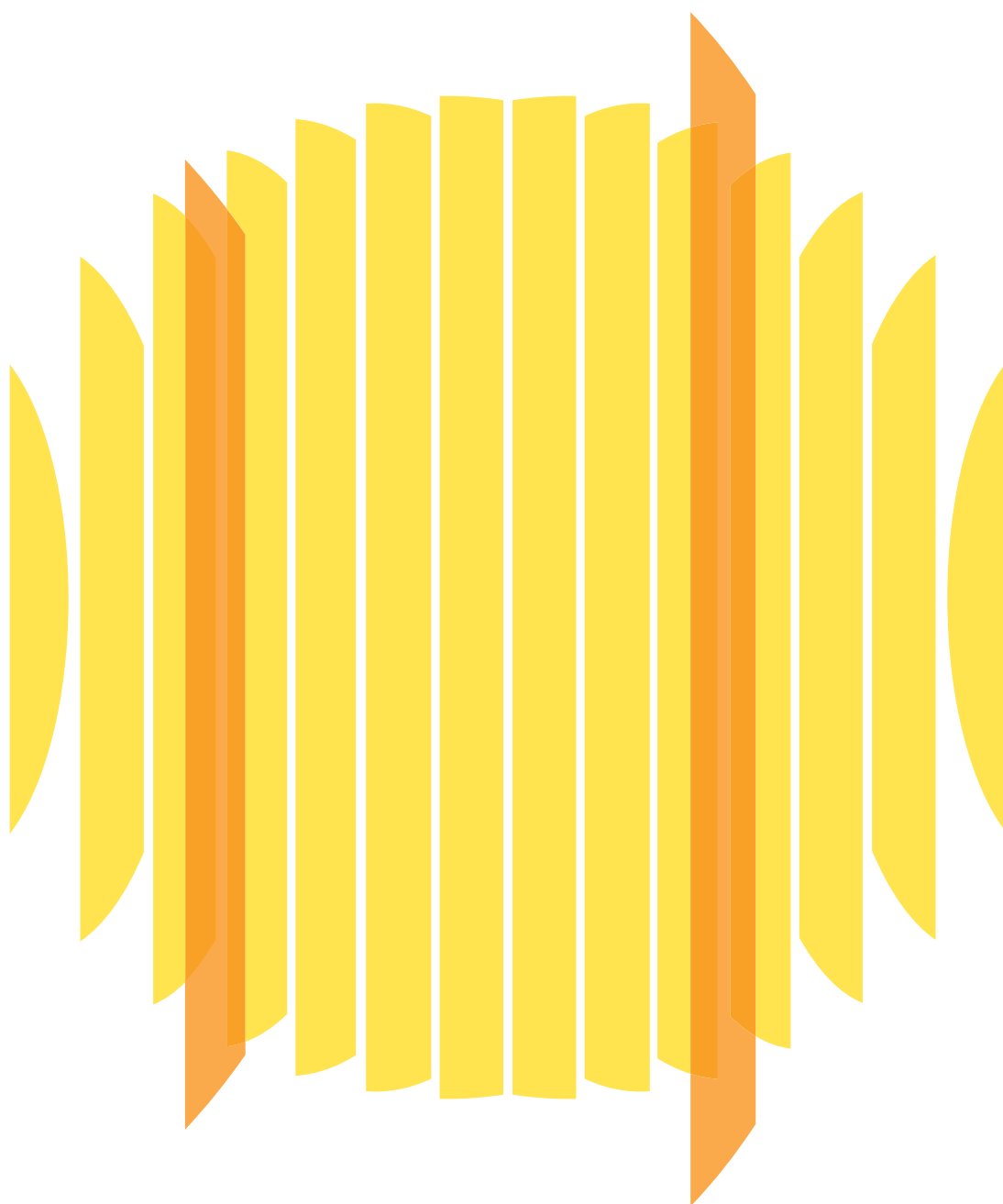


季報 エネルギー総合工学

Vol. 43 No. 3 2020. 10



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

目 次

【寄稿】

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

和光大学 経済経営学部 教授 岩間 剛一 1

【寄稿】

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

北海道大学大学院 工学研究院附属エネルギー・

マテリアル融合領域研究センター 准教授 能村 貴宏 21

【寄稿】

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

京都大学大学院 経済学研究科／地球環境学堂 教授 諸富 徹 33

【調査研究報告】

蓄熱発電の可能性と世界の開発計画

プロジェクト試験研究部 主管研究員 岡崎 徹 45

【研究所のうごき】 57

【編集後記】 59

[寄稿]

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

岩間 剛一（和光大学 経済経営学部 教授）



1. はじめに

中国の武漢市を震源地とした，新型コロナウイルスのパンデミック（世界的大流行）は，21世紀の高度工業化社会と人類を震撼させている。IT（情報通信技術）とAI（人工知能）の発達に支えられた人類文明は，高度の繁栄をとげ，大量のエネルギーと食糧の消費，医学の発展により，14世紀の黒死病（ペスト）の流行をはじめとした感染症の大流行は，過去のものであると考えられてきた。しかし，冷静に数千年間の世界の歴史を振り返ると，人類の歴史は，感染症の歴史でもあった（図1参照）。

人類は，狩猟・採集生活から，1万年前の農耕社会の成立により，定住生活を構築して以来，感染症と共生しながら発展をとげてきた。歴史的には，100年に1度程度の割合で，感染症のパンデミックが発生している。かねてから，感染症の専門家からは，グローバル化した世界経済において，途上国を震源地とした感染症の拡

大への懸念が示唆されてきた。そして，新型コロナウイルスの感染拡大が現実のものとなった。この半年間を超える新型コロナウイルスのパンデミックと，ロック・ダウン（都市封鎖），ヒトとモノの往来の停止，数多くのイベントの中止，マイナス原油価格，100年に1度ともいえる世界大恐慌以来の大不況等，世界中の人々は，かつてない経験をしている。多くの読者の方々も，歴史の教科書により，数多くの天然痘，黒死病（ペスト）等の感染症流行の話は知っていることと思う。14世紀に欧州諸国に流行した黒死病（ペスト）によって，ドイツ，フランス等の人口の3割が死亡し，多くの農村が壊滅し，農業労働者を失って，中世封建制が崩壊した。15世紀のコロンブスの新大陸発見とともに，スペイン人が持ち込んだ天然痘によって，免疫を持たなかったメキシコのアステカ文明，ペルーのインカ文明が滅亡した。多くの感染症が，世界の歴史を変え，文明を滅ぼし，社会構造を変革させてきた。日本も，奈良時代には，

表1 感染症の歴史

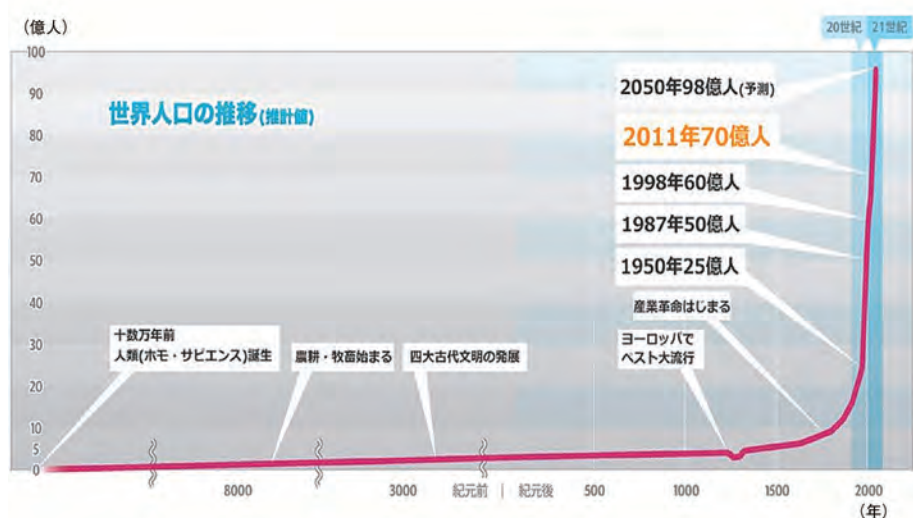
時 代	概 要
紀元前 3000 年	エジプトのミイラに天然痘の痕跡
6 世紀	東ローマ帝国にペストが流行
8 世紀	日本に天然痘が流行，人口の3割が死亡
14 世紀	欧州に黒死病（ペスト）の流行，人口の3割が死亡
16 世紀	コロンブスにより，中南米に天然痘が流行
19 世紀	インドにコレラが流行
1918 年	第1次世界大戦中にスペイン風邪が流行，4,000万人が死亡
1980 年	天然痘撲滅宣言
1981 年	HIV の流行，累計 2,500 万人死亡
2002 年	SARS（重症急性呼吸器症候群）流行
2020 年	新型コロナウイルスの流行

（出所：各種新聞報道）

大陸から、天然痘が持ち込まれ、人口の3割が死亡した。また、江戸幕府の鎖国政策に対して開国を迫った黒船の来航により、コレラが流行し、江戸の人口の3割程度が死亡している。感染症が歴史を変えてきたということは、知識としてはあっても、高度な現代文明に生きる、私たちが、1918年のスペイン風邪のような、ウイルスの感染拡大により、生命と日常生活を脅かされることとなると、1年前に考えた人はいただろうか。いかに、IT技術が進歩し、医学が発展しているとしても、ヒトに感染しても、8割の感染者は無症状もしくは軽症であり、無症状でありながらも、新たなヒトに感染させるという、感染拡大防止が難しく、ウイルスにとっては、感染拡大に都合がよい、感染力と致死率に未知な部分があるウイルスの誕生に対して、21世紀の人類文明は、まったくの無力である。数多くあるコロナウイルスのうち、人間に感染するものは、新型コロナウイルスを含めて、7種類だけしかない。そのうちの3種類は、通常の風邪を引き起こすウイルスであり、数日寝ていれば、自然治癒する。これまでの6種類のコロナウイルスについては、ワクチンが開発されておらず、主として、高齢者、基礎疾患のある人を重症化させるコロナウイルスの誕生は、ある種の偶然といえる。改めて、人類も、自然界の摂理のなかにいることを、人類が現在もって

いる科学技術だけでは、自然に逆らえないことを、謙虚に考える必要がある。

ここで、2020年の新型コロナウイルスの感染拡大と、エネルギー、経済活動に与えるインパクト、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命との関係について考えてみる。もちろん、人間の生命と経済活動のどちらを優先するかと問われ、経済活動を優先すべきであるという人は、政治的指導者、経済人にはいない。筆者も、人命を第一に考えるべきであると思っている。そのうえで、過去の感染症の歴史、経済活動への打撃、国家の興亡を考えながら、これからの国際エネルギー情勢、持続的な経済成長について考察する。新たなウイルスが登場し、有効なワクチンも治療薬もなく、人類に免疫もない状況においては、感染拡大を防止し、人間の健康と生命を守るための唯一の方法は、ヒトとヒトとの接触を回避し、飛沫感染、接触感染を防ぐために、ヒトとモノの動きを止め、ヒトとヒトとの接触につながることを、ヒトの往来等の経済活動を抑制することに尽きる。現代文明が、これほど進歩しているとしても、行っていることは、極めて前近代的である。20世紀以降は、食糧生産の増加、近代的なエネルギー消費技術により、人類は、未曾有の繁栄をとげ、2020年時点における世界の人口は、77億人を超えている（図1参照）。



(出所：国連人口統計)

図1 世界の人口の歴史

21 世紀の半ばには、世界の人口は 100 億人を超え、近代文明は、絶え間ない発展とエネルギー消費の増加とともに、歴史上初めてともいえる繁栄が続くものと、誰もが考えていた。そして、陰鬱 (Dismal) なオイル・ピーク論 (世界の原油生産量はピークを越え、原油価格は天文学的に高騰するという理論) を大きく覆すこととなった、米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、米国を再び世界最大の原油生産国とし、人類に対して、貴重な石油・天然ガスの供給源として、明るい未来を支える要因と考えられてきた。しかし、1 年前には予想もしていなかった、2020 年に入ってから新型コロナウイルスの感染拡大が、世界の社会、経済を動揺させている。そこで、新型コロナウイルスの感染拡大と共鳴するシェール・ガス革命、シェール・オイル革命の最新動向について考えていく。

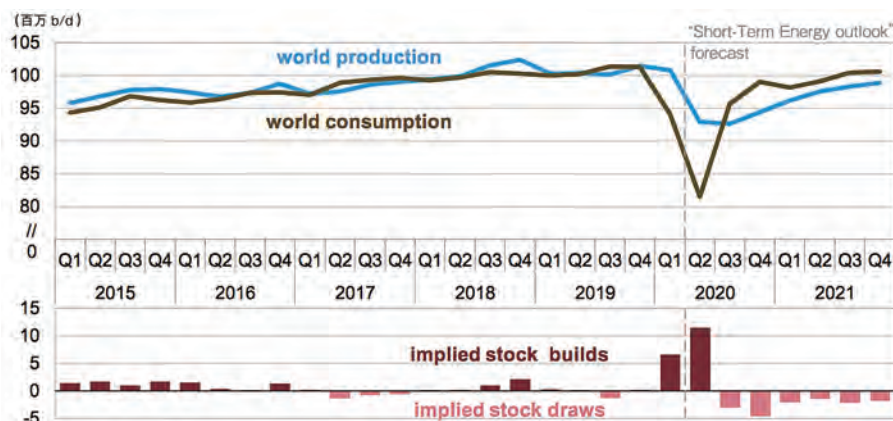
2. 世界を震撼させる新型コロナウイルスの感染拡大と減少する石油需要

2020 年春以降における新型コロナウイルスの感染拡大は、世界中の経済活動を停滞させ、2020 年 5 月時点の世界の石油需要は、2,000 万～3,000 万バレル/日 (b/d) 程度減少し、第 2 四半期の国際石油需給は、大幅な供給過剰となった (図 2 参照)。

ヒトとモノの動きを制限し、ヒトとヒトとの接触機会を減らすことは、新型コロナウイ

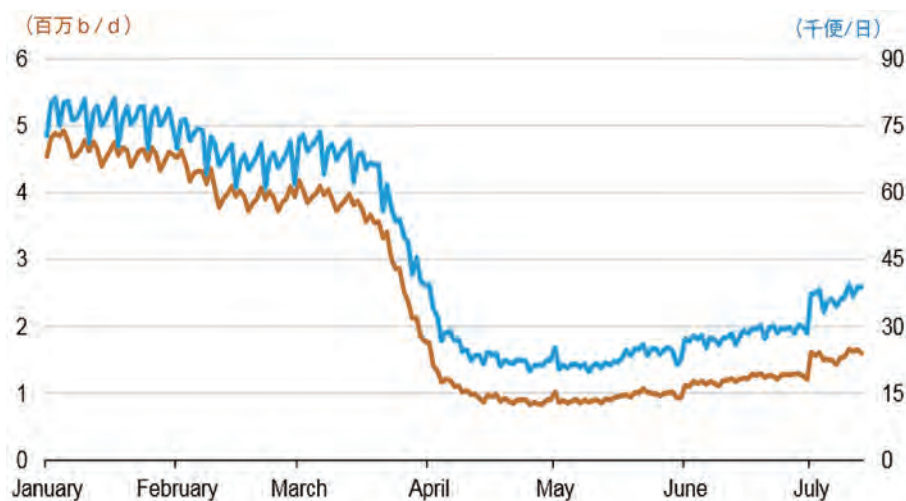
ルスの感染拡大に大きな効果があるものの、ヒトの往来を制限するロックダウン (都市封鎖) は、自動車用ガソリン、航空機用ジェット燃料等の石油需要を大きく減少させる。世界の石油需要の 6 割程度は、自動車、航空機、船舶等の輸送用燃料として消費されており、化石燃料のなかで、一番大きな打撃を受ける。それに対して、発電用の燃料、粗鋼生産用の原料として一定の需要が維持される石炭、発電用燃料、都市ガス原料として利用される天然ガスは、工場、オフィスの利用率の低下により、若干の需要減があるものの、巢籠もりにより、家庭用の電力需要は、むしろ増加する。石油製品の 1 つであるジェット燃料は、世界中の航空機における運行率の低下により、消費量が大きく減少した (図 3 参照)。

在宅勤務、テレワークの普及、イベントの開催中止、海外出張の自粛等は、ヒトの往来を減少させ、世界の石油需要は、2020 年 4 月に、2,900 万 b/d 程度が瞬間蒸発したと推計されている。新型コロナウイルスの感染拡大への防止策は、経済活動を停滞させ、1929 年の世界大恐慌以来の 100 年に 1 度の不況に直面している。今回の不況を、リーマン・ショック、東日本大震災と比較する議論があるものの、リーマン・ショックは、名門投資銀行であるリーマン・ブラザーズの経営破綻による金融システムの崩壊であり、実体経済の打撃は大きくなく、金融政策により、景気回復をはかることができた。東日本



(出所：米国エネルギー情報局 (EIA) 統計)

図 2 世界の石油需給



(出所：米国エネルギー情報局 (EIA) 統計)

図3 世界のジェット燃料消費量

大震災も、日本の局地的な被災であり、その他の地域の経済活動は正常に続けられていた。それに対して、新型コロナウイルスの感染拡大に対する防止策としてのロック・ダウンは、世界全体の経済活動を止める結果となり、最新の国際通貨基金 (IMF) による見通しにおいては、2020 年の世界経済の成長率は、マイナス 4.9% と、戦後最悪の不況となる (表2 参照)。

しかも、上記の見通しは、新型コロナウイルスが、2020 年年末には収束することを前提としており、第 2 波、第 3 波が来襲した場合には、さらに下方修正される可能性がある。日本の場合も、2020 年 4 月～6 月期の実質 GDP (国内総生産) 成長率は、前期比マイナス 7.9%、年率換算マイナス 28.1% と、戦後最低を記録している。

3. 歴史上初めてのマイナス原油価格

新型コロナウイルスの感染拡大による、未曾有の世界経済の低迷、石油需要減少という状況のもと、サウジアラビアをはじめとする OPEC (石油輸出国機構) 加盟国と、ロシアをはじめとする非 OPEC 加盟主要産油国による OPEC プラスは、2020 年 4 月には、逆に原油生産量の引き上げに動いた。2020 年 3 月 5 日のウィーンの OPEC 臨時総会において、サウジアラビアの主導のもと、ロシアの協調を条件に、150 万 b/d の追加減産を 2020 年 4 月 1 日から 3 カ月間にわたり実施する方向で合意が成立した。これは、当初の 60 万～100 万 b/d の追加減産予測よりも踏み込んだ内容であり、2018 年 10 月から見

表2 IMF 世界経済見通し

(%)

	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
世界	3.4	3.4	3.2	3.8	3.6	2.9	-4.9	5.4
日本	0.0	1.1	1.0	1.9	0.3	0.7	-5.8	2.4
米国	2.4	2.6	1.5	2.2	2.9	2.3	-8.0	4.5
ユーロ	0.9	2.0	1.8	2.4	1.9	1.3	-10.2	6.0
中国	7.3	6.9	6.7	6.8	6.7	6.1	1.0	8.2
インド	7.2	8.0	7.1	7.2	6.1	4.2	-4.5	6.0
ブラジル	0.1	-3.8	-3.5	1.1	1.3	1.1	-9.1	3.6
アセアン5	4.6	4.9	4.9	5.3	5.3	4.9	-2.0	6.2
中東アフリカ	2.7	2.7	4.9	2.1	1.8	1.0	-4.7	-3.3

(出所:IMF『世界経済見通し』, 2020 年 6 月)

れば、合計 360 万 b/d もの減産となる。しかし、翌日の 3 月 6 日のロシアを含めた OPEC プラスの会合において、ロシアのノワク・エネルギー相は、追加減産案を拒否した。①減産強化を行わないばかりか、②従来の 170 万 b/d の協調減産に加えて、サウジアラビアの自主的な減産 40 万 b/d を含めた 210 万 b/d に達する協調減産の 4 月以降の延長も合意できず、サウジアラビアをはじめとした OPEC 加盟国にとって、悪夢のような結果となった。2020 年 4 月から、主要産油国は、自由に原油生産量の引き上げを行うことが可能となり、石油需給緩和に歯止めがきかなくなってしまった。当初は、サウジアラビアのアブドルアジズ・エネルギー相は、2019 年 12 月に国内証券取引所において新規株式公開 (IPO) を果たした、サウジアラビアの国営石油企業サウジアラムコの海外市場における IPO を睨み、原油価格下支えを目指し、協調減産強化を主導していた。しかし、ロシアとの協調減産

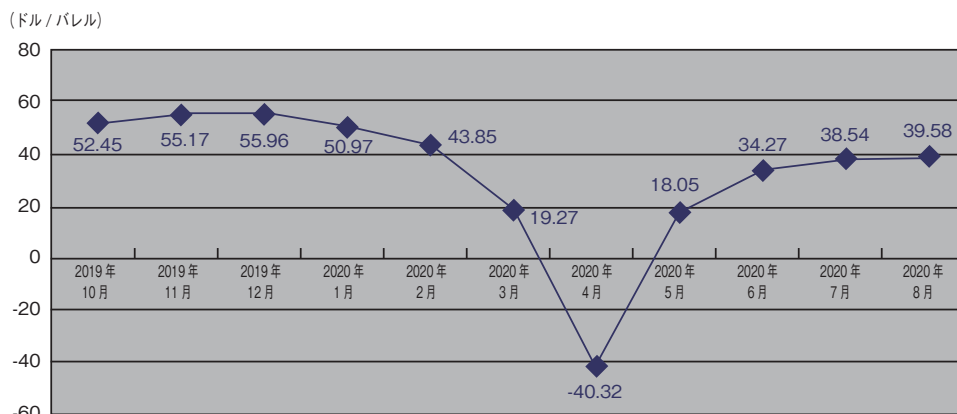
の合意が決裂すると、サウジアラビアは、一転して減産から増産に舵を切り替え、3 月 10 日に原油生産量を、従来の 970 万 b/d から、2020 年 4 月に 1,230 万 b/d に引き上げる強攻策に打って出て、欧州向けの原油販売価格 (調整金) を引き下げ、ロシアとの生産競争に入った。OPEC プラスは、原油価格の高値維持についてはある程度の合意が成立しているものの、協調減産の幅と時期については、同床異夢にあり、協調減産政策は迷走してきた (表 3 参照)。

2020 年 4 月に入ってから、米国、サウジアラビア、ロシアの三大産油国が、1,000 万 b/d を超える、原油生産競争を開始し、国際石油需給は、大幅な供給過剰状況となった。そのため、国際指標原油となっている WTI (ウェスト・テキサス・インターミディエート) 原油価格は、2020 年 4 月 20 日に、ニューヨークの先物市場において、1983 年の市場創設以来、歴史上初めてのマイナス原油価格を記録した (図 4 参照)。

表 3 OPEC プラスの協調減産の迷走

日 付	協調減産概要
2020 年 1 月 1 日	170 万 b/d の追加減産
3 月 5 日	OPEC の臨時総会は 150 万 b/d の協調減産と 2020 年末まで延長合意
3 月 6 日	150 万 b/d の追加減産についてサウジアラビアとロシアの交渉決裂
3 月 10 日	OPEC プラスは協調減産期限切れ、サウジアラビアは 1,230 万 b/d に増産
4 月 9 日	OPEC プラスは再び協調減産に合意するものの 4 月はフル生産
4 月	世界の石油需要は 2,900 万 b/d 程度減少
4 月 20 日	WTI 原油価格が歴史上初めてマイナス原油価格に
5 月 1 日	OPEC プラスによる 970 万 b/d の過去最大の協調減産
5 月 19 日	WTI 原油価格はプラスの価格を維持
6 月 9 日	OPEC プラスは 7 月 1 日以降の協調減産維持
8 月 1 日	OPEC プラスは 8 月 1 日以降の協調減産幅を 770 万 b/d に縮小

(出所：各種新聞報道)



(出所：ニューヨーク商品取引所 (NYMEX) 統計)

図 4 WTI 原油価格 (安値)

2020年4月20日のWTI原油価格の終値はマイナス37.63ドル/バレル（最安値はマイナス40.32ドル）を記録した。直近の高値と比較すると、100ドル/バレル近い暴落となった。マイナス37.63ドル/バレルという価格の意味は、売り手が取引単位1,000バレルの原油とともに、400万円近い現金を買い手に渡すということであり、常識では考えられない異常な取引といえる。こうしたマイナス原油価格の発生という、エネルギーの世界における異常な状況は、2つの要因が挙げられる。第1に構造的な石油需給要因が挙げられる。新型コロナウイルスの感染拡大に対して、有効なワクチン、治療薬が現時点においてないことから、唯一の対策は、ヒトとヒトの接触を減らすロック・ダウン（都市封鎖）であり、ヒトとモノの動きが止まった。石油の消費の6割程度は、輸送用燃料が占めており、ヒトの往来が止まったために、自動車用のガソリン消費、航空機用のジェット燃料消費が、急速に減少した。2020年4月の世界の石油需要は、2,000万～3,000万b/d程度減少した。これだけの石油需要の瞬間蒸発に対して、大産油国サウジアラビアとロシアは、新型コロナウイルスの影響を楽観的に考えていた。協調減産を行って、原油価格を下支えしても、米国のシェール・オイル企業に、市場シェアを奪われるだけとの懸念も働き、OPECプラスの2020年3月の会合において、日量150万バレルの協調減産交渉が決裂した。2020年4月から、従来のOPECプラスによる協調減産は、期限切れとなり、産油国は、原油をフル生産して、サウジアラビアは、上述のように、970万b/dから、原油備蓄の取り崩しと原油生産量の増加により、総供給量を1,230万b/dに引き上げた。新型コロナウイルスの感染拡大によって、世界の石油需要が大きく減少していたことから、2020年4月の世界の石油需給は、1,500万b/d程度の供給過剰となり、米国をはじめとした先進国の石油在庫は積み上がり、陸上だけではなく、洋上備蓄のためにタンカーの備蓄も増加し、タンカー運賃も高騰した。第2にWTI原油先物市場のテクニ

カルな要因が挙げられる。WTI原油先物市場は、北海ブレント原油先物市場と異なり、決済期日には、先物の買い手は、原油という現物を受け取る必要がある。原油価格の上昇を見込んで、先物買いを行った投機資金は、原油の余剰感から、貯蔵タンク、鉄道貨車、洋上備蓄タンカーが、満杯に近づき、決済期日に原油を受け取っても、原油を保管する場所がなくなってしまった。そこで、損失を覚悟して、原油を受け取ってもらえる買い手に対して、投げ売りを行った。いわば、投機資金にとって持っている必要がない原油の保管費用が、マイナス原油価格のテクニカルな理由である。しかし、サウジアラビアをはじめとした産油国の想定を超えた原油価格の暴落は、原油価格に連動する液化天然ガス（LNG）価格の暴落にもつながった。さらに、米国、豪州等の新規LNGプラントの稼働開始による輸出量の増加に対して、中国、インド等が、フォース・マジュール（不可抗力条項）を宣言し、LNG輸入を削減したことから、LNGも供給過剰となり、2020年4月におけるLNGスポット価格も2ドル/百万Btu（英国熱量単位）割れと、歴史的な低迷となっている。こうした原油価格の暴落に危機感を抱いた、OPECプラスの産油国は、2020年5月1日から、970万b/dという過去最大の協調減産を実施し、2020年7月以降も延長した。OPECプラスの協調減産に加えて、原油価格の下落にともなって、米国のシェール・オイルの生産量も減少し、OPECプラス以外の産油国の原油生産量も減少した。他方、需要面においては、先進諸国も、経済活動の再開を徐々に行っており、米国のガソリン需要も回復基調にあり、WTI原油価格は、2020年8月時点まで、40ドル/バレル程度と、低位安定している（図5参照）。

先進国の経済活動の部分的な再開により、世界の石油需要は回復してきていることから、OPECプラスも、2020年8月1日から、協調減産幅を770万b/dに縮小したものの、世界の石油需要増が吸収し、原油価格は安定している。

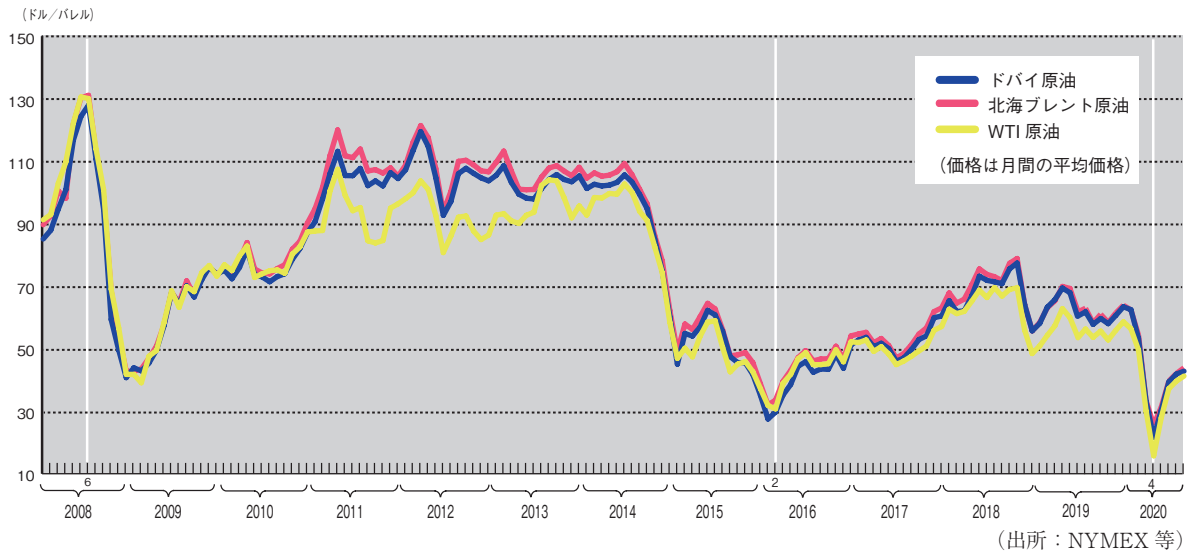


図5 主要原油価格の推移 (2008年1月～2020年8月)

4. 米国のシェール・オイルの生産量は 2020年年初までは順調に増加

米国におけるシェール・オイルの生産量の増加が顕著となって、10年が経過する。米国のシェール・オイルの生産量は、順調に増加してきた(図6参照)。

これまでも、米国のシェール・オイルの生産については、原油価格が低迷するたびに、①シェール・オイル生産の中心となっている中堅・中小石油企業の財務体質が脆弱であり、②金融機関の融資審査が厳格となり、③資金調達のための低格付け社債(ジャンク・ボンド)の利回りが上昇する、等により経営破綻する企業

が相次ぎ、生産量が減少するという見方があった。しかし、第1に、多くのシェール・オイル生産企業は、自己資本が手厚く、内部資金によって、新規油田の開発を行っていることから、金融機関が融資に慎重になっても、資金繰りに困らないこと。第2に、経営破綻して、連邦破産法第11条(チャプター・イレブン)を申請しても、かえって、債務が整理され、財務体質を強化して、シェール・オイル生産を続けることが可能なこと。第3に、AIを活用して、地下の構造解析を精緻化し、水圧破碎(Fracturing)の技術を向上させ、水平掘削(Horizontal Well)の頁岩(けつがん)への接触面積を増やすことにより、バッケン・シェー

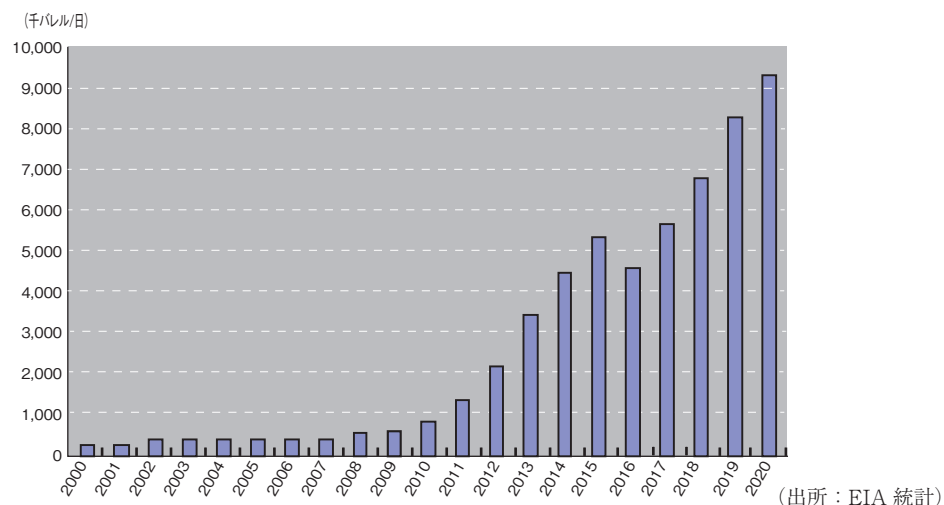


図6 米国におけるシェール・オイル生産量推移 (2013年～2019年)

ル・オイル油田、イーグル・フォード・シェール・オイル油田、パーミアン・シェール・オイル油田というビッグ・スリーをはじめとして、シェール・オイル生産の1井戸当りの生産性を向上させている（図7参照）。

第4に、深度3,000メートル程度の井戸の掘削期間を、従来の数週間程度から、数日間程度に短縮し、新規油田の投資額を削減し、シェール・オイル開発の総コストを圧縮し、1バレル当りのシェール・オイルの生産コストを大きく引き下げている。2020年9月時点においては、シェール・オイルの生産コストは、30～35ドル/バレル程度と推計され（図8参照）、WTI原油価格が、40ドル/バレル程度であるならば、販売管理費、人件費を含めても、シェール・オイル生産企業は、利益を挙げられる状況にある。ただし、米国のシェール・

オイルの生産コストは、鉱区によって、異なっており、パーミアン鉱区は、頁岩の深度が浅く、生産コストが安価であるものの、ニオブララ鉱区等は、生産コストが割高となっており、原油価格の下落への耐久力に差があることに留意する必要がある。

2020年6月以降、WTI原油価格が40ドル/バレル程度を回復してからは、パーミアン鉱区を中心に、米国のシェール・オイルの生産活動は、徐々に活発化している。その意味においては、米国のシェール・オイルの底力は、サウジアラビア、ロシアが考えている以上に、力強いといえる。これまでも、2014年と2020年に、サウジアラビアは、原油生産競争を仕掛け、原油価格が下落するならば、生産コストが割高な、米国のシェール・オイル企業が、市場から撤退すると考え、2014年には米国のシェール・オイル

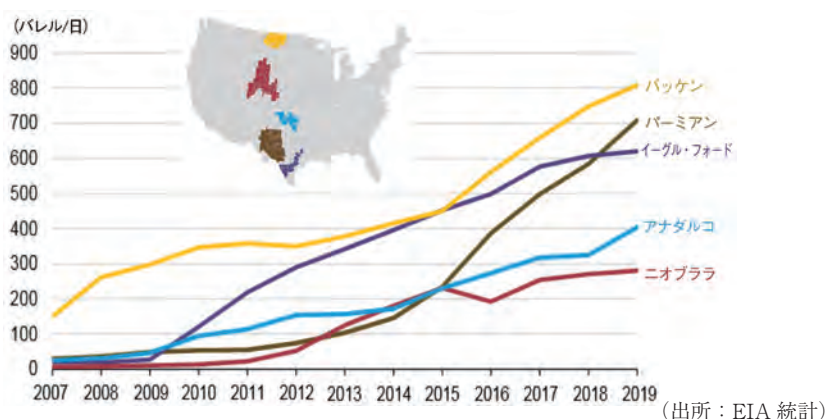


図7 新規の1井戸当たりのシェールオイル生産量

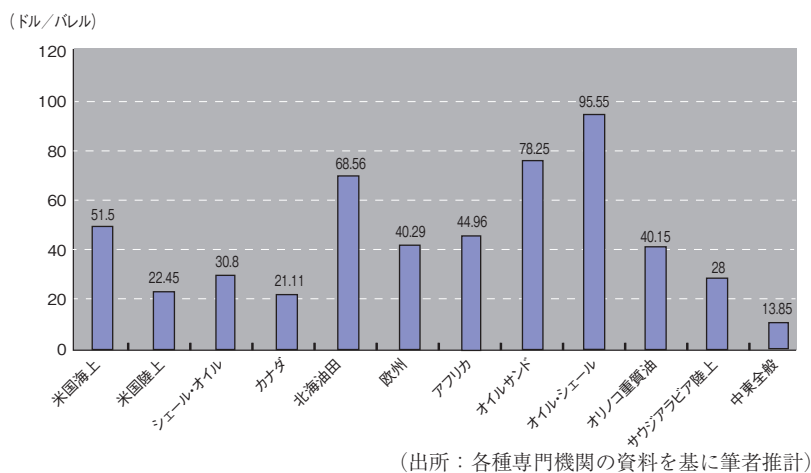


図8 地域別油田発見・生産コスト

とサウジアラビアの陸上油田との消耗戦が始まり、WTI原油価格は、2014年の107ドル/バレルから、2016年には26ドル/バレルまで下落した。2020年3月も、サウジアラビアとロシアが、協調減産を放棄し、原油生産量を増加させ、原油価格が下落するならば、米国のシェール・オイル生産企業が脱落すると考えていた。確かに、油田ごとの生産コストを比較するならば、サウジアラビアの陸上油田の生産コストは28ドル/バレル程度、中東産油国全体でも10ドル/バレル程度、米国のシェール・オイルの生産コストと比較して圧倒的なコスト競争力がある。しかし、米国のシェール・オイル生産企業と、中東の産油国国営石油企業との間に生産コストの差があるとしても、中東産油国の多くは、所得税がなく、小学校から大学までの教育費は無料、ガソリン等に多額の補助金を出し、国民の半分は公務員というかたちで、手厚い社会保障を行っている。加えて、中東産油国においても、新型コロナウイルスの感染拡大が続いており、新型コロナウイルス対策の費用もかかり、多くの中東産油国の財政を均衡させる原油価格は、60ドル/バレルを超えている（図9参照）。

それに対して、米国のシェール・オイル生産企業は、WTI原油価格が40ドル/バレル程度であるならば利益が出る。つまり、WTI原油価格が、40ドル/バレルを割り込むと、中東産油国国営石油企業自身は利益が出るとしても、中東産油国そのものの財政が行き詰まり、サステナブル（持続可能）ではない。中東産油国の国営石油企業の利益がでる原油

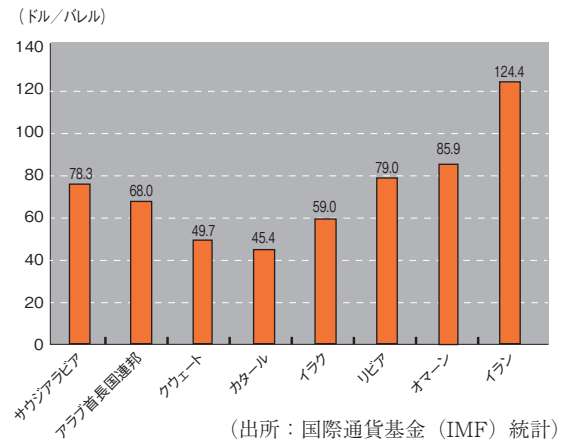


図9 産油国財政均衡原油価格

価格と、米国のシェール・オイル生産企業の利益がでる原油価格を比較するのではなく、中東産油国の財政が均衡する原油価格と、米国のシェール・オイル生産企業の利益がでる原油価格を比較すると、圧倒的に米国のシェール・オイル生産企業に、コスト競争力がある。そのため、米国の原油生産量の7割程度を占めるシェール・オイルの生産量は増加し、米国の原油生産量は、2020年3月13日には、1,310万b/dと、過去最高を記録している。上述のように、米国における1井戸当りの生産性の向上により、2019年までは、米国の原油生産量は、順調に増加し、1970年代を超えて、過去最高の生産量を更新している（図10参照）。

BP統計で比較すると、米国の原油生産量は、2008年の6,783千b/dから、2019年の17,045千b/dへと、1,000万b/dも増加しており、これは、OPEC加盟国の原油生産量第2位、第3位のイラク、イランの合計よりも多く、原油生

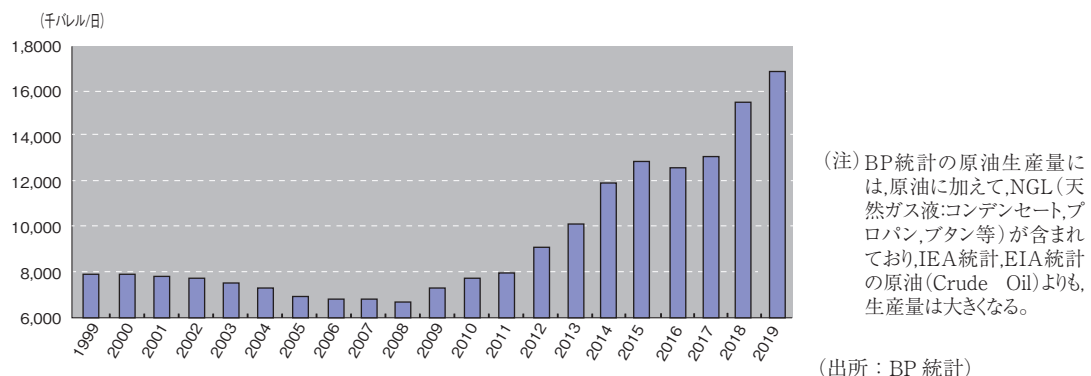


図10 米国の原油生産量推移

産量第1位のサウジアラビアに匹敵する、原油生産量であり、この10年間のシェール・オイル革命により、サウジアラビアに匹敵する、OPEC加盟国が、1カ国分登場したことを意味する。これは、国際石油市場とOPEC加盟国にとって、大きな脅威といえる。米国においては、現時点においても、未開発のシェール・ガス構造、シェール・オイル構造が多いと見込まれ、AIを用いた地質構造解析技術の進歩により、2050年に向けて、米国のシェール・ガス、シェール・オイルの生産量は、増加が続けることが見込まれている（図11参照）。

5. 短期的には新型コロナウイルスの打撃を受けるシェール・オイル

これまで順調に増加を続けてきた、米国のシェール・オイルとシェール・ガスの生産は、

短期的には、新型コロナウイルスの感染拡大にともなう石油需要の減少、原油価格の下落の打撃を受けている。原油価格の暴落により、シェール・オイルの生産活動を見合わせる企業が相次ぎ、米国の原油生産量は、2020年6月12日には1,050万b/dと、ピーク時から200万b/d以上も、減少している。従来は、シェール・オイルの生産量について強気の見通しを行っていた、米国のEIAも、新型コロナウイルスの感染拡大の影響が、2021年以降も続く予測しており、米国の原油生産量は、1,200万b/dを割り込むと見込まれている（図12参照）。

WTI原油価格の下落、米国のガソリン需要、ジェット燃料需要の減少により、シェール・オイル生産企業の一部は、経営破綻するところもでてきており、シェール・ガス開発の先駆的な存在であった、チェサピークも、2020年6月28日に連邦破産法第11条（日本の民

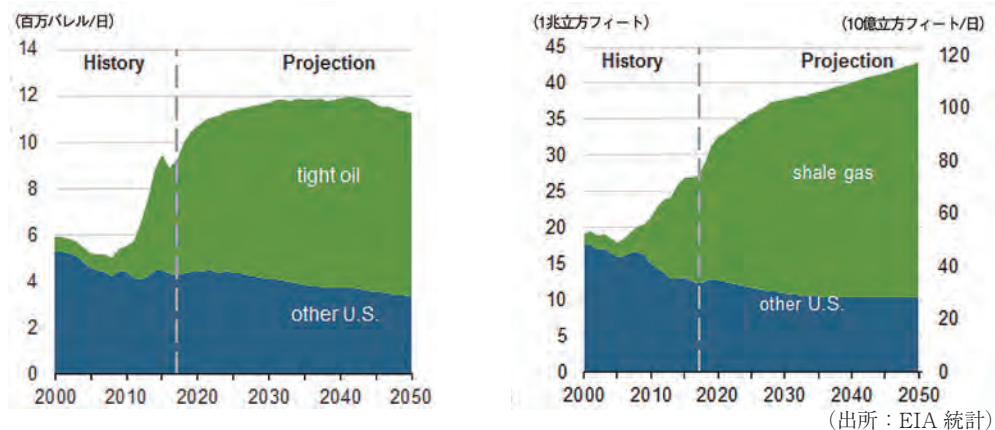


図11 米国のシェール・オイル生産量（左）とシェール・ガス生産量（右）の見通し

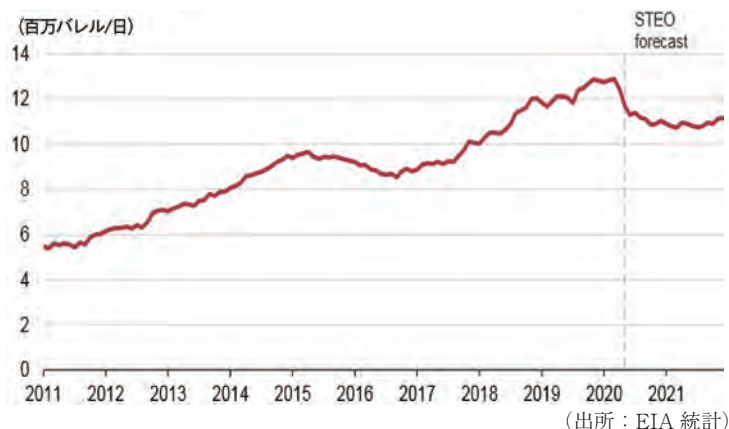


図12 米国の原油生産量見通し

事再生法に相当)の適用申請を行い、経営破綻している。チェサピークは、シェール・ガス革命の象徴的な企業であり、天然ガス価格の下落が、資金繰り難を引き起こしたが、これほどの名門企業が経営破綻したことに、多くのエネルギー専門家は、驚愕している。その他にも、20社程度が、原油価格、天然ガス価格の下落により、経営破綻している。他方、原油価格の下落によって、シェール・オイル生産企業が経営破綻する状況において、シェール・オイル生産企業の価値が底値とみて、シェール・オイル権益の取得、シェール・オイル生産企業買収の好機ととらえ、シェブロンは、ノーブル・エナジーを買収しており、シェール・ガス、シェール・オイルに関連して、統合・再編の動きが加速することが考えられる(表4参照)。

もっとも、シェール・ガス生産企業の経営

破綻は、連邦破産法第11条の適用により、既存の過剰な債務を整理し、財務体質を強靱なものとし、シェール・ガス生産、シェール・オイル生産を続けられることから、長期的にみると、米国のシェール・ガス生産量、シェール・オイル生産量を大きく減少させることにはならないことに留意する必要がある。チェサピークも、連邦破産法第11条適用申請後も、シェール・ガス生産を順調に続けている。その意味においては、サウジアラビアが期待していたように、米国のシェール・オイル生産企業が、経営破綻しても、米国のシェール・オイルの生産量は、大幅に減少せず、サウジアラビアの陸上油田だけが、勝ち残る結果とはならないのである。

また、原油価格の下落に伴い、新たなシェール・ガス田、シェール・オイル油田の開発活動も停滞しており、リグ(新規油田開発のた

表4 シェール・ガス、シェール・オイルの新たな動き(2020年)

年 月	概 要
2016年1月	米国のシェール・オイル輸出開始
2月	シェニエールがシェール・ガスを原料としたLNG輸出開始
2月	エクソンモービルが120億ドルの社債発行計画、シェール権益取得
3月	グッドリッチ・ペトロリアムが利払い延期
4月	BPが中国のCNPCと四川省のシェール・ガス開発で提携
4月	グッドリッチ・ペトロリアム、エナジーXXIが経営破綻
4月	エクソンモービルが60年ぶりにトリプルAから格下げ
6月	パイオニア・ナチュラル・リソーシズがパーミアン鉱区を取得
6月	マラソンがオクラホマ州スタック鉱区を取得
6月	東京ガスがイーグルフォード鉱区を取得
9月	カナダのエンブリッジが、パイプライン企業スペクトラ・エナジーを280億ドル買収
9月	トータルがバーネット鉱区を追加取得
12月	三井物産が米国ペンシルバニア州のシェール・ガス権益を240億円で売却
2017年1月	エクソンモービルが、パーミアンのシェール・オイル鉱区を66億ドルで買収
2018年2月	エクソンモービルが米国国内のシェール・ガス、シェール・オイル開発に5年間500億ドル投資
3月	国際石油開発帝石がカナダのシェール・ガス事業で760億円の減損計上
3月	丸紅が米国のシェール・ガスとシェール・オイルの権益売却
6月	大阪ガスがテキサス州でシェール・ガス権益を取得
7月	住友商事が米国テキサス州のシェール・オイル権益を50億円で取得
7月	BHPビリトンが米国シェール事業をBP等に108億ドルで売却
2019年5月	シェブロンとオキシデンタルがアナダルコの争奪戦、オキシデンタルが買収
5月	サウジアラムコが、シェール・ガスを原料としたLNG権益を25%取得
8月	BPがアラスカ事業を売却し、シェール・オイル開発投資
12月	シェブロンがアパラチア鉱区等のシェール・オイル油田の100億ドルの減損計上
2020年4月	中堅石油企業ホワイティング・ペトロリアムが経営破綻
5月	エクソンモービル、シェブロンがパーミアン鉱区の開発投資を縮小
6月	名門石油企業チェサピークが連邦破産法11条の申請
7月	シェブロンがノーブル・エナジーを50億ドルで買収することを発表
9月	住友商事がマーセラスのシェール・ガス権益を売却

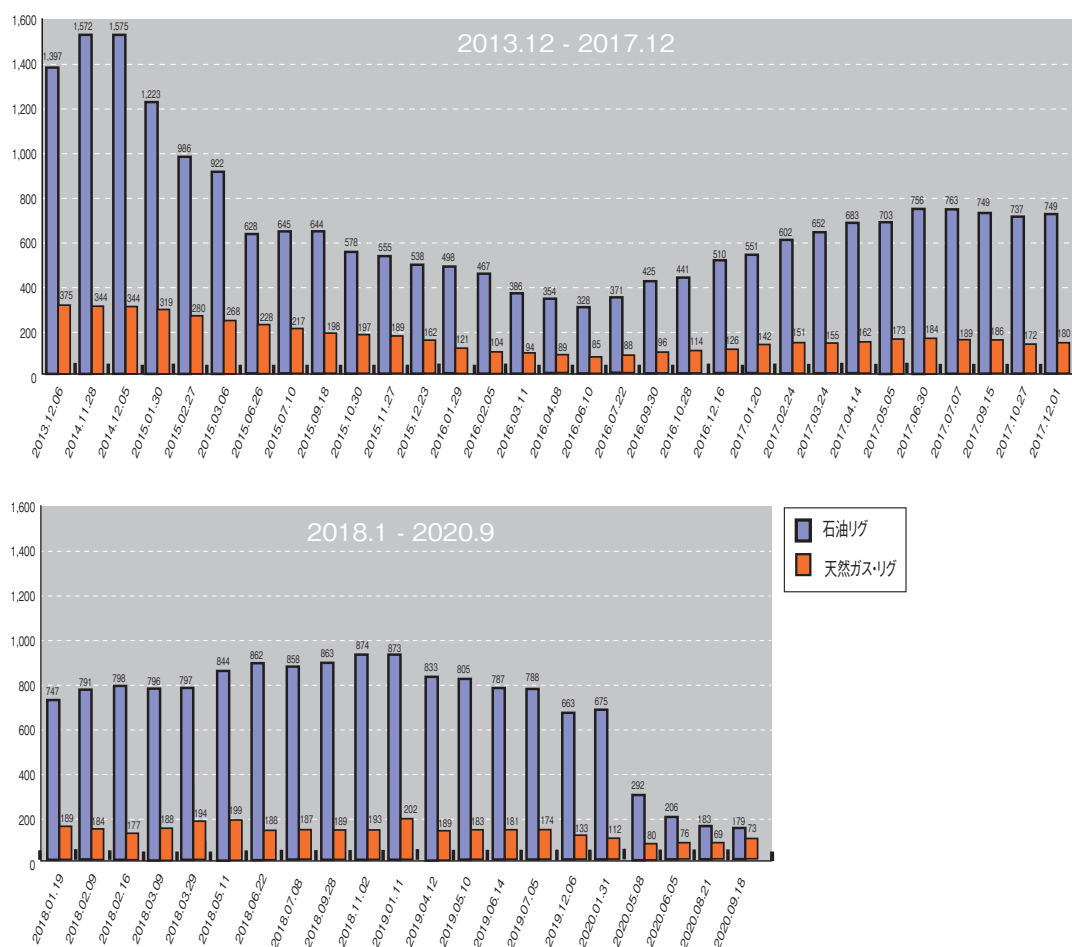
めの掘削装置)の稼働数も大幅に減少している(図13参照)。

ただし、リグ稼働数についても、条件の良い、経済性がある、シェール・オイル油田の開発に絞って、井戸を掘削しており、1井戸当りの生産性は、向上している。また、原油価格が低迷している場合には、DUC(Developed but Uncompleted:井戸を掘削しているものの、坑井仕上げを行っていない油田、一種の在庫のような掘削済みの油田といえる)の後仕上げを行い、低コストで、シェール・オイルの生産を開始することから、リグの稼働数が減少しているとしても、米国のシェール・オイル、シェール・ガスの生産量は、維持することが可能である。このように考えると、米国のシェール・オイル生産企業は、多くのエネルギー専門家が考えている以上に、底力を持っているといえる。

6. 米国のシェール・ガス革命はLNGの国際市場にも拡大

地下の硬い岩盤であるシェール(頁岩)に含まれる石油・天然ガスの成分の採取は、まず天然ガスの開発から始まった。その理由は、天然ガスの粒のほうが、原油の粒よりも小さく、経済的な採取が容易であったからである。まず、革命は、シェール・ガスから始まった。このシェール・ガス革命により、米国の天然ガス生産量は、大きく増加している(図14参照)。

米国の天然ガス生産量は、2005年を底に、急速に増加している。米国は、ロシアを抜いて世界最大の天然ガス生産国となり、米国は、国内において使い切れない天然ガスをLNGとして輸出する計画が始まった。米国は、2008年時点までは、天然ガス生産の伸び悩みから、中東、豪州等のLNGを輸入する構想を持って



(出所:ペーカー・ヒューズ社統計)

図13 米国のリグ稼働数推移(2013年~2020年)

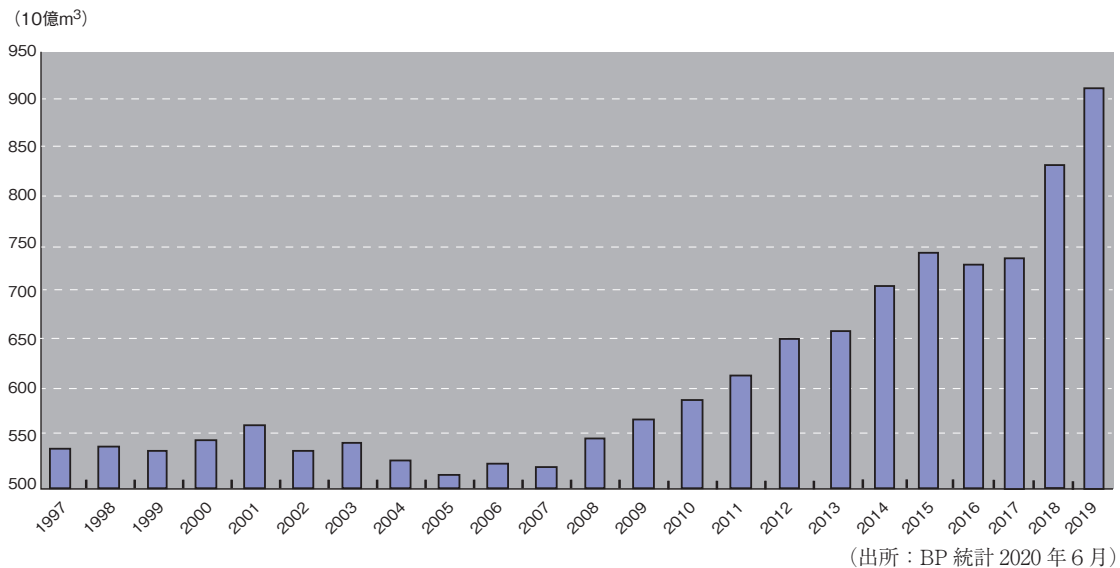


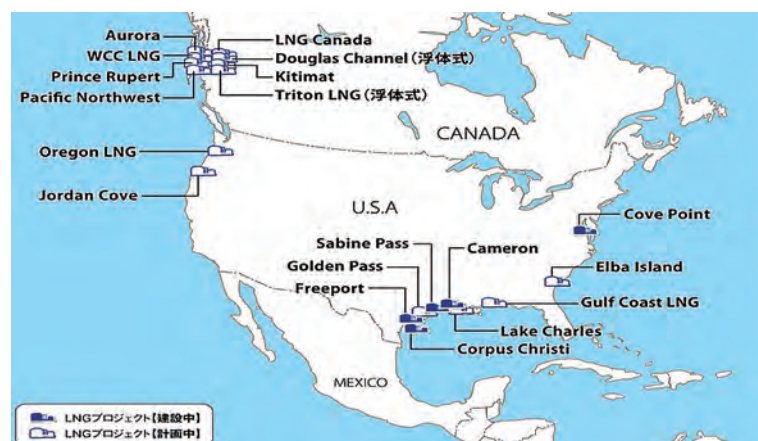
図 14 米国の天然ガス生産量推移

おり、米国メキシコ湾沿いに、多数の LNG 受入基地を建設していた。しかし、米国のシェール・ガスの生産が増加し、LNG 受入基地を転用して、LNG 液化基地を建設する構想が次々と立ち上がった。LNG とは、天然ガスをマイナス 162℃ まで冷却して、液化して、体積を 600 分の 1 とし、海外に輸出するが、極低温の液体を扱うプラントとして、受入基地を液化基地に切り替えることは、グリーン・フィールド（利用できる敷地、設備がない状況）から、プラントを建設するよりも、投資コストが小さくてすむ。米国国内において余剰となったシェール・ガスを原料とした LNG プロジェクトは、北米全体において多数稼動、建設され

ている（図 15 参照）。

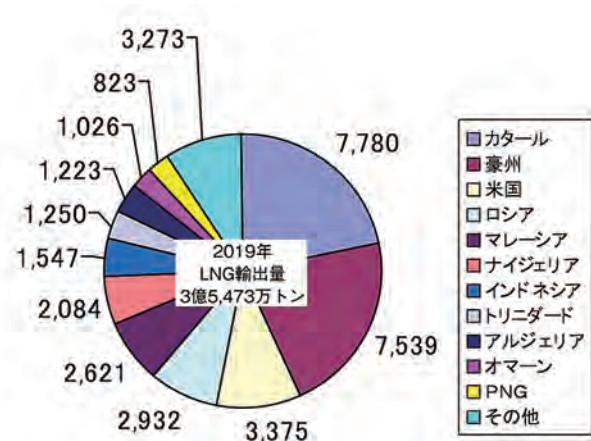
北米における LNG 輸出プロジェクトは、2016 年以降も、新規のプロジェクトが次々と計画されており、米国の LNG 生産能力は、2020 年に年間 6,800 万トンに達し、2022 年には、カタール（年間 LNG 生産能力 7,700 万トン）を抜いて、世界最大の LNG 輸出国となることが見込まれている。既に、米国は、2019 年時点において、LNG の輸出量は、カタール、豪州に次いで、世界第 3 位の LNG 輸出国に躍進している（図 16 参照）。

米国の LNG 輸出量は、シェール・ガスの生産量増加とともに、拡大基調にある（図 17 参照）。



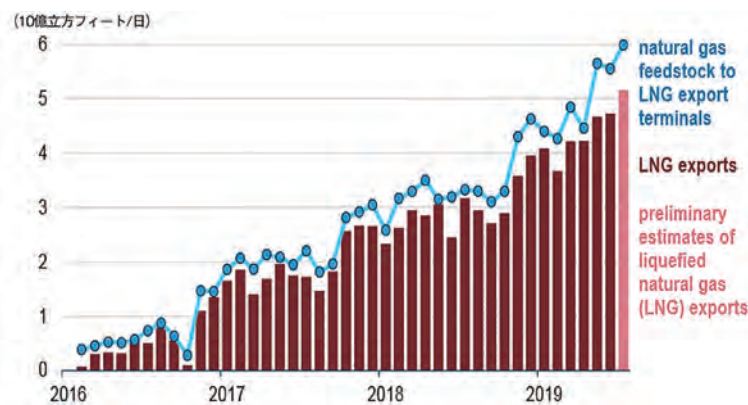
(出所: 石油天然ガス・金属鉱物資源機構)

図 15 米国の LNG プロジェクト例



(出所：国際 LNG 輸入者協会統計)

図 16 国別 LNG 輸出量 (2019 年)



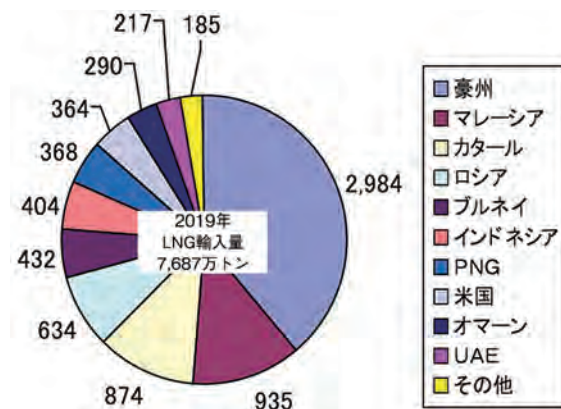
(出所：EIA 統計)

図 17 米国の LNG 輸出量

7. 米国の LNG 輸出は世界最大の LNG 輸入国日本にも恩恵

米国のシェール・ガスを原料とした LNG 輸出の増加は、日本にも恩恵を与えている。日本は、世界最大の LNG 輸入国であるが、日本が輸入する LNG の 8 割程度は、長期契約、原油価格連動、仕向け地条項という契約となっている。つまり、実際のアジア大洋州における LNG 需給に関係なく、石油の代わりとして LNG を利用しているという根拠から、原油価格に連動して、LNG 購入価格が決められ、原油価格が 40 ドル / バレルの場合には、6 ドル / 百万 Btu 程度となる。これは、米国のヘンリー・ハブ渡しの天然ガス価格 2 ドル / 百万 Btu と比較して、かなり割高といえる。さらに、仕向け

地条項により、決められた場所において、LNG を受け取る必要があり、転売を行うことができない。そのため、より割高な価格で LNG を購入する買い手がいるとしても、ディーリングにより利益を上げることができない。それに対して、米国のシェール・ガスを原料とした LNG の価格は、米国のルイジアナ州ヘンリー・ハブ渡しにおける天然ガス価格の 115% を基準に、液化コストと船賃を上乗せするスキームとなっており、LNG 価格に透明性がある。さらに、仕向け地条項がなく、転売が自由であることから、その時の市況によって、より割高に購入してくれる買い手に、米国産 LNG を転売し、ディーリング益を上げることが可能となる。日本は、東京電力と中部電力が提携した(株) JERA が、2017 年に、シェール・ガスを原料とした



(出所：国際 LNG 輸入者協会統計)

図 18 日本の国別 LNG 輸入量 (2019 年)

米国産 LNG の輸入を開始し、自由な契約形態である米国産 LNG の輸入量は、増加基調にある (図 18 参照)。日本の電力企業、都市ガス企業、総合商社は、シンガポール等に、LNG のディーリングの拠点を置きはじめている。将来的には、余剰な LNG を利用して、ディーリング益を上げることが可能となる。米国からのシェール・ガスを原料とした LNG 輸入を増加させることによって、LNG 調達源を多様化し、LNG の地政学リスクを小さくすることが可能であるとともに、LNG の価格決定スキームを複数もつことにより、市況状況によって、原油価格連動 LNG、スポット LNG、ヘンリー・ハブ基準 LNG を機動的に購入する手法を駆使して、より割安かつ効率的な LNG 輸入が可能となってくる。

8. 短期的には先送りが始まる米国 LNG プロジェクト

ただ、短期的には、LNG のスポット価格の下落、米国のヘンリー・ハブ渡しの天然ガス価格の下落により、米国の新規 LNG 輸出プ

ロジェクトには、逆風は吹いている。米国、豪州等の相次ぐ LNG プロジェクトの稼働による LNG 供給増に対して、2020 年の冬場が暖冬であり、LNG の暖房需要が減少したうえに、新型コロナウイルスの感染拡大により、経済活動が停滞したことから、LNG の需要が減少し、2020 年 4 月下旬のアジアにおける LNG スポット価格は、1,825 ドル / 百万 Btu と、史上最低を記録した。この価格では、米国の新規 LNG プロジェクトは、利益を上げることができず、2020 年に入ってから、米国のシェール・ガスを原料とした、新規 LNG プロジェクトからの撤退、FID (最終投資決定) が先送りされる例が続いている (表 5 参照)。

もっとも、単位熱量当りの炭酸ガス排出量が、石炭の半分程度であり、硫黄酸化物、窒素酸化物の排出量も少ない天然ガスは、21 世紀における地球環境保護の切り札として期待されており、LNG は、最終目的 (Destination) のエネルギーとして、世界の LNG 需要は、2040 年には年間 8 億トンを超えることが見込まれている (図 19 参照)。

世界の LNG 需要の増加とともに、米国のシェー

表 5 北米の新規 LNG プロジェクトの見直し

企業名	プロジェクト名	概要
シェニエール	コーバスクリスティー LNG	2020 年 2 月、2021 年への FID 延期を決定
ロイヤル・ダッチ・シェル	レイクチャールズ LNG	2020 年 3 月、事業から撤退
センブラ	ポート・アーサー LNG	2020 年 5 月、FID を 2021 年に延期
テルリアン	ドリフトウッド LNG	2020 年 6 月、FID を 2021 年に延期

(出所：各種新聞報道)

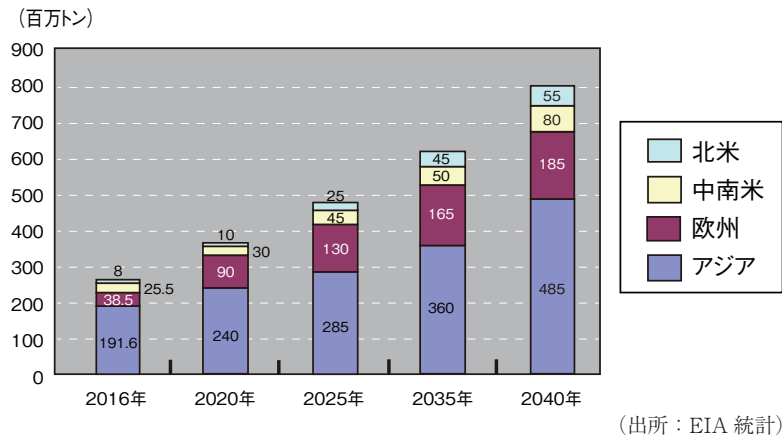


図 19 世界のLNG 需給見通し (2020 年 9 月見通し)

ル・ガスを原料としたLNGは、ますます重要性を強めることは間違いない。

9. シェール・ガス革命, シェール・オイル革命は米国の政治・外交の変革に

米国のシェール・ガス革命, シェール・オイル革命は、米国のエネルギー立国をはじめとして、国際エネルギー市場のパワー・バランスに変化を与えただけにとどまらない。米国の大統領選挙, 米国の外交政策にも大きな影響を与えている。2020 年 9 月時点において、シェール・ガス革命, シェール・オイル革命は、米国をはじめとした北米大陸においてのみ実現したエネルギー革命といえる。しかし、世界最大の石油・天然ガス消費国である米国において、シェール・ガスの生産量の増加, シェール・オイルの生産量の増加は、玉突き的に、国際エネルギー情勢にインパクトを与える。米国は、2019 年に、石油, 石炭, 天然ガスのすべてについて、純輸出国となった (図 20 参照)。

米国は、1957 年以来、62 年ぶりに、エネルギー生産が、エネルギー消費を上回り、エネルギーを外国に依存する必要がなくなった。米国は、これまで中東の石油を守るために、湾岸戦争, イラク戦争を主導してきた。これは、米国が、中東の石油に依存する必要があったからであり、中東からの石油の安定的な調達は、米国の安全保障にとって、極めて重要だったから

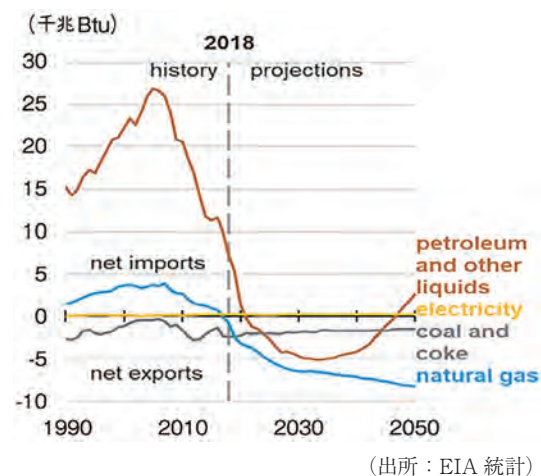


図 20 日本の国別 LNG 輸入量 (2019 年)

である。しかし、シェール・ガス革命, シェール・オイル革命により、米国が、中東の石油を必要としなくなると、米国は、多額の軍費を投入し、多くの米軍兵士の生命を危険にさらしてまで、中東の安全保障に責任を持つ必要がなくなる。現時点においては、米国第 5 艦隊は、バーレーンに司令部をおいて、ペルシャ湾の安全保障を担っているが、中東の石油を輸送するシーレーン防衛に関して、2019 年 6 月に、日本の石油タンカーが、ホルムズ海峡付近で攻撃を受けた際には、米国トランプ政権は、中東の石油に依存する国は、自らの資金的、人的負担によって、安全を守るべきであるという趣旨の発言をしている。米国の原油・石油製品純輸入量は、2005 年の 12,549 千 b/d から、2019 年には 670 千 b/d まで、1,200 万 b/d も減少している (図 21 参照)。

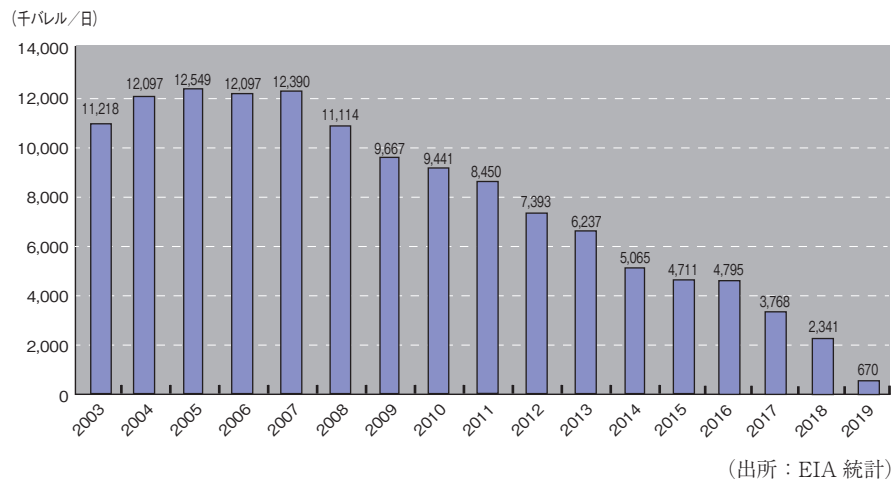


図 21 米国の原油・石油製品純輸入量の推移

米国の石油純輸入量の減少は、サウジアラビアの原油生産量を上回っており、国際石油貿易において、これだけの原油・石油製品輸入が減少すると、原油価格の下落要因となるとともに、米国がエネルギーの国内自立により、外国からの原油輸入、LNG 輸入の必要がなくなると、自由貿易を守ることへの関心が低下し、内向きの保護貿易に向かう要因となる。また、中東の安全保障への関心が低下することから、イランへの敵対姿勢を強め、米軍が内戦の続くシリアから撤退し、中東情勢が混乱化するリスクを気にしなくなる。さらには、トランプ大統領は、米国大統領選挙における、キリスト教福音派の支持を強固なものとし、ユダヤ人による政治的、資金的な支援を期待して、イスラム教徒を敵に回すリスクをとってまで、歴代米国大統領が自制してきた、エルサレムをイスラエルの首都と認定し、第3次中東戦争において、イスラエルが占領したシリアのゴラン高原の主権を、2019年3月にトランプ大統領が認めた。こうした動きは、国際社会、イスラム教世界との緊張化につながるものの、米国国民の3割近くに達するキリスト教福音派の人々は、ユダヤ人国家イスラエルの繁栄を、強く支援しており、2020年9月には、イラン敵視政策で意見が一致するアラブ首長国連邦（UAE）、バーレーンが、トランプ大統領の仲介のもと、イスラエ

ルと国交を樹立した。こうした動きも、アラブ世界、イスラム教世界の混乱を引き起こすリスクをとってまで、キリスト教福音派、ユダヤ人ロビーの支持を強固なものとしたいトランプ大統領の選挙戦略であり、シェール・オイルの生産量増加により、中東産原油の供給途絶を気にすることなく、トランプ大統領の中東政策の自由度が増した結果といえる。そもそも、2016年の大統領選挙においてトランプ政権が誕生した原動力は、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命に他ならない。シェール・ガス革命により、米国の天然ガス生産量が増加し、天然ガス火力発電が増加し、コスト競争力で劣る石炭火力発電が減少を続けている。米国の石炭生産量は、1978年以来の低水準に落ち込んでいる（図 22 参照）。

米国の天然ガス価格が、4.1 ドル / 百万 Btu を下回ると、天然ガス火力発電のほうが、石炭火力発電よりも、発電コストが安価となる。米国の天然ガス価格は、数年以上にわたって、2 ドル / 百万 Btu 台に低位安定しており、かつて電力の5割を占めていた石炭火力発電は、3割を割り込んでいる（図 23 参照）。

加えて、石炭は、炭酸ガス排出量が多く、地球温暖化、大気汚染の元凶とされている。こうした状況において、トランプ大統領は、石炭の消費による地球温暖化はなく、石炭産業を育成し、石炭労働者の雇用を守るという

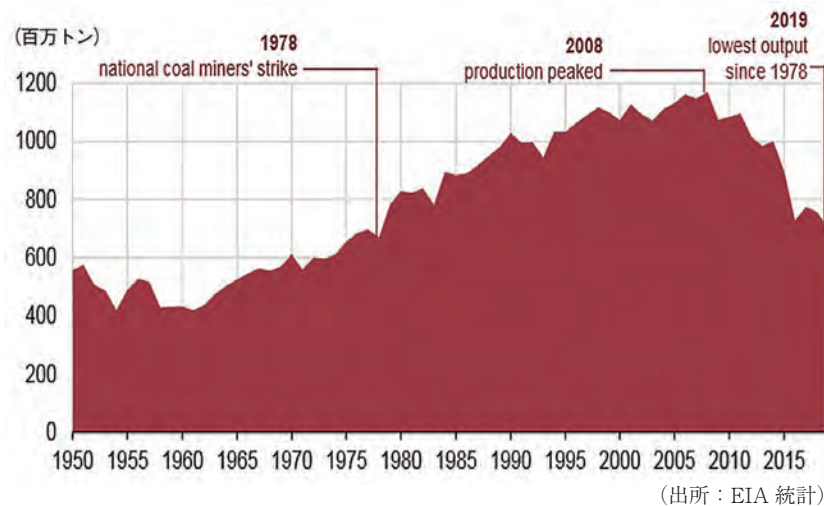


図 22 米国の石炭生産量

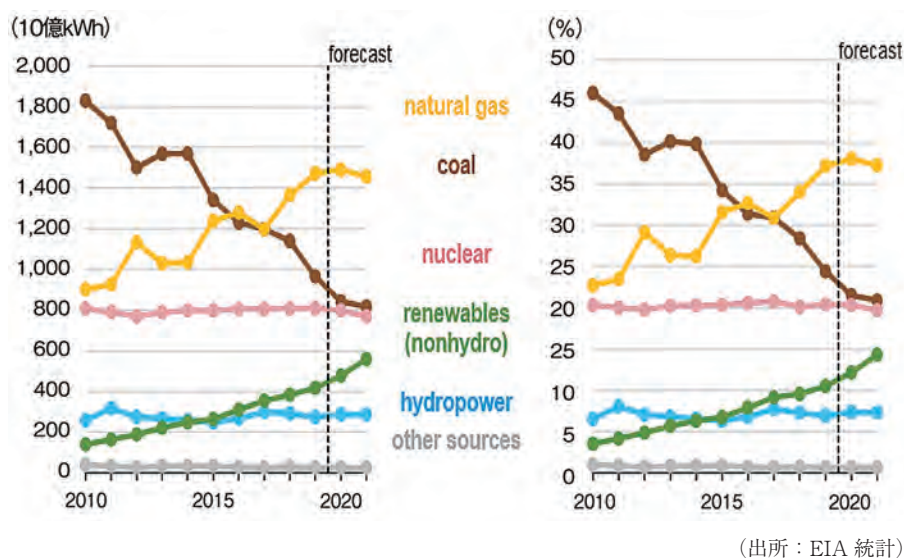


図 23 米国の電源別発電量シェア

救いの手をさしのべ、共和党の支持基盤である石炭産業の白人労働者の熱狂的な支持を得ている。2019年11月には、国連に対して、地球温暖化対策の世界的な枠組みであるパリ協定からの離脱を通告し、大統領選挙再選に向けて、石炭産業保護の姿勢を明確にしている。つまり、米国における石炭消費量の減少は、シェール・ガス革命によって、天然ガス火力発電が石炭火力発電に対して、経済的に優位に立ったことが本質であるものの、シェール・ガス革命により、苦境にあった白人の石炭労働者の支援に動き、トランプ大統領は、大統領選挙勝利の原動力とした。

また、テキサス州をはじめとした産油州も、共和党の支持基盤であるが、トランプ大統領は、環境保護を重視する民主党とは反対に、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発に係わる環境規制を見直し、米国の石油企業が、より自由にシェール・ガス開発、シェール・オイル開発を行うことが可能となるようなエネルギー政策を行っている。トランプ大統領の政策は、化石燃料の消費による地球温暖化はなく、石油、石炭の生産と消費を促進することにある（表6参照）。

表6 シェール・ガス, シェール・オイルの新たな動き (2020 年)

項 目	概 要
シェール・オイル	連邦保有地の開発規制緩和
シェール・ガス	水圧破碎の規制緩和
油田開発	油田開発時のメタン排出規制緩和
パイプライン	原油・天然ガスを輸送するパイプライン規制緩和
石炭	オバマ前大統領による CPP を見直し
エネルギー全般	米国のエネルギー自立により雇用を創出する
原油価格	石油業界支援のため OPEC プラスに働きかけ
新型コロナウイルス対策	経済活動の再開に重点
自動車	燃費規制を緩和
気候変動	2019 年 11 月 4 日にパリ協定の離脱を通告
再生可能エネルギー	自由経済における市場性重視
環境保護庁	炭酸ガス排出規制を見直し

(出所：各種新聞報道)

10. シェール・ガス革命, シェール・オイル革命は 21 世紀を変革する

上述のように、シェール・ガス革命, シェール・オイル革命は、エネルギーの世界にとどまらず、米国の国内政治、外交政策にも多大なインパクトを与えてきた。新型コロナウイルスの感染拡大に起因する原油価格の暴落にあたっては、トランプ大統領は、OPEC プラスに対して、協調減産を呼びかけ、原油価格の下落により苦境にあった、米国のシェール・オイル生産企業を擁護する外交を展開してきた。今後のシェール・ガス開発, シェール・オイル開発には、2020 年 11 月の大統領選挙の結果が、大きな影響を与えるであろう。民主党のバイデン候補は、パリ協定への復帰を主張し、シェール・ガス開発, シェール・オイルの開発にあたっての水圧破碎が、地震誘発、水質汚染を発生させるリスクを強調し、シェール・オイルの開発への規制強化を行うことが予想される。それに対して、トランプ候補が再選されるならば、シェール・ガス開発, シェール・オイル開発の環境規制は緩和され、米国の貿易収支改善のために、シェール・オイル、LNG の輸出が奨励されることとなる。2020 年 9 月時点の世論調査においては、民主党のバイデン候補が優勢であるものの、トランプ大統領の再選の可能性が高いとする見方も多い。

なぜならば、4 年前の大統領選挙の際も、対抗するクリントン候補のほうが、世論調査において、リードしていたものの、実際には、トランプ候補が勝利した。それは、トランプ大統領の移民排斥、白人労働者の雇用保護、保護貿易主義、パリ協定離脱等の、やや極端な主張は、良識ある白人知識人層が、世論調査で、表立って評価しないものの、有権者の過半数を占める白人にとっての 1 つの「本音」を表現しているからといえる。100% 確実に、石油、石炭の消費によって、地球温暖化、巨大なハリケーンが発生しているといえるのか。シェール・ガス、シェール・オイルの開発が、環境破壊をもたらしているのか。やはり、人件費の安価な移民が、白人の雇用を奪っているのではないか。トランプ大統領によって、シェール・オイルの生産により、安価なガソリンを消費することが可能となり、南部の産油州の石油産業は繁栄し、株価が上昇したことは間違いない。国際エネルギー機関 (IEA) によると、世界の石油消費は、1 億 b/d を超えることが見込まれている (図 24 参照)。

世界の石油需要が堅調に増加した場合、米国のシェール・オイルの生産量増加は、国際的なエネルギーの安定供給にとって、極めて重要な意味を持つ。また、シェール・ガス、シェール・オイルの存在は、石油・天然ガスの地政学リスクをミニマイズするとともに、

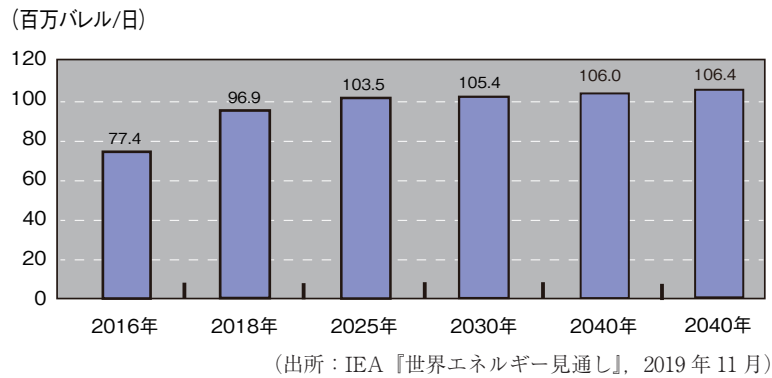


図 24 世界の石油需給見通し

原油価格の安定化にも寄与する。世界の人々は、安価で豊富な石油と天然ガスを利用できる。ただし、新型コロナウイルスの感染拡大が、どのようにシェール・オイルと共鳴するのか。今後の動きに注視する必要がある。新型コロナウイルスの感染拡大により、在宅勤務、テレワークが拡大し、通勤、出張、海外旅行等の輸送用燃料の需要が減少し、世界の人々の行動様式が変化し、石油需要のピークは、2019年となってしまう可能性がある。とメジャー（国際石油資本）の1つであるBPは、2020年9月に予想している。石油だけではなく、再生可能エネルギーを含めた総合エネルギー企業に、BPは変貌することを表明している。おりしも、本論を執筆中に、トランプ大統領が、新型コロナウイルスに感染したという報道が世界を震撼させている。地球温暖化はない。新型コロナウイルスは、ただのインフルエンザだと主張し、欧州諸国の環境保護派の人々から反発を受けていたトランプ大統領自身が、新型コロナウイルスに感染した。新型コロナウイルスの感染拡大が、1カ月後に迫った大統領選挙にどのような影響を与えるのか。米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、コロナ後の世界とどのように共鳴するのか。モノを所有しないシェアリング・エコノミー展開、インターネット通販の普及、レジ袋の有料化、廃棄プラスチック削減への世界的な動き、テレビ会議をはじめとしたITの発展という状況のもと、アジアをは

じめとした世界中の人々が、大量の石油化学製品を消費し、自動車を保有し、海外旅行を目的に航空機に乗ることによって、従来の延長線上にのって世界の石油消費量が増加し、米国のシェール・ガス、シェール・オイルの生産量増加が、エネルギー安定供給に寄与するという楽観的なシナリオを、コロナ後には、見直す必要があるのかもしれないのである。

[寄稿]

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

能村 貴宏 (北海道大学大学院工学研究院附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター 准教授)



1. はじめに

出力変動が大きい太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー（再エネ）の導入拡大に伴い、蓄エネルギー（蓄エネ）技術導入の必要性が急速に拡大している。特に、再エネの余剰電力の発生に起因する電力の需給バランスの調整を目的として、数時間～日単位で充電と放電を繰り返すことができる蓄エネ技術の導入の必要性が高まっている。貯蔵するエネルギーメディアの形態に応じて、蓄電池、水素、揚水発電、蓄熱、圧縮空気貯蔵、フライホイールなど、様々な蓄エネ技術があるが、電気を「熱」として貯める「カルノーバッテリー」と呼ばれる新たな技術が注目されている。

カルノーバッテリーは、再エネ由来の電力の余剰あるいは変動が大きく使用困難な部分を高温の熱に変換し、その熱を中規模～大規模の蓄熱システムに貯蔵（蓄熱）しておいて、

電力需要の大きい時間帯に貯蔵した熱を使ってスチームタービンなどで発電する。"Power-Heat-Power" タイプといえるこの方法を導入することで、不安定かつ変動する再エネの安定化・平準化が可能となり、再エネ由来の電力の普及の拡大およびコスト低下につながると期待されている。

本稿ではまず、カルノーバッテリー技術の概要を説明する。次に、カルノーバッテリー技術の体系化・普及促進を目的とした国際連携の動きについて紹介する。最後に、カルノーバッテリーへの適用を見据えた最新の高温蓄熱技術開発として、北海道大学の取り組みを紹介する。

2. カルノーバッテリー技術の概要

(1) カルノーバッテリーのコンセプト

カルノーバッテリーは、電気を入力して、熱として貯蔵し、電気として出力する蓄エネ

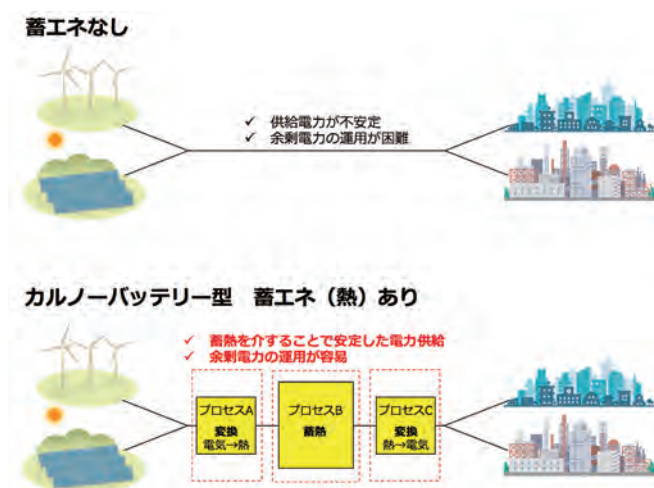


図1 カルノーバッテリーの原理

ルギー技術の一種である。図1にカルノーバッテリーのコンセプトを示す。繰り返しになるが、再エネ由来の余剰かつ使用困難な電力を一旦「熱」に変換し、それを「中規模～大規模の蓄熱システム」に一時貯蔵し、電力需要の大きい時間帯に貯蔵した熱を使って発電する“Power-Heat-Power”タイプの再エネ安定利用方法として、近年注目されている。コンセプト自体は1922年⁽¹⁾に提案されていたが、蓄熱技術が進歩したことで実装に向けた開発が急速に進んでいる。

カルノーバッテリーは主に3つのプロセスで構成される。図2にその概要を示す。プロセスAは電気から熱への変換である。電力および低温の熱源を投入し、ブレイトンサイクルやランキンサイクル等の逆サイクルでヒートポンプのように低温熱を電力で昇温（または冷却）する。直接抵抗加熱等で高温熱を発生させるケースもある。プロセスBは蓄熱である。プロセスAで発生させた熱を蓄熱材に貯蔵する。蓄熱技術として、熔融塩を用いた液体顕熱蓄熱技術、コンクリートや碎石などを用いた固体顕熱蓄熱技術、より高密度に熱を貯蔵できる潜熱蓄熱技術や化学蓄熱技術、およびこれらを組み合わせたハイブリッド型などがある。プロセスCは熱から電力への変換である。プロセスBで蓄えた熱を熱源として、ブレイトンサイクルやランキンサイクルで熱を電力へと変換し、供給する。プロセスCでは低温の熱が発生するため、地域熱供給などと組み合わせ、電力と熱を併給することも可能である。

(2) カルノーバッテリー導入のメリット

蓄エネルギー技術として、カルノーバッテリーには以下の8つのアドバンテージが期待できる。特に、項目4～8は蓄熱技術を使うカルノーバッテリーのみが享受可能である。

① 安定した電力供給が可能

中～大規模な蓄熱システムを使って熱を貯蔵するため、熱→電気の変換時の熱の入力温度の変動が少なく、結果として安定した電力供給が可能となる。

② 余剰電力の運用が可能

蓄熱技術は概ね数時間～日単位での蓄エネに適しており、余剰電力の運用に適した技術である。

③ 建設立地に制約がない

大規模な揚水発電や圧縮空気エネルギー貯蔵等とは違い、カルノーバッテリーはコンパクトなシステム設計が可能であり、基本的には建設立地に制約はない。

④ 他の蓄エネルギー技術に比べて圧倒的に低コスト

カルノーバッテリーは蓄電池などと比べると圧倒的に低コストで建設できることが報告されている⁽²⁾。

⑤ 既存の熱利用設備を再利用可能

熱→電力への変換はスチームタービンを利用できる。よって、今後徐々に操業が制限されていくであろう石炭火力発電所の施設を利活用できる可能性がある。

⑥ 排熱利用とのカップリングが可能

カルノーバッテリーは多様な熱源を受け入れ、電気または熱として供給可能である。例えば、図2のプロセスAでは外部から低温排熱を受け入れることで電気から熱への変換効率は向上する。

⑦ 極めて高い繰り返し耐久性

蓄熱技術のみを考えると数10万～100万回レベルでの繰り返し耐久性が期待できる。これは、すでにリジェネレーターなどのより過酷な環境で使われる蓄熱技術において証明されている。よって、カルノーバッテリーは30年程度の寿命が想定されている。

⑧ 様々なエネルギーメディアを受け入れ可能

カルノーバッテリーは蓄エネルギー時のメディアが熱である。熱は最も質の低いエネルギーメディアであるが、見方を変えたと全てのエネルギーメディアを熱に変換することがで



図2 カルノーバッテリーを構成する3つのプロセス

きる(あるいは熱になってしまう)。よって、持て余された様々なエネルギーメディアを熱に変換することで容易に受け入れることができる(エクセルギーの観点からは、メリットとして挙げることは憚られるが)

(3) カルノーバッテリーの暫定的な技術体系

図3にカルノーバッテリーの暫定的な技術体系を示す。電気→熱への変換方法(図2プロセスA)で分類すると、カルノーバッテリーはPTES(Pumped Thermal Energy Storage)と、その他の技術に大まかに分類することができる。

PTESはあえて日本語に訳すならば、「昇温蓄熱発電」というべきシステムである。図4はPTESの原理を模式的に示したものである。蓄熱/蓄電モードでは、電力および低温の熱を投入し、逆ランキンサイクルや逆ブレイトンサイクルでヒートポンプ的に低温熱を電力で昇温し、その熱を一旦高温熱溜(=高温側蓄熱システム)に貯蔵する。放熱/発電モードでは、蓄熱材に蓄えられた熱を高温熱源と

して、順サイクルにより発電する。この際発生する低温熱は低温熱溜(=低温側蓄熱システム)で貯蔵する。このPTESの効率(供給電力/投入電力)は、カルノー効率の制約を受けず、理想的には1となるが、電気→熱および熱→電気の変換時の効率に大きな影響を受け、概ね、0.5~0.7程度の効率となることが予想されている⁽³⁾。

図5にヒートポンプ的な電気→熱変換を使わないその他のカルノーバッテリーの原理例を示す。蓄熱/充電モードでは、再エネ由来の電力を入力して、電熱ヒーターなどを利用して高温熱を発生させ、その熱を蓄熱システムにて貯蔵する。放熱/発電モードでは、蓄熱システムに貯蔵した熱を高温熱源として、スチームタービンなどを利用して発電する。この種のカルノーバッテリーの理想的な効率 η は、発電システムを駆動する際に使用する熱力学サイクルにおける最高温度 T_H と最低温度 T_L の温度から、 $\eta = 1 - T_L/T_H$ となる。当然だが、このシ

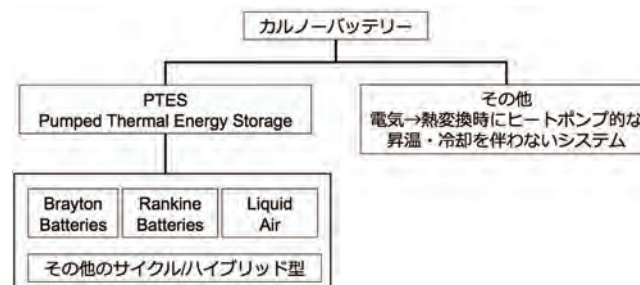


図3 カルノーバッテリーの暫定的な技術体系

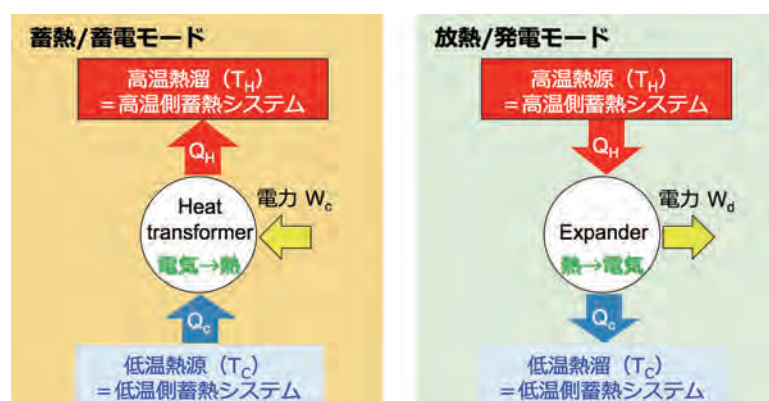


図4 PTESの原理

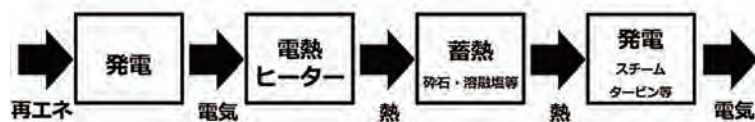


図5 その他に分類されるカルノーバッテリーの原理例

表1 蓄熱技術の種類

蓄熱方式	例
1. 顕熱利用型	水、レンガ、コンクリートなどの温度差利用。熱風炉のレンガが加熱。再生式バーナーの排ガスによるセラミックス加熱など。
2. 潜熱利用（PCM）型	固体・液体変態時の熱を蓄える。夜間電力による氷による蓄冷が有名。塩水和物、パラフィン、有機化合物、熔融塩、合金等の相転移も含む。
3. 化学反応利用型	A) 可逆反応利用型 $\text{Ca(OH)}_2 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ 、水素吸蔵合金、メタノール生成分解、etc... B) 不可逆反応利用型： $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ 、 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ など吸熱反応で直接回収

ステムでの発電効率はカルノー効率に制限される。また、基本的には蓄熱温度（蓄熱／充電モードで蓄熱材が到達した最高温度）が向上してもこの効率が改善されることを意味しない。一方、 T_H で供給可能な熱量が増大するため、蓄熱容量の増大につながる。

(4) 蓄熱技術

カルノーバッテリーの心臓部ともいえるのが、蓄熱技術である。表1は一般的な蓄熱技術の分類である。顕熱（固体顕熱・液体顕熱の2種）利用型、潜熱利用型、および化学反応利用型は代表的な技術であり、様々な研究、開発が進んでいる。この中でも特に、カルノーバッテリー技術向けに検討されている技術は顕熱利用型（固体顕熱・液体顕熱）、潜熱利用型の3パターンである。この項ではそれぞれの技術の概要と特徴を紹介する。

① 顕熱利用型（固体顕熱・液体顕熱）

顕熱蓄熱は物質（＝顕熱蓄熱材）の比熱と基準温度との温度差を利用した蓄熱法である。図6に顕熱蓄熱における作動温度と積算蓄熱量の関係を示す。積算蓄熱量は式1で示され、温度に比例する。物質の状態は変化せず、固体なら固体、液体なら液体としてその顕熱を利用する。

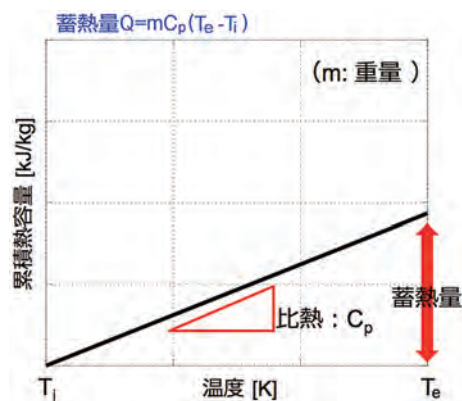


図6 顕熱蓄熱における作動温度と積算蓄熱量の関係

$$Q = m C_p (T_e - T_i) \quad \text{式1}$$

Q: 積算蓄熱量 [kJ] m: 蓄熱材重量 [kg]
 C_p : 比熱 [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] T_e : 到達温度 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_i : 初期温度 [$^{\circ}\text{C}$]

顕熱蓄熱材は固体と液体型に分類される。使用する温度範囲で熱的・化学的に安定な物質のほとんど全てが顕熱蓄熱材料になりうると言っても過言ではない。また、比熱は物性値として決まる。

顕熱蓄熱技術の長所と短所は以下の通りである。

長所

- 相変化，化学変化を伴わないため，極めて扱いやすい
- 半永久的に繰り返し使用可能
- 安価な材料を蓄熱材として使える
- 低温～高温域まで安定して使える蓄熱材が多数存在する
- 蓄熱材の成型加工の自由度が高い（固体顕熱蓄熱の場合）
- 産業レベルで長年の実績がある

短所

- 蓄熱材の蓄熱密度が低い
- 大きな蓄熱容量を得るには大きな温度差が必要

顕熱蓄熱は，ほぼ全ての温度レベルで成熟した技術である。特に，高温領域における蓄熱技術は現在のところ顕熱蓄熱技術の独壇場であり，熱風炉やリジエバーナー，ユングストローム式熱交換器などが産業における熱利用の根幹として使われている。また，カルノーバッテリーを想定した蓄熱材として，碎石，鉱物，ガラス固化物，コンクリートなど，安価な固体顕熱蓄熱材料の利用が検討されている。熱交換方式としては，単純な充填層だけではなく，シェル&チューブ型（主にコンクリート）や流動層型などがある。また，硝酸塩を使った液体顕熱蓄熱技術は，太陽熱発電用の蓄熱システムとして発展し，商用化に至っている。

② 潜熱利用型

潜熱蓄熱は，物質の相変態潜熱（主に固液）を利用した蓄熱方法である。この物質（蓄熱材）のことを相変化物質（PCM：Phase Change Material）と呼ぶ。図7に潜熱蓄熱における作動温度と積算蓄熱量の関係を示す。PCMは

固体 ⇔ 固液共存 ⇔ 液体の状態変化を経て蓄放熱するため，蓄放熱量は融点（凝固点）に達すると，潜熱によりステップ状に増大する。その積算蓄熱量は式2で示される。

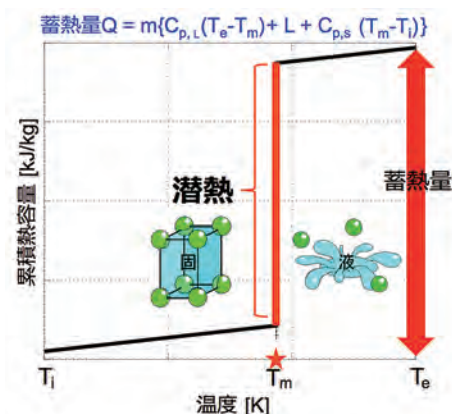


図7 潜熱蓄熱における作動温度と積算蓄熱量の関係

$$Q = m \{C_{p,L} (T_e - T_m) + L + C_{p,S} (T_m - T_i)\} \quad \text{式2}$$

Q: 積算蓄熱量 [kJ] m : 蓄熱材重量 [kg]
 $C_{p,L}$: 液体比熱 [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] $C_{p,S}$: 固体比熱 [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 T_m : 融点 [$^{\circ}\text{C}$] L : 潜熱 [kJkg^{-1}] T_e : 到達温度 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_i : 初期温度 [$^{\circ}\text{C}$]

図8にPCMとして使える物質の分類と例を示す。パラフィン，脂肪酸，糖アルコール類，水和塩，熔融塩，合金等様々な種類のPCMが報告されている100 $^{\circ}\text{C}$ 以上の高温用PCMとして，糖アルコール類，熔融塩，および合金系PCMが提案されている。

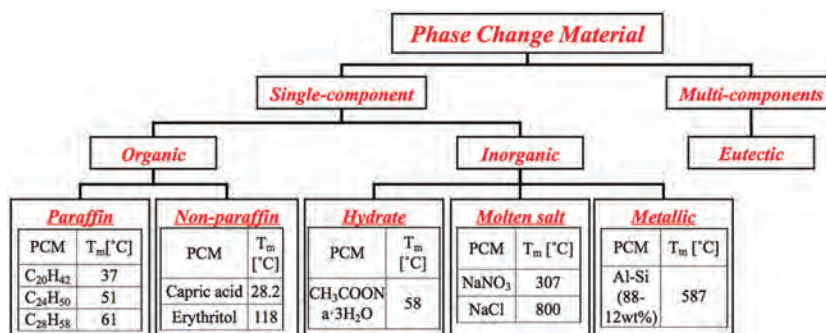


図8 PCMとして使える物質の分類と例⁽⁴⁾

潜熱蓄熱技術の長所と短所は以下の通りである。

長所
● 顕熱蓄熱と比較して高密度に蓄熱可能 ● 融点一定温度での熱源として利用可能（すなわち、間欠的に発生する産業排熱や再エネ由来の変動するエネルギー源を恒温熱源に変換可能） ● 顕熱蓄熱と同様、半永久的に繰り返し使用可能 ● 蓄熱のみならず熱制御への応用分野が広い
短所
● 蓄熱時に液相となるため、液体 PCM の漏出を防止する術が必要 ● 液相となったときに高い腐食性を持つ PCM 候補が多い

図 9 に潜熱蓄熱熱交換器の分類・種類を示す⁽⁵⁾。熱交換の際に伝熱壁を介するか介さないかで、間接接触熱交換と直接接触熱交換に分類でき、PCM が強制的に循環するかしないかで、アクティブ型とパッシブ型に分類できる。間接・パッシブ型として、PCM カプセル充填層型、シェル・チューブ型がある。カプセル充填層型は、伝熱面積を比較的大きく確保できるため、ガスを熱媒体とするときに有利である。一方、シェル・チューブ型は伝熱管部分に耐圧性を持たせることで、高圧水や高圧水蒸気を熱媒体として用いることができ、直接水蒸気発生型として太陽熱発電用蓄熱システムとして検討が進められてきた⁽⁶⁾。アクティブ型として流動層型と直接接触型がある。直接接触型は他の熱交換と違い、PCM と熱媒体が直接接触して熱交換するため、材料の組み合わせは限定されるものの、単純設計で高速の熱交換が期待である。流動層型では粒子

状の PCM または PCM カプセルを流動化させ、蓄熱槽を流動層とすることで、均一な熱交換が可能となる。また、熱媒体による PCM カプセルの高速輸送も検討されている。

（５）カルノーバッテリーの開発事例

ここ数年でカルノーバッテリーの開発事例が急速に増加している。2020 年 9 月 15 日、16 日に開催されたカルノーバッテリー技術に関する国際学会“2nd International Workshop on Carnot Batteries”では、新たなコンセプト、PTES におけるサイクルの改善、高温ヒートポンプや蓄熱システムの開発、および進行中のプロジェクト等に関する 23 件の報告があった。ここでは、代表的な 2 つの検討例について紹介する。

① PTES の検討例：CHEST（Compressed Heat Energy Storage, 圧縮熱エネルギー貯蔵システム）

ドイツ航空宇宙センター（DLR）などを中心に「研究及び革新的開発を促進するための欧州研究・イノベーション枠組み計画」（Horizon2020）で開発が進められているランキンサイクルをベースとした PTES の一種である。CHEST は、循環媒体として水／水蒸気を用い、高温ヒートポンプ、高温側蓄熱システム、低温側蓄熱システムおよび有機ランキンエンジンから構成される。高温側蓄熱システムは顕熱と潜熱蓄熱システムのハイブリッド型が想定されている。潜熱蓄熱システムとして $\text{KNO}_3 - \text{LiNO}_3$ （融点 133°C 、潜熱量 167kJ kg^{-1} ）を

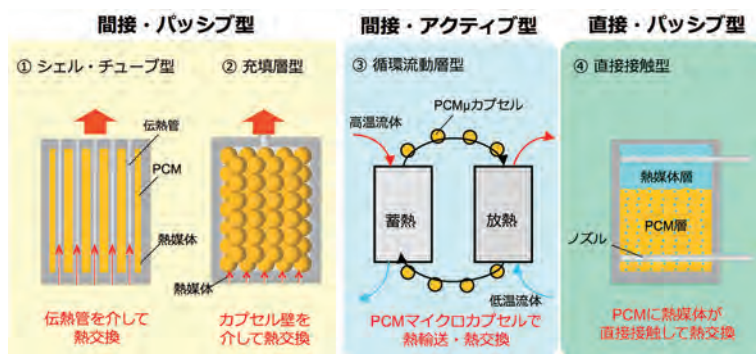


図 9 潜熱蓄熱熱交換器の分類・種類

PCMとして用いたシェル&チューブシステムが、顕熱蓄熱システムとしては高圧水を蓄熱材とした2タンクシステムが検討されている。蓄熱/充電時は、低温熱源からの熱を多段階で圧縮し、高温の熱を得る。低温側の蓄熱システムは発電時の低温溜として機能するだけでなく、太陽熱やバイオマス、廃熱などを熱源として受け入れ、セクターカップリングすることで地域熱供給システムとしても機能することが大きな特徴である⁽⁷⁾。

②その他の検討例：SIEMENS

Gamesa RENEWABLE ENERGY 社

Electric Thermal Energy Storage (ETES)⁽⁸⁾

サイクルを使わないカルノーバッテリーの検討例として、シーメンス社のETESが有名である。システム構成は先述した図4と同様である。電気から熱への変換は電気ヒーターが採用されている。蓄熱システムとしては、断熱材が内張されたコンクリートの蓄熱槽に蓄熱材として碎石を充填し、空気を熱媒体とした充填層型固体顕熱蓄熱システムが採用されている。蓄熱温度はおよそ600℃で1,000トンの碎石でおよそ130MWthの蓄熱容量を持つ。発電効率はおよそ25%が想定されている。

3. カルノーバッテリーに技術に関する国際連携 (IEA Annex36 "Carnot Batteries")

カルノーバッテリーは蓄電池などよりも低

コストな蓄エネルギー技術となる可能性があり、近年欧州を中心に開発が急速に進行している。そこで、カルノーバッテリーの可能性を体系的に調査、評価するための産業界、学術界の専門家から成るプラットフォームを確立することを主意として、国際エネルギー機関 (IEA) エネルギー貯蔵技術協力プログラム (ECES: Energy Conservation and Energy Storage-IEA Technology Collaboration Programme) の国際共同研究活動 (Annex) の1つ、Annex36 Carnot Batteries が2020年1月に発足した。このエネルギー貯蔵技術協力プログラムでは、(一財) ヒートポンプ・蓄熱センターが日本の締結者に指定されている⁽⁹⁾。

図10にAnnex 36の構成を示す。Subtask 0, Subtask A～Dの5つのSubtaskで構成される。Subtask 0 Definitionsは、カルノーバッテリー技術の定義、技術体系の整理、用語の標準化、およびカルノーバッテリーのKPI (Key Performance Indicator) を包括的に議論するグループである。Subtask A～Cは電気⇔熱の変換 (図2のプロセスAおよびCに相当) 技術毎に最新技術の情報を集約し、データベース化する。また、システムのモデリング、アセスメントを実施し、効率や拡張性および経済性評価の基盤に関する共通理解を構築することを目的としている。Annex 36ではRankine Batteries (ランキンサイクルがベース)、Brayton Batteries (ブレイトンサイクルがベース)、その他の技術に、タスクを分けて

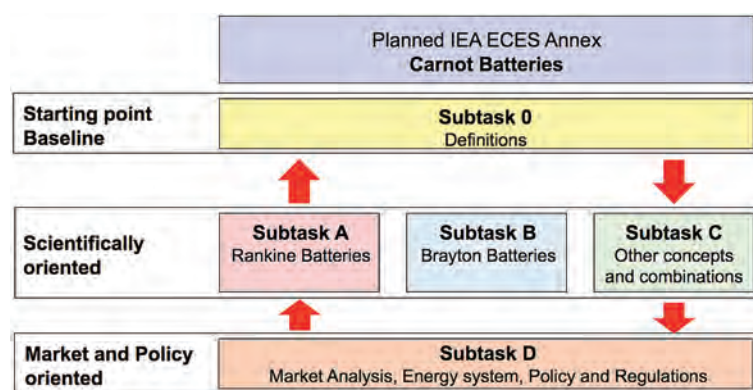


図10 IEA Annex 36 "Carnot Batteries" の構成

活動している。Subtask D -Market Analysis, Energy System, Policy and Regulations- は、市場ニーズの明確化、コストのモデリングなどを実施し、カルノーバッテリーの普及促進を目指すグループであり、政策提言や市場への参入戦略の立案等をアウトプットする予定である。

この Annex 36 には、2020 年 9 月時点で 49 機関が参加しており、活動期間は 2022 年 12 月までの 3 年である。ほとんど全て参画機関はカルノーバッテリー開発に関するプロジェクトを進行させており、Annex 36 を通じて技術の体系化、標準化がされる見通しである。

4. 北海道大学における蓄熱材料開発の紹介

(1) 研究開発の背景

カルノーバッテリーは現時点でも既存技術の組み合わせである程度建設可能であるが、特にわが国での技術の普及促進や産業とのインテグレーションを考えると、蓄熱材ベースでも大きな研究開発の必要性がある。カルノーバッテリーに求められる蓄熱材の性質として、以下が挙げられる。

●安価

現段階においても固体顕熱蓄熱材として碎石が適用されていることからわかる通り、圧倒的に低価格な蓄熱材の利用が求められている。

●高い蓄熱密度

高い蓄熱密度を持つ蓄熱材を使うことで、同じ蓄熱容量を想定すれば蓄熱槽がコンパクトに、同じ蓄熱槽サイズを考えればより長時間の容量の蓄エネにつながる。特にわが国での導入および産業とのインテグレーションを考えると、コンパクトなシステムが求められるだろう。

●高温域での蓄熱が可能

より高い温度の熱ほど仕事に変換できる量は増大し、高い効率で電気に変換できる。また、サイクルに投入される熱源温度一定である場合は、高温での蓄熱するほど、高い蓄熱容量となることを意味する。

●高速での熱交換が可能

再エネの負荷変動抑制や余剰電力の有効活用のみを考えるならば、1 日に 1 回程度の蓄熱・放熱サイクルが想定される。一方、産業とのインテグレーションを考えると（つまり排熱利用との組み合わせを考えると）、1 日に数回程度の蓄放熱も十分想定され、高速の熱交換性能が必要となるだろう。

●安心・安全で高い耐久性

未来のエネルギーシステムにおける蓄エネ技術の位置づけ、および 10 年以上の長期間にわたる操業を考えると安心・安全で高い耐久性を持つことが大前提となる。

我々の研究グループでは、カルノーバッテリーへの適用を見据えた高温蓄熱技術として、金属 / 合金 PCM の利用に注目している。その最初の検討は、筆者の師である故秋山主宏先生が、内側をセメントでコーティングしたステンレス製球カプセルに Al 基合金 PCM を封入しその蓄放熱特性を調べた 1991 年まで遡る⁽¹⁰⁾。金属 / 合金系 PCM は高温でも安定的に作動可能であり、蓄熱容量 (Jg^{-1}) および蓄熱密度 (Jm^{-3}) とともに、顕熱蓄熱材や従来開発されてきた溶融塩 PCM よりも大きく、魅力的である。また、例えば Al を大量購入すれば市場流通価格も安価である。以上より、金属 / 合金系 PCM は将来のカルノーバッテリー用蓄熱材として大きな可能性がある。しかし、溶融した金属 / 合金 PCM の高い腐食性から派生する技術的課題の克服が難しいためか、今まで報告例は極めて少なかった。

(2) 金属・合金系 PCM のマイクロカプセル化のコンセプト

金属 / 合金系 PCM の腐食問題に対する最もシンプルかつ有効な方法は、充填容器（カプセル）として「適切な」組成のセラミックスを使う、または容器にコーティングすることである。この「適切」な組成はエリンガム線図等からある程度予想できる。また、マイクロサイズのセラミックスシェルに PCM を封入できれば、あたかもセラミックス粒子としてハンドリングすることができ、従来の固体顕熱蓄熱技術での熱伝達に適した蓄熱体構造をボトムアップ的に作り上げていくことができる。そこで、我々の研究グループではカルノーバッテリーに適した作動温度（500℃ 以上）を持つ Al 基合金 PCM をコア、 Al_2O_3 をシェルとしたコア-シェル型のマイクロカプセル潜熱蓄熱材（MEPCM）の開発を進めてきた。

(3) 金属／合金系 MEPCM の作製手順

図 11 に、我々の研究グループが提案した化成被膜処理と熱・酸化処理による金属／合金 MEPCM の基本製造コンセプトを示す。Al を一定濃度以上含む合金系 PCM のマイクロ粒子をコア（＝原料）として、①融点以下での化成処理による Al_2O_3 の前駆体としての AlOOH 被膜の形成と、② 融点以上での酸化・熱処理による AlOOH の α - Al_2O_3 化および原料である合金 PCM に含まれる Al の酸化反応を利用して、「コア＝合金系 PCM - シェル＝ α - Al_2O_3 構造」の MEPCM を実現した。

(4) 金属／合金系 MEPCM の革新的な特徴

開発した MEPCM には蓄熱密度，作動温度

域，構造において従来材料よりもはるかに優れた特徴がある。

① 特徴 1：高い蓄熱容量（vs. 顕熱蓄熱材）

図 12 は開発した MEPCM とカルノーバッテリーで採用されている顕熱蓄熱材との蓄熱エクセルギーの比較である。顕熱分の寄与を考慮するため、 400°C から 700°C まで 100K ごとの顕熱により蓄熱されたエクセルギーを積算している。開発した MEPCM の相変化温度一点での蓄熱容量は、 $188^{(11)} \sim 350 \text{ Jg}^{-1}$ ⁽¹²⁾ であり、ここでは代表値として 250 Jg^{-1} を想定した。操業時に想定される $100 \sim 400 \text{ K}$ の温度幅を考慮しても、欧州を中心に検討が進んでいる固体顕熱蓄熱材，熔融塩顕熱蓄熱材

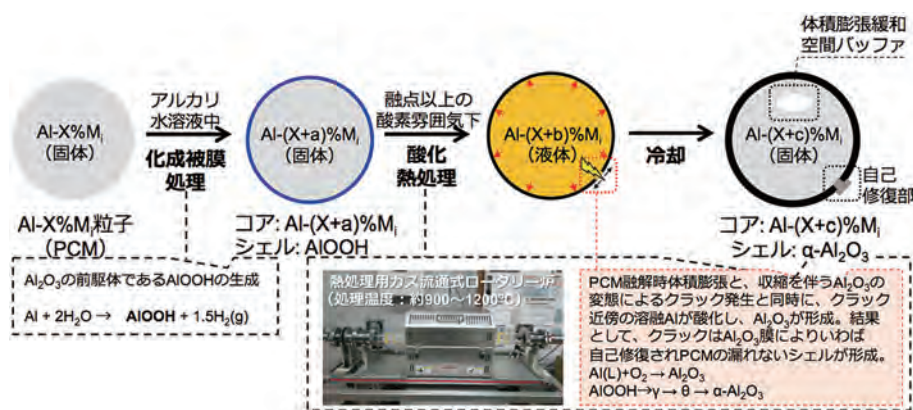


図 11 金属／合金 MEPCM の基本製造コンセプト

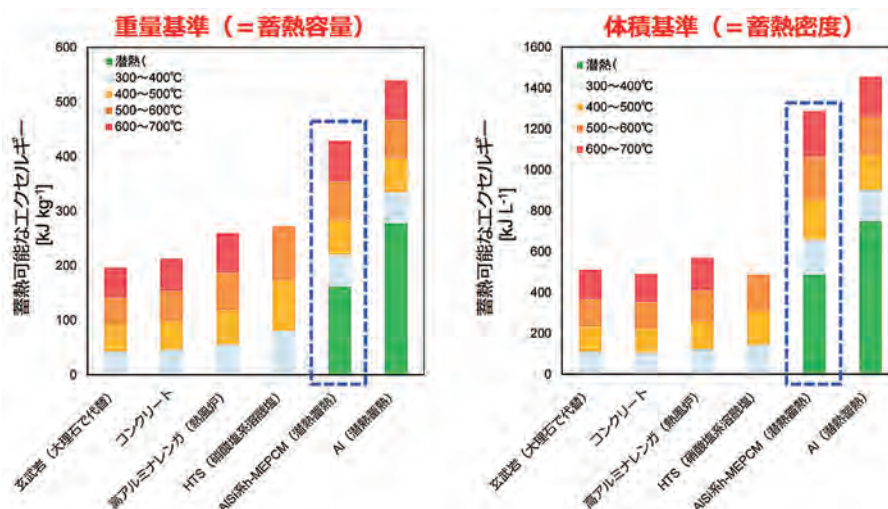


図 12 開発した MEPCM とカルノーバッテリーで採用されている顕熱蓄熱材との蓄熱エクセルギー比較

よりも、MEPCMは重量基準で約2倍以上、体積基準で約3倍近くのエクセルギーを蓄熱可能であり、カルノーバッテリーシステムのコンパクト化に寄与する大きな可能性がある。

② 特徴2：高温域での蓄熱が可能

従来のMEPCM研究はコア材料としてパラフィンや脂肪酸がほとんどあり、その作動温度領域は100℃以下、ないしは60℃以下であり、それ以上の高温領域で作動可能MEPCMは全く検討例がなかった。開発したMEPCMでは、従来は伝熱管材料や蓄熱槽材料としてのみ考えられていた金属や合金そのものをPCMとして適用することで、高温領域での安定作動を実現した。また、コア材料を変えることで低温化および高温化が可能である。図13に作製に成功したMEPCMのラインナップを示す。Al（融点660℃）⁽¹³⁾、Al-Si（融点：580℃）^(12, 14-17)、Al-Zn（融点380～500℃）⁽¹⁸⁾においても、同様にMEPCMの作製に成功しており、さらに多くの作動温度域（＝融点）でのMEPCM開発が進行中である。

③ 特徴3：高熱伝導率

金属／合金PCMの熱伝導率は固体顕熱蓄熱媒体や熔融塩の数百倍であることから、熱交換においてもアドバンテージがある。つまり、金属・合金そのものをPCMとして利用することへの大胆な発想転換により、高熱容量と高熱伝導性（従来PCM比100倍以上可能）を両立することができた。

④ 特徴4：熱的、化学的、機械的に優れた構造

図14 a) は、開発したMEPCMの外観のSEM像⁽¹⁵⁾、b) は断面のSEM像⁽¹⁴⁾を示し、c) はMEPCM構造の簡易模式図である。b) より、シェルは厚さ1 μm程度の緻密層であり、空隙の存在が確認された。この空隙は、PCMの固⇄液相変化時の体積変化のバッファとなり得る極めて有利な構造だと予想される。このマイクロカプセル化法はPCM融点以上において溶融Alと酸素の反応によるアルミナの形成により、自己修復的に最終的なシェル形成が達成される。つまり、コア材料が最も体積膨張した状態で最終的なカプセル化が完了す

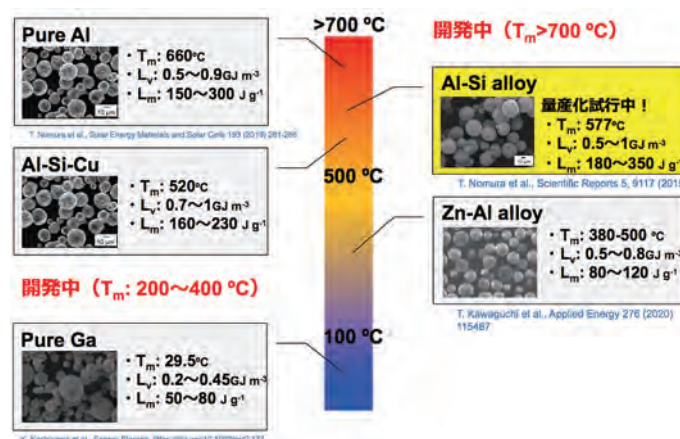


図13 MEPCMのラインアップと開発状況^(13, 15, 18, 19)

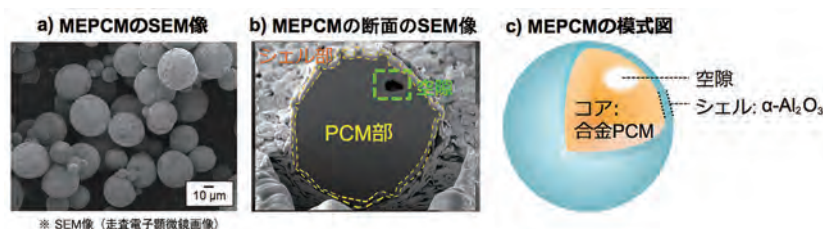


図14 金属／合金MEPCMの基本製造コンセプト

る。よって、液相時よりも体積の小さい室温状態における観察では、上記の如く空隙が観察される。この空隙は、セラミックスなどの硬殻シェルで構成されるマイクロカプセルにおいて必須の構造である。また、X線回折法(XRD)および透過電子顕微鏡(TEM)による解析の結果、シェルの主成分は α - Al_2O_3 であった。 α - Al_2O_3 はアルミナの結晶形態の中でも最も熱的に安定であり、耐腐食性、耐酸化性に優れる。以上より、開発したMEPCMは機械的、熱的、化学的にも優れた構造を持つ。なお、既に3,000サイクルの蓄放熱耐久性をクリアしている⁽¹¹⁾。

⑤ 特徴5：ボトムアップ的設計による蓄熱体設計⁽²⁰⁾

開発中のMEPCMのシェルは α - Al_2O_3 （厚み1～2 μm 程度）であるため、セラミックス（ここでは α - Al_2O_3 ）のマイクロ粒子同様のハンドリングが期待できる。よって、MEPCMを主構成材料として成型、焼結することで様々なサイズの粒子、ペレット、ハニカム等様々

な形状のデバイスを作製できる可能性がある。図15はそのコンセプトである。蓄熱材を用途や機能に応じた成型の自由度は固体顕熱蓄熱材のアドバンテージだが、開発したMEPCMはこのアドバンテージを継承した上で蓄熱密度、熱応答性、温度制御特性などの機能をグレードアップ可能である。蓄熱構造体の開発により、カルノーバッテリーに適した大規模蓄熱システムへの展開が見えてくる。

(5) 金属/合金系MEPCMに想定される用途

図16に、MEPCMに想定される応用用途を分野別、利用温度別に示す。カルノーバッテリーをはじめとする再エネ利用技術だけではなく、ガス分離技術、産業排熱有効利用技術、次世代自動車の熱マネジメント、触媒熱制御、エクセルギー再生など様々な応用用途への展開が期待できる。MEPCM利用技術は、再エネ利用/省エネ問わず、熱利用技術の共通課題の解決につながり、新たな熱利用技術の基盤となることが期待できる。



図15 MEPCMを原料とした蓄熱体のボトムアップ設計コンセプト

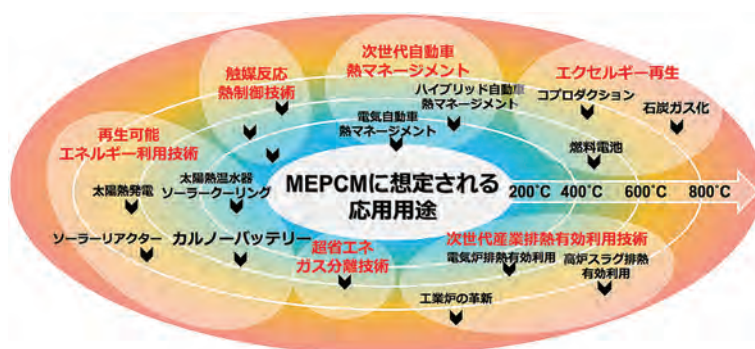


図16 MEPCMに想定される応用用途

5. おわりに

本稿では、蓄熱を利用した新たな蓄エネルギー技術であるカルノーバッテリーの概要を説明し、その体系化・普及促進を目的とした国際連携について紹介した。また、カルノーバッテリーへの適用を見据えた最先端の高温蓄熱技術として、北海道大学が開発中の金属/合金系 MEPCM を紹介した。カルノーバッテリーは低コストな蓄エネルギー技術として、再生可能エネルギー大量導入に向けた重要な選択肢となる可能性がある。また、今回紹介した MEPCM など、このカルノーバッテリーに求められる蓄熱技術の探求は、再エネ利用/省エネ問わず、熱利用技術の共通課題の解決につながり、新たな熱利用技術の基盤となることが期待できる。

[謝辞]

本稿を執筆するにあたり東京工業大学 加藤之貴教授からご助言を賜りました。厚く御礼を申し上げ、感謝する次第です。

参考文献

- (1) Marguerre, F. "Verfahren zur Aufspeicherung von Energie." Patentschrift Nr. 388 122, 1922
- (2) Okazaki T. "Electric thermal energy storage and advantage of rotating heater having synchronous inertia," Renewable Energy, 2020;151:563-74
- (3) Steinmann W-D. "Thermo-mechanical concepts for bulk energy storage," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017;75:205-19
- (4) 秋山友宏, 能村貴宏 (堤 敦司監修) 『熱エネルギー高度有効利用と省エネルギー技術』, 第3章, pp.113-124, (株)ロントピア出版, 2015年3月
- (5) Laing D, et al, "Development of high temperature phase-change-material storages" Applied Energy, Vol.109, pp.497-504, 2013
- (6) Nomura T, et al, "Technology of Latent Heat Storage for High Temperature Application: A Review" ISIJ International, Vol.50, pp.1229-1239, 2010
- (7) https://www.chester-project.eu/wp-content/uploads/2019/10/CHESTER_D3.3_Detailed-design-of-the-high-temperature-TES-laboratory-prototype.pdf
- (8) Siemens Gamesa, Renewable Energy
- (9) <https://www.hptcj.or.jp/about/tabid/1168/Default.aspx>
- (10) 秋山友宏, 芦沢芳夫, 八木順一郎 『高融点相変化物質を封入した単一球カプセルの蓄熱・放熱』, 日本機械学会論文集 B 編 57: pp.284-291, 1991 年
- (11) Sheng N, Zhu C, Saito G, Hiraki T, Haka M, Hasegawa Y, et al. "Development of a microencapsulated Al-Si phase change material with high-temperature thermal stability and durability over 3000 cycles," Journal of Materials Chemistry A, Issue 37, pp.18143-18153, 2018
- (12) Nomura T, Yoolerd J, Sheng N, Sakai H, Hasegawa Y, Haga M, et al. "Microencapsulation of eutectic and hyper-eutectic Al-Si alloy as phase change materials for high-temperature thermal energy storage," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.187: pp.255-262, 2018
- (13) Nomura T, Yoolerd J, Sheng N, Sakai H, Hasegawa Y, Haga M, et al. "Al/Al₂O₃ core/shell microencapsulated phase change material for high-temperature applications," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.193: pp.281-286, 2019
- (14) Nomura T, Sheng N, Zhu C, Saito G, Hanzaki D, Hiraki T, et al. "Microencapsulated phase change materials with high heat capacity and high cyclic durability for high-temperature thermal energy storage and transportation," Applied Energy, Vol.188: pp.9-18, 2017
- (15) Nomura T, Zhu C, Sheng N, Saito G, Akiyama T. "Microencapsulation of Metal-based Phase Change Material for High-temperature Thermal Energy Storage," Scientific Reports 5, Article 9117, 2015
- (16) Sheng N, Zhu C, Sakai H, Akiyama T, Nomura T. "Synthesis of Al-25 wt% Si@Al₂O₃@Cu microcapsules as phase change materials for high temperature thermal energy storage," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.191: pp. 41- 47, 2019
- (17) Sheng N, Zhu C, Sakai H, Hasegawa Y, Akiyama T, Nomura T. "Modified preparation of Al₂O₃@Al-Si microencapsulated phase change material for high-temperature thermal storage with high durability over 3000 cycles," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.200, Article 109925, 2019
- (18) Kawaguchi T, Sakai H, Sheng N, Kurniawan A, Nomura T. "Microencapsulation of Zn-Al alloy as a new phase change material for middle-high-temperature thermal energy storage applications," Applied Energy, Vol.276, Article 115487, 2020
- (19) Kashiya K et al., "Ga-based microencapsulated phase change material for low - temperature thermal management applications," Energy Storage, 2020 (<https://doi.org/10.1002/est2.177>)
- (20) Sakai H, Sheng N, Kurniawan A, Akiyama T, Nomura T. "Fabrication of heat storage pellets composed of microencapsulated phase change material for high temperature applications," Applied Energy, Vol.265, Article 114673, 2020

[寄稿]

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

諸富 徹 (京都大学大学院 経済学研究科／地球
環境学 教授)



1. 地域再生の担い手としてのシュタットベルケ

(1) いまシュタットベルケを取り上げる意義

本稿は、ドイツのシュタットベルケ(Stadtwerke: 都市公社)を念頭に置きながら、日本の自治体による公益的なエネルギー事業体の可能性を検討する。戦後、電力・ガスなどのエネルギー事業は、大手電力会社やガス会社に委ねられ、自治体はほとんど関与してこなかった。しかし歴史をふり返れば、戦前にいくつもの自治体が電力事業を市営事業として手掛け、都市財政に大きく貢献していた経緯をいま一度想起する必要がある⁽¹⁾。再生可能エネルギー(再エネ)固定価格買取制度の下で分散型エネルギーが伸長しつつあり、また電力システム改革の下で発電事業や電力小売事業への新規参入が自由化されたいま、自治体がエネルギー事業に参入する制度的障壁は取り除かれた。日本の自治体／地域が参照すべき手本は、ドイツのシュタットベルケである。

日本の自治体は、地方公営企業の形態ですでに上下水道、交通、病院などの事業に取り組んでおり、一部、ガス・電気などのエネルギー事業にも取り組んでいる。これはドイツとほぼ同じであり、エネルギー事業が中核事業に座っていない点だけが異なっている。日本で今後、エネルギー事業がここに本格的に加わるようになったとしても、何ら不思議ではない。エネルギーは住民生活に不可欠の必需財

であり、きわめて公益性が高い。公益的なサービス供給のために、発電所と送配電網というインフラを整備し、その資本費用と維持管理費用を料金徴収で賄い、独立採算制を成り立たせる経営形態は、上下水道や交通など、地方公営企業の経営形態と基本的に同じである。

20世紀が「集中型エネルギーシステム」(火力発電所や原子力発電所のように、遠隔地に集中立地した発電設備から、大規模送電網を用いて大都市の電力消費者に向けて一方的に電気を送り届ける仕組み)によって特徴づけられたのに対し、21世紀は「分散型エネルギーシステム」によって特徴づけられる。再エネで発電することが当たり前になる時代では、太陽光、風力、地熱、木質バイオマス、小水力などの再エネ資源がある限り、どこでも、誰でもエネルギーを創り出すことが可能になる。個人でも可能だし、集落単位でももちろん発電事業は可能である。

再エネ発電の特徴は、個々の発電設備は小規模だが、全国に無数に散らばっており、それらが送配電網でネットワーク化されている点にある。将来的にはこれら分散型設備のすべてにセンサーを取り付け、送配電網に情報通信機能を持たせれば、無数に分散した発電設備を遠隔制御で効率的に利用することができる。再エネに特有の、気象条件の影響による発電量の変動性は、いまは全国規模で調整するほかないが、将来的に蓄電技術が発達し、より低コストでそれが利用可能になれば、地

域ごとに電力需給のバランスを調整し、問題の解決を図ることが可能になるだろう。

日本ではまだ普及していない「熱利用」も、分散型エネルギー源として重要だ。熱は、人口密集地区で冷暖房に用いることができ、工夫すればエネルギー効率性を大幅に改善できる。欧州都市の場合は、再エネである木質バイオマス資源を燃焼させて熱を発生させ、熱湯を熱導管で人口密集地区に回流させて暖房を行っている。しかも、バイオマス資源を燃焼して熱を取り出すだけではもったいないので、その熱で発生する蒸気でタービンを回し、発電も行う「熱電併給（コジェネレーション）」を行えば、エネルギー効率性は約70～90%にまで高まる。こうした熱事業も実は、ドイツのシュタットベルケによる重要なエネルギー事業の柱となっている。熱電併給設備が増加するほど、分散型電源が増えていくことを意味し、エネルギー利用の効率性を大幅に引き上げることが可能になる。日本でも北海道・下川町が、木質バイオマスを熱源とした地域熱供給システムと熱電併給設備を構築する計画をもっている。

再エネや熱電併給などの分散型電源の技術が進歩し、その事業採算性を確保することが可能になるにつれて、エネルギー供給主体は、必ずしも大規模な電力会社である必要はなくなってきた。発電、送電、配電、小売の電力各事業のうち、送配電のみは独占を認める必要があるが、他の事業領域は、地域独占を認められた大規模な電力会社が事業を占有する必要はなくなった。むしろ地域で、将来的なエネルギービジョンをまとめ、無数の分散型電源をネットワーク化し、電力の地産地消、熱利用、地域における電力・ガス・熱の最適な利用を、垣根を越えて総合的に推進・調整できる自治体の役割が今後、重要になっていくと考えられる。

自治体は、調整役としての役割に特化してもよいが、自らエネルギー事業を手がけるこ

とも十分検討されてよい。その場合に、自治体はどのような事業形態でエネルギー事業に参入するかを検討しなければならない。それが、「自治体エネルギー公益的事業体」であり、「シュタットベルケ」のあり方を考えることに他ならない。

（２）地域再生にエネルギー事業を活用すべき積極的な根拠

自治体がエネルギー事業に取り組むべきより積極的な理由もある。つまりそれは、地域に所得と雇用をもたらし、ひいては税収の増加をもたらしてくれるからだ。すなわち、「エネルギー自治」に取り組むことで、「地域経済循環」を促され、地域の所得水準が引き上げられるのである。筆者は別の箇所でも、「エネルギー自治」の定義を試みたことがある。木質バイオマスを事例に取れば、それは以下のように5つの要素を含んでいる⁽²⁾。

- (1) 自分たちが消費するエネルギーを、地域資源（ここでは森林）を用いて自ら創り出す。
- (2) 上記目的のために、域外の大企業に頼るのではなく、自治体、もしくは地元企業が中心となって地域でエネルギー事業体を創出。
- (3) 域外から購入していた化石燃料を、より安価な地域資源（木質バイオマス）に置き換えることで、燃料費を削減、地域の実質所得を上昇させる（費用削減効果）。
- (4) れまでは、「化石燃料費支出」として域外に流出していた所得部分を、地域資源である木質バイオマスへの支出に置き換えることで、所得が地域に留まるようになる。つまり山林所有者や、エネルギーの生産、流通、消費に関わる地元事業者の利潤、雇用者報酬、自治体への税収の形で、地域の実質所得を上昇させる（資金還流効果）。
- (5) 地域資源の活用による燃料生産（薪、チップ、ペレットなど）から、エネルギー（電気・熱）の生産、流通、消費、そして廃棄物（灰）処理のプロセスで、関連産業が地域に発生し、地域に所得と雇用が生みだされる。

実際、我々の共同研究によれば、日本でもエネルギー自治の実践を通じて、地域に所得と富、そして雇用が新たに生み出されていることが、定量的に確かめられている。我々が

採用したのは、「地域付加価値分析」という手法である*¹。この手法に基づいて、長野県飯田市のおひさま進歩エネルギー株式会社が太陽光発電事業を通じて生み出した地域付加価値を試算すると、2030年までの累計で、約18億円もの付加価値が生み出されることが判明した⁽³⁾。しかし、飯田市の再エネ促進政策に対しては、環境省をはじめとする補助金の支援が充てられている。そこで、再エネ事業がもたらした真の効果を見極めるには、補助金についても累計額を試算し、付加価値の累計額と比較してみる必要がある。結果的に、補助金の累計額は2030年時点で約6億円、これに対して、おひさま進歩の太陽光発電事業がもたらした付加価値累計額は約18億円なので、補助金の約3倍もの付加価値を生み出すことに成功していることが分かった。つまり、再エネ事業への投資は、地域にとって大いに経済合理性をもつ投資なのである。

もっとも、課題も浮き彫りになった。おひさま進歩が生み出した付加価値のうち、地元の南信州地域に帰属するのは約9億円で、付加価値総額の約半分に過ぎない。その原因は、事業資金の調達方法による。おひさま進歩は、全国から小口の出資金という形（市民共同出資）で事業資金を募った。これは、事業資金調達方法上のイノベーションであり、おひさま進歩の事業が成功する上で大きな要因の1つとなった。しかし出資者には南信州だけでなく、東京や大阪などの大都市住民も多く含まれていたため、おひさま進歩が生み出した付加価値は、「配当」という形で域外へ流出してしまったのである。このことは、事業資金をできる限り地元から調達し、地域的な資金循環を活発化させることの重要性を我々に知らせてくれる⁽³⁾。

2. エネルギー自治の担い手としての「自治体エネルギー公益的事業体」

（1）シュタットベルケと「自治体エネルギー公益的事業体」

長野県・飯田市が環境エネルギー政策で注目を浴びるようになった要因は、「おひさま進歩エネルギー株式会社」という社会的企業の存在なくしては語りえない。おひさま進歩は、資本金の出資構成からみれば純然たる民間企業だが、その目的は利潤最大化ではなく、温暖化防止のために省エネと再エネの拡大を目指し、地域社会への貢献を使命とする社会的企業である⁽²⁾。飯田市は、おひさま進歩に出資こそしていないものの、その創設時から今日まで、さまざまな支援を行ってきた。おひさま進歩は、会社の設立目的からその事業内容にいたるまで公益性が高く、本稿でいう「エネルギー公益的事業体」にあたる。エネルギー自治を実現するには、自治体による先導的役割が必要なのはもちろんのことだが、その中核には、こうしたエネルギー事業を担う何らかの事業体の存在が不可欠である。もっとも、本稿で光をあてる「自治体エネルギー公益的事業体」は、自治体が一歩表に出て、自らが事業体に参与する点で、おひさま進歩と異なっている。

もう少しこれを厳密に定義しておくと、「自治体エネルギー公益的事業体」とは、自治体が出資という形でその創設と運営に関与し、その事業目的を公益的な目的に置くあらゆるエネルギー事業体を指す。自治体はその事業体に100%出資する公社から、民間企業が主体となり、自治体は数%のみの出資に留める事業体まで、さまざまな事業形態がありうる。仮に、民間企業が主導であったとしても、その事業目的が公益的なものである限り、その

* 1 地域付加価値分析は、もともとドイツの研究機関で開発された。日本では、筆者が研究代表者を務める京都大学再生可能エネルギー経済学講座の研究プロジェクトの一環として、日本版の地域付加価値分析モデルの開発とそれに基づく日本での地域付加価値分析の適用を、立命館大学のラウパッハ教授の協力のもとに展開した。地域付加価値分析の理論、分析モデル、そして適用事例については、巻末参考文献（4）を参照。

事業体をここでは、「自治体エネルギー公益的事業体」と呼ぶことにしたい。

日本でも最近、よく耳にするようになったドイツの「シュタットベルケ」(都市公社)もまた、自治体が出資するエネルギー公益的事業体である^{*2}。現在、ドイツには約900のシュタットベルケが存在しているといわれ、電力、ガス、熱供給といったエネルギー事業を中心に、上下水道、公共交通、廃棄物処理、公共施設の維持管理など、市民生活に密着したきわめて広範なサービスを提供している。シュタットベルケは、これらのサービス提供を可能にするためのインフラの建設と維持管理を手掛ける、独立採算制の公益的事業体である。電力では自治体が所有する配電網を利用して配電事業、電力小売事業、そして発電事業を手掛けている。

これらはいったい黒字を計上しており、それを元手に、他の公益的事業に再投資している。欧州の電力自由化政策の下でシュタットベルケは競争に打ち勝って生き残り、いまや分散型電力システムの担い手に成長しつつある。日本では戦前、シュタットベルケをモデルとした電気事業が主要都市で展開されたが、総力戦体制下で現在の九電力体制に強制的に統合された。いま、再エネの促進と電力自由化というエネルギー政策の大きな構造転換の中で再び、自治体によるエネルギー公益的事業体の可能性への関心が高まっている。我々

はこの点で、ドイツのシュタットベルケから大いに学ぶことができるだろう。

(2) エネルギーが牽引するシュタットベルケの事業構造～ドイツ・フライブルク市の事例から

シュタットベルケを理解するには、シュタットベルケの事業構造を具体的事例に即してみてもいくことが分かりやすい。ここでは、筆者が調査で複数回訪れているドイツ南西部のフライブルク市(バーデン・ヴュルテンベルク州)を事例にとってみたい。

フライブルク市は、インフラ整備をともなう公益事業について、さまざまな公益的事業体を設立し、独立採算で事業にあたらせている。その全体像を示したのが図1である。それに示されているようにフライブルク市の傘下には、「廃棄物処理および都市清掃有限会社」(53%出資)、「フライブルク土木有限会社」(100%出資)、「フライブルク経済観光見本市有限会社」(100%出資)とならんで、「シュタットベルケ・フライブルク有限会社」(100%出資)が存在する。シュタットベルケ自体も、複数の事業を束ねる総合的な公益企業であることが図1から分かる。シュタットベルケ・フライブルク有限会社の傘下には5つの事業が束ねられており、そのうち「バーデノヴァ株式会社」はシュタットベルケ・フライブルクが32.76%の資本参加を行う総合エネルギー企業である。これに

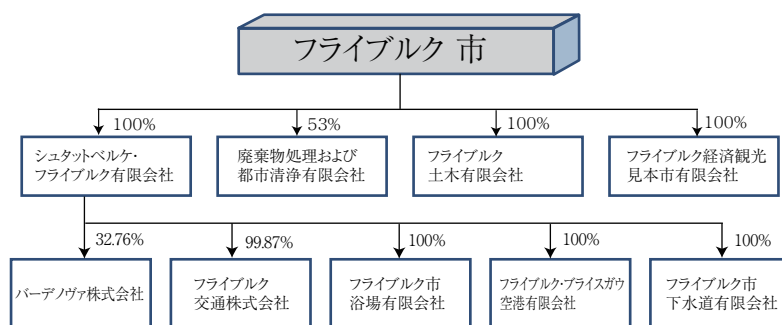


図1 フライブルク市におけるシュタットベルケの事業構造 (5)

^{*2} 今のところ、「シュタットベルケ」の邦語訳で定まった訳語は存在しない。そのままカタカナで「シュタットベルケ」と表現されることがほとんどである。

表1 バーデノヴァ株式会社の資本構成

出資者	出資比率(%)
テューガ株式会社(本社ミュンヘン市)	44.6
シュタットベルケ・フライブルク	32.8
オフエンブルク市ガス供給会社	7.1
レアラッハ市	4.1
ブライザッハ市	2.1
シュタットベルケ・ヴァルトシュート・ティーンゲン	1.6
ラール市	1.4
ヴァール市	1.0
その他,90以上の自治体	5.4

加えて、交通（99.87%出資）、浴場、空港、そして下水道事業（以上100%出資）の各事業体が傘下企業となっている。

バーデノヴァ株式会社は、フライブルク市を含む複数の自治体が共同出資する企業である。各自治体の出資比率は表1の通りとなっており、シュタットベルケ・フライブルク有限会社は、第2位の出資比率をもつ大株主となっている。シュタットベルケ・フライブルク有限会社は、この出資比率に応じた投資収益をバーデノヴァ株式会社から受け取ることができる。ちなみに、筆頭株主であるテューガ株式会社は、100以上の自治体のエネルギー供給を担う、ドイツ最大の自治体連合エネルギー会社（従業員約17,000人[2015年12月]：売上約2兆3,000億円[2015年]）である。

興味深いのは、シュタットベルケの収益構造である。基本的に、エネルギー事業で稼いで、

他の事業を賄うという形になっている。それをフライブルク市に即して示したのが、表2である。以下、この表を詳細にみていくことにしよう。まず表2の⑥は、シュタットベルケ本体の「営業損益」を示している。これは各年とも、赤字を計上している。これに対して、⑦～⑩はシュタットベルケがもつ傘下企業への資本参加がもたらす投資収益（もしくは損失）が記載されている。例えば2012年であれば、バーデノヴァからの投資収益が1,778.2万ユーロを計上しているのに対し、フライブルク交通株式会社、フライブルク市浴場有限会社、そしてそれ以外の傘下企業への出資はそれぞれ、632.8万ユーロ、400.2万ユーロ、32.4万ユーロの投資損失をもたらしている。にもかかわらず、バーデノヴァのもたらす投資収益がきわめて大きいため、他の参加企業の損失を相殺し、なおかつシュタットベルケ・フライブルクの営業損を相殺して712.8万ユーロの経常利益を生み出していることが、表2から読み取れる。結果、税引き後の当期純利益は706.9万ユーロとなっている。

このように、エネルギー事業で生み出す収益で他の事業の赤字を相殺し、シュタットベルケ総体としても黒字を計上するシュタットベルケに特有の収益構造は2012年から2014年にかけて

表2 フライブルク市シュタットベルケの収益構造 (5)

(単位:千ユーロ)

	経常損益	2012	2013	2014	2015(計画)	2016(計画)
①	営業利益総計	2,300	2,222	2,248	2,441	2,052
②	人件費	861	913	959	954	959
③	減価償却費	63	68	63	68	72
④	その他の営業費用	1,659	1,659	1,427	1,810	1,727
⑤	営業費用総計(②+③+④)	2,583	2,640	2,449	2,832	2,758
⑥	営業損益(⑤-①)	-283	-418	-201	-391	-706
⑦	バーデノヴァ株式会社への資本参加に伴う投資収益	17,782	18,227	17,103	16,577	16,544
⑧	フライブルク交通株式会社への資本参加に伴う損失吸収	-6,328	-12,325	12,784	-22,415	-24,033
⑨	フライブルク市浴場有限会社への資本参加に伴う損失吸収	-4,002	-4,011	-4,487	-4,350	-4,539
⑩	その他の損益	-324	-27	226	-154	-205
⑪	経常損益(⑥+⑦+⑧+⑨+⑩)	7,128	1,864	58	-10,342	-12,233
⑫	税引前当期純利益(⑤+⑪)	6,845	1,446	-143	-10,733	-12,939
⑬	所得/収益,その他への課税	-244	1,031	1,065	263	-3
⑭	当期純利益(⑫+⑬)	7,089	2,476	923	-10,996	-12,936

で継続している。2015 年以降は交通事業において何らかの理由により損失がほぼ倍増すると見込まれているため、2015 年、2016 年の 2 年間は、シュタットベルケとして赤字決算となっている。しかし、これら 2 年間においてもバーデノヴァは安定的な収益をもたらすと見込まれており、シュタットベルケの収益構造にいかにか大きく貢献しているかが示されている。こうした収益構造は、フライブルク市だけでなく、広く他のドイツの自治体にもみられる一般的な傾向である。逆に言えば、シュタットベルケが持続的に事業を営んでいく上で、収益性の高いエネルギー事業を取り込むことは、必須の条件だといえよう。

(3) シュタットベルケが生み出す財源への期待

もっとも、こうした事業部門間の資金融通は、「内部補助」と呼ばれ、経済学的な観点から批判されることも多い。つまり、高収益部門であげた収益で非効率的な事業が温存されることになり、全体として資源配分の非効率が発生している、という批判である。しかしこうした批判は、ただちに次のように反駁されうるであろう。第 1 に、公益的事業体だけでなく民間企業もまた、内部補助を行っている。収益性の高い事業で得た資金で、赤字事業を存続させたり、新規事業を立ち上げたりするための資金を調達することは、民間企業でも頻繁にみられる。だが、これらが「内部補助」として批判されることはない。第 2 に、民間企業であれば、エネルギー部門で得られた収益は、配当として株主に還元され、市民には還元されない。株主はその地域に住んでいるとは限らないため、配当支払は域外への資金流出を意味することが多い。これに対して自治体の公益的事業体では、上がった収益が、公共交通など市民生活と密接に関係する公益的事業に投じられることで市民に還元される。

そもそも、民間企業と自治体の公益的事業体とでは、事業目的が異なる。前者が「株主

価値の最大化」を目指すのに対し、後者は、「市民生活の満足度の最大化」を事業目的とする。この点で、自治体の公益的事業体がエネルギー部門の収益で他の公益的事業を支えるのは、この事業目的に沿っている限り、問題なく正当化しうる。ただし、その事業が放漫経営に陥ってはならず、費用最小化が図られるべきである。

シュタットベルケが日本でも近年、急速に人口に膾炙しつつあるのは、「地方再生」や「地方創生」が大きな政策課題となっている事情がある。人口減少の中で、それを反転させ、地域経済を持続可能な発展の軌道に乗せ、雇用を増やしていくにはどうすればよいのか、多くの人々が頭を悩ませている。そして何よりも、そのための財源をどこから調達すればよいのかが大きな論点となっている。2000 年代に実施された「三位一体改革」を経た現在、地方消費税を除いて近い将来に再び、大規模な税源移譲が実行されると期待することはできないであろう。さらに、地方交付税や国庫支出金の増額も、中央政府が巨額の債務残高を抱えて財政再建中であることを考慮すれば、大きな増額を同様に期待することはできない。

以上の状況を踏まえれば結局、地域を豊かにするための資金は、自分で稼がねばならないということになる。シュタットベルケが注目されているのは、そのための有力な手法の 1 つとして捉えられているからであろう。なかでもエネルギー事業はドイツの経験からいって、その中核的分野となることは間違いない。もっとも、自治体が出資する公社や「第 3 セクター」は 1980 年代に多数設立され、バブル崩壊とともに不良債権を抱えて事業に失敗し、1990 年代以降、一般財源を投入して清算されたケースが続出した。こうした第 3 セクター失敗の原因を分析し、それを繰り返さない企業統治の仕組みを創出する必要がある。

日本でも急速に自治体エネルギー公益的事業体創設の機運が高まってきている。よく知

られている代表的なものだけでも、「真庭バイオマス発電」(2013年2月)、「中之条電力」(2013年8月設立)、「泉佐野電力」(2014年1月設立)、「とっとり市民電力」(2015年8月設立)、「北九州パワー」(2015年11月設立)、「浜松新電力」(2015年10月設立)、「みやまスマートエネルギー」(2015年3月設立)、「東京都環境公社」(1962年設立)など、いくつも挙げることができる。本稿では以下、鳥取県米子市で設立された「ローカルエナジー」を取り上げて、日本の自治体による新しいエネルギー公益的事業体の可能性を検討することにしよう。

3. 日本版シュタットベルケの課題と展望 ～「ローカルエナジー社」(鳥取県米子市)の事例から

(1) 設立の経緯

ローカルエナジー社は、鳥取県米子市で2015年12月に創設された地域新電力である。この企業は、自治体と地元の民間インフラ企業が協力して設立した点、顧客数、売上、利潤ともに経営者の見込みを上回る形で順調に伸び、経営が軌道に乗っている点で全国的に注目されている。この会社設立のきっかけの1つは地域外の大手資本による米子空港近くのメガソーラー建設計画だった。米子市でも内々にメガソーラー設置を検討しているが、結局は断念した。その最大の理由は、地域外の大手資本が手がける事業を支援しても、利潤が地元に着かず、地域所得循環の促進につながらないからであった。

ローカルエナジー社は、中海テレビ放送(出資比率50%, CATV)、山陰酸素工業株式会社(同20%, ガス卸業)、米子市(同9%, 自治体)、三光株式会社(同5%, 廃棄物処理)、米子ガス株式会社(同5%, 都市ガス)、皆生温泉観光株式会社(同5%, 源泉供給)、境港市(同1%, 自治体)の出資を受けて設立された。境港市は設立後の2018年3月に米子市の保有株

の譲渡を受ける形で出資した。

その特徴は、①ケーブルテレビ会社である中海放送テレビが主導権をとっている点、②地元ガス事業者など地域の民間インフラ事業者と組んでいる点、さらには、③電源の多様化を見越して廃棄物処理事業者や温泉事業者と組んでいる点にみられる。

ローカルエナジー社が調達する電源では当初、米子市の廃棄物発電が総供給の75%を占め、その存在感がきわめて大きかったが、顧客数が大きく伸び出してからは、供給量が足りなくなって他の電源で補わざるをえず、廃棄物発電の比率は大きく低下した。2018年4～5月の実績値によれば、調達電源のうち地産(県内)電源の比率は34.4%(太陽光、廃棄物、水力など)、民間電力取引業者との相対契約が23.6%、そして日本卸電力取引所(JEPX)からの調達が14.5%、残りが民間企業の廃棄物発電等となっている。

(2) 経営的成功の要因

電力の販売戦略からみて、ローカルエナジー社は次の優れた利点をもっている。すなわち、①自治体(出資者である米子市、境港市、そして出資者ではないが、鳥取県、大山町も)からの400件にも上る公共施設の電力需要を獲得し、事業開始当初から大口需要家として支えたこと、②ローカルエナジー社の最大出資者である中海テレビ放送など地元企業の営業体制を活用することで、コストを抑えつつ順調に顧客数を伸ばすことができた点である。

地域新電力は、ゼロからスタートするので通常は、新規顧客の獲得にそれなりの人的資源を投入しなければならない。だがこれは、非常に大きなコスト要因となり、経営を圧迫する。ローカルエナジー社が創設間もないにもかかわらず強固な経営基盤を築きつつあるのは、中海テレビ放送を通じた営業活動が可能であって、ゆえに営業費用を節約できるほか、電力販売についても中海テレビ放送に卸

し、中海テレビ放送がその顧客への販売を担当できる点が大きく効いている。

こうした「中海テレビ放送を通じた電力卸販売」という戦略は、ローカルエナジー社に様々なメリットをもたらしている。第1は、経産省が求める消費者保護の体制を、中海テレビ放送を通じて整えることができる点である。例えばクレーム対応ひとつとっても、顧客対応に大きな人的資源を割くのは大きなコスト増加要因となるが、それを節約できる。第2に、中海テレビ放送が取り組むケーブルテレビや情報通信というサービスを、ローカルエナジー社が取り組むエネルギーというサービスと組み合わせることで、利便性・割安感を打ち出し、一般電気事業者や他の新電力との単純な価格競争を避けることができる。第3に、料金の滞納リスクを回避できる点も挙げられる。1件の料金滞納が起きると、それを回収するのに10件分の利益くらいのコストがかかるという。こうした回収業務も中海テレビの料金回収業務に相乗りさせることで、みずから人的資源を投入する必要がなくなる。こうしたビジネスモデルは、下記報告書⁽⁶⁾にあるように、東日本大震災から間もない2012年に新電力設立に関する可能性調査で打ち出されていた。

「まず、米子市内を事業エリアとする PPS（新電力）の設立対象地域であるが、米子市において PPS を設立してエネルギー事業を行う場合、エネルギーに関する専門的な技術・ノウハウ、関連インフラ（エネルギー・通信）、料金徴収を行う仕組み、維持管理に十分に対応できる要因・体制など、PPS には多様な機能が求められる。

現時点では、すべての機能を持つ企業は米子市に存在しないが、ガス事業を行う『米子瓦斯株式会社』と通信事業を行う『株式会社中海テレビ放送』との共同出資会社であれば、王子製紙（バイオマス発電）の売電先となる PPS になり得る可能性がある。

なお、米子瓦斯株式会社と株式会社中海テレビ放送の主要顧客は一般家庭であり、エネルギー事業を行う場合においても同様の顧客とすることが事業運営上は効率的である。」

販売戦略と並ぶローカルエナジー社のもう1つの強みは、電力の需給調整を大都市の大手専門業者に任せるのではなく、自ら担っている点にある。これは、利潤の域外流出を防ぐことができる点で特筆すべき重要性をもつ。電力需給調整のノウハウがないために、東京の専門業者にこの業務を任せ、数千万円の単位で高額な委託サービス料を負担している地域新電力が多い。これは、地域新電力の当期純利益を吹き飛ばしてしまうほどの水準だ。逆にいえば、この業務を自社で内部化できれば、その分だけ利潤が増加する。また、専門人材を地元で雇用でき、人件費は地元の経済循環の一部となるメリットも生まれる。稲垣憲治氏の推計によれば、需給管理業務の「内製化」によって地域経済付加価値は40%上昇するという⁽⁷⁾。

せっかく稼いだ収益を域外流出させないためにも、電力需給業務の内部化は、「日本版シュタットベルケ」の経営上、非常に重要なポイントである。これを実行するために、ローカルエナジー社は会社設立時に社員を、東京の一般社団法人「ローカルグッド創成支援機構」に送り、その人材育成プログラムを活用することで人材育成を行い、自ら需給管理を行う体制を整えた。現在は、常勤社員5名が年中無休で電力需給管理業務にあたっている。

（3）自治体とシュタットベルケの関係

日本版シュタットベルケの中には、自治体出資をめぐって2つの流れがある。1つは、福岡県みやま市のように自治体が過半出資を行い、日本版シュタットベルケの主導権をとるケースである。もう1つは、米子市のように自治体は少数出資にとどめ、民間企業に経営の主導権を任せるケースである。どちらにも利害得失があり、新たに日本版シュタットベルケの創設を検討する場合は、どちらを採用すべきか、各地域で十分検討して決定する必要がある。

ローカルエナジー社の場合は、行政の出資を10%に留めているのが、経営判断の迅速性を確保する上で有利だという。行政が過半だと、往々にしてスピード感のある決断ができない。電力ビジネスは頻繁に制度変更が行われており、一般電気事業者に有利な制度変更も増えている。そのたびに、地域新電力は迅速な経営判断を迫られる。自治体との調整に時間を取られたり、議会の承認を得たりするのに時間がかかってしまうと、ビジネス機会を失うことになる。

他方で、米子市の公共施設の電力需要を獲得できたことや、同様に米子市の廃棄物処理施設のごみ発電事業で当初は電力事業の大半を賄うことができた点などは、自治体出資に基づく自治体の全面的な協力によるところが大きかったと、ローカルエナジー社も認めている。自治体出資は、地域新電力への支援に自治体が積極的にコミットするという意思表示を意味し、それが実行される担保になっているのだ。また、自治体出資が地域新電力に絶大な信用力を付与している点も見逃せない。地域金融機関が、日本版シュタットベルケに出資しているケースが多いが、その際の判断材料として、自治体出資の存在が非常に大きな効果を発揮している。

米子市の場合は、あくまでも自治体は少数出資に留め、ビジネスは民間主導で実行されるべきだという点で、地元民間企業と完全に方針が合致している。むしろ当初、米子市側は完全な民間主導（自治体出資ゼロ）での会社設立さえ、想定していたという。米子市としては、地域新電力ビジネスを当初こそ支えるが、最終的には地元民間ビジネスとして完全に自立することが望ましい、とのスタンスを取っている。

（４）エネルギー事業収益の使途はどうあるべきか

ローカルエナジー社がしっかりとした収益基盤を確立していることはすでに述べたが、

他方で利益を出しすぎると、議会や市民から「儲けすぎだから電気代を安くして市民還元すべきだ」との議論が出てしまうのが、日本版シュタットベルケの難しいところである。ローカルエナジー社は、防災対応を主目的とした10kWhの蓄電池を、市と協力して公民館に設置していくプロジェクトを進める予定である。これは、ローカルエナジー社にとってはVPP（Virtual Power Plant: バーチャルパワープラント、一定の電力供給家と需要家を顧客にもって、双方に利益になる価格を提示することで電力供給量／需要量を調整してもらい、電力需給調整を図ることで、仮想的な発電所の役割を果たす）ビジネスを見越した実験的投資であると同時に、非常時の住民の安全を守ることに役立つ地域貢献としての意味をもっている。つまり、収益の市民還元である。

たしかに、ドイツのシュタットベルケはエネルギー事業で稼ぎ、その収益で事実上、交通事業など他の公益事業を支える役割を果たしている。日本でも、日本版シュタットベルケが軌道に乗って収益を安定的に稼ぐようになれば、その収益がどのように公益的に使われ、市民還元されるのかという点に注目が集まるのは自然なことである。

しかし19世紀に起源をもち、配電網を保有し、発電事業すら営んで地域に確固たる地位を築いているドイツのシュタットベルケと異なり、日本の地域新電力事業は、創設後5年以内のまだ草創期にあるビジネスだといえる。したがって、収益を安定的に稼ぎ出す企業ばかりではない。彼らは、一般電気事業者や全国市場を対象とした大手新電力会社とも競争していかなければならない。収益力ですでに優れた特性を発揮しつつあるローカルエナジー社ですら、急成長にともなって電力調達を地元の再エネ（FIT 電源）から、日本卸電力取引所での電力購入に頼る比率を高めている。だが、取引所の電力価格は変動性が激しくなっており、今夏は1kWhあたり100円を突破するなど価格高騰が生じた。

ローカルエナジー社にとっても予想外のこうした事態は、電力の仕入れ価格を上昇させ、収益性を圧迫する要因となる。取引所での電力購入への依存度が高い新電力会社の中には、「逆ザヤ」が生じて経営的に打撃を受けたところが出てきているはずである。

以上の状況から、日本版シュタットベルケは草創期のビジネスとして、まだまだその収益基盤を確固たるものにしていく途上にあり、市民はそれを当面、見守る必要があるのかもしれない。将来収益を生み出してくれる事業体が、収益悪化により倒産してしまっても元も子もない。現在は、性急にエネルギー事業の収益還元を求めるのではなく、日本版シュタットベルケの収益基盤を確固たるものに育て上げる時期だといえよう。ローカルエナジー社もまた、基本的にエネルギー事業の収益については、地域内のエネルギー事業（再エネ）に再投資すべきだという考えをもっている。

もっとも、ローカルエナジー社の最大出資者である中海テレビ放送そのものが、シュタットベルケ的存在だと考えることもできる。この企業はケーブルテレビのほか、インターネットサービスなど情報通信産業を手掛けているが、実は、米子市や境港市など、鳥取県西部の自治体、山陰合同銀行や鳥取銀行などの地域金融機関、そして新日本海新聞社や山陰中央新報社など地元メディアが共同出資している。地域情報番組を維持するのは不採算事業だが、地元の情報を創出し、それを地域で共有するのは金銭には換算できない価値がある。防災情報発信の必要性が増えてくると、こうした考え方がより重要になってくるだろう。中海テレビ放送は、ケーブルテレビやインターネットサービスの収益事業で財源を捻出し、情報の地産地消を維持しているのだという。これはまさに、シュタットベルケ的発想である。

（５）地域総合インフラ企業に向けて

もともとシュタットベルケ的な存在である

中海テレビが、主要事業でしっかり稼ぎ、それで地域にとっては不可欠な、しかし必ずしも収益性の高くない公益的事業を実施するというアイデアと親和性をもっていることは想像に難くない。ただそれだけでなく、電力事業への進出に中海テレビ放送として将来の新しい事業展開を見据えている点に注目しておきたい。同社は現在、都市部は自営線、中山間地は公設民営方式で情報通信事業を営んでいる。インフラを活用したサービス事業で収益を上げ、インフラを保有する自治体に使用料を支払う、というビジネスモデルだ。同社はVPP事業に可能性を見出して実験的投資に乗り出しているが、さらに、スマートグリッド事業に関心をもっているという。

将来的には、再エネが大量に導入され、その主力電源化が進むならば、電力システムの「分散化」が進展し、地域の電力系統（配電網）のスマートグリッド化が現実の課題となっていく。やがて、電力系統が地域の工場、ビル、家庭などに設置された分散型電源、蓄電池、蓄熱設備、さらには電気自動車などを結び、地域で電力を融通しあうことでその効率的な利用を可能にする時代が来る。

上記の施設群は、電力を通じて結ばれるだけでなく、情報通信設備によっても結ばれるようになる。スマートメーターその他の機器を介して相互に情報が行き交うことで電力需給バランスが調整され、全体として効率的なシステム運用が可能になる。つまり電力系インフラに、ガスや熱供給などのエネルギー系インフラ、さらにはケーブルテレビ、インターネットなどの通信系インフラが融合していくことになる。配電網は、電気という物的要素だけでなく、情報とそれを活用した制御サービスという非物質的サービスを提供することで、新しい価値を生み出し、地域産業を創出することになる。

ローカルエナジー社の株主は、いずれも地域インフラ企業なので、彼らが保有するイン

フラもいずれ、維持更新が課題となる。そういう意味で、地域インフラを支える企業が共同出資して新しい事業を創出し、新たな収益源を育てながら、既存インフラの維持更新を図っていくという将来像は、傾聴に値する。例えば皆生温泉地区では、皆生温泉観光株式会社が泉源を保有し、旅館に湯を配っている。温泉のインフラ企業としての役割を担っている。こうした地域インフラ会社の集合体でもあるローカルエナジー社では、将来の事業として、地域の他のインフラの更新に合わせて共同溝化を図ったり、電力の配電網を自ら敷設する「自営線」の構築も視野に入れているという。まさに、「地域総合インフラ企業」への途である。

インフラの維持更新は、自治体にとっても大きな課題である。上下水道、公共交通、廃棄物処理施設などの地域インフラの維持更新費用をどのように捻出するのか。その維持管理のための費用も、効率化により低減していかねばならない。人口減少下で財源不足に悩む自治体は、その解を探しあぐねている。上下水道で想定されているような外資系水企業への事業売却が、問題の解決になるとは思えない。人口減少がさらに進展すれば、有収水量が減少し、いずれ収益性を確保できなくなった民間企業は撤退するだろう。彼らが去った後に、地元には、残されたインフラを管理するためのノウハウもなければ、人材もいない、という事態になりかねない。

地方自治体の出資を受けている中海テレビ放送や、同社が経営の主導権をとるローカルエナジー社の試みがヒントを与えてくれるのは、インフラ事業の民間売却に代わる、地域インフラ維持更新に関する代替的な方途がありうるという点である。例えば、次のような試みが可能になるのではないだろうか。具体的には、自治体が地元の民間インフラ企業と協力しながら、インフラ維持管理／更新のための人材やノウハウ・知見の共有化を図るこ

とはできないだろうか。また、インフラの共同化、つまり共同溝化によってインフラの物理的な共同化を図ったり、システムの共同化、つまり料金徴収システムなどを一元化してソフト面での共同化を図ったりすることで、コスト低減を図ることができないだろうか。もっと積極的には、こうした垣根を超えた地域レベルでのインフラ融合により、新しい総合地域インフラ産業を創出できるかもしれない。以上より、米子市における日本版シュタットベルケの新しい試みは、今後本格的に人口減少に向かう日本の自治体にとって、インフラの維持更新を誰が、どのようにして進めるべきかという課題をめぐって、貴重な示唆を与えてくれているといえよう。

4. 日本版シュタットベルケの可能性と展望

以上、米子市のローカルエナジー社の事例に即してみてきたように、日本版シュタットベルケには、様々な可能性がある。将来的に、電力だけでなく上下水道、廃棄物、地域公共交通などの社会インフラを維持管理する総合インフラ産業としてシュタットベルケを育成できれば、そこにさまざまな地域インフラ管理業務を一括受託させて効率化を図るとともに、インフラ管理に関する専門ノウハウを地域で蓄積していけるというメリットが生まれる。

また日本版シュタットベルケを、地域の産業発展と雇用拡大の拠点として育成し、活用していくことも考えられる。ドイツのシュタットベルケがほぼ100%自治体出資の「公社」なのに対し、日本版シュタットベルケの多くは、自治体との関係では二手に分かれている。1つは、自治体が過半出資を行い、公的な主導権と責任の所在を明確にしているケースである。もう1つは少数出資に留め、民間主導であることを明確にしているケースである。米子市のローカルエナジー社は、後者のケース

である。これは、公民がもたれ合って事業がうまく行かなかった第3セクター失敗の教訓が生かされているからである。特に後者の民間主導の場合は、地元民間企業の可能性を引き出し、将来的に地域産業発展へのプラットフォームになることを期待されているからであろう。

今後、再エネの順調な普及によって電力システムは、着実に「分散型」へ向かうだろう。地域は、電力会社からの電力供給を待つだけの受け身の時代は終わり、自らエネルギーを創り出し、地域でそれらを相互融通して需給バランスを調整したり、域外に販売して「外貨」を獲得したりする、能動的な主体に変わっていくだろう。人々のエネルギーへの嗜好はますます、原発や火力から離れ、再エネに向かっていく。

現時点では、再エネには様々な課題があるが、だからこそ、それらを克服していく面白さがある。例えば地域では、配電網のスマートグリッド化・IoT(モノのインターネット)化、固定価格買取期間を終えた太陽光パネルで発電された電気の買取／融通ビジネスの創設、蓄電・蓄熱による電力貯蔵システムの開発、さらには、ガス／熱供給企業やケーブルテレビ企業との連携など、様々な可能性が広がってくる。こうした地元民間企業とも協力しながら、地域の分散型エネルギーシステムの構築を推進できる主体として、日本版シュタットベルケが発展していく可能性もある。こうした方向性は近年、地震や台風により地域全体がブラックアウトに見舞われるなどの事態が起きたことで、より実感をもってその必要性が認識されるようになってきている。

これは、これまで電力会社まかせ、ガス会社まかせであったエネルギー政策の「地域化」と言えるかもしれない。つまり、地域住民の安全保障、地域産業の発展の観点から、地域が主体となってエネルギーシステムの構築を図っていく遠大な構想でもある。自治体にとっては、税収以外の収益源を獲得する方途であ

り、人口減少時代に備えてインフラを効率管理する途でもあり、さらにまた、地域産業を育成し、成長と雇用増大を図るための政策手段でもある。日本版シュタットベルケが、そうした将来構想の中核に座ることができるかどうか、筆者としては期待をもちつつ今後の推移を見守りたい。

参考文献

- (1) 諸富徹,『人口減少時代の都市—成熟型のまちづくりへ—』中公新書, 2018年2月
- (2) 諸富徹,『「エネルギー自治」で地域再生! — 飯田モデルに学ぶ—』岩波ブックレット, 2015年6月
- (3) 中山琢夫・ラウパツハ・スミヤ ヨーク・諸富徹,「日本における再生可能エネルギーの地域付加価値創造—日本版地域付加価値創造分析モデルの紹介, 検証, その適用—」『サステイナビリティ研究』Vol6, 2016年3月
- (4) 諸富徹,『入門 地域付加価値創造分析—再生可能エネルギーが促す地域経済循環』日本評論社, 2019年4月
- (5) Stadt Freiburg im Breisgau (2015), Beteiligungsbericht 2015
- (6) 中電技術コンサルタント株式会社『平成23年度スマートコミュニティ構想普及支援事業費補助金 とっとりスマートライフ・プロジェクト調査事業』平成24年3月
- (7) 稲垣憲治「本当に地域に貢献する新電力とは」,『環境ビジネス』2018年秋号

蓄熱発電の可能性と世界の開発計画

岡崎 徹 (プロジェクト試験研究部
主管研究員)



1. はじめに

脱炭素社会の実現のため、出力が不安定ではあるが風力、太陽光などの再生可能エネルギー（再エネ）の大量導入が喫緊の課題となっている。その不安定性に導入課題があることは以前から指摘されていた⁽¹⁾。当初は無視できていた不安定性が、導入が進むにつれて無視できなくなってきた。すると、根本的な概念の転換が必要となってきた。化石燃料と言う、素晴らしく使い勝手の良い物を使える場合には、例外はあるものの、経済性の向上には、装置の高効率化が最大の課題であった。しかし、再エネ時代には、高効率は必ずしも経済性には結びつかない。なぜならば、再エネのコストは設備コストの割合が大きく、その設備コストや、効率、利用率、保守、発電抑制、周辺既存機器など様々なことを総合的に考慮

しないと経済性が得られないためである。その代表的認識変化を表1に示す。2010年代ころの概念が、2020年では大きく変化していることがわかる。

この中で特に大きな変化は、不安定性対策として、かつては系統強化などで対応できる、と論じられていたのが、蓄エネルギーは必要である、と変わってきた点である。

それに伴い、前述の経済性には高効率だけが重要で無く、様々な面から見た総合的な経済性が重要である、と理解され、その中で提案されてきたのが蓄熱発電である。図1にその構成例を示す。不安定な再エネ電力は、一旦熱に変換され、蓄熱で安定化される。そして、必要時に蓄熱から熱を取りだし発電する。熱から電力への変換には大きなロスが発生するため非合理的に見える。しかし、蓄熱の設備コストが極めて安く、数時間以上の長い時間

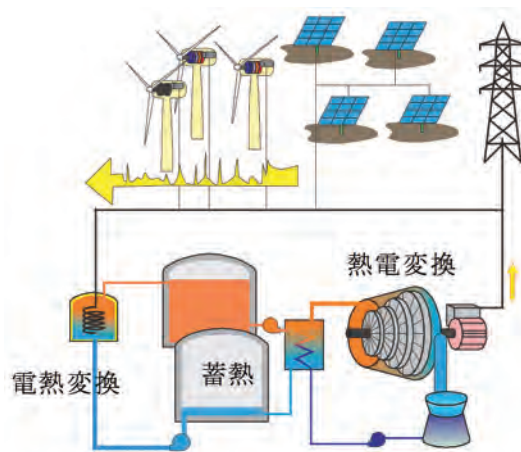


図1 蓄熱発電の構成例

帯にわたって再エネを安定化させる際に経済的となることがわかり、世界的に開発が急速に進められつつある。

本稿では、この再エネに対する認識変化と、近年世界で急速に顕在化しつつある蓄熱発電について概説する。

2. 近年の再エネに関する認識変化

再エネ導入には様々な段階がある。電力システムの中で、導入量が少ない場合の再エネ不安定性に対する適切な対処と、大量導入・主力電源化した場合の対処法とは全く異なっている。そのため、表1に示したように10年前は特段の新規設備の導入なしに再エネを導入できていた。しかし、スペインのように大量導入し、かつ、周辺国との電力融通がほとんどない状態では、実は図2に示すように、

風力の導入は出力調整が容易なガス火力の導入と道義となる⁽²⁾。2000年ごろから風力の導入が始まったが、それにやや遅れて、同じ設備容量のガスコンバインド火力発電（CCGT：Combined Cycle Gas Turbine）を導入している。風力発電の出力が変化した際に、出力調整が容易な電源が必要なためである。

風力を導入するためにガス火力発電所の導入をするならば、再エネ100%の実現などは全く不可能となる。ただし、風力の導入により、化石燃料の使用量そのものは削減される。

スペインの電力系統には別の課題もある。それは、設備裕度（予備力とも）の増大である。設備裕度は、全発電設備量（kW）をその年の最大需要（kW）で割ったもので、これが1に近いと落雷・故障・その他トラブルに弱い電力系統になる。保守もできないことになるので、1以下になることはあり得ない。図2の期間中、

表1 この10年の再エネへの認識変化

2000～2010年代半ばの認識	2020年の認識
再エネは蓄エネルギーなしに導入可能 (DOE:米国エネルギー省)	再エネ導入に蓄エネルギーが必要
系統強化で何とかなる(DENA:ドイツエネルギー省)	系統強化は進まない(NYMBY: Not in My Back Yard)
蓄エネルギーに蓄熱(発電)はあり得ない。バッテリーが本命	蓄熱(発電)もあり得る。特に熱需要の再エネ化にも有効(日本以外の認識)
風力が最も安い。PVのコストは風力の数倍	風力もコストダウンするがPVが最安に(2セント/kWh以下も)
陸上風力は2MWが物理的限界 再エネ導入は先進国の道義的義務	陸上でも5MWが可能に 再エネ導入も途上国の選択肢に

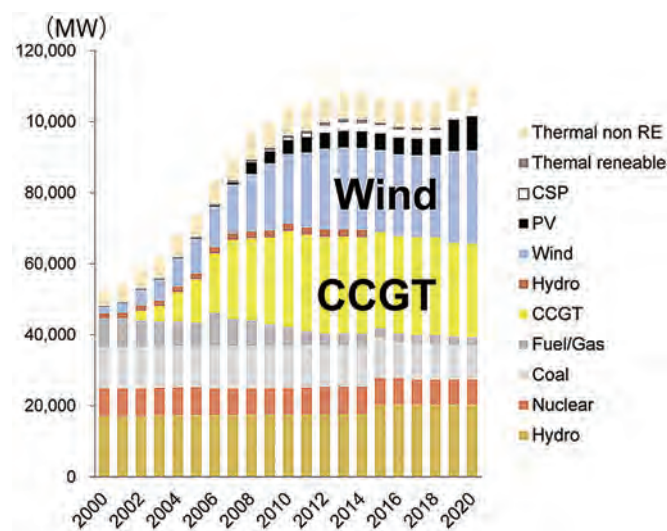


図2 スペインの発電設備容量の推移⁽²⁾

在来型発電所の設備容量は増加し、風力導入前には1.3くらいであった設備裕度が2018年には1.6にまで増加している。言い換えると、スペインは全ての再エネがなくなってもなんら困らない電力システムを維持している。当然、これは電力コストの高騰を招き、国家財政に大いに影響した。

ただ、そのスペインとその他の国の熱心な再エネ導入により、風力発電も太陽光発電(PV)も発電コストが下がっている。特に、PVは発電コストが大きく下がっている。図3にコスト低下の経過を示す⁽³⁾。

図3から見て取れるように、世界では風力もPVも発電コストが化石燃料による平均発電コストより安くなっている。これが、表1で示し

たように、再エネ導入が先進国の道義的義務から途上国の選択肢に入った理由である。

ただし、図3での風力、PVの発電コストには随時電力供給実現コストが含まれていない。当たり前だが夜間にPVは発電できない。風が吹かない夜もある。前述した通り、スペインで風力導入と同時にガス火力を増強したのも、この課題を解決するためである。だが、このスペインの方式では明らかに「減・化石燃料」はできても「脱化石燃料」ができない。そこで蓄エネルギーが必要となってくる。

米国の国立再生可能エネルギー研究所(NREL)がこの蓄エネルギーの現状を調査した結果が図4である⁽⁴⁾。念のため、この蓄熱は、太陽熱「発電」での蓄熱で、暖房給湯用は含

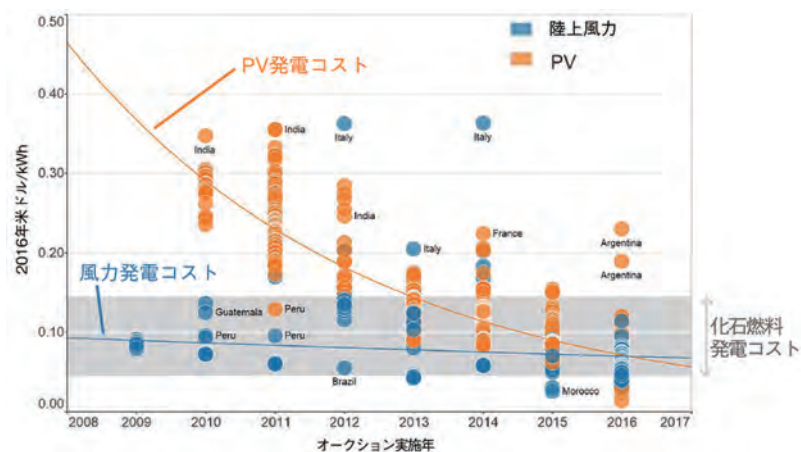


図3 再エネ発電コストの変化⁽³⁾

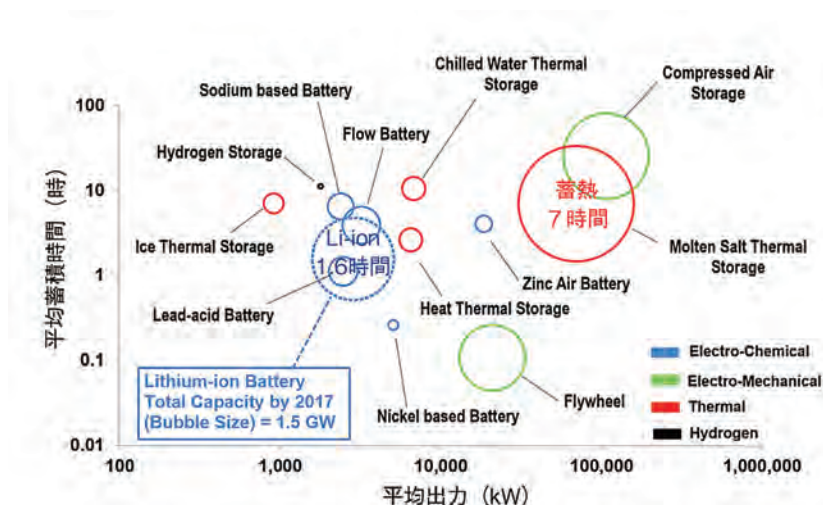


図4 世界の蓄エネルギー技術の実態⁽⁴⁾

まれていない。

意外に思われる方も多いであろう。発電に供する蓄熱の方が、電池より平均出力も遙かに大きく、蓄積時間も長い。このグラフは対数表示なので、通常の軸にすると、差はもっと明確になる。規模的には300MWクラスのもので稼働しており実用化している。しかし、蓄熱がこのような規模で実用化していることは、世界的にもあまり知られていない。国際エネルギー機関（IEA）の報告書でも、圧縮空気貯蔵やフライホイール、各種電池の年度別シェアを比較した資料を出しているが、その中では一切蓄熱のことは触れられていない⁽⁵⁾。

その理由の1つは、報告書が書かれた当時、蓄熱装置がほぼ100%、太陽熱発電所に付随して建設されているからであろう。蓄エネ装置として認識されていないということである。また、太陽熱発電は、雲1つない真っ青な青空が毎日広がる、世界でも直達光の多い地域でしか経済的な発電所が建設できず、限られた人・地域しか興味を持たないから、ということも考えられる。さらに、系統接続レベルの巨大な設備でありながら、関係者が少なく、宣伝もあまりされない。また、太陽熱発電には多くのノウハウが含まれ、外部に発表することはノウハウの流出にも繋がりがかねない、という事情もある。

若干話題が変わるが、蓄熱に関しては1つ1つが巨大であり、1つでも失敗事例があると大きく取り上げられてしまう。とある太陽熱発電所では、施工ミスにより事故が発生し、その後、復旧はしたものの設備利用率が大きく落ちた例がある。しかし、この施工ミスを教訓として、その後に建設された、さらに大きな太陽熱発電所では同様のトラブルは報告されていない。

いずれにせよ、太陽熱発電は、夜間でも発電できるという特性から、PVよりも高コストでありながら導入される例が出ている⁽⁶⁾。また、PVと蓄熱発電のハイブリッド計画も進ん

でいる⁽⁷⁾。PVと蓄電池の組み合わせよりも太陽熱発電の方が経済的であると認識されたためである。その認識が正しいかどうかを次に分析する。

3. 蓄熱発電の経済性比較

図4で示した各種蓄エネルギー技術と、図にない揚水発電の中で、系統接続レベルでの実績があり、立地に制限がないのはリチウムイオン（Li-ion）蓄電池と蓄熱だけである。フライホイールは短時間用途であるので比較にならない。期待の水素は、まだ系統接続レベルでの実証試験がされておらず、経済性を論じられるだけの資料がない。Li-ion以外の蓄電池は、まだ公表資料が少ない。そのLi-ion蓄電池について、国際再生可能エネルギー機関（IRENA）の報告書⁽⁸⁾で将来性や経済性が詳細に分析されている。それによると、2016年時点で系統接続用Li-ion蓄電池設備のコストは600ドル/kWhであり、寿命は3,000回となっている。このコストの内、半分以上はユーティリティーコスト、すなわち、建屋、配線、配電盤、変電設備等である。そして様々な改良により、2030年にはこの半額になるだろうと予測されている。

蓄熱発電の方は、太陽熱発電で実用化・商用化されている硝酸塩2タンク型を例にとった⁽⁹⁾。世界的には、様々な蓄熱技術の開発がされているが、今のところ、GWhクラスの蓄エネルギーを実証・商用化しているのは、この硝酸塩2タンク型しかない。理由の1つは、蓄熱材として利用する硝酸塩混合物（硝酸カリと硝酸ナトリウム）は肥料でもあり、極めて安く入手でき、毒性もなく、「熱い」という以外熔融状態での危険性もない安定な物質だからである。さらに、利用可能最高温度が600℃程度と、既存の蒸気タービンシステムとも相性がよく、溶融点も220℃で、600℃との温度差が大きくとれるからである。

蓄熱発電の経済性比較では、PV 電力を夜間に利用する場合を例に取った。この場合、夜間電力コストは、設備費を寿命で割った設備損料と、充電に要するコストの合算となる。保守費、解体費、利息などは考慮しなかった。すると、結果は図 5 のようになった⁽¹⁰⁾。横軸の価格で電力を仕入れ、縦軸の価格で販売すれば成立するというグラフで、縦軸で低い値の方が安い電力が得られる。

充電コストがゼロ（この場合は PV 電力を無料で仕入れること）としても、設備費のため、蓄熱発電より蓄電池の方が高コストである。2030 年に蓄電池コストが半分になったとしても、蓄電池はまだ蓄熱発電より経済性が悪い。しかし、蓄熱発電は、充電コストが上がるほどに発電コスト（放電コスト）が上がり不利になる。しかしそれでも 2030 年でも、充電コ

ストが 7 セント /kWh 以下であれば蓄熱発電の方が有利である。

さらに、蓄熱発電ではコジェネ（コンバインド・ヒート・アンド・パワーとも）のように、電力と同時に熱も供給することが可能である（図では「熱利用兼用」と表現）。すると、コジェネ効率 60～80% が適用でき、2030 年時点でも蓄電池より遙かに経済的となる。電池も熱を出すが、利用可能な温度の熱は出せない。ぬるいお湯をどれだけ大量に集めても、熱湯は作れないのである。

この状況は、テレビでも紹介され始めた。例えば、米 CNBC は、電力系統に Li-ion 蓄電池を利用するには、あと 10～20 倍の性能向上が必要であり、それは難しいだろうと紹介している。このニュース番組は、図 6 のように YouTube でも視聴できる⁽¹¹⁾。その番組の

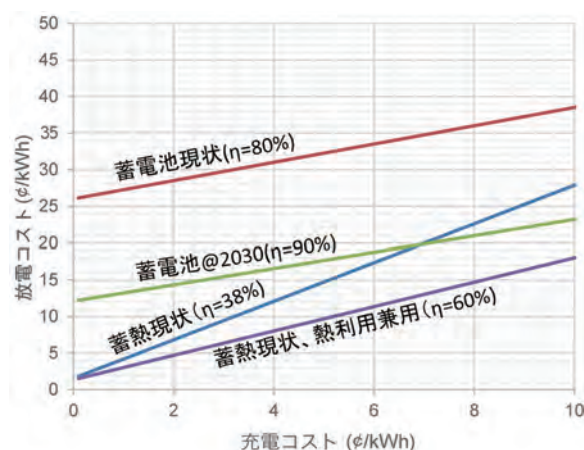


図 5 PV 電力の夜間利用時における蓄熱発電と蓄電池の経済性比較⁽¹⁰⁾

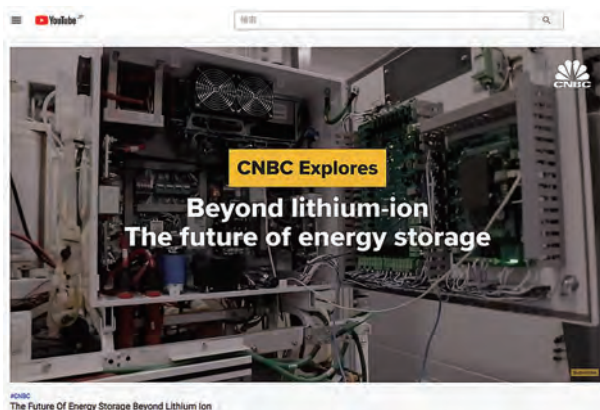


図 6 蓄エネに Li-ion を超えた何かが必要と報じた米 CNBC のニュース⁽¹¹⁾

中で代替技術の例として紹介されたのが、フロー電池、重力電池、そして蓄熱発電である。

フロー電池はレドックスフロー電池とも言われ、エネルギーを蓄積する部分と電気／化学エネルギーの変換部分を別々に設計できるのが特長である。そのため、安価なエネルギー蓄積物質が開発されると経済的になると期待されている。

重力式電池は、原理的には揚水発電と同じで、電力を物質の位置エネルギーに変換する技術である。具体的には、電子制御クレーンの周囲にコンクリートブロックを用意し、それをモータで巻き上げ、積み上げることで電力を位置エネルギーに変換し、発電時は逆にその位置エネルギーを電力に変換する。他のエネルギーよりもパワーを出しやすく、フライホイールの利用法である。

なお、図5の試算は蓄電池に不利な条件で行っている。蓄エネルギー量(kWh)に対してパワー(kW)が大きい用途の場合には、蓄熱発電は熱電変換コストが大きくなり、不利である。また、蓄熱発電はその性質が石炭火力に似ており、急速な出力変化はさせにくい。従って、蓄熱発電と蓄電池との協調運転を検討するなど、総合的な観点から全体システムを設計すべきである。

4. 様々な蓄熱技術

蓄熱というと身近な技術のようであるが、それを発電に使うとなると、今ひとつよく知らない人が多いと思われる。本章では、具体的な蓄熱技術について説明する。

蓄熱には、蓄熱体と熱を運ぶ熱媒体が必要である。その蓄熱体と熱媒体の両方を兼用する場合もある。図7に、太陽熱発電で商用化している硝酸塩2タンク型の動作を示す。

まず、硝酸塩を熱し290℃まで温め、低温タンクに充填しておく。これをポンプで取り出し、系統からの電力で560℃にまで昇温して

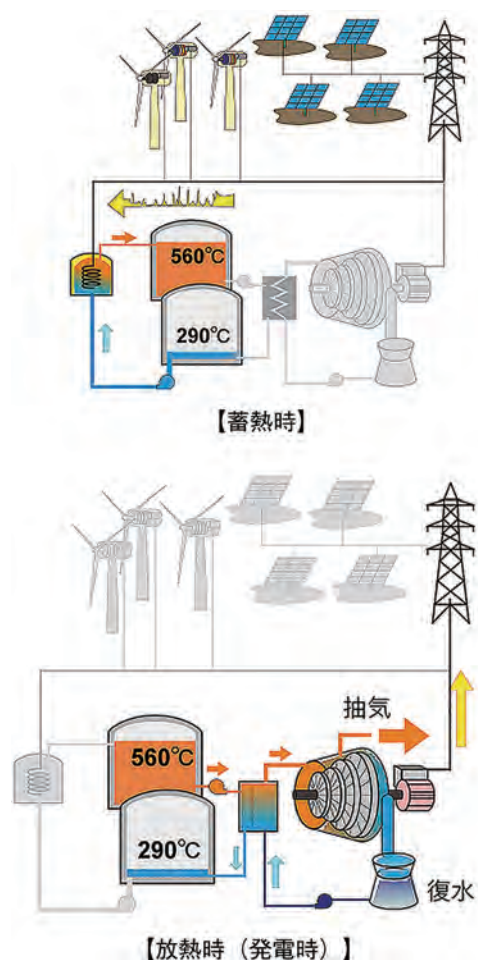


図7 蓄熱発電の蓄熱時と放熱時（発電時）

高温タンクに移す。熱媒体の移送が完了すれば満蓄熱である。放熱時（発電時）には高温タンクから取り出し、熱交換器で高温水蒸気を発生させ、蒸気タービンを駆動し発電する。抽気することで、蒸気タービンから高温蒸気を取り出すこともできる。硝酸塩は前述のように安価なため、熱媒体と蓄熱体を兼用させている。

蓄熱方式にもよるが、電熱変換、蓄熱量、熱電変換のステップ全てを異なる仕様で設計できるのが蓄熱発電の1つの特長である。

再エネ余剰電力などはバースト的（爆発的）に発生するので、蓄熱発電の電熱変換部の容量は大きくなり、熱電変換部の容量はそれより小さくなるのが一般的である。

このほかの蓄熱方式を図8に示す。顕熱(液体・固体)、潜熱、化学吸着、化学蓄熱の4種がある。

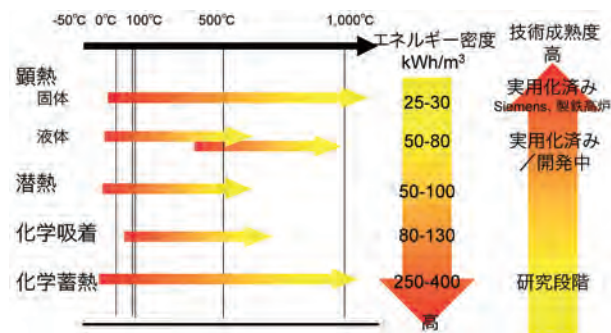


図8 各種蓄熱方式とその現状

顕熱は物質の温度差と比熱によって熱エネルギーを貯めるもので、比熱と利用可能温度差が大きく、安価なものが優れている。液体蓄熱は、図7に示したように、硝酸塩を使って実用化されているが、熱媒／蓄熱体を炭酸塩や塩化物にして、より高い温度帯、より高いエネルギー密度などを目的とする開発も進められている。固体蓄熱は、製鉄の高炉で熱風炉としての利用実績がある。しかし、発電目的ではパイロットプラントしかない。1,000℃以上の極めて高い温度まで利用できるのが固体蓄熱の特長で、パイロットプラントでは600℃超程度の温度設定になっている。蓄熱体としては砂、碎石、レンガ等セラミックが採用され、熱媒体には空気が使われることが多いが、硝酸塩を用いる場合もある。

潜熱蓄熱は、物質の相変化を利用するもので、顕熱蓄熱よりさらに高いエネルギー密度が実現できる。物質としては、塩類、合金などが用いられ、用途に応じて選択される。一般に、相変化の前後で大きく変わる性状・形状に対して、効率の良い入熱／抜熱構造を設計するのが課題である。

最も高い蓄エネルギー密度が期待される化学吸着、化学蓄熱に関しては様々な提案がなされている。カルシウム系やマグネシウム系などの安価な材料を用いることが多い。化学吸着、化学蓄熱では、非常に長い期間のエネルギー蓄積が可能である。化学反応に伴う、粒子の凝集などの対策が課題となっている。

5. 世界の蓄熱発電開発プロジェクト

(1) 民間主体の開発計画

使用条件・目的によっては蓄電池よりも蓄熱発電の方が経済性に優れるため、以前は蓄電池一辺倒だった蓄エネルギー技術開発で、蓄熱発電の開発がにわかに活発になってきている。現在30近い民間の開発計画があり、大学等研究機関での開発も含めると非常に多い。表2に、代表的な開発例を示す。大手では電力会社主導のニーズオリエンテッド的なものと、シーメンスガメサ社、MAN社やベンチャー企業のようにシーズオリエンテッドな計画とがある。

ドイツの大手電力会社RWE Power社は、石炭火力の再エネ化を計画している。ドイツは、脱石炭と脱原発を同時に目指すという意欲的な計画を進めている。それが実現すると、既存石炭火力設備が全く無駄になってしまう。そこで、石炭火力に蓄熱設備を導入し、再エネ電力を貯めて必要時に蒸気タービン発電システムに熱を投入すれば、石炭ボイラ関連以外の設備が生かせる。全てを再エネで賄わなくとも、半分を再エネ由来の熱にすれば、電力当たり二酸化炭素排出量はガス火力並みとなり石炭火力廃止の意義がなくなり、ボイラ設備や石炭産業従事者の雇用もある程度守れる。RWE Power社は、比較的近い将来の変換を目指しているため、商用化している硝酸塩2タンク型の蓄熱設備を採用する予定である。

シーメンスガメサ社は、碎石を蓄熱体に、

表2 世界の蓄熱発電・民間開発計画

社名	国	規模 (設備容量 / 投資額)	蓄熱材料, 温度他	熱電変換, 効率
RWE Power / DLR	DE	40 億円以上	石炭火力代替, 硝酸塩 560℃ 2 タンク式	Rankin
Siemens-Gamesa	DE	120MWh (熱)	碎石、600℃超 1 タンク式	Rankin 25 ~ 50%
MAN / ABB	DE	?	CO ₂ (熱媒), 高圧水 (120℃), 水	Brayton ?
Vattenfall, SaltX	DE	10MWh (熱)	ナノ被覆化学蓄熱, 530℃, 1 タンク式	Rankin
Vattenfall, LUMENION	DE	2.4MWh	鉄, 650℃ 1 タンク式	Rankin
STORASOL	DE	数 MWh (熱)	碎石, 空気, 600℃, コージェネ用	Organic Rankin
Stiesdel	DE	?	碎石, 空気	Rankin
Malta (Google)	US	60MWh~	硝酸塩 + 揮発油 560℃/-100℃, 4 タンク式	Brayton, 60% ~
Element16	US	2 億円	硫黄, 産業熱利用	?
Brayton Energy	US	2 億円	硝酸塩, Malta 類似	Brayton
Echogen Power	US	3 億円	砂, CO ₂	Brayton
Brenmiller Energy	US	40MWhn	碎石, 550℃, 元シーメンス CSP 担当	Rankin
MGA Thermal	US	?	各種合金, 潜熱蓄熱	?
Pintail Power	US	?	硝酸塩 2 タンク型, 600℃	Rankin
Antra Energy	US	?	グラファイト, 1000℃	TPV
Alumina	US	?	アルミナ, 600℃	Rankin
1414degrees	AU	10MWh	シリコン潜熱, 1,414℃, 1 タンク式	Rankin 25 ~ 50%
CCT Energy	AU	5kW ~	シリコン潜熱, 1,414℃, モジュール式	Stirling
seas-nve	DU	15 億円	碎石, 600℃, 1 タンク式	Rankin
EnergyNEST / Enel	NO	10MWh (熱)	コンクリート, 1 タンク式	Rankin 25 ~ 40%
Bharat Energy	IN	100 億円	シリコン潜熱 1,414℃	Stirling ?
Eco-Tech Ceram	FR	1 億円	セラミック, 600 ~ 900℃, 廃熱利用	Rankin
Azelio	SW	13kW	Al-Si, 600℃	Stirling
TEXEL	SW	30kW	水素吸蔵合金, 900℃	Stirling
ECOVAT	ND	?	碎石, 600℃	Rankin
Moltex	UK	?	熔融塩 560℃	Rankin
Tata steel	SP	?	コンクリート・プロセス熱の有効利用	なし
Arcelor Mittal	SP	1 MWh (熱)	スラグ蓄熱, 800℃	なし

DE: ドイツ US: 米国 AU: 豪州 DU: デンマーク NO: ノルウェー IN: インド FR: フランス
 SW: スイス ND: オランダ UK: 英国 SP: スペイン



図9 シーメンスガメサ社の蓄熱発電パイロットプラント

空気を熱媒体としたシステムを開発中で、図9に示すように、ハンブルクに130MWhのパイロットプラントを建設して検証を行っている。蓄熱媒体として碎石を採用しているため廃棄物がなく、材料コストも極めて安い。“New

Stone Age”などと面白いキャッチコピーを出している。興味深いのは、兄弟会社のシーメンスエナジー社が、碎石 / 空気システムのシーメンスガメサ社でなく、コンクリートを用いる EnergyNEST 社と協業している点である。

(2) 新発想の蓄熱発電の提案

表2の中で、熱電変換にBraytonサイクルを使う設備では、電熱変換にも熱機関を採用して総合効率を高める工夫をしている。熱電変換効率が低くても、その熱を作る工程の電熱変換で、高いエネルギー消費効率(COP: Coefficient of Performance)を採用すると、その分だけ熱電変換効率が上がるという理屈である。COPはヒートポンプの効率で、どれだけの動力投入で熱が作れるかという指標である。簡単には、COPが3のヒートポンプで熱を作り、通常なら効率20%の熱機関を駆動すれば60%の効率になる、ということである。

例えば、MAN社は蓄熱材には水と氷、作動媒体に二酸化炭素を採用し、電熱変換に抵抗ヒータではなく自社の超高压ポンプを採用したシステムを開発中である。蓄熱温度がわずか120℃と低い温度ながら、超臨界二酸化炭素サイクルでのヒートポンプと熱機関を採用することで、単体で50%超の効率、熱併給することで総合70%の効率が得られるとしている。構成的に、冷熱も温熱も供給できる。

Google初のベンチャー、MALTA社もヒートポンプと熱機関を組み合わせた、同じような新しい蓄熱方式で60%以上の効率を出せる、

としている。その他、ヒートポンプと熱機関の組み合わせで高効率実現を目指すプロジェクトが複数、見受けられる。熱機関は歴史が長く、枯れた技術分野と思われてきたが、このような新発想で、熱機関が蓄熱発電として革新的に効率を上げる可能性が出てきている。

6. 電熱変換に回転発熱機

(1) 電熱変換の低コスト化が必要な理由

再エネを安定利用する際、まず考えられるのが余剰電力の有効利用である。前に述べたように、再エネ発電の余剰電力はバースト的に発生する。図10に、平成30年度「熱を活用した次世代型蓄エネルギー技術実用化推進事業」で試算された将来の余剰電力発生状況を示す⁽¹²⁾。図10上で分かるように、年間を通じて余剰電力発生量の多い時期と少ない時期がある。この発生量を大きなものから順に並べ替えたものが、図10下に示すデュレーションカーブである。

余剰の最大発生量は、年間8,760時間に対して数時間もない。9000MWという最大発生量に対して電熱変換設備を準備すると、その設備利用率は極めて低くなる。従って、再エネ

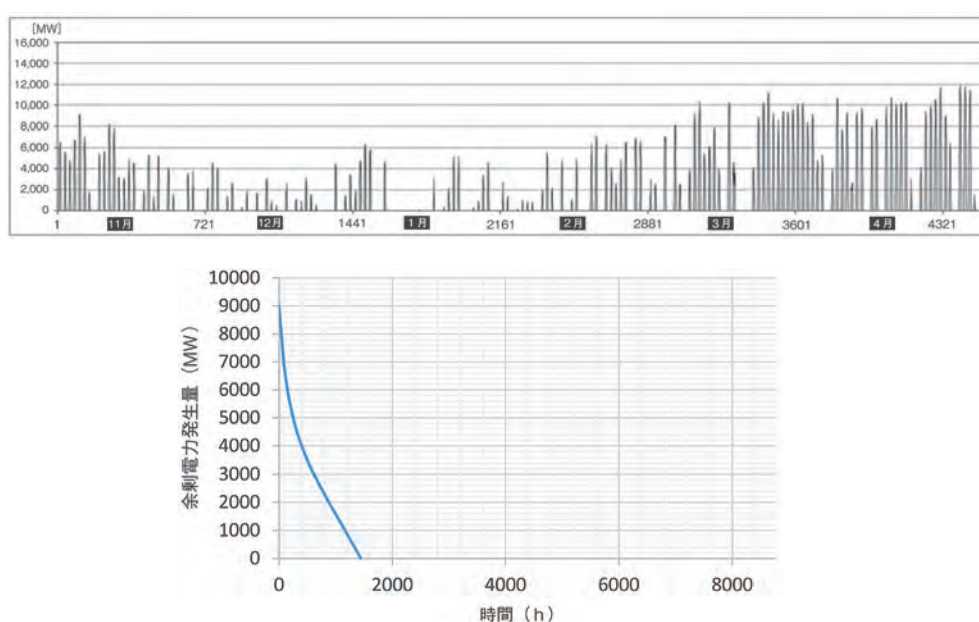


図10 余剰電力発生の様子(上:将来の発生予測(半年分) 下:デュレーションカーブ)

の余剰電力をすべて無駄なく取り込むというのは経済的ではない。ある程度は捨てる（抑制する）のが全体最適解となる。あるいは、電熱変換設備を極めて安いものにすれば、かなりの余剰分を取り込む設備でも高コストにならない。これが電熱変換の低コスト化が必要な理由である。

（２）高コストな電熱変換

電熱変換の低コスト化に関して、前項では電熱変換にヒートポンプを利用する例を示したが、その電熱変換に回転発熱機の開発・採用が有望と考えている。現状の抵抗ヒータ（いわゆるニクロム線）による電熱変換が高コストだからである。

ニクロム線ヒータが高コスト、と言われると違和感を持たれるであろう。発熱部だけを見れば、単なるニクロム線は安価である。現に、家庭用ホットプレートなどは1kWの製品が数千円しかない。しかし、MW以上で24時間365日運転の電力設備となると話が変わってくる。まず、電圧を高圧から低圧に下げる設備が別途必要になる。産業用ヒータは、図11に示すように構造的に高電圧化が難しく、400V駆動が一般的である。そのため、高圧系から低圧に落とすための変圧器などの設備が必要となる。家庭用ホットプレートと違って100Vが得られる環境は産業用ではないので、産業用の受電・変電設備が別途必要となる。家庭でも、電気自動車的高速充電器を入れようとなると、結構な工事費がかかるのと同じである。

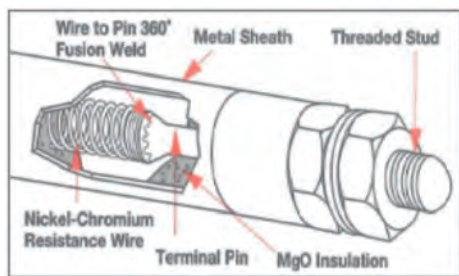


図11 産業用ヒータの構造

さらに、この大電力の制御が必要である。単純な機械スイッチでは、あっという間に放電で摩耗してしまう上に、多大なノイズ・フリッカ（電圧の変動）を上流側に戻し、周辺他電気機器に深刻な影響を及ぼす。これは単純な半導体制御も同じで、台数制御やそのほかの高度な制御によって、この悪影響を防止している。家庭用ホットプレートが及ぼす影響とは比べ物にならない。図12に500kWの産業用ヒータの例を示す。このクラスで実勢価格は5万円/kW、家庭用ホットプレートの10倍程度のコストになっている。また、この構成から推定されるように、大容量化による低コスト化は難しい。

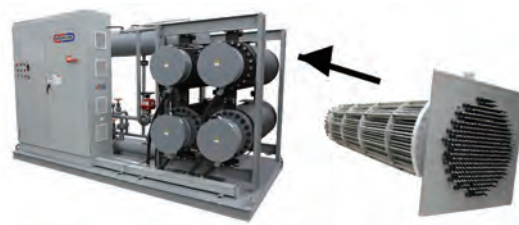


図12 500kW ヒータの例

（３）設備コストの安い回転発熱機

回転発熱機は、大容量の電熱変換を安価に実現する。原理を図13に示す。原理は家庭用のIHコンロと同じである。モータにより静磁場（図では永久磁石をイメージしているが、電磁石を利用）を金属板の近傍で回転させる。この図では平板の下で静磁場を回転させているが、実際にはパイプの中で回転させる。モー

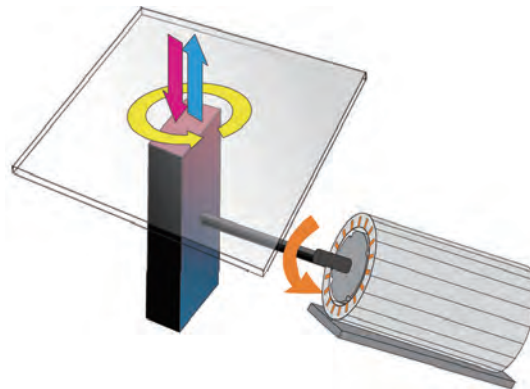


図13 回転発熱機の原理

タの方は一定の回転数とするが、電磁石の励磁電流を調整することで発熱量を制御する。励磁電流をゼロにすると、空回りするだけで発熱はしない。

この構造では一見、ニクロム線よりも高価になりそうに見える。しかし、大容量になるほどにモータのkW 当たり単価は安くなる。例えば、最新の数百 MW 級ガス火力の建設費は、すべて込みでkW 当たり7万円を切る。この中で、同期発電機（モータ）のコストは一部であるため、kW 当たり単価は1万円を切ると推定される。誘導モータであれば、もっと小容量でもkW 単価はこれ以下である。回転発熱機では、図13で示したもっと構造の簡単な発熱部を付けるだけなので、回転発熱機は駆動部（モータ）込みでkW 単価が1万円を切ると期待される。また、発電機（モータ）がそうであるように、電力系統に、ブレーカなどが必要だとしても、半導体制御装置など高価な制御装置なしに直結できる。唯一、電磁石の励磁電源は半導体制御となるが、全体の容量に対して遥かに小さい容量である。

（４）同期慣性力、短絡電流供給能力

回転発熱機には別のメリットもある。モータに同期発電機を採用した場合、電力系統の安定化に寄与する同期慣性力を持つことである。電力系統は、同期慣性力と言われる特性がないと、需要と供給のバランスがとれていても停電を起こすことがある。この同期慣性力は、従来のインバータにはない。このため、インバータのみで構成された電力系統は極めて不安定である。再エネは基本的にインバータを利用するため、再エネの導入量が増えるほど電力系統が不安定になる。

そこで、インバータで同期慣性力を仮想的に出せるように開発が続けられており、マイクログリッド（一定の地域で全電力負荷を分散型電源から供給する小規模電力系統）での採用例もある。デジタル技術の信頼性がどこ

まで上げられるかによって、基幹系統への導入が実現されるであろう。

次に、モータとして同期機または誘導機を採用した場合、回転発熱機では、電力系統に事故が発生した時の短絡電流供給能力が得られる。これも、電力系統を知らない方は「あれ？」と思うことであろう。電力系統の事故は、落雷など日常的に発生している。その際、事故点を見つけ出し、素早く遮断し、その事故が継続・拡大しないようにすることは、大停電を起こさないために重要である。

この際には、流れた事故電流の大きさと位相を検知することで事故点を見つけている。他の様々な事故点検知方法もあるが、少なくともインバータ電源ではこの事故電流供給ができない。回転発熱機では、同期機あるいは誘導機が回転しており、物理的なエネルギーを持つため、その事故電流を供給できる。電力系統の多重防御を維持するためにも、この事故電流供給能力は必須である。この事故電流は、過大にならないように電力系統が設計されている。大きすぎると変圧器等を破損して問題となるが、全くないと、事故時の原因除去が遅れ大停電に繋がる恐れがある。大きすぎても小さくても問題が生じるのである。

蓄熱発電で熱電変換に蒸気タービンを採用している場合は、自動的に同期慣性力と短絡電流供給能力を持つ。インバータ電源にはどちらもない。ただ、蓄熱発電の発電容量は、入力部の容量より小さい。電力系統に必要な十分な同期化力および短絡電流供給能力をもたせるためには、この回転発熱機の採用が有効である。

7. おわりに

再エネの大量導入には様々な課題がある。特に、不安定性の対策は喫緊の課題となりつつある。その対策として、蓄熱発電が注目されつつある。熱機関を採用するため、効率は蓄電池等と比べて低い。しかし、蓄熱設備コストが極めて安く、そのため最も経済的に数

時間以上の不安定性解消ができる。既に世界では、電力会社やメーカーを中心に 30 近い民間の開発計画が進行中で、その中には熱機関の効率を飛躍的に高める開発もある。

その世界の開発で、見落とされているのが電熱変換部の低コスト化である。ここで回転発熱機の適用が有望である。単純な抵抗ヒータよりさらに安価になる上に、電力システムの安定運用および保護に必要な同期慣性力や短絡電流供給能力も持つ。日本も蓄熱発電および回転発熱機の開発を早急に開始すべきである。

参考文献

- (1) M. Arita, A. Yokoyama, Y. Tada, "Evaluation of Battery System for Frequency Control in Interconnected Power System with a Large Penetration of Wind Power Generation," 2006 International Conference on Power System Technology, October 22-26, 2006, Chongqing, China
- (2) Statistical Series of RED Electrica (<http://www.ree.es/en/publications/>)
- (3) Michael Taylor, "Renewables: The True Costs," International Renewable Energy Agency (IRENA)
- (4) Ran Fu, Timothy Remo, Robert Margolis, "2018 U.S. Utility-Scale Photovoltaics-Plus-Energy Storage System Costs Benchmark," National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy, October 2018
- (5) IEA, "Tracking Clean Energy Progress 2017"
- (6) <https://www.thenational.ae/business/dubai-on-course-for-another-pricing-record-at-mohammed-bin-rashid-al-maktoum-solar-park-1.174930>
- (7) <https://www.bestmag.co.uk/indnews/azelio-plans-25-mw-energy-storage-installations-jordan>
- (8) IRENA, ELECTRICITY STORAGE AND RENEWABLES: COSTS AND MARKETS TO 2030
- (9) M. Jonemann: "Advanced Thermal Storage System with Novel Molten Salt" NREL/SR-5200-58595 (2013-5), December 2013
- (10) 岡崎, 蓮池, 中村, 西畑, 伊瀬 『蓄熱発電所と風力熱発電』電気学会論文誌 B, Vol.138 No. 4 pp.303-308, 2018 年
- (11) <https://www.youtube.com/watch?v=EoTVtB-cSps>
- (12) 平成 30 年度「熱を活用した次世代蓄エネルギー技術実用化推進事業」, 環境省

研究所のうごき

(令和2年7月1日～9月30日)

◇ 第14回評議員会

日 時：7月31日（金）16:00～17:00

場 所：航空会館（2階）201 会議室

議 題：

第一号議案 令和元年度事業報告（報告事項）
および決算について

第二号議案 公益目的支出計画実施報告書
（報告事項）について

第三号議案 役員の一部改選および補欠選任
について

第四号議案 役員退職金の支給について

第五号議案 評議員の一部改選について

第六号議案 常勤役員候補者選考委員会委員の
一部改選について

報告事項 受託事業に係る労務費の不適切計
上事案について

◇ 第24回理事会（電磁的記録による決議）

決議があったものとみなされた日：8月18日（火）

議 題：

第一号議案 代表理事の選定について

第二号議案 役員報酬額について

◇ 賛助会員説明会

日 時：9月29日（火）14:00～15:30

開催方式：オンライン会議

次 第：

1. 新理事長挨拶
2. 労務費不適切計上事案について
3. 再発防止に向けた取組み状況
4. 令和元年度の事業及び決算報告
5. 賛助会員サービス向上への取組み
6. 質疑応答

◇ 月例研究会

第400回月例研究会（Web会議）

配信日時：7月10日（金）14:00～16:00

テーマ：

1. 日本版シュタットベルケの可能性

（京都大学大学院 経済学研究科 / 地球環境学
教授 諸富 徹氏）

2. 地域エネルギー利活用の課題と展望

（（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 主管研究員 森山 亮）

第401回月例研究会（Web会議）

配信日時：8月21日（金）14:00～16:00

テーマ：

1. 蓄熱発電の可能性と世界の開発計画

（（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 主管研究員 岡崎 徹）

2. 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
（北海道大学 大学院 工学研究院 准教授 能村
貴宏氏）

第402回月例研究会（Web会議）

配信日時：9月11日（金）14:00～16:00

テーマ：

1. WNN から見た最近の原子力動向

（（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 都筑 和泰）

2. 最近の米国の原子力に対する取組み

（（一財）エネルギー総合工学研究所 原子
力技術センター 参事 藤井 貞夫）

3. COVID-19の原子力への影響と今後の原子
力の役割

（（一財）エネルギー総合工学研究所 原子
力技術センター 研究員 高野 大志）

4. An Overview of the Nuclear Energy Agency :
NEA Activities during the Pandemic ～ポス
トコロナを見据えた NEA の取組み～
（Senior Nuclear Safety Specialist, Division of
Nuclear Safety Technology and Regulation ,
OECD Nuclear Energy Agency (NEA) 熊谷
裕司氏）

◇ 外部発表

[学会発表]

発表者：井上 智弘, 加藤 悦史, 黒沢 厚志

テーマ：COVID-19 対策に伴う社会活動の変化と
電力需要への影響評価

発表先：第 39 回エネルギー・資源学会研究発表会
日 時：7 月 28 ～ 29 日

発表者：井上 智弘, 加藤 悦史, 黒沢 厚志
テーマ：2020 年電力需要分析手法の再検討～ CO
VID-19 の社会活動影響を考慮するための
分析課題 ～
発表先：令和 2 年 電力・エネルギー部門大会（電
気学会）
日 時：9 月 9 ～ 11 日

発表者：岡崎 徹
テーマ：世界の蓄熱発電の現状
発表先：電気学会 B 部門大会
日 時：9 月 9 ～ 11 日

発表者：岡崎 徹
テーマ：世界の蓄熱発電の現状
発表先：日本冷凍空調学会年次大会
日 時：9 月 9 ～ 11 日

発表者：黒沢 厚志
テーマ：タクソミーの形成と持続可能な開発指標
発表先：環境経済・政策学会 2020 年大会
日 時：9 月 26 ～ 27 日

編集後記

今回、初めて編集後記を執筆する。昭和53年以来、途切れることなく発行を継続している歴史ある機関誌であり、身の引き締まる思いである。これまでの継続に関する諸先輩方の努力に感謝するとともに、更に有効的な情報発信についても考えていく所存である。

今、私たちが享受している豊かな生活は産業革命以降の技術発展によるところが大きい。代表的なものは蒸気機関等による化石燃料の利用である。これにより先進国を中心に生活の質が大きく向上し、それを新興国にも展開しようとする段階で気候変動問題が顕在化した。

気候変動に関しては再生可能エネルギー利用が1つの解ではあるが、国・地域により本当に主力電源にまでなり得るかは未知数である。その観点でシュタットベルケや蓄熱技術が見直されていると考える。

以前は自国のエネルギー確保のみを議論すれば良かった。ところが、近年は経済のグローバル化、世界的な気候変動に対する枠組みもでき、加えて、世界経済や各国の地政学的リスクも踏まえた検討が必要である。さらに、米国がシェール革命以降、エネルギー供給国的な立場になるなど、考慮すべき事項、変数が多くなり、将来の不確定さが増大した。

このような状況では、日本や世界のエネルギー動向がこうなるとは断定はできず、色々なシナリオを想定することが必要である。個人的には不確定性が一番大きいのは地政学的リスクや政治であり、次が世界経済の動向、特に経済の中でもエネルギー（資源）関係と考える。この分野は世界的な動向を幅広く把握することが重要であろう。

技術に関しては過去及び現在の技術については比較的確かな情報が存在する。技術の将来予測は難しい面もあるが、政治や地政学的リスクと比べれば過去の技術進展も参考にでき、不確定性は相対的に小さい。但し、技術については誰しも自分/自社の技術分野の将来を楽観的に評価する傾向がある。モチベーション維持等の観点からある意味当然であるが、客観性という点が第三者的な機関の評価がよく参照される理由の1つと思う。

以上、本号の内容と関連付けて記載した。まずは、不確定性の小さい技術情報を幅広く集め、その上で、政治・経済的の世界的動向を考慮して将来を推定していくことが重要だと思う。

初めての編集後記執筆でもあり、少し長くなったが、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43巻第3号

令和2年10月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

FAX (03) 3501-1735

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

(印刷) 株式会社 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。