

ガス化炉の概要紹介

合同会社 バイオ燃料

平井 晃

バイオマス（廃棄物を含む）の発電用途に対する①ガス化と燃焼炉、熱分解炉等との違いを先ず簡単に説明します。次にガス化装置、特にその前工程の②ガス化方式の紹介を行い、③各ガス化、熱分解炉の概要説明、商用装置（未商用も一部含む）を広く紹介し、装置の特徴、使用可能な原料とその結果得られる合成ガスの特徴（熱量、水素濃度、用途先等）を順次説明します。併せて、ガス化炉の後工程である④合成ガス精製法、及び必要な⑤ガスエンジン発電機、ガスタービン発電機とその特徴等も全般的に紹介します。更に原料の種類（バイオマス、各廃棄物類）に対応する⑥前処理設備等も簡単に紹介し説明します。更に、より詳しい関連情報のリンク先も必要性に応じ参照可能です。

1. ガス化炉と燃焼炉（ボイラー）、熱分解炉との違い？

ガス化炉は、原料（木質、バイオマス、廃棄物、他）を熱化学的な分解処理により、主に固体原料(液体・気体原料も可)を気体のガス燃料へと効率的に変換する熱分解・ガス変換処理法です。当初、原料は原則固体ですが、温度の上昇に伴い、水分蒸発、続いて凡そ 250℃以上で原料の半炭化/炭化が進み、合成ガス量は徐々に増加します（600℃～）。逆にバイオ油（高沸点成分）量の割合は徐々に減少します。合成ガス成分も低中温時はメタン、エタン、酸類等も比較的多く含まれますが、温度上昇に伴いガス化分解領域（700℃以上）では、これら成分は徐々に再分解・減少し、高温域（1000℃以上）では水素成分が最大化し（ガス量も）、Tar 油留分は殆ど分解され消滅（Tar-Free）します。一方、合成ガスの主成分でもある CO ガスは、水分（蒸気）量、反応諸条件（酸化・還元）、等に影響されますが、温度上昇に伴い通常減少します（ガス化温度 700~720℃で H₂/CO=1.0 前後）。下記テーブルは発電用途向けに、特に着目し、バイオマス（含む廃棄物類）原料の各種熱変換・処理方式を簡単に纏め、その主な差異をまとめてあります。

先ずは【熱分解処理タイプ】と【発電機】との関係説明です。

発電機の回転エネルギーを（最終的に）蒸気タービン駆動力で得る燃焼炉（項目-1 & 2 の蒸気ボイラー）、合成ガス（水素/CO・N₂/CO₂,他）をガスエンジン（高熱量ガスならガスタービンも）発電の他、水素製造、化学合成用途でも使える炭化炉+蒸気改質炉構成の2段（2-Step）ガス化蒸気改質炉（Steam-Reforming）（項目-3）、熱分解炉（低中温、500℃前後）により、得られるバイオ油・酸類(Bio-Oil)を使い、油ボイラー蒸気発電を、或いは油ガスタービン発電を行う低中温・熱分解炉（項目-4）、合成ガスエンジン（ガスタービン）発電を主に行う高温熱分解炉、及び熱分解ガス化炉（項目-5 & 6）とに分類します。炉タイプにより、合成ガス（水素、CO、CH₄,CO₂,N₂ 等）割合もガス発生量も、及びバイオ油（Tar）の成分も量も異なる各熱分解ガス化炉タイプが存在します。

項目-3 の蒸気改質装置

(Steam-Reforming)を除いた炭化炉（中低温）単独では、その名前の様に固体燃料（炭化/半炭化、Bio-Coal）の製造（

<https://biofuels.co.jp/page40-2.html>）が主目的であり、石炭炊き蒸気ボイラ

No.	熱処理タイプ (空気/蒸気等の供給)	空気/蒸気供給量 (酸化剤)	合成ガス	タール分	炭	灰	微粉	NOx	排熱	蒸気 ボイラー (駆動)方式	発電機
1	燃焼蒸気ボイラー	完全燃焼に充分な 空気供給				△	○	◎ (除去設備)	○	◎	蒸気タービン
2	ガス化+ガス燃焼ボイラー (Hot-Syngas Gas Biler)	部分燃焼+完全燃焼	(◎) 合成ガス @Hot-Gas		△		○	○		◎ (ガス燃料)	蒸気タービン、 ガスタービン
3	炭化炉(+蒸気改質) (Biocoal or Syngas with Steam Reformer)	空気供給遮断 (原料含有酸素分)	◎ (高濃度水素)	(◎)	(◎)	○	△		(要蒸気)		ガスエンジンガスタービン (高濃度水素対応)
4	熱分解炉(低中温) (for Char,Biooil)	空気供給遮断 (原料含有酸素分)	△ (自己加熱)	(◎)	◎ (外販も)		△			○ (油ボイラー)	蒸気タービン (Bio油対応)
5	(超)高温・熱分解炉 (Ultra-High Temperature)	空気供給遮断 (原料含有酸素分)	◎ (高濃度水素)		△ (溶融)		△		○ (低圧蒸気副生) (乾燥用)		ガスタービン、ガス・ エンジン(高水素対応)
6	ガス化炉(各タイプ) (Syngas as Main Product)	空気供給を制限 (部分燃焼)	◎ (低~高熱量)	一~◎	△		○		△ (低圧蒸気副生) (乾燥用)		ガスエンジン、ガス・ タービン(高エネルギー)

一の混焼用・炭化燃料（石炭代替）、或いはガス化原料用（チップ・ペレット代替の半炭化原料）等の用途向けとなります。（半）炭化燃料は、特にバイオマス原料を海外から輸入し利用する場合、チップ・ペレット材に比べ多々優れた特性があります（撥水性、高発熱量、Tar 副生なし、容易な再粉碎性/ブリケット化）。同様に項目-4 は、主に Bio-Oil 製造用であり（Bio-Oil 収率の最大化を目指す高性能 Fast-Pyrolysis 熱分解法もあり：<https://www.btg-bioliquids.com/our-technology/>）、合成燃料の製造が主目的です。発電用途の例は、限定的ですが、重油ボイラー混焼用、特殊な（腐食対策済）ガスタービンであれば、燃料用途にも使えます。上記添付テーブルの【空気/蒸気供給量】の補足説明です。バイオマス（木質、廃棄物、廃プラ等）原料（A）に対し、化学的に必要当量（以上）の空気（酸素、酸化金属等の酸化剤）（B）を供給し、原料の部分燃焼（酸化反応）による高温状態下、バイオマス原料を同一炉内で熱分解⇒液化（油化）⇒気化（熱分解ガス化）し、その気体燃料（合成ガス）を（ほぼ完全）燃焼させる場合を燃焼ボイラー（項目-1）と言い、理想的には熱エネルギー+灰+排ガス（CO₂,H₂O,N₂）等が得られま

す。その改良型である合成ガス製造とガスボイラー燃焼を別工程に分割し最適化した方式（項目-2）です。同様に B を（完全に）遮断した状況で、外部加熱（外部電力・燃料、内部ガス・バイオ油の燃焼熱等）による高温下、熱分解を行う方式が熱分解炉（項目-3、4、5）です。項目-5【（超）高温熱分解炉】では、特に合成ガスの主成分は**高濃度水素**、Tar-Free でもあり、項目-3 & 4 の様に【熱分解（Pyrolysis）炉】と云わず、ガス化（Gasification）炉、或いは熱分解ガス化（Pyrolysis-Gasification）炉とも云いガス化炉と特に区別しない場合もあります。因みに、米国エネルギー省は、次の様にガス化を定義しています。「炭素質材料の化学変換を通じて合成ガス（燃料、化学物質、または電力の生産に使用できる汎用品）を生産することを目的として設計および運用されるプロセス技術」（The US Department of Energy defines gasification as “A process technology that is designed and operated for the purpose of producing synthesis gas (a commodity which can be used to produce fuels, chemicals or power) through the chemical conversion of carbonaceous materials”）

尚、バイオマス原料（代表としてグルコースは $C_6H_{12}O_6$ ）は、その分子内に酸素分が含まれますので、極少量の燃焼=酸化・発熱反応（その結果、 CO, CO_2, H_2O の副生）が起こります。廃プラ原料（例、ポリエチレン： C_nH_{2n+2} ）は酸素分を高分子内に含まず、自己酸化反応は全く発生しません。何れも同じ類似熱分解メカニズムですが、違いは反応温度と合成ガス量、タール油量、炭の量、品質等です。項目-6 の**ガス化（炉）**は、通常 B を制限した状態下での熱（化学ガス）分解法であり、部分燃焼による高温・ガス化熱分解状態となります。項目-2 は、前工程のガス化炉（項目-6）＋後工程のガス燃焼炉（ガスボイラー）（項目-1）との組み合わせ法です。ガス化の化学反応は何れも酸化（部分燃焼）・還元元素反応の多数組み合わせた化学反応です。ここでは説明を省略します。必要性があれば、下記の PMX ガス化装置の説明書【ガス化の理論の概要】（https://www.biofuels.co.jp/PMX_日本語製品カタログ.pdf）、他の文献情報を参照下さい。

ガス化と熱分解は、空気（酸素）供給量の有無、或いは供給量の差異であり、空気供給量を（ほど）完全に遮断すれば、熱分解（Pyrolysis）反応が起こり、充分供給すれば、燃焼反応（Incineration）となり、その中間が通常のガス化（Gasification）反応です。燃焼（ボイラー）の様に固体燃料から熱エネルギーを 1 段で直接得る代わりに、ガス化は使い易い合成ガス燃料の製造を行う 1 段、エンジン等でエネルギーを最終利用する **2 段エネルギー変換法**とも云えます。

纏めですが、合成ガス（Syngas）の製造はガス化の項目-6、蒸気を加え合成ガスを製造する項目-3（蒸気改質炉）、及び項目-5 の（超）高温熱分解炉（**高濃度水素**を含む合成ガス）等、がガス化分解操作の中心ですが、項目-4（通常は液体燃料化、合成ガスも一部）でも多少の合成ガスは製造可能です。直接燃焼方式の項目-1 は、蒸気熱利用（発電）、或いは蒸気タービン発電用途であり、項目-2 は、2 段燃焼（ガス化+ガス燃焼ボイラー）方式であり、通常のボイラー燃焼炉方式の改良型です。ガス化炉に加え、別と合成ガス・ボイラーが必要ですが、主用途は燃焼ボイラーと同じで蒸気発生（+発電）です。ガス精製設備が含まず（微粉・炭除去のサイクロン設備は含む）、ガス化エンジン（ガスタービン）発電、**水素製造**等の用途利用は出来ません。

2. バイオマス（廃棄物）ガス化方式の紹介

各種**ガス化方式の商用装置**（含む、一部商用前のデモ状態装置）（前述の項目-3、5、6）とその規模、原料（種類、形状）、酸化剤、ガス化温度、含水率、冷ガス化効率の概要例を、下記テーブルに示します。加えて右側欄のガス化技術とその装置例（主に商用機）も列記します。より詳しい説明（主にブルー色の製品）は、弊社ホームページのガス化（<https://biofuels.co.jp/page2.html>）のページを参照下さい。弊社が現状取扱中のガス化発電装置の比較選択表は下記です。その特徴、制限、概略価格（単価）等を簡単に纏めてあります（<https://www.biofuels.co.jp/ガス化発電装置早見表.pdf>）。他のガス化炉も出来る限り、リンク先も示してあります。これらの諸条件に加え、設備投資額、技術、実績等を考慮して最善の**ガス化炉装置の選定**が出来ます。全ての要望を満たす万能機はありません。下記添付のテーブルは、比較的好く知られた**ガス化方式**、及び**装置例**となります。ガス化装置は同じ分類でも、メーカーにより用途、プロセス・フロー、使用可能原料、装置規模、更に説明を省きますが装置材質、操作性・制御法（自動化）、等々の違いもあります。この分類以外に属するガス化方式、或いは記載されていないガス化炉メーカーも多々あります。例えば、①ガス化炉（2 炉）切り替えバッチ方式、原料は完全に静止状態、代わりに空気投入口がガス化の進展に伴い連続的移動する（殆ど、通常のガス化炉は固定の場所）ガス化炉（Wild-Fire:<https://www.wildfireenergy.com.au/>）、②スラッジ類に対し、湿式（～70%水分）・臨界圧での高圧ガス化（Super Critical Water Gasification, 等）技術による水素、メタンガス製造プロセス（<https://www.entsog.eu/hydrothermal-gasification>）、。。等、..いろいろ取り組みはありますが、多くは、未だパイロット、小規模規模程度でもあり省略します。一方、類似の主にスラッジ類、家禽類の糞等の原料を、③熱分解技術で効率的にガス化する Ecoremedy（<http://ecoremedyllc.com/>）の FLG (Fluid-Lift-Gasification) 技術もあります。その他、EU/USA 諸国のガス化状況報告（[Hrbek-Gasification-developments-in-Europe-USA.pdf](http://hrbek-gasification-developments-in-europe-usa.pdf) (ieabioenergy.com))、新タイプのガス化技術紹介記事（[New Publication - Emerging Gasification Technologies for Waste & Biomass | Bioenergy \(ieabioenergy.com\)](#)）や、過去に火災・爆発事故等を起こした、

或いは破産した等のガス化炉（④国内 T 社の炭化炉＋蒸気改質炉）も省略してあります。以上、興味があればネット検索、別途可能なら直接メーカー側にお問い合わせ下さい。

No.	Gasification-Type	規模	原料タイプ	酸化剤	反応温度 (°C)	含水率 (%w/o-Dryer)	冷ガス化効率 (%)	弊社取扱(可)製品(*) (国内他社製品)例
1	Down-Draft (Fixed-Bed)	超小型、小型	(チップ)、ペレット	空気	950~1100	5~15	低中効率	VEE,APL,GRESO,RESET,LOCK,Gasiflex, BIOEARTH,(Spanner,Volter,ESPE,BioMAX,etc)
2	Up-Draft (Fixed-Bed)	中型、大型	チップ、(ペレット)	空気 (+蒸気)	850~1000	20~40	最高効率	PMX,FPT,OMNI(Gas-Plasma),Nexterra, ReGaWatt,(URBAS,B&W-Volund)
3	Twin-Fire (Up/Down-Mixed)	小型、中型	チップ、(ペレット)	空気、(酸素)	950~1000	5~15	高効率	Bio&Watt,PMX-Twin Fire, BR-Energy,(AHT,)
4	Multi-Step (Hybrid/No-Tar)	小型、中型	チップ、(ペレット)	空気	950~1100	5~15	最高効率	A-Tec,EEE,LIPO,TCP,INSER, (Wood-Roll,Concord-Blue,Ways2H,Xylowatt)
5	Fuidized Bed (Bubbling)	大型、超大型	チップ、ペレット	空気 (蒸気)	850~1000	20~50	高効率 (TRI:高熱量ガス)	S-Nova,EQTec,WtEnergy, Andritz-Carbona,(Burkhardt),TRI
6	Fuidized Bed (Circulating)	大型、超大型	極小チップ、粉体	空気、酸素	850~1000	20~30	中効率	PMX-Circulating,E-Green, Andritz-Carbona,Aries
7	Fuidized Bed (Dual-Column)	大型、超大型	チップ、ペレット	— (& 空気)	850~1000	5~40	高効率 (高熱量ガス)	Highbury,Verto,Synova,Taylor, Repotec(Gussing),VTT(for Comsyn)
8	Rotary-Drum	小型、中型	チップ、ペレット	—	850~1100	5~20	中高効率 (高熱量ガス)	GreenE,P-Power(Drum-Type), Env-Power,W2E,(Biogreen,中外炉)
9	Entrained (Down-flow)	中型、大型 (超大型@石炭ガス化)	極小チップ、粉体	空気、(酸素)	950~1200	5~15	高効率	UG Bioliq
10	Vortex (Up-flow)	小型、中型	極小チップ、粉体	空気	900~1000	5~30	高効率	VTX, (SynCraft)
12	Chemical Looping Hydrogen(Fe2O3-FeO)	大型+ (商業化中)	チップ (木質、農業廃棄物)	Metal(Fe) (+蒸気)	850-1000	5~30	高効率 (純水素)	RGH2 (Pure-H2 Production)
11	Chemical Looping Syngas(Fe2O3-FeO)	大型+ (Dual-Fluidized)	粉体 (木質、農業廃棄物)	Metal(Fe) (+蒸気)	750-850	5~30	高効率 (高熱量ガス)	Clara,@Demo (for Fuel/Chemical Synthesis)
13	High-Temp (Pyrolysis/Gasifier)	中型、大型	廃棄物チップ (RDF,廃プラ)	— (酸素(Sierra))	1000~1300 600~700(CHZ)	5~15	(中)高効率 (高熱量ガス)	CCC,DMG,CHZ&KUG,GWE Anergy,PyroCore,TorrGas,Sierra
14	Plasma(Gasif/Pyro) (Ultra-High-Temp)	大型、超大型	廃棄物チップ (RDF,廃プラ)	—	1500~2000	5~40	(中)高効率 (高熱量ガス)	SGH2(forH2),InEnTec,Cogent,AlterNRG, Pheonix-Engy,H2PRO&Enapter(Electrolyzer)

Note: ガス化炉製品紹介欄で、()内の機種、他社で国内導入済機種、黒文字()無し、海外製品、特に代理店未定、ブルー色: 弊社取り扱い機(代理店、或いは予定)

3. 各ガス化炉（熱分解炉）タイプの概念図・写真と簡単な説明

次に前項の各種ガス化炉（炭化・蒸気改質炉、（超）高温・熱分解炉を含む）タイプ毎に、図、テーブル、装置写真等を添付し、その特徴等を概説します。より詳細情報、関連情報（H.P.,文献先、他）はリンク先を張っておりますので、必要性に応じ参照ください。

3-1.Down-Draft/Up-Draft 及び Twin-Fire タイプ（固定床）

上記の3タイプのガス化炉、何れの固定床タイプ（実際は原料固定ではなく、ガス化の進展により徐々に下方向に動く）であり、基本的・代表的なガス化方式です。次に各ガス化炉タイプ毎に、その特徴、課題等を概説します。

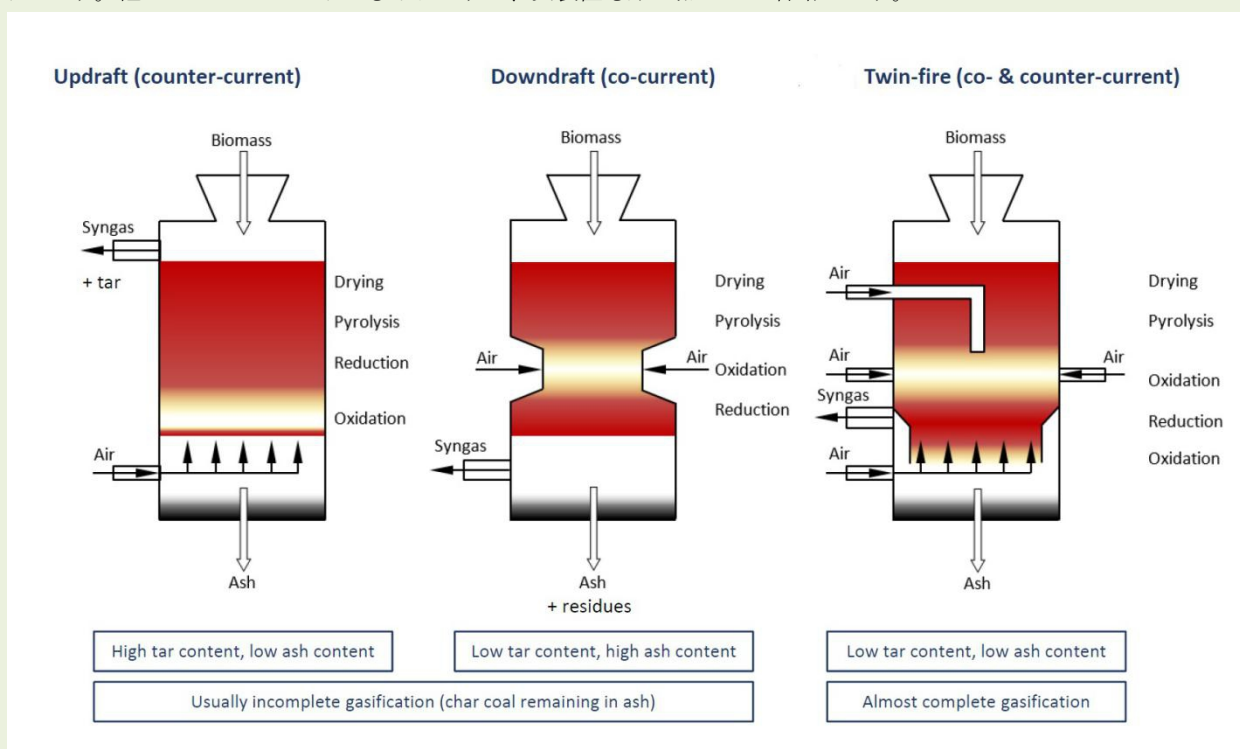
Down-Draft タイプ⇒特徴はタール副生が比較的少なく、ガス化炉構造も単純、価格も比較的安価なことです。課題は低中・冷ガス化効率、小型機限定(最大でも~250KWe程度以内が限度、大多数は50~100KWe以下の装置規模です。尚、エネルギー単位KWを発電はKWeと、熱エネルギーはKWth換算表示してます。Down-Draft法(<https://biofuels.co.jp/page20-8.html>)は（弊社販売中のAPL社PP30@25KWeも）、比較的Tarが少ないガス化法ですが、ガスエンジン用途向け合成燃料の場合、後工程の合成ガス精製工程で残留Tar除去が必ず必要です。簡単なガス化プロセス構造と装置価格の低下重視等の観点から、Down-Draftタイプは小型機の主流ガス化方式となっています。原料選定と品質（木質種、サイズ、含水率）、運転監視・管理等が、安定運転の前提として特に重要です。小型機の導入済例は多々存在します（APL,Spanner,Volter,ESPE,BioMAX,他）。

Up-Draft タイプ⇒最大の特徴は冷ガス化効率最重視・高発電効率、原料の多様性（バイオマス／廃棄物原料、チップ形状・高含水率）に優れ、中大型機（500KWe~4MWe+）対応も充分可能です。課題はTar副生が特に多く（500mg+/Nm3）、合成ガス精製部（Tar除去）付で無いとガスエンジン発電では、100%使えません（<https://biofuels.co.jp/page20-2.html>）。FPT/PMX-Updraftの他、山形県2ヶ所（2MWe）、石川県で導入・稼働中のB&W Bolund、URBAS等の例もあります。B&W Boulundも、FPT/PMXもガス化炉及びガス精製部の基本構成はほぼ同じです。

Twin-Fire タイプ⇒Twin (Dual)-Fire方式は、Down-DraftタイプとUp-DraftタイプのHybridタイプのガス化炉であり、3方式のガス化炉方式では、最も新しいガス化炉タイプです。ガス化規模は小型機、中型機（500KWe~1MWe）程度迄が設備能力の限界の様です（これ以上のスケール・アップは殆ど無く困難）。従って、特徴は冷ガス化効率も（比較的）高く、Down-Draftタイプより、タール副生も更に少ないですが、ガスエンジンTar規格（50mg/Nm3）を常時は満たせなく、殆どの場合、後工程のTar除

去設備が必要です(<https://biofuels.co.jp/page20-3.html>)。単純な Down-Draft タイプの Twin-Fire(Bio&Watt)型の他、更に改良版のガス化炉として、Twin-Fire 化と多段化 (Multi-Step)とを組み合わせた (ガス化炉出口で Tar-Free/NoTar とガス化の高効率化を兼ね備えた)ガス化炉タイプもあります (次項 3.2. Multi-Step 方式で LiPRO 国内導入済, A-Tec、他を紹介)。

本 Twin-Fire ガス化炉は、下記添付図に示す様に、代表的なガス化分解炉タイプである 1 塔型固定床 Down-Draft (原料は降下、空気・ガスも降下する並流、下記の添付図参照) タイプと Up-Draft (向流) タイプの折衷型 (Hybrid)・改良型タイプであり、空気 (蒸気) 投入を 2 ヶ所で行います。両タイプの長所・特徴を保持し、課題を補うガス化方式でもあり、比較的新しいガス化炉タイプです。他に Cross-Draft タイプもありますが、実装置も殆ど無いので省略します。



次は、これら 3 タイプのガス化炉の実例を写真等を含め、簡単に紹介します。

Down-Draft: 最初は、下記添付の小型 Down-Draft ガス化炉装置(<https://biofuels.co.jp/page20-8.html>)の 2 例です。

左側は①APL 社 (<https://www.allpowerlabs.com/>) の PP30 (25KWe) です。更に 2 基コンテナ仕様 (50KWe 版もあり)、バッテリー付最大 150KWe タイプもあります。

右側は②コンテナ仕様 RESET (<https://www.syngasmart.com/>)、19KWe, 35KWe@1-reactor、或いは 50KWe@2-Reactors、更に 100KWe@4-Reactors) です。



小型ガス化炉は、ほぼ全てこの様なコンパクトな一体型 (All-in-Type) 構成です。原料チップ管理 (サイズ、含水率) の安定化が安定・連続運転の鍵となります。小型ガス化炉は 15KWe~150KWe 程度の規模迄、数多く販売されています (添付参照、これ以外にも有り)。用途は、ほぼ 100% 小型発電、排熱利用 (CHP: Combined Heat&Power、温水利用)

専用です。ガス化規模も小型、水素濃度も低く、通常は商用水素製造、或いは合成燃料等のより進化版の製造用途向きガス化炉ではありません。但し、特定条件下、例えば非系統接続 (Off-Grid) で夜間電力が余る場合に、余剰電力を使用し電気分解を行い純水素を貯蔵し、電力が不足時に燃料電池 (Fuel-Cell) で再発電する例もあります (Solid biomass combined heat and power (CHP) with hydrogen storage and fuel cells | Furniture Production Magazine)。当然、蓄電池でも同じことは可能です。他にも国内導入済の Down-Draft 小型機は Spanner, Volter, ESPE, BioMAX, URBAS. . 等があります。必要なら各代理店に直接お尋ね下さい。

この他、海外で販売されているガス化装置には、③小型 18KWe 版も販売している GLOCK (50KWe:

<https://www.glock-ecoenergy.com/en/GGV>), ④ガス化ボイラー・メーカーの小型ガス化発電装置 Froling(50KWe, [Fixed bed gasifier | Froling fixed bed gasifier CHP 50 - Fröling \(froeling.com\)](#)), ⑤GasiFlex (49KWe, [GasiFlex Technical Datasheet - GasiFlex](#)), ⑥CMD ECO20X(20KWe, [CMD ECO20x | Operating Mode \(eco20cmd.com\)](#)), ⑦更に中型・高効率の最新 GRESCO (破産: 300&500KWe, <https://gresco-power.com/>), ⑧VEE (350&250KWe, 他, [The wood gasifier CHP unit with 245-350 kW from Vee Energy](#)) ..等もあります。特に⑧は Moving-Air 方式、コンパクトな Down-Draft ガス化方式を採用した製品です。尚、EU 諸国は電力に加え、排熱の温水利用(暖房)がほぼ 100%必ずあります。従って、これらタイプの需要も多く、小型ガス化炉メーカーも多数存在します。一方、我が国では、小型機を売電用途(FIT)で利用しても、殆ど国内では排熱利用もなく、高設備費(KW 単価)に加え、更に高原料費を考慮すると、採算が第一の目的では導入は苦しいと思います。低価格・ガス化設備も狙うのも解決策の 1 つかもしれません。

更なる説明は省略しますが、必要なら、上記の弊社 H.P.、及び夫々のメーカーの H.P.を直接参照下さい。

Up-Draft: 下記は Updraft タイプのガス化炉(<https://biofuels.co.jp/page20-2.html>)の 2 例です。

左側の写真は、①FPT(250~4MWe @800KWe)

右側は、②PMX (100~2000KWe@1000KWe)

の写真の添付例です。Up-Draft 法ガス化炉の特徴は、原料の多様化対応、及び含水率対応の広さ、及び高冷ガス効率等の実現です。但し、課題は Tar 量も多く、これらの除去操作がガスエンジン発電では鍵となります。合成



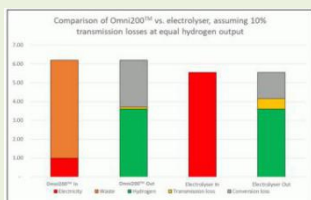
ガス熱量は、諸条件により変動しますが、1 例は 1270Kcal/Nm³ (ガス組成は H₂:11%/CO:18.5/CO₂:8/CH₄: 5/N₂:57.5%程度) です。Tar 油は燃焼炉で燃やし、熱回収を行うのが(③B&W-Bolund 方式の例)通常装置例です。片や改良型 PMX 炉(弊社 OEM)では、ターボ付中速型ガスエンジンの排気ガス(500℃)を、別設置の燃焼炉内に導き Tar 油を吹き付け再燃焼させ、排ガス温度の高温化(800℃~)を実現し、ORC (Organic Rankine Cycle)の発電効率を大幅に向上をさせる複合発電の仕様です(5-3 複合発電の項で説明)。Up-Draft 法は、国内でも中大型型 2 MW 規模の稼働例(B&W-Bolund)の 2 例、([事業実績 | やまがたグリーンパワー \(jbmd.co.jp\)](#) , [NKC ながいグリーンパワー株式会社 \(nkc-nagaigp.co.jp\)](#)), 他 1 例、④小中型 URBAS(250/450KWe)の導入例もあります。

FPT/PMX のガス化炉及び合成ガス精製部も、ベースは上記の B&W-Bolund の導入例とほぼ同一です。但し、何れも発電効率アップの ORC 発電付でも、比較的価格でお薦めしています(非 ORC タイプも可)。尚、Up-Draft 法ガス化の主用途は、ガスボイラー向けガス燃料(合成ガス)、或いはガスエンジン発電用途でもあり、勿論可能ですが、**水素製造**等の用途例は未だ存在しないと思われます。その他、⑤ReGaWatt(300~2000KWe: <https://regawatt.de/home-en/>), ⑥Nexterra(2~15MWe:

<https://www.nexterra.ca/files/gasification-technology.php>) 等も同じ Up-Draft 法を採用し、中大型ガス化炉を販売しています。Up-Draft 法のガス化炉は、その高ガス化効率(Tar 熱量も含む)の結果、Tar 除去処理なしのガス・ボイラー燃料(Hot-Syngas)利用例(高温では Tar 分もガス状、合成ガスと差は無し)も多数存在します。

一方、⑦OMNI(200 トン/day:<https://omni200.com/solutions/>) (下段参照)は、Up-Draft 法ガス化と Plasma・Tar 分解ガス分解技術(<https://www.ukrplasma.com/index.php/our-technology/plasma-refining-system> 及び 3-9. Plasma タイプ分類も可)とを組み合わせた高温熱分解方式(3 段法 Tar-Free : 1)Horizontal Grate Gasifier, 2)Up-Draft Gasifier, 3)Plasma Syngas(Tar)-Refining Chamber)を採用し、Up-Draft 法の課題である多量の Tar 分の分解を Plasam で行いクリーンな合成ガスを製造します。廃棄物ガス化発電(Biomass も可)の他、下記添付表の数値とは多少異なりますが、MSW 廃棄物原料(日量 200 トン)による**水素製造**プラント(年産 5000 トン)建設を、水素社会実現を強力に進めている米国,California 州で計画中です(<https://hydrogen-central.com/omni-ct-brings-first-of-its-kind-waste-to-hydrogen-plant-to-market/>)。

OMNI ガス化なら、電気分解法の 5 分の 1 の電力(左側と右側の赤部分)で、同一量の**水素**(左側と右側の緑部分)が生産でき



とっています。 <https://globalsyngas.org/syngas-technology/syngas-production/waste-to-energy-gasification/plasma-gasification/> その他、Up-Draft 法ガス化炉はインドで特に多く採用されています（メーカーの例、⑨UDCCG Cool and Clean Gasification – Radhe Group of Energy & <https://www.youtube.com/watch?v=Q7yBT08eyyA>, Updraft gasifier | zld technology | zero liquid discharge technology (arvindenvisol.com)）。その他、EU でも、Tar クリーニング分解を含む⑩Up-Draft 法ガス化+燃料電池発電 Project があります (<https://www.hieff-biopower.eu/the-project/>)。Up-Draft 法の紹介は以上です。他に必要なら、弊社 H.P. (<https://biofuels.co.jp/page20-2.html>), 添付各ガス化装置の H.P., 説明資料、他を参照ください。

Twin-Fire: Twin-Fire 方式は、①小型 Bio&Watt (200~300KWe, <http://www.bioewatt.com/eng/impianti.html>), ②PMX-Twin-Fire (500KWe, 1 MWe) (<https://www.biofuels.co.jp/page20-3.html/>), ③BR-Energy (<http://br-eg.com/>, 200KWe), 他に、④AHT (A. H. T. Services: [Home\(aht-energy.com\)](http://Home(aht-energy.com))) (400KWe、メーカー側は Double-Fire 方式と云う、国内導入済)、等もあり、何れも Down-Draft と Up-draft との Hybrid タイプの Twin-Fire 方式のガス化炉です。その他に A-Tec、LiPRO、Xylowatt も Twin-Fire タイプであり、更に Multi-Step(多段) 方式ガス化でもあります。これらガス化炉の紹介は【3-2. Multi-Step】で行います。

右側添付例は、小型①の Bio&Watt ガス化装置の全体と炉内部写真の例です。使用原料により 250KWe~300KWe 程度の発電能力です。発電出力は、木質系、農業残渣等の諸原料により変わります。ガス化炉本体、及びガス精製設備、残渣（炭、タール）の燃焼ボイラーに加え、前処理の乾燥機、ガスエンジン発電機等を加えた設備も Turn-Key 構成でも提供しています。特徴は小型機では少ない各種バイオマス原料に対する原料の多様性、コンパクトな装置等です。詳細は同社の H.P.、他を参照ください。



3-2. Multi-Step タイプ (多段ガス化、固定床)

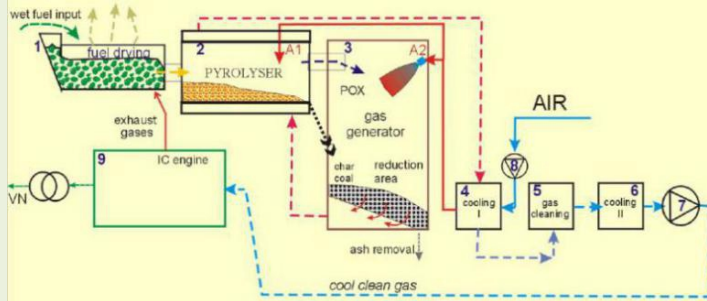
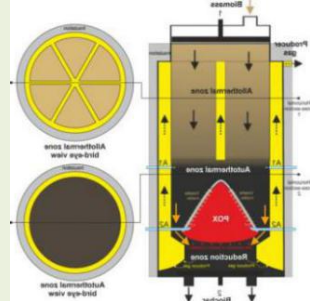
Multi-Step(或いは **Multi-Stage**) 多段化タイプは、Down-Draft 方式 (他のガス化方式の Multi-Step 方式もあり) の様に 1 塔・同一塔内で、乾燥、熱分解、燃焼 (ガス化)、還元の各工程を連続的に上から下へ向かって境界域が不明瞭なまま順に行う方式ではなく、物理的に分割・多段化 (2 段~) された工程で行う方式を云います。この Multi-Step 方式は、メーカー、装置により実現方法は異なりますが、高性能 (高冷ガス化効率、No-Tar/Tar-Free, 他) のガス化炉を実現する有力な、主に中型ガス化炉の技術手法です。

①LiPRO(50/85KWe)は Down-Draft 法の塔内を分割し 3-Step 法を、類似ですが、やや大型②C-ATS(EEE@印度、50/125/250/500KWe, <https://cleanenergyee.com>) ③A-Tec も実現の方法は多少異なりますが、同様に 3-Step 法を、④INSER は塔内部改良 Clean-EEHybrid 化対応を行い Multi-Step 化を実現してます。一方、E-Green(<http://www.enertecgreen.com/>), ET-Gas(<https://www.etgas.eu/>)は流動床ガス化方式の 2 塔・多 (2 段) 段化・ガス化方式を採用しています。特にスラッジ、高灰分バイオマス類のペレットのガス化発電、最近では水素製造にも注目しています。

次に Multi-Step 方式の①、②のタイプのガス化炉の紹介と説明です。何れも特徴は高ガス化効率、タール処理不要 (No-Tar/Tar-Free) であり、バイオマス系原料のガス化 (発電) 用途では、弊社が取り扱う③A-Tec(890KWe)(<https://biofuels.co.jp/page20-3.html>)、或いは④INSER (500KWe) (<http://biofuels.co.jp/page20-5.html>) の様な中型機迄のガス化規模に於いて最も優れた高冷ガス化 (発電) 効率を実現するタイプです。但し、課題は、1MW 以上への大型化のスケール・アップは未だ実現出来ていません。

右側の右添付は①小型固定床多段 (Multi-Step) ガス化 LiPRO, 50KWe (<http://biofuels.co.jp/page20-7.html>) の写真例です。①LiPRO は、Multi-Step 方式、及び Twin-Fire 方式でもある Hybrid タイプです。ガスエンジン発電機も、ガス化装置と一体化され、オプション仕様ですが、乾燥機付、コンテナ仕様も可能です。右





上段の図の様に、2 筒（連結）方式（熱分解部と燃焼・還元部、3 段（3-Step）法を採用しています。垂直部分の燃焼（ガス化）部と還元部

も塔内で分離され、各工程ステップ毎に最適な操作（制御）条件設定が可能であり高効率機です（150KWe 以下程度の小型機では、Multi-Step 機は、他に存在しないと思います）。

次は、弊社が代理店の③A-Tec ガス化炉の例です（ガス化発電装置 890KWe,ORC 付 1MWe <https://biofuels.co.jp/page20-3.html>）。

基本ガス化炉③は①と類似構造のガス化炉であり、③も②も Multi (3) -Step 方式、及び Twin-Fire 方式、更に熱分解炉部は外熱（Allothermal）& 自己内熱（Autothermal）-熱分解（Pyrolysis）炉+Down-Draft ガス化（Gasification&Reduction）方式の Hybrid タイプですが、設備能力は、③は①の 1.7 倍以上の 890KWe もあり、②は 3.4~6.8 倍、同様に No-Tar/Tar-Free となっています。木材チップのガス化・合成ガス熱量は、種々の条件で変わりますが、1 例は 1385Kcal(5.8MJ)/Nm³ 程度（H₂:22.7%, CO:5.3, CO₂:9.7%, CH₄:1.3%, N₂:40.9%, other:0.1%）です。冷ガス化効率も（超）高効率です。乾燥機、及びガスエンジン発電機（Jenbacher）も標準・統合化されています。この他、排熱（熱回収）利用による乾燥機、更に ORC（Organic Rankine Cycle）発電機付の複合ガス化発電方式の装置です。③の A-Tec ガス化発電装置程の高発電効率設備は、その価格に拘わらず、中規模では他に存在しないと思われます。

因みに水分 50(40)%の生チップ材の gross 発電効率は 55.2(47.8)%を超えます。高発電効率と云われるガス化装置の発電効率は、通常 25~28%程度であり、30%を超える装置は殆ど存在しないと思います。尚、③の Hybrid ガス化方式の詳しい説明は機密情報でもあり、省略します。必要なら類似の①LiPRO,④INSER

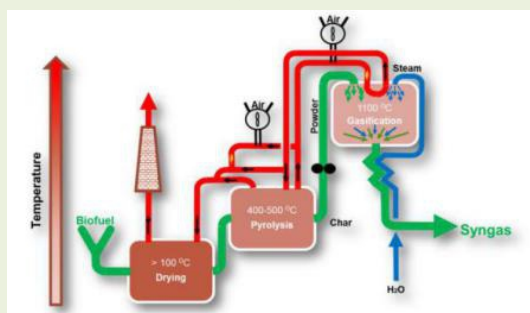
（500KWe）(<http://biofuels.co.jp/page20-5.html>) 等の説明を参照ください。その他、Up-Draft ガス化の多段化（Multi-Step/Multi-Stage）（334kurkela.pdf (aidic.it), 流動床（Fluidized-Bed）多段ガス化方式（https://www.shanghai-electric.com/group_en/c/2019-10-23/550916.shtml）等の検討例もあります。Down-Draft &



Multi-Step タイプでは困難な 1~10MWe 規模の Tar-Free ガス化も、何れ対応可能となると考えられます。

同様に⑤Cortus/Wood-Roll（<https://cortus.se/>）、或いは⑥Xylowatt（Home - Xylowatt）、⑦Concord-Blue（<https://www.concordblueenergy.com/technology/>）、⑦の派生製品である⑧Ways2H（<https://ways2h.com/>）主に廃棄物のガス化を主なターゲットとし、Concord-Blue-Reformer と呼び、Multi (2) -Step 方式炉（乾燥を含めて 3-Step）です。空気の代わりに蒸気（H₂O）を使う Steam-Reformer（800℃）タイプであり中高濃度水素を含む合成ガスを製造できます。米国、ドイツ、インド等で廃棄物ガス化装置としてビジネス展開中です。尚、⑦国内（JBEC）でも過去取り扱いがあったガス化装置（旧 Blue-Tower,<https://www.intechopen.com/chapters/17498>）でしたが、いろいろ問題もあった様で現在⑥と別行動の様です。JBEC 関連法人（J.V.）の Way2H（<https://ways2h.com/>）は Blue-Tower ガス化による純水素製造装置（PSA）を販売中です。同様に、主に廃プラ/MSW 原料を対象とするガス化発電装置、⑨大型・（特）高発電効効率機 TCP-Energies（Upcycling Kraftwerk - TCP Energies GmbH）等も Multi-Step ガス化方式に分類されるガス化炉です。Tar-Free/多段法の装置としては、極めて大型(9MWhe)であり、炭化炉(Pyrolysis)+Bubbling-Fluidized-Bed-Gasifier とを組み合わせ、酸素 Rich ガスで運転する方式（です。エンジン発電機+ORC で発電効率 50%）と云うことです。

⑤Cortus/Wood-Roll(下記左側添付) はバイオマス原料が主あり、炭化炉+Steam-Reforming 炉構成の Multi(3)-Step 方式、高温



（1100℃）（蒸気）改質ガス化方式です。前者の Concord-Blue より、更に高濃度水素(58%)の他成分（CO:28,CO₂:12,CH₄:2%）、N₂ を含まない高熱量合成ガス（2510Kcal/Nm³）が得られます。この結果(他の高熱量・高濃度水素・ガス化炉も同様)、ガスエンジン用途では水素濃度が高過ぎて、エンジン発電用の単独利用は不向きかもしれません。むしろ水素製造（PSA）（https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj1958/43/12/43_12_1088/_pdf , [file:///D:/Joe-Hirai/Documents/CatalyticDepolymerizaionProcess/Plastics-TireCatalyticPyrolysis/APC-Pyrocrat/catalysts-11-00393-v2%20\(1\).pdf](file:///D:/Joe-Hirai/Documents/CatalyticDepolymerizaionProcess/Plastics-TireCatalyticPyrolysis/APC-Pyrocrat/catalysts-11-00393-v2%20(1).pdf)）と、水素分離後の低

水素濃度合成ガス（Tail-gas）を利用するガスエンジン発電（FIT:Feed-in Tariff）とを併用する方が、ビジネス上も採算上もベストな選択の様に思えます（<https://joeh.hatenablog.com/entry/20779617>）。

④、⑦は類似の熱分解炭化炉+Steam-Reforming 炉であり、合成ガス（高熱量、**高濃度水素**、窒素成分殆どなし）成分、熱量も類似です。大きな違いは、前者は**水平横型炉**、後者は**垂直縦型炉**と云うガス化炉の設備構造上の差が大きい。

⑤Xylowatt(下記右側添付、[Home - Xylowatt](#)) (260KWe、760KWe)) は No-Tar/Tar-Free ガス化を Sales-Point (彼らは” NOTAR” と云う) としている Multi-Stage(3 段)・Down-Draft 型ガス化装置です。空気を使うガス化方式であり、合成ガス成分 (H₂,CO,CO₂,N₂)、熱量も普通のガス化炉タイプの低熱量合成ガスです。主にガスエンジン発電用途向けです。従って**水素分離**用としては不向きです。これら装置の説明は以上です。必要なら、装置メーカー各社の H.P.を参照するか、関係する代理店に直接お問い合わせ下さい。

本 Multi-Step ガス化の装置例の紹介は以上ですが、以纏めです。

基本的に Multi-Step 方式のガス化炉は全て Tar-Free 合成ガスであり、窒素分を含む低濃度水素、中低熱量合成ガス(①LiPRO/②C-ATS/③A-Tec/④INSER/⑥Xylowatt)、或いは窒素分を含まない**高濃度水素**、高熱量合成ガス(⑤Cortus/⑦Concord-Blue/⑧Ways2H&JBEC)のタイプとがあります。現状、何れも発電用途が主ですが、今後は合成燃料 (③建設中)、化学品製造、或いは高濃度合成ガス(⑤&⑦⑧) からの**水素分離・製造**(PSA)用途等の分野への新展開が期待されています(<https://cortus.se/2021/02/10/green-hydrogen-the-woodroll-way/>)。但し、⑤は可成り高設備価格の模様です

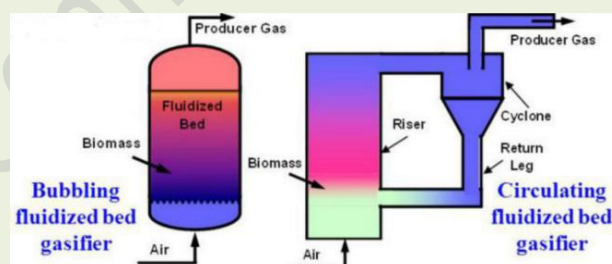


3-3.Fluidized Bed タイプ (Bubbling/Circulating)

流動床ガス化炉 (1 塔) タイプは、Bubbling 及び Circulating (循環) タイプに分類されます(下記参照)。

主に Bubbling タイプガス化炉 (S-Nova)を現在取り扱っています(<https://biofuels.co.jp/page20-1.html>)が、ご希望により Circulating タイプも可能です。バイオマス発電用途なら、1 塔 Bubbling-Bed タイプで、ほぼ最大規模の発電装置迄、充分対応できます。

これら 1 塔式は何れも空気を使う結果、窒素分を多く含む合成ガスが製造されます。**水素濃度**も高濃度ではない為、**水素製造**は余り適さないと考えます。低熱量合成ガスが使えるガスエンジン発電用途が主となります。次の 3-4 【Dual-Fluidized Bed ガス炉化技術、装置】は、ガスタービン発電方式でなくガスエンジン発電方式なら不要です。バイオマス原料に加えて各種廃棄物原料のガス化も充分対応できます。



Bubbling と Circulating 流動床・ガス化炉の違いは、添付図で示す様に

空気 (Air)の供給により原料チップ・砂・炭等を塔内 (Bed)で浮遊 (Bubbling)状態を維持させる方式か、又は塔頂へ舞い上げ、サイクロン (Cyclone:固体・ガス分離器) 経由で、巡回 (Circulation)させるかという流動 (Fluidized-Bed)方式の違いです (合成ガス、微粉炭は炉外へ)。固形物の砂 (Olivine-sand,等) は (砂と原料間の) 伝熱媒体、混合と触媒効果 (ガス分解) とがあります。固定床炉方式 (Fixed-Bed)に比べ、遥かに高速ガス化反応の進行、均一な炉内温度分布、低中温度ガス化対応 (低熔融温度の廃農産物、木材パルク、パーム EFB 等のガス化)も可能であり、更に大規模ガス化炉 (スケールアップが比較的容易) 対応、比較的短時間の装置停止・再稼働等が特徴です。

下段の写真 2 枚は、**Bubbling Fluidized Bed ガス化炉** (Gasifier) (BFBG)タイプのガス化炉装置例です。

BFBG ガス化炉は、①S-Nova (<https://biofuels.co.jp/page20-1.html>)の他、②EQTEC([EQTEC Syngas Experts | Sustainable Waste to Energy and Biofuels](#))、③WtEnergy([Technology - WtEnergy Advanced Solutions \(wte-as.com\)](#)) ④Andritz-Carbona (<https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/power-generation/gasification/bfb-gasifiers>)、⑤GIDARA-HTW (ペレット原料、主に燃料・化学品合成用) ([HTW - High Temperature Winkler technology - GIDARA Energy \(gidara-energy.com\)](#))、等があります。何れも中大型から超大型迄のガス化炉対応が可能な主要ガス化炉技術、製品例となります。例外的ですが、小型 2.5 KW タイプの⑥Bio2Chp(<http://www.bio2chp.com>)も存在します。



バイオマス、及び農林業・バイオマス廃棄物原料を利用した発電用ガス化炉では、Bubbling-Fluidized Bed 方式のガス化炉、何れも十分な設備能力・拡張性、機能性、及び投資価格対性能等のバランスを兼ね備えています。最近、BFBG 法による**グリーン水素製造** ([How biomass gasification can help boost global green hydrogen](#))



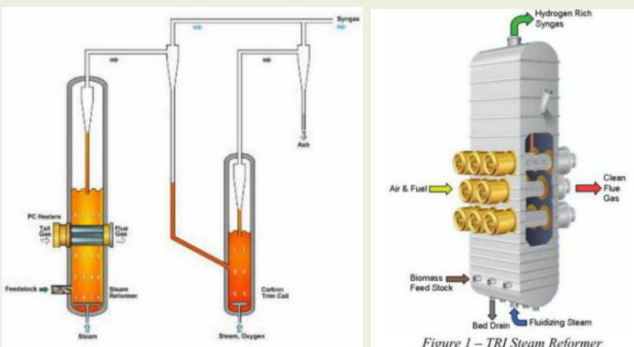
[production \(eqtec.com\)](http://production.eqtec.com) も検討されています。

次の紹介例(右記添付)は、BFBG 方式の⑦ブルクハルト (Burkhardt, 50/180KWe) (<https://burkhardt-gruppe.de/en/power-engineering/>) です。小型炉では珍しい BFBG 方式を採用したガス化炉です。EU では多数導入実績もあるガス化炉ですが、最大の課題は高価 (チップの 2 倍以上) なペレット専用で、より安価なチップ材は使えないことです。ペレット材限定のガス化炉は、原料ハンドリングの容易さ (均一サイズ、高密度、高熱量、低含水率、原料投入の容易さ、ガス化炉内でのトラブル減少) 等の理由から、ガス化炉の設備設計が楽なことです。装置メーカー側は、その分気楽ですが、逆に顧客利用者側は好ましくはない条件だと思います。ペレットは国内流通もなく、自己で製造の可能性があります (追加設備費、多電力消費・高額な製造費)。

国内導入例もあり、詳しい情報が必要なら、直接国内代理店、或いは上記 H.P. からメーカーにお問い合わせ下さい。

更に小型 2.5 KWe タイプの Bubbling Fluidized ガス化発電装置⑧Bio2CHP (<https://www.bio2chp.com/index.html>) もあります。特に、**鋸屑の様な微細な原料** (<2 mm) をペレット化の再加工を行わず原料化が可能です。

次は 2 塔式⑨TRI ガス化炉 (<https://tri-inc.net/steam-reforming-gasification/>) の紹介 (左記添付) です。合成ガスを使い合成燃料、合成化学原料を製造するプロセス (F.T.法; [フィッシャー・トロプシュ法 - Wikipedia](#)) の前工程の役割をします。専ら最適な合成ガス原料を供給することを主目的としています。勿論、水素濃度も高めたクリーンな合成ガス、**水素製造**用途でも使えます。当然、発電用 (ガスエンジン、ガスタービン) 利用も希望なら可能です。



TRI は **Steam Reforming Reformer** と呼ぶガス化炉であり、左側添付図の様に 2 塔シリーズ結合の Bubbling ガス化炉 (塔) 構成です。**第 1 塔** (Steam Reformer) は、前述 Bubbling タイプ流動床ガス化ですが (彼らは Deep-Fluidized Bed と呼ぶ)、通常よりガス化炉 Bed 用固形物 (アルミナ粒・砂粒、触媒効果 & 伝熱媒体) を多量に上層部迄に積み上げ充填します。通常タイプとの違いは、Bubbling ガス化の様に空気 (酸素)、更に蒸気を加えて原料の一部部分燃焼により高温化する方式 (Autothermal-Gasification) ではなく、特殊熱交換器 (上記右側写真) により、余剰ガス燃料 (例、下流の F.T. プロセスの余剰・使用済オフ・ガス類) を熱源としています。但し、単純に燃焼加熱

する方法 (Indirect-Heating) ではなく、**高速パルス燃焼** (Pulse-Combustion) による熱交換器壁面の **高効率・高熱伝導率効果の最大化** により固体砂 (アルミナ) 及び原料加熱を効率的に行い、更に蒸気投入により窒素分 (N₂) を含まず、CO₂ 分の少ない合成ガスを効率的に製造出来るガス化 (外熱源加熱ガス化: Allothermal-Gasification) 方式の採用が、本ガス化炉の最大の特徴です。ガス化温度は比較的低く (中温 750~900℃)、この結果、溶解性の高い無機物 (K) 分等を多く含む低融点の農業廃棄物等、原材料の多様化対応も図れる様です。**第 2 塔** (Carbon Trim Cell) は、云わば補助ガス化 (炉) 塔であり、再度 Steam Reforming 反応操作 (例えば、反応速度の遅い a) Boudouard (ブドア) 反応: $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$, b) Water-gas 反応: $C + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$, c) Water-gas Shift 反応: $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$) を継続しつつ、先ず a)、b) により炭 (固体 Char) のガス化を促進させ、逆に残りの残留の炭素 (炭) 減・残る無機物 Ash 化促進 (減量化)、更に c) **Water-gas Shift 反応** ([6.2.6. Water Gas Shift & Hydrogen Production | netl.doe.gov](#)) により H₂/CO モル比の調整・最適化を行います。何方の塔も塔内部は、内部サイクロン付 (外部サイクロンもあり) であり、固体の伝熱媒体 (アルミナ)、固体状の炭と (合成) ガスとの固・ガス分離を行う方式を採用しています。

TRI は、以上説明の様に、物理的には 2 塔ガス化構成ですが、後述の 2 塔 (Dual Fluidized Bed) 方式の様に、それぞれ異なる役割ではなく、Bubbling 方式類似のガス化炉の 2 基 (連) シリーズ結合構成と云う、云わば Multi (2) -Step 流動床 (BFBG) ガス化方式とも云えます。従って、次項の 3-4. Dual Fluidized Bed 方式ガス化、或いは、流動床の Multi (2) -Step 方式としての分類も可能ですが、ここでは一応 1 塔式 Bubbling 流動床 (BFBG) タイプとして、この項で分類・整理してあります。

纏めですが、TRI ガス化炉の特徴は、プロセス上は前述の**間接熱交換器・加熱、実質 2 段式ガス化炉**であり、多種原材料 (各種バイオマス、廃棄物、**黒液の様な液体原料**) を使いクリーンな高エネルギー合成ガスの製造が可能となっています。加えて合成反応 (F.T.法) に不可欠な H₂/CO モル比を 1.5~3.5 程度迄、用途に応じ広範にモル比の調整・制御できる主に合成燃料、合成化学原料の製造用のガス化炉装置です。メタノール合成のモル比: 理論値は 2.0、多少過剰水素で現実値は 2.1~2.2 前後、合成天然ガス (メタン) なら、1:3、合成炭化水素燃料なら理論モル比は (2N+1)/N、N:炭素数、ガソリンは、平均 N=8 なら、2.13+となります。

TRI ガス化炉 (Reformer) は、有力な米国の合成燃料企業 Fulcrum 社 (<https://fulcrum-bioenergy.com/partners/tri/>) の商用合成燃料製造 (合成軽油、JET 燃料) プロセスの前段のガス化装置部 (後段は、F.T.法) として採用されています。加えて既に大型化 (500

ト/日) も実証済です。

次に **Circulating Fluidized Bed ガス化炉** (Gasifier)(CFBG)を簡単な解説と装置例で紹介します。

特徴は BFBG の様に、原料等を泡・浮遊 (Bubbling) 状態でガス化を行うのではなく、巡回 (Circulation) 状態でガス化を行う方式です。巡回させる為、課題は原料サイズ、BFBG の様に大きな、不均一サイズのチップ原料は使えず、より均一な、それも

細粉 (1 mm 以下) 状態の原料が必要になります。製材工場の鋸屑等を使う場合は、乾燥処理だけで使えて便利ですが、丸太材から原料を用意する場合、多数の前処理工程 (6. 前処理の項で説明) が必要です。その他、特徴は中規模ガス化から、BFBG 炉より更に超大型化(Andritz、他) も可能ですが、バイオマス材料では、大量の原料調達は殆ど不可能です。通常の用途は、廃棄物 (廃バイオマス類) のガス化であり、石炭のガス化では、過去から主に CFBG 方式が、特にガス化+合成ガスボイラー蒸気発電が多く採用されています。最近では廃バイオマス大型ガス化・ボイラー (蒸気タービン発電) 装置 (Valmet、他) でも数多く採用され (日本の JFE 他でも)、PMX-Fluidized Bed を除きバイオマスのガス化発電の例は多くは無い状況です。装置例が比較的少ない理由は発電なら Bubbling タイプで充分、合成燃料、化学分野なら、Circulating Fluidized Bed タイプはとても無理・使えない、次の Double Fluidized Bed 方式をやはり使うと云う理由だと思われる。加えて原料サイズが大きなチップ・ペレットでは巡回 (Circulation) 動作は不向きで微粉原料 (0.5~1mm 程度) 条件が不可欠であり課題です。CFBG 方式のガス化炉例は下記です。①Andritz-Carbona (ANDRITZ

[Circulating Fluidized Bed \(CFB\) gasifier](#))、左側写真 2 枚添付の②E-Green、([Green Concept](#) :

[EnertecGreen](#)、尚、現在は [ETGAS | Waste-to-X](#)) ③Aries ([Aries Clean Technologies | Fluidized Bed Gasification](#))、④PMX (<https://www.biofuels.co.jp/page20-1.html>)、⑤KEW ([Home • KEW Technology • Delivering a world beyond fossil fuels \(kew-tech.com\)](#))、その他、⑥GTI-ENERGY ([Home • GTI Energy, https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/GTIGasificationProcess9_18_07.pdf](#)) もあります。GTI は石炭ガス化で多くに実績があり、バイオマス・ガス化 (～1000 ト/日) の販売は GTI の子会社の⑦SunGas Renewables (<https://sungasrenewables.com/>) が販売中です。主に水素製造、及び合成メタンガス (RNG)、化学合成等にも注力しています。

更に発電効率が驚異的に高効率 (50～60%)、⑧BTC ([Our technology — Phoenix Biopower](#)) 等があります。①は超大型向け、それも主に廃棄物のガス化であり、高温合成ガス炊きボイラー (発電) 用だと思われます。②はバイオマス原料専用の 1.2MWe のガス化発電装置ですが、均一なペレット専用 (チップ細粉材も検討中の模様) のやや特殊な CFBG 炉ですがここに分類しました。ペレットを使うことから、本装置は極めて高信頼性・高稼働率と言うことで、ペレットが有利な条件で入手できれば、有力な候補機種だと思われます。③及び④は通常タイプの CFBG ガス化炉ですので、ここでの説明は省略します。⑤、⑧は加圧タイプの、⑥、⑦は加圧、或いは常圧タイプ CFBG ガス化装置です。

又①Andritz-Carbona(<https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/power-generation/gasification/bfb-gasifiers>)もバイオマス原料に対して GTI ガス化プロセス技術(BFBG)を採用しています。

3-4.Dual-Fluidized Bed タイプ

通常のバイオマス・ガス化法では、機能上最も優れたガス化方式です。酸素使わずとも空気利用し高熱量ガスを製造できるガス化炉方式であり、酸素分離の運転経費の削減に貢献しています。逆に、高装置価格や操作性の難易度も高くなる課題もあります。従って、ガス化装置の後工程の合成ガスの用途先を充分考慮する必要があります。単純な発電用途向きではなく、合成燃料、合成化学原料、或いは水素ガス製造等、より高度な用途向けが主となります。ガス化炉の大型化が比較的容易でもあり、バイオマス原料ではなく、原料確保の容易な廃棄物利用の大規模合成燃料の製造設備が今後の主用途先と云えそうです。

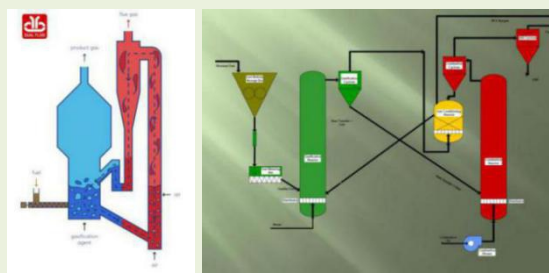
炉内でタール分解処理できるタイプ (下記右側の例) もあります。下記添付図は 2 塔の流動床塔構成の例です。

左側：第 1 塔のガス化炉/Bubbling タイプ、もう一方の第 2 塔は燃焼炉/Circulating (Fast Circulating)タイプの構成例です。

①REPOTEC (<http://www.repotec.at/index.php/homepage.html>)、②Highbury (<https://highburybiofuels.com/#our-planet-cant-wait>)、③Verto(https://www.verto-engineering.com/?page_id=29)等が左側の図のガス化方式です。この逆の④Synova(<https://synovatech.com/>) も存在します(廃器物 (廃プラ) ガス化全体プラント図、下段左側添付)。

右側：両塔とも Circulating タイプ⑤Taylor : http://www.taylorbiomassenergy.com/taylorbiomass03_tayl_mn.html、⑥VTT(for Comsyn: Project: <https://www.comsynproject.eu/technology/>) の例です。

Dual-Fluidized Bed ガス化方式の最大の特徴は、何れの方式も空気を使うガス化方式ですが、窒素 (N₂)ガスを含まない高熱量合成ガスが製造できる装置方式です。その理由は空気を使い第2塔で、炭 (Char)を完全燃焼させ灰にし、得られた燃焼熱で循環熱媒体 (固形物の砂) を加熱し、第1塔のガス化炉へ加熱済・熱媒体を循環させています (Allothermal ガス化)。燃焼時の窒素、CO₂ 等を含んだ排ガスは、第2塔頂から外部 (排熱回収後) 放出されます。従って、第1塔内では熱媒体の熱、及び蒸気だけでガス化反応を行う為、空気中の窒素分は合成ガス内への混入はなく、不燃の窒素分を含まない高熱量



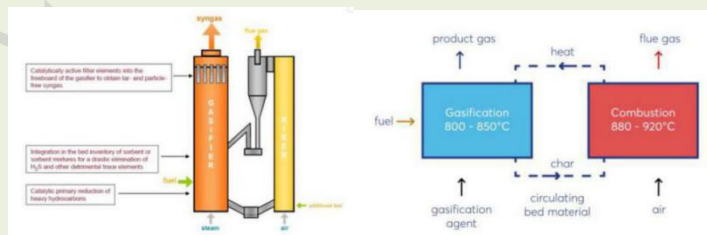
合成ガスが得られる仕組みです。

当然、発電用途ならガスエンジンに加え熱量も高く、大型ガス化炉ならガス・タービン発電も充分可能です。通常のクリーンなバイオマス発電に限定した場合、本方式がベストなガス化方式の選定かは、費用対機能・効果で疑問が残ります。単なる発電用途なら、主に大型 (10MWe~) 廃棄物 (MSW, RDF) ガス化 (ガスタービン) 発電向けの用途、或いは合成燃料・合成化学向け用途が、本ガス化炉の主な用途先となります。当然、合成ガス中の (一部) **水素ガスの抽出分離 (PSA/Membrane)** も可能です。日本でも有名なガス化装置⑦Gussing ガス化装置 (<http://www.gussingrenewable.com/technology.html>) は、①



RepoTec らが手掛けた2塔式ガス化炉 (上記左側の塔構成であり、バイオマス原料で2 MWe+程度の発電規模では、商業目的の採算性は極めて疑問です (実は技術実証プラント)。尚、2塔の機能を1塔内に納めた商用化ガス化炉④Synova (<https://synovatech.com/our-technology-platform/>) は、ガス化炉部を Milena と云う名称で、ガス精製部を OLGA と云う名称を付与しています。特に、ガス化装置はバイオマス等、原料種には限定しない汎用ですが、最近では**廃プラ処理**に特に注目しています。フィンランドのガス化炉等の研究開発研究期間 (VTT : <https://www.vttresearch.com/en>) が開発し、現在は Synova が販売中のガス化炉です。ガス精製工程の OLGA は、4-3 項でも紹介しています。

左側の添付図例は、上記左側とほぼ同一 Dual-Fluidized (Bubbling +Circulating タイプ) ガス化炉であり、改良型でもあり (サイクロン固・ガス分離機に代えて) 高温・固形物フィルターをガス化炉塔内部の出口前に備えています。更に、循環・熱媒体用 (Bed-Material) の固体 (砂) は、不純物 (H₂S 等) を吸収させる機能も兼ねている模様で、より優れたガス化方式の模様です。



https://www.vt.tuwien.ac.at/chemical_process_engineering_and_energy_technology/future_energy_technology/gasification_and_gas_cleaning/projects/eu_project_unique/EN/

同じく、その右側の図、別の Dual-Fluidized ガス化炉塔内の温度条件と固定熱媒体の循環等の概念図の参考例です。

以上、纏めですが、バイオマス原料による DFBG 発電 (FIT) はコスト (高価格、複雑操作) 対効果等から、余りお勧めできません。主要な用途は**廃棄物処理用大型ガス化** (合成燃料、或いは発電との併用) 用途向けです。当然メーカー側もその様な分野をターゲットに置いています。不純物処理を含め、ガス化炉部に加え、ガス精製処理部、前処理部の設備を含めると、投資額は倍増します。廃棄物、廃プラ類を使う**水素製造**も可能ですが、高額な投資が必要なことからビジネス的には、他の方法が第一選択だと思います。

3-5. Rotary-Drum タイプ

ガス化目的のロータリー・キルン方式熱分解炉①中外炉 : <https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201302chugai/index.html> は、数少ない貴重な国産炉 (元 NEDO 資金の研究開発炉) として古くから存在し、国内導入例もありますが、休止例 (阿蘇) もあり、ガス化効率面、信頼性の課題もある様ですが、詳細は不明です。特に、興味があれば、メーカー、他に直接お問い合わせ下さい。この他の製品、例えば、主に廃棄物用ガス化炉②GreenE (<https://greene.es/>, [Waste to Energy Gasification System \(expo21xx.com\)](https://waste-to-energy-gasification-system-expo21xx.com/)) の例もあります。

Rotary-Drum タイプは、セメント、乾燥機、或いは廃プラ油化装置では使用例も多い方式ですが、ガス化 (熱分解) 装置の例は少数派、少ないと思われます。逆に、ドラムの回転はなく静止、内側が回転し (オーガー)、高温熱分解を行う Drum 式小型装置例の (超) 高温③Proton-Power (左側の写真添付:



<http://www.protonpower.com/technology>)、類似 (高温) 熱分解装置④Biogreen-Energy

(建機、[Industrial equipment for pyrolysis of plastic \(biogreen-energy.com\)](http://www.biogreen-energy.com)、CR-Power

(国産 200KWe, <https://www.cr-power.jp/about/>) 及び全廃プラ・ガス化専用、コンテナ仕様の

CES (<https://www.conversionenergysystems.com>), 同じく全廃プラ専用ガス化 (方式は不明) ⑦C-Tec

(500KWe, <https://www.ctecenergy.co.uk/>)。。。等もあります。空気を遮断した熱分解炉方式の為、外部 (内部) 加熱方式、及び高温熱分解炉の諸問題から、各装置ともいろいろ工夫はされていますが、併せてスケールアップは極めて困難な模様です。

高濃度水素を含む合成ガスが製造できる為、②、③は主要なターゲットの水素製造を、②は更に合成燃料、合成化学への展開も考えている様です。特に③、及び④は小型装置 (廃プラガス化発電等) でもあり、大型化装置の可能性はほとんどないと思われます。

例外は⑤EnviroPower (50~200 トン/Day: [Eco-Friendly Power Generation, EnviroPower Renewable Inc. \(eprenewable.com\)](http://www.eco-friendly-power-generation.com))、或いは空気を取り入れ内部 (一部) 燃焼・加熱のガス化の⑥W2E (<http://w2es.com/gasification.php>)、⑦

ECOGAS (<https://www.ecogasgenerator.com/en/>)。。。等の廃棄物 (RDF) 処理 (及びクリーンなバイオマス原料処理) 用・高温

大型ガス化炉がありますが、⑤は Syngas・ボイラー蒸気発電が主となっています。纏めです。Rotary-Drum タイプの製品は、乾燥機、炭化炉、油化機は多数存在しますが、諸問題もあり有力なガス化方式とはなり得ない模様です。

3-6. Entrained/Cyclone タイプ (Down-Flow/Up-Flow)

次は噴流 (Entrained) タイプ (<https://biofuels.co.jp/page20-6.html>) ガス化炉タイプです。微粉バイオマス (木材鋸屑、他) をガス化する場合、最適な中規模ガス化炉発電装置と云えます。特徴は、固定床ガス化装置の様に滞留時間は長くなく、流動床ガス化より更に短滞留時間です。因みにガス化炉内の原料ガス化滞留時間は数秒程度です。この結果、装置の停止・再開、及び故障時の炉内解放検査、等も比較的簡単、短時間周期で可能であり、比較的容易です。固定床タイプのガス化炉は小型でも最低 1 ~ 2 時間、中大型なら半日以上時間を要します。本ガス化タイプの原料は、鋸屑の様な微粉で、かつ乾燥状態なら、即直接原料として利用できます (流動床タイプも類似です)。従って、大規模製材所、家具工場等々が最善の利用先となります。チップ、ペレット原料は、更に再粉砕・微粉化処理 (Hammer-Mill) が必要となり、設備費も処理経費・処理時間も掛かります。

①VTX (<https://mevaenergy.com/>、発電能力 1200KWe) は (ガス化炉と装置全体)

の下記右側の添付例です。

ガス化反応及び固形物分離を同一機器内で行う渦流 Up-Flow タイプの例

(Cyclone/Vortex 方式) です。添付図の様に細粉原料と空気を、上部からサイクロンの様に炉内壁沿いに高速で流れ、この結果、急速なガス化反応が起こります。重力により固体は徐々に回転沈降分離し、合成ガスは中心部から上方へ、そして後工程の合成ガス精製部へと向かいます。



②Syncraft (<https://en.syncraft.at/>) (200~500KWe) も Up-Flow 型ガス化炉です。但し、分類上は多少無理があります (彼らは Floating Fixed Bed と呼ぶ)。高機能・高性能な小中型装置ですが、原料は細粉ではなく木質チップ材が使えます。(国内) 価格は可成り高価の様です。特に興味があれば、国内代理店 (Forest-Energy) に直接お問い合わせ下さい。



③UG Entrained Gasifier (<https://www.biofuels.co.jp/page20-6.html>)、左側 2 例添付 (ガス化炉図と実写真) 例です。こちらは通常の渦流 Down-Flow タイプです。酸化剤は空気、又は酸素を使用、発電能力 200~1000KWe 程度です。添付図の様に細粉原料と空気が回転・混合燃焼しながら下方に向かって流れ、急速なガス化反応をします。酸素を使う加圧方式のガス化装置は、特に酸素ガスを使い大型石炭ガス化向けの主要ガス化方式 (装置容量の小型化を狙い加圧下) として多種・多数存在します (石炭の微粉化も必要) が、空気を使うバイオマス原料向けガス化炉例は少ない様です。何れのガス化方

式も、使用原料は微粉であり、強力な微粉・空気混合効果により、ガス化炉内でのガス化反応は、他のガス化方式に比べ、遥かに高速に進み速やかに完了します。炉内ガス化温度分布もほぼ均一、スケールアップ大型化も容易な模様です。

以上の纏めです。合成ガス熱量は空気を使い窒素ガス分が含まれる為、①、②、③は通常よりやや高め程度 (1300~1500Kcal/Nm3) です。水素濃度は、③UG は高温ガス化の為もあり高めですが、一方①VTX (Cyclone) ガス化炉は、通常の反応温度、水素濃度です。②Syncraft も同様です。

その他の Down-Flow タイプの Entrained ガス化の例に、④Bioliq ([bioliq - The bioliq® Process - High Pressure Entrained Flow Gasification](http://www.bioliq.com)) もあります。特徴は固体バイオマスではなく、液状 Bio-Oil を高圧ガス化 (4~8 MPa) する方式です。高圧ガス化にする理由は、次工程の化学合成 (メタノール、DME) の合成圧に合わせ、合成ガスの昇圧操作を不要とする為です。

3-7. Chemical-Looping タイプ(合成ガス/水素)

最新ガス化炉技術であり、機能上は今後最も期待されるガス化炉タイプと云えます。現状は未だ研究、パイロット試験、或いは実証炉の状況であり、未だ殆ど商用化されていない模様です(例、EU の Clara-Consortium は大型商用化への実証デモ・プロジェクト、1 MWth)。金属酸化物、或いは金属化合物の組み合わせで何が最適な酸化・還元物質(Fe, Mg, Cu, 等) かも重要です。下記添付左側のガス化炉図の様に、このケースの場合は、実証済の Dual-Circulating-Fluidized-Bed 方式のガス化炉構成です。但し、通常使う空気、(濃縮/純) 酸素に代えて、その右側の①Fuel-Reactor 塔では、蒸気(又は CO₂)と既に加熱状態の金属酸化物(Fe, 他) の還元反応(原料に酸素を供与) + 吸熱反応(温度降下) によってバイオマス原料から合成ガスを製造し、片や還元化された金属(酸化物) は②塔へと循環されます。②Air-Reactor 塔では、①塔で還元された金属(酸化物) を空気で酸化(酸素付加) + 発熱反応により再加熱化させて、元の①塔へ再循環させます。金属酸化物は酸素供給媒体と、金属(酸化物) の潜熱供給(熱移動) 媒体、更に触媒作用(タール分解) も兼ね備えています。

Clara: <https://clara-h2020.eu/the-concept/>

CLG: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/15/7069/htm>

CLC: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-chemical-looping-for-hydrogen-production_fig6_273634728

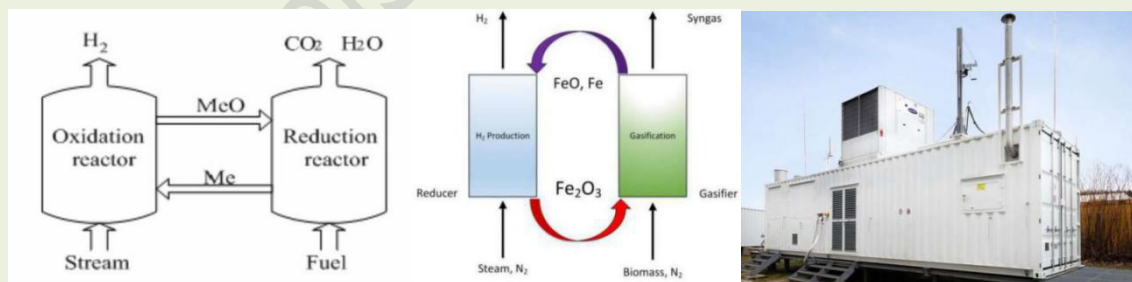
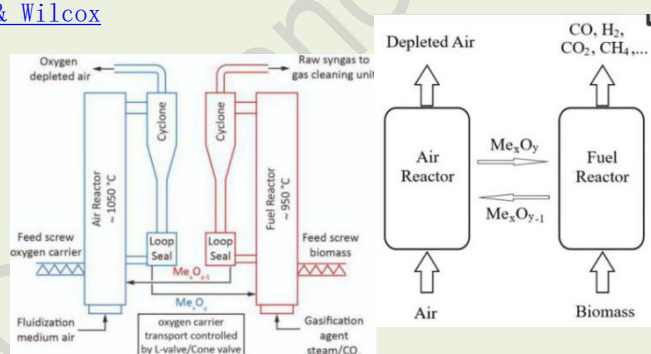
CLGH: [Chemical Looping Gasification and Hydrogen \(CLGH\) Process from Solid Biomass in a Dual Fluidized-Bed System | AIChE](#)

BrightLoop: [BrightLoop™ Hydrogen Production » Babcock & Wilcox](#)

本 Chemical-Loop タイプのガス化炉の特徴は、右記の左側添付図の A) でもクリーンな(窒素ガスを含まない)、或いは右側の B) でもクリーンな高熱量合成ガスの製造は可能です(詳細は上記 Clara/CLG 参照)。

A) Clara コンソーシアムの目標は、F.T.法(Fischer-Tropsch)、他により、最終目的は液体燃料の合成を目指しています。Clara の合成ガスでも PSA(Pressure Swing Adsorption)吸着分離操作、或いは膜分離(Membrane Separation)操作で**純水素**は得られますが、合成ガス中の水素濃度はそれ程高濃度でもなく、装置の費用対効果では余り得策ではない様に思われます。

下記左側の C) の方式なら**純水素**が得られ(詳細 CLC 参照)、更に下記中央の D) の方式なら**純水素と合成ガス**が同時に製造できるスキームとなります(詳細 CLGH 参照)。更に、メタン発酵、<https://www.biofuels.co.jp/page8.html> による**メタンガス**から直接**純水素**を製造できる方法もあります。E) 分散型設備(<http://www.rgh2.com/home.html>) (下記右側の添付コンテナ写真) 例ですが、既に販売されています。その他、**植物油**から、Chemical-Looping 方式で合成ガスを連続的製造し貯蔵できる分散型装置、等もあります。何れも、金属(Fe、Mg 等) の酸化・還元作用を利用した Chemical-Looping ガス化を利用しています。



その他に 3-8.High-Temp(高温熱分解)方式、他で得られる高濃度水素・合成ガスから、PSA 水素分離法で**純水素**が製造できます。尚、水素製造法は電気分解法により、既に商業化され販売されている高効率**水素製造法**(PEM:Polymer Electrolyte Membrane)もあります(<https://biofuels.co.jp/page90-2.html>)。特に、欧米では太陽光、風力の余剰電力の有効利用・エネルギー貯蔵法(バッテリーに代えて水素製造・タンク貯蔵)として、電気分解法による**水素**(Renewable-Hydrogen)製造法が本命の模様です。廃バイオマス、廃プラ類で得られる合成ガスを使い一旦全て発電を行い、この電力で電気分解(PEM 法等)を行う方法も、低効率ですが、時と場合によっては、実現性があるかもしれません。

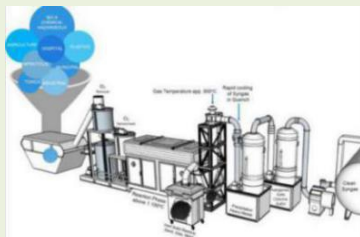
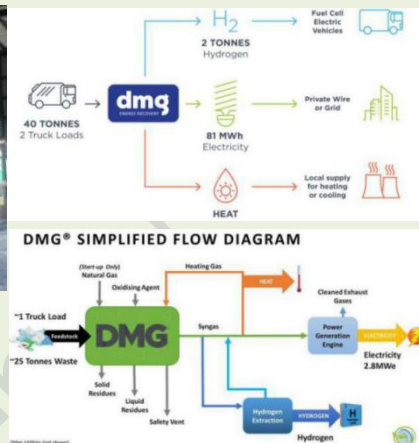
纏めですが、ガス化法による水素製造なら、本 Chemical-Looping、特に**純水素**が製造可能な方法に魅力を感じています。実用化に向けた今後の取り組みに最注目です。

3-8. High-Temp タイプ(高温熱分解炉、或いは純酸素を使うガス化炉)

本タイプの炉は、主に廃プラ・廃バイオマス原料の（超）高温熱分解炉（<https://biofuels.co.jp/page20-4.html>）タイプです。本タイプは高温熱分解処理の為、使用原料にも影響しますが、通常極めて**高濃度水素成分**（50~70%、但し、原料、操作条件により変動）の高熱量合成ガス（4000~5000Kcal/Nm³）が得られます（Tar&N₂ Free）。主な用途先は、**廃棄物（一般廃棄物、医療廃棄物）による水素製造**（PSA）、残りの合成ガス発電との併用利用、或いは**廃棄物発電**、又は合成燃料、合成化学用の合成ガス原料供給等の用途向けです。国内 FIT 対応の様なクリーンな**木質バイオマス発電用途**も技術・装置的には当然可能ですが、恐らく製造コスト高、等から不向きだと思われます。

①DMG の例：右側写真及びプロセス説明図は、DMG（<https://www.powerhouseenergy.co.uk/>）ガス化（@1100℃+）の例です。

主に廃棄物原料（廃プラ）を使い、特に**水素濃度（65%）**も高く水素燃料（+合成ガス発電）用途に最適だと思われますが（水素ガス製造が主目的の意向）、合成燃料、化学原料製造等向けは、必ずしも最適ではないと思われます。理由は H₂/CO 比の調整の工夫が更に必要です。下記の例の様に、40 トンの廃棄物で水素が 2 トン、発電 81MWh と言うことで、1 日 24 時間で処理する装置なら、毎時 1.67 トン/h の処理で、毎時 83Kg/h の水素製造と 3.4MWe の発電、及び排熱の利用も可能と言うことになります。

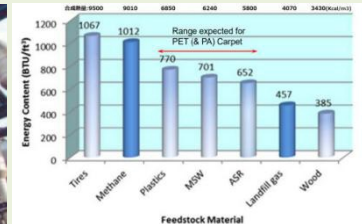
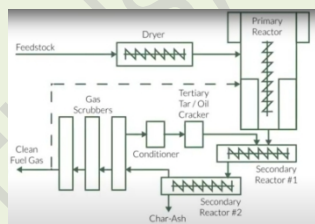


②CCC の例： 同じく超高温（1100~1300℃）熱分解炉（<https://www.biofuels.co.jp/page20-4.html> / <https://cleancarbonconversion.com/>）の例（左側添付）です。

主に廃プラ、廃タイヤ等の廃棄物を原料として、高温熱分解ガス化を行い最終的にガス精製工程を経て高熱量合成ガス（3100Kcal/Nm³ 程度）を製造します。従来は高熱量合成ガスの発電利用（ガスタービン、ガスエンジン発電）でした。①と同様、今後 PSA/Membrane 等による**水素製造用途**例も増えそうです。通常、残渣は炭、或いは不純物とも熔融・再固化（砂状）します。

③CHZ の例： 熱分解炉タイプですが、熱分解温度は中高温（600~700℃）炉の例です。下段は CHZ（[Technology - Today's Waste Tomorrow's Energy \(chztechnologies.com\)](https://www.easlellc.com/fugen-renewable-energy)）, (<https://www.easlellc.com/fugen-renewable-energy>)

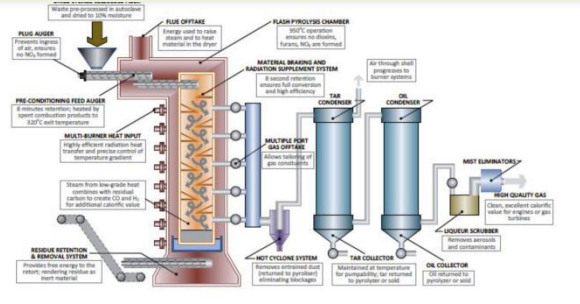
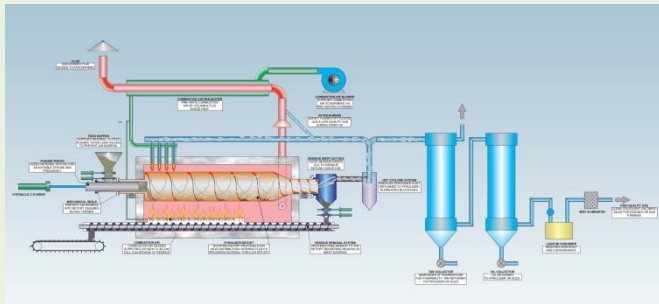
の情報（ガス化炉フロー略図、プラント写真（44 トン/日）, 及び各種原料に対する合成ガス熱量です。仮に 1 段中高温熱分解炉タイプなら、通常は水素の他、メタンガスからブタン迄の各種炭化水素ガス類の他、多量の油（Tar）が生じます。③の特徴は、①、②、次の⑦とも異なり、**多段（3）・中高温・熱分解法**（特許、Thermolyzer）により、最終の合成ガスは、他の炉タイプ（①、②、他）より、更に（超）高熱量の合成ガスが製造できます。低温熱分解の結果 Tar 分は一時的に増加しますが、別 Tar 分解反応器で熱分解によりガス化しリサイクルされます。この結果、Tar（Tar-Free）、及び窒素ガス（N₂）を含まず、水素は低濃度、高熱量・炭化水素ガス（C₁/C₂/C₃ ガス）分を多量に含む（**ガスエンジン/ガスタービン発電用途なら高効率・理想的な合成ガス**）を製造できます。多段熱分解炉方式でもあり、



温・熱分解法（特許、Thermolyzer）により、最終の合成ガスは、他の炉タイプ（①、②、他）より、更に（超）高熱量の合成ガスが製造できます。低温熱分解の結果 Tar 分は一時的に増加しますが、別 Tar 分解反応器で熱分解によりガス化しリサイクルされます。この結果、Tar（Tar-Free）、及び窒素ガス（N₂）を含まず、水素は低濃度、高熱量・炭化水素ガス（C₁/C₂/C₃ ガス）分を多量に含む（**ガスエンジン/ガスタービン発電用途なら高効率・理想的な合成ガス**）を製造できます。多段熱分解炉方式でもあり、3-2. Multi-Step（多段法）タイプの分類も可能ですが、他と同じ熱分解炉タイプでもあり、一応このタイプに分類しています。尚、当然原料により合成ガスの各成分濃度は変化します。上記右側の添付表（熱量単位変換：9.333 x BTU/ft³⇒Kcal/Nm³）の様に、廃タイヤ：9500Kcal/m³～木材：3430Kcal/m³迄も変わります。一般廃棄物（MSW）の合成ガス例は 6850Kcal/m³（内訳のガス組成は H₂:11.3%, CO₂:10.8, 水素 H₂:29.4, メタン：30.1, C₂：16.2, C₃:2.2, N₂:0%）であり、他の方式、②CCC：3100Kcal/Nm³ の 2.2 倍、メタン・ガス（9010Kcal/Nm³ 程度）0.76 倍もの熱量値です（通常の Down-Draft ガス化の 5 倍以上の熱量）。あらゆる廃棄物（MSW、廃プラ、複合材、廃タイヤ、[Tire Gasification | Pennoni](https://www.e-materialsrecoveryllc.com/index.html), e-Waste: <https://www.e-materialsrecoveryllc.com/index.html> 等）を原料に使い**多段・中高温・熱分解ガス化**によって最終的にガス精製工程を経た後、特別高熱量・合成ガスを、及び副産物の Char（炭）を製造します。本合成ガスの**発電利用**（ガスタービン、ガスエンジン発電）に**最適**です。尚、（中高温熱分解の為）

良質 Char (吸着材、土地改良剤、他) が比較的多く副生しますので、その販売先、或いは利用法の考慮も必要です。

高熱量・高濃度水素・合成ガス①、②と類似の廃プラ等を含む廃棄物用最新高温熱分解ガス化装置④Green-Waste=Energy (GWE) の例 (下記添付写真左側: 25 トン/日、同右側: 125 トン/日; <https://greenwasteenergy.com/c6technologies.html>)、或いは⑤



ECOGAS-Generator (@3,000KWe,

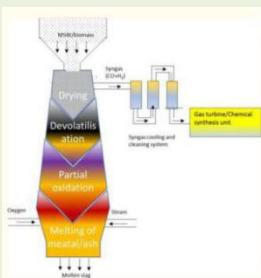


<https://www.ecogasgenerator.com/index.php/tecnologia/?lang=en>)

更に⑥PyroCore の例 (<https://pyrocore.com>)、⑦Anergy の例 (<https://www.anergy.com/what-is-htp.php>)、及びバイオマス用⑧TorrGas の例 (200604-Torrgas-english-RGB) の装置例もあります。①、②に比べ④～⑦は「やや中高温 (700～950℃) の熱分解ガス化方式です。特に④及び⑤に注目しています。

更に、⑧は大規模集中型・廃バイオマス処理の炭化炉装置と中小型・分散処理の2段階ガス化(中温@700℃と高温@1300℃)方式です(炭化は海外、ガス化国内も)。Micro-Gasturbine/20Feet コンテナ仕様の分散型⑨ENEXOR (の例

<https://www.enexor.com/our-product/>) もあります(添付右側、75KWe)



⑩Sierra の例: 超高温 (2200℃) Sierra ガス化炉(<https://sierraenergy.com/>)タイプです。元々は溶鉱炉 (Blast-Furnace) 技術の転用であり、左側添付の様に Up-Draft 類似、溶鉱炉類似の向流型ガス化炉タイプです。溶鉱炉と類似の為、スケールアップはほぼ無限大、全く問題なしとメーカー (Sierra) 側は言っています。空気の代わりに酸素 (空気より PSA 分離) と蒸気を使い、超高温で廃棄物類 (MSW 等) を完全にガス化します。得られる合成ガスは高熱量合成ガス (CO:60%, H₂:30%)、中濃度水素を含みます。ガス化発電に、或いは水素製造でも適しています。単一



超高温ガス化炉なので、次項 3-9. Plasma の①の様な発熱反応の Water-Gas-Shift 反応は余り進まず(逆反応が大) 高濃度水素は得られない模様です。残渣 (灰、無機物) も完全に溶かす溶融炉ガス化炉タイプです。酸素ガスを使う為、運転コストも高く、例えば、処理費用が多少高くても処理が優先される廃棄物専用です。原料コストの高いクリーンな木質バイオマスを使う発電 (FIT) は高運転経費等、採算的に不向きです。

通常は単独水素製造より、水素製造+発電との併用が最適だと思います。

纏めです。本 (超) 高温熱分解ガス化炉は、廃棄物処理用に特化したタイプです。③を

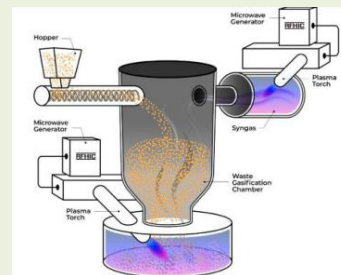
除き、何れの装置も類似の高熱量合成ガス、高濃度水素が得られますので、その用途先は、A) 水素製造+残合成ガス利用のガスエンジン発電、或いは B) ガスタービン発電等です。③は、通常ガス化の水素濃度ですが、N₂ を含まない特別高熱量の合成ガスであり C) ガスエンジン、ガスタービン発電分野がベストな選択だと思っています。特に一般廃棄物 (MSW) 処理量の多くは日量最低でも 200~300 トン、今後は 500~1000 トン規模が求められます。一方、本ガス化炉の設備能力は、単位装置当たり、現状日量 20~50 トン以下程度であり、スケールアップが簡単と云う Sierra でもその規模以下です。従って大規模ガス化用途分野は、次の 3-9. Plasma タイプか、或いは 3-3、或いは 3-4 で説明済の流動床タイプ (ガス化+ガスボイラー蒸気タービン複合発電、等) に譲るべき分野だと思います。同じ廃棄物でも、産業廃棄物 (廃プラ、廃タイヤ、他)、或いはそれらの中小規模、分散処理分野の日量 100

以下（2～3基並列設置・処理）程度が主なターゲット、限界でもあり現実的だと思います。

3-9. Plasma/Microwave タイプ（超高温熱分解）と Green-H₂ 製造

本熱分解ガス化炉タイプは、超高温（前者より更に超高温・熱分解ガス化）を実現する為、（多量の）電力を使い Plasma トーチ熱、或いは Micro-Wave(電磁波) 熱を使う熱分解ガス化方式炉です。Plasma 熱分解ガス化は一般廃棄物ガス化法として、以前より大型装置で実用化されています(国内もゴミ処理場向けに導入済例も有り)。より効率の高い方式の

Microwave(<https://rfhic.com/applications/rf-energy/waste-gasification/microwave-plasma-for-waste-gasification-application/>)方式(右記参照) もありますが、少数の例を除き



(<https://www.ukrplasma.com/index.php/product>), [Microwave Plasma Cracking | Filter - Plasma](#)

[Dynamics \(plasma-dynamics.it\)](#)), 通常は大型化が難しい等の諸課題もあり、未だ一部小型機を除いて大型商用化プラントの実現は出来ていない模様です。

何れも一般廃棄物 (MSW、バイオマス廃棄物) を超高温で熱分解ガス化を行い、高熱量合成ガスを発生させます。含まれる一部金属・鉱物・無機物迄も完全に熔融させ、冷却後・最終的に固形状の建築用資材 (砂/砂利) 等として取り出す処理法です。

多量のプラズマ電力も必要であり、通常のクリーンなバイオマス発電(原料費が有価) では採算性が採りにくい状況です。従って、一般都市廃棄物、MSW、産業廃棄物、医療廃棄物、等のガス化分野が主なターゲット分野となります。この分野なら、原料費は無料か、逆に処理・処分費 Tipping-Fee が頂ける場合もあります。最近事情も変わって来ますが、これ迄は廃棄物を利用するガス化ビジネスを行うと云うより、前処理 (分別) , 処分が困難と思われる様な大量廃棄物を一括処理出来れば、それで一安心とも云えます。多くの場合、公共設備・事業分野、大規模設備であり、直接燃焼法か、ガス化法でもガスボイラー・蒸気タービン発電に利用されています。下記は [Plasma/Microwave ガス化炉装置](#) の例です。

<https://www.semanticscholar.org/paper/Plasma-Gasification-as-an-Alternative-Technology-of-Mansur/a996ebb9ef91511c3ecf431e9b9b95372a4cd644>, <https://www.pyrogenesis.com/wp-content/uploads/2019/09/PRRS-EN.pdf> 及び [Microwave plasma gasification - YouTube](#)

(この Microwave ガス化の法人は、現在営業はしていない模様です)

次にプラズマ熱分解ガス化の実例です。

①SG-Group の [SGH2 \(Technology — SGH2 Energy\)](#) は、プラズマ・ガス化炉技術 (3500℃) を使う [超高温ガス化炉](#) です。従来の様な超高温ガス化発電ではなく、更に [【純水素ガス製造法、及び装置】](#) 迄をパッケージ化した例です。最初の設備計画は、廃バイオマス (廃紙) 原料を無料で市側 (Lancaster) から供給を受け、小型分散型の日産 11 トン、年間 3800 トンのグリーン水素の製造設備を計画 (米国, California) 中です。興味があれば、前記の同社 H.P.、及び下記の記事、動画等を参照ください。

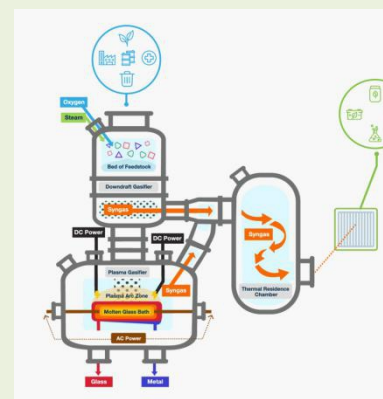
<https://www.powermag.com/group-says-it-will-launch-worlds-largest-green-hydrogen-project/>
[EnergySource Innovation Stream with SGH2: Green hydrogen from gasified biomass - YouTube](#)

①では、投入された固体原料 (廃紙: 無料) は、高純度酸素 (95%、空気中から PSA 分離) を使い高温 (2000℃) ガス化 (Autothermal-Gasification) 行い、更に Plasma トーチ熱 (4000℃) により超高温 (3500℃) 熱分解ガス化 (Allothermal-Gasification) を実現しています。得られる窒素を含まないクリーンな合成ガスは H₂:43%/CO:45%程度の様ですが、更に Water-Gas-Shift 反応: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ (<https://ja.wikipedia.org/wiki/水性ガスシフト反応>, <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35592.pdf>, [Water Gas Shift - Global Syngas Technologies Council](#)) (発熱反応: $\Delta H @ 298\text{K} = -41.1 \text{ KJ/mol}$) を利用し (触媒@低中温下) 80%+ 迄水素ガス濃度を高めています (残 CO 濃度は少量 (4~5%)、この装置では副生 [バイオ CO₂](#) は大気放出、特に利用なし)。その後、PSA 分離により 99.99% の [高純度水素 \(Green-Hydrogen\)](#) を製造出来ると云っています。Plasma の必要電力量は一般に思う程多くはない様です。これが [【高純度水素を 2\\$/Kg】](#) で製造できると云う根拠の様です (製造費の詳細は不明)。前項 3-1 Up-Draft 法⑦OMNI ケースも考え方は類似です。ガス化は一部原料の部分燃焼・ガス化 (Autothermal-Gasification) を行い、そして Plasma 熱を利用し残留 Tar 分を効率的に合成ガスへ再分解する方式です (Gas-Plasma 法)。

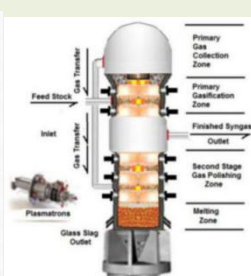
バイオマス由来の Green 水素価格は現在恐らく 2000 円/Kg 程度すると思われます (メタン Reforming の Blue 水素でも 1000 円+/Kg, 添付表でも 10~13\$/Kg)。国内の将来目標でも 1000 円/Kg 程度の模様です。因みに別の EU の添付資料でも、グリーン水素 7 €/Kg as H₂=945 円程度 ([GrInHy2.0 - GrInHy 2.0: Green Industrial Hydrogen 2.0 \(green-industrial-hydrogen.com\)](#)) とも述べてますので、SGH2 の 2 \$/Kg (220 円/Kg) の製造コストは、将来目標の数分 (4.5) の 1 の水素価格となり驚異的なグリーン水素製造コストの安さです。最も Plasma 炉でなくても、高濃度水素を製造できる他ガス化炉方式 (例、前述 3-8. High-Temp) もあり、PSA/膜分離・技術と組み合わせた方法、或いは将来有力な 3-7 Chemical-Looping (H₂) 技術による直接的な純水素製造等が利用でき

ば、効率的に**グリーン高純度水素**は製造出来る見込みです。

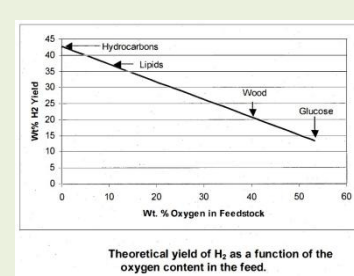
次は②AlterNRG 技術 (Plasma Gasification | netl.doe.gov) です。この Plasma 技術に基づき、いろいろの会社が、国内(日立金属)を含め世界各国で一般廃棄物を対象とした大型 Plasma ガス化炉を建設して来ています。その 1 例が③Phoenix-Energy (http://www.phoenixenergy.com.au/plasma_gasification.php)です。同じ廃棄物(炭素水素化合物)でも、水素製造の原材料(廃棄物)、何を使うかにも影響してきます。最も**水素含有割合**(下記添付グラフ参照)の多いのは、炭化水素(廃プラ、廃タイヤ、炭化水素油)、そして動植物油脂(廃食油)、更に水素含有割合は低下しますが、木材、その主要成分グルコース(廃バイオマス)の順で低下します(含有酸素割合は、逆に増加)。水素製造は水分の多い**廃棄物(廃プラ)**を使う例が多い理由の一つです。加えて原料が多量に、都市部に集中し、処理費も得られ、その処理が環境問題の解決に繋がるからだと思います。この他、④MSW, 廃プラ/廃バイオマス等から、**Down-Draft 法+Plasma ガス化**を組み合わせ、水素なら日量 1.5 トン(500 トン/年)と、小規模ながら**高濃度水素**を含む合成ガス(純水素製造は P S A 等の設備必要)が製造も出来る InTec (PEM ガス化法 : Plasma Enhanced Melter: <https://www.inentec.com/pem-technology/>, 右ガス化炉部添付図) の例もあります。添付図の様に、先ず上段の高温 Down-Draft ガス化炉(800~1200℃、1 段反応炉)に原料廃棄物と酸素、蒸気を上部から加えガス化を行いクリーンな**合成ガス(橙色)**を底部から得ます。残った Char/Ash は、下段の PEM (2 段反応炉)に灰皿(Grate)を介し移され、そこで Plasma-Arc (10000℃) を使い炭素分を完全に再ガス化(1200~1400℃)し、更にクリーンな**合成ガス**と無機物ガラス質砂利が取り出されます。



その他、⑤超々高温(Hyper High Temperature :3000~10000℃)の更に小型・分散型の廃棄物ガス化(**Ionic-Gasification-Cogent: HelioStorm - Cogent Energy Systems**)もあります。Plasma ガス化は、前述の NRG 技術の様に大規模の廃棄物ガス化対応でしたが分散処理用の小型(3.5 トン/日)であり、勿論バイオマス廃棄物も処理可能ですが、例えば、医療廃棄物等の発生場所での処理等が最適です。



OUR HYDROGEN: MORE CARBON REDUCTIONS, LESS COST		
HYDROGEN TYPES	CARBON INTENSITY (kg CO2e/kg H2)	PRODUCTION \$ (per kg)
GREEN HYDROGEN	SMR Greener Than Green Hydrogen	<100 kg CO2e/kg H2 (avoiding 20 kg of CO2 per kg of H2)
	Green Hydrogen (Electrolysis)	0 kg CO2e/kg H2
HYDROGEN FROM FOSSIL FUELS	Gray Hydrogen from NatGas	+12 kg CO2
	Brown Hydrogen from Gasification of Coal	+100 kg CO2
BLUE HYDROGEN WITH CARBON CAPTURE & SEQUESTRATION	Gray Hydrogen	+12 kg CO2 (carbon captured)
	Brown Hydrogen	+100 kg CO2 (carbon captured)



他にも Plasma ガス化とは離れますが、高効率・水素製造法として、水の電気分解法があります。注目例は H2PRO 社です。イスラエルのベンチャー企業 (Home | H2Pro) であり、最近 Bill-Gate の【Breakthrough Energy Ventures】も出資 : ([Bill Gates backs \\$1/kg green hydrogen water splitter technology | RenewEconomy](http://Bill Gates backs $1/kg green hydrogen water splitter technology | RenewEconomy)) している企業(住友商事も)です。同社は E-TAC 技術と云う最新・水電気分解(2-Step)技術を使い(必要電力 42KWh/Kg)、2023 年迄に**水素 2\$/Kg(以下)**で製造できる分散型コンテナ仕様機(500Kg/day)を販売する計画の様様です。何れ今後 10 年以内に 1\$/Kg で**グリーン水素**を大規模・商業規模で製造できると云ってます。こちらも水素価格の計算根拠は不明です。



次も同じ電気分解法による**水素製造**(左側の添付写真例、新電解法 **AEM : Anion Exchange Membrane 法**の Enapter: <https://www.enapter.com/>)と云う会社の製品、既に販売されています。この装置、水素製造単位 0.5Nm3/h に標準化され、希望の水素必要量に応じ自由に必要数(PC サーバーの様に)標準ラックに組み込む方式です(水素需要が増加なら、追加も簡単)。Enapter の仕様書から計算すると水素は 53.8KWh/Kg、538 円/Kg(@10 円/KWh となります。同じ AEM 法は他(例: <https://ionomr.com/solutions/aemion/>, <https://www.hydrolite-h2.com/company-profile/>)にもあります。

一方、日本もそうですが、既に前述の米国でも EU でも、特に**グリーン H2 化社会**の実現に向けた大規模プロジェクトを推進中です。その 1 例がアムステルダム(オランダ)(H2ermes: <https://www.youtube.com/watch?v=gAXINZhZpn8>)です。

纏めですが、Plasma ガス化法は一般廃棄物関連のガス化(+ガスボイラー・蒸気発電)法、過去旧ウエスティングハウス(W.H.)が開発した②AlterNRG 技術をライセンスし各社(例、③Phoenix-Energy)各国・各地に大規模ガス化設備が導入されています。一方、分散処理・小型の④Cogent の様な廃棄物ガス化炉も注目です。

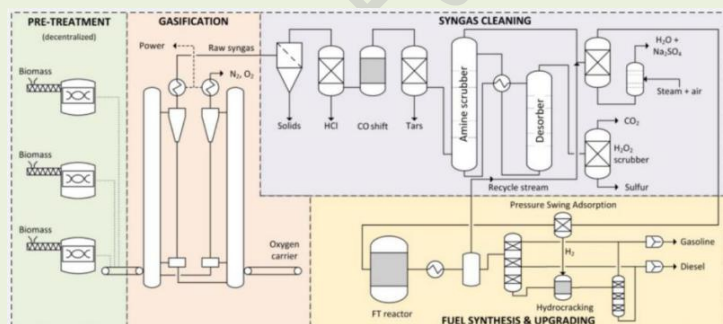
最近、この Plasma ガス化を使い**グリーン水素**を効率的に製造する方式も①SGH2 から発表されてます。一方、**熱分解法 (Pyrolysis)**ではなく**加水分解法 (Hydrolysis)**でスラッジ等から炭(Bio-Char)を作り、その炭のガス化+Water-Gas-Shift 反応で**グリーン水素製造**を目指す新興企業(独 blueFLUX:<https://www.bluefluxenergy.com/en/blueflux-process/>)も注目です。余剰電力(太陽光、風力、バイオマス)を前提に、より少ない電力で効率的に水素を製造する技術も H2Pro, Enapter 等から、或いは水素利用社会の実現に向けた H2ermes 計画等も公表されています。余剰電力が常時存在する状況であれば(電気料金が無料なら)、将来大量のグリーン水素が安価に製造できるかもしれませんが、太陽光は広大な設面積も必要であり、別の意味で環境問題を引き起こす可能性もあります。海上風力の余剰電力も同様です。Microwave ガス化の実用化は今後に期待と云う状況です。

4. ガス化炉(熱分解炉)のガス精製処理

ガス化炉出口を出た高温の合成ガスは、次工程の合成**ガス精製工程**処理が必要です。合成ガスの精製工程を経て初めて、その次の工程であるガスエンジン(或いは、ガスタービン)発電用合成ガス燃料として、或いは PSA ガス分離等による**水素製造**の利用等も可能となります。本解説の主テーマは、各種ガス化炉、及びその前処理工程部が主であり、ガス化炉の次工程の合成ガス精製工程は、(超)概要説明のみを行います。特定のガス化炉、特定のガス化原料、及び特定の合成ガス用途(発電ならガスエンジン、ガスタービンの種類と燃料ガス仕様、等)により、合成ガスの精製工程は異なります。更に必要なら、他情報を参照頂くか、別とご質問(<https://biofuels.co.jp/page70-1.html>)お願いします。通常ガス化炉は、**ガス原料前処理⇒ガス化分解炉⇒合成ガス精製処理⇒合成ガス利用設備** 工程、等から構成されます。

上記の合成ガス利用設備は、ガスエンジン発電なら、更に⇒ガスエンジン発電機に接続されます(大型の場合、⇒ガスタービン発電機も)。海外の場合、特に中小型設備であれば、**高温ORC**タービン発電機の例も数多く存在します。通常ガス化装置を前提とした**水素製造目的**であれば、ガス精製装置と別と水素分離 PSA (Pressure Swing Adsorption)装置、或いは膜 (Membrane) 分離設備、等が別と必要です。化学合成用であれば、発電用途より高純度合成ガスを、反応に必要な厳密な H₂/CO のモル比の管理を(蒸気量の制御等で)ガス化炉内で、或いは後工程(Tar 分解後の**水素添加** / 一部**除去**・モル比調整)等が必要となります。何れにしても、これらの工程は、ガス化炉タイプに加えて、原料の種類、合成ガスの用途(発電、水素製造、合成燃料用、化学原料等)により、必要な工程、或いは工程順、合成ガス、不純物の仕様・管理は変わります。ガス化炉+ガス精製処理工程は多くの場合、同一ガス化装置メーカーが、後工程の合成ガス用途に応じて(標準/カスタム設計)の設備提供となりますが、別メーカーがガス精製工程を提供する例(Sierra はガス化炉の提供限定)も時にあります。この場合、後工程のガス精製工程を提供する企業との密な協力が必要となります。合成ガス利用設備(例、ガスエンジン、ガスタービン発電機)は別エンジン、ガスタービン製であり、同様に発電機も別発電機メーカーの製作です。ガス化装置メーカーによっては、彼らの標準構成のエンジン、発電機を組み合わせ一括標準構成の販売をする場合、或いはお薦めの提携先エンジンと発電機メーカーとの組み合わせを薦める場合、等いろいろです。又は顧客の自由選択でガスエンジン、発電機は仕様さえ合えば、それ以上は関与しない場合等ガス化炉メーカーにより種々雑多です。下記は合成ガス精製部の例です。

4-1. Clara 合成燃料用ガス精製の例



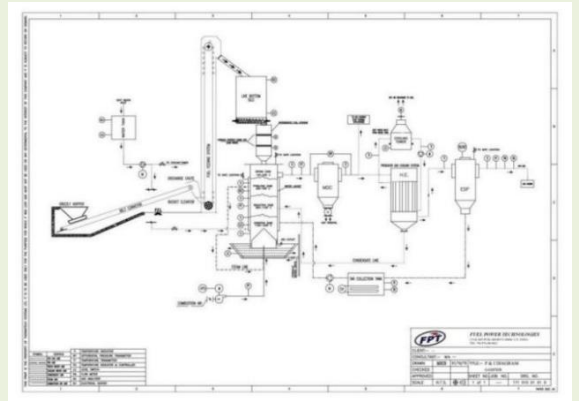
左記の添付例は Chemical-Looping(Clara, <https://clara-h2020.eu/>)のバイオ燃料合成のコンセプト・フローの概念図(Clara)の例です。ガス化炉は、前述 2 塔式 Dual-Circulating Fluidized Bed ガス化炉であり、その合成ガス精製工程は、下記(複雑な例)となっていますが、詳細は不明です。

- ①サイクロン(微粉体 Solids 除去)
- ②酸(HCl)除去(アルカリ・スクラバー洗浄処理、ガス化原料と合成燃料等の合成ガス仕様により変わる)
- ③合成ガス CO-Shift 反応(H₂/CO モル比調整(ガス化精製工程で行う例))
- ④タール除去(一般に Dry/Wet タイプ有、No-Tar ガス化炉は不要)
- ⑤スクラバー処理(Amine)により、硫黄(H₂S),CO₂ 処理工程(木質発電なら不要)
- ⑥水素ガス濃縮(PSA)、次工程の⑦燃料油合成(F.T.法)、更に調整工程等…へととなります。

4-2.FPT/PMX ガス化発電用ガス精製の例

次の例は、Up-Draft ガス化炉により、原料は（廃）木質等を利用し発電用途の合成ガス燃料を製造するガス精製工程の例（PMX or FPT, <http://biofuels.co.jp/page20-2.html>）です。前述のバイオ燃料用途に比べ極めて単純です。右記添付 Up-Draft ガス化の例はガス化炉の出口温度は低く（250℃）、木質系ガスエンジン発電が前提であり、必要な精製工程は下記のガス精製工程のみです。Up-Draft 法発電でも、硫黄、塩素等を多く含む原料のガス化発電の場合、塩化水素（HCL）、硫化水素（H₂S）等の除去用スクラバー処理は必要となります。

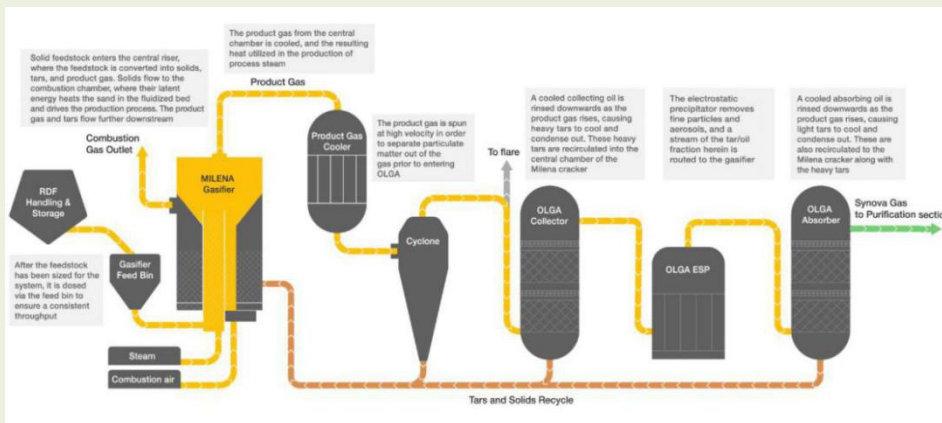
①サイクロン（微粉体 Solids/炭の除去）②間接冷却(熱交換) 処理(水冷却塔)、及びタール除去 ③高圧静電装置（ESP,残留タール、残渣除去）④次工程の発電装置へ、となります。



4-3. Synova ガス化ガス精製の例

次の例は、その中間の Synova の合成ガス精製プロセス（ORGA）の例です（下記の工程概要図参照）。

- ①高温合成ガス冷却器（熱回収、自己利用の蒸気発生）（流動床ガス化炉出口の合成ガス温度は、比較的高温）
- ②サイクロン（微粉・固形物除去）
- ③高分子(高沸点の Heavy-Tar)除去



（ガス化炉ヘリサイクル再分解）

- ④高圧静電装置（ESP）（微細固形物、エアロゾル・タール除去）
- ⑤低高分子（低沸点 Light-Tar）除去（ガス化炉ヘリサイクル再分解）、除湿処理
- ⑥必要なら不純物除去（合成燃料等の仕様による、発電は不要）⑦次工程（燃料合成、発電等）

以上ですが、ORGA の特徴は、Tar を Heavy/Light 留分、別々に分けて効率的に溶剤吸収分離するのが、特徴です。

ORGA 単体も他社製ガス化炉向けに外販もしています。

以上、合成ガス精製工程は、ガス化炉の原料種、ガス化方式、及び後工程の合成ガスの用途により、極く簡単な例から、複雑の例まで種々あります。一般に合成ガスの用途、仕様に応じ、ガス化炉出口（生）合成ガスの

- 1) 固形物除去（炭残渣）
- 2) 冷却処理（熱回収（温水、低圧蒸気、ガス化用空気加熱）、間接・直接冷却、油（BDF）、水冷却、或いは空冷）
- 3) タール除去（Tar-Free ガス化炉の場合、不要）、及び水分除去・乾燥処理（次の工程の仕様迄の除湿・乾燥）
- 4) 有害物質除去（必要なら塩素、硫黄等のスクラバー除去、木質バイオマス発電は不要）
- 5) 合成ガスの圧力安定化・中間バッファ貯槽の設置（次工程の圧力変動仕様を超える場合、或いは工程安定化の為）、圧力不足なら合成ガス昇圧器の設置等の各工程が必要です。

5. ガスエンジン発電機、ガスタービン発電機

次にガス化炉装置の合成ガスを使う発電機について、その概要を紹介します。

5-1. ガスエンジン発電機

合成ガスによるガス化発電を行う場合、通常採用されるの方法はガスエンジン発電方式です。殆どのガス化装置はガスエンジン発電機方式を採用します（全て天然ガス用ガスエンジンを合成ガス用へ仕様変更し使用）。

世界的に実績があるのは、高速型（1500/1800rpm）の Jenbacher (<https://www.innio.com/en/products/jenbacher>) です。エンジンモデルも、中型から大型機迄、ガス化装置規模に応じ選択の自由度は大きいです。高性能ですが価格も高価です。ガス化発電装置 A-Tec、B&W Bolund 等の標準仕様機となっています。

より経済的、高信頼性の中速型 Zichai(<https://zcxny.cnadc.com.cn/yw/index.jhtml>) (OEM 製品)ターボ付高性能機がお薦めです。中速型 (600rpm) ガスエンジンの回転数は高速型 (1500/1800rpm) のほど 3 分の 1 であり、単純に考えれば、エンジン・オーバーホール時間 (ピストンの摩耗に伴う大規模修理) は 3 倍 (高速型は 2~3 年毎、中速型 6~7 年毎) となります (長期使用可能、高信頼性、保守費減)。課題は Jenbacher 等の高速型エンジンに比べ、発電効率が多少劣ります。これを解消する為、Jenbacher と同様、EU 製のターボチャージャー付を標準仕様に変更しています。尚、発電機能力は、1 基当たり 400, 500, 800, 1,000KWe 限定となります。発電規模が 400KWe 以下の場合、高速型の選択となります。400KWe 以下の場合、ガス化炉メーカーの指定機種が原則ですが、特に無ければ他の高速型を選定します。



ガスエンジン発電に代えて Dual-Fuel エンジン発電の例もあります。合成ガスは主燃料、及び着火用に液体燃料 (軽油、バイオ油、BDF) を少量 (数%) 補助燃料として加えて燃焼・駆動させます。エンジンの基本構造はディーゼルであり、従って、ガスエンジン (ガソリン・エンジン) の様な点火プラグは不要です。軽油補助燃料が圧縮着火・点火プラグの役割をします。エンジンメーカーで販売している場合と、中間のエンジン改造会社が改造して再販する場合も有ります。

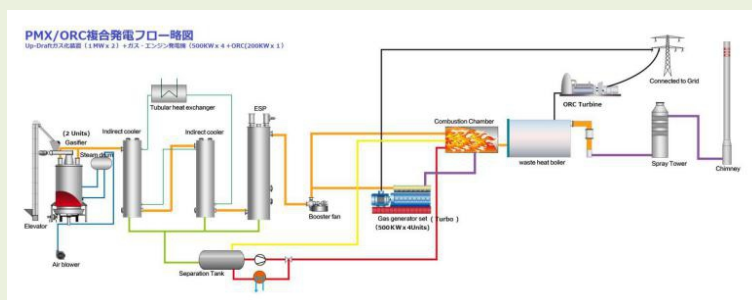
5-2. ガスタービン発電機

大規模ガス化炉の場合、ガスタービン機 (前記ガスエンジン右側添付の例、<https://biofuels.co.jp/page20-9.html>) の採用もあり得ます。ガスタービンは一般にガスエンジンに比べ高信頼性ですが、設備費はより高価です。最近、ガスエンジンの発電効率を超える高効率タービン発電機 (発電効率 40%+@400KWe) も販売されていますが、通常は排ガス温度も高く、低発電効率 (中型機の場合、25~30%程度) となります。従って、排熱の有効利用が採算上不可欠です (低発電効率を ORC 付とし発電効率アップを図る案もあり)。加えて、ガスタービンの場合、中高熱量合成ガス (2000Kcal/Nm3 以上程度) が不可欠であり、通常の空気を使うガス化装置で製造される合成ガス (低発熱量、1000~1500Kcal/Nm3 程度) では、いろいろ工夫しても恐らく利用できません。項目 3 で説明の様に、①1 塔式ガス化炉では酸化剤として酸素を使う分解炉、②2 段法 (炭化炉+蒸気改質炉) 合成ガス、或いは③2 塔式ガス化炉、④空気を遮断した高温・熱分解炉、或いは⑤Plasma ガス化炉等によって製造される (中) 高熱量・合成ガスが必ず必要です。加えてガスタービン燃料ガスは (常圧) ガス化炉の場合、合成ガスを加圧 (少なくとも 1MPa 程度) する必要があります (大多数のガス化炉は常圧運転、或いは多少負圧運転です。従って合成ガス圧縮費が運転経費増の一因)。小型 Micro-Gasturbine も、設備規模差はありますが、同様の傾向であろうと思われます。小規模発電でも、その採用例も少ないと思われます。

5-3. 排熱回収複合発電 (ガスエンジン、ガスタービン)

次は排熱回収複合発電 (<https://biofuels.co.jp/page20-13.html>) です。3-1.Up-Draft タイプの②PMX/①FPT Updraft ガス化発電装置で

は、排熱回収発電 ORC 付ガス化発電 (右側添付フロー図) を標準化して提供しています。ORC 機器の 2 例 (下段左側添付) です。エンジン排熱の熱回収に加え、副生 Tar を燃料化・有効再利用し、更にこれら熱回収も併せることで高温化された排ガスによる ORC 発電を行います。この結果、大幅な発電量増が実現できます。他社ガス化発電装置に比べ遥かに高発電効率であり価格も割安だと思えます。添付フロー図は典型的なガスエンジン



発電機+ORC 発電機の組み合わせですが、ガス化発電規模、排熱量、排熱温度によっては、ガスタービン+ORC、或いは排熱回収・低圧蒸気ボイラー・タービン発電機との組み合わせ法もあり得ます。尚、ORC 例は、

Tica(<https://www.exergy-orc.com/exergy-restarts-with-tica-to-boost-integrated-systems-and-advanced-green-power-generation>) の小型版 (下段左側) Pure-Cycle(~280KWe), 及び大型版 Exergy(~2MW: <https://www.exergy-orc.com/>) (同じ右側) です。

前者は、主に PMX-Updraft(2MW)用、後者は同じく PMX-Updraft (8~10MW)用の標準 ORC 複合発電設備に採用をします。同様に 3-2Multi-Step タイプの②A-Tec ガス化炉 (2 基構成) タイプでも、ORC (150KWe) 1 基付を標準としています。



更に他社の中大型ガス化炉でも、ORC 付の発電設備が可能だと思われませんが、その価格アップと効果（発電量増、或いは原料減）次第だと思われます。

5-4.その他、発電方式

その他、理論効率が高いと言われ古くから存在するスターリン

グ（Stirling）エンジン（外燃式）発電もあり得ますが、例え、小型機でも、殆ど実例はない模様です。同様に燃料電池による発電方式もあり得ます。但し、原料は高純度水素、或いは高純度メタン・ガスが必用不可欠です。

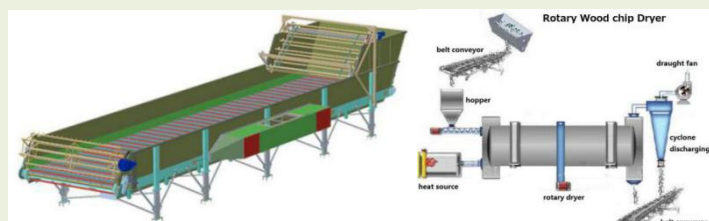
ガス化装置では、通常水素を含む混合・合成ガスが得られる為（例外、前述 Chemical-Looping の例は純水素も可のケース）、更に水素分離（PSA）、或いは合成ガス（CO,H₂）からメタンガス合成（合成メタン）等の追加設備も必要です。これら設備があれば、技術上では燃料電池発電は可能です（純メタンガスはメタン発酵法：<https://www.biofuels.co.jp/page8.html> + PSA でも可能）。特に燃料電池は高発電効率（45%+）が期待されていますが、設備費・高運転経費の為か、現状では実例は殆どありません。燃料電池発電の多くの実例は、天然ガス原料による発電だと思われます。今後、余剰電力（太陽光、風力）を使った水素製造（水電気分解、前述の例：[Home | H2Pro](#)）により、燃料電池・発電の他、将来的には水素ガスエンジン（ガスタービン）発電等も期待されます（現在でも、水素用は一部で販売されています）。

6. ガス化前処理設備

原料の状況により、或いはガス化炉装置の原料受け入れ仕様により、何らかのガス化炉投入前の原料前処理も必要です。

1) 最も簡単な原料木質チップの受け入れ可能仕様（外部購入チップ・サイズ（例、2~5 cm）と含水率（例、5~15%））基準をクリアしていれば、通常ガス化炉なら、即ガス化炉へ原料投入も可能であり、特に前処理は不要です。但し、現実はこの様な実例は少ないと思います。木質チップは空中水分の吸収が早く、例え、入荷時に含水率が使用条件を満たした乾燥状態だったとしても、2~3日間、大気中放置すれば、即含水率過多（20~25%）となり得ます（外部空気を遮断できる格納庫も必用）。

2) この様に水分過多な場合、乾燥機が不可欠です。乾燥機があれば、逆に含水率を全く気にしないで生チップ（~50%程度迄）



を、時に有利な条件で購入できます。乾燥機に必要な乾燥機用熱源はガス化装置、及びエンジン排熱の的確な熱回収を行えば、必要な熱量は（充分）得られます。ガス化装置で必要な乾燥機が標準で付いている場合（左側添付の左側は A-Tec 乾燥機）、或いはオプション使用で選択出来る場合（LiPRO,他）、ガス化炉メーカー提供（指定）のオプション乾燥機がリスクも少なく

ベストな選択です。ガス化装置メーカー側で提供がなければ、別と乾燥機の購入（左側添付の右側の例：Rotary 式乾燥機：<https://biofuels.co.jp/page20-11.html>）となります。

3) 原料が林業組合等から丸太供給の場合、切削型チップ機（右側の添付例、<https://biofuels.co.jp/page20-10.html>）が必要です。丸太のチップ化処理後、仕様を超えた（下限・上限）チップを篩処理後、前述の乾燥機により乾燥処理を必ず行います。

4) ガス化炉タイプによっては、ペレット（例、下段左側から2番目）（又は、原料細粉のブリケット化）仕様のガス化炉もあります。ペレットを外部購入出来れば、特に前処理設備は不要ですが、極めて高価（チップ単価の2~3倍も）です。また、ペレットも水分を吸収します。水分吸収したペレットは（再）細粉化し、最早ペレット仕様のガス化原料として使えません。保存法の注意が必要です。

5) ペレットを自家製造する場合、チップ化処理後、再粉碎機（細粉・微粉化）（例、Hammer-Mill, 下記左側の例）とその右側のペレット（或いはブリケット）機も必要となります。設備費はガス化炉に比べ、そう大きな割合の金額ではないと思われますが、運転経費（モーター駆動電力）が可成り掛かります。丸太から、ペレット迄の主要処理（工程）は、次の様になります。

丸太⇒チップ機⇒再粉碎機⇒乾燥機（細粉用）⇒ペレット機（ブリケット機）

以上が、バイオマス（主に木質系）の前処理工程の概説です。原料供給とガス化炉間の前処理は、これら相互の充分な調整が必要です。固体（バイオマス類）を取り扱う前処理が不十分な結果、次工程のガス化装置が稼働できないトラブル原因の場合も少なくない様です。付帯重機類も必要です。最低でもチップ機への丸太投入用 Log-Loader（左側から3番目）、チップ材移動用 Wheel-Loader（右側）、或いはチップ機とガス化炉間のベルトコンベアー等も必要です。





6) 次は廃棄物(MSW, 廃プラ, 等)の前処理です。どのような廃棄物をどのようなガス化炉用原料として使用するか等で、前処理工程は決定されますが、実務上は可成り複雑です。前処理の設備設置場所、要員も、ガス化炉工程部よりむしろ多く必要です。

廃棄物集荷(MSW, 廃プラ, 一般/産業廃棄物等)⇒一時保管⇒粉砕⇒選別・除去(石・金属・ガラス)⇒ガス化・精製⇒(ガスエンジン)発電 等が一般的な工程です。

具体例の解説は、廃棄物の種類、形状、処理装置、規模...等により大幅に異なり複雑です。

ここでは個別の説明は省略し、ご参考までに関連動画の例を添付します。

下記の動画は、一般廃棄物(MSW, 廃プラ, 埋立済の廃棄物)等の原料の前処理を含む動画の例です。

<https://fulcrum-bioenergy.com/>

https://www.youtube.com/watch?v=D9-cGSbQ_Mg

<https://www.youtube.com/watch?v=vVvCEkKxWs0>

何れにしても、現状取り扱う廃棄物のもとより、将来的に見込まれる廃棄物も含め、十分な前処理法の検討が必要です。

この分野専門家(企業)のコンサルティング、経験が特に重要だと思います。

何かお問い合わせは、<https://biofuels.co.jp/page70-1.html> 経由でお願いします。

尚、最新版は、<https://www.biofuels.co.jp/ガス化炉概要説明.pdf/> です。

/ 以上 (R.4.3.20)

合同会社 バイオ燃料(BioFuels,LLC)

(<https://biofuels.co.jp>, info@biofuels.co.jp)

046-247-6047

神奈川県厚木市温水4 7 6 (〒243-0033)