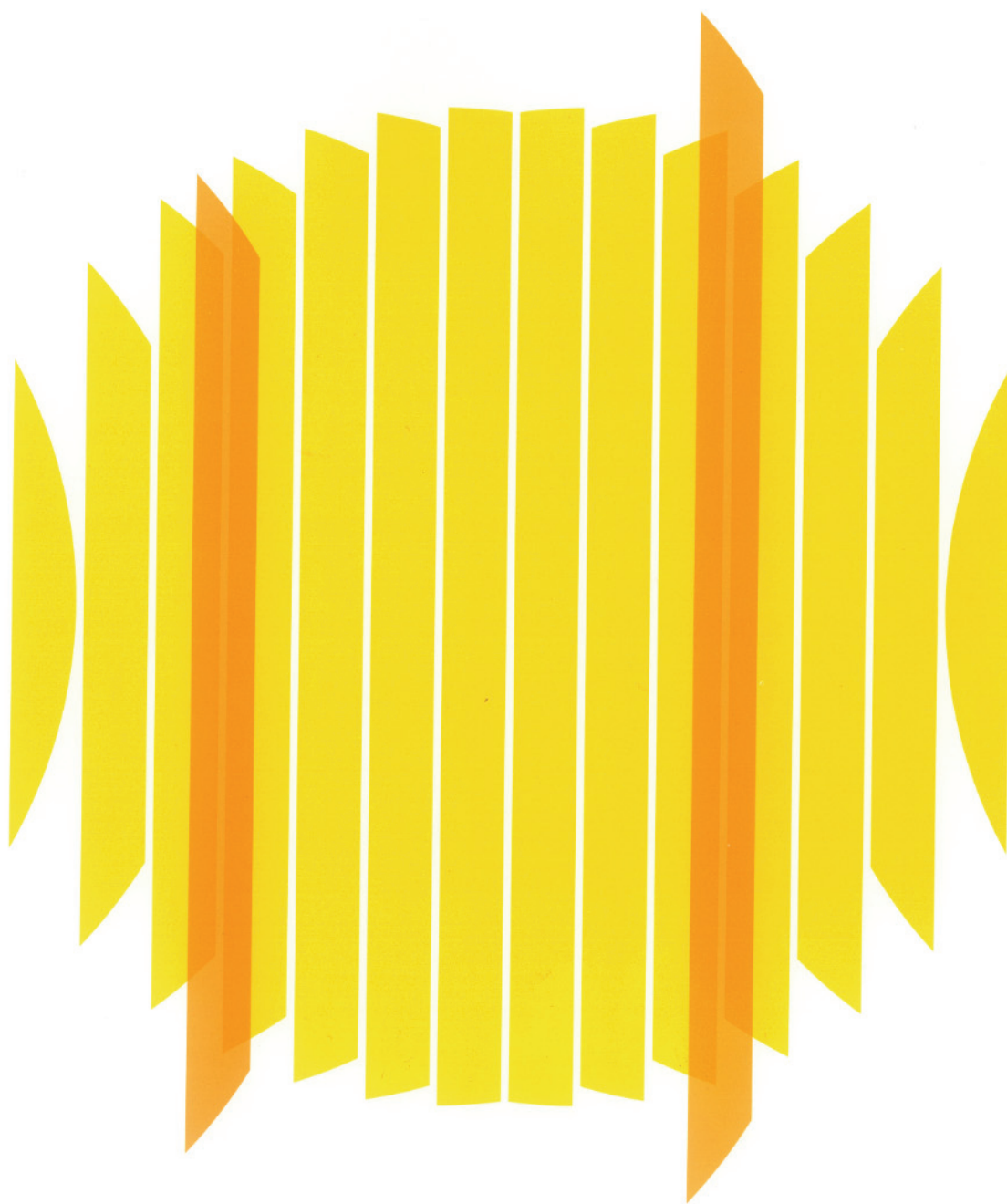


季報 エネルギー総合工学

Vol. 30 No. 3 2007.10.



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

目 次

【巻頭言】			
原子力カルネサンスと共生	関西電力(株) 取締役副社長	森 本 浩 志	1
【特別報告】			
次世代軽水炉の開発について	(財)エネルギー総合工学研究所 理事	松 井 一 秋	3
【寄稿】 最近の省エネルギー政策と技術の動向			
ー世界に冠たる省エネ技術の更なる発展ー	(財)省エネルギーセンター 企画調査部 部長	佐 藤 文 廣	10
【調査研究報告】			
原子力分野における人材基盤に関する分析と課題			
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 参事	波多野 守		
プロジェクト試験研究部 主管研究員	鈴木 和人		20
【調査研究報告】			
消防機関と原子力事業者等との円滑な連携について	プロジェクト試験研究部 主管研究員	酒 谷 幹 男	27
【調査研究報告】			
原子力安全と科学技術社会論	プロジェクト試験研究部 主管研究員	氏 田 博 士	34
【調査研究報告】			
「水素供給インフラ整備のシナリオ			
ー水素供給の価格分析と技術課題ー	プロジェクト試験研究部 主管研究員	中 村 恒 明	40
【調査研究報告】			
車載水素貯蔵材の動向	プロジェクト試験研究部 副参事	村 田 謙 二	48
【調査研究報告】			
電力・ガス総合技術開発戦略の策定について			
プロジェクト試験研究部 主管研究員	岡 田 康 宏		
プロジェクト試験研究部 主任研究員	高 山 大 輔		
プロジェクト試験研究部 主任研究員	鳥 飼 航 洋		61
【お知らせ】			
エネルギー技術情報プラットフォームの運用開始について	(財)エネルギー総合工学研究所 エネルギー技術情報センター		72
【研究所の動き】			75
【編集後記】			77

巻頭言

原子カルネサンスと共生

森 本 浩 志 （関西電力㈱ 取締役副社長）



近年、欧米では「原子カルネサンス」ということが言われています。米国では、1979年のTMI事故の影響により1980年代は原子力発電所の稼働率が低迷し、建設中や発注済みの原子力発電所が相次いでキャンセルされるなど「原子力冬の時代」でした。しかし、1990年代に入ると官民双方で改善に向けた努力が行われ、最近では原子力発電所の稼働率は90%程度を記録するまでとなっています。その結果、原子力発電の重要性が再認識され、現在、政府の支援策とも相俟って、30数基の原子力発電所新規建設計画も打ち出されています。また、2006年には国際原子力パートナーシップ（GNEP）構想が発表され、30年ぶりに再処理リサイクル路線の方向に舵取りを変更しようとしています。一方、欧州においても、1986年のチェルノブイリ事故以来、脱原子力の動きが支配的でしたが、フィンランドは、2005年に30年ぶりに5番目の原子力発電所の建設に着手し、さらに次の原子力発電所建設も計画中であります。フランスでは2007年に原子力発電所新設の許可が発給され、また、スウェーデンは原子力からの段階的撤退を凍結、イギリスでは2007年のエネルギー白書において新規原子力発電所建設計画に対する支持を打ち出すなど、欧州でも原子力発電が有力なエネルギー選択肢と再認識され、原子力が再び脚光を浴びつつあります。

わが国近隣のアジア諸国に目を転ずれば、中国やインドは、高い経済成長を背景にエネルギー安定供給確保のため、原子力発電所の建設に積極的であり、また、ベトナムやインドネシアは、新たに原子力発電導入計画を打ち出すなど、アジアでの原子力開発の動きには活発なものがあります。

ところで、「ルネサンス」とは、「再生」を意味するフランス語であり、14～16世紀にイタリアを中心に、ヨーロッパ各地に広がったギリシアやローマの古典文化の価値を再発見した文芸復興運動のことを指しますが、自由な精神のもと、封建主義の殻を破り、芸術、技術、産業など多くの分野でめざましい発展を遂げま

した。このルネサンスの原点は人間性の尊重を求めるヒューマニズムであり、人間性への回帰、人間と色々なものとの共生を意味するものであると考えています。

「共生」とは、生物学的には2種類の生物がお互いに利益を元にしながら、一緒に生活していること、即ち、共存共栄の姿を言いますが、これはとりもなおさず、片方が死ぬともう片方も死ぬことに思いをはせる必要があります。

さて、20世紀は「技術の時代」、21世紀は「命の時代」あるいは「心の時代」とも言われています。20世紀、我々は目標を掲げ、ひたすら技術開発に没頭し、科学技術の発展に貢献できれば人々に幸せをもたらすことができると考えてきました。しかし、21世紀に入り、それが必ずしもそうではなく、他を犠牲にして生活が豊かになるそのしっぺ返しは必ず自らにはね返ってくることを色々な分野で学びました。この最大の課題の1つが、化石燃料の大量消費による地球環境問題であります。我々は、今、サステナブルな社会にするためにも、すべての活動に共生の概念が求められています。

原子力発電は、これを解消する切り札的存在であります。このことが世界の原子力ルネサンスの流れになっているところであり、そのためにも原子力には共生の概念が必須であります。原子力の平和利用、放射線利用には、多くの恩恵があり、また、共に生きていくことが可能であります。このためにはリスク管理をしっかりと行い、社会に納得していただき、信頼していただくことが必要であります。

立地地域との共生は必須であり、このためには、安全で安心なプラントでなくてはならず、そのことを地域の皆さまにご理解いただく必要があります。また、プラント自体についても、我々にとって使い勝手がよいというのみでなく、プラント自体が機嫌よく動いてくれること、すなわち、人間と機械との共生が大切であります。わが国では、「モノにタマシイを入れる」と言いますが、設計、建設、運転、保全、そして、廃止措置にいたるまで、この人間と機械の共生ということを考えることが必要ではないかと思います。

7月16日の中越沖地震は、柏崎刈羽原子力発電所に設計想定を上回る地震動をもたらし、幸い原子炉はすべて安全に停止しましたが、改めて原子力発電所の耐震性や安全性が問われることとなりました。耐震安全性を含め、安全をもう一度徹底的に見直し、安全を最優先に、社会からの理解と信頼を確固たるものとし、わが国が世界の「原子力ルネサンス」の流れの中で、原子力推進にいささかでも貢献できればと思う次第であります。

次世代軽水炉の開発について

松 井 一 秋 (財)エネルギー総合工学研究所
理事



1. はじめに

原子力安全・保安院が過去に遡って行なった大掛かりな電力総点検により、2007年春、原子炉停止中の臨界事象が2件（北陸電力志賀1号機：1999年6月、東京電力福島第一3号機：1978年11月）報告された。いずれも大分昔の事ではあったが、世は一瞬騒然となり、1基は運転中止を命ぜられ、さらに保安規定が強化されることとなった。2007年7月の中越沖地震では、柏崎刈羽原子力発電所で運転中の原子炉4基は無事緊急停止したが、多くの周辺施設が被害を受け現在まだ運転再開の見通しが立っていない。

一方、「原子力立国計画」が、国の新しいエネルギー政策の確立と歩調を合わせ制定され、エネルギーと環境問題への対応の主軸の1つとして明確にされている。その上、国際的には「原子力ルネッサンス」と言われるように各国の原子力発電所新設の動きが明らかになってきている。さらには、中国、インドなど経済成長著しい発展途上国の原子力エネルギーに対する大きな期待も膨らんできている。

ビジネス界に目を向ければ、東芝による、加圧水型原子力発電所製造ナンバーワンである米国ウェスチングハウス社買収が引き金となって、また前述の「原子力ルネッサンス」に乗り遅れまいとする空気の中で、特にわが国産業が中心となる海外各社との事業再編・協力の模索が激しくなっている今日この頃である。

これら1つひとつについての分析も必要と

は思うが、ここでは2000年前後の数年間、何回かの講演で私が取り上げてきた原子力に対する疑問から議論を始めることとする。

2. 原子力エネルギーへの回帰の可能性

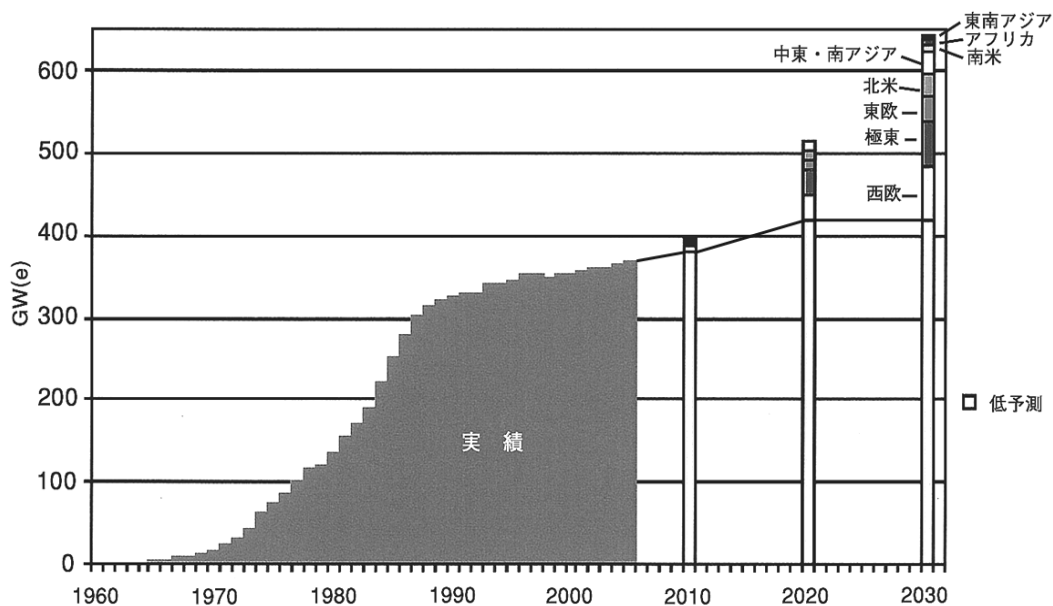
(1) 2000年前後までの原子力導入の変遷

米国でのスリーマイルアイランド事故（1979年）、ソ連（当時）でのチェルノブイリ原子力発電所事故（1986年）を受け、2000年前後には世界的な「原子力モラトリアム」、欧州（スウェーデン、ドイツなど）を中心とする「脱原子力」のうねりがあった。原子力エネルギーの平和利用は理念として正しいに違いないにしても、今でも多くの理知的な方々ですら原子力の力と果たすべき役割に不安なまなざしを向けているのは隠しようもない事実である。

世界の原子力発電の導入は図1に示すように1970年代から80年代後半まで好調に拡大した後、導入テンポが鈍化している。しかもその時期に寄与したのは、日本、韓国、台湾など東アジアにおけるプラント建設であった。

(2) 物質的豊かさを求めてやまない人類

60億人を超える世界の人口は、大方のところ今世紀半ばには90億人、末には100億人程度と予測されており、しかもその原因は、貧困にあえぐ国々の貧困層による人口爆発である。より一層の省エネルギーを求めるのは容易だが彼らの最低限の生活を保証し、さらには「人並みの生活」を送るために必要な食糧、エ



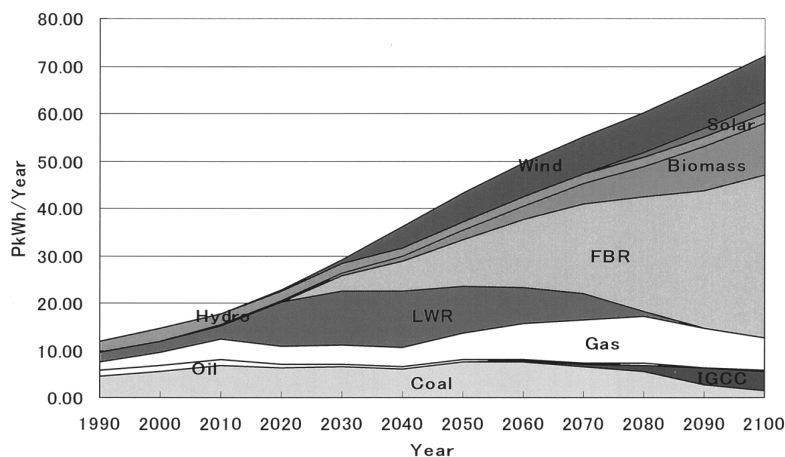
（低予測の上に各地域別の追加分を表示、なお国際エネルギー機関・IEAによる世界エネルギー予測2006では低予測を取っている。）

図1 国際原子力エネルギー機関・IAEAによる2030年までの原子力発電導入予測例

エネルギーはどの程度であろうか？それを地中から掘り出す化石資源で賄えると信じる人はいないだろう。自然エネルギー、再生可能エネルギーでこれらを賄うことになると思いたい理想家や夢想家はあるかもしれない。贅沢や浪費を悪徳とするライフスタイル、「意識の変革」が必要ということかも知れないが、人類の進歩そのものは、物質的に豊かな生活を探求し続けてきたことによる。科学技術の発展の基礎もそこにあった。

（3）地球温暖化対策としての原子力

世界経済、人口の拡大と温暖化ガス濃度制限による21世紀の電力供給予測例を図2に示す。これは当研究所が中心となって開発した「総合評価モデルGRAPE」を使用した分析の一例である⁽¹⁾。詳細については参考文献を参照されたい。ここで強調しておきたいことは、エネルギー需要の拡大を相当抑えこまないと、2100年に大気中の温室効果ガス濃度を、現在の議論では不十分とされる550ppmで安定化させるシナリオですら達成が不可能だということである



（出所：2006年先進原子力プラント国際会議（International Congress on Advanced Nuclear Power Plant）より）

図2 21世紀の発電シミュレーション（炭素制約550ppm＋競争力のある原子力）

(2100年基準では総需要のおよそ3分の1は、年率約1.5%の省エネルギーによって削減できると仮定して分析している)。この分析例では、2100年においては電気の半分は高速増殖炉が賄っているが、全体の結論として、炭酸ガスの地中固定や再生可能エネルギーの最大規模の利用を仮定しても、原子力エネルギー利用は地球温暖化対策として合理的な選択肢だということである。そうはいっても、適切な政策的、社会的な手立てとともに、原子力自体が市場での競争力を持たねばならない。

(4) 2050年に向けた原子力の将来—MIT予測

マサチューセッツ工科大学(MIT)が2003年に実施した原子力の将来についての分析例を紹介する(表1)。2050年に向けての展望だ

表1 MITの描く世界の原子力成長シナリオ

地 域	原子力発電容量 (GWe、2050年)	原子力発電のシェア	
		2000	2050
全世界	1,000	17%	19%
先進国	625	23%	29%
米国	300		
欧州とカナダ	210		
先進東アジア	115		
旧ソ連	50	16%	23%
途上国	325	2%	11%
中国、インド、パキスタン	200		
インドネシア、ブラジル、メキシコ	75		
その他途上国	50		
世界の総電力需要	年2.1%伸び	13.6兆kWh	38.7兆kWh

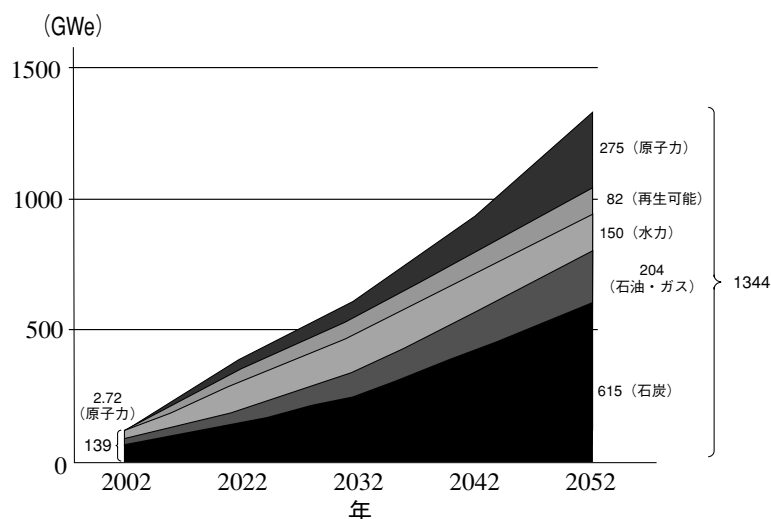
(出所：MIT「原子力の未来」)

が、発表当時、原子力界ではこの分析が使用済み核燃料リサイクルを否定している側面に議論が沸いた。この分析でも世界のエネルギーと環境に対応する原子力の可能性を強調している。2050年の世界の原子力発電容量を1,000GWeとしているが、これは現在(約370GWe)のおよそ3倍に相当する(1GWeは百万KWeで一昔前の大型原子力発電所の規模)。現在、原子力発電は世界の電力のおよそ17%を供給しているが、MITの研究では電力需要の伸びを年2%強と想定しており、2050年の原子力1,000GWeは、およそ20%弱を賄えるにすぎない状況である。

これによると、1,000GWeのうちおよそ3分の2は日米欧の先進国、3分の1はロシアを含む途上国となっている。さらにその内訳を見ると、ロシアで現在の日仏と同程度の50GWe、中国、インド、パキスタン合計で200GWeとなっている。しかし、この数字も後で紹介する各国の展望と比較するとかなり低めである。

(5) 中国、インドのエネルギー展望との差

例えば、インドは今後半世紀の間に約10倍の発電設備の増強として、原子力は現状の100倍(275GWe)を見込んでいる(図3)。それでも全設備の半分は石炭火力という展望である。インドにとっても米印原子力協定を突破口として



(出所：An International Journal of Nuclear Power, Vol.18, No.203 (2004))

図3 インドの発電設備容量の展望

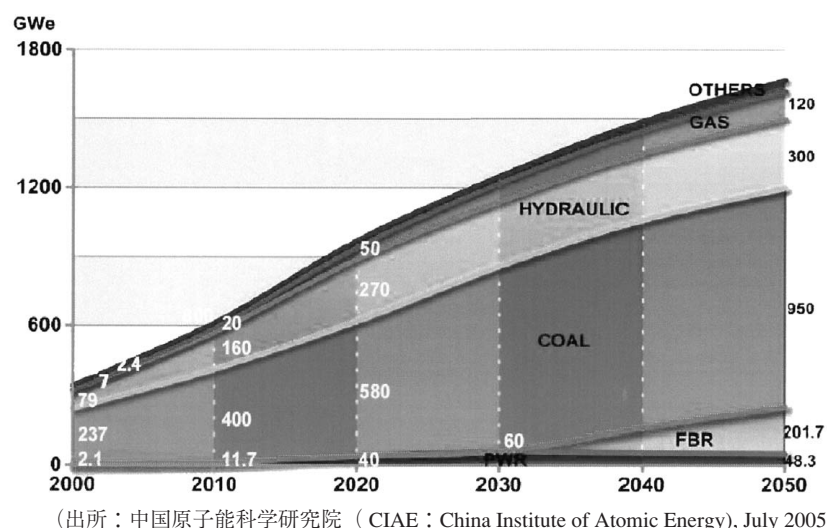


図4 中国の発電設備展望

原子力技術，産業の導入，育成に力を入れる理由がよく分かる。

中国の展望は基本的にインドの展望と性格が似ている（図4）。すなわち，大規模な総量拡大と，原子力への期待が大きいにもかかわらず石炭への依存が大きい。2050年にはインドとほぼ同じ約250GWeの原子力を期待しており，中印合わせると500GWeを超え，先のパキスタンを加えて200GWeとするMITの分析とはかけ離れている。この差を途上国の身勝手な希望によるものと見るか，あるいは「資源を食い荒らされてはかなわない」という先進国側の希望によるものなのか。それとも全体を満足する解はなく，人類がその生き方を変えない限り21世紀を乗り越えられないのだということなのか。

（6）「原子カルネッサンス」を受けた国際的な動き

各国の原子力発電新設計画あるいは展望（表2）を見ると中印の年当たり5GW eの増設が突出しているが，次いで米ロに建設ラッシュの芽があると考えられる。これらの計画と分析，展望を合わせ見てみると明らかに21世紀は原子力開発が再び活性化する，すなわち「原子カルネッサンス」の到来と考えることができる。もっとも本当の意味での原子力のグローバル化が実現するためには，仕組みとしての原子力安全と核不拡散を保全する機能の拡充が必要であることと，その上で燃料の供給，廃棄物の処理を集中して行うなどの手立てが必要となる。

表2 各国の原子力発電新設計画あるいは展望

国	計画あるいは展望	GWe/年	
インド	2022年までに30GW e 2052年までに275GW e	1.6 5.5	
パキスタン	2030年までに8GW eの新設	0.32	
中国	2020年までに40GW e 2050年までに250GW e（CIAE）	2 5	
ロシア	2030年までに30GW eの新設 2015年までに10基，12GW e	1～1.5 1.5	2020年までに+22GW e
南アフリカ	通常型軽水炉の新設決定（12基?） 24基のPBMR（165MWe）		2030年までに27GW e
米国	2020年までに25基 2020年までに50GW e（NEI）	2 2.5	

（出所：公表されたものや学会などでの発言などに基づく）

「御三家」と言った所である。「EPR」は仏アレバ社の主軸炉であるが、「AP1000」はウェスチングハウス社（2006年東芝が買収）の主軸炉、ESBWRは本年日立と原子力部門の提携を強化したGE社の主力炉型であり、同計画には、わが国原子力産業ががっちり食い込んでいる。三菱重工業も単独で米国市場を切り開くべく、自らのAPWR（敦賀3，4号）の米国版「US-APWR」を提示している。そのほかABWR自身の計画もあるうえ、原子炉压力容器などの大型機器の多くについては日本企業が活躍すると期待されている。

表に載っている計画がすべて着工されるか保証の限りではないが、新設の途絶えていた米国にも具体的な計画があることと、いかにわが国の産業が関連しているかがうかがえる。

4. 日本の次世代軽水炉の狙い

以上の様々な背景の中で、またわが国の「新・国家エネルギー戦略」（2006年5月）、「エネルギー基本計画」（2007年3月）の一部を構成する「原子力立国計画」の中で、一步先の次世代軽水炉を開発する意義の第一は比較優位にあるわが国の原子力産業力の維持向上にある。

「原子力立国計画」において、炉心、燃料関係では、運転サイクル長期化や高燃焼度化による利用効率の向上と使用済み燃料の低減を目的として濃縮度5%超の原子炉並びに核燃料サイクルシステムを開発する。これにより使用済み燃料の発生量を3割から4割削減し、稼働率も97%を可能とすることを目標とする。これらは既存の原子力発電所への適用も考慮すべきだし、また性能を標準化して型式認定を実現する制度設計も必要となる。

新潟県中越沖地震（2007年7月）の経験を生かして耐震設計の一層の向上も図られるであろうが、一方で免震技術の採用による、立地条件によらない標準化プラントも次世代軽水炉のセールスポイントの1つと考えている。

上記を含む6つのわが国の次世代軽水炉の開発項目を図5に示す。これは平成20年度から8年をかけたメーカー、国・事業者の一体となった技術開発計画（総額約600億円）である。

単に単体機器、ハードの開発、それらの寄せ集めにとどまることなく、世界標準と安全規制の合理化を開発当初からいかにして取り入れていくか、開発工程そのものを知識管理の体系としてとらえられるかが課題であろう。

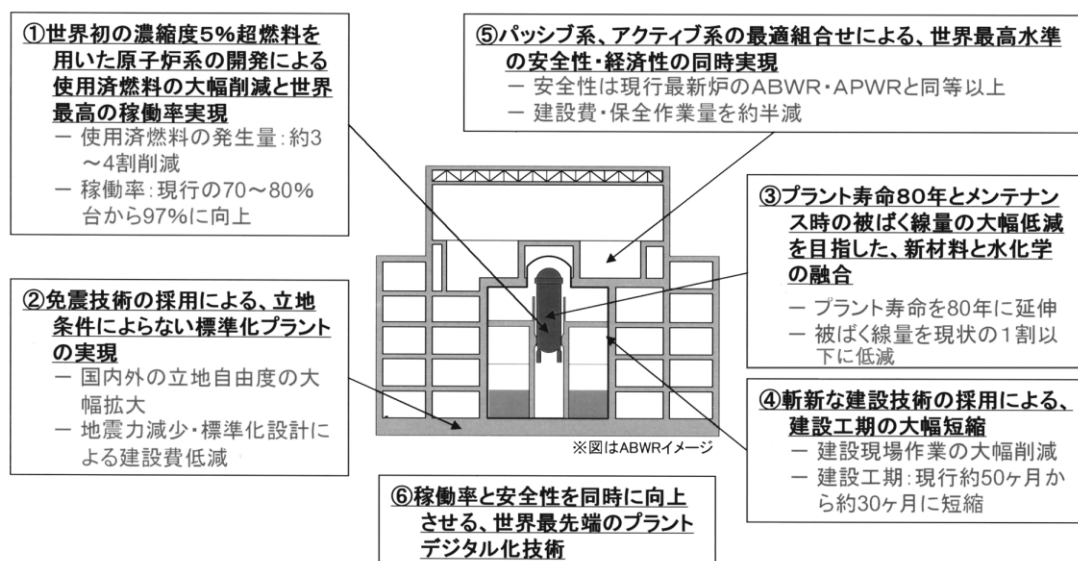


図5 次世代軽水炉の開発項目—6つのコアコンセプト—

5. さいごに

本稿冒頭で触れた臨界事象については、まず少なくとも結果的には安全上の影響は皆無であったことと、臨界といっても極めて限られた部分であり、軽水炉の反応度制御の強固なことを証明しているとも言えないことはない。しかし、設計と運転上の見直しが必要かどうか検討を要するし、次世代炉にも意味があることかもしれない。もちろん当時の事象の隠ぺいが信頼をさらに損なってしまった事実は重い。

中越沖地震については、柏崎刈羽原子力発電所の原子炉系は完全にその安全機能を全うしており、これが原子力施設でなく、水道や

ガス、自動車部品製造工場であったのなら、周辺施設・機器などを修理して運転再開されていたはずである。もちろん、影響の調査と分析により次世代軽水炉の持つべき性能、設計尤（ゆう）度などにも有用な貢献が期待される場所である。

これら多くの課題があることは事実であるが、挑戦ととらえ、わが国の原子力技術開発をもって世界のエネルギーと環境問題の解決に向けて邁進する使命を我々は持っている。

参考文献

- (1) 財団法人エネルギー総合工学研究所、「平成17年度 軽水炉改良技術確証試験（次世代型軽水炉開発戦略調査）エネルギー問題と原子力の役割に関する調査検討―長期エネルギーシステム評価―」，平成18年3月

[寄稿]

最近の省エネルギー政策と技術の動向 —世界に冠たる省エネ技術の更なる発展—

佐藤 文 廣 (財)省エネルギーセンター
企画調査部 部長

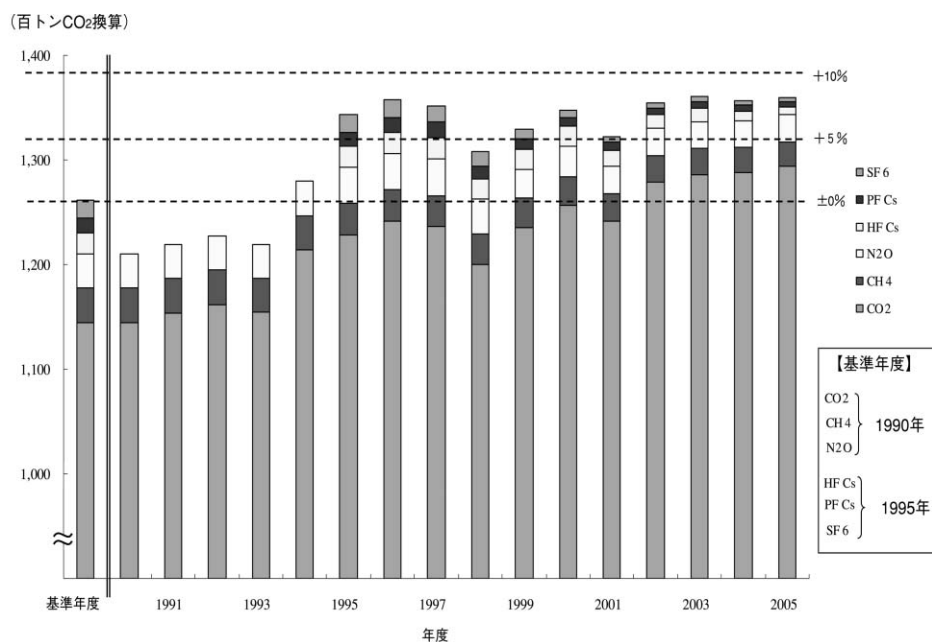


1. はじめに

今年2月、「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)は、地球温暖化の自然科学的根拠に関する『第4次報告書』を公表しました。この報告書において、IPCCは初めて地球温暖化の原因が人為起源の温室効果ガス濃度の増加であると断定しています。一方、地球温暖化に歯止めを掛けようとする活動は、京都議定書が主要な役割を担う中で世界的な高まりを見せています。わが国は京都議定書が定めた目標値達成を遵守するため、「京都議定書目標達成計画」(目達計画)を策定し、その実行を図っていますが、2005年度では目標値より約

8%の増加状態にあります。目達計画では、2007年度に計画の定量的な評価・見直しを行い、第1約束期間(2008年～2012年)に必要な対策・施策を2008年度から講ずることから、昨年11月より経済産業省の「産業構造審議会」と環境省の「中央環境審議会」との合同会合で目達計画の評価・見直しに関する報告書の取りまとめが行われてきました。検討の中で、省エネルギー対策が益々重要な課題となってきました。

本稿では、これら検討を踏まえて最近の省エネルギーに関する政策の検討経緯と技術の動向、そして地球温暖化防止のための国際的な活動について紹介します。



(出所：中央環境審議会地球環境部会・産業構造審議会環境部会地球環境小委員会
『京都議定書目標達成計画の評価・見直しに関する中間報告(案)』, 平成19年8月を基に作成)

図1 わが国の温室効果ガス総排出量の推移

2. 最近の省エネルギー政策の動向

(1) わが国の温室効果ガス排出状況

2005年度のがが国の温室効果ガス排出量は13億6,000万t-CO₂となっており、基準年（1990年）の総排出量を7.8%上回っています（図1）。温室効果ガス別に見ると、総排出量の9割以上を占める二酸化炭素（CO₂）の増加、中でもエネルギー起源CO₂の増加が大きな要因となっています（表1）。増加要因の1つに、原子力発電所の長期停止の影響が約2.3%あると

試算されていますが、業務部門、家庭部門の2005年度排出量はそれぞれ基準年比44.6%、36.7%の増加となっており、全体の増加の主な要因となっています。

(2) 目達計画の対策の進捗状況と評価

先に述べた合同会合では、目達計画に示された各対策の進捗状況等について、関係業界および関係省庁からのヒアリングを21回に亘り行い、現状における評価結果を取りまとめています（表2）。

表1 温室効果ガスの種類別・部門別排出状況

	基準年度 (全体に占める割合)	2005年度実績 (基準年度増減)
エネルギー起源二酸化炭素	1,059 (84%)	1,203 (+13.6%)
産業部門	482 (38%)	456 (-5.5%)
業務その他部門	164 (13%)	238 (+44.6%)
家庭部門	127 (10%)	174 (+36.7%)
運輸部門	217 (17%)	257 (+18.1%)
エネルギー転換部門	67.9 (5%)	78.5 (+15.7%)
非エネルギー起源二酸化炭素	85.1 (7%)	90.6 (+6.6%)
メタン	33.4 (3%)	24.1 (-27.9%)
一酸化二窒素	32.6 (3%)	25.4 (-22.0%)
代替フロン等3ガス	51.2 (4%)	16.9 (-66.9%)
合 計	1,261 (100.0%)	1,360 (+7.8%)

(単位：百万t-CO₂)

表2 既存省エネルギー対策の評価

	現行計画を上回る 対策効果が見込まれるもの	現行計画における 対策効果が見込まれるもの	現行計画を下回る 対策効果が見込まれるもの	現時点では対策効果を把握できないもの
産業部門 エネルギー転換部門	・天然ガスコジェネレーション ・高性能ボイラーの普及	・自主行動計画の着実な実施とフォローアップ ・原子力の推進等による電力分野における二酸化炭素排出原単位の低減 ・新エネルギー対策の推進 ・燃料電池の導入促進 ・バイオマスの利活用の推進 ・複数事業者の連携による省エネルギー ・高性能工業炉の導入促進 ・次世代コークス炉の導入促進		・省エネルギー法によるエネルギー管理の徹底 ・建設施工分野における低燃費型建設機械の普及
業務その他部門 家庭部門	・トップランナー基準による機器の効率向上 ・省エネ機器の買い替え促進	・建築物の省エネ性能の向上 ・BEMS, HEMSの普及 ・住宅の省エネ性能の向上 ・複数事業者の連携による省エネルギー ・高効率給湯器の普及 ・業務用高効率空調機の普及 ・業務用省エネ型冷蔵・冷凍機の普及 ・待機時消費電力の削減	・高効率照明の普及 (LED) 照明	・省エネルギー法によるエネルギー管理の徹底 ・エネルギー供給事業者等による消費者へのエネルギー情報の提供
運輸部門	・トップランナー基準による自動車の燃費改善 ・交通安全施設の整備 ・トラック輸送の効率化	・公共交通機関の利用促進 ・環境に配慮した自動車使用の促進 ・自動車交通重要の調整 ・高度道路交通システム (ITS) の推進 ・路上工事の縮減 ・海運グリーン化総合対策 ・鉄道貨物へのモーダルシフト ・国際貨物の陸上輸送距離の削減 ・クリーンエネルギー自動車の普及促進 ・鉄道のエネルギー消費効率の向上 ・航空のエネルギー消費効率の向上		・環境に配慮した自動車使用の促進 (74t リックストップ 車導入支援) ・テレワーク等情報通信を活用した交通代替の推進 ・高速道路での大型トラックの最高速度の抑制 ・サルファーフリー燃料の導入及び対応自動車の導入

(出所：「京都議定書目標達成計画の評価・見直しに関する中間報告」より作成)

産業／エネルギー転換部門では、コージェネレーション、高性能ボイラーの普及については予定を上回る伸びが見込まれています。大半の対策は大幅な伸びは期待できないものの、達成目標年度（2010年度）までには目標達成がなされるだろうとしています。しかし、対策の柱とも言える「経団連環境自主行動計画」では排出量の多い業界で未達状態のところがあります。また、電力分野における原単位低減対策では、原子力発電の利用効率が現状で計画ほど向上していない等の問題を抱えています。

業務／家庭部門においては、トップランナー基準による機器の効率向上が順調に進展し、大きな効果が見込まれています。しかし、業務部門でのエネルギー管理の徹底や、消費者へのエネルギー情報の提供などソフト対策は効果測定ができないとしています。業務／家庭部門のエネルギー消費が伸び続けていることを考えると、現時点での対策が十分効果を発揮しているとは言えない状況にあります。

運輸部門については、トップランナー基準による燃費の改善や、トラック輸送の効率化対策で大きな効果があります。アイドリングストップ車の導入支援等計画に達しない対策もあるものの、全体として対策は順調に進展しており、全体としての目標達成は可能とされています。一方、自動車対策としては、「目標をより高く置くべし」との意見も見られます。

このような結果から、合同会合の取りまとめでは、「わが国の地球温暖化対策は前進していると言えるものの、現状では、総合的に見れば、対策が十分に進捗しているとは言えない状況にあり、各対策の排出削減量を達成するためには、これまで以上の進捗を必要とする対策が多く、目達計画の進捗は極めて厳しい状況にある」としています。

（３）2010年に向けての施策概要

このような状況を受けて、目標達成のためには現行対策の確実な実行を図ると共に、更なる対策の拡充が必要として追加対策の検討

が行われています。現在検討されている対策の概要を手段別に見ますと以下のようなものかと思えます。

① 法整備で対策の徹底を図ろうとするもの

産業部門においては、省エネ法による工場・事業場の省エネ規制は、これまで事業場単位で行われてきました。しかし、実態的には企業単位で管理されているケースも多く見られます。更なる管理の徹底を図るためには、より実態的な管理方法に合わせ、工場・事業場の省エネ水準が定量的に評価されるようにすると共に、業種、事業毎の評価ができるようにし、また、企業単位・事業部単位での管理もできるようにすることが必要として法改正が検討されています。

業務部門については、スーパー、コンビニなど、事業所単位では小さいものの、企業単位で見ると大きなエネルギーを消費している所もあり、産業部門以上に企業単位の規制が効果的であると考えられます。また、ビルオーナーとテナントとの管理の問題が内在しており、両者の協力した省エネ取組みを評価・推進できる仕組みが必要として法改正が検討されています。

家庭部門においては省エネ機器の効果が明確であることから、更なる対象機器の拡大を図ると共に、住宅での躯体と設備を一体化した省エネ基準の整備などが考えられています。

運輸部門においては、改正省エネ法で導入された、輸送事業者、荷主に対する規制の適切な実施が望まれています。

② インセンティブ付与で対策の促進を図ろうとするもの

産業部門では、省エネルギーポテンシャルは有るものの、資金、技術、人材等の不足により省エネが進んでいない中小企業に対し、これを支援する方策が検討されています。また、これら中小企業に対し、大企業が支援できる環境作りが検討されています。

業務部門としては、省エネ性能の高いビルが市場で評価・選択されるような対策が検討されており、また、家庭部門においては省エネ住宅に対する支援策が検討されています。

③各人の行動に訴える広報等により促進を図ろうとするもの

家庭部門においては、消費者各人の意識に依存するところが大きく、これまで色々な形で広報が行われてきましたが、省エネ家電、省エネ住宅については今後一層積極的な広報による普及促進が必要と考えられています。また、温暖化対策に向けては国民運動の展開が必要と考えられ、今後一層の省エネ広報、普及啓発、教育等による促進策が検討されています。

3. 省エネルギー技術の動向

(1) 全体的な動き

今年度の経済産業省予算における資源・エネルギー政策予算（表3）を見てみますと、全体的に歳出削減が求められる中、省エネ、原子力、新エネ、運輸、資源戦略、アジアとの協力関係、緊急時対応などの施策に対し、増額はされていないものの必要な予算の確保は行われています。中でも、省エネルギー対策については、世界の省エネルギーのフロンランナーとしての日本の立場を一層強化して、2030年時点で少なくとも30%の省エネルギーを実現するための施策実現に向けた予算が盛り込まれました。省エネルギー技術関連予算については、昨年来検討してきた省エネルギー技術戦略に沿って、今年度は計33のプ

表3 平成19年度経済産業省予算における資源・エネルギー政策予算（総額7374億円）

費 目	予算額 (億円)
1 省エネルギーフロンランナー計画	1,346
(1) 省エネルギー技術開発の一層の推進	502
(2) 住宅・建築物に係わる省エネ機器等の導入促進	242
(3) 産業・運輸部門における省エネ設備等の導入促進	286
2 原子力立国計画	1,770
(1) 高速増殖炉サイクル、核燃料サイクル等の技術開発、ウラン資源確保、人材育成等	151
(2) 原子力安全・防災・核物質防護対策の確実な推進	323
(3) 原子力発電設備等と地域との共生の実現	1,289
3 運輸エネルギー次世代計画	581
(1) バイオマス由来燃料に係わる調査研究・技術開発・実証	102
(2) GTL生産技術の実証研究	69
(3) 蓄電システムに係わる戦略的技術開発・導入促進	76
4 新エネルギーイノベーション計画	1,153
(1) 新エネルギー技術開発の推進	508
(2) 蓄電システムに係わる戦略的技術開発・導入促進	76
(3) 水素貯蔵材料先端基盤技術	8
5 総合資源確保戦略	1,573
(1) 石油・天然ガス開発企業に対する支援の強化	134
(2) 革新的な石油精製技術の開発	23
(3) 鉱物資源の安定供給確保	72
6 緊急時対応策の強化	1,821
(1) 国家石油備蓄の推進	1,529
(2) GTL生産技術の実証研究	69
7 アジアエネルギー環境協力プログラム	165
(1) 「アジア省エネルギー・プログラム」の戦略的実施	55
(2) アジアにおける石炭のクリーン利用、生産・保全技術の普及	96

表4 省エネルギー技術開発プログラム

カテゴリー	プロジェクト名
1 提案公募	エネルギー使用合理化技術戦略の開発
2	無曝気・省エネルギー型次世代水資源循環技術の開発
3 超燃焼システム技術	植物の物質生産プロセス制御基盤技術開発
4	微生物機能を活用した高度製造基盤技術開発
5	微生物群のデザイン化による高効率型環境バイオ処理技術開発
6	革新的マイクロ反応利用部材技術開発
7 時空を超えたエネルギー利用技術	超高効率天然ガスエンジン・コンバインドシステム技術開発
8	揮発性有機化合物対策用高感度検出器の開発
9	有機発光機構を用いた高効率照明の開発
10	デジタル情報機器相互運用基盤プロジェクト
11	次世代大型低消費電力プラズマディスプレイ基盤技術開発
12	次世代大型低消費電力液晶ディスプレイ基盤技術開発
13 省エネ型情報生活空間創成技術	高機能化システムディスプレイプラットフォーム技術開発
14	次世代高効率ネットワークデバイス技術開発
15	マルチセラミックス膜新断熱材料の開発
16	次世代光波制御材料・素子化技術
17	低損失オプティカル新機能部材技術開発
18	鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発
19	超フレキシブルディスプレイ部材技術開発
20	自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発
21 先進交通社会確立技術	革新的次世代低公害車総合技術開発
22	環境適応型小型航空機用エンジン研究開発
23	カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト
24	次世代プロセスフレンドリー設計技術開発
25	マスク設計・描画・検査総合最適化技術開発
26	次世代半導体材料・プロセス基盤技術(MIRAI)プロジェクト
27 次世代省エネデバイス技術	極端紫外線(EUV)露光システム開発プロジェクト
28	ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発
29	半導体アプリケーションチッププロジェクト
30	パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術「開発
31	次世代高度部材開発評価基盤の開発
32 その他	高度機械加工システム開発事業
33	エコマネジメント生産システム技術開発

プロジェクトの実施が計画されています(表4)。主たる方針として、民生・運輸・産業分野において、省エネ効果の高い基盤技術等の開発や、周辺技術の不足や製品化技術の問題により実用化が遅れているものについては、その実用化を支援するための研究開発を行うこととしています。更に、製品化し市場へ導入するのに有効性・信頼性を実証する必要があるものについては、実機ベースでのデータ収集及び技術改良などの実証研究を行うことにしています。また、その実施に当たっては、技術的波及効果が大きいテーマに重点を置くと

ともに、省エネ法におけるトップランナー規制の実効性を高めるため、その対象機器に関連した技術開発を推進するとしています。また、アジア省エネルギープログラムの推進予算は昨年度より増額され、アジア地区に対する省エネ協力に強く関与していく方向が示されています。以下に部門毎に技術動向の詳細を見ることとします。

(2) 産業部門の技術動向

産業部門の省エネルギー対策は、前述した通り「自主行動計画」によって、各業界別に

表5 産業部門の省エネルギー投資

工業会	投資額	投資時期
電気事業連合会	1兆1,200億円	1997年度～2005年度 火力発電の効率向上分
石油連盟	120億円	2005年度
日本鉱業協会	158億円	1999年度～2005年度
製紙業界	261億円	2005年度
セメント業界	106億円	2005年度
電気・電子4団体	323億円	2005年度
日本自動車工業会	350億円	2005年度
日本自動車部品工業会	256億円	2005年度
鉄鋼連盟	1兆5,000億円	1990年度～2005年度
日本化学工業会	3,010億円	1997年度～2005年度

自主的に取り組みが行われています。主要業界のこれまでの省エネルギー投資額を見ますと（表5）、相当額の投資が行われていることが分かります。これらの具体的投資対象は様々ですが、「自主行動計画」では、目標達成に向けた今後の対策として、各社できる限りの様々な省エネ対策を講じるとしています。実際には操業状態の改善，工程の改善，装置の改善，省エネ装置の導入など全ての分野に亘って対策が行われています。図2には省エネセンターが毎年実施している省エネルギー実施事例発表大会での，昨年度発表事例のテーマ類型別発表件数を示しています。この図から，工場における圧空，蒸気等のユーティリティーの対策や保温・断熱対策，コージェネ，

インバーターの導入対策と言った個別対策は件数が低いのに対し，最適制御とJIT（Just in Time），工程停止・統合，固定概念の打破，時間短縮と言ったプロセス全体の制御に係わる対策が多く，省エネがより総合的な対策に向けられて来ている事が伺えます。また，鉄鋼業が今後進める省エネルギー対策の項目を合同会合に出された資料から見ますと（表6），対策項目として挙げられている事項は，従来の省エネルギー対策技術の範囲に止まっていた印象を受けます。操業効率化が他の対策に比べ抜きん出て多いことを考えますと，最近の省エネルギー対策が頭打ち状態にある印象を受けます。

一方，産業部門の省エネルギーを抜本的に進

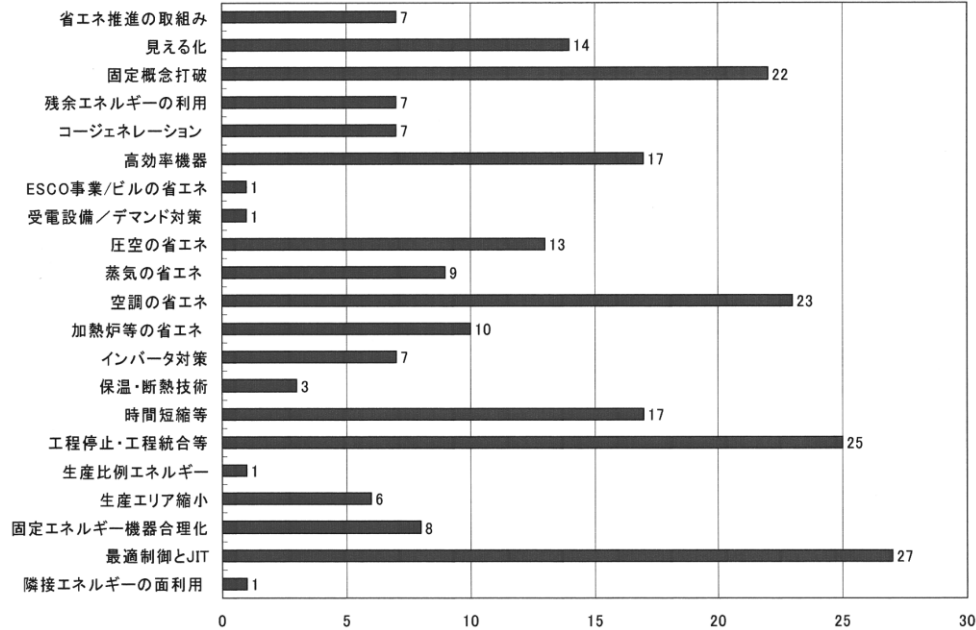


図2 省エネルギー実施事例類型分野別発表件数（総数131件 重複有り）

表6 鉄鋼業の今後の省エネルギー対策

(構成比%)		
排エネ回収	TRT増強、CDQ新設、ガス回収強化、転炉ガス顕熱回収、リシエネバーナー 他	25
設備高効率化	高効率酸素設備、発電タービン改良、焼結改良、高炉改修、モーター効率化、発電設備効率化、熱風炉改修 他	20
操業効率化	還元材比低減、鋼材温度管理、冷鉄源利用 他	45
廃プラ等有効活用	廃プラ等活用、廃プラ処理設備増強 他	5
その他	ダストリサイクル、石炭調湿、鉬石事前処理 他	5

(出所：第18回産業構造審議会・中央環境審議会合同会合資料)

めるには、技術革新に基づく新しい技術の導入が不可欠です。省エネルギー技術戦略の中では、「超燃焼システム技術」として6テーマ、「時空を超えたエネルギー利用技術」として1テーマ、その他として高度機械加工システムとエコマネジメント生産システムなどが今年度より具体的なテーマとして推進が図られています（表4）。

（3）民生部門における対応技術

民生部門の省エネルギー対応技術としては、エネルギー消費機器に係わるものと建物に関するものが考えられます。

エネルギー消費機器については、その消費エネルギーの大きなものからトップランナー基準の対象として、エネルギー消費効率の基準値を定め、目標年度迄に達成することを製造事業者等に求めています。昨年度の5品目に加えて6品目が目標年度に達し、合計11品目が達成度の

評価をされています（表7）。目標年度に達した全ての機器において目標値が達成され、トップランナー制度に基づく機器の効率改善が順調に進んでいると判断されます。

家電機器、OA機器、空調／照明機器などの省エネルギー化には、モータ、ファンなどの制御をインバータ化するなど、パワーエレクトロニクスの応用による制御性の改善・効率の向上、電源部分の電力損失の低減、LEDなど表示半導体といった電子デバイスの技術改革が大きく貢献すると考えられます。現在オール電化住宅の普及が進んでいる中、これら電子・電気機器の効率の向上が今後の省エネルギーにとって益々重要な対策になってくると考えられます。

一方、建築物（ビル）については、近年ビルのエネルギー使用実態調査などが積極的に行われ、省エネルギー対策のポイントも大分整理されてきています。表8には、省エネ

表7 トップランナー制度によるこれまでの省エネ効果

機器名	エネルギー消費効率の改善 (実績)	エネルギー消費効率の改善 (見込み)
テレビジョン受像機 (ブラウン管テレビ)	25.7% (1997→2003年度)	16.4%
ビデオテープレコーダー	73.6% (1997→2003年度)	58.7%
エアコンディショナー※ (ルームエアコン)	67.8% (1997→2004冷凍年度)	66.1%
電気冷蔵庫	55.2% (1998→2004年度)	30.5%
電気冷凍庫	29.6% (1998→2004年度)	22.9%
ガソリン乗用自動車※	22.8% (1995→2005年度)	22.8% (1995→2010年度)
ディーゼル貨物自動車※	21.7% (1995→2005年度)	6.5%
自動販売機	37.3% (2000→2005年度)	33.9%
電子計算機	99.1% (1997→2005年度)	83.0%
磁気ディスク装置	98.2% (1997→2005年度)	78.0%
蛍光灯器具※	35.6% (1997→2005年度)	16.6%

出所：経済産業省 資源エネルギー庁作成資料

表8 ビルの省エネの着眼点

1. 無駄の排除 ☐ 不使用室の照明・空調のカット ☐ 風除室設置等による侵入外気の抑制 ☐ 室内発熱源に対する局所排気 ☐ 予冷・予熱時の外気取り入れ停止 ☐ フィルターの清掃等	5. エネルギー供給会社との需給調整契約 ☐ 水・氷蓄熱による夜間電力の利用 ☐ ピーク時間調整契約等
2. 快適さを損なわない程度の節約 ☐ 設定温度・送風量・外気侵入量・照度等の見直し ☐ 節水型衛生器具への交換等	6. 機器・設備の効率向上 ☐ 機器の適性容量化・高効率化へのリプレイス ☐ 高効率照明器具への交換 ☐ 負荷変動に対する容量の自動制御(台数制御・VAV等) ☐ 電力の力率改善等
3. 建物・設備からのエネルギーロスの抑制 ☐ 外壁の断熱 ☐ 窓の日射調整(ブラインド、熱反射フィルム貼等) ☐ ダクトのエアリーク対策 ☐ 配管・ダクトの断熱強化等	7. 自然エネルギーの積極的利用 ☐ ソーラー設備 ☐ 中間期の外気冷房 ☐ 昼光利用 ☐ 外気・河川水・地下水を熱源とするヒートポンプ ☐ 雨水利用等
4. 廃熱回収 ☐ 外気取り入れに対する吸排気的全熱交換器 ☐ 熱回収ヒートポンプ等	

(出所：省エネルギーセンター「業務用ビルにおける省エネ推進の手引き」2006年)

ギーセンターが進めるビルの省エネ診断で行われる省エネルギーの着眼点を示しています。建物の省エネルギー対策は、断熱性能の向上など建物そのものの対策と、そこに使用されるエネルギー使用機器の適性を加味した検討が重要と考えられています。現在「オフィス管理ツール」として、建物のエネルギー消費に関係する様々な所有データを投入することで、その建物のエネルギー使用実態を把握し、省エネルギーの対策を検討できる道具が出来ます。このような道具を使って、建物の省エネルギーを総合的且つ効果的に進めることが求められています。

住宅の省エネも、基本的には建物の省エネルギーと同じ考え方に立って行われるべきですが、住宅の場合は対象が千差万別ですので、むしろ様々な対応技術が必要と考えられます。国は、省エネ性能の高い住宅の普及に向けた支援策を行っておりますが、大半を占める既存住宅の対策として、例えば、住宅の冷・暖房機能を向上することのできる様々な手段を提供すると共に、その活用に向けた支援策が必要と考えられます。

(4) 運輸部門の技術動向

運輸部門の省エネルギー対策は、大きくは運送機器単体の燃費改善対策と、効率的な運送対

策とがあります。運送機器の燃費改善策として、最近船舶や飛行機の対策も検討されていますが、エネルギー消費の大半を占める自動車の燃費対策が最大の対策となっています。自動車の燃費改善はトップランナー基準によって定められる燃費基準値を達成する形で行われています。現在のところ、各社による燃費基準値の達成状況は、目標年度より早い時期での達成が見込まれ、この状況を受けて今年基準値が新たに改訂された所です。また、従来無かった重量車に対する燃費基準も、業界などの努力により昨年基準化がなされました。

今回のトップランナー基準改定で、今後の燃費改善技術として検討された技術対策項目を表9に示します。今後の燃費改善要素として、なおエンジンの改良が大きな改善項目として期待されていますが、効果の大きな対策項目としてはハイブリッド自動車やディーゼル自動車などが挙げられており、中長期的にはこれらの新しいシステムによる自動車への転換・普及が考えられています。

一方、効率的運送対策としては、省エネ法の改定により新たに輸送事業者と荷主に対し省エネルギー対策の実施が義務付けられ、今年よりスタートしました。貨物輸送のエネルギー効率化に向けた取り組みが期待されるところです。

表9 自動車の燃費改善技術一覧

改善技術項目	改善率 %	改善技術項目	改善率 %
①従来燃費改善技術の更なる改良	2~4	・電子制御燃料噴射装置	1.5
・エンジンの高圧縮比化		・コモンレール	2.5
・フリクション低減		・ディーゼルエンジン直噴化	8
・軽量化		・高圧噴射化	1
・車両走行抵抗低減		・過給機及び過給機効率改善	2~2.5
・低ころがり抵抗タイヤ		・インタークーラー	1
・エンジン全体制御最適化		・EGR	0.5~1
②エンジン改良		・ローラカムフォロワー	1.5
<ガソリンエンジンの改良>		・オフセットクランク	2
・4バルブ	1	③補機損失低減	
・2バルブ&2点点火	2	・電気パワーステアリング	2
・可変動弁系	1~7	・充電制御	0.5
・直噴ストイキエンジン	2	④駆動系改良	
・直噴リーンバーンエンジン	10	・アイドルニュートラル制御	1
・可変気筒	7	・AT多段化	1~4
・ミラーサイクル	10	・CVT化	7
・大量EGR	2	・自動MT(AMT・DCT)化	9
・ローラカムフォロワー	1	・MT化	9
・オフセットクランク	2	⑤燃費性能の優れた自動車の導入	
・可変圧縮比	10	・ハイブリッド自動車	15~70
<ディーゼルエンジンの改良>		・ディーゼル自動車	20
・4バルブ化	1	・アイドリングストップ自動車	4~7

(出所：第9回省エネルギー基準部会資料，2007年)

また、道路システム側から見た輸送エネルギーの効率化の課題は、国土交通省を中心として取り組まれており、高度道路交通システム（ITS）として、ノンストップ自動料金支払いシステム（ETC）や道路交通情報通信システム（VICS）、路上工事の縮減、自転車利用の促進など一定の効果が有ったとして、今後一層の普及に期待が寄せられています。

4. 国際的活動の広がり

地球の温暖化が現実的に認識できるようになるにつれて、国際会議のあらゆる場で対応が議論されるようになってきました。G8サミットにおいても、2005年の英国グレンイーグルスでの会合で、「気候変動問題」が重要テーマとして取り上げられ、気候変動部分の成果文書として、「気候変動、クリーンエネルギーおよび持続可能な開発に関するグレンイーグルス行動計画」が合意されました。この行動計画の中で、気候変動問題におけるIEAの役割強化が合意され、産業分野や火力発電分野における途上国を含めたエネルギー効率の評価や、建物、電気機器等における各国の省エネルギー基準のレビュー、政策のベストプラクティスの評価等を行うことがIEAにタスクアウトされました。また、G8およびエネルギー需要が急増する途上国を含む対話の場で、行動計画をフォローアップしていくことが合意されており、検討の結果について、2008年、日本の「洞爺湖サミット」で報告されることになっています。このようなことを背景として、IEAを中心とした各国の省エネルギー対策に関する動きが活発化してきています。また、京都議定書の定める約束期間後の対応について、欧州を中心として議論が活発化してきています。

今年6月にドイツのハイリゲンダムで開催されたサミットにおいて、わが国は安倍前総理より「美しい星50」と題した地球温暖化に対する取り組みの考え方を提案しました。世界全体の

排出量を現状に比して2050年までに半減することを世界の共通の目標とするとともに、次期枠組みを構築するに当たっての「3原則」を提案したものです。G8として、同時に行われたEUおよびカナダからの同様な提案を受けて、今後真剣に検討することになっています。

一方、米国の主導により「クリーン開発と機構に関する太平洋パートナーシップ（Asia-Pacific Partnership on Clean Development: APP）」が、日本、米国、豪州、韓国、中国、インドの6カ国間の地域間協力体制として立ち上げられました。2006年1月に豪州シドニーで第1回の閣僚会合が開かれ、民間企業のCEOも参加して、セクター別アプローチなどに関し建設的な意見交換が行なわれ、次の8つのセクター別タスクフォースが設けられました。

- ①よりクリーンな化石エネルギー
- ②再生可能エネルギーと分散型電源
- ③発電および送電
- ④鉄鋼
- ⑤アルミニウム
- ⑥セメント
- ⑦石炭鉱業
- ⑧建物および電気機器

その後、各タスクフォースは具体的行動計画の下に活発な活動を展開しています。

昨年策定された「新・国家エネルギー戦略」の目標の1つとして、アジア・世界のエネルギー問題の克服が謳われ、アジア諸国における省エネルギーの自立的推進を図るための国際協力の取組として、「アジア省エネルギー推進プログラム」が推進されています。

現在様々な形での取組が行われていますが、その1つとしてアジア諸国の制度的取組への支援が省エネルギーセンターを中心として行われています。その中身は、長期専門家の派遣、受け入れ研修の人材育成支援を通じて、①省エネ制度の構築支援の実施。②地域省エネセンターの運営支援など相手国の省エネ制度の的確な運用の支援。③省エネ基準・ラベリング制度の策定支援。④ESCO分野の協力など、民生、

運輸、電力部門の協力の実施などです。これらの協力を行う上で、各国との情報交換を密にするために、5月よりコラボレーションセンターを省エネルギーセンター内に設置して、各国からの省エネルギーに関する様々な質問に対応する窓口を設けています。

わが国の省エネルギー技術は、個別技術に止まらず、ソフト技術としても広く海外で適用されようとしています。今後は、実行する上でのファイナンスや技術トランスファー上の課題などへの対応が必要と思われます。

5. まとめ

以上を取りまとめてみますと、次のようになります。

- ① 地球環境問題が深刻化する中、省エネルギー対策は益々重要な施策として注目を集めています。
- ② 京都議定書目標達成計画の評価では、現行計画での目標達成は困難として追加対策が検討されています。
- ③ 省エネルギー技術の対応としては、短期的対応課題と長期的対応課題とがあり、短期的課題としては、既存の技術を既存の枠を越えて広く適用することなどありますが、一方、総合システムとして捉えた改善技術が今後より重要になるものと思われます。
- ④ 長期的課題としては省エネルギー技術戦略に基づく開発が始まっています。
- ⑤ わが国の省エネルギー技術の海外への積極的展開が図られています。

原子力分野における 人材基盤に関する分析と課題



氏 田 博 士 ^{*} (財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 主管研究員

波 多 野 守 ^{**} (財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 参事



鈴 木 和 人 ^{***} (財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 主管研究員

1. はじめに

原子力産業界においては、国内における軽水炉プラントの新規建設の停滞や団塊の世代のリタイアに伴う技術・技能の維持・継承等の課題が指摘されているところである。これら課題に対応するためには、原子力産業における人材基盤の状況を総合的に把握しその課題を明確にした上で、今後の人材育成方策など適切な施策を実施していくことが必要である。

本稿では、平成18年度に独立行政法人原子力安全基盤機構（JNES）の委託により実施した各種人材データの分析、人材の将来予測および関係者へのインタビュー等の結果、ならびに、これらを通じて抽出された課題と必要な対策等について報告する。

2. 原子力産業における人材基盤の状況

原子力産業界の人材基盤に関する課題を把握するため、過去に実施された原子力関連人材に関する調査^{(1)～(3)}を中心に、原子力関連人材を取り巻く状況の推移等について調査・分析を実施した。

これら調査の中には定期的・不定期で実施

されているものが混在しているが、毎年度定期的に実施している調査として、(社)日本原子力産業会議（原産会議、現在の(社)日本原子力産業協会）の「原子力産業実態調査」⁽⁴⁾がある。ここでは、同調査データを基に、原子力産業全体の分野別の従事者数の推移を概観した。主要な結果を、原子力の運転プラント基数、建設プラント基数の推移と合わせて図1に示す。

なお、鉱工業として整理されている事業者は、原子力プラントメーカーを含むほぼ300社以上にのぼる企業である。

上記に加え、技術者分野別の詳細な従事者データの調査結果から、その傾向を表1のとおりまとめた。

電気事業者では、1989年以降技術者総数はコンスタントな増加傾向を示している。その増加は、主に技術者全体の6割程度を占める「運転・保守」部門であり、運転プラント基数の増加によるものと考えられる。一方、「設計・建設工事」部門はほぼ一貫した減少傾向であり、「研究者」（図1では省略）も1990年代後半をピークとして減少傾向を示している。これらは、建設プラント基数の減少、および、研究者に関してみれば軽水炉に係る研究開発

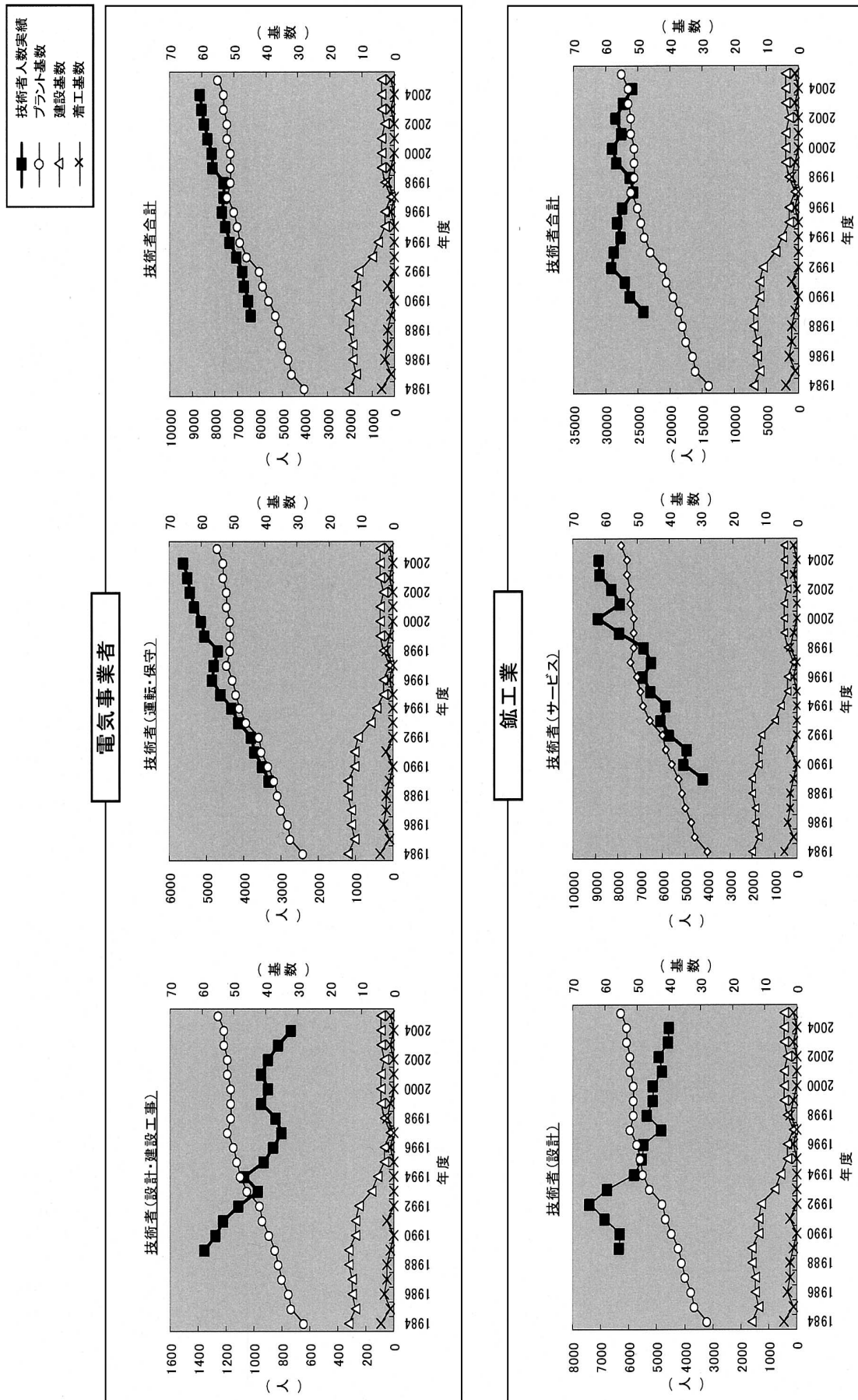


図 1 電気事業者及び鉱工業事業者の技術者推移

表1 技術者の減少及び増加分野

分類 推移	電気事業者	鈾工業
減少領域	・研究者 ・設計・建設工事 ・RI（ラジオアイソトープ）・放射線利用	・研究者 ・設計 ・原子炉機器製造
増加領域	・運転・保守 ・調査・計画・管理 ・核燃料 ・廃棄物処理処分	・サービス部門（定期検査・メンテナンス） ・再処理、放射性廃棄物処理・処分

（出所：参考文献1を基に作成）

が一時期のピークを超えたことによるものと想定できる。

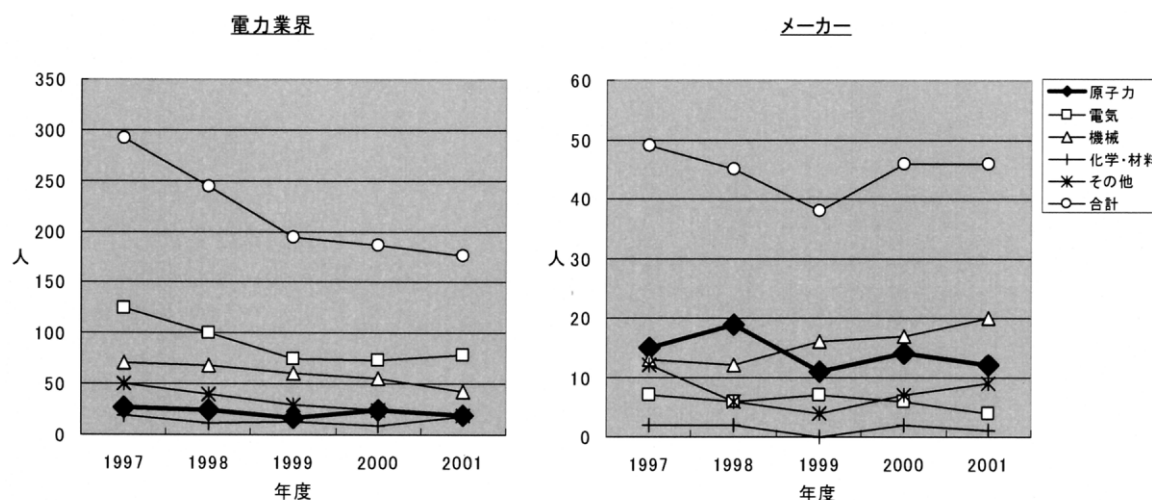
鈾工業では、技術者総数の変動はあるものの、ほぼ横ばいである。原子力発電所の定期検査、メンテナンス等に対応した「サービス」部門はほぼ一貫して増加しているが、運転プラント基数の増加によるものと考えられる。一方、1990年代前半より「設計」技術者および「研究者」（図1では省略）が急激に減少している。これは前述の電気事業者の場合と同様、主に設計技術者については建設プラント基数の減少によるもの、研究者については軽水炉開発課題の減少と想定できる。

以上のように電気事業者、鈾工業の双方において、運転プラント基数および建設中のプラント基数の推移と相関のある分野がみられる。

3. 原子力産業界における人材採用状況

原子力関連人材の需要側である電力業界・原子力プラントメーカーと、供給側である大学卒業生との関連について調査した。原産会議が基盤強化委員会人材問題小委員会で実施したアンケート調査^{(2)※}に基づく結果を図2に示す。

電力業界、原子力プラントメーカーとも、技術者全体の採用数には若干の変動はあるものの、原子力専攻出身者をほぼ安定的に採用しており、原子力技術基盤を支える人材として一定数を採用していることがうかがえる。また、原子力部門への技術系採用者全体に占める原子力工学専攻出身者の割合は、電力業界で10%程度、原子力プラントメーカーで30%程度であり、それ以外の人材は機械・電



（出所：原子力ポケットブック2005年版，日本原子力産業会議）

図2 原子力産業界における原子力部門への技術系採用者数の推移

※ 人材問題小委員会委員（電力関係8社，メーカー2社）のアンケート回答を集計

気工学専攻出身者を中心として原子力に必要な関連部門から採用している。

4. 将来の人材需要に関する予測

原子力関連の人材に関する課題を抽出するため、将来の需要を予測した。ここでは、① 電

気事業法に基づき電気事業者が毎年度末に届ける供給計画に基づく予測、② 平準化した新增設により2030年に58GW（電気出力）を達成する場合、の2つのケースについて予測を行った。

予測方法を表2に、予測結果を図3および図4に示す。

表2 将来の人材需給の予測方法

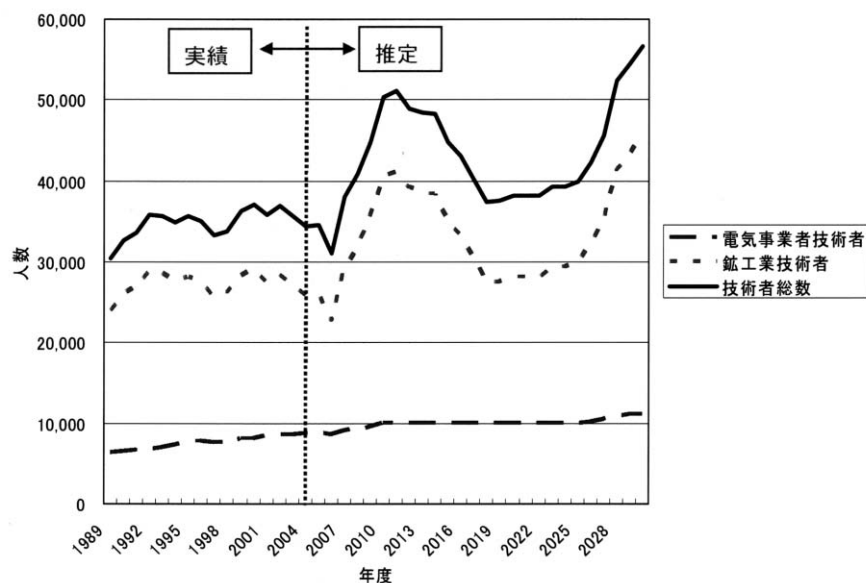
① 供給計画に基づく場合

- 過去の電気事業者および鉱工業における原子力産業従事者数実績⁽¹⁾⁽³⁾から、今後（～2030年）の大まかな原子力従事者数需要を予測する（将来の需要傾向の把握）。
- 軽水炉プラントの建設、運転に必要な従事者の需要予測は、基本的に、1基の軽水炉プラントの設計、建設、運転に必要な人員数を過去の実績値から求め、軽水炉プラント（国内外）の建設、運転工程を想定して求めた。
- 軽水炉プラントの建設/運転計画は、建設・計画中プラントは各電気事業者の供給計画等の公表計画を使用し、既設炉については寿命を60年とし、即刻リプレースと仮定する。
- 高速増殖炉サイクル開発に必要な従事者の需要予測は、過去の実績値のピーク人員数を下に設定し、実証施設等の建設に必要な人員数を軽水炉プラントの建設に準じて求め合算した。
- その他分野の従事者に関しては、基準年度（2004年度）の規模を維持するものと考えた。

② 平準化した新增設により2030年に58GW（電気出力）を達成する場合

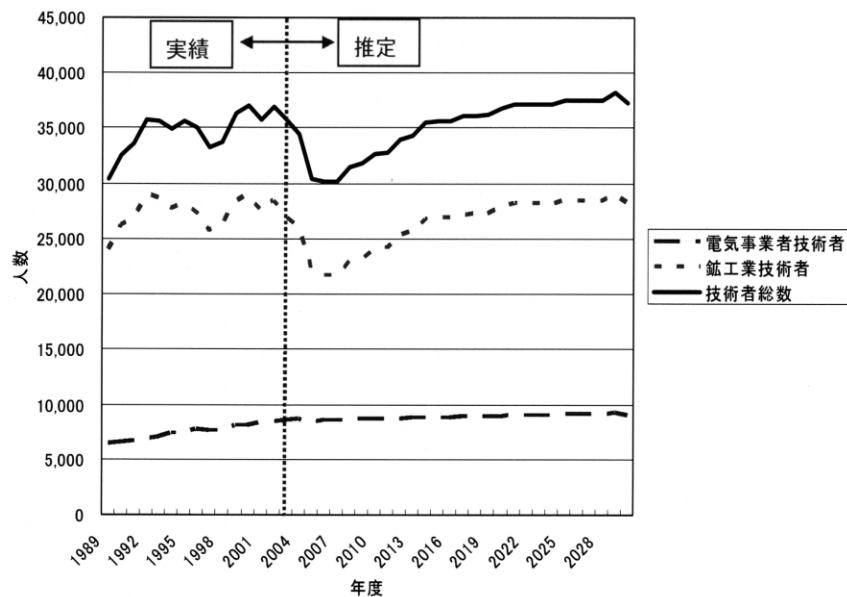
以下の条件を変更する以外は、上記①と同様。

- 2030年までの新增設は単機容量130万kW，2010年から2030年に58GWeとなるよう，4年毎に1基ずつ導入。



（供給計画に基づく場合）

図3 全原子力産業従事者数の予測結果



(平準化した新增設により2030年に58GWeを達成する場合)

図4 全原子力産業従事者数の予測結果

供給計画に基づくケース（図3）では、全原子力産業における技術者総数は大きな傾向としては増加傾向にある。しかし、現計画の国内軽水炉プラント建設完了～リプレース需要立ち上がり間の「端境期」に、特に原子力プラントメーカーを中心に技術者数の大きな変動が生じる可能性がある。

平準化した新增設により2030年に58GWを達成するケース（図4）では、ほぼ定常的に従事者数増加が見込まれ、過去のピーク人員数以上までの増員の可能性がある。

以上の結果から、課題を以下のように整理した。

● 現在計画されている軽水炉プラントの建設が完了、運転が開始された後、既設炉のリプレースが開始されるまでの間、国内プラントの建設の「端境期」が生じ、人材／技術力の維持の面で課題が生じる可能性がある。

● この対応としては、電気事業者においては建設やリプレース時期の平準化、原子力プラントメーカーにおいては海外プラント受注が考えられる。

人材（人数）の確保と技術力の維持が必ずしもイコールの関係ではないため、軽々には言えないが、端境期を含む以降について人材／技術力の厚み確保が課題であることは読みとれる。両者の関係について、表面的な数字から一歩掘り下げた分析が必要とされる。

5. 関係者へのインタビュー

大学・電気事業者、原子力プラントメーカーにおける原子力に関する人材確保の動向・方策・課題、そして相互の人材流動の状況や課題を明らかにするため、4大学の教授、電気事業者2社・原子力プラントメーカー3社の方々へのインタビュー調査を行った。

主な質問事項は以下のとおりである。

- ① 原子力関連事業に係わる人材に関する課題と対策
 - －従事者数の状況と課題
 - －当面の人材確保策
 - －国内軽水炉プラント建設端境期の対応等
- ② 外部専門家への要求
- ③ 人材確保のための外部への要望
- ④ 産学連携への対応

表3 インタビュー結果の概要

大 学	・夢のある原子力も大切だが、社会を支え地球環境にも貢献する技術といったメッセージ性が必要。 ・シニアが中心となりプロジェクト化して、知識・データベースの体系的な構築・維持・継承が必要。 ・大学の実験施設を定期的に共同で利用できるシステムとそれに対する資金援助、またその指導者雇用のための制度・資金援助も必要。 ・若手教員は、シミュレーションや論文を書きやすい分野を指向。 ・実験の機会減少による工学的センスや応用力低下の懸念あり。 ・原子力に対する学生の意識は高揚傾向。 ・人材の需要が高まれば志望も増え質も向上していく。 ・産業界、規制当局、研究機関等から人材ロードマップを明示すべき。 ・大学はドクターコースへの進学を奨励しているが、ドクターを必要としない傾向にある産業界と感覚にずれがある。
電気事業者	・保全に係る技術体系の整備が必要。 ・建設工事の管理ノウハウは、大型改造工事で維持・継承するほか、過去のドキュメントを電子化して活用。 ・技術的要件作成及び総合的な評価力を有する人材が必要。 ・原子力工学だけでなく、原子力に関する幅広い知識をもつ人材が必要であり、機械・電気・化学工学等の各分野にニーズあり。
原子力プラントメーカー	・組織再構築、人員再配置等により人材を維持。 ・40歳台後半の技術者が多く、若手技術者が手薄。 ・基礎・基盤分野の外部専門家の強化が必要。 ・国内原子力プラント建設減少機関の技術力維持のため継続的な研究開発支援やプロジェクトが必要。 ・民間規格基準類作成のための国による支援を要望。

表4 インタビュー結果から得られた主要課題

- 実験指導者不足の傾向と研究施設の老朽化
- 若手の原子力離れと高齢化
- ポスドク研究者数の増加と需給のミスマッチ
- プラント数の増加に伴い、人員増加、特に保全関連の人材は増加保守の体系化が必要
- 新規原子力プラントの減少に伴い、開発関連の研究者・設計技術者が減少人材維持に努めているが、継続的な研究開発プロジェクトが必要
- 安全研究に開発要素を含めた上で、メーカー・大学に資金提供必要
- 基盤技術関連の人材は手薄、特に若手研究者の育成が必要
- 基盤研究者や教育者の評価システムが必要
- 規格基準業務支援が必要

インタビュー結果の概要を表3に示す。

このインタビュー結果の集約として主要な課題を表4のとおりまとめた。

6. 今後の人材基盤のあり方・育成について（提言）

以上の各種データ分析とインタビュー結果から、各機関別の現状の課題と人材需給の関係について図5のとおり整理した。

各機関において、それぞれが抱える課題を解決していく必要があるが、主要な課題として技術者の高齢化が挙げられており、人材育成や技術継承に加え、原子力部門内の人材流動化が必要であることが明らかとなった。また、3. および5. で述べたように、原子力

産業界においては、原子力工学専攻出身者だけではなく、原子力技術を支える機械工学・電気工学・化学工学等の各分野に人材ニーズがある。これら人材の確保にあたっては、原子力分野とそれ以外の分野との人材交流を進める必要があり、そのためには、原子力部門における長期的な技術開発や新規プロジェクトに関するロードマップを明示し、人材要求の明確化を図ることが必要となる。さらに将来的には、海外展開戦略、既設原子炉のリブレースや高速増殖炉サイクル開発等について明確化を図っていく必要があると考えられる。

また、原子力以外の分野との連携についても具体的に実践していくことが求められる時期になっていることも指摘しておきたい。

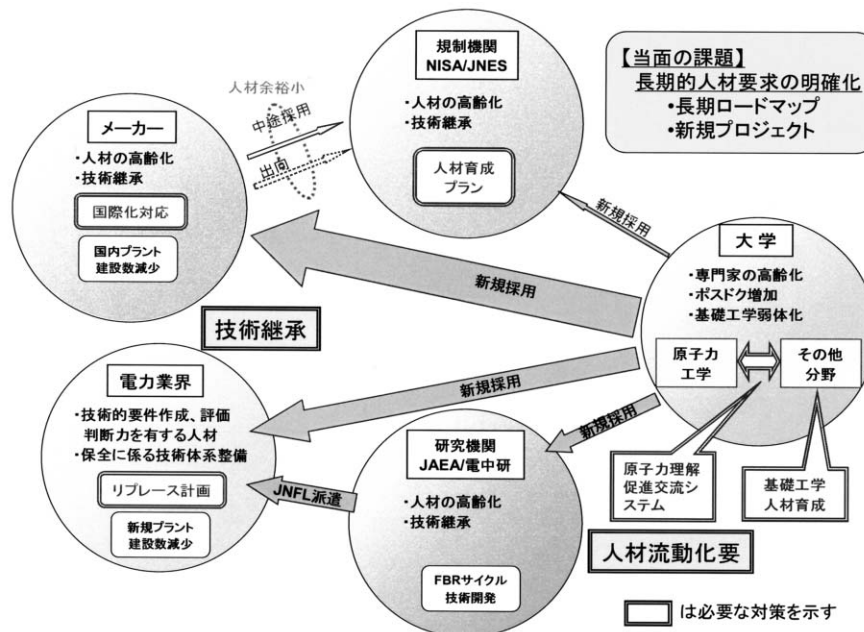


図5 人材需給に関する現状と課題

表5 人材基盤確保のための対策に関する提言

対 策	具体的内容（例）
原子力業界としての長期的人材要求の明確化（ロードマップ）	●ロードマップの提示 ー将来を見渡す全体像の提示ー 「原子力は社会を支え、地球環境を守る基幹技術」 ・次世代軽水炉・高速増殖炉・第4世代原子炉開発 ・リプレース計画 ・海外展開戦略 ・エネルギー・地球環境問題における原子力の役割 ●技術課題の明確化 ・成熟技術の必要性の提示：構造，材料，溶接 等 ・新たな研究課題の抽出と提示：高経年化，高燃焼度化
大学の基礎体力の増強	●実験施設の計画的リプレース ●人材育成 ・教育機能充実 ・学生の人間力と専門力の強化 ・研究者の研究能力と応用力の育成 ・キャリアパスの提示
原子力業界での技術継承	●知識，データ，ノウハウの蓄積 ●シニア技術者の活用 ●研究システムの見直し ●独自のマイスター制度 等
原子力業界の人材の流動化（キャリアパスの多様化）	●技術士，原子力関連資格保有者の活用 ●人材交流システムの設定 ●人材要求の情報発信と交流の場の設定
原子力以外の分野との交流・連携	●原子力に興味をもってもらうための活動 ・ニーズの発信 ・相互交流システム

以上のまとめとして、今後の人材基盤の確保にあたって実施すべき対策について表5のとおり提言する。

[謝辞]

本報告は、JNESから受託した「原子力安全規制に資する安全研究のあり方に関する調査研究」（平成18年度）の中で実施した内容である。原子力安全・保安院およびJNESをはじめ、

ヒアリング調査および各種データ調査にご協力頂いた電気事業者、電気事業連合会、原子力プラントメーカー、(社)日本電機工業会、大学、研究機関の皆様に感謝の意を表する。

参考文献

- (1)「原子力産業実態調査」報告書（平成元年度～16年度）：日本原子力産業会議
- (2) 原子力ポケットブック2005年版：日本原子力産業会議
- (3)「原子力関係統計」：日本電機工業会

消防機関と原子力事業者等との円滑な連携について

酒 谷 幹 男 (財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 主管研究員



1. はじめに

消防庁ではこれまで、原子力施設等（原子炉施設、核燃料施設、放射性同位元素等取扱施設等）における火災等の発生時に、消防機関が安全かつ確かな消防活動を実施するための「原子力施設等における消防活動対策マニュアル」や「原子力施設等における消防活動対策ハンドブック」等を作成している。これらを参考に、各地の消防機関では消防活動計画を策定し、原子力施設等の特殊性を考慮した火災等に対応し得る体制等を整備している。また、原子力事業者（以下、事業者という。）においても、消防計画等で活動計画を策定し、対応体制等を整備している。

しかし、近年発生した火災等において、通報の遅れ、情報の錯綜等、消防機関と事業者との連携に関する課題が散見されている。このため、消防庁では、「消防機関と原子力事業者等との連携などに関する検討会」を設置し、消防機関と事業者との連携の現状を調査し、円滑な連携についてまとめることとした。

本稿では、当財団が平成18年度に消防庁から受託したこの調査・検討の概要について報告する。

なお、今回の調査・検討は、原子力発電所を対象に、原子力災害対策特別措置法が適用されない火災等の発生という想定で実施している。

2. 連携の現状に係る調査

原子力発電所所在地域の消防機関（14消防本部）と事業者（17事業所）の協力を得て、消防活動に係る連携の現状調査を実施した。現状調査は、アンケート調査（31カ所）及び現地情報交換会（3カ所）により実施した。アンケート調査は、連携の基本となる協定モデルを基に実施した。アンケートの回収率は93%（31カ所中29カ所から回答）であった。現地情報交換会は、先のアンケート調査結果のほか、連携を図る上での重要事項や課題と考える事項を中心に、意見・情報の交換を実施した。

なお、アンケート調査結果の内容は、次項以降に部分的な引用をしているが、詳細については参考文献1を参照されたい。

3. 円滑な連携に係る検討

アンケート調査及び現地情報交換会の結果を踏まえ、消防機関と事業者との円滑な連携について、

- ・ Plan（実効性のある活動計画の策定）
- ・ Do（計画に沿った実施）
- ・ Check（活動実績の評価）
- ・ Act（評価結果に基づいた改善）

というPDCAサイクル（図1参照）に展開し、次項以降のようにとりまとめた。

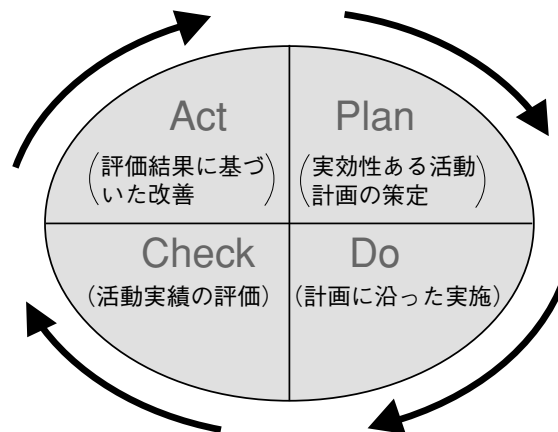


図1 消防活動の継続的な改善プロセス（PDCAサイクル）

4. Plan（実効性のある活動計画の策定）

原子力発電所において、火災等の発生時に、確実な被ばく管理及び二次汚染の防止を図りつつ、安全かつ的確な消防活動を展開するためには、消防機関と事業者との円滑な連携が不可欠である。このためには、消防機関及び事業者双方で実効性のある活動計画の策定が必要である。これらについては、事業者は消防法に基づく消防計画等で、消防機関は警防計画等で定めることになるが、それぞれについて具体的な計画となるよう双方で協議し策定しておく必要がある。

Planの主な項目を表1に示す。ここでは、この内の、（1）通報に関する事項、（2）先着消防隊に関する事項、（9）事前調査等に関する事項について紹介する。

[通報に関する事項]

原子力発電所において火災等が発生した場

合には、事業者は消火及び延焼の防止等に努めるとともに、直ちに消防機関にその旨の通報を行う必要がある。この通報を出発点として消防活動が開始されることになることから、事業者の迅速・的確な通報が求められる。

事業者においては、通報体制・要領等を定めるとともに、「通報手順を社員に配布している。」「通報連絡当番を指名している。」等の工夫をしているが、消防機関からは、「発災からの通報に時間を要する。」「消防活動に必要な情報を正確に通報してほしい。」との回答がある等、火災等が発生した場合の通報体制・要領等が十分と考えていない消防機関もある。このような消防機関にあつては、通報体制・要領等に関する計画の再確認、見直し等を行うことが必要と考える。

また、迅速・的確な通報を行うためには、自動火災報知設備の発報等火災の疑いのある事象が発生した段階での通報連絡等について、双方で取り決めておくことや、消防機関から回答の

表1 Planの主な項目

- | |
|-------------------------------|
| (1) 通報に関する事項 |
| (2) 先着消防隊に関する事項 |
| (3) 消防機関の現場指揮本部設置に関する事項 |
| (4) 事業者対策本部及び消防現場指揮本部設置に関する事項 |
| (5) 役割分担に関する事項 |
| (6) 放射線防護対策に関する事項 |
| (7) 資機材に関する事項 |
| (8) 活動計画を定める際の協議 |
| (9) 事前調査等に関する事項 |
| (10) 協定（覚書） |
| (11) その他 |

表2 通報様式で定める項目の例

- (1) 発生時刻
- (2) 火災等の種別（火災、爆発、放射性物質（放射線）の漏えい、その他）
- (3) 要救助者数と被ばく及び汚染の有無
- (4) 火災等の場所（施設名）
- (5) 消防隊等が向かう事業者の構内の入口名または施設名及び誘導者名
- (6) 消防活動を行う際の被ばく及び汚染のおそれの有無
- (7) 燃焼物及び火災等の状況
- (8) 管理区域の内外及び管理区域への延焼危険の有無
- (9) 放射線量率の程度
- (10) 放射性物質の拡散危険の有無
- (11) 既に実施した防護措置及び消火等の状況
- (12) 消防用設備等の配置状況及び使用状況
- (13) 消防隊が使用可能な測定機器
- (14) 消防活動に影響を及ぼす事項
- (15) 通報者の氏名・所属・電話番号
- (16) 地域の実情等に応じ必要な事項

あった「事業者では通報メモを、消防機関では覚知専用用紙を設け、通報と受信の手順が一致するようにしている。」等を参考として、事前に通報内容等に関して必要な項目を網羅した様式を作成するとともに、その運用を定めておくことも1つの方策と考える。この様式に基づき通報を行う場合は、正確さを期すあまり通報に遅れが出ないように、把握できた項目から随時通報すること等を徹底することも重要である。通報様式で定める項目例を表2に示す。

なお、消防機関から、「夜間・休日等の通報体制等に不安を感じており、検討が必要。」との回答もあり、事業者及び消防機関双方で十分な協議を行うとともに、その体制・要領等を周知しておくことが必要である。この夜間・休日等の対応体制・要領に関する計画の協議等の必要性については、以降の先着消防隊、消防現場指揮本部、事業者対策本部・消防現場指揮本部が設置された場合の体制等にも言えることである。

[先着消防隊に関する事項]

事業者においては、先着消防隊の指揮者等への情報伝達、誘導等の対応要領等を定めているが、消防機関からは、「正確な情報伝達が出来ないため、施設担当者に誘導・助言してほしい。」「現場の状況を把握した者が情報伝達等に当たってほしい。」との回答があった。

現場に先着した消防隊の指揮者等は、火災等の拡大防止及び隊員の安全確保等を図るため、早期に事故の概要、放射線量率等の正確な情報を収集する必要があるが、必ずしも先着消防隊への事業者の対応が十分ではない場合もある。また、原子力発電所は、広大な敷地に多数の建屋が存在するため、火災等の状況及び発生場所等によっては、先着消防隊への事業者の対応が難しくなることも考えられることから、先着消防隊に対する情報伝達の体制・対応要領に関する計画の再確認、見直し等を行うことが必要と考える。

なお、消防機関からは、「夜間・休日の対応マニュアルが必要。」「合同訓練を行った結果、誘導員が確保できなかったため、誘導員を増員した。」との回答もあり、夜間・休日等において限られた人員で先着消防隊に対する対応を円滑に行うためには、消防機関、事業者双方で協議を行った上で、マニュアル等において対応要領を定めておくことも有効であると考ええる。

また、先着消防隊への情報提供等は、現場及び放射線に関する知識を有する施設関係者が行う必要があるが、このような施設関係者の特定に先着消防隊が苦慮すること考えられるため、情報提供等を行う施設関係者を特定する方策等について協議しておくことも必要である。

[事前調査等に関する事項]

消防活動等に必要な情報及び資料等については、事業者からの提供が必要である。事業者は従来から、この消防活動等に必要な資料等の提供を行っているが、消防機関からは、「施設の完成時にのみ入手した。」「変更等があった場合には入手できていない。」との回答もあった。

火災等の発生時における消防隊の活動が円滑に実施され被害を最小限にとどめるために、消防機関は活動内容や方針等を定めた警防計画（活動計画）を策定する必要がある、警防計画の策定及び見直し等に当たっては、事業者からの資料等の提供が不可欠である。このため、資料等の提供が十分ではないと考えている消防機

関にあつては、必要な資料等の入手に努める必要があり、この例を表3に示す。

消防活動等に必要な資料等については、新築工事や変更工事等が行われた場合の提供の他、提供されている資料等の確認を定期的に行うことも必要である。

また、警防計画は約9割の消防機関で策定しているが、「事業者が多いため詳細に出来ていない。」と回答した消防機関もあったことから、警防計画を策定していない消防機関及び詳細にできていない消防機関にあつては早期に作成する必要がある。

なお、改修工事や定期点検等の際には、施設への立入者が増加するとともに、可燃性物品等が搬入される等、通常時に比べ消防活動の困難性が増すことになる。このため、事業者は、可燃性物品等の保管場所及び管理方法等について、消防機関と必要な協議を行うとともに、消防活動等に必要な資料等の提供を行う等適切な対応を図る必要がある。

また、現状調査の結果から、消火方法（放水禁止場所がある場合はその範囲等）の情報提供も必要である。

表3 必要な資料等の例

- | |
|-----------------------|
| (1) 対象物概要表 |
| (2) 施設別使用物質一覧 |
| (3) 付近見取り図 |
| (4) 構造設備図 |
| (5) 消防用設備等位置図 |
| (6) 断面図又は立面図 |
| (7) 空調関係系統図（負圧管理を含む） |
| (8) 消防水利図 |
| (9) 放射性物質の飛散を招くおそれの有無 |
| (10) 感電を招くおそれの有無 |
| (11) 防火区画・防災区画等 |

表4 Planに反映すべき主な事項

Planの項目	主な反映事項
1. 通報に関する事項	1. 体制・対応要領等の計画全般の再確認、見直し 2. 自動火災報知設備発報等の、火災の疑い段階での通報連絡要領 3. 通報に必要な項目を網羅した様式の事前作成とその運用 4. 通報遅れが出ないように、把握できた項目から随時通報
2. 先着消防隊に関する事項	1. 情報伝達体制・対応要領等の計画全般の再確認、見直し 2. 現場及び放射線に関する知識を有する施設関係者による情報提供要領
3. 消防機関の現場指揮本部設置に関する事項	1. 消防現場指揮本部の協力体制等の計画全般の再確認、見直し 2. 消防機関、事業者双方の連絡窓口及び連絡要員の明確化
4. 事業者対策本部及び消防現場指揮本部設置に関する事項	1. 相互協力体制等の計画全般の再確認、見直し 2. 県・市町村・警察等の相互協力体制
5. 役割分担に関する事項	1. 消防機関及び事業者間の役割分担 2. 原子力防災組織が設置された場合の、自衛消防隊との有機的な関連付け
6. 放射線防護対策に関する事項	1. 情報提供・助言体制等の計画全般の再確認、見直し 2. 管理区域内負圧管理に異常が生じた場合(可能性がある場合)の情報伝達体制
7. 資機材に関する事項	1. 貸出用資機材の整備状況の把握 2. 使用方法等の理解、取扱訓練 3. 貸出用資機材の将来的課題への検討
8. 活動計画を定める際の協議	1. 協議を通じた活動計画のすり合わせと内容の相互理解
9. 事前調査等に関する事項	1. 新築・変更工事の資料等の提供、提供済み資料等の定期的な確認 2. 警防計画の策定や詳細化
10. 協定（覚書）	1. 連携に必要な基本事項を定めた協定（覚書）の早期締結
11. その他	1. 柏崎刈羽原子力発電所OSART調査（H16年11月）改善推奨事項の確認と、活動計画への反映 2. 廃止措置段階にある原子炉の、解体進行に応じた再確認、見直し

（注：活動計画の再確認、見直しには、夜間・休日等の対応を含む）

以上、本稿では、紙面の都合から、Planのうちの（１）通報に関する事項、（２）先着消防隊に関する事項、（９）事前調査等に関する事項、について記載した。なお、これらを含めたPlan全体の主な項目と、それぞれに反映すべき主な事項を表４に簡略化してまとめた。各事項の詳細は参考文献１を参照されたい。

５．Do（計画に沿った実施）

消防機関と事業者の合同訓練は概ね１～２回／年の頻度で、管理区域内からの出火等を想定して行われているとの回答であったが、「合同訓練は実施していない。」「国、県主導の原子力災害を対象とした訓練であり、火災を想定した訓練はなおざりにされていた。」との回答もあった。

消防機関と事業者が合同で行う訓練は、活動計画の実効性を確認するとともに、消防活動に従事する者の火災等発生時の対応要領等の習熟にもつながるため、消防機関と事業者の合同訓練を実施していない地域、また、原子力災害を対象とした合同訓練であった地域は、火災等の発生を想定した合同訓練を早期に実施する必要がある。

また、「訓練を年１回以上実施する必要がある。マニュアル等がある場合には、これに沿った行動が出来るか否かの訓練が必要。」との回答もあり、このことから、活動計画を策定するだけではなく、合同訓練を定期的を実施し、計画通りの活動ができるか等を検証しておく必要がある。

合同訓練にあたっては、対応人員の少ない夜間・休日等や構造が複雑な建屋内(放射線管理区域内)からの出火を想定した訓練、過去の火災事例等を参考とした訓練等、実際の活動に即した訓練とするとともに、訓練を形骸化させないために、実施ごとに出火場所、被害等の訓練想定を変える等の工夫をすることも必要である。

このほか、合同訓練のみならず単独で行っ

た訓練における活動の記録を作成し、訓練計画の改善に活用する等も有効な方策である。

なお、自動火災報知設備の発報等の異常を確認した段階から、火災確認、通報、初期消火等についての目標時間を設定する等、訓練の目標を具体的に設定することも実効性のある訓練とするためには望ましい。

６．Check（活動実績の評価）

（１）査察（立入検査）について

消防機関において、頻度はまちまちであるが査察を実施している。

また、「範囲が限定的である。」「高レベル区域への立ち入りは困難である。」との回答がある。一方「高レベル区域全てに立ち入ることが出来ないということではない。」との回答もある。

査察は、建屋の維持管理状況等に関する評価及び評価結果に基づく改善等の予防行政上の必要性のみならず、建屋の実態を把握することにより消防活動を容易にする等の消防活動上の必要性もあることから、定期的を実施する必要がある。

また、査察の範囲を限定することなく建屋全体について実施する必要があるが、高レベル区域等の立ち入ることが困難な区域や、大規模かつ複雑な構造の建屋も多数存在することから、事業者と円滑に査察を実施するための方策等について協議を行うことも必要である。

なお、被ばく防止等の観点から、査察の難しい高レベル区域等において、査察の実施を延伸する場合については、事業者から防火管理状況等の説明や図面の提出等を受け、その管理状況等を確認することも必要である。

（２）定期協議について

約８割の消防機関及び事業者において定期協議を実施している。

消防機関及び事業者が連携して円滑な消防活動を行うためには、定期的にそれぞれ策定

している活動計画の実効性に関する評価や、合同で行った訓練の評価を行うとともに、課題等があった場合にはその改善策等を策定する必要があることから、定期協議を実施していない地域にあっては、早期に定期協議を実施する必要がある。

また、「消防訓練後に反省会とあわせ協議を実施しているが、協力会社の従業員の方が多い。」「消防機関から講師を招いての防火講演会の実施。」との回答があったが、定期協議の実効性を担保するためには、それぞれ責任のある立場の者の参加や、双方の連携を図るために必要な事項を協議の議題にすることも必要である。

定期協議については、合同訓練、立入検査実施後や人事異動等の機会を捉えての開催が考えられる。特に合同訓練直後を捉えての開催は、ホットなタイミングで訓練の評価を行うことができるとともに、消防機関、事業者双方の訓練参加者等に訓練実施時の課題等を印象づけることにも有効である。

この合同訓練の評価にあたっては、訓練の目標を具体的に確認できるよう、訓練目標とセットで評価項目を作成することが望まれるとともに、評価結果を整理・分析し、新たに抽出された課題等については、双方で誰が・何を・いつまでに改善計画を作成及び措置するのか等を確認するといったPDCAサイクルに沿った訓練の継続的な実施が必要である。

なお、消防機関及び事業者で行う協議については、定期の開催にこだわることなく、火災等が発生した場合や活動計画の変更を伴うような増築及び用途変更が行われた場合に開催する等、時機を逸することなく行うことも必要である。

定期協議以外にも、消防機関、事業者双方の有する知識等に関する研修等の交流を行い、消防機関と事業者双方の原子力発電所における火災への認識の向上につなげていくことも必要である。

7. Act（評価結果に基づいた改善）

約8割の事業者で消防機関が出動した火災等が発生しており、その際の、事業者の初動体制、誘導、情報伝達等で課題が出ている。これらの課題については、それぞれの案件ごとに、適宜改善が実施されているところである。このように火災等を踏まえた課題の改善は、同じことを繰り返さないためにも必要である。

定期協議において合同訓練等の評価及び評価結果に基づく改善策を策定し、消防機関、事業者双方の活動計画に反映する等により、円滑な連携を図る上での課題等に関する改善を継続して行う必要がある。

また、火災発生や合同訓練等の結果を踏まえた課題や改善策等について、事業者、消防機関、それぞれの相互間等において情報提供や意見交換を行うこと等も、更なる活動計画の充実を図り円滑に連携を行うための1つの方策であると考ええる。

8. おわりに

円滑な連携を行うためには、継続的な改善プロセスに基づき、消防機関と事業者双方が協議した上で実効性のある活動計画（Plan）を定め、この計画に沿って活動を実施（Do）し、その活動実績に関する評価（Check）及び評価の結果に基づき改善すべき事項を改善（Act）し、次につなげていく行為が必要である。

さらに、消防機関または事業者からの一方的な情報提供となることなく、日頃からの情報交換等を密にすることで、互いの顔が見える信頼関係を築いていくことが大切である。このような信頼関係を築くことにより、PDCAのサイクルも円滑に展開されることになり、より良い連携体制を築き上げることができるものと思われる。

今回は、原子力発電所を対象に、消防活動に係る連携の現状を調査し、とりまとめたも

のであるが、原子力発電所以外の原子力施設等においても、同様に実効性のある消防活動が展開できるように取り組み、地域の安心・安全の確保に向けて、より円滑な連携体制の構築が図られることを望むものである。

また、本調査・検討（平成18年度下期実施）後の平成19年7月に中越沖地震が発生し、この際の消防活動（通報連絡、自衛消防など）に対していくつかの改善が検討されている。これらの改善を、本調査・検討結果と組み合わせることで、更なる円滑な連携に展開されることを願う。

最後に、本調査・検討にあたってご指導・ご協力を頂いた、消防庁、原子力安全・保安院、検討会委員、地元消防機関、原子力事業者に深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 消防機関と原子力事業者等との円滑な連携について（消防機関と原子力事業者等との連携などに関する検討会、平成19年3月）
- (2) IAEA（国際原子力機関）OSART（運転安全調査団）の評価結果について、（東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所、平成17年6月）
- (3) 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針（原子力安全委員会）
- (4) 発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針（原子力安全委員会）
- (5) JEAG4607-1999 原子力発電所の火災防護指針（日本電気協会）
- (6) JIS Q9001:2000 品質マネジメントシステム—要求事項（日本規格協会）

原子力安全と科学技術社会論

氏 田 博 士 (助エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 主管研究員)



1. はじめに

本研究のきっかけは、例えば原子力安全・保安院の幹部（審議官クラス以上）が、1年間に自治体を訪問する件数がこの数年100件以上に及んでいるが、原子力安全・保安院の行動規範には科学的・合理的な判断があり、科学合理的に行動すべき規制当局がどこまで社会に出て行くべきか、という素朴な疑問を持っているところに在る。一方で、規制当局は、社会と円滑なコミュニケーションを図り、信頼される安全行政を実現するべきであるという考え方もある。この相反する考え方からあるべき姿を模索するには、科学的・合理的な判断と社会的合理性の関係を見極めること、技術的リスクと社会的リスクの両者を含めてリスクマネジメント、リスクベネフィットのトレードオフの問題として捉えること、が重要であると考えられる。

このような背景から、本研究の目的は、諸外国における社会技術論的な手法（その中でも特に、科学技術社会論に着目）、リスク論的手法を用いた先行事例を踏まえつつ、規制当局が社会に対応していく際の取るべきスタンスや行動計画を策定する際に参考となる資料を提供することにある。さらに、これを取り巻く環境因子としてのマスコミや事業者との関係、また政治・経済的な問題の影響なども考慮することが必要である。その方法として、科学技術社会論の専門家やメディア関係者などによるラウンドテーブル形式での自由な討論により、課題や対

応方針を抽出することとした。

以下に、様々な調査の結果のまとめと、ラウンドテーブル形式で議論した結果をまとめるとともに、今後の課題を示す。

2. 調査結果のまとめ

(1) 国際的な規制の考え方

原子力の規制に関して国際的に議論した例として、2002年頃から継続的に実施されている経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）による規制関係者の国際会議がある。この会議では、次に示すようなテーマでリスクコミュニケーションの話題が議論されている^{(1)～(3)}。

- Investing in Trust: Nuclear Regulators and the Public
- The Regulator's Evolving Role and Image in Radioactive Waste Management
- Society and Nuclear Energy: Towards a Better Understanding

これらの会議報告のコンセンサスは、これからの規制は以前にもまして国民のためにあるという姿勢を示すように変えていくべきだ、である。規制が信頼に足る存在であるためには、その理念、考え方、内容、規制担当者の専門性などをよく知ってもらう努力が必要である。規制側がもっと国民の側に立って、国民との対話、しかも定期的な対話だけではなくリクエストがあったときに対話しましょう、それは双方向であるべき、そういう姿勢が大事である、と述べている。例えば高レベル廃棄物処理処分では、

プロジェクトの詳細が決まってから規制が関与するのではなく、プロジェクトの最初から参加して、国民のために安全をどうすれば良いかについて関与していくことが大事だ、と結論付けている。

一般的に、大衆の信頼は、規制当局の実績そして担当者のモラルと価値感への理解に基づく。信頼を構築するために大切な規制当局の特性は以下のとおりとされている。

- 開放性**：情報提供、質問に答える姿勢、大衆と議論すること、それを維持することが重要
- 明確性、透明性**：コミットしたことを分かりやすく伝える
- 説明責任**：大衆にいつでも行動と決定した内容を証明できる準備
- 独立性**：産業界と独立していることの分かりやすい提示
- 適格性**：法的なものとの能力がある
 - ▶**法的**：権限が国家的により認知されている
 - ▶**能力**：スタッフのレベルと情報入手源の適切さが大衆に認知されている
- 対話と相互作用**：開放的な文化、学習する組織、活発で協調的な態度

これらの特性は、組織の信頼性を確立する際に最低限必要なものである。

（２）科学技術社会論（STS）における社会的合理性の考え方

STSは、英語の Science, Technology and Societyあるいは Science and Technology Studies の略で、日本語ではSTSを「科学技術と社会」あるいは「科学技術社会論」と呼ぶ^{(4)～(8)}。

昨今の科学技術をめぐる構造は、従来の枠組みに依拠しては解けないものが増えてきている。利害関係者が多様で、市民も賛成派と反対派にわかれ、かつ一国の中の加害者－被害者図式の枠には収まりきれず、国境を越え、他国との外交が関係する。例えば、深刻化する地球環境問題、加速度的に進行する情報化、高度化する先端医療と生命への技術的操作など、科学・技術と社会の界面で、様々な問題が生じている。

このように、科学に問うことはできるが、科学だけでは答えられない問題があり、そのため２種類の合意、即ち専門家集団の合意と

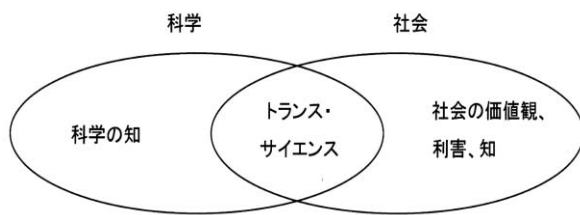


図1 トランス・サイエンスの課題の位置付け

社会の合意とが要請される図1に示すようなトランス・サイエンスの問題が指摘されている⁽⁹⁾。

このような状況で、これら問題群に対して学問的な見取り図を与えることが、社会の差し迫ったニーズとして認識されている。今日の科学技術が巨大な営みとして、産業、政治、行政、教育、医療など社会の多様なセクターと密接な関わりを取り結んでいる以上、この「新たな関係」の構築のためには、人文・社会系の学問から、理学・工学・医学などの自然系の諸科学にまたがるトランス・ディシプリナリーな研究を新たに組織化することが不可欠であり、これが科学技術社会論であると言われている。

科学技術社会論では、多様な利害調整を、パブリックの参加する場に関き、専門家と市民と行政と企業とが、そのセクターの枠を超えて、諸外国との関係も考慮しながら話し合う必要性が生じているとされている。多様な利害関係者で構成される公共空間において、それらのガバナンスによって問題を解決し、意思決定をすることが求められている。すなわち、図2に示すリスクガバナンスのモデルによれば、科学合理的なリスク評価を実施するには、その前に社会的フレーミングを定めることが前提となっている⁽⁹⁾。

藤垣によると、科学的合理性と社会的合理性と予防原則の関係は、以下のように整理できる⁽¹⁰⁾。大きく2つの課題があり、それぞれに2種類の過誤が存在する。その例を表1に示す。因みに統計学では、第1種の過誤とは「無いのに在る」とする誤りであり、その逆に第2種の過誤とは「在るのに無い」とする誤りである。

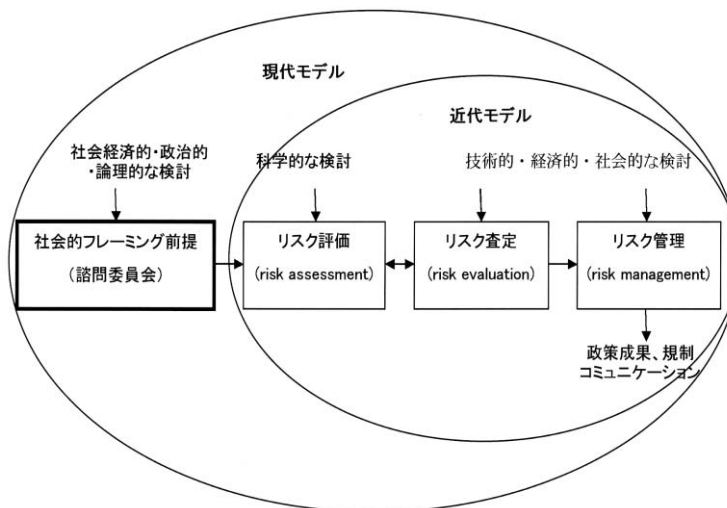


図2 リスクガバナンスのモデル

表1 第1種の過誤、第2種の過誤の例 ⁽¹⁰⁾

1. 「科学的に確実な結果を待っている結果的に後手にまわらないように対策」 = 「不確実性下の意思決定における第二種の過誤」防止システム ≠ 水俣のケース（危険性が在るのに無いと判断） → 「先制的予防原則」（原因究明は規制の後でよい） 「危険性証明」の適用＝カナリア型 → 「不確実性下の意思決定における第一種の過誤」の恐れ = カイワレO157ケース（危険性が無いのに在ると判断） 2. 「科学者が試行錯誤しているときは、より厳しい基準で安全性判断」 = 「不確実性下の意思決定における第一種の過誤」防止システム ≠ 薬害エイズのケース（安全性が無いのに在ると判断） → 「安全性証明」の適用＝ふくろう型 → 「不確実性下の意思決定における第二種の過誤」の恐れ = GMOの日本における扱い（安全性が在るのに無いと判断）

多様な利害関係者が係る社会的合理性を担保する方法として、以下の項目が提言されているが、当事者が考える科学的合理性とは全く異なる原理から成り立っていることは明らかである。

- 意思決定に必要な情報の開示
- 意思決定のための選択肢の多様性を保障
- 多様な利害関係者の参加の原則が守られる
- 各利害関係者の「代表性」の担保
- 議論過程の透明性の担保
- 意思決定にいたる手続きの明確化

3. ラウンドテーブル研究会の議論のまとめ

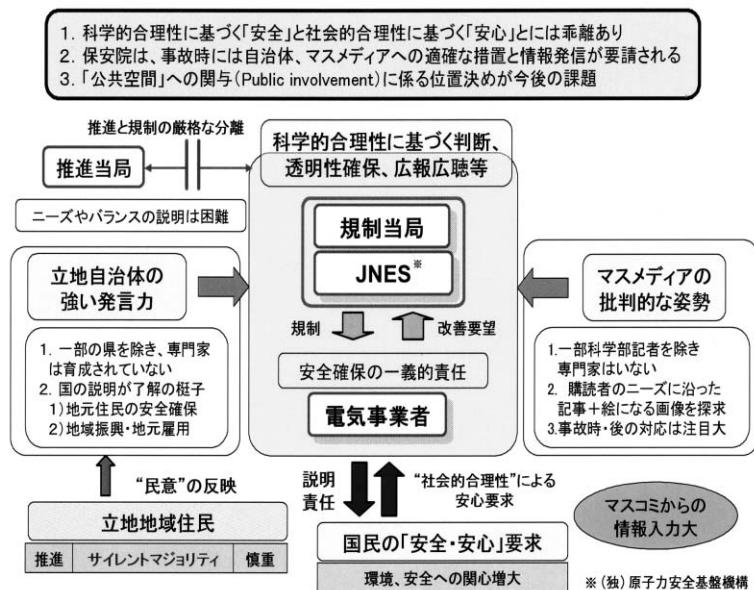
(1) 規制対応のあり方

規制のあり方とその社会的な対応のあり方について、2006年度の後半に8名の専門家（大

学・公共政策、技術社会、事業者、新聞記者など）によりラウンドテーブル形式で5回にわたり自由に討論した。またその中では4名の専門家の講演（大学・科学技術社会論、地方自治体、住民、放送記者）も設定し、講演者も含めて議論を深めた。この議論から研究会から摘出された、リスク関連の社会的意思決定に寄与する規制当局の対応のあり方に関する主要な論点を、以下に整理し、また図3にまとめた。

規制のあり方の根本姿勢については、次の3点が指摘された。

- ① 原子力安全・保安院の行動規範として、「強い使命感、科学的・合理的な判断、業務執行の透明性、中立性・公正性」の4つを挙げているが、それに基づき規制の妥当性、正当性、合理性をどのように担保していくのが課題。



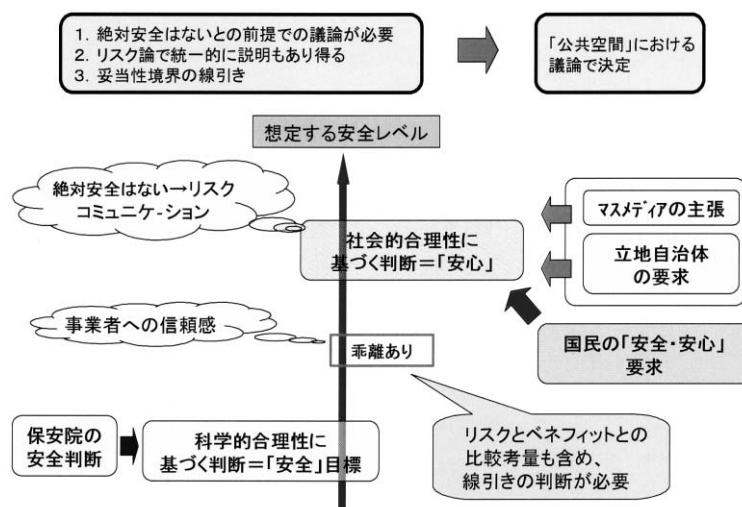
②「原子力力の安全確保は、一義的には事業者の責任である」は正論であるが、しかし国民は「安全をどう担保するのかというのが国の規制だ」と思っているのも事実。特に、個々の事象はともかく、事故や不祥事の連鎖の防止は国の責任ではないだろうか？ また大事故を起こさないための規制という考え方もあるが、微小な兆候が大事故につながり得る危険性もあり（ハインリッヒの法則）、はたして事故の重要度が兆候から判断できるのか、と言う問題もある。

2つの妥当性境界がある。1つは、リスクレベルや安全目標と言った規制として考えるべき安全基準。もう1つは、国民が望む安全安心のレベルである。

また、規制と社会的な意思決定の関係の全体的な論点は、以下の4つがある。

③ 安全安心のレベルには、図4に示すように

① 原子力をめぐる日本のステークホルダ（利害関係者）というのはだれか？ステークホルダ間の関係（規制，推進，事業者，地方自治体，地域住民，一般大衆）はどうあるべきか？を決めることが課題である。



② 多様な利害関係者で構成される公共空間において、それらのガバナンスによって問題を解決し意思決定する事が、社会的意思決定と考えられている。ではその社会的意思決定の当事者とは果たして誰なのであろうか？ステークホルダ全員であらうか？国民も含まれるのか？反対派を入れるべきか、モニタ程度には参加させるべきか？どのような公共空間を設定するのであろうか？の明確化が必要。

③ パブリックインボルブメント（大衆参加）のあり方を事前に決めておくことが必要。具体的には、原子力分野でよく見られる地域協定や住民投票の意味を考えるべきである。

④ 社会的合理性や様々な主体の主張を、規制行政に反映するための枠組み作りが必要。

このうち、特に推進と規制の観点からは、以下のような4つの指摘がある。

① 規制当局の役割は、国民の代理として、開発推進の安全性をチェックすること（国民へのサービス）であり、そのためプロジェクトの最初から関与し、市民の安全を確保するために地域社会と協力し合うべきである。

② 推進と規制というのが車の両輪で、いつでも必ず対峙していないといけない。当然、協力すべき場面もありえる。

③ 原子力政策、特に核燃料サイクルは、国策民営になっているが、国の方針が分かりづらい。原子力委員会と原子力安全委員会、文科省と経済産業省（資源エネルギー庁と原子力安全・保安院）がお互いに協力しながら方針を整理し役割分担を決めていくことが、国民に対して信頼感を得ることになる。

④ 推進側が原子力のベネフィットを国民に提示し、国民はそれを受けて受容できるリスク

を議論し、それに基づき規制方針を定める、という手続きが必要。

なお、情報提供のあり方の本質的な課題として、公共政策とリスクコミュニケーションの在り方、また公共政策と報道の関係、さらには公共政策にかかわる安全の国民理解増進の意義、をまず明確化する必要性がある。

（２）「科学的合理性と社会的合理性」また「安全と安心」

以上をさらにまとめると、以下のような検討項目が浮かび上がってくる。

「技術者は安全を求める一方、一般大衆は安心を求めている。」とよく言われる。本来は、“How Safe is Safe Enough”（どのくらい安全なら安全か）と言う言葉があるように、Safe Enoughが安心するレベルに相当し、そこまで至った対策により実現できたレベルが安全である。すなわち、原義的には全く等価なものである。しかし、一般大衆にアンケートを取ると、安全安心のイメージに優位な差が出てくる。それは技術そのものではなくそれを維持管理している人々への信頼感の問題である。

実際に、安全安心のレベルには2つの妥当性境界があるように見える。1つは、リスクレベルや安全目標と言った規制として考えるべき安全基準。もう1つは、国民が望む安心のレベル（図4参照）。この差は、事業者をどこまで信頼できるかのレベルである。この乖離を埋める事業者の安全努力と規制側の説明努力が必要であらう。

科学的合理性と社会的合理性とは異なるものであり、また科学的合理性に基づくのが安全で社会的合理性に基づくのが安心と一対一に対応するものでもない。例えば、安全目標は科学的合理性と社会的合理性との折衷案であり、安全委員だけで決めるものでも国民だけで決めるものでもない。またその決定過程の実態も、各種のステークホルダの利害関係の妥協として決まったものであり、理想的な社会的意思決定プロ

セスとは言えないであろう。

原子力規制当局に対する国民の信頼は、技術力、規制の独立性そして十分な人的資源に匹敵するほど重要であるが、現実には通常の業務とコストとの関係で国民サービス（国民への説明や対話）をどこまでできるかを考えるを得ない。要は、質的にも量的にも適正な資源配分の問題である。

（３）規制対応のあるべきイメージ

リスク関連の社会的意思決定に寄与する規制当局のあり方についてのイメージを検討すると、以下のように整理できる。

- 規制のスタンスは不変で不偏
- 社会的合理性に対する理解と科学的合理性の普及の両立
- 安全安心のためのリスク概念による議論
- 推進側、地域、メディアとの連携を促進
- 説明責任は果たす努力
- 対話能力を高める訓練
- 規制のあるべき姿を議論する場を継続

４．今後の課題

まず、規制のあるべき姿を探求すると言う大きな課題がある。その具体的な分析対象は以下の３点が挙げられる。

- ① 国策民営の方針と、推進（エネルギーセキュリティ）と規制（安全）と事業者との関係の整理
- ② 国策民営の方針と、国と地域と大衆参加との関係の整理
- ③ 規制の社会への働きかけの是非、スタンス、方法論の整理

これ以外に、規制を取り巻く様々なステークホルダの分析も規制の立場を考える上で有益であろう。そのステークホルダ分析として、反対派の位置付けの分析（立場により様々な思惑の相違がある）、メディア特性（例えば、原子力の事象に対しセンセーショナルな記事を書く傾向）の分析などがあり、また柏崎地域の会（賛成、中立、反対が参加）や福島情

報会議（賛成、中立が参加）のような具体的な地域の活動例を分析（自治体との関係も含む）することが挙げられる。また、様々なレベルの安全安心の尺度などを比較分析することも、規制に対する姿勢を考える上で有益であろう。

以上の課題から、今後検討すべきテーマをまとめてみると以下ようになる。

- 国策と、規制と地域と大衆参加との関係を整理する。特に柏崎地域の会や、福島情報会議のような具体的な活動を例として、MOX導入や事故時の対応などの具体事例を対象として、規制や自治体との関係も含み分析する。
- 安全目標を例として、英国、米国、日本の社会的意思決定のプロセスを比較検討し、社会的合理性の意味を考察する。
- 一般的な安全安心の尺度、技術一般に対する安全安心の尺度、原子力に対する安全安心の尺度、原子力としての安全安心の尺度、報道の考える安全安心の尺度、の尺度を比較分析し、またステークホルダによる安全安心の尺度に相違があるときの情報公開（事故報告）の相場観を分析する。これらの分析から、原子力業界の文化の実態とあり方を考察する。

参考文献

- (1) Investing in Trust: Nuclear Regulators and the Public (Summary of CNRA Work Shop), OECD/NEA, Dec. 2002.
- (2) The Regulator's Evolving Role and Image in Radioactive Waste Management, OECD/NEA, 2003.
- (3) Society and Nuclear Energy: Towards a Better Understanding, NDC-OECD/NEA, July 2004.
- (4) 大阪大学コミュニケーションデザイン・センター, <http://www.cscd.osaka-u.ac.jp/>
- (5) STS Network Japan Web Site, <http://stsnj.org/nj/index2.html>
- (6) 科学・技術と社会の会, <http://www.l.u-tokyo.ac.jp/JASTS/main.htm>
- (7) 科学技術社会論学会, http://jssts.org/component/option,com_frontpage/Itemid,1/
- (8) 社会技術研究開発センター, <http://www.ristex.jp/>
- (9) 平川秀幸, 科学技術のリスクガバナンス—コミュニケーション問題としての安全・安心, 「安全・安心」と科学技術プロジェクト, 共通コース・オープンスクール, 第5回 (2004.1.16)
- (10) 藤垣裕子, 『専門知と公共性—科学技術社会論の構築へ向けて』, 東京大学出版会, 2003年5月, ISBN4-13-060302-7

水素供給インフラ整備のシナリオ ー水素供給の価格分析と技術課題ー

中 村 恒 明

(財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 副部長 主管研究員



1. はじめに

エネルギーセキュリティーや地球温暖化対策として水素エネルギーに注目が集まっている。水素エネルギー社会の中核は、従来の内燃機関自動車に代わる燃料電池自動車（FCV）と水素供給インフラであり、これを構築するために産官学に渡る長期的・戦略的な取り組みが進められている。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）は水素エネルギー社会構築に必要な



図1 水素ステーションと燃料電池車

広範囲の技術開発を極めて戦略的に主導してきた。水素安全利用等基盤技術開発事業はその1つである。本稿では、(財)エネルギー総合工学研究所が本事業の調査研究として取り組んできた水素インフラ整備シナリオ検討について報告する。

2. 水素供給インフラとその導入目標

図1は水素・燃料電池実証プロジェクト（JHFC）で進められている水素ステーション（水素ST）の1つである。多様な水素の製造・供給パスの技術実証を行うため、2007年8月末現在、首都圏・中部・関西圏で合計12の水素STが運営中である。図2に水素の製造・供給パスの代表例を示す。水素STは、オンサイト型、オフサイト型に分類される。オンサイト型は水素STにて水素を化石燃料から改質製造するか、水電解等により製造する。オフサイト型は、集中して大規模に水素を製造しトレーラー等で水素STに水素を輸送し供給する。

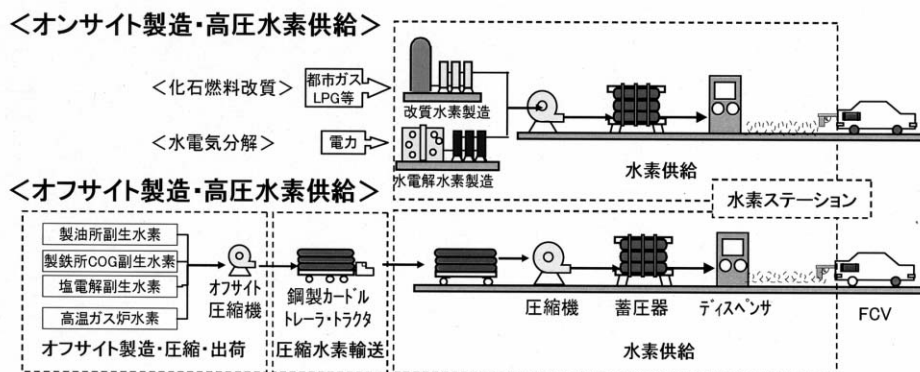


図2 水素の製造・供給パスの代表例

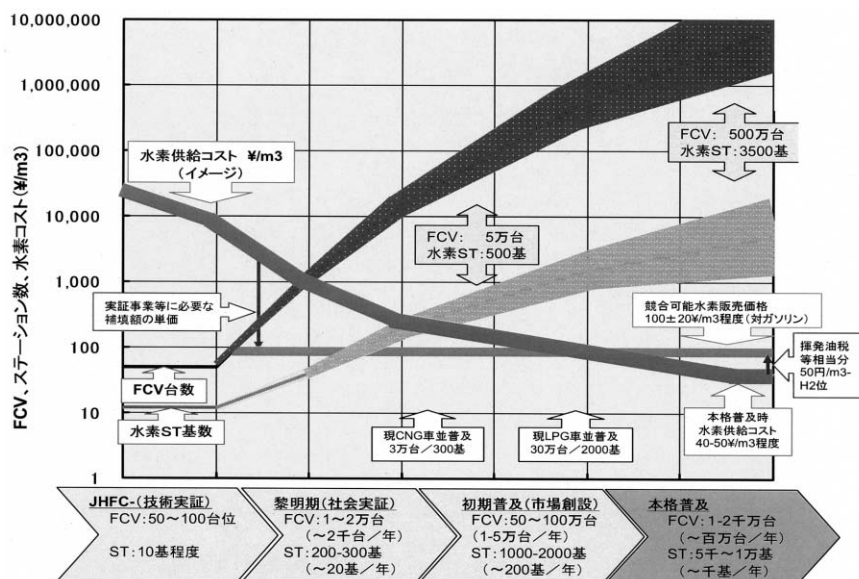


図3 水素インフラ普及イメージ

オフサイト水素源としてはいわゆる副生水素が主流になると言われている。FCVへの水素供給は高圧圧縮水素によるものが主流である。

図3にFCV、水素STの普及台数・基数、水素供給コストの推移イメージを示す。資源エネルギー庁は、FCV／水素STの導入目標を次のように設定している。

	FCV	水素ST
2010年	5万台	500カ所
2020年	500万台	3,500カ所
2030年	1,500万台	8,500カ所

(2007年8月現在)

2007年時点で走行中のFCVが100台弱と言われている実状を勘案すれば、上記の導入目標は極めてチャレンジングである。水素供給コストは、本格普及期においてガソリン自動車

と同等の燃費となるべく、40円/m³台（揮発油税分除く）を目標としており、また、当面のターゲットは100円/m³台である。

3. 本格普及期の水素供給コストと低減策

(1) オンサイト型水素ST

図4に水素供給コスト算出例を示す。水素供給パスとしては、図2に示したパスである。定格水素製造・供給能力500Nm³/hのガソリンスタンド併設型水素STを仮定した。これで普通乗用車クラスのFCVに10～20台/時程度供給できる。普及期として、上記2020年目標値である、水素ST：1,500カ所、FCV：500万台を仮定した。その時点での建設費は、現在の初号機の建設費を基に量産効果によるコストダウンを予測して

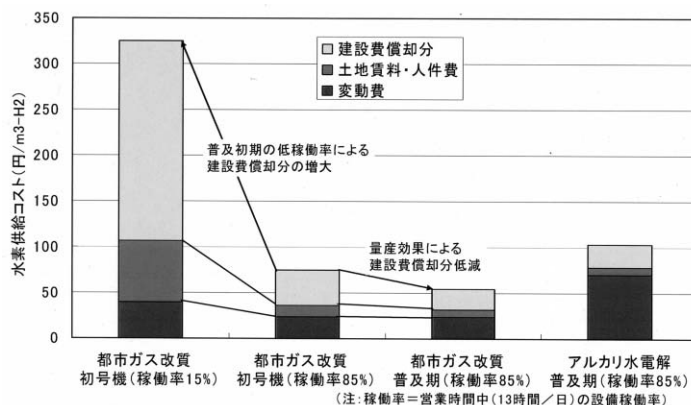


図4 水素供給コスト（オンサイト水素ST）

求めた。量産効果によって建設費は約60%に低減し、その分水素コストに占める建設費割合（償却負担）が減る。人件費・土地賃料は規制見直しによる保安要員の減少を考慮したことによる。水素STの稼働率は普及期では85%（13時間/日営業時間中の設備稼働率）としている。この結果、普及期のオンサイト都市ガス改質の水素供給コストは55円/Nm³-H₂程度と予測された。アルカリ水電解の場合は、変動費のうち水電解用の電力コストが大きく（想定電力単価：13円/kWh）、水素供給コストを大幅に押し上げてしまう。電力コストを3分の1以下にまで低減することが必要である。なお、水素STはFCVの普及に先行して建設されるので、その稼働率は普及初期には低いと予想される。量産化によるコストダウン効果が無く、さらに稼働率が低い場合は、水素供給コストは300円/Nm³-H₂（稼働率：15%）を超えることを覚悟する必要がある。

（２）オフサイト型水素ST

表１にオフサイト型の水素ステーションからの水素供給コスト算出例を示す。オフサイト水素STとしては、オフサイトの水素製造コストと輸送コストの合計コストで水素を仕入れ、水素STでのコスト（固定費負担＋変動費）を上乗せしたコストが水素供給コストである。

表１ 水素供給コスト（オフサイト水素ST）

円/m ³ -H ₂	塩電解副生	製鉄所COG副生	製油所副生水素
工場出荷価格(製造・精製・圧縮コスト)	17	22.2~24.6	14.2~26.2
輸送コスト(20MPa, 輸送距離50km)	13.2 (固定費:11.7, 変動費:1.5)		
水素STコスト(500Nm ³ /h, SS併設)	25.4 (固定費:21.2, 変動費:4.2)		
水素供給コスト	55.6	60.8~63.2	52.8~64.8

表２ 大型水素STの水素供給コスト

オンサイト都市ガス改質	300m ³ /h H2ST		500m ³ /h H2ST	
営業時間(h/日)	13	24	13	24
供給能力(m ³ /h)	300	600	500	1000
供給量(m ³ /日)	3,315	9,435	5,525	15,725
固定費	建設費	26.3	17.6	23.7
	土地・人件費	6.9	4.8	7.0
変動費		24.7	22.9	24.4
合計		57.8	45.4	55.1

副生水素の製造コストについては様々な数字が公開されているので範囲で示した。水素STでの水素供給コストは、3つの副生水素ではほぼ同じで、60±5円/m³-H₂程度となった。

オンサイト型都市ガス改質、オフサイト型副生水素のいずれにしても、水素供給コストに占める固定費（建設費＋土地賃料・人件費）の割合が大きくコストの60%程度を占める。このことは、水素供給コストが設備の稼働率に大きく影響を受けることを示している。政府の水素供給コスト目標である40円/m³-H₂台を安定的に目指すには、固定費償却費負担の低減が極めて重要であることが推察される。

（３）水素供給コストの低減

ここまでの水素供給コスト算出では、我が国のガソリンスタンド（SS）の平均的営業時間である13時間/日を前提としてきた。一方、最近ではガソリンスタンドの集約化・大型化が進みつつあり24時間営業も普通である。そこで、最近の大型24時間営業のSS並の水素STを仮定して水素供給コストを算出したのが表２である。例えば、供給能力500Nm³/hの水素STを、大型化24時間営業化し供給能力1,000Nm³/hの水素STにすると、水素供給コストは、55円/Nm³-H₂程度から10円以上減り、40円/Nm³-H₂台半ばになる。また、水素STの稼働率を上

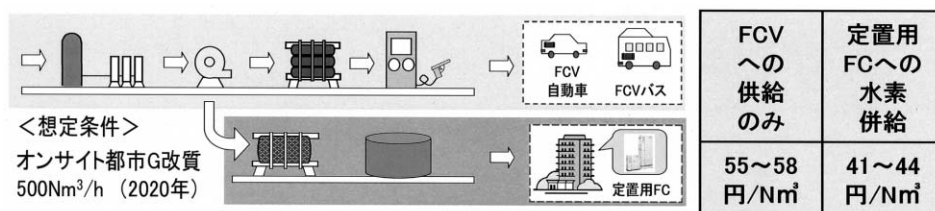


図5 水素STから定置用燃料電池への水素供給モデル

げる方策として、図5に示す様に、水素STから水素駆動型定置式燃料電池に水素を併給するモデルも検討した。この場合も、水素供給コストは、40円/Nm³-H₂台半ばになる。水素STの大型24時間営業化、定置用燃料電池への併給モデルいずれも水素STの稼働率を飛躍的に向上させる点では同じ効果がある。水素エネルギー社会の普及期においては、大規模な水素STを中核に、FCVへの水素供給と周囲の住戸に水素を併給する「水素コミュニティー」を構築することも一考に値しよう。

4. 黎明期の水素STモデル

これまで進められてきたJHFC I・IIは技術実証のフェーズであり、この次には社会実証と呼ばれるフェーズが必要であると言われている（図3）。社会実証フェーズは本格的な普及の前段として、水素STやFCVが社会に受け入れられるための実証であり、例えば、全国で水素ST：100～300カ所、FCV：1～3万台程度の普及が必要と言われている。また、普

及初期の水素STは既存のガソリンスタンド（SS）や圧縮天然ガスステーション（CNGST）に併設することが立地面や経済面で好ましいとされている。

そこで、既存のSS、CNGSTについてサンプル調査を行い、水素STを併設することができるかどうか調査を行った。水素ST併設には様々な要件があるが、ここでは、最も制限が厳しいと思われる、敷地面積と建築基準法の用途地域規制を縛りとしSSとCNGSTを類型化した。図6に結果を示す。建築基準法の用途地域制限とは危険物の貯蔵に関する規制である。現状、準工業地域や工業地域においては標準的な規模（供給能力：300～500 Nm³/h）の水素STが建設可能であるが、いわゆる商業地や住居地域においては、小型（供給能力：50～100 Nm³/h）の水素STしか建設ができない。なお、いわゆる住居専用地域においては貯蔵ができないので水素STの建設はできない。既存のSS、CNGSTの敷地面積としては、500 m²あれば水素STに転用可能、また、1000 m²程度あれば水素STの併設が可能であると言われ

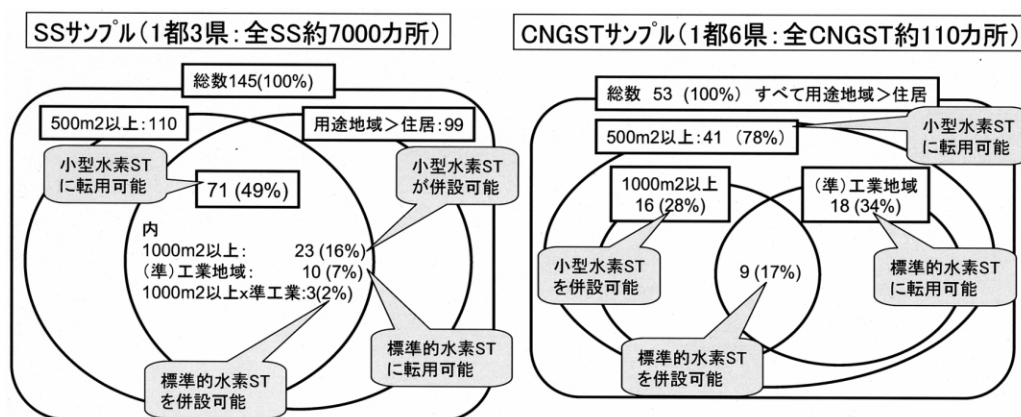


図6 ガソリンスタンド（SS）と天然ガスステーション（CNGST）の類型化



図7 SSに併設した水素SS（オフサイト）の設計例

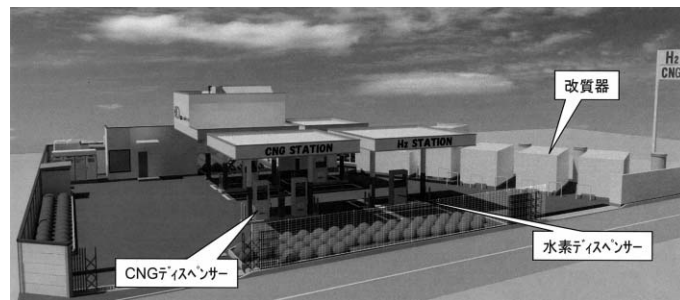


図8 CNGSTに併設した水素SS（オンサイト）の設計例

ている。サンプル調査による考察では、首都圏で100カ所（全国で300カ所）程度の水素STは、小型のSTを含めれば、今でも既存のSS・CNGSTに併設建設可能と推測される。一方、本格普及期に必要な数（例えば3,500カ所）の標準的水素STを、既存のSS・CNGSTに併設するのは、現状困難と結論できる。

図7、8にそれぞれSS、CNGSTに水素ST（300Nm³/h）を併設した概念設計図を示す。SS併設の場合はオフサイト型水素STを、CNGST併設の場合は天然ガス改質オンサイト型水素STを併設している。共に敷地面積は1,100m²程度ある比較的大型のSS、CNGSTである。水素STを併設するには、既存設備の廃止・移設等や追加の敷地が必要となる場合もあろう。しかしながら図6に示したように、全国で300程度の水素STであれば、このように多少無理をすれば既設SS、CNGSTに併設が可能である。一方、本格普及のためには、水素STのさらなるコンパクト化が必要であると判断できる。

社会実証フェーズを5年行うとして、全国で毎年60カ所程度の水素STを建設することになる。水素ST1カ所で平均3億円程度の建設費が必要であり、年間200億円弱の投資になろう。

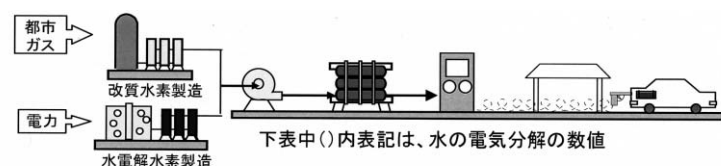
水素供給コストとしては図4に示したように、稼働率が低く割高になると予測される。価格競争力を担保するには建設費相当分について何らかの補助策が必要と思われる。

5. 水素製造・供給に関わる技術課題

水素供給価格を低減し経済性を高めるために必要となる技術開発課題を整理した。代表的な水素製造・供給パスについて、プロセス毎のコスト構造やエネルギー効率を算出した。コスト削減、効率向上に大きなインパクトがあると思われるプロセス、設備・装置項目を抽出し、技術開発の方向性を明確にした。

（1）オンサイト水素供給

図9にコスト構造、効率を示す。水素製造の固定費、変動費（人件費除く）のウェイトが高い。また、エネルギー効率としては改質操作において大きなロスを生じている。従って技術開発課題としては表3に示すように、改質・電解効率の向上や改質・電解装置の低コスト化が重要課題である。これには、例えば、高効率膜型リフォーマーや高温



＜水素供給コスト＞

	製造	圧縮機	蓄圧器	ディスプレイ	土木工事	合計
固定費	12.2(10.9)	2.1	0.8	2.1	9.9	27.1(25.7)
変動費	15.8(64.2)	4.6	0.0	0.1	2.1	25.7(71.0)
労務費	1.7	1.7	1.7	1.7	0.0	6.7
合計	76.7	8.3	2.5	3.8	12.0	59.5(103.3)

コスト影響度: 1位 2位 3位

＜エネルギー効率＞

都市ガス改質製造	採掘・輸送・供給	オンサイト	
		改質・精製	昇圧・充填
エネルギー効率	86.4%	74.0%	90.0%
WtT	100%	86.4%	63.9%
			57.5%

図9 オンサイト 高圧水素供給のコスト構造, 効率

表3 オンサイト製造供給の技術課題

タイプ	化石燃料改質 高圧水素供給	水電解 高圧水素供給
コスト	製造-変動費 製造-固定費	製造-変動費 製造-固定費
取り組むべき 技術課題	・改質効率の向上 ・改質装置の低コスト化	・電解効率の向上 ・電解装置の低コスト化
効率	製造	発電
取り組むべき 課題	・改質効率の向上	・再生可能エネルギー 由来電力の適用

動作PEM電解システム, 高圧水素発生システムの開発が必要となろう。水電解製造については, 再生可能エネルギー由来電力を用いるなど, 製造する水素に別の観点から付加価値を付けることも必要である。図10にバイオマスや太陽光由来の水素製造技術をまとめて示す。長期的には水素を高効率に直接発生する技術開発が期待される。

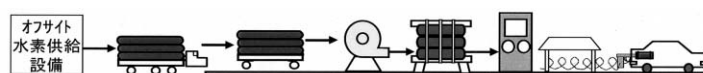
(2) オフサイト水素供給

[高圧水素輸送/高圧水素供給]

図11にコスト構造, 効率を示す。コスト負担の大きいのは輸送の部分である。圧縮水素のトレーラーによる輸送は極めて輸送効率が悪く, 20トントレーラーで一度に250kg程度(20MPa圧縮)しか水素を輸送できない。従って水素単価への固定費負担が大きくなる。

技術の現状				今後の展開	
水素製造		工程	開発フェーズ	内容	実用化時期
熱分解処理		後段で改質操作	実用階段	・ガス化プロセスは実用化技術 ・ガス化ガスからの水素製造/水素変換プロセス用 設備構成、運転条件の最適化	短期
熱水処理 (超臨界・亜臨界水処理)		水素直接発生	実証段階		
微生物 処理	メタン発酵	後段で改質操作	実用段階	・反応容器材料の選択 ・長寿命触媒の開発 ・反応炉への原燃料供給機構の構築 ・高収率、高発生速度の発酵菌探索	中～長期
	水素発酵	水素直接発生	基礎研究段階		
太陽電池発電／ 水電解プロセス		水素直接発生	実用階段	・当面の効率目標:「太陽電池＋水電解」 ・吸収波長長波長化材料研究開発 ・当面の効率目標:「太陽電池＋水電解」 ・遺伝子操作、育種改良等工学的効率の向上 ・反応プロセスの確立/反応装置設計検討 ・実運用システムの検討	長期
光触媒 ／光電気化学			実証段階		
光合成微生物			実用段階		
太陽光集熱 ／熱化学法			基礎研究段階		

図10 バイオマス・太陽光由来水素製造の技術開発



＜水素供給コスト＞

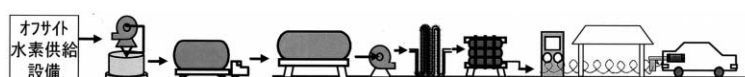
コスト影響度 1位 2位 3位

操作 工程	オフサイト			運搬	オンサイト					合計
	製造	精製	圧縮 出荷	トラクター トレーラー	トレーラ 受入	コンプレッサ	蓄圧器	ディスプレイ ペンサ	土木工事費 その他	
固定費	(5)	0.9	2.0	14.0	0.26	3.5	0.8	2.1	10.3	39.2
変動費	(8)	1.4	3.7	1.5	0	3.4	0	0.1	0	18.1
労務費	(0.2)	0.1	0.3	4.9	1.4	1.4	1.4	1.4	0	11.1
合計	13.2	2.4	6.0	20.8	1.7	8.3	2.2	3.6	10.3	68.4

＜エネルギー効率＞

操作工程	探掘輸送精製	オフサイト			輸送		オンサイト	
		製造	精製	圧縮出荷	運搬	昇圧・充填		
エネルギー効率	93.9	72.7%	98.6%	94.1%	97.8%	92.6%		
WtT	100%	93.9%	68.3%	67.3%	63.3%	61.9%		
輸送	-	-	100%	98.6%	92.7%	90.7%		

図11 オフサイト 高圧輸送・高圧水素供給のコスト構造，効率



＜水素供給コスト＞

コスト影響度 1位 2位 3位

操作 工程	オフサイト			運搬	オンサイト					合計
	製造	精製	液化 出荷	液水 ローリ	タンク	液水 ポンプ	蓄圧器	ディス ペンサ	土木工事費 その他	
固定費	(6)	1.0	28.9	3.9	2.1	1.1	0.8	2.1	10.3	55.8
変動費	(9)	1.5	14.0	0.3	0	0.6	0	0.1	0	25.4
労務費	(0.2)	0.1	1.1	2.1	1.4	1.4	1.4	1.4	0	9.1

＜エネルギー効率＞

操作工程	探掘輸送精製	オフサイト			輸送		オンサイト	
		製造	精製	圧縮出荷	運搬	昇圧・充填		
エネルギー効率	93.9	72.7%	98.6%	75.0%	89.9%	98.9%		
WtT	100%	93.9%	68.3%	67.3%	50.5%	45.5%		
輸送	-	-	100%	98.6%	73.9%	66.5%		

図12 オフサイト 液水輸送・高圧水素供給のコスト構造，効率

〔液体水素輸送／高圧水素供給〕

図12にコスト構造，効率を示す。コスト負担の大きいのは液化の部分である。コスト的には，液化に関わる固定費，変動費の割合が大きい。液化効率は通常75%程度と言われており，効率的にも液化がボトルネックになっている。

〔ケミカルハイドライド輸送／高圧水素供給〕

図13にコスト構造，効率を示す。水素化，脱水素化それぞれに装置が必要であり，コスト負担の大きいのは水素化の固定費負担部分と脱水素化の変動費負担部分である。特に脱水素化は吸熱反応なので，ここでのエネルギー

効率低下がボトルネックである。

図14にオフサイト製造供給の技術課題をまとめて示す。高圧輸送では，複合材料を用いた軽量容器の開発が待たれる。液体水素輸送では，高効率な液化が期待できる磁気冷凍技術の開発が待たれる。また，ケミカルハイドライド輸送では，ケミカルハイドライド媒体の探索，脱水素反応の高効率化技術が必要である。

なお，オンサイト，オフサイトともに土木工事費が水素供給コストに占める割合はかなり大きい。保安等の規制見直し等による敷地面積の縮小等が必要である。

車載水素貯蔵材の動向

村田 謙二 (財エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 副参事)

まえがき

燃料電池車の実用化を果たすためのクリティカルな技術課題は、性能・耐久性要求を満足させたままでの燃料電池スタックのコスト低下、車載水素貯蔵、再生可能エネルギー資源からの低コストでの大量の水素製造の3つに絞られつつある。車載水素貯蔵の要求レベル、車載水素貯蔵法の種類と取り組み現状、車載水素貯蔵材の現状とその一環としての水素貯蔵に関する水素国際共同研究での取り組み結果、車載水素貯蔵材の今後を紹介する。

1. 車載水素貯蔵の変遷

燃料を帯同する輸送システムとして成熟したレベルにあるガソリンエンジン自動車(ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle)、特に乗用車では、1回数分で50ℓ程度のガソリンを給油して、500km以上の距離を移動できる。固体高分子型燃料電池(PEFC)を搭載する燃料電池自動車(FCV: Fuel Cell Vehicle)の乗用車においても、同じような機能を果たすことが期待されている。ところで、表1に示すように、タンクのガソリンは、質量エネ

表1 ガソリンと水素、バイオ燃料の比較

	燃焼熱(LHV)	密度等 単位換算	単位質量あたり 燃焼熱(LHV)	質量エネルギー 密度(kWh/kg)	体積エネルギー 密度(kWh/L)	等価質量 水素密度 (kg-H ₂ /kg)	等価体積 水素密度 (kg-H ₂ /m ³)
ガソリン	32.9 MJ/L	0.733 kg/L	44.9 MJ/kg	12.47	9.14	0.37	274
軽油	36.1 MJ/L	0.833 kg/L	43.3 MJ/kg	12.03	10.03	0.36	301
容器込みガソリン50Lのエネルギー密度(*4) (想定容器重量: 10kg、容器による想定体積増: 2.5L)				9.80	8.70	0.29	261
水素(0.1MPa)	10.8 MJ/Nm ³	0.0899 kg/Nm ³	120 MJ/kg	33.34	0.0030	1.00	0.0899
水素(*1) (35MPa, 272K)		25.22 kg/Nm ³	120 MJ/kg	33.34	0.841	1.00	25.22
水素(*1) (70MPa, 272K)		41.86 kg/Nm ³	120 MJ/kg	33.34	1.395	1.00	41.86
液体水素 (20K)	8.5 MJ/L	0.0708 kg/L	120 MJ/kg	33.34	2.36	1.00	70.80
水素吸蔵合金(*2) (室温、~0.1MPa)	水素含有率2mass%-H ₂ を想定、 含有水素の燃焼熱 0.02*120MJ/kg	粉末充填率1での 想定密度 5 kg/L	2.4 MJ/kg	0.67	3.33	0.02	100.00
メタノール	15.8 MJ/L	0.796 kg/L	19.9 MJ/kg	5.53	4.39	0.17	132
エタノール	21.2 MJ/L	0.790 kg/L	26.8 MJ/kg	7.45	5.89	0.22	177
BDF	35.4 MJ/L	0.890 kg/L	39.8 MJ/kg	11.06	9.83	0.33	295
アンモニア(*3) (-33.5°C, 0.1MPa)	382.58 kJ/mol -NH ₃	0.682 kg/L	22.5 MJ/kg	6.25	4.26	0.19	128
リチウムイオン 蓄電池単電池	三洋UR18650Fカタログ値 公称電圧: 3.7V, 公称容量: 2.6Ah, 外形寸法(直径: 18.1mm, 高さ: 64.8mm), 重量(Max): 47.0g			0.204	0.577	0.006	17.32

$$1 \text{ MJ} = 0.2778 \text{ kWh}$$

$$1 \text{ mol-H}_2 = 1.00794 \times 2 \text{ g}$$

等価水素質量密度は、質量エネルギー密度を水素の燃焼熱(120MJ/kg、33.34kWh/kg)で除したもので、同様に、等価水素体積密度は、体積エネルギー密度を水素の燃焼熱で除したものである。

燃焼熱と密度のデータは、下記特記の場合を除き、「JHFC総合効率検討結果」報告書(平成18年3月)、<参考1> 燃料定数の設定方法、表 2-1 燃料定数の一覧表(再掲)より抽出した。

(*1)「米NBS TN-1079, Ben A. Younglove, Neil A. Olien (1985) 9.5 Hydrogen Density」より

(*2)「水素・燃料電池ハンドブック(オーム社、平成18年9月)の、15.3.2タンクシステム」より

(*3)「米DOE Potential Role of Ammonia in Hydrogen Economy Table 2.1 Selected Ammonia Properties」より

(*4)JARI「平成18年度 燃料電池自動車に関する調査報告書」表4-1-26より

ルギー密度10kWh/kg、体積エネルギー密度 9 kWh/ℓ 以上を有しているのに対し、燃料電池の燃料である水素は、容器を含まない物質としての重量エネルギー密度こそ33kWh/kgとガソリンより大きいですが、仮に35MPaに圧縮しても、体積エネルギー密度は、0.8kWh/ℓ とその10分の1以下である。

FCVの早期実用化を可能と考え、自動車メーカー間のFCV開発競争が激化していった1997～2001年頃は、自動車向けの水素供給インフラが現存していないことを重視して、液体燃料であるメタノールやガソリントankを搭載し、車上で水蒸気改質反応等により水素に転換してPEFCに供給する方式も試みられた。この場合には、水素そのもののタンクを搭載しないので体積エネルギー密度が小さいことは問題にならない。しかしながら、これらの燃料を車上で水素に転換する反応装置（リフォーマ）は、水蒸気改質反応以外にシフト反応・CO成分除去（1 ppm以下）反応を行わせねばならず、小型化学プラント的な装置となって重量・体積とも車載装置としては大きすぎ、また起動時間が長かったために採用されなくなった。米国エネルギー省（DOE）でも、始動時間30秒以内等の目標達成は困難として、2004年8月に車載リフォーマのDOE資金による開発は断念している⁽¹⁾。

そこで、FCV用には、そのまま車載PEFCに供給できる純度の数気圧の水素を、高温での反応無しに発生・供給できるような方式で、500km以上の走行距離を確保できる量を、同等の距離の走行に必要なガソリン貯蔵（ICEVの燃費が10km/ℓ なら50 ℓ。容器を含めた重量では、約45kg）と同等の質量・体積で貯蔵できることが求められることになった。例えば、DOEは、車載水素貯蔵システムの質量貯蔵密度・体積貯蔵密度等への要求条件を表2のように設定している。

なお、FCVのガソリン等価燃費（ガソリン燃料 1 ℓ と同等の燃焼熱の燃料あたりの走行距離（km/l.g.e.））は、ICEVのその3倍弱（「水素・燃料電池実証プロジェクト」（JHFC）の平成17年度総合効率検討結果では平均値として2.3倍、トップランナーでは3.0倍、また、DOEの2005年のレビューでは2.4倍としている）であるので、燃費の改善効果を考慮するとガソリン等価の容器込みの水素貯蔵体積エネルギー密度は、2.9kWh/ℓ で良いことになる。また、FCVの等価燃費が3倍良いことをベースに、500km走行に必要な水素量としておおむね5 kgの水素が必要とされた。（水素 1 kgの燃焼熱は、3.6 ℓ のガソリンに等しいので、100km/kg-H₂、28km/l.g.eと想定することになる。）

表2 車載水素貯蔵システムへの要求条件

Storage Parameter	Units	2010	2015
Gravimetric Capacity (Specific energy)	kWh/kg (MJ/kg) wt%	2 (7.2) 6	3 (10.8) 9
5kg-H ₂ System Weight:		83 Kg	55.6 Kg
Volumetric Capacity (Energy density)	kWh/L (MJ/L) g H ₂ /L System*	1.5 (5.4) 45	2.7 (9.7) 81
5kg-H ₂ System Volume:		111 L	62 L
Storage System Cost	\$/kWh \$/kg H ₂ capacity	4 133	2 67
5kg-H ₂ System Cost:		\$666	\$333
Min.Full Flow Rate e.g. 90kW Stack	g-H ₂ /s/kW Nm ³ -H ₂ /s	0.02 0.02	0.02 0.02
Refueling Rate	kg H ₂ /min	1.5	2
Refueling Time:		3.3 min	2.5 min
Loss of usable H ₂	(g/hr)/kg stored	0.1	0.05
Cycle Life (Durability)	Cycles (1/4 to full)	1000	1500

JoAnn Milliken, 2004 DOE Review Meeting, Sunita Satyapal, 2007 DOE Review

2003年夏頃、DOEでは水素エネルギー社会実現のための水素・燃料電池プログラム推進に対する見直しを外部機関（NAE-NRCや、米国物理学会）に依頼し、その提言⁽²⁾⁽³⁾とそれに基づく取り組みの方向を2004年5月のレビュー会議（DOE Hydrogen-Fuel Cell & Infrastructure Technology Program, Annual Merit Review and Evaluation Meeting）で発表した。現状の技術改良的な取り組みを進めていくだけでは目標達成が困難な技術的課題として次の3つを取り上げ、このためには、基礎に戻った革新的な研究・技術開発が必要とした。

- （FCV向け）燃料電池スタックのコスト低下
- 実用車載水素貯蔵
- （再生可能エネルギー資源からの）低コストでの大量水素製造

この中で、車載水素貯蔵については、2004年よりGrand Challengeと称して5年間で1億5,000万ドルを投入し、潜在的に小型軽量で水素貯蔵が可能となりうる、「新規の金属ハイドライド」、「無機・有機のケミカルハイドライド」、「ナノ炭素系材料」について、それぞれ3つのセンターを設けて推進することなどが発表された。

日本でも、ブレイクスルーが必要な水素の製造、貯蔵、輸送、安全性確保等に関する技術課題に対して、海外の研究機関と共同で研究を行うとの、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）水素国際共同研究プロジェクトが2004年12月1日より開始された。この中では水素貯蔵のテーマが、2004年が11採択テーマ中5テーマ、2005年が12採択テーマ中8テーマと、水素貯蔵技術に重点化した取り組みが行われている。

2. 開発FCVに使用されている車載水素貯蔵法と取り組み現状⁽⁴⁾

水素タンクから純水素を発生・供給する水素貯蔵方法として表3に示すものがある⁽⁵⁾。これらの中で、実際の開発FCVに使用されたという観点からの主な水素貯蔵方法としては、高圧水素、液体水素、水素吸蔵合金、および高圧水素と水素吸蔵合金の組み合わせがあげられる。おのおのの貯蔵方法の特徴・課題は次のとおりである。

〔高圧水素〕

水素を圧縮して高圧水素タンクに貯蔵する方

表3 純水素を発生・供給する水素貯蔵方法

方法	圧縮水素	液体水素	水素吸蔵材料				炭素系材料
			水素吸蔵合金	無機系水素吸蔵材料	加水分解型	有機系水素吸蔵材料	
内容	高圧 常温 軽量高圧タンク(小容量) 20~70MPa, 数10Nm ³ ボンベ・ローダー 15~20MPa, ~2,800Nm ³ 耐圧タンク(大容量) 1~3MPa, ~25,000Nm ³	常圧 極低温(-253℃) 断熱容器 容量: 数10Nm ³ ~3200Nm ³	常圧近傍 常温~300℃ 熱交換器付容器 金属水素化物状態 LaNi ₅ 等の合金 体積: 気体状態 の1/1000 容量: 0.03 ~2000Nm ³	可逆型 10~20MPa 100~200℃ 高圧容器 (熱交換要) 例 NaAlH ₄ 錯陰イオン(AIH ₄ ⁻) 状態 小容量容器試作の 段階: ~0.1Nm ³	常圧 常温 FRP容器 (要耐アルカリ性) 例 NaH NaBH ₄ 小規模システム 試作段階~0.1Nm ³	常圧 200~400℃ ガソリンタンク程度の 容器 例 シクロヘキサン ベンゼン デカリン ナフタレン等の系	常圧~10MPa 常温~300℃ 高圧容器に充填 カーボンナチューブ等
長所	高質量水素密度 低エネルギー消費 常温貯蔵 普及技術	高質量水素密度 高体積水素密度 高純度水素源	高体積水素密度 高安全性 高純度水素源 常温貯蔵	高質量水素密度 運搬・充填等 取扱容易	高質量水素密度 運搬・充填等 取扱容易	高質量水素密度 高体積水素密度	水素貯蔵特性不明 ¹⁾ 高質量水素密度?
短所	低体積水素密度 高圧	液化動力大(高コスト) 自然蒸発(ボイルオフ) 充填時の蒸発	低質量水素密度 吸蔵・劣化現象 初期活性化	遅い吸蔵放出速度 サイクル特性 熱水性物質	強アルカリ性 廃液タンク必要 水素化物再生に多量の エネルギーが必要	反応器、精製器、廃液 タンクが必要 反応熱大 有害性を持つものも有	水素貯蔵特性不明 ¹⁾
所要動力	理論: 0.163kWh/Nm ^{3a)} 現状: 0.25 ~0.5kWh/Nm ³	理論: 0.31kWh/Nm ^{3b)} 現状: 1.2 ~2.0kWh/Nm ³	0.37kWh/Nm ^{3c)}	0.43kWh/Nm ^{3d)}	0.94kWh/Nm ³	理論: 0.85kWh/Nm ^{3e)}	圧縮水素と同程度
充填時間 ²⁾	5~10分	3~10分	10分(WENET目標)	数時間	数分	数分	圧縮水素と同程度

a) 1気圧から35MPaへの等温圧縮に必要な動力(実際には、この1.5~3倍の電力が必要)

b) 液化に必要な動力(実際には4~6倍の電力が必要)

c) 水素化熱(30kJ/molH₂)で算出

d) シクロヘキサン・ベンゼン系

e) NaAlH₄系、NaHまで脱水素

f) 水素吸蔵性能にはまだ議論がある。

g) 自動車用小型容器の場合

資料提供: (独)産業技術総合研究所西センター (2002年度 NEF「FC動向調査報告書資料編」)

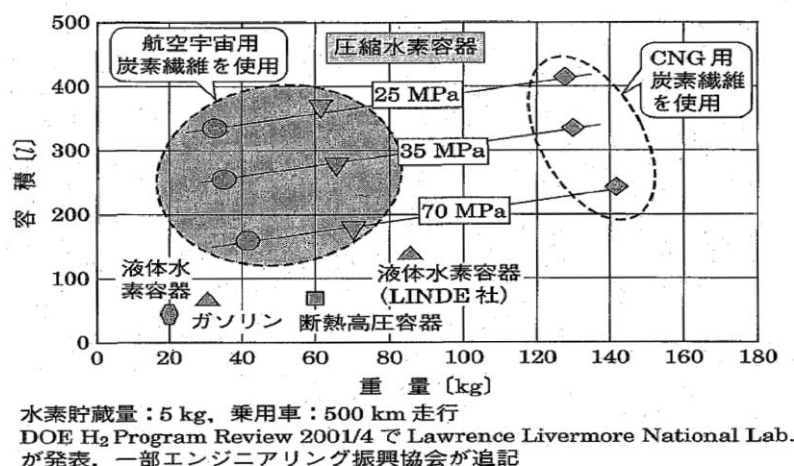


図1 高圧水素タンクの容量と重量 (4)

法である。図1に高圧水素タンクの容量と重量とを、液体水素タンクと比較して示す。車載高圧水素タンクは、その軽量化のために、金属(AI)ライナをFRP(カーボン繊維、次いで表面の防護を兼ねたガラス繊維とで強化したプラスチック)でフルラップ巻きにしたタンク(Type3)と、樹脂ライナをFRPで同様にフルラップ巻きにしたタンク(Type4)の2種類が主流となっている。貯蔵圧力は35MPaの場合が多いが、70MPa対応の水素タンクもタンクメーカー各社から発表されている。

水素ステーションでは、水素を圧縮器で昇圧し、これを蓄圧器に貯蔵し、これからディスプレイを介して、車載水素タンクに充填する。車載水素タンクに水素を充填するために、蓄圧器の水素貯蔵圧は、少々高い40MPaあるいは80MPaが必要になる。

高圧水素貯蔵は現在、大多数の自動車会社が採用している方法であり、現時点では実用性が最も高い。しかし、単位体積当たりの貯蔵エネルギー密度が低く、体積がかさばる欠点がある。改善方法の1つとして、さらなる高圧化が考えられるが、高圧条件下では水素の特性は理想気体法則に従わなくなるため、同一容積の下で35MPaから70MPaに貯蔵圧力を昇圧しても、貯蔵量は約1.6倍程度にしか増加せず、高圧化だけでは大幅な体積貯蔵密度向上は難しい。また、軽量タンクのフルラッ

プに使われるカーボン繊維は、高強度なものが必要とされ、その製造プロセス上の制約もあって軽量水素タンクのコストは高い。

日本では、2003年度から2004年度にかけて、6法律28項目についてのFCV普及のための法律および規制の再点検が行われた。この中で、道路運送車両法でのFCV技術基準および高圧ガス保安法でのFCV用圧縮水素容器の技術基準が、2005年3月末に公布・施行された。これにより、高圧水素貯蔵容器を有するFCVは世界で初めてガソリン車と同じ手続きにより認定が得られるようになった。

[液体水素]

水素を液化して液体水素タンクに貯蔵する方法である。液体水素の沸点は -252.9°C と極低温のため、多重に真空断熱された特殊容器に収納される。液体水素貯蔵は、質量貯蔵密度は最も高く、また体積貯蔵密度も高く、貯蔵装置を小型化できる利点がある。一方、現状の技術では極低温を長時間保つことが難しく、使用せずに放置しておくと、車載タンクの規模では数%/dayの割合で水素が気化し散逸していくボイルオフ現象が避けられない(但し、ボイルオフによる散逸量は、貯蔵タンクの表面積/体積に依存し、 25m^3 程度の液体水素貯蔵タンクでは、 $0.1\%/\text{day}$ 以下となる)。液体水素を用いた水素貯蔵技術の実用化のた

めには、ボイルオフ抑制が1つの大きな課題となる。また、液体水素を、貯蔵タンクから車載タンクに移充填する際、充填パスの低温化のために液体水素のかかなりの量(数%~20%)が一気に失われる(フラッシング)のをいかに防ぐかも課題となっている。

[水素吸蔵合金]⁽⁶⁾

金扇が水素を取り込む現象を積極的に水素貯蔵に用いたものが水素吸蔵合金である。水素吸蔵合金には、LaNi₅に代表される、水素吸蔵量が1 mass%強の希土類系AB₅型合金(A: La, Ce等希土類元素, B: Ni, Co, Mn, Al等, Ni-MH蓄電池の水素極に採用されている)、チタン、マンガンなどの遷移元素を合金をベースとし、水素吸蔵量が2 mass%弱のAB₂型ラーベス相合金(A: Ti, Zr等, B: V, Mn, Cr等)、TiFe等Tiを主成分として、水素吸蔵量が1.8 mass%のAB型合金等の種類がある(注: ケミカルハイドライドでは、ABは、Ammonia Borane NH₃-BH₃のこと)。さらに、1990年代半ばに秋葉と射場によって発見されたTi-Mn-V系合金⁽⁶⁾に始まるbcc構造合金は、2~3 mass%と従来型合金の2倍程度という高い質量水素密度を示した。その後、室温付近で水素吸放出可能なTi-Cr-V系、V-T-Cr系およびTi-Cr-Mo系bcc合金に発展した。

これらの合金は、常温・常圧付近で水素の吸放出を行うことができる。水素吸蔵合金の中では、水素は金属の結晶格子間に規則的に配置され、単位体積あたりの水素原子密度はおおむね90 kg-H₂/m³以上と、液体水素の場合(70.8 kg-H₂/m³)よりも高い体積貯蔵密度を実現することができる。

一方、水素吸蔵合金は遷移元素を用いているために重く、水素の質量貯蔵密度としては2 mass%程度であり、そのままでは車載に適さない欠点がある。例えば、これらの従来型水素吸蔵合金で5 kgの水素を貯蔵しようとすると、約250 kgの合金を必要とし、容器を含めた総重量は数百kgになる。また水素吸蔵放出

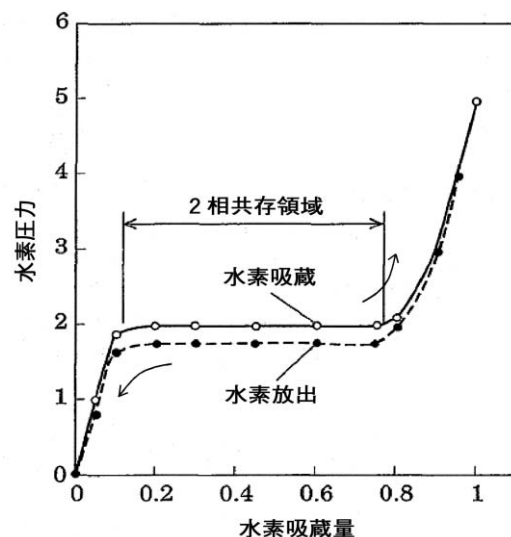


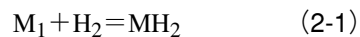
図2 水素圧力組成等温線図(PCT図)

の過程で反応に伴う熱の出入りがあり、そのため大きな熱交換器が必要となり、このことと、水素吸蔵合金粉末の充填率が30~50%と小さいことから、合金そのものの理論必要体積は40 ℓ強であっても、容器としては、150~200 ℓ程度になるなど、システムが複雑になる問題点も残っている。

FCVの試作車にも、トヨタ「FCEV」(1996年)、ホンダ「FCX-V1」(1999年)、トヨタ「FCHV-3」(2001年)らで、水素貯蔵合金水素貯蔵方式が用いられた。

水素吸蔵合金のみならず水素貯蔵材料での水素吸放出の挙動は、水素圧力組成等温線図(PCT図)(図2)で表わされる。これは、水素吸蔵量、ある温度での水素平衡圧力(P_{H₂-e})などが一目でわかる図である。水素吸蔵合金の場合、既に水素と反応した水素化物といまだ反応していない合金の2相がともに存在(2相共存)する領域では、Gibbsの相律により、自由度が1となって、水素吸蔵量が増減しても変化しない水素平衡圧を示す。

水素吸蔵合金と水素との反応は、2-1式で表される。



この反応(水素放出方向)の反応のエンタル

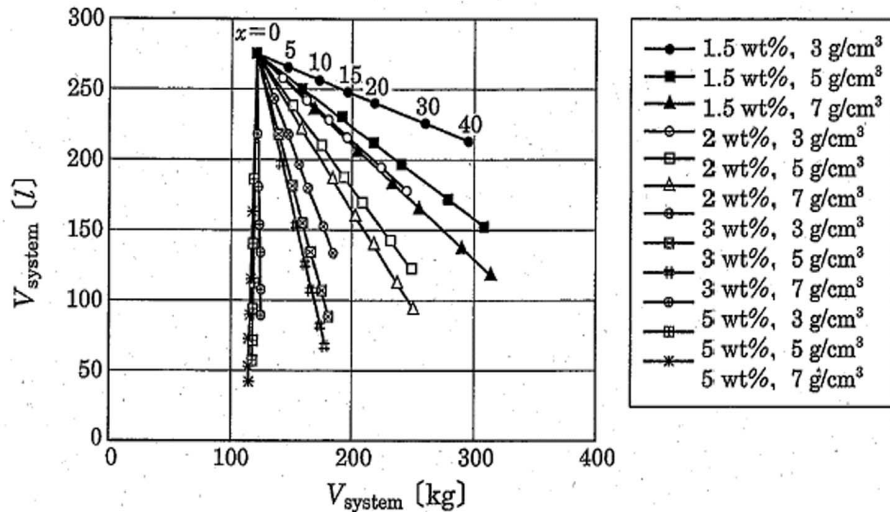


図3 ハイブリッド貯蔵における貯蔵水素量のシミュレーション

ピー変化 (ΔH) とエントロピー変化 (ΔS) は、
上述の水素平衡圧と2-2式の関係が成立する。

$$RT \ln P_{H_2-e} = -\Delta H + T \Delta S \quad (2-2)$$

いくつかの温度でのPCT図より得た P_{H_2-e} と
(2-2式) から ΔH を求められる。室温で作動する
水素吸蔵合金の脱水素反応のエンタルピー変化は
30~40kJ/mol- H_2 (吸熱) 程度である。

[高圧水素吸蔵システム]

実規模の貯蔵タンクで検討されている水素貯蔵
技術の1つとして、高圧水素吸蔵システムがある。
これは、軽量の高圧水素タンクの中に熱交換器と
水素吸蔵材料を収納し、従来の同容量の高圧水素
タンクに比べ水素貯蔵量を向上させたものである。
この「ハイブリッド容器」が質量水素密度の低下を
抑えつつ水素貯蔵容器のコンパクト化を進めるの
に有効であることは、栗山、竹市らによってシミュ
レーション検討と共に示された⁽⁷⁾。ここでは、
Type 3型高圧タンクと水素吸蔵合金を組み合わせ
て、水素吸蔵合金による貯蔵量と内部空隙の圧縮
水素の和重量5kgとなる水素を充填するハイブリ
ッドタンク方式について検討している (図3)。こ
れから、比重5g/cm³、水素吸蔵

能力3質量%の高容量水素吸蔵合金が開発され
れば、圧力35MPaで、合金粉末充填率X=40%
でタンク総重量約180kg、体積90ℓまで、小型軽
量化が可能となることが示された。

これらと独立に、トヨタは、水素吸蔵量1.9mass
%のラーベス相合金を用いて「高圧水素吸蔵合金
容器」を試作し、外容積：180ℓ、重量：420kg
(合金300kg) の容器において35MPaまで水素を
充填することによって水素貯蔵量：7.3kgおよび5
分間での充填率80%を実現した。このシステム概
要を図4に示す⁽⁸⁾。

このように高圧水素吸蔵システムは、従来の高
圧水素タンクよりも単位体積当たりの貯蔵量が多
く、常圧の吸蔵合金よりも軽量という利点を有す
るが、実用化にあたってはさらなる軽量化などが
課題として残されている。

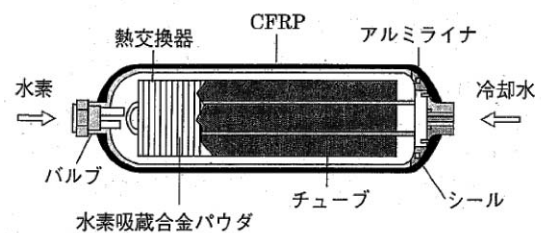


図4 高圧型タンクシステム概要図

3. 水素吸蔵合金以外の固（液）体水素貯蔵材料の開發現状

[分類と水素貯蔵密度の概要] ^{(9) (10)}

軽元素と水素の化学的結合で水素を含む無機・有機の化合物は、潜在的に高い水素貯蔵能を有する。これらの材料の、潜在的な（物質の化学式と、物質の密度から計算される理論的な）水素貯蔵密度（質量貯蔵密度と体積貯蔵密度）を図5に示す。

これらの水素貯蔵材は、大きく分けて、化学結合で水素を含有する無機系材料と有機系材料、カーボンナノチューブ（SWCNT）のチューブ間のナノボアへの水素保有等、物理吸着で水素を吸蔵する材料がある。

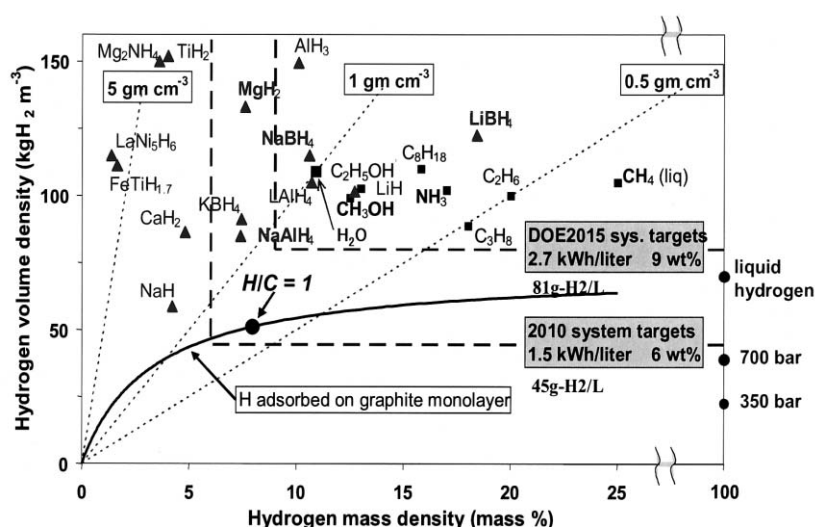
無機系には、軽元素の金属水素化物（金属ハイドライド LiH , NaH , MgH_2 ）と、 Al , B , C および N に代表される元素のまわりに共有結合により高密度に水素を配位した集合体アニオン（ $(\text{AlH}_4)^-$, $(\text{BH}_4)^-$, $(\text{CH}_3)^-$, $(\text{NH}_2)^-$ など）とカチオン金属（ Li , Na , Mg , Ca ）とのイオン性結晶である無機錯体化合物（無機ケミカルハイドライド）— NaAlH_4 （ナトリウムアラネート）, LiBH_4 （リチウムボロハイドライド）等と、無機錯体化合物の一種であるが、窒素系水素貯蔵材とも称される、 LiNH_2 （リチウムア

ミド）等のアミド（ NH_2^- ）・イミド（ NH^- ）化合物と、 H_2O （水）, AlH_3 , NH_3 , $\text{NH}_3\text{-BH}_3$ （アンモニアボラン）等の分子化合物とがある。

有機系には、 CH_4 （メタン、加圧して液体）等ハイドロカーボン（HC）, CH_3OH （メタノール）等単純な有機分子以外に、ベンゼン（ C_6H_6 ）とシクロヘキサン（ $\text{C}_{12}\text{H}_{12}$ ）のように、 $\text{C}_{12}\text{H}_{12} \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_6 + 3\text{H}_2$ の反応で可逆的に水素を吸放出し、常温では液体で存在する有機ケミカルハイドライドがある。

これらの材料は、単独のあるいは組み合わせた熱分解反応により、あるいは、ボロハイドライドと水との加水分解（Hydrolysis）や、アンモニアと金属ハイドライドとのアンモノリシス、同様にメタノリシス等のように2種の水素含有物質の反応により水素を発生する。

もう1つの水素貯蔵材の分類として、車載貯蔵タンクに水素含有化合物を収納したまま熱分解等で水素を発生し（吸熱反応）、逆に水素高圧下かつタンクの耐熱温度以下で水素を吸蔵して元に戻せる（発熱反応）「可逆型（オンボード再生型）」、加水分解等で水素を発生し（発熱反応）、発生後の生成物を車外に取り出して再生する（吸熱反応）「非加逆型（オフボード再生型）」がある。「可逆型」は、水素供給インフラとしては高圧水素貯蔵と同様に



”George Thomas, NSF Workshop, Arlington, VA, June 27-29, 2004”を基に追記。

図5 水素貯蔵材料の潜在的水素貯蔵密度

なり、また、水素発生が吸熱反応であると、事故で水素漏洩しても温度が下がって自然に放出されにくくなるので、水素貯蔵の安全性が高いとの特長を有する。

無機系水素貯蔵材料は、遷移金属が主要な構成元素である水素吸蔵合金の多くが1～3 mass%なのに対して、5～20mass%と理論質量水素密度は高い。一方、金属結晶の格子間に水素原子として水素が保持される水素吸蔵合金の場合に比べて体積水素密度は低く、 AlH_3 ($149\text{kg-H}_2/\text{m}^3$) のように水素吸蔵合金を超えるものもあるが、通常液体水素 ($70.8\text{kg-H}_2/\text{m}^3$) 程度となる。

単一物質の熱分解で水素放出する水素含有物質は、水素放出反応でより不安定になる吸熱反応 (ΔH が正) の「可逆型」であることが多いが、往々にして反応速度が遅くて 100°C ～ 400°C と高温でなければ生起しない場合が多い。また、水素放出反応温度が高いと車載PEFCの排熱が利用できなくなって、燃料の一部を燃焼させて水素発生させる必要が生じ、水素発生のエネルギー効率が大幅に (80%以下に) 低下する。なお、このような単一物質の熱分解反応での水素放出は、水素吸蔵合金の場合と同等に扱うことができ、不安定性の程度を示す水素放出反応のエンタルピー変化 ΔH がわかると、逆に水素吸放出の平衡水素圧・温度が定まることになる。

複数物質を組み合わせで水素放出させる場合には、「可逆型」・「非可逆型」の双方がありうるが、水素貯蔵システムとして6 mass% (DOE2010年目標) を実現するには、単独の水素貯蔵物質そのものの水素含有率としては、9mass%程度が必要となる。これに適合のは、Li, Mgアラネート、ボロハイドライド、軽元素金属ハイドライドの組合せや、アンモニア (あるいは軽元素金属アミドやアンモニアボラン) とLiH, ボロハイドライドと水の組み合わせにほぼ限定される。

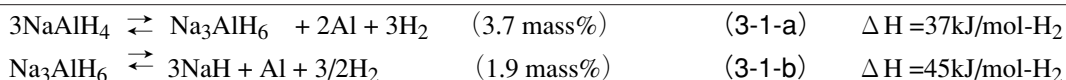
[アラネート (Al-H系)]

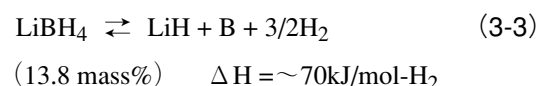
アラネート (Alanate) は、4水素化アルミニウムイオン (AlH_4^-) という錯イオンを含む塩の総称である。アラネートの中で、 LiAlH_4 は発熱反応を伴って水素を放出し、このため、可逆的な水素吸放出反応は期待できない。また、 $\text{Mg}(\text{AlH}_4)_2$ は多量の水素 (9.3 mass%) を吸蔵するが、再水素化が困難であった⁽¹¹⁾。そうした中で、最も集中的な研究が NaAlH_4 に関してなされてきた。それは、2 mol%程度 of Ti を触媒として添加すると、下記の2段階反応の可逆性が向上して、全体で5.5mass%水素貯蔵材料として利用しうることが見出されたからである⁽¹²⁾。実際、 125°C で5 mass%の水素放出量で、5時間以内に放出を終了し、水素吸蔵は、1時間以内に4 wt%吸蔵するとの報告がある⁽¹³⁾。Ti触媒添加でこれらの反応が可逆的に進行し気相中の水素と平衡にある場合には、固相での Na^+ の移動が必要と考えられるものの、水素吸蔵合金の場合と同様に、圧カー組成等温線 (PCT) に平衡水素圧領域が現れ、その温度変化から ΔH (水素放出反応のエンタルピー変化) が求められる。

この ΔH の値は、車載用水素貯蔵材としての可能性を有する ($\Delta S = 130 \text{ J/mol-H}_2\text{K}$ とすると、第1段階反応 (3-1-a式) では、 30°C で1気圧の水素圧で水素を放出し、第2段階反応 (3-1-b式) では、 100°C で1気圧の水素圧で水素を放出すると期待できる)。しかし、現実には、反応速度遅いために、特に、3-1-b式の2段目の反応は、期待どおりの速度では反応は進行しなかった。

[ボロハイドライド (B-H系)]

還元剤としても利用されている4水素化ホウ素イオン (BH_4^-) を含むボロハイドライドは、高い理論水素含有率から、水素貯蔵材料としても注目されるようになった。このボロハイドライドは、水と組み合わせた加水分解





(水和反応)による水素放出(発生)と、熱分解による水素発生の方が検討されている。

加水分解による水素発生は3-2式によって進む発熱反応であって、理論的に10mass%以上の水素含有率となる。実際には、濃厚アルカリ水溶液に NaBH_4 を溶解し(液体燃料の形態)、表面処理したマグネシウム系水素化物の表面でこの水素発生反応を促進している⁽¹⁴⁾。

車載水素貯蔵システムとしてこの反応による水素発生を利用するには、生じた NaBO_2 の貯蔵タンクからの回収と、 NaBH_4 の濃厚アルカリ水溶液形態での補給、および NaBO_2 のオフボードでの再生反応(のコスト低下)をいかに行うかが課題となる。

日本では工学院大学/水素エネルギー研究所、豊田中央研究所、海外ではアメリカ・Millenium Cell社などが、この研究を進めている^{(15) (16)}。

熱分解反応による水素放出反応は次の式で表される吸熱反応で、2003年、スイス・フリブール大学のZuttelらが注目した⁽¹⁷⁾。

この反応では、 LiH として水素が固体材中に残るにも関わらず13.8mass%の水素が放出されており、水素貯蔵材料としての潜在性は高い。しかし、 $\Delta H = \sim 70 \text{ kJ/mol H}_2$ は車載用としては大きすぎ、また、3-3式の右方向への反応は通常548～653Kで進行するのでその低温化も望まれる。このため、 SiO_2 の添加による不安定化での水素放出温度の低下なども試みられている。

一方、B—H系そのものの熱力学的な不安定化を目指した系統的な研究も進んでいる。電

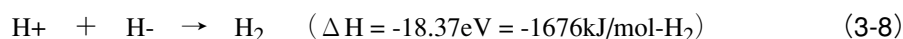
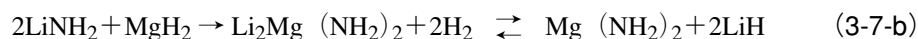
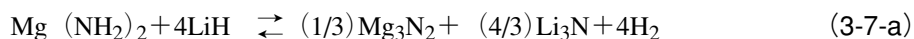
子構造の実験的・理論的解析により、 LiBH_4 を不安定化して低温で水素を放出させるには、 Li の一部を Mg などの、より電気陰性度の大きな元素で部分置換して、陽イオンと BH_4^- 陰イオンとのイオン結合性を弱めることが効果的であることが見いだされた^{(18) (19)}。

アミド/窒素系(N-H系)

LiNH_2 (リチウムアミド)からの水素放出反応の報告は1910年代に遡るが、2002年に金属窒化物/イミドと水素との間に強い親和性があることを、シンガポール国立大学(NUS: National University of Singapore)のChenらが報告を行って以降、N—H系の研究が活発化している⁽²⁰⁾。 LiNH_2 では、 NaAlH_4 に似た3-4式の2段階の水素放出・吸蔵反応によって、それぞれの段階で約5 mass%の水素を放出する。ここで、中間相の Li_2NH はリチウムイミドと呼ばれる。

窒素系で重要なことは、燃料電池反応の阻害要因となるアンモニアの、副反応での放出を抑制することである。3-5式のように、 LiNH_2 だけを昇温するとアンモニアが放出される。一方、 Li 水素化物は3-6式のようにアンモニアを喰って水素を放出する^{(21) (22)}。

このように、窒素系においては、アンモニアと低温でも迅速に反応して(喰って)水素を放出する第2相との複合化が不可欠であり、そのために多様なN—H系と軽元素金属ハイドライドとの組合せが試されている。その中で、水素貯蔵量や水素放出温度の観点から、これまで最も良好な特性を示したのは $\text{Mg}(\text{NH}_2)_2$ と



LiHとの複合化である。例えば、3-7-a式の反応では、昇温に伴って最大9.1mass%の水素が放出される⁽²³⁾。

MgはLiに比べ安価であり、またMg(NH₂)₂はLiNH₂と比較して大気中で安定であることも、実用化の観点から有用である。このような、Mg(NH₂)₂とLiHとの異なる組成比での複合化の研究がサンディア国立研究所 (SNL), NUS, 広島大学, 東北大学一豊田中央研究所ではほぼ同時期の2004年に報告されており、各組成比での反応過程や中間相の原子・電子構造などについての詳細な研究が進められた⁽²⁴⁾。SNLの報告によると、200℃程度では3-7-b式に示すように、Mg(NH₂)₂と2式量のLiHが反応して2分子のH₂とMgLi₂(NH)₂が生成するまでしか反応しないとのことである。その際の水素放出量は5.5mass%であり、これが、Mg(NH₂)₂-LiH系の限界としている。

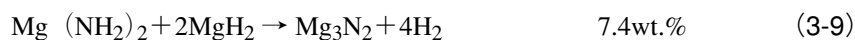
窒素系の水素の吸放出反応で、以上のようなNH₃の発生・吸収が介在するとの解釈に対し、NUSのChenらのグループは、アミド等を構成する部分的に正の電荷を有する水素原子 (H δ^+ 部分的なプロトン) と、単純なあるいは錯体のハイドライドを構成する部分的に負の電荷を有する水素原子 (H δ^- 部分的なプロタイド) との強力な相互作用がその源であるとの解釈をしている。すなわち、3-8式に示すようにプロトンとプロタイドとの反応エンタルピー変化は、非常に大きい発熱反応なので、部分的な電荷を有する場合にも、局所的にこれと類似の相互作用が働くとしている。そこでアミドとハイドライドとを、全水素が放出されない段階まで、ミリング処理によっ

てナノ複合化すると、両分子間に引力的な相互作用が働いて、著しく不安定化され、残り(余り)の水素をアミド単独、ハイドライド単独の熱分解による水素放出より低温で放出すると解釈している。これはハイドライドとアンモニアとの反応(アンモノリシス)で水素を発生することに似ているが、生成する気体水素と気体状態のアンモニアとの分離のしにくさを、アンモニアを固体のアミドで置き換え、また、アンモノリシスそのものは発熱反応であるが、アンモニアを含有する化合物としてアミドを利用し、アミドとハイドライドとの反応が、適度な吸熱反応となるように反応系を調整したものとも言える。

この観点から、アルカリ金属やアルカリ土類金属の軽金属 (Li, Mg, Ca) のアミド (アンモニアも含む)・イミドと、B, Alと水素の錯体を含む軽元素金属のハイドライドとの組み合わせの選択により、室温に近い温度、常圧の水素圧力で6 mass%以上の水素吸放出の可能性を有すると考え、多くの系の常温・ボールミル混合下の水素放出特性が調べられた。

この一環として、Mg(NH₂)₂:MgH₂の混合比1:2を出発材料とし、ボールミリング中に、室温付近で3-9式に示す理論量に相当する7.3wt%の水素を放出し、生成物のほぼ全量がMg₃N₂のみとなること、3-9式の反応の熱力学的特性は僅かに吸熱的であることを確認した⁽²⁵⁾。この系では、中間的に生成したNH₃と反応するとされるLiHを含んでいないので、水素発生には必ずしも中間的なNH₃の生成は必要ないとも言える。

水素放出反応 (3-9式) の生成物Mg₃N₂の水





素化（水素吸蔵）はほとんど起こらなかったため、水素化特性向上の一環として、 Mg_3N_2 へのアルカリ金属化合物の添加の効果を調べた。 Mg_3N_2 に対してモル比 1 : 4 で NaNH_2 を加えると、加圧水素下でのボールミリング中に最も多く、混合物の 3 mass% 強の水素吸蔵が示された。ただ、これは 3-7-b 式類似の反応である⁽²⁶⁾。

$\text{Mg}(\text{NH}_2)_2$ と LiAlH_4 のモル比 1 : 1 混合物のボールミリング中の水素放出挙動が調査された。この系では、3-10 式に示す反応で 8 原子の水素（8 H）の放出が想定される。18 時間のボールミリング中に、5.8 H の水素が放出され、また XRD と ^{27}Al NMR 測定によって、ボールミリング中に Li_3AlH_6 が生成され、さらに Al に配位する元素が、はじめの AlH_4 から AlN_4 に変化するのが観測された。これは、ボールミリング中の $\text{Mg}(\text{NH}_2)_2$ と LiAlH_4 との相互作用の直接的な証拠といえる。ボールミリング後のサンプルに対し、昇温にともなう放出水素量を測定し、2.1 H が放出された。全体として 7.9 H（8.4 wt%）が混合物から放出され、(3-10) の反応がほぼ完全に進むことが確認された。また、DSC 測定により、水素放出反応は、32.9 kJ/mol- H_2 の吸熱反応であることが分かった。しかし、水素放出後のサンプルに対する水素吸蔵量測定では 1.5 wt% 相当の水素しか吸蔵されなかった⁽²⁶⁾。

$\text{Mg}(\text{NH}_2)_2$ と Li_3AlH_6 の 1.5 : 1 モル比の混合物のボールミリング中での水素放出挙動が調べられた。 Li_3AlH_6 単独の熱分解反応は進みにくいが、この混合物ではボールミリング中に 3 H に相当する水素が放出され、その後の静置下 400℃ までの昇温過程で 9 H 相当の水素が放出され、あわせて 12 H 相当（8.7 wt%）の水素が放出された。この水素放出済みのサンプルに対して、加圧水素（70 atm）下、昇降温と室温での静置条件で水素吸蔵特性測定を行い、

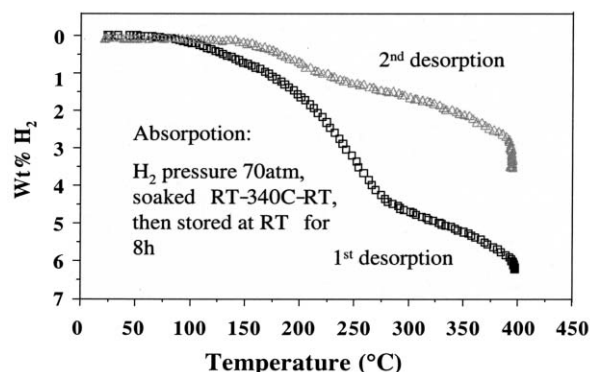


図 6 $\text{Mg}(\text{NH}_2)_2/\text{Li}_3\text{AlH}_6=1.5/1$ での可逆的水素貯蔵

当初混合物に対して 4.5 H 相当（3.6 wt%）の水素が吸蔵されることが確認された。図 6 に水素放出曲線を示す⁽²⁶⁾。

4. 今後の車載水素貯蔵材

車載水素貯蔵については、車載 PEFC へ供給する水素には、CO 濃度 1 ppm 以下と言うような高純度の水素を必要とするため、貯蔵する水素、あるいは、貯蔵タンクで発生する水素が、このような高純度であるものに重点を置いて、実用化に向けて開発が行われてきた。このうち、高圧水素としての貯蔵では、35 MPa や 70 MPa で貯蔵できる軽量の高圧容器が開発され、搭載の認定も取得できて、質量貯蔵密度としては、ほぼ目標を達成している。実際ホンダ・トヨタとも、一回の充填で 500 km 以上の走行距離が可能な FCV の試作・実走行実証等を行っている。ただ、軽量の高圧水素貯蔵タンクには、自動車部品用としては高価な炭素繊維を用いていてコスト高となっている。従って、車載時のレイアウトの自由度を上げようとして、現状の大直径の単一タンク構成をやめて複数タンクを搭載するのがコスト面でできなくなっていて、タンク搭載のために荷物室あるいは座席の一部の空間を犠牲にしている。これに対する取り組みの 1 つがハイブリッド容器である。

一方、水素吸蔵合金以外の固体水素貯蔵にお

いても、水素貯蔵密度が高いと水素充填時の熱除去が過大であったり、短時間（数分）での水素充填が不可能であったり、水素放出が容易であっても水素放出後生成物からの再生反応に多大のエネルギーと反応時間が必要であったりして、実用に供しうる系は見出されていない。DOEでは、2004年から5年間でこの分野に1億5,000万ドル（年3,000万ドル）の多大な資金を投入して研究開発を行っているが、決定的なものが見出されたとは言えない。2007年5月のレビュー会議においては、 $-20\sim 100^{\circ}\text{C}$ で水素を放出し、物質としての水素質量貯蔵密度が6 mass%以上であるのは、AB（アンモニアボラン）のイオン液体溶液、AB/LiNH₂の複合系、AlH₃に限定されている⁽²⁷⁾。

ところで、貯蔵タンク内では35MPaで存在する水素の圧力エネルギーは有効に利用されていない。一方、化石燃料資源の水素源から、FCVの車載水素タンクに水素ステーションのディスプレイで水素を充填するまでのパスのうち、水素の純度を上げ、加圧して、輸送・貯蔵するためになされた電気的な仕事によるエネルギー消費は、少なく見ても水素の有する燃焼熱（3.00kWh/Nm³, LHV）の10%以上となっている⁽²⁸⁾。発電前の一次エネルギーに戻せば、水素の燃焼熱の30%程度となる。

このように、水素源から車載水素タンクでの貯蔵・水素発生に至るパスでのエネルギーロスを考慮すると、いわゆる「非可逆型」の

水素貯蔵材についても見直しが必要と思われる。特に、常温・常圧（あるいは1 MPa程度の加圧）で液体状態で存在し、その輸送・水素貯蔵タンクへの充填・水素放出後生成物の回収が容易で、その再生仕事量がさほど小さくしなければメリットが大きい。水素発生が発熱反応なら、それと同じ量以上のエネルギーが再生反応で必要となるので、水素発生反応の吸熱・発熱量の絶対値が水素発生～再生を考えたエネルギー消費量を表わす。このような観点で、代表的な車載水素貯蔵候補材を表4に示す。この中で、特に考慮すべき候補材は、CO₂排出量の少ない再生可能エネルギー由来の水素源（風力・太陽光からの水電解での水素やバイオマス）で、高圧化や高純度化の仕事が少なく、輸送・充填（さらには回収）が容易で、水素放出時にCO₂を併発しないようなものである。例えば、アンモニア（NH₃＋マイクロクラッキング装置、NH₃/LiH＋生成Li₃Nの分散・溶解溶媒）、有機ケミカルハイドライド、MgO＋CH₃OH＋H₂O、バイオマスそのもの（燃料タンク内で発酵により水素発生）⁽²⁹⁾等である。ただ、メタンやメタノールの車上改質は、装置が複雑で重量・体積とも大きすぎて、一度は採用されなくなったものなので、コンパクト・軽量・エネルギーロスが少ない水素発生器が必要となる。

表4 水素貯蔵候補材料の水素発生と再生反応の消費エネルギー

Hydrogen release reaction	Regeneration reaction	no. of H2 for release reaction	mwt of all reactants (including water)	density of reactants	ΔH° of release reaction per H2, kJ/mol	max ideal efficiency	Grav density, wt% H2	Vol density, kg-H ₂ /liter
NaBH ₄ + 2 H ₂ O → NaBO ₂ + 4 H ₂	NaBO ₂ + 4 H ₂	4	73.86	1.40	-53.09	74.9%	10.92	0.153
NaBH ₄ + 5 H ₂ O (approx 11M, 30% NaOH)	NaBO ₂ + 4 H ₂	4	127.9	1.40	-53.09	74.9%	6.30	0.088
formic acid (HCOOH)	CO ₂ + H ₂	1	46.03	1.00	31.61	88.2%	4.38	0.044
B10H14	10B(s) + 7 H ₂	7	122.22	1.00	4.13	88.8%	11.55	0.115
silane condensation	Me ₃ Si-SiMe ₃ + H ₂	1	148.4	1.00	-8.37	87.6%	1.36	0.014
paraformaldehyde+H ₂ O = CO ₂ +H ₂	CO ₂ + 2 H ₂	2	48.04	1.00	34.98	89.1%	8.39	0.084
MgO·CH ₃ OH + H ₂ O → MgCO ₃ + 3H ₂	MgCO ₃ + 3 H ₂	3	90.36	1.40	4.81	92.7%	6.69	0.094
hexahydrotriazine	triazine + 3 H ₂	3	87.12	1.00	23.73	92.3%	6.94	0.069
BH ₃ NH ₃ to BN	BN + 3 H ₂ = BH ₃ NH ₃	3	30.87	0.76	-32.66	78.9%	19.59	0.149
BH ₃ NH ₃ to BHNH (borazine)	BHNH + 2 H ₂ = BH ₃ NH	2	30.87	0.76	-13.61	83.1%	13.06	0.099
C ₆ H ₁₂ → C ₆ H ₆ + 3 H ₂	C ₆ H ₆ + 3 H ₂	3	84.16	1.00	68.50	80.7%	7.19	0.072
CH ₃ OH + H ₂ O → CO ₂ + 3 H ₂	CO ₂ +3H ₂	3	50.06	1.00	43.84	86.7%	12.08	0.121
C10H18 → 5 H ₂ + C10H8	C10H8 + 5H ₂	5	138.25	1.00	71.64	80.0%	7.29	0.073
2 NH ₃ → N ₂ + 3 H ₂ (liquid density at bp -33.5C at 1atm)	3 H ₂ + N ₂ = 2 NH ₃	3	34.06	0.682	30.62	90.3%	17.76	0.121
MgCl ₂ ·6(NH ₃) = MgCl ₂ + 3N ₂ + 9H ₃ (assume 10 kcal binding enthalpy per NH ₃ , 2 kcal binding free energy)	MgCl ₂ +3N ₂ +9H ₃	9	197.39	1.239	58.62	83.0%	9.19	0.114

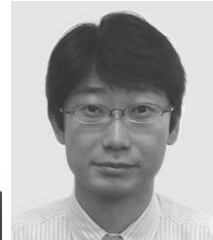
Bill Tumas (LANL), DOE 2006 Annual Review Meeting, ST1 を基に作成。

[謝辞]

本報告の一部は、NEDO技術開発機構より受託した「水素安全利用等基盤技術開発－水素に関する共通基盤技術開発／国際共同研究／車載水素貯蔵用のマグネシウム－窒素系固体材料の研究開発」の中で、シンガポール国立大学（NUS）との共同研究で実施されたものである。NEDOおよび共同研究先のDr.CHEN Pingに謝意を表する。

参考文献

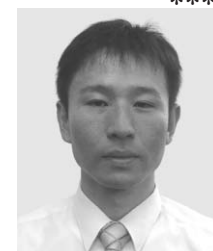
- (1) ON-BOARD FUEL PROCESSING GO/NO-GO DECISION, DOE DECISION TEAM COMMITTEE REPORT, August 2004
- (2) The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs, National Research Council (NRC), Feb. 2004
- (3) The Hydrogen Initiative, American Physical Society (APS), Panel on Public Affairs (POPA), (POPA Report), March 2004
- (4) 水素・燃料電池ハンドブック, 第2部第15章「水素の貯蔵および輸送」、オーム社, 2006
- (5) JARI「平成18年度 燃料電池自動車に関する調査報告書」p.241,2007
- (6) 田村英雄監修 「水素吸蔵合金－基礎から最先端技術まで」 エヌ・ティー・エス、1998.
- (7) N. Kuriyama, N. Takeichi, and H. Senoh :
“Hybrid hydrogen storage vessel,” A Novel High-pressure Hydrogen Storage Vessel Combined with Hydrogen Storage Material, Int. J. Hydrogen Energy, 28, pp.1121-1129, 2003.
- (8) 森大五郎, 小林信夫, 篠澤民夫, 松永朋也, 久保秀人, 藤敬司, 都築誠: “水素貯蔵材料を利用した車載水素貯蔵システムの研究, 高圧型水素吸蔵合金タンク,” 金属誌, 69, (3), pp. 308-311, 2005.
- (9) 中森裕子, 折茂慎一: “最先端の水素エネルギー技術とその関連材料, 水素貯蔵のための錯体水素化物”, まてりあ (日本金属学会報), 44, pp. 192-196, 2004.
- (10) A.Zuttel, P.Wenger, P. Sudan, P.Mauron, and S.Orimo: “Hydrogen density in nanostructured carbon, metals and complex materials,” Mater. Sci. Eng. B, 108, pp. 9-18, 2004.
- (11) M. Fichtner, O. Fuhr, O. Kircher, J. Alloys Compd., 356-357 (2003) 418.
- (12) B.Bogdanovic, M.Schvictrardi: “Ti-doped alkali metal aluminum hydrides as potential novel reversible hydrogen storage materials” , J. Alloys Compd. 253, pp.1-9, 1997.
- (13) Gross, K. et al., Hydride development for hydrogen storage, DOE Hydrogen Program FY2002 Progress Report, III.C.6.
- (14) Z.P.Li,B.H.Liu,K.Arai,N.Morigazaki,and S.Suda: “Protide compounds in hydrogen storage systems,” J.Alloys Compd.,356-357,pp.469-474,2003
- (15) Y.Kojima, K.Suzuki, K.Fukumoto, M.Sasaki, T.Yamamoto, Y.Kawai, Int. J. Hydrogen Energy, 27, pp.1029-1034, 2002
- (16) S.C.Amendola, S.L.Sharp-Goldman, M.S.Janjua, N.C.Spencer, M.T.Kelly, P.J.Petillo, and M.Binder:
- (17) A.Zuttel, P.Wenger, S.Rentsch, P.Sudan, and P.Mauron, J.Power Sources, 118, pp. 1 -7, 2003.
- (18) S.Orimo, Y.Nakamori, and A.Zuttel, Mater. Sci. Eng. B, 108, pp.51-53, 2004.
- (19) K.Miwa, N.Ohba, S.Towata, Y.Nakamori, and S.Orimo, Phys.REV. B, 69, p.245120, 2004.
- (20) P.Chen, Z.Xiong, L.Luo, J.Lin, K.L.Tan, “Interaction of hydrogen with metal nitrides and imides, ” Nature, 420, pp. 302-304, 2002.
- (21) Y.H.Hu and E.Ruckenstein, J. Phys. Chem. A, 107, pp.9737-9739, 2003.
- (22) T.Ichikawa, N.Handa, S.Isobe, H.Leng, and H.Fujii, J. Phys. Chem. B, 108, pp.7887-7892, 2004.
- (23) Y.Nakamori, G.Kitahara, K.Miwa, S.Towata, and S.Orimo, Appl. Phys. A, 80, pp.1-3, 2005.
- (24) W.Luo: “LiNH₂-MgH₂: A viable hydrogen storage system,” J. Alloys Compd., 381, pp.284-287, 2004.
- (25) Jianjiang Hu, Guotao Wu, Yongfeng Liu, Zhitao Xiong, Ping Chen, Kenji Murata, Ko Sakata, Gerd Wolf: “Hydrogen Release from Mg(NH₂)₂-MgH₂ through Mechanochemical Reaction,” J. Phys. Chem. B, 110, pp. 14688-14692, 2006.
- (26) 財エネルギー総合工学研究所, シンガポール国立大学, 「車載水素貯蔵用のマグネシウム－窒素系固体材料の研究開発」 燃料電池自動車・家庭用燃料電池の実用化に向けて2007, NEDO平成18年度成果報告シンポジウム, 7月13日 (ポスター発表 要旨集)。
- (27) Sunita Satyapal, Hydrogen Storage, 2007, DOE Hydrogen Program, Merit Review and Peer Evaluation Meeting
- (28) ARI「JHFC総合効率検討結果」報告書, 平成18年3月
- (29) Susan Trulove, “Novel sugar-to-hydrogen technology promises transportation fuel independence.” <http://www.vtnews.vt.edu/story.php?relyear=2007&itemno=300>



岡田 康 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 主管研究員

高山大輔** (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

鳥飼航洋*** (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



(2) プロジェクトの特徴 —ポートフォリオ
的技術開発戦略

本調査では従来の技術戦略ではあまり馴染みのない「ポートフォリオ」という考え方を取り入れていることが特徴の1つとなっている。

本来、「ポートフォリオ」とは「様々な証券の入った書類匁」の意味で、資産運用において様々な資産ないし株式銘柄を組み合わせ、投資を分散させることでリスクを低減する手法である。これは企業の経営戦略にも応用され、限られた経営資源を、リスクを低減しつつ最も効率的に配分できる事業の組合せを決定するための分析・管理手法となっている。

本プロジェクトでは「将来の不透明性、不確実性に対応した厚みのあるポートフォリオ的技術開発戦略」の策定を目指したが、上記の手法を技術戦略の策定に応用したものである。将来の不透明性、不確実性に留意しつつ、着実に政策目標を達成していくための技術開発への資金配分の考え方を示すことで、多様な将来の展開あるいは想定外の事態の展開に柔軟に対応し、それに起因するリスクを低減することに力点を置いた技術戦略と言える。

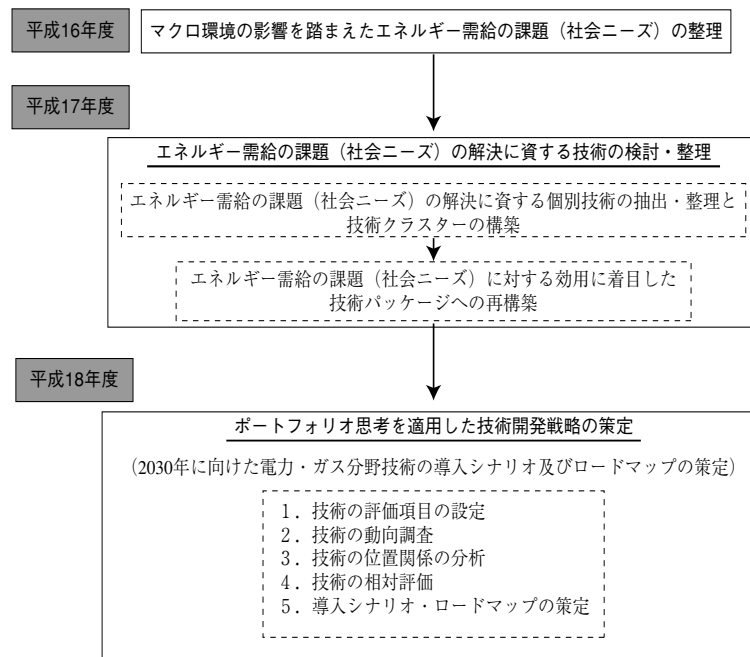


図1 電力・ガス総合技術開発戦略策定のフロー

シナリオ分析とは異なり、多様な将来展望の中のどれが基本ケースか、といった問題に固執することなく、それら様々な事態が起こる可能性、起きた場合に当該産業に与えるインパクト等を考慮して、限られた研究資金をどのように配分すれば当該産業の政策目的（エネルギー政策に関していえば3Eあるいはそれを展開した諸目標）を的確に達成できるか、という観点から技術戦略を構築した。

2. 電力・ガス総合技術開発戦略策定の手順

各年度の検討フローは図1に示す通りである。以下で各ステップの説明を行う。

（1）エネルギー需給の課題（社会ニーズ）の整理

わが国の少子高齢化の進展、アジア地域における急速な経済発展といった、今後2030年程度の中長期を展望したときに、現状から継続的におこりうる、もしくは今後おこると予想される社会・経済面のマクロ環境を考察し、安定供給確保、環境への適合、持続的な経済

成長への寄与というエネルギー政策の理念と照らし合わせて、これらのマクロ環境がどのような影響を与えるかを検討し、どのような対応が必要になるかという観点から、エネルギー需給の課題（社会ニーズ）を整理した（表1参照）。

（2）エネルギー需給の課題（社会ニーズ）を解決するための技術の整理

（1）で整理したエネルギー需給の課題（社会ニーズ）を解決していくために、今後エネルギー分野で必要と考えられる技術について次の3つのステップで俯瞰的な整理を行った。

① エネルギー分野に関する技術の抽出

エネルギー資源の井戸元（資源確保）から需要家（エネルギー消費）までのエネルギー・サプライチェーン上にエネルギー分野に関連する個別技術を網羅的に抽出した。

なお、この抽出作業では網羅的に整理する観点から、技術開発要素の有無は、考慮していない。また、原子力に関しては、他で精力的に検討されているため、原則として検討対象外とした。

表1 エネルギー需給の課題（社会ニーズ）の整理結果

エネルギー需給の課題				
基本的な課題			詳細な課題	
安定供給の確保	① 供給面からの制約への対応に加え需要面からの制約への対応へ	・従来の石油依存度の下、中東依存度低下といった供給面からの約への対応のみでなく中国、インドをはじめとするアジア地域等エネルギー需要増大という需要面からの制への対応	多様なエネルギー資源の活用において ・一次エネルギー供給の絶対量の拡大 ・他国の諸情勢に左右されないわが国独自のエネルギー資源を確保 ・価格変動に応じたエネルギー選考へ対応	・「多様なエネルギー資源の活用」供給途絶リスクの少ないエネルギー資源の活用に加えて ・「（海外の）未活用資源の活用」 ・「自給率の向上（国産エネルギー源等の活用）」
	② 水際（国際面）リスク対応に加え国内リスク対応へ	・テロによる設備破壊、社会受容性に起因する設備立地対応の長期化等の国内における安定供給に関わるリスク等への対応、IT技術の浸透に伴う都市機能の高度化等から、現状の自然災害や事故を想定した安全対策の範囲だけでなく、一層強靱なエネルギー需給構造への要請の高まり。	一層強靱なエネルギー需給構造への要請の高まり等の観点から、 ・国内外の不可避的要因 [※] による大規模影響を緩和し二次災害等を抑制 ※不可避的要因： 国際情勢に起因する資源供給途絶リスク、災害・有事、供給設備の一斉停止、国内のエネルギー供給設備の新增設に関わるリスク、従来の想定を超えた記録的な異常気象等による国内の需要急増リスク等	・「不可避的要因による大規模影響、二次災害等の抑制」 不可避的要因による影響の可能な限りの抑制。影響発生後の早期復旧。外部からのエネルギー供給が途絶えても影響を受けない最低限の拠点の確保を可能とする。
	③ 安全・安心への要求の高まり			
	④ 将来の不透明性不確実を視野に	・世界の需要は増大する一方で、少子高齢化が進むわが国ではエネルギー需要が成熟化するとともに、地球環境面の対応や制度改革、エネルギー価格の高騰とも相まって、 ・エネルギー需要構造の変化 ・エネルギー供給形態の変貌する可能性	・制度改革や地球環境面の対応等から、エネルギー供給形態が変貌し、電力・ガスマットワーク運用者以外の第三者が大量に接続された場合、電力・ガスマットワークの供給品質や信頼度に影響が出る場合もある。よって、第三者接続者と電力・ガスマットワークの調和を図り、更に、エネルギーの安定供給の観点から、現状の供給品質・信頼度の維持・向上の可能性を検討 ・需要家の選択を通じた需要構造の多様化の結果、国内外のエネルギー安定供給に関わるリスク等による影響が緩和される可能性を検討 ・エネルギー需要成熟化に伴う設備投資サイクルの長期化等の中でも安定供給や資源・環境制約への対応を図る手段を確保	・「第三者接続者と電力・ガスマットワークの調和」 ・「電力・ガス供給（変換）の多様化の可能性の検討」 ・「系統電力と分散型電源・電力貯蔵設備が調和した電力ネットワークの供給品質・信頼度維持、及び向上の可能性の検討」 ・「ガスマットワークと分散型ガス発生源が調和した供給品質・信頼度維持、及び向上の可能性の検討」
			・省資源の観点・国内の安定供給の観点から需要量やエネルギー供給量を減らす	・「エネルギーの高度有効活用」 ・「井戸元（資源採取）から需要家（エネルギー消費）までのトータルなエネルギー利用効率の向上」 ・「循環型社会（3R）への対応」
			・経済活動とCO2排出量の連鎖を効果的に断ち切る	・「非化石エネルギーの活用」 ・「CO2の排出量が相対的に少ない化石エネルギーの活用」 ・「CO2の分離・回収・隔離」
			・CO2削減の活動の円滑化	・「需要家の需要形態に応じたベストソリューションの提供」
環境への適合			① 地球環境を始めとする地球大での対応	・中国、インドをはじめとするアジア地域等の世界的なCO2排出量の増大に対応した、さらなるCO2の削減と経済発展を両立する地球大での取組
国際的視点による技術開発				

② エネルギー分野に関する技術の体系化

網羅的に抽出したエネルギー分野に関する技術を俯瞰するため、井戸元から需要家までのエネルギー・サプライチェーン上での位置付けと活用可能なエネルギーの種類について、整理し、体系化した。（詳細は省略）

③ 「技術クラスター」という概念での整理

前項での整理・体系化の結果、個別技術の分類が200以上となったため、技術の特性が同類なもの等を40個程度の「技術クラスター」という単位でまとめた（表2参照）。

（3）技術パッケージの構築

（2）で整理した技術が、どのエネルギー需給の課題（社会ニーズ）の解決に資するかを明らかにするため、各エネルギー需給の課題（社会ニーズ）の解決の方向性毎に個別技術を「技術パッケージ」という解決群に整理した（図2参照）。

電力・ガス分野の個別技術が、どのエネルギー需給の課題（社会ニーズ）に対応しているかを表3に示す。

表2 「技術クラスター」単位の整理結果一覧表

大分類	中分類	技術クラスター
転換 [資源]	気体	気体
	液体	液体
	固体	固体
転換 [供給]	気体	ガス化
		水素製造
	熱	ボイラ
		ヒートポンプ
		冷凍機
		原子力・熱
	電気	燃焼系の発電関連の技術
		ガスタービン
		エンジン
		汽力発電
		その他複合発電
		発電機
		廃棄物
		バイオマス
		水力
		風力
		海洋
		地熱
		燃料電池
		熱電素子
		太陽
		原子力
	物質・熱・電気複合	コプロダクション
転換 [利用]	熱	産業
	熱	民生
	電気	電気
	動力他	エンジン
		モーター
		照明・A V等（制御用通信）
転換 [変換]	気体（水素）	気体（水素）
	液体・固体	液体・固体
	熱	熱
	電気	電気
輸送	気体、液体、固体	気体・液体・固体
	熱	熱
	電気	電気
貯蔵	気体、液体、固体	気体・液体・固体
	熱	熱
	電気	電気
制御	気体、液体	気体・液体
	熱	熱
	電気	発電制御
		系統制御
		電力供給制御（系統保護・保安）
		計測・監視
	気体、熱、電気利用制御用通信	気体・熱・電気制御通信
排出物処理	CO2	分離・回収
		隔離
	NOx, SOx, 灰	NOx, SOx処理

調査の対象外とした技術クラスター

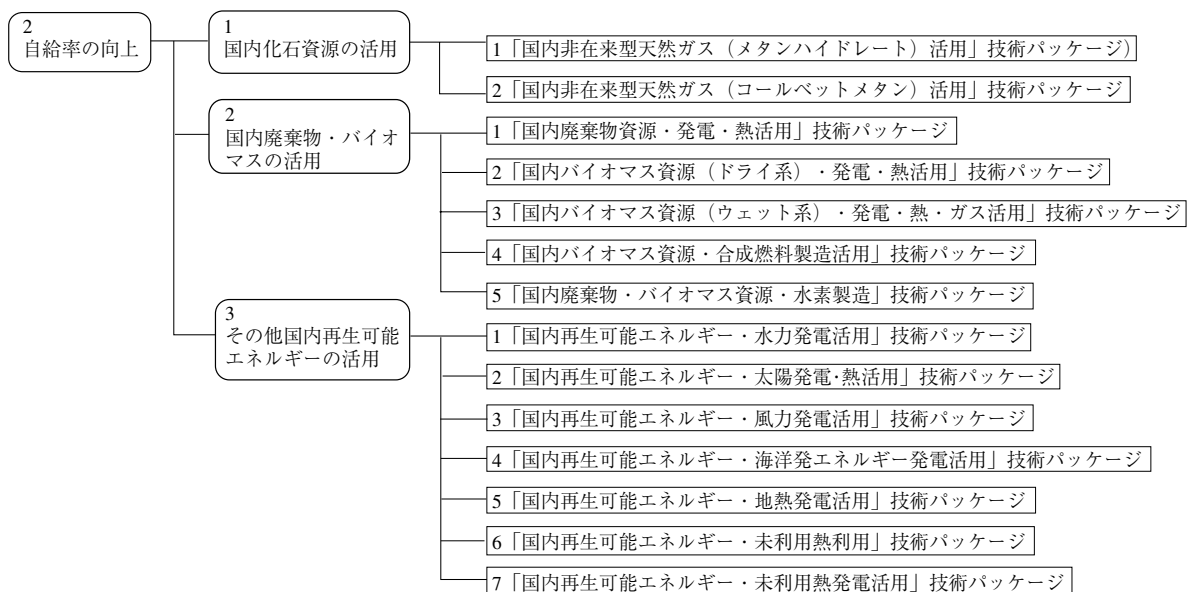


図2 エネルギー需給の課題に適合した技術パッケージの整理結果の例

3. 電力・ガス総合技術開発戦略（導入シナリオ、技術ロードマップ）の策定

平成18年度においては、表3で整理された電力・ガス分野の技術をもとに、ポートフォリオ思考を適用した技術開発戦略の策定を行った。

導入シナリオ・ロードマップの策定にあたっては、まず、電力・ガス分野の技術群に対して、効用、開発コスト、開発の難易度といった観点から相対的な評価を実施し、電力・ガス事業に係る技術の、エネルギー需給の課題（社会ニーズ）を解決していく上での、位置付け、重要性等を明確化する技術の評価を行った。図3に技術の評価手順の概略を示す。

評価結果に基づいて、電力・ガス分野の技術について、今後実用化に向かう道筋や導入・普及に必要な関連施策等を検討し、さらに、各個別技術の求められる機能の向上等を時間軸上に示す導入シナリオと、個別技術単位での2030年に向けた技術ロードマップを策定した。導入シナリオは、エネルギー需

給の課題（社会ニーズ）毎に図とその解説として記載した。技術ロードマップについては、エネルギー利用の上流から下流という流れに従い、個別技術単位で記載した。

（1）導入シナリオ

① 安定供給の確保

(a)多様なエネルギー資源の活用

石油依存度の低下、中東依存度低下といった供給面からの制約への対応に加え、中国、インドをはじめアジア地域等のエネルギー需要増大といった需要面からの制約への対応が求められる。

そのためには、「海外の未活用資源の活用」や国産エネルギーの活用による「自給率の向上」といった、多様なエネルギー資源の活用による、エネルギー供給の絶対量の拡大が考えられる。

「海外の未活用資源の活用」の観点からは、低品位炭（褐炭、亜瀝青炭）、非在来型石油（オイルサンド、オイルシェール、オリノコタール）、中小規模ガス田ガス及び非在来型天然ガス（中小規模ガス田ガス、タイトサンドガ

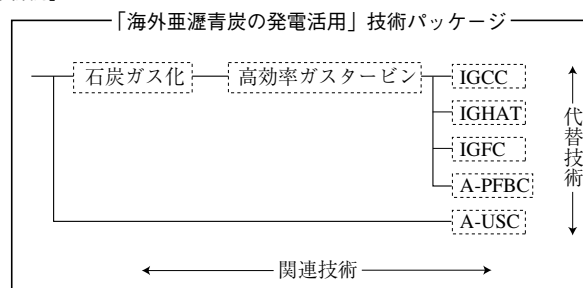
1. 技術の評価項目の設定

- ①「開発コスト」：現状の技術レベルに対して、開発目標を達成するためのコスト
- ②「開発の難易度」：現状の技術レベルと開発目標とのギャップ

2. 技術動向調査：開発コスト・開発の難易度・効果という3つの評価項目に即し、個別技術ごとに評価項目に即したデータベースを作成する。

3. 技術の位置関係の分析：平成17年度に整理した技術パッケージ内の個別技術同士で技術の位置関係（代替技術、関連技術）を分析する。

【技術の位置関係の分析例】



4. 技術の評価

- ① 技術の位置関係の分析から、エネルギー需給の課題に資する代替関係にある技術の相対評価対象を抽出。
- ② 技術動向調査（技術調査表）のデータを基に、相対評価を実施。

図3 技術の評価手順の概略

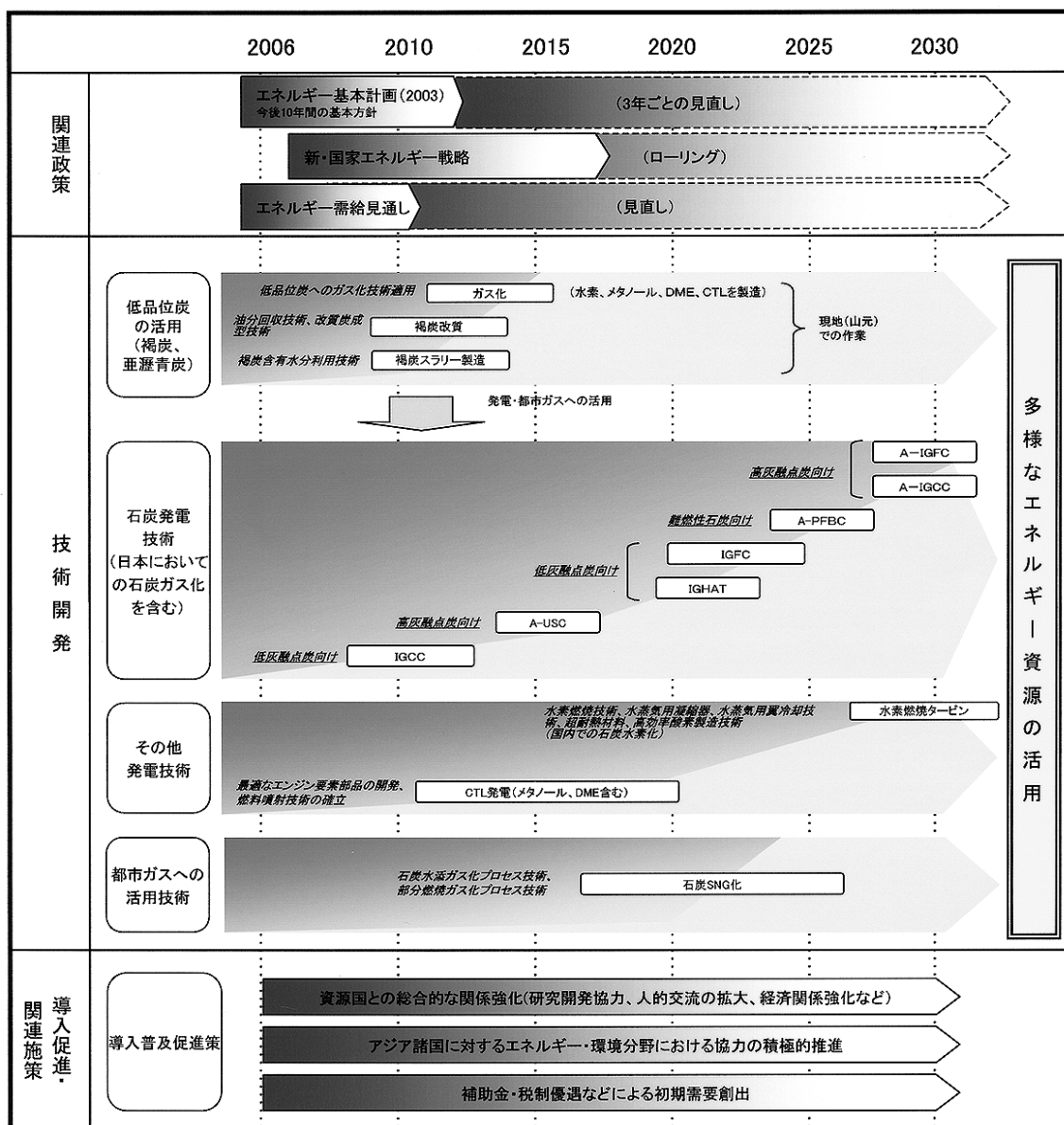


図4 安定供給の確保—多様なエネルギー資源の活用（低品位炭活用の導入シナリオ）

ス、コールベットメタン、シェールガス、メタンハイドレート）の活用について以下の検討がなされた。

- (i) 低品位炭：改質及びガス化技術，発電への適応技術，都市ガスへの活用技術等
- (ii) 非在来型石油：井戸元でのアップグレード技術等
- (iii) 中小規模ガス田ガス：輸送関連技術等
- (iv) 非在来型天然ガス：回収技術等

図4は低品位炭の導入シナリオである。

(b) 系統電力と分散型電源・電力貯蔵設備が調和した電力ネットワークの供給品質・信頼度維持，および向上の可能性の検討

エネルギー自給率の向上という社会ニーズの高まりから，自然エネルギーである太陽光発電や風力発電等の導入拡大が予想されている。しかし，自然エネルギー発電は気象状況による出力変動が大きいいため，大量に系統連系される場合には，電力ネットワークの電圧や周波数等の電力品質を維持するため，新たな対策が必要になると考えられる。また，自然エネルギー発電に限らず分散型電源が多数

普及した場合、系統の電圧や周波数調整能力が低下し、電力品質が低下する可能性があるため、電力品質調整能力の確保のための対策も必要である。

対策の方向性としては、系統に対する分散型電源の導入割合等により、経済性、運用性等の面から、分散型電源システムと系統電力システムのそれぞれの技術開発が求められる。

(i) 分散型電源普及時の電圧・周波数基準内への調整および安定度の確保

電力品質調整の対策を実施する場所を意識し、分散型電源システム、系統電力システム、需要家内での対応という観点で技術の導入シナリオの検討を行った。概要は以下のとおりである。

● 分散型電源システム

自然エネルギー発電の出力安定化に関しては、二次電池等の電力貯蔵装置の技術開発が重要と考えられる。一方で、制御性の良いガスタービン等の回転機型分散型電源を系統の電力品質調整に積極的に活用することも可能であり、将来的には、分散型電源や電力貯蔵装置、パワエレ機器を統合的に制御し、需要家に多品質の電力を供給するシステムや、電気利用機器までも統合的に制御して需給調整を行うようなシステムが考えられ、実現には制御通信技術が鍵となる。

● 系統電力システム

電力系統側では、発電所や変電所等に設置した電力貯蔵装置や静止型電力補償装置(SVC)等のパワエレ応用機器を活用して集中的に電力品質を調整することが考えられる。電力貯蔵装置では大出力、大容量化、長寿命化、低コスト化、パワエレ応用機器では低コスト化、高機能化、高効率化等の技術開発が求められ、また、SiC等の新しい半導体素子の開発も期待される。さらに、

これらの各種系統構成機器を協調的に制御するシステムの開発が行われている。

● 需要家内での対応

需要家側の電力品質調整は、自分自身を守るという観点から瞬低と停電対策がメインであり、電力貯蔵装置の技術開発が求められる。最近では、負荷平準化と瞬低対策を一体化した二次電池や、電気二重層キャパシタを活用した瞬低対策装置の普及が始まっている。将来的には、需要家内に設置された電力貯蔵装置や電気利用機器を制御することにより、需要家が積極的に電力品質維持へ貢献することが考えられ、技術開発が行われている。

(ii) 分散型電源普及時の短絡容量抑制

ループバランスコントローラ(LBC)等のパワエレ応用機器を活用して短絡容量の増大を抑制する技術や、超電導限流器等の短絡電流を遮断器の遮断容量以下に抑制する技術の開発が重要である。

(iii) 分散型電源普及時の高調波抑制

これまで、高調波対策としてはLCフィルタが主に用いられてきたが、最近幅広い次数の高調波に対応できるアクティブフィルタの適用が拡大してきている。技術的には既に成熟レベルにあり、今後は、設置スペースの縮小や、電圧変動対策や電圧フリッカ等への適用拡大等、高性能化、付加価値化の技術開発が行われると考えられる。また、高調波の発生自体を抑制する技術開発も重要であり、変換器回路技術や次世代パワエレデバイスの技術開発が求められる。

② 環境への適合

(a) エネルギーの高度有効利用

(i) 電力サプライチェーンにおけるエネルギー利用効率の向上

表4 電力サプライチェーンにおけるエネルギー利用効率向上に資する技術

電気事業用発電技術 (集中型電源)	石炭を燃料とする発電技術	A-USC,IGCC,IGFC,IGHAT等
	天然ガスを燃料とする発電技術	コンバインドサイクル, AHAT, GT-FCハイブリッドサイクル等
電力輸送技術	大容量送電	UHV送電, 直流送電
	超電導機器	超電導送電, 超電導変圧器, 超電導発電機
電力変換・貯蔵技術	電力貯蔵装置	二次電池, 電気二重層キャパシタ, SMES, 超電導フライホイール
	電力変換器	高電圧化, 回路・制御方式, 次世代半導体素子
電力利用技術	モータ	パワエレ活用, 超伝導技術の応用等
	照明	次世代素子の適用等
	空調・給湯機器	COP向上, コンパクト化, ハイブリッド化, 蒸気供給等
	蓄熱機器	次世代蓄熱方式等

表5 ガスサプライチェーンにおけるエネルギー利用効率向上に資する技術

分散型電源	燃料電池	セルスタックの長寿命化, 大容量化, ハイブリッド化等
	ガスタービン	高温化, タービン翼耐久性向上, 大容量化等
	ガスエンジン	大容量化, 小型低コスト化, HCCI技術適用等
空調・給湯他	空調・給湯機器	COP向上, 耐久性向上, コンパクト化等

電力サプライチェーンにおいては発電・輸送・変換・貯蔵・利用技術エネルギー利用効率の向上について検討を行った(表4)。

(ii) 都市ガスサプライチェーンにおけるエネルギー利用効率の向上

都市ガス(天然ガスを対象)サプライ・チェーンにおいては, LNGの気化から輸送までは既存技術とその延長で対応可能であるため, 利用(分散型電源, 空調関係)技術の効率向上について検討を行った(表5)。

(iii) 熱のサプライチェーンにおけるエネルギー利用効率の向上

熱のサプライチェーンにおいては, 電力, 都市ガス, 石油等から熱(蒸気, 温水, 冷水)が作られる。熱に変換する機器については, 電力・都市ガスのサプライチェーンで取り上げたので省略し, ここでは熱の輸

送・貯蔵について, 季節間貯蔵, 中・高温熱バッチ輸送等を対象として, 検討を行った。

(iv) エネルギーマネジメント

需要家(需要地)においては, エネルギー消費機器の機器単位でのエネルギー利用効率の向上だけでなく, エネルギーマネジメント技術を駆使した電力, 熱の総合的なエネルギー利用効率の向上も求められており, 関連技術として, HEMS,BEMS等の今後の活用拡大について検討を行った。

(b) CO₂の分離・回収・貯留

石油・天然ガス・石炭等の化石燃料は, 今後もエネルギーの主要部分を占めると考えられるが, 地球温暖化問題がクローズアップされる中, これらの化石燃料を使用する火力発電所や化学プラント等で発生する二酸化炭素

(CO₂)を分離・回収し、海洋や地中に隔離・貯留する技術の研究開発が進められている。

これらの技術は、大量のCO₂を確実に削減できる可能性があり、世界的に注目されている一方で、プラント効率の低下や発電原価の上昇を伴う等の課題を抱えている。

ここでは、CO₂の分離・回収（膜分離法、物理的分離法、化学分離法等）・貯留（地中

貯留、海洋貯留等）に関する技術に関して、追加的に必要なエネルギー消費量の低減や設備コストの低減を念頭に導入シナリオの検討を行った。

（２）ロードマップ

図５に「2030年に向けた電力・ガス分野技術のロードマップ」の例を示す。

電力・ガス関連技術	2010	2015	2020	2025	2030
褐炭改質	実証プラント (インドネシア) 600t/d	5000t/d			
	油分回収技術 改質炭成型技術	大型化			
褐炭スラリー製造					
	界面活性剤を使用したスラリー化技術 褐炭が含有する水分を利用したスラリー化技術	大型化 スラリー利用先の拡大			
石炭ガス化	パイロットプラント 150t/d(酸素吹) 200t/d(空気吹)	1700t/d	実証機 1000t/d級(酸素吹)		
	酸素吹き技術 空気吹き技術 噴流床技術	空気吹き石炭ガス化炉	高効率酸素製造技術 酸素吹き石炭ガス化炉	流動床ガス化炉	
石炭CTL合成 (メタノール、DME合成含む)		3000 t/d(国内) 3000 t/d(海外) 1t/d試験装置(PSU)(インドネシア)	6000 t/d(国内)		
	アップグレーディング技術 ガス化技術 FT合成技術	褐炭液化技術の適用検証 技術者・運転員研修			
非在来型石油改質 (オイルサンド、オイルシェール)					
	オイルシェール乾留技術	ビチューメンのオンサイト改質技術 オイルサンド層からのビチューメン増進回収技術	ビチューメンの油層内改質技術 先進・複合型オイルシェール開発技術		
小規模液化プラント (LNG化)	液化規模:100~500万トン/年 効率:13~15kW/tpd 建設期間:38~48ヶ月		液化規模:0.1~100万トン/年 効率:8~10kW/tpd 建設期間:18~24ヶ月		
	概念設計 F.S.		スケールダウン技術		
フローティング型洋上プラント (LNG、ガスハイドレート、合成燃料)		概念設計	実証プラント	実用化	
		オペレーション手法 安全システムの確立			
ガスハイドレート化		500トン/dの製造システム確立			
		冷熱利用NGH製造技術 NGHコンテナ輸送技術 NGH再ガス化・利用技術	NGH製造技術 NGH船輸送技術		

図５ 2030年に向けた電力・ガス分野技術のロードマップの例

図中、線図では実用化時期に近づくにつれ影が濃くなる。線図の上段に効率、価格等の数値目標、下段に要素技術、技術課題等を記載している。

4. おわりに

「電力・ガス総合技術開発戦略」は、平成16～18年度における資源エネルギー庁の委託調査として、とりまとめたものである。

3年間にわたる委員会委員の精力的なご検討及び資源エネルギー庁関係課のご協力に感

謝すると共に、今後、2030年に向けて具体的な技術開発が行われていく中で、本調査における検討内容が活用され、また、エネルギー基本計画や「新・国家エネルギー戦略」等の見直しに合わせて、本調査内容のブラッシュアップが図られることを期待するものである。

なお、今回策定を行った「電力・ガス総合技術開発戦略」導入シナリオ及びロードマップの詳細については、(財)エネルギー総合工学研究所ホームページ (<http://www.iae.or.jp/>) の「研究成果の紹介」>「電力・ガス総合技術開発戦略」を参照されたい。

[お知らせ]

エネルギー技術情報プラットフォームの運用開始について

(財)エネルギー総合工学研究所
エネルギー技術情報センター

1. はじめに

当研究所では、このたび賛助会員にエネルギー技術情報を適切に提供するための限定ウェブページとして「エネルギー技術情報プラットフォーム」(略称ETIP, Energy Technology Information Platform)を構築しその運用を開始いたします。賛助会員各位にログインのためのパスワードおよびIDをお知らせして、11月1日より試験運用をスタートさせ、平成20年1月1日からの本格運用を予定しています。なお、本ウェブサイトは、当研究所に特に関係の深

い政府関係機関および大学等の研究者の方々にもご案内しご参考に供して参ります。

賛助会員企業各位また政府関係機関・大学等研究者各位におかれましては、ETIPサイト(<http://etip.iae.or.jp/>)をご覧頂き、ご意見・ご要望をお寄せ下さいますようお願い申し上げます。

2. ETIPの概要

ETIPは次の4つの部分から構成されます(図1参照)。



図1 エネルギー技術情報プラットフォーム(ETIP)のログインページ(試作版)

表1 エネルギー技術情報コンテンツに含まれる技術課題

大分類	中分類	小分類（技術課題）
1. エネルギー転換・供給	1.1. 化石エネルギー	1.1.1 クリーンコール発電
		1.1.2 化石系液体燃料製造
	1.2. 原子力エネルギー	1.2.1 原子力発電開発利用の動向
		1.2.2 軽水炉
		1.2.3 高速増殖炉
		1.2.4 高温ガス炉
		1.2.5 核燃料サイクル
		1.2.6 放射性廃棄物処分
		1.2.7 核融合
	1.3.再生可能エネルギー	1.3.1 太陽エネルギー
		1.3.2 風力エネルギー
		1.3.3 廃棄物エネルギー
		1.3.4 バイオマスエネルギー
1.4. 電力供給	1.4.1 配電・系統制御	
	1.4.2 電力貯蔵	
1.5. 水素エネルギー	1.5.1 水素製造	
	1.5.2 水素インフラ	
2. 二酸化炭素回収・貯留		
3. エネルギー利用	3.1. 民生部門	3.1.1 燃料電池
		3.1.2 機器
		3.1.3 都市エネルギー技術
	3.2. 運輸部門	3.2.1 燃料電池自動車
		3.2.2 ハイブリッド/電気自動車
	3.3. 産業部門	3.3.1 産業間連携

（１） エネルギー技術情報コンテンツ

主要エネルギー技術課題に関する最新の情報をまとめたもので、当面表1に示す24のテーマ（総合科学技術会議第三期計画の内容等を参考に選択）を掲載いたします。随時アップデートに努めるとともに、将来的にはさらにテーマ数を増やしていく計画です。

（２） ヘッドライン

エネルギー関連の最新ニュース、関連情報のエッセンスを掲載いたします。

（３） 掲示板

当面は、会員各位の要望・質問の受付に使用いたします。将来的には機能を拡充する予定です。

（４） 研究成果ライブラリー

当研究所が行った様々な調査研究の報告書類、および普及活動としての各種刊行物ならびに催し物のサマリーなどを掲載していきます。

3. エネルギー技術情報コンテンツ

主要エネルギー課題に関する最新情報を1テーマ当り10～20ページ（A4換算）にまとめたものであり、ウェブ上で閲覧することができます（図2参照）。図表について、画面上で解像度が不足して読み取りにくい場合は、クリックにより拡大できます。また、全文をPDFファイルとしてダウンロードも可能です。テキストは全文検索を行うことができます。

コンテンツの内容は、テーマによって様々ですが、次のような項目を含むことを原則としています。

- ・当該エネルギー技術の定義、意義
- ・商業化または研究開発の状況、現状の課題
- ・当該技術の評価（メリット／デメリット、実現可能性、など）
- ・引用文献

コンテンツ作成に当たっては、幅広く情報を収集するとともに、当研究所独自の視点による

とりまとめを行うように努めています。原則として、当研究所研究員が執筆していますが、一部外部の識者に依頼したものもあります。記事ごとに執筆者の氏名を記載しています。

4. 研究成果ライブラリー

下記のような調査研究報告書類、各種刊行物およびシンポジウム等行事のサマリーなどを、タイムリーに掲載していきます。(ライブラリーの一部は、時期が遅れますが、どなたでもアクセス可能な当研究所のホームページ(<http://www.iae.or.jp/>)に従来どおり掲載いたします。)

(1) 調査研究報告書類

- ・調査研究要旨集（1報／年）
- ・受託調査研究報告書（随時）
- ・外部発表・講演資料（随時）
- ・エネルギー技術に関するアンケート調査報告書（1報／年）
- ・エネルギーに関する公衆の意識調査報告

書（1報／年）

(2) 普及活動資料類

- ・月例研究会サマリー（毎月）
- ・季報エネルギー総合工学（4報／年）
- ・新エネルギーの展望（2報／年）
- ・エネルギー総合工学シンポジウムサマリー（1報／年）
- ・賛助会員会議（1報／年）

5. さいごに

「エネルギー技術プラットフォーム」ETIPは、賛助会員企業および政府関係機関がエネルギー技術関連政策の企画立案を行うに際してご参照いただくことを目的としてスタートさせるものです。賛助会員各位のご要望・ご指摘により、テクニカルな不具合の修復はもとより、その内容をより良いものとして参る所存です。遠慮なく、ご意見・ご要望を、掲示板に書き込んでいただきますようお願い申し上げます。

燃料電池

3.1.1.1 概要

定置用燃料電池の種類を表3.1.1-1に示す。使用する電解質に応じて作動温度や燃料が異なる。PAFC(リン酸形: Phosphoric Acid Fuel Cell)、PEFC(固体電解質形: Polymer Electrolyte Fuel Cell)は低温作動型であり、作動温度が低く起動・停止性が良い。PAFCは商品化しており実績がある。PEFCは現在大規模実証中で商品化にあたり一歩である。PEFCはFCV(燃料電池自動車)にも使われる。MCFC(熔融炭酸塩形: Molten Carbonate Fuel Cell)、SOFC(固体酸化物形: Solid Oxide Fuel Cell)は高温作動型であり、起動・停止は低温作動型のPAFC、PEFCに比べて難しい。MCFCは既に商品化の段階に入り、SOFCは実証が始まったところである。低温作動型と高温作動型の大きな違いは電池本体(セル)への燃料である。低温作動型は水素イオンを用いるので燃料は水素に限定される。厚燃料が化石燃料の場合は別途改質器が必要である。従って、例えばPEFCの発電効率を考えると、水素ベースの発電効率は50%(HHV)にもなるが、一次燃料ベースになると改質ロスを含め35~40%(HHV)程度になる。低温作動型の燃料電池システムには、改質器と電池(セル)の性能の両方が大きなインパクトを与えそれぞれ性能とマッチングが極めて重要である。高温作動型は内部改質が可能なので燃料は水素に限定されず一酸化炭素を燃料とすることが出来る。また電池内で内部改質が可能なのでメタン系燃料の使用も比較的容易である。バイオマス由来の燃料でも精製して直接に使用可能なものが大きなメリットである。水素と燃料電池はしばしば同一に議論されるが水素との相性は作動方式で異なることに留意する必要がある。

定置用燃料電池の電気出力と発電効率の関係を図3.1.1-1に示す。融合するエネルギー変換器であるガスエンジン(GE)、ガスタービン(GT)等の原動機の発電効率も比較・参考のために掲載した。図はあくまで概要で、一次燃料基準の発電効率で比較している。燃料電池の発電効率を論じる場合には出力規模や融合する原動機の効率等と比較しながら行うのが分かり易い。PEFCは1~数10kWの小規模の発電向き。発電効率は30~40%(HHV)程度であり家庭用から小規模民生用のコジェネレーション用途がふさわしい。同規模のGEやMG(マイクロガスタービン)よりも潜在的に性能が良い。PAFCはPEFCよりも数100kW程度の発電に向いている。数100kW規模では近年GEの性能向上が著しくコスト面でPAFCの普及は苦戦している。MCFCは数100~数1000kWの発電に向いている。大型GEの効率とも充分に競合できる。SOFCは1kW規模から1000kW程度までの発電規模に向いており発電効率は4つの燃料電池システムの中で最も高い。AOC(advanced Combined Cycle)の発電効率に匹敵する性能を出す可能性がある。SOFC、MCFCは作動温度が高く、GTやST(蒸気タービン)と組み合わせると数十MW級のコンビナードサイクルとする事が出来る。この場合には発電効率は60%(HHV)程度まで向上し、将来、分散発電システムの中核となるものとの期待が大きい。なお、実用にあたっては、発電効率だけでなく、コジェネレーションとしての排熱活用、コストや所要敷地面積など多面的に評価する必要がある。

表3.1.1-1 定置用燃料電池の種類

	リン酸形 PAFC	固体高分子形 PEFC	熔融炭酸塩形 MCFC	固体酸化物形 SOFC
電解質	リン酸水溶液	高分子膜	炭酸塩	セラミックス
エンジン	なし	なし	なし	なし
作動温度	200℃	常温~90℃	650~700℃	750~1000℃
燃料	H ₂	H ₂	H ₂ , CO, CH ₄	H ₂ , CO, CH ₄
燃料内部改質	不可	不可	可能	可能
燃料改質	外部改質	外部改質	外部改質	外部改質
主な用途	民生用 コジェネ	民生用 コジェネ	分散発電	分散発電

サイト内検索

最近の更新

- 3.1.1.1 概要
- 3.1.1.2 燃料電池の作動原理と基本構成
- 3.1.1.3 燃料電池の技術開発ロードマップ
- 3.1.1.4 PAFCの現状と将来
- 3.1.1.5 MCFCの現状と将来
- 3.1.1.6 PEFCの現状と将来
- 3.1.1.7 SOFCの現状と将来
- 参考文献
- PDFファイルのダウンロード

アーカイブ

- 2007年08月

図2 技術情報コンテンツの例(燃料電池)

研究所のうごき

(平成19年7月11日～10月1日)

◇ 第28回評議員会

日 時：7月19日(木) 10:30～11:40

場 所：経団連会館(9階) 901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 評議員の委嘱について

第三号議案 平成18年度事業報告書および決算報告書について

第四号議案 その他

◇ 月例研究会

第259回月例研究会

日 時：7月27日(金) 14:00～16:00

場 所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 革新的実用原子力技術開発(IVNET)提案公募事業

(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 三部貴之)

2. 原子力分野における人材基盤に関する分析と課題

(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 主管研究員 鈴木和人)

第260回月例研究会

日 時：9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. 水素供給インフラ整備のシナリオー水素の供給価格・技術課題等ー

(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 副部長 主管研究員 中村 恒明)

2. 水素革新的技術の研究」の紹介

(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 副主席研究員 坂田 興)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：石垣 幸雄

テーマ：品質別電力供給システム実証研究に係る総合調査ー総合評価クライテリアに関する検討結果についてー

発表先：平成19年 電気関係学会 東北支部連合大会(一般講演)

日 時：8月23日～24日

発表者：石垣 幸雄

テーマ：

(1) 品質別電力供給システム実証研究に係る総合調査ー総合評価モデルに関する計算機シミュレーション結果についてー

(2) 品質別電力供給システム実証研究に係る総合調査ー総合評価クライテリアに関する検討結果についてー

発表先：平成19年 電気学会電力・エネルギー部門大会(一般講演) 電気学会

日 時：9月12日～14日

発表者：小野崎 正樹

テーマ：合成燃料の製造技術と将来動向

発表先：自動車技術会 第5回ガス燃料エンジン部門委員会

日 時：7月10日

発表者：塙 雅一他

テーマ：水素化重質溶剤を用いた褐炭改質による粘結性能の発現

発表先：第16回日本エネルギー学会大会

日 時：8月3日

発表者：石本 祐樹

テーマ：Study of Hydrogen Diffusion and Deflagration in a closed system

発表先：International Conference on Hydrogen Safety(水素の安全に関する国際会議、略称2nd ICHS)

開催地：スペイン

日 時：9月11～13日

発表者：浅見 直人

テーマ：エネルギー分野におけるバイオマスの活用ーバイオマスのエネルギー利用における技術の現状と展開についてー

発表先：バイオマス利用研究会(主催：京都高度技術研究所)

日 時：9月26日

[論文・寄稿]

発表者：正田 知士

テーマ：21世紀のエネルギーとして期待される天然ガスの現状と将来

寄稿先：高压ガス(平成19年8月号)

発表者：小野崎 正樹

テーマ：石炭液化油の物性

寄稿先：分離技術シリーズ9『実用製造プロセス物性集覧』分離技術会編(平成19年8月)

発表者：小川紀一郎

テーマ：新エネルギー発電事例―廃棄物発電―

寄稿先：電気設備学会誌 第27巻第8号 通巻287号（平成19年8月号）

発表者：松井 一秋，鳥飼 誠之

テーマ：自原子力ルネッサンス―欧米の動向―

寄稿先：エネルギー・資源学会誌『エネルギー・資源』（平成19年9月）

発表者：中村 恒明

テーマ：天然ガスと水素社会の展望

寄稿先：日本コージェネレーションセンター「コージェネレーション」（VOL. 22-2号）＜視点・論壇＞（平成19年9月）

◇ 人事異動

○ 7月31日付

（出向解除）

三部貴之 プロジェクト試験研究部 主任研究員

○ 8月1日付

（出向採用）

中村文隆 プロジェクト試験研究部 主管研究員

○ 8月31日付

（退職）

姫野睦子 業務部 主任研究員 兼 総務部
兼 プロジェクト試験研究部

○ 9月1日付

（嘱託採用）

高山 繁 エネルギー技術情報センター 副参事
兼 総務部

三宝淳子 プロジェクト試験研究部 副参事 兼
総務部

（異動）

丸山尚子 業務部 主任研究員 兼 総務部
兼 プロジェクト試験研究部

○ 9月30日付

（出向解除）

橋本孝雄 プロジェクト試験研究部 主管研究員

○ 10月1日付

（嘱託採用）

橋本孝雄 プロジェクト試験研究部 副参事

編集後記

「ワンセグ」という言葉をお聞きになったことがあるだろうか？ 通勤電車の中で見てますよ、というトレンドリーな方もいらっしゃるかも知れない。携帯電話でテレビを見ることができる技術である。携帯でなぜテレビを見なければならぬのか、という疑問はひとまず置く。受信状態がよければ驚くほど良い映像が見られる。テレビが始めの頃の白黒の貧弱な映像を思い浮かべると、なんでこのように小さいものでと、感心するしかない。ワンセグは、地上デジタル放送のハイビジョン放送が12セグメントの電波帯を使うところを、1セグメントだけ使うのでこう呼ばれる。言うまでもなく、小さい画面にあわせて解像度を下げたりデジタルデータの圧縮技術を駆使して、同じプログラムの放送を可能にしているのだ。カセットテープのウォークマンが小さいと感じたのは昔の話で、いまやiPodの時代。これもデジタルデータの圧縮の賜物だ。

ひるがえってエネルギーの世界を見ると、太陽光、風力、バイオマスなどの再生可能エネルギーは、圧縮とは正反対の薄く分散した性格である。コンベンショナルエネルギーの代表格である石炭は圧

縮という言葉に当にびったりであり、石油や天然ガスとともに地球の歴史の中で圧縮されてできあがったエネルギーの形だ。原子力もまた、宇宙創生の歴史の中で圧縮されたエネルギーを解放するものということができるだろう。化石や原子力という圧縮型エネルギーに対する非圧縮型の再生可能エネルギー。情報の伝達効率がデジタル領域の圧縮によって飛躍的に向上することの逆のアナロジーだと言わなくても、非圧縮型エネルギーを効率よく利用することは難しく、コンベンショナルな圧縮型エネルギーの時代を続けざるを得ないことは周知のところである。

言葉の遊びとのそしりを恐れずに言えば、再生可能エネルギーを圧縮できないのならば、利用サイドを圧縮して効率向上をはかるということになる。公共交通機関の利用促進、米国のcar pool, コンパクトシティ、職住接近、時間軸で言えばサマータイム、等々……。それぞれは新しい概念ではないが、粘り強く取り組むべきテーマである。

編集責任者 疋田知士

季報 エネルギー総合工学 第30巻第3号

平成19年10月20日発行

編集発行

財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(8F)

電話 (03) 3508-8894

FAX (03) 3501-8021

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

(印刷) 和光堂印刷株式会社

※ 無断転載を禁じます。