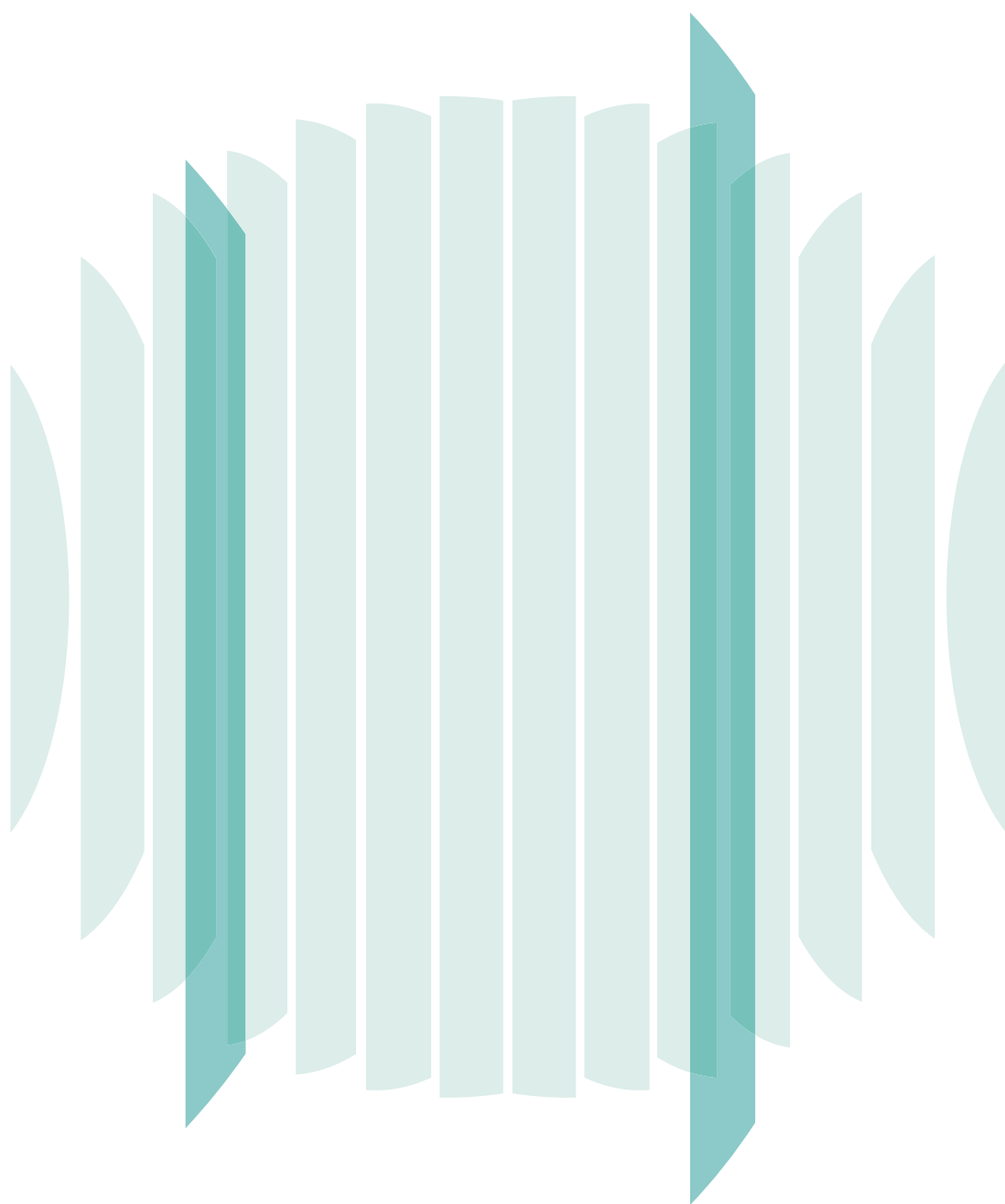


季報 エネルギー総合工学

Vol. 44 No. 2 2021. 7



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

【座談会】

自動車用燃料の低炭素化に関する取り組み

～運輸部門のカーボンニュートラル化に向けたバイオ燃料の寄与～

早稲田大学 名誉教授	大聖 泰弘
東京大学 名誉教授	横山 伸也
アメリカ穀物協会 日本代表	浜本 哲郎
(国研) 産業技術総合研究所	
エネルギー・環境領域長補佐	坂西 欣也
日本環境エネルギー開発(株) 代表取締役社長	澤 一誠
司会：(一財) エネルギー総合工学研究所	
プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員	森山 亮 …………… 1

【調査研究報告】

非効率石炭火力のフェードアウトに関する考察

～動向と燃料転換技術オプション等について～

プロジェクト試験研究部 参事	濱田 利幸
主任研究員	徳永 貴道
主任研究員	橋上 聖 …………… 21

【調査研究報告】

原子力発電所から発生する大型機器の処理について

原子力技術センター 部長	堀川 義彦 …………… 32
--------------	----------------

【調査研究報告】

英国の脱炭素化政策と原子力研究開発の最近の動向について

原子力技術センター 参事	藤井 貞夫 …………… 42
--------------	----------------

【事業報告】

令和2年度 事業報告の概要

(一財) エネルギー総合工学研究所	…………… 53
-------------------	----------

【研究所のうごき】	…………… 64
-----------	----------

【編集後記】	…………… 66
--------	----------

座 談 会

自動車用燃料の低炭素化に関する取り組み ～運輸部門のカーボンニュートラル化に向けたバイオ燃料の寄与～

大聖 泰弘 （早稲田大学 名誉教授）

横山 伸也 （東京大学 名誉教授）

浜本 哲郎 （アメリカ穀物協会 日本代表）

坂西 欣也 （（国研）産業技術総合研究所
エネルギー・環境領域長補佐）

澤 一誠 （日本環境エネルギー開発（株）
代表取締役社長）

司会：森山 亮 （（一財）エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員）



はじめに

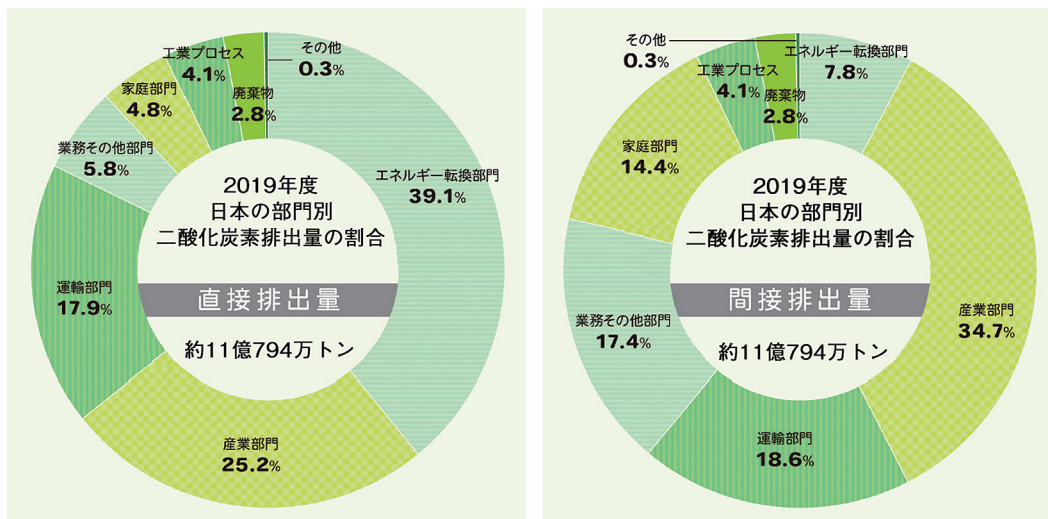
座談会テーマの背景

森山 今回の座談会のテーマは、「自動車用燃料の低炭素化に関する取り組み」についてですが、次世代自動車の普及導入について造詣が深い大聖先生とバイオ燃料の事業や技術開発に携わってこられた有識者をお招きして、運

輸部門のカーボンニュートラル化に向けたバイオ燃料の寄与について議論していきたいと思っています。

「第5次エネルギー基本計画」（2018年）でも、電源に関して再生可能エネルギー（再エネ）の主力電源化が謳われています。しかし、2050年にカーボンニュートラルを達成するには、エネルギー転換部門（発電部門）のみならず、運輸部門も二酸化炭素（CO₂）を削減する必要があります。

図1左に示しますように、CO₂の直接排出



(出所：全国地球温暖化防止活動推進センター (JCCCA))

図1 日本の部門別 CO₂ 排出量

表1 運輸部門の低炭素・脱炭素・カーボンニュートラルに向けた動向

1997年	COP3（京都会議）にて京都議定書；温暖化に対する国際条約が制定
2014年	経済産業省「自動車産業戦略 2014」では、2020年度、2030年度における次世代自動車の普及目標を定めた
2015年	COP21（パリ会議）にてパリ協定；世界全体の温室効果ガス排出量削減のための方針と長期目標の設定
	パリ協定に先立って、提出された日本の約束草案では、温室効果ガスの排出量を2030年度に2013年度26.0%削減
	運輸部門については、CO ₂ 排出量2013年度2.25億トン→2030年度1.63億トン（27～28%減）
2020年	10月の菅内閣総理大臣による「2050年カーボンニュートラル宣言」 経済産業省 12月「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」
2021年	4月 菅内閣総理大臣 日本の2030年度における温室効果ガス削減目標を引き上げると発表。2030年度の排出量を2013年度比で46%削減

量は、エネルギー転換部門、産業部門、運輸部門の順となっています。また、世界の排出量削減に向けた取り組みの流れは、表1のようになっています。特に、わが国では、2020年に「2050年カーボンニュートラル宣言」が出され、2021年には、CO₂排出量を2030年度に2013年度比46%削減するという目標が掲げられました。

カーボンニュートラルとは、どうしてもCO₂を排出しなければならない分は、他のところでCO₂を吸収したり削減したりして、社会全体として差し引きゼロ、正味ゼロ（ネットゼロ）にすることです。図1右に示しますように、日本のCO₂の間接排出量は、

産業部門で34%、運輸部門でも約2割弱の18.6%です。その取り組みとして、現在、電気自動車（EV）やハイブリッド車（HV）、プラグインハイブリッド車（PHV）、燃料電池車（FCV）などの次世代自動車で、運輸部門の一部電化も進められています。表2に示し

表2 運輸部門の低炭素・脱炭素・カーボンニュートラルに向けた動向

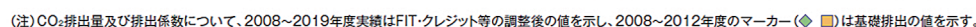
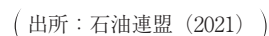
車種※	民間努力ケース		政府目標	
	2020年	2030年	2020年	2030年
従来車	80%以上	60～70%	50～80%	30～50%
次世代自動車	20%未満	30～40%	50～70%	50～70%
HV	10～15%	20～30%	20～30%	30～40%
EV・PHV	5～10%	10～20%	15～20%	20～30%
FCV	僅か	1%	～1%	～3%

※HV:ハイブリッド車 EV:電気自動車 PHV:プラグインハイブリッド車 FCV:燃料電池車

(出所：『次世代自動車戦略 2010』『自動車産業戦略 2014』)

ただ、運輸部門のエネルギーが電気に替わるとしても、その電気を作るのにどのぐらいCO₂が排出されるかによってカーボンニュートラルの達成も変わってきます。図2にある

最後に、図3にあるとおり、2021年3月に石油業界のカーボンニュートラルに向けたビ

図2 発電に伴うCO₂排出量等の推移

第44卷第2号(2021)

ジョンが出されました。2030 年、2050 年に向けて、バイオ燃料も使っていくし、エンジンの燃費向上、さらに合成燃料や e-fuel (CO₂ と水素で作る合成燃料) も使って CO₂ 削減をしていくというビジョンです。

以上を背景に、運輸部門の CO₂ 排出をどう削減していくのか。燃料側の話、それを使う自動車など輸送機器側の話もあると思います。そういったことについて、今回お集まり頂いた有識者の方々からご意見なり取り組み状況の紹介なりを頂いて、意見交換できたらと思っています。

運輸部門での CO₂ 削減の論点

森山 まず、大聖先生から運輸部門の CO₂ 削減に向けた全体的な取り組みについて、最初に自己紹介を含めてお願いいたします。

次世代自動車による排出削減

大聖 私は学生の頃から主にエンジンの燃焼や燃費改善、排出ガス低減の研究を行ってきました。1990 年頃から、エンジンだけでは将来立ち行かないのではないかとということで、次世代自動車といわれる電動化した車やシステムなども研究対象に加え、企業の協力を得てそれらの試作や性能評価をやってきました。

実は、運輸部門の CO₂ 排出の 86% は自動車で占められています。そこで、運輸部門の CO₂ 削減の主要な対策は自動車の低炭素化・脱炭素化だと思っています。

その中で何が技術としてあるか。まず、エンジンの燃費向上技術があります。それによって今後 10 年ぐらいの間に、2 割から 3 割ぐらい燃費が改善され、飽和域に達するものと見えています。そうすると、例えば、HV などでは、そのまま比例的に燃費が改善されることになります。次に、PHV という選択肢があります。



大聖 泰弘 氏

(早稲田大学 名誉教授)

(公社)自動車技術会という学会での議論では、将来の電動化の中で HV と EV の「橋渡し役」、あるいは EV と共存するのは、PHV ではないかと予測しています。この特徴は、搭載するバッテリーの量が EV の数分の 1 で済み、家庭でも気軽に充電できます。PHV で 1 日に何百キロも走るということは、日常生活では考えられませんので、利便性を考えても、そうなるのではないかとということです。バッテリーは、コバルト、リチウム、ニッケルといった希少な資源を使いますから、そういった資源の節約にもなると考えています。

長期的な取り組み

～水素、モーダルシフト、CCS、CCUS～

大聖 それから、やはり水素は長期的に取り組まなければならない燃料だと思っています。様々なソースから作れるという面はありますが、自動車用燃料として使うには、大幅な低コスト化や充填ステーションの配置などの解決すべき課題があります。

では、自動車分野でそういった新しい技術を総動員してカーボンニュートラルになるかということ、どう計算してもならない訳です。冒頭、森山さんがおっしゃったように、材料の製造や生産面での工夫、リサイクルなどをやってもまだゼロにはなりません。では、ど

うしたらゼロになるか。やはり、車の利用のあり方を見直すと、「モーダルシフト」で鉄道などをさらに活用するとかです。さらには、究極的には炭素回収貯留（CCS）とか炭素回収利用貯留（CCUS）があります。炭素排出に価格をつけて排出削減へ誘導する「カーボンプライシング」といった考え方も取り入れて行かなければならないのではないかと思います。

輸送用に セルロース系エタノールなどの カーボンニュートラル燃料を

坂西 産業技術総合研究所（産総研）の坂西です。私自身のバックグラウンドは、石炭液化とか重質油アップグレーディングの研究です。1990年代から輸送用燃料の石油依存の低減ということで取り組んできました。1973年のオイルショックで原油価格が高騰した時、まだ日本でも石炭を掘っていたので、国内外の石炭を液化して石油代替・脱中東依存をしようということも研究の背景にありました。

1999年に私が九州大学から資源環境技術総合研究所（資源環境研）に移籍した時は、重質油アップグレーディングということで、ブラジルのマリーム、メキシコのマヤ、カナダのタールサンドとか非在来型の超重質油をガソリン・軽油にして石油代替していくという研究を行いました。

その後、再生可能な生物由来の有機性資源（バイオマス）の利活用を促進しようという「バイオマス・ニッポン総合戦略」（2002年）との関連で、2003年に産総研・中国センターに設立された「循環バイオマス研究ラボ」（2005年にバイオマス研究センターに改組）に移った時は、非食用である草本系バイオマスからのセルロース系エタノール、廃棄物からのBTL（ガス化経路によるディーゼル燃料）という自動車用燃料を想定したバイオ燃料の研究に従事していました。

2012年ぐらいまで、産総研・中国センターで、王子製紙（株）とかENEOS（株）と一緒にセルロース系エタノールの研究をしていました。NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の「セルロース系エタノール革新的生産システム開発プロジェクト」では、海外のユーカリ等の紙パルプ原料の林地残材を活用して海外生産していけば、40円/ℓの目標を達成できるところまで行き着きました。ブラジル産エタノールのCIF価格（入着価格）が70円/ℓぐらいですから、それを東南アジアで作れば、価格競争力もあります。

東日本大震災後の2012年、固定価格買取制度（FIT）で発電への再エ大量導入促進策が始まったのを契機に、木質系バイオマスや廃棄物を発電利用しようということになり、輸送用燃料を作る優先順位が下がりました。

大聖先生からもありましたように、2050年のカーボンニュートラルを目指していく上では、エタノールやバイオディーゼルをカーボンニュートラル燃料として輸送用燃料に使っていくことが大事だと思います。2019年6月に策定された「カーボンリサイクル技術ロードマップ」では、ジェット燃料や船舶用燃料のカーボンニュートラル化で、バイオマスを活用する研究が出てきました。ATJ（アルコール・トゥ・ジェット）という研究ですが、積水化学工業（株）と米ランザテック社が、廃棄物からバイオ変換でエタノールを作り、それをエチレン経由でバイオケミカルにしていく開発を進めています。

エタノールの復権

澤 私は20年ぐらいバイオ燃料に携わっています。私は三菱商事（株）在籍時に、産総研の外部評価委員を約8年やらせて頂きました。その後、2016年7月、日本環境エネルギー開発株式会社（NEED）を設立して、現在、私自身バイオマスエネルギーのコンサルタントをやっています。

エタノールとの関連では、2019年12月からアメリカ穀物協会のアドバイザーをやらせて頂いております。実は、10年ぐらい液体バイオ燃料の仕事から離れていたのですが、10年ぶりにエタノールの仕事に携わりました。そのプロモーションもやっております。2020年12月3日に、今日おいでの坂西さんが議長を務められた「第15回再生可能エネルギー世界展示会」(RE2020)で、私と浜本さんと講演をしました。その時の講演会のタイトルは主催者側でつけられた、「エタノールの復権」という非常にアグレッシブなものでしたが、特段ご批判を受けることはありませんでした。

その後、今年の1月29日、バイオマス関連で、石油学会に2つの政策提言をいたしました。私は、液体燃料から離れていた10年間はバイオマス発電の仕事をやっていたので、石油学会での提言の1つは、CO₂削減で石炭火力をバイオマス発電に転換するという、もう1つは、EVやFCVなどによる運輸部門の電動化後も残る内燃機関(エンジン)のCO₂削減策としてのエタノールなどバイオ燃料を使用するというものでした。

私は、早稲田大学・理工学部機械工学科出身ですので、大聖先生のところともご縁がありまして、今日の座談会に参加させて頂いたという次第です。

トウモロコシからガソリン消費量10%相当の エタノール生産を達成したアメリカ

浜本 アメリカ穀物協会の浜本と申します。アメリカ穀物協会の日本事務所も協会本部(ワシントンDC)も60年の歴史があります。アメリカからの飼料穀物、特にトウモロコシの輸入促進をやって来まして、今の日本の畜産業の基礎作りのお手伝いをさせて頂いてきたと思っています。

今から20年ほど前、アメリカではトウモロコシをエタノールの原料にする政策が始まりました。今、全米で売られているガソリンの

10%に相当する量はエタノールを利用しなさいという基準があって、その基準に沿ってエタノールが利用されています。アメリカのエタノール製造産業としては、国内ガソリン消費量の10%に相当する量は既に混合されていることを背景に、海外での利用も広めたいということになりました。それにはエタノールの輸出促進をするところが必要だということで、アメリカ穀物協会に「白羽の矢が立った」という次第です。原料トウモロコシの輸出を促進している協会であれば、派製品であるエタノールの輸出促進もということで、2015年ぐらいからやってきました。それで、アメリカ穀物協会がエネルギーと関係することになった訳です。

私はもともと微生物学を研究していて、1989年、カリフォルニア大学デイビス校に在外研究員として行った時に、米国エネルギー省の予算で、カリフォルニアの稲藁からのエタノールの生産について研究しました。微生物学者の立場から、「これは難しい。そんなに簡単にできないだろう」と思いました。2015年にエネルギーの世界に戻って見たら、その研究はまだ技術開発の途中でしたが、技術革新のスピードは日増しに速くなっていますので、エタノールも「第二世代」の草本系などの原料から作れるようになってくると思っています。

次世代自動車導入が進む中での エタノールの役割

横山 私は学生時代にオイルショックを経験しました。その頃、社会的に大きな混乱があって、「将来、研究者として生きる場合、石油に替わるものを作りたい」とぼんやり考えていました。

その後、当時の工業技術院(現産総研)に職を得ました。入ってから3年ぐらい後に、木材や草本系のバイオマス研究に取り組みまして、ガス化や高温高压処理する液化反応に

よる重油相当の油を作る研究をしました。特に、下水汚泥とかの廃棄物を原料として、重油相当の燃料を作る研究に従事してきました。

バイオマスは当時から「カーボンニュートラル」と言われていましたので、CO₂削減の方策に関わる研究にも携わってきました。車は、将来、EVやFCVに転換していくのですが、当面の相当長い間、内燃機関で動く車が健在なのですから、その中でエタノールの果たす役割はまだあるのではないかという立場で最近の仕事をしています。



横山 伸也 氏

(東京大学 名誉教授)

論点を巡る意見交換

時間軸による論点整理

アメリカで進むエタノール導入／エタノールの復権／食糧競合しないエタノール／モーターシフト

森山 皆さんからのお話で頂いたキーワードを考えます。大聖先生の将来的なFCVやモーターシフトという話、浜本さんのトウモロコシから作るエタノールの話、坂西さんのセルロース系エタノールの話。「時間軸」というのが大事なのではないかと思います。今すぐに、水素のインフラが整って大量にFCVが街中を走る状況が来るかというところという訳ではありません。内燃機関が残っているところで、CO₂削減するために今できるアクションと、インフラ整備含めて考えていかなければならない将来のアクションとは、時間軸で整理していくのが大事だと思います。

時系列で順に考えますと、まず、アメリカで大量に10%エタノールが導入されているという浜本さんの話。次に、電動化後でも残る内燃機関にどれぐらいのエタノールを入れていくかという澤さんの話。もう少し進むと、坂西さんからあった、食糧と競合しないセルロース系エタノールの話とCO₂をどううまく

使っていくかというカーボンリサイクルの話。そして、皆さんの生活を変えるという意味で、大聖先生が言われたモーターシフトやEV、FCVも含めた資源の節約の話があります。

よく「自動車用のエネルギーには何がいいか」と言った時に、時間軸をごちゃまぜにして、「CO₂出さないからEVがいいんだ」とか「水素がいい」という声を聞きます。それに対して「その場では出さないかも知れないけれども、エネルギー転換時に排出している」とか「将来は再生可能エネルギーでCO₂フリーの水素を作る」という話もありますが、そこは時間軸で整理していくことが重要だと感じます。

では、時間軸で少し近い方から、「今実現されているもの」「もう少しで実現しそうなもの」として、バイオ燃料、エタノールについてです。横山先生は、バイオ燃料、エタノールをガソリンに入れる効果を検証されていると思いますが、その知見を頂けますでしょうか？

運輸部門のCO₂削減効果大のE10導入

横山 現在、日本のガソリンには、約83万kl(原油換算50万kl)のエタノールが入っています。実際には、直接ブレンドではなく、E3(エタノール3%混合ガソリン)相当のETBE(エチル・ターシャリー・ブチルエーテル)に

変換したものを入れています。エタノールのCO₂削減率は対ガソリン比55%ですから、現在ガソリンに入れているエタノールのCO₂削減効果は約62万トンです。E3で62万トンですから、E10を入れると、3倍強の約200万トンが削減されることになります。2017年ベースの政府の約束草案では、2030年に運輸部門で2089万トンのCO₂を削減することになっていますから、E10を入れればそれだけで約束草案の目標の約1割という大きな削減になります。

それから、ライフサイクルアセスメント(LCA)的に見ますと、車の場合のCO₂排出は、7割から8割ぐらゐは走行時の燃料燃焼によるもの、2割ぐらゐが車両の部品の製造や組立によるもの、そして、ごく僅かな部分がインフラに関わるものです。ということは、走行時の燃料燃焼によるCO₂排出が相当大きい訳ですから、これを低炭素化することには非常に大きな意味があると思います。そういう意味で、バイオ燃料やエタノールには大きな役割があると考えています。

森山 やはり、今走っているガソリン車の燃料を切り替えるのは、CO₂削減で非常に即効性があると思います。もう少し先のこと、例えば、EVやFCVの場合にはインフラの改善が必要ですが、そういったところで大きな観点はあるでしょうか？

石油業界の許容姿勢で期待されるE10導入

大聖 需要側である自動車のほうでは、E10対策はもう講じられていて、いつでも使える状況にあります。後は供給側のほうで、E10にした時の問題点をクリアしていけば可能だと考えています。

エタノールのいいところは、従来のガソリンに混ぜて使えるということです。燃焼技術面ではいつでも使える状況なので、後は供給側がどう取り組むかだと思います。また、最

近は、そういったことへの石油業界の受容性も高まってきたと実感しています。

森山 先ほど私が示した図3(石油業界のカーボンニュートラルに向けたビジョン)にも「第1世代バイオ燃料の活用」という既述があります。ですから、石油業界もバイオ燃料を選択肢として考えているのは確かだと思います。その点で、澤さん、コメントありますか？

バイオ燃料への姿勢変わる石油業界

澤 実は、10年以上前に三菱商事(株)で「北海道バイオエタノール」というプロジェクトをやりました。その当時は、石油業界の方々はバイオ燃料に対するアレルギーがあって、色々と苦労したのを覚えています。ようやく、「エネルギー供給構造高度化法」の原油換算50万klまで導入するという目標は受け入れられましたが、その代わりに、バイオディーゼルは普及させないという方向でした。

バイオマス発電用はFITによって様相がガラッと変わりましたが、液体バイオ燃料も随分様相が変わりました。過去にバイオエタノール利用の弊害が強調された中で、一番大きな課題は「食糧との競合」でした。その次に、当時は技術的にも「バイオエタノールをガソリンに直接購入すると層分離をするからETBEにしないとダメだ」ということが強調されたと記憶しています。

その後、技術的な問題も「食糧との競合」の問題もクリアされてきました。アメリカのトウモロコシなどは収率が飛躍的にあがったことで、今はほとんど食糧と競合しないのではないかというレベルまで来ていると聞いています。この辺りの環境が随分と変わってきたと思われまゐす。

一方、日本に限らずエネルギー産業そのものが大転換しているから、石油業界も生き残りをかけて、総合エネルギー企業として生まれ変わるために色々模索されていると思いま

す。その1つとして、液体燃料について言いますと、エタノールやバイオディーゼルを取り扱うことを検討する方向が出てきたのではないかというのが私の感想です。

森山 まさに、石油業界というくくりではなくて、今までの石油会社、ガス会社が、例えば、新電力に事業を広げて総合エネルギー企業になろうとしているようです。従来のガス、電力、石油という業界も変わりつつあると実感しています。

先ほど話がありました「食糧との競合」だとか、日本でエタノールを大量に導入していくに当たっての調達のポテンシャルだとかの観点を含めて、浜本さんからコメントあればお願いします。

エネルギーセキュリティ確保で始まった アメリカとブラジルのエタノール利用

浜本 アメリカやブラジルでは、どういういきさつでエタノールが使われているのか。そして、エタノールを入れるためにインフラや車のことでどういったことが行われてきたのか。それから、エタノール価格がガソリンと比較してどうなのか。そして、「食糧との競合」をどう考えるのか。これらについて、お話しさせて頂こうと思います。

まず、最初にエタノールを燃料として使おうとしたのはブラジルです。ブラジルでは、1973年のオイルショックで原油供給が細ったことへの対策として、まずエネルギーセキュリティ（エネルギー安定供給）のために、1975年に沢山採れるサトウキビからエタノールを作り、それをガソリンの代わりに車の燃料として使おうという法制を整えました。それからエタノール導入が始まったのです。

アメリカでは、2005年に再エネ基準の下でガソリン消費量10%相当量のエタノールを利用する政策が導入されました。エタノールの導入・利用の理由は2つあります。1つは環

境です。この再エネ基準の元の法律となる大気浄化法での大気汚染防止の観点から導入を図りました。もう1つはブラジルでの導入と同じエネルギーセキュリティ。アメリカも自国で燃料を生産しようということです。当時はまだシェールガス、シェールオイルがなくて、中東依存・中南米依存が大きかったのです。今、アメリカではガソリン消費量10%相当量のエタノールが使われていますが、それを導入するに当たって、ガソリンスタンドなどのインフラの調整が若干必要だったと聞いています。また、2001年製以降の車についてはエタノール15%の混合までは使えるようになっています。多くのガソリンはエタノールを10%まで混合したE10として給油されています。エタノールをガソリンに入れるに当たっては、ガソリンとのバランスで蒸気圧の調整が若干必要と聞いていますが、それは供給サイドで行われています。

日本では、澤さんから話がありましたが、政府主導で実証実験まで行われ、E10で実際に車を走らせて実証済みです。また、今後の導入時、若干のチューニングやパッキンの調整が必要となった場合には、日本には車検制度があるので、その時に交換していくということで比較的対応し易いと思います。

価格競争力あるアメリカ産エタノール

浜本 価格については、アメリカ穀物協会が毎週のニュースレターで価格データを出しています。6月9日のニュースレターによると、米国産エタノールをメキシコ湾岸、主にヒューストンから輸出する場合の価格は64.9セント/ℓです。一方、ブラジル産エタノールは、ブラジルのサントス港のFOB価格（積み出し価格）で71.5セント/ℓになります。ガソリン価格ですが、メキシコ湾岸出で、55.8セント/ℓです。相場によって、エタノールもガソリンも価格が変わりますので、エタノールが安くなったり、ガソリンが安くなったり

と日々変わっています。そういう状況で、現時点では若干エタノールのほうが高いですが、べらぼうに高い訳ではありません。55.8セント対64.9セントで、米国産エタノールは、ガソリンに対して競争力があると思っています。

生産性向上で「食糧との競合」を克服

浜本 最後に、「食糧との競合」ということで。図4の折れ線グラフは、トウモロコシの生産量の推移です。アメリカも中国も、1980年から2016年までの間に1.5倍以上、2倍弱ぐらい生産量が伸びています。生産量が上がってきている理由は何か。アメリカの場合、図5左のグラフで分かるように、単位面積当たりの収量（単収）が右肩上がりに伸びています。この増加傾向は、今後しばらく続くと見えます。栽培面積は伸びていないので、今ある農地での生産性向上によって生産量が増えてきていると言えます。

図5右のグラフの右端にE15の棒がありますが、これは全米のガソリン消費量の15%相当量のエタノール混合で必要となる量です。そこまでエタノール利用が増えて行っても単

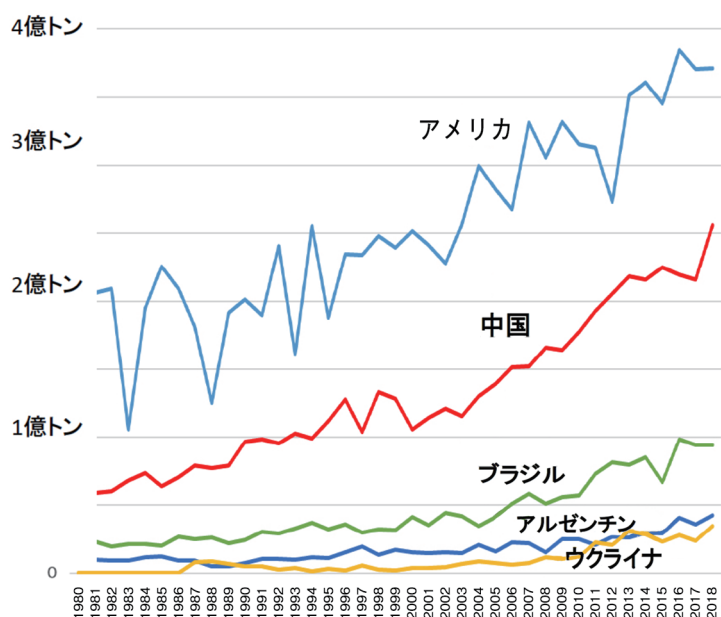


浜本 哲郎 氏

（アメリカ穀物協会 日本代表）

収の伸びがあればトウモロコシの供給に問題はないと考えています。

また、「食糧との競合」ということにもつながってきます。「食糧との競合」が声高に言われたのが2008年のリーマンショックの時でした。図6で、そこまでが青い点線のボックスで囲ってあります。そこまでは、穀物価格とバイオ燃料の生産量は同じような傾向で増えていたので、「エタノールにトウモロコシを使うから穀物価格が上がった」と言われていました。その後、赤いボックスに入りますが、リー



（出所：アメリカ穀物協会）

図4 世界のトウモロコシ原料バイオエタノールの将来展望

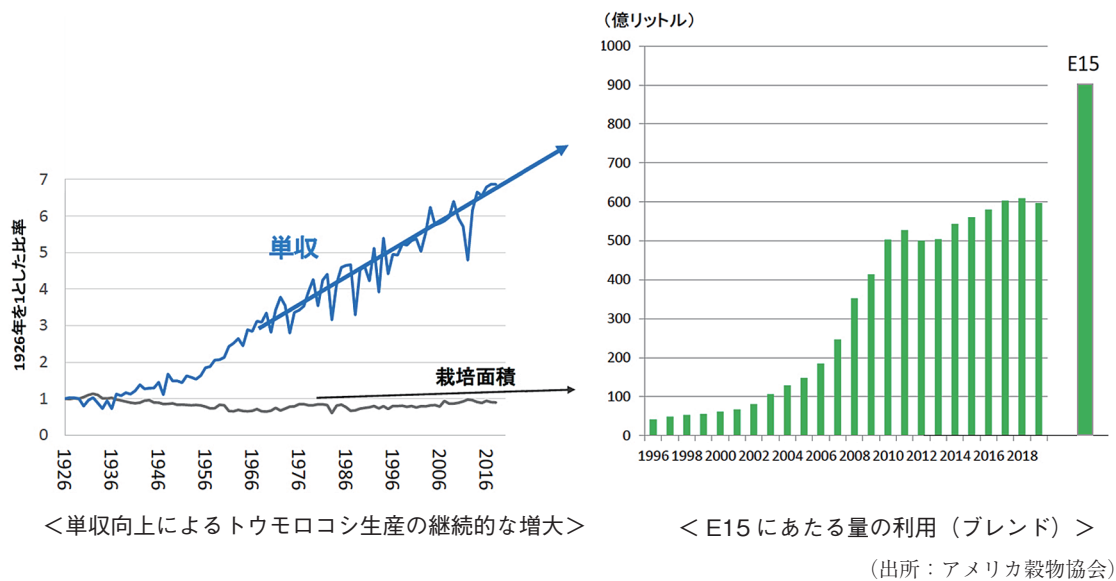


図5 将来の米国トウモロコシ生産トレンド

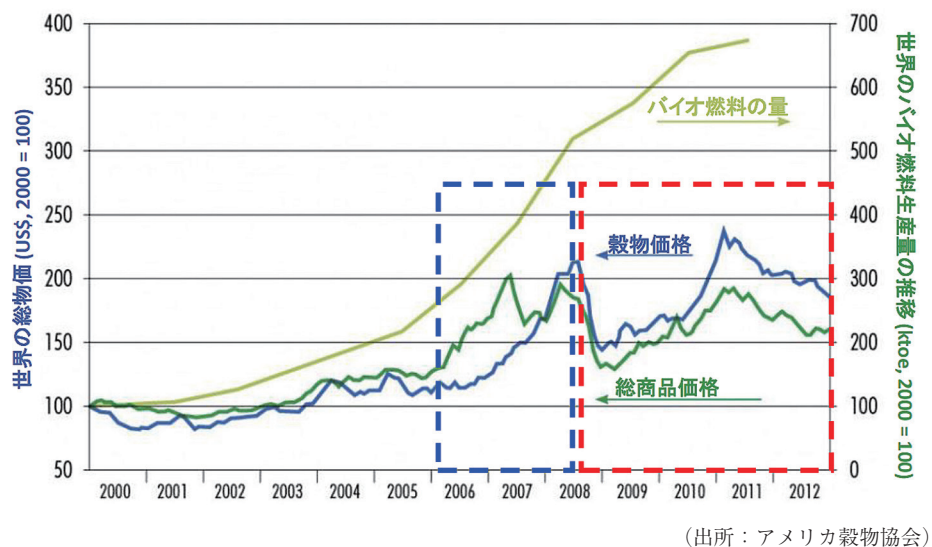


図6 世界の物価、穀物価格とバイオ燃料生産量の推移

マンショックで穀物価格がガクンと下がって原油価格を含めた総商品価格も下がりました。このことが何を意味しているかというと、「トウモロコシ価格が上がっていたのは、エタノールを作るようになったために需給がひっ迫したことが理由ではない」ということです。つまり、総商品価格と連動しているトウモロコシ価格の上昇には、機関投資家の投資による相場の推移が影響したのではないかと思います。

では、将来的に大丈夫なのか。私たちは「レイショニング」(rationing) と言っていますが、

需給バランスというのは若干タイムラグがあっても、需要と供給が互いにバランスをとりあって調整されていきます。今後、エタノール原料のトウモロコシの需要が増えた場合には、それに見合う供給ができてきます。逆に言うと、需要がない限り、供給側は価格が下がってしまうので生産へのインセンティブが下がり、生産は減退してしまいます。今後もトウモロコシの供給については、メインの家畜飼料とバイオエタノール生産への供給も並行して行っていけると考えています。

高まってきた国内バイオマス利活用の気運

坂西 図6に関連して。リーマンショックの2008年、日本では農林水産省の「バイオ燃料技術革新計画」が出て盛り上がったところでした。私たちはセルロース系エタノールの研究をやっていたのですが、バイオマス研究センターが立ち上がった2005年には、80ドル/バレルを超えるくらいの高値安定だった原油価格が、リーマンショックで100ドル/バレルを超えて、ガソリンが瞬間的に200円/ℓになったのです。

当時、私たちは、逆にこれを「国産エタノールのチャンス」と思ったのです。アメリカもブラジルもエネルギーセキュリティを考えて、自国農産物の余剰分をエタノール燃料にしたように、2008年頃の日本でも「倉庫に眠っている古米が100万トン以上ある」とか「約38万ヘクタールの耕作放棄地に多収穫米、飼料米を植えて、それをエタノールにする」とかいうプロジェクトが沢山立ち上がりました。建築廃材や古紙といった廃棄物系のものをエタノールにすれば、6000万klのE3用のエタノール180万klはすぐにできるということで、当時、「6000万klのE10用に600万klだ」という農水大臣の発言が新聞に出ました。セルロース系エタノールを研究している私たちも「では、札幌のビート残渣とか1.5世代という農業残渣でエタノールを作ろう。砂糖や米など食べられるものは採って稲藁とか農業残渣をエタノールにする。天麩羅の廃油もバイオディーゼルにする」とか。もう総掛かりで日本にあるバイオマスを燃料に変えようと、盛り上がり過ぎた感があります。行き過ぎてしまって、「米をエタノール燃料にするなんて」という「食糧との競合」の話や持続可能性の話が国内外から出て、その後、少し原油価格も下がったので国産エタノールの話も少し落ち着いてしまいました。その時にある程度、E3とかE10の導入まで行っていたら、ある程度、今のガソリンスタンドでもE10が給油

できるようになっていたと思います。

それが今、2020年を過ぎて、また、海外から買ってくるだけではなくて、廃棄物系エタノールも含めて国内のバイオマス資源を有効利用しようという動きが盛り上がってきているかなと思っています。

今後 LCA ベースで

厳しく評価される自動車からの CO₂ 排出

大聖 その際、問題になるのは、カーボンニュートラルに向かって車をどう評価したらいいのかということです。LCAをベースにしたCO₂の排出量が判断基準となりますが、そうすると、燃料の原料採取、生産から、輸送、消費、土地利用も含めたトータルの評価が今後シビアに行われてくると思います。

欧州連合(EU)では2025年にそういう基準を作って、中国も検討中ですが、それを満たさない車は排除しようという動きがあります。その典型的な対象は、バッテリーなのです。バッテリーは、LCAでは非常にCO₂を出します。原料の採掘・生成と製造とで大体半々程度出すようです。そういったシビアな評価として、原料をどこから持ってきたか、どんなCO₂排出レベルの電力で製造したかがチェックを受けるようになります。やはり、燃料もそういった視点からの評価が行われることになると思います。バイオ燃料も水素も代替燃料全てに言えることであり、今後そういう視点も重要であると考えています。

森山 先ほどの浜本さんの話に戻りますと、アメリカの状況を含めて、今まで言われていた「食糧との競合」とか「バイオ燃料は高い」というのは、かなり解消されていて、「食糧との競合」も少なくともアメリカ国内では十分に食べる量を賄いつつ余剰分でやっているということ、価格もかなりガソリン価格に近づいているということでした。後、広く持続可能性の指標には、単に「食糧との競合」だけでなく、

CO₂ 排出量だけでもない、正に、2015 年に国連サミットで採択された「持続可能な開発目標」(SDGs)と言われる 17 のゴールがあります。例えば、バイオ燃料を使う時には、それらが SDGs のゴールに見合うかを考えないといけません。バイオ燃料だけではなく、化石燃料から作った水素というのは製造工程のどこかで CO₂ が出ている訳ですし、極端な話、再エネの電解で作った水素であっても、太陽光パネルはどうやって作ったのかとかまで考えないといけません。本当にカーボンニュートラル社会を目指すのであれば、その辺も注意深く見ていく必要があると思います。

e-fuel を巡るヨーロッパと日本の動き

森山 先ほど「時間軸」の話をさせて頂きましたが、今のバイオ燃料から少し時間軸を移させて、カーボンリサイクルや内燃機関を考える時、バイオ燃料だけではない、水素も含めたこの先の燃料、転換、利用の技術で注意すべき観点はありますでしょうか？

坂西 ヨーロッパが先行している e-fuel というのがあります。再エネで作った水素と回収した CO₂ で液体燃料を作る話です。さっき言われたとおり、2050 年時点で世界的に見ても全てが大きく変わる、EV や FCV に替わるといのはなかなか難しいので、内燃機関は段階的に無くなっていくとしてもある程度残るでしょう。ですから、ヨーロッパでは、内燃機関に必要なカーボンニュートラル燃料として、カーボンリサイクルで CO₂ を回収して、再エネ水素で液体燃料化していくという「CO₂ の水素化」が始まってきています。

経済産業省も同じような視点で、e-fuel とちょっと違った「合成燃料」という言い方で力を入れると記者発表しています。

それで問題になっているのが、再エネで作った水素と CO₂ を回収する場所というのが一致しないということです。石炭火力や鉄鋼・化



坂西 欣也 氏

(国研) 産業技術総合研究所
エネルギー・環境領域長補佐

学では、石炭を使って CO₂ を出していますが、その場所と再エネ水素を作っている場所がなかなか一致しません。例えば、オーストラリアで褐炭をガス化して水素を作るとか、中東で膨大なメガソーラーの電気を使って水素を作り、アンモニアの形で運ぶということでアラムコが日本に売り込むとか。色んなやり方が出てきていますが、燃料を作る場所と CO₂ を回収する場所とがなかなか一致しません。ですから、ヨーロッパが先行している e-fuel の場合は、CO₂ が出ている場所に見合う再エネ水素で液体燃料化(Oxy 燃料とも)するとか、現実的なブレンドが出てきています。

日本の場合、合成燃料を大量に作るということですが、価格は現状では 200 円/ℓ 以上で、結局、水素の値段で決まってくるという段階です。今、問題になっているのは、カーボンリサイクルの CO₂ が化石資源由来であれば、それと再エネ水素で作った液体燃料が本当にカーボンニュートラルなのかということです。要するに、化石資源由来 CO₂ と再エネ水素だと、プラスマイナスゼロみたいな話ですが、どこかで化石燃料から出ている CO₂ を再エネ水素で液体燃料にして、燃焼させてまた CO₂ を出すということなので、ニュートラルにならないという議論です。

見直されてきたバイオ燃料

坂西 ですから、今回の座談会のテーマになっているバイオ燃料がすごく見直されてきているんです。バイオジェット燃料も含めて、先ほどのCO₂削減の基準、持続可能性の基準を満たし、カーボンニュートラルということが「売り」になっているので、見直されてきているのかなと思います。「カーボンリサイクル技術ロードマップ」には、主にバイオジェット燃料だけが入っています。セルロース系エタノールに関しては、ある程度技術開発が一段落して、廃パルプ、廃菌床とかの国内廃棄物で作ったエタノールの価格は約70円/ℓまで来ています。この価格は、ブラジルから買ってくるエタノールの値段を想定しています。そこで、このエタノールを、アメリカ並みでガソリン消費量の1割程度は導入していくことが必要な段階にあると考えています。

CO₂の利用も処理も現場でできる トウモロコシ原料エタノールの優位性

横山 今、坂西さんがCO₂の出所について議論されましたが、それとの関連で、図7を使ってエタノールを作る工程について話そうと思います。図7の上のルートは、アメリカのコ

ンからのエタノールを作るプロセスです。原料のコーンを発酵させると、エタノール、家畜飼料（DDGs）、CO₂が出てきますが、重さで言うと、おおよそ1：1：1です。アメリカで生産されているエタノール量は6000万klですから、重さは5000万トンです。DDGsも5000万トン、CO₂も5000万トン出るわけです。このCO₂はバイオ由来ですから、クリーンでグリーンな不純物のないCO₂です。今、風力発電の電気で水電解して作った再エネ水素と上のバイオ由来CO₂を反応させれば、またエタノールができます。このプロセスは、ランザテック社が開発した合成ガス発酵ですが、米アルゴンヌ国立研究所の最近の研究によれば、これにより、エタノール生産量が37%アップ（2200万kl増）すると報告されています。すなわち、新たにコーンを必要とせず合成ガス発酵でエタノールもできるわけです。また、図7の下ルートに示したように、コーンの葉、茎、穂軸をガス化して得られるCOと水素を反応させFT合成と合成ガス発酵でe-fuelができます。

それから、ATJ法でジェット燃料も作れます。エタノールの場合には、脱水してエチレンを作り、そのエチレンのポリメライゼーションでジェット燃料ができる訳です。コーンの場合には、このような多様な利用形態が可能であると

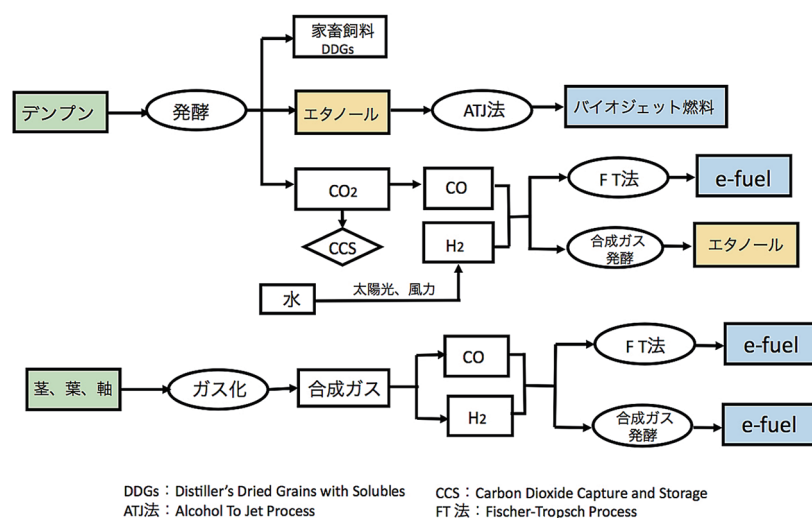


図7 コーンからのエタノールおよび e-fuel 生産

いう優位性があり、さらにはCO₂の地下貯留いわゆるCCSも可能なので、バイオエタノール産業は発展性があると考えています。

大聖 ちょっと補足させて頂くと。例えば、先ほど坂西さんがおっしゃったBTLで、食糧と競合しないバイオマスを1回ガス化し、後はFT合成でe-fuelを作るという経路もありますね。

坂西 そうです。

大聖 ですから、例えばフィンランドのNeste社がe-fuelを売り込んでいる訳です。そうやってできた自動車用燃料としては、実は直鎖系の燃料が一番出てきやすいのですので、セタン価の高い燃料となり、ディーゼル車にとっては向いています。ですから、特にディーゼル重量車のメーカーがリーズナブルな価格のe-fuelの登場に大いに期待している訳です。

車にバッテリーや水素を搭載するとなると、充電や水素の供給インフラが新たに必要となり、車両の構造自体も変わり重量も増えたりするのです。ですから、やはり液体燃料のメリットに対する期待は特に大きいです。そうすると、その液体燃料をどうやって作るかというと、ディーゼルの場合は、バイオディーゼルかBTLその他の脱炭素合成燃料となります。

コスト、CO₂削減効果で優れるエタノール混入

坂西 図7で意外と知られていないのは、FT合成で作ったガソリン留分には直鎖パラフィンが多くオクタン価が非常に低いので、ガソリンとしては使いにくいことです。と言うことで、先生がおっしゃたように、C10～20、ジェット燃料とかの軽油留分だとセタン価が高いので使えます。南アフリカのSasol社などは、鉄系触媒を使ってわざわざパラフィニックなものを異性化してガソリン留分を作って



澤 一誠 氏

(日本環境エネルギー開発 (株)
代表取締役社長)

いました。通常のFT合成で作った直鎖パラフィンが主成分のガソリン留分は使えないということを知っておくべきです。エタノールというのはガソリンブレンド基剤としては一番オクタン価が高いので、そのまま混ぜられます。極端に言えば、E85やE100でも車が走ります。ですから、その部分を、ガソリンへのエタノールブレンドがコスト的にも一番CO₂削減メリットが大きいというのを、きちんと伝えることが大事だと思います。

バイオ燃料生産に関する外国企業の動き

澤 Neste社は15年ぐらい前からシンガポールに作った85万トンのプラントで、パーム油を調達してバイオジェット燃料を作っています。なかなかパーム油を調達できずに苦労しましたが今は脚光を浴びています。基本的に彼らが考えている出口はジェット燃料なのですが、できた留分によっては、ディーゼル燃料代替にもなります。

先ほどのBTLについても、アメリカのランザテック社はFT合成の代わりにマイクロブで燃料を作っていますが、そういう燃料もこれから出てくると思います。

いずれにしても、持続可能性というキーワードで言うと、最近バイオ燃料の持続可能性

についても、LCA での評価が大事になってきていると思います。LCA はバウンダリーとデフォルト値で違ってくるとは言え、ある程度、数値が出てきますから、LCA での評価というのは持続可能性を考える上では最も重要だと思います。

品質、量、価格の議論が必要な新燃料の開発

澤 最近、新しい燃料を検討する上で、品質、量、価格をどう考えるかという議論が忘れられている気がします。先ほどの量と価格ということで言うと、水素などもそうです。水素をどう調達するかという部分で、水の電気分解で作る「グリーン水素」が王道だと思いますが、オーストラリアの褐炭からの水素は、いわゆる「グレー水素」なのですが、作る際に出てくる CO₂ を CCS で地下に貯留することによって「ブルー水素」になるという解釈があります。さらに、電気分解する際の電気を再エネではなく原子力でやると「パープル水素」というそうです。「グレー」や「ブルー」というのは、本当は反則なはずなのですが、「とりあえず色は問わない」という意味不明な状況になっているようです。

ただ、水素社会は大事だと思います。先ほどの品質と量と価格ということで言うと、将来、品質と量は確保できるでしょうが、最後に価格の部分で相当課題が残ります。今、水素価格は 100 円 /Nm³ で、2030 年の目標を 30 円 /Nm³ と言っていますが、これかなりしんどいと思います。更に 2050 年の目標値は 20 円 /Nm³、今の 5 分の 1 ですが、これでようやく経済性が合うかどうかというところだと思います。その時、現実として、海外で大量に水素を作って日本に持ってくるしかないだろうと思うからです。そうすると、あらゆる手段の「合わせ技」でとなった場合でも、日本国内で作るのは水素もアンモニアも他も難しいと思うのです。国産には限界があることを現実として受け止め、全体の量と価格の議

論をしながら色々な手段を講じ、全体のポートフォリオで成り立たせるという構図にすべきだと、最近すごく感じます。

足下と将来の両方を見た技術開発が必要

大聖 私も澤さんの今の意見に賛成です。それにもう 1 つ付け加えますと、やっぱり「昨日までガソリン。明日から E10」という話ではないと思います。必ず「過渡期」という目標に至るまでの段階的なプロセスがあります。エタノールが有用でコストが安く環境にも良くて CO₂ 削減できるということであれば、突然、何万トンとか言わず、徐々に入れて行けばいいのです。合成燃料もいきなり大量に作れないので、「ドロップインフューエル」という混合して使う考え方で着実に増やしていって、その目標値に到達するということだと思います。

そのいい例がバッテリーです。バッテリー価格はまだ高い上、電源が CO₂ を出す化石燃料では問題ではあるのですが、では、その電源が脱 CO₂ になるまでバッテリー開発を待つかということ、それはない話です。今からどんどん性能をアップしていかないと、車両用としても広範には使えない訳です。ですから、バッテリーの開発は電源の脱炭素化と併行して進める必要があります。それは、PHV がいい例です。PHV の場合、バッテリーの量が調整できるので、バッテリー価格が高いうちは搭載量を抑え、バッテリーが安くなり、リサイクルやリユースもうまくできるようになると搭載量を増やし、ハイブリッド運転での燃料の使用量を減らして行けばいい訳です。もう 1 つ、運良く合成燃料が使えるようになれば、PHV はかなり有力なパワーシステムになるのではないかという意見が我々の学会ではあります。

森山 少し先の時間軸で考えると、合成燃料が使えるようになり、PHV が主流になって行くかも知れませんが、水素が出てくるかも知れません。色々な選択肢がある中で、今どれ

かに舵を切る必要はないと思います。それぞれ、将来の主力になることを目指して開発しているのではないのでしょうか。

運輸部門だからこそ求められる

カーボンニュートラルな燃料

森山 今回、自動車用燃料でテーマを設定したのも、合成燃料であれ水素であれ、作る過程でCO₂を出すか出さないかが非常に重要になってくるからです。例えば、大規模な発電所から出たCO₂は、全部でないにしろCCSで処理できますが、自動車や飛行機だとCO₂がそこから大気中に出てしまいます。また、燃料自体が可能な限りカーボンニュートラルとするために、燃料を作る過程で使う電気もカーボンニュートラルである必要があります。ですから、やはり、運輸部門に目を向けて議論すべきではないか、というのが今回の座談会テーマを設定した理由でもあります。

持続可能性と環境ということでは、横山先生のご提案のように、バイオ燃料を作る過程で出てきたカーボンニュートラルなCO₂を使って燃料を作るのも一手だと思います。

将来に向けた注力点

輸入エタノール利用と国産エタノール開発

森山 将来に向けて、いくつか選択肢がある中で、運輸部門の低炭素化をどう考えて行ったらいいのか、注力して行ったらいいのか。少し皆さん方からのご意見を頂けたらと思います。

浜本 先ほど「過渡期」という言葉が出ましたが、それは非常に重要なことだと思います。「解は1つではない」ということ、2050年を見据えた新たな技術革新をやりつつ、やはり

足下で併行してできることをやっていくというのが非常に重要だと思っています。

私の立場から言えば「液体燃料で低炭素燃料を」です。1つの例がエタノールですが、今はコスト的には草本系から作る「第二世代」も難しいし、国産原料を利用するエタノールは、農作物から作る「第一世代」ですら難しいと思います。ただ、2050年を見据えた時、「第二世代ができるようになる」とか、「日本でも非常に効率化が図れて農産物の生産量が増える」とか、「エタノールを作るのに適した農作物が休耕地で作るようになる」とかをただ座して待っているのではなく、今できることをやって行ったらいいと思うのです。

当面、輸入エタノールでコストを抑えつつ、インフラや車側の技術を輸入エタノール混合に合わせて調整する必要があるでしょう。そうすれば、「第二世代」あるいは国産エタノールが経済的にも見合う価格でできるようになった時には、すぐに国産エタノールに置き換えて行くことができます。そしてその先、e-fuelやエタノールを含めたカーボンニュートラルフューエルが新たにできてくれば、それらを組み合わせて使っていくことができます。

なので、長い目で見える部分と足下で着実にやっていく部分が、両輪としてうまくやって行けるといいと思っています。

森山 先ほど大聖先生から「昨日までガソリンだったのが、今日からE10というのは難しい」という話がありましたが、「昨日までガソリンだったのが今日から水素」はもっと難しいと思います。やはり、新しい燃料が従来の燃料インフラで使えるというのも大事な視点だと思います。

CCS との組み合わせで

カーボンネガティブになるエタノール

横山 先ほどエタノールを作る際にCO₂が出てくるという話をしました。現場で出るCO₂

を CCS で地下に埋めるという話もあって、実際にアメリカの食品大手 ADM 社はそれを行っています。そうしますと、これまでカーボンニュートラルという扱いだったエタノールの燃焼で排出される CO₂ がカーボンネガティブという扱いになります。これもエタノール産業の持つ優位性だと思うのです。

従来車の燃費改善と液体燃料で乗り切る 「過渡期」

横山 また、自動車は、すぐに「次世代」に行くのではなく、じわじわと進んでいくと思います。今、1 単位の CO₂ を削減するコストが一番安いのは、従来車の燃費改善や HV です。次がエタノールを従来車あるいは HV や PHV に入れることです。これは削減コストが非常に安く有利ですが、それに比べると、EV や FCV の場合は車体価格が高いので削減コストも非常に高くなります。

従来車の燃費改善や従来車や HV にエタノールや e-fuel を使ったりしながら、徐々に次の世代に行く。「過渡期」をうまく乗り切るにはコストも大事ななので、それら辺も考慮しながら、なだらかに 2050 年に向かって行くというのが「あるべき姿」だと考えています。

森山 コストの観点と CO₂ のネガティブエミッションという観点ですね。「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC) も CO₂ をマイナスにするには、植林かバイオマス CCS かぐらいの技術オプションしかないと言っています。電気を低炭素化した後に残る少しの排出量を少しでも減らそうと思ったら、植林かバイオマス CCS ぐらいしかないとなりますね。

坂西 大規模植林とバイオマス炭素貯留 (BECCS) や利用 (BECCU) は、重要視されてきていると思います。バイオマスは、単に発電に使うよりもリユース、化学製品化も含めて液体燃料やガスの形で使う方向に向かっ

ていると思います。

技術開発が進むバイオメタンと「地産地消」

坂西 私、最近、「グリーンイノベーション基金」との関係で、日本 LP ガス協会の「グリーンプロパンガス」のプロジェクトにも携わっています。また、メタネーションのプロジェクトリーダーもさせて頂いていて、再エネ水素と CO₂ で作ったカーボンニュートラルメタンを都市ガス代替にするというプロジェクトもやっています。例えば、スウェーデンに行くと、ゴミから作ったメタンでバイオ CNGV (圧縮メタン自動車) が走っていますし、アウディ社も “e-gas” と言って、メタン発酵からのメタンを濃縮したバイオメタンを作る工場を建設しています。私たちの研究では、バイオガス (メタンが 60, CO₂ が 40) をドライリフォーミングでメタンと CO₂ を反応させて合成ガス (CO と水素の混合ガス) にできます。そういうふうには、バイオマスから合成ガスを作るとか、中国センターにいた時からやっていた「木から水素を」のように、バイオマスから水素を作ることでもできます。

「地産地消」ということで、ゴミでバイオメタンを作る。日本でもそこを見直さないとならないと思います。今日はエタノールが主題ですが、日本も「バイオマス・ニッポン」の時にやった、廃棄物をメタンやエタノール、ディーゼル油にする取り組みを、また、できる範囲でやることが重要だと思っています。

私がすごく印象に残っているのはブラジルでやった SATREPS プロジェクトです。ブラジルでは、サトウキビの収穫期 (5 月～11 月) には、製糖工場とエタノール工場が動いていてバガス (サトウキビの搾りかす) も使われています。その期間はエタノールが安くなるので、みんなエタノールを車に入れて E100 で走ったりする訳ですから、ブラジルは地産地消をやっているのです。ところが、11 月から 5 月はエ

タノールが生産されないので、エタノール含量減らして E25 とかで使う訳です。そこで、私たちの SATREPS プロジェクトでは、バガスとか葉っぱとかの余ったものを 5 月から 11 月の間に糖液に変えておくと工場が 300 日稼働できて、ブラジルでもセルロース系エタノールを増やせるということをやりました。

アメリカでもトウモロコシ農家の方が余剰分で作った車用のバイオエタノールが飲めないようにガソリンとブレンドして、飲料用のアルコールと区別するとのこと。これも「地産地消」です。

原料調達で海外と組む「地産地消」戦略

澤 ブラジルは、「スイング・プラント」、「スイング・ポリシー」でエタノールを作っています。アメリカもそういったことができます。なぜブラジルやアメリカがそれをできるかというと、やはり原料があるからなのです。ところが、日本の場合、自国内で完結するのはほぼ不可能に近いのです。そうした時、「バイオマス・アジア」ではないのですが、原料豊富なアジアと日本が組めば、同じようなことができるかも知れません。

そうでないと、ヨーロッパと比べても難しいということになります。例えば、イギリスも原料が全くありません。そこで、例えば、ドラックス社が石炭火力発電所（660MW × 4）でやったのは、全量バイオマスへの転換で、その改修を手がけたのは三菱重工業㈱なのです。それで燃料は、とりあえず、アメリカから 700 万トンを持って来るのです。次のステップは、バイオマス炭素回収貯留（BECCS）です。

また、イギリスは、2030 年にはガソリン車を禁止して EV の普及加速を図るという過激なことを言いながら、他方で E10 の義務化を発表しました。つまり、両方やっているのです。その辺はしたたかです。自国にはない原料をどう調達するかですが、日本がイギリスを全部真似する必要はないのですが、日本の



森山 亮 氏

（一財）エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員

場合、カナダ、アメリカから全部という訳にいかないのでアジアも含めてということであれば、「地産地消」っぽいこともできるのではないかという気がします。

森山 海外からのエネルギー資源の調達は、従来から日本が戦略的にやってきたことなので、そういったことでの強みはあります。もちろん、地産地消を否定する訳ではありません。日本で採れるものは、その場で有効利用しつつ国の重要なエネルギーセキュリティの確保では、エネルギー資源を海外でどう調達するか戦略的に動くことが必要だと思います。そこは今後やっていかなければならないことだと思います。では、最後に大聖先生、お願いいたします。

短距離は EV、長距離は FCV、長距離トラックには液体燃料とモーダルシフトも

大聖 今日は大変勉強になりました。ありがとうございました。今後、短距離を走る小さい車は EV になっていき、長距離を走りたいなら、PHV や FCV になると思います。ところが、FCV は、水素を水の電気分解で作る時に 2 割ぐらいロスがあります。それから、FCV の効率は最高で 60% ぐらいなので、行っ

て帰ってくるとエネルギーが半分になります。ですから、短距離だと、EVの方がエネルギー的に得なのです。ですが、バッテリー容量に限界があるので、FCVのほうが長距離走れるという利点があり、両者を使い分けることになります。

ところが、物を運ぶ長距離トラックをどうするかは、自動車分野の脱炭素化においても一番難しい課題で、液体燃料の価値は、その辺にあると思っています。

その一方で、私、最近鉄道貨物にも注目しています。JR貨物では、コンテナのスタンダード化や荷物のICT化が進められています。ただ、貨物は旅客用の線路を借りて運行されているので、縮小均衡の状態なのですが、鉄道貨物輸送は究極のEV（Electric Vehicle：電気で動く乗り物）と言えます。特に長距離輸送において、トラック輸送との連携複合化をさらに進めれば、脱炭素化につながるものと期待されます。

坂西 モーダルシフトですね。

大聖 そうです。モーダルシフトです。物を運ぶ、人の移動、それらの距離も含めて、多様なエネルギー比べながら賢く使っていないといけません。また、国際的な取り組みがすごく必要だということについては、私も大賛成です。国内で生産できるエネルギーには限界がありますし、今輸入している液化天然ガス（LNG）や石炭、石油を水素に替えなければならないとなると、その量は膨大になります。それをどこから持って来るか。日本の技術を展開しながら、東南アジアやオーストラリアから資源を持つてくるという、国際貢献しながら日本のプラスにもなる戦略が必要です。結局、国際貢献をする商品として展開できるのは、やはり自動車です。私は、自動車産業のアジアでの展開は、これからが「正念場」だと思っています。そういう中で、燃料もセットにした戦略が国際貢献にもなるし、

日本の自動車産業の盛衰にも大きく影響すると予想しています。

おわりに

森山 皆さんから展望をお話し頂き、十分な議論ができたと思います。燃料の話もそうですし、環境から国際的な話も含めて、時間軸という意味では、将来どうしていくのか。答えと言うよりも選択肢として、そういった取り組みを進めて行かなければならないという課題は見えてきたと思います。

これ以上、特にご意見がなければ、座談会を終了させて頂きたいと思います。本日は皆さんお忙しい中、また、コロナ禍の中、お越し頂いて本当にありがとうございました。

【調査研究報告】

非効率石炭火力のフェードアウトに関する考察 ～動向と燃料転換技術オプション等について～

濱田 利幸[※]（プロジェクト試験研究部
参事）



徳永 貴道^{※※}（プロジェクト試験研究部
主任研究員）



橋上 聖^{※※※}（プロジェクト試験研究部
主任研究員）

1. はじめに

2020年10月、菅内閣総理大臣は所信表明演説の中で「わが国は、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す。」と宣言した。

2015年にパリで開かれた第21回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）に先立って提出された日本の約束草案では、温室効果ガス（GHG）削減の目標として、2030年度に2013年度比26.0%減が掲げられた。この削減目標は目指すエネルギーミックス（電源構成）⁽¹⁾を達成することによって、日本のGHG排出量の9割を占めるエネルギー起源二酸化炭素（CO₂）の排出削減につながり、達成可能と考えられていた。

約束草案では石炭火力による発電電力量は総発電電力量の26%程度を占めることが想定されており、対策・施策としては超々臨界圧火力発電（USC）、先進超々臨界圧火力発電（A-USC）、石炭ガス化複合発電（IGCC）等火力発電の高効率化を進めることが考えられていた。

その後、2018年に策定された「第5次エネルギー基本計画」⁽²⁾では燃料としての石炭の

低い地政学リスク、安価な燃料費、石炭火力発電のベースロード電源としての役割と出力調整を担う必要性について触れつつ、非効率石炭火力を徐々に廃止していくフェードアウト（fade out）に取り組むことが述べられている。これに対し、海外では石炭火力を段階的に廃止していくことをフェーズアウト（phase out）と呼んでいるが、本稿では日本国内の説明に限り、エネルギー基本計画やその後の経済産業省の資料でも使われている用語「フェードアウト」を用いることとする。

2020年8月からは石炭火力のフェードアウトの進め方について「石炭火力検討ワーキンググループ」（石炭火力WG）による議論が開始され、2021年4月に「中間とりまとめ」⁽³⁾が公開されたところである。

さらに2021年4月には第45回地球温暖化対策推進本部において、2050年カーボンニュートラルの目標と整合的で野心的な目標値として2030年度のGHG排出削減目標を26%減から46%減まで引き上げることが表明された⁽⁴⁾。

本稿を執筆している2021年6月中旬にはまだ発表されていないが、「第6次エネルギー基本計画」ではこれらの上方修正されたGHG削減目標と整合的なエネルギーミックスの数値が定められることになると想定される。

本稿では、国内外の石炭火力のフェードアウトもしくはフェーズアウト（段階的廃止）の動向について整理するとともに、日本の石炭火力のフェードアウトによるエネルギー需給バランスへの影響および石炭火力発電事業者として考える事業もしくは燃料転換の技術オプションを整理する。

2. 世界の石炭火力段階的廃止の動向

欧州では、2010年に採択された欧州決定（2010/787/EU）において、欧州連合（EU）域内のエネルギーミックスに対する石炭の貢献度が低いこと、およびEUにおける再生可能エネルギー（再エネ）奨励と低炭素経済の政策と合致しないということから石炭産業への国家補助を禁止することとした⁽⁵⁾。

イギリスでは2013年に成立した火力発電所排出基準法によって新設もしくは更新する火力発電所について450g/kWhのCO₂排出基準値を適用することが定められ、石炭火力は炭素回収貯留（CCS）設備の設置を伴わなければ基準値を満たすことが困難となっている。

また、2017年にドイツのボンで開催されたCOP23においてイギリス政府とカナダ政府は石炭火力の段階的廃止を推進する初の政府主

導のプラットフォームである「脱石炭連盟」（PPCA：Powering Past Coal Alliance）を発足した。2021年6月時点では36の国家政府、38の自治体や都市、51の企業が加盟している⁽⁶⁾。

フランスでは2019年に成立したエネルギー・気候法によって2020年から火力発電所に550g-CO₂/kWhのCO₂排出基準値を適用することが定められるとともに2022年には石炭火力を全廃することを明言している。

図1に示すように、イギリスおよびフランスは発電電力量に占める石炭火力の寄与が少なく、2017年においてそれぞれ7%および3%であったため、石炭火力の段階的廃止の影響は限定的であると考えられる。

一方、2017年における発電電力量に占める石炭火力の寄与が39%と高かったドイツにおいても2020年に成立した脱石炭法において2038年までに石炭火力を全廃する方針が打ち出された。

世界のCO₂排出量について見ると、図2に示すように、2018年時点で排出量第1位は中国で全体の28.4%を占め、第2位はアメリカで14.7%を占めている。

中国は2020年9月の国連総会において、2030年をピークにGHG排出量を減少させ、2060年に実質ゼロとするカーボンニュートラ

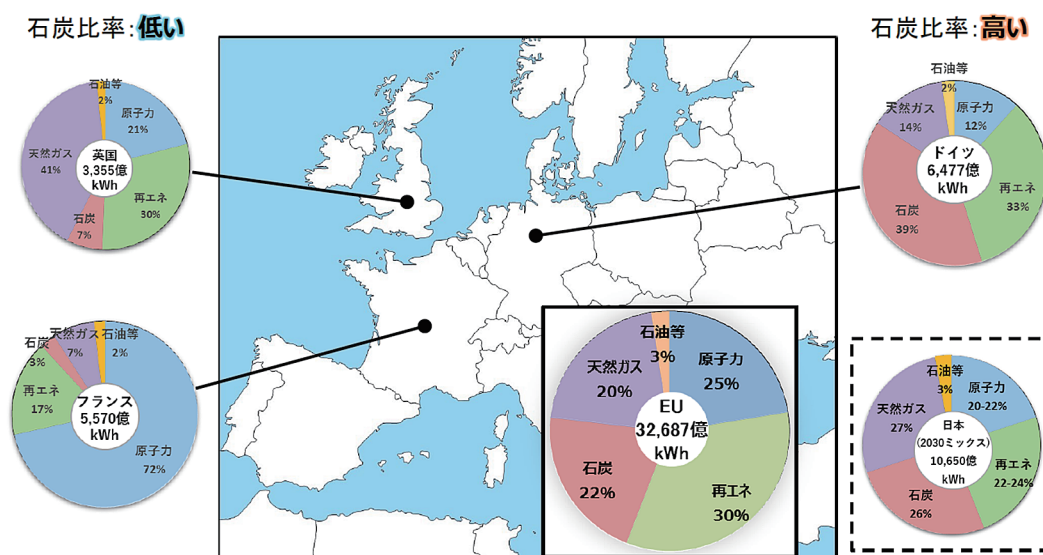


図1 欧州各国の2017年のエネルギーミックス（電源構成）⁽⁷⁾

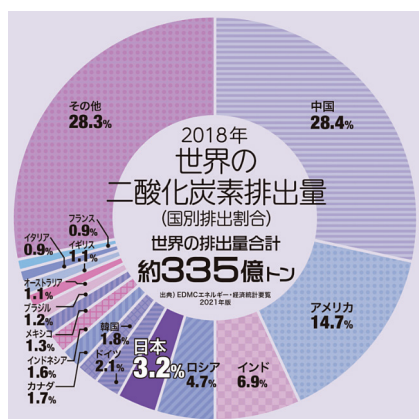


図2 世界のCO₂排出量 (8)

ルを宣言するとともに、脱石炭を約束した。現在は電力の60%弱を石炭で賄っているが、2021年3月に発表された新5カ年計画では、2025年までにエネルギーの20%を再エネで賄うとする目標を掲げた。

アメリカでは2010年以降、シェールガス供給が急増したことにより、石炭火力発電所の閉鎖が進んでいた。2021年1月に就任したジョー・バイデン大統領は就任初日にトランプ前政権で離脱したパリ協定の復帰にかかる文書に署名した。

また、石炭火力の段階的廃止の必要性については国際エネルギー機関（IEA）においても述べられている。2021年3月に発行された特別レポート“Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector”⁽⁹⁾では2050年までにネットゼロエミッションを達成する

シナリオ（NZE：Net-Zero Emissions by 2050 Scenario）を検討し、シナリオ達成のためには図3に示すような石炭火力の段階的廃止が必要であることを示した。

2030年までに最も効率が低いプラントから徐々に廃止し始め、2040年までにCCSなどの改修をしない限り完全に廃止すべきと述べている。

このように世界全体でも温暖化対策として石炭火力の段階的廃止が求められている状況にある。

3. わが国の石炭火力発電所とフェードアウトの議論

(1) 石炭火力に対する規制措置

第5次エネルギー基本計画⁽²⁾に基づいたわが国の石炭火力発電所に対する維持もしくは廃止の議論は、第26回総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会（2020年7月13日）において行われ、2020年8月からは前述の通り、石炭火力WGで非効率石炭火力のフェードアウトに向けた検討の方向性が議論された⁽³⁾。

石炭火力WGの「中間とりまとめ」では、石炭火力単独のベンチマーク指標の新設、発電効率目標43%への引き上げ、アンモニア混焼・水素混焼への配慮措置の新設などが示された。

現行の「エネルギーの使用の合理化等に関

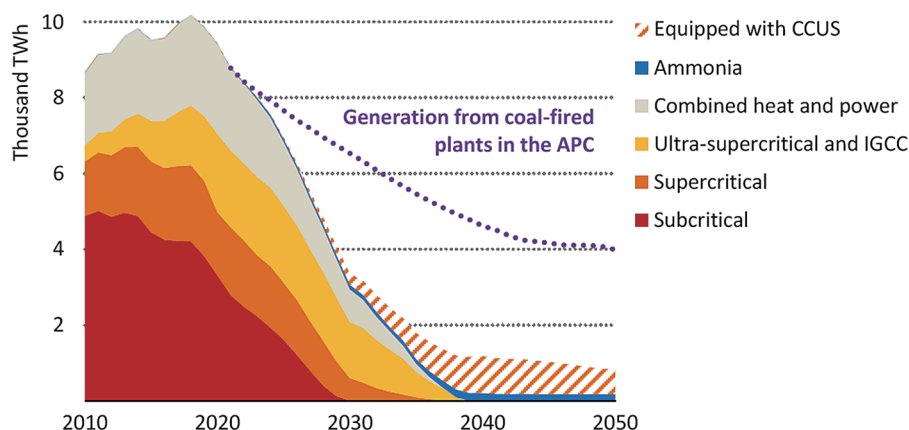


図3 2050年までにネットゼロエミッションを達成するシナリオにおける石炭火力の発電量推移⁽⁹⁾

する法律」(省エネ法)で示される火力ベンチマーク目標(燃料種毎の発電効率 A 指標, 火力発電の総合的発電効率 B 指標)は, 火力発電設備全体(石炭, 液化天然ガス(LNG), 石油)の目標であるため, 石炭, LNG, 石油それぞれの火力発電を所有する事業者は, 石炭以外の燃料による火力発電が高効率であれば, ベンチマークを達成することができていた。石炭火力 WG では非効率石炭火力のフェードアウトを確実に進めていくため, 石炭火力単独のベンチマーク指標を新設することとなり, 発電効率目標は「43%」と示された。この水準は, 現行の超々臨界圧発電方式(USC)であっても 2 基しか超えていないことから, 発電所単体では達成が難しいといえる。

それでは, 2030 年度以降に 43% を超えていない石炭火力発電所はすべて停止させなければいけないかというところではない。事業者単位で 43% を超えることによって, 運転を継続することができる。省エネ法で報告する事業者効率は, 設備の効率に対し, 設備ごとの発電電力量に応じた加重平均で算出される。そのため, 非効率な発電所は発電電力量を低下(設備利用率を下げる)または休廃止し, 一方で高効率な発電所の発電電力量割合を増やすことによって 43% を達成することができる。

また, バイオマスや副生物(生産過程において副次的に発生する可燃物, 可燃ガス等), もしくは, アンモニアや水素を混焼することによって, 図 4 に示す発電効率が向上するような算出式が用いられるため, 上述の非効率な発電所の利用率低下とバイオマス混焼を組み合わせ

ることによって, 2030 年度の基準達成を目指す事業者は多いのではないかと推察される。

さらに, 再エネの導入拡大に伴う需給変動幅の拡大に対して石炭火力の設備利用率を一定程度下げて運用することで発電効率が低下しているという実態があることに対し, 設備利用率の低下度合いに応じた補正値が設定されることとなった。

すなわち, 省エネ法に基づき報告する発電効率は, 以下の式のようにバイオマス混焼等の他の補正措置を講じた発電効率に調整力補正値を加算することで算出される。

$$\begin{aligned} & \text{省エネ法に基づき報告する発電効率} [\%] \\ &= \text{バイオマス混焼等の補正込みの発電効率} [\%] + \\ & \quad \text{調整力補正値} [\%] \end{aligned}$$

(2) 石炭火力フェードアウトの見通し

石炭火力 WG で示されている大手電力(旧一般電気事業者に加え, 電源開発, 旧一般電気事業者や電源開発が共同出資する共同火力を含む)および製造業等自家発電含むその他の事業者による 2030 年度に向けた非効率石炭火力削減見通しを図 5 に示す。

大手電力が保有する石炭火力は 2019 年度実績で 69 基(約 3,877 万 kW)であり, 内訳として, 超々臨界圧発電方式(USC), 石炭ガス化複合発電(IGCC), その他(加圧流動床複合発電方式(PFBC))の合計が 30 基で 2,267 万 kW, 超臨界圧発電方式(SC)が 17 基で 1,140 万 kW, 亜臨界圧発電方式(Sub-C)が 22 基で 470 万 kW となっている。

2030 年度における見通しでは, Sub-C と SC が 20 基で 900 万 kW と 2019 年度実績に対して半減することが検討されている。一方, USC, IGCC, PFBC については 35 基で 2,700 万 kW と 2019 年度実績よりも基数, 出力ともに増加していることが分かる。

石炭火力 WG の中間とりまとめでは規制措置の対象として発電効率を指標とすることが述べられているため, 一般的に発電効率が

$$\begin{aligned} & \checkmark \text{ 実績効率 } 39\% \Rightarrow \text{補正措置で } 43\% \\ & \left(\frac{39}{100} \Rightarrow \frac{39}{100 - 10} = 43.3\% \right) \\ & \quad \Rightarrow 10\% \text{ の混焼が必要} \\ \\ & \checkmark \text{ 実績効率 } 41\% \Rightarrow \text{補正措置で } 43\% \\ & \left(\frac{41}{100} \Rightarrow \frac{41}{100 - 5} = 43.0\% \right) \\ & \quad \Rightarrow 5\% \text{ の混焼が必要} \end{aligned}$$

図 4 混焼による目標水準達成の目安 (3)

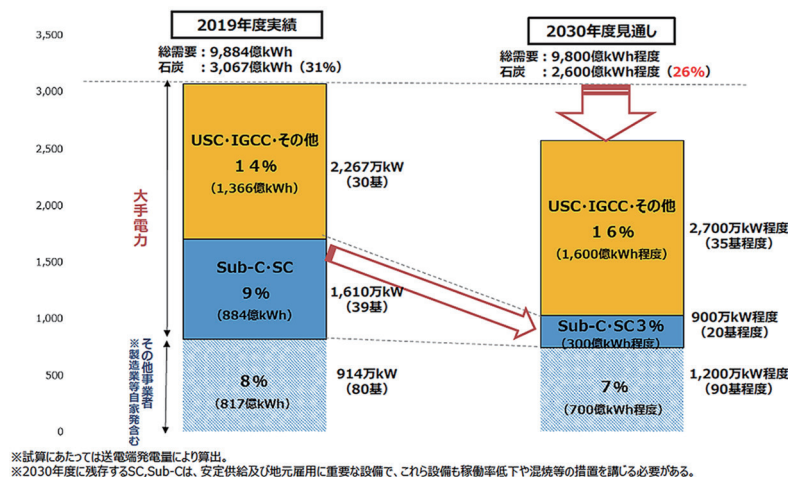


図5 非効率石炭火力のフェードアウトの見通し⁽³⁾

低いSub-CとSCは大幅に減少し、効率が低いUSC、IGCC、PFBCは新設計画も含めて維持もしくは微増する傾向にある。

なお、製造業等自家発電含むその他の事業者についてみると、エネルギー使用量が石油換算で1,500kl/年未満の事業者は省エネ法の対象外であり、1,500kl/年以上の事業者は省エネ法において、エネルギー多消費事業者として、毎年度のエネルギー使用原単位の改善や、各業種におけるベンチマーク目標の達成が求められている。このため、発電設備の利用にあっては、熱利用等の総合的な発電効率の向上に資する取組やバイオマス混焼等を行うことを義務として規定すること、高効率化に向けた取組の状況について毎年度の定期報告書において報告すること、出力が1,000kW以上の発電設備については毎年度発電効率等の詳細データを報告すること、といった措置を講ずることとして、フェードアウトの対象にはなっていない。

前述したIEAの予測(Net Zero by 2050)⁽⁹⁾では、2030年においてSub-Cがほぼ全て廃止、SCは2020年と比較して半分程度まで減少する結果が示されている。USCについては大きな削減はなく、半分以上の残存が予測されており、IEAの予測の方が2030年に向けた石炭火力による発電電力量の削減割合は大きいものの、発電方式別の段階的廃止の見込みはわが国の石炭火力フェードアウトの見通しと

同様の傾向にあることが分かる。

ただし、この見通しは「第5次エネルギー基本計画」⁽²⁾に基づいたものであるため、2050年カーボンニュートラルおよび2030年のGHG排出削減目標の46%減までの引き上げ⁽⁴⁾に対応するためには、規制が強化される可能性も考えておく必要がある。

4. 2030年の発電効率43%達成の技術オプション

(1) 石炭火力発電所の燃料転換事例

2030年発電効率43%達成に向けた技術オプションは、前述のようなバイオマスや副生物、もしくは、アンモニアや水素を混焼する技術の他、天然ガス火力発電所や廃棄物発電(炉の形式にもよる)への燃料転換が考えられる。国内における既に発表された事例として、運開した鈴川エネルギーセンター⁽¹⁰⁾をはじめ、建設中の福島いわきバイオマス発電所⁽¹¹⁾、住友商事(株)が手掛ける仙台市の発電所⁽¹²⁾など、石炭火力発電所の計画をバイオマス専焼へ変更した事業所も出てきている。これらは将来をいち早く見越した事業転換ともいえる。

また、2030年に事業転換を選択する場合は、送電インフラを活用した太陽光発電設備の設置、蓄電池など蓄エネルギー設備の設置といった方法も考えられている。

海外では日本に先立って、石炭火力の燃料転換事例がいくつか見られる。

英国では2012年9月に英DRAX社が石炭火力発電所であるDrax Power Stationの6つのボイラ(3,900 MW)のうち、3つのボイラを100%バイオマスに転換する計画を発表した。現在では4つのボイラ(2,600 MW)が100%バイオマス発電に転換されている。さらに、英DRAX社は2021年にカナダのPinnacle Renewable Energy社を買収し、燃料調達体制を強化した他、バイオマス発電と排ガスからのCCSを組みわせることで、大気中のCO₂を減らす「ネガティブ・エミッション」技術の1つであるバイオマス炭素貯留(BECCS: Bio-energy with Carbon Capture and Storage)の実証を進めている⁽¹³⁾。

米国では、Intermountain Power Agency社がユタ州のIntermountain石炭火力発電所をガス火力発電に転換し、将来の水素発電を視野に入れている⁽¹⁴⁾。また、NRG Energy社がペンシルベニア州のShawville, New Castle, イリノイ州のJoliet, ルイジアナ州のBig Cajun II石炭火力発電所をガス火力発電に転換している⁽¹⁵⁾。

カナダでは、2030年までに石炭火力発電所の段階的廃止を目指すことを発表しているが、オンタリオ州では2014年に石炭火力の段階的廃止が完了している。

Ontario Power Generation社のAtikokan石炭火力発電所とThunder Bay石炭火力発電所は2015年にバイオマス発電へ転換した⁽¹⁶⁾。2018年には稼働率の低下とボイラ腐食の修繕にかかるコストが高いことを理由にThunder Bayバイオマス発電所は廃止された。カナダのアルバータ州のCapital Power社はGenesee石炭火力発電所を天然ガスコンバインドサイクル発電や100%天然ガス発電に転換している。

石炭火力発電所の燃料転換事例は、英DRAX社のように完全にバイオマス転換する例やカナダのようにガス火力に転換するなど地域に応じて様々である。

事例としては記載していないが、段階的に廃止した石炭火力の中には規制による廃止だけでなく、プラントの寿命が来て廃炉にしたものや、価格競争力がなくなったために閉鎖を決断したものも含まれる。

(2) バイオマス混焼の技術と課題

2030年発電効率43%達成に向けた技術オプションで示したものうちバイオマス混焼は、バイオマスが石炭火力との親和性が高いことから、比較的即効性のある解決策といえる。(一財)石炭エネルギーセンター(JCOAL)の調べによると⁽¹⁷⁾、石炭火力発電所の内、40基以上でバイオマス混焼の実績があるといわれており、混焼するためのプラント側の工夫や原料バイオマスの改質の工夫などを組み合わせることによって、バイオマス混焼が進められている。

以下、バイオマス混焼に関わる技術と課題について述べる。

①プラント側の工夫

・石炭ミルによる混合粉碎

微粉炭焚きボイラの石炭の搬送コンベアにバイオマスを数%混合し、石炭ミルで混合粉碎して、微粉炭バーナで燃焼する方法である。国内の混焼事例ではバイオマスの混焼率が3%程度の事例が多いことから、混焼率を大きく上昇させることは難しく、熱量ベースで2~3%が安定運転域と考えられる。

・バイオマスミルによる粉碎、混合燃焼

微粉炭焚きボイラの石炭ミルのうち最大半数を木質ペレットミルに改造、木質ペレットを熱量ベースの高比率(25~50%:バーナ総数の4分の1~2分の1)で混焼する方法である。専用ミルを石炭兼用とした例もあり、各社それぞれ燃焼に工夫を凝らしているが、当然、燃料系が2つになることから、燃料受入ヤードからバーナに至るまで2系列が必要となり、これらのコストアップも発電コストに影響を及ぼす。

・ 混焼の課題

バイオマス混焼による発電効率低下が問題になる。低炭素電力供給システムに関する研究会での試算⁽³⁾では、混焼率1%につき、発電効率が0.08%低下すると仮定されており、発電事業者としてはどこまで混焼率を上げるべきか、悩みの1つとなる。

②原料バイオマスの工夫

- ・ トレファクション（Torrefaction：半炭化、Torrefied Pellet／Black Pellet）は、炭化寸前の200～300℃程度の温度域でバイオマス燃料化する熱分解技術の1つで、石炭火力混焼率と輸送・貯蔵効率向上を目指したペレットの改良版である。チップ、ペレットとの性状の比較を表1に示す。

現在、出光興産⁽¹⁸⁾、日本製紙⁽¹⁹⁾、宇部興産⁽²⁰⁾などがトレファクション技術の導入に取り組んでいる。原料栽培からエネルギー利用のサプライチェーンを一貫した事業運営としてどのように進められるかを見守る必要がある。

・ 原料調達の課題と対策

原料の調達に目向けると、仮に、国内の既設の石炭火力にバイオマスを5%混焼する場合、少なくとも1,000万t/年のバイオマスが必要となると言われている⁽¹⁷⁾。今後混焼率を上昇、専焼発電所が増加すると、バイオマス原料の安定的な調達先の確

保が問題となる。国内原料の大量安定調達には限界があり、北米、東南アジアなどからの輸入に頼らざるを得ない。これに対し、Enviva社やPinnacle Renewable Energy社などからの大量調達も進んでいる⁽²¹⁾。

国内バイオマス発電大手のイーレックス^(株)は、前述の英DRAX社と同様に大手電力などから石炭火力発電所を買収し、環境負荷が少ないバイオマス発電に転換する。4基程度を、専用設備を導入して2022年以降の運転開始を目指すとしている⁽²²⁾。

買収した火力発電所は、順次30%から100%へと混焼率を上げ専焼とする方針であり、原料の調達（現地での栽培からの原料確保）までをサプライチェーンとして傘下に収め、年3回の収穫可能なソルガムを利用している。

バイオマス混焼／専焼の戦略は、原料栽培からエネルギー利用のサプライチェーンと、焼却灰の廃棄までの一貫した事業運営をどう見込むかが鍵となる。海外での燃料製造も単純な栽培と加工だけでは採算性に欠ける。現地のエネルギー事情への配慮、バイオマスの飼料としてのカスケード利用など、コストを下げる工夫や、廃棄物の取り込みなどの有効利用、輸送や貯蔵など複合的な判断のもと事業展開も必要になる。

表1 チップ、ペレット、トレファイドペレットの性状比較

種類	チップ	ペレット	トレファイドペレット
概要	木質原料を粗粉碎した燃料、製紙用が主体	事前に異物除去、粉碎・乾燥、圧縮成形した燃料	原料を焙煎もしくは蒸気爆砕して含水率を低下
含水率	35～50%	10%以下	1～3%
発熱量	10MJ/kg以上	16MJ/kg以上	20MJ/kg以上
粉碎性	△	○	◎
メリット	屋外貯蔵が可能、価格が安い	発熱量が高い 輸送性に優れる	発熱量がペレットより高く、発電所の改造が不要
デメリット	含水率が高く、発熱量が低い 含水率、形状等のばらつきも多い	屋外貯蔵には向かない 粉塵対策も必要 価格が高い	ペレットよりも割高 屋外貯蔵も可能 現在発展途上、大量調達は 今後に期待
評価	専焼発電にコスト的に有利	石炭混焼／混焼率に限り	石炭同様に扱える

（出所：各種資料を基に筆者作成）

5. 2050年のカーボンニュートラルを見据えた技術オプション

2050年のカーボンニュートラルに向けた技術オプションは、バイオマス、アンモニア、水素などの燃料に転換したり、石炭火力発電所の土地やインフラを利用して、太陽光発電、蓄電池設備、水素製造設備、圧縮空気エネルギー貯蔵装置（CAES）や蓄熱などエネルギー貯蔵設備、蓄熱オプションの1つである岩石発電などに事業を転換することが考えられる。これに加え、CCSや炭素回収・有効利用・貯留（CCUS）の併設なども考えられる。

環境省では令和3年度（2021年度）に「岩石蓄熱技術を用いた蓄エネルギー・サービス事業の実現可能性評価・検証委託業務」を実施している。蓄熱技術を用いることにより、石炭火力発電の蒸気タービンを活かして、CO₂フリーな電力を作り出すことも可能な技術の評価が始まったところである⁽²³⁾。

以下に、(株)JERAと電源開発(株)（J-POWER）が発表している2050年に向けた取り組みを紹介する。

① JERA アンモニア混焼技術

JERAは、図6の2020年に「JERA ゼロエ

ミッション2050」を示しており、石炭火力については非効率な発電所（超臨界以下）全台を停廃止すること、高効率な発電所（超々臨界）へのアンモニアの混焼実証を進める目標を掲げている。

政府が示す2030年度の長期エネルギー需給見通しに基づく、国全体の火力発電からの排出原単位と比べて20%減を実現するとも述べている⁽²⁴⁾。

また、JERAおよび(株)IHIは、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業」（2021年6月～2025年3月）に採択され、JERAの碧南火力発電所4号機（発電出力：100万kW）において、2024年度にアンモニア20%混焼を目指す計画である。さらに、アンモニアの大量混焼を確実にを行うため、同発電所5号機（発電出力：100万kW）において、2021年8月から12月の間、実証用バーナの開発に必要な条件を確認する予定である。

② J-POWERのロードマップ

J-POWERは、J-POWER“BLUE MISSION 2050”⁽²⁵⁾を示しており、図7で分かるように、

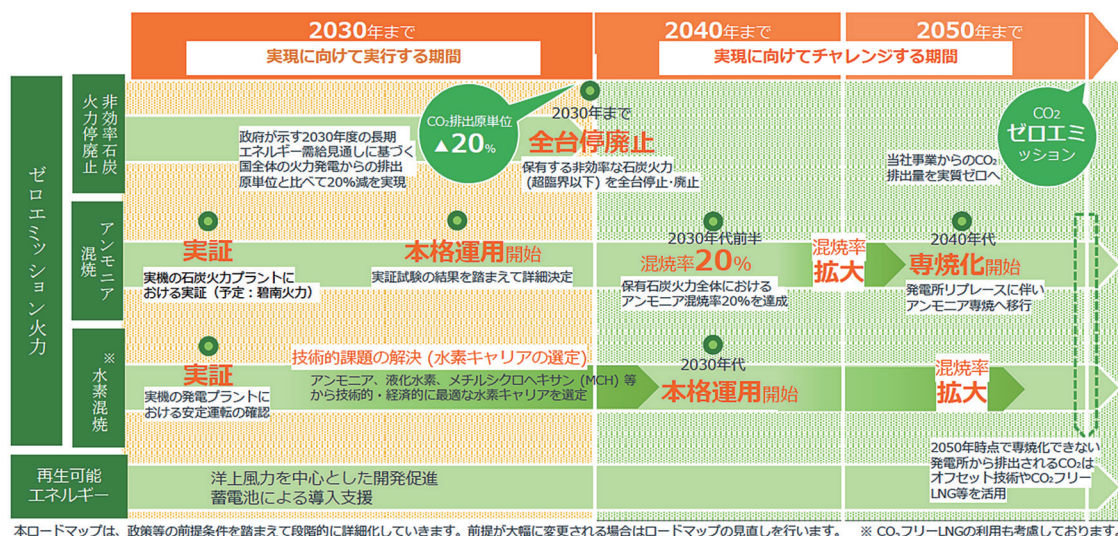


図6 JERA ゼロエミッション2050 日本版ロードマップ⁽²⁴⁾

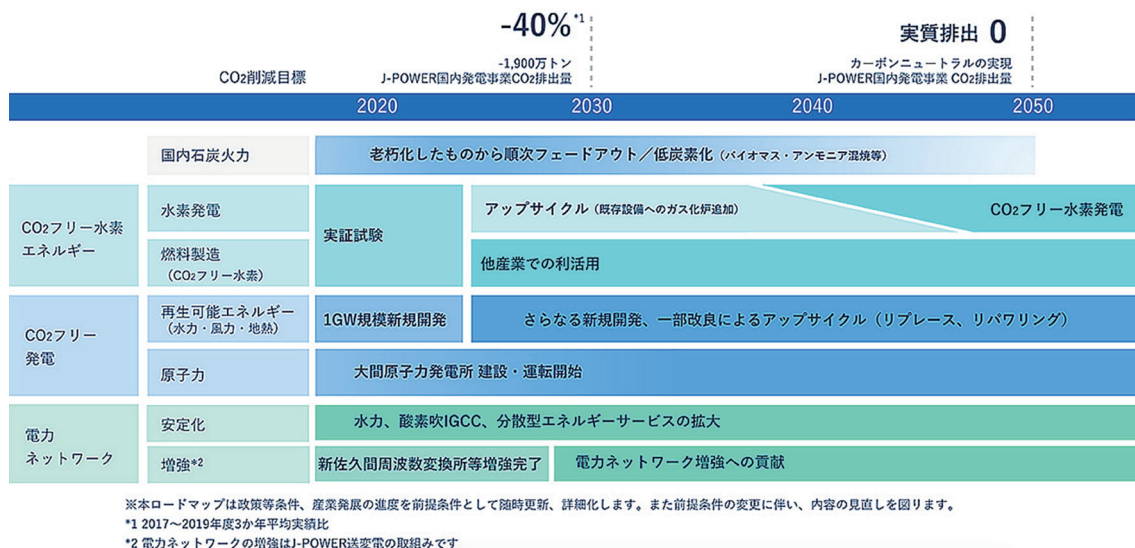


図7 J-POWER "BLUE MISSION 2050" (25)

2050年のカーボンニュートラルの実現に段階的に取り組む中で、そのマイルストーンとして、2030年のCO₂排出量を40%削減するとしている。

2050年の水素サプライチェーンとして、これまでの石炭から電気への転換から、石炭によるCO₂フリー水素製造とそれを利用した水素発電への移行を開始するとともに、多様な用途への水素供給による事業拡大の可能性も追及としている。

旧一般電気事業者およびJ-POWERのロードマップにはフェードアウトの記載の有無、バイオマスや水素・アンモニアの表現の網羅、

時期などに若干の違いはあるが、石炭火力削減の方針は一致している。

6. おわりに

これらの情報を基に石炭火力発電所の技術オプションを整理すると図8のように考えられる。

既に石炭火力新設の計画を断念し、バイオマス専焼に、また、既設の設備をバイオマス混焼／専焼へ切り替える事業判断に踏み切った事業者もあるが、今後、「第6次エネルギー基本計画」や炭素税導入検討など、より事業

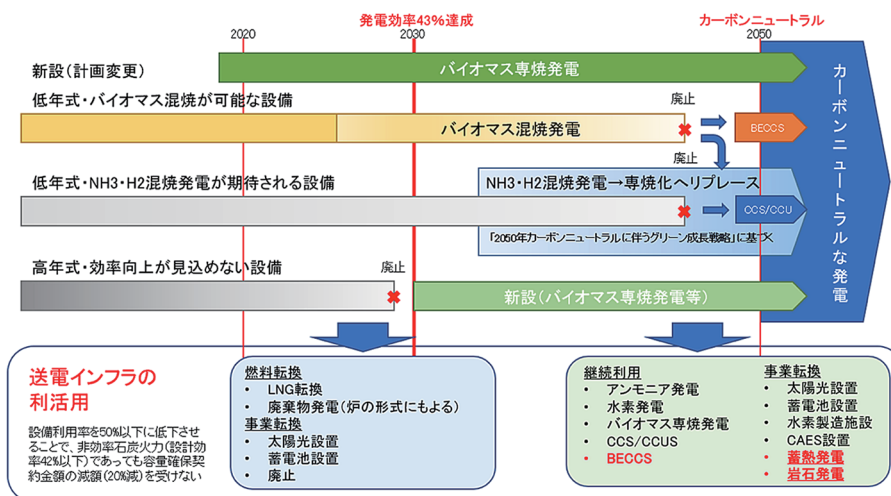


図8 石炭火力発電所の技術オプション

運営が見通しにくい時代となる。各事業者が2030年、2050年を目指し、どのような戦術を打ち出すか、見守る必要がある。

バイオマス利用には、大量調達への懸念や持続安定性のほか、現時点では、日本に運ばれた燃料は、発電所で燃焼時にCO₂が発生するが、日本の排出量としてはカウントされていないことや、ライフサイクルGHG評価はしていないなど将来的に不利に働く懸念材料もあるが、石炭火力の既存プラントを有効活用しつつ、CO₂削減することは当面間違いなく有効な手段だと考える。

既に述べたように、英DRAX社ではBECCSに取り組んでいる。バイオマスはカーボンニュートラルなので、バイオマスの燃焼によって排出されたCO₂はゼロカウントとなる。これを捕捉して貯蔵し排出しなければ、その分は更にCO₂を削減したと見做される。これは2050年以降の「国連気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)のネガティブエミッションシナリオの切り札と位置付けられている。従い、バイオマス混焼を行なっている石炭火力発電所に将来CCSを設置すれば、石炭分のCO₂排出がゼロとなり、更にバイオマス分はマイナスになるという効果が期待できる。

当研究所の小野崎と橋崎は、既存の膨大なインフラであるLNGや石炭火力発電を活かしながら、日本においてゼロエミッションを実現する方策を検討した。その結果、海外の高再エネポテンシャル地域で安価な再エネを用いて製造するアンモニア、メタン、メタノールを併用して、エネルギーミックスを維持しつつ、CO₂排出ゼロエミッションを実現することが可能であることが試算された。過度に国内の再エネに頼ることなく、国際的なカーボンリサイクルを適用し、既存の火力発電設備を活用して、安定した電源が確保できることを明らかにしている⁽²⁶⁾。

英DRAX社のようにバイオマス戦略の要は、原料栽培からエネルギー利用のサプライチェーンを一貫した事業運営としてどう見込

むか、必要に応じたM & Aを含めた事業選択が鍵となってきそうだと。

これまで述べてきたように、石炭火力発電を取り巻く社会は、今、急激な変化を求めている。しかしながら石炭火力がこれまで受け持ってきた役割を忘れてはならない。

電力の安定供給に資する大きな発電容量を有することや調整力としての役割である。そして火力発電の中では最も発電コストが安いことも重要である。

今後、再エネの主力電源化を実現するためにも一定数の調整力を持った発電所の確保が必要と考えられるが、将来、水素、アンモニアの時代となり持続的・安定的に供給されるまでは、バイオマス利用は過渡期として必要なものと考えられる。

参考文献

- (1) 地球温暖化対策推進本部、日本の約束草案(2015)
- (2) 経済産業省、エネルギー基本計画(2018)
- (3) 経済産業省、石炭火力検討ワーキンググループ
- (4) 首相官邸、地球温暖化対策推進本部(2021)
- (5) 欧州委員会、2010/787/EU(2010)
- (6) Powering Past Coal Alliance (PPCA, 脱石炭連盟), <https://www.poweringpastcoal.org/>
- (7) 資源エネルギー庁、海外の石炭火力政策動向について(2020)
- (8) JCCCA、世界の二酸化炭素排出量(2018年)
- (9) IEA, Net Zero by 2050 -A Roadmap for the Global Energy Sector(2021)
- (10) 中部電力、プレスリリース(2019) https://www.chuden.co.jp/publicity/press/3272165_21432.html
- (11) 関西電力、福島いわきバイオマス発電所, https://www.kepc.co.jp/energy_supply/energy/newenergy/biomass/fiwaki.html
- (12) 住友商事、宮城県仙台市におけるバイオマス専焼火力発電所の着工について(2021), <https://www.sumitomocorp.com/ja/jp/news/release/2021/group/14580>
- (13) Drax, <https://www.drax.com/>
- (14) IEEFA, Conversion of 1,800MW Intermountain coal plant in Utah to 840MW gas-hydrogen facility moving forward(2020), <https://ieefa.org/conversion-of-1800mw-intermountain-coal-plant-in-utah-to-840mw-gas-hydrogen-facility-moving-forward/>
- (15) POWERGRID International, NRG Energy completes four coal to gas projects(2016) <https://www.power-grid.com/news/nrg-energy-completes-four-coal-to-gas-projects/#gref>
- (16) Canadian Biomass Magazine, From pellets to power:

- Inside North America' s first power plant to be converted from coal to biomass (2021), <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/from-pellets-to-power/>
- (17) 塚本修, バイオマス発電と石炭火力発電の共存 (2017), <http://iju.jp/noutokaigi/kyokai/20170718tsukamoto.pdf>
- (18) 出光興産(株), ブラックペレット, <https://www.idemitsu.com/jp/business/coal/environment.html#environment01>
- (19) 日本製紙グループ, 統合報告書 2020 (2020)
- (20) 宇部興産(株), ニュース 木質バイオマス炭化燃料実証設備の建設について (2018), https://www.ube-ind.co.jp/ube/jp/news/2018/20180419_02.html
- (21) 満田夏花, 大規模バイオマス発電の問題点 (2021), https://www.foejapan.org/forest/biofuel/pdf/210124_Mitsuta.pdf
- (22) 日本経済新聞, イーレックス, 石炭火力発電所買収へバイオマスに転換 (2021), <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC09EBR0Z00C21A6000000/>
- (23) 環境省, 令和3年度岩石蓄熱技術を用いた蓄エネルギー・サービス事業の実現可能性評価・検証委託業務 (2021), https://www.env.go.jp/kanbo/shotatsu/20210415_115137.html
- (24) JERA, JERA セロエミッション 2050 (2020), <https://www.jera.co.jp/corporate/zeroemission>
- (25) J-POWER, BLUE MISSION 2050 (2021), <https://www.jpowers.co.jp/bluemotion2050/>
- (26) 小野崎 正樹, 橋崎 克雄「火力発電の脱炭素化に向けたカーボンリサイクル活用の検討」, 火力原子力発電 (2021)

原子力発電所から発生する大型機器の処理について

堀川 義彦 (原子力技術センター
部長)



1. はじめに

わが国では使命を終えて廃止措置に移行した原子力発電所が増加している。今後原子力発電所の廃止措置が進むと、さらに大量の処理すべき大型機器が発生し、敷地内に保管され続けることとなり、廃止措置作業スペースを圧迫することが予想される。

当研究所は、「原子力発電所廃止措置調査検討委員会」(委員長：岡本孝司・東京大学教授)を設置し、わが国の廃止措置の円滑な推進などに資するため、循環経済を進めている欧米での大型機器の処理実績を踏まえて、わが国において保管されている、または今後発生する大型機器の処理の在り方等についての評価および提言を、技術レポート『原子力発電所から発生する大型機器の処理について』にまとめた。同レポートは、2021年2月、当研究所ホームページ(<https://www.iae.or.jp/download/nlr-2020-03/>)で公開された。本稿では、以下にその概要を述べる。

2. 背景と目的

わが国でも原子力発電所の廃止措置が、今後2020年代半ば以降に本格化していくにあたって、解体を円滑に進めるために、作業エリアの確保が必要である。発電所内での敷地も狭く、そのための建屋を増設するのは難しい状況にある一方、敷地内には、高経年劣化対策として大型改良工事等で取り外された蒸気発生器(SG)、給水加熱器等の大型機器が

専用保管庫等に保管されている。これらは体積も大きくまた構造上頑丈なので、解体するには設備と時間を要するが、いずれは処理しなければならない。

こうしたなかで、廃止措置が進むと解体のための設備導入等により発電所敷地内のスペースが圧迫される恐れがでてくる。解体のためのスペース確保ができなければ、効率的な廃止措置の遂行に支障を来すことが懸念される。一方、海外では、原子力を含めた持続可能な社会形成を推進するため、大型機器を含む有用資源のリサイクル化に取り組んでおり実績を上げている。

以上の状況をふまえ、同委員会は、わが国の原子力発電所廃止措置の円滑な推進のため、海外の先行実績を参考に、国内の大型機器を対象とした処理の在り方について検討を行った。

3. 大型機器の処理の取り組み

(1) 先行実績

わが国も加盟している経済協力開発機構／原子力機関(OECD／NEA)において、欧米での先行実績をもとに、原子力発電所から発生する大型機器の処理選択の考え方に関する報告書がまとめられている。また、OECD／NEA主催のワークショップでは処理方法の評価事例も出されている。

まずは、原子力発電所の廃止措置では、施設の解体や除染等により放射性廃棄物が発生することから、作業を円滑に進める上で放射性廃棄物の処理処分戦略を練る必要がある。

国際原子力機関（IAEA）、NEA および欧州連合（EU）は、放射性廃棄物の現状（発生、保管、処分等）を踏まえて、今後の方向性、取り組む方針を検討し、放射性廃棄物管理の最適化の取組みとして、放射性廃棄物の最小化・管理の最適化を図るべく、廃棄物階層適用の実践を推進している。特に、EU は、循環経済に向けて、「廃棄物から資源化」を推進しており、2011 年に放射性廃棄物に関する指令を発出している。図 1 に、EU による放射性廃棄物量の将来予想を、図 2 に廃棄物管理の階層の主要原則を示す。

（2）実績および教訓

欧米では、これまでに原子力発電所から発生した大型機器の処理処分を実施経験を積んでいる。これまで実施された方法は、主に次の 3 事例に分類され、国情に応じて適切な方法が選定されている。

の 3 事例に分類され、国情に応じて適切な方法が選定されている。

- A：原子炉建屋内で細断し、標準容器（輸送）に収納する。
- B：一体撤去して施設外の廃棄物処理施設へ輸送し、そこで処理する。
- C：一体撤去して処分施設へ輸送し一体で処分する。

欧米において実施された大型機器の処理処分方法を表 1 に、図 3 にその実例を示す。

一方で、OECD/NEA では、3 つのシナリオの先行実績を踏まえ、表 2 に示すように、大型機器の処理シナリオの評価選定に大きな影響を及ぼす要因を挙げている。

大型機器の処理方法の評価項目の重みづけは、それぞれの国情をもとに決められるものであるものの、国際的な状況についても考慮しておく必要がある。

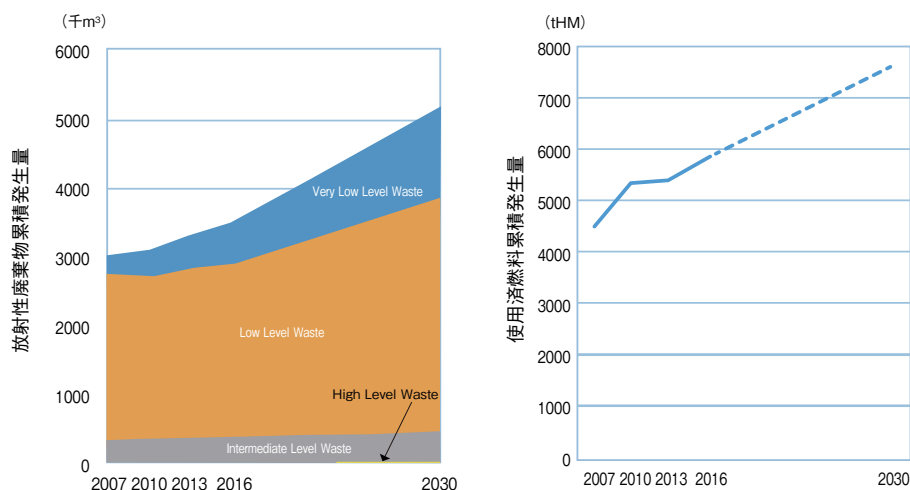


図 1 EU の放射性廃棄物量の将来予想

- 発生元で廃棄物を発生させないこと(Waste Prevention)
- 可能な限り発生量を抑制すること(Waste Minimization)
- 廃棄物の廃止を防止できない場合には、廃材や廃棄物を直接再利用もしくは修理して再利用すること(Re-use of Materials)
- 廃棄物をリサイクルする、もしくは二次原料として再加工すること(Recycling)
- 廃棄物を環境中へ放出できるのは、廃棄物の発生防止、再利用等ができない場合のみであり、かつ管理された方法でのみ行うこと(Disposal)

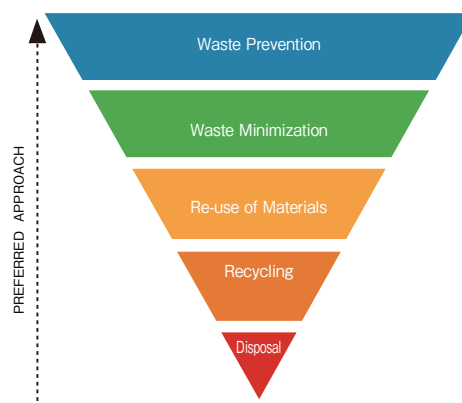
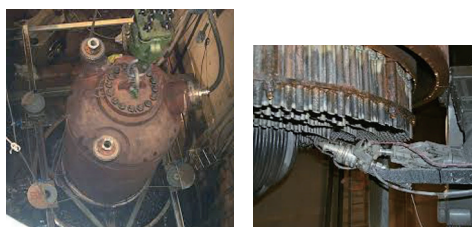


図 2 廃棄物管理の階層の主要原則

表 1 欧米における大型機器の処理処分方法（先行実績）

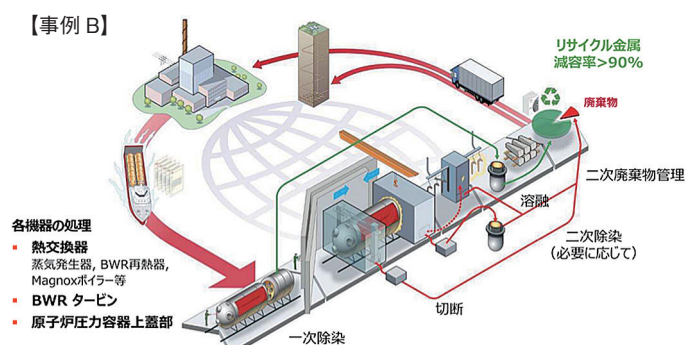
国	大型機器の処理方法	備考
米国	主に一体型処分（C）	処分容量に余裕あり
英国	一般に、廃棄物の再利用および再利用を処分より優先しており、輸送してサイト外にて除染、リサイクル・減容処理。（B）	処分容量に余裕なし
仏国	一般に、廃棄物の再利用および再利用を処分より優先しており、輸送してサイト外にて除染、リサイクル・減容処理。VLLWとして一体型処分した例はあるものの今後は適用せず。（B）	処分容量に余裕なし
独国	大型機器一体撤去後、輸送してサイト外にて長期減衰保管、その後、リサイクル・減容処理。なお、スウェーデンに輸送して、除染、リサイクル・減容処理の例もある。（B）	処分場を建設中
ベルギー	除染後、解体切断して、放射性廃棄物は200ℓもしくは400ℓドラムに収納し、セメント固化。クリアランスレベル以下は再利用。（A）	
スペイン	除染後、解体切断して、放射性廃棄物は200ℓもしくは400ℓドラムに収納し、セメント固化。クリアランスレベル以下は再利用。（A）	
スウェーデン	大型機器一体撤去後、輸送してサイト外にて除染、リサイクル・減容処理。（B）	

【事例 A】



ベルギー原子力研究所での蒸気発生器の現地解体

【事例 B】



スウェーデンでの大型機器のリサイクル処理のフロー

【事例 C】



＜バーンウェル処分場＞

米国で一体撤去後、処分施設へ輸送して一体処分

図 3 実施された処理処分方法（ABC）の実例

表 2 大型機器の処理方法を評価するうえでの重要項目

国際経験から得られた主要な要因	大型機器に対する国際的な志向
リサイクル戦略	・有用資源の再利用、廃棄物の最小化のために、リサイクル戦略の推進を推奨。
貯蔵施設、処理施設の利用	・貯蔵施設（減衰貯蔵）、処理可能な施設の利用による最適化を推奨。
処分の受入能力	・大型機器の処分受入可能な場合は、有力な方法。ただし、国際的には処分施設の確保が難しい状況にあるため、最小化した廃棄物を処分することに高い優先順位を与えている。
輸送の実施可能性	・貯蔵方法、処理方法の選択に関連する事項。 ・IAEA 輸送規則 2018 年版では、大型機器の海外輸送実績が反映されており、加盟国は国内法整備する必要がある。 ・輸送規則に適合した実施手順の整備を推奨。
経済性	・安全面、放射線防護面を含む廃止措置全体の技術対策を含めた検討を推奨。
適切な解体手順／工法利用	・実証済み技術、実績を元とした手順を活用することを推奨

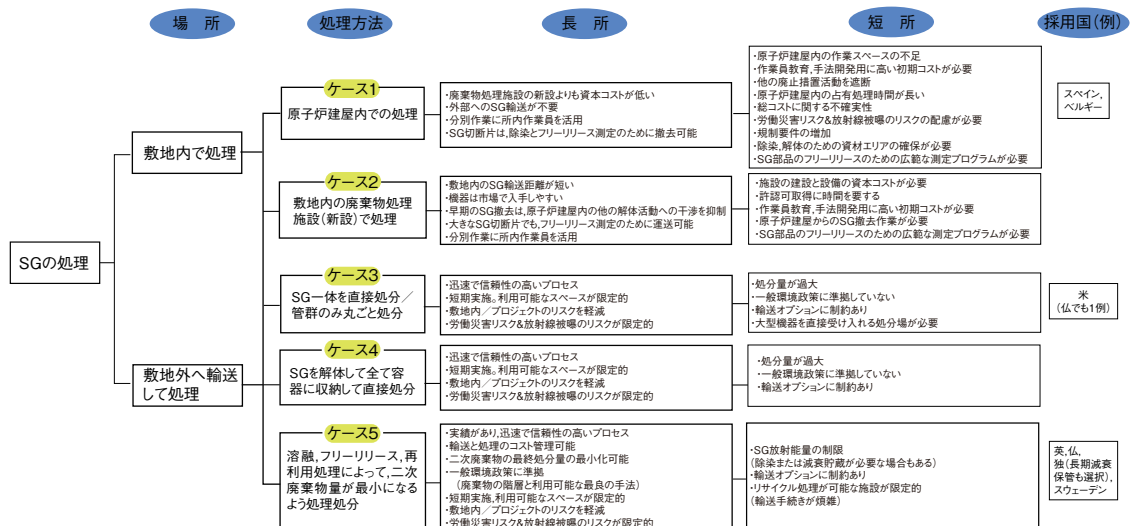


図4 蒸気発生器（SG）処理シナリオと OECD/NEA ワークショップによる評価例

（3）方向性

大型機器の例として蒸気発生器を処理する場合に想定される処理シナリオ（ケース1～5）と評価例を図4に示す。

想定される処理シナリオは5つ。発電所敷地内で処理する場合に既設建屋内と新設建屋で行うケースの2つ、敷地外に輸送して処理する場合に、そのまま処分するケース、解体して全て容器に収納して処分するケース、そして解体してリサイクルできるものと放射性廃棄物に分類して処理処分するケースの3つがある。OECD/NEAのワークショップでは、5つのケースについて特徴を整理・評価している。

表3から分かるように、ケース5の処分量が最も少なく、リサイクル量が最も多く活用できるシナリオになっている。また、ケース

5の評価では、大部分がリサイクルされる一方、処分量は元の重量で20%、体積で8%に低減されている。

OECD/NEA ワークショップは、ケース1～5を次のように評価している。

- ケース1、2（発電所施設内での処理）は、他のケースのような輸送の課題はないが、大型機器の解体処理に関する設備の調達およびそれらを取り扱うための作業員の教育訓練が必要。
- ケース3（蒸気発生器を一体毎直接処分）は最も簡易に処理処分可能であるが、受け入れる処分場が必要である。
- ケース4（敷地外施設で解体処理し、リサイクルせずにすべて処分）は、処分量が最も多い。
- ケース5（敷地外の専用施設でのリサイクル処理）では、蒸気発生器金属部材の最大80%のリサイクルが可能であり、放射性廃棄物量も90%以上に低減される。ケース3を除くと、ケース5のアプローチが、処分コストが最も低く、投資コストが最も低く、また処理プロジェクトを最も速く遂行できる。

表3 各ケースでのリサイクル量と放射性廃棄物処理量の評価例

処理前	処理後		
	想定シナリオ	処分量 (m ³)	リサイクル量 (トン)
蒸気発生器：1基 体積：約430m ³ 重量：約310トン	ケース1*	108**	245
	ケース2*	108**	245
	ケース3	500	0
	ケース4	600	0
	ケース5	36	245

* ケース1、2については、IAEA文献等を基に推定評価した。

** 金属溶融処理した場合の処分量（3m³）を基に、金属溶融の減容率（1/3～1/5）から、金属溶融処理しない場合の処分量を評価した。

以上より、できるだけリサイクル処理する方針である場合は、環境条件、経済条件等からケース5が最も優位との結果である。

なお、ケース3の一体処分は最も簡易に処理処分可能ですが、受け入れる処分場が必要で、土地利用、資源有効利用の観点から、欧州各国では難しい選択と考えられている。

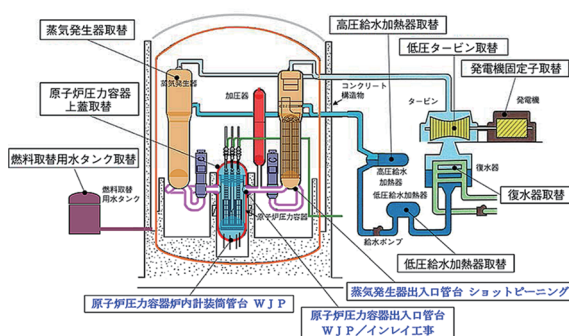
米国は、経済性も考慮して大型機器一体の直接処分を選択することが多い一方、わが国と類似の環境にある欧州では、土地も狭くまた新規処分施設の開設が難しいなどが挙げられる。また、欧州においては、発生した大型機器は有用資源のリサイクル、放射性廃棄物の最小化、廃棄物管理の最適化として、リサイクル処理ビジネスが展開されており、必要に応じて国外の集中処理施設も活用されている。

4. わが国への適応性

(1) わが国の基本方針と大型機器の保管状況

わが国の原子力発電所の廃止措置政策の基本となる考え方は、経済産業省総合資源エネルギー調査会原子力小委員会において検討されており、2019年4月に開催された同小委員会において、原子力発電所の解体（一般廃炉）を進めていくための具体例（設備の共用や集中的な処理）としては、次の2点が示されている。

- 集中的に処理する。
- 処理実績が乏しい大型金属について、海外の事業者処理を委託する。



加圧水型原子力発電所（PWR）

ここで、対象となる大型機器は、原子力発電所の高経年化対策として、取替が行われ、これまでに発電所内で保管されている量は相当数占め、専用の保管庫に保管されているものも含まれると考えられる。図5に大型機器取替の例を、表4に国内の原子力発電所で保管されている大型金属の保管量を示す。

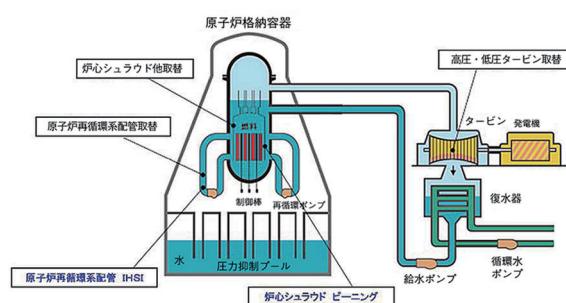
(2) 先行国の教訓等を参考としたわが国への適用性評価

前述の基本方針の下、原子力発電所の円滑な廃止措置を一層推進するためには、大型機器の処理についても具体化していく必要がある。

原子力発電所をとりまく環境は立地国によってさまざまであり、欧州での評価がそのままわが国にあてはまるわけではない。とはいえ、廃止措置の取組み（解体・撤去、敷地解放、解体物の処理処分）は概ね共通であり、最終目標も共通であることから、欧米先行国の教訓及び今後の方向性は、今後わが国の大型機器の最終処分までの管理戦略を講じるうえで、大いに参考になるものである。ここでは、欧米先行国の教訓及び今後の方向性を参考としながら、わが国の現状を踏まえて、将来（中長期的）に向けて目指すべき方向と、それに向けて当面（短期および中期的）取り組むべきことについて検討した。

(a) 処理方法の選定および評価

これまで国内での処理実績の乏しい大型機



沸騰水型原子力発電所（BWR）

図5 わが国における大型機器の取替例

表4 原子力発電所に保管されている大型金属の保管量

＜蒸気発生器保管庫等＞			＜給水加熱器保管庫等＞		
発電所名	蒸気発生器(基)	保管容器(m ³)	発電所名	給水加熱器保管庫等	保管容器(m ³)
泊	0	179 ^{*1}	東海第二	給水加熱器 3基	311
美浜	7	966 ^{*2}	東海第二 (固体廃棄物作業建屋他)	固体廃棄物 1,437体	—
高浜	6	894 ^{*2}	志賀	タービンロータ 630m ³	—
大飯	8	2,674 ^{*2}	高浜 (外部遮蔽壁保管庫)	保管容器 895m ³	—
伊方	4	746 ^{*3}			
玄海	4	663 ^{*3}			
川内	3	509 ^{*4}			
敦賀	0	170 ^{*1}			
合計	32	6,801			

*1: “原子炉容器上部蓋保管庫”に保管。
 *2: 原子炉容器上部蓋を含む。
 *3: 原子炉容器上部蓋および炉内構造物を含む。
 *4: “固体廃棄物貯蔵庫”に保管。原子炉容器上部蓋を含む。

器の処理について、OECD/NEA での処理方法の評価を参考として、そこで優位性のあるシナリオ（ケース1、ケース5）について、わが国に適用可能性について検討した。

なお、ケース3「敷地外での一体処分」については、広大な処分地が必要となるため国内の実施は困難なこと、国のリサイクル推進の方針と合致しないこと等から選択肢の対象から外した。

また、ケース5「敷地外での処理」は、欧米では、国外での委託処理も行われていることから、以下のように、国内と国外に分けて評価することとした。

●評価シナリオ

- ケース1：原子炉建屋内での処理
- ケース5-1: 敷地外での処理（国内）
- ケース5-2: 敷地外での処理（国外）

また、大型機器の処理戦略の選定に影響を及ぼす主要な要因について、国際機関が目指す方向性を考慮しつつ、わが国として目指すべき視点について表5に整理した。ここでは、わが国では地元を含めた一般公衆の関心が高いことから「パブリックアクセプタンス」および、欧米では国境間移動を行って実施する場合も多いことから、「その他」として輸出管理も追加した。

各評価シナリオについて、主要項目ごとに評価した結果を表6に示す。表から各ケースの長所、短所を抜き出すと表7のようになる。

(b) 適用性評価

以上の検討・評価をもとに、わが国への適用性について検討した結果は、次の通りである。

表5 わが国において大型機器処理の方法を評価する上で考慮すべき主要項目

	国際経験から得られた主要な要因	大型機器に対する国際的な志向	わが国の現状	わが国の目指すべき視点
①	リサイクル戦略	・有用資源の再利用、廃棄物の最小化のためにリサイクル戦略の推進を推奨	・放射性廃棄物の最小化を原則としている。 ・有用資源の再利用を推進している。	・放射性廃棄物の最小化を原則としている。 ・有用資源の再利用を推進している。
②	貯蔵施設、処理施設の利用	・貯蔵施設（減衰貯蔵）、処理可能な施設の利用による最適化を推奨	・大型機器貯蔵施設は発電所敷地内に設置している。 ・大型機器の処分前処理施設はない。 ・施設を活用する場合には、原子炉建屋内に除染・解体・処理設備を設置する必要がある。	・国内での大型機器処理可能な施設の導入およびのための先行事例の知識・教訓の習得・整備
③	処分の受入能力	・大型機器の処分受入可能な場合は有力な方法。ただし、国際的には、処分施設の確保が難しい状況にあるため、最小化した廃棄物を処分することに高い優先順位を与えている。	・国内では、大型機器の処分施設はない。 ・廃止措置で発生する放射性廃棄物の処分施設確保が必要。 ・施設処分場の廃棄物受入基準は、ドラム缶を対象としている。	・廃止措置廃棄物の処分施設確保
④	輸送の実施可能性	・貯蔵方法、処理方法の選択に関連する事項 ・IAEA 輸送規則 2018 年版では、大型機器の海外輸送実績が反映されており、加盟国は国内法整備を必要とする。 ・輸送規則に適合した実施手順の整備を推奨	・非汚染大型機器の海上輸送実績はあるものの、使用済の取替大型機器の海上輸送実績はない。 ・取替大型機器の構内輸送実績はある。 ・IAEA 輸送規則 2018 年版では、大型機器の海外輸送実績が反映されており、わが国も法令取入れ済。	・実施手順等の整備
⑤	経済性	・安全面、放射性防護面を含む廃止措置全体の新技术を含めた検討を推奨	・計画時に事業者によって考慮されている。	・計画時に事業者によって考慮されている。
⑥	適切な解体手順／工法利用	・実証済み技術、実績を元とした手順を活用することを推奨	・わが国では、一体での取り出し搬出実績はあるものの、大型機器の解体実績はない。	・国内では実績がないことから、海外の先行実績をもとにした手順／工法の構築
⑦	パブリックアクセプタンス（PA）	・公衆の主な懸念事項は、サイト周回輸送（頻度、被曝、交通制約）および放射性廃棄物の排出であり、輸送経路上、PAは重要である。 ・日語からの情報公開、コミュニケーション、ステークホルダーの関与を推奨	・原子力発電の情報公開に取り組んでいる。 ・ただし、ステークホルダー関与について、米、英、仏での制度化は行われていない。	・米、英、仏のようなステークホルダー関与の制度化等、国際的動向も考慮して、ステークホルダー関与制度の導入を検討する必要がある。
⑧	その他（輸出管理制度）	・国際的には放射性廃棄物の減容処理、リサイクル処理等については、国境を越える移動は禁止されていない。	・わが国では、放射性廃棄物の輸出は、原則として承認されない。	・国際的な環境変化等（有用物の再利用推進）を踏まえ、リサイクル処理等の目的の場合は、放射性廃棄物の輸出が受け入れられる必要がある。

表6 わが国における大型機器の処理の在り方

ケース		リサイクル戦略	貯蔵施設、処理施設の利用	処分地の受入能力	輸送の実施可能性	経済性	適切な解体手順、工法利用	パブリックアクセプタンス (PA)	その他 (輸出管理制度)
発電所敷地内処理	ケース1 (原子炉建屋内処理)	・適用可能 ・処理後の金属 (クリアランス対象) の再利用先、および処理後廃棄物の処分地確保が必要	・建屋内で処理を行うためのスペース確保が必要 ・大型機器処理可能な設備の導入が必要 ・処理方法の知識、教訓の習得が必要	・処理後廃棄物の処分地確保が必要	・通常の標準的輸送の適用	・建屋内改造費 ・作業員教育訓練費 ・処分費 (設備等も含む) ・処分費 ・他の作業建設・施設による管理費・補償費 (必要に応じて)	・作業員の教育訓練が必要 ・手搬車等の搬送が必要 ・実施しようとする時点で廃止措置全行時に支障が出る可能性あり	・特別な PA 活動は必要とされていない (立地地点の同意・了解が必要)	・特になし
敷地内での処理 (国内)	ケース5-1 (敷地外処理施設でのリサイクル等により廃棄物最小化の処理 処分：国内)	・適用可能 ・処理後の金属 (クリアランス対象) の再利用先、および処理後廃棄物の処分地確保が必要	・新規施設の立地、建設、設置が必要 ・大型機器処理可能な設備の導入が必要 ・処理方法の知識、教訓の習得が必要	・処理後廃棄物の処分地確保が必要	・大型機器の機外輸送の経路は国内ではないものの、海外では重要 ・海外での輸送方法 (海上、陸上) について家路を含めて整備しておく必要がある	・機外への搬送等の整備費 ・設計費 ・建築建設費 ・処分設備の整備費 ・作業員教育訓練費 ・処分費 ・輸送費	・作業員の教育訓練が必要 ・手搬車等の搬送が必要 ・実施しようとする時点で廃止措置全行時に支障が出る可能性あり	・輸送には地元の同意が必要 ・処理施設を確保するには、地元の同意が必要 ・同意が得られるまで、輸送期間を要する可能性がある	・特になし
敷地内での処理 (国内)	ケース5-2 (敷地外処理施設でのリサイクル等により廃棄物最小化の処理 処分：国外)	・適用可能 ・処理後の金属 (クリアランス対象) の再利用先、および処理後廃棄物の処分地確保が必要 ・処理後の放射性廃棄物は、必要に応じて、運送される場合もある	・施設は特に必要としない ・処理方法の知識、教訓の習得が必要	・運送される場合は、処理後廃棄物の処分地確保が必要	・大型機器の機外輸送の経路は国内ではないものの、海外では重要 ・海外での輸送方法 (海上、陸上) について家路を含めて整備、知識習得する機会を得ることができる	・委託費 (輸送、処理) ・処分費 (運送廃棄物がある場合)	・特に、国内では必要としないが、適切な解体手順、工法利用について家路を含めて学習、知見習得する機会を得ることができる	・輸送には地元の同意が必要	・国際的には放射性廃棄物の国境を越える移動は禁止されていないが、わが国では、厳格に規制されている ・国際的な環境変化等 (廃棄物の再利用促進) を踏まえ、リサイクル処理等の目的の場合は大型機器の輸出が受け入れられる必要がある

表7 ケース (1, 5-1, 5-2) の長所と短所

ケース	長 所	短 所
1 (原子炉建屋内で処理)	・既設の施設利用という観点から合理性がある。	・作業スペースが限られること⇒運用面や経済面等で合理性に欠ける。
5-1 (敷地外処理施設でのリサイクル処理：国内)	・今後の増加していく処理対象の大型機器を国内で適切に処理していくことが可能。ケース1より優位。 ・リサイクル等により放射性廃棄物の最小化を図ることが可能。	・集中処理施設を新設するための立地選定から始める必要があり、時間を要する。
5-1 (敷地外処理施設でのリサイクル処理：国外)	・当面の対応としては、国内で処理を実施するケースと比較して同等もしくはそれ以上の評価。 ・リサイクル等により放射性廃棄物の最小化を図ること。	・長期海上輸送が必要。処理の委託費用が必要。 ・放射性汚染大型機器の輸出が受け入れられることが必要。

●廃止措置の着実な実施により、遠くない将来に多くの大型機器が発生する見通しであることを考慮すると、国内で発生したものは国内で処理処分することが基本とすることが必要である。

●そのため、中長期的な視点から、国内の集中処理施設での処理も念頭に、適切な手法を検討していく必要がある。

●今後、経済性や技術的な課題など、電力事業者において議論・検討がなされる必要がある。

一方、国内の集中処理施設の新設には、立地や建設に時間を要することから、円滑な廃止措置の実施に支障を来す恐れがある。

その上で、当面の対応として各ケースを検討した結果は、以下の通りである。

●ケース1の建屋内の処理については、既設の施設利用という観点からの合理性があるものの、作業スペースが限られることで処理の作業効率が落ちるだけでなく、他の作業を阻害してしまう可能性もあること、あるいは、必要とされる処理設備も発電所毎に設置し、かつ発電所毎に作業員の教育訓練等が必要な場合も想定されるなど、運用面や経済面等で合理性に欠けるところも考えられる。

●ケース5-1は、集中処理施設を新設するための立地選定から始める必要があり、その実現には時間を要すると思われるものの、今後の増加していく処理対象機器を国内で適切に処理していくうえでは、ケース1より優位であると考えられる。このシナリオについては、国内で大型機器を処理した実績がないことから、導入に先立って海外で行われている輸送も含めた処理設備・運用についての情報を収集し、その教訓を反映していくことが重要となる。

●ケース5-2は、海外で既に大型機器の処理を受け入れている事業を念頭に、そこへ輸送して処理する場合を評価している。当面の対応としては、国内で処理を実施するケースと比較して同等もしくはそれ以上の評価であるが、長期海上輸送が必要であること、処理の委託費用が必要であることを踏まえると、ケース5-1の環境が整うまでの間においては、信頼性の高いプロセス・処理実績を有する委託先において、リサイクル等により二次廃棄物の最小化を図ることは、有用な選択肢と考えられる。また、国際的な環境変化等 (有用資源のリサイクル推進等) を踏まえ、リサイクル処理等の目的の場合は大型機器の輸出が受け入れられる必要がある。

以上から、大型機器の処理は、今後の発生も考慮し、将来的には、国内で原子力事業者が共同で利用可能な集中処理施設の設置も含めて、国、事業者ともに検討を進める必要がある。一方、国内の集中処理施設の新設には、立地や建設に時間を要することから、円滑な廃止措置の実施に支障を来す恐れがある。そのため、検討に先立って、わが国の大型機器の資供材を海外での先行プラントに提供して、設備・運用の実績教訓に関する情報を収集し、集中処理施設へ反映して、安全安定運転に資することも極めて重要である。

なお、集中処理施設の在り方を検討する上で、海外委託処理の対象とする機器として、特に有効な大型機器は、現時点において廃止措置の過程で必要となる敷地面積を専有しており、今後の廃止措置の円滑な実施に悪影響を与えうるものである。

以上を踏まえると、円滑な廃止措置のための処理が必要な大型機器の要件は以下のように整理できる。

- リサイクル可能であること
- 発電所から施設への安全な輸送の実現性があること
- 国外で輸送・処理の実績がある、あるいは少なくとも候補として挙げられているもの

さらに、近い将来に海外へ処理を委託することを想定する場合は、資源の有効利用や輸送・処理の安全の確保の観点から以下の要件が追加的に必要となる。

- 原子力施設敷地内に保管されており、多くの面積を専有していること
- 今後国内で発生する見通しがあること
- 現状、国内では合理的な処理が困難であること

発電所等の敷地内に保管され、多くの面積を占有している大型機器のうち、上記要件を満たすものは、「熱交換器（蒸気発生器、給水加熱器）、キャスク（輸送用、貯蔵用）」と考えられる。

（３）大型機器の国外処理への課題と対応

欧米では、原子力発電所から発生した蒸気発生器等の大型機器が自国以外の処理施設に搬送（輸出）され、リサイクル処理するビジネスが行われている。このため、大型機器の輸出入に関連する日本と欧米諸国の比較を表８に示す。

日本においては、リサイクル可能な大型機器も取扱上「放射性廃棄物」となっている。また、欧米諸国であれば、放射性廃棄物であっ

ても輸出入は可能と整理されているが、日本では「放射性廃棄物は原則として承認しない」という整理となっており、国際的な環境変化等（有用資源のリサイクル推進等）を踏まえ、海外での処理委託を選択肢の１つとするため、リサイクル処理等の目的の場合には輸出が可能とすることが有用と考えられる。

さらに、リサイクル目的で大型機器の輸出を行おうとする場合は、「放射性物質である」とするなど、「定義」を見直すことも考えられる。

こうしたことから、わが国においても、次のような対応をとる必要がある。

- 国際法上、一定の条件の下での放射性廃棄物の国境を越える移動は容認されているため、わが国においてもリサイクル目的であることなどの要件を満たす機器については、輸出が認められるような制度の整備。
具体的には、海外委託処理の対象として、次の機器が考えられる。
 - i) 熱交換器（蒸気発生器、給水加熱器）、
 - ii) キャスク（輸送用、貯蔵用）
- 原子力産業を含めた循環型社会形成の取り組みにおいて、国際的にはリサイクルを前提とした定義となっており、今後の廃止措置プラントの増加に向けては、資源循環の一層の促進が奨励されている。このため、「リサイクル可能な放射性物質」の定義の創設、又は米国が規定している「リサイクル可能な放射性物質は放射性廃棄物に該当しない」とする項の制定。

５．委員会の提言

以上のような、検討結果をもとに、委員会として、わが国の大型機器の処理の在り方として、以下に示す提言をとりまとめた。

- 提言１ 最終目標⇒ 中長期的な取り組み**
わが国の大型機器の処理方法として、「原子力事業者が共同利用可能なリサイクル処理集中施設を

表８ 日本と欧米の大型機器の取り扱いの比較

	日本	米国、EU加盟国
保管中の使用済大型機器の扱い	取扱上、放射性廃棄物	放射性物質またはリサイクル可能な物質は放射性廃棄物ではないとの扱い
放射性物質の輸出	承認手続きを経て、輸出可能	承認手続きを経て、輸出可能
放射性廃棄物の輸出	原則として、承認しない	承認手続きを経て、輸出可能

導入すること」

ただし、施設を導入するには、立地・建設・設置・運転というプロセスを経る必要があることから、時間を要することが想定される。また、国内では大型機器の処理実施経験に乏しいことから、今後の発生量を考慮し、経済性・技術的課題等について検討を行っていくことが適切である。

提言2 当面（短期・中期的）の取り組み ー最終目標が達成されるまでー

発電所敷地内スペースを確保して廃止措置を円滑に進めるために、「信頼性の高いプロセス・処理実績を有する海外の事業者の技術・施設を活用して国内の大型機器の処理を進めること」

国内に集中処理施設を導入する上では、実績を有する処理設備（米国、スウェーデン等）で、わが国の実機材を用いた委託処理を行うことにより、輸送も含めて設備・運用の実績教訓等を反映することも有効であると考えられる。

提言3 選択肢の1つとして海外での委託処理を選択しようとする場合

イ) 熱交換器、キャスクなどの放射性廃棄物の輸出を可能とする制度整備（国）

国際法上、一定の条件の下での放射性廃棄物の国境を越える移動は禁止されていないため、わが国においてもリサイクル目的であることなどの要件を満たす機器については、輸出が認められるような制度整備が必要である。

具体的には、海外委託処理の対象として、次の機器が考えられる。

- i) 熱交換器（蒸気発生器、給水加熱器）、
- ii) キャスク（輸送用、貯蔵用）

ロ) 放射性廃棄物の定義の見直し（国）

原子力産業を含めた循環型社会形成の取り組みにおいて、国際的にはリサイクルを前提とした定義となっており今後の廃止措置プラントの増加に向けて、有用資源のリサイクル化推進が今後の動向として注視されている。このため、「リサイクル可能な放射性物質」の定義の創設、又は米国と同様に、「リサイクル可能な放射性物質」を放射性廃棄物に該当しないとするものの検討が望まれる。また、事業者においても、この定義を着実に履行しうる運用の策定を行う。

ハ) ガイドラインの策定

学術界、産業界が協力して、大型機器の国外処理、SCO-III適用に向けた輸送（IAEA 輸送規則 2018 年版；2021 年 1 月 1 日施行）について、透明性および使い勝手の良いガイドラインの作成することが必要。

海外での委託処理を実施するうえでは、循環社会形成の考えに基づく国際的な潮流や実態にも即して、ロ) のとおり、放射性廃棄物の定義を見直すことが望まれるが、定義の見直しに当たっては、放射性廃棄物全体に係る規制・運用に幅広く影響を及ぼすことから、今後国内において慎重に議論を重ねていくことが必要となる。

一方で、廃止措置の円滑な実施は喫緊の課題であるため、国内処理も見据えた海外処理の実現に向けては、速やかな対応が求められる。そのためには、現行の運用の下、リサイクル可能な機器も放射性廃棄物として扱われる当面の間は、イ) のとおり、放射性廃棄物の輸出について、国際条約の履行に加え、一定の要件を満たす場合には、輸出を可能とする制度整備が必要である。

さらに、制度と並行して、事業者側で海外処理を適切に実施するための対策も求められる。「技術に立脚した内容を、誰でもが活用できるように、透明性をもって、策定されたもの」とするために、ハ) のとおり、技術知見を整理して、実績を積みつつ得られた教訓を後続で実施するための手本として参照しうよう、ガイドライン策定の準備をすすめていく必要がある。

6. おわりに

本件に関する公表後の動きについて、ご紹介する。

本年 3 月に開催された経済産業省総合資源エネルギー調査会の原子力小委員会および 5 月に開催された原子力委員会定例会議においても、「原子力発電所から発生する大型機器の処理」としての集中処理および海外での委託処理が取り上げられた。

今後、わが国の廃止措置・放射性廃棄物管理に関する政策やステークホルダー間での議論において、本委員会の提言が活用されることを期待している。

参考文献

- (1) 原子力発電所廃止措置調査検討委員会 技術レポートシリーズ Vol.3「原子力発電所から発生する大型機器の処理について」(2020年12月), (一財) エネルギー総合工学研究所ホームページ https://www.iae.or.jp/report/list/nuclear_energy/haishi-report/
- (2) 経済産業省 第22回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 (2021年3月22日), 資料8「着実な廃止措置に向けた取組」(事務局提出資料), 資料10「廃止措置を進めるための取り組み状況」(電気事業連合会提出資料) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/022.html
- (3) 内閣府 原子力委員会定例会議第14回 令和3年5月18日, 原子力発電所から発生する大型機器の処理について (東京大学 岡本孝司氏), <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/index.htm>

英国の脱炭素化政策と原子力研究開発の最近の動向について

藤井 貞夫 (原子力技術センター
参事)



1. はじめに

英国の原子力政策は、特に 2011 年の東日本大震災以降毎年のように大きく変わっている。これが英国の原子力政策を分かりにくくしている面がある。しかし、この 10 年間、英国政府の原子力を積極的に推進していくという姿勢とその役割の重要性に対する認識は、政権が代わっても一貫して変わっていない。

本稿は、英国政府の積極的な支援の下にある原子力研究開発、特に小型モジュール炉 (SMR) を中心とした研究開発の動向について、これまでの英国の原子力研究開発の変遷も含め、原子力関連ニュースを中心に調査した結果をまとめたものである。

2. 脱炭素化を目指す英国のエネルギー政策

英国は気候変動を国の経済と安全保障の脅威と捉えており、表 1 に示す通り、英国のエ

ネルギー政策のこれまでの流れは気候変動対策そのものである。英国は世界に先駆けて「気候変動法 2008」を制定し、2050 年までに温室効果ガス (GHG) を 80% 削減するという野心的な目標を定めた。さらに、気候変動委員会を設置するとともに炭素割当量などを設定し、英国の気候変動への取り組み状況のチェックや削減する仕組みを構築した。

2011 年 12 月、エネルギー・気候変動省 (DECC) は英国のエネルギー政策の枠組みにおいて脱炭素化をいかに達成するかを示した「炭素計画」を公表した。2050 年までに排出量を 80% 削減するためには、エネルギーの使用と生成方法に大幅な変更を加え、電力セクターは再生可能エネルギー (再エネ)、原子力および炭素回収貯留の利用によって脱炭素化する必要があるとし、特に原子力が最もコスト競争力があるとした。

2013 年 3 月、ビジネス・イノベーション・技能省 (BIS) は「原子力産業戦略」(Nuclear Industrial Strategy - The UK's Nuclear

表 1 英国の最近の主な脱炭素化政策と原子力政策

期日	脱炭素化政策	原子力政策
2008.11	気候変動法 2008 (Climate Change Act 2008)	
2011.12	炭素計画 (The Carbon Plan: Delivering our low carbon future)	
2013.03		原子力産業政策 (Nuclear Industrial Strategy- The UK's Nuclear Future)
2017.10	クリーン成長戦略 (Clean Growth Strategy)	
2017.11	産業戦略 (Industrial Strategy Building a Britain fit for the future)	原子力セクターディール (Industrial Strategy Nuclear Sector Deal)
2018.06		
2019.06	気候変動法 2019 (Climate Change Act 2019)	
2020.10		原子力ロードマップ (Forty by '50 : The Nuclear Roadmap)
2020.11	グリーン産業革命のための 10 項目計画 (The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution)	
2020.12	エネルギー白書 (The Energy White Paper Powering out Net Zero Future)	
2021.02	水素ロードマップ (Hydrogen Roadmap)	
2021.11	COP26 (Glasgow)	

Future)) を公表したが、これは将来、原子力が英国のエネルギーミックス（電源構成）において重要な役割を果たし、英国を主要な原子力発電国に引き上げることを狙ったものであった。原子力産業戦略は、新設、廃棄物管理と廃止措置、核燃料サイクルサービスおよび運転保守を含む原子力産業全体を網羅していた。これに基づいて、SMRの実現性検討や原子力イノベーションプログラムなどが打ち出された。

2016年7月、メイ政権が発足すると同時に、それまで科学技術イノベーションを担ってきたBISとDECCが統合してビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）が新たに設置され、英国における科学技術イノベーションを所掌することになった。2017年10月、GHGの排出を削減しながら英国経済を成長させる「クリーン成長戦略」（Clean Growth Strategy）がBEISより発表された。クリーン成長戦略においては、イノベーションこそが英国産業の低炭素化を可能とし経済成長のキーであると強調された。政府は、イノベーション全体で9億ポンドの公的資金を投資することを目指し、これには、スマートシステム用の2億6,500万ポンド、原子力研究イノベーション（将来の核燃料、新しい原子力製造技術、リサイクルと再処理、先進原子炉設計など）を支援するために4億6,000万ポンドおよび再エネのコスト削減に1億7,700万ポンドが含まれていた。

2017年11月、BEISは英国全体の生産性と収益力を高めることを目的とした新しい「産業戦略」（Industrial Strategy Building a Britain fit for the future）を公表した。同戦略

で、英国経済の生産性を高めつつ、英国全体で未利用の潜在能力を最大限に活用するために5つの基盤（アイデア、人々、インフラストラクチャ、ビジネス環境、場所）を将来の産業の最前線に置き、英国が地球規模の変化を利用して、確実に人々の生活と国の生産性を向上させるために、4つのGrand Challenge（国家的プロジェクト）を設定した。これら4つの国家的プロジェクトは、英国の未来を変える世界的なトレンドに焦点を当てており、表2に示すように、国家的プロジェクト毎に意欲的なミッションが策定された。この中で「クリーン成長」が原子力に大きく係っていた。

2019年6月には、2050年までのGHGの削減目標を8割減からネットゼロに強化する気候変動法の改訂（CCA 2019）が行われた。

2020年11月、ジョンソン政権はネットゼロを実現する「グリーン産業革命のための10項目計画」（The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution）を公表した。これにより、野心的な政策と120億ポンドの投資によって、400億ポンド以上の民間投資の促進を狙った。

計画には、2030年までに洋上風力発電容量を4倍の40GWにし、水素の研究開発へ最大5億ポンドを投資する。5億ポンドには「水をエネルギーに変える」という約束や電気自動車への28億ポンド以上の投資、炭素の回収と貯留における世界を主導する新しい産業の確立のためのイングランド北部、ウェールズおよびスコットランドのクラスターへの10億ポンドの政府投資「エネルギーイノベーションファンド」も含まれる。この「エネルギーイノベーショ

表2 4つのGrand Challengeとミッション

国家的プロジェクト	ミッション
人工知能とデータ経済	データ、人工知能およびイノベーションを利用して、2030年までに慢性疾患の予防、早期診断および治療を変革する。
高齢化社会	人々が2035年までに少なくとも5年間の健康で独立した生活を享受できるようにすると同時に、最も裕福な人々と最も貧しい人々の経験のギャップを狭める。
クリーン成長	2030年までに新しい建物のエネルギー使用量を少なくとも半分にする。 2040年までに世界初のネットゼロカーボン産業クラスターおよび2030年までに少なくとも1つの低炭素クラスターを構築する。
移動手段の未来	英国をゼロエミッション車の設計と製造の最前線に置き、すべての新車とバンは2040年までに実質的にゼロエミッションとする。

ンファンド」は、世界初の液体空気電池などの新しい低炭素技術の商業化に役立ち、ロンドン市が国債、カーボンオフセット市場および開示要件を介したグリーンファイナンスのグローバルセンターとなるとのことである。

10 項目計画の中の項目 3「新規の先進原子力提供」(Delivering New and Advanced Nuclear Power)は、大型から SMR/ 先進モジュール炉 (AMR) まで、新規の原子力発電を開発するという政府の約束である。10 項目計画に原子力発電を含めることは、原子力イノベーション研究諮問委員会 (NIRAB) が BEIS の最近の報告書で行った助言を反映している。NIRAB は同報告書で、企業の低炭素電力のうち、再エネ電力でない部分の少なくとも半分を提供するために原子力を利用することが賢明であると述べた。

2020 年 12 月、BEIS は「エネルギー白書」(The Energy White Paper Powering our Net Zero Future)を公表し、2050 年までの GHG 排出量の実質ゼロ化に向けたエネルギー関連の取り組みに関する長期戦略を示した。今後 10 年間で最大 22 万人の雇用を支援し、価格を適正に保ちながら、エネルギーシステムをクリーン化するという野心的な計画である。白書は、10 項目計画に基づき策定されたもので、政府が今後 10 年間に、新たなグリーン雇用を支援しつつ、産業、輸送、建物からの排出量を 2 億 3,000

万トン削減 (ガソリン車 750 万台分の排出分に相当) するための具体的な取り組みを提示している。白書では電化の進捗により、2050 年までに電力需要が倍増すると見られることから、電力部門では洋上風力とともに原子力を重視する姿勢が鮮明に打ち出されている。

2021 年 2 月、英国原子力産業協会 (NIA) は「水素ロードマップ」(Hydrogen Roadmap)を公表した。気候変動委員会は、2050 年までに現在の 4 倍のクリーン電力と 225TWh の低炭素水素を生産して脱炭素化を完了する必要があるとしており、その中で原子力発電はグリーン水素の将来における重要な役割を担っているとしている。

2021 年 4 月、英国グラスゴーで 11 月に開催される COP26 を控えて、政府は GHG 排出削減目標を引き上げ、2035 年までに 1990 年比で 78% 削減することを目指すこととした。

3. 英国の原子力政策

2013 年英国の原子力産業戦略が打ち出されて以降の主な原子力政策と資金提供プログラムの流れを表 3 に示す。

(1) 原子力産業戦略と SMR の研究開発

2011 年 11 月、貴族院科学技術特別調査委員会は英国の原子力研究開発能力に関する調査

表 3 主な原子力政策と資金提供プログラム

2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
原子力産業政策 (2013.03)	SMR FS	Techno-Economic Assessment	SMR Competition		Nuclear Sector Deal			
					Advanced Modular Reactor Feasibility and Development (Phase 1-2)			
					Nuclear Innovation Program (Phase 1-3, AMM ^{※1})			
								ANF ^{※2}
				原子力産業政策 (2017.7.10) 産業政策 (2017.11)				10 項目計画 (2020.11)
					Industrial Strategy Challenge Fund			

※1) AMM : Advanced Materials Manufacturing ※2) ANF : Advanced Nuclear Fund

報告書を発表した。この報告書の中で、原子力の新しい戦略とその戦略を支える原子力研究開発ロードマップを策定するとともに、これらを策定するために政府を支援する独立の委員会を設立することを勧告した。これを受けて、2012年3月、原子力研究開発特別諮問委員会が発足した。この委員会はBISとDECCが発行した4つの文書("Long-Term Nuclear Energy Strategy," "Nuclear R&D Landscape Review," "Nuclear R&D Roadmap," "Nuclear Industrial Vision Statement")の策定に大きく関与した。

上記の文書等を踏まえ、2013年3月、原子力産業戦略が発表された。原子力産業戦略は、2016～2017年にかけて発表された政府の原子力イノベーションプログラムや先進炉に対する財政支援の基となった戦略と考えられる。原子力産業戦略は、政府と産業界との協議により策定され、そこで"The Home Market," "Building a Future : Innovation and R&D," "Forging a Stronger International Presence," "Investing in the Right Skills"の4項目についてのマイルストーンとキーアクションが示された。

上記4項目のうち、研究開発に関連する"Building a Future : Innovation and R&D"のアクション項目の中には、独立的な立場で原子力研究開発の検討を行い政府に助言するためのNIRABの設立、将来の原子力システムのための研究開発の公的資金レベルの検討、すなわち、2050年までの原子力発電計画(16～75GW)に必要でグローバル市場にも貢献する可能性がある将来の原子炉設計およびその核燃料サイクル、SMRの研究開発に向けた実現可能性などが挙げられていた。

また、原子力問題と戦略的研究プロジェクトについて政府に助言する上でより中心的な役割を担うことができるよう、国立原子力研究所(NNL)の使命と役割を変更した。

本戦略は、政府がSMRへの関心を明示する端緒となるものであった。以下、SMRに関連する具体的な施策を示す。

① SMR 実現性検討 (SMR Feasibility Study)

2013年12月、英国政府はSMRに関連するワークショップを開催し、これを受けてSMR実現可能性の検討を開始した。2014年の初めに、政府は英国でのSMRの展開に関する技術的、経済的および商業的事例を評価するための実現可能性調査を国立原子力研究所に委託し、2014年12月に調査結果が発表された。そこでは、一部のSMRが10年以内に実現できる可能性があり、英国がベンダーや英国産業と協力して実施する可能性があることを指摘した。ただし、この調査では、特定のSMR設計のさらなる詳細な技術的分析が必要であるとも結論付けている。2015年3月、政府は根拠に基づくSMRに貢献し政策決定と将来のコンペ段階の設計に情報を提供するために、独立したSMRの技術経済評価(TEA: Techno-Economic Assessment)委託事業を開始した。TEAは、政府がSMRを導入するための政策決定を行うための知見を得ることを目的として、7つのプロジェクトで構成され、図1に示す流れで、2016年6月までにそれぞれ報告書が提出された。

② SMR コンペ (SMR Competition)

2016年3月、DECCは英国にとって最も価値のあるSMRを特定するためのSMRコンペ(SMR Competition)のフェーズ1ガイダンスを発表した。その中で、政府は、気候変動法に定められているとおり、2050年までに少なくとも80%の排出削減という目標を達成すると同時に金銭的価値を保証するために作業コストを可能な限り低く抑えるべきであるとした。これは、2015年11月の政府発表である「SMRを含む原子力研究開発に5年間で少なくとも2億5,000万ポンドを投資する」とことに関連している。

フェーズ1の目的は、英国でのSMRの開発、商品化、資金調達における技術開発者、公益事業者、潜在的な投資家、資金提供者の間の市場の関心を判断することである。フェーズ

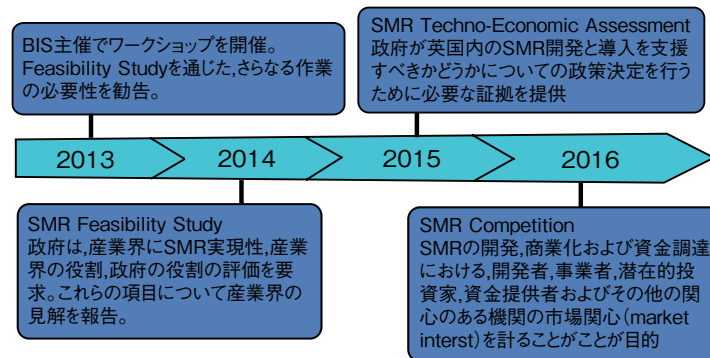


図1 SMRの実現可能性に向けた検討作業

1では、SMR設計が「製造と組立て用に設計され」「総プラントコストの最低40%に相当するモジュール機器またはシステムは工場内生産を達成できる必要がある」など、一連の基準が公開された。

フェーズ1は「SMR供給ロードマップ」(SMR Delivery Roadmap)が公開される2016年後半までに完了する予定であったが、大幅に遅れ33の「有資格参加者」のリストが公開される2017年12月までかかった。実は、33の有資格参加者は、これらの基準を満たす33の技術を代表してはおらず、参加者の約半数は、設計を提供するコンソーシアムのパートナーの1人にすぎないか、またはSMR設計の開発に必要な技能を持っていると見なされた者であった。「SMR供給ロードマップ」が公開された時点で、設計を持っている者の中で、原子炉の概念以上のものを有しているのはほんの一握りであるように見えた。2017年に発表された450MWのロールスロイス設計は、規模の要件を超過しているにもかかわらず、NNLによる実現可能性調査で示された4つの選択肢のすべてで適格と見なされた。このため、2017年5月に公開された貴族院特別調査委員会の調査結果は、SMRプログラムのフェーズ1完了の遅れについて非常に批判的であった。SMRは、軽水炉(LWR - 加圧水型炉PWRと沸騰水型炉BWR-)と非LWR技術の2つのグループに分類され、PWRとBWRは2019年時点で稼働している商用原子炉の大部分を占めているが、非LWR技術は商

業的に展開されていない新しい設計である。これを反映して、貴族院特別調査委員会は、非LWR設計について「2030年までの展開は困難であり、展開前にさらに大幅な研究開発が必要になる」と述べた。

英国政府は2017年12月にSMRコンペを事実上中止した。しかし、このコンペは設計されている様々な先進原子力技術のエネルギーシステムにおける潜在的役割を強調する上で、すなわち、様々な原子炉型式が競争できるエネルギー市場を強調する上で非常に貴重なものであったとしている。

(2) 原子力セクターディール (NSD: Nuclear Sector Deal)

NSDは、英国の産業戦略の構成要素として2018年6月に発表された。これは、英国が世界有数の原子力国の1つになることを助けてきた政府と産業界の間の歴史的なパートナーシップに基づいている。

NSDは、グリーン経済成長を推進し、原子力発電を英国のネットゼロエネルギーの未来の不可欠な要素にするために協力するという政府と産業界との公約であった。NSDの当初の焦点は、2030年までに原子力セクターのビジョンを実現し、大きな社会経済的利益を生み出し、より大きな長期雇用機会、よりクリーンなエネルギーおよびすべての人々への原子力の安全な供給を保証することであったが、NSDははるかに長期的な進展と活動の基盤となる可能性がある。この基盤は、以下に示す

NSD の 4 つの主要な 2030 年目標に基づいて構築されている。

- 2030 年までに新しい建設プロジェクトのコストを 30% 削減
- 2030 年までに現在の見積りと比較して廃止措置のコストを 20% 節約
- 2030 年までに原子力分野の女性の割合を 40%
- 2030 年までに最大 20 億ポンドの国内および国際契約を獲得

原子力セクター全体の先進製造と建設技術の向上やサプライチェーンの構築を支援するため最大 6,200 万ポンドが提供されることになった。

(3) 原子力ロードマップ (Forty by '50: The Nuclear Roadmap)

2020 年 6 月、NIA は 2050 年までに英国のクリーン電力の最大 40% を供給し、地域暖房とともに水素やその他のクリーン燃料の生産を通じて「より幅広い脱炭素化を推進」し、最終的には 30 万人もの雇用と 330 億ポンドの年間経済価値をもたらす「2050 年までに 40%：原子力ロードマップ」(Forty by '50: The Nuclear Roadmap)」を発表した。NIA によると、原子力は英国のクリーン電力の 40% を供給するが、化石燃料の代替と電気自動車と暖房部門の需要により、需要は現在の 4 倍になると予想されている。これを実現するため、以下の 6 つのステップを示している。

- 原子力産業は、新設炉プロジェクトのコストを引き続き削減し (2030 年までに 30%)、「納入の卓越性を確立」しなければならない。
- 政府は「新設の原子力発電への明確で長期的な公約をはっきりと述べる」べきである。
- 新しい設備容量への投資を刺激し、資本コストを削減するために、原子力の新設のための「適切な資金調達モデル」についても進展しなければならない。
- 小型原子炉に対して、国家政策声明および立地と許認可の提案を含む「促進的」プログラムが策定されるべきである。
- 原子力セクターディールの 2030 年の目標 (政府の産

業戦略の一部) は維持されるべきである。これには、新設と廃止措置のコスト削減目標、40% の女性労働力および英国サプライチェーンの国内と国際契約の 20 億ポンドが含まれる。

- 産業界と政府は、地域暖房や農業、貯蔵技術などの熱利用とともに、医療用アイソトープ、水素、輸送用合成燃料の生産を含む、従来の電力生産以外の分野横断的な協力で焦点を当てた枠組みと公約に合意すべきである。

4. 原子力への資金提供プログラム

(1) AMR の実現可能性と開発 (AMR F&D) プロジェクト

前述のように、2017 年 12 月、BEIS は SMR コンペを事実上中止した。2 億 5,000 万ポンドのコンペは、非 LWR 設計を目的に、3 年間で総投資額 4,400 万ポンドのより幅広い種類の原子炉を組み込むように設計された新しい 2 段階の「AMR の実現可能性と開発」(Advanced Modular Reactor (AMR) Feasibility and Development (F&D)) プロジェクトに置き換えた。このプロジェクトの狙いは、先進原子炉の技術的実現可能性と商業的実行可能性を理解し、英国政府の開発資金がそれらを商業的展開に近づけることができる有望な設計を特定することであった。モジュールのオフサイト製造を最大限に活用し、低コスト低炭素電力、電力供給の柔軟性の向上、熱や電気の供給などの機能性の向上および追加の収益を生み出すまたは経済成長を支援する代替用途を提供する技術に関心を集中させた。

2 段階の R&D プログラムである AMR プロジェクトのフェーズ 1 では、AMR 設計に関する実現可能性に取り組むための最大 400 万ポンドの資金提供と 8 組織 (それぞれ最大 30 万ポンド) の選定、フェーズ 2 では最大 4,000 万ポンドの資金提供と開発作業に取り組むフェーズ 1 の企業から 3 社のプロジェクト (それぞれ約 1,000 万ポンド) を選定した。

(2) 原子力イノベーションプログラム (NIP)

2015 年の包括的支出計画 (Spending Review 2015) において、政府は野心的な原子力研究開発プログラムへの投資を公約した。この資金提供は、英国のエネルギーイノベーション支出を 2 倍にするという政府の幅広い公約の一環であり、2021 年までの 5 年間に原子力研究イノベーションに 4 億 6,000 万ポンドを投資することとした。NIP は英国に短期および長期の市場機会を活用する技能と能力を身に付けることを目的とした優先的な研究イノベーションプログラムであった。この公約の 1 つとして、BEIS が NIP に 1 億 8,000 万ポンドを資金提供することによってサプライチェーン全体で機能を開発し、新設原子炉群、SMR 開発および AMR R&D をより適切に支援できるようにすることを狙った。5 年間の NIP のプログラムは 2016 年に開始され、6 つの分野で 16 カ国にまたがる 54 の組織が関与している。

① フェーズ 1

2016 年から 2018 年までに 5 つの主要分野にわたる民間原子力セクターのイノベーションを支援し、また NIRAB の勧告事項に基づいて 2016 年 11 月に 2,000 万ポンドを超える資金を提供するフェーズ 1 が開始された。この資金提供には以下が含まれていた。

- より高いレベルの効率を提供できる先進核燃料に関する英国の最先端の作業を維持するための 600 万ポンド
- 次世代の原子炉設計の開発、安全性および効率を支える研究に 500 万ポンドの資金提供。これには、ウェールズ政府と協力した詳細調査作業が含まれる
- 将来の原子炉のための原子力材料、先進製造技術およびモジュール式組立てにおける英国の能力を開発するための 600 万ポンドの資金提供。このプロセスは小企業研究イニシアチブ (Small Business Research Initiative) を通じて Innovate UK が主導している。
- 将来の環境上および財政上の負担を軽減する可能性のある核燃料リサイクルプロセスの研究に 200 万ポンドの資金提供
- 2050 年まで、原子力部門における将来の意思決定の

ための政府の知識基盤を強化する一連のツールキットと基盤となるデータの開発を継続するための 200 万ポンドの資金提供

② フェーズ 2

フェーズ 2 は 2017 年 12 月に発表され、以下に示す最新の安全とセキュリティの方法論と先進燃料研究に取り組むために最大 800 万ポンドを提供した。

- 原子炉の設計と安全工学の作業のための 370 万ポンドの資金提供。この作業の狙いは、安全とセキュリティの事例を開発および評価するためのより優れたツールを構築し、原子力の安全とセキュリティのパフォーマンスの評価を改善し、設計プロセス全体で原子力の安全、核セキュリティおよび保障措置の要件をどのように提供できるかについての理解を深めることである
- 先進核燃料の研究のための 430 万ポンドの資金提供。この作業は、事故耐性燃料を開発するための世界をリードする研究所を展開し、先進核燃料が運転中にどのように振る舞うかについての改良されたコンピューターモデリングとシミュレーションを開発することを狙いとしている。この作業は、第 IV 世代技術などの先進原子炉の展開を支援する。

③ フェーズ 3

NIP の 1 つであるデジタル原子炉設計 (Digital Reactor Design) プログラムは、英国の将来のエネルギー需要を満たす上で重要な役割を果たす可能性のある第 IV 世代原子炉と SMR の開発の最前線に英国産業を置くための幅広い取り組みの一環であった。

プログラムは 2 組に分けられ、それぞれ 2 段階で進められる。熱水力モデリングと仮想エンジニアリングを含む原子炉のデジタル設計機能に関する 2 年間の研究を対象としていた。

(a) ロット 1 - 熱水力モデル開発

様々な冷却材媒体を使用して、将来の原子炉設計の設計と開発または評価を支援するために、原子炉の熱水力を正確にモデル化するソリューションを開発する。

Frazer-Nash 社は NSD の一環として、250 万ポンドの核熱水力研究開発プロジェクトを主導している。2017 年から 2019 年にか

けて実施されたプロジェクトの第一段階では、2つの仕様が提供された。1つは新しい熱水力試験施設用で、もう1つは新しい熱水力モデル開発用である。モデル開発に関する最初の革新的な研究も実施された。この研究は産業用途の可能性があり、第二段階で進められている。

2019年3月から2021年3月まで実施された第二段階では、熱水力現象に関する6つの技術ボリュームが作成され、産業界および規制当局向けの良好事例が含まれていた。さらに、4つのケーススタディで、先進原子力技術アプリケーションへの技術ボリュームの使用を示す。原子炉開発者は、各ケーススタディに関連付けられ、産業界で役立つことを確認する。

(b) ロット2-原子力仮想エンジニアリング機能と検証イノベーション

初期段階の作業に基づいて、原子力の設計および開発プログラムのコストを改良し削減するために、ハイテク産業からの仮想エンジニアリングおよび関連技術を組み込んだ原子力仮想エンジニアリング機能を提供するソリューションを特定し開発する。セクター間の最適事例を含む「ビッグデータ」を革新的に管理するための先進的な測定機能とアプローチを開発し、この作業を支援する。

Wood社は、約330万ポンドのデジタル原子炉設計を主導している。第一段階は、ライフサイクル全体を対象とするコンピューターシミュレーションの設計および管理プラットフォームを開発することにより概念を実証した。2019年5月に発表された第二段階の焦点は、ソフトウェアフレームワークにデジタルツールを実装し、実際のプロジェクトアプリケーションを利用して効率の向上を実証し、サプライチェーンの協業を可能にし、最終的に業界全体に文化的変化をもたらすことである。

④先進製造技術と材料（AMM）プログラム

SMRおよびAMRの検討から得られる重要な教訓の1つは、特注の現場ベースの土木工学ではなく、製造施設の建設技術を使用するという共通の目的である。この供給アプローチの変更が成功すれば、建設時間が短縮され、生産性と品質が向上し、最終的にはプログラムのリスクが低下する。これは投資を呼び込むために不可欠なものである。なお、AMMプログラムのうち、2019年に開始して2021年3月末までに完了する資金提供プログラムを「先進製造と建設技術」（AMC）と呼んでいる。

小型原子炉の工場製造とオフサイト組立の利用は、最先端の技術とプロセスを利用して費用効果の高い方法で原子力部品を製造する、生産性が高く有能なサプライチェーンに依存する。

NIPの構成要素内で、またNSDの一環として、AMCイニシアチブに最大2,000万ポンドを投資している。これは、原子力セクターからの1,200万ポンドのマッチファンディングが見込まれている。このイニシアチブは、新しい技術が従来の原子力の新設、先進原子力技術または原子炉廃止措置の中でコスト削減を実現できることを実証することを狙いとし、新しい先進製造と建設技術の可能性やデジタルエンジニアリングなどを証明することを目的としている。重要な点は、実際のプロジェクトに資金を提供することにより、イニシアチブはサプライチェーン内に商業的能力を構築し、将来の民間原子力セクター、特に先進原子力セクターを支援する態勢を整えることを期待している。

(a) 第一段階

第一段階は500万ポンド資金提供プログラムで2017年4月から実施され2019年8月に終了した。このプログラムは先進製造と材料の技術を開発するための初期資金で第二段階に対する基本機能を提供することを目的とした。

(b) 第二段階

第二段階は実証と商業化に向けて、第一段階で確立されたものを含む製造技術または技術準備レベルの向上に焦点を当てた2,600万ポンドの投資プログラムである。先進製造技術または建設技術を使用して、第一段階の資金提供を受けたプログラムからの教訓と技術を取り入れ開発する1つ以上の技術実証機を製作する。

第二段階は2Aと2Bに分割されている。2Aは2019年4月に終了し、4つのプロジェクトに最大1,600万ポンドの資金を提供した。2Bは2021年3月末に終了した。2Bは1,000万ポンドの助成金であり、短期、中期および/または長期に展開可能な原子力発電所の製造と建設に使用される技術の製造レベルまたは技術準備レベルの向上に焦点を当てている。2Bはアウトプット主導で行われ、技術実証機または先進製造および/または建設技術を利用する多数の実証機が製作される。これらの技術は、原子力発電所の建設、保守、廃止措置および将来の技術に適用できる。

(3) 先進原子力ファンド

(ANF: Advance Nuclear Fund)

10項目計画の項目3「新規の先進原子力提供」(Delivering New and Advanced Nuclear Power)は、大型から小型先進モジュール炉まで、新規の原子力発電を開発するという政府の公約である。政府は、「次世代の小型先進原子炉」へ5億2,500万ポンドを投資としている。

英国は60年以上前に世界初の本格的な民間原子力発電所の本拠地であり、この業界は現在、英国で約6万人を雇用している。大型発電所であろうと小型および先進モジュール炉などの次世代技術であろうと、新規の原子力は低炭素電力を産み出し英国全体で雇用と成長を産み出す。政府は費用対効果の高い大型の新規原子力プロジェクトを推進し支援する

ために開発資金を提供する。これに加えて、次世代の原子力技術へのさらなる投資も検討している。金銭的価値(value-for-money)と将来の支出協議(spending rounds)を条件として、政府はANFで最大3億8,500万ポンドを投資する。これにより、SMRに最大2億1,500万ポンドの投資が可能となり、工場で製作して現地で組み立てることができる国内の小型発電所技術設計を開発できるとしている。それは最大3億ポンドの民間部門のマッチファンディングへの扉を開くものである。

また、AMRの研究開発プログラムに最大1億7,000万ポンドを投資する。AMRは800℃以上で運転することが可能であり、炭素の回収・利用と貯留(CCUS)、水素および洋上風力への投資を補完する高品位熱は水素および合成燃料の効率的な生産に扉を開く可能性がある。遅くとも2030年代初頭までに実証炉を建設して、この技術の可能性を証明し、英国を国際的な競合他社に対して最先端に置くことを狙いとしている。

SMRへの2億1,500万ポンドの投資は、UKRI(UK Research and Innovation)の産業戦略チャレンジファンドの低コスト原子力プログラムを通じて提供される。

これらの技術の市場投入を支援するために、規制の枠組みの策定と英国のサプライチェーンの支援にさらに4,000万ポンドを投資するとしている。

(4) 産業戦略チャレンジファンド

(ISCF: Industrial Strategy Challenge Fund)

2017年4月、BEISはビジネス主導の産業戦略チャレンジファンド(ISCF)を開始した。これは、ネットゼロ、健康と福祉から技術の進歩に至るまでの課題に資金を提供するための新しいアプローチであり、より良い世界を創造することを目指すものであった。2018年4月、ファンドの管理を担当するUKRIがBEISによって設立された。

このファンドは、量子技術やロボット工学

から SMR に至るまでの興味を惹かれる課題に約 26 億ポンドの公的資金と民間部門からの 30 億ポンドのマッチング資金を今日の大きな社会的および産業的課題に取り組むために研究者と企業を結集するプロジェクトに投資するものである。資金提供しているプロジェクトは、イノベーションを推進し、雇用を創出し、英国を科学とイノベーションの世界的な目的地として確立することにより、国全体に経済的影響を与えることとなる。

ISCF は、主要な研究者と企業を結集して主要な産業的および社会的課題に取り組むことを狙いとしている。「産業戦略」には 4 つの Grand Challenge（人工知能とデータ経済、高齢化社会、クリーン成長、移動手段の未来）があり、ISCF のすべてのチャレンジがそれぞれに対応している。

ISCF の各チャレンジは、産業界、研究者、国、地方と地方政府およびその他多くの者と協力して定義され、毎年、ISCF チャレンジの新しい波が発表されている。支援されている活動の重要な要素は、企業や業界との関わりと協力の必要性である。

チャレンジの最初の波は 2017 年、2 番目の波は 2018 年、3 番目の波は 2019 年に開始された。各チャレンジには、2,000 万ポンドから 2 億 4,600 万ポンドの範囲の専用ファンドがある。ファンドの多くは、産業界とのマッチングファンドである。

テーマの 1 つであるクリーン成長には産業の脱炭素化、低コスト原子力、より賢明な製造、エネルギー革命による繁栄、賢明で持続可能なプラスチック包装、建設の変革および基盤産業の変革の 7 つのチャレンジが取り上げられている。低コスト原子力チャレンジは、迅速に建設できネットゼロ経済への移行を支援できる SMR を通じて低コストの原子力を提供するための新しいアプローチを開発することである。

2019 年 7 月、UKRI は ISCF の一環としてロールスロイス社が主導する SMR コンソーシ

アムに 1,800 万ポンドのマッチングファンドを投入することを公表した。ロールスロイス社は英国で唯一の大規模な SMR の開発候補であり、英国への潜水艦用原子炉の独占供給における長い歴史があるため、英国の SMR 開発資金の受領者となる可能性が高いと広く認識されている。ロールスロイス社は、4 年間予備設計に取り組んできた原子力、土木建設および製造業の企業から同額の資金が提供されるとし、合計 3,600 万ポンドの投資によりコンソーシアムは設計をさらに発展させることができる。これが成功すれば、公的資金と民間資金の合計は 5 億ポンドに達する可能性があり、2030 年までに SMR を英国に展開できる。また、英国の企業に重要な輸出機会を提供し、エンジニアリングと製造で最大 4 万人の雇用を創出する可能性がある。これらは、再エネからの増大する貢献を補完し、将来的に信頼性の高い電力供給を確保するのに役立つとしている。

2021 年 2 月、ロールスロイス社は実現可能性段階を終了し、2024 年頃に一般設計評価 (GDA: Generic Design Assessment) を完了し、2030 年頃に最初の SMR の電力供給を開始することを目指していることを発表した。ロールスロイス社は設計開発に多額の自己資金を投資する場合に英国政府が満たすべき特別な一連の条件を設定した。これらには、政府が設計開発費の半分以上を支払うこと、設計のための英国市場への独占的アクセスおよび 7 GW（16 基の原子炉）の保証された英国市場が含まれる。ロールスロイス社の設計が選択されていない場合は、どの設計を選択しても、英国のパートナー企業であることを要求している。

5. 原子力規制の動向

原子力規制庁 (ONR) と環境庁 (EA) は、指針とプロセスを見直して、目的に適合し、小型原子力プロジェクトにアクセスできるよ

うにするとともに、先進原子力技術（ANT: Advanced Nuclear Technologies）を評価する能力と力量を育成するための重要な作業プログラムを実施している。

2017年10月、「クリーン成長戦略」の一環として、BEISはANTの開発を支援し規制する原子力規制当局の能力と力量をさらに発展させるために、最大700万ポンド（ONRに500万ポンド、EAに200万ポンド）を投資することを発表した。

ONRとEAは、継続的な改善への取り組みの一環として、GDAプロセスを見直してきた。英国では、GDAは立地許可の前に実行される主要な規制プロセスである。彼らは改善の機会を特定するために大規模な原子力プロジェクトに対する最近のGDAからの教訓を検討するとともに、SMR/AMRビジネスモデルに適した柔軟性を導入するためにSMR/AMRの潜在的な要件を検討し、規制プロセスの最新化と強化を図ってきたが、ONRの審査はまた過去のGDAの頑健性との整合性も維持している。彼らは、GDA自体を最新化することに加えて、SMR/AMRがGDAへの参加を要請できる明確なプロセスを推進することを約束した。

AMR F&Dプロジェクトと並行して、英国の規制制度とANTに対する規制能力を引き続き強化するためにONRへのさらなる投資が含まれていた。これには、産業界および国際協力への関与の大幅な増加が含まれている。また、AMRを評価し、国内のAMRサプライチェーンの開発を促進する英国の規制環境を育成するための規制当局の能力と力量も構築している。

規制当局は現在、AMR F&Dのフェーズ1で提供された豊富な裏付け資料を評価しており、残りの知識のギャップや関連する規制上の課題の特定など、これからの重要な教訓を期待している。原子力規制当局は、強力な知識管理アプローチを確立し海外の規制当局と協力して経験、知識および良好事例を共有し

ている。AMR F&Dのフェーズ2では、能力と力量をさらに伸ばすために技術開発者との緊密な連携を継続することを期待している。

2021年5月、ONRはEAとともにAMRに対するGDAプロセスを開始した。ロールスロイス社が主導するSMRコンソーシアムは、2021年の後半にSMR設計をONRが最初に評価することを目指しており、2030年代初頭までに初号機を完成させることを望んでいるとした。また、Penultimate Power社も日本原子力研究開発機構（JAEA）と共同で開発している第IV世代高温ガス炉（EH HGTR）をGDAプロセスの初号機とすることを目指していることを発表した。

6. おわりに

本稿は、英国の原子力研究開発の経緯を紐解くとともに、原子力補助政策について分かりやすく整理して説明した。

英国政府の補助政策は2011年以降毎年のように大きく変わり、政府の大規模な資金提供プログラムが発表されても数年後には中止となり次のプログラムが打ち出されることになるが、これは英国独特の複数年度予算計画（Spending Review）に原因があると考えられる。これが英国の原子力政策を分かりにくくしている面があるが、いずれにしても、この10年間、英国政府が一貫して原子力を積極的に推進していることが分かった。

米国、カナダにおいてもSMRの商業化に向けた取り組みが進展しており、またSMRの規制プロセスも進行しており、世界のどの国が最初にSMRを商業展開し、世界標準となって世界市場を独占するか今後も大いに注目される状況である。

令和2年度 事業報告の概要

(一財) エネルギー総合工学研究所

1. 概況

(1) 当研究所は、昭和53年4月の設立以来、「エネルギーの未来を開くのは技術である」との認識の下、時々のエネルギー情勢を踏まえつつ俯瞰的長期的な視座を持って、産学官の連携を図りながら、エネルギー技術に関する調査、研究、評価、普及に取り組んできました。このような中、「受託事業等の労務費計上に係る不適切事案」に関し、令和2年8月、経済産業省、新エネルギー・産業技術総合開発機構等から補助金交付等停止措置等の処分を受け、関係機関の皆様にご迷惑とご心配をおかけし、賛助会員をはじめ社会の信頼感を損ねたことは誠に遺憾でありお詫び申し上げる次第であります。

(2) 令和2年度においては、上記補助金交付等停止措置もあり、調査研究については民間企業等からの受託事業および将来の研究能力向上等のための自主研究に取り組みました。具体的には、国内外のエネルギー情勢、気候変動問題への対応の緊要性等を踏まえ、次世代電力ネットワーク、蓄熱システムに関わる技術開発、カーボンリサイクル技術を中心とした二酸化炭素(CO₂)有効利用技術、水素の製造・輸送・利用等に関する調査研究等を実施しました。また、原子力災害の発生を踏まえ、現在の軽水炉の安全性向上に資するための技術開発を継続するとともに、原子力開発を巡る国内外の動向調査、廃止措置に関し、

技術・制度等に関する調査、課題への対応策の検討、人材育成の支援等も進めました。さらに、個別分野研究会として、次世代電力ネットワーク(APNet)研究会、人為的カーボンサイクル(ACC)技術研究会等、受託事業の運営として、CO₂フリー水素普及シナリオ研究会、原子力発電所廃止措置調査検討委員会等において、検討会の開催、技術動向の情報共有等所定の活動を行いました。

(3) 調査研究に加え、我々の諸活動を支えて頂いている賛助会員へのサービス向上の観点から、月例研究会のオンライン開催等運営改善、ニュースレターの内容充実に加え、協業支援の観点からマッチング事業のような新しい取り組みも実施しました。

(4) 上記のような事業活動の状況により、令和2年度決算については事業収支がマイナスとなりました。今後については、向こう数年間で健全な事業収支を達成できるよう、令和3年度事業計画の通り、研究内容に見合った人員、スペースの削減等によるコスト削減、民間企業等からの受託事業の強化、賛助会員様へのサービスの強化等、構造的な改革を進めてまいります。引き続き、不祥事の再発防止策を確実に実施していくとともに、新型コロナウイルスへの対応も含め、より働きやすい環境の整備を目指します。引き続き、関係者の皆様のご理解とご支援をよろしくお願い申し上げます。

2. 各エネルギー分野における主な調査研究プロジェクトの概要

(1) エネルギー技術全般

国内外の地球温暖化に対する緩和策にとって重要な技術情報に関する調査全般を実施した。具体的には長期的な地球温暖化対策経路とネガティブエミッションの基礎的評価、および新型コロナウイルス感染症拡大がエネルギー需要に与える影響の評価や空調機のライフサイクル評価に向けて基礎研究を行った。加えて、国際エネルギー機関での会合を通じたエネルギー関連技術の海外情報調査を行った。また、エネルギーに関する最新の技術情報および評価を提供するエネルギー技術情報プラットフォームの更なる内容の充実、エネルギーに関する公衆の意識調査を実施した。

(ア) 地球規模でのエネルギーシステムに関する調査研究

① 長期地球温暖化対策経路の評価

世界モデルである地球環境統合評価モデル (GRAPE) によるエネルギー・気候・経済・土地利用・環境の超長期統合評価シナリオや、日本モデル TIMES-Japan によるカーボンニュートラルシナリオを提示、世界や日本のエネルギー・環境の評価を実施した。TIMES モデルの試算結果は、2050 年 80% 削減シナリオのモデル比較プロジェクトへの参画を通じて、他のモデルとの比較分析や、ネガティブエミッションの役割についての基礎的評価を行った。

② 新型コロナウイルス感染症拡大がエネルギー需要に与える影響に関する研究

新型コロナウイルス感染症拡大に伴い、緊急事態宣言などの影響もあり、人の移動や産業活動は大きな影響を受けた。日本を対象にして、気象要因や平日休日などの要因で説明できない電力需要変化のデータを整理し、人流データと電力需要の相関や、産業活動との関連について考察を行った。

③ 国際エネルギー機関研究開発プライオリティ専門家会合を通じた海外情報調査

国際エネルギー機関の研究技術委員会の下で活動を行っている、研究開発プライオリティ専門家会合 (Expert Group on R&D Priority Settings and Evaluation) に日本代表かつ副議長として参画し、エネルギー技術に関する国際ワークショップ (現在、Webinar 中心) の開催を支援するとともに、国際的な人的ネットワークを構築強化および最新海外情報を収集した。

④ 将来シナリオに基づく空調機のライフサイクル評価のための基礎データ調査研究

低炭素社会の実現に資する環境調和製品の開発のため、製品ライフサイクルの視点に立った環境影響の将来推計を行うことが重要となる。そこで、空調機を対象に、環境調和製品の普及による温室効果ガス排出抑制の貢献を評価するため、ライフサイクル諸量の定量的評価を行うことを前提に、将来の環境負荷を評価する基礎調査を行った。日本を対象にしたエネルギーシステムモデル TIMES-Japan の試算結果を利用して、空調機 (特に電気ヒートポンプ型民生用エアコン) に関連するエネルギーおよび CO₂ 排出量の将来シナリオに関連する諸量を算出し、整理してとりまとめた。

(イ) その他

① エネルギー技術情報プラットフォームの運用・整備

資源制約および環境制約の克服に資する有望な技術について、関連情報の収集・整理、分析・評価、関係機関・企業への情報提供を行うエネルギー技術情報プラットフォームを運用しており、国内外の情報を継続的に掲載するとともに、見やすさ、分かり易さを含めた情報の充実等を図った。

② エネルギーに関する公衆の意識調査

平成 15 年から継続的に調査を実施している公衆意識調査につき、令和 2 年度も継続実施

し、過去の結果との比較を行った。東京電力福島第一原子力発電所事故の後、原子力発電の利用、有用性および安全性に関する意見は大きく否定的な方向に変化し、その後大きな変化は見られていない。今回も原子力発電所の再稼働に対して否定的な意見が4割を超えているなど、状況に大きな変化は見られなかった。このような意識は、日本の原子力に対する不信・不安や再生可能エネルギー（再エネ）への期待、省エネルギーに対する意識の高まりに加え、原子力発電所の停止による影響をあまり感じていないことなども関係すると思われる。

（2）新エネルギー・電力システム関連

電力システム分野では、再エネ大量導入を見据えた次世代電力ネットワークの調査検討を進めるとともに、電力システム改革に伴う、電力取引市場、配電事業ライセンス制度、グリッドコードの調査・検討を行った。

新エネルギー分野では蓄熱システムに関わる技術開発の動向調査、地域エネルギー利活用調査、バイオエタノール導入に関する調査研究を実施した。

（ア）次世代電力システムに関する調査研究

① 次世代電力ネットワーク研究会の運営

本研究会は、国内外の情報収集や会員相互の意見交換等に基づき、次世代電力ネットワークのあり方およびその実現に向けた方策などの検討を行うことを目的としている。令和2年度は、新型コロナウイルスの感染状況を鑑み見学会は中止したが、検討会およびシンポジウムは多様な講師を招いてWEB形式で開催し、会員の利便性を向上しつつ出席者が増加した。また、国内外の政策や事業、企業等の動向を紹介するニュースレターを毎月発行し、電力システム改革に関する話題を深く掘り下げたコーナーを始めた。

② 電力システム改革に関する調査研究

2011年の東日本大震災、福島第一原子力発電

所事故を契機に始まった電力システム改革は、2015年の電力広域的運営推進機関（OCCTO）設立による広域系統運用の拡大、2016年の小売完全自由化、2020年の送配電部門法的分離の3つの柱に加えて、再エネの主力電源化およびエネルギーの自立分散化を見据え、新たな取引市場設立、配電事業制度導入など、様々な施策導入が進められている。

この分野は、電力分野の基盤となるものであり、令和2年度は日常的な情報収集とともに、下記テーマに関する調査・検討を行った。

<電力取引市場の調査・分析>

電力の需給調整力は、公募により行われていたが、2021年度から段階的に需給調整市場で行われることになった。調整力は、応答・継続時間により5種類に区分され、調整力の資源は発電設備、蓄電設備、需要家負荷設備が対象となる。

そこで、需要家負荷設備を活用する場合の各業種・生産プロセスへの適用性の検討を行った。また、2020年9月の容量市場の初回入札価格高騰、2021年1月の需給逼迫に伴うJEPXスポット価格上昇高騰の影響など取引市場に関する分析を行った。

<配電事業制度に関する調査・検討>

2020年6月のエネルギー供給強靱化法制定に伴い配電事業ライセンス制度が規定され、新規事業者が配電事業を行うことが可能となり、2022年4月の施行に向けて制度設計が進んでいる。

そこで、新規事業者が配電事業に参入する際の課題を明らかにするために、国内外の関連情報の調査をもとに分析を行った。また、既存の配電設備を有する一般送配電事業者の同制度導入への対応策の検討を行った。

<グリッドコードに関する調査・検討>

2030年の再エネ主力電源化を見据え、系統の安定性確保を前提として分散型電源を効率

的に系統連系するための日本版グリッドコードの整備が進められている。

そこで、先行する欧米のグリッドコードの内容を調査するとともに、電源種別に応じたグリッドコード制定に際しての条件および課題の検討を行った。

(イ) 再エネに関する調査研究

① 太陽熱・蓄熱技術研究会

本研究会（STE（Society of Concentrating Solar Thermal Energy）技術研究会）は集光型太陽熱発電（CSP）、高温太陽熱による水素・燃料製造および工業用として100℃～600℃程度の熱を供給する集光型太陽熱利用に関する研究会であり、当該技術の開発に取り組む産学のネットワークづくりを目的として2012年6月14日に設立された。また、昨今は再エネ大量導入における電力平準化や、CO₂削減策の1つとして、熱による蓄エネルギー技術（蓄熱技術）に対する関心が高まっていることから、令和2年度から本技術についても積極的に取り扱うこととした。令和2年度の3回の研究会では、毎年秋に行われるCSPの国際会議であるSolarPACESの紹介を行うとともに、再エネのコスト評価、技術動向、蓄熱に関する最新技術および国際動向について講演会を実施した。本研究会は産学の連携を取り持つ場を提供し、本分野の国内産業への技術力向上、普及を促進する役割を担っている。

② 蓄熱システムに関わる技術開発の動向調査

太陽光や風力などの出力変動が大きい再エネから負荷変動に対応した安定的な電力供給を可能とするため、蓄エネルギー技術の開発が重要視されている。近年は蓄電池等の他に、熱によって蓄エネルギーを行い必要時に発電する、蓄熱発電技術が注目されており、原子力発電や石炭火力発電の効果的な運用改善の手段として関心が高まっている。この蓄熱発電技術に関して、公開情報を基にした調査や、独自の解析・試算による検討を行い、主幹シ

ステムおよび補機類の構成・仕様、起動・運転・停止時の運用方法、コストについて詳細に調査するとともに、企業や団体が蓄熱発電の導入や事業実現性を検討する際に必須となる、蓄熱発電技術および電力市場の最新動向を整理した。

③ 地域エネルギー利活用調査

地域における木質バイオマスを用いたバイオマス発電の事業について、原料調達量、転換方式、電力販売方法、および熱利用などの周辺技術の可能性を検討することによってバイオマス発電の事業可能性を調査し、事業モデルを検討した。

バイオマス発電の導入については2022年度以降の固定価格買取制度（FIT）の要件に地域活用電源であることが加わるため、事業者と自治体の連携が更に重要となること、地域に存在するエネルギー資源（再エネ、コジェネレーション（以下、コジェネ）、蓄電池等）すなわち、地域エネルギーを有効活用した地域新電力の取り組みも地域活性化や防災の観点で有用な事業となりうるということがわかった。

対象エリアでの単独での事業性の成立しにくさをカバーするため、「地域レベルでの導入の工夫」を盛り込んだ、発電と熱利用とで面的展開を模索する事業モデルを提案した。

④ バイオエタノール導入に関する調査

バイオエタノールの利活用に関する食物競合および混合技術について、経済性、環境性、持続可能性といった多面的な情報を整理した。

現在大半のバイオエタノールがトウモロコシやサトウキビといった第一世代のバイオ燃料であるが、その利用によって従来言われていた食料価格の高騰や食料不足は起こっておらず、アメリカではトウモロコシ農地面積を増やさずに収穫量を増やすことに成功しているため、持続可能なバイオ燃料と考えることもできる。さらに、元々飼料作物として利用されてきたトウモロコシからエタノールを製造する際には、発酵

残渣をカスケード利用する DDGS (トウモロコシ蒸留粕) が飼料として併産されているため、食料競合の問題は起こっていない。

今後温暖化対策としてバイオエタノールの導入拡大を考えるためにはエタノールの直接混合を含めて広く見なおすべきではないかと結論付けた。

(3) 水素エネルギー関連

エネルギーキャリアの観点から、CO₂ フリー水素普及シナリオに関する調査、エネルギーモデルを用いた将来の水素需要量に関する調査、水素エネルギーキャリアの経済性・環境性に関する調査等を実施した。また、蓄エネルギー手段および製造・利用技術に関する調査研究も行った。

(ア) エネルギーキャリアとしての水素に関する調査研究

① CO₂ フリー水素普及シナリオに関する調査研究および研究会の開催

「CO₂ フリー水素普及シナリオ研究会」を自主研究会として開催し、日本での CO₂ フリー水素普及のシナリオとシナリオ実現のストーリー、エネルギーモデルによる将来の日本の水素需要量の分析結果等を議論の素材として提供した。水素普及シナリオは、①既存利用拡大 ②国際水素サプライチェーンの確立／新規需給の本格化／水素ステーションの自立化 ③トータルサプライチェーンの CO₂ フリー化／燃料転換／国際連携強化 ④水素社会の始まり、のステップで進むと想定した。キーポイントである燃料転換は水素調達価格がカーボンプライスを上乗せした従来エネルギーと同等以下となることで生じると思われ、設定した条件下、火力発電では 22～23 円 / Nm³ となる 2045 年頃起こり得る結果となった。2015 年度から 2020 年度までの研究会成果を「CO₂ フリー水素普及シナリオ研究 総括報告書」としてとりまとめ、ホームページに公開した。

② エネルギーモデルを用いた将来の水素需要量に関する調査研究

GRAPE のエネルギーモジュールを用いて、各種条件における世界と日本の将来の水素需要量の分析を継続して実施している。2020 年度は、日本を含む様々な国や地域がカーボンニュートラルを目指している動きを踏まえ、これらを考慮した各国・地域の CO₂ 排出量制約の変更や新たな水素利用技術、ネガティブエミッションの技術オプションを追加した。また、日本の水素需要を詳細に分析するため、TIMES-Japan モデルとのソフトリンクを行った。この分析から、日本の CO₂ 排出量制約を満たすためには、発電部門では原子力発電の寿命までの維持、太陽光・風力発電の大幅な導入が必要である。運輸部門では水素が大幅に導入され、特に乗用車では水素起源の合成ガソリンを含む水素が利用される。世界では、2050 年と 2060 年の CO₂ 制約（実質ゼロ）を課した西欧と中国で、運輸部門を中心に水素の大幅な導入が確認された。結果を「CO₂ フリー水素普及シナリオ研究会」に示し、議論するとともに、成果を上述の報告書として公開した。

③ 水素エネルギーキャリアの経済性・環境性に関する調査研究

エネルギーシステムの低炭素化に貢献するため、再エネなどから製造した水素を様々なエネルギーキャリアに変換して輸送して、需要地で利用するサプライチェーンの経済性と環境性の分析を継続して実施している。水素エネルギーキャリアには、それぞれ特徴があり、その経済性・環境性は、水素の製造場所・生産規模・輸送方法・輸送距離・利用場所・最終利用形態など、想定するサプライチェーンによって変動し、また利用時期（技術進展をどの程度見込むか）によっても大きく影響を受ける。水素エネルギーキャリアとして液化水素・有機ハイドライド・アンモニア・合成メタン・メタノール・合成液体燃料 (e-Fuel) など、製造場所として海外・国内、利用場所

として水素ステーション・発電所・製鉄所・民生産業用などを種々のサプライチェーンを想定し、分析を実施した。成果の一部を学会等の場で発表するとともに、合成液体燃料(e-Fuel)については、「再生可能エネルギー由来水素等を活用する低環境負荷な内燃機関自動車用燃料に関する調査報告書 炭化水素系燃料編」としてとりまとめ、ホームページに公開した。

(イ) 蓄エネルギー手段としての水素に関する調査研究

① 水素を用いた国内再エネの有効活用に関する調査研究

変動性電源である太陽光発電や風力発電等の再エネ大量導入をはかるためには、余剰電力の有効活用が1つのポイントとなる。国内特定地域に変動性再エネが大量に導入されたときに発生する余剰電力の活用方法として、蓄電池による電力貯蔵や水の電気分解による水素製造とその利用(Power-to-Gas)を想定し、種々の条件での経済性・環境性の分析を行った。

(ウ) 水素の製造・利用技術に関する調査研究

① 水素燃焼タービン発電に関する調査研究

地球温暖化対策への取り組みが加速し、エネルギー分野では再エネの導入促進と合わせて、化石燃料を利用する火力発電の脱炭素化対策が急務となっている。LNG火力発電の中核であるガスタービン発電技術について、国内外で行われている水素利用に向けた技術開発動向を調査分析した。わが国の発電分野の脱炭素化とガスタービン発電の役割、必要な水素量の目安を検討し、ガスタービンでの水素利用技術をまとめるとともに、世界の主要ガスタービンメーカーが実施している水素の混焼・専焼に関する技術開発や実証事業の状況、将来の高効率発電技術として期待される酸素水素燃焼技術等を調査した。その成果を、月例研究会で紹介するとともに、「水素燃焼タービン発電技術と世界の動向」として季報

エネルギー総合工学に発表した。

② 水素の製造技術に関する調査研究

CO₂フリーの水素の製造技術として、再エネで発電した電力による水の電気分解技術が注目され、国内外において、基礎研究からシステム実証まで、電解効率の向上、機器の大型化、耐久性・負荷追従性の向上、コストダウン等、様々な観点での研究開発が行われている。アルカリ形水電解、プロトン交換膜形水電解、アニオン交換膜形水電解、高温固体電解質方水電解等、種々の方式の水電解技術の特徴と国内外の開発動向を調査分析した。

(4) 炭素循環エネルギー関連

化石燃料の高度転換・利用技術、炭素有効利用・循環技術を核としたエネルギーシステム研究に関して、CO₂分離・回収型石炭ガス化複合発電の実用化検討、太陽熱利用CO₂フリー燃料の経済性検討等を行うとともに、積極的に炭素を活用するCCU技術について研究会の場において議論、意見交換を行った。

(ア) 炭素有効利用・循環技術等のエネルギーシステムに関する研究

① CO₂分離・回収型石炭ガス化複合発電の実用化検討

現在、世界で進められているCO₂分離・回収型石炭ガス化複合発電(IGCC)の実証事業の進捗状況、CO₂分離・回収技術動向の調査を行った。海外の実証事業の進捗状況については、公開情報も少なく総じて動きが鈍く、石炭火力に対する風当たりの強さを感じさせる状況となっている。石炭火力から分離・回収したCO₂の処理(CCS)、活用方法(CCU)については、未だ世界中で模索状態が続いており、これら課題を解決すべくIGCCにいかなる付加価値を与えられるか検討を行った。

② 太陽熱利用CO₂フリー燃料の経済性検討

海外の再エネによる発電単価は急激に低下

しており、わが国の再エネだけでは賄えない一次エネルギー源分については、この海外の安い再エネの輸入を考えることは得策である。温室効果ガスの1つであるCO₂を排出することなく、安定供給、経済性、環境、安全性(3E+S)を堅持すべく海外の再エネの1つである太陽熱エネルギーを蓄熱技術と組合せ、安定的にCO₂フリー燃料(水素、メタン、メタノール)を製造し、国内に輸入することは、その目的に資する1つの解決策として期待される。

そこで、国内で分離・回収したCO₂と海外の太陽熱を活用し製造した再エネ水素を用いて合成した各種CO₂フリー燃料の経済性について、検討、評価を行った。

③ ACC (Anthropogenic Carbon Cycle) 技術研究会

ACC 技術研究会は、将来の低炭素／脱炭素化に向けたCO₂排出量のマネジメントの重要性に鑑み、CCU 技術の中でも大量にCO₂を処理することが可能なエネルギーシステムの構築を目的として、2019年2月に設立された。

わが国の新しいエネルギー供給システムの構築のため、必要なCCU 技術の調査・研究、開発・実証・検証等の実施を目指し、会員との技術情報交換、国への調査・実証研究の提案、必要な要素技術開発やシステム開発に関する提言等の発信を行い、産官学協力の下、新しいエネルギーシステムの早期社会実証・実装に向けた議論を深める場を提供している。

(5) 原子力関連

福島第一原子力発電所事故を踏まえ、さらに高い水準の安全確保を図るため、原子力の安全性向上に資する技術開発プロジェクトを実施したほか、過酷事故解析コードを活用した福島第一原子力発電所の事故進展およびFP挙動評価を進めた。また、原子力をめぐる最新動向の分析、米国の原子力に対する取り組み、新型コロナウイルス感染拡大の原子力への影響と今後の原子力の役割に関する調査等

を行った。原子力プラント技術では、浮体式原子力発電所の揺動時熱水力挙動を評価した。国内廃止措置を円滑に進めるため、関連する工程、技術、制度に関する調査、廃止措置を担う人材育成のための教材開発および研修システムの構築、民間規格基準整備への支援、および放射能インベントリ評価用コードおよび基盤データ整備に関する調査研究を行った。また、大型機器を含む放射性廃棄物の処理・処分に関する調査検討を行った。

(ア) 福島第一原子力発電所事故関連

① 発電用軽水炉の安全対策高度化技術開発

本技術開発は、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、深層防護の観点から原子力の安全性向上に資する技術開発を選定し、国の支援の下、プラントメーカおよび電気事業者と協力して進めるプロジェクトである。2テーマの要素技術開発(静的デブリ冷却システム、RCP シール漏えい防止対策技術)は、プラントメーカ3社が主体的に実施し、当研究所は、プロジェクトの着実な管理を実施した。

② SAMPSON コードによる福島第一原子力発電所の事故進展およびFP 挙動評価

福島第一原子力発電所事故進展および現在のデブリ・FP の状態を推定するため、経済協力開発機構／原子力機関(OECD/NEA)におけるBSAF の後継プロジェクトARC-Fに参加し、BSAF の経験を基に改良したシビアアクシデント解析コードSAMPSON2.0を用いて、福島第一原発1～3号機の事故進展シナリオを構築した。また、同コードの解析結果をベースに、炉内から建屋や環境に放出された放射性核種(RN)の移行・沈着挙動を評価し、RNによる炉内・環境の汚染メカニズムを検討した。

(イ) 原子力全般

① 原子力をめぐる最新動向の分析

原子力の最新動向を分析するにあたっては、関連ニュースを統計的に分析するというのが

有効な手法である。ここでは、主に World Nuclear News (WNN) のキーワードに着目し、過去5年分の推移を分析した。その結果、大型軽水炉の建設を中国、ロシアが主導し、国際展開を積極的に進めている一方で、米国、英国、カナダは原子力産業の復活を明確に志向し SMR を軸として巻き返しを図っているという構図が明確となった。また、2020 年第 1 四半期より新型コロナウイルス関係のニュースが急増していることも明らかとなった。

② 最近の米国の原子力に対する取り組み

「原子力をめぐる最新動向の分析」の結果を受けて、米国の状況の詳細調査を実施した。米国は近年、原子力技術開発や輸出市場におけるリーダーシップは大幅に低下させている。その状況をうけて、2020 年 4 月 23 日、米国エネルギー省 (DOE) 長官が「米国の原子力での競争力優位性の復活－米国の国家安全保障の確保戦略」を公表するなど原子力産業の復活を明確に志向しており、小型モジュール炉 (SMR) の実証とそれに関連する先進技術の開発に集中的に資金を投下している。2020 年代後半の SMR 商業化を目指して、議会の法律制定による支援と許認可を所掌する原子力規制委員会 (NRC) の協力も含めて、DOE は所有する国立研究所のすべての施設の提供とマンパワーを総動員しているようである。

③ 新型コロナウイルス感染拡大の原子力への影響と今後の原子力の役割

世界中での新型コロナウイルス感染拡大という状況を受けて、その原子力への影響を調査した。その結果、原子力発電所は、消毒の徹底や社会的距離の確保といった一般的な対策を実施しつつ運転を継続できているということが明らかになった。新設作業や保守作業については、一部延期等の措置があったものの、これも順次再開・継続しているようである。このような現状を踏まえ、2020 年 6 月頃より、新型コロナウイルス関連ニュースの力点は、今後の with

コロナの中で、経済性と気候変動問題対応を兼ねたエネルギーである原子力をどう活用すべきか、という方向にシフトしてきた。

(ウ) 原子力プラント技術

① 浮体式原子力発電所の揺動時 BWR 熱水力挙動評価

産業競争力懇談会 (COCN) の浮体式原子力発電検討会に参画し、沸騰水型原子炉 (BWR) を炉型として採用した場合のプラント成立性について評価した。成立性評価では、BWR プラントの重要パラメーターである原子炉内沸騰挙動・ボイド率に着目し、これらパラメーター変化に起因する炉出力や限界熱流束への揺動の影響について調査・検討した。検討の結果、定性的には BWR 安定運転時では揺動の影響は小さく、浮体揺動時にも運転継続可能であり原子炉停止に至る可能性が低い見通しを得た。また、概念設計への設計条件整備として、浮体縦揺動および傾斜時の詳細評価、および BWR 実機条件での評価を今後の課題として提言した。

(エ) 原子炉廃止措置に関する調査研究

① 廃止措置に係る工程、技術、制度に関する調査および課題への対応策の検討

廃止措置分野の学識経験者による検討委員会を開催し、通常炉の廃止措置状況や課題等について検討を行うとともに、最近の国内外の廃止措置の実施状況に関する情報の共有を行った。また、課題解決策について関係機関の理解獲得のために社会へ提言を行う資料として、本年度は原子力発電所から発生する大型機器の処理に関する技術レポートを作成し、公表した。この提言については、現在、国において検討されているエネルギー基本計画策定会議においても取り上げられている。

② 廃止措置を担う人材育成のための教材開発および研修システムの構築

状況が変化していく廃止措置対象施設に対して、安全かつ合理的に廃止措置を実施していく

ためには、このような廃止措置の本質を理解した“廃止措置マインド”を有する人材が必要である。このような要件を満たす技術者として、海外実施事例を参考に国際的な視野を持った、原子力施設の廃止措置の計画、実施および終了の各段階において効果的なプロジェクトマネジメントを実践できる人材を育成することを目的とする事業の支援を行った。

また、その支援を通じて培った経験をもとに、廃止措置を担う人材育成のための教材を開発するとともに研修システムを構築して事業展開に取り組んだ。

③ 廃止措置に関する民間規格基準整備への支援

日本原子力学会による原子力発電所の廃止措置に係る基本安全原則や計画に関する標準、廃止措置の安全評価に関する標準、廃止措置全般にわたるガイドライン類の制定および改定のための業務を実施した。

④ 廃止措置に係る放射能インベントリ評価用

コードおよび基盤データ整備に関する調査研究
安全かつ合理的な原子力発電所等の廃止措置や運転中廃棄物の処理・処分の計画立案に当たって必要となる、施設に残存する放射能の性状、分布および量を把握する放射能インベントリ評価に関し、同評価に用いる中性子輸送計算および放射化計算に係る技術的知見の提供等を実施した。

(オ) 放射性廃棄物の処理・処分に関する調査検討

① 循環経済における放射性物質／放射性廃棄物管理に関する海外動向調査

日本では使命を終えて廃止措置に移行した原子力発電所も増加している。今後原子力発電所の廃止措置が進められると、さらに大量の大型機器が発生し、敷地内に保管され続け、廃止措置作業スペースを圧迫することが予想される。

国内の原子力発電分野における循環経済および廃止措置の円滑な推進などに資するため、

循環経済を進めている欧米での大型機器の処理の実績等の調査を踏まえて、わが国において保管されている、または今後発生する大型機器の処理の在り方等について評価を行った。

(6) 国際標準関連

ISO（国際標準化機構）の国際規格の策定に係る活動を進めた。

① エネルギーマネジメント・省エネルギーに関する国際規格開発

エネルギーマネジメント・省エネルギー分野の国際規格の開発において、わが国の意見を適切に反映させるため、ISO/TC301（エネルギーマネジメント・省エネルギー量）の国内審議委員会および同WGの事務局として、産業界・学識経験者・省エネルギー専門家等からなる委員会・WGを組織運営し、課題の検討と国際規格案への対処案の作成等を継続して実施している。2020年度は、日本提案に基づくISO50009「複数の組織で共通のEnMSを実施するためのガイダンス」開発の最終年度にあたり、この規格開発を推進して、2021年3月にエネルギーマネジメント分野で初の日本提案の規格となるISO50009の発行に至った。2番目の日本提案であるISO50011「エネルギーマネジメント進展度の評価」も正式承認を得て、規格開発を開始した。また、基本規格ISO50001をはじめとする同分野の国際規格に影響を与えうる国際動向について、継続的に情報収集を実施した。

3. 情報発信・広報事業

(1) 定期刊行物の出版

当研究所の調査研究活動の紹介および重要なエネルギー技術開発の動向の周知を目的として、毎年、四半期毎に「季報エネルギー総合工学」を作成しており、令和2年度も表1に示すとおり4号（第43巻第1号～第4号）を発行した。（発行部数各約1,000部）

表1 季報の報告テーマ

号	寄稿・調査研究報告のテーマ名
第43巻第1号 (令和2年4月)	・令和元年台風15号による千葉の停電事象および地域エネルギー活用について ・地方創生を目指した地域エネルギー利用について ・安全解析チームの数値シミュレーションに対する取り組み ～原子炉隔離時冷却系（RCIC）の研究を例に～
第43巻第2号 (令和2年7月)	・世界の原子力に関する最新動向と今後に向けた考察 ・寄稿変動対策における原子力の役割と技術的・社会的課題 ～「気候変動と原子力の役割に関する国際会議」を踏まえて～ ・廃止措置を推進する技術者育成カリキュラムの構築と研修の実施 ・将来を担う廃止措置技術者の養成～廃止措置海外研修の意義と成果～
第43巻第3号 (令和2年10月)	・新型コロナウイルスの感染拡大と共鳴する米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命 ・蓄熱を利用する蓄エネルギー技術「カルノーバッテリー」と最新高温用蓄熱材料の紹介 ・自治体エネルギー公益的事業体「日本版シュタットベルケ」の可能性 ・蓄熱発電の可能性と世界の開発計画
第43巻第4号 (令和3年1月)	・わが国における運輸部門のCO₂排出削減に対するバイオエタノール導入の効果 ・WNN ニュースから見た世界の原子力動向と米国の原子力産業復活の国家戦略・支援策 ・新型コロナウイルス感染症の原子力への影響と今後の原子力の役割 ・水素燃焼タービン発電技術と世界の開発動向 ・大規模水素サプライチェーンの国際実証 ・国際水素サプライチェーンの構築に向けた取り組み

（2）月例研究会の開催

当研究所の賛助会員等を対象に、研究所の調査研究成果の報告および時宜を得た情報の提供を目的とした「月例研究会」を昭和58年度から開催しており、令和2年度も引き続き、表2に示すとおり計9回開催した。

なお、新型コロナウイルス感染症の影響で4、5月は休会とし、6月よりウェブ会議での開催とした。講演資料のデジタル化および賛助会員限定ウェブサイトへの事前掲載を継続したことに加え、ウェブ会議で遠方からの参

表2 月例研究会の報告テーマ

開催年月	報告題目
令和2年6月	中東情勢と新型コロナウイルスが共鳴するシェール・ガス革命とシェール・オイル革命の未来 2020年度電力供給計画の取りまとめについて（概要）
令和2年7月	日本版シュタットベルケの可能性 地域エネルギー利活用の課題と展望
令和2年8月	蓄熱発電の可能性と世界の開発計画 カルノーバッテリー技術における国際連携と北海道大学における高温蓄熱研究の紹介
令和2年9月	WNN から見た最近の原子力動向 最近の米国の原子力に対する取り組み COVID-19の原子力への影響と今後の原子力の役割 An Overview of the Nuclear Energy Agency: NEA Activities during the Pandemic（ポストコロナを見据えたNEAの取り組み）
令和2年10月	CO ₂ を利用する循環エネルギーシステム「カーボンリサイクル」（1） CO ₂ を利用する循環エネルギーシステム「カーボンリサイクル」（2）
令和2年11月	水素燃焼タービン発電技術と世界の開発動向 大規模水素サプライチェーンの国際実証 ～世界初国際間水素サプライチェーンの紹介～ 国際水素サプライチェーン構築に向けた取り組み
令和2年12月	ネット・ゼロ排出とその達成に向けた課題 先進的CO ₂ 分離膜の開発とその将来展開
令和3年1月	循環経済における廃止措置（放射性廃棄物管理）の在り方と取り組み 廃止措置で発生する放射性物質／放射性廃棄物管理の最適化－OECD/NEAの取り組み－
令和3年3月	カーボンニュートラルに向けた世界の動きと日本の対応

加障壁も無くなった結果、参加者数は全体的に大きく増加した。今後は新型コロナウイルス感染症の状況や参加者からのアンケート結果を踏まえつつ、ウェブ会議、従来の航空会館での開催およびウェブ会議とのハイブリッド開催を検討する。

（3）メールマガジン（IAE Newsletter）の発行

当研究所の研究員によるコラムを新設しエネルギー・環境分野の内外動向等に関する考察を発信するとともに、月例研究会の開催概要、個別研究会の動向、当研究所研究員の外部発表紹介を掲載するなど、コンテンツの充実を図った。また、見やすさの改善と合わせて、賛助会員専用ホームページにPDF ファイルで保存し閲覧を容易にした。

（4）カーボンリサイクル本の出版

CO₂を炭素資源（カーボン）と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用（リサイクル）するカーボンリサイクルは、大気中に放出されるCO₂の削減、気候変動問題の解決に貢献および新たな資源の安定的な供給源の確保につながり得る。一方でカーボンリサイクル全体を俯瞰する出版物が無かった。そこで当研究所は関連技術全般をカバーし、さらに理解のしやすさも意識した「図解で分かるカーボンリサイクル」を令和2年9月に出版した。複数の雑誌等の書評で好評価され、カーボンリサイクル技術全般の普及に貢献した。

（5）スタートアップスとの連携支援事業

近年、社会経済を巡る情勢や産業構造が変化し、企業を取り巻く競争環境がより厳しさを増す中、ベンチャー企業、大学等との協働を通じたイノベーションへの取り組みが活発化している。この取り組みを賛助会員の関心の高いエネルギー分野中心に拡大するため、ベンチャー支援機関のケーエスピー社と連携し、スタートアップス（ベンチャー企業）、大学等による事業紹介・講演の場として、「IAE

オープンイノベーションフォーラム」を令和
2年9月に開催した。その結果、個別面談が
22件成立したことから令和3年度も7月1日
に第2回を開催予定である。

研究所のうごき

(令和3年4月1日～6月30日)

◇ 第27回理事会

日 時：6月8日(火) 14:00～15:00

場 所：Web会議 (Webexを使用)

議 題：

- 第1号議案 令和2年度事業報告および決算について
- 第2号議案 公益目的支出計画実施報告書について
- 第3号議案 監事の報酬総額ならびに役員報酬規程の改定について
- 第4号議案 定時評議員会の開催について
- 報告事項 常勤役員候補者選考委員会の結果について
- 業務執行の状況について

◇ 第15回評議員会

日 時：6月25日(金) 14:00～15:00

場 所：Web会議 (Webexを使用)

議 題：

- 第1号議案 令和2年度事業報告(報告事項)および決算について
- 第2号議案 公益目的支出計画実施報告書(報告事項)について
- 第3号議案 役員の選任について
- 第4号議案 評議員の選任について
- 第5号議案 常勤役員候補者選考委員会委員の選任について
- 第6号議案 監事の報酬総額ならびに役員報酬規程の改定について
- 報告事項 常勤役員候補者選考委員会の結果について
- 業務執行の状況について

◇ 第28回理事会(臨時)

日 時：6月25日(金) 16:00～16:15

場 所：Web会議 (Webexを使用)

議 題：

- 第1号議案 代表理事および業務執行理事の選定について
- 第2号議案 役員報酬額について

第3号議案 事務局長の委嘱について

第4号議案 賛助会員規程の改定について

◇ 月例研究会

第408回月例研究会 (Web開催)

配信日時：4月9日(金) 14:00～15:00

テーマ：

原子力発電所から発生する大型機器の処理について～原子力発電所廃止措置調査検討委員会の取り組み～
((一財) エネルギー総合工学研究所 原子力技術センター 部長 堀川 義彦)

第409回月例研究会 (Web開催)

配信日時：5月20日(木) 14:00～15:00

テーマ：

発電事業のゼロエミッションに向けて
(東京電力ホールディングス(株) フェロー 姉川 尚史氏)

第410回月例研究会 (Web開催)

配信日時：6月18日(木) 14:00～15:00

テーマ：

バイデン新政権の誕生、脱炭酸ガスへの動きとシェール・ガス革命、シェール・オイル革命の最新動向
(和光大学 経済経営学部 教授 岩間 剛一氏)

◇ 外部発表

[講演]

講演者：岡崎 徹

テーマ：再エネ大量導入を経済的に実現する蓄熱発電と国内外の技術開発動向

講演先：日本産業機械工業会

日 時：4月27日

[寄稿]

寄稿者：飯田 重樹

テーマ：水素エネルギーキャリアの経済性分析(第2章)

寄稿先：『有機ハイドライド／アンモニアの合成

と利用プロセス』（シーエムシー出版）

発行日：4月12日予定

寄稿者：小野崎 正樹，橋崎 克雄

テーマ：火力発電の脱炭素化に向けたカーボンリ
サイクル活用の検討

寄稿先：『火力原子力発電』5月号

寄稿者：黒沢 厚志，加藤 悦史

テーマ：日本の長期CO₂削減とネガティブエミッ
ションの役割

寄稿先：『エネルギー・資源』5月号（Vol.42 No.3）

発表者：岡崎 徹

テーマ：経済的脱炭素社会を実現する蓄熱発電と
回転発熱機

寄稿先：『電気評論』6月号

編集後記

日本の脱炭素化に向け、政府は昨年10月の2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す宣言、更に本年4月の気候変動サミットでの2030年温暖化ガス13年度比46%減と急速に動いた。まずは、風力、太陽光といった再生可能エネルギーによる電力供給の脱炭素化が急務である。しかし、2019年度では、電力供給によるCO₂排出が全体の約40%であるのに対し、産業と運輸の合計が約43%とそれよりも多い。

本号では、運輸部門の自動車の低炭素化に関する取り組み、非効率石炭火力のフェードアウト、更に原子力分野の廃止措置と英国の最新動向を紹介した。分野は異なるが共通している点は2つある。1つ目は、ライフサイクルでの評価(LCA)の重要性、2つ目は2050年に向けて現実はどう移行するかの視点である。前者で大きく先行する欧州は2050年に向け、レ

アメタル等も含む鉱物資源を欧州内でリサイクルする循環経済へ舵を切り、欧州外に依存しないエネルギー安定供給に動いている。後者については欧米も課題を抱えながらも、対応できるもの、今後のイノベーションに期待するもの等、多面的に対応している。このように、世界的な脱炭素化の動きはもう止まらない。

先行する欧州、シェールガス・オイルでエネルギー覇権も持つ米国、更には中国の台頭もあり、日本の国際的地位は相対的に低下している。今後10年がその先の日本を決める時期である。

今回、令和2年度の事業報告を全編掲載とした。弊所の事業内容を知って頂く一助になると期待するとともに、10年後、30年後の真の姿が見えない中で、本号が皆様の今後の事業活動に少しでもご参考となれば幸いである。

編集責任者 茶木雅夫

季報 エネルギー総合工学 第44巻第2号

令和3年7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

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

（印刷）株式会社 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。