

将来の石炭および 炭素資源利用のあり方に関する考察

林 潤一郎

1. はじめに

社会の低炭素化、脱炭素化が叫ばれる中、石炭の利用は最先端の転換技術をもってしても逆風の真っ只中にある。例えば、日本政府はこれまで一定条件を満たした石炭火力設備の輸出に対して、国際協力銀行の低利融資等による輸出コスト引き下げを支援してきたが、如何なる石炭利用も温暖化ガス排出を長期間固定化するとの理由によって英国、米国をはじめとする国際社会からの批判を受けている。国内メガバンクによる石炭火力新設への投融資の原則停止(2019~2020)も記憶に新しい。

石炭転換によって不可避免的に発生するCO₂を分離回収し、地中に貯留するcarbon capture and storage(CCS)技術は、現状では、石炭利用が今後許容されるための必須条件であるように見えるが、一方、太陽光、風力等の再生可能エネルギー(再エネ)に由来する電力の低価格化が世界的に進んでおり、実現できないリスクがあるだけでなく実現できても割高になる石炭利用、さらには石油や天然ガスを併せた化石資源の利用をできるだけ早期に停止し、再エネのみでエネルギー需要を賄う社会を実現すべきとの意見が主流になりつつあるように見える。エネルギー需給の長期的な構造変化への過渡期にある現在、産業界が比較的短期で対応できるものとしては、本特集でも取り上げている発電部門や産業部門におけるCO₂排出量低減に寄与する石炭利用技術開発を挙げることができる。

本稿では、このような背景を踏まえ、まず、わが国の一次エネルギー供給、最終エネルギー消費の現状をベースとして、それらを再エネのみによって賄うための条件(再エネ

発電等の規模感)を掴んでみる。後述するが、その条件を満たすのは可能かもしれないが相当に難しい。そこで、このことを踏まえ、エネルギー需要の一部を石炭利用によって満たさざるを得ない場合の、カーボンニュートラルあるいはネガティブ転換の実現に向けたコンセプトと関連技術を考察する。

2. 再エネのみで最終エネルギー消費を支えられるか?

わが国の年間発電電力量(ただし、2018年)は、約10,500億kWhである。この電力を太陽光発電によって生産するために必要な土地面積を以下の仮定に従って試算してみる。再エネ電力としては風力も考えるべきであることを承知しているが、現在までの国内の設備容量は太陽光発電より1桁小さいので、ここでは太陽光発電に限定することをお許し願いたい。1) システム容量1kWの太陽光パネル設置面積は10m²、2) システム容量1kWあたりの年間発電電力量は1.2MWh、3) 十分な蓄電設備を前提とする電力の有効利用率は90%(蓄電に伴う電力損失率10%)、4) 発電設備を設置する土地の面積余裕率は20%。試算結果は約12,000km²であったが、この面積はわが国の総宅地面積(15,600km²)の77%に相当する。

次に、発電以外の石炭利用、すなわち鉄鋼生産およびセメント製造を太陽光電力に由来する水素および熱(ジュール熱)で置き換えてみる。鉄鉱石の還元は鉄鋼生産において最も多くのCO₂を排出するので、廃鉄等の鉄鋼材料リサイクルがCO₂排出削減に有効であることは自明だが、一方、世界の鉄鋼蓄積の増加に必要な鉄鋼生産のためには、当面は鉄鉱石還元による製鉄が必要というのが鉄鋼業界の考え方である(例えば参考文献¹⁾)。そこで、わが国の粗鋼生産量(0.95億トン、2018年)と同等量の粗鋼を専ら水素による鉄鉱石の還元と還元鉄融解によって生産することを考える。粗鋼をFeとみなし、鉄鉱石(Fe₂O₃)を水素によってFeに還元するために必要な水素を高效率水電解(未実用化、製造動力4kWh/Nm³-H₂)によって製造するとともに、吸熱反応である水素



Consideration of Coal Conversion and Utilization in Future Decarbonized Societies

Jun-ichiro HAYASHI (正会員)
1996年 九州大学 博士(工学)

現在 九州大学先端物質化学研究所 教授
連絡先: 〒816-8580 福岡県春日市春日公園
6-1

E-mail jun-ichiro_hayashi@cm.kyushu-u.ac.jp

2021年4月5日受理

還元および還元鉄融解(1800 K)に必要な熱をジュール熱によって供給する場合に必要な総電力量は約2,800億kWhである。一方、セメント生産に必要なエネルギーは、その主要部分としての石灰石脱炭酸のみを考える。わが国で1年間に利用される石灰石(0.61億トン/年;2018年)を生石灰に転換するのに必要な熱量をジュール熱として供給する場合に必要な電力量は少なくとも約300億kWhである。このように、鉄鋼・セメント生産に必要な電力量は上で想定したプロセスのみを考慮した場合でも3,100億kWh程度になる。

さらに、天然ガス、石油およびこれらに由来する製品(燃料)のエネルギー消費も再エネ電力で置き換えてみる。資源エネルギー庁による統計に基づくわが国のエネルギーバランス・フロー(2018年)²⁾を解析すると、石油由来製品の最終消費は輸送用燃料(自動車等の燃料);3.0 EJ,加熱等のための燃料;3.4 EJ,天然ガスの場合は、都市ガスとしての利用(加熱等);1.1 EJがある。以上に産業用の加熱・上記発生用途;0.9 EJを合わせると、8.5 EJのエネルギー消費となる。自動車や加熱の電化によるエネルギー効率の大幅な向上を(荒っばい)3倍とすると、上記の8.5 EJは約7,800億kWhの電力で代替されると概算される。

以上に試算した電力量の合計は、=21,400億kWhとなる。これは、さきの試算と同様の方法で土地面積に換算すると、24,800 km²(宅地面積の1.6倍)となる。電力消費デバイスの効率は今後も向上すると期待されるが、それによる電力需要減を期待するのは楽観的に過ぎる。高度情報化に伴う電力消費量の増加が著しいためである。24,800 km²という面積は、筆者が住む福岡県の面積に、同県に隣接する佐賀県、長崎県、大分県および熊本県の面積を加えたものにほぼ等しい。このように、わが国のエネルギー需要を太陽光発電+蓄電のみで賄うのは、決して不可能とは言えないが、政府の相当な決断があったとしても容易でないことは明らかである。最近、海外からの大規模な水素輸入等が検討されているが、それのみによって容易に解決できる問題とは言えない。

3. 発電の高効率化～究極の複合発電は実現するか？

わが国は石炭(微粉炭)火力発電の技術に関して世界のトップランナーであり、世界最高水準の蒸気温度を達成した超々臨界圧火力プラントの発電効率は約43%(石炭HHV基準)である³⁾。これまで、関係省庁によるロードマップ⁴⁾に従い、先進超々臨界圧(A-USC;発電効率~46%)、ガス化複合発電(IGCC;46~50%)、ガス化燃料電池複合発電(IGFC;55%)が開発され、このうちIGCCは国内で商用化しており、IGFCは、CO₂分離回収と燃料電池(FC)を組み込んだシス

テムの実証試験⁵⁾が準備段階にある。

上記の石炭火力発電は、いずれも燃焼あるいは部分燃焼(ガス化)によって石炭を転換する。エクセルギー論に基づけば、それらの発電における最大のエクセルギー損失は、燃焼あるいは部分燃焼で発生する化学エネルギー損失である。したがって、更なる発電効率の向上には、発熱反応である石炭あるいは燃料ガスの燃焼・部分燃焼の総括反応に対する寄与を小さくする必要がある。IGCCおよびIGFCのアドバンスドタイプとして提案された先進IGCCおよびIGFC(A-IGCCおよびA-IGFC⁴⁾)は、ガスタービンあるいは燃料電池(FC)からの排熱によって吸熱反応(エクセルギー再生型の石炭ガス化)を駆動するもので、57~65%の効率が試算されている。このような発電効率の向上は、換言すればCO₂排出係数の低減であり、発電コストに占めるCCSコストの削減にも直接貢献する。

エクセルギー再生と脱燃焼を同時に実現できれば、原理的には石炭を燃料とする発電の効率はさらに向上する。Tsutsumiら⁶⁾が提案したSuper IGFCは、石炭の水蒸気ガス化(吸熱反応)をFC排熱のみによって駆動し、シフト反応とガス分離を経て得られる水素を燃料としてFCを駆動し、さらに蒸気タービンも駆動する複合発電である。エクセルギー解析によれば、理想化したSuper IGFCの効率は(驚くことに)89%であり、部分燃焼ガス化およびガスタービン燃焼の排除によるエクセルギー損失低減の効果が著しい。Super IGFCは未だ本格的な研究開発に至っていないが、700℃の触媒水蒸気ガス化による褐炭の完全転換⁷⁾、石炭ガス化にそのまま適用できる可能性がある円筒電極挿入式の熔融炭酸塩型燃料電池⁸⁾(一種のダイレクトカーボン燃料電池)による高効率発電の基礎研究が進んでいる。

4. コプロダクション～カーボンニュートラル/ネガティブな電力と炭素資源の併産は実現するか？

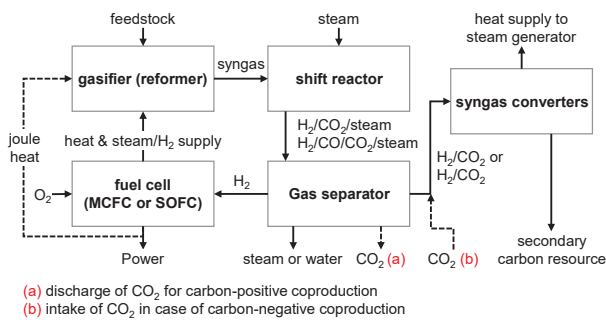
4.1 CCSの課題とコプロダクション

CO₂の発生が不可避である発電等とCCSの組み合わせがカーボンニュートラル炭素資源転換の最有力候補であることは既に述べたが、CCSの実用化には、プロセスから排出されるCO₂の分離・回収よりもその後の輸送と地下貯留を実現できるかどうか障壁となろう。世界規模で見れば、地層の潜在的なCO₂貯留容量は人為的CO₂を当面の間貯留し続けるのに十分であり、貯留容量は制約でないと考えられる⁹⁾。しかしながら、わが国がそうであるように、帯水層にCO₂を圧入、貯留する方式では投資コストを回収できないとの厳しい見方もある。分離回収したCO₂を液化して海外の受入地に輸送する場合はCO₂の国際取引に由来する経済

的・政治的リスクが生じることを考えれば、CCS(CO₂貯留)頼みの石炭利用でよいのか、との疑問も生じる。

CCSの代替となり得るのは、石炭から電力と「地上で貯留可能な固体あるいは液体」を生産する技術である。その中で筆者が有望と考えるコプロダクションは従来からあるIGCCコプロダクション(電力と合成ガスあるいはそれに由来する化学品の併産)の原理を革新したもので、前節に述べたSuper IGFCの概念(脱燃焼およびFC排熱による吸熱的ガス化駆動)にも基づく。コプロダクションの概念図を図1¹⁰⁾に示す。コプロダクションは、石炭あるいは他の炭素資源の吸熱的ガス化(改質)、燃料電池(発電・熱供給)、シフト反応、ガス分離および合成ガス転換の五つの主要プロセスからなる。

断熱系を仮定したシステムの数値シミュレーション結果の例(原料:褐炭,メタン)を図2に示す。図中の各直線の右端は、FCの発電効率(消費されるH₂のLHV基準)を60%とした場合に相当し、原料と改質剤の組み合わせによって発電効



(a) discharge of CO₂ for carbon-positive coproduction
(b) intake of CO₂ in case of carbon-negative coproduction

図1 コプロダクションシステム(改質剤:水蒸気)の概念図
MCFC: 熔融炭酸塩形燃料電池(熔融塩がガス化反応場となる),
SOFC: 固体酸化物形燃料電池

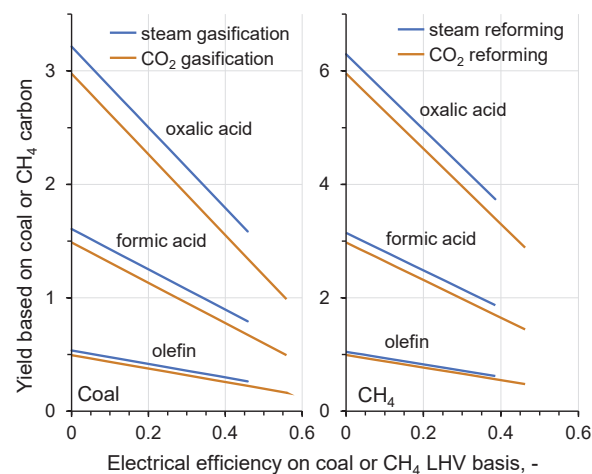


図2 コプロダクションの発電効率と二次炭素資源の炭素基準収率の関係

左:石炭(褐炭;CH_{0.9}O_{0.3}),右:メタン。各線の右端:FCの発電効率(消費したH₂のLHV基準)が60%,左端(効率0):発生電力を全てジュール熱としてガス化・改質に供給した場合。合成ガス転換反応(総括)はいずれも発熱なので、熱自立すると仮定

表1 コプロダクションの発電効率と二次炭素資源収率(例)

原料	天然ガス(CH ₄)	石炭(CH ₄)		
改質剤	水蒸気	CO ₂	水蒸気	CO ₂
発電効率, % -LHV ^{*1}	38.5	46.2	45.8	55.9
二次炭素資源収率, 原料炭素基準				
オレフィン(C _n H _{2n})	0.62	0.48	0.26	0.17
メタノール(CH ₄ O)	0.62	0.48	0.26	0.17
ギ酸(CH ₂ O ₂)	1.87	1.44	0.79	0.49
シュウ酸(C ₂ H ₂ O ₄)	3.74	2.89	1.58	0.99

*1 燃料電池の発電効率(基準:消費した水素のLHV)が60%の場合。

率が異なる(表1)。コプロダクションは、生産する化学品が酸素リッチ・水素プアであるほど同じ発電効率における化学品収率が高くなる。褐炭を原料とする場合、特にシュウ酸を生産する場合、その収率が1を超えており、コプロダクションによって自立したカーボンネガティブ発電(外部からCO₂を正味で取り込んで有機物化する発電)の可能性があると言える。水素リッチ原料であるメタンの場合は、極めて高いシュウ酸収率が得られることが分かる。しかしながら、二次炭素資源として有機酸を生産するコプロダクションを実現するには、システム・要素技術の開発は無論、有機酸の貯留(地上)と利用に大きな課題がある。一方、オレフィンを合成する場合は、原料炭素の一部をそれに転換するに過ぎないものの、基幹化合物を電力とともに生産できるアドバンテージがある。

4.2 コプロダクションと製鉄の結合

製鉄プロセスは、カーボンネガティブコプロダクションで生産したシュウ酸の一部を製鉄プロセスに利用することによってカーボンニュートラル化できる。シュウ酸は水素キャリアであり、このうち後者の水溶液は、鉄鉱石中の鉄分をシュウ酸鉄(III)として水溶液中に高濃度で溶解する。シュウ酸鉄(III)は日光照射によってシュウ酸鉄(II)に還元され、固体として析出する。さらに、シュウ酸鉄(II)は適切な雰囲気中で加熱すると、外部からの水素供給を要せずに500℃以下の低温で還元鉄に転化する¹¹⁾。シュウ酸合成には水素が必要だが、鉄鉱石を鉄に還元するのに必要な正味の水素量はさきに述べた水素還元の場合と同じである。シュウ酸の分解によって生じたCO₂をコプロダクションに全量戻すことによって、石炭を使いながらのカーボンニュートラル製鉄が可能となる。シュウ酸をメディアとする鉄鉱石還元法は、溶解工程を経るため還元鉄を高純度がしやすい等の優位性もあり、今後の技術開発が期待される。

4.3 カーボンニュートラルセメント製造

合成ガスからのシュウ酸合成は、セメント製造のカーボンニュートラル化にも貢献する可能性がある。図3に示したように、高温焼成炉において石灰石の脱炭酸による生石灰の製造、炭素資源の改質および部分燃焼(高温ガス発生

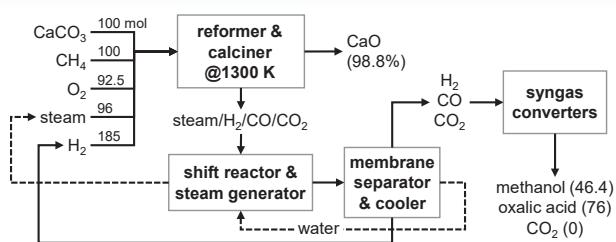


図3 カーボンニュートラル石灰石焼成プロセスの概念図（ただし、炭素資源がメタンの場合）

ため不可欠)を同時におこない、生石灰とともに生成した合成ガスを(例えば)メタノールとシュウ酸に転換することによってCO₂の発生をゼロにできる可能性がある¹²⁾。

5. おわりに

本稿では、石炭あるいは天然ガスを利用する発電、製鉄およびセメント製造のカーボンニュートラル化の可能性を、現在実証中のシステムから概念が提案されている段階のシステムにわたって考察した。本稿で述べたように、

CCSあるいは炭素資源転換原理を革新したコプロダクションによるカーボンニュートラル石炭利用は、再エネ電力生産は国土面積等によって強い制約を受けるわが国にとって、2050~2060年頃まで、あるいはそれ以降も欠かせない、あるいはエネルギー安全保障上必要となる可能性がある。また、高度石炭転換技術はバイオマス転換に即転用可能なものが少なくなく、国際的な普及も期待される。

参考文献

- 1) 日本製鉄カーボンニュートラルビジョン2050, https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20210330_ZC.pdf(2021)
- 2) 高江俊介: 東芝レビュー, **74**, 18-21 (2019)
- 3) 資源エネルギー庁: 石炭火力の新設基準の考え方について, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/sho_energy/karyoku_hatsuden/pdf/h30_01_05_00.pdf(2016)
- 4) JCOAL: 次世代高効率石炭ガス化発電プロセス, http://www.jcoal.or.jp/coaldb/shiryo/other/2_2B5.pdf
- 5) 大崎クールジェン(株): 第3段階CO₂分離・回収型IGFC実証, <https://www.osaki-coolgen.jp/project/step3.html>
- 6) Panthi, D., B. Choi and A. Tsutsumi: Proc. AIChE 2012 Spring Meeting and 8th Global Cong. Process Safety 2012; Houston, TX (2012)
- 7) Yang, H. et al.: *Energy Fuels*, **30**(3), 1616-1627 (2016)
- 8) Sugiura, K. et al.: *ECS Trans.*, **83**, 151-157 (2018)
- 9) Global CCS Institute: 世界のCCS動向2020年版, <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-2020-Japanese.pdf>
- 10) 林潤一郎, 前一廣: 化学工学会第50回秋季大会, A114-115 (2018)
- 11) Santawaja, P. et al.: *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **8**(35), 13292-13301 (2020)
- 12) 林潤一郎: 学術振興会第148委員会講演会資料(2018)

2020年4月より「化学工学－電子版－」を配信しています

WEBサービス委員会
化工誌編集委員会

PC, スマホに対応。お気に入り記事登録機能付き!
(毎月の10日頃発行です。)