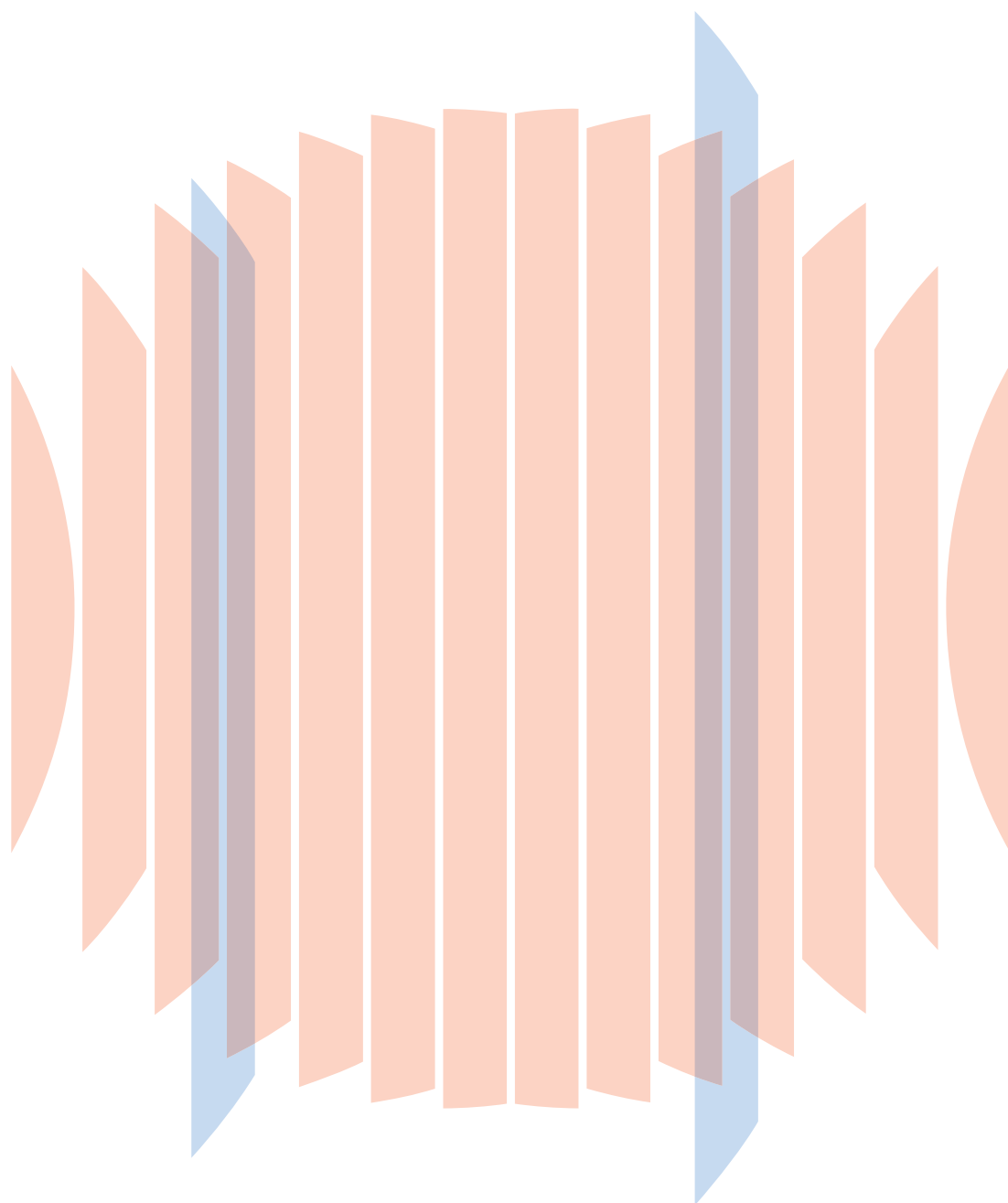


季報 エネルギー総合工学

Vol. 34 No. 1 2011. 4.



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】		
「エネルギーを基軸とした経済成長」の実現を目指して		
経済産業省 資源エネルギー庁長官	細 野 哲 弘	1
【寄稿】		
シェール・ガス、シェール・オイル革命がもたらす大きな衝撃		
和光大学 経済経営学部 教授	岩 間 剛 一	3
【寄稿】		
高温太陽集熱によるソーラー水素製造技術		
新潟大学 工学部 化学システム工学科 教授	児 玉 竜 也	
新潟大学 超域研究機構 准教授	郷右近 展 之	18
【寄稿】		
気候工学（ジオエンジニアリング）の最近の動向		
(財)電力中央研究所 社会経済研究所 主任研究員	杉 山 昌 広	31
【調査研究報告】		
超臨界CO ₂ ガスタービン発電システムの開発		
(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 参事	小 川 紀一郎	
プロジェクト試験研究部 主任研究員	丹 光 義	
プロジェクト試験研究部 部長	蓮 池 宏	
東京工業大学 原子炉工学研究所 教授	有 富 正 憲	
東京工業大学 原子炉工学研究所 特任教授	宇多村 元 昭	40
【調査研究報告】		
ウラン資源の持続可能性	プロジェクト試験研究部 参事	楠 野 貞 夫 53
【調査研究報告】		
平成22年度 原子力発電に関する公衆の意識の変化		
エネルギー技術情報センター 主管研究員	下 岡 浩	64
【事業報告】		
平成23年度 事業計画	(財)エネルギー総合工学研究所	75
【研究所の動き】		82
【第33巻通巻目次】		84
【編集後記】		88

巻頭言

「エネルギーを基軸とした経済成長」の実現を目指して



細野 哲弘（経済産業省 資源エネルギー庁長官）

平成23年度を迎えるに当たり、資源エネルギー政策について私の所感を述べさせていただきます。

近年、わが国の資源・エネルギーを巡る情勢は劇的に変化しています。

地球温暖化問題の解決に対する貢献が国際的に要請されており、わが国の温室効果ガスの9割を占めるエネルギー起源CO₂の削減について、より強力かつより包括的な対応が求められています。

また、新興国の経済成長による資源・エネルギー需要の増大、資源国における政情不安や資源権益の確保をめぐる国際競争の熾烈化に伴い、エネルギーの安定調達体制の確保、レアアース等資源の供給体制の多角化の重要性は、益々高まっています。

さらに、スマート・グリッド、再生可能エネルギー、原子力発電プラントをはじめ、エネルギー・環境分野に対する投資が世界規模で拡大し、市場争奪戦が始まっています。

このような情勢の変化を捉まえて、これからの資源エネルギー庁は、三つのE（①エネルギーの安定供給、②地球温暖化問題への対応、③エネルギーの効率的な供給）に関する取組を強化するのみならず、昨年6月に閣議決定した「エネルギー基本計画」及び「新成長戦略」でも打ち出したように、「エネルギーを基軸とした経済成長」の実現に向けた取組を、抜本的に強化してまいります。

まず、低炭素型社会構造への転換に向けた取組を強化します。具体的には、国内の再生可能エネルギーを普及拡大するために、再生可能エネルギーの固定価格買取制度の導入を進めます。また、産業部門における世界最高の省エネ・低炭素技術の維持・強化、住宅・建築物のネット・ゼロ・エネルギー化の推進、環境性能に優れた自動車や省エネ家電、省エネIT機器等の普及を図ってまいります。このような取組を通じて新たな社会システムが実現することにより、ゼロ・エミッション型エネルギーの拡大によるエネルギー・セキュリティの向上に資するのみならず、新産業の育成、雇用

の拡大、地域経済の活性化にも繋がり得るものと考えております。

さらに、「エネルギーを基軸とした経済成長」を実現するためのエンジンとして、革新的なエネルギー技術の開発・普及拡大、再生可能エネルギー、スマート・グリッド及び原子力発電プラント等の海外展開を推進してまいります。

このような取組を強化するために、昨年末、わが国政府は、平成23年度に「地球温暖化対策のための税」を導入することを決定いたしました。現下の厳しい経済状況の中ではありますが、ギリギリ産業界・国民に御理解をいただくべく検討を重ね、何とか政府部内におきまして石油石炭税の段階的な課税強化という成案が得られたということです。国会にてご審議いただくこととなりますが、お認めいただいたあかつきには、影響の大きな業種等に十分配慮しつつ、税収を活用し、エネルギー起源CO₂排出抑制対策の強化と「エネルギーを基軸とした経済成長」の実現に向けて、必要な取組を進めてまいりたいと考えております。

また、石油・天然ガス・石炭の安定的な供給確保について、官民で連携しつつ、オールジャパンで力を尽くしてまいります。加えて、レアアース等の鉱物資源は、次世代エネルギー関連産業を支える資源としての重要性が益々高まっておりますので、資源外交による海外資源確保、リサイクルの推進、代替材料開発の促進、備蓄等の取組を進めてまいります。さらに、原子力は、エネルギー・セキュリティと低炭素社会の実現を目指す上で不可欠な基幹エネルギーとして、安全の確保を大前提に、国民の理解・信頼を得つつ、原子力発電の新增設・リプレース、設備利用率向上、核燃料サイクル等を推進してまいります。

今、資源・エネルギー政策は、経済活動・国民生活を根幹で支えるのみならず、地球環境問題への対応と経済成長の牽引を両立させる社会システムを創造するという新たな役割を担う必要があります。今後とも、わが国のエネルギーを巡る現状や施策の効果について、国民の皆様との対話を続け、その御理解と信頼、御協力のもとに、次の世代の社会を「国民の皆様と共に創る」べく、なお一層努力してまいりますので、引き続き御理解と御協力を御願いたします。

最後になりますが、財団法人エネルギー総合工学研究所におかれましては、このように劇的に変化するエネルギー情勢の中で、エネルギー技術を中心とする総合工学の立場から調査研究に取り組んでいただき、「エネルギーを基軸とした経済成長の実現」にも貢献していただけることを期待しております。

皆様の御健勝と御発展を祈念して、私の挨拶とさせていただきます。

*この巻頭言は、3月8日にご寄稿頂いたものです。(編集部)

[寄稿]

シェール・ガス，シェール・オイル革命がもたらす 大きな衝撃

岩間 剛一（和光大学 経済経営学部 教授
経済学科長）

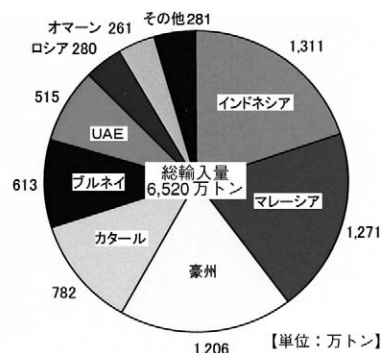


1. 国際エネルギー情勢を変貌させる非在来 型化石燃料開発の衝撃

現状においては，世界の石油市場，天然ガス市場は，中東諸国のエネルギー情勢を中心に動いているといっても過言ではない。なぜなら，世界における原油埋蔵量の3分の2は中東諸国に集中しているからである（図1参照）。

原油埋蔵量が中東に集中し，かつ原油生産量の3割を中東に依存していることから，チュニジアに始まる中東・アフリカ情勢の混迷は，原油価格高騰につながり，北海ブレント原油の価格は2011年2月上旬には120ドル/バレル目前にまで達した。それに対して，天然ガスは一般的には地政学的に安定しているといわれている。しかし，それは日本が， -162°C に冷却して，液化した天然ガス（LNG）を，主として地政学的に安定したアジア大洋州地域から輸入しているからであり（図2参照），天然ガスの将来的な生産ポテンシャルテ

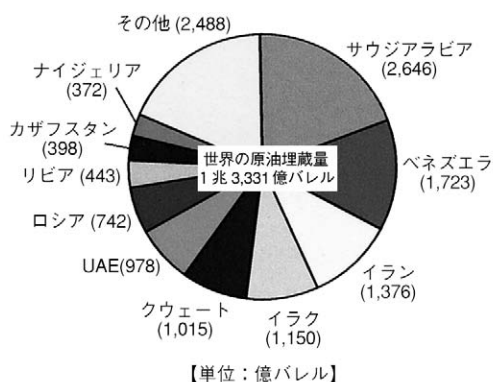
ーを意味する天然ガス埋蔵量の半分以上はロシア，イラン，カタールの3カ国に占められている。その他の主要な天然ガス埋蔵国も中東諸国であって，石油以上にエネルギーの一部の国への集中度が高く（図3参照），地政学リスクが石油と同じように高いことは重要である。しかし，本論において述べるシェール・ガス，シェール・オイルをはじめとした非在来型天然ガス，非在来型石油（非在来型という言葉は，通常の原油・天然ガスのよう



【単位：万トン】

（出所：経済産業省統計）

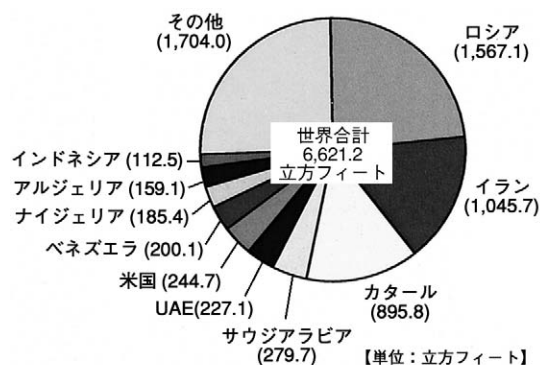
図2 日本の国別LNG輸入量（2009年）



【単位：億バレル】

（出所：BP統計2010年6月）

図1 国別原油埋蔵量（2009年末）



【単位：立方フィート】

（出所：BP統計2010年6月）

図3 国別天然ガス埋蔵量（2009年末）

に油層，ガス層に存在しているわけではなく，油層工学の常識を破る岩盤という構造に存在するメタン，軽質油を意味する。従来は採取コストが高いために，資源としては放置されてきた炭化水素資源である）の劇的な生産コストの低減は，米国，中国をはじめとしたエネルギー消費大国を巨大な産油国，産ガス国に変貌させる可能性があり，石油輸出国機構（OPEC）を中心に動く国際エネルギー情勢を変貌させることも大いに考えられる。

2. エネルギー革命とは100年に一度程度しか起こらない

1780年代に英国で始まった産業革命における蒸気機関の発明によって石炭の本格的な利用が始まった。米国ペンシルバニア州において世界で最初の商業油田であるドレーク油田による石油の生産が始まる1859年まで100年という時間を必要としている。さらに，LNGの国際貿易が始まったのは1964年のアルジェリアから英国，フランスへの輸出であり，海を越えた天然ガスの国際市場成立には100年を必要とした。つまり，根本的なエネルギー利用の変革は100年に一度の大きな革命と表現することができ，短期間における技術革新は多くの科学者が期待するほど容易には起こらないのである。

1969年7月20日に人類が初めて月に一步を踏み出した時，21世紀初頭には誰もが月旅行を気軽に楽しめるものと考え，当時世界最大の航空会社であったパンナムは月旅行の募集を世界中で行った。ところが，この40年間にわたって，人類は1人も月に行っていない。さらに，月旅行を企画したパンナムという企業そのものも破綻して，米国には存在していないという笑えない話となっている。1960年代に構想された超音速旅客機による東京－ニューヨーク間3時間の夢も，今もって12時間以上の長旅のままである。結局は音速のカベという大きな問題を解決できないのである。

そして，今米国では100年に一度ともいえる革命的な天然ガス，石油の新たな開発が始まっている。それは，「非在来型」化石燃料である。私たちが，普通に利用してきた在来型の石油，天然ガスとは地質学的な埋蔵状況がまったく異なるシェール・ガス，コール・ベッド・メタン，タイト・サンド・ガス，シェール・オイルあるいはタイト・オイルと呼ばれる，新世代の石油・天然ガスである。これらは，膨大な資源量の存在は以前から知られていたものの，生産コストが在来型の数十倍も高いために，国際石油資本（メジャー）も開発を最初から諦めていた炭化水素エネルギーである。

ここで強調しておきたいことは，エネルギーとは自然界に存在するというだけでエネルギーであるというわけではないことである。エネルギーとは，その時点における経済的諸条件，技術水準において，他のエネルギーと価格競争力を持った資源のことを意味する。よく，原子力発電の燃料とするウランは可採年数70年と有限であるとされる。しかし，海水中にも微量のウランが含有されており，地球上の海水に存在するすべてのウランを抽出できれば，現在の世界の原子力発電所を6万年間稼働させることができる。その意味では，ウランというエネルギーは人類の生活する時間から見れば無限ということとなるが，海水中的ごく微量のウランを抽出するコストが余りに高いために，海水中のウランをエネルギーとは呼ばない。

繰り返しになるが，現在の原油価格水準，天然ガス価格水準において，経済的競争力を持つものがエネルギーである。その意味では，シェール・ガス，シェール・オイルともに，存在は昔から知られていたが，シェール・オイルの生産コストが300ドル/バレルを超える技術条件では，エネルギーとは考えられていなかったことに留意すべきである。

①シェール・ガスとは天然ガスの主成分であるメタン CH_4 生成の根源岩である頁岩に含

表1 比在来型天然ガス資源量

(単位：兆立方フィート)

	コール・ベッド・メタン	シェール・ガス	タイト・サンド・ガス	小計
北米	3,017	3,840	1,371	8,228
中南米	39	2,116	1,293	3,448
西欧	157	509	353	1,019
東欧	118	39	78	235
ロシア	3,957	627	901	5,485
中東	0	2,547	823	3,370
アフリカ	39	274	784	1,097
中国	1,215	3,526	353	5,094
その他	509	2,625	1,450	4,584
世界合計	9,051	16,103	7,406	32,560

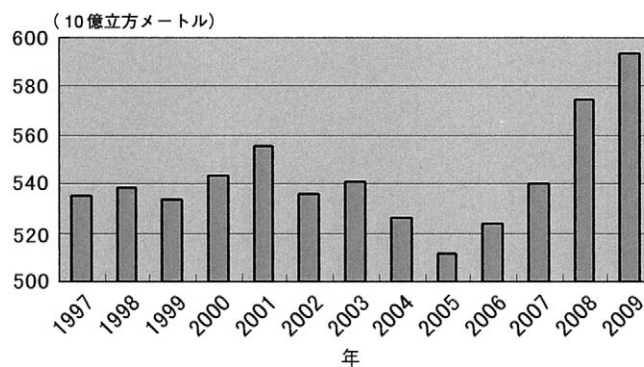
(出所：米国地質調査所)

まれた天然ガスであり、②コール・ベッド・メタン（炭層ガス）とは石炭層に含まれた天然ガス、③タイト・サンド・ガスとは浸透性の低い、硬い砂岩に含まれた天然ガスである。

通常の天然ガス田であれば、井戸の掘削によって簡単に天然ガスが自噴するが、非在来型天然ガスの場合には掘削しても、天然ガスの抽出が極めて難しいと考えられていた。シェール・ガスとは、文字通りシェールすなわち頁岩と呼ばれる、天然ガス生成の根源岩の中に含まれているメタンである。その存在は早くから知られており、メタンの存在が在来型の天然ガスのような地層ではなく、岩盤という構造にあることから資源量は在来型天然ガスとは比較にならないほど莫大であることは分かっている（表1参照）。その資源量は在来型天然ガス埋蔵量の5倍以上にも達するものの、多くのエネルギー専門家は、天然ガス生産コストが200ドル/百万Btu以上もすると見ていたことから、世界最高のメジャーである

エクソンモービルでさえ、エネルギーとしては経済的に採算がとれないと考え、「資源とはいえない資源」として取り扱われてきた。

ところが、チャサピーク、XTOエナジーをはじめとした多くの米国の中堅石油企業は、米国内の天然ガス田を地道に開発するよりほかに経営戦略がなかった。エクソンモービル、シェル、シェブロン等のスーパー・メジャーと対抗して、カタールの巨大LNGプロジェクト、豪州の洋上LNGプロジェクト、米国メキシコ湾深海部油田プロジェクトのような1兆円を優に超える巨額投資と大きなリスクを有する資源開発プロジェクトを行うことは、資金力、外交交渉力の面で企業体力的に無理だからである。また、天然ガス価格が2003年のイラク戦争以降に高値で推移したことにより、米国内における天然ガス生産を増大させるための技術開発を促すというインセンティブも働いた。そして、これまでの油田開発で培ってきた水平掘削、水圧破碎（フラクチャリン



(出所：BP統計2010年6月)

図4 米国における天然ガス生産量の推移

グ)、三次元探査、四次元探査、マイクロ・センシング（微細探査）等の既存技術を巧みに組み合わせることによって、シェール・ガスの生産コストを、短期間のうちに2.5ドル/百万Btu程度と劇的に低下させることに成功し、2011年3月時点における、一番条件の良いシェール・ガス田における生産コストは2ドル/百万Btuを下回っている。米国の天然ガス生産量は2005年を底に急増しており（図4参照）、米国内における天然ガス埋蔵量も過去最高水準に近づいている。

3. これまでの油田開発技術の地道な組み合わせによる天然ガス革命

筆者は常々、「技術革新」とは、必ずしも1人の天才が考え出した予想もできない独創的なアイデアから生まれるとは限らず、当り前の技術の組み合わせから生まれることが多いと考えている。多くの読者は、真空管からトランジスターへの転換、プロペラ機からジェット機の発明のような根本的なコンセプトの転換だけを「技術革新」と思いがちである。しかし、既に使われている当り前の技術を組み合わせ、精緻な組み合わせの結果が、大きな技術革新となることもある。

例えば、地球環境に優しいクルマの代表格となったトヨタ自動車のハイブリッド車であるプリウスが典型例である。今でこそ、ハイブリッド車は地球環境に優しいクルマの象徴であり、トヨタ自動車の国際自動車市場における名声を高めた。しかし、20世紀後半における開発当初、当時の世界最大の自動車メーカーであるGMはハイブリッド車を軽視していた。よくよく考えてみれば、ハイブリッド車は奇抜な発明でも、斬新な発想でも何でもない。既に発明され、普通に使われているガソリン・エンジンとモーターとニッケル水素電池を組み合わせただけである。つまり、組み合わせに妙があり、真空管からトランジスターへの転換のような革命的な技術的飛躍では

ない。従来技術の精緻な延長である。GMはより革新的なアイデアとして水素自動車という、技術的難易度が格段に高い、雲を掴むような技術開発に邁進して、結果として経営破綻した。

「創造的破壊」という言葉で有名な、20世紀を代表する経済学者シュンペーターは、「技術革新」とはまったく考えもしなかった斬新な発明だけではなく、新しい経営システム、列車とカー・シェアリングを組み合わせた炭酸ガス排出量を削減するモダール・シフトのような、当り前の使い古されたコンセプトの組み合わせからも起こると説いている。

シェール・ガスも、用いている技術に革命的なものは何もない。ハイブリッド車と同じように、組み合わせ、擦り合わせという精緻な職人芸に革命がある。米国のシェール・ガス革命も、油田開発で使い古された技術を組み合わせただけである。新しい発明は何もないといっは、失礼ではあるが、水平掘削というシームレス・パイプを地下数千メートルで水平に折り曲げる技術と、水圧破碎という地下のパイプから水を圧入して岩盤を破壊する技術等を巧みに組み合わせた職人芸に、米國中堅石油企業の偉大なノウハウがある。マイクロセンシングによって、頁岩の構造を解析し、水圧入によって効果的に岩盤に割れ目を作り、メタンを抽出する。

天然ガス生産量が激増する米国においては、1970年を境に天然ガス生産量は減退を続けるという「天然ガス・ピーク論」は完全に消え失せた。その結果、米国の天然ガス需給の緩和が、世界的な天然ガス供給過剰状態につながり、天然ガス価格は2008年夏のピーク時の15ドル/百万Btuから2009年9月には2.4ドル/百万Btuまで暴落し、30年ぶりの厳冬に見舞われた2011年2月時点においても4ドル/百万Btuを割り込む水準で推移している。

2008年9月に勃発したリーマン・ショック以降の景気回復期は、国際天然ガス市場にとって、21世紀に入って最大ともいえる激動の

時期であった。21世紀は環境の世紀と呼ばれ、世界的な天然ガス需要の急増によって、2011年の天然ガス価格は20ドル/百万Btuを超えることが確実視されていた。

世界最大の天然ガス企業であるロシアのガスプロムは、欧州諸国への大量の天然ガス輸出によって、莫大な富を手に入れ、わが世の春を謳歌し、豊富な資金力を最大限活用して、本命視されていた英国との競争で、2018年のサッカー・ワールドカップ開催権を勝ち取った。

インドネシアも2008年秋には、日本へのLNG輸出量を年間1,000万トン削減し、輸出価格も15ドル/百万Btuとするとして、日本の電力企業、都市ガス企業を動揺させた。ところが、需要面では景気後退による天然ガス需要の予想外の伸び悩み、供給面ではシェール・ガスをはじめとした非在来型天然ガスという新しい種類の天然ガスの生産が激増し、国際天然ガス価格が暴落したのである。まさに、天才による奇抜な発明とは関係のない「静かなる革命」といえる。

4. 石油の世界でも非在来型石油革命が

天然ガスの世界で起きた革命と同じことが、石油の世界でも起きつつある。チャサピーク、EOGなどの中堅石油企業は、シェール・ガス生産で蓄積した、水平掘削、水圧破碎、マイクロ・センシング等の組み合わせ技術をシェール・オイルあるいはタイト・オイルと呼ばれる

非在来型石油に用いて、原油生産を増加させている。既に、原油生産量は1970年にピークを迎えたと石油専門家に結論づけられていた米国本土48州においても、2008年から原油生産が増加している。米国全体の原油生産量は2008年を底に増加を始めている（図5参照）。

これまでの米国における石油工学の常識では、アラスカとメキシコ湾を除いた米国本土48州の油田は限なく探査され、石油は取りつくしたため、石油生産はピークを過ぎて、原油価格は天文学的に高騰すると「オイル・ピーク論」は言っていた。この神話が完全に崩壊したのである。

シェール・オイルというと、これまでに開発が部分的に進められてきたオイル・シェール、オイル・サンドと混同する読者も多い。だが、シェール・オイルとオイル・シェールはまったく異なる炭化水素である。

オイル・サンド、オイル・シェールは、重質で未成熟な石油成分（ケロジェン）を含んだ砂粒、岩片というガソリンをはじめとした軽い石油製品の得率が低い超重質油である。大量の熱水注入による重質油成分の蒸気化、流動化という膨大なエネルギー投入が必要で、生産コストは現在でも80～100ドル/バレルを超えるため、経済性の面においてBP統計でも原油埋蔵量に算入されていない。カナダのオイル・サンドの埋蔵量は世界最大の原油埋蔵国であるサウジアラビアに匹敵するとされながらも、BP統計では経済性のある埋蔵量とされ

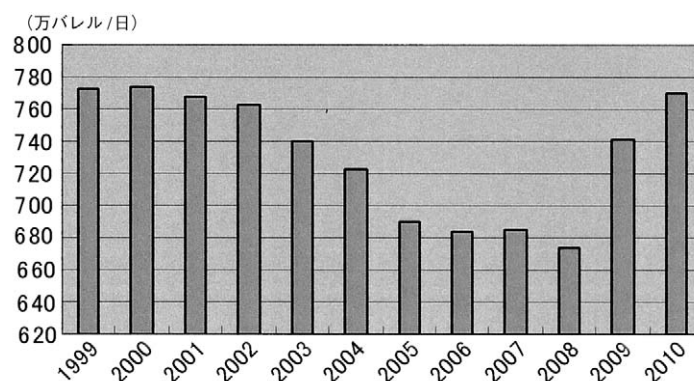


図5 米国における原油生産量の推移

ておらず、カナダは現時点においては大産油国とはいえない。

それに対して、シェール・オイルは、シェール・ガスと同じように、石油生成の根源岩である頁岩あるいは硬い岩盤の中に含まれている軽質油あるいはコンデンセート（粗製ガソリン）である。シェール・オイルも、その存在は昔から知られていた。だが、砂岩の細かい砂の粒である貯留層に原油が含まれ、地中の圧力によって自噴する在来型の原油と異なり、硬い岩盤の中に含有する石油を取り出すことから、経済性の面で不可能だと考えられていた。エクソンモービル、シェルをはじめとしたメジャーも非在来型石油の開発には、経済性はまったくないと考えていた。だが、多くのメジャーが米国における原油生産量を減少させるのとは対照的に、チェサピーク、EOGなど中堅石油企業の2010年の原油生産量は30～40%も伸びている（表2参照）。

2010年4月20日に発生したBPのメキシコ湾原油流出事故により、BPをはじめとしたメジャーは、表2のように米国内における原油生産量を大幅に減少させた。しかし、米国内の原油生産量は、この1年間で50万バレル/日以上も増加し、世界で一番原油生産量を増やしている産油国は米国である。

今、筆者が執筆を続けているこの瞬間にもシェール・ガス革命に次ぐシェール・オイル革命が静かに、かつ着実に進んでいる。ノースダコタ州のバッケン・シェール油田の原油生産量は2006年に10万バレル/日であったが、2010年に

は40万バレル/日近くに達し、2015年には100万バレル/日近くまで増加すると予測する石油専門家もいる。米国全体のシェール・オイル生産量は、2015年には200万バレル/日程度に達すると筆者は推定している。さらに、チェサピークはテキサス州でシェール・ガス生産を行っているバーネット・ガス田においてシェール・オイルの開発を本格化させた。

中堅石油企業が、先を争うようにシェール・オイルの開発を進めている背景には、シェール・ガス開発で蓄積した生産ノウハウを活用できるというメリットとともに、熱量換算で原油価格が天然ガス価格の4倍以上もするという経済性とエネルギー間の価格差という問題が挙げられる。2011年3月時点でWTI原油価格は100ドル/バレル、それに対して天然ガス価格は石油換算で24ドル/バレルに過ぎない。2009年以降のシェール・ガス革命を契機とした天然ガス価格暴落によって、熱量換算で見た原油価格が圧倒的に天然ガス価格を上回っている（図6参照）。

シェール・オイルの開発は、中国の大慶油田のシェール・オイル岩盤、フランスをはじめとした欧州諸国のシェール・オイル岩盤の開発にも広がりを見せている。オバマ大統領は中国の胡錦濤国家主席とシェール・ガス開発で合意し、米国の中堅石油企業であるヘスは、中国国営石油企業であるペトロチャイナと大慶油田、勝利油田におけるシェール・オイル開発を進めている。ヘスは、フランスのパリ郊外においてもシェール・オイル開発事

表2 米国における原油生産量の推移

石油企業名	石油生産量 (万バレル/日)	前年比 (%)
BP	56.4	-16
シェブロン	48.2	-5
エクソンモービル	43.0	15
コノコフィリップス	37.5	-6
シェル	23.7	-12
アパッチ	11.4	18
EOG	9.8	31
ヘス	9.3	9
マラソン	8.0	27
チェサピーク	5.4	48

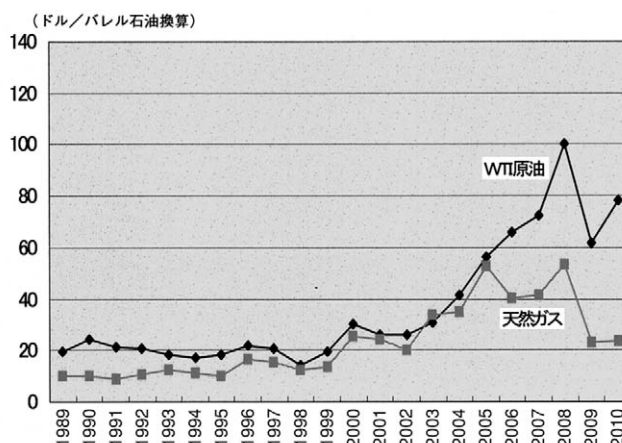


図6 WTI原油価格と天然ガス先物価格の推移

業を展開している。もちろん、米国ペンシルバニア州にある巨大シェール・ガス田であるマーセラス・ガス田については、シェール・ガスの生産にあたって、水の注入に加えて、界面活性剤を用いることから、土壌汚染を危惧した環境保護団体による反対運動も起こっている。しかし、水圧入による岩盤層は、地下数千メートルと深く、飲料水用の地層とは深度が異なることから、飲料水が汚染される可能性は低い。世界全体においては、生産コストの安いシェール・オイルの開発の勢いは止まらないものと思われる。

ビジネスの変化に鋭敏なメジャー、日本の総合商社は、シェール・ガス、シェール・オイルの開発に動き出している（表3参照）。米国内においては、シェール・ガス開発がいち早く行われたテキサス州のバーネット・シェール・ガス田においてシェール・オイルの開発が進められている。チェサピーク、EOG、デボン、テキサス州のイーグル・フォード・シェール油田、コロラド州のニオブラ

ラ・シェール油田の開発にまで事業を拡大し、シェール・オイルの生産量増加を目指している。シェール・オイル開発の先駆者であるチェサピークは、米国における石油生産量を2011年の5万バレル/日から2016年には25万バレル/日に増加させる目標を掲げている。

シェール・オイルは多くの面で、これまでの石油地質学の常識を超えている。

第一に、在来型の石油は、背斜構造というラクダのコブのような地層に原油が溜まっている。砂岩のような細かい砂の粒の間において貯留岩と呼ばれる地層に原油が存在し、その蒸発を防ぐ帽岩（キャップ・ロック）が存在する構造となつて（図7参照）、揮発性の高い石油・天然ガスを蓄えている。

これまで、油田を探す時は、まず人工地震を発生させ、三次元探査、四次元探査等によって背斜構造を見つけることが油層工学の常識であった。ところが、石油を含んだ硬い岩盤あるいは固まった砂粒ということとなると、揮発性の高い石油・天然ガスの蒸発を防ぐ帽岩が存在す

表3 日本の総合商社の動き

商社名	開発概要
三菱商事	カナダ西部のシェール・ガス開発、3,000億円
三井物産	米国東部のシェール・ガス開発、4,300億円
伊藤忠商事	米国中西部でシェール・オイル開発
住友商事	米国東部と南部でシェール・ガス開発
双日	米国南部でシェール・ガス開発

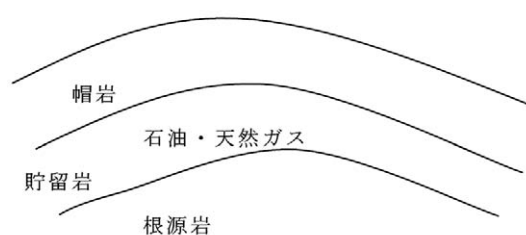


図7 石油の存在する背斜構造

る背斜構造を探す必要がなくなる。プランクトンの死骸が堆積した構造であれば、欧州、中国をはじめとした世界中どこにでも石油が存在する可能性が出てくる。

第二に、資源量が莫大である。現在、米国で開発が進められているバッケン・シェール油田の期待資源量は、単一の鉱区だけで4,000億バレルで、サウジアラビアの原油埋蔵量2,646億バレルを凌ぐ莫大な量である。かりに原油回収率が10%としても、原油生産量は膨大なものが期待できる。テキサス州のバーネット・シェール・ガス田、イーグル・フォード・シェール油田等の開発では、期待資源量が1兆バレルを超える。現時点では、シェール・オイルの正確な地質調査は、ほとんど進められておらず、原油回収率も在来型石油における20～40%と比較して、はるかに低い5～10%にとどまる。しかし、今後の技術革新次第では、米国地質調査所（USGS）のより正確な物理探査につれて、在来型の石油埋蔵量の数十倍もの非在来型石油が発見される可能性が高い。ということは、石油の可採年数が200年を超え、オイル・ピークを懸念する必要がなくなるという人類への希望を与える可能性もある。

第三に、現在の国際エネルギー情勢を大きく変貌させる可能性が高い。在来型石油については、原油埋蔵量の3分の2は中東産油国に集中し、タンカーはホルムズ海峡を通過し

なければならないという地政学リスクがある。ホルムズ海峡は、世界の石油消費量8,900万バレル/日のうち1,800万バレル/日もの莫大な石油がタンカーで通過するチョーク・ポイントである。ところが、エネルギー消費国である米国、中国にも、石油が大量に存在することとなると、原油輸送に伴う地政学リスクがなくなり、現時点で世界第3位の原油生産量にとどまる米国（図8参照）が、再び世界最大の産油国となるという、20世紀前半の状況が復活する可能性も大いに考えられる。

現在の技術水準においても、シェール・オイルの生産コストは20～30ドル/バレル程度まで低下しており、WTI原油価格が100ドル/バレルを超える現時点の状況では、十分な利益を挙げることが可能である。

シェール・オイルは、シェール・ガスと同様に、生産開始直後に急激に生産量が減退し、その後30年程度にわたって低水準の生産量を続けるという特徴を持っている。そのため、恒常的に新規の井戸を掘削する必要がある。現在、シェール・オイル開発の成功例として挙げられるバッケン・シェール油田では、水平掘削の距離を従来の1,000メートルから3,000メートルに延伸し、水圧破碎のステップを10段階から30段階に増やし、マイクロ・センシング技術で、岩盤により効果的な割れ目を形成し、軽質油とコンデンセートを効率的に抽出する技術が用いられている。シェール・オイルの生産コストは、21世紀初頭には300ドル/バレルを超えられ、エクソンモービルをはじめとしたメジャーは、最初から開発を放棄していた。ところが、1本の坑井元から多数の水平坑井を掘削し、さらにバッケン層の下にスリー・フォーク層という軽質油を含有した岩盤が存在するため、二階建ての水平坑井を掘削することにより、1本の坑井元における開発コストが膨らむものの、投資額の増加以上に石油総生産量が増加し、探鉱・開発コスト、生産コストは劇的に低下している（図9参照）。

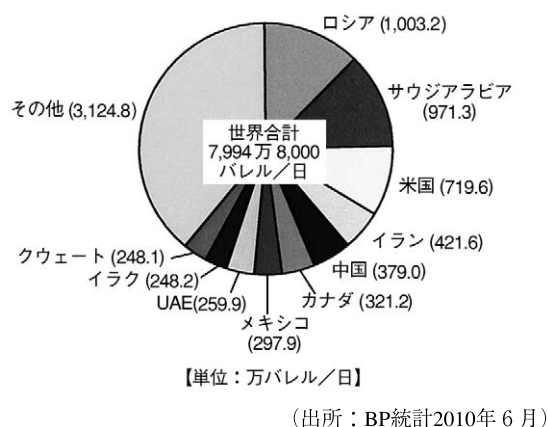
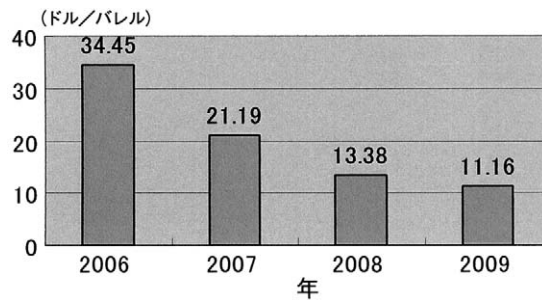


図8 国別原油生産量



(出所：石油天然ガス・金属鉱物資源機構資料)

図9 バッケン・シェール油田の探鉱・開発コスト

石油は、輸送、貯蔵が簡単であり、極論すれば、赤いポリタンクで簡単に持ち運ぶことができることから、LNGプロジェクトのような巨額のインフラ投資が不要である。既に奥行きのある国際市場が成立し、生産コストの安い原油さえ手に入れば、世界中どこにでも持っていくことが可能である。

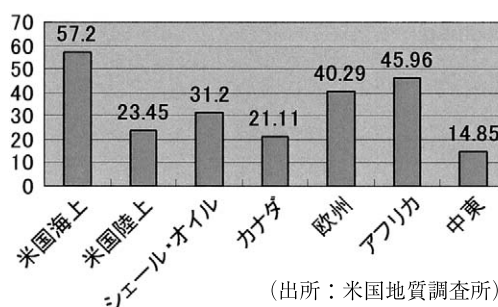
シェール・ガス、コール・ベッド・メタン（炭層ガス）等は、低コストで生産できても、生産地域で利用するか、総額1兆円を超えるLNGプラントとLNG専用船のような巨大なインフラ整備が必要となる。シェール・オイル開発のインパクトは、シェール・ガスとは比較にならないほど大きい。シェール・オイルの生産コストは、既に開発条件の良いスイート・スポットにおいては、30ドル/バレル程度まで低下しており、米国メキシコ湾深海部油田の生産コストである60ドル/バレルよりも、はるかに安い（図10参照）。

現状の原油価格である100ドル/バレルの根拠として、欧米のメジャーが容易にアクセスできる深海部油田の生産コストが60ドルであることが挙げられている。しかし、今後、生

産コストの安いシェール・オイルの増産が始まるならば、原油価格高騰の1つの根拠がなくなることとなる。「安い原油の時代は終わった」という一般的な常識ではなく、「安い原油の時代が始まった」といえる状況となりつつある。まさに21世紀最大のエネルギー革命といえる。日本の石油・天然ガス企業も、2011年のシェール・オイル革命の進展に大いに注視する必要がある。

5. 既にシェール・ガスで立証された天然ガス価格暴落

地球温暖化防止の切り札として天然ガスの需要は大きく増加することから、天然ガス需給逼迫を見込んだ、天然ガス先物市場への投機資金の流入がこの数年急増した。2008年夏の資源インフレーション発生時には、15ドル/百万Btuまで上昇した。ところが、米国におけるシェール・ガスの生産コストの劇的な低下に伴う米国の天然ガス生産増によって、天然ガスを巡る市場環境は一変した。2010年12月16日に公表された米国エネルギー省エネルギー



(出所：米国地質調査所)

図10 地域別の原油生産コスト比較

情報局（EIA）の2035年までの長期エネルギー見通しによれば、米国のシェール・ガス資源量は2010年時点において825兆立方フィートで、2009年から倍増し、2035年の天然ガス生産量も2010年から20%増加するとしている。そのため、米国は2035年においても海外からLNGを輸入する必要がなくなる。逆にシェニエールをはじめとしたLNG企業が、ほとんど操業していないメキシコ湾沿いのLNG受入基地を利用して、天然ガスを液化し、LNGの輸出を検討するという驚異的な逆転現象が発生する。つまり、米国が巨大な産ガス国、産油国となる可能性が高まっている。その結果として、2035年までの新規電源の7割近くは、最新鋭の天然ガス・コンバインド・サイクル火力発電が占めることとなり、原子力発電もほとんど必要なくなる（図11参照）。

米国においては、2008年までは国内の天然ガス需要の急増に対して、国内の天然ガス供給が追いつかず、2030年には年間3億9,000万トンものLNGを輸入しなければならないとされていた。これは、世界の2010年におけるLNG国際貿易量の2倍に相当する。ところが、2009年以降の米国エネルギー省による長期エネルギー需給見通しの見直しでは、シェール・ガスをはじめとした非在来型天然ガスの生産増によって、米国にとって必要なLNG輸入量は多くて年間3,000万トン、米国国内の天然ガス生産増が順調に進めば、米国のLNG輸入量は年間1,000万トンで十分ということになった。そこで、慌てたのが米国市場を主要な

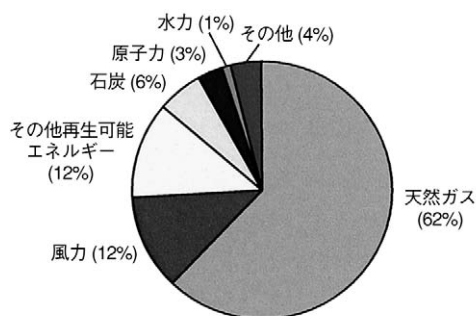
買い手と考えて、進められていたカタール、豪州をはじめとした巨大LNGプロジェクトであった。世界の天然ガス消費量の20%を占める米国天然ガス市場の需給緩和を反映して、国際天然ガス市場におけるLNGスポット物は供給過剰の状態となり、ドイツ、イタリアをはじめとした欧州諸国は3ドル/百万Btu程度でLNGを購入している。ニューヨーク先物市場における天然ガス価格は、15ドル/百万Btuから2009年9月には2.4ドル/百万Btuまで暴落、その後の世界経済の回復で少し持ち直したものの、30年ぶりの記録的な厳冬に見舞われている2011年2月時点においても4ドル/百万Btu台で低迷している。

シェール・ガスの生産コストは好条件のガス田においては、1.5ドル/百万Btu程度まで急激に低下しており、筆者の見方としては、少なくとも2015年まで天然ガス価格は4ドル/百万Btu程度で推移する可能性が高い。

6. シェール・ガス革命からシェール・オイル革命へ

既にチェサピーク、EOGリソースをはじめとする米国の中堅石油企業は、シェール・ガス開発において培った水平掘削、水圧破碎、特に多段階フラクチャリング、三次元探査、四次元探査、マイクロ・センシングを精緻に組み合わせることによって、非在来型石油であるシェール・オイルの開発を進めている。

シェール・オイル生産の特徴として、1本の井戸当たりの原油生産量が少ないいうえに、生産開始後に生産量が急激に減退し、その後は低い生産量が長期間続くという問題点が指摘されている。しかし、1本の井戸における水平掘削の距離を3,000メートル以上に伸ばし、フラクチャリングの段階を増やすことによって、1本当たりの原油生産量を増加させることができる。さらにはバッケン・シェール油田においては、バッケン構造とその下のスリー・フォーク構造の両方に多数の水平掘



（出所：米国エネルギー情報局2010年12月見通し）

図11 米国における2035年までの新規電源割合

削パイプを設置することで、1本の井戸当たりの生産コストを急速に低下させている。現状では、1つの井戸の石油生産量は2006年の200バレル/日から2010年には4,000バレル/日に急激に向上しており、バッケン・シェール油田の生産コストの低下と石油生産量増加に大きく寄与している。

前述のように、シェール・オイルの生産コストは、最も好条件の場合に30ドル/バレル程度であり、世界で一番コストが低い中東の陸上油田の生産コストは、3ドル/バレル程度であるが、イラクをはじめとした中東諸国には、多くの未開発油田が存在し、対外開放が進んでいないことから、短期間における生産開始の可能性は低く、世界の原油埋蔵量の8割近くは産油国国営石油企業によって支配されている（図12参照）。

世界の在来型石油の圧倒的部分を産油国国営石油企業が支配しているために、エクソン・モービルをはじめとしたメジャーは、世界の原油埋蔵量のうち、わずか7%にしか開発参加できず、だからこそBPをはじめとしたメジャーは、原油流出事故のリスクを負ってまで、アクセスの容易な深海部油田の開発に注力している。深海部油田の開発は、技術的難易度が高く、そのため生産コストは上昇する傾向にあり、それが現在の原油価格100ドル/バレルの根拠となっている。しかし、生産コストが30ドル/バレル以下のシェール・オイルの開発が進むならば、国際原油市場においても、天然ガス価格と同様に、石油需給緩和への期

待感から原油価格下落という、石油消費国にとっては好ましい状況も可能性としてはある。

7. 原油価格の変動と国内経済への影響

原油価格をはじめとしたエネルギー価格の変動は、財・サービスの全体平均の値段である物価に大きな影響を与える。1973年の第1次石油ショックによって、1974年に日本が戦後初めてのマイナス成長に転落したのも、原油価格高騰による年率10%を超える物価上昇が原因であった。では、そもそも物価上昇は国内の実質GDP（国内総生産）に影響するかであるが、普通は物価が上昇する場合には、ほとんどの財・サービスの価格は上昇する。

今でこそ、日本はデフレーション（物価の持続的な下落）に直面し、モノの値段が下がるのは当たり前であるという意識が国民の中に浸透しているが、逆に、1960年代の高度経済成長期にはモノの値段が上がるのが当たり前であった。石油ショック時にも、原油価格の高騰に伴って、石油を原料、燃料にした石油化学製品、トイレット・ペーパー等のすべての製品の価格が高騰した。1973年の第1次石油ショック時には、石油がなくなるというパニックから、洗剤、トイレット・ペーパーの買占めが発生し、街から商品が姿を消した。筆者は、当時高校生であり、ノートがなくなってしまうという噂が流れ、ノートを手当たり次第に買い漁ったものである。

昨日（3月11日）起こった「東日本大震災」

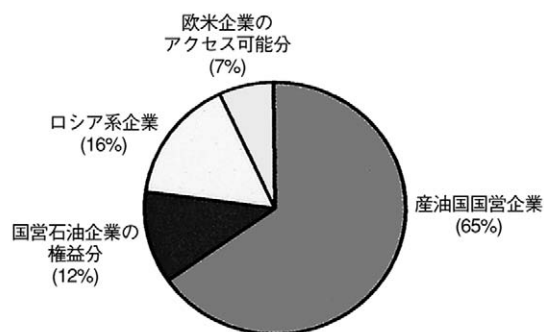


図12 欧米企業のアクセス可能な原油埋蔵量の割合

によっても、品不足への危機感から消費者は買いだめに走っている。筆者も、本日ガソリンスタンドに行ったところ、ガソリンは売り切れ、スーパー・マーケットの商品棚は品物がほとんど残っていない状況であった。こうしたエネルギー価格の高騰、自然災害の発生は、パニック的な仮需を発生させ、製品価格を引き上げる結果となる。特定の製品、例えば米の価格だけが上昇し、小麦の価格が上昇しなければ、米の価格は小麦に対して割高となることから、米の消費を控え、割安になった小麦によって作られたパンを購入することとなる。だが、すべての製品の価格が上昇した場合、例えば1973年の第1次石油ショックにおける狂乱物価においては、すべての製品価格が暴騰し、それぞれの製品の価格比（相対価格）は変化しないので、割安な製品への消費の移動は起こらない。すべての製品価格が50%上昇したとして、消費者が以前と同じ量だけ製品の購入行動を取り続けた場合には、消費者の支出額は50%増加する。しかし、支出国民所得が50%増加するということは、生産国民所得も50%増加することとなり、企業の売上高の増加を通じて、消費者の名目所得も50%増加することとなるので、実質GDPは変化しないこととなる。つまり、物価が1.5倍になっても、給料も1.5倍になるので、買えるものは同じであるという実質的な理論である。

しかし、マクロ経済学では、ケインズ理論を図式化したヒックスによるIS-LM分析による考え方に立てば、国民経済の均衡GDPは、生産物市場と貨幣市場の同時均衡が達成した時に成立する。生産物市場における需要と供給の均衡が成立する利子率 r と国民所得 Y の関係を表した曲線をIS曲線と呼び、貨幣市場における需要と供給の均衡が成立する利子率 r と国民所得 Y の関係を表した曲線をLM曲線と呼ぶ。均衡GDPは、IS曲線とLM曲線の交点で成立する（図13参照）が、すべての物価が上昇し、すべての人々の所得が上昇するならば、「実質」は変わらないという生産物市場の均衡は、必ずしも貨幣市場においては成立しない。取引動機と

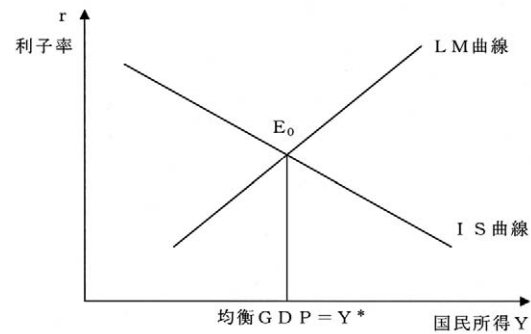


図13 均衡GDPの成立

いわれるように、製品が取引される場合には、一般的交換手段として貨幣が必要であり、物価上昇によって、取引金額が大きくなれば、国民はより多くの貨幣を保有する必要が発生し、国民経済に流通する貨幣量が一定であるとすれば、物価上昇は貨幣の超過需要を発生させることとなる。名目上の貨幣供給量が一定であるならば、物価上昇は貨幣供給の実質的な価値を減少させ、国民経済に対して、金融引き締めと同じ効果をもたらす、均衡GDPを減少させる、すなわち景気後退効果をもたらすこととなる。

1973年の第1次石油ショックにおける原油価格高騰に伴う物価上昇の場合には、生産物価格、給与そのものの金額である名目値と、物価変動分を考慮した実質値を明確に区別する必要がある。ケインズは、消費は所得によって決まるという「絶対所得仮説」を提唱したが、消費者が消費を行う場合の基準は、名目所得よりも物価上昇分を考慮した実質所得であると考えられる。つまり、実質消費は実質所得に依存するという消費関数 $C = C(Y)$ を想定する。投資については、物価が上昇しても、その分だけ投資収益が増加するので、物価が上昇しても、投資の収益率は変わらず、実質投資 I は利子率によって決定され、投資関数を $I = I(r)$ とする。その場合に、実質値による生産物市場の均衡条件は、

$$Y = AD = C(Y) + I(r) + G$$

となる。ここで、投資は利子率の減少関数で

あることから、実質GDP=Yと利率の関係を表す実質値で表現した「実質」IS曲線は右下がりとなる。前述のように、製品価格が50%上昇しても、給与が50%上昇すれば、実質的に購入できる製品の量は同じであり、物価の変動は、生産物市場の需給関係に影響を与えることはなく、物価の上昇はIS曲線を変化させない。それに対して、貨幣市場の均衡条件を表すLM曲線の場合には、物価の変動は大きな影響を受ける。物価上昇によって、名目GDPが増加して、取引量が増加すれば貨幣需要は増加する。物価上昇は、生産物市場に影響を与えない。実質GDP、利率というマクロ経済変数に変化を与えなくとも、貨幣需要は名目的な物価上昇分だけ増加するが、物価上昇分を考慮した実質的な貨幣需要は変化しないと考えられる。そこから、実質貨幣需要は実質GDPと利率の関数であるとし、名目貨幣供給量をM、物価水準をPとすれば、貨幣市場における均衡条件は、実質貨幣供給量は M/P となり、貨幣需要関数をLとすると、

$$M/P = L(Y, r)$$

と表される。

名目貨幣供給量Mと物価水準Pが一定であれば、実質GDPと利率の関係は、通常のIS-LM分析の場合と同じように右上がりの曲線となり、実質値で表したLM曲線ということとなる。

名目貨幣供給量Mが一定のまま、原油価格

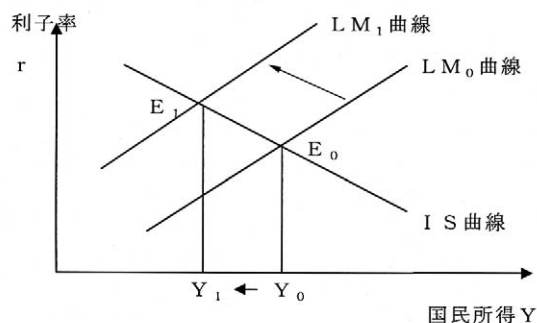


図14 物価上昇に伴う実質GDP水準の減少

の高騰によりすべての財・サービスの価格が上昇して、物価水準が P_0 から P_1 へ上昇した場合、実質貨幣供給量は M/P_0 から M/P_1 に減少し、図14のようにLM曲線は LM_0 から LM_1 へと左側にシフトする。これによって生産物市場と貨幣市場を同時に均衡させる点は E_0 から E_1 に移動し、実質GDPの水準も Y_0 から Y_1 に縮小する。すなわち、金融引き締めを行った場合と同じように景気後退が発生する。

このように第1次石油ショックの時のように物価上昇が発生した場合には、生産物市場の均衡条件は変わらなくとも、名目貨幣供給量を物価水準で除した実質貨幣供給量は、 M/P_0 から M/P_1 に減少し、LM曲線がシフトして、結果として実質GDP水準が低下し、完全雇用GDP水準を下回り、不況が発生する。

8. 1970年代の原油価格高騰時になぜ不況と物価上昇が同時に起こったか

本来、好況の時にはモノが飛ぶように売れ、物価が上昇する。まさに1980年代後半のバブル期が典型である。自動車の販売台数は、1990年代初頭には年間777万台と現在よりも30%以上も多く、株価も地価も上昇の一途を辿った。それに対して、バブル崩壊後の不況時には、モノが売れず、ユニクロに代表されるように物価は下落の一途を辿っている。このように、好不況と物価は逆相関の関係にあり、景気が良くなると物価が上昇し、景気が悪化するとモノが売れなくなって、物価が下落する。実質GDPが増加する時には、企業の労働需要も増加し、失業率は低下することとなる。このように、実質GDPと失業率が逆相関の関係にあることを「オクンの法則」と呼ぶ。とするならば、総供給曲線が一定であるなら、物価上昇率と失業率との間には逆相関があり、物価が上昇すれば、失業率は減少するという現象が、通常発生する。英国の経済学者フィリップスは、長期間にわたる英国のマクロ経済指標を分析し、名目賃金率の上

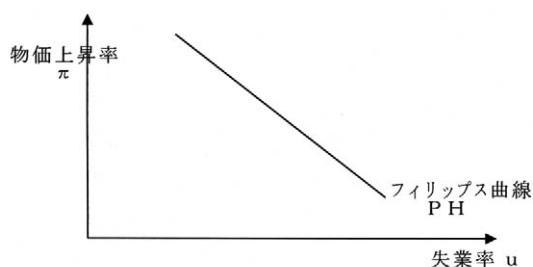


図15 フィリップス曲線

昇と失業率との間には逆相関があり、名目賃金率が上昇すれば、企業の生産コスト上昇に伴って製品価格が上昇することから、物価上昇率と失業率の間には負の相関がありことを図表化した。これを「フィリップス曲線」と呼ぶ（図15参照）。

このように雇用情勢の改善、好況と物価上昇が繋がっているはずであるにもかかわらず、1970年代の石油ショック時には、不況にもかかわらず、物価が上昇するという「スタグフレーション」という矛盾した状況が発生した。それは、物価水準と実質GDPの関係を供給側から見た総供給曲線と、需要側から見た総需要曲線の分析によって、理解することができる。石油ショックのように、OPECが原油輸出量を絞り（実際にはOPECは原油生産量を減少させてはならず、原油供給が途絶するという危機感からの先進国の仮需が発生した）、原油価格が高騰する状況を供給ショックと呼ぶ。1970年代の石油ショックにおいては、原油価格は3ドル/バレルから36ドルへと12倍も上昇した。原油価格の高騰は、ガソリン、石油化学製品の価格のみならず、トラック、船舶をはじめとした輸送費の上昇を通じて、あらゆる財・サービスの価格を上昇させる。その場合には、従来と同じ労働力を雇用して生産活動を行っても、原油購入代金の増加分だけ付加価値が海外に漏出し、実質GDP水準が低下する。労働1単位が生み出す限界生産物も減少し、マクロの生産関数を下方にシフトさせる。こうした状況は、図16のように総供給曲線ASを AS_0 から AS_1 へ左側にシフトさ

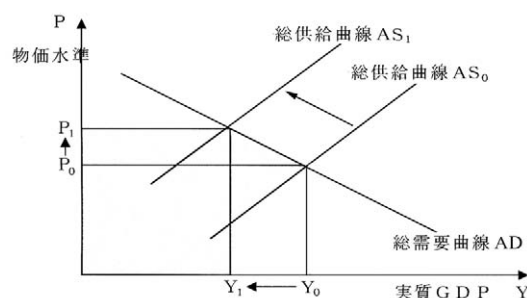


図16 原油価格高騰による不況と物価上昇の併存

せ、均衡GDPの水準を Y_0 から Y_1 に引き下げるとともに、物価水準を P_0 から P_1 に引き上げる。20世紀後半に欧米先進諸国のすべてが困惑した、不況と物価上昇が並存する「スタグフレーション」という、かつての主流派マクロ経済学では、まったく説明のできない極めて深刻な状況をもたらすこととなる。

9. シェール・オイルの登場による物価下落と景気回復の好循環

シェール・ガス革命によって国際天然ガス価格が暴落したように、シェール・オイルの生産増によって、原油価格の下落が発生した場合、どのような効果が生じるかを分析してみる。原油価格が下落した場合には、石油を原料、燃料とした幅広い財・サービスの価格が低下し、物価下落が発生する。その時には図16で考察した場合と逆の状況が起こる。すなわち、生産物の価格が下がった場合には、企業の売上高減少を通じて、給与も下落し、実質GDPは変化せず、生産物市場に直接的な影響を与えないことからIS曲線は変化しない。それに対して、物価下落によって、名目GDPが減少することから取引量が縮小し、貨幣の取引需要も減少する。したがって名目貨幣需要は物価下落分だけ減少する。名目貨幣供給量 M が一定であるとする、物価水準が P_0 から P_2 に下落するならば、実質貨幣供給量は M/P_0 から M/P_2 へと増加し、市場に対して、ベースマネーあるいはハイパワードマネーと

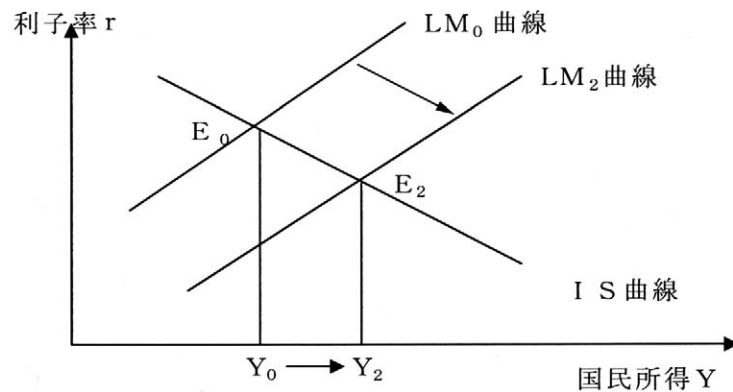


図17 シェール・オイルを通じた原油価格下落による実質GDP増加効果

いう貨幣供給量を増やす。現在，米国連邦準備制度理事会が行っている金融緩和政策を実施した場合と同じ効果がもたらされ，LM曲線は図17のように LM_0 曲線から LM_2 曲線へと右側にシフトする。

その結果，生産物市場と貨幣市場の同時均衡を意味する新たな交点は E_0 から E_2 に移動する。それに対応する均衡GDPも Y_0 から Y_2 に増加し，完全雇用GDP水準となり，すべての人々に就業機会が与えられ，不況を脱出することが可能となる。

つまり，シェール・オイル革命が21世紀半ばに向けてさらに進展して，シェール・ガス革命によって国際天然ガス価格が下落したように，原油価格がシェール・オイルの生産コストである30ドル/バレル程度まで下落したとする。石油の用途は天然ガスよりも極めて大きく，輸送用燃料，石油化学製品の原料として幅広く用いられるため，製品製造コストの低下，輸送コストの低下をはじめ，すべての財・サービスの価格低下による物価下落を引き起こす可能性が極めて高い。物価水準の低下は，実質貨幣供給量を増加させる。とするならば，①政府債務の膨張という負の面を抱える政府支出を行わなくとも，②ゼロ金利と量的緩和という金融政策の自由度を奪う緊急

時対策を行わなくとも，原油価格の下落には完全雇用を達成する水準にまで実質GDPを引き上げる景気浮揚効果が期待できる。現在の金融緩和政策は，必ずしも市場に供給されたマネーが実物経済に回らず，商品市場におけるトウモロコシ，小麦をはじめとした穀物価格の高騰をもたらし，貧困層の食糧不足が，中東における政治情勢の不安定化につながっている。それが原油供給懸念を生じさせ，原油価格高騰をもたらすという悪循環となっている。もちろん，中国，インドをはじめとした新興経済発展諸国における食糧とエネルギーの爆食という需要面の変化はあるものの，市場にもたらされた過剰流動性が，コモディティ（商品）の価格高騰を強めている面があることは確かである。

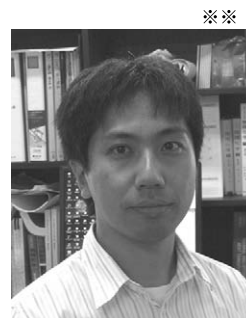
生産コストの安いシェール・オイルの生産増は，先進国と新興経済発展諸国の調和ある，物価の安定と完全雇用を実現する好ましい景気回復への循環をもたらす可能性を大いに秘めている。今回の大地震により原子力の安全神話が崩れ，エネルギー安全保障の観点から石油という優れたエネルギーの存在が見直される状況において，生産コストの安いシェール・オイルの開発は，人類に大きな希望を与えるのである。

[寄稿]

高温太陽集熱によるソーラー水素製造技術

児玉 竜也[※] (新潟大学 工学部 化学
システム工学科 教授)

郷右近 展之^{※※} (新潟大学 超域研究機構
准教授)



1. はじめに

北アメリカ南西部，地中海沿岸，豪州，中東，北アフリカ等は，年間直達日射量（DNI）が $1,800 \text{ kWh/m}^2$ を越える地域であり，サンベルトもしくはソーラーベルトと呼ばれる。これらの地域では，“コレクター”または“ヘリオスタット”と呼ばれる反射鏡で日射を集光し，これを“ソーラーレシーバ”で受光することで，太陽集熱が得られる⁽¹⁾⁽²⁾。

太陽集熱による発電プラントとして古くは，1990年まで建設された米国・カリフォルニア州のSEGS（Solar Energy Generating System）プラント（350MWe級）がある。1990年以降，新たな建設が途絶えていたが，2000年代に入って再評価され，現在，米国，スペイン，シリアで新たに10～50MWe級の発電プラントが相次いで建設されている。

太陽熱発電の実用化が進む一方で，サンベルトで得られる高温太陽集熱を熱源として利用し，水素や合成ガス等の化学燃料に転換するプロセスが近年急速に注目されている。高温太陽集熱の化学燃料への転換により，エネルギー貯蔵・エネルギー消費地への輸送等が容易となる。これは，特に日本のようなサンベルトから遠く離れた地域では有効であり，サンベルトで製造した太陽熱由来の水素・化学燃料をタンカー等で輸送することが可能となる。

本稿では，まず太陽集光システムの開発動

向について紹介し，次いで，高温太陽集熱によるソーラー水素製造技術として，水熱分解サイクルによる水素製造，天然ガスのソーラー改質，石炭・バイオマスのソーラーガス化技術における世界の開発現状を紹介する。

2. 大型太陽集光システムの開発動向

(1) 集光原理

サンベルトでは，最大直達日射が約 1 kWh/m^2 を超え，これを“コレクター”または“ヘリオスタット”で点集光，あるいは線集光してエネルギー密度を大きくし，焦点・集線に集熱器・集熱管（ソーラーレシーバ）を設置して高温太陽熱を回収する。

一般に，レシーバ表面には，吸収率の良い黒色の吸収体を使用されるが，吸収体の温度が上昇すると放射損失が増大する。吸収体の理論的な熱吸収効率は，以下のようになる⁽¹⁾⁽²⁾。

$$(\alpha IC - \epsilon \sigma T^4) / IC$$

$$\left(\begin{array}{ll} \text{吸収体の吸収率：} \alpha & \text{直達日射：} I \\ \text{集光倍率：} C & \text{放射率：} \epsilon \\ \text{ステファン・ボルツマン係数：} \sigma & \\ \text{吸収体表面の温度：} T & \end{array} \right)$$

(2) 集光システムの特徴と規模

太陽集光システムは，パラボリックトラフ型，集中タワー型，パラボリックディッシュ型，ビームダウン型に分類される（図1参照）。

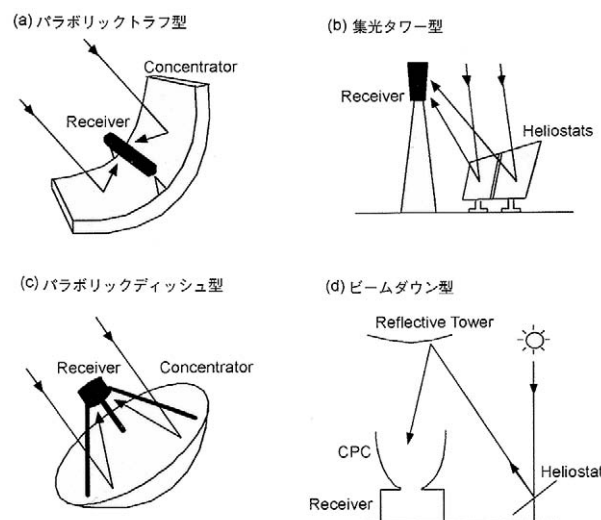


図1 太陽集光システム

①パラボリックトラフ型（図1a）

放物状の樋（トラフ）の内側が反射鏡で構成されている集光器（コレクター）を使用し、日射を焦線上に集光する。太陽エネルギーは、焦線上に設置されたパイプ内の流体に吸収される。このシステムの集光倍率は100倍程度であり、集熱流体の温度は200～400℃程度である。現在、太陽熱発電プラントとして実用化、あるいは建設中のものは、この方式をとるものが多く、最初に実用化された米国カリフォルニア州のSEGSもこの方式である。しかし、最高集熱温度が400℃程度と低いため、化学燃料製造用の集熱システムに利用することは難しい。

②集中タワー型（図1b）

タワー周辺部に多数配置したヘリオスタットで太陽日射を反射し、タワー頭頂部に設置されたレシーバに集光することで熱を発生させる。集光倍率は、300～1,500倍であり、レシーバ温度は最高で1,500℃以上に到達する。集熱量としては数十MW級から100MWを超えるものが建設されている。太陽熱発電プラントの集光システムとしての実用化は、スペイン南部の11MWeプラント“PS10”で行なわれている。タワー頭頂部のレシーバにおける集熱量は70MWthに達する。さらに、スペインで

は同地区に20MWeの“PS20”を建設中である。およそ2倍の140MWthの集熱量に達すると思われる。

③ディッシュ型（図1c）

皿状の反射鏡の焦点部にレシーバを設置し、日射を集光する。集光倍率は1,000～5,000倍で、到達可能温度は1,500℃を超える。一般的に、集熱量は1器当たり数十kW～数百kWと小型である。オーストラリア国立大学が反射鏡面積500m²の500 kWシステムを実験用として建設している。米国ではスターリングエンジンと組み合わせたディッシュ/スターリング発電システム（7 kWeと25kWe）が開発された。25kWeのシステムの発電効率は約25%とされている。アメリカ・アリゾナ州フェニックス近郊に商用太陽熱発電プラントが建設され、25kWディッシュ/スターリング発電システム60器で1.5MWeの発電とされている。

④ビームダウン型（図1d）

集中タワー型のタワー上のレシーバの替わりに曲面形状の反射鏡を設置し、ヘリオスタットで反射した日射を地上に再反射させ、地上に設置したレシーバで集熱する。理論集光倍率は、5,000～10,000倍に達し、1,300℃以上の高温の太陽集熱を地上で得ることが可能で

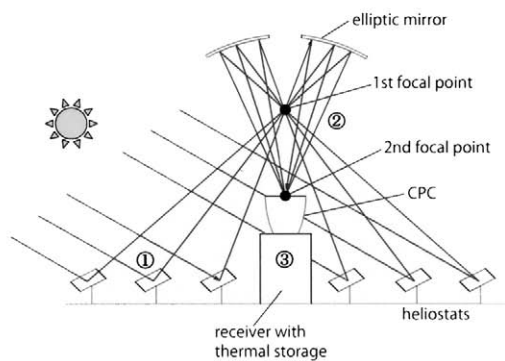


図2 三鷹光器(株)が開発した凹面楕円鏡による新型のビームダウン型太陽集光システム

ある。未だ開発段階ではあるが、イスラエルのバイツマン研究所が双曲面反射鏡による300kWのシステムを建設・試験している⁽¹⁾⁽²⁾。

近年、これをマルチリング型に改良したシステムを100 kWthで東京工業大学・コスモ石油(株)・マスダールがアブダビに建設した。また、最近では、三鷹光器(株)が凹面楕円鏡による新型のビームダウンシステムを開発し、世界の注目を集めている(図2参照)。これには曲率をナノレベル制御した高温集熱用ヘリオスタットが使用されており、その集光度を大きく増大させている。

(3) ソーラー水素製造用の集光システム

化学燃料製造用の熱供給源としては到達集熱温度が低くとも800℃を超える必要があり、この観点から、パラボリックトラフ型を除く、集中タワー型、パラボリックディッシュ型、ビームダウン型の何れかを集光システムとして利用する必要がある。

3. 水の熱分解による水素製造

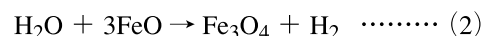
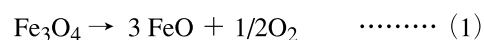
これまで太陽熱発電を目的に開発されてきた太陽集光システムは、化学燃料の製造においては化学反応のプロセスヒートの供給のために使用される⁽¹⁾⁽²⁾。高温太陽集熱を熱源とするソーラー製造プロセスは、水の熱分解による水素製造プロセスと、高温太陽集熱を利用して天然ガスや石炭・バイオマス等の化石

燃料を熱量的にアップグレードし合成ガスに転換するプロセスに大きく分けられる。

(1) 二段階水熱分解サイクル

①反応媒体の開発

現在最も活発に開発が行なわれている水熱分解サイクルは、反応媒体として金属酸化物である鉄酸化物(フェライト: Fe_3O_4)を用いるサイクルである。 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$ 酸化還元系による二段階サイクルは下記のように進行する。

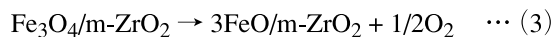


最初の反応ステップである Fe_3O_4 の高温熱還元(分解)反応は、吸熱反応であり、二番目の反応ステップである低温水熱分解反応はわずかに発熱を伴う反応である。酸素・水素を高温分離する必要がないことや一段階の水の直接熱分解($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$)と比べて、反応温度を低温化できることが主な特徴である。熱力学平衡論に基づき、その熱→水素転換のエネルギー効率の理論値を熱フローから計算すると、全く熱回収をしない場合でも(水素のHHVに基づく)エネルギー転換効率は36%となる。

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$ 酸化還元系の問題点は、ウスタイト(FeO)の高温融解・凝固により、反応表面積が極端に減少することである。これについては、還元相の FeO に、高融点の MO ($\text{M} =$

Mn, Ni, Mg等)と混合酸化物化することで、融解凝固を抑えることが期待される。筆者らはNiFe₂O₄系でこの効果を実証している⁽²⁾。

上記の混合酸化物化に加えて、筆者らはフェライトを単斜晶ジルコニア (m-ZrO₂) 粒子に分散担持して高温焼結を抑えた“ジルコニア担持フェライト”を開発し、二段階反応をサイクル化することに成功した⁽²⁾。



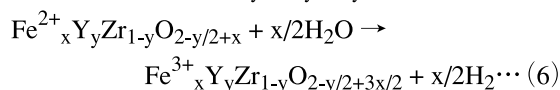
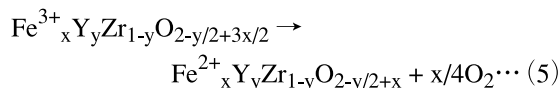
(熱還元反応：1,400℃)



(水分解反応：1,000℃)

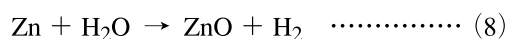
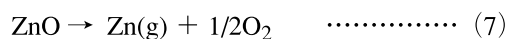
筆者らは、各種金属をドーピングしたm-ZrO₂担持フェライトについて詳細に検討した結果、NiFe₂O₄/m-ZrO₂が最も高活性・高サイクル反応性であることを報告している⁽²⁾。

また、筆者らは、m-ZrO₂の代わりに立方晶ジルコニア (イットリア立方晶安定化ジルコニア：YSZ) を担体にした場合、そのサイクル反応機構が大きく異なることを見出した⁽²⁾。



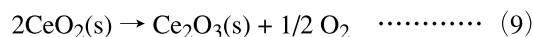
この反応系では、フェライトの鉄イオンが高融点のYSZ中に溶解したまま二段階反応が進むため、サイクル反応ではYSZ格子中におけるFe₂+⇌Fe₃+転移で二段階水熱分解反応が繰り返される。この反応系は、鉄酸化物の融解凝固のない新しい反応系として注目されている。

Zn/ZnO系を用いた亜鉛プロセスも鉄酸化物プロセスと共に、二段階水熱分解サイクルの有力候補として研究が進められている⁽²⁾。

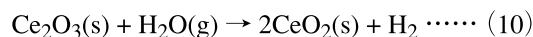


このプロセスは、エネルギー損失が大きい点や、酸化亜鉛が反応器壁に堆積する点、酸化亜鉛粉末をフィルターで回収する方法等の問題点が多く、これらが大型化の際に障害となると思われる。

最近では、セリウム酸化物による二段階サイクルが注目を集めている⁽²⁾。



(熱還元反応：2,000℃)



(水分解反応：400-600℃)

セリウム系は、フェライト系より低温水分解の反応性は高いが、熱還元に対する反応性が低いことから、1,500℃以上の高温域での使用が有効な反応媒体として研究開発が進んでいる。

②ソーラー反応器の開発

太陽集光を熱源にして、1,400℃付近の高温を得るには、集光を反応粒子に直接照射する方法が有効である。この観点から、各国で種々の石英窓型ソーラー反応器が提案・実証試験されている⁽²⁾。

[ハニカム反応デバイス型ソーラー反応器]

EUの国際プロジェクト“HYDROSOL”ではドイツ・航空宇宙センター (DLR)、スペイン・CIEMAT-PSA等が参加し、ハニカム反応デバイスをを用いたソーラー反応器を開発している (図3参照)。ハニカム構造のSiCセラミックに反応体としてフェライト粒子を担持したものを反応デバイスとして用いる。これに石英窓を通して太陽集光を直接照射し、N₂雰囲気、1,200～1,300℃加熱により熱還元ステップを行う。その後水蒸気を流通し、水熱分解ステップを行う。水熱分解ステップは、熱還元ステップより低温で進行するため、各ステップで入射エネルギー量を調節し、デバイスの温度制御を行う。2つの反応器を用いて、連続的に二段階反応を行う仕組みである。

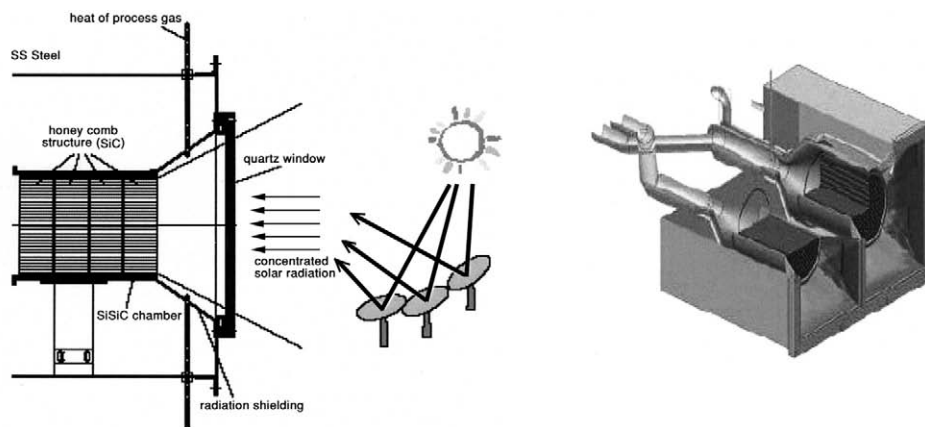


図3 HYDROSOLプロジェクト<開発中のハニカム反応デバイス型ソーラー反応器> (3)

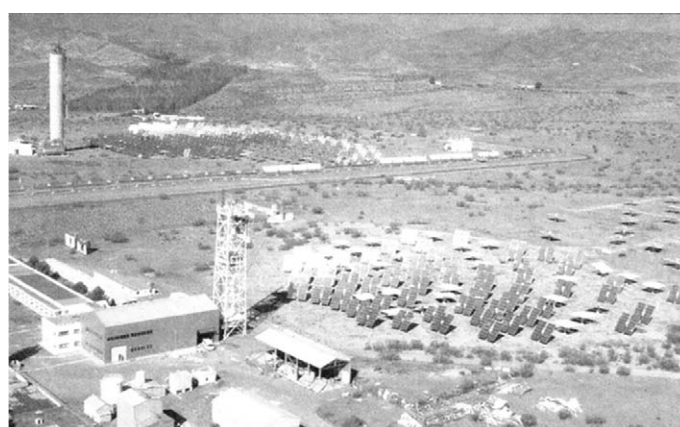


図4 HYDROSOLプロジェクト<CIEMAT-PSAでのソーラー試験> (3)

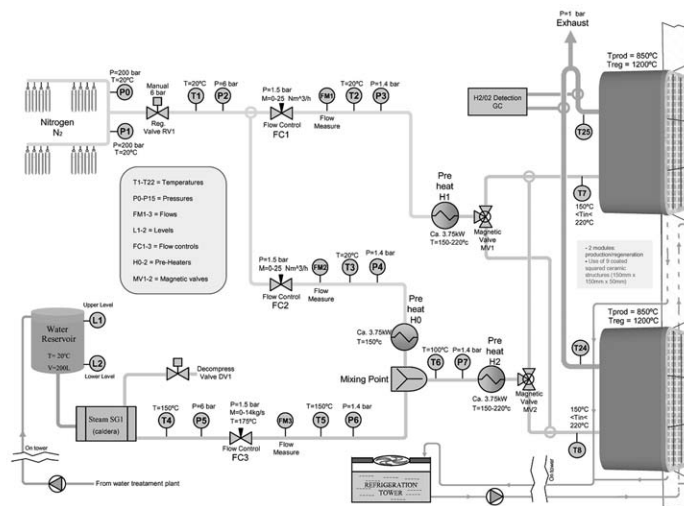


図5 HYDROSOLプロジェクト<プラント配置図> (3)

“HYDROSOL II” プロジェクトでは100kWthパイロットプラントがスペイン・アルメリアのCIEMAT-PSA (図4 参照) に建設され、プロトタイプ反応器が集中タワー型集光システム

上でソーラー試験 (図5 参照) され、現在その評価が行われている。これは現段階で最も大型の水熱分解ソーラー反応器試験である。

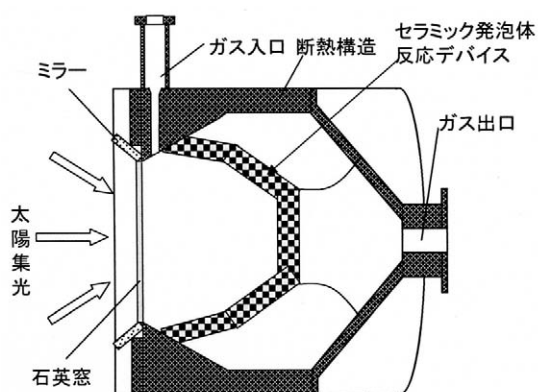
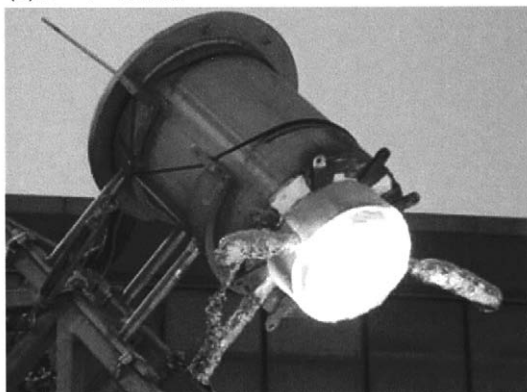


図6 新潟大学で開発中の発泡体反応デバイス型ソーラー反応器

[発泡体反応デバイス型ソーラー反応器]

新潟大学（筆者ら）では、韓国インハ大学と共同で、セラミック発泡体を反応デバイスとするソーラー反応器を開発中である（図6参照）。セラミック発泡体は、ハニカムと比べて高表面積を有するため、より多くの反応体を担持でき、さらに大きな受光面積を有することから太陽集光の高効率吸収が期待できる。

(a) ソーラー反応器



(b) 5 kW ディッシュ型太陽集光器



図7 発泡体反応デバイス型ソーラー反応器のソーラー試験

$\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{m-ZrO}_2$ をMg部分安定化ジルコニア発泡体（MPSZ）に担持した3 cm径の小型デバイスをラボスケールで試験し、二段階反応を1,100～1,500℃で20サイクル行い、繰り返し水素生成に成功している。現在、デバイス直径を8 cmとし、5 kWディッシュ集光器によるソーラー試験を韓国・インチョンで行っている（図7参照）。 $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{m-ZrO}_2/\text{MPSZ}$ 発泡体反応デバイスの太陽集光照射試験では、5サイクル連続の水素発生に成功している⁽⁴⁾。

[ロータリー型ソーラー反応器]

東工大の研究グループは、Ni-Mnフェライト等を反応体とするロータリー型ソーラー反応器を開発している⁽²⁾。この反応器は、2つの異なる反応室を持ち、一方で熱還元ステップまたもう一方で水熱分解ステップを行う。

[回転リング式ソーラー反応器]

米国でも、サンディア国立研究所（SNL）が回転リング式のソーラー反応器（Counter-Rotating-Ring-Receiver/Reactor/Recuperator（CR5））を開発している（図8参照）。フェライト-ジルコニアの三次元網目構造のリング状焼結体がセラミック円盤の外周部に取り付けられ、円盤が回転することで反応器上部の熱還元反応室と下部の水分解反応室をフェライト-ジルコニア焼結体が通過して二段階反応を行う。画期的な特徴は、多層に積み重なった円盤が互いに逆方向に回転することで、両リング間で熱交換してエネルギー効率を上げる点である。

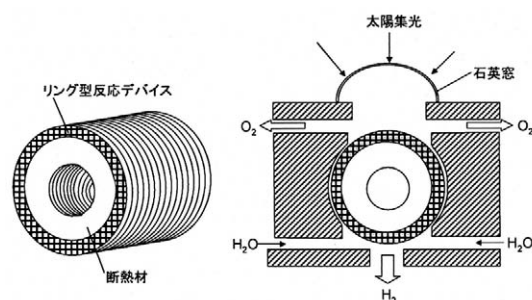


図8 回転リング式ソーラー反応器

SNLにおいて16kWhのディッシュ集光器によるソーラー試験が行われている。現在は、米エネルギー省のプロジェクト“sunshine to Petrol Project (S2P)”として、 H_2O と CO_2 を原料にCR5で H_2 と CO を合成し、メタノール等の液体燃料の生産を目指す研究開発も進行している。

[焼結体反応デバイス型ソーラー反応器]

最近の報告では、カリフォルニア工科大学の研究グループが、セリウム酸化物 (CeO_2) の円筒形焼結体を反応デバイスとする石英窓型ソーラー反応器を提案・開発した⁽⁵⁾。水蒸気および二酸化炭素の二段階反応を500サイクル以上実証し、太陽-化学エネルギー転換効率 (HHV基準) 0.4%を報告している。

[内循環流動層型ソーラー反応器]

反応デバイス型ソーラー水熱分解器が各研究機関で開発されているが、この方式の弱点は反応デバイスに搭載できる金属酸化物の量が制限され、サイクル当たりの水素製造量が限られるという点である。従って、水素を大量製造するには、サイクル数を高める必要があり、反応デバイスには非常に高速の反応速度が要求される。また、数MW以上に大型化するにはソーラー反応器をクラスター化しなければならないという難しさがある。

これに対し筆者らは、ビームダウン型集光システムとの組み合わせを想定した反応粒子の内循環流動層によるソーラー反応器を開発している (図9 参照)。ビームダウン型集光システムの利点は、地上付近で高温の太陽集熱が得られるため、反応器の大型化に有利なことである。円筒形のステンレス製反応器の上部に石英窓が設置され、石英窓を通して太陽集光が反応粒子の流動層を直接照射加熱する。反応器内部にはドラフト管が設置され、ガスを反応器下部からドラフト管内とアニュラス部に異なる流速で流通することで反応粒子を内循環流動させる。固体粒子の内循環流動により、太陽熱が流動層上部から下部に円滑に伝えられ、流動層全体がよ

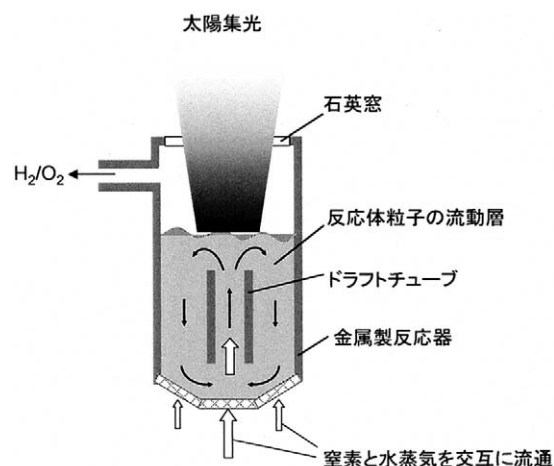
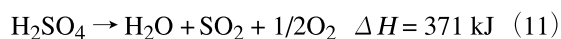


図9 新潟大学で開発中の内循環流動層型ソーラー反応器

り高温になることが期待される。 $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{m-ZrO}_2$ や非担持 NiFe_2O_4 等の反応粒子で、3～5 kWhサンシミュレータにより小型の流動層反応器で照射試験を行っている。流通ガスを窒素→水蒸気に切り替える方式で二段階反応による水素発生に成功している。著者らは、この反応器システムをさらに発展させ、内循環流動層の上部と下部の温度差を利用して二段階反応を一段階プロセス化することに最近成功し、この技術を国際特許出願している⁽⁶⁾。

(2) Sulfur-Iodine (S-I) サイクル

反応温度を1,000℃以下にするには反応を3段階以上のステップに分けることが必要である。1,000℃以下で進行する多段階水分解サイクルのほとんどは、高温ガス化炉 (HTGR) を熱源として利用するために開発されてきた。現在でも国内外で活発に研究開発が行われているSulfur Familyサイクルの中で核熱利用用として最も活発に開発が行われているのはSulfur-Iodine (S-I) サイクルである。



このサイクルは「GA プロセス」とも呼ばれる。一段目の硫酸の分解には反応器材料の

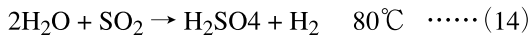
問題がある。二段目の反応はブンゼン反応と呼ばれる。三段目の反応はブンゼン反応後のHIx溶液からのHIの分離とこれのH₂とI₂への分解だが、技術的、経済的な課題が多い。

Sulfur-Iodine (S-I) サイクルは、ヨーロッパでは2004年からHYTHECプログラムで核熱利用用に国際共同研究されている。一方、米国でも核熱用として、米国エネルギー省 (DOE) が原子力水素イニシアチブ (NHI) でフランスと共同で研究開発を行っている。

さらに、SNLが硫酸分解ステップ、フランス原子力庁 (CEA) がブンゼン反応ステップ、米ゼネラル・アトミックス (GA) 社がHI分解ステップの開発をそれぞれ行っている。日本では日本原子力研究開発機構 (JAEA) が優れた研究成果を挙げている。

(3) Hybrid-sulfurサイクル

太陽熱による水分解法としては、硫酸の熱分解と電気化学プロセス

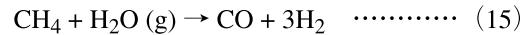


を組み合わせた“ハイブリッド”二段階サイクルが検討されている。一般に「ウエスチングハウスサイクル」と呼ばれるが、最近では「Hybrid-sulfurサイクル」と呼ばれることが多くなった。ヨーロッパではHYTHECプログラムで、米国ではDOEのNHIの一部としてSulfur-Iodine (S-I) サイクルとの抱き合わせで研究開発が行われている。上記の電気化学プ

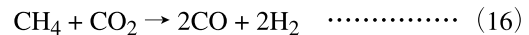
ロセスでは、電極材料の耐久性、エネルギー効率の低さ等に課題がある。

4. 天然ガス (メタン) のソーラー改質

天然ガス (メタン) のソーラー改質法における重要な化学反応は、次の2つの吸熱反応である。

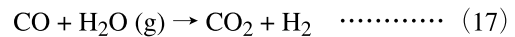


$$\Delta H^\circ_{298\text{K}} = 206 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H^\circ_{298\text{K}} = 247 \text{ kJ/mol}$$

ソーラー改質法は、吸熱反応のプロセスヒートを800～1,000℃の高温太陽集熱で供給し、原料メタンを熱量的にアップグレードして水素と一酸化炭素からなる合成ガスに転換するプロセスである⁽¹⁾。理論的に22～28%のアップグレードが可能であり、得られた合成ガスをさらに水性ガスシフト反応



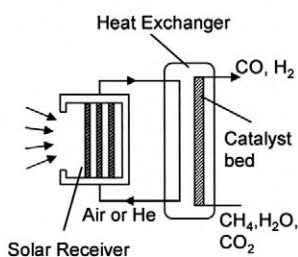
$$\Delta H^\circ_{298\text{K}} = -41 \text{ kJ/mol}$$

で全て水素に転換すると原料メタンを熱量的に19%アップグレードできる。

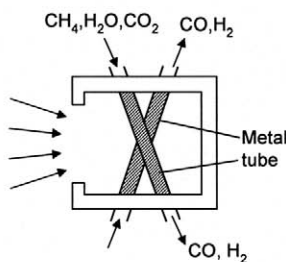
(1) 熱交換型 (間接加熱型) チューブラ改質器

これまで開発されたソーラー改質器は3つに分類される (図10参照)⁽¹⁾。

(a) 熱交換型チューブラ改質器



(b) 直接照射型チューブラ改質器



(c) 直接照射型ボルメトリック改質器

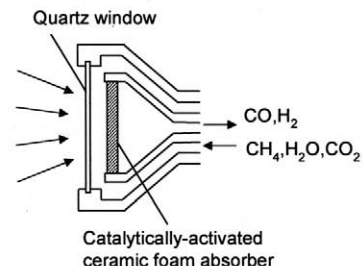


図10 天然ガス (メタン) のソーラー改質用のソーラー改質器

〔熱交換型のチューブラ改質器〕（図10a）

熱交換型のチューブラ改質器は、間接加熱型と呼ばれる方式で1991～1992年にASTERIX（Advanced Steam Reforming of Methane in Heat Exchange）プロジェクトで試験された。間接加熱型なため熱損失が大きく、本プロジェクト後、開発が停止している。

〔直接照射型のチューブラ改質器〕（図10b）

直接照射型のチューブラ改質器は、キャビティ受光器内部に、改質触媒を充填した金属製の改質反応管を配置し、太陽集光を直接照射するもので、イスラエルのワイツマン研究所（WIS）が設計した⁽¹⁾。480 kW級改質器で、反応管内部にはルテニウム触媒が使用され、ソーラー試験が行われた。最近、オーストラリア国立研究所（CSIRO）は、コイル状のチューブラ改質器を新たに設計し、ディッシュ型集光システムでソーラー試験を行っている。シングルコイルによるチューブラ改質器は、25 kW級改質器で水蒸気改質用に設計され、圧力 2 MPa、温度800℃で1999年にソーラー試験された。その後、2009年に二重コイルによるチューブラ改質器として200 kW級に大型化され、圧力 1 MPa、温度850℃で500 kW級のタワー型太陽集光器で試験されている。

現在、2 MWthのタワー型太陽集光器を5基隣接して建設し、各々の集光器に改質器を設置したマルチタワーによる実証試験が豪州クィーンズランドで計画されている（図11参照）。

一方、新潟大学（著者ら）では、顕熱・潜熱の大きい熔融炭酸塩を高温蓄熱体として導入した二重管構造の新規ソーラー改質管を考案し、その性能を検討している。日射の急激な変動下でも熔融塩蓄熱体からの潜熱・顕熱の放出により触媒の温度低下を抑え、反応を短時間維持できる仕組みである。これにより、日射の急激な変動下でも安定した改質反応が行え、改質ガスの組成や出力の変動を大幅に緩和し、改質ガスをそのまま燃料電池やシフト反応器に利用することが期待される。特に熔融塩/MgOコンポジット体が、熱伝導性と蓄熱容量に優れた高温蓄熱体であることを見出している。

〔直接照射型ボルメトリック改質器〕（図10c）

直接照射型ボルメトリック改質器は、透明な石英製の窓を持ち、これを通して太陽集光を直接、触媒を担持したセラミック発泡体レシーバに照射し、反応ガスを流通することで改質を行う。太陽集光で直接加熱するため、触媒担持の発泡体レシーバを900℃以上に急速加熱でき、雲が比較的頻繁に通過する日射条件下でも日射

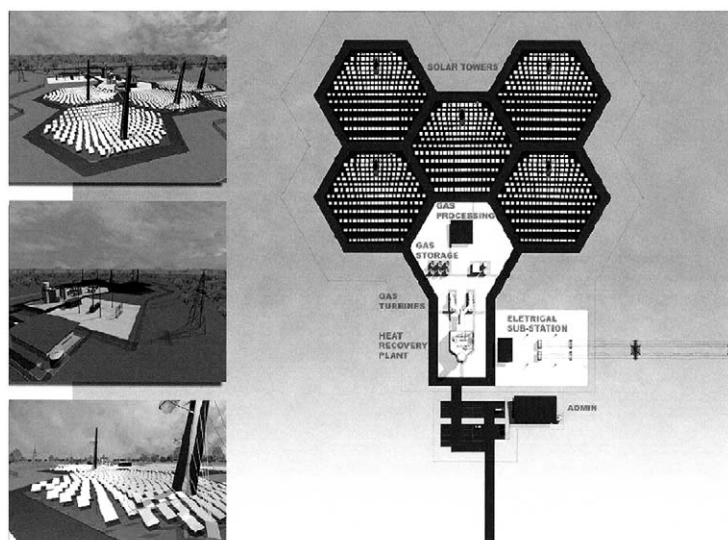


図11 豪州クィーンズランドでCSIROが計画中のマルチタワーによるソーラー改質実証試験

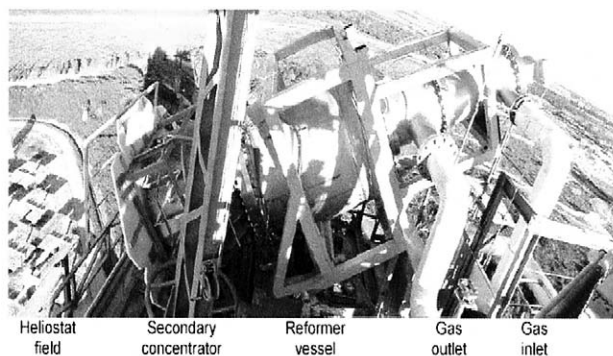
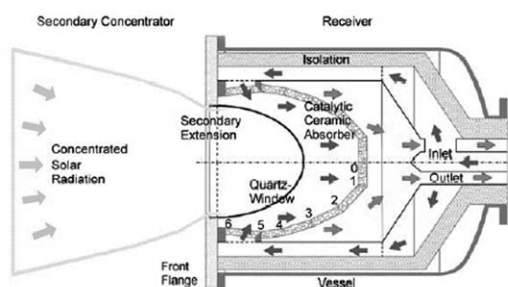


図12 SOLASYSプロジェクトでソーラー試験された400kW級ボルトメトリック改質器⁽⁷⁾

変動に迅速に追従でき、再昇温時間を短縮して運転効率を高められる利点がある。また、熱損失が少なく、他のソーラー改質器と比べて、エネルギー効率が高いことが特徴である。

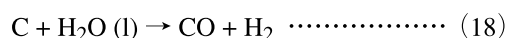
米SNLと独DLRが行ったCAESAR (Catalytically Enhanced Solar Absorption Receiver) プロジェクトでは、ロジウム触媒担持のアルミナ発泡体をレシーバとして150 kW級ボルトメトリック改質器に設置し、ディッシュ型集光器によりCO₂改質がソーラー試験された。第二世代のボルトメトリック改質器は、イスラエル・WISとドイツ・DLRがSCR (Solar Chemical Receiver-Reactor) プロジェクトでソーラー試験された。ロジウム触媒担持のアルミナ発泡体とSiC発泡体をそれぞれレシーバとして、300 kW級のボルトメトリック改質器によりCO₂改質のソーラー試験が行われた。このプロジェクトでは、ドーム形状の石英窓が導入され、セラミック発泡体レシーバもドーム状に組み立てられ、レシーバ上の太陽集光のエネルギー分布が均一になるよう工夫された。近年では、イスラエルWISとドイツDLRは、SOLASYS (Solar Assisted Fuel Driven Power System) プロジェクトとして、ターゲットを水蒸気改質に変え、400 kW級のボルトメトリック改質器をソーラー試験した⁽⁷⁾ (図12参照)。改質器前面の開口部に二次集光器 (CPC) を設置してパワーを上げ、高圧下 (~10 bar) で反応を行えるよう改良された。

これに対し新潟大学 (著者ら) では、従来のRh/ γ -Al₂O₃触媒担持SiCデバイスに替わる高

温ソーラー改質用触媒デバイスとして、安価なNi系触媒による高温安定性に優れたソーラー改質用触媒デバイスの開発を行っている。Ni-Mg-O触媒またはNi/MgO-Al₂O₃触媒をSiC発泡体に担持した新規触媒デバイス (Ni-Mg-O/SiC, Ni/MgO-Al₂O₃/SiC) であり、サンシミュレータによる光照射でメタンのCO₂改質の活性試験を行っている。従来のRh/ γ -Al₂O₃触媒担持SiCデバイスに匹敵する高活性が得られている。また、比較的低温での使用を目的に熱伝導性と成形性に優れた金属発泡体を基盤とした低温ソーラー改質用触媒デバイスの開発を進めている。Ni-Cr-Al合金発泡体に安価なRu触媒を担持した触媒デバイスであり、600~900℃での反応速度の解析を進めている。

4. 石炭・バイオマスのソーラーガス化

石炭のガス化に太陽集熱をプロセスヒートとして使用した場合、まず石炭の熱分解が生じる。この反応は1,000℃以下で進行するが、この反応の吸熱量は小さく、高温太陽熱の化学燃料転換技術として期待できない。期待できるのは、固定炭素成分のガス化プロセスであり、重要な化学反応は、下記の2つの吸熱反応である。



$$\Delta H^\circ_{298\text{K}} = 175 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H^\circ_{298\text{K}} = 172 \text{ kJ/mol}$$

ソーラーガス化法は、この反応のプロセスヒートを高温太陽集熱で供給することで、原料炭素を熱量的に44～45%アップグレードして一酸化炭素や合成ガスに転換するものである⁽¹⁾。得られた合成ガスはさらに水性ガスシフト反応で水素に転換できる。

石炭のガス化については、1,000℃以上の反応温度を達成する必要がある、これを太陽集熱だけで達成するには直接照射型のソーラーガス化反応器が有効である。最近行われた国際プロジェクトには、スペイン・CIEMATやスイス・ETH/PSI等が実施したSYNPET (Hydrogen Production by Steam Gasification of

Pet coke) プロジェクトがある。重質原油由来のペットコークの水蒸気ガス化がパイロット試験として行われた (図13参照)⁽⁸⁾。スペイン・アルメリアのCIEMAT-PSAにあるタワー型集光システムSSPS-CRS (Small Solar Power Systems - Central Receiver System) 施設に500 kW級ソーラー反応器 (図14参照) が建設され、ソーラー試験が実施された。

これに対し、新潟大学 (著者ら) は、石炭コークスによる流動層ソーラーガス化反応器を開発している。ビームダウン型集光システムと組み合わせることを想定し、ステンレス製反応器の上部に設置された透明な石英窓を

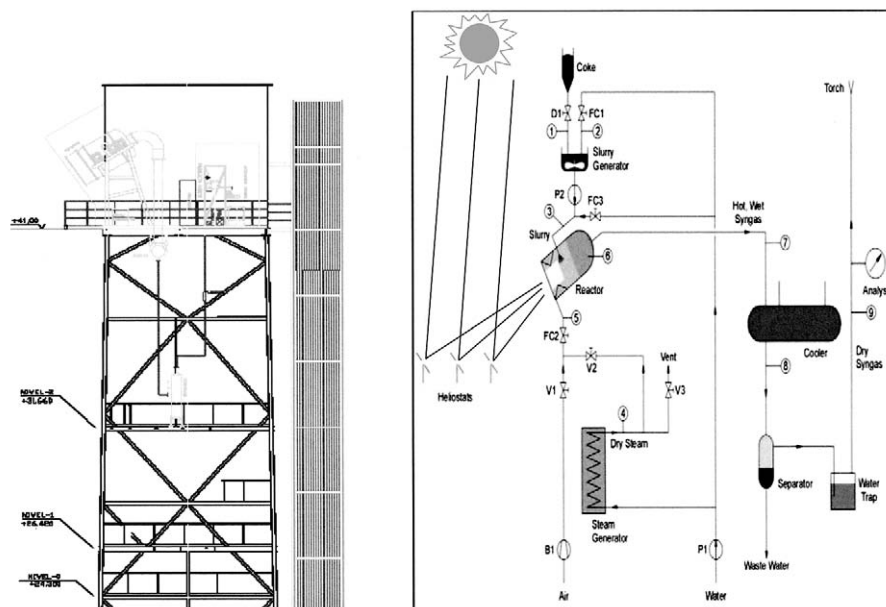


図13 スペインCIEMAT-PSAに建設されたソーラーガス化プラントのレイアウト

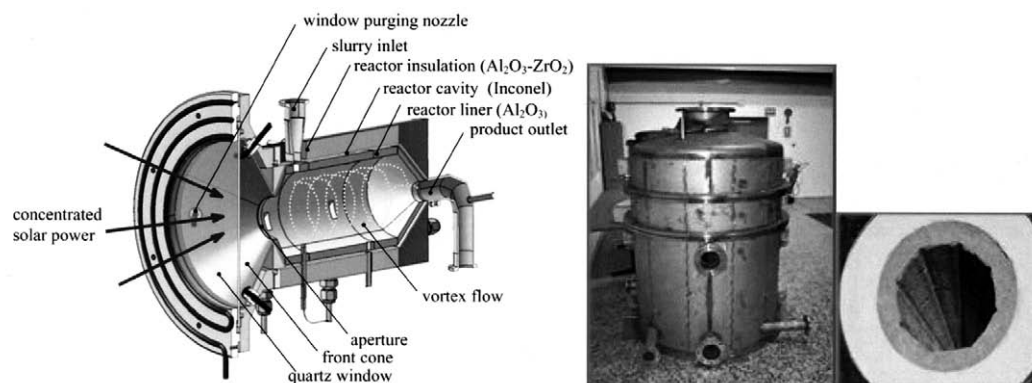


図14 SYNPETプロジェクトでソーラー試験された500kW級ソーラーガス化反応器

通して太陽集光を石炭コークス粒子の流動層に直接照射するガス化反応器である。3 kWth サンシミュレータにより石炭コークス内循環流動層のCO₂（または水蒸気）ガス化反応試験を行っている。流動層ガス化実験では、ドラフトチューブを設けない通常の流動層と比べて、内循環流動層は集光照射により発生した熱が流動層上部から下部に円滑に伝えられ、流動層内をより高温かつ均一温度になることを実証している。

5. ソーラー水素製造の経済性評価

(1) CO₂フリー水素製造コストの比較

フランス・PROMES-CNRSによると、原子力発電による電力で水の電解を行った場合、水素製造コストを3～5ドル/kgと試算している⁽⁹⁾。一方、原子力発電に代わり太陽熱発電による電力で水の電解を行った場合、フランス・PROMES-CNRSの試算によると、水素製造コストは8.5～10ドル/kg⁽⁹⁾、IEA-SolarPACESの試算（太陽熱電力8セント/kWhと仮定）では、6～8ドル/kgと報告している⁽¹⁰⁾。また、太陽電池により発電した電力で水の電解を行った場合、12ドル/kg以上でIEA-SolarPACESは試算している⁽¹⁰⁾。

高温太陽熱を熱源とした水熱分解サイクルによる水素製造のコスト試算については、近年、報告例が増えてきた。2008年に独DLRと仏PROMES-CNRSがそれぞれ行なったコスト試算を紹介する。DLRが開発しているHYDROSOLプロジェクトのハニカムデバイス反応器のシステムと、同じくDLRがヨーロッパHYTHECプログラムで検討しているHybrid-sulfurサイクルをモデルとした試算である。50MWthの集中タワー型集光システムを用いた場合について計算している。水素製造コストとしてHybrid-sulfurサイクルに対しては5ユーロ/kg⁽¹¹⁾、鉄酸化物サイクルに対しては3.4～6ユーロ/kg⁽¹²⁾⁽¹³⁾が報告されている。フランス・PROMES-CNRSの試算では、55MWthの集

中タワー型集光システムを用いた場合について計算している。亜鉛サイクルの水素製造コストは8ドル/kg⁽⁹⁾が報告されている。鉄酸化物サイクルのコスト試算には大きな幅があるが、これは反応デバイスを含む酸化還元システムのコストが全体に与えるインパクトが大きく、この試算の幅が大きいからである。

(2) 天然ガスからの水素製造コスト比較

フランス・PROMES-CNRSによると、天然ガスからの水素製造コストは、天然ガス価格を4ドル/GJと仮定した場合、1ドル/kgと報告されている⁽⁹⁾。このルートによる水素製造コストは、天然ガス価格に大きく依存し、今後増加が予想される。

天然ガスのソーラー改質による水素製造について、ドイツ・DLRによるコスト試算を紹介する⁽⁷⁾。SOLASYSプロジェクトで行われた400 kW級ボルメトリック改質器によるソーラー試験と、通常の水蒸気改質による水素製造コストを計算している。通常の水蒸気改質による水素製造コストは0.048ユーロ/kWh、一方ソーラー改質の場合は、0.058ユーロ/kWhと試算している。ソーラー改質では約20%程度高くなるが、天然ガス価格の増加により十分競争できると思われる。

参考文献

- (1) T. Kodama, "High-temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels," Prog. Energy Combust. Sci. 29, (2003), 567
- (2) T. Kodama, N. Gokon, "Thermochemical cycles for high-temperature solar hydrogen production," Chem. Rev. 107, (2007), 4048
- (3) A. Vidal, 日本エネルギー学会誌, Volume 90, Number 4, April 2011
- (4) T. Kodama, T. Seo, N. Gokon, J. Lee, S. Oh, K. Sakai, N. Imaizumi, "5kWth-solar demonstration of a ferrite foam device reactor for thermochemical two-step water-splitting," SolarPACES2010, Perpignan, France, September 21-25 2010
- (5) W. C. Chueh, C. Falter, M. Abbott, D. Scipio, P. Furler, S. M. Haile, A. Steinfeld, "High-Flux Solar-driven thermochemical dissociation of CO₂ and H₂O using nonstoichiometric ceria," Science, 330 (2010), 1797-1801.
- (6) 国際特許出願：PCT/JP2010/071485「水熱分解による水

素製造法及び水素製造装置」，発明者：児玉竜也・郷右近展之

- (7) Moler, S., et al. Proc. of the 1st European Hydrogen Energy Conference, 2-5 September 2003, Grenoble, France
- (8) International Energy Agency (IEA), Solar Power and Chemical Energy systems, SolarPACES Annual Report 2009, Edited by C. Richter, (2010) 4.1-4.14
- (9) P. Charvin, S. Abanades, F. Lemort, G. Flamant, “Analysis of solar chemical process for hydrogen production from water splitting thermochemical cycles,” *Enerngy Conversion and Management*, 49 (2008), 1547-1556.
- (10) IEA-SolarPACES Implementing Agreement of the International Energy Agency, “Solar Fuels from Concentrated Sunlight”
- (11) M. Schmitz, N. Monnerie, D. Graf, D. Quantius, M. Roeb, C. Sattler, C. Corgnale, C. Salvini, G. Cerri, C. Mansilla, “Process design for solar thermo-chemical hydrogen production and its economic evaluation,” *SolarPACES 2008*, LasVegas, Nevada, USA, March 4-7 2008.
- (12) M. Roeb, et al. “Solar hydrogen production by a two-step cycle based on mixed iron oxides,” *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 128 (2006), 125-133.
- (13) D. Graf, N. Monnerie, M. Roeb, M. Schmitz and C. Sattler, “Economic comparison of solar hydrogen generation by means of thermochemical cycles and electrolysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, 33 (2008), 4511.

【寄稿】

気候工学（ジオエンジニアリング）の最近の動向

杉山 昌広（財電力中央研究所 社会経済研究所
主任研究員）



1. 気候工学（ジオエンジニアリング）とは

（1）欧米で関心高まる気候工学

「ジオエンジニアリング」（geoengineering）は、地球温暖化対策として人工的に地球を冷却する手法である。直訳だと「地球工学」となるが、気候を改変するので「気候工学」と呼ぶこととする。これが今、欧米を中心に関心を集めている。

「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）も、次期報告書で気候工学をテーマとして取り扱うことが決まり、2011年6月には3つの作業部会の合同で専門家会合を開く予定である⁽¹⁾。

このように公の場で気候工学が議論されるようになってきた理由は、地球温暖化対策が、危険な気候変動のリスクを避けるのに手遅れになる可能性が出てきたからである。気温上昇を2℃以内に抑えるという目標がよく議論されている。しかし、2009年の国連気候変動コペンハーゲン会議（COP15）、2010年のカンクン会議（COP16）での交渉を見ると、目標達成に十分な温室効果ガスを削減することは困難を極められると思われる。こうした状況から、一部の科学者は「2℃という目標が達成できない場合、4℃温まった場合の対応も真剣に検討すべきである」と言い始めている⁽²⁾⁽³⁾。

（2）気候工学への期待と問題点

気温が4℃上がった世界では、気候が大き

く変わり地球温暖化が「危険」な水準に近づく可能性がある。こうした危機的な状況下でも望みがあるのが、気候工学である。

有名な方法の1つが、成層圏に人為的にエアロゾル（浮遊する粒子状物質）を散布して太陽光を反射する「成層圏エアロゾル注入」である。二酸化炭素（CO₂）削減と違い速効性があり、温度上昇を抑えるどころか温度を下げることにすら可能である。この最終手段に効果があることは自然が示している。火山が大規模に爆発して上空大気（成層圏）に粒子状物質を噴き上げると、地球は冷却するのである。1991年のピナツポ火山の噴火後、地球の平均気温は約0.5℃下がった。

また、大気から直接CO₂を除去する「CO₂直接空気回収」もある。CO₂は一度大気に放出されると長期に渡って残る点が、大気汚染と大きく異なる点である。しかし、CO₂直接空気回収技術ができれば大気中のCO₂濃度を下げ、危険な地球温暖化を避けられるかも知れない。

気候工学は有望な温暖化対策技術であるが、万能ではないし、また、使い方を誤ってもいけない。地球全体の温暖化を救う技術かも知れないが、太陽を反射する技術には地域ごとの雨の降り方が変わるなど問題点もある。大まかな効果については分かっているが研究の日が浅いため未知の点も大変多く、副作用の検討もこれから必要だ。

さらに、科学技術的な検討以外に、社会的な課題も大きい。温暖化対策だとしても、地

球全体の気候を改変していいか、倫理的な疑問を抱く人もいるだろう。国際政治の問題につながるかも知れない。

本稿では、わが国ではまだ一般的に知られていない気候工学について概観し、最近の研究動向について紹介する。より詳しい解説については巻末参考文献（35）を見ていただきたい。

2. 最近の動向

気候工学の考え自体は古い。国際応用システム分析研究所（IIASA）マルケッティ博士の1977年の論文が“geoengineering”という言葉をもとに用いられたとされる⁽⁴⁾。「成層圏エアロゾル注入」は70年代に既に気候学者ブディコなどによって検討された⁽⁵⁾。しかし、温暖化対

策として検討されるようになったのは最近である。論文は書かれていたが、緩和策から目をそらすことになるのではないかという懸念が根強く、温暖化対策の表舞台に出ることはなかった。

状況が大きく変わったのは、2006年のクルツェン論文以降である⁽⁶⁾。フロンによるオゾン層破壊のメカニズムに関する理解への貢献で1995年にノーベル化学賞を受賞したクルツェンが、気候工学も検討が必要という論文を書いたことで議論が巻き起こり、研究が増えていった。

表1に2006以降の動向について主なものをまとめた。気候工学の科学的・技術的な議論が進むと同時に、国際枠組みや市民との対話を考える会議も増えてきたことが見て取れる。

表1 2006年以降の動きのまとめ

2006	ノーベル化学賞受賞者Crutzen(2006)（蘭）はClimatic Change誌に、Wigley(2006)（米国）はScience誌に気候工学の論文を載せる。以後研究が盛んになる。
2007	米国学士院気候工学ワークショップ（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ） 米ベンチャー企業ブランクトスの海洋肥沃化鉄散布実験が失敗
2008	英国王立協会紀要が気候工学の特集号 外交評議会ジオエンジニアリング・ワークショップ（米国ワシントンDC） ロンドン条約・議定書、海洋肥沃化について、研究を除いて禁止する決定（法的拘束力はなし）
2009	国際リスク・ガバナンス機構専門家ワークショップ（ポルトガル、リスボン） 米気象学会、地球物理学連合が気候工学に関する立場を表明。慎重ながらも研究を支持。 英国王立協会が初の気候工学の総合的な報告書発表（The Royal Society 2009） 科学者グループが成層圏エアロゾル注入の実験を含む研究計画案を発表（Blackstock et al. 2009）
2010	科学 国際科学誌Science誌、Nature誌で気候工学の是非について論争 英国王立協会による科学会議（ロンドン）、ユネスコ専門家会合（パリ） 第1回気候工学サマー・ワークショップ（ドイツ） 政府・国際機関関連報告書 英国下院委員会、米国下院委員会、米国議会調査局、米国会計検査院、世界銀行（「世界開発報告」の1ページで気候工学に触れる） ガバナンス・市民対話・国際枠組 アシロマ会議（米国カリフォルニア州）、英科学機関の国家環境研究委員会の市民対話イベント ロンドン条約・議定書の海洋肥沃化実験の評価枠組 名古屋での生物多様性条約COP10における気候工学に関する決定
2011	科学 地球圏－生物圏国際協同研究計画（IGBP）による気候工学の生態系影響に関するワークショップ（1月、米国カリフォルニア州） 気候工学モデル相互比較実験プロジェクト（GeoMIP）ワークショップ（2月、米国ニュージャージー州） IPCC専門家会合（6月、ペルー） 第2回気候工学サマー・ワークショップ ガバナンス・市民対話 太陽放射管理ガバナンス・イニシアティブ（SRMGI）の会議（3月、英国）

3. さまざまな気候工学

(1) 概要

英国王立協会は、気候工学を「人為的な気候変動の対策として行う意図的な惑星環境の大規模改変」(deliberate large-scale manipulation of the planetary environment to counteract anthropogenic climate change)と定義する⁽⁷⁾。気候工学は、緩和策や適応策とは異なる第3の地球温暖化対策と考えられ⁽⁸⁾、英語では“geoengineering”がよく用いられるが、“climate geoengineering”や“climate engineering”という用語などもある*。

気候工学として実に様々なアイデアが提案されている。主に太陽光を反射して地球を冷やす

太陽放射管理SRM (solar radiation management)と、CO₂を大気から回収する二酸化炭素除去CDR (carbon dioxide removal)に大別される。図1に様々なアイデアを示した。

以下、中でもよく関心が寄せられている3つの技術、「成層圏エアロゾル注入」「鉄散布による海洋肥沃化」「CO₂直接空気回収」について解説する。

(2) 成層圏エアロゾル注入

全球平均気温を低下させるために成層圏にエアロゾルを注入するという考えは、70年代から提案されていた。火山噴火後の温度低下と同様の原理である。大規模な火山噴火があると、硫黄ガスが成層圏に吹き上げられる。

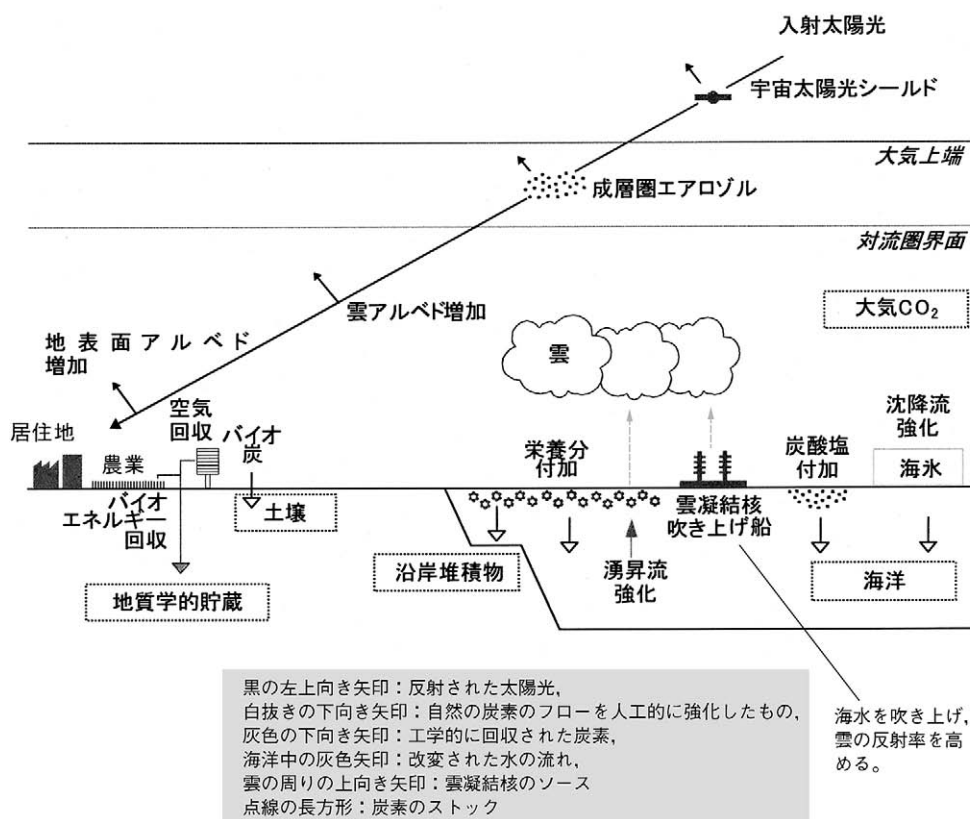


図1 気候工学の様々な手法⁽⁹⁾

* ジオエンジニアリングとは、ジオが地球、エンジニアリングが工学であるので直訳すれば地球工学になる。例えば、IPCC第4次評価報告書の経済産業省訳でも地球工学という言葉が使われている。しかし、地球工学は一般的に資源や土木の関連分野として認識されている。京都大学工学部には地球工学科があり、著者の勤め先である電力中央研究所にも地球工学研究所がある。もちろん、京都大学の地球工学科も地球工学研究所も、「ジオエンジニアリング」を研究しているわけではない。英語圏でも同様の理由でジオエンジニアリングという用語は紛らわしいという意見もあるので、本稿では気候工学という言葉を用いる。

ガスの化学反応により太陽光を反射する硫酸エアロゾルが形成され、短期的に全球平均気温が下がることはよく知られている⁽¹⁰⁾。最近では1991年、フィリピンのピナツボ火山が噴火して、ピーク時には全球平均気温が0.5℃下降している。

注入物質としては硫酸エアロゾルやダスト、人工エアロゾルが考えられている。成層圏エアロゾル注入の効果は観測に加えて気候モデルを使ったシミュレーション研究で確かめられているが、同時に問題点も明らかになりつつある。地球全体の降水量が減少し、また降水の地理的分布も変化する恐れがある。成層圏に物質を注入するため、成層圏のオゾン層の破壊も進んでしまうことなども分かってきた。

この手法の最も驚くべき点はコストの低さである。全米科学アカデミーの古い報告書によれば、1ドル/t-CO₂を切るコストで地球を冷却できる⁽¹¹⁾。欧州の排出権市場での価格が15ユーロ/t-CO₂程度であること、今後温暖化対策のコストが上昇することを考えると非常に低い。最近のコスト試算でもこの結果はおおむね覆されていない⁽¹²⁾。

そもそも成層圏に飛行機などを飛ばしてエアロゾルを散布するのに最先端技術は必要ない。航空機を作る能力のある新興国でも十分に可能である。コストが低いため、温暖化の被害に危機感を感じたある国が単独で行うことも可能である。ただし、一国が世界の気候を変えるという国際問題になりかねない側面はある⁽¹³⁾。

このように成層圏エアロゾル注入は、社会的な課題が大きいため、後述のように専門家は国際管理体制についての議論を始めている。

(3) 鉄散布による海洋肥沃化

多くの生物を育む海は、毎年大量のCO₂を吸収している。陸上での農業のように「肥料」を散布して海洋の光合成を促進し、海洋のCO₂吸収量を増進できれば、大気中のCO₂濃度

を低減できる可能性がある。特に注目されているのは海洋鉄散布である。鉄は海洋の微量栄養素である。光合成を行うための鉄が不足している南極海や北太平洋に散布すれば、光合成が促進できると考えられている⁽¹⁴⁾。この考えは、氷河期は強い風によって、陸域から海洋への鉄を含むダストの流入量が増え、海の光合成が盛んであったためCO₂濃度が低下していたとする、マーチンの仮説に基づいている⁽¹⁵⁾。

海洋での鉄散布実験は多数行われており、北太平洋亜寒帯域鉄散布実験（SEEDS：Subarctic Pacific Iron Experiment for Ecosystem Dynamic Study）のIとIIでは日本の研究者が中心となった。鉄を散布した地域の光合成が促進されることは観測されているが、植物プランクトンに吸収された炭素が分解されることなく海底まで沈降するのか、局所的ではなく地球全体で正味の炭素吸収量が増えるのかなど、科学的に未解明な点も多い。実際に大気中のCO₂濃度を下げるために大量の鉄を散布すると、生態系の攪乱につながる恐れもある。

海洋廃棄物を規制するロンドン条約・議定書では、法的拘束力はないが海洋肥沃化を禁止する議決が2008年に採択されている。ただし、環境安全評価など適切な手続きをとった研究は除外されており、アセスメントの枠組みも2010年にまとまっている。

(4) CO₂直接空気回収

石炭発電所などの排ガスからCO₂を回収する炭素回収貯留（CCS: Carbon Capture and Storage）は重要な温暖化対策の1つと認識されている。これに似ているが、排ガスではなく大気からCO₂を回収する、CO₂直接空気回収（Direct Air Capture）も提案されている⁽¹⁶⁾。

CO₂直接空気回収は、潜水艦やスペースシャトルなど閉鎖空間では実用化されている。現在開発されている技術には、水酸化ナトリウム溶液で吸収する手法や、特異的にCO₂と反応するイオン交換樹脂を用いたものなどがある。

CO₂直接空気回収の場合、発電所に併設するCCSと異なり立地場所がより自由に選べるため、建設費用が少ない場所や貯留場所に近い場所を選ぶことができるというメリットもある。

しかし、非常に薄い濃度からCO₂を回収するため、コストが高額になるのではという懸念がある。発電所の排ガスに含まれるCO₂濃度が10%のオーダーであるのに対し、大気中のCO₂濃度は0.04%程度である。そのような懸念に対し、分離のためのエネルギーは濃度に比例するのではなく濃度の対数に比例するため、そこまでコストはかからないという意見もある。このため現時点で知られているコスト見積りは、27～640ドル以上/t-CO₂と大きな幅がある。

(5) 特徴のまとめ

表2に気候工学の種別ごとの特徴をまとめた。副作用や問題点を除き実施のコストに限れば、太陽放射管理は一般的にコストが低く、

全球平均気温を低減することができ、速効性もある。そのかわり降水パターンの変化など、問題点も認識されている。当然ながら海洋酸性化の解決にはつながらない。一方、CO₂除去は温暖化の原因を大気から取り除くことができるが、速効性がなく時間がかかるとされている。また、コストについては、緩和策と同等かそれ以上になる傾向が見られる。

4. 気候工学の研究：現状と今後

(1) 欧米の気候工学関連プロジェクト

今までは研究者が個人ベースで行ってきたが、政府が誘導する研究プロジェクトが増えつつある。また、気候モデル研究の国際プロジェクトも立ち上がりつつある。

表3に米国の、表4に欧州の気候工学関連の主な研究プロジェクトを示した。欧米で研究が徐々に始まりつつあることが分かる。

表2 気候工学の特徴のまとめ

種類	CO ₂ 除去 (CDR: Carbon Dioxide Removal) CO ₂ を大気から取り除く	太陽放射管理 (SRM: Solar Radiation Management) 太陽入射光を減少させ、温度上昇を抑える。
利点	・ 地球温暖化の原因を直接除去する。 ・ 温暖化のみならず海洋酸性化を抑えることができる*。	・ 概ね安価である。 ・ 温度上昇を抑えるのに速効性がある。
欠点	・ 温室効果ガス削減(緩和)策と同等かそれ以上に費用がかかる。 ・ 効果が出るまで数十年要し速効性はない。	・ 海洋酸性化の解決にはつながらず、また降水への大きな影響という副作用もある。 ・ CO ₂ の滞留時間(数百年～数千年間)継続する必要がある、停止すると急激な気温上昇が生じる可能性がある。

* 海洋鉄散布は海洋表層の酸性化を抑えるが、その代わりに深海に貯留された炭素が溶融し、酸性化が進むという指摘もある(Cao and Caldeira 2010)。

表3 アメリカにおける気候工学の研究プロジェクト^{(17)～(20)}

担当省庁	研究内容	種類	金額・研究の期間
商務省	成層圏エアロゾル注入について太陽エネルギーの発電所の出力への影響の調査	内部研究 (海洋大気庁 NOAA)	45,000ドル ('08-'09)
	様々な太陽放射管理 (SRM) の手法について温度以外の気候システムへの影響の調査	内部研究 (海洋大気庁 NOAA)	25,000ドル ('08-'09)
エネルギー省 (DOE)	アメリカ物理学会が進めているCO ₂ 直接空気回収の技術の現状についての調査への資金供与	外部委託	50,000ドル ('09-'10)
	大規模なCO ₂ 直接空気回収システムの分析とコスト見積もり	内部研究 (ローレンス・リバモア国立研究所)	243,000ドル ('09)
	気候工学 (SRMとCDRの複数の手法) を含む温暖化対策の問題点を調べる調査	内部研究 (サンディア国立研究所)	170,000ドル ('09-'10)
	雲の反射率増加と成層圏エアロゾル注入についてのモデル研究	外部委託 (カナダ・カルガリー大学を通じてパシフィック・ノースウェスト国立研究所)	266,000ドル ('09-'10)
国立科学財団 (NSF)	鉄散布による海洋肥沃化の環境への影響の研究 (動物性プランクトンにおける鉄と炭素の比率の影響を調べる)	外部委託 (ニューヨーク大学 ストローニブルック校)	473,904ドル ('00-'13)
	成層圏エアロゾル注入と宇宙太陽光シールドについてのモデル研究。哲学者も参加し、社会科学的な側面も研究。	外部委託 (ラトガーズ大学)	622,275ドル ('08-'11)
	太陽放射管理に関する倫理的側面を検討	外部委託 (モンタナ大学)	208,551ドル ('10-'11)

表4 欧州の主なジオエンジニアリング関連研究プロジェクト^{(21)~(25)}

国	プロジェクト名・担当機関	研究内容
イギリス	SPICE (ブリストル大学, オックスフォード大学, ケンブリッジ大学, 英気象庁など)	成層圏エアロゾル注入について評価する。2010年-2014年。約160万ポンド。市民との対話もプロジェクトの一部に含まれる。
	IAGP (ブリストル大学, オックスフォード大学, イースト・アングリア大学, 英気象庁ほか)	気候工学の様々な手法の総合評価を行う。2010年-2014年。約170万ポンド。市民との対話もプロジェクトの一部に含まれる。
	オックスフォード気候工学プログラム (オックスフォード大学)	オックスフォード大学マーティン・スクールにおける分野横断型研究プロジェクト。2011年3月時点、学内で6万ポンドの研究計画を募集中。
ドイツ・フランス・ノルウェー	IMPLICC (マックス・プランク気象研究所他)	2007年-2013年。100万ユーロと推測される。太陽放射管理についてモデル研究。経済的側面についても検討する。予算は各国政府ではなくヨーロッパ科学財団の第7次フレームワーク・プログラムから拠出されている。
ドイツ	気候工学の世界でのガバナンス (ハイデルブルグ大学)	ハイデルブルグ大学高等研究所 (Marsilius Kolleg) のプロジェクト。気候工学の統治について自然科学、法律や経済、哲学など様々な観点から検討する。60万ユーロで3年間(2009年にプロポーザル受託)。

2010年の米国会計監査院の報告書によれば、米国には気候工学に直接関連する研究プロジェクトは9つある。しかし、気候工学を研究の主題とした競争的研究資金はまだ提供されていない。言い換えれば、政府内部の研究プロジェクト、または個々人の科学者がアイデアを出した研究が進められている**。

一方、英国の2つのプロジェクトは、研究資金を出す機関が気候工学研究のために研究アイデアを募ったものである。また、ドイツ・フランス・ノルウェーの研究はヨーロッパ科学財団 (ESF: European Science Foundation) が提供している⁽²⁶⁾。ヨーロッパでの第7期フレームワーク・プログラムにおいて、2007年に気候工学を含む「新規の温暖化対策」について研究プロジェクトを募集し、ドイツのマックス・プランク研究所を含む3カ国6機関が応募して採択された。

(2) 内容面での特徴

研究内容としては、太陽放射管理や成層圏エアロゾル注入の気候モデル研究、倫理や社会的な評価の研究が多い。最も有望とされている成層圏エアロゾルに研究資金が割かれているのは納得がいく。アメリカの研究プロジェクトは広

範囲の手法を扱っている傾向も見取れる。

また、社会における技術の評価など、社会的な側面についても早くから取り組む姿勢が見取れる。英国の気候工学を総合評価するプロジェクトIAGP (Integrated Assessment of Geoengineering Proposals) は市民対話に重きを置き、モンタナ大学の研究プロジェクトは気候工学の倫理を主題としている。

(3) 国際研究プロジェクト

国際研究プロジェクトも始まりつつある。気候モデルの研究では、米国ラトガーズ大学ロボック教授たちの主導で、気候工学相互比較プロジェクトGeoMIP (Geoengineering Model Intercomparison Project)⁽²⁷⁾が動き出している。気候モデルは各国の研究機関によって偏りがあつたりするため、複数モデルの結果を比較検討することが重要であり、気候工学についても複数モデルの結果を比較する。GeoMIPでは、太陽放射管理、特に成層圏エアロゾル注入について、効果や問題点を検討することになっている。

(4) 資金提供者

気候工学研究に資金提供しているのは政府

** 米国では、現時点では直接気候工学を対象にした研究プロジェクトはまだ始まっていない (‘There is virtually no federal funding explicitly dedicated to “climate engineering” or “geoengineering” research.’ US House of Representatives Committee on Science and Technology, 2010, p. 8)。一方で、多くの既存の温暖化研究は気候工学に関連があるのも事実である (US GAO 2010)。

機関に限られない。数多くのベンチャー企業がCO₂排出権の販売を狙って海洋鉄散布を試みた。ベンチャー企業クライモス社は、現在は商業的な活動を行っていないが、科学的な活動を続けている。直接空気回収については、ベンチャー企業がいくつか立ち上げられている。気候工学研究の第一人者であるカナダのカルガリー大学、デビッド・キース教授も、水酸化ナトリウム溶液を用いた直接回収システムを開発するためにカーボン・エンジニアリング社を立ち上げた。

また、ビル・ゲイツ氏も気候工学のために研究資金を提供している。ビル・アンド・メリンダ・ゲイツ財団の活動とは別に、2007年から最近までの提供額は、約460万ドルに達した。デビッド・キース教授と米国カーネギー研究所のケン・カルデイラ博士が資金拠出の審査や運用を行っており、気候工学の研究に積極的に取り組んでいる。今まで13の研究プロジェクトが選ばれ、キース博士とカルデイラ博士の研究も対象になっている。政策的な取り組みもカバーしており、英国王立協会の進める太陽放射管理ガバナンス・イニシアチブ (SRMGI: Solar Radiation Governance Initiative) の運営にも資金が出されている⁽²⁸⁾。

(5) 日本における気候工学研究

日本における気候工学研究はどうであろうか？ 日本の研究チームが中心となった海洋鉄散布実験はSEEDS-I, SEEDS-IIと2回行われており、鉄散布の研究については欧米と違いはさほどないだろう⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾。しかし、太陽放射管理になると、研究は限られる。(財)地球環境産業技術研究機構 (RITE) の「地球再生計画」⁽³¹⁾はモデル計算も行い意欲的に様々な気候工学手法を検討したが、英文で発表されていないため欧米ではその成果が殆ど知られていないだろう。また、日本では2006以降欧米で活発化した議論を受けて行われた研究は限られる。

日本でも気候工学に関心を寄せている研究

者はいるが⁽³²⁾⁽³³⁾、本稿執筆時点では欧米と違い体系的な研究プログラムは立ち上っていない。

5. 気候工学に社会でどう向き合うか

温暖化対策とはいえ、気候工学は自然に直接介入するため、例えば、以下のような課題が考えられる。

- (1) 気候工学の考えが広まると緩和策 (CO₂ 排出削減など) への動機が薄れ、温暖化対策が後退する恐れがある (「モラル・ハザード」)。
- (2) 地域によって異なるはずである「最適な気候」を誰がどのようにして決めるのか不明である。地球温暖化問題の被害を受けるのは主に発展途上国である。地球の気候を制御する権利が先進国を中心とした一部の国に集中すれば、副作用のために発展途上国の被害の影響緩和に直結しない恐れがある。
- (3) 地球温暖化問題の対策であるとはいえ神のように地球環境の基礎である気候システムを意図的に改変することは倫理的に許されない。
- (4) 一部の技術 (特に太陽放射管理) は非常にコストが安いと、一部の国家や主体が安易に実施してしまう恐れがある (Victor et al. 2009)。

こうした問題を検討するために、専門家は気候工学の「ガバナンス」の議論を始めている。社会的な課題も大きい技術を、どのように社会全体として民主的に法制度や研究原則などの管理体制を整えていくか、議論しているのである。長期的には「実施」の議論も大きくなるが、現在は「研究」についての議論が中心である。

表1にあるようにさまざまな報告書が出され、議論の場が設けられているが、こうした会議でアシロマ会議は非常に重要であった。私も日本からただ1人、会議に参加した。

2010年3月に米国カリフォルニア州で開かれた「アシロマ会議」の名前は、カリフォルニア州モンレー近郊の会議場の名前に由来する。同じ場所で1975年に遺伝子組換え実験に関する会議が開かれた。この会議では当時非常に論争が多かった遺伝子組換え実験について、

研究者自らが研究の規制やガイドラインについて検討したもので、その後の生物学実験に大きな影響を与えた。2010年のアシロマ会議は、遺伝子組換のアシロマ会議になぞらえて、研究者のみならず政策担当者や社会学者、メディアや非政府組織（NGO）が集まり気候工学について議論した。

アシロマ会議は当初、実験を含む研究のガイドラインを検討する予定だったが、議論は非常に紛糾した。「危険な気候変動について真剣に研究を推進すべき」という研究者がいる一方で、副作用を恐れて「とにかく気候モデルの研究で副作用について検討するのが最初だ」という主張も聞かれた。朝8時から夜9時まで3日間議論した後、最終日の午前中に、合意に至らないまま会議は散会となった。

アシロマ会議の報告書では、オックスフォード大学の研究者が集まって作った「オックスフォード原則」（Oxford Principles）とほぼ同じ内容の気候工学研究の原則が提示された。以下が5つの原則である（訳は著者による仮訳）⁽³⁴⁾。

- (1) Promoting collective benefit
気候工学研究の目的は、地球温暖化社会・環境への影響を抑制し、人類の共通な利益に資することである。
- (2) Establishing responsibility and liability
研究の監督機構を作り、責任を明確化する。
- (3) Open and cooperative research
データなどを公開し、国際協力のもとに研究を進める
- (4) Iterative evaluation and assessment
独立した主体による効果・副作用の評価を繰り返し行う。
- (5) Public involvement and consent
市民が研究の方向性付けや監督、影響評価に関わる。

この原則は上述した問題点を直接解決するものではない。むしろ、今後ガバナンスの枠組みを形成していくための原則として理解すべきであろう。

IPCCの第5次評価報告書でもレビューの対

象となった気候工学は、今後自然科学・工学的な研究も進むと同時に、社会的な側面の評価も進むだろう。実際、本稿執筆と同時期にイギリスでは太陽放射管理ガバナンス・イニシアティブの会議が開かれている。国際政治的にも大きなインパクトがありうる気候工学については、わが国も多面的な検討が求められるであろう。

参考文献

- (1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2010. Proposal for an IPCC Expert Meeting on Geoengineering. IPCC-XXXII/Doc.5 (3.IX.2010). http://www.ipcc-wg2.gov/meetings/EMs/doc05_p32_proposal_EM_on_geoengineering.pdf（2月7日閲覧）
- (2) Parry, M., Lowe, J., Hanson, C., 2009: Overshoot, adapt, and recover. *Nature*, 458, 1102-1103, doi: 10.1038/4581102a.
- (3) New, M., Liverman, D., Schroder, H., Anderson, K., 2011: Four degrees and beyond: the potential for a global temperature increase of four degrees and its implications. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 369, 6-19, doi: 10.1098/rsta.2010.0303.
- (4) Marchetti C., 1977: On geoengineering and the CO₂ problem. *Climatic Change*, 1 (1), 59-68, doi:10.1007/BF00162777.
- (5) Budyko, M.I., 1974: *Izmeniya Klimata*. Leningrad: Gidrometeoizdat. [日本語版: 内嶋 善兵衛, 岩切 敏 訳 (1976): 「気候の変化」, 日本イリゲーションクラブ, 英語版: 1977年]
- (6) Crutzen, P., 2006: Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, 77, 211-219, doi:10.1007/s10584-006-9101-y.
- (7) The Royal Society, 2009. *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*. Royal Society, London. <http://royalsociety.org/geoengineering-the-climate/>（2月7日閲覧）
- (8) Keith, D.W., 2000: Geoengineering the climate: History and prospect. *Annual Review of Energy and the Environment*. 25, 245-284, doi: 10.1146/annurev.energy.25.1.245.
- (9) T. M. Lenton and N. E. Vaughan 2009, "The radiative forcing potential of different climate geoengineering options," *Atmos. Chem. Phys.*, 9, pp. 5539-5561.
- (10) Rasch, P.J., S. Tilmes, R.P. Turco, A. Robock, L. Oman, C.-C. Chen, G.L. Stenchikov and R.R. Garcia, 2008: An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 366, 4007-4037, doi:10.1098/rsta.2008.0131.
- (11) National Research Council (NRC), 1992: *Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation, and the Science Base*. The National Academies Press, 918 pp.
- (12) McClellan, J., Sisco, J., Suarez, B., Keogh, G., 2010: *Geoengineering cost analysis: Final report*. Prepared under contract to the University of Calgary. AR10-182. Aurora Flight Sciences Corporation, Cambridge, Massachusetts, USA. 86 pp. <http://people.ucalgary.ca/~keith/Misc/AuroraGeoReport.pdf>（2月7日閲覧）

- (13) Victor, D.G., Morgan, M.G., Apt, J., Steinbruner, J., Ricke, K., 2009: The geoengineering option: A last resort against global warming? *Foreign Affairs*, March/April, 64-76.
- (14) Wallace, D.W.R., Law, C.S., Boyd, P.W., Collos, Y., Croot, P., Denman, K., Lam, P.J., Riebesell, U., Takeda, S., Williamson, P., 2010: Ocean fertilization. A scientific summary for policy makers. IOC/UNESCO, Paris (IOC/BRO/2010/2) <http://unesdoc.unesco.org/images/0019/001906/190674e.pdf> (2月7日閲覧)
- (15) Martin, J.H., 1990: Glacial-Interglacial CO₂ change: The Iron Hypothesis. *Paleoceanography*, 5, 1-13, doi: 10.1029/PA005i001p00001.
- (16) Keith, D.W., 2009: Why capture CO₂ from the atmosphere? *Science*, 325, 1654-1655, doi: 10.1126/science.1175680.
- (17) United States Government Accountability Office (US GAO), 2010: Climate change: A coordinated strategy could focus federal geoengineering research and inform governance efforts. Report GAO-10-903. <http://www.gao.gov/new.items/d10903.pdf> (3月18日閲覧)
- (18) ニューヨーク大学ストーニーブルック校 (鉄散布による海洋肥沃化の環境への影響) <http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward.do?AwardNumber=0962201>
- (19) ラトガーズ大学 (成層圏エアロゾル注入と宇宙太陽光シールドの評価) <http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward.do?AwardNumber=0730452>
- (20) モンタナ大学 (太陽放射管理の倫理学) <http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward.do?AwardNumber=0958095>, <http://www.umt.edu/ethics/EthicsGeoengineering/default.aspx>
- (21) SPICE (Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering): <http://gow.epsrc.ac.uk/ViewGrant.aspx?GrantRef=EP/I01473X/1> (3月15日閲覧)
- (22) IAGP (Integrated Assessment of Geoengineering Proposals): <http://gow.epsrc.ac.uk/ViewGrant.aspx?GrantRef=EP/I014721/1> (3月15日閲覧)
<http://www.iagp.ac.uk/> (3月15日閲覧)
- (23) Oxford Geoengineering Programme: <http://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/institutes/geoengineering/> (3月15日閲覧)
- (24) IMPLICC (Implications and Risks of Novel Options to Limit Climate Change): http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FP7_PROJ_EN&ACTION=D&DOC=1&CAT=PROJ&QUERY=012e1ab78d80:d0be:75d013f6&RCN=92904 (3月15日閲覧)
<http://implicc.zmaw.de/> (3月15日閲覧)
- (25) ハイデルベルグ大学 (気候工学の世界でのガバナンス): <http://www.uni-heidelberg.eu/presse/news09/press090807-1e.html> (3月15日閲覧)
<http://www.climate-engineering.uni-hd.de/> (3月15日閲覧)
- (26) 欧州委員会ホームページ(ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/docs/wp/cooperation/environment/f_wp_200801_en.pdf, http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FP7_PROJ_EN&ACTION=D&DOC=1&CAT=PROJ&QUERY=012e1ab78d80:d0be:75d013f6&RCN=92904) (3月15日閲覧)
- (27) Kravitz, B., Robock, A., Boucher, O., Schmidt, H., Taylor, K.E., Stechikov, G., Schulz, M., 2011: The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Atmospheric Science Letters*, online early view, doi: 10.1002/asl.316.
- (28) David Keithホームページ, <http://people.ucalgary.ca/~keith/FICER.html> (3月15日閲覧)
- (29) Tsuda, A., Coauthors., 2003: A mesoscale iron enrichment in the western subarctic Pacific induces large centric diatom bloom. *Science*, 300, 958-961, doi: 10.1126/science.1082000.
- (30) Uematsu, M., Tsuda, A., Wells, M.L., Saito, H., (eds) 2009: SEEDS II: The second subarctic Pacific iron experiment for ecosystem dynamics study. *Deep Sea Research II*, 56 (26).
- (31) (財)地球環境産業技術研究機構, 「地球再生計画」の実施に関する調査事業報告書 (平成12年度調査報告書, 平成13年度調査報告書, 平成14年度調査報告書), 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- (32) 山本良一, 2009: 「残された時間: 温暖化地獄は回避できるか?」, ダイアモンド社, 310 pp.
- (33) Takanobu Kosugi, 2010, Role of sunsades in space as a climate control option, *Acta Astronautica*, 17/4, 345-363, doi: 10.1016/j.actaastro.2010.02.009
- (34) Asilomar Scientific Organizing Committee (ASOC), 2010: The Asilomar Conference Recommendations on Principles for Research into Climate Engineering Techniques. Climate Institute, Washington D.C., <http://www.climate.org/PDF/AsilomarConferenceReport.pdf> (2月6日閲覧)
- (35) 杉山昌広, 杉山大志, 「気候工学 (ジオエンジニアリング) のレビュー」, *Eco-Engineering*, 第22巻第4号, 生態工学会, 2010年10月

超臨界CO₂ガスタービン発電システムの開発

※
小川紀一郎 ((財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 参事)

※※
丹 光義 ((財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 主任研究員)

※※※
蓮池 宏 ((財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長)

※※※※
有富 正憲 (東京工業大学
原子炉工学研究所長 教授)

※※※※※
宇多村 元昭 (東京工業大学
原子炉工学研究所 特任教授)



1. はじめに

地球温暖化対策上および貴重な化石燃料削減上からも、発電における高効率化および高品質燃料にとらわれない燃料の多様化（排ガス利用を含む）の必要が高まっている。本稿で述べる超臨界CO₂ガスタービン発電システム（以下「CO₂発電システム」）は、超臨界CO₂の特性を生かした閉サイクルガスタービン発電システムであり、中小規模発電における高効率発電が見込まれ、さらに低品質油、石炭等を含む多様な燃料或いは工場排ガス・太陽エネルギー適用においても高効率発電を可能とするものである。同システムは、NEDO技術開発機構からの委託事業「超臨界CO₂を作動流体とする高効率ガスタービン発電の研究開発」にて平成20年度より3年計画にて研究中的のもので、2011年2月末現在、原理検証試験装置（10kW試験機）にて試験中であるが、既に閉サイクルの自立運転を達成し、

さらなる発電を目指して試験中である。本稿ではその一環として実施中の実用プラント概念設計から一部を紹介する。

2. CO₂発電システムとは⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

(1) CO₂発電システムの原理

CO₂の臨界点は、圧力7.38MPa（75ata）、温度304K（31℃）であり、特に温度に関しては比較的常温に近いレベルを有する。臨界点近傍の超臨界状態CO₂の圧縮率係数は一般的なガスタービン圧縮機で用いられる空気に比べて極めて小さく、このためこの近辺で圧縮した場合、動力の低減が図れる。そこで、臨界点近傍で圧縮機を作動させ、圧力・温度をさらに上げた状態でタービンを駆動すれば、従来ガスタービン発電に比べ正味出力が大きい高効率発電システムが可能となる。

CO₂発電システムは、この超臨界CO₂を作動流体とする「閉サイクル」としたものである。

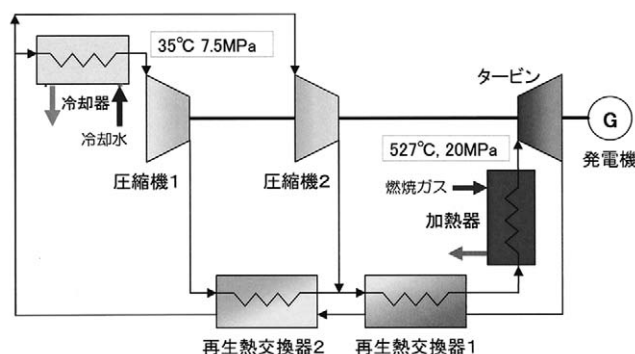


図1 CO₂発電システムの構成

図1に構成例を示す。図に示すように、主要構成機器はCO₂の圧縮機およびタービンを中心として、それに加熱器、再生熱交換器等からなる。CO₂は、先ず圧縮機に入り、所定圧力に圧縮され、再生熱交換器、（間接）加熱器で所定温度まで加熱されて膨張機（タービン）にて発電し、その後冷却を経て再度圧縮機へ入る。このように一旦封じ込められたCO₂は繰り返し利用される。その点燃料と空気を（加圧）燃焼器で直接燃焼し、燃焼ガスがガスタービンで膨張（出力発生）した後、煙突から排出されるガスタービン発電システム（コンバインドサイクル）の「開サイクル」とは大きく異なる。一方「閉サイクル」の場合、加熱は加熱器において外部からの間接加熱となるので、その燃焼・伝熱特性が全体特性に大きな影響を及ぼす。本稿は、同加熱器との組合せを基本としたシステム検討結果を示す。

（2）CO₂発電システムの特徴

ここで改めてその特徴を、まず長所から述べる。

① 高効率発電が可能

本システムは比較的中小規模（0.5～5万kW）での適用を想定しているが、その範囲で従来型発電方式に対し効率面で優れる。その理由は次の通り。

a) 圧縮率係数が小さい

圧縮機の所要動力は圧縮率係数に比例する。本システムの場合、同係数は0.3～0.4と通常のコンバインドサイクルで用いられる空気（同係数は約1）に比べ非常に小さく圧縮動力が低減できる。

b) 亜臨界圧流体に見られる凝縮過程がない

サイクル構成上冷却器が存在するが、同機器入出口においても媒体は超臨界状態であり、亜臨界圧流体で見られる一定圧力温度による凝縮過程がない。その分熱損失が少なく、高効率化上有利である。

② 適用燃料の幅が広い

本システムは外部加熱方式であるため低品質重油、石炭等の固体燃料も適用可能である。その点、従来のガスタービンでは、内部加熱方式であるので燃料性状に厳しい制約があるのと大きく異なる。

③ 設備費の低減と設備構成の簡素化が可能

本方式は従来型発電との比較では、タービン自体のサイズが小さい^{*}、復水器が不要、給水加熱器等の熱交換器に替わり優れた伝熱特性とコンパクト性を有す再生熱交換器を採用する等により設備構成の簡素化と建設費低減が可能である。一方、短所としては、超臨界

^{*}一般にタービンは、入口圧力と出口圧力の比（圧縮比）により圧縮・膨張する羽根車の大きさが左右される。例えば同値は、蒸気タービンの場合数100～数1000（例、産業用タービンで入口蒸気圧力15MPa、出口圧力0.05 MPaなら、約300）、通常ガスタービンの場合約10～30であるが、本システム（5MW実用機レベル）では約3と小さく、その分出口羽根サイズが小さくコンパクトとなる。

近傍のCO₂は物性値的に変化の幅が大きく、特に起動・負荷変動時等圧力・温度が変動する場合の安定性確保および閉サイクル特有の運転制御性の確立が課題として挙げられる。

(3) CO₂ガスタービンサイクルの熱効率と比出力

ここで、CO₂発電システムの核になる超臨界圧CO₂ガスタービンサイクル（以下「CO₂タービンサイクル」）について述べる。同サイクルとしては、一般に単純サイクル（ブレイトンサイクル）とさらに高効率を狙った分流再圧サイクル（前述図1対応）が考えられる。図2は分流再圧サイクルにおけるタービン膨張比を最適化した際の熱効率および比出力の計算結果を示したものである。圧縮機出口圧力20MPa、タービン入口温度800Kの条件において、40%以上の効率が得られる試算が得られている。

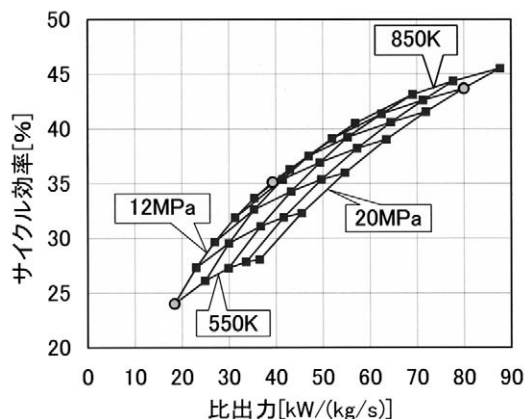


図2 サイクル熱効率と比出力の関係

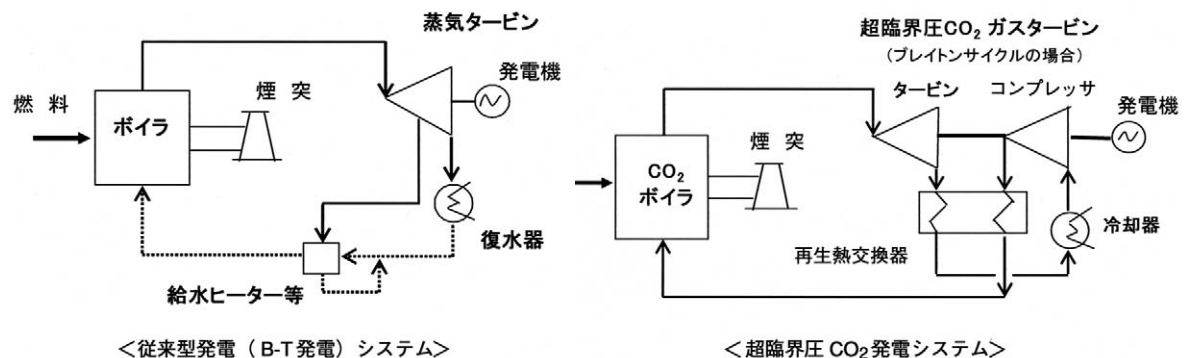


図3 従来型発電システムと超臨界CO₂発電システム

3. CO₂発電システムの方式と特性

CO₂発電システムとはどういうものか。本項では加熱器との関連からその適用方式を整理し、特性を見る。まず、加熱システムとしては、燃料を燃焼して加熱する方法と排ガスを用いて加熱する方式に2分される。前者は、CO₂の加熱を主目的として燃料を燃焼装置で燃焼させて加熱する方法で、ここでは「ボイラ方式」と称す。後者は、ガスタービン出口排ガス、工場排ガス等で加熱する方法で、ここでは「ガスタービン方式」と称す。以下、それぞれの方式とCO₂発電システムとでどのような結びつきが考えられるか、効率面、経済性面等の特性も踏まえ紹介する。

4. 超臨界CO₂発電システム（ボイラ方式）

(1) システム構成

システム構成例を従来型発電システム（ボイラー蒸気タービン（B-T）発電システム）との比較で図3に示す。

概括すると従来型の蒸気タービンの代わりにCO₂ガスタービンシステムが入り替わったものということができる。従来型発電システムも水を封じ込めてボイラで加熱し、蒸気を発生させ、タービンで仕事をした後水に戻す点では閉サイクルであり、両者には類似性もある。しかし、CO₂発電システムがCO₂の超臨界圧以上の条件で終始ガス状（正確には圧縮器入口は擬似流体）

分，後流設置のCO₂加熱器伝熱面積が小さくなり，加熱器管内の圧力損失も減る。このため，高効率化および機器配置のコンパクト化が可能となるので，本システムとして最も適切な方式と考える。なお，火炉内のCO₂冷却管材料選定に関しては，超臨界圧CO₂の伝熱特性が（過熱）蒸気の値とほぼ同等であるので，市販の材料（SUS材）を利用可能と判断した。

CO₂冷却壁方式のフローおよび概念図を，図4および図5に示す。

（4）CO₂発電システム（ボイラ方式）の試算

① 検討条件

CO₂発電システム効率の検討を従来型発電との比較において行った。まず，検討条件を下に示すが，記載以外の方は前述のCO₂ボイラの検討条件と同じとする。

- ・ 発電規模（発電端）：3,000kW，
5,000kW（ベース），
10,000kW
20,000kW，
50,000kW
- ・ 蒸気条件（圧力×温度）：55ata×455℃
～140ata×540℃
- ・ 蒸気タービン形式：抽気復水タービン
（空気冷却）
- ・ 燃料：C重油（低位発熱量；9,860 kcal/kg）
- ・ CO₂ボイラ形式：CO₂冷却壁方式

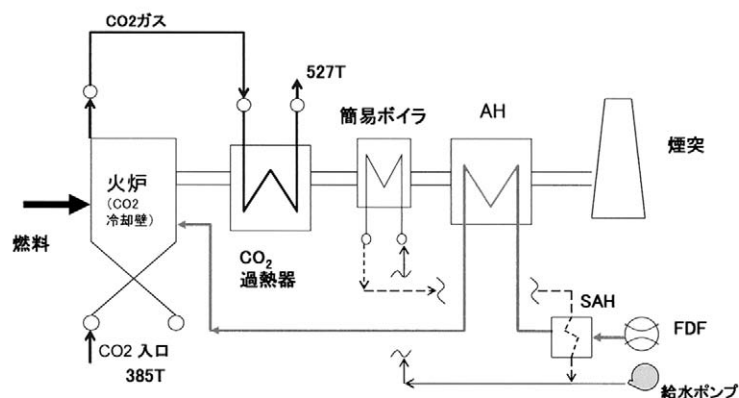


図4 CO₂冷却壁の方式

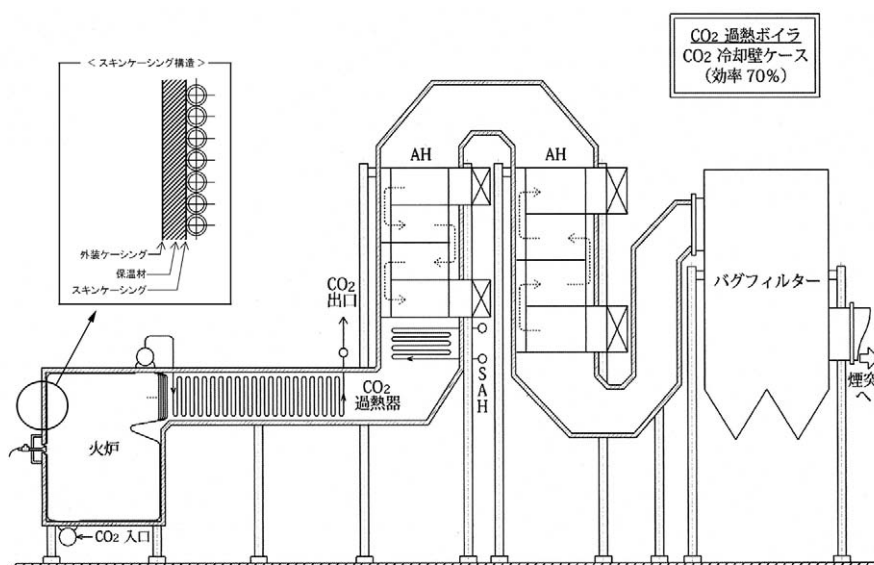


図5 CO₂冷却壁の構造

② 試算結果

表1および図6に、従来型発電所における発電規模に対する効率特性を示す。出力規模が中小規模（～5万kW）において、同図に示されるようにCO₂発電システムが従来型プラントに比べ高い効率特性を有することを示している。特に発電規模約1万kW以下において、従来型発電プラント効率は顕著な低下を示すが、これは同範囲におけるタービン効率の著しい低下に対応するものである。一方、CO₂発電システムの効率特性は、規模に応じてそれほど顕著な低下はない。これは、CO₂ガスタービンの効率低下が規模に対しそれほど変わらないと見ていることによる。

（5）CO₂発電システムの経済性

① 検討条件

技術的な検討条件は、（4）①と同じとする。

経済性に関する検討条件としては、従来型発電プラントとして2万kW級の産業用蒸気発

電プラント（抽気復水タービン）をベースとして、CO₂発電システムの機器構成の相違、出力・蒸気条件等の相違を組入れた相対比較を行った。具体的条件または仮定は次の通り。

- ・ベース発電設備：産業用蒸気発電プラント
- ・蒸気タービン形式：抽気復水タービン（空気冷却）
- ・出力規模（ベース）：20,000kW
- ・建設単価（ベース規模）（新設総建設費）：25万円/kW

② 検討結果

計算結果として、建設単価比較を図7、発電コストの計算例を図8に示す。全体的に、CO₂発電システムが従来方式より建設費および発電コストとも有利であること、この場合も特に1万kW以下の中小規模においてその差が顕著となることが示された。なお、建設費および発電コストは従来型をベースとした相対比較的な試算値であり、実プラント検討の際は改めて検討を行う必要があることはいうまでもないことである。

表1 CO₂発電システムと従来型システムとの効率比較の詳細

ケース		—	1	2(ベース)	3	4	5
従来型発電	発電出力	KW	3,000	5,000	10,000	25,000	50,000
	ボイラ効率	%	87.5	88	88	89.1	90.2
	タービン効率	%	22.8	25.4	30.2	34.7	35.4
	プラント効率(従来型)	%	20	22.3	26.5	30.9	32
CO ₂ 発電 (CO ₂ B+CO ₂ GT)	CO ₂ ボイラ効率	%	83	85	87	89	89
	CO ₂ タービン効率	%	40	40	40	40	40
	プラント効率(CO ₂ サイクル)	%	33.2	34	34.8	35.6	35.6

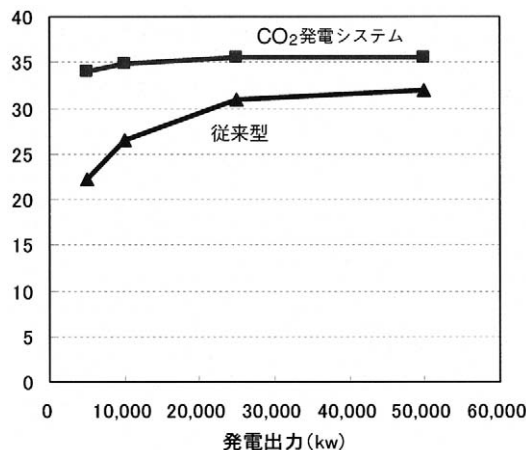


図6 CO₂発電システムと従来型システムとの効率比較図

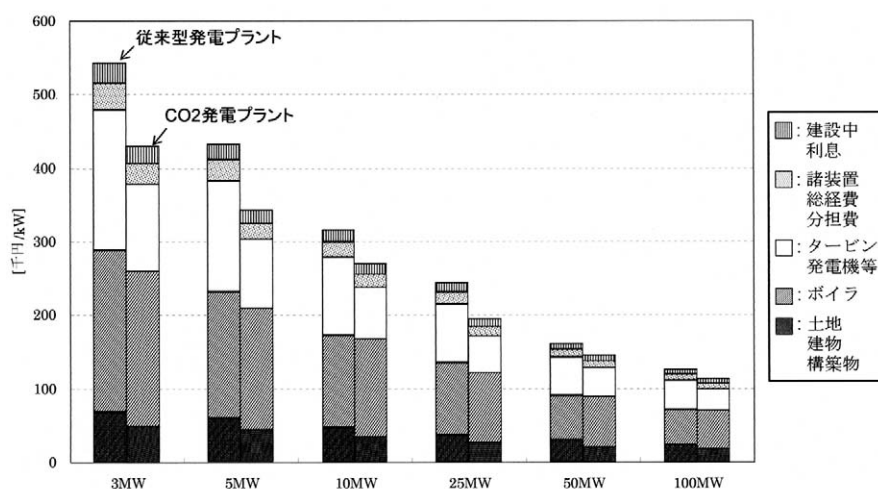


図7 CO₂発電システムと従来型システムとの建設費の比較

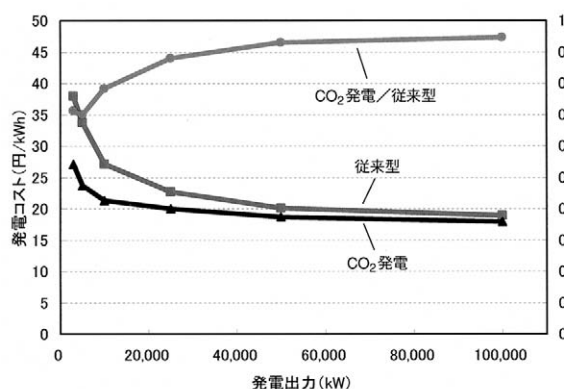


図8 CO₂発電システムと従来型システムとの発電コスト試算例

5. CO₂発電システム（ガスタービン方式）

（1）システム構成

詳細は後述するとして、システム構成例を従来型との対比の下に図9～図12に示す。図12は、回収蒸気を全量ガスタービンに導入する、いわゆるチエンサイクルであり参考までに示した。概括すると、形の上ではコンバイ

ンドサイクルの蒸気タービンと超臨界圧CO₂ガスタービンサイクルが入れ替わった格好と見ることができる。しかし、超臨界圧CO₂ガスタービンサイクルのみでは、ガスタービン出口排ガス顕熱を十分利用できないので、その点の工夫が必要であり、本稿ではその点を考慮して立案した組合せ方式の例およびその効率面等の特性を紹介する。

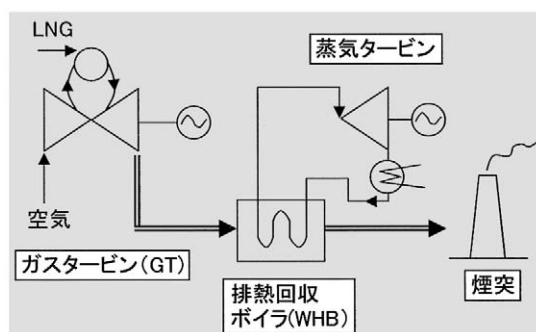


図9 コンバインドプラント

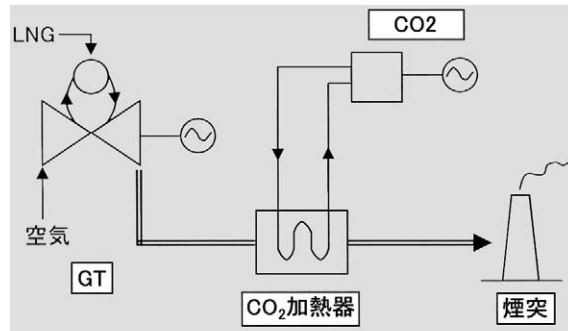


図10 GT-CO₂組合せプラント（その1）

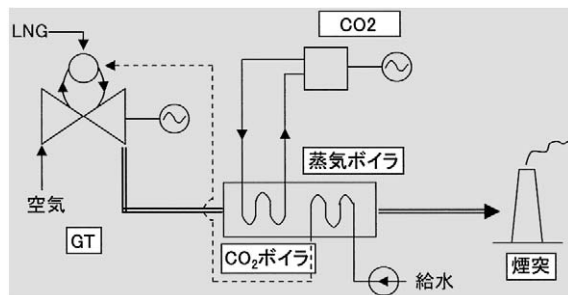


図11 GT-CO₂組合せプラント（その2）

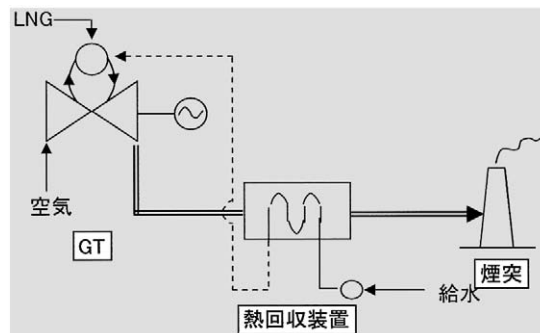


図12 チェンサイクル（参考）

（2）発電システムと各要素システムの効率

CO₂発電システム，ガスタービン，CO₂タービンサイクルのそれぞれの効率は，次の式で関係づけられる。

$$\eta_p = \eta_{gt} + (1 - \eta_{gt}/100) \eta_b \times \eta_{co2}/100 \quad \dots (4)$$

$$\left(\begin{array}{l} \eta_p : \text{CO}_2 \text{ 発電システム効率 (\%)} \\ \eta_b : \text{排ガスボイラ効率} \\ \quad \text{(CO}_2 \text{ サイクル対応) (\%)} \\ \eta_{gt} : \text{ガスタービン効率 (\%)} \\ \eta_{co2} : \text{CO}_2 \text{ タービンサイクル効率 (\%)} \end{array} \right)$$

また， η_{gt} および η_{co2} はそれぞれ次の式で計算される。

$$\eta_{gt} = \text{LTg} \times 860 \times 100 / (\text{LHV} \times \text{FC}) \quad \dots (5)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{LHV} : \text{燃料の低位発熱量 (kcal/kg)} \\ \text{FC} : \text{燃料消費量 (kg/h)} \\ \text{LTg} : \text{ガスタービン出力 (kW)} \end{array} \right)$$

$$\eta_{co2} = \text{LTc} \times 860 \times 100 / Q_{CO2} \quad \dots (6)$$

$$\left(\begin{array}{l} Q_{CO2} : \text{排ガスボイラからのCO}_2 \text{ ター} \\ \quad \text{ビンサイクルへの入熱量} \\ \quad \text{(kcal/h)} \\ \text{LTc} : \text{CO}_2 \text{ タービンサイクル出力 (kW)} \end{array} \right)$$

従って、全出力（LT）は次式で示される。

$$LT = LT_g + LT_c \dots\dots\dots (7)$$

なお、 η_{gt} はガスタービンの出力規模と温度レベルにより各メーカー特有の値が採用されており、また η_{co2} は、前述のとおりCO₂タービンサイクル効率として与えられるので、その値を基に全体効率（ η_p ）および全体出力（LT）等を計算する。

（３）CO₂発電システム（ガスタービン方式）

の試算

① 検討条件

- ・ 発電規模（発電端）：5,000kW, 12,500kW
25,000kW, 50,000kW
- ・ 燃料：天然ガス（低位発熱量；8,790kcal/m³N）
- ・ ガスタービン温度：1,250℃
(5,000kWは1,100℃)
- ・ ガスタービン効率：文献値等を参考にして設定
- ・ CO₂タービンサイクル効率：前述のボイラ方式の場合とサイクル入口温度（排ガスボイラ出口温度）を除き同一とした。（例、圧力20Mpa、温度（入口）385℃、（出口）500℃）

② ガスタービン加熱方式の検討

図9は、ガスタービンと蒸気タービンの組合せによる通常のコバインドプラント、図10～図11が、ガスタービン排ガスを使ってCO₂タービンサイクルを加熱する提案方式で、図10は、ガスタービンとCO₂タービンサイクルのみの組合せ、図11は、さらにその後段に、熱回収装置（ボイラ）を設置して、その発生蒸気をガスタービン燃焼器に導入し、全体と

しての効率向上を狙った方式で、ガスタービンとCO₂タービンサイクル組合せの候補として提案するものである。なお、図11の候補案においては、ボイラにおける蒸気圧力を単圧とするか、複圧とするかで排ガス回収の程度が異なるが、ここではガスタービン燃焼器導入が可能な範囲で複圧方式を採用した。

③ 試算結果

筆者等が作成した簡易計算手法を使って、各ケースの試算を行った。その際メーカー公表値（文献値）を参考として、先ずコンバインドサイクル計算において公表値と簡易計算結果と照合して相関性を確認し、その上で他の方式の計算を実施した。図13にガスタービン規模12,500kW級における試算結果を示す。同結果に示されるように、ガスタービンとCO₂タービンサイクル組合せ（候補案）が、効率面で優れた可能性を有していることが判明した。さらに、図14に従来型との対比でCO₂発電システムの効率特性を先に紹介したボイラタービン方式の場合も含めて示した。同図で見られるように2万kW程度以下の中小規模において、顕著な効率差が見られる。

なお、発電規模が大きくなると（例、10万kW以上）従来方式（特に、GT-ST方式）は、大型化に伴う効率上昇が本方式より顕著になるので、効率差は逆転すると予想される。

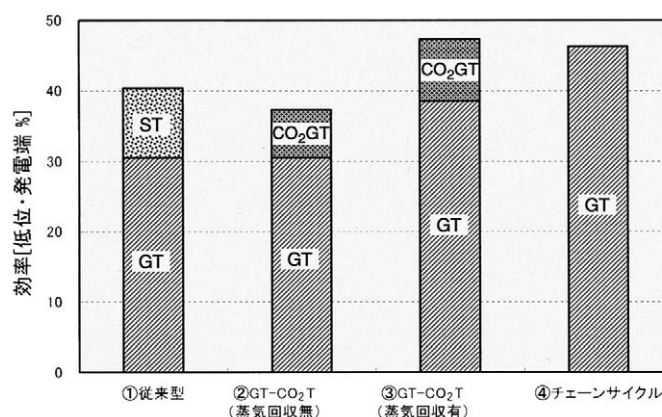


図13 CO₂発電システム（GT方式）の効率

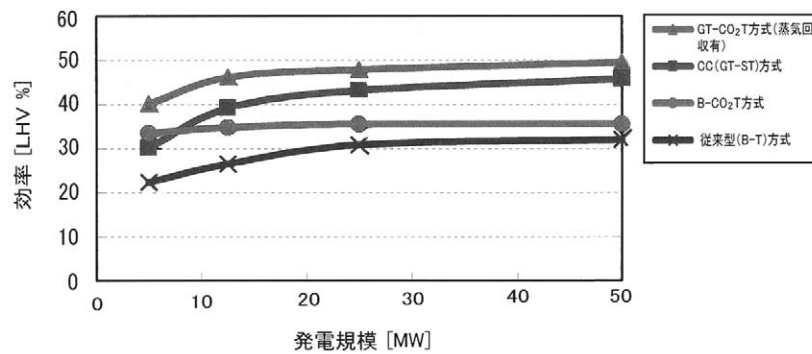


図14 従来型発電とCO₂発電システムの効率

④ 経済性に関する見通し

ガスタービンとの組合せに関する経済性に関しては、未だ検討が十分進んでないこともあり、概略の考え方の紹介に留めるが、この場合も一般のコンバインドサイクルの蒸気タービン系がCO₂タービンサイクルに置き換わったと見ることができる。例えば、コンバインドサイクルの設備関係総建設費（100%）に占める蒸気タービンの割合を15%とし、さらにCO₂発電システム（ボイラ方式）の経済性検討のベースになったCO₂タービンサイクルのコストと従来型蒸気タービンのコスト比率（例えば、2万kW級で約0.7）をここでも採用した場合、CO₂発電システムと同総建設費はコンバインドサイクルの約95%になると予想される。これに、前項で述べた効率面での有利性を加味すると、中小規模（例、2万kW級以下）のガスタービン適用発電システムにおいてもCO₂発電システムの経済的有利性が示される。

（４）CO₂発電システムの熱併給発電への適用

① 概説

最後に、熱併給発電（コージェネレーション）

向けCO₂発電システム適用の可能性を述べる。現在、熱併給発電向けの原動機は、比較的規模の大きい（例、1,000kW以上）場合は、ガスエンジンとガスタービン方式が中心となっている。特に、規模が大きくなるにつれガスタービンが採用される傾向が見られる。ガスタービンはガスエンジンに比し大容量化し易いという特性に加え、蒸気の発生量が多い、軽量である、振動が少ない等の特長を有すためと考える。特に、近年季節と時間帯に応じて熱と電気の発生割合を比較的自由に変更できる熱電可変型の要求が増えているが、その場合はガスタービン方式が適切と見られている。

ガスタービンを利用したCO₂発電システムは、この適用に際しても優れた可能性を有している。以下、検討結果の概要を紹介する。

② 熱併給型CO₂発電システムの検討

図15～図17に各種ガスタービン適用型熱併給プラントの系統例を示す。

図15は、発電と熱併給の割合が固定された従来型熱併給プラント、図16は熱電可変型の一般的フローでチエンサイクル方式の応用と

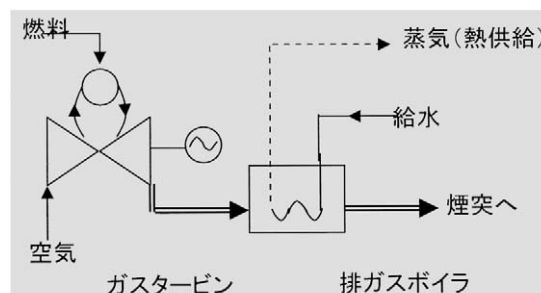


図15 ガスタービン熱併給プラント（従来型）

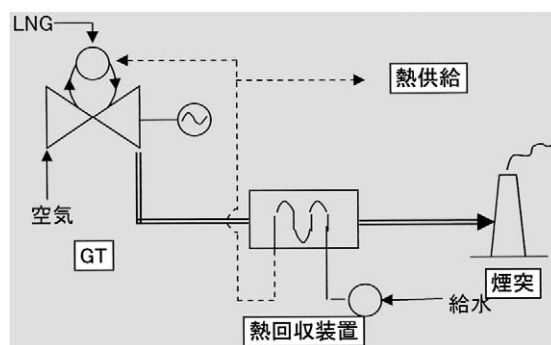


図16 熱電可変型熱併給プラント（チエンサイクル型）

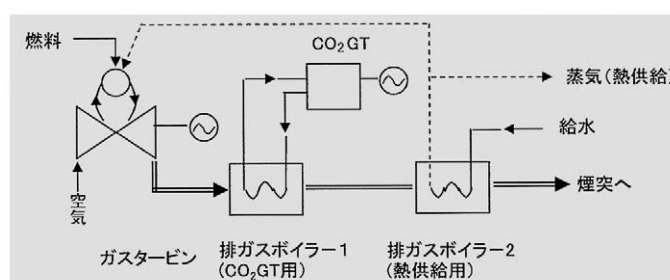


図17 熱併給型CO₂発電システム

もいえるもの、図17が熱併給型（熱電可変型）CO₂発電システムのフロー例である。図17にて示されるようにCO₂加熱器後段の熱回収部で発生した蒸気を、電力ニーズが高い場合はガスタービン（燃焼器）へ、熱のニーズが高い場合は蒸気供給の割合を増す方式である。従って、一般的にガスタービンを利用した熱電可変型（図15または図16）に比べ、最大発生蒸気量は少なくなる反面、最大発電量は大きくなり、その分発電効率面では最も高くな

る。図18にその比較図を示す。近年ますます電気の需要は増加する傾向があり、また電気と蒸気のエネルギーとしての質の違いを勘案すると、発電効率が高いことは、大きな特徴であると考えられる。図19に国内における熱電可変型プラントの実績と本システムの位置付けを示す。同図に示されるように熱供給の割合がやや小さいという限界はあるが、本システムの発電効率面の有利性がうかがえる。

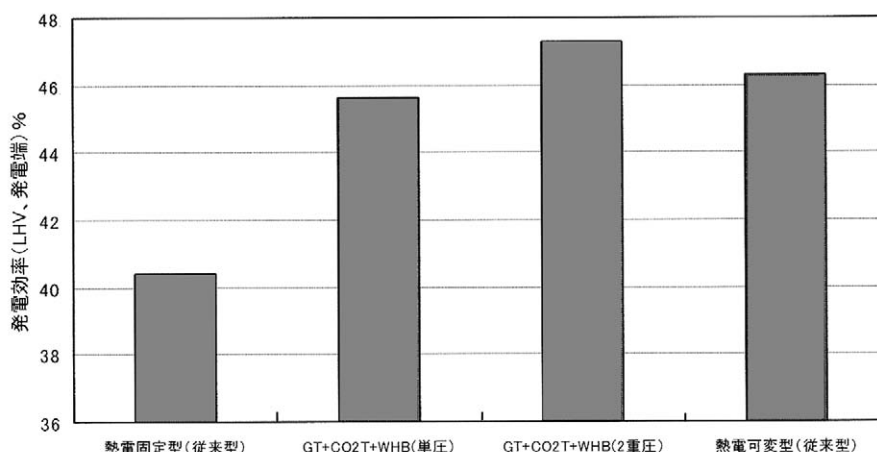


図18 各種熱併給プラントの発電効率比較

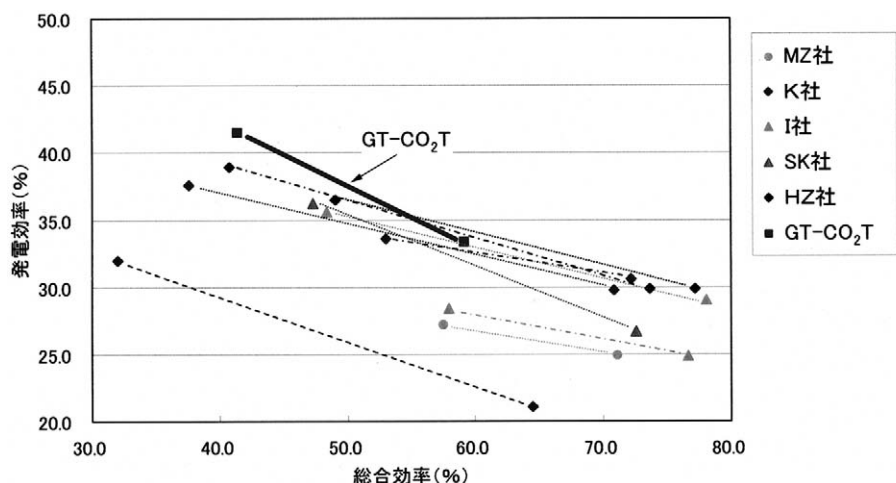


図19 熱電可変型実績（国内）とCO₂発電方式

6. CO₂ガスタービン原理検証試験装置

本システムの基礎となるCO₂タービンサイクルの原理を検証する目的で、NEDO技術開発機構の委託を受けて「超臨界圧CO₂を作動流体とする高効率ガスタービンの研究開発」を平成20年度より3年間の研究にて実施してきた。実施に際しては、当所と熱技術開発㈱が共同受託し、それに東京大学および東京工業大学の協力を得て茨城県下妻市に試験装置を建設し、試験を進めてきたものである。同装置のフローを図20に示す。

試験装置の主要仕様は、圧縮機に遠心圧縮機、タービンにはラジアル型、加熱器に電熱ヒータを用い、CO₂は超臨界圧（最大12MPa）状態で、先ず閉サイクルにおける自立運転

（タービン起動用モータ電源を遮断し、所定の閉サイクル運転を可能とした状態）を達成し、その後発電（最大10kW）を目指すものである。

平成23年2月末現在、自立運転を達成し、現在10kW発電試験達成を目指して試験を進めているところである。

なお、それらの詳細については別途機会を得て発表する予定でありここでは省略する。

7. まとめ

本稿は、CO₂ガスタービン発電システムにつき、加熱器としてのボイラとの組合せとガスタービンとの組合せにおいて、効率特性、基本構造、さらに経済性等につき従来型発電システム（ボイラタービン発電方式あるい

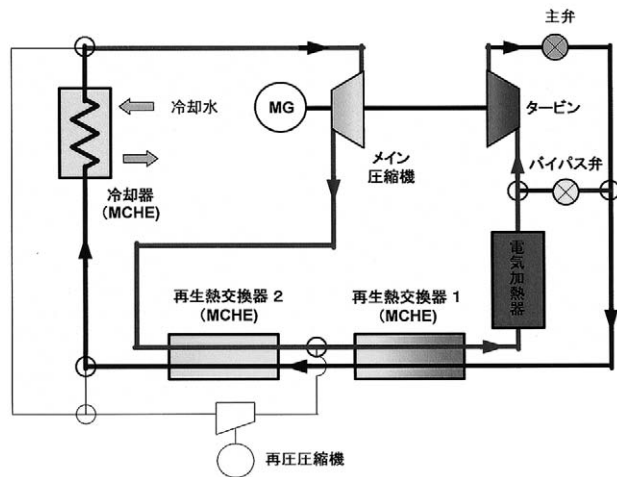


図20 CO₂ガスタービン原理検証試験装置

はコンバインドサイクル)との比較で行った。その結果、中小規模発電向け(例、2万kW以下)に対し、本システムはボイラ適用およびガスタービン適用の両ケースとも効率および経済性面で優れた可能性を有していることを見出した。

さらに、ガスタービン適用の応用として熱併給プラントとしての可能性についても検討した。その結果、特に熱電可変型の熱併給プラントとしても発電効率面で優れた可能性を有する試算結果を得た。

一方、CO₂ガスタービンそのものは現在10kW機による原理検証試験中であり、予定通り自立性は確認できたものの、実用化に際しては今後さらなる検討・研究開発が必要である。しかし、超臨界CO₂ガスタービン発電システムは、本稿で述べたような優れた特徴を有しているので、昨今益々重要になってきている地球温暖化対策あるいはエネルギー利用効率向上に資する技術と考えている。

今後一層関係各位の御理解と御協力を期待したい。

[謝辞]

本稿作成にあたりNEDO技術開発機構からの委託事業「超臨界CO₂を作動流体とする高効率ガスタービン発電の研究開発」の成果を利用させていただいた。NEDOご関係者に深甚なる謝意を表する。

また、本研究の共同受託社として試験ループ作成等を担当された熱技術開発(株)関係者(高松忠彦様、山本敬様、葉山幸彦様、福島敏彦様、梶田梨奈様)、圧縮機のCFD(Computational Fluid Dynamics)解析を担当された東京大学関係者(渡辺紀徳様、姫野武洋様、井上智博様)、およびタービン本体の製作を担当された(株)アーカイブワークス(松尾栄人様)にもこの場をお借りして謝意を表する。

参考文献

- (1) 蓮池宏他、超臨界CO₂ガスタービン発電システムの効率特性評価、ガスタービン定期講演会、2010年10月
- (2) 宇多村元昭、蓮池宏、有富正憲；超臨界CO₂を作動流体とするガスタービンの研究開発、季報エネルギー総合工学、Vol.32, No. 1 (2009) 20-30
- (3) 蓮池宏他；超臨界CO₂ガスタービン発電システムの効率特性評価、第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス論文集、平成22年1月26～27日
- (4) 蓮池宏他；超臨界CO₂クロードサイクルガスタービンの開発—第一報サイクル計算の高度化とバイオマス発電への適用検討、第36回ガスタービン定期講演会
- (5) 宇多村元昭他；超臨界CO₂クロードサイクルガスタービンの開発—第二報超臨界CO₂ガスタービンの原理検証実験計画、第37回ガスタービン定期講演会
- (6) 宇多村 他；熱交換器の伝熱限界を考慮した超臨界CO₂ガスタービンサイクル特性の解析、日本ガスタービン学会誌、Vol.36, No. 2 (2008) pp.60-65
- (7) 12～16MW級高性能ガスタービン MF-111、三菱重工技報 Vol.26, No.4 (1989-7)

ウラン資源の持続可能性

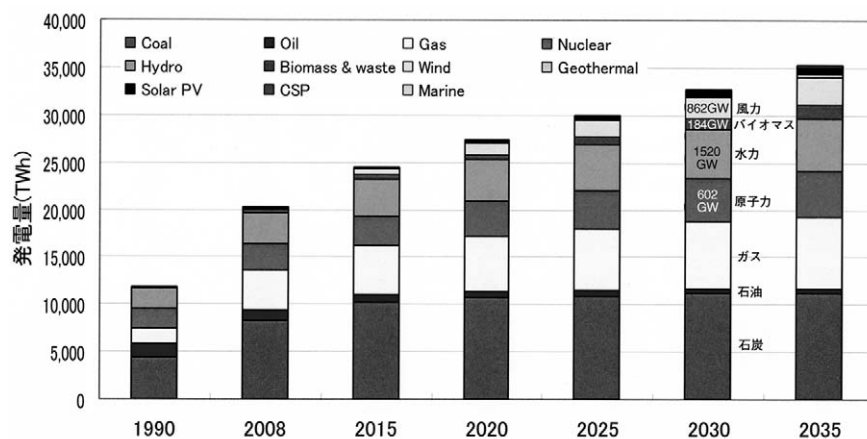
楠野 貞夫 (プロジェクト試験研究部 参事)



1. はじめに

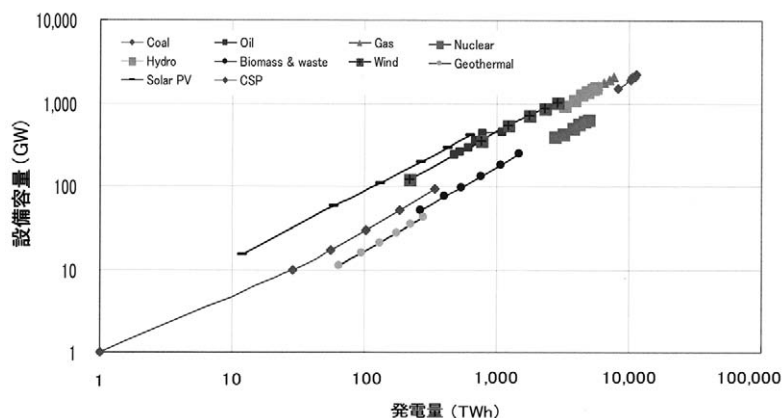
2011年1月現在、世界全体で442基（電気出力375 GWe ネット）の原子力発電プラントが運転中で、65基が建設中である⁽¹⁾。2009年の発電量シェアは14%⁽²⁾で、最新の「世界エネルギー展望」(WEO2010)⁽³⁾のNew Policies Scenarioでも、2035年まで14%程度で推移する

と予測されている。図1に示すように、原子力の発電量シェアは大幅に伸びないにしても、総発電量が増大していくため、原子力発電量も増大することになる。2030年における設備容量は、原子力が602 GW、水力発電1520 GW、風力発電862 GWで、原子力発電がその設備容量に比して大きな発電量を供給することに注目したい。これは、図2からも明らかである。



※ 2030年の風力、バイオマス、原子力、水力発電の設備容量を図中に示した。

図1 世界の発電量予測⁽³⁾



※ 各点は2008年、2015年、2020年、2025年、2030年、2035年に対応する。

図2 世界の発電量に対する発電規模の関係⁽³⁾

次節で示すように、中国の原子力発電規模は急速に増加しつつあり、2011年初現在の11GWeが、2050年には400GWeになるという予測もある。一方、米国など原子力先進国においても原子力発電設備容量が減ることはないと予測されている。これら原子炉の大部分が軽水炉で、その燃料としてのウラン資源の長期的確保が原子力開発の最重要課題となっている。

2. 原子力発電の現状と将来予測

世界の原子力発電の現状を、発電規模の大きい順に国別に示すと図3のようになる。米国、フランス、日本、ロシア、ドイツに続いて、第6位に韓国がある。

中国は、運転中の規模からは11位であるが、建設中、計画中および提案を加えると、電気出力は200GWeを超え、将来は世界一となることが注目される。これに続いて、ロシアとインドの成長が目立つ。

インドの計画は、2020年までに20 GWe、2032年までに63 GWeであり、2050年までには、原子力のシェアを25%とすることを目指している。インドは、その核兵器開発プログラムのために、NPT条約に入っていないので、34年間もの間、原子力プラントや材料の商業取引からは外されていた。2009年までは、この

ことが商業原子力開発の妨げとなった。このために、また国産のウラン資源がほとんどないために、インドは埋蔵しているトリウム資源を活用する核燃料サイクルの独自開発を進めてきた。しかし、現在は海外技術と燃料とによって、インドの原子力発電プラントはかなり推し進められるものと期待される。ただし、海外から輸入する軽水炉（ロシアおよびフランスのPWR、など）以外のプラントは、全てインド独自の技術（PHWR加圧重水炉）に基づいている。

さらに規模の小さい国として、南アフリカ、アラブ首長国連邦（UAE）、ベトナム、トルコ、タイおよびイタリアの計画または、提案が目立っている。しかし、南アフリカのペブルベッド高温炉実証発電所は資金難のため無期限の延期に追い込まれた⁽⁴⁾。UAEは、韓国が開発した4基の第III世代炉APR-1400⁽⁵⁾の建設を決定した。ベトナムでは、フォックディンのニントアン第1原子力発電所に、ロシアが2基のロシア型PWR（VVER）を建設することとなった。ロシアは燃料を供給し、再処理するために引き取ること、また建設のために債務保証をすることになっている⁽⁶⁾。ビンハイのニントアン第2原子力発電所には、日本が2基建設する計画もある。トルコでは、地中海沿岸メルシンのアックユ地区に、ロシア

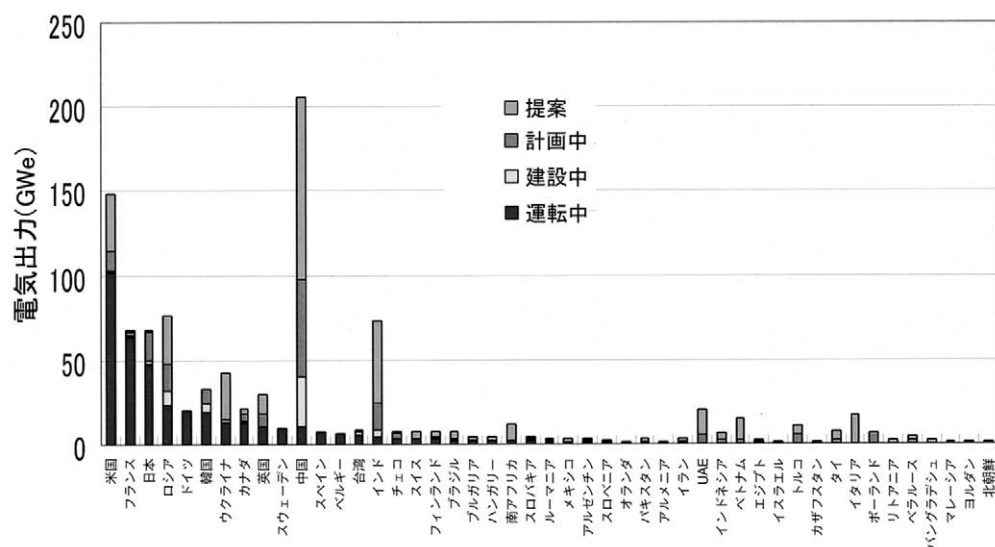


図3 国別で見た世界の原子力発電⁽²⁾

が2基のPWRの建設を進めており、2011年3月中にもサイト調査が開始される予定である⁽⁷⁾。

UAE以外の中近東においても、ヨルダンやエジプトなどに原子力発電所の建設計画がある。しかし、北アフリカのチュニジアで、23年間独裁を続けたベンアリ政権が2011年3月半ばに崩壊した⁽⁸⁾ことを契機として、エジプトなどで政変が起きたために、中東での原子力発電計画は遅れるものと予測される。

図4は、2009年の原子力発電量とそのシェアとの相関を示している。ここで、リトアニアの原子力発電量シェア76.2%（2009年、世界最高）は、唯一の原子炉イグナリナ2

（RBMK-1500、軽水冷却黒鉛減速炉LWGR、1360 MWe）によるものであった。しかし、リトアニアは、EUに加盟する条件として、旧ソ連製のRBMKを2009年12月31日に閉鎖した⁽⁹⁾。図4では、ロシア、中国およびインドを□記号で、他の国は◆で示した。

この3国の発電量の推移を図5に示した。中国の成長が著しく、これに合わせて原子力発電量も伸びていることがわかる。また、2015年からは、インドの成長率が大きいために、インドの発電量はロシアよりも大きく伸びている。2035年においても、中国の発電量の55%は石炭火力であり、原子力は9%程度に過ぎない。

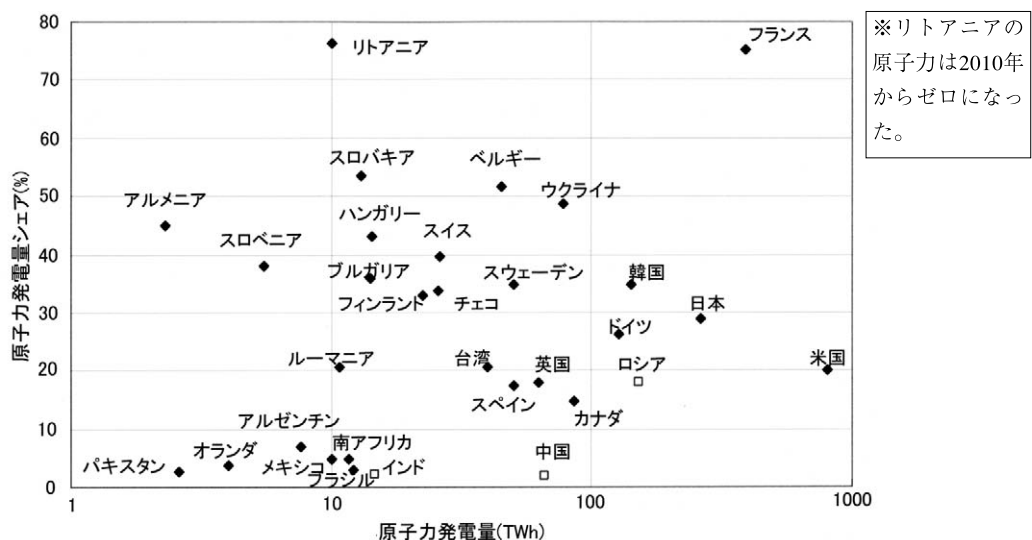


図4 2009年における原子力発電量のシェア⁽²⁾

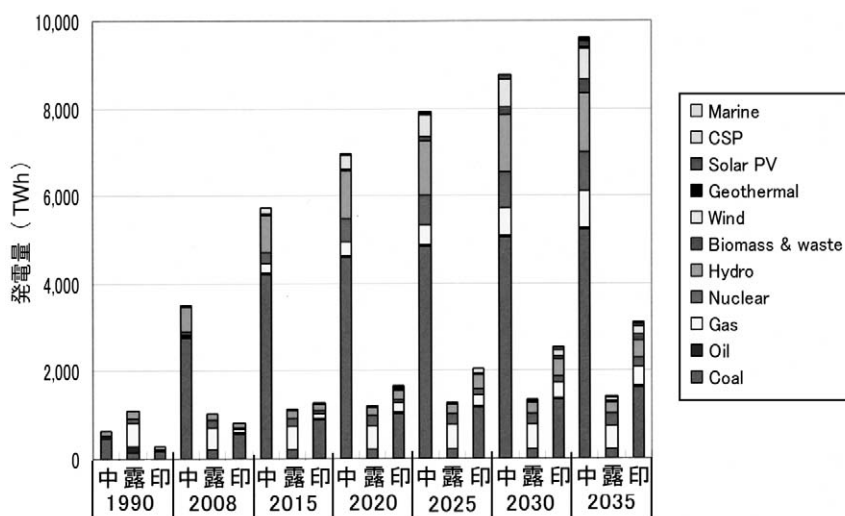


図5 中国、ロシア及びインドの発電量推移比較⁽³⁾

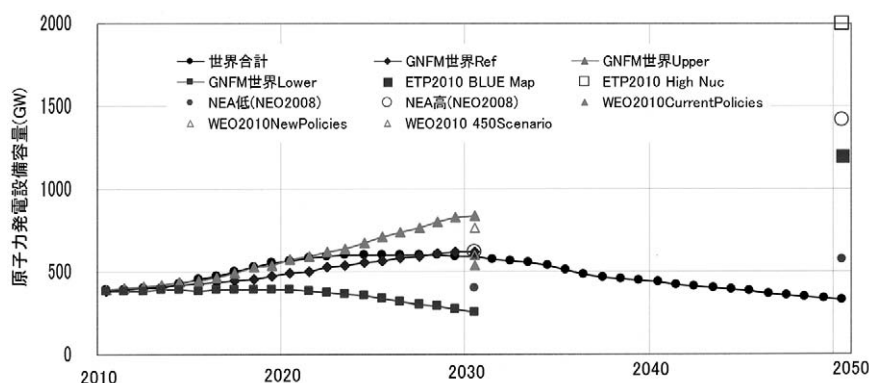


図6 2050年までの原子力発電設備容量の予測比較^{(3) (11) (12) (14) (17) (18)}

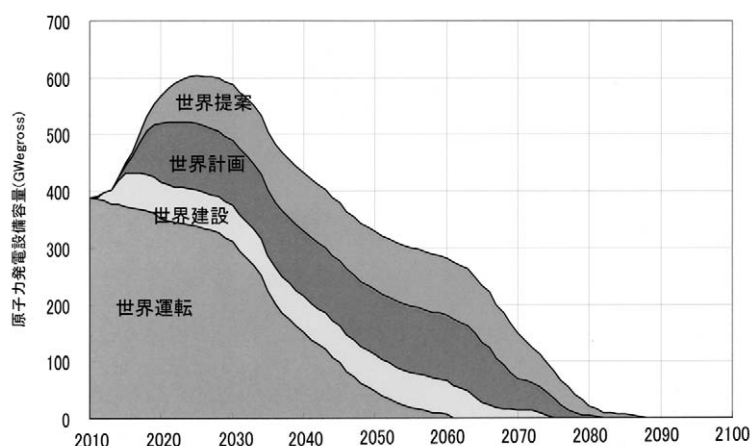


図7 世界の原子力発電設備容量の内訳

2030年が過ぎてからの原子力発電に関する将来予測を図6に、世界の原子力発電設備容量の内訳を図7に整理した。図6で世界合計とは、参考文献(11)、(12)の世界のプラント毎の積み重ねで、プラント寿命は参考文献(14)のレファレンスケースの値を用いた。2030年過ぎて設備容量が右下がりになる理由は、新設またはリプレースを考えていないからである。

3. ウラン資源

ウラン資源は、在来型と非在来型とに分類される。在来型ウラン資源とは、生産に関する歴史が確立されているものであり、一次産物、同時産物、または重要な副産物(例えば、銅および金からの)のいずれかである。

非在来型資源には、極めて低い品位の資源や、リン鉱石などの副産物の他に、潜在的には海水や黒色頁岩中のウランも含まれる。

最新のOECDによるウラン資源情報(「レッドブック」)⁽¹⁰⁾では、図8に示すように、既知資源量631万トン(コスト区分260ドル/kgU以下)、未発見資源1,040万トン(これら合計の究極資源量はほぼ1,670万トン)である。

これに対して、年間のウラン要求量は、世界全体で2008年には約6万tUであった。このままの消費割合が続くならば、既知資源だけで向こう100年間は十分に世界の原子力発電に対して、ウランを供給することができる。しかし、2035年には9～14万tUに増大するものと予測されている。

2008年における世界のウラン生産量は約4.4万tUであった。これらはすべて一次資源である。従って、要求量約6万tUの74%しか満たしていなかった。このギャップは、二次資源によって補われた。二次資源とは、① 政府および商業在庫の過剰分、② 解体核兵器からの高濃縮ウランの希釈により生産された低濃縮

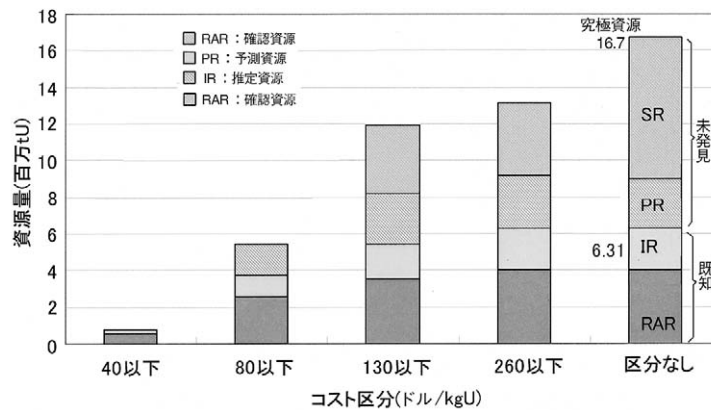


図8 在来型ウラン資源のコスト区分と資源量⁽¹⁰⁾

ウラン，③ テイルウラン（劣化ウラン）の再濃縮および，④ 使用済燃料の再処理（回収プルトニウムはMOX燃料に，回収ウランは再濃縮して，リサイクルする），である。

4. システムダイナミックスによる評価

中国の原子力発電の成長が大きいことが予測されているが，不確定性は大きいと考えられる。そこで，世界の原子力発電国を，中国を除いた世界と，中国の2つに区分し，それぞれの発電設備容量の成長がウラン資源消費に与える影響を評価した。取り扱う炉型は軽水炉のみと仮定し，評価にはSystem Dynamicsコード（STELLA 9.1.3）を使用した。

（1）シナリオの設定と前提条件

前章で調査した原子力発電設備容量をベースに，世界および中国の原子力発電設備容量の増加シナリオを想定し，2100年までのウラン要求量を評価することによって，軽水炉開発に要求される重要な技術因子の効果につい

て検討した。軽水炉燃料の再処理・リサイクルは検討しなかった。その代わりに，発生する使用済燃料の量を評価した。

ウラン資源消費に係るフロントエンドのパラメータとして重要な因子は，テイルウラン中のU-235濃度（Tails Assay）である。また，軽水炉プラントに係る重要因子は，熱効率，設備利用率および比出力であり，燃料に係るものは，取出平均燃焼度である。これは，燃料取替割合（バッチ）を通して，燃料濃縮度と密接な関係がある。これらの設定を表1で定義した。

（2）システムダイナミックスのモデル

前章で説明したように，既設の原子力発電設備容量は，参考文献（11）の個別プラントデータを積み上げた。特に，中国・インド・ロシアなどの原子力発電成長率の大きな国に関しては，新設計画・提案の規模・時期はWNA（World Nuclear Association）の最新データ⁽¹²⁾を，プラント寿命については参考文献（14）を参考にした。2050年から先のデータがない年代

表1 システムダイナミックスの計算条件

軽水炉重要パラメータ	設定値	備考
熱効率	33%	
設備利用率	80%	2地域について、グラフ関数で与える
バッチ	3.3	燃料の取替割合
取出平均燃焼度	50→70 GWd/t	50 GWd/t から 70 GWd/t に、2031 年から高燃焼度化
初装荷燃料燃焼度	33 GWd/t	
比出力	38 MW/t	PWR 相当
Tails Assay	0.25%	グラフ関数で与える

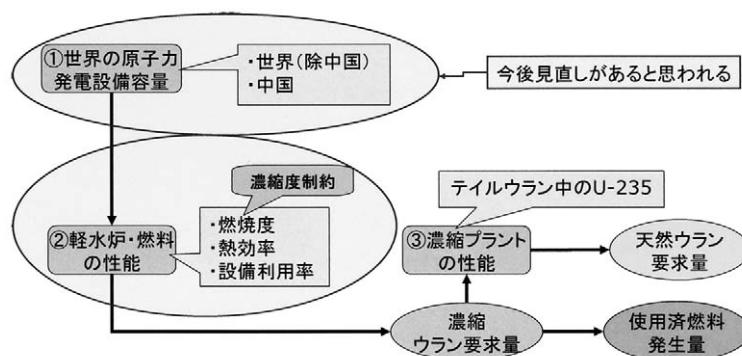


図9 ウラン資源の持続可能性評価の考え方^{(11) (12)}

に関しては、世界および中国の原子力発電成長率を仮定した。評価の考え方を図9に示す。

①世界（および中国）の原子力発電設備容量

世界の原子力発電設備容量は、参考文献(11)をベースにした。しかし、中国、インド、ロシアなどのように、その後に更新のあったものについては、主としてWNAの報告⁽¹²⁾により追加修正した。これらを含めたものを「既存計画」と称した。しかし、2030年を過ぎてからの明確な計画はないので、多くの設備の寿命は尽きてしまう。また、寿命が尽きた後に、リプレースされる計画もまた不確実性が極めて大きい。これを補うために、仮想的に「建設速度」（年間に建設される原子力発電所の基数(1GWe単位)）という概念を導入した。

世界の原子力発電設備容量は、中国を除いた世界全体と中国のみの2地域に分けた。そ

の理由は、中国の設備容量の伸びが大きく、またその不確実性も大きいからである。前記の既存計画と建設速度とは、2地域について独立に与えることとした。

図10は、中国の原子力発電設備容量の推移の予測である。運転中、建設中、計画、提案、および希望の5つのカテゴリーに分け、さらに、運開、提案運開、希望運開の3つにまとめた。ここで、運開は運転中、建設中および計画をまとめたものである。これらをひとまとめにしたのは、確度が高いからである。これに対して、提案はより確度が低く、希望に関しては、どちらかといえば確度は低い。このそれぞれに対して、閉鎖がある。

図11に2010年以降の中国の運開プラントと閉鎖プラントの規模と時期を示す。

ここで、「運開」はその年に運開するプラント、「提案」は提案されているプラントで、

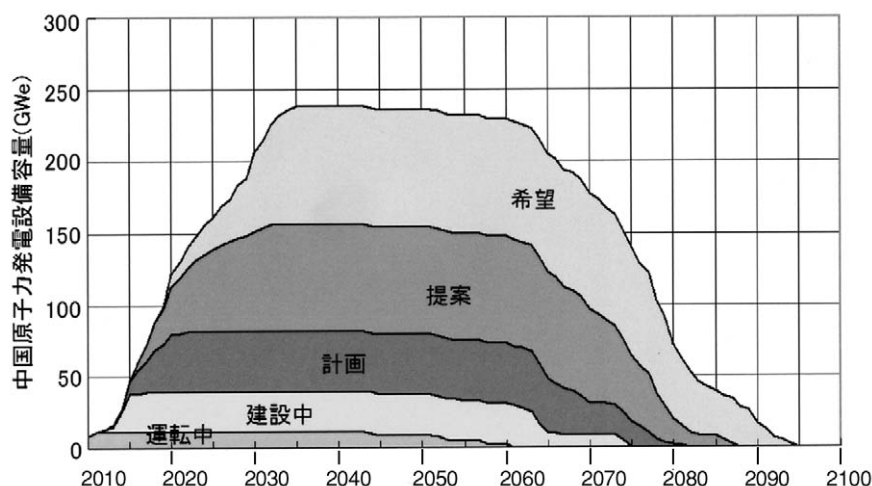


図10 中国の原子力発電設備容量の推移

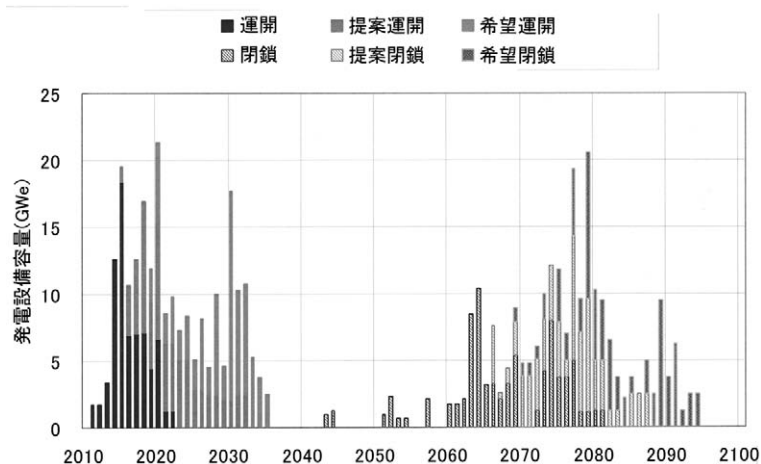


図11 2010年以降の中国の原子力発電の運開と閉鎖

「希望」は「提案」よりも確度が低い。斜線は、それぞれのプラントの閉鎖に対応している。2040年過ぎに現れる閉鎖プラントは、2010年以前に運開されたものである。運開から閉鎖までのプラント寿命は、参考文献（13）のレファレンスケースに従った。

同様のグラフを世界全体（除中国）について図12に示す。運開は2030年手前からなくなっている。

② 軽水炉・燃料の性能

原子力発電のタイプとしては、軽水炉のみを想定し、熱効率、設備利用率、取出平均燃焼度（濃縮度）をパラメータとした。

既設の原子力発電設備容量は、文献の個別プラントデータを積み上げた。特に、中国・イン

ド・ロシアなどの原子力発電成長率の大きな国に関しては、新設計画・提案の規模・時期はWNAの最新データ⁽¹²⁾を、プラント寿命に関しては参考文献（14）を参考にした。2050年から先のデータがない年代に関しては、世界および中国の原子力発電成長率を仮定した。

③ 濃縮プラントの性能

ウラン濃縮市場は、長期にわたり、比較的均衡状態を保っているものと見込まれる。必要ならば、多くの供給者は、新規設備容量を追加することができる。ただし、濃縮技術が資本集約的であるため、重大な過剰供給になることはない。新規プラントの運開遅れがあれば、向こう数年間には、小規模の不足が起きることは確かにあり得る⁽¹⁴⁾。

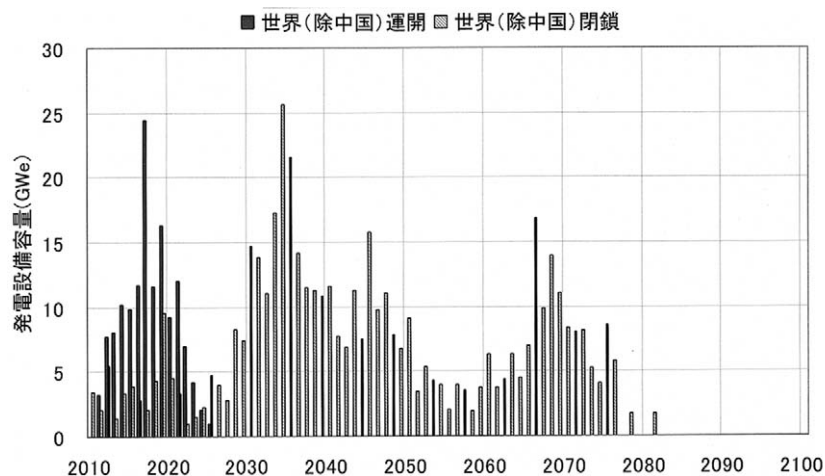


図12 2010年以降の世界全体（除中国）の原子力発電の運開と閉鎖

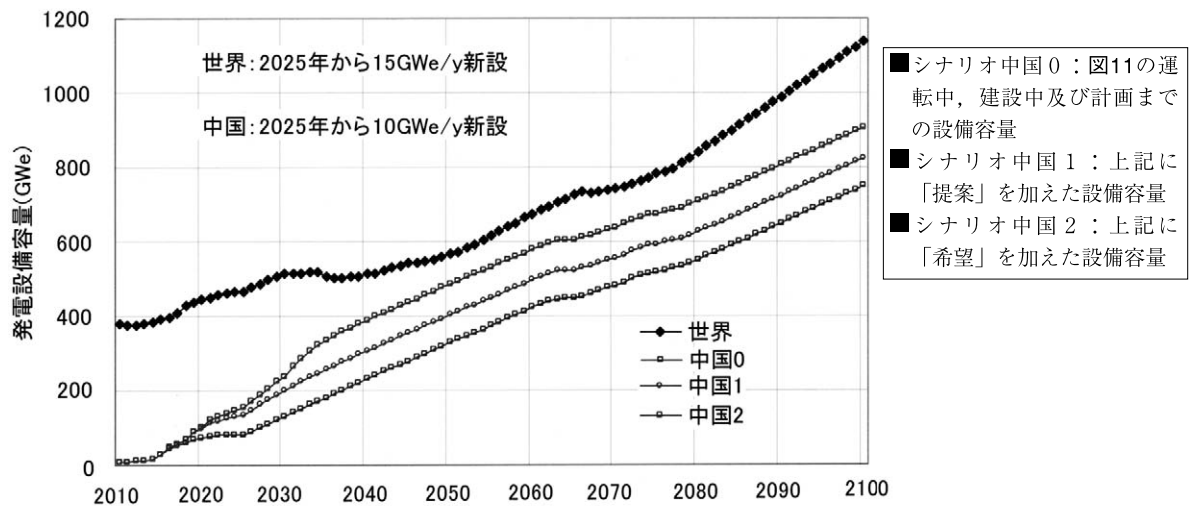


図13 中国に関する3つのシナリオの発電設備容量の比較

濃縮分離作業量の供給能力⁽¹³⁾は、2008年末52,050 tSWU（実効容量）であったが、2015年末における予測は68,850 tSWUである。2008年における濃縮分離作業の供給量の内訳はガス拡散プラント30％、遠心分離プラント60％および解体核兵器からのHEUの希釈10％であったが、2015年にはすべて遠心分離になると予想されている⁽¹⁵⁾。その中にレーザー濃縮が4％程度占める可能性もあるが、現在のところは疑問符がついている。

濃縮ウランを生産するために必要なウランと濃縮要求量に関する組合せは、濃縮時の廃棄ウラン（劣化ウラン）に残っているU-235濃度（TA：Tails Assay）によって分類される。この考え方は、マサチューセッツ工科大学のTom Neff⁽¹⁶⁾が開発したものである。テイルウラン中のU-235濃度（TA）をパラメータとして図を描くことができる。濃縮プラントの性能は重要な要素であるが、現在の遠心分離法で技術的・経済的に達成可能と考えられる範囲を選んだ。

遠心分離法は、ガス拡散法に比して、エネルギー効率が10分の1以下と言われており、TAを0.15％程度まで下げてでも経済的には十分成立する。その程度は、濃縮価格に対する天然ウラン価格の比で決る「最適廃棄材濃度」による。

5. 評価結果の検討

（1）天然ウラン要求量

2010年からの天然ウラン累積消費量に対する年間の分離作業要求量を3つの中国シナリオに対して図14～図16に示す。確認資源631万tおよび究極資源1,670万tに対応する位置に補助線を引いた。右上がりの4本の線（TA一定の線）は、TAがそれぞれ、0.15, 0.20, 0.25, 0.30に対応している。各点は、2010年から2100年までの各年に対応する。他方、右下がりの曲線（同一年の線）は10年おきに、異なるTAの点を結んでいる。TAが大きくなれば、年間分離作業量が小さくなる反面、天然ウラン累積消費量は増大している。中国2ケースの場合でも、TAが0.20％以下なら、2060年過ぎても確認資源を消費し尽くすことはない。また、2100年になっても、究極資源を枯渇させることはない。

2030年から2031年にかけてTA一定の線が不連続なのは、高燃焼度化のためである。

（2）使用済燃料発生量

各国の核燃料サイクルに拘わらず、発生する使用済燃料（SF）は、崩壊熱がある程度下がるまで一時貯蔵しなければならない。従って、SF累計量はウラン要求量と対をなす指標である。

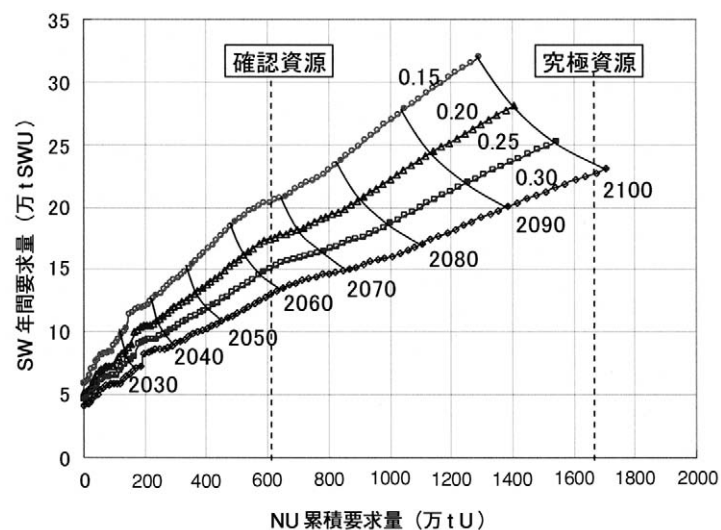


図14 天然ウラン累積要求量に対する年間の分離作業要求量（中国 0 ケース）

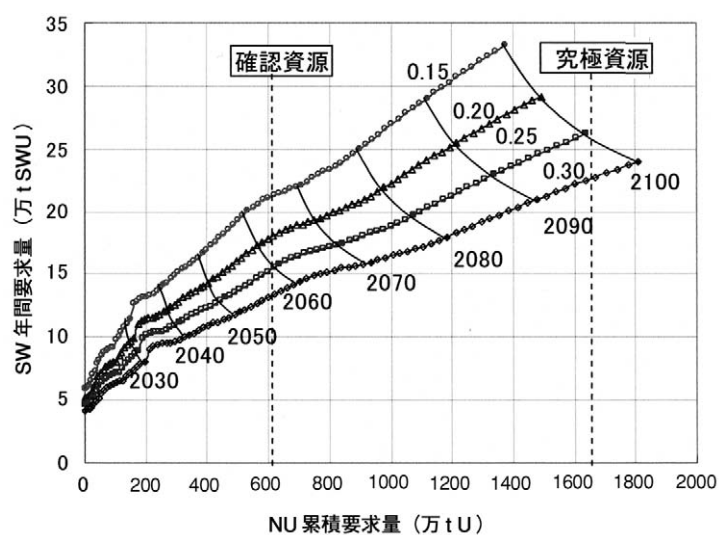


図15 天然ウラン累積要求量に対する年間の分離作業要求量（中国 1 ケース）

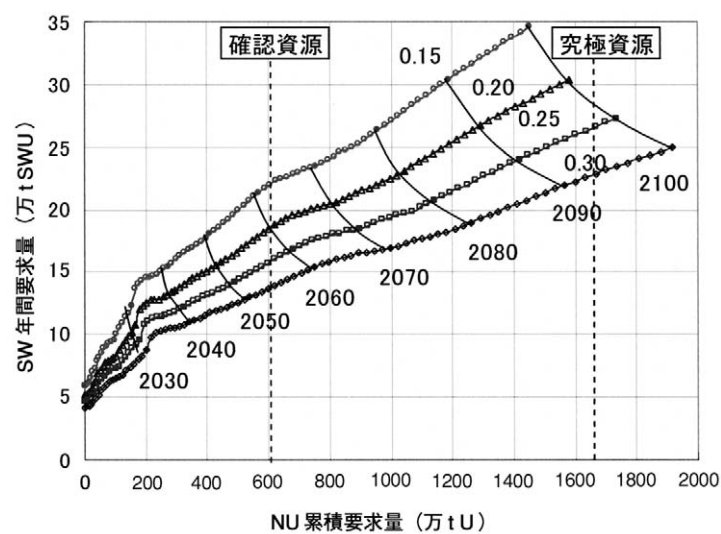


図16 天然ウラン累積要求量に対する年間の分離作業要求量（中国 2 ケース）

天然ウラン累積要求量に対応するSF累計量を図17～図19に示す。

中国の発電規模の影響を検討するために、TAが0.25%の場合に限って整理する。天然ウ

ラン累積要求量が確認資源の範囲内で最大に達する年と全SF累計量，究極資源の範囲内で最大に達する年と全SF累計量を表2に示す。

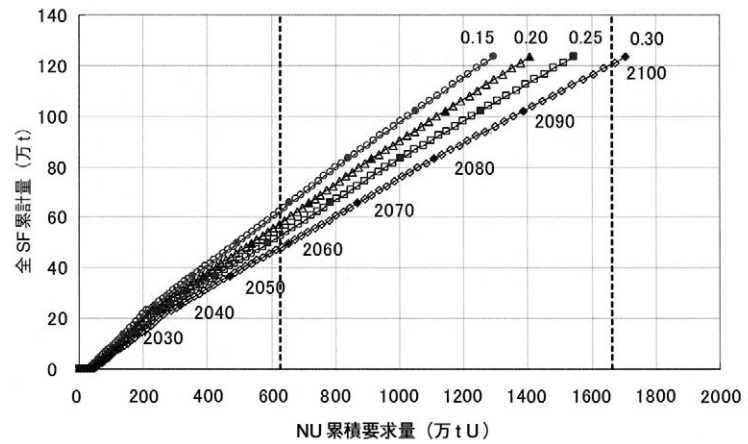


図17 天然ウラン累積要求量に対するSF累計量（中国0 ケース）

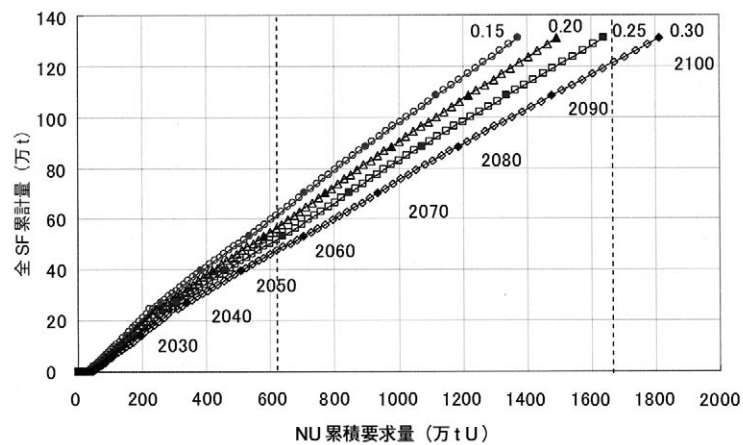


図18 天然ウラン累積要求量に対するSF累計量（中国1 ケース）

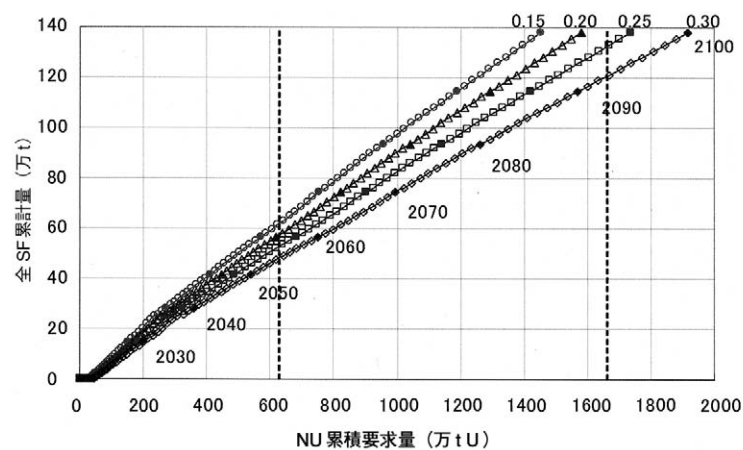


図19 天然ウラン累積要求量に対するSF累計量（中国2 ケース）

表2 中国の天然ウラン累積要求量が最大に達する年とSF累積量（TA:0.25％）

	確認資源の範囲内		究極資源の範囲内	
	最大になる年	累積量	最大になる年	累積量
中国0ケース	2062年	52.6万t	2100年	123万t
中国1ケース	2059年	51.8万t	2100年	131万t
中国2ケース	2057年	51.8万t	2098年	133万t (究極資源量)

6. おわりに

中国の計画が全て実現した場合でも、天然ウラン要求量に関しては、TAが0.20％以下ならば、2060年を過ぎても、確認資源を消費し尽くすことはない。また、2100年になっても、究極資源を枯渇させることはない。

極端な評価ではあるが、究極資源まで使い切ってしまったときのSF累計量が133万t程度であることは、1つの目安としては有用な数値である。むつ市のリサイクル燃料貯蔵株式会社⁽¹⁹⁾の最終的な貯蔵能力は5000トン（乾式）とされている。133万tは、この様な施設を世界全体で266カ所設置すれば十分であることを意味している。

ウラン資源節約に関しては、熱効率などの原子力プラント性能も重要であるが、TAもまた極めて重要であることが示された。これは、技術的にも十分に対応可能な範囲である。

[謝辞]

電力中央研究所からの2010年度委託事業の成果による。

参考文献

- (1) IAEA, Power Reactor Information System (<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>)
- (2) World Nuclear Association, World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements, 6 January 2011
- (3) World Energy Outlook 2010, OECD 2010
- (4) ニュークレオニクス・ウィーク日本語版, 2009.9.17 “(南ア) ペブルベッド実証炉は無期限延期”
- (5) WNN 29 December 2009, “UAE picks Korea as nuclear partner”
- (6) WNN 09 September 2010, “Reactor and fuel take-back for Vietnam”
- (7) WNN 25 February 2011, “Site work to start for Turkish plant”
- (8) 読売新聞2011.1.22 p.3
- (9) WNN 04 January 2010, “Lithuania shuts Ignalina plant”
- (10) Uranium 2009: Resources, Production and Demand - A Joint Report by the OECD NEA and the IAEA 2010
- (11) 「世界の原子力発電開発の動向 2010年版」, 日本原子力産業協会2010
- (12) 中国に関しては, Nuclear Power in China (Updated 21 January 2011)
- (13) The Global Nuclear Fuel Market Supply and Demand 2009-2030, WNA 2009
- (14) Thomas Meade and Michael H. Schwartz, Nuclear Engineering International, September 2010, pp.26-28, “Supply satisfactory-excepting surprises”
<http://www.neimagazine.com/story.asp?sc=2057707>
- (15) Seminar on Global Nuclear Fuel Supply, IAEA, Vienna, 26 Jan. 2009 (<http://www.mofa.go.jp/policy/energy/iaea/seminar0902/tenex.pdf>)
- (16) Thomas Neff, Enrichment supply and the uranium market, <http://www.world-nuclear.org/sym/2009/papers/neff.pdf>
- (17) OECD/IEA, Energy Technology Perspectives 2010
- (18) 原子力エネルギー・アウトルック2008 (NEO2008), OECD/NEA2008 (エネルギー総合工学研究所翻訳版)
- (19) リサイクル燃料貯蔵株式会社ホームページ (<http://www.rfsc.co.jp/about/about.html>)

平成22年度 原子力発電に関する公衆の意識の変化*

下岡 浩 (エネルギー技術情報センター
主管研究員)



1. はじめに

当研究所は、公衆のエネルギーに関する意識がどのようなものであるかについて、平成15年度より首都圏の住民を対象に定期的にエネルギーに関するアンケートを行い、これまでに計8回の調査を実施してきた。

本報告では、8回目調査の結果を中心に、原子力発電に対する意識の分析結果の報告を行う。なお、このアンケートは日本全国の意見を調査したものではないことに注意すべきである。

また、今回の調査では、今まで行ってきた訪問留置調査に加え、インターネット調査も行い、両調査の比較検討を行った。調査の概要は表1の通りである。

2. 訪問留置調査による結果と分析

(1) 主な結果

原子力発電の利用－廃止の意見（Q26. あなたは、日本は今後も原子力発電の利用を続けるべきだと思いますか、やめるべきだと思いますか）と、前回までの調査で、これに影響を与える要因であると分かっている「今日の有用－無用感（Q27. あなたは、原子力発電は、今日の社会や人々の生活にとって有用だと思いますか、無用だと思いますか）」「安心－不安感（Q29. あなたは、原子力発電の安全性については、安心していますか、不安ですか）」「原子力発電所の運営に対する信頼－不信感（Q31. あなたは、日本の原子力発電所は適切に運営されていると思いますか、

表1 調査の概要

【訪問留置調査】	【インターネット調査】
(1) 調査対象：首都圏（東京駅から30km圏内）の満20歳以上の男女 (2) 調査数：500人（男性250人、女性250人） (3) 抽出法：割当法（首都圏における性別・年代別人口構成に合わせ、あらかじめ割り当てた目標数に達するまで回答者を選んで調査をする） (4) 調査方法：訪問留置法（調査員が対象者宅を訪ね、調査票を渡し、後日、記入された調査票を訪問回収する） (5) 調査期間： 第8回目調査（平成22年10月22日～11月22日） なお、8回目調査以前の調査については以下の通り。 第1回目調査（平成15年10月20日～11月17日） 第2回目調査（平成16年10月29日～11月29日） 第3回目調査（平成17年10月28日～11月25日） 第4回目調査（平成18年10月27日～11月24日） 第5回目調査（平成19年10月26日～11月26日） 第6回目調査（平成20年10月24日～11月25日） 第7回目調査（平成21年10月23日～11月20日） (6) 質問構成 1) 公衆の一般的な社会や生活に関する意識 2) 公衆のエネルギー問題に対する意識 3) 公衆の原子力発電に関する意識 4) その他	(1) 調査対象：首都圏（東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県）の満20歳以上の男女 (2) 調査数：500人 (3) 抽出法：割当法 (4) 調査方法：登録モニターによるインターネット調査 (5) 調査期間：平成22年10月22日～11月8日

*本報告書は、平成22年10月に行った調査結果に基づいて、平成23年3月11日の東日本大震災の前に作成されたものです。大震災後の意識の変化については、平成23年度の調査によって明らかにする予定です。

されていないと思いますか)」の経年変化について報告する。

① 原子力発電の利用—廃止意見は前回と同様

原子力発電の利用—廃止の意見は、図1に示すように、2008年調査までは廃止回答（すぐにやめる、徐々にやめていく）の減少など、肯定的方向に変化する傾向がみられていたが、前回の調査では、この傾向が逆転し、否定的方向に変化した。今回調査は回答割合が前回調査とほぼ同様な結果になっており、前回調

査で変化した状況が継続していることが示された。

② 有用回答は約6割

図2に示すように、「今日の有用—無用感」は、2010年では約6割の人が有用回答（有用、どちらかといえば有用）をしており、無用回答（無用、どちらかといえば無用）は非常に少ない。

2009年と比べると2010年は、有用回答の割合が若干増加している。ただし、（2）結果の分

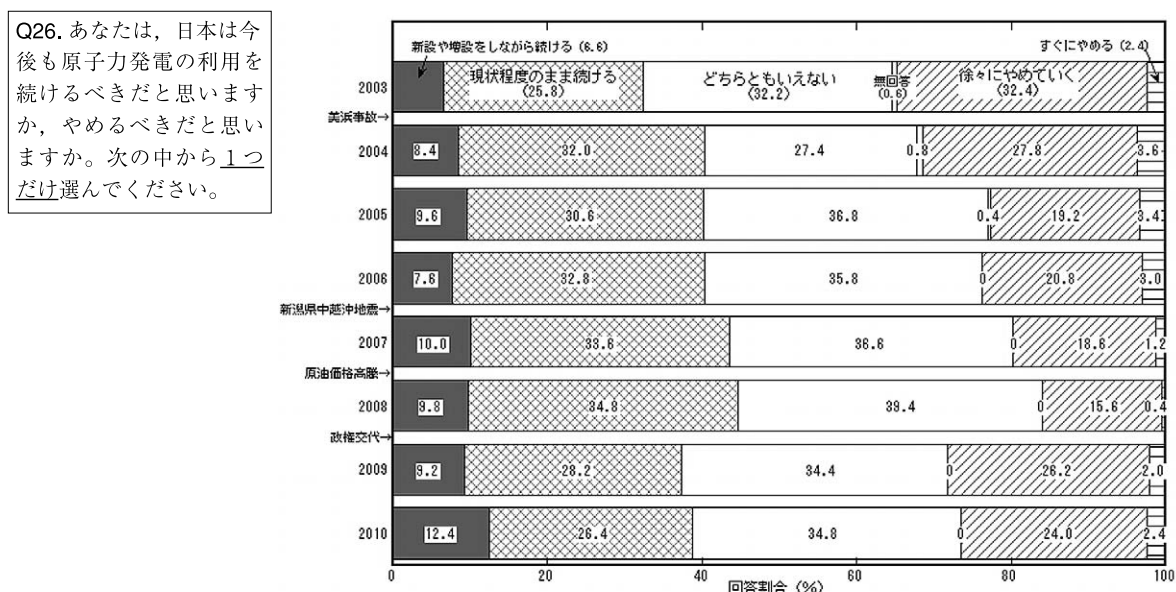


図1 原子力発電の利用—廃止の意見（Q26）

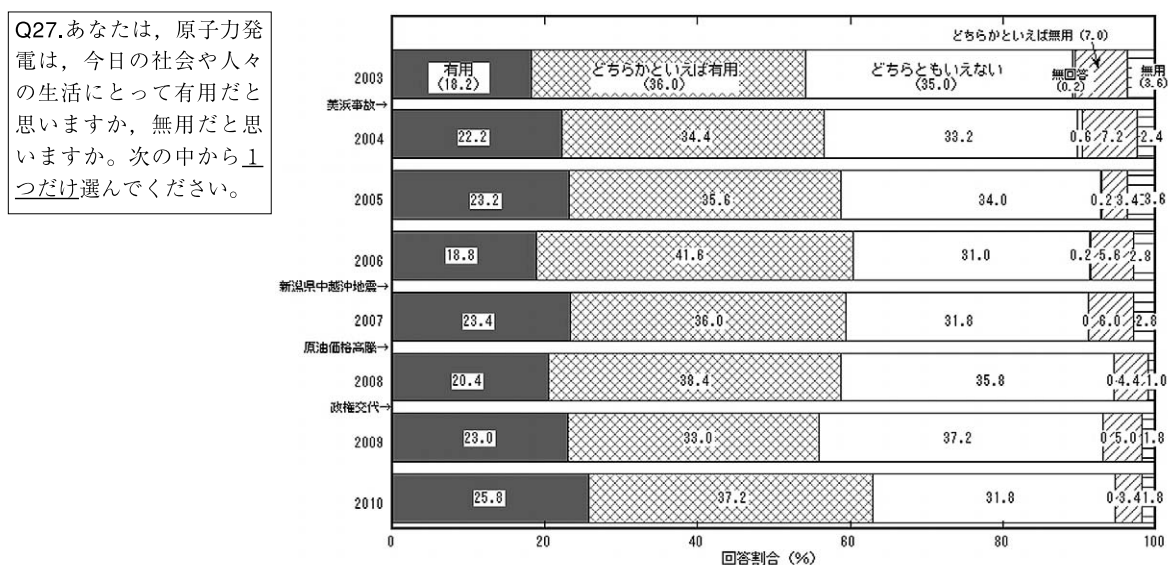


図2 原子力発電の有用—無用感（Q27）

析：今日の有用－無用感と20年後の有用－無用感の関係、に後述するように、今回調査から「20年後の有用－無用感（Q28. あなたは、原子力発電は、20年後の社会や人々の生活にとって有用だと思いますか、無用だと思いますか）」の質問を追加した影響があるかもしれないので、次回以降の調査結果をみる必要がある。

③ 安心－不安感は肯定的方向へ変化している

図3に示すように、「安心－不安感」は、2010年では約2割の人が安心回答（安心、ど

ちらかといえは安心）、5割弱の人が不安回答（不安、どちらかといえは不安）をしており、前回調査とほぼ同様な結果を示している。

2003年からの変化をみると、不安回答が減少するなど、安心－不安感は肯定的方向へ変化する傾向にあるといえる。

④ 運営に対する信頼－不信感は肯定的方向への変化が続いている

図4に示すように、「原子力発電所の運営に対する信頼－不信感」は、地震等のあった

Q29. あなたは、原子力発電の安全性については、安心していますか、不安ですか。次の中から1つだけ選んでください。

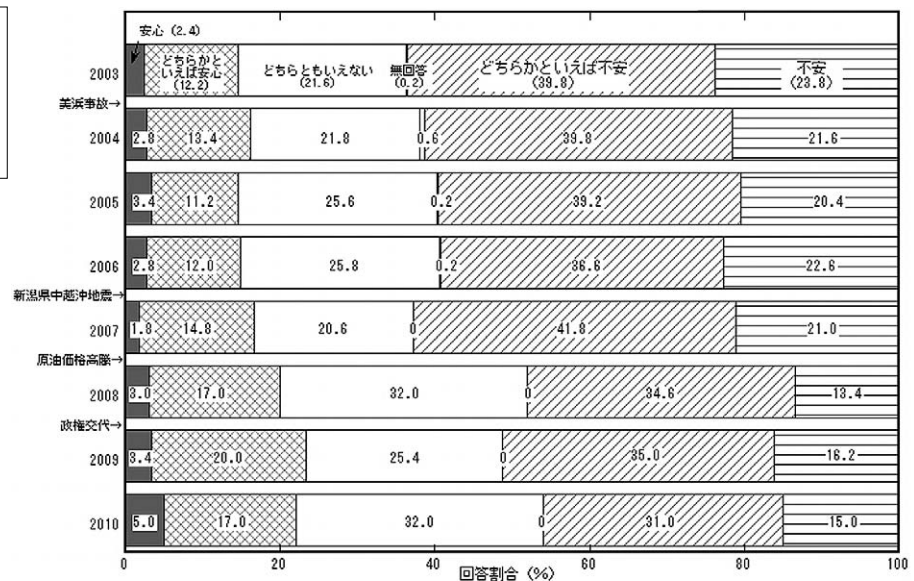


図3 原子力発電の安心－不安感（Q29）

Q31. あなたは、日本の原子力発電所は適切に運営されていると思いますか、されていないと思いますか。次の中から1つだけ選んでください。

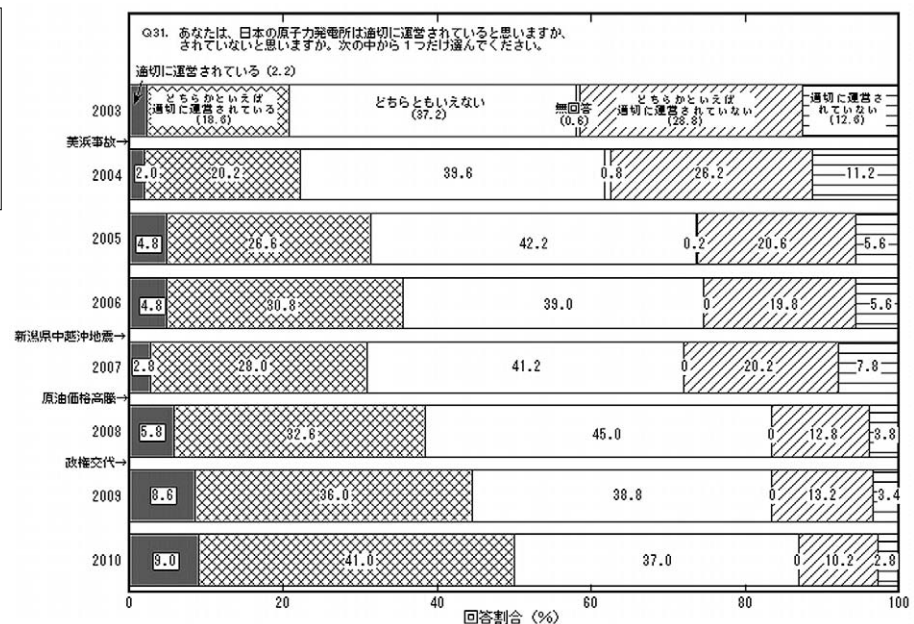


図4 日本の原子力発電所の運営に関する意見（Q31）

2007年を例外として、信頼回答（適切に運営されている、どちらかといえば適切に運営されている）が増え、不信回答（適切に運営されていない、どちらかといえば適切に運営されていない）が減るという肯定的方向への変化が続いている。

（２）結果の分析：今日の有用－無用感と20年後の有用－無用感の関係

原子力発電の利用－廃止意見に大きな影響を与える要因である有用－無用感を、前回までは「今日の有用－無用感」を聞く質問（Q27. あなたは、原子力発電は、今日の社会や人々の生活にとって有用だと思いますか、無用だと思いますか）で聞いていたが、前回調査において「将来の有用－無用感」が重要な要因となっているのではないかと推定を行った（季報 エネルギー総合工学 Vol.33 No.1（2010.4）参照）。

この推定に基づき、今回調査では今まで実施していた「今日の有用－無用感」を聞く質問（Q27）に加え、「20年後の有用－無用感」を聞く質問（Q28. あなたは、原子力発電は、20年後の社会や人々の生活にとって有用だと思いますか、無用だと思いますか）を新たに追加した。

以下に、今日の有用－無用感と20年後の有用－無用感の関係を述べる。

① 原子力発電の今日の有用回答は約6割、20年後の有用回答は約4割

図5に示すように、「今日の有用－無用感」をみると、約6割の人が有用回答（有用、どちらかといえば有用）をしており、無用回答（無用、どちらかといえば無用）は約5%と非常に少ない。

これに対し、「20年後の有用－無用感」をみると、無用回答は約5%から約2割と大幅に増え、有用回答は約6割から約4割へと減少している。

② 「今日の有用回答者」の4割弱が「20年後の有用感」を持っていない

図6は「今日の有用－無用感（Q27）」の回答別に「20年後の有用－無用感（Q28）」の回答を比べたものである。

今日の有用回答者の4割弱が「どちらともいえない、無用、どちらかといえば無用」という回答をしている（回答者全体の約23%）。これに対し、中間回答者はそのほとんどが20年後も中間回答であり、無用回答者もそのほとんどが20年後も無用回答である。

図5で示したような「今日の有用－無用感」と「20年後の有用－無用感」の回答割合の差の大きな要因は、今日の有用回答者の4割弱が20年後の有用感を持っていないことにある。

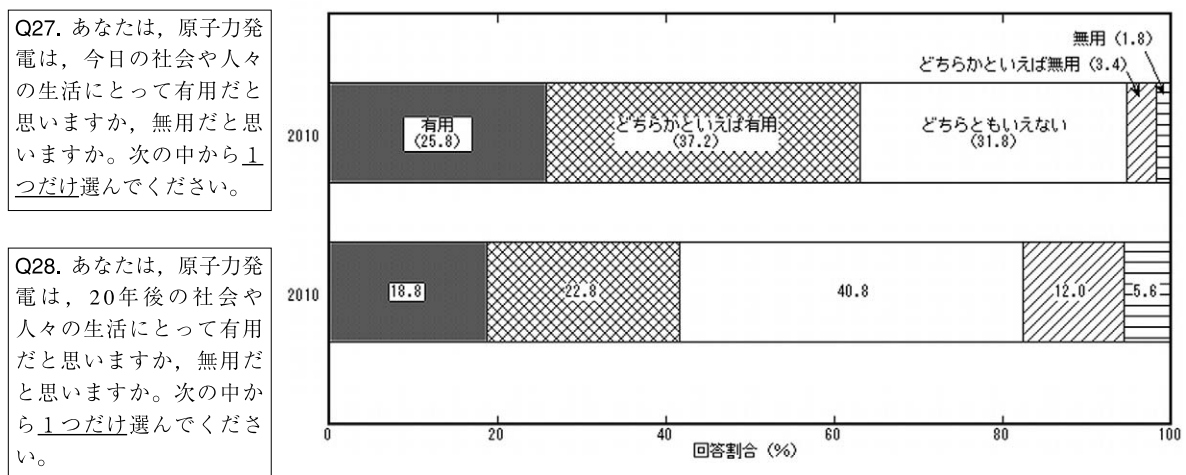


図5 原子力発電の今日と20年後の有用－無用感（Q27, 28）

Q28. あなたは、原子力発電は、20年後の社会や人々の生活にとって有用だと思いますか、無用だと思いますか。次の中から1つだけ選んでください。

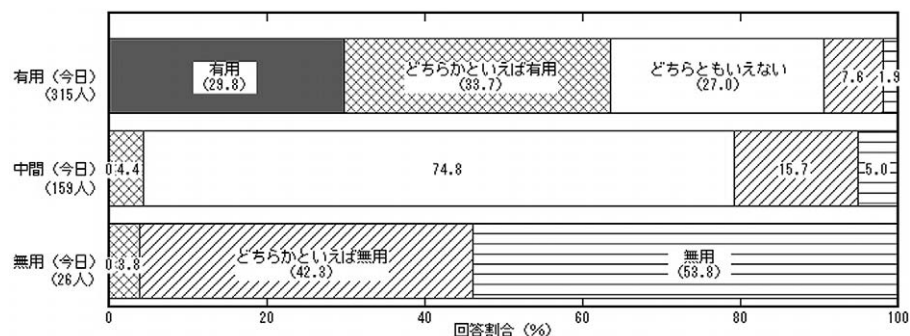


図6 原子力発電の今日の有用—無用感 (Q27) 別にみた20年後の有用—無用感 (Q28)

③ 不安感を持つ人は、今日の有用性は認めても、将来の有用性までは認めていない

前年度までの調査から、有用—無用感と安心—不安感は原子力発電に対する利用—廃止意見と関係があることが示されている。

この原子力発電の有用—無用感と安心—不安感を聞く2つの質問の選択肢を統合して、考察してみる。

図7に示すように、原子力発電についての今日の有用—無用感と安心—不安感 (Q27,29) と、20年後の有用—無用感と安心—不安感 (Q28, 29) を用いて、首都圏の回答者を、それぞれ「有用&非不安グループ、有用&不安グループ、非有用&不安グループ、非有用&非不安グループ」の各4グループに分類した。

図7をみると、今日の有用感と不安感の組み合わせである「有用&不安」グループの割

合 (26%) が、20年後の有用感と不安感の組み合わせである「有用&不安」グループでは小さな割合 (12%) になっている。

不安感を持つ人は、原子力発電は今日では「有用」と思う人がその半数以上もいるが、20年後は「有用」と思う人はわずかしかない。不安感を持つ人は、今日の有用性は認めても、将来の有用性までは認めていないといえる。

有用感を持つ人は、今日と20年後の回答割合はそれぞれ約6割と約4割であるが、この約2割の差の内訳は、今日と20年後の「有用&非不安」グループ間で約7% (37.0%→29.6%), 「有用&不安」グループ間で14% (26.0%→12.0%) であり、「有用&不安」グループ間での差の方が大きい。これが、今日と20年後の有用感の割合の差の大きな要因となっていることになる。

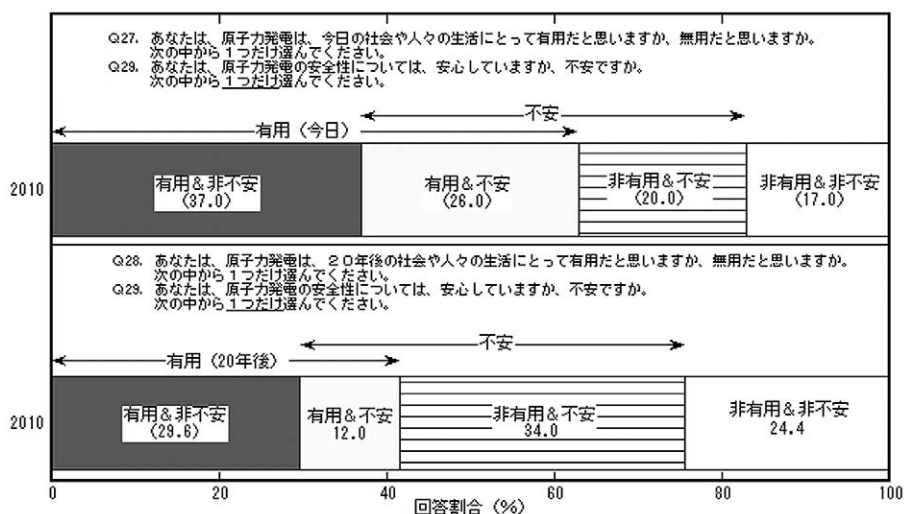


図7 原子力発電についての今日の有用—無用感と安心—不安感の組合せ (Q27,29) と20年後の有用—無用感と安心—不安感の組合せ (Q28,29)

おそらく、将来のエネルギー問題を楽し観するような意識を持つことにより、今日の有用感を持つグループの中で、特に原子力発電に不安感をもつ人が将来の有用感を無くしてしまったものと思われる。

④ 将来の有用－無用感は利用－廃止意見との関係が大きい

図8は「安心－不安感（Q29）」「今日の有用－無用感（Q27）」「20年後の有用－無用感（Q28）」の回答別に「原子力発電の利用－廃止意見（Q26）」の回答を比べたものである。

図8に示すように、原子力発電の利用－廃止意見は、安心－不安感や（今日や20年後の）有用－無用感との関係が大きい。原子力発電の利用－廃止意見との単相関係数（2つの変量の相関の大きさを表す係数）をみると、安心－不安感とは0.55、今日の有用－無用感とは0.55であるのに対し、20年後の有用－無用感とは0.69となっており、20年後の有用－無用感との関係が特に大きい。

図8に示すように、今日でも20年後でも有用回答者（有用、どちらかといえば有用）はその多くが利用意見を持っている。利用意見を持つには有用感を持つことがほぼ必要条件であることが分かる。また、今日の有用回答者の中には廃止意見の人が少なからずいる（約2割）のに対し、20年後の有用回答者の中には廃止意見の人はほとんどいない（1割弱）。この点からも、将来の有用－無用感は利用－廃止意見との関係が大きいことが読み取れる。

前回調査で、将来のエネルギー問題を楽し観するような意識を持つことにより、将来の「有用－無用感」が否定的方向に変化したために「廃止回答が増加した」のではないかと考えられる、と推定した。

今回調査の結果をみれば、将来のエネルギー問題を楽し観するような意識変化によって原子力発電に不安感をもつグループの一部が、将来の有用感を無くしてしまったことが、「廃止回答が増加した」主な要因であろう、と考えられる。

Q26. あなたは、日本は今後も原子力発電の利用を続けるべきだと思いますか、やめるべきだと思いますか。次の中から1つだけ選んでください。

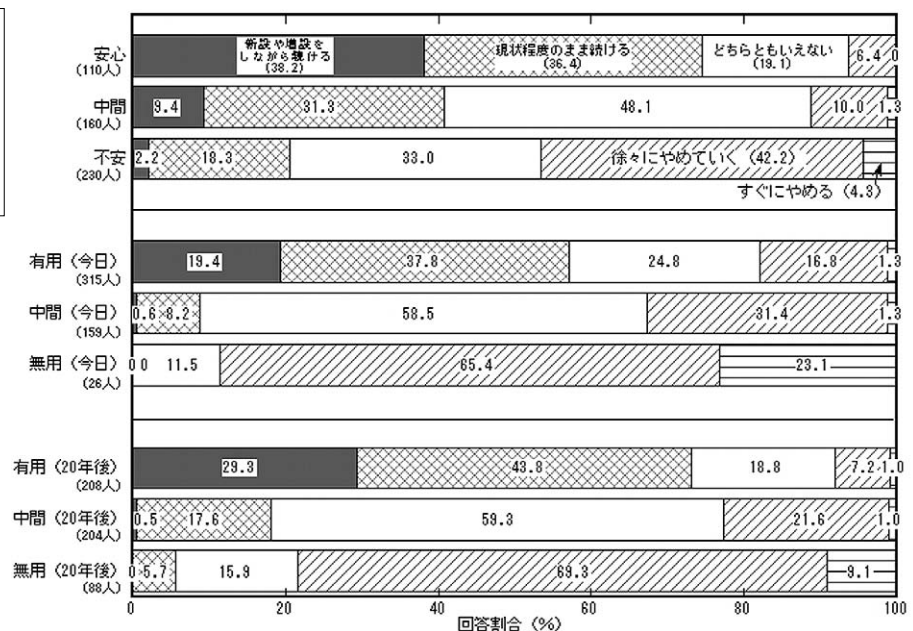


図8 原子力発電の安心－不安感（Q29）・今日の有用－無用感（Q27）・20年後の有用－無用感（Q28）別にみた原子力発電の利用－廃止の意見（Q26）

⑤ その他の結果と新たに得られた結果のまとめ
今回の訪問留置調査では、前回までの調査結果とほぼ同様な次の結果や分析結果が得られている。

- 1) 原子力発電に対する関心は大きくない。そのため中間回答が多い。
- 2) 原子力発電を、現在も将来も最も発電量の多い電源と認識する人が多い。
- 3) 原子力発電の利用―廃止の態度決定要因としては、安心―不安感より有用―無用感の方が大きい。
- 4) 原子力発電への関心は、有用感に、さらには利用意見に繋がる。
- 5) 原子力発電への信頼感は、安心感に繋がる。
- 6) 原子力発電の信頼―不信感や安心―不安感は、肯定的方向へ変化している。
- 7) 原子力発電の過去の運転実績への評価は、信頼―不信感や安心―不安感と関係がある。
- 8) 新エネルギーへの期待が大きい。
- 9) 新エネルギーへの期待の大きさなどの将来のエネルギーに対する考え方が、原子力発電の利用―廃止意見と関係する。
- 10) 地球温暖化問題を重視している。
- 11) 女性は男性に比べ、エネルギー問題や原子力発電問題などへの関心が低い。
- 12) 女性は男性に比べ、原子力発電に対し、否定的回答には大きな差はなく中間回答が多い。
- 13) 女性は男性に比べ、原子力発電に対し、不安感が強いが、他の事象についても概して不安感は強い。

また、今回の調査で新たに得られた結果としては下記がある。

- 1) 前回調査において、エネルギー問題の楽観的方向への変化、原子力発電の利用―廃止意見の否定的方向への変化などの大きく変化した回答は、今回調査でもほぼ同じ回答であり、変化した状況が継続している。
- 2) 原子力発電の「将来の有用―無用感」は「今日の有用―無用感」よりも原子力発電の利用―廃止意見に強い影響を及ぼす要因である。
- 3) 原子力発電を今日では有用と考えるが、将来においては有用とは考えない人がいる（回答者全体の約23%）。
- 4) 原子力発電に不安を持つ人は、今日の有用性は認めても、将来の有用性までは認めていない。

3. インターネット調査と訪問留置調査の比較

今回の調査では、今まで行ってきた訪問留置調査に加え、インターネット調査も行い、両調査の比較検討を行った。インターネット調査については多くの研究例^{(1)～(5)}があり、下記のような特徴があることが報告されている。

- 信頼性が高いとされてきた訪問留置調査などの従来調査は、住民基本台帳の閲覧禁止や不在世帯の増加などで回収率が低下し、母集団の「代表性」が失われつつある。
- インターネット調査は、調査期間が短く、費用が低いといったメリットがある反面、「代表性」に欠けると認識されており、信頼性の検証が十分ではない。現段階では、従来調査をインターネット調査で代替することはできないとされている。
- インターネット調査の回答者は、従来型調査と比較して高学歴、ネガティブな回答が多い等の特徴がある。

これらの知見を踏まえ、インターネット調査と訪問留置調査の比較を行った。今回行ったインターネット調査は、調査対象地域を訪問留置調査の東京駅から30km圏内とすることが困難であったため、調査対象地域を（東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県）とした。また、年代の割当に関して70歳以上のモニターを必要数確保することが困難であったため、60代と合わせて、60歳以上とした。この点が訪問留置調査と異なる。

(1) 両調査でほぼ同様の結果を示す質問が多くある

図9～図11に示すような、インターネット調

査と訪問留置調査の結果が、ほぼ統計上の誤差範囲内にある質問が全42問中20問程度あった。

Q1. あなたは、今の日本の社会に、全体として満足していますか、不満ですか。次の中から1つだけ選んでください。

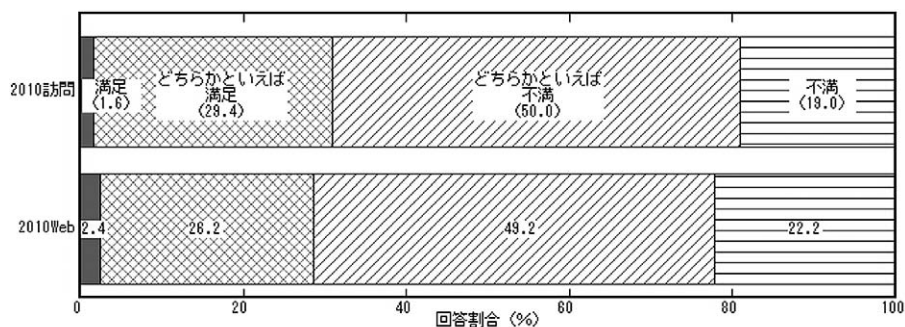


図9 訪問留置調査とインターネット調査の比較／今の日本の社会への満足度 (Q1)

Q32. あなたは、原子力発電に関する情報は、公開されていると思いますか、公開されていないと思いますか。次の中から1つだけ選んでください。

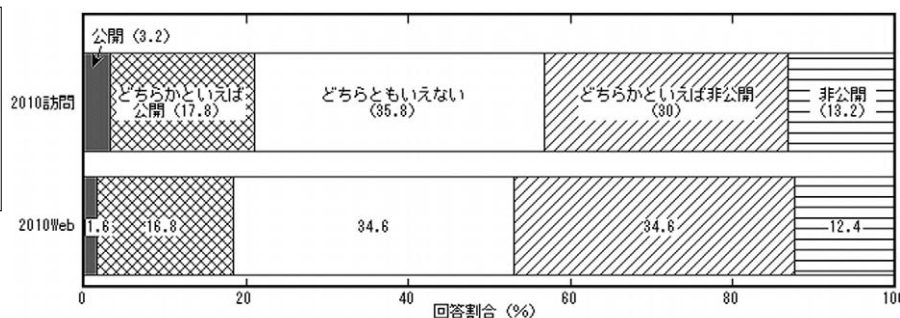


図10 訪問留置調査とインターネット調査の比較／原子力発電に関する情報公開の評価 (Q32)

Q37. あなたは、今までの日本の原子力発電の運転実績をどの様に思っていますか。次の中から1つだけ選んでください。

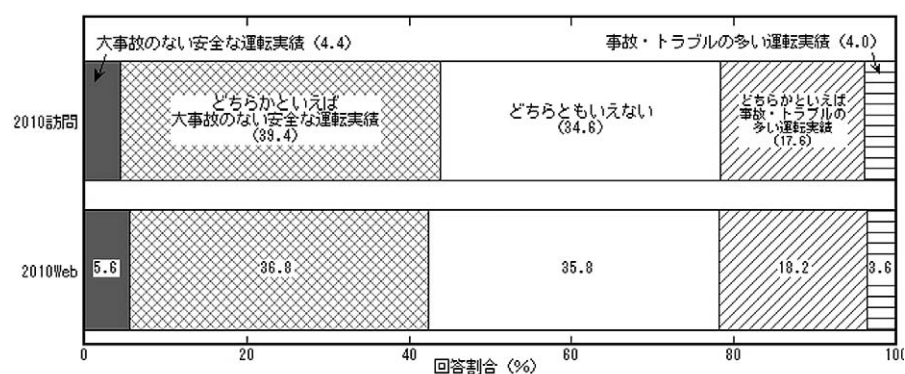


図11 訪問留置調査とインターネット調査の比較／日本の原子力発電の運転実績の評価 (Q37)

（２）両調査で結果に差のある質問

両調査で差があるものの１つは、エネルギーや原子力発電に対する関心の高さである。図12に示すように、原子力発電についての関心度は、インターネット調査の方が、関心回答（関心がある、どちらかといえば関心がある）が多い。エネルギー問題についての関心（Q12）でも同様である。インターネット調査の回答者には、これらに対する関心の高い人達が多くいるといえる。

図13に示すように、インターネット調査は訪問留置調査と比べ、現在の日本の発電量の最も多い電源として、正解である「火力発電」との回答が多い。正解率は3分の1程度と低い。訪問留置調査の回答者に比べれば、知識が高いといえる。

また、インターネット調査の回答者は、エネルギーや原子力発電に対する知識や関心の高い人達が多いためか、両質問において「わからない」の回答割合が、訪問留置調査と比べ少ない。この他にも、「日本の原子力発電関係の技術水準の評価（Q38）」「日本の原子力発電施設の事故イメージ（Q39）」「原子力発電の利用－廃止の判断理由（Q40）」では、「わからない」等の回答割合が訪問留置調査と比べ少ない。

また、インターネット調査の回答者は、訪問留置調査の回答者に比べて、将来に悲観的な回答を行うという結果も得ている。

図14に示すように、インターネット調査は訪問留置調査と比べ、地球温暖化の原因の1つといわれている2酸化炭素の排出量を大幅

Q25. あなたは、原子力発電について関心がありますか、関心がありませんか。次の中から1つだけ選んでください。

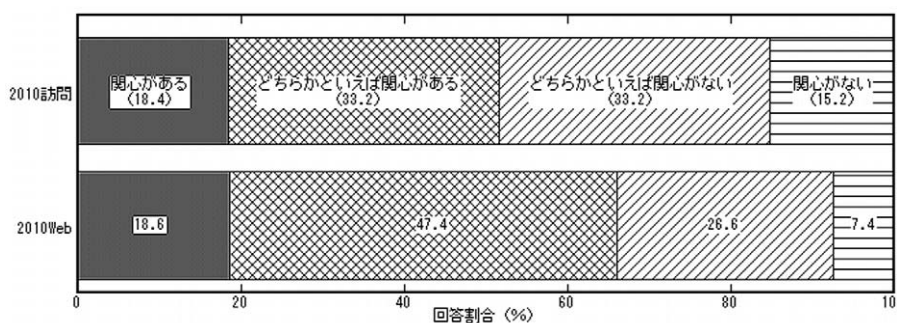


図12 訪問留置調査とインターネット調査の比較／原子力発電についての関心度（Q25）

Q18. あなたは、現在の日本で発電量の最も多いのはどの発電だと思えますか。次の中から1つだけ選んでください。

Q19. あなたは、20年後の日本で発電量の最も多いのはどの発電だと思えますか。次の中から1つだけ選んでください。

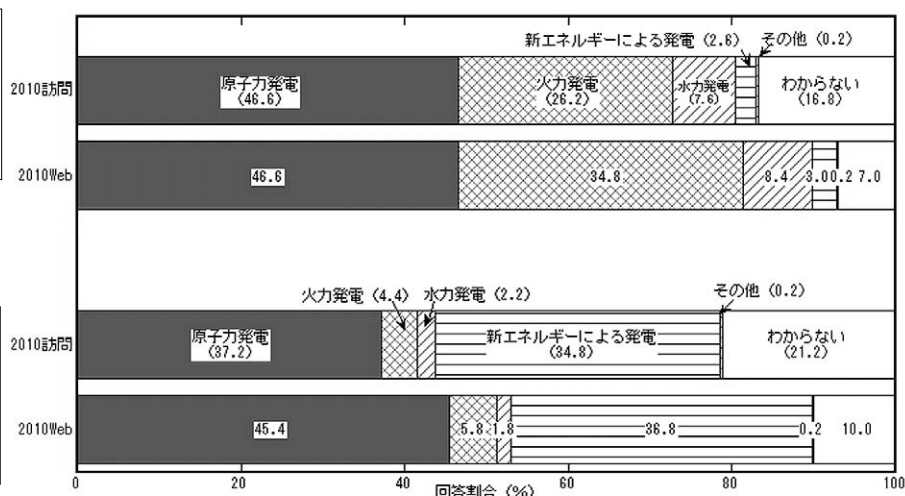


図13 訪問留置調査とインターネット調査の比較／現在の日本の発電量の最も多い電源と20年後の予測（Q18,19）

Q17. あなたは、20年後の日本では、熱心に取り組めば、地球温暖化の原因の1つといわれている二酸化炭素の排出量を大幅に下げることができると思いますか。次の中から1つだけ選んでください。

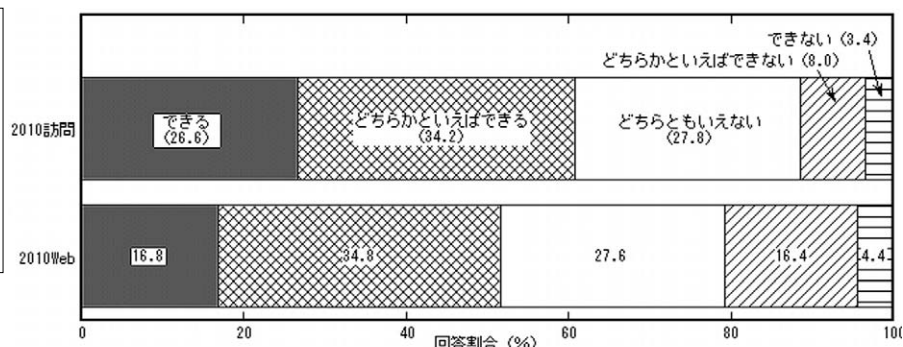
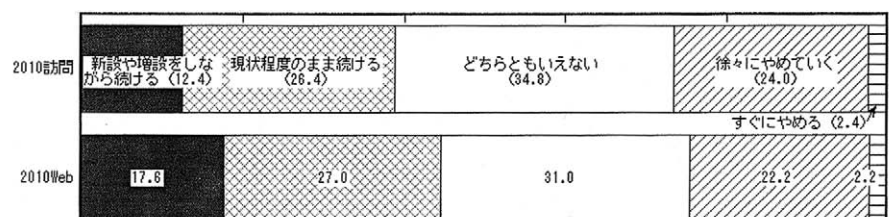


図14 訪問留置調査とインターネット調査の比較／20年後の日本の二酸化炭素の排出量低減可能性についての認識 (Q17)

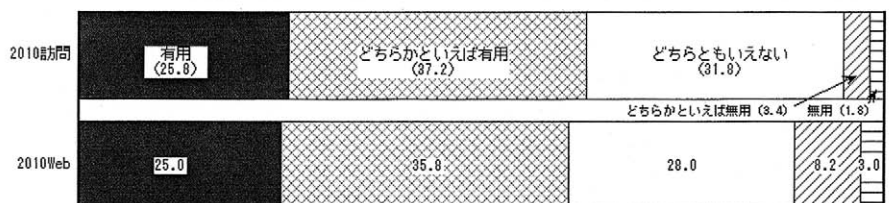
に下げることができると思う回答（できる、どちらかといえばできる）が少ない。「20年後の日本の新エネルギーの可能性についての認識 (Q15)」「20年後の日本の省エネルギーの可能性についての認識 (Q16)」でも同様な結果が得られている。

今回得られたインターネット調査の「エネルギーや原子力発電に対する関心が高い」「エネルギー問題に対して知識が高い」「わからない等の回答割合が少ない」「将来に悲観的」という特徴は、過去に行われた研究例で示された、インターネット回答者は「高学歴が多い、

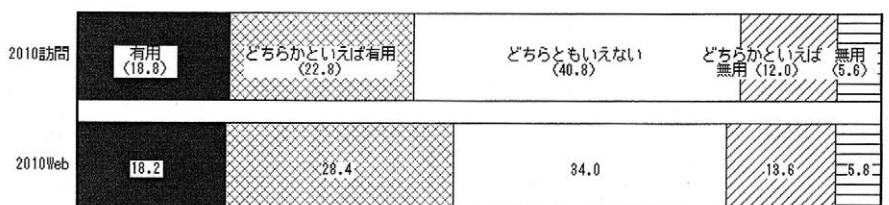
Q26. あなたは、日本は今後も原子力発電の利用を続けるべきだと思いますか、やめるべきだと思いますか。次の中から1つだけ選んでください。



Q27. あなたは、原子力発電は、今日の社会や人々の生活にとって有用だと思いますか、無用だと思いますか。次の中から1つだけ選んでください。



Q28. あなたは、原子力発電は、20年後の社会や人々の生活にとって有用だと思いますか、無用だと思いますか。次の中から1つだけ選んでください。



Q29. あなたは、原子力発電の安全性については、安心していますか、不安ですか。次の中から1つだけ選んでください。

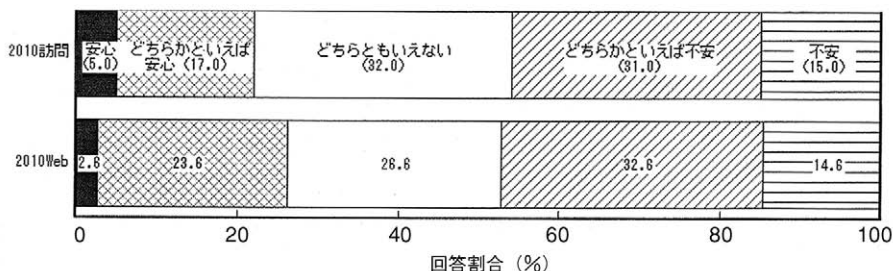


図15 訪問留置調査とインターネット調査の比較／原子力発電の利用—廃止意見、今日と20年後の有用—無用感、安心—不安感 (Q26,27,28,29)

ネガティブな回答が多い」などの特徴と矛盾しない結果であるといえる。

(3) 原子力発電に関する主要な4つの意見は、 両調査でほぼ同様の結論を得る

図15に原子力発電に関する主要な4つの意見について、両調査の結果を比較して示す。

両調査結果に統計上の差はあるものの、原子力発電の利用－廃止意見では利用回答の方が廃止回答より多い、今日の有用回答は無用回答に比べ圧倒的に多い、20年後の有用回答は今日の有用回答に比べ少ない、不安回答は安心回答より多いなど、ほぼ同様の結論を得る結果となっている。

この例以外でも、両調査の結果が異なる結論になるような質問は少ない。

4. おわりに

訪問留置調査では、前回調査において、それまでの調査では肯定的方向に変化していた原子力発電の利用－廃止意見が、逆に否定的方向に変化し、廃止回答が大きく増加したという大きな変化がみられていた。今回調査では、回答割合が前回とほぼ同じ結果を得ており、前回調査で変化した状況が継続していることが示された。

また、前回調査で原子力発電の利用－廃止意見に、原子力発電の「将来の有用－無用感」が強く影響を及ぼすのではないかと推定していたので、今回の調査では、新たにこの「将来の有用－無用感」を聞く質問を加えて調査を行った。その結果、原子力発電の「将来の有用－無用感」は「今日の有用－無用感」よりも原子力発電の利用－廃止意見に強く影響を及ぼす要因であることが判明し、「将来の有用－無用感」の重要性が確認できた。

また、今回の調査では今まで行ってきた訪問留置調査に加え、インターネット調査も行い、両調査の比較検討を行った。

比較検討の結果、インターネット調査は訪問留置調査に比べ、概して同様の結果を示していた。ただし、インターネット調査の回答者は、訪問留置調査と比べ、「エネルギーや原子力発電に対する関心が高い」「エネルギー問題に対して知識が高い」「わからない等の回答割合が少ない」「将来に悲観的」という特徴があった。また、両調査結果に統計上の差があっても、異なる結論になるような質問は少なかった。今後も、両調査の比較検討を行っていく予定である。

最後に、本調査をとりまとめるにあたって、アンケート調査にご協力いただいた方々に対し深く謝意を表します。

なお、アンケート結果は当研究所のウェブサイト (<http://www.iae.or.jp/index.html>) に公開されている。

参考文献

- (1) 石田浩, 佐藤博樹, 他, 信頼できるインターネット調査法の確立に向けて, SSJDA-42 (2009年3月)
<http://ssjda.iss.u-tokyo.ac.jp/rps/RPS042.pdf>
- (2) 内閣府大臣官房政府広報室, 世論調査におけるインターネット調査の活用可能性～国民生活に関する意識について～ (2008年6月)
<http://www8.cao.go.jp/survey/sonota/h20-internet1/index.html>
- (3) 独立行政法人 労働政策研究・研修機構, インターネット調査は社会調査に利用できるか―実験調査による検証結果―, 労働政策研究報告書 No. 17 (2005年1月)
<http://www.jil.go.jp/institute/reports/2005/documents/017.pdf>
- (4) 大隅 昇・前田 忠彦, インターネット調査の抱える課題―実験調査から見えてきたこと― (その1), よろん 日本世論調査協会会報, 第100号記念号 (2007年10月)
- (5) 大隅 昇・前田 忠彦, インターネット調査の抱える課題―実験調査から見えてきたこと― (その2), よろん 日本世論調査協会会報, 第101号 (2008年3月)

平成23年度 事業計画

(財) エネルギー総合工学研究所

1. 基本的な考え方

(1) 当研究所は、これまで、わが国のエネルギー工学分野の中心的な調査研究機関として、産・学・官の緊密な連携の下、各エネルギー技術分野における専門的な知見を集め、技術的側面から総合的に調査、研究および評価を行い、その成果の普及に努めてきた。技術は、わが国が国際社会で優位性を維持向上する上で不可欠な資産であり、将来のリスクに対応し得る強靱なエネルギー戦略の構築・実現に貢献するものと考えられる。当研究所は、今後とも「エネルギーの未来を拓くのは技術である」との認識の下、エネルギー技術に係る調査、研究、評価、成果の普及等に取り組んでいく所存である。

(2) 昨今、中国をはじめとする新興国の台頭に伴うエネルギー市場構造の変化、中東情勢の流動化、原油をはじめとする化石燃料価格は高い水準で推移するなど、エネルギーを巡る国際情勢は不確実性を増している。一方、地球環境問題はポスト京都の温室効果ガス削減目標を巡り国際的に議論が継続している。先進諸国、新興国、さらに資源国とも、エネルギーの確保および地球環境問題への対応の重要性を認識し、原子力発電や再生可能エネルギーの開発利用、化石燃料のクリーン利用や高度化に積極的に取り組むようになってきている。わが国においては、エネルギー・環境に係る産業や技術が主導する成長戦略が提唱され、昨年はベトナムへの原子力発電プラ

ントの輸出が決まる等、エネルギーインフラの海外展開も積極的になされている。

(3) このような状況の下、わが国が、国家存立の基盤であるエネルギーを安定的に確保し、地球環境問題に適切に対応し、また、顕在化が懸念される人類共通のリスクである資源制約および環境制約に対処していくためには、長期的かつグローバルな観点から、戦略的にエネルギー供給確保および利用方策を企画立案し、着実に実施していくことが必要である。したがって、当研究所の重要な任務は、「総合工学」の視点に立脚して、産・学・官の緊密な連携の下、中立的な立場から、広範なエネルギー技術全分野を俯瞰し、エネルギー技術開発のあり方について調査、研究及び評価を行い、エネルギーや地球環境に係るリスクが、わが国経済社会に与える影響を分析するとともに、これらの影響緩和、さらには問題解決に向けた提言を発信し、国民経済の発展に貢献していくことであると考えている。

(4) これまで、当研究所は、中長期的な観点からエネルギー技術全般を俯瞰し評価分析するとともに、将来型原子炉、スマートグリッド、バイオマス利用、クリーンコールテクノロジー（CCT）及び二酸化炭素回収・貯留（CCS）、グリーン水素、太陽熱利用等の最新技術に関し調査研究を行ってきているが、新たな技術課題を探索するとともに、技術評価に関する知見の最新化及び深化を図ることも、当研究所の重要な任務と考える。

次世代軽水炉技術開発事業に関しては、昨年度、これまでの成果に関し中間的な評価が行われ、引き続き官民一体となって2015年の基本設計終了を目指して取り組むことが関係機関で合意された。本年度からは、技術開発は原子炉メーカーが国の財政支援を直接得て主体的に担う体制となる一方、当研究所は引き続き中核機関としてプロジェクト管理業務を担うとともに、調査研究機関としての中立的な立場とノウハウを活かした事業を実施する。また、メーカーが行う技術開発に対して資金面も含め協力を行う。

また、これまで開発・運用してきた原子力安全解析モデルを活用して、海外の原子力発電施設の安全向上に貢献していくこととしている。

(5)「情報」と「評価」は、当研究所の事業の基盤を成すものであり、当研究所が運営するエネルギー技術情報プラットフォームの更新・改良を進め、最新の技術情報、評価分析結果等の技術的知見を、引き続き、会員企業をはじめとする関係各位に提供していくこととする。また、当研究所の評価分析能力向上の観点から、エネルギー技術の評価ツールの充実を図る。

(6) 当研究所を巡る経営環境には厳しいものがあり、事業収支の改善に向けて一層の収益の確保と業務運営全般に亘るコストダウン等の経営努力を図ることが急務である。受注を巡る競争環境の下、これまで蓄積してきた知見を生かし、競争力ある調査研究を実施するとともに、調査研究成果を活用した事業展開を行う。

(7) 新公益法人法により全ての公益法人は期限内に新しい法人形態を選択し移行することが要請されており、当研究所は、本年度において移行に向け準備を行うこととする。

併せて、このような機会に、激動する時代

環境に適確に対応すべく、成功体験や優位性に安住することなく、先駆的な調査研究および公正な経営両面で基盤の強化を図っていくこととする。

(8) 当研究所は、次のような点にも留意しつつ事業を実施する。

① 有望技術の実用化には、国の政策、市場ニーズ、社会の受容性との適合性も必要とされることから、技術と社会との係わりを考慮して、学際的な調査研究の実施、異分野の調査研究機関との連携等による総合的なアプローチを進める。

② 調査研究及び技術開発活動の推進にはコンプライアンス体制の強化が不可欠であり、当研究所の事業に係る協力企業や外注先企業も含め、行動規範等の徹底を図る。

③ 調査研究成果等の適切な普及を図り、関係機関の当研究所に対する評価向上に努めることにより、IAEブランドの一層の向上を図る。

2. 各エネルギー分野における調査研究等のテーマ

(1) 総合的な見地からの調査研究

① エネルギー技術開発戦略に係る調査研究

エネルギーの安定供給、地球環境問題の解決の両面から、国、研究機関、民間企業等国内関係機関が有する知見を総合し、わが国の将来を中長期的な観点から見据えた、当研究所としてのエネルギー技術戦略策定に係る調査研究を行う。

② エネルギー技術情報プラットフォームの運用・整備

上記戦略策定の基盤を成す「情報」については、資源制約及び環境制約の克服に資するエネルギー技術に係る情報の収集・分析・評価を行い、関係機関・企業がインターネットを通してアクセスできるエネルギー技術情報

プラットフォームの更新・充実を進める。また、エネルギーに関する技術開発動向についての調査・分析を進める。

③ エネルギーシステムに係る評価手法の開発及び充実

上記戦略策定の基盤を成す「評価」については、地球環境に係る長期分析が可能な地球環境統合評価モデル(GRAPE)の機能拡張を図るとともに、新たなエネルギーシステム分析評価モデルの導入により、供給及び需要双方の詳細分析を可能とする体制を整える。

④ エネルギーに関するアンケート調査研究

今後のエネルギー技術開発のあり方に関しては企業や大学に対し、また、エネルギーに係る意識に関しては一般公衆に対して、アンケート調査を実施し、その動向を分析する。

⑤ エネルギーマネジメントシステムの国

エネルギーマネジメントシステムに係る国際規格(ISO50001)は今夏に発行予定であり、同規格の普及に資する事業に取り組んでいくこととする。また、同規格に関連する諸規格の策定、また、新たに省エネルギー効果の測定や評価に係る国際規格の策定に向け、関係機関の動向や意見を調査するとともに関連の国際会議や議論に参画していく。

⑥ わが国の競争力強化と資源安定供給に向けたシステム輸出に関する調査研究

わが国の経済成長戦略である原子力発電、クリーンコールテクノロジー、新エネルギー分野のプラントシステムを輸出する上でのフィージビリティスタディー等の検討に参画する。

(2) 新エネルギー・エネルギーシステム関連

地球環境重視の潮流の下、新エネルギーの開発利用が推進されており、太陽光、太陽熱、風力等分散型電源の導入拡大、電気自動車の

普及等に対応して電力を安定的・効率的に供給するスマートグリッドが注目されている。新エネルギーは、資源賦存に地域性が大きく利用形態も多様なため、供給から利用に至るシステムの最適化を図りつつ、各種資源・用途の相互比較も念頭に置いて長期的な視点から技術開発を推進することが必要である。

平成23年度には、次世代の電力ネットワークやエネルギーネットワークのあり方について調査研究を行う。また、セルロース系バイオマスからの液体燃料製造について、種類や賦存形態に合わせた最適利用システムの総合的な調査研究を行う。産業部門では、省エネルギーに資する機器の高効率化を実現する技術シーズの調査研究や国際協力を行う。また、運輸部門では、電気自動車及びプラグインハイブリッド自動車に関する開発動向、技術開発とコスト低減に応じた普及可能性、充電方式等について調査研究を行う。

(ア) 次世代の電力系統に関する調査研究

- ① 次世代電力ネットワーク研究会の運営
- ② スマートエネルギーネットワークに係る調査研究
- ③ 通信機能付き電力制御システムの実証に係る調査研究
- ④ 大規模蓄電池による出力変動電源対策に係る調査研究
- ⑤ 中国における直流送電に係る調査
- ⑥ 海外の電力ネットワークに係る調査

(イ) 再生可能エネルギーに関する調査研究

- ⑦ バイオマスからの液体燃料製造に係る総合調査研究
- ⑧ 畜産バイオマスの発電利用に係る調査研究
- ⑨ インドネシアにおけるバイオエタノール市場に係る調査

(ウ) 省エネルギーに関する調査研究

- ⑩ 超臨界CO₂ガスタービンに係る研究開発

⑪ 高効率電気機器に係る国際協力に関する調査

⑫ ヒートポンプ導入施策に係る調査研究

(エ) 電気自動車およびプラグインハイブリッド自動車、その他

⑬ 電気自動車およびプラグインハイブリッド自動車の開発動向に係る調査研究

⑭ 燃料電池自動車の導入シナリオに係る調査研究

⑮ スマート充電コントローラの実証に係る調査研究

(3) 水素エネルギーに関する調査研究

水素エネルギーは、将来の重要な二次エネルギーと期待され、家庭用燃料電池の市販、燃料電池自動車および水素供給装置の普及促進等、導入拡大に向けた動きが見られる。

平成23年度においては、短中期的な課題である水素輸送および貯蔵に関し、水素低温加圧貯蔵技術、水素を用いた電力貯蔵技術等の調査研究を行う。また、中長期的な課題として、風力等の再生可能エネルギーに由来する水素（グリーン水素）に関し技術的成立性、供給チェーンシナリオ等の調査研究、また、製油所や高温ガス炉における水素製造に関し評価研究等、さらに、水素エネルギーシステムの高度化に資する可逆型燃料電池技術、水素技術およびシステムの統合的な評価等に関し調査研究を行う。

(ア) 燃料電池自動車導入に関する調査研究

① 水素大量輸送に資する水素低温加圧貯蔵技術に係る調査研究

② 水素ステーションのコスト低減に資する高圧水電解技術に係る調査研究

(イ) 海外再生可能エネルギー水素システム等に関する調査研究

③ グリーン水素に係る調査研究

④ 海外で生産される水素の供給チェーンシナリオに係る調査研究

(ウ) 水素の製造、輸送および貯蔵に関する調査研究、その他

⑤ 将来型製油所水素シナリオに係る調査研究

⑥ 水素を用いた電力貯蔵技術の比較評価に係る調査研究

⑦ 可逆型燃料電池技術に係る調査研究

⑧ 水素およびアンモニアの技術・市場に係る調査研究

⑨ 水素技術およびシステムの統合的な評価に係る調査研究

⑩ 国内外における水素技術政策動向調査

(4) 化石エネルギー関連

化石燃料については、温室効果ガス排出量の削減を図りつつ、エネルギーの安定供給を図っていくことが重要な課題である。かかる観点から、地球環境保全を前提として、化石燃料の開発から供給、転換、利用、さらに炭素回収・貯蔵までのトータルシステムに関し調査研究を実施する。

平成23年度においては、石炭ガス化複合発電（IGCC）から発生するCO₂を回収し貯留するまでのトータルシステム、また、石炭ガス化を核として低炭素の合成ガスや液体燃料を経済的に製造するシステムに関し調査研究を行う。また、石炭火力発電の利用高度化に資する低品位炭改質に関し調査研究を行う。

近年、再生可能エネルギーの一環として世界的に太陽熱利用が注目されている。これまで蓄積してきた、わが国の太陽熱利用技術に関し、化石燃料や造水と組み合わせたシステムでの利用を含めて、国内外での活用のあり方について調査研究を行う。

その他、石油関連プラント設備等の寿命予測に係る調査研究等を実施する。

(ア) 化石燃料の高度転換技術（石炭ガス化、CCS等）を核としたエネルギーシステム研究

① 革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電

- に係る調査研究
- ② 石炭ガス化技術の多目的利用に係る調査研究
 - ③ 低品位炭改質に係る調査研究
 - ④ わが国が開発したCCTに係るシステム輸出に係る調査研究

(イ) 最新の太陽熱利用技術に関する調査研究、その他

- ⑤ 集光型太陽熱発電（CSP）技術に係る調査研究
- ⑥ 産油国等へのCSP技術の適用に係る調査研究
- ⑦ 石油精製・石油化学設備の寿命予測システムに係る調査研究

(5) 地球環境関連

地球環境問題は、今世紀中頃を目途とした世界の温室効果ガス排出量の半減に向け、国際社会全体として取り組みが進められているが、気候変動枠組条約締約国（COP）におけるポスト京都の目標を巡る議論に示されるように、途上国と先進国の利害対立などの国際政治、科学技術、経済、社会等広範な分野に関連し、国際合意形成は容易ではない。

平成23年度においては、当研究所が有する気候変動とエネルギー・土地利用などの地球環境システムを分析するGRAPEモデルを活用して、化石燃料起源の合成燃料製造にCCSを組み合わせた低炭素合成燃料の導入・普及に係る日米共同研究に参画するとともに、省エネルギー技術戦略策定に関する基礎的な調査研究を行う。また、温室効果ガス排出に関し、クリーン開発メカニズム（CDM）に代わって提案される二国間クレジットに関し調査研究を行う。

- ① 低炭素合成燃料導入・普及のシナリオに関する調査研究
- ② 省エネルギー技術戦略の策定に関する基礎的な調査研究

- ③ 温室効果ガス排出に係る二国間クレジットのあり方に関する調査研究

(6) 原子力関連

原子力は、エネルギーの安定供給及び地球環境問題への対応を図る上で重要な役割を担うと評価され、最近では、先進国のみならず、新興国において利用拡大が推進され、さらに、産油国等においても新規導入が検討されている。

平成23年度においては、将来型原子炉に関し、国際的な競争力を持つ次世代軽水炉技術開発事業を実施するとともに、軽水炉以外の炉型が主となる第4世代原子力システムに関する国際共同研究開発へ引き続き参画する。また、現実化してきた軽水炉の廃止措置に係る工程評価や安全確保策に関する民間規格基準整備に係る調査研究と廃止措置に関する情報発信を行う。高レベル放射性廃棄物処分については、研究開発や社会科学的発想を織り込んだ処分事業の進め方等に関し調査研究を行うとともに、昨年度に引き続き、日本学会会議における高レベル放射性廃棄物処分に係る審議へ積極的な協力を行う。

さらに、国が実施する原子力基盤技術や戦略的技術の開発の支援や人材育成に係る公募管理業務を実施する。

運用する各種の評価モデルを活用して調査研究を行っており、持続可能なエネルギー供給システムに対し原子力がなす寄与に関してはGRAPEモデルを活用した評価研究を行うとともに、高速増殖炉導入に向けたシナリオに関しては核燃料サイクル諸量評価モデルを用いた調査研究を実施する。また、原子力発電施設の安全確保に資するため、当研究所の各種の安全解析コードを用いて、原子炉内の挙動の解析評価を実施するとともに、モデルの改良及び検証解析を行う。特に、23年度は、SAMPSONコード等を活用して、海外の軽水炉におけるシビアアクシデント挙動の解析を実施する。

1) 研究所本部における事業

(ア) 長期的、グローバルな視点に立った調査研究

- ① 持続可能なエネルギー供給システムに対する原子力の寄与に係る調査研究
- ② 高速増殖炉導入に向けたシナリオに係る調査研究
- ③ 第4世代原子力システム開発に係る国際研究協力
- ④ 国内外の原子力発電所トラブルに係る人的要因に関する調査研究
- ⑤ 高温ガス炉プラント及び原子力多目的利用に係る調査研究
- ⑥ 世界の原子力開発利用動向に係る調査

(イ) 高レベル放射性廃棄物処理処分に関する調査研究

- ⑦ 高レベル放射性廃棄物地層処分と社会科学に係る調査研究
- ⑧ 高レベル放射性廃棄物地層処分の研究開発と実施に係る調査研究

(ウ) 原子力開発利用基盤の整備や支援に係る調査研究

- ⑨ 原子力に関し発信される不適正情報に即応した情報提供に係る調査
- ⑩ 原子力基盤技術の強化および戦略的技術の利用高度化に係る調査研究
- ⑪ 原子力人材育成プログラムに係る人材育成ならびに研究環境整備に係る調査研究

2) 原子力工学センターにおける事業

(ア) 次世代軽水炉技術開発

当研究所は、国内既設炉の代替炉及び国際標準炉として2030年頃の実用化を目指す次世代軽水炉に関し、国の財政的支援の下、電力会社の協力を得て中核機関として原子炉メーカーと一体となった技術開発事業を実施してきている。昨年度には、それまでの成果等について多面的・総合的な中間評価を実施し、

要素技術の開発とプラント概念の構築によって開発目標が達成される見通しがあると評価された。引き続き官民一体となって取組むことが関係機関で合意され、2015年までに基本設計を終了することとしている。本年度からは、策定された技術開発計画に基づき、より効率的・効果的な開発を行うべく、技術開発は原子炉メーカーが国の財政支援を直接得て主体的に担う体制となる一方、当研究所は、引き続き中核機関としてプロジェクト管理業務を担うとともに、調査研究機関としての中立的な立場とノウハウを活かし、規制高度化や国際展開等、基盤整備に係る事業を実施する。また、メーカーの技術開発に対して資金面も含め協力を行う。なお、電力会社は、引き続きユーザーの立場から積極的な協力を行うこととしている。

(イ) 原子力安全解析

- ① SAMPSONコードを用いた軽水炉におけるシビアアクシデント挙動の解析
- ② 軽水炉における気液二相流挙動解析モデルの開発
- ③ 腐食解析モデルによる軽水炉配管の減肉挙動の評価
- ④ 高速炉の事故時安全解析

(ウ) 原子炉廃止措置に関する調査研究

- ⑤ 軽水炉廃止措置技術の最新状況に係る調査研究
- ⑥ 軽水炉廃止措置工程等に係る評価研究
- ⑦ 軽水炉廃止措置の安全確保に関する民間規格基準整備に係る調査研究

(エ) 耐震に関する調査研究

- ⑧ 設計用動的解析モデルの精度向上に係る調査研究
- ⑨ 多度津振動台試験結果の有効活用に係る調査

3. 調査研究成果に係る情報発信

(1) 前号の事業で得られた成果のうち、技術情報として有用度の高いものを編集し、情報提供を行う。これらの調査研究に係る活動内容や成果は、寄稿・投稿、講演会、学会発表、ホームページへの掲載等により公表し、広く利用に供することとする。

(2) 当研究所では、下記の手法により、調査研究成果に係る情報発信を行う。

- ① 定期刊行物（季報エネルギー総合工学）の刊行
- ② 月例研究会，エネルギー総合工学シンポジウム，セミナーの開催
- ③ エネルギー技術情報プラットフォームの整備及び運用

4. その他

(1) 産・学・官の緊密な協力体制の下、関係各分野の専門家による情報交換と共有を実施する場を提供し、適宜、エネルギー技術開発のあり方について提言を行う。

(2) 海外の調査研究機関との交流・連携を深めるとともに、国際プロジェクトへの参画等により、国際協力の一端を担う。

(3) コンプライアンスの強化のために、行動規範、規程等の整備・拡充を図っているが、今後は、内部監査体制の整備等により、その実効性を高める。

研究所のうごき

(平成23年1月2日～4月1日)

◇ 第37回評議員会

日 時：3月10日(木) 11:00～12:00

場 所：経団連会館(5階) 502号室

議 題：

- 第一号議案 平成23年度事業計画および収支予算(案)について
- 第二号議案 理事の一部変更について
- 第三号議案 公益法人制度改革への対応について
- 第四号議案 次世代軽水炉プロジェクトの推進体制の変更について
- 第五号議案 その他

◇ 第80回理事会

日 時：3月17日(木) 11:00～12:00

場 所：経団連会館(4階) 404号室

議 題：

- 第一号議案 役員の一部改選について
- 第二号議案 理事長の互選について
- 第三号議案 平成23年度事業計画および収支予算(案)について
- 第四号議案 公益法人制度改革への対応について
- 第五号議案 次世代軽水炉プロジェクトの推進体制の変更について
- 第六号議案 その他

◇ 月例研究会

第297回月例研究会

日 時：1月28日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 気候工学(ジオエンジニアリング)の最近の動向
(財電力中央研究所 社会経済研究所 主任研究員 杉山 昌広 氏)
2. 石炭ガス化 - 韓国の現状
(双日(株) 環境・新エネルギー事業開発室 事業開発専門部長 牧野 英一郎 氏)

第298回月例研究会

日 時：2月25日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 地下高温域におけるCO₂鉱物固定に関する研究
(財電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域 上席研究員 海江田 秀志 氏)
2. 環境調和型製鉄プロセス技術開発(COURSE 50)

(新日本製鐵(株) 執行役員 製鉄技術部長 三輪 隆 氏)

第299回月例研究会

日 時：3月25日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 中国原子力発電ビジネス
(東京大学 公共政策大学院 エネルギー・地球環境の持続性確保と公共政策講座 特任教授 諸葛 宗男 氏)
2. ウラン資源の持続可能性
(財エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 参事 楠野 貞夫)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：徳田 憲昭

テーマ：スマートコミュニティと電気工学

発表先：九州大学 工学部 電気工学科3年生 電力工学特別講義(九州大学)

日 時：1月24日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：超長期エネルギービジョン

発表先：原子力委員会 第3回新大綱策定会議
(ホテルグランドパレス(飯田橋))

日 時：1月31日

発表者：松井 一秋

テーマ：地層処分における安全コミュニケーションの考え方

発表先：Conference on public involvement in siting of nuclear facilities, OECD/NEA

日 時：2月15日

発表者：坂田 興, 石本 祐樹, 福田 健三

テーマ：再生可能エネルギー起源電力の長距離輸送技術の経済性に関する調査研究

発表先：FC EXPO ～国際 水素・燃料電池展～

日 時：3月3日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：環境とシステムのアプローチと課題

発表先：化学工学会 第76年会 シンポジウム「化学産業技術フォーラム」(東京農工大 小金井キャンパス)

日 時：3月24日

[寄稿]

発表者：氏田 博士

テーマ：エネルギーセキュリティと原子力の役割に関する考察

発表先：原子力学会 和文論文誌, Vol.10, No. 1

日 時：3月

発表者：筈井 滋 (IAE), 遠山 眞 (三菱重工),
守屋 公三明 (日立GE), 飯倉 隆彦 (東芝)

テーマ：次世代軽水炉の開発状況について ―中間
評価と今後の開発計画―

発表先：原子力学会誌「ATOMOΣ」2011年3月

木村公隆
萩原直人
石田敬一

プロジェクト試験研究部主管研究員
プロジェクト試験研究部主管研究員
プロジェクト試験研究部研究員

(昇格)
都筑和泰

プロジェクト試験研究部兼原子力工学
センター主管研究員

◇ 人事異動

○2月28日付
(退職)

小野崎正樹 プロジェクト試験研究部部長 (副
主席研究員)

○3月1日付
(嘱託採用)

小野崎正樹 プロジェクト試験研究部部長 (特任
参事)

○3月12日付
(退職)

浅見直人 プロジェクト試験研究部参事

○3月31日付
(退職)

清田佳美 プロジェクト試験研究部主管研究員

(出向解除)

氏田博士	プロジェクト試験研究部主管研究員
中村文隆	プロジェクト試験研究部主管研究員
小西康雄	プロジェクト試験研究部主管研究員
寺田 保	プロジェクト試験研究部主管研究員
丹 光義	プロジェクト試験研究部主任研究員
大賀幸治	原子力工学センター主管研究員
黒崎利和	原子力工学センター主管研究員
山本知史	原子力工学センター主管研究員
鈴木洋明	原子力工学センター主管研究員

○4月1日付
(就任)

白土良一 理事長

(採用)

鈴木洋明 原子力工学センター主管研究員

(出向採用)

入谷淳一	プロジェクト試験研究部主管研究員
新藤紀一	プロジェクト試験研究部主管研究員
村上嘉孝	プロジェクト試験研究部主管研究員
山田英司	プロジェクト試験研究部主管研究員

第 33 卷 通 卷 目 次

VOL.33, NO.1 (2010.4)

【巻頭言】				
原子力と国際競争力	早稲田大学 特任教授	岡 芳 明	……	1
【寄稿】				
波力発電の壮大な風景—日本の波力発電の可能性—	三井造船(株) 事業開発本部 本部長補佐	黒 崎 明	……	2
【寄稿】				
メガワット級海流発電への挑戦	(社)エンジニアリング振興協会 理事	梅 田 厚 彦	……	13
【寄稿】				
原子力輸出の際の一指針 —原子力導入を表明した国々へのGDPモデルの適用と考察—	(株)東芝 原子力事業部 技監	飯 田 式 彦	……	21
【調査研究報告】				
ケミカルルーピング燃焼技術 —エネルギー・ペナルティーを伴わない革新的燃焼技術—	プロジェクト試験研究部 主管研究員 プロジェクト試験研究部 部長	吉 田 一 雄 小野崎 正 樹	……	29
【調査研究報告】				
海外の再生可能エネルギーの国内利用について (その2：システムの経済性検討) ～発電用燃料等としての可能性について～	プロジェクト試験研究部 主任研究員 プロジェクト試験研究部 参事 川崎重工業(株) 技術開発本部 技術企画推進センター 上級専門職	渡 部 朝 史 村 田 謙 二 神 谷 祥 二	……	36
【調査研究報告】				
エネルギーに関する公衆の意識調査	エネルギー技術情報センター 主管研究員	下 岡 浩	……	42
【事業報告】				
平成22年度 事業計画	(財)エネルギー総合工学研究所		……	50
【研究所の動き】				57
【第32巻通巻目次】				59
【編集後記】				63

VOL.33, NO. 2 (2010.7)

【就任挨拶】	就任のご挨拶	(財)エネルギー総合工学研究所 理事長	鈴木 篤 之	1
【座談会】	スマートグリッドを巡る動向と展望	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授 資源エネルギー庁 電力基盤整備課 電力需給・流通政策室長 東京電力(株) 技術部スマートグリッド 戦略グループ マネージャー (株)東芝 電力流通・産業システム社 スマートグリッド統括推進部 技術責任者 日本電気(株) エネルギーソリューション事業部 統括マネージャー 司会 (財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長	横山 明彦 吉野 潤 岡本 浩 林 秀樹 本林 稔彦 蓮池 宏	3
【寄稿】	わが国の温暖化対策 中期目標の達成に向けて —1990年比25%削減に向けた対策と課題—	東京大学生産技術研究所 特任教授	金子 祥三	21
【寄稿】	米国のシェールガス革命	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油開発支援本部 調査部調査課	市原 路子	33
【調査研究報告】	インドネシア南スマトラにおける低品位炭の活用	プロジェクト試験研究部 副参事	埴 雅一	42
【調査研究報告】	平成21年度エネルギー技術に関するアンケート調査	エネルギー技術情報センター 主管研究員	下岡 浩	48
【事業報告】	平成21年度 事業報告の概要	(財)エネルギー総合工学研究所		56
【研究所のうごき】				58
【編集後記】				60

VOL.33, NO. 3 (2011.10)

【巻頭言】

自動車の安全・環境に係る基準と認証制度の国際調和に向けて

一般社団法人 日本自動車工業会 常務理事 中山 寛 治 …… 1

【寄稿】

船舶輸送で広がるCO₂地中貯留の可能性

－圧入設備を装備したCO₂タンカーによるシャトル輸送－

(財)電力中央研究所 地球工学研究所 客員研究員 大 隅 多加志 …… 3

【寄稿】

高性能二次電池の開発動向

(独)産業技術総合研究所 ユビキタスエネルギー研究部門

電池システム研究グループ長 境 哲 男 …… 9

【寄稿】

原子力リサイクル事業への道

元 東京工業大学教授 鳥 井 弘 之 …… 21

【調査研究報告】

セルロース系バイオ燃料の開発動向

プロジェクト試験研究部 参事

浅 見 直 人

プロジェクト試験研究部 副参事

山 田 富 明 …… 29

【調査研究報告】

GRAPEモデルによる持続可能なエネルギーシナリオの分析

プロジェクト試験研究部 主管研究員

氏 田 博 士

プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員

黒 沢 厚 志 …… 41

【訪問記】

三鷹光器(株)：集光式タワー型太陽熱発電の実証設備

IAE女性研究員 …… 52

【研究所の動き】

…………… 56

【編集後記】

…………… 59

VOL.33, NO. 4 (2011.1)

第25回エネルギー総合工学シンポジウム
原子力エネルギー 成長戦略と地球環境の両立

平成22年9月30日(木) 千代田放送会館
総合司会 プロジェクト試験研究部 部長 蛭沢 重信

【開会挨拶】	(財)エネルギー総合工学研究所 副理事長 並 木 徹	1
【来賓挨拶】	経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部長 横 尾 英 博	3
【講演 1】	地球環境と原子力の貢献 東京大学 特任教授 キヤノングローバル戦略研究所 理事 湯 原 哲 夫	5
【講演 2】	わが国の成長戦略と原子力 資源エネルギー庁 原子力政策課 原子力政策企画官 舟 木 健太郎	13
【講演 3】	電気事業者の国際展開について 電気事業連合会 原子力部 部長 富 岡 義 博	19
【講演 4】	原子力の国際展開について (社)日本電機工業会 原子力政策委員長 五十嵐 安 治	24
【講演 5】	次世代軽水炉プロジェクトの展開 (財)エネルギー総合工学研究所 原子力工学センター理事 田 中 隆 則	30
【パネルディスカッション】		
テーマ：原子力産業の国際展開		
モデレーター：橘 川 武 郎	一橋大学大学院商学研究科 教授	
パネリスト：尾 本 彰	原子力委員会 委員	
末 次 克 彦	アジア・太平洋エネルギーフォーラム 代表幹事	
広 瀬 崇 子	専修大学法学部 教授	
松 井 一 秋	(財)エネルギー総合工学研究所 理事	38
【閉会挨拶】	(財)エネルギー総合工学研究所 専務理事 山 田 英 司	50
【研究所の動き】		51
【編集後記】		53

編集後記

3月11日に起きた地震・津波およびそれに伴う原子力発電所の事故は、一夜にして世界の見え方が変わってしまうほどのマグニチュードを持った出来事であった。「きのう一本の直線と見えたものが、今日は千切れた円の断片になり・・・」というような一節が、昔読んだ小説の中にあったことを思い出した。地震・津波による犠牲者の冥福を祈り、被災者へ心からお見舞いを申し上げる。

原子力発電は、二酸化炭素排出抑制の追い風を受けて、世界中で原子力カルネッサンスと言われるほど期待感が高まっていたが、今回の津波により文字通り水を掛けられた格好である。国内外で建設延期などの減速が報じられているのは致し方ないことであろう。しかしながら、技術者の一人として科学・技術が人間に与えるプラスおよびマイナスについて深く反省しつつ、それでもなお、日本にとって原子力発電が不可欠であることは、災害の前後で全く変わっていないことを強調したい。

その唯一無二と言っても良い理由は、原子力発電が準国産エネルギーと位置づけられるからである。この国が最近の停滞を抜け出すためには、エネルギーに限らず様々な面で不足している自立・独立性の向上を図っていかなければならない。そして、エネルギーについては、その96%を海外からの輸入に頼っている、

即ち自給率4%に過ぎないのであるが、長期間にわたってエネルギーを生み出しうるウランを準国産とカウントした場合のエネルギー自給率約19%と言う数字も、この国の自立・独立性の指標となしうるであろう。この観点から、震災後の今日においてもなお、後者の19%と言う数字を保持しかつ向上させていかなければならないと考える。今、こんなことを言うと非現実的との謗りを受けそうだが、自立・独立性向上のための必須条件である。失われた電力量を補うため化石燃料の手当てに迫られる今日、逆説的に、原子力の重要性が認識されていると言っても良い。前提として、今回結果的に不十分であったことが認識された安全対策の一層の向上が必要であることは言うまでもない。逆風の中での原子力発電推進、当に未曾有のスケールの努力を覚悟する必要がある。

3月11日以前において、この国は停滞に喘いでいた。今般の大災害がこの停滞を覚醒させる契機になりうるのだろうか。復興を急ぐべきことは論を待たないが、震災復興が以前の姿を再現することであるならば、停滞もまた再現されるということになる。復興と停滞脱出の同時達成を目指さなければ、犠牲者の霊は浮かばれまい。

編集責任者 疋田知士

季報 エネルギー総合工学 第34巻第1号

平成23年4月20日発行

編集発行

財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋 1-14-2

新橋SYビル（8F）

電話（03）3 5 0 8—8 8 9 4

FAX（03）3 5 0 1—8 0 2 1

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

（印刷）株式会社日新社

※ 無断転載を禁じます。