

## 石炭火力発電利用について ～解説～

2019/06/24 樋口 登

### 1. はじめに

最近、地球温暖化の具体的事象が明らかになってきている。超大型台風(ハリケーン)の多発による多数の人的被害の発生、海面上昇による南方諸国の国土消失の懸念、各種動植物分布の変化など、列挙にいとまがない。この傾向を抑制するために、三年前の 2016 年 11 月 4 日に全地球規模でパリ協定が発効した。この協定では世界共通の目標として①世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より充分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする、②21 世紀後半には温室効果ガス排出量と吸収量のバランスを取り、事実上の排出をゼロに抑える、を掲げた。

この背景にあって一番の槍玉に挙がっているのが石炭である。石炭火力発電は燃焼温度の低さと相俟って発電電力量当たりの CO2 発生量は他の発電方式と比較して格段に多い。更に亜硫酸ガス、煤塵排出などのデメリットを生じやすい。それ故、世界の資金スポンサーには石炭火力プラント建設への資金提供を拒否する向きも多くなってきている。日本は石炭火力の利用を続けるばかりでなく、発展途上国への石炭火力発電プラント輸出を継続しているという理由から、気候変動枠組み条約第23回締約国会議(COP23)において他の「先進国」と並んで「化石賞」を贈られるなど非難を受けている。日本の方向性を非とする国内の NPO などには、これを当然として受ける向きもあるようだ。

しかし、この非難には果たして正当性があるのかという疑問からこの稿を起こした。読者諸兄の批判を仰ぎたい。

### 2. 地球温暖化の原因について

まず、パリ協定目標の設定の背景を確認したい。Fig.1.に北半球の気温推移を示す。これに見られるとおり、19 世紀中葉より気温の急速な上昇が発生し、それ以降現在までに既に 1℃程度の上昇が見いだされている。

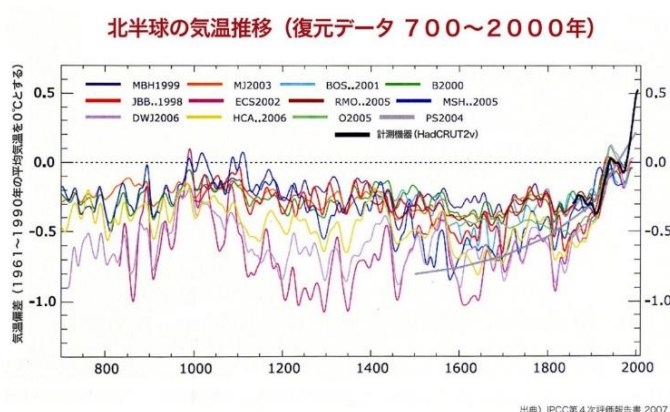


Fig.1. 北半球の気温推移

同時に最近 500 年間のエネルギー消費と人口の推移を Fig.2 に示すが、同時期における両者の急速な立ち上がりが見える。人口の増加がエネルギー消費の増大を促しているわけだがこれが直ちに気

温の上昇につながっている、即ちエネルギー消費によって地上に放出された熱エネルギーが気温の上昇に直結したように思われるかもしれないが、事はそう単純ではない。

また、地球上の長期的な CO<sub>2</sub> 濃度の変化を Fig.3 に示すが、これに見られるようにここ数十万年の傾向の中で近年の異常な増加が確認できる。

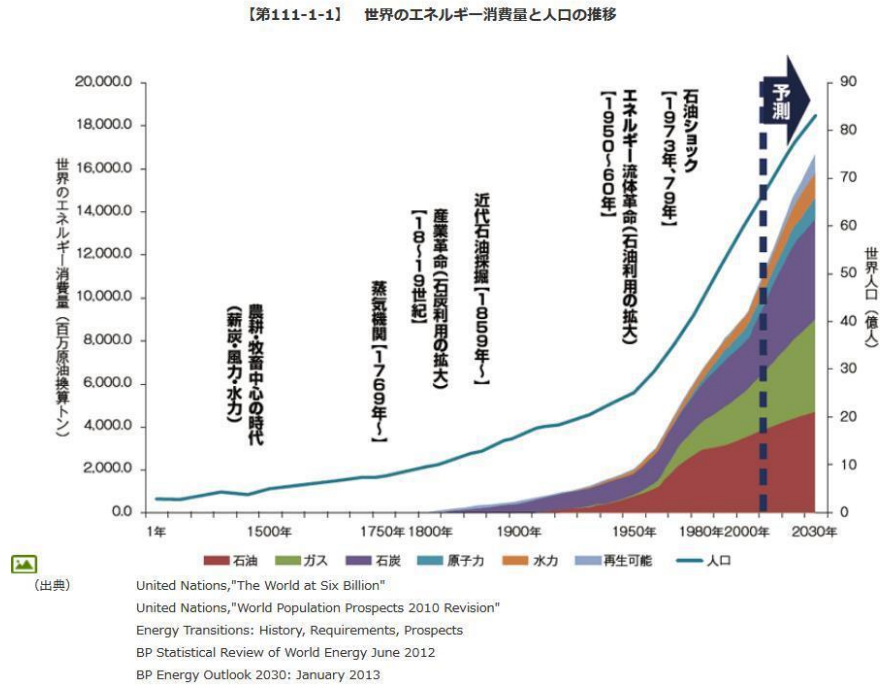
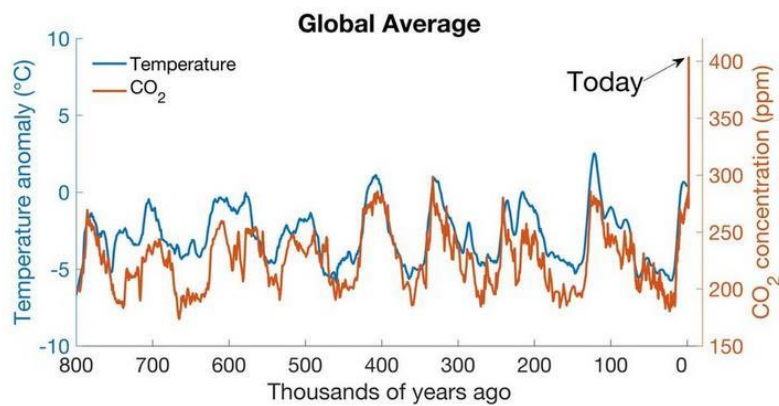


Fig.2 最近 500 年間のエネルギー消費と人口の推移

(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013html/1-1-1.html>)



@benhenley, @dr\_nerilie

Data from Parrenin et al., 2013; Snyder et al., 2016; Bereiter et al., 2015. Ben Henley and Nerilie Abram/The Conversation

Fig.3 地球上の CO<sub>2</sub> 濃度の長期的変化

(<https://www.businessinsider.com/carbon-dioxide-record-human-health-effects-2018-5>)

エネルギー消費、人口、そして CO<sub>2</sub> 濃度の関連性を検討するために具体的な数字を見てみよう。

2016 年における全世界のエネルギー消費は 13,761Mtoe(百万 石油換算トン、Key world energy statistics by IEA)で、仕事率で見れば 18.3TW であるのに対して太陽放射は 174PW(Wikipedia「地球のエネルギー収支」より)と評価されており、その比は 9,500 にも達する。すなわち、人類が放出する熱エネルギーの総量は、地球に入射する太陽の熱と光のエネルギーの和と比較して 4 桁も小さく、地球温暖化の直接の原因とはなり得ないのである。

膨大な太陽の入射エネルギーの約三割は反射により宇宙空間に戻され、一旦は吸収された熱エネルギーも放射により地球外に放出される。この入射と放射のバランスが地球環境を地球生命にとって快適な環境を維持している。

このバランスを維持する上で重要な働きをするのが CO<sub>2</sub> を始めとする「温室効果ガス」である。これらによる赤外線吸収は放射熱量を決定するためである。エネルギー源としての化石燃料の消費により放出された CO<sub>2</sub> などが地球温暖化を促進していると考えられている。地球温暖化の原因を温室効果ガスとする論に異議を唱える向きもあるが、それらはすべて論に値しないものと考えられている。ただし、赤外吸収の強さは水蒸気が最も大きく、現段階では CO<sub>2</sub> の倍以上の効果があるとの主張は顧みる必要がある。

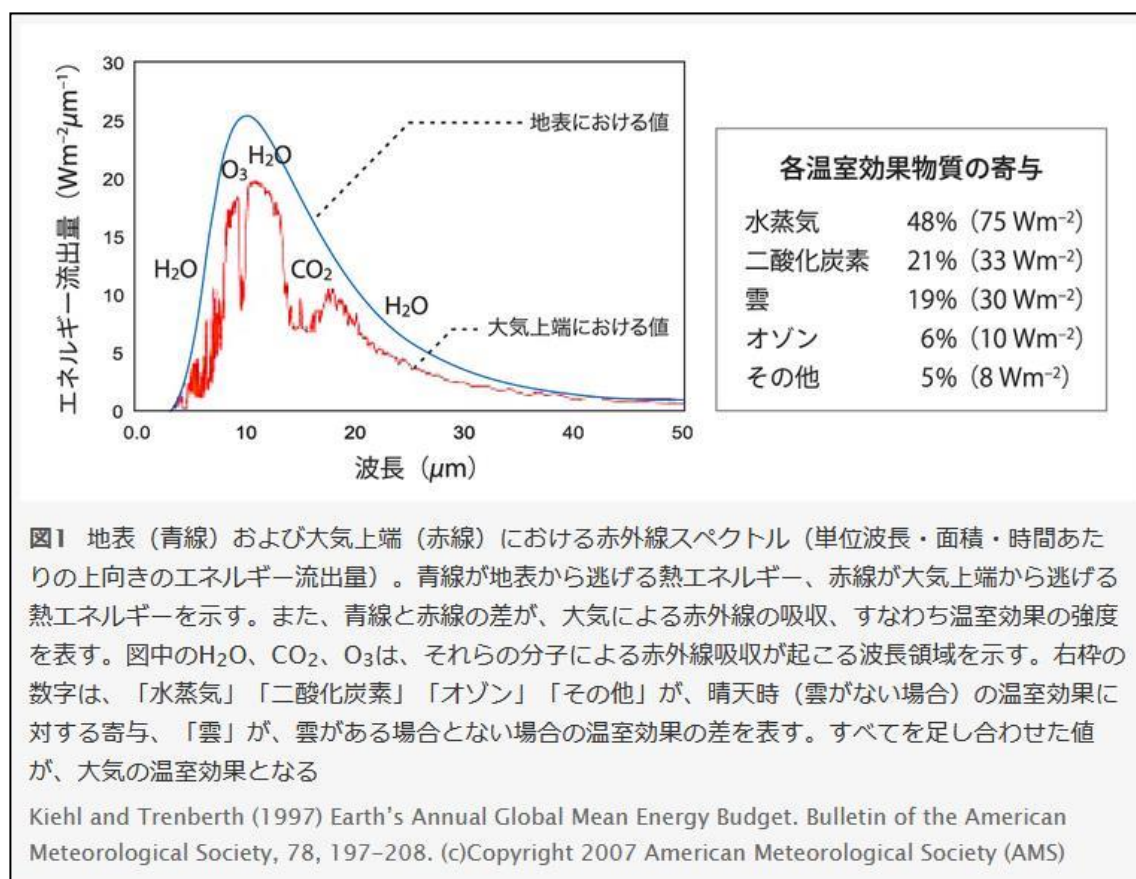


Fig.4 地球温暖化への各種物質の寄与(国立環境研 HP より)

この図に見られるとおり、確かに水蒸気の効果は大きい。しかし水蒸気は自然現象であって産業革命とは無関係に存在してきており、水蒸気が産業革命とともに立ち上がった気温上昇の原因とする事

は不適當である。また、季節による変動や飽和現象もあり、無制限に影響が拡大する訳ではない。これに対し CO<sub>2</sub> による赤外線吸収は季節によらず常時発生し、飽和現象もなく、更に水蒸気の発生増加にも寄与する。従って、地球温暖化進行に最も影響を与えるのは CO<sub>2</sub> などの地球温暖化ガスと断言して差し支えないものとする。

以上を総括すると下記の通りとなる。

- 産業革命以降エネルギー消費と人口の増加に伴い空気中の CO<sub>2</sub> 濃度は上昇を続けている。これと同時に地球温暖化が進行中である。
- しかし、人間の活動に伴い地球上に放出される熱エネルギーは、太陽から届く光と熱エネルギーの大きさと比較して約 4 桁も小さい。従って、地球温暖化の真因は熱収支バランスを狂わせる地球温暖化ガスの増加にある。(この点で、熱効率の低い原子力発電の大量の温排水も温暖化に責任有りとする説は見当違いも甚だしいと言える。)

### 3. 石炭利用の現状

前節に見たとおり、石炭利用は地球温暖化に直結するよう見える。

そして現在の石炭利用を調べてみると表 1. の通りである。欧米での消費こそ減少しているものの、アジアやアフリカ、特にアジアにおける消費の大きいことがわかる。先に述べたように、日本に「化石賞」を贈った向きの思惑では、高価だが「クリーン」な天然ガスの利用を必然とし、石炭の利用など考慮すべきではないとするのであろうが、資金の比較的潤沢な先進国は別として、開発途上国では廉価なエネルギー源である石炭の利用は避けられないものと考えらるべきであろう。開発途上国の多いアフリカでは、最も多用されているエネルギー源は「可燃再生・廃棄物」すなわち薪・炭の類いである。石炭すら高価に過ぎるというわけであろうが、今後の趨勢はどうであろう。

再生可能エネルギー導入の推進者として代表的なドイツでも、出力の変動を補完するエネルギーとして安価な褐炭火力の稼働率は高く、ガスコンバインドサイクル発電は燃料費の高さからその稼働は停止に追い込まれている。結果として、CO<sub>2</sub> 排出量は下げ止まっている。

日本でもエネルギーセキュリティ上の理由から「エネルギーミックス」の考え方を重視して、石炭の利用を進めており、発電効率の向上に注力している。その結果として 40% を越える技術を獲得したが、各国の状況を見ると到底これに及ばない。特に使用量の多いインド中国などでは 30% 台前半にとどまっております。日本の現用技術を広く適用するだけでも大幅な CO<sub>2</sub> 発生の削減が達成できる。石炭利用技術の輸出には理があると言うのが日本政府の主張である。

また、賦存資源量から見ても石炭は他の化石燃料との比較では優位性が確認されており、これを捨て去ることは人類の将来に向けて得策ではないと断言できる。

蛇足ながら付け加えるが、天然ガスに「クリーン」な、と括弧付きの形容詞を付けたには理由がある。表 2. に石炭、天然ガス(LNG)、天然ガス(国産)、石油を燃焼させたときの発生熱量当たりの CO<sub>2</sub> 排出量を示す。石炭の CO<sub>2</sub> 排出の大きな事は一目瞭然であるが、LNG と国産天然ガスの比較を見ていただきたい。

表.1. 世界各国・地域の人口・GDP・エネルギー消費と石炭利用

	人口	GDP	一次エネルギー供給	GDP/人口	一次エネルギー/人口	石炭使用量	一次エネルギー内シェア	世界全体におけるシェア	可燃再生・廃棄物	一次エネルギー内シェア
	百万人	十億ドル	Mtoe	1,000 \$/人	石油換算トン/人	Mtoe			Mtoe	
米国	323	16,920	2,167	52.38	6.71	342	15.8%	9.2%	102	4.7%
中国	1,379	9,505	2,958	6.89	2.15	1,916	64.8%	51.4%	113	3.8%
日本	127	6,053	426	47.66	3.35	114	26.8%	3.1%	14	3.3%
アジア	4,035	23,375	5,497	5.79	1.36	2,685	48.8%	72.0%	517	9.4%
アジア (中国、日本以外)	2,529	7,817	2,113	3.09	0.84	655	31.0%	17.6%	390	18.5%
ヨーロッパ	912	22,891	2,854	25.10	3.13	481	16.9%	12.9%	179	6.3%
アフリカ	1,223	2,316	818	1.89	0.67	108	13.2%	2.9%	390	47.7%
世界合計	7,433	77,395	13,761	10.41	1.85	3,731	27.1%	100.0%	1,349	9.8%

(EDMC エネルギー・経済統計要覧2019 より)

日本で天然ガスを利用するにはほとんどが液化ガスとして輸入する必要がある。主成分であるメタンの沸点は $-162^{\circ}\text{C}$ であり、液化する前に十分に不純物を取り除く必要もあるほか、液化には大きなエネルギーが必要である。更に輸送途上で蒸発による損耗もあって、約  $1/3$  を事前に消費されてしまい炉前  $\text{CO}_2$  を発生して消えてしまうため、利用熱量当たりの  $\text{CO}_2$  排出量はほとんど石油と変わらない。この点で、天然ガスをそのまま利用可能な地域と、LNG として利用せざるを得ない地域とでは事情は大きく異なる。

尤も石油火力と LNG コンバインドサイクルとは発電効率に大差があるため、この数字通りの評価とはならないが、天然ガスの絶対的な優位性は自明のものではないことは記憶すべきである。

表.2. 燃料種類別  $\text{CO}_2$  排出量

	燃焼熱 (MJ/kg)	炉前 $\text{CO}_2$ (g/MJ)	利用時 $\text{CO}_2$ 発生量 (g/MJ)	全 $\text{CO}_2$ 発生量 (g/MJ)
石炭(一般炭)	26.6	4.15	24.7	28.9
天然ガス(LNG)	54.5	7.62	13.5	21.1
天然ガス(国産)	54.5	0.853	13.5	14.4
石油	38.3	0.853	19.5	20.4

(産総研 匂坂氏 調べ)

以上見たとおりの情勢ではパリ協定の完全実施など到底覚束ないと言わざるを得ない。

事実、世界の勢は気温の上昇を今世紀後半までに  $1.5^{\circ}\text{C}$ ~ $2^{\circ}\text{C}$  程度に抑制しようとする目標に反対はしなくとも、具体的なアプローチについては何らの合意形成もされておらず、見通しも明るくないのが現状である。

しかし、日本で確立されて、現在展開途上にある技術はこの情勢を打開できるものと期待している。それは、最新の石炭火力発電技術、「石炭ガス化複合発電技術」である。次章以下にこれについて概観する。

## 4. 最新の石炭火力発電技術 -IGCC-

最新の石炭火力発電技術である石炭ガス化複合発電技術 (IGCC - Integrated coal Gasification Combined Cycle generation) とは、石炭を前段で不完全燃焼させてガス化し、これを高温・高圧で燃焼させることによってガスタービンを駆動して発電し、更にその余熱を持ってスチームタービンを駆動して発電する複合発電技術である。

既に天然ガスを利用する複合発電技術では、関西電力姫路第二発電所において 1600℃級のガスタービンの採用による MACC II システムによって、非常に高い 60% の発電効率 (LHV 基準) を得ている。更に高温の 1700℃級のガスタービンの開発に目処が得られている。カルノーの定理によれば高温源の温度が高いほど熱機関の効率が向上するので、一層の高効率化の道をたどりつつある。

石炭火力の場合も全く同様で、従来の燃焼方式では高温燃焼は難しく、最新式の超超臨界圧火力発電でも効率は約 40% 程度であるが、福島県で建設中の (常磐共同火力発電所、540MW、2020 年運転開始予定) 1,400℃級ガス化複合発電商用機では約 48% の、将来の 1,500℃級のユニットでは約 50% の発電効率が見込まれている。これは同じ発電量当たりの CO<sub>2</sub> 発生が 20% 程度少なくなることを意味し、同時に、通常石炭利用に伴い発生が懸念される Sox、NO<sub>x</sub>、煤煙も現用の LNG コンバインドサイクルとほぼ同等の発生に抑制できるという一石二鳥の効果も付随している。

世界的に見ると、この福島県の IGCC のように空気吹きシステムを例外とし、ほとんどは純酸素燃焼の「酸素吹き」であって、両者には得失があるが、後者の場合、排気ガスに窒素を含まない純粋な CO<sub>2</sub> であるため、CO<sub>2</sub> の回収が容易になるという特徴がある。CO<sub>2</sub> を回収して別途貯蔵する技術 CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) の開発が進行中であるが、これが実用化されれば、CO<sub>2</sub> 排出ゼロの発電が可能になり、石炭火力発電のデメリットは消滅することになる。

更に広島県で展開中の大崎クールジェンプロジェクトでは、ガス化技術と燃料電池技術の融合により、500MW 級のプラントで CO<sub>2</sub> 回収率 90% を満たしながら発電効率 47% の達成を目指し、2022 年度に実証試験を実施すべく準備を進めている。

以下に現在福島県いわき市勿来で運転中の IGCC 発電ユニット (勿来共同火力発電所 10 号機、出力 25 万 kW) の系統図を示す。

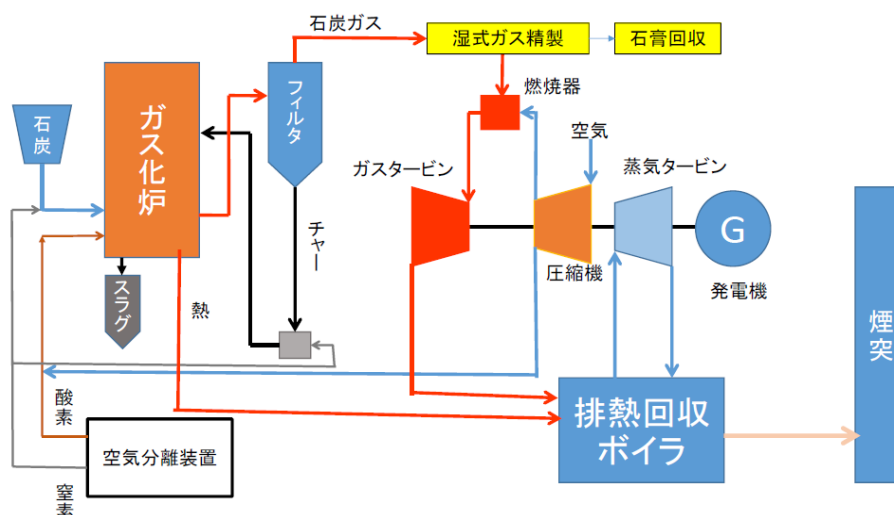


Fig.5. IGCC 発電ユニット系統図

粉砕された石炭は、空気分離装置から送られてきた窒素によりガス化炉に送り込まれ、圧縮機からの高圧空気とやはり空気分離装置からの酸素との混合気で部分燃焼する。石炭灰は炉内で溶融してスラグとして落ちる。ガス化炉の温度が高いため、スラグは溶融してガラス状となって体積は小さくなり、処理も比較的容易になる。発生した熱は排熱回収ボイラに送られて蒸気発生に利用される。精製器を通った石炭ガス(燃料ガス)は圧縮機からの空気と混合されて燃焼し、高温(約 1,250°C)になってガスタービンに供給されて動力を発生する。ガスタービンからの排気ガスはまだ高温で、排熱回収ボイラに供給されて蒸気を発生させ、蒸気タービン駆動に用いられる。このシステムにおける発電効率は 42.4%(LHV 基準)であったと報告されている。蛇足ながら、排気ガスは窒素と CO<sub>2</sub> であり、運転中の煙突の状況を見ても「煙」は全く見えず、停止しているのではないかとさえ感じさせる。これをまとめて回収することができれば、と、夢想することもあった。

この 25 万 kW プラントの実績を踏まえ、50 万 kW 級の商用プラントが、福島県の広野火力発電所にも、勿来共同火力発電所と同様に建設中である。(Fig.6-a,b)



Fig.6.a (左) タービン建屋



Fig.6.b (右) 排熱回収ボイラ他

## 5. まとめ

三年前に発効したパリ協定では、平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°Cより充分低く保つため、21 世紀後半には温室効果ガス排出量と吸収量のバランスを取り、事実上の排出をゼロに抑えることを謳っている。この目標達成に障害となる石炭利用を戒めようとする動きが活発であるが、必ずしもこの動きに同調するものばかりではない。

石炭利用の新技术としての石炭ガス化複合発電(IGCC)と CO<sub>2</sub> 回収・貯留技術(CCS)との組み合わせはこのジレンマを解消する高い可能性を含んでいるものとする。そもそも、自動車などで消費された化石燃料から発生する CO<sub>2</sub> の回収など、およそ考えることはできず、発電所などで集中して回収することこそ温暖化防止対策の本命と言えよう。技術開発のさらなる進展が望まれる。

## 石炭火力発電利用について ～補稿～

FES 会報第 38 号 (2022/4/30) より

樋口 登

### 1. はじめに

先に会報 36 号(2019)において、「石炭火力発電利用について ～解説～」と題して運転開始に向けて準備の進む IGCC(石炭ガス化複合発電)火力発電所に就いて紹介した。その後、地球温暖化防止に向けた世界的な議論が更に進み、昨年 10 月、当時の菅首相は 2050 年度を目標に温室効果ガスの排出と吸収のバランスを取って、実質的な排出をゼロにする、いわゆる「カーボンニュートラル」の実現を世界に向かって宣言するに至った。

それ以前の地球温暖化防止対策としての、GHG(温室効果ガス)の排出については「低減」が目標で、どれ位減少させることが出来るか、即ちその低減量が課題であったが、これ以降は森林効果、CCS(CO<sub>2</sub>回収・貯留)などによるマイナス分を考慮した上で、CO<sub>2</sub>の排出を実質的になくそうとするもので、世界的にもエネルギー供給の八割強を化石燃料に依存する現状に於いて、非現実的とも言われかねない非常に厳しい目標である。

前稿でも紹介したとおり、石炭は世界に遍く産出し、且つ安価なエネルギー源として広く利用されているが、現在は CO<sub>2</sub> の大量の排出源として、その利用には糾弾の声が高まっている。COP 会議では石炭火力の利用を続ける国に「化石賞」(Fossil Awards)を贈るなどの動きがその例である。

しかしながら、石炭抜きで人類の生存継続に必要なエネルギーを供給可能であるか否かは明確になっていないことは前稿でも強調し、更にここで、IGCC+CCS がこの窮状のブレイクスルーを可能にする候補たることも述べた。

### 2. その後の進捗

前稿で可能性として述べた IGCC 火力発電所であるが、その後、福島県において二つの 50 万 kW 級の発電所が完成し、営業運転を開始している。その一つは勿来 IGCC 火力発電所(福島県いわき市岩間町川田 102 番 3、2021. 4. 16 運転開始、出力 52 万 5,000kW) であり、もう一つは広野 IGCC 火力発電所(福島県双葉郡広野町大字下北迫字二ツ沼 58 番地 2021. 11. 19 運転開始 出力:54 万 3,000kW)である。

この両者はともに、順調に営業運転を継続している。

### 3. まとめ

地球温暖化の結果と考えられる異常気象の頻発、生物相の変化、氷河・氷山の消滅などの顕在化が指摘され、GHG 排出対策の促進が切迫してきているが、同時にエネルギー供給も確実に行わなければならない現状に於いて、IGCC+CCS は現状打破の重要な候補と考えることが出来る。さらなる進展に期待したい。