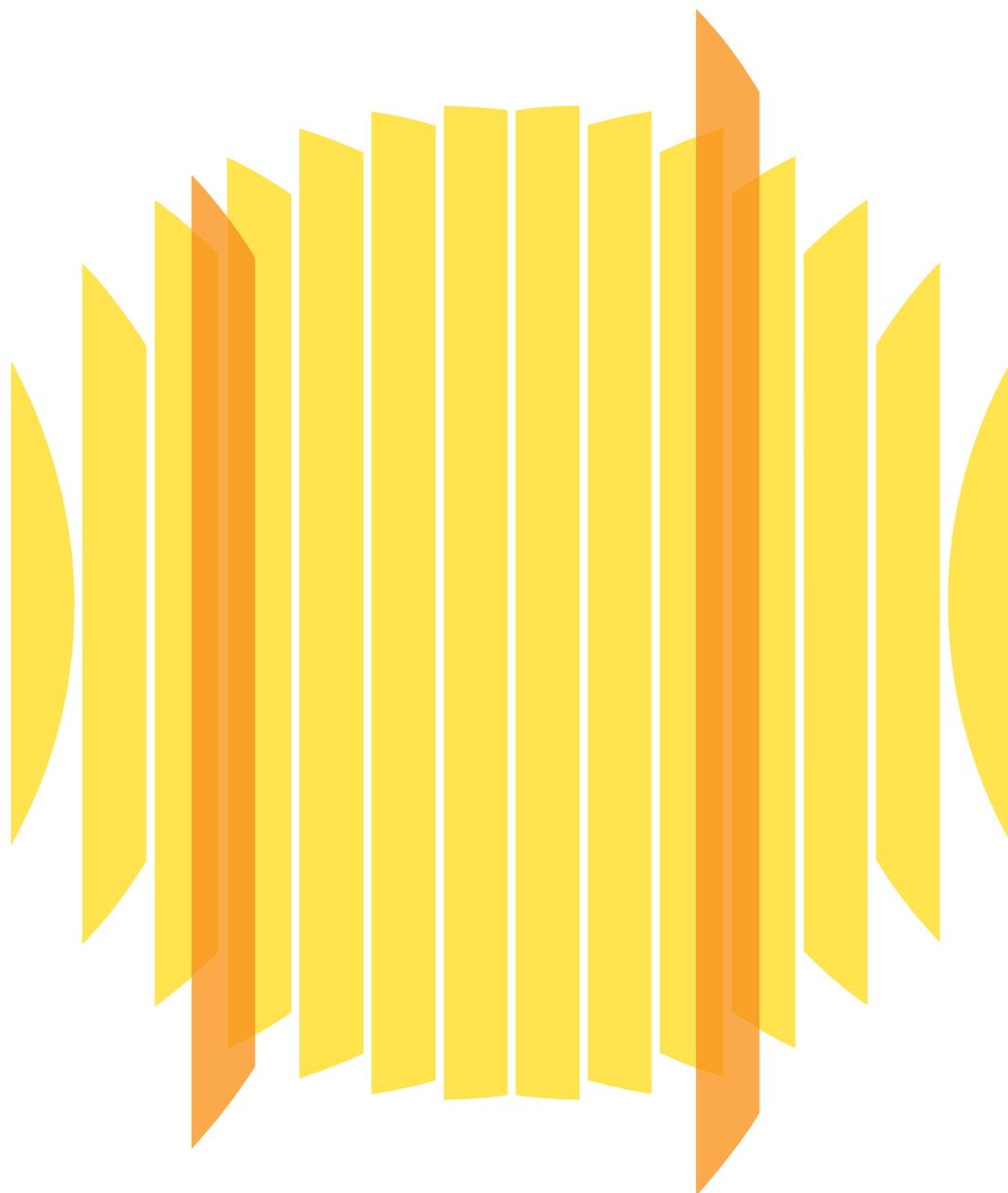


# 季報 エネルギー—総合工学

Vol. 36 No. 3 2013.10.



一般財団法人 エネルギー—総合工学研究所  
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

# 目 次

## 【巻頭言】

- エネルギー技術立国としてのトップランナー  
東京農工大学大学院 産業技術専攻 教授 亀山 秀雄 …………… 1

## 【寄稿】

- 地熱エネルギー開発の最新状況  
(独) 産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所  
イノベーションコーディネータ 阪口 圭一 …………… 3

## 【寄稿】

- 大崎クールジェンプロジェクトの概要  
～石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業～  
大崎クールジェン(株) 取締役技術部長 外岡 正夫 …………… 9

## 【調査研究報告】

- バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発  
～総合調査研究～事業の成果概要  
プロジェクト試験研究部 部長 徳田 憲昭  
プロジェクト試験研究部 主任研究員 森山 亮 …………… 17

## 【調査研究報告】

- 福島事故後の欧州原子力発電所における  
安全性向上策の状況  
プロジェクト試験研究部 主管研究員 木村 公隆 …………… 28

## 【調査研究報告】

- 福島第一原子力発電所の事故の要因と  
シミュレーションによる事故事象の解析  
原子力工学センター 安全解析グループ 部長 内藤 正則 …………… 37

- 【研究所のうごき】 …………… 50

- 【編集後記】 …………… 52

# 巻頭言

エネルギー技術立国としてのトップランナー

亀山 秀雄 (東京農工大学大学院  
産業技術専攻 教授)



日本の経済成長にとって2020年の東京オリンピック開催の決定は強力な起爆剤になると思われる。世界が注目するこのスポーツの祭典で日本の復興の姿を見てもらうというミッションとともに、世界に対してどのように貢献しているかも示す必要がある。

いま世界は一国では解決できない様々な問題を抱えており、ホリスティックな関わり合いの中で協力して解決する時代である。日本ができることはなにかと考えた場合、環境技術と省エネルギー技術があると言える。この2つは、世界のトップに行く技術を有する国として自他共に認めている日本の強みである。

特に、省エネルギー技術は、震災を契機としたエネルギー構造の大変革の中で、今まで以上に強化することが求められている。経済産業省は、平成26年度予算の概算要求で、前年度比1.2倍(3,099億円増)となる1兆7,470億円を要求する方針であり、この概算予算では、「エネルギー最先進国」実現に向け、省エネ・再生エネ投資促進に重点配分している。説明の中で、エネルギー源の多角化、安定的かつ低廉な「生産(調達)」と、最適・効率的かつ強靱なエネルギーの「流通」、スマートな「消費」により、「多様な供給体制とスマートな消費行動を持つエネルギー最先進国」を目指すとしている。

このような大型予算は、プロジェクトレベルのマネジメントでなく、プログラムレベルで総括的にマネジメントを行う必要があり、プログラム評価とプログラムマネジメント力が必要であり、予算配分だけでなく適切なマネジメント人材の配置が必要である。また、社会インフラの整備も含めて日本を改革する内容であるので、経済産業省始め他の省庁との連携によってこそ成果が挙げられると思う。

省エネルギーに関して言えば、身近なトップランナーの個別省エネルギー技術導入だけでなく、企業や地域との連携による省エネルギーの実現や再生可能エネルギーによる省化

石エネルギー技術開発の先行投資も含まれている。今年から始まった先端的低炭素化技術開発（ALCA）特別重点技術領域「エネルギーキャリアプログラム」は、将来の日本のエネルギーの有りたい姿を実現するための長期プログラムである。研究開発期間は、当初5年（最長10年）、年間研究開発費が2～5億円／チームとなっている。このプログラムは、温室効果ガスの排出量削減を中長期にわたって継続的かつ着実に進めていくために、新たな科学的・技術的知見に基づいて温室効果ガス排出量削減に大きな可能性を有する技術を創出するための研究開発を推進して、グリーン・イノベーションの創出につながる研究開発成果を得ることを目的とするものであり、経済産業省と文部科学省が連携して行う初めての大型プログラムである。

このようなエネルギープログラムが持続的に継承されることで、将来の省エネルギー技術を日本で生み出すことになり、エネルギー最先進国のトップランナーを維持できることを期待している。

[寄稿]

## 地熱エネルギー開発の最新状況



阪口 圭一 (独) 産業技術総合研究所  
福島再生可能エネルギー研究所  
イノベーションコーディネータ

### 1. はじめに

2011年東日本大震災とその後の福島第一原子力発電所の事故以降、再生可能エネルギーへの注目と期待が急速に高まっている。その中で地熱発電も各種のメディアに取り上げられることが多くなった。日本では、2012年3月現在、自家用を含めて17カ所の地熱発電所が稼働しており、認可出力合計は約52万kWである。これは日本の発電設備容量の0.2%程度であり、火山国日本としてはあまりに少ない数字だという声も多い。本稿では、地熱発電と地熱資源の特性という視点に基づいて、地熱資源の一層の活用に向けての課題を考えてみたい。

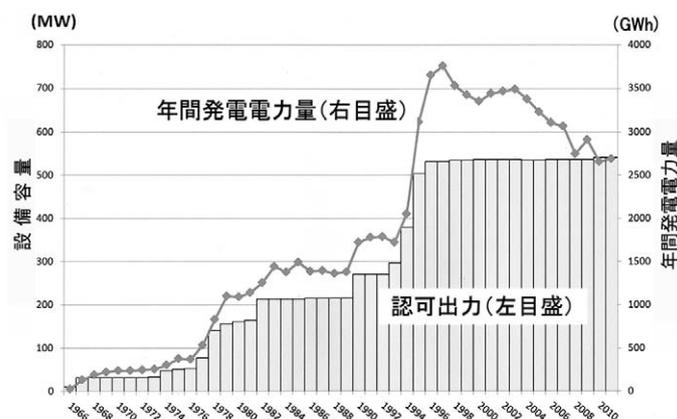
### 2. 世界と日本の地熱開発

世界最初の地熱発電実験はイタリア、トスカナ地方のラルデレロで1904年に行われ、

同地で地熱発電所が操業を開始したのが1913年であるので、地熱発電はちょうど1世紀の歴史を持つ。日本では、別府、熱海などでの初期の実験を経て、1966年に岩手県の松川地熱発電所が日本初の地熱発電所として運転を開始した。すなわち、日本でもほぼ半世紀の運転実績がある。

1970年代の石油ショックを契機として、石油代替エネルギーを開発するための「サンシャイン計画」および「ニューサンシャイン計画」が実施された。地熱は太陽光、石炭液化、水素などとともに同計画に取り入れられ、2000年頃まで国による種々の技術開発が行われ、並行して有望地域の調査も実施された。これにより、1980～90年代に各地に地熱発電所が建設された(図1参照)。

しかし、2002年に、地熱発電開発には更なる技術開発は不要という理由で国の地熱技術開発予算が打ち切られた。同時期の経済の落



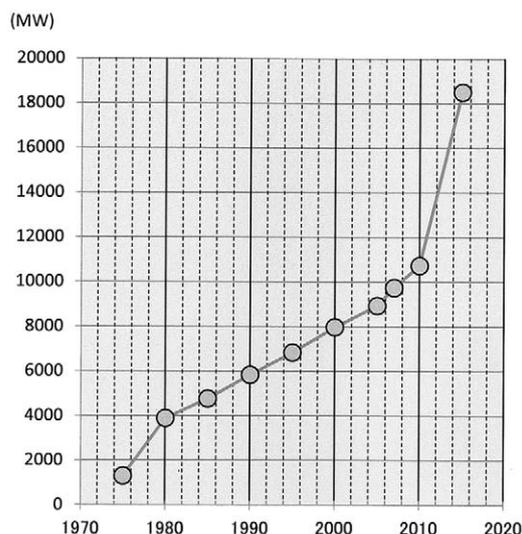
(出所：火力原子力発電技術協会(2013)を基に作成)

図1 日本の地熱発電設備容量と年間発電電力量の推移<sup>(1)</sup>

ち込みによって企業の開発活動も不活発になり、1999年の八丈島地熱発電所を最後に、新たな地熱発電所は建設されていない。

2000年代の後半から地球温暖化対策としての再生可能エネルギーへの関心が高まり、地熱についても、徐々にではあるが見直されることとなった。それを受けて、一部地域において地熱発電所建設を目指した調査・開発が開始された。2010年6月には、より明確に地熱が政策の中に位置づけられた。すなわち、政府が「新成長戦略」を発表し、その中で地熱を含む再生可能エネルギーの開発とそれによる産業創出を「グリーンイノベーション」と位置付けた。時を同じくして、環境大臣が、1973年に当時の環境庁により行われた「1973年当時に運用・開発が実施されていた6地域以外は、国立公園内での地熱開発を当面の間行わない」という通知を見直す、という発言を行った。ただ、「新成長戦略」発表は、再生可能エネルギー開発の好転にはすぐには結び付かなかった。また、再生可能エネルギー全般や地熱に対する施策には統一性が欠けているとしか言えない部分もあり、例えば2010年10・11月に行われた事業仕分けでは、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が実施していた地熱開発促進調査等の廃止が決定されたりした。

そのような中、2011年3月に東日本大震災とその後の福島第一原子力発電所の事故が起き、再生可能エネルギーへの関心と期待が一気に高まることとなった。その後2年余りが経過し、2012年7月には再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT）が開始されたり、再生可能エネルギー導入に向けての各種規制緩和が検討・実施されたりして、再生可能エネルギー利用拡大に向けた動きが継続している。地熱特有の課題について言うと、地熱探査を担当する機関のNEDOから石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）への移行、経済産業省による地熱関連施策・予算の再編・強化、環境省による温泉資源の保護に関する



（出所：Bertani (2007, 2010) を基に作成。2015年の値は Bertani (2010) による推定値）

図2 世界の地熱発電設備容量の推移<sup>(2)(3)</sup>

ガイドライン（地熱発電関係）の通知や、国立・国定公園内の地熱開発についての改訂された通知、などが実施され、東日本大震災以降の地熱開発の新しい環境が定まりつつあり、今後の地熱開発への再スタートを切った状況と言える。

この間、海外では、太陽光発電や風力発電のような指数関数的な増加ではないが、着実に地熱開発が進んでいる（図2参照）。現在、世界の20カ国以上で地熱発電がおこなわれている。各国とも地熱を国産の重要なエネルギー資源とみなし、積極的に開発・利用しようとしている。

### 3. 地熱発電と地熱資源の特性

#### (1) 地熱発電の特性

地熱発電の仕組みについて、多くの読者には既知のことであろうが、まず簡単にまとめておく。地熱発電では、地下に溜まっている熱水や蒸気の溜り（地熱貯留層）までボーリングを掘削し、熱水や蒸気を取り出して発電する。発電を行うためには地下の貯留層での温度は200℃程度以上が必要になる。地熱貯

留層では、200℃を超える高温でも圧力が高いため、多くの場合、熱水は液相もしくは気液2相として存在する。これが地上に噴出する際に減圧されて気化・膨張し、この力によってタービンを回転させて発電する。蒸気によってタービンを回転させて発電する機構は、火力発電や原子力発電と同様である。

地上に取り出した地熱流体が蒸気だけの場合は、その蒸気をタービンに導き発電する（蒸気発電）。地上に取り出した地熱流体が気液2相の場合には、気水分離機で蒸気と熱水を分離して、分離した蒸気でタービンを回す（フラッシュ発電または熱水分離型発電、図3左参照）。現在では、ほとんどすべての場合、資源の保護と場合によっては有害物質（ヒ素など）の隔離のため、熱水は再び地下に還元される。貯留層温度が低く、十分な蒸気量が得られない場合には、熱交換をして低沸点の媒体を蒸発させ、その蒸気でタービンを回して発電する方法（バイナリーサイクル発電、図3右参照）もある。現在の地熱発電ではフラッ

シュ発電が主流で、少数の地域で蒸気発電がおこなわれている。バイナリーサイクル発電は、一般的にはフラッシュ発電や蒸気発電より小規模になるが、近年は導入されるケースが増加している。

地下から適切な量の蒸気を生産していれば、天候に左右されず安定した発電が可能であり、ベースロード電源として使用できる（図4参照）。これが、再生可能エネルギーの中でも地熱発電が持つ最大の特長と言える。設備利用率は、太陽光発電が約12%、風力発電が約20%であるのに対し、地熱発電は約70%と格段に大きい。また、再生可能エネルギーの中でも二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量が少ない特徴を持つ（図5参照）。

火力発電や原子力発電では蒸気を得るために一定の燃料費が必要であり、火力発電用の燃料は今後の価格高騰の懸念もある。地熱発電の場合には熱源は地下のマグマであり、燃料を必要としない。ただし、劣化した坑井の代替井や、生産量が低下した坑井の補充井の

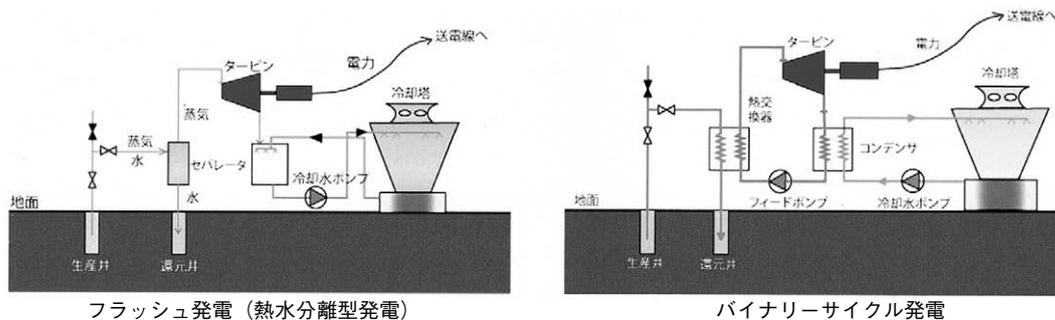


図3 地熱発電の種類

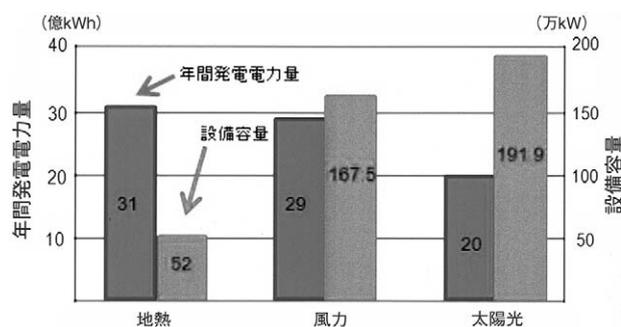


図4 地熱・風力・太陽光発電の設備容量と年間発電電力量<sup>(4)</sup>

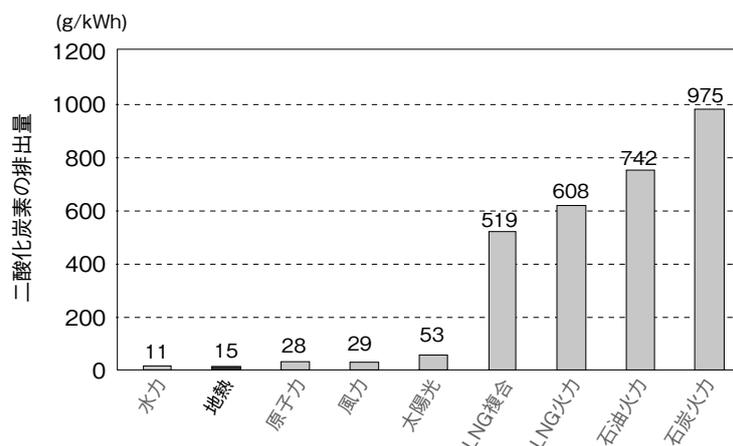


図5 電源別の二酸化炭素排出量<sup>(4)</sup>

掘削が必要になる。それらを含めても、長期間にわたる安定運転が実現できれば、時間の経過と共に経済性が向上する。

## (2) 地熱資源の特性

地熱資源は地下資源であり、地表からの探査を行って有望地域を絞ってゆき、最終的に坑井調査および坑井からの噴気試験を経て資源量を確認し、最終的な開発の判断を行う。そのため、他の再生可能エネルギー開発に比べてリードタイムが長くなり、かつ坑井調査を行うために初期投資が大きくなるというハンディキャップがある。地熱資源の質や規模を評価するための地表探査で得られる単一ないし非常に有効な指標は存在しない。一般的に地下の蒸気・熱水の貯留場所である地熱貯留層は、ある深度（層準）に一様に蒸気・熱水が胚胎しているのではなく、断層周辺や特定の地層・岩体周辺などに発達するき裂群として存在する。坑井から得られるボーリングコアの観察や坑井の検層結果から、ほとんどの場合、個々の割れ目は10cm程

度以下で、き裂群としても数m以下であると考えられている。現状では、その程度の大きさのき裂（群）を地表から捉えることのできる探査法は存在しない。そのため、調査においては多種類の探査結果を総合的に解釈して絞込みや評価を行うことになる。

順調に開発が進んだ場合でも、発電所操業開始までには10年以上の期間が必要である（表1参照）。更に、地熱資源の利用においては、発電所操業開始後の貯留層モニタリングと管理が重要である。地熱発電所の操業のために地下の地熱貯留層から蒸気・熱水を生産し、気液分離した熱水を還元することにより、貯留層内の温度・圧力状態や流体性状など、すなわち資源の状況が変化する。言ってみれば、地熱資源は“生きた地下資源”である。操業開始以降の貯留層データや周辺でのモニタリングデータの蓄積や補充井掘削による地下データの追加等によって、地熱系概念モデルおよび数値モデルを改良し、地熱貯留層およびその地域の地熱系の理解の精度が向上する。

表1 地熱発電所の開発年次展開の例<sup>(5)</sup>

年次	実施内容
1-2	地表調査（地質・地化学調査、物理探査、ターゲット選定）
3-5	地下探査・評価（坑井調査、噴気試験、総合解析）
6-9	環境アセスメント（環境影響評価、温泉影響評価、許認可）
10-12	建設（設計、建設、試運転）
13-	操業（運用、メンテナンス、貯留層モニタリング）

#### 4. 今後の地熱資源利用拡大において立つべき視点

##### (1) 日本の地熱開発における主要な障害

日本の地熱開発における主要な障害として、①（生きた地下資源の）探査・運用リスクが大きいこと、②リードタイムが長く、初期投資が大きいこと、③国立公園内の開発が規制されていること、④地元（特に周辺温泉）との調整が難しいこと、が挙げられている。

①と②を一緒にして3つの障害とすることもありますが、ここでは4課題としておく。また①については開発リスクとして説明されることがほとんどであるが、前項で述べたように、地熱資源利用では発電所の操業開始後の貯留層管理が非常に重要であることから、開発・運用リスクとした。適切な資源量評価を行っていれば、運用期間中の資源管理リスクは開発時の探査リスクに比べて大幅に低いものと考えられる。②については、FIT導入によって状況が大きく改善されたと言えるので、以下では触れない。

##### (2) 地熱資源の効率的で適正な開発と利用

以下の議論を簡単に表2にまとめた。今後の地熱資源利用拡大において立つべき視点を考えた時には、地熱資源の効率的で適正な開発と利用の実現が目指すところとなる。前項①で挙げた探査リスク低減のためには、貯留層を構成する断裂（系）を高精度に探査・検知する技術や、各種データの総合解析から的確に資源の賦存状況抽出やその時点での資源評価を行う技術の開発・向上が必要である。

地熱資源の適正な利用ということでは、①で述べた持続的利用を実現するための技術が挙げられる。ここでは、運用開始後のモニタリングや熱水流動シミュレーション技術などの開発・向上が主要な課題となる。また、地熱資源の適正な利用のための技術には、持続的利用のための技術と共に、③や④に挙げた、自然景観・環境や温泉を始めとする周囲への影響低減や、地元の理解を得るための手法も含まれる。自然公園内での開発制限の問題や温泉との調和の問題は、社会的な制約として捉えられることも多いが、その解決のためには、火山や温泉を含めた対象地域の地熱系全体を理解して、地熱開発の影響の可能性を説明することや、適切なモニタリングの実施とその評価などの技術的支援が不可欠である。発電技術自体はかなり成熟したものと言えるが、自然公園内での開発では、発電設備の小型化など、より一層の環境適合性の向上が求められる。

前に挙げた課題の克服から離れ、より有効に地熱資源を利用しようとする視点では、これまで未利用だった資源の利用を促進する必要がある。1つの例は、最近注目を集めているいわゆる温泉発電（高温温泉を用いたバイナリーサイクル発電）で、国内でも温泉発電を視野に入れた小型の発電システムの開発が相次いでいる。温泉発電はまだ緒に就いたばかりであり、普及拡大にあたって、今後様々な課題が指摘されるであろう。バイナリーサイクル以外の小規模発電や地域密着型の発電・熱利用システムの開発や導入も今後の課題と思われる。その中で、地熱資源は250～

表2 今後の地熱資源利用における目標、キーワードと対象技術

目標、キーワード	対象技術・分野
効率的な資源探査・開発	断裂（系）探査技術、総合解析技術
持続的利用	熱水流動シミュレーション、貯留層管理技術、モニタリング
環境影響低減	タービン・発電機技術、モニタリング、熱水流動シミュレーション
未利用（新）資源の利用	小規模発電システム（温泉発電） 直接熱利用、カスケード利用 EGS関連技術

300℃以下の温度範囲の資源なので、各種の温度域での利用を組み合わせ（カスケード利用）、全体としての利用効率を高める工夫も有効であろう。

更に先を見据えた課題として、地下岩体の透水性を加工・制御して、従来利用してきた蒸気・熱水資源より広い範囲での地熱資源を利用する技術（EGS: Enhanced/Engineered Geothermal System）の開発がある。日本国内でも、過去に高温岩体発電として技術開発が行われてきた。EGS技術には、地下の透水性改善、断裂分布把握、貯留層評価・管理など、現行の蒸気・熱水資源を利用した地熱発電所での持続性確保や規模拡大の技術としても利用価値が高い技術が含まれるので、特別な将来技術ではなく、従来技術の延長として位置付け、将来に向けて技術を向上させていくことが有用と思われる。

## 5. おわりに

地熱発電は過去に、すでに確立した発電技術であるとして新エネルギーの範疇から除外された。現時点では、「新エネルギー」と定義されることの是非を問うても無意味であるが、以下のような認識が社会で共有されることが必要だと考える。

・資源の賦存状況と発電所設置・運営が密接に関連したエネルギー資源であり、資源を適正に、すなわち持続的にかつ環境調和的に、利用するためには、解決すべき技術課題もまだ多くある。

・しかし適切な開発・利用を行うことにより長期間持続可能な安定したエネルギー源として有用である。

言い方を変えれば、社会の共通認識や技術開発によって、真に再生可能なエネルギーに育てていくべき資源である。その解決のため、更なる技術開発は当然必要であるし、地熱資源を有効かつ適正に利用していくためには、地熱資源の特性を正しく理解し、それを活かすような開発方針、施策、制度の策定・整備と組み合わせる進めることが望まれる。

## 参考文献

- (1) 『地熱発電の現状と動向 2012年』, p.95, 火力原子力発電技術協会, 2013年4月
- (2) Bertani, R. (2007) World Geothermal Generation in 2007. Proc. European Geothermal Conference 2007
- (3) Bertani, R. (2010) Geothermal Power Generation in the World - 2005-2010 Update Report. Proc. World Geothermal Congress 2010
- (4) 『地熱発電に関する研究会—中間報告』, p.22, 経済産業省, 2009年  
<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004561/g90609a01j.pdf>
- (5) 『地熱—地域・自然との共生にむけて』, 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC), 2013年3月

[寄稿]

## 大崎クールジェンプロジェクトの概要 ～石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業～

外岡 正夫 (大崎クールジェン㈱)  
取締役技術部長

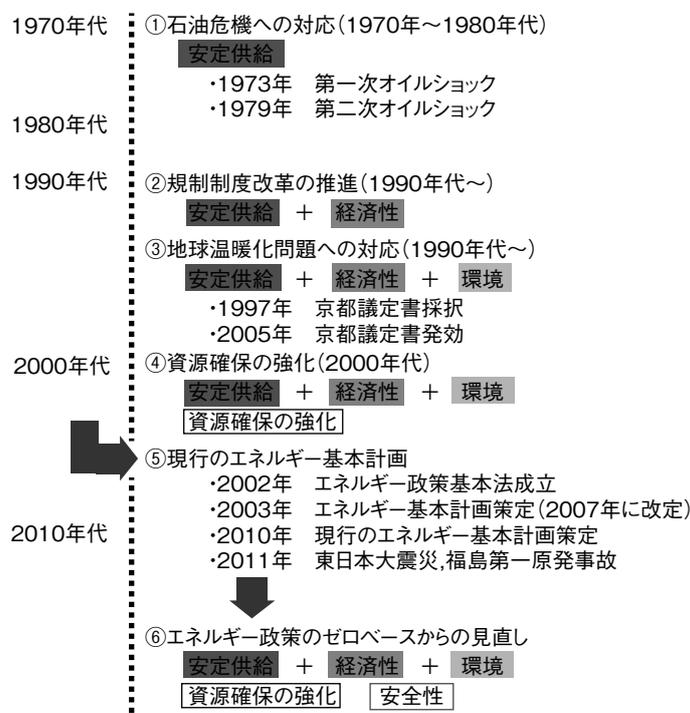


### 1. はじめに

わが国のエネルギー政策は、「安定供給の確保」、「環境への適合」及びこれらを十分に考慮した上での「市場原理の活用」を基本方針として、時々の経済・エネルギー情勢の変化に対応し、政策の見直しがなされてきている。現在は、2011年3月11日の東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故の教訓を踏まえ、新しいエネルギー政策についてゼロベースでの見直しがなされている(図1参照)。

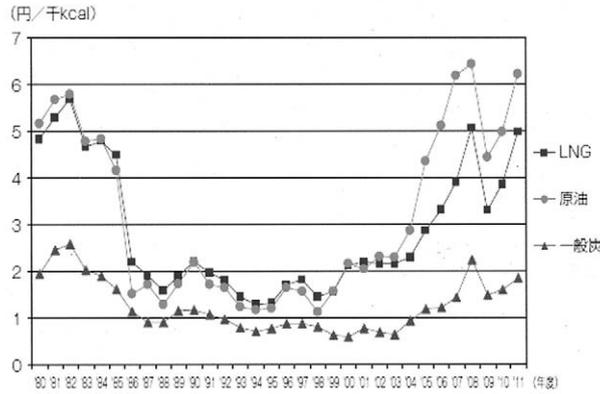
これからのエネルギーに求められるものは、従来の3E (Energy Security: 安定供給, Environment: 環境への適合, Economy: 経済性) に安全のS (Safety: 安全性) が大前提の3E + Sである。

全面自由化後における供給力確保策に関して石炭は、供給安定性・経済性に優れたエネルギーで(図2参照)、かつ安全性についても長年の実績があり信頼性を有している。残りの環境のEについては、日本国内では高度な環境対策技術の開発・実用化により硫黄酸



(出所:『エネルギー白書2013年』を基に作成)

図1 エネルギー政策の変遷



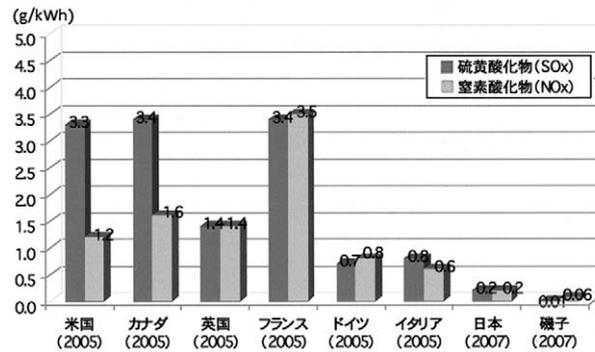
(出所：『エネルギー白書 2013 年』，環境省)

図2 化石エネルギーの単位熱量当たりのCIF価格 (運賃・保険料込み)

化物 (SO<sub>x</sub>)，窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>)，ばい塵の排出については世界トップのクリーン化が達成され問題がないレベルとなっている (図3 参照)。一方，温室効果ガスである二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) については他の化石燃料に比べ排出原単位 (単位発電電力量当たりの排出量) が大

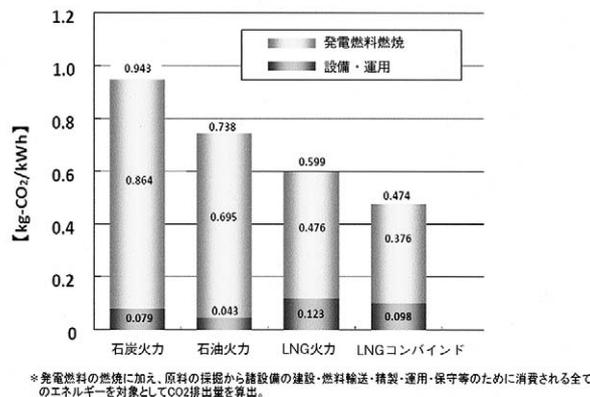
きく (図4 参照)，石炭火力からの CO<sub>2</sub> 排出量の削減が課題となっている。

石炭火力からの CO<sub>2</sub> 削減には高効率化が有効であり，わが国の石炭火力の効率是世界トップクラスにあるが，主要な CO<sub>2</sub> 排出国である米国，中国，インドの石炭火力の効率は相対



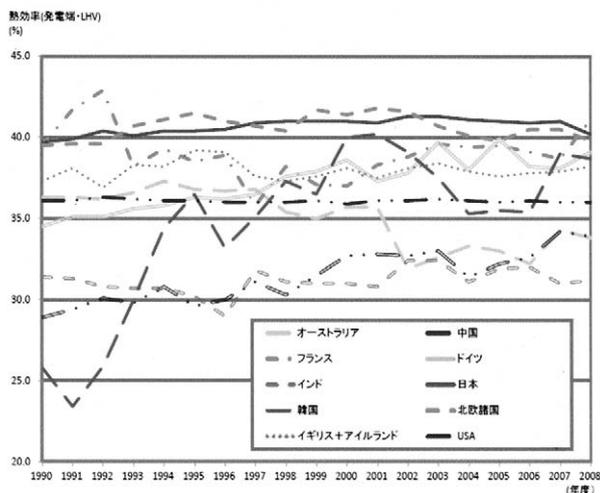
(出所：「ゼロエミッション石炭火力発電ワークショップ」，平成 23 年 2 月，JPower 発表資料)

図3 各国の石炭火力からの SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 排出量



(出所：総合資源エネルギー調査会，総合部会第2回会合資料，平成 25 年 4 月)

図4 電源別発電電力量当たりの CO<sub>2</sub> 排出量



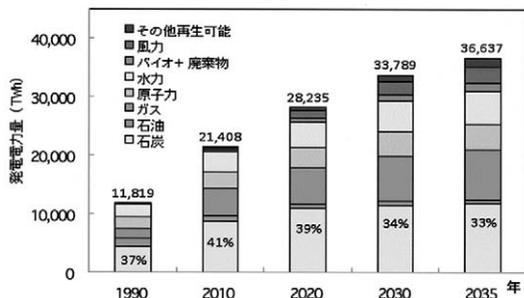
(出所：総合資源エネルギー調査会，総合部会第2回会合資料，平成25年4月)

図5 石炭火力の熱効率の国際比較

相対的に低い状況にある（図5参照）。

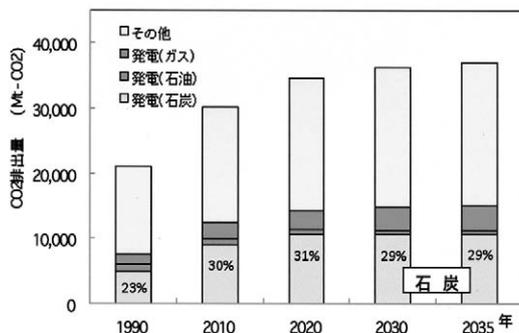
世界的には石炭火力は、今後も発電電力量の3分の1を占める主要な電源であるとともに、CO<sub>2</sub>排出量の約3割が石炭火力からの排出であり、地球温暖化対策の取組として石炭火力からのCO<sub>2</sub>削減がますます重要となってくる（図6，図7参照）。

このような状況の下、高効率石炭火力発電技術である石炭ガス化燃料電池複合発電とCO<sub>2</sub>分離・回収技術を組み合わせたゼロエミッション石炭火力の実現を目指し、平成24年度から経済産業省の補助事業としてスタートした大崎クールジェンプロジェクトの概要と石炭ガス化技術について紹介する。



(出所：IEA “World Energy Outlook 2012” 「世界新政策シナリオ」より作成)

図6 電源別発電電力量の推移



(出所：IEA “World Energy Outlook 2012” 「世界新政策シナリオ」より作成)

図7 石炭火力からのCO<sub>2</sub>排出量

## 2. 石炭ガス化技術

### (1) わが国のIGCC技術開発

わが国の石炭ガス化複合発電（IGCC）技術開発は、ガス化方式として石炭をガス化する際に空気を使う空気吹方式と酸素を使う酸素吹方式の2つの方式で進められてきており、空気吹IGCCは、平成25年3月に250MWの実証機による実証試験を終了し、現在は商用機として運転されている。

酸素吹IGCCは、（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」）と電源開発（株）（以下「JPOWER」）との共同研究事業として平成7年度からJPOWERの若松研究所においてEAGLE（Coal Energy Application for Gas, Liquid, and Electricity）プロジェクトとして進められてきている。

STEP 1: 国産EAGLEガス化炉の開発 1995～2006年度

- (1) 酸素吹噴流床ガス化炉の開発
- (2) ガスクリーンアップ技術の確立

STEP 2: 石炭ガス化多目的利用技術開発 2007～2009年度

- (1) CO<sub>2</sub>分離回収（化学吸収法）
- (2) 炭種拡大（低灰融点～高灰融点）
- (3) 微量成分の挙動調査

STEP 3: 次世代CO<sub>2</sub>回収技術開発 2010～2013年度

- (1) CO<sub>2</sub>分離回収（物理吸収法）
- (2) 新CO<sub>2</sub>分離回収技術調査

図8 EAGLEプロジェクトの概要

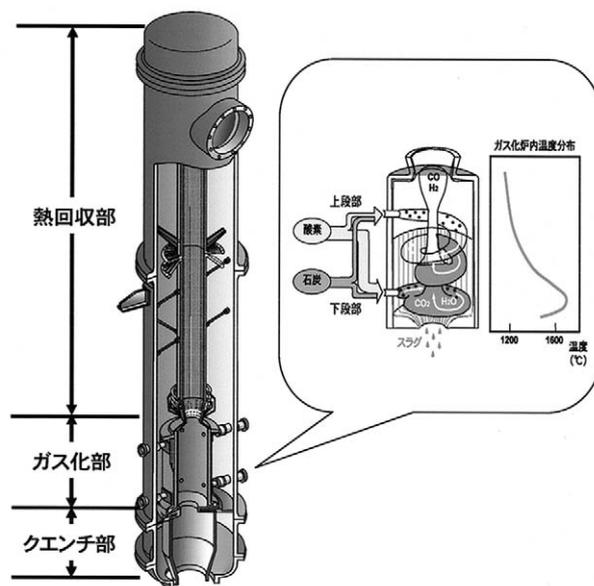


図9 EAGLE炉構造概要とガス化部断面イメージ

### (2) EAGLEプロジェクト

EAGLEプロジェクトは、石炭使用量150t/日の石炭ガス化炉を中心にIGCC、石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）や合成燃料・化学原料、水素製造などの多目的利用を目標としている（図8参照）。

EAGLE炉は、酸素吹噴流床1室2段旋回流方式のガス化炉で、ドライフィード給炭方式、水冷対価壁構造である。その特長は、1室のガス化反応部に上下2段の石炭バーナが配置され、それぞれに酸素が供給され、供給量がコントロールできる点にある。この方式により、下段では石炭灰を溶融させスラグを安定流下排出が維持できる高温雰囲気を作りながら、全体の酸素量をコントロールすることができ、最適なガス化状態を形成しやすい特長がある。上段では低い酸素状態にてガス化反応を促進させることが可能となる（図9参照）。

すなわち、灰の溶流点温度が高い石炭でも高いガス化効率（冷ガス効率）でガス化が可能である。これにより、石炭ガス化炉に適した低灰融点炭から従来の微粉炭火力で使用されてきた高灰融点炭まで幅広い炭種が適用可能であることが確認されている（図10参照）。

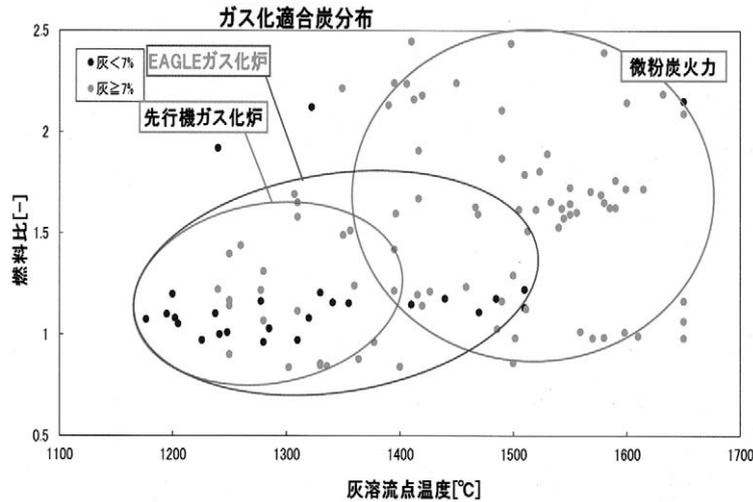


図 10 EAGLE 適用炭種

また、旋回流で石炭粒子の炉内滞留時間を確保するとともに、旋回流によるサイクロン効果により溶融・半溶融状態の灰分がガス化炉出口に滞留するのを抑制しスラッキングによるトラブル発生を防止している。

さらに EAGLE プロジェクトでは、石炭火力からの CO<sub>2</sub> 排出量の大幅削減を図るため CO<sub>2</sub> 分離回収技術についての試験も実施している。石炭火力からの CO<sub>2</sub> 分離回収技術としては、燃焼前回収法、燃焼後回収法、酸素燃焼法があるが (図 11 参照)、石炭ガス化方式と組み合わせた燃焼前回収方式が最も効率的である。

EAGLE プロジェクトでは、燃焼前回収方式の化学吸収法と物理吸収法について試験を実施し、今後両方式の比較評価を実施する予定となっている。

### 3. 大崎クールジェンプロジェクト

#### (1) 目的及び計画

石炭火力の更なる高効率化と低炭素化を喫緊の課題として、中国電力(株)と JPOWER の共同出資によるプロジェクト実施事業主体として平成 21 年 7 月に設立され、国のクリーンコール政策である「Cool Gen 計画」を実現するという主旨から社名を大崎クールジェン(株)とした。

大崎クールジェンプロジェクトは、次世代の石炭ガス化技術として EAGLE 炉の特長を活かし、究極の高効率発電方式である IGFC と CO<sub>2</sub> 分離回収設備の組み合わせによるゼロエミッション石炭火力の実現を目指すもので、平成 22・23 年度の NEDO との共同研究事業「燃料電池対応型石炭ガス化複合発電最適化調査研究」を経て、平成 24 年度からは経

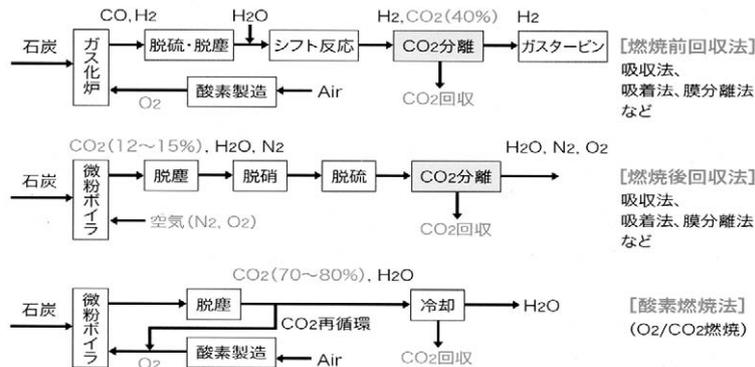


図 11 CO<sub>2</sub> 分離・回収方式

経済産業省補助事業「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」として開始された。本プロジェクトは、3段階に分けて実施する計画で、まず第1段階としてIGFCの基幹技術となる酸素吹IGCC実証試験を実施する。第2段階では、第1段階の高効率石炭火力である酸素吹IGCCにCO<sub>2</sub>分離回収設備を組み込み石炭火力からのCO<sub>2</sub>排出量の大幅削減を実証する。更に第3段階では、第2段階のシステムに燃料電池を組み合わせたCO<sub>2</sub>分離回収型IGFCの実証試験を実施する計画である。(図12参照)

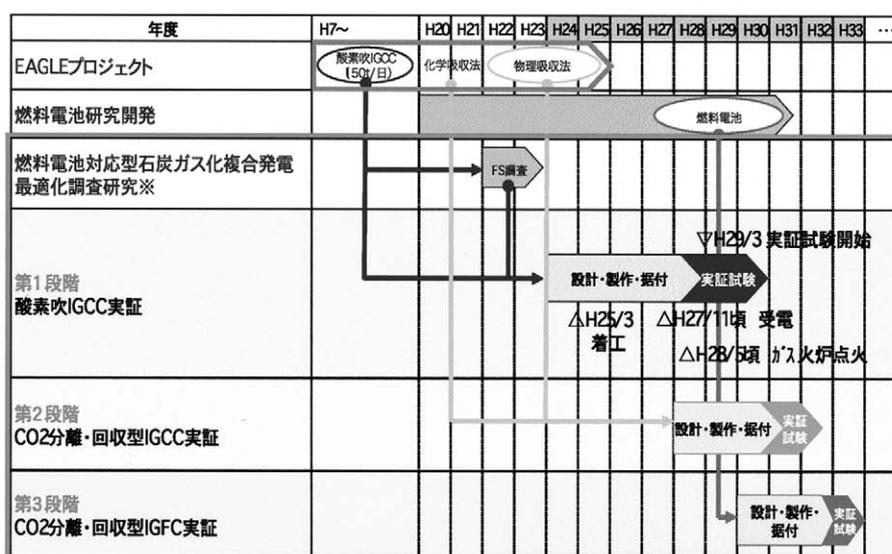
実証設備は、中国電力(株)大崎発電所構内に建設する計画で、平成25年3月に建設工事を着工し、平成29年3月から実証試験開始を計画している。

## (2) 実証試験

実証試験では、EAGLEプロジェクトで検証された個別プロセスをスケールアップして連係されたトータル発電システムとして実証を行う。

石炭ガス化炉は、石炭使用量150t/日のEAGLEパイロット試験炉から約8倍の1,180t/日にスケールアップしている。1,300℃級のガスタービンと蒸気タービンによる複合発電で出力は166MWである。(表1参照)

基本性能である送電端効率<sup>1</sup>は40.5% (HHV)でこの規模での火力発電設備としては世界最高水準である。実証機において目標の効率が達成できれば、1,500℃級のガスタービンを採用した商用機規模では高効率石炭火力発電



※燃料電池対応型石炭ガス化複合発電最適化調査研究  
大崎クールジェン協がNEDOとの共同研究として酸素吹IGCC/IGFCと高効率CO<sub>2</sub>分離・回収技術の最適モデルについて調査検討を実施。  
(事業期間:平成22年度~平成23年度)

□:大崎クールジェンプロジェクト外

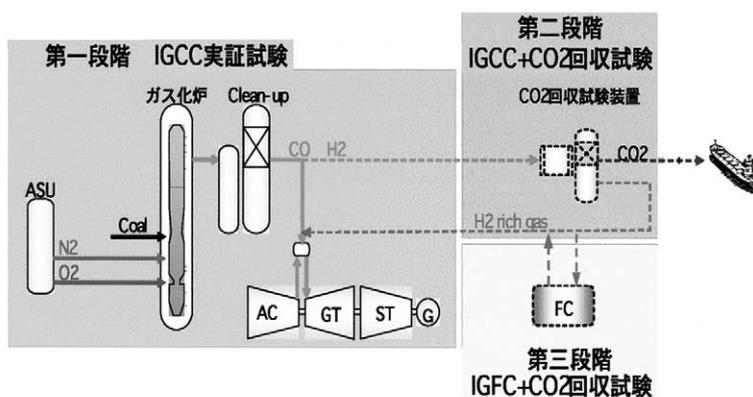


図12 大崎クールジェンプロジェクト計画

表1 主要設備の概要

主要機器	設備仕様
石炭ガス化設備	酸素吹1室2段旋回噴流床方式(EAGLE炉),石炭使用量:1,180t/日
ガス精製設備	硫黄除設備:湿式化学吸収法,硫黄回収設備:湿式石灰石石膏法
複合発電設備	1軸型コンバインドサイクル発電方式(出力:166MW) ガスタービン:開放サイクル型(1,300℃級),蒸気タービン:再熱復水式
発電機	全閉横置円筒回転界磁形同期電動機
排煙脱硝装置	乾式アンモニア接触還元法
排水処理設備	低塩系 高塩系
煙突	鋼製自立型(高さ:200m)
揚運炭設備	揚炭設備,屋内貯炭場(45,000t),運炭設備(一部新設)(300t/h)
所内ボイラ	自然循環式:約21t/h
取放水設備	深層取水(海底取水管方式),水中放水
港湾設備	揚炭棧橋(6,000DWT級),揚荷棧橋(2,000DWT級×2)

■ 部分は既設設備利用

の技術開発ロードマップに掲げる送電端効率46%を達成できる見通しが得られることになる。(表2, 図13参照)

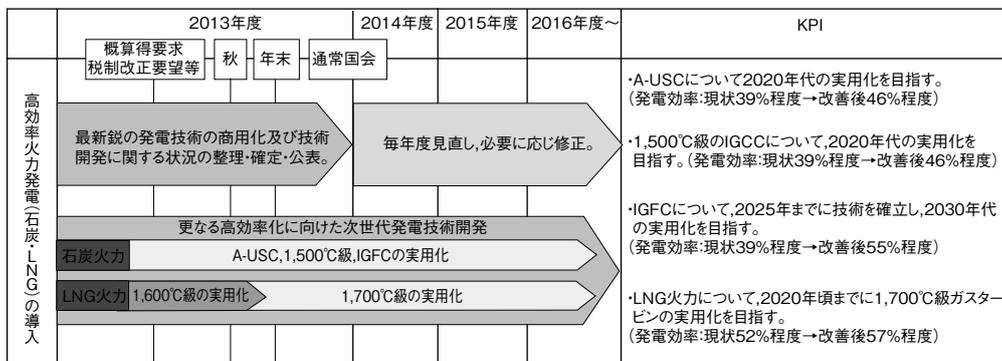
環境性能については,国内の微粉炭火力と同等レベルとし,日本の厳しい環境規制に対応できる環境特性を有することを検証する。実証試験では,発電設備全体としての目標と合わせて設備を構成する各設備について商用機を見据えた検証を実施する計画である。

(3) 建設状況

実証試験設備は,平成25年3月に着工し,現在土木建築工事が順調に進捗している。平成26年6月には設備の据付工事開始となる機電工事着工に引き続き,平成27年11月受電,平成28年5月ガス化炉点火を予定している。その後,試運転調整を経て平成29年3月から実証試験を開始する計画である(図14, 図15参照)。

表2 実証試験の目標

項目	目標
基本性能 (プラント性能・環境性能)	・送電端効率: 40.5%(HHV) ・環境目標値(O <sub>2</sub> :16%換算) SO <sub>x</sub> : 8 ppm, NO <sub>x</sub> : 5 ppm, ばいじん: 3 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
多炭種適用性	・炭種性情適合範囲の把握 (微粉炭火力に適合しにくい低灰融点炭から微粉炭に適合する石炭まで拡大)
設備信頼性	・長時間耐久試験により事業用石炭火力レベルの年利用率70%以上
プラント制御性・運用性	・事業用火力プラントとして必要な運転特性,制御性等 (例:負荷変化率:1~3%/分)
経済性	・商用機レベルで発電原価が微粉炭火力と同等以下になる見通しを得る



(出所:長短期工程表,「日本再興計画」,平成25年6月)

図13 技術開発ロードマップ



図 14 建設工事状況（平成 25 年 8 月末）

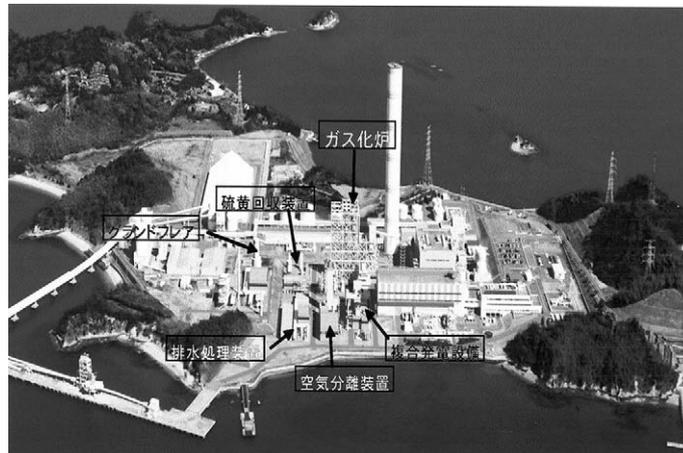


図 15 完成予想図

#### （4）まとめ

日本再興戦略（平成 25 年 6 月 14 日閣議決定）の戦略市場創造プランのテーマ 2 『クリーン・経済的なエネルギー需給の実現』の中で、先進技術を加速し、世界最高水準の効率を有する火力発電をわが国で率先して導入するとともに、世界へ積極的に展開するとされ、IGCC、IGFC の実用化が挙げられている。大崎クールジェンプロジェクトは、その礎として、まずは酸素吹 IGCC の商用化の前段となる実証試験を平成 29 年に開始すべく建設工事を進めている。

プロジェクトの推進にあたっては、資源エネルギー庁石炭課、NEDO 等関係者の皆様の

ご支援に感謝するとともに今後も引き続きご支援をよろしくお願い致したい。

#### 参考資料

- (1) エネルギー白書 2013（資源エネルギー庁）
- (2) 平成 23 年 2 月 23 日 ゼロエミッション石炭火力発電ワークショップ発表資料（J-POWER）
- (3) 平成 25 年 4 月総合エネルギー調査会総合部会第 2 回 会合資料（資源エネルギー庁）
- (4) IAE「Word Energy Outlook 2012」
- (5) 「多目的石炭ガス製造技術開発（EAGLE）」平成 16 年度～平成 21 年度成果報告書（NEDO, J-POWER）
- (6) 「大崎クールジェンプロジェクトの概要」火力原子力発電 Vol.64 Jan.2013（貝原良明，渡辺喜久）

[調査研究報告]

バイオマスエネルギー等高効率転換  
技術開発～総合調査研究～事業の成果概要

徳田 憲昭<sup>\*</sup> (プロジェクト試験研究部 部長)  
森山 亮<sup>\*\*</sup> (プロジェクト試験研究部 主任研究員)



1. はじめに

バイオ燃料は、京都議定書上、カーボンニュートラルとして扱われるため、地球温暖化対策の一手段として重要である。わが国においても、2005年に閣議決定(2008年改定)された「京都議定書目標達成計画」<sup>(1)</sup>において、2010年度までにバイオエタノールを含む輸送用バイオ燃料を原油換算で50万kL導入することが目標として掲げられた。2006年3月には「バイオマス・ニッポン総合戦略」<sup>(2)</sup>が改定され、二酸化炭素排出量の削減を目的として、バイオマス熱利用の導入促進、バイオ燃料導入、さらに国産バイオ燃料の開発に重点的に取り組む方針が明らかにされた。

しかしながら、バイオマスは化石燃料よりコスト競争力に乏しいことが導入普及のネックとなっており、中長期的視野に立ったエネルギー転換効率や経済性のさらなる向上を目指す必要があった。このような状況を受け、2007年11

月には経済産業省と農林水産省が連携して、石油業界、自動車業界および大学・独立行政法人等の委員からなる「バイオ燃料技術革新協議会」を設置し、経済的、多量、かつ安定的にセルロース系原料からバイオ燃料等を生産する技術革新の実現を目指すために、具体的な目標、技術開発、ロードマップ等について「バイオ燃料技術革新計画」<sup>(3)</sup>が策定された。

一方、バイオ燃料の技術開発に関する取組みとして、(独)新エネルギー・産業技術総合機構(以下「NEDO」)によってエネルギー転換効率のさらなる向上を目標とした、「バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発事業」が2004～2012年度の期間において実施された。さらに、2008年からは、バイオエタノール等の製造に関わる技術開発を「加速的先導技術開発」として取り上げ、「バイオ燃料技術革新計画」<sup>(3)</sup>で掲げられた技術開発目標(開発ベンチマーク)の達成を目指した研究開発を推進されてきた(図1参照)。



(出所：NEDO 資料)

図1 バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発の実施工程

当研究所は2008～2012年度において「加速的先導技術開発」プログラムの一つである「総合調査研究」をNEDOから受託し、2015～2020年頃の実用化を目指した、セルロース系原料からのバイオエタノール等製造技術開発に取り組んだ。

## 2. バイオ燃料技術革新計画のベンチマーク

前述の「バイオ燃料技術革新計画」<sup>(3)</sup>では、食料と競合しないセルロース系原料を活用し、安定供給、経済性等を実現できるような技術革新を実現するために、開発ベンチマークが設定されている。

この革新計画<sup>(3)</sup>にはバイオマスの生産地については国内外を問わず、食料と競合しない多収量草本植物（以下「草本系バイオマス」）や早生広葉樹（以下「木質系バイオマス」）を原料とした、「技術革新ケース」の開発ベンチマーク（表1参照）が示されている。このケースでは、バイオエタノールの生産規模を10～20万kL/年とし、バイオエタノール製造コスト目標を、ガソリンとの価格競争力や米国等の開発計画を勘案し、40円/Lと設定されている。

NEDOの「加速的先導技術開発」プログラムでは、「技術革新ケース」の開発ベンチマークを達成することを目標として、技術開発が行われた。

表1 バイオ燃料技術革新計画「技術革新ケース」の開発ベンチマーク

前提条件			
原料	生産地	国内外	
	原料種	目的生産バイオマス 多収量草本植物(社°アカサ、リアサ、ミカサなど) 早生広葉樹(1-加、ホ°ラ、ヤキなど)	
転換	生産規模	10～20万kL/年	
	開発対象技術	前処理	微粉碎処理、アンモニア処理、水熱処理、リプレッサ、アルカリ処理、微生物処理
		酵素糖化	高活性酵素選択・創製、成分比最適化、わすれ酵素生産、酵素回収再利用、含水固体糖化リアクター、糖液濃縮技術
		イタノル発酵	連続発酵、5炭糖・6炭糖同時利用、高温耐性、含水固体発酵装置
		濃縮脱水	膜分離方法、溶媒抽出法
		廃液処理	廃液処理ー再利用(膜分離法など)、発酵残渣・灰分の有効利用(肥料、飼料)、処理コストー低減
実用化時期	2015～2020年頃		
開発ベンチマーク			
原料	乾物収量	多収量草本植物：50t/ha・年 早生広葉樹：17t/ha・年	
転換	一貫プロセスとして	Iコストー使用量6MJ/kg-バイオマス以内（バイオマスで自立） イタノル収率0.3L/kg-バイオマス以上、Iコストー回収率35%以上	
		前処理	酵素糖化率80%以上となる前処理
		酵素糖化	酵素使用量1mg/g-生成糖以下、酵素コスト4円/L-イタノル以下、糖収量500g/kgバイオマス以上
		イタノル発酵	イタノル収率95%以上
		濃縮脱水	Iコストー使用量2.5MJ/L-イタノル以下（10%イタノル水溶液→無水イタノル分離回収）
		廃液処理	Iコストー回収分を除いた処理コスト5円/L-イタノル以下
環境・社会評価		・ライフサイクルを通じたCO <sub>2</sub> の排出量やIコストー収支の評価 ・食料との競合、生態系への影響等、環境・社会・経済的な持続可能性に関する評価	
原料～製造に係るLCAの視点		04 <sub>2</sub> 削減率50%以上、エネルギー収支2.0以上	
イタノル製造コスト目標		40円/L	

（出所：バイオ燃料技術革新協議会、「バイオ燃料技術革新計画」に追記）

### 3. 総合調査研究の実施内容

表 1 に示した開発ベンチマークの中でも、特に、製造コスト 40 円 / L や二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 削減率 50% 以上を達成するためには、バイオエタノール製造プロセスの開発のみならず、原料生産技術やバイオエタノール輸送技術も考慮し、原料生産 (Well) から日本におけるバイオエタノールの受け取り (Tank) までを総合的に (Well to Tank) 評価することが必要となる。

総合調査研究では Well to Tank での一貫したバイオ燃料事業を想定し、当該事業におけるバイオエタノール製造コストの試算および CO<sub>2</sub> 削減率の試算を行うことによって、プロセス開発を行うチーム (以下「研究チーム」) の事業化検討を実施した (図 2 参照)。

Well to Tank でのバイオ燃料事業を評価するために、総合調査研究では以下の内容で主に検討を実施した。

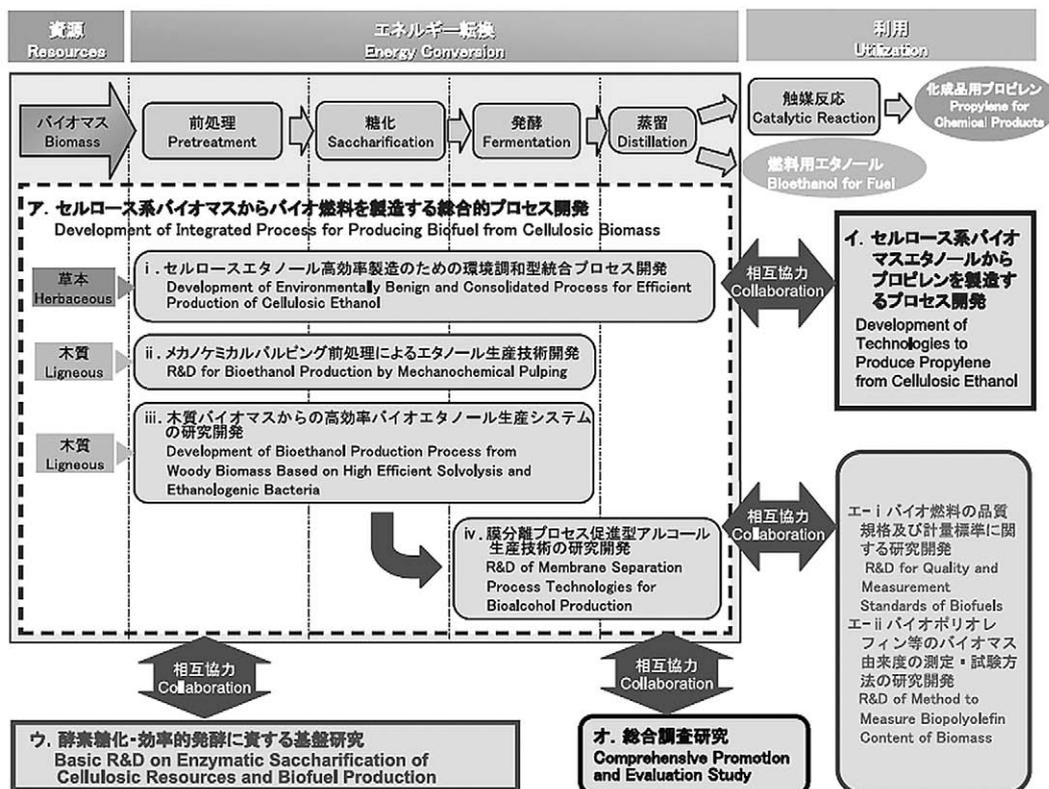
#### ① 有望バイオマス生産地域検討

技術革新ケースで想定しているバイオエタノールの生産規模 10 ~ 20 万 kL / 年に必要な原料を生産するためには、草本系バイオマスの場合で最大 13,000ha 程度、木質系バイオマスの場合で最大 40,000ha 程度の面積が必要である。バイオ燃料事業の持続可能性に必要な事項を踏まえ、この面積を確保できる可能性が高い地域 (以下「有望バイオマス生産地域」) のリストアップおよび絞込みを行った。

さらに、得られた結果を用いて、東南アジア諸国連合 (ASEAN) 地域に対する有望バイオマス生産地域選定マップ (以下「ASEAN 地域ポテンシャルマップ」) を作成した。

#### ② 実用化事業モデル検討

社会・環境・文化が異なる対象国に対して、国の概要、農林業の概況、経済状況等を取りまとめることにより、バイオ燃料事業の先行的 FS として、事業化に関わる判断材料を提供した。



(出所: NEDO, 「バイオマスエネルギー先導技術開発」)

図 2 加速的先導技術開発の概要

また、上記を踏まえて、①においてリストアップされた複数の有望バイオマス生産地域におけるバイオ燃料事業を想定した。具体的にはバイオマス原料の生産・収穫・運搬方法（原料生産）、研究チームが開発したプロセスの商業規模へのスケールアップ（エタノール転換）、および製品であるバイオエタノールの輸送方法（製品輸送）などの検討を行うことにより、実用化事業モデルを構築した。

構築した実用化事業モデルに対し、経済性評価を行うことによって、「技術革新ケース」の開発ベンチマークにあるエタノール製造コスト目標 40 円/L の達成状況を把握するとともに、ライフサイクルアセスメント (LCA) 検討によって、CO<sub>2</sub> を含む、温室効果ガス (GHG) 排出量を試算し、開発ベンチマークにある CO<sub>2</sub> 削減率 50% 以上の達成状況を把握した。

次章以降に「① 有望バイオマス生産地域検討」および「② 実用化事業モデル検討」について得られた成果を述べる。

#### 4. 有望バイオマス生産地域検討

前述の通り、「技術革新ケース」の開発ベンチマークを達成するためには、木質バイオマスの場合、最大 40,000ha 程度の土地を確保する必要がある。事前検討の結果、このような広大な土地を確保できる地域は日本国内に存在しなかったため、事業化を想定する対象地域を海外で探索した。

また、生産したバイオエタノールの日本までの輸送距離を極力短くし、GHG 排出量や輸送費を削減すること、および日本の国際協力事業を推進することも視野に入れ、対象国を ASEAN 地域（国土面積が小さいシンガポールとブルネイを除く）8カ国に絞り込んだ。

ASEAN 地域のように経済発展が著しい国々では、土地利用変化のスピードが速いため、各国政府が過去に作成した土地利用図は、現状と異なる可能性が高く、最新の状況を把握することは非常に難しい。そこで、近年整備

が進んだ高解像度の人工衛星画像を用いて、詳細な土地利用状況の把握を行い、有望バイオマス生産地域を探索した。

##### （1）地域選定の条件

技術革新計画で謳われている持続可能性を考慮した事業を想定すると、

- 食料生産と競合しないことが重要であり既存の水田や畑地などを選択しないこと
- GHG 削減の観点から、炭素貯蔵量の大きな森林等の土地利用は極力避けること
- 地域社会への社会的な影響を考慮して農業、居住地等との競合を避けること

などの地域選定に必要な条件が挙げられる。

##### （2）手法検討ステップ

有望バイオマス生産地域の選定手法は以下のステップに従って確立した。

###### ①ステップ1：マクロスケール検討

現在の土地利用状況から、バイオマスの生産に適正な地域を ASEAN 全体の概要として把握するために、マクロスケール（分解能～1 km）の人工衛星画像を分析した。画像解析によって得られる土地利用区分の情報から、未利用地かつ現状の植生が少ない土地であると考えられる、灌木地、草地および裸地を抽出し、その集積度合が大きい地域を選定した。さらに、環境保護区、治安情報、地形、物流状況、年間降水量、平均気温を指標に上記の地域に対し、フィルタリングを行うことによって、現地の社会・環境・文化に与える影響が極力少なくなるように考慮した候補地域（45 地域）を選定した。

###### ②ステップ2：事業実施可能性の適用検討

ステップ1で選定された候補地域に対し、社会・環境・文化的な観点から重みづけを行い、次ステップにおいてミクロスケール検討を行う地域を抽出するために、階層分析法 (AHP) を用いて、地域の順位付けを行った。順位が高い地域を目安に、対象 8カ国から各国 1～

2 地域（最大 16 地域）を次のステップであるミクروسケール検討を行う候補地域および実用化事業モデルにおけるケーススタディの候補地域として選定した。今回の条件下で選定された土地はすべて灌木地であった。

### ③ステップ3：ミクروسケール検討

ステップ2で選定された候補地域に対し、更に、未利用地の集約度からバイオ燃料事業の実施に適正な地点を検討するために、ミクروسケール（分解能 10m）の人工衛星画像を用いて詳細な対象土地利用区分の抽出を行った。さらに、地表流水のたまりやすさを指標化した地形湿性指数や斜面傾斜角度を考慮した対象地の景観予測を行い、草本系バイオマスの育成に適した散在系灌木地と木質系バイオマスの生育に適した密集系灌木地の類型化を行った。それぞれの灌木地のイメージを図3に示す。

上記ミクروسケールの検討を行った地点の中から草本系バイオマスの育成に適した散在系灌木地および木質系バイオマスの生育に適した密集系灌木地を合計2～3地点抽出し、現地調査を実施することにより、選定手法の妥当性および机上検討で得られた情報と実際の土地利用状況との整合性を確認した。

### ④ステップ4：ポテンシャルマップの作成

ステップ3で選定手法の妥当性を確認した



上で、ASEAN 地域全体における利用可能性が高い土地を抽出した、ASEAN 有望バイオマス生産地域ポテンシャルマップ（以下「ASEAN 地域ポテンシャルマップ」）を作成した。

### (3) 使用データ

有望バイオマス生産地域検討において利用したデータは下記の通りである。

- 土地被覆 GIS データ (GeoCover-LC)
- 衛星画像分光特性データ (ALOS<sup>(5)</sup>, MODIS<sup>(6)</sup>)  
解像度：10m～1 km  
バンド：4 バンド (可視青, 可視赤, 近赤外, 中赤外)  
データ頻度：月単位
- 標高データ (SRTM-3<sup>(7)</sup>)
- 保護区データ (Protected Planet<sup>(8)</sup>)
- 国境データ (GADM<sup>(9)</sup>)

### (4) ASEAN 地域ポテンシャルマップ

ASEAN 地域全体の人工衛星画像を分析し、得られた選定地域に対して、環境保護区、治安情報、地形、物流状況、年間降水量、平均気温等のフィルタリングを行うことによって作成した ASEAN 地域ポテンシャルマップを図4に示す。

マップは環境保護区や治安情報などから土地の利用が不可能と思われる地域を白抜きで表している。バイオエタノールの生産規模 20



図3 密集系灌木地（左）と散在系灌木地（右）の例

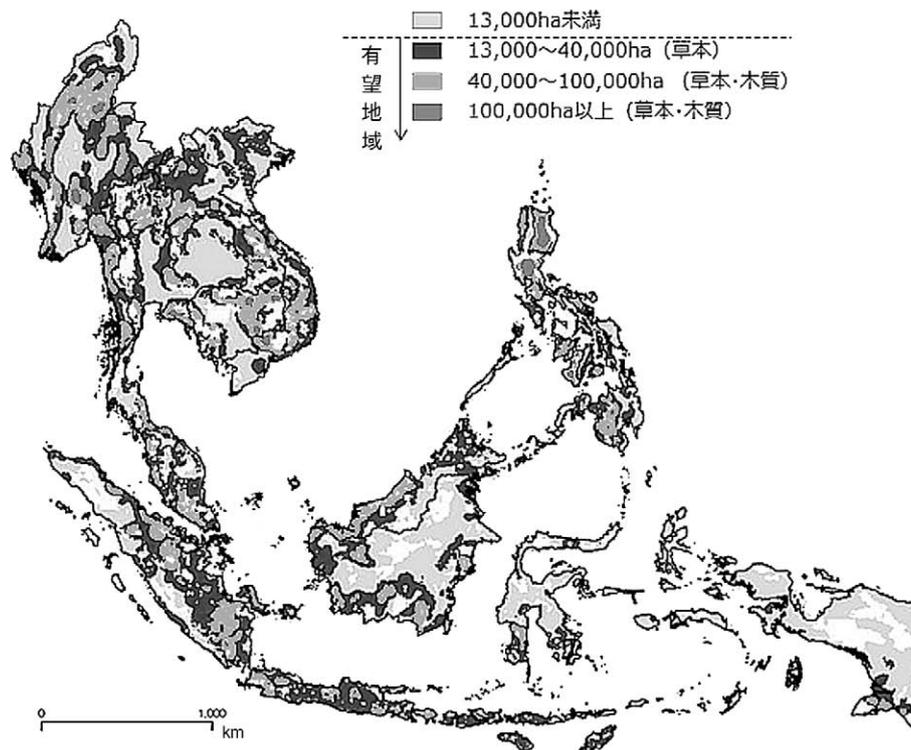


図4 ASEAN地域ポテンシャルマップ

万 kL/年に対して草本系バイオマスを供給する場合、13,000ha以上の土地が必要となり、木質系バイオマスを供給する場合、40,000ha以上の土地が必要となることは「バイオ燃料技術革新計画」<sup>(3)</sup>においても述べられているため、マップは半径30km圏内<sup>(3)</sup>における土地の集積度合に基づいて、13,000ha未満、13,000～40,000ha、40,000～100,000ha、および100,000ha以上の4段階に色分けしている。

なお、作成したポテンシャルマップは、前述の開発手法により作成したものであり、すべての土地についての利用可能性を確認していない。バイオ燃料事業者が本ポテンシャルマップを活用する場合、このような概要としての結果に加えて、ステップ3で検討したミクروسケール検討による事前情報の入手、および詳細現地調査によって土地利用可能性の確度を高める必要がある。

また、具体的な地域において事業の実施可能性を検討しているバイオ燃料事業者の場合、ステップ3のミクروسケール検討を行うこと

によって、事前情報の入手ができると思われる。

また、今回作成したポテンシャルマップは、デジタル画像データとして出力されるため、Google Earthなどにも対応した形式に変換することが可能である。現在、Google Earthなどはインターネットなどを介して、フリーソフトとして利用可能なものであるが、主要都市の位置、道路、鉄道などのインフラ情報も提供されている。将来的にユーザーが本ポテンシャルマップを上記インフラ情報と組み合わせて利用することにより、今回の手法にとどまらず様々な観点での有望バイオマス地域選定に使用されることが期待できる。

## 5. 実用化事業モデル

有望バイオマス生産地域におけるバイオマス原料の生産・収穫・運搬方法（原料生産）、研究チームが開発したプロセスの商業規模へのスケールアップ（エタノール転換）、および

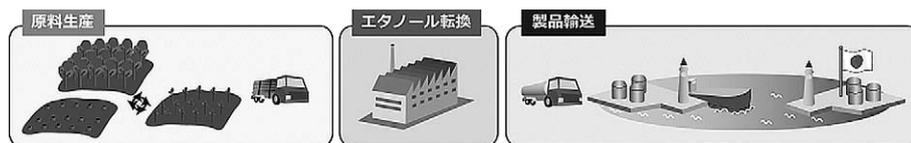


図5 実用化事業モデルの全体イメージ

製品であるバイオエタノールの輸送方法（製品輸送）などの検討を行うことにより、実用化事業モデルを構築した（図5参照）。以降に検討したモデルの内容とコストおよびGHG排出量試算の内容について原料生産，エタノール転換，および製品輸送の工程毎に示す。

### （1）原料生産

#### ① 前提条件

技術革新ケースのベンチマークを基に、実用化事業モデルを設定するための前提条件について検討し、表2の条件を用いることとした。図6に木質系と草本系のプランテーションや転換プラントの位置関係のイメージ図を示す。

#### ② 原料生産コストの試算

上記の前提条件に基づいて、原料生産コストを試算した。試算の手順と用いた情報を図7に示す。

原料生産の作業工程および内容は各種文献情報<sup>(10)～(16)</sup>や実用化事業モデルWGの委員から提供された情報に基づいて設定した。さらに、必要な労力、機器、燃料および消耗品（肥料や苗等）の量と単価をヒアリングや様々な文献情報<sup>(17)～(19)</sup>を用いることにより設定し、積み上げ法による原料コストを試算した。

なお、原料生産に関わるGHG排出量は、設定した作業体系における施肥量や燃料量等から計算した。

表2 実用化事業モデル設定の前提条件

原料バイオマス生産地	ASEAN 地域（シンガポール、ブルネイを除く）
バイオエタノール製造量	年産 10 万もしくは 20 万 kL
バイオエタノール転換効率	0.3kL/乾燥トン-バイオマス
バイオマス必要量	年間 67 万乾燥トン
バイオマス収量	50 乾燥トン /ha/年（草本系バイオマス） 17 乾燥トン /ha/年（木質系バイオマス）
プランテーション面積	6,700 もしくは 13,000ha（草本系バイオマス） 20,000 もしくは 40,000ha（木質系バイオマス）
プランテーション形状	円形
転換プラント配置	プランテーションの中心
転換プラント設備数	1 か所
転換プラントまでの原料輸送	20tトラックを用いる

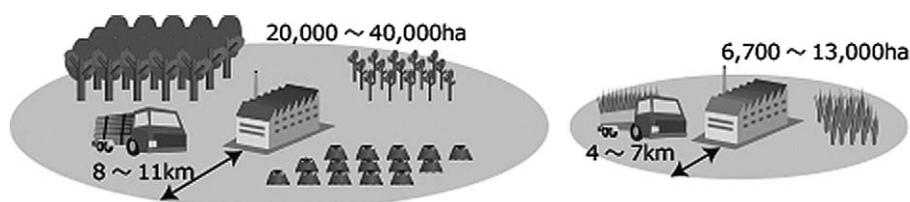


図6 木質系バイオマス（左）と草本系バイオマス（右）のプランテーションイメージ

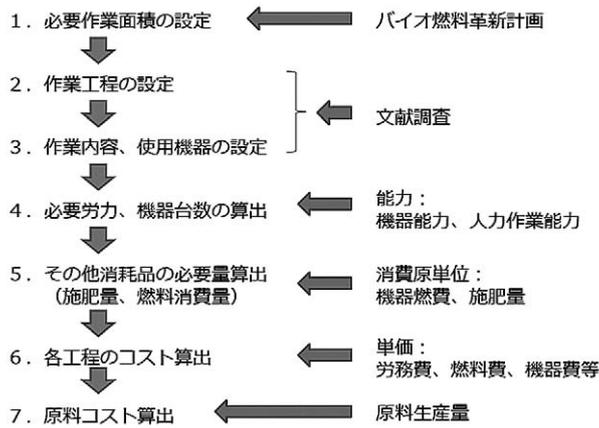


図7 原料コスト試算のフローと試算に用いた情報

## (2) エタノール転換

エタノール転換コストは各研究チームから提出された情報を基に、草本系バイオマスを原料としたプロセスと木質系バイオマスを原料としたプロセスの2種類について検討した。また、既存のセルロース系バイオマスを原料としたバイオエタノール転換プロセスとしてNEDOにおいて行われた濃硫酸法<sup>(20)</sup>を比較対象とした。

イニシャルコストの試算には、転換プロセスの情報を基に、スケールアップ検討と有望バイオマス生産地域におけるロケーションファクターを考慮した商業規模のプラント建設費試算を行った。また、ランニングコストの試算には、同様に、転換プロセスの情報を基に、ユーティリティ費、運転員費、メンテナンス費、租税公課、借入金利等を設定した。また、表1に記載した、転換プロセスに関わる開発ベンチマークである、エネルギーについてバイオマスで自立、およびエネルギー回収率35%以上の達成状況については、エネルギー収支の検討を行って把握した。

## (3) 製品輸送

### ① 前提条件

製品であるバイオエタノールの輸送モデルを設定するための前提条件は、「有望バイオマス生産地域検討」において挙げられた複数の候補地に関する情報を基に検討し、表3のとおりとした。

対象国内において製造した液体燃料であるバイオエタノールを輸送するためには、鉄道、バージ、パイプラインもしくはタンクローリーといった様々な輸送手段が考えられる。本輸送モデルでは「有望バイオマス生産地域検討」において挙げられた複数の候補地に対して、同等の条件でバイオエタノール輸送コストを比較するために、一般的な内陸輸送手段であるタンクローリー輸送を想定した。

また、対象国の内で唯一の内陸国である、ラオスにおいてバイオエタノールを生産するケースについては、内陸輸送距離を極力短くするように考え、海上輸送出荷港をベトナムのダナンに設定した。

表3 バイオエタノール輸送モデル設定の前提条件

転換プラント建設地	有望バイオマス生産地域検討の結果に基づく
転換プラント設備数	1カ所
バイオエタノール製造量	年産10万もしくは20万kL
対象国内の輸送手段	20kLタンクローリーを用いた内陸輸送
バイオエタノール出荷港	15,000tのケミカルタンカーが入港できること <sup>(21)</sup>
対象国～日本までの輸送手段	15,000tケミカルタンカーを用いた海上輸送

バイオエタノール輸送モデルの全体イメージを図8に示す。図中に示した内陸輸送および海上輸送の距離は「有望バイオマス生産地域検討」において挙げられた複数の候補地における最大距離と最小距離を幅で示したものである。

## ② 製品輸送コストの試算

上記の前提条件に基づいて、製品輸送コストを試算した。試算の手順と用いた情報を図9に示す。

内陸輸送コストは、バイオエタノールを転換プラントから港湾までタンクローリーで輸送するコストである。道路インフラは既存のものを利用することとし、新規の道路敷設は考慮しない。内陸輸送コストは、タンクローリーの減価償却費、燃料費、運転手の労務費を合算することにより、推計した。

海上輸送コストは、バイオエタノールを港湾から日本までケミカルタンカーで輸送するコストである。海上輸送コストは、ケミカルタンカーの傭船料、燃料費、ポートチャージを合算することにより、推計した。また、現

地と日本の港湾にそれぞれバイオエタノールを貯蔵するタンクを建設することも想定した。必要な労力、機器および燃料の量と単価はヒアリングや様々な文献情報<sup>(17)</sup>を用いることにより設定し、積み上げ法によるバイオエタノール輸送コストを試算した。

なお、製品輸送に関わるGHG排出量は、使用する燃料量から計算した。

## (4) 事業モデル簡易評価ツール

これまでに説明した、原料生産、エタノール転換、および製品輸送の一貫した事業に対し、経済性評価とLCA評価を主とした事業性を簡易に評価できるツールを開発した。評価結果の出力例を図10に示す。事業の実施サイト、原料種、エタノールの生産規模などの条件を入力することによって、評価結果が出力される。条件入力欄に示したエタノール製造方法の“BASE”は、参照ケースとして、濃硫酸法<sup>(20)</sup>の転換プラントを設定していることを示している。

事業性の評価は技術革新ケースの開発ベン



図8 製品輸送モデルの概要

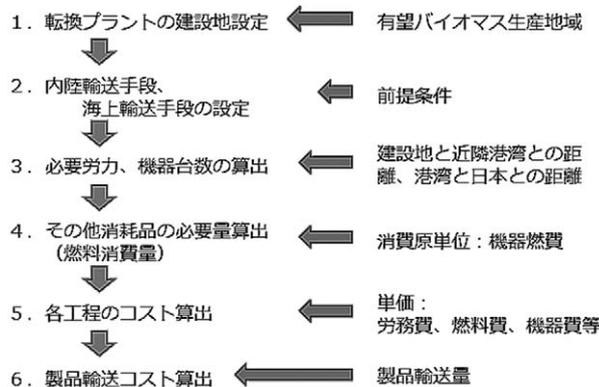


図9 製品輸送コスト試算のフローと試算に用いた情報

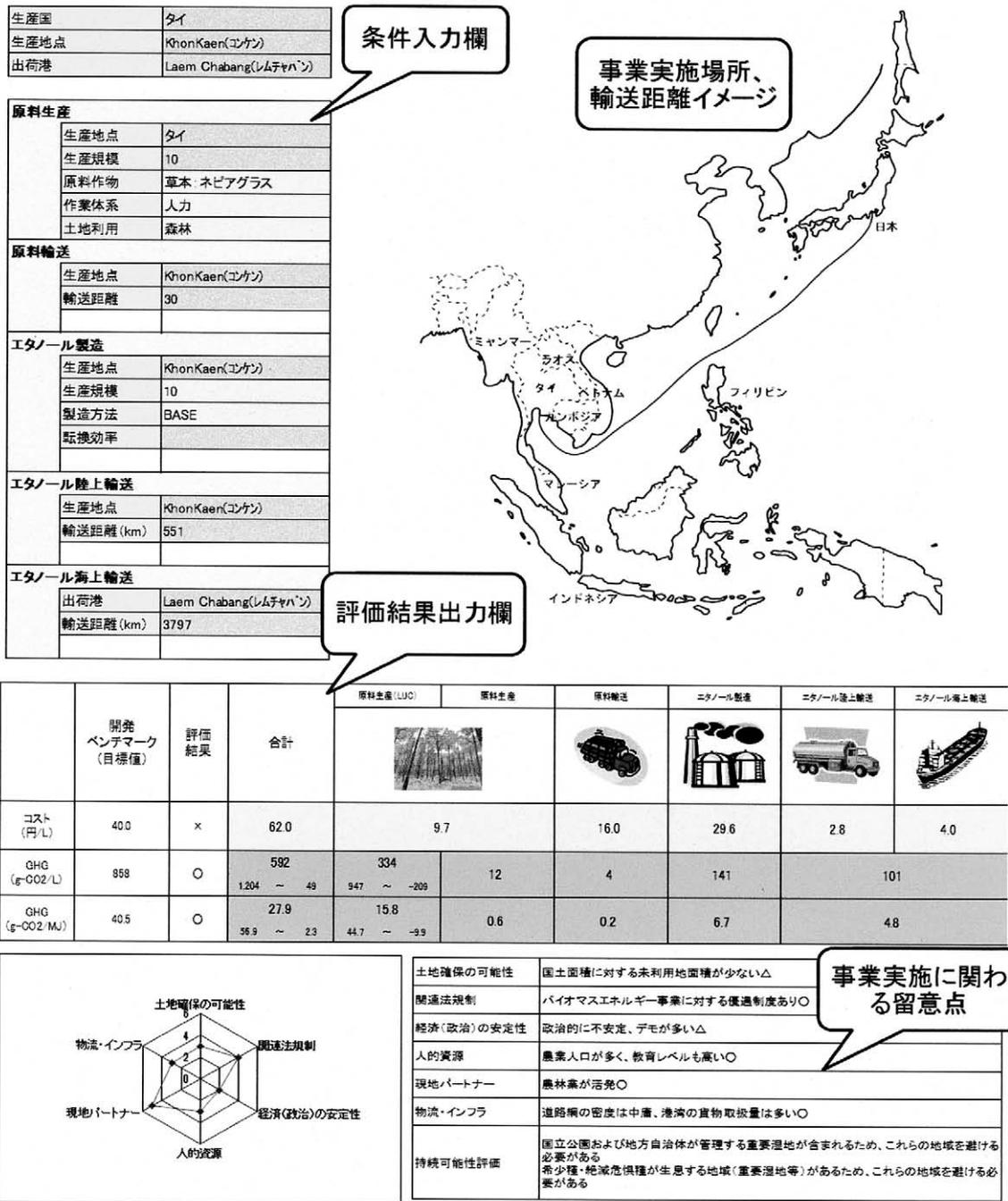


図 10 生産規模と原料価格がエタノール製造コストに及ぼす影響

チマークの達成状況から判断している。評価結果出力欄の左側には開発ベンチマーク（目標値）を表示しており、その右側には事業性評価結果を○×で表示している。さらに、その国および地域における事業実施に関わる留意点および事業の持続可能性評価から考えられる留意点を下部に示している。

本試算例の GHG 排出量は 27.9g-CO<sub>2</sub>/MJ（合計）であり、開発ベンチマークの 40.5g-CO<sub>2</sub>/MJ

（ガソリン比 50% の GHG 排出量）以下を達成している。一方、バイオエタノール製造コストは 62 円/L（合計）であり、開発ベンチマークの 40 円/L を上回っているので未達となる。また、GHG 排出量の中でも土地利用変化（LUC：Land Use Change）に関わる部分はその土地の植生によって大きく変わるため、幅で示している。本試算例でも LUC による GHG 排出量を最大として考えた場合、GHG 排出量は 56.9g-CO<sub>2</sub>/

MJ（合計に記載の最大値）となり、開発ベンチマーク未達となるので、注意が必要である。

本ツールを用いることにより、原料生産地域、使用原料、転換プロセス等、様々な条件におけるバイオエタノール製造コストやGHG排出削減量を推算することができる。

## 6. 成果の活用

以上、当研究所が2008～2012年度において実施した「総合調査研究」の成果の中から、特に有望バイオマス生産地域検討および実用化事業モデル検討で得られた成果について述べた。

食料と競合しないセルロース系原料からのバイオエタノール等製造技術開発の成果を事業化に結び付けるためには、その事業を「どこで?」、「どのようにして?」実施するかを想定する必要がある。本検討では、原料生産から日本におけるバイオエタノールの受け取りまでの一貫したモデルを構築し、そのモデルに基づいたバイオエタノール製造コストの試算やGHG排出量の試算を行うことにより、経済的および環境的側面から事業の成立性を検討した。

本検討によって得られた成果は当該地域における詳細な現地調査によってその確度を高める必要があるものの、先行的FS結果として、実施国間や作業体系間の比較が可能であり、バイオ燃料事業者が事業を検討する際の一助となる情報を提供できるものと思われる。

また、ASEAN地域のように経済発展が著しい国々では、社会・環境・文化以外にも労務費や燃料費などの経済的な指標、港湾や道路網などのインフラの変化するスピードが速いため、使用した原単位情報も常に更新していく必要がある。

さらに、本事業において開発したツールは転換プロセスや対象地域を拡張することによって、バイオエタノールの製造プロセスの評価に留まらず、さまざまなバイオマス活用事業の事業性評価にも応用が可能であると思われる。

## 【謝辞】

本稿は、NEDOの委託研究「新エネルギー技術研究開発／バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発（先導技術開発）／総合調査研究」において当研究所が実施した成果について取りまとめたものである。

NEDOおよび関係各位に感謝するとともに、実用化事業モデルWGの委員長を始めとする委員のメンバーには本調査内容に対して適切なコメントを頂いたことをここに感謝する。

## 参考文献

- (1) 地球温暖化対策推進本部, 「京都議定書目標達成計画」(2008)
- (2) 農林水産省, 「バイオマス・ニッポン総合戦略」(2006)
- (3) バイオ燃料技術革新協議会, 「バイオ燃料技術革新計画」(2008)
- (4) NEDO, 「バイオマスエネルギー先導技術研究開発」(2011)
- (5) 一般財団法人リモート・センシング技術センター, <https://cross.restec.or.jp/cross-ex/topControl.action>
- (6) The Land Processes Distributed Active Archive Center, <https://lpdaac.usgs.gov/>
- (7) NASA, Shuttle Radar Topography Mission, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- (8) World Database on Protected Areas, <http://www.protectedplanet.net>
- (9) GADM database of Global Administrative Areas, <http://www.gadm.org/>
- (10) 国際緑化推進センター, 「熱帯樹種の造林特性」
- (11) 吉田貴紘他, 「インドネシアにおける木材伐出・加工におけるエネルギーフロー解析」, 海外の森林と林業, 75 (2009)
- (12) 今富裕樹他, 「インドネシア南スマトラ州産業植林地を訪問して」, 森林利用学会誌, 22 (2007)
- (13) 海外産業植林センター, 「インドネシア共和国ランブ州におけるパルプ用植林適地調査報告書」(2009)
- (14) 田中孝一他, 「サトウキビの機械化栽培 第1報 植付作業」, 農作業研究, 42 (1981)
- (15) 鈴木光雄, 「インドネシアにおける主要作物の農作業体系と適正農業機械化」, 農作業研究, 77 (1993)
- (16) 星野生正他, 日本草地学会誌, 24-4 (1979)
- (17) JETRO, 「第22回アジア・オセアニア主要都市・地域の投資関連コスト比較」(2012)
- (18) 日本農作業学会, 「農作業データ集」, <http://www.jsfwr.org/>
- (19) 鈴木誠, 東京大学農学部演習林報告, 100 (1998)
- (20) NEDO, 「セルロース系バイオマスを原料とする, 新規なエタノール発酵技術等により燃料用エタノールを製造する技術の開発」(2006)
- (21) Sea-Rates.com, <http://www.searates.com/>

# 福島事故後の欧州原子力発電所における 安全性向上策の状況



木村 公隆 (プロジェクト試験研究部  
主管研究員)

## 1. はじめに

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所事故後に、安全性向上を目指して、日本国内はもちろんのこと、米国、欧州、ロシア、中国等の原子力発電所を有する諸国や国際原子力機関（IAEA）をはじめとする関係国際機関が様々な活動を行ってきた。ここでは、欧州連合（EU）および欧州主要国の原子力発電所における安全性向上策に係わる最新の状況についてまとめた。

欧州では、福島第一原子力発電所の事故を受け、直ちにEUを中心として、稼働中および廃止措置中の原子炉を対象に「ストレステスト」と呼ばれる安全性評価（プラントの安全余裕の再評価）が実施され、その一環として、

国別の評価報告書に対する欧州大のピアレビュー（専門家チームによる評価）も行われた。ここでの指摘事項も踏まえて、各国より国別行動計画が提示され、各国の実施内容や実施状況の確認を行うフォローアップ会合も開催されている。以下において、これらの状況について紹介する。

## 2. 欧州全体の状況

### (1) ストレステスト

#### ① 経緯

欧州理事会は、福島第一原子力発電所で発生した過酷事故（2011年3月11日）後、欧州委員会（EC）エネルギー部会での提案（2011年3月15日）を受けて、EUの全ての原子力発電所

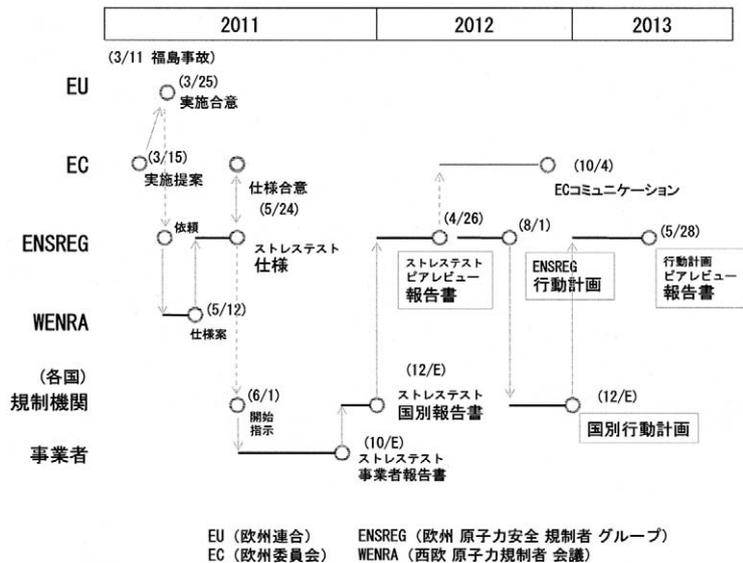


図1 欧州ストレステストの流れ概略

に対して福島第一原子力発電所事故に対する暫定的な教訓を踏まえた包括的で透明性のある安全性とリスクの評価（ストレステスト）を実施することに合意した（2011年3月24日、25日）。欧州理事会は、西欧原子力規制者会議（WENRA）の支援を受けてストレステストの範囲と評価手順を策定するように、欧州原子力安全規制者グループ（ENSREG）とECに対して要請した。WENRAはストレステストの仕様案を策定し、これをベースにENSREGとECによる協議が行われ、最終的にストレステストの仕様の合意に至った（2011年5月24日）。評価は2011年6月1日より開始された。

図1にストレステストに係る概略の流れを示す。以下に図に記載される各機関について補足する。

欧州理事会は、EUの最高協議機関であり、ECはEUの執行機関である。ENSREGは、EUの全加盟国の国家規制機関または原子力規制機関の高官から構成されるECの諮問機関である。WENRAは、原子力発電所を有するEU加盟国およびスイスの原子力規制機関の代表によって構成されている機関であり、EUの機関ではない。

## ② 評価項目

ストレステストでは、福島第一原子力発電所事故から得られた暫定的な教訓から導出された項目に対する、耐性評価、裕度評価を行うものであり、以下を技術的範囲としている。

- ・起因事象（地震、洪水、厳しい自然事象）
- ・安全系の機能喪失の影響（全交流電源喪失、最終ヒートシンク喪失、両者の重畳）
- ・過酷事故管理（炉心冷却機能喪失、使用済燃料プール冷却機能喪失、格納容器健全性喪失）

## ③ 評価のプロセス

ストレステストにおいては、以下の3段階のプロセスにより評価が実施された。

- ・第1段階：運転事業者が、ENSREGの仕様に従って評価を実施（～2011年10月）  
（安全性の改善に向けた提案を含む）
- ・第2段階：各国規制機関が、運転事業者の評価に

対して評価（～2011年12月）  
（必要に応じて規制要件を発行する）

- ・第3段階：国別報告書に対する欧州ピアレビュー（～2012年4月）

## ④ 参加国

欧州ストレステストに参加した国は、EU加盟国の15カ国にEU非加盟国のスイス、ウクライナを加えた計17カ国であった。表1に、欧州ストレステストに参加した国とそれぞれの国の原子炉基数およびサイト数を示す。

表1 欧州ストレステストの参加国<sup>(1)</sup>

国名	基数	サイト数
ベルギー	7	2
ブルガリア	2	1
チェコ	6	2
フィンランド	4	2
フランス	58	19
ドイツ(*)	17	12
ハンガリー	4	1
リトアニア(**)	2	1
オランダ	1	1
ルーマニア	2	1
スロバキア	4	2
スロベニア	1	1
スペイン	8	6
スウェーデン	10	3
英国	19	10
スイス(#)	5	4
ウクライナ(#)	15	4

(\*)：このうち、8基（サイト4か所）は福島事故後政治的に閉鎖

(\*\*)：2基ともチェルノブイリ型のため廃止措置中

(#)：EU加盟国ではない

## (2) ストレステストのピアレビュー

### ① ピアレビューの概要

ストレステストの第3段階としてのピアレビューは、2012年1月より実施された。ピアレビューは以下の内容を目的としている。

- ・ストレステストがENSREG仕様書を遵守して実施されているかを評価し、重要な問題が見落とされていないことを確認する。
- ・福島第一原子力発電所事故を踏まえ、発電所の頑健性を高めるための強い機能や脆弱性、並びに関連する提案事項を特定する。

ピアレビューは、以下のようなプロセスで行われた。

- ・国別報告書の書面による評価
- ・3つの重要な分野（極端な自然事象，安全機能喪失，過酷事故管理）について，各国の手法と調査結果の整合性を比較するための水平的な問題に関するレビュー

- ・17カ国の国別報告書それぞれに対する，垂直的な個別のレビュー（サイト訪問を含む）

ピアレビュー実施後，以下の報告書が公表された（2012年4月）。

- ・欧州全体のピアレビュー結果に関する報告書
- ・各国別のピアレビュー報告書（欧州加盟国15カ国と非加盟国2カ国の17カ国）

## ② ストレストテスト・ピアレビュー報告書

ピアレビューの欧州全体の報告書では，主な結果として，以下が述べられている。

- ・ピアレビューは，具体的な方法はそれぞれ異なるものの，全ての国が発電所の安全性を向上させるために十分な措置を講じていることを示した。
- ・各国の取組方法と実施の度合いの相違にもかかわらず，強みと弱みを特定し，福島は災害から学んだ教訓に照らし合わせて発電所の堅固さを高めるために可能な方法を特定することについて，ピアレビューは欧州全域にわたり全体的な整合性があることを示した。
- ・ストレストテストの結果として，発電所の堅固さを高めるための大幅な措置が既に決定されているか，検討が進められている。

報告書では，今後欧州レベルで取組むべき事項として，以下の4項目が指摘されている。

- ・全般的に地震や洪水の設計基準の評価について，ENSREG仕様は良く遵守されていた。しかし，自然ハザードに関しては，各国の取組方法に大きな相違が存在し，整合性が欠けていた。WENRAは，地震，洪水，極端な気象条件を含む自然ハザード評価の指針，および設計基準を超えた裕度とクリフエッジ効果（注：負荷の小さな変動に反応して発電所の状態が突然大きく変動すること）について関連指針を策定すべきである。
- ・発電所の安全性と頑健性を維持・改善するため定期安全レビューが効率的な手法であることが，

ピアレビューにおいて確認された。ENSREGは，定期安全レビューに重点を置き，少なくとも10年ごとに，自然ハザードおよび発電所の関連規定に対する再評価を実施する必要性に重点を置くべきである。

- ・原子力事故に起因する放射性物質の放出に対して，人と環境を守るための最後の障壁として必要不可欠なものとして格納容器の機能の重要性が福島県の災害により再度強調された。各国の規制当局は，格納容器の健全性を保護するために特定された措置の迅速な実施について検討すべきである。

また，欧州レベルの勧告項目以外に，ピアレビューで取り扱われた項目に関し，各国の規制当局によって検討されるべきものとして，各トピック別にいくつかの項目があげられている。表2にピアレビューで取り扱われた考慮すべき項目を示す。

表2 ピアレビューで取り扱われた考慮すべき項目 (2)

	番号	考慮すべき項目
自然ハザード	1.1	ハザード発生頻度
	1.2	地震の二次的影響
	1.3	空間防護手法
	1.4	早期警報の通知
	1.5	地震監視
	1.6	認証されたウォークダウン
	1.7	洪水裕度評価
	1.8	外部ハザードに対する裕度
安全系の喪失	2.1	代替冷却及びヒートシンク
	2.2	AC電源
	2.3	DC電源
	2.4	運転・準備活動
	2.5	計測と監視
	2.6	停止の改善
	2.7	原子炉冷却材ポンプシール
	2.8	換気
	2.9	中央制御室と緊急時対策所
	2.10	使用済燃料プール
	2.11	分離独立
	2.12	流路とアクセスの利用可能性
	2.13	可搬式機器
	2.14	掩蔽防護/強化されたシステム
	2.15	複数の事故
	2.16	設備検査と訓練のプログラム
	2.17	不確実性に対処するためのさらなる研究
過酷事故管理	3.1	WENRA(西欧原子力規制者会議)参照レベル
	3.2	過酷事故管理(SAM)設備機器の設備
	3.3	厳しい外部ハザード後のSAM措置の評価
	3.4	過酷事故管理指針(SAMG)の強化
	3.5	SAMGの検証
	3.6	SAM演習
	3.7	SAM訓練
	3.8	全ての原子力発電所状態へのSAMGの拡張
	3.9	通信の改善
	3.10	予期しない場所での水素の存在
3.11	大量の汚染水	
3.12	放射線防護	
3.13	サイト内緊急事態センタ	
3.14	現地事業者への支援	
3.15	レベル2確率論的安全評価(PSA)	
3.16	過酷事故の研究	

### (3) 行動計画

#### ① ENSREG 行動計画

ENSREG より、「行動計画：欧州原子力発電所に対して実施されたピアレビューのフォローアップ」が公表された<sup>(3)</sup> (2012年8月)。これはピアレビューのフォローアップに関する計画であり、各国に行動計画をまとめることを要求している。

#### (加盟国および ENSREG の行動)

- ・各国規制当局は、福島後の教訓とストレステスト・ピアレビューの勧告・助言に関する国別行動計画を2012年末までに策定・公表する。
- ・国別行動計画は、以下に関する実施状況の情報を含むこと
  - 国別報告書に記載された国内のストレステストに関する規制当局の結論
  - ピアレビュー全体報告書および国別報告書に含まれた勧告項目
  - 原子力安全条約締約国会議から得られる追加的な勧告
  - 各国での評価および関連する決定から得られた追加的な活動
- ・ENSREG ワークショップが2013年に開催され、国別行動計画の内容と実施状況について議論を行う。ワークショップの主目的は、国別行動計画を説明し、それらについて共通の議論を通じてピアレビューを行うこと

#### (フォローアップのためのサイト訪問)

- ・サイト訪問は、国別行動計画の一環として実施された安全改善措置や、計画中または検討中の措置に関する情報交換に重点を置く。

#### (透明性と公衆の参画)

- ・ENSREG および EC による声明 (2011年5月) で表明された公開性・透明性の原則は、既に欧州ストレステストとピアレビューに対して適用されている。それらはまた、フォローアップ行動計画にも適用される。
- ・全ての国別行動計画と ENSREG 行動計画は、各国法制および国際的義務に基づいて公開される。国別行動計画へのリンクは ENSREG ウェブサイトを通じて提供される。

#### ② 国別行動計画

2012年12月末から2013年1月初めにかけて、欧州ストレステストに参加した各国は、ENSREG に対して国別行動計画を提出し、公開した。

国別行動計画は、ENSREG がまとめた「行動計画」を受けたものである。欧州ストレステストに参加した EU 加盟 15 カ国、EU 非加盟国のスイス、ウクライナから発行された。

#### ③ 国別行動計画のピアレビュー

ENSREG がまとめた「行動計画」に基づき、国別行動計画のピアレビュー会議 (ワークショップ) が開催された (2013年4月)。

国の規制機関が今後進展させるべき課題として、以下の指摘事項が示された<sup>(4)</sup>。

- ・事故時の環境への放射性物質の放出を防止するため格納容器の健全性を確保すること
- ・緊急事態に対処するため、保護される機器への設計要件と同様に、可搬機器の設計、品質保証、維持に対する要件の検討を進めること
- ・自然災害により破壊された状況で、同じサイトの複数の施設の同時の過酷事故に対応できるよう、必要な資源と配置が機能していることを示すこと

また、各国の行動計画の更新を考慮し、ピアレビューのための次回ワークショップを2015年以降に行いたいとしている。

## 3. 主要国の状況

ここでは、主要国の状況として、フランス、ドイツ、スイスについて紹介する。

### (1) フランス

フランス原子力安全規制当局 (ASN) は、福島事故に鑑みて、首相よりフランス国内すべての原子力施設に追加的な安全監査を実施するように要請された (2011年3月23日)。これに対する ASN の見解は、「直ちに緊急措置を取る必要性はない。しかし、同様の事象

に関する補完的安全評価を短期間に実施すべきである」というものであった。

ASNは、フランス電力(EDF)に対する「補完的安全評価(ECS)」を実施することの指示を含む決定を発行した。ASNは、国内の原子力施設認可事業者に対して、補完的安全評価の仕様詳細決定を行ったと発表した(2011年5月)。対象施設はENSREG仕様より拡大され、建設中の発電所、核燃料サイクル施設および原子力研究施設を含む。なお、施設は重要性によって異なった期限が設定された。

原子力発電所を含む重要な原子力施設の認可事業者は補完的安全評価結果をASNに報告した(2011年9月)。なお、優先度の低いとさ

れた施設についての評価結果は、提出期限とされた2012年9月までにASNに提出された。

ASNは、2012年1月、福島事故を受けて国内の稼働中の原子炉などで実施した補完的安全評価報告書をフィヨン首相に提出し、同報告書はENSREGを通じてECに提出された。

ASNは、EDFに対する指示を含む決定を発行した(2012年6月)。

ASNは、2012年12月、欧州ストレステストの結果を受けて、ENSREGから指示されていた国別行動計画を公表した。同報告書による指示項目は、基本的に2012年6月のASN指示に基づいたものである。表3に、補完的安全評価に基づく指示の概要を示す。指示は

表3 フランス・補完的安全評価(ECS)に基づく指示<sup>(5)</sup>

番号	概要
	<中核的措置(ハードコア)>
ECS-1	危機管理施設を含む「中核的措置」の構造と機器の定義 「中核的措置」の要件の定義 多様化された構造・機器に基づく「中核的措置」
ECS-16. I	非常時の冷却材の確保
ECS-16. II	原子炉停止時の一次系への非常用給水の確保
ECS-18. II	究極の非常用ディーゼル発電機
ECS-18. III	暫定的な非常用発電機の設置
	<耐震対策>
ECS-8	地震計のRFS(基本安全規則) 1.3. bへの適合
ECS-9	地震発生時の相互作用対策
ECS-10	地震発生時に備えた要員の準備体制強化
ECS-12	防火対策の耐震性検証
ECS-13	地震発生時の自動停止の是非の検討
	<洪水対策>
ECS-4	REXブレイエ(洪水対策手法)の教訓反映作業完了
ECS-5	「空間防護」の要件遵守
ECS-6	洪水防護対策の強化
ECS-7	洪水発生時の孤立サイト対策(クリュアスとトリカスタン)
ECS-11	フェッセンハイムとトリカスタンの堤防の強化
	<冷却水・電力の供給対策>
ECS-15	ヒートシンクの設計の評価
ECS-17	長期のUHS・全電源喪失に対する施設の強化
ECS-18. I	蓄電池自立性の強化
	<過酷事故管理・危機管理>
ECS-14. I	極端な状況での周辺産業によるリスク
ECS-14. II	緊急時の周辺産業との調整
ECS-19	圧力容器貫通と格納容器内水素の検知用計装機器の冗長性確保
ECS-20	プール状態監視計装機器の強化
ECS-21	燃料建屋内の使用済燃料輸送容器の落下の影響の防止・緩和のための追加的措置の研究 燃料建屋内の容器の落下の影響の研究
ECS-22	燃料プールからの急速な排水事故防止対策の強化
ECS-23	取扱中の燃料集合体の安全な場所への保管
ECS-24	プールでの事故時の熱・水力学的挙動
ECS-25	燃料移動水路(transfer tube)での漏えい対策の強化
ECS-27. I	地質工学的閉じ込め又は同等の効果を持つ措置についての検討
ECS-27. II	水理地質学的データシートの更新
ECS-28	EPRについて:格納容器内圧力管理措置の強化
ECS-29	USフィルタ付ベントシステムの強化
ECS-30	地震・洪水に対する危機管理施設の設計
ECS-31	放出に至るまで施設管理を確保するための変更
ECS-32	複数基における緊急事態管理組織
ECS-34	病院との契約の更新
ECS-35. I. II	極端な状況下での危機管理活動の実施可能性
ECS-35. III. IV	事故管理訓練
ECS-36	FARN(原子力即応部隊)



図2 フランス・補完的安全評価 (ECS) に基づく作業スケジュール (5)

全部で36の項目より構成されている。

作業項目は、中核的措置、耐震対策、洪水対策、冷却水・電力の供給対策および過酷事故管理・危機管理、に分類され、2018年までのスケジュールが示されている。図2にそのスケジュールを示す。

### ① 中核的措置

フランスで提案されている「中核的措置 (ハードコア)」という概念は、重大な事故を防止またはその進行を制限することを意図した、最終的な手段となるシステムや機能を示すものとされている。

ASNの指示においては「中核的措置」として、以下の機能を要求している。

- ・燃料溶融による事故を防止またはその進行を制限すること
- ・大量の放射性物質の放出を制限すること
- ・事業者が危機を管理する責務を果たすことを確実なものとする

ASNからEDFに対して検討要求された「中核的措置」は、以下のとおりである。

- ・危機管理施設を含む「中核的措置」の構造と機器の定義

- ・「中核的措置」の要件の定義
- ・多様化された構造・機器に基づく「中核的措置」

上記を受けたEDFから説明書面は期限までに提出され(2012年6月)、検証作業が進められているとのことであるが現状公開されていない。このため、ここでは、国別行動計画において、対応項目のうち「中核的措置」として分類されている以下の2項目を示すものとする。

- ・緊急時の水源(ヒートシンク喪失時に原子炉および燃料貯蔵プールの残留熱を長期的に除去するための技術的バックアップ装置)
- ・追加的な電力供給手段(外部電源・所内電源喪失時に「中核的措置」の要件が適用されるシステム・機器に対して電力供給を可能とする追加的な手段)

前者に関しては、シノンとゴルフエッシュを除く各サイトについて変更措置が提出され、諮問委員会で審査されている状況である。後者に関しては、設置期限は2018年末であり、検討作業が進行中である。

### ② 原子力即応部隊

ASNは事故発生後24時間以内に現場で対

応できるように、特殊チームおよび設備・資機材を集結させる全国規模の緊急配置体制としてEDFが提案した「原子力即応部隊」(FARN)を、2012年から段階的に設置することを義務付けるとした。

FARNは、24時間以内に現場で当直を交代し、電力を供給する非常用手段を提供する。部隊発動後12時間以内にサイトで活動を開始する。FARNは、大量の放射性物質放出が生じた場合を含めて、6基の原子炉を有するサイトで活動ができることを実証する必要がある。

FARNの創設について、最初のチームの設置は2012年12月まで。4基サイトでの運用は2014年中、6基サイトでの運用は2015年中に開始する予定とされている。

4地域で設置される予定であり、その拠点としては、図3に示すダンピエール、シボー、パリュエル、ビュジュイの各サイトとされる。

## (2) ドイツ

ドイツ連邦政府は、福島第一原子力発電所の事故後、8基の原子炉の運転を停止させた。その後、後述する改定原子力法の施行に伴って、そのまま閉鎖扱いとさせた。ドイツ政府は、2022年までに全原子力発電所の運転を終了させる改定原子力法を施行した(2011年8月6

日)。改定原子力法により、各原子炉の停止時期がそれぞれ明記された。

欧州ストレステストの実施に係る補足を以下に示す。

- ・ドイツ連邦政府は、各州規制当局に対してEUのストレステストをENSREGの仕様に基づいて実施するように要請した。これを受けてストレステストが実施され、報告書はENSREGに提出された上で、ピアレビューを受けた。なお、ドイツのストレステストは、航空機衝突、爆発波、毒ガス、テロ・サイバー攻撃のような、人為的な事象も対象としている。
- ・ドイツ連邦政府は、国別行動計画をENSREGに提出した。国別行動計画では、既に閉鎖された原子炉を含め、国内の原子炉についてそれぞれストレステストを受けてなされた勧告項目の実施状況が示されている。行動計画では、実施すべき勧告項目について、既に完了したものに加え、2013年から2014年にかけて完了予定のものが含まれている。勧告項目は各原子炉共通で示されている。

## (3) スイス

### ① 欧州ストレステストへの参加

スイスはEU加盟国ではないが、スイス連邦原子力安全検査局(ENSI)は、2011年6月

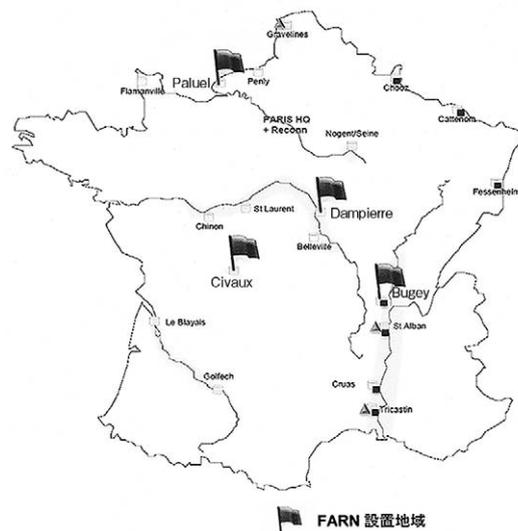


図3 FARN 設置地域 (6)

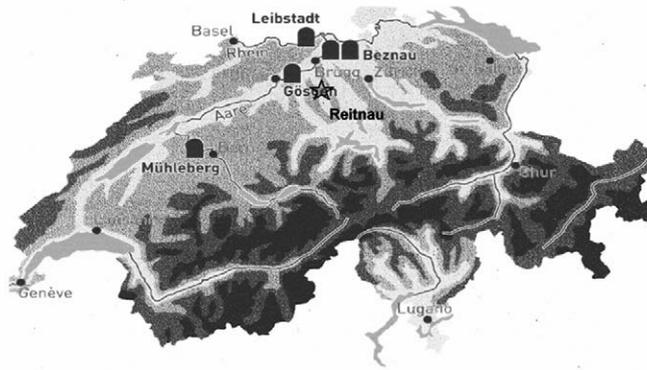


図4 ライトナウ保管施設設置地域 (7)

1日の公式命令において、スイス国内の原子力発電所運転管理事業者に対して欧州ストレステストに参加するように指示した。2011年12月にスイスはストレステスト報告書をENSREGに提出した。

ENSIは、2013年1月、ENSREGから指示されていた国別行動計画を公表した。スイスはEU加盟国ではないため、義務としてではなく、自発的に行動計画を策定・提出した。スイスがENSREGに提出した国別行動計画の進捗状況では、ピアレビューおよびストレステストで指摘された項目についての実施状況がそれぞれ説明されている。

#### ② ライトナウ集中保管施設

福島事故後、ENSIは、国内の原子力発電所に対して地震および津波に耐えることが可能な保管施設を設置することを指示した(2011年3月18日)。これに対して国内の4カ所の発電所は、図4に示すように共同でライトナウに集中保管施設を設置することを決め、使用開始した(2011年6月)。この保管施設の特徴を以下に示す。

- ・重大な事故に対する機器が作動可能な状態で保管されている。
  - 非常時に必要な機器に電力供給し、蓄電池に充電するための非常電源装置
  - 冷却材を供給する移動式のポンプ
  - 電気ケーブルおよび冷却水用のパイプ
  - 輸送可能なドラム缶に入ったディーゼル燃料

- 放射線防護のための防護手段と計測装置

- ・輸送手段についても十分に考慮されている。(緊急事態発生時における、当該地域の軍の輸送能力の活用等)

#### 4. まとめ

欧州においては、EUが主導して、福島第一原子力発電所事故の発生後、EU内のすべての原子力発電所の安全評価の実施が早期に合意され、約3カ月後にはストレステストが着手された。ストレステストの結果は、国内の規制当局の評価だけでなく、ピアレビューの形で欧州大での評価が実施された。

ストレステストを経て、欧州各国は国別行動計画を策定し、行動計画のピアレビューを通じ情報の共有化等が行われている。各国の安全性向上策として、フランスの原子力即応部隊の創設やスイスの中央外部貯蔵施設の設置等、独自の取組も見られる。

以上の欧州での安全性向上に対する様々な取組は、日本国内の規制者や事業者へも大きな影響を与えており、日本国内の原子力発電所の安全性強化に非常に有益かつ参考となるものと考えられる。

#### 参考文献

- (1) EC ストレステストに関するコミュニケーションについてのメモ  
<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/12/731&format=HTML>

- (2) ENSREG 勧告と提案のとりまとめ  
[http://www.ensreg.eu/sites/default/files/Compilation of Recommendationsl.pdf](http://www.ensreg.eu/sites/default/files/Compilation_of_Recommendationsl.pdf)
- (3) ENSREG 行動計画  
[http://www.ensreg.eu/sites/default/files/ENSREG Action plan.pdf](http://www.ensreg.eu/sites/default/files/ENSREG_Action_plan.pdf)
- (4) ENSREG プレス発表  
<http://www.ensreg.eu/node/1344>
- (5) フランス 国別行動計画 (2012年12月)  
<http://www.ensreg.eu/node/686>
- (6) Complementary Safety Assessments within the EDF nuclear fleet, Atomexpo 2012 International Forum, 2012  
[http://2012.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present 2012/Camarkat.pdf](http://2012.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present_2012/Camarkat.pdf)
- (7) Switzerland LWR Activities 2012/2013, TWG-LWR 18th Meeting, IAEA, June 2013  
[http://www.iaea.org/nuclearenergy/nuclearpower/ Downloadable/Meetings/2013/2013-06-18-06-20-TWG- NPTD/20-switzerland.pdf](http://www.iaea.org/nuclearenergy/nuclearpower/Downloadable/Meetings/2013/2013-06-18-06-20-TWG-NPTD/20-switzerland.pdf)

## 福島第一原子力発電所の事故の要因と シミュレーションによる事故事象の解析

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

2011年3月11日、マグニチュード9.0の巨大地震と、それに伴う巨大津波が関東から東北地方の太平洋岸一帯を襲った。この災害によって東京電力の福島第一原子力発電所（以下「福島原発」）1～3号機は甚大な被害を受け、多量の放射性物質が環境に放出されて多くの人達が今なお避難生活を余儀なくされるなど、周辺環境にも大きな影響を残している。

本稿では、福島原発事故がなぜこのような悲惨な状況に拡大したのか、その要因を探るとともに、炉心溶融に至った事故進展挙動をシミュレーションした結果について述べる。

### 2. 地震発生直後の原子炉冷却の状況

地震発生時まで運転中であった福島原発1～3号機は、地震動の信号を受けて自動的に運転が停止した（運転停止は核分裂の停止を意味する。以下「スクラム」）。

一般に原子力発電所では、運転の継続とともに核分裂で生成した放射性物質が核燃料の内部に蓄積する。この核分裂生成物はスクラム後も発熱（崩壊熱発生）が長期間続く。この熱を除去しないと核燃料が過熱し溶融に至るため、スクラム後も長期間にわたって原子炉を冷却し崩壊熱を除去する必要がある。

原子力発電所の安全を確保するためのほとんどの機器類は、その作動のために電源（交

流電源、あるいは少なくとも直流電源）を必要とする。福島原発1～3号機における電源の確保状況は以下のとおりであった。

#### (1) 地震発生から津波襲来までの間：

地震時の地滑りにより所外電源を引き込む送電線の鉄塔が倒壊したこと等により所外電源が断たれたが、直ちに非常用ディーゼル発電機が作動したことにより、津波襲来までは交流電源が確保された。また、直流電源（バッテリー）も確保されていた。

#### (2) 津波襲来以降：

非常用ディーゼル発電機および電源盤が海水に水没して機能を喪失した（全交流電源喪失事象）。現場では代替電源車の調達に奔走したが、電源盤の仮設も必要としたことから、全交流電源喪失は長期にわたった。1、2号機では、さらにバッテリーも水没し直流電源も喪失した（全電源喪失事象）。3号機のバッテリーは水没を免れたため、主要な弁操作等に使用された。津波襲来に伴って、自動的なプラントデータの記録が断たれたため、現場の運転員は可搬バッテリーを用いて、断続的に主要なプラントデータを実測した。

1～3号機において、スクラム後に作動した原子炉冷却系統を図1に示す。これらの冷却系統はすべて交流電源がなくても作動するものであった。

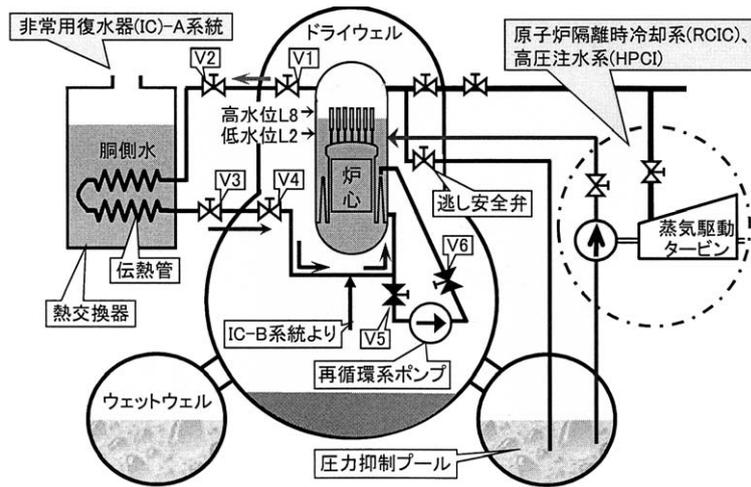


図1 スクラム後に作動した原子炉冷却系統

[1号機]

1号機で作動した冷却系統は、非常用復水器(IC)のみであった。ICは、崩壊熱を受けて発生した炉内蒸気を熱交換器で凝縮した後、再び炉内に戻す系統である。IC弁の開閉には電力が必要であるが、弁が開いていれば蒸気・凝縮水は自然循環し、崩壊熱が除去される。熱交換によって胴側水は蒸発して保有水は徐々に減少していくが、胴側水を補給せずに約6時間は連続運転が可能である。

1号機では、スクラム後に再循環系配管の弁V5、V6が自動閉止し、その後IC弁V1～V4が自動で開放し、2系統のICが自動起動した。ICは1系統だけでも崩壊熱除去の能力があるので、その後、現場の運転員は直流電源で弁V3を操作して1系統のIC(A系統)だけを使用し、断続的に起動・停止を繰り返した(V3以外の他の弁は開放状態)。3月11日15:34に4度目の弁操作によってICが停止した後、15:37に津波襲来によって全電源喪失となった。これ以降、ICが稼働することはなく、3月12日05:46の消防車注水までの14時間にわたって、崩壊熱除去のための冷却が途絶えた。

[2号機]

2号機では、原子炉隔離時冷却系(RCIC)が作動した。RCICは、原子炉内の蒸気を用いてタービンを駆動し、連結したポンプによ

て圧力抑制プール内の水を汲み上げて炉内に注水するシステムである。RCICには、炉内の水位が図1に示した低水位L2まで低下するとその信号を受けて自動的に弁が開いて注水を開始し、水位が図1の高水位L8まで回復すると自動的に弁が閉じて注水を停止するというロジックがあらかじめ組込まれている。

実際には、スクラムの3分後に運転員がRCICを手動起動し、その後も手動による停止・再起動が津波襲来の直前まで繰り返された。津波襲来時にはRCICは作動中であり、津波襲来による全電源喪失に伴って弁は開いた状態のまま固定された。その後は、RCICを停止させるL8信号が発せられないため、RCICは作動を継続し、炉内に連続的に水を送り込んだ。その結果、炉内水位は上昇し、遂には主蒸気管から水が溢れ、RCICタービンには水と蒸気が混在した二相流が流入した。タービンは本来蒸気単相流で作動するように設計されているため、二相流条件下では設計通りの注水流量は得られず、長期間にわたって部分負荷運転が続いた。スクラム後の崩壊熱発生量の減少に伴い、発生蒸気量も時間経過とともに減少し、RCICタービンを駆動できなくなり、3月14日09:00頃にRCICは停止した。それまでの約66時間、炉内に冷却水が維持され、崩壊熱は除去されたが、その後消防車による注水が開始されるまでの約11時間は、崩壊熱除去のための冷却が途絶えた。

[3号機]

3号機では、RCICと高圧注水系（HPCI）が作動した。HPCIの作動ロジックはRCICと同一である。3号機では交流電源は喪失したが、直流電源（バッテリー）は水没を免れた。そこで運転員は、直流電源を用いて弁を操作し、これら冷却系の起動・停止と炉内注水流量の制御を実施した。最終的にHPCIが停止（3月13日02:42）するまでの約36時間、炉内水位が維持され、崩壊熱は除去された。その後消防車注水が3月13日09:25に開始されたが、その間6時間43分にわたって、崩壊熱除去のための冷却が途絶えた。

以上に述べた各号機の原子炉冷却の状況を時系列で比較して図2に示す。各号機の冷却システムが機能停止した後、消防車による注水までの間隔は、1号機が最も長く、次いで2号機、3号機の順になっていることがわかる。

冷却手段が途絶えると、核燃料は過熱する。原子炉の炉心には、核燃料を保持するための各種構造材があるが、これら構造材（特にジルコニウム）は温度が上がると水、あるいは水蒸気と反応（酸化反応）して水素が発生する。炉内で発生した水素は、ドライウエルを經由して原子炉建屋に漏洩していく。原子炉建屋には、ブローアウトパネルと言われる小窓が設置されており、建屋の圧力が上昇すると開放して建屋内の気体を外部に放出する仕組み

になっている。1号機と3号機では、このブローアウトパネルが開かずに、水素爆発に至った。一方2号機では、3号機の水素爆発に伴う爆風によってブローアウトパネルが開放したため、建屋上部での水素爆発は発生しなかった。なお、4号機は定期点検のために地震発生前から運転停止中であり、原子炉内の核燃料は取り除かれていたが、3号機で発生した水素が原子炉圧力容器から外部に漏洩し共用配管を通して4号機原子炉建屋に流入したため、建屋で水素爆発を起こした。

### 3. 事故事象進展のシミュレーション

1～3号機の炉内にあった核燃料はどのような経過を辿って溶融に至ったのか、当研究所が所有するシビアアクシデント解析コードSAMPSONを用いて、事故事象の解析を実施した。

一般に原子力発電所では、プラントの状態を示す各種のパラメータ（圧力、温度、炉内水位など）は、電源が存在する限り連続的に記録されている。しかし、福島原発では、津波によって電源を失ったため、津波襲来後は、運転員が可搬バッテリーによって断続的に計器を目視で確認し記録に残した。

事故発生後、初期の段階における解析は、これらの実測値を再現することができなかった。

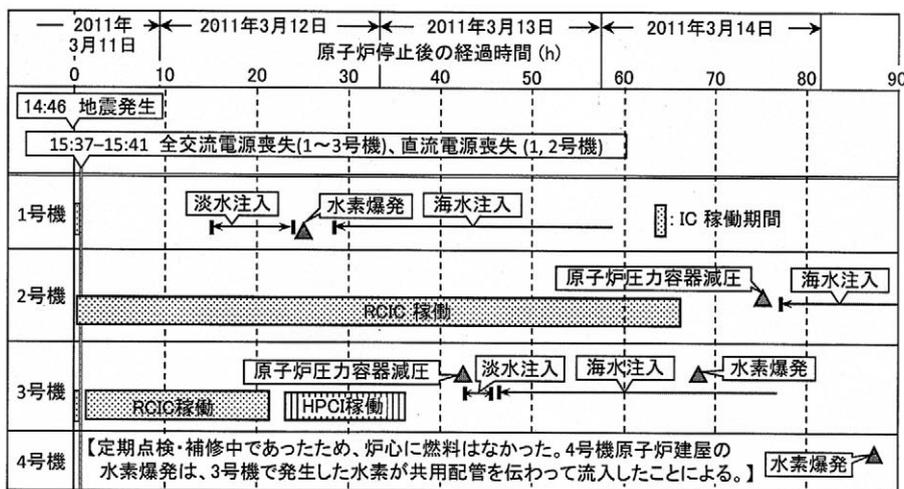


図2 地震発生後の原子炉冷却の状況

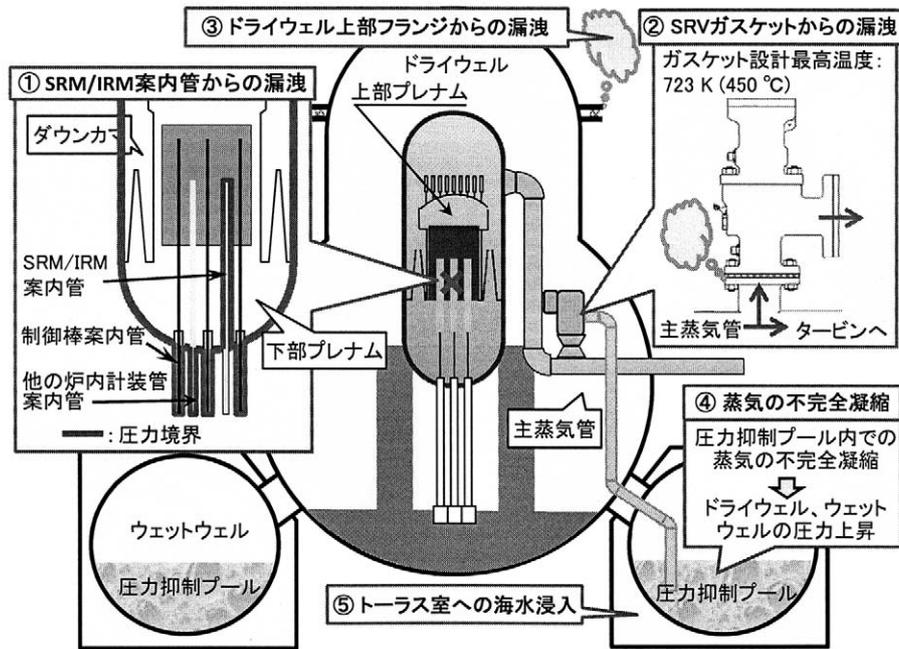


図3 新たにモデル化した福島原発固有の現象

その原因がどこにあるかを探った結果、図3に代表例を示すように、1～3号機ではそれぞれ固有の現象が発生し、これらの現象を記述するモデル（数式）がオリジナルのコードには組み込まれていないことが判明し、新たなモデル化が必要となった。1～3号機で見られた固有の現象を以下にまとめて示す。

(1) 固有の現象の新たなモデル化

① ドライウエルへの蒸気の直接漏洩

設計上は、原子炉圧力容器内の蒸気がドライウエルに直接流出する経路は存在しない。しかし、崩壊熱除去の冷却システムが作動せず、炉内が高温になる異常状態下では、以下の漏洩経路が存在する。

a) 炉内計装管の損傷

原子炉内には、中性子計測用の各種計装管が挿入されている。その中の Source Range Monitor (SRM) と Intermediate Range Monitor (IRM) は、図3①に示すようにその案内管の下端がドライウエル内に開放されている。原子炉圧力容器の下部（下部プレナム）には、これら以外にも多数の案内管が貫通しているが、SRM/IRM 以外の案内管はそ

の下部がシールされている。通常運転中は、SRM/IRM 案内管も十分な強度を有しているが、案内管の温度が上昇すると、材料強度が弱くなり、7 MPa の圧力差で座屈を起し、損傷部から炉内の蒸気が案内管内部を伝わってドライウエルに直接漏洩する。ここでは、座屈の条件として Von Mises の簡易式を採用した。この式は案内管材料の温度に依存する弾性係数の関数で表される。図4に座屈を起す圧力と温度との関係を示す。案内管の温度が1,300K (1,027 °C) に達すると、7 MPa の圧力差で座屈を起すことが分かる。

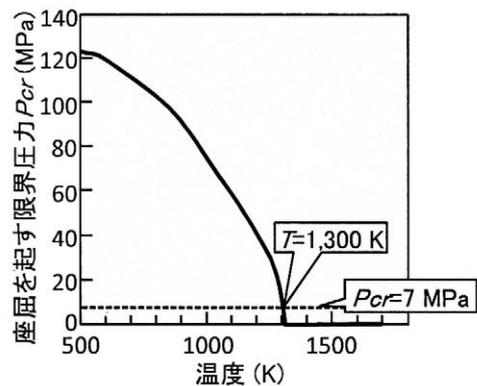


図4 座屈限界圧力の温度依存性

#### b) 逃し安全弁ガasketの高温劣化

逃し安全弁 (Safety Relief Valve: SRV) は主蒸気配管に取り付けられており、炉内の圧力が高くなると SRV が開いて蒸気を圧力抑制プールに逃がして凝縮させ、圧力が下がると自動閉止するものである。図 3 ②に示すように、SRV の配管のガasketは、設計最高温度が 723K (450℃) であり、SRV を通過する蒸気の温度がこれを超えると、高温劣化を起してシール機能が喪失し、蒸気が直接ドライウエルに漏洩する可能性がある。

#### ②ドライウエルから建屋への漏洩

ドライウエルの上部は、図 3 ③に示すように、使用済み核燃料の交換や内部の補修・点検等のためにフランジ構造になっている。フランジにはガasketが挟みこまれ、ボルトで締めつけられている。実際の事故時には、ドライウエルに炉内の高温蒸気が直接流出し、ドライウエル雰囲気が高温になった。その際、ボルトが熱膨張で緩み、ガasket部に隙間が生じて、ドライウエルのガスが原子炉建屋に漏洩したと考えられる。

#### ③蒸気の不完全凝縮 (図 3 ④)

ドライウエルと圧力抑制プールは、配管を介して連通しており、ドライウエルに蒸気が流出して圧力が高くなると、ドライウエルのガスが圧力抑制プール内に流れ込み、蒸気がプール水で凝縮されて圧力上昇を抑える仕組みになっている。設計およびこれまでの評価においては、圧力抑制プールにおいて蒸気は完全に凝縮するとしていた。しかし、実際の事故時には、蒸気凝縮の進展に伴って、圧力抑制プールの水の一部 (特に、プールの上層部) だけが温度上昇し、残りの水は凝縮に寄与しなくなったと考えられる。この場合、高温のプール中に放出された蒸気は一部凝縮せず、ドライウエルおよびウェットウエルの圧力を想定以上に高めたと考えられる。

#### ④トラス室への海水浸入 (図 3 ⑤)

2号機では、圧力抑制プールが設置されているトラス室に、海水が浸入した痕跡が残っていた。トラス室に海水が入ると、プール水を冷却する効果が生じる。しかし、いつの時点で海水が浸入し、いつの時点で海水が引いたのか、その時刻については記録が残っていないため、不明である。現実には、その時刻を仮定して現実的な結果が得られるよう解析を進めるしか手立てがない。

#### ⑤ RCIC タービンの部分負荷運転

前述したように、2号機では RCIC が二相流条件下で長期間作動したと考えられる。二相流条件下でのタービンの作動は設計段階では想定されていなかったため、その性能は不明である。しかし、実測された原子炉圧力容器内の水位変化および崩壊熱発生量等に基づくエネルギーバランスから、タービンに抽気された二相流の流量および注水流量を推定することができる。

#### ⑥消防車注水配管における分岐管の存在

消防車注水に際して、現場ではタービン建屋にある注水口に消防ホースを接続した。注水配管は、ホースの接続口からタービン建屋を通過して原子炉建屋内に入り、原子炉圧力容器に接続されているが、この間に多数の分岐管が存在していた。いくつかの分岐管は弁が閉じられていたが、弁が開放状態となっていた分岐管が存在し、消防車からの注水のかなりの量が分岐管から漏洩したと考えられる。実測された注水流量は消防車ポンプからの吐出流量であり、炉内に入った流量ではない。そのため、ポンプの性能曲線と配管系統図に基づいて、分岐管からの漏洩流量を算出し、実際に炉内に注入された流量を推定した。

以上に述べた 1～3号機の固有の現象を新たにモデル化して SAMPSON コードに組み込み、それぞれの号機の事故進展挙動を解析した。以下には、特に原子炉圧力容器内の炉心

溶融挙動に焦点を当て、消防車注水までの間にどのように事故が進展したのか、そのシミュレーションの結果を述べる。

## (2) 1号機の解析結果

原子炉圧力の変化を図5に、原子炉压力容器内の水位の変化を図6に示す。

津波襲来で全電源喪失するまでの圧力変化は連続的に記録されているが、図5下段に示すように以降消防車注水までの間、圧力の実測は2点だけであった。1号機では意図的な減圧は実施していないが、7MPaを実測した後、0.9MPaを実測するまでの間に何らかの原因で

原子炉圧力が大きく減少したことになる。しかし、減圧のタイミングは実測値からは不明である。

全電源喪失まではICの断続的作動にあわせて圧力が変動しているが、解析値は実測値をほぼ再現している。図6で分かるように、この間、原子炉冷却材の流出はないので、水位も変動するが低下はしていない。その後、全電源喪失によって崩壊熱除去のための冷却が途絶えて原子炉圧力が上昇し、安全弁の機能が働いて炉圧は7MPa近傍で振動するという結果となった。安全弁の作動にあわせて炉内の蒸気が安全弁から流出し、原子炉水位は低下し始める。スクラム

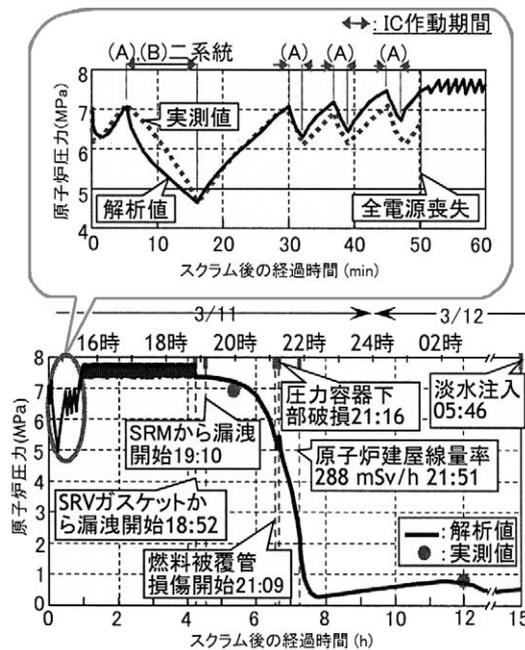


図5 1号機原子炉圧力の時系列変化

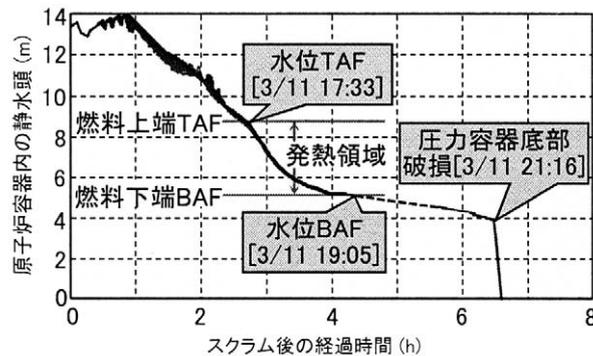


図6 1号機原子炉水位の時系列変化

後2時間46分で水位は核燃料の上端（TAF）まで低下し、これ以降、核燃料が空焚き状態となる領域が上端から徐々に広がっていき、核燃料の過熱が始まる。スクラム後4時間18分には、水位が核燃料の下端（BAF）にまで低下する。それ以前に核燃料の過熱に伴って炉内蒸気の温度も上昇するため、スクラム後4時間5分でSRVガスケットが劣化して蒸気漏洩が始まる。この時点では、漏洩蒸気流量は少ないので、崩壊熱による蒸気発生とはほぼ釣り合い、圧力の顕著な低下はみられない。ほどなくしてSRM案内管が座屈し、漏洩を開始する。SRVガスケットとSRM案内管の両方から蒸気が漏洩することにより、炉圧は徐々に低下し始める。水位がBAFを下回ってからは、炉内は蒸気雰囲気となり、核燃料の温度上昇が顕著になって、スクラム後6時間22分で核燃料の被覆管が破損、ほぼ同時刻（さらに1分後）には核燃料の溶融が始まる。溶けた高温の核燃料は压力容器の下部プレナムに蓄積し、スクラム後6時間29分で压力容器下部はクリープ破損を起す。現場で実際に消防車注水が始まったのは、压力容器下部破損から8時間半後であった。表1に解析で得られた主な事象発生時刻を示す。

消防車注水の遅れにより、それまでに核燃料を含む炉心構成材の67%が溶融し、炉内で発生した水素量の解析値は572 kgとなった。溶融した炉心構成材は、压力容器下部の破損部からドライウェル床に落下した。

### (3) 2号機の解析結果

図7に炉内の水位変化の解析結果を示す。RCIC作動中は、原子炉内水位はほぼ一定に保持される。RCIC停止後、原子炉圧力が上昇するとSRVの安全弁機能が働き、炉内水位は徐々に低下し始める。その後、消防車による注水を可能とするためにSRV開放による意図的な炉圧低下が試みられた。運転員の操作によってSRVが開かれると炉内水位は一挙に低下する。水位がBAFまで低下した後、海水注入が始まるまでの44分間、炉心は完全な空焚き状態となった。

図8に原子炉圧力の時間変化を示す。全電源喪失後もRCICによる注水が続いたが、L8信号が発せられないため、水位は上昇を続け、結果として水と蒸気が混在した二相流がRCICタービンに流れ込んだ。本来の設計によるRCIC注水流量は崩壊熱除去に対して十分な余

表1 主な事象の発生時刻（1号機）

事象	スクラム後の時間
炉内水位が燃料上端まで低下	2h 46m
SRVガスケットからの蒸気漏洩開始	4h 05m
炉内水位が燃料下端まで低下	4h 18m
SRM案内管からの蒸気漏洩開始	4h 23m
燃料被覆管の破損開始	6h 22m
燃料の溶融開始	6h 23m
原子炉压力容器下部破損	6h 29m
消防車による淡水注入開始*	14h 59m

\* 実際に現場でとられた対応

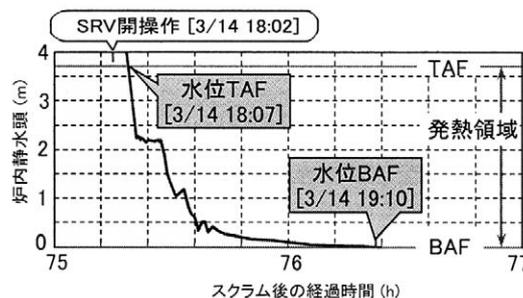


図7 2号機炉内水位の時系列変化

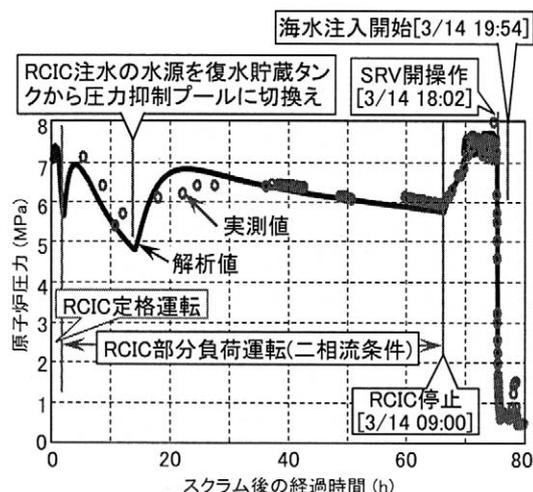


図8 3号機炉内水位の時系列変化

裕があるため、RCICの作動によって炉圧は低下する。しかし、二相流条件下でのタービン性能は、本来の蒸気単相流による駆動と比べて劣化した状態になったため、炉圧は図に示すように不安定な値となった。RCICの作動開始時には、復水貯蔵タンクの水を注水のための水源としていた。しかし、同タンクの水の枯渇により、3月12日04:20に水温が高い圧力抑制プールに水源を切替えた。この注水温度の変化によって、同時刻に原子炉圧力が極小値を示している。

表2に解析で得られた主な事象発生時刻を示す。消防車注水の前に、水位はBAFを下回っており、核燃料の溶融がすでに始まっていた。消防車注水はスクラム後77時間8分から始まった。消防車からの水は図3に示すダウンカマに注入された。そのため、まず下部プレナムを満たした後に炉心部分を下から冷却することにな

り、炉心冷却に有効に寄与するまでに相応の時間遅れが生じた。この間、すでに核燃料の溶融は始まっているので、溶融物は下部プレナムに落下していたことになる。しかし、前述したように消防ポンプからの吐出流量の一部分しか炉内に注入されないため、下部プレナムに落下した溶融物を有効に冷却するに至らず、消防車注水開始から1時間34分を経過した時点で压力容器下部はクリーブ破損するに至った。原子炉压力容器下部破損時点での核燃料を含む炉心構成材の溶融割合は38%、炉内で発生した水素量の解析値は930kgとなった。溶融した炉心構成材は、压力容器下部の破損部からドライウェル床に落下した。

#### (4) 3号機の解析結果

図9に原子炉圧力の変化を、図10に原子炉压力容器内の水位変化を示す。

表2 主な事象の発生時刻 (2号機)

事象	スクラム後の時間
炉内水位が燃料上端まで低下	74h 48m
炉内水位が燃料下端まで低下	75h 30m
燃料被覆管の破損開始	76h 36m
燃料の溶融開始	77h 00m
原子炉压力容器下部破損	78h 42m
消防車による淡水注入開始*	77h 08m

\* 実際に現場でとられた対応

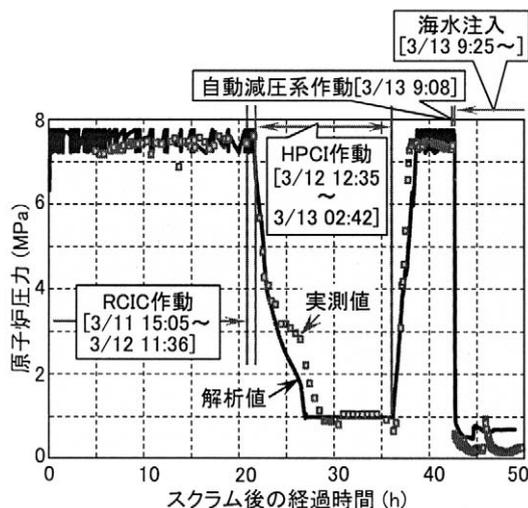


図9 3号機原子炉圧力の時系列変化

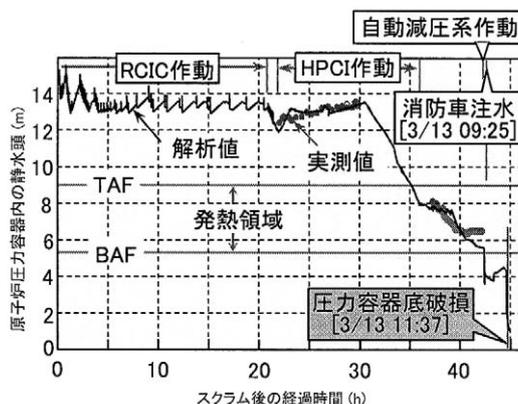


図10 3号機炉内水位の時系列変化

RCIC 作動中は、運転員による流量制御および起動・停止の繰り返しにより、炉圧は7MPaを少し超えた状態で維持され、水位もほぼ一定のレベルに維持される。3月12日 11:36にRCICがトリップすると水位が低下し、約1時間後にHPCIがL2信号により自動起動する。HPCIの能力はRCICより大きいため、水位は回復傾向を示すが、炉圧は1MPa程度まで低下する。HPCIタービンを駆動する蒸気圧力の低下に伴い、タービンの機能も低下し、注水流量も減少する。そのため、炉内水位は徐々に低下していく。3月13日 02:42にHPCIが停止した時点では、炉内水位はすでにTAFを若干下回っており、この時から燃料の過熱が始まる。3月13日 09:08に、直流電源がまだ

生きていたため、自動減圧機能(ADS)が働き、複数のSRVが同時開放したことによって炉圧は急激に低下する。このときの減圧開始時点では、水位はほとんどBAFまで低下していた。消防車による注水は、ADS作動後18分で始まっているが、分岐配管からの漏洩のため、実際に炉内に注入された水量は少ない。かつ最初にダウンカムに入った水はまず下部プレナムを満たした後、炉心水位を下から回復させるため、炉心冷却に寄与するまでには相当の時間遅れが生じた。そのため、炉心は冷却不足で過熱・溶融を開始し、3月13日 11:37にRPV底部の破損に至った。この間の主な事象の発生時刻を表3に示す。

消防車注水開始時点ではすでに核燃料を含

表3 主な事象の発生時刻（3号機）

事象	スクラム後の時間
炉内水位が燃料上端まで低下	35h 07m
炉内水位が燃料下端まで低下	42h 24m
燃料被覆管の破損開始	43h 16m
燃料の溶融開始	44h 23m
原子炉压力容器下部破損	44h 50m
消防車による淡水注入開始*	42h 39m

\* 実際に現場でとられた対応

む炉心構成材の40%が溶融し、炉内で発生した水素量の解析値は880 kgとなった。溶融した炉心構成材は、压力容器下部の破損部からドライウェル床に落下した。

#### 4. 事故拡大の要因

福島原発では、炉心溶融に引続いて原子炉建屋が水素爆発によって損壊し、大量の放射性物質（核分裂生成物）を周辺環境に放出する事態にまで事故が拡大した。なぜ、このような悲惨な状況にまで事故が拡大したのか、その要因を以下に述べる。

わが国の電力会社が自主的に実施してきたシビアアクシデント対策は、1990年8月30日の原子力安全委員会決定によるものであった。この決定では、「原子炉施設は、短時間の全交流動力電源喪失に対して、原子炉を安全に停止し、かつ、停止後の冷却を確保できる設計であること」とされていた。加えて、「長期間にわたる全交流動力電源喪失は、送電線の復旧または非常用交流電源設備の修復が期待できるので考慮する必要はない」と明記されていた。すなわち、当時の原子力安全委員会の考え方は、①直流電源（バッテリー）の喪失は考慮せず、②交流電源喪失に対しては短時間（1時間以内程度）で復旧あるいは修復できるので長期の交流電源喪失は考慮しなくて良い、というものであった。

わが国の電力会社におけるシビアアクシデント対策は、規制の考え方を踏襲して全交流電源の喪失は想定したが、長期の直流電源喪

失までは想定せず、少なくとも直流電源は生きているという前提をおいていた。そのため、非常時の運転マニュアルも直流電源は使用できる前提で整備されていた。また、少なくとも福島原発事故前には、直流電源を含む全電源喪失時のプラント挙動とその対策に関して教育・訓練が実施されたことはなかった。

一方米国では2001年9月11日の同時多発テロ事件を受けて、2002年2月25日に原子力規制委員会（USNRC）はテロ防護対策（通称「B5b」と呼ばれる対策）を米国の各電力会社に指示した。「B5b」には、直流電源も含む全電源喪失への対応策として、可搬ポンプによる炉心注水や可搬の直流電源による逃し安全弁の操作、および冷却機器・弁などを電源に依存せずに手動で操作できるようにしておくこと、などが含まれていた。当時の原子力安全・保安院（NISA）は、USNRCからB5bの内容について説明を受けていたが、テロ対策の一環でもあることから機密情報の扱いとされ、その内容が電力会社やプラントメーカーに開示されることはなかった。また、NISAではB5bを参考にわが国のシビアアクシデント対策を見直す動きも見られなかった。

（独）原子力安全基盤機構（JNES）は2008年3月に「地震時レベル2PSAの解析（BWR）」（JNES/SAE08-017）を公表した。この報告書には、1号機と同等の実機を対象として、直流電源喪失後に高温の溶融炉心によって原子炉压力容器が破損し、ほどなく格納容器も破損するという解析結果も含まれていた。このJNES解析は確率論的評価の観点からなされた

ものであり、この観点からは特段新しい情報を提供するものではなかった。しかし、直流電源喪失後7時間ほどで格納容器破損に至るとした解析結果について、規制側（原子力安全委員会、あるいはNISA）がどのように判断し、対応したかは判然としない。また、産業界では、その対策が現実が必要であるとの認識には至らなかった。それは、1990年の「長期の全電源喪失は考慮不要」という原子力安全委員会決定もあり、代替電源を早期に確保するという対策で対応できるとしていたためと推定される。

- **技術力の過信:**わが国の技術力は優れており、電力網も確立している。シビアアクシデントは確率的にはあり得るが、長期の全電源喪失は起きない、という思い込み。
- **思考停止:**諸外国が進めてきたシビアアクシデントの研究、その対策を参照することなく、シビアアクシデント対策の必要性に思いを巡らすことを中断した。
- **経済性重視:**上記2点の要因もあり、電力会社では屋上屋を重ねるシビアアクシデント対策(安全性の向上)よりは、経済性を重視する傾向が強まっていた。

このように米国では、同時多発テロ事件が契機となったものではあるが、直流電源を含む全電源が長期にわたって喪失した場合の対策が具体的にとられていた。これに対して日本では、短期間で電源が復旧できると誰もが思い込み、長期間にわたる全電源喪失の対策に思いを巡らすことができなかつた。その要因は以下の点にあったと考えられる。

今回の福島原発事故に対して、当事者としての電力会社は反省すべき点が多々あるであろうが、ここに至った経緯を考えると規制当局にもその対応に不備があり反省すべき点があると思える。加えて、学界も技術力過信・思考停止に陥り、何ら警報を発してこなかつた点は大いに反省すべきであると考えられる。

これらの反省課題を受けて、東京電力は「原

子力改革特別タスクフォース」を立ち上げ、過去の反省にたった原子力発電所運営組織の改革を進めている。また、日本原子力学会は「東京電力福島第一原子力発電所事故に関する調査委員会」を設置し、事故の要因解明と学会としての役割の再認識に努めている。規制の在り方については、原子力規制委員会が新たな規制基準を発表した。今後、わが国において原子力発電所の再稼働があり得る場合には、新たな規制基準に則った厳しい審査に合格する必要がある。

## 5. 事故の拡大を防ぐ手立て

わが国では、誰もが長期間全電源喪失の対応が現実に必要なとの認識に至らず、現場ではその対応に係わる教育・訓練は実施されていなかった。また、全電源喪失に対応した非常時マニュアルもなかった。こうした中で現場はその場での判断を余儀なくされ、その当時は最善の努力をした。しかし、前記したようなシミュレーションによる現象の理解が進んできた現時点において当時を振り返ると、当時の設備および入手可能な機器類の活用で炉心溶融を防ぐ手立てがあつたと考えられる。

### (1) 1号機

1号機ではスクラムから15時間後に消防車による炉内注水が開始された。それまでの間IC運転を継続し、15時間経過後に消防車を用いてIC胴側に水を補給すれば核燃料を過熱させず、炉心溶融の防止が可能であつた。

事故当時、巨大津波の襲来は予測していなかつたので、津波襲来までは実際に取られたIC運転を前提とし、津波襲来後にとるべき対応を以下に述べる。

- ①津波襲来後、車載バッテリー等の調達を最優先し、これを用いてICの系統弁を操作してICを再起動させる(現場では電源車調達が最優先したが、交流電源の全面復旧には電源盤の架設が必須であり、早期の交流電源復旧は実現困難と考えるべきであつた)。

②ICの系統弁を全開にすると、2基のICを1基ずつ作動させても、再起動後約6時間で(3月11日の24時間前後には)IC胴側水が枯渇し、崩壊熱除去機能を失う。

③再起動に際してIC流量を定格の30%程度まで絞り込む(弁を部分開にする)と、ICを1基ずつ運転することにより、胴側水の補給なしで再起動後約13時間は崩壊熱除去が可能となる。現地で実際に消防車注水が開始された3月12日 05:46に、消防車によってIC胴側に水を補給すると崩壊熱を継続除去できる。なお、2基目のIC再起動時には崩壊熱発生量が減少しているため、IC流量を定格の25%まで低下させても崩壊熱除去が可能であり、IC枯渇までの時間をさらに1時間強伸ばすことができる。早期のIC再起動が実施されると、核分裂生成物が放出されないため、タービン建屋や原子炉建屋の線量率上昇もなく、建屋内に作業員が立ち入ることも可能となる。

解析によれば、津波襲来後3時間以内にICを再起動させれば、燃料の過熱、および水素発生を増大を抑えることができる。感度解析によれば、津波襲来後はICを定格流量の30%程度まで絞った部分負荷運転をしても、1基のICで崩壊熱除去が可能である。これを実現する方策は以下の通りである。

## (2) 2号機および3号機

RCICあるいはHPCI停止後、炉圧を早期に減圧し、直ちに炉心スプレイ系を経由して消防車注水を開始し、かつ注水系統の分岐配管の弁をすべて閉じることにより、炉心溶融の防止が可能であった。

2号機、3号機ではRCICやHPCIが停止後、崩壊熱除去のための冷却が途絶えたため、現場では消防車注水を決断した。消防車で炉内に注水するためには、消防車ポンプの吐出圧以下に炉圧を下げる必要があり、SRV開放を実施した。これは正しい判断であったが、RCICやHPCI停止後に炉圧が上昇したことによりSRVがすでに間欠作動しており、炉内蒸気の流出が始まっていた。そのため注水開始時にはすでに炉水位はBAFを下回り、核燃料の損傷が始まっていた。すなわち、2、3号機

ともにSRV開放による減圧実施時には、すでに燃料は過熱された状態にあった。また、消防車からの注水は、まず下部プレナムを満たし、炉心冷却に有効に寄与するまでに時間遅れが生じていたことと、分岐流の存在によって吐出水の一部しか炉内に流入しなかったという問題があった。これらの問題を解決し、炉心溶融を防止する手段は、SRV間欠作動による蒸気流出の時間帯を極力短縮し、SRV開放による減圧と消防車注水を一連の手段としてRCICやHPCI停止後迅速に実施することである。具体的な対応は以下のとおりである。

①RCICあるいはHPCIの停止を確認後、直ちにSRVを開放して減圧し、時間差なく消防車注水を開始する。このとき、重要なことは、(A) 消防車注水の配管系統として炉心スプレイ系を利用し、核燃料を上部から直接冷却すること(時間遅れの防止)と、(B) あらかじめ分岐配管の弁を全閉として注水の漏洩を防止することである。このようにすれば、例えば3号機ではSRV開放(実際にはADS作動)から消防車注水まで18分の時間遅れがあったが、この程度の時間遅れであれば核燃料被覆管の破損は免れることができる。

②SRV開放のためには直流電源が必須であるため、RCICあるいはHPCI作動中に十分な量の車載バッテリー等を確保し、SRV作動確認等の準備をしておくことも重要となる。

以上の対応策は一案ではあるが、もし、事前に全電源喪失対応のマニュアルが整備され、現場が事前に教育・訓練を受けていれば、当時利用できたプラントの機器類、および入手できた機材の活用によって事故の拡大は防ぐことができたことを示している。

マニュアルがなかった、教育・訓練を受けていなかった、この点が最も悔やまれる。

## 6. おわりに

福島原発では、地震、そして津波の襲来後、現場の判断でプラントの運転・操作を実施した。事故直後は、これらの詳細について不明な点が多かったが、その後東京電力は運転員

へのヒアリングや現場の確認などにより、現在ではかなりの部分が明らかになり、その情報は公表されている。これらの最新情報に基づいて事故事象をシミュレーションした結果、1～3号機はともに炉心が溶融し、原子炉圧力容器の底部が損傷して溶融物はドライウエル床に落下したという結果となった。

事故の最大の要因は、全電源喪失が確率的には起こり得ると認識しつつも、現実はその対策が必要と認識するに至らなかった点にある。産・官・学ともに反省すべき点が多くあった。

もし、事前に、本文で述べたようなシミュレーションの結果も含めてシビアアクシデント時の事故進展挙動とその対応策について教育・訓練等がなされ、かつマニュアルも整備されていれば、今回の事故は回避できたと考えられる。

現在は、原子力規制委員会が決定した新しい規制基準にしたがい、わが国の発電所では、ハードウェアの対策が進められているが、それらを使いこなすための十分な知識と応用力、実行能力が問われる。シミュレーションによる事故事象進展の知識とあらゆる状況を想定した対策の有効性を検討し、その知識・情報を発電所現場でも共有し、マニュアルの整備と訓練によって実効性を確認するといったソフト面の対策が重要である。

#### [謝辞]

本稿に示したシミュレーションは、経済産業省資源エネルギー庁委託事業の一環として実施したものである。

## 研究所のうごき

(平成 25 年 7 月 2 日～9 月 30 日)

### ◇ 月例研究会

#### 第 325 回月例研究会

日時：7 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. 「パナソニックにおける家庭用燃料電池『エネファーム』の最新技術動向と普及拡大戦略」  
(パナソニック(株)海アプライアンス社 燃料電池事業担当 理事 清水俊克氏)
2. 「エネファームの取組状況と将来ビジョン」  
(東芝燃料電池システム(株) 技術統括責任者 永田裕二氏)

#### 第 326 回月例研究会

日時：8 月 30 日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 「電磁界共振結合によるワイヤレス給電の概要」  
(東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 助教 居村岳広氏)
2. 「電気自動車 (EV/PHEV) のワイヤレス給電実証評価と標準化の最新動向」  
( (公社)自動車技術会 ワイヤレス給電システム技術部門委員会 幹事 横井行雄氏)

### ◇ 外部発表

[講演]

発表者：笹倉 正晴

発表題目：カーボンフリー社会を目指す水素社会の展望 CO2 フリー水素チェーン構想について

発表先：第 8 回 RE 世界展示会 & 国際フォーラム @ 東京ビッグサイト 分科会 7 (水素・燃料電池)

日時：7 月 25 日

発表者：小野崎 正樹

テーマ：高効率石炭火力の将来動向

発表先：JCOALCCT ワークショップ 2013

日時：8 月 7 日

発表者：松井 一秋

テーマ：Development of the Small Light Water Reactor (LWR) and Fast Reactor (FR)

発表先：Forum for Nuclear Cooperation in Asia (FNCA) ,The 5th Meeting of "Study Panel on the Approaches toward Infrastructure Development for Nuclear Power"

日時：8 月 22 日

発表者：内藤 正則, 内田 俊介, 鈴木 洋明, 岡田 英俊

テーマ：Nuclear Accident in Fukushima Daiichi NPP and its Influence on Nuclear Energy in Japan

発表先：ICPWS16 (16th Int. Conf. on the Properties of Water and Steam) (会場：英国ロンドン, University of Greenwich)

日時：9 月 2 日～5 日

発表者：蛭沢 重信, 田中 知, 小松崎 俊作 (東大) 寿楽 浩太 (東京電機大), 田辺 博三 (原環セ), 河村 秀紀 (大林組), 平野 史生 (IAEA)

テーマ：放射性廃棄物地層処分の学際的評価

発表先：日本原子力学会 2013 年秋の大会 企画セッション (総合講演・報告)

日時：9 月 3 日

発表者：岡田 英俊, 内田 俊介

テーマ：1D/3D FAC 解析コードによる減肉評価・管理の高度化

(第 1 報) 1D FAC コードによる減肉個所の予測 (発表者：岡田英俊)

(第 2 報) 3D FAC コードによる減肉形状の評価 (発表者：岡田英俊 (内田俊介) 代理)

発表先：日本原子力学会 2013 年秋の大会 (会場：八戸工業大学)

日時：9 月 4 日

発表者：鈴木 洋明, 溝内 秀男, 平川 香林, 高橋 淳郎, Marco Pellegrini

テーマ：東京電力福島第一原子力発電所炉内状況把握の解析・評価

(第 8 報) 全体計画と進捗状況 (発表者：鈴木洋明)

(第 9 報) SAMPSON コードにおける解析モデルの高度化 (発表者：溝内秀男)

(第 11 報) SAMPSON コードによる福島第一原子力発電所 1 号機の事故進展解析 (発表者：平川香林)

(第12報) SAMPSON コードによる福島  
第一原子力発電所2号機の事故  
進展解析 (発表者:高橋淳郎)

(第13報) SAMPSON コードによる福島  
第一原子力発電所3号機の事故  
進展解析

(発表者:Marco Pellegrini)

発表先:日本原子力学会 2013 秋の大会  
(会場:八戸工業大学)

日 時:9月4日

発表者:小野崎 正樹

テーマ:2050年に向けたエネルギー技術開発と  
そのあり方

発表先:日本鉄鋼協会, グリーンマテリアルフォー  
ラム:「エネルギーシフトと高効率転換  
に向けた鉄鋼材料研究の最前線」シンポ  
ジウム

日 時:9月17日

発表者:発表者:内藤 正則, 鈴木 洋明, 溝内 秀  
男, 平川 香林, 高橋 淳郎, Marco  
Pellegrini, 岡田 英俊

テーマ: Analysis of the Fukushima Daiichi Nu-  
clear Accident by Severe Accident Ana-  
lysis Code SAMPSON

発表先:6th European Review meeting on Se-  
vere Accident Research (ERMSAR-  
2013) (会場:フランス アヴィニヨン)

日 時:10月2日~4日

[寄稿]

発表者:入谷 淳一

テーマ:世界のガス化技術の現状と展望

寄稿先:月刊『配管技術』(8月号)

【その他】

発表者:松井 一秋, 楠野 貞夫, 笠井 滋, 藤井 貞夫,  
蛭沢 重信

発表題目:平成24年における重要なエネルギー  
関係事項 (Annual Energy Reviews -  
2012) II章4原子力

発表先:日『日本エネルギー学会誌』(9月号)

発表者:小野崎 正樹

テーマ:非在来型石油の動向

寄稿先:『電気評論誌』(9月号)

発表者:小野崎 正樹

テーマ:非在来型天然ガスの動向

寄稿先:『電気評論誌』(10月号)

発表者:小野崎 正樹, 若村 修 (新日鉄住金エン  
ジニアリング株), 持田 勲 (九州大学)

テーマ:7章4節 石炭液化

寄稿先:『石炭の科学と技術 ~未来につなぐエ  
ネルギー~ (分担執筆)』(2013年11月  
発行予定)

◇ 人事異動

○7月16日付

(採用)

高橋知慎 経理部 主任研究員

○7月31日付

(退職)

元吉聖子 経理部研究員兼企画部兼総務部兼プ  
ロジェクト試験研究部

○8月31日付

(解嘱)

田中隆則 理事 原子力工学センター長兼企  
画部長 (主席研究員)  
企画部長の兼務を解嘱

(定年退職)

蛭沢重信 プロジェクト試験研究部部長兼  
原子力工学センター部長 (副主席  
研究員)

○9月1日付

(採用)

重政弥寿志 企画部長 (副主席研究員)  
木野千晶 原子力工学センター 主任研究員

(嘱託採用)

蛭沢重信 原子力工学センター部長 (参事)  
兼プロジェクト試験研究部

○9月16日付

(採用)

井野大輔 業務部主任研究員兼総務部兼企  
画部兼エネルギー国際標準  
(ISO) センター

## 編集後記

30年以上前のことだが、筆者が米国ロスアンジェルス郊外に住んでいたころ、外出時にハチドリが花の蜜を吸っている姿を良く目にした。ホバリングすることで知られるこの鳥は、普通の鳥とも昆虫とも異なる飛行術を備えている。人類の航空機開発の歴史においてなかなか真似できなかった飛び方だが、数年前に千葉大学および米民間会社がそれぞれ10cm程度のハチドリ型超小型飛行機の開発に成功した。ハチドリ飛行の空気力学的秘密の解明のみならず、電池、アクチュエータ、軽い構造材料、姿勢安定化を含む電子制御システム等々の進歩を組み合わせて、初めて実現できたことであろう。

ハチドリ飛行機の開発には、遊びの世界からの貢献があったのではないかと想像している。模型飛行機の世界では、十数年以上前から電動化・小型化が普及し始めたようだ。リチウム電池の軽量・大容量化、電気モータの軽量・高出力化、無線・制御装置の高速・小型化などにより、翼幅50～100cmの小さな飛行機でもよく飛ぶようになった。遊びの世界に要素技術の革新的進歩を起こす力などはないにしても、大勢が参加して、世界の最新技術を取り入れ、リスクを無視して

組み合わせ、システムを作りあげる、と言った試行錯誤を積重ねることはできる。その成果が、ハチドリ飛行機の開発に応用されても何の不思議もない。もともと、模型飛行機とハチドリ飛行機の開発には、おそらく2～3桁あるいはそれ以上差がある開発費用（米国の場合は軍事予算だから特に）を別にすれば、共通する部分が結構あるに違いない。

航空機の開発は、空気力学的に飛行に適した条件、すなわち比較的容易な条件を選んで開発が進められ今日の成功に到達したわけだが、ハチドリ飛行機はこれまでの常識と全く異なる困難な空気力学条件下での飛行を実現した。おそらくは、かなり遊びに近い形でのアマチュア的な活動が、「何の役に立つの？」という当然の問いを投げ掛けられつつ行われたことであろう。この革命的な進歩を受けて、今はさらに小さいハエ型飛行機が開発されているという。

エネルギー技術の世界で、アマチュア的アプローチによるブレイクスルーを期待するのは余りに夢想的に過ぎるのであるか。小型の技術ならば、あり得るかと思いたいが。

編集責任者 疋田知士

季報 エネルギー総合工学 第36巻第3号

平成25年10月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

FAX (03) 3501-1735

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

---

(印刷) 株式会社日新社

※ 無断転載を禁じます。