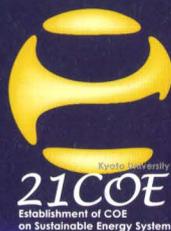


# 「新エネルギー技術の可能性を求めて」



## 21COEプログラム 環境調和型エネルギーの 研究教育拠点形成

京都大学大学院エネルギー科学研究科  
京都大学エネルギー理工学研究所  
京都大学生存圏研究所

Graduate School of Energy Science  
Institute of Advanced Energy  
Research Institute for Sustainable Humanosphere  
Kyoto University

# 環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成

## Establishment of COE on Sustainable Energy System

「新エネルギー技術の可能性を求めて」



京都大学大学院エネルギー科学研究科  
京都大学エネルギー理工学研究所  
京都大学生存圏研究所



# 目次

1. はじめに –持続可能社会のための環境調和型エネルギー拠点の構築–	5
2. 2030年に向けたエネルギー需給シナリオの策定	7
3. 新エネルギー開発拠点の今後の展開	11
4. 「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」各事業における成果の概要	15
4.1 太陽電池ナノサイエンスユニット	15
4.2 宇宙太陽光発電ユニット	20
4.3 人工太陽(核融合)ユニット	26
4.4 次世代水素エネルギーユニット	31
4.5 超臨界流体技術によるバイオエネルギー創製ユニット	34
4.6 エネルギー需給評価支援ユニット	37
4.7 教育拠点形成	44
4.8 国際(環境調和型)エネルギー情報センター	47

はじめに

2030年に向けた  
エネルギー需給  
シナリオの策定

新エネルギー開発拠点の  
今後の展開

各事業における  
成果の概要

太陽電池ナノサイエンス  
ユニット

宇宙太陽光発電  
ユニット

人工太陽(核融合)  
ユニット

次世代水素エネルギー  
ユニット

バイオエネルギー創製  
ユニット

エネルギー需給評価  
支援ユニット

教育拠点形成

国際(環境調和型)  
エネルギー情報センター



## 1.はじめに – 持続可能社会のための新エネルギー拠点の構築 –



拠点リーダー 吉川 暹  
 京都大学エネルギー理工学研究所  
 s-yoshi@iae.kyoto-u.ac.jp

地球温暖化が現実味を帯び、化石資源の枯渇が喫緊の課題となってきたことから、新エネルギー開発が「人類社会の持続可能な発展」に直接関わる焦眉の急と認識されつつある。1997年の気候変動枠組み条約第3回締約国会合(COP3)において採択された京都議定書では化石資源を使わない環境調和型新エネルギーへの代替が強く求められている。2007年2月に発表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の報告書は、地球温暖化の原因を化石燃料によるものとほぼ断定しており、このままでは人類は破滅コースをたどると警告している。今後、そう遠くない時期に人類は、定められた二酸化炭素の排出枠の中でしか生活あるいは産業活動をできないという事態にいたるものと予想される。

本COEでは、このような社会変革への対応を目指して、京都大学大学院エネルギー科学研究科、エネルギー理工学研究所、生存圏研究所(旧宙空電波科学研究センター)の3部局が合同で、「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」を目標とする提案を行い、平成14年度の文部科学省のCOEプログラムに採択され5年間にわたり事業を進めてきた。

本研究拠点形成計画では、環境に優しい新エネルギーシステムとして、①太陽エネルギーの創製・変換・利用技術、②水素エネルギーの製造・貯蔵・利用技術、③バイオエネルギーの創製・利用技術、の研究開発を推進するとともに、④エネルギー削減型社会の形成を含む、真に環境に調和したエネルギーシステムの構築を目指した研究拠点形成を目的としてきた。

一方、教育拠点形成では、特に、エネルギー科学が世界的視野からの判断能力とバランス感覚が必要であることから、国内外のエネルギー研究機関との連携ならびに人文・社会系との連携を図り、国際社会ならびに地域社会のニーズを的確に把握し、国際的に通用する人材の養成を目指した。

また、これらの研究教育拠点化活動を円滑に推進するための組織として、国際環境調和型エネルギー情報センターを設立し、エネルギー情報の発信・政策提言を行うとともに、国際連携、産官学連携を推進し、大学の社会的責務を果すことを目的として活動を進めてきた。

この5年間の事業を通じて、太陽エネルギータスクでは、1D ナノ材料による超階層ナノ構造をもつ有機薄膜太陽電池や色素増感太陽電池など、有機太陽電池の国際拠点を構築した。また、宇宙太陽光発電(Solar Power Satellite/Station、SPS)では、METLAB、SPSLABのような専用施設を有し拠点化しており、宇宙空間で太陽光発電により得られたエネルギーをマイクロ波で地上に伝送するための小型軽量高効率のマイクロ波送電器や安全性の高いマイクロ波ビーム制御技術において世界最高の性能を持つ素子の開発に成功した。また、人工太陽とも言えるプラズマ核融合技術では、ヘリカル磁場や、球状トカマクなど、世界を先導する磁場閉じ込め方式の提案を行うとともに、熱流束と粒子束を制御するための炉工学の分野でも世界をリードする研究拠点を構築した。

一方、水素エネルギーでは、クリーンなエネルギー媒体としての水素の生成・貯蔵・輸送・利用に関わる独創的研究を進め、アンモニア等の化合物水素媒体による水素貯蔵輸送利用システムや、一室型燃料電池など次世代燃料電池・小型高出力水素エンジンの開発など新たな水素エネルギーシステムに資する研究拠点を構築した。

バイオマスは現下、環境調和型エネルギー源として最も期待されているが、オンサイトでの処理技術など課題も多い。本COEでは、京大独自の超臨界流体によるバイオマスからの糖生産及びアルコール発酵によるエタノール変換、植物油からのバイオディーゼル燃料創成のための新規なプロセスの開発など新規なバイオ燃料

の国際的研究拠点を確立した。

環境調和型トータルエネルギー評価タスクでは、新エネルギーシステムの環境への影響や社会的受容性について解析・評価し、真に環境に調和したシステムについて持続可能性指標を提案するとともに、未来のエネルギー需給シナリオを提言、世界的な評価拠点を形成した。

教育タスクでは、国際エネルギー科学スクールを実施するとともに、広範なエネルギー研究に対応した教科書を揃え、英語訳により国際化に対応できる体制を整えた。エネルギー問題の解決は市民の協力なしに不可能であり、47都道府県で「エネルギーと環境」に関する市民講座を開催した。

国際連携ではアジアとのパートナーシップが取り分け重要であることから、タイに海外拠点を設け、東南アジア諸国との連携を深めた。「持続可能なエネルギーと環境」国際会議(SEE Meeting)を2度開催し、新エネルギーイニシアティブを柱に、アジア各国との連携のためのSEEフォーラムをスタートさせるとともに、国内でも新エネルギーフォーラムを結成した。

以上のようなCOE活動は、今後は国際新エネルギー連携機構に引き継がれ、拠点活動を展開していく計画である。今後、本COEの活動がいささかでも、地球温暖化防止に役に立ち、国際的な研究拠点の一つとして役割を担っていけることを期待するとともに、関係各位のこれまでの努力に感謝したい。

最後に、このようなCOEの機会を与えていただいた文部科学省を初めとする諸機関に深く感謝するとともに、ご協力、ご支援いただいた関係各位に対し、厚く御礼申し上げます。

## 2. 2030年に向けたエネルギー需給シナリオの策定

### 2.1 シナリオ設定

本シナリオは再生可能エネルギーを可能な限り導入しながら2030年に二酸化炭素排出量を2004年に比べて50%削減することを目標とする。さらに、非化石エネルギーを50%導入することを視野に入れる。そのため日本におけるエネルギー需給の可能性とその実現に対して求められる技術、経済的課題の抽出を目的としている。本シナリオは2030年を予測するものではなく、議論のための基盤となるものである<sup>1)</sup>。

### 2.2 現状分析

図2.1に示すとおり2004年の一次エネルギー国内供給量は、約22,678PJ (542Mtoe)<sup>2)</sup>であり、石炭4,937PJ (118Mtoe)、石油10,732PJ (256Mtoe)、天然ガス3,283PJ (78Mtoe)、原子力2,542PJ (61Mtoe)、再生可能エネルギー1,182PJ (28Mtoe)であり、非化石エネルギー

(含原子力)は16.5%を占めている(エネルギー・経済統計要覧2006)。

日本における京都議定書の対象となっている二酸化炭素排出量は、約1279MtCO<sub>2</sub>と推定されている。また、その内訳として各部門別の割合をみると、セメント製造時等の化学反応による工業プロセスにおいて4%、発電所、ガス工場、製油所等での自家消費分において6%、製造業、建設業、鉱業、農林水産業のエネルギー消費による産業部門において36%、貨物車や企業の自家用車、船舶等の運輸部門において14%、商業、サービス、事業所等の業務部門において18%、そして家庭での冷暖房、給湯、家電使用や家庭の自家用車使用の民生部門において約21%を占める(環境省、2004)。民生部門(家計)における排出量は21%であるが、この部門の排出量のうち7%が自家用車によるものである(図2.2)。

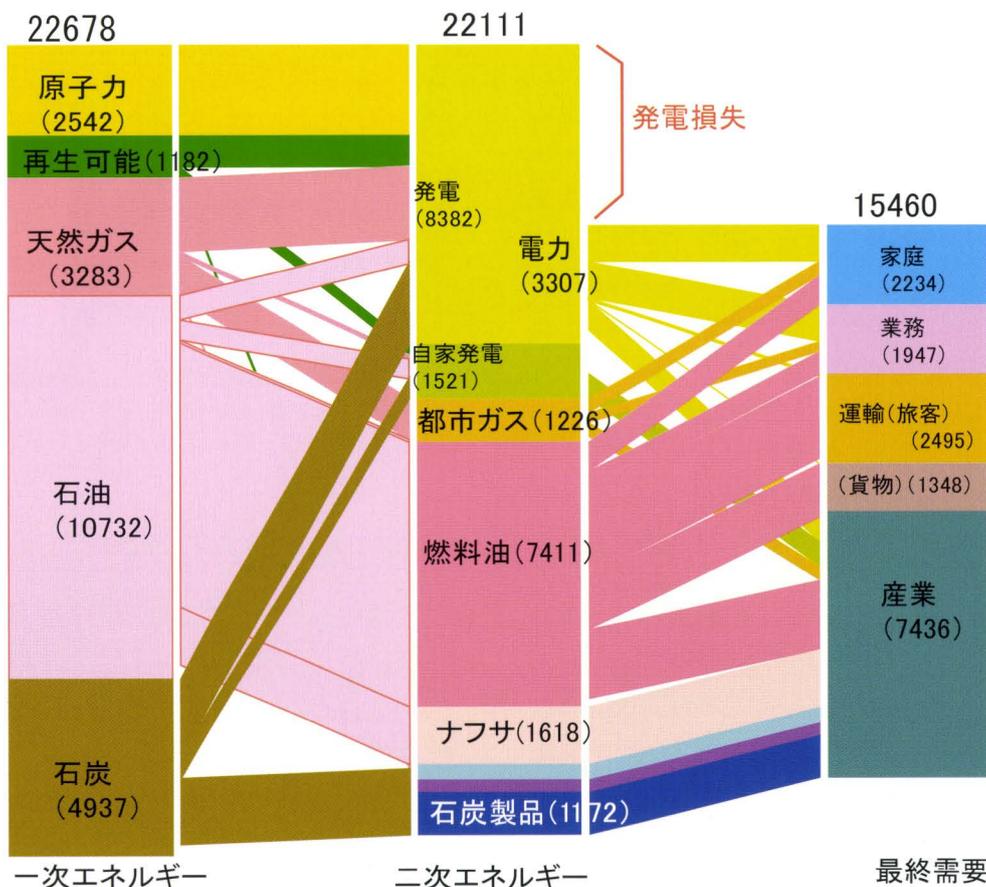


図2.1 2004年度のエネルギーバランス(エネルギー・経済統計要覧2006)

1) ここに掲げる数値はまだ検討途中にあり、今後の検討において修正される可能性がある。  
 2) 1PJ=2.39×10<sup>11</sup>kcal=2.39×10<sup>4</sup>石油換算トン(toe)、電力の一次エネルギーは、1kWh=2150kcalとした。

はじめに  
 2030年に向けたエネルギー需給シナリオの策定  
 新エネルギー開発拠点の今後の展開  
 各事業における成果の概要  
 太陽電池・太陽熱  
 宇宙太陽光発電  
 人工衛星(搭載型)  
 宇宙太陽光発電  
 次世代水素エネルギー  
 バイオエネルギー開発  
 エネルギー需給計画  
 教育拠点形成  
 国際環境調和型エネルギー情報センター

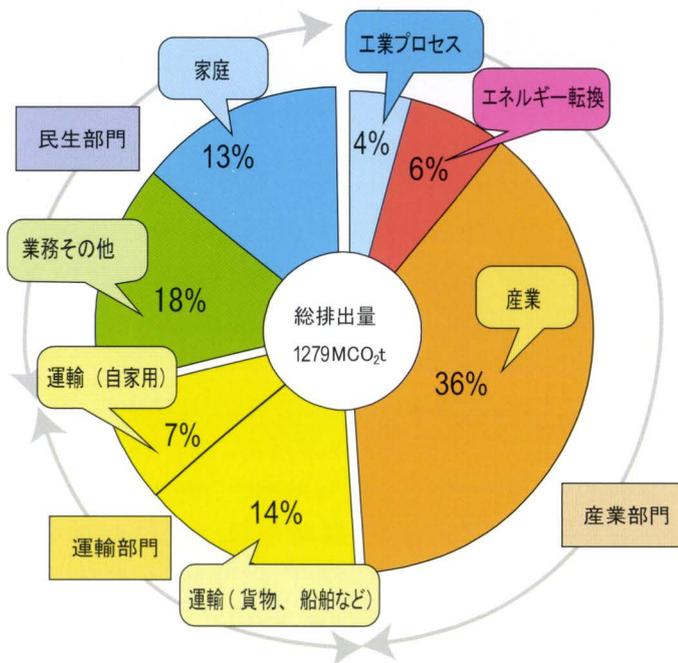


図2.2 2004年 CO<sub>2</sub>排出部門別内訳 環境省

### 2.3 2030年一次エネルギー供給

次に、本シナリオが提案する、一次エネルギー供給について次のように目標を定める。まず、再生可能エネルギーについては利用可能量の推計データに基づき定めた。太陽光は一戸建て住宅の30%に4kW、共同住宅の10%に10kW、工場、公共施設、高速道路、鉄道、新幹線、一級河川にパネルを設置し8600万kWの設備容量とした(図2.3)。太陽熱は太陽光の80%、バイオマスはNEDOバイオマスGISデータより(図2.4)、風力はNEDOのデータよりそれぞれの利用可能量の値を元に推定した(図2.5)。表2.1に個々の値を示す。

次に、二酸化炭素排出量目標から化石エネルギー供給可能量を定める。石炭は鉄鋼業などの工業用途への需要を満たすため大幅な削減は困難であること、天然ガスはほぼ現状どおり供給が可能であることから石油の大幅な削減を目指すこととした。これは今後の原油価格の高騰などから現実とそれほど乖離しているとは考えにくい。また、石油の多くは自動車用燃料として使われているが、バイオディーゼル、エタノールなどの代替燃料供給が可能となることを念頭においている。この可能性については個別に評価する。

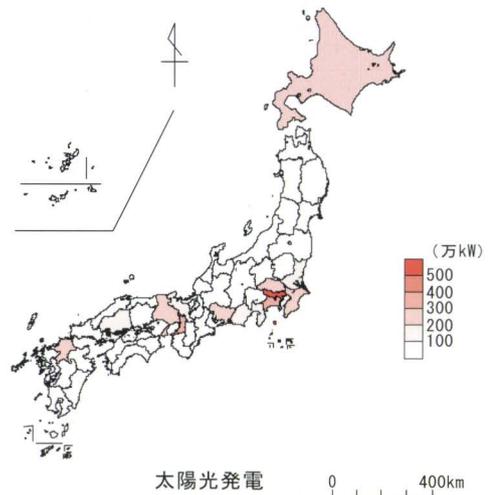


図2.3 都道府県別太陽光発電容量(住宅設置分)

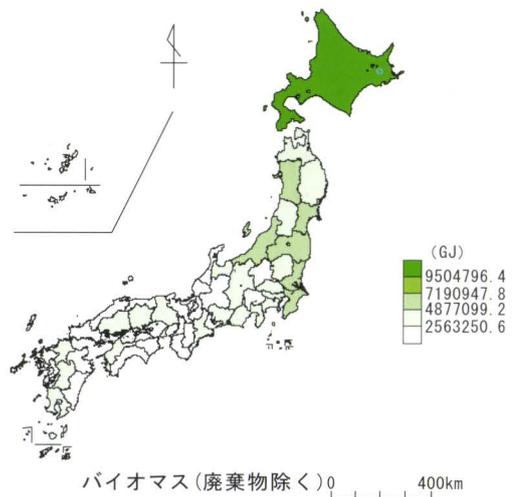


図2.4 都道府県別バイオマス資源(廃棄物を除く)利用可能量

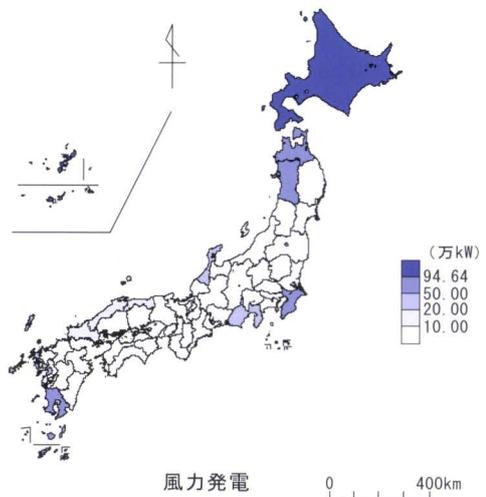


図2.5 都道府県別風力発電設備容量

表2.1 再生可能エネルギー量内訳(PJ)

	水力	地熱	太陽光	太陽熱	バイオマス	風力等	輸入
2004年	837	41	9	28	255	12	0
2030年	837	42	774	620	837	108	591

## 2. 2030年に向けたエネルギー需給シナリオの策定

表2.2 2004年および2030年のエネルギー供給量内訳 (PJ)

	非化石エネルギー		化石エネルギー			合計
	原子力	再生可能	天然ガス	石油	石炭	
2004年	2542	1182	3283	10732	4937	22678
2030年	3014	3810	3266	4354	2303	16747

また、現状からの原子力の大幅な増加は見込めないことからほぼ現状どおりであるとした。2030年の供給量を表2.2に示す。総供給量は16747PJ (400Mtoe)であり、この量は図2.6に示すように1986年から1987年の日本の一次エネルギー供給量にあたる。このときCO<sub>2</sub>排出量は583MtCO<sub>2</sub>となり2004年比54%減(1990年比46%減)となり目標を達成している。この想定では非化石エネルギー(原子力、再生可能エネルギー)は40.7%を占めている。さらに、非化石エネルギー50%導入のためには、1550PJ(37Mtoe)の化石燃料を非化石エネルギーに置き換える必要がある。本シナリオの特徴は図2.7に示すように他のものと比較して、石油の削減に重点をおいているところにある。

### 〈本21COEにおける研究との関連〉

- 安価で効率の良い太陽光発電システムの開発。2030年までに8600万kWの設備が必要である。これは太陽光発電協会の目標値である8100万kWよりも多いが、本21COEの成果である次世代太陽光発電技術の投入などが必要である。
- 種々のバイオ起源資源からのバイオ燃料の開発も課題である。農業廃棄物、畜産廃棄物、森林廃棄物など多彩なバイオマス資源からのバイオ燃料の転換がオンサイトでできる技術が必要とされるが、本21COEで開発されている超臨界転換技術やウッドバイオマスのエタノール化を用いることが必要である。
- 風力や太陽光発電は変動が激しく、効率のよいエネルギー貯蔵システムが必要となる。また、海外からのバイオマスなどの再生可能エネルギーの輸入が必要である。本21COEで開発された水素エネルギーシステムやアンモニアを媒介とした高効率エネルギー貯蔵システムの利用が必要となる。

## 2.4 2030年のエネルギー消費

本シナリオの最終エネルギー消費であるが、各部門で次のようにシナリオ設定した。

### ・ 民生部門

民生部門においては総量を1987年の消費量までエネルギー削減をする必要がある。これは2004年に比べて約30%のエネルギー削減となる。家庭の省エネル

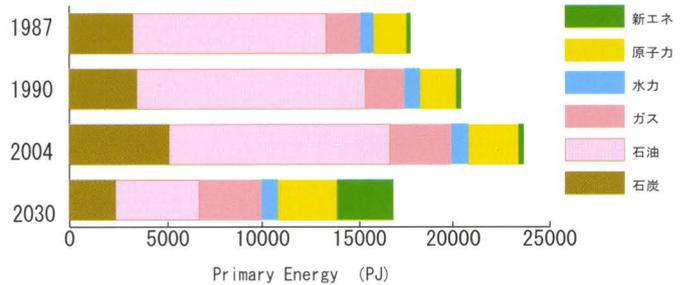


図2.6 一次エネルギー供給量 (PJ)

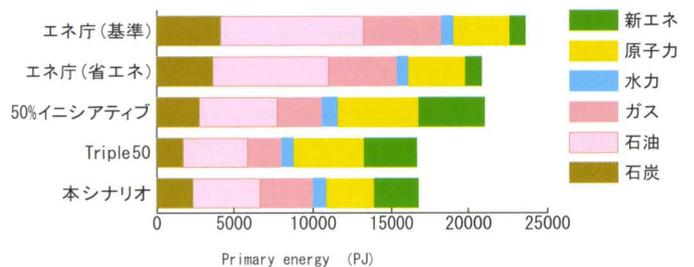


図2.7 他のシナリオなどとの関係 (PJ)

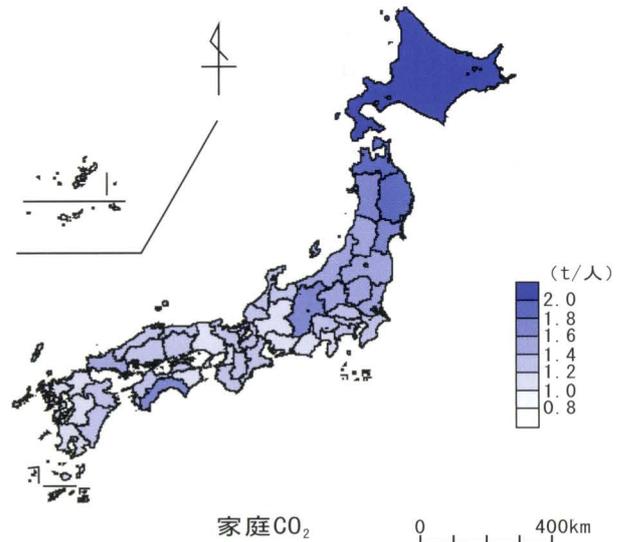


図2.8 都道府県別民生部門家庭からの一人当たりのCO<sub>2</sub>排出量

ギーを3%とし、暖房用の石油をCOP(成績係数)6のエアコンに置き換え、さらに20%の都市ガスを太陽熱などでまかなえるものとした。業務部門においては10%の省エネルギー、その他は家庭部門と同様に石油を電気に置き換え、都市ガスを太陽熱で置き換えられるとした。また、北海道や東北地方においては風力、バイオマスなどの新エネルギー資源が豊富であり(図

2.4、2.5参照) これにより暖房需要の大きい北日本(図2.8参照)の需要をある程度まかなえると考えられる。要するに、人口密集地においては、効率のよい輸送方法により石油消費量を減らし、非人口密集地においては新エネルギーを地産地消することが効率的である。

・ 運輸部門

運輸部門においても25%の削減を必要としている。ここでは、20%の燃料消費率の改善と10%の台数削減により達成できるものとした。それには都市域の効率の良い輸送体系の確立が望まれる。路面電車などの公共交通機関により乗用車を削減することやトラック輸送から鉄道、船舶へのモーダルシフトが必要である。また、燃料構成の約30%をバイオディーゼル油などの新エネルギーへの転換も必要とされる。そのための技術開発が必要であり、これは主に非人口密集地における輸送に用いることが推奨される。

・ 産業部門

産業部門においては総量の20%を削減する必要がある。ここでは重油の使用を天然ガス、電力へ置き換え、全体の効率を15%向上するとした。これは運輸部門における乗用車の削減により自動車生産の縮小による寄与や、建設部門の縮小が考えられる。そのほか、特に石油関連産業の縮小が求められる。産業部門に

おける燃料は石油から新エネルギーあるいは電力、天然ガスへの転換が求められる。

〈本21COEにおける研究との関連〉

- 乗用車の燃費改善には軽量化が重要な技術要素である。およそ20%の軽量化で10%の燃費改善が期待され、本21COEで開発された軽量化技術が重要な要素となる。
- 家庭部門や業務部門の省エネルギーにおいてはそれぞれ3%、10%を見込んでいるがこれは本21COEで検討された環境教育や社会システムの効率化などにより達成可能となる。

以上まとめると2030年のエネルギーバランスは図2.9のようになる。

2.5 さらなる挑戦

非化石エネルギー50%導入については、新エネルギーの更なる投入がなされなければならない。しかし、本シナリオで想定している輸入バイオマスなどの削減についても考慮する必要がある。さらに、2030年以降の削減においては宇宙太陽光発電、核融合などが必要となるであろう。これに対しては、本21COE拠点の持続的な展開が重要となる。

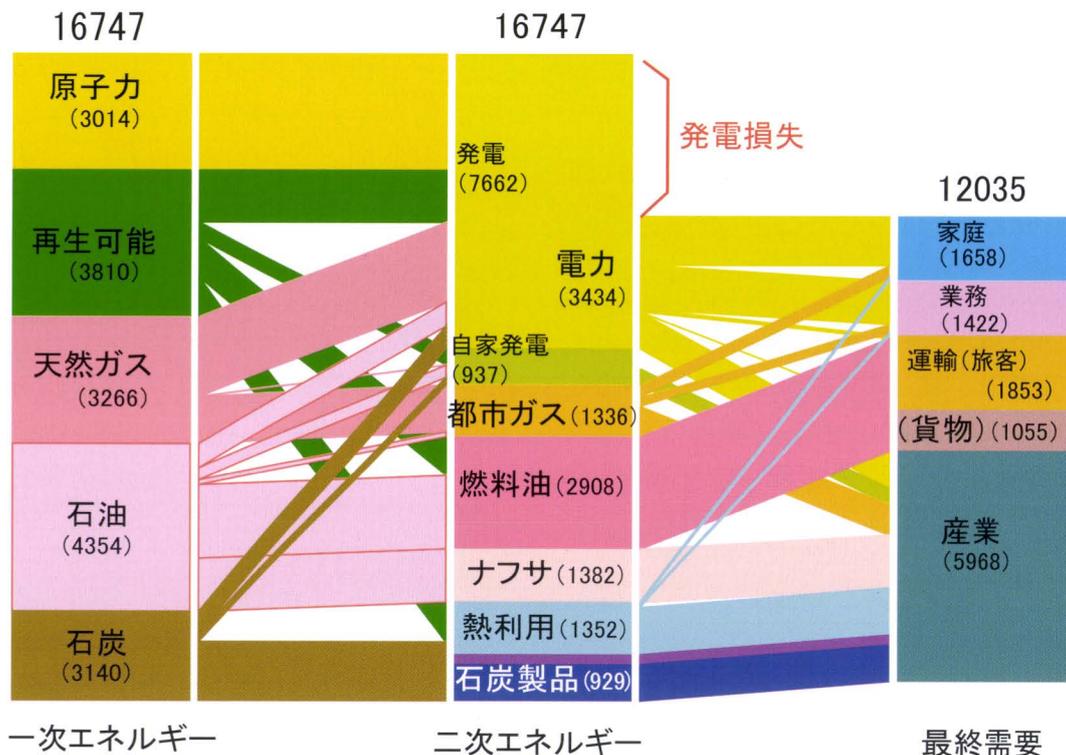


図2.9 2030年のエネルギーバランス (PJ)

### 3. 新エネルギー開発拠点の今後の展開

拠点リーダー 吉川 暉

#### 3.1 新エネルギーイニシアティブの推進

以上のような、エネルギーシナリオを実現するためには何が必要であろうか。

本COEでは「新エネルギーイニシアティブ」を提言の柱として拠点活動を推進している。これは、二酸化炭素削減、エネルギー自給率の拡大などとあわせて、今後のエネルギー政策の重点として国内外に向けて提言しているものである。

再生可能エネルギーを中心とする新エネルギーで化石燃料を代替することは、資源的には十分に実現が可能といえる。わが国の新エネルギーの定義は多様で、実用性に富み、省エネ、減エネも期待される効果が同一であれば、新エネルギーの範疇に加えてもおかしくないほどの柔軟性を持っている。

しかし、わが国では欧米に比べて新エネルギーへの取り組みが緩やかで、今後、新エネルギー開発は、わが国にとって最大の課題といっても過言ではない。再生可能エネルギーの利用が進まないのは、高コストと効率の悪さ、技術が未成熟、残された安全性の課題など多様であり、今後のイノベーションが最も重要な領域といえる。

本COEでは、太陽エネルギー、水素エネルギー、バイオエネルギーの3つのタスク分野の新エネルギー技術を取り上げ重点的な取り組みを進めてきたが、その中から優れた成果を上げつつある6つの領域について研究ユニットを立ち上げた。これらのユニットは、規模、取り組みなどのレベルは其々に異なるものの、いずれも世界的な研究拠点として注目されつつある。今後は、これらのユニットに加え新たな新エネルギー研究領域を増やしていけるような機構を考えていく必要がある。

しかし、新エネルギー導入に当たっては、政策的なツールを使うなど戦略的な取り組みが欠かせない。欧州における取り組みはこのことを如実に示している。

新エネルギー導入の先進国であるドイツでは、再生可能エネルギーの拡大については極めて楽観的である。ドイツのブッパタール研究所のワイゼッカーは、その著書「地球環境政策」の中で、今後、20-50年の間で枯渇性資源の消費量は大幅に削減可能であるとしている。21世紀においては、エネルギーに徐々に重い税金を課することによって、効率のよい、エネルギーシステムに移行する原動力が生まれると考えている。試算では、価格が2倍になれば4分の1、5倍になれば約半分を再

生可能エネルギーで賄うことになると予想している。このような考えはドイツの再生可能エネルギー法（EEG法）にも生かされており、新エネルギーの急激な利用拡大に繋がっている。石油価格の高騰が続く今、各国において急速にエネルギー転換が始まっており、支援策をとらないわが国との格差が拡大するのではないかと危惧される。

本COEのもう一つの柱が社会への発信にあり、我が国のエネルギー政策への積極的な提言をすすめることが求められている。今後、拠点からの政策提言の柱として、新エネルギーイニシアティブを据え、国内外との連携をコアに発信を進めていく計画である。

#### 3.2 国際新エネルギー連携機構

以上のような要請をふまえ、新エネルギーイニシアティブのリーディングを進めつつ、5年間に構築されてきた本COEの諸事業を継続的に展開していくために、恒常的な拠点として「国際新エネルギー連携機構」を立ち上げる。本組織は、研究ユニットとともに、教育ユニット、連携ユニットを設け、独自の活動としてデータベース構築を掲げている。

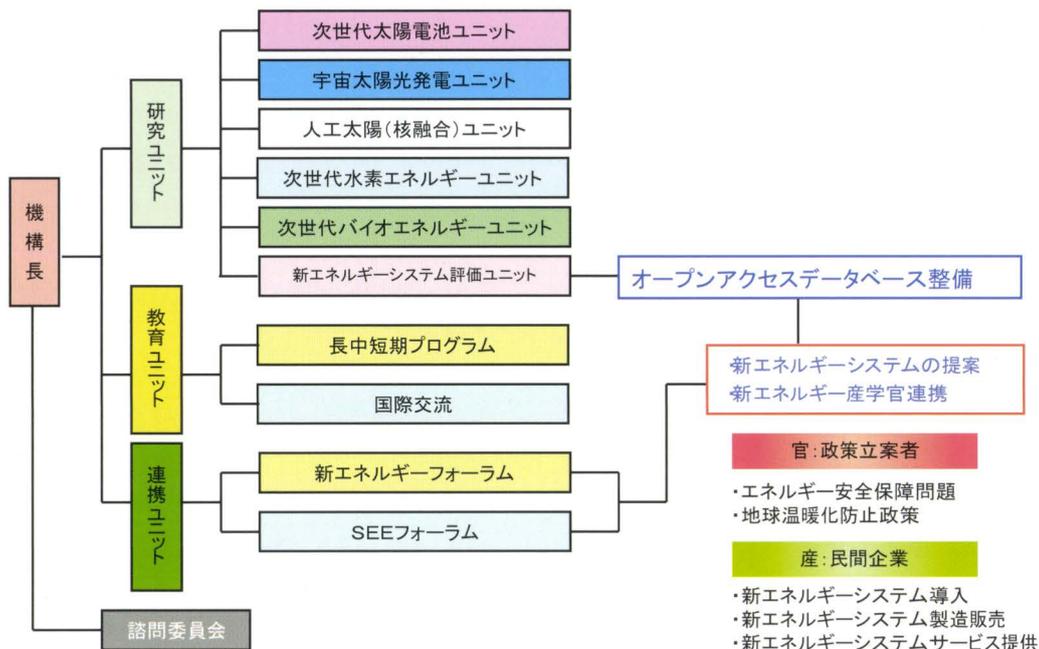
##### 3.2.1 研究ユニット

連携機構には、世界に発信すべき先端的な新エネルギー研究を担う研究ユニットを設ける。研究ユニットの要件は、独自の技術をベースとして、国内外の研究者をひきつけ、国際的な研究教育機関との連携が可能な研究グループ単位であり、今後更に多くの研究グループの参画が見込まれるが、現時点では本COEで拠点化の進んだ6つの研究ユニットから出発する。

以下にその概要を示す。

- 1) **次世代太陽電池ユニット** 有機太陽電池、超階層ナノ構造素子などの第三世代の太陽電池の研究を産官学連携のプロジェクトとして実施する研究ユニットである。これを展開していく上で、ナノ構造形成が不可欠であり、エネルギーナノサイエンス分野の協力の基に拠点形成を図る。
- 2) **宇宙太陽光発電ユニット** コンパクトなマイクロウェーブ発信・受信装置など開発した多くの要素技術での産官学連携研究を実施する。既に設置されている、METLAB や SPSLAB などの全国共同利用施設を基に、学におけるSPSの中核機関としての整備を図る。

## 国際新エネルギー連携機構の組織図



- 3) **人工太陽(核融合)ユニット** ヘリオトロンJ、球状トカマクなど独自の多様なプラズマ閉じ込め技術を基にITERの次を視野に入れた次世代核融合システムの提案を行える研究グループ形成を図る。また、その実用化をにらんだ炉工学の研究整備を図る。
- 4) **次世代水素エネルギーユニット** 水素エネルギーシステムの実現にとって必要となる、水素の貯蔵輸送利用技術の全般にわたる先端研究を実施する。取り分け一室型燃料電池やFHFCなど、次世代燃料電池の開発を進めるとともに、この分野でキーとなる先端エネルギー材料開発の研究を重点的に実施する。
- 5) **次世代バイオエネルギーユニット** 超臨界法に基づくバイオマスプロセッシングシステムをベースとして、循環型資源サイクルシステムの構築を目標とする。また、これに遺伝子工学等の知見を加えた高付加価値な物質生産システムへの展開を図る。
- 6) **新エネルギーシステム評価ユニット** 以上のような新エネルギーの提案を横断的に評価し、提案していくための指標を作成するとともに、必要なデータベースの構築を行い一般に公開していくとともに、新エネルギーシステムとして提言をまとめて行く横断的な研究ユニットとして整備する。

上記の研究ユニットは必ずしも固定的なものではなく、今後、工学系、農学系などの広範なエネルギーユニット

を加え、より総合的な新エネルギー拠点の形成が可能となるものと考えている。

### 3.2.2 教育ユニット

実際に新エネルギーイニシアティブを推進していくには、新エネルギーシステムを開発する人材の育成が急務である。エネルギー科学は極めて実用性の高い学問領域であるが、そのニーズは産官学公民其々のセクターにより異なる。そこでエネルギー関連の人材を育成するための組織としては、今後、文理融合型の研究教育組織が重要となる。

本拠点はそのようなことを実現していくための学内部での連携を作り上げるための機能をも備えるものである。そのために現在既に協力可能であるエネルギー科学研究科とエネルギー理工学研究所、生存圏研究所の3つの部局をコアとしつつ、今後は、経済系、農学、工学系等を加えより広い領域での教育を実現するとともに6つの大学で実施されているエネルギー関連のCOEプログラム(6COE)および海外との連携を図りつつ多面的な要望に応える組織の構築を図っていく。

### 3.2.3 連携ユニット

昨年バンコクで開催したSEE国際会議ではSEEフォーラムを形成し新エネルギーイニシアティブを広く進めることが合意された。これに基づき、今年3月にフォーラムが正式に発足し活動をスタートさせた。ここでは各大学間での交流を初め産官学の共同研究体制を確立している。



経済性、社会受容性などあらゆる観点からの持続可能性モデルの構築をすすめるものである。

### 3.4 ポスト COP3（次期京都議定書）への提案

持続可能な発展 (Sustainable Development) は本来、1987年のブルントラント委員会の報告書で提起された概念であって、以降、1997年の気候変動枠組み条約第3回締約国会合 (COP3) において署名された京都議定書において、多くの国による温室効果ガスの排出規制という形で現実的な連携を促すことに成功した。

しかし、この条約は最大のエネルギー消費国であるアメリカが批准を見送っていることや、社会インフラの整わない中国・インド・東南アジア諸国を含む発展途上国は参加しにくく、従って、義務を負わないですむ不平等条約であることなど多くの問題を抱えたままであり、このままでは早急な温暖化防止策の実行は事実上不可能というのが現実である。

そこで、現在、COP3に替わる、2013年以降のポストCOP3では、どのように世界的な実効ある協調を取っていくのが課題となっている。我々は『2030年、新エネルギー 50% イニシアティブ』を、これに応えうる次期京都議定書案として提案している。提言の趣旨は、“各国はその持てるポテンシャルをフルに生かして、2030年までに化石資源に頼らない、新エネルギーシステムの比率を50%まで増やしましょう”というものである。どの国も独自の比較優位な新エネルギー技術を用いて参加でき、省エネ技術、減エネ技術を含めることによってCO<sub>2</sub>排出量を50%以上削減できるだけでなく、イノベーション等の効果も含め新エネルギー比率を50%に高めることも可能と考えている。しかも、経済を縮小するのではなく、新エネルギー産業の育成によって、発展途上国や地域の産業を拡大することも可能である。公平である上、地球温暖化対策としての実効が期待できることから各国の合意を得やすい。是非、京都議定書をまとめた日本の次期提案として提案していければと考えている。幸い京都大学では、現在、Sustainability Scienceのプログラムが進行しており、その一環として協力して取り組んでいく計画である。

### 3.5 SEE Forum の構築

このような提言を実現していく上で、周辺国との協力が欠かせない。特に、現在我が国ではアジアとの連携を強く推進している。そこで、本COEではバンコクに拠点を設けるとともに、いくつかの大学との連携を進

め、2004年と2006年の2回にわたりSEE会議を開催し、これを基に、SEEフォーラムを設立した。これは、ASEANに属する17大学とインド韓国の13カ国の主要大学が連携して新エネルギー開発を進めるとともに、お互いの交流を進め、この分野のポテンシャルを高め、新エネルギー開発による、世界への貢献をすすめることを目標にしている。

このような活動はアジアへの発信であると同時に、新エネルギーを核とする交流のスタートとなるものである。タイ、韓国との交流は多面的にスタートしており、インド、ベトナム、カンボジアとの交流も始まった。マレーシアとも既に、広い領域での交流を深めている。今後、新エネルギー開発では先輩格の欧州との交流を進め、世界的な視野でのフォーラム活動が期待される。

## 4. 「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」各事業における成果の概要

### 4.1 太陽電池ナノサイエンスユニット

#### 4.1.1 ユニットの目標

本 COE では提案書の冒頭、拠点の目的として以下のように提案した。

まず、京都議定書の要請に応え、持続可能な社会を実現するには、環境調和型エネルギーシステムを実現し、未来に亘ってエネルギーの安定な供給を確保することが不可欠である。そこで、これまで生命系が作り上げた太陽光による二酸化炭素固定に学び、太陽・水素・バイオエネルギーシステムの確立を拠点の目標とした。

このため、究極のエネルギーシステムである太陽エネルギーの創製・変換・利用、水素の創製・貯蔵・利用、バイオエネルギーの生成、変換技術を確認するとともに社会的受容と環境調和を志向した新エネルギーシステム技術および評価手法を開発することとした。

その柱として、京大が既に国内外の研究拠点となっている宇宙太陽光発電の要素技術の研究と最適化を進めるとともに、高効率で安価な太陽光発電の開発を進める。このために、材料機能の至適化手法の開発、高効率化の期待できるナノ構造を持ったデバイス技術の開発、第三世代の高効率太陽電池の研究を行うことにより次世代太陽電池の拠点構築を目的として研究を進めた。

#### 4.1.2 研究の課題と成果

太陽光発電は、再生可能エネルギーの中で最も資源量が多いにも拘らず、利用が進んでいない。既に、シリコン半導体を用いた太陽電池生産は2GW/年に達しているが、これが化石燃料の代替エネルギーとして位置付けられるには、更なる高効率化と低価格化が必須である。太陽電池は大きく第一、第二、第三世代の太陽電池というカテゴリーで分類でき、それぞれバルク結晶、薄膜、次世代型の太陽電池に対応している。

本拠点では、①色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池などの次世代太陽電池の開発、②安価な高純度シリコンの新規製造方法の開発や光閉じ込め効果を目指したシリコンの表面モルフォロジー制御など第一世代の太陽電池の改良、③エネルギーナノ工学による未来の高効率太陽電池のための基盤技術の開発を中心に研究を進め、国のプロジェクトの実施や有機太陽電池研究会を立ち上げるなど次世代太陽電池の拠点化を進めた。

#### 1) 次世代太陽電池の開発

我々は有機太陽電池が最も可能性の高い次世代太陽電池と考えている。生体分子集合体設計の自由度が光合成系を作り上げたように、有機光電変換系の可能性は無限である。さらに、軽量・安価・資源制約のなさなど有機材料の持つ多くのメリットを考えると、将来は有機太陽電池の時代が来るものといえよう。

##### 1-1) 色素増感太陽電池 (DSC)

DSC は多孔質チタニアの表面を一層の Ru 色素で覆った光電極と  $I_3^-/I_2$  レドックス系を組み合わせた湿式太陽電池で、界面での効率的な pn バルクヘテロ接合の形成が重要である。我々は2種類の光電極の高度化を進めてきた。第一はチタンアルコキシドとアセチルアセトンの等モル混合物を 0.4M のラウリルアミン塩酸塩存在下反応させることにより、図 4.1.1 (B) に示したようにファイバー状のネットワークを形成することができる。このセルは  $3\mu$  以下で 5% を超える高い効率を示しており、光マネジメントにより、9.5% の高い効率を得ることができた。これは現在最も高い効率を出すブラックダイの 11% に匹敵する値である。

1D 材料の導電帯の状態密度は、低エネルギーレベルに最も多く縮退しており、同じ電子遷移を仮定すれば、結晶性の高い 1D 材料を用いることにより、バルク結晶以上の速い電荷輸送を実現できるものと期待される。広幅バンドギャップを持つ酸化物半導体においても

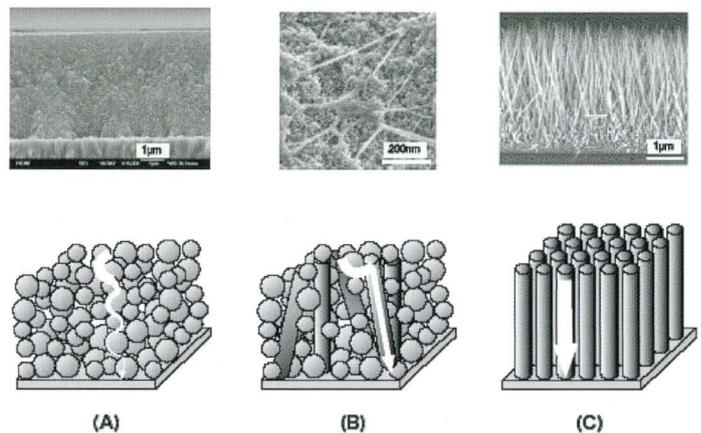


図 4.1.1 有機太陽電池における超階層性ナノ構造電極の設計  
(A) 第一世代電極：ナノ粒子結晶集合体、(B) 第二世代電極：ナノ粒子集合体+1D ナノ材料のネットワーク構築体、(C) 第三世代電極：1D ナノ結晶アレイ

同様な速い電荷の移動が期待できる。また、1D 材料は、微粒子焼結体では避けられない結晶粒界がないことからトラップサイトからの逆反応の減少も期待でき、高速・高効率な電荷移動パスとしての高い可能性を秘めている。さらにバルクヘテロ接合セルの理想的な構造は、ナノサイズの1D 材料が、交互に林立した図4.1.1 (C) のような構造であろう。我々は色素増感太陽電池でこのような構造を持った ZnO 及び TiO<sub>2</sub> 光電極を構築し薄膜でも優れた変換特性を観察している。これ以外にも10種類以上の1D ナノ材料の調製に成功し、DSC への展開を図っており、この分野の研究をリードしている。

### 1-2) 有機薄膜太陽電池

信頼性・寿命という点では、これまで Al に LiF 層を導入した電極が用いられてきたが、活性層の厚みが100nm という薄膜であるがゆえに、ショートしやすいという欠点がある。我々は、図4.1.2 に示したように、チタニアを電子輸送層として導入したセル構造により4.1% の変換効率を達成した。この値は、湿式で調製した有機薄膜太陽電池としては世界最高レベルの値であり、これを契機に NEDO の PV ロードマップにこれまで加えられていなかった有機薄膜太陽電池が加えられることとなり、我々のグループがこの領域最大の研究受託グループとなっている。

また、LiF 層の導入を必要としないことから安定性にも優れており、大気中、未封止のセルで AM1.5 の擬似太陽光を100時間照射しても初期効率の6% しか劣化しない。特に、フィルファクター 0.70 はこれまでの高分子太陽電池では世界最高の値であり、TiO<sub>2</sub> 層の優れたホール阻止効果を示すものと考えている。

有機太陽電池の最大のメリットは、フィルム化により軽量大面積セルを簡便に作れることであるが、そのためには、印刷技術や溶液からの塗布が可能な湿式での調製法の確立が欠かせない。我々は貧溶媒添加による相

分離結晶化というアニーリングに代わる方法を見出しており、低温での傾斜機能薄膜形成に道を開くものであり新コンセプトの太陽電池を提案している。以上のように、変換効率は Tang の1% の報告から20年で5倍以上に伸びたことになり、ここ20年の展開は、アモルファスシリコンや色素増感太陽電池に比較しても、格段に速く次世代太陽電池候補として最も期待されるものといえる。

### 1-3) 超階層ナノ構造型太陽電池

しかし更に高率な電荷の分離・輸送を実現するためにはナノレベルでの精緻な階層構造形成が不可欠である。効率を上げるためには、如何に、効率よく電荷分離を起こし電荷を速やかに輸送できる材料を設計するのが課題となるが、そのためには電荷分離を生ずる pn 接合界面構造の表面積を大きくするとともに、ドナーアクセプター界面から電極へのビルトイン電場をできるだけ大きくすること、電荷輸送層のモルフォロジーを制御し電荷の輸送効率を上げることが重要である。これを実現するために、我々は、エネルギーナノテクノロジーを駆使した『超階層性ナノ構造利用素子』の開発を進めている。その際、1D 材料の開発やその2次元界面へのアレイ化技術をはじめとするナノテクノロジーがキーテクノロジーとなるものといえる。

### 2) 第一世代太陽電池の課題

2-1) シリコンウエファをベースとする第一世代の太陽電池では、高価な結晶シリコンを200ミクロン以上の厚さで利用するため、低価格化が大きな課題である。このため本研究ユニットでは、結晶シリコンの原料を従来の半導体グレードのシリコンから、金属グレードのシリコンに変換できる画期的な新プロセスの開発を進め、高純度化に成功している。

太陽光発電システムの価格において高純度シリコンを用いるシリコン基板のコストの占める割合が高い。太

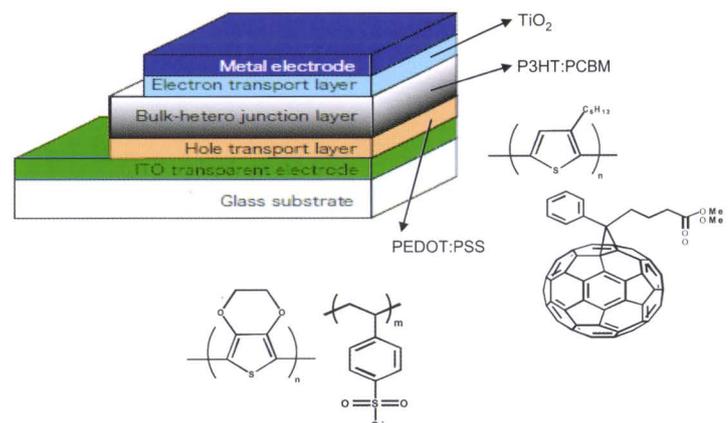
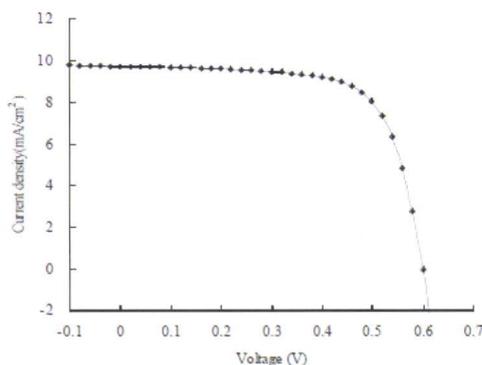


図4.1.2 チタニアをホール阻止層 (HBL) とする高分子薄膜太陽電池の構造と IV 特性

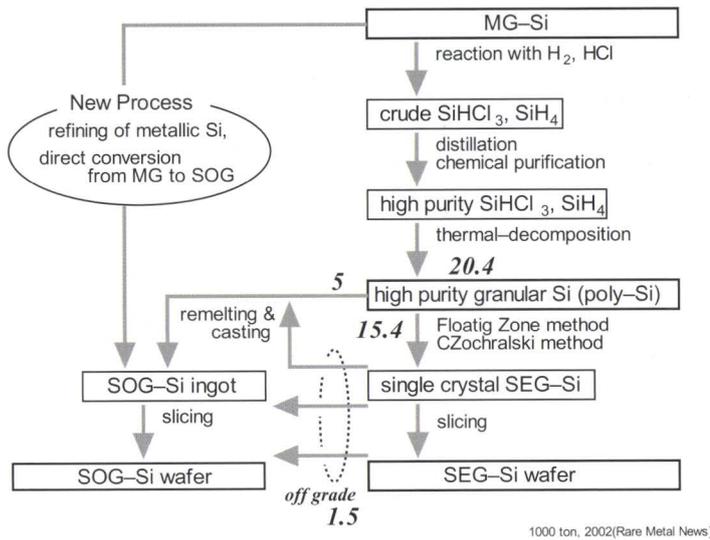


図4.1.3 ソーラグレード (SOG) -Si 生産のプロセスフロー

太陽電池システムのさらなる普及を妨げているこれらの要因は太陽電池用高純度シリコンが主として半導体用シリコンのスクラップ利用で供給されている事実由来する(図4.1.3)。本研究では低廉な金属級シリコンを太陽電池級の高純度シリコンへと金属状態を保ったまま精製するプロセス技術の開発を目的とした。特に、元素物性に由来して固液分配による金属シリコンからの除去が困難であるリンおよびボロンの除去技術に対象を絞り、真空処理、不均一系の化学反応などを適用した速度論的、熱力学的な応用研究と実験的手法に立脚した基礎的研究を併せて遂行した。

2-2) 光マネージメント技術

また、太陽電池の効率は、表面での反射や入射光の効率的な利用に大きく依存している事から、シリコンの結晶表面の構造を最適化するためのプロセス技術の開発が重要となる。本研究では薄膜結晶材料の表面プロセスの高度化の研究を進め、構造形成に成功した。

具体的には、シリコンを湿式法により表面処理することにより、表界面構造を制御し、太陽電池の効率化に資することを目的とした。太陽エネルギーの電気ないしは化学エネルギーへの変換のための光電気化学セルの実用化に向けて、半導体からなる光電極上での反応速度の遅さが克服課題のひとつとなっている。この課題に資するために、シリコン自身の多孔質化による表面改質、およびシリコン表面上への光電気化学反応触媒としての金属析出に関する基盤的研究を行った。われわれは比較的高い比抵抗のp型シリコンを多孔質化すると特異な多孔質層の成長様式が現れることを見いだした。低い電流密度で行う陽極電解初期においては均一なナノサイズの多孔質層が成長するが2-3 μmに達した後、

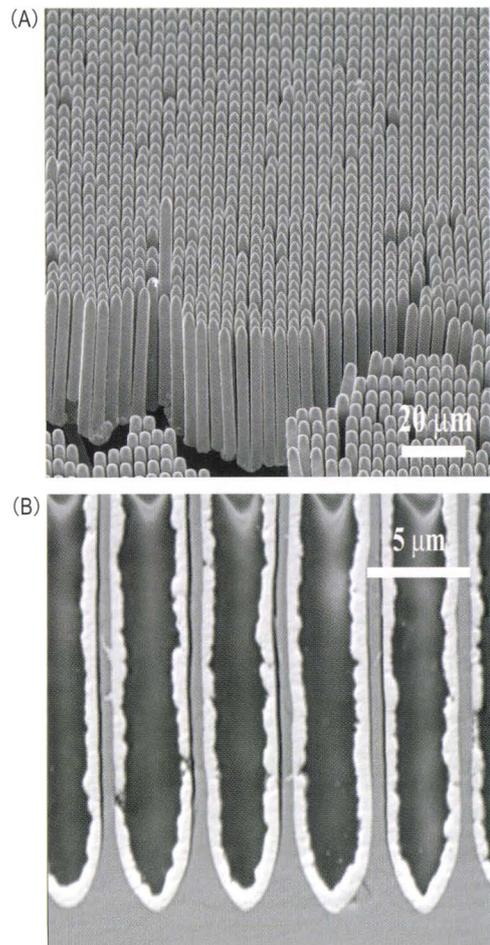


図4.1.4 マクロ孔多孔質シリコンをテンプレートとして作製したマイクロ構造体。(A)：銅マイクロロッド；(B)：ニッケルマイクロチューブ

ナノ多孔体で満たされたマクロ構造が現れる。整列したマクロ孔列を得るために、報告されている方法に従ってフォトリソグラフィーを用いて微小エッチビットをシリコン表面上に形成した後、陽極溶解を行った。孔径4 μm、深さ60 μmの規則正しく整列したマクロ孔が得られた。マイクロメートル程度の孔径を有する多孔質シリコンを作製し、電析によりその孔内への金属充填を試みた。

銅や白金においてはマイクロロッド構造となる(図4.1.4A)。孔充填は底部から優先的に、緻密かつ滑らかに進行し、シリコン孔の形態を忠実に転写するものであった。

さらに小さい孔内への金属充填が興味ある課題であるが、そのためにはテンプレートとなる多孔質シリコンの孔径をサブミクロンにまで落とす必要がある。この取り組みは現在進行中である。

3) エネルギーナノ工学の研究

第三世代の太陽電池では超薄膜材料によるより高効率な太陽電池が期待されている。そのためには1D材料をはじめとするナノテクの開発利用による高効率化が

はじめに  
2030年に向けた  
エネルギー需給  
シナリオの策定  
新エネルギー開拓拠点の  
今後の展開  
各事業における  
成果の概要  
太陽電池用サイクリング  
材料の開発  
水素エネルギー  
貯蔵技術  
エネルギー貯蔵  
技術の開発  
教育拠点形成  
国際連携推進  
エネルギー  
情報センター

不可欠である。本太陽電池グループは、そのいずれにおいても優れて方向性を持つ研究グループとして拠点化した。

ナノ構造を持たせることによる量子効果や多光子吸収プロセスの発現などの設計が提案されている。本研究ユニットでは、これらをにらんだ研究として、レーザーを利用した原子・分子レベルの新しい物質制御・プロセス技術の基礎研究を行った。一方、太陽電池の超高効率化の方法として、光電変換に利用する光の波長域を拡大する研究が行われている。このような研究を行う上で、広い波長に渡り可変で強強度のレーザーが必須であり、波長可変遠赤外自由電子レーザー装置の開発を行った。また材料中での電子輸送損失はスピン自由度に依存するため、輸送損失が少なくなるようにスピンを制御することは将来的には重要な課題の1つである。そこで本研究ユニットではレーザーを使った電子のスピン制御について研究を行った。

当グループでは、超短パルスレーザーによってのみ実現できる物質機能の発現とその制御技術の開発を目的として、トップ・ダウン及びボトム・アップアプローチによる新しい物質制御・加工の基礎研究を進めてきた。前者では、当グループで発見したフェムト秒 (fs) レーザーによる硬質薄膜表面のナノ構造生成と結合構造改質を基に、光の回折限界を越える微細加工手法の開発を目指した研究を行い、ナノ構造生成のための新しい物理過程をほぼ明らかにした。また、後者では、高強度 fs レーザーパルスを用いることにより、当グループが世界に先駆けて成功した配向分子からの高次高調波発生を基礎として、配向分子の回転コヒーレンスと高次非線形光学応答を実験的・理論的に解明し、超短光パルスによる分子配向とその高感度検出手法を開発した。

用いたエネルギー材料としては、ダイヤモンド状炭素 (DLC) や TiN 等の硬質薄膜に fs レーザーパルスを照射することにより、膜表面に間隔  $d \sim \lambda / 10$  から  $\sim \lambda / 5$  の周期的構造を生成できることを発見し、伝搬光による従来の加工分解能を克服できる可能性を実証した。さらに、ナノ構造生成とほぼ同照射条件下で DLC がガラス状炭素 (GC) 層へ改質されることも見出した。

以上のように、超短パルスレーザーを利用した非断熱的分子配向では、その大きな尖頭出力を用いて多種多様な分子を空間的に配向させることができる。そのため、空間的にランダムに存在する分子を対象として行われてきた様々な実験手法 (分子構造、回転・振動・電子励起、イオン化、解離、衝突・再結合、分子反応等々) が分子軸を固定した条件下で行えるようになる。その結

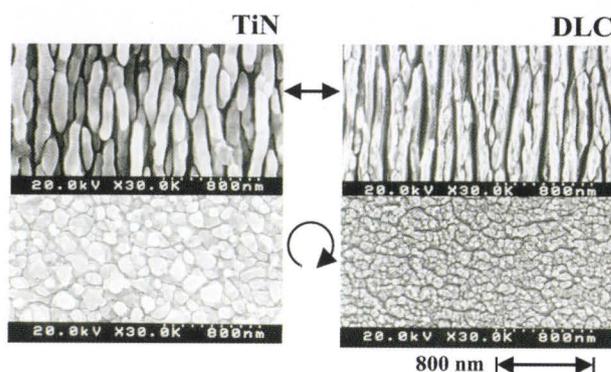


図4.1.5 直線偏光 (上段) 及び円偏光 (下段) のレーザー照射で生成された TiN と DLC 膜表面のナノ構造 (SEM 像)

果、分子・物質の物理化学特性を新たな視点から制御できることを明らかにした。

スピン偏極電子 / イオン源は (太陽電池用) 材料評価のプロンプとして非常に有効なツールとなりうる。同様に、核スピン偏極についても原子核物理学における有用性から原子核物理学研究者たちによって開発が進められてきた。しかしながら、電子スピンの偏極したイオンについては、材料科学研究の重要なツールとなりうるにもかかわらず、これまでほとんど研究がなされなかった。本研究では、高いピーク光強度の得られるパルスレーザーを使った新しいスピン偏極源の開発を試みた。

アルカリ土類金属原子を使ったこのスキームでは、新しい「デュアルタイプ」のスピン偏極源として材料物性や表面物理などの分野で活用可能である。まず、Sr の固体金属試料に YAG レーザー (1.06  $\mu\text{m}$ ) を集光照射し、瞬間的に蒸発させる (レーザーアブレーション) ことによって高密度の原子ガスを発生させる。この時、中性原子と共にイオンも発生するが、イオンの多くは高速であり、アブレーションパルス後、2色レーザーパルスを入射するまで数10マイクロ秒の時間遅延をとることにより、レーザーイオン化によって発生した。

本研究では、既知の手法の延長ではない新たなスキームをゼロから考案し、理論的および実験的に評価および実験実証することによって、新しいスピン偏極源の開発を進めてきた。現在の所は未だ実験実証の段階であり、実際に材料評価に応用するところまでは至っていない。今後は、さらに基礎データを蓄積し、より簡便でより性能 (電子及びイオンのパルス当たり収量と到達偏極度) の高い偏極源の開発を進めていくことが重要であると考えられる。

#### 4.1.3 有機太陽電池拠点の構築

以上のようなユニットの成果をベースに有機太陽電池を中心とする次世代太陽電池の拠点形成を図った。

- 1) NEDO ロードマップにおける有機薄膜太陽電池研究を位置付け、その最大の受託先として、この分野の我が国の研究をリードしている。
- 2) 本研究ユニットは、これらの一連の研究を推進しつつ、「有機太陽電池研究会」を立ち上げ、我が国における本研究分野の拠点としての地位を築いた。
- 3) この拠点を中心に我が国初の「有機薄膜太陽電池の最新技術研究」の本を出版するとともに、「新エネルギー最前線」を出版し次世代太陽電池の位置付けを行った。
- 4) 学振175委員会（次世代太陽電池）における有機太陽電池担当幹事として本ユニットのリーダーが緒シンポジウムをオーガナイズしてきた。
- 5) 本ユニットのリーダーは各種学会での有機太陽電池のプレナリースピーチ・招待講演を担当するとともに、4件の民間との産学共同研究が進展している。

#### 4.1.4 拠点の今後の展開

以上のような研究成果を基に、本研究グループは今後、世界的な研究拠点の構築に向けた取り組みを進める計画である。

- 1) 本グループは、世界に類の無い、有機薄膜太陽電池の拠点化を図ってきた。「有機太陽電池研究会」では、既に3度のシンポジウムを企画成功させ、其々、150名を超える参加者の下に活発な議論を進めた。今後、この会は、産学のみならず、官においても十分な評価を勝ち得ていく計画である。
- 2) 宇治構内に有機太陽電池研究室を整備し、デバイス評価のメッカとしての機能を持たせ、産官学の研究会メンバーを中心とする、評価拠点を構築する。
- 3) 拠点が、世界に発信していくために、昨年よりスタートしている、東南アジアとの共同研究集中講義を充実させ、英文での教科書を整備し、今後、アジア地域を中心とする、共同研究の国際拠点形成に向けた取り組みを行う。

## 4.2 宇宙太陽光発電ユニット

当初の計画調書に基づく達成度の評価を最初に示し、研究拠点の形成、今後の展開について述べる。

### 4.2.1 マイクロ波発送受電システムの軽量低損失化やビーム制御システムの開発

**軽量小型マグネトロンマイクロ波送電器** COMET (Compact Microwave Energy Transmitter) は我々がこれまで開発を行ってきた位相制御マグネトロン (Phase Controlled Magnetron : PCM) をベースとし、地上、宇宙に於ける可搬性を考慮し、宇宙使用を前提とした熱設計と小型軽量化を行ったマイクロ波送電システムである。COMET はマグネトロン、PCM 制御部、高電圧電源 (=DC/DC コンバータ)、導波管、放熱回路、アンテナ部等をすべて含み、大きさφ310×99mm 以下、重さ7.1 kg 以下を実現した (図4.2.1)。(十分以上の成果を挙げた。)

#### ■新聞記事

- 03.07.17 日刊航空通信 (2面) 「IA, 小型/軽量/高効率のマイクロ波送電器開発」
  - 03.09.26 (朝刊) 日経産業新聞 (11面) 「マイクロ波送電器 石播子会社が小型化」
  - 03.09.26 (朝刊) 日本工業新聞 (10面) 「世界最小水準の送電器」
  - 03.10.01 (朝刊) 化学工業日報 (11面) 「マイクロ波送電器を開発」
  - 03.10.05 京大学生新聞 (3面) 「送電器の軽量化実現」
- ビーム制御システム** 宇宙太陽発電所 (SPS: Solar Power Satellite/ Station) においては、サイドローブを減らし、受電点への高効率伝送を実現するために、送電アンテナに10dB のガウス型の電力分布もたせる。送電部をそのように設計すると放熱の難しい中央部で最大の電力となり発熱も多く、温度上昇をもたらすことが問題

となっている。マイクロ波送電にとっては伝送効率 (送電電力に対するアンテナ面での受電電力の割合) も重要な要素であるため、低サイドローブかつ高伝送効率を満たす均一励振アレイアンテナの最適化を行った。最適化により得られた MSSL を抑制した放射パターンの理論計算値と実際に測定された結果は、図4.2.2に示されたように十分一致し、全て同相で放射するとき比べて MSSL を約6.6dB 抑制することができた。二方向への送電に対応したマルチビームの形成も行い、良好な効率で最適化が行えることを示した。(十分な成果を挙げた)

### 4.2.2 高精度目標位置推定システムや位相誤差を低減した高効率マイクロ波発生電子管システムの研究

#### 高精度目標位置推定システム

ソフトウェア・レトロディレクティブシステムは複数の受信アンテナで受信されたパイロット信号の位相情報を元にパイロット信号到来角を計算する。計算機によりパイロット信号の到来方向が正確に検出されなければならないが、実際に用いる機器にはその特性にばらつきが存在する。そのため、特性のばらつきによる誤差が到来方向に及ぼす影響を自動的に較正する自動較正到来方向検出法が必須となる。そこで、いくつかの到来方向検出自動較正法、理論検討と実証実験を行い、その精度を検証した。一例を図4.2.3に示す。(十分な成果を挙げた)

#### 位相誤差を低減した高効率マイクロ波発生電子管システム

位相制御の問題に対し、我々の研究グループでは注入同期法とマグネトロンの陽極電流制御を用いた位相制御マグネトロンをこれまでに開発した。本研究ではさ

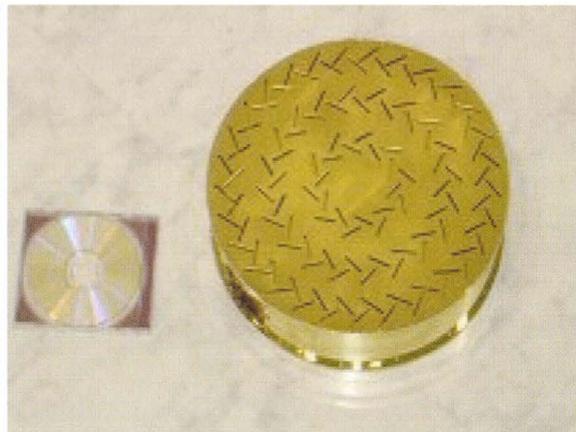
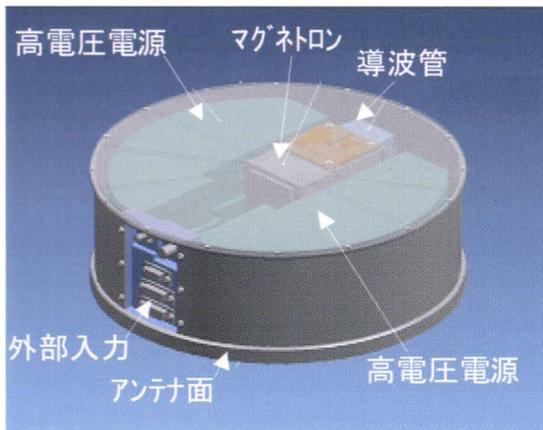


図4.2.1 COMET の構造及び概観

らに外部磁場制御用コイルを取り付け、マグネトロン  
の陽極電流及びコイル電流を制御する事により位相と振  
幅が制御 / 安定化可能なシステムの開発を行うことを  
目的とする。さらに位相振幅マグネトロンの低損失化や  
高安定化に関し、様々なアプローチで改良も行った。

本研究の結果、マグネトロンの陽極電流及びコイル  
電流を制御による位相と振幅が制御 / 安定化可能な新  
システムの開発に成功した(図4.2.4)。周波数、位相、  
振幅の安定度がそれぞれ10<sup>-6</sup>以下、1°以下、1% 以下  
という、宇宙から地上への太陽エネルギーの無線電力  
伝送には十分な安定度を実現しながら、100% 以上の  
出力可変制御も可能とした。さらに高効率化のために、  
これまではシステムで利用していた重くて損失が多い  
サーキュレータを排して、複数のマグネトロンの空間結  
合を利用したビーム制御方式を開発し、4つのマグネト  
ロンを用いたアレイで±5°程度のビーム制御が可能なシ  
ステムを開発した。(十分な成果を挙げた)

### 4.2.3 大型マイクロ波送電アレイのユニット間 位相同期システムの研究

SSPS においては、受電点からパイロット信号を送信  
し、その到来方向に送電するレトロディレクティブ方式  
がとられる。一方、SSPS のような大型システムでは、  
多数のユニットから成り立つ。その場合、ユニット毎で  
はビームを向けるように動作するが、ユニット間も基準  
の位相がそろそろ保証はなく、最悪打ち消しあうことも  
あり得る。そのために、ユニット間の位相同期をとるこ  
とができるシステムを提案した。地上から送信されたマイ  
クロ波を動力源とする成層圏無線中継飛行機に用いら  
れた SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform)  
システムの自己ビーム制御方式を改良し、位相同期に応  
用した。

基準位相を合わせることができないような、大規模な  
フェイズアレイシステムの位相制御について、新しい  
方法 (IQ 法) を開発し、ユニット型 SSPS に応用した結果  
をシミュレーションにより評価した。図4.2.5は10素子の  
アンテナからなり、緑線で示すように、ユニット毎ではあ  
る方向のビームを形成するように位相が揃っていた10  
のユニットが、本方式適用後は青線で示されたように、  
システム全体で位相が揃えられる。しかし、一つ一つの  
ユニットの位相を更新していくので、位相が統一される  
まで非常に時間がかかるという短所があるため、更新  
操作を一部重畳させた先取り法による高速化も示した。  
(十分な成果を挙げた)

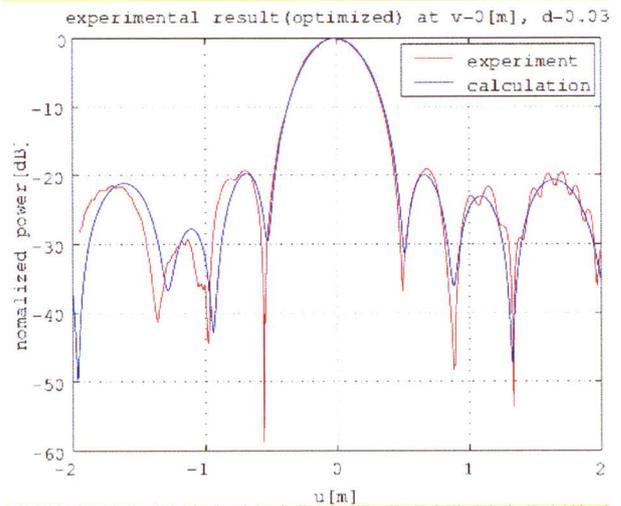


図4.2.2 正面にビームを向けた場合に MSLL を最も抑制した解の計  
算値(青)と測定値(赤)

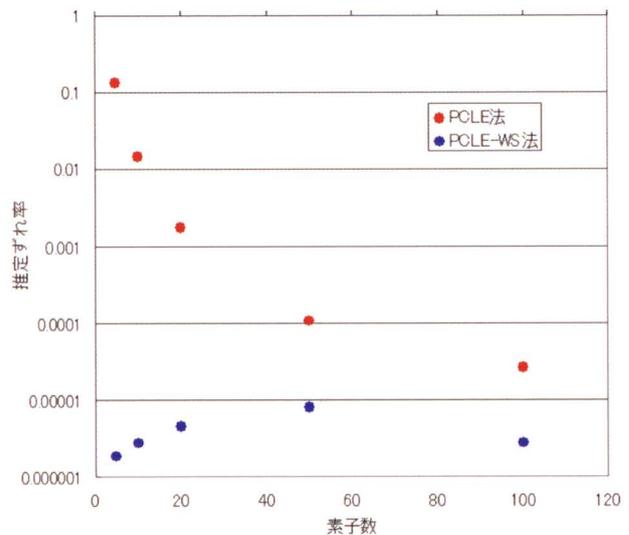


図4.2.3 二つの方式の推奨ずれ率の素子数依存性の比較

### PACM基本原理モデル

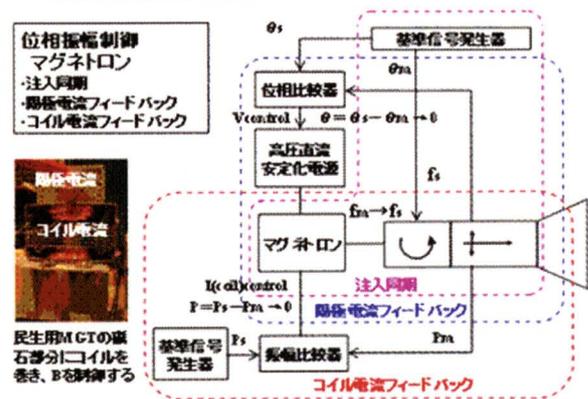


図4.2.4 位相振幅制御マグネトロン原理モデル

はじめに  
2030年に向けた  
エネルギー供給  
シナリオの策定  
新エネルギー開拓拠点の  
今後の展開  
各事業における  
成果の概要  
宇宙太陽光発電  
次世代水素エネルギー  
ハイブリッドエネルギー  
エネルギー供給  
教育拠点形成  
エネルギー供給センター

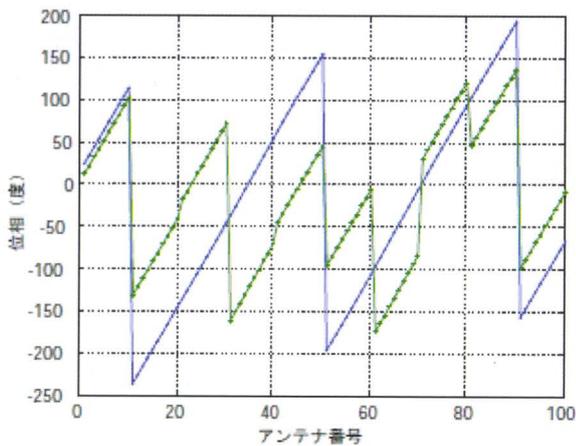


図4.2.5 ユニット型SPSにおけるIQ法適用前(緑)後(青)での基準信号の位相

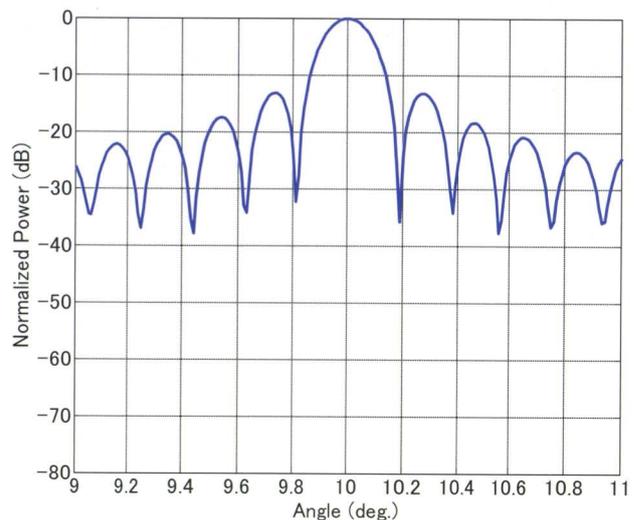


図4.2.6 電力試験衛星で現実的な誤差(トータル位相誤差20度+構造誤差5度)を考慮した場合の地上でのビームパターン(周波数5.8GHz, アンテナ径16m, 送電目標10度方向)

#### 4.2.4 マイクロ波発送受電システムの技術実証衛星の設計のための技術検討

本COEの目標である電力試験衛星の設計のための予備調査も行っている。これまで本COEで研究を行ってきた位相振幅制御マグネトロンを始めとするマイクロ波送電システム、目標自動追尾やビームフォーミングに関する研究、マイクロ波伝播経路に当たるプラズマ波動に関する研究、及びマイクロ波受電用レクテナの研究を中心とし、他の既存技術の調査を加えて10年以内に電力試験衛星を実現するための基礎設計を行った。その結果、電力試験衛星のミッションとしては(1)対地上送電によるビーム制御精度実験とマイクロ波送電実証実験、(2)対子衛星送電による高効率マイクロ波送電実験とプラズマ物理実験を行うこととした。図4.2.6は現実的な誤差を含めた地上でのビームパターンであるが、方向誤差は約 $10^{-3}$ 度レベルであり、約 $10^{-2}$ 度の半値幅に比べ十分小さいために精度に関する実験/議論が可能であることが分かった。また、対地上と対子衛星の送電アンテナを共通化させるとプラズマ物理実験のためにはマイクロ波強度が弱く、現象が確認しにくいことも分かり、対子衛星用にはより小さな専用アンテナから高密度のマイクロ波を放射した方が良い結果が得られることも判明した。(十分な成果を挙げた)

#### 4.2.5 マイクロ波送電システムの総合評価 「太陽エネルギー無線電力空間」という斬新な環境調和型エネルギー輸送方式

過去のマイクロ波電力伝送実証は1対1の送電を基本としていた。しかし、無線であるという特徴を生かしたもう一つの応用として本研究グループが提唱する「ユ

ビキタス電源」がある。近年のIT技術及びデジタル機器の発展により、生活の至るところにIT機器が存在し、便利に情報がやりとりできる社会、いわゆる「ユビキタス情報化社会」の到来が間近であると言われている。IT機器への給電に関しては、現状では、バッテリーによる給電が主流であるが、充電器の待機電力、使い捨てとなるバッテリーによる環境負荷の増大、充電器が機器ごとに異なり必要以上に生産されるといった問題を抱えている。そこで提唱されたのが無線により給電するシステム、「ユビキタス電源」である。「ユビキタス電源」とは、弱い電磁波を用いて電力伝送を行い、ある空間の至るところでIT機器をバッテリーレスで駆動、コードレスで充電することのできるシステムである。このユビキタス電源を実現した空間を「無線電力空間」と呼ぶ(図4.2.7)。基本的に人がいる場所でのユビキタス電源であるため、人体に対する安全基準である $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下の空間となるようにしなければならない。この安全基準は熱効果を中心に決定されたものである。受電電力は最大でもその点での電力密度×受電有効開口面積であるため、携帯性を高める場合にはそんなに大きな電力を得ることはできない。しかし、近年の携帯機器の省電力化は急速に進んでおり、太陽電池のように室内外の場所や昼夜による変動のないユビキタス電源は今後有望と考えている。(十分以上の成果を挙げた)

##### ■新聞・雑誌記事

- 04.1. 月刊ASCII 1月号 (ASCII) (記事)「宇宙からノートPCを充電できる？」
- 04.07.16 日本経済新聞「マイクロ波活用 電源どこにでも」

図4.2.8は2.45GHz、150W程度のマイクロ波で約5.8m × 4.3m × 3mのシールドルームを無線電力空間として実施した携帯電話の充電実験の様子である。FDTDによるシミュレーション及び実験にて部屋中がほぼ均一な



図4.2.7 ユビキタス電源（無線電力空間）の概念図

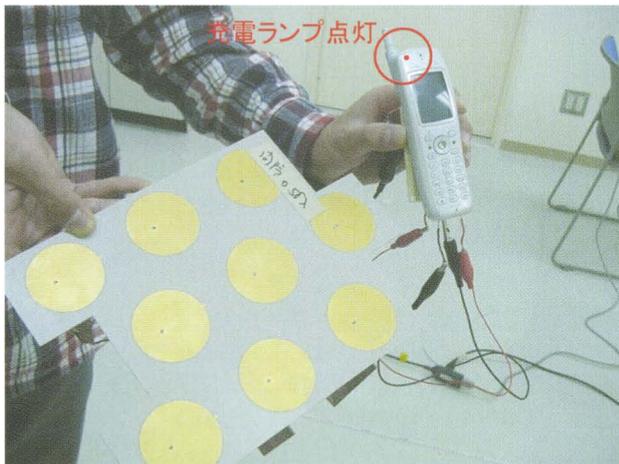


図4.2.8 無線電力空間での携帯電話充電実験の様子（写真左はレクテナ）

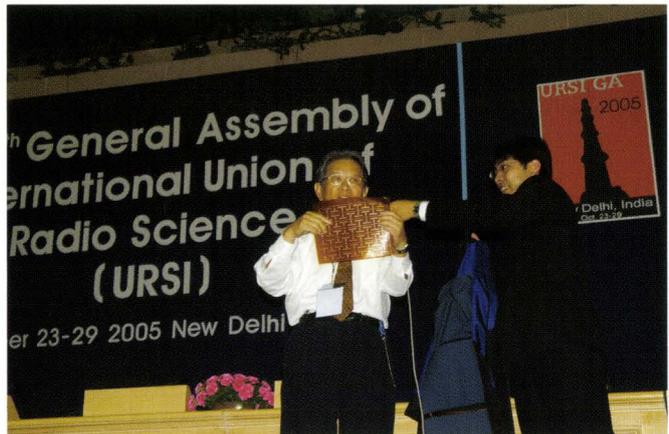
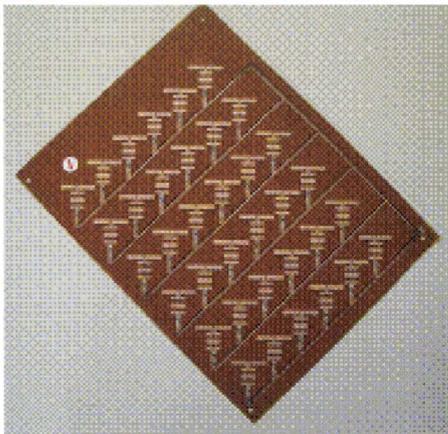


図4.2.9 開発したウェアラブル「はっぴ」レクテナ

1mW/cm<sup>2</sup>のマイクロ波密度となることを確認し、デュアル偏波レクテナ5並列接続で市販の携帯電話の充電に成功した。送電システムには経済性を考慮してマグネトロンと導波管スロットアンテナを用いた。受電整流システムはレクテナと呼ばれるアンテナ + 整流回路である。弱電力ウェアラブルレクテナ

ユビキタス電源は、いつでもどこでも、である以上、1mW/cm<sup>2</sup>以上のマイクロ波密度を用いることは難しい。そのため、この密度と持ち運べるレクテナの面積で決まる出力電力レベルがW級以下となり、それ以上の所用電力が必要な機器はバッテリーとの組み合わせを考える必要がある。ICやセンサー等、所用電力が更に小さなデバイスに関しては無線電力伝送のみの動作も可能であり、その代表はパッシブRF-IDである。RF-IDは現在900MHz帯での普及が進みつつあり、数mの無線電力伝送を利用している。マイクロ波電力伝送は今後様々なセンサー等へ応用が拡大していくことが期待されている。

ユビキタス電源の課題は弱電力で高効率動作するレクテナの開発である。レクテナは通常ショットキーバリアダイオードを用いて整流を行うが、ダイオードの立ち上がり電圧よりも低い入力に対しては高効率の整流を行うことができない。現在入手可能なゼロバイアスダイオードは他のパラメータがレクテナに不向きで高効率化には成功していない。本研究グループではマイクロ波回路の改良によりショットキーバリアダイオードを用いた弱電力高効率レクテナの研究開発を行い、5.8GHz、1mW入力で50%以上、2.45GHz、0.1mWで50%前後の高効率を実現した。これは既存のパッシブRF-IDに用いられているレクテナよりも格段に高効率となっている。このレクテナをユビキタス電源に利用しやすいようにウェアラブルとしたレクテナアレーが図4.2.9である。はっぴレクテナと呼んでいるが、はっぴレクテナははっ

はじめに  
2030年に向けた  
エネルギー戦略  
シナリオの策定  
新エネルギー開発拠点の  
今後の展開  
各事業における  
成果の概要  
エネルギー・サイエンス  
ユニット  
宇宙太陽光発電  
ユニット  
人工衛星（探査機）  
ユニット  
次世代水素エネルギー  
ユニット  
ハイエネルギー創製  
ユニット  
エネルギー・船舶技術  
推進ユニット  
教育拠点形成  
国際環境調和型  
エネルギー情報センター

びの背中部分に5.8GHz用デュアル偏波72素子レクテナアレイが3枚装着されており、5.8GHzのマイクロ波で100mW程度の直流を得ることができる。(十分な成果を挙げた)

送電周波数と同一周波数のスペクトル拡散パイロット信号を用いた送電システム

宇宙太陽発電所 (SPS、Solar Power Station/Satellite) の実現へ向けて、重要な要素技術の1つである送電ビーム制御のシステムの開発を行った。SPSの送電ビーム制御にはレトロディレクティブ方式を用いるため、受電地点からSPSへ向けてパイロット信号を送信する必要がある。本研究グループでは、このパイロット信号にスペクトル拡散変調 (SS 変調) を施し様々な利点を得ることを提案している。図4.2.10に示すSSパイロット信号を用いたシステムを構築し、その特性を測定し回路の改良を行った。さらにSPSへ適用する際の検討を行った。

マイクロ波送電でSSパイロット信号を用いる際の一番の難点は、同じ周波数帯に存在する大電力の送電電波が干渉波となり拡散符号の同期がとれなくなることである。また、干渉の影響で検出する信号の位相差に誤差が生じるという点も挙げられる。この特性を改善するため、復調の前に帯域除去フィルタ (BEF) を挿入し干渉波を抑圧することと、ソフトウェアによる同期の検出を行うことを提案する。この方法を用いて製作した復

調器では、干渉波排除能力を約45dB改善することが確認された。(十分な成果を挙げた)

4.2.6 研究拠点形成

これらの研究活動他、下記の活動を通じて、研究拠点化を図ってきた。(十分な成果を挙げた)

- 1) 世界にも類のない大電力マイクロ波エネルギー伝送実験を行うことが出来る電波暗室とマイクロ波発生器、測定器等を備えたマイクロ波エネルギー伝送実験装置 (METLAB) および近傍解測定システムやシールドルームなどを備えた宇宙太陽発電所研究棟 (SPSLAB) を平成16年度より全国共同利用化を開始し、年間10件程度の利用がある。
- 2) 民間との共同研究が年6社程度 (ベンチャー含む) 進行中である。
- 3) 米UCLAとの日米SPSシンポジウム (平成15年7月) を主催したほか、国際電波科学連合 (URSI)、IEEE等の国際機関のSPSやマイクロ波電力伝送関連国際会議でのセッションを開催してきた。
- 4) 電子情報通信学会宇宙太陽発電時限研究専門委員会を設立し、委員長、幹事、委員として牽引してきた。またその他のSPS関連研究会や委員会での中心的な貢献を行ってきた。
- 5) URSIではInter-commission working group on SPSを設立し、委員長、幹事、委員としてUSRIで初めて

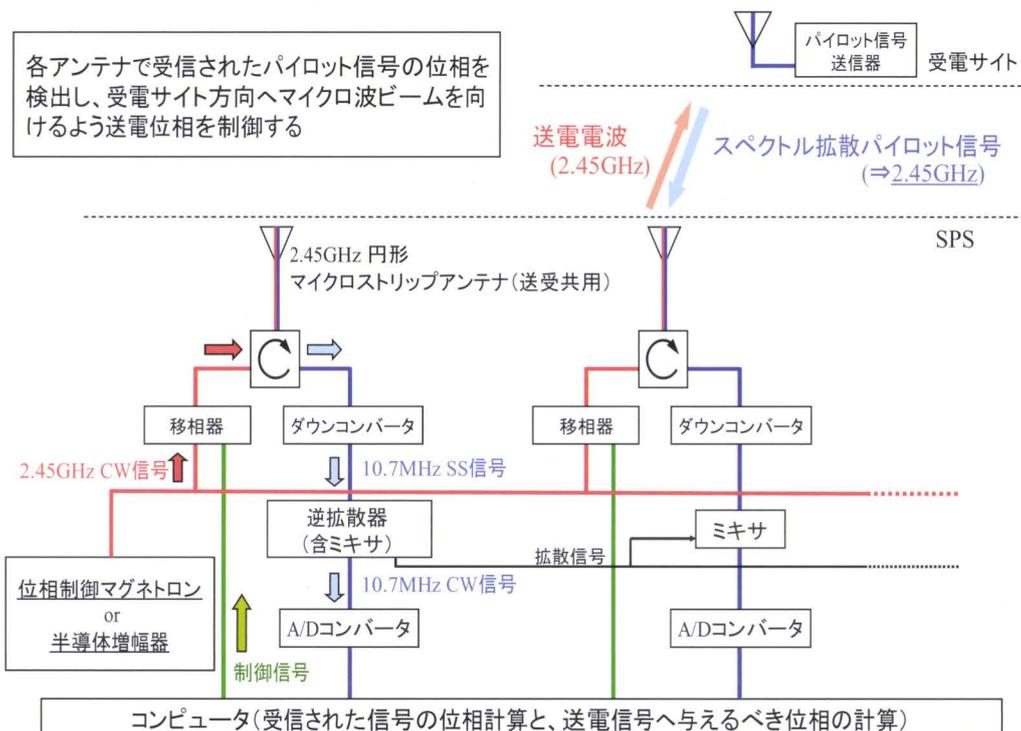


図4.2.10 送電周波数と同一周波数のスペクトル拡散パイロット信号を用いた送電システム

のSPS白書作成に向け、中心となって尽力している。

#### 4.2.7 今後の展開

以上のような研究成果を発展させ、さらに高効率・高精度のマイクロ波送電システムを開発し、実証実験の設計へとつなげ、研究ロードマップを明らかにする必要がある。宇宙太陽発電所の研究拠点をさらに発展させていくために、以下の活動を行っていく予定である。

- 1) マイクロ波送電技術の宇宙太陽発電への応用のため、今までの成果を生かした高効率・小形・高精度システムの開発・実証
- 2) マイクロ波送電スピノフ技術（地上応用）を推進し、ICタグ（無線タグ）の高性能化など、マイクロ波送電技術の裾野を広げてゆく。
- 3) マイクロ波送電や宇宙太陽発電に関する、平成16年度より実施している全国共同利用の充実
- 4) マイクロ波 SPS 関連における国際学会（国際電波科学連合 URSI、米国電気電子技術者協会 IEEE など）・国内学会（電子情報通信学会など）活動の強化
- 5) 京大の技術・知見を元にした電力試験衛星及びそのミッションの提案

## 4.3 人工太陽(核融合)ユニット

将来、人工太陽、すなわち、核融合エネルギーは人類の主要なエネルギー源の一つとなると期待されている。核融合炉の実現を目指し、半世紀を越える努力が世界的な規模でなされてきて、これが国際共同作業により、国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor; ITER)プロジェクトに結実した。ITERプロジェクトは核融合プラントの実現の鍵となるものであるが、真に有用な核融合プラント、それは、経済性、安全性、および環境適合性を同時に満たすものである。しかしその実現には、さらなる広く困難な課題があり、その解決に向けた幅広く、且つ挑戦的な研究開発が必要である。

我々、人工太陽ユニットは、これらの挑戦的な問題を認識し、特に以下の四つ主要課題について成果をあげた。

- (1) 核融合エネルギーの先進利用：環境調和型エネルギーとしての核融合エネルギーのより広く有用な利用法を明らかにした。
- (2) 革新的プラズマ閉じ込め：マイクロ波による球状トカマク形成を実証し、コンパクトで高性能な炉心プラズマへの展望を開いた。先進ヘリカル閉じ込めシステムと核融合プラズマシミュレーションを進展させた。
- (3) 革新的炉材料開発：水素製造と高効率発電の実現を目指して、高温での炉の運転を可能にする革新的な炉材料である ODS 鋼材と SiC/SiC 材の研究開発に成功した。
- (4) コンパクト中性子・陽子源：核融合科学と応用の新展開をめざした小型中性子源および陽子源の研究開発に成功した。

これらは、単に ITER プロジェクトを支援・補完するだけでなく、核融合エネルギーの可能性を高め、より広い領域に広げるものである。これらはすべて革新的な研究手法を要し、若い学生を刺激し、研究に誘うものであり、それゆえ、大学において行うのが最も相応しい。以下に主な成果を記し、最後に結論を述べる。

### 4.3.1 核融合エネルギーの先進利用 核融合エネルギーの社会的・経済的検討

将来のエネルギー需要シナリオ(予測ではない)において、環境問題に配慮しない、いわゆる Business as Usual といわれるシナリオでは核融合の市場可能性は 21 世紀中にはほとんどないが、一方、温暖化ガス放出の抑制を厳しく実行し、環境調和型のエネルギーへの転

換を社会が図るシナリオにおいては、核融合エネルギーは大きな役割をはたすことができる。特に、後述する水素製造の可能性を考えれば、その寄与は大きい。核分裂炉も、温暖化ガスの排出抑制に大きく寄与するが、核融合炉は核分裂炉に比べて、連鎖反応が起きない、炉の放射化レベルが低く軍事的転用の問題も無いなどの特長があり、経済的に競合できれば、核融合炉が有利になる。とくに、タイなど、現在核分裂炉が導入されていない発展途上国においては、バックエンドへの投資や燃料供給安定性を考慮すると、核融合炉に大きなメリットがある。すなわち、日本では核融合炉は既存の核分裂炉の代替の形でしか導入できないが、タイでは新規需要の多くを核融合がベースロードとして担うことができる。これはあくまで環境問題を考慮したときの核融合炉の市場可能性を示すものであり、これを実現するためには、核融合炉の起動エネルギーの低減、定常化、小型化、高温運転による高効率化などの技術課題をクリアする必要がある。後述する本ユニットの成果は、ITER プロジェクトを支援、補完するとともに、これらの実現に直接大きく貢献するものである。

### 高温エネルギー変換と水素製造

エネルギー形態として電力と燃料に大別できる。電力の比重は徐々に高まるが、今世紀末においても燃料分野は電力の 4 倍のエネルギー供給が必要と予測される。すなわち、環境問題を解決するためには非化石起源の燃料供給割合を高める必要がある。図 4.3.1 に示すように核融合炉を高温運転できれば吸熱反応によりバイオマス廃棄物からの水素製造が可能であり、環境調和への貢献はきわめて大きくなる。これを実現すべく、本ユニットではすでに、LiPb を用いた高温ブランケット概念を提案するとともに、セルロースからの水素製造を試み、最大 40% の変換効率を実証した。

### 4.3.2 革新的プラズマ閉じ込め マイクロ波球状トカマク形成実験

ITER は熱核融合を実現する炉心プラズマの閉じ込め方法としてトカマク型を採用している。トカマク方式は最も良好な閉じ込め性能実績を有するが、炉心プラズマが大きくなり、将来の実用炉の建設コストを押し上げる。球状トカマク方式は良好な閉じ込め性能を維持しつつ、炉心プラズマをコンパクトにできるので、経済的な実用炉の有望な候補である。プラズマの立ち上げに従来不可欠と考えられていた中心ソレノイドを省くことができれば球状トカマク炉の構造は大幅に簡素化でき、よ

りコンパクトな炉が実現でき、炉の建設コストを大幅に低減できる。中心ソレノイドのかわりにマイクロ波を用いたプラズマ電流立ち上げ方式による球状トカマク形成法は炉工学的見地から優れた方法である。低アスペクト比トラス実験装置 (LATE) においては、中心ソレノイドを要しないコンパクトな先進トカマク炉の実現に向けて、マイクロ波のみによる球状トカマクプラズマ形成法の確立を目指している。実験では5GHz マイクロ波の100k Wレベルの入射を試み、図4.3.2に示す様にプラズマ電流を12 kAまで立ち上げることに成功し、より本格的な球状トカマク平衡配位に近づくことができた。これは中心ソレノイドを持たないシンプルでコンパクトな球

状トカマク炉実現の可能性を示唆する成果である。

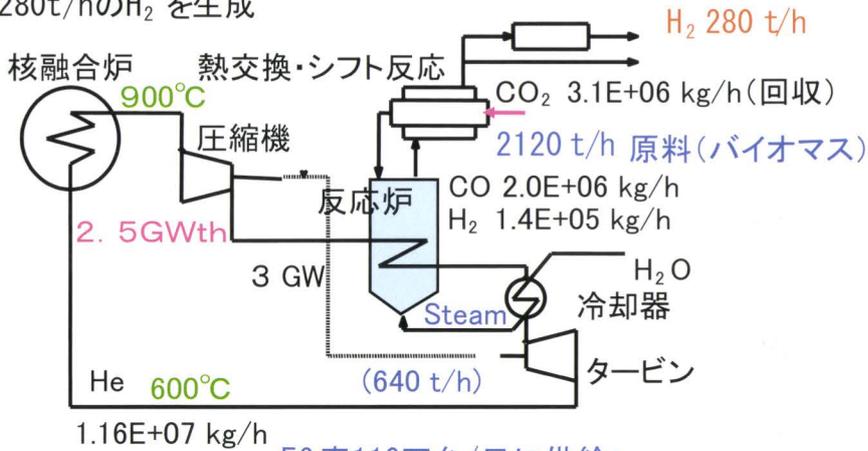
先進ヘリカルシステム

京都大学で独自に創案されたプラズマ閉じ込め概念であるヘリオトロン磁場配位の優れた特性は、ヘリオトロン E 装置に代表されるこれまでの装置により実証されてきた。これらの成果を継承・発展させ、プラズマ閉じ込め磁場最適化における新パラメタ領域の開拓を目指して、ヘリカル軸ヘリオトロン配位を持つプラズマ実験装置「ヘリオトロン J」を建設、新しいパラメタ領域のプラズマ閉じ込め特性の理解に資するための実験研究を精力的に進めた。ヘリオトロン J では、プラズマ加熱・電流駆動の手法として、電子サイクロトロン共鳴加熱シス

バイオマス(廃棄物)からの水素製造

○廃棄物処理／燃料製造量

- ・2120t/hの廃棄物を処理(わが国で年間6000万トン発生)
- ・280t/hのH<sub>2</sub>を生成



○エネルギー生成

- ・2GWの核融合出力
- 5.2GWを燃料電池で発生

FC車110万台/日に供給\*  
年間1700万台分\*\*

\* 6kg/台日と仮定  
\*\* 460g/台年と仮定

図4.3.1

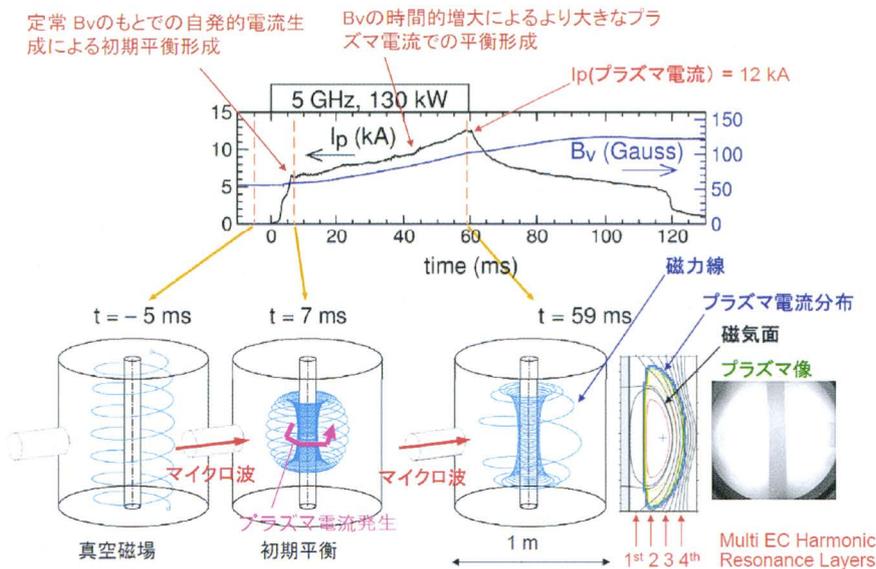


図4.3.2

はじめに  
2030年に向けた  
エネルギー戦略  
シナリオの策定  
新エネルギー開発拠点の  
今後の展開  
各事業における  
成果の概要  
太陽電池サイエンス  
ユニット  
手動ロボット装置  
ユニット  
人工太陽(核融合)  
ユニット  
次世代水素エネルギー  
ユニット  
バイオエネルギー創製  
ユニット  
エネルギー創成  
支援ユニット  
教育拠点形成  
国際(環境和型)  
エネルギー情報センター

テム (ECH)、イオンサイクロトロン共鳴システム (ICRF)、中性粒子ビーム加熱 (NBI) を用いている。ECH プラズマ実験では、周波数 70GHz、最大入射パワー 400kW の高パワーミリ波を入射し、プラズマエネルギー閉じ込め時間が国際実験則 ISS95 の予測値の最大 2 倍となることが示された。また、自発的閉じ込め遷移現象を発見し、その発現機構及びその ISS95 比例則との比較に関する研究が進展した。H モード ECH プラズマのエネルギー閉じ込め時間は、遷移前と比較し約 50% の向上が見出された。また、EC 波の斜め入射を用いた非誘導電流駆動を行い、プラズマ電流制御の手段として期待できる結果も得た。

#### プラズマ輸送理論・シミュレーション

高温プラズマ閉じ込めに関する物理を理論的側面から研究し、ITER 計画に寄与するとともに先進的なプラズマ閉じ込め配位の物理検討を行った。また、これらの観点から磁場閉じ込めトラスプラズマの統合的・階層的シミュレーションの研究を進めた。主な研究課題としては

- ・ トカマクプラズマにおける非線形 MHD シミュレーション、乱流輸送解析
- ・ ヘリカル系プラズマの MHD 解析・輸送解析
- ・ プラズマ表面相互作用の解析

が挙げられる。また、21 世紀 COE プログラムの目的に則り、これらの研究を通して高温プラズマ理論研究の研究拠点のひとつとなるべく、国際ワークショップの開催など拠点形成活動を行っている。

### 4.3.3 革新的炉材料開発

#### 先進エネルギープラント用高性能構造材料 (ODS 鋼) の開発

先進エネルギープラント用の構造材料として、高 Cr - 酸化物分散強化鋼 (ODS 鋼) の開発研究を行い、耐照射性能、高温強度特性、耐食性、に優れた構造材料の開発に成功した。学術的には、ナノスケールの酸化物粒子を高密度に分散させることが、従来の鉄鋼材にとって、耐食性、耐熱時効脆化特性、耐照射性能、耐ヘリウム脆化特性、および耐水素脆化特性のいずれにおいても好影響を及ぼすメカニズムを解明することの重要性が示され、将来の材料科学の展開に指針を与えた。特に耐照射性能に関しては、従来の金属材料において観察されている照射脆化が極めて起こりにくいことを確認した。すなわち、従来材料においては照射による伸びの低下が 90% に及ぶ場合でも、開発した材料では伸びがほとんど変化しない。800°C における引張応力は、従来

材の 2 倍に達し、高温強度が飛躍的に向上した。耐食性に関しては、ステンレス鋼に匹敵するかそれ以上の高性能を示した。

#### 先進エネルギーシステムセラミックス複合材料 (SiC/SiC) の開発

セラミックス SiC の高温での優れた強度特性、化学安定性、低放射化特性は核融合炉材料として高い可能性を持っている。京都大学で開発された革新的な製造技術である NITE プロセスにより、高結晶質・近化学量論組成の SiC 繊維を強化繊維として、ナノサイズの極めて細かい SiC 粒子を原料粉末として用い、緻密で高結晶質の微細組織を持つ SiC/SiC 複合材料の作成に成功した (図 4.3.4 参照)。さらに、自由度に優れた NITE 法の特長を生かして、工場における高性能 SiC 繊維および SiC/SiC 複合材料の連続生産ラインの構築をはかっている。さらに加えて、デュアルイオンビーム照射施設 (DuET) — マルチスケール評価開発基盤群 (MUSTER) と呼ばれる世界最高水準の核融合模擬・制御照射装置および多角・多次元的高精度評価装置群を活用した研究活動により、核融合炉のための SiC/SiC 複合材料や低放射化フェライト鋼の照射研究における目覚ましい

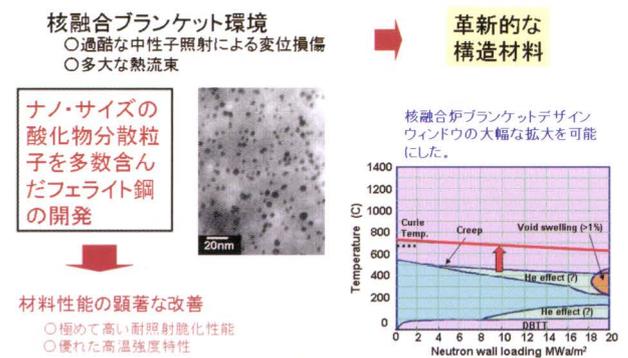


図 4.3.3

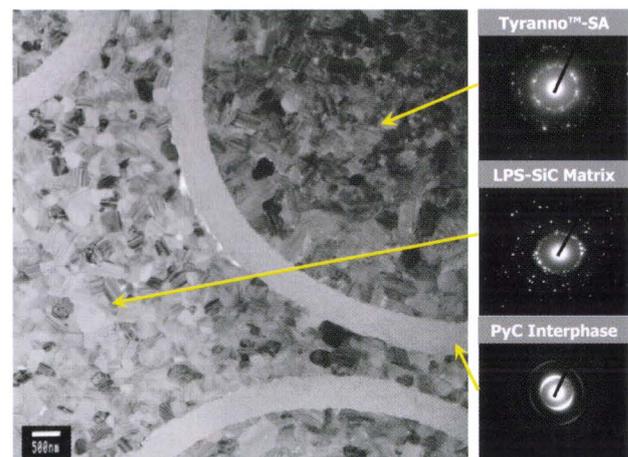


図 4.3.4

成果をあげた。

#### 超流動ヘリウム冷却超伝導マグネットの研究

超流動ヘリウム (HeII) は常流動ヘリウム (HeI) にくらべて、革新的に優れた冷却特性を持ち、核融合実験装置に用いられる大容量超伝導マグネットの小型化のための有力な冷却材である。HeII 冷却超伝導マグネットの設計や安定性評価の基礎となる HeII 中の定常及び非定常熱伝達特性についての実験的並びに理論的研究を行い、従来全くといって良いほど解っていなかった HeII における2次元ないし3次元熱流現象を解明した。加えて、HeII 冷却超伝導コイルの安定性について実験的研究を進め、新しい実験方式を開発して、実際の核融合実験装置に用いられた臨界電流数十 kA の大型複合導体について、安定性評価を行った。

#### 4.3.4 コンパクト中性子・陽子源

核融合エネルギーの応用として、慣性静電閉じ込め核融合 (Inertial Electrostatic Confinement Fusion: IECF) を利用したコンパクト中性子・陽子源の研究開発を行った。IECF 中性子・陽子源は、小型、簡潔構造で、ロバスト、制御性・安全性にも優れており、癌検査、地雷や税関などでの爆薬の探知等、さまざまな分野における理想的な線源としての展開が期待されている。具体的には、超小型実用機の開発に成功し(図4.3.5参照)、小型簡易イオン源付加新方式の基礎研究、D-He3核融合反応実験と核融合反応密度分布計測、IECF 用統合型計算機シミュレーションコード、および、円筒形状 IECF の開発と動作ガス圧依存性評価において成果をあげた。

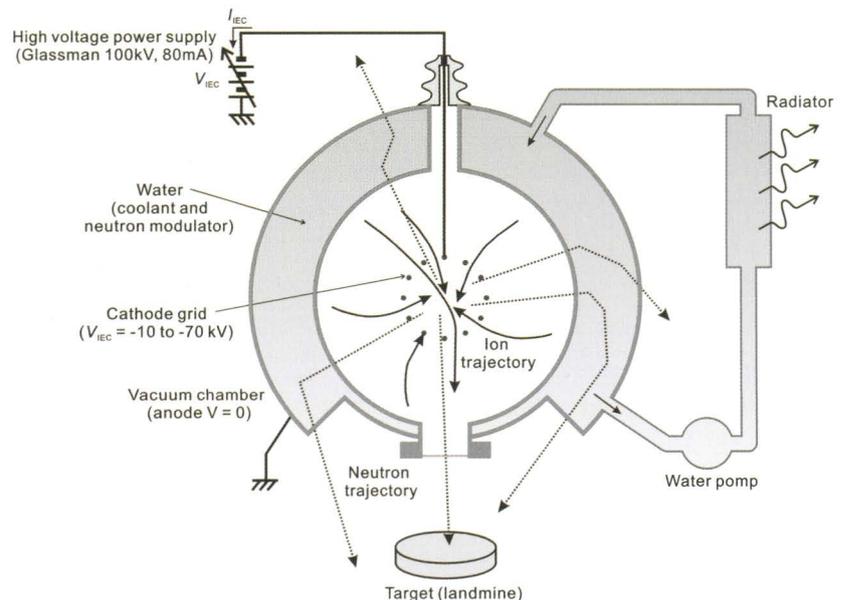


図4.3.5

#### 4.3.5 結論

本ユニットは、環境調和型エネルギーとしての人工太陽を目指し、プラズマエネルギーの実用化、市場化を念頭において多角的な研究を展開してきた。単一の大学における、プラズマ理論からトラス装置、工学、材料、利用系から社会経済検討に至る総合的な研究は、個々の規模は小さくとも、国内外の国公立研究機関と比べても類例を見ない、拠点形成の名にふさわしいユニークなものである。実際、5年間に亘る21COEプログラムにより、4.3.1で述べた核融合エネルギーの先進的利用法の概念が生まれるとともに、この概念における本ユニットの研究課題の意義が明らかになりつつある。特に、発電のみならず、水素などの燃料生成などの炉の熱の多角的利用を盛りこんだ核融合エネルギーの先進的利用法の概念は、持続型エネルギーシステムの実現に直結するものであり、きわめて重要で魅力的である。この概念は、5年に亘る COE 活動中に生まれてきたものであり、上記の多角的研究の各分野に光を投げかけ、先進的利用における個々の研究の役割を明らかにしつつある。すなわち図4.3.6に示す様に、今後の目標は、本 COE 活動で得られた多角的な成果さらに一層発展させるとともに、これらを有機的に結びつけ、核融合エネルギーを基盤とした持続的エネルギーシステムに向かって発展させることである。

# 京大21COEにおける学術融合型プラズマ・核融合研究の新展開

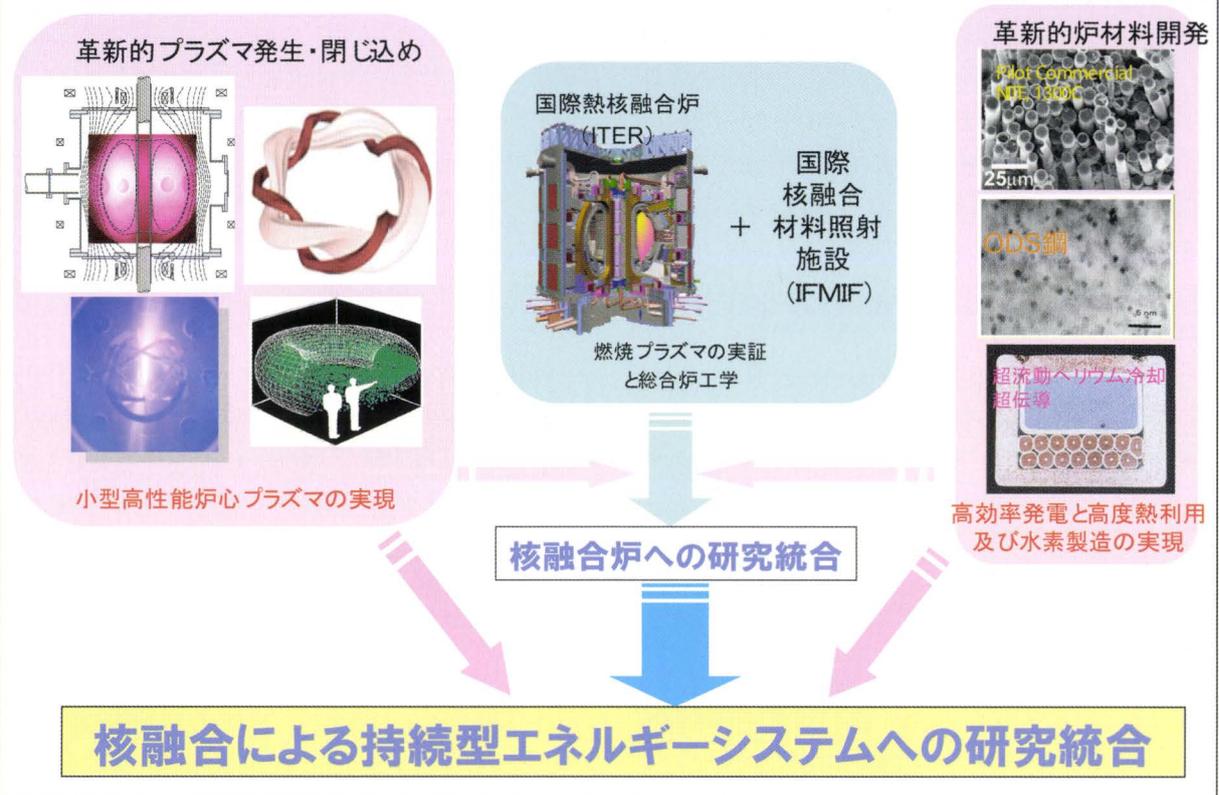


図4.3.6

### 4.4 次世代水素エネルギーユニット

21COE プロジェクト、「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」では再生可能エネルギーとして太陽エネルギーならびにバイオエネルギーの研究タスクとともに水素エネルギータスクが設置され、この5年間研究活動を行ってきた。水素エネルギー自体は電気エネルギーと同じく二次エネルギーであり、太陽エネルギーやバイオエネルギーといった再生可能な一次エネルギーではない。しかしながら、地球上には豊富に存在する太陽エネルギー、水力、風力等の再生可能エネルギーも、日本のような消費地にとっては、「大部分が遠く海のかなたに存在するエネルギー」であることは化石燃料と変わらず、十分な量を直接国内で調達して使用することは技術的に困難である。そのため、遠隔地にある豊富な再生可能エネルギーを、化学エネルギーとして貯蔵、輸送

し、低環境負荷という再生可能エネルギーの長所を損なわずに利用する方法として考案されたのが、水素エネルギーシステム(図4.4.1)である。燃料電池や水素エンジンで消費しても排出されるのが水であり、原理的にはきわめて高効率利用が可能である水素エネルギーは、日本のような社会における二次エネルギーとしてまさに理想的である。しかしながらこのシステムの構築については、水素の製造、貯蔵・輸送、利用のそれぞれの段階において多くの未開発技術が山積しており、実用化のためにはこれらの課題をすべて解決していかなければならない。

水素エネルギーユニットはこのような背景のもと、エネルギー科学研究科3専攻に所属する9研究室が参画し、図4.4.2に示す水素エネルギーシステムのそれぞれ

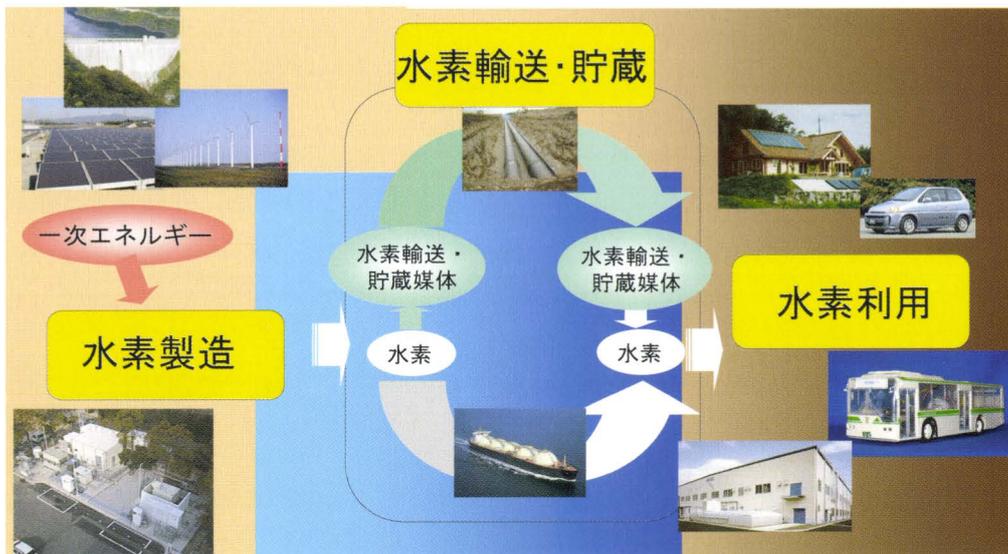


図4.4.1 水素エネルギーシステムの概念図

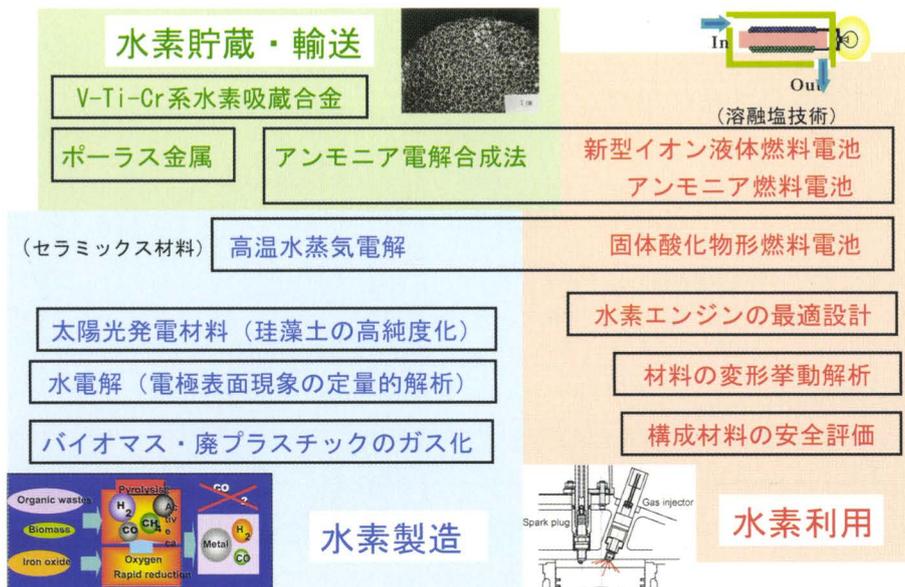


図4.4.2 21COE 水素エネルギーユニットで開発された水素エネルギーシステムの要素技術

はじめに

2030年に向けた  
エネルギー戦略  
シナリオの策定

新エネルギー開発拠点の  
今後の展開

各事業における  
成果の概要

太陽光発電システム  
ユニット

再生可能エネルギー  
ユニット

人工太陽電池  
ユニット

次世代水素エネルギー  
ユニット

バイオエネルギー  
ユニット

エネルギー輸送  
ユニット

教育拠点形成  
エネルギー情報センター

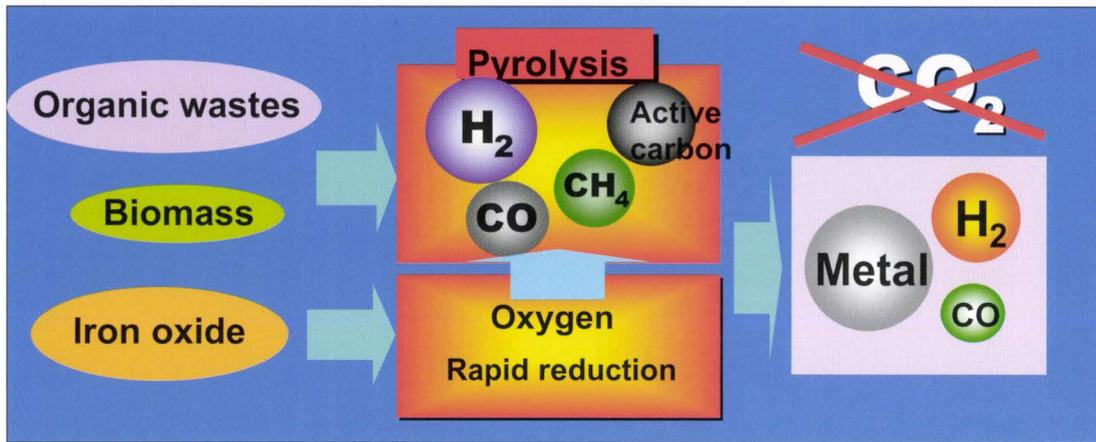


図4.4.3 廃有機材料と酸化鉄からの金属鉄と含水素還元ガス製造機構の概念図

の段階に関する技術ならびに周辺技術に関する独自の研究を行ってきた。この中で特徴的なものとしては、水素の貯蔵・輸送媒体としてのアンモニアの採用と、水素からアンモニアを製造する新しい熔融塩電解技術ならびにこれを直接燃料に用いたアンモニア燃料電池発電が挙げられる。また、水素の貯蔵技術としては、消費地での水素ステーション等での据置型のリザーバへの応用が考えられる水素貯蔵合金に関する研究が進められた。さらに水素利用の中心的課題である燃料電池や水素エンジンの開発については、一室型燃料電池や、イオン液体燃料電池、水素噴射型の高熱効率エンジンなど、京都大学独自の次世代型の燃料電池やエンジンが考案され、その開発が進んでいる。周辺技術にもユニークなものも多く、製鉄プロセスを利用したバイオマスや廃プラスチックからの水素製造や宇宙利用技術である無重力下での電解水素製造、また水素設備関連材料の安全性診断技術などに関する研究が行われてきた。この中で特に成果が大きいと考えられる特徴的なものを以下に要約する。

#### 4.4.1 製鉄プロセスプロセス熱利用によるバイオマス、木材、廃プラスチックなどからの水素製造

製鉄プロセスの熱を利用したバイオマス、木材、廃プラスチックなどからの水素を含む還元ガスの製造法を開発した(図4.4.3)。このプロセスにおいては製鉄とガス製造が同時に行われ、このプロセス中においては二酸化炭素や水の発生が伴わないという、全く新しい製造プロセスである。廃プラスチック、廃木材(バイオマス)の利用により、鉄とCOガスを併産する水素製造法に関する超高温実験をほぼ完了し、廃紙の該手法への応用について、超高温実験へと研究の展開が進んでいる。同時に、該プロセスの熱力学解析を行った。

#### 4.4.2 水素吸蔵合金の新製造方法の開発ならびに熱交換用ポーラス金属の開発

酸化物を混合して強い還元性雰囲気中で酸化物混合体を同時に還元し、水素吸蔵合金粉末を得る方法を開発した。還元剤としてCaを用いると40%の酸素を含む難還元性酸化物である酸化チタンであっても残留酸素濃度500ppmという高純度チタンを製造できることを示した。本法は広く水素吸蔵合金の安価な製造法として利用可能であるが、更に電気分解と組み合わせるOS法によってCaを不要とし、二酸化炭素以外には廃棄物の排出のない合金製造プロセスに組み上げる事に成功した(図4.4.4)。

高気孔率ポーラス金属創製のために開発したスパーサー法を応用し、各種プロセス条件の影響を調べることにより、ポーラスアルミニウムの気孔サイトにニッケル系水素吸蔵合金が分散した一種の複合材料の創製に成功した(図4.4.5)。しかし、アルミニウムと水素吸蔵合金の一部が製造プロセスの過程で反応し、化合物が生成することがわかった。一方、同法をポーラス銅で行った場合、化合物は生成せず、現在この材料について水

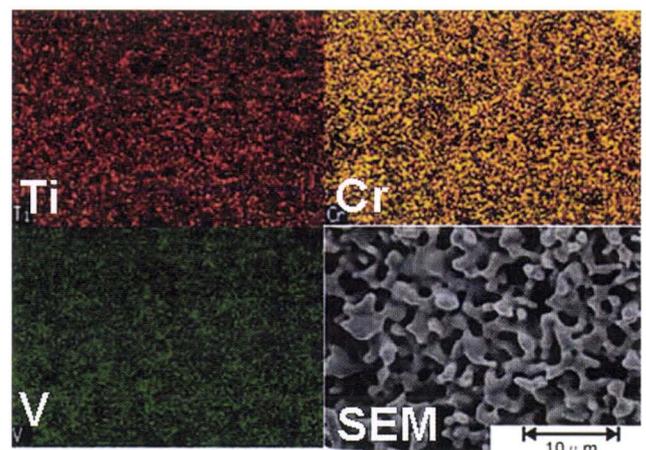


図4.4.4 OS法で作製されたV-Ti-Cr合金粉末のSEM写真と構成元素の分布

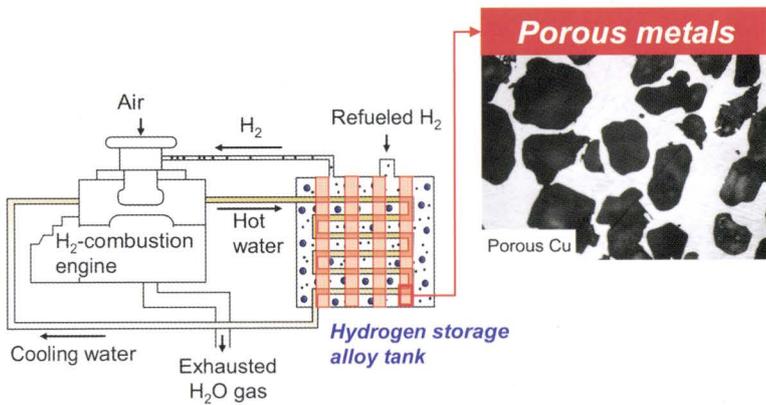


図4.4.5 水素吸蔵合金熱交換用ポラス金属

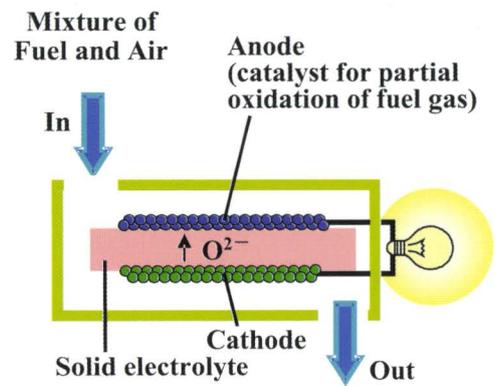


図4.4.6 一室型燃料電池の作動原理図

素の吸収脱着挙動の解析を進めている。

### 4.4.3 次世代型燃料電池の開発

本 COE プロジェクトでは次世代型の特徴ある燃料電池の開発研究が進んでいる。燃料ガスと空気をそれぞれのガス室に供給することなく、同時に供給することにより構造を単純化し、スタック化などを容易にできる画期的な一室型燃料電池を開発した(図4.4.6)。このために高イオン伝導性を有する欠陥ペロブスカイト型の酸化物電解質  $BaLaIn_2O_{5.5}$  を独自に開発した。現在メタン燃料使用時に  $60mWcm^{-2}$  の出力密度に達しており、今後スタック化などの実用化を目指した試験が行われる。

また、現在開発が求められている、 $100^{\circ}C$  以上の中温領域、無加湿状態で動作可能な新しい燃料電池が開発された(図4.4.7)。電解質としては本 COE で独自に開発された新しいイオン液体と高分子の複合体からなる電解質が用いられており、現在完全無加湿状態で、 $80mWcm^{-2}$  の出力を達成している。今後さらなる出力向上ならびに耐久性の向上を目指した研究が進められる。

### 4.4.4 燃料直接噴射方式の高熱効率水素エンジン

高速燃焼によるノッキングを防ぎ、 $NO_x$  の生成を低減し、高い熱効率を有する燃料水素直接噴射方式の水素エンジンを独自に開発した。この方式ではディーゼルエンジンの最大熱効率である40% にほぼ匹敵する39% を達しており、当初目標であるディーゼルエンジン並みの熱効率をほぼ達成した(図4.4.8)。

### 4.4.5 COE プロジェクトの終了に際して

この5年間で培われたこれらの水素エネルギーに関する独自の技術は、そのいくつかが現在文部科学省や新エネルギー・産業技術開発機構などの新たなプロジェクトとして採択されており、また、企業との共同研究

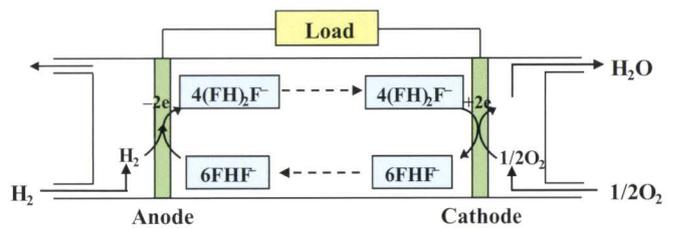


図4.4.7 中温無加湿型イオン液体燃料電池の作動原理図

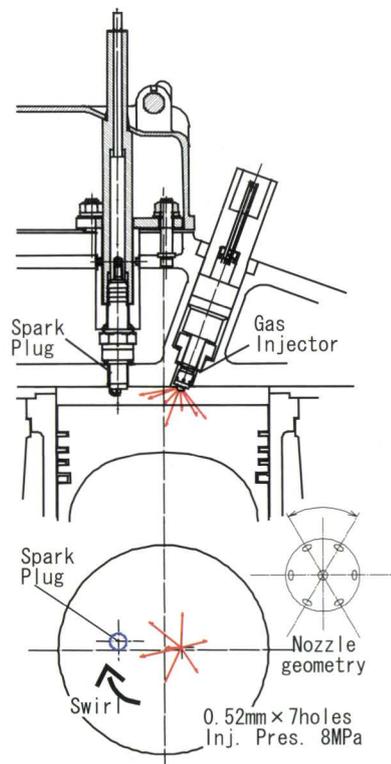


図4.4.8 燃料直接噴射型高熱効率水素エンジン

も進められており、今後新しい研究拠点として発展していくことになる。ここに関係各位のご協力に対して感謝の意を表するものである。

## 4.5 超臨界流体技術によるバイオエネルギー創製ユニット

エネルギー問題、地球環境問題が深刻になるに伴い、再生可能、カーボンニュートラルで莫大な賦存量を有するバイオマスが、環境調和型のエネルギー源として期待されている。我々の近年の調査では、我が国で年間約3億7,000万トンのバイオマス資源が発生し、うち約7,700万トンが有効利用されずに廃棄されている。後者は二酸化炭素重量に換算すると約1億2,700万トンで、これは1990年における我が国の二酸化炭素排出量の約11%に相当している。したがって、これらバイオマス資源のエネルギー源や有用ケミカルスとしての利用は、2005年2月16日に発効された京都議定書での我が国の二酸化炭素排出量削減目標の達成に有効と考えられる。

本研究タスク「バイオエネルギー」では、バイオマス

資源からの高品位バイオ燃料として液体バイオ燃料、バイオエタノール、バイオメタン、バイオメタノール、バイオディーゼルの製造プロセスの確立を進め、図4.5.1に示すように、環境負荷の小さい超臨界流体技術を用いた京都大学独自のバイオエネルギーの創製に関する検討を行った。具体的には、超臨界アルコール技術によるバイオマス資源からの液体バイオ燃料、超臨界水技術により得られた木質バイオマスからのバイオエタノール燃料および超臨界水技術によるメタン・メタノール生産、さらには超臨界メタノールによる油脂類からのバイオディーゼル燃料、さらには熱分解制御技術による液体燃料の創製である。バイオエタノール創製に関しては、図4.5.2に示すような製造プロセスを提案し、木質バ

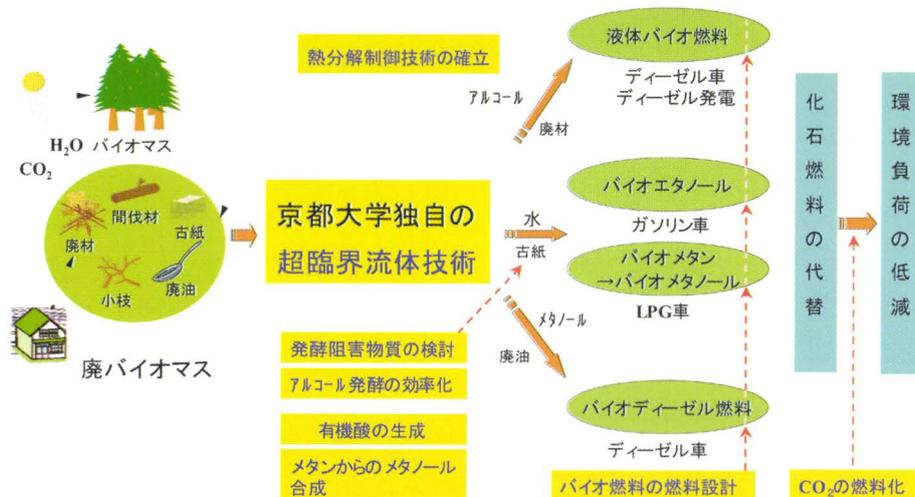


図4.5.1 環境負荷の小さい超臨界流体技術によるバイオエネルギーの創製

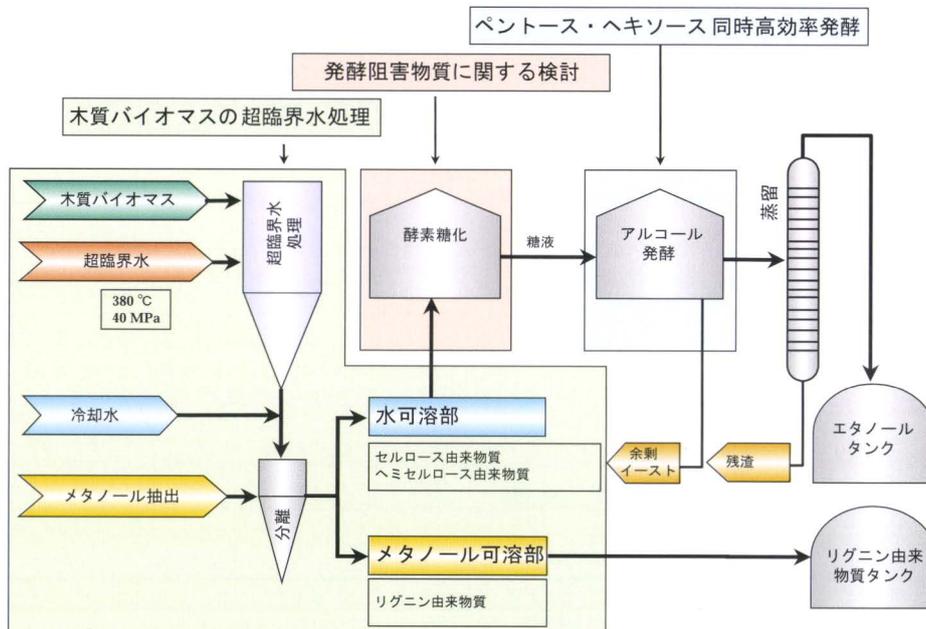


図4.5.2 木質バイオマスからの超臨界水によるエタノール生産



図4.5.3 各種超臨界流体バイオマス変換装置

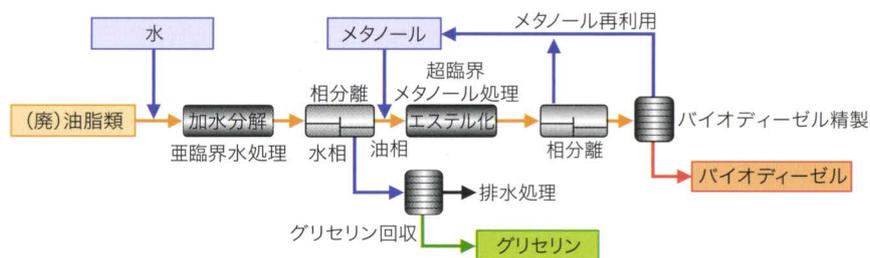


図4.5.4 二段階超臨界メタノール法のプロセス

バイオマスの超臨界水処理、処理により生成した各種生成物のアルコール発酵への阻害に関する研究およびペントース、ヘキソース同時発酵による高効率エタノール生産を検討した。また、バイオメタン創製では、リグノセルロースから得られる有機酸などからのメタン生産、蟻酸・水素生産、メタンを液体燃料に変えるメタノール生産、さらにはバイオマス由来  $\text{CO}_2$  からのメタノール生産について研究を行った。得られた各種バイオ燃料について、それらの燃料技術の高度化と燃料設計を試みた。図4.5.3には、本研究で使用した各種超臨界流体バイオマス変換装置の外観を示した。

それらの成果の中で、バイオディーゼル燃料については、平成15年度 NEDO（新エネルギー産業技術総合開発機構）による「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発」プロジェクトの一つ「二段階反応法によるバイオディーゼル燃料（BDF）製造技術の研究開発」として採択され、産学連携のもと実用化に向けて動き出した。図4.5.4には、その製造プロセス図を示す。

これら一連の研究を通して、副産物や廃棄物を産出しない  $\text{CO}_2$  ゼロエミッション型エネルギー生産・利用

技術とそれらの利用システムの確立を図っている。その概念を図4.5.5にまとめて示す。すなわち、超臨界流体技術を用いて獲得した高品位バイオ燃料の中で、まずバイオメタンは、酵素メタンモノオキシゲナーゼ（MMO）によりバイオメタノールに変換され、さらにこのバイオメタノールは、バイオエタノールとともに固体バイオマスを液体バイオ燃料に変換する溶媒として利用される。また、油脂類からのバイオディーゼル燃料製造プロセスでは、バイオメタノールを反応溶媒として用いることにより100%バイオマスベースのバイオディーゼル燃料（脂肪酸メチルエステル）の製造が可能となる。さらに、その製造プロセスにて副生するグリセロールはバイオメタンへの変換の良基質として再利用し得る。これらの融合、相互乗り入れにより、廃棄物を産出しないゼロエミッション型エネルギー生産・利用システムの構築が可能となる。化石資源の枯渇と地球環境の悪化に伴い、今後益々バイオマス資源の有効利用が進展するものと思われる。その際のゼロエミッション型エネルギー生産・利用システムのモデルの一つとしてここでの提案が役に立てれば幸いである。

はじめに

2030年に向けた  
エネルギー需給  
シナリオの策定新エネルギー開発拠点の  
今後の展開各事業における  
成果の概要太陽電池・ウインド  
ユニット宇宙太陽光発電  
ユニット人工衛星搭載型  
ユニット次世代水素エネルギー  
ユニットバイオエネルギー創製  
ユニットエネルギー供給基盤  
構築ユニット

教育拠点形成

国際（環境）エネルギー  
センター

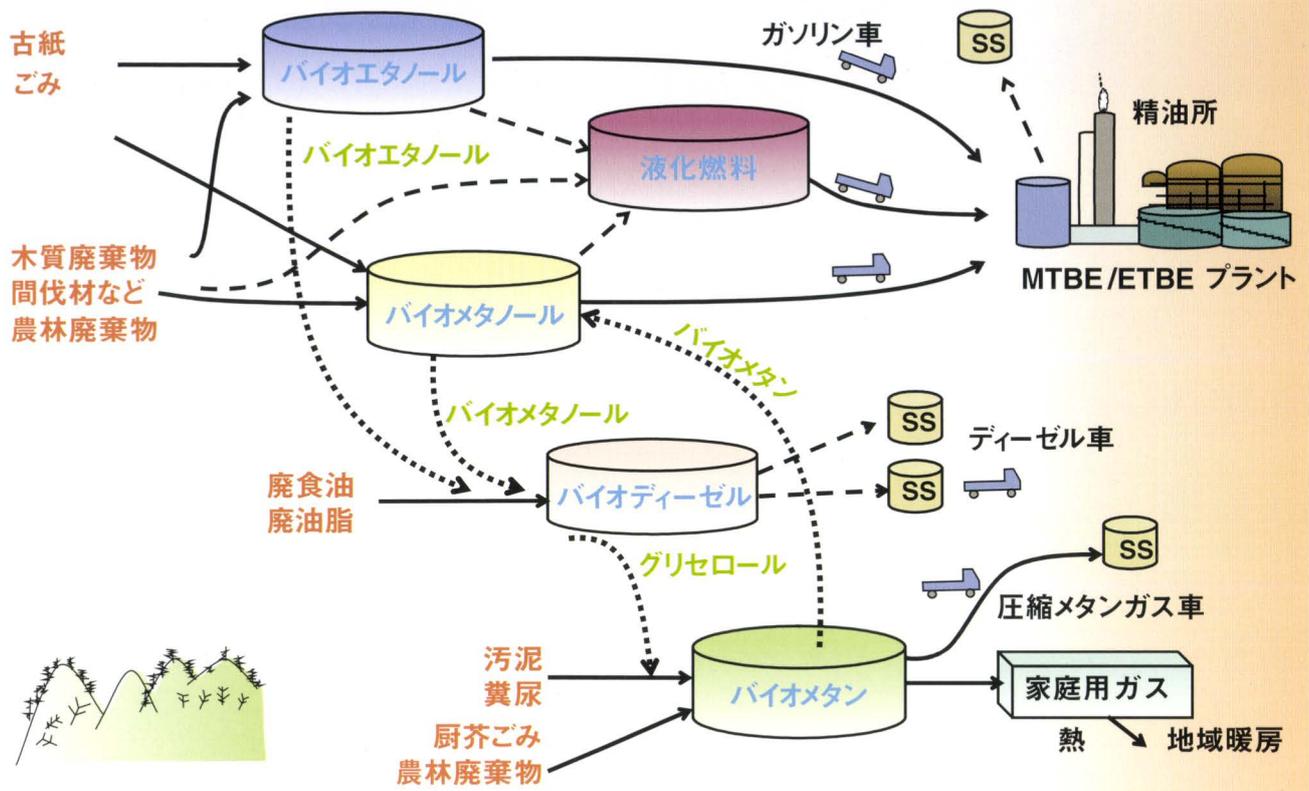


図4.5.5 CO<sub>2</sub>ゼロエミッション型バイオ燃料製造・利用システム

## 4.6 エネルギー需給評価支援ユニット

## ユニットの設置の背景と目的

1990年頃までの地球温暖化問題が広く知られる以前のエネルギー需給システムにおいて考えるべき問題は、それ以降のエネルギー需給の問題に比べて多少単純であったといえる。安定した石油価格の下では、主として経済性に基づいて決定される一次エネルギーの変換・輸送・消費過程は重要な選択を迫る状況には至らなかった。

1990年に入り国連気候変動枠組み条約、京都議定書の採択などを契機として地球温暖化問題が広く注目されはじめた。温室効果ガス排出についての定量的な削減義務が生じたことは必然的に社会のエネルギーに対する価値観の変化をもたらした。その量が産業廃棄物に匹敵する二酸化炭素排出量の削減、希薄で取り扱いにくい資源である再生可能エネルギーの有効利用を考える必要が生じた。京都議定書の発効に伴い二酸化炭素や温室効果ガスに関わる国際市場が形成されたことからその変化をうかがい知ることができる。その結果、安定した化石燃料供給の下ではほとんど顧みられることのなかった、太陽エネルギーやバイオマスの利用、二次エネルギーとしての水素の利用、炭素税、二酸化炭素市場、グリーン料金などの社会制度、エネルギー・環境教育、温室効果ガス排出量という新たな評価指標などを、エネルギー需給計画において積極的に考慮する必要が生じた。大気中の温室効果ガス濃度安定化のためには大幅な温室効果ガス排出削減が必要とされており、そのためには技術と社会の双方からの協調的な対応が不可欠である。その検討のための枠組みの一つが、本ユニットの基本目標設定となった図4.6.1に示すものである。

一般にエネルギー需給評価の目的は、エネルギー需給システムに関わる意思決定の際に必要な情報を意思決定関係者に提供することであると考えられる。どのようなエネルギーインフラに投資すべきか、どのような研究開発に力を注ぐべきか、どのような社会制度を導入すべきか、いずれも正解のない意思決定問題であるが、その合理的な検討に必要な情報が選択、加工され問題の検討に利用される。石油危機や地球温暖化問題に対しては既に数多くのエネルギー政策が検討され、その過程では統計データや専門

家の意見、数理モデルなどから得られた数多くの情報が提供された。エネルギー需給長期見通しや多様なエネルギー関連技術のロードマップの策定、一次エネルギー価格の将来予測、エネルギー需給関連設備投資計画、種々の技術導入効果の環境影響評価の相互比較、環境税導入のマクロ経済効果分析、電力産業自由化に伴うエネルギー料金制度の策定、排出量取引の制度設計など枚挙にいとまがない。しかし、そのような過去の多大な努力の結果に基づいて現在のエネルギー・環境に関わる意思決定作業が合理的、効率的に行われているかということ、現状は残念ながらそうとは言えない。本ユニットの問題意識の一つがここにある。

あるエネルギー技術に着目したときの「エネルギー需給システム評価」の過程の一例を次に示す。

- (1) 技術の特性に関わる分析、調査、
- (2) ライフサイクルの視点からの、エネルギー消費量、資源負荷、環境負荷（二酸化炭素、硫黄酸化物、窒素酸化物、エアロゾルなど）、経済費用などの分析、
- (3) 各種環境負荷の環境影響評価、
- (4) 効果的な技術導入のためのシステム条件の技術・社会的視点からの検討、
- (5) (1)～(4)の結果として得られるエネルギーシステムの供給安定性、安全性、ミクロ・マクロ経済評価、社会受容性などの多様な視点からの評価、
- (6) 政策策定への情報提供

個人の独断に基づく評価結果の利用価値は低く、効果的な政策策定への貢献のためには合意形成促進への配慮が必要となる。将来予測に基づく評価である以上、技術特性、環境負荷、エネルギー需要、マクロ経済との関わり、評価のあらゆる側面においてその多くを前

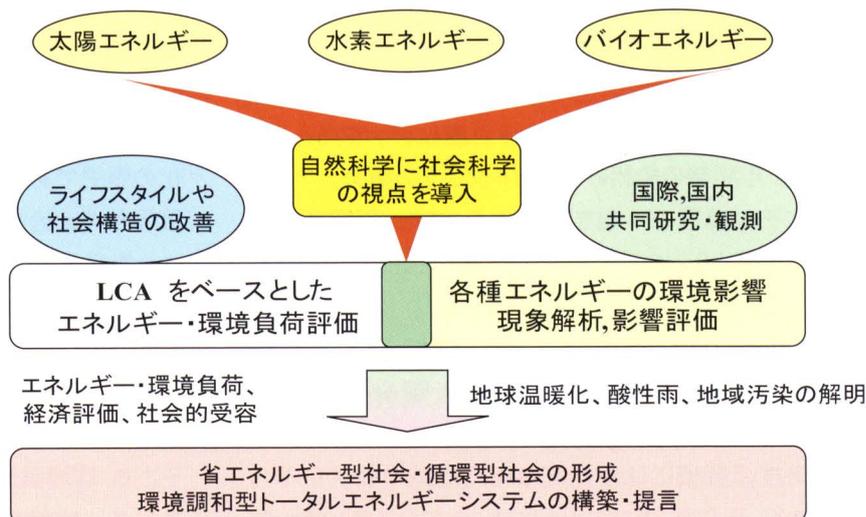


図4.6.1 環境調和型エネルギー需給システム評価の枠組み

提条件に依存することとなる。すなわち、その前提条件の理解無しにはその結果に基づいた政策策定に関わる議論はできない。根拠の明確な情報は、第三者による再利用も容易にし、種々の政策策定のための作業を大幅に効率化する可能性がある。そのためにも、技術系と社会科学系の種々の分野の専門家の評価作業への積極的な参画が不可欠となる。

そこで、本ユニットでは「エネルギー需給システム評価」を支援するための新規な枠組みを提案し、そのプロトタイプを構成することを目的に研究を進めた。本ユニット全体としての最終目的は、環境調和型エネルギー需給システムの設計・評価について技術と社会との両面から教育・研究を実施することのできる体制を確立することにある。具体的には以下の内容の活動を実施した。

- (1) 環境調和型エネルギー需給システム構築のための素材関連技術開発およびシステム化技術開発、
- (2) エネルギー需給システムの環境影響評価のための環境負荷原単位データベース構築、およびその大気環境影響評価、
- (3) 各種環境調和型エネルギー需給システムの分析・設計・評価、
- (4) 環境調和型エネルギー需給を実現するための教育・コミュニケーションシステムの開発、
- (5) 合意形成促進を促進するエネルギー需給システム環境影響評価のための拡張可能なデータベースとモデル開発の枠組みとプロトタイプの構築。

以下にその成果の一端を紹介する。また、研究活動の全体像を図4.6.2に示す。

#### 4.6.1 環境調和型エネルギー需給システム構築のための素材関連技術開発およびシステム化技術開発

将来技術評価には最先端の専門知識の提供が不可欠である。そこで、本ユニットには、特に体系的な観点からエネルギー関連技術開発を行っているグループ

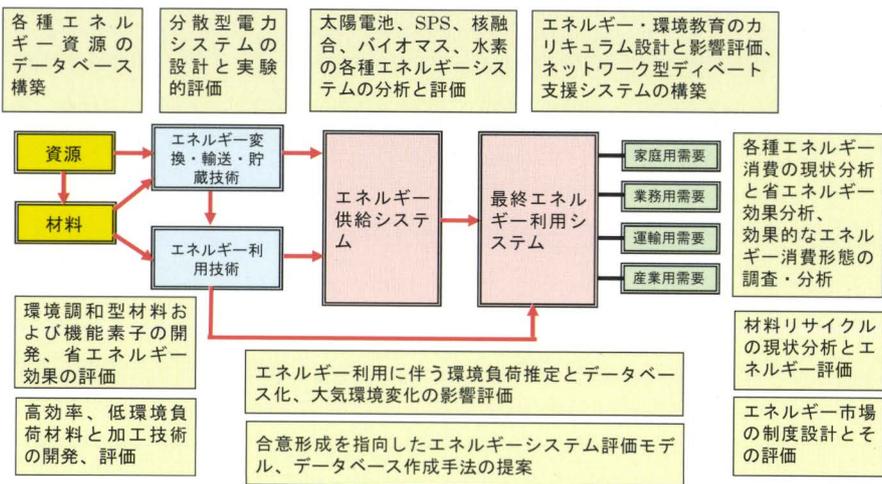


図4.6.2 21世紀 COE プロジェクトにおける研究内容一覧

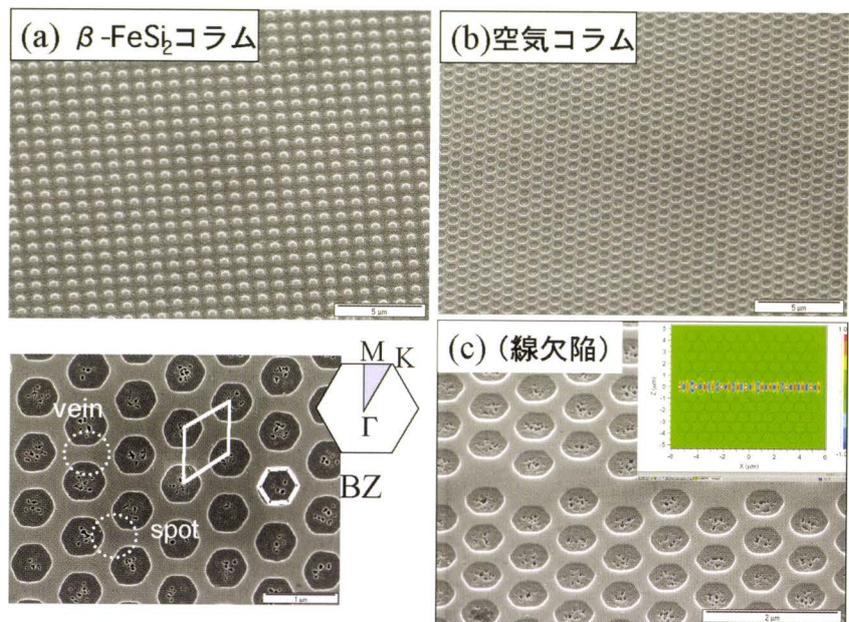


図4.6.3  $\beta$ - $\text{FeSi}_2$  / Si に作製された各種のフォトニック結晶 (2次元) (a)  $\beta$ - $\text{FeSi}_2$  コラム正方形格子、(b) 空気コラム六角格子、(c) 線欠陥の導入、挿絵: (右) 線欠陥部での TE 光波の伝播特性の評価、(左) 対応するブリルアンゾーン (BZ) とフォトニック周期構造 (vein&spot)

を含む。

##### 4.6.1.1 環境調和型半導体フォトニクスの開発

集積回路の進化は微細化によるサイズと機能の集積化の歴史である。しかしながら、微細化だけでは機能に限界が見え始めており、その問題の解決方策としてシリコン集積回路の電気配線に代わる新しい情報伝達回路: 光インターコネクションが考えられている。そのためには、シリコンテクノロジーではもっとも不得意であったフォトニクス素子 (発光素子、光変調器、光導波路、受光素子など) をシリコン基板上に作製する必要がある。そこで、環境調和型フォトニクス材料および将来型省エネルギー機能素子の創製を目指して、(1) 砒素など環境為害性元素を含まない環境調和型シリサイド光半導

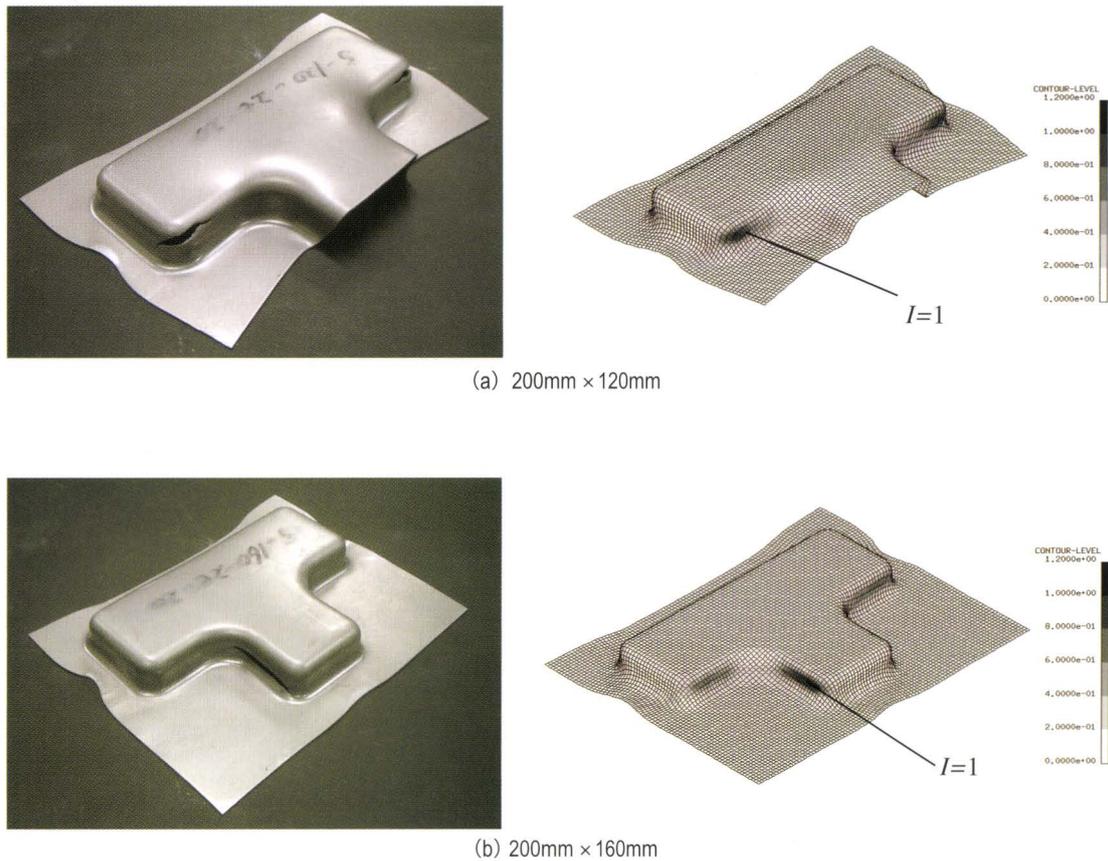


図4.6.4 高張力鋼板のT字成形の実験および計算結果

体の開発とその光エレクトロニクス集積回路への応用、  
(2) 省電力型高機能半導体素子 CAD とそれらのエネルギー評価を目標にして研究を行った。その結果、

- シリコンへの鉄イオン注入とその後のシリコン光集積回路での光源として $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>の可能性を検討し、従来比で約100倍の高輝度を得た。これは、ジュール損失を1万分の1倍に削減することに相当する。
- 将来のシリコン光集積回路への応用を目指し、屈折率の高いシリサイド半導体を利用したフォトニック結晶の作製にも世界で初めて成功した(図4.6.3参照)。

#### 4.6.1.2 自動車の軽量化のための材料評価技術

自動車の軽量化は低燃費化のために重要な技術であるが、アルミニウム合金やマグネシウム合金などの低密度材料の使用だけではなく、高張力鋼板のような高強度材料を使用して薄肉化を計り、材料体積を低減することによっても達成される。しかし、材料の高強度化は一般に低延性化をもたらすため成形限界の予測法の確立が重要となる。本課題では板材の成形限界予測に延性破壊条件式を適用する手法を提案し、高張力鋼板への適用の可能性を調べるとともに、初めて3次元有限要素シミュレーションによる成形限界予測を試みた。図4.6.4は、590MPa級の高張力鋼板のT字成形試験結

果を示すもので、材料寸法の違いによって破壊箇所が異なり、それぞれの場所での破壊発生が、その広がりも含めてよく予測されていることが理解される。この高張力鋼板の成形限界予測法の確立により軽量化設計が容易となった。

#### 4.6.1.3 分散電源の電力系統導入に関するシステム研究

太陽光、水素、バイオなどの再生可能な新エネルギー源は小規模分散電源として利用される可能性が高い。しかし、このような電源の系統への大量導入は従来の電力システムの形態を大きく変えるものであり、新たな系統形態・運用のシステム的な検討が不可欠である。そこで、まずこれらの分散電源の電力系統への導入形態について、多数台連系時の影響、単独運転、短絡容量増加、発電出力変動、電力貯蔵・制御機器との協調運転など、検討すべき問題点の調査・抽出を行った。そして、指摘された問題の解決方法を探るために電力系統シミュレータを用いて分散電源を含む負荷系統を構築し、分散電源を含む系統の運用状態の実系統情報からの把握手法、SMES(超電導電力貯蔵装置)を用いた負荷系統の単独運転検出手法および自立運転への移行手法を提案(図4.6.5)、模擬実験により有用性を検証

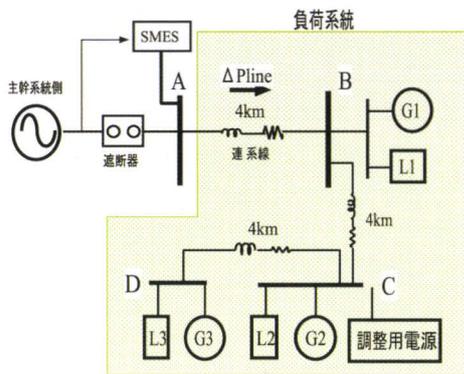


図4.6.5 SMESを用いた自立運転への移行実験システム

した。また、発電機端へ超電導限流器を導入したときの系統事故に対する発電機の保護機能、発電機設置による短絡容量増加の抑制効果などを模擬実験により確認した。

#### 4.6.2 エネルギー需給システムの環境影響評価のための環境負荷原単位データベース構築、およびその大気環境影響評価

エネルギー消費に伴う種々の環境負荷の推定とその影響評価は本ユニットに不可欠な要素技術である。エネルギーシステムの環境評価には、ライフサイクル思考に基づく分析手法、いわゆるライフサイクルアセスメント(LCA)手法が用いられる。エネルギーシステムの環境負荷をライフサイクル的に評価する上では、ライフサイクルインベントリ(LCI)データが不可欠であり、本課題では最新の産業連関表に基づき各種環境負荷のLCIデータベースを構築した。また対象によっては、環境への影響を地球温暖化、人の健康影響など種々の影響項目に対するインパクト評価(LCIA)として統合化することが必要となる。本課題では、特に化石燃料やバイオマス燃焼などにより排出される粒子状物質(エアロゾル)を対

象に、人の健康影響、気候変動に対する影響を環境リスクおよび放射強制力として定量的に算出する方法を検討し、他の環境負荷項目による影響と統合化する上での基礎データを提供することに成功した(図4.6.6参照)。化石燃料やバイオマス燃焼に伴って発生する粒子状物質(PM)のうち、特に、人の健康影響に強く関与する空気力学径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の微小粒子( $\text{PM}_{2.5}$ )のわが国における排出インベントリを、最新の2000年度版産業連関表の各部門について推計し、LCI分析のための環境負荷原単位を求めた(図4.6.7)。また、エアロゾルの気候変動(温暖化)への影響を推定するための物理量である放射強制力(正は加熱、負は冷却)を評価するためには、エアロゾルの物理化学特性・存在量の分布や時間変動などを正確に知る必要がある。しかし、従来、衛星によるリモートセンシングでは地上における特性取得が困難であった。そこで、地上における地表面反射率及びエアロゾル性状の測定と衛星観測により得られるエアロゾルの特性値を比較検証し、放射強制力を評価することが可能となった。これらの結果は地球気候モデル(GCM)への重要な入力情報を提供する。

#### 4.6.3 各種環境調和型エネルギー需給システムの分析・設計・評価

エネルギー需給システムの分析・評価に関わる研究については、独自にエネルギー消費量を調査すると共に、新規な着眼点に基づいた種々の再生可能エネルギーシステム、エネルギー利用システムの特性分析・最適化に関わる研究を実施、提言をまとめた。

日本の多くの産業においては鉄鋼業が直接、間接的に強い連関を示しており、その効率化が日本産業のエネルギー生産性の向上のために必要である。そのため、

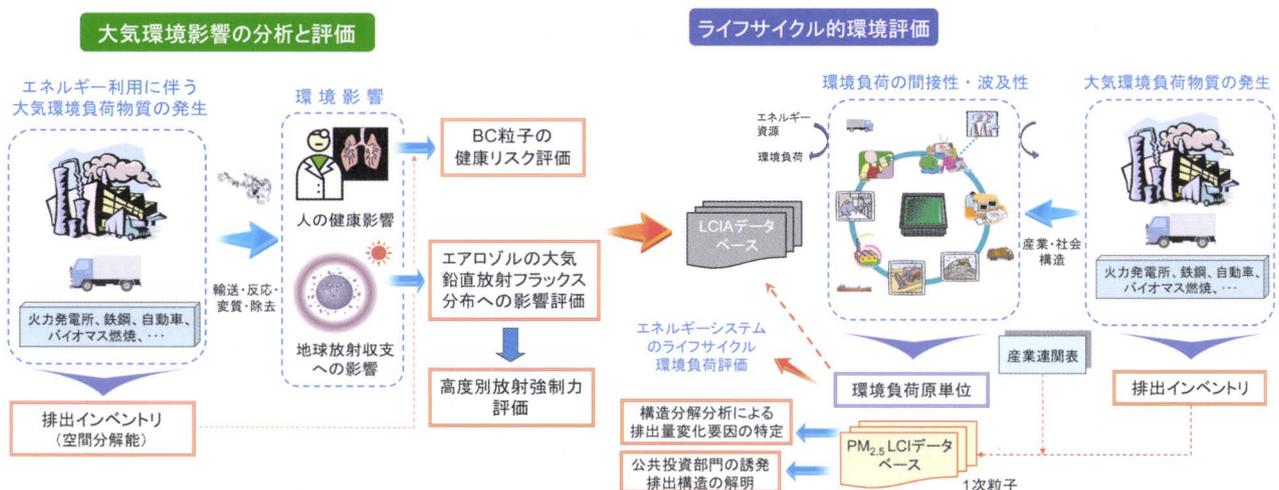


図4.6.6 エネルギー利用に伴う大気環境影響と環境負荷評価





図4.6.9 大学院におけるディベート授業風景



図4.6.11 中学における環境教育風景

(総合的な学習の時間における「ゴミから循環型社会を考えよう」という授業テーマにおいて、「教科カリキュラム」と「経験カリキュラム」の両方を含むエネルギー・環境教育カリキュラムを作成し、授業を実施した。)

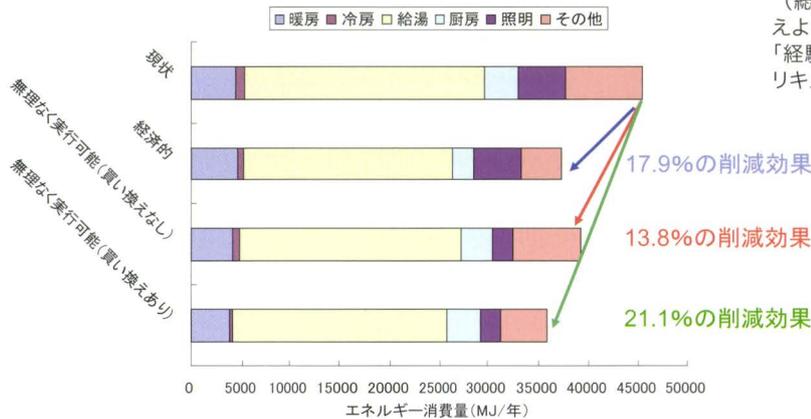


図4.6.10 省エネルギー可能性評価結果

いた学習が導入されており、本課題でもエネルギー科学の研究者や将来エネルギー・環境分野での第一線の研究者となることが期待される京都大学大学院エネルギー科学研究科の学生を対象として、情報通信技術を用いて効果的に上記能力の醸成を目指すネットワーク型ディベート支援システム (DEEV システム) を開発した。そして、アンケート調査などを通してその有効性を確認した。DEEV システムは (1) 事前入力、(2) 議論、(3) 評価・閲覧の3つのサブシステムから構成され、自分の立論をツールミン議論モデルに沿って主張、論拠、証拠の3項目に分けてシステムに入力する点に教育上の大きな特徴がある。

エネルギー消費行動を決定する社会の価値観に関する研究も重要である。エネルギー消費に関する種々のアンケート調査を広く実施して省エネルギー可能性をエネルギー消費に伴って得られる効用と共に評価し省エネルギー潜在量を推定した (図4.6.10)。また、エネルギー・環境教育に関しては、教育の有効性を評価するため中学校、高校において循環型社会や省エネルギーについての授業を行い (図4.6.11)、実行が困難な省エネルギー行動に対して教育が行動に与える影響を調査した。その結果、教育は個人の倫理規範に最も大きく影

響を及ぼし、その結果として省エネルギー・環境行動意図に作用することが明らかになった。さらに、テレビ・新聞などのマスメディアによる情報、自治体・大学・NPOが行う講座、あるいは図書館やインターネットといった外的情報源が重要であり、エネルギー・環境教育と共にこれらの情報源を整備することが、エネルギー・環境問題解決行動の促進に重要であることが明らかになった。

#### 4.6.5 合意形成促進を促進するエネルギー需給システム環境影響評価のための拡張可能なデータベースとモデル開発の枠組みとプロトタイプ構築

また、前述した相互理解に関わる問題意識に基づき、エネルギー・環境政策策定のための合意形成の促進を目的とした数理モデル分析の枠組みを提案 (図4.6.12)、プロトタイプ構築を行った (図4.6.13)。具体的には、

- エネルギー・環境システム評価のための拡張可能 (継承可能) なデータベースの提案とプロトタイプ構築
- エネルギー・環境システム評価の標準化手法の提案とプロトタイプ構築

を実施した。その基本的な考え方は、モデル分析の際に利用した情報を可能な限り第三者が容易に利用でき

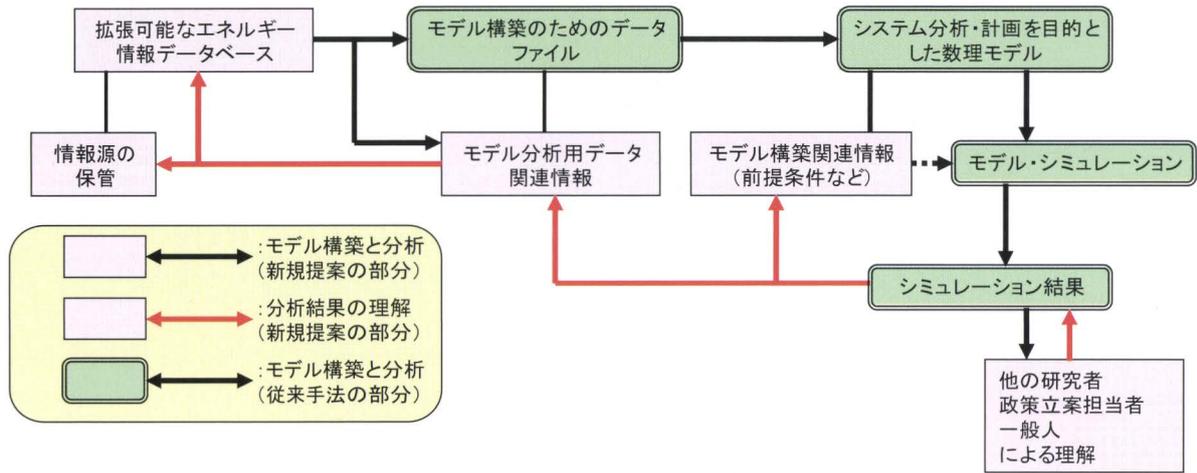


図4.6.12 提案するモデル分析の流れ図

る形式でモデル自身に付加するという点にある。個のモデル化の枠組に基づいて、タイ国におけるバイオマス利用のモデル分析を行い、バイオマス利用の際の市場政策の重要性を指摘した。また、伝えるべき情報の選択に関して、近畿地方における電力の二酸化炭素原単位 [ton-CO<sub>2</sub>/kWh] の推定問題を対象として伝達事項の項目を具体的に示した。このような合意形成を指向したモデル化の枠組は新規なものであり、今後、データベースの公開、情報共有を目的としたモデル化インタフェースの開発などを通して普及することが期待される。この二つの機能と、

- エネルギー・環境システム評価に関わる研究と教育の設計と実施
- エネルギー・環境システム評価のための組織形成

の二機能とを併せたものが本ユニットの最終的な基本機能となる。後半の二機能はエネルギー科学研究科の機能の一部でもある。

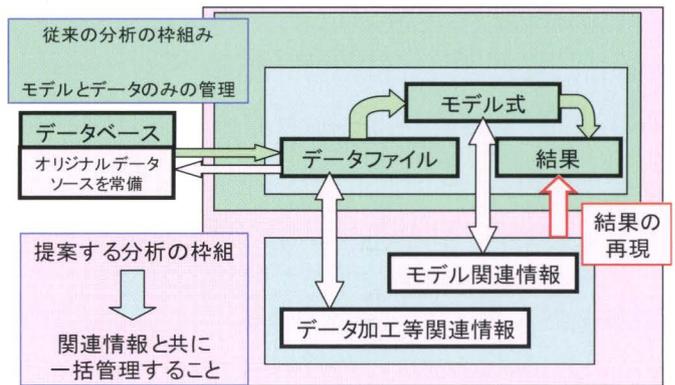


図4.6.13 提案するモデル分析の枠組み

はじめに

2030年に向けたエネルギー供給シナリオの策定

新エネルギー開発拠点の今後の展開

各事業における成果の概要

太陽電池・太陽熱温水システム  
ユニット

水素エネルギーシステム  
ユニット

人工太陽電池システム  
ユニット

次世代水素エネルギー  
ユニット

バイオエネルギー創製  
ユニット

エネルギー供給評価  
支援ユニット

教育拠点形成

国際連携推進拠点  
エネルギー情報センター

## 4.7 教育拠点形成

エネルギー科学研究科では、自然科学系と人文社会科学系が融合した新しいエネルギー科学の学域の創成を目標としている。博士課程では、それらの高度な科学的知見に基づいて、環境への負荷や経済性を考慮してエネルギー問題を解決する能力とともに、英語によるコミュニケーションやプレゼンテーションが自由にできる国際的な人材を養成する。そのために、多くの講義を英語で行い、国際共同研究に参加する機会や、国際シンポジウムでの発表機会を積極的に設ける。修士課程においては、カリキュラムを改善し、エネルギー科学教育のための体系的な教科書を発行し、教育内容を充実させる。また、積極的に留学生を受入れ、国際化を図る。

そのような目的を達成するため、本 COE プログラムでは、主として博士課程学生に対し以下のような活動を行った。

- ・ 公募型研究助成を通じ、競争原理・評価方式による若手研究者の育成。
- ・ 優秀な学生の RA、TA への積極的採用により、教育的訓練を通して、その報酬により経済的援助を行い、研究活動に集中できる環境を整備。
- ・ 国際エネルギー科学スクールの開催、および国際シンポジウムでの研究発表の奨励、旅費支給、国際的視野の持つ若手研究者の育成。
- ・ 国際交流の基礎となる英語能力を高めるため、外国人講師による英語研修。
- ・ エネルギー科学教育のための体系的なテキスト(日本語、英語)の執筆、発行。

以下に各々の活動について述べる。

### 4.7.1 公募型研究助成

博士課程学生を対象とし、科学研究費の若手研究計画調書に準じた計画調書を提出させ、計画調書に記載された研究計画・実施方法・研究業績などを審査し、平成14年度は55件の応募中25件を、平成15年度は51件の応募中24件を、平成16年度は48件の応募中20件を、平成17年度は44件の応募中21件(内1件は中途退学のため辞退)を、平成18年度は35件の応募中20件を採択した。

審査は、研究目的の妥当性(研究目的の検討、絞込みが十分に行われており、目的設定が妥当である)、研究実施の妥当性(研究の実施内容および実施方法が妥当である)、目的達成の可能性(研究目的を達成し、成果を挙げる可能性の高いことが見込まれる)の3項目について採点し(5点:非常に良い、4点:良い、3点:概ね

良い、2点:やや劣る、1点:劣る)、審査員全員の合計得点によって評価した。応募者の希望があれば、評価を開示している。助成額は、評価の高いものから順に70、50、30万円の3段階とし、年度総額を1千万円とした。1件当たりの額自体は小額であるが、研究における自立化、自主管理能力の育成にむしろ期待した。

助成を受けた学生に対しては、最低限本 COE プログラムが主催する国内および国際シンポジウムでの研究発表、および終了報告提出を義務付けた。終了報告書には受給期間中に投稿、掲載された論文リストを添付させた。これら5年間の記録は別途保管している。

初年度以降の大きな変化は、研究計画調書を学生がしっかりと書けるようになったことである。研究目的、実施計画などを綿密かつ具体的に記述できるようになり、このような競争資金を獲得する意欲が感じられるようになった。逆に、研究目的を具体化できていない学生の応募は少なくなり、応募者数は減少した。

### 4.7.2 RA、TA への採用

博士課程学生の経済的問題は避けて通れない。優秀な学生を RA (リサーチアシスタント) や TA (ティーチングアシスタント) として採用し、教育的訓練を通して、結果としてその報酬によって経済的援助を行い、研究活動へ専念できる環境を整えた。RA については指導教官から採用願いの出た学生について、学生から現在の研究状況や RA としての役割を文書で提出させ、エネルギー科学研究科の教育研究委員会で適性を判断したうえで採用している。平成14年度は5ヶ月の短期間であったため、試験的に40名という多人数を採用したが、平成15年度以降はその成果も踏まえて毎年15名程度を厳選した。TA は、学内経費による採用もあるため、若干名の採用にとどめた。

### 4.7.3 研究発表のための旅費助成

国内外での学会、シンポジウム等に積極的に若手研究者を派遣し、研究発表を通じて本 COE 活動を発信するとともに、若手研究者の研究意欲向上に努めた。このような助成があることで、これまで躊躇してきた海外での国際シンポジウムへの参加が容易になり、国際交流の機会を増やせた。外国での国際会議への派遣を中心に、平成15年度以降は毎年40件程度の旅費助成を行った。

## 4.7.4 国際エネルギー科学スクール

国際エネルギー科学スクールは、教育拠点事業の一環として、本 COE 対象の大学院博士課程の学生を海外の大学、研究機関、またはエネルギー関連学会等に派遣し、学術発表の機会を与え、現地の大学院生とのシンポジウム共同開催等により交流の場を設け、さらに現地の特色のあるエネルギー関連施設の見学などを行い、エネルギーや環境の分野で国際的に活躍できる人材を育成することを目的として開催した。

第1回は、平成15年6月に米国イリノイ州シカゴのイリノイ工科大学 (IIT) において開催した。参加者は学生9名、教員3名である。6月17日にはエネルギーおよび環境関連施設の見学として、Gas Technology Institute と Chicago Center for Green Technology の2箇所の見学を行った。6月18日には研究発表会を行った。プレポ

スターとして口頭発表を5分ずつ行ったあと、ポスター発表を行うという形式をとった。なお、日本側学生からは1名がポスター賞を受賞した。6月19、20日は2日間にわたって第3回シカゴ中西部再生可能エネルギーのワークショップに参加した。

第2回は、2004年7月20日から22日までタイのパトゥムタニ市にある Rajamangala Institute of Technology (RIT) において開催された。講演会は Student Presentation on Energy and Environment for Sustainable Development という名のもと、京都大学、RIT および The Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE) King Mongkut's University of Technology Thonburi の3者により共同で開催された。京大からは13名の博士後期課程学生が参加し、RIT は3名および JGSEE から15名の発表があった。これらの講演は2日間、“Solar and Wind Energy”、



スクール参加者 (IIT の発表会場にて)



ポスター発表会風景



発表会プログラムすべて終了後の全発表者

“Waste Minimization and Utilization”、“Air Pollution and Atmospheric Modeling”、“Climate Change”、“Fuels and Combustion”、“Energy and Environmental Policy”、“Materials Technology”の計7つのセッションに分けて一会場で行われ、約150名の参加者があった。第3日は Thailand Science Park 内にある National Science Technology Development Agency (NSTDA)を訪問した。本スクールを通じて、エネルギー・環境問題を議論の対象とする場合には、各国に特有の問題と、全世界的に共通して認識されている問題の二種類があり、相互に交流することの重要性を一同が再認識した。

#### 4.7.5 英語研修

国際的に活躍する人材を育てるための基礎として、日本人に欠けがちな英語を聞く、話す能力を向上させるため、特にプレゼンテーション能力を高めるため、ネイティブスピーカーを講師に招いて吉田、宇治両キャンパスにおいて、少人数クラスで英語研修を継続的に行った。また、学生がプレゼンテーションしている様子をビデオに撮り、講師が具体的に修正すべき点を指摘するなど、視聴覚機器も活用してきめ細かく指導した。このような指導を可能にするため、講師には教育経験豊富な人材を京都外国語大学の協力も得て採用した。



英会話教室風景

#### 4.7.6 テキストの執筆・発行

エネルギー科学教育のための体系的な教科書の執筆、発行を進め、平成15年度は、まず修士課程学生を対象とした日本語の教科書、「エネルギー社会・環境科学通論Ⅰ」「同Ⅱ」「エネルギー基礎科学通論Ⅰ」「エネルギー変換基礎通論」「エネルギー応用科学通論」を完成させた。これらは、それぞれ4専攻の修士課程の基礎的科目であり、またエネルギー科学研究科全体のカリキュラムの中でコアプログラムとして期待されているも

のでもある。16年度よりこのテキストを用いた授業が可能となった。さらに、16年度に「エネルギー基礎科学通論Ⅱ」を執筆、発行し、和文テキスト6分冊を完成させた。

「エネルギー社会・環境科学通論Ⅰ」(A4、110ページ)

「エネルギー社会・環境科学通論Ⅱ」(A4、106ページ)

「エネルギー基礎科学通論Ⅰ」(A4、148ページ)

「エネルギー基礎科学通論Ⅱ」(A4、198ページ)

「エネルギー変換基礎通論」(A4、184ページ)

「エネルギー応用科学通論」(A4、157ページ)

続いて、17年度には英文テキストを、エネルギー科学研究科の4専攻に加えて生存圏研究所も執筆し、以下の5分冊を完成させた。4専攻では同名の博士課程の英語講義でこれらのテキストを使用するとともに、生存圏研究所においても広く啓蒙活動に使用している。

“Advanced Seminar on Socio-Environmental Energy Science” (A4, 125 pages)

“Present and Future Trends of Fundamental Energy Science” (A4, 115 pages)

“Advanced Energy Conversion Science” (A4, 186 pages)

“Advanced Energy Science and Technology” (A4, 180 pages)

“Space Solar Power Satellite and Microwave Power Transmission” (Naoki Shinohara) (A4, 102 pages)

#### 4.7.7 今後の課題

以上が、教育拠点形成事業の主なものである。本プロジェクトでは、博士課程在学中のプログラムの充実を図ったが、しかしそれだけでは博士課程の根本的な解決にはならない。修士課程修了で就職すれば幸福な将来が約束されている状況で、あえて就職口がないかも知れない博士課程に進学することは、進学するほうもさせるほうも二の足を踏むのは当然である。現在の状況で、博士後期課程の定員充足率を上げるためだけに進学者を増やそうとするのは、教育者として無責任である。やはり、博士課程終了後、それに見合う就職先が確保されているという状況をつくらないと、この問題は解決しないであろう。大学自身はそれに反する改組、すなわち若手の助手ポストを減少させるという政策をとってきたことに、もっと反省すべきである。また、本当に社会が多くの博士後期課程修了者を必要としているのか、適正な博士後期課程定員の規模はどれくらいか、も含めて検討すべきではないであろうか。

## 4.8 国際(環境調和型)エネルギー情報センター

本21世紀COEプログラムでは国際(環境調和型)エネルギー情報センターを設け、当初から次のような目的を設定して活動を行った。全ユニットを含む総合的な国内国際シンポジウムを開催し、海外拠点による国際共同研究を進める。環境・エネルギーに関する各種データベース構築を国内外の調査に基づいて行う。また市民講座を定常的に開催するとともに、産学連携による共同研究の推進を行う。更に本COEでの各種の成果や報告を、広報誌およびニュースレターの発行やホームページを用いて国内外に向けて情報発信を行う。これらの目的に対する具体的な施策として、国内・国際シンポジウムや国際スクールを通して太陽・水素・バイオエネルギーに関する国際情報の収集と発信を行った。この際、大学院教育だけでなく、市民講座を開催し広く社会人教育にも寄与するとともに、海外拠点を設け各国の事情に合致したエネルギー研究開発への協力活動を行った。また国際エネルギー共同研究事業として、既存分野・組織の枠を超えて国際共同研究を推進するため、広く国内外から第一級の研究者(人文社会科学系を含む)を招聘し、先端的研究の世界的な拠点形成を行うとともに国際的な博士課程学生の教育の場とした。さらに、産官学連携研究事業を推進し、新産業創生のため大学シーズの産業界への効率的かつ積極的な技術移転を進めた。これらの研究活動をホームページなどで間断なく世に発信する広報活動にも注力した。具体的な実施内容と成果を以下に記述する。

### 4.8.1 海外研究拠点の設置

海外研究拠点設置の設置候補場所として、2002年度に5地域9研究機関が候補とされ、以後推薦された候補も含め、海外拠点として適切な場所を絞り込んだ。このなかでタイのラジャマンガラ工科大学の調査訪問を2002年12月11日から15日まで、吉川 暹教授ほか7名が行い、タイ国文部大臣、ラジャマンガラ工科大学学長、およびその他の関係者と面談し、交流および拠点設置の可能性についての話し合いを進め、2003年度にバンコクオフィスバンコク市内に設けるとともに、既に協力協定を結ぶラジャマンガラ工科大学(RIT)内に国際共同研究のための実験室を開設し、以後タイ在住の調査専門員の協力のもとで、アジアの多くの大学との研究協力を進めた。2004年度には、拠点設置以降の情報収集、研究交流の成果をもとに、バンコクオフィスを拠点に、タイにおけるCOEの国際事業などを共催した。また国際スクールをラジャマンガラ工科大学(RIT)

のパツタニキャンパスで実施した。12月には HuaHin で、JGSEE と(エネルギー環境合同大学院大学)の共催による SEE Meeting (持続可能性エネルギーと環境国際シンポジウム)を開催した。また、RIT 内に設けた

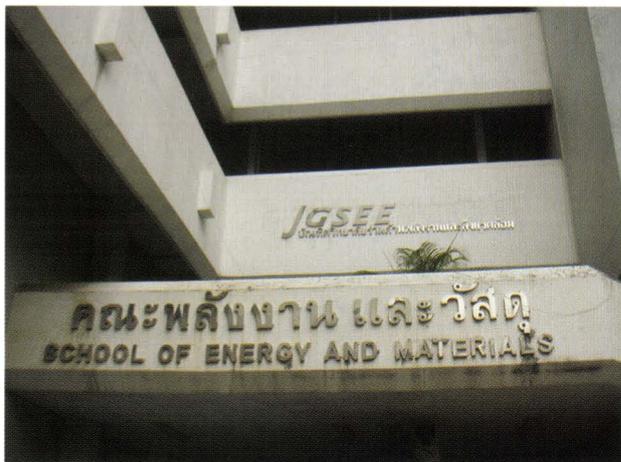


図4.8.1 KMUT 内に設けられた5大学からなるエネルギー環境合同大学院大学

また、2003年11月に開設したバンコクオフィスは、バンコク市内での諸大学との連携拠点、調査研究拠点という所定の役割を果たしたことから、同じく2003年に開設した研究拠点との連携効率化のため、RMUT パトムタニー校(バンコク近郊)への移転を行った。



図4.8.2 オフィスでの共同研究打ち合わせ風景

はじめに

2030年に向けた  
エネルギー戦略  
シナリオの策定新エネルギー関連拠点の  
今後の展開各事業における  
成果の概要エネルギー環境合同  
大学院大学エネルギー環境合同  
大学院大学エネルギー環境合同  
大学院大学次世代水素エネルギー  
ユニットバイオエネルギー創製  
ユニットエネルギー環境合同  
大学院大学

教育拠点形成

国際(環境調和型)  
エネルギー情報センター

共同研究ラボを整備し、バイオマス資源量の調査や太陽エネルギー利用などの共同研究をスタートした。その一環として環境適合型材料開発に向けラボ拠点長のソンマイ工学部副学部長を招聘し、エネルギー材料研究における共同研究を開始した。2005年度にはバンコク拠点において太陽エネルギーなどの新エネルギー技術開発をすすめるとともに、アジア地域との連携をすすめた。特に、タイ在住の調査専門員の協力のもとで、バンコク周辺の大学との研究協力を行った。KMUT（キンモンクット大学）や JGSEE、RIT において、京大での研究活動を紹介するとともに、大気汚染物質サンプルの微細構造・成分調査などを共同で進めた。2006年度は、JGSEE や RIT などの関連する大学との連携事業を実施した。さらに、海外拠点における情報収集、研究交流の成果をもとに、タイにおける COE の国際事業として11月にバンコク市で第二回目の JGSEE と京大の国際シンポジウムを開催した。多数の参加者が集まり海外拠点を足がかりにした活動の成果と、アジアにおいてのこれまでの活動が根付いたことを感じさせるものとなった。

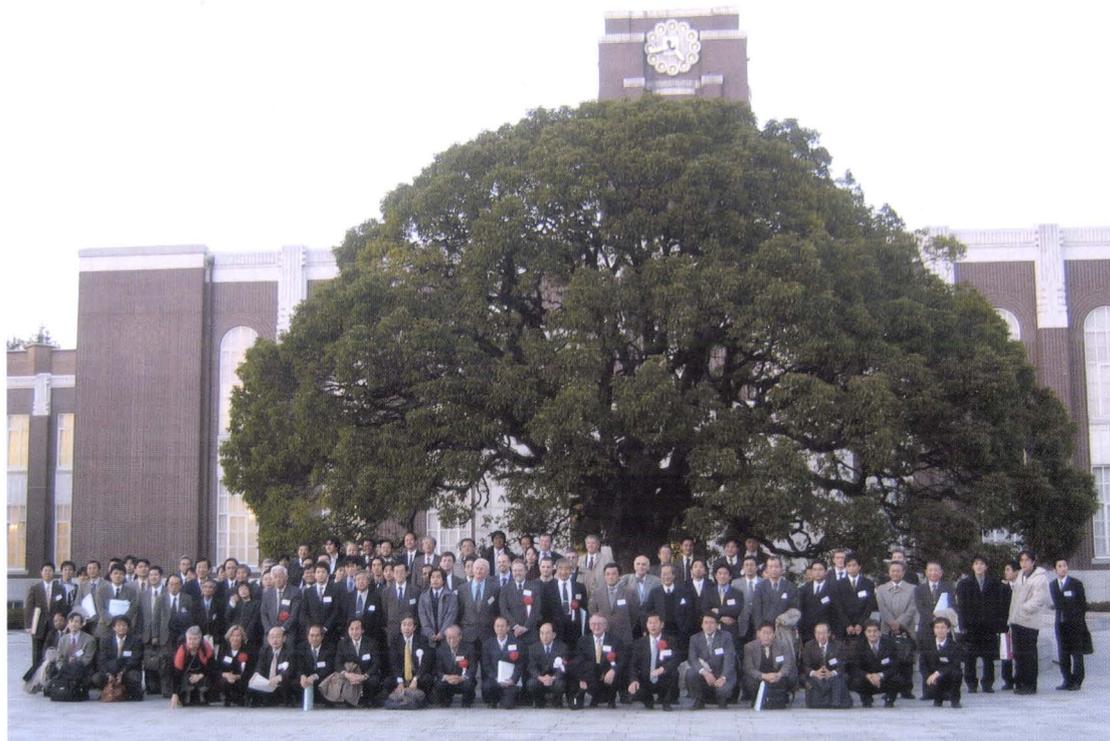
#### 4.8.2 国際エネルギーシンポジウムの開催

本21世紀COEプログラムでは国際シンポジウムや国際スクールを通して太陽・水素・バイオエネルギーに関する国際情報の収集と発信を行い、エネルギー研究開

発の推進を図った。

#### ■環境調和型エネルギーに関する国際シンポジウム

環境調和型エネルギーに関する国際シンポジウム (The 1<sup>st</sup> International Symposium on Sustainable Energy System) を三回にわたり開催した。アメリカ合衆国、カナダ、フランス、オランダ、フィンランド、ノルウェー、オーストリア、タイ、インドネシア、韓国、中国、ブラジル等から多くの外国人研究者が参加した。第一回目は、平成15年3月13-14日にキャンパスプラザ京都（京都）にて開催し、358名の参加者を得て活発な討論がなされた。初日には、本COEプログラムリーダーによる概要が説明され、太陽エネルギー、水素エネルギー、バイオエネルギー、エネルギー評価に関する国際的なリーダーとして著名な研究者による基調講演がなされた後、全ての分野の研究成果を一同に集めたポスター発表（112件）が行われ、それぞれの分野の専門家のみならず、分野を越えた幅広い視点からの討論、意見交換が活発に行われた。2日目には、6会場に分かれての研究討論会が開催され、より専門的な立場からの活発な討論が行われた。また、ポスター発表、2日目の研究討論会においては、多数の学生にも発表、討論する機会が与えられた。第2回目の同シンポジウムは、平成16年12月17-18日に京都大学時計台記念館にて開催した。各国からの参加者55名を含む357名の参加者があり、太陽エネルギー（太陽光発電、宇宙



太陽光発電、プラズマ)、水素エネルギー、バイオエネルギー、エネルギー評価に関する幅広い視点からの活発な討論、意見交換がなされた。初日は、辻副学長(当時、以下開催当時の役職)、笠原本COEプログラムリーダーの挨拶に始まり、当COEの各研究ユニットの研究の進捗状況についての講演がなされた。午後には、6名の招聘外国人学者による基調講演が行われた。2日目には、当COEプログラムの各研究ユニットに分かれた分科会が5会場で開催され、個々の研究成果の発表を含め、より専門的な立場からの議論、意見交換が行われた。第3回目は、平成18年8月30日-9月1日に京都大学時計台記念館にて行われた。海外からの参加者54名を含む参加者総数は439名であった。初日と2日目の午前中は、百周年記念ホールでの全体会議を行った。尾池総長の挨拶により開始され、吉川本COEプログラムリーダー、Numyoot ラジャマンガラ工科大学(タイ)学長の挨拶の後に、午前中は本COE研究ユニットの研究進捗状況についての講演がなされた。初日午後と2日目午前中には、世界各国の著名な研究者による基調講演がなされ、幅広い視点から“持続可能なエネルギーシステム”について活発な討論が行われた。初日午後のポスターセッションでは、123件のポスター発表が学生によりなされ、2時間に渡って活発な議論が行われた。2日目午後と3日目には、6研究グループに分かれての分科会が開催された。各研究グループの具体的な研究成果の発表とともに関連する学外からの研究発表が行われ、十分に時間をかけてより専門的な立場からの活発な討論が行われた。

#### ■「持続可能なエネルギーと環境」国際会議(SEE Meeting)

第一回目は平成16年12月1-3日にタイ国のホアヒン(Hua Hin)にてJGSEEと京大エネルギーCOEが共催した。SEEとは、Sustainable Energy and Environment(持続可能なエネルギーと環境)の略であるが、「皆が一堂に会して」という「見る、出会う」の意味が込められた。会議の目的は、東南アジアを中心にエネルギーと環境分野に従事する研究者、技術者、政策立案者が集うことによって、「持続可能なエネルギーと環境」についての研究交流を深めるとともに、アジアにおける国際連携を進める事であった。共同開催のパートナーであるJGSEE(タイ国エネルギー環境合同大学院大学)は、1998年にタイ国のエネルギー・環境問題に答えるために、5大学の合同大学院大学として発足したユニークな組織である。2004年2月には当COEプログラムとの間で協力協定が締結されている。本合同国

際会議は、この協定に基づき、2つの組織が協力して、持続可能エネルギーとその関連科学技術の現時点での進歩を発表し、科学技術によるアジア太平洋地域のエネルギー環境への寄与を検討することをアジア各国に呼びかけ実現した。会議は、320人を越える参加者の下、18カ国から200件を越える発表が行われた。第二回目は平成18年11月21-23日にタイ国バンコクにて開催した。本学より派遣の研究者、学生のほか、本学以外の研究機関の共同研究者、学生を併せて、総数350名の出席者数であった。日本以外からの出席者の出身国は、タイを筆頭に、マレーシア、カンボディア、インドネシア、バングラデシュ、インド、イランのほか、オーストラリア、アメリカ合衆国、イギリスなど20カ国以上であり、国際的な視点から活発な意見交換が行われた。先進エネルギー技術、再生可能エネルギー技術、公害および気候変動、エネルギーおよび環境マネジメントおよび政策などに関する230件の研究発表の内、160件が口頭発表で行われた。6カ国のカントリーレポートも発表され、産官学のいずれにおいても国際協調のためにネットワークを構築する重要性を再認識する貴重な機会を生むことができた。

#### 4.8.3 国内シンポジウムの開催

持続可能な社会を実現するためには環境調和型エネルギーシステムを実現し、未来にわたってエネルギーの安定な供給を確保することが緊要である。本プログラムが採択されて以来、本稿執筆時点までの4年間に亘り、2回の国内シンポジウム(東京および京都)を開催した。

第1回国内シンポジウムは平成15年1月21日に本COEプログラムを全国的に紹介することを目的として、東京有明のTFTホールで開催した。参加者は282名(一般137名、京大関係者145名)であった。シンポジウムに先立ち、本プログラムのベースとなった研究内容について6件のポスター発表を行い、熱心な議論が交わされた。シンポジウムは、長尾真京大総長(当時、以下役職は開催時点のもの)の開会挨拶に続き、小松親次郎文部科学省高等教育局主任大学改革官に来賓挨拶を戴いた。その後、各ユニット、事業の説明を行った。また江崎玲於奈芝浦工業大学学長から「限界への挑戦～テクノロジー・イノベーション～」、榎本晃章東京電力副社長から「21世紀のエネルギー問題を考える～効率利用最適化社会を目指して～」、西岡幸一日本経済新聞社論説副主幹から「産業記者から見るCOE」と題したご講演をいただき、大きな盛り上がりを見せた。

第2回国内シンポジウムは、プログラム採択後、1年



図4.8.4 国内シンポジウムの様子

半の時点で構成メンバー全員による成果報告会をかねて、平成16年3月8-9日の2日間、京大会館（京都市左京区）で開催した。本COEプログラムの目的や方法、成果等について参加者からの批判、批評を受ける機会とすることが大きな目的であった。同時に産学分野の有識者に「環境調和型エネルギー」に関する講演を依頼するなど、広い視点からの指導的意見を取り入れることも目的とした。参加者は250名、展示パネルは150枚を数える盛況となった。初日に尾池総長の挨拶、各ユニット・事業の全体説明に引き続きトヨタ自動車株式会社瀧本正民専務取締役から「将来の自動車」、また大阪工業大学西川学長から「エネルギー科学技術の発展と人材育成」と題された基調講演が行われ、夕刻、諮問委員会が開催された。それに引き続き、ポスターセッションと懇親会が開催された。外部からトヨタ自動車、関西電力、大阪ガス、日立造船、シャープ、三菱電機などの多数の企業関係者が京大の教官学生と活発な議論が繰り広げられた。また、2日目午前中は著名な研究者による招待講演を中心に進行し、環境調和型エネルギーに関してより具体的な研究発表が披露された。日頃は文献でしか知りえない他機関の研究者や企業の第一線の研究者と直接接触できるので大学院生諸君は大いに触発され、ロビーで議論の輪が広がった。

これら国内シンポジウムの開催、共催事業に引き続き、最終年度の平成19年（3月12-13日）には本COEプログラムの総括として、これまでの活動、成果、拠点体制の確立についての普及及び広報をすべく最終報告会を京都大学時計台記念館にて開催する。

#### 4.8.4 エネルギー環境調査

研究教育拠点としての基本的な機能は、人と情報がそこに集まり、そこから能力のある人が育ち、新たな付

加価値を有する情報が発信されることである。そのために不可欠な基盤設備として、必要な情報を容易に入手できる研究教育環境、すなわち「研究教育情報サーバー」がある。既存のデータであっても、その入手に何ヶ月も要する場合がある。また、各種一次データの統計処理のノウハウも効果的に引き継がれているとはいえない。研究情報の利用効率の善し悪しは、特に複合領域研究においては新たな研究の誕生や成否を左右するといっても過言ではない。教育環境についても同様である。このような非効率的な研究教育環境を改善し、研究教育の労力を有意義な作業に注ぐことができるようにすべきである。ただし、膨大な情報を一朝一夕にデータベース化することは不可能であり、まずは、エネルギー環境に関する既存情報、埋没情報（既に存在するが第三者の目に触れることのない情報）を大学内外の研究者および学生に提供できるプロトタイプ構築を目指した。具体的には、

- ・ 有用な公開可能データのデータベース化とネットワーク上での提供、
- ・ 各研究室所蔵データのリスト作成、
- ・ 公開困難な情報については、入手方法、所蔵場所などの情報を提供

から手がけた。内容としては、超長期、国別、種類別、年度別エネルギー需給量、各種エネルギー資源埋蔵量、各種機器効率、用途別エネルギー需要、エネルギー変換効率、エネルギー変換設備、各種LCI結果、などを想定した。なお、この情報サーバーの構築作業を通して、研究教育情報サーバーに付与すべき機能についても検討を進め、付加価値のある情報の発信を探った。

エネルギー需給データベース、エネルギー変換・利用技術データベース、エネルギー研究情報データベース、の3データベースについて、その作業の枠組みを検討し、実際に調査、入力することにより各データベースのプロトタイプを構築した。そのデータや情報については、できる限り一次データ、一次情報まで遡って調査を行った。

エネルギー・環境問題の対応策は、その国、歴史、地理、文化などの特徴によって大きく異なる。そのため、検討の対象とする地域の特徴を考慮した問題の分析が重要となる。そこで、タイ国バンコク市に開設された21COE拠点事務所を中心として、JGSEE（Joint Graduate School of Energy and Environment）の協力を得て、バンコク近郊の籾殻発電所2箇所を見学し、その発電所の運転特性、そして籾殻流通の実態についてインタビュー調査を行った。また、籾摺場（Rice-Mill Plant）5箇所を訪問し、籾殻の販売経路の調査を行っ

た。また地域特性を考慮した分析と並行して、タイ国全土での再生可能エネルギーの分布データの調査、利用可能性評価を目的として、リモートセンシングデータの活用を検討を開始した。具体的には、宇宙航空研究開発機構（JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency）の協力を得て、タイの GISTDA（Geo-informatics and Space Technology Development Agency）などを訪問するとともに、関連する利用可能データの調査とその利用可能性の検討を行った。さらに、エネルギーシステム評価モデルにおける利用を目的として、エネルギー変換などに関わる新技術の特性データベースの構築作業を進めた。多くの研究者による更新可能な永続的データベースとするために、著作権を考慮しながら、オリジナルに近い情報源の確保に留意した。

#### 4.8.5 産官学連携に関わる事業概要

平成14年9月18日に開催したエネルギー科学研究科・エネルギー理工学研究所産学連携シンポジウムの成果を引き継ぐ形で、本COEにおいて産学連携シンポジウムを継続的に開催することで、産学連携の強化をすすめた。また、既の実績のある事例について産学等共同研究の状況の紹介等も行った。また毎回、産学連携の観点から大学、企業からさまざまなテーマについて特別講演を設定した。技術シーズは、まず口頭でのプレゼンテーションを行い、その後ポスター形式での出展を行った。毎回、活発な情報交換が行われ、いくつかのシーズについては、共同研究等の話に発展した。単なるシーズ提供にとどまらず、産業界と共同で社会のニーズを吸収・昇華して新しい技術を創造することを目標とした。最終年度には参加者も120名を超え、例年同様熱気にあふれる会であった。経営トップから研究者まで多彩な顔ぶれで、職種も多岐にわたっており、第4回を数えた



図4.8.5 講演中の会場の様子

この産学連携シンポジウムが、産業界に定着したことが窺われた。以下に開催データを記載する。

表 産学連携シンポジウムデータと特別講演

第一回 平成15年11月19日 提案技術シーズ23件、参加人数100名超 松村雄次大阪ガス株式会社副社長「エネルギー産業における環境技術への取り組み」 長尾真京都大学総長「21世紀における京都大学の研究」
第二回 平成16年11月24日 提案技術シーズ23件、参加人数70名超 松重和美京都大学副学長（国際融合創造センター長、ベンチャービジネスラボラトリー施設長、知的財産企画室長、工学研究科教授）「京都大学を核とするイノベーション創出拠点形成」 伊藤靖彦同志社大学教授（京都大学名誉教授、（株）イオックス取締役）「大学発ベンチャー（株）イオックスの設立と、発展へのロードマップ」
第三回 平成17年11月24日 提案技術シーズ21件、参加人数70名超 松本紘京都大学副学長・研究担当理事「環境調和型エネルギーの産官学民連携-京大21COE プログラムの光る個性に期待する-」 田邊敏憲株式会社富士通総研経済研究所主席研究員（京都大学エネルギー科学研究科客員教授）「自給率50%に向けた産業構造改革と政策措置」
第四回 平成18年12月11日 提案技術シーズ17件、参加人数120名超 吉川 暹エネルギー理工学研究所教授「持続可能なエネルギーシステムを目指して」 清水正文シャープ株式会社技術本部新材料技術研究所所長「太陽電池技術開発の現状と将来展望」

#### 4.8.6 市民講座

21世紀のエネルギー・環境問題に対峙し、エネルギー少消費型社会を形成して持続可能な社会の基盤を築くためには、産官学の努力とともに、国民一人一人の自覚と協力が不可欠である。この観点から、本COEにおける社会的活動の一環として、新エネルギーや環境問題をテーマに、第1回（平成15年10月25日京都市）から第47回（平成17年9月4日愛媛県松山市）まで全国で市民講座を開催した。

この講座では、各回で講演内容に沿ったテーマを設け、基本的に京都大学からの講師2名と地元講師による講演に加えて、講演後に総合討論を実施し、ご参加いただいた皆様とともに各地域の特徴・課題等を踏まえた議論を展開した。これらテーマの設定、地元講師の紹介、市民への広報、等については、自治体のエネルギー・環境対応部局の方に多大なご支援をいただき、それぞれ特徴のある市民講座となった。また、広報活動には、読売新聞および地元新聞への掲載や、開催地域近隣の教育機関への案内のほか、自治体関連のNPO法人、な

ど各種市民団体にもご協力いただき、全体で3000名近い方々の参加を得ることができた。地元講師として、主にNPO・市民団体や地元の大学、自治体関係者の方々から各地域の特徴を捉えた話題をご提供いただき、総合討論に加わっていただいた。参加者は50～70才の方が多かったが、30才前後の方も多数お越しいただいた。また、開催規模として大半は30～50名で行ったが、100名を越えてご参加いただいた場合も数回あった。この活動を通して、エネルギー問題、環境問題を市民の皆様にごできる限り易しく説明し、理解していただき、それにより少しでも多くの方が自分達自身の問題として捉え、エネルギーの削減・環境の保全に取り組んでいただくことに貢献できたと考えている。

さらに、全国47都道府県での開催が一回りしたことを機に、それまでCOE事業の一環として取り組んできた市民講座の活動を総括して、今後の発展に繋げるためのシンポジウムを企画し、2005年11月11日に京都市で開催した。この総括シンポジウムでは、市民講座の内容と成果を報告するとともに、基調講演として日本および京都における地球温暖化防止への対応についてお話いただいた後、国、自治体、市民団体、大学関係者によるパネルディスカッションを行って、国としての様々な取り組みや、自治体および民間レベルでの環境活動、大学の役割、等を討論し、民産官学の連携について市民の皆様とともに考えた。

#### 4.8.7 広報事業

出版物としての広報誌（和文版・英文版）に加えて、京都大学大学院エネルギー科学研究科、エネルギー理工学研究所および生存圏研究所のホームページで逐次21世紀COE「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」に関する最新情報の公開を行った。また、速報性に配慮し、2003年度以降はニュースレターを年2回、全7号まで発行し、英語版も発行した。



広報誌（和文版・英語版）

#### 4.8.8 今後に向けて

以上が、国際（環境調和型）エネルギー情報センターの主な活動である。エネルギー問題は極めて国際的であるため、エネルギー・資源・環境に関する正確な情報を収集して現状・将来展望を正しく認識し、政策・立案・提言に寄与するとともに、得られた研究成果をわかりやすい形で提供していくことが重要である。このような観点のもとに行った国際シンポジウム、国内シンポジウムでは、本COEでの研究成果を随時発信でき、重要なテーマについて高いレベルでディスカッションが行うことができた。参加者も多く外国人を含め、学生も参加することで教育の場としても機能させることができた。多くの学生が視野を広げ、そのような場で受けた刺激は研究にも反映したに違いない。また、情報発信とともに、共同研究を生み出す機会とした産学連携シンポジウムは大いに盛り上がり、最終年度には特に多くの参加者を集めるに至った。われわれの活動が認知され、定着したと感じた。同様に市民講座での開かれた教育もかなりの反響があった。このように、本センターでの多くの事業の成功から、本COEプログラムにより拠点形成は達成できていると感じられるが、今後の継続のためには、少なくともこれまでと同様の努力を我々は続けていかねばならない。



和文ニュースレター表紙



英文ニュースレター表紙



21世紀 COE 「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」

「新エネルギー技術の可能性を求めて」

編集総責任者：日比野光宏

デザイン／レイアウト：清水俊洋、砂連尾瞳

編集校正：十倉紫野、清水俊洋、砂連尾瞳

印刷：西湖堂印刷株式会社

発行代表者：

京都大学エネルギー理工学研究所 吉川 暉

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

平成 19 年 3 月 9 日発行

<http://energy.coe21.kyoto-u.ac.jp/>

