

高純度水素・酸素製造のためのオンサイト 大型商用水電解装置『HHOG[®]』

Large-scale commercial water electrolyzer "HHOG[®]" on-site system
for generating high-purity hydrogen and oxygen gases



(技)研究開発部
三宅 明 子
Akiko Miyake
小林 宏 子
Hiroko Kobayashi
森岡 輝 行
Teruyuki Morioka

大型商用水電解装置として開発されたオンサイト型高純度水素・酸素発生装置“HHOG (High Purity Hydrogen Oxygen Generator)”の特長について、原理及び構造の面から詳しく解説した。HHOG の最大の特長は、電解質を添加せずに純水を電気分解する点である。これを可能にした固体高分子電解質膜の水素イオン伝導のメカニズムや、水素及び酸素の膜内透過があるにもかかわらず高純度水素が得られる理由を説明した。また、水電解では飽和蒸気を含む水素と酸素が発生するため、要求露点に応じた3通りの除湿方式を紹介した。これまでに開発した低圧型 HHOG 及びコンプレッサーなしで高圧水素を発生させることができる中圧/高圧型 HHOG の装置概要とその適用システム例をまとめて紹介した。

Features of a large-scale commercial water electrolyzer, HHOG (High Purity Hydrogen Oxygen Generator), which was developed as an on-site system for generating high-purity hydrogen and oxygen, are reviewed in details in the view of its principle and electrolysis cell structure. One of the most important features of HHOG is to electrolyze deionized water without addition of any electrolytes into the water. The mechanism of proton migration in a solid polymer electrolyte membrane and the reason why high-purity hydrogen and oxygen gases are generated in spite of permeation of H₂ and O₂ through the membrane are described. In order to decrease the dewpoint of the generated gases which contain saturated water vapor, three systems for dehumidification are mentioned. In this paper, two series of HHOG for low-pressure system and for middle/high-pressure system which dose not require any compressors are summarized and their applications are also mentioned.

Key Words :

水	素	Hydrogen
酸	素	Oxygen
高	純	High-Purity
水	電	Water electrolysis
脱	塩	Deionized water
電	解	Electrolyzer
固	体	Solid polymer electrolyte membrane
高	分	
子	子	
電	解	
質	膜	

まえがき

固体高分子電解質膜を利用して純水の電気分解により水素と酸素を発生させる方法は、1970年代初期に米国ジェネラルエレクトリック社が燃料電池技術の水電解に応用して潜水艦のライフサポート用酸素発生装置を開発したのが始まりである^{1,2)}。国内では石油危機を契機に1975年から、水素エネルギー開発を目的に、通産省工業技術院大阪工業技術研究所で先駆的な研究開発が進められた³⁻⁵⁾。しかし、現在、商用装置としてはガスクロマトグラフ用キャリアガス等の小容量発生装置が実用化されているのみで、大型商用装置として固体高分子水電解法が実用化された例はほとんどない。

一般に電気分解法による水素製造は高価で経済性が成り立たないとみられているが、固体高分子電解質膜を利用した水電解法は、操作が簡単なこと、メンテナンスが簡単なこと、クリーンであること、精製装置なしで発生ガスの純度が高いこと等多くの利点を有している。

当社では、水素供給のオンサイト化傾向に着目し、固体高分子水電解装置 HHOG の開発を行ってきた^{6,7)}。最近では、化学工場に7.5 Nm³/h のオンサイト装置を納入したのをはじめ⁸⁾、半導体工場や火力発電所向けの受注が相次いでいる。

本稿では、固体高分子水電解装置の特長と、これまでに開発した大型商用装置の機種とその適用例をまとめて紹介する。

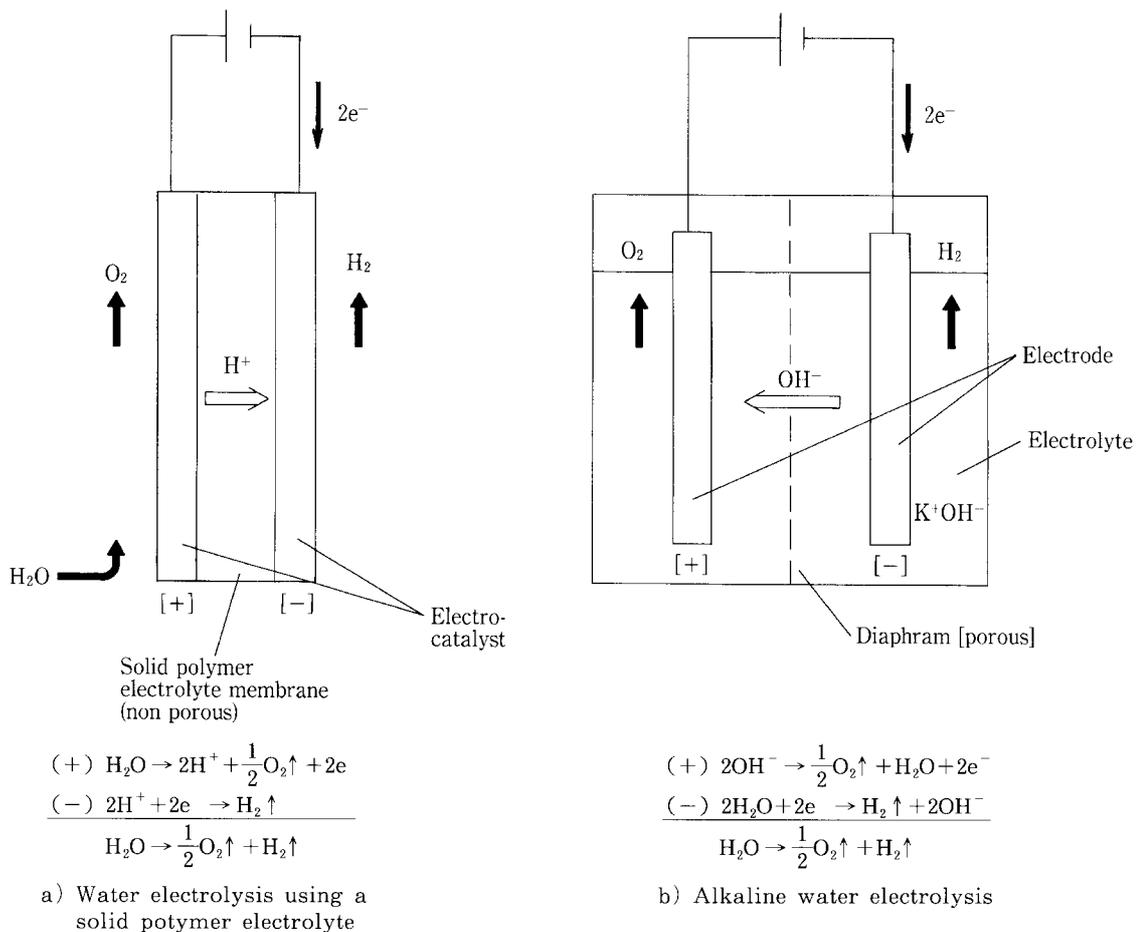
1. 固体高分子水電解装置の特長

1.1 固体高分子水電解の原理

第1図に、固体高分子水電解法の原理を、通常の水の電気分解（アルカリ水電解法）と比較して示す。

水の電気分解は、材料の腐食が少ないアルカリ（30% KOH, 20% NaOH等）を電解質として添加し、隔膜の両側に陰極及び陽極電極を配置し、電解液を直流で分解して水素と酸素を発生させる。隔膜は多孔質であり、水酸化物イオン(OH⁻)を陰極から陽極に透過させる機能をもつ。陰極で水素が発生する際に水が消費されるので、陰極に純水を供給する。

一方、固体高分子水電解法では、固体高分子電解質膜が、隔膜と電解質の役割を果たす。この固体高分子電解質膜には、化学的に安定なスルホン酸基(-SO₃H)を有するフッ素樹脂系のカチオン交換膜が用いられる。含水処理を行い、固体高分子電解質膜を湿潤状態にして直流電圧を印加すると、電解質イオンが電解液中を対極へ向かって移動するように、固体高分子電解質膜内をスルホン酸基の水素イオン(H⁺)が陽極から陰極へ移動する。



第1図 固体高分子水電解法の原理

Fig.1 Principle of water electrolysis using a solid polymer electrolyte.

第2図に、湿潤状態における固体高分子電解質膜の膜構造として提案されている“イオンクラスターモデル”を示す⁹⁾。水は主にスルホン酸基により形成される親水性ネットワークに含有され、これがポリテトラフルオロエチレン(PTFE)骨格中に分散していると考えられている。固体高分子電解質膜は非多孔質の膜であるが、このように湿潤状態にすることにより水素イオン伝導性を発現する。

また、固体高分子電解質膜の両面には、白金族金属の電極触媒を接合する。陽極に純水を供給すると、陽極電極触媒層で水の電気分解が起こり、酸素ガスと水素イオンが生成する。水素イオンは前述のごとく陰極へ移動し、陰極電極触媒層で電子を得て水素ガスが発生する。

このような原理により、固体高分子水電解では、電解質を添加せずに純水を電気分解し水素と酸素を発生させることができる。

1.2 電解セルの特長

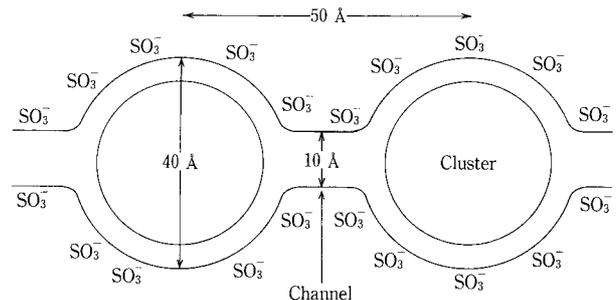
実際の固体高分子水電解装置では、電解セルを直列に積層し、第3図に示すような複極式の電解セル構造にする。

複極式電解セルでは、両端の電極板に直流電圧を印加するため、中間の電極板は片面が陽極で、もう片面は陰極になる。したがって、電極板と固体高分子電解質膜で仕切られた陽極室と陰極室が交互に並び、陽極室には純水を供給する経路及び酸素と未反応の純水とを取り出す経路を設け、陰極室には水素ガスを取り出す経路を設ける。

一つの電解セル内には、電極触媒層に純水を均一に供給し、かつ、発生するガスをスムーズに電解セル外へ排出す

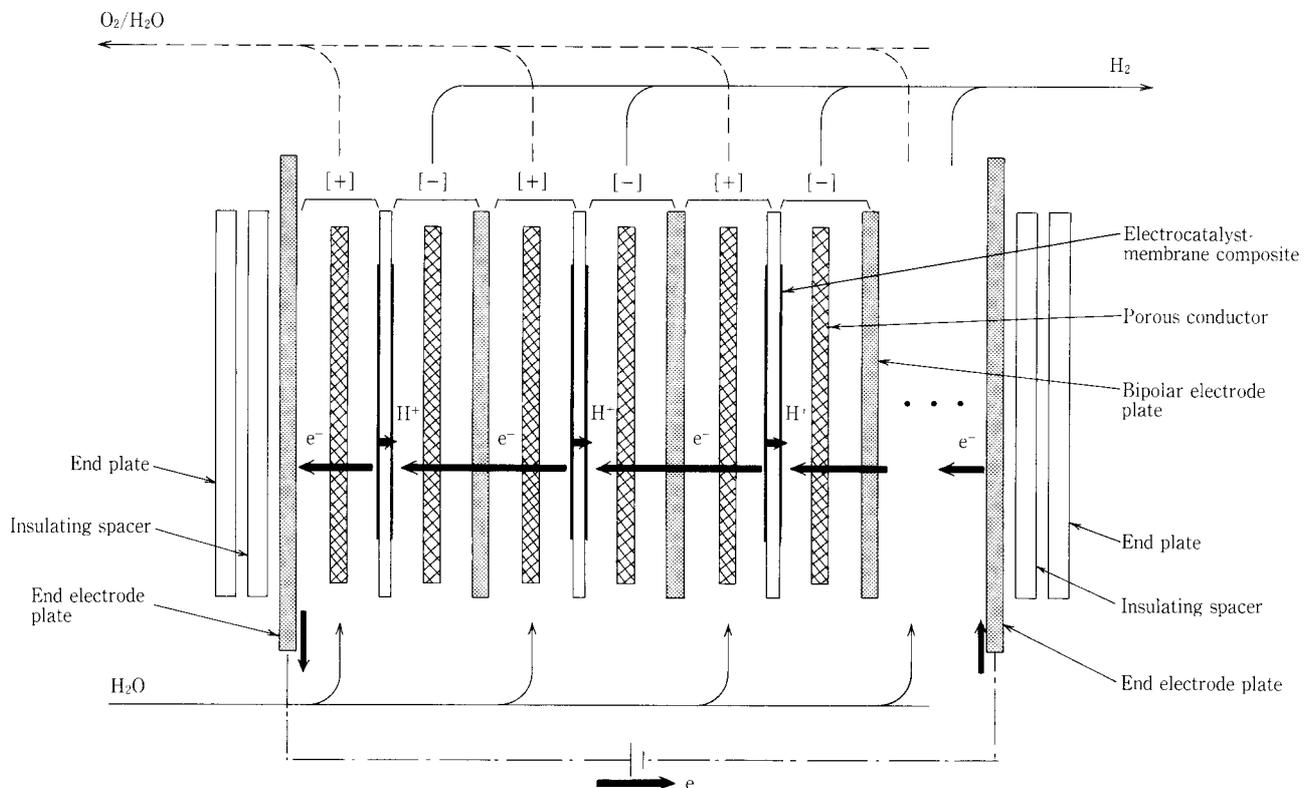
るために、固体高分子電解質膜と電極板の間に給電体と呼ばれる多孔質電極板を置く。

固体高分子電解質膜は水素イオンを通すが、電気は通さない絶縁体である。第3図において、ある固体高分子電解質膜の陽極面で発生する水素イオンと電気の流れに着目すると、電子は給電体を通して隣のセルの固体高分子電解質膜の陰極まで移動し、水素イオンは1.1で述べたように、固体高分子電解質膜を陰極へ移動する。したがって、電解セル全体の電気の流れは、固体高分子電解質膜内の水素イオンの移動と、それ以外の導電体部の電子の移動から成り



第2図 固体高分子電解質膜のイオンクラスターモデル (湿潤状態)

Fig. 2 Ion Cluster-network model for a wet solid polymer electrolyte membrane.



第3図 複極式積層電解セルの構成

Fig. 3 Structure of bipolar stacking electrolysis cells.

立っている。

導電体の電子の移動に比べ、水素イオンの移動が遅いため、水素イオンの移動が電解セル全体の電気抵抗の律速になる。一般に使用される固体高分子電解質膜の水素イオン伝導度は0.1 S/cm程度である¹⁰⁾。

前述のように、固体高分子水電解の電解セルは、固体だけから成り、通常の水電解のように溶液抵抗や電極間のガス抵抗が存在しない。しかし、電極板—給電体—固体高分子電解質膜間の固体同士の接触抵抗があるため、これをできる限り小さくする必要がある。

また、電解セル内での水素と酸素の混合あるいは水素の漏洩は爆発の危険性を伴う。HHOGの電解セルは、シール機構にも十分配慮した設計になっている。

2. ガス純度

固体高分子水電解は、電解質を添加せず、比抵抗が5 MΩ・cm以上の純水を電解分解するため、不純物の混入が極めて少ない。しかし、発生したH₂とO₂の極一部が固体高分子電解質膜内を透過して対極へ混入するため、水素ガス純度は水分を除くと99.999%~99.9999% (5ナイン~6ナイン)、酸素ガス純度は99.9% (3ナイン)になる。

第1表に、HHOGのガス純度を市販のボンベ充填高純度水素ガスの純度と比較した。¹¹⁾ HHOGでは、CO、CO₂及び炭化水素は検出下限以下で、ボンベより一桁以上濃度が低い。水電解以外のオンサイト水素製造装置としてメタノール改質法や都市ガス改質法があるが、PSAで精製してもCO、CO₂及び炭化水素の総濃度は1 ppm以下のレベルで残存する。また、水素中の窒素不純物の除去は一般に困難であるが、HHOGで混入するN₂は、純水中に溶存したN₂が原因である。したがって、純水を予め脱気すること等によりN₂は低濃度にすることができる。

固体高分子電解質膜のガス透過は、膜が非多孔質である

第1表 ガス純度分析

Table 1 Analysis of generated hydrogen gas (unit: ppm)

	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CnHm	Purity (%)
HHOG	0.93	0.17	<0.1	<0.01	<0.01	99.9999
Cylinder Gas	<0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	99.9999

Note: Analysis method for HHOG gas

Impurity	Lowest detectable limit	Analysis method
O ₂	0.002 ppm	Gas Chromatograph Mass Spectroscopy
N ₂	0.003 ppm	
CO	0.01 ppm	Gas Chromatograph (PID)
CO ₂		
CnHm		

ことから、気体が膜表面で溶解し、膜中を拡散して他面で脱溶解する“溶解—拡散機構”が適用されると考えられている¹²⁾。含水率を変えた固体高分子電解質膜で酸素や水素の拡散係数、溶解度及び透過係数が調べられており、含水率が低いときは、ガス透過はPTFE骨格で起こり、含水率が高くなるとPTFE骨格の間に形成される第2図に示したイオンクラスターを透過することが報告されている^{13, 14)}。

また、ガス透過速度は次式で表され、膜にかかる差圧に比例するが、電解を行った場合のガス透過速度は、この式から予想されるよりもはるかに大きい。

$$Q = P_m \cdot \Delta P / d$$

Q : ガス透過速度 (mol/cm²・s)

P_m : 透過係数 (mol・cm/cm²・s・atm)

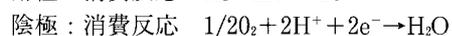
ΔP : 差圧 (atm)

d : 膜厚 (cm)

例えば電極触媒を接合しない固体高分子電解質膜で、水素中の酸素不純物濃度及び酸素中の水素不純物濃度は、それぞれ1 000 ppm, 10 000 ppmになることが確認されている¹⁵⁾。この原因として、固体高分子電解質膜に押し当てた給電体や、電極触媒層の抵抗により、局所的差圧が生じているものと考えられている。

しかし、電極触媒を接合した固体高分子電解質膜を使用して実際に電解すると、水素中の酸素不純物濃度は1 ppm以下 (第1表)、酸素中の水素不純物濃度は数百ppmと低くなる。これは固体高分子電解質膜の両面に接合された白金族金属触媒層において、第4図に示したような反応により透過ガスが消費されるためであることが報告されている¹⁵⁾。

電気化学的反応



化学的反応

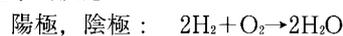
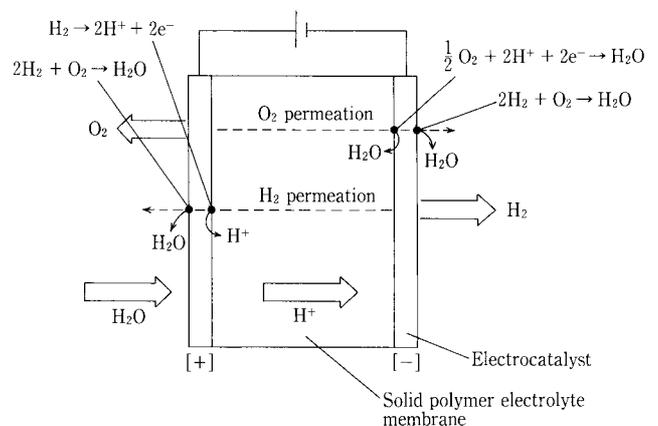


写真1に、白金族金属電極触媒の接合状態を走査型電子



第4図 透過ガスの消費反応

Fig. 4 Consuming reactions of permeation gases.

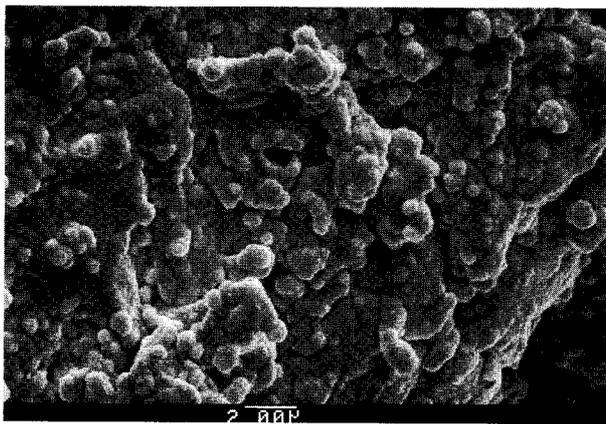
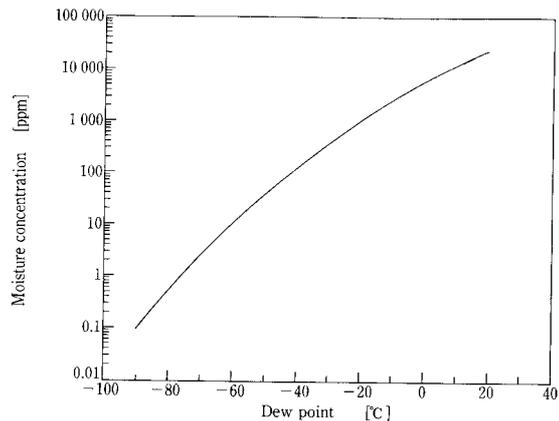


写真 1 電極触媒の接合状態

Photo.1 SEM image of an electrocatalyst-solid polymer electrolyte membrane composite.



第5図 露点と水素ガス中の水分量

Fig. 5 Moisture concentration in hydrogen gas at dew point.

顕微鏡で観察した結果を示す。電極触媒の接合は、通産省工業技術院大阪工業技術研究所で開発された吸着還元成長法（無電解メッキ）³⁾について同所より技術指導を受けて、内製したものである。ガス純度は、膜のガス透過量よりもむしろ、電極触媒層の構造や電極の種類に依存する。前処理として固体高分子電解質膜の表面粗化を行い、電極触媒-膜界面の面積を増大させ反応効率を上げると同時に、電極触媒層を多孔質構造にして発生ガスの抜けを良くしている。

3. 除湿

電解モジュールから発生する水素ガス及び酸素ガスには、40℃～50℃で水分が飽和状態で含まれているため、除湿する必要がある。HHOGではユーザーの要求露点に応じて、除湿方法を選択している。大気圧下の露点が-10℃までは冷却方式、-20℃までは膜方式、-80℃までは吸着剤方式を適用する。

第5図に露点と水素ガス中の水分量の関係を示す。露点の低下にともない水分量は指数関数的に減少する。例えば大気圧下の露点が-10℃の場合の水分量は2560 ppm、-30℃の場合は375 ppm、-80℃の場合は0.5 ppmとなる。

3.1 冷却方式

使用時に大気圧下で結露しない程度の露点を要求される場合、冷却方式を用いる。発生ガスは40～50℃と高温であるため、ガスを冷却すると露点は下がる。例えば5℃に冷却した場合、次のように露点が下がる。

低圧型：露点5℃ (0.4 MPa) → 露点-11℃ (大気圧)

中圧型：露点5℃ (0.9 MPa) → 露点-21℃ (大気圧)

冷却には熱交換器にチラーの冷却水を流す方法、熱交換器を直接熱電子冷却素子で冷却する方法等がある。

3.2 膜方式

HHOGの後工程で発生ガスを昇圧する場合、結露を防止するために大気圧下で-20℃の露点を要求されることがある。この場合膜方式を適用する。水の透過速度が非常に大きく、水分子のみを選択的に透過させるガス分離膜を用いる。中空糸膜の内側に湿潤ガスを通し、外側に水蒸気分圧の低い乾燥ガスを流す。水蒸気分圧の差が駆動力となり湿潤ガス中の水分子が乾燥ガス側へ移動する。

乾燥ガスは低圧の方が水蒸気分圧は低くなり除湿効率は高くなる。コンプレッサーの圧縮空気を減圧して乾燥ガスに使用した場合、発生ガスを-20℃まで除湿できる。

3.3 吸着剤方式

大気圧下で-80℃の露点を要求される場合には、吸着剤方式を適用する。吸着剤は活性アルミナ、ゼオライトなどを用いる。除湿器は吸着剤を充填した2塔で構成され、一方が吸着工程時、他方は再生工程となる2塔切替方式で自動連続運転できる。

再生には脱着した水分を系外へ排出するためにパージガスが必要であり、本装置では発生ガスの純度を保つために高純度なパージガスを用いる必要がある。しかし高純度なパージガスを準備すると装置が高価なものになる。このため発生ガスの一部をパージガスとして用いる。パージガスによる発生ガスの損失は、電解セル数を増やす必要があり、イニシャルコスト、ランニングコストを高くすることになるため、最小限にとどめる必要がある。

吸着剤の再生方法には、温度スイング方式 (TSA) と圧力スイング方式 (PSA) がある。温度スイング方式は、水と吸着剤間の物理吸着力よりも大きな熱エネルギーに相当する温度にまで昇温し、吸着された水分を脱着する。脱着された水分をパージガス中に取り込み系外に排出する。パージガス量は全ガス量の数%となる。再生の加熱・冷却に時間がかかるため、2塔切替サイクルが長く、装置が大きくなる。一方、圧力スイング方式は、減圧して水蒸気分圧を下げることにより吸着された水分を脱着する方式である。昇圧された吸着塔内のパージガスは、大気圧に減圧され系外に放出される。損失ガス量は全ガス量の約20%となる。再生の昇圧・減圧は短時間ででき、2塔切替サイクルが短く、装置が小さくなる。

HHOGでは、発生ガスの損失が少ない温度スイング方式を採用している。

4. HHOG装置の概要

第6図に、HHOGの標準機種を示した。0.1, 0.5 Nm³/hの水素発生量については低圧型 HHOG シリーズがあり、1～50 Nm³/hの水素発生量については低圧型と中圧/高圧

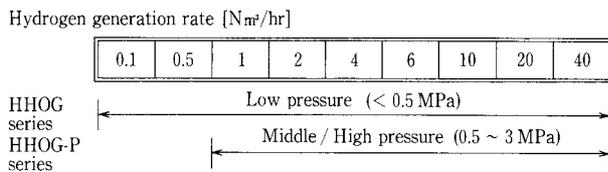
型 HHOG-P シリーズの両方がある。これ以外の水素発生量に対してはこれらの標準機種を組み合わせる。酸素の発生量は、水素発生量の1/2である。

ここで、低圧型とは発生圧力が0.5 MPaの装置を、中圧/高圧型とは0.5~3 MPaの発生圧力の装置を示す。後者は、発生ガス圧力によって、高圧ガス保安法の規制を受けない1 MPaまでの中圧型と1.1~3 MPaの高圧型とを区別しており、装置のシステムは同じである。次に、それぞれの装置の概要を述べる。

4.1 低圧型 HHOG

第7図と写真2に、装置のフロー図と装置全体の外観を示した。

装置は、純水製造ユニット、電解セル、気液分離タンク、除湿器から成る。電解セルの陽極室で発生した酸素ガスは酸素側気液分離タンクで、電解セルの陰極室で発生した水素ガスは水素側気液分離タンクでそれぞれ純水と分離され、除湿器を通してユースポイントへ供給する。気液分離タンクで分離された純水は、純水製造ユニットに戻し循環使用する。



第6図 HHOGの標準機種
Fig.6 Standard Series of HHOG.

水素ガス発生量は電解電流値で制御し、水素側気液分離タンクの圧力を一定に保つようにする。酸素側気液分離タンクの圧力はリリーフ弁の開閉のみで一定に保つようにする。これにより酸素分離タンク-〈陽極室|膜|陰極室〉-水素分離タンクそれぞれの圧力をほぼ一定に保ち、固体高分子電解質膜が過度の差圧によって破損することがないようにしている。

4.2 中圧/高圧型 HHOG-P²⁾

第8図と写真3に、装置のフロー図と装置全体の外観を示した。

中圧/高圧型では、酸素側気液分離タンク（電解タンク）の中に電解セルを入れ純水に浸漬した点が低圧型と異なる。電解セルの陽極室で発生した酸素ガスは電解タンク内へ放出されるため、電解セルの外側の圧力、すなわち電解タンク

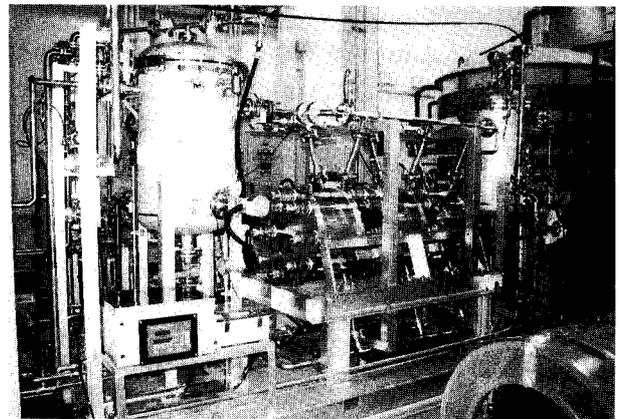
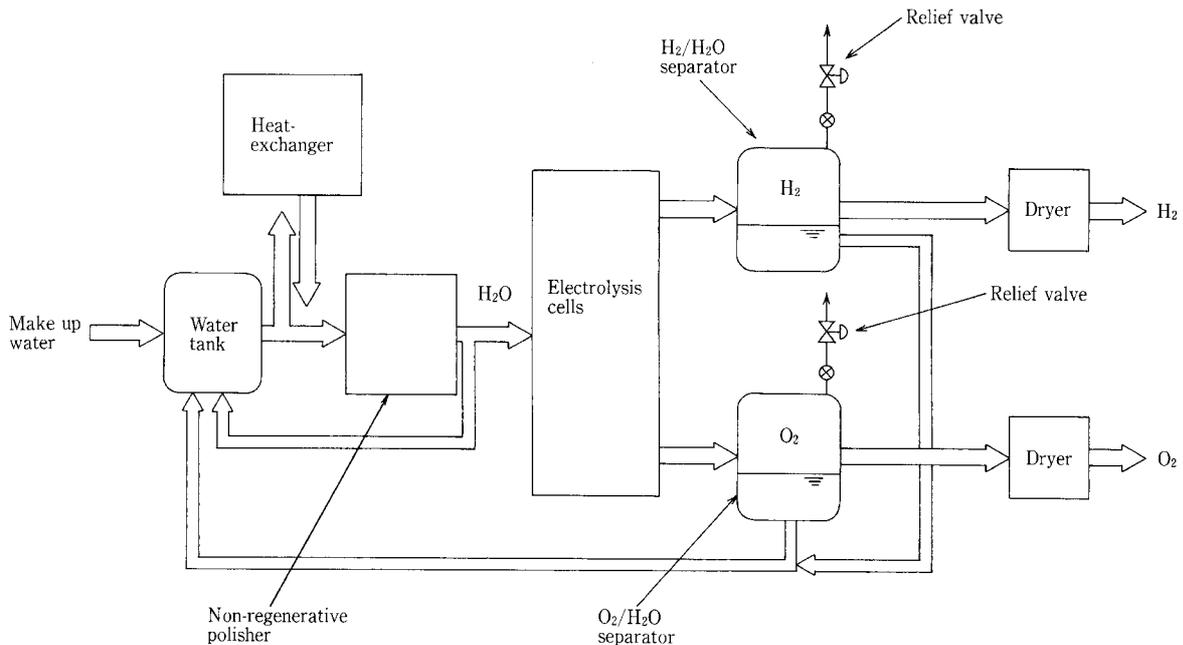


写真2 低圧型 HHOG
Photo.2 Low pressure system of HHOG.



第7図 低圧型 HHOGのフロー
Fig.7 Flow diagram of low pressure system of HHOG.

ク内の圧力と電解セルの陽極室の圧力が等しくなる。

低圧型 HHOG で高圧ガスを発生させるとすると、電解セル内の圧力と大気との圧力差が大きくなるため、電解セルは、それだけ耐圧性を上げる必要がある。しかし、中圧/高圧型 HHOG では、電解セルを電解タンク内に入れることにより、低圧型と同じ耐圧の電解セルで高圧ガスを発生させることができる。

また、水の電気分解に対する圧力の影響は小さく、反応速度は電流に依存する。したがって、高圧下においても通電しさえすればガスが発生し、電解タンクと水素分離タンクへ発生ガスを充填することにより、コンプレッサーなしで所定圧力まで昇圧させることが可能である¹⁶⁾。このように中圧/高圧型 HHOG は、コンプレッサーを使用せず昇圧することができるため、コンプレッサーからの不純物汚染がなくガス純度は低下しない。

このシステムでは、タンクの耐圧強度を確保できれば、さらに高圧のガスを発生させることができる。標準仕様は 3 MPa までであるが、原理的にはポンペの充填圧力と同等の 14.8~19.7 MPa の圧力も可能である。

高圧になると酸素側気液分離タンクと水素側気液分離タンクの差圧が大きくなるおそれがあるため、中圧/高圧型では、水素側気液分離タンクの圧力を電解電流値で制御し、水素側気液分離タンクと酸素側気液分離タンクの差圧を一

定に保つように両方のタンクのリリーフ弁を開閉し、差圧を制御している。

電解タンク内の純水は、非再生ポリッシャを通して電解セルに循環供給され、電解タンクが純水タンクと酸素側気液分離タンクの役割を果たす。また、電解セルを電解タンクに内蔵するため装置全体がコンパクトになる点も中圧/高圧型 HHOG の大きな特長である。

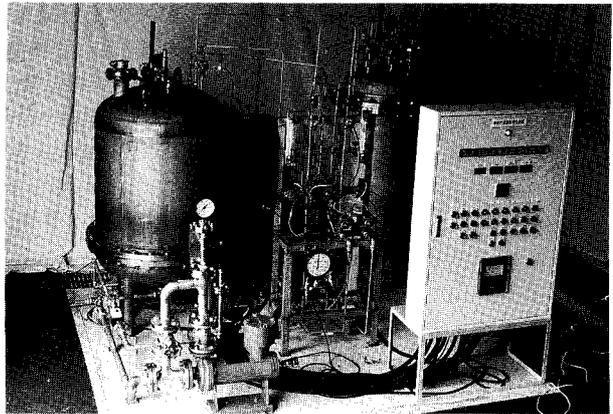
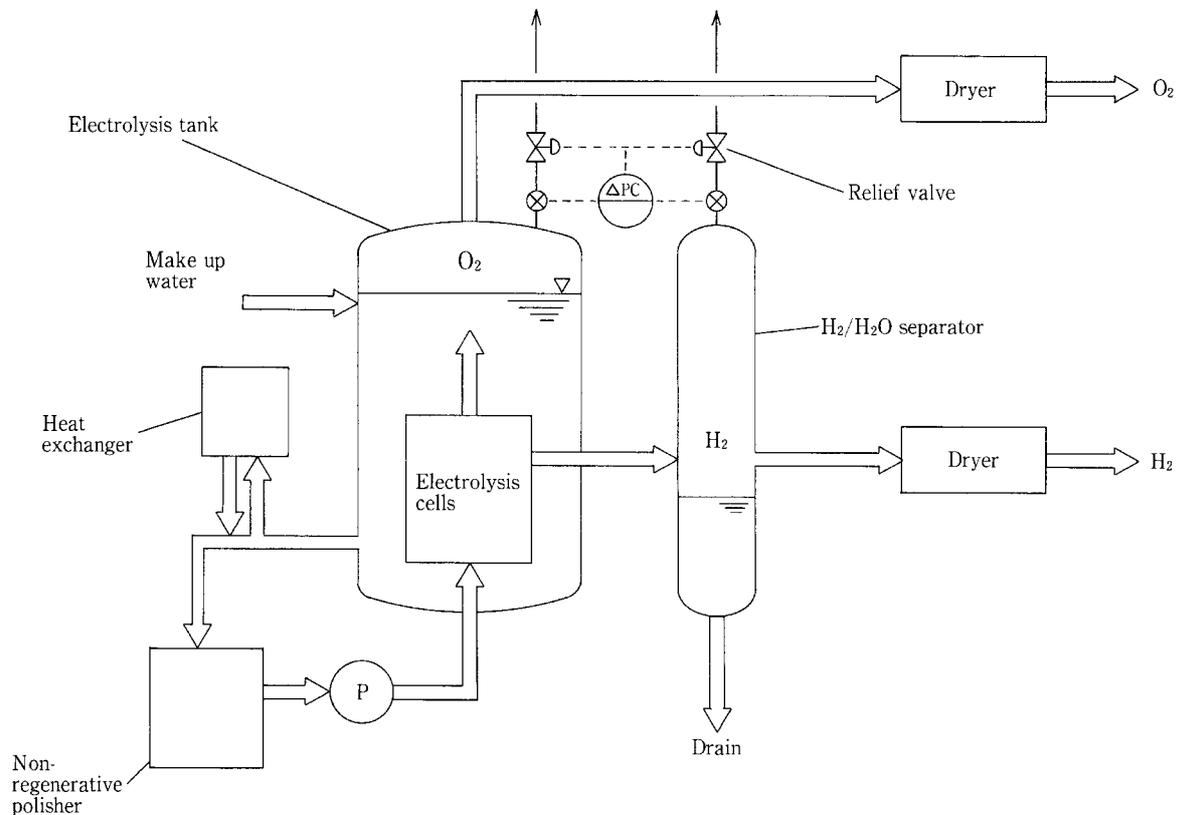
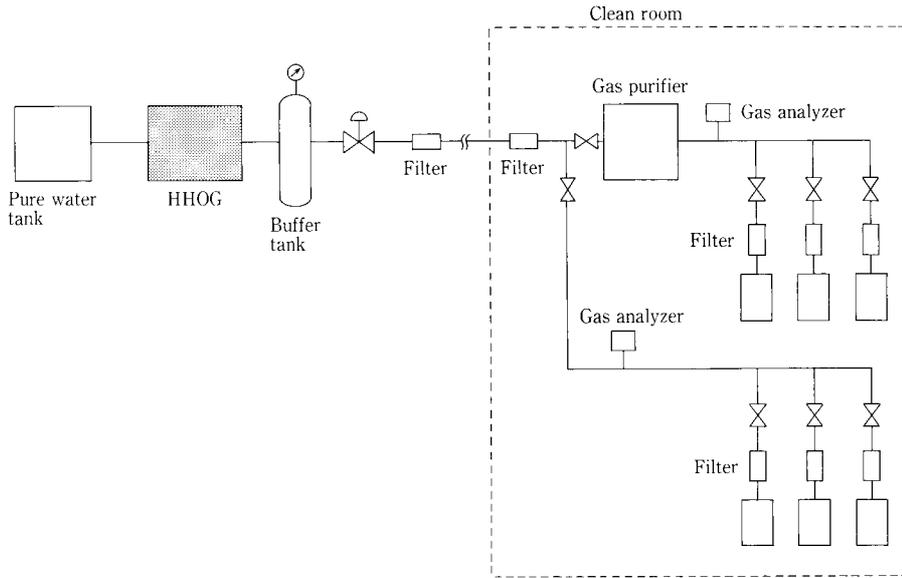


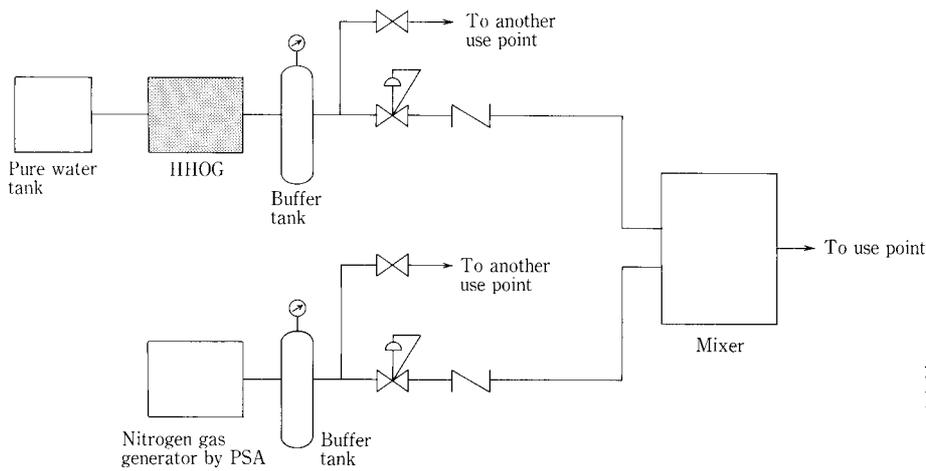
写真 3 中圧/高圧型 HHOG
Photo.3 Middle/High pressure system of HHOG.



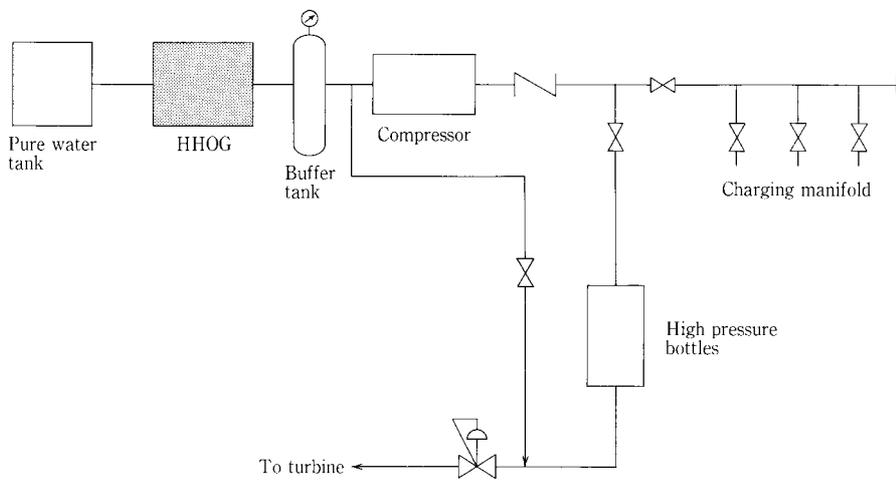
第 8 図 中圧/高圧型 HHOG のフロー
Fig.8 Flow diagram of middle/ high pressure system of HHOG.



第9図 半導体製造のプロセス用水素ガスフロー
 Fig.9 Hydrogen gas flow diagram of LSI manufacturing process.



第10図 電子工業用水素混合ガスフロー
 Fig.10 Mixing gas flow diagram of electronic industry.



第11図 火力発電所用水素ガスフロー
 Fig.11 Hydrogen gas flow diagram of power generating system.

5. HHOG の応用例

HHOG は先に述べたように半導体分野, 電子工業分野, 電力分野において使用される。そのフローを紹介する。

5.1 半導体製造プロセス

一般に半導体工場では水素ガスは高圧充填されたローダーで工場内に一括して貯蔵される。大容量の高圧ガスを貯蔵しているため高圧ガス保安法に規制される。さらに地震, 火災等の不測の災害時には爆発の心配があり, 安全性に問題がある。このような問題を解決し, オンサイトで高純度水素を得るために HHOG が使用される。

半導体製造プロセスで使用される水素ガスは他の窒素ガス, 酸素ガス, アルゴンガスと同じように第9図に示すような工場規模のフローで供給される。配管には内面が電解研磨処理されたステンレス鋼が使用される。6 ナインを超える超高純度が要求される処理工程にはガス精製装置が設置され, 水素ガス中に含まれる超微量の窒素, 酸素, 炭化水素等が除去される。

メイン配管, クリーンルームの入口, 各処理装置の入口には必要な大きさのフィルターが取り付けられている。そして水素ガス中に含まれる微粒子, 減圧弁, バルブ等の配管部品からの発塵による微粒子を除去し, シリコンウェハーの汚染を防止している。

5.2 電子工業

第10図に示すようなフローによりオンサイトで水素ガスと窒素ガスを発生させる装置が電子工業で使用されている。窒素ガスは PSA 方式により発生させる。このフローでは水素ガス, 窒素ガス及びこれらの混合ガスが使用できる。

5.3 火力発電所のタービン発電機の水素冷却

火力発電所のタービン発電機は水素ガスにより冷却される。国内の火力発電所ではタービン発電機の冷却用水素ガスはボンベ等の貯蔵設備から供給される。海外の火力発電所の中には地理的にボンベによる水素ガスの確保が困難な場合がある。このような場合オンサイトで水素ガスが発生できる HHOG が使用される。そのフローを第11図に示す。

定期補修後の発電機立ち上げ時には約 500 Nm³ の冷却用水素ガスが必要である。定常状態の運転においては 3 ~ 20 Nm³/h の水素ガスが冷却用として使用される。HHOG は定常状態でのタービンの冷却に使用する水素ガス量よりも幾分大きい水素ガス発生量の機種が選定される。そして定常運転時には定期補修後の発電機立ち上げ時のために発生ガスの一部がボンベに高圧充填される。

むすび

HHOG は, 固体高分子電解質膜への電極触媒接合技術については通産省工業技術院大阪工業技術研究所の技術指導を受け, 電解セル構造, 除湿器, 装置全体フローは独自の技術開発により水電解装置の大型化, 高圧化を実現したものである。HHOG では純度99.9999%の高純度水素ガスを手軽に, 安全にオンサイトで得られる。

高純度水素ガスは半導体産業をはじめとする各種プロセスガスに使われている。また自然エネルギーを利用した水電解水素ガスは, 地球環境の安全性が良い21世紀のエネルギーとして期待されている。このような背景のなかで HHOG の果たす役割は大きいと確信している。今後ユーザーの期待に沿った HHOG として性能, コスト面でより完成度を高めていく所存である。

[参考文献]

- 1) L. J. Nuttall, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2 (1997), P395
- 2) L. J. Nuttall, et al., *Proc. of 2nd World Hydrogen Energy Conf.*, 391 (1978)
- 3) 鳥養栄一, 竹中啓恭, 特許1, 226, 766号
- 4) 竹中啓恭ほか, 電気化学, 52 (1984), P351
- 5) 竹中啓恭ほか, 電気化学, 53 (1985), P261
- 6) T. Sasaki, *proc. of 4th Symposium on Sino-Japanese Fossil Power Plant Water Treatment*, 245 (1995)
- 7) 安井信一ほか, 神鋼パンテック技報, Vol.40, No.1 (1996), P1
- 8) 広瀬潤ほか, 神鋼パンテック技報, Vol.40, No.2 (1997), P48
- 9) T. D. Gierke, *Electrochem. Soc. Fall Meeting, Atlanta* (1977)
- 10) T.A.Zawodzinski, *J. Phys. Chem.*, 95 (1991), P6040
- 11) 大陽東洋酸素株式会社特殊ガスカタログ
- 12) T. Sakai, et al., *J. Electrochem. Soc.*, 133 (1986), P88
- 13) T. Sakai, et al., *J. Electrochem. Soc.*, 132 (1985), P1328
- 14) Z. Ogumi, et al., *J. Electrochem. Soc.*, 131 (1984), P769-773
- 15) 竹中啓恭ほか, 電気化学, 57 (1989), P229-236
- 16) 宝月章彦, 神鋼パンテック技報, Vol.40, No.2 (1997), P104

連絡先

三宅明子
(学術博士)

技術開発本部
研究開発部

小林宏子

技術開発本部
研究開発部

森岡輝行

技術開発本部
研究開発部

TEL 078-992-6525

TEL 078-992-6525

TEL 078-992-6525

FAX 078-992-6504

FAX 078-992-6504

FAX 078-992-6504

E-mail a. miyake@pantec. co. jp

E-mail h. kobayashi@pantec. co. jp

E-mail t. morioka@pantec. co. jp