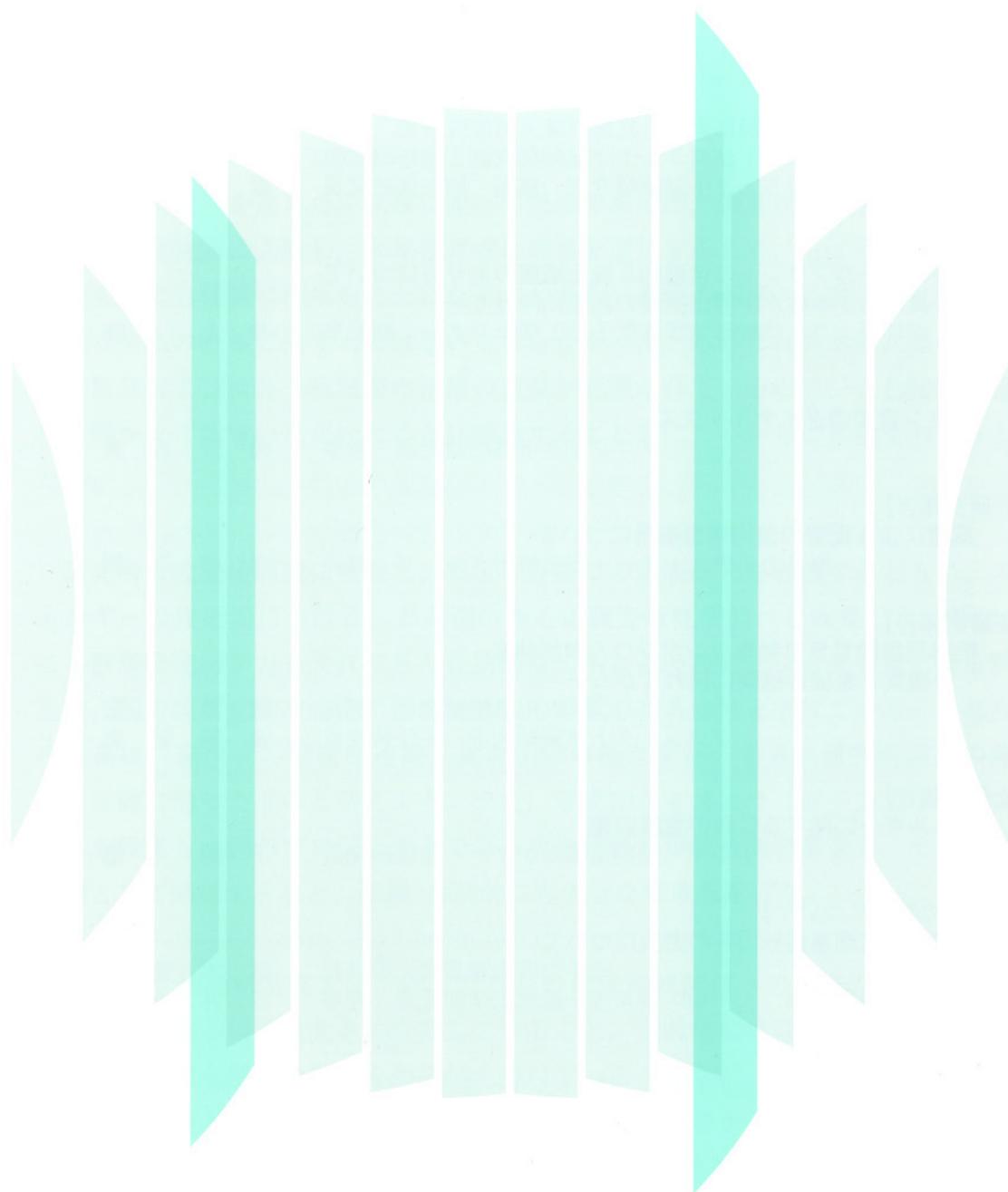


季報 エネルギー総合工学

Vol. 32 No. 2 2009. 7.



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

目 次

【巻頭言】			
研究所の更なる発展を願って			
(財)エネルギー総合工学研究所 研究顧問	高 倉	毅	1
【寄稿】			
メタンハイドレート資源開発をめぐる最新の状況			
(独)産業技術総合研究所			
メタンハイドレート研究センター長	成 田	英 夫	3
【調査研究報告】			
エネルギーモデル分析による合成燃料導入可能性評価			
プロジェクト試験研究部 主任研究員	時 松	宏 治	
プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員	黒 沢	厚 志	12
【調査研究報告】			
今後の原子力プラントの合理的な廃止措置のあり方について			
一具体化する軽水炉廃止措置の実施に向けて一			
プロジェクト試験研究部兼原子力工学センター 副参事	井 上	隆	18
【調査研究報告】			
ウラン資源のダイナミックス			
プロジェクト試験研究部 参事	楠 野	貞 夫	28
【調査研究報告】			
腐食による配管の減肉挙動解析について			
原子力工学センター 安全解析グループ 部長	内 藤	正 則	37
【調査研究報告】			
第24回国際電気自動車シンポジウム参加報告			
一現実と希望の狭間に揺れながら一			
プロジェクト試験研究部 部長	蓮 池	宏	
プロジェクト試験研究部 主任研究員	渡 部	朝 史	47
【調査研究報告】			
エネルギーに関する公衆の意識調査			
エネルギー技術情報センター 主管研究員	下 岡	浩	58
【前理事長の逝去について】			
当研究所前理事長秋山守の逝去について			68
追悼の辞	原子力安全委員会 委員長	鈴木 篤 之	69
秋山先生の思い出	(財)エネルギー総合工学研究所 理事	松 井 一 秋	73
【事業報告】			
平成20年度 事業報告の概要 (財)エネルギー総合工学研究所			75
【行事案内】			
ISO50001 (エネルギーマネジメントシステム国際規格) の策定に関するシンポジウム			77
【研究所の動き】			79
【編集後記】			81

巻頭言

研究所の更なる発展を願って

高倉 毅 (財)エネルギー総合工学研究所
研究顧問



(財)エネルギー総合工学研究所は1978年(昭和53年)4月に設立され、昨年4月に創立30周年を迎えた。私事に渡って恐縮であるが、筆者は設立2年目の1979年4月に研究所に入所し、本年3月末に理事を退任するまで、ちょうど30年間この研究所にお世話になったことになる。しかし、退任の翌日、4月1日に秋山理事長の突然の訃報に接するとは思ってもよらなかった。本号には鈴木篤之原子力安全委員長および松井一秋理事の追悼の言葉が記載されているので、ここでは、常日頃暖かくご指導いただいたことに感謝するとともに、心からご冥福をお祈りしたい。

研究所は設立後順調に発展し、幅広い分野での調査研究を実施するとともに、エネルギーの技術面における、わが国の中心的調査研究機関へと成長した。特に、ここ数年研究所が力を入れてきた長期的なエネルギー技術ビジョン策定に係る調査は、国の政策立案や企業の研究活動にも貢献し得る成果を挙げている。これらの成果は、産学官の緊密な連携、総合工学の視点など、まさに研究所設立の趣旨・目的に沿ったものと言えよう。また、平成20年4月には「原子力工学センター」を設置し、国のプロジェクトである次世代軽水炉技術開発事業を、その中核機関として開始するなど、組織・体制的にも大きな変革を遂げた。

一方、原油価格乱高下や、待ったなしの地球環境問題への対応などエネルギー・環境を巡る情勢は大きく変動していること、金融危機に端を発する経済・社会環境の急激な悪化の影響を否応無く受けていることなど、研究所の経営面での舵取りは一段と厳しいものとなっている。さらに、国等からの調査委託は競争入札制となり、特命調査に多くを依存してきた研究所は大きな試練に直面している。

このような情勢を踏まえ、昨年度に改訂された研究所の中長期ビジョンでは、

「激動の時代環境を生き抜いていくには、時代環境に的確に対応しつつ、研究所の体質改善を図っていくことが必要」としている。そのため、今後研究所が実施すべき事項として、「競争力を有する調査研究基盤の構築」、「総合力を発揮できる調査研究体制の整備」、および「次世代軽水炉技術開発事業の着実な推進」を挙げ、その具体的方策を掲げている。

上記の具体的方策はそれぞれ重要であるが、さらに多少私見を交えて補足しておきたい。まず、「提案能力の向上」である。公募や競争入札では、提案書の出来が死命を制すると言っても過言ではない。しかし、競争環境への移行後の研究所の受注獲得成績は決して思わしいものではなく、その勝敗の分析や提案の一元管理などの対策が急務と思われる。次に「人材の問題」である。研究者の専門性においてはバランスの取れた構成となっているが、設立30年を経て高齢化が進んでいることは否めない。近年若手研究者の採用を進めているが、今後の10年、20年を考えた場合、さらに優秀なプロパーの採用・育成が必要であろう。最後に「新規分野の開拓」である。既に実施中のエネルギーマネジメントシステムの国際標準化に関する調査のような、従来研究所では手がけていなかったテーマを積極的に開拓すべきであろう。関連して、民間からの受託拡大がある。厳しい経営環境の中、賛助会員を中心に民間企業への調査提案等を積極的に行い、民間からの受託は増大しているが、さらに、ニーズを的確に把握しつつ、また、マルチクライアント調査も含めて、提案・獲得を目指したい。

幸い、本年度は研究部門においても収支改善の兆しが見られ、やや明るさを取り戻しつつあるが、今後、研究所がその改善の方向を軌道に乗せ、また、中長期ビジョンに掲げた理念を実現しつつ、更なる発展を果たすことを期待したい。

[寄稿]

メタンハイドレート資源開発をめぐる最新の状況

成田 英夫 (独)産業技術総合研究所
メタンハイドレート研究センター長



1. はじめに

「BP世界エネルギー統計2008」⁽¹⁾によれば、世界の天然ガス生産量は約3兆 m^3 であり、非OECD諸国の加速的な消費拡大、わが国周辺諸国、米国での液化天然ガス(LNG)輸入量の増加が顕著である。わが国における天然ガス消費は1970年以降直線的に増加しており、

2007年は世界の生産量の3%に相当する900億 m^3 を越えている。国内外の天然ガス消費拡大の動きは、エネルギー社会の低炭素化の要請に基づくものと考えられるが、図1に示すようにこのまま推移すると2030年におけるわが国の消費は1,400億 m^3 を越える勢いである⁽²⁾。また、図2に示すようにわが国企業が海外と締結している大口のLNG輸入契約の更改が今

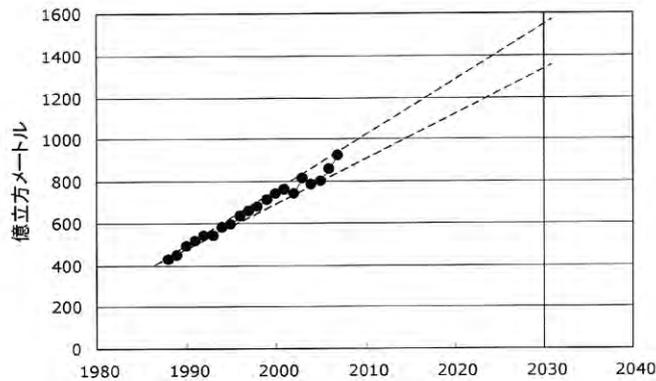


図1 わが国のLNG輸入量推移

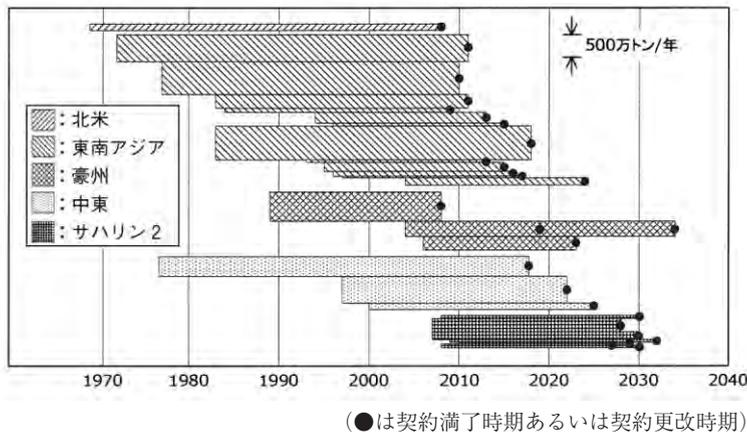


図2 わが国のLNG輸入プロジェクトと契約期間

後10年間軒並み続いており、その長期的な安定供給確保にとって重要な時期に入ったと言える⁽³⁾。このように、わが国を始め世界的に将来の天然ガスの需要増加への対応が必要な状況に直面しており、各国において在来型ガス田の開発促進のみならず非在来型と呼ばれる天然ガス資源の開発が進んでいる。

本稿では、非在来型天然ガス資源として最近注目されているメタンハイドレート資源開発について、その研究開発状況などを紹介する。

2. メタンハイドレート資源

(1) メタンハイドレートの特性

メタンハイドレートは、メタン分子が水分子によって包接されたクラスレート・ハイドレートと総称される化合物の1つである。石油産業においてかねてからケーシングやパイプライン、配管類の閉塞原因物質として研究が実施されてきた。

その結晶構造は、図3に示すように水分子で構成する2種類のケージ（5角12面体（ 5^{12} ）2個、5角12面6角2面体（ $5^{12}6^2$ ）6個の組み合わせで、ケージの空隙にガス分子が1個充填されている。その理論的組成は、単位格子に含まれる水分子（46個）とメタン分子（8個）の個数から、 $CH_4 \cdot 5.75H_2O$ となる。メタン分子と水分子の個数比5.75は水和数と呼ばれ、計算上水1gの中に約220ml（標準状態換算）のメタンが包蔵されている。また、メタンハイドレートの比重は約0.92であるため、ハイドレートの単位体積あたり約170倍のメタンが閉じこめられているとも言える。

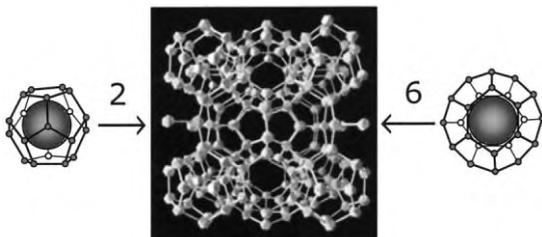


図3 メタンハイドレートの結晶構造と構成する多面体ケージ

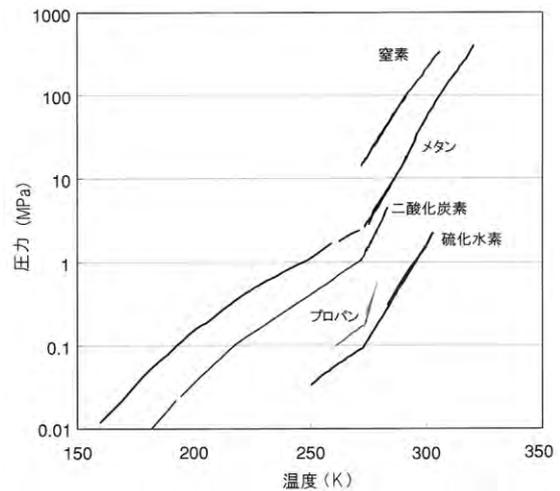


図4 ガスハイドレートの生成・解離平衡線図

図4の生成・解離平衡線図⁽⁴⁾に示したように、比較的低温・高圧下で安定であり、例えばメタンハイドレートが安定に存在するには0.1MPa下で193K、273Kでは約2.5MPaの圧力を必要とする。また塩類やアルコール類の共存によりハイドレートの平衡曲線は低温・高圧側にシフトし、ハイドレートの生成が阻害されることが知られている。その結晶構造は、氷のそれと異なるため、誘電率、音波速度、弾性係数、熱伝導率等の物性値が氷と大きく異なる物質である⁽⁵⁾。その他、混合ガスハイドレートの取り得る結晶構造はガス濃度依存性を有すること⁽⁶⁾、生成条件に依存して誘導期間と呼ばれる一定の生成開始までのタイムラグがあること、その誘導期間はメモリー効果と呼ばれる生成履歴によって変化すること、分解時には自己保存効果と呼ばれる現象⁽⁷⁾が発現することなど、学術的な関心も高い。

(2) メタンハイドレート資源の特定

世界の大陸縁辺部の海域や永久凍土地帯では、地震探査において異常な反射面が得られることがある。この反射面は、海底面とほぼ並行し明瞭に認められることから、海底疑似反射面（BSR: Bottom Simulating Reflector）と呼ばれているが、これがメタンハイドレートを含む地層の基底を示すものと考えられている。

これまでに、BSRの分布面積およびメタンハイドレート層が存在すると考えられる層の層厚をもとに、メタンガスとしての資源量が見積もられており、Kvenvolden⁽⁸⁾はメタン量で2万1,000兆m³、佐藤ら⁽⁹⁾は原始資源量として317兆m³と報告している。ここでメタン量とは、集積の如何に関わらず存在するメタンガスの量であり、原始資源量とはメタン量に資源として認められるだけの集積率を考慮した値である。

わが国周辺海域のBSR分布域を図5に示したが、北海道周辺の日本海、オホーツク海、太平洋および本州から四国、九州東岸に至る太平洋側の大陸斜面などに認められている。前述の佐藤らによると、その分布面積は九州と四国を合わせた面積に匹敵する約6万km²と見積られ、原始資源量は集積率を0.5%と仮定し

て7.4兆m³と推定されている。なお、わが国周辺のBSR分布域については、経済産業省の「国内石油天然ガス基礎調査」結果をもとに、見直しが進行中と言われている。

メタンハイドレート資源の存在を実際に確認するためには、BSRが認められる場所の掘削、検層を行う必要がある。メタンハイドレート層の検層においては、①通常用いられる自然γ線検層による砂相と泥層の識別、②γ線密度検層による地層密度の測定、③中性子検層による孔隙率の測定、④FMI (Full-bore Formation Micro Imager) 検層による地層イメージング計測、⑤核磁気共鳴検層による孔隙中の自由水の測定、⑥音波検層による弾性波特性の解析、⑦VSP (Vertical Seismic Profile) による地震探査データとの対比、⑧温度検層



(提供:産総研佐藤幹夫主任研究員)

図5 日本周辺海域のBSR分布

による坑内温度、⑨地層温度の測定などが実施される。その他、メタンハイドレート自体の存在量を見積もるために、孔隙水の塩化物イオン濃度、コア試料の低温異常、比抵抗異常、核磁気共鳴検層と中性子孔隙率からの推定などメタンハイドレート確認のための独自の手法が適用されている。

メタンハイドレート資源の起源は、堆積物中の有機炭素を起源とする生物起源⁽¹⁰⁾、堆積物浅部でのメタン生成菌などの活動によって生成する微生物起源と地層中の有機物が熱分解して生成する熱分解起源に大別されている。その区別は、分解ガス中のエタン、プロパン濃度に対するメタン濃度の比および炭素の同位体組成分析によってなされており、一般に微生物起源の場合はほぼ100%がメタンである。しかし、ガスの起源とメタンハイドレート堆積層の成因とは必ずしも場所的にも時間的にも一致せず、東海沖のメタンハイドレート堆積層の場合は、それより下部地層で生成した微生物起源ガスが移動・集積したもの、カナダマッケンジーデルタ地域のメタンハイドレート堆積層は、深部で生成した熱分解起源ガスが移動過程でエタン、プロパンなどが吸着され、結果的にメタンに富んだガスが集積したものと考えられている。

3. 諸外国におけるメタンハイドレート資源の開発状況

メタンハイドレート資源の開発は、近年世界的に急速な変化が見られており、米国、インド、韓国、中国および日本においては国が大きく関与してその開発を進めている。

米国では、当面、開発対象として浸透性砂質層中のメタンハイドレートに焦点をあてている⁽¹¹⁾。現在、BP、シェブロン社との共同研究体制の下、エネルギー省傘下の国立エネルギー技術研究所（NETL）等が主体となり、2007年2月にはアラスカ・ノーススロープでのコア採取、検層およびMDT（modular

formation dynamics tester）を用いた貯留層特性応答試験を実施した。MDTを用いた試験結果の検証では、産業技術総合研究所、日本オイルエンジニアリング㈱、東京大学が共同開発した生産シミュレータも使用された。現時点の計画としては、2013年まで極域において2回の長期産出試験を実施するほか、海域においても2015年まで生産試験を行い、2020年までに商業生産用のパラメータ取得を行うこととしている。また、達成するための主な開発課題として、①恒常的な資源評価、②生産シミュレーション技術、③大型生産実験研究、④リモートセンシング、⑤探査技術、⑥海底面観測技術などを設定している⁽¹²⁾。

インドでは、DGH（インド炭化水素総局）等によって、東岸沖合、西岸、アンダマンタン諸島周辺海域等の合計8万km²にメタンハイドレート資源を特定したほか、坑井掘削航海が2006年4～8月に実施され、21坑井から、総計2,850mのコア採取を実施した⁽¹³⁾。インドでは、国家プロジェクトによる2回目のコア採取やコア試験のためのラボの設置が計画されている。また、中国では2004年3月に「中国科学院広州天然ガスハイドレートセンター」を設立し、その本格的開発を開始しているが、2007年4～6月に南シナ海北部の掘削航海によって最深1,500m、8カ所の掘削・検層を行った。その内3カ所において厚さ10～25mのメタンハイドレートを胚胎する堆積層が海底下250mの深度において確認された⁽¹³⁾。

韓国では、韓国石油公社とガス公社、地質資源研究院で構成されたガスハイドレート開発事業団を組織し探査を推進してきている。2007年6月には、地質資源研究院の物理探査船を利用して浦項の北東方向135km、鬱陵島南方向約100kmの海域でメタンハイドレートを採取している。韓国政府は、今後5カ所で本格的に試錐を行う予定であり、さらに2014年末まで2,257億ウォンの予算を投じ探査と商業生産技術を開発する計画とされている。

4. わが国における開発状況

2001年7月に通商産業省（現、経済産業省）が発表した「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」では、「我が国周辺の相当量の賦存が期待されているメタンハイドレートについて、将来のエネルギー資源として位置付け、その利用に向け、経済的に掘削・生産回収するための技術開発を推進し、エネルギーの長期安定供給確保を図る」ことを基本方針として、その商業的産出のための技術を整備することを目標とした。その研究開発を実施するため、石油公団（現、石油天然ガス・金属鉱物資源機構）、（独）産業技術総合研究所、(財)エンジニアリング振興協会からなる「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム（MH21研究コンソーシアム）」⁽¹⁴⁾が設立され、それぞれ「資源量評価」、「生産手法開発」、「環境影響評価」の各分野の研究開発を実施する体制が構築された。MH21研究コンソーシアムでは、2001年度から2008年度にわたり、開発計画のフェーズ1を実施し、世界に先駆けた成果を数多く創出した。

(1) 資源量評価、貯留層特性解明への取り組み

MH21研究コンソーシアムでは、2002年に東部南海トラフ海域において三次元探査などが実施されたほか、2004年1月から資源量評価、開発技術の検討、堆積層の性状解明などに向け、検層、コア掘削、実証実験などを内容とする基礎試錐「東海沖～熊野灘」が実施され

た。本基礎試錐では、LWD（Logging While Drilling）坑井を16地点で掘削し、メタンハイドレートの存在区間を示す検層データや地震探査情報を獲得した。また、ワイヤーライン検層、地層温度計の設置・回収、フルコアリング、PTCS（圧力温度保持機構を有するコアリング装置）を用いたスポットコアリングなどを実施した。同時に、フェーズ2における海洋産出試験の基盤技術を整備するため、大水深・未固結地層におけるケーシング・セメンチング作業および垂直坑井、水平坑井の掘削を実施し、技術的な有効性の検証を行った。

基礎試錐「東海沖～熊野灘」における検層結果、コア試験結果の解析によって、東部南海トラフ海域のメタンハイドレート層は、典型的なタービダイト成であることが判明した。これは大昔の海底土石流により混濁流となって運搬された砂泥が海底において粗粒砂から細粒砂、シルト質の順に再堆積し、その後、上層に半遠洋性の泥が堆積した連続した砂泥互層の態様をとっている。コア試料のX線断層撮影像を図6に示したが、砂層中には、タービダイト成であることを示す平行葉理、斜行葉理が確認された。同図に砂層部分のマイクロフォーカスX線CTイメージを示したが、上部と下部では粒径が異なっており、それに応じて浸透率特性、力学特性等の基礎物性も異なる値をとった。

メタンハイドレートは、砂層の孔隙に存在しており、孔隙率は40%程度、その孔隙中に占めるメタンハイドレートの体積割合は60%程度で

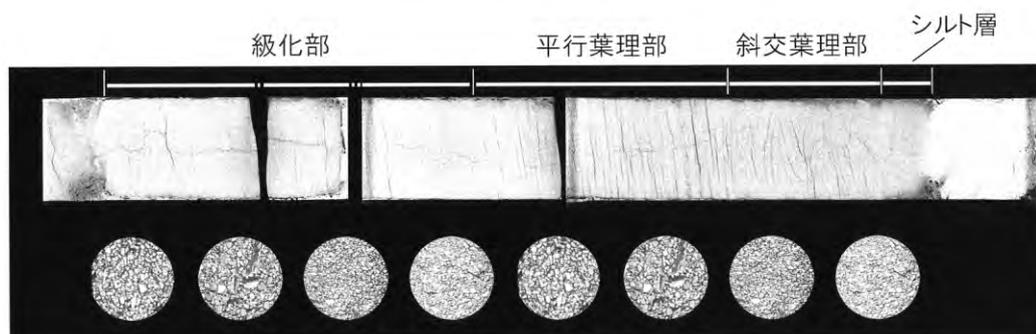


図6 基礎試錐採取コアのX線CT像

あった。メタンハイドレートが分解すると標準状態で約160倍の体積に相当するメタンが放出されることから、貯留層あたり約40倍（ $160 \times 0.4 \times 0.6$ ）のガス密度を有していると言える。また、メタンハイドレート堆積層が存在する原位置条件下におけるコア試験によって各種貯留層特性が解析された。その一例を表1に示したが、孔隙内を占めるメタンハイドレート量（メタンハイドレート飽和率）によって貯留層の基礎物性は大きく変化している。

本基礎試錐の検層結果および三次元地震探査の解析作業によって資源の濃集体の抽出などが進められ、2007年3月には、東部南海トラフ域の原始資源量が40兆立方フィート（1兆 m^3 強）であることが公表された。これは、わが国の天然ガス消費量の十数年分に相当する。しかし、これはあくまで原始資源量であり、回収率を考慮した埋蔵量の確定は、今後の生産手法の確立に負うところが大きい。

表1 東部南海トラフ海域メタンハイドレート層の基礎物性測定例

物性	試料	物性値
熱伝導率	砂質コア	1.56 W/m・K
	泥質コア	1.15 W/m・K
	砂泥互層界面近傍	1.7～2.3 W/m・K
比熱 (15℃)	砂質コア砂粒子	0.82 J/g・K
	泥質部	0.77 J/g・K
	砂質コア試料 (ϕ :40%, S_{mh} :60%)	1.26 J/g・K
	塊状メタンハイドレート	1.91 J/g・K
絶対浸透率	砂質コア	数 md～数 100md (異方性あり)
	泥層	数 μ d～数 100 μ d
弾性波速度	砂質コア (S_{mh} :30%)	P波:2000m/s S波:800m/s
比抵抗	砂質コア (S_{mh} :数%)	3 Ω ・m
粒径等	砂質コア	平均 100-300 μ m
	泥層と砂層の境界	シルト分:10%以上
嵩密度	砂質コア	1.6～1.9
	泥質コア	1.9～2.0
孔隙率	砂質コア	40%～45%
	泥質コア	36%～40%
メタンハイドレート飽和率	砂質コア	40%～50%以上
	泥質コア	殆ど 0%
	砂泥層境界付近	1%～3%
分解ガス組成	砂質コア	CH ₄ :99%以上 C ₂ H ₆ :600ppm～ 2,800 ppm
	泥質コア	CO ₂ :1 ml/g 程度
強度	砂質コア (S_{mh} :60%)	最大軸差応力:7 MPa～8 MPa
毛管圧	泥質コア	浸入開始圧 0.14 MPa、 20%浸入圧:1 MPa

(S_{mh} :メタンハイドレート飽和率、 ϕ :孔隙率)

(2) 生産手法開発への取り組み

メタンハイドレート層から天然ガスを生産するには、まず層中のメタンハイドレートを分解させる必要がある。その原理は比較的単純で、図4の生成・解離平衡条件において、メタンハイドレートの安定領域である低温・高圧の条件を高温側か低圧側の条件にするだけで分解は進む。これらの手法はそれぞれ「加熱法」、「減圧法」と呼ばれている。その他、濃塩水、窒素や炭酸ガスの圧入により生成・解離平衡条件自体を変化させて分解を促進する「インヒビタ圧入法」、「異種ガス交換法」などの方法も考案されている。

分解手法は単純であるが、生産の安定性、安全性、長期の持続性、経済性、環境影響等の商業生産に必要な要素を満足させる生産技術まで高めるには、いくつかの特異的な課題を克服するために、一層の研究開発・技術開発が必要である。まず、メタンハイドレートの分解によって、堆積層の骨格構造が変化し、それに伴い堆積層の熱伝導率、浸透率といった生産性を評価する上で重要な物性が変化する。また、骨格構造の変化は堆積層の力学特性やガスのシール性の変化にも繋がる。さらに、メタンハイドレートの分解は、吸熱反応であるため、周りの堆積層から熱を奪うことで分解速度の低下に繋がる堆積層の温度低下を引き起こす。長期の生産過程では、生産につれて砂質堆積層中に含まれるシルト等の細粒砂が生産水、生産ガスと共に孔隙内を移動し生産坑井周辺に堆積することによる生産障害も念頭に置く必要がある。一方、生産坑井内では、生産されたガスのみならず、随伴する生産水や細粒砂を含む高圧下での気固液三相流動状態にあり、かつ坑井内の圧力・温度条件によってはメタンハイドレートの再生成による閉塞等の障害にも注意が必要である。

このように、メタンハイドレート層からの天然ガス生産は、堆積層自体の変化を伴うものであり、従来の石油・天然ガス生産技術の単なる延長では解決できず、堆積層の物性や分解挙動

を把握しながら取り組む必要がある。MH21研究コンソーシアムでは、これまでメタンハイドレート貯留層原位置条件下における基礎物性、分解特性計測・解析技術基盤を確立し、在来型天然ガス生産では見られない「生産中の貯留層特性の変化」、「特異的な生産挙動の発現」をコア試験などにおいて解析しモデル化することによって、生産シミュレータ(MH21-HYDRES)を開発し、同時にコア試験によって各種分解法の開発と評価を実施してきた。

図7は、基礎試錐において採取したメタンハ

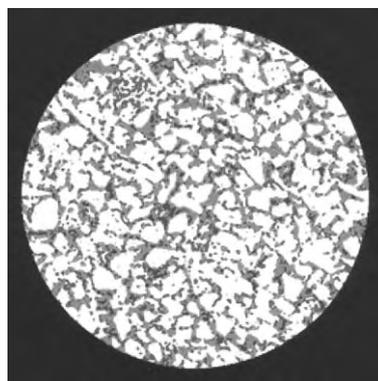


図7 砂質コアのマイクロフォーカスX線CT像

イドレート堆積物天然コアのマイクロフォーカスX線CT像である。本画像から得られる輝度値(X線の透過度)分布を解析することによって、堆積物を構成している砂、水、メタンハイドレートおよびメタンハイドレートが分解したことにより生成したメタンガスの三次元的な空間分布を求めることが可能となったほか、非破壊的に孔隙率、メタンハイドレート飽和率などを評価する手法が開発されている。

図8は、減圧法のコア試験結果例である。減圧法では図8(a)に示すように圧力の低下と共に生産速度が増加するが、1MPaと低すぎた場合は逆に生産速度が低下する現象が認められた。これは、図8(b)に見られるようにコアの温度が0℃になり孔隙内の水が氷結したことによって分解したガスが流れにくくなったものと解釈できる。

これらの取り組みの結果、東部南海トラフの

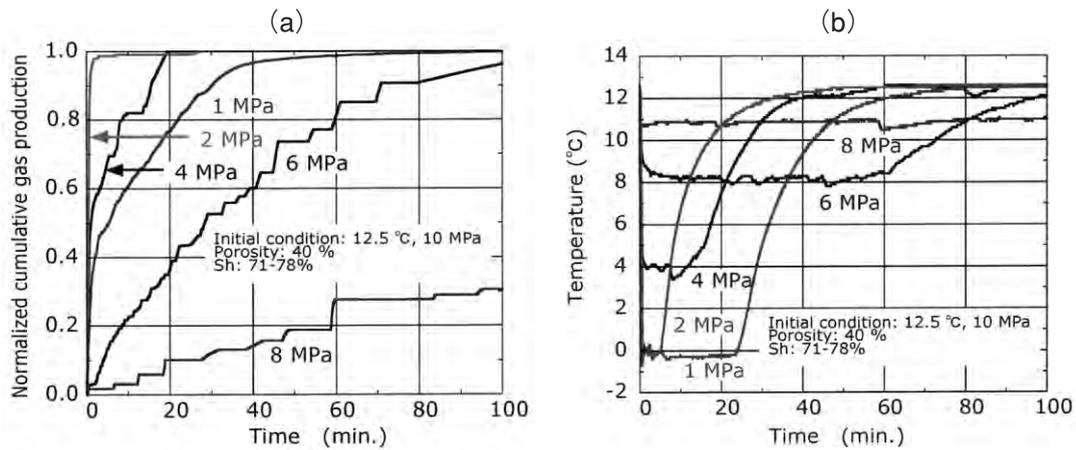


図8 減圧法における生産圧力と生産性および試料温度変化の推移

メタンハイドレート資源域は、貯留層温度が比較的高いこと、浸透率も期待できること等から減圧生産手法がエネルギー効率および生産性の点で優れていることを明らかにした。減圧生産手法は、生産坑井内の水を汲み出すことによって坑底圧を下げ、坑井に穿孔した孔を通じて地層圧を低下させて地層内のメタンハイドレートを分解し採取する方法であるが、生産に必要なエネルギーは、基本的に坑内から水を汲み出すポンプ動力のみであることから、生産されたエネルギーに対する生産に投じたエネルギーの比（エネルギー産出比）が高い。

図9は、東部南海トラフ海域における各種生産手法毎のエネルギー産出比と回収率を表したものである。熱媒体として温水を使用した加熱法では、回収率は高いものの温水製造と温水圧入にエネルギーを必要とするため、エネルギー産出比は低くなる。一方、減圧法では減圧度などの生産条件にもよるが一般に2桁位のエネルギー産出比が期待された。

2008年3月、MH21コンソーシアムはカナダとの連携の下、カナダ極域のマッケンジー・デルタ地域で陸上産出試験を行った。産出試験は、当初予定の約6日間に渡る連続生産に成功した。本陸上産出試験によって、減圧生産手法が技術的に有効であることを実証したほか、減圧度の増加に伴い生産量も増加すること等を示し、生産シミュレータの生産性・生産挙動予測技術としての有効性も検証された。

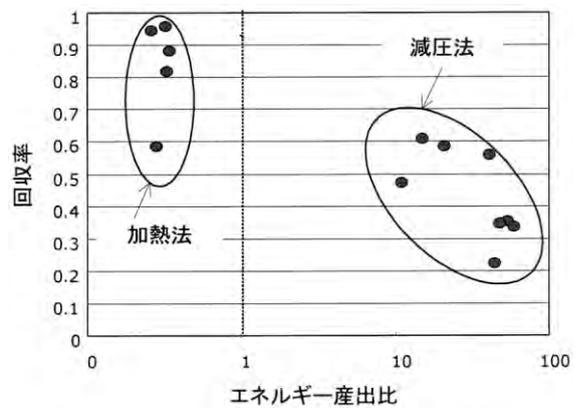


図9 東部南海トラフ海域のメタンハイドレート層での回収率、エネルギー産出比推算結果

5. 今後の取り組み

経済産業省の「メタンハイドレート資源開発計画」では、2009年4月から新たな研究開発段階であるフェーズ2が開始された。フェーズ2における研究開発とそのマネジメントにおいては、より「商業化のための技術整備」を意識した取り組みを行う必要がある。同時に、フェーズ2の研究開発成果は、商業化を担う石油開発事業者を始め、電力・ガス事業者など天然ガス関連事業に係わる企業の開発意欲を醸成するものでなくてはならない。開発意欲を醸成するには、今後開発が可能な貯留層特性を有する資源が確実にあり、その資源から天然ガスを長期にわたり安定・大量に生産できる技術があり、その生産行為は環境や経済活動に負荷を与えないような社会受容

性を有しており、総体として経済性が期待できるという見通しを示す必要がある。

当研究センターが引き続き担当する生産手法開発に関する研究開発においても、エネルギー産出比をなるべく低下させずに生産レートおよび回収率を向上させる分解採取手法の開発、生産の経過に伴い種々の要因によって生産性が低下する生産障害への対策技術の開発、生産に伴う坑井周辺地層や断層周辺地層の力学挙動の評価、生産障害などを精度高く予測可能な生産シミュレータの開発を通じて、企業が事業化を検討するにあたって実践的な情報をもたらす技術基盤を構築していく予定である。

6. おわりに

わが国のエネルギー安定供給の確保のためには、自主開発の拡大と供給源の多様化が重要であることは言うまでもないが、一般に、新たなエネルギー導入には長いリードタイムが必要であるため、在来型と呼ばれるエネルギー資源の逼迫が大きく顕在化していない今から、非在来型エネルギー資源の導入に向けた環境整備と技術開発を実施していく必要がある。特に、世界的なエネルギー需給が天然ガスへシフトしていく中で、わが国周辺海域のメタンハイドレート資源を将来のエネルギーとするには、生産対象海域の貯留層特性の実践的評価を含む技術的可能性と経済性の両面からのアプローチが必要である。同時に、環境に対する影響評価を含め安定・確実に生産する技術を確立することが重要であり、このためにも、より信頼性の高いメタンハイドレート堆積層の物性や分解に伴う種々の現象の把握と理解のための取り組みが必要である。

経済産業省「メタンハイドレート開発促進事業」のフェーズ2で予定している海洋産出試験は世界でも初めての挑戦であり、それを成功に導くためにも、陸上産出試験による生産技術の立証と、経済面、環境面も念頭に置いた、メタンハイドレート資源からの天然ガス導入シナリ

オの策定が急がれる。同時に重要なのは、人材の育成である。大学における資源開発分野の研究室は世界的に減少しており、かつ、メタンハイドレートに関する研究開発、技術開発が比較的新しい分野であることを踏まえると、商業化まで10年程度は必要と言う現段階から、国の研究開発機関、産業界、大学の人材育成に対する取り組みが求められていると考える。

以上、メタンハイドレート資源開発を担ってきた者として、その特徴、課題、得られた成果および今後の予定などについて解説した。現時点では、集積したメタンハイドレート資源があり、分解・採取する生産手法の見通しがある程度得られたところであるが、一方、我々が大きな自然を相手にこれまで知り得たことは、極めて限られているものと認識しなければならない。このため、今後の研究開発や実証試験などを行うにあたっては、これまで以上に真摯に取り組むことが重要であろう。

参考文献

- (1) BP Statistical Review of World Energy, BP, June 2008
- (2) 財務省貿易統計, <http://www.customs.go.jp/toukei/info/index.htm>
- (3) 新日本石油・石油便覧, <http://www.eneos.co.jp/binran/>
- (4) E. Dendy Sloan, Jr.: Clathrate Hydrates of Natural Gases, Marcel Dekker, Inc, (1990)
- (5) <http://riodb.ibase.aist.go.jp/ghdb/index.htm>
- (6) S. Takeya et al., Can. J. Phys. 81: 479 - 484 (2003)
- (7) W. Shimada et al., J. Phys. Chem. B 2005, 109, 5802-5807
- (8) Kvenvolden, K.A.: Methane Hydrates Resources in the Near Future?, JNOC-TRC of Japan, October 20 - 22. (1998)
- (9) 佐藤幹夫ほか：地質学雑誌, 102(11), 959 - 971(1996)
- (10) 早稲田周ほか, 石油技術協会誌 67, 3 - 15 (2002)
- (11) Fire in the Ice, Fall06, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2006.12
- (12) Minutes - Methane Hydrates Advisory Committee, U.S. Department of Energy, 2006.4
- (13) Fire in the Ice, Spring/Summer 07, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2007.6
- (14) <http://www.mh21japan.gr.jp/>

エネルギーモデル分析による 合成燃料導入可能性評価

※ 時松 宏治 (プロジェクト試験研究部
主任研究員)

※※ 黒沢 厚志 (プロジェクト試験研究部
部長 副主席研究員)



1. はじめに

合成燃料を含む輸送用代替燃料の製造技術は、「新・国家エネルギー戦略」(2006年)や、「燃料関連分野の技術戦略マップ」(2007年)、「Cool-Earthエネルギー革新技術計画」(2008年)などで重要技術の1つと位置づけられており、経済産業省では早期実用化を目指している。

本稿では、この合成燃料の2050年までのわが国のエネルギー需給における導入可能性を検討するモデルと、それをういた分析の概略を紹介する。合成燃料の技術的政策的意義と、分析に関する詳細説明は、別稿⁽¹⁾⁽²⁾を参照願いたい。

2. モデルの概略

(1) 従来のモデル枠組みとの違い

GRAPE⁽³⁾は当研究所が開発した「地球環境統合評価モデル」である。世界を10地域に分割し、1期10年刻みで2100年までの超長期シミュレーションを可能とするモデルである。モデルの全体はエネルギー、気候変動、土地利用変化・食糧需給、マクロ経済、環境インパクトの5モジュールで構成されている。

日本における合成燃料の導入可能性の検討に用いたGRAPEのバージョンは、上記の世界10地域の2100年を対象としたバージョンとは若干異なる。日本国内のエネルギーシステムに海外での合成燃料製造を加えた、日本としてのエネルギー需給のみを扱う。時間軸は

2050年までとしている。

エネルギーシステムには、合成燃料を製造する生産地での域内輸送、合成燃料製造(建設・運転)、海外輸送を経た輸入、国内原油精製、配送までが含まれる。その海外生産・海外輸送・国内転換・配送のシステムコストを線形計画法により最小化する。多様で複雑な合成燃料製造ルートを表現している点が、既存のエネルギーモデルとの大きな違いである。合成燃料以外のエネルギー転換は従来のGRAPEと同様であるため、以下では合成燃料製造について補足する。

(2) 合成燃料の製造ルート

エネルギーモジュールに、天然ガス・石炭・石油・バイオマスの4種類を原料資源とする、合成燃料の製造プロセスを組み込んだ(表1)。

合成燃料の製造プロセスとしては、天然ガス起源の合成燃料はマレーシア立地を想定した4プロセス(①~④)、石炭起源は中国山西省・内モンゴル自治区立地の5プロセス(⑤~⑨)とした。それ以外に、石油精製は日本国内におけるガソリン、軽油(灯油)、LPG・ナフサ、重油を製造プロセス(⑩)、バイオマス起源は東南アジア立地の2プロセス(⑪⑫)とした。

(3) 合成燃料の導入制約

新技術導入を評価するモデル分析においては、当該技術が導入可能な最大量である制約条件を外的・内的要因を検討して設定する。最大

表1 合成燃料の製造プロセス

パス No.	パス名	想定立地	一次原料	変換プロセス	経由	合成燃料 (製品)
①	天然ガスDME(直接)	マレーシア	天然ガス	TOPSOEプラント (直接法)	-	DME
②	天然ガスDME(間接)	マレーシア	天然ガス	TOYO-DMEプラント(間接法)	(メタノール経由)	DME
③	天然ガスFT合成油	マレーシア	天然ガス	FT油製造プラント(スチームリアミグ+FT合成)	-	FT合成油
④	天然ガスメタノール	マレーシア	天然ガス	スチームリアフォーミングプラント+メタノールプラント	(合成ガス)	メタノール
⑤	石炭メタノール	中国山西省、内モンゴル自治区周辺	石炭(亜亜青炭)	石炭ガス化プラント+メタノールプラント	(合成ガスより)	メタノール
⑥	石炭DME(間接)	中国山西省、内モンゴル自治区周辺	石炭(亜亜青炭)	石炭ガス化プラント+メタノールプラント+DMEプラント	(メタノール経由)	DME
⑦	石炭FT合成油	中国山西省、内モンゴル自治区周辺	石炭(亜亜青炭)	石炭ガス化プラント+FT合成	(合成ガスより)	FT合成油
⑧	石炭MTG	中国山西省、内モンゴル自治区周辺	石炭(亜亜青炭)	石炭ガス化+メタノール+MTG	石炭 3850t/d	ガソリン
⑨	石炭直接液化化CP	中国山西省、内モンゴル自治区周辺	石炭(亜亜青炭)	石炭直接液化化プラント(NEDOLプロセス)	石炭 30000t/d	ガソリン、軽油
⑩	石油精製	日本にて精製	原油(アラビアンヘビー)	石油精製プラントと想定立地	-	LPG、ガソリン、軽油、重油
⑪	バイオディーゼル油(BDF)	東南アジア地域	バイオマス(パーム油)	AXENSプロセスプラント		バイオディーゼル油(BDF)
⑫	バイオエタノール	東南アジア地域	バイオマス(コーン)	発酵エタノールプラント		燃料エタノール

でどの程度入りうるのかを表す制約の与え方が重要となる。そのため、その制約条件を変化させることで結果に与える影響を確認する手続き(感度解析)が必要となる。本分析においては、合成燃料は2015年以降に導入可能とし、建設可能なプラント件数を想定することで、その導入量に上限制約を与えた。

石炭起源の合成燃料については、中国でのプラント規模と建設基数の導入見通し、生産能力のうちの日本への輸出可能なポテンシャルを考慮して、上限制約を設定した。

天然ガスFT合成油は、世界エネルギーアウトLOOK (WEO) 2006⁽⁴⁾のリファレンスケースでの世界のガス・トゥ・リキッド (GTL) への天然ガス投入量の見通しをもとに上限制約を設定した。天然ガス起源のジメチルエーテル (DME) は、日本エネルギー学会誌による国内需要予測⁽⁵⁾を上限制約として与えた。

(4) 最終需要

最終需要は、電力、移動(運輸)、定置(熱電併給含む)の3部門とした。図1には電力を

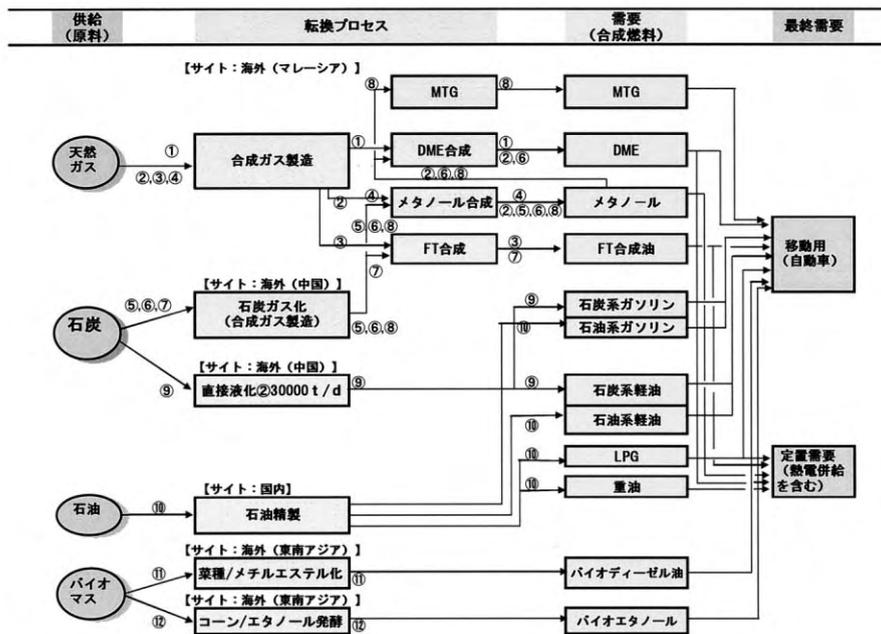


図1 モデル検討に利用した合成燃料の製造ルート (電力除くエネルギーフローのみ表示)

除いたエネルギーフローを示す。将来シナリオは、総合エネルギー統計（2000年と2005年実績）と2030年エネルギー需給展望（2010年と2030年）を用い、2025年～2030年の年変化率のトレンドが続くとして、2050年まで総需要を延長した。

運輸用においては、ガソリン代替燃料を石炭起源ガソリン、FT合成油、バイオエタノールとし、ディーゼル代替燃料を、石炭起源軽油、DME、FT合成油、BDFとした。石炭起源ガソリンはガソリン車のみ利用可能、航空用は石油製造からのみ利用可能、メタノールは運輸では利用されないとした。

定置用需要は、ガソリン、BDF、エタノール以外の合成燃料が全て利用可能とした。なお合成燃料の発電利用は想定していない。

3. シナリオ設定

(1) エネルギー資源の価格シナリオ

エネルギー資源の2050年までの価格シナリオは、標準と価格2倍の2つを想定した（図2、図3）。標準の価格シナリオでは

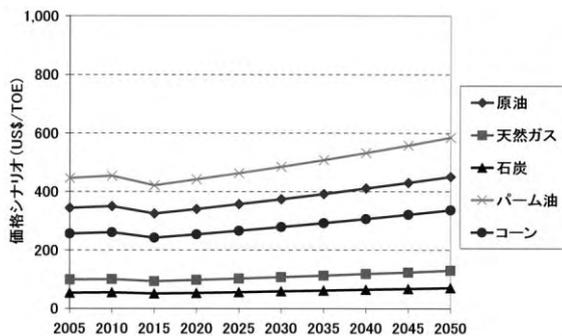


図2 資源価格シナリオ（標準）

WEO2006年版による2015年～2030年までの価格上昇が、2030年以降は直線的に延びるとした。

価格2倍シナリオでは、2050年時点における原油価格が2005年の2倍になると想定した。価格2倍では、天然ガス、パーム油、コーンについては、2005年時点での原油価格の差分が2050年まで維持されるものとした。石炭については、2050年価格を2005年時点の2倍弱の100石油換算トン（TOE）/年とした。従って、価格2倍では、相対的に石炭以外の価格が石炭に比べて高い設定になっている。

(2) ケース設定

シナリオ検討は、表2に示すように、以下の8ケースとした。標準ケースは、全ての設定が標準である。

最初の2ケースは価格と導入制約に関するものである。価格2倍ケースは、資源価格が前節の価格2倍の場合である。相対的に石炭価格が下がることで石炭起源の合成燃料導入量が増大する。価格2倍・導入制約緩和ケー

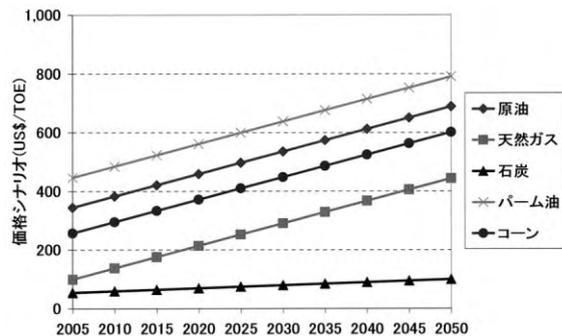


図3 資源価格シナリオ（価格2倍）

表2 ケース間の特徴の比較

ケース名	資源価格	導入制約の上限	石油供給	設備コスト	MTG導入	CO ₂ 制約
標準	標準	標準	標準	標準	なし	なし
価格2倍	2倍	標準	標準	標準	なし	なし
価格2倍・導入制約緩和*	2倍	2倍*	標準	標準	なし	なし
石油供給半減	標準	標準	0.5倍	標準	なし	なし
液化コスト高位	標準	標準	標準	1.5倍	なし	なし
液化コスト低位	標準	標準	標準	0.5倍	なし	なし
MTGあり標準	標準	標準	標準	標準	あり	なし
CO ₂ 排出制約	標準	標準	標準	標準	なし	あり

* 「価格2倍・導入制約緩和」は、H18年度報告書⁽²⁾の「エネルギー資源高価格」ケースと同一

スは、資源価格が2倍のまま、導入制約の上限も2倍に高めた場合である。導入制約を緩和するため、石炭起源の合成燃料導入量の更なる増大が期待される。

次の3ケースは、原油供給と石炭液化設備コストが変動するリスクに関するものである。石油供給半減ケースは、2030年時点でのオイルショックの発生を想定し、2030年の原油と石油製品の供給量合計が、2005年供給量の半分となる場合である。液化コスト高位および低位のケースは、石炭液化設備コストが想定値よりも5割高、あるいは、5割低の2つの場合である。

最後の2つは標準ケースを基本として、大幅な違いを想定したものである。1つはMTG (Methanol to Gasoline) の製造ルートを設定した、MTGあり標準ケースである。MTGは、メタノールを原料にし、触媒によりDMEを経てガソリンを合成するプロセスである。現在は中国1カ所に建設中、米国2カ所に建設計画があり、いずれもExxonMobil社によるプロセスである。このケースの場合は、MTG製造ルートを加えた以外は全て標準ケースと同じである。

もう1つの二酸化炭素 (CO₂) 制約ケースは、MTG製造ルートがない標準ケースにおいて、CO₂排出制約を加えたものである。このケースでは、2050年時点における日本国内に

おけるCO₂排出を1990年の半分とする排出制約を課す場合である。この場合の海外製造時におけるCO₂は制約に含まれないので、リーケージが起こりえる。2050年までの排出パスの上限制約を5年毎に与えている。

4. モデル分析結果

(1) 石炭起源の合成燃料導入

図4にわが国への導入総量を、図5にその内訳を示す。標準ケースの石炭起源の合成燃料の導入量合計は、2015年の6 Mtoe/年から2050年には34 Mtoe/年に増大する。その内訳は、石炭起源の軽油とガソリンの合計、石炭DME、石炭FTの3つがほぼ当分である。

導入制約が標準ケースと等しい、価格2倍ケースと標準ケースを比較すると、2050年時点

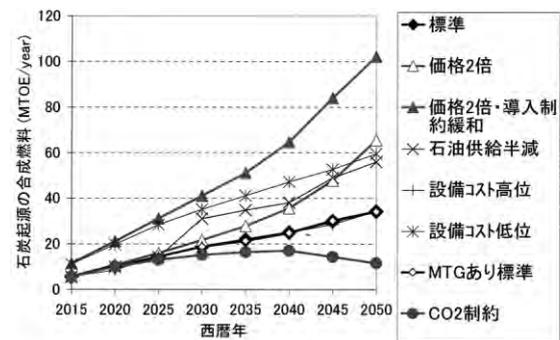


図4 石炭起源合成燃料導入量の推移

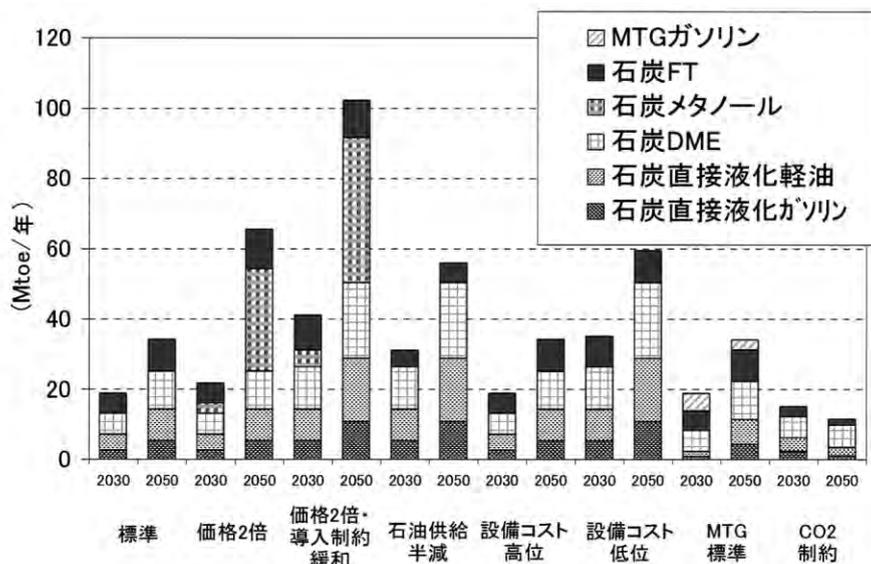


図5 石炭起源の合成燃料の導入量内訳

の導入量も約2倍に増大する。導入制約を価格2倍のまま導入制約を2倍にした、価格2倍・導入制約緩和ケースにすると、2050年時点の導入量は3倍になる。

なお、価格を更に上げて、その上に導入制約上限を上げて制約を緩和しても導入量はほぼ変わらない。この理由は、エンドユースにおける石炭起源の合成燃料が限界近くまで導入されるためである。

石油供給半減、設備コスト高位、設備コスト低位の各ケースの2050年における導入量は価格2倍ケースと同程度、MTGあり標準ケースは標準ケースと同じ、CO₂制約ケースでは3分の1に、石炭起源の合成燃料導入量がそれぞれ変動する。

図5には、2030年と2050年での石炭系の導入量内訳を示している。内訳では、石炭DMEと石炭直接液化軽油、石炭直接液化ガソリンの順に多く、価格2倍ケースと価格2倍・導入制約緩和ケースでは、これらに加え石炭メタノールの導入増大により、石炭起源の合成燃料の導入量が増加する。

標準ケースと、MTGあり標準ケースとを比較すると、石炭FTと石炭DMEの導入量はMTG製造ルートへの導入には影響を受けず、石炭軽油の導入は若干しか減少しないが、石炭ガソ

リンとMTGのコスト差は若干としているため、石炭ガソリンとMTGが競合して導入されることがわかる。

(2) 運輸エネルギーの構成

2005年時点での運輸エネルギー構成は、ガソリンが6割、軽油が3割と、これらで大部分を占めている。それが図6に示すように、標準ケースの場合、2030年時点では、ガソリンが4割、軽油が2割に、2050年にはそれぞれ2割と1割にさらに減少する。それを代替するように、2030年には石炭系と天然ガス系の合成燃料がいずれも1割強、2050年には石炭系が3割、天然ガス系が2割、それぞれ導入される。政府の「新・国家エネルギー戦略」では、2030年に運輸用燃料における合成燃料を20%以上とする目標を掲げており、状況次第では達成が可能となることを示している。

他のケースでも現在太宗を占めるガソリンと軽油は同様に減少し、代替する合成燃料も大まかには同様の傾向を示している。MTG標準ケースでは前述の通り、MTGが若干導入され、石油供給半減およびCO₂制約のケースではバイオエタノールの導入も行われる。

CO₂制約ケースにおいて、石炭起源の合成燃料導入量が減少して、バイオエタノールが

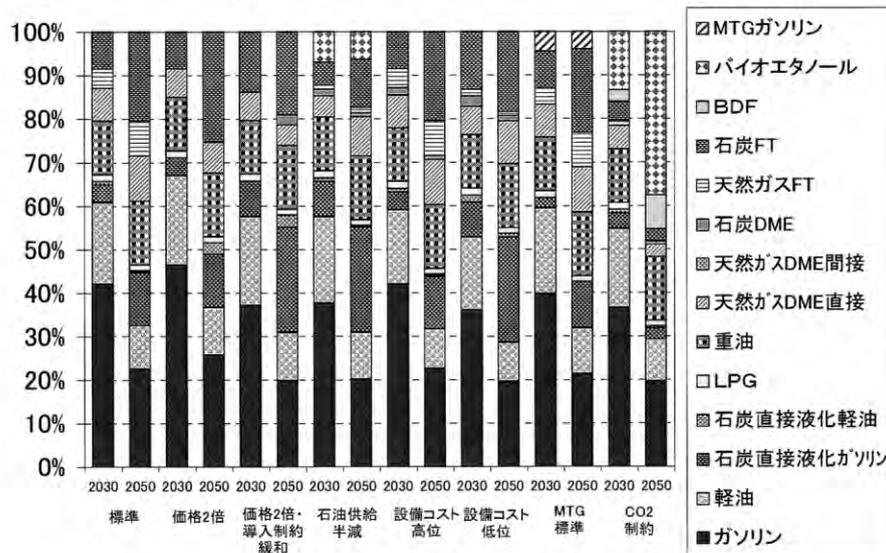


図6 2030年、2050年の運輸用エネルギーのシェア

大幅に導入される理由は、国内排出量を抑制すべく、低炭素原単位のエネルギー源、特にカーボンニュートラルと扱っているバイオエタノールの海外生産を行って、それを輸入するためである。

5. まとめ

本稿では、モデル分析により2030年、2050年といった中長期の合成燃料導入の姿の一端を記した。2030年以降、石炭を中心とした化石燃料を起源とする合成燃料は現在太宗を占めるガソリンと軽油を代替し、2030年には3割、2050年には5割と、大幅に導入される結果となった。オイルショックのような原油輸入の厳しい制限や厳しいCO₂制約を課すと、バイオ系の燃料も導入されることになる。石炭からガソリンを製造する方法として、直接・間接の石炭液化だけではなく、MTGのように沸点留分の範囲が狭く、市場への導入が

容易な方法も注目される。今後もこのようなモデル分析に基づいた戦略の検討、例えば資源生産地におけるCCSを考慮した世界エネルギーモデルに基づいた分析などが望まれる。

[謝辞]

本稿の内容は、平成18年度および20年度の新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託事業の成果の一部である。元職員である橋本孝雄氏をはじめ、関係者の方々に多大な御協力を頂いた。ここに謝意を記す。

参考文献

- (1) 小野崎正樹, 季報 エネルギー総合工学, 31, 43 (2008)
- (2) 平成18年度NEDO成果報告書, 「石炭起源の合成燃料の導入可能性に関する調査」
- (3) 黒沢厚志, 日本エネルギー学会誌, 86, 87 (2007)
- (4) OECD/IEA, “World Energy Outlook 2006” (2006)
- (5) 日本DMEフォーラム利用技術分科会導入普及ワーキンググループ, 日本エネルギー学会誌, 84, 350 (2005)

今後の原子力プラントの合理的な廃止措置のあり方について — 具体化する軽水炉廃止措置の実施に向けて —



井上 隆 (プロジェクト試験研究部
兼原子力工学センター 副参事)

1. はじめに

現在、わが国では53基の商業用軽水炉プラントが稼動している⁽¹⁾。中には運転経過年数が30年を超え、40年近傍のプラントもあり、近い将来、寿命を迎え、または経済的な理由などで運転停止に至るプラントが出てくると予想される。運転停止したプラントは、わが国の基本方針⁽²⁾に基づき、いずれ解体撤去され、跡地は原子力プラント用地として引き続き有効利用されることとなる。

本稿では、国内外の廃止措置の実施状況、わが国の廃止措置に係る動向について述べ、実用発電用原子炉の廃炉設備に関する技術調査および確証試験の概要をまとめるとともに、今後具体化する商業用軽水炉プラントの廃止措置の実施に向けた取り組みについて紹介する。

2. 廃止措置とは何か

「廃止措置とは、原子炉施設の解体、その保

有する核燃料物質を譲渡し、核燃料物質による汚染の撤去、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染されたものの廃棄及び放射線管理記録の指定する機関への引渡しとする」と定義されている⁽³⁾。つまり、運転を終了した原子力プラントを解体撤去し、解体廃棄物を処理処分して、放射線管理を必要としない状態（グリーンフィールド）に移行するためのプロセスとその管理のことである。廃止措置の手順を図1に示す。

3. 国内外における廃止措置の実施状況

(1) 海外における廃止措置

① 主要国での実施状況

海外では、初期に建設された原子力プラントはすでに運転を停止し、その後建設されたプラントの中にも政策変更や経済性を理由に運転停止に至ったものがある。そのようなプラントは、現在100基以上あるが、原子力発電の先進国であるアメリカ、ドイツなど主要国では、30基を超える商業用軽水炉プラントで

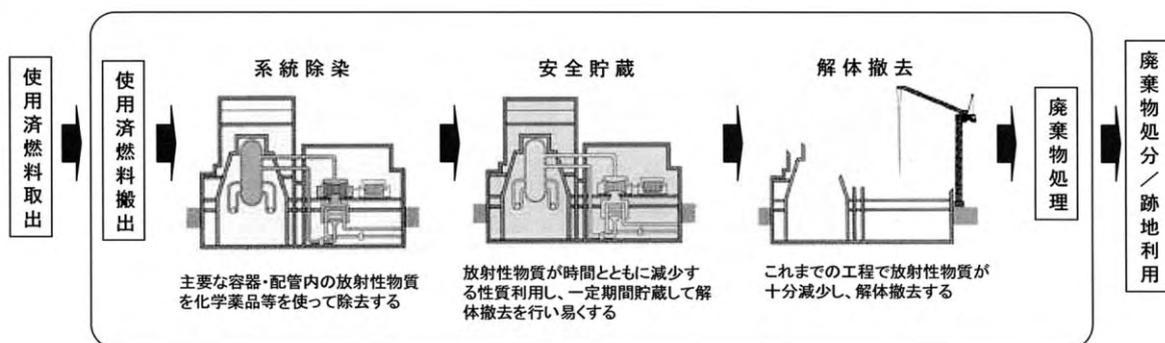


図1 廃止措置手順



図2 海外における廃止措置の状況（2009年初現在）

廃止措置が安全に実施され、経験が積み重ねられてきている。海外における廃止措置の実施状況を図2に示す⁽¹⁾。アメリカがもっとも多く、それに欧州が続いている。

アメリカでは、既に廃止措置が終了しサイト解放（グリーンフィールド化）されているプラントがある。さらに、解体中（廃止措置実施中）のプラントがあり、今後、サイト解放されるプラントが増えると想定される。また、ドイツでも解体中のプラントがあり、今後、サイト解放されるプラントが出てくると思われる。

② 海外の廃止措置実施プラントにおける廃止措置方式・適用技術の特徴

欧米主要国では、廃止措置は国によって理由は異なるものの合理的な方式として「即時解体方式」を採用している。

さらに、前述のように海外では、30基を超える軽水炉プラントの廃止措置が進んでおり、それに伴い、廃止措置実施プラントでの適用技術は、作業環境の改善、二次廃棄物量の低減などの点で、近年めざましく進歩している。

廃止措置方式と適用技術の一例をわが国における従来の適用技術と比較して以下に示す⁽⁴⁾。

a. 廃止措置方式

- イ. アメリカ：密閉管理方式 ⇒ 即時解体方式（特徴；処分費用の高騰による方式の変更）
- ロ. ドイツ：安全貯蔵後解体 ⇒ 即時解体方式（特徴；人材・記録の活用，残存設備の活用による方式の変更）
- ハ. フランス：安全貯蔵期間の短縮（50年 ⇒ 25年以内）（特徴；記録・情報の散逸防止，要員活用，同一世代での債務履行による方式の変更）

b. 適用技術

イ. 解体技術

- (a) わが国の従来技術（調査・検討）：主に熱的工法（例，プラズマアーク切断）
- (b) 海外の近年技術（実績）：機械的工法（アブレッシブウォータージェット切断）を主体に熱的工法との組み合わせ
- (c) 海外近年技術の特徴：作業環境の改善，切断時二次廃棄物発生量の低減

ロ. 除染技術

- (a) わが国の従来技術（調査・検討）：濃厚化学薬品による酸化・還元法
- (b) 海外の近年技術（実績）：希薄化学薬品による酸化・還元法
- (c) 海外近年の技術の特徴：二次廃棄物量の低減

ハ. 解体手順

- (a) 高放射能レベルから低放射能レベルへ解体（特徴；処分費用高騰に対応するために，高放射能レベル廃棄物の処分場への早期搬出）
- (b) 低放射能レベルから高放射能レベルへ解体（特徴；作業員の習熟度向上，技術力養成）
- (c) 放射能レベルに依らない同時期解体（特徴；工程短縮）

(2) わが国における廃止措置

① 実施状況

わが国における原子力プラントの廃止措置の実施状況を図3に示す。わが国の廃止措置は、わが国で初めて原子力発電に成功した日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）の動力試験炉（JPDR）に始まり、さらに、初めて商業用原子力プラントとして営業運転を開始した東海発電所と続く。

[JPDR]

JPDRは、1963年10月26日にわが国で初めて原子力発電に成功した後、発電炉の運転、保守に関する貴重な経験を蓄積して所期の目的をほぼ達成した。その後、原子炉施設の廃止措置技術の開発に関する試験を実施した。1986年に解体開始、1996年に廃止措置を終了してサイトを開放した。

[東海発電所]

東海発電所は、炭酸ガス冷却型原子炉（GCR）で、1998年に営業運転を停止し、2001年10月に原子炉解体届を提出して、同年12月に廃止措置に着手した。廃止措置全体工事工程は、原子炉領域以外の撤去（付属設備撤去等の準備工事、熱交換器撤去等）と原子炉領域の撤去（原子炉本体解体等）に分けられて

いる。廃止措置実施中に、クリアランス制度と廃止措置規制制度の整備、法改正が行われたため、廃止措置計画認可申請（2006年3月）を行い、同年6月に認可された。また、クリアランスレベル以下の放射能濃度の測定および評価方法の認可申請（同年6月）を行い、同年9月に認可された。現在、原子炉領域以外の撤去を実施中である。

[新型転換炉ふげん発電所]

わが国が独自開発した原子炉（新型転換炉／ATR）の原型炉である新型転換炉ふげん発電所が運転を終了（2003年3月）し、廃止措置計画認可申請（2006年）を行ない、2008年に認可された。使用済燃料搬出期間、原子炉周辺設備解体撤去期間、原子炉解体撤去期間、建屋解体期間の4段階に区分された主要工程のうち、現在、使用済燃料搬出期間中である。

[浜岡原子力発電所]

浜岡原子力発電所1、2号機が2009年1月に営業運転を終了、2009年6月に廃止措置計画認可申請を行なった。

現在は、解体工事準備期間、原子炉領域周辺設備解体撤去期間、原子炉領域解体撤去期間、建屋等解体撤去期間の4段階に分けられた主要工程のうちの解体工事準備期間中である。

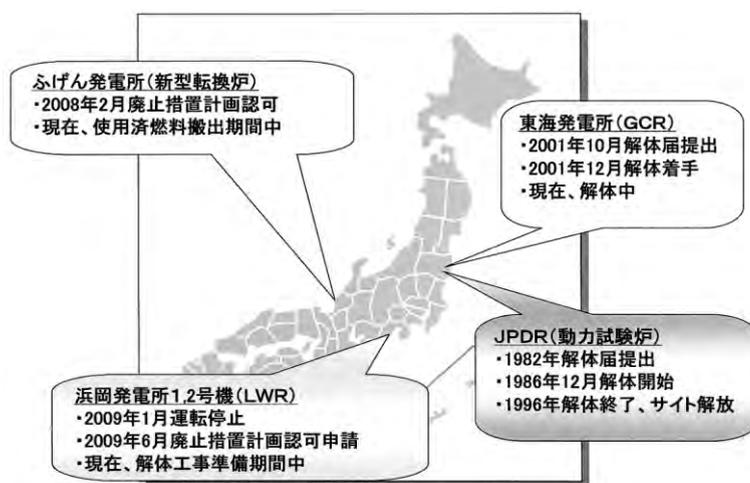


図3 わが国における廃止措置の実施状況

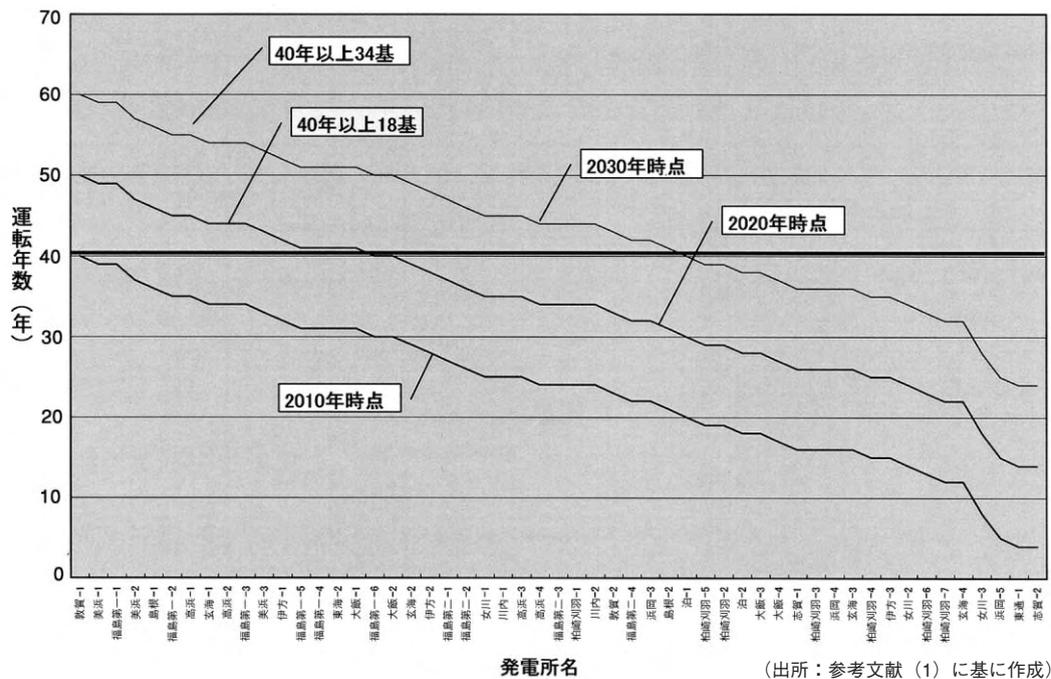


図4 わが国の発電所の年度毎の運転年数（各年度の3月時点）

② 軽水炉プラントの運転経過と廃止措置時期の想定

わが国で稼働中の原子力プラントの運転経過年数を主要年度ごとに図4に示す。

最も運転経過年数が多いプラントは、わが国初の商業用軽水炉プラントである日本原子力発電(株)敦賀発電所1号機で、2009年3月時点で39年となる。同社は、敦賀発電所1号機の運転停止時期を2010年としていたが、2009年2月に運転停止時期の延期を発表している。

運転経過年数が30年以上のプラントは、2009年3月時点で16基、40年以上は0基である。しかし、40年以上のプラントは、2020年3月時点では18基、2030年3月時点では34基と予想できる。図5のわが国の商業用炉の中

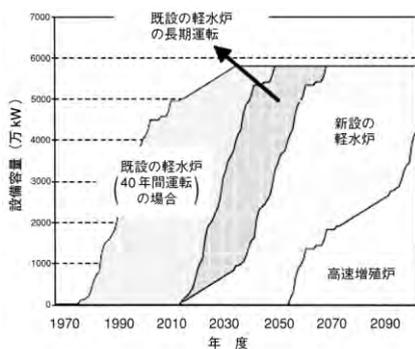


図5 わが国の商業用炉の中長期的な方向性

長期的な方向性⁽⁵⁾でも分かるように既設軽水炉の新設軽水炉へのリプレース時期が2030年頃と想定でき、いずれにしても、既設プラントは、2020～2030年前後に運転停止および廃止措置へ移行していくものと想定される。

4. 商業用原子力プラントの廃止措置に係る国の動向

わが国における廃止措置については、1985年の総合エネルギー調査会原子力部会報告書⁽²⁾で初めて言及され、わが国の廃止措置の基本的考え方が以下の3点にまとめられている。

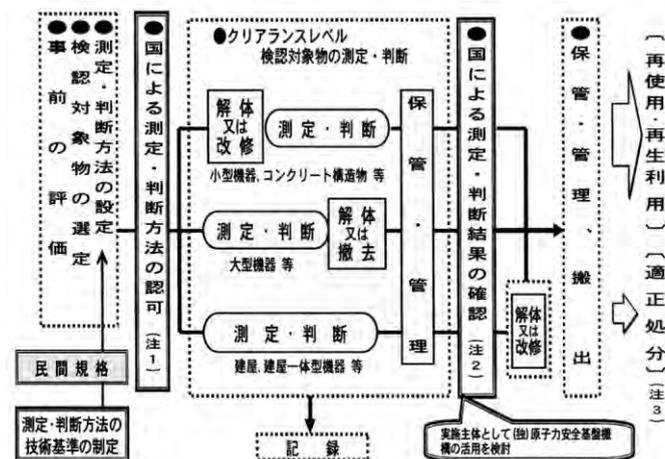
- a. 原子力発電プラントの廃止措置については、原子力委員会の「原子力開発利用長期計画（1982年6月）」にも示されているように、安全の確保を前提に地域との協調を図りつつ進めるべきであり、さらに敷地を原子力発電プラント用地として引き続き有効に利用することが重要である。
- b. 運転を終了した原子力発電プラントは最終的には解体撤去することを基本的な方針とする。なお、解体撤去に当たっては、引き続き使用できる施設等の利用、解体作業の効率化を図るための技術開発、廃棄物の合理的な処理等を図ることにより、効率的に実施することが重要である。
- c. 廃止措置に係る対策の確立を図るため、上述の点を踏まえ、標準工程を策定し、これに基づき費用対策、廃棄物の処分等の課題の検討を行っていくことが重要である。

標準工程とは、使用済燃料搬出後、機器の内部に付着している放射性物質を除去する「系統除染」、放射性物質の減衰を待つ「安全貯蔵」、機器・建屋の「解体撤去」の3ステップをいう。同報告書では、「標準工程としては、原子力発電プラントの規模、炉型等に関係なく廃止措置方式は密閉管理－解体撤去方式とすることとし、密閉管理による安全貯蔵期間は5～10年程度とするのが適当である」とまとめている。

1997年1月の原子力部会報告書⁽⁶⁾では、廃止措置技術水準、安全確保対策の手続き、解体廃棄物の処理処分に係る課題の検討が取りまとめられ、以降、原子力委員会および原子力安全委員会で、解体廃棄物に関する処分方策や安全基準の検討等が着実に進められてきた。

2001年5月の原子力部会中間報告⁽⁷⁾では、解体放射性廃棄物の処理処分費用の見積もりが示されるとともに、クリアランスレベル以下の廃棄物の再利用促進、解体廃棄物の処理処分等を適切に実施するための所要の取り組みの実施に期待が示された。

2001年8月の総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃止措置小委員会で、廃止措置に係わる安全確保及び安全規制の具体的な検討が進められ⁽⁸⁾、2004年にクリアランス制度の整備⁽⁹⁾（図6）、廃止措置規制制度の見直し⁽¹⁰⁾（図7）が行われ、2005年に「原子炉等規制法」が改正された。2009年5月には、国から放射性廃棄物でない廃棄物の取り扱いについてのガイドラインが示された⁽¹¹⁾。



(注) 1. 国による測定・判断方法の認可(認可時の審査内容) 評価対象とする放射性核種の選択や組成比の設定方法、対象物の特性に応じた測定条件の設定や測定方法、測定結果の評価方法、測定・判断が完了した対象物の一時保管の方法、記録の管理、品質保証計画の策定状況等
2. 国による測定・判断結果の確認 認可を受けた方法に基づき行われた測定・判断に関する記録を確認する(必要に応じ抜き取り測定)、また、事前の評価からクリアランスされた物の搬出まで一連の測定・判断に係る品質保証活動の実施状況の確認について、国は適切な機会を通じてこれを行う。
3. クリアランスされた物の処分又は再生利用の際の最初の搬出先について、制度が社会に定着するまでの間、事業者が把握・記録するよう求める。

図6 クリアランス制度の整備⁽⁹⁾

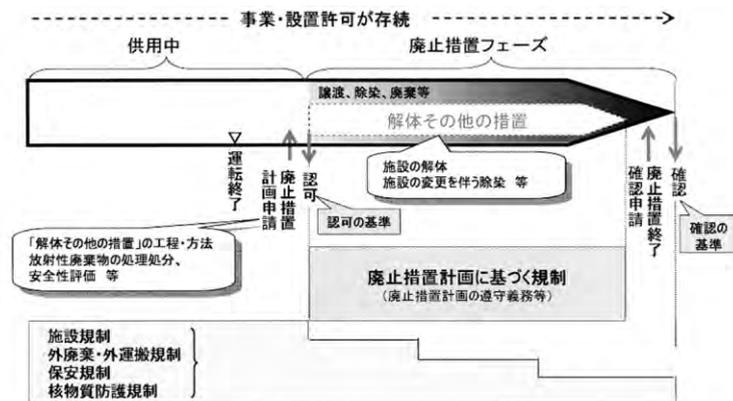


図7 廃止措置制度の見直し⁽¹⁰⁾

このように、廃止措置実施に必要な制度が整備されてきたが、今後は廃止措置の技術面での国の関与が期待される。2009年4月の原子力部会で、2030年前後からの本格的リプレース需要を見越した対応として、国は廃止措置技術に関する検討への関与を示唆した⁽¹²⁾。

それに対し、電気事業者は、「将来の円滑な廃止措置の実施に向けて、国内外の最新技術を踏まえた廃止措置技術（解体技術、除染技術等）をレビュー中であり、今後、国の検討会等の場でも、最新の廃止措置技術の検証が進められることをお願いしたい」とした⁽¹⁾。

5. 廃止措置に係る技術の課題とその取り組み（技術調査および技術確認試験）

廃止措置実施に必要な技術には、システムエンジニアリング、解体技術、廃棄物処理処分技術

術等がある。図8にその概要と体系を示す。

廃止措置に係る技術の課題とその解決のための取り組みとしては、海外を含めた国内外の廃止措置の実績を踏まえた廃止措置技術を反映し、その実証・検証、工法のレビューが必要と考えられる。このうち、国内試験の成果としては、① JPDRの廃止措置技術開発試験、② 原子力発電技術機構（旧NUPEC）確認試験（解体技術、廃棄物処理処分技術等の開発）がある。今後は、実証・検証、レビューの成果を踏まえて廃止措置計画を検討・策定することが大事である。廃止措置計画に係る主な検討項目を表1に示す。ここで、合理的な廃止措置計画を検討・策定するには、運転停止前から廃止措置の準備を進めておくことが重要と考える。

(1) JPDR廃止の措置技術開発試験

JPDRの廃止措置技術開発試験では、解体シ

- a. システムエンジニアリング
システムエンジニアリングとは、廃止措置全体のシステムを管理する技術で、合理化設計、支援システム、廃棄物管理、工程管理等より構成される。
- b. 解体技術
解体技術は、施設の解体に必要な技術で、以下の技術で構成される。
・切断技術：網構造物切断、コンクリート切断、
・安全防護技術：安全防護対策技術、二次廃棄物抑制技術
・除染技術：解体前除染（系統除染、大型機器除染）、解体後廃棄物除染
・放射能計測技術：インベントリ評価技術、クリアランス測定技術
- c. 廃棄物処理処分技術
廃棄物処理処分技術は、解体廃棄物の処理処分基準に合致した合理的な処分を行なうための処理技術、処分技術、再資源化技術、再利用技術等で構成される。

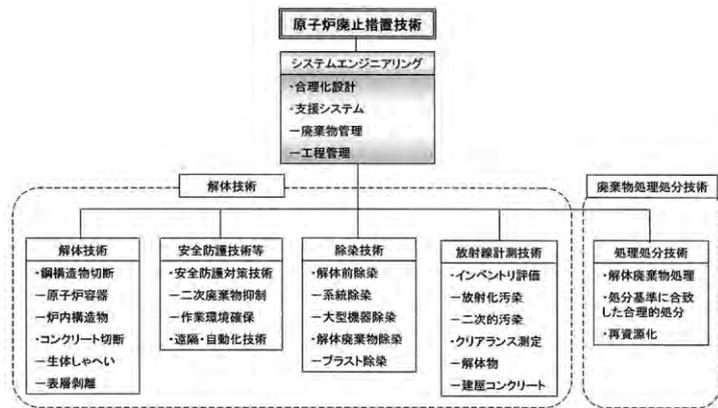


図8 廃止措置に係る技術の概要と体系

表1 廃止措置計画策定に係る主な検討項目（例）

	基本設計	詳細設計 I	詳細設計 II / 行政手続等	廃止措置工事
工程			▽停止計画公表 ▽運転停止 ▽廃止措置計画認可 申請等行政手続	▽SF燃料搬出 ▽工事着手
基本計画 (エンジニアリング) 検討	●跡地/施設利用計画 ●国、都との協議（事前調査） ●費用計画（引当金取崩/積増） ●物量把握/評価 ●放射化/汚染放射能評価調査	●工法検討/廃棄物量/放射能 インベントリ他 ●準備工事計画/先行工事計画 ●処分制度化（規格基準）整備	●定期検査計画策定と官庁調整 ●廃止措置計画認可申請 ●保安規定/電気工作物変更 ●解体に伴う設備設置許可/工認申請 ●自然公園法手続き 他	●発電所調整 ●費用管理 ●法手続管理 ●費用低減計画
解体工事 検討	●解体工程・工法の比較検討 ●系統除染/安全貯蔵管理 ●先行解体/標準工程	●解体工程、工法の詳細化 ●系統除染範囲 ●解体技術/基本工程策定 ●安全貯蔵管理範囲/期間	●工程/工法の現場調整 ●詳細工程策定（準備工事） ●コスト積算/合理化計画 ●設備維持 ●安全貯蔵期間中工事計画	●工事管理 ●次期工事計画 ●費用削減 ●技術内部化
廃棄物 処理処分 検討	●使用済燃料搬出計画 ●輸送方法検討 ●受入先調整 ●放射性廃棄物処理方法 ●処理処分計画策定 ●一般廃棄物処分方法 ●クリアランス廃棄物処分計画 ●廃棄物量把握と処分計画 ●解体廃棄物処分先の調査	●燃料輸送などの申請手続き ●解体廃棄物処分先の絞り込み ●放射能評価、除染計画 ●費用積算・放射線管理計画	●解体廃棄物処分先の確定 ●放射能評価、除染計画 ●費用積算・放射線管理計画 ●廃棄物処理施設毛設計 ●データベース整理 ●クリアランス再利用計画	●廃棄物低減 ●処分具体化 ●輸送具体化

ステムエンジニアリング，解体技術，放射能インベントリ評価技術，除染技術，放射線管理技術等の8項目について総合的な技術開発が進められた。特に，原子炉の解体作業を進めるに当たり，作業員の被ばく低減の観点から解体技術の開発が重要であるとの認識に立って，機器・構造物の特徴に応じた遠隔操作技術が開発された。

(2) 廃止措置に係る技術調査および確証試験

「解体作業の効率化を図るための技術開発」(1985年原子力部会報告書)については，国から「実用発電用原子炉廃炉設備技術調査」(「廃炉設備技術調査」)を(財)エネルギー総合工学研究所(エネ総研)が受託し，「実用発電用原子炉廃炉設備確証試験」(「廃炉設備確証試験」)を旧NUPECが受託して実施した。それぞれ2002年度，2003年度に終了している。

「廃炉設備技術調査」，「廃炉設備確証試験」の成果は，従来その実施元が管理してきたが，旧NUPECが2008年3月で解散し，その事業がエネ総研に移管，継承されたため，廃止措置に係る事業もエネ総研が継承した。その結果，エネ総研は，実用発電用原子炉廃炉設備の技術調査および確証試験に関する情報を一元管理しており，わが国における実用発電用原子力プラ

ントに係る廃止措置に関するノウハウを把握する中枢機関となっている。

① 廃止措置に係る廃炉設備技術調査(1983～2002年度)

エネ総研は，商業用原子力発電プラントの廃止措置が安全かつ円滑に行われるよう，長期的観点で，今後，具体化する軽水炉プラントの廃止措置の具体的検討に資すべく，廃止措置に係る制度，シナリオ(標準工程，解体費用検討，廃棄物処理処分費用検討)，法手続き等の海外動向を調査し，廃止措置のあり方について検討するとともに，解体工数，廃棄物発生量，被ばく線量，費用等に関する検討を行なった。

成果は，適宜，総合エネルギー調査会原子力部会等の検討に反映され(図9)，わが国の廃止措置の方針策定の基礎資料として，廃止措置の標準シナリオ策定，費用に対する引当金制度の構築で参考とされてきた。

② 廃止措置に係る廃炉設備確証試験(1982～2003年度)

旧NUPECは，商業用原子力プラントの廃止措置を安全かつ確実に遂行するため，廃止措置に係る基盤技術(必要技術)の開発を行うとともに，東海発電所の廃止措置で必要となる技術

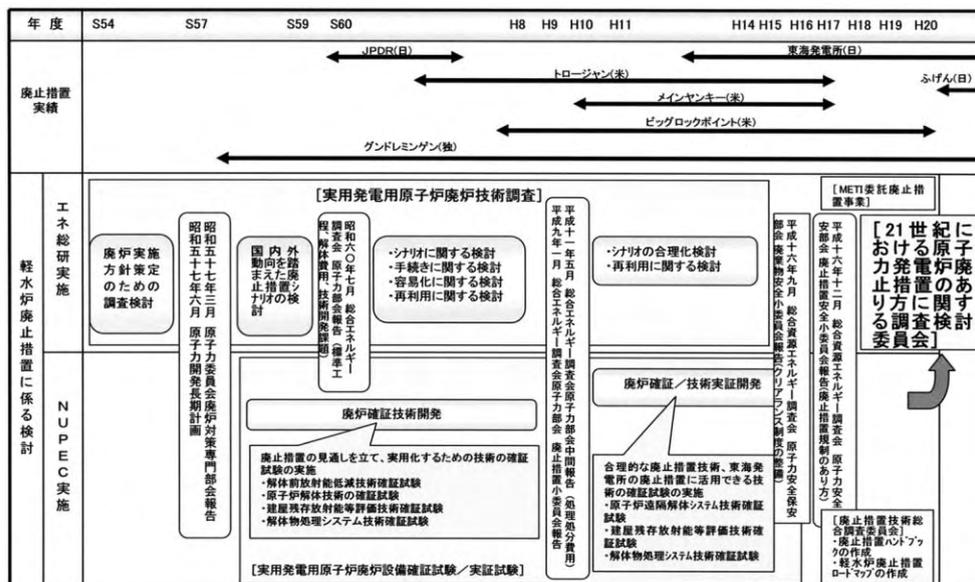


図9 廃止措置に係る従来の動向

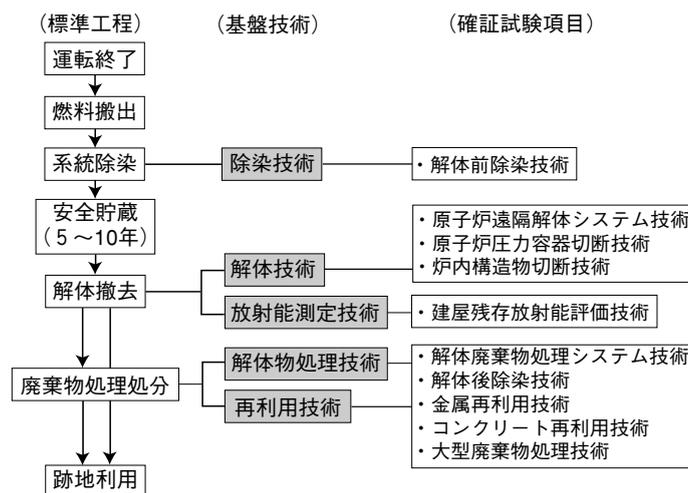


図10 旧NUPEC確証技術

の確証，実証を行なった。

本試験では，技術の向上と安全性・信頼性の確証のため，解体，除染，廃棄物処理に関する技術開発を推進した。本試験の成果に，国内外での技術開発や廃止措置の実績を加え，廃止措置ができる技術的見通しを得ることができた。図10に，本試験での標準工程，基盤技術，確証試験項目の対応を示す。

③ 廃止措置ハンドブックおよび軽水炉廃止措置実施に向けたロードマップ

旧NUPECでは，確証試験終了後，「廃止措置技術総合調査委員会」（委員長：石榑頭吉東 大名譽教授，日本アイソトープ協会常務理事）を設置し，2006年度に『廃止措置ハンドブック』を作成した。このハンドブックは，除染，解体，測定，再利用等の廃止措置に係る技術データベースをまとめた廃止措置関係者の参考図書となっている。

また，2007年度には，軽水炉プラントの廃止措置を安全かつ合理的に実施するために諸課題を抽出し，『軽水炉廃止措置実施に向けたロードマップ』を作成し，課題解決のための基本的な道筋を示した。本ロードマップは，廃止措置全般の課題を漏らさずに網羅的に取り上げて整理できるようにするため，全体を① 廃止措置

全般，② 政策・方針，③ 計画と実施，④ 規制・基準，⑤ 技術工法，⑥ 廃棄物管理，⑦ 地域社会・経済の7つの分野に分割し，各分野について課題（全17課題），目標，課題解決のためのアクションプランを整理した。

本ロードマップは，作成後，3年が経過しており，作成後の状況変化による最新知見に基づいた見直しが必要である

6. 今後の軽水炉プラントの廃止措置実施に向けた取り組み

商業用原子力発電炉の廃止措置を取り巻く環境を整理すると，海外では，アメリカ，ドイツ等の主要国において廃止措置の実験が蓄積されている。他方，わが国では，ガス炉，ふげんが廃止措置を実施中である。さらに，軽水炉プラントの廃止措置の具体化が目前に迫ってきており（現状計画段階），軽水炉プラントの廃止措置の本格実施に向け，実施環境が大きく進展してきている。

このような状況においてエネ総研は，2008年度に「21世紀における原子力発電炉廃止措置のあり方に関する調査検討委員会」[※]を設置した。エネ総研の財産と旧NUPECの財産（上記の軽水炉廃止措置実施に向けたロードマ

※委員長：石榑頭吉東 大名譽教授，日本アイソトープ協会常務理事，メンバー：電力，研究機関，プラントメーカー，建設会社等，事務局：エネ総研

ップ等)を念頭に、中立的な第三者機関という立場を生かし、① 廃止措置具体化要件の明確化、② それらに基づいた関係機関への提言、③ 社会への情報発信の役割を果たすため、「運転を終了した原子力発電所は解体撤去し、跡地を原子力発電用地として、社会の理解を得つつ引き続き有効利用する」⁽²⁾を基本方針に、以下の基本的枠組に基づいて、軽水炉プラントの安全にかつ合理的な廃止措置の実施に向けた検討を行なっている。

<基本的枠組>

- ① 安全に解体撤去・廃棄物処理処分する
国内外での技術進捗について評価・検証し、最新知見を反映して「合理的な標準工程」の見直しを行なうとともに、「廃止措置費用の合理的な試算」に係る評価条件を整備する。
- ② 地域をはじめとする社会からの信頼を得る
適宜社会に対して情報の公開・発信を行なう。
- ③ 必要な資源を確保する
関係者間の最新情報の共有を図るとともに、技術の継承、人材の確保、養成を行なう。

7. まとめ

以上を整理すると次のとおりである。

- ① 軽水炉プラントの将来に向けた具体的かつ合理的な廃止措置検討の時代が到来している。
- ② 廃止措置を実施するに当たって必要な制度が整備されてきて、法改正が進んだ。
- ③ 安全かつ合理的な廃止措置を実施するために、今後、海外プラントでの廃止措置実績を含めて、国内外の実績を踏まえた廃止措置技術の実証・検証、工法のレビューが必要である。
- ④ 軽水炉プラントのリプレースを円滑に進めるため、適切な廃止措置に係る費用負担の平準化が必要であり⁽⁶⁾、浜岡1、2号機等の廃止措置計画が具体化してくる等、廃止措置の内容がより明確になっていくことを踏まえて、本稿では紙幅の関係で詳細な説明は省略したが、今後も適時適切に上記③の成果等を反映した「技術」の変化に基づいた廃止措置に係る費用の見直しが必要である。
- ⑤ 技術基準の性能規定化に基づいて廃止措置に関する民間規格の整備を推進し、最新の科学的知見を反映し、技術進歩への迅速かつ柔軟な対応を容易にすることが必要である。
- ⑥ 軽水炉廃止措置実施に向けたロードマップは、作成後の状況変化による最新知見に基づいた見直しが必要である。

8. おわりに

本稿では、具体化する軽水炉プラントの廃止措置の実施に向けて、最近の国内外の廃止措置経験、わが国の従来の廃止措置に係る動向等を踏まえ、原子力発電プラントの合理的な廃止措置のあり方についてエネ総研の今後の取組みを含めて紹介した。

今後、軽水炉プラントの合理的な廃止措置のあり方に向けて、具体的活動のためのアクションプランの見直しを行なっていく必要がある。エネ総研は、将来の軽水炉プラントの廃止措置の実施にむけた唯一の第三者検討機関として、従来より幅広く廃止措置シナリオ等に係る調査、検討を実施してきており、今までもまして、その成果を関連機関に提言していく。

本稿で紹介した原子力プラント以外にも、今後、運転停止して、廃止措置へ移行していく軽水炉プラントが増えていくと考えられる。その廃止措置は、安全かつ合理的に実施しなければならない。本稿で述べた内容が今後の軽水炉プラントの廃止措置に係る検討の一助となるものと期待する。軽水炉プラントの廃止措置については、それに係る国、電気事業者、作業実施者等がそれぞれの役割の中で責任を果たしていくことが重要であると考ええる。

最後に、既設の軽水炉プラントは必ずしも廃止措置を考慮した設計となっていないため、実際の廃止措置の計画および実施において難しい問題が出てきている。したがって、次世代炉を含めた今後の軽水炉プラントにおいては、廃止措置を合理的、かつ効率よく実施するためにも、設計段階から廃止措置を念頭に置くことが重要である。

参考文献

- (1) 世界の原子力発電開発の動向2009年版, 原産協会
- (2) 総合エネルギー調査会原子力部会「総合エネルギー調査会原子力部会報告書－商業用原子力発電施設の廃止措置のあり方について－」昭和60年7月15日
- (3) 実用発電用原子炉の設置, 運転等に関する規則 (昭和53年12月28日通商産業省令第77号)
- (4) 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会第19回原子力部会資料4
- (5) 電気事業分科会原子力部会報告書「原子力立国計画」平成18年8月8日
- (6) 総合エネルギー調査会原子力部会原子炉廃止措置対策小委員会報告書「総合エネルギー調査会原子力部会報告書－商業用原子力発電施設の廃止措置に向けて－」平成9年1月14日
- (7) 総合エネルギー調査会原子力部会総合エネルギー調査会原子力部会中間報告－商業用原子力発電施設解体廃棄物の処理処分に向けて－」平成11年5月18日
- (8) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃止措置安全小委員会「実用発電用原子炉施設の廃止措置に係る安全確保及び安全規制の考え方について」平成13年8月13日
- (9) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会「原子力施設におけるクリアランス制度の整備について」平成16年9月14日(平成16年12月3日改訂)
- (10) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃止措置安全小委員会「原子力施設の廃止措置規制のあり方について」平成16年12月9日
- (11) 平成20年4月21日原院第1号「原子力施設における放射廃棄物でない廃棄物」の取り扱いについて (指示) 平成20年5月27日
- (12) 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会第19回原子力部会資料3-1

ウラン資源のダイナミックス

楠野 貞夫 (プロジェクト試験研究部 参事)



1. はじめに

最近発行された『原子力エネルギー・アウトLOOK2008』(エネルギー総合工学研究所訳, OECD/NEA刊)⁽¹⁾によれば, 原子力発電は, 全世界の発電の16%を占めており, 26億メガワット時 (MWh) を発電した。これは, 2006年の実績であるが, 発電設備容量はほぼ370ギガワット (GW) で, 天然ウランの要求量はほぼ6万6,500トン・ウラン (tU)⁽²⁾であった。これを石炭で代替するならば13億トンあまりになる。

2009年1月現在, 世界中で432基の原子炉が運転中で, 30カ国と1経済地域(台湾)にまたがっている。発電設備容量は約390 GW⁽³⁾で, 軽水炉(加圧水型炉および沸騰水型炉)が88%を占めている。

原子力発電設備容量は, 今後とも世界的に伸びると予想されている。したがって, 天然ウランの要求量も伸びることになり, 2030年までには年間9万4,000 tU~12万2,000 tUになるとの予測⁽²⁾もある。世界的には, 原子力発電炉の建設の重点は, 軽水炉に置かれており, 資源利用率が軽水炉の60倍以上になる高速増殖炉の本格的登場はまだ先になる。ウラン資源の枯渇が問題になりそうであるが, 既知のウラン資源量は, 使用済燃料を再処理してリサイクルしなくても, 少なくとも2050年までは全世界の原子力発電所に燃料を供給するのに十分であると予測されている⁽¹⁾。

本稿では, 「ウラン資源とは何か」からはじめて, このような予測の意味を考え, さらに不確定性の高い2050年以降の軽水炉発電規模予測に影響を与える因子についても考察する。

2. 原子力エネルギーの利用法と利用可能資源

(1) 原子力エネルギーの利用法

原子力エネルギーは, 原子核の結合エネルギーの解放によって得られる。解放時のエネルギーの利用法には, 核融合, 核分裂, 原子核の自然崩壊の3通りがある。

1つ目の核融合では, 質量数の小さな原子核を合体させることにより, 結合エネルギーが解放される。2つ目の核分裂では, 質量数の大きな原子核を分裂させることにより, 結合エネルギーが解放される。これは, 核子あたりの結合エネルギーを質量数の関数と見た場合, 水素(質量数1)から鉄(質量数56)までは増加関数であり, 鉄以降は減少関数になっているからである。鉄の結合エネルギーが最も高いのである。

3つ目は, 原子核の自然崩壊に伴い放出される放射線のエネルギーを利用する方法である。例えば, プルトニウム238 (Pu-238) の崩壊熱 (α 崩壊により放出される α 線の運動エネルギー) を熱電変換する原子力電池が, 探査衛星などに利用されていることはよく知られている⁽⁴⁾。過酷な環境で長年にわたり働き続ける長所をもつが, 大規模な発電には向かない。

(2) 核分裂により利用可能な資源

現在、人類が核分裂エネルギーの資源として入手できる元素は半減期が非常に長いウラン (U-235とU-238) とトリウム (Th-232) のみである。原始の核種合成過程の1つであるr-過程⁽⁵⁾においては、プルトニウムなども生成されたが、半減期が短いので天然には残っていない。その唯一の証拠がPu-244である。Th-232の半減期はほぼ宇宙の年齢に、U-238の半減期はほぼ地球の年齢45億年に等しい。

ウラン同位体U-235とU-238とはr-過程で生成された時には、同じ組成割合⁽⁶⁾ (50%濃縮度)であったと推定されている。しかし、現在の地球上での組成割合が原子数比で0.0072 (0.72%)であること、またU-235の半減期が約7.1億年であることを考慮すると、これらの重い核種は60億年程度前に生成されたものではないかと推定されている⁽⁶⁾。

アフリカのガボンにあるオクロ鉱山では、17.4億年前の天然原子炉が発見されている。オクロの天然ウランの一部に、U-235組成比が通常の0.0072とは異なるものがあることなどから、その存在が分かった。この年代から逆算すると、当時の天然ウランはU-235が3%であった⁽⁷⁾ことがわかる。これは、現在の商業炉の

濃縮ウラン燃料の濃縮度とほぼ同じである。オクロ天然原子炉は周期的に臨界を繰り返しながら10万年から50万年間稼働したと考えられている⁽⁷⁾。

天然にある核分裂性核種はU-235のみである。オクロ天然原子炉でも、核分裂をしたのは主としてU-235である。天然原子炉と言っても、当時は現在の軽水炉とほぼ同様の濃縮ウランを燃料とする軽水炉であったことは重要である。他方、U-238とTh-232は、核分裂可能核種であり、核分裂を引き起こすためには中性子のエネルギーがある値よりも高いことが必要である。しかし、中性子を吸収させて核分裂性のPu-239やU-233に転換して利用できる。

3. ウラン資源の特徴と利用

原子力のエネルギーセキュリティー面での主な長所を、ウラン資源の点から言えば⁽¹⁾：
 ①ウラン燃料のエネルギー密度が高いこと、
 ②ウラン資源と加工施設とが地政学的に多様で安定な地域にあること、
 ③燃料の戦略的貯蔵が容易であること、
 ④化石燃料発電に比べ、原子力発電は燃料の価格変動に対する脆弱性が小さいこと (燃料コストは全発電コストの

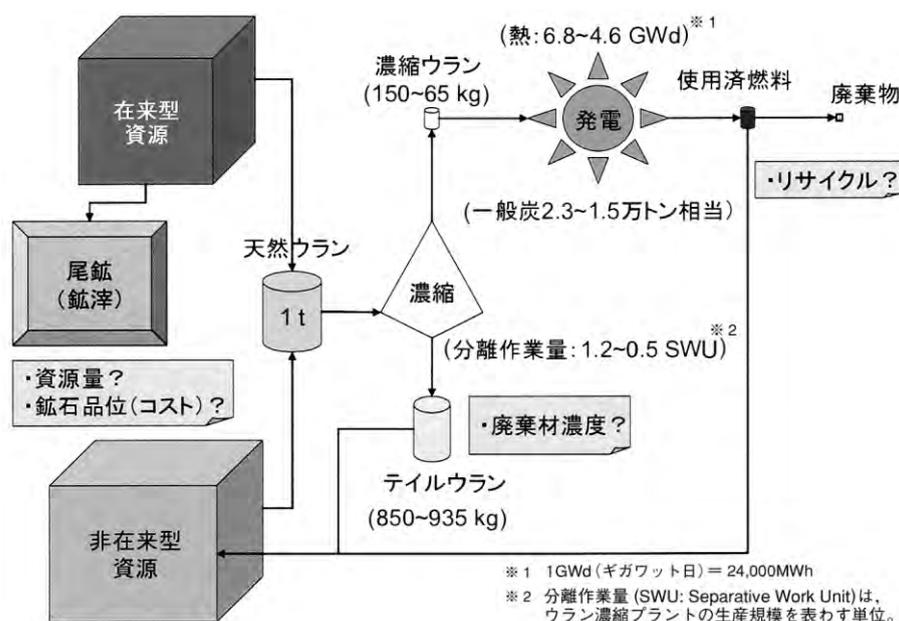


図1 1トンの天然ウランに関する工程と物量

4分の1程度であり、しかもウランコストは燃料コストのほぼ2分の1程度である)⁽⁸⁾、⑤リサイクルにより資源利用効率を高めることができること、である。

図1は、天然ウランの採掘から利用を経て、使用済燃料に至るまでの工程と物量との概略を示している。以下で議論する項目に「？」を付けた。1トンの天然ウランを、エネルギー的に等価な一般炭で代替するならば、2万トン(～2.2万m³)前後が必要である。しかも、一般炭には石炭灰が5～10%残される。中国では、この石炭灰からウランを回収する試みもある⁽⁹⁾。

●ウラン資源量、品位、コスト、タイミング
ウラン資源といえば、通常は「在来型」を指しており、世界にウラン取引市場が存在している。在来型ウランの生産方法は2006年実績⁽²⁾で、

露天掘り(～24%)、地下坑道(～40%)、原位置浸出[ISL: in situ leaching](～25%)、その他(～11%)である。金や銅の副産物としてのウランはその他に分類される。資源に関して問題になるものは、その量と回収コストである。表1では、2007年のウラン資源量に関する評価をレッドブック⁽²⁾から抽出して整理している。

2005年と比較して2007年のウラン資源が増えた理由は、ウラン価格が高騰したためにカットオフ品位を見直したせいである(図2参照)。資源量は、経済的に関心のある資源に関する入手可能な情報のスナップショットであって、地殻に含まれる採掘可能なウランの総量ではない⁽¹⁾。

ウランの生産は、その価格に影響を受ける。しかし、ウラン鉱床の発見から生産の開始までには、歴史的にかなりの時間経過があるこ

表1 NEA/IAEA区分方式で分類した在来型ウラン資源量の推計⁽²⁾

資源区分 [百万tU]	既知資源 (Identified Resources)		未発見資源 (Undiscovered Resources)	
	確認資源 (RAR)	推定資源 (IR)	予測資源 (PR)	期待資源 (SR)
コスト区分なし				2.973
<\$130/kgU (<\$50/lbU ₃ O ₈)	>3.338	>2.130	2.769	4.798
	5.469		7.567	
在来型合計*	5.47 (4.74)		2.769	7.771
			10.5 (10.1)	
究極資源*	16.0 (14.7)			

* 括弧内は2005年の値

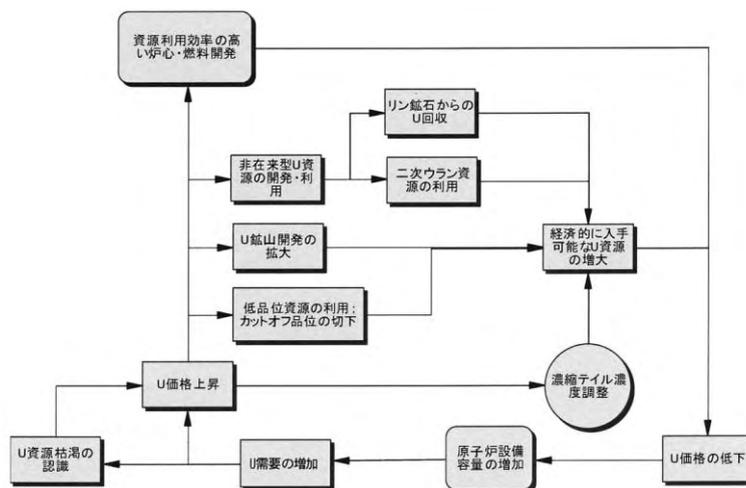


図2 ウラン価格のダイナミクス

とが知られている。逆に、せっかく生産を開始しても価格が安い場合にはスタンバイの状態に維持される鉱山もある。ウラン生産者は、タイミング、人材、規制の不確定性を考慮に入れて開発の時期を判断することになる。

開発に時間が掛かる理由の一部は環境と規制要求である。これらの開発期間には、探査の開始から鉱床の発見までの時間は含まれていないから、全く新しい鉱床が生産開始に至るまでには15年以上を要するとしても不合理ではないだろう。発見から採鉱開始まで30年の例も報告されている⁽¹²⁾。開発と生産とが、何十年間も低調である場合には、ウラン地質学者と鉱山技術者の全世代が形成されないことになる⁽¹³⁾。ウラン鉱山の廃止もまた、やはりウラン価格の動向に影響される。最近のウラン価格の高騰に伴い、ほぼ閉山同様であった鉱山からの採掘を再開した例もある。図2は、ウラン価格形成のダイナミックスを模式化している。価格動向によっては、カットオフ品位の見直し、非在来型資源の導入、濃縮テイル濃度の調整が手っ取り早い。長期的に高価格の時代が継続する見込みがない限りは、前述の通り、新たなウラン鉱山開発に乗り出すにはタイミングを見極める必要がある。まさに山師である。

●非在来型資源

非在来型資源の代表的なものを表2に整理した。二次ウラン資源を除けば、一般的には低品位である。

●二次ウラン資源はウラン供給に不可欠

二次ウラン資源は、ウラン鉱山からの直接供給（一次ウラン）よりも少ないが、毎年の供給には不可欠である（図3）⁽¹⁵⁾。2030年の供給不足は、ロシアHEUがなくなるためである。しかし、図2のダイナミックスが働くはずなので、筆者はこれを深刻には受け止めていない。

●ウラン資源の品位に関する議論

一部の人の中には、原子力開発とともにウラン資源は掘り尽くされ、鉱石品位が低下するとともに、深く掘り下げるのでコストがかかりすぎ、エネルギー収支はマイナスになると観念的に思いこんでいる人⁽¹⁰⁾もある。このような非科学的な推論を、スイスのDones達⁽¹¹⁾は科学的に反論した。実際、精錬時のウラン鉱石の平均品位の推移の統計データを見ても、1940年代から2005年に至るまで、品位が下がっているという証拠は一切見えない⁽¹⁴⁾。水没の影響で生産開始年が明確にされていないカナダのシガーレ

表2 非在来型ウラン資源の分類

タイプ	品位	説明	
リン鉱石鉱床 (推定資源量：2,200万tU)	~0.01% (100 ppm)	製造法が確立されており、99年まで米国の2工場、97年までベルギーで、94年までカザフスタンで商業生産されていた。リン酸肥料副産物。(年間3700 tU程度)	
黒色頁岩 (black shale) 鉱床		三井物産がウズベキスタンにて共同調査予定 (2008年7月報道)	
褐炭 (lignite) 及び石炭 (coal)		石炭灰からの回収を中国で実施中 ⁽⁹⁾ 。米国では1960~70年代に120万tを回収 ⁽¹⁹⁾ 。	
海水(*)	海水 1t 当たり 1~3 mg	実証されている。量は膨大にある。	
二次ウラン資源 (合計100万tU程度)	HEU (High Enriched Uranium)	90%以上	解体核弾頭から回収された高濃縮ウラン 低濃縮Uによる希釈 (1tHEUは306tNUに相当)
	再処理から回収されたプルトニウム		当面は、軽水炉燃料 (MOX燃料) に加工して利用 (プルサーマル)
	回収ウラン	1%程度以下	再濃縮して軽水炉燃料 (濃縮ウラン燃料) に加工
	テイルウラン	0.2~0.3%	再濃縮 (将来的には、高速増殖炉のブランケット)
			廃棄材濃度調整 (図1)

(*) 推定溶存量46億tUを出すのは、文献(10)などの物売りの種となる。

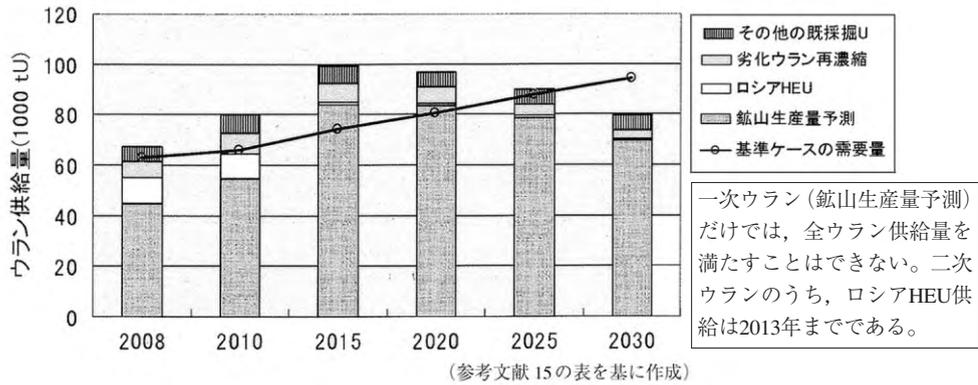


図3 ウランの供給と要求量

イク鉱山の平均品位は19%と言われている。また、ウラン価格決定のメカニズムは、図2をみれば明らかのように、単純なものではない。

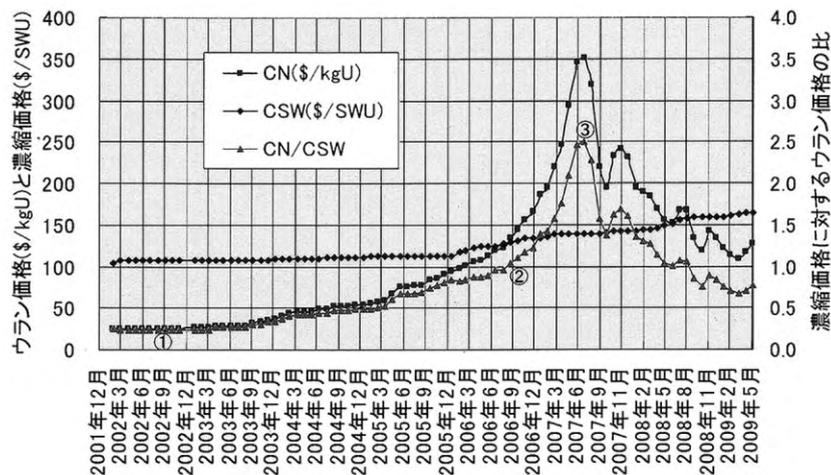
R. Dones達⁽¹¹⁾の結論は、「ウラン鉱石の品位は14 ppm (0.0014%) またはそれ以下であっても、主として軽水炉からなる原子力システムにおいて天然ウランを利用することは、エネルギー的に成り立つと考えられる」。ただし、海水に溶けているウランの平均品位は、残念ながら、3 ppb (10億分の3) と極めて微量である。一方、石炭灰中のウラン濃度は、石炭産地に極めて依存すると考えられるが、中国の石炭灰ウラン⁽⁹⁾の品位は採算が取れるレベルであるのだろう。

地殻におけるウランの品位と存在量との関係については、Deffeyesの分布図⁽¹⁶⁾が有名だが、科学的根拠は乏しいのではないと思われる。

4. ウラン資源と濃縮とのダイナミクス

この数年間のウラン・スポット価格 (CN) (Trade Tech Exchange value) および濃縮価格 (二次濃縮市場価格推定) (CSW) (Trade Tech Restricted) を図4に整理した。濃縮価格に対するウラン価格の比 (CN/CSW) も図示している。

ウラン価格は、2004年から緩やかに上昇し続け、2007年半ばに350ドル/kgUを超えるピークに達した後、乱高下しながら下降している。他方、濃縮価格の乱高下はないが、2006年から緩やかに上昇している。ウラン価格が急激なピークを出して変動した原因は、鉱山事故による供給不安などを背景とする高騰を嫌っての買い控え、トレーダーの利益確定の売り (投機資金流出)、サブプライムローン、米国



(出所: Platts Nuclear Fuel誌から作成)

図4 最近のウラン価格と濃縮価格の推移

エネルギー省（DOE）による在庫放出，シガレーイク等の生産開始に目途がたったことなど⁽¹⁷⁾，である。

●最適廃棄材濃度

電力会社が1トンの濃縮ウランを入手するために，天然ウランNトンと濃縮役務量SWトンSWUが必要だとすれば，その価格は $C=N \cdot C_N + SW \cdot C_{SW}$ となる。この価格を最小にするためには，濃縮時の廃棄材（テイルウラン，または劣化ウランともいう）中のU-235濃度を調整すればよい。

この最適廃棄材濃度曲線は，製品濃縮ウランの濃縮度には依存せず，濃縮価格に対するウラン価格の比（ C_N/C_{SW} ）のみで決められる。図5には，濃縮ウラン1トン当たりに必要な天然ウラン量と濃縮役務量とをプロットした。廃棄材濃度を小さくしていくと，天然ウラン量は節約されるが，濃縮役務量は増大する。価格比曲線上の①，②および③は，図4と対応している。すなわち，ウラン価格が①→②→③と高騰するに従い，濃縮側に負荷を掛けることにより，天然ウラン量の消費を抑える方向に進んでいることが分かる。

これは，スポット価格に関しての話であるが，長期契約によりウランの手配をする電力会社についても同様であろう。このように，ウラン資源量を論じる場合には，濃縮も併せ

て考えることが重要である。また，長期的には，軽水炉の設備容量が増加すること，燃料の高燃焼度化が進むことは，間違いのないであろう。高燃焼度化は，一般的には濃縮度の高い燃料を使うことを意味している。

●システムダイナミクスによる評価

そこで，システムダイナミクス⁽¹⁸⁾を用いて，不確定性の高い今世紀末までのウラン資源要求量を濃縮と併せて評価してみた。

世界の原子力発電設備容量は，文献⁽³⁾などを参考に，1960年代からの実績を積み上げ，原子炉寿命を40年（米国のみ60年）として，リプレースが行われるものと仮定した。2011年からは，毎年20基（20 GWグロス電気出力）が，廃炉／リプレースと同時に進行するものと仮定した。

モデルは，原子力発電，フロントエンド，およびバックエンドの3つのセクターで構成されている。予測に影響を与える因子が多く含まれるフロントエンドのみを図6に示す。評価期間は2010年から2100年までである。

影響因子として，熱効率，（取出平均）燃焼度，設備利用率，バッチをとり，時間変化をグラフ関数で入力した。新規に建設されるプラントは，「第3世代+」以降になるものと予測されるので，燃焼度や熱効率は段階的に高くなるものと考えられる。図7はモデルデータの入力画面である。設備利用率も高くなる

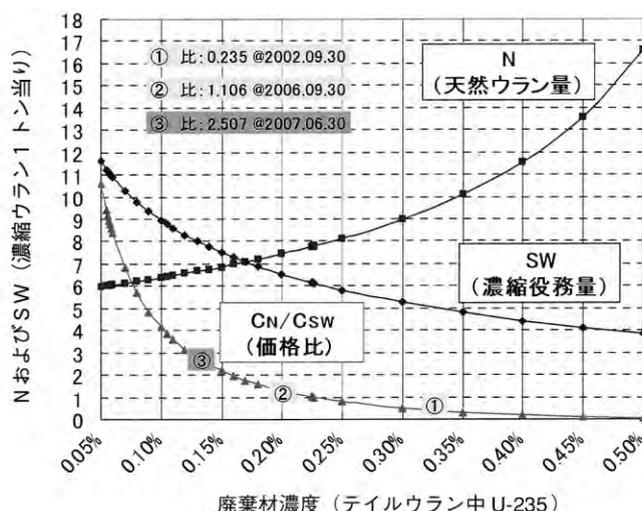


図5 市場データから推定される最適廃棄材濃度の変化

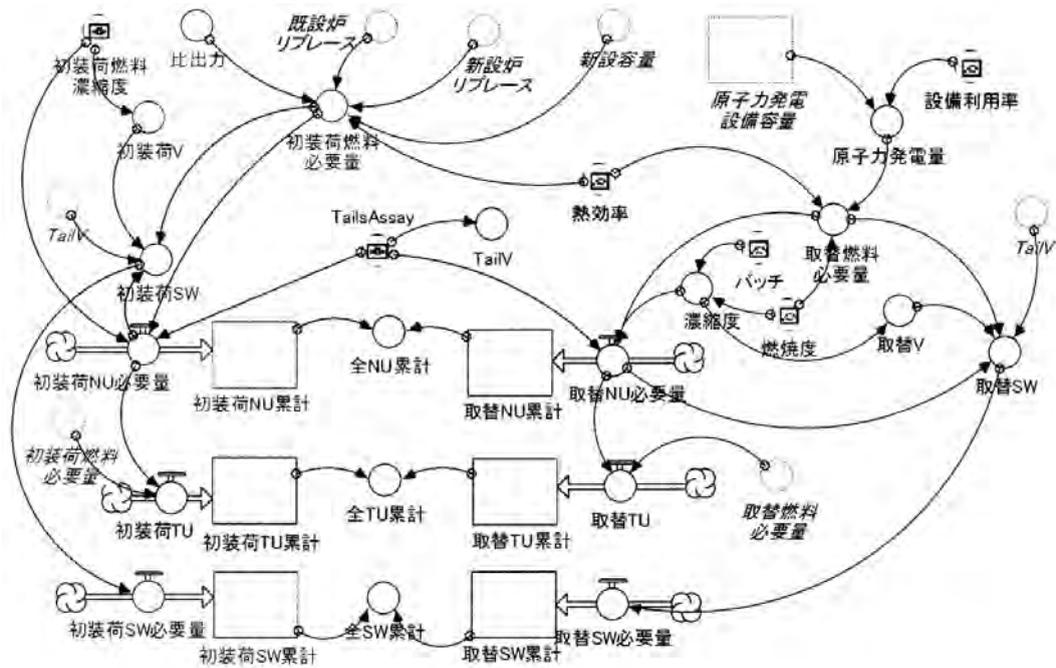
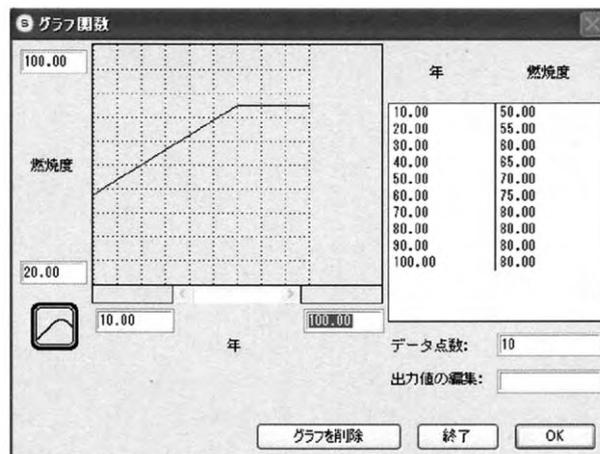
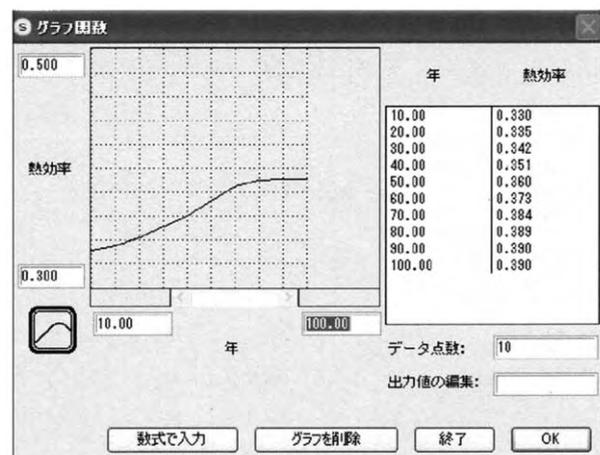


図6 モデル・レイヤーにおけるフロントエンド・セクター



取出燃焼度は、2010年の50Gwd/tから直線的に上昇し、2070年に80Gwd/tに達した後は一定であると仮定した。

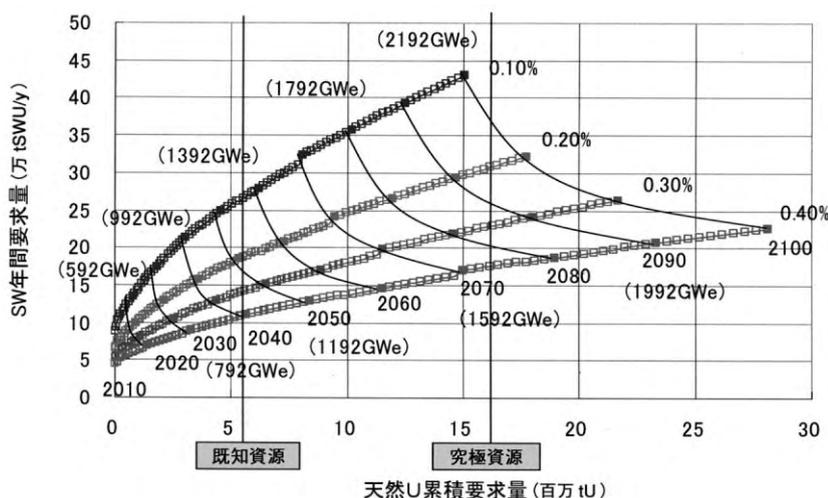
(a)



熱効率は、2010年の33%からS字カーブを描いて徐々に上昇し、2090年には39%に達すると仮定した。

(b)

図7 インターフェースレイヤーにおける新設炉の取出燃焼度と熱効率のグラフ入力画面



天然ウラン累積要求量は、2010年をゼロとしてある。これが、既知資源（550万tU）に達するのは2050年（1,192GWe）である。廃棄材濃度を0.15%以下に抑えておけば、天然ウラン累積要求量は2100年（2,192GWe）になっても究極資源（1600万tU）を超えない。SW年間要求量は、2050年では17万tSWU程度、2100年には37万tSWU程度となる。

図8 天然ウラン累積要求量と分離作業量年間要求量の長期予測

と期待できるが、ここでは85%一定とした。バッチも3で固定した。

現実の廃棄材濃度は経済原理に従って選択されるはずだが、ここでは、廃棄材濃度を0.1%、0.2%、0.3%および0.4%一定としてSTELLAによりシミュレーションした。図8に天然ウラン累積要求量と分離作業（SW）年間要求量との相関図の形にして整理した。2010年（原子力発電設備容量392GWe）を原点にした。このシナリオでは、原子力発電設備容量は2030年に792GW、2050年に1192GWとなり、2100年には2,192GWに達している。廃棄材濃度が0.2%余でも、2050年までのウラン要求量は、既知資源量550万トンよりも小さい。しかし、2100年までになると、廃棄材濃度を0.2%弱にしても、ウラン要求量は究極資源量1,600万トン相当には達する。

2010年を起点として、図8に描かれるウラン資源の消費に関する軌跡は、廃棄材濃度一定のものではあり得ない。累積要求量が増加すれば、廃棄材濃度は下がる方向であるが、濃縮に技術革新が起きる可能性がある。それでもウラン価格上昇を止められなければ、資源の開発加速、さらには高速増殖炉導入の可能性が高まるであろう。

5. おわりに

不確定性の高い2050年以降の軽水炉発電規模予測に影響を与える因子として、燃料取出燃焼度、熱効率などをグラフ関数で仮定し、濃縮プラントの廃棄材濃度をパラメータとして、天然ウラン要求量と濃縮要求量との相関関係を評価した。2010年から毎年20基の原子力発電が増えたとしても、2050年までは既知資源は十分にある。廃棄材濃度を小さくすれば、2100年（2,192GW稼働）までに究極資源内にウラン要求量を納めることは可能である。

究極資源には、未発見資源も含まれる（表1）ので、その開発導入の過程では、非在来型ウラン資源（表2）との経済的競争が起きるであろう。また、図8から分かるように、濃縮技術の革新が極めて重要である。高速増殖炉は、熱効率と資源利用効率との観点から軽水炉よりもはるかに優れているにもかかわらず、世界的には軽水炉（「第3世代」および「第3世代+」）の建設が続く見通しである。したがって、次世代軽水炉の技術革新が鍵となる。

参考文献

- (1) 原子力エネルギー・アウトLOOK2008, NEA No. 6850, OECD/NEA 2008.
- (2) Uranium 2007: Resources, Production and Demand, A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency 2008, OECD/NEA.
- (3) 世界の原子力発電開発の動向 2009, 日本原子力産業会議2009.
- (4) J. Kenneth Shultis and Richard E. Faw, Fundamentals of Nuclear Science and Engineering (New York: Marcel Dekker, Inc., 2002) .
- (5) Francis Albarede, Geochemistry An Introduction (Cambridge: Cambridge University Press, 2003) .
- (6) Martin Harwit, Astrophysical Concepts. 4th ed. (New York: Springer, 2006) .
- (7) Gregory Choppin, Jan-Olov Liljenzin and Jan Rydberg, Radiochemistry and Nuclear Chemistry. 3rd ed. (Woburn: Butterworth-Heinemann, 2002) .
- (8) NEI Report2008: Status and Outlook for Nuclear Energy In the United States.
- (9) WNN 26 March 2009, Uranium company announces Chinese takeover. このほかに, WNN 02 Aug 2007, WNN 04 March 2008, WNN 17 November 2008.
- (10) Jan Willem Storm van Leeuwen, "Nuclear power- the energy balance," February 2008. <http://www.stormsmith.nl/>
- (11) Horst-Michael Prasser, Andre-Samuel Bayard, Roberto Dones, "Sustainability of uranium sources," International Conference on the Physics of Reactors "Nuclear Power: Sustainable Resources," Casino-Kursaal Conference Center, Interlaken, Switzerland, September 14-19, 2008.
- (12) "Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective (The Red Book Retrospective)," OECD 2006.
- (13) Robert R. Price, "Will higher uranium prices restore domestic U.S. production?" Nuclear News, March 2006, pp.25-29.
- (14) Gavin M. Mudd and Mark Diesendorf, Sustainability of Uranium Mining and Milling: Toward Quantifying Resources and Eco-Efficiency, Environmental Science & Technology, Vol. 42, No. 7, pp.2624-2630, 2008.
- (15) Julian Steyn, "Mining the supply gap," Nuclear Engineering International, September 2008.
- (16) Kenneth S. Deffeyes and Ian D. Macgregor, "World Uranium Resources," Scientific American Vol. 242, No. 1, January 1980, pp.66-76.
- (17) 日本経済新聞2007年10月10日:ウラン, スポット価格急落 6月高値の半値 需要家がい控え.
- (18) STELLA V9.0.3. http://www.varsitywave.co.jp//Pro_idea/STELLA/stellatop.html
- (19) Nuclear Engineering International, Jan., 2009, "Turning Ash into cash."

腐食による配管の減肉挙動解析について

内藤 正則 (原子力工学センター
安全解析グループ 部長)



1. はじめに

原子力プラントや火力プラントなどの大規模発電プラントにおいて、内部に流体が流れる配管が腐食し、その結果として配管の肉厚が減少(減肉)して遂には配管にピンホール状の穴が開いたり、あるいは破断に至るといったトラブル事例は時折見られる問題である。表1に外国での事例を含めて、代表的な事故事例を示す。これらの事故は、高温水が流れる配管が破損し、高温水が蒸気となって破損箇所から噴出したものである。原子力プラントにおいては、放射性物質の環境への漏洩はなく、いずれの事故も、一般住民への影響はなかったが、配管破損箇所の近くにいた作業員が不幸にして亡くなる例があり、表における死者数は、このような作業員の死亡数である。

表1に示した代表的事例⁽¹⁾から分かるように、腐食による配管破損の問題は25年以上前から問題となっており、未だ完全に配管破損を防止できる技術は確立されていない。

わが国においては、原子力発電プラントである美浜-3号機において5名の作業員が亡く

なるといふ悲惨な事故が2004年8月に発生した(表1のNo.4)。図1に美浜-3号機の配管破損の状況を示す。直径56cm、肉厚1cmの配管が大きく破れている様子がわかる⁽²⁾。

この事故の経験に基づいて、現在では、配管点検検査(肉厚測定)の強化、測定結果に基づく配管の余寿命評価から、問題となりそうな箇所の配管を事前に交換するといった対応策がとられるようになった。しかしながら、このような対策は一種の対症療法的手段であり、根本的に腐食を抑制するものではない。さらに、例えば原子力プラントの配管では、点検箇所が数千箇所にも及び、点検作業の負荷は大きなものとなっている。

本質的な対策としては、①減肉の要因を定量的に明らかにし、腐食による減肉速度を抑制できる水質を具体的に調整すること(現在も水質調整はなされているが、経験に基づくものである)、②減肉量(あるいは余寿命)を予測して、その結果を重点点検箇所の摘出など点検検査に反映するとともに、③減肉し

表1 発電プラントの配管破損事例

No.	プラント名	型式	発生年月	死者数
1	Navajo-2	火力	1982.11	0
2	Surry-2	原子力	1986.12	4
3	Pleasant Prairie-1	火力	1995.2	2
4	美浜-3	原子力	2004.8	5
5	Iatan-1	火力	2007.5	2

(参考文献(1)を基に作成)

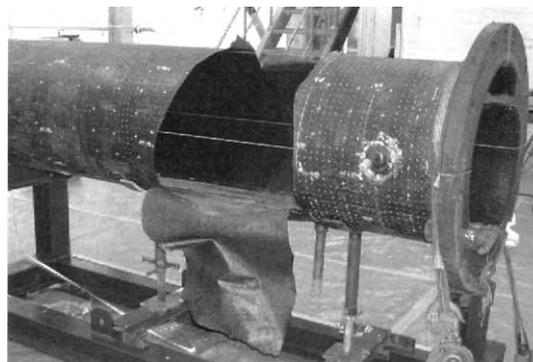


図1 美浜-3号機の配管破断の状況

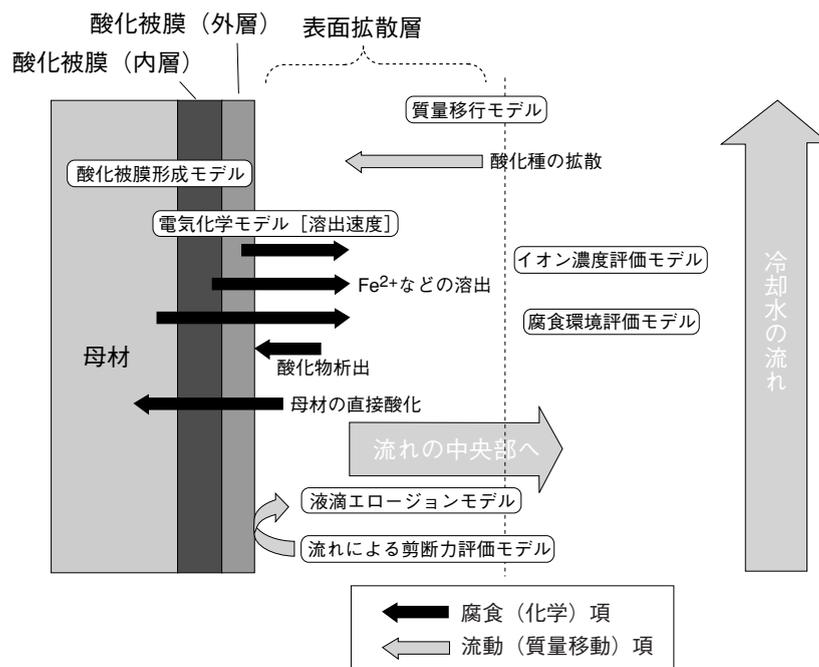


図2 FAC評価のための要素モデル

た配管の交換時期を事前把握しておくことが重要である。

このような背景から、平成17年度より、経済産業省の補助金事業や委託事業に参画しつつ、独自に腐食による配管の減肉挙動を評価できる解析手法を開発してきた^{(3)~(5)}。

本稿では、当財団安全解析グループが開発してきた解析手法を紹介するとともに、同手法を用いた実機配管の減肉評価例を紹介する。

2. 配管腐食のメカニズム

表1に示した事件事例はいずれも、配管の内部に水が流れる系統での配管の腐食に起因する。これは流れの存在によって腐食が加速された現象によるものであり、流動加速腐食(FAC: Flow Accelerated Corrosion)と呼ばれている。FACは、図2に示すように腐食挙動(化学反応)と流動挙動(質量移行)とが重畳した結果、促進される現象である。

鉄イオン(Fe^{2+})を主とする金属イオンは境界層を通して水中に放出される。境界層の厚さは流動によって決まる。境界層では過飽和の Fe^{2+} が酸化物粒子として析出し、金属表

面に蓄積して酸化皮膜となる。FACを決定する基本因子は、構造材(配管)表面の酸化皮膜で、腐食の結果として生成し、同時に保護性皮膜として腐食速度を抑制する。すなわち、境界層の酸素濃度はマグネタイト(酸化皮膜の内層)が酸化してヘマタイト(外層)に転換する上で重要な役割を担い、酸化皮膜の外層を構成するヘマタイトは高い腐食抵抗を有するので、さらなる腐食の進行を抑制する効果がある。

配管内壁(母材)から溶け出す金属イオンの流体中での移行現象、逆に流体中に溶けている酸化物が配管表面に析出する現象など、流体の境界層内における質量移行挙動が金属材料の腐食挙動に大きく影響する。FACの解析においては、図1に示した腐食挙動のモデルと流動挙動のモデルを定量的に数式化し、両者を連成させて解くことが重要である。

図3にFACに対する影響因子を示す。鋼材のクロム含有量など材料因子は酸化皮膜の保護性を左右するパラメータである。水の温度やpHなどの環境因子は鉄イオンの溶解度を左右し、FACを決める重要な因子となる。局所流速などの流れの特徴を表わすパラメータは、

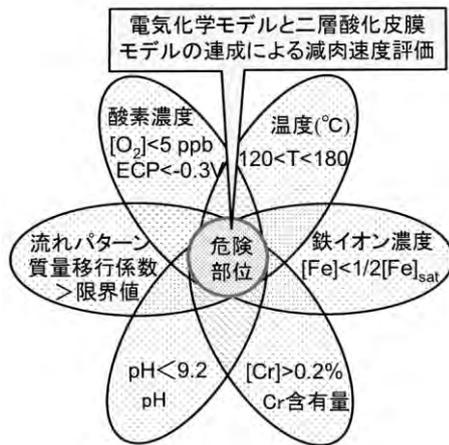


図3 腐食 (FAC) に対する影響因子

境界層の厚さを左右し、鉄イオンの拡散，さらには酸化皮膜の成長に寄与する因子となる。水中での鉄イオンの濃度は流動計算に基づいた化学反応モデルで計算され，計算で得られた鉄イオン濃度が減肉計算のための環境パラメータとしてフィードバックされる。

図3には，個々の影響因子がFACを促進する危険領域を示したが，これは過去の経験から明らかになっているものである。FACは図3に示した各影響因子が危険領域にあり，かつ，それらが重畳した場合に促進され，個々の影響因子単独では促進されない。言い換えると，FACは，各影響因子が危険領域の外に来るように制御することで抑制できる。

危険部位を抽出するためには，図3に示した個別の影響因子を定量的に評価し，それらが重畳する領域を求めることが重要となる。

以上のFACのメカニズムに基づき，FACによる配管減肉を評価する手順を図4に示す。

まず，既存のプラントシステム解析コードを用いて配管系統における流速や温度分布を求める(ステップ1)。原子力プラント(加圧水型軽水炉)では酸素濃度の制御を目的として冷却水中にヒドラジンを注入するため，酸素とヒドラジンの反応を考慮した上で，流路に沿う酸素濃度を求め，あわせて腐食電位(ECP)も評価する(ステップ2)。ステップ3では，水中での腐食影響因子の挙動を求めるために流動解析によって質量移行係数を求める。

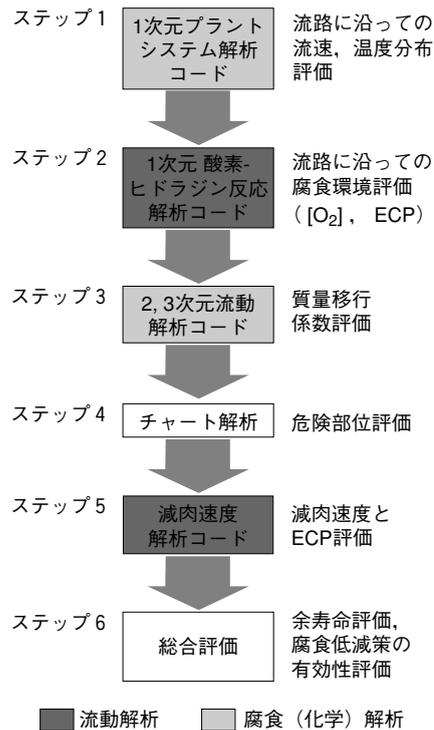


図4 FAC解析システムの手順

ステップ3までの情報から，各影響因子を定量化し，それらが重畳する部分を危険箇所として抽出する(ステップ4)。この危険部位について，電気化学モデルと二層酸化皮膜モデルを連成させて減肉速度を評価し(ステップ5)，最終的に余寿命を評価する(ステップ6)。

3. 要素モデル

本章では，図3に示した影響因子および減肉速度評価モデル(電気化学モデル，二層酸化皮膜モデル)について，現象を支配する主要な方程式およびモデル化の考え方を述べる。

配管材料の化学組成(炭素，マンガン，クロム等の含有率)，および流体のpHは解析の入力値である。

流路に沿っての流体の温度，流速は既存のプラントシステム解析コードによって求める。後述する実プラント配管の減肉解析においては，RELAP5コード⁽⁶⁾を使用した。

(1) 腐食環境評価

腐食環境評価は図4のステップ2に該当し、酸素-ヒドラジン反応を考慮した上で、流路に沿う酸素濃度、ECP等を求めるものである。

① 酸素濃度

配管内を流れる流体を、図5に示すように配管内表面に接する表面層と流路中央部（バルク層）の2領域に分け、領域間の流体混合を考慮して各領域における酸素-ヒドラジン反応を解く。バルク層内及び表面層内の反応は、本稿末尾の(1)～(4)式で表わすことができ、これらを解くことによって腐食環境として重要な酸素濃度を求めることができる⁽⁴⁾。領域間の流体の混合率 χ はCFD（Computational Fluid Dynamics）コードを用いて、別途計算し、(1)～(4)式の入力値とする。

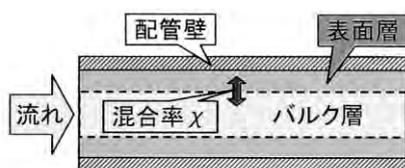


図5 酸素-ヒドラジン反応の解析体系

② 腐食電位 (ECP)

電気化学モデルに基づいて腐食電位 (ECP: Electro-Chemical Potential) を求める。

図6にECP評価モデルの概念を示す。カソード電流は、配管表面にある酸化体の還元反応に基づいて求められる。カソード反応は次の[A], [B]に示す2式で代表される。



カソード反応[B]は水素生成反応であり、水中のプロトン (H^+) が還元され電子を受け取って、カソード電流が増加する。この反応は水の温度、pHに依存する。

アノード反応は次の[C]式で代表される。



アノード電流は、配管鋼材からのイオン放出とヒドラジン酸化反応による電流の和である。両電流とも、酸化物表面と境界層間の拡散の影響を受ける。配管鋼材が炭素鋼の場合は、イオンの主成分は鉄 (Fe^{2+}) であり、ステンレス鋼の場合には、これにニッケルイオン等が加わる。FACは炭素鋼配管でより多くみられることから、ここでは、鋼材からのイオン放出は鉄イオンで代表させることとする。

カソード電流は正、アノード電流は負であり (図6の縦軸は電流密度として絶対値で示している)、両者の電流密度がバランスして正味の電流がゼロとなる電位がECPである。ECPは流体の温度やpHによって決定される水素生成の電位を下回ることはない。

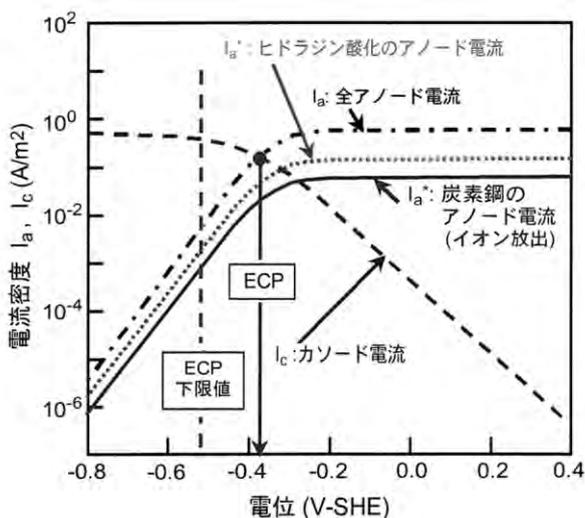


図6 電位腐食 (ECP) の評価モデル

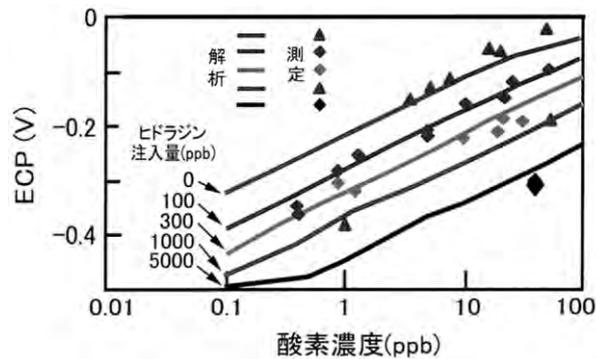


図7 ヒドラジン注入時の酸素濃度とECPの関係

ヒドラジンを配管内の水に注入すると、酸素と反応し、水中の酸素濃度が変化する。このときのヒドラジンの酸化電流によってアノード分極特性が変化し、ECPも変化する。この関係は酸素-ヒドラジン反応モデルと電気化学モデルで表すことができる。カソード電流、アノード電流、ヒドラジンの酸化電流は、本稿末尾の(5)～(8)式で表わされる。

ヒドラジン注入によるアノード分極特性の変化に伴うECPの変化を、酸素-ヒドラジン反応モデルと電気化学モデルを連成させて解析した結果を実測値⁽⁷⁾と比較して図7に示す。解析値は、実測値を良く再現しており、前記モデルの妥当性を示している。

(2) 質量以降係数

図4のステップ3として評価する質量移行係数は、配管内表面近傍における流れの乱れに左右される。配管の曲がり部や、オリフィスあるいは弁の下流側では特に乱れが大きくなることから、FACが促進されることが知られている。配管内表面近傍における詳細な流動挙動は既存のCFD(Computational Fluid Dynamics)コードによって求めることができる。後述する実験解析及び実プラントの解析においては、当財団が所有する解析コードPLASHY⁽⁸⁾を使用した。具体的な計算方法は参考文献(9)に述べられている。

(3) 減肉速度の評価

減肉速度の評価は図4のステップ5に該当する。酸化皮膜の成長を、電気化学モデルと二層酸化皮膜モデルを連成させて解くことにより、母材の減肉速度が求められる。電気化学モデルは酸化皮膜表面での静的な電荷バランスを示すが、二層酸化皮膜モデルは Fe^{2+} イオンのバランスを示し、金属から溶出した Fe^{2+} イオンの質量バランスの積算結果として酸化皮膜厚さが求まる。

二層酸化皮膜モデルの概要を図8に示す。

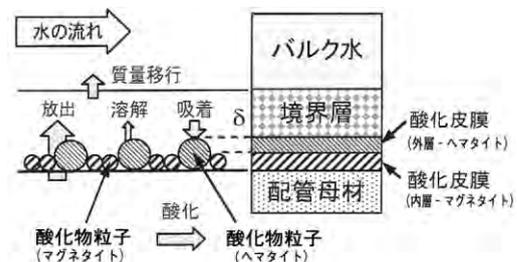


図8 二相酸化被膜モデル

Fe^{2+} イオンは母材から酸化皮膜を通して溶出され、表面に酸化皮膜を形成する。酸化皮膜はマグネタイト内層とヘマタイト外層に分かれ、外層のヘマタイトは内層のマグネタイトが酸化した結果として形成される。

本稿末尾に示す二層酸化皮膜モデルの支配方程式の(11)、(13)式からマグネタイト、ヘマタイトの酸化層の厚さを求めることができる。

4. 解析結果

(1) 実験解析

本手法により、参考文献(11)、(12)に示されている実験を解析した。図9に解析結果と実験値を比較して示す。

解析では、所定の実験条件の下で、流速及び酸素濃度等は既知としてFACによる配管減肉率を求めた。解析では、水質(pH)の依存性を良く再現できていることがわかる。

次に、減肉速度の酸素濃度依存性に関する実験解析の結果を図10に示す。解析は実験結果を良く再現していることがわかる。

酸素濃度が高い場合には、酸化皮膜が生成され易くなるが、同時にマグネタイトの皮膜内層が酸化してヘマタイト皮膜に転換する割合も大きくなる。ヘマタイトは鉄イオンの溶出に対して大きな抵抗となるため、結果とし

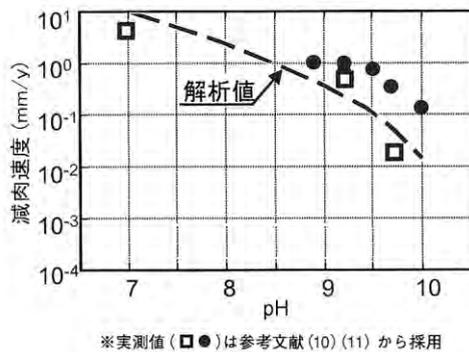


図9 FAC減肉速度解析値と実測値の比較

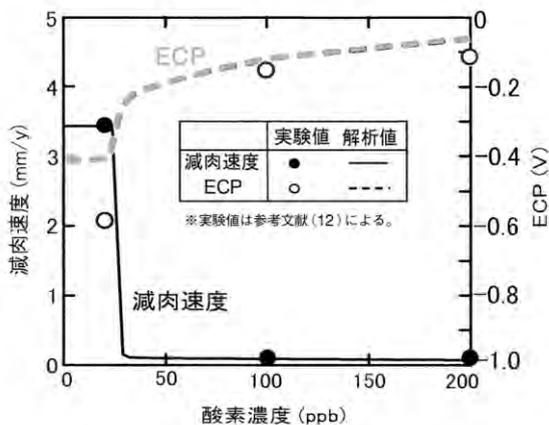


図10 FACによる配管減肉の酸素濃度依存性

て酸化皮膜の成長が抑えられることになる。低酸素濃度の場合には、逆にヘマタイトへの転換率が小さくなるので、鉄イオン溶出が相対的に容易となり、腐食の進行が大きい。すなわち、FACを抑制するためには、酸素濃度を低減することが有効な対策であると言える。図にはECPと酸素濃度との関係も示したが、ECPが低下する領域で減肉速度が大きくなっており、FACの指標としてECPが有用であることがわかる。

(2) 原子力プラント配管の実機解析

原子力プラントでは、定期点検の際に配管の肉厚を実測している。点検間の肉厚実測値の差と、その間の運転履歴から、測定部における減肉速度を求めることができる。

実機解析の対象箇所は、直径約450mmの二次系、復水配管及び給水配管の曲がり部(90°エルボ)とした⁽⁹⁾。配管は炭素鋼であり、クロム含有率は0.01%以下である。

減肉速度を図4に示した解析手順に沿って計算した。すなわち、①ステップ1として流路に沿う流速および温度を計算し、②その結果に基づいて、ステップ2で酸素-ヒドラジン反応を考慮して復水および給水中の酸素濃度、ECPを計算した。水のpHは実測値を用いた。ステップ3である質量移行係数は、三次元CFDコードPLASHYを用いて計算した。これらの情報に基づいて、電気化学モデルと二層酸化皮膜モデルを連成させて解くことにより、母材の減肉速度を求めた。

解析対象とした配管内の流動挙動の特徴として以下の点が挙げられる。すなわち、配管には弁が設けられているが、弁の直下流にあるエルボでは、エルボ自体での流路方向の曲がりに伴う乱れに、弁内で生じた乱れ成分が重畳することになり、最も大きな乱れが生じる。配管肉厚の実測結果においても、弁出口のエルボ部で最も大きな減肉速度を示した。そこで、弁を含んで、下流側に設置されている複数のエルボを解析対象に選定した。

配管のエルボ部における断面方向の流れの特徴を図11に示す。エルボでは、流路の曲がりに伴い、主流方向に対して、図に示すような半径方向、周方向の流れ成分（二次流れ）が現われ、配管内表面近傍における質量移行係数を増大させる要因となっている。

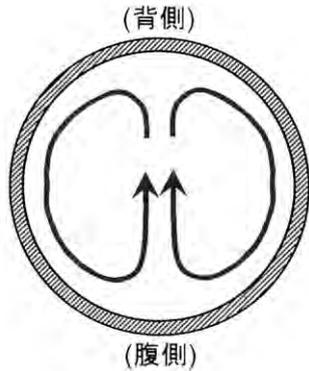


図11 配管の曲がり部における二次流れ

図12に弁出口部に設置されたエルボでの減肉速度について解析値と実測値との比を示す。図12の結果は、2点検間の肉厚測定之差を実測値として、エルボ部の流れ方向（A～E）及び周方向（a～h）の各点で解析値と比較したものである。図中の数値は解析値／実測値であり、数値が小さいほど（図の内側ほど）解析の方が減肉速度を過少評価していることを意味する。

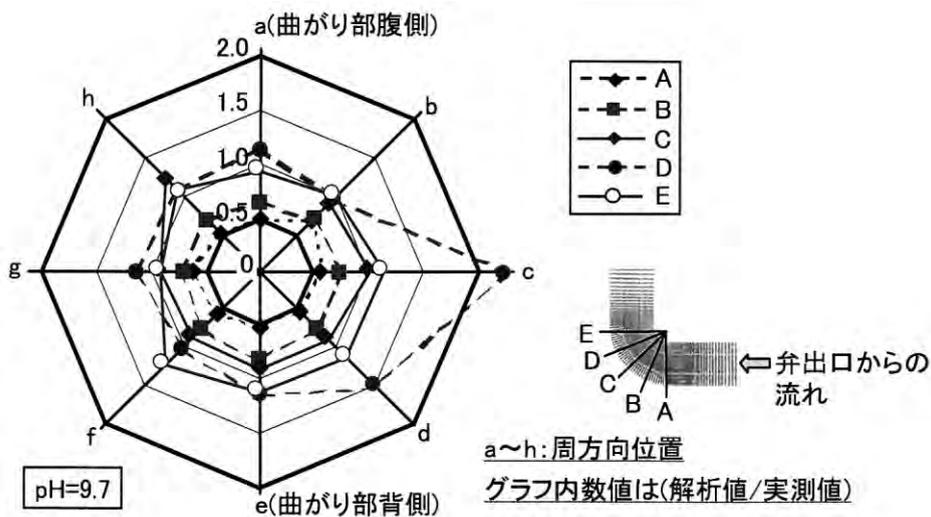


図12 実機配管曲がり部の減肉速度

図から、解析値／実測値は、弁出口に近いほど（A断面）小さく、エルボ中方部（C断面）より下流側では、1.0前後と良い解析精度を示していることがわかる。弁出口に近い部分で解析値が小さい値となったのは、弁内部の複雑な流路の模擬が解析では不十分であったためと考えられる。弁出口での流れの乱れは、エルボ内を流動するにつれて消滅していくため、弁自体の模擬が不十分であっても、下流側ではその影響が小さくなり、解析値は実測値に近づいたものと考えられる。例外的に、D断面の周方向c点において解析値が実測値の2倍を超えて過大評価している。これは、解析値が他の点よりも大きいのではなく、この点における実測値が小さかったことによる。減肉速度の実測値は、肉厚の測定値の差から求めたものであるため、肉厚測定の実測値が重畳して含まれることになる。したがって、解析の精度を評価するためには、同一の箇所に対して時期の異なる多くの実測値との比較が重要となる。

実機では、同一配管の同一箇所について、定期点検の都度肉厚を測定しているので、同一箇所について、時期の異なる肉厚データが採集されている。実機では、運転履歴に応じて水質も調整しており、これらのデータにはpH値の異なるものも含まれている。そこで、

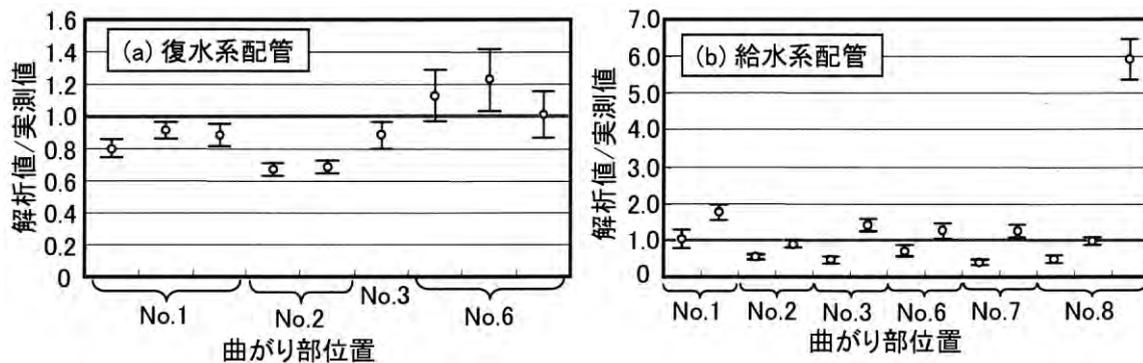


図13 実機配管曲がり部の平均減肉率

図12に示したような、2点検間におけるエルボ部の流れ方向 (A~E) 及び周方向 (a~h) の全データを平均化し、この値を当該エルボの平均減肉速度と定義して、同一箇所についても異なる点検間の平均減肉速度を求めた。この結果を図13に示す。図の横軸は、流れの上流部から下流部に向けてのエルボの番号であり、同じ番号に対して複数のデータがプロットされているのは、同一のエルボに対して測定時期が異なる (水のpH値も異なる) ことを意味している。

図13において、給水系配管No.8のエルボ部で解析値/実測値が6.0と大きくなっている。これは、解析・実測ともに減肉速度は小さい値であったが、実測においては肉厚測定の間隔をとっていることから、肉厚の測定誤差が重畳し、実測値として大きな誤差を生じたことによるものである (この箇所では、実測値が負になる、すなわち減肉ではなく肉厚が増加したという、有り得ないデータも存在する)。

図から、給水系配管のエルボNo.8の例外を除いて、解析値/実測値は、概ね0.5~2.0の範囲内にあると言える。すなわち、解析で得られた配管の余寿命が例えば2年であったとすると、実際は、2倍の4年間は持ち堪えるかも知れないし、逆に余寿命は2分の1の1年であるかも知れない、ということの意味する。

このような解析の精度の意味するところを理解しておけば、本解析手法の実機適用は可能であるが、現在、さらに解析値/実測値が

1.0~1.5の範囲になるよう、すなわち、実機適用上は保守的な評価となるよう解析モデルの高度化・改良を進めているところである。

5. おわりに

原子力プラントや火力プラントの配管で散見された流動加速腐食による配管減肉を対象とした解析手法を開発し、同手法による実機原子力プラントの配管解析事例を示した。

配管減肉の評価手法は、世界的に見てもこれまでは経験 (実際の測定データ) に基づくものがほとんどであり、本解析手法のように物理・化学現象に立脚したモデルによる一貫解析は、未だ公表例がないと思われる。

実機の実測値との比較から、現状の解析精度は余寿命評価においてファクター2以内程度 (余寿命を2倍~2分の1の範囲で評価) である。現状においても解析精度の意味するところを理解した上で実機適用は可能と考えるが、さらに解析精度の向上を目指して手法の高度化・改良を進めている。

参考文献

- (1) R.B.Dooley, Power Plant Chemistry, 10(2) p.70, 2008
- (2) Final report about Mihama-3 secondary system piping failure, Nuclear and Industrial Safety Agency, Tokyo, 2005.
- (3) Masanori NAITOH, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 45 (11) pp. 1116-1128, 2008.
- (4) Shunsuke UCHIDA, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 45 (12) pp. 1275-1286, 2008.
- (5) Shunsuke UCHIDA, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 46 (1) pp. 31-40, 2009.

- (6) <http://www.relap.com/>
- (7) M. Ullberg, et al., "Modeling the oxygen-hydrazine reaction using electrochemical kinetics," Proc. 13th Int Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems- Water Reactors, Whistler, BC, Canada, Aug. 19-23, 2007, CNS, 2007.
- (8) 内藤正則, 他, 日本原子力学会誌, Vol. 41, No. 3, pp174-201, 1999.
- (9) Shunsuke UCHIDA, et al., "Evaluation Methods for Corrosion Damage of Components in Cooling Systems of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics (IV)," J. Nucl. Sci. Technol., (to be published) .
- (10) M. Izumiya, et al., 火力原子力発電, 27, 419, 1976.
- (11) H. G. Heitmann and P. Schub, Proc. Third Mtg. on Water Chemistry of Nuclear Reactors, London, 243, 1983.
- (12) T. Satoh, et al., "Flow-Assisted Corrosion of Carbon Steel under PWR Secondary Water Condition," Corrosion, 63, 770, 2007.
- (13) R. P. Tremaine and J. C. LeBlanc, J. Solution Chemistry, 9, 415, 1980.

[酸素 - ヒドラジン反応の支配方程式]

バルク層領域

$$\frac{d[O_2]_B}{dt} = -k_b[O_2]_B^{0.5}[N_2H_4]_B + \chi([O_2]_w - [O_2]_B) \quad (1)$$

$$\frac{d[N_2H_4]_B}{dt} = -k_b[O_2]_B^{0.5}[N_2H_4]_B + \chi([N_2H_4]_w - [N_2H_4]_B) \quad (2)$$

表面層領域

$$\frac{d[O_2]_w}{dt} = -\left(k_b + k_s \frac{(S/V)_w}{[N_2H_4]_w^{0.5}}\right)[O_2]_w^{0.5}[N_2H_4]_w - \chi([O_2]_w - [O_2]_B) \quad (3)$$

$$\frac{d[N_2H_4]_w}{dt} = -\left(k_b + k_s \frac{(S/V)_w}{[N_2H_4]_w^{0.5}}\right)[O_2]_w^{0.5}[N_2H_4]_w - \chi([N_2H_4]_w - [N_2H_4]_B) \quad (4)$$

ここで、 $[O_2]$, $[N_2H_4]$: 酸素、ヒドラジンの濃度(mol/m³) (添字 B:バルク層、W:表面層)
 k_b : 酸素、ヒドラジンのバルク層内での反応速度(m^{3/2}mol^{-1/2}s⁻¹)
 k_s : 酸素、ヒドラジンの配管内表面における反応速度(m/s)
 (S/V) : 表面積と体積との比(m⁻¹)
 χ : バルク層と表面層の間の流体の混合率(-)

[電気化学モデルの支配方程式]

カソード反応 [A] による電流密度 I_c

$$I_c = f(\phi)C_s / \{1 + f(\phi)/z / F\delta_o D_o\} / \{1 + f(\phi)/z / F\delta_B / D_B + \{1 + f(\phi)/z / F\delta_o D_o\}\} \quad (5)$$

$$f(\phi) = zFk_o \exp(-\alpha z F(\phi - \phi_o) / RT) \quad (6)$$

ここで、金属表面での鉄イオン Fe²⁺の溶解度 C_s は、温度と pH の関数として与えられる。

アノード反応 [C] による電流密度 I_a

$$I_a = f(\phi)[X_{sat} - \{X_b + f(\phi)X_{sat}/z / F(\delta_o / D_o + \delta_B / D_B)\} / \{1 + (f(\phi)/z / F + \beta)(\delta_o / D_o + \delta_B / D_B)\}] \quad (7)$$

ヒドラジン酸化電流 I_a^H

(参考文献12)

$$I_a^H = z\beta^* Fk_o \exp(\alpha z F(\phi - \phi_o) / RT)C_s^H \quad (8)$$

ここで、 C : 濃度(mol/m³)、 D : 拡散係数(m²/s)、
 F : ファラデー定数(=96,485C/mol)、 R : ガス定数(=8.31J/mol/K)、
 T : 温度(°C)、 z : 酸化、還元反応における電子の数(-)、
 X : アニオン濃度(mol/cm³)、 α : 伝達係数(=0.5)、 β : 係数(-)、
 β^* : ヒドラジン酸化効率(-)、 δ : 厚さ(m)、 k : 反応定数(-)、
 ϕ : 電位(V-SHE) (添字 0: 標準電位)
 添字 b :バルク、 B :境界、 O :酸化皮膜、 s :金属表面、 sat :飽和、 H :ヒドラジン

Fe²⁺イオンの溶出速度は電気化学モデルの結果として求められ、溶け出した Fe²⁺イオンの境界層中でのバランスは以下の式で表される。

$$dC/dt\tau_b = I_a/z/F - \delta_m CS_m C_m \tau_b^2 - \delta_h CS_h C_h \tau_b^2 - k_g C / C_{sat} f_b(C) \tau_b - k_m (C - C_b) \tau_b + \zeta_m T_m + \zeta_h T_h \quad (8)$$

$$dC_p/dt\tau_b = k_g C / C_{sat} f_b(C) / W_m \tau_b - k_d C_p - k(C_p - C_{pb}) \tau_b \quad (9)$$

酸化皮膜はマグネタイトの析出により成長する。

$$dC_m/dt\tau_b = k_d C_p \tau_b - (\chi^* + k_m) C_m \tau_b \quad (10)$$

$$dT_m/dt = \delta_m CS_m C_m \tau_b^2 + k_d C_p W_m \tau_b - (\zeta_m + \chi^* + k_m) T_m + \Phi(ECP) \quad (11)$$

酸化皮膜の一部はヘマタイトで、マグネタイトの一部が酸化して生成する。

$$dC_h/dt\tau_b = \chi C_m \tau_b - k_h C_h \tau_b \quad (12)$$

$$dT_h/dt = \chi T_m + \delta_h CS_h C_h \tau_b^2 - (\zeta_h + k_h) T_h \quad (13)$$

ここで、 C : 濃度(mol/m³) (添字なし: 鉄イオン、添字 p : 酸化物粒子)、

C_m, C_h : マグネタイト、ヘマタイト粒子の表面における個数密度(1/m²)、

C_p : 境界層内における酸化物粒子の濃度(1/m³)、

T_m, T_h : マグネタイト、ヘマタイト層の厚さ(mol/m²)、

S_m, S_h : 酸化物粒子の表面積(m²)、

W_m : マグネタイト粒子生成直後の重さ(mol)、

δ_m, δ_h : 鉄イオンの酸化物粒子への吸着率(1/s·m²)、

k_d : 析出率(1/s)、 k_g : 酸化物粒子の生成率(1/s)、

k_m, k_h : マグネタイト、ヘマタイト粒子の境界層を通しての質量移行割合(1/s)、

τ_b : 境界層の厚さ(m)、 ζ_m, ζ_h : 酸化皮膜層での放出率(1/s)、

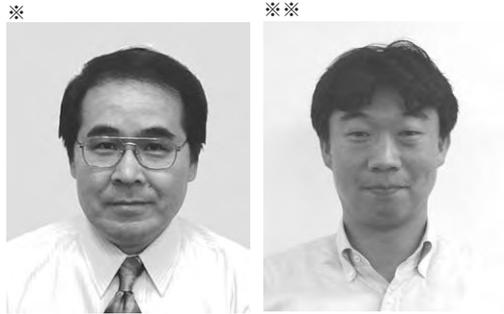
χ^* : マグネタイトからヘマタイトへの転換割合(1/s)、

$\Phi(ECP)$: 配管母材の直接酸化の割合

第24回国際電気自動車シンポジウム 参加報告—現実と希望の狭間に揺れながら—

蓮池 宏 (プロジェクト試験研究部 部長)

渡部 朝史 (プロジェクト試験研究部 主任研究員)



1. 概要

第24回国際電気自動車シンポジウム (EVS-24) が5月13日～16日、ノルウェーのスタバンガー市において開催された。事前登録者数は1,069人、うち日本人は70人とのことであったが、新型インフルエンザの影響で、実際に参加した日本人は30人程度であったと思われる。

今回は、1969年に米国で第1回が開催されてから40周年になる節目の大会であった。開催地のStavangerは1970年代に北海油田の基地として成長したノルウェー第4の都市である。この油田基地都市において電気自動車の国際シンポジウムを開催するということが、次世代の自動車燃料を考える上で極めて象徴的な事象であり、EVSの歴史上特筆すべき大会であったと考えられる。

発表論文数は、口頭発表144件、ポスター発表266件の合計370件で、これは過去最多であった。論文テーマの分類は図1のとおりである。

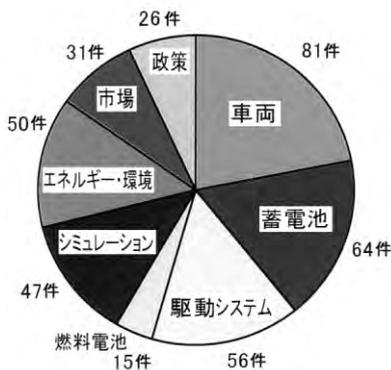


図1 発表論文の分類

国別では、米国の63件が最も多く、次いで34件のドイツ、日本は中国、韓国と同じ28件で3位であった。シンポジウムに並行して開催された展示会は、昨年の金融危機に端を発した自動車不況の影響で出展のキャンセルが相次いだとのことで、出展者数は前回の125社から92社に減少した。この他、電気自動車や電動バイクの試乗会 (試運転会) などが催された。

2. 論文発表

論文発表は、144件を正味8時間 (1コマ2時間×4コマ) で消化するため、6つのセッションが並行する形で行われた。セッションのテーマを表1に示す。

筆者らは、6つのセッションの中、「乗用車」「蓄電池・電力貯蔵」「エネルギー供給・インフラ」のセッションを重点的に聴講した。その概要を以下に示す。

表1 口頭発表セッションの構成

	15日			16日
	午前1	午前2	午後	午前1
会場1	乗用車	乗用車	乗用車	乗用車
会場2	蓄電池・電力貯蔵	蓄電池・電力貯蔵	蓄電池・電力貯蔵	蓄電池・電力貯蔵
会場3	エネ供給・インフラ	エネ供給・インフラ	環境影響・LCA	燃料電池
会場4	導入・実証・市場	導入・実証・市場	普及促進	普及促進
会場5	駆動システム	シミュレーション	駆動システム	シミュレーション
会場6	標準化・規制	重量車	コスト分析	軽車両

(1) 乗用車

乗用車のセッションで発表を行った完成車メーカーは、トヨタ (FCV, HEV)、ホンダ (FCV)、Daimler (FCV)、Audi (FCV)、Renault (EV)、Reva (インド, EV)、PROTOSCAR (スイス, EV)、日産 (EV)、Think (ノルウェー, EV)、PSA (HEV) であった。(純電気自動車EV、ハイブリッド車をHEV、プラグインハイブリッド車をPHEV、燃料電池自動車をFCVと略した。以下同様。)

[EVとPHEVの市場見通し]

乗用車セッションの最初に、自動車分野の著名なコンサルティング会社であるRoland Berger社 (ドイツ) から、“Power Train 2020”と題した発表があった。この中で、2011年から2020年のEVとPHEVの販売シェア予測 (図2) が示された。予測においては、ユーザー

の分類、走行パターン、エネルギー価格、蓄電池価格、インフラ整備状況、エンジン車への課税とEV・PHEVへの課税優遇、CO₂排出規制 (燃費規制)などを考慮したとしている。欧州でシェアが高まるのは、エンジン車に対する厳しい燃費規制とEV等への手厚い優遇策が見込まれるためである。

また、2つのシナリオにおける電気関係のコンポーネントの市場規模 (欧州, 米国, 日本, 中国の合計)も図3のように示された。図2の車両の市場シェアに比べて伸びが小さいのは、各コンポーネントのコスト低減が進むからである。一方、コンポーネント別のシェアは電池が約50%、パワーエレクトロニクスが25%を占めており、その比率はほとんど変わらない。これは、各コンポーネントの相対的な価格比が変わらないと予想されていることを意味している。

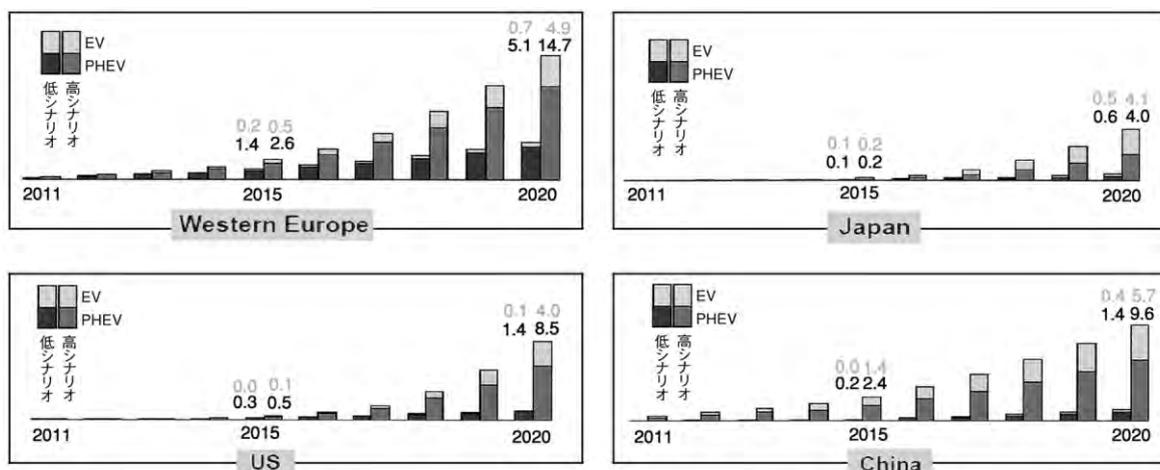


図2 Roland Berger社によるPHEVとEVの市場シェア予測 (%) (1)

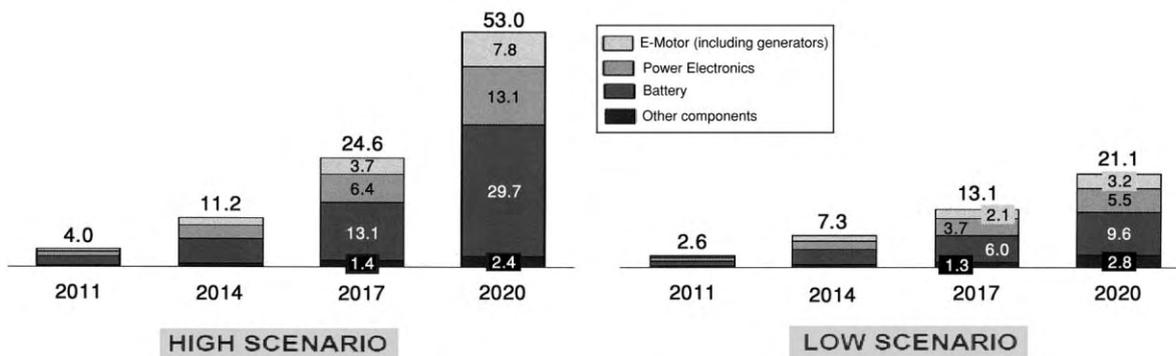


図3 Roland Berger社による自動車用電気コンポーネントの市場規模予測 (10億ユーロ) (1)

(2) 蓄電池・電力貯蔵

蓄電池のセッションでは、Manga Steyr, Electrovaya, Johnson Controls Saft, A123Systems, EnerDel, GS-Yuasaといったメーカーの他、米国エネルギー省(DOE)の蓄電池研究開発プログラムに関する発表が2件あった。

① 米国DOEの蓄電池開発プログラム

図4に示すように、DOEの蓄電池開発予算は2004年度の2,400万ドルから2009年度の6,900万ドルに急増している。中でもPHEV用電池の予算増加が著しい。また、2009年2月に成立した経済再生法の一環として、電池の生産設備建設に研究開発予算の30倍に相当する20億ドルの補助金を投入することが決定されている。緊急経済対策の一環とは言え、商業生産のための設備に補助金を投入するのは、あまり例のないことである。

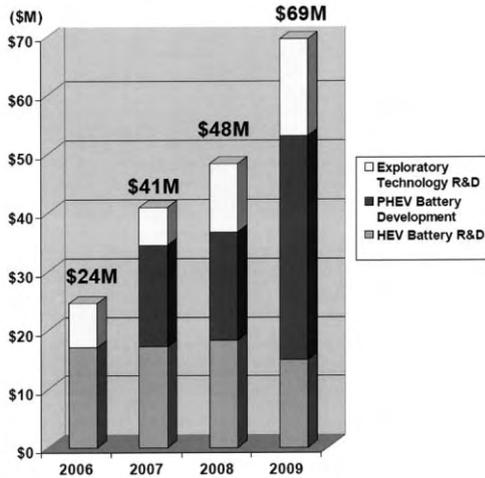


図4 米国DOEの自動車用蓄電池の開発予算⁽²⁾

PHEV用電池の開発対象技術とその開発段階を図5に示す。グラファイト負極にニッケル系正極、リン酸鉄正極、スピネルマンガン正極を組み合わせた3つのタイプの開発が進んでいる。これに続くのがチタン酸負極と高電圧ニッケル系正極との組み合わせである。基礎研究では、リチウム合金負極、リチウム-硫黄系、リチウム金属負極が対象となっている。

② EPRIにおけるPHEV用電池価格の検討

EPRI (Electric Power Research Institute) は我が国の電力中央研究所に相当する米国の研究機関である。EPRIは大量生産時のPHEV用リチウムイオン電池の価格を図6のとおりと発表した。

図6によれば、価格はほぼ250ドル/kWhとなる。前項に示したDOEの発表でも、Liイオン電池の将来的なコスト低減見通しについて質問があり、講演者のBarnes氏は250~300ドル/kWhと回答していた。これをわが国のロードマップ⁽⁴⁾と比較すれば、ほぼ2015年~2020年の価格に相当する。

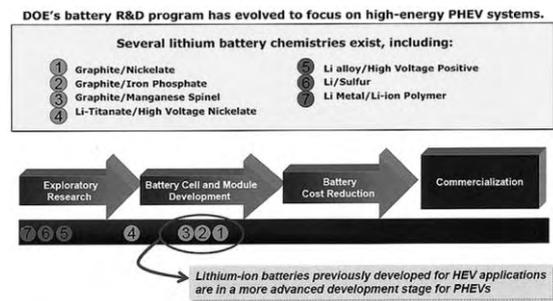


図5 米国DOEでのPHEV用電池の開発状況⁽²⁾

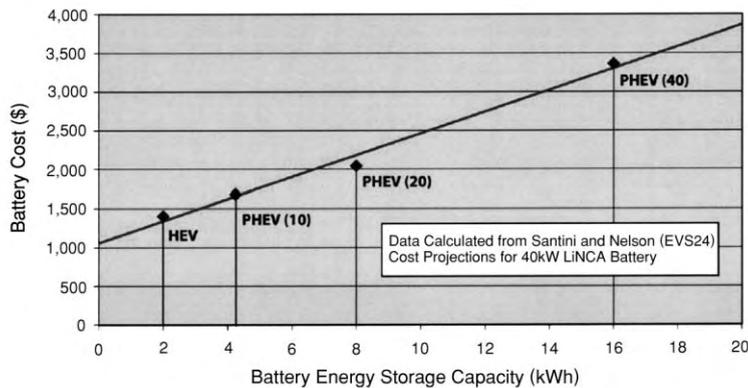


図6 PHEV用リチウムイオン電池の価格⁽³⁾

(3) エネルギー供給・インフラ

エネルギー供給・インフラのセッションでは、電力会社と研究機関の発表が目立った。そのうち主な6つの発表について解説する。

① Integral, Intelligent, Efficient Energy Systems

スイスのLucerne University of Applied Sciences & Artsは電気走行距離が64kmであるPHEV「Blue Angel III」を用いて太陽光発電(PV)(2.8kW)の余剰電力による充電効果のシミュレーションを行なった。シミュレーションの概要は「家から職場まで片道33km」「職場には2.8kWのPVの設備がある」「工作中にPVの

余剰電力を車載電池に充電させることの有無で系統への逆潮流量と、帰宅後の充電電力量」を比較した。

図7(a)ではPVから車両への充電はなく、PVからの余剰電力は電力系統へ流れている。車両は帰宅後、3時間かけて充電されている。一方、図7(b)では、車載電池がほぼ満充電になるまでPVの余剰電力を充電しているため高SOCとなっており、帰宅後1時間で充電が完了している。

表2にシミュレーションの結果のまとめを示す。PVの余剰電力を車載電池に充電させることで「系統逆潮流電力の減少」「帰宅後の充

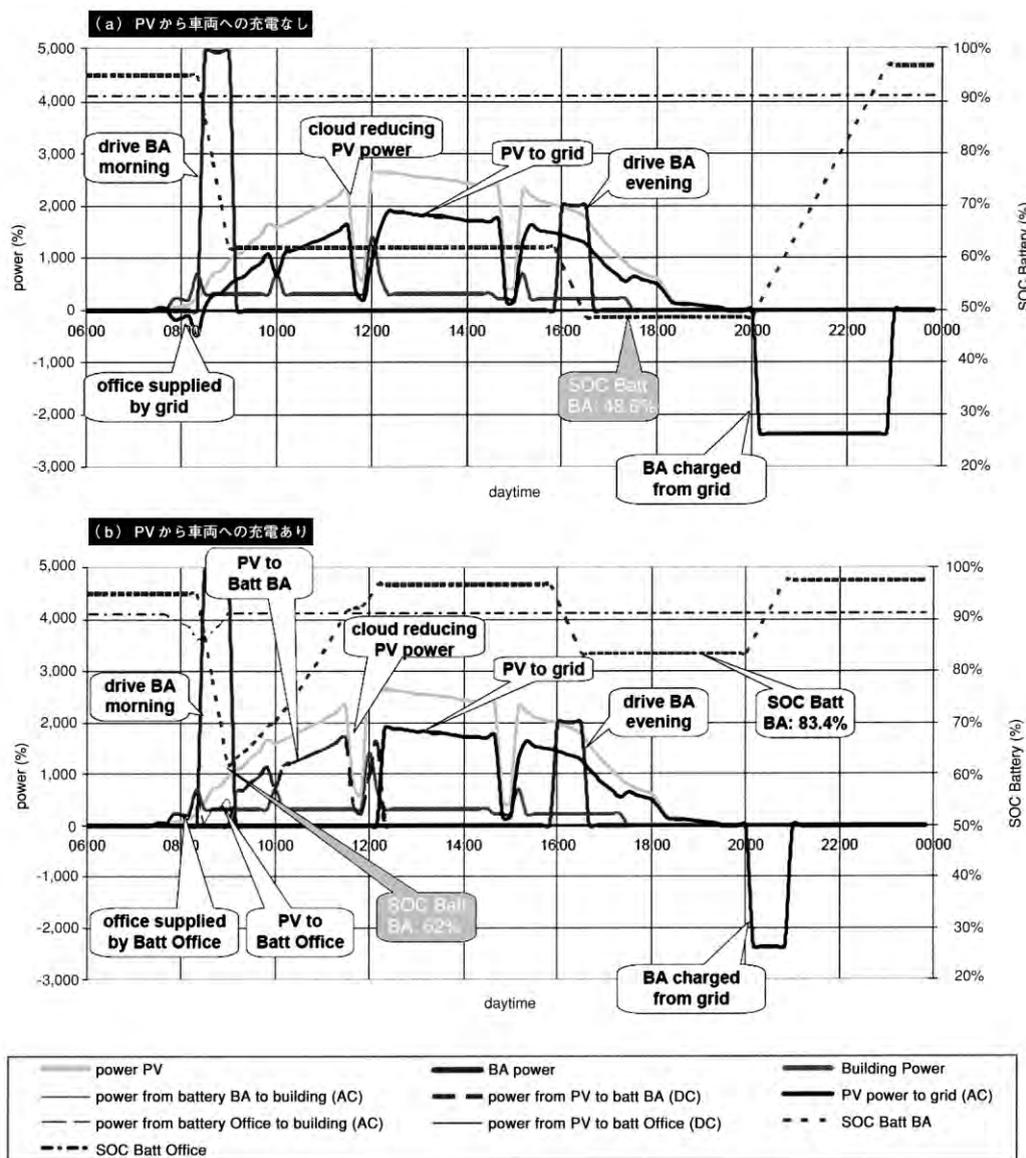


図7 PVの余剰電力による充電効果シミュレーション⁽⁵⁾

表2 シミュレーション結果のまとめ

	PVから車両への充電	
	あり	なし
PVから系統へ流れた余剰電力	7,906Wh	11,394Wh
帰宅後の充電電力量	1,961Wh	6,667Wh
帰宅後充電時間	1時間	3時間
車載電池の最低SOC	62%	48%

電力量の減少＝充電時間の短縮」「車載電池を高SOC（State Of Charge）状態で利用できる」といったメリットが明らかにされている。

わが国においてもPVからの余剰電力対策は将来顕在化するものと思われる。本シミュレーションは、その解決策に対して示唆に富むものである。

② Vehicle to Grid (V2G) における制御

太陽光発電や風力発電は再生可能という点で優れているが、気象によって出力が変動するため、それらの増加は電力の需給バランスを調整するためのコスト上昇を招く。そこで、今後、大量普及が期待されているEV（の車載電池）を需給バランスの調整力として活用しよう（そうすれば、新たな需給調整設備の追加を抑えられる）という提案が行われている。その際、系統からEVに送るとき（つまり充電）の電力を調節するだけでなく、車載電池に充電された電気を電力系統に向けて流すこともできれば、調整能力は倍増することになる。このEVから電力系統へ向けて電気を流すことをVehicle to Grid (V2G) と呼んでいる。V2Gは、最近話題になっているSmart Grid（賢い電力系統）の技術要素の1つでもある。

V2Gは比較的新しい概念で、前回のEVS23ではV2Gに関係した論文は僅か4件（いずれも米国）であったが、今回は20件と大幅に増えた。特にドイツ、ポルトガル、スイス等の欧州諸国からの論文が多く見られた。

米国のDowerらはVehicle Discharging to Grid (V2G) Systemにおける制御ロジックを発表した。(図8)

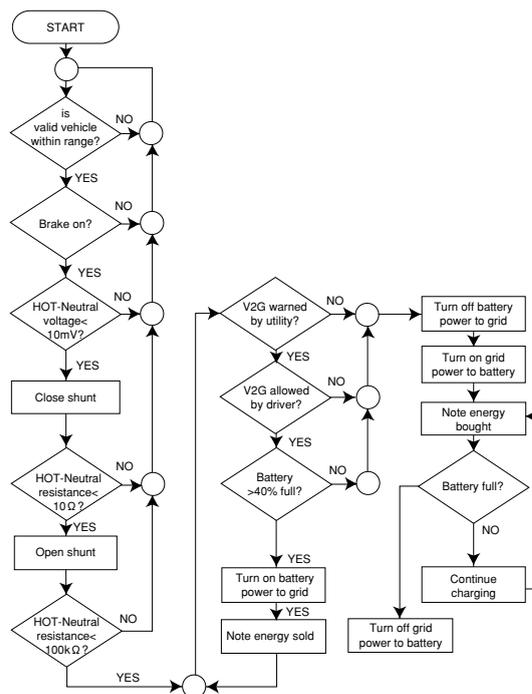


図8 V2G System Vehicle Logic⁽⁶⁾

このロジックによって、V2Gが行われる時の判断の流れは次のとおりである。

- ①車両が電力供給システム（電力系統）と正しく接触していることを確認
- ②電力供給事業者にとって、車両から系統への電力逆潮流が必要とされているかどうかを判断。（判断の具体的な根拠は説明されていない）
- ③車両から系統への電力逆潮流を行う用意ができていないかどうかを判断。（判断の具体的な根拠は示されていない）
- ④車載電池のSOCが40%より高い状態であればV2Gが行われる。
- ⑤上記の1～3のいずれかがNoであれば、満充電になるまで充電が行われる。

Dustmannら（スイス）も、V2Gのための制御ロジックを発表した（図9）。ここでは、SOCのほかに、電圧と周波数の条件が定量的に定義されている。このロジックの流れは次のとおりである。

- ①車載電池のSOCが100%であるかどうか判断。
- ②100%でなければ、まず自端の電圧を確認し、閾値よりも大または小であれば、電池のSOCと周波数を確認して充電または放電を行う。電圧が中間値の場合は、充電に適した時間帯かどうか、さらに周波数と電池のSOCを確認して充電を行う。1回の充電や放電は電池容量の2%分とし、再度、電力系統の状況を見て充電か放電かを判断する。

表3 前提条件

パラメータ	収入	支出
kW価値単価(cent/kW-h)	2.1	
1台あたりの容量(kW/台)	3.5	
連系時間(h)	10	
売電単価(cent/kWh)	11.32	
車載電池容量(kWh/台)		4.4
電池単価(ユーロ/kWh)		1,000
買電単価(cent/kWh)		6.14
耐用年数(年)		10

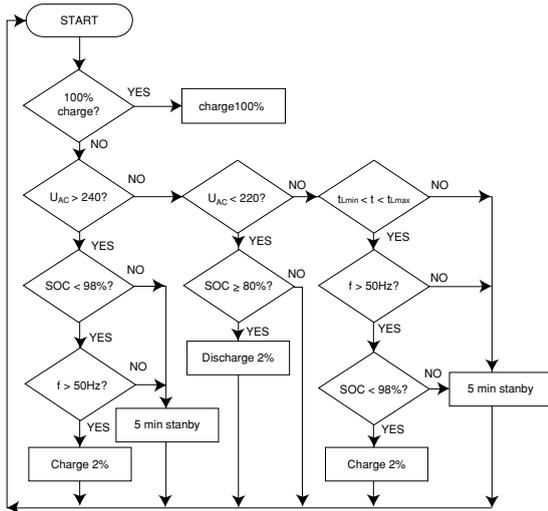


図9 V2Gの制御ロジック例⁽⁷⁾

図8のロジックの特徴は、充電よりも放電（電力系統への逆潮流）の可否を判断の上位に持って来ている点にあり、放電による電力系統への貢献を積極的に行うことをねらっている。一方、図9のロジックは、充放電の判断に使用する情報を具体的に示し、充電と放電の両方で電力系統の調整に参加するシステムを提案している。

いずれの提案も検討の初期段階であり、今後、充放電を行う際の制御条件が精査されていくものと思われる。例えば、充電か放電かを判断する材料として電気の売買価格を組み入れることも考えられる。また、電力系統の電圧や周波数に多数のEVが過敏に反応して一斉に充電や放電を開始することを防ぐ仕組みも必要になるとと思われる。

わが国において車載電池から系統への逆潮流を実施することは、制度的な問題（例えば逆潮流に応じた金銭授受の考え方など）の存在が大きく、当面は考えにくい。しかし、充電量の制御だけ（逆潮流はしない）であれば実施可能であり、その際、ここに示した制御ロジックも参考になるとと思われる。

③ V2Gの経済性検討

先に述べた、車載電池を電力需給の調整力に使うというV2Gの狙いは、電力系統を運用

する電力会社の立場からのものであった。これに対しEVの所有者から見た場合は、電池の充放電回数が増えれば劣化は必ず進むので、それに見合うメリットがなければ、V2Gを行うインセンティブは働かない。

EV・PHEV所有者が得るメリットとしては、まず、充放電電力の価格差（kWh価値）が想定される。単価が安い時間帯に充電して、高い時間帯に放電することでメリットが得られる。これに加えて欧米では、調整電力の市場が存在するため、EVの電池の充放電による調整力、いわゆる「kW価値」を市場に提供することで、EVの所有者が利益を得ることが可能になる。

C.Camusら（ポルトガル）は、ユーザーの視点から「kW価値」と「kWh価値」の双方を含むV2Gの経済性を報告した⁽⁸⁾。検討の前提とした主な条件は表3のとおりである。

表3の条件で計算すると、年間の収入は「kW価値」から215ユーロ、系統へピーク時に売電することで116ユーロ、そのためにオフピーク時に買電するために-80.6ユーロとなり、計250ユーロ程度となった。これに対し電池の費用は年間で300ユーロ程度と試算されるため、この売電価格では赤字となってしまふ。赤字解消のためには、現在の売電価格11.32ユーロ/kWhが13ユーロ/kWh程度になることが必要であるとしている。

上記の検討からも明らかのように、収入の85%以上は「kW価値」から得ており、売買電力の価格差から得られる「kWh価値」は収入

の15%程度でしかない。わが国におけるV2Gの検討ではkWh価値のみが議論されることが多いが、V2Gの経済性にはkW価値の評価が決定的に重要であることが分る。

④ RWEの発表

RWEはドイツ・エッセンに本社を置く大手エネルギー会社。E.ONに次ぐドイツ第二位の電力会社である。

RWEは同じドイツ企業のダイムラーや、欧州最大の電力会社であるEDF、わが国のトヨタ自動車などとパートナーシップを結び、電気自動車と電力系統の接続関連の標準化作業を進めている。図10に標準化のパートナーシップと範囲を示す。

WGで提案されている例を図11に示す。

欧州から提言される電気自動車関連の標準化関連の今後の日程は次のとおりである。

- 平成21年末 : Official proposal to ISO/IEC
- 平成22年中旬 : Start international voting process
- 平成22年末 : End of voting process

現在、EV関連の標準化は大変大きな問題となっている。これは、「標準を制する者が市場を制する」領域にEVも含まれるとの観点からである。特に、EVのキーデバイスである自動車用リチウムイオン電池の国際標準化に向けた動きでは、日米欧の主導権争いが、激しさを増しているようである。

⑤ 充電設備の容量について

欧州では、普通充電の電圧が220~230Vとわが国より高く、充電設備の容量についても高めの規格を指向するところがある。図12はフィンランドのエネルギー会社Fortumが発表した充電設備の分類である。

また、表4はAeroVironment社(米国)が発表した充電設備の分類である。ここでも250kWおよび500kWという規模の設備が提示されている。

現在、わが国で試験中の急速充電器の容量が50kWであることを考えると、非常に大きな容量での充電を検討している。このような大容

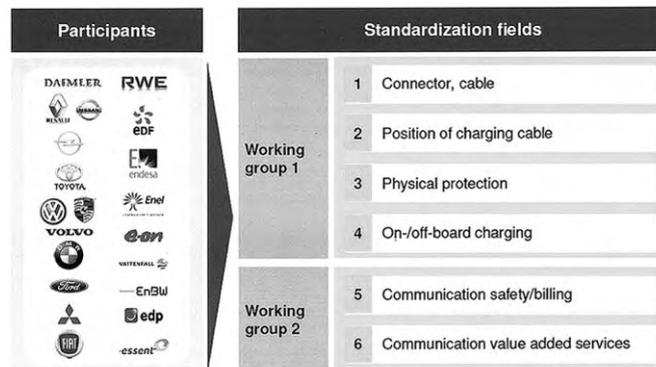


図10 標準化のパートナーシップと範囲⁽⁹⁾

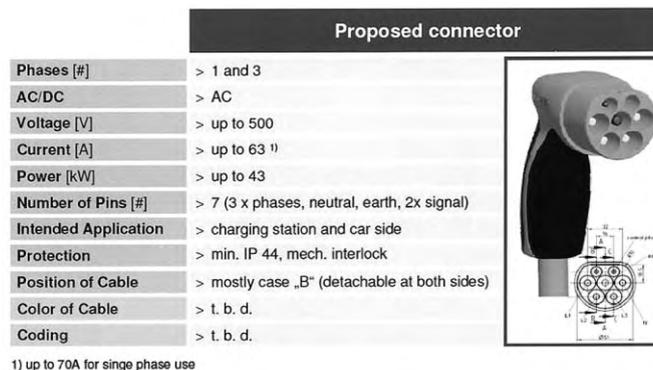


図11 コネクタの標準化提案⁽⁹⁾

表4 Aero Vironment社（米国）による充電設備の分類⁽¹¹⁾

Type of Charge	Charger Power Level (kW)		
	Heavy Duty	SUV/Sedan	Small Sedan
Fast Charge (10 minutes, 100% SOC)	500	250	125
Rapid Charge (15 minutes, 60% SOC)	250	125	60
Quick Charge (60 minutes, 70% SOC)	75	35	20
Plug-In Hybrid (30 minutes)	40	20	10

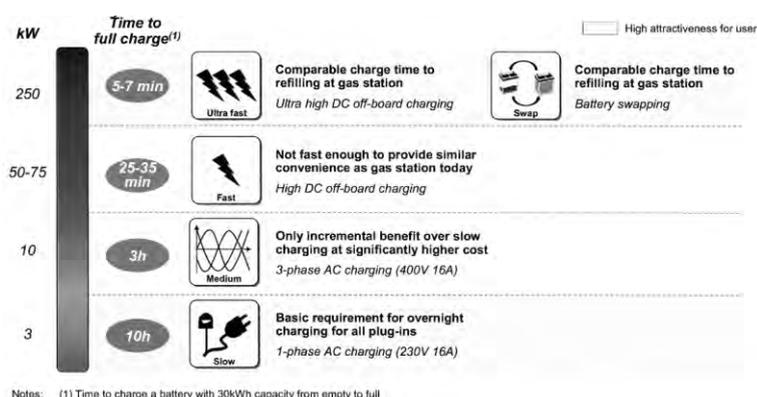


図12 Fortum社（フィンランド）が発表した充電設備の分類⁽¹⁰⁾

量充電器が配電系統に接続された場合の技術的な影響については、慎重に検討する必要があると思われる。

⑥ Better Place社の電池交換システム

Better Place社が、同社が推進する電池交換と充電スタンドを総合したビジネスモデルのプレゼンテーションを行い、横浜で行われている電池交換のデモンストレーションがビデオで紹介された。この発表は、クロージングセッションで行われたため聴講者も多く、同社の知名度は一気に上昇したと思われる。



図13 Better Place社の電池交換システム

Better Place社のシステム（図13）において電池交換に要する時間は数分程度であり、ガソリン車の給油と変わらない利便性を有している。同じ時間で30kWhの電池をフル充電しようとする、500kW程度の充電設備が必要になる。これに対し、交換して取り外した電池は時間をかけて充電すればよいので、充電設備の容量は小さくて済む。つまり、EVユーザーの利便性と電力系統への影響緩和を両立させることができるシステムであると言える。

電池交換は従来からあるアイデアであるが、実際に装置を製作し、数分での交換が可能であることを示したのは注目に値する。しかし、電池交換可能な構造は車両側にコストアップとデザイン上の制約を課すこと、スタンド側も交換装置と予備電池のストックにコストがかかるなど、避けられない課題が存在する。これらの課題が克服されて、同社はもちろん、ユーザーにも自動車メーカーにもメリットが出るビジネスが本当に成立するのか注目される。

3. 展示会

(1) 自動車メーカー

トヨタは本シンポジウムのメインスポンサーであり、最も大きなスペースを使って新型プリウスや実証中のフラグインハイブリッド車などを展示していた。完成車を出品したのは多くが新興の小メーカーで、トヨタ以外の主要メーカーは三菱自動車がiMiEVを、ドイツOpel社がPHEVを出品したのみであった。自動車業界全体の動きを把握するには今回の展示や発表だけでは不十分で、今年に入ってから開催されたジュネーブ、北京、ニューヨークなどの自動車ショーも併せて考えていく必要がある。

以下、販売実績または予定のある車両について紹介する。

図14は、ノルウェーMiljobil Grenland社のBEVである。インドTata社のガソリン車を改造したもので、カナダElectrovaya社のLiMnO₂を正極とするLiイオン電池を40kWh搭載し、満充電での航続距離は250kmである。北欧での販売を想定して冷房は装着しておらず、暖房は2kWの電気ヒーターで行う。2009年3月のジュネーブモーターショーでは2009年9月に発売と発表されたが、発売は2010年にずれ込み、価格3万ユーロで初年度3,000台の販売計画とのことであった。

図15は、Think Global社が2008年から市販している専用ボディのBEV、TH!NK Cityである。同社は1991年に設立され、一時期、米国Ford社の所有となり、約1,000台のBEVを生産したこともある。現在はノルウェーの投資グループInSpireの所有となっている。標準車の価格は2万4,500ユーロ、これまでの販売実績は300台とのことであった。

ボディ材料にはプラスチック（ABS樹脂）が使用されており、衝突試験も実施済みである。電池はLiイオン電池またはゼブラ電池が搭載可能であるが、展示車両にはEnerDel社製のLiイオン電池26kWhが搭載されていた。航続距離200km、最高速度105km/h、暖房用に4



図14 Miljobil Grenland社Indica Vista EV



図15 Think Global社TH!NK City



図16 Bright Automotive社IDEA⁽¹²⁾

kWのヒーターを装備している。

図16は、米国Bright Automotive社のIDEAである。前輪をエンジン、後輪を電気モーターが駆動する二軸式のPHEVで、EiG社製のLiイオン電池を搭載する。オープニングセッションで講演を行ったエイモリー・ロビンス氏が所長を務めるロッキーマウンテン研究所との共同設計により軽量化と空気抵抗の低減を図つ

ている。販売開始予定は2012年、販売目標は年間5万台である。これは米国の大型バンの市場、年間50万台の10%に相当する。

なお、FCVの車両展示はなく、前回のEVS23にも増してFCVの影が薄くなっている印象であった。FCV、BEVなどの将来展望を扱った論文発表が数件あったが、FCVの普及可能性については、インフラと車両製造へのBig Ban的な巨大投資が必要と評価されていた。

(2) 電池メーカー

鉄系リチウムイオン電池の開発が最も進んでいると思われるA123社は、比較的大きなスペースを使って、従来の円筒形セルの他に長方形セルも展示していた。また、車載電池パックとしては、米国クライスラー社のJeep Patriot用、Chrysler Town&Country用、Jeep Wrangler用、Chrysler 200C EV用の4点が展示されていた(図17)。



図17 A123社のバッテリーパック

A123社の子会社であるHymotion社(米国)は、プリウスをPHEVに改造するキットを製造し、その販売・取付けを行っている。価格は1万ドルで、500台を販売したとのことであった。同社製のキットを取り付けたPHEVは、PHEVの燃費評価などを扱った論文にもしばしば登場しており、現時点では実在するPHEVとして最もメジャーな存在となっている。なお、前回の目玉であったFord社のEscape PHEVは、

南カリフォルニア電力だけでも20台導入するという計画であったが、実際には9台の導入(いずれも米国内)にとどまっているとのことであった。

この他の電池メーカーとしては、米国EnerDel社、韓国EiG社、米国Balance社が前回のEVS-23に続いて出展していた。Liイオン電池には、材料や製造機械の専門メーカーが存在しており、そうしたメーカーから材料や機械を調達できれば、セル製造への新規参入は比較的容易と言われている。しかし、自動車用Liイオン電池の市場は、期待は大きいものの現時点では殆ど存在していないに等しい。新規参入メーカーは、サンプル出荷まではできても売上げを確保するには苦勞しているはずで、自動車用電池に特化したベンチャー企業が生き残っていくのは厳しい状況にあると思われる。

日本からは三菱自動車と同一のブースでリチウムエナジー・ジャパンが出展していた。他のメーカーの展示はなかったが、むしろ自動車会社との共同開発が進んでいて情報開示が制限されているのかも知れない。

4. おわりに

シンポジウム全体を通じて、CO₂排出を削減するために自動車の電動化と再生可能エネルギーによる電力供給の必要性が盛んに強調されていた。今回のEVSは、VW社やDaimler社を始めとする欧州主要メーカーの展示がなく迫力の点では今一つであったが、昨今の各種情報を総合すれば、自動車の中に電気が入り込んでいくという流れは、もはや逆らうことができない状況と言ってもよいだろう。

電動車両の実用化という点において、トヨタとホンダのHEV販売競争や三菱iMiEVの販売開始など、現時点ではまだ日本のメーカーがリードしていると思われる。しかし、この次世代の自動車の動力源を巡る競争は、まだ始まったばかりである。日本のメーカーを超える実用化の動きが出てくるとしたら、それ

は米国や欧州ではなく、低コスト化に大きなポテンシャルを有する中国やインドではないかと思われる。その意味で、中国・深圳市で2010年秋に開催される次回のEVS25は、一層興味深いものになると予想される。

参考文献

- (1) M. Valentine-Urbschat, EVS24プレゼン資料, 2009.
- (2) J. Barnes, EVS24プレゼン資料, 2009.
- (3) Fritz Kalhammer, EVS24プレゼン資料, 2009.
- (4) NEDO技術開発機構, 次世代自動車用蓄電池技術開発ロードマップ2008, 2009
- (5) Vinzenz V. Harri, EVS24プレゼン資料, 2009.
- (6) Gordon Dower and Shelley Damewood, EVS24プレゼン資料, 2009.
- (7) Cord-Henrich Dustmann, EVS24ポスター資料, 2009.
- (8) C.Camus, EVS24プレゼン資料, 2009.
- (9) Dr. Ingo Diefenbach, EVS24プレゼン資料, 2009.
- (10) Joachim Skoogberg, EVS24プレゼン資料, 2009.
- (11) Charles Botsford, EVS24プレゼン資料, 2009.
- (12) L. Shuey, EVS24プレゼン資料, 2009.

エネルギーに関する公衆の意識調査

下岡 浩 (エネルギー技術情報センター 主管研究員)



1. はじめに

当研究所は、社会の構成員である公衆の意識がどのようなものであるかについて、平成15年度より首都圏の住民に対して定期的にエネルギーに関するアンケートを行い、計6回調査を実施している。調査の概要は表1の通りである。

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

2. 公衆のエネルギーに関する関心や認識

(1) エネルギー問題に対する関心は低い

首都圏住民がどんな問題や事象に関心があるかを図1に示す。環境問題への関心は高いが、エネルギー問題や原子力発電問題は、他の事項

と比較して相対的に関心が低いという結果が出ている。エネルギー問題や原子力発電問題は、一般の人々にとって、意識の中では大きなものではないということに注意すべきである。

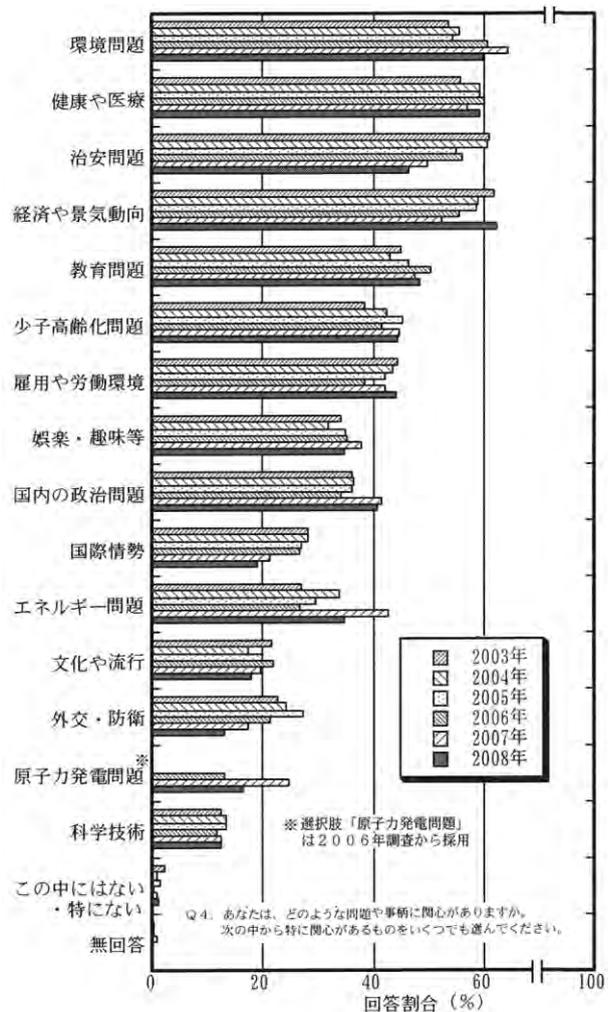


表1 調査の概要

(1) 調査対象：首都圏（東京駅から30km圏内）の満20歳以上の男女
(2) 調査数：500人（男性250人，女性250人）
(3) 抽出法：割当法（首都圏における性別・年代別人口構成に合わせ、あらかじめ割り当てた目標数に達するまで回答者を選んで調査をする）
(4) 調査方法：訪問留置法（調査員が対象者宅を訪ね、調査票を渡し、後日、記入された調査票を訪問回収する）
(5) 調査期間： 第1回目調査（平成15年10月20日～11月17日） 第2回目調査（平成16年10月29日～11月29日） 第3回目調査（平成17年10月28日～11月25日） 第4回目調査（平成18年10月27日～11月24日） 第5回目調査（平成19年10月26日～11月26日） 第6回目調査（平成20年10月24日～11月25日）
(6) 質問構成 1) 公衆の一般的な社会や生活に関する意識 2) 公衆のエネルギー問題に対する意識 3) 公衆の原子力発電に関する意識 4) その他

図1 特に関心のある問題や事柄 (複数回答)

(2) エネルギーや環境問題についての認識は不安と楽観が入り交じっている

今後、日本が必要なエネルギーを十分に確保できるかどうかというエネルギー供給の問題について、大部分の人が不安を感じると回答している(図2)。

ただし、20年後の日本では、熱心に取り組めば「新エネルギー」は主要なエネルギー源にすることが可能だと思う人が大部分であり、この部分では楽観的にみている(図3)。

また、20年後の日本では、熱心に取り組めば地球温暖化の原因の1つといわれている二酸化炭素の排出量を大幅に下げることができると思う人が大部分であるが、年々否定的な方向に変化する傾向がみえる。楽観視する人が多いものの、地球温暖化問題への不安や懸念が徐々に高まっているようである(図4)。

このように、エネルギーや環境問題についての認識は、不安と楽観が入り交じっているといえる。

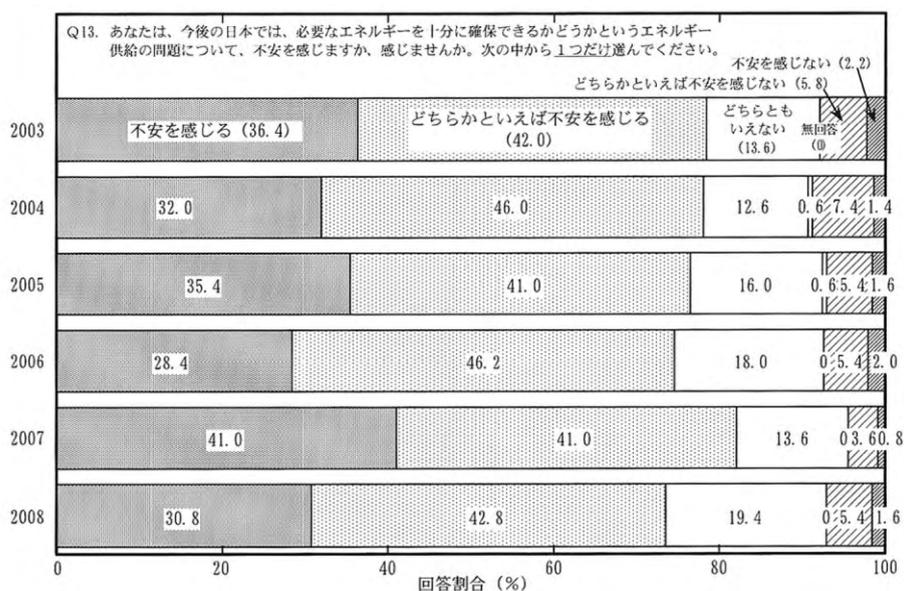


図2 今後の日本のエネルギー供給問題についての不安感

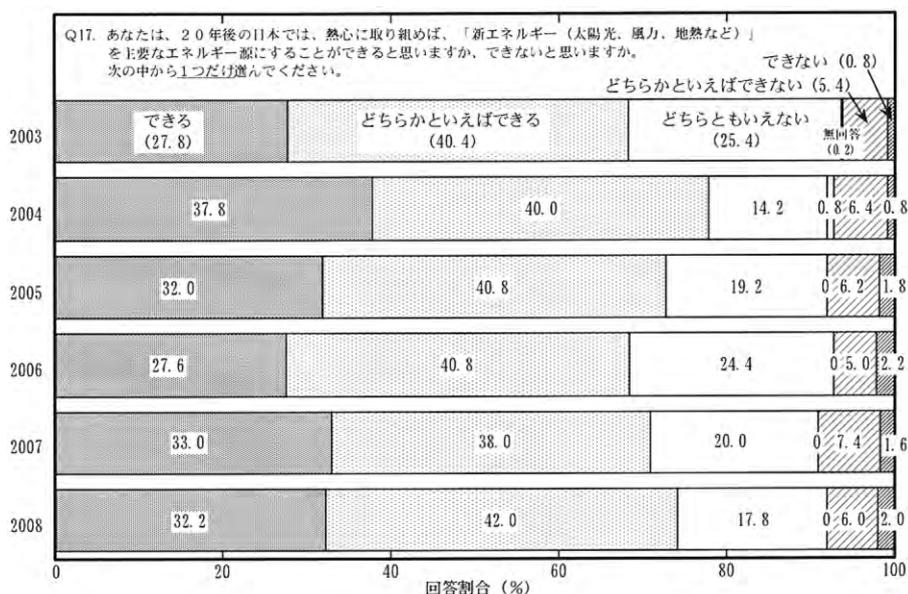


図3 20年後の日本の新エネルギーの可能性についての認識

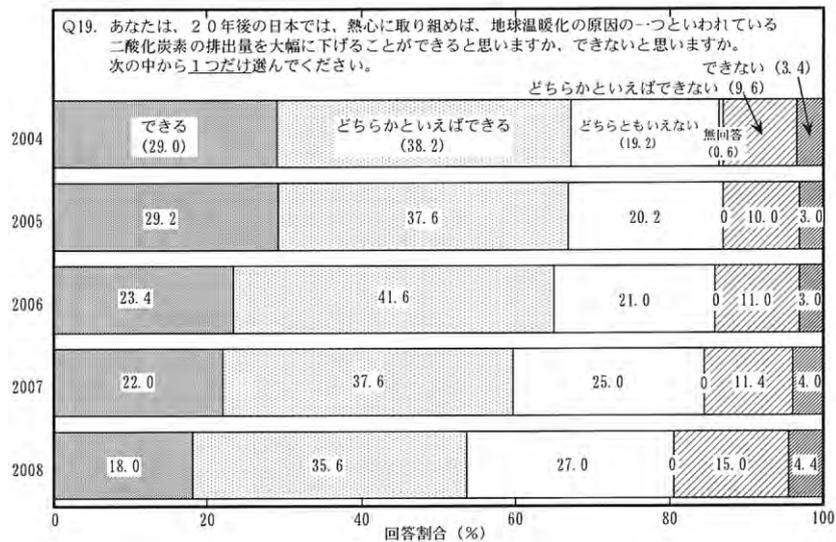


図4 20年後の日本の二酸化炭素の排出量低減可能性についての認識

(3) エネルギーに関する知識や予想

エネルギーに関する知識や予想を図5に示す。日本のエネルギー自給率（原子力発電を含まない場合）を「数%程度」とする正解は2割程度である。現在の日本の最大発電量の電源は「原子力発電」とする回答が多く、原子力発電を実際よりも大きくイメージしている。また、20年後の最大発電量の電源として「原子力発電」の次に「新エネルギーによる発電」とする回答が多く、新エネルギーに対する期待が大きくなっている。

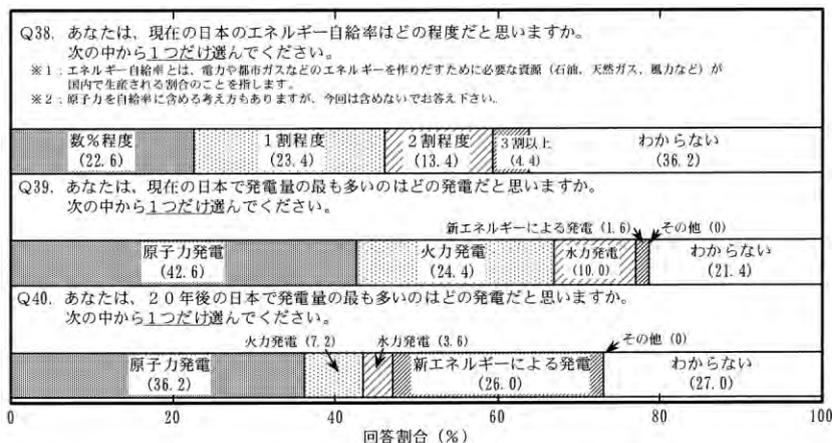
今回のアンケートへのさまざまな回答は、このような認識の下で行われているということに注意が必要である。

3. 原子力発電に関する調査結果

(1) 原子力発電に対する評価の好意化傾向は変わらず

原子力発電の利用を続けていくべきか、やめるべきかの意見の経年変化を図6に示す。ここで、「新設や増設をしながら続ける、現状程度のまま続ける」との回答を利用継続回答、「すぐにやめる、徐々にやめていく」との回答を廃止回答と略記する。

近年の利用継続-廃止回答は、廃止回答の減少、利用継続回答の若干の増加傾向がみられ、好意的方向に変化しており、2008年の調査結果をみても、この傾向は続いている。



「長期エネルギー需給見通し」(平成20年5月)では、2005年度の実績は、火力61%、原子力31%、新エネルギー1%で、2030年度の予測は、火力38~60%、原子力31~49%、新エネルギー2~4%となっている。

図5 現在の日本のエネルギー自給率と発電量の最も多い電源の認識、20年後の予測 (2008年)

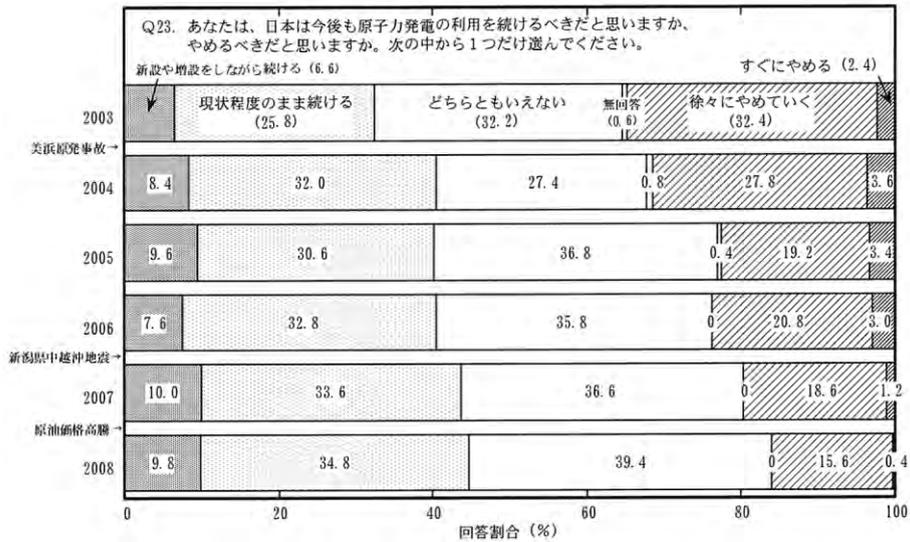


図6 原子力発電の利用継続 - 廃止回答

特に、廃止回答の割合をみると、2008年は2003年の半分以下となっており大きく減少していることが分かる。さらに、「すぐにやめる」という強い廃止回答は2008年調査ではほとんどなくなっていることにも表れているように、原子力発電の廃止回答は近年急速に減少している。

性別、年代別にみると、女性は男性に比べて、若い人は高年代グループに比べて、否定的回答である廃止回答に大きな差はなく、「どちらともいえない」という判断保留の中間回答が多く、その分利用継続回答が少ないグループになっているという結果が出ている（図7、図8）。

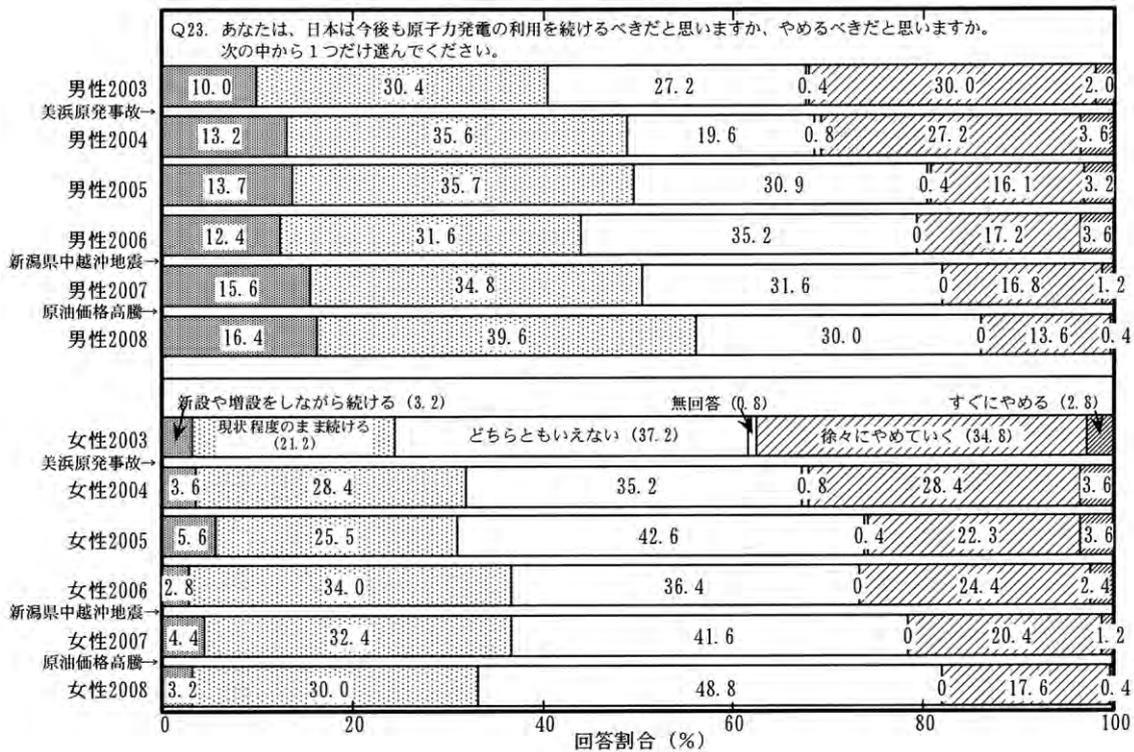


図7 性別にみた原子力発電の利用継続 - 廃止回答の推移

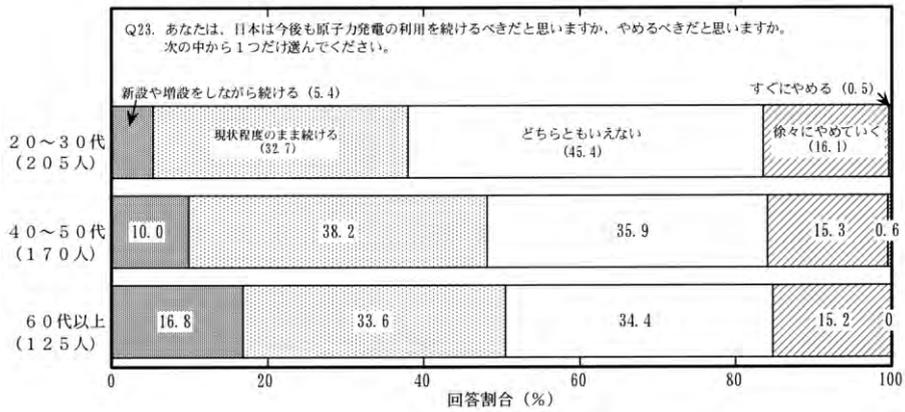


図8 年代別にみた原子力発電の利用継続 - 廃止回答 (2008年)

(2) 不安回答が減少している

前節に示した原子力発電の利用継続 - 廃止回答を決定する要因として、有用 - 無用感と安心 - 不安感を取り上げ、その経年変化を示す。

有用 - 無用感は、若干無用回答「どちらかといえば無用、無用」の減少が認められるものの、特に大きな変化はない (図9)。一方、安心 - 不安感も2007年調査までは大きな変化はみられていない (図10) が、2008年調査では、不安回答「どちらかといえば不安、不安」の減少という興味深い結果が得られている。不安回答がこの様に大きく減少したのは、当研究所の実施したアンケートで初めてのことである。ただし、それに伴って大きく増えたのは「どちらともいえない」という中間回答

であって、安心回答「どちらかといえば安心、安心」が大きく増えたわけではないことにも注意すべきである。

また、2007年調査では、不安回答に大きな変化はなかったが、この時期は同年発生した新潟県中越沖地震等が影響をもたらした時期であったと考えられる。特に男性は同年調査でのみ不安回答が大きく増えており、地震等がなければ同年調査でも不安回答は減少していたのではないかと推察される。すなわち、数年前から不安回答の減少傾向は始まっていたとも考えられる。

この不安回答の減少という現象が一時的なものか今後継続していくものか、また、安心回答が今後増加していくものなのか、さらなる調査が求められる。

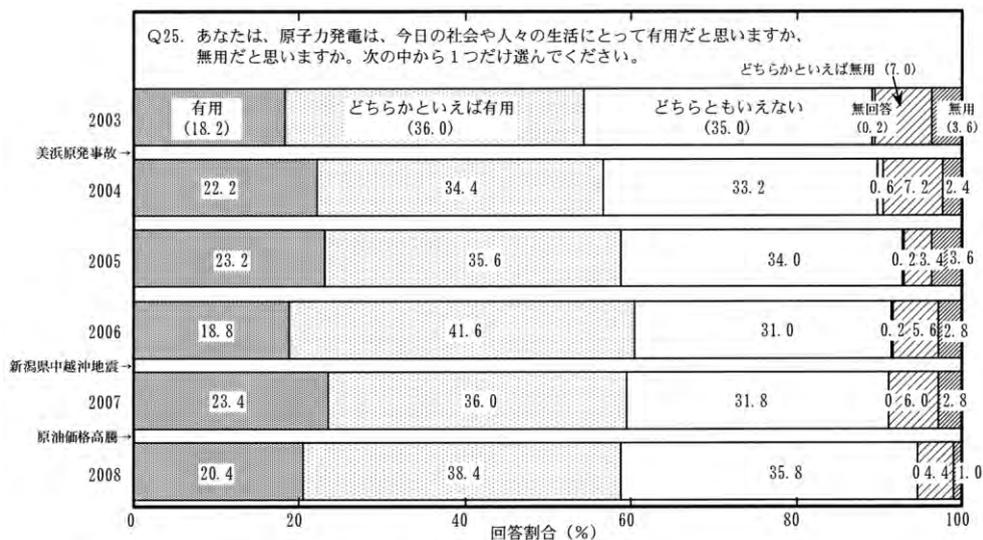


図9 原子力発電の有用 - 無用感

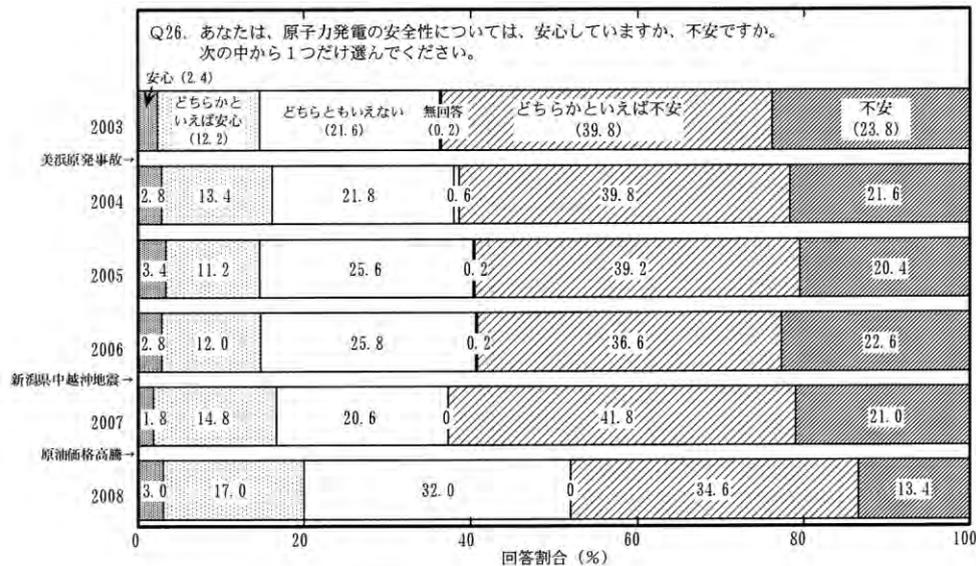


図10 原子力発電の安心 - 不安感

(3) 原子力発電の不安感は廃止回答に直結しない

原子力発電の利用—廃止回答を、原子力発電への有用—無用感別と安心—不安感別に示す(図11)。

原子力発電の無用回答とした人は少ないが(500人中27人)、そのほとんどが廃止回答である。原子力発電の有用回答「どちらかといえば有用、有用」とした人は、その多くが利用継続回答である。利用継続回答を行うには有用感を

持つことがほぼ必須であることが分かる。

また、原子力発電を「安心」と答える人はそのほとんどが利用継続回答である。また、原子力発電を「不安」と答える人の利用継続回答と廃止回答は同程度であり、不安感を持つというだけで廃止回答となる訳ではない。

すなわち、原子力発電の利用継続—廃止の態度決定要因として、安心—不安感より有用—無用感の方が大きいといえる。

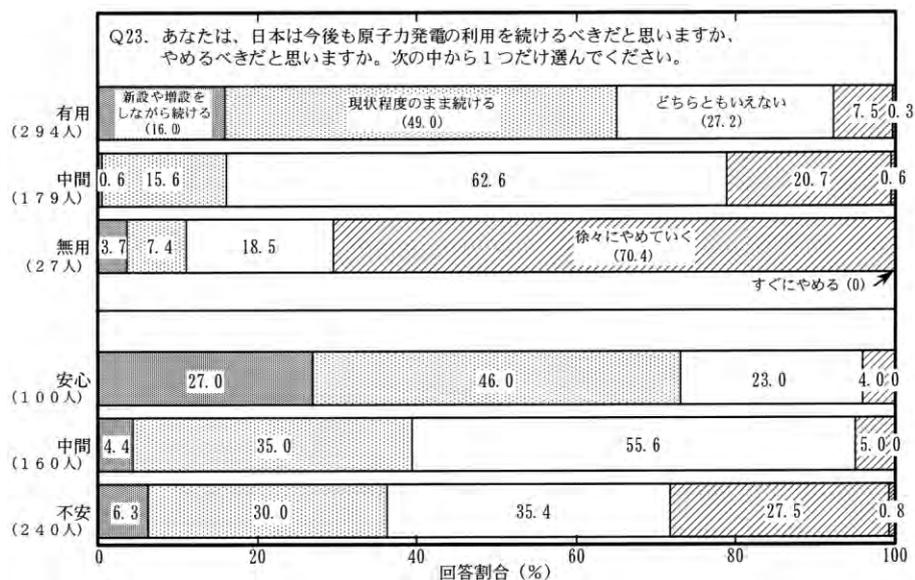


図11 有用—無用感別・安心—不安感別にみた原子力発電の利用—廃止の意見(2008年)

(4) 不安感が廃止回答に繋がらないようになっている

原子力発電を「有用」と回答し、同時に「不安」と回答した回答者グループを抜き出し、原子力発電の利用継続-廃止の質問に対し、どう回答したかを示す(図12)。

このグループ内の利用継続-廃止回答の経年変化をみると、利用継続回答が増え、廃止回答が減少する傾向がみられる。すなわち、このグループでは「不安だが有用だから利用」となる人が増え、「有用だが不安だから廃止」となる人が減少しているといえる。原子力発電の利用継続-廃止の態度決定に、有用感と比べ不安感により重視されなくなっており、不安感が廃止回答に繋がらないようになってきている。

2007年調査までは、図10に示すように不安回答の割合に大きな変化はなかったが、図12に示すように不安感が廃止回答に繋がらないようになり、これを一因として、図6に示すようにこの数年廃止回答が減少してきたと考えられる。

(5) 運営に対する不信感が減少している

原子力発電所の運営に対する信頼感についていえば、2007年に発生した事件等の影響により、一時的に否定的回答は上昇(男性のみ)したものの、それを除けば、数年前から信頼

回答「適切に運営されている、どちらかといえば適切に運営されている」が増え、不信回答「適切に運営されていない、どちらかといえば適切に運営されていない」が減るという経年変化を示している(図13)。

ただし、「どちらともいえない」との中間回答が多いことにも注目すべきである。

そして、当然のことではあるが、この不信回答を行うグループの減少は、不安回答の減少に繋がる。2008年調査における不安回答の減少の一因には原子力発電所の運営に対する不信感の減少があるといえる。この不信感の減少は、ジェー・シー・オー(JCO)事故から年数が経過したことや、大事故のない安全運転の実績がもたらしたものと考えられる。

(6) 原子力発電への関心は低下している

地震等の事件があった2007年調査では、原子力発電に関心があると答えた人の割合は増えたが、2008年調査では、関心がある割合はそれ以前の調査結果と比べて減少している。2008年は、2007年の地震等に匹敵する事件がなく、不況等による経済問題などへの関心の増大などもあり、図1に示すように、もともと低い原子力発電への関心はさらに低くなったものと思われる(図14)。

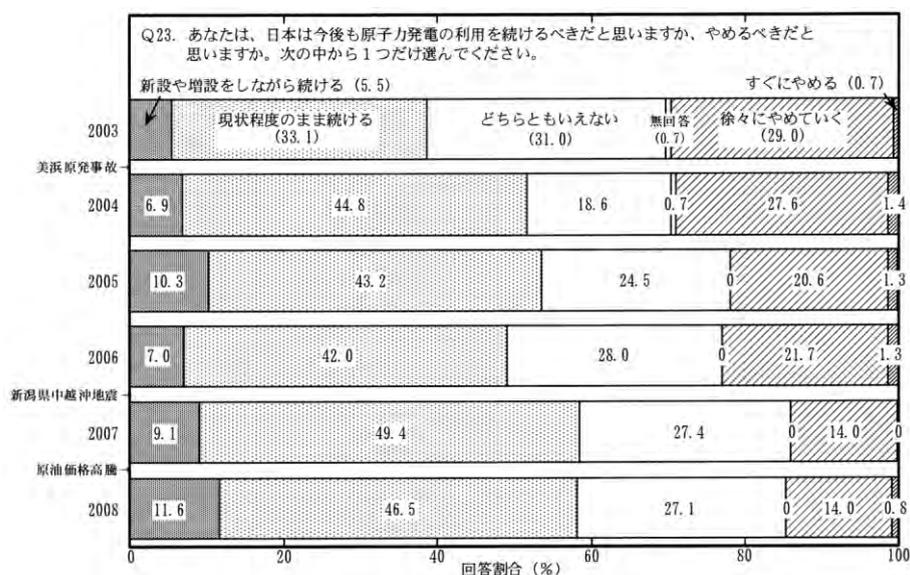


図12 「有用&不安」と答えた人の原子力発電の利用継続-廃止の意見

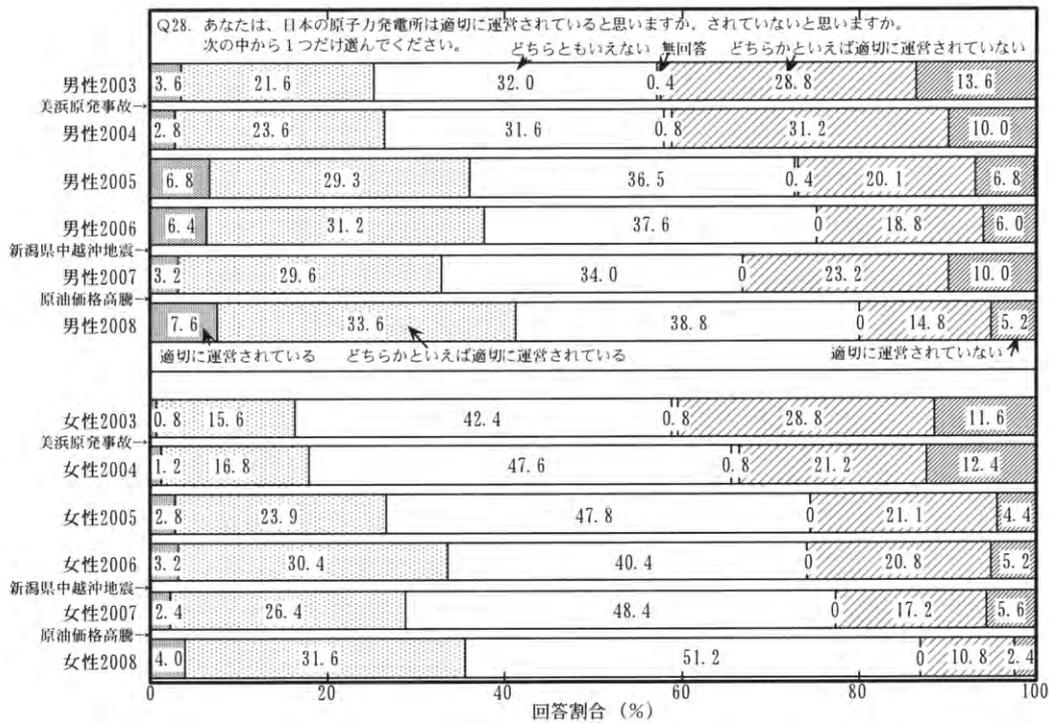


図13 性別でみた日本の原子力発電所の運営に関する意見の推移

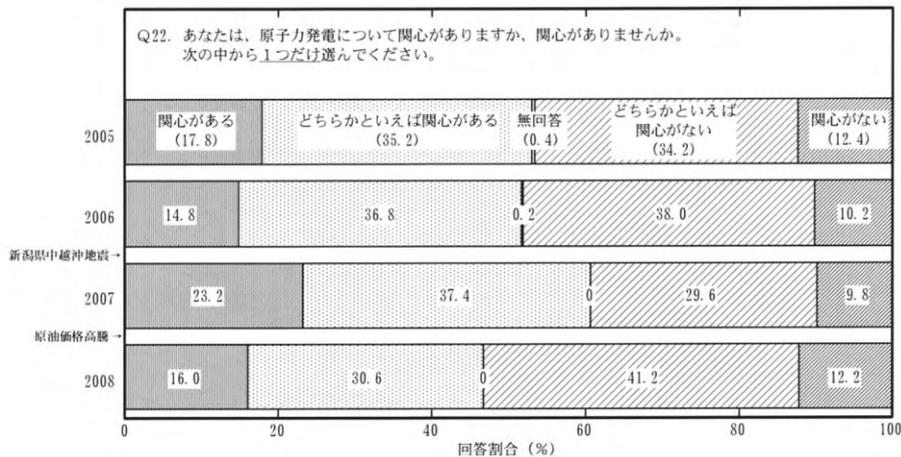


図14 原子力発電についての関心

(7) 原子力発電への関心低下は「どちらともいえない」との回答増加に繋がる

原子力発電に「関心がある」と答える人は、利用継続回答や有用回答の割合が多くなっている。原子力発電への関心増大は有用感増大に繋がり、そしてそれが利用意見増大に繋がると思われる(図15上段・中段)。

しかし、安心-不安感に関しては、原子力発電に「関心がある」と答える人は、安心回答も

不安回答も、共に多くなっている(図15下段)。

そして、どの評価に関しても、原子力発電への関心のないグループは「どちらともいえない」との回答が多くなっている。

図14に示すように、原子力発電への関心は低下しているが、この関心低下が図10に示すように、原子力発電に対する質問において「どちらともいえない」の回答増加の一因となっている。

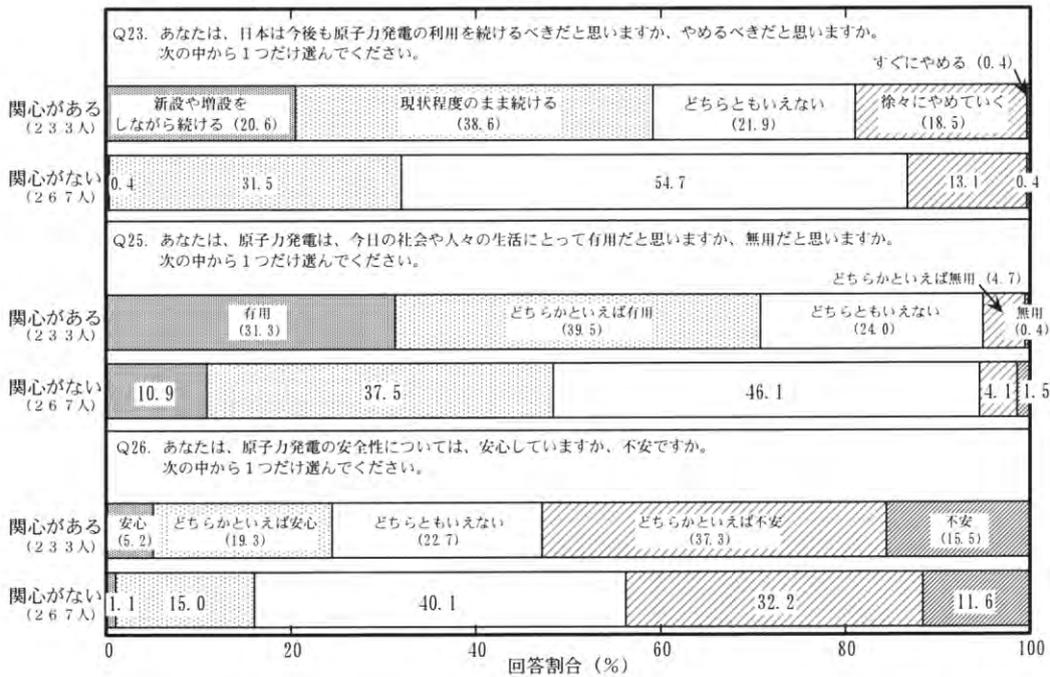


図15 原子力発電への関心別にみた原子力発電の利用継続—廃止の意見，有用感，安心感（2008年）

(8) 不安回答が減少した理由

2008年の調査で最も注目した点は、今までの調査であまり変化の無かった原子力発電の不安回答が大きく減少していたことである。

では、「なぜ不安回答が減少したのか？」という疑問に対し、図16の仮説を作成した。

つまり、エネルギー問題や原子力発電に対する低関心や低知識という状況下で、信頼感など原子力発電に対する意識の好転や相対的

な関心の低下があった。この信頼感などの好転が不安回答の減少に繋がり、関心の低下が「どちらともいえない」との回答の増加と共に、不安回答の減少に繋がったと考えられる。

また、今回調査では、不安回答が減少したが、その分増えたのは安心回答よりも「どちらともいえない」という態度保留の中間回答である。いくなれば消極的な好転といえる。

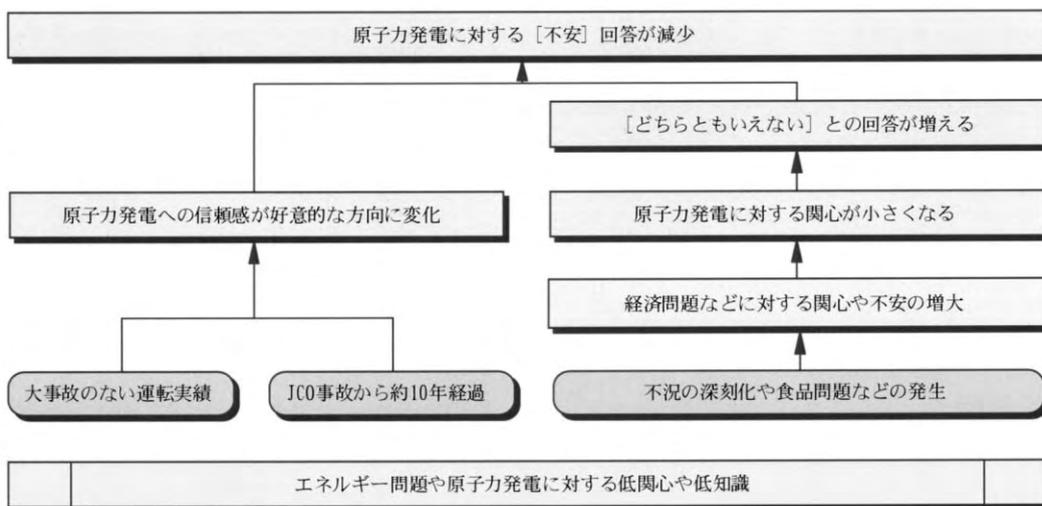


図16 2008年調査において原子力発電に対する「不安」回答が減少した理由

4. おわりに

近年、原子力発電の運営に関する信頼感は、改善されており、原子力発電の廃止回答も減少している。さらに、2008年調査では不安回答の減少という結果も出ている。ただし、これらの結果も首都圏住民のエネルギー問題や原子力発電に対する低関心・低知識という状況下での話であり、不安回答の減少とはいえ、安心回答の割合に大きな変化はなく、増えたのは「どちらともいえない」という態度保留の中間回答である。いくなれば消極的な好転といえる。

したがって、もしも将来、原子力発電に対する信頼を裏切る様な事故・事件の発生があれば、この傾向は容易に反転する可能性を含んでいるといえよう。さらなる安全運転実績の積み重ねと共に、関心・知識向上のための努力が求められる。

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

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

当研究所前理事長秋山守の逝去について



秋山 守

長生きしてやるのが親の務め

略 歴

昭和10年 8月23日 岡山市生まれ
昭和33年 3月 東京大学工学部卒業
昭和33年 5月 日本原子力研究所 入所
昭和38年 4月 東京大学工学部 講師
昭和39年 5月 東京大学工学部 助教授
昭和49年12月 東京大学工学部 教授
昭和53年 4月 財団法人エネルギー総合工学研究所
理事（非常勤）
平成 8年 4月 東京大学 名誉教授
平成 8年 4月 財団法人エネルギー総合工学研究所
理事長（～平成21年 4月 1日）

主な団体公職歴

平成10年 5月 社団法人日本原子力学会 会長
～平成12年 5月
平成11年10月 埼玉工業大学 学長
～平成15年 3月
平成16年 6月 社団法人日本原子力産業会議副会長
～平成18年 3月

主な著書

「原子力熱工学」「軽水炉」「超電導エネルギー革命」
「次世代の原子力発電」「技術立国日本のエネルギー戦略」

当研究所前理事長秋山守は、去る 4月 1日に73歳の生涯を閉じました。
生前故人に賜りましたご厚誼ご高配に対しまして謹んで深謝申し上げます。
5月には、「秋山守お別れの会」を下記のように開催いたしました。
ご多忙の中をご参加くださいました皆様に厚く御礼申し上げます。

日 時： 平成21年 5月19日（火）午後 1時～ 3時
場 所： 虎ノ門パストラル 「鳳凰の間」
参加者： 約500名

追悼の辞

鈴木 篤之 (原子力安全委員会
委員長)

秋山 守 先生は、平成21年4月1日、薬石の効なく、お亡くなりになりました。73歳でした。先生に長年、ご指導いただいてきた我々にとって、先生の突然の訃報は、ただただ愕然とするのみでした。

先生は、私共の精神的支柱でした。原子力という、善しきにつけ悪しきにつけ甲論乙駁することの多い科学技術分野において、恒に沈着冷静かつ高い学殖の下に行動される先生のお姿は我々にとって心の支えでした。

お若くして、東京大学工学部の助教授・教授に任ぜられ、爾来一貫して、原子力工学、とくに核エネルギーを熱エネルギーに変換する上で欠かせない学問である原子力熱工学の研究教育に携わられました。進取の気質に溢れ、明朗闊達、公平無私、清廉潔白な先生のお人柄を反映して、先生の研究室は、常に活気に満ちており、多くの俊英が自然に集まる雰囲気がありました。班目春樹教授、大橋弘忠教授、岡本孝司教授など、今まさに日本の原子力界を中心的に指導している人たちがその中から輩出しているという事実が何よりもそのことを如実に物語っています。

軽水炉の二相流に関する先駆的研究、液体金属冷却や低温超伝導などの先進的研究、蒸気爆発現象の動力学シミュレーションに係る先端的研究など、先生のご業績は枚挙の暇がありません。とくに、蒸気爆発については、事故解析におけるその重要性を早くから見抜かれ、科研費特定研究の研究代表者として、大きな国際会議も主宰されるなど、その指導性と先見性を如何なく発揮されました。

そのような研究上のご活動や成果をひけらかそうとは決してなさいませんでした。大学での先生の居室には、熱ループ試験装置が隠れるように置かれていたことがありました。それは、大学紛争のため自由な研究活動が一時的に妨げられたこととも無関係ではありましたが、院生たちの研究活動に必要なスペースを研究室や実験室の方にできるだけ十分に確保するためという暖かいご配慮からでした。私は、先生のご退官後、そのお部屋に入る栄に浴したのですが、同装置の電源スイッチを取り外すことは敢えてしませんでした。私にとって、それは、先生を鑑とする上でなくてはならないものでした。

先生は、東京大学で機械工学を専攻された後、創立されたばかりの日本原子力研究所に自ら進んで入られました。原子力こそが世界のエネルギー問題を解決する本命との思いからだったと伺ったことがあります。エネルギーばかりでなく、この地球が抱える諸問題を解決できるのは技術以外にないという信念をお持ちでした。科学技術による果実がすべて

の人に普く行き渡るようにすることが地球の未来を救う唯一の途とお考えでした。原子力やエネルギー技術の開発研究への先生のひたむきさは、他の追随を許さないほどの迫力がありましたが、それは先生のこの哲学に根ざしていました。

先生のご姿勢は、しかし、決して派手ではありませんでした。むしろそう映ることを避けていらっしゃるような印象を受けました。科学技術による地球的課題への貢献には途方もないほど時間がかかります。いわんや独りでできることには限界があります。先生は、ご自身が表に立つよりも裏方に徹することを好まれました。そうすることが多くの賛同者を得ることに繋がり、その限界を少しでも早く超えようとされていたのではないのでしょうか。

先生は、何事にも誠実を旨に取り組みられました。日本学術会議の会員としてご活躍の頃は原子力工学研究連絡委員会の委員長をされておられました。学術会議は文科系から理科系まで日本中の多分野の学者が集う場であり、多様な意見のある原子力に係る報告書をまとめ上げるのは並大抵の努力では難しいのですが、先生はそれを見事に成し遂げられました。報告書「21世紀に向けた原子力研究開発について」はその後の原子力研究開発に関する大学関係予算等を決める上での指針となっています。また、エネルギー全般に係る研究連絡委員会も立ち上げられ、エネルギー問題を総合的に研究教育する学問領域としてのエネルギー学を提唱するなど、エネルギー科学全般にわたる勧告書もまとめられました。これらの難しい取りまとめ作業は先生を措いて外には成し得なかったのではないのでしょうか。

原子力安全委員会では、原子力のエネルギー利用において避けて通ることのできない高レベル放射性廃棄物処分に係る環境安全要件等を審議する新設の特別専門部会の部会長をお願いしました。自分は専門ではないからと就任を固辞されたのですが、理学から工学、さらには社会学にもまたがる当分野をまとめていただける方は先生以外には考えられず、強引をお願いした経緯があります。多分野にわたる専門的見解を報告書にまとめ上げることは容易ではなかったのですが、先生は、偏った結論に陥らないよう誠意をもってすべての人の意見に等しく耳を傾けつつ、いとも簡単に部会としての合意を取り付けてくださいました。

このような誠実なお人柄は、先生と一緒に仕事をされた海外の人たちにもすぐに伝わっていたようです。ご自身の研究領域においてばかりでなく、日米機械学会共催原子力国際会議の協同開催、原子力に係る規格基準類策定の日米協力、環太平洋地域原子力学会の国際協力などで中核的な役割を担われ、先生は多数の海外の研究者との交流を深められておられました。先生の訃報を受けて、多くの人たちから弔意が寄せられましたが、あまりにも早い他界を悼むとともに、先生の行き届いた気配りに感謝の念を抱くと、申し合わせたように言い添えられておりました。

先生は、いつも前向きに考え行動される方でした。そして、ときとして、不可能と思われるほどの構想を建てられ果敢に挑戦される方でした。その代表的事例が本エネルギー

一総合工学研究所の設立でした。本研究所は、昨年、30周年を迎えましたから、30年以上も前のことになりますが、「これからの日本にとってもっとも重要な課題はエネルギー問題であり、それを技術的に解決する知恵、専門知の開発と結集が欠かせない。そのために産官学が連携して研究を行う機関を新設しよう」との先生の大構想が当研究所を産む元になったのです。本構想は、正真正銘、先生のオリジナルでした。

私は、当時、東大原子力工学科の若手の1人でしたが、現原子力委員会委員長の前藤駿介先生とともに、先生からお誘いいただき、本研究所設立準備のお手伝いをする幸運に恵まれました。文字通りゼロからの出発で大学人にとっては初めてのことも多く、創立までの過程では、連日、説明に駆け回り、また、徹夜の作業を要することも少なくありませんでした。先生の不撓不屈のお心意気が伝わったのでしょうか。先生が敬愛される大島恵一先生が率先して力をお貸しくださり、先生と同郷の経団連会長であった土光敏夫さんが自ら激励会を兼ねた朝食会を何度か開いてくださり、また、当時、資源エネルギー庁で本件を担当された平田辰一郎さんが我々のいわば同志となって奔走されるなど、学界とともに産業界、官界関係者から暖かいご理解とご支援を広く得るに至り、無事、創設に漕ぎ着けたのでした。

本研究所は、創立以来、一貫して、先生のご指導の下、今日に至っています。とくに、先生が大学をご停年のため退官された後は、初代理事長の山本 寛 先生のを継がれ、陣頭に立って活動を牽引していただきました。今日のエネルギーを巡る諸情勢をみるまでもなく、設立の趣旨にある産官学による専門知の創出の重要性は増しています。先生のご慧眼にあらためて感服するとともに、先生のご構想がますます実を結ぶことを祈念して已みません。

先生は、和やかな雰囲気でのチームワークと、後進との交流や協力を特段に大事にされていました。東大の原子力工学科・専攻は、いろいろな経緯から、現在では、システム創成、原子力国際、原子力専門職、の3つに分科しているのですが、それらの間での連帯感の維持に役立てればと、毎月、定例の勉強会を学外でもたれていました。メンバーには、田中 知 教授をはじめとする現役教員ばかりでなく、事務主任として長年、原子力工学科・専攻の発展を陰から支えてくれた、大川 勉 さん、神崎典子さんも入っていました。原子力工学科の発展は、ご両人の献身的奉仕のお陰であることを、先生は決して忘れられていなかったのです。そして、その勉強会で、原子力をはじめとするエネルギー技術の社会への理解促進のためにいわゆるアウトリーチ活動に率先して取り組もうとの声がかとなく大きくなり、今では、NPOを立ち上げその具体化に向けた運動が始まっています。先生のご遺志とも言える、この活動が着実に発展することを切に願うものです。

アウトリーチ活動と言えば、先生は、エネルギー技術に関する月刊誌「エネルギーレビュー」の編集長を、創刊以来、元読売新聞論説委員の中村政雄さんと協同して務められていました。今年が29巻目とのことですから、こちらの方も約30年前からのご活動ということになります。同誌は、今では、原子力をはじめとするエネルギー科学技術に関する啓蒙

的雑誌として広く読まれているのですが、先生の長年にわたったご尽力の賜物以外の何物でもありません。

これらのご活動の幅の広さと底の深さをあらためて思い起こしますと、先生は、日本の原子力界、惹いてはエネルギー界のまさに屋台骨の役割を担っていただいていた気が致します。世界の原子力情勢、エネルギー情勢がますます複雑化、混迷化しつつある今日、その損失はあまりにも大きく、茫然とするばかりです。

先生は、エネルギー戦略という言葉を好んで使われました。エネルギー総合工学研究所（編著）「技術立国、日本のエネルギー戦略」（エネルギーフォーラム、平成20年9月）は、先生が病苦を押して編纂されたものですが、その序章を、先生自ら執筆されています。その中で、「未来はどのように姿を現すか不明確ながら、私たちとしては受け身で迎えるのではなく、『自己充足的予測』の姿勢で進路を切り開いていくということが重要である。」と説かれ、「意あれば自ずから通ず」、「天は自ら助くるものを助く」の精神の肝要性を強調されています。我々は、この先生の教えを胸に刻み、力を合わせて、先生が切り拓いてこられた道が途絶えないよう、先生が理想とされた地球技術社会の実現に向け微力を尽くすことができると願うものです。

先生は、ほんとうにお優しい、温情溢れる方でした。「几帳面で女性でもかなわないほどの気配りの人だった。家族や母親に対してもそうだった。その気苦労が命を縮めたのかもしれない」と、奥様が思わず漏らされました。その言葉は、私の胸にもズシンとくるものがあります。私のような後輩にまで、先生がどんなにかお気を遣ってくださっていたとか、私には痛いほどわかっています。しかし、私はそのご恩に何ひとつ報いることができませんでした。その悔恨の念は尽きません。

先生は、しかし、もっと大きなお気持ちで、我々を見守ってくださっているのではないかと、私は、勝手に自分を慰めることにしました。エネルギー総合工学という学際的領域の重要性を30年以上も前に見透されていた壮大さは、誰も真似ができません。我々ができることは、その気宇調暢なお心に少しでもお応えすることではないかと思うのです。

先生のご冥福を心からお祈りします。

合掌

秋山先生の思い出

松井 一秋 (助エネルギー総合工学研究所
理事)

私は東大原子力工学科の卒業であるので、秋山先生に初めてお目にかかったのは多分昭和42年、今から40年以上前のことになる。当時学科の講義は、七色のチョークを駆使して金属材料の講義をされたべらんめえ調の三島良績先生、これが工学部の講義かと感嘆したエネルギー資源論の大島恵一先生、ひょっとして掃除のおじさんかと間違えられそうな作業衣のままの田村先生といった方々がおられた中で、秋山先生は物静かで学究肌の先生であった。計算機を使ってある数値解を出した米国の研究について、実は整理するとヤコブか何かの関数形になり、計算機を持ち出すような問題ではなかったのだと言われ、頭脳明晰との印象を持ったのかすかに覚えている。

当研究所については、設立の時からいろいろご尽力を戴いており、初代理事長の山本先生も秋山先生には全幅の信頼を置いておられた。研究所設立初期のころは、原子力発電施設の廃止措置のプロジェクトや、熱水力を中心とする原子炉内事象に関する計算機の高度利用、中小型原子炉の研究開発、核熱の利用などのプロジェクトの指導をされていた。私はこれらのプロジェクトで先生とご一緒したことは殆どなかったが、いろいろな機会で、特にお酒を飲むような時にお近づきさせてもらった。先生は、お酒はお好きではあったが強いほうではなく、ちょっとよい気分になって盛んに相手の杯に注ぐといったタイプであった。やはり初代の専務理事であった武田さんと馬が合い、時々ご一緒させてもらった折に、ストレートのウイスキーをなみなみとグラスに注がれて往生した覚えがあるが、陽気でよく冗談が出る良いお酒であった。

先生は極めて控えめでおごらない方で、第二代理事長として研究所にこられた後も、例えば、車をお使い下さいと言っても常に電車で帰宅されていたし、私用とは思えない飲食もご自分で清算されるようなところがあり、事務方が却ってやきもきしていたことを思い出す。これも、先生一流の美学のひとつだったと思われる。

これも良く知られていることであるが、秋山先生は、「戦略」に特にご関心を示された。人類全体のこと、日本の将来、そして研究所の将来についても「戦略」を打ち立てていく必要ありとのお考えだった。昨2008年には当研究所は創立30年を迎え、それを記念する事業の1つとして「技術立国日本のエネルギー戦略」を出版したが、その序章である「エネルギー戦略への期待」は、先生が常日頃お考えの集約と言え、昔の哲人の言葉なども引用して、あらゆる事象に亘って論じられた名文である。

「構想は極端かつ多様に、行動は節度と調和を持って（Think extremely and diversely, act moderately and harmoniously）を基本として努力を積み重ねていくべきであろう。」如何にも先生のお考えと生き様を良く表している。

21世紀は地球環境の制約、エネルギー資源の制約などの問題が顕在化し、それこそ沸騰しそうな様相の中で、超長期の戦略の意味や意義を改めて考える必要が認識された。当研究所は、2004年春ごろから、エネルギー技術戦略の構想を抱き、従来の検討スパンよりはるかに長い2050年、あるいは2100年といった長期、超長期の視点から技術的課題とその実現のためのロードマップを検討すべく、先生を委員長として「超長期エネルギー技術研究会」を発足させた。この議論・検討の成果として、資源エネルギー庁の2100年を展望した「超長期エネルギー技術ビジョン」、2030年を目標年度とする「技術戦略マップ」が作成され、以後も検討が続き、2008年開催の北海道洞爺湖サミットの際、日本国政府が提唱した「Cool Earth エネルギー革新技术計画」も、原案は、先生の指導の下、それらの調査研究を踏まえて当研究所が作成したものである。これらは先生のお考えの一部をなすものであり、当研究所としては今後さらに大事に発展させていきたいと考えている。

先生が創設にご尽力されたと聞く原子力工学国際会議（ICONE）に先生が出席できない時があり、私が代理としてニューオリンズで講演させて戴いたことがある。それを機として、以降、私は、ICONE、原子力発電プラント国際会議（ICAPP）等の国際会議の運営に関与することになり、また、先生が環太平洋原子力協議会の会長を務められた際には、私はお手伝いをする事になり、その後、私は、日本と米国、双方の原子力学会の役員に就任するに至ったが、これらは、全て、秋山先生のお導きのおかげである。

先生はご病気になり、手術で入院された後、約2年に亘り職務に復帰された。その間も、静養されることもあったが、先生は、いつも研究所の運営を気遣い、出社できない時は電話にて、笑いながらアレコレと適確なご指示をして戴いていた。そして、電話の最後に「〇〇様によろしくお伝え下さい」と言われるのが常であり、関係の方々に心配りされていた。

病院なり自宅へのお見舞いは固辞された。ご都合を電話で何うと断られるので、連絡せずにお宅に伺ったことも何度かあり、玄関先ではあったがご挨拶を申し上げた。東大病院に入院されているところをお伺いしたら退院されたあとで病室には他人がいてびっくりしたこともある。これも、迷惑はかけない、自分の醜態は見せないという先生の美学であったと思う。

ご冥福をといつて筆をおくところなのだろうが、何かそうはしたくない。先生のご遺志、お考えを大事に、先生のお考えの「戦略」をさらに発展させていきたいと考えている。

平成20年度 事業報告の概要

(財) エネルギー総合工学研究所

当研究所における平成20年度事業の概況は以下のとおり。

(1) 当研究所は、平成20年4月に創立30周年を迎えた。創立以来これまで、わが国のエネルギー工学分野の中心的な調査研究機関として、産・学・官の緊密な連携の下、専門的な知見を集め、技術的側面から総合的に調査研究を行ってきた。この節目の年に、向こう5～10年の間に当研究所が進むべき方向を展望する「中長期ビジョン」を策定するとともに、海外招聘講演を含む創立30周年記念シンポジウム、エネルギー技術戦略をテーマとした大島賞懸賞論文コンテスト、「技術立国日本のエネルギー戦略」の記念出版等の活動を実施した。

(2) 平成20年度には、所内に新たに「原子力工学センター」を設置し、(財)原子力発電技術機構 (NUPEC) の事業の継承を図るとともに、国内の既設炉の代替炉および国際標準炉として2030年頃の実用化を目指す次世代軽水炉技術開発事業を中核機関として開始した。また、最新の技術情報および技術的知見をウェブベースで賛助会員企業等に提供するエネルギー技術情報プラットフォームの運用を本格化した。

(3) 昨今、原油価格の乱高下、迫られる地球環境問題への対応等エネルギー・環境を巡る情勢は大きく変動し、また、世界的な金融危機の発生等、政治や経済を巡る情勢も流動的な様相を呈している。このような多様なリスクが存在する状況下において、当研究所は、「エネルギーの未来を拓くのは技術である」との認識の下、平成20年度においても、各エネルギー分野で積極的に調査研究等の活動を実施した。

① 総合的な分野では、エネルギー技術戦略マップ、エネルギーマネジメントシステムの国際標準化等に係る調査研究を行った。情報と評価は技術開発戦略を策定していく上で基盤を成すものであるとの認識の下、平成20年度から本格運用を開始したエネルギー技術情報プラットフォームについては、技術テーマの追加・改訂、研究成果ライブラリーの充実等を実施した。

② 新エネルギー・エネルギーシステムに関しては、電力システム分野で関心が高まっているスマートグリッドの開発に資する電力システムの監視・制御技術の高度化、スマートメータの技術動向等、また、自動車エネルギー分野では、プラグインハイブリッド自動車の導入効果、自動車燃料の将来シナリオに関し調査研究を実施した。

また、再生可能エネルギー分野では、バイオマス由来の液体燃料製造技術開発、太陽光発電大量導入時の技術課題等に関し、水素エネルギー分野では、水素の輸送技術、水素供給源としての製油所水素の利用可能性、海外の再生可能エネルギー由来の水素の経済的・技術的成立性等に関し、さらに、省エネルギー分野では、超臨界CO₂ガスタービンの開発、低温度排熱の利用可能性に関し、それぞれ調査研究を実施した。

③ 化石エネルギー分野では、石炭ガス化による発電から発生した二酸化炭素 (CO₂) の回収・貯留 (CCS) に係るシステム評価、石炭乾留ガスを改質しクリーン燃料とする技術開発、石炭ガス化及び液化の実用化に向けた技術調査等のクリーンコールテクノロジーに関して調査研究を行った。

④ 地球環境分野では、地球環境問題の解決に資するため、同問題に係る国際的な動向の調査、当研究所の地球環境統合評価モデル（GRAPE）を活用したCO₂以外の温室効果ガス削減や土地利用起源温室効果ガス削減について調査研究等を行うとともに、国際的な会議に参画し情報発信に努めた。

⑤ 原子力分野では、原子力は実用的な非化石エネルギーであり、エネルギー安定供給および地球環境問題対応を図る上で重要な役割を担うとの認識の下、現在の原子力発電の主流をなす軽水炉について、世界標準を獲得しうる次世代軽水炉の技術開発事業を実施するとともに、軽水炉の先にある将来の原子炉コンセプトである第4世代炉開発に係る国際的な共同研究へ参画し、中小型炉、高温ガス炉等の新型炉に関する調査研究を行った。また、国が実施する革新的原子力技術開発や人材育成に係る公募管理業務を実施した。

さらに、NUPECから継承した事業である安全解析事業を新たに開始するとともに、当研究所およびNUPEC双方で実施してきた原子力発電施設の廃止措置に係る調査研究事業を統合し、さらなる推進を行った。

(4) 近年、当研究所を巡る経営環境には厳しいものがあり、また、平成20年度には新公益法人法が施行され新しい制度に移行した。これらの変化に適確に対応しつつ、安定的な経営を可能とするべく諸活動を実施した。

● 行 事 案 内 ●

ISO50001（エネルギーマネジメントシステム国際規格） の策定に関するシンポジウム —我が国の貢献と今後の対応—

主 催：(財)エネルギー総合工学研究所
後援(予定)：経済産業省，(財)日本規格協会，(財)省エネルギーセンター，
(社)日本エネルギー学会，(社)エネルギー・資源学会

開催趣旨

省エネルギーのみならず，エネルギーコストやエミッションの低減を組織として統一的にマネジメントする仕組みをエネルギーマネジメントシステムといい，世界的にもエネルギーを使用する多くの企業・組織が実践しはじめています。このような状況に鑑み，ISO はエネルギーマネジメントシステムの国際標準化のためにPC242（Energy Management）を立ち上げ，規格番号としてISO50001 が与えられました。

我が国では当研究所が国内審議団体として認定を受け，策定作業の事務局として参加しております。

本規格が策定され，国際的に普及した場合には産業活動に様々な影響があると予想されます。

本シンポジウムは，我が国が規格策定に積極的に貢献しつつ，我が国の組織にとって有益で使いやすいISO50001を策定することを目的として，我が国の貢献のあり方，本規格の策定作業メンバー等の有識者を交え，本規格が我が国に与える影響について議論等を行い，今後我が国の採るべき対応について共に考える場を提供するものです。

日時，場所

平成21年 8月28日（金） 13：30～17：30 （開場 13：00）
経団連ホール（東京都千代田区 1－3－2 経団連会館 2階 定員500名）

会場アクセス（右図）
東京メトロ「大手町」駅下車
C2b出口直結



講演テーマ

- 講演 1： ISO50001の概要，標準化の背景と進捗状況
西尾 匡弘（(独)産業技術総合研究所 エネルギー社会システムグループ グループ長）
- 講演 2：マネジメントシステム規格としてのISO50001
～ISO14001(環境マネジメント規格)との対比を中心に～
寺田 博（IMSコンサルティング株式会社 取締役）
- 講演 3：ISO9001(品質マネジメント規格)とISO50001の関係
平林 良人（株式会社テクノファ 代表取締役）
- 講演 4：省エネルギー法とISO50001標準化
石原 明（財省エネルギーセンター 常務理事）
- パネルディスカッション：規格策定への我が国の貢献，我が国産業界への影響と対応

申し込み方法

- ・事前予約制となっております（当日の申込はお受けしていません）。
- ・参加費 1万円（税込み）
- ・首記の申込みは、必ず弊所ホームページ<http://www.iae.or.jp/> をご覧のうえ、電子メールにてお申し込みください。
- ・なお、会場の都合上、満席になり次第受付を締切らせて頂く場合がありますので、ご了承ください。

研究所のうごき

(平成21年4月2日～7月1日)

◇ 第75回理事会

日時：6月12日(金) 11:00～12:00

場所：経団連会館(4階) 404号室

議題：

第一号議案 平成20年度事業報告書および決算報告書(案)について

第二号議案 評議員の一部交替について

第三号議案 その他

◇ 月例研究会

第278回月例研究会

日時：4月24日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 欧米諸国における電気事業の現状 ～市場自由化から低炭素社会、電力安定供給に向けた潮流変化～
(社)海外電力調査会 調査部 副主任 研究員 大西 健一氏)
2. 『21年度 供給計画の概要』について
(電気事業連合会 電力技術部長 藤井 裕三氏)

第279回月例研究会

日時：5月29日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 海外風力エネルギー由来の水素エネルギーシステムについて
(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 渡部 朝史)
2. 電気自動車の最新動向
(財)日本自動車研究所 FC・EV研究部 企画・実証グループ グループ長 荻野 法一氏)

第280回月例研究会

日時：6月26日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館 地下1階 B101会議室

テーマ：

1. 地球温暖化防止対策とCCSへの取組みについて
(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境技術開発部 主査 横塚 正俊氏)
2. 石炭ガス化プロジェクトの動向と将来展望
(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 埜 雅一氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：坂田 興

テーマ：Cool Earth エネルギー革新技術計画と日本の低炭素水素技術

発表先：アジア水素エネルギー会議

日時：4月9日

発表者：小野崎 正樹

テーマ：中国の石炭ガス化の動向

発表先：九州大学石炭等化石資源中核人材育成事業、特別講演

日時：4月24日

発表者：氏田 博士

テーマ：Proposal on Concept of Security of Energy Supply with Nuclear Energy

発表先：ICAPP '09

日時：5月11日

発表者：楠野 貞夫

テーマ：世界のウラン資源開発の状況(現状及び将来像)及び濃縮施設の需要について

発表先：原子力エネルギーシステム研究委員会(日本原子力学会中部支部)(開催場所：名古屋東桜会館)

日時：5月22日

発表者：小野崎 正樹

テーマ：クリーンコールテクノロジー(CCT)を用いた化学品、輸送燃料などの海外展開

発表先：KRIワークショップ'09

日時：5月29日

発表者：時松 宏治

テーマ：資源循環を考慮した鉱物資源需給モデルの開発

発表先：第28回エネルギー・資源学会研究発表会

日時：6月11日

発表者：時松 宏治

テーマ：Measuring Weak Sustainability for the future : Calculating Genuine Saving with population change by an integrated assessment model

発表先：欧州環境経済学国際会議(EAERE '09)

日時：6月25～27日

発表者：坂田 興

テーマ：2008年の水素

発表先：低温工学会冷凍部会例会

日時：6月26日

発表者：蓮池 宏

テーマ：今後の輸送用エネルギーと天然ガスの役割
発表先：天然ガス自動車フォーラム第50回研究会
主催：天然ガス自動車フォーラム
場所：経団連会館
日時：7月8日

[論文・寄稿]

発表者：坂田 興

テーマ：水素利用技術
寄稿先：日本機械学会誌2009年8月号「機械工学
年鑑」特集号

発表者：渡部 朝史，村田 謙二

テーマ：国内外風力発電における電力供給パスの
コスト比較
寄稿先：エネルギー・資源学会論文誌2009年5月号

発表者：埜 雅一，小野崎 正樹

テーマ：合成液体燃料製造の現状と展望
寄稿先：日本エネルギー学会誌 平成21年6月号

発表者：蓮池 宏，渡部 朝史

テーマ：レポート「EVS-24」
寄稿先：「エンジンテクノロジーレビュー」Vol.1,
No.3

発表者：石本 祐樹，後藤 信之

テーマ：ISO50001（エネルギーマネジメント国際規
格）開発の進捗について
寄稿先：月刊アイソス 6月号

発表者：坂田 興

テーマ：2008年の水素
寄稿先：日本エネルギー学会誌 8月号

◇ 人事異動

○5月12日付

(非常勤嘱託採用)

青木 孝 原子力工学センター特別嘱託研究員

○5月15日付

(退職)

池田 崇行 原子力工学センター部長(参事)
兼総務部

○6月25日付

(出向解除)

高山 大輔 プロジェクト試験研究部主任研究員

○6月26日付

(出向採用)

西 順也 プロジェクト試験研究部主任研究員

○6月29日付

(出向解除)

酒谷 幹男 プロジェクト試験研究部主管研究員

○6月30日付

(出向解除)

石丸 順久 プロジェクト試験研究部主任研究員
浦田 浩孝 プロジェクト試験研究部主任研究員

(出向採用)

野崎 広治 プロジェクト試験研究部主管研究員

○7月1日付

(出向採用)

吉澤 秀夫 原子力工学センター部長(副主席研
究員)

坪内 俊博 プロジェクト試験研究部主任研究員
野口 英樹 プロジェクト試験研究部主任研究員

(非常勤嘱託採用)

山田 富明 プロジェクト試験研究部副参事

編集後記

太陽光発電が再び脚光を浴びその設置が加速し、またメーカーの設備増強も相次いで報じられている。二酸化炭素排出削減への関心が高まり、普及支援へのてこ入れ策が奏功した結果と思われ、大いに歓迎すべき状況である。ただし現行の長期需給見通しによれば、「最大導入」ケースでも、即ち精一杯背伸びしても、太陽光発電は2030年の一次エネルギー国内供給の5パーセント弱を担うに過ぎない。

以前から度々指摘されていることではあるが、エネルギーにあまり関心の無い人々には、このような太陽光発電の非力さは「意外」なこととして受け取られがちであり、なぜそうであるのかについて理解を得るのは容易でない。言うまでも無く、太陽光に限らず他の再生可能エネルギーの場合も同様である。一方で、太陽光発電の持つクリーンなイメージは極めて大切なものである。将来の社会においてもエネルギーと地球環境は「何とかかなりそうだ」という希望と感触を人々が持てるように、そのための手掛かりとして。希望の星、すなわちスターとして。

ただし、スターだけでは世界は構成できない。スターの周りには、それを支える多くの、しっかりとした、実力のある脇役が必要である。エネルギーの世界では、原子力、そして化石燃料が脇を固めなければならない。時代の風潮からは、脇役とも見なされずに、裏方なのかもしれないが。まさにインフラ、縁の下の力持ちである。もとより、為政者を含む社会のリーダーは、スターを語り明るい未来を人々に示すべきである。しかしその時、脇役にもしっかりと照明を当ててその重要性について一般の理解を得るように努めることを忘れてはならない。いぶし銀の渋い役柄をアピールすることを。

20年、30年先のことは分からない、夢のような素晴らしいエネルギー技術が発明されているかもしれないのではないかと人は言う。そうかもしれないし、そうであって欲しいと思う。しかしそれを前提にするのは責任ある態度とは言えないだろう。地に足がついた舵取りが望まれる。

編集責任者 正田知士

季報 エネルギー総合工学 第32巻第2号

平成21年7月20日発行

編集発行

財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(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。