

# 石炭ガス化複合発電(IGCC)について

2015年4月21日

荒木 成光

## 1. IGCC の定義と原理

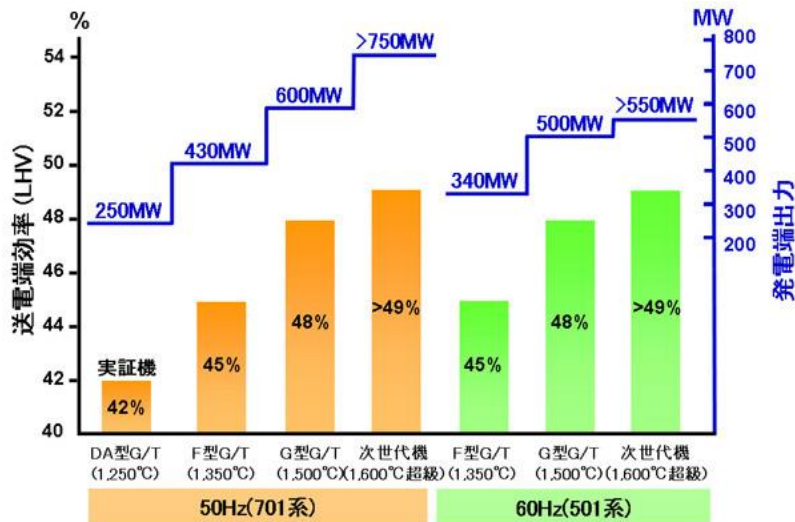
### (1)IGCC の定義

IGCC は、Integrated Gasification Combined Cycle の頭文字をとったもので、通常「ガス化複合発電」と呼ばれている。燃料(原料)としては、石炭に限らず重質油等を用いる場合もある。石炭ガス化複合発電の場合を特定して ICGCC と呼ぶ場合もある。

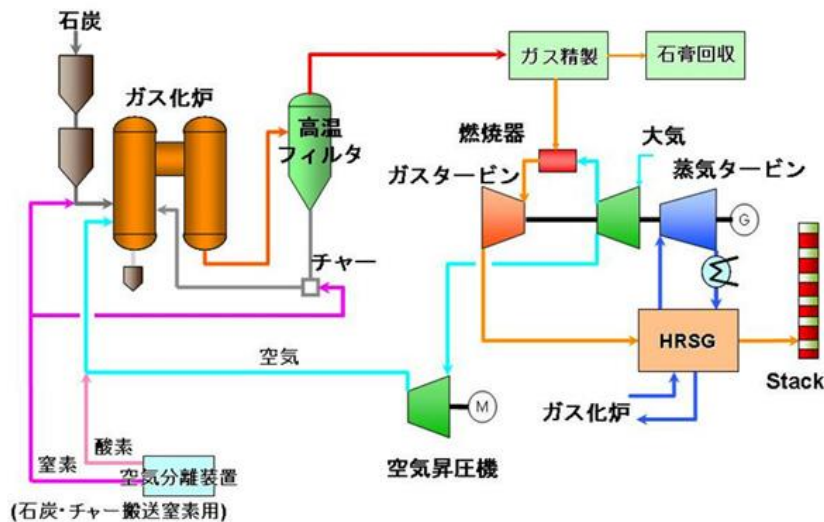
### (2) IGCC の特長

IGCC は、燃料(原料)を高温でガス化・ガス精製したのち、ガスタービンで燃焼・発電し、さらに後置の排熱回収ボイラにより蒸気を発生させ発電するため、在来の単純な微粉炭火力に比べてプラントの熱効率が一段と高くなるとともに、温排水量も30%程度減少する。

([https://www.mhi.co.jp/products/category/integrated\\_coal\\_gasification\\_combined\\_cycle.html](https://www.mhi.co.jp/products/category/integrated_coal_gasification_combined_cycle.html))



### (3) IGCC システム



## 2. IGCC の要素

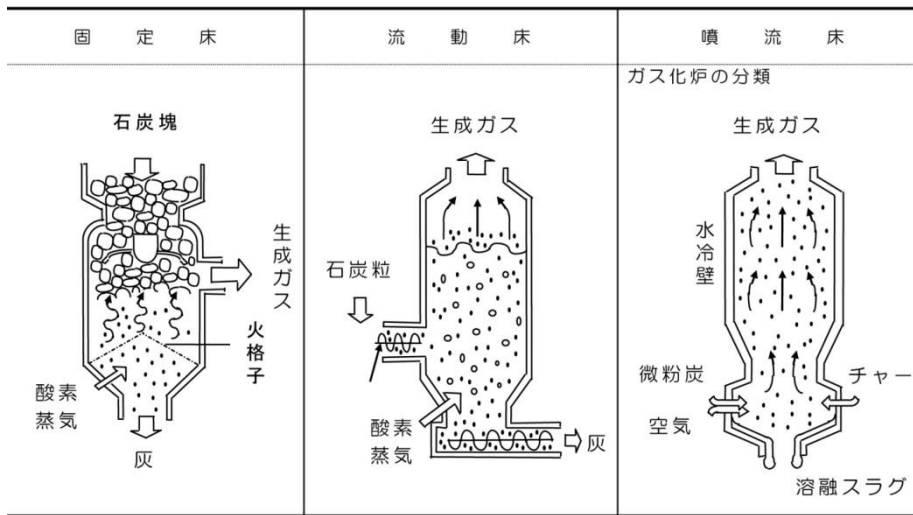
### (1) ガス化炉

#### a. ガス化炉の分類

石炭のガス化は、まず、部分ガス化と全量ガス化に分けられる。部分ガス化は、原料炭のコークス炉における乾留による石炭ガス及びコークス製造の目的でガス会社や製鉄所においてふるくから商業化されており、現在も、都市ガスのLNG化などにより数は減少したが、製鉄所などでは稼働している。

IGCC と組み合わせるべき石炭ガス化技術には、安価な一般炭を全量ガス化できることが要求される。

石炭ガス化炉は、通常、炉内における石炭粒子挙動によって分類され、固定床ガス化炉、流動床ガス化炉、噴流床ガス化炉の3方式に分けられる。固定床ならびに流動床ガス化炉は、都市ガス製造用あるいは化学原料製造用として古くから開発が進められ、現在でも商用機として使用されている。一方、発電用としては、大容量化が容易で、負荷追従性に優れた加圧型の噴流床ガス化炉が適しており、現在、世界の発電用ガス化炉の主流となっている。噴流床ガス化炉は、高品位の瀝青炭だけではなく、亜瀝青炭、褐炭等の低品位炭、オリマルジョン、残渣油、石油コークス等石炭以外の低品位燃料にも適用できるものであり、その技術開発には燃料ソースの拡大といった面からの期待も大きい。



#### <固定床(別称:移動床)ガス化炉>

固定床ガス化炉は粒径 3~50mm の塊炭を用いる。石炭はロックホッパを通して供給され、水蒸気と酸素からなるガス化剤の上昇流に逆らう形で、上から下へ炉を貫通して移動する。その間に、石炭はまず乾燥され、次に乾留され、最後にガス化される。反応温度は 800~1000℃である。灰はプロセスのタイプに応じて固体または熔融状態で取り出される。このプロセスは比較的低い温度で進行するため、タールは低分子の生成物に変換することは出来ず、冷却時に凝縮する。固定床炉によるガス化では生成ガス中の化学的エネルギーの割合が大きくなり冷ガス効率が高い。

#### <流動床ガス化炉>

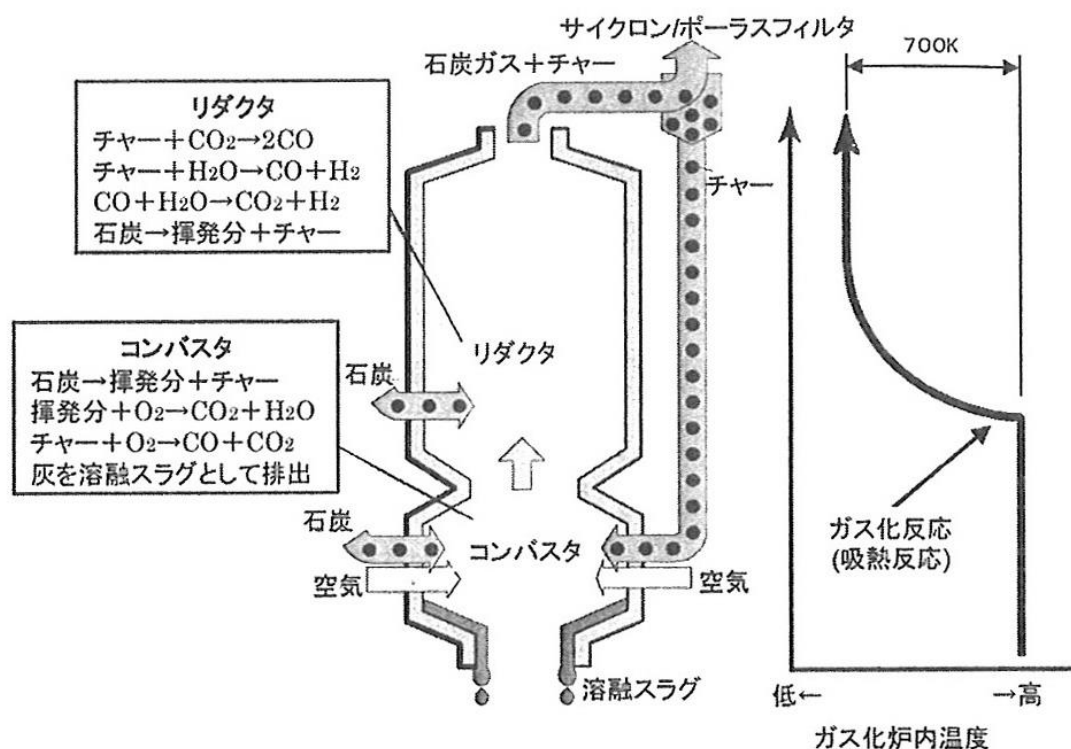
流動床方式の石炭ガス化炉では、平均粒径が 1~6mm の粉炭が使用される。ガス化剤である酸素ないしは空気、それに水蒸気により粉炭を流動化させ、その層内で CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> への変換が進行する。粒子の凝集現象(アグロメレーション)によって流動状態が乱されることがないように、ガス化温度は灰の軟化温度より低い 800~1100℃に保つ必要があるが、逆にガス化温度が低くなるとタールが発生してくる。このため高灰融点炭のガス化に適し、粉炭を用いることから石炭の粉碎動力も少なくすむ。ただし、流動床における石炭粒子の滞留時間が長いにもかかわらず、高い炭素転換率を達成するには高反応性の石炭を使用しなければならない。

#### <噴流床ガス化炉>

噴流床方式ガス化炉では、微粉炭火力と同様に平均粒径約 0.1mm まで石炭を微粉碎してガス化炉内に投入する。投入

された微粉炭は、酸素または空気と目的によっては少量の水蒸気をガス化剤として、各炭種の灰融点以上（1500～1800℃程度）の高温雰囲気下で石炭ガスに転換される。ガス化炉内で溶融した石炭灰は、炉底に流下し、水と直接接触し、急冷・破碎されてガラス状のスラグとして炉外へ取り出される。排出スラグ中有害物質の環境への溶出はほとんどなく、環境保全に対する評価は国内外とも高い。炉内でガス化されずに生成ガス中に残っているチャー（主に固定炭素と灰分から成る）は、ガス化炉出口に設置されたサイクロン、電気集塵器、セラミックフィルタ、水スクラバなどの集塵装置により回収した後、ガス化炉へ再投入される。

なお、噴流床ガス化炉は、微粉炭吹き込み方向によって、「旋回上昇流型」、「対向流型」及び「下降流型」に分類することも出来る。また、使用するガス化剤によって、「酸素吹きガス化炉」と「空気吹きガス化炉」に分類される。生成石炭ガスの発熱量は、酸素吹きガス化炉の場合は 2500 kcal/m<sup>3</sup>N 程度の中カロリーガス、空気ガス化炉の場合は 1,000～1,500 kcal/m<sup>3</sup>N 程度の低カロリーガスが発生する。しかし、酸素吹きガス化による中カロリーガス燃焼は、断熱燃焼温度が高いため天然ガス焚き時と同程度の NO<sub>x</sub> が発生する。このためガスタービン入口で空気分離装置で分離された N<sub>2</sub> を生成ガスと混合し、1,500 kcal/m<sup>3</sup>N 程度の低カロリーガスとした後、ガスタービンに導き、動力回収するとともに Thermal NO<sub>x</sub> 発生を抑制するシステム（インテグレーション技術）の採用が一般的である。さらに、石炭供給方法により、ドライフィード方式とスラリーフィード方式に分類する事もできる。



### (1) ガス精製

石炭のガス化反応は、石炭の部分燃焼であるため、ガス化炉に投入される酸素量は、完全燃焼に必要な理論酸素量の50%以下である。従って、炉内は、還元雰囲気中に保たれているため、石炭中の硫黄分は、燃焼時と異なりSO<sub>2</sub>にはならず、大部分は硫化水素(H<sub>2</sub>S)になり、一部は硫化カルボニル(COS)になる。これらの硫黄化合物の除去方法は、乾式法と湿式法に大別される。

#### <乾式ガス精製プロセス>

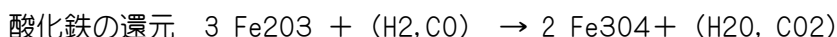
##### a. 乾式ガス精製の原理

石炭のガス化は、通常 1,000~1,500℃の高温で行われる。従って後流のガス精製は、高温で行われる程熱ロスが少なく、IGCCの総合熱効率は高くなる。しかし、装置材料の耐食性や吸収剤(金属酸化物)が硫黄分と反応して出来る硫化物の分解温度が比較的低いことなどの理由から、ガス化炉出口の高温ガスを直接ガス精製装置に導くことは出来ず、乾式(高温)ガス精製装置においても、通常、ボイラに類似したガスクーラで粗生成ガスを冷却(蒸気回収)した後の、400~500℃のガスを精製装置に導いている。ガス精製装置は、脱じん部と脱硫部に分けられる。乾式脱じん装置としては、「グラニューフィルター(砂濾過)」や「セラミックフィルタ」が開発されている。乾式ガス精製装置は、機構的には、固定床、移動床及び流動床があり、また、脱硫剤としては、現在 Fe や Zn の酸化物が考えられている。

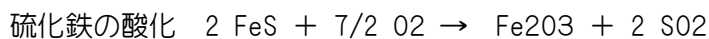
酸化鉄を吸収剤として用いた場合の主要反応は下記の通り。

(副産品として元素状硫黄を回収する場合)

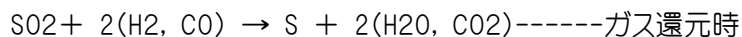
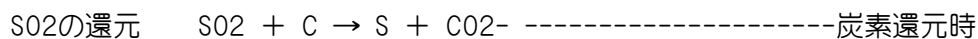
脱硫塔



再生塔



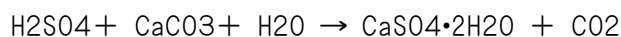
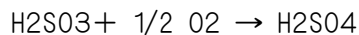
SO<sub>2</sub>還元塔



(副産品として石膏を回収する場合)

脱硫塔及び再生塔は、元素状硫黄回収時と同じ。

石膏製造(石灰石石膏法)



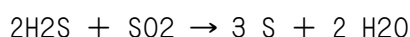
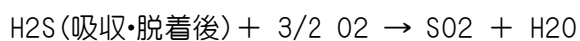
## b. 湿式ガス精製

湿式ガス精製の原理

石油精製業界などで実績のある方法で、ガスを低温の水や化学薬品で洗う(物理・化学吸収)方式であり、熱的にはロスが大きいですが、徹底したガス精製が可能である。湿式ガス精製法は、下表のように分類される。

装置は、やはり、脱じん部と脱硫部に分けられるが、脱じん装置としては、通常、サイクロンの後にガス冷却の目的もかねて水スクラバーを設置する。脱硫剤としては、いくつかの薬品が市販されているが、IGCC 用としては、硫黄化合物を選択的に吸収できる MDEA(メチル-ジエタノール-アミン)が有望視されている。吸収された硫黄化合物は、再生部で加熱脱着したのち、元素状硫黄、石膏、(場合によっては硫酸)として回収する。

(副産品として元素状硫黄を回収する場合)



(副産品として石膏を回収する場合)

吸収・脱着後の H<sub>2</sub>S を完全酸化で SO<sub>2</sub>に転換後、乾式の場合と同様の反応で石膏を回収する。

湿式ガス精製（酸性ガス吸収）法

化学吸収法					
	第一級アミン	第二級アミン	第三級アミン	熱炭酸カリ法	
1. 吸収溶液 名称及び化学式	MEA Monoethanol amine OH-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -NH <sub>2</sub>  DGA Diglycolamine OH-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -O-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -NH <sub>2</sub>	DEA Diethanol amine (OH-CH <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -NH  DIPA Diisopropanol amine (CH <sub>3</sub> -CHOH-CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -NH	MDEA Methyldiethanol amine (OH-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> -N-CH <sub>3</sub>  TEA Triethanolamine (OH-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> -N	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> aq + アミン	
2. 運転条件					
吸収塔温度 °C	38~77	32~54	40~85	32~138	
吸収塔圧力 kg/cm <sup>2</sup> g	< 70	< 70	< 77	7 ~ 70	
H <sub>2</sub> S/CO <sub>2</sub> 選択性	低	中	高	低	
精製ガス濃度 H <sub>2</sub> S CO <sub>2</sub>	数 ppm~数十 ppm 数 ppm~数十 ppm	同左 数百 ppm	同左 部分除去	同左 数十 ppm	
3. 適用例	製油所ガス 天然ガス 水素製造装置	製油所ガス	製油所ガス 天然ガス 石炭ガス化	水素製造装置	
物理化学吸収法			物理吸収法		
1. 吸収溶液 名称及び化学式	スルフォラン+アミン Tetrahydrothiophene dioxide + AMINE C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> S + amine  (Sulfinol)	Methanol + MEA  CH <sub>3</sub> OH+MEA  (Amisol)	Methanol  CH <sub>3</sub> OH  (Rectisol)	Dimethylether polyethyleneglycol CH <sub>3</sub> O(CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> -OCH <sub>3</sub>  (Selexol)	N-methyl-pyrrolidone  C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> ONCH <sub>3</sub>  (Purisol)
2. 運転条件					
吸収塔温度 °C	43	38~46	-40~-57	-7 ~ 38	27 ~ 43
吸収塔圧力 kg/cm <sup>2</sup> g	<70	>28	21~141	21 ~ 70	>35
H <sub>2</sub> S/CO <sub>2</sub> 選択性	中		中	高	高
精製ガス濃度 H <sub>2</sub> S CO <sub>2</sub>	数 ppm~数十 ppm 数十 ppm		数 ppm	数 ppm	数 ppm
3. 適用例	天然ガス 石炭ガス化		製油所ガス 水素製造装置	天然ガス 製油所ガス 石炭ガス	天然ガス

### 3. IGCC システム

#### (1) 開発の経緯

2001年6月現在

ガス化方式	1970	1975	1980	1985	1990	1995	備考
電中研/三菱炉 [IGCC実証機] [空気吹き噴流床]				電中研横須賀 2t/日	勿来 200t/日PP	実証炉FS	2007年に実証炉運用予定
日立炉 (EAGLE) [酸素吹き噴流床]			1t/日炉(日立)		50t/日PP(HYCOL)	若松EAGLE PP	2002年に、EAGLE試験開始予定
CE炉 [空気吹き噴流床]	70年代初頭から発電用ボイラの基礎技術を基に開発に着手	ウインザー 120t/日常圧炉PP		加圧型検討		..... スプリングフィールド(米) 600t/日DP	スプリングフィールド計画は、経済情勢を理由に中止 タンバ：1996年運用
テキサコ炉 [酸素吹き噴流床]	モンテペロー 15~25t/日PP 50年代から開発した重質油ガス化技術を基に開発		オーベルハウゼン 150t/日(プロセスガス供給)	クールウォータープロジェクト(米) 1000t/日DP		タンバ(米) 2300t/日CP	
シェル炉 [酸素吹き噴流床]	50年代初頭から開発に着手	アムステルダム(蘭) 6t/日PP ハーブルグ 150t/日PP		ディアパーク(米) 250t/日DP		ブナム(蘭) 2000t/日CP	ブナム：1998年1月より商用運転開始
ダウ炉 [酸素吹き噴流床]	70年代初頭から開発に着手	ブラクマイン(米) 12~35t/日PP		ブラクマイン(米) 1600t/日DP	ブラクマイン(米) 2400t/日CP	ワバッシュリバー(米) 2600t/日CP	ワバッシュリバー：商用運転中
ブレンフロー炉 [酸素吹き噴流床]	40年代から開発に着手したコッパーストチェック法を基に開発	ハンブルグ(独) 150t/日PPでシェルと共同開発		フルステンハウゼン(独) 48t/日PP		プルトヤノ(西) 2600t/日CP	プルトヤノ：1998年運用
HTW炉 [流動床]	20年代から開発に着手されたウィンクラ一法を基に開発、常圧150t/日規模は56年に試験開始		Freohen(独) 34t/日PP	Berrenrath(独) 720t/日DP		..... コブラ計画 ケルン(独) 3600t/日CP	コブラ計画は中止。チェコ400MW IGCC計画有り(2003年運用予定)
ルルギ炉 [酸素吹き固定床]	ルーネン(独) 360t/日PP 58年からPP試験開始		ウェストフィールド(英) 350t/日PP	ウェストフィールド(英) 600t/日DP			ケンタッキー(米) BGL 400MW IGCC計画有り(2002年運用予定)

PP：パイロットプラント  
 DP：実証プラント  
 CP：商用プラント（補助を受けて建設され、実証運転の後商用運転を行うものも含む）  
 →：現在でも炉が存在し、試験運転を行っていると思われるもの

#### IGCC用ガス化炉開発の歴史

注) クールウォーター・プロジェクト(米国カリフォルニア州において、SCE、Texaco、GE、Bechtel Power、JCWP(東電、電中研、東芝、IHI の共同体)が共同で120,000kW の実証プラントを建設、運転したプロジェクト)については、  
<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=GS-6806> 及び燃料協会誌 vol64,12,p p973~982) 参照。

#### (2) 我国における研究開発

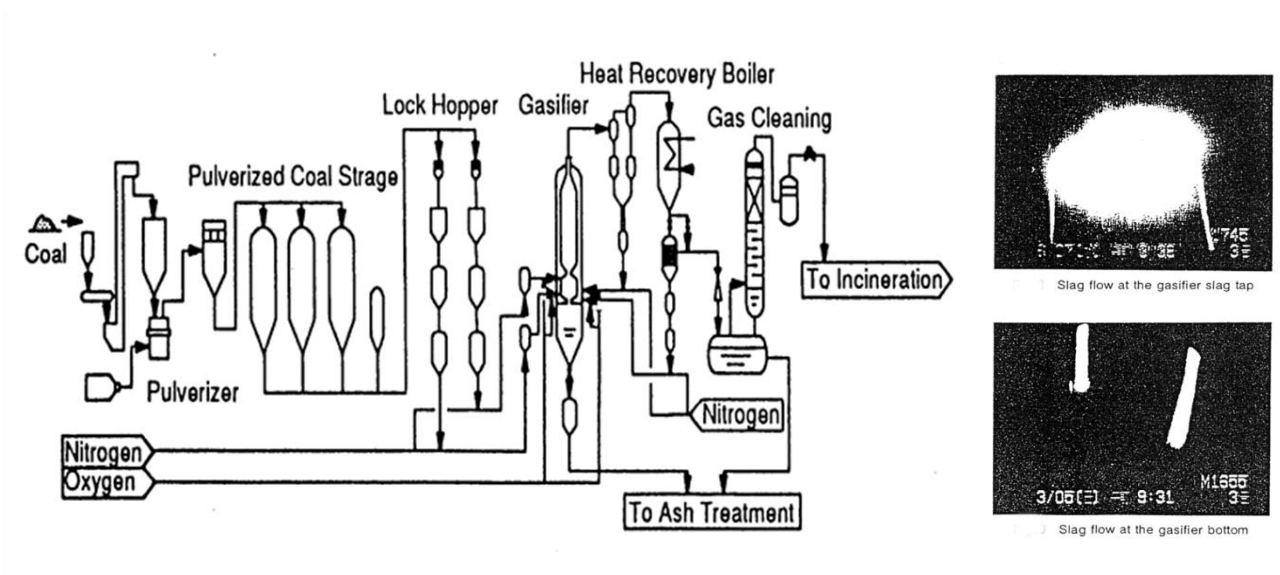
##### a. パイロット・プラントによる研究開発

(参照:「200t/日 石炭ガス化発電パイロットプラントでの研究成果」、日本エネルギー学会誌、75(9) 1996.09 839~850、<http://www.s-araki.com/KOREA.htm>)

1986年度より通産省の補助のもとに NEDO からの委託をうけて、9電力会社、電源開発、電力中央研究所の11法人で構成する石炭ガス化複合発電技術研究組合が、常磐共同火力 勿来発電所構内にパイロット・プラントを建設して研究開発を実施した。

## パイロットプラントの概要

出力	125MW (ガスタービン)	
石炭使用量	200t/d	
方式	ガス化炉	加圧二段噴流床ガス化炉 (空気吹き)
	ガス精製	(脱硫) 酸化鉄粒子による乾式ガス精製 (脱塵) 合成濾過材による充填層
	ガスタービン	1,260℃



### <パイロットプラント試験での問題点と成果>

- ・ ガス化炉：スラグホールの詰まりや熱交換器のスラッシングが起こったが、ガス化炉改造によって問題が完全に解消できた。炭素転換率は目標を上回 99%以上、冷ガス効率 は 65～70%であった。なお、ガス化炉は“空気吹き”であるが、GT での安定燃焼確保のため、若干の酸素富化を行うとともに、豪州炭の場合には灰融点降下剤(フラックス)として、石灰石粉を石炭に混入した。
- ・ ガス精製:通常運転時(入口濃度:400～1,400ppm)の装置出口濃度は、化学平衡値に近い 30ppm 前後であったが、適正温度域を外れる起動停止時等には、90ppm 位まで上昇した。脱塵性能はガス化炉出口濃度が設計値(3g/m<sup>3</sup>N)を下回ったこともあり、出口濃度は GT 側から要求される 30mg/m<sup>3</sup>N を大きく下回り、2mg/m<sup>3</sup>N 程度となった。
- ・ ガスタービン：燃焼器の安定燃焼下限界が、800kcal/m<sup>3</sup>N 程度(ガス化炉出口で約 950kcal/m<sup>3</sup>N に相当)であることが把握できた。

b. 実証機による運転試験(参照:石橋喜孝 2014.2.7 日本計画研究所講演、

[http://www.joban-power.co.jp/igccdata/research/pdf/doc/201402\\_Nipponkeikakukenyuujo.pdf](http://www.joban-power.co.jp/igccdata/research/pdf/doc/201402_Nipponkeikakukenyuujo.pdf))

実証機の仕様と実績

		仕 様	実 績
出 力		250MW	250.0MW GT 出力 124.2MW ST 出力 125.8MW/m <sup>3</sup> N
石炭使用量		約 1,700t/日	約 1,700t/日
方 式	ガス化炉	空気吹きドライフィードガス化	空気吹きドライフィードガス化 冷ガス効率 75.3% 炭素転換率 99.9% 生成ガス発熱量 5.2MJ/m <sup>3</sup> N *
	ガス精製	湿式ガス精製(MDEA) + 石膏回収	湿式ガス精製(MDEA) + 石膏回収
	ガスタービン	1,200℃級	1,200℃級
目標熱効率	発電端(LHV)	48%	
	送電端(LHV)	42%	42.4%
環境特性	SOx 排出濃度	8 ppm	1 ppm
	NOx 排出濃度	5 ppm	3.4 ppm
	ばいじん排出濃度	4 mg/m <sup>3</sup> N	0.1 mg/m <sup>3</sup> N 以下

\* 生成ガス組成 C0 30.5%  
C02 2.8%  
H2 10.5%  
CH4 0.7%  
N2 他 55.5%

また、このプラントは実証試験期間中に2238時間の連続運転記録を達成した。さらに、2013年2月の商用  
転用後には、3,917時間の連続運転を達成している。



#### 4. 各国の現状

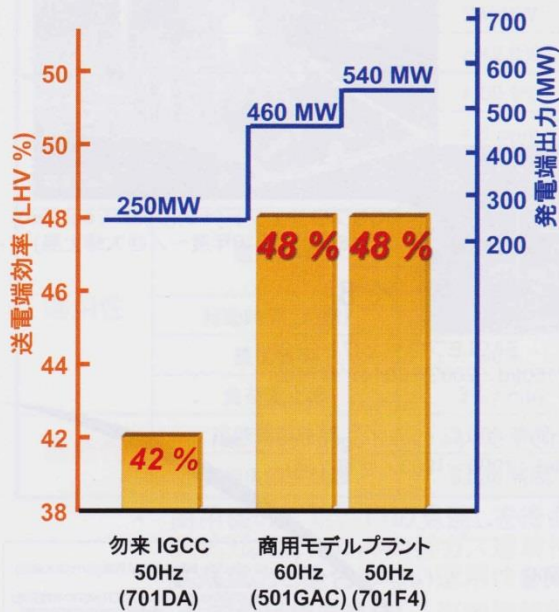
#### 各国の運転中並びに計画中の IGCC

2013.11.20 現在

No	国名	プロジェクト名	出力 (MW-net)	ガス化炉	運転開始	状況	原料
1	オランダ	Buggenum	253	Shell	1994	運転中（商用）	石炭
2	米国	Wabash River	262	E-Gas	1995	運転中（商用）	石炭/ペトロコークス
3	米国	Polk County	315	GE	1996	運転中（商用）	石炭
4	スペイン	Puertollano	335	Prenflo	1998	運転中（商用）	石炭
5	イタリア	ISAB Energy	512		1999	運転中（商用）	石油残渣
6	イタリア	SARLUX	551		2000	運転中（商用）	石油残渣
7	イタリア	api Energia S.p.A	287		2001	運転中（商用）	石油残渣
8	日本	根岸	342	GE	2003	運転中（商用）	石油残渣
9	日本	勿来	250	三菱重工	2007	運転中（商用）	石炭
10	中国	GreenGen	250	TPRI	2012	運転中（商用）	石炭
11	米国	Edwardsport	630	GE	2013	建設中（商用）	石炭
12	米国	BP Hydrogen Power	630	GE	2015	計画	石炭
13	米国	Lima Energy	540	E-gas	2013	計画	ペトロコークス
14	米国	Mesaba Energy	530	E-gas	2013	計画	石炭→天然ガス
15	米国	Taylorville Energy	602	Siemens	2013	計画	石炭→天然ガス
16	韓国		300	Shell	2014	建設中（実証）	石炭
17	英国	Powerfuel's Hatfield	900	Shell	2016	2016 まで保留	石炭
18	オランダ	Magnum	1200	Shell	(2013)	中止	石炭/天然ガス
19	米国	Taylorville	630	GE	(2014)	中止（環境問題）	石炭
20	米国	Cash Creek	630	GE	2015	計画中	石炭
21	ドイツ	RWE	450	未定	(2014)	中止	褐炭
22	米国	Clean Hydrogen	500		2014	???	石炭
23	米国	PA Energy	900	Prenflo	2015	計画	石炭
24	米国	Texas Clean Energy	400	Siemens	2015	建設中	石炭
25	韓国	Taejan#1	300	Shell	2016	計画	石炭
26	米国	Sweeny	680	E-gas	2016	環境評価中	ペトロコークス
27	米国		583	KBR	2016	計画	褐炭
28	米国	HydrogenEnergy	390	三菱重工	2015	FS	石炭
29	豪州	Wandoan	400	GE	2015		石炭
30	日本	大崎クールジエン	170	日立	2017	建設中	石炭
31	日本	福島IGCC	480x2	三菱日立	2020	計画中（別添参照）	石炭

参照-----([http://www.jcoal.or.jp/coaldb/tech/cct/ecopro/igcc\\_3.html](http://www.jcoal.or.jp/coaldb/tech/cct/ecopro/igcc_3.html))

# IGCC商用機



項目	主要仕様	
	60Hz	50Hz
石炭	瀝青炭	
発電出力 発電端	460 MW	540 MW
送電端	410 MW	480 MW
ガス化炉 酸化剤	空気 (酸素富化)	
給炭方式	乾式給炭	
ガス精製方式	湿式 化学吸収法 (MDEA) (Methyl Di-ethanol Amine)	
ガスタービン	M501GAC × 1 (1 on 1)	M701F4 × 1 (1 on 1)
送電端効率 (LHV)	48 %	

Note: 発電出力・効率等の性能数値については、サイト条件や石炭性状等により異なります。

# 福島復興IGCCプロジェクト



## 主な仕様

定格出力	540 MW (発電端) 480 MW (送電端)
ガス化炉	空気吹き乾式給炭
ガス精製	湿式化学吸収法(MDEA)
ガスタービン	M701F GT (1 on 1)
プラント効率	48% (LHV, 送電端)

- ◆ 最新式のガスタービン採用により効率向上
- ◆ 最新のUSC発電設備よりもCO2排出量を低減
- ◆ 高水分低品位炭など幅広い炭種適合性
- ◆ 勿来250MW IGCC発電設備で実証された高信頼性システム (PHOENIX IGCC) を採用

