

製鉄業のカーボンニュートラル(CN)化には、CCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)の活用が必要ですが、製鉄法やCCUSにより消費エネルギー量は大きく異なります。下表<sup>\*1</sup>は、各CO<sub>2</sub>削減法のCO<sub>2</sub>削減量とCN化達成にCCUSを利用する場合の消費エネルギー量を纏めたものです。Simple (Smart Iron Making Process for Low Emissions) 以外では、CCU(CO<sub>2</sub>リサイクル)利用時<sup>\*2</sup>には、鉄1t製造に10,000kWh以上のクリーン電力が必要というエネルギー問題が生じ、CCS(CO<sub>2</sub>貯留)利用時には、クリーン電力は大幅に削減できても、最大CO<sub>2</sub>排出源の従来高炉が最もエネルギー効率が高くなり限られた資源(CO<sub>2</sub>貯留能力)の早期枯渇が問題になります。

Simpleは、Gross熱量<sup>\*3</sup>を従来より実質2割以上削減しながら化石燃料由来CO<sub>2</sub>をCCUSを利用せずに8割以上削減でき、CN由来CO<sub>2</sub>をCCS処理することでDAC(大気からの直接CO<sub>2</sub>回収)不要で3割以上のNegative Emissionsも可能にできるという、CO<sub>2</sub>削減とエネルギー効率を高度に両立できる唯一無二の方策です。

|                       |  |                              | 従来BF                 |         | 従来BF + CO <sub>2</sub> 対策 |                    | Simple (脱化石燃料型高熱効率BF) |                                   |                    | DRF + Melter           |                     |                    |
|-----------------------|--|------------------------------|----------------------|---------|---------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------|--------------------|
|                       |  |                              | 2013年                | 現在      | H <sub>2</sub> 吹込化        | CH <sub>4</sub> 循環 | V.1.ck                | V.1.0                             | V.2 (V.3)          | CH <sub>4</sub> 利用     | H <sub>2</sub> 利用   |                    |
| ①                     | 化石燃料由来C<br>(外部調達)                        | 原料炭                          | kg/tp                | 475     | 409                       | 409                |                       | 223                               | 75                 |                        | 57                  | 57                 |
|                       |  | 一般炭、重油                       | kg/tp                | 一般炭 136 | 一般炭 160                   | 0                  | 0                     | 一般炭 35                            | 一般炭 208            | 0                      | 重油 35               | 0                  |
|                       |  | CH <sub>4</sub>              | kg/tp                | 0       | 0                         | 0                  | 0                     | CH <sub>4</sub> 63~0              | CH <sub>4</sub> 53 | 0                      | CH <sub>4</sub> 212 | CH <sub>4</sub> 17 |
|                       |  | その他                          | kg/tp                | 副原料 35  |                           | 副原料 31             |                       | 副原料 27                            |                    |                        | 副原料 31              |                    |
|                       |  | 合計                           | kg/tp                | 645     | 604                       | 440                | 440                   | 348~286                           | 364                | 106                    | 349                 | 120                |
|                       | 化石燃料熱                                    | GJ/tp                        | 23.9                 | 22.2    | 15.9                      | 15.9               | 14.3                  | 14.8                              | 2.9                | 18.5                   | 3.9                 |                    |
| ②                     | グリーンエネルギー                                | 燃料                           | kg/tp                |         |                           | H <sub>2</sub> 52  | CH <sub>4</sub> 126   |                                   |                    | 廃棄物                    |                     | H <sub>2</sub> 94  |
|                       |  | 加熱・溶解電力                      | kWh/tp               |         |                           |                    |                       |                                   |                    | 18* <sup>3</sup> GJ/tp | 778                 | 1,500              |
| ③                     | 製鉄余剰熱                                    | 含;LDG,タル等                    | GJ/tp                | 7.9     | 7.4                       |                    |                       |                                   |                    | 0.5                    | 0.5                 |                    |
| ④                     | 銑鉄製造Net熱                                 | 除;②製造熱損失                     | GJ/tp                | 16.9    | 15.7                      | 15.7               | 16.4                  | 15.2                              | 15.7               | 10.3* <sup>6</sup>     | 20.6                | 21.9               |
| ⑤                     | Utility電力                                | 緑はグリーン電力を想定                  | kWh/tp               | 120     | 120                       | 160                | 160                   | 160                               | 160                | 200                    | 200                 | 200                |
| ⑥                     | 銑鉄製造Gross熱                               | 含;②製造熱損失,④⑤                  | GJ/tp                | 18.1    | 16.9                      | 32.6               | 40.2                  | 16.8                              | 17.3               | 12.4* <sup>5</sup>     | 28.6                | 74.7               |
| ⑦                     | CO <sub>2</sub> 排出量                      | ①由来                          | tCO <sub>2</sub> /tp | 2.4     | 2.2                       | 1.6                | 1.6                   | 1.3                               | 1.3                | 0.4                    | 1.3                 | 0.44               |
| ⑧                     | CO <sub>2</sub> 排出削減率                    |                              | %                    | 100     | 6                         | 32                 | 32                    | 46                                | 44                 | 84                     | 46                  | 81                 |
| カーボンニュートラル達成に必要なエネルギー |  |                              |                      |         |                           |                    |                       | SimpleのDe-CO <sub>2</sub> 熱の殆どは④に |                    |                        |                     |                    |
| ⑨                     | De-CO <sub>2</sub>                       | CO <sub>2</sub> 分離熱(⑩⑪に共通)   | GJ/tp                | 4.73    | 4.43                      | 3.22               | 3.22                  | 0.51                              | 0.51               | 0.00                   | 2.56                | 0.88               |
| ⑩                     | CCU(CH <sub>4</sub> 化)* <sup>2</sup> ケース | 合計グリーン H <sub>2</sub> (含;②)  | kg/tp                | 430     | 403                       | 345                | 356                   | 232                               | 243                | 71                     | 233                 | 174                |
|                       |  | 合計グリーン電力(含;②⑤)* <sup>4</sup> | MWh/tp               | 23.3    | 21.8                      | 18.8               | 19.4                  | 13.2                              | 13.7               | 4.2                    | 14.0                | 11.4               |
|                       | Grossグリーン燃料* <sup>1</sup>                | η = 35%                      | GJ/tp                | 201     | 188                       | 167                | 174                   | 113                               | 118                | 44                     | 123                 | 110                |
|                       | 銑鉄製造Gross熱* <sup>1</sup>                 | 含、⑥                          | GJ/tp                | 225     | 211                       | 183                | 190                   | 128                               | 133                | 48                     | 141                 | 114                |
| ⑪                     | CCS(液炭化)* <sup>2</sup> ケース               | CO <sub>2</sub> 液化熱          | MWh/tp               | 0.47    | 0.44                      | 0.32               | 0.32                  | 0.26                              | 0.27               | 0.08                   | 0.26                | 0.09               |
|                       |  | 合計グリーン H <sub>2</sub> (含;②)  | kg/tp                | 0       | 0                         | 52                 | 63                    | 0                                 | 0                  | 0                      | 0                   | 94                 |
|                       |  | 合計グリーン電力(含;②⑤)* <sup>4</sup> | MWh/tp               | -0.20   | -0.18                     | 2.7                | 3.3                   | 0.42                              | 0.43               | 0.28                   | 1.2                 | 7.0                |
|                       | Gross Green燃料                            | η = 35%                      | GJ/tp                | 2.7     | 2.6                       | 31                 | 37                    | 4.8                               | 4.9                | 11.4                   | 15                  | 73                 |
|                       | 銑鉄製造Gross熱                               | 含、⑥                          | GJ/tp                | 29      | 27                        | 63                 | 78                    | 22                                | 22                 | 15                     | 33                  | 77                 |

CCSが可能なら、Simple以外では、最もエネルギー効率が高い。  
しかし、CO<sub>2</sub>貯蔵委託量が最大であり、CCS処理コストは最大。

1.1t/tpのCO<sub>2</sub>をCCS処理で3割のNegative Emissionsも可能  
(追加で必要なグリーン電力は0.14 MWh/tpと僅か)

注記 \*1) 比較表の諸値は弊社試算値であり、弊社Home Page(<https://simple-labo.co.jp>)を参照下さい。なお、全ての資材の輸送に伴うCO<sub>2</sub>発生量は未考慮です。

\*2) CCUとして、メタネーション(CH<sub>4</sub>化)×転換効率100%で試算しています。CCSとして、液炭化し貯留基地まで海上輸送する想定としますが、液炭化までの熱消費を試算しています。

\*3) Gross熱量は、1次エネルギーに換算した熱量を指します。⑩のGross グリーン燃料は、CCUで生成されるCH<sub>4</sub>の潜熱を差し引いた値です。

\*4) 従来BFならびに「DRF+Melter」の余剰エネルギーは、全て発電化する前提で必要グリーン電力から控除しています。

\*5) 廃棄物利用時に熱効率が従来の2/3に低下するとして、廃棄物投入熱量 = 18 GJ/t (wet LCV) としています。

\*6) 廃棄物の転用により焼却発電時の熱ロス(11.5 GJ/tp)が無くなるので、余剰エネルギーと同様にGross熱から差し引いています。(Home Page/「SimpLEについて」Page 9/11を参照)

### 考察 (他プロセスの懸案事項)

- CO<sub>2</sub>削減対策の潮流である「水素還元DRF(直接還元炉)+Melter(電気溶解炉)」は、CO<sub>2</sub>の8割削減に、銑鉄1t当たり1000Nm<sup>3</sup>の水素、7,000kWhのグリーン電力、従来高炉の5倍近いGross熱(1次エネルギー換算消費熱)が必要です。カーボンニュートラル(CN)達成には更なるCO<sub>2</sub>削減が必要ですが、CCUを利用するなら、900Nm<sup>3</sup>の水素、4,400kWhのグリーン電力、従来高炉の2倍以上の製銑Gross熱、が追加が必要です。CNにCCSを利用するなら、他プロセスでCCSを利用の方がエネルギー的には遥かに優位です。
- 欧州を始め世界はCO<sub>2</sub>削減を最優先する流れですが、グリーン電力やグリーン燃料を大量に必要とするプロセスに進むのは、限られたエネルギーの有効活用という点から逆行しているように見えます。また、製鉄からのCO<sub>2</sub>発生は、生産量に応じて欧州(や日本)以外で殆ど発生しており、エネルギー多量消費的なCO<sub>2</sub>削減策ではエネルギー不足から日本はもとよりそれらの国々で普及は進みません。従い、2050年に地球規模のCO<sub>2</sub>削減を実現するには、別のCO<sub>2</sub>削減プロセスの台頭が待ち望まれます。
- なお、欧州では1st Stepとして、実機豊富な天然ガス(CH<sub>4</sub>)を利用する「天然ガスDRF+Melter」を導入します。水素インフラ不足やプロセス確認がその理由ですが、上表から判るように、最終的にCCSを利用するなら天然ガスDRFの方が、エネルギー的に遥かに優位です。欧州にはCO<sub>2</sub>貯留に適した地盤も多く近隣でCCS処理が可能であり、1st Step+CCSが最終形になる可能性も十分あります。日本では、天然ガス価格や地盤の関係から、同じ選択肢は取り難いので重々留意が必要です。
- CCSを利用するケースとして、CCS付帯のブルー水素を製造する方法があります。しかし、ブルー水素には水素転換効率や輸送効率が変わるので、「CH<sub>4</sub>の水素転換+CCS+水素輸送」よりも「CH<sub>4</sub>直接利用+CO<sub>2</sub>輸送+CCS」(比較表に記載済)の方が、CO<sub>2</sub>処理量(=貯蔵量)やエネルギー効率の点から明らかに優位なため比較表から除外しています。
- CCSを利用する場合、「DRF+Melter」に限らずグリーン水素を利用すると、利用しない場合に比べて製造Gross熱(1次エネルギー換算消費熱量)が2倍以上に増加し、従来高炉で最大CO<sub>2</sub>排出量ののままCCS処理する方が、水素による削減努力をするよりもエネルギー的にもコスト的にも優位になります。しかし、CO<sub>2</sub>貯留能力は有限であり地域も限定され、実際のCCS利用は制限を受けるので、処理価格の高騰や政治情勢の影響を強く受け、CCS依頼できない国がCO<sub>2</sub>を排出し続ける可能性を否定できません。

### 結論 (ご提案)

SimpLEは、Step1(Ver.1)で、原料炭や余剰熱を減らすことで銑鉄製造のGross熱を増やさずにCO<sub>2</sub>を4~5割削減できます。Step 2 (Ver.2)で石炭の代りに循環資源である廃棄物を利用することで、Gross熱を実質25%以上削減\*6しながらCO<sub>2</sub>を合計8割削減できます。Step 3ではCCSを利用することで従来高炉よりGross熱を実質10%削減しながら、DAC不要でCO<sub>2</sub>を合計13割削減できます。

直接還元法を利用したCO<sub>2</sub>削減プロセスは、CCSを利用してもCN達成にはSimpLEの2倍以上のGross熱が必要であり、Gross熱においては「従来高炉+CCS」が次善のCO<sub>2</sub>削減対策となります。しかし、たとえCCS処理のエネルギー負担が比較的小さくても経済負担は大きく、CCS処理費用をCO<sub>2</sub> 1t当り100\$と低めに仮設定しても、カーボンニュートラルまでに必要な負担は、右図(Fig.1: Home Page「主要製鉄法のCO<sub>2</sub>排出量と経済性」P 9/10を参照)の黄色分になり、SimpLE(右図の②)= Step1、③= Step2)と比べると、大きな負担になります。

SimpLEは、CO<sub>2</sub>削減とエネルギー効率と経済性を3両立できる唯一無二のCO<sub>2</sub>削減策と言えます。

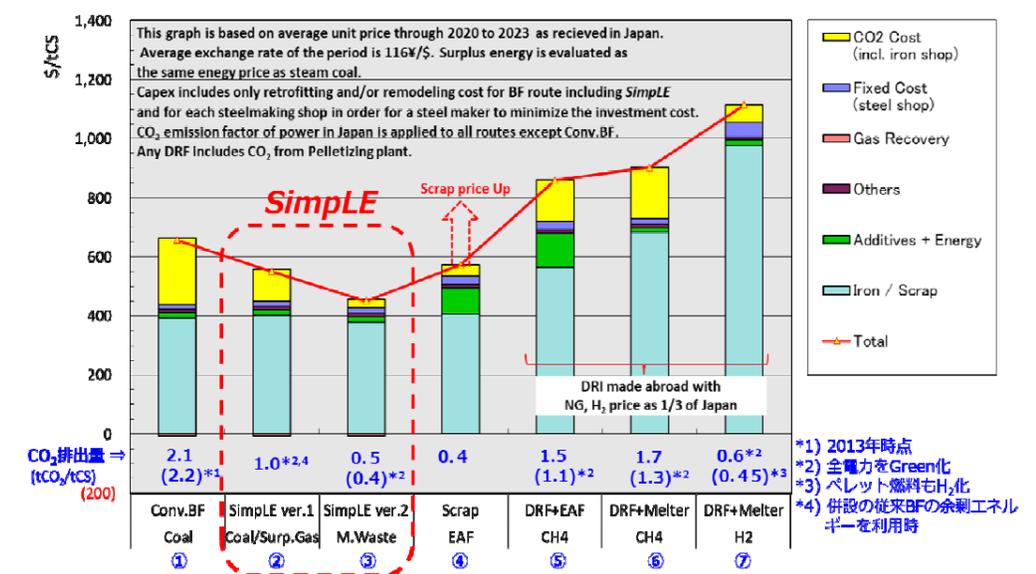


Fig.1 スラブ製造全部費用 (CP=100\$/tCO<sub>2</sub>)

\*1) 2013年時点  
\*2) 全電力をGreen化  
\*3) ペレット燃料もH<sub>2</sub>化  
\*4) 併設の従来BFの余剰エネルギーを利用時