ISSN 0286—3162

季報 エネルギー総合工学

Vol. 27 No. 2 2004. 7.

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

目　　次

【巻頭言】　長期的かつグローバルな視点に立った
エネルギーの安定供給
中部電力株式会社　代表取締役副社長　伊藤隆彦 …1

【理事長対談】　エネルギー，環境，経済の調和
ー世界に先行する日本モデルー
国際問題評論家　小関哲哉
㈶エネルギー総合工学研究所 理事長　秋山守 …2

【寄稿】　これからのエネルギー文明学—人間と社会からの発想—
一橋大学大学院商学研究科　教授　栗原史郎 …22

【寄稿】　中国のエネルギー事情について
㈶日本エネルギー経済研究所
アジア太平洋エネルギー研究センター所長　藤冨正晴 …32

【寄稿】　わが国の温暖化対策と排出量取引模擬実験の結果について
㈱三菱総合研究所　地球環境研究本部
サステナビリティ研究部環境政策・経営研究チーム
チームリーダー　伊藤一道…42

【調査研究報告】　原子力の持続的エネルギー源 としての重要性
プロジェクト試験研究部　主管研究員　氏田博士
プロジェクト試験研究部　主管研究員　波多野守 …53

【調査研究報告】　人工ゼオライト製造プラントの開発
プロジェクト試験研究部　嘱託研究員　森山亮 …64

【内外情勢紹介】　炭層へのCO_2隔離とECBM
プロジェクト試験研究部　副部長　黒沢厚史 …73

【調査研究報告】　産業間連携による省エネルギーについて
プロジェクト試験研究部　主管研究員　塙雅一 …86

【行事案内】　第20回エネルギー総合工学シンポジウム …… 97

【研究所の動き】 ……98

【編集後記】 …… 100

巻頭言

長期的かつグローバルな視点に立った エネルギーの安定供給

中部電力株式会社　代表取締役副社長　伊　藤　隆　彦

エネルギーは国民生活や経済活動の基盤をなすもの。しかしながら，その大部分を海外に依存しているというのがわが国のエネルギー供給構造という現実。アジア諸国のエネルギー需要の急増や湾岸戦争以来の石油価格の暴騰などに見られるように，わが国だけでは解決できないリスク要因が常に存在する。

経済活動のグローバル化に伴って，電力エネルギーの高コスト構造を是正するため，電力小売市場の自由化が進められ，それが一層加速している。

一方，電気事業者には電力の安定供給や信頼度も，当然求められている。自由化を含めどう経営環境が変化しようとも，各エネルギー源の持つ種々のリスク，環境に対する負荷の問題，設備産業ゆえの長期的な視点は欠かせない。

将来的に少子化に伴う人口減少もあり，エネルギー消費はこれまでのようには伸びないであろう。発電設備の建設ラッシュは一段落し，保守の時代を迎えた。もちろん長期的な技術開発は必要であるが，既存技術の継承や設備の徹底的な活用こそが重要であろう。

原子力においても，例えば，超長期の課題であるバックエンド事業などについて自由化との共存を図る条件整備が検討されているように，取り巻く環境が変化してきている。

昨年10月，エネルギー基本計画が閣議決定されたが，原子力発電は安全確保を前提に基幹電源として推進すること，また，原子燃料サイクルの推進について的確に取り組むことが明記され，国の重要な政策として再確認された。重要なエネルギーであり，今後とも着実に進める必要がある。しかし，原子力が長期にわたってその役割を果していくためは，たゆまぬ技術向上の気概に裏打ちされた安全運転の積み重ねや，社会との関係において透明性の確保・説明責任の遂行を地道に続けていかなければならない。

今後とも，長期的かつグローバルな視点に立って，エネルギーの安定供給のために努めていきたい。

理事長対談

エネルギー、環境、経済の調和

ー世界に先行する日本モデルー

小　関　哲　哉（国際問題評論家）

秋　山　　守（(財)エネルギー総合工学研究所 理事長）

はじめに

戦後急速に進んだ日本の石油文明化

秋山　まず，先生から自己紹介をかねて，ご専門分野，さらに地球温暖化問題やエネルギー問題に深く関心を持つに至られました経緯など簡単にご紹介願います。

小関哲哉氏　略歴

1933年（昭和８年），山形県西村山郡大江町左沢生まれ。1956年早稲田大学政経学部卒。1952年時事通信社入社。政治部，外信部，カラチ特派員，ワシントン特派員などを経て，1973年ワシントン支局長。1979年外経部次長兼「アジア情報」編集長，1980年内外情勢調査会編集部長，1986年同理事，事業本部編集部長，1988年時事通信解説委員などを経て，時事総合研究所取締役主任研究員，のち客員研究員。国際問題研究所ATWI所長。

共著，訳書に『遷都・分都、日本は地方で伸びる』（時事通信社），『アメリカ犯罪株式会社』（時事通信社），『日本を裸にする』（二見書房），『日本ほど重要な国はない』（サイマル）など。

小関　私は山形県左沢（あてらざわ）という町の出身です。左沢というのは，NHK朝の連続ドラマで有名なおしんの故郷でもあります。もっともおしんは架空の人物ですが，似たような境遇の方は沢山いらっしゃっいました。一言で言うと，東北地方の典型的な山里で，人口は8,000人ぐらいです。

痛感するのは，私が少年時代を過ごした頃の故郷では石油の恩恵をほとんど感じなかったということです。農作業は大体人力でした。それから，積雪２～2.5mという豪雪地帯で，２階の窓から家に出入りしたのを覚えています。

ところが，敗戦後の日本は石油文明化し，今では，石油がなければ田植えも脱穀もできません。農家の暮らしも町場の暮らしも全部石油の恩恵にあずかって，それがまったく当たり前になってしまいました。その結果，目に見える変革が起きています。

日本中，また地球全体でも積雪量がどんどん減ってきました。今では雪のない正月もあるし，１mぐらいの雪でも「大雪だ」と騒ぐようになりました。

カラチで初めて知った環境問題ー命の水

小関　昭和31年，早稲田大学卒業と同時に時事通信社に入りました。政治部を経て外信部に行き，最初に特派員としてカラチに勤務したのです。当時はカラチがパキスタンの首都で，物凄いカルチャーショックを受けました。日本はアジアの一部だと頭の中では考えていたのですが，

小関 哲哉 氏

（国際問題評論家）

実際にカラチに行ってみると，「こんな違う所があるのか。同じアジアと言えるのか」という感じでした。日本との最大の違いは，降雨量が圧倒的に少なくて乾燥地帯だということです。私の田舎は山形県のほぼ真ん中で，どちらを見ても山また山です。森林被覆率が75～80％あり，日本全国の66％をはるかに上回っています。それを当たり前と思っていました。パキスタン，さらに隣のアフガニスタンは樹木らしい樹木がない乾燥地帯で，それで初めて，「環境とかエネルギーというのは大変なものなんだ」と肌で感じました。要するに，彼らにとっての大問題は，石油ではなく水なのです。水がないと生きられないですよね。日本にいる時はまったく意識しないで使っていた水が，これほど貴重なものだというのを痛感しました。

秋山　私はパキスタンの首都がイスラマバードに替ってから行ったことがあります。その時の印象は非常に強烈なものでした。パキスタンにはカシミール高原の領有権を巡るインドとの軍事問題もありますが，同時に，自前の技術，エネルギーを持つために相当高度な研究投資を行っており，その状況を垣間見て，本当に国としての強い意志を感じました。

小関　パキスタンは，天然資源には恵まれていません。インダス文明が栄えていた頃に流れていた２本の大河のうち，東側の１本が気候変動による乾燥化で干上がってしまい，インダス文明は地上から消滅しました。今残っているのはモヘンジョダロの遺跡です。水もない，石油も出ない。

エネルギーというのは大変なものなんだと思ったのは，彼らの主食である「ナン」（インド）または「チャパ」（パキスタン）の作り方を知った時です。石造りの竈の内側に粗引きの小麦粉を練って作ったおせんべいの化け物みたいなパンを張りつけて焼くのですが，一般庶民は道端に落ちて乾燥しているラクダの糞を燃料にしています。火力はありますが，焼き上げたナンにもなんとも言えない香りが付いておりまして，私はとても食べる気になれなかったですね。

秋山　最近，バイオマスの中に牛糞も入っています。ラクダの糞も燃料として長く使ってこられた。量もある程度あると聞いています。

小関　それはあの絶対的な乾燥という自然環境だからできることです。私の故郷にも牛はいましたが，糞を燃料になんてことはとても考えられないことでした。あまりにも違い過ぎる落差に驚いて，環境，エネルギー問題に興味を持つようになったのです。

エネルギー，環境を巡る最近の動向

チャレンジをチャンスに変えてきた日本

秋山　1973年のオイルショックを契機にエネルギー危機が叫ばれるようになりました。また，地球環境問題は20世紀の終わり頃から，特に京都議定書を機に広く認識されるようになっています。

当所の調査研究のキーワードとして，エネルギー（Energy），環境（Environment），経済（Economy）の３Ｅがあります。それと並んで，安全保障（Security），安全（Safety），社会的受容性（Social acceptability）の３Ｓ。私はさらに３つのＣを考えています。つまり，こうした作業をポジティブに進めていくためには社会のご理解，ご協力（Collaboration）が必要で，次に，活力を維持するための適切な競争（Competition），そして全体として，反対派と賛成派で意見の対立があっても共存しようというCoexistance。こういう切り口で研究を進めています。

小関　私は４つ目のCがあると思います。

エネルギー問題が私たちに突き付けているのは，ChallengeでありChanceです。日本は戦後，急成長期に入るわけですが，世界は第１次，第２次の石油ショックによって，エネルギーの有限性に気づかされたんです。１バーレル３ドル前後だった石油が，1980年９月のイラン・イラク戦争の時には１バーレル42ドルまで上がってしまいました。

その時，高いお金を出して輸入する以外にない日本は，これでお仕舞いだろうと世界中のエコノミストが思っていました。しかも当時は，大変な円安で，1980年９月の時点で１ドル287円でした。石油の取引はドル建てですから，287円出してやっと手に入れた１ドル札を42枚持っていかないと，１バーレル(樽)の原油を売ってくれない。

ところが，石油価格の高騰が日本にもたらしたものは製造業の大発展だったのです。日本はもともとエネルギーも原材料となる資源も自給できないために，省エネルギー，省資源型の製品を開発していました。それが石油の暴騰した80年代に黄金期を迎えたのです。

秋山　別の言葉で言えば技術力ですね。

小関　そうです。私は，第１次石油ショックの後遺症が猛威を振るっていた1977年に２度目のワシントン勤務から戻ってきました。たまたま，トヨタ自動車の本社に近い愛知県刈谷市で，中小企業の経営者の方々に話をする機会があったのですが，日本の自動車産業はこれで壊滅するんじゃないかと皆さん浮き足立っていました。

私は，「とんでもない。これから日本の車が飛ぶように売れる時代が来るでしょう。アメリカのユーザーは既に，ガソリンを際限なく垂れ流して走るようなアメリカ車を捨て，血まなこになって燃費と経済性の良い日本車を買い始めています。これは必ず世界中のトレンドになりますから，石油の値段が上がったことで皆さんの商売はうんと忙しくなるでしょう」と言ったのです。そのとおりの結果になりました。

ですから，エネルギー資源に限りがあって値段が高くなるだけでなく，それを使うと温暖化の原因になる二酸化炭素(CO_2)が出て問題が深刻になるという今の状況は，私たちにとって非常に大きなチャレンジであると同時に絶好のチャンスだと思います。

ですから，日本が落ち込む必要は全然ありません。前もって対策を立てておけば，必ずチャレンジをチャンスに変えていくことができます。

テロで石油入手困難な時代に突入

小関　今，イラクとサウジアラビアでテロが横行しています。そのために，とうとう石油価格が1980年の42ドルを上回って，ニューヨーク市場で42ドル38セントぐらいまで上がっています。45ドルぐらいまで上がって，あまり下がってこないという状況になるかも知れません。その最大の理由は，石油がテロリストにとって最大の戦略上の武器になっているか

らです。送油管や製油所，積出港などが既にイラクではテロ攻撃のターゲットになっています。サウジアラビアでは製油所や石油化学プラントを動かしている外国人技術者への襲撃が始まっています。そういう状況からすると，石油ショック当時よりももっと，エネルギーが入手困難になる時代が既に始まっているように思います。

秋山　厳しい要素の数も増えるし，全体の絡みもありますしね。

イラク戦争は石油争奪戦

小関　ブッシュ大統領とブレア首相が2003年３月20日に国連安保理のお墨付きなしでイラク攻撃を始めた最大の理由は，巷間よく言われるように，やはりイラクの石油にあったと私も考えています。

全世界の原油の確認埋蔵量は１兆バーレルです。確認埋蔵量第１位は，その４分の１に相当する2,640億バーレルを持っているサウジアラビアです。第２位はイラクの1,120億バーレル。これは1989年の数字ですが，その後，湾岸戦争，イラク戦争があってイラク国内での地上探査は行われていませんから，現在でも1,120億バーレルのままです。

ところが，地球資源衛星で宇宙からイラクを見てみますと，いましきりに武力闘争が行われている西部砂漠地帯の地下に非常に有望な油層があるらしいことが分かりました。それを地上で探査して採油できるようになったら，2,000億～2,200億バーレルは固いんじゃないかと，石油メジャー筋は見ているようです。確認済みの1,120億バーレルを足すと，イラクの原油埋蔵量は3,120億～3,320億バーレルとなり，サウジアラビアを抜いて世界第１位になる。

イラク戦争は，その石油を誰が手中に収めるかという，言わば「陣取り競争」で始まった戦争ではないかと一般に言われています。しかし，日本もそれに相乗りしたと考えるのは大間違いなのですね。アメリカやイギリスは，あまりに近視眼的です。イラクの石油を争って掘って，今の地球環境で今までと同じような使い方をしたら，100年ももたないかも知れません。

秋山　私どもの研究所は日本工学アカデミーと協力して「エネルギー基本戦略」の研究を行っているんですが，その研究会で石油資源の権威の石井吉徳先生が，「『石油の見通しは世情で言われているよりも大変厳しい』ということをアメリカの確かな情報筋から聞いている」と警告しています。一方では，確認埋蔵量は世界全体で１兆バーレルよりかなり多く，枯渇までには十分先があるんではないかという議論も最近ありますね。

小関　私流に言わせていただくと，それは20世紀的発想であってね。100年，1000年，1万年にわたって我々の住んでいる地球の将来を考えた場合，とても通用する議論ではないと思います。

イランで大油田が発見されたのが1905年（明治38年）でした。それから「石油の世紀」が始まりました。その資源争奪

秋山　守氏
（財）エネルギー総合工学研究所
理事長

戦（第２次世界大戦）で敗れたのが日本だったんです。ところが，敗れた後に日本の高度成長時代がやってきた。

戦後の日本が世界に対して証明してみせたことは，「石油を力づくで取るのはもうやめます。必要な石油は金出して買えばいいんでしょう。買うための外貨は，みんなが欲しがる製品を開発して，それを売って稼ぎます」という加工貿易の有効性です。その経済発展モデルのお手本どおりにやっているのが，韓国，台湾，香港，シンガポール，タイ，マレーシア，今の中国です。そういう意味では，みんな敗戦日本の生徒たちです。

日本のイラク復興の柱は石油でなく水

小関　中東で一番大事なのは水です。文明は水が汚染されたり，なくなってしまうと滅びていくわけです。インダス文明もメソポタミア文明も滅びていきました。メソポタミア文明の古戦場が今のイラクです。私も行ってみましたけれど，かつてチグリス川，ユーフラテス川の合流地点あたりに広大なメソポタミア湿原があったのです。その湿原に流れ込んでくる川の水は非常に塩分が高いんですが，湿原の水生植物とかが水を浄化するという自然の再生作用が働いていました。ところが，フセイン政権になってそのメソポタミア湿原をほとんど全部干拓してしまった。石油を掘るのにいい場所だからです。その結果，水資源がますます枯渇してきた。それで，「ぜひ湿原を復元してほしい」という要望が地元の部族の長が，去年12月に小泉総理にお会いになって進言した。今，サマーワに自衛隊が派遣されているわけです。

つまり，日本のイラク復興の柱は石油ではなくて水なんです。同時にそれはエコロジーです。かつて文明の栄えたメソポタミア湿原をもう一度甦らせる，これはまさに100年，1000年のプロジェクトであって，恐らく自衛隊が撤退した後，引き揚げた後も浄水施設は残るでしょう。それ以外に用水路，上下水道の工事もあるでしょう。

もっと大きい仕事はチグリス，ユーフラテス川という国際河川の水系の保護保全でしょう。ユーフラテス川は，水源がトルコにあり，シリアを流れた後，イラクに入るんです。各国で水を奪いあうもんですから，水分の蒸発が進んで地中の塩分が濃縮されるという塩害が発生するのです。その状況

を打開するためには，日本のように水に恵まれ，その有難みを満喫していながら，石油を輸入している国が，逆に石油国でありながら水資源がない国と互いに知恵を出し合ってプロジェクトを進めていくことが大切だと思います。

秋山　石油は船やパイプラインで運べるんですが，水は地形改造，自然改造によって，現地で調達するのが一番良いわけですね。

小関　そうなんです。人口降雨計画も色々やっていますが，自然と人間の関わり合いをどうするかという，もっと大きな取組みをする必要があります。

秋山　水の欠乏したアラブの中で，比較的海に近い国では，海水の淡水化が重要な課題になっています。エネルギーを投入して海水から真水を作ろうという計画が国際原子力機関（IAEA）の場などでも検討されています。

深刻な中国の水不足

秋山　水と言えば，隣の中国でも水不足が深刻なようです。植林による中国の緑化に相当な実績を挙げている日本の方がいらっしゃる，という新聞記事を読んだことがありますが……。

小関　私もその活動に関心を持っていてずいぶん前から関わっています。中国の最大の悩みは水不足です。特に黄河流域は乾燥が進んでいます。中国の90年代は毎年，神奈川県の面積（24万ヘクタール）に相当する国土が砂漠になっていった10年だったのです。21世紀に入って砂漠化のスピードが早まりまして，2001年，2002年は，２年続けて30万ヘクタールずつ砂漠になった。30万ヘクタールというと東京都の面積の1.4倍です。ですから，日本の気象庁は今年１月１日から全国的に黄砂予報を出すようにしました。少しでも西風が強いと大陸から黄砂が飛んでくるわけです。

中国の黄河流域では地下水位がどんどん下がっています。場所によっては毎年2.5m下がっています。ですから，土地の表面を流れている川の水が伏流水として地中に吸い込まれ，川は海まで流れていかないという状態が当たり前になっています。

なぜそうなったかというと，中国4000年のエネルギー源は主に木であって，それに伴う乱伐で森林が消滅し土地の保水力が低下したからです。例えば西安の秦の始皇帝は兵馬俑を焼かせて地下軍団を作った。青銅器や鉄器を鋳造して帝国を作った。それを守るために膨大なレンガを焼いて万里の長城を作った。そういうことをし続けて4000年，ついに中原から森が消えてしまったのです。

水，エネルギー，環境の維持確保というセキュリティ

秋山　水，エネルギー，環境などを維持確保するということは，セキュリティ（保障）の話だと思います。セキュリティ

の対象は，さらに我々の社会や経済，文化が安定的に維持発展することに関わる全ての要素に及びます。エネルギー，環境については，安定的（stable）で，安全（safe）で，保障（secure）されていて，よって安心（peace of mind）だ，ということが要件かと思います。

このセキュリティのことにつきまして，これからの期待も含めてコメントをいただけますか。

小関　20世紀から21世紀への過渡期において，一番大事なキーワードがセキュリティだと思います。「本当に安心できるのか」という不安をどう解消していくかが大きい問題ですね。

エネルギーでも，CO_2を出さない原子力の良さは分かるけれども「本当に安心なの？」という不安があります。その安心感はどうやって得られるのかということが，セキュリティの問題です。答えは科学技術的に，また，人間工学的に出せると思います。例えば，スリーマイル島事故，チェルノブィリ事故にしても，設計ミスを含めて，原因のほとんどがヒューマンエラーです。人間が色々な道具を使って今日までやってきたわけですが，「放っといても大丈夫だ」という安全性などどこにもありません。念には念を入れて初めて安全性が確保される。セキュリティを支えているのは人間工学だと思います。

感情的に過ぎる日本の原子力に対する意見

小関　今，日本では原子力の評判が非常に悪いんですが，日本で起きた致命的な原子力事故の代表例であるジェーシーオー（JCO）事故を客観的に見ると，まさにヒューマンエラーでしょう。普通では考えられないこと，最も日本的でないことをやって事故に至った悪い例です。

良い例を見ますと，最も原子力発電の安全運転の実績を積んでいる国も日本なんです。悪い例，良い例の両方を見た上で，セキュリティの問題を考えるべきであると思います。私は日本の原子力問題，特に原子力の安全性に関する議論は感情的に過ぎると思っています。

アメリカでは，スリーマイル島事故以来あれほど拒絶反応があったのに，クリントン政権下で原子力政策の方針を180度転換しました。21世紀にはやはり安全で使いやすくて，しかも経済的な原子力発電施設が必要だということで，国際研究，開発を行っています。

確かに安全というのは大事なことなんですが，私はもう少しバランスのとれた考え方をしないといけないという気がします。

「100%安全」というセキュリティはない

秋山　社会一般に言われる「安全」とは「100％安全」と受け止められていると思います。しかし，私ども，いや少なくとも私自身のような技術系の人間が「安全目標や安全基準」を語る際には，それは合理的な範囲で最善を尽くすという意味です。稀にはヒューマンエラーやマネジメントの問題，品質保証の過信などで穴

が抜けることがありますから，将来にわたって絶対ゼロというところまではいかないんですが，それに向けてみんなで努力しているという状況です。

小関　セキュリティの基本はそれだと思います。

温暖化問題を巡って

議論よりも現実が進んでいる温暖化

秋山　ところで，温暖化の顕在化の程度や将来の危惧については，学者の間でもまだ異論があるようですが，その疑いがあれば先手を打って予防するというのが合理的な考え方だと思います。

異常気象，砂漠化などの原因としては，我々人間の活動が影響していると見られる節があると私も思っております。温暖化問題について，皆が気持ちを引き締めなければいけないという事例が他にもあると思いますが，海外の状況にも詳しいお立場から，その辺りをご紹介下さい。

小関　確かに温暖化については諸説紛々としているところがあります。科学的に「絶対に温暖化が進んでいる」と言い切れない部分があるから，例えばブッシュ政権は経済発展を優先させて京都議定書を蹴ったわけですね。しかし，20世紀というのが私たちにとって一体どんな時代だったのかを考えてみれば，温暖化は抜き差しならない問題になっていると思います。20世紀というのは，非常に繁栄した豊かな時代でした。例えば，私のふるさとの山形県左沢町を例にとりますと，私が生まれた頃にはほとんど走っていなかった自動車が，一家に２，３台は当たり前みたいになってきました。

20世紀の100年間で世界の人口は４倍になりましたが，エネルギー消費量は25倍になっています。今，63億人が，毎日１人当たり５ℓの石油に相当するエネルギーを使って生活しています。日本人は12ℓ相当，アメリカ人は26ℓ相当のエネルギーを使っています。

そのエネルギーの大部分が石油，石炭，あるいは天然ガスといった，炭素を含んでいる燃料です。それを燃やすことによってCO_2が放出される。さらにメタンガス，フロンガスといった温室効果ガスがどんどん出ていって，20世紀の100年間に地球の平均気温が0.6℃上昇したわけです。0.6℃の上昇でも，南極大陸ではロス海の氷が融けたり，ヨーロッパアルプスでは氷河が後退したりという現象が起きています。

21世紀にはさらにその状況が進んで，2003年の10月は世界で気象観測が始まって以来，最も暑い10月だったと気象庁が発表しています。2002年10月よりも0.6℃上昇したんです。非常に象徴的に言えば，20世紀に100年間かかった温度上昇が，21世紀に入ったらたった１年で上昇している。その結果，カリフォルニアでは大変な山火事が１週間以上続いて，30万ヘクタールが灰になった。ヨーロッパでも異常気象でものすごく暑い。シベリア中部

で５月中旬に38℃になった。そういう異常気象が出てきてます。議論するよりも現実の方が先行していると思うんです。

秋山　気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第３次報告書を読んでおりますと，科学的にフォローした結果，温暖化傾向が現実化してきているというのが大方の専門家の見解のようですね。

小関　ですから，子孫のためにも，このまま放っておいて大変なことになってはいけないので，手を打つというのが，セキュリティですね。ぜひとも必要なことです。

京都議定書を巡るロシア，アメリカの思惑

秋山　京都議定書については，アメリカのブッシュ政権が参加しない，ロシアも近々批准すると言われながら実際にはなかなか批准しない。全体としても見通しは必ずしもはっきりしないようですね。

小関　ロシアについて言えば，プーチン大統領の最大の狙いは，「強健なロシアの再建」です。ロシアの最大の武器は，現時点でサウジアラビアと肩を並べる大石油産出国だということですから，石油の値段が上がっていくことはプラスなのです。同時に，エコロジーも彼らにとっての切り札になります。というのは，「タイガ」と呼ばれる北方の針葉樹原生林がまだ残っていて，それを小出しにできるからです。さらに，天然ガス，石油のパイプラインをどこに引くかというのも取引材料になるわけです。中国と日本を天秤にかけて，ナホトカまでなのか，大慶まで引くのか。プーチン大統領の腹の内には，日本の資金と技術で，ナホトカまで引いて，ついでに沿線の開発，つまりシベリア開発をしていこうということがあると思います。沢山持っているカードの１枚が京都議定書批准だと思います。ですから，プーチン大統領が京都議定書を批准して，それで万事解決になると，あまり期待しない方がいいですね。

ブッシュ政権が京都議定書を蹴った大きな理由は２つあります。１つは，科学的根拠が薄いということ。もう１つは，経済発展に伴い今後ますますCO_2やSO_2を放出していく中国，インドといった発展途上国が対象になっていない国際協定では入っても無意味だということです。ですから，インドを含めたアジアの発展途上国をどう枠組みに取り込んでいくかが非常に大きい問題だと思います。

最長８年で途切れるアメリカの政策

秋山　京都議定書には，共同開発（JI），クリーン開発メカニズム（CDM），排出権取引などのいわゆる「京都メカニズム」と呼ばれる温室効果ガス排出抑制の手段が盛り込まれています。

アメリカが京都メカニズムを超えて，より幅の広い戦略的な新しい枠組や対策を考え出す可能性があると受けとめてよろしいでしょうか。

小関　あり得ますね。ただアメリカの欠

点は，国家戦略というのが政権交替で必ず切れる。最長でも大統領の任期２期８年で終わってしまうということです。ですから，1000年，１万年も継続するような長期構想をある政権が政治的に決定することは不可能だと思います。それは，むしろシンクタンクとか，超党派の機関が策定して，それに有象無象がすり寄っていくという形になると思います。

プレゼンテーション上手な欧米
実績で手本を示す日本

秋山　戦略的に深く考えているという点で，私がいつも感心するのはイギリスです。やはり，包括的かつ長期的な戦略に関しては，我々の方が遅れているのではないかというコンプレックスを私は持っているんですが……。

小関　そこら辺について，私は１つに，プレゼンテーションの差があるのではないかという気がしています。

それと，彼らは情報の蓄積を持っています。特にエネルギー問題については，ロシア帝国と大英帝国の中央アジアをめぐるグレートゲームの時代から底辺に流れていたんだと思います。それを踏まえて，長い間，学術研究と称して色々なミッションを派遣する。そのミッションの大多数が，大英帝国もロシア帝国も陸軍将校だったわけです。そういうことを中東・中央アジアを舞台にずっとやってきた。そういった調査情報の蓄積があります。それをうまいタイミングで戦略的にプレゼンテーションする。それでごまかされているところが多分にあります。

確かに，彼らの構想は非常に壮大で「すごいな」とも思うのですが，ここから先の21世紀のテーマとして考えた場合，意外と日本の方が先行している部分があると思うんです。確かに日本はプレゼンテーション下手ですが，実績で手本を示しています。

例えば，アメリカの今年の大統領選挙の最大の争点に，イラク問題，国内の失業問題に並んでガソリン価格の上昇というのがあるのです。１ガロン（3.8ℓ）２ドルを超えてしまったんです。

それは，日本人にすれば，１リッター200円を超えたという感覚なんです。これが政治的な大問題になっています。特に民主党のケリー候補の選挙参謀などは，「次の政権はハイブリッド車を優先的に作らせるべきだ」とまで言っています。

日本はプレゼンテーション下手ですが，実績で示しているわけです。今，アメリカで販売されているハイブリッド車というのはトヨタ自動車の「プリウス」とホンダの「インサイト」，「シビック」だけです。これが爆発的に売れて品薄で，奪い合いになっているところなんです。

秋山　日本は実利をとるということですか。

小関　そうです。日本は実績を先行させておいて，後で誰かがそれを体系化してレポートを作ればいいというやり方です。日本流の「沈黙の戦略」の方が案外先を行っているのではないかと思います。

３Ｅの調和は日本モデルで

秋山　環境との調和，社会経済の維持・発展との関係で将来どれくらいエネルギーを必要とするか，国が産業界などの協力を得て需給見通しを作っています。エネルギー需給見通しによりますと，アメリカ，中国の需要の伸びは相当大きいと言われています。それに比べ，日本の伸びは昨今では年0.1％～0.2％で，ほぼフラットに近づきつつあります。

日本として現状でよろしいのか，あるいは節減すべきなのか，もっと伸ばすべきなのか，お考えをお聞かせ下さい。

小関　エネルギー消費があまり増えずに，経済が伸びていくという「日本モデル」が21世紀のあるべき姿だと私は思っています。先進工業国だけでなく，途上国もこのモデルを採用していくべきでしょう。このために必要なのは絶えざるイノベーションです。例えば，先ほど触れたハイブリッド車によって直接的にはガソリンの消費量が減ります。さらに，ブレーキを踏んだらまた電気が起きて，それを蓄えてまた走るというハイブリッド車の基本技術は，水素を燃やす燃料電池の時代になっても通用するキーテクノロジー（基幹技術）なわけです。日本の場合，それを国家政策として選択したのではなく，トヨタ，ホンダといった民間企業が「生き残り戦略」として採用したのです。

それに対して，世界最大のエネルギー消費アメリカや，モータリゼーションが起きてこれからエネルギー消費の増大が必至な中国は，エネルギーの供給をどうやって確保していくかという目先の問題にこだわっています。

アメリカの自動車業界の専門調査機関JD&Powersは，2008年までに年間50万台のハイブリッド車がアメリカで売れるようになるだろうと予測しています。フォードも25年後にはアメリカ市場で売られる新車の75％がハイブリッドシステムになるだろうと予想しています。ところが，アメリカでハイブリッド車を作っている会社は１つもありません。フォードは当所目指していた自力開発をあきらめてトヨタ方式を採用しました。

中国ではハイブリッド車に代表される省エネ車なんか全然売れていません。今，一番売れているのは，アメリカでよく売れている大型のスポーツ・ユーティリティ・ビークル（四輪駆動車）です。後発国の中国でも，ステータスシンボルとして飛ぶように売れています。

環境や資源の枯渇といった地球的問題にはほとんど目をくれないで，欲しいからすぐ使ってしまうという「消耗政策」をとっているのが中国だと思います。日本が「そういうことではすぐ行き詰まってしまいますよ」と粘り強く説得する材料を揃えていれば，日本の21世紀のエネルギー環境戦略として立派に通用すると思います。

GDP成長率で先進国中トップの日本

秋山　日本の状況として，エネルギー消費は伸びないのに経済活動はある程度活

力を保っているとのお話ですが，省エネを産業界と民生分野で比べた場合，景気が停滞している割には，一般大衆はなおエネルギー消費を増やしている，省エネが進んでいないということがあります。

小関　景気が低迷しているという方が嘘なのですよ。みんな，景気が悪いようなふりをしているだけです。今，先進工業国でGDPの伸び率が一番高いのは日本なのです。

今年第１四半期（１－３月）のGDPの実質成長率は，速報値で年率5.6％と発表されました。ところが，つい最近6.1％に上方修正されました。アメリカでさえ第１四半期は速報値4.2％，改定値4.4％で，第２四半期に4.5％までいけるかどうかと言っているのです。EU諸国は１，２％台の低成長です。

なぜ日本の民生部門はそんなに伸びてるかというと，省エネ型でない商品，例えば大型のプラズマテレビが飛ぶように売れているからなのです。どこで売れているのか。田舎で売れているんです。東京ではプラズマテレビなんて大きな家電を置く部屋がありませんから。

日本人は「景気が悪いですなあ」なんて言いながら，結構，内福な暮らしをしている。民生の省エネが進まないというのは，いい暮らしをしているからであって，同情することでもないでしょう。

秋山　日本の実質成長率が現時点で先進工業国中トップであるにも係わらず，国全体としてエネルギー消費は微増にとどまっている。これはやはり欲望と，それを満たす手段が混在している21世紀初頭においては，いい線いっていると言って良いのでしょうか。

小関　そう思います。「お手本」と言うのはちょっと恥ずかしいのですが，「まあ，いいか」とは言えますね。

必然的な日米のエネルギー政策の違い

戦略的観点での評価

秋山　エネルギー戦略，特にその中で原子力政策について日米比較をして見ようと思います。

まず，アメリカは，ニクソン，フォード政権の時代に，第１次オイルショックの発生を教訓として，「プロジェクト・インディペンデンス」という政策をまとめました。次のカーター政権でエネルギー省（DOE）ができ，国家エネルギー計画という体系的な計画を出しました。しかし，原子力はカーター政権では落ち目でした。後継のレーガン政権では，原子力の推進を謳いながらも，エネルギー関連予算は思い切って削ってしまった。その後，旧ブッシュ政権，クリントン政権，現ブッシュ政権と，民主党と共和党で政権交代を繰り返してきた中で，どちらかといえば，原子力に対して民主党はやや距離を置いていると見受けます。しかし，結果だけを見ると，原子力の基盤的な話は民主党政権の時に出ています。例えば，クリントン政権時に，NERI

(Nuclear Energy Research Initiative) の構想とか，当研究所も大いにコミットしている第4世代原子力計画などが作られました。2030年前後から第4世代に属する一段と安心できる，高性能の革新的原子炉を導入し，普及していくことを目指して提案公募をするとともに，先進的な研究開発を行っています。

各政権毎に戦略的な色彩があります。私がやはり日米で違うなと思いますのは，彼らはまず“Mission and Goal”から始めるということです。エネルギー戦略レポートは，現ブッシュ政権では「チェイニー・レポート」という名前で出ています。戦略的な色彩が濃いですね。

翻って，日本のエネルギー基本計画を見ますと，“Mission”に相当するものが3つあります。1つは「エネルギーの安定供給」，すなわち「エネルギーセキュリティ」，2番目が「環境安全」，すなわち，「環境セキュリティ」，そして3番目が「市場原理の活用」です。それぞれに基盤の中でメニューが並べられ，誰がどこまでやるかというプログラムまで出ています。しかし，“Goal”が読みにくいということと，3番目に少し次元の異なる「市場原理の活用」が出てくる点が少し気になるところです。

「市場原理の活用」は正直な政策

小関　私の独断で申し訳ないのですが，赤字の政府としてはそれしか言えないんじゃないでしょうか。つまり，採算がとれないプロジェクトには民間は乗ってこないわけです。ですから，どんな理想を掲げても実際にやるのは，採算をベースにした民間です。「どうしても赤字なら，やめても仕方がないです」とは言えませんから，「市場原理」という言葉を入れたんじゃないですか。

アメリカは，力があるし，政策目標が達成されなくても8年後には政権が変わるわけですから，お題目をだけ並べるだけでも戦略らしく見える。

しかし，日本の場合には政権交替と同時に政策も変更されるアメリカとは違い，必ず結果が問われるわけです。ですから，「採算をとれるかどうか考えなさい」とは，結構立派なことを言ったと思いますね。

MOXによるプルサーマルは平和利用の切り札の1つ

小関　先程原子力が落ち目になったと言われたカーター政権の誕生時，私もワシントンにおりました。カーターが大統領に就任して，原子力政策で日本のプルサーマル計画と正面からぶつかって大変だったんです。

カーター大統領は，海軍兵学校出身の自称原子力技術者で，原子力潜水艦にも乗り組んでいましたので，「核のことは俺に聞いてくれ」という自負心があって，プルトニウムサイクルが核拡散をもたらすという確固たる信念をもっていたのです。ですから，日本のプルサーマル計画も「絶対だめだ」と言ってきました。そこで，日本政府は，「わが国は原爆被爆国であって絶対に核分裂物質の兵器利用は

しない。それを保証するために純粋プルトニウム，あるいは兵器グレードのプルトニウムに分離できない混合燃料（MOX）として取り出す。そのMOXを使いますから」と言ってようやく説得したわけです。

そうやって苦心惨憺道筋を作ったのに，いよいよ国内で実施段階になったら，「そんなものを使うのは危ないんじゃないか」と住民の反対にあいました。住民感情としては分からないことはありませんが，何ともったいないと思いました。それこそ，日本の政策はお題目よりも実施段階での感性に問題があるという感じがするのです。

地元住民に対しても「これは日本だからできたことであって，むしろ世界のお手本になるんです」と言えば良いのです。

秋山　おっしゃるとおりです。日本の原子力政策は原子力長期計画という形で改定を重ねてきていますが，大きな柱としては一貫性があります。

エネルギー戦略を考える上で重要な情報の真贋見極め

秋山　エネルギー戦略の研究は先にも紹介しましたが，日本工学アカデミーと共同で研究会を進めています。エネルギー戦略を議論するには，その際に，情報を集めて的確に分析，評価し，さらに，分かり易い形で情報を社会の方々に提供していくための情報基盤の強化が必要ではないかと認識しています。技術，環境，経済，政策的な情報を含めたエネルギー情報の品質，また情報がニーズに合っているかなど，お考えになっているところがありましたら，ご紹介願います。

小関　情報というのは私たちの商売道具ですから，長所も短所も痛感しています。今の情報社会の最大の難点は，粗雑な情報が溢れ過ぎているということです。本物と偽物の区別がほとんどつかない。私たちは偽物の情報のことを「ガセネタ」と言っています。英語ではディスインフォメーション（disinformation），情報操作，偽情報と訳されています。「ガセネタ」と本物の情報が入り混っています。それをどうやって見分けたらいいか，素人にはほとんど分からない。玄人でさえ引っかかったりします。そういう情報の氾濫，あるいは悪質な情報が大手を振ってまかり通っているところが今の情報社会の問題点なのです。

ですから，逆に流す情報をうんと減らしたらいいと思います。「これだけは間違いない」という情報だけを流す。つまり，情報に方向性を持たせるということですね。例えば，第4世代原子炉というのはこういう方針，考え方で進めます。巨大な施設は作らない。遮蔽物とかも処分するときのことをよく考えて設計する。それと普遍性のある技術にするということですね。つまり，日本だけでなく，世界中どこに持っていってもターンキーですぐ使えるようなものが，第4世代原子炉だと私は理解しています。

例えば，中国の場合，上海の電力需要を満たすために造った三峡ダムが大失敗

で，今でも停電が頻発している。そのために中国は何百基という原子力発電所を造ろうとしています。しかし，安全性を考えていないような軍事用原子炉（黒鉛減速型）を発電用に転用されたら，チェルノブイリ原子力発電所のジュニア版が無数にできてしまいます。そこで，日本を含む９カ国で共同開発中の第４世代原子炉の中からＡモデル，Ｂモデル，Ｃモデルぐらいの量産カタログを作っておいて，日本で実証試験を行い，必要があれば国際協力で中国の原子力発電所を造る，それを可能にする普遍性を持った技術が必要だと思うのです。

秋山　情報について，徐々にそうした認識が広まりつつあります。少なくとも意図的なdisinformationは除外するために情報を十分に吟味しましょうという話が国際的な科学技術フォーラムでも議論されています。先日，ノルウェーで開かれた工学アカデミーのセミナーで，それについてプレゼンテーションをしてきたところです。各国の情報センターをネットで結んで，そして情報を国際的に吟味して提供する，一種の情報プラットフォームを作ったらどうかと提案してきたところです。

原子力について

第４世代原子炉開発の現状

秋山　先程来，話題となっております第４世代原子炉開発は国際コンペといいますか，プロポーザルを集めて議論しています。現在は，有力なものとして５つ，ないし６つの炉型に絞られてきています。その中で日本が力を入れているものの１つが高温ガス炉。日本原子力研究所の高温工学試験研究炉（HTTR）の先を目指す高温ガス炉です。1000℃級の温度が得られれば，それで水を分解して水素を作っていく，核の熱で水を直接分解するという話です。高速炉も長期的な燃料サイクルを視野に入れた重要な炉型です。もう１つは，超臨界圧水冷却炉です。今の原子力発電所の主流は軽水炉ですが，やはり圧力と温度の点で技術的な上限があり，そのためにエネルギー変換効率は34％くらいに留まっています。では，40％超を達成するために圧力を超臨界圧までもっていったらどうか，というコンセプトを東京大学の岡教授が考えまして，それが大きく取り上げられてきています。材料の問題が課題として残ってはいますが，設計はとても魅力的です。

こうした第４世代炉の設計構想の中から，遠からず２つか３つぐらいに絞っていくことになると思います。原子力もそうした新しい構想を示すことで社会の方に関心をもっていただければと思っているところです。

核融合研究は永遠の研究課題

小関　核融合炉についてはどうお考えですか。

秋山　私どもは，エンジニアリングの観点で，核融合炉の全体のコンセプトとプラズマから出てくる中性子や熱を受ける壁の健全性の問題，色々な材料，トリチウムのサイクルなどについて20年近く研究をしてきました。一言で申しますと，やはりエネルギー源としての核融合炉の見通しは数十年後，あるいはもっと先かなと思っています。壁の材料の問題にしても，高温，真空で，14ミリオン・ボルトの中性子が当たりますと，２年はもたないです。そのように，度々大きな壁を取り換えるというシステムが経済的に成り立つかも問題ですね。

小関　私もまったく同感です。私はずぶの素人ですが，核融合を21世紀の理想のエネルギー源と考えるのはフィクションだと思います。

研究することは大変結構ですが，期待できるのは，副産物として生まれてくる色々な新技術，新材料であって，核融合そのものは永遠の研究課題だと思っています。

秋山　核融合のような先端技術開発課題を持つことによって，非常に優れた学生がその分野に集まってきて，それがスピンオフして核分裂原子力の分野にも行くことがあるわけです。核融合の研究から出てくるスピンオフ技術に関するレポートも出ましたが，産業利用の分野にまで広がるような技術が50も100も挙げられています。

小関　それが理事長の言及された「市場原理」かも知れませんね。

世界に先駆ける日本の実用化

小関　私は，核融合研究から何が出てくるのかというのが非常に楽しみなのです。例えば，プラズマディスプレイなどは，世界中で誰も製品化できなかった。そこに富士通と日立が一生懸命やって，ついにものにしてしまった。

他の分野でも日本で初めて実用化に成功したというケースは沢山あります。自動車のロータリーエンジン，テープレコーダー，VTRもそうです。原理は分かっていても実用化できなかったものを日本では次々に実用化し，製品化してきているのです。

秋山　超高密度な垂直磁気記録なども東北大学の岩崎先生などの発案です。今，私，日本工学アカデミーで西澤潤一先生に研究の考え方などご指導いただいています。やはり，あの西澤先生のグループは凄いですね。

小関　東北人だからですね。私の田舎では，１つのことに熱中して飯を食うのも忘れる人間を，「たがり」と言うんですよ。英語ではEnthusiastですね。楽しいことがあまりなかった，雪に閉ざされた東北などで，「たがり」が出てきて，局面を変えていったケースがよくあります。今の科学技術などはまさにそうだと思います。

秋山　世界でそれに似たような環境の国というと，北欧などでしょうか。あちらからは，とても革新的な情報，エネルギー，そして文化が出てくるんですね。

小関　そういうところと交流なさったらいいですよ。核融合研究所はEUに取られても構わないから，こっちからどんどん研究者，「たがり」候補者を送り込めば，「さすが日本人は凄い」というずば抜けた者が必ず出てくると思うんです。

21世紀に求められる技術

エネルギーと環境の調和は「小型」「軽量」「普遍性」のある技術で

小関　エネルギーと環境の調和の方向性ということでは，巨大システムに対する疑念が出てきていると思います。100万kW級の原子炉とか，大型の水力ダム，巨大な火力発電所，意外に見落とされているのが巨大な風力発電施設です。温暖化が進んで，ちょっとした熱帯低気圧でもすぐ台風クラスの威力をもって秒速50メートル以上の強風が吹きつけるような日本列島で，欧州型の巨大風車が果たしてどれだけ耐え得るか疑問です。

ですから，21世紀に入って暗中模索している段階でのキーワードは「小型」,「軽量」,「低負荷で動かせるもの」です。例えば，分散型電源があります。燃料電池も据置型は法改正すればすぐにでも使える状態になっていますが，巨大な発生装置で作った水素を燃料電池に供給して発電して送電するという発想では普及しないと思います。むしろ，山の中や離島でも，各戸に小型の燃料電池と発生装置を備えて，熱と電気を自給できる形が考えられます。

既に，非常に厄介な生ごみを糖液状にして，特殊なバクテリアの入っているペットボトルサイズの培養器に入れ，水素ガスを発生させる。それを燃料電池に供給して一家４人の標準家庭の電力と熱源になるという新発明が，地球環境産業技術研究機構（RITE）とシャープ株式会社の共同研究で，2003年２月に発表されています。

そういうものが実用段階に入ってきている。つまり，小型，軽量，低負荷の分散型ですね。それは，世界中どこででもすぐ使えるという点で，普遍性があります。特に大きな人口を抱える中国，暑いために腐敗という問題を抱えているインドで活躍する技術になるでしょう。腐敗という天然の現象を積極的に活用する方が，自然界と人間界の調和という意味で，理に叶っていると思います。

小関　今まで意義を持っていた大きいものについては，今後，できるだけセキュリティに徹していく。これから無限に広がっていく可能性があり，地球環境も汚さないのは，軽量，小型で，常温で動く分散型のものでしょう。それを必要に応じて集落や地域に導入していく。すると，そこでアメーバみたいに自生し始める。そんなモデルもあると思っています。

秋山　まったく同感です。小型・分散型への取組みは直接的な効果もかなり大きいですし，人々がエネルギーと環境の問題をもっと身近に感じるようになりますね。

若い世代への教育効果もある分散型技術

小関　そうすると，若い世代への教育効果がもの凄くあるのです。目の前で起こることなので分かり易いんですね。

日本の教育問題の解決策に関する私の主張は，「読みかけの本を閉じて，インターネットも捨てて，野に出なさい」ということなんです。それで，汚いものがあったら，それをどうしようかと考える。どんどん腐っていく。それを特殊なバクテリアに食べさせると，あるものは硫化水素を，あるものは純粋水素を出す。それを実用化した装置がこれだよと実物を見せると，子供たちは「ワー凄いな」とみんな驚くでしょう。驚きを与えなければ子供は成長しないですよ。

秋山　それに関連して，人間は体験したことでないと本当には分からないんじゃないかと思います。私は江戸，明治，大正時代の歴史に興味があって本を読んだり，映画を見たりしましたけれど，実際に，自分が触ったり歩いたりしたものと比べたら，大正以前は自分の中では現実からは距離のある世界ですね。

小関　絵空事ですよね。

秋山　私も昔，先生と同じ頃に育ちましたが，いわゆる戦後は米の飯がなくて，さつまいもをお粥に混ぜて食べたりしたもんです。あの空腹感だとかは体験しないと決して分からないでしょうね。森の中で一晩寝たとか，自然と触れ合う色々な経験があるとないではずいぶん違うと思いますね。

小関　そういう点で，アメリカとかヨーロッパ，特に英国あたりでは金持ちの子供ほど，全寮制の学校に寄宿させたり，サマーキャンプに参加させたりします。山の中のキャンプにひと夏放りこんで，一切肉食なしで，自給自足の生活をさせるんです。ちゃんと指導者がいて，自然に対する興味と畏れを教えるわけです。それともう１つは，日常の暮しの価値の再発見とでも言うのでしょうか，私の子供もサマーキャンプに参加したのですが，キャンプから帰ってきて真っ先に食べたのがありきたりのハンバーガーです。そして「肉ってこんなにおいしかったんだ」と感激しているのです。

飢餓体験というのは，大人が計画的に与えれば，今でも経験可能です。日本みたいに何でもかでも無制限に与えるからおかしなことになるんだと私は思います。

森と科学技術と智慧

手本とならん世界に冠たる日本３Ｅモデル

秋山　最後になりましたが，私，この間，福島県の「森・知・エネルギー」の懇話会で話をさせていただきました。佐藤福島県知事は「森にしずむ都市」という構想で，人を配置して作業を進めておられます。森は大きな財産ですし，その中で

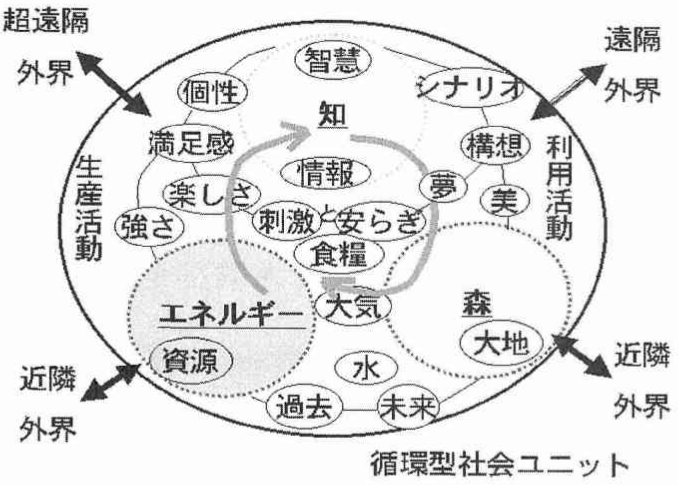


図1　循環型社会の要素イメージ

水もエネルギーも循環する。そこで全体を動かすのは知であり，さらには智慧ではないかと。そんな循環型社会をイメージしています（図1参照）。

小関　日本は森林被覆率が66％と高い，フィンランドと並ぶ珍しい先進工業国です。

中国は森林被覆率が11％なのに今も下がっています。将来が危ぶまれる所以です。中国では，例えば雲南省とか，貴州省とか，まだ辛うじて森林が残っている場所がありますが，これ以上木を切ってはいけないと言っているのにお金のために切っている。ですから，科学技術でも製造技術でも，世界トップクラスの日本がなぜ永続的なシステムを構築できて，将来が明るいのか，中国の人たちに教えることも必要でしょう。

私は21世紀のお手本になる３Ｅのモデルは日本モデルだと思っているのです。

秋山　大変力強いお言葉で良い締めくくりになったと思います。これをご縁にまた色々よろしくご指導ください。今日は長い間，本当にありがとうございました。

〔寄稿〕

これからのエネルギー文明学*
—人間と社会からの発想—

栗　原　史　郎　（一橋大学大学院商学研究科　教授）

1．はじめに

1年ほど前，「日本エネルギー学会」に「省エネルギー部会」（柏木孝夫部会長）ができ，その中に「要素技術」，「システム技術」，「社会システム」の3つの分科会が設けられました。最後の「社会システム分科会」は，社会システムの省エネルギー化に関する提言をまとめようということで始まりました。

今日のタイトルは，「エネルギー文明学」としましたが，そういう学問があってもいいんじゃないかと期待を込めて付けてみた名前です。この中で，オイルショック以来の省エネルギーがどういう形で効果を上げてきたのか考察し，省エネ促進と新エネ導入を一緒にやった方がいいという提案をさせていただきたいと思います。それから，文明学を作る上でもう一度エネルギー問題と火について考え直す必要があるという話をさせていただきたいと思います。

2．省エネ効果ー人間・装置系の視点

早稲田大学理工学部の永田勝也教授が「ライフスタイルにおける行動改善による環境負荷削減効果の評価」（2002年8月）を発表されています。そこでは，家電製品を買い替えることなく，人間が現在の製品の使い方を変えたとき（例えば，冷蔵庫内で食品の詰め過ぎをやめる，ご飯は1日2回に分けて炊く等）の省エネ効果と，冷蔵庫や掃除機，温水式便座，ビデオデッキ，パソコンなど家電製品そのものを省エネ型に買い換えた場合の省エネ効果について評価しています。現状の製品で使い方を変えるだけで十数％エネルギーを削減でき，省エネ型商品に買い換えた場合には，約3割の削減ができると評価しています。

突き詰めて考えると，省エネの効果は，技術進歩とライフスタイルの掛け合わせで出てくるわけです。すると，機械と人間との関係が問題になってきます。

＊本稿は，本年3月26日の第222回月例研究会におけるご講演を，本誌掲載のためにテープ起こししたものです。

3．文明とは何か

（1）文明の定義

文明とは，「人間と人間を取り巻く装置群とで作る１つの系であり，システムである」（梅棹忠夫）と定義できます。「装置群」には，具体的な器物，建築物の他に諸々の制度や組織を含めることができるでしょう。つまり，人間が人工的に作り出してきたものすべてが装置群だと言えます。ですから，文明とは巨大な工業力，全国規模の交通通信網，行政組織，教育制度，豊富な物資，生活水準の高さ，高い平均寿命，低い死亡率，学問，芸術など，より良い暮らしを求める人間の望みを叶えてくれるものと言うわけです。

他の人の定義を読んでみても，文化とは人間装置系としての文明の一側面であって，文明の方が文化より大きいという捉え方をしている人が多いようです。

（2）夏目漱石の文明開化観

ここで紹介するのは，夏目漱石が日本が日露戦争に勝利した６年後，明治44年（1911年）に和歌山県で行った「現代日本の開化」と題する講演です。漱石全集に入っています。文明開花のモデルを，人間という観点から，つまり，人間の活力が外界の刺激にどう反応するかという観点から定義しています。漱石によると，外界の刺激には大きく分けて，「義務の刺激」と「道楽の刺激」の２つしかありません。

[義務の刺激]

何かをしなければならないというとき，人間は，短時間にできるだけ多くの働きをしようと色々工夫するというのです。つまり，人間のエネルギー，活力を節約しようとするというわけです。その結果，色々な発明が出てくる。汽車や汽船，電信電話，自動車，飛行機とかが出てくる。

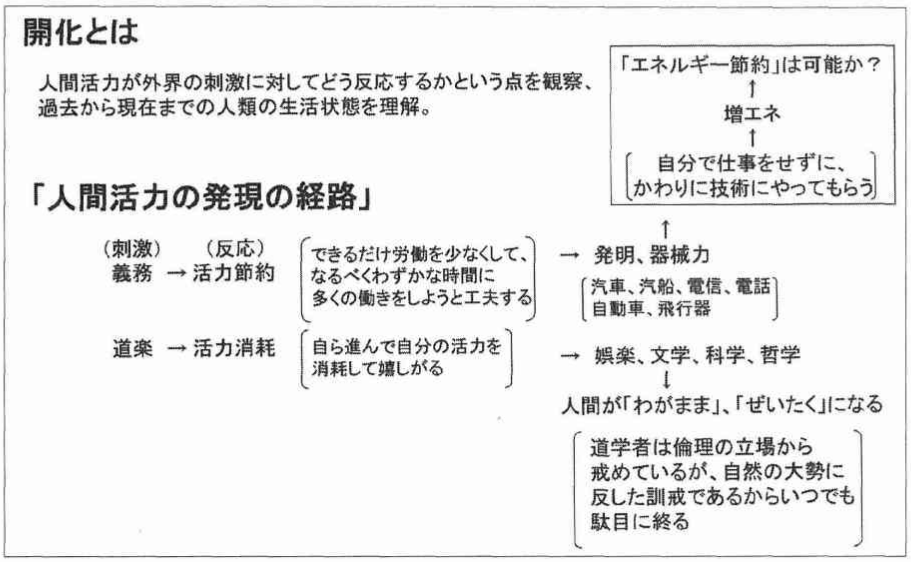


図１　夏目漱石の文明開化観

さらにその結果どうなるか，私の考えを図1の右上に書きました。人間がエネルギーを節約し，仕事をしない代わりに機械が仕事をするわけです。仕事や熱というのはエネルギーそのものですから，これは増エネになる。だから，義務の刺激が強ければ強いほど，例えば，企業なら競争しなければいけないとなればなるほど，色々な機械ができ，その機械が仕事をして増エネになる。省エネにはなりません。

[道楽の刺激]

道楽といっても別に悪いことをするわけではありません。自ら進んで自分のエネルギーを消耗して嬉しがる反応を起こさせる刺激のことです。その結果，娯楽や文学，科学，哲学というのが出てくる。そして，人間が凄くわがままになったり，贅沢になる。昔から儒学者や道学者が倫理という立場から，「人間は贅沢しちゃいかん」と言っているのですが，これは自然の大勢に反した訓戒であるからいつでも駄目に終わっている。何より証拠に，人間社会は時が経てば経つほど，わがままになって，贅沢になっている。

では，生活が楽になったかというと，そういうことはないと言うんです。昔は人間が死ぬか生きるかという問題だったけれども，漱石のいた20世紀初めには，どういう状態で生きるのかという選択の問題になっている。ますます生存競争が激しくなっていて，日本も大変だと言っています。

漱石が言いたかったことは，ヨーロッパがルネッサンスの波から産業革命の波まで長い時間をかけゆっくり進んできた過程を，日本は短期間で波の一番高い部分を飛び飛びで吸収しようとして大変になって，神経衰弱になっているんじゃないかということです。

このモデルは非常に面白いと思うんです。道楽の刺激でわがままな社会，つまり，エントロピーが大きい社会になる。義務の刺激のほうはできるだけ自分のエネルギーを節約していこうとするけれど，結果的に機械の方がエネルギーを消費する。そして物理的にもエントロピーが増大する。漱石が指摘したように，文明は生存競争を厳しくする面があります。資源エネルギーの問題も必然的に文明の流れの中に入ってきます。増エネが漱石の言う「自然の大勢」ということになるでしょう。

だから，省エネというのは「自然の大勢」に反する，かなり難しいことだということを，まず認識しなければいけません。

4．省エネの30年史

過去30年間の省エネのインセンティブの変化を図2に示しました。

日本で省エネが叫ばれるようになったのは，1973年の第1次石油ショックからです。石油の値段が4倍にもなった。何もしないと燃料費が4倍になりかねないわけですから，必死でコスト低減の努力をしたんです。その結果，日本は省エネ先進国になりました。

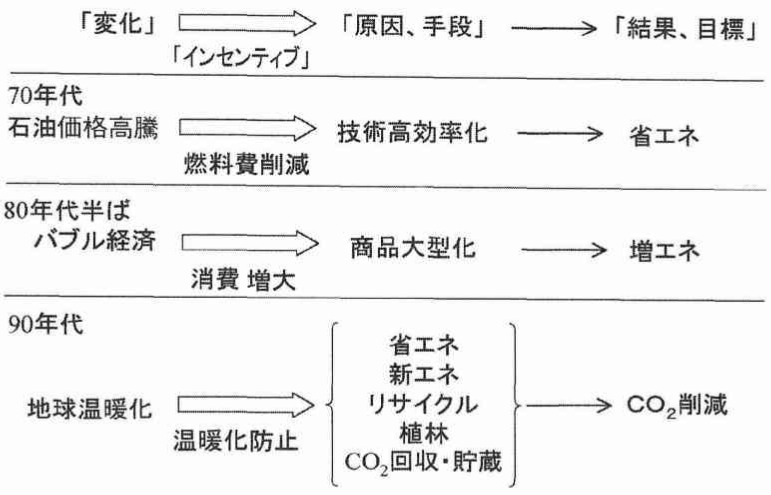


図2　省エネ・インセンティブの時代的変化

ところが，80年代半ばのバブル経済の頃，所得が増えたために消費も増え増エネになりました。90年代に入ったら，今度は地球温暖化が問題となり，対策として二酸化炭素（CO_2）を削減しなければならなくなりました。燃焼によってCO_2を排出する石油など化石燃料の消費を減らし，太陽光，風力，バイオマスなど新エネルギーを導入するとか，物をリサイクルするとか，色々な手があります。しかし，どうもこの温暖化防止策というのは「やると儲かりますよ」という刺激でもないし，コスト削減に駆り立てる刺激でもありません。地球全体が暖かくなるとか，海面が上昇するとかで，経済の次元に下りてこないインセンティブなんです。こういうものに，私の言う「悪い」人間や「悪い」企業というのはなかなか反応しません。だから，70年代以降の30年間で省エネが進んだり進まなかったりしているんです。

やはりここで，漱石が言ったように，人間がどういう刺激に反応するかもう一回考え直さないといけません。「義務の刺激」というのは規制のことです。「道楽の刺激」というのは自発的なアクションです。よく考えてみると，これはどっちもうまくいかないんです。我々は民主主義の社会に住んでいて，わがままになっていますから，「規制はしないでくれ」と言います。また，自発的なアクションで温暖化防止をしようという人は多分少ししかいないと思います。これも駄目ですね。では，どうしたらいいのか。非常に難しい問題だと思います。

5．省エネ行動の類型化

省エネ行動をどういうふうに考えたらいいのかということで，図3を作って見ました。

需要サイドで見たとき，省エネはON型とOFF型の2つに分けられると思います。

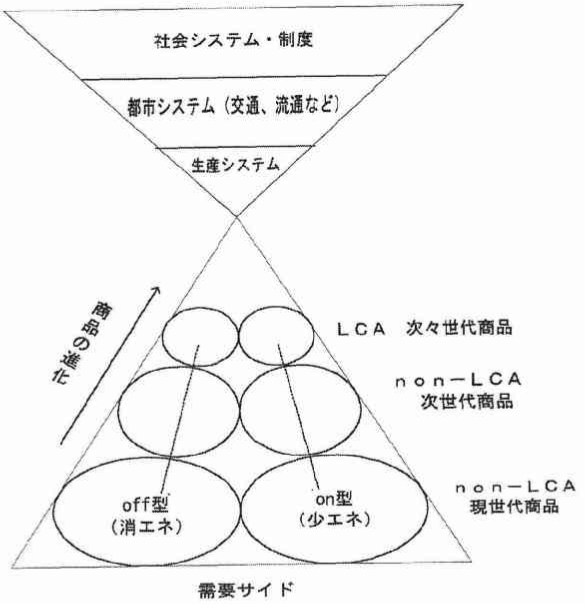


図3　省エネ行動の類型化

ON型の省エネというのは，例えばエアコンの設定温度を夏は1度上げ，冬は1度下げるというような省エネです。

OFF型の省エネというのは，これはまさにエネルギーを使うのをやめるということです。待機電力を切るとか，1時間ぐらいテレビを観ないとかです。

省エネ型製品といってもライフサイクルアセスメント（LCA）で，省エネなのか判定しないといけないと思います。省エネ製品に切り替えていくと，下の三角形で上へ上へと行くわけです。この三角形は機械と人間との関係ということで，どうしてもエネルギーを使わなきゃいけない。その時どうするかという話です。

上の逆三角形は，供給サイドとか，社会全体の仕組みです。社会システムに関しては，エネルギーを使う機会そのものを減らしていこうということで，逆三角形になっています。そういう区別があります。

6．社会システム分科会での検討

「エネルギー学会」の「社会システム分科会」で議論していることを図4にまとめてみました。LCAで物事を考えて色々な法律，企業活動の上流から下流へということで閉じた形で書いてあります。

補助金の活用法とか，トップランナー方式をどういう機種に拡げていくか，どういう形で省エネ商品の表示をするか，ESCOサービスなど企業の省エネをどういう形で進めていくか，機械をどう使うかということでエコドライブ，アイドリングストップとか，車を共有してカーシェアリングで車の稼動率を上げていくとか，台数を減らすとか，色々なものがあります。交通システムだとか，自転車をもっ

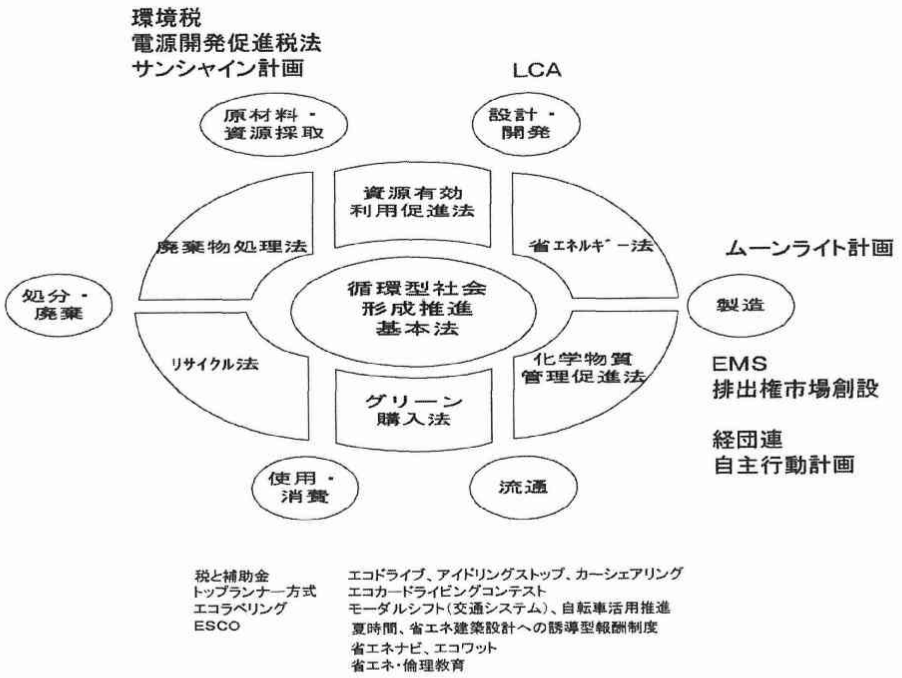


図4　商品ライフサイクルから見た環境保全・省エネ支援・促進策

と使えとか，夏時間とか，それから建築の設計屋さんなんかでも大型で高い設備を導入する設計をした方が報酬が上がるとか，倫理教育をしようとか，いろんなことを研究しています。

7．エネルギー文明学の構想

エネルギー文明学の領域はどこなのか考えてみましょう。図5の真ん中に神様がいて，人間がその神様を中心とする軌道上を動いている。工学というのは神と人間との間にあるような学問です。人間の軌道と工学の軌道の間は幅広いと思うんです。その間を文明学がカバーするのだと思います。つまり，今問題となっている消費をどうコントロールするかとい

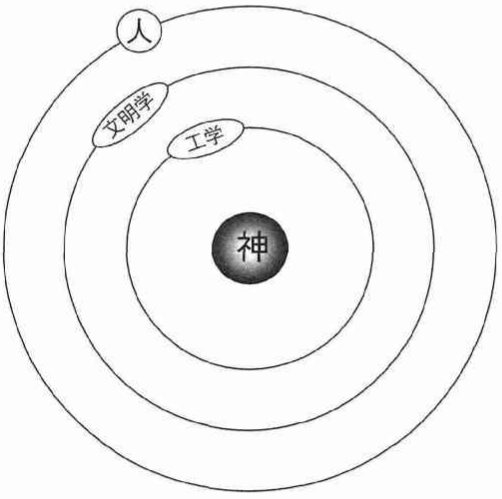


図5　文明学の領域

うことは，簡単なようで，実は非常に難しいです。環境税をかけて値段を上げて人間の行動を変える，機器に働きかけて省エネ型の商品を作るというのもありま

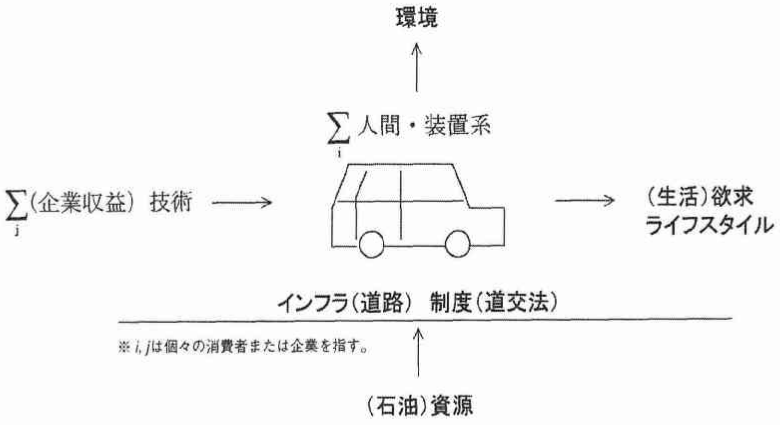


図6　エネルギー文明学の構想

す。人間に働きかけたり，機器に働きかけたり，そういう人間と装置系の両方に働きかけて何か有効な問題解決の何か手立てがないんだろうか。文明学は，そんなことを考えなければいけないわけです。

図6の車を作っている企業はやっぱり儲かるから作っているわけです。儲かるから株主に配当も出せるし，賃金も払える。消費者の方は欲望を満足させるために車を走らせ，結果として環境を汚してしまう。それからインフラも，道路交通法という制度も必要なわけです。

車だけを考えず，企業活動，消費者，環境，資源という横軸と縦軸の皆が考慮すべき対象として入ってくるだろうと思います。こういう学問作りに参加するのはどういう人たちなのか例示したのが図7です。社会システム分科会では，社会学，哲学，環境経済学，LCA，ESCO事業者，法律家も入れて検討を進めております。当然，自然科学とか工学は前提として含まれています。

どうしてかというと，そもそも「エネルギー」という言葉は，1807年にイギリスの物理学者のヤングが作ったんです。ですから，「エネルギー」は物理学的概念なんです。そして，ジュールの実験が1843年，それからヘルム・ホルツの自由エネルギーという熱力学の第2法則の基本が発見されたのは1847年です。蒸気タービンは1884年に発明されました。ジーメンスが発電機を作ったのもやっぱり1870年

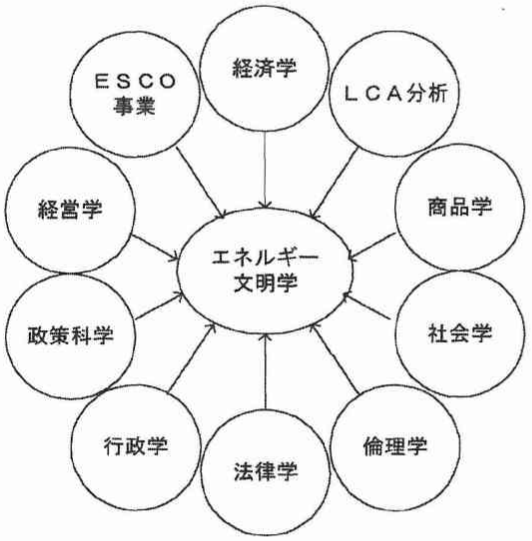


図7　エネルギーへの学際的アプローチ

で19世紀の終わり頃です。

社会科学の研究者でエネルギーに関心を持っている人はあまりいません。私の同僚に聞いても，「燃料電池ができたらガソリン車は要らなくなるし，エネルギー問題は解決だね」と言う人が多いです。水素というのは2次エネルギーなので，それをどこから作ってくるかが問題だなんて気にならないんですね。ある意味では単純です。もう少し社会科学系の人たちがエネルギー問題を研究して，社会的な議論がもっとされる必要があると思ったわけです。

8．省エネと新エネの進め方

（1）エコノミー優先でエコロジー優先へ

環境が大切だからというふうなことで進めていっても話はうまくいかないというのが最近の僕の感触です。エコノミー優先が実はエコロジー優先につながっていく，そういうところで知恵を出さなきゃいけないんじゃないかと思うんです。

図2で過去30年間の省エネの進み方を示しましたが，やはり経済的なメリットがあった70年代に省エネが進んでいます。90年代はエコロジー優先だったと思うのですが，結果として省エネはほとんど進んでいない。だから，人間はやはり「悪」で，わがままになっている。その時に，「わがままではいけない」と言っても駄目なんです。100年前に漱石はそう言っている。だけど，私たちは同じ間違いをやろうとしていたのかも知れません。まだ遅くないから，エコノミー優先でやったらいいんじゃないかと思います。

1つのヒントは，光熱費ゼロ住宅というコンセプトです。既に2万軒ぐらい売れています。これは，まず，色々な断熱材を張りめぐらせてエネルギー消費を3分の1ぐらいに減らす。それから，太陽光発電を入れる。余った分はもちろん売る。さらに，深夜電力を上手に使うんです。そうして，4人家族，新築の住宅で，年間25万円ぐらいの光熱費をほとんどゼロに近づけようというものです。

太陽光発電，エコ給湯器を入れたりすると，250万円くらいかかります。しかし，毎年20万円ぐらいずつ光熱費が減っていきますから，十数年でゼロになるわけです。

（2）一般家庭における省エネの試算

省エネと新エネ導入を同時にやると，一般家庭でどのぐらいの節約が可能か試算してみました。表1に示します。待機電力だけでも9％は減らせるという計算がありますから，5％ぐらいは難しくないでしょう。ガソリン代も入れますと，1家庭で年間30万円ぐらいの光熱費を使っています。4人家族の2900万世帯で

表1　エネルギーへの学際的アプローチ

$30^{万円} \times 5\% \times 2900^{万世帯} = 4350^{億円}$・・・年間総節約額

$4350^{億円} \div (250^{万円} / 3^{kw}) = 52^{万kw}$・・・大陽光発電の年間導入量

$8^{kwh} \times 365^{日} \times 25^{円} / 250^{万円} = 3\%$ ・・・売電収入の年間利回り

エネルギー経費7%の節約で、5%を大陽光発電に投資、
6割は売電で回収し、残りの2%を未回収分4割に充当。
結果としてエネルギー経費の5%節約となる。

4350億円の節約になる。これに見合った光発電としては年間約50万kWの設備が導入可能です。今の仕組みだと売電で年間大体３％ぐらいの利回りになる。すると，元金を別にして，20年間で６割ぐらいは回収できるわけです。残り４割は，深夜電力を使うとかで２％の節約をする。結果として７％節約をしてみる。それで，５％分を太陽光発電に投資するんです。2900万世帯でやると，10年間で500万kWぐらい太陽光発電が導入される計算になります。年間52万kWですから，10年間続ければ520万kWです。これだけで2010年の太陽光発電導入目標である482万kWを超える規模になるんです。

どうしてこういう計算をしたかというと，家庭というのが省エネの仕組みから一番抜けているところだからです。ESCOは企業向けです。ISO14000も企業を対象とする基準であって家庭向けではありません。家庭向けには何もないまま，「温暖化防止のために節約しろ」と言っているだけです。これでは全然効果がありません。

しかし，新エネを導入するとCO_2の削減効果は大きいんです。例えば，３kWの太陽光発電で年間700kgぐらいのCO_2が削減される。ハイブリッド車を買うと250kgぐらいが削減される。だけど，いわゆる省エネというのは，例えば省エネ型の冷蔵庫に買い換えても年間24kgしか節約になりません。使わないときにプラグを抜いても87kg，冷房を１度高め，暖房は１度低めに設定しても30kgぐらいしか減りません。太陽光発電を入れるとか，ハイブリッドカーを買うというのは桁が１つ大きいぐらいの効果があるわけです。ところが，それだけやろうとするとものすごく高くつくわけです。だから，省エネでお金を貯めて，それを新エネに回すというハイブリッド戦略が有効だと思うんです。これによって，家庭も儲かるということです。

統計上，家庭が占めるエネルギーのシェアは14％です。しかし，14％の中にガソリン消費も水の消費も入っていません。水も電気を使います。それから，物に含まれているライフサイクル的な間接的エネルギーを入れますと，最終エネルギー消費の50％ぐらいが家庭用で使われている。産業というのは消費のために生産しているわけですから，これは当然です。

だから，ライフサイクル的にすごい省エネの商品に買い換えていけば，家庭がもつインパクトは非常に大きいんです。ところが，「義務の刺激」でも難しい。そこで，エコノミー優先ということで光熱費ゼロ住宅のコンセプトを応用できるのではないかというのが今日の具体的な提案の１つです。

９．エネルギー問題と火

ギリシャ神話に「プロメテウスの火とパンドラの壺」という話があります。万能の神ゼウスは，人間に火を与えませんでした。人間は生の肉を食べ，寒さに震え，野獣を恐れて岩陰に潜んでいました。毛皮もなく，ひどく惨めでした。

そこで人間であるプロメテウスが天界から火を盗んで来るのです。人間が火を使うようになったのでゼウスは「けしからん」と言って，人形に息を吹き込んで人類最初の女性，パンドラを作りました。そして，パンドラをプロメテウスの妻にと差し向けたのです。その時，パンドラは，ゼウスから渡された１つのプレゼントを持っていたんです。それは「絶対に開けてはならない」とゼウスに言われていた壺でしたが，好奇心を抑えることができなかったパンドラは壺のフタを開けてしまいます。すると，壺の中から疑いや争い、憎しみなどが飛び出して来て，一斉に世界に広がってしまいました。慌ててフタを元に戻したんですが，希望だけが壺の中に残されたという話です。実はプロメテウスが盗んだ火というのは，バイオマスの火だったんです。

動物が植物を食べ，その動物の死骸が化石燃料になった。その化石燃料を燃やしたためにCO_2が出てくるわけです。

これまでのエネルギー変換技術の主流は，熱機関の技術でした。今，その熱機関をやめて「直接発電」，ダイレクト・コンバージョンという技術を使おう，火を使わない，火に頼らないエネルギー革命が始まっていると思います。燃料電池も太陽光発電もそうです。

いいエネルギーは何かというと，私は「クリーン」，「安全」，「安い」，「いつまでもなくならない」という条件を満たすエネルギーだと定義しています。ところが，色々なエネルギーをチェックしてみると，４つの条件の全てを満たすものはありません。しかし，我々には「希望」が残されているわけですから，何とか４つの条件をクリアするエネルギーを見つけなければいけません。

一般の消費者も政府も政治家も，こういうエネルギーを人間や社会の観点から問題にしていかなくてはいけないんじゃないか。そのために，色々な学問を融合して「エネルギー文明学」を作っていくことが非常に大切だと思うんです。「言うは易く，行うは難し」です。工学の中ですらエネルギーを扱う学問の融合は難しいです。電気工学，機械工学，化学工学，あるいは原子力工学とかがあります。発電所で何か問題があったときに「１人で全部わかる人はいない」と言われる所以です。

社会科学で融合が可能なのかということですが，そう簡単ではないと思います。しかし，私が感じるところでは，エネルギーは物理学の問題から社会的選択の問題に移ってきていると思います。その社会的選択を支える有力な理論や学問があまりはっきりしていません。そこに一つの大きな問題があるだろうと思っています。（拍手）

〔寄稿〕

中国のエネルギー事情について*

藤　冨　正　晴　（㈶日本エネルギー経済研究所
アジア太平洋エネルギー研究センター所長）

1．はじめに

私どもアジア太平洋エネルギー研究センター（APERC）は，1995年11月のAPEC（アジア太平洋経済協力）大阪会議で日本が提案し，㈶日本エネルギー経済研究所の付置機関として1996年７月に発足したAPECのエネルギー関係の研究センターです。当センターでは，APECの21エコノミー（19カ国と２地域）から１人ずつ研究員を日本に招聘し，１～３年東京に住み，一緒にエネルギー関係の研究をしています。基本的にはAPEC全体の計量モデルに基づいた長期エネルギー需給見通しを作ろうとしています。

今日は，「APECエネルギー需給見通し」

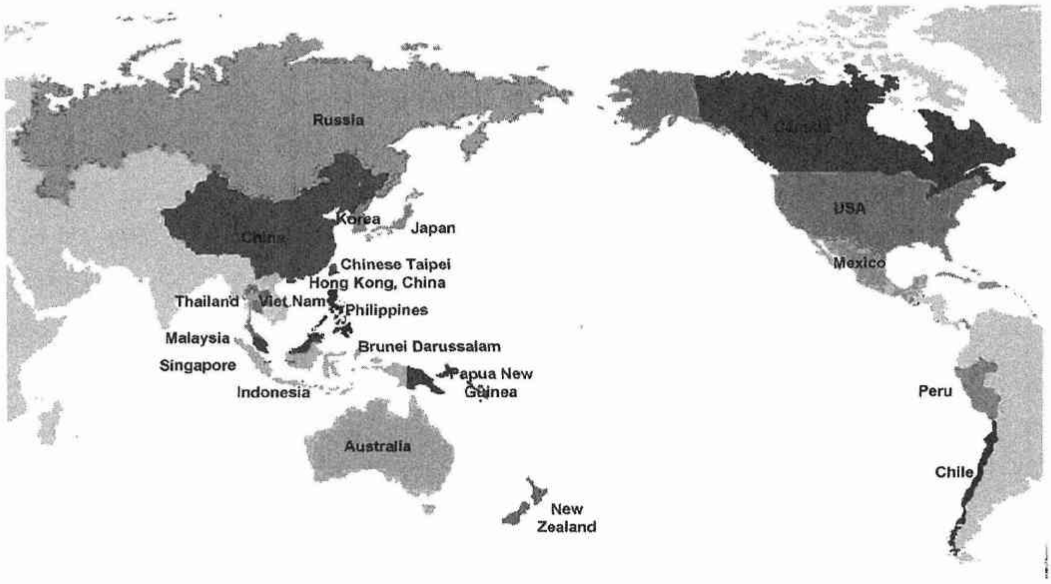


図１　APEC21エコノミー

＊本稿は，本年４月９日の「エネルギー基本戦略部会」（社）日本工学アカデミーの専門委員会で，㈶エネルギー総合工学研究所は事務局に協力）第８回会合におけるご講演を，本誌掲載のためにテープ起こししたものです。

(2002年) をもとに，中国のエネルギー関係，特に石油や電力に関する当センターの調査についてお話しするとともに，中国のエネルギー政策を担当する部局から聞いた話をご紹介します。さらに，今後20年間で約4兆ドルのエネルギー関連投資が必要だとする「APEC地域におけるエネルギー投資見通し」(2003年) のお話もさせていただこうと思います。

2．APECエネルギー長期需給見通し

(1) アジア全体の見通し

図2はアジアの人口増加の予測です。中国は「一人っ子政策」を採っているために，2030年に14億3,000万人ぐらいで頭打ちになり，その後，緩やかに下降すると中国統計局が言っています。日本の人口も2年以内にピークを打ちますが，労働人口は既に

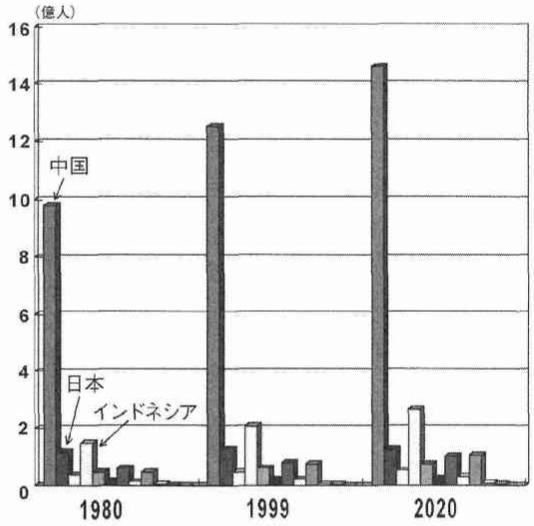


図2　アジアの人口

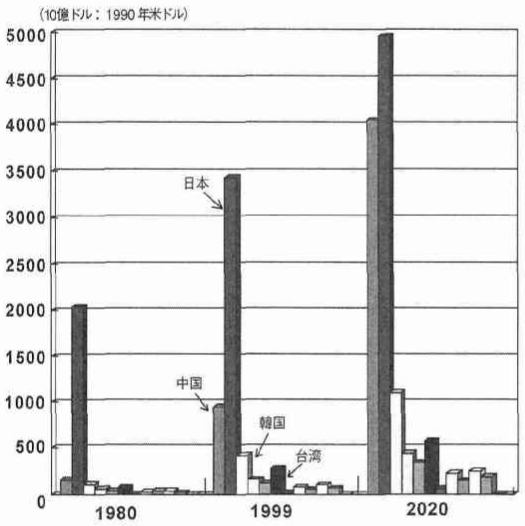
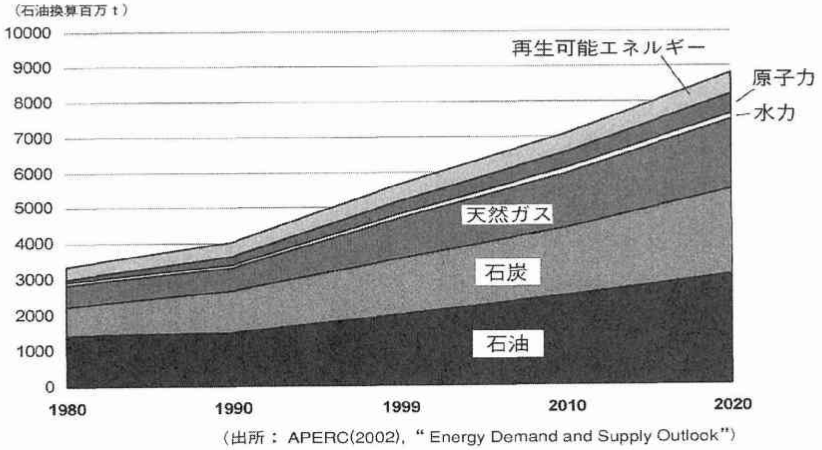


図3　アジアのGDP



(出所：APERC(2002),“Energy Demand and Supply Outlook”)

図4　APECのエネルギー需要予測

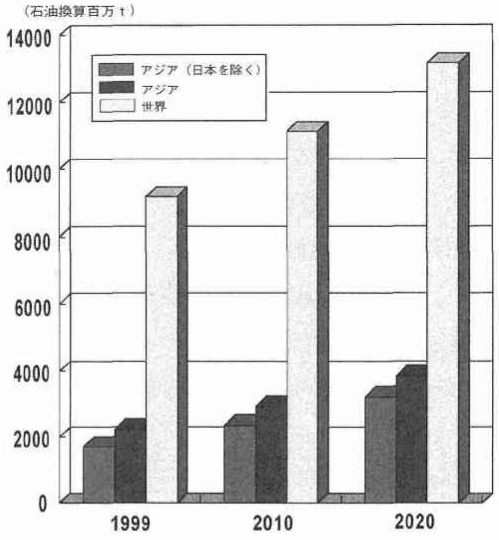


図５　１次エネルギー供給

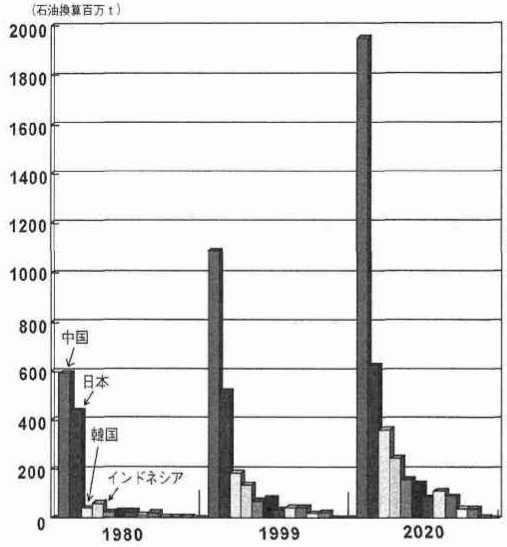


図６　アジアの１次エネルギー供給

1995年にピークを打っています。

図３はアジアのGDPの推移です。中国がどんどん日本に追いついてきています。

図４は，2020年までのAPEC全体のエネルギー需要の伸びです。1999年から2020年の増加率は年2.1％になります。エネルギー構成にはそれほどの変化はありません。各エネルギー源に対する需要の伸び（年平均）は，石油2.1％，石炭2.1％，天然ガス2.6％，水力2.7％，原子力1.7％，再生可能エネルギー1.1％と予測しています。

図５は世界全体のエネルギー供給でアジアが占める割合が大きくなっていくことを示しています。しかも，アジアの中で特にエネルギーの供給が増えてくるのは，図６で分かるように圧倒的に中国なんです。

（２）中国の見通し

図７は中国のエネルギー消費です。世界

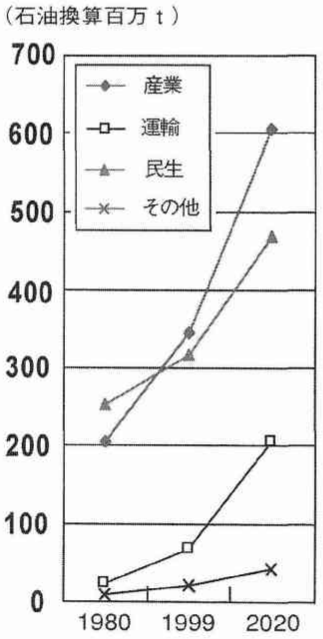


図７　中国のエネルギー消費構造

第２位のエネルギー消費国ですが，産業用の半分は石炭で賄っています。運輸部門の伸びが非常に大きいです。また，電力需要も大きく伸びています。

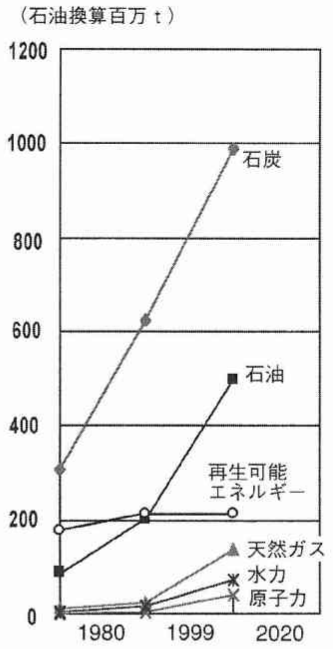


図８　中国のエネルギー供給構造

図８は中国のエネルギー供給構造です。石炭の生産，消費量ともに世界１ですし，何より絶対量がありますから，これからも大きく伸びていきます。

天然ガスは，2010年までに10～15％になる。それを西東パイプラインで供給しようとしています。

原子力も2020年には設備容量で40GWを確保しようという大きな計画があります。

３．中国のエネルギー政策：国家発展改革委員会（NDRC）

（１）エネルギー戦略の大枠

APECには10のワーキンググループがありますが，その中の域内エネルギー協力ワーキンググループの会合が３月下旬に北京でありました。

表１　中国のエネルギー政策の重点項目

①エネルギー戦略
②エネルギー供給の変化
③深刻な環境問題
④計画経済から社会主義市場経済への移行

前回私が北京に行ったのは８年ぐらい前で，天安門広場に香港復帰まであと何日という掲示があった頃です。当時走っていたタクシーはダイハツの小型車でした。今回行ってびっくりしたことに，もうダイハツのタクシーは全く走っていなくて，シトロエン，フォルクスワーゲンの中型車になっていました。中国では道路網もかなり整備されていました。当時は上海から秦山（シンザン）の原子力発電所へは，普通の道を天秤棒を担いでいる人にぶつかりそうになりながら３時間かけて行っていました。ところが，今は上海から秦山の側まで高速道路が通っていて，移動中にスリルを味わうことはないそうです。

APECの会合で中国のエネルギー政策について，全体を統御している国家発展改革委員会（NDRC）の副主任と担当者が中国のエネルギー事情について話をしてくれました。

彼らが強調していた主な項目を表１に示しました。

[政策の基本姿勢]

エネルギー政策について，APECの中で

共通の理解を作ることは可能でしょうが，各国でアプローチが異なりますから，各国の政策について互いに異なる意見を尊重するということをベースにしています。

[石炭]

石炭は，向こう数年間で，１次エネルギー供給に占める比率を70％から66％まで下げたそうです。

[省エネ]

エネルギー供給の伸びが，国内総生産（GDP）の伸びに追いつかない現状で，この先もGDPの伸びを支えるためには，省エネが非常に重要だと言っていました。

例えば，エアコンについては，強制的な基準を結構作っています。冷蔵庫，照明などについても結構，色々な基準を作って努力しています。

[環境問題]

特に大気汚染は深刻で，北京でも雨が降った日の次の朝は青空が広がっていましたが，それから日を追うごとにスモッグで空が黒くなっていきます。車で１時間ぐらいの万里の長城でもスモッグがかかっていました。硫化物（SOx），窒素酸化物（NOx）の濃度は，世界保健機関（WHO）の基準値や日本の基準値に比べてはるかに悪い状態になっています。

[市場経済への移行]

計画経済から社会主義市場経済への移行は，NDRCのパンフレットの最初に書いてあります。つまり，開放改革政策を強く推進していくんだという意思表明です。

（２）対応策

エネルギー供給量は過去20年間，年平均３.43％というハイペースで伸びてきました。ところが，それ以上に伸びているのがGDPで年平均9.3％です。NDRCは向こう20年間にエネルギー供給の伸びを年４％と想定しています。

[石油，ガス開発の体制]

石油，天然ガスの開発を行う石油会社，ガス会社があります。中国を大きく２つの地域に分けて，北と西はChina National Petroleum Corp.（CNPC），南と東はChina Petrochemical Corp.（Sinopec），海上はChina National Offshore Oil Corp.（CNOOC）がやっています。３社とも開発資金を2000年から2001年にかけて香港，ニューヨーク，ロンドンの株式市場に上場して調達しています。資金確保の重点は，西東ガスパイプライン，西東送電線，三峡ダムに置いています。

電源開発についても，現在でも３億8,000万kWの設備容量があり，日本よりも大きいのですが，これから毎年3,000万kWぐらいずつ増やしていく計画です。

天然ガスについてさらに言うと，西東ガスパイプライン以外に，オーストラリア，インドネシアから液化天然ガス（LNG）を持ってくる計画もあります。山東省，江蘇省，福建省，広東省にLNG基地を作ろうとしています。

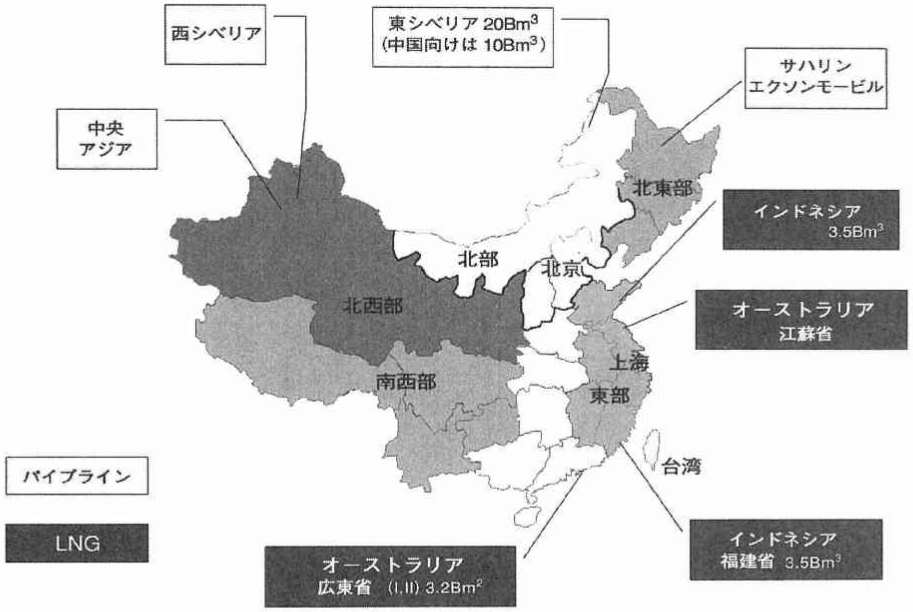


図９　中国の石油、ガス開発プロジェクト

特に彼らが力を入れているのは，省エネ，ハイテクなどの高付加価値産業です。

石油備蓄についても，候補地から４サイトを選定中とのことでしたが，実際には数カ所で着工しているということです。

彼らのエネルギー政策のベースになっているのは，第10次５カ年計画（2001年～2005年）です。さらに，2003年になって新しい開発戦略を出して，今言ったことを再確認しています。2002年に世界貿易機関（WTO）に加盟したこともあって，一生懸命にやっているようです。

問題は石炭の利用です。彼らが言っていた中で面白かったのは，加圧流動床炉（PFBC），ガス化複合発電（IGCC）もやりますけど，石炭液化もやるということです。これは，エネルギーセキュリティのためだけでなく，石油代替燃料を作るためにやるんだということです。

エネルギーセキュリティが彼らにとって一番重要です。そのために，まず，国内資源の開発，２番目に海外資源の開発，３番目に石油輸入，４番目が石炭液化による石油代替燃料作りです。2007年までに年間100万トンの石炭液化を可能にするプラントを作るという途方もない計画があります。そんなものが急にできるのかという議論はあるのですが，彼らはこれにまじめに取り組んでいます。

（３）提案

[中東依存度低下へ向けて]

今の中国の石油輸入戦略というのは，石油の中東依存度が高くなっていく一方で，石油の供給先の分散化，海外での石油開発プロジェクトにどう参加していくかということです。

中国の石油精製所は効率が悪く，ガソ

リン，灯油などの石油製品が投入する原油の７割ぐらいしか出ません。因みに日本は８割程度です。そこで，中国は原油と石油製品の両方を輸入しています。もし中国が中東依存度を減らしたいと思えば，もう少しアジア諸国から石油製品を輸入すれば良いと思います。

[環境との調和ー炭素税の導入]

中国の電力設備は，2002年で発電出力３億7,900万kWです。電力需要の伸びは，エネルギー需要全体の増加よりも速く，これから20年間で設備は２倍以上，電力量は３倍になると予想されています。増加分の大半は火力発電所で賄うことになるわけですが，もともと火力発電所の８割ぐらいが石炭火力ですから，放っておくと酸性雨の問題も起こります。

石炭火力がいいか，コンバインドサイクルガスタービン（CCGT）がいいか考えてみましょう。

排煙脱硫装置などを付けた石炭火力（60万kW，発電効率34％），CCGT（30万kW×２基，発電効率50％）を比較すると，固定費は，520ドル/kWぐらいで変わりませんが，燃料費で差が出てきます。燃料費が石炭が32ドル/ｔ，ガスが4.17ドル/百万Btuだと，発電コストは1.27セント/kWhだけCCGTが高くなります。西東ガスパイプラインが上海まで来たときに，4.2ドル/百万Btuぐらいになると言われていますが，この場合，石炭価格が60ドルだとやっと競合できるわけです。ところが，石炭は実際に非常に安くて32ドル台ですから，圧倒的に石炭火力のほうが有利になります。

そこで図10のように，$CO_2$１トン当り20ドルくらいの炭素税を導入すると，CCGTと石炭火力が競合できるようになります。つまり，短期的には経済性の面でCCGTはあまり有望でなくても，長期的に環境面で見ていくと結構いいのではないかと思うのです。

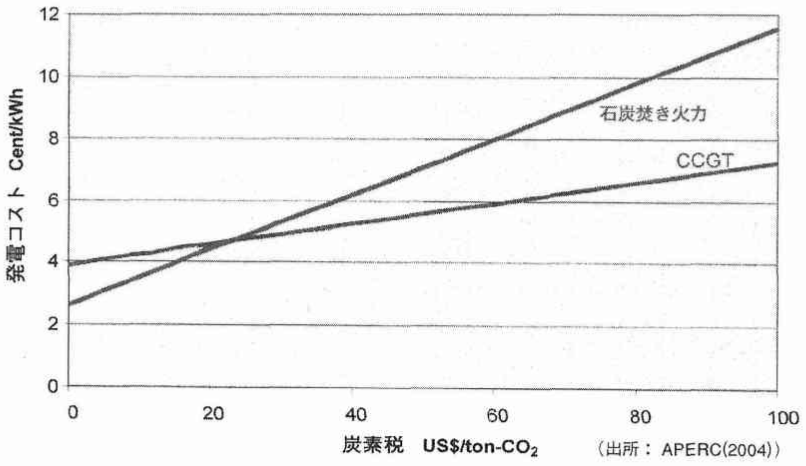


図10　炭素税導入の経済性に与える効果

4．APECエネルギー投資見通し

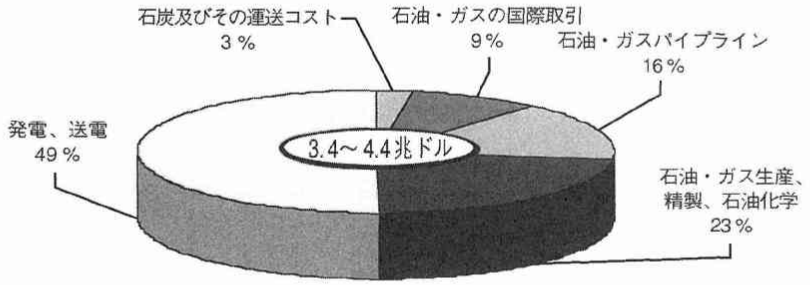
（1）必要投資額の予測

図11は，2020年までのエネルギー需給に基づいて，向こう20年間にエネルギー施設を作るのにAPEC全体で3.4～4.4兆ドル，日本を除くアジア諸国では最高2.7兆ドルかかることを示しています。半分近くが電力関係，次は石油やガスの生産，精製にかかります。

APECエコノミー別で見ますと，図12に示すように，中国の1.3兆ドルが突出しており，APECエコノミー全体の29%，日本を除くアジアの48%を占めています。

（2）途上国による資金調達の難しさ

問題はその必要投資額を調達できるかということです。先進国は色々な調達手段が



（出所：APERC(2003),"Energy Investment Outlook for the APEC Region"）

図11　2000～2020年までに必要なエネルギー関連投資額（1999年米ドルで評価）

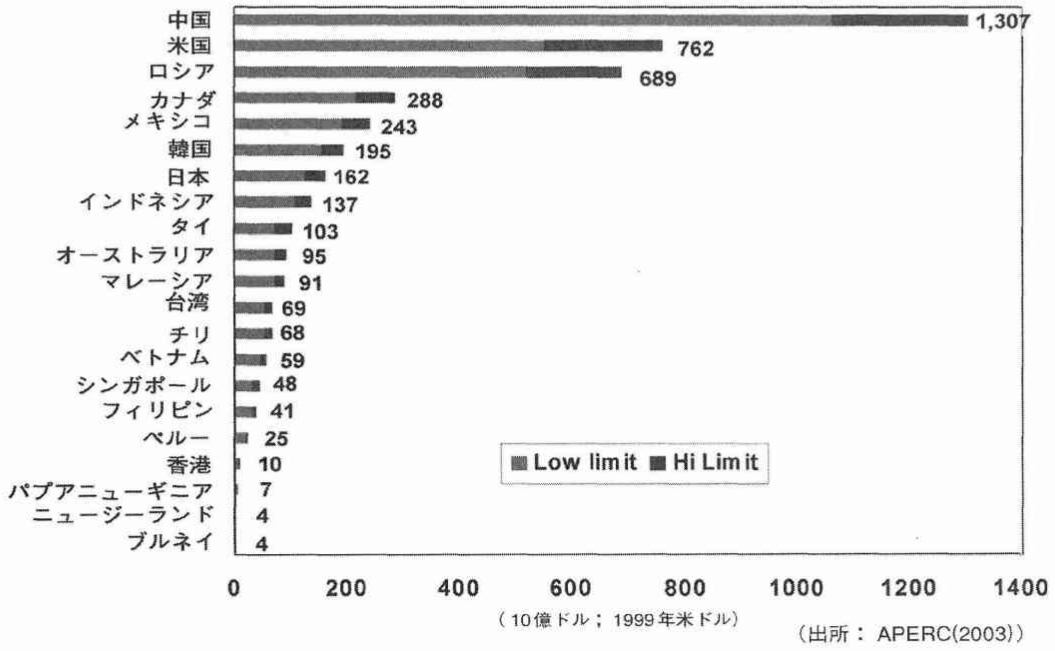


図12　APECエコノミー別の必要投資額（2000～2020年）

表2　アジアにおけるプロジェクトの失敗例と原因

	プロジェクト	失敗の原因
中国	Shiajiao B & C（広東省）	金融リスク：予想収益率18％のところ、政府が10％で制限を設けたため、プロジェクトの開始が阻まれた。
インドネシア	パイトン発電所	為替リスク：現地通貨ルピアの切り下げにより、当初契約されていた価格（$0.055/kWh）での買取りが不能となった。
タイ	プロジェクトのフェーズ1	経済リスク：供給過剰問題に対処するため、4つのコンソーシアムがプロジェクトの延期に合意した。
台湾	IPPプロジェクトのフェーズ1、2	現地サポートの欠如：8件のIPPプロジェクトのうち2件がキャンセルされた。
	IPPプロジェクトのフェーズ3	インフラリスク：6件のIPPプロジェクトの申請がなされ、タイ電力が購入契約を検討していたが、送電線がなかったため、中部、南部の計画が難しくなった。
韓国	SK大邱プロジェクト	インフラリスク：大邱電力がLNG焚きコンバインドサイクルプラントの建設を予定していたが、工業用水が足りない、パイプライン網の敷設が難しいということで全ての建設作業が遅れた。

（出所：APERC(2003)）

あるので心配はしていないですが，問題は発展途上国がうまく資本調達ができるか。国内の貯蓄で充足できない部分については海外から調達するとか，色々なプロジェクトに海外から投資を呼び込むことができるかということです。

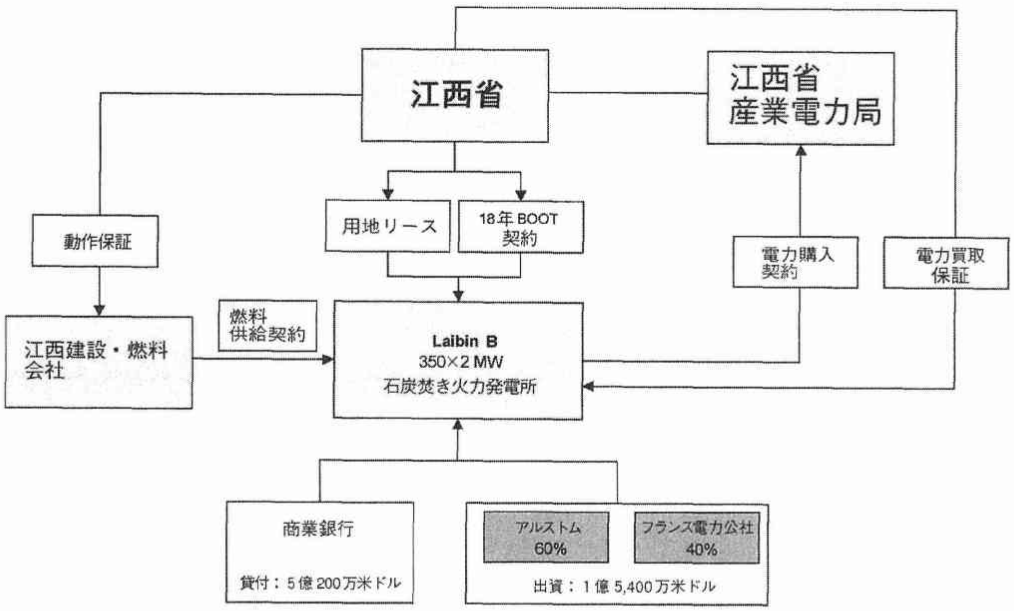
特に発展途上国の場合，投資には高いリスクが伴います。経済的なリスクの中ではプロジェクトが予定どおり終わるか，途中で現地通貨の価値が下がらないか，環境の規制変更がないかとかのリスクがあります。さらに，政治リスク，戦争のようなリスクもあります。このようなリスクのために，発展途上国には資金が集まりにくいのではないかと思われます。

表2は，アジアでのプロジェクトの失敗例を集め，その原因を示しています。例えば，インドネシアのパイトン発電所プロジェクトでは，計画時に0.055ドル／kWhだった売値が現地通貨ルピアの価値下落によって0.03ドル/kWhに下がった（為替リスク）ために採算が合わなくなってしまいました。

（3）重要な投資受入国政府の役割

中国の石炭火力（35万kW×2基）プロジェクトで，ライビンBのBOTプロジェクトは，中央政府と地方政府の共同作業で成功した例を図13に示しました。江西省（現在の江西壮族自治区）がプロジェクトがうまくいかなくなったときに，電気の63％を買い受けることを保証したのです。北京の中央政府もフィージビリティスタディを江西省と一緒になってやったり，その後必要となる色々な許認可を積極的に与えたりして，うまく行ったケースです。

エネルギー関連投資の必要資金を調達するには，規制緩和の程度，その時の石油価



（出所：Navitt and Fabozzi(2000)）

図13　中国での成功例ー石炭火力発電所プロジェクト

格，国内における金融市場の有無などが重要になります。つまりは，受入国の政府の動向が一番重要なわけです。ただ，政府が色々なことを決断するときには，経済事情だけでなく，社会的要請，安全保障など色々なことを考慮します。それがプロジェクトのリスク要因になり得るのです。

5．最後に

2010年ぐらいから非OPEC諸国の原油生産が頭を打ってきて，現在，世界の原油生産力の３分の１ぐらいしかないOPECの供給力が2010年ぐらいになってくると，非OPEC諸国と均衡してくくると予想されます。

わが国は，各種のエネルギーを色々な場所から輸入しているわけですが，石油に限らず早く手を打っておかないと手遅れになるのではないかと思います。私どもAPERCは，今は協調的な21エコノミーですが，資源争奪戦の状況になってくると北東アジアの協力もうまくいかなくなるのではないかと心配します。ですから，まだ比較的余裕のある今のうちに何かをしなければいけない。そういうことが，APERCの使命の１つではないかと思っています。研究者の人数が少ないので，どう補強しようか考えていますし，外のいろんな研究所と連携をとって，実際のエネルギープロジェクトに近いところで仕事をして行きたいと思っています。以上で終わらせていただきます。（拍手）

〔寄稿〕

わが国の温暖化対策と排出量取引模擬実験の結果について

伊藤一道（㈱三菱総合研究所　地球環境研究本部
サステナビリティ研究部
環境政策・経営研究チームチームリーダー）

1．はじめに

1992年の国際連合気候変動枠組条約に基づき国際的な協調の下で温暖化問題への取り組みが実施されることとなった。本条約に基づき1997年に京都議定書が採択されているが，昨今の関心の１つはロシアが批准してこの議定書が発効するかどうかということである(1)。京都議定書が発効すれば批准国は議定書遵守の義務を国際的に負うこととなり，わが国も基準年より６％の温室効果ガス排出量の削減を迫られることとなる。

本稿では，このような状況下でわが国の温暖化対策及びその周辺について概観した後，株式会社三菱総合研究所など(2)が実施した排出量取引模擬実験の結果を引用して，今後のわが国における温暖化対策について考察する。

表１　京都議定書の数値目標

国・地域名	数値目標	基準年排出量（百万t-CO_2e）
フランス	0%	554
ドイツ	-21%	1,211
英国	-12.5%	745
ＥＵ（再掲）	-8%	4,223
ロシア	0%	3,040
米国	-7%	6,070
日本	-6%	1,229

（出所：基準年排出量は気候変動枠組条約事務局資料から概算）

2．わが国の温暖化対策

ここでは，諸外国の対応状況について概観し，わが国の置かれている状況を述べるとともに，温暖化対策のメリット／デメリットに触れることとする。

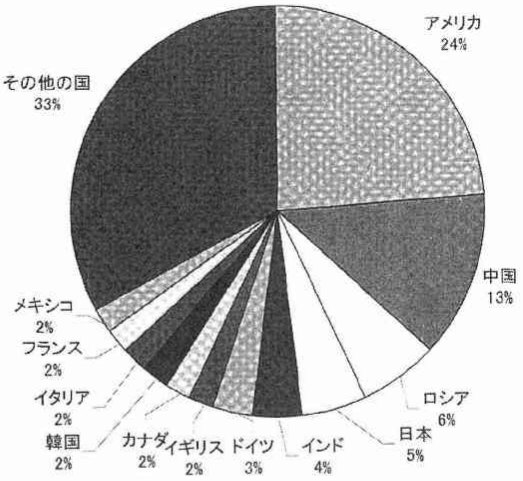
（１）各国の状況

表１に京都議定書の温室効果ガス排出削減目標を示す。

この削減目標は，科学的に決まったも

(1) 京都議定書は1997年11月COP3（第３回気候変動枠組み条約締約国会議）にて採択された。附属書。国，すなわち削減目標を設定されている先進国・移行期経済国（東欧及び旧ソ連諸国）の排出量の55%超と55カ国（途上国など含む）の批准が発効要件となっている。後者は既に満たされている。

(2) 株式会社三菱総合研究所とナットソースジャパンが共同で実施した。



（出所：OECD/IEA CO_2 Emissions from Fuel Combustion）

図１　エネルギー起源CO_2排出量（2000年）

のではなく政治的に決まったものである。削減の数値目標が日本（－６％），米国（－７％），ＥＵ（－８％）と規則的に並んでいることがそれを物語っている。

わが国は，図１に示すように１国としての排出量が大きい，また表２に示すように１人あたりの二酸化炭素（CO_2）排出量は比較的少ないという特徴を持って

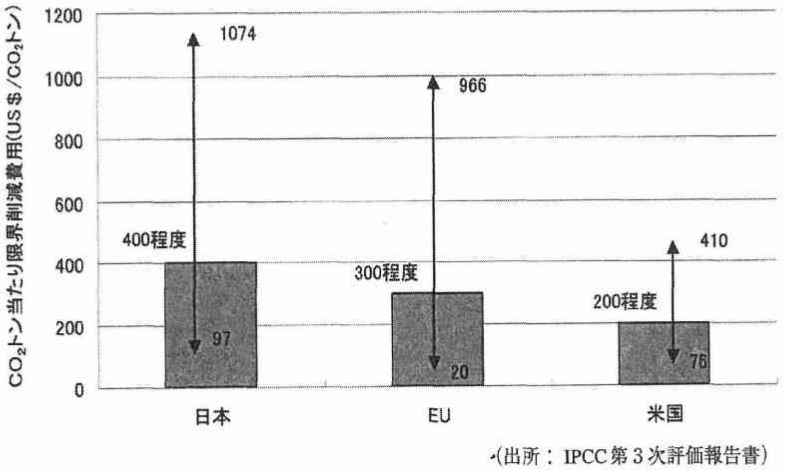
表２　１人当りのCO_2排出量

国　名	排出量（t-CO_2e/人）
米国	19.8
ロシア	9.8
ドイツ	9.6
イギリス	9.5
日本	9.4
中国	2.2
インド	1.1

（出所：OECD/IEA CO_2 Emissions from Fuel Combustion）

おり，排出削減目標がＥＵなどに比べて「厳しい」状況にあるといえる。削減可能性がどの程度あるか短絡的に言うことはできないが，一般的に，ＥＵは東欧との統合，あるいは老朽化してきた石炭燃料利用設備のガスへの転換などのオプションも多くあるなどとされ日本に比べて排出削減が容易ではないかと考えられる。

温室効果ガスの削減コストという観点から見ると，図２に示すようにわが国においてCO_2を１トン削減するコストはＥＵや米国のコストに比べてかなり大きい。



（出所：IPCC第３次評価報告書）

図２　各国・地域の温室効果ガス排出削減対策のコスト比較

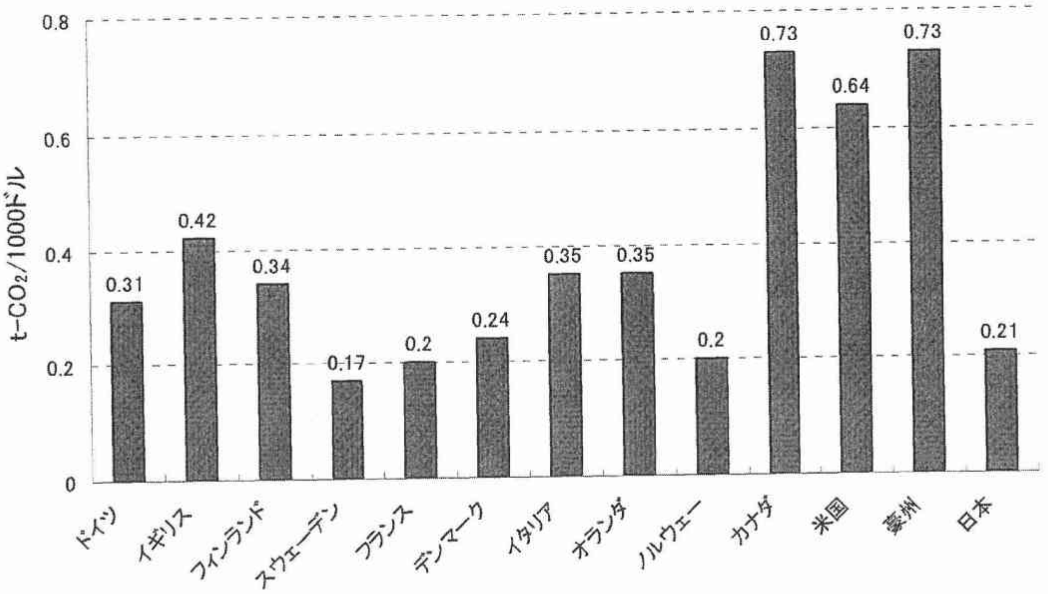


図３　GDP当りのエネルギー起源CO_2排出量

同じCO_2排出量を削減するのに，わが国が米国やＥＵに比べとても高い費用がかかることを示している。逆にいえば，日本は相当，省エネルギー・エネルギー効率の向上が進んでいると考えられる。

具体的に各国の国内総生産（GDP）あたりのCO_2排出量を比較すると図３のとおりである。わが国は先進各国中でGDPあたりのCO_2排出量が相当少ない。他に少ない国は水力発電を多く用いている北欧，原子力発電を多く用いているフランスなどである。このようにCO_2排出量の少ないエネルギー需給構造となっている先進国では，一般にCO_2排出削減対策コストが割高になる傾向にあると考えられる。

ところで，京都議定書に係る大きな問題点として世界最大の温室効果ガス排出国である米国が入っていないことがあげられる。なお，世界第２位の排出国である中国は途上国であるために目標設定をしていない（他の途上国，例えばインドも同様）。こう考えると現在の京都議定書の削減義務を負う国は日本も含めて少数派であり，現時点で「地球温暖化問題は国際問題である(3)」という前提はやや崩れてスタートしたともいえる(4)。

（２）温暖化対策のメリットとデメリット

京都議定書が発効した暁には(5)，議定書批准国は具体的な温室効果ガスの排出

(3) 世界中のどこで二酸化炭素を排出しても同じ１トンなら影響は同じである。

(4) 1997年の京都会議直前に米国はバード上院議員提案である「途上国の意味ある参加」と「経済的影響の回避」を求める決議を95対0の全会一致で採択しており，簡単に議定書に参加できる状態にはない。

(5) ＥＵは仮に京都議定書が発効しなくてもＥＵ独自に排出量取引制度の導入を行うことを決めつつある。

削減に取り組む義務を負う。

その際，各国が採りうる国内制度として大きく以下の３つがあげられる。

① 環境税

CO_2排出に課税される際には炭素税とも呼ばれる。

② 排出量取引

排出削減目標を下回った（削減達成）者が得るクレジットを取引できる。

③ 自主行動計画

企業の自主的取り組みであり，協定とも呼ばれる。

これらの制度の産業界及び政府関係者の利害を概略的にとりまとめる。**表３**には環境税 (6)，排出量取引 (7)，自主行動計画 (8) について示す。

環境税は，排出削減ビジネスにかかわる者（例：ブローカー，排出削減プロジェクト実施者等）にはビジネスチャンスが増えメリットがあるが，規制対象者にはデメリットになる。

排出量取引は，制度設計が先行するＥＵでは，現在，排出量取引制度が議論されているが環境税や自主協定の見直しの

表３　環境税、排出量取引、自主行動計画のメリットとデメリット

		政府	産業界	
			政策の対象者	CO_2ビジネス
環境税	メリット	・規制するためのコストがあまりかからない（現行のガソリン税、軽油引取税、石炭税等に加えれば良い）。	・特になし。	・省エネルギー技術保有企業は、売上が増加する。
	デメリット	・計画通りCO_2が減少するか否か不明。	・燃料費が上昇し、利益を圧迫する。 ・燃料費を製品価格に上乗せした場合、売上高が減少する。	・特になし。
排出量取引	メリット	・各企業、工場に排出権を割当てるため、計画通りのCO_2削減が可能。	・目標以上に削減できれば排出権を売却できる。	・排出権関連ビジネスの売上増大（CO_2削減プロジェクトの開発、ブローカー、認証機関、省エネルギー技術保有メーカー）。
	デメリット	・規制するためのコストが高い（個別産業界・企業との目標設定の交渉、排出量のモニタリング制度の確立、取引所の創設）。	・省エネ投資、海外でのCO_2削減プロジェクト、排出権購入等のCO_2削減コストの発生。	・特になし。
自主行動計画	メリット	・現行の日本経団連自主行動計画をベースにすれば比較的導入し易い。	・特になし。	・省エネルギー技術保有メーカーの売上増大。
	デメリット	・企業の排出量モニタリング制度の確立のためのコストがかかる。	・省エネ投資、海外でのCO_2削減プロジェクト等のCO_2削減コストの発生。	・特になし。

(6) 北欧諸国等では多くが導入済みである。

(7) 中国等の途上国が排出「権」という概念に反対のため日本政府は「排出削減量（クレジット）」等と標記する。

(8) ドイツなどでは欧州の排出量取引制度の議論が始まるまでは自主協定制度が政府と産業界の間で締結されており、温暖化対策の根幹をなしていた。

問題も生じている。これらの制度はそれぞれが有機的に結合し補完関係をなして実施・導入されており（ポリシーミックス），排出量取引のみが実施されると言うわけではない。

（3）わが国の温暖化対策策定の現状

京都議定書を批准したわが国は，「地球温暖化対策推進大綱」を国の温暖化対策の根幹として位置付けている(9)。この大綱は、1998年６月に閣議決定され実施されている。大綱を具体化するための施策メニューが各省庁から示されており，ステップ・バイ・ステップ・アプローチが取られている。それらの取り組みの見直しが今年度にあたっており，今年度中には第２ステップの対策案や取り組みスキームが決定され，第１ステップからの継続施策に加え新規施策が決まることとなる。

既述のように京都議定書発効はロシアの議定書批准に依存している。現時点では発効しない可能性も否定できない(10)。ロシアが批准して議定書が発効した場合，わが国の６％削減目標は国際公約であり，不遵守の時にはペナルティーが規定されている（目標未達分の1.3倍のクレジットを次の約束期間のクレジットから差し引く）。議定書が発効すると考えれば目標の達成意欲や取り組み不足部分の補填対策を急速に高めていく必要がある。逆に，議定書が発効しない場合，第１約束期間の６％削減目標に向けての取り組みが遅れる，あるいは変更を余儀なくされる可能性もある(11)。現時点では，ロシアは批准しそうだがいつになるか全く分からない状況である。このため，今年度，わが国の政策のステップアップも一部分は玉虫色で決着する可能性も高いと思われる。

（4）「両にらみ」戦略の選択

わが国にとっての最悪ケースは，2007年（京都議定書の第１約束期間の前年）にロシアが議定書を批准し発効することである。その場合、削減活動をあまりしていない企業はどうなるか想像してみると良いだろう。これが国レベルで生じる可能性を考えると，現時点では，京都議定書が発効する，しないというのを両にらみで対策を考慮しておくことが多くの企業さらには日本政府に求められるスタンスであろう。

省エネとエネルギー効率向上が進んだ日本にとって，京都議定書遵守コストは高く，京都議定書自体が他国・地域と比較して不平等な取り決めであるとの声もある。実際，米国はそのようなロジックで議定書を批准しないと言っている。

しかし，現実問題として日本が京都議定書を積極的に離脱することは考えられ

(9) 地球温暖化対策推進本部（本部長：内閣総理大臣）が設置され，その閣議決定（温暖化対策推進大綱）がわが国の温暖化政策の根幹となっている。

(10) 2004年５月21日プーチン大統領がＥＵとの包括的な経済交渉を受け，京都議定書の批准に向けた検討を早めることを述べた。議定書の批准に前向きな姿勢に変化したと解釈することもできるが「検討を早める」と述べただけであり，「対応未定」状態は変わらないだろう。

(11) 既述の通り日本政府は京都議定書が発効し，国際公約としてわが国が排出削減を達成することを前提に大綱を策定している。

ない。そのため「両にらみ」戦略を選択するしかない。そう考えると，現段階からCO_2削減投資を徐々に進めることが企業やわが国全体にとりリスクとコストを最適化することになるのは確実である。「当面できるところ」を具体的に見極めることが重要である。例えば，他の金融投資のように各種の投資オプションを比較検討して見て，「それらのオプションをどう組み合わせて投資するか」のポートフォリオを構築する必要がある。

ポートフォリオ策定はそれほど難しいものではない。温暖化対策の分野でもリアルオプション分析等の金融工学的な手法の導入も考えられるが，それほど複雑に考えなくてもよいだろう。例えば，ツリー状に分岐を作っていって判断する方式（ディシジョンツリー）なども，温暖化対策オプションの検討にはそれなりに有効である[12]。

3．排出量取引模擬実験

京都議定書の目標は，わが国にとって容易ならざる目標である。そのためコスト効果的な京都メカニズムの利用が鍵となる。具体的には，自社対策，排出量取引，JI/CDM[13]のプロジェクトに関するポートフォリオの構築が課題となってくる。ここでは各排出削減手段に伴うリスクの理解と企業におけるリスクヘッジ手法の分析について記述する。

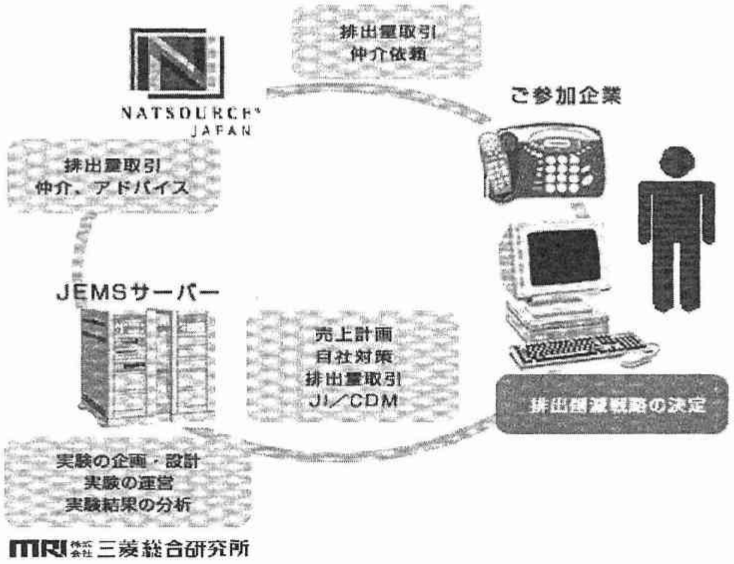


図4　ＪＥＭＳⅡの実験形態

(12) リアルオプション分析を行う場合でも結局は過去の経験値，それが無い場合には妥当な予測・シナリオが必要であり，それが精緻に得られなければ，ディシジョンツリーとほとんど同じである。

(13) Joint Implementation（共同実施）：書附属書。国間で排出削減プロジェクトを（附属書。国内で）実施し排出削減クレジットを移転するもの。Clean Development Mechanism（クリーン開発メカニズム）附属書。国が投資国となって発展途上国で温室効果ガス排出削減プロジェクトを実施しクレジットを得るもの。

（1）目的・実験方法等

JEMS Ⅱ [14] の実験形態を図4に示す。実験に用いられる仮想企業として表4のような種類を想定し実験条件としては表5のとおりとした。

（2）初期データ

今回の実験で用いた国内企業の限界削減コストカーブを図5に示す。

限界削減コストカーブはあくまでも今回の実験に際してのコストであり，実際のわが国全体のコストをマクロ的に示すわけではない。しかし，マイナスコスト（対策を講じれば得をする）対策，安価な対策もあるので，ある程度の対策は国内対策として採り得ると考えられる。

表4　仮想企業の種類 [15]

国内企業（27社）	排出主体として排出枠が設定される，企業利益と排出枠の遵守との両立を目指す。自社対策や排出量取引，JI/CDM 及び国内吸収源プロジェクトを活用し，排出枠遵守におけるコスト削減とリスクマネジメントを図る。
トレーダー（7社）	予め保有している資金を運用することを目的に、排出量取引、JI/CDM 及び国内吸収源プロジェクトに参加する。資産価値の最大化を図る。
海外政府（1社）	ホットエアーである余剰の排出権を市場で売却することを目的に、排出量取引に案化する。売買益の最大化を図る。

表5　ＪＥＭＳⅡにおける実験条件 [16]

	ＪＥＭＳⅡ
対象期間	準備期間：2006～2007年 第1コミットメント期間（CP1） ：2008～2012年 第2コミットメント期間（CP2） ：2013～2015年
排出枠	仮想企業に応じて個別に設定
割当方法	グランドファザリング（概ね初期排出量で分配）
取引期間	先渡し取引を含め2006年から取引可能
罰則	CP1分の不足はCP2において不足分の1.3倍を控除。 CP2不足分は平均価格の2倍を控除
使用・バンキング制限	個別企業毎に設定
海外政府	2回の実験で売却戦略が違う（売り叩き，売り渋り）

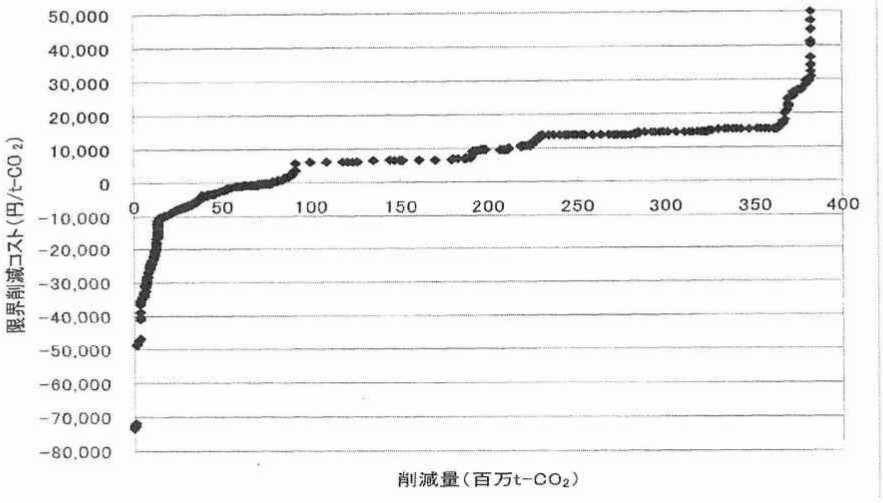


図5　国内企業の限界削減コストカーブ

（14）Japan Emissions Management Simulationの略。「排出量マネジメント」という意味である。命名には企業が排出量をいかにマネジメントすべきか，という問題意識がある。

（15）実際の参加企業の所属業種と異なる場合もある（参加企業に合意を得て別の業種となってもらった）。海外政府は当社がその役割を実施（ロシアを想定した）。

（16）一部分は京都議定書ルールに沿っているが，多くは暫定ルール。例えば第2約束期間は実験期間（1日1年分を実施）のため短縮（実際には何年になるかは未定）。

ただ，この曲線の右終端に見られるように最終的には限界削減コストが急速に上昇し，それ以上の排出削減ができなくなるところがある。このように，マクロ的にどのくらいの削減ポテンシャルがあるか十分考える必要がある。例えば，民間企業にとって高コストな対策は現実的ではない。

今回の実験に際し，JI/CDMのプロジェクト費用単価を表6のように設定した。

表6　費用単価（JIの例）

省エネルギー	1,000～15,000 円/t-CO_2
燃料転換・コージェネ	1,000～10,000 円/t-CO_2
小水力	5,000～20,000 円/t-CO_2
風力	5,000～30,000 円/t-CO_2
バイオマス	5,000～30,000 円/t-CO_2
植林・再植林	1,000～10,000 円/t-CO_2
森林管理	1,000～10,000 円/t-CO_2
廃棄物メタン抑制	1,000～ 5,000 円/t-CO_2
散逸ガス回収・利用	1,000～ 4,000 円/t-CO_2

ここで，スケールメリットの高いプロジェクトは規模が大きくなるほど安くなるよう現実に即した設定にした（ただし，実際のプロジェクト価格とは異なる）。プロジェクト種別にクレジット取得リスクも併せて設定し，CDMの方が費用は安いがリスクは高くなるよう設定した。

また，今回の実験に際して海外政府（クレジットの余剰がある国：ロシアなどを想定）の売却戦略を以下の2つとした。

・JEMSⅡ-1：「売り叩き」戦略
　－計画した売却量以上を売る。
　－他者より低い売却価格を提示する（それにより他者の売却やJI/CDMを妨害することになる）。
・JEMSⅡ-2：「売り渋り」戦略
　－他者より高めの売却価格を提示する（価格吊り上げ意思表示）。
　－計画した売却量の達成にはこだわらない。

表7　不遵守状況

実験	コミットメント期間	不遵守企業数	不足量（百万t-CO_2）	不遵守の理由
JEMSⅡ-1	1	4	7.3	・不参加、特定年について参加することが出来なかった。未習熟など
	2	1	0.3	・不参加
JEMSⅡ-2	1	6	11.2	・不確実性に対処しきれなかった（排出権保有量を必要最小限に抑えようとして） ・排出権保有量を考慮せず売りすぎた
	2	3	3.6	・不参加、特定年について参加することが出来なかった ・不確実性に対処しきれなかった（排出権保有量を必要最小限に抑えようとして）

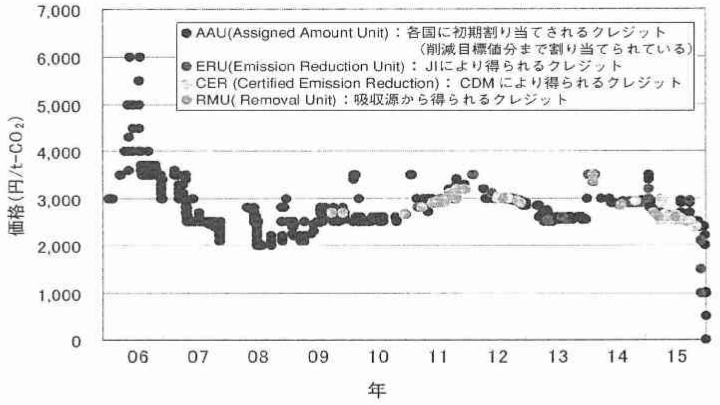


図6　排出権価格の推移（ＪＥＭＳⅡ-２：売り叩きケース）

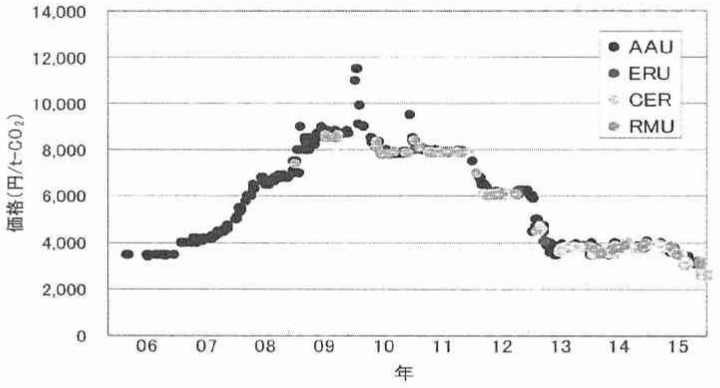


図7　排出権価格の推移（ＪＥＭＳⅡ-２：売り渋りケース）

（3）実験結果

今回の実験で生じた「不遵守」の状況を以下に示す（表7）。また，排出権価格の推移を図6に示す。

取引量293百万t-CO_2のうち海外政府の売却分が206百万t-CO_2である。また，2015年末は資産評価実施（持っていても資産価値をもつ，すなわちゼロ円にはならないというルール）について知らなかった参加者の売り取引による価格下落である。

別のシナリオについては図7に示すとおりである。

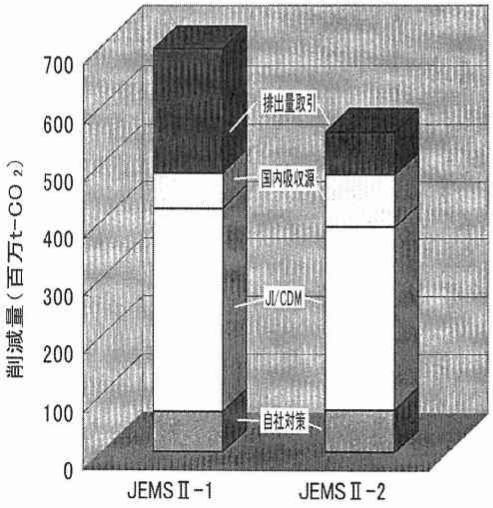


図8　国内企業の削減ポートフォリオ

ここで，取引量225百万t-CO_2のうち海外政府の売却分は25百万t-CO_2である。

図より，海外政府以外の約定が大半だが，前半は売り渋り効果が認められる。

（4）分析

① 排出権価格と削減コストの決定要因

排出量取引以外については，海外政府の売却戦略の影響を受けず，概ね同程度の削減規模である（図8）。今回の実験に際し，多くの企業では，まず，排出量取引の影響を受けずに実施可能な自社対策さらに海外プロジェクトを先行的に実施する戦略がとられた，ということになる。

② 企業の排出削減戦略

国内企業の排出削減戦略において，排出削減ポートフォリオは削減量確保と削減コスト低減の両面から構築することが必要である。その際，JI/CDMプロジェクトを早期に発掘してポートフォリオを決定することが，1つの方法として考えられる。

今回の実験においては，以下のように，ポートフォリオ構築で削減所要量などに応じた様々なバリエーションの対策が講じられた。

－早期からの排出権購入やコミットメント期間以降における安価なプロジェクトの発掘
－余剰が見込まれる排出権の早期売却
－排出権の運用など

リスクマネジメントとしての排出権確保について見ると，比較的早期に達成する企業とコミットメント期末にまとめて行う企業があった。

クレジット取得量のリスクによるプロジェクトの選別は特に行われなかった。

本検討結果から見て，実験と現実との差異はあるものの「経験をつむ」ことが重要であると言えよう。具体的には，企業単位でリスクヘッジ手法を考える必要があり企業特性を反映させる必要がある。例えば，エネルギー多消費産業であれば大規模プロジェクト，多数の中小規模プロジェクト，将来排出量の不確実性がある産業であればオプション取引（ただし市場の成熟が必要）がある。

現実社会では，制度設計スケジュールとの兼ね合いも問題となる。規制反対が制度設計遅延，さらに制度リスク増大へと進み，結果的に対策の遅れ，企業にとってのリスク増大につながる可能性も大きい。現実にわが国の制度設計はＥＵに比べて遅れており，このまま遅れると各種悪影響も懸念される。

企業の規制反対の背景には，環境税や排出量取引制度（企業の排出枠設定，排出規制の実施）といった，「新しい規制」あるいは「新たな企業負担」が発生することへの抵抗感がある。しかし，地球温暖化問題が存在すると考えたら[17]，「企業の社会的責任」は相応にあるわけで「温暖化対策」は避けて通れない。

また，「産業界の反対で温暖化対策が進

(17) 少なくとも日本政府は京都議定書のあるいは気候変動枠組み条約の言う「人為的な温室効果ガス」によって，温暖化が起こりつつある，というような考え方に賛同しているがため，京都議定書や条約を批准している。

まない」というステレオタイプのイメージを一般市民に与えてしまうデメリットへの配慮も必要だろう。本音で何でも絶対反対という企業はあまりないのではと思うが「本当にそこまでの対策が必要なのか」という漠然とした不安感があると思われる。要は温暖化対策の相場観が全くないのが，ある意味で，企業の対策を困難にする理由とも思われる。

そのため，産業界と政府の間で早期に「この程度の温暖化対策を講じる」という合意が得られると良い。現段階では「産業界は全ての措置に反対」「産業界は排出増の環境影響に対する負担をすべき」という原則論のせめぎ合いがまだ先行していると思われる。結果として，時間切れで政府の規制案を産業界側が甘受するというところに落ち着きかねない。それでは，既述のとおりの「リスク」や「コスト」を日本全体で最適化することは難しいのではないかと考える。

4．まとめ

ロシアがいつ批准するのか分からない現段階では，京都議定書の発効も国内対策によってリーズナブルな費用負担[18]で必要な削減量が得られるかも不透明である。そのような状況が当面続く可能性があるという前提で，企業／産業界はいくつかのリスクに沿ったシナリオ（例：制度設計が強化されるシナリオ）と現状維持のシナリオを描くことが必要だろう。例えば，２つの施策オプションが選択される確率について，可能性をｘ％，ｙ％［ｘ＋ｙ=100％］として検討するだけでも相当な問題意識の醸成，企業にとっての温暖化問題の位置付けの把握につながると思われる。[19]

以上述べたように，「当面，制度設計待ち」というスタンスには，企業にとってあまりメリットはない。最低限の影響の大きさを見積もり，「影響が大きい」と考える企業は，積極的に先取りして温暖化問題に対処していくよう検討を開始していただきたい。

また，「当面，影響は小さい」と思われた企業も当然，将来の不確実要因を十分に把握するのみならず，逆に本問題をビジネスチャンスにつなげることができないか，検討することが必要と思われる。

参考文献

(1)“OECD/IEA CO2 Emissions from Fuel Combustion” 2000

(2) JEMS資料（公開用概要版），株式会社三菱総合研究所，2003.3

(3)『CO_2排出権取引市場と日本企業の対応について』，冷凍2003年４月，伊藤一道

(18) 企業ごとに「リーズナブルな費用負担」のレベルは異なるだろう。経常利益に対しての比率，売上高に対しての比率さらには「環境対策費」あるいは「広告宣伝費」などの既存の費目支出に比べての大きさなど，考え方はいろいろあるが，「企業としてどの程度が適正な水準なのか」は分からない（温暖化対策の適正な費用は「ゼロ」という意見もあるだろう）。

(19) 仮に経常利益が年100億円の企業を考える。排出規制強化政策の可能性を50%，そのときの対策費を20億円、排出規制を強化しない政策時の対策費を２億円と見積もったら，想定（期待）される費用は20億円×50%＋２億円×50%＝11億円であり、経常利益の10%に相当するレベルの経営問題である，というように，企業にとって温暖化問題の重要性が分かる。

〔調査研究報告〕

原子力の持続的エネルギー源としての重要性

氏田博士※（(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 主管研究員）
波多野守※※（(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 主管研究員）

1．はじめに

高速増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故（1995年），ジェーシーオー（JCO）臨界被ばく事故（1999年），もんじゅ名古屋高裁敗訴（2003年），東電不正報告事件（2002年），巨額のバックエンドコスト試算（2004年）など原子力の暗いニュースが続き，核燃料サイクル開発政策の見直し論議まで出てきてかまびすしい昨今である。しかし，本当に再処理や高速増殖炉は無駄なのだろうか？　環境重視，循環型経済社会としての21世紀における意義はないのであろうか？　たとえ省エネや再生可能エネルギーの開発努力を最大限に考慮しても，環境問題と資源制約の問題を解決するポテンシャルを持つのは原子力エネルギーだけではないだろうか？　という問題意識から本研究が始められた。

エネルギー政策の検討では，その時間・空間の領域の広さのために，また環境問題や経済性の問題と密接な関係があるため，どこまでを視野に入れて議論するべきかの判断は難しい。実際に，観点が不明確なまま議論しているときが多々あり，不毛の論争を招いているケースが見受けられる。しかし，エネルギー問題や環境問題が全人類と地球の未来にかかわる課題であることを考えれば，長期的（～100年）視点と世界的規模で地球温暖化防止と持続的発展の調和のための方策を総合的に検討しなければならないことは自明であろう。一方，温暖化防止対策として大きな役割を期待される原子力システムに目を向けると，研究・開発・建設までに要する期間と費用，さらに持続的エネルギー源として開発中の高速増殖炉によるプルトニウムの増殖時間を考え合わせれば，長期的・国際的な視点の必要性はまた明らかであろう。

このためには，まず長期的・世界的な観点のエネルギー政策，そのなかでの原子力エネルギーの位置づけ，そして高速増殖炉の有効性を明確化する。その後それに基づき日本における短期的・中期的（～10年～30年）なエネルギー政策，またその中での原子力政策を検討する必要があろう。本研究では，この思考過程に沿って検討を進めており，これからさらに

日本の原子力政策について議論を深めていく予定である。本報告では，長期的・世界的な観点の原子力エネルギーの位置づけと高速増殖炉の有効性の検討結果について述べる[1]。

2．シミュレーションに基づく評価

（1）シミュレーションの仮定

「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第3次報告書」でもその試算結果が取り上げられたGRAPEモデル[2]のエネルギーモジュール構造を用いて，二酸化炭素（CO_2）排出量制約等の環境下におけるエネルギー需要を仮定し，世界を対象に2100年までのエネルギーシステムコストを最適化する超長期エネルギー供給シミュレーションに基づき議論する。

シミュレーションにおいては，21世紀の社会経済的シナリオとして，IPCCの「排出シナリオに関する特別報告書（SRES）」においてエネルギー需要の中庸なケースであるB2ケース（環境重視／地域共存型）を基本的条件として採用した。環境制約が無く経済成長に伴うエネルギー需要を自然に任せる条件（以下，BAU：Business As Usual条件)においては，2100年における一次エネルギー供給は30Gtoe（石油換算トン）となる。一方，「IPCC第3次報告書」では，温暖化防止のために，現在370ppmである大気中CO_2濃度が2100年において450ppm～1000ppmで飽和する安定化シナリオを検討している。ここでは，Wigley, Richles, & Edmonsが提案した550ppmで安定化するWRE550シナリオで示されたCO_2排出経路の累積値をCO_2制約条件とし，かつエネルギー需要は2050年以降エネルギー利用効率の改善などにより大幅には増加せず，省エネ量をBAU条件の35％の10Gtoe程度に見込めるものと仮定した[3~9]。

（2）解析結果

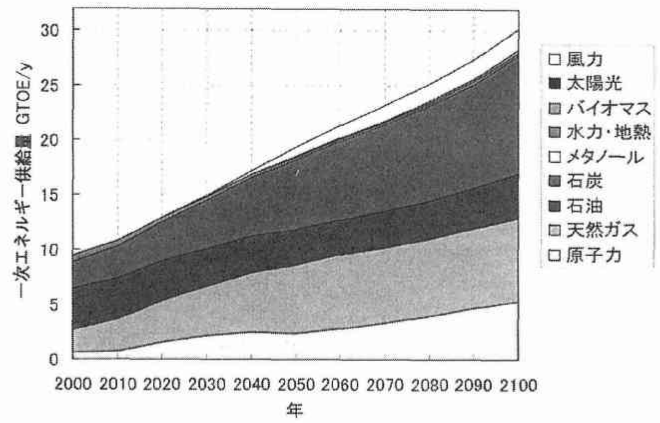
<u>① CO_2制約条件を満たすには、省エネ推進に加え，原子力エネルギーと新エネルギーの供給拡大，が重要</u>

エネルギー需要を自然に任せるBAU条件では，2100年に必要と想定される一次エネルギー30Gtoeは，図1に示すように石炭を中心に十分に供給可能である。しかし，WRE550シナリオのCO_2制約条件を実現するためには，図2，図3に示すように省エネルギーの推進（2100年時点で10Gtoeを見込む）に加えて，原子力エネルギーと新エネルギーの供給拡大が重要である。

1. 省エネルギーは，21世紀のエネルギー政策において持続可能な発展を実現するための最重要課題である。

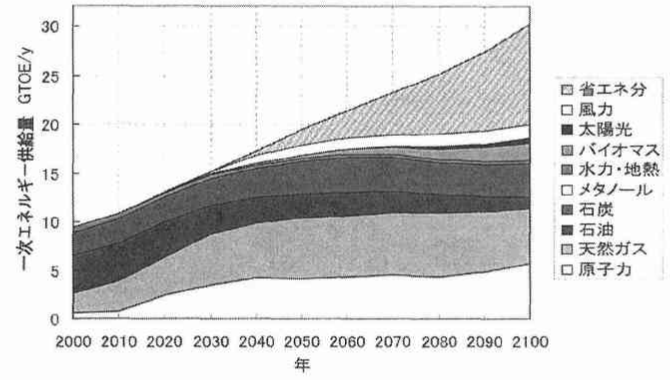
2. 地球環境維持の為には，化石燃料の炭酸ガス隔離技術の向上，再生可能エネルギー開発，に加え原子力エネルギーが必要であり，2100年に於ける基幹エネルギーとして，それぞれの持つポテンシャルを十分に発揮できように，技術開発を進めるべきである。

原子力発電設備容量を世界的規模で見ると，図4に示すようにCO_2排出抑制に伴い当初は軽水炉が伸び，ついで高速増殖炉が急激に立ち上がることとなる。



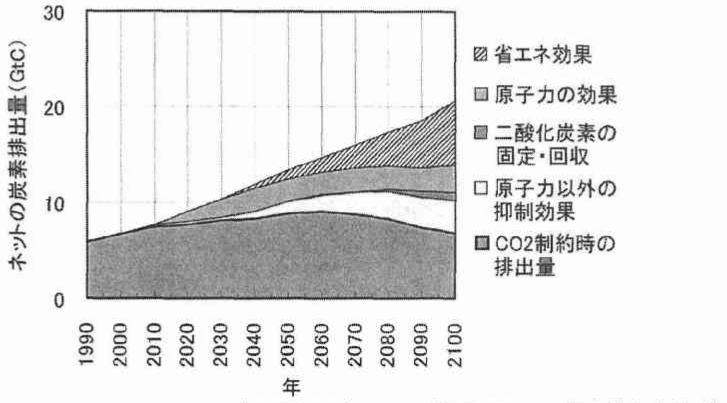
（SRES B2ケース）

図1　一次エネルギー供給構成（世界，BAU）



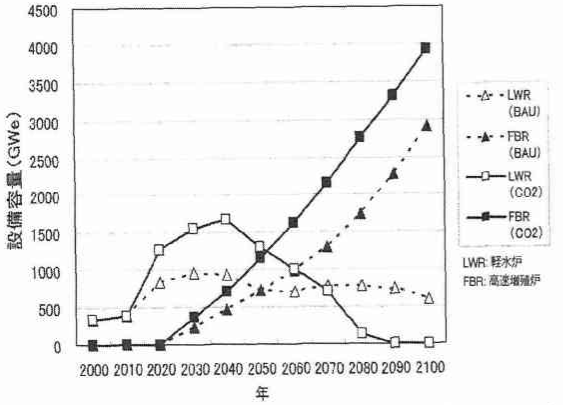
（SRES B2ケース，WRE 550ppm 安定化シナリオ）

図2　一次エネルギー供給構成（世界，CO_2制約）



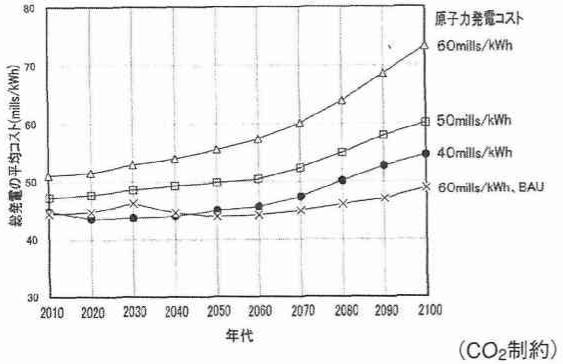
（SRES B2ケース，WRE 550ppm 安定化シナリオ）

図3　CO_2排出抑制効果（世界）



（SRES B2ケース，WRE 550ppm 安定化シナリオ）

図４　原子力発電設備容量（世界）



（CO_2制約）

図５　原子力発電コストと総発電の平均コスト

② 原子力エネルギーのコストを安くできれば，2100年の発電全体コストの大幅上昇を抑制できる

原子力エネルギーシステムの経済性が向上し発電コストが40mills（約4円）/kWh程度まで下がれば，原子力のシェアが拡大し，図５に示すように2100年の発電全体コストの大幅な上昇を抑制する効果がある。長期的視点から，原子力エネルギーの経済性向上が発電コスト全体の抑制に非常に重要な役割を果たす。なおPuのマスバランスから高速増殖炉と軽水炉は相補的関係にあり，軽水炉のコストを40mills/KWhに固定し高速増殖炉のコストを60mills/KWhから軽水炉なみまで下げたケースでは，高速増殖炉の導入時期が早まるため，軽水炉も早い時点で導入され，高速増殖炉導入以降は発電量を早めに低下させる傾向となる。

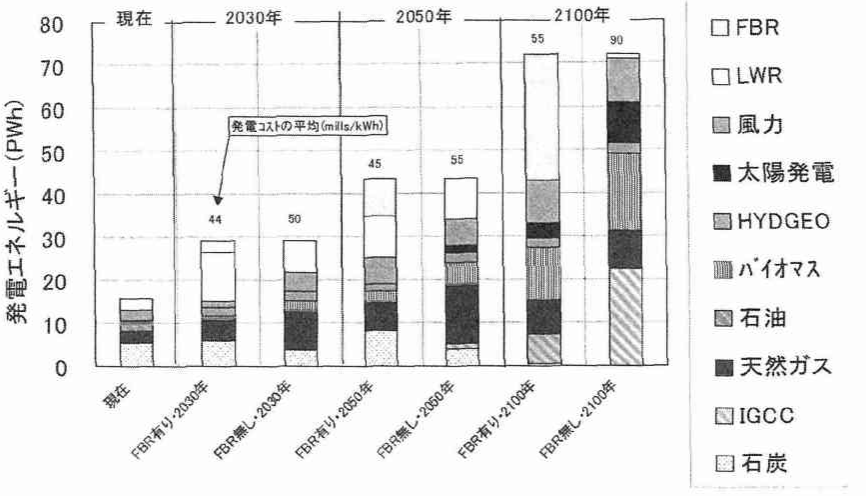


図６　ＦＢＲの有無によるエネルギー構成の比較

③ 高速増殖炉が無いと平均発電コストが大幅に上昇

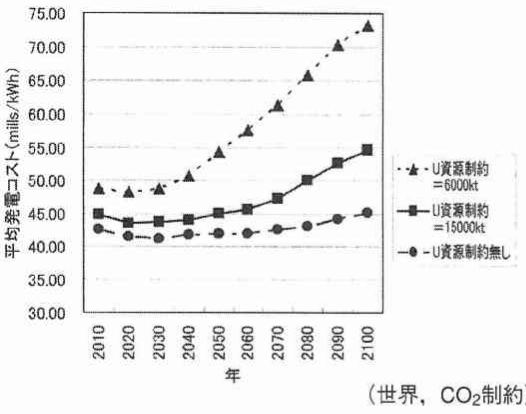
ウラン資源のバイブルとでもいうべきIAEA/OECD-NEAレッドブック（2000年版）によれば，在来型未発見資源も含めたウラン鉱石の究極推定埋蔵量は15,000ktUである。高速増殖炉が実用化されず，原子力エネルギーが軽水炉のみになるとした場合，原子力エネルギー利用はウラン資源量によって制約を受けることとなる。

ウラン資源制約量を究極推定埋蔵量として，高速増殖炉が無い条件における結果を図6に示す。高速増殖炉が無くとも新エネルギーの増加により発電エネルギーを補うことは可能であるが，2100年における平均発電コストで見ると55mills/kWhから90mills/kWhへと大幅に上昇することになる。

④ウラン資源の制約がきつくなるに伴い平均発電コストが上昇

高速増殖炉が実用化された場合においても，導入初期においては軽水炉で生成したプルトニウムを利用するため，高速増殖炉の導入ペースは軽水炉の利用規模に影響を受ける。

利用可能なウラン資源量を変化させた場合の，世界における平均発電コストへの影響を図7に示す。ウラン資源の制約がきつくなるにつれ平均発電コストが45mills/kWhから73mills/kWhへと上昇する。しかし，先に示したように高速増殖炉の導入によりコスト上昇が抑制されており，持続可能なエネルギーとして重要な役割を果たすことが分かる。



（世界，CO_2制約）

図7　ウラン資源量の影響：平均発電コスト

⑤原子力水素により発電コストが低減

運輸用燃料電池（水素エネルギー）は，化石燃料内燃機関と比較して車両効率が約3.0～3.3倍（一次エネルギーベース）向上すると言われる。ここで，高速増殖炉の核熱を熱源として天然ガス改質により製造した水素（原子力水素）を燃料電池車で利用すると仮定したとき，同じ運輸サービスを提供する場合の必要エネルギーが減少することになる。このため図8に示すように運輸需要起源の炭素排出量が45％減少し，炭素削減限界費用（炭素一単位を削減するに要する費用)も280ド

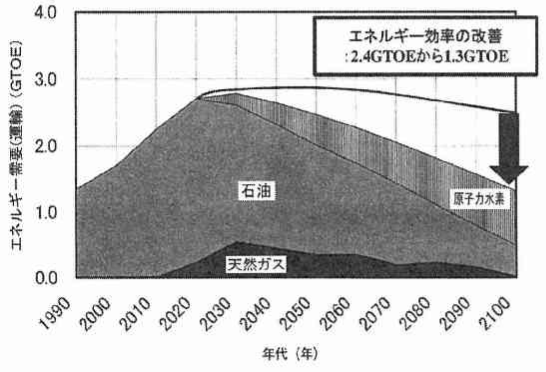


図8　原子力水素利用による省エネ効果

表1　CO_2排出制約の影響評価の検討ケース

ケース	CO2排出制約		条　件
	Annex1	世界	
1	無し	WRE550	標準的条件における検討ケース、世界全体で排出権取引あり、2150年までのCO_2排出量をWRE550で制限する。
2	京都議定書 10年毎5%減	WRE550	2010年まで京都議定書,2020年以降Annex1地域（旧ソ連東欧を含む）で10年で5%低減。世界の排出量はWRE550で制限する。排出権取引有り。
3	京都議定書継続	WRE550	京都議定書の制約がそのまま続く、Annex1地域では排出権の取引を認める。世界の排出量はWRE550で制限する。
4	京都議定書継続	年間7.3GtC	京都議定書の制約がそのまま続き、全世界で7.3GtC*の排出量で規制。全世界では排出権の取引を認める。 Non-Annex1地域のCO_2年間排出量を1990年排出量の200%以下に制約
5	京都議定書 10年毎10%減	WRE550	ケース-2のAnnex1地域で10年での低減率を10%に変更した場合。

＊ 発展途上地域の1990年の200%分を追加

ル/tC（炭素トン）から200ドル/tCに低下する。また，原子力水素の燃料電池車への利用により，運輸部門の炭素排出量を大幅に削減することが可能となるため，発電によるCO_2排出規制が緩和され，高速増殖炉の総導入規模は変わらなくとも発電コスト低減効果が見込まれる。

⑥ 21世紀後半には発展途上国でも炭酸ガス排出制約が厳しくなる

表1に，検討したケースの一覧を示す。この条件下におけるCO_2排出量を図9に示す。ケース1に対し，ケース2,3,5では京都議定書Annex1地域（先進国）に厳しく，逆に言えばNon-Annex 1 地域（発展途上国）にとっては制約の少ない条件になっていることが分かる。しかし，世界全体のCO_2累積排出量は一定と仮定しているので，21世紀後半においてはNon-Annex1でのCO_2排出量対策も重要となる。ケース4は，他のケースでは2150年までに最終的な炭素濃度目標を達成する方式であるのに比べ，各地域

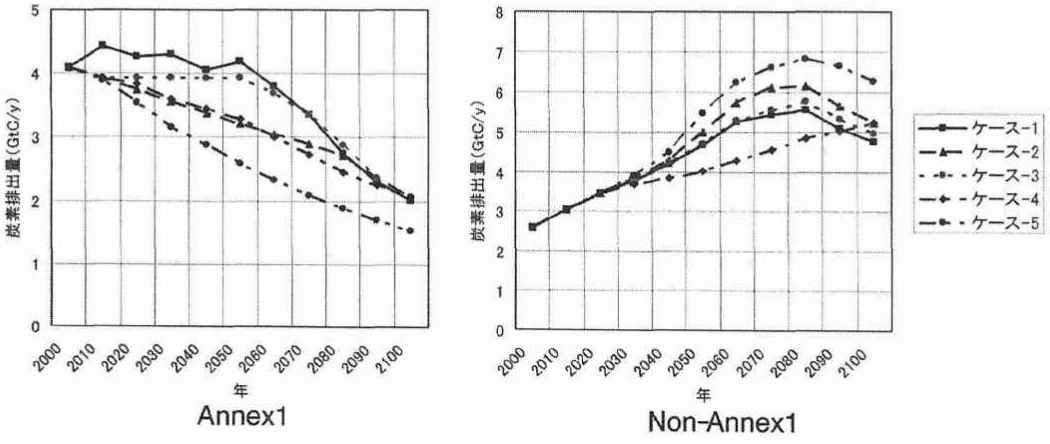


図9　CO_2排出制約条件の影響：各ケースのCO_2排出量

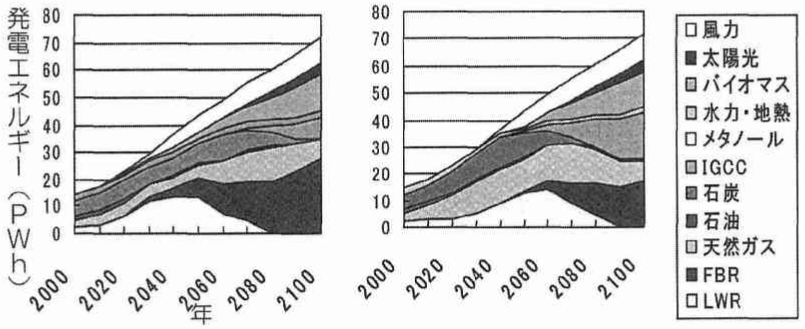
で毎年の炭素排出量を一定になるように規制する方式となっている。このために，Annex1地域が年々徐々に排出量を削減するように，Non-Annex 1 地域においては年々徐々に排出量の増加を許す規制方式となっている。

⑦ 長期的な意志決定から短期的な意志決定に変えると，原子力エネルギー利用拡大は遅延 - 21世紀の後半にCO_2排出量は同程度だがコスト高の電源比率が高くなる

ここでは，いままで用いてきた超長期（～2100年）一括のコスト最適化シミュレーション*に加え，より現実的な意志決定に近いと考えられるオーバーラッピングジェネレーション（OLG）法**(10)を用い，施策決定における長期的展望の重要性を示す。

以下，図10～12に示す長期的な意志決定と現実的な意志決定の比較による結果をまとめる。

- OLG法による評価では，軽水炉利用の伸びも低調で高速増殖炉導入も遅れる。その結果，21世紀の後半にCO2排出は同程度だが，コスト高の電源比率が高くなる（図10）。
- Non Annex1地域では，OLG法の評価においてはCO2排出抑制が遅い時期に本格化する（図11）。
- OLG法評価では，21世紀後半に発電コストが上昇すると共に地域間格差が生じる（図12）。
- OLG法による評価は，より現実の意志決定に近い状況を模擬しているものと考えられるが，評価期間が短くなるにつれ，低コストのエネルギー（CO_2排出量は必ずしも少なくない）が選択される。



a　発電エネルギー〔超長期最適化〕　　b　発電エネルギー〔OLG法（30年最適化）〕

図10　OLG法による発電エネルギー予測（世界，CO_2制約）

*2000年を基準年とし，10年刻みで計算実施。2150年までを一括で最適化し，2100年まで評価する。計画経済的とでも言うべき長期的な意志決定である。

**一定期間（30年）の最適化を図り10年ごとに逐次反復した最適化を繰り返す，評価も行っている。最近の需給見通しも2030年までを想定しており，これを10年ごとに見直すことに相当するので，より現実的な意志決定を模擬していると言える。

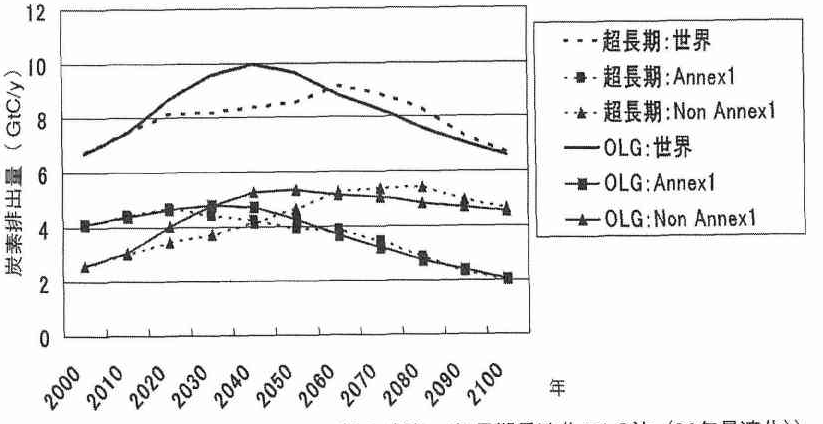


図11　OLG法によるCO_2排出量予測（CO_2制約）

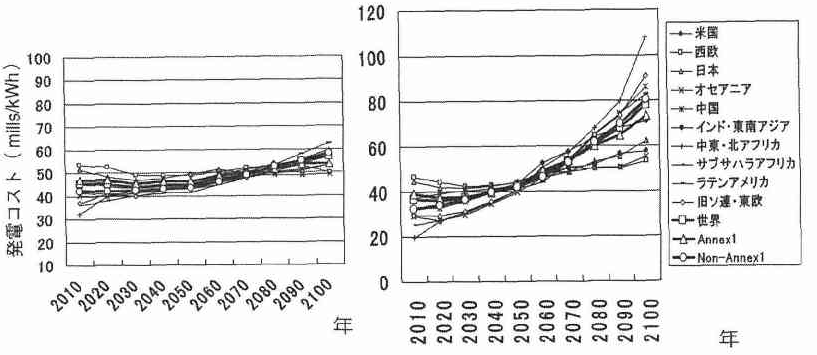


図12　地域発電コスト予測（CO_2制約）

この状況は，わが国でも同様であるが，原子力エネルギー利用により21世紀後半においても比較的低いコスト上昇に止まる。

3．本研究の結論

（1）世界的な結論

本研究でCO_2制約として採用したWRE550のシナリオに依存しているが，環境問題を制約条件として持続的な開発を実現することを目標とした本研究のシミュレーションから，以下のような特徴が見えてくる。

- 所与の条件のもとでは，エネルギーシステムにおける地球環境問題の緩和策は徐々に導入され，2050年頃まではCO_2排出量が増え続け，増えた排出量を残りの50年で削減する。
- 環境対策によりCO_2排出量が減少し続

ける先進国地域と未対策のため増え続ける発展途上国地域とで，2050年頃に排出量が逆転する。

- その後も発展途上国地域では排出量が増え続けるが，環境制約のため2100年頃には減少し始める。
- 環境対策のために，2050年頃までに軽水炉が大幅に導入されるが，その後ウラン資源が希少化するのに伴い2100年にはほとんどなくなる。
- 2050年頃以降の軽水炉の減少を補完する形で高速増殖炉が大幅に導入され，2100年には主要エネルギー源となる。

超長期的に地球温暖化影響を緩和しつつ，エネルギー資源の持続的利用を図るためには，天然資源であるウランに依存しない，有限な資源を拡大可能な核燃料サイクルの導入が有力なオプションとなりうる。これにより軽水炉ワンススルー方式における炭素削減限界費用を半分に低減でき，21世紀後半においても炭酸ガス排出抑制に伴う発電コスト上昇を大幅に抑制することが可能となる。

（2）日本における主な結論

日本におけるシミュレーション結果から得られる主な示唆は次の通りである。

- 日本では，その人口および経済規模と比較して，化石エネルギーおよび再生可能エネルギーの資源量が少ないため，エネルギー自給率が他地域と比較して極度に低く，比較的多い水力・地熱エネルギーもコスト高である。このため，原子力発電コストが高い場合でも原子力エネルギーが日本の基幹エネルギーとなることが予測される。したがって，環境負荷の少ないエネルギーの利用，エネルギーコストの低減の観点から，原子力エネルギーをより信頼性の高いより安価なものにしていく努力が必要である。これにより，エネルギーの安定的供給すなわちエネルギーセキュリティの確立が可能となる。
- 原子力エネルギーは日本の基幹エネルギーであるが，軽水炉ワンススルー方式のウラン資源の利用では，世界的な環境制約条件の下で21世紀後半以降のエネルギー需要を満足することは困難である。

2100年までの将来を見越した持続可能な開発に対し実現可能性が高い将来の基幹エネルギーとして，高速増殖炉および核燃料サイクルシステムの経済性を向上し信頼性の高いものにしていくことが，地球環境と調和するエネルギー計画の課題である。

4．シミュレーション結果に基づく提言

（1）長期政策立案と国際協調

今後のエネルギー政策立案には，従来長期計画で用いられてきた30年程度先を見据えるだけでは不十分であり，環境問題・対策の重要性を認識して2100年までの超長期の予測に基づく知見を利用して，100年程度先を見据えて研究・開発プロセスを検討し判断する必要がある。

日本にとっては環境問題に加え，エネ

ルギー安全保障も重要な課題である。エネルギー自給率を向上するための基幹エネルギーとして原子力エネルギーの利用拡大が必須であり，このためにも環境問題と同様に100年先を見越す必要がある。

世界のエネルギー需要をまかなうために，新たな技術の研究開発及び技術の実証を必要とする巨大プロジェクトは，国際的な戦略の下で国際的・公的資金による支援を受けて実施する必要があろう。このために，国際的なコンセンサスと国際戦略の策定が望まれる。例えば，まず原子力発電を環境にやさしいエネルギー源として世界的に合意形成を図ることから始め，炭素排出エネルギー源には必要と想定される炭素削減量に対応した限界費用相当の炭素税をかける，またその幾分かは原子力を含めた無炭素エネルギーの研究開発費に回す枠組みを作る，というような議論も必要であろう。また，化石燃料は，他のエネルギー源では代替が困難なさまざまな運輸用エネルギーや化学工業原料などとして長期的に温存する資源温存政策，の考え方もありえる。

（2）研究開発及び「技術の実証」

21世紀末において，高速増殖炉が大幅な発電シェアを占めるためには，プルトニウムの増殖には長時間を要するために2030年ごろから高速増殖炉が導入され始め，それ以降は世界全体で年25基程度のプラント建設が必要とされる。あらゆる科学技術が成功し社会に受け入れられるためには，図13に示す「死の谷」を乗り越える必要があり，そのためには研究開発及び「技術の実証」が重要である。持続的エネルギー源として高速増殖炉が期待されるが，研究開発及び「技術の実証」に要する期間が30年程度は必要であり，かつプルトニウムの増殖には長時間を要するため，できるだけ早期に概念設計及び技術開発を開始しておく必要がある。高速増殖炉開発が遅延すると，特に発展途上国に高コストのエネルギー源利用を強いることになるが，それでも高速増殖炉導入は2050年頃には導入を開始することが必要と考えられる。

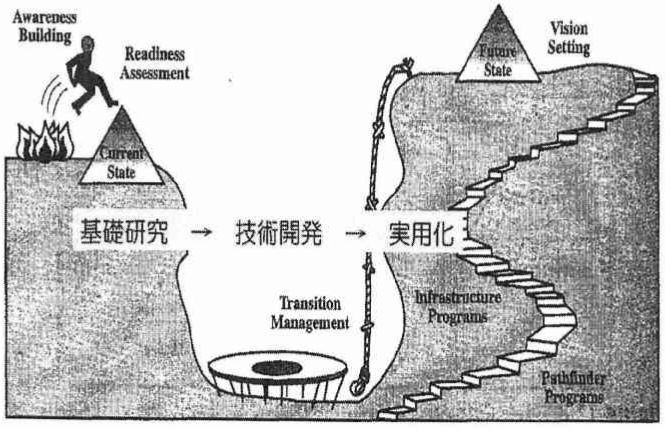


図13　死の谷

（3）国際協調 - CDMの導入

今後50年間は，環境制約が先進国中心に強化されるために，原子力（ウラン資源使用の軽水炉）利用は先進国で進むが，その制約の無い発展途上国では比較的安い化石エネルギーが利用され結果的に原子力の利用が遅れる可能性が高い（中国では高速増殖炉の大幅な導入が計画されているようである）。2050年以降は，ウラン資源の枯渇に加え，途上国ではウラン燃料の燃焼により生成されるプルトニウムの不足も重畳するため，原子力（軽水炉に加え高速増殖炉）利用が進められず，先進国と途上国間のエネルギーコストが大きく乖離する可能性がある。この様な事態を回避するには，原子力エネルギー利用をCDM(Clean Energy Development Mechanism)として採用することが有効な対策であろう。途上国に早期に原子力を導入するための支援は，温暖化のみでなく将来の南北問題に対する有力な方策と考えられる。

5．おわりに

本稿では世界で最適化したシミュレーション結果を紹介した。21世紀後半の日本を考えると，人口の減少や経済発展の停滞のためこれ以上のエネルギー需要の伸びは予測できず，その時点における日本は成長著しい発展途上国の影響を強く受けることが予想され，必ずしも日本にとって最適化された結果を示しているものではない。今後の日本のエネルギー施策に関しては，ここに示した世界規模での結果を参考に，長期的エネルギー需給と構成を別途シミュレーションで評価し，検討することが必要であろう。

また，地球温暖化防止対策として締結された京都議定書は，2012年までしか強制力を持たず，その後のCO_2排出抑制策を具体化しなければ地球温暖化防止はなし得ない。このため，日本としては，日本の国益を損なうこと無く，かつ南北問題や後世の人々にも配慮したポスト京都議定書の提言が望まれる。このような検討に際して，様々な制約条件におけるシミュレーションを実施することにより，示唆に富んだ結果が得られるものと考える。

参考文献

(1) エネルギー総合工学研究所，「高速増殖炉利用システム開発調査」平成15年度報告書.

(2) Kurosawa, A., et al., Analysis of Carbon Emission Stabilization Targets and Adaptation by Integrated Assessment Model, The Energy Journal, Kyoto Special Issue, pp. 157-175, 1999.

(3) 山地，藤井，グローバルエネルギー戦略地球環境時代の21世紀シナリオ，電力新聞社，1995.

(4) Uranium-Resources, Production And Demand-1999, OECD/NEA, 2000.

(5) Rogner H. H., An Assessment of World Hydrocarbon Resources, Annual Review of Energy and the Environment, vol. 22, pp. 217-262, 1997.

(6) 山地，山本，藤野，バイオエネルギー，ミオシン出版，2001.

(7) Special Report on Emission Scenarios (SRES), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, 2000.

(8) IPCC 地球温暖化第３次レポート（気候変化2001），中央法規出版，2002.

(9) Word Energy Outlook 2002，IEA，2002.

(10) 電中研報告，最適化型世界土地利用エネルギーモデルによる持続可能エネルギーシステムの評価，Y02022，2003.

〔調査研究報告〕

人工ゼオライト製造プラントの開発

森　山　　亮（㈶エネルギー総合工学研究所　プロジェクト試験研究部　嘱託研究員）

1．はじめに

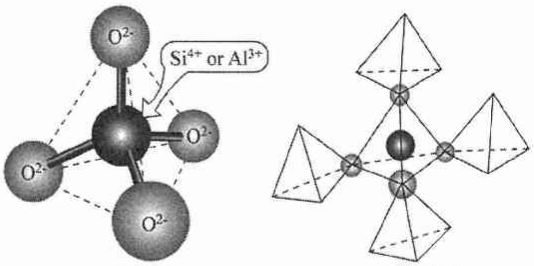
「ゼオライト」は1756年、スウェーデンの鉱物学者によって発見された。「ゼオライト」という名前は，加熱すると鉱石に含まれる水分が蒸発して表面に泡ができるが，それが沸騰しているように見えることからギリシャ語のZeo（沸騰する）とlite（石）から名付けられた。ちなみに和名は沸石である。従来「ゼオライト」という名前は，結晶性の多孔質アルミノケイ酸塩の総称として用いられてきた。この多孔質結晶は穴の入口が0.4～0.8nm程度で，その入口より小さい分子だけが細孔内に進入でき，大きな分子は進入できないという分子ふるい作用をもつ[(1)]。

エネルギー総合工学研究所は，2003年度に環境省の次世代廃棄物処理技術基盤整備事業の一環として行われた「加圧・加熱型スラリー反応法を用いた人工ゼオライト製造システムの開発プロジェクト」において，㈱五洋建設が建設した人工ゼオライト製造プロセスの１トン/日実証プラントの運転指導と共同研究を行った。本稿では，ゼオライトの基本構造，特徴及び用途を紹介した後，小型実験装置による運転最適条件の検討と実証プラントの運転結果を報告する。

2．ゼオライトの基本構造と用途

（1）ゼオライトの基本構造

図１に示すように，アルミノケイ酸塩であるゼオライトの基本構造は，Si（ケイ素）を中心に，酸素が四面体になるように並んだ$(SiO_4)^{4-}$（ケイ酸四面体）と，Al（アルミニウム）を中心に酸素が並んだ$(AlO_4)^{5-}$（アルミン酸四面体）である。四面体単位の頂点にある酸素をそれぞれ隣の4つの四面体単位と共有することにより，３次元的に結合し，結晶を形成する。$(SiO_4)^{4-}$単位の頂点酸素をすべて共有し3次元的に結合した物質は，鉱物学的にはテクトケイ酸塩とよばれ，その骨格組成にAlを含まないものは，SiO_2（シリカ）となる。一方，Alを含む場合，Si^{4+}をAl^{3+}で置き換えた分不足した正電荷を他のカチオン（Na^+，H^+，Ca^{2+}など）で補うた



(a) 四面体構造　　(b) 連結構造

図1　ゼオライトの基本構造

め，組成は$M_nAl_nSi_{1-n}O_2$（Mが1価のカチオンの場合）となる。

（2）ゼオライトの用途

ゼオライトは，多孔質物質であるため，吸着性能に優れている。また，カチオンは，水溶液中で容易に他のカチオンに置き換えることができるため，ゼオライトはイオン交換能も有する。イオン交換能は，Si/Alの比が低いほど大きくなる。A型ゼオライト（Si/Al原子比=1.0）のイオン交換能は，イオン交換樹脂の交換能に匹敵し，試料質量当たりの陽イオンモル数である陽イオン交換容量（CEC）は無水物基準で700cmol/kgになる。さらに，ゼオライトのカチオンをNH^{4+}（アンモニウムイオン）でイオン交換し，焼成することによって酸性プロトンが生成し，固体酸性を有する触媒にもなる。このゼオライト触媒は，特に石油化学における流動接触分解（FCC）触媒として用いられている。

表1にゼオライトの用途を性質ごとにまとめて示す。ゼオライトの吸水性は，特に農業分野で土壌の保水に有効であり，吸着性能はアンモニアを吸着できるので消臭剤にもなる。また，重金属を捕集するイオン交換能で水質浄化にも役立つ。さらに，イオン交換によってゼオライトに銀を導入すると抗菌剤となる。

表1からわかるようにゼオライトの用途は，土壌改質材や糞尿の脱臭剤のように使用後回収が困難なものが多い。このような用途には，高価で品質の高い合成ゼオライトよりも安価な天然ゼオライト

表1　ゼオライトの用途

機能	分野	用途
吸着および吸水	農業	土壌改質材（保水性）、有機肥料水分調整、畜産糞尿の脱臭および乾燥
	環境	汚泥の悪臭除去、汚染土壌の浄化
	一般	冷蔵庫脱臭剤、食品乾燥剤、湿気除去剤、消臭剤、ペット用トイレ
イオン交換	建築および土木	多機能性コンクリート（藻礁、河川水質浄化）
	農業	土壌改質材（保肥性）
	環境	汚水処理、水質および排気浄化
	一般	抗菌剤
触媒活性	工業	石油化学（FCC 触媒）、自動車排ガス浄化（研究レベル）
その他		洗剤の助剤、ゴム、プラスチック、製紙等の充填材、家畜飼料への添加

の方が向いているといえる。しかし，天然ゼオライトは，一般に均質性が悪く，イオン交換能にもばらつきがある。ゼオライトを広く利用するためには均質性と低価格の実現が重要といえる。

（3）天然ゼオライト，合成ゼオライト，人工ゼオライト

天然ゼオライトは，火山ガラスが海水の影響を受け，続成作用により変質して生成したもので，火山岩の空隙や岩石内に存在する。

これに対し，ケイ酸ナトリウム（Na_2SiO_3），アルミン酸ナトリウム（$NaAlO_2$）といったSiおよびAlを含む試薬を反応させることによってゼオライトを合成することができる。この合成ゼオライトは，純度が高いため高機能であるが，試薬を用いて製造することもあって非常に高価となる。

天然ゼオライトや合成ゼオライトに対し，近年，石炭灰や製紙灰のようなSiやAlを含む産業廃棄物をアルカリ処理して作る「人工ゼオライト」が注目されている[(2)～(8)]。このゼオライトの原料は廃棄物であるため安価であり，反応条件によっては天然ゼオライトの性能を上回ることが知られている。現在，数件の製造プラントが建設され，実用化に向けた動きが活発化してきた。しかし，使用するアルカリ溶液の量が多く，反応に要する時間も長いため，価格が天然ゼオライトに比べ割高になってしまうことや，効果や性状，評価方法が不明確であるなどの課題も多い。灰の種類によっても異なるが，石炭灰からゼオライトを作る際に，反応温度90℃においてアルカリ溶液の比が12.5ml/g，反応時間は95～190時間にもなるという報告がある[(4)]。

天然ゼオライト，合成ゼオライトおよび人工ゼオライトの特性と価格の比較を表2に示す。人工ゼオライトはCECも高く，その性能では天然ゼオライトを上回り，原料である廃棄物の品質が安定していれば，製品の品質安定性が見込まれるといった点で有利である。しかし，天然ゼオライトの価格（40～120円/kg）に匹敵する低コストを実現することが今後の課題といえる。

表2　各種ゼオライトの性能比較

項目	合成ゼオライト	天然ゼオライト	人工ゼオライト	フライアッシュ（参考）
CEC [cmol/kg]	400～600	50～170	180～400	ほとんど無い
吸湿能力 [%]	50	20～40	20～50	小さい
吸油能力	1～2倍	0.5～0.7倍	1.3～1.5倍	小さい
価格[(10)]	80円/kg～20万円/kg	40円/kg～120円/kg	（目標：80円/kg）	

3．人工ゼオライトの低コスト製造法

（1）製造プロセスの特徴

本プロセスでは，従来のプロセスにあった問題点を解決し，低コストで石炭灰や製紙灰をゼオライトに転換する方法[11]を用いた。

本プロセスの特徴は以下の3つである。

(1) 加圧反応器を用い，反応は100℃以上の高温下において短時間で行う。

(2) 灰とアルカリ溶液の比を0.1～1.5ml/gとし，余剰なアルカリ溶液を少なくする。

(3) 反応中に徐々に脱水を行うことで，反応進行に伴うアルカリ濃度の低下を防ぎ，反応速度の低下を抑える。

また，最終製品は乾燥状態であるため，濾過や水処理の費用がかからないといった利点がある。

（2）実験

① 小型実験装置

ゼオライトの原料は石炭灰を，アルカリ溶液は，NaOH（水酸化ナトリウム）水溶液を用いた。小型実験装置は，加熱，加圧ができる容積5ℓの攪拌槽を備えたニーダーで，試料の温度上昇に伴って，水分が蒸発し，攪拌槽内の圧力は飽和水蒸気圧に達する。攪拌槽に取り付けた圧力計の表示から内部温度が換算できる。また，実験中に水分を蒸発させるために排気ラインを取り付け，凝縮させた水の量を計り，そのときの脱水量がわかるようになっている。実証プラントの運転最適条件を求めるために，圧力，石炭灰とアルカリ溶液の固液比およびアルカリ溶液の濃度を変化させて実験を行った。圧力は0.2，0.4および0.7MPa-G，石炭灰とアルカリ溶液の固液比は0.7～1.23mℓ/g，アルカリ溶液の濃度は1.5～3.5Nとした。

1kgの石炭灰および所定量のアルカリ溶液を小型実験装置に投入し，密閉した後，試料を攪拌しながら昇温した。所定の圧力に達するまでの時間は1～1.5時間である。30分間圧力を保持した後，圧力が低下しない様に排気ラインのバルブを開放し，脱水を行った。2～3時間かけて完全に脱水し，冷却後，試料を取り出した。得られた試料は，X線回折でゼオライトの有無と型を調べ，CECを測定し性能を評価した。

② 実証プラント

実証プラントの概観写真を図2に，フロー図を図3に示す。実証プラントは，バッチ式反応器で1回の原料投入量が最大300kgの大きさである。ニーダーの混練

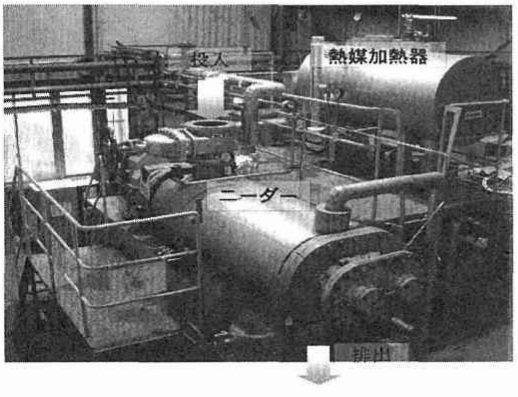


図2　実証プラントの概観

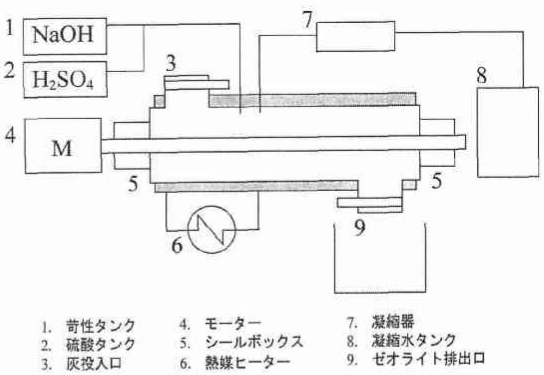


図3　実証プラントのフロー図

形式は水平二軸型であり，片側の羽根が対する軸の周辺を回転するため，双方の軸への試料の付着が少なく，十分な撹拌および混練が可能となる。軸の回転速度は25rpmである。ニーダーの外周部には加熱ジャケット（層厚16mm）があり，熱媒加熱器で150～220℃に加熱した熱媒を循環させることにより試料の加熱を行う。

加圧型ニーダーを設計する場合，内圧が上昇するために軸のシール部から試料が漏れ出る心配がある。本プロセスで用いる試料は，研磨剤にも用いられるようなアルミナやシリカなどの金属酸化物なので，軸とシール部の間に入り込むと，軸の摩耗を引き起こす可能性があり，量が多い場合は固着してモーターへの過負荷を引き起こす原因となる。試料の漏れを防ぐために軸シール部の締め付けを強くすると，同様にモーターへの過負荷となる。このような問題を解決する方法として，実証プラントではシール部を含むニーダーの外側にシールボックスを設置した。その内圧を圧縮空気でニーダー内圧より数kPa高くすることにより，シール部の締め付けを強くしなくても，ニーダー側からの試料の漏れを防止することが可能となる。

実証プラントも小型実験装置と同様，水蒸気の排気ラインがあり，圧力調整弁により水蒸気を排出しながらニーダー内圧を一定に保つことができる。排出された水蒸気は，コンデンサ内で冷却され凝縮水となり凝縮水タンクに入る。最高使用圧力は0.38MPa-Gで，そのときの水蒸気温度は153℃である。

実証プラントの運転では，130kgの石炭灰と所定量のアルカリ溶液をニーダー内に導入する。その後，内部を撹拌しながら210～220℃に加熱された熱媒を循環させ試料を加熱する。設定の圧力下でニーダー内温度が水の沸点と同等になった時点から圧力調整弁により水蒸気を排出しながら内圧を一定に保つ。最終的には，水分をすべて蒸発させ，乾燥した状態で反応を終了して試料を排出する。試料の昇温時間は約2時間，脱水に要した時間は約4時間であった。得られた試料は，小型実験装置のときと同様，X線回折とCEC測定に供した。

（3）結果

①小型実験装置による最適条件調査

小型実験装置を用いてゼオライト製造に最適な条件を調べた。結果を表3に示す。

(a) NaOH添加量とCEC

実験圧力0.4MPa-Gで比較すると（実験

表3　ゼオライト製造条件

製造条件						
固液比 [ml/g]	アルカリ濃度 [mol/l]	圧力 [MPa-G]	CEC [cmol/kg]	NaOH 添加量 [mol/kg-ash]	NaOH 利用率 [mol/mol]	実験 No.
1.23	3.5	0.4	200	4.31	0.780	①
1.10	3.5	0.4	180	3.85	0.769	②
0.88	3.5	0.4	180	3.08	0.812	③
0.70	3.5	0.4	130	2.45	0.779	④
1.10	2.5	0.4	160	2.75	0.824	⑤
1.10	2.0	0.4	140	2.20	0.793	⑥
1.10	1.5	0.4	83	1.65	0.745	⑦
1.10	3.5	0.2	170	3.85		⑧
1.10	3.5	0.7	200	3.85		⑨

No.①～⑦），固液比およびアルカリ濃度が高い，すなわち，NaOH添加量が高いほどCECが高くなることがわかる。

(b) 水分量と反応速度

ゼオライトの合成過程として，液相を経由して前駆体が輸送される過程とヒドロゲル（コロイド状態のシリカが水を含んでゼリー状になったもの）が直接固体に転移する過程の２つが提案されている[12]。どちらのメカニズムも反応中の水分の存在が必須である。従って，固液比が低くなるほど試料中の水分が少なくなり，溶液状態を保つことが難しくなる。

本プロセスでは反応中に徐々に脱水を行うため，初期の固液比が低い条件では（実験No.④），脱水中，早い段階で反応媒体として必要な水が少なくなり，反応速度が極端に落ちることが予想される。本実験結果から0.88㎖/g以上の固液比が必要であるということがわかった。この値は試料の攪拌効率によって変化することが予想される。攪拌効率が上がれば，固液比がより低い状態であっても反応速度の低下を抑えることが可能であろう。

(c) アルカリ濃度

アルカリ濃度が高いほど，その溶液中にSiおよびAlを溶解することが可能となる[13]。さらに，このアルカリ溶液はゼオライトのカチオンであるNa^+（ナトリウムイオン）の供給源でもある。表3を見ると，実験後，中和されたNa^+の量から求めたNa^+の利用率は非常に高く，0.745mol/mol以上である。水を抜かずに反応が進行した場合を考えると，Na^+の濃度は初期の3.5mol/lから0.89mol/l以下になる。Na^+のゼオライト骨格構造への拡散速度を考えると，濃度が低くなるほど遅くなるので，初期アルカリ濃度は高いほど

良い（実験No.②，⑤～⑦）という結果が説明できる。本プロセスでは反応中に脱水を行い，この濃度低下を抑えているが，初期のアルカリ濃度が低いほど相対的にCECが低くなった。

ゼオライトの製造コストを考えると，余剰アルカリ溶液は少ないほど良いため，実験圧力0.4MPa-Gにおけるアルカリ濃度は2.5～3.5mol/l，固液比は0.88～1.10ml/g程度が適正だといえる。

(d) 実験圧力とCEC

実験圧力を高くするほど，得られるゼオライトのCECが高くなる（実験No.②，⑧，⑨）。これは内部の試料温度を高くしたほうが，ゼオライトの生成反応速度が速くなることに起因する。本実験条件範囲にはないが，実験圧力を高くすると，運転時間を短くすることができ，バッチ式であるプラントの（単位時間当たりの）処理量を増加させることが可能である。実験No.⑨のようにアルカリ添加量を減らしても圧力最大（0.7MPa-G）の条件で得られたゼオライトのCECが高いことから，実験圧力および処理時間の検討をすることが必要であると考えられる。

② 実証プラントとの比較

実証プラントによって得られたゼオライトの物性を小型実験装置によって得られたゼオライトの結果，従来の実験方法[14]によって得られた結果と比較した。表4に示す。

従来法では固液比8ml/gの試料をフラスコに入れ，約100℃において24時間反応させる。反応中は脱水せず，反応後得られた混合物を濾過，乾燥してゼオライトを得た。すべての実験においてアルカリ濃度を3.5mol/lとした。実証プラントは使用最大圧力が0.38MPa-Gなので，圧力0.2および0.38MPa-Gの実験条件で比較した（実験No.⑧と⑩および②と⑪）。

表4　各装置によるゼオライトの性能比較

製造条件					
装置	灰投入量 [kg]	固液比 [ml/g]	圧力 [MPa-G]	CEC [cmol/kg]	実験 No.
小型実験装置	1	1.10	0.2	170	⑧
			0.4	180	②
			0.7	200	⑨
実証プラント	130	1.05	0.20	200	⑩
			0.38	200	⑪
フラスコ実験＊	0.02	8.00	0.0	220	⑫

＊反応温度：約 100℃、反応時間：24 時間

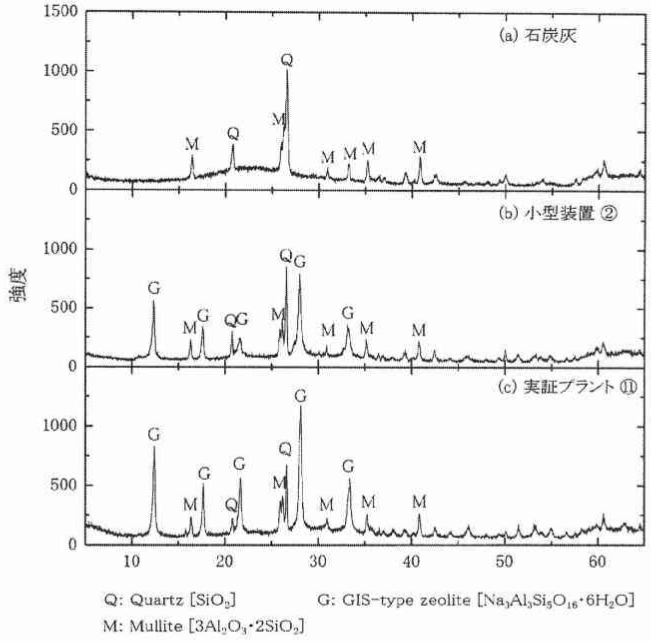


図4　X線回折結果

(a) ゼオライトのCEC

実証プラントで得られたゼオライトのCECは，小型実験装置で得られた結果と同等もしくはそれ以上であった。これは実証プラントの方が攪拌効率が良いためと考えられる。また，フラスコ実験（使用するアルカリ溶液量が8倍，反応時間が1日）の結果にも近い値が得られており，本プロセスによって人工ゼオライトが従来よりも安価に製造できることがわかる。

(b) ゼオライトの生成量

得られたゼオライトおよび元の石炭灰のX線回折結果を**図4**に示す。ゼオライト化処理前の石炭灰は石英とムライトからなる。これをゼオライト化処理すると石英とムライトのピークは小さくなり，変わってGIS型として分類されるゼオライト[(15)]が生成する。このゼオライトはSi/Alの原子比が1.8程度で前述のA型ゼオライト（Si/Al=1.0）よりも高い。ゼオライトのピーク高さは，小型実験装置で得られたものよりも実証プラントで得られたものの方が高くなっている。X線回折パターンのピーク強度とゼオライトの生成量には相関が得られている[(7)]ので，実証プラントの方がゼオライトを多く生成したといえる。

③ 本プロセスによる人工ゼオライトの可能性

五洋建設が作った実証プラントにおいて，本プロセスで得られたゼオライトを汚水の浄化や脱臭，植生実験といった様々な用途実験に供した。その結果，重金属の吸着，アンモニアなどの吸着，植物の成長促進に寄与することがわかった。

また，年間3,000トンのゼオライトを製造する実規模プラントの運転を想定すると，人工ゼオライトの販売価格は80円/kgとなることがわかった。この価格は天然ゼオライト程度であるため，安定した品質が見込まれる本プロセスによる人工ゼオライトで，天然ゼオライトの市場に参入することが可能であろう。

5．おわりに

石炭灰や製紙灰のような産業廃棄物を低コストでゼオライトに転換する人工ゼオライト製造実証プラントを開発した。実証プラントを運転するために小型実験装置を用いて運転条件の最適化を図った。実験条件範囲内で圧力，固液比，およびアルカリ濃度が高いほうがゼオライトのCECが高くなることがわかった。低コストを実現するためにはゼオライトの性能を落とすことなく，固液比およびアルカリ濃度を下げる必要がある。また，実証プラントは小型装置と同等もしくはそれ以上の品質をもったゼオライトを製造できることがわかった。今後，製造能力を上げるために，反応温度を上げ，運転時間の短縮を図り，コストの極小化を実現することが必要であろう。

本稿は，環境省から受託した「加圧・加熱型スラリー反応法を用いた人工ゼオライト製造システムの開発」の研究成果の一部をまとめたものである。関係各位のご支援・ご協力に感謝します。

参考文献

(1) 小野嘉夫, 八嶋建明, ゼオライトの科学と工学 2000, 講談社サイエンティフィク.

(2) Chang H-L, Shih W-H. A general method for the conversion of fly ash into zeolites as ion exchangers for Cesium. Ind. Eng. Chem. Res. 1998;37:71-78.

(3) Hollman GG, Steenbruggen G, Janssen-Jurkovicova. A two-step process for the synthesis of zeolites from coal fly ash. Fuel 1999;78:1225-1230.

(4) Mouhtaris Th, Charistos D, Kantiranis N, Filippidis A, Kassoli-Fournaraki A, Tsirambidis A. GIS-type zeolite synthesis from Greek lignite sulphocalcic fly ashes promoted by NaOH solutions. Micropor. Mesopor. Mat. 2003;61:57-67.

(5) Querol X, Umana JC, Plana F, Alastuey A, Lopez-Soler A, Medinaceli A, Valero A, Domingo MJ, Garcia-Rojo E. Synthesis of zeolites from fly ash in a pilot plant scale. Examples of potential environmental applications. International Ash Utilization Symposium 1999.

(6) Andres JM, Ferrer P, Querol X, Plana F, Umana JC. Zeolitisation of coal fly ashes using microwaves. Process optimization. International Ash Utilization Symposium 1999.

(7) Maruyama N, Yamamoto H, Shibata J. Mechanism of zeolite synthesis from coal fly ash by alkali hydrothermal reaction. Int. J. Miner. Process 2002;64:1-7.

(8) 逸見彰男, 愛媛大学農学部紀要 1989;33 (2) :143-149.

(9) http://www.zeolite-f.com (ゼオライトフォーラム)

(10) http://www.clio.ne.jp/home/zeotec/index.html (株式会社ゼオテック)

(11) 片山優久雄, 特許第3325514号, Katayama Y. US patent No. 6,599,494, 2003, Katayama Y, AU patent No. 768253 (4470/99) .

(12) Davis ME, Lobo RF. Zeolite and molecular sieve synthesis. Chem. Mater. 1992;4:756-768.

(13) 安藤生大, 齊藤将人, 村松重緒, 日吉公男, 春名淳介, 松枝直人, 逸見彰男,福田寿夫. ペーパースラッジ焼却灰を用いたゼオライトの合成と評価. 紙パ技協誌 2003;57 (2) :94-104.

(14) http://web.agr.ehime-u.ac.jp/~soil/ (愛媛大学農学部環境土壌学研究室)

(15) http://www.iza-structure.org/databases/ (ゼオライトデータベース)

〔内外情勢紹介〕

炭層へのCO2隔離とECBM

黒　沢　厚　志（(財)エネルギー総合工学研究所　プロジェクト試験研究部　副部長）

1．はじめに―気候変動対策と炭層へのCO2地中隔離 ECBMとは

炭層中にはメタンが存在しており，安全性の問題から回収が進められてきた。近年になって，これらの炭層メタン（Coal Bed Methane, CBM）の非在来型ガス資源としての性格に注目が集まり，商業生産も開始されている[(1)]。さらに，CBM回収率増加を意図して，採掘不能とされる深炭層へのガス注入によるECBM（Enhanced CBM）に注目が集まっている。

気候変動対策の中心となるのがエネルギー起源からの二酸化炭素（CO_2）排出削減である。その手段は，CO_2を排出しないエネルギー源への転換，省エネルギー，そして地中または海洋へのCO_2隔離の３つに分類される。ECBMの注入ガスにはCO_2を用いることが可能であることがわかっている。化石燃料燃焼に伴って生じるCO_2を回収し注入すれば，ガス資源が回収可能であり，かつ地中CO_2隔離が可能という二重のメリットがあるわけである。

石炭は微細な空隙構造を有しており，ガスを吸着する性質がある。回収するメタンは，この微細構造中に捕捉されているので，別のガスでメタンを置換すれば，メタンは遊離して回収可能状態となる。フィールド試験や実験室実験の結果，CO_2 2分子の注入によって，約１分子のメタンが回収可能であるという経験値が得られている。回収メタンを燃焼したと仮定し，大気中の炭素バランスでみると，炭素２単位の注入（隔離，マイナス）に対して，炭素１単位分が燃焼（排出，プラス）されるので，正味でみると，炭素１単位分のマイナスとなり，炭素抑制が現実的なものとなった場合には，魅力的な技術オプションとなる。CO_2注入／メタン回収比は炭層により大きく異なることも報告されている。注入／回収比が大きい時にはCO_2隔離としての価値が増し，逆に小さい場合にはメタン回収としての経済的価値が大きいことになる。このような，CO_2注入等によるCBMの増進回収がECBMである。図１に，ECBMの概念図を示す。

現在行われているガス注入によるECBMパイロットプロジェクトでは，１つのガス注入井のまわりに複数の回収井を配置する例が多いようである。ECBM

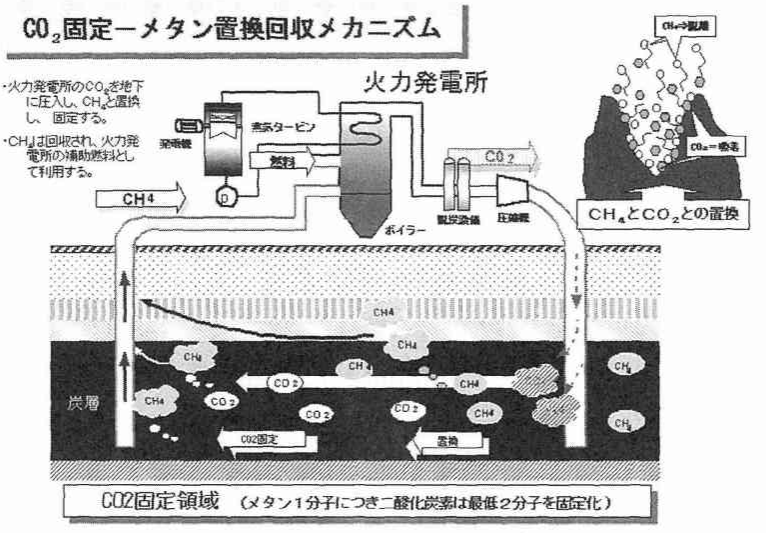


図1　ECBMの概念図 (2)

のために注入されるガスには，CO_2以外にも，窒素や発電所等からの排煙なども候補に挙がっている。

2．採掘不可能な深炭層へのCO_2地中隔離　国際フォーラム

アメリカのエネルギー省（DOE）は，炭層への炭素隔離技術開発を推進しており，活動の一環として，採掘不可能な深炭層へのCO_2地中隔離国際フォーラム（COAL-SEQ）を毎年開催している。筆者は，2004年3月25～26日にかけて，メリーランド州ボルチモアで開催された，第3回COAL-SEQ会議に参加する機会を得た。計51名の専門家の参加があり，2日間にわたりセッション報告，質疑応答がなされた。以下には，その概要を報告する。

なお，会議の概要は，COAL-SEQホームページ (3) で公開されている。

（1）COAL-SEQ会議オープニングセッション

①炭素隔離プログラム（DOE，アメリカ）

DOEの炭素隔離プログラムは，コア研究開発，地域パートナーシップ，統合研究（Futuregen），炭素隔離リーダーシップフォーラムで構成される（図2）。そのうち，コア研究開発では，CO_2回収，CO_2貯留（直接貯留，自然吸収拡張），革新概念，CO_2以外の温暖化ガス削減，測定・モニタリング・検証などに関する活動が行われている。

地域パートナーシップでは，全米7地域（中西部およびグレートプレーンでそれぞれ2つ，南東部，南西部，西海岸地域でそれぞれ1つ）で活動を展開しており，あわせて140組織，カナダの2つの州，3つの先住民地域，および33の州が参加している（図3）。活動費用はDOEとパー

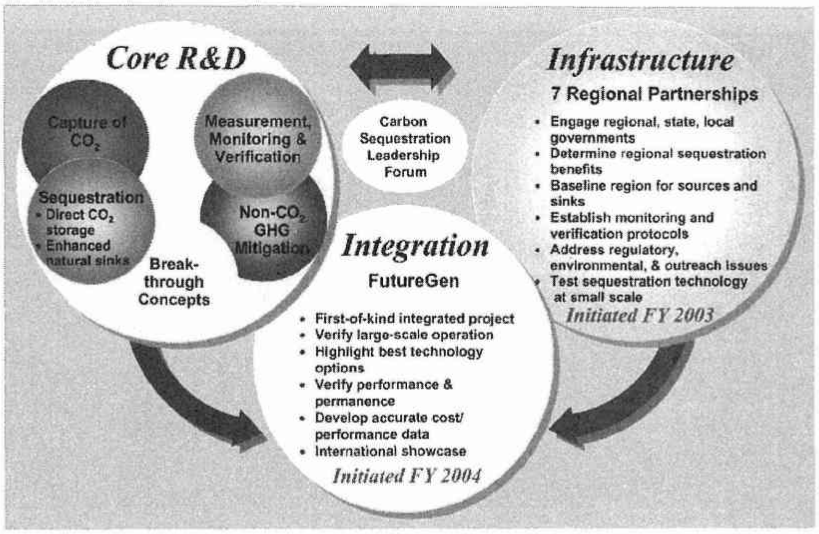


図2　DOEの炭素隔離プログラム

トナーシップ参加者が分担している。また，炭素隔離リーダーシップフォーラムは，炭素隔離に関する国際協力を意図して結成された（日本も参加）。

ECBMに関するDOEの活動には，採掘不能な炭層およびCO_2隔離によるCBM生産増進，炭層CO_2隔離の地質学的スクリーニング基準，深部かつ採掘不能な炭層へのCO_2隔離の地質学的スクリーニング，炭層CO_2隔離およびCBM生産の物理化学，バージニア州フィールドテスト等があることが紹介された。

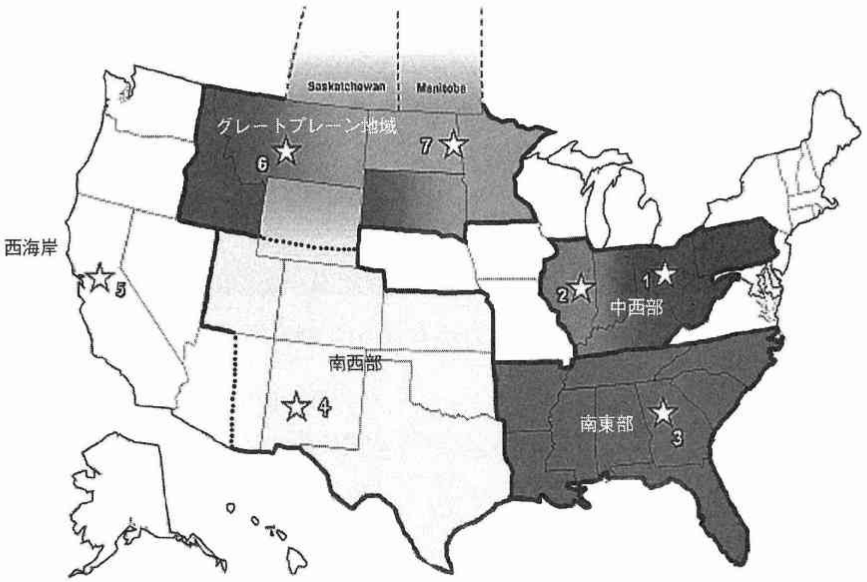


図3　炭素隔離地域パートナーシップ

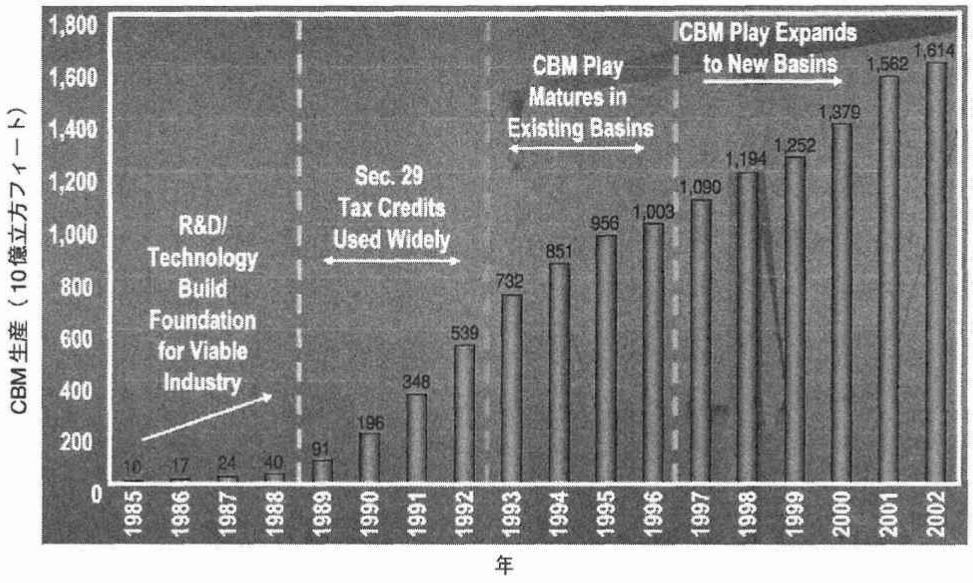


図４　アメリカにおけるCBMの年間生産量

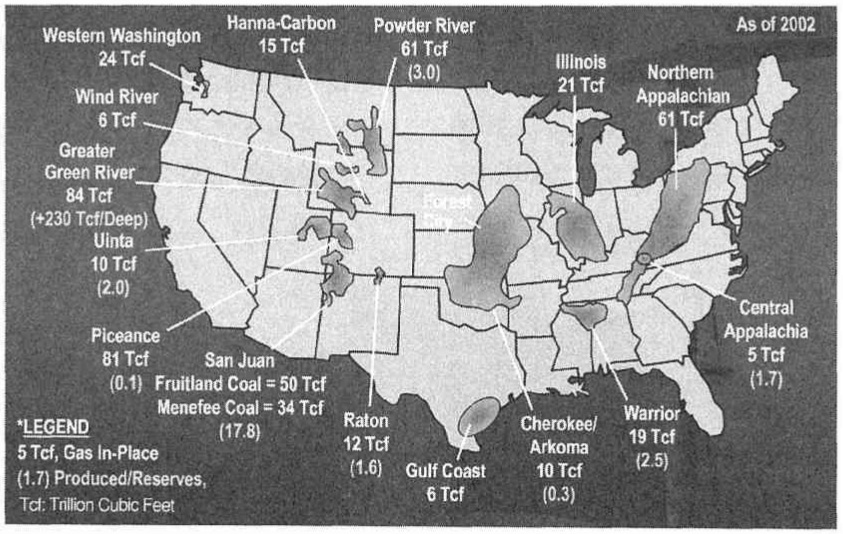


図５　アメリカにおけるCBM資源分布

②なぜ炭層隔離を行うか

（アドバンスト・リソース・インターナショナル（ARI，アメリカ）

アメリカのCBM生産は，天然ガス生産における重要度を増している。2002年における生産量および埋蔵量シェアは，それぞれ８％，10%に達している。また，採掘成功率は90%を超え，発見採掘コストの低下につながっている。一方，排水処分などの運転管理コストが比較的高価となっている。図４には，近年におけるアメリカのCBM生産量の推移を示す。当初は税控除

などの経済的インセンティブもあり競争力が増し，税控除廃止後も生産量が低下せずに推移してきた様子が見て取れる。図5には，CBM資源分布を示した。

ECBMとCO_2隔離のポイントは，①CO_2隔離によるガス増産効果はCO_2貯留コストの一部をカバーすること，②ECBMを行うとCBMガス埋蔵量の大幅な回収増加が見込めるケースが多いこと，③炭田は広範に分布し，しばしば発電所の近くにあるので，このようにCO_2発生源と貯留地点が近接している場合には輸送コスト低減が可能であること，④CO_2ロスや漏洩のリスクが小さいこと，である。

また，今後必要なアクションは，①技術的問題とその不確実性を明らかにすること，②フラグシップとなるフィールド実証試験支援，③安全性，モニタリング，検証に関する要件と技術，④CO_2貯留に対して，パフォーマンスベースの経済的インセンティブを与えること，であろう。

③炭層への炭素隔離に関する国際的視点（国際エネルギー機関温室効果プログラム（IEA GHG））

CO_2貯留は，CO_2削減策のオプションとして認識されているが，京都議定書の枠組のもとでは削減策と公式に認められていない。CO_2-ECBM採用基準は，CO_2貯留ポテンシャルとメタン増進回収量が十分であること，将来にわたっても炭層が乱されないこと等が条件となるだろう。メタン回収が見込めない場合は，炭層へのCO_2注入はあまり魅力的でなく，他のCO_2削減手段を採用した方が経済的だろう。

20ドル/tonCO_2の対策コストにおける世界的なCO_2貯留ポテンシャルは，廃ガス田・油田，帯水層，ECBMの各オプションでそれぞれ930GtonCO_2，400-10,000GtonCO_2，30GtonCO_2であり，ECBMのポテンシャルは他のオプションと比較して相対的に小さい。しかし，アメリカ，オーストラリア，インドネシア，ロシア，中国，カナダ，インド，ポーランドなどの技術的貯留ポテンシャルが大きい国や地域にとっては魅力的対策手段となりうる。

今後は米国サン・ホワン盆地以外でのプロジェクトでの成功が鍵を握るだろう。

（3）セッション　実証プロジェクト

①サン・ホワン盆地アリソン・ティファニープロジェクトの最終結果（ARI，アメリカ）

コロラド州およびニューメキシコ州に位置する（図6），アリソンおよびティファニープロジェクトの総括がなされた。アリソン・ユニットのCO_2注入履歴とメタン生産量の関係を図7に示す。CO_2注入以前のCBM生産は徐々に増加し，その後CO_2注入を開始して数年後から，CBM生産量が急増した傾向がわかる。また，ティファニー・ユニットの窒素注入とメタン生産履歴の関係をみても，間欠的な窒素注入に呼応してCBM生産が急増していることが伺える。2つのユニットと同等の条件であれば，CO_2または窒素によるECBM商業生産は採算にのることが予

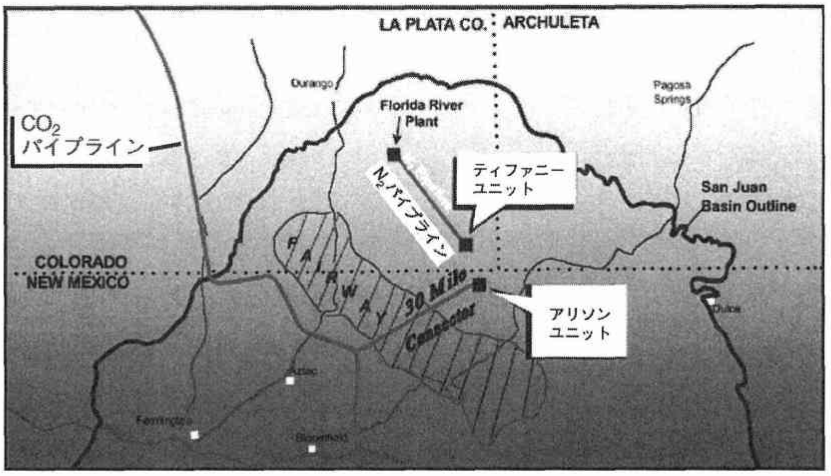


図6　サン・ホワン盆地のECBMフィールド試験場所

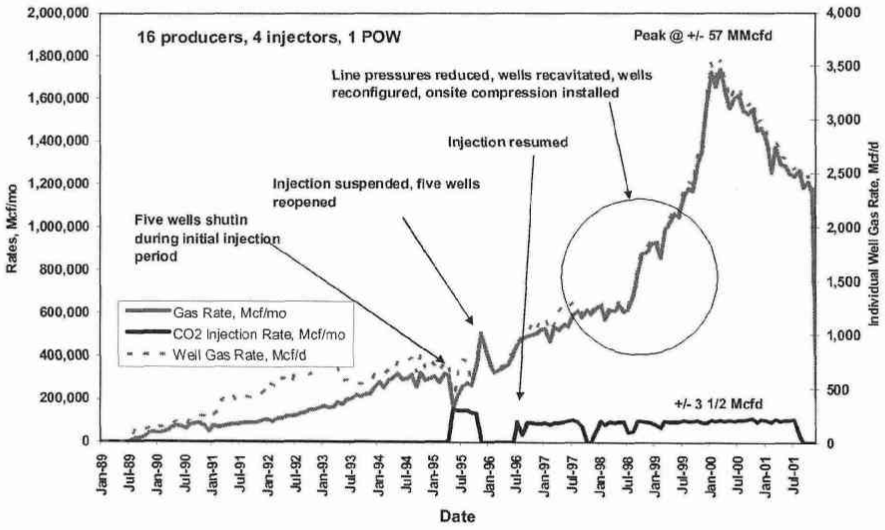


図7　アリソン・ユニットのCBM生産およびCO_2注入履歴

想される。注入性（浸透率），等温線挙動，拡散挙動，メタン－CO_2—窒素系の圧力・体積・温度挙動などを明確にする必要がある。パイロット試験は最適化されていないので，今後も改善の余地がある。

②RECOPOLプロジェクト最新動向

（オランダ地質調査所（TNO），オランダ）

ポーランドのシュレジエン炭田で実施されているEUを中心とした国際ECBMプロジェクトRECOPOLは，北米以外で最初のECBMプロジェクトである。RECOPOLプロジェクトのフィールド試験デザインを図8に示す。断層が存在するが強固なシール層があるため，CO_2漏洩は少ないと予想されている。CO_2モニタリングに

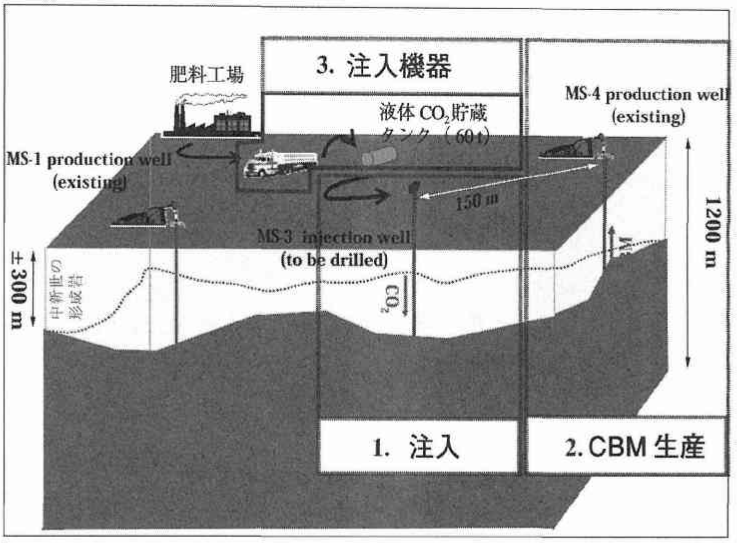


図 8　RECOPOLプロジェクトのフィールド試験概要

関して，直接測定（地下および地表），ガス同位体分析，水サンプル測定，地震観測など，多くの方法が採用されているのが特徴である。

③JCOALプロジェクト（KANSO，日本）

経済産業省補助事業として，関西環境総合センター（KANSO），石炭エネルギーセンター（JCOAL）等により実施されているプロジェクトの紹介があった。サイト選択にあたっては，地質構造がよくわかっていること，炭層が地下500mより深部にある，炭層厚さが１m以上，キャップロック（帽岩）厚さ250m以上等の点を満たすことを条件として，北海道石狩炭田を選択した。サイトには，地表から，幌内層，夕張層，幌加別層が分布している。幌内層は約700mの厚さがあり，泥岩・砂岩で構成されキャップロックとなる。夕張層には上中下の３つの炭層がある。そのうち最も厚さのある下部夕張層（深さ890m）へのCO_2貯留を予定している。2004年度には，注入井から150mの距離を狙って生産井を掘削し，200tonCO_2の注入を予定している。

日本には，北海道の他にも，常磐沖，九州，日高三陸沖，東シナ海などに炭層CO_2注入の可能性がある。

（４）地域プロジェクト

①沁水プロジェクト（アルバータ研究評議会（ARC），カナダ）

カナダ国際開発庁と中国商務部が協力して進めている，中国山西省沁水地域でのプロジェクトの報告があった。サイト候補位置を図９に示す。

沁水盆地（Qinshui Basin）におけるCBM資源量は約5.5兆m^3と推定され，南部地域では5,000～16,000m^3/日のCBM生産（増進回収前の一次ベース）が可能と推定

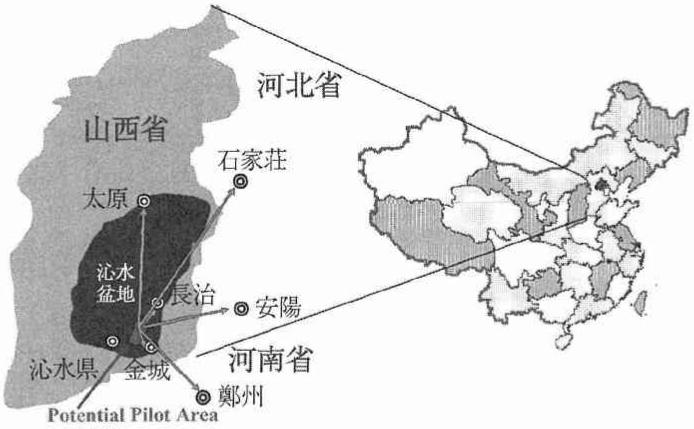


図9　沁水プロジェクトサイト位置

されている。地下478mの山西層を狙ってフィールド試験を実施中であり，CBM生産は既に確認している。今後は計200ton程度のCO_2注入試験を行う予定である。

②アラバマ州ブラック・ウォリア盆地プロジェクト（アラバマ地質調査所，アメリカ）

アラバマ州ブラック・ウォリア盆地では既にCBMの商業生産が行われており，4,000以上のCBM井戸がある。全体のCO_2貯留ポテンシャルは30～52MtonC，ECBM生産ポテンシャルは1.5～2.8兆立方フィート（tcf）程度と想定しているが，そのうち技術的に可能であるのは12-20MtonC，0.6～1.2tcf程度であろう。ECBMによりメタン回収率は18%以上は向上すると思われる。

ECBM生産のスクリーニング基準は，地質（層位，地質構造，地球熱学，水理学，炭質，吸着特性），技術（ECBM回収，石炭発電における大規模CO_2回収），イン

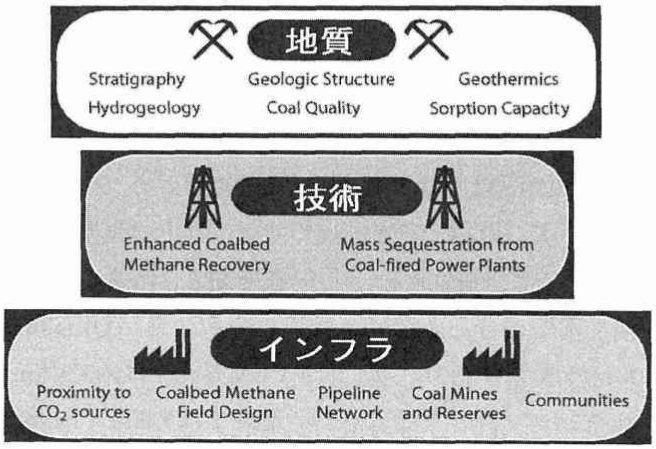


図10　ECBMのスクリーニング基準

フラストラクチャ（CO_2源への近さ，CBMフィールド設計，パイプライン，炭田と埋蔵量，地域コミュニティ）などで決定されると考えている（図10）。

③テキサス低品位炭プロジェクト（テキサス農工大，アメリカ）

テキサス州低品位炭層におけるCO_2隔離の実現可能性，環境および経済影響を評価することを目的として調査を行っている。テキサス州では石炭（褐炭などの低品位炭を含む）がメキシコ湾岸地域で産出する。炭田近くでは山元発電が行われて，CO_2の大量排出源と隔離可能地点が近接している場合もある。

3つの石炭発電プラントを対象に実現可能性を評価した。炭理，浸透性等の炭質をサンプル調査したところ，低品位炭に対しては深部ほど浸透率が低いという相関を得たが，その原因は不明である。今後は，CO_2・メタン・窒素の吸着特性や，CO_2隔離およびECBMの技術的および経済的実現性を評価する予定である。地下帯水層汚染防止なども課題である。

（5）モデリング

①モデル比較研究の最終結果（ARC，カナダ＆ARI，カナダ）

GEO-SEQは，炭層へのガス注入時における数値モデル挙動比較プログラムである。注入ガス（CO_2，燃焼ガス，および両者）や，井戸構成（5点法，単独井，フィールドテストデータ）などの組み合わせを変え，5種類の標準問題に対するモデル挙動を比較した。比較対象としたパラメータは，ガス成分比，拡散率，吸着率，浸透率と空隙率の応力依存性，石炭収縮・膨張挙動などである。

ARCが用いているコンポジット型モデルであるGEMの試算結果の紹介があり，フィールドデータとの一致がよいこと，浸透率理論とGEMモデルの組み合わせにより挙動予測能力が向上する可能性があることが指摘された。また，ARIが用いているブラックオイル型のモデルであるCOMET3モデルの説明では，マトリックス膨張および浸透率変化はガス濃度だけでなくガスの種類に依存することの重要性が示された。

②炭素隔離スクリーニングモデルおよび経済性感度分析（ARI，アメリカ）

リザーバシミュレーションモデル試算結果，および経済性評価モデルを組み合わせて，感度分析を可能としたCOAL-SEQモデルの開発を進めている。感度分析が可能なパラメータは，浸透率，井戸間隔，炭層深度，石炭品位，ガス注入率，注入ガス組成，注入タイミングの7つである。経済性については，発電方式（微粉炭，IGCC，NGCC）の違い，輸送・注入に係る固定費と資本費，税，天然ガス価格，CO_2クレジットなどを考慮した分析結果の紹介があった。

③ヴァーチャル・インテリジェンススクリーニングモデル（ペンシルベニア州立大学，アメリカ）

ニューラルネットワークを用いたシミ

ュレーションによる炭層CO_2隔離スクリーニングツールの紹介があった。データを用いたネットワーク学習により，炭層CO_2隔離の予測ツールとしての有用性が確認された。

（6）実験室規模での研究

①アシッドガス注入による石炭膨張（ブリティッシュコロンビア大学，カナダ）

吸着誘発石炭膨張の浸透率影響と，アシッドガスの炭層隔離に関する研究成果の報告があった。CO_2，CO_2と窒素，硫化水素，硫化水素と窒素の4種類の注入に対する浸透率の変化を調べた。硫化水素およびCO_2をカナダ炭に注入した時の浸透率低下，窒素とCO_2を混合した場合のCO_2注入効率およびメタン回収効率の向上などが報告された。

②最新の吸着モデル（オクラホマ州立大学，アメリカ）

汎用的なリザーバシミュレーションに利用できる簡易で信頼性のある吸着平衡モデルの研究を進めてきた。ガス－石炭の分子レベルでの相互作用，相変化などを表現するため，3種類の基本モデル（簡易局所密度，小野－近藤格子，2次元状態方程式）と，吸着量と温度・圧力・組成・含水率などの関係を整理した吸着データベースにより，高圧かつ多成分ガスの吸着挙動の汎用的モデル構築を行った。より現実的なCO_2-ECBM評価のためには，水分影響，剛体球モデルによる状態方程式，データベース改善などの課題が残されている。

③石炭中の高温高圧流動実験チャレンジ（デルフト工科大学，オランダ）

静圧セル，動圧セル，毛細圧セル，ペンダントドロップセルなどの計測機器開発および各種パラメータ測定結果の紹介があった。ペンダントドロップセルでは，石炭／水／ガスの界面可視化，吸収・拡散に伴う容積変化，ぬれ性，CO_2飽和にともなう石炭膨張などの測定が可能である。

④メタン／CO_2／窒素系の圧力－体積－温度挙動（オークリッジ国立研究所，アメリカ）

CO_2は，高温高圧条件下では地下で超臨界状態になっている場合が多く，理想気体挙動に従わないことが予想される。CO_2，メタン，窒素の3成分混合気体の密度および粘性を高精度で把握することは，CO_2-ECBMを実施する上で重要である。各種の温度圧力条件下での測定が可能な装置の紹介があった。

（7）安全性，モニタリング，検証

①炭素への炭素隔離における安全性・モニタリング・検証の重要課題（ARI，アメリカ）

CO_2炭層貯留に対する安全性，モニタリング，検証に関する諸問題の報告があった。

(a) 地中隔離／貯留に伴うリスク

リスクは，影響および確率の関数である。CO_2はしばしば自然に地中にトラップされている。油田およびガス田へのCO_2注入の

プロセスはよくわかっているが，炭層中挙動はよくわかっていない。CO_2が「永久」に隔離できるかが問題になっている。グローバル・リスク，操業リスク，地域的リスクの3種類は区別する必要があり，注入規模がスケールアップした場合のリスクの把握が求められている。長期貯留に関するリスク評価のためには，1000年スケールでの地質挙動予測によりCO_2が貯留層にとどまっているかを知り，長期モニタリングおよび検証システムを安価で構築する必要がある。漏洩パスには，坑井，不十分なキャップロック，断層・亀裂などが予想される。炭層に特有なリスクとしては，ゴブ・ウェルまたは坑道からの漏洩，水圧破砕時の亀裂からの漏洩，CO_2に置換されたメタンの漏洩，将来の石炭採掘可能性などがある。

これまでに得られたリスクに関する知見は，(i) CO_2は安全に貯留することが可能，(ii) 健康影響はよくわかっている，(iii) ハザードはCO_2放出の規模ではなく性質に依存する，(iv) リスク最大値は同定されている，(v) CO_2貯留は（他の地中貯留物質と比較して）ユニークな特性がある，といったところである。

また，CO_2貯留に関する規制枠組は整備されているとは言えず，(i) 既存の政策がないか少ない。ただし，アシッドガス注入，EOR，天然ガス貯蔵，CO_2輸送および産業利用，水注入などに関する規制はCO_2貯留に拡張可能かもしれない，(ii) 油田・ガス田，天然CO_2貯蔵地点などの知識が活用可能である。天然CO_2源には，火山噴火，熱水噴出，湖沼，生態系からの発生源がある，等の点が強調された。

(b) モニタリングおよび検証の枠組

地中貯留が安全かつ環境によいという，公衆に対する合意形成を得た後，ECBMのCO_2貯留量や他のCO_2削減オプションと比較した経済性を示す必要がある。モニタリングおよび検証に関する技術は，既存技術が利用可能である場合が多い。現在のところあまり考慮されていない事項には，(i) CO_2のユニークな特性（地中では上昇，空気より密度が高いので地表に滞留する，1%以下の濃度では毒性が低い），(ii) 長期にわたる貯留時間（坑井から離れた漏洩や影響），(iii) 将来状況（地質学的，地理的，生態学的条件）などがある。また，初期のパイロットプロジェクトでは集中的にモニタリングおよび検証を行い，その後は相対リスクに基づいてモニタリングを行うのがよいだろう。

②CCPにおける貯留・モニタリング・検証プログラム（BP，アメリカ）

カーボン・キャプチャー・プログラム（CCP）の貯留・モニタリング・検証プログラムでは，貯留完全性，最適化，モニタリング，リスク評価に関する広範な活動を行っていることが紹介された。

③炭層隔離の地力学的リスク（ローレンスバークレイ国立研究所,アメリカ, L）

地力学的リスクについての説明があった。新規井戸掘削において，従来技術に

表1　世界の主なECBMパイロットプロジェクト

実施主体（カッコ内は進捗状況）	実施場所
（実施済）	
アメリカ　BP、バーリントン・リソース （エネルギー省支援）	サン・ホワン盆地 アリソン・ユニット（ニューメキシコ州） ティファニー・ユニット（コロラド州）
（実施中）	
カナダ　アルバータ研究評議会	アルバータ州　フェン・ビッグ・バレー
欧州連合　RECOPOLプロジェクト	ポーランド　シュレンジン炭田
日本　関西総合環境センター、 石炭エネルギーセンター	北海道石狩炭田夕張地区
（調査、計画段階）	
アメリカ　アラバマ地質調査所	アラバマ州　ウォリア盆地
アメリカ　コンソル・エナジー社	ウエストバージニア州
オーストラリア　連邦科学研究機構	オーストラリア国内
中国商務部・カナダ国際開発庁	中国山西省　沁水炭田

（原典：各種情報をもとに筆者作成）

よる漏洩リスク最小化が可能であるが，廃井戸には潜在的リスクがあること等が指摘された。

3．まとめ

● ECBMの技術的実現可能性が高まっている。

アメリカにおける天然ガス生産のうち，CBMのシェアは拡大してきており，技術的な成熟が進んできたと言えるであろう。ECBMは，CBM回収の回収率増加のため，CO_2などのガスを地中に注入する技術であり，注入ガスにCO_2を用いる場合には，CO_2隔離と天然ガス増産を狙う一石二鳥型の技術となりうる。ECBMによる増産効果がどの程度であるかは，各国で実施されている基礎研究やパイロットプロジェクト（表1）の結果を見極める必要がある。

● 経済性や社会制度の問題をクリアすべきである。

ECBMの実現のためには，まず，プロジェクトの経済性に注目すべきである。炭素税等の炭素削減インセンティブがなくても，天然ガス価格や効率向上などの要因で採算ベースに乗れば，ビジネスベースで導入が進むであろう。炭素削減インセンティブがある場合は，採算基準が変化するのでさらに導入可能性が高まる。地中にCO_2を注入する場合の規制制度は国によって異なるが，社会的受容性や利害関係者調整などの方策もあわせて考慮していく必要があるだろう。

● CO_2削減手段として認知される可能性が大きい

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）ではCO_2隔離に関する特別報告書の作成

を決定し，作業を行っている。ECBMは報告書中でもCO_2隔離手段として認知されることが予想される。CO_2削減手段および天然ガス増産手段としてのECBMに関する動向に今後も注目したい。

[謝辞]

本稿は，経済産業省地球環境国際研究推進事業「二酸化炭素の国別排出インベントリ算出における隔離技術の適用ルールに関する研究」の成果の一部を含むものである。紙面を借りて関係者に深謝する次第である。

参考文献

(1) 島田，コールベッドメタン（CBM）(I) CBM概論，日本エネルギー学会誌，vol83,pp291-297,2004

(2) JCOALホームページ，http://www.jcoal.or.jp

(3) COAL-SEQホームページ，http://www.coal-seq.com

〔調査研究報告〕

産業間連携による省エネルギーについて

塙　雅一（㈶エネルギー総合工学研究所　プロジェクト試験研究部　主管研究員）

1．はじめに

わが国の産業基盤である素材産業のアジア地域における国際競争力が低下しつつある。製品供給先である自動車，家電機械産業等，組み立て産業の海外転出に伴う国内産業の空洞化による内需の伸び悩み，それに伴う設備更新の遅れと設備の老朽化による原単位の上昇で，わが国の素材産業の生産設備のほとんどが立地するコンビナートの持つ国際競争力が徐々に低下してきているのである。

かつて，不況時にはバッファーとしてアジア地域へ安値輸出することで対応することもあった。しかし，中東産油国での汎用品の大量生産や組み立て産業海外転出先での原料調達の増加によりこれまでと同じ対応ができにくくなってきている。このような現象は，日本のみならず，台湾，韓国においても，程度の差はあれ現実のものとなってきている。

さらに，最近では国内においても海外からの安価な汎用品の流入に対しても対抗策を講ぜざるを得なくなってきている。

わが国では，前述のような原単位高に加え，原料高，エネルギーコスト高，という「三重苦」の中で，安定操業と正確な物流システム，多品種少量生産と高品質の両立，等によってかろうじて海外品の大量流入を防いでいる。

現在，コンビナートに参加する企業は，原料，製品，エネルギーを相互に融通利用しあうことで，安定生産と価格競争力の維持強化を目指しているが，30年以上前に建設された鹿島コンビナート以降新たなコンビナートは建設されていない。ということは，現状のコンビナートはその後の状況の変化により，十分な産業間連携がなされなくなり，結果として本来有していた高効率という特徴が薄まった可能性が大きい。

では，如何にしてわが国の素材産業，ひいてはコンビナートの国際競争力を強化することができるのであろうか？　限られた資源，限られた内需の下で，国際競争に勝ち残っていくには，国内の非効率的な小規模のコンビナートを整理統合するとともに，国際競争力強化の可能性が残されたコ

ンビナートに資産を集中して，よりエネルギー原単位の小さい，高効率なコンビナートへ改造していくしかないと考えられる[1]。

そこで，本稿ではコンビナートの高効率化に寄与すると期待される産業間連携による省エネルギーの効果，方法，技術，課題等について報告する。

2．日本の素材産業のアジアにおける位置づけ

（1）設備の老朽化による競争力低下

素材産業のアジア地域における国際競争力の一例としてエチレン生産量の推移と将来予測について図1に示す。わが国のエチレン生産量はここ10年間，約550万トンと600万トンの間を動いており，ほとんど伸びてこなかった[2]。一時的に，1993年を底に，主としてアジア向けの輸出に牽引されて増産を重ね，1999年にはピークに達したが以後減少に転じた[3]。

これまでの輸出先であった国々に最新鋭のプラントが建設され，日本からの輸出に代替した結果，日本国内ではプラントの新増設が進まず，設備の老朽化が進んで行った。エチレン生産メーカーは，老朽プラントのボトルネック解消による能力増強と小型の旧式プラントの廃止で原単位の改善とコスト低減を図る等，生き残り努力を続けている。しかし，建設後30年以上が経過した老朽設備がベースでは競争力回復までには至っていないのが現状である。この状況は，エチレンに限らず，鉄鋼，その他製品輸出比率の高い素材産業においても同様と考えられる。

広大な土地と人口を有する中国とイン

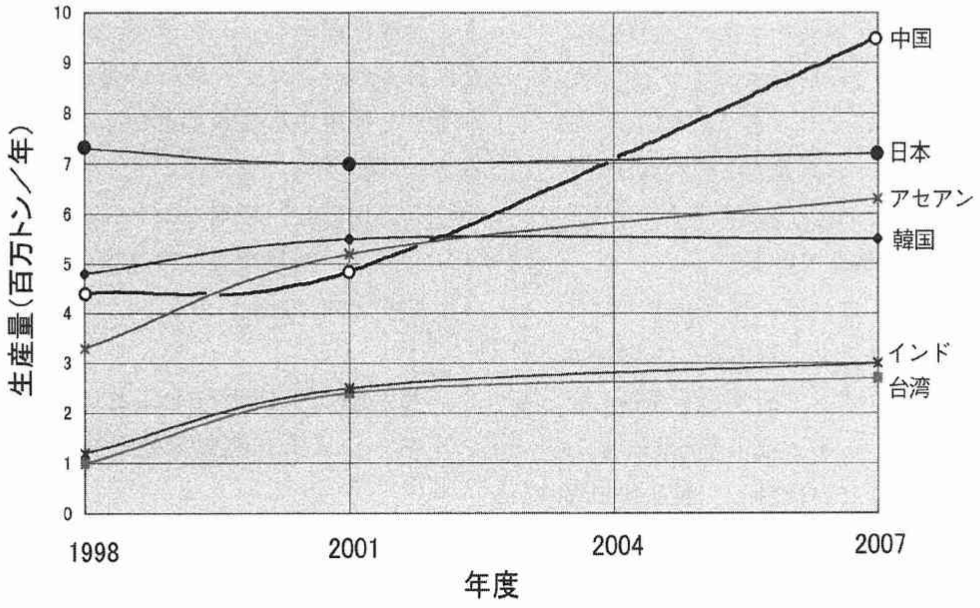


図1　エチレン生産量の推移と将来予測[3][4]

ドを除き，程度の差こそあれ，台湾，韓国をはじめとするアジアの他の諸国は，日本と同様の経過をたどると予想される。

（2）競争力強化の事例ーシンガポール

日本と同様，原料を輸入して製品を輸出する比率の高いシンガポールの状況はどうであろう？　中東産油国と製品需要国との中間に位置するシンガポールでは，ジュロン地区沖合の７つの島の間を埋め立てて，ジュロン島という１つの平坦な工場用地を造成し，80年代半ば，そこに世界最大級のコンビナートを建設した。ジュロンコンビナートでは「ケミカルアイランド」の掛け声の下，エチレンを年間200万トン弱（日本のエチレン生産量の約３分の１）生産している。

現在の中国特需に対しては，日本に比較し大型かつ最新鋭プラントにより競争力を発揮している。誘導品メーカーの誘致のために，熱，電気その他のユーティリティを供給するエネルギーセンターを先行して建設し，製品バランス調整のための重質油のガス化とガスタービンのコンバインドサイクル発電にも挑戦している。

しかし，ジュロンコンビナートでは最新鋭の大型プラント，日本よりも低いユーティリティコストで競争力を発揮しているにもかかわらず，中東産油国の新設計画が目白押しなのに対し，製品輸出型のコンビナートの将来性に不安が残り，次期計画がなかなか具体化しないという悩みを抱えている。今後は，少品種大量生産による汎用品は中東産油国に任せ，技術力をベースにした多品種少量生産の特殊グレードで生き残りを図る戦略をとるものと考えられる。

（3）日本が国際競争力維持に必要なもの

アジア地域での素材産業の製品需給バランス上，一時的な特需を除き，将来的には，日本の製品輸出競争力維持は期待できない。老朽設備の廃棄と比較的競争力の残されたコンビナートへの最新鋭設備の集中により，国内需要に見合った規模まで均衡縮小を図り，多品種少量生産の特殊グレードで一部製品の輸出競争力を維持しつつ，技術力を保持することが日本の戦略となる。

大型化に加え，各産業間のエネルギーの相互利用やマテリアルリサイクルによる省エネルギーによってエネルギー原単位を改善することで国際競争力を強化できる可能性がある。シンガポールと異なり，日本のコンビナートには莫大なエネルギーを使用する鉄鋼産業が立地しているケースが多い。シンガポールのコンビナートに比較し，日本のコンビナートのメリットは，鉄鋼産業との連携による省エネルギーの可能性があることである。

3．わが国コンビナートにおけるエネルギーシステム高効率化の取り組み

（1）エネルギーセンターで高効率化

1973年の石油ショック以降，わが国の製造業は生き残りをかけた省エネルギーを各社ごとに推進し，世界で最もエネル

ギー原単位の優れた産業群を作り上げている。しかしながら，エネルギーコストの高さと設備更新の遅れからその国際競争力にも翳りが見え始めている。対策として，単一企業内の省エネルギーに止まらず，産業間，企業間のエネルギーや副製品の相互融通によってより高度の省エネルギーを達成することが必要である。同時に，個別企業ごとに自家発電所を設置し熱と電気のコージェネレーションを実施するのではなく，大型のエネルギーセンターを共同で設置し「規模の経済性」を享受することで更なる原単位の改善を図ることも望まれている。

わが国でもっとも遅く設立された鹿島コンビナートや大分鶴崎コンビナートではすでにエネルギーセンターが設置され，それなりに高効率のエネルギー利用を達成しているが，シンガポールジュロン島のコンビナートに比較すると，建設後30年以上が経過し最新鋭の設備とは言い難い。

（2）大型エネルギーシステムの最適化

最近，大型エネルギーシステムの最適化については，ピンチテクノロジー*を利用した解析が有効であることが明らかとなった。図2に従来型ボイラとスチーム・タービン（ボイラ＋タービン）によるエネルギーシステムと，ガスタービンを組み込んだ（GT複合）エネルギーシステムとの理論上のエネルギー効率の比較を示す[(5)～(8)]。熱と電気の需要比率（R値）によって理論上の最高エネルギー効率は変動する。熱需要が多いときは両システムに差は見ら

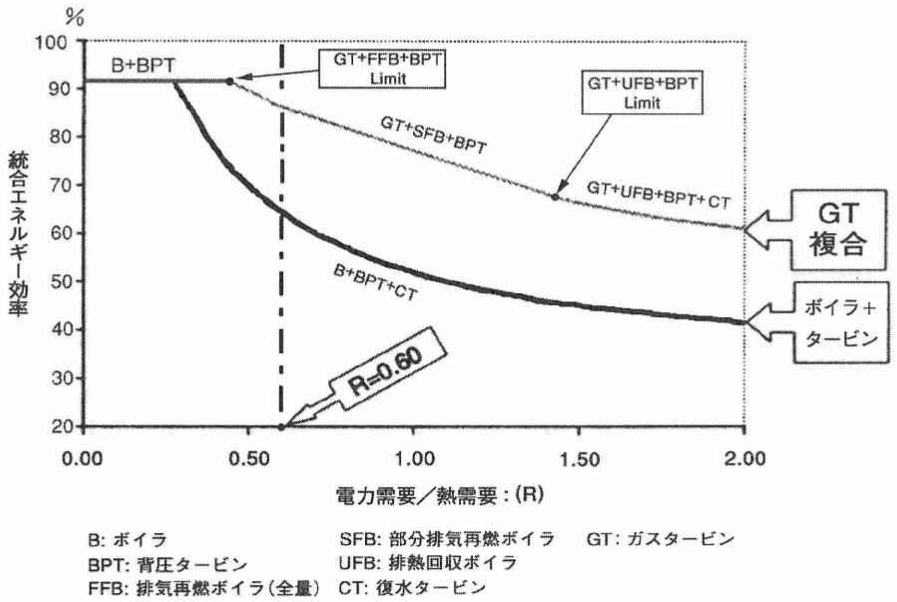


図2　エネルギー効率比較

＊ピンチテクノロジーとは、設備ごとの熱需要と排熱供給に係るデータをそれぞれ解析して、熱融通の最適状態を調べる手法。

れないが，電力需要が多くなるにつれて，GT複合システムの理論上のエネルギー効率のほうがより高効率となる。

R値を産業別に比較すると，化学産業では熱需要が多く通常0.5程度であるが，鉄鋼業や機械産業では1.0以上となることが多い。石油や石油化学を中心とするコンビナートのR値は0.5～1.0，鉄鋼を含めるとそれ以上になるため，一般にコンビナートではGT複合システムのほうが高効率となる。

（3）エネルギーシステムの効率の変遷

ボイラ＋タービンシステムにおいては，1950年代半ばに再熱・再生サイクルを採用して大幅に熱効率が向上した。

わが国最後のコンビナートが建設された1960年代末以降も，電気事業者向けのボイラとスチーム・タービンシステムやガスタービンシステムの技術開発が進められ，スチームタービンにおいては，図3に示すように，超臨界圧から超々臨界圧へと更なる蒸気条件の向上を図るなど，着実に熱効率向上が図られてきた[(9)]。

1990年代以降は，図4に示すように，ガスタービンと蒸気サイクルを組み合わせたコンバインドサイクル発電とすることで熱効率が飛躍的に高くなった[(9)]。導入当初は，高効率ガスタービンはタービン入り口温度をタービン材料の耐熱温度より高くする必要があるため，タービンブレードの寿命等，信頼性にかける点が多く，電気事業者向けに導入されることはほとんど無かった。しかし，1984年1,100℃級のガスタービンコンバインドサイクル発電システムが東北電力㈱東新潟3号系列に導入されて以来，急速に技術開発と設備導入が進められた。

コンビナートで設置される自家発電所では従来型ボイラとスチーム・タービンによるエネルギーシステムが採用されている。そこでは電気事業用と異なり蒸気

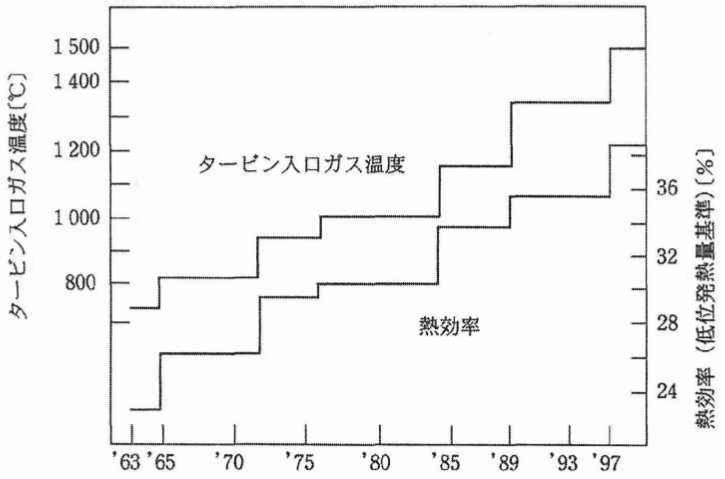


図3　燃焼温度の高温化と熱効率の推移

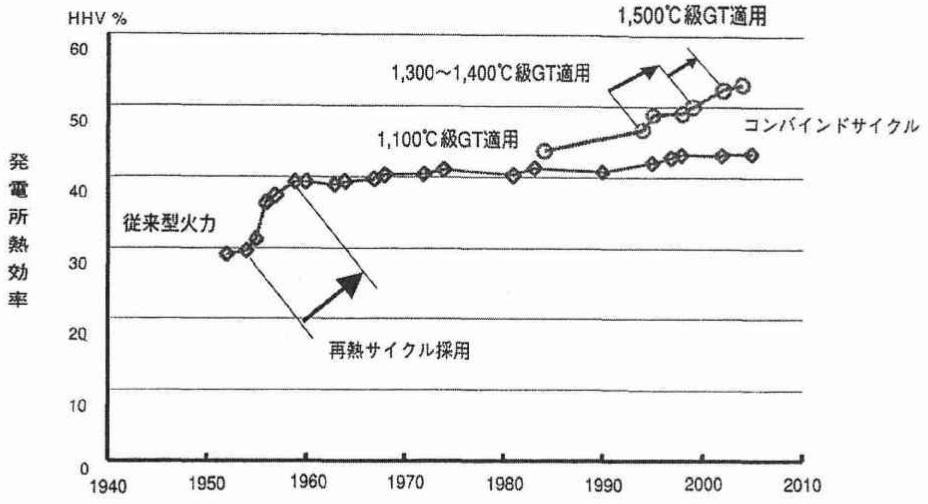
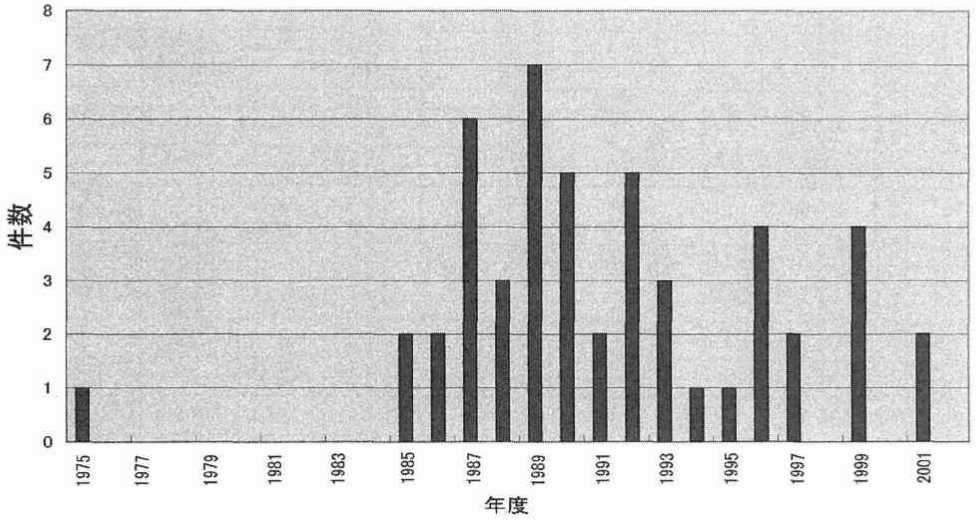


図4　コンバインドサイクル発電の推移

の供給を伴うため，蒸気のホールドアップ量が多いドラム型ボイラが採用され，超臨界圧型ボイラの採用はほとんど見られない。発電効率の向上を狙うより，熱需要の拡大により熱供給を含めた総合効率の向上を狙ったものと考えられる。

（4）進むコンビナートへのガスタービン導入

ガスタービン自体の効率も燃焼温度の高温化や大型化によって近年急速に向上し，信頼性の向上ともあいまって，図5に示すようにコンビナートのガスタービ



（出所：日本コージェネセンター「導入実績表」，三菱重工「製作経歴表」を基に作成）

図5　コンビナート向けガスタービン設置実績

ンの導入が，1980年代後半から急激に進んだが，ガスタービン用の安価な燃料の供給に制約があり十分普及しているとは言い難い。ガスタービン用の安価な燃料である副生ガスとしては鉄鋼のコークス炉ガス（COG），石油精製のFCCオフガス，

表1　コンビナートガスタービン実績（2003年3月まで）

設置年月	場所	名称	燃料	電力kW	ｽﾁｰﾑt/h	ﾀｰﾋﾞﾝﾒｰｶｰ	ﾀｰﾋﾞﾝ型式	発電機ﾒｰｶｰ	備考
1989年7月	大分	九州石油大分	副生ガス	1000		三井造船		西芝電機	92年増設、97年増設
1990年2月	大分	住友化学大分	副生ガス	6800	15	三菱重工	MF-61	明電舎	
1990年8月	大分	鶴崎共同動力	副生ガス	23350	45	日立製作所		日立製作所	
1992年6月	大分	九州石油大分	副生ガス	7000		三井造船		西芝電機	
1997年1月	大分	九州石油大分	副生ガス	7000		三菱重工	MF-61	明電舎	追い炊きボイラー
1987年11月	大阪	住友化学大阪	都市ｶﾞｽ	4000	10	ｱﾘｿﾝ(IHI)		明電舎	89年増設、99年廃止置換
1989年9月	大阪	住友化学大阪	都市ｶﾞｽ	4000	10	ｱﾘｿﾝ(IHI)		明電舎	
1999年11月	大阪	住友化学大阪	都市ｶﾞｽ	4000	10	ｱﾘｿﾝ(IHI)		明電舎	
1994年11月	鹿島	鹿島北共同火力	メタン	35000		三菱重工	MF-221		
1996年7月	鹿島	昭和産業鹿島	LPG	7000		三菱重工	MF-61		
1997年5月	鹿島	DIC鹿島	ﾌﾟﾛﾊﾟﾝ	5090	20	日立製作所		日立製作所	
1999年1月	鹿島	鹿島動力	LPG／灯油	8160		EGT(タクマ)		西芝電機	01年増設
2001年12月	鹿島	鹿島動力	LPG／灯油	8160		EGT(タクマ)		西芝電機	
1985年3月	川崎	浮島石油化学	その他	14000		三井造船		明電舎	
1987年11月	川崎	昭シェル川崎	ｵﾌｶﾞｽ／ﾌﾞﾀﾝ	12000	20.1	三菱重工	MF-111	三菱電機	
1987年12月	川崎	東燃石化川崎	副生ガス	38000	140	三菱重工	MW-251	三菱電機	追い炊きボイラー
1993年6月	川崎	日石化学川崎	ﾌﾞﾀﾝ	38000	110	三菱重工	MW-251	三菱電機	
1994年7月	川崎	キグナス石油川崎	副生ガス	35000	69	日立製作所		日立製作所	
1997年3月	川崎	旭化成川崎	都市ｶﾞｽ	26200		三菱重工	MFT-8		CC多軸式
1989年8月	堺	ゼネ石堺	副生ガス／灯油	24800	42	日立製作所		日立製作所	
1995年3月	堺	コスモ石油堺	ﾌﾟﾛﾊﾟﾝ	17500	140	三菱重工	MF-111	三菱電機	排気再燃
1975年3月	周防	出光興産徳山	ﾌﾞﾀﾝ／A重油	25000		日立製作所		日立製作所	88年廃止置換
1988年11月	周防	出光興産徳山	ﾌﾞﾀﾝ／A重油	24100		日立製作所		日立製作所	
1992年2月	周防	出光石化徳山	ｵﾌｶﾞｽ	17500	31	三菱重工	MF-111	三菱電機	
1992年9月	周防	武田薬品光	A重油	14900	47	三菱重工	MF-111		追い炊きボイラー
1987年2月	知多	出光興産愛知	ｵﾌｶﾞｽ	11270	21.9	三菱重工	MF-111	三菱電機	
1989年9月	知多	Jｴﾅｼﾞｰ知多	副生ガス／軽油	11130	16.9	ﾇｰﾎﾞﾋﾟﾆｮｰﾈ		安川電機	
1985年3月	千葉	出光石化千葉	副生ガス	36000		三菱重工	MW251	三菱電機	分解炉排気再燃、92年増設
1987年6月	千葉	丸善石化千葉	副生ガス	10000	90.7	三菱重工	MF-111	三菱電機	排気再燃
1987年12月	千葉	川鉄千葉	その他	128800		三菱重工	MW-701	三菱電機	CC、96年増設、01年増設
1988年4月	千葉	三井石化千葉	副生ガス	16800	42.9	三井造船		東芝	
1990年8月	千葉	住友化学千葉	都市ｶﾞｽ	17500	40	三菱重工	MF-111	三菱電機	追い炊きボイラー
1992年2月	千葉	出光石化千葉	ﾌﾞﾀﾝ	40000	210	三菱重工	MW-251	三菱電機	追い炊きボイラー
1992年4月	千葉	極東石油千葉	ｵﾌｶﾞｽ／灯油	15000	30.2	三菱重工	MF-111		
1993年10月	千葉	住友化学千葉	都市ｶﾞｽ	17500	50	三菱重工	MF-111	三菱電機	追い炊きボイラー
1996年1月	千葉	川鉄千葉	都市ｶﾞｽ	9000		三菱重工		三菱電機	
1996年11月	千葉	コスモ石油千葉	LPG	35200	60	日立製作所		日立製作所	
1997年10月	千葉	極東石油千葉	LPG／A重油	17000		三菱重工	MF-111		
1998年5月	千葉	富士石油袖ヶ浦	LPG／A重油	15310		三菱重工	MF-111		CC一軸式
2001年5月	千葉	川鉄千葉	都市ｶﾞｽ	1500		ｲｴﾝﾊﾞｯﾊ		ｲｴﾝﾊﾞｯﾊ	
1989年7月	新潟	三菱瓦斯化学新潟	天然ｶﾞｽ	6540×2	12.5×2	三菱重工	MF-61	明電舎	
1993年2月	新潟	北越製紙新潟	灯油	17000		三菱重工	MF-111		
1976年3月	姫路	新日鐵広畑	A重油	30200		三菱重工	MW251		89年排ガスボイラー設置
1991年3月	姫路	新日鐵広畑	都市ｶﾞｽ	10000	31	三菱重工	MF-111	三菱電機	
1999年5月	姫路	日本触媒姫路	都市ｶﾞｽ	6500×3	105	川崎重工		東芝	排気再燃
1986年8月	水島	三菱石油水島	副生ガス	14000	25.5	三菱重工		三菱電機	93年増設
1988年11月	水島	三菱瓦斯化学水島	メタン	16250	32.8	三菱重工	MF-111	三菱電機	追い炊きボイラー
1989年2月	水島	旭化成水島	ｵﾌｶﾞｽ	17000	34	三菱重工	MF-111	三菱電機	
1991年1月	水島	Jｴﾅｼﾞｰ水島	副生ガス	15500	31	三井造船		明電舎	
1993年2月	水島	三菱石油水島	A重油	17000		三菱重工	MF-111	三菱電機	
1994年6月	水島	水島共同火力	副生ガス	128250		三菱重工	MW-501		CC一軸式
1995年6月	水島	水島共同火力	副生ガス	128250		三菱重工	MW-501		CC一軸式
1989年2月	横浜	日石根岸	ｵﾌｶﾞｽ／灯油	12600		三菱重工	MF-111	三菱電機	加熱炉で排熱利用、96年増設
1996年12月	横浜	日石根岸	LPG	32000		三菱重工	MF-221	三菱電機	排気再燃
1986年4月	四日市	昭和四日市石油	その他	23000		三井造船		明電舎	96年増設
1990年5月	四日市	石原産業四日市	A重油	17000	34	三菱重工	MF-111	三菱電機	
1990年10月	四日市	コスモ石油四日市	ｵﾌｶﾞｽ／LPG	17500	100	三菱重工	MF-111	三菱電機	排気再燃
1996年2月	四日市	昭和四日市石油	その他	25000×2		三菱重工		三菱電機	
1999年6月	四日市	東ソー四日市	ｵﾌｶﾞｽ	39000		GE(三井造船)	LM6000	BRUSH	

（出所：日本コージェネセンター「導入実績表」，三菱重工「製作経歴表」を基に作成）

石油化学のエチレン分解炉トップガス等がある。

イニシャルコストの安い小型の航空機用ガスタービンを産業用に転用した場合，メンテナンスコストが高くなるケースも数多く見受けられる。これは小型軽量の航空機用ガスタービンは連続運転を前提としないためメンテナンスコストが高くなるものと考えられる。

このためコンビナートに設置されているガスタービンは電気事業用に開発されたヘビーデューティ型ガスタービンを小型化したものが主流となっている（表１）。

（５）ガスタービン燃料の開発状況

わが国のコンビナートの国際競争力を強化するためには，コンビナートのエネルギーシステムにガスタービンシステムを導入することが有効であることは理解できるが，ガスタービン用の安価な燃料の供給に制約があり十分普及し難いという問題があった。そこで，エネルギーコストの安い石炭や重質油をガス化してガスタービン燃料とすることが検討されている。石炭ガス化コンバインドサイクル発電システム（IGCC）の開発は，実証段階に至ったがガス化炉の大型化，高温乾式ガス精製装置の開発，ガスタービン用の低カロリー石炭ガス高温燃焼器の開発等の開発課題が残されている[9]。

一方，昨年，新日本石油㈱根岸製油所において重質油を使用するIGCC商用機の運転が開始された。燃料に残渣油（アスファルト）を使用し，送電端効率36%，発電端効率46%（いずれも高位発熱量あたり）となっている[10]。これはコンビナートのエネルギーシステム用ではなく，独立系発電事業者（IPP）としての運用となっている。

㈶電力中央研究所が作成した稼動中もしくは計画中の重質油ガス化コンバインドサイクル発電システムプロジェクトの一覧を表２に示す。プロジェクトのほと

表２　世界で稼働中または計画中の超重質油等ガス化複合発電プロジェクト

（出所：米電力研究所（EPRI）ガス化会議等に基づき電力中央研究所が作成）

プロジェクト名	ガス化炉	ガス化炉仕様	処理量	燃料	適用	出力	運開年	状況
EL Dorado-USA	Texaco	噴流床　酸素	160MT/D	Petcoke/残渣油	Cogen	35MW	96	※１
Shell Pernis-Netherlands	Shell	噴流床　酸素	1650MT/D(3基)	減圧残渣	Cogen/H_2(255T/D)	127MW	97	※１
ISAB-Italy	Texaco	噴流床　酸素	2879MT/D(2基)	残渣油(asphalt)	Power/H_2	512MW	00	※１
SARAS-Italy	Texaco	噴流床　酸素	3420MT/D(3基)	残渣油(vb. tar)	Cogen/H_2	551MW	01	※１
Api-Italy	Texaco	噴流床　酸素	1370MT/D(2基)	残渣油(vb. tar)	Power	250MW	00	※２
Delaware-USA	Texaco	噴流床　酸素	2086MT/D(2基)	Petcoke	Power	240MW	00	※３
新日本石油根岸一日本	Texaco	噴流床　酸素	2000MT/D(1基)	減圧残渣	Power	431MW	03	※１
EDF-France	Texaco	噴流床　酸素	－	Sludge	Power	400MW	03	－
PIEMSA-Spain	Texaco	噴流床　酸素	4680MT/D(2基)	残渣油	Power /H_2	935MW	04	－
IOCL-India	Shell	噴流床　酸素	－	Petcoke	Power /H_2	180MW	04	－
ENI R&M-Italy	Shell	噴流床　酸素	1200MT/D	残渣油(vb. tar)	Power	250MW	05	－

※１：商用運転中　　※２：不明（2000年7月にガス化炉100%負荷運転）　　※３：不明（2000年7月にガス化開始）

んどがテキサコ炉とシェル炉であり，両者の寡占状況にある。いずれも噴流床酸素吹きとなっており所内率が高いことが，送電端効率の低下要因と思われる。

IPP用ではなく，コンビナートのエネルギーシステム用にガスタービンシステムを導入し，コンビナート内外の熱需要に対応することで，コンバインドサイクル発電システムとして発電にのみ利用するより高い総合効率を狙うことが可能となる。重質油のIGCC用燃料にはアスファルトのほかにペトロコークスやオリマルジョン，アスマルジョン等の安価な燃料が使用可能で，この安価な燃料を高効率で利用することでエネルギー原単位を下げコンビナートの国際競争力強化に貢献可能である[(11)]。

重質油のガス化システムを導入しなくても，安価なLNGの導入が可能であればカスタービンシステムの導入により同じ効果が期待できる。ただし，小規模なLNG受け入れ基地ではでは経済性の不安があり，大量需要先との共同もしくは相乗りによる大規模受け入れ基地を志向することが不可避と考えられる。

4．　新たな国際競争力強化策ー産業間のマテリアルリサイクル

（1）副生成物およびユーティリティ

各企業で有効利用できないためにボイラー燃料等に使われている副生成物がある。より高付加価値の利用先をコンビナート内の他企業，他産業に見い出すことができれば双方にとってメリットがある。さらに，蒸気，圧縮空気，窒素，水素，純水といったユーティリティについても共同で大型のユーティリティセンターを設置することで，規模の経済性と操業の安定性，設備の有効利用，稼働率の向上といったメリットを享受することが可能となる。

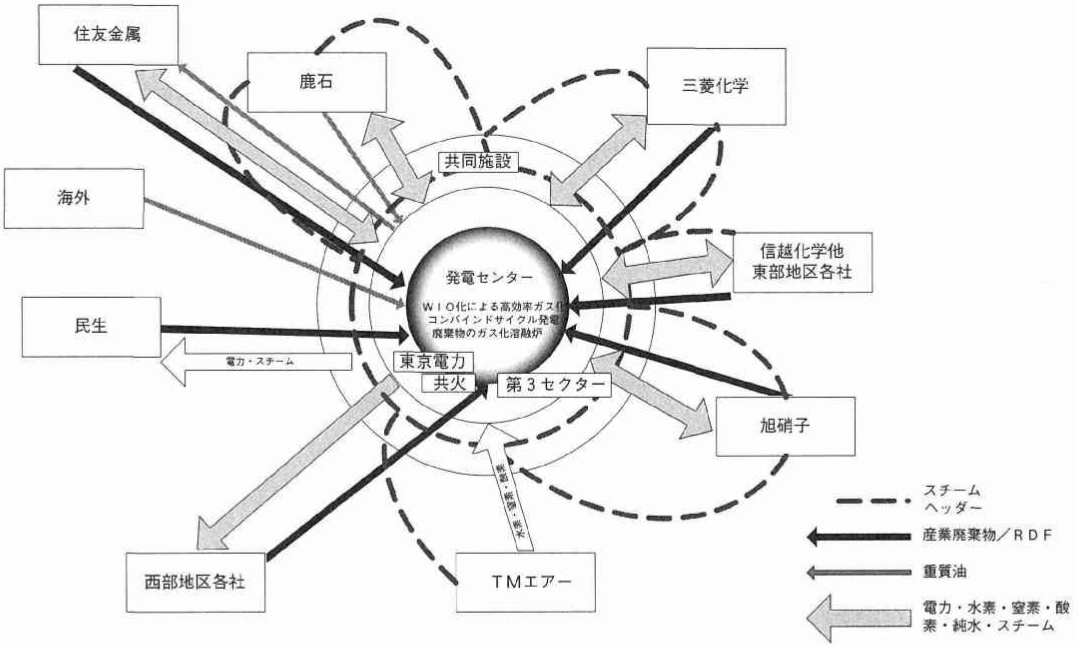
シンガポールのジュロンコンビナートでは，大がかりなユーティリティセンターを設置することで新規参入企業の誘致に成果を挙げている。わが国でも，鹿島や大分のコンビナートではユーティリティセンターを設置することでそれなりの成果を挙げている。

（2）鉄鋼業との連携

副生成物の有効利用という面では，すでに石油精製と石油化学の間で広範な相互融通が実施されてきたし，相互融通が不十分なコンビナートでもコンビナートルネサンス計画でかなり補完整備され，成果を挙げている[(12)]。現在まだ十分な相互融通が行われず今後，まとまった量の産業間連携が可能なのは鉄鋼業との連携である。

鉄鋼業のエネルギー使用量は石油化学コンビナート全体のエネルギー使用量の1.5倍から2倍以上ときわめて巨大であるにもかかわらず，これまで，鉄鋼業は他産業との連携に消極的であった。鉄鋼業のみで小さなコンビナートを形成しており，その中で関連会社間の有機的な連携による省エネルギーを徹底的に実施しているのもその原因であろう。

鉄鋼業と石油化学コンビナートの連携を考えた場合，エネルギー価格に比較しより



（出所：鹿島コンビナートにおける産業間連携のあり方に関する調査研究WG3資料を基に作成）

図６　鹿島コンビナートでの産業間連携の例

高く評価される水素を軸にするのが効果的と思われる。鉄鋼業ではCOG，高炉ガス（BOG），転炉ガス（LDG）をそのまま，あるいは混合して燃料に利用している。この中でCOGは特に水素濃度が高いため水素を抽出分離して回収した後に，残りを燃料として活用すれば，水素とエネルギーの高効率な利用が可能となる。この水素の有効利用先が石油コンビナートの中で開拓できれば双方にとってメリットが大きい。

石油精製では各種石油系燃料の水素化脱硫用に多量の水素を使用している。この水素は，LPGやナフサを水蒸気改質し，CO変性して製造している。この場合，化学反応を伴うので副反応が不可避であり，冷ガス効率は多少犠牲にせざるを得ない。鉄鋼業からの水素を脱硫用に利用し，ナフサをより高付加価値の石油化学原料に利用すれば，鉄鋼，石油精製，石油化学それぞれがメリットを享受できる。平成15年度の新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）委託調査によれば[11)][13)]，現在の鹿島コンビナートおいては，鉄鋼業から供給可能な水素量は，石油精製のナフサの水蒸気改質装置を停止できるほど多量であることが明らかとなっている。

水素を軸とした鹿島コンビナートでの産業間連携の一例を図６に示す。

５．結び―民生との連携を目指して

将来，水素エネルギー社会が到来し，安価で大量の水素製造が必要となったとき，専用の大型水素製造装置が必要とな

るのは言うまでもない。それに至る過程では徐々に増加して行く水素需要に対応するために，コンビナートの余剰水素を活用することが最も現実的かつ最良の解決策である。余剰水素だけで足りないときには，燃料に使用している水素含有ガスから水素を抽出分離することで補える。

一挙に大型水素製造装置を設置するのではなく，需要の増加に応じステップバイステップで水素供給量を増やして行く以上のような対応がより現実的でコストを極小化できると思われる。

さらに，民生への熱供給については，わが国のように温帯に位置し，冬季の熱需要が少なく，期間も短いため，経済的に成立しがたいケースが多い。そこで，熱の替りに水素や燃料を供給することで，コージェネレーションによる高効率が達成可能となるケースも考えられる。水素エネルギー社会の実現に向け，コンビナート周辺地域における水素供給と水素の取り扱いシステムの確立を目指した実用化検討が望まれる。

6．謝辞

本研究はNEDOよりの委託調査の一環として行われた。発表の許可を頂いたNEDOに謝意を表する。

参考文献

(1) 座談会「産業間連携による省資源・省エネルギーの方策－コンビナートの国際競争力強化について－」季報エネルギー総合工学vol27（1）pp3-24（2004）

(2) 産業レポートVol8「石油化学コンビナートの再生について」日本政策投資銀行（2002）

(3) 2004年版「アジアの石油化学工業」重化学工業新聞社（2003）

(4) 世界の石油化学製品の今後の需給動向，経済産業省製造産業局化学課（2002）

(5) 塙雅一・高倉毅・松田一夫・広地芳一; 水島コンビナート省エネルギー調査と省エネルギー対策案について，第20回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，(2004)，pp531-534

(6) 塙雅一・高倉毅・松田一夫・広地芳一; 水島コンビナート省エネルギー調査と省エネルギー余地について，第22回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集，(2003)，pp343-348

(7) 塙雅一・高倉毅・松田一夫・広地芳一; 水島コンビナート省エネルギー調査と省エネルギー余地について（2），第23回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集，(2004)

(8) 平成14年度「水島コンビナート地域企業における省エネルギー調査及びエネルギー有効利用促進策の策定に関する調査」（財）エネルギー総合工学研究所（2003）

(9)「火力発電所の熱効率向上」，火力電子力発電vol.54, p564

(10) 化学工業日報，2003年６月18日

(11) 平成15年度「産業間連携に関する動向等調査報告書」，㈶エネルギー総合工学研究所（2003）

(12) 能村郁夫「コンビナート・ルネッサンスの背景と新たな展開」，ペトロテックvol.27（5）pp390-395,（2004）

(13) 平成15年度「産業間連携のあり方に関する調査研究」㈶省エネルギーセンター（2004）

●行　事　案　内●

第20回　エネルギー総合工学シンポジウム

テーマ：21世紀のエネルギー戦略と
水素等の次世代燃料製造技術

開催日時：平成16年９月10日（金）10：00～17：30

会場：経団連ホール（定員420名）
東京都千代田区大手町１－９－４　経団連会館14F

参加費：無料

プログラムは８月上旬に発送の予定です。

問合せ先：（財）エネルギー総合工学研究所シンポジウム事務局
電話：03－3508－8894／FAX：03－3501－1735
E-mail：sympo@iae.or.jp
ホームページ：http://www.iae.or.jp/

研究所のうごき

（平成16年４月２日～７月１日）

◇　第18回評議員会（臨時）
日 時：６月２日（水）12:00～12:30
場 所：経団連会館（９階） 901号室
議 題：
第一号議案 寄附行為の一部変更について

◇　第62回理事会
日 時：６月４日（金）11:00～12:00
場 所：経団連会館（９階） 902号室
議 題：
第一号議案 平成15年度事業報告および決算報告書（案）について
第二号議案 評議員の一部交替について
第三号議案 寄附行為の一部変更について
第四号議案 その他

◇　第19回評議員会
日 時：６月23日（水）11:00～12:05
場 所：経団連会館(９階) 906号室
議 題：
第一号議案 役員の一部選任について
第二号議案 評議員の一部交替について
第三号議案 平成15年度事業報告書および決算報告書について
第四号議案 その他

◇第63回理事会（臨時）
日 時：６月30日（水）12:00～12:30
場 所：経団連会館(９階) 901号室
議 題：
第一号議案 副理事長および専務理事の互選等について
第二号議案 退任常勤役員に対する退職金の支給について
第三号議案 役員報酬規程の一部改定について

◇　月例研究会

第223回月例研究会
日　時：４月23日（金）14:00～16:00
場　所：東海大学校友会館「阿蘇の間」
テーマ：
１．平成16年度供給計画の概要－電力各社供給計画の集約結果－
（電気事業連合会　電力技術部長
西　亨　氏）
２．最近の省エネルギー政策と技術の動向
（㈶省エネルギーセンター　調査第２部長
佐藤　文廣　氏）

第224回月例研究会
日　時：５月28日（金）14:00～16:00
場　所：航空会館７階 702・703会議室
テーマ：
１．欧米における分散エネルギーへの取り組みの現状
（㈱テクノリサーチ研究所　代表取締役
内田　二郎　氏）
２．分散型電源を活用した新しい供給システムの最新技術動向　－マイクログリッドを中心として－
（㈶エネルギー総合工学研究所　プロジェクト試験研究部 主管研究員　田村　豊一）

第225回月例研究会
日　時：６月25日（金）14:00～16:00
場　所：航空会館７階 702・703会議室
テーマ：
１．燃料電池車普及に向けたインフラ整備シナリオ
（㈶エネルギー総合工学研究所　プロジェクト試験研究部 主管研究員　乾　昌弘）
２．水素の普及における安全性と課題
（㈶エネルギー総合工学研究所　プロジェクト試験研究部 主管研究員　佐藤　保和）

◇　主なできごと

４月12日（月）・原子力水素研究会
14日（水）・第４回電力分野産業技術戦略に関わる動向調査委員会
15日（木）・第４回革新的温暖化対策技術に関するフォローアップ調査作業部会＆第３回検討G合同会議
26日（月）・第４回バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ作業部会幹事会
28日（水）・第１回革新的温暖化対策技術に関するフォローアップ調査拡大会議
・第４回バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ作業部会幹事会
・第５回電力系統制御システム技術検討会
５月20日（木）・第１回風力発電電力系統安定化技術開発実行委員会
24日（月）・原子力水素研究会
28日（金）・第５回バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ作業部会幹事会
６月１日（火）・第６回電力系統制御システム技術検討会
・高温ガス炉プラント研究会総会・第１回研究会
７日（月）・第３回バイオマス技術戦略調査委員会
10日（木）・「平成15年度原子力システム研究開発シーズ調査事業」公募説明会

6月16日（水）・第6回バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ作業部会WG全体会議

◇ 人事異動

○5月31日付
（出向解除）
阿閉　聡　　プロジェクト試験研究部　主任研究員

○6月1日付
（出向採用）
細木　訓　　プロジェクト試験研究部　主任研究員

○6月30日付
（退任・解嘱）
稲葉裕俊　　専務理事兼プロジェクト試験研究部長

（解嘱）
布施正樹　　企画部長兼プロジェクト試験研究部　専門役

（出向解除）
糟谷邦彦　　経理部長兼総務部
北田俊二　　プロジェクト試験研究部　主管研究員
菅野　実　　プロジェクト試験研究部 主管研究員

○7月1日付
（就任）
並木　徹　　副理事長
荒井行雄　　専務理事兼プロジェクト試験研究部長
高倉　毅　　理事兼プロジェクト試験研究部部長

（出向採用）
山田英司　　企画部長兼プロジェクト試験研究部部長 主席研究員
高橋　温　　経理部長兼総務部
小泉真範　　プロジェクト試験研究部 主管研究員
横山昌宏　　プロジェクト試験研究部 主管研究員

編集後記

本号の理事長対談は，国際問題評論家の小関哲哉氏にご登場いただきました。

お読み頂きましたように，国際問題に限らず現在の世界的重要問題であります地球温暖化問題或いはエネルギー問題に関する両氏の思いが一致し熱い対談となりました。

その最後のところで，将来の希望の鍵として日本の「森」を挙げておられます。対談でも紹介されましたが，日本の森林被覆率は約66%と先進世界でも有数の高レベルにあります。

その恩恵は，豊富な水，酸素の生成等環境面の影響とともに，日本の風土，文化の土壌形成に計り知れないものがありましょう。また最近ではこれにバイオマスエネルギー源としての期待も大きなものがあります。たとえば，未利用木質系の一部である「林地残材」と「間伐材」を合わせた利用可能量は約60PJ／年（石油換算約160万kl／年）といわれ，もし全量発電するとしたらその規模は約100万kWにも相当する量でもあります。

しかし一方では森林に関し最近やや気になる話を聞きます。現在，建築用木材は約５割が海外からの輸入となっている由ですが，その主要原因が価格差によるといわれます。個人所有者が多い日本の森林は，労働力，資金力の不足などもあって，一般に高コストを免れないというものです。売れないとなると，ますます間伐，主伐等の必要伐採上の手入れが行われなくなり，樹木の成長が阻害されるとともに日光が森林内へ浸透困難となり下草の成長が阻害され，土壌流失など森林の多面的機能も低下するという懸念です。その状況によっては，森林に期待される「二酸化炭素吸収」効果と「バイオマスエネルギー」としての期待に大いに影響が出ることは間違いないでしょう。

「京都議定書」発効時の対1990年比6%低減に対し，森林の吸収効果は3.9%と大きな期待がかけられており，またバイオマスエネルギー面における木質系のポテンシャルの高さを思うときに，今やエネルギー関係者も森林関係者とこの問題を論じるときが来たのではないかと考えます。

本格的暑さを迎えるこの夏，田舎への帰郷，山へ，森への行楽のひと時，その実態に触れられる機会がありましたら，その結果を紹介しあってこれからの日本のエネルギー問題を論じる話の種にしようではありませんか。

編集責任者　小川紀一郎

季報　エネルギー総合工学　第27巻第 2 号

平成16年 7 月20日発行
編集発行
財団法人　エネルギー総合工学研究所
〒105-0003　東京都港区西新橋 1—14—2
新橋SYビル（6F）
電話（03）３５０８—８８９４
FAX（03）３５０１—１７３５
http：//www.iae.or.jp/

（印刷）和光堂印刷株式会社

無断転載を禁じます。