超高温ガス炉 (VHTR)	T	C	中型	発電、水素製造、プロセスヒート	燃料、材料、水素製造
超臨界水炉 (SCWR)	T、F	O、C	大型	発電	材料、安全性
熔融塩炉 (MSR)	T	C	大型	発電、水素製造、AM	燃料、燃料取扱、材料、安全性及び信頼性

F: 高速炉、T: 熱中性子炉、C: クローズド燃料サイクル、O: オープン燃料サイクル、AM: アクチニド管理

2つの概念が熱中性子炉システムである。ただし、超臨界水炉（SCWR）は、将来的に、高速炉システム、クローズド燃料サイクルの開発も行うことを考えている。また、同じ概念でも、ナトリウム冷却高速炉（SFR）はタンク型とループ型、SCWRは圧力管型と圧力容器型の2種類が検討に挙がっている。

高速炉システムは、第4世代原子力エネルギーシステムの目標の1つであるプルトニウム（Pu）の燃焼による資源の有効利用やアクチノイドリサイクルによる廃棄物の削減を満たすために不可欠なシステムである。しかし、熱中性子炉システムにおいても、将来導入される原子力エネルギーシステムが1種類とは

限らないため、他の高速炉システムと組み合わせることによる相乗的な効果をあげる燃料サイクルシステムの開発を目指している。

6つの概念の特徴、利点、課題について表2に比較してある。

第4世代原子力エネルギーシステムの設計寿命は60年である。多くのシステムが高速炉システムを採用し、熱を水素製造等に利用することを目指しているため、原子炉出口温度が高くなっている。このため、燃料および炉材料について表3のような課題を有している。

また、第4世代原子力エネルギーシステムの開発はまず、今後数年から10年間程度かけて、システムの実現可能性評価が行なわれる

表2 第4世代原子力システムの比較

	特 徴	利 点	課 題
SFR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Na 冷却材</li> <li>出口温度 550℃</li> <li>出力 15~150 万 kWe</li> <li>金属合金/U-TRU 酸化物燃料</li> <li>プール型/ループ型</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軽水炉使用済燃料のアクチノイド燃焼</li> <li>廃棄物最小化</li> <li>燃料サイクルの持続可能性</li> <li>実績のある原子炉技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発中断を招くような技術的課題はない</li> <li>多くのシステムに共通な課題               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 経済性</li> <li>- 燃料リサイクルの核拡散抵抗性</li> </ul> </li> </ul>
LFR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pb-Bi/Pb 冷却材</li> <li>出口温度 550~800℃</li> <li>金属合金/U-TRU 窒化物燃料</li> <li>出力 5万~40 万 kWe</li> <li>カートリッジ方式の炉心燃料交換 (15~30 年毎)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>分散型エネルギー</li> <li>単純化設計 (炉容器内に U チューブ型熱交換器組込み)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉛冷却材中の材料、燃料の腐食管理 (15~30 年)</li> <li>出口温度を高くする場合の材料</li> <li>地震時挙動</li> </ul>
GFR	<ul style="list-style-type: none"> <li>ヘリウム冷却</li> <li>直接サイクル ガスタービン</li> <li>出口温度 850℃</li> <li>出力 60 万 kWt(28.8 万 kWe)</li> <li>U-TRU セラミック燃料</li> <li>複数の燃料形態及び炉心形状</li> <li>全アクチノイド リサイクル</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高発電効率</li> <li>廃棄物最小化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温、高フルエンス用の燃料、材料開発</li> <li>安全系</li> <li>燃料リサイクル技術</li> </ul>
VHTR	<ul style="list-style-type: none"> <li>ヘリウム冷却</li> <li>出口温度約 1,000℃</li> <li>水素製造プラントとの結合</li> <li>出力 60 万 kWt(MHTR ベース)</li> <li>被覆粒子燃料、固体黒鉛ブロック炉心</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高効率水素製造/発電</li> <li>静的安全機能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温燃料 (TRISO)、材料 (黒鉛、複合材、超合金)</li> <li>原子炉と水素製造プラントの安全結合</li> <li>廃棄物発生</li> </ul>
SCWR	<ul style="list-style-type: none"> <li>出口温度 510℃</li> <li>圧力 25MPa</li> <li>熱中性子炉/高速炉</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軽水炉に対し、高熱効率</li> <li>低ポンプ容量</li> <li>単純・小型 BOP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射線分解と水化学</li> <li>腐食、応力腐食割れ、炉心構造材料及び被覆材の微細構造安定性</li> </ul>
MSR	<ul style="list-style-type: none"> <li>U/Pu のフッ化物燃料</li> <li>出口温度 700~850℃</li> <li>黒鉛減速熱中性子炉</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軽水炉使用済燃料からのアクチノイドの燃焼</li> <li>オンライン燃料交換・処理</li> <li>従来型の燃料加工が不要</li> <li>低蒸気圧の燃料冷却材システム</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熔融塩ケミストリ</li> <li>構造材や黒鉛と照射熔融塩との両立性</li> <li>熱交換器への金属 FP の沈着</li> <li>新規規制レジムが必要</li> <li>複雑なプラント システム</li> </ul>

MHTR : Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor (モジュラー高温ガス炉)

TRISO : Tri Isotropic (三重被覆)

表3 燃料および炉材料に関する課題

<p>① 放射線損傷 設計寿命が60年の長期であることに加えて、特に高速炉システムにおける高い中性子フルエンスの影響</p> <p>② 高温 水素製造等の高温の熱利用を考慮しているため、BOPを含めた耐高温材料の問題。因みにVHTRが目標としている原子炉出口温度は1000℃以上で、異常時の許容制限温度を1600℃以上に設定する計画。今後、新材料の照射データの取得やASMEへの規格化等が必要</p> <p>③ 腐食（エロージョン、コロージョン） VHTRやGFRで冷却材として用いられる高流量のヘリウムの不純物対策、LFRの鉛合金ベースの冷却材やMSRの熔融塩システムおよびSCWRの超臨界水冷却材の燃料や構造材料に対する腐食対策</p> <p>④ 照射、高温、環境の複合的影響 上記の要因による複合的影響についての検討と対策</p>
--

が、6つの原子炉概念のうち、LFR（鉛合金冷却高速炉）、GFR（ガス冷却高速炉）、MSR（熔融塩炉）、SCWRの4つについては運転データがほとんど、あるいはまったくない。また、VHTR（超高温ガス炉）もこれまでの高温ガス炉よりもより高温を目指している。従って、研究開発は燃料や材料等のコンポーネントの問題に加えて、システム全体としての課題もあり、今後長期にわたり、順次これら課題に挑戦していくことになる。

### 3. 米国の第4世代原子力エネルギーシステムの関連開発研究

第4世代原子力エネルギーシステムの開発と関連の深い研究開発として、米国では原子力水素イニシアティブ（NHI）や先進的燃料サイクルイニシアティブ（AFCI）等の研究開発が進められている。以下ではNHIとAFCIについて概要を述べる。

#### （1）原子力水素イニシアティブ（NHI）<sup>(2)</sup>

原子力水素イニシアティブ（NHI）は、米国のエネルギー保障、エネルギー多様性および環境要求等に対応する水素経済の構築を目指し、2002年に公表された米国エネルギー省（DOE）のNational Hydrogen Roadmapに従った研究開発の1つである。開発の目標は原子力

エネルギーを使って2015年までに経済的な実用規模の水素製造を実証し、やがて到来する水素経済に燃料を供給する大規模でエミッションフリーな国産の水素製造能力が得られるようにすることである。

NHIの研究開発の重点は、大きく分けて次の3つである。

- 原子力水素製造プロセスの研究開発
  - 先進的高温原子炉に最も効率的に結合できる水素製造プロセスの開発
  - 候補プロセスは、熱化学的サイクルと温水蒸電解（High Temperature Electrolysis）
- 原子炉と水素製造システム等のインターフェースに関する研究
- 高温原子炉とプロセスプラントを結合するための高温熱輸送、熱交換器および材料の検討

米国では、次世代原子力プラント（Next Generation Nuclear Plant：NGNP）プロジェクトと呼ばれる先進的原子炉を用いた電力水素併産のプロジェクトを計画しており、第4世代原子力エネルギーシステムのVHTRの開発に先んじて、高温ガス炉を用いた水素製造システムの運転実証試験を2015年以降に行う計画である。

## (2) 先進的燃料サイクルイニシアティブ (AFCI) <sup>(3)</sup>

先進的燃料サイクルイニシアティブ (AFCI) の目的は核拡散抵抗性のある使用済燃料取扱技術と核変換技術を開発し、核燃料サイクルを現在のワンスルー (オープンサイクル) 型から持続可能なクロズドサイクル型へ移行させることにある。

AFCIの主な最終目標は次の2つである。

- 使用済燃料からの高レベル廃棄物の地層処分コストを低減する技術を開発し、処分場のパフォーマンスを強化する
- 第4世代原子力エネルギーシステムを支援するため、原子燃料と燃料サイクル技術を開発する

この目標を達成することによって、使用済燃料の有用なエネルギーを回収し、放射性廃棄物の第2処分場が必要になる時期を大幅に延期 (あるいは不要と) させ、米国の民生用プルトニウムのインベントリを急激に減少させることが可能になる。

AFCIは2007年～2009年の間に、第2処分場に対するDOE長官勧告のための技術情報を取りまとめる予定である。

AFCIの研究開発プログラムは次の中期と長期の両方の課題に総合的に取り組むことを計画している。

### ① 中期的課題

主に先進的分離技術の開発や既存炉、改良型炉およびおそらく近い将来に導入される見込みのガス冷却炉に核拡散抵抗性のあるリサイクル燃料を使うことにより、処分場に貯蔵される使用済燃料の減容と発熱量の低減を図る。

### ② 長期的課題

高速炉でマイナーアクチニド (超ウラン元素のうちプルトニウムを除いたもの、すなわちネプツニウム (Np)、アメリシウム (Am)、キュリウム (Cm) 等の総称) を燃焼・

破壊する燃料サイクル技術を開発し、地層処分場へ送られる高レベル廃棄物の長期的な放射性毒性と熱負荷の大幅な低減を図る。

AFCIの主なスケジュールは次のとおりである。

- 2008年のDOE長官勧告までに第2廃棄物処分場を必要としないオプションを準備する。
- 2012年までにNGNP用の燃料 (粒子燃料) の認定プログラムを完成する。
- 2015年までに第4世代原子力エネルギーシステムの高速度炉用燃料サイクルの詳細を明らかにする。

## 4. わが国の原子力技術開発の状況

わが国では、本年4月に新計画策定会議において、表4のような原子力発電にかかわる今後の中長期の基本的方向が示されている <sup>(4)</sup>。

わが国では、1898年まで、毎年連続して原子力発電の着工が行われ、最盛期には14基を超えたが、90年代以降は電源設備投資の減少に合わせて、原子力発電プラントの新規着工も激減し、現在建設中のプラントは4基である。この間、原子力産業界では新規プラント建設の減少に伴い、メーカーの設計・建設部門の技術者の減少が顕著になってきている。

わが国では2030年頃から既設の原子力発電所が順次代替 (リプレース) されていくことが想定されるが、それまでの間、必要な技術や人材をこれまで通り維持・確保していけるかどうか、深刻な課題となっている。

このような状況にあって、資源エネルギー庁に電力事業者、メーカー、学識経験者等で

表4 わが国の原子力発電に関わる基本的方向

- 2030年前後からは既設プラントを順次代替することを基本とし、炉型としては現行の軽水炉を改良したもので大型炉を中心に位置付ける。
- 標準化された中型軽水炉も選択肢として位置付け得る。
- 高速増殖炉については経済性などの諸条件が整うことを前提に、2050年頃から商業ベースでの導入を目指す。
- 高速増殖炉の導入条件が遅れる場合には、改良した軽水炉の導入を継続する。

構成されたメンバーにより、「原子力発電の技術開発のあり方」検討会が2005年初めに設置され、今後の原子力の技術開発の対応について中長期的な原子力の開発戦略等について議論が行われた<sup>(5)</sup>。

この検討会でまとめられた原子力技術開発対応の基本的方向は国、電力会社、原子力メーカーが将来ビジョンを共有し、焦点を絞った中長期的な技術開発戦略をたて、日本型次世代軽水炉開発のためのフィージビリティスタディ (FS) に着手すべきというものであり、この際の重要事項として、次を挙げている。

- 総花的なものでなく、焦点が明確で電力会社の炉型戦略と整合的であること。
- 世界で通用する性能、経済性等を有すること（世界にアピールできるブレイクスルーが明確であること）。
- ユーザー ニーズを踏まえた上で、メーカーが一体となって取り組める、標準炉を目指したものであること。
- 2030年前後以降のリプレース時代に保持すべき技術や人材の開発・能力育成に資すること。

また、日本型次世代軽水炉開発に向けた炉のコンセプトとして「世界最高水準の安全性と経済性を有し、立地条件に柔軟で現場にやさしいプラント」を掲げ、今後の検討をすすめるにあたっての例として表5が示されている。

## 5. おわりに

最近、米国では新規プラント建設の動きが活発になってきているが、わが国や欧州の原子力先進国は、共通して電力需要の伸び悩みや政策的な問題等により、新規原子力発電プラント建設の動きが低迷している。また、これらの各国で現在運転されている原子力発電プラントの多くが、2030年頃にプラントの寿命等によって、廃炉の時期を迎えることになる。今後とも原子力発電の維持を考えている国にとっては、2030年頃のリプレースの時期まで、いかに原子力プラントの設計や建設等の技術力を維持して行くかが大きな課題となってきている。

米国での新規プラント建設の動きは、官民協力によって2010年までに1基以上の新規原子力プラントを建設し運転することを目指す

表5 日本型次世代軽水炉開発に向けた検討項目の例

項目	目標値	達成手段/要素技術
建設費	APWR/ABWR 成熟機（リピータ効果限界）比で大幅減	○システム簡素化、スケール効果 ○物量低減、建屋コンパクト化 ○機器・システム高性能化
建設工期	30ヶ月台前半（現状40ヶ月台後半） （1stコンクリート～運転）	○新設工法（SC構造、鋼構造等） ○大モジュール工法
発電コスト	世界に通用する水準（20%以上低減） （APWR/ABWR成熟機比）	○システム簡素化 ○稼働率向上 ○炉心運用高度化
稼働率	94%（現状60%～80%） 長期サイクル運転：～24ヶ月 定期検査：20日以下	○状態監視、オンラインメンテナンス ○定検期間中の機器交換対応 ○設計段階から系統的なメンテナンス手法を作りこんだ新たな発想の導入
被ばく線量及び廃棄物量	20%低減 （APWR/ABWR成熟機比）	○物量低減 ○リスク情報を活用した保全
安全性	炉心損傷確率、早期大規模放出確率を海外最新炉 <sup>*</sup> 以下 ※EPR 炉心損傷確率：10 <sup>-6</sup> /炉年以下	○パッシブ技術の有効活用

(注) 本表の目標は、今後FSで検討するための例示であり、個々の項目間での整合性は取れていない。FSにおける検討後も、他電源の発電コストや原子炉技術開発の状況変化によって変わりうるが、より挑戦的な目標を検討する予定

「原子力2010 (Nuclear Power 2010)」プログラムがすでにスタートしたことによるものである。また米国では、さらに将来をにらんで、第4世代原子力エネルギー システムの開発を含め、AFCIやNHIのプロジェクトが進められており、短期・長期にかけて、かなり政府主導的に政策が展開されているようである。

一方、わが国では、原子力委員会の原子力政策大綱で述べられているように、2030年以後も現在の水準程度か、それ以上の供給割合を原子力発電が担うようにするには、それまでの間、着実に原子力技術や人材の維持等が行なわれていくことが必要である。上述のとおり、これに向けた取組みとして、日本型次世代型軽水炉の開発に向けた議論が始まったばかりであるが、今後、官民協力して、具体策について一層積極的な議論が必要である。

#### 参考文献

- (1) Mitchell K. Meyer et. al. Argonne National Laboratory, "The role of Research Reactors in the Development of Generation、 Nuclear Energy Systems," RRFM 2004, March 22, 2004
- (2) Department Of Energy Office of Nuclear Energy, Science and Technology, Nuclear Hydrogen R&D Plan, March, 2004
- (3) Advanced Fuel Cycle Initiative, Office of Nuclear Energy, Science and Technology, U.S. Department of Energy, October 2004.
- (4) 原子力委員会新計画策定会議(第24回)参考資料1, "エネルギーと原子力発電について(論点の整理)",平成17年4月14日
- (5) <http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/report/050624.pdf>

# ディーゼルエンジンの排出ガス規制と対応技術について ーディーゼル車の復権なるかー

横山 昌宏 ( 財)エネルギー総合工学研究所  
主管研究員



## 1. はじめに

ディーゼルエンジンはその熱効率の高さ、優れた耐久性および信頼性の点から、船舶、乗用車などの輸送機関の動力源として、また建築土木用機械や発電用のパワーユニットとして幅広く活用され、社会・経済的に重要な役割を担っている。わが国においてはこれまで、ディーゼル車には「汚い、うるさい、臭い」のレッテルが貼られ、また大気汚染の元凶であると思われ、ディーゼル排出ガスに対する規制が行われてきた。本年10月には世界で最も厳しい「新長期規制」がスタートする。しかし、これまでの規制をバネに様々な環境対応技術が開発されており、今後の厳しい規制にも充分対応可能な、クリーンなディーゼル車が台頭しつつある。

今回オフロードディーゼルエンジンに関する調査（平成16年度経済産業省委託調査「オフロードエンジンから排出される未規制物質測定法の標準化に関する調査研究」）の一環でディーゼル車の排出ガス規制動向とその対応技術に関して調査したので、ディーゼル車の現状と将来について考えてみたい。

## 2. ディーゼル車の普及状況

### (1) EUの普及状況とその背景

欧州連合（EU）では、ディーゼル車がガソリン車を超える威勢で増加している。図1は新車販売に占めるディーゼル車比率を示したものであるが、1997年を境に急拡大し、2004年には5割近くを占めるに至っている。これは勿論、欧州自動車工業会（ACEA, the

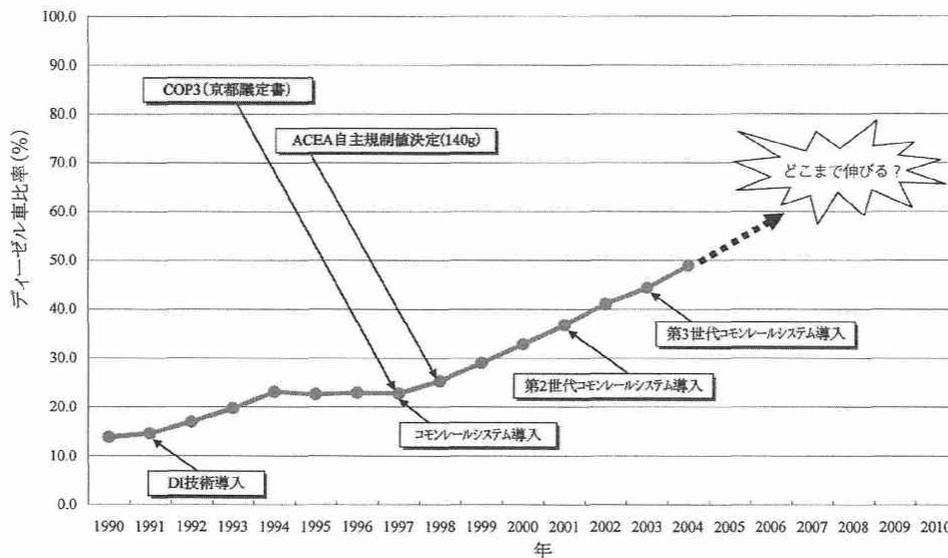


図1 EUの新車販売に占めるディーゼル車比率

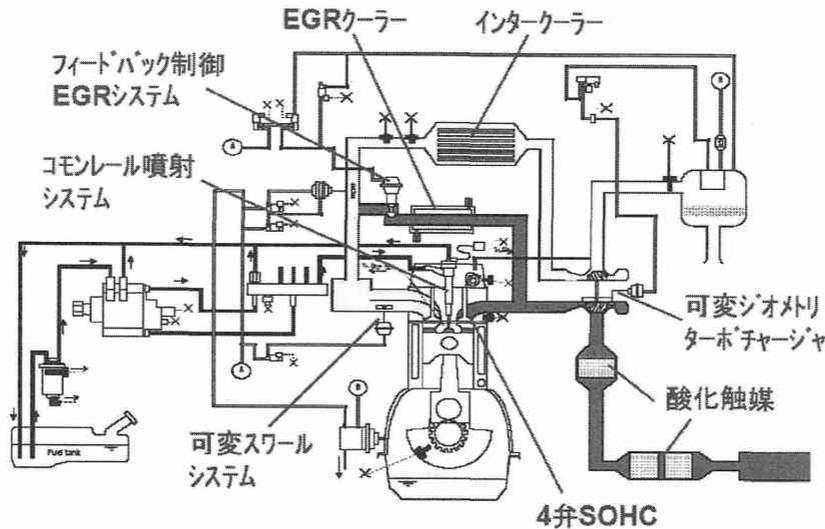


図2 最新のディーゼル車に導入されている技術<sup>(1)</sup>

European Automobile Manufacturers Association) がコミットしている自主規制（参加企業の販売乗用車について、2008年時点で、平均CO<sub>2</sub>排出量を140g/km以下に抑える）を達成するために、エネルギー効率が高く、CO<sub>2</sub>削減効果の大きいディーゼル車の導入に積極的にならざるを得ないという事情もあるが、1997年のコモンレール式燃料噴射システム等の導入によりディーゼルエンジンが技術革新されたということが背景になっている。

図2は最新のディーゼル車に導入されている主な技術群であるが、高性能ターボチャージャとの組合せによる高出力化や、コモンレール式燃料噴射システムとの組合せによる低騒音化が図られた。その結果、低出力と騒音の問題はほぼ解決されつつあり、ディーゼル車の性能がガソリン車並みに向上している。加えて、ディーゼル車は低速トルクが大きいためエンストはほとんど起こらず、走り出しは極めてスムーズで加速性に優れ、また人が歩くスピードに減速してもシフトダウンせずに再加速が可能であるなど、ドライバーにとってディーゼル車の乗り心地が魅力的なものになっている。

## (2) 日本の普及阻害要因

わが国においても1980年代後半からのRV車のブームとともに燃費の良いディーゼル車に

対する需要は旺盛であったが、新車販売におけるディーゼル車比率はピーク時の5%強を境に減少に転じ、2002年には0.1%までに低下している。これは、この間にディーゼル車にとられた種々のアクション、①わが国のNO<sub>x</sub>重視の規制体系と燃費悪化、②自動車税改正による購入メリットの減少、③特石法廃止等によるガソリンと軽油の価格差縮小、④平均走行距離の短さ(EUの平均約14,000km/年に対し、日本は平均約10,000km/年)による低経済性、⑤排出ガス規制の段階的な強化、⑥東京都によるディーゼル車NO<sub>x</sub>作戦、などに起因すると想定されている。

## 3. ディーゼル車に対する排出ガス規制

### (1) ディーゼルエンジンの燃焼と排出ガス

ディーゼルエンジンは圧縮した空気中へ燃料を噴射して燃焼させる方式（拡散燃焼と呼ばれる）で、一般的に空気過剰状態での燃焼反応となるため、ガソリンエンジンに比べて排出ガス中の炭化水素（HC）および一酸化炭素（CO）の濃度は低くなる。しかし一方では、局所的に空気不足の燃焼域も存在し、不均一燃焼が生じるため、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）と煤などの粒子状物質（PM, Particulate Matter）の濃度はある程度高くなる。

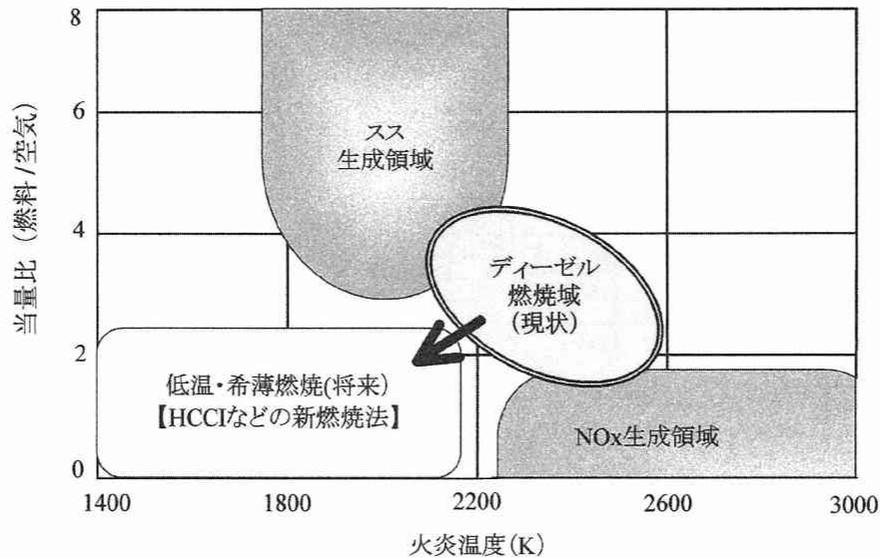


図3 燃焼有害物質の生成領域 (NOxとPMのトレードオフ) (2)

図3はディーゼルエンジンの燃焼特性を模式的に示したものであるが、図に見られるように、ディーゼルエンジンの燃焼域はNOx生成域とPM生成域とにまたがっている。このように、NOxとPMはトレードオフの関係にあり、一方を下げると他方が増えるなど、同時に低減することは極めて難しいとされている。

(2) 排出ガス規制の動向

現在ディーゼル排出ガス中の規制対象物質はCO, HC, NOx, PMの4種であるが、COとHCは既に低いレベルにありそれほど問題ではない。残された問題はNOxとPMであり、世界

的にNOxとPMの低減を目的とした排出ガス規制が強化されている。図4, 図5は日本とEUにおけるディーゼル車の排出ガス規制の推移をNOxとPMの場合につき示したものである。

日本のディーゼル排出ガス規制は1974年にスタートしているが、当初は光化学スモッグ発生の抑制に重点が置かれたため、NOxのみが規制対象とされ、PMは1994年までの20年間規制されることはなかった。しかし、2005年10月より実施される「新長期規制」では、PMは0.013g/kmレベルに低減され、現時点では世界で最も厳しいものになる。さらに、2009年には「ポスト新長期規制」が導入される予定

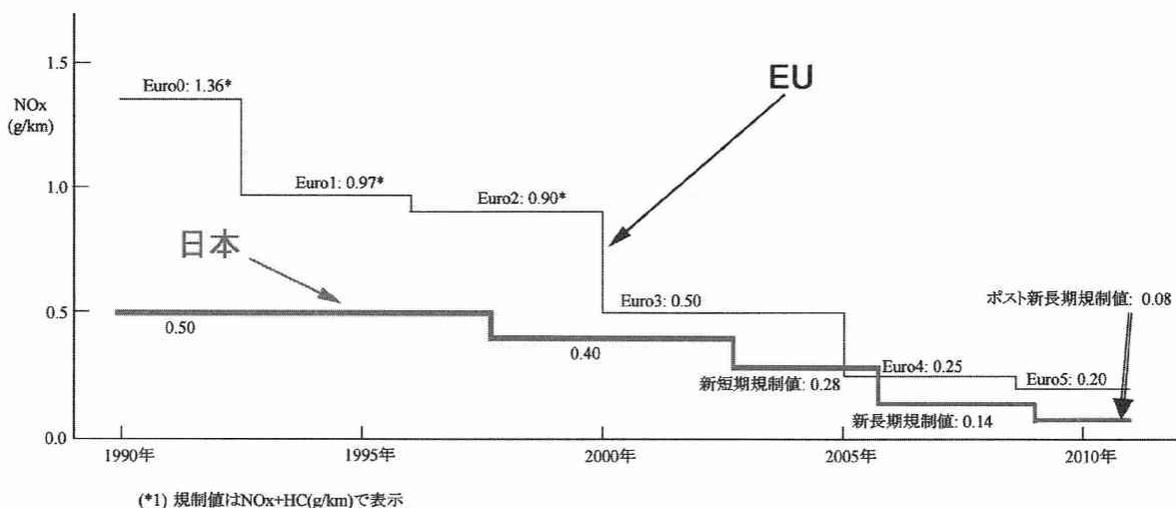


図4 ディーゼル車排出ガス規制の推移 (NOx)

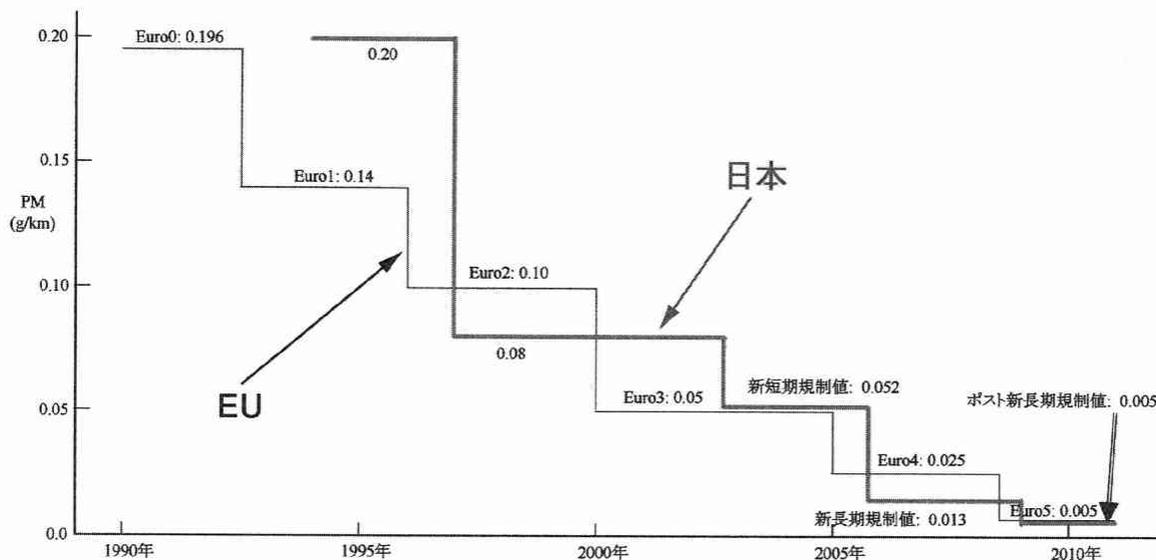


図5 ディーゼル車排出ガス規制の推移 (PM)

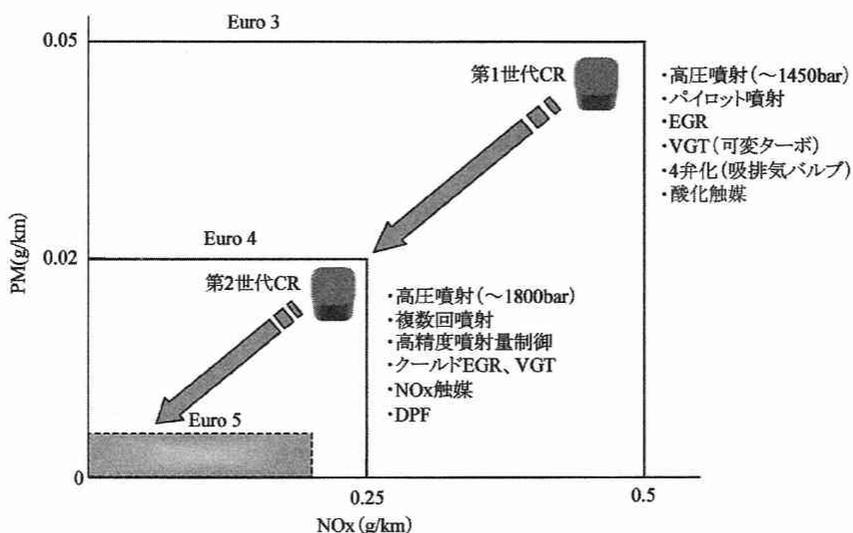


図6 EUのディーゼル車排出ガス規制への対応技術

で、NOxおよびPMの双方がより厳しいレベルに低減される。

一方、EU委員会はEuro 4と呼ばれる現行の自動車排出ガス規制を強化したEuro 5を年内にまとめ、2008年半ばまでに実施する方針を発表<sup>(3)</sup>している。これによると、ディーゼル車のPM排出量は現行より80%、NOxは20%削減されることになる。Euro5には業界など利害関係者の意見を反映させるとしているが、素案通り施行されれば、図6に示すように、ディーゼル車にはディーゼル微粒子除去装置(DPF, Diesel Particulate Filter)等の後処理装置の装着が必須になる。

#### 4. ディーゼルエンジンの環境対応技術

ディーゼルエンジンの環境対応技術を大別すると、図7に示すように、「燃焼技術」、「後処理技術」、「制御技術」および「燃料品質」の4分野にまとめることができる。目的に応じてそれらが単独あるいは複数で関与しており、また、その関与の程度はエンジンの種類あるいは用途等によって異なる。

特に制御技術は、今後、燃料噴射、排出ガス後処理、エンジンと他システムとの融合を更に進化させるために重要な役割を担っており、その高度な発展が期待されている。

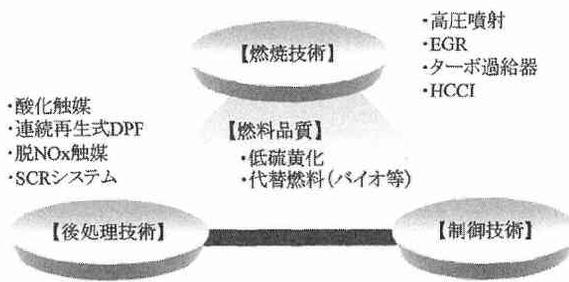


図7 ディーゼルエンジンの環境対応技術

(1) 燃焼技術

燃焼技術はディーゼルエンジンの基本要素であり、燃料噴射も含めて燃料と空気との不均一混合気形成を適切に制御することが重要課題である。この技術として、長年に亘り多様な対応技術が開発・集積されてきたが、昨今では特にNOx、PMの低減のために高圧噴射、電子制御による燃料の多段噴射、排出ガス再循環（EGR, Exhaust Gas Recirculation）等の技術は必須になっている。

一方では、前掲した図3に見られるように、将来に向けて新燃焼方式の開発も積極的に取り組まれている。中でも予混合圧縮着火方式（HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition）は非常に期待されている燃焼方式で、比較的低い温度でかつ燃料の希薄なクリーンな燃焼域にあるため、NOxとPMの生成を同時に回避することが可能であるとされている。

[コモンレール式燃料噴射システム]

コモンレールとは、高圧化した燃料を蓄え、各インジェクターへ均一に供給するシステムである。図7に示すように、全気筒分の燃料を高圧ポンプで噴射圧力まで加圧し、コモンレールへ圧送する。コモンレールには燃料を噴射するインジェクターが接続されており、電子制御システムから開閉信号が発信されると、インジェクターが作動し、決められた時間に、決められた量の燃料を噴射する。

コモンレール式燃料噴射システムはエンジン回転数に依存せず、噴射の重要な特性である噴射圧力、噴射量、噴射タイミング、噴射率をそれぞれ独立に制御することが可能である。そのため従来は不可能であった1燃焼サイクルにおける複数回噴射が可能となり、現在では図9に示すように、5回の多段噴射が実用化されている。

パイロット噴射、プレ噴射はメイン噴射に先駆けて少量の燃料を噴射するもので、PMの低減と騒音の抑制に効果がある。これはパイロット、プレ燃焼によりシリンダー内ガス温度を上昇させてメイン噴射燃料の着火遅れを短縮することで、メイン燃焼初期の急激な予混合燃焼を回避できるためである。アフター噴射は、メイン単独噴射と比較してPMの抑制に効果がある。これはメイン噴射によりPMが発生したところ

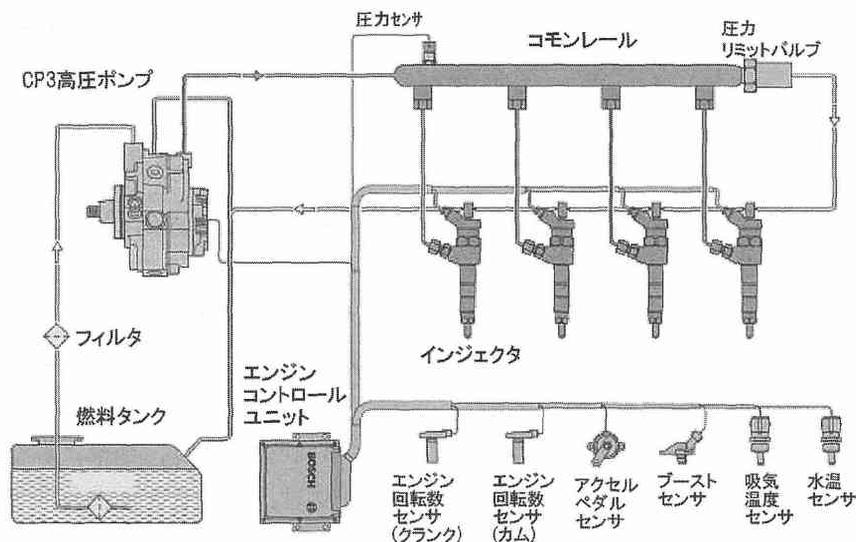


図8 コモンレール式燃料噴射システム (4)

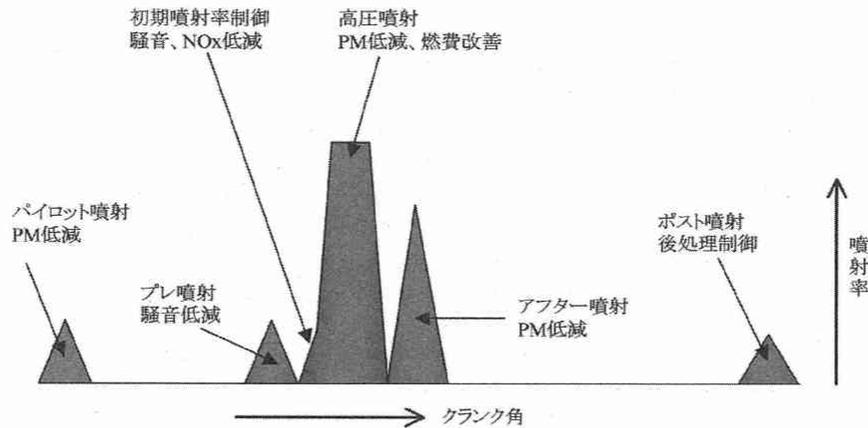


図9 多段噴射による燃焼の制御 (5)

へ微量の燃料を噴射し、再び拡散燃焼を発生させ、残ったPMを完全に燃焼させる。さらにメイン噴射から大きく離れたポスト噴射は、排気ガスの温度上昇や排気中のHCを増加させる効果があるため、脱NO<sub>x</sub>触媒やDPFなどの後処理装置の制御に利用される。

噴射圧が高圧になればなるほど燃料は微粒化し、PM等の排出ガスのエミッションは減少する。そのため、さらなる高圧化と高度制御技術の開発が行われており、現在、第4世代コモンレールシステムが開発されている。噴射圧は2500気圧に高められ、また、インジェクターのアクチュエーターにピエゾ素子<sup>\*</sup>を用いて開閉速度の高速化（従来タイプに比べ約2倍）が図られ、9回の多段噴射も実現されている。

## (2) 後処理技術

前述したようにNO<sub>x</sub>とPMにはトレードオフの関係があり、燃焼改善のみでNO<sub>x</sub>とPMを同時に低減するには限界があることから、今後の厳しい排出ガス規制をクリアするためには後処理装置の導入が必要である。

表1に示すように、NO<sub>x</sub>の後処理技術としてはNO<sub>x</sub>吸蔵還元触媒（NSR, NO<sub>x</sub> Storage Reduction）、尿素選択還元触媒（SCR, Selective Catalytic Reduction）等があり、PMの後処理技術としては酸化触媒（DOC: Diesel

Oxidation Catalyst）、DPF等がある。また、NO<sub>x</sub>とPMを同時に連続浄化可能なDPNR（Diesel Particulate NO<sub>x</sub> Reduction system）も実用化されている。

しかし、後処理では加熱のために燃料の一部を用いる場合や還元剤等が必要になる場合も多く、燃費悪化あるいは運転コストの増大などの課題が残されている。ディーゼルエンジンにとって最も大切な燃費を犠牲にしない後処理技術が望まれる。また、特に触媒を用いる場合は、燃料中の硫黄分によって被毒されることから、その本来の機能を発揮させるためには燃料の低硫黄化が欠かせない。

## [SCRについて]

SCRは尿素を加水分解して得られるアンモニアによって、酸素過剰雰囲気中でも選択的にNO<sub>x</sub>だけを還元する。この方法は既に工業プラント等で行われている方法で技術的には確立されているものである。また、後述の燃料を還元剤として用いるDPNR法等に比べると、尿素噴射量の制御は比較的容易で、燃費の悪化も抑えられるというメリットがある。しかし、尿素の供給インフラをどのように構築するのか、毒性が強いアンモニアの大気中への漏洩をどのように防ぐかという課題が残されている。このような課題を抱えてはいる

\* ピエゾアクチュエータとはピエゾ圧電効果を応用したセラミック素子で、従来のソレノイド型アクチュエーターに比べて開閉動作速度が速く、よりきめ細かな燃料噴射と制御が可能になる。

表1 後処理装置と特徴

後処理装置		削減効果		硫黄による被毒	備考
		NOx	PM		
脱NOx	NOx吸蔵還元触媒 (NSR)	約80%以上	約30%	大	ガソリン車の三元触媒を応用 周期的な制御運転による燃費悪化
	尿素選択還元触媒 (SCR)	約80%以上	約30%	軽微	尿素的供給インフラが課題 アンモニアスリップが課題
脱NOx & PM	DPNR	約90%以上	約90%以上	大	NOx吸蔵触媒とDPFを一体化 還元剤として燃料を使用、燃費が悪化
脱PM	酸化触媒 (DOC)	無し	約20~30%	大	PM中の可溶性有機成分(SOF)を酸化除去
	DPF	無し	約80~90%	大	交互再生方式/連続再生方式(CR-DPF)

CR-DPF: Continuously Regenerating DPF

が、特にEUは大型トラックへの導入を進めており、わが国でも一部のトラックメーカーが導入を準備している。

[DPNRについて]

DPNRはNOx吸蔵触媒とDPFを一体化した、すなわち、DPFの表面に三元触媒としてのPtとNOx吸蔵材の2種類を担持させたものである。通常のディーゼルエンジンでは排ガス中には酸素が多く、この状態では排ガス中のNOはPtによって酸化されてNO<sub>2</sub>となり、吸蔵材に吸蔵される。NO<sub>2</sub>が吸蔵材にある程度吸蔵されると、エンジン側で燃料の噴射量をわざと過剰にすることにより排ガス中の酸素を低減させ、CO、HCが存在するようにする。このCOやHCを還元剤として三元触媒が吸蔵材に吸蔵したNO<sub>2</sub>を還元し、N<sub>2</sub>に変える。同時にCOとHCも酸化され、H<sub>2</sub>OとCO<sub>2</sub>に変わる。また、排ガス中のNOがPtで酸化される過程で発生する活性酸素によってPMの酸化を促進し、比較的低い温度域でもPM中の煤が酸化される。

このように、DPNRはこれまでディーゼルでは難しいとされてきた後処理装置でのNOxとPMの同時低減を達成することが可能であるが、燃料を還元剤として使用するため燃費が若干悪化するというデメリットがある。

[DPFについて]

DPFはPMの80%以上を補足することができ

る。フィルターはこれまで、捕集したPMを電気ヒーターやバーナーを用いた強制着火により間欠的に再生されていたが、最近ではNO<sub>2</sub>の強い酸化力を利用してPMを酸化する触媒付DPF (CDPF, catalyzed DPF) が注目されている。このCDPFでは酸化触媒をDPFの前段に配置するかDPF内に担持して、排気中のNOをNO<sub>2</sub>とし、これによって捕集したPMを連続的に酸化除去することができる。しかし、このシステムでは燃料中の硫黄分により触媒が劣化するため、定期的な燃料噴射によって触媒温度を一時的に上昇させる (300℃以上) ことが必要で、燃費悪化につながる。これを回避するため、燃料中の硫黄分を限りなくゼロレベルに下げることが求められている。

以上の後処理装置を例えば図10のようにシリーズに組み合わせることによって、ディーゼル排出ガスは規制レベルまで浄化される。すなわち、エンジン出口でのエミッション量を可能な限り低減した後、先ず酸化触媒によりPMに含まれる可溶性有機成分 (SOF, Soluble Organic Fraction) が酸化除去され、次いでCDPFによりPMの煤成分 (図11参照) が除去される。最後に、SCR装置によりNOxが還元除去され、排出ガスはクリーンに浄化されて大気中に放出される。

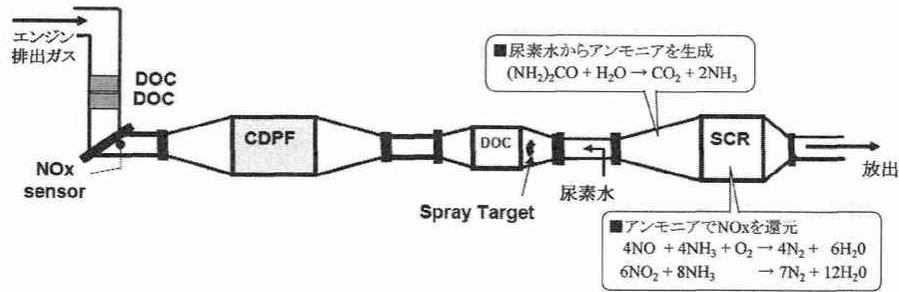


図10 排気管に装着した後処理装置

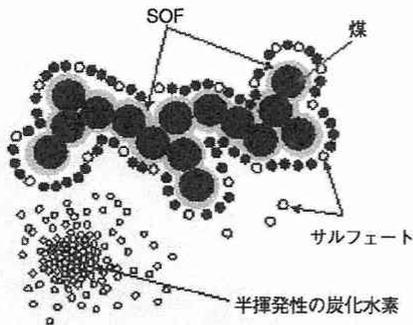


図11 PMの形状と構造 (6)

## 5. 燃料品質について

エンジン燃焼技術や排出ガス後処理技術は燃料品質と密接な関係があり、これらの技術を最適にするためには、燃料品質を適切なもの

にする必要がある。軽油についてはこれまで燃焼改善のためにセタン価、沸点等の適正化が行われてきたが、後処理装置等の性能を長期間にわたり保証するために、軽油中の硫黄分の大幅な低減が図られてきた。特に、石油業界は大気環境の改善を目指した自動車業界との共同研究（JCAP, Japan Clean Air Program）の成果に基づき、図12に示すように規制を前倒しして、世界に先駆けて2005年1月からサルファーフリー軽油の全国供給を開始している。したがって、これまで後処理技術の開発に際して大きな障害となっていた燃料品質面の制約が解消され、今後はサルファーフリー軽油を前提にした高性能排出ガス浄化システムの開発が促進される見込みである。

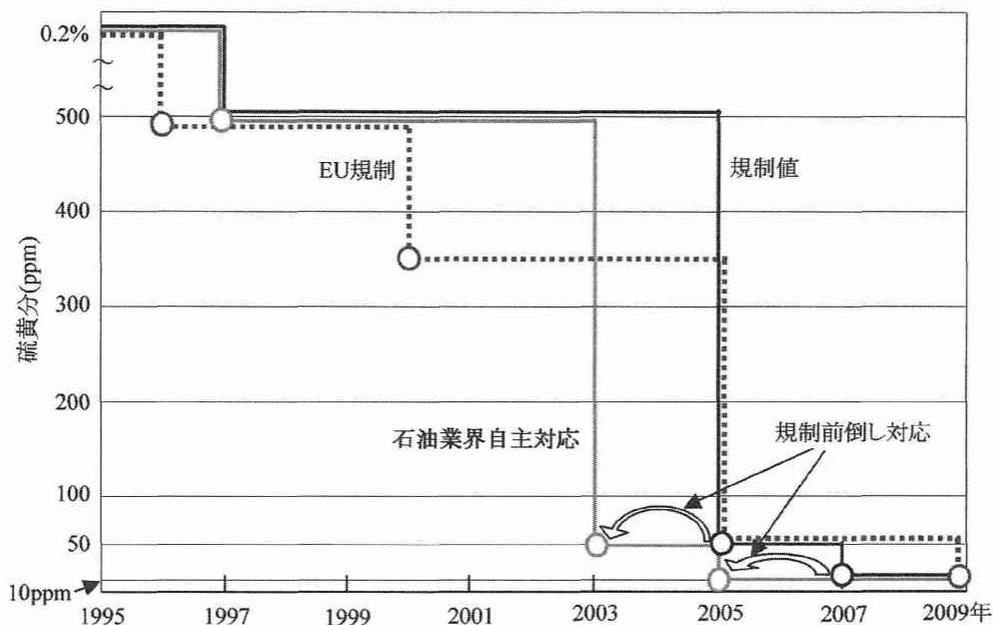


図12 低硫黄軽油への取組 (7)

## 6. さいごに

ローカルな環境問題（大気環境改善）のためにディーゼル車への排出ガス規制が一段と厳しさを増しているが、それを上回る威勢でディーゼル関連技術の革新が起きている。いずれ、ディーゼル車の排出ガスレベルはガソリン車と同等レベルに低減される、あるいは環境上の懸念事項が解消される時がくと想定される。その時は、ディーゼル車のグローバルな環境問題（地球温暖化対策）に対するメリットが改めて見直されることになると思われる。

また、将来は化石資源制約がクローズアップされ新たな代替資源への取組みが求められるが、軽油代替燃料としてはGTL（Gas to Liquid）、BTL（Bio to Liquid）、DME（ディメチルエーテル）、バイオディーゼルなどの多様な燃料が期待できることから、ディーゼル車は資源制約面でも大きなフレキシビリティを保有している。

以上のように、ディーゼル車は今後とも持続的な技術革新によりさらなるクリーン化が

期待でき、また超長期的な燃料供給面で比較的制約の少ない輸送機関であると考えられる。このような意味で、わが国においても今後、ディーゼル車が普及することを期待したい。

## 7. 謝辞

本稿は平成16年度に経済産業省の委託により実施した「オフロードエンジンから排出される未規制物質測定法の標準化に関する調査研究」を参考にしている。ここに謝意を表する。

### 参考文献

- (1) 経済産業省「クリーンディーゼル車の普及・将来見通しに関する検討会」資料（2004）
- (2) ディーゼルエンジンの排出ガス低減技術展望，堀政彦，自動車研究，26（2004）
- (3) 新聞情報（ブリュッセル2005.07.16）
- (4) Boschホームページ
- (5) ディーゼルエンジンの最新情報と今後の動向，西村輝一，シンポジウム資料（2003）
- (6) 産総研ホームページ
- (7) 石油産業における低硫黄化への取組みと技術動向，石油連盟・自動車用燃料専門委員会（2004.10.26）



1893年にディーゼル機関を発明したルドルフ・ディーゼル（左）と特許（右）

## 研究所のうごき

(平成17年7月2日～9月30日)

### ◇ 第22回評議員会(臨時)

日時: 7月22日(金) 11:00～12:00

場所: 経団連会館(9階) 901号室

議題:

- 第一号議案 理事の一部改選について
- 第二号議案 評議員の委嘱について
- 第三号議案 平成16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11回賛助会員会議

日時: 9月15日(木) 16:00～19:30

場所: 経団連会館(9階)

クリスタルルーム・906号室

議事次第:

1. (財)エネルギー総合工学研究所の調査研究活動の状況について
2. 研究報告「超長期エネルギー技術戦略研究会の成果について」
3. 「新エネルギー政策の現状と課題について」  
(経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課長 荒木由季子 氏)

### ◇ 月例研究会

#### 第237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. バイオマスへの期待と現実ー森林バイオマスのエネルギー利用をどう進めるかー  
(岐阜県立森林文化アカデミー 学長 熊崎 實 氏)
2. バイオマスエネルギー変換技術の最新動向  
(東京大学大学院 農学生命科学研究科 生物・環境工学専攻 生物機械工学研究室 教授 横山 伸也 氏)

#### 第238回月例研究会

日時: 8月26日(木) 14:00～16:00

場所: 航空会館 7階 701・702会議室

テーマ:

1. エネルギー分野の技術戦略マップの検討状況(策定にあたっての考え方)

(経済産業省 資源エネルギー庁 長官官房 総合政策課 課長補佐 蘆田 和也 氏)

### 2. エネルギー技術の評価における新たな展開ー社会・心理的な観点からー

(横浜国立大学大学院 環境情報研究院 自然環境と情報部門 助教授 本藤 祐樹 氏)

### ◇ 主なできごと

- |         |   |
|---------|---|
| 7月7日(木) | ・第1回品質別電力供給システム総合調査委員会                                      |
| 8日(金)   | ・第2回超長期エネルギー技術戦略研究会   |
| 12日(火)  | ・第1回「廃棄物発電及び廃棄物ガス変換発電導入普及に関する調査」導入戦略委員会                     |
| 26日(火)  | ・原子力水素研究会   |
| 8月3日(水) | ・第1回革新的技術に関する研究委員会  |
| 24日(水)  | ・第3回超長期エネルギー技術戦略研究会   |
| 29日(月)  | ・第1回リスク情報検討委員会  |
| 9月5日(月) | ・第1回分散型電源と系統安定に関わる技術検討会                                     |
| 6日(火)   | ・第2回高温ガス炉プラント研究委員会  |
| 7日(水)   | ・第2回革新的技術に関する研究委員会  |
| 8日(木)   | ・第1回「下水汚泥の高効率ガス変換発電システムの開発」技術開発推進委員会                        |
| 13日(火)  | ・第2回品質別電力供給システム総合調査委員会                                      |
| 15日(木)  | ・第1回700℃級超々臨界圧プラント(A-USC)技術開発 経年石炭火力発電所の高効率化とそれに伴うCO2排出削減研究 |
| 16日(金)  | ・第2回電力ネットワーク技術総合調査委員会                                       |
|         | ・原子力水素研究会   |
| 22日(木)  | ・第2回エネルギーモデル検討委員会   |
| 23日(金)  | ・第1回軽水炉等技術開発推進事業公募審査委員会                                     |

### ◇ 人事異動

○9月1日付

(出向採用)

西間木幸彦 プロジェクト試験研究部 主任  
研究員

## 編集後記

本号の理事長対談はご覧いただきましたように作家の石川英輔氏にご登場頂きました。江戸時代という約300年もの長い間、実質上自国のみの閉鎖空間で、自給自足すなわち再生可能な社会が実現できた貴重な経験は、多くの難問を抱えている現在の日本においても参考になるところが少なくない筈という発想から企画いたしました。

車もパソコンも自由に使いこなされる同氏は、決して江戸時代に戻るべしと言っておられるのではなく、世界と日本の将来に不安を覚えて、そのために何か参考になれば、あるいは警鐘の意味で江戸を紹介されておられる様です。

一例として挙げられた文化・文政時代(約200年前)の人々が、今から見れば多くの不便があった筈なのに、55万人(除武士)の江戸で警察官(常町廻り同心)はたったの12人という治安のよさ、契約を基礎としつつ結婚に見られる男女の自由な生き方、し尿を含むほとんどの物質が有効利用される「もったいない」の徹底、そして物質文明に左右されない普遍的人間性等、現代で見られなくなったものが何と多くあることでしょうか。

次のトピックは、今回季報で初めて紹介する「エネルギー技術分野の技術戦略マップ」(いわゆる『超長期エネルギー戦略』)に関するものです。これは、超長期(例えば、2100年時点)における(世界および日本における)経済の活動量および生活の質のレベルを落とさず

に、資源制約、環境制約を技術で解消することを想定した時の「あるべき技術」の姿を描き、それから逆に現在まで開発すべき技術課題を洗い出す、いわゆるバックキャスト手法によるものです。

関係者の知恵を結集して技術的視点から可能性ある取り組みが纏められたもので、これはわが国が世界に向けて発信する提案としても期待されます。期せずして、現在から200年前の過去へのバックキャストと100年後の未来から現在までのバックキャストを紹介することになりましたが、後者は状況によってどのように変化するか不確定要素を含めているだけに、経験済みの前者を参考とすることは無駄ではないと思われれます。

秋たけなわ、本来なら実りの秋を喜ぶときに、10月初旬にパキスタン北東部で発生した大地震の状況が報道されました。被災者の方々に心からの哀悼の意を表し、一日も早い復旧を祈るしだいです。

ところで情報化社会においては、世界のどこで起きた災害でも今やその日のうちに報道されるほど世界は狭くなってきておりますが、一方世界の総力を挙げて取り組むべき大きな問題が増えてきたことも事実のようです。この際、現在の人類のみでなく、過去の先輩たちにもご登場いただき、歴史を含む人類全体の叡智を結集することを考えても良いのではないのでしょうか。

編集責任者 小川紀一郎

季報 エネルギー総合工学 第28巻第3号

---

平成17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) 和光堂印刷株式会社

※ 無断転載を禁じます。