

# JCOAL Journal

2021.12  
Vol.47

＜クリーン・コール・デー特集号＞

## ■巻頭言

カーボンニュートラルへの道～コール・フロンティアの役割 2

## ■スペシャルレポート

第30回クリーン・コール・デー国際会議（2021）（オンライン）  
開催報告 3

## ■JCOAL 活動レポート

日本のエネルギー政策をめぐる動向 11

クリーン・コール・デー実行委員会広報活動報告 15

ケミカルルーピング燃焼（CLC）技術開発の進捗、その3 18

カーボンリサイクル最新技術動向 21

カーボンニュートラルに向けたアンモニアマイクロ  
ガスタービンを活用した  
先進農業にかかる技術実証事業を本格スタート 26

鉱業終了後の施設の後処理と有効活用 28

グリッド変動指数（GFI）の導入および  
エネルギー移行期における ASEAN 諸国の系統変動傾向の予測 32

■編集後記 39

 **J-COAL**

一般財団法人 石炭フロンティア機構  
<http://www.jcoal.or.jp>

## カーボンニュートラルへの道～コール・フロンティアの役割

(第30回クリーン・コール・デー国際会議を開催して)



クリーン・コール・デー実行委員会  
委員長  
一般財団法人  
石炭フロンティア機構  
理事長 塚本 修

コロナ感染拡大が、ようやく収束に向かいつつあるようでありませぬ。この巻頭言が皆様の目に触れるころには、緊急事態宣言、蔓延防止対策も全国的に解除され with コロナ、after コロナの中で正常な経済活動が戻っていることを願っております。今回の JCOAL ジャーナルは、第30回目を迎え、先の9月21日、22日に開催されましたクリーン・コール・デー国際会議を中心とするクリーン・コール・デー特集号となっております。

今年の国際会議はコロナ禍の中、昨年に続き2回目のオンライン形式での開催になりましたが、24カ国延べ1500人の参加者を得て活発な議論が行われました。

共催をいただきました、経済産業省(METI)、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)をはじめ、ご後援をいただきました在京大使館や内外の関係機関、さらには、講演やパネラーをお勤めいただいた方々、そして2日間にわたり熱心に参加いただきましたすべての皆様のご協力、ご支援に対しまして心から感謝と御礼を申し上げたいと思います。

2030年の新たなエネルギー基本計画、2050年に向けたカーボンニュートラル宣言のなかで石炭を含む化石燃料のエネルギー政策の中での位置づけが大きく注目されております。CO<sub>2</sub>排出を実質的にゼロにするカーボンニュートラルに向けて、とりわけ未来を拓く進化した石炭利用の役割、すなわち、今回の国際会議のテーマは、『カーボンニュートラルへの道～コール・フロンティアの役割』でありましたが、2日間の会議を通じて皆様と共有できました点につきまして以下の通りご報告させていただきます。

- (1) 2050年のカーボンニュートラルへ加速している世界的な潮流の中、すべての国がそれを達成できるとは限りません。自然条件、地理的条件、経済的条件、社会的受容性等の条件などその国のエネルギーを取り巻く環境は、それぞれ異なり、カーボンニュートラルを達成することは、相当困難な道のりでありませぬ。カーボンニュートラルに対応できる技術開発や国際連携を進めることができる国は限られております。再生可能エネルギーを最大限導入する中で、一方、再生可能エネルギーだけで電力を賄うことは難しいことも認識すべきであります。
- (2) 新興国や東南アジア等多くの国々では、現在使われている化石燃料、特に埋蔵量が多く安定した供給が可能な石炭を使わざるを得ないことも事実であります。カーボンニュートラルにおいて重要なことは、極力CO<sub>2</sub>排出を押さえるとともに、排出されたCO<sub>2</sub>を実質的にゼロにすることであり、石炭を含む化石燃料を使わないという意味ではありません。
- (3) 再生可能エネルギーの導入を最大限に推進しながらも、非効率な石炭火力発電所のフェードアウトを進める一方、それ以外の石炭火力発電所は徹底したCO<sub>2</sub>低減策を講じる必要があります。この対策として、既設の石炭火力発電でのバイオマスやアンモニアの混焼、専焼火力への転換等CO<sub>2</sub>発生低減策をとること、更には発生したCO<sub>2</sub>のCCS/CCUS(CO<sub>2</sub>の分離、回収、再利用、貯蔵)の導入が挙げられます。その国の実情にあうカーボンニュートラルに向けた最適な技術、手段の組合せを各国ごとに見つけ実行することが、現実的なカーボンニュートラルの解になるのではないのでしょうか。
- (4) カーボンニュートラルに向けたエネルギー移行期においては、とりわけ広い分野のCCTの技術開発・実証・導入・普及が必要であり、カーボンニュートラル実現には、政府のみならず民間によるファイナンス支援が必須であります。また、カーボンニュートラルに資する広義のクリーン・コール・テクノロジー(Innovative CCT)の技術開発を社会実装させるためには、中国や欧米諸国なども含めた地球規模での国際連携が重要であります。「アジアCCUSネットワーク」の発足による新たなネットワークの構築とアセアンとの連携強化によるカーボンニュートラルの推進は、極めて重要な意味を持つものであると考えます。
- (5) 新しい石炭火力の使い方、CCS/CCUSによるCO<sub>2</sub>の削減等により、カーボンニュートラルに貢献する進化したInnovative CCTを実践、社会実装し、石炭を有効に利用しようとするのがJCOALが挑戦する“コールフロンティア”であり、今後の世界の石炭火力の新しい道であると考えます。

英国グラスゴーで開催されておりましたCOP26(第26回国連気候変動枠組み条約締約国会議)は、先進国途上国から多くの参加を得、約2週間の積極的な議論を経て11月13日に終了し多くの成果が見られました。

COP26の合意文書の中には石炭火力に関する記述があり、「CO<sub>2</sub>削減対策の取られていない石炭火力の段階的な削減」が合意された訳であります。

今回のクリーン・コール・デー国際会議の議論は、開催期間がCOPより先行しましたが、まさしくCOP26で合意された内容に沿うものであります。

この2日間の国際会議の議論の総括は、第30回クリーン・コール・デー国際会議のJCOAL'S STATEMENTとして国内外に発信させていただきました。今年の4月より「石炭エネルギーセンター」から名称も新たにしました「石炭フロンティア機構」は、皆様とともにこの新しい挑戦に肅々と取り組んでまいりたいと思ひます。会員皆様のご理解とご協力、ご支援をよろしくお願ひします。

## 第30回クリーン・コール・デー国際会議(2021)(オンライン)開催報告

国際事業部 藤田 俊子

平成3年(1991年)6月の石炭鉱業審議会から新石炭政策推進の必要性が答申されたことに併せ、同年9月に発表された当時の通商産業省(現経済産業省)資源エネルギー庁石炭部長の私的懇談会「地球を救う新石炭政策研究会」中間報告において、石炭に対する伝統的なイメージの払拭並びに正しい認識と評価を得るためのPR体制の充実・推進の必要性が強調され、その活動の一環として、「石炭の日(クリーン・コール・デー)」の制定が提案され、平成4年(1992年)9月に、第1回「クリーン・コール・デー」記念シンポジウム及び記念式典が開催された。この日から、毎年9月5日の「石炭の日(クリーン・コール・デー)」を中心に、石炭エネルギーに関する更なる理解と普及を目的に、石炭PA活動を続けている。

その活動の中で、海外にも知名度をあげてきており、業界の方々にも浸透してきている「クリーン・コール・デー国際会議」は、お陰様で本年度で第30回目という節目の年を迎えた。主催は弊財団、共催は経済産業省(METI)、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)、オールジャパンの体制でこの会議を開催した。また、例年20か国余の大使館州政府から後援名義を頂いているが、コロナの影響もあり、米国をはじめとする在京14か国大使館、カナダ・豪州の4州政府、グローバルCCSインスティテュート(GCCSI)等から、後援名義を頂いた。

本年度は、当初、観客をある程度来場頂きハイブリットでの開催を予定したが、本夏のコロナ感染急増もあり、昨年度同様オンラインで開催した。

本年度は、テーマとして、世界の早急な課題であるカーボンニュートラルをキーに「カーボンニュートラルへの道～コールフロンティアの役割」として、9月21日(火)、22日(水)の2日間で実施した。なお、本年度も、本会議独自のポータルサイトを構築し、その中で、登録～当日の視聴～アーカイブ配信まで全て通して対応できるように計画した。



本年度国際会議ポータルサイト(トップページ)

本会議最後には、例年度同様閉会辞とともにサマリー動画を制作し、JOAL's Statementとともに国内外に発信した。

本会議では、米国、インド、インドネシア、豪州等主要石炭産消国・関係機関・企業、世界石炭協会(WCA)、ASEANエネルギーセンター(ACE)、東アジア・ASEAN経済研究センター(ERIA)等国际機関、日本の経済産業省及び学会等有識者の参加を頂き、24か国から延1,500名の参加者数を得、活発な議論を行った。

以下、概要を報告する。

### 1. 第30回クリーン・コール・デー国際会議プログラム

テーマ:カーボンニュートラルへの道～コールフロンティアの役割

主催:一般財団法人石炭フロンティア機構(JCOAL)

共催:経済産業省(METI)

国立研究開発法人

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)

独立行政法人

石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)

後援:GCCSI、宇部市、オーストラリア、米国他大使館州政府



プログラム:

(敬称略)

総合司会:JCOAL 国際事業部次長 藤田 俊子

#### 1日目(9月21日)

13:00-13:54 開会セッション

13:02-13:05 主催者開会辞 北村 雅良

一般財団法人石炭フロンティア機構(JCOAL) 会長

13:05-13:08 共催者挨拶-I 定光 裕樹

経済産業省資源エネルギー庁資源・燃料部長

13:08-13:11 共催者挨拶-II 小林 出

国立研究開発法人

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 理事

13:11-13:14 共催者挨拶 - III 廣川 満哉

独立行政法人  
石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) 理事

13:14-13:34 基調講演 -I 木村 繁



東アジア・ASEAN 経済研究センター (ERIA)  
エネルギー特別顧問

アジア地域における CCUS の進展と Asia CCUS Network  
の役割

13:34-13:54 基調講演 - II Michelle Manook



世界石炭協会 (WCA)  
事務局長

世界のカーボンニュートラルに向けた技術革新による新たな石炭の役割

14:40-17:00 セッション I

主要国のカーボンニュートラル化への政策動向

モデレーター：学校法人国際大学 (IUJ) 副学長  
国際経営学大学院教授 橘川 武郎

14:45 speech-1 (米国) Jason Begger



米国ワイオミング州  
政府総合実証センター (ITC) 所長

カーボンニュートラルに向けた技術革新の加速化

15:05 speech-2 (インド) Rohit Yadav



電力省中央電力庁 (CEA)  
既設火力部課長補佐

インドにおけるエネルギー政策最新動向

15:25 speech-3 (インドネシア) Ir. Rida Mulyana, M. Sc.



エネルギー・鉱物資源省 (MEMR)  
電力総局長

インドネシアにおけるカーボンニュートラル化政策動向

15:45 speech-4 (豪州) David Lawrence



産業・科学・エネルギー・資源省 (DISER)  
資源庁陸上鉱物・エネルギー局長

豪州-現在そして将来における信頼と責任あるエネルギー  
資源供給

16:05 speech-5 (日本) 土屋 博史



経済産業省資源エネルギー庁  
資源・燃料部石炭課長

カーボンリサイクル政策について

16:25 特別講演 -A 橘川 武郎



国際大学 (IUJ) 副学長  
国際経営学大学院教授

世界と日本の動向：カーボンニュートラル化における石炭と  
アンモニア

2日目(9月22日)

10:30 基調講演 - III Dr. Nuki Agya Utama



アセアン・エネルギーセンター (ACE)  
所長

アジアからのカーボンニュートラル化への期待

10:50 特別講演 -B 笹津 浩司



電源開発株式会社 (J-POWER)  
取締役常務執行役員

2050年カーボンニュートラルと水素社会実現に向けた  
J-POWER グループの取り組み

13:00-15:30 セッション II

カーボンニュートラル化に向けた CCT 技術開発とその  
導入の在り方

モデレーター：東海国立大学機構名古屋大学  
未来材料・システム研究所長 教授 成瀬 一郎

13:10 speech-1 (日本) 小田 俊之

一般財団法人 石炭フロンティア機構 (JCOAL)  
国際事業部長

カーボンニュートラルに向けた石炭火力の使命

13:30 speech-2 (日本) 武田 孝治

株式会社 IHI 執行役員  
資源・エネルギー・環境事業領域長

カーボンニュートラル達成に向けた IHI のソリューション

13:50 speech-3 (日本) 石瀬 史朗

三菱パワー株式会社 常務執行役員  
スチームパワービジネスユニット長  
兼エンジニアリング本部長

持続可能社会実現に向けた先進発電技術の取り組み

14:10 speech-4 (日本) 原田 英一

川崎重工業株式会社 常務執行役員  
水素戦略本部長

技術の最新開発動向：褐炭由来液化水素の活用

14:30 speech-5 (インドネシア) Dr. Mohammad Rachmat Sule  
バンドン工科大学教授  
CO<sub>2</sub>・フレアガス有効利用技術センター長  
インドネシアのエネルギー産業における排出ガス削減策としての CCS 技術

14:50 speech-6 (日本) 小野 透  
一般社団法人日本鉄鋼連盟 特別顧問  
日鉄総研株式会社 常務取締役  
鉄鋼業における 2050 年のカーボンニュートラルに向けた挑戦と課題

15:10 質疑応答



16:30 特別講演 -C 杉山 大志  
キヤノングローバル戦略研究所 (CIGS)  
研究主幹



脱炭素政策の経済的・地政学的帰結とトランジションにおけるクリーン・コールの役割

17:00-18:30 セッション III パネルディスカッション/  
カーボンニュートラルへの道～コールフロンティアの役割

モデレーター：東京大学公共政策大学院教授 有馬 純

パネリスト 1 Dr. Nuki Agya Utama

アセアン・エネルギーセンター (ACE) 所長

パネリスト 2 杉山 大志

キヤノングローバル戦略研究所 (CIGS) 研究主幹

パネリスト 3 Bikas Chandra Mallick

電力省中央電力庁 (CEA) 既設火力部部長

パネリスト 4 Michelle Manook

世界石炭協会 (WCA) 事務局長

パネリスト 5 秋元 圭吾

公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE)

システム研究グループリーダー

18:50 閉会辞 / 会議総括

塚本 修

一般財団法人石炭フロンティア機構 (JCOAL) 理事長 /

クリーン・コール・デー 2021 実行委員長

## 2. 主催・共催挨拶要旨概要

主催者開会辞



JCOAL 会長 北村 雅良

【要 旨】

- 今年度の会議も、昨年度に続き感染症対策の観点から、オンライン会議方式となったが、講演、ディスカッションに登壇する国内外の皆様、Web 参加の皆様にご心から感謝致したい。また、国際会議の開催にあたり、共催者の METI、NEDO、JOGMEC をはじめ、各国大使館や国際機関等の関係者の方々のご支援に厚く御礼を申し上げる。
- 今回の会議のテーマは「カーボンニュートラルへの道～コールフロンティアの役割」で、この 2 つのキーワードにつき私の考えを申し上げたい。
- 「カーボンニュートラル」とは、化石資源を「使うのをやめる」のではなく、化石資源の利用に伴う CO<sub>2</sub> 排出を森林・海洋等の CO<sub>2</sub> 吸収源とのバランスにおいて世界全体でネットゼロに抑えようということである。地球の生態系が持つ吸収能力を超えて排出し続ける状態にプレーキをかけようという意味で、そのバランス均衡を実現する目標年が 2050 年とされているのだと理解する。石炭を始めとする化石資源は、発電、製鉄、セメント、化学工業、交通手段等あらゆる分野で社会の基盤を支えており、気候変動対策の観点から解決すべき課題は、CO<sub>2</sub> エミッションを抑えることであり、CO<sub>2</sub> 排出の多い化石資源利用方法を漫然と続けることが問題である。
- とりわけ石炭は、利用時の CO<sub>2</sub> 発生量が相対的に大きく、排出抑制への要求が最も高いため、まず、高効率化による低排出化 (HELE) 技術の適用拡大を行う。次いで、CO<sub>2</sub> 自体をキャプチャーし、再利用や地中貯留する所謂 CCUS 技術の実装へのチャレンジが求められる。これら技術を組合せれば、石炭から CO<sub>2</sub> フリー水素を製造する所謂ブルー水素の実現も可能になる。発電用燃料、製鉄・化学品原料としても石炭利用に伴う CO<sub>2</sub> 排出の抜本的低減、更にはゼロエミッション化ができれば石炭は人類を支える資源選択肢の一つであり続けて良いはずであり、石炭利用の新しい世界が私たちが挑戦すべき「コールフロンティア」だと考える。
- 世界の国々では、エネルギー資源の賦存条件やコスト条件、更に経済発展の度合いが国によって大きく異なる現実があり、各々の国に見合った方法で最適なエネルギー選択と技術の組合せを見つけ、トランジションしていくべきである。気候変動枠組み条約が掲げる「共通だが差異のある責任」原則の下で、世界全体で 2050 年のカーボンニュートラル実現にチャレンジしていくことが大切である。現時点で特定のエネルギーを選んだりあるいは排除したりすることなく、多くの選択肢を保持しながら、必要な技術革新にチャレンジし、CO<sub>2</sub> 排出抑制に貢献する取組みを加速し、共に「コールフロンティア」を目指していきたい。私たちの取組みが、国連 SDGs の目標である「誰も置き去りにしない」持続可能で多様性と包摂性のある社会の実現に繋がることを心から願う。

共催挨拶 -I

経済産業省資源エネルギー庁  
資源・燃料部長 定光 祐樹



【要旨】

- 世界石炭協会のマヌーク事務局長、ASEAN エネルギーセンターのヌキ所長をはじめとする参加者の皆様、開催・運営に当たってご尽力されてきた北村会長、塚本理事長、他事務局の方々に、改めて敬意を表す。
- この国際会議は1992年以来、今年で30回目となり、長い歴史の中で、エネルギーを取り巻く状況は大きく変化してきた。9月5日を「クリーン・コール・デー」と制定した当時は、エネルギーが低廉で安定的に供給されることが強く意識された時代であったが、現在は、世界的に「脱炭素化」が意識される時代となった。
- こうした潮流も踏まえ、日本は2020年10月、2050年にカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。そして、「経済と環境の好循環」を実現すべく、2020年12月にグリーン成長戦略を策定した。この中で、水素・アンモニア等の脱炭素燃料やカーボンリサイクルといった成長分野に重点的に取り組み、次なる成長に繋げていく道筋を具体的に示した。特にカーボンリサイクルについては、カーボンニュートラル実現のキーテクノロジーとして位置付け、日本がイノベーションをリードしていくこととしている。
- こうした中、石炭に対する環境上の懸念が示されているが、開発途上国を中心に環境と経済発展の両立のため、地域によっては依然として石炭が必要とされているのが実情である。
- そのため、この会議をカーボンニュートラル実現という新たな目標に向けて、高効率でクリーンな石炭火力技術をどのように活用できるのかについて議論するプラットフォームとしていきたいと考える。
- カーボンニュートラルに向けた石炭火力の高効率化については、日本は次世代の高効率石炭火力発電技術である石炭ガス化複合発電(IGCC)や石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)等の技術開発・実証を実施している。また、広島県大崎上島をカーボンリサイクル実証研究拠点として位置づけ、技術開発を集中的に実施し、CO<sub>2</sub>を活用したコンクリートの実現など着実に成果を出している。
- カーボンニュートラルも含めた地球規模の課題解決のためには、国際連携の強化による非連続なイノベーションの力が必要である。本会議では、「カーボンニュートラルへの道」というテーマについて、活発な議論が行われ、関係各国の理解が一層深まるとともに、未来志向の新しい協力関係が構築されることを期待している。

(文責：藤田)

共催挨拶 -II

国立研究開発法人  
新エネルギー・産業技術総合開発機構  
(NEDO) 理事 小林 出



【要旨】

- 第30回クリーン・コール・デー国際会議開催にあたり、共催者として、新エネルギー・産業技術総合開発機構、NEDOを代表し、ご挨拶申し上げます。
- 現在、2050年カーボンニュートラルの達成に向け、風力、太陽光を主とした再生可能エネルギー導入が世界中で進められる中、火力には、極端な負荷変動への追従性と慣性力の確保という、従来とは異なる、しかし大変重要な機能が求められている。
- 特に北東アジアはガス供給をLNGに頼らざるを得ず、LNGは大変重要なエネルギーであるが、コストは高く、しかも備蓄が難しいため市場はどうしても不安定になる。ガスに比べて発電量当たり約2倍のCO<sub>2</sub>を出すとは言え、アジアにおいて石炭の役割を過小評価することは、エネルギー安全保障の観点からは全く不適切である。
- 勿論、2050年カーボンニュートラルを目指すという目標の下で石炭を活用するためには、CO<sub>2</sub>処理という問題を直視する必要がある。このため、現在、NEDOは、経済産業省の支援の下で、CCS、カーボンリサイクル技術の開発・実証に取り組んでいる。
- 例えば、広島県大崎上島の「大崎クールジェンプロジェクト」では、電源開発株式会社、中国電力株式会社と共に、石炭をガス化して水素を製造しつつ、発生するCO<sub>2</sub>を効率的に分離・回収し、水素・ガス火力と燃料電池で複合発電を行う実証事業を行っている。また、同地では石炭フロンティア機構と共に、回収したCO<sub>2</sub>を活用した、バイオ燃料や化学品、炭酸塩などのカーボンリサイクルの研究開発拠点の設置に取り組んでいる。更に、それ以外にも、苫小牧でのCCS実証、CO<sub>2</sub>の運搬、その他CO<sub>2</sub>排出削減・カーボンリサイクルプロジェクトを多数手がけている。
- また、既存石炭火力からのCO<sub>2</sub>排出削減を実現するため、石炭火力発電ボイラーへのアンモニア混焼技術の実証研究を、株式会社JERA、株式会社IHIと協力して行っている。
- 海外では、豪州政府とも連携し、褐炭ガス化・水素精製と、豪州から日本への一連の国際間大規模水素サプライチェーンの実証を、参加企業と協力して実施している。
- 以上の事業に加え、昨年度補正予算で新たにNEDOに設置され2兆円の「グリーンイノベーション基金」も活用しつつ、カーボンリサイクルに関連したプロジェクトに向けて取り組む企業に対し、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援していく。

このような取り組みの成果が広く社会に普及してこそ、2050年のカーボンニュートラル実現が可能と考える。NEDOとしても、このような技術の研究開発・実証・実装・普及に向けた努力を続けていきたい。

(文責：NEDO)

## 共催挨拶 -III

独立行政法人  
石油天然ガス・金属鉱物資源機構  
(JOGMEC) 理事 廣川 満哉



## 【要旨】

- 昨年の政府の「2050年カーボンニュートラル」宣言表明を受け、JOGMECでは今年4月に「カーボンニュートラル・イニシアティブ」を策定した。
- その中の基本方針の一つである「クリーンな資源エネルギーへの取組強化」の一環として、石炭部門では、低炭素・環境改善に貢献する取組を実施中である。これはCCD国際会議のテーマである「カーボンニュートラルへの道」にも関係している。
- まず、石炭を「クリーンな資源エネルギーとして利用する取組み」として、従来、一部の民間企業などで推進してきた褐炭水素化事業に着目し、国内外の褐炭資源ポテンシャル及び褐炭水素化の技術動向を把握するとともに、実際のプロジェクトの商業化に向けて支援する取組を開始している。
- 豪州ビクトリア州において、褐炭水素化プロジェクトが進展しており、ビクトリア州政府と協力関係を有するJOGMECでも実用化に向けて積極的に支援している。また、輸出に不向きで、これまで注目されてこなかった世界中に分布する褐炭の賦存状況や炭質を改めて整理・把握し、併せて褐炭水素化に不可欠なCO<sub>2</sub>の処分適地を調査する等水素社会の実現のために褐炭水素化の可能性を追求していく意向である。
- 更に、カーボンリサイクル事業として、水素化等のプロセスで発生するCO<sub>2</sub>を地中空洞や旧坑道に固定化する技術の研究を産官学で開始した。
- 具体的にはCO<sub>2</sub>をCa等の陽イオンと反応させ、セメントスラリー状態で圧送充填することにより、空洞や旧坑道を安定化させる技術であり、CO<sub>2</sub>の処分と同時に地盤沈下や陥没等の鉱害防止対策としても、その効果が期待される。
- このように、資源エネルギーとして石炭資源の安定供給を確保しつつも、脱炭素化の社会ニーズに対応して、石炭をクリーンなエネルギーとしても活用できるよう多角的なテーマに対して、今後ともJOGMECは積極的に取り組んでいく。

(文責: JOGMEC)

## 3. 基調講演

## 基調講演 I

「アジア地域におけるCCUSの  
進展とアジアCCUS Networkの役割」

東アジア・ASEAN 経済研究センター (ERIA)  
エネルギー特別顧問 木村 繁



## 【要旨】

- 本年6月に正式発足したAsia CCUS Network (アジアCCUSネットワーク: ACN) について説明する。ERIAはこのACNの事務局として経産省の活動を支援している。

- ERIAの1次エネルギー供給量の予測では、省エネや再エネの大胆な導入を仮定しても、2017年に77%だった化石燃料の比率は2050年には87%(BAU)や82%(APS)になり、CO<sub>2</sub>排出量も同比で2.3倍になるため、CCUS等のCO<sub>2</sub>削減技術の活用が不可欠である。
- ERIAは2020年11月に第3回East Asia Energy Forum (EAEF3)を第38回ASEANエネルギー大臣会合(AMEM38)及びASEAN Energy Business Forum 2020 (AEBF2020)の枠組みの中で開催、ACNの設立がアジア地域でのCCUSの進展と商業化への移行に欠かせず、Capture-Transport-Storageで構成されるCO<sub>2</sub>バリューチェーン構築の基礎になることを確認、同週開催の第14回EASエネルギー大臣会合で日本が提案したACNの重要性が認識された。
- 本年6月22、23日、第1回Asia CCUS Network ForumがERIA西村事務総長、梶山経産大臣の開会の辞で開催され、本Networkが正式発足した。ERIAは本NetworkのWebsiteも立ち上げ、CCUSへの周知を図っている。

## 基調講演 II

「世界のカーボンニュートラルに向けた  
技術革新による新たな石炭の役割」

世界石炭協会 (WCA) 事務局長  
Michelle Manook



## 【要旨】

- 2014年～2018年、新興国では石炭火力発電容量は319GW以上増加しており、IEAは、石炭は今後もエネルギーの一翼を担い続け、2040年まで世界の電力の22%を生成し、石炭火力が直面しているCO<sub>2</sub>排出問題もクリーン・コール技術で対応することができると述べている。
- CO<sub>2</sub>排出の問題への世界の戦略には石炭の世界的貢献が考慮されておらず、排出量削減効果も出ていない。
- 脱炭素化の複雑さや、どこから始めるのか、移行によるコストとメリットが理解されていないことが問題である。また目標達成のために、費用対効果を最大化するための投資判断が必要となる。この観点から再生可能エネルギーだけをを用いた解決策では、シナリオ実現は不可能であろう。
- 石炭は電力や産業の構成要素のみならず、再生可能エネルギーのインフラ構築にも必要な主要素であるため、再生可能エネルギーと石炭は互いに必要な存在である。
- WCAは、自身の脱炭素化方針を持っている国をサポートする。

## 4. 特別講演

### 特別講演 A

「世界と日本の動向：カーボンニュートラル化における石炭とアンモニア」

国際大学 (IUJ) 副学長  
国際経営学大学院教授 橋川 武郎



#### 【要旨】

- 石炭とアンモニアの役割に注目しながら話をする。日本では、昨年(2020年)10月26日、菅首相は2050年のカーボンニュートラルを表明、それに先立つ10月13日に、JERAが「2050ゼロエミッション」方針を発表した。その中心は石炭火力をアンモニア火力へ、LNG火力を水素火力へ置換し、再エネ変動電源をカーボンフリー火力発電で出力調整することで、火力も含めたカーボンニュートラルが実現するとしている。遡ること昨年4月22日、菅首相は気候サミットで「2030年GHGを13年比46%削減」を表明し、それまでのNDC「26%削減」を大幅に引き上げている。
- 2030年の新電源構成では、ゼロエミッション電源は15ポイント増で59%、火力電源はLNG及び石炭火力はいずれも7ポイント減で41%に減少する。これには4つの問題がある。①再エネ電源36～38%の達成困難、②原子力20～22%の達成困難、それら未達分15%は火力で賄う。③石炭・天然ガス電源の縮小と世界の天然ガス争奪で3E (Energy security, Economy, Environment) が課題となる。そのため、日本政府はカーボンニュートラルへの道筋として、①電源 zero emission 化、②非電力分野の電化率38%と水素還元製鉄や燃料電池車等による低炭素化、③炭素除去(植林、DACCS)が示した。
- 一方、RITEでは2050年に向けた7シナリオを示し、発電コスト(2050年)は現行を大きく上回ると試算した。つまり、カーボンニュートラル実現にはコスト削減が最大の課題であり、そのためには、①イノベーションによる既存インフラの徹底的活用、②バイオマス、アンモニアの活用がカギである。既設ガス管を使うためのメタネーション、石炭火力をカーボンフリー燃料であるアンモニアやバイオマスに置き換え、現実的な形でカーボンニュートラルを非OECD諸国で実現していくことが見えてきたのではないかと。

### 特別講演 B

「2050年カーボンニュートラルと水素社会実現に向けた J-POWER グループの取組み」

電源開発株式会社 (J-POWER)  
取締役常務執行役員 笹津 浩司



#### 【要旨】

- J-POWERは、2021年2月に2050年カーボンニュートラル実現に向けた「J-POWER「BLUE MISSION 2050」」を公表した。人々の求めるエネルギーの不断の提供、ステークホルダーとの価値共有、SDGs貢献に取り組む。

- これまでの経験や技術開発を活かし、2050年に発電事業のCO<sub>2</sub>排出ゼロを目指す。マイルストーンとして、2030年にCO<sub>2</sub>排出40%削減を目標に、その一つとして、石炭からの「CO<sub>2</sub>フリー水素」製造を通じて水素社会実現に貢献すべく、段階的に取り組む。
- J-POWER「BLUE MISSION 2050」では、「加速性」、「アップサイクル」を優先したアクションプランを策定し、3柱で(①石炭火力+石炭ガス化+CCUS/カーボンリサイクル、②CO<sub>2</sub>フリー電源=再エネ+原子力、③電力ネットワークの安定化・増強)を進める。
- 石炭の持つ強みを生かして、石炭からCO<sub>2</sub>フリー水素エネルギーへの移行を目指す。  
J-POWER GENESIS Visionでは、石炭+バイオマス+その他固形燃料→ガス化炉・ガス精製設備→CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>、更に、システム拡張性を生かした水素発電、CCS、CCU/カーボンリサイクル、CO<sub>2</sub>フリーH<sub>2</sub>等への展開を進める。
- 国内初の海外炭火力の松島火力にガス化システムを組合せたJ-POWER GENESISシステムにより、CO<sub>2</sub>フリー水素発電の第一歩を踏み出す(2024着工2026運開を予定)。既存設備へ大崎クールジェンプロジェクトで培ったコア技術に新技術を組合せ、電力安定供給を維持しつつ、経済合理性を持って早期の環境負荷低減化の実証を期待する。事業環境の変化に柔軟に対応しつつ、段階的にカーボンニュートラルを実現を目指すものであり、将来的に石炭とバイオマスの混合ガス化とCO<sub>2</sub>分離・回収の組合せによりCO<sub>2</sub>ネガティブエミッション化するとともに、出力調整機能などの高い運用性・機動性により、再生可能エネルギーの大量導入にも貢献する。
- また、酸素吹き石炭ガス化技術を活用した豪州褐炭ガス化水素プロジェクトは、褐炭ガス化水素製造から輸送、荷役までのサプライチェーン技術を実証すべく現在進行中である。

### 特別講演 C

「脱炭素政策の経済的・地政学的帰結とトランジションにおけるクリーン・コールの役割」

キヤノングローバル戦略研究所 (CIGS)  
研究主幹 杉山 大志



#### 【要旨】

- 本講演では前半で脱炭素における地政学上の大きな変化、後半でエネルギー転換における石炭の位置付けについて説明する。
- 脱炭素社会では化石燃料は使わないが、鉱物資源を大量に使用する。鉱物資源の生産国は石油やLNGよりも特定国に集中しており、安定供給が心配だ。鉱物資源は加工過程で中国への依存が高い。
- 石炭は、欧州では脱炭素化で新規建設はなく投資も止まっているが、中国では新規建設を8000万Kw予定、内、海外向建設が72%、中国の銀行が資金提供している。

- IEAのネットゼロシナリオでは2021-2030年の投資は石油かLNGに限定される。石炭は建設中か承認済みのもののみ投資が可能である。
- 米バイデン政権は、「2050年までに温室効果ガスの実質排出ゼロを達成」を公約に気候変動対策に積極的だ。しかし、共和党は反対し、産炭州と産油州でも温度差がある。
- CO<sub>2</sub>を大幅に削減するには電力の脱炭素化と経済の電化が必須である。これには2つの課題がある。①電気料金高騰による急速な脱炭素化は電化を妨げ機能しない、②安定で安価な電気料金で電化し脱炭素化を図るには石炭は重要な役割を持つ。
- 結論として脱炭素化は、地政学的な懸念があるが、次案で対応を主張する。
  - (シナリオ A) 2050 Net Zero 対応: CCS や DAC に安価で豊富な石炭を使用する
  - (シナリオ B) 開発優先: 開発のための石炭利用と「電化優先」を行う。

## 5. パネルディスカッション纏め



(モデレーター／有馬教授)

- カーボンニュートラルを2050年、あるいはそれ以降で達成する目標を120か国超の国々が掲げているが、実情、自然条件、地理的条件、経済的条件等の様々な条件並びにカーボンニュートラル化に向けた技術開発や国際連携ができる国に限られていることから、全ての国が達成できるとは限らないことが現実である。
- カーボンニュートラルに向けて、石炭をめぐる議論がクローズアップされている。今年6月のG7サミットの首脳声明では、2030年代の石炭利用フェードアウト、石炭火力に関するパブリックファイナンスの停止等が盛り込まれた。一方G20では、石炭利用停止に関するメッセージはなく、石炭をクリーンに活用するメッセージが全面に出、G7とそれ以外で状況が異なった。
- 再生可能エネルギーへの期待が高まっているが、変動制の再生可能エネルギーで電力を賄うのは非常に難しい。欧米の一部の国では再生可能エネルギーと原子力で電力のカーボンニュートラルを達成できるかもしれないが、新興国や東南アジアを含めた多くの国では、化石燃料、特に埋蔵量が多く、安定供給可能な石炭を使わざるを得ない実態がある。カーボンニュートラルで重要なのはCO<sub>2</sub>排出を抑えること、排出したCO<sub>2</sub>を実質的にゼロにすることである。
- 各国のカーボンニュートラルに向けた現実的な解として、非効率な石炭火力のフェードアウト、それ以外はCO<sub>2</sub>低減策の徹底、具体的には既存の石炭火力発電所のバイオマス、アンモニアの混焼、最終的にはバイオマス、アンモニアの専焼火力への転換、CCUS等各種技術とその国々の実情に合わせて、最適な技術の組み合わせを見つけ、実装していくことと考える。
- アジアでは引き続き石炭が役割を担っていくという中で、新しい石炭火力、つまりはCCUSによってCO<sub>2</sub>削減に貢献する革新的なCCTについて考えることが今後の世界の石炭火力の新しい使い方と言えるのではないかと考える。
 

(パネリスト／CIGS 杉山研究主幹)
- 今後も石炭火力を使わなければならないASEAN等から声を上げて欲しいが、日本としてもきちんと積極的に主張すべきである。電力を必要としている国の石炭火力を整備することは、先進国の責任。日本政府も考え方を見直した方が良い。
 

(パネリスト／RITE 秋元 GL)
- 私は、ファイナンスの観点から話す。日本政府を含め先進国は石炭に対して距離を置こうとしている。金融機関からの石炭に対するネガティブな対応があるが、本当に金融機関がこの問題を理解しているのか。二元論がわかりやすいので、単純に「石炭はだめ」と言っているのではないかと。雰囲気のように醸成されたため皆同じ方向に向いてしまったのではないかと。グリーン水素、バイオマス、アンモニア混焼やCCS等転換するためには、最後に完全なグリーン化に向かうカーボンニュートラルに関する技術としてCCTが見直されていることでもう一度考え直す切欠にできるのではないかと。これを国際金融機関を含め理解頂きカーボンニュートラルの道に繋がることをしっかりアピールすることが大事である。
 

(パネリスト／WCA Manook 事務局長)
- ファイナンス投資セクターは公平にきちんとした根拠を用い検討し、それが与える影響を考えた上で判断してほしい。この会議に参加している人にリーダーシップを発揮して頂きたい。この点で日本は重要な役割を果たすことができる。我々も協力する。石炭産消国とも技術的に協力することが重要である。きちんと実証示すことが重要で、これを人々に理解してもらえば、どのような技術でどのような世界になるのかが理解頂けるようになり、石炭の有用性が理解してもらえる。
 

(パネリスト／ACE Nuki 所長)
- それぞれの地域で状況が異なり、異なる環境にある。それぞれが使っている技術や資源において再エネのポテンシャルを全て見た上で、それぞれの国で最適で適正な手法を見つけていかなければならない。それによって経済目標も達成する。各国により社会的、経済的、エネルギー的状況は全く異なる環境の中でエネルギーの将来を考えなければならない。人を中心に考え、他国がどう考えるかではなくまずは自国の中で手ごころな価格のエネルギー供給をどの実現できるのかを考える必要がある。

(パネリスト／印 CEA Mallick 部長)

- Nuki 氏に全く同意だ。各国、それぞれの状況が全く異なる。自分たちの国にある資源を理解しなければならない。どれが Affordable であるのか決めていく必要がある。そこで適正なエネルギー構成を考えていく。CCUS 等様々な技術があるが、商業的にまだ使えるような状況ではない。技術そのものが利用可能であり活用できる状態になっていることが大事である。特にインドでは、エネルギーの構成は常に問題として挙がるが、Affordability を元に決めていく。

(モデレーター／有馬教授 [纏め])

- 非常にリッチな議論をさせて頂き、私がまとめるのは非常に難しいが、幾つかキーワードが出てきた。
- 一つは、多様性。各国が置かれた状況、発達段階、エネルギー状況が異なるため多様性を尊重しなければならない。
- 一方、インドと ASEAN の両方から出てきたのは、Affordability。社会を牽引するエネルギーは、Affordable なコストで提供されなければならない。
- それから、Responsibility。各国の発展に影響を与えるエネルギーに影響する議論は責任を持った議論でなければならない。無責任で二元論的な Ideological な議論は押し付けてはならない。
- もう一つのキーワードは技術。特定のエネルギーを排除するのではなく、究極の目的であるカーボンニュートラルを実現するのは技術であり、従来型の HELE 型技術が引き続き重要であることも改めて認識した。そこから更に Innovative CCT、例えばアンモニア混焼、バイオマス混焼、その後の専焼化、あるいは CCUS 等の技術があり、脱炭素化と整合性がある CCT が出てきている。その意味から従来とは異なるコールフロンティアというステージを開いていくのが必要ではないか。
- 最後のキーワードはコミュニケーション／発信である。石炭の役割を国内で経済発展・国の安全保障を担っている人に理解してもらおう。政治家は金融機関の影響を受けている。社会経済・世界経済あるいは将来のある途上国の経済がへたってしまうことでは意味がない。持続的発展のためにも金融機関いろいろな技術転換を受け入れる議論をオープンマインドで取り入れられるよう喚起しなければならない。

## 6. JCOAL 塚本理事長による閉会辞及び総括



(CCD2021 実行委員長)

- 2日間に亘り開催した第30回クリーン・コール・デー国際会議は皆様のご協力ご支援により無事終了した。コロナ禍の中、昨年度に続き2回目のオンライン形式での開催であったが、24カ国延べ1500人の参加者を得て活発な議論が行われた。
- 共催頂いた METI、NEDO、JOGMEC をはじめ、ご後援頂いた在京大使館・内外の関係機関、更には講演やパネリストをお務め頂いた方々、そして2日間に亘り熱心に参加頂いた全ての皆様に心から感謝とともに御礼申し上げたい。
- 今回のテーマ「カーボンニュートラルへの道～コール・フロンティアの役割」のもと、2日間の会議を総括して、クロージング・リマークスとして JCOAL Statement (下記参照) を述べる。本日示した2日間の国際会議の議論は、JCOAL's STATEMENT として国内外に発信する。
- 来年度はリアルでの開催で皆様とお会いできることを祈念する。

### < JCOAL's Statement >

**JCOAL's STATEMENT**

- 2050 年のカーボンニュートラルへ加速している世界的な潮流の中、すべての国が役割を達成できなければならない。自然条件、地質的条件、経済的条件、社会的責任等の条件等々の違いはエネルギー政策の立案において異なるため、カーボンニュートラルを達成することは、相違点に留意する必要がある。カーボンニュートラルに対応できる技術開発や国際連携を促進することが重要視されている。再生可能エネルギーも最大限導入する中、一方、再生可能エネルギーだけで電力を賄うことは難しい。
- 新興国や発展途上国等々では、現在使われている化石燃料、特に埋蔵量が豊富安定した供給可能な石炭を脱却するも得がたい事実である。カーボンニュートラルに不可欠なものは、電力 CO<sub>2</sub> 排出削減ととも、排出された CO<sub>2</sub> を実質的にゼロにすることであり、石炭を含む化石燃料を使わないという意味ではない。
- 再生可能エネルギーの導入を最大限に推進しながら、非化石再生エネルギーの導入を進める一方、それ以外の化石火力発電所は削減した CO<sub>2</sub> 削減を達成することが必要である。この点として、脱炭素化石火力発電での代替やアンモニアの混焼、専焼火力への転換等 CO<sub>2</sub> 発生削減策をとると、更に CO<sub>2</sub> の CCS/CCUS (CO<sub>2</sub> の分離、回収、再利用、貯蔵) の導入が期待される。その国や地域に合ったカーボンニュートラルに向けた最適な技術、手段の組合せを各国ごとに見出す必要があるが、従来のカーボンニュートラルの解ではない。
- カーボンニュートラルに向けたエネルギー移行期においては、とりわけ途上国や CCT (クリーンコールフロンティア) の国は、資金・人材・資金の面で、カーボンニュートラル実現には、政府のみならず民間によるファイナンス支援が必要である。また、カーボンニュートラルに関する広範な CCT (Innovative CCT) 技術開発と社会実装させるためには、中国や韓国等々を含めた地球規模での国際連携が重要である。「アジア CCUS ネットワーク」の発展による新たなネットワークの構築と ASEAN と連携強化によるカーボンニュートラルの推進は、極めて重要な意味を持つ。
- 脱炭素化石火力の移行、CCS/CCUS による CO<sub>2</sub> の削減等により、カーボンニュートラルに貢献する進化した CCT を開発、社会実装し、石炭の有効な利用を促すのが JCOAL が目指す「コールフロンティア」である。今後の世界の化石火力の削減は重要である。

# 日本のエネルギー政策をめぐる動向

総務部広報室 佐々木 信平

## 1. はじめに

日本のエネルギー政策は、エネルギー政策基本法（平成 14 年法律第 71 号）に基づいて策定される「エネルギー基本計画」に沿って進められている。エネルギー基本計画は、エネルギー基本法で明らかにされたエネルギー政策の基本方針である「安定供給の確保」、「環境への適合」及び「市場原理の活用」に則り、エネルギーの需給に関する施策の長期的、総合的かつ計画的な推進を図るために策定される。平成 15 年（2003 年）に第 1 次エネルギー基本計画が閣議決定されて以降、現在まで 6 次にわたり策定されてきた。

最新版である第 6 次エネルギー基本計画は、本年 10 月 22 日に閣議決定された。昨年 10 月より総合資源エネルギー調査会基本政策分科会（経済産業大臣の諮問機関）において議論が行われ、今年 7 月の素案公開後、パブリックコメント内容を踏まえて、策定された。その中で示された 2030 年度の電源構成としては、再生可能エネルギー比率を 36 ~ 38%（第 5 次では 22 ~ 24%）、石炭は 19%（第 5 次では 26%）とされた。

本年 10 月 4 日に新政権が発足されて以降、エネルギーや環境政策に関する政策の方向性にどのような影響が生じるか、関心が集まっており、カーボンニュートラルやデジタル化という世界的な潮流や、電力の価格高騰、需給の不安定化といった不安要素も抱える現状にあって、利用可能な技術を総動員する方針を示したと見られている。

## 2. 第 6 次エネルギー基本計画の策定経緯

今般閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画は、今年 7 月 21 日に開催された「総合資源エネルギー調査会基本政策分科会」（※以下、基本政策分科会）にて公表された素案がベースになっている。

基本政策分科会では、3E + S のバランスをとりつつ、いかに各エネルギーの特徴を踏まえたエネルギーミックスを構成していくかという点を中心に、審議が行われてきた。

日本政府は、2020 年 10 月に「2050 年までに温室効果ガス排出を実質ゼロ」を目指すと表明し、本年 4 月には「2030 年度の温室効果ガス削減を 2013 年度比 46%削減」とする目標を示した。これを受けて、経済産業省では、2030 年に向けて、現状の延長で想定できる技術の活用が中心であるとの考えを示しつつ、主

な論点に「省エネの深掘り」と「非化石エネルギーの導入拡大」を挙げて、2030 年に向けた政策の検討を進めてきた（図 1, 2）。

具体的には、省エネ法などの規制的措置と支援的措置のバランスを、どのように取りながら進めるかについて、基本政策分科会を中心に議論が行われた。また、非化石エネルギーの導入拡大に関連して、再エネの主力電源化に向けた取組や、原子力政策の再構築、火力発電の今後の在り方等について、検討された。

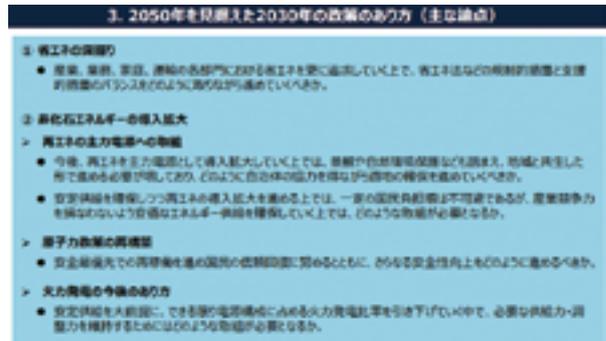


図 1 2030 年削減目標に向けた政策策定にあたっての主な論点（令和 3 年 5 月 24 日「第 3 回 気候変動対策推進のための有識者会議」等 資料より）

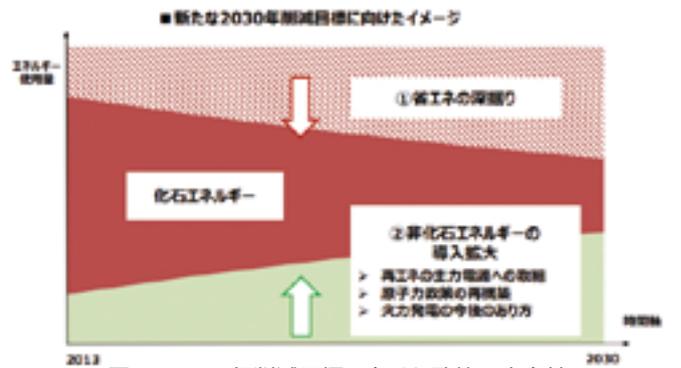


図 2 2030 年削減目標に向けた政策の方向性（令和 3 年 7 月 13 日「第 45 回 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会」資料より）

こうした議論や検討を踏まえて、今般閣議決定された、第 6 次エネルギー基本計画では、2050 年カーボンニュートラル実現と 2030 年度温室効果ガス 46%削減（2013 年度比）の実現等に向けた気候変動対策と併せて、国内のエネルギー需給構造が抱える課題に対して、安全性の確保を大前提とした安定供給の確保やエネルギーコストの低減（S+3E）に向けた取組を進める方針が示されている。

### 3. 第6次エネルギー基本計画の概要

第6次エネルギー基本計画は、主として、①東京電力福島第一原子力発電所事故後10年の歩み、②2050年カーボンニュートラル実現に向けた課題と対応、③2050年を見据えた2030年に向けた政策対応、から構成される。

原子力発電については、「東京電力福島第一原子力発電所事故の経験、反省と教訓を肝に銘じて取り組むことが、エネルギー政策の原点」と明記された。2050年カーボンニュートラルや2030年度温室効果ガス46%削減(2013年度比)の実現にあたっては、従来のエネルギー基本計画と同様、2030年度における電源構成を全体の20～22%とされている。

これまで、基本政策分科会における議論では、原子力の位置づけについて、「安全性を優先させ、国民の懸念の解消に全力を挙げる前提の下、原子力規制委員会により世界で最も厳しい水準の規制基準に適合すると認められた場合には、その判断を尊重し原子力発電所の再稼働を進める。国も前面に立ち、立地自治体等関係者の理解と協力を得るよう、取組む」との方針が示されていた。

原子力は、新增設がない場合、原則40年となっている原発の運転期間を60年に延長し、建設中の3基を加えても2050年には23基、2060年には8基まで減ることが見込まれている。一部報道では、政府が新增設や建替を見送り、原発運転の法定期間を延長することを検討していると報じられた。これに対し、安全性に不安が強い老朽原発を延命するのではなく、新增設を議論すべき、との指摘も聞かれる。

再生可能エネルギーの扱いについては、「S+3Eを大前提に、再エネの主力電源化を徹底し、最優先の原則で取組み、国民負担の抑制と地域との共生を図りながら最大限の導入を促す」と明記された。

導入量については、本年7月の素案公表時において、現時点で具体化されつつある政策を最大限・確実に実施することで到達する水準として「3,130億kWh」が示されていたが、2030年の46%排出量削減に向けて、もう一段の野心的な取組が必要との指摘がなされていたことから、確定版では、230～400億kWhの追加導入を見込み、合計約3,360～3,530億kWh(36-38%)の再エネ導入を目指す。

具体的な対応策としては、地域と共生する形での適地確保、コスト低減、系統制約の克服、規制の合理化、研究開発などを着実に進めていくことで、国民負担の抑制や、電力システム全体での安定供給の確保、地域と共生する形での事業実施を確保しつつ、導入拡大を図っていく、とされた。これまでの議論では、系統増強等を通じた風力の導入拡大、地域共生型再エネ導入の推進、民間企業による自家消費促進、現行ミックスの達成に向けた施策強化、公共施設での太陽光発電の導入等が示されていた。

一方で、これまでの基本政策分科会における議論では、2030年までの限られた時間軸では削減目標の達成には不十分との指摘もあり、導入量について更なる検討が求められるとの意見が一部委員より出されている。

2050年カーボンニュートラル実現に向けた、各分野への課題と対応としては、電力部門では、再エネや原子力などの実用段階にある脱炭素電源の活用により、着実に脱炭素化を進めるとともに、水素・アンモニア発電やCCUS/カーボンリサイクルによる炭素貯蔵・再利用を前提とした火力発電などのイノベーションを追求していくことが求められる、とされた。

産業・業務・家庭・運輸からなる非電力部門では、徹底した省エネルギーによるエネルギー消費効率の改善に加え、脱炭素化された電力による電化が採用可能な分野においては電化の推進が求められる、とされた。一方で、電化が困難な部門(高温の熱需要等)では、水素や合成メタン、合成燃料の活用などにより脱炭素化を推進するとして、特に産業部門において、水素還元製鉄や人工光合成などのイノベーションを進めていくとされている。

火力発電については、非化石電源の導入状況も踏まえながら、安定供給確保を大前提に、火力発電の比率をできる限り引き下げていくことが基本とされた。一方で、震災以降の電力の安定供給や電子レジリエンスを支えてきた重要な供給力であり、当面は再生可能エネルギーの変動制を補う調整力・供給力として必要であることから、過度な退出は抑制するなど、安定供給を大前提に進めていくとされた。

こうした方針の下、今般公表された2030年度における電源構成では、徹底した省エネルギーや非化石エネルギーの拡大を進める一方で、エネルギー安全保障の観点から、天然ガスや石炭も重視する火力ポートフォリオが維持された。LNG火力は20%、石炭火力は19%、石油火力等は最後の砦として必要最小限の約2%程度とされた(図3)。

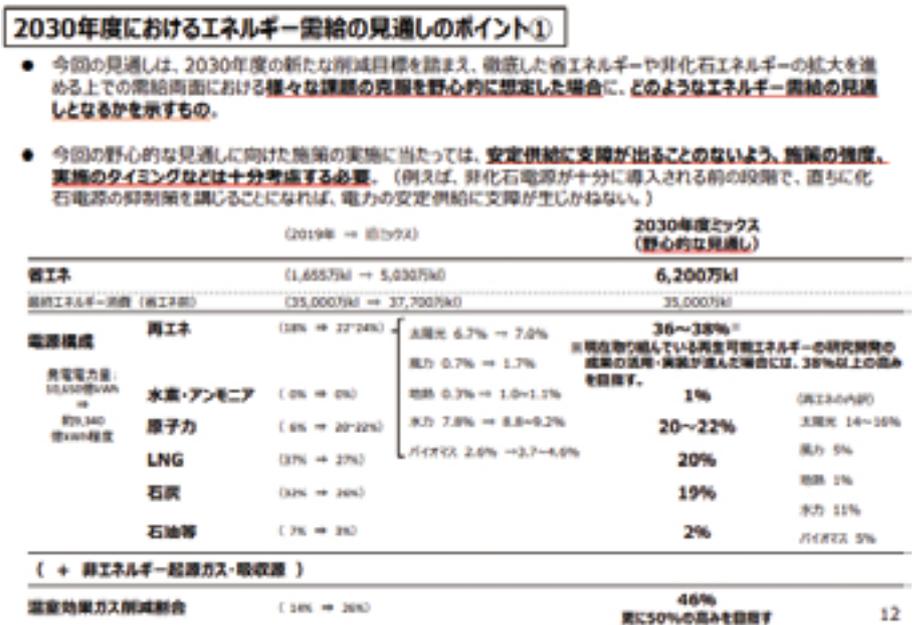


図3 第6次エネルギー基本計画における2030年ミックス(電源構成)  
(令和3年10月22日「第6次エネルギー基本計画の概要」より)

#### 4. 石炭火力の位置付け

石炭火力については、2018年度の発電電力量における石炭火力発電の比率は約32%であるが、2030年に向けた非効率石炭火力のフェードアウトにより、26%まで引き下げる方針であった。

第6次エネルギー基本計画では、非効率石炭火力のフェードアウト等を着実に進めることで、2030年度電源構成のうち、石炭火力は19%に引き下げると示された。これには製造業等の自家発電分としての8%という比率も削減対象とされており、これまでの議論では、自家発電が削減されることによる、国際競争力の低下を懸念する声も出ていた。

また、第6次エネルギー基本計画の公表に併せて本年10月に資源エネルギー庁が公表した資料（「2030年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）」<sup>1</sup>）によれば、安定供給の課題に加え、製造業への影響の課題があることから、20%台前半への引き下げも「相当の困難が伴う」とされている。同資料では、石炭の安定供給性及び備蓄性についても整理され、天然ガス（LNG）や原油と比べて地政学的リスクが低い点や、備蓄性を確保することでレジリエンス（強靭性）の向上にも貢献可能として、取り纏められている（図4）。

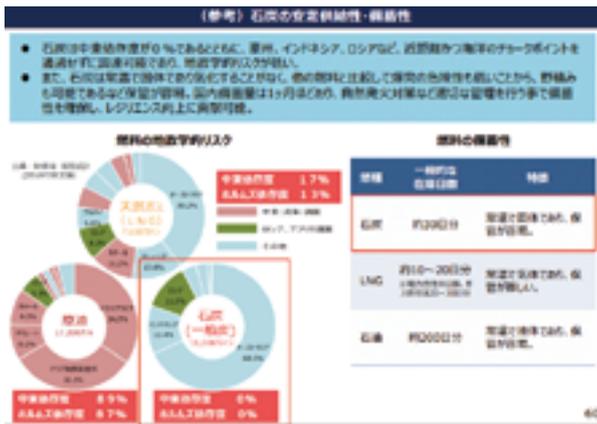


図4 石炭の安定供給性・備蓄性  
（令和3年10月資源エネルギー庁「2030年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）」より）

<sup>1</sup>：令和3年10月資源エネルギー庁「2030年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）」  
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-3.pdf>

#### 5. 発電コストに関する検証

電源構成の検討にあたっては、本年8月4日の基本政策分科会（第48回）において、「各種電源の発電コスト検証結果」が示された。その際、モデルプラントの運転期間全体での均等化発電コスト<sup>1</sup>だけでなく、「統合コストの一部を考慮したとして定義された発電コスト（仮称）」の試算結果も公表された。

統合コストとは、電源を電力システムに受け入れ（統合）に要する費用のことを示しており、太陽光、揚水発電や蓄電池の活用などによる出力変動を火力発電所で吸収した際、火力の発電効率の低下、起動・停止回数増などで生じる費用とされる。電力システム全体における発電コストは、各種電源の個別の発電単価だ

けでなく、電源を電力システムに統合するコストも評価する必要があるため、統合コストを考慮することも重要とされている。

この統合コストの一部を考慮した2030年の発電コストが示された際<sup>2</sup>、参考として、各電源の追加に伴い、電源立地や系統制約を考慮した発電コスト試算も示されたが、太陽光発電は18.9円、原子力は14.4円となり、8月3日の「第8回発電コスト検証ワーキンググループ」で示された統合コストを含まない発電コスト試算結果とは順位が逆転した（図5、6）。



図5 2030年のエネルギーミックス上での総合コスト試算結果  
（令和3年8月4日「第48回総合資源エネルギー調査会基本政策分科会」資料より）



図6 2030年の電源別発電コスト試算の結果概要  
（令和3年8月3日「第8回発電コスト検証ワーキンググループ」資料より）

コスト試算にあたっては、自然変動電源の大量導入により、火力が需給バランスの調整力を提供する必要があることから、火力で生じる設備利用率低下や、発電効率の低下、揚水等の蓄電増加に伴う損失などが、統合コストの一部として加味された。この試算から判明した各電源のコスト面での特徴等を踏まえて、電源ごとの政策策定等、今後のエネルギー政策に関する議論の参考材料としていくとされている。

<sup>1</sup>：発電量あたりのコストを意味し、均等化発電原価もしくはLCOE (Levelized Cost Of Electricity) とも言われる。建設費や運転維持費・燃料費・設備廃棄費等、発電に必要なコストと利潤等の合計を、運転期間中の想定発電量で割り算出したもの。  
<sup>2</sup>：令和3年8月3日「第8回発電コスト検証ワーキンググループ」  
[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/mitoshi/cost\\_wg/2021/data/08\\_05.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/2021/data/08_05.pdf)

## 6. 新政権発足に伴う今後の方向性

エネルギー政策は、先日行われた自民党総裁選や、10月31日の衆院選において、政局も絡めた重要な争点になった。

これまでは、前内閣において打ち出された「2050年カーボンニュートラル社会の実現」という目標に伴い、「再生可能エネルギーを最大限・最優先で導入していく」という主張・方針も一部の閣僚等から聞かれたことで、産業界や電力業界では懸念を示す声も散見されてきた。また、化石燃料が高止まりしている状況にあって、電力や産業関連団体等からは、安価な電力の安定供給が重要、との意見も聞かれる。

新しい内閣が発足し、報道等では、再生可能エネルギーのみに依らない、原発再稼働などを含む「クリーンエネルギー戦略」の策定に向けた議論が進んでいくとの見方が出てきた。岸田首相は、10月8日の所信表明演説で、「2050年カーボンニュートラルの実現に向け、温暖化対策を成長に繋げる、クリーンエネルギー戦略を策定し、強力に推進する」と言及し、経済成長と国民生活が恩恵を受けられることを目指すとしている。

一方で、岸田首相は、「2050年に向けて、デジタル化によって電力需要の増加が見込まれる中、温暖化対策の観点のみならず、さらなる経済成長につながる安定的で安価なエネルギー供給を確保することが重要」とも発言しており、一部有識者等からは、10年近く進んでいない原発の再稼働に関して、原子力産業の見直しや再構築が行われるのでは、と分析する声もある。

EUを中心に進む、サステナビリティに関連する国際的な基準策定についても、今後どのような政策が打ち出されていくか注目される。例えば、EUタクソミーは、6項目ある環境目的のうち、4項目（「水・海洋資源」、「循環型経済」、「汚染防止」、「生物多様性」）に対して、2023年1月から対象セクターと特定の経済活動への「実質的な貢献」が求められる予定となっている<sup>1</sup>。これらに貢献する事業に対して、官民の資金を導入することが、EUタクソミーの目的とされており、これに対応しない企業は、EU市場における評価や資金調達が悪くなる想定される。

10月12日には、EUの欧州委員会は、欧州復興基金の原資として、世界最大である120億ユーロ（約1兆5700億円）分の環境債（グリーンボンド）を発行したと発表（期間15年、利回りは0.453%）した。今後、EUとして環境債の分野で先行し、国際的なルール形成にも影響力を示していく可能性がある。

こうした動きに対して、日本政府は、省エネ等の着実な低炭素化（トランジション）や、脱炭素化に向けた革新的技術（イノベーション）へのファイナンスが重要との立場を示しており、経済産業省主導の下、「トランジション・ファイナンス」の普及拡大を目指して、電力、ガス、石油、鉄鋼、化学、セメント、紙パルプの7業種を対象とした、ロードマップの策定に着手しており、年度内の策定を目指している。タクソミーに関しては、金融庁等を介して、「サステナブル・ファイナンスに関する国際的な連携・協調を図るプラットフォーム」（IPSF）等の国際議論に参画し、対応していく考えを示している<sup>2</sup>。

特に、世界全体で総額3,000兆円とされるESG関連の民間資金<sup>3</sup>を、いかに日本企業による技術開発等に取り込めるか、注目が集まっている。

アジア地域においては、現在使われている化石燃料、特に埋蔵量や安定供給の面で優れた石炭を、これからも使わざるを得ない状況にある国が多い状況から、日本政府は、アジア全域でCCUS技術を推進していく「アジアCCUSネットワーク」をASEAN10カ国等と立ち上げた<sup>4</sup>。こうした取り組みを通じて、アジア地域におけるCCUS技術への投融資の呼び込みや、枯渇油田でのCCUS活用による原油の増産、といった経済的インセンティブを働かせて、CCUSの商用化を目指している。

1: 環境省「EUのサステナブルファイナンス戦略の動向」

[http://greenfinanceportal.env.go.jp/pdf/news\\_report\\_210910\\_1.pdf](http://greenfinanceportal.env.go.jp/pdf/news_report_210910_1.pdf)

2: サステナブル・ファイナンスに関する国際的な連携・協調を図るプラットフォーム

<https://www.fsa.go.jp/inter/etc/20201120.html>

3: 経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」

[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green\\_innovation/pdf/001\\_06\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/pdf/001_06_00.pdf)

4: Asia CCUS Network <https://www.asiaccusnetwork-eria.org/>

## 7. まとめ

本年7月の基本政策分科会において素案が公表された際、委員からは、再生可能エネルギーの最大限導入については同意するも、科学的な分析に基づいて長短を把握した上で、検討を進めるべきとの趣旨の意見が散見された。また、2030年46%減を目指す中で、目標とするエネルギーミックスの実現に必要な発電供給力の裏付けが確約されていないことから、適切な課題認識を持って対応していくべきと指摘されていた。

9月3日～10月4日まで募集されたパブリックコメント<sup>1</sup>では、省エネや再生可能エネルギー推進といった意見が寄せられた一方で、再生可能エネルギー拡大に伴う電気料金上昇や、安定供給への懸念を示す意見も見られた。

原子力については、安定的かつ安価な電力供給、気候変動への対応などから、安全性を大前提にしつつも欠かせないものとの見解が示されている。新增設・リプレースについては、国民理解を先に進めるとの考えから、明示されていないが、化石燃料価格の高騰や気候変動対策を背景に、必要な方策として新たな動きが出てくる可能性もある。

国内外の石炭等化石資源については、現状の消費量や利用方法のまま使用を継続することは出来ないと言われる一方で、産業構造の変化に向けたエネルギー政策の絵姿や、コロナ禍後のエネルギー需要高騰に伴う石炭などの調達戦略について、具体性に欠けるとの意見も見られる。こうしたことから、炭鉱開発への投資の縮小等による供給リスクに対して、どのような対応を取って安定的な調達を確保するか等、慎重な検討の積み重ねが求められる。

今後は、10月13日（日本時間）に公表された、国際エネルギー機関（IEA）の「2021年世界エネルギー見通し報告書（WEO）」における見通しや、10月31日～11月12日にかけて開催されるCOP26（第26回国連気候変動枠組条約締約国会議）を踏まえた参加国の対応等、国際的な動向も踏まえつつ、日本のエネルギー政策の動きを注視していきたい。

1: e-Gov「エネルギー基本計画（案）に対する意見募集の結果について」

<https://public-comment.e-gov.go.jp/servlet/PcmFileDownload?seqNo=0000225933>

## クリーン・コール・デー実行委員会広報活動報告

総務部広報室 鎌田 淳一

クリーン・コール・デー(CCD)実行委員会では、毎年9月5日の「クリーン・コール・デー(石炭の日)」を中心に児童生徒や一般の方々から専門家の方々までを対象に石炭やその利用に関する広報活動を実施している。

石炭は重要なエネルギー源として、我が国をはじめ多くの国と地域で利用されてきた。しかし、他のエネルギーに比べて二酸化炭素の排出量が多いことから、温暖化ガス排出削減やカーボンニュートラルを目指す世界の潮流の中でその利用を抑制する動きが顕在化している。しかし、石炭は重要な電源の一つであるばかりでなく、製鉄などの産業用原料としても重要な資源であり、エネルギーの自給率が低い我が国にあっては、エネルギー安定供給の観点から石炭を含めたエネルギーミックスを推進する必要がある、そのため石炭利用における低排出化やカーボンリサイクルなどカーボンニュートラルを目指した技術開発への取組が不可欠となっている。

今後も「革新的クリーン・コール・テクノロジー (Innovative CCT) でカーボンニュートラルに挑戦し、SDGs (持続可能な開発目標) に貢献していくこと」を国内はもちろん、世界に向けて発信していくことが重要である。

これらについての社会的認知と合意形成を図ることを目的に、クリーン・コール・デー(9月5日)を中心とした期間に一連の石炭広報活動を展開するもの。

クリーン・コール・デー実行委員会は、①一般社団法人日本鉄鋼連盟、②一般社団法人セメント協会、③日本製紙連合会、④電源開発株式会社、⑤一般財団法人石炭フロンティア機構(順不同)の5団体で構成され、委員長はJCOALの塚本理事長が務め、事務局もJCOALが担当している。

### 【令和3年度事業計画】

昨年度から新型コロナウイルスへの感染拡大により繰り返し緊急事態宣言が発令されている中で、今年度の広報活動の実施計画案については、ポスター作成やメディア広報を中心に可能な限り昨年と同様な取組を実施するが、参加者や関係者の健康・安全確保の観点から運用上の制約を考慮し、例年とは一部異なる対応とした。

6月中旬に基本計画案を実行委員会に提示した結果、ポスター案やメディア広報案を募るための公募の実施について了承が得られたため、6月25日から7月9日まで公募を行い、ポスター案については17案、メディア広報案については7案、ノベルティについては15案の提案を受けた。これらについてセンター内での投

票などを参考に事務局案を決定し、予算案や石炭実験教室の開催案などと共に7月30日に実行委員会に提案し、意見集約の結果8月2日に承認された。

### 【ポスター制作】

提案の有った17案の中から、「拓く」の文字を題材とした案を事務局案として実行委員会に提案し、各委員からの意見を基に、キャッチコピーに「未来を」を追記してより分かり易い表現とした。

本案の選定理由は、4月に当財団の名称を一般財団法人石炭フロンティア機構としたこともあり、菅総理大臣が宣言した2050年カーボンニュートラルを目指して、未来を拓く、新たな道を拓くといった意味の「拓く」という漢字をキャッチコピーに使用し、その一部を石炭に置き換えて、石炭の技術革新が未来を切り拓いていくことを直感的にイメージさせ、背景も朝空の明るいイメージであり、まさに、「石炭のフロンティア、カーボンニュートラルに挑戦」のテーマにふさわしいと評価されたためである。



令和3年度クリーン・コール・デー広報ポスター

完成したポスターは、8月下旬に実行委員会各委員はもとより、関係協力機関及びJCOAL会員企業全社に配布した。最終的に272枚のポスターを211個所に配布した。

### 【メディア広報～産経ニュースへの広告記事掲載】

今年度利用したメディアについては、3社から提案のあった7種のメディア広報案の中から、過去に実施したメディア広報の

中でページビュー（PV）数の最も多かった産経ニュースを選抜し、実行委員会の承認のもと、広告記事を発信する事とした。

記事のタイトルは、『石炭が探るカーボンニュートラルへの道 トリプル複合発電、CO<sub>2</sub> 再利用、アンモニア混焼…イノベーションの最前線』とし、日本の電力供給のほぼ3分の1を担う「石炭火力」の中でも最高の効率を誇る「大崎クールジェンのIGCC 実証試験」を紹介し、CO<sub>2</sub>の回収利用の実証拠点での取組やJERA 碧南火力でのアンモニア混焼の取組など低排出化の流れと共に苦小牧でのCCS 実証やカーボンリサイクルなどCO<sub>2</sub>の回収利用の流れを紹介し、石炭のカーボンニュートラルへの挑戦について理解を訴求する内容とした。記事は9月13日に掲載を開始し9月20日までは誘導期間、その後もアーカイブされるため記事は今後1年以上に渡り下記URLにて参照可能である。

<https://www.sankei.com/article/20210913-6M4Z4VJ6C5AG5HMREICYOEHHQA/>



なお記事の右側にある今年のポスターを使ったバナーは、今年30回目の開催となったクリーン・コール・デー国際会議の特設サイトへリンクしている。

産経ニュースの報告によれば、1週間の誘導（ホームページの記事リストの上部に維持）期間中のページビュー数は24,453PVで、想定5,000PVを大幅に上回った。デバイス別ではスマートフォンによる閲覧が64%、パソコンやタブレットによるものが36%であった。また、男女別では80%が男性で、年齢構成は35-44歳を中心に幅広い年齢層に読まれたことが分かり、初期の目標を達成したと評価している。

なお、肯定的な意見と共に読者のツイッターによる拡散もあった。

### 【メディア広報～電気新聞】

例年電気新聞社ではクリーン・コール・デーにちなんで、9月5日前後にクリーン・コール・デー特集ページを掲載頂いている。今年は9月3日（金）に掲載いただいた。

JCOALも同ページの記事作成のためクリーン・コール・テクノロジー（CCT）関連の情報提供を行っている。今年は、褐炭水素製造関連の事業進捗、石炭灰有効活用、IGFC、ワイオミングにおけるCO<sub>2</sub>回収固定プロジェクト、及び今年度もWEBで開催さ

れた国際会議のプログラムなどを掲載頂いた。また、有償となるが、実行委員会として今年のポスターを図案化したクリーン・コール・デーの広告も掲載して頂いた。

### 【メディア広報～経産新報】

経産新報社でも例年クリーン・コール・デー特集号を制作いただき国際会議前後に配布いただいている。

今年は会議前の9月20日に特集号を制作いただいた。関連記事と共に会議のプログラムや会長の挨拶文を掲載いただいた。国際会議がWEB開催となったため、印刷物は配布せずJCOALのwebサイトwhat's newで紙面を紹介した。

### 【石炭実験教室】

毎夏恒例のクリーン・コール・デー実行委員会と科学技術館との共催行事「夏休み子ども石炭実験教室」の実施について、今年度は新型コロナウイルス感染防止のため緊急事態宣言期間中は避け、緊急事態宣言が終了して感染状況も落ち着いた10月30日（土）、31日（日）の2日間、科学技術館4階スタジアムLにて開催した。

教室運営は、国・東京都・博物館協会のガイドラインに準拠した科学技術館のコロナ感染防止対策マニュアルに従い、予約制として参加人数を絞り、教室入室時のアルコール消毒、実験後の各テーブル消毒、参加者個別の実験器具を用意、スタッフはマスク+手袋の着用、等の対策のもと開催した。

コロナ対策として、1テーブル3名の定員として6テーブルで毎回18名の参加を上限として参加者を募り、午前と午後各1回、合計4回の実験教室を開催し、49名の小中学生児童と52名の保護者に参加いただいた。

教室では、石炭についてその性状や生成過程、賦存状況や生産方法、用途等について実物や動画、スライドを使って説明した後、①土砂と石炭を選び分ける「選炭」の実験、②ヤカンの湯を沸騰させて作る蒸気によりプロペラを回して電気を起こす実験、③実際に石炭が燃えるところを見てもらい臭いや煙を感じてもらう実験、を見たり体験したりしてもらった。子どものみならず、保護者も石炭を見るのも触れるのも初めてという方が多く、熱心に質問される方々もおられた。



実験教室の様子（石炭の実物を示すJCOAL職員）



重液を使った選炭実験



石炭の燃焼実験



地球温暖化を解説する JCOAL 職員

実験と指導は科学技術館の学芸員にお願いしたが、最後にクリーン・コール・テクノロジー、地球温暖化、カーボンニュートラルやカーボンリサイクルなどについて JCOAL 職員が解説した。

コロナ禍の中、感染拡大防止に配慮しながらも、参加者の皆様に実物の石炭に接していただく体験型イベントとして開催できたこと、皆様に楽しんでいただけたことを関係者一同大変うれしく思っている。

### 【地方での関連イベント】

#### ①北海道庁でのパネル展示

8/24(火)、25(水)の両日、北海道庁にて、石炭資源の有効活用の推進に関する取組の一環として、石炭をクリーンに利用する「クリーン・コール・テクノロジー」及び道内の石炭産業や炭鉱遺産、産炭地域の魅力の普及啓発を目的に、石炭資源有効活用研究会(事務局:北海道経済部環境・エネルギー局環境・エネルギー課)が主催するクリーンコールパネル展が北海道庁本庁舎1階道政広報コーナー特設展示場にて開催された。

実行委員会も、地方独立行政法人北海道立総合研究機構や釧路コールマイン株式会社、産炭地域市町と共に協力

しており、今年もクリーン・コール・テクノロジーの紹介パネル12枚を展示したほか、広報冊子「石炭利用によるカーボンニュートラルへの挑戦」、「マンガ・ニャンコール教授と学ぶ石炭のひみつ」、「石炭がわかる本」、「明治日本の産業革命遺産ガイドマップ」及びノベルティグッズとして「黒いマスク」を配布した。



パネル展会場の様子

#### ②石炭博物館等での入場無料公開、資料配布

石炭の日であるクリーン・コール・デー(9/5)に合わせて9月5日の日曜日に、太平洋炭礦炭鉱展示館及び直方市石炭記念館で無料公開が行われた。大牟田市の石炭産業科学館でも無料公開を予定していたが、緊急事態宣言のため休館となった。

これらを含め、全国13カ所の石炭博物館等に今年のポスターや広報資料、ノベルティグッズを送付し、一般入場者への配布をお願いした。

### 【その他の広報活動】

#### ①広報冊子の配布

実験教室に集まった保護者や子供たちに石炭広報用冊子(2種)を配布した。今年度制作した「カーボンニュートラルへの挑戦」及び、マンガ版石炭教本「ニャンコール教授と学ぶ、石炭のひみつ」で、マンガ教本は JCOAL のウェブサイトでも閲覧可能となっている。



新しい広報冊子

#### ②ノベルティの配布

実験教室に集まった子供たちにクリーン・コール・デーのロゴを印刷した、石炭にちなんだ黒い消しゴムを配布した。1cm角程度の石炭のサンプルを入れた石炭カプセルもあわせて配布した。



黒消しゴム



石炭カプセル

# ケミカルルーピング燃焼 (CLC) 技術開発の進捗、その 3 —ポリジェネレーション技術開発—

技術連携戦略センター 林 石英、齊藤 知直

## 1. はじめに

ケミカルルーピング燃焼 (Chemical Looping Combustion, CLC) とは媒体の化学変化を介して、石炭やバイオマス等の燃料を空気中の  $O_2$  と直接接せず、熱あるいは燃料ガス ( $H_2$  等) に転換し、同時に  $CO_2$  が分離される方法である。ケミカルルーピングに使用する  $O_2$  を運ぶ媒体を酸素キャリアと呼ぶ。

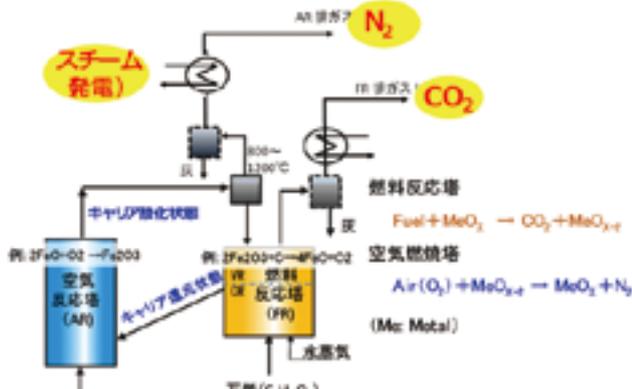
2010 年から 2011 年に当時の一般財団法人石炭エネルギーセンター (現在の一般財団法人石炭フロンティア機構、以下では JCOAL) がケミカルルーピング技術小委員会を設立し、ケミカルルーピング技術開発の可能性を検討した。また、国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構 (以下、NEDO) が 2012 年度から 2014 年度に「 $CO_2$  分離型化学燃焼石炭利用技術に関する検討」として、国内外の技術開発動向と市場の調査及び酸素キャリア予備選定を行い、以後の開発に酸化鉄ベース酸素キャリアを使用することを決めた。

そして、2015 年度～2019 年度に NEDO「 $CO_2$  分離型化学燃焼石炭利用技術開発」プロジェクトを実施した。また、その成果を生かして 2020 年度から NEDO「ケミカルルーピング燃焼ポリジェネレーション技術開発」プロジェクトをスタートした。

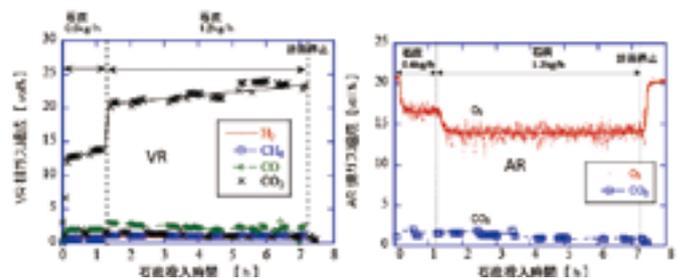
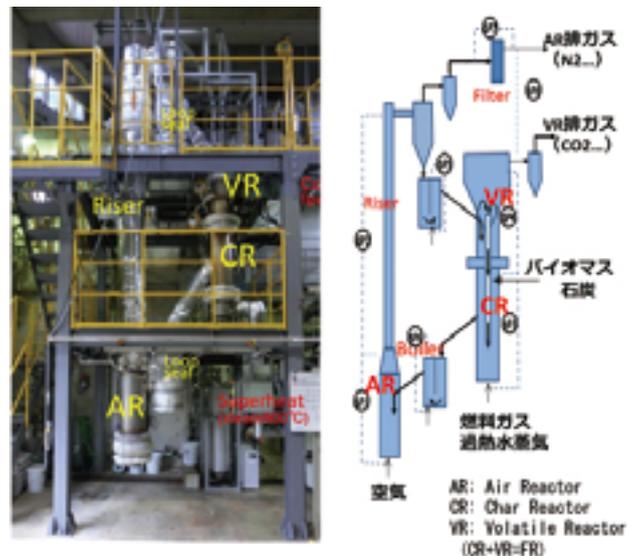
以下に、「 $CO_2$  分離型化学燃焼石炭利用技術開発」の主な成果及び「ケミカルルーピング燃焼ポリジェネレーション技術開発」の主な開発計画を紹介する。

## 2. $CO_2$ 分離型化学燃焼石炭利用技術 (CLC) 開発

$CO_2$  分離型化学燃焼石炭利用技術 (CLC) は石炭燃料を利用した  $CO_2$  分離回収もできる先進的火力発電を目指している。図 1 に循環流動層タイプ CLC プロセスの概念図を示す。



循環流動層 CLC プロセスは主に空気燃焼塔 (AR) と燃料反応塔 (FR) で構成される。また、FR は揮発分反応塔 (VR) とチャー反応塔 (CR) の二つ部分に分けられている。図 2 は 100kWth スケール循環流動層 CLC 評価装置の写真と構造の概念である。図 3 は石炭ケミカルルーピング燃焼試験における AR と VR の排ガス組成を連続分析した結果である。なお、本試験では酸素キャリアとしてイルメナイトを使用した。



VR の生成ガスは主に  $CO_2$  と僅かな  $CO$  と  $CH_4$  であった。実機サイズなら燃焼状態がさらに改善できるので、 $CO$  と  $CH_4$  のさらなる低減が期待される。さらに AR 排ガス中の酸素濃度は石炭投入前の 21% から石炭投入後の 14% まで約 7% を低下していることで、酸素キャリアが CR と VR で燃料によって還元される酸化還元繰り返し反応の進行を検証できた。

### 3. ケミカルルーピング燃焼ポリジェネレーション技術開発

燃料反応塔 (FR) の還元された酸素キャリア (例 :FeO) を水蒸気で酸化反応させれば水素を生成することができる。したがって、水素発生反応器を付与した三塔式循環流動層ケミカルルーピング燃焼 (CLC) において、褐炭や亜瀝青炭やバイオマス等を燃料とし、熱 (電力)、水素、CO<sub>2</sub> 等を併産するポリジェネレーションが可能になる。図 4 は三塔式循環流動層 CLC ポリジェネレーションプロセスの概念図である。

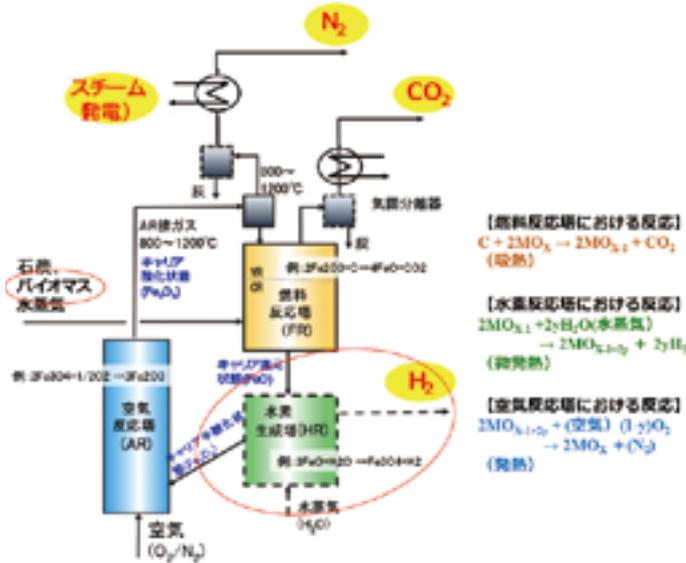


図 4 三塔式循環流動層 CLC ポリジェネレーションプロセスの概念図

2020 年から NEDO 「ケミカルルーピング燃焼ポリジェネレーション技術開発」プロジェクトが本格的にスタートした。

本プロジェクトは、ケミカルルーピング燃焼において、新たに低品位炭とバイオマスを利用可能とし、かつ、水素も生産できるポリジェネレーション型の技術を開発するものである。本技術は、流動層反応器を用い、酸素キャリア (流動材) の化学変化を介して、燃料を空気中の O<sub>2</sub> と直接接触させることなく、水素及び熱に転換し、CO<sub>2</sub> を分離回収する技術である。図 5 は CLC ポリジェネレーション技術開発実施体制である。



図 5 CLC ポリジェネレーション技術開発実施体制

本プロジェクトは、大阪ガス(株)、JCOAL、及び 4 大学から成る開発体制で、5 年間、開発を二段階に分けて、表 1 に示す技術課題に取り込む。また、名古屋大学成瀬一郎教授を委員長とする専門家で構成された有識者委員会を設けて、定期的にご指導やご助言を頂いている。

表 1 CLC ポリジェネレーションの技術開発課題

技術開発課題	
1	国内外 CLC ポリジェネレーション開発状況、技術到達度の把握
2	水素生成反応に用いられるキャリアの繰り返し反応性、物性変化
3	キャリアによる水素生成速度、純度の把握
4	システム内キャリア循環 / 流動性、キャリア粉化率の把握
5	バイオマスチャーとキャリアの混合 / 分離条件の把握
6	3 塔式 CLC 試験ベンチスケール装置 (5-10kWth) における原理実証及び褐炭、亜瀝青炭、バイオマス CLC 燃焼反応挙動把握
7	燃料中灰分等不純物がキャリア循環 / 流動、及び反応へ及ぼす影響
8	プラント構成の最適化、プロセス効率アップ
9	300kWth CLC ポリジェネレーション技術原理の実証、スケールアップ検討
10	ビジネスモデル、実用化課題、市場性の検討

第一段階は要素技術研究開発 (2020 年度～ 2022 年度) である。CLC からの H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、熱及び N<sub>2</sub> の総合利用案を策定すると同時に、三塔式 CLC 試験装置を製作して、バイオマス燃料を用いた CLC、酸素キャリアによる水素発生を含む基本原理の確認を目的に検証試験を行う。また、300kWth 三塔式循環コールドモデル及びバブリング流動層反応器を用いて、水素生成速度、循環 / 反応性能等の確認試験を行い、基礎データを取得する。さらに、ベンチ試験装置の設計、実証装置の概念設計、建設コスト評価を行う。

第二段階はスケールアップ課題解決に係る技術開発 (2023 年度～ 2024 年度) である。300kWth ベンチ試験装置を製作し、石炭、バイオマスから H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、熱及び N<sub>2</sub> 同時生成の連続評価試験を行う。スケールアップ技術データの取得及びベンチ試験装置、ならびに実機レベルにおける CO<sub>2</sub> 回収費 (目標: 1000 円/前半 t-CO<sub>2</sub>) 及び事業性を試算する。

図 6 に CLC ポリジェネレーション技術開発の全体スケジュールを示す。以前の CLC 技術開発の成果を生かして 2020 年度～ 2024 年度は、水素発生反応器を追加した 300kWth 装置試験を実施する。

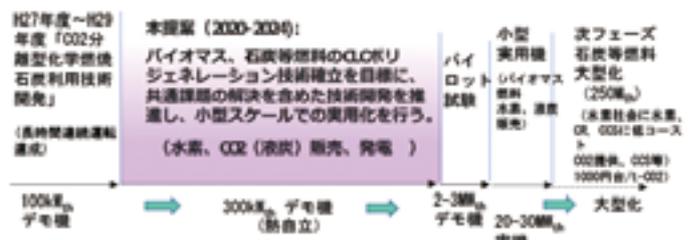


図 6 CLC ポリジェネレーション技術開発スケジュール

その後、パイロット試験 (2 ~ 3MWth 規模) を経て、バイオマス燃料の小型機 (20 ~ 30MWth 規模) の実用化を目指す。さらに次フェーズとして 2030 年代には 250MWth 規模の石炭及びバイオマス混焼の CLC ポリジェネレーションを実用化し、CCUS やカーボンリサイクルに対して低コスト CO<sub>2</sub> (1000 円台前半 t-CO<sub>2</sub>) を、さらに来たるべき水素社会に向けて水素を供給できることを目指す。

#### 4. 終わりに

現在進行中の第一段階は各要素研究と事業性評価を固め、第二段階は 300kWth ベンチ試験を中心に技術開発を継続し、CLC ポリジェネレーションシステムの基盤技術を確立していきたい。

参考文献：

1. NEDO「CO<sub>2</sub> 分離型化学燃焼石炭利用技術開発」成果報告書 (H27-H29)

#### 【謝辞】

CLC ポリジェネレーション技術開発は NEDO 委託事業において実施しており、今回の報告をご了承いただいたことに謝意を表します。

# カーボンリサイクル最新技術動向

技術連携戦略センター 齊藤 知直

## 1. カーボンリサイクル技術動向調査の背景、目的

カーボンリサイクルとは、CO<sub>2</sub>を資源として捉え、これを分離・回収し、化学品、燃料、鉱物、素材等を製造する際に再利用することで、大気中へのCO<sub>2</sub>排出を抑制していく取組である。CO<sub>2</sub>を大量、かつ、効率的に利用するために、人工光合成、CO<sub>2</sub>メタネーション、あるいはCO<sub>2</sub>吸収コンクリート等の新しい技術へのパラダイムシフトを起こす必要がある。これまで人工的な変換利用が遅れてきたCO<sub>2</sub>を使用するカーボンリサイクルの社会実装には、産学官連携の下で革新的な技術開発を加速し、非連続なイノベーションを早期実現することが鍵とされている。

経済産業省は、2019年にカーボンリサイクル推進室を設置し、カーボンリサイクルのコンセプトや対象分野、ロードマップを策定し、国際的にG20やカーボンリサイクル産学官国際会議で発表している。JCOALは、資源エネルギー庁石炭課やNEDOの支援を得て、我が国でのカーボンリサイクル実現に向けた研究開発の推進や国際連携に資する調査を実施しており、特に、火力発電設備から排出されるCO<sub>2</sub>を利用するカーボンリサイクルシステムの検討や、海外の大学、研究機関等との国際協力案件創出につなげていくことを目的とし、カーボンリサイクル海外技術動向調査を実施している。

本稿では、海外（日本も含む）におけるカーボンリサイクル技術開発動向に関する文献収集・整理及びカーボンリサイクル技術の社会実装に向けた課題抽出を行った。その結果概要について報告する。

## 2. カーボンリサイクル技術動向に関する文献収集・整理

本節では、海外（日本も含む）におけるカーボンリサイクル技術に関する最新の研究開発動向を把握することを目的として、国際学術情報データベースを用いて2014年以降に発表された学術論文を網羅的に検索した。なお、文献検索にあたっては、高品質論文での絞り込みも行い、各分野でのハイレベルな研究に関する動向調査も行った。

調査対象は、カーボンリサイクルを目的とした下記の技術である。

- (ア) 化学品（人工触媒合成、人工光合成等）
- (イ) 燃料（メタネーション・水素キャリア、藻類利用等）
- (ウ) 鉱物（炭酸塩化、コンクリート化等）
- (エ) その他（メタン、CO等を利用したC1化学（オレフィン製造等）、藻類からのプラスチック製造等）

- (オ) 直接利用（EOR（Enhanced Oil Recovery）、民生・産業用途等）

### 2.1 各分野における発行論文数の推移

研究開発分野の盛衰を図るため、各分野における発行論文数の経時変化を1つのグラフにまとめた結果を図1に示す。人工触媒と炭酸塩化に関する論文は数が多い一方、EOR、オレフィン製造、藻類利用に関する論文は少なかった。2017年までは炭酸塩化に関する論文が多かったが、2018年からは人工触媒に関する論文が上回るようになり、「CO<sub>2</sub>を固定して貯蔵・固形物を利用」から「CO<sub>2</sub>を化学原料に変換して利用」にトレンドがシフトしている様子が見て取れた。

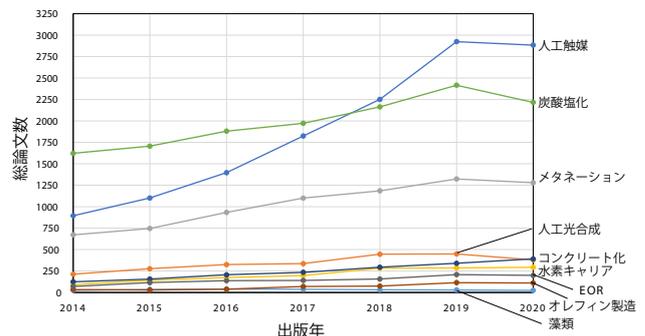


図1 各分野における発行論文数の経時変化  
(2014年～2020年11月)

(出典：学術情報データベースを基に作成)

ただし、分野ごとの総論文数には差があるため、次いで2014年以降に発行された論文を基準に伸び率で評価した。図2より、人工触媒、水素キャリア、コンクリート化、オレフィン製造、EORなどは高い伸び率を示しており、ホットな研究（技術開発）分野であることが伺える。メタネーションや人工光合成については着実に伸びてはいるが、上述の分野に比べると伸び率が低かった。おそらく、これらのテーマはより基礎科学的、もしくは技術的に困難であることから参加プレイヤーの数が増えない、もしくは論文化までに時間を要していることが原因であると考えられる。炭酸塩化及び藻類利用については伸び率が低調、もしくは減少傾向にあるため、学術的に画期的な成果が出にくく場合によっては撤退したケースもあるかもしれない。

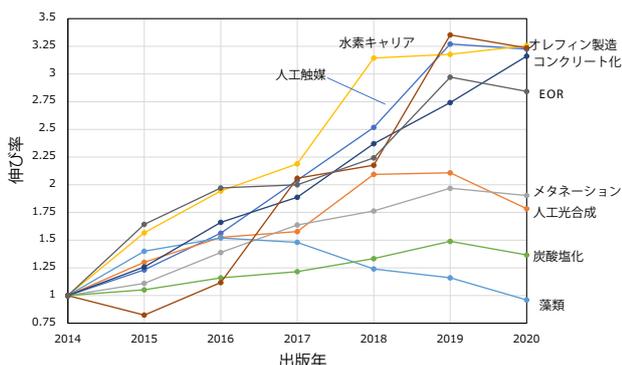


図2 2014年以降に発行された論文を基準にした伸び率 (出典：学術情報データベースを基に作成)

次に分野別における国別の総論文数から見た研究開発動向について整理した。なお、論文の質を簡易的に見るために、総論文数に占める高品質論文の割合についても整理した。高品質論文としては、自然科学における2大トップジャーナルのNatureとScienceの他、化学系における高品質論文誌として著名な米国化学会誌Journal of American Chemical Society (JACS)とドイツ化学会誌Angewandte Chemie International Edition (Angew. Chem. Int. Ed.)、及び英国化学会が発行するEnergy & Environmental Science (Energy Environ. Sci.)の5誌を選定した。

## 2.2 各分野における国別の総論文数の傾向

### (1) 化学品 (人工触媒合成)

図3より、国別の総論文数を見ると、中国と米国が抜きん出ており、ドイツの次には日本、韓国、インドとアジア諸国が続いている。論文総数に占める高品質論文の割合で見ると、欧米諸国とシンガポール、台湾は高い傾向が見られた。東アジア諸国(日韓中)は中程度であり、インドなどの新興国においては低かった。このことから、新興国では数重視、欧米諸国等では質重視、東アジア諸国(日韓中)ではその中間であることが想定される。

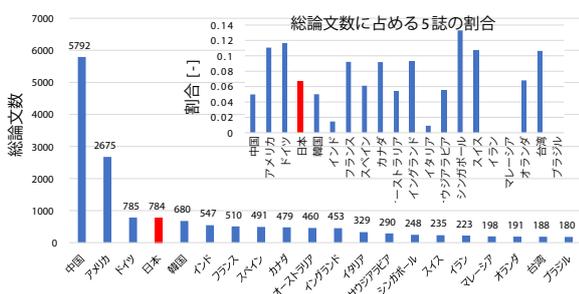


図3 国別の総論文数及び総論文数に占める5誌の割合 化学品(人工触媒合成)分野 (出典：学術情報データベースを基に作成)

### (2) 化学品 (人工光合成)

図4より、国別の総論文数を見ると、中国と米国が抜きん出ているが、人工触媒合成の研究に比べてその差は小さかった。なお、当該分野の論文数がそれほど多くないこともあり、Nature論文については検索されず、Science論文については3報のみであった。

高品質論文の割合で見ると、中米日の3カ国では大きな差は見られなかった。一方、韓国、スウェーデン、スイスで高めの傾向が見られた。

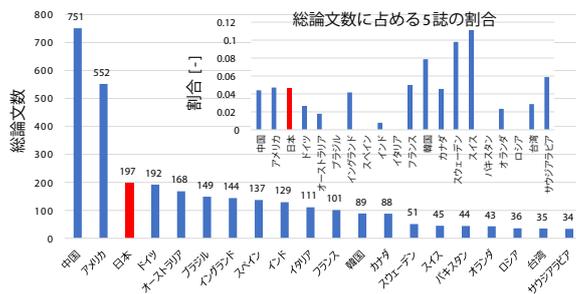


図4 国別の総論文数及び総論文数に占める5誌の割合 化学品(人工光合成)分野 (出典：学術情報データベースを基に作成)

### (3) 燃料 (メタネーション)

図5より、国別の論文数については、中国と米国が抜きん出ており、ドイツの次に日本がいる。高品質論文の割合については、これまでと同様、欧米諸国で高い傾向が見られ、特にスイスが顕著であった。

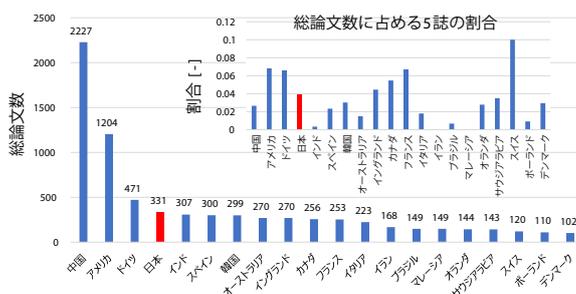


図5 国別の総論文数及び総論文数に占める5誌の割合 燃料(メタネーション)分野 (出典：学術情報データベースを基に作成)

### (4) 燃料 (水素キャリア)

図6より、国別の総論文数については、中国と米国が1位、2位であるが、日本が3位につけている。高品質論文の割合については、これまで同様、欧米諸国とシンガポール・台湾で高くなり、特にフランスで顕著であった。その一方、日本はやや低めであった。

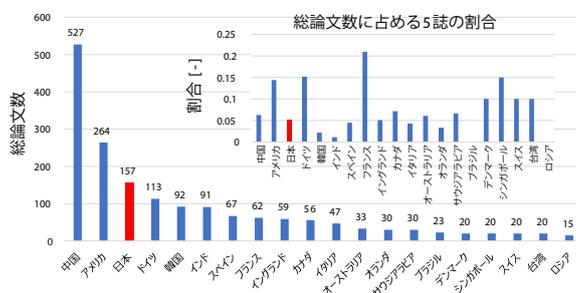


図6 国別の総論文数及び総論文数に占める5誌の割合 燃料(水素キャリア)分野 (出典：学術情報データベースを基に作成)

### (5) 燃料 (藻類バイオ)

図7より、国別の総論文数については、他の分野同様、中国と米国が抜きん出ているが、その差は殆ど無かった。また、メタ

ネーションや水素キャリアの分野では日本は上位にランクインしていたが、この分野では中位に位置していて研究が手薄であることが示唆された。なお、研究論文の総数が少ないこともあり、対象5誌に掲載された論文が殆ど無かったことから、これまでのような質の評価は行えなかった。

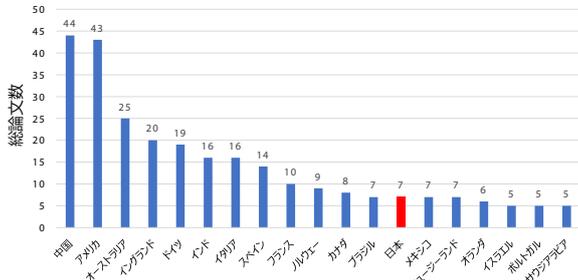


図7 国別の総論文数 燃料(藻類バイオ)分野 (出典: 学術情報データベースを基に作成)

(6) 鉱物(炭酸塩化)

図8より、国別の総論文数については、中国と米国が抜きん出ているのはこれまでよく見られた傾向である。なお、ドイツの次にイングランドが位置しているが、グラフ中にはスコットランドも見られた。ウェールズ(21件)や北アイルランド(55件)の論文も加味し、イギリスとして見るとドイツを抜いて3位になることから、この分野の研究は、イギリスが強いことが見受けられた。日本については、総論文数では中位であったが、高品質論文誌に掲載された論文が比較的多かったこともあり、質の評価では欧米諸国並みに達した。

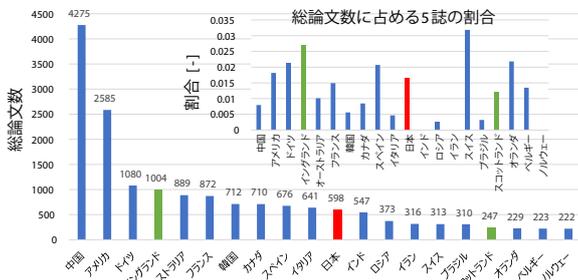


図8 国別の総論文数及び総論文数に占める5誌の割合 鉱物(炭酸塩化)分野 (出典: 学術情報データベースを基に作成)

(7) 鉱物(コンクリート化)

図9より、国別の総論文数については、中国と米国がリードしているのはこれまで同様であるが、スペインが4位にいることが特徴的であった。一方、日本は低位に甘んじており、この分野の研究は手薄であることが窺えた。

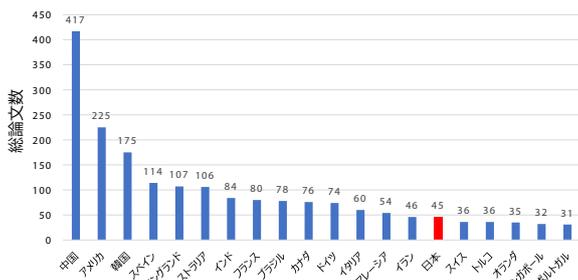


図9 国別の総論文数 鉱物(コンクリート化)分野 (出典: 学術情報データベースを基に作成)

(8) その他(オレフィン製造)

図10より、国別の総論文数については、中国と米国が抜きん出ているのはこれまでのよく見られた傾向であるが、日本が3位につけている。また、イランが4位についたことは注目に値する。

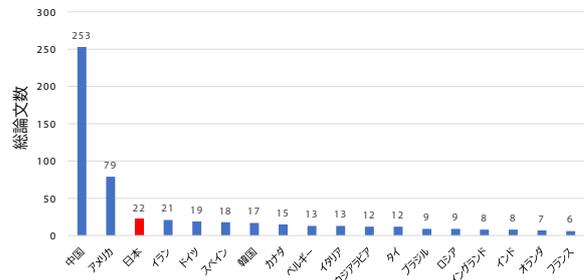


図10 国別の総論文数 その他(オレフィン製造)分野 (出典: 学術情報データベースを基に作成)

(9) 直接利用(EOR)

図11より、国別の総論文数については、中国と米国が1位、2位にいるのは他の分野と同様であるが、その差は殆ど見られなかった。また、3位のイランをはじめとするイラクやサウジアラビアといった中東諸国がランクに入り、産油国の貢献が顕著であった。一方、日本については石油資源に乏しい(国内ではほぼ産出できない)事情もあってか、他の分野と比べると本研究開発分野は弱いと思われた。

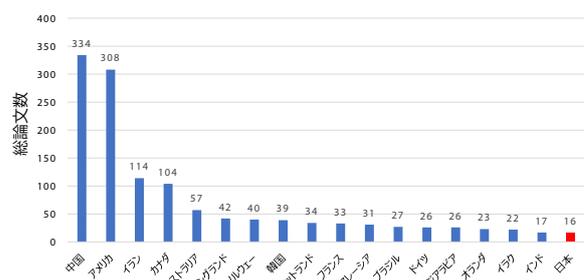


図11 国別の総論文数 直接利用(EOR)分野 (出典: 学術情報データベースを基に作成)

以上の結果から、国別の総論文数及び高品質論文の割合で整理すると、日本においては化学品・燃料分野、鉱物(炭酸塩化)では盛んに研究されているが、燃料(藻類利用)、鉱物(コンクリート)、直接利用(EOR)の分野での研究は限定的であることが窺えた。

3. カーボンリサイクル技術の社会実装に向けた課題抽出

カーボンリサイクル技術の社会実装に向けた課題を抽出するため、各分野でコア(起点)となる技術、開発過程、現在の開発状況等について整理した。なお、表1に各分野の研究開発状況を一覧できるようにまとめた。

3.1 各分野における研究開発状況

(1) メタン

メタネーション自体は1911年にフランスの化学者サバティエが発見した古い技術で、次の反応式で進行する(CO<sub>2</sub>+4H<sub>2</sub>→CH<sub>4</sub>+2H<sub>2</sub>O)。

水素源と（反応を促進する）触媒があれば CO<sub>2</sub> をメタンとして利活用可能である。この考えに基づき、（太陽光発電による電力を用いて）海水の電解で生成した水素と CO<sub>2</sub> からメタンを合成し、燃料として利活用するグローバル CO<sub>2</sub> リサイクル構想を東北大学の橋本教授が 1990 年代前半に発表した<sup>1)</sup>。メタネーションにおけるキー技術は触媒開発にある。同教授は 1993 年に Ni-Zr 合金触媒がほぼ 100% の効率で CO<sub>2</sub> からメタンに変換することに成功<sup>2)</sup>している他、日立造船とともに 1995 年に世界初の実証プラントを作製した。日立造船は現在、清掃工場の排ガス中の CO<sub>2</sub> を原料としたメタン製造実証実験を開始している。同社以外では、INPEX が、自社のガス田で排出されている CO<sub>2</sub> から合成メタンを製造し、都市ガスとして再利用する実証事業を開始している。

国内におけるメタネーション普及の課題として、「水素製造コストの低減」と「カーボンニュートラルメタンが持つ環境負荷価値の顕在化」が挙げられる。水素は水の電気分解により製造されるため、再生可能エネルギーの導入拡大により電力価格を低減することが必要。また、合成メタンはガス田などから産出される化石燃料由来メタンより価格が高くなると想定されるため、都市ガス利用に留まらない高付加価値製品（クリーンな燃料や化学品）での利用に向けた取り組みや技術開発が重要となってくる。

## (2) 一酸化炭素

一酸化炭素はそれ単独では需要が少ないものの、C1 化学に接続できることから製鉄における還元剤の他、燃料や化学品として活用できるため製品需要が多く、CO<sub>2</sub> の固定化ポテンシャルも期待されている。

逆シフト反応 (CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> → CO+H<sub>2</sub>O) による CO<sub>2</sub> 還元反応での一酸化炭素製造はすでに実用化されている。一方で、水溶液中で CO<sub>2</sub> の電解還元による一酸化炭素生成も検討されており、高温を必要としないメリットがある。CO<sub>2</sub> の電解還元は 1994 年に千葉大学堀教授ら<sup>3)</sup>により初めて報告された。2010 年代から被引用数が急激に増加していることから、この 10 年間で CO<sub>2</sub> の電解還元が注目されていることが窺い知れる。

しかし、CO<sub>2</sub> から一酸化炭素への還元には、現状多量の電力を消費するため、ネガティブエミッションを実現するためには再生可能エネルギー等のカーボンフリー電源の利用が必要となる。

## (3) メタノール／エタノール

CO<sub>2</sub> から製造できる化学品及びその基幹物質となるものに、メタノールやエタノールが挙げられる。Lurgi 社は、CO<sub>2</sub> と水素からメタノールを生産する活性の高い触媒を開発し、世界で初めて CO<sub>2</sub> からのメタノール合成を実証<sup>4)</sup>した。基本的には Cu ベースの触媒が用いられ、200℃～300℃程度の高温と 2～10MPa の高圧を要している。しかしながら、2021 年に入り、産業技術総合研究所 (AIST) が低温 (30℃～60℃)・低圧下 (0.4～5MPa) で高い選択性でメタノール合成できる触媒を開発<sup>5)</sup>したと米国化学会誌で発表している。また、三井化学や三菱ガスなどが再エネ電解から製造した水素と火力発電所などの排ガスからの CO<sub>2</sub> で合成メタノールを製造する調査・実証事業を始めている。

## (4) ポリカーボネート

CO<sub>2</sub> からのポリカーボネート合成は、有毒なホスゲンの原料利用、環境負荷の大きい塩化メチレンの利用などの課題がある従来の製法を代替できる点で有望である。CO<sub>2</sub> 原料の研究開発においては、脱水反応が鍵であり、生成する水に伴う反応の平衡制約により反応効率が極めて低いことが課題となっていた。東北大学の冨重教授らは、脱水剤 2-シアノピリジンを利用し、CeO<sub>2</sub> 触媒による CO<sub>2</sub> とアルコールからの高効率なカーボネート化合物合成を実現<sup>6)</sup>している。また、旭化成では、CO<sub>2</sub> を原料利用とした非ホスゲン法を開発し、海外でポリカーボネート生産の事業化を実現している。

製品需要は現状少ないため、CO<sub>2</sub> の固定化ポテンシャルを増やすためには、用途開発が必要となる。また、CO<sub>2</sub> はホスゲンと比べて反応性が低いため、多くの投入エネルギーを必要とする。そのため、再生可能エネルギーを活用するなど、CO<sub>2</sub> 排出量を増加させないように製造プロセスを工夫することが重要となってくる。

## (5) 藻類バイオ燃料

藻類を用いた燃料生産の研究開発は米国で約 30 年前に開始され、Gracilaria tikvahiae という藻類バイオマスから、投入太陽光エネルギーに対して最大 22% のエタン製造に成功<sup>7)</sup>している。その後、2000 年代に米国で多くのベンチャー企業が誕生したが、コストの問題から開発を断念、あるいはターゲットを付加価値品に変更したものも多い。

日本では、IHI、ユーグレナ等が公的資金援助を受けながら藻類由来のバイオジェット燃料の商用化に向けた検討が進められている。

## (6) メタノール／尿素の増産

CO<sub>2</sub> を有効利用する技術の多くは発展途上にある中、メタノール・尿素の増産技術については既に実用化している。

カタールのメタノール製造工場において、三菱重工業の CO<sub>2</sub> 回収プラント（回収能力：500トン/日）により回収された CO<sub>2</sub> がメタノールの増産に利用されている。

同様に、マレーシア、インド、UAE 等の尿素製造工場において、三菱重工業の CO<sub>2</sub> 回収プラントにより回収された CO<sub>2</sub> が尿素的増産に利用されている。

メタノール／尿素増産におけるコア技術は、工場排ガスからの CO<sub>2</sub> の回収技術である。三菱重工業と関西電力が低エネルギー・低コストを実現する特殊な吸着液を開発<sup>8)</sup>し、自社のプラントに導入している。

## (7) 鉱物化

炭酸塩は自発的に反応が進行する上、水素を必要としないため、投入エネルギーが少ない。そのため、コスト面でも経済性が成立しやすく、早期実現が可能と考えられる。

マギル大学 (カナダ) のグループにより、セメント内のカルシウム成分に CO<sub>2</sub> を反応させて炭酸カルシウムをコンクリートのバインダーとして使うことが 2006 年に提唱され、作製したコンクリートの強度も強かったと報告<sup>9)</sup>されている。また、炭酸塩は廃コンクリートや

鉄鋼スラグ、石炭灰、バイオマス燃料灰等に含まれるアルカリ土類金属源に対してCO<sub>2</sub>を付加することが可能であり、これらの国内発生量を元に産出した場合のCO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルが期待される。

海外では欧米のスタートアップ企業での商用化、日本においても鹿島建設らがCO<sub>2</sub>吸収コンクリート製品を商用化している。ただし、コスト低減と用途拡大が課題である。

表1 各分野における研究開発状況まとめ

	画期的論文	途中経過	現在の状況	考察
メタン	・グローブ(二酸化炭素リサイクル)構築の提案 <sup>1)</sup> ・CO <sub>2</sub> からメタンをほぼ100%の選択率で変換する触媒開発に成功 <sup>2)</sup>	グローブ(二酸化炭素リサイクル)構築の提案者(東北大学本教授)と日立造船がプロトタイプを作製	INPEXが実証実験を開始/日立造船が実証実験を開始	反応自体は成熟した技術のため、水素価格が低下すれば事業化は可能
一酸化炭素	千葉大電教授らのCO <sub>2</sub> の電解還元を初実証 <sup>3)</sup>	2018年以降、CO <sub>2</sub> 電解還元研究が加速	基礎研究段階	電力価格の低下の他に、電圧低下での電極還元が可能にする電極開発が必要
メタノール/エタノール	Lurgi社CO <sub>2</sub> からのメタノール合成を初実証 <sup>4)</sup>	産総研が低圧低温下、高い選択性でメタノール合成できる触媒プロセスを発表 <sup>5)</sup>	・CRI(アイスランド)が事業化 ・三井化学が実証プラント稼働中 ・三菱ガス等が合成プラント設置に向けた調査開始	反応自体は成熟した技術のため、水素価格が低下すれば事業化は可能
ポリカーボネート	東北大学電教授らがCO <sub>2</sub> 触媒による二酸化炭素とアルミニウムからの高効率なポリカーボネート化合物合成を実現 <sup>6)</sup>	-	旭化成が触媒プロセスを開発し、海外での事業化を進め	製品需要は現状少ないため、用途開発が課題
バイオ燃料	米ノバティが糖類/バイオマスからエタノール製造に成功 <sup>7)</sup>	-	・米国ではベンチャー企業の創産、スタートアップを付加価値製品に実用化 ・国内ではHI、ユーグレナ等がNEDO等公的資金援助を受け研究開発・実証中 ・三菱重工のCO <sub>2</sub> 回収技術が各国のプラントで採用	大規模実証を通じた低コスト化、供給拡大が課題
メタノール/尿素増産	関西電力/三菱重工業が低エネルギー・低コストを実現する新規CO <sub>2</sub> 吸着剤を開発 <sup>8)</sup>	-	三菱重工のCO <sub>2</sub> 回収技術が各国のプラントで採用	反応自体は成熟した技術のため、CO <sub>2</sub> 吸着剤の性能向上に伴い生産性向上
鉱物化	加マギル大がセメント内のカルシウム成分にCO <sub>2</sub> を反応させて形成したCO <sub>2</sub> をバインダーとしたコンクリート製造 <sup>9)</sup>	-	・O. C. O. Technology(英国)、道徳建設が事業化 ・GreenDre(米国)がバインドプラント建設 ・大成建設がカーボマイナスのコンクリートを開発	・自発的に反応が進行する上、水素を必要としないため投入エネルギーが少なくない。 ・市場が限定的のため、公共建設の活用等で販路拡大に期待

(出典：参考文献、公開情報を基に作成)

### 3.2 カーボンリサイクル技術を社会実装するための課題

カーボンリサイクルに関するこれまでの取り組みを整理すると、以下のような課題が見えてきた。

#### (1) 技術的な課題

CO<sub>2</sub>を固定化する際の化学的なプロセスが、発熱反応か吸熱反応かでその難易度は大きく異なる。前者であればエネルギーを投入しなくても反応が進行するため、技術的難易度は低い。これに該当するのが炭酸塩化で、既に商業利用化が進んでいる。

一方、CO<sub>2</sub>を還元し、燃料や化成品を製造する過程は後者にあたり、外部から電力などのエネルギーを投入する必要がある。このエネルギー投入に際しては、エネルギー製造に起因するCO<sub>2</sub>削減の観点から再生可能エネルギーの投入、かつ、製造コスト削減の観点から安価であることが求められる。

#### (2) 市場の課題

ポリカーボネートのように現状の市場規模がそれほど大きくない場合、必要な製品量が少ないため、CO<sub>2</sub>削減効果は小さい。そのため、新用途の開発による製品自体の市場拡大も同時に行う必要がある。

#### (3) 政策上の課題

カーボンリサイクル技術で製造された製品の購入にあたり、優遇策が取られないと広く市場には行き渡らない。そのため、カーボンリサイクル製品の導入を促す政策(CO<sub>2</sub>固定化製品の認証制度等)が必要である。また、政権に左右されない安定的な研究資金援助も重要である。

## 4. 最後に

カーボンリサイクルに係る総文献数で評価すると、日本は欧米や中国より劣っているのが現状であるが、化学品・燃料分野では日本がコア技術となる画期的な論文を発表しているなど、開発競争力を有していると考える。日本の強みとなる技術を磨くと共に、幅広い分野での研究開発を推進していくことが肝要である。

カーボンリサイクル技術を社会実装するための課題としては、技術的な課題(低コスト化等)、市場の課題(販路拡大等)、政策上の課題(認証制度、安定的な研究資金援助等)が見えてきた。これらの各種課題の解決には、企業のみならず、産学官あるいは日本全体で連携していくことが不可欠となる。さらには、カーボンリサイクルの市場拡大を考えると、国内だけでなく国際連携も視野に入れることが重要である。

## 5. 参考文献

- 1) K. Hashimoto, "Metastable metals for "green" materials for global atmosphere conservation and abundant energy supply", *Materials Science and Engineering*, A179/180, 27-30 (1994)
- 2) K. Wada, H. Habazaki, A. Kawashima, K. Asami, K. Hashimoto, "CO<sub>2</sub> Methanation Catalysts Prepared from Amorphous Ni-Valve Metal Alloys Containing Platinum Group Elements", *Science reports of the Research Institutes, Tohoku University. Ser. A, Physics, chemistry and metallurgy*, 38, 76-87 (1993)
- 3) Y. Hori, H. Wakebe, T. Tsukamoto, O. Koga, "Electrocatalytic Process of CO Selectivity in Electrochemical Reduction of CO<sub>2</sub> at Metal Electrodes in Aqueous Media", *Electrochimica Acta*, 39,1833-1839 (1994).
- 4) H. Goeha and P. Koenig, "Producing methanol from CO<sub>2</sub>", *CHEMTECH*, 24, 36-39 (1994).
- 5) R. Kanega, N. Onishi, S. Tanaka, H. Kishimoto, Y. Himeda, *J. Am. Chem. Soc.*, 143, 1570-1576 (2021).
- 6) M. Honda, M. Tamura, Y. Nakagawa, S. Sonehara, K. Suzuki, K. Fujimoto, K. Tomishige, *ChemSusChem*, 6, 1341-1344 (2013).
- 7) E. A. Laws and J. L. Berning, "Photosynthetic Efficiency Optimization Studies with the Macroalga *Gracilaria tikvahiae*: Implications for CO<sub>2</sub> Emission Control from Power Plants"; *Bioresource Technology*, 37, 25-33 (1991).
- 8) T. Minura, H. Simayoshi, T. Suda, M. Iijima, S. Mituoka, "Carbon Dioxide Recovery in Power Plant by Chemical Absorption Method and Steam System", *Energy Conversion and Management*, 38, S57-S62 (1997).
- 9) Y. Shao, M. Saeed Mirza, X. Wu, "CO<sub>2</sub> sequestration using calcium-silicate concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33, 776-784 (2006).

#### 【謝辞】

本調査結果は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務から得られたものである。

# カーボンニュートラルに向けたアンモニアマイクロガスタービンを活用した 先進農業にかかる技術実証事業を本格スタート

カーボンニュートラル推進部 水素・アンモニア室 窪田 富雄

## 1. 背景

昨年10月に2050年カーボンニュートラル宣言がなされて以来、環境意識の高い企業においては、新型コロナウイルス感染症を契機に、カーボンニュートラルに道筋をつける等の動きが加速化している。電力業界では、アンモニアは石炭火力発電の分野ですでに脱硝装置用触媒として使われているが、今後はカーボンフリー燃料として火力発電への混焼、さらに専焼へ適用していく実証が進められており、我が国のCO<sub>2</sub>削減に大きく貢献する技術と期待されている。

また、カーボンニュートラル達成に向けては、燃料の脱炭素という考え方だけでは不十分であり、CCSあるいは森林や海を中心とした吸収源という考え方を重視したカーボンリサイクルという考え方が極めて重要である。これまで、JCOALとしては秋田県との協力関係の下、岩館漁港での人工藻場造成事業、いわゆるブルーカーボンに係る事業を取り組みつつあるが、秋田県の農林水産業には、大きなポテンシャルを感じているところである。

このような状況の中で、JCOALは株式会社トヨタエナジーソリューションズ（本社：豊田市、代表取締役社長 等 哲郎氏）を代表事業者として、株式会社秋田農販、公立大学法人秋田県立大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人東北大学と共同で、農商工連携、産学官連携による環境省の「令和3年度環境省CO<sub>2</sub>排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の公募に対し、「アンモニアマイクロガスタービンのコージェネレーションシステムを活用したゼロエミッション農業の技術実証」として応募した結果、採択され委託事業として受託し、この度プロジェクトを本格的にスタートした。本事業の委託期間は2021年5月から2023年3月までとなり、一般社団法人クリーン燃料アンモニア協会、秋田県、大仙市、秋田県産業技術センターのご協力を頂き、本事業を推進して行く。

## 2. 目的

農業用ハウスでは、周年での栽培に伴う暖房用の灯油や冷房用の電力消費によるCO<sub>2</sub>の排出が課題となっている。本事業はカーボンフリーのアンモニア燃料によるマイクロガスタービンのコージェネレーション（熱電併給）を活用した周年ハウス農業の最適栽培管理システムを開発し、農業分野におけるカーボンフリー燃料への転換と電化促進を実現することで、農作物の生産性向上とCO<sub>2</sub>排出削減に貢献するものである。

図1に実証圃場の所在地を示す。

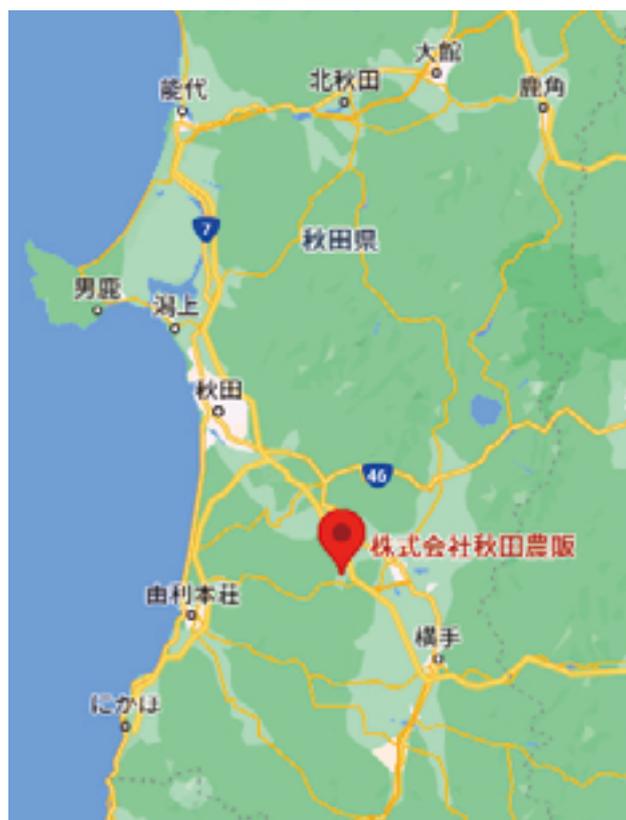


図1 実証圃場所在地（株式会社秋田農販）

## 3. 技術開発・実証事業概要

実証事業では株式会社秋田農販のイチゴとミニトマトのハウス各2棟で、マイクロガスタービン（50キロワット級）で発電した電気と熱を使用する。冬場は日照時間を補うための発光ダイオード（LED）照明、夏場はクーラーなどに電力を使用する。さらに発電で生まれた熱で水を温め、循環させることで冬のハウスの温度を一定に保ち、CO<sub>2</sub>を排出しない周年農業を目指す。実証圃場における装置設置等を今年度中に完了し、今年度末から試運転、安全確認を行い来年度の実証運転を行う予定である。図2に本事業における技術開発概念図を示す。

実証試験においては日照、ハウス内CO<sub>2</sub>濃度、温度計測などのデータを統合システムで採取し、秋田県立大学による生育データとの分析による植栽条件の最適化を検討する。

また、実証によるイチゴ、トマトの想定収量を確保することにより、ハウス園芸で行われているほとんどの農作物に本システムの適用が可能になるものと期待されている。

株式会社トヨタエナジーソリューションズのマイクロガスタービンは2014年度からアンモニア燃焼による開発を開始（SIPプログラムに参加）し、アンモニア100%専焼として50キロワット級、300キロワット級に成功し、令和2年度二国間クレジット取得等のためのインフラ整備実証事業として1週間の連続運転を実施している。本事業ではアンモニアマイクロガスタービンの最初の農業利用として、安全基準の順守とともにハウス側エネルギー需要に対応した負荷追従プログラムの開発等を国立研究開発法人産業技術総合研究所の協力により行う。

また、ゼロエミッション農業の実現には、アンモニアマイクロガスタービンの起動燃料についてもカーボンフリー化・カーボンニュートラル化が必要となる。国立研究開発法人産業技術総合研究所は国立大学法人東北大学と共同で、カーボンフリー起動燃料の選定と、試験設備による燃焼試験を行う。

JCOAL は本事業の中で、一般社団法人クリーン燃料アンモニア協会、秋田県産業技術センターのご協力を頂き、農業ハウス

栽培へのアンモニアマイクロガスタービンのコージェネレーションシステム導入における市場規模の検討、市場規模に対する普及シナリオ、CO<sub>2</sub>削減シナリオの検討、アンモニア供給システムの安全性の検証、およびCO<sub>2</sub>フリーアンモニアの市場動向とサプライチェーンの立案等を行う。将来的には風力発電などの再生エネルギー発電事業の盛んな秋田県における脱炭素エネルギーの地産地消への可能性も検討する。図3にアンモニアサプライチェーンの将来の姿を示す。

#### 4. まとめ

JCOAL としては、今年度よりカーボンニュートラル推進部を新たに立ち上げ、その推進の目玉として、水素・アンモニア室を立ち上げた。本事業はJCOALにとってアンモニア関連の第1号案件であり、本プロジェクトを最大限バックアップさせて頂くとともに、更なるアンモニアに関する経済性などの普及課題についての課題解決についても、取り組む所存である。

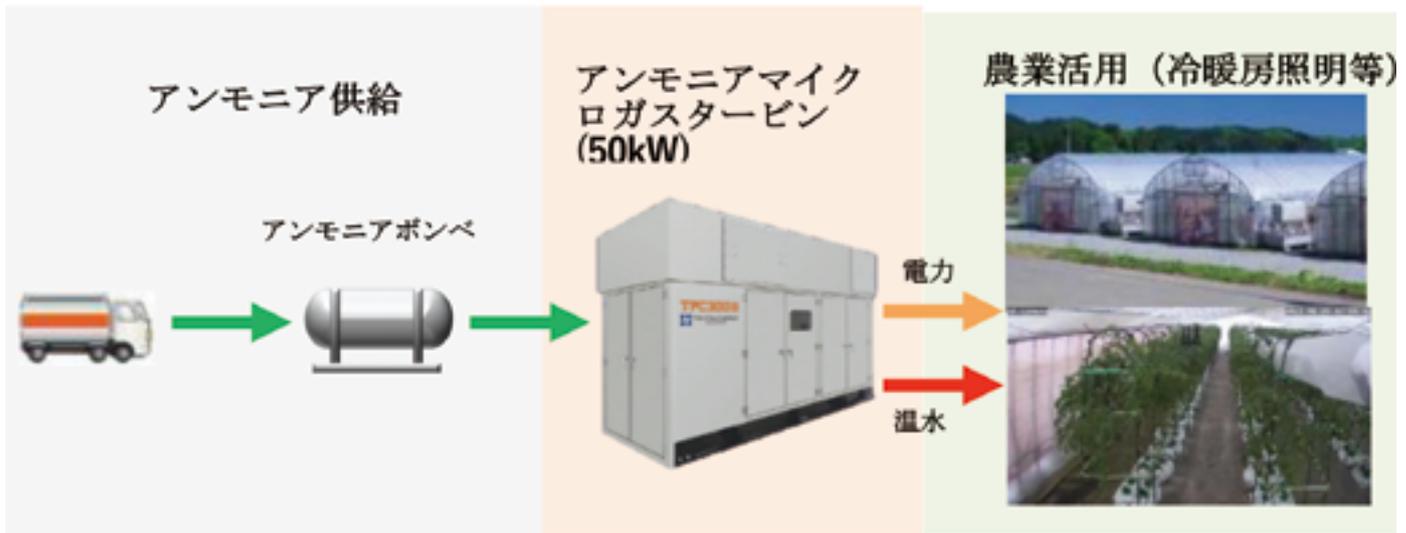


図2 技術開発概念図



図3 アンモニアサプライチェーンの将来の姿

# 鉱業終了後の施設の後処理と有効活用

資源開発部 小柳 伸洋

## 1. はじめに

鉱業終了後に留意すべき大きな環境対策として、採掘跡地（特に露天鉱）のリハビリテーションと緑化による景観の回復、ボタ山の安定化と覆土・植栽等が挙げられる。JCOAL はインドネシアやベトナム等で操業中の炭鉱に、本邦の閉山後処理の実例を機会あるごとに紹介している。ここに三池炭鉱のケースを示す。

1997年3月30日、三井石炭鉱業(株)三池炭鉱所(三池炭鉱)が閉山した。町の中心部には選炭工場の関連施設が位置し跡地利用が可能な形での鉱業施設の早急な後処理が求められた。

ここで、選炭工場とは採掘されたばかりの石炭を受入れ比重分離装置や浮遊選鉱装置を通して原料炭や各種一般炭などの商品炭を生産すると共に、主に岩石から成るボタを分離する設備である(図1)。得られた原料炭や各種一般炭などの商品炭は需要家に送れば処理は完了するが、分離されたボタは自社で最終処分する必要がある。また、選炭工場の固液分離装置から排出される選炭廃水は選炭工場外に設けられた広大な沈殿池で自然沈降させて懸濁物質を更に減らした後に公共用水域に排出するのが一般的である。そのため、ボタ処分のための「ボタ集積場」、「選炭廃水沈殿池」が町の中心部に位置した。そこで、両施設の後処理状況と現在の有効活用状況について紹介する。なお、筆者は閉山当時の三池選炭工場の責任者である。

ボタ海洋投棄船は梅丸(7,000dw)、四国沖B海域まで往復3日の工程で航行していた。潮待ちやドック入りの都合上、年間の最大航海数は100航海程度である。

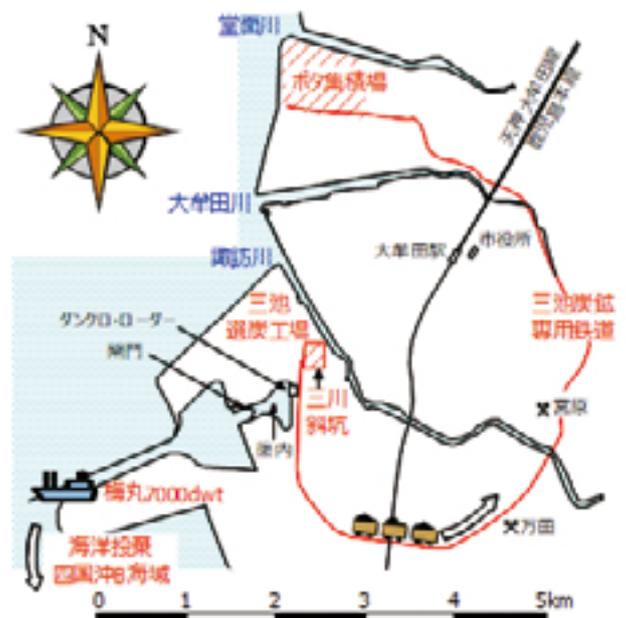


図2 三池炭鉱のボタ処理

余談であるが、梅丸の専用埠頭は三池港渠内(きよない)である。有明海の大きな干満の差(5.5m)を開門(こうもん)の開閉で制御して渠内の水位を調整している。これら渠内や開門施設は明治41年製である。また梅丸へのボタ積み込み機はダクロ・ローダー(当時の三井鉱山幹部 團琢磨と黒田恒馬の頭文字)と呼ばれ明治44年製である。

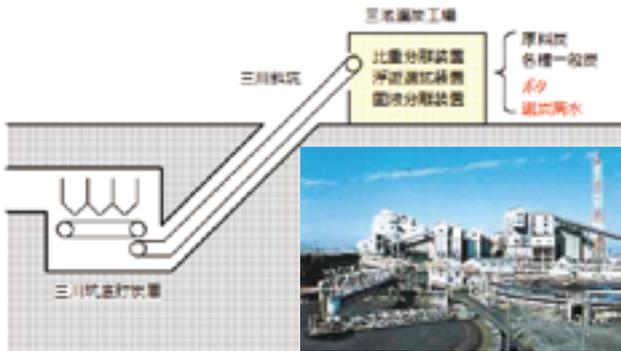


図1 三池選炭工場

## 2. ボタ集積場の後処理と有効活用

三池炭鉱にボタ山は無い。三池選炭工場の北方3kmの地点に約60haのボタ集積場があり、ここに高さ数メートルを限度にボタを集積していた。この集積高さが計画値に達して以降はボタの海洋投棄に切り替えた(図2)。



図3 開門(こうもん)

出所: 大牟田の近代化遺産 HP



図4 閘門を開閉する水圧ポンプ  
出所：大牟田の近代化遺産 HP



図5 ダンクロ・ローダー  
出所：大牟田の近代化遺産 HP



図7 ボタ集積場跡の有効活用状況(写真)  
出所：(株)九州新エネルギー機構 HP

このエコタウン構想は、ある産業から出る全ての廃棄物を新たに他の分野の原料として活用し、あらゆる廃棄物をゼロを目指す「ゼロエミッション構想」を基軸に地域の振興を図りながら環境と調和した町づくりを推進する事業である。



図8 大牟田市エコサルクセンター  
出所：大牟田市エコサルクセンター HP

いずれ劣らぬ国宝級の港湾施設は使用料も高い。元々高価な梅丸コストにこれら港湾施設使用料が上乗せされボタの海洋投棄費用は高騰した。かかる状況下、ボタ処理の担当者として熟考しひねり出した標語が「ボタの長旅禁止」である。本標語を各坑の採鉱技術者に情宣した。

ボタ海洋投棄の開始以降、ボタ集積場が使われなくなったため時機を見てボタ集積場の後処理に着手した。後処理内容は整地(レベリング)、覆土・植栽、調整池・放流路の造成である。難しい工事ではないが面積が60haと広大なため完成までに数年を要した。なお、この完成は有効活用の土台の完成であり、実際の有効活用に際しては更なる土木工事が実施されている。

図6と図7に現在の有効活用状況を示す。ボタ集積場跡の西半分には15MW(68,448枚)のメガソーラーが設置され、東半分には大牟田エコタウンと称して多くの企業が進出している。



図9 大牟田・荒尾 RDFセンター  
出所：大牟田・荒尾清掃施設組合 HP

また、メガソーラーと堂面川の間にはひまわり畑があり20万本のひまわりが毎年公開されている(春にはポピー畑となる)。



図6 ボタ集積場跡の有効活用状況



図10 ひまわり畑  
出所：(株)九州新エネルギー機構 HP

### 3. 選炭廃水沈殿池の後処理と有効活用

選炭廃水の最終沈殿池で、ここのオーバーフローが公共用水域に放流される。大牟田市の中心部に位置する、泥水を湛えた

危険な沈殿池群である。沈殿池周辺への一般人の立入りを厳しく管理するも不法侵入が跡を絶たず、閉山を間近に控え早期の沈殿池埋め立てが迫られた。そこで、出炭量・選炭量が減少し選炭廃水量も減少するなか、これまで使用の広大な「沈殿池 A 群」を止め、より小容量の「沈殿池 B」に切り替えた。切り替えに際しては凝集剤を増量し、使わなくなった「沈殿池 A 群」はボタで埋め立てた(図 11)。

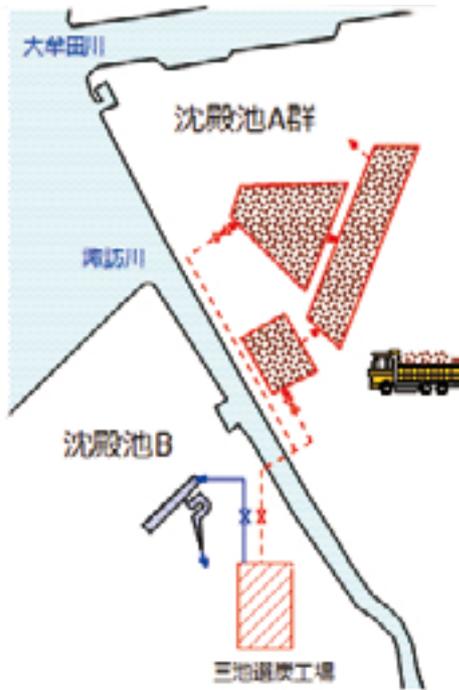


図 11 使用沈殿池の変更

「沈殿池 A 群」が無くなり、町の中心部に広大な未使用地が出現したため石炭産業科学館をはじめ帝京大学、大型商業施設、諏訪公園等の多くの施設が設立される土台となった(図 12)。



図 12 沈殿池跡地の有効活用



図 13 石炭産業科学館(全景)

出所：石炭産業科学館 HP



図 14 石炭産業科学館 屋外(後方の建物は帝京大学)

出所：石炭産業科学館 HP



図 15 大型商業施設

出所：イオンモール大牟田 HP



図 16 諏訪公園

出所：諏訪公園 HP

#### 4. 有明海沿岸道路と選炭工場跡地の利用

有明海沿岸道路は福岡県大牟田市から佐賀県鹿島市に至る延長 55km の自動車専用道路で 2008 年 3 月に一部が開通した。

今回紹介したボタ集積所跡、選炭廃水沈殿池跡に隣接して敷設され、さらに選炭工場跡地を縦断して南下している。将来的にはさらに南進し、熊本・天草幹線道路まで延長する構想もある。



図 17 有明海沿岸道路(矢部川橋梁)  
出所：有明海沿岸国道事務所 HP

選炭工場は使わなくなったら単に解体するのみである。解体した跡地を有明海沿岸道路が通過している。

現在、選炭工場跡地にはシグマパワー有明の2つのバイオマス発電所がある。三川発電所は2017年4月に石炭焼きからリニューアブルして稼働中、大牟田発電所は建設中である(図18)。



図 19 シグマパワー有明 三川発電所  
出所：シグマパワー有明 HP



図 20 シグマパワー有明 大牟田発電所(完成イメージ図)  
出所：シグマパワー有明 HP

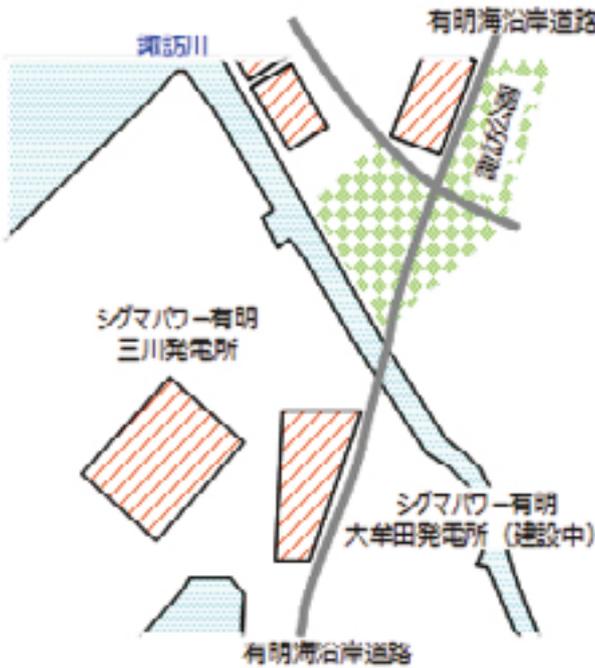


図 18 選炭工場跡地の活用状況

三川発電所には東芝の大規模なCO<sub>2</sub>分離回収設備が設置され2020年10月から実証運転を開始しており定格運転時に発生する日量約1,000トンのCO<sub>2</sub>の50%以上を分離回収する。

本発電所は椰子殻を主燃料としたバイオマス発電所で BECCS (Bio-Energy with CCS) 対応設備となりネガティブエミッション技術となる。

表 1 シグマパワー有明 三川・大牟田発電所の仕様

	出力	発電方式	主燃料	運転開始
三川発電所	50,000kW	バイオマス 発電	椰子殻	2017年4月
大牟田発電所	1U：22,100kW			1U：2021年秋(予定)
	2U：22,100kW			2U：2021年冬(予定)
	計：44,200kW			

出所：シグマパワー有明 HP

## 5. おわりに

三池炭鉱が閉山してやがて四半世紀を迎える。かつて町の中心部に陣取っていた鉱業施設は影も形もなくなり跡地には時代に即した新たな産業が根付いている。

JCOALはインドネシアやベトナム等の炭鉱に対し機会あるごとに本邦における鉱業終了後の施設の後処理に関し技術的事項を含め詳細に紹介してきた。

インドネシアやベトナム等における鉱業施設の立地状況は本邦のそれとは異なるであろうし、有効活用が可能な環境も本邦とは大きく異なるであろう。しかし、ここに紹介した本邦の鉱業施設の後処理の最終目標はインドネシアやベトナム等と同様、炭鉱による環境破壊の防止と有効活用の活性化である。

JCOALは炭鉱による環境破壊を防止する一助とすべく、本邦における鉱業終了後の施設の後処理状況と有効活用状況について、インドネシアやベトナムをはじめ、その他産炭国の炭鉱に対し今後とも機会あるごとに紹介していきたい。

# グリッド変動指数 (GFI) の導入および エネルギー移行期における ASEAN 諸国の系統変動傾向の予測

技術開発部 村上一幸  
国際事業部 山田 史子、小澤 政弘、手打 晋二郎

## 1. はじめに

2021年10月6日、7日に開催されたインドネシア Purnomo Yusgiantoro Center (PYC) 主催の International Energy Conference 2021 において、JCOAL から投稿した論文“Grid Fluctuation Index (GFI) to Support Countries in the Energy Transition”が論文コンペティションで8位に入賞したので、投稿論文の概要を報告する。なお GFI とは、ACE (ASEAN Centre for Energy) と JCOAL が共同で作成した ASEAN のエネルギー移行期における石炭の役割に関するレポートで検討、構築した指標であり、いつ頃どの程度系統変動が顕著になるかを示すことができる。

## 2. 背景と目的

気候変動に対処するためのエネルギー転換の世界的な目標は、主に再生可能エネルギーの大規模な導入が主導となっている。最近では、グリッド分析自体が非常に複雑であるにもかかわらず、再生可能エネルギーによるグリッド変動とその柔軟性対策がしばしば議論されている。

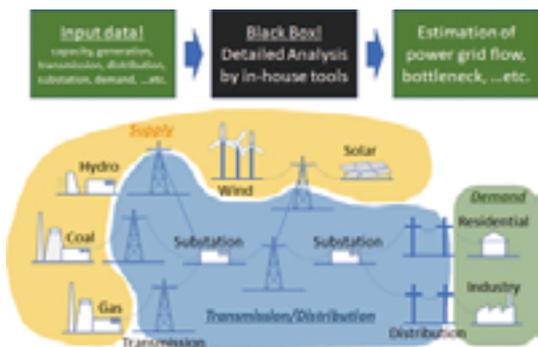


図1 典型的な電力網とその分析フロー

電力系統の負荷変動状況を分析するには、図1に示すように、各電源の発電、送電、変電所、消費者への配電、電力需要、天候などのすべての要素が必要で、ボトルネックを調べるためには上記のパラメータを詳細に調査する必要がある。したがって、分析用の大規模データとそれらを分析するための専用ツールおよび高度な専門知識が不可欠となっている<sup>1,2</sup>。通常、このような高度な分析は、送電網を管轄する電力会社または関連組織に限定されており、外部から負荷変動の状態を知ることはできず、まして将来の負荷変動を予測することは非常に困難である。

したがってこの論文では、設備容量や発電量などの従来のパラメータの多変量解析によってグリッド変動の程度を推定するための簡略化された分析ツールを提供することを目的とした。また第2の目的は、GFI分析を使用して、ASEAN 諸国の将来のグリッド変動挙動を推定することにある。

## 3. 分析手法

本研究では、主要国のダックカーブをウェブサイト等から入手し、カーブの最大勾配から GFI を算出した。さらに、対応する発電量データを公開サイトから取得し、GFI との相関を分析し、GFI 予測モデルは多変量解析を用いた。

### 3-1. 公開サイトからのデータ収集

ウェブサイト等に掲載されている主要国のダックカーブ<sup>3~18</sup>を収集し、最大勾配をダックカーブに対応する設備容量で割った値を GFI と定義した。計算例を図2及び(1)式に示す。

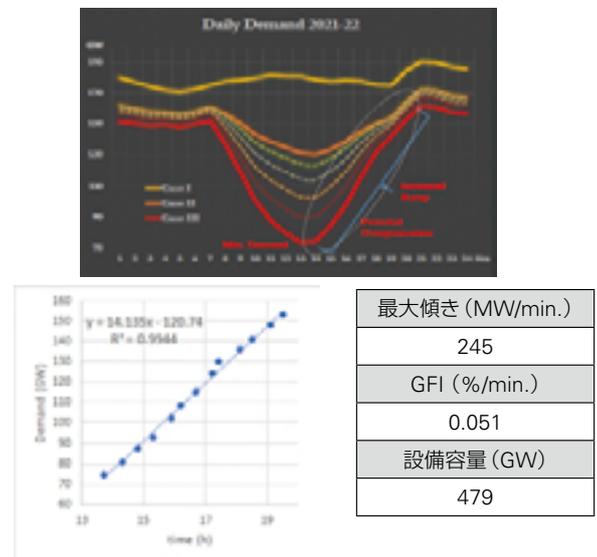


図2 ダックカーブと GFI の計算例

$$GFI = S_{max} / ICAP \quad (1)$$

ここで GFI はグリッド変動指数 (%/min.)、 $S_{max}$  は最大傾斜 (MW/min.)、ICAP は設備容量 (GW) である。GFI は、同様に Web サイトから取得したダックカーブから計算した。次ステップとして、米国 EIA の「International Energy Outlook 2019」から、GFI に対応する各国および各年の電源による発電量と設備容量を収集した。電源データには、石炭、石油、ガス、水力、総再生可能エネルギー、

太陽エネルギー、風力を採用した。地熱とバイオマスは、総再生可能エネルギーに含まれる。また電源別設備利用率は発電量と設備容量から計算、各シェアも同様に電源別データから計算した。

### 3-2. 分析手順

通常の変数解析では変数が多い場合にオーバーフィッティングが発生する。したがってデータは最初に平均値が0、標準偏差はすべてのデータで±1となるように変換した。データの規格化後、GFIと42個の規格化された変数すべての間の単相関を調べ、相関の高い変数を抽出した。本研究では、変数間の共線性の影響を考慮して、部分最小二乗法 (Partial Least Square, PLS) を適用した。PLS 法の詳細については、文献<sup>19,20</sup>等を参照されたい。得られたデータに対して「実験値」と「計算値」の検証チェックを行い、結果が適切でない場合は選択した変数を変更しデータ自体の特異性を確認するループを通じて、最終的な回帰モデルを取得した。

表1に、重回帰に用いたGFIと4つのパラメータのデータセットを示す。石炭、原子力、再生可能エネルギーの合計、および太陽光の利用率 (Energy Availability Factor) は相対的に高い相関係数を示したため、重回帰のパラメータとして選択した。これらの利用率は、EIA サイトの各エネルギー源の発電量と容量から計算したものである。

表1 重回帰に用いた各国のGFI値と利用率のデータ

Country	year	GFI	Coal EAF (%)	Renewable EAF (%)	Nuclear EAF (%)	Solar EAF (%)
United States	2020	0.095	51.4	27.9	93.2	20.1
OECD Europe	2030	0.058	36.3	26.9	78.0	22.5
Japan	2020	0.054	59.4	20.1	65.0	19.0
South Korea	2030	0.054	33.3	24.2	88.9	21.1
Australia & New Zealand	2020	0.149	75.1	28.7	0.0	21.7
Russia	2020	0.052	34.4	25.8	83.5	21.7
India	2020	0.040	43.3	28.0	66.2	21.7
India	2022	0.051	45.3	28.3	66.1	22.6
Middle East	2020	0.051	10.0	21.7	74.5	21.7
Africa	2020	0.133	52.4	26.1	79.4	21.7
Brazil	2020	0.012	37.7	22.7	81.1	14.1

### 3-3.PLSによる多変量解析

表1の規格化されたデータからGFIを予測するために、4つの変数を使用して(2)式の回帰モデルを構築した。

$$GFI = w_1 X_{coal} + w_2 X_{nuclear} + w_3 X_{renew} + w_4 X_{solar} + E \quad (2)$$

ここで、Xcoal、Xnuclear、Xrenew、Xsolarはそれぞれ石炭、原子力、総再生可能エネルギー、太陽光のエネルギー利用率であり、w1、w2、w3、w4はそれぞれXcoal、Xnuclear、Xrenew、Xsolarの係数、Eは残差である。

## 4. 結果と考察

### 4-1. 回帰モデル

表2に回帰モデルの各変数の係数を示す。係数の大きさから、石炭火力と太陽光発電の利用率が主にグリッド変動に影響していることが判明した。

表2 回帰式における各変数の係数

X	coefficient	value
X <sub>coal</sub>	w <sub>1</sub>	0.0015
X <sub>nuclear</sub>	w <sub>2</sub>	-0.0001
X <sub>renew</sub>	w <sub>3</sub>	-0.0003
X <sub>solar</sub>	w <sub>4</sub>	0.0071

図3は、回帰モデルから計算されたGFIと各国のダックカーブから計算されたGFIの比較を示す。横軸は実測値、縦軸は計算値である。

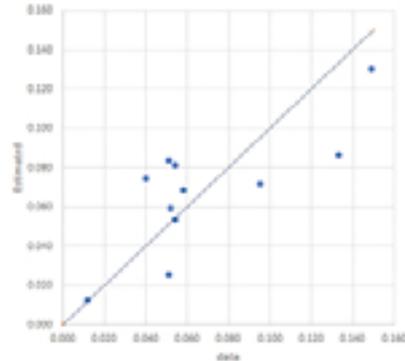


図3 回帰式のバリデーションチェック

全体的な傾向として、実測値と計算値はよく一致していることがわかる。一方、0.04から0.06の範囲は、外れ値が多く、より複雑な要素があるように思われるが、本研究の範囲は全体的な傾向を把握することであるため、将来の検討としたい。

### 4-2.EIAデータに記載されている国のGFI挙動

表3に、EIAサイトにリストされている国のGFI予測値を示す。このように、各電力の電源ごとの発電量と設備容量に関するデータが利用可能であれば、グリッド変動所帯の程度を簡単に予測することが可能である。図4、5に典型的な例として、ブラジル、中国、インド、および日本のGFIの比較プロットを示した。図4は年、図5はベースロード電源である石炭および原子力発電のシェアを横軸にとった場合のGFI値の変化である。

表3 重回帰に用いた各国の2020-2050年のGFI値

Country	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
United States	2020	2025	2030	2035	2040	2045	0.121
OECD Europe	0.072	0.103	0.114	0.115	0.119	0.119	0.025
Japan	0.026	0.026	0.026	0.026	0.025	0.025	0.067
South Korea	0.026	0.027	0.031	0.038	0.047	0.058	0.075
Australia & New Zealand	0.056	0.067	0.069	0.068	0.071	0.073	0.081
Russia	0.082	0.082	0.082	0.082	0.079	0.081	0.038
India	0.053	0.057	0.054	0.052	0.045	0.039	0.142
India	0.130	0.140	0.136	0.131	0.124	0.134	0.065
Middle East	0.060	0.037	0.045	0.049	0.063	0.064	0.089
Africa	0.077	0.083	0.087	0.086	0.089	0.091	0.134
Brazil	0.026	0.037	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048

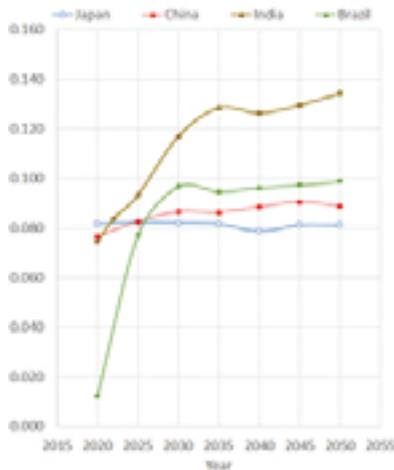


図 4 2020-2050 年における主要国の GFI 値の変化

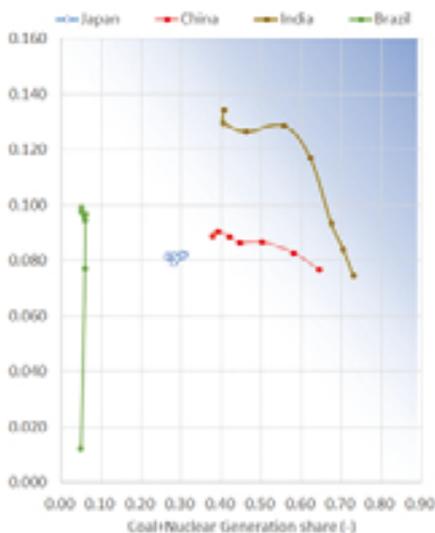


図 5 主要国の GFI 値の変化とベースロードシェアの関係

日本は今後 30 年間で安定した GFI を示している。また元データによると再生可能エネルギーの導入が続き、総発電量もわずかな増加が見込まれている。再生可能エネルギーの利用率は比較的、低くガス火力がグリッドの柔軟性を補う役割となる。現在、中国は世界最大のグリッドを持っており、将来もその地位を維持する。中国の GFI は、総容量、特に再生可能エネルギーの増加に伴い、わずかに増加する可能性がある。石炭は依然として主な発電源であるがそのシェアは減少すると見込まれる。インドは、石炭が主要な電力源であり、現在世界で最も拡大している電力網である。インド政府は大規模な再生可能エネルギーの導入と化石燃料シェア低減の政策を追求している。そのためインドの GFI は、特に 2030 年以降著しく増加し効果的な対策が講じられない場合、柔軟性の問題がより顕在化する可能性がある。ブラジルの GFI は 2025 年に増加し、約 0.1 を維持する。GFI 値そのものは中国と同レベルの約 0.1 であるが、水力が主な供給源であるためグリッドの変動は深刻ではないと考えられる。

### 4-3. GFI 分析に基づく ASEAN のグリッド変動挙動

同様の分析を ASEAN 諸国で実施した。2040 年までの各国の電力計画は、ASEAN Centre for Energy (ACE) によってまと

められており、この調査の分析のためにデータが提供された。分析結果を表 4 と図 6 および 7 に示す。なお、電力開発計画は ASEAN ターゲットシナリオ (ASEAN Target Scenario, ATS) に沿ったデータである。

石炭は ASEAN 地域の主要なエネルギー源であるため、GFI は石炭火力の利用可能性と密接に関連していることが容易に予想される<sup>21</sup>。多くの国の GFI は 2030 年から増加し、特にインドネシア、マレーシア、フィリピン、ベトナムはグリッド自身も大きく、また石炭に依存しているため大きな数値を示した。一方、シンガポールとタイはグリッド変動への懸念が少ないことがわかる。ブルネイ、ラオス、カンボジア、ミャンマーはグリッドサイズが比較的小さいため、グリッドの変動に対する懸念は少ないと思われる。一方インドネシア、ベトナム、フィリピン、マレーシアの電力供給シェアには大きな変化がないまま拡大しており、グリッド変動の懸念は 2030 年以降に顕在化する可能性がある。

表 4 ASEAN の 2020-2040 年までの GFI 値

Country	2020	2025	2030	2035	2040
Brunei	0.050	0.040	0.043	0.043	0.049
Cambodia	0.033	0.010	0.056	0.051	0.049
Indonesia	0.029	0.011	0.049	0.078	0.077
Laos	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Malaysia	0.088	0.095	0.095	0.095	0.096
Myanmar	0.035	0.000	0.028	0.047	0.061
Philippines	0.082	0.088	0.095	0.094	0.097
Singapore	0.021	0.012	0.007	0.000	0.000
Thailand	0.002	0.002	0.002	0.009	0.006
Vietnam	0.059	0.025	0.070	0.103	0.098
ASEAN	0.061	0.043	0.073	0.080	0.083

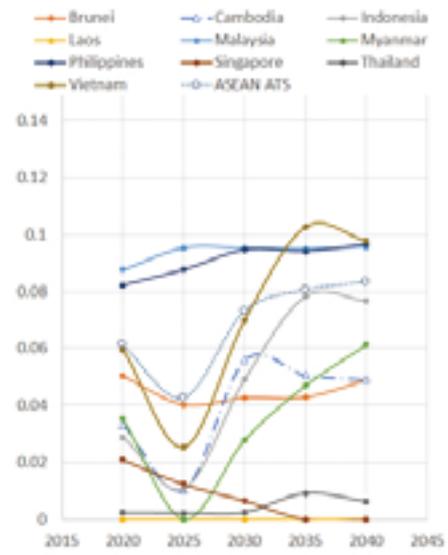


図 6 2020-2050 年における ASEAN 諸国の GFI 値の変化

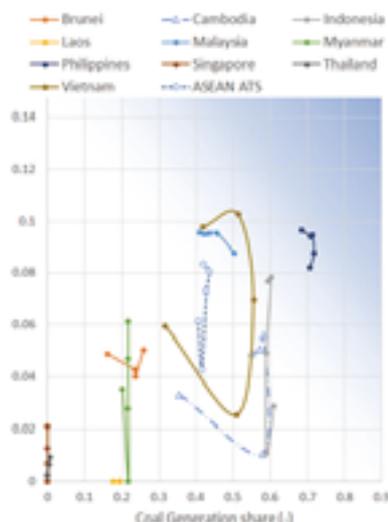


図7 ASEAN 諸国の GFI 値とベースロードシェアの関係

インドネシアでは、2035 年以降に GFI が急増すると予測される。したがってインドネシアにとって石炭火力発電所による柔軟性向上は国の送電網の変動に対処するための主要な選択肢の 1 つである。マレーシアの GFI は、0.09 ~ 0.1 の比較的高いレベルにある。またフィリピンも石炭火力発電への依存度が高いためのその GFI は 0.08 から 0.1 の比較的高い水準にとどまる。したがってフィリピンでもグリッドの柔軟化対策が必要となり、ガスや水力などのより柔軟な電源が利用できない場合、ローカルグリッドシステムの変動はより深刻になる可能性がある。ベトナムの GFI は、2025 年までは比較的低水準にとどまるが、その後 2035 年に向けて急激な増加が見られる。設備容量は長期的に増加し続ける。2040 年の時点で、石炭は発電量の 40%未満となることが計画されている。

#### 4. 結論

GFI は、容量や発電量などの従来のパラメータの多変量解析を使用して計算することにより、グリッド変動の程度を表すことができることが判明した。

いくつかの国と地域の GFI は、パブリックドメインから取得したデータを使用して、2020 年から 2050 年までの推定に成功した。この分析によると、インドはグリッド変動に最も深刻であり、ブラジルは将来的にグリッド変動の問題に悩まされることはないに行くことが読み取れる。ASEAN 諸国での分析によれば、成長が急増している ASEAN 諸国の中には、適切な措置を講じないとグリッド変動の問題が発生する可能性があることがわかる。

このように GFI 分析は、手頃で信頼できるコストでエネルギー供給を拡大する必要がある国の将来の柔軟性対策を検討するための有用なツールであると考えられる。

#### 5. 謝辞

この論文は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成を受けたプロジェクト JPNP17006 から得られた結果に基づいている。ASEAN の分析では、2040 年までの電力計画のデータが ASEAN Centre for Energy (ACE) の協力により提供された。ACE のチームは、オリジナル論文の共著者である Andy Tirta 博士が率い、Ms. Alnie Demoral、Mr. Muhammad Rizki Kresnawan、Ms. Silvira Ayu Rosalia が参加した。ここに各位のご協力に感謝の意を表す。

#### References

1. Martha Maria Frysztacki et al, Institute for Automation and Applied Informatics, KIT, Energy System Modelling (ESM), <https://www.iai.kit.edu/english/esm.php>, (2021)
2. Thomas Spencer et al, The Energy and Resources Institute (TERI), RENEWABLE POWER PATHWAYS: MODELLING THE INTEGRATION OF WIND AND SOLAR BY 2030, (2020)
3. Tobias Bossmann et al, European Commission, METIs STUDIES, Effect of high shares of renewables on power systems, (2018)
4. S.K Soonee et al, POSOCO, Flexibility Requirement in Indian Power System, (2018)
5. Deepak Tiku, Requirement and Initiatives for Flexible Operation of Thermal Power Plants, Presentation in CEA JCOAL Workshop, (2021)
6. PV Magazine, The duck curve comes to New England, MAY 8, (2018)
7. JERA, FACT Study Group Material (written in Japanese), Ministry of the Environment, (2020)
8. Wooyoung Jeo, et al, New & Renewable Energy (written in Korean), Vol.15, 4, pp28-38, (2019)
9. Solar Choice, How do I use electricity throughout the day – the load curve, 28 January, (2010)
10. Caston Sigauke et al, Journal of Energy in Southern Africa, vol.28, 4, pp68-76, (2017)
11. China Electric Power Research Institute, Study on PV Power Grid Integration in Qinghai Province (written in Chinese), HNY2016, TM614, G1406-21499 (2016)
12. Chunning Na et al, Sustainability, 11, 4424; doi:10.3390/su11164424, (2019)
13. Quetzalcoatl Hernandez-Escobedo et al, Energies, 12, 2330; doi:10.3390/en12122330, (2019)
14. GE Energy Consulting, Pan-Canadian Wind Integration Study (PCWIS), (2016)
15. Jaquelin Cochran et al, Flexibility in 21st Century Power Systems, Clean Energy Ministerial, NREL/TP-6A20-61721, (2014)
16. Ricardo Menezes Salgado et al, International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications, Vol.3, pp.336-346, (2011)
17. Takashi Otsuki et al, Energy Policy, Vol.89, Pages 311-329, (2016)
18. International Energy Outlook 2019, U.S. Energy Information Administration, (2019)
19. For example, Vincenzo Esposito Vinzi et al, Handbook of Partial Least Squares Concepts Methods and Applications, (2010)
20. For example, Koji Shimizu, Theory and practice of multivariate regression (written in Japanese), (2015)
21. Iqlima Fuqoha et al, The New Role of Coal Fired Power Plant in the Era of Energy Transition, ASEAN Centre for Energy, (2020)







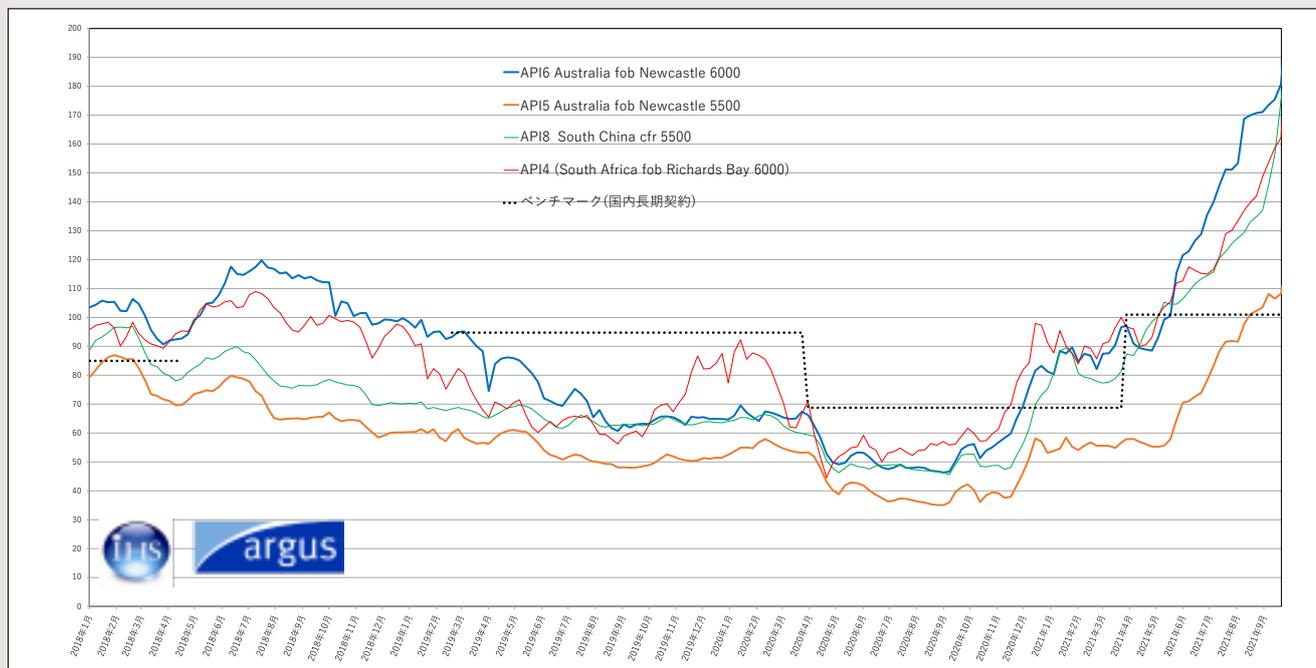
# 編集後記

日頃からJCOALへのご支援を賜り誠に有難うございます。

昨今 2050 年カーボンニュートラルに向けて、国内はもとより世界の様々な動きを目にするようになりました。二酸化炭素の排出量を大幅に削減するための技術開発や、エネルギー転換への動きも活発になってきています。「水素」「アンモニア」「CCS CCUS」という響きもはや日常になりつつあるのではないのでしょうか。年齢がバレちゃいますが、当方の幼少時代は東京で頻繁に光化学スモッグが発生しておりまして、そうすると学校が途中で終わって帰宅出来るので子供にとって喜ばしくはあるのですが、いかんせん空気が悪くて目や喉にダメージを受けてしまうのです。車や工場、建設現場等から煙が立ち上る風景が思い出されるところです。安直な表現ですがいろいろな排出削減技術が当方が大人になるまでの間に革新的に進んだという事になります。これは私が子供の頃に大人だった人達ががんばった成果です。今は 2021 年ですから、この先 29 年間で更なる革新的技術開発による排出削減が急速に進めばという期待が膨らみます。私もあと 29 年間で自分に出来ることは何か？地球や今を生きる子供たちのために何が出来るのかを考えたいと思います。

(広報室 O)

Argus/McCloskey's Coal Price Index



りの交通機関：虎ノ門駅より徒歩7分、内幸町駅より徒歩7分、神谷町駅より徒歩8分、御成門駅より徒歩8分、新橋駅より徒歩9分、霞ヶ関より徒歩9分



JCOAL Journal Vol. 47 (2021年12月1日発行)

発行所：一般財団法人 石炭フロンティア機構

〒105-0003 東京都港区西新橋3-2-1 Daiwa西新橋ビル3F  
 Tel: 03-6402-6100 (総務部)  
 03-6402-6101 (技術連携戦略センター)  
 03-6402-6106 (カーボンニュートラル推進部)  
 03-6402-6102 (資源開発部)  
 03-6402-6103 (技術開発部)  
 03-6402-6104 (国際事業部)

Fax: 03-6402-6110 E-Mail: jcoal-qa\_hp@jcoal.or.jp  
 URL: http://www.jcoal.or.jp/

本冊子についてのお問い合わせは…

一般財団法人 石炭フロンティア機構 総務部  
 〒105-0003 東京都港区西新橋3-2-1 Daiwa西新橋ビル3F  
 Tel: 03-6402-6100 Fax: 03-6402-6110

編集・印刷：株式会社十印



# JCOAL Journal

「JCOAL Journal」は石炭分野の技術革新を目指す（一財）石炭フロンティア機構が発行する情報誌です。

【禁無断転載】