

# 持続型社会へ向かうエネルギービジョン (改訂版)

2005年8月

持続型社会研究協議会

東 京 大 学  
石川島播磨重工業(株)  
(株) 東 芝  
(株) 日 立 製 作 所  
三 菱 重 工 業 (株)

本文書は、現在、協議会における検討途上の案であり、今後、本ビジョンに基づいて個別のロードマップを策定する過程からのフィードバックを踏まえて、変更する可能性がある。

## 1. 持続型社会研究協議会の目的

人類は18世紀の産業革命以降、化石資源のエネルギーを動力として取り出すことにより飛躍的な発展を遂げ、結果として石油、天然ガス、石炭などの化石資源はもとより、多くの地球資源を大量に消費してきた。化石資源は地球が2億年という長い歳月をかけて蓄えてきたエネルギー源であり、短期的にその大量消費によって社会、技術を発展させることは許されるとしても、人類の持続的な存続、発展を鑑みれば、このような有限地球資源の消費に立脚した社会から脱却し、エネルギーと資源の循環に基づく持続型社会を確立することが不可欠となる。

一方、グローバル化の進展の中で、世界のエネルギー需要はその増大の傾向をますます顕著にし、特に中国を始めとする東アジア諸国のエネルギー需要増大と、それに基づく経済成長は目覚ましいものがある。化石燃料価格が上昇し、早い見通しでは数十年のスケールで、需要増大と資源枯渇に起因する石油の供給不足が懸念される中、2000年時のエネルギー自給率が19%である日本が、このエネルギーセキュリティの課題にどのように対応できるか、また近隣諸国の有限地球資源の大量消費の抑制に対してどのようなリーダーシップを発揮できるかが、短中期的に非常に重要な課題となる。長期的には持続型社会へのソフトランディングを志向しつつ、同時にこれらの短中期的な課題に適切に対応することにより産業競争力を維持し続けることしか、資源に乏しい日本の生き残る戦略はない。

持続型社会研究協議会は、このような問題意識を共有する企業と大学関連部局が連携し、持続型社会実現のための技術課題に関して特にエネルギー分野に焦点をあて、将来ビジョン及びそれを実現するためのロードマップを策定する。そして、社会及び政府に対して提言するとともに、策定した共有のロードマップに基づき、役割分担に基づく技術開発の実践を目指す。

## 2. 背景

系(システム)の持続性は、永続性とロバスト性とを併せ持つことで実現される。永続性とは、系の内部でエネルギーや物資が循環し保持され、外部からの投入がある場合には、等価な生産能力を有することで系が永久に活動を続ける能力を有することである。ロバスト性とは外部の擾乱に対して、系が安定性を有し、擾乱を吸収して系自身に大きなカタストロフィを生じさせない能力を有することである。

以下で論じる人類や日本社会などの系は、通常、図1に示されるような非線形複雑状態図で表される。擾乱がAの範囲にとどまれば系には負のフィードバックが働き、系はBの範囲内で安定する。しかしながら、Aの範囲を超えるような擾乱が加わると、負のフィードバックが効かなくなり、大規模な変動を通じて、システムの状態は新たな領域Cへ遷移する(別の安定点Cがあれば)。系のロバスト性とは、外部の擾乱に対して図1のAの山が十分に高いことに他ならない。

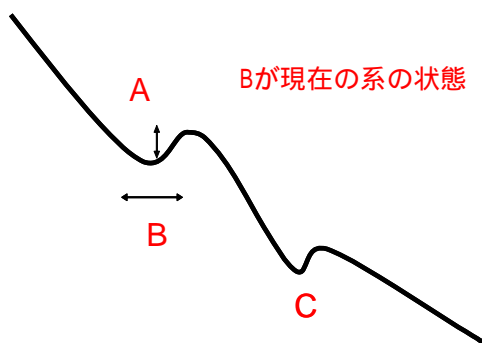


図1 非線形システムの状態図

以下、エネルギーに着目し、人類（地球）及び日本社会の持続性とロバスト性の現状と課題を点検する。

### 人類の持続性:

人類の持続性のためには、地球規模でエネルギーと物質、そして環境の主要要素である生命の循環を確立することが絶対条件となる。18世紀の産業革命以降、人類は化石資源のエネルギーを動力として取り出すことにより飛躍的な発展を遂げ、結果として、石油、天然

ガス、石炭などの化石資源はもとより、多くの地球資源を大量に消費してきた。しかしながら、化石資源は地球が2億年という長い歳月をかけて太陽から降り注ぐエネルギーを変換して蓄えてきた有限地下資源であり、短期的にはその大量消費が許されるとしても、持続的な利用は不可能である。さまざまな予測はあるものの、石油、天然ガスの供給不足が、早い見通しでは数十年のうちに現実となろうとしている今、急激な舵切りは必要ないとしても、化石資源利用から脱却し、持続的な利用が可能な再生可能エネルギーと原子力エネルギーの利用を基本とした社会構造へとソフトランディングを図る必要がある。

### 人類のロバスト性:

人類のロバスト性としては、人類の生存基盤となる地球の気圏、水圏、地圏システムがカタストロフィに陥り、人類を含めて完全崩壊するリスクと、これらの地球システムがある擾乱に対してその平衡状態を崩し変動する中で、人類の存在が脅かされるリスクを考える必要がある。地球規模での全面核戦争の可能性が低減した現代、人為的な擾乱による前者のリスクの可能性は縮小の傾向にある。しかしながら、人類の活動に伴う人為的擾乱が地球環境システムの安定の許容限界（図1のA）を超えない保障はない。むしろ、最近の観測データは地球システムが発散、若しくは大規模な変動に移行するかもしれない可能性すら示す。

人類は、有史以来、地域的な変動はあるにしても、総人口や経済活動などあらゆる面で単調増加を続け、地球環境システムに大きな擾乱を与え続けてきた。この人類の活動を起源とし、単調に増加する擾乱が地球環境の持続性、ロバスト性を脅かすことは言を待たない。産業革命以前に280ppmであった二酸化炭素濃度は、2002年には374ppmにまで上昇している<sup>[1]</sup>。二酸化炭素濃度と地球温暖化の関係、あるいは温暖化と気象変動の関係は科学的には完全に立証されていないものの、急激な二酸化炭素濃度の上昇は、人類が地球に与える環境負荷が地球システムの負のフィードバックの大きさよりもはるかに大きいことを意味し、地球システムが現在の安定領域から外れ、新たな状態へ遷移する懸念を増大させている。このような現在の状態は好ましいとは言えず、一定の期間の間に二酸化炭素濃度を安定化させることが重要である。

### **日本社会の永続性：**

現代の日本は、国土の範囲に閉じた系にとどまって永続的に維持されるようなレベルを大きく超えてしまっている。多くの活動が日本の国土を越え世界、地球的規模に達しており、これにより維持されている。特に、国土の狭い日本は、エネルギーや物質、特に食料の循環系を国内だけで構築することが不可能となっており、2次産業、3次産業の国際競争力を維持し、国内の需給の差分を国外から導入するための外貨獲得が不可欠である。

より長期的視点で見れば、日本は東アジア圏に存在し、中国など東アジア圏を構成する国々と大きな相互依頼関係を持ち、さらには現在までその経済的発展の先頭を切ってきた。それ故に、東アジア圏の永続性とロバスト性を確保するためにも、エネルギーと物質の循環を成立させるようなエネルギー／経済圏を、日本がリーダーシップを発揮して作り上げていく必要と責任がある。先進工業国に共通するものではあるが、日本の経済的発展は、東アジア圏内の他国に先がけて、資源とエネルギーを消費した結果得られたものであることを忘れてはならない。こうして得た繁栄を東アジア圏に還元し、共存と永続を図るためにリーダーシップを発揮することは倫理的にも日本の義務であり責任である。日本が平和国家である限り、リーダーシップの所以はその技術力、経済力、高い倫理性と見識にあることは明らかであり、日本がこれらの面で東アジア圏において先頭を切ることが期待される。

日本の人口は2006年をピークに減少に転じ、15歳から64歳までの労働人口も2000年に8,638万人であったものが、2030年では6,958万人にまで減少するとの予測<sup>[2]</sup>があり、他方で、中国を始めとする近隣諸国の経済力が伸長するなかで、国外からのエネルギーや食糧など安定調達を可能とするための経済競争力を維持し、アジア圏でのリーダーシップを発揮するためのシナリオ作りが必要となる。

### **日本社会のロバスト性：**

社会的、経済的活動、特にエネルギーや食料の調達の少なくない割合を国外に依存しているという日本社会の実態は、それらの諸外国や国際関係の擾乱に対して日本社会が脆弱な体質となっており、ロバスト性を損なっていることを意味する。日本社会の存立基盤である日本の国土や日本の自然環境、あるいは文化や倫理観、社会セキュリティなどの社会基盤のロバスト性の確保に大きな努力がなされる必要があることは無論であるが、社会、経済活動が日本の国土を越えている以上、外部変動要因に対するロバスト性が国土のロバスト性以上に重要となる。現在の生活水準は、産業革命以降のエネルギー供給の急速な増大が生活水準を大幅な改善に寄与したことを思い出すまでもなく、その大量なエネルギー使用に基づいていることは明らかである。日本で消費可能なエネルギー量の確保こそが、日本社会のロバスト性を確保する最も大きな前提のひとつとなる。このエネルギー調達に関連した日本社会への外部変動リスクとしては、(1)政情不安などによる化石資源価格の高騰や供給不安定化、(2)二酸化炭素排出量規制の強化、などが挙げられ、これらの変動リスクに対してロバストなエネルギー供給システムを構築することが必要となる。ド

イツを除く主要先進国の自給率が 50%以上である中で、2000 年時の日本のエネルギー自給率は 19%と突出して低く、この割合は可能な限り早期に諸先進国並に向上させる必要がある。

繰り返しになるが、現代の日本は、国土の範囲に閉じた系にとどまって永続的に維持されるようなレベルを大きく超えてしまっている。日本社会の永続性に必要なものは、日本の国土の範囲内で調達できず、これを広く世界に求めている。一方的な収奪による調達が許されない以上、必要なものを調達するためにはそれに見合う価値創造が日本国内で行われる必要がある。日本が世界市場におけるプレーヤーとして活躍できる国際競争力を保持することは、日本社会の持続性、すなわち永続性とロバスト性を維持するための必須条件である。エネルギーは人類のなす様々な価値創造の中で最も基本的な必須の要素である。エネルギー供給の持続性は、日本の価値創造における国際競争力の持続性、ひいては日本社会の持続性を左右する。

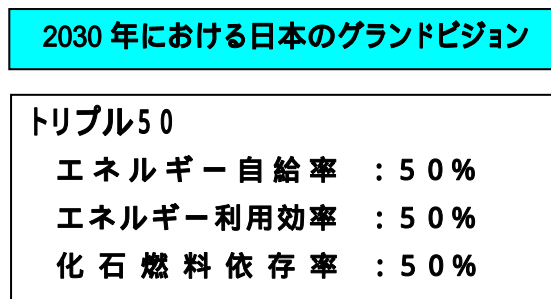
### 3. 持続型社会に向かうエネルギービジョン

上記に挙げたリスクの中でも、化石資源利用からの脱却は、人類の永続性にとっての最大の課題のひとつである。本持続型社会研究協議会がターゲットとする 2030 年までの期間では、世界的視野、日本的視野での永続性の観点からみた場合、資源の枯渇や、地球環境システムの急速な変動などの大きなリスクが発生するとは、現段階では予測されない。しかしながら、化石資源が最も安価な一次エネルギー源であり、現在のエネルギー利用や化学工業がこの利用の上に成り立っている現実を考えれば、この問題の解決には非常に多くの労力と長い時間が必要であり、再生利用エネルギー技術の開発と普及を積極的に推進し、環境（Environment）を重視した循環型社会へのソフトランディングを図る必要がある。

また、これと同時に、日本経済の国際競争力を向上、維持するために必要な最終エネルギーを、許容できるコストで供給し、エネルギーセキュリティなどの短中期的なリスク要因に対するロバスト性を確立することが重要になる。日本社会は、出生率の驚くほどの低下に伴い世界に類を見ない速度で高齢化社会に突入し、生産人口が減少に転じようとしている。人口の漸減は国内における需要の停滞を招き需要ドライブによる経済発展の芽を摘む。これらの要素は日本国内における価値創造の意欲を減退させ国際競争力の低下をもたらすものとなる。エネルギー供給の脆弱性は、このような日本の価値創造の脆弱性をさらに拡大し、相乗効果による国際競争力の低下を招きかねない。また、東アジア圏の視野で見れば、日本以外の国々の急速な経済発展により東アジア圏内のエネルギー需要が増大し、短期的、局所的に供給の逼迫をもたらされる可能性が高い。このような状況に対して、東アジア圏内の混乱を回避し、日本が東アジア圏内でリーダーシップを確保して、東アジア圏全体の永続性とロバスト性を確保してゆくためには、まず東アジア的視野に基づく日本におけるエネルギー供給のロバスト性を確保することが急務である。日本がその経済力を後盾にしてなりふり構わず、供給量の確保に走るような事態になれば、東アジア圏における日本への信頼は大きく損なわれ、日本を含む東アジア圏の永続性とロバスト性は回復しがたい疵となる。現時点でも日本の GDP 当たりの一次エネルギー消費量は世界トップの省エネ水準

にあるが、技術革新を更に進め、環境と経済活動とエネルギー問題のトリレンマを解決し、持続型社会実現と経済活動の両立を他国に先んじて指し示すことが、資源に乏しく2次、3次産業の国際競争優位性の維持が必須の日本のなすべきことであると考え。またこの道こそが、日本が位置する東アジア圏の安定と持続性に寄与するものとなる。

本協議会では、このような認識の下、日本を含む東アジア圏を視野に、経済（Economy）、エネルギー（Energy）、環境（Environment）の3つのEのトリレンマを解決し、長期的には持続型社会へのソフトランディングを目指しながら、短中期的なリスクに対するロバスト性を有する社会を実現するための技術開発の挑戦目標（エネルギービジョン）として、トリプル50を掲げる（図2、3）。



**図2 2030年における日本のグランドビジョン**

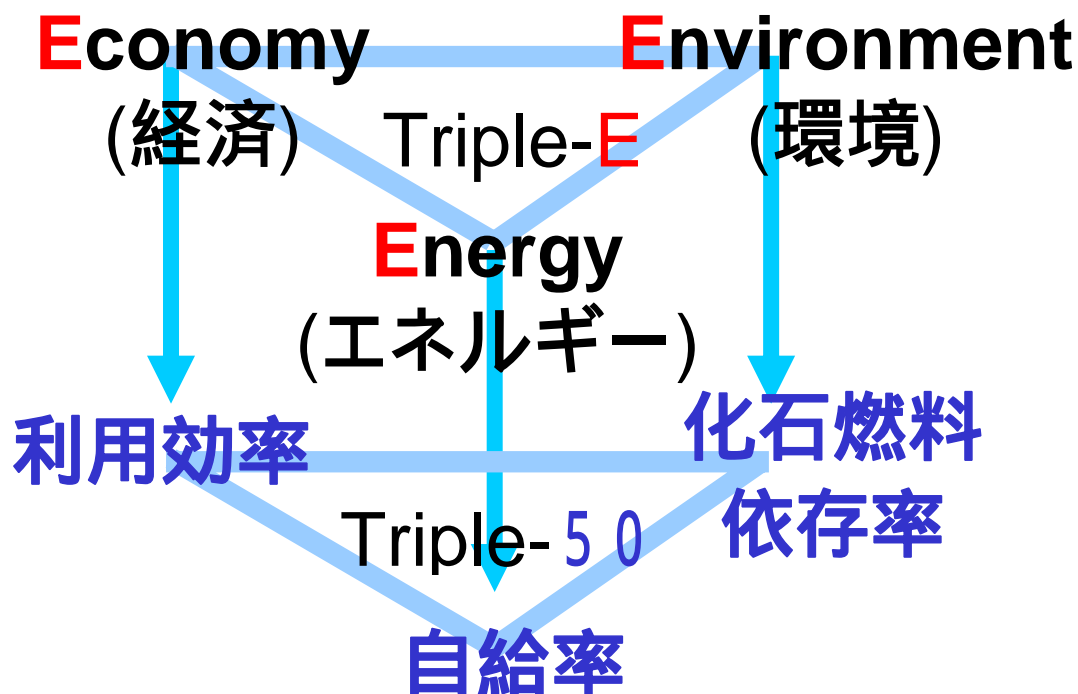


図3 トリプル50

#### エネルギー自給率 50%:

日本のエネルギーの最大の脆弱性は、エネルギー自給率が 19% しかなく、うち石油依存度が 52% (輸入 100%) を占めることである。エネルギー政策の基本は、この自給率をいかに高めるかということにあり、将来の世界規模でのエネルギー需要の増大や政情不安などに起因する調達リスクに治してロバスト性を確保するためにも、自給率向上は急務の課題である。

自給率の適切な数値目標を具体的に定めることは難しい。適切さを評価する評価項目によりその数字は前後する。しかし一般論で言えば、世界のエネルギー供給市場において供給が逼迫した時、日本が必要量を輸入できるだけの価値創造、すなわち輸出経済力に見合う量しか輸入できないことは明らかである。自給率の適切な数値目標はこの輸入可能量からまず逆算される。この際、日本の東アジア圏での位置を意識した時、これらの国々の必要エネルギー購入量に対する経済力を大きく脅かさないことも条件となる。その意味では、世界のエネルギー供給市場における需要側の日本のプレゼンスが相対的に低下する大きな目標を掲げることが必要になる。なお、必要なエネルギー量は世界市場のみならず、世界の需給関係に左右されない閉じた相対取引により調達することも可能である。日本の国土以外で算出されるエネルギーであっても、日本の長期輸入が担保され、世界市場における需要者としての日本のプレゼンスを縮小させるものは、たとえ輸入

であっても日本のエネルギー需要に対するロバスト性を向上させるものであり、このようなエネルギー確保に努めることも視野に入れることが必要である。

2003年における日本の貿易収支は10.2兆円の黒字、燃料輸入総額は9.35兆円（円ドル為替レート116円、原油価格\$29.3）であり、将来為替レートが150円、原油価格が\$35/バレル時にも貿易収支黒字を維持するためには、エネルギー自給率は約50%程度まで高めておくことが必要との試算がある<sup>[3]</sup>。本協議会では、エネルギーの有効利用、省エネも併せて推進することで、自給率に対しては50%を目標とする。

### **エネルギー利用効率 50%:**

ここでは、一次エネルギーのうち最終的に需要側で利用される負荷及び便益への変換効率をエネルギー利用効率と定義する。現在の日本のエネルギー利用効率を平田<sup>[4]</sup>を参考にして35%とする。実効的なエネルギー利用効率は、一次エネルギーコストと、エネルギー高効率利用技術の導入コストのトレードオフで決まると考えられるが、より戦略的にエネルギー有効利用技術を開発、利用していくことが望ましい。特に、化石資源などの燃料や原料の価格が長期的に上昇傾向にあることを考慮すると、エネルギー利用効率そのものが経済競争力に大きなウェイトを占めるようになると予想される。また、高度なエネルギー利用技術は、日本が世界、特に東アジア圏の中でリーダーシップを発揮してゆく上で、重要なコンピタンスであり、日本の優れたエネルギー利用技術を東アジア圏諸国に供与することは、東アジア圏全体としての安定と持続性に大きく寄与することができる。本協議会では、利用効率を年率約1.5%で高め、2030年に50%まで引き上げること为目标とする。

### **化石燃料依存率 50%:**

短中期的には、化石燃料資源の枯渇、あるいは埋蔵量減少による価格の大幅な高騰のリスクは少ないと考えられるが、化石燃料は有限な資源であり、我々の子孫が可能な限り長期にわたり化石資源を利用するためにも、その利用料は低減させることが望ましい。

化石燃料のほぼ全量を輸入に依存している現在の日本の一次エネルギー調達構成では、上記の自給率50%は化石燃料依存率50%と同義である。ただし、国内でのバイオマス、風力、太陽光といった再生可能エネルギー供給の大幅な増加は、現実的には非常に困難であることを鑑み、海外での再生可能エネルギー生産、日本への輸送のフレーム開発へも取り組むことを想定している。この意味で自給率は若干低下するが、あくまでも本協議会の高い目標として自給率も化石燃料依存率も50%という数字を設定する\*。

---

\* この目標は、京都議定書のCO<sub>2</sub>排出目標を大幅にクリアする。経済同友会「自給率50%イニシアティブ」<sup>[3]</sup>によれば、1990年排出量6%減はCO<sub>2</sub>排出量換算282Mt-Cとなるが、総合資源エネルギー調査会によるエネルギー需給展望<sup>[5]</sup>の省エネ進展ケースで同246Mt-C、経済同友会50%イニシアティブで190~220Mt-Cであり、十分に達成可能な目標となっている。



## 4. グランドデザインの策定に向けて

### (1) 前提条件

2030年の社会のグランドデザイン策定にあたっては、以下の見通しを前提条件とする。

項目	見通し	参照(原典)
人口構造	人口は2006年をピーク(1億2,774万人)に達した後、減少に転じ、2030年度には1980年頃の水準まで低下する。	[5]([6])
エネルギー価格	原油価格は、2010年度までは緩やかに推移、以降は徐々に上昇し、2030年度に\$29/バレルまで上昇。LNG価格は基本的に原油価格に連動するが、原油に対する相対価格はやや低下。石炭は近年実績を踏まえ、引き続き原油価格より低めで推移する。	[5]([7])
経済成長率	2010年度頃までは2%成長程度で推移。中期的には労働人口の減少と、年1%程度の生産性向上を想定し、1%台で推移する。	[5]

また、エネルギー、環境、経済の各分野におけるリスク要因に対しては以下のように考える。

#### エネルギー：

2030年ごろまでの短中期では、最も大きなリスク懸念がある。具体的には次のようなものが想定される。

- ・ 政情不安、人口増大、アジア圏のエネルギー消費増大による化石燃料資源の価格高騰
- ・ 原子力発電所の事故の発生などによる原子力発電インフラのシナリオ崩壊
- ・ CO2排出量規制の強化

#### 環境：

長期的には、エネルギーと物質の循環を確立する必要があるが、2030年頃までの短中期では、深刻なリスクは生起しないと考えられる。ただし、地球温暖化との因果関係は明らかではないものの、CO2排出量に対しては、国際協調の下、CO2濃度で550ppmレベルで安定化させることが現実的と考える。

#### 経済：

一次エネルギーや食料などで十分な資源を保有しない日本にとって、経済の国際競争力を維持し、安定的に外貨を獲得することは極めて重要である。エネルギーと関連したリスクでは、貿易収支の悪化による一次エネルギー調達不安定化が最も懸念される。

## (2) 持続型社会研究協議会のビジョンの具体的なイメージ

上記の前提条件の下で、持続型社会研究協議会のビジョンの具体的なイメージをつかむため、総合資源エネルギー調査会需給部会による「2030年のエネルギー需給展望(中間取りまとめ原案)」(以下「需給展望」という)をベースにした簡易検討を行った。

検討に際しての単位は、原油換算(百万kl)としたが、設定したケースは簡易的に単純な比例配分をしたもので、個々の数値の妥当性検討は今後の課題である。

簡易検討を行うに当たっては、次の点を基本的な方針とした。

原子力は需給展望におけるハイケースを使用(運開10基 17基、設備利用率85% 90%)

水力、地熱は、資源エネルギー庁の見積もりを採用。

CO<sub>2</sub>ニュートラルなエネルギーを海外で生産、輸入し、自給率にカウント(バイオマスからのエタノール生産、太陽光発電、風力発電等を想定)。

**協議会のビジョン: エネルギー利用効率50%の達成 (現状35%)**

### 需要の構成(最終エネルギー消費)

(原油換算 百万kl)

	産 業	民 生	運 輸	合 計
2000年	195	117	101	413
2030年(リファレンス)	188	136	101	425
2030年(省エネ)	185	114	78	377
2030年(協議会)	179	87	59	325

**協議会のビジョン：エネルギー利用効率 50%、化石燃料依存率 50%**

**一次エネルギー国内供給**

(原油換算 百万kl)

	合計	化石燃料			原子力	水力	地熱	国内新エネルギー	輸入Cニュートラル	自給率	化石燃料依存率	利用効率
		石油	石炭	天然ガス								
2000年	588	274	107	98	75	20	1	14	0	19	81	35
2030年(リファレンス)	607	233	106	131	90	20	1	26	0	19	81	35
2030年(省エネ)	536	189	93	112	95	20	1	26	0	26	74	40
<b>2030年(協議会)</b>	<b>428</b>	<b>204</b>			<b>113</b>	<b>20</b>	<b>1</b>	<b>72</b>	<b>18</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>

- ・輸入するCニュートラルなエネルギーのイメージ：東南アジアでのバイオマスプランテーション、風力、太陽電池のエネルギー基地等を想定
- ・自給率は輸入Cニュートラルも勘案

**国内新エネルギーに対する考え方**

(原油換算 百万kl)

	合計 (輸入含まず)	新エネルギー内訳			
		太陽	風力	バイオマス	輸入バイオマス
2030年(協議会)	72	22	19	31	18

- ・需給展望の新エネ進展ケース見積もり：原油換算 46 百万 kl
- ・「バイオマス日本総合戦略」の目標値：原油換算 33 百万 kl
- ・風力賦存量 106.25 百万 kl

### (3) ビジョン実現に必要な技術開発

上記のビジョンを実現するために必要と考えられる技術を、当面の持続性を維持するための「繋ぎ技術」と、循環型社会へのソフトランディングを目指す上で必要となる「本質技術」に分けて以下のとおり整理した。

	繋ぎ技術	本質技術
供給サイド	<p><u>(化石燃料関係)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>メタンハイドレード</li> <li>石炭ガス化</li> <li>クリーンコール</li> <li>石炭 IGCC, 石炭 IGFC 石油残渣 IGCC 天然ガス MACC</li> <li>燃料の多様化(オイルシェールなど)</li> <li>GTL</li> <li>CO2 固定技術</li> </ul> <p><u>(非化石燃料)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>軽水炉の安全性・稼働率向上技術</li> </ul> <p><u>(電力系統最適化技術)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>蓄電・蓄熱・蓄エネルギー技術</li> </ul>	<p><u>(再生可能エネルギーの高効率化)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>太陽光発電</li> <li>バイオマス(未利用国内資源及び海外バイオマスプラントーション含む)</li> <li>風力発電</li> <li>廃棄物発電</li> <li>燃料電池</li> <li>波力・潮力・海洋温度差発電</li> <li>大規模電源(非化石)の超高効率発電</li> </ul> <p><u>(超長期持続エネルギー)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>核融合</li> <li>高速増殖炉(高速炉燃料再処理)</li> <li>高温ガス炉(水素製造)</li> <li>超電導電力輸送</li> </ul>
需要サイド	<p><u>(電力需要平準化技術)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>蓄電・蓄熱・蓄エネルギー技術(2次電池、フライホイール、キャパシタ)</li> <li>マイクログリッド技術</li> <li>分散型電源</li> <li>太陽熱利用</li> <li>高効率配送, 長距離, 大量, 高速輸送技術(モーダルシフト)</li> </ul> <p><u>(エネルギー利用技術の最適化(省エネ技術含む))</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>コプロダクト技術(製鉄, 化学プロセスなど)</li> <li>水素利用(燃料電池・貯蔵・輸送も含め)</li> <li>高効率ヒートポンプ</li> <li>ハイブリッドエンジン(トッランナー自動車, クリーンエネルギー自動車)</li> <li>省エネ建築, トッランナー家電, 高効率給湯機, 高効率証明</li> <li>IT 活用のエネルギー管理システム, HEMS(照明・ディスプレイ・家電), BEMS</li> <li>ESCO 事業</li> <li>全電化システム</li> <li>ITS</li> <li>高性能工業炉・ボイラ</li> </ul> <p><u>(その他)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>素材リサイクル</li> <li>消費財の長寿命化</li> </ul>	

## 参 照

- [1] 気象庁報道発表資料(平成16年3月22日),「増え続ける大気中および海洋中の二酸化炭素濃度 国内および世界の最新状況」,2004.
- [2] リソナ経済調査,2003年8月号
- [3] 経済同友会・富士通総研,「エネルギー自給率50%イニシアティブ」,2003.
- [4] 平田賢,「省エネルギー論」,1994.
- [5] 総合資源エネルギー調査会,「2030年のエネルギー需給展望(中間とりまとめ原案)」,2004.
- [6] 国立社会保障・人口問題研究所,「中位推計」,2002.
- [7] IEA,“World Energy Outlook 2002”,2002.

## 5 グランドデザインと技術課題

上記のビジョンを実現するためには、再生可能エネルギーの大幅導入、エネルギー転換・供給システムの効率と安定性向上、徹底した省エネルギーが必要である。以下、これらの3つの視点から検討を行った結果について記述する。

### 5.1 再生可能エネルギー

本協議会では、再生可能エネルギーの賦存量評価に基づき、2030年の国内供給目標を原油換算7200万klと設定する(水力・地熱は含まず)。また、そのための再生可能エネルギーの2030年の発電コスト目標を、火力発電の2030年の予測発電コストと競合しうる値として10円/kWhと設定する。以下、この発電コスト目標を達成するための技術課題を分析し、研究開発項目を抽出する。なお、上記供給目標は、再生可能エネルギー全体が対象であるが、協議会のメンバー構成の制約から、具体的にビジョン、ロードマップ作成も含め検討すべき技術項目として、風力発電、バイオマス(未利用国内資源および海外バイオマスプランテーション含む)、廃棄物発電に絞り込んだ検討を行った。

本協議会の再生可能エネルギー(風力,バイオマス,太陽光・熱)の国内供給目標量72百万klは、総合資源エネルギー調査会「2030年のエネルギー需給展望」の国内新エネルギー導入量26百万klと比較すると約3倍であり、また、シェアでは全一次エネルギー供給量の17%という高い目標である。一方、国内でのバイオマス、風力、太陽光といった再生可能エネルギー供給の大幅な導入は、現実的には非常に大きな困難を伴うことを鑑み、海外での再生可能エネルギー生産、日本への輸送の枠組の開発へも取り組むことを想定した。即ち、国内供給72百万klに加え、CO<sub>2</sub>ニュートラルなエネルギーを海外で生産、輸入する。バイオマスからのエタノール生産、太陽光発電、風力発電等を想定し、海外供給量の目標は18百万klとした。

現状の火力発電の設備コスト、人件費、効率、補修費等の固定費3.3円/kWhを維持し、燃料費(現状2100円/Barrel)が変動するとして2030年の火力発電コストを評価した。現状は原油価格

で 2100 円/Barrel で発電燃料費 4 円/kWh である。長期エネルギー需要見通しにおける 2030 年の原油価格推定は、為替レートを 120 円/\$ とすると、基本ケース( 3480 円/Barrel )、低価格ケース( 1800 円/Barrel )、高価格ケース( 4200 円/Barrel ) なので、固定費 3.3 円/kWh を加えると、火力発電コストはそれぞれのケースで 6.7、9.9、11.3 円/kWh となる。本協議会としては、火力発電コストの 2030 年の予測値として、中間値 9.9 円/kWh を採用する。従って、これに競合できる再生可能エネルギーの 2030 年のコスト目標を 10 円/kWh 未満とした。

## 5.1.2. 風力発電

### 賦存量と供給目標

風力エネルギーの賦存量を、以下のように陸上と洋上に分けて算出した。

陸上風力賦存量推定は、NEDO(1994)に基づき求めた。利用可能土地で年平均風速 5 m/s以上の地点を選定すると、建設可能面積は 3,600 km<sup>2</sup> (国土の約 1%) となる。標高 500m以下、最大傾斜 5 度以下、道路幅 2.5m以上を有効地域とし、500 kW風車を風車設置間隔 3D×10D (D: ブレード直径) で設置すると、陸上風力賦存量として 3500 万 kW (340 億 kWh/year) が推定される。

洋上風力賦存量は、をNEDO(1998)に基づき推定した。日本の海岸線総延長距離から、内湾・内海・島嶼部を除外し、残余の海岸線延長距離から湾口、航路に係る海岸線延長距離分 20%を差し引いて、風車設置可能海岸線を設定する。その海岸線と沖合 3km (水深 20m前後) の区域に囲まれた海域を風車設置可能海域とするとき、その面積は 19,600km<sup>2</sup>となる。ここに、風車 2MWを風車設置間隔 3D×10D (D: ブレード直径) で設置したとすると、洋上風力賦存量 25000 万 kW (4000 億 kWh/year) が見込まれる。

上述の賦存量をもとに、本協議会での風力発電供給目標を以下のように定める。2010 年の政府目標である 300 万 kW が陸上の賦存量の 10%程度となっていることに倣い、設備量を賦存量換算の 10%程度と定め、2030 年に風力発電設備量として、陸上 300 万 kW、洋上 2700 万 kW、合計 3000 万 kW を目標とする。このとき、平均設備利用率を 30%まで向上させたとして、

陸上：設備容量 300 万 kW：(電力量約 79 億 (kWh/year)) = 約 1.9 百万 (原油換算 kl)

洋上：設備容量 2700 万 kW：(電力量約 710 億 (kWh/year)) = 約 17 百万 (原油換算 kl)

風力総計：設備容量 3000 万 kW：(電力量約 790 億 (kWh/year)) = 約 19 百万 (原油換算 kl) を導入目標値とする。これは、2010 年までの風力発電設備導入量の年平均成長率を 25%、2015 年までの成長率を 20%、2020 年までを 15%、2030 年までを 10%とすれば達成可能な数値である。発電設備導入量は、近年 5 年間で年平均約 70%の成長率という非常に高い値を示しており、さらに洋上風車への新展開が可能であるならば、今後はその伸び率が減速していくことも考えても、十分に達成可能な数値であると判断する。

### 風力発電コスト目標

風力発電の発電コストは、資源エネルギー庁(2003)資料によると、大規模で 9~14(円/kWh)、中小規模で 18~24(円/kWh)とされている。発電コストの 8 割以上が固定費 (= 建設コスト×年経費率) によるものである。建設コストとして、NEDO(2004)の「1999 年、国内 20,000kW」ケースの 20(万円/kW)を採用し、さらに利率として 7.5%、耐用年数として 20 年、運転保守料とし

て324万円/年を想定すると、陸上風力発電コストは11.4(円/kWh)となる。再生可能エネルギー目標発電コストである10(円/kWh)達成のためには、上述の発電コスト11.4(円/kWh)を約1割低減することで達成可能である。NEF(2003)によれば、日本とデンマークにおける風力発電設備の建設コストは、風車本体のコストはほぼ等しいが、その他のコストが日本の方が高く、全体の建設コストは、日本はデンマークの1.65倍になっている。従って、建設コストを削減するためには、風車本体以外のコスト低減が重要である。

洋上風車の発電コストについて、現在の欧州における洋上風車の発電コストは、浅瀬に建設された着底式のHorns Revでは、約6.5円/kWhの発電コストとされている。2000kW機を想定し、利率7.5%/年、耐用年数20年、運転保守料はEWEA(2004)を参考に1296万円/年、年間発電量電力量を8,000,000kWh/年とすると、建設コストの推定値は20万円/kWである。この建設コストは、国内の陸上風車と同等以下であり、欧米の陸上風車の約1.5倍である。風速9m/s、設備利用率45.7%による大きな年間発電電力量が、安価な発電コストの理由の大きな要因である。

日本においても洋上風車は、まず沿岸の着底式から展開し始めている。しかしながら、日本においては遠浅の海岸が限られていることなどから、風力発電の導入目標を達成するためには、沿岸から離れた海上に、浮体式の洋上風車を設置する必要があると考えられる。Ushiyamaら(2003)の資料から推定される浮体式(Box Girder)の建設コストは33万円/kWである。浮体・係留・設置に関わる建設コストは18.5万円/kW、そして発電コストは14.0円/kWhと推定される。これを、再生可能エネルギー目標の10円/kWh以下とするためには、建設コストによる固定費を約25%低減し、運転保守料を約50%低減する必要がある。従って、浮体の建設コストの低減、運転保守料の低減、風車および浮体のメンテナンスフリー化、風車の故障率低減が重要である。

## 風力発電の技術課題

風力発電は出力変動が大きい電源であるため、大量に電力系統に連系した場合、電圧や周波数などの電力品質に影響を及ぼすことが懸念されている。電圧変動については局地的な問題であり、電圧補償装置等での対応が可能である。周波数への影響に対しては、風力発電の出力変動がガバナフリー制御(数秒~数分程度)、負荷周波数制御(Load Frequency Control: LFC、数分~十数分)でカバーできる範囲内であることが必要となる。各電力会社のLFCの容量は概ね総需要の±1~2%程度である。風力発電の導入量を増やすためには、電力系統への影響を緩和する対策を実現することが必要である。そのための対策として、電力会社間の送電空き容量の周波数調整への利用、電力会社の予備調整力不足の解消(風車の電力会社との協調制御)、風力発電と電力貯蔵装置のハイブリッド化、電力以外の二次エネルギーへの変換などが挙げられる。送電空き容量の利用については、電力会社間の送電容量の増加が必要となる。電力会社の予備調整力不足の解消については、電力系統にとって予備調整力に余裕がなくなる時間帯、あるいは需要電力がベースロード運転に近い時間帯に風力発電電力が大量に投入されることが厳しいため、風力発電設備側で出力制限運転を行う必要がある。逆に、この余力を予備調整力とすることができる。また、気象予測/風車発電量予測に基づいて給電指令計画を立てることにより、供給の過不足解消できるが、局地的な風況予測技術の高精度化、高速通信網の整備等が課題である。風力発電と

電力貯蔵装置のハイブリッド発電は、風力発電の出力変動を電力貯蔵装置（二次電池、フライホイール電力貯蔵、超電導電力貯蔵など）によって低減させるものであるが、その最大の課題はコストが高いことと、電力貯蔵容量が風車容量の約 70%と大きいことである。電力以外のエネルギーキャリアへの変換には、水素やバイオガス等の供給インフラを構築する必要があり、長期的な戦略が必要である。なお、これら対策には、政策としての後押しが必要である。

### 5.1.3. バイオマス発電 賦存量と供給目標

「バイオマス・ニッポン総合戦略」にて、わが国のバイオマスエネルギー量の賦存量と利用可能量示されている。木質系バイオマスでは未利用樹が相対的に大きいと、間伐材などは現状では 2 割程度しか間伐されておらず、森林保全の観点で間伐が進めばこの 5 倍程度は排出されることになり、林地残材の利用可能量も増加することが期待できる。製紙系バイオマスでは、現状において黒液はほとんどエネルギー回収に利用されている。農業残渣系では、稲ワラのポテンシャルが大きいものの、鋤込みで処理されているのが現状である。ただし、利便性などの点で今までにないメリットがあればエネルギーとして利用される可能性はある。一方、糞尿、下水汚泥、食品廃棄物などのウエット系では、ほとんどが未利用とあって過言ではなく、利用可能性は高い。もとより処理技術や経済性には課題が多いが、賦存量としては全体で 4,334 万 kl/年、利用可能量は 3,279 万 kl/年と推定されている。

本協議会では供給目標として、ドライ系バイオマス 2,500 万 kl、ウエット系バイオマス 600 万 kl、総計で原油換算 3,100 万 kl とした。ドライ系では利用可能量全てをエネルギー変換しても 1,900 万 kl であり、600 万 kl 分は他に見つけなくてはならない。当面は、廃棄物系、近い将来には未利用系バイオマスが、長期的には「バイオマス・ニッポン総合戦略」にも示されているように、エネルギー作物が利用されると考える。耕作放棄地、遊休地、海洋などの利用が指摘できる。わが国は国土を海洋に囲まれており、海洋をエネルギー生産の場として捕らえることができる。例えば、コンブのような成長の早い海藻を養殖して収穫し、嫌気性消化によりメタンに変換できれば、未利用の海洋をエネルギー生産に利用できる。海藻の養殖は藻場を提供することにもなり、食料としての魚介類の増産にも繋がる。

ウエット系については、供給可能量が 1,372 万 kl であるが、その約 1/2 である 600 万 kl を供給目標とした。

#### ドライバイオマスの発電コスト目標

ドライバイオマスを燃料とした発電方式として、直接燃焼方式とエタノール化した後、燃焼させるエタノール燃焼方式について検討した。

直接燃焼方式のコスト見積りの前提として、技術的な課題は発電技術を除きバイオマス使用上の問題となる新たな事象は発生しないこと、又は発電コストを変動させるような他の付加要因はないことを仮定した。発電コストに関わる主な要因として、燃料コスト、設備コスト、発電効率、運転経費(燃料を除く)について試算した。



バイオマス燃料の調達コストに関して、対象とするバイオマスは、木質ないしはこれに準じる比較的水分が少ない材料で燃焼により熱を取り出すことが可能なものを想定した。燃料として利用する植物起源の固体バイオマスの場合、加工、建築廃材、間伐等大部分が木材と想定され、これらの他に農作物廃材、藁、籾殻等がある。現状では、これらのうち、固形化燃料（RDF等）としての処理法が確立されているのはごく一部であるが、今回の試算では、燃料の平均熱量としてはRDF化またはそれに相当する物に対して、3,000 kcal/kgを暫定的に使用した。また、現行の輸入木材の平均価格は約 2 万円/m<sup>3</sup>以上であり、熱量換算の価格は 4 万円/トン以上となるため、発展途上国のように新規木材等が燃料に使用されることは少ないと考えられる（加工廃材は除く）。従って、廃棄部またはこれに準じる材料を対象とした。2030 年においては、バイオマス購入、及び収集コスト、RDF化等、燃焼に適する形にするのに必要なコストをシステムの整備により 2.3 万円/トンとし、ここから、自治体の平均的な廃棄物処理コストを 2 万円/トンの削減が図られることから 0.3 万円/トンと仮定した。

2030 年における設備費用と効率については、大型設備（日処理量 300 トン以上、稼働率 50%）を想定し、発電設備単価を 12 万円/kW、発電効率は、化石燃料の燃焼方式による既存の発電設備効率はガスタービンコンバインドシステムにおいて約 50%となっていることを勘案し 40%と仮定した。

燃料費を除く運転経費に関しては、設備費の 8%を一律に運転経費（人件費、管理費、消耗品費他）と仮定した。

バイオマスのエタノール化の目的は、主に自動車燃料代替と考えられるが、今回火力発電での混焼を念頭に検討した。エタノール燃焼方式のコスト見積りに関して、エタノール製造コストを 121 円/l、エタノール発熱量 29.7MJ/l、発電効率 0.38 を用いて、電力 1kWh あたりのエタノール製造コストを 39 円/kWh と試算した。その内訳は、燃料コスト 14 円/kWh、運転コスト 21 円/kWh、設備コスト 4 円/kWh である。RPS 相当分 4 円/kWh を除くと、現状の発電コストは 35 円/kWh となる。エタノール化のコストロードマップとして、DOE 資料を参考に 2020 年のエタノール製造コストを 13 円/kWh（40 円/l）を目標とし、燃料コスト分を 6 円/kWh（19 円/l）とした。残りの運転、設備コストを 2004 年と同比率として計算した。2030 年においては、総コストを火力発電と競合させるために 10 円/kWh（31 円/l）、燃料コストを 2020 年と同じく 6 円/kWh（19 円/l）として残りの運転、設備コストを 2004 年と同比率として計算した。

ドライバイオマス直接燃焼方式とエタノール燃焼方式の発電コストのマイルストーンを表 5.1 に示す。

表 5.1 ドライバイオマス発電コスト目標

	2005 年	2010 年	2020 年	2030 年
直接燃焼	* 25	* 20	12.5	8
エタノール燃焼	* 35	* 23	13	10

\* 2005 年、2010 年のみ RPS 相当分 4 円/kWh をコストから除いた値を示す

## ドライバイオマスの技術課題

ドライバイオマス直接燃焼方式の 2030 年のあるべき姿として、最も高効率化の達成できる石炭加圧ガス化技術を流用し、石炭にバイオマスを混合させてガス化させる共ガス化が望ましいと思われる。加圧ガス化による高効率化および石炭プラントを流用することでの低コスト化が見込まれる。課題として、石炭ガス化プラントの過酷な反応条件でのバイオマス中の灰の融解による各種トラブル（炉内、ボイラーへの灰付着）が挙げられる。

2030 年からバックキャストして、2020 年ではまたバイオマス収集形態が整わず、各サイト単独での小型のガス化になると考えられる。そのため、バイオマス単独の流動層ガス化炉を用い、燃料電池での発電を主として目指すべきであろう。燃料電池で発電するためには高度なガス精製技術が必要でタール、酸化硫黄、ダスト除去を乾式で行うことが高効率化につながる。

2010 年ではガスタービン、またはガスエンジンによる小型の流動層ガス化炉発電での技術開発が主となると思われる。このときはエネルギー効率よりも不純物の除去効率が重視されるため、ガス精製を湿式で行うことで確実に精製されることが望まれる。

エタノール化の 2030 年のあるべき姿として、酵素による前処理 - C6 酵母 / C5 酵母によるエタノール化 - エタノールの膜分離による高濃度化というプロセスが理想である。そのためには前処理の酵素反応の高速化、エタノール酵母の高速化と C6 と C5 の分離による高効率化、膜分離技術の高度化が必要である。

2020 年は 2030 を目指した位置付けとなる。前処理では、水熱技術を用いた前処理技術の実用化研究を行いつつ、酵素前処理技術自体の開発が必要である。エタノール化では C5 酵母の遺伝子組織技術の開発やリアクター設計技術として酵母の反応器への固定化技術が必要と思われる。

## ウェットバイオマスの発電コスト目標

ウェットバイオマスは、乳牛糞尿処理(5t/日)を目的としたメタン発酵-発電システムを基本モデルとした。乳牛 1 頭当たりの糞排出量を 39kg/頭・日、尿排出量を 13kg/頭・日とすると、およそ 100 頭、1~2 戸の規模となる。メタン発酵槽として中温発酵槽、発電方式としてガスエンジン利用、消火液を液肥利用するシステムを基本モデルとして検討する。

NEDO (2003) をもとに、建設コストは建設単価 22 百万円/(t/日-糞尿)を用いて計算し、人件費を除く運転維持費は単価 850 円/(t/日-糞尿)を用いて計算した。また、人件費は、小規模個人ケースであり、施主が運転を実施するため発生しないとした。メタン発酵 発電方式以外の処理方式で糞尿を処理した場合、糞尿処理費として、約 2000 円/t・年 (40 千円/頭・年) かかると計算されている。糞尿をメタン発酵 発電方式で処理した場合は、その糞尿処理費が不要となり、発電燃料として使用が可能であるため、燃料費として-2000 円として試算する。

発電コスト試算を行なうにあたり、2030 年に向けて、バイオガス発生量は 2005 年比 33% 増加、及び発電効率も 2005 年と比較して相対的に 50% 増加すると仮定する。また、建設費の適正化、過剰設備の見直し、保守費用の低下等により、建設単価は 50% 減、及び運転費単価も 30% 低下すると仮定する。表 5.2 に、試算されたウェットバイオマスの発電コストを示す。

表 5.2 ウェットバイオマス発電コスト目標

	2005 年	2010 年	2020 年	2030 年
メタン発酵-発電システム	63	24	14	10

現状の発電コストは、63 円/kWh となった。その内、設置コストによるものが 79.7 円/kWh、運転コストによるものが 12.5 円/kWh、燃料費によるものが -29.4 円/kWh である（従来費用をかけて処理していた糞尿 2000 円/t をウェットバイオマス発電システムにおいては燃料として利用できる）。また、2030 年の発電コストは 9.6 円/kWh となった。その内、設置コストによるものが 19.9 円/kWh、運転コストによるものが 4.4 円/kWh、燃料費によるものが -14.7 円/kWh である。発電量向上と、建設コスト低下と運転コスト低下の相乗効果により発電コストは 2030 年の火力発電コスト予測値と競合できる 10 円/kWh 未満になる。

### ウェットバイオマスの技術課題

バイオガス発生量の増大、ガス精製技術の確立、発電効率の向上、発酵残さ・排水処理技術の高効率化が主な技術課題として挙げられる。バイオガス発生量を増加するには、メタン発酵槽における有機分解率を向上に寄与する破砕・可溶化技術等の前処理技術開発や高効率メタン発酵技術開発を促進させる必要がある。発生したバイオガスを高効率にエネルギー（電力）変換するには、脱硫技術等のガス精製技術の開発や発電効率の高い燃料電池の開発が望まれる。

コスト面の課題としては、設置コストの適正化、メタン発酵装置の小型化やメンテナンス簡略化、発酵残さ・消化液の低コスト処理技術開発等が主な課題として挙げられる。特に発電コストの大部分を占める設置コストの適正化を行なうことが重要である。現状では、スペックが安全側に設定されており、必要以上に高度な技術、高価な材料が採択され建設費に反映されている。今後、過剰設備の見直し、材質等の見直し、装置のコニット化や規格化を行なうことで設置コストを低減させる必要がある。

### 輸入バイオマス

わが国のバイオマス供給量には限界があるために、ある程度は外国のバイオマス資源に依存せざるを得ない。輸入先は当面は地理的に有利な東南アジアが候補となるが、将来的にはバイオマス供給を確保し安定化させるために、東南アジア以外の地域も視野に入れる必要があると考える。輸入に対する基本的な考え方としては、次のような点を考慮しなければならない。

- ・ 輸出先である地域の環境に負荷を与えないことが重要であり、持続的な発展が保持されなければならない。商業生産を目的とする人工林を対象とし、伐採量が生産量を上回らないような管理が必要である。
- ・ 新たにエネルギー作物を生産する場合は土地の確保が問題となるが、合弁事業としてバイオマスプランテーションの開発を行うなど、わが国と輸出国との双方に経済的にも環境保全の観点からも便益があるような仕組み作りが求められる。
- ・ 輸入の対象となるバイオマス資源は、原料と製品があり得る。バイオマスは用材やパルプ生産

に利用できるので、エネルギーとして利用する場合はできるだけ樹皮や廃材を利用することが望ましい。

・製品としては、ペレット、木炭、粗パーム油、BDF (Biodiesel Fuel)、エタノール、DME (Dimethyl Ether)、FTD (Fischer-Tropsch Diesel)、メタノールなどがある。

現在、パーム油は主にマレーシアとインドネシアで生産されており、両者で 2,000 万 kl 程度である。パーム油は大豆油の価格と連動して相当の変動がある。マレーシア政府はこの変動をヘッジするために 1 割程度を外国が安定的に輸入してくれるならば輸出できるとしている。従って、最大 200 万 kl 程度は輸入の可能性があると考える。また、エタノールの輸入先はブラジルが可能性が高い。米国からも価格次第ではあるが、相当量の輸入が見込めると考えられる。将来的には、リグノセルロースの糖化によるエタノール生産が技術的に可能になると予想され、糖質ではない廃棄物系バイオマスからのエタノール生産が経済的に成り立てば輸入量も増大するものと期待される。また、ドライ系バイオマスをガス化して合成ガスを製造すれば、必要に応じてメタノール、DME、FTD など石油代替となる液体燃料を製造することができる。現地でこのような製品を製造する場合は、現地での一次産業と二次産業の活性化、雇用の確保、二酸化炭素削減、環境保全に貢献するなど副次的な効果が期待できる。

輸入バイオマスのポテンシャルに関しては、2010 年には原油換算で 400 万 kl、2020 年には約 1,000 万 kl、2030 年には約 1,800 万 kl と想定した。2010 年では、エタノールで 117 万 kl でそのうち 92 万 kl が糖質系バイオマスから供給されるとした。現在、ブラジルでは年間約 1,200 万 kl を生産しており、この程度は十分に供給可能であると考ええる。また、粗パーム油の輸入も前述したマレーシアやインドネシアの状況を考慮すれば可能な供給レベルであろう。FTD は廃棄物系バイオマスを移用して 45 万 kl、その他はメタノール、DME、チップなどで 50 万 kl と仮定した。「産業植林によるバイオマスエネルギーの確立評価等に関する調査研究報告書」(2001)によれば、我が国が海外で行っている産業植林でのバイオマス生産可能量は、2010 年度には 8,480 千 m<sup>3</sup> と推定される。ユーカリを想定して発熱量や比重から原油換算で約 260 万 kl に相当する。世界規模では人工林の面積は 186.733 千ヘクタールで、仮に生長量を 52 m<sup>3</sup>/ha/年とすれば生産量は 9.7 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/年となる。このうち、用材やパルプ生産を除くと樹皮や枝条は 17% となる。これより得られる一次エネルギー換算値は原油換算で 456 百万 kl に相当する。従って、付加価値の高い用材やパルプ生産用には利用できない廃棄物系バイオマスだけでも相当量が見込まれる。わが国としては、このような廃棄物系バイオマスを原料あるいは製品に変換して輸入することで、双方に便益のある形でバイオマスを確保できると考える。海外からのバイオマス輸入を前述した樹皮や枝条に限定して、1,800 万 kl を世界の人工林面積で案分した場合、アジアからは最も多くて 1116 万 kl、アフリカからは 77 万 kl、オセアニアからは 27 万 kl、ヨーロッパからは 308 万 kl、北米からは 170 万 kl、南米からは 101 万 kl となる。これは木質系バイオマスだけであり、これに加えてマレーシアやインドネシアからの BDF やブラジルからのエタノールが加わることになる。図 5.1 に輸入バイオマスの賦存量と、燃料内訳を示す。

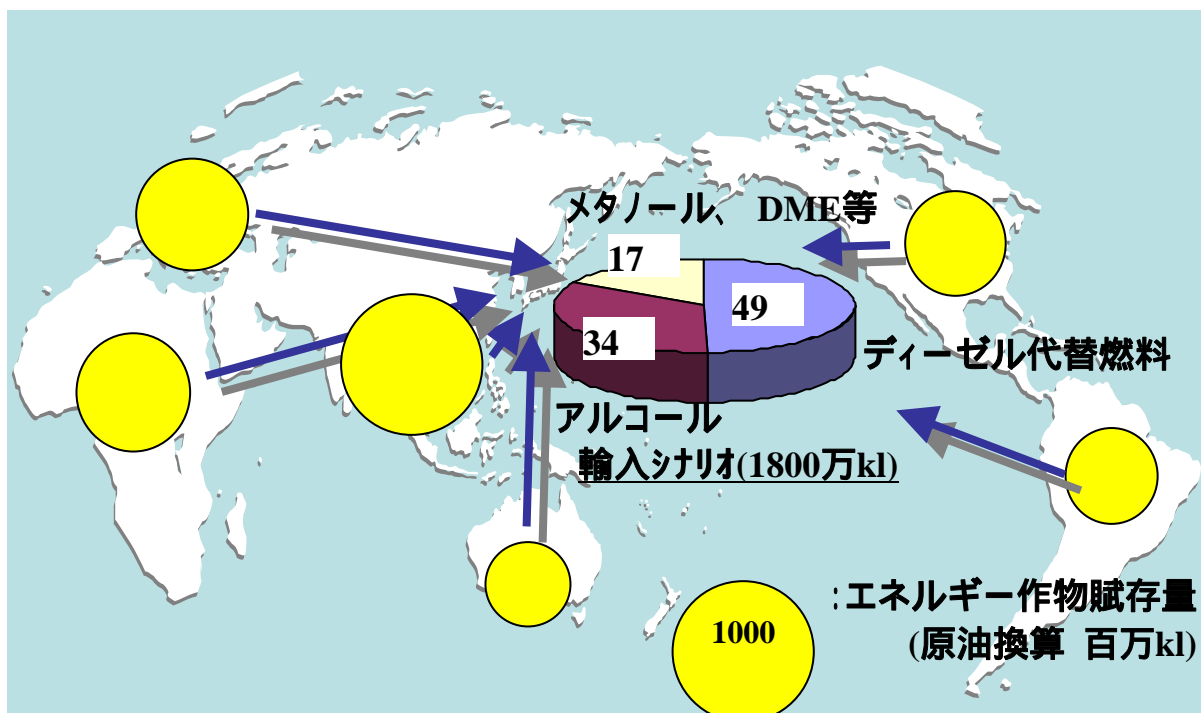


図 5.1 輸入バイオマス

### 輸入バイオマスの技術課題

輸入バイオマスのエネルギー変換技術に関しては、輸送用液体燃料の製造技術にポイントを置いている。その理由は、石油など輸送用燃料が不足する可能性が非常に高く、再生可能資源から液体燃料を製造する技術が強く求められるからである。

アジア地域においては一次エネルギー消費が増え続けており、消費量がエネルギー生産を上回って、エネルギー純輸入が増大している。特に、石油は消費量が1,004百万TOEに対して生産量は349百万TOEであり、655百万TOEを輸入に依存している。これは消費と生産が拮抗している天然ガスや石炭とは状況が全く異なっている。石油需給の見通しによれば、中国の石油需要の伸びが際立って大きい。中国の2030年の二酸化炭素排出量見込みはBAUケースで2,575百万トン-Cでこれは2000年の米国の1,577百万トン-Cに比較して1.6倍にもなる。このような状況で液体燃料を製造することは、わが国にとってもアジア諸国にとっても、化石資源利用の削減、二酸化炭素排出削減、再生可能燃料の製造など有意義なことである。

技術的には、大別して2通りの方法がある。双方とも基本的に非食料でドライ系のバイオマスを原料とする。一つはバイオマスのガス化による合成ガスの製造、合成ガスからの液体燃料合成から成る。もう一つはバイオマスを酸、望ましくは酵素により糖化してC5、C6糖をつくり、これからエタノール発酵を行いエタノールを製造するものである。前者では、目的によりメタノール、DME、FTDなどを製造できる。わが国では、バイオマスからのメタノール合成はNEDOでも研究開発が行われており、DMEに関しては天然ガスの水蒸気改質反応による合成ガスからDMEの実証プラントが稼働しており、研究ポテンシャルは高く、これらの研究開発の加速が期待され

ている。また、FTD においても最近新しい触媒開発が行われている。リグノセルロース系の糖化技術は世界でしのぎを削っている段階であり、安価な糖化酵素の開発がポイントである。両技術ともここ 5 年から 10 年程度で大きな進歩が予想でき、わが国としてバイオマスの製品輸入の大きな柱となることが期待される。

## 参考文献

NEDO, 1994, 大型風力発電システム開発, p.39.

NEDO, 1998, 日本における洋上風力発電の導入可能性調査, p.119.

資源エネルギー庁, 2003, 風力発電普及政策とその動向, 第 25 回風力エネルギーシンポジウム.

NEDO, 2004, 風力発電導入ガイドブック, 第 6 版.

EWEA (欧州風力エネルギー協会), 2004, Wind Power Economics.

NEF (新エネルギー財団), 2003, 風力発電導入の現状と課題, 第 25 回風力エネルギーシンポジウム.

Ushiyama, I., Seki, K. and Miura, H., 2003, Feasibility study on floating offshore wind farms in Japanese waters.

バイオマス・ニッポン総合戦略資料, 2002.

NEDO, 2003, バイオマスエネルギー導入ガイドブック.

平成 13 年度新エネルギー等導入促進基礎調査「産業植林によるバイオマスエネルギーの確立評価等に関する調査研究報告書」平成 14 年 (社) 海外産業植林センター.

## 5.2 エネルギーネットワーク

本協議会で掲げるビジョン Triple-50 を実現するためには、エネルギー転換・供給システムに対して、以下のようなグランドデザインが必要である。

- (1) 大規模な再生可能エネルギー導入と、負荷変動低減によるインフラ有効利用を可能とする系統ネットワーク (電力ネットワーク + IT ネットワーク)
  - ・動的需給制御系統ネットワーク (需給調整のための 2 次電池、ヒートポンプ含む)
  - ・新燃料(水素等)の製造・貯蔵・輸送に対応したガス供給インフラ
- (2) クリーン、かつ超高効率 (60% 超) な大規模発電
  - ・燃料サイクルと FBR 導入、大規模温排水利用
  - ・LNG / 石炭による高効率火力発電 (化学再生 CC、USC、IGCC / IGFC)
- (3) クリーン、かつ電力、熱、化学エネルギーの柔軟な供給制御が可能な小・中規模分散システム
  - ・産業分野におけるコプロダクションシステム
  - ・風力、太陽電池、バイオマスなどの再生可能エネルギー大幅導入

図 5.2 に、このようなエネルギーネットワークシステムのイメージを示す。このようなシステムを実現するための具体的なキーテクノロジーとして、次のような技術が挙げられる。

- (1) 再生可能エネルギーの大量導入を可能とする系統ネットワーク
- (2) エネルギー貯蔵（二次電池、蓄熱ヒートポンプ等）
- (3) コプロダクション
- (4) クリーン／超高効率石炭火力発電
- (5) 水素利用技術／燃料電池
- (6) 原子力エネルギー利用拡大

以下では、エネルギービジョン（Triple-50）にて定量化され、グランドデザインとして描き出された2030年のエネルギー社会の実現において、これらの個々のキーテクノロジーが果たすべき役割、課題等を示すことで、今後、我が国が取り組むべき未来技術開発の姿を明確化する。

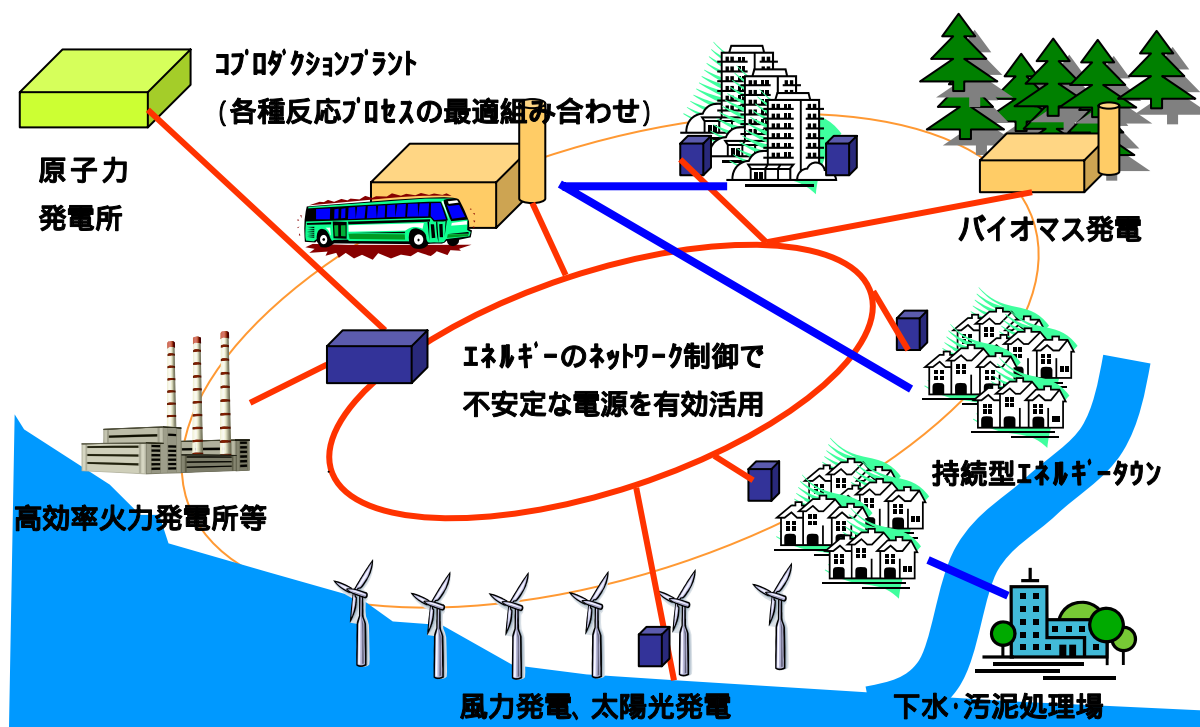


図 5.2 持続型社会を支えるエネルギーネットワークシステムのイメージ

### 5.2.1 再生可能エネルギーの大量導入を可能とする系統ネットワーク

化石燃料枯渇後の社会では、エネルギー供給は原子力と再生可能エネルギーに頼らざるを得ない。化石燃料枯渇によるドラスティックなエネルギー不足を回避するためには、そこに至る過程である2030年というポイントにおいても、再生可能エネルギーの大幅な導入が必要になる。再生可能エネルギーの最大活用のためには、水力、地熱、太陽光・熱、風力、潮力、バイオマスなど、それぞれを徹底的に利用することが不可欠である。例えば、風力発電については、設備容量として3,000万kWの大規模導入を見込んでいる。但し、再生可能エネルギーの中でも太陽光や風力発電は、気象や風況条件によって出力が不安定になるため、系統への連系については十分な考慮

が必要である。以下ではその技術課題の整理とその解決策について示す。

風力発電の出力変動は、数 10 秒～20 分の短周期成分と、20 分以上の長周期成分に分類できるが、前者は特に周波数変動として系統に影響を与える。負荷周波数制御 (Load Frequency Control) に求められる精度は利用側の要求品質によるので一律ではないが、家電などの末端利用で許容される精度に比べても 5～6 倍の精度が求められる。例えば、JEC 規格では 60Hz 系において 58.8Hz 以上の確保が求められるが、この精度を実現するためには系統側は  $60 \pm 0.2\text{Hz}$  に定常変動を抑える必要がある。シミュレーション検討から、風力出力の 30% 程度のバッファをもつことで、当該風力短周期変動による影響を抑制することが出来ると試算されている。従って、蓄エネルギー技術が本質的に重要となる。サイクル寿命の極めて長く信頼性の高い 2 次電池や、低コストの電気二重層キャパシタなどが開発されることが望まれる。蓄電以外にも、省エネルギーの面から大幅導入が期待されている蓄熱ヒートポンプを負荷調整に使える可能性がある。ヒートポンプ運転には必ずしも高品質な電力は必要ないので、例えば、給湯能力 5kW 機 (COP=5 を仮定すると電気入力 1kW) 2,000 万台を全て蓄熱に用いたとすると、2,000 万 kW 分の LFC 調整能力となる。同様に、汚泥・下水処理場による負荷調整も考えられる。出力変動に応じて瞬時に需要側の機器を制御 (DSM) するためには、高度な IT/電力ネットワークが不可欠である。

20 分から数日のオーダーの出力変動に対しては、その需給ギャップを補うために風力定格出力の 80% 程度のバックアップが必要となる。特に、火力発電が停止し原子力発電が主となる夜間の出力吸収が困難となる。その解決のためには、昼夜間の需要変動を平準化し、夜間のバックアップ余力を向上させる必要がある。例えば、夜間利用率の目標として、産業部門 80%、家庭部門 70% (現状 60% 程度)、業務部門 60% (現状 40% 程度) まで改善できれば、およそ風力 3,000 万 kW 分の夜間バッファを確保できたことに相当する。その上で、高効率で低コストの化学 2 次電池や、省エネルギー蓄熱技術が求められる。

なお、短周期・長周期変動いずれの対応の場合も、結果的に非常に多数の末端機器 (ヒートポンプやその周辺機器) を制御・管理するための IT 網の構築が必須である。特に短周期変動の場合は、数秒程度の制御周期での全体管理を行う必要があり、技術面・インフラ政策面での今後の大きな課題の一つである。

また、風力発電のピーク出力に合わせた系統線の増設が必要である。特に、将来的に主流となると予想される大規模洋上風力ウィンドファームと、消費地域をつなぐ系統線が問題となる。ビジョン実現のために、電力網増築 (10 億円/km)、海底ケーブル敷設 (25 万円/kW)、高圧変電所増設・増強 (5 万円/kW) 等のコスト負担を、先の末端機器の DSM 制御への IT 投資を含め、国レベルでの中長期的な視野に立ったインフラ整備が不可欠であると考えられる。

## 5.2.2 エネルギー貯蔵(二次電池、蓄熱ヒートポンプ等)

前節で述べたように、供給変動の大きく地域的に分散する再生可能エネルギーと、ベースロード運転を基本とする原子力によって、全 1 次エネルギー供給の 50% を賄うためには、需給バランスを調整するための蓄エネルギー技術が鍵となる。

電力貯蔵の重要性はこれまでも広く認識されており、1987 年ころから以下の技術開発が実施さ



れている。

- (1) 新型負荷平準化電源技術開発 (CAES)
- (2) 海水揚水発電技術実証試験
- (3) 地下揚水発電技術調査
- (4) 超伝導電力貯蔵システム技術開発 (SMES)
- (5) 負荷平準化新手法実証調査 (キャパシター)

開発成果が大規模に用いられていないのは、経済性がまだ不足しているためである。今後、システムと材料の両面から、経済性の向上が必要である。エネルギー貯蔵設備では、大規模に導入されている貯水池式揚水発電の効率と建設コストが、開発の目標になる。貯水池式揚水発電所では電力貯蔵効率が70%で、建設費は送電系統設備費を除いて、22万円/kWほどである。以下、本稿では、蓄電と蓄熱を中心に記す。

定置式の電力貯蔵用二次電池としては、エネルギー密度以上に将来的なコストダウンのポテンシャルが重要である。そのような観点で予測すると、NaS電池、鉛蓄電池、レドックスフロー電池、リチウムイオン電池などが有望と考えられる。リチウムイオン電池は、その高いエネルギー密度によって携帯情報機器向けに1990年代に大幅に発展したが、高価な材料を用いていないことや、量産効果による低コスト化が期待される。ただし、これら二次電池は原理的に電力と化学エネルギーの変換であるため、充放電サイクル寿命や、瞬時の出力調整、反応温度による性能変化等に課題が残る。コストとともに、これらの課題が解決されれば、大幅に普及することが期待される。

電極と電解液の界面に生じる電気二重層の電気容量を利用する電気二重層キャパシターも可能性がある。出力密度が高く、充放電サイクル寿命も長いため、二次電池の短所を補うことができる。エネルギー密度向上と量産効果によって、課題のコストダウンを実現できるかが鍵を握る。

民生部門の空調や給湯によるエネルギー消費は、現在の全エネルギー消費の1/6を占めており、これらの機器を蓄熱バッファとして利用できれば非常に大きなポテンシャルがある。既に、氷蓄熱ヒートポンプが普及しており、2004年で153万kWの夏季電力ピークシフト容量の実績がある。今後は、省エネルギーの観点からも、給湯、暖房用途にヒートポンプ導入が不可欠であり、その蓄熱槽を昼夜間の負荷平準化に加え、再生可能エネルギー出力変動調整用のバッファとしても利用すべきである。蓄熱には必ず放熱ロスが発生するが、低コストに再生可能エネルギーの需給バランス調整が可能であるということの意義はあると考える。逆に言えば、低コストで断熱性能の良い蓄熱槽が求められる。前節で既に記したが、給湯能力5kW機(COP=5を仮定すると電気入力1kW)2,000万台を全て蓄熱に用いたとすると、2,000万kW分の調整能力となる。

### 5.2.3 コプロダクション

エネルギープロセスの中で、最もエクセルギー損失が発生するのが燃焼過程である。従って、燃焼過程でのエクセルギー損失をいかに低減させるかという視点が重要である。そのためには、排熱を吸熱反応によって化学エネルギーにリサイクルする熱化学再生、排熱を熱交換して予熱に利用する熱再生、燃焼生成物を反応場に循環させ反応を原系側にずらすことで平衡に近い条件で

反応させるなどの方法がある。熱化学再生の例としては、炭化水素燃料の水蒸気改質やCO<sub>2</sub>改質、熱再生の例としてはガスタービンの再生サイクルなどがある。このようなプロセスは、我が国のエネルギー消費の約半分を占める産業部門を中心に実現可能である。発熱反応はできるだけ平衡に近い温度で行い、電力を取り出した上で排熱を吸熱反応に供給し、熱化学再生で水素を発生させる。あるいは、高温燃料電池を利用して可逆的に電力を取り出した上で、その排熱で熱化学再生を行うこともできる。他の例としては、アイアンカーバイドを利用した製鉄プロセスによってもエクセルギー損失を低減することができる。鉄鉱石を天然ガスで還元したアイアンカーバイドを輸入し、水蒸気と混ぜ 600 程度で吸熱反応させ、水素と鉄を発生させる。この水素を用いて発電し、その排熱でスチームを発生させ、吸熱反応に利用すれば熱化学再生となる。発電した電力は電炉に供給し、リサイクル鉄を製鋼する。以上述べてきたようなプロセスでは、電力、熱以外に、水素や鉄などの物質がコプロダクトされる。コプロダクションの趣旨は、排熱のカスケード利用ではなく、ゼロエクセルギー損失を実現させるためにプロセスを再設計することにある。物質とエネルギーのコプロダクションにより、従来燃焼過程で発生していたエクセルギー損失を大幅に低減し、革命的なエネルギー有効利用が実現できる。

#### 5.2.4 クリーン/超高効率石炭火力発電

化石燃料の中にあつて、石炭は安定した供給が可能、また埋蔵量が豊富なことから、エネルギーセキュリティの面から引き続いて重要な 1 次エネルギー源であり、そのクリーン・高効率な利用技術の開発が求められる。

石炭利用のデメリットは、他の化石燃料に比較して単位電力量当たりの環境汚染物質、特に二酸化炭素発生量が多いことにある。従って、その課題は転換プロセスの高効率化による二酸化炭素排出量の削減、また二酸化炭素の分離・回収・固定化によるゼロエミッション化があげられる。石炭は、鉄鋼等で使用されている原料炭と、電力で利用されている一般炭に大きく分けられるが、それぞれについて利用高効率化の対策が必要となる。日本における CCT (クリーン・コール・テクノロジー) は世界最高水準にあることから、世界的な二酸化炭素排出量低減の意味で、CCT の積極的な海外への普及が求められる。

CCT の開発及び普及については、資源エネルギー庁や経済産業省のクリーン・コール・サイクル (C3) 研究会等においてそのロードマップが明確に示されている。従って、ここではそれら技術開発を継続して進めることとし、エネルギー構造の転換と合わせ Triple-50 を達成することとした。

石炭利用の高効率化として、まずは微粉炭火力発電 (現状送電端効率39%) の高効率化が挙げられる。超々臨界圧発電技術 (USC、タービン入口蒸気条件800、38.5MPa、送電端効率49%以上、CO<sub>2</sub>排出原単位0.67kg-CO<sub>2</sub>/kWh以下)、次世代型石炭高効率利用技術としての石炭ガス化複合発電 (IGCC、1500 級GT効率46~48%、1700 級GT効率50%)、石炭ガス化燃料電池発電 (IGFC、効率55%)、アドバンスド型ガス化発電 (A-IGCC、A-IGFC、効率57~65%)、石炭ガス化水素製造、水素利用技術 (水素-酸素燃焼ガスタービン) などがある。また、バイオマス等の多種燃料とのハイブリッドガス化、電力-熱-水素のコプロダクションなどの普及が期待される。

ポスト京都議定書を睨み、二酸化炭素の分離、回収、固定化技術も重要である。石炭を空気ではなく、酸素+排気ガスの混合ガスで燃焼させることにより、排ガスのほとんどをCO<sub>2</sub>として回収する酸素燃焼技術や、溶解希釈型隔離法、深海底貯留隔離法等の海洋隔離、石油増進回収(EOR)、枯渇ガス田への注入(EGR)等の地中貯留、炭層メタン増進回収(ECBM)による炭層固定などが挙げられるが、全体システムの中でこれらの分離・隔離技術をいかにシナジーのある形で導入するかが問われる。

これらのCCTを、クリーン開発メカニズム(CDM)を活用して、石炭利用率が高い中国、東南アジア諸国への普及させることが重要である。

### 5.2.5 水素利用技術 / 燃料電池

水素は、エンドユースでのクリーンさのイメージが先行しているが、1次エネルギーから製造、運搬、貯蔵、転換の全エネルギープロセスでの効率や環境負荷を評価することが重要である。水素のエネルギーキャリアとしての重要性は、本質的にはエクセルギー率が83%と低いことにある。即ち、エクセルギー率の高い炭化水素燃料(化石燃料、バイオマス)と、排熱や太陽熱などの質の低い中低温の熱エネルギーから、吸熱反応によって水素を製造できる。このことで、エンタルピーとエクセルギーを増大、即ち、利用しやすい化学エネルギーの形でエネルギーの量と質を高めることができる。燃料電池は、高効率の水素-電力変換装置、高温型は熱化学再生装置として、水素システムの重要な要素の一つである。固体高分子形燃料電池は、水素供給インフラの末端での高効率変換を担い、固体酸化物形燃料電池や熔融炭酸塩燃料電池等の高温燃料電池は、その排熱を燃料改質の吸熱反応に徹底的に利用すべきである。一方、仮に水素を燃焼させたとしても、水素はエクセルギー率が低いため、炭化水素燃料を直接燃焼させ同じ熱量を得る場合と比較すると、そのプロセスでのエクセルギー損失は大きく減少する。出力変動が大きい需要などでは熱機関での利用も考えられる。

上記の水素を利用した社会システムの一例として、以下のような分散型コプロダクションシステムを提案する。これは、電力・水素・熱をエクセルギー再生により高効率で併産するものであり、送電ロスが無い分散型電源であると共に、燃料電池自動車や燃料電池バイクなどのモビリティでの水素利用シーンにおける、オンサイト水素供給源であり、オフィス・住宅等への熱供給源をも兼ねている。現状、例えばCOG副生水素の製造コストは20円/m<sup>3</sup>だが、輸送・貯蔵コスト等により、燃料電池自動車等への供給時点では100円/m<sup>3</sup>程度に上昇してしまう。一方、既存の天然ガスネットワークを利用した分散型コプロダクションシステムの場合、輸送コストを削減出来るため、コストメリットがある。分散型コプロダクションは、天然ガス改質器と高温型燃料電池を組み合わせたシステムであり、2種類のモードで運転する。コジェネレーションモードでは、改質器における熱交換により燃料電池排熱をエクセルギー再生することによって、発電効率を70%以上にまで高めることが出来る。発電規模は数MW程度(例:オフィスビル)が想定される。コプロダクションモードでは、改質器で得られる水素の一部を外部に抽出し、電力と共に水素を併産する。更に、電力・水素・熱の生産割合を可変にすることで、風力発電や太陽光発電の出力変動の調整機能を担うことが出来る。このシステム実現のためには、高温型かつ発電効率が高い

固体酸化物形燃料電池（SOFC）の開発が最重要課題である。これまでの国内外の研究開発により SOFCの技術レベルは着実に高まっており、2030 年には広く普及することが期待される。高出力密度化・低温化によるコストの低減、信頼性の確保（高耐久性材料・構造の開発、劣化機構解明・寿命予測法の確立）、負荷変動運転の確立（部分負荷、動特性）などが課題である。

将来的には、炭化水素燃料の改質による熱化学再生、風力や太陽光といった再生可能エネルギーからの水素製造、また CO2 回収・隔離システムも含めた総合的なインテグレーション技術、システム構築が重要である。

### 5.2.6 原子力エネルギー利用拡大

本ビジョンでは、全 1 次エネルギー消費の 25%を原子力によって賄う。そのために、軽水炉プラントによる供給力の増強が必要であり、既存プラントの出力増強と稼働率の向上を計った上で、既計画プラントの建設推進を改良型軽水炉（ABWR、APWR）によって、安全性の向上と稼働率の向上を計る必要がある。

次世代炉の導入と普及に関して、2025 年頃より、高速増殖炉と核燃料サイクルを導入開始し、順次古いプラントの建替推進を計りながら、持続可能な原子力エネルギーの構築を目指す。そして、同じ頃から普及する燃料電池の燃料供給は、原子力エネルギーによる水素製造により、持続可能な供給システムを確立する。

技術的課題としては、季節間変動とピークロードに対応できる、プラントの負荷追従運転の確立が挙げられる。また、高速増殖炉と燃料サイクルシステムについては、2030 年実用化普及のために、商業用 FBR 発電プラントと燃料再処理プラント / 最終処分システムの着実なる構築が技術開発と共に必要である。核熱水素製造技術の確立には、核熱利用による天然ガス / 石炭からの改質技術、熱分解、及び水蒸気電解等の高効率な製造技術の開発が必要である。

また、大規模温排水利用によるコージェネレーション等、熱利用と熱供給システム化を高度化させることで、総合的なエネルギー利用効率を向上させる視点も重要である。

## 5.3 省エネルギー

省エネルギーは、トリプル 50 を実現する鍵になる。図 5.3 および図 5.4 に総合資源エネルギー調査会「2030 年のエネルギー需給展望」レファレンスケースと、本協議会のトリプル 50 の場合の、1 次エネルギー供給、消費、便益を示す。エネルギー転換部門でのエネルギー使用効率の大幅向上、最終エネルギー消費の場面でのエネルギー使用効率の向上により、エネルギー利用の便益を確保しつつ、1 次エネルギー量を削減することが求められている。

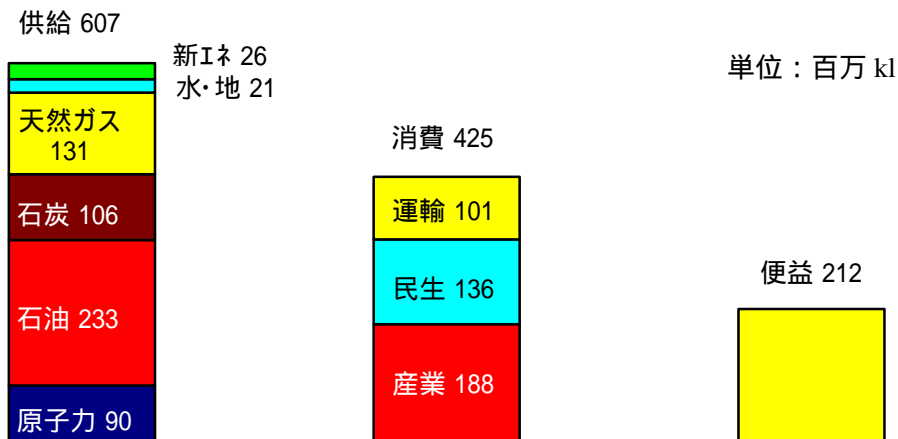


図 5.3 総合資源エネルギー調査会「2030年のエネルギー需給展望」  
レファレンスケースにおける一次エネルギー供給、消費、便益

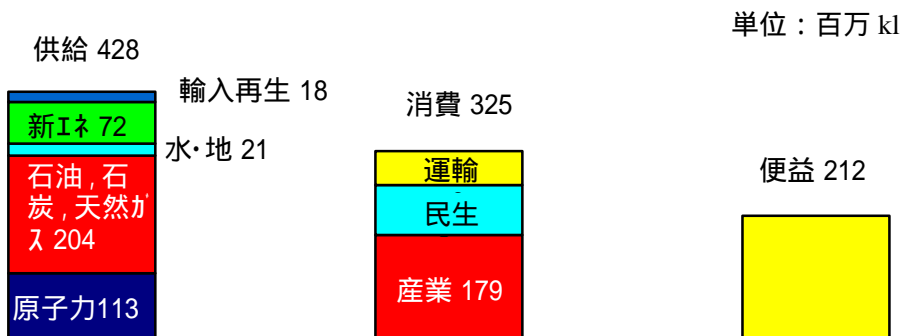


図 5.4 トリプル 50 における一次エネルギー供給、消費、便益

省エネルギーの効果は、再生可能エネルギーの開発に比べ、費用対効果が高い場面が多いことに特徴がある。例えば、民生部門におけるビル空調では、夏季の電力ピーク削減の見地から、日本ではガス焚きの吸収式冷凍機が普及しているが、これを最新の MACC による高効率電力転換とターボ式冷凍機に置き換えれば、1 次エネルギーの使用を半減させることが出来る。120 万平方のオフィスの空調熱源は、約 3 万冷凍トンと見込まれるが、この吸収式冷凍機設備費は 12 億円である。ターボ冷凍機は約 30 億円であり、18 億円余分にかかるが、1 次エネルギーの節約効果は約 8000kl である。これを 1 万戸の住宅、合計 120 万平方に、それぞれ 3kW の太陽電池を設置した場合、設備費は合計で 200 億円 (1kW 当たり約 70 万円) であり、発電量の原油換算値は、年間 1000 時間の稼働率で約 8000kl である。同じ 8000kl の削減を行うのに、省エネルギーは、再生可能エネルギー開発の 1/10 の費用効果で可能である。日本が 2 度の石油ショックを乗り越え、産業競争力を維持して現在の繁栄を保っているのも、この費用対効果の高い省エネルギーに邁進したことが、その大きな理由であることは明らかである。

ここでは、日本の産業競争力を殺ぐことなく、また民生の利便性を落とすことなく、進められる省エネルギー手法を検討する。

### 5.3.1 産業部門

産業部門のエネルギー消費は、オイルショック以来、さまざまな省エネルギー技術の導入により、ここ 30 年での伸び率は 5%程度に抑えられている。しかしながら、依然として我が国全体のエネルギー消費の 50%近くを占めていることも事実であり、産業部門の省エネルギー技術は、今日の緊急課題であるCO<sub>2</sub>削減や国際競争力強化に結びつくとともに、我が国の省エネルギーに大きく寄与するものと思われる。

#### 【鉄鋼分野】

産業部門のなかでも、とりわけ鉄鋼業はエネルギー多消費産業といわれ、我が国全体の 10%を超えるエネルギーを消費している。これに対して鉄鋼業では、生産設備の効率改善や大型排熱回収設備の導入、さらには廃プラ、廃タイヤ、バイオマスなどの廃棄物利用の拡大を推進することにより、2010 年には対 1990 年比で 10% (7.3 百万 kl) の省エネルギーを目標としている。しかしながら、さらなる省エネルギーを推進するには、鉄鋼の生産過程で必要とされるエネルギー自体を削減することがより重要となる。

鉄鋼の生産過程で消費されるエネルギーのうち、約 70%が高炉でのエネルギー消費であり、それゆえ、高炉でのエネルギー消費を大幅に削減することが、鉄鋼業における省エネルギーのキーテクノロジーとなる。鉄鉱石やコークスの反応性を飛躍的に高め、低温での高速還元を可能にする革新的高炉を実用化すれば、高炉での石炭量消費を大幅に削減でき、鉄鋼業全体で 8.5 百万 kl の省エネルギーが実現可能となる。また鉄鋼の生産過程で発生する高温スラグの顕熱を、これもエネルギー多消費産業のひとつといわれるセメント製造に利用すれば、0.5 百万 kl の省エネルギーが期待できる。

#### 【化学分野】

化学分野は鉄鋼分野に次ぐエネルギー消費産業であり、産業分野の中での炭酸ガス排出量は鉄鋼の 32%に対し 14%を占めている。特に石油化学は化学分野の炭酸ガス排出量の約 55%を占め、この分野の省エネが期待される。これに対し、化学業界では 2010 年度のエネルギー原単位を 1990 年比で 10%削減することを掲げており、排熱回収の促進・設備の高効率化、最適化等の世界トップレベルの省エネ対策により現時点で既に目標を達成している。しかし、個々の設備の効率改善はコスト対効果の点でほぼ上限に近づきつつあること、多くの設備がここ 20 年以内に耐用年数に達することから、今後の省エネ対策としては大幅な設備のリプレイス等による大規模な対策が必要と考えられる。

将来的には、石炭、非在来型化石資源やバイオマスからのガス化プロセスによる化学原料が主流となってくると予想される。排熱利用燃料改質によるエクセルギー再生、電力-熱-化学エネルギーのマルチパスのエネルギー相互変換を可能とするコプロダクションを産業部門に普及させることが重要である。

### 5.3.2 民生部門

我が国の民生部門のエネルギー消費は、国民の利便性や快適性への志向から増加の一途を辿っており、将来的にも情報機器の発達・普及による電力消費の一層の増加や、高齢化の進展による家庭部門での光熱費の増加等が予想されている。しかしながら、本ビジョンであるトリプル 50 を実現するためには消費部門の大幅な省エネルギーは必須であり、特に消費の増加傾向が続く民生部門に対しては、重点的、かつ大胆な省エネルギー対策が不可欠である。以下、民生部門の省エネルギーについて記す。

第一に、現在の民生部門エネルギー消費の約 50% を占める暖房、給湯は、環境との温度差が非常に小さい温度域での熱利用にもかかわらず、ガス、灯油、電力等による直接加熱というエクセルギー効率の極めて低いエネルギー変換が未だ主流となっており、抜本的な対策を講ずる必要がある。高いエクセルギー効率を持つヒートポンプの利用を徹底的に推進することで、暖房で 12.5 百万 kl、冷房で 1.4 百万 kl、給湯で 8.6 百万 kl のエネルギー消費削減が期待できる。ヒートポンプについては、例えば、設置スペースの小さな瞬間給湯式、冷媒封入量を大幅に削減した自然冷媒対応空調機、タスクアンビエント空調用の超小型空調機など、幅広い用途にユビキタスに利用可能な多様な機器の開発が望まれる。脱フロン化の動向を戦略的に睨みつつ、世界のトップランナーとして今後も高効率化、低コスト化、小型化への継続した技術開発が必要である。また、原子力と再生可能エネルギーの割合が増加していくことに伴い、電力需給のミスマッチが現在以上に顕在化することが予想されるが、その中であって蓄熱ヒートポンプには、需要変動や供給変動を吸収するバッファとしての期待も大きい。例えば、蓄熱給湯ヒートポンプを風力発電の短周期変動と連動させて運転する制御を行うことで、風力発電で最大 2000 万 kW に相当する負荷調整が可能と試算される。

また、住宅や建築物の高断熱化は地味ながらその効果が非常に大きく、極めて重要である。空調負荷低減効果により、8.8 百万 kl の省エネルギー量が見込まれる。断熱技術は、空調に限らず、貯湯槽、燃料電池等、応用範囲が広く、波及効果が大きい。熱抵抗が大きいことはもちろんのこと、軽量、安価で、施工性が良く、長期間の信頼性が高い超断熱材の開発が求められる。

さらには、情報技術の進展に伴い、BEMS や HEMS の普及促進が進み、IT を駆使したエネルギーマネージメントにより、7.1 百万 kl のエネルギー消費削減が期待できる。エネルギーマネージメントにおいては、低コストのセンサーがその普及と実効性の鍵を握るため、その技術開発が重要である。温度、圧力、光、湿度、速度、人体検知等、超小型なユビキタスセンサーによって、はじめてきめ細かいエネルギーマネージメントが可能となる。その他、インバータに代表されるパワーエレクトロニクス機器の高性能化や、高効率照明の普及等により、10.4 百万 kl のエネルギー消費削減を見込む。

以上の対策により、2030 年の民生部門エネルギー消費を、合計 87 百万 kl にまで削減させる。図 5.4 に、レファレンスケースおよびトリプル 50 における民生部門エネルギー消費の内訳と、2 次エネルギーの内訳を示す。暖房や給湯等の低温熱利用分野で、断熱およびヒートポンプの導入によって大幅に消費が削減される。また、エネルギーマネージメントにより、動力も大きく削減

される。

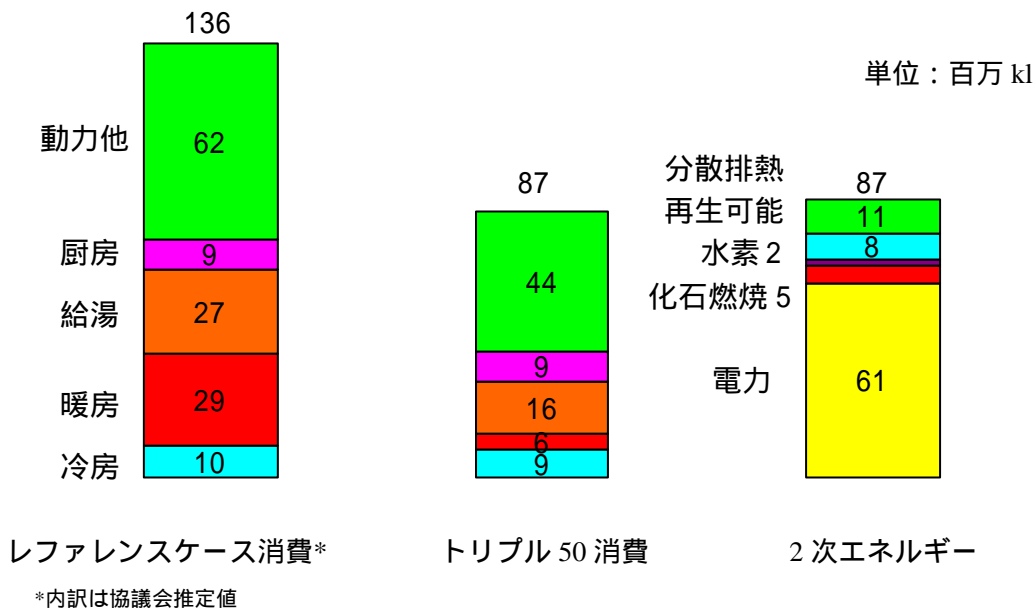


図 5.4 民生部門エネルギー消費、および 2 次エネルギーの内訳

電力化率が 70%程度にまで増大する一方で、太陽光、太陽熱、バイオマス、風力といった再生可能エネルギーが、分散エネルギーの形で需要側に近接して普及してくる。本協議会では、再生可能エネルギー熱利用（太陽熱、バイオマス熱利用）8.1 百万 kl，分散電源排熱 10.6 百万 kl の熱利用を民生分野で想定しているが、季節間で大きく熱需要が変動する我が国の場合、その導入は決して容易ではない。しかしながら、風力や太陽光など供給変動が大きな再生可能エネルギーのバックアップとしての小型熱機関や燃料電池からの排熱、太陽熱、バイオマス熱利用は徹底的に利用することが本ビジョンであるトリプル 50 を実現するためには不可欠である。そのためには、昼夜の熱需要平準化に加え、季節間の熱需要平準化に貢献する技術、例えば温度変化の小さい地熱や河川水等を熱源とする蓄熱ヒートポンプ、排熱利用吸収式、吸着式冷凍機などの高効率化、低コスト化等の技術開発が重要である。今後大きな経済成長が予想されるアジア、アフリカ等の高温地域での省エネルギーに貢献する技術を、リーダーシップを発揮して開発すべきである。

以上、主として需要側からの視点で民生部門の省エネルギーについて記してきたが、理想的には都市や地域のあり方をエネルギー、経済、防災、治安、環境といった複数の観点であらためて総合的に問い直す必要がある。理想的な都市開発を行うことができれば、民生部門の省エネルギーにも極めて大きな効果が期待できる。一例として、熱需要の大きい病院、ホテル等が含まれる最小単位と考えられる人口 5 万人程度の小・中規模都市を想定する。住人は、およそ 1km 四方に集中して居住し、隣接するオフィス商工業地区に職住接近で通勤、通学する。都市機能を高密度に集約し、オープンスペースを確保することで、負荷ピーク平準化、省エネルギー機器導入コスト削減、高い断熱性、緑地・河川・農地や道路スペースの回復、防災時の孤立防止、ヒートア



イランド防止、通勤や地域内配送エネルギー削減など様々なメリットがある。エネルギー需給の面では、熱需要の大きい病院、ホテル、家庭などが近接することで、真の意味で高効率な地域冷暖房、エネルギーサービスが可能となり、本ビジョンを実現するための理想的な条件が整う。都市再開発事業とエネルギー政策の有機的な連携が望まれる。

### 5.3.3 運輸部門

運輸部門においては、ハイブリッド車、燃料電池車に代表される低燃費自動車の普及、ITS による都市渋滞の改善等により、レファレンスケースに対して 42 百万 kl の削減を見込む。特に、小型で大容量の 2 次電池やキャパシター等の蓄電技術、エネルギー回生技術、車体軽量化等が鍵を握る。

一方で、再生可能エネルギーの拡大に伴い、BDF や DME 等、従来のガソリンや軽油に代わる新たな燃料が普及してくると予想される。また、電気自動車、水素自動車など、多様なエネルギー源の自動車が、用途、地域等に応じて導入が始まると考えられる。高性能蓄電には、電力系統の需給バランス調整としての役割も期待される。

( 参考 1 )

持続型社会研究協議会規約調印者

東京大学生産技術研究所長 西尾 茂文

東京大学大学院工学系研究科  
総合研究機構 社会連携推進室長 笠木 伸英

石川島播磨重工業株式会社  
常務執行役員 技術開発本部長 中川 幸也

株式会社東芝 執行役上席常務 東 実

株式会社日立製作所  
執行役専務 研究開発本部長 中村 道治

三菱重工業株式会社  
代表取締役 常務 技術本部長 柘植 綾夫

注：役職・所属は平成 16 年 3 月当時

(参考 2)

持続型社会研究協議会 参加メンバー

【東京大学】

(工学系研究科)

笠木 伸英	教授	社会連携推進室長	(機械工学専攻)
金子 成彦	教授		(機械工学専攻長)
鹿園 直毅	助教授		(機械工学専攻)
鎌田 実	教授		(産業機械工学専攻長)
横山 明彦	教授		(電気工学専攻)
藤井 康正	助教授		(電気工学専攻)
堤 敦司	助教授		(化学システム工学専攻)
佐藤 光三	教授		(地球システム工学専攻)
登坂 博行	助教授		(地球システム工学専攻)
湯原 哲夫	教授		(環境海洋工学専攻)

(農学生命科学研究科)

横山 伸也 教授

(新領域創成科学研究科)

山地 憲治 教授 (先端エネルギー工学専攻)

(情報理工学系研究科)

中村 仁彦 教授 (知能機械情報学専攻長)

(情報学環)

荒川 忠一 教授

(生産技術研究所)

西尾 茂文	教授	所長	(機械・生体系部門)
浦 環	教授	副所長	(機械・生体系部門)
前田 正史	教授	副所長	(物質・環境系部門)
渡辺 正	教授		(物質・環境系部門)
畑中 研一	教授		(物質・環境系部門)
迫田 章	教授		(物質・環境系部門)

宮山 勝 教授 (物質・環境系部門)  
 光田 好孝 教授 (物質・環境系部門)  
 立間 徹 助教授 (物質・環境系部門)  
 岡部 徹 助教授 (物質・環境系部門)  
 安井 至 客員教授 (物質・環境系部門)

**〔座長〕加藤 信介 教授 (人間・社会系部門)**

野城 智也 教授 (人間・社会系部門)  
 伊香賀 俊治 研究員 (人間・社会系部門)  
 加藤 千幸 教授 (機械・生体系部門)  
 板倉 周一郎 教授 (機械・生体系部門)

(原子力研究総合センター)

班目 春樹 教授

**【石川島播磨重工株式会社】**

勝又 一郎 航空宇宙事業本部 技監  
 塩田 朋彦 技術開発本部管理部技術企画グループ 課長  
 渡邊 忠昭 技術開発本部管理部技術企画グループ 課長  
 張 惟敦 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部強度評価グループ 課長  
 小林 和典 電力事業部管理部企画グループ 部長  
 高野 伸一 エネルギー・プラント事業本部事業開発部 課長代理

**【株式会社東芝】**

山下 勝比拵 技術企画室理事・産業連携グループ長  
 佐田 豊 研究開発センター 機械・システムラボラトリー室長  
 篠原 和太郎 電力・社会システム技術開発センター  
 エネルギーソリューション開発部  
 エネルギー環境ソリューション担当グループ長

**【株式会社日立製作所】**

中尾 俊次 電力グループ 電力・電機開発研究所 企画室室長  
 飯野 利喜 機械研究所主幹研究長  
 後田 孝一 研究開発本部研究戦略統括センタ 企画室 部長

**【三菱重工業株式会社】**

山田明 技術本部 先進技術研究センター 次長

古屋孝明	技術本部	技術企画部	主席部員
藤村皓太郎	技術本部	技術企画部	主任
中村 剛	技術本部	技術企画部	主席部員

注：役職・所属は平成 16 年 3 月当時

( 参考 3 )

持続型社会研究協議会  
ワーキンググループメンバー

【東京大学】

加藤 信介	教授 ( 座長 )	生産技術研究所	人間・社会系部門
板倉 周一郎	教授	生産技術研究所	機械・生体系部門
光田 好孝	教授	生産技術研究所	物質・環境系部門
岡部 徹	助教授	生産技術研究所	物質・環境系部門
鹿園 直毅	助教授	大学院工学系研究科	機械工学専攻

【石川島播磨重工株式会社】

塩田 朋彦	技術開発本部管理部技術企画グループ	課長
渡邊 忠昭	技術開発本部管理部技術企画グループ	課長
小林 和典	電力事業部管理部企画グループ	部長
高野 伸一	エネルギー・プラント事業本部事業開発部	課長代理

【株式会社東芝】

佐田 豊	研究開発センター機械・システムラボラトリー	室長
篠原 和太郎	電力・社会システム技術開発センター	
	エネルギーソリューション開発部	
	エネルギー環境ソリューション担当グループ	長

【株式会社日立製作所】

中尾 俊次	電力グループ企画室	室長
飯野 利喜	機械研究所	主幹研究長

【三菱重工業株式会社】

山田明	技術本部 先進技術研究センター	次長
古屋孝明	技術本部 技術企画部	主席部員
藤村皓太郎	技術本部 技術企画部	主任
中村 剛	技術本部 技術企画部	主席部員

注：役職・所属は平成 16 年 3 月当時

(参考 4)

### 未来開拓連携研究協議会趣意書

大学における研究の第一義は自由な発想による課題選定であり、このことが、研究に多様性をもたらし、「知の創出・蓄積」の源泉である。逆に言えば、大学の研究には様々な方向のベクトルがあるのが健全と言える。こうした多様性の中から新企業創成(例えばベンチャー企業創成)にもつながる傑出した成果が生まれてくることは言うまでもなく、現在大学に求められている社会貢献あるいは成果還元のための重要なものの一つである。

しかし、科学技術のもたらした社会システムが資源・環境問題のような課題を突きつけている現在、単に多様性を保障するにとどまらず、価値創成を目指して未来社会に対するビジョンを構築し、創出・蓄積された知をビジョンの基に総合して課題解決にあたる努力、あるいは課題解決を目的として基礎・基盤・開発研究を行う努力が大学にも求められている。また、先端科学技術のようにシーズが価値を創成する社会、あるいは知の国際的優位性が産業競争力に影響する時代が到来している現在、創成される価値を議論し、価値の実現に向けて総合的に取り組む努力が必要となっている。換言すれば、多様性と総合性により二足歩行する大学が求められていると言えよう。

特に、総合性に基づく課題解決型の研究開発においては、未来社会に対するビジョンや価値創成について、大学と社会あるいは産業とが互いに共有できる認識に辿り着くことを目的とした「可塑的対話」が重要である。また、可塑的対話により共有されたビジョンや価値を光源として現在から未来への道筋を照らし出し、大学と企業が役割分担を行いつつ、連携を行うことが重要である。特に、我が国の戦後復興を支え、いまや世界のトップランナーとなった基幹産業に対しては、新たな基盤技術の開発あるいは既往技術の限界を突破する新技術などについて、大学が基盤研究を担い、その成果を企業群が共有し、その礎の上に独創的な製品開発へと進む新たな連携プラットフォームを構築し、我が国の産業競争力を向上させることが必要と思われる。

東京大学生産技術研究所と大学院工学系研究科は、上述の可塑的対話によるビジョン等の共有、共有されたビジョン等の社会や政府への発信、そしてビジョン等を光源とした役割分担に基づく技術開発の実践を目指して、「未来開拓連携」と名付ける新たな連携の枠組みをスタートさせる。本協議会は、上記趣旨に賛同する企業と大学との連携により、持続型社会の実現に向けての産学連携活動を行うことを目的とするものである。

東京大学生産技術研究所長 西尾 茂文

東京大学大学院工学系研究科総合研究機構社会連携推進室長 笠木 伸英

(参考 5)

【記者発表資料】

平成 16 年 3 月 29 日

持続型社会研究協議会の発足について  
～ 東大と企業群が連携 / エネルギー・環境・経済のトリレンマを解決～

東京大学生産技術研究所  
東京大学大学院工学系研究科総合研究機構社会連携推進室

東京大学の生産技術研究所と工学系研究科総合研究機構は、大学と企業が対話を行いながら、それぞれの強みを生かして、相乗効果を発揮し、科学技術の向上と産業競争力の強化を通じて広く社会に貢献するために「未来開拓連携」という新しいスキームによる産学連携をスタートさせます。

その第 1 弾として、生産技術研究所と、工学系研究科総合研究機構社会連携推進室は、石川島播磨重工業株式会社、株式会社東芝、株式会社日立製作所、三菱重工業株式会社の 4 社と、持続型未来社会に対するビジョンを構築・共有し、これを実現することを通じて社会に貢献することを目的として、「持続型社会研究協議会」を発足させます。

本日、6 者の合意にもとづき、その協議会規約に署名をしました。(平成 16 年 3 月 29 日 午後 2 時; 於 東京大学)

生産技術研究所は、工学領域のほぼ全分野をカバーする体制により、分野の壁を越えた、あるいは総合的な立場から、基礎研究にとどまることなく実技術への結実を目指しております。また、社会連携推進室は、工学系研究科の学外組織との連携を推進する窓口です。その活動の最初の試みとしての「持続型社会研究協議会」では、大学院工学系研究科・情報理工学系研究科にまたがる機械系 3 専攻(機械工学、産業機械工学、知能機械情報学)が責任専攻として研究成果の社会的活用を目指します。

本協議会の具体的な活動項目は次のとおりです。

- (1) 社会の持続・発展を可能とするビジョンの設定
- (2) ビジョンに基づく未来社会のグランドデザインの策定
- (3) グランドデザインからのバックキャストによる長期的な技術ロードマップの策定
- (4) 上記技術ロードマップに基づく、必要な連携計画の立案と実施

本協議会が取り扱う当面のテーマは、「持続型社会実現のための循環型エネルギー技術」とします。今後、早期に、上記のグランドデザインとロードマップを策定し、社会や国に提言するとともに、本協議会のコミットメントとしてその実現を目指します。

本件に関するお問い合わせ先:

東京大学生産技術研究所 板倉周一郎 教授

(電話: 5452-6671 FAX: 5452-6672 e-mail: sitakura@iis.u-tokyo.ac.jp)

東京大学工学系研究科機械工学専攻 鹿園直毅 助教授

(電話: 5841-8850 FAX: 5841-8850 e-mail: shika@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp)

以上



**エネルギーセキュリティと地球温暖化防止への対応  
日本の持続型社会のエネルギービジョン・トリプル 50 について**

東京大学 持続型社会研究協議会\*

近年、世界の化石燃料消費は、飛躍的な増大を示しており、将来起こりうる石油の供給不安定化への対応は、エネルギー自給率の低い日本にとって重要な問題であり、又、同時に、地球温暖化防止の観点から化石燃料の消費に伴うCO<sub>2</sub>の排出抑制が求められています。このような社会情勢の中、数百年規模で人類の持続性を実現する為には、有限である化石資源への依存を低減し、短中期的なリスクを許容しつつ、持続的利用が可能な再生可能エネルギーと原子力エネルギーの利用を基本とした社会構造へとソフトランディングを図ることが必要であると考えます。

そこで**持続型社会研究協議会**では、これらの問題を解決し、日本が世界の範となる**持続型社会を実現するための技術開発の挑戦目標（エネルギービジョン）**として、**トリプル 50**を発表します。

本協議会では、この挑戦目標設定にあたり、新たに**バックキャスト**の考え方を取り入れました。これは、従来の現状からの予測に基づき将来の目標を設定する手法と異なり、**まず未来のあるべき姿を設定し、それに基づき、その姿を達成する為の目標と取り組むべき事を設定する手法**です。

具体的には、日本が持続型社会を実現する為、**2030 年時点での日本の目指すべきエネルギービジョンとして、トリプル 50% - エネルギー自給率 50%、エネルギー利用効率 50%、化石燃料依存率 50% - を設定**しました。エネルギー自給率は、日本の持続的発展を維持する為、将来の日本の貿易収支、及び、それに基づき輸入可能なエネルギー量の検討に基づき、50%を設定しました。エネルギーセキュリティの観点から化石燃料依存率も 50%と設定しました。また日本は既に、世界トップレベルの省エネ大国ですが、これを更に普及・発展させ、世界の範となる省エネ国家をめざすとともに、エネルギー価格が高騰する状況においても日本の競争力を維持する為に、エネルギー利用効率 50%を設定しました。

協議会では、このトリプル 50 を実現するために必要な社会の姿創りに向け、まず以下の観点から、社会の姿の具体化（グランドデザイン）と実現に必要な技術課題の抽出について検討を進めています。

**再生可能エネルギーの最大活用と、その大幅導入を可能とする社会システム  
産業分野でのエネルギーの高効率利用****エネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出の大幅削減を実現する持続型エネルギータウン**

現在検討中の例を上げれば、再生可能エネルギーの活用では、風力、太陽光、バイオマスの最大活用について検討を進めるとともに、この再生可能エネルギーを原子力と併せて、日本のエネルギーの半分以上を支える柱にしていく為に、**不安定な電源を許容する為のエネルギーのネットワーク制御、蓄エネルギー等に関する技術課題の抽出**だけでなく社会システムも含めた検討に取り組んでいます。又、エネルギーの高効率利用では、エネルギー消費を低減させる為の**各種反応プロセスの最適組み合わせを目指したコプロダクションシステム、持続型エネルギータウンでは、エネルギー消費 4 割削減とCO<sub>2</sub>排出量の半減を実現する都市のあり方**について、**地域のエネルギーマネジメントと徹底した省エネ技術、更に、これらの技術を最大限活用しうる都市システム**について検討を行っています。

又、これまでの検討の結果、ビジョン実現のためには、エネルギーネットワークや交通システム等について業界を横断した検討の必要が明らかになっており、今後、さらなる関連業界と連携して、エネルギー戦略を産学にて知恵を出し合う活動を拡大する事についても検討していくとともに、関連府省への提言を行っていく予定です。

本件に関するお問い合わせ先：（URL <http://rmo.iis.u-tokyo.ac.jp/jizoku.index.html>）

東京大学生産技術研究所 加藤信介 教授

（電話：5452-6433 FAX:5452-6432 e-mail:kato@iis.u-tokyo.ac.jp）

東京大学工学系研究科機械工学専攻 鹿園直毅 助教授

（電話：5841-8850 FAX:5841-8850 e-mail:shika@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp）以上

【\*：東京大学 生産技術研究所、工学系研究科総合研究機構社会連携推進室、及び、IHI、東芝、日立、三菱重工をメンバーとし、H16年3月発足】