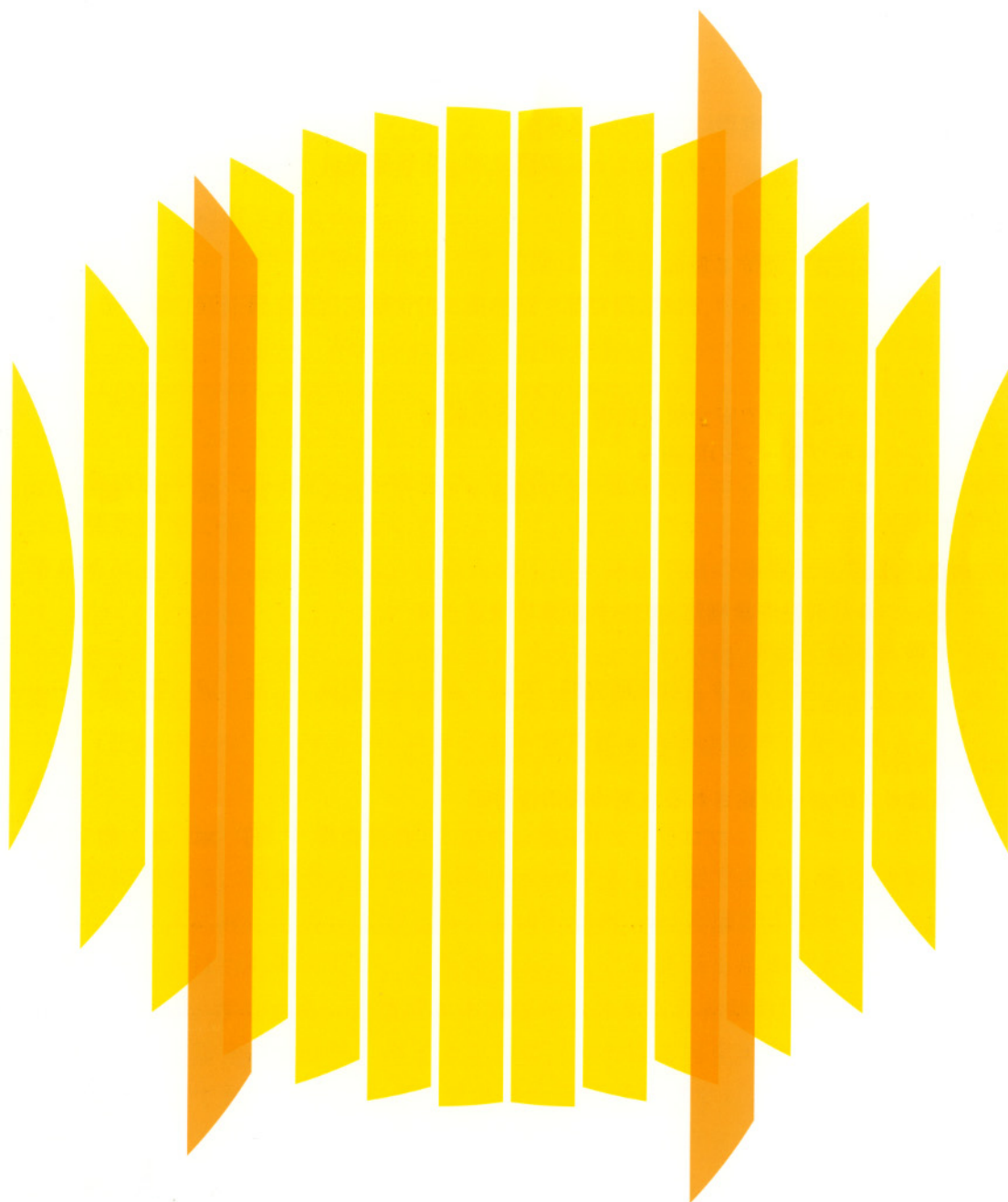


季報 エネルギー総合工学

Vol. 31 No. 3 2008.10.



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

目 次

【巻頭言】 再生可能エネルギーとネットワーク事業者の役割 ～「3つのベストミックス」 東京ガス(株) 代表取締役 副社長執行役員	前 田 忠 昭 ……	1
【寄稿】 合成燃料のライフサイクルアセスメント評価 日本工業大学 工学部 システム工学科 准教授	八木田 浩 史 ……	3
【調査研究報告】 「Cool Earth50」実現に向けた取組み プロジェクト試験研究部 主管研究員	寺 田 保 ……	10
【調査研究報告】 ブラジル提案に関する動向 プロジェクト試験研究部 副部長 主管研究員	黒 沢 厚 志 ……	18
【調査研究報告】 原子力分野における安全解析技術とその応用展開 —安全解析グループの取組み 原子力工学センター 安全解析グループ 部長	内 藤 正 則 ……	25
【調査研究報告】 高レベル放射性廃棄物処分の世代間意思決定とは どのようなことか プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員	蛭 沢 重 信 ……	35
【調査研究報告】 高温ガス炉から供給される水素の経済性評価 プロジェクト試験研究部 主任研究員	石 本 祐 樹 ……	45
【研究所の動き】		52
【編集後記】		54

巻頭言

再生可能エネルギーとネットワーク事業者の役割 ～「3つのベストミックス」



前田 忠昭 (東京ガス(株) 代表取締役
副社長執行役員)

何をいまさらと言われそうだが、わが国の国民生活を支えているエネルギーは、石油、石炭、天然ガス、原子力、水力等の組合せであり、需要、供給それぞれの特徴に応じて利用されている。

一般に、エネルギーを評価・採用する基準は、価格、使い勝手の良さ、供給の安定性、資源の可採埋蔵量、気候や海洋へのインパクト等、いろいろな角度がある。こうした基準で見ると、それぞれ長所、短所があって、全ての角度から完璧なエネルギーは残念ながら存在しない。日本全体の需要をどれか一種類のエネルギーでまかなうことはできないし、また、そうすべきでも無い。例えば、何か予測できない事象は必ず起こると考えるべきで、不測の事態が起こった場合でも、国民生活への悪影響をできるだけ少なくするように、社会システムは適度な冗長度や代替手段を持っておく必要がある。日本人の国民生活が不測の事態で破綻して良いはずはなく、賭けとしてはリスクが大きすぎるからである。

したがって、わが国のエネルギー供給システムとしては、常にセキュリティを考え、多様なエネルギーで支えあい、ある程度の冗長度を持った設計思想、すなわち「供給サイドでのベストミックス」と言う考え方が必要不可欠である。

「需要サイドでのベストミックス」

これに対して、需要サイドでのベストミックスも重要である。需要地でのいろいろなニーズに対応して、最適なエネルギーの組合せを選択するという単純なベストミックスはもちろんだが、需要地であることの特長を生かしたシステム設計が重要である。すなわち、分散型エネルギーシステムの有効利用である。

例えば、太陽光、太陽熱、バイオマス等、いわゆる再生可能エネルギーはローカルに分散しており、できるだけ需要地の近くで利用することが効率的である。この際、同じく分散型のコージェネレーションなどもうまく利用して、消費地近くでエネルギーを作る特長を生かしたベストミックスを考えることができる。組み合わせで出力を安定化したり、余り遠くまで運べない熱エネルギーを、1棟の中、複数の建物、あるいは街単位で相互に融通しあうことも効率的である。

こうすることによって、大規模システムが海洋や空气中に捨てている無駄なエネルギーを極力少なくすることが出来る。また、複数のエネルギーシステムの利用によって相互のバックアップが可能な強い社会システムの構築にもつながることとなる。

「ネットワークのベストミックス」

環境問題が重要な今、太陽光、太陽熱、バイオマス等、いわゆる再生可能エネルギーをできるだけ利用すべきということにあまり異論は出ないものと思われる。ただし、自然に依存したエネルギーは、量的にも、時間的にも、常に安定的に確保できるわけではないので、推進に当たっては、他の何らかのエネルギーによる補完が必要となる。

従来、電力事業、ガス事業などのネットワーク事業者の考える安定供給とは、他者に頼ることなく、必要なエネルギーを全て供給することをベースにネットワークの設計を行ってきた。すなわち、遠隔地で大規模に発電あるいはガス製造を行い、エネルギーは上流から下流に一方的に流れていくネットワークシステムである。こうした考えに立つと分散型システムは邪魔者以外の何者でもないことになる。仕方なく導入するが、できれば無いほうが良い厄介者と考えているふしがあった。しかしながら、そもそもこれはネットワーク事業者が不遜ではないかと思うのである。

本来、ネットワーク事業者は（私もその一人であるが）、自分の供給システムを中心に考えるのではなく、需要地で多くの方々が自分で作る再生可能エネルギーを補完するものとして位置づけられるべき存在ではないだろうか。こう考えると、事業としての対応方法は自ずと異なってくる。ローカルに分散している再生可能エネルギーを利用することを基本に、ネットワークを見直してみる必要がある。遠くで作ったエネルギーを延々と運ぶのは最小限にする必要がある。

都市、ビル、住宅等、ローカルに最適な都市づくりを考え、ローカルネットワークの概念を取り入れ、残りを大規模ネットワークが担う。その際に上流、下流と言う考え方を少し修正することによって、再生可能エネルギーをできるだけ多く取り込むことができるようにネットワークを再調整する。

こうした「ネットワークのベストミックス」とも呼ぶべき考え方を取り入れ、より柔軟な社会システムを作っていくべきではないかと考えているところである。

[寄稿]

合成燃料のライフサイクルアセスメント評価

八木田 浩史

(日本工業大学 工学部
システム工学科 准教授)



1. はじめに

原油価格の高騰などを背景として、GTL（ガストゥリーキッド）やBTL（バイオマストゥリーキッド）、DME（ジメチルエーテル）といった合成燃料へ注目が集まっている。他方、地球温暖化問題が世界的に取り組むべき課題となっており、合成燃料についても環境負荷を見極めた上での利用が求められている。燃料の環境負荷といった場合、燃焼時の温室効果ガス（GHG）排出量に注目が集まることが多いが、製造時も含むライフサイクル視点で、排出量を検討すること、つまりライフサイクルアセスメント（LCA）による評価が必要である。

そこで、本稿では、合成燃料の環境負荷について、ライフサイクルの視点で評価する方法と評価例を紹介する。

2. ライフサイクルアセスメントとは

LCAとは、評価対象とする製品やサービスについて、資源の採掘から生産・使用・廃棄までのライフサイクル全体における資源消費量や排出物量を計量（インベントリ分析）し、その環境への影響を評価する手法である⁽¹⁾。図1にLCAの概念イメージを、図2にLCAの構成段階を示す。さらに、図3に示すように、LCAでは、インベントリ分析で把握した資源

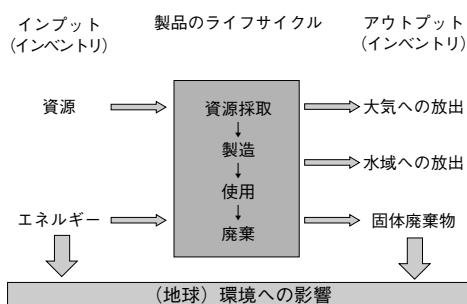


図1 LCAの概念イメージ

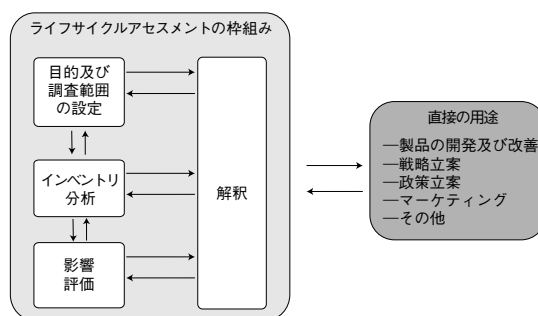


図2 LCAの構成段階

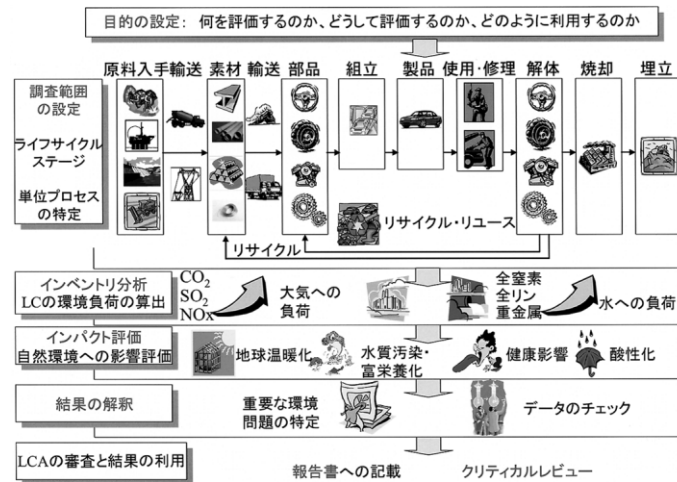


図3 LCAの基本概念と一般的手順

消費量や環境影響物質の排出量に基づいてインパクト分析を行うことにより環境影響の大きさが評価される。LCAによる燃料の評価では、一般的に着目される二酸化炭素（CO₂）は対象項目の1つに過ぎない。

3. 合成燃料のLCA評価の例

合成燃料のLCA評価の実例として、（1）自動車燃料としてのGHG排出量、（2）輸送機関用燃料としてのCO₂、NO_x、SO_x、PM排出量、（3）発電用としてのCO₂、NO_x、SO_x、PM排出量に関する検討結果を紹介する。

（2）（3）は、筆者も評価委員の1人として参加した、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成16年度国際石炭利用対策事業「石炭起源クリーンエネルギーの環境影響度調査」の成果である。同調査では、さまざまなLCA環境影響評価方法のうち、日本版被害算定型環境評価手法（LIME: Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint Modeling）を活用している（図4）。これにより、環境排出の発生から生じる最終的な被害の程度を定量的に算定し、単一の環境影響評価指標に統合して示すことが可能となった⁽²⁾。

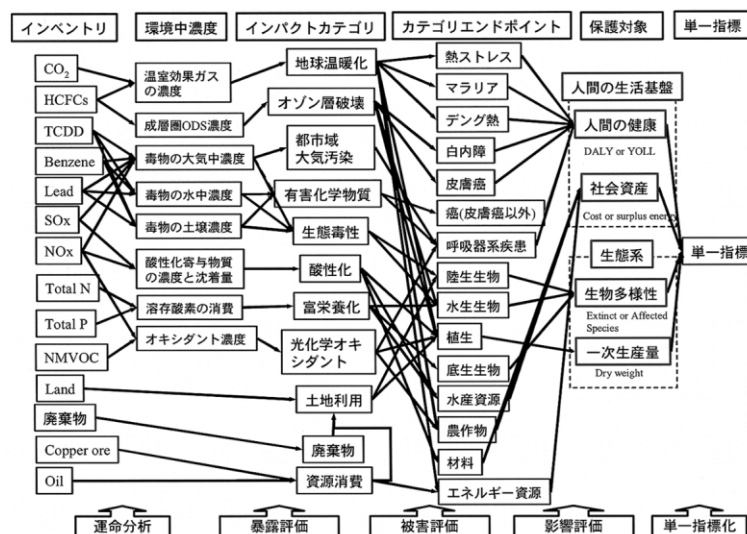


図4 LIMEのイメージ²⁾

（１）自動車燃料としてのGHG排出量

図5は代表的なGTLであるFT軽油を天然ガスからFischer-Tropsch (FT) 合成、生成物の水素化分解・精製で製造した時のGHG排出量を石油系軽油と比較したものである。また、図6は、自動車燃料としての使用段階まで含めたライフサイクルGHG排出量を、さまざまな燃料種と自動車種（従来車、ハイブリッド車、燃料電池車）について整理したものである。図6のFT

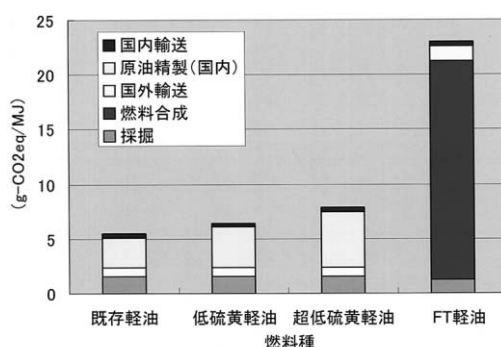


図5 FT軽油と石油系軽油の製造時GHG排出

軽油（天然ガス→FT軽油 [ICE]）、石油系軽油（軽油 [ICE]）に着目すると、燃料利用時のGHG排出が、燃料製造時のGHG排出に比べて大きいため、FT軽油と石油系軽油の差は、製造時よりも小さく見える。ライフサイクルのGHG排出量は、FT軽油の方が石油系軽油よりも2割程度大きい。

（２）輸送機関用燃料としてのCO₂、NO_x、SO_x、PM排出量

図7～図10は、天然ガス、石炭から合成されたFT軽油、DMEについて、ライフサイクルのCO₂、NO_x、SO_x、PM排出量を、石油系の軽油2種（低硫黄型、超低硫黄型）と比較したものである。各排出量は、トラックエンジンの13モード運転の1 kWh当たりの排出量であり、排出場所として「海外」は燃料の製造時、「国内」は燃料の使用時（走行時）、「海上」は燃料の輸送時に、対応している。

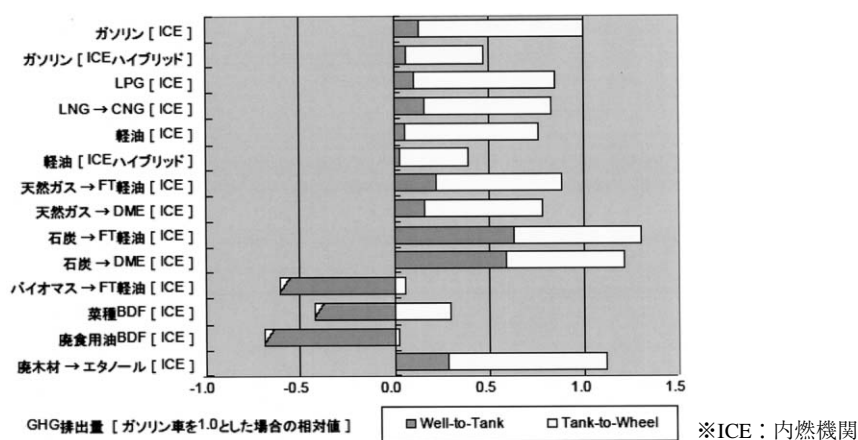


図6 各種燃料及び自動車のWell-to-WheelのGHG排出

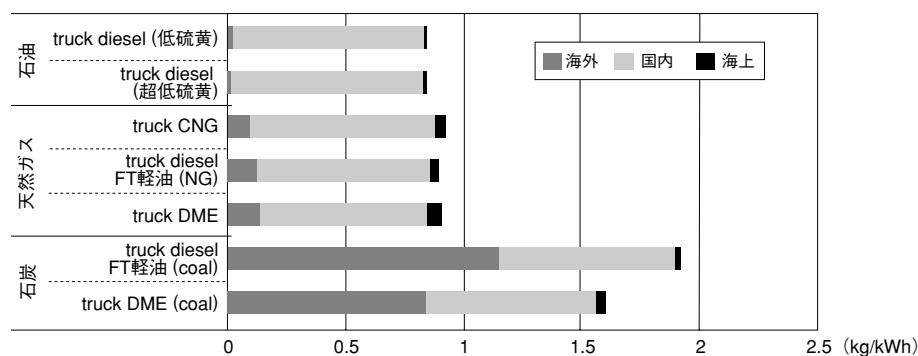


図7 各種輸送機関用燃料のライフサイクルCO₂排出量⁽³⁾

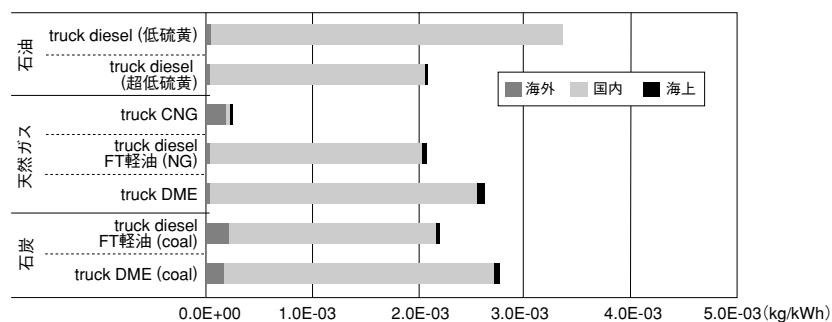


図 8 各種輸送機関用燃料のライフサイクルNOx排出量⁽³⁾

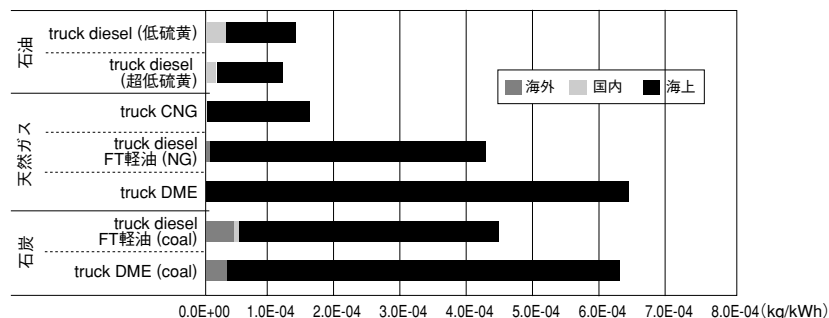


図 9 各種輸送機関用燃料のライフサイクルSOx排出量⁽³⁾

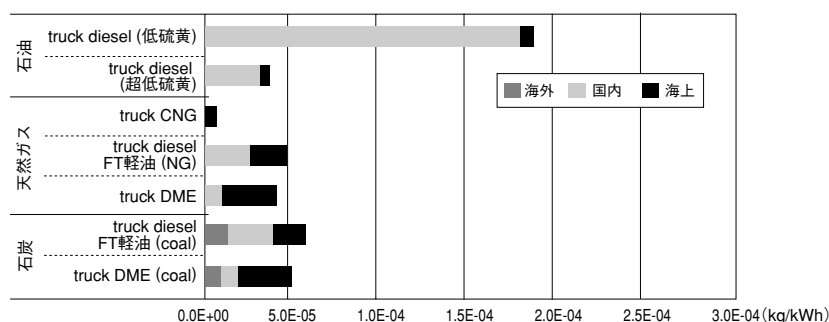


図10 各種輸送機関用燃料のライフサイクルPM排出量⁽³⁾

図11は、図7～図9の試算結果のうち国内での環境影響物質排出量に関して、LIMEを適用して統合評価を試みたものである。左側のグラフでは、一次生産、社会資産、人間健康

への影響について相対的に比較可能な形となっており、右側のグラフでは、CO₂、SO_x、NO_x、PMといった排出物質の環境影響が相対的に比較可能な形となっている。

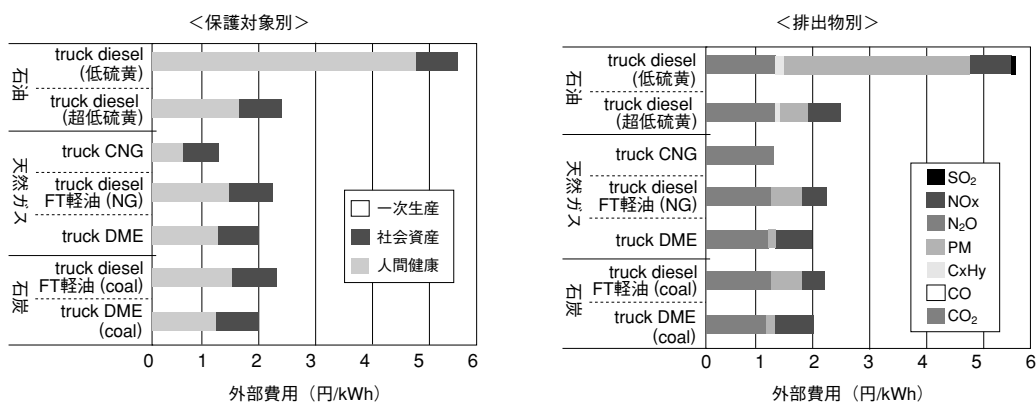


図11 各種輸送機関用燃料の国内環境影響の統合評価⁽³⁾

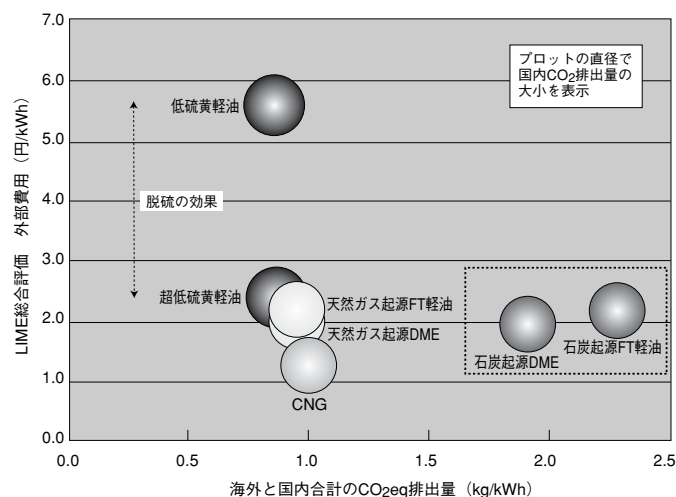


図12 各種輸送機関用燃料の総合評価⁽³⁾

図12は各輸送機関用燃料のLCA評価結果を示したものである。このような整理を行うことにより，注目すべき各種の視点について一見して対比することが可能となる。

(3) 発電用燃料としてのCO₂、NO_x、SO_x、PM排出量

各種合成燃料の火力発電燃料としての利用をLCAに基づいて比較・評価した例を説明する。発電効率，NO_x，SO_xの排出量は，各種の規制値などを勘案し，表1のように設定している。BTGは従来型の蒸気タービン発電を，GTCCはガスタービン複合発電を意味している。

図13は，各種火力発電のライフサイクルのCO₂排出量を整理したものである。合成燃料による発電は，液体燃料に変換することにより国

表1 各種火力発電のデータ設定⁽³⁾

項 目	送電端効率 (%)	排出量 (g/kWh)	
		NO _x	SO _x
石炭BTG	38	0.28	0.25
石炭IGCC	45	0.28	0.25
重油BTG	35.5	0.28	0.25
LNG-BTG	38.8	0.28	-
LNG-GTCC (従来)	49	0.28	-
LNG-GTCC (Advanced)	51.6	0.28	-
LPG-BTG	38.8	0.28	-
LPG-GTCC (従来)	49	0.28	-
DME-BTG	38.8	0.28	-
DME-GTCC (従来)	49	0.28	-
DME-GTCC (Advanced)	51.6	0.28	-
メタノールBTG	38.2	0.28	-
メタノールGTCC (従来)	49	0.28	-

内での発電時のCO₂排出量が低減する場合があるが，海外での燃料製造時のCO₂排出量の増加分がこれを上回るため，ライフサイクルではCO₂排出量の削減とはならないことが分かる。

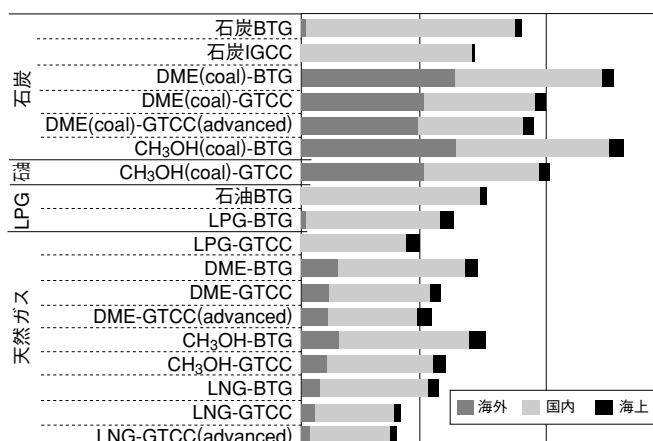


図13 各種火力発電のライフサイクルCO₂排出量⁽³⁾

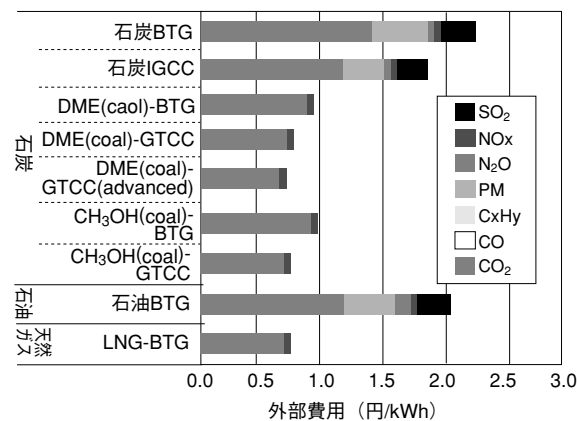


図14 各種火力発電の国内環境影響の統合評価⁽³⁾

図14は、国内での環境影響物質排出量について、CO₂に加えてNO_x、SO_xなどもLIMEに基づき統合評価したものである。発電の評価では、地球環境問題への関心からCO₂排出が着目されることが多いが、場合によっては地域環境の視点も必要であることが示唆される。

図15は、石炭および天然ガスを原料とする合成燃料による火力発電について、CO₂排出量を整理したもので、プロットの直径で国内CO₂排出量の大きさを表わしている。特に、石炭起源合成燃料については、合成燃料に変換することで、ライフサイクルのCO₂排出量

は増加するものの、外部費用が下がり、地域環境が改善する可能性がある。プロットの直径も小さくなり国内CO₂排出量が減少することがわかる。

また、天然ガス起源の合成燃料による発電は、LNG火力に比べてCO₂排出量は大きい、石油BTGよりもCO₂排出量および地域大気汚染物質の排出量は小さい。場合によっては旧式の重油火力などを合成燃料による火力発電に切り替えることにより、地球環境および地域環境両面の改善に繋がる可能性がある。

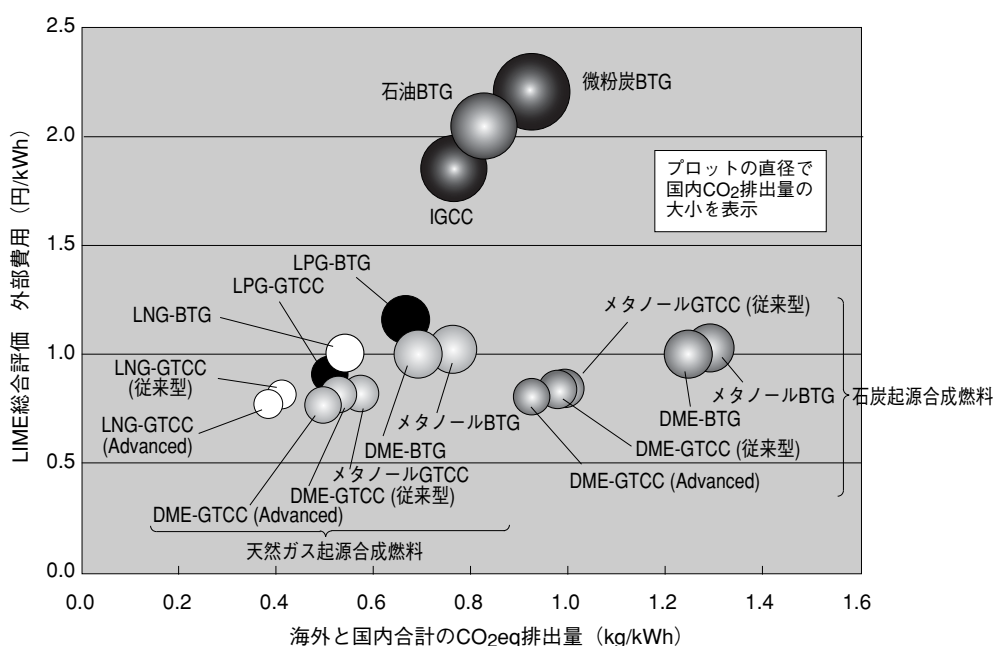


図15 各種合成燃料による火力発電の総合評価⁽³⁾

6. おわりに

合成燃料の評価において考慮することが必要と考えられる論点について、LCA以外の視点を含めて私見をまとめる。

●地球温暖化対策の視点

- エネルギーの有効利用の視点
- CO₂削減の視点
- 地域的な環境問題との兼ね合い

●エネルギーセキュリティの視点

- エネルギー源の多様化
- 各種の供給制約の緩和

●経済性、規模の視点

- 環境側面の評価では、環境改善の効果のみが強調
- 費用対効果の視点
- 規模を考慮する必要性

[謝辞]

本検討の一部は、筆者が評価委員の1人として参加した、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成16年度国際石炭利用対策事業「石炭起源クリーンエネルギーの環境影響度調査」の一環として実施された成果であり、改めて感謝の意を表したい。

参考文献

- (1) 伊坪徳宏，田原聖隆，成田暢彦（監修：稲葉敦/青木良輔）「LCA概論」産業環境管理協会（2007年11月）
- (2) 伊坪 徳宏，稲葉 敦：ライフサイクル環境影響評価手法—LIME - LCA，環境会計，環境効率のための評価手法・データベース，産業環境管理協会（2005）
- (3) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成16年度成果報告書 石炭補助事業費 国際石炭利用対策事業「石炭起源クリーンエネルギーの環境影響度調査」（2005年3月）

「Cool Earth50」実現に向けた取組み

寺田 保（プロジェクト試験研究部
主管研究員）



1. はじめに

平成19年5月24日、国際交流会議「アジアの未来」2007において、安倍総理（当時）は、地球温暖化に関するイニシアティブ「美しい星50（Cool Earth50）」を発表した。その中で、世界に向けて、短期（京都議定書第1約束期間）、中期（2013年以降）、長期（2050年）からなる戦略が述べられている。特に、長期目標では、世界全体の温室効果ガス（GHG）排出量を2050年までに現状より半減するという提案がなされ、この目標の実現には、従来技術の延長では困難で、革新的技術の開発、普及が不可欠とされている。

さらに、洞爺湖サミット（2008年7月7～9日）では、2050年までに世界全体のGHG排出量の少なくとも50%の削減を達成するという目標を、国連気候変動枠組み条約（UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change）のすべての締約国と共有し、かつ、この目標をUNFCCCの下での交渉において、これら諸国と共に検討し、採択することを求めるという合意が得られた。

世界トップ水準の技術力を有する日本が上記の目標を達成するには、世界をリードできるエネルギー技術に研究開発資源を重点配分し、技術開発の加速・推進で競争力を強化・維持しつつ、国際的連携を推進していくことが必要である。

本稿では、2050年を見通した上で、エネルギー分野における革新的な技術開発の具体的な取り組みのあり方を検討した「Cool Earth－エネルギー革新技術計画」※1の策定経緯、革新技術のロードマップの詳細について報告する。

2. 「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」の選定

当研究所は、平成16年から資源エネルギー庁からの委託により、2100年までの超長期を見通す、「超長期エネルギー技術ビジョン」※2の策定に携わった。同ビジョンでは、地球的規模の資源制約、環境制約を乗り越えるために求められる技術の姿を逆算（バックキャスト）することで描き出した。

さらに、平成18年には「エネルギー技術戦略2007」※3の策定に貢献した。ここでは、「新・国家エネルギー戦略」※4で想定される2030年までに実用化され、「総合エネルギー効率の向上」など5つの政策目標に寄与すると思われるエネルギー分野全体から洗い出した235技術を俯瞰した。

今回策定された「Cool Earth－エネルギー革新技術計画」（平成20年3月）では、「エネルギー技術戦略2007」をベースに当所内に設置した「Cool Earth－エネルギー革新技術計画検討委員会」で様々なエネルギー技術分野の専門家の知見を集約し、2050年までの世界全体のGHG排

※1 http://www.enecho.meti.go.jp/policy/coolearth_energy/index.htm

※2 <http://www.iae.or.jp/research/result/cho06.html>

※3 <http://www.meti.go.jp/press/20060531004/20060531004.html>

※4 http://www.iae.or.jp/research/result/ene_map_2007.html

出量大幅削減に向けて、わが国として重点的に取り組むべき革新技術を特定した。その上で、長期にわたる技術開発を着実に進めるためのマイルストーンとして、各技術の開発に向けたロードマップを作成した。この大幅削減は、国際協調なくして達成し得ないと考えられることから、ロードマップを軸に長期的視点での技術開発に関する国際連携のあり方についても検討を行っている。

「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」は、最終的には経済産業大臣の下に設置された有識者会議の報告としてとりまとめられた。

3. 「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」の策定

2050年までのGHG排出量半減には、既存技術の改良と普及が重要であることは言うまでもないが、既存技術の延長線上だけでは達成が困難である。そこで、「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」では、対象技術の要件として、①GHG削減効果がある上に従来の延長線上にない技術、特に中長期の視点からの実用化、普及段階まで見通した技術であること、さらに、②わが国が世界をリードできる分野に研究開発資源を重点化し技術開発を加速・推進する視点から、「日本が世界をリードできる技術」という要件が加えられた（表1参照）。

これらの要件を満たす技術を見つけ出すた

め、2007年度に実施した「エネルギー技術戦略2007」の策定過程で得られた技術評価結果を利用し、235のエネルギー技術について再整理を行い、環境適合技術とエネルギー安定供給技術に分類した。このうち、環境適合性（GHG削減、超長期環境制約克服）が高い（寄与度が高い）と判断された技術を「革新的環境適合技術」として選定対象とした。絞り込みを行った一例を図1に示す。

その後、「Cool Earth-エネルギー革新技術検討委員会」で「革新的環境適合技術」の中から選定されたのが21の「Cool Earth-エネルギー革新技術」である。（図2参照）

この21技術はエネルギー供給側からエネルギー需要側に至る全ての分野（発電・送電、運輸、産業、民生、部門横断）にまたがる技術で効率向上、低炭素化に資する技術である。

この21の技術は、エネルギー供給側では世界に先駆けて実用化し今後より一層の高効率化を目指す高効率天然ガス火力や高効率石炭火力などの発電技術やその発電技術と組み合わせによりゼロエミッション化が可能な二酸化炭素回収・貯留（CCS）を取り上げている。また、現行の3～4倍の効率を有する革新的太陽光発電のほか、供給安定性に優れ、わが国で唯一のクリーンな基幹電力である原子力発電などを取り上げている。エネルギー需要側では家庭用電源より直接充電でき、夜間の余剰電力の有効活用が期待されるプラグインハ

表1 「エネルギー革新技術」の選定要件

革新的技術の絞り込みの考え方		
①2050年の世界における大幅なCO ₂ 削減に寄与する技術 —技術の普及に要する時間を考慮し、2030年には実用化が期待される技術。 —普及に要する時間が短い技術については、2030年以降に実用化するものも対象。		
②従来の延長線上にない革新技術 a～cのいずれかの方法を通じて飛躍的な性能の向上、低コスト化、普及の拡大等が期待できる革新的な技術	【a】新たな原理の活用、既存材料の新活用を含めた材料の革新	(例) 新構造・新材料太陽光電池、燃料電池の白金代替触媒など
	【b】製造プロセスの革新	(例) 水素還元製鉄など
	【c】要素技術が確立した技術をシステムとして実証	(例) CO ₂ 回収・貯留（CCS）など
③日本が世界をリードできる技術（要素技術について強みを有する技術）		

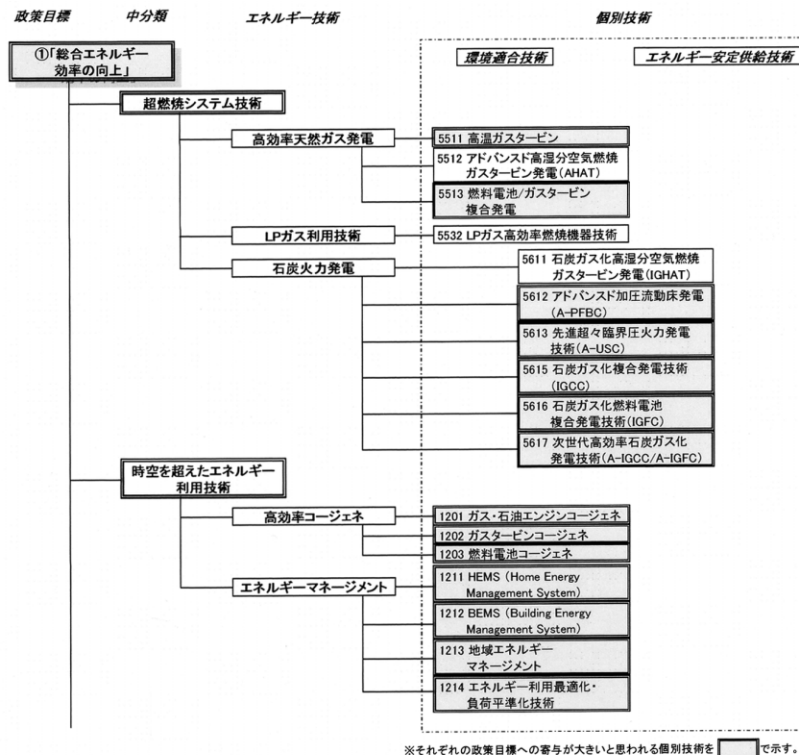


図1 革新的環境適合技術の一例

イブリッド、電気自動車や、コージェネシステムとして高い総合効率向上ほか、火力発電と組み合わせることで発電効率が大幅に向上すると期待される燃料電池などがあげられている。これら以外に、部門横断的な技術として、発電、送配電、蓄電、機器全ての分野に係わる次世代

半導体等を活用した省エネ技術であるパワーエレクトロニクスやハイブリッド自動車、電気自動車の普及、太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入拡大にかかせない高性能電力貯蔵技術などを取り上げている。



図2 重点的に取り組むべきエネルギー革新技術

4. 2050年のCO₂排出量大幅削減への技術別の寄与度

2005年に約270億トン⁽¹⁾と推計されている世界のエネルギー起源による二酸化炭素（CO₂）排出量を2050年に半減しようとする場合、世界経済が順調に成長を続けると仮定すれば、CO₂換算で約400億トンを越えるCO₂排出量の削減を行う必要があるとされている⁽²⁾。当研究所は、今回選定した「エネルギー革新技術」の導入によって、CO₂排出量半減が可能であるか、そして、それぞれの革新技術が世界のエネルギー起源によるCO₂排出量削減に対してどのように寄与するかについて、地球環境統合評価モデル（GRAPE, Global Relationship to Protect the Environment）を用いた試算を実施した。試算では、技術開発が今回策定したロードマップに沿って加速的に進むという前提のもとに検討を行った。

図3に示すとおり、織り込まれている21の革新技術全体で半減に要する削減量の約6割を占めている。二酸化炭素の回収・貯留（CCS）、原子力、太陽光といった発電分野の技術と運輸分野の技術の寄与度が比較的高いが、CO₂排出量半減と言う野心的な目標を達成するには、この技術のうち1つを取り上げ

るということでは十分でなく、エネルギー供給側からエネルギー需要側に至る全ての分野で技術開発とその導入、普及に総力を挙げて取り組む必要がある。

5. 技術開発ロードマップによる目標設定

Cool Earth-エネルギー革新技術の開発は2050年という長期のリードタイムと多大な研究開発投資を必要であり、特にエネルギー技術は多大な時間とリスクがあるだけでなく、インフラ整備の必要なものも多い。今後、効率よくかつ着実に開発を行うためには産・学・官の関係者がその方向性を共有することが必要であり、長期にわたる技術開発を着実に進めるためのマイルストーンとして21の全てについてロードマップを作成し、関連する技術の関係を明確にした。

21の技術のうち、世界全体の部門別CO₂排出量の30%以上を占める発電・送電部門では、効率向上に貢献する「高効率天然ガス火力発電」、「高効率石炭火力発電」、低炭素社会に貢献する「CCS」など6つの技術が取り上げられている。以下に、この「高効率石炭火力発電」と「CCS」について、ロードマップと技術の詳細について述べる。

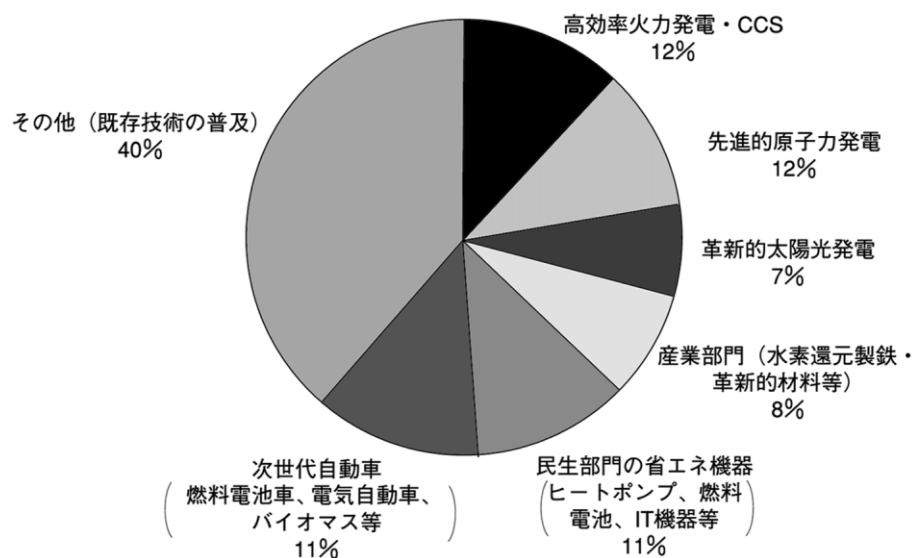


図3 2050年世界のCO₂半減に至る削減へのエネルギー革新技術別の寄与度

（１）高効率石炭火力発電

石炭は可採埋蔵量が多く、石油・天然ガスなどと比較して経済性に優れており、エネルギー安定供給上重要な資源である。わが国の石炭火力発電技術は、亜臨界圧発電（C）に始まり、超臨界圧発電（SC）、超々臨界圧発電（USC）を実用化し、発電効率を向上させてきた。しかし、他の化石燃料に比べて燃焼時のCO₂排出量が多いという環境制約を克服するため、さらに発電効率を向上させた先進的超々臨界圧発電（A-USC）や、石炭ガス化複合発電（IGCC）、石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）といった技術開発が進められている。

このうち、IGCCは石炭をガス化し、燃料ガスをガスタービンで燃焼して発電した後、高温の排ガスで蒸気タービンにより発電する技術で、さらに燃料電池と組み合わせて発電する技術がIGFCである。石炭をガス化することにより、ガスタービンと蒸気タービンの２種の発電形態による複合発電が可能となり、従来の微粉炭火力に比べて大きく発電効率を向上できる。また、燃料電池を加えたトリプル複合発電を行うことにより、飛躍的な発電効率向上が見込まれる。さらに、エクセルギー回収型の次世代ガ

ス化技術を用いた次世代石炭ガス化複合発電（A-IGCC）や次世代石炭ガス化燃料電池複合発電（A-IGFC）、高効率酸素製造技術等により、さらなる効率向上が期待できる。

今後、現状の石炭火力（発電効率41%）をIGCC（同48%）にすることにより約２割減、IGFC（同55%）により約３割減、さらに、A-IGCCでは57%まで効率が高まり、A-IGFCで65%まで向上させれば約４割の削減が期待できる。さらに、CCSと組み合わせにより全体で約９割のCO₂排出量を削減することも可能である（図４参照）。

現状、蒸気タービンやボイラー技術は、アルストム、シーメンスなどの欧州メーカーとともに、三菱重工、東芝、日立などが世界的にビジネス展開しており、技術的に世界を牽引している。また、近年の中国、インドにおける急激な電力需要増大を背景に、上海、東方、ハルピンという中国の三大企業およびインドの国営重電会社のBHELが、日米欧の主要メーカーとの技術協力を通じて、圧倒的な世界シェアを有するに至っており、民間ベースの技術移転が段階的に進展していることが伺える。

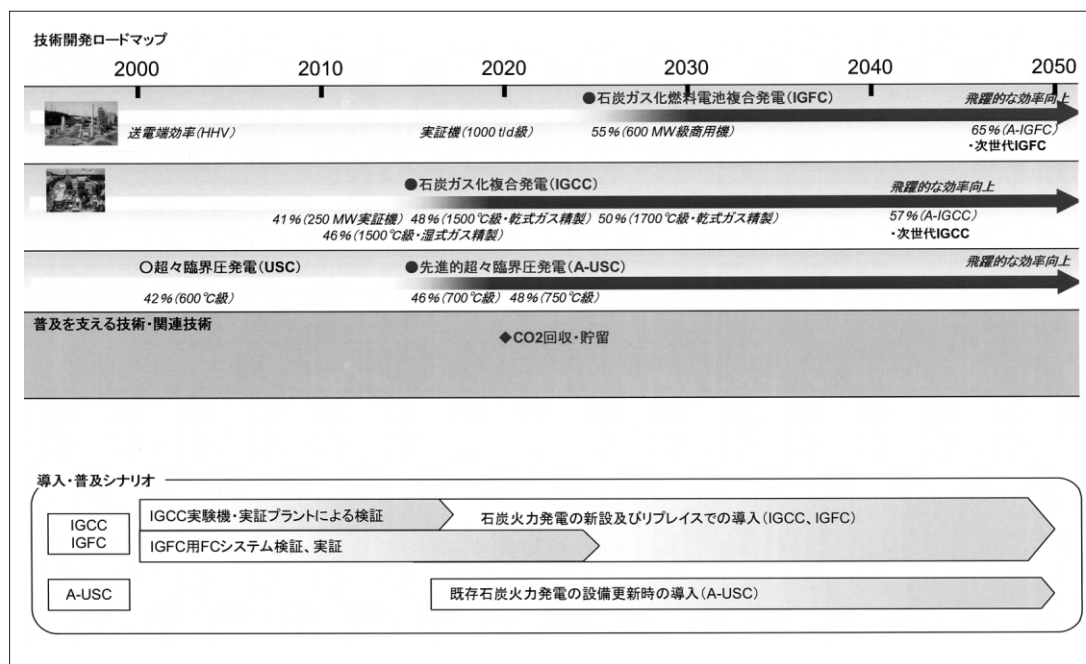


図４ 高効率石炭火力発電のロードマップ

今後、IGCC／IGFC、A-USCは、その特徴に応じて、今後東アジアを中心に見込まれる石炭火力発電の増加に対して、エネルギー安定供給および有効なCO₂削減対策の観点から特に需要が高い技術であり、既存の石炭火力発電のリプレイス時や新設時にはIGCC、IGFCの導入が見込まれる。

また、日本のIGCC技術は、海外の酸素吹きガス化技術に比べ、送電端効率の面で有利となるわが国独自の空気吹きガス化を実証プラントに採用している。また、石炭ガス化技術開発は乾式給炭ガス化炉であり、海外で多い湿式給炭ガス化技術と比較して、幅広い炭種に対応可能である。IGFCは、日本が世界に先駆けて酸素吹きガス化炉と燃料電池を組み合わせて開発に着手したもので、最近、米国FutureGenや中国GreenGenで同様な検討を始めたところである。また、USCでは、わが国は世界に先駆けて600℃級を実用化している。

今後、日本は効果的な石炭関連技術開発を進め、わが国が技術の優位性を維持していくためには、大学等における材料や触媒技術等の基礎研究と、民間主体の大型実証プロジェクトの連携を強化し、幅広い人材を育成しつつ技術開発を推進することが必要である。

(2) 二酸化炭素回収・貯留（CCS）

CCSは、火力発電等の大規模排出源の排ガスからCO₂を分離・回収し、それを地中または海洋に長期間にわたり貯留または隔離することにより、大気中へのCO₂放出を抑制する技術で、石炭火力発電と組み合わせることによりゼロエミッション化も可能となる。また、CCS技術は、近年、大気中のCO₂を短期間で大幅に削減する有力なオプションとして国内外で注目を集めている。欧米では積極的に技術開発が進められるとともに、石油増進回収の技術としては実用化が進展している（図5参照）。

CCSは、CO₂の分離・回収、輸送、圧入および貯留という4つの機能から構成され、技術開発の中核となるのは、分離・回収技術と貯留技術である。分離・回収には、化学吸収法、物理吸収法、膜分離法、物理吸着法および深冷分離法がある。

このうち、分離・回収コストはCCSコストの6割を占めるといわれており、これを低減することが実用化を進める上での課題となっている。このような流れの中、日本では1980年代末から電力会社を中心に技術開発が行われ、現在継続されている主な取組としては、

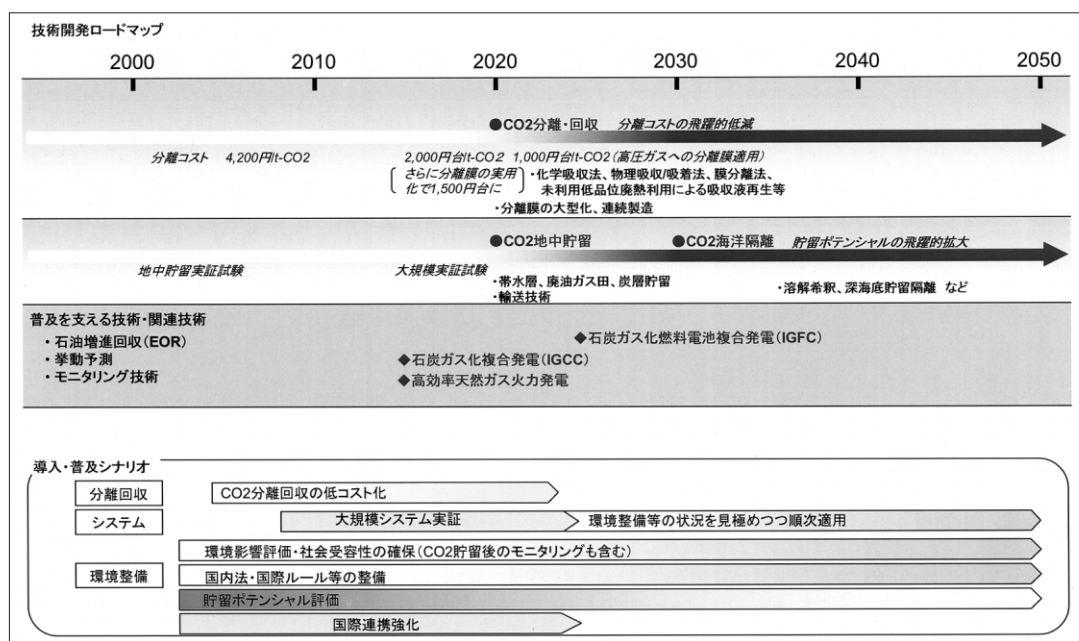


図5 二酸化炭素回収・貯留（CCS）のロードマップ

三菱重工業(株)と関西電力(株)の燃焼後化学吸収による大規模排出源（天然ガス焚き排ガス）からのCO₂回収試験等がある。この技術は世界トップレベルにあり、1999年に尿素製造プラントで用いるCO₂回収プラントとして商用化されており、低コスト化に資するものと考えられる。また、分離膜を用いた回収法も加圧・加湿環境におけるCO₂選択性について、研究室レベルで世界最高水準を達成しており、燃焼前回収の高効率化および低コスト化に向けた実用レベルへの展開が期待される。

その他の重要な技術としては貯留技術があげられる。貯留技術には地中貯留と海洋隔離があり、地中貯留には、帯水層貯留、石油・ガス増進回収（EOR）、枯渇油・ガス層貯留および炭層固定がある。また、海洋隔離は、溶解希釈（固定式、移動式）および深海底貯留隔離が挙げられるが、実施するための国際的な理解と環境づくりが必要な上に、長期の貯留安定性を確保するための高精度な挙動解析・モニタリング技術の開発や、貯留システムの安全を担保するための二酸化炭素挙動予測技術の開発が必要である。

これまでに、日本では、1980年代末から国立研究所等においてCCSに関する基礎研究が開始された。1995年から2年間、CO₂の地中貯留・海洋隔離に関する先導研究が実施され、1997年から「CO₂の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」が開始された。2000年にはCO₂地中貯留技術研究開発が開始され、新潟県長岡で計1万トンの帯水層貯留試験が実施された。また、2002年から北海道夕張で「CO₂炭層固定化技術開発」が開始され、CO₂注入試験が実施された。

今後、日本における貯留ポテンシャルは限定的と考えられることから、炭素隔離リーダーシップ・フォーラム（CSLF, Carbon Sequestration Leadership Forum）やアジア太平洋パートナーシップ（APP, Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate）等の国際連携を通じて情報交換を行うこと、海外の大型プロジェク

トへの参加を通じて技術やノウハウの蓄積を高めつつ実証に向けた取り組みを推進していくことが必要である。

また、CCS技術は、EORのように商業的にCCSが行われている場合を除き、経済的インセンティブを伴わないことから、今後実施に向けた官民の協力について検討が必要である。さらに、環境影響評価、国内関連法令や国際ルールを整備、CCSに関する信頼醸成と社会的受容性の確保が課題であり、IEA等を通じ国際的に連携しつつ検討を進めるなど、普及に向けた環境整備を着実に進めることが必要である。

また、現時点では海洋隔離の科学的・社会的な認知が十分ではないが、国際的・社会的合意の形成の過程にあつては、海洋隔離の基本となる技術として開発中の海水中二酸化炭素濃度の海洋生物への影響評価技術の成果を、海底下地中貯留のモニタリング・安全評価に活用すること等を通じて、海洋隔離技術開発の実績と安全性に対する認知度を高めていくことも不可欠である。

6. エネルギー革新技術における国際的な連携の推進について

気候変動問題の解決に向けエネルギー分野の技術開発を強化、加速するには、国内の技術開発を推進するだけでは不可能である。しかし、昨年来、国連などをはじめ多くの国際的な議論の場で気候変動問題への対応としてのエネルギー技術開発の重要性が指摘されているが、実際のエネルギー分野における研究開発投資は、近年停滞傾向にある。そのような中で、日本の政府研究開発投資は総額で世界最高水準にあり、日本はエネルギー安全保障の確保と気候変動問題への対応という課題に積極的な投資を行っている。

今後、日本として各国の技術開発や国際連携の現状を分析しつつ、各国や地域において策定されつつある技術開発ロードマップ等、

長期的な技術開発の方向性を共有し、世界におけるエネルギー技術開発をより体系的に推進していくことが必要である。そして、国際エネルギー機関（IEA, International Energy Agency）とも連携し、各国・地域が技術開発ロードマップを共有しつつ、技術開発の現状や進捗を確認し着実に技術開発に取り組むための協力の枠組みの構築の検討が必要である。

国際連携による研究開発には、日本単独では対応できないリスクの高い研究や実証プロジェクトにおけるリスク分散、日本研究リソースの活用による研究開発の加速、海外における先端的な技術動向、知見の把握による研究開発の効率化、国際標準化の推進等による成果の市場導入の円滑化、といったメリットが期待できる。

また、国際連携を進める上で、技術開発・普及の最終的な担い手である民間企業の研究開発意欲を妨げることなく国際連携を進めるためには、知的財産の保護や意図せざる技術流出の防止に配慮し、競争と協調の適切なバランスをとることも不可欠である。

今後、既に進展しているエネルギー分野における国際連携の方向性としては、GNEP（Global Nuclear Energy Partnership）およびGIF（the Generation IV International Forum）の枠組みを活用した原子力発電技術に関する連携や、APP（Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate）やCSLF（the Carbon Sequestration Leadership Forum）等を通じた

CCS技術に関する連携など多様な研究段階にある技術について、情報交換をベースとした国際連携を図り、国際パートナーシップにおける取組を拡充しながら、技術の状況や各国のニーズ等を踏まえて、新たな連携による研究開発の実施を検討することが適当である。

そして、こうした技術についても国際連携を推進していくとともに、技術革新の加速が求められる中で、国際連携により効率的に技術開発を進めることが有効と考えられる分野が存在する可能性もあることから、わが国の技術開発の進展や海外動向等に応じて、柔軟に検討していく必要がある。

7. さいごに

「Cool Earth—エネルギー革新技术計画」は、平成19年度経済産業省資源エネルギー庁委託調査“エネルギー環境総合戦略調査（エネルギー分野における技術戦略マップ改定に関する調査）”の成果の一部として取りまとめられたものである。赤井委員長（（独）産業技術総合研究所）をはじめ18名の委員および関係者の方々、経済産業省の関係者の方々など策定に携わられた数多くの関係者の皆様方にこの場をお借りして深く感謝致します。

参考文献

- (1) IEA “World Energy Outlook 2007”
- (2) IEA “Energy Technology Perspective” 等

ブラジル提案に関する動向

黒沢 厚志

（プロジェクト試験研究部
副部長 主管研究員）



1. はじめに

地球温暖化をはじめとした、数十年から数百年単位での長期気候変動に関する関心が高まっている。政治の要請を受け、世界の自然科学、社会科学の研究者が集まって、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が結成され、気候変動問題に対する報告書が定期的にとりまとめられている。第4次評価報告書では、気候変動の原因として、人為起源の温室効果ガス（GHG）排出量増加が指摘されており、その因果関係は報告が回を重ねる毎に、確信度が高まっている。国連気候変動枠組条約（UNFCCC）のもとで定められた京都議定書では、先進国を中心とした諸国の温室効果ガス排出に一定の制限を設けることを政治的に要請している。

京都議定書が想定している削減目標達成時期は、第1約束期間が2008年から2012年となっているものの、温暖化防止に関するそれ以降の国際合意は存在せず、内外で多様な方式が提案されている。京都議定書は、温室効果ガスの基準年排出量に対して、国別の事情に応じて、一定割合を削減することを求めている。しかし、京都議定書に至る排出量割当方法については、一定割合削減以外にも、様々な提案がなされた。本稿では、その際に提案された1つの方式である「ブラジル提案」に着目した。筆者は、2002年以降、ブラジル提案に関する動向をフォローし、関連の専門家会合にも参加して活動を行ってきたので、その動向を報告する。

2. ブラジル提案とSBSTAの関与

UNFCCCのGHG削減量割当方式交渉において、ブラジル政府は1997年に、今後の気候変動に関する温室効果ガス削減負担分担は、産業革命以降の排出履歴等を加味した新たな基準とすべきであるという、いわゆる「ブラジル提案」を行った⁽¹⁾。京都議定書は結局、先進国全体での基準年からの削減率を定める方式を採用したのは周知の通りである。その後、ブラジル提案を受けて、2002年、気候変動枠組条約の常設補助機関の1つである「科学的・技術的な助言に関する補助機関」（SBSTA）において、複数の気候モデルを用いた場合のブラジル提案に関する地域寄与度分析比較が実施され、2001年5月、2002年9月に気候変動枠組条約事務局が主催する専門家ワークショップが開催されている⁽²⁾⁽³⁾。

2002年、ニューデリーにおいてCOP8と並行して開催されたSBSTA17会合では、ブラジル提案の科学的および方法論的側面について、科学コミュニティによる活動継続およびピアレビューを受けた出版物に基づく作業などによる方針が定められ、地球圏－生物圏国際協同研究計画（IGBP, International Geosphere-Biosphere Programme）、世界気候研究計画（WCRP, World Climate Research Programme）、地球環境変化の人間・社会的側面に関する国際研究計画（IHDP, International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change）、気候変動に関する政府間パネル

表1 ブラジル提案に関する経緯のまとめ

1997年	気候変動枠組条約に関する温室効果ガス削減基準交渉において、ブラジルは、今後の気候変動に関する各国の温室効果ガス削減負担分担は、産業革命以降の排出履歴等を加味した新たな基準とすべきであるという提案（ブラジル提案）を行う
2001年5月	第1回専門家ワークショップ（ボン、ドイツ）
2002年前半	気候変動枠組条約の常設補助機関のひとつである、科学的・技術的な助言に関する補助機関（SBSTA）において、気候モデル比較作業を実施
2002年9月	第2回専門家ワークショップ（ブラックネル、イギリス）
2002年11月	SBSTA17 ブラジル提案の科学および方法論的側面について、科学コミュニティによる活動継続、ピアレビューを受けた出版物に基づく作業方針を定め、国際科学コミュニティの協力を依頼することになる。 その後、この科学コミュニティによるアドホックな活動をMATCH（modelling and assessment of contribution to climate change）と呼ぶことになる。
2003年6月	SBSTA18 IGBP（地球圏－生物圏国際協同研究計画）およびWCRP（世界気候研究計画）から活動に肯定的な返答
9月	第3回専門家ワークショップ（ベルリン、ドイツ）
2004年5月	第4回専門家ワークショップ（ケルン、ドイツ）
6月	SBSTA20 ブラジル提案に関するサイドイベント
2005年4月	第5回専門家会議（リオデジャネイロ、ブラジル）
10月	第6回専門家会議（レディング、イギリス）
2006年3月	第7回専門家会議（ルーバン・ラ・ヌーブ、ベルギー）
5月	SBSTA24 ブラジル、ドイツ、イギリスが活動報告文書提出。活動継続について審議
11月	第8回専門家会議（ケルン、ドイツ）
2007年5月	第9回専門家会議（オスロ、ノルウェー）
9月	第10回専門家会議（ケルン、ドイツ）
10月	MATCHの活動報告をSBSTAに提出
12月	SBSTA27 イン・セッション サイドイベント
2008年3月	FCCC締約国が今後活動への意見表明
6月	SBSTA28 SBSTAとしてブラジル提案の検討を終了。政策的な場を含めた、締約国による別の体制での検討実施を提言

（IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change）などの科学コミュニティの協力を依頼することになった⁽⁴⁾。同会合では、ブラジル、イギリスは、2003年にワークショップを開催することを提案し、その後ドイツ、ノルウェーも支援を表明した。

ブラジル提案に関する今までの経緯は表1にまとめた。

3. MATCHの活動

2003年、ブラジルとイギリスの両政府は、UNFCCC締約国に対して、2003年9月のベルリンで第3回専門家ワークショップが開催される旨通知した。それ以降は、ブラジル提案を巡る活動は、国連気候変動枠組条約のもとではなく、科学コミュニティによるアドホックな活動として継続された。このグループの

略称は、MATCH（Ad-hoc group for the modelling and assessment of contribution to climate change）と名付けられた⁽⁵⁾。作業は、イギリス政府が欧州の環境コンサルティング会社ECOFYSに事務局を委託し実施され、参加者は、ボランティアベースで、ワークショップでの討論や研究活動を行った。会議は、ECOFYS社のオフィスの1つであるケルン（ドイツ）や、MATCH参加者の所属機関がホストして、世界各国で開催されてきた⁽⁶⁾。

活動成果は、2004年および2007年のSBSTAにおけるサイドイベントで報告されている。そのうち、2007年12月には、バリ島でのCOP13会合に併催されて開催されたSBSTA27会合のイン・セッション・サイドイベントとして、MATCHの活動成果について報告がなされた。以下ではその概要を述べる。

(1) 先進地域の1990年代排出量履歴と気候科学の不確実性⁽⁷⁾

UNFCCC附属書I (ANNEX-I) 中のOECD諸国(論文中ではANNEX-IRと略されている)のGHG排出が気候変動に与える影響とその不確実性を、排出量－濃度－放射強制力^{*}－気温変動の関係を明示的に考えることによって評価しようとするものである。評価にあたっては、観測値(濃度、気温)からGHG排出量、放射強制力等を逆算する「インバースモデリング」による検証も行われた。対象とした放射強制力要因はCO₂、メタン、亜酸化窒素、フッ化ガス、エアロゾル(大気中微粒子の一般呼称)である。

1990～2003年の温度上昇に与える地表気温上昇のうち、ANNEX-IRのGHG排出の寄与は0.11℃(σ を標準偏差とした場合の、 $\pm \sigma$ の不確実性範囲 -27% to +32%)としている。また、ANNEX-IRのCO₂排出については、化石燃料起源CO₂の排出量について1995年で3.11 $\pm$ 0.19PgC、土地利用を含む全CO₂で同じく1995年で2.75 $\pm$ 0.44 PgCとする評価結果を得ている。土地利用排出を含めた場合は、排出量の不確実性が大きい。メタンはCO₂と比較して排出量の不確実性が大きく、亜酸化窒素はメタンよりさらに不確実性が大きいとしている。

(2) 産業革命以降の国別排出量の不確実性と気候変動寄与度⁽⁸⁾

ブラジル提案は、これまで、過去を含めた国別のGHG排出量に関する適当な既存のデータベースがないことから、地域別の気候変動寄与度評価を行ってきた。そこで、世界の国別、セクター別の産業革命以降温室効果ガス排出量について、不確実性評価を伴う排出量データベースが整備された。作成されたデータベースを用い、過去～現在～将来にわたる評価期間における気候変動パラメータ変化の寄与度評価結果が示された。寄与度に影響を与える重要要因とし

て、過去の排出量の不確実性、評価開始年、土地利用変化を含めるかどうかの選択、メタン・亜酸化窒素を含めるかどうかの選択があり、簡易気候モデルの選択はあまり重要でない。また、今後の課題として土地利用変化に伴う排出の不確実性、セクター別の寄与度評価などが指摘された。詳細は後述する。

(3) 土地利用変化によるCO₂排出・吸収の不確実性⁽⁹⁾

土地利用変化によるCO₂排出・吸収の不確実性を扱った研究では、ラテンアメリカ、アメリカ、および世界のCO₂排出・吸収に関する既存評価例が整理され、土地利用・森林に関するデータベース間のCO₂排出・吸収量の違いは大きいことが示された。同時に、気候フィードバックや肥沃化効果は世界の土地利用・森林CO₂排出量を大きく減少させる可能性があり不確実性は大きいこと、世界レベルでの排出・吸収と、各国の排出・吸収の積み上げを一致させることは難しい課題であることなどが強調された。

4. 国別排出量と気候変動寄与度

以下には、SBSTA27サイドイベント資料をもとに、国別排出量とその気候変動寄与度に関する評価の概要を述べる。まず、世界全体の部門別GHG排出量の推移を図1に示す。20世紀後半以降は化石燃料起源CO₂が支配的である。累積ベースでのエネルギー・産業起源の世界CO₂排出量推移をみると、1950年以前が約2割、それ以降は約8割であり、20世紀後半に急増した排出量とその太宗を占める。また、よく知られたことであるが、20世紀中葉までは先進国の排出が大部分であったが、近年にかけた途上国のGHG排出急増を受け、先進国と途上国の排出比率はかなり接近し、近年中に逆転することも見込まれる。

^{*}気温が一定であったとみなす産業革命前の状態を基準とし、宇宙から地球への放射によって地球が持つエネルギーを増やす(気温を上げる)外部因子を正の放射強制力と呼ぶ。

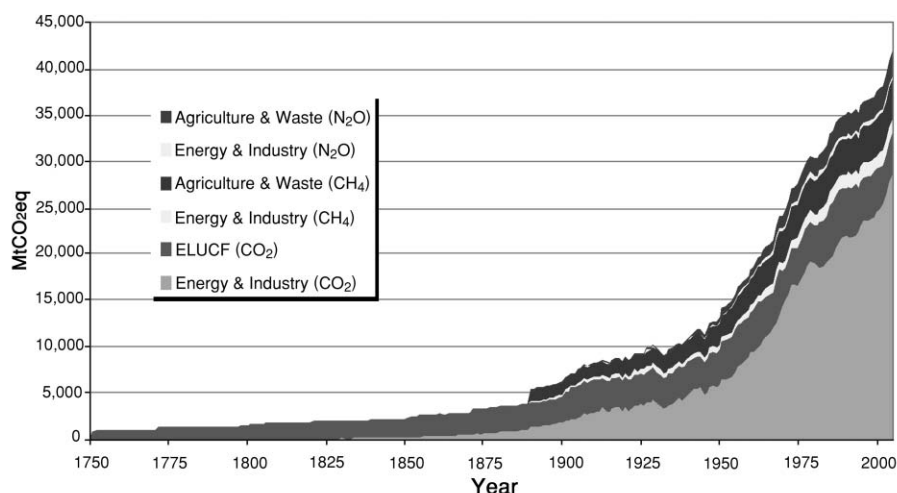


図1 世界のセクター別GHG排出量の推移 (CO₂等価換算) ⁽⁶⁾

しかし、排出量の推移およびその内訳は、国によって大きく異なる。イギリスとブラジルの例をみると、イギリスは、産業革命以降化石燃料CO₂排出をほぼ線形的に増加させてきたが20世紀に入ると排出量に大きな変化はなく、メタンや亜酸化窒素に至っては、農業活動の停滞を反映して、減少傾向をみせている。それに対して、ブラジルは近年まで化石燃料CO₂の発生比率は小さく、森林伐採に伴う土地利用CO₂や農業起源のメタン、亜酸化窒素の排出が多い。

図2は、1900-2005年の累積GHG排出量、および気温上昇に対する国別の寄与度 (CO₂、メタンおよび亜酸化窒素をカウント、土地利用

起源排出含む) をみたものである。1900年という評価期間開始年は、排出量がそれほど大きくない時期として選択された。気候モデルによる国別寄与度の差はそれほど大きくなく、累積排出量と温度上昇はほぼ同等の寄与度を与えることがわかる。BCC-SCM (中国), CICERO (ノルウェー), Ecofys (ドイツ), IAE (筆者らが開発したGRAPEモデル, エネルギー総合工学研究所, 日本), UKMO (イギリス) の5つのモデルによる温度上昇への相対寄与度が示されているが、モデルによる差は大きくない。棒グラフにおける誤差棒は、不確実性の範囲を示す。

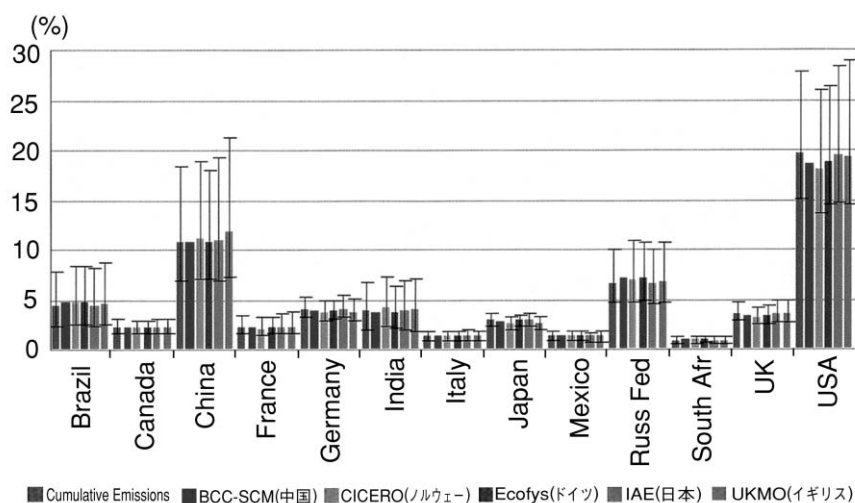


図2 1900-2005年の累積GHG排出量および気温上昇における国別寄与度 ⁽⁶⁾

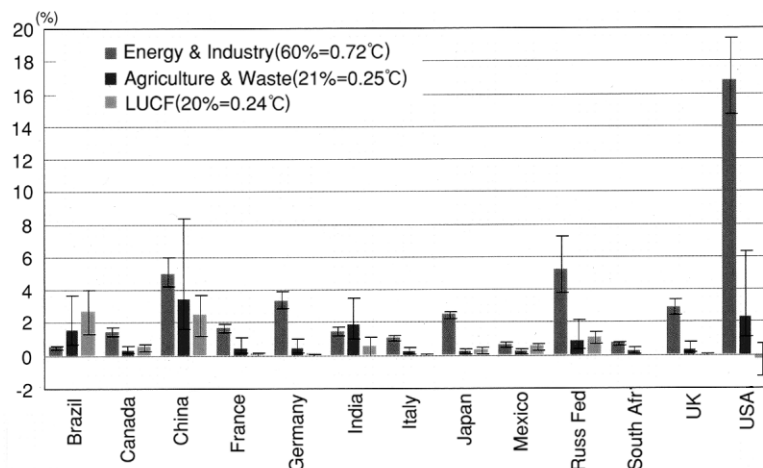


図3 国毎の部門別排出量の温度上昇への寄与度⁽⁶⁾

評価開始年の影響をみるための感度分析の結果をみると、排出量増加時期との関係が深い。現在の排出量が相対的に大きいか（中国、インド等）、過去の排出が大きく現在の排出は相対的に大きくないか（アメリカ、イギリス等）で、結果が異なる。一般的に、評価開始期間が過去にさかのぼるほど先進国に不利となり、現在に近いほど途上国に不利となる。

部門別の寄与度をみるため、国別寄与度をさらにブレイクダウンしたものを図3に示す。インド、ブラジルを除く各国でエネルギーおよび産業の寄与が最大である。一方で、インドでは農業・廃棄物排出の寄与が大きく（メタンの影響が大きい）、ブラジルは土地利用変化・森林の寄与が大きくなっているのが特徴的である。

将来を含めた期間の排出に対する寄与度評

価では、過去から現在までのそれと比較して、一般的に、先進国寄与度が低下し、途上国寄与度が増加する。1900年以降の温度上昇寄与度の傾向を図4に示す。2005年ではアメリカの寄与が最大であるが、2050年には中国が最大となり、逆転している。この評価における将来排出は、IPCC排出シナリオ特別報告書A1Bシナリオに基づいており、シナリオ自体にも不確実性があることに注意したい。

世界の国・地域数は、100以上あるが、これまでは代表的な国に対する評価結果を示した。データベースが整備されたことにより、国別評価が可能となった。排出量評価期間を1900年から2005年までとした場合、相対的寄与度はいずれのパラメータにおいてもアメリカが最大である。土地利用変化によるCO₂

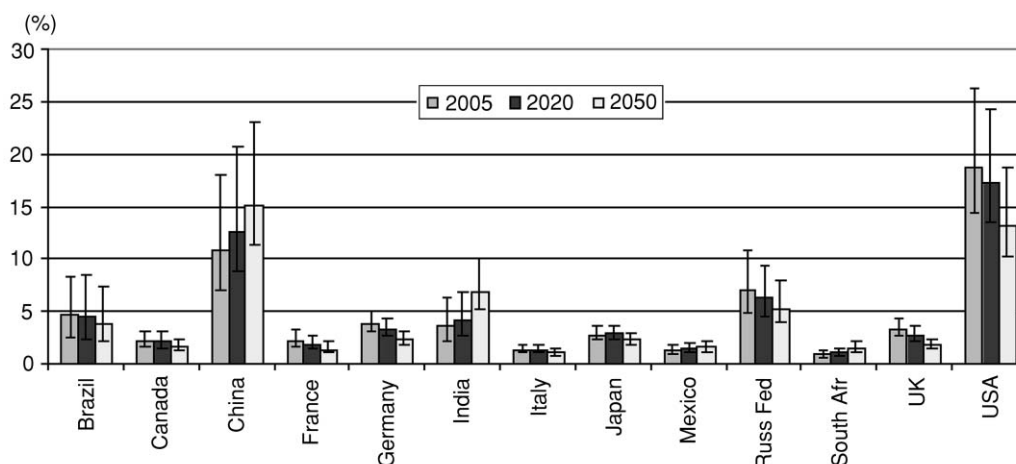


図4 1900年以降の温度上昇に対する将来を含めた寄与度評価（Ecofysモデル）⁽⁶⁾

排出をカウントする場合、東南アジア、南米、アフリカで大規模な森林伐採が行われた諸国もランク入りする可能性も確認されている。また、排出量の絶対値をとると、人口や面積の大きい大国が上位となる傾向にあるが、上位にランクされていない欧州などの国でも、1人当たり排出量の多い国々があることを記しておきたい。

5. SBSTAによる評価と今後の展開

2008年に入って、イギリス政府がMATCHの活動をSBSTAに報告した⁽¹⁰⁾。それを受けて、オーストラリア、ブラジル、パキスタン、スロベニア（EU代表）、スリランカがMATCHの活動に関して意見を提出した⁽¹¹⁾。2008年6月のSBSTA28では、各国の意見を集約した下記の提言がなされ、科学的な検討はいったん終了することとなった⁽¹²⁾。ただし、政治的な視点からの検討が行われる余地も残されている。

- ① SBSTAは、ブラジル提案に関する作業はロバストな方法論による気候変動の歴史的寄与度評価方法を確立し、条約締約国がブラジル提案に関する科学的および方法論的な情報をよりよく判断するための材料を提供したことに合意する。
- ② SBSTAは、作業結果を受けて、締約国による他の検討主体において、さらなる作業が実施されるよう留意する。
- ③ SBSTAは本件に関する検討を終了する。

ブラジル提案は、政治的な提案から科学的検討が開始されたが、科学的検討から政治的検討へと揺り戻しの傾向にあるといえるだろう。

6. まとめ

ブラジル提案は、途上国を含めた過去の地域別寄与度を評価可能であり、科学的合理性、衡平性などの点においても、説得性を有している。

将来の排出量に対する割当に関しては、まず、気候変動安定化という科学的観点から許容される温室効果ガスの排出量範囲が定められ、その排出量を世界合計で達成するための方策の検討が試行錯誤的になされることが想定される。ブラジル提案が将来の排出割当方法とし適切であるかは、MATCHの枠組で実施された国別寄与度評価の結果、および将来の排出シナリオにおける排出量の大きさなどをみて、総合的に判断されるべきである。

中国政府は、2006年12月の「気候変化国家評価報告書」で、目標年次における一人あたり排出量に加え、目標年に至るまでの一人あたり累積排出量の両方がどの国も同じであるべきであると主張している⁽¹³⁾など、人口というパラメータを組み合わせ、ブラジル提案に近い考え方を打ち出している。

過去のGHG排出比率は先進国が多く、先進国が中心となりGHG削減義務を負うべきとする「共通だが差異のある責任」のもとに、京都議定書では先進国のみが義務を負っている。気候変動問題は地球規模の問題であり、すべての国・地域がGHG削減の枠組に参加すべきであることを考える上で、科学的な合理性に基づく意思決定を行う必要がある。ブラジル提案を契機とした科学的知見の蓄積は、途上国の役割を議論する上で、非常に参考となるであろう。

[謝辞]

最後となるが、活動にあたっては、経済産業省産業技術環境局環境政策課地球環境対策室、財団法人地球環境産業技術研究機構をはじめとした関係者の方々に多大な協力をいただいた。ここに深謝する次第である。

参考文献

- (1) FCCC/AGBM/1997/MISC.1/Add.3, UNFCCC, 1997
- (2) FCCC/SBSTA/2001/INF.2, UNFCCC, 2001
- (3) FCCC/SBSTA/2002/INF.14, UNFCCC, 2002
- (4) FCCC/SBSTA/2002/L.24, UNFCCC, 2002
- (5) <http://www.match-info.net> (accessed September 2008)

- (6) http://unfccc.int/methods_and_science/other_methodological_issues/items/1038.php (accessed September 2008)
- (7) M. Prather, J. Penner, J. Fuglestedt, A. Kurosawa, J. Lowe, N. Hohne, A. Jain, N. Andronova, L. P. Rosa, C. P. de Campos, S. Raper, R. B. Skeie, P. Stott, J. van Aardenne, and F. Wagner, Tracking uncertainties in the causal chain from human activities to climate change (submitted)
- (8) N. Hohne, H. Blum, J. Fuglestedt, R. B. Skeie, A. Kurosawa, G. Hu, J. Lowe, L. Gohar, B. Matthews, A.C.N. de Salles, C. Ellermann, Contributions of individual countries' emissions to climate change and their uncertainty (submitted)
- (9) A. Ito, J. E. Penner, M. J. Prather, C. P. de Campos, R. A. Houghton, T. Kato, A. K. Jain, X. Yang, G. C. Hurtt, S. Frolking, M. G. Fearon, L. P. Chini, A. Wang, and D. T. Price, Can we reconcile differences in estimates of carbon fluxes from land-use change and forestry for the 1990s?, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol.8, pp3291-3310, 2008
- (10) FCCC/SBSTA/2008/MISC.1
- (11) FCCC/SBSTA/2008/MISC.5
- (12) FCCC/SBSTA/2008/L.7
- (13) 李志東, ポスト京都議定書をめぐる中国の地球温暖化防止戦略, 第24回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 2008

原子力分野における安全解析技術とその応用展開 — 安全解析グループの取組み

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

2008年3月に(財)原子力発電技術機構(NUPEC)が解散し、NUPEC安全解析部が実施してきた事業は、4月から(財)エネルギー総合工学研究所(IAE)に継承された。それまでのNUPEC安全解析部はIAE原子力工学センター内の安全解析グループとして衣替えし、活動を継続している⁽¹⁾。NUPEC安全解析部時代を含めて、IAE安全解析グループでは、原子力発電所の安全評価を中心に、コンピューターを使って、人間の五感ではなかなか捉えきれないような物理現象を説明するソフトウェア、「解析コード」の開発および解析業務を実施している。

本稿では、まず当グループが解析コードを開発する際に採ってきた基本方針を述べ、次いで最近の成果を紹介する。

2. 解析コード開発の基本方針

(1) 基本方針

解析コードは、表1に示すプロセスを経て開発されるべきとの考え方により、次のような基本方針のもとで開発することとしている。

- ① 解析コード開発のプロセス毎にドキュメントを整備し、改訂の履歴を明らかにしておくことによって、解析コードの詳細仕様を残し、誰でも使えるコードを目指す。
- ② 解析コードを構成する物理モデルは、経験式、経験定数、調整係数等を極力排除し、理論式や物理現象を精緻に記述した機構論的モデルで構築する。これにより、解析結果のユーザー依存性を極力排除する。
- ③ 解析コードは、できるだけ個別の物理現象に対応した解析モジュール群で構成する。これは、コード作成および完成後の保守を容易にするためである。また、解析の対象とする事象・現象に対応する解析モジュール単独での作動も可能とする。
- ④ 必要に応じて並列演算を可能とする。
- ⑤ 運用開始前の検証解析により、解析コードの適用範囲、精度等を確認しておく。運用開始後も、解析の実績を「解析事例集」として蓄積し、適用範囲の拡大を目指す。

(2) ユーザー依存性の問題

従来の解析コードにおいては、コンピューターの性能上の制約や、対象とする物理現象

表1 解析コード開発のプロセスとドキュメントの整備

プロセス	主な内容	作成文書例
要求仕様の決定	・解析対象となる事象・現象の特定、要求精度、計算機環境、等	要求仕様書
概念設計	・解析対象で生じる物理現象を記述する数式等(物理モデル)の構築	概念設計書
基本設計	・入出力条件の設定、使用する計算機仕様の選定、等	基本設計書
詳細設計	・計算機が理解できる形式で数式(物理モデル)を変換(離散化)	詳細設計書
コーディング	・離散化式を計算機用言語で記述	使用説明書
検査(検証解析)	・実験解析、感度解析等により、コードの適用可能範囲、精度等を確認	試験報告書
運用・保守	・解析事例の蓄積とコードの改良	解析事例集

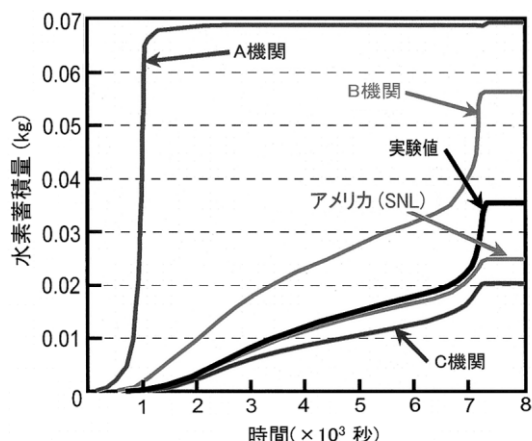


図1 ISP-45（燃料急冷の解析）結果

の詳細に未知の部分があったことなどから、例えば、実験結果の上限あるいは下限を包絡する曲線を二次方程式で表す方法がとられていた。このような解析コードから得られた結果は、物理現象の説明が困難だけでなく、多くの係数等が使用されていることから、それらの係数をユーザーが調整することにより、異なる結果が得られてしまうという「ユーザー依存性」の問題があった。

解析結果のユーザー依存性の具体例を図1に示す。図は経済協力開発機構（OECD）による、解析コードに対する国際標準問題ISP-45（International Standard Problem No.45）の解析結果である。ISP-45は、原子力プラントの事故対応として原子炉燃料集合体に非常用冷

却水を注入した際に、水－金属反応によって発生する水素量に着目した実験の解析である。図に示した解析実施機関はすべて米国Sandia National Laboratory（SNL）が開発したMECORコードを使用した。SNL自身の解析結果は実験値を比較的良く再現しているが、他の機関の解析は、同一コードを使いながらも結果が大きく異なっていることを示している。

一般に、コード内に調整係数が多用されていたり、物理モデルの選択肢が多かったりすると、ユーザー依存性が大きくなり、得られた解析結果から即座に物理現象を説明ことが困難で、結果の信頼性にも疑問が残る。

（3）解析コードの検証

解析コードの信頼性、精度を確認するためには充実した検証解析が必須である。検証には、図2に示すようにVerificationとValidationの2種類がある。

Validationとは製品に対する一種の総合検査であり、Verificationとは製品の部品検査、すなわち、解析コードを構成する部品の検査に該当する。Validationでは、解析コードが対象としている事象・現象について実験結果との対比等により解析結果の妥当性を確認する。しかし、解析コードが対象とする事象には、複数の物理現象が絡み合っている場合

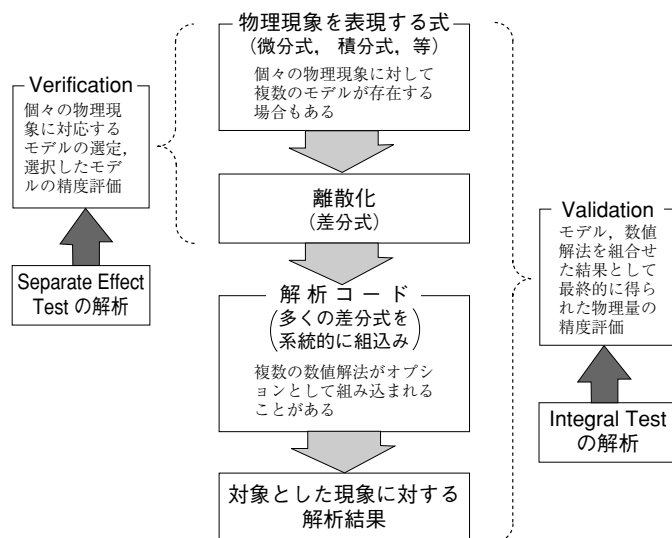


図2 VerificationとValidation

合が多く、最終的な結果が一致しても、例えばある物理現象を過大評価、他の物理現象を過少評価し、それらが相殺した結果として実験値を再現した、ということも考えられる。そのため、個々の物理現象を対象とした実験解析により、物理モデルの妥当性および数値解法上含まれる「数値誤差」を検討するのがVerificationである。完成した解析コードを運用するためには、VerificationとValidationの両方のプロセスを充実させておくことが必須と言える。

3. 流動加速腐食（FAC）解析システムの開発

（1）開発の背景と体制

プラント配管システムの腐食による減肉は、原子力に限らず、火力プラントにおいても共通の課題である。最近の例として、美浜3号機（原子力プラント）の二次系配管の減肉による破断で高温蒸気が噴出し従業員が死亡した事故（2004年8月）、米国Iatan 1号機（火力プラント）での同様の破断による死亡事故（2007年5月）がある。これは流れの存在によって腐食が加速さ

れる現象、すなわち、「流動加速腐食」（FAC: Flow Accelerated Corrosion）によるものである。この種のトラブルの防止策として、配管肉厚の検査の強化策がとられているが、本質的には、減肉の要因を定量的に明らかにし、減肉量（あるいは余寿命）を予測し、その結果を検査に反映させるとともに、減肉した配管の交換時期を事前に把握しておくことが重要である。

上述のような背景の下、東京大学の越塚誠一教授を総括代表者とし、東京電力(株)、日本原子力発電(株)、東京工業大学、(株)日立製作所、みずほ情報総研(株)、伊藤忠ソリューションズ(株)、およびNUPECが連携して、経済産業省の補助金を受け、平成17年度から19年度まで「IVNETプロジェクト」を推進し、FAC解析システムを開発した⁽²⁾⁽³⁾。

（2）解析システム開発上の留意点

FACは、図3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り、解析においては、これらの各要素モデルをコードに組み込む必要がある。

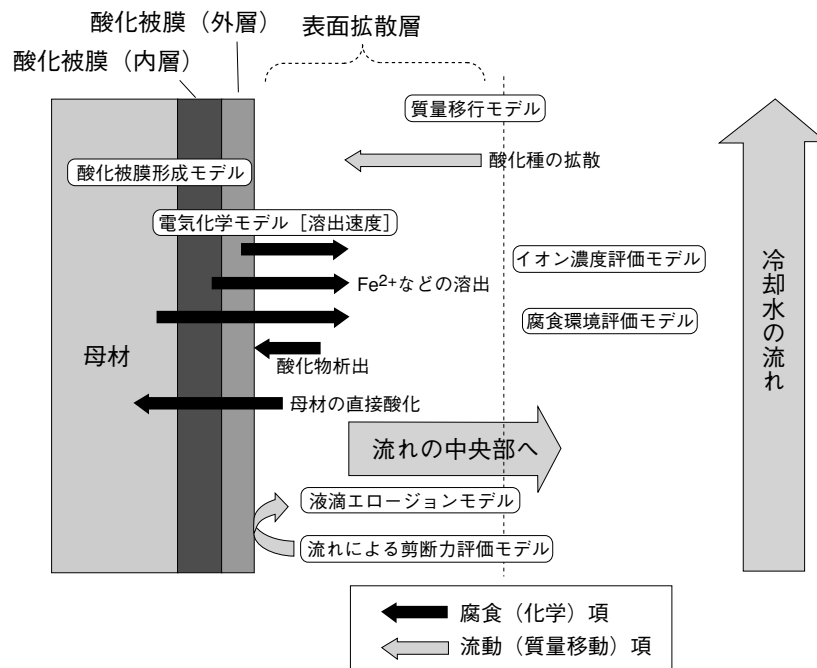


図3 FAC解析のための要素モデル

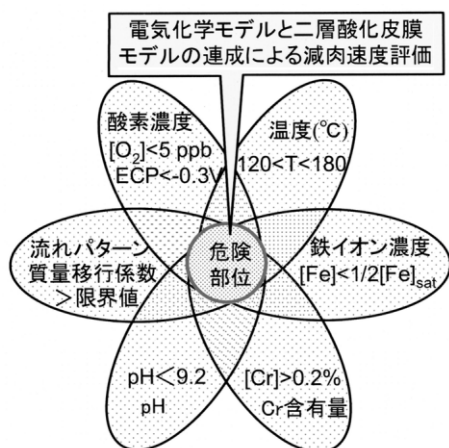


図4 FACに対する影響因子

これまでの知見から、FACに対する影響因子には図4に示すように、材料の組成、水質、酸素・鉄イオン濃度、腐食電位（ECP）等がある。腐食は、個々の影響因子単独では促進されないが、種々の影響因子が重畳した条件で促進されることが分かっている。鉄イオンや酸素は、流れ場における材料近傍での濃度が重要となるが、これは、流れ場における境界層内の質量移行係数に依存する。

腐食による減肉の観点から危険箇所を抽出するためには、図4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。

(3) FAC解析システムの手順

開発したFAC解析システムでは、図5に示す6ステップで解析の最終ターゲットである配管の余寿命を評価する。

まず、既存のプラントシステム解析コード（RELAP5）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しているため、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るとともに、腐食電位（ECP）も評価する（ステップ2）。さらに、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ておく（ステップ3）。

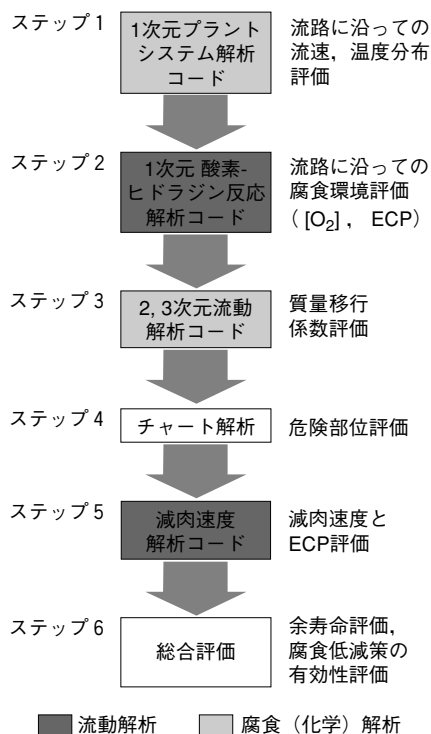


図5 FAC解析システムの手順

ステップ3までで得られた情報から、図4に示す各影響因子を個別に定量化し、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）。この危険箇所を対象として、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（ステップ5）し、最終的に余寿命を評価する（ステップ6）。

本手法により、参考文献（4）（5）に示す測定条件の下で、流速、酸素濃度等は既知としてFACによる配管減肉率の解析結果を実測値と比較して図6に示す。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。

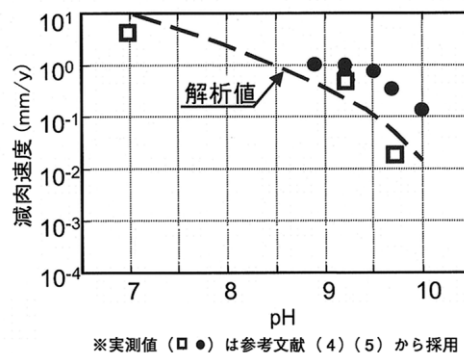


図6 FAC減肉速度解析値と実測値

(4) 実機解析の事例

開発した腐食解析システムを使って、加圧水型軽水炉プラントの復水器から蒸気発生器に至る配管システムを対象にチャート解析した(図5におけるステップ1～4)結果を図7に示す。図は復水加熱器第1段の入口に100ppbのヒドラジンを注入したケースであり、復水加熱器第4段の入口からデアレータ出口までの

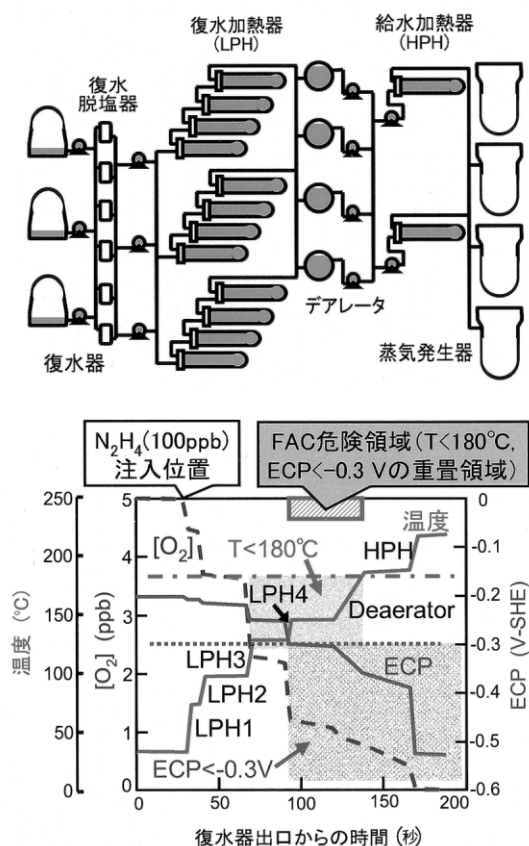


図7 加圧水型軽水炉プラント二次系配管の実機解析 (FAC危険領域の抽出)

の配管が、各影響因子が重複する危険領域であることがわかる。次に、ヒドラジンの注入位置をデアレータ入口に変更した場合のチャート解析結果を図8に示す。この場合には、温度の危険領域と腐食電位 (ECP) の危険領域が重複することがなく、FAC抑制策として有効であることがわかる。

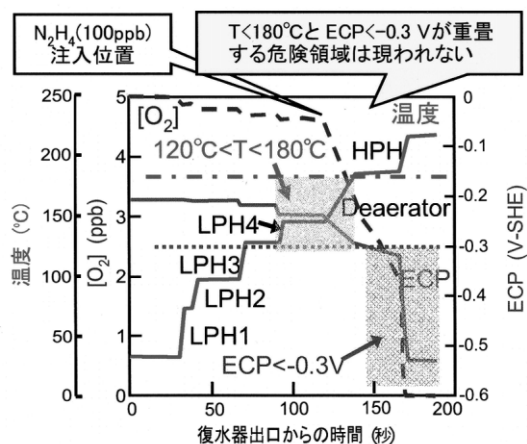


図8 ヒドラジン注入位置変更によるFAC抑制

4. IMPACTソフトウェアシステム

IMPACTは、平成5年度から14年度にかけて経済産業省の委託事業の中で我々が作成したソフトウェアであり、軽水炉プラントの定常運転からシビアアクシデントに至る種々の事象を対象とした表2に示すコードの総称である⁽⁶⁾。IMPACTは、本稿冒頭で紹介した「解析コード開発の基本方針」に則って開発したもので、以下の特徴を有する。

表2 IMPACTソフトウェアの構成

コード名	機能
沸騰遷移挙動 解析コード CAPE	原子炉燃料集合体の温度を過度に上昇させることなく、安全に運転することのできる最大の出力を解析する。BWR (沸騰水型軽水炉) 版とPWR (加圧水型軽水炉) 版がある。また、過渡事象発生時の燃料棒表面温度の変化も解析できる。
流体・構造連成 解析コード FLAVOR	単相流による構造物の振動 (流動励起振動) を解析する。構造物表面の圧力振動や振動の振幅・周波数等の解析が可能である。
流動挙動 解析コード PLASHY	汎用的な三次元流動解析コードである。単相流、二相流及び混相流に対応したモジュールで構成されており、それぞれ独立に使用できる。
シビアアクシデント 解析コード SAMPSON	プラントの定常運転からシビアアクシデントに至る一連の事象を12個のモジュールを連成させて解析する。モジュールは個別に使用することもできる。

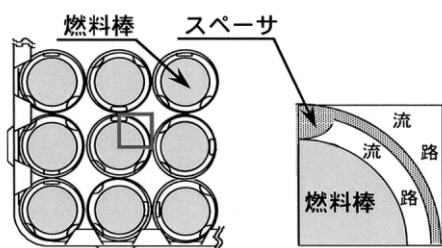
- ① 理論式や機構論的モデルを広く採用しており、軽水炉プラントにおける定常運転からシビアアクシデントに至るプラント状態や各種の事象を、精緻に解析できる。
- ② 調整係数 (Tuning Parameter) がほとんどないため、ユーザーに依存しない解析結果が得られる。
- ③ OECDが主催する国際標準問題の解析等により、現在世界で使用されている解析コードの中でトップクラスの性能であることを確認している。
- ④ モジュール構成としているため、必要に応じてモジュールを単独で利用できる。

IMPACTの各コードは、VerificationとValidationにより解析機能や精度を確認しているが、ここでは主としてValidationの例と実機解析の事例を中心に紹介する。

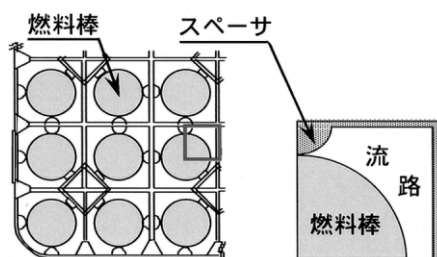
(1) 各コードの概要

[CAPEコード]

現行軽水炉の燃料集合体は多数の燃料棒を正方格子状に束ねたもので、燃料棒の間隔を保持するために燃料スペーサが高さ方向に複数個、設置されている。現行BWRの燃料スペーサは、図9に示すように丸セル型と格子型の2種類が使用されている。燃料集合体の限界出力（この出力を超えると燃料棒の温度が急上昇する）はスペーサの型式によって差があることが知られている。



丸セル型スペーサ



格子型スペーサ

図9 BWR燃料集合体のスペーサ型式

ーサは、図9に示すように丸セル型と格子型の2種類が使用されている。燃料集合体の限界出力（この出力を超えると燃料棒の温度が急上昇する）はスペーサの型式によって差があることが知られている。

NUPECが実施した実寸大の模擬燃料集合体（寸法は実物大であるが、核加熱の代りに、電気加熱により発熱量を模擬）の限界出力試験を解析した例を図10に示す⁽⁷⁾。丸セル型スペーサの方が格子型スペーサよりも限界出力が高くなるという実験結果を、解析では冷却材流量の依存性を含めて再現できている。

それではなぜ、丸セル型スペーサは限界出力が高くなるのであろうか。限界出力は、燃料棒表面から冷却水の液膜が消失するときの出力と定義される。冷却材流路中の液滴のうち燃料棒表面に付着する量が増えれば、それだけ液膜の消失が遅れ、限界出力が高くなることになる。そこで、CAPEコードにより、液滴付着特性を解析した（図11）。その結果、丸セル型は格子

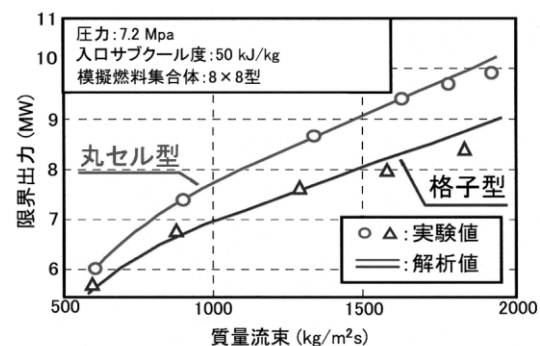


図10 スペーサ構造による限界出力の差

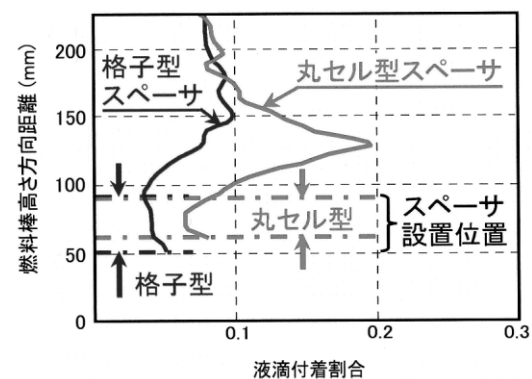


図11 スペーサ構造による液滴付着特性の差

型よりも液滴付着量が多いことがわかった。このようにCAPEコードでは、物理現象の精緻な評価が可能であり、限界出力の差の理由を物理現象として説明することができる。

[FLAVORコード]

垂直円柱に直交する流れによって円柱が振動する現象に着目した実験⁽⁸⁾の解析例を図12に示す。図には、解析で得られた流れの渦の生成状況を可視化した結果もあわせて示した。

流動励起振動は、低流速域で現われる対象渦の生成を特徴とする自励振動から、高流速域で現われる交互渦の生成を特徴とするロックイン振動に遷移することが分かっている。図に示すように、解析では振動の変位を最大で24%ほど過大評価しているものの、自励振動からロックイン振動に遷移する流速を精度良く再現しており、また渦生成の特徴も良く再現していることがわかる。

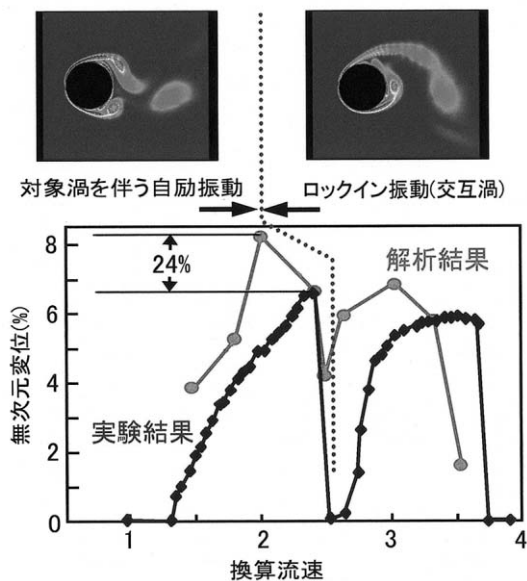


図12 弾性支持円柱振動実験の解析

[PLASHYコード]

OECDの国際標準問題解析（ISP-43）に参加し、PLASHYの解析能力を検証した。

ISP-43は、PWRのボロン希釈の問題に着目し、PWR1次系を模擬した試験装置において、ボロン水を模擬した温水を容器内に満たし、

これに希釈水を模擬した冷水を注入して温度変化から希釈挙動を調べるものである。試験は、米国メリーランド大学で実施された。

PLASHYによる解析結果を図13に示す。解析の後で試験結果が開示される「ブラインド解析」で実施したものであるが、解析は試験結果を良く再現している。この解析ではPLASHYの单相流モジュールを使用した。PLASHYには他に二相流及び混相流モジュールがあり、IMPACTの他のコードにおける流動挙動解析のためのモジュールとして組み込まれている。

PLASHYコードは原子力分野に限らず、当研究所以外の機関にも提供して、例えば発熱素子の冷却特性解析などに活用されている。

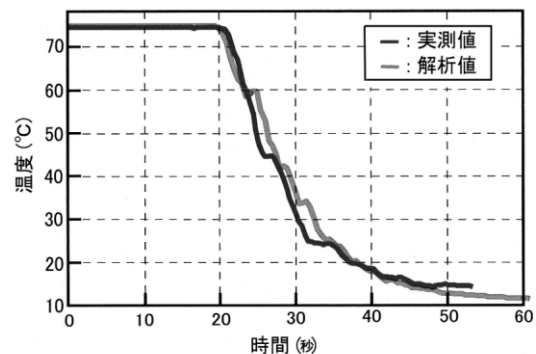


図13 ISP-43（冷温水混合問題）の解析結果

[SAMPSONコード]

軽水炉プラントでシビアアクシデントを想定した場合、定常運転から原子炉容器内事象を経て格納容器内事象に至る間、種々の現象が複雑に錯綜して現われる。SAMPSONコードは、このような一連の現象を対象として事故の一貫解析を可能とするもので、最終的に格納容器の健全性、核分裂生成物の放出挙動を評価するものであり、図14に示す解析モジュール群で構成されている。並列計算機を使用する場合には、各モジュールの起動・停止及び解析モジュール間の情報の授受は制御モジュールが担当する。各解析モジュールの物理モデルは、実験解析によってVerificationしている。

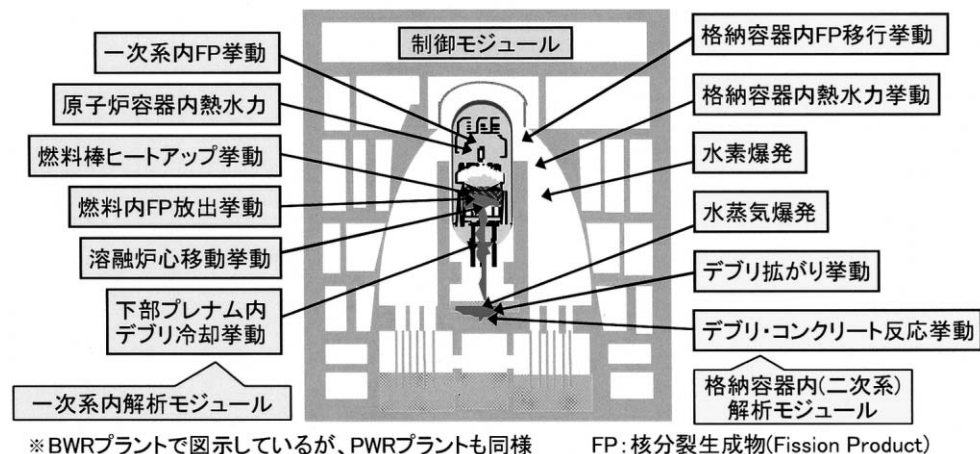


図14 SAMPSONコードのモジュール構成

(2) IMPACTの適用事例

[ISP-45の解析]

第1章の図1では、他機関によるISP-45の解析結果を示したが、ここでは、NUPECが実施した解析を紹介する⁽⁸⁾。

ISP-45には、13カ国、21の機関が参加し、SAMPSONコードを含む7種類の解析コードを使用した。まず、実験結果が開示される前に実験条件だけを与えられてBlind解析を実施した。その後、実験条件に加え、実験結果も開示され、Open解析を実施した。

具体的には、SAMPSONコードのうち、「燃料棒ヒートアップ挙動」と「溶融炉心移動挙動」の2モジュールを連成させて解析した。実験では模擬燃料棒を電気加熱したが、Blind解析においては、電極の接触抵抗が未知であ

ったため推定値を入力し、かつ実験装置の断熱状況も詳細が不明であったため、装置からの放熱を無視して解析した。SAMPSONコードでは、それ以外の調整係数は一切ない。

次いで、実験結果と詳細な実験条件が開示され、電極の接触抵抗や装置からの放熱を適切に評価してOpen解析を実施した。模擬燃料棒の被覆管表面温度の時間変化を図15に、水素発生量の解析結果を図16に示す。

燃料被覆管の破損時刻(7182秒)を正しく評価したのはSAMPSONコードのみであった。また、最終的な水素蓄積量の解析値は実測値と比べてBlind解析では18%ほど少なかったがOpen解析での差は約6%となった。これらの値については、NUPECが参加21機関による解析中ベスト2以内の成績であった。

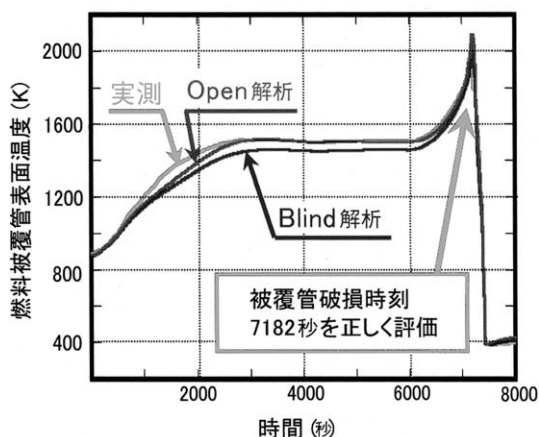


図15 ISP-45 (燃料被覆管温度の解析)

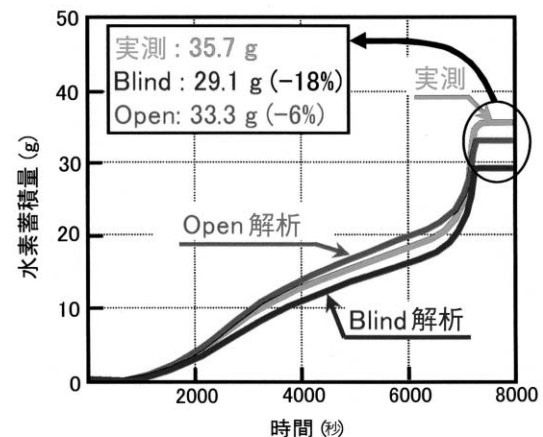


図16 ISP-45 (水素蓄積量の解析)

[ISP-46の解析]

ISP-46は、フランスのPHEBUS試験炉におけるシビアアクシデント総合試験の解析である。PHEBUS炉は実際の核燃料を使用した研究用原子炉で、実際にシビアアクシデントを発生させて炉心の溶融挙動や格納容器内に放出された核分裂生成物の挙動などが測定された。解析はOpen解析として実施され、21カ国、47機関が参加した。

具体的には、SAMPSONコードのうち、「燃料棒ヒートアップ挙動」、「溶融炉心移動挙動」、「燃料内FP放出挙動」、「一次系内FP挙動」、「格納容器内FP移行挙動」、「格納容器内熱水力挙動」の計6モジュールを連成させて解析した⁽⁹⁾。図17に試験終了時の燃料（一部、溶融している）の軸方向分布、図18に格納容器雰囲気に浮遊するヨウ素量の解析結果を示す。

試験の進展に伴って、炉心中央部の燃料が

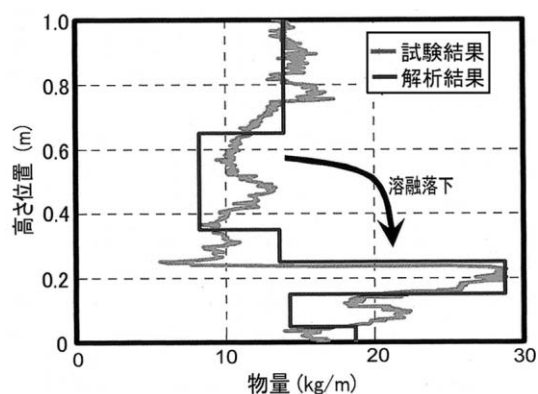


図17 試験終了時の燃料の軸方向分布

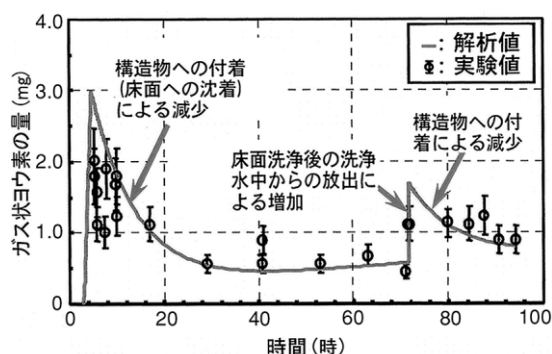


図18 格納容器内に浮遊するヨウ素量

溶融し下部に落下した現象を解析で良く再現できた。また、核分裂生成物であるヨウ素の挙動（床面沈着、水中からの放出、構造物への付着等）についても物理現象として説明でき、実測値を良く再現できていることがわかる。

SAMPSONによるISP-46の解析は、多次元性を考慮した初の成果であり、結果は参加機関中ベスト2以内であった。

SAMPSONの各モジュールは個別試験の解析によってVerificationされており、デブリ冷却挙動、デブリ拡がり挙動のモジュールは火山溶岩流の解析にも活用されている。

[浜岡1号機における水素爆発の解析]

2001年11月、浜岡1号機（BWRプラント）の余熱除去系配管が破断する事故が起きた。破断の原因は、原子炉内で冷却水が放射線分解した結果、水素・酸素の気体が発生し、これが配管内に移行して高濃度で蓄積し、流路の弁操作に伴う熱流動挙動の過渡変化をトリガーとして爆発したことによると推定された。

PLASHYコードを用いて配管内の水素・酸素等の気体の蓄積状況と熱流動挙動の過渡変化を解析し、その結果に基づいてSAMPSONコードの水素爆発解析モジュールを用いて水素爆発時の配管内圧力応答を解析した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。水素爆発（爆轟）はマイクロ秒のオーダーで現象が進展するが、図19に示すように最高300MPa程度の圧力が過渡的に加わったことが分かった。

さらに、水素爆発に伴って発生した三次元過渡圧力応答の解析値を入力値として配管の構造解析を実施した結果、解析においても実際と同じ位置で破断するという結果が得られた。これらの解析結果から、実機の事故は水素の爆轟によるものと結論付けられた。

水素爆発解析モジュールは、米国企業からの解析依頼を受けて、原子力発電プラント以外の分野に活用した実績もある。

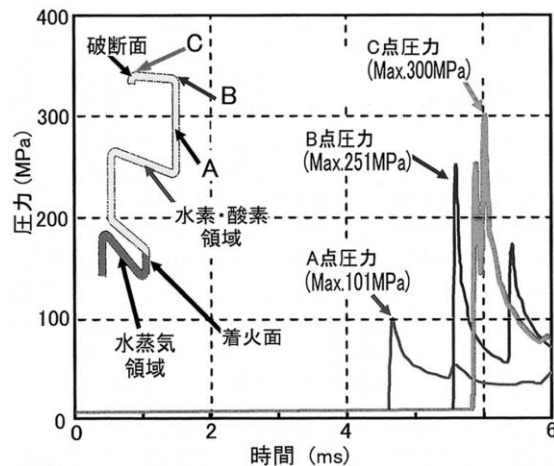


図19 浜岡1号機水素爆発時の配管内圧力応答

5. おわりに

解析で得られる直接的な結果は、通常は数字の羅列である。現象を理解・判断するために、これらを本文中の図に示したような二次元平面上でグラフや表にまとめることは容易にできるが、加えて、可視化（例えば、図12に示した流況の可視化）や動画表示が現象の理解を深める上で強力なツールであり、画像表示技術の開発・活用も重要である。

解析コードは、「生き物」と同じであり、完成した状態のまま手を入れなければ、いずれは死物化してしまう。世の中の技術の進歩にあわせて、常に保守・改良を継続することが必須である。

本稿では述べなかったが、IAE安全解析グループでは、文部科学省の委託事業を受け、平成17年度から21年度までの5カ年計画で、東京大学越塚誠一教授を代表とする研究連携機関の一員として、高速炉を対象として「新技術を活用した次世代安全解析手法の開発」も進めている。

本文では、原子力分野への適用を中心として、腐食・伝熱・流動現象の解析技術に関する当グループのアクティビティを述べたが、これらの現象は原子力以外の分野でも広く現れるものであり、今後は原子力以外の分野に対しても貢献していきたいと考えている。

参考文献

- (1) 内藤正則, 日本原子力学会誌, Vol. 50, No. 4, pp49-50, 2008.
- (2) Shunsuke Uchida, et al., PowerPlant Chemistry 2007, 9(3) pp. 143-156.
- (3) Masanori Naitoh, et al., Heat Transfer Engineering, 29(8) pp. 712-720, 2008.
- (4) M. Izumiya, et al., 火力原子力発電, 27, 419, 1976.
- (5) H. G. Heitmann and P. Schub, Proc. Third Mtg. on Water Chemistry of Nuclear Reactors, London, 243, 1983.
- (6) 内藤正則, 他, 日本原子力学会誌, Vol. 41, No. 3, pp174-201, 1999.
- (7) Masanori Naitoh, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 39(1) pp. 40-52, 2002.
- (8) T., Ikeda, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 40(4) pp. 246-255, 2003.
- (9) T., Ikeda, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 40(8) pp. 591-603, 2003.
- (10) Masanori Naitoh, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 40(12) pp. 1032-1040, 2003.
- (11) Masanori Naitoh, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 40(12) pp. 1041-1051, 2003.

高レベル放射性廃棄物処分の世代間意思決定とは どのようなことか

蛭沢 重信 (プロジェクト試験研究部)
部長 副主席研究員



1. はじめに

「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)の報告では、地球温暖化は疑う余地がないとされてきている。わが国は、現在、京都議定書に基づいて地球温暖化防止を推進しており、昨年(平成19年)5月には、安倍総理(当時)は「美しい星50(クールアース50)」を提唱し、世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比して2050年までに半減するという長期目標を提案した。この目標は、極めてチャレンジングなものともみられており、単に従来の技術の延長では困難で、革新的技術の開発が不可欠であるとされている。

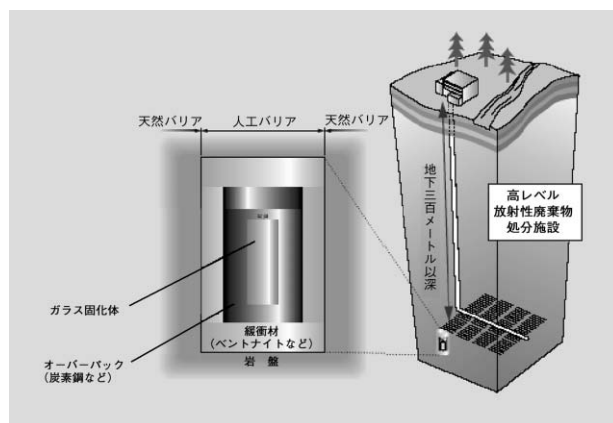
地球温暖化防止対策が人類共通の喫緊の課題と認識される中で、発電に伴って二酸化炭素(CO₂)を発生しない原子力発電は地球温暖化防止に貢献する有効なエネルギー供給手段の一つであることが広く認められるに至っている。化石燃料資源の供給不安とも重なり、米国における原子力リバイバルの具体的な動き、中国等新興国の大胆な原子力導入計画など、世界的レベルで原子力導入に拍車がかかった感がある。原子力産業においても世界的な再編がダイナミックに進んでおり、開発計画を含めある種活況を呈している状況といえよう。

わが国では、原子力政策大綱⁽¹⁾にも述べられているように、使用済燃料を再処理し、核燃料をリサイクル利用することにより、供給安定性に優れている原子力発電の特性をより

一層有効に活用することとしている。また、相当長期間にわたり燃料資源として活用するといえどもウラン資源にも埋蔵量に限りがある⁽²⁾ことから、原子力が長期にわたってエネルギー供給を行うことを可能にする上でも、核燃料リサイクルは重要である。

原子力発電所で使われた使用済燃料をリサイクルする再処理の過程で、核分裂生成物、長寿命核種等を含む放射能レベルの非常に高い放射性廃液が発生する。廃液のままでは取り扱いが不便なため、ガラス原料と一緒に溶かし、これを冷やして固め、貯蔵および処分に適した安定な固化体とする(ガラス固化体：日本においては一般的にガラス固化体を高レベル放射性廃棄物と称する)。ガラス固化体は製造直後は温度が高いことから冷却のため30～50年程度貯蔵された後、わが国では地下300m以深の安定した地層に処分される。地層処分の安全性は地層(天然バリア)と地層の閉じ込め性をより確かなものとするための人工的措置(人工バリア)により確保される(図1参照)。

地層処分は、長期にわたり一般公衆の生活環境への影響が有意なものとならないように設計されるとともに、被ばく上問題となることがない放射能レベルに減衰するまでその性能を評価するのが専門家の共通認識になっている⁽³⁾。その評価期間は高レベル放射性廃棄物(HLW)の主要な放射性核種の放射能減衰期間により数千年、または数万年と長期間にわたる。

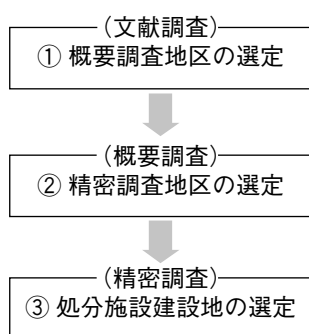


(出所：資源エネルギー庁パンフレット (平成16年11月))

図1 HLW処分場概念

このようにHLWの地層処分には、想像すらできない社会の遙か未来の問題に対して現世代の責任と将来世代の配慮のバランスを考えながらどのように決定を下すことが妥当であるかという難しい課題が含まれている。

地層処分の実施状況を見ると、わが国も含め、地層処分開発を推進している国々は、処分実施に向けた具体的スケジュールを作成し、一部の国では処分場候補地を決定するまでに至っている。わが国における処分場の選定は、次の3段階によって進められることが決っており、応募があれば、その第一段階である、文献調査により調査地区の選定を行っていくことになる。



2007年1月高知県の東洋町が「高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」へ応募したものの、地元等の反対にあい、出直し町長選挙等の政治的プロセスを経た上で応募取り下げに至った事例⁽⁴⁾、他にも検討が明らかになった段階で反対運動により断念したいくつかの自治体の例から考

えると、わが国においては、HLWの地層処分は社会の理解を得ているどころか、適正な判断のための正確な情報すら一般の人々に届いていないように思われる。

「原子力」、「放射性廃棄物」、「長期の危険性」、「不確実性」など、とらえ方にもよるが、HLWの地層処分に関する話では、どちらかと言えばネガティブに伝えることが比較的容易なキーワードが並ぶ。

地球温暖化が一地域に限定した問題でなく全地球規模の課題であるのに対し、HLW地層処分は極めて地域限定的な課題であるという違いがある。一方、遠い将来への影響という点では、冒頭紹介した地球温暖化と同じ軸にある課題であるという共通点もある。

2. 世代間に係わる処分概念の検討例

地層処分事業がいろいろな事情により足踏みをせざるを得ない状況に追い込まれ、事業の進め方の見直しを図った国がいくつかある。過去の報告から再掲すると例えば、スウェーデン、フランス、カナダなどを上げることができる⁽⁵⁾。

フランスの場合を例にとると、地層処分場候補地の選定活動が1990年のモラトリアムにより中断するまでは、研究開発活動の一環として主として科学技術主導により極端な反対に合うことなく進められた。立地活動に伴う

モラトリウムを転換点とし、地層処分を進める上で従来何が欠けていて、どのような進め方が望ましいかとの議論が進められた。

転換点後のHLW管理のあり方に関する検討において、地層処分研究はオプションの1つであるとした上で、可逆性を有する処分概念の検討をするよう求めた。オプション研究の意義は、地層処分研究のみを推進するのではなく、社会の関心のあるいくつかの選択肢を選定しその研究開発に一定の期間を設け、選定評価ができるようになった時点で選択をすることにあった。また、可逆性を有する処分概念の検討は、何かあったら取り出せるようにして欲しいという市民の意見を採り入れる形で導入されたものであが、その背景には、将来世代の関与の余地を残すという配慮も含まれていた。今後実施主体は、研究開発成果、関係自治体等との様々な面でのコミュニケーションなどの蓄積の上に立ち、いよいよ本格的に候補地選定に入っていくものと思われる。この過程で、可逆性を持つ処分概念とは具体的にどのようなことを備えているべきか等についても議論が進むのではないかとと思われる。

フランスの例は、HLW管理は社会の理解のためには技術開発に時間を要することに加え、

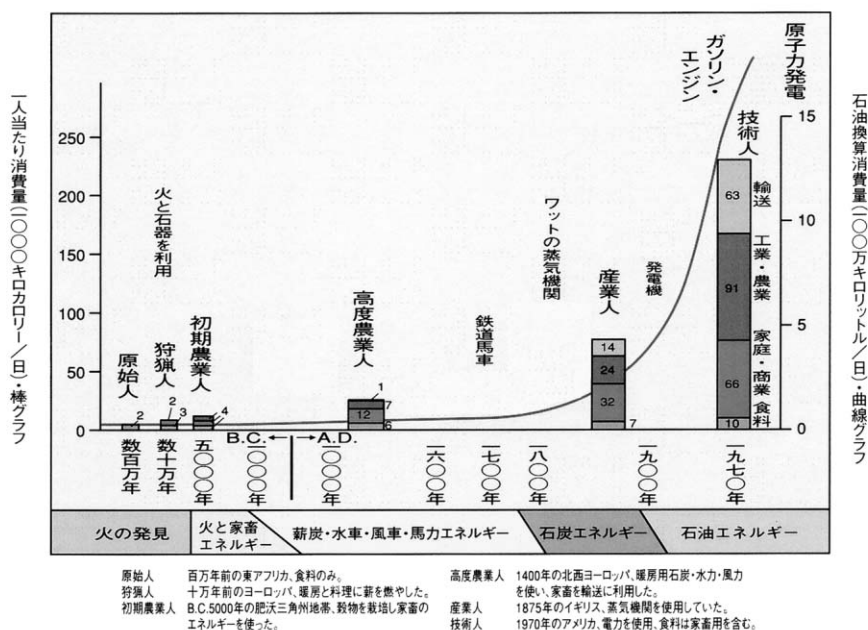
世代間の配慮を含む意思決定問題であることも示している。次節以降では、HLW地層処分が持つ特性のうち、事業の長期性、および安全を確保しておくべき期間の長期性に着目し、世代を超えた課題の解決のために、どのような配慮が必要となり、そのためどのような原則を明確にする必要があるかに注目し、具体的な検討事例を紹介しつつ、考察を進めることとする。

3. HLW処分の長期性とリスクについて

将来世代への影響を考慮した意思決定において考えなければならないこととはどのようなことか整理しておく必要がある。

高レベル放射性廃棄物の長期管理に関し、将来にわたり延々と続く時間を技術的な視点および人間活動の視点から世代間の意思決定を考えていくことになるが、過去にこのような例はなかったのだろうか。よく引き合いに出されるのは、過去の人間活動の履歴である。本題に入る前に、既に整理されている例を紹介しておくこととする。

図2は、主要なエネルギー関連の技術開発とエネルギー消費量からみた人類の歴史を大きくまとめたものである。



(出所：原子力文化振興財団「原子力・エネルギー」図面集を基に作成)

図2 人類の歴史：技術開発とエネルギー

1800年代頃からエネルギー消費量が急速に伸び出した背景には、あらためて言うまでもなく、イギリスで1700年代中葉から始まった産業革命がある。家内工業的に営まれていた繊維産業の効率化を一気に高めたのは、初めは水力を利用した紡織機の開発であり、これにより大量生産が可能になったとされている。それより少し後の1785年には、豊富な石炭を背景にトーマス・ニューコメンにより実用化されていた蒸気機関をジェームス・ワットが改良し、以降紡織機のみならず、それまで水力を利用していた産業機器の動力源として「革命的に」導入されていくこととなった。

産業革命は、様々な影響を社会に与えたとされているが、それらは人々の生活の質の向上といったような肯定的なものばかりではなく、労働環境問題、都市化に伴う負の影響、さらには1900年代まで続く霧のロンドンに象徴される自然環境問題なども引き起こした。そのような中で、負の影響を是正するような社会制度の近代化が促進されてきたことも指摘されている。

産業革命進行時に環境影響問題がどれほど指摘され、その取り組みがなされてきたかは別途調べるべき課題ではあるが、少なくとも都市環境問題、労働環境問題という空間的には都市レベルあるいは国家的レベル、時間的にはその時代の範囲内での取り組みはなされたと言えるようである。エネルギー消費量の増大、人口増大、社会の近代化などをみるにつけ、産業革命以降は、人類史の中でも特に技術開発が社会に与える影響の大きい時代と言える。将来世代への影響の観点からどれほどの考慮、検討がなされてきたかについて明確に示すことはできないが、どのような取り組みをその社会がするかはその時代の「価値」あるいは「価値観」によっているのではないかと思う。

ここで、舞台を一気に現代に引き戻し、我々が直面しているHLW管理について世代間

問題として考える際の要素の一つであるリスクについて考えてみることにする。HLWは、その潜在的な環境影響が世代を超えて長期にわたることから、現世代のリスクに加え将来世代へのリスクを考慮して対策を検討することになる。さらに、これらのリスクを軽減させるために使われる費用をどのように考えるかがリスクと対になってあげられる。リスクにしても、現世代へ与える「不確実性の小さいリスク」と遠い将来世代への「不確実性の大きいリスク」を同等に扱うのは妥当か、そうでないとすればどのような考え方で区別するか。将来世代のリスクを制限するあるいは低減するために実現化された技術を踏まえつつ、さらに技術開発を進める場合、それに投じる費用の妥当性をどのような基準で判断するか。このような課題を類型化し整理すると次の通りである⁽⁶⁾。

分類1：現世代のリスクと将来世代のリスク

- ① 不確実性の小さい現在および近い将来のリスク^{※1}と不確実性の大きい将来のリスク^{※2}を比較する合理的な方法はあるか？
- ② 近い将来（例えば、子、孫から3世代位先の公衆に対する不確実性の小さいリスクと遠い将来（例えば、千年、1万年あるいはそれ以上）の公衆に対する不確実性の大きいリスクとをどのように比較するのが合理的か。

分類2：リスク低減策と派生リスク

- ① 将来の公衆に対するリスクを減らすための活動から生じる生態系に対するリスク、または被害の比較やバランスはどのように行うか。

分類3：リスク低減策と費用

- ① 将来のリスクを防ぐために現世代が負担する妥当な費用^{※3}はどのように算定するのが合理的か。
- ② 将来世代が処分場の不具合により廃棄物を再取り出しする可能性を考慮し、再取り出しに必要な技術開発に要する費用の算定方法と負担方法の妥当性、また、再取り出しに要する費用をどのように考慮しておくのが妥当か。

分類4：各世代の責任と意思決定プロセス

- ① 現在の世代の責任、将来の世代の責任と選択権を意思決定プロセスにどのように具体的に組み込むのが良いか。

※1 例えば、処分場建設、操業、埋め戻し工事に伴う一般災害による死亡リスクおよび放射線被曝によるガン発生のリスク、および処分場閉鎖後の性能評価に基づく公衆の個人の放射線被曝に伴うガン発生リスク

※2 例えば、千年、一万年後の公衆の個人の処分に起因する放射線被曝によるガン発生リスク

※3 資金には、処分施設の頑健性をより高めるための設計、施行等費用、および代替案開発も含め研究開発費用などを含む。

HLW処分には、将来世代に対する不確実性の大きいリスクの扱いように技術的判断だけでは解決が難しい課題が含まれている。技術以外も含めた社会制度あるいは価値観の中で判断していく問題であることが推察される。

4. 高レベル放射性廃棄物管理では、将来世代問題にどのように取り組んでいるか

前節では数世代にわたるHLW管理の意思決定、および処分施設に起因する近い世代のリスクと不確実性が大きくなる遠い将来の世代のリスクをどのように考えるかを中心に、世代間の意思決定に係る課題を抽出した。

ここでは、将来世代と現世代の関係を考慮した意思決定に関し、具体的に検討された例の中から、次の5節で掘り下げる世代間意思決定に含まれる課題のポイントを抽出する。

(1) 国際機関での検討例

国際機関での検討としては、以下の2例を紹介することができる。

①「放射性廃棄物の処分 含まれる原則の概観」1982年、経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)

3.3節「将来世代に対する責任」において、次の表現がある⁽⁷⁾。

放射性廃棄物処分の場合、危険を考慮することよりその利益を定量化することの方が難しいと思われる。確かに、利益よりもリスクに注目することの方がずっと多く、廃棄物処分に関する問題は現世代が負担し、将来世代負担を極力少なくするという考え方が強く受け入れられる傾向があることもその理由の1つである。(中略)

責任感とは技術的対策を探す強力な要素にはなるが、しかしここで考えるべきことは影響の性質であり、また、入手可能な資源である。正しいバランスのとれた判断をするためには、実際問題として「残されるリスクの許容レベルは幾らか？」ということになる。とにかく、絶対的な安全性を保証することはできないのであるから、将来の世代に対しては、社会が自分の世代の許容レベルより悪くない状態を残すようにすることが、一般的には認められると考えられる⁽⁷⁾。

(訳IAE)

この報告書は、いくつかの国で地層処分場のための具体的な立地選定という意思決定に入る少し前に公表されている。すでに、現世代の責任と将来世代の負担の文脈で、限られた資源の中で将来世代へ残す可能性のあるリスクの許容レベルの考え方が示されている。

②「長寿命放射性廃棄物の地層処分の環境的および倫理的基礎」1995年、OECD/NEA

本報告書を取りまとめた放射性廃棄物管理委員会(RWMC)は、その集約意見を次のようにまとめている⁽⁸⁾。

RWMCは、公正と公平の考察に焦点を絞った。即ち、

- 将来世代にリスクの可能性と負担を残すであろう現世代の責任に関して、世代間の公平(世代間公平 intergenerational equity)、及び
- 実施されることとなる廃棄物管理の解決方法に関する資源分配のバランス及び公正で開かれた意思決定過程に現在社会の様々な層の参加を得ることにに関して、世代内の公平(世代内公平 intragenerational equity)。

(中略)

- ・ 世代間及び現世代内の公平という倫理的原則は、放射性廃棄物の長期的管理の方策の受容可能性を評価する際に、考慮されなければならないことを配慮し、

(中略)

- ・ 長寿命放射性廃棄物の地層処分の方策は、
- 特に、現在に適用しているものと同じリスク基準を遠い将来に適用することにより、そして将来世代に残す責任を制限することにより、世代間の公平問題を考慮するものであること、
- 特に、科学の進歩の結果を考慮しながら、数十年にわたる段階的实施による処分の実施を提案することにより、現世代内の公平問題を考慮するものであること；この手順により、全ての段階で公衆を含む利害関係者との協議が可能になるであろうことを信じ、

- ・ 地層処分概念は、処分場からの廃棄物の再取り出しのための周到な準備は必要としないが、たとえ閉鎖後であっても、費用はかかるものの廃棄物の再取り出しは不可能ではないことに注目し、

- ・ 放射性廃棄物に対する地層処分方策によるリスクの低減に取り組む中で、現世代は、人間や環境へのより大きなリスク低減の可能性のある他分野への資源配分を勧告し、より効果的に資源を使えるかどうか考えるべきであることを警告し⁽⁸⁾、

(訳IAE)

上記に示された考察の結果、HLWの管理方法として、貯蔵によるよりも最終処分の方が、現世代が将来世代に対する責任をよりよく果たすと考察し、地層処分がその時点で最も好ましい方策であるとしている。

RWMCは以上の考察に基づき、次の2点を最終結論とした。

- ・環境的にも倫理的にも、数百年以上にわたって生物圏から隔離されるべき長寿命放射性廃棄物に対する地層処分場の開発を続けることは正当化されると結論し、
- ・地層処分計画を段階的に実施することにより、科学の進歩と社会の受容性に照らし合わせて、数十年にわたって状況の変化に適応できる余地が残り、将来他の選択肢が開発され得る可能性を排除しないことを結論する⁽⁸⁾。

(訳IAE)

(2) スウェーデンにおける検討例

世代間倫理の側面から議論した古い例としては、スウェーデンにおける「不確実性の中での倫理的行動に関するセミナー」を上げることができる。これは「放射性廃棄物国家評議会」(KASAM, Swedish Consultative Committee for Nuclear Waste Management)と「使用済燃料に関する国家評議会」(SKN, Swedish National Board for Spent Nuclear Fuel - 当時)の共催により、1987年9月8～9日にストックホルムで行なわれたものである。このときの議論をもとに、両機関名で、「放射性廃棄物の倫理的側面(Ethical Aspects on Nuclear Waste, SKN Report 29 (KASAM, SKN))」(1988)と題する報告書が公表されている。

セミナーには、約30人の招待科学者、また、社会問題に関する公開の対話に参加してきた人々、特に、人文科学、神学、自然科学、科学技術などに関する基礎知識を有する人々も招待され、不確実性を伴う課題が倫理的側面から検討され、どのように行動することが望ましいか議論が展開された⁽⁹⁾。

次に示す報告書の目次構成からも、将来の不確実性を含む課題について世代間の公平性も含め倫理的考察がなされたことが伺える。

1. 起点
(Starting-Points)
2. 様々なタイプの不確実性
(Different Type of Uncertainty)
 - 2.1 人間に組み込まれた制約
(Mankind's Built-in Limitations)
 - 2.2 社会の展開に関する不確実性
(Uncertainty About Society's Development)
 - 2.3 環境の開発に係わる不確実性
(Uncertainty About Environmental Development)
3. 不確実性を減少させるシステム
(Systems that Diminish Uncertainty)
4. リスク
(Risk)
5. 倫理のパラダイムの変化
(The Shifting of Paradigms in Ethics)
6. 我々の責任、将来世代の責任、管理(コントロール)の必要性
(Our Responsibility-The Responsibility of Coming Generations-The Need for Controls)

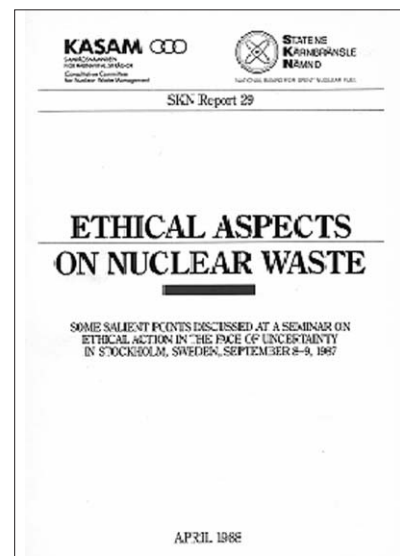


図3 「放射性廃棄物の倫理的側面」の表紙

この検討を始めた動機として、現世代が取る行動の長期的な結果について現在の世代が評価する際には、不確実性要因を受け入れざるを得ないことを次のように述べている。

我々の責任の境界が今日や明日に限定されるわけではなく、はるか先の不確かな将来にまで広がっているという事実は、我々に新しい連帯感を要求する。すなわち、現在と将来の間の長年にわたる連帯である。(中略)

放射性廃棄物の取り扱い(deal with nuclear wastes)方法を倫理面から評価する際に生じる主要な問題の1つは、長期的視野から見て避け

られない不確定性を考慮しながら行動を開始するにはどうしたらよいのかということである⁽⁹⁾。

(訳IAE)

このセミナーにおける議論の中心的課題の1つは、我々の世代が将来の世代に対して負う責任に関係するものであった。この問題について検討した上で確認されたことの1つは、1980年代末当時の人々が、世代間の問題に対する理解のし方のパラダイムにおいて変化の途上にあると認識していたことである。つまり、世代間倫理に係わる問題への対処の基本考え方、つまり価値観の変化の期間であった、と言っても差し支えないと思われる。そのような状況認識の中で放射性廃棄物の処分問題を論じると2つの方向が示されると述べた。

そのうちの1つはまず比較的長期間使用されるよう意図された技術的製品に対しては、製品が安全に運転されなければならないことに加え、保修可能でなければならないことが一般的であることを示した。この要件は、放射性廃棄物処分場についても適用される可能性があるとの認識を示し、処分場について次のように要件を整理した。つまり、運転時の安全性とは、予測可能な限り、将来の世代が自らまたはその環境を廃棄物から保護するための措置を余儀なくされることのないように(負担をかけないように)、廃棄物を処分することができることを意味する。一方、保修可能性とは、廃棄物の処分の際に実施した世代が犯したかもしれない過ちを将来の世代が修正できるということを意味する。

もう1つの議論の方向は、将来技術の進歩のとらえ方には二面性があるが、その両方に対応可能なシステムを備えなければならない、との問題である。

1つ目は、放射性廃棄物の処分方法に関する知識が今後ともたえず存在し続けるということを今日保証することはほとんどできない立場に立つ見方である。この観点に立つと、処分場は、いったん密封されると監視が必要とされない方法で建設されなければならない。したがって、

現代の責任は、安全性の維持のために、積極的な監視を必要としない処分システムを構築しなければならないこととなる。

2つ目は、知識の進歩に肯定的な見方である。将来の世代は、安全性を高め、かつ、または廃棄物に潜むエネルギー資源を有効活用するため放射性廃棄物を処理する能力を有するようになるかもしれない。そうするとその選択は、当該の世代にまかされることになり、その時点における長所および短所に関するその世代の評価に基づき選択が行われることとなる。さらに、このことは、将来の世代による処分場の制御が可能であるような方法で処分場が設計されなければならないことを意味する、としている。

この2つの議論から導き出される以下の結論によれば、一見すると相矛盾するような方法を採用することになる可能性もある。ここで示された議論の1つの結論が、その後のSKNの提言になり、それを受けて検討、公表されたSKBによる廃棄物の再取りだしも可能にする実証処分(当時)の導入につながったと考えることができる。

これらの議論は、二重の結論を導き出す。処分場は、管理措置や是正措置を不必要にするが、それと同時に、管理措置や是正措置を不可能にしないような方法で建設されなければならないということである。言い換えれば、我々の世代は、処分場の保守に対する完全な責任を将来の世代にまかすべきではないが、制御の可能性を将来の世代に与えるのを拒むべきでもないということである⁽⁹⁾。

(訳IAE)

5. 将来世代に配慮した意思決定とはどのようなことか

4節で示したように、HLW処分は、原子力発電による恩恵を受ける現世代の直接の利益の負担として生じる問題である。原子力発電の直接の恩恵を受けない、あるいは受けない可能性のある将来の世代に対し、現世代の利益の裏返しとしての負担を課すことは基本的に容認され

ないとのコンセンサスがある。同じ論理は、CO₂に代表される温室効果ガス、重金属の取り扱いについても当てはまる。高度経済成長期後半に顕在化した公害問題の初期では、ある活動に伴って発生した個人、ある集団、または社会への影響のとらえ方は、加害者 対被害者という構図^{※4}の中であった。しかしこの考えか方は、それほど長い時間を経ずに加害者が及ぼす影響がその時代の被害者だけに止まらず、数世代にわたり影響を考えなければならないという問題に発展した。数世代の影響を考慮の対象にしなければならないことになると、長期的課題は一個人や一企業あるいは企業群に止まらず、ある世代が選択した技術による長期影響に対する社会的責任という枠組みで検討せざるを得なくなった。

1984年国連に設置された「環境と開発に関する世界委員会」(WCED、通称ブルントラント委員会)が1987年に取りまとめた報告書“*Our Common Future*”では、持続可能な開発の概念^{※5}を初めて提唱した。同報告書の中で、今日の活動は、我々が今日有すると同じ機会を将来世代から奪い取るような資源消費や環境劣化を導くべきではない、との原則を提示した⁽¹⁰⁾。この原則は、1992年のリオデジャネイロで開催された「環境と開発に関する国連会議」の国際的政策課題として選ばれ、広範に議論された。この原則を、潜在的に危険な廃棄物の発生から生ずるような複雑な環境問題に適用することは適切であるとした。4節(1)で紹介したOECD/NEAの報告書⁽⁸⁾では、この原則を高レベル放射性廃棄物管理の環境的および倫理的基礎を検討するにあたり、直接参照すべきものとして言及している。

このような原則を環境政策に反映すると、汚染の発生者負担の原則と発生者責任の原則が具体的な制度としての原則として提示される必要があると認識されるようになった。放射性廃棄物管理の領域では、国際原子力機関(IAEA)

が取りまとめた報告書「放射性廃棄物管理の原則」(安全シリーズNo.111-F)の原則4で次のようにその原則を取り入れている⁽¹¹⁾。

原則4：将来世代の防護

放射性廃棄物は、将来世代の健康に対して予想される影響が、現在受け入れられている影響のレベルよりも大きくならないような方法で管理されなければならない⁽¹¹⁾。

ブルントラント委員会報告が提唱した将来世代への責任という「パラダイム・シフト」(価値観の変化とも言えよう)は、放射性廃棄物管理の分野では、その責任は現世代が負い、将来世代に過大な負担を強いてはならないとのコンセンサスとして定着してきている。しかし、高レベル放射性廃棄物処分の場合、安全性を確実にすべき期間が長いことから、長期に伴う不確実性の存在故に、現世代の責任をいかにして果たすべきかについては、様々な議論があり、未だそれほど明確になっているとは言い難い。これはすでに、3節で将来世代のリスクとして、いくつか課題を挙げた通りである。

不確実性にもいくつかの種類のものであり、一律に扱うことはできない。不確実性が大きい課題に対する対策の決定は困難を伴うものであるが、そうだからと言って、それを理由に対策決定を引き延ばしてよいということにはならない。これは、リオデジャネイロの「環境と開発に関する国連会議」でも確認されており、一般的に予防原則と言われる。

長期性に伴う不確実性から世代間公平性を考察すると、リスクと負担の世代間の公平な分配という概念と世代間での資源の公平な分配、という二つの概念が整理される。どの世代も、社会資源を利用するという何らかの活動に伴い、それに付随するリスクや負担を負うという構造の中にある。前者の「リスクと負担の公平な分配」の概念は、IAEAの原則4において、「現在受け入れられている影響のレ

※4 加害者を特定することが困難なケースもあった。

※5 「将来の世代のニーズを満たす能力を損なうことなく、今日の世代のニーズを満たすような開発」

ベルよりも大きくなならないような方法で」と言う形で表現されている。後者の「資源の公平な分配」は、どの世代も等しく前の世代から受け継ぐ資源や便益を享受する権利を有するため、各世代は続く世代のために資源が等しく分配されるための責任を果たすべきということである。これは通常、持続性の原則といわれるものに近い。持続性の原則は、どの世代も、その世代の生活の質に匹敵する生活の質を求める機会を将来の世代から奪うべきではない、とするものである。また、どの世代も、次に続く将来の世代の利益を守る義務がある。これは、将来世代に対する義務の原則とでもいうことができる。義務の原則は、各世代が連続的に果たしていく必要があることから、世代間の連帯、あるいは義務の連鎖が必要とされる。

一方、4節(2)スウェーデンの検討例で紹介したが、ある世代が取った行為が将来世代の選択の自由を狭めることがあってはならないことも世代間倫理の面から指摘されている。地層処分に関して言えば、現世代が地層処分を最善の技術選択と判断し実行したとしても、将来世代は別の技術の採用が妥当であると判断するような場合を想定すると、それが比較的容易に行えるようになっていることは検討すべきである。ただし、将来世代の選択のために現世代がどれほどの研究開発を行っておくのが妥当であるかは、それほど明確にされてはいない。

世代間意思決定とはどのような課題であり、その中身を構成している要素は従来の価値観と違いがあるのか無いのか。違いがあるとすればどのような点であるかを明確にして整理し、社会のコンセンサスとして定着させていく努力が必要とされる。

今まで述べてきたことから、世代間の意思決定という課題に含まれる基本的要素のうち社会的に合意されているものを整理すると次の通りである。

- ① 各世代は、次に続く将来の世代の利益を守る義務がある。

- ② どの世代も、その世代の生活の質に匹敵する生活の質を求める機会を将来の世代から奪うべきではない。

- ③ 不確実性が大きい課題に対する対策の決定は困難を伴うことを理由に対策決定を引き延ばしてよいということにはならない。社会の合意が必ずしもはっきりしていないものとしては、

- ④ 近い将来の世代に対する不確実性の小さいリスクは、遠い将来の世代に対する不確実性の大きいリスクより優先的に考えられるべきである。

- ④の要素に関しては、3節で提起したリスクに係わる課題が今後具体的に検討すべきものとして関係付けられる。すなわち、

- i) 近い将来の世代に対するリスクと遠い将来の世代に対する不確実性の大きいリスクに対し、重み付けをして公平に判断する方法とはどのようなものであり、また、その判断基準はどのようなものであるべきか。
- ii) 将来の世代のリスクを防ぐために現世代が負担する費用の妥当な算定方法とは何か。
- iii) 将来世代の選択の権利を尊重すると、その具体的技術内容は何であって、どの程度まで先の世代を対象にして考えるのが妥当か。

これらの課題はいうまでもなく、現世代が回答を出していくべきことであるが、これすらも世代が変われば変化するものである。世代間の連帯という新しい概念の中でこれをどのように継承していくことか、それ自体も新しい概念に含まれるものである。

6. おわりに

様々な課題に対する意思決定はその時代の諸条件の中で下されていき、時代が変われば、前の世代の決定が見直され、その時代の条件の中で決定が見直される。時代が変わってもその意思決定の根拠にある共通した理念は突き詰めるところ、その時代の価値あるいは価

価値観に基づく、ということではないだろうか。人類の歴史とエネルギー使用量の増大を例に見ても、産業革命時代には、その時代の置かれた状況に基づく時代の価値観があり、それに基づき社会の近代化すらも整備されてきたと言えるであろう。

わが国でも、戦後の高度経済成長期には、世界の一流国への仲間入りを目指して、いわば国民が一丸となって技術開発、人材投入が集中して行われ、経済成長を遂げた時期があった。現在の我々はそのおかげもあって、世界の中でも一流の豊かな生活を享受することができている。一方、高度経済成長期の後期には、公害問題が顕在化し、一定の成長を遂げた後には、そのような負の遺産に社会全体の目が向けられるようになった。1990年以前から次第に明らかになってきた地球環境問題は、産業革命から続く地球レベルでの環境の質の低下がもはや放置できない状態になってきたとの一部の科学者のメッセージが次第に国際社会で認知され、20年ほどの間に、社会の新たな価値感に係る課題として定着してきた。子、孫から始まる将来の世代への我々の責任、という価値がこれほど世界的レベルで論じられるようになった例は、今まではなかったのではないか。将来世代への影響が中心的課題でもある高レベル放射性廃棄物の管理は、将来世代の価値観と現世代の価値観が必ず一致するものではないことを踏まえ、将来世代の関与の余地を残すことの必要性について関係者のみならず、社会が広く認識し、理解した上で行動する必要がある。

批判的な声としては、「現世代で解決できない問題を内包する原子力発電は止めるべきだ」との声が聞こえてきそうであるが、この場合、現代社会を支えるものとしての原子力発電という価値を冷静に考える必要があるのではないか。また、原子力発電の賛否に係わらず、既に発生している廃棄物については、いずれにせよ解決しなければならない問題であることは事実である。現代社会は価値観が多様化

しており、一元的な社会の価値観などあり得ない、という声も聞こえそうである。そうかもしれない。だからこそ、わが国でもあらためて国民の意見を広く聞き、高レベル放射性廃棄物の長期的管理における世代間に配慮した意思決定について、広範な議論に基づく見解が示されることを望む。

参考文献

- (1) 原子力委員会, 「原子力政策大綱」, 平成17年10月
- (2) OECD/NEA, “Uranium 2007: Resources, Production and Demand,” 2008
- (3) OECD/NEA, “Can long term safety be evaluated?,” 1991
- (4) 田嶋裕起, 「誰も知らなかった小さな町の原子力戦争」, 2008, ワック(株)
- (5) エネ総研季報04年01月号
- (6) National Academy of Public Administration, “Deciding for the Future: Balancing Risks, Costs and Benefits Fairly Across Generations,” 1997
- (7) OECD/NEA, “Disposal of Radioactive Waste An Overview of the Principles Involved” 1982
- (8) OECD/NEA, “The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal A Collective Opinion of the NEA Radioactive Waste Management Committee,” 1995
- (9) KASAM/SKN, “Ethical Aspects on Nuclear Waste, SKN Report 29” 1988
- (10) United Nations, “Report of the World Commission on Environment and Development “Our Common Future,”” 1987
- (11) IAEA, “The Principles of Radioactive Waste Management” Safety Series No.111-F, 1995

高温ガス炉から供給される水素の経済性評価

石本 祐樹 (プロジェクト試験研究部
主任研究員)



1. はじめに

「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)の第4次評価報告書でも述べられているように、人為起源の温暖化ガスによる地球温暖化の兆候が多く観測され、また、京都議定書の第一約束期間が始まり、これまで以上に温暖化ガスの排出抑制が求められている。したがって温暖化ガスの中でもその温室効果の主要部分を占める二酸化炭素(CO₂)の排出量の低減が必須である。これを実現するためには、エネルギー需要および供給の両面から長期を見据えた取組みが必要となる。

さらに近年、エネルギー・資源の枯渇問題が表面化している。中国やインド等の旺盛なエネルギー需要は原油および資源の需給のタイトな状態を作り出し、世界経済の動向も織り込みながら価格は乱高下を繰り返している。したがって、エネルギー自給率の低いわが国においても、長期にわたるエネルギーの安定供給を実現することがこれまで以上に求められている。

水素エネルギーは、燃焼(化学反応)時に温暖化ガスを排出しないという優れた環境特性と、再生可能エネルギーを含む多様な一次エネルギーから製造可能という供給安定性から、地球温暖化対策・エネルギー安定供給に貢献できるエネルギー媒体として期待されている。水素の利用機器としてまず挙げられるのは、各種の燃料電池である。輸送部門では、燃料電池自動車(FCV)や直接水素を燃焼さ

せる水素エンジン自動車の開発が進められており、電気自動車、ハイブリッド自動車と並んで次世代燃料自動車の一翼を担っている。民生・業務部門では、コージェネレーションの定置用燃料電池の実証事業が進められており、民生・業務部門へのCO₂排出低減対策の1つとして期待されている。

水素は多様な一次エネルギーから供給することができるものの、コストの観点から世界で供給されている年間約4,000万トンのほとんどは化石燃料由来である。理想的には水素はCO₂を排出しない一次エネルギー源から製造されることが望ましい。太陽光、風力、バイオマス等の再生可能エネルギーから水素を製造する研究が進められているが、エネルギー密度の小さい再生可能エネルギーをいかに安価に集約するかが最大の課題であろう。

一方、CO₂を排出しない有力な一次エネルギー源として、原子力の研究開発が活発に進められている。そこで、CO₂を排出しない水素製造法として導入が期待される高温ガス炉を用いた水素製造法の経済性の評価を行った。なお、本稿は、平成16年度に高温ガス炉プラント研究会(RAHP, Research Association of High Temperature Gas Cooled Reactor Plant)より受託した委託研究の成果の一部を本誌向けにまとめたものである。

2. 高温ガス炉による水素製造

水の直接熱分解には2,500℃以上の温度が必

要であるため、反応温度を1,000℃以下に下げ
る試みがなされてきた。原子力を利用した水
素製造法としては、水電解の他、原子炉から
の核熱を利用した熱化学法と高温水蒸気水電
解および水蒸気改質が考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。原子
力発電による水電解は現在でも実現可能な技
術だが、全体の効率は低くなるため高コスト
となり利用には至っていない。また、水蒸気
改質は吸熱反応に必要な燃料を節約できるが、
化石燃料から完全には脱却できない。高温水
蒸気電解は、米国の原子力水素イニシアチブ
において熱化学法と並行して研究が進められ
ているが、本稿では日本原子力研究開発機構
(JAEA) を中心に開発が進められている熱化
学法を検討する。

高温の熱源を利用して複数の化学反応の組
み合わせで水を分解する熱化学法は、発電と
水電解の組み合わせよりも高い効率が期待さ
れるが、軽水炉から供給される熱源の温度で
は適用できなかった。一方、軽水炉とは異な
る方式で、約900℃のヘリウムを冷却材とする
高温ガス炉の開発が進められており、高効率
のヘリウムガスタービンによる発電のほか、
高温の熱を利用した各種化学反应用途への熱
供給も想定されている⁽³⁾。

熱化学法は、複数の反応を組み合わせた熱
化学反応サイクルを用いて、熱エネルギーの
みで水を分解する方法である。熱源として太

陽熱も考えられているが、ここでは原子力を
前提として記述する。硫黄とヨウ素を用いる
IS法が最も検討が進んでおり、高温ガス炉を
熱源として900℃における予想効率は43%で
ある。図1にIS法のプロセスの概念図を示す。
図1に示すように、100℃近傍のブンゼン反応、
約400℃のヨウ化水素の分解反応、900℃近傍
の硫酸の分解反応からなり、水を分解するた
めに硫黄とヨウ素を全体の反応の中でリサイ
クルして使用する。当面の開発目標は、原子
力発電と水電解を組み合わせた場合の効率で
あろう（約28%＝原子力発電熱効率34.5%×
水電解効率80%）。国内では、JAEAを中心に
研究が進められており、実験室規模の装置に
おいて電気ヒータで熱を供給し、30ℓ/時の水
素の連続製造（約1週間）が可能となってい
る。ヨウ化水素と硫酸を高温で用いることか
ら非常に厳しい腐食環境であり、耐食材料開
発も大きな課題であったが、セラミック製硫
酸分解器やガラスライニング材の開発が進み、
技術的には全体の反応を組み合わせた実証実
験が行える段階に近い⁽⁴⁾。

原子力委員会に提出されたロードマップで
は、高温ガス炉は2030年の商業運転開始とな
っている⁽⁵⁾。また、国際的にも研究開発が進
められ米国やEUでも水素製造を目的とした高
温ガス炉のプロジェクト研究が進められてい
る。

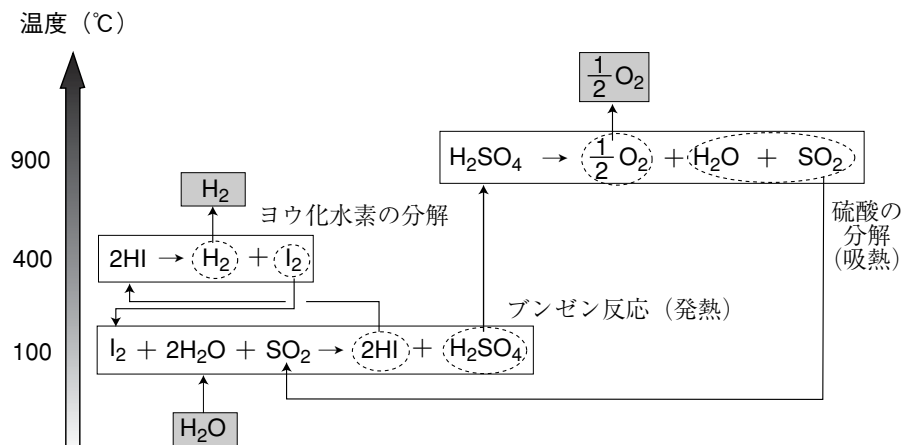


図1 IS法の反応概要

3. 経済性の評価

(1) 水素供給コスト評価の枠組み

本稿で用いたオフサイト水素製造供給における価格試算スキーム⁽⁶⁾の概念図を図2に示す。水素がFCV等で利用されるまでには、製造、精製・圧縮・貯蔵・充填、輸送、ステーションの工程が存在する。それぞれの工程の費用は、設備建設費、変動費、人件費から構成される。表1に設備建設費、変動費、人件費の内訳を示す。これらの費用を調査し、水素1Nm³当たりの費用に変換する。その総和を水素供給コストとした。本稿では必要な経費を積み上げて水素供給に必要なコストを試算しているため、この金額が市場価格ではないことに留意されたい。市場価格は、顧客がい

くらなら買ってくれるかという条件が加わる。さらに、本稿で試算する水素供給コストには、いわゆるガソリン税に相当する税を加算していないことも付記しておく。

(2) 高温ガス炉によって製造された水素の供給コスト

JAEAが現在開発中の高温ガス炉の場合、熱出力は60万kW級の小型炉として設計されており、水素専用プラントと電力と水素を併産するコージェネプラントなどがある。高温ガス炉核熱利用のISプロセスで製造したプラント出口における水素供給コストの試算結果は、文献(7)の値を使用した。専用プラントおよびコージェネプラントのISプロセス出口における水素仕様を表2に示す。文献(8)において高

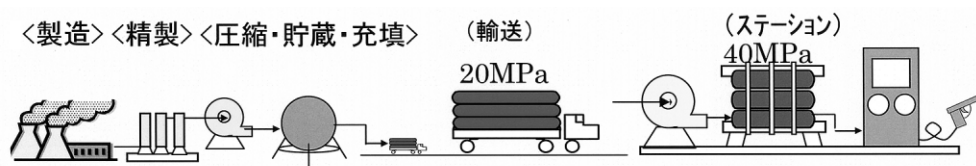


図2 オフサイト水素製造の供給コスト試算スキーム

表1 オフサイト水素製造供給における価格試算における費用内訳

工程	費用項目	内容の例
製造	設備建設費 変動費 人件費	原子炉本体，ISプラント本体，計装機器，工事費，ユーティリティ費，諸経費 [※] 燃料費，上水，工水等 運転要員
精製	設備建設費 変動費 人件費	PSAユニット，工事費，諸経費 [※] 電力量料金，上水，工水 運転要員
圧縮 貯蔵 充てん	設備建設費 変動費 人件費	コンプレッサー，諸経費 [※] 等 電力量料金，上水，工水 運転要員
輸送	設備建設費 変動費 人件費	トラクタ，トレーラー，諸経費 [※] 等 燃料費 運転要員
供給	設備建設費 変動費 人件費	圧縮機，蓄圧器，ディスベンサー，ユーティリティ設備，工事費，諸経費 [※] 電力量料金，上水，工水 運転要員

※諸経費：減価償却費，固定資産税，保険，定期点検補修費，事業報酬，一般管理費

表2 ISプロセス出口 水素仕様⁽⁷⁾

	専用プラント	コージェネプラント
水素価格	18.3円/Nm ³ -H ₂	21.5円/Nm ³ -H ₂
純度	99%	
圧力、温度	2MPa, 40℃	

温ガス炉から供給される電力コストが詳細に評価されており、電力原価は約4円とした。

また、ISプロセス出口における水素の圧力、温度は、2MPa, 40℃と仮定した。

精製から水素ステーションまでの工程については、下記に示す学習効果によりコストが低減されるとして評価した。学習効果とは、生産数の増大や普及に伴う技術進展や習熟度の向上等によるコスト低減である。下記の式から進歩指数と累積生産量から製品のコストを見積もることができる。

$$Y_i = Y_1 \times X_i^{-\gamma}$$

$$\left(\begin{array}{l} Y_1 : \text{第1番目の製品のコスト} \\ Y_i : \text{第}i\text{番目の製品のコスト} \\ X_i : \text{第}i\text{番目の累積生産量・生産数} \\ \gamma : -\log F / \log 2 \text{ (}F\text{ : 進歩指数)} \end{array} \right)$$

Fは進歩指数と呼ばれ、累積生産量が2倍となった時のコストの割合であり、進歩指数がコスト低下の度合いを示す。Fが1の場合はコスト低下なし、1より小さくなるにつれて同一累積生産数に対するコスト低下が進むことを示している⁽⁹⁾。なお、各部品の累積生産量に直接影響する水素ステーションの導入台数

は、燃料電池実用化戦略研究会で議論された値（2020年 約3,500カ所、2030年 約8,500カ所）を利用した⁽¹⁰⁾。

この価格試算スキームに基づき、下記の操作で水素をFCVに供給した際の価格を求めた。

- ① プラント内純度99.999%で精製
- ② 高圧（19.6MPa）容器カードルに充填
- ③ ステーションへ高圧カードルローダーを陸送移送（50km, 100km, 200km）
- ④ ステーションで昇圧（40MPa）し、蓄圧器へ貯蔵後、FCVへ供給

陸送距離50kmの場合、信号等がある一般道を平均して時速20kmで走行し、100km, 200kmでは、一部高速道路を使用し、平均して時速40kmで走行することとした。本稿では2030年を中心に想定しているため、水素ステーションの供給規模は500Nm³/hとした。

表3、図3に2030年における水素生産専用プラントケースにおける輸送距離100kmの場合の水素供給コストの内訳を示す。水素1Nm³当たりの水素供給コストは63.8円であり、水素ステーション、輸送、製造、精製～充填の順でコストがかかるが、水素ステーション、輸送、製造については、コストに大きな偏りはなく、重点的にコスト低減をする部門を特定することは難しいと思われる。一方、内訳の明らかでない製造部門を除いても、設備建設費が27.4円/Nm³と供給コスト全体の約40%を占めており、設備建設費の低減がコスト削減に有効であるといえる。

表3 水素生産専用プラントケース（2030年、輸送距離100km）のコスト内訳

	製造	精製・圧縮・貯蔵・充填	輸送（100km）	ステーション
設備建設費	18.3	1.4	12.1	13.9
変動費		1.6	2.9	3.2
人件費		0.02	4.7	5.7
合計	18.3	3.0	19.7	22.8

（単位：円/Nm³-H₂）

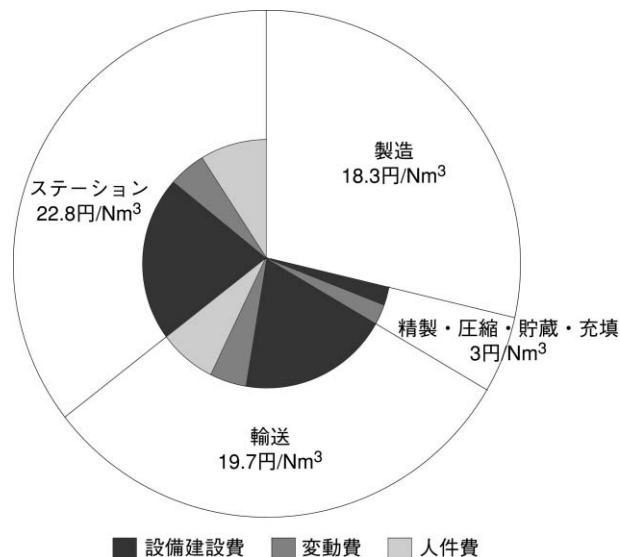


図3 水素生産専用プラントケース（2030年，輸送距離100km）のコスト内訳

表4 高温ガス炉 水素供給コスト

輸送距離 (片道)	2020年		2030年	
	専用プラント	コージェネプラント	専用プラント	コージェネプラント
50km	63.2	66.9	62.4	66.0
100km	64.7	68.3	63.8	67.5
200km	74.7	78.4	73.9	77.6

(単位：円/Nm³-H₂)

2020年，2030年度の試算結果を表4に示す。専用プラント，コージェネプラントとも2030年価格が2020年価格に比べ，1円/Nm³-H₂程度安くなっている。これは，ステーション数の増加に伴う上述の学習効果（大量生産による価格低減効果）によりステーション設備費が下がったためである。

輸送距離が50kmから100kmに伸びても，価格上昇は1.5円/Nm³-H₂程度に収まるのに対し，100kmから200kmに伸びると，10円/Nm³-H₂程度の上昇となる。これは，輸送距離が50km，100kmでは，輸送にかかる時間がどちらも5時間（50km×2／20km/時=5時間，100km×2／40km/時=5時間）であるのに対し，200kmでは10時間（200km×2／40km/時=10時間）を要するため，同量の水素を配給する

場合でも必要牽引車台数，運転員人数等が，2倍必要であるためである。

（3）その他のCO₂排出を伴わない水素製造プロセスとの比較

比較のために，表5の4つのプロセスで水素供給コストを試算した。ここで(a)～(c)の水素製造プロセスではCO₂排出を伴わない。

(a)の水素コストについては，文献(3)のデータを用い，日本の石炭価格に基づき試算した。(b)のCCSコストは，文献(12)における同一プロセスについてCCSの有無によるコスト差から約2.3円/Nm³-H₂と見積もられた。(d)は，炭素の回収隔離（CCS, Carbon Capture and Sequestration）は行なわないものの，価格競争力のあるオンサイト天然ガス改質型水素ステ

表5 水素コスト検討のための4システム

オフサイト型水素ステーション
(a) 石炭ガス化+CCS
(b) 天然ガス改質+CCS
オンサイト型水素ステーション
(c) アルカリ水電解（海外メーカ水電設備ベース）
(d) 天然ガス改質

表6 原燃料・エネルギー価格（2004年）

	重量単価 (円/kg)	熱量単価 (円/千kcal)
石炭	5.97	0.94
LNG	29.7	2.28
	基本料金 (円/kW・月)	従量単価 (円/kWh)
電力	1,175	9.76

※石炭、LNG価格は、2006年版「EDMCエネルギー・経済統計要覧」のCIF価格

表7 対象プロセスでの水素供給コスト

(単位: 円/Nm³-H₂)

	オフサイト供給								オンサイト供給					
	輸送距離 (片道)	(a)石炭ガス化+CCS			(b)天然ガス改質+CCS			(c)アルカリ水電解			(d)天然ガス改質			
2020年	50km	66.6			70.2			電気料金または天然ガス 価格の水準（対2004年） 0.5倍 1 倍 2 倍			電気料金または天然ガス 価格の水準（対2004年） 0.5倍 1 倍 2 倍			
	100km	原料価格水準（対2004年） 0.5倍 1 倍 2 倍			原料価格水準（対2004年） 0.5倍 1 倍 2 倍									
			65.2	68.0	73.7	67.5	71.7	80.0	64.3	87.2	132.9	46.7	55.1	72.0
		200km	78.1			81.7								
2030年	50km	65.7			69.4			電気料金の水準 (対2004年) 0.5倍 1 倍 2 倍			—			
	100km	原料価格水準（対2004年） 0.5倍 1 倍 2 倍			原料価格水準（対2004年） 0.5倍 1 倍 2 倍									
			64.3	67.2	72.9	66.7	70.8	79.1	63.4	86.3				132.0
		200km	77.3			80.9								

ーションの価格である。ただし、文献(11)の値を利用したため、水素供給コストは2020年のみである。

また、変動費は、表3、表6に示したようにわが国の条件を考慮したが、(a)については文献(12)における米国でのコスト評価であり、設備費や人件費が国内調達の場合と異なる可能性があることに留意されたい。

なお、4つのプロセスとも水素製造プラントの後段の工程は、高温ガス炉と共通である。

石炭、天然ガス、電力価格は表6に示す2004年ベースの価格を用いた⁽¹³⁾。天然ガスは、LNG価格に加工費5.5円/kgを追加した価格とした。本評価における想定では、高温ガス炉による水素生産が始まるのは、2020年以降であるが、この時点における精度の高い化石燃料価格予測は困難であるため、ここでは化石燃

料価格が半分および2倍になった場合についての感度分析を行なった。試算結果をオフサイト供給、オンサイト供給について、それぞれ表7に示す。

表4、表7に示した水素供給コストのうち、輸送距離100kmの場合の試算結果を、図4に示す。また、原料の価格（石炭、天然ガス、電力）を2倍とした場合と、半分とした場合の試算結果もあわせて示す。

表4、表7ならびに図4に示すように、現状のエネルギー価格（2004年水準）を前提とした場合でも、高温ガス炉水素供給コストは、他のCO₂排出を伴わないプロセスの水素供給コストとほぼ同等か若干安価に試算され、経済的な観点から高温ガス炉由来の水素の競争力が期待できる結果となった。

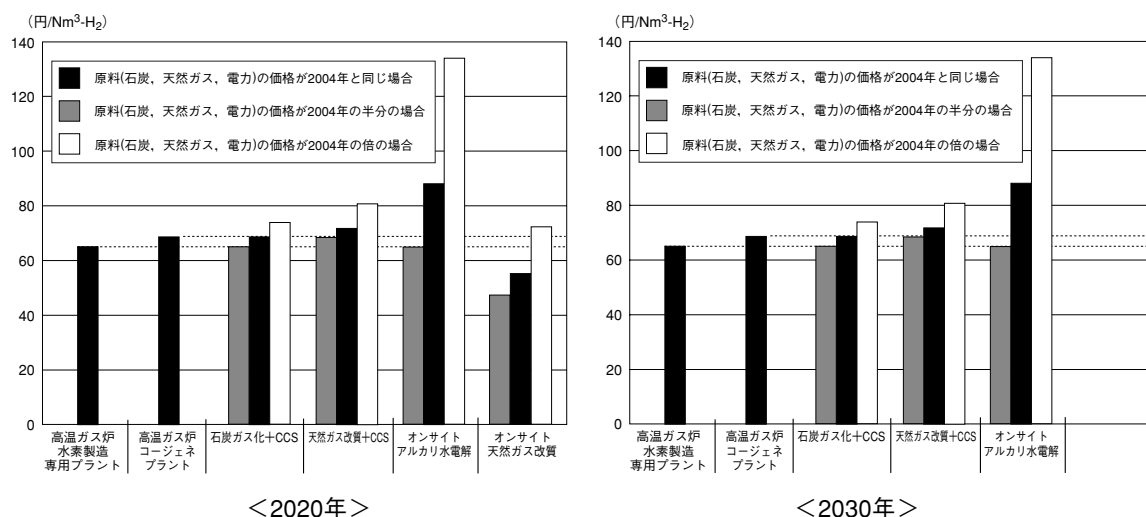


図4 水素供給コストの比較（輸送距離100km）

4. おわりに

高温ガス炉の核熱を利用する水素供給コストを試算した結果、化石燃料を原料とする大規模水素製造と比べても競争力のある結果となった。安全対策も含めた高温ガス炉と化学プラント間のインターフェースや社会受容性など本稿で検討できなかった課題もあるが、化石燃料価格・需給の動向によっては、大量の需要に対応できる水素製造方法となりえると考えられる。また、今後は化石燃料価格の上昇・高止まりも予想されるため、その優位性は強まってゆくものと考えられる。

参考文献

- (1) 原子力水素研究会 編, 「原子力による水素エネルギー」 180ページ2002年6月, 原子力システム研究懇話会
- (2) 堀雅夫, 「原子力を利用する水素製造技術」, 燃料電池 Vol.6, No.2, Autumn 2006
- (3) (独) 日本原子力研究開発機構ホームページ, <http://www.jaea.go.jp>
- (4) 寺田敦彦他, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 5, No. 1 (2006) p. 68
- (5) 内閣府第31回原子力委員会定例会議, 資料2-1, 2008年7月15日
- (6) NEDO技術開発機構, H15年度～H16年度成果報告 水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発, 「水素シナリオの研究」, 平成17年3月, 本編 p.278
- (7) 原子力EYE, Vol.53, 2007年, p.14
- (8) 武井正信他, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 5, No. 2 (2006) p.109
- (9) NEDO技術開発機構, H15年度～H16年度成果報告 水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発「水素シナリオの研究」, 平成17年3月, 本編 p.56
- (10) 第12回燃料電池実用化戦略研究会, 資料6-1, 2004年3月11日
- (11) NEDO技術開発機構, H17年度～H18年度成果報告 水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発「水素供給価格シナリオ分析等に関する研究」, 平成19年3月, p.1-8
- (12) IEA, Prospects for Hydrogen and Fuel Cells, 2005, p54
- (13) EDMC/エネルギー・経済統計要覧〈2006年版〉, 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット(編集)

研究所のうごき

(平成20年7月2日～10月1日)

◇ 第30回評議員会

日 時：7月17日（木）11:00～12:10

場 所：経団連会館（9階）901号室

議 題：

第一号議案 役員の一部選任について

第二号議案 評議員の一部交替について

第三号議案 平成19年度事業報告書および決算報告書について

第四号議案 NUPEC残余財産の一部を基本財産に繰り入れることについて

第五号議案 その他

◇ 第73回理事会（臨時）

日 時：9月5日（金）11:30～12:20

場 所：経団連会館（9階）906号室

議 題：

第一号議案 NUPECからの承継財産の運営管理について

第二号議案 その他

◇ 第31回評議員会（臨時）

日 時：9月5日（金）14:00～14:30

場 所：経団連会館（9階）902号室

議 題：

第一号議案 NUPECからの承継財産の運営管理について

第二号議案 その他

◇ 第14回賛助会員会議および創立30周年記念

パーティー

日 時：9月18日（木）15:30～19:30

場 所：千代田放送会館

議事次第：

1. (財)エネルギー総合工学研究所の調査研究活動の状況について

2. 研究報告「合成液体燃料 (XTL)の将来を読む」

3. 講演「気候変動枠組条約交渉の動向と地球温暖化対策」
(資源エネルギー庁次長 本部和彦 氏)

◇ 月例研究会

第269回月例研究会

日 時：7月25日（金）14:00～16:00

場 所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 分散型電源普及拡大に必要な配電線電圧対策について

(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 浦田浩孝)

2. 原子力分野における安全解析技術と他分野への応用展開

(財)エネルギー総合工学研究所 原子力工学センター 安全解析グループ部長 内藤正則)

第270回月例研究会

日 時：8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. 石油開発分野における注目される国産技術

((独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油開発技術本部 R&D推進部 石油工学研究課 課長 市川 真 氏)

2. カナダにおけるオイルサンド開発

(石油資源開発(株) 開発本部 操業管理部カナダグループ長兼カナダオイルサンド(株) 開発部長 中村常太 氏)

第271回月例研究会

日 時：9月26日（金）14:00～16:00

場 所：航空会館5階501・502会議室

テーマ：

1. 瀬戸際にあるわが国の風力開発

((株)HIKARUWIND.LAB 取締役代表, (独)産業技術総合研究所 客員研究員) 松宮 輝 氏)

2. 太陽熱発電 (CSP) 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 主管研究員 吉田一雄)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：内藤正則, 上原 靖, 内田俊介, 岡田英俊

テーマ：連成解析による気液二相流中構造物の振動・腐食評価手法の開発

[第3報] 流動解析と腐食解析の連成による単相および二相流中での配管減肉速度評価 (内藤正則)

[第4報] 乱流に起因する質量移行係数の評価 (上原靖)

[第5報] 電気化学モデルと二層酸化皮膜モデルを連成させた配管減肉速度評価 (内田俊介)

[第6報] 二相流での配管減肉評価モデル (発表者：岡田英俊)

発表先：日本保全学会 第5回学術講演会

日 時：7月10日

発表者：石本祐樹

テーマ：水素拡散, 燃焼基礎物性の研究について

発表先：福岡水素エネルギー戦略会議研究分科会

日 時：7月30日

発表者：徳田憲昭

テーマ：電力系統での新エネルギー拡大に必要な対策について

発表先：第25回太陽光発電システムシンポジウム
日 時：7月31日～8月1日

発表者：笠井 滋

テーマ：世界標準を獲得し得る次世代軽水炉の技術開発

発表先：日本原子力学会中部支部「先端技術と原子力」研究専門委員会

日 時：8月22日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：世界の地球環境・エネルギー動向と原子力発電

発表先：日本原子力学会 原子力発電部会 夏期セミナー

発表日：8月25日

発表者：徳田憲昭

テーマ：複数の風力発電機の系統連系を想定した限流動作に関する一考察

発表先：電気設備学会全国大会

日 時：9月4日～5日

発表者：時松宏治

テーマ：「持続可能な発展」指標の将来値の推計方法に関する研究

発表先：(社)環境科学会 2008年会

日 時：9月18日

発表者：浦田浩孝

テーマ：海外のスマートメーターの導入状況等

発表先：JEMICフォーラム2008

日 時：9月25日

発表者：時松宏治

テーマ：「持続可能な発展」指標の将来値の推計方法に関する研究

発表先：環境経済・政策学会 2008年大会

日 時：9月27日～28日

[論文・寄稿]

発表者：福田健三、小野崎正樹、村田謙二、石本祐樹、坂田興

テーマ：とことんやさしい水素の本

寄稿先：日刊工業新聞社（2008年6月）

発表者：石本祐樹

テーマ：水素エネルギー技術開発はどこまで進んだのかー現状と展望ー

寄稿先：「電気管理技術」（2008年7月号）

発表者：高倉 毅

テーマ：新エネルギーの開発・導入と今後の見通し

寄稿先：「化学経済」（2008年8月号）

発表者：坂田興

テーマ：2007年の水素

寄稿先：「日本エネルギー学会誌」（2008年8月）

発表者：徳田憲昭

テーマ：特集企画 化石燃料への依存度を減らすために [総論]：「化石燃料代替技術とエネルギー有効利用」

寄稿先：「電気協会報」（2008年8月）

発表者：小野崎正樹（分担執筆）

テーマ：第4章 石油・天然ガス代替燃料と化学原料製造技術

寄稿先：「図解 クリーンコールテクノロジー」（株）工業調査会（2008年8月）

◇ 人事異動

○7月31日付

（兼務解嘱）

山田英司 原子力工学センター長兼務解嘱

○8月1日付

（就任）

田中隆則 理事兼原子力工学センター長

○9月26日付

（出向解除）

山崎 毅 企画部長兼プロジェクト試験研究部長（主席研究員）

○9月27日付

（兼務）

山田英司 専務理事兼プロジェクト試験研究部長（採用）

山崎 毅 企画部長（副主席研究員）

○9月30日付

（出向解除）

井上 隆 プロジェクト試験研究部兼原子力工学センター主管研究員

○10月1日付

（嘱託採用）

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

編集後記

北京オリンピックが無事終了した。中国の国を挙げた取組みに、世界の人が圧倒されるような印象を持つ場面が少なからずあったのではないかと。大気汚染やテロを抑え込む努力の他にも、競技場に雨を降らせないようにする人工降雨策がとられたと報道されている。北京に近づく雲にロケットでヨウ化銀を打ち込み、事前に雨として降らせてしまおうというもので、技術的には特に新しい点はないようだ。その成果か否かは別として、実際に北京の周辺で降雨が観測され、北京市内では雨が降らなかったと言われる。人間の力で自然を捻じ伏せる、あるいは力を使うことを躊躇しないことは、さすが万里の長城を造った国であると思わせる。緑豊かな自然の中に生きてきた記憶を持つ日本人があまり自然と対決しないのに比べて、中国は欧米に近いなあ、と。

話は変わるが、地球温暖化について

「全球平均の年平均気温を、産業革命前と比べて2℃以内の上昇に抑える」というアイデアも、自然を制御するという意味で同列のものと言えるかもしれない。日本人の感覚に馴染みにくい、あるいは民族の性格に根ざす奥深いことだからといって、自然との対決を回避することも許されない中、「2℃コンセプト」に大きく矛盾しないような日本型の温暖化防止策が模索されているのが、今日のわが国の状況なのだろう。

一方、さすがの中国もオリンピック3カ月前の四川大地震という自然現象には為すすべも無かったが、中国が現在の国力と自然との対決姿勢をもって地震予知に取り組めば、わが国が長年掛かって越せない壁を乗り越えられるのではないかというのは、荒唐無稽な想像だろうか。

編集責任者 疋田知士

季報 エネルギー総合工学 第31巻第3号

平成20年10月20日発行

編集発行

財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋 1-14-2

新橋SYビル（8F）

電話（03）3 5 0 8—8 8 9 4

FAX（03）3 5 0 1—8 0 2 1

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

（印刷）和光堂印刷株式会社

※ 無断転載を禁じます。