

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 (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。

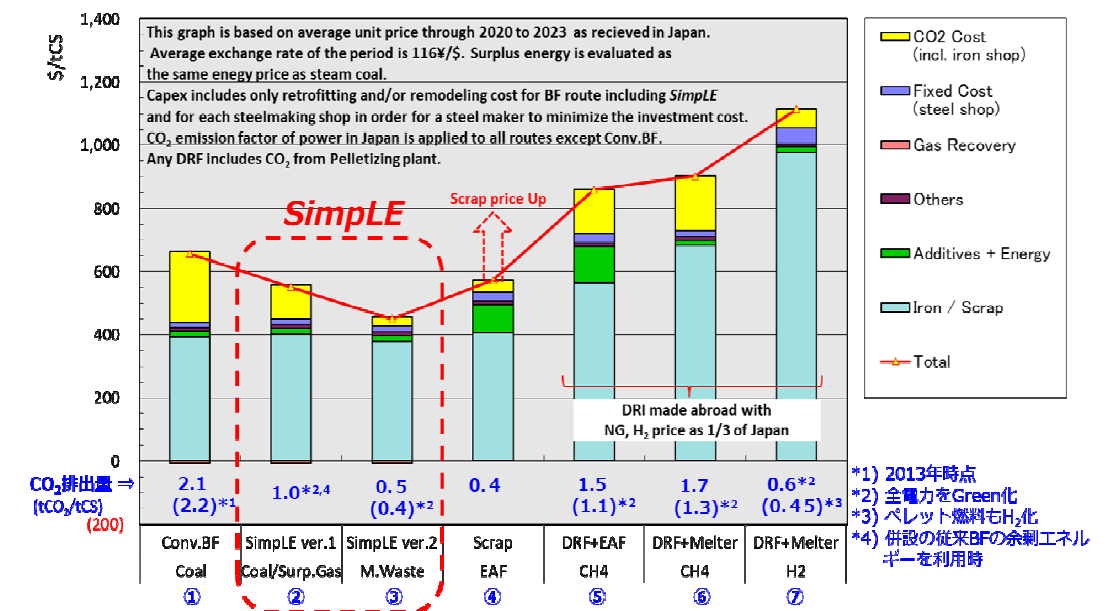


Fig.1 スラブ製造全部費用 (CP=100\$/tCO<sub>2</sub>)

\*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