

高純度水素酸素発生装置 (HHOG) その2

—水素利用技術への適用—

A High-purity Hydrogen and Oxygen Generator (HHOG) (2)

—applications of HHOG to hydrogen utilizing fields—



技術開発本部 第2研究室
小林 宏 子
Hiroko Kobayashi
平井 清 司
Kiyoshi Hirai

A High-purity Hydrogen and Oxygen Generator (HHOG), which directly electrolyzes deionized water and generates high-purity hydrogen and oxygen gases, has been developed. The HHOG can be applied to a wide range of gas volume requirements, using a unit type for small-scale needs and a system type for large-scale needs. The HHOG is superior in gas purity, safety and maintenance to an alkaline water electrolyzer or a storage system like a cylinder. It is most suited for the on-site gas generation system of a nuclear power plant, a thermal power plant, a semiconductor manufacturing process and so on.

まえがき

近年、水素ガスは将来のクリーンエネルギーとして注目を集めているが、その他にもいろいろな分野で利用されている。一般に水素ガスは高圧に充填されたボンベまたはカードルやローダーでサイトに輸送され使用されている。しかし、最大限に安全性を確保したい原子力発電所や、ポンプ等による供給が困難な海外では、アルカリ水電解法による水素ガス供給を採用しているところもある。しかし、アルカリ水電解法は、ガス純度や、操作性、メンテナンス性に改善が望まれている。

高純度水素酸素発生装置 (HHOG: High-purity Hydrogen Oxygen Generator) は、固体高分子電解質膜を利用して、超純水を直接電気分解し、純度の高い水素ガスと酸素ガスを発生させる装置である¹⁾。アルカリ水電解法と比較すると、高純度ガスの発生が高電解電流密度で可能で、また操作性、メンテナンス性の点でも優れた特性を示す。当初、HHOGは高純度ガスを使用する半導体製造用の小容量のオンサイトガス供給装置として開発されたが、適用範囲は広く、小容量供給用のユニット型(写真1)から大容量供給の原子力発電所向等のシステム型としても製作出来る。

本稿では、システム型HHOGの水素利用技術への適用を紹介する。

1. HHOGの概要

1.1 原理

HHOGは、超純水を直接電気分解し、純度の高い水素ガスと酸素ガスを発生させる装置である。超純水は電気抵抗が高いため電気分解できないが、HHOGでは固体高分子電解質膜が電解質として働くため、アルカリ等の電解質を添加しないで、超純水を電気分解することが出来る¹⁾。

装置は、電解セル、気液分離タンク、ドライヤーで構成される。固体高分子電解質膜を備えた電解セルの陽極側に超純水を供給し、直流電流を流すと、陽極側から酸素ガス、陰極側から水素ガスが発生する。超純水は、電解セルの冷却を兼ねて過剰に供給するため、陽極側では超純水に酸素

ガスが混合した状態、陰極側では水素ガスに微量の超純水が混合した状態で発生する。これらはそれぞれの気液分離タンクでガスと超純水に分離され、さらにガス中に含まれる水分は、ドライヤーで除湿されて供給される。

1.2 ガス純度

HHOGから発生した水素ガス、酸素ガス中に含まれる不純物ガスを第1表に示す。HHOGの原理から、発生ガス中に混入する可能性がある物質は、供給超純水中の溶存物質と水素ガスまたは酸素ガスのみである。超純水は、前処理として膜脱気装置で脱気処理して供給した。脱気処理後の超純水の溶存酸素濃度は5ppbであった。表に示すように、水素ガス、酸素ガスともに窒素、炭化水素、一酸化炭素、炭酸ガス等の不純物ガスは非常に少ない。従来のPSA (Pressure Swing Adsorption) 精製法や深冷分離法で高純度ガスを得る場合には、特別な精製装置を必要とするが、本法では直接純度の高いガスを発生出来ることがわかる。水素ガスの純度は99.9999% (6 NINE) 以上であった。

また、発生ガス中の金属イオンは全て1ppt以下と非常に少ない¹⁾。

1.3 大容量供給用システム

水素発生量が2Nm³/hr以上の大容量供給の場合、必要

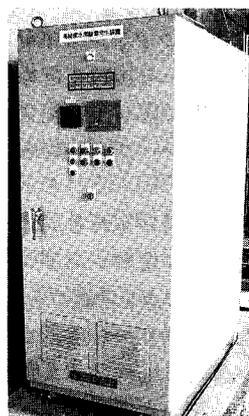


写真1 ユニット型HHOG
Photo.1 Unit type HHOG.

第 1 表 水素ガスまたは酸素ガス中の不純物
Table 1 Impurities in hydrogen or oxygen gas

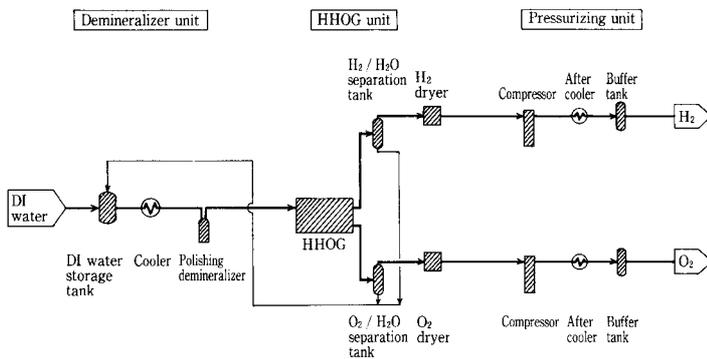
		H ₂	O ₂
Gas purity	%	≥99.99994	≥99.94
N ₂	ppm	0.50	<2.0
C _n H _m	ppm	<0.01	<0.01
CO	ppm	<0.01	0.07
CO ₂	ppm	0.09	0.66
Ar	ppm	<0.01	0.02
O ₂	ppm	0.05	—
H ₂	ppm	—	573.7

Symbol < means lowest limit of detection.

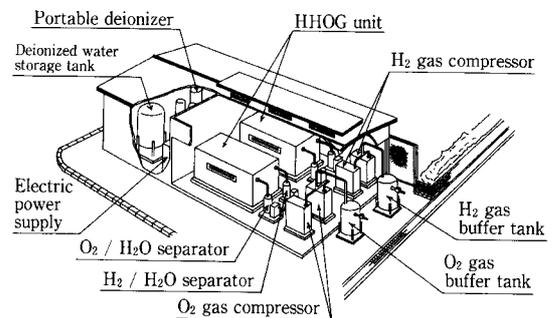
第 2 表 システム型 HHOG 仕様表
Table 2 Specific features of system type HHOG

Type	HHOG-10	HHOG-20	HHOG-50	
Gas volume	Hydrogen	10N m ³ /hr	20N m ³ /hr	50N m ³ /hr
	Oxygen	5 N m ³ /hr	10N m ³ /hr	25N m ³ /hr
Electrochemical unit number	8	16	40	
Electrolyzed DI water	0.01 m ³ /hr	0.02 m ³ /hr	0.05 m ³ /hr	
Electric power	400V×72KW	400V×144KW	400V×360KW	
Area *	10m×6 m	10m×12m	10m×25m	

* Total area for demineralizer, HHOG and pressurizing units.



第 1 図 システム型 HHOG のフローシート
Fig. 1 Flow diagram of system type HHOG.



第 2 図 システム型 HHOG
Fig. 2 System type HHOG.

に応じて超純水製造装置や昇圧装置と組み合わせたシステム型で対応する。システム型 HHOG のフローシートの一例を第 1 図に外観図を第 2 図に示す。システム型 HHOG は、超純水製造装置、ガス発生装置 (HHOG)、昇圧装置で構成される。超純水製造装置から超純水を HHOG に供給し、電気分解によりガスを発生し、必要に応じて昇圧装置でガスを加圧して供給する。

超純水製造装置は、ミクロンフィルター、純水タンク、熱交換器、非再生ポリシャー等で構成される。供給超純水の比抵抗値は 5 MΩ・cm 以上が必要である。1 次純水の補給量は、HHOG で電解により消費される超純水を補充するだけで十分であるので極小容量である。

HHOG は、電解ユニット、気液分離タンク、ドライヤーで構成される。電解ユニットは、電解セルを複数まとめたものである。ドライヤーは、ガスの露点に応じて膜脱気方式、熱電子冷却素子方式、モレキュラーシーブ方式等を用いる。

昇圧装置は、オイルフリー型圧縮機が用いられる。オイルフリー型圧縮機としては、ダイヤフラム型やレシプロ型が適用出来るが、ガスの汚染と漏洩防止の点を考慮すると、ダイヤフラム型が適している。また、水素ガスと酸素ガスの使用時間が異なる等、一時貯蔵が必要な場合はガス貯蔵タンクが付帯される。

システム型 HHOG の仕様の一列を第 2 表に示す。

2. 従来のガス供給設備との比較

2.1 貯蔵設備との比較

システム型 HHOG は、従来のポンプやローダー等の貯蔵設備と比較すると、安全性に優れている。オンサイト発生装置は、必要なときに任意にガス発生を開始したり停止することが出来る。停止時のシステム内の残留ガスは極わずかなので、地震や火災等の不測の災害時に爆発等の危険がなく、安全性を確保出来る。またガス圧が 10 kg/cm² 未満の場合、高圧ガス取締法に規制されない。さらに、ローダーのような交換作業がないため長期連続運転が可能であり、また交換用の予備のローダーを設置するための敷地も必要ない。

2.2 アルカリ水電解設備との比較

アルカリ水電解は、古くから汎用的に利用されている技術である。システム型 HHOG とアルカリ水電解装置の比較を第 3 表に示す。システム型 HHOG は、アルカリ水電解装置と比べて、優れた特性を有することがわかる。

1) ガス純度

アルカリ水電解は、高純度のガスを供給する場合、ガス中に混入しているアルカリ成分を処理するためにスクラバーを付けているが、完全に除去するのが困難でどうしてもガス中にアルカリ成分が飛沫同伴として混入するため、HH

第 3 表 システム型HHOGとアルカリ水電解装置の比較

Table 3 Comparison of system type HHOG with alkaline water electrolyzer

		System type HHOG	Alkaline water electrolyzer
Gas purity	Gas purity	99.9999%	99.8%~99.9%
	Possibility of contamination of gas	None	Alkaline contamination
Current density		0.7A/cm ²	0.2~0.4A/cm ²
Control in gas volume		0~100%	20~100%
Control of pressure difference between electrodes		0~2 kg/cm ²	0 kg/cm ²
Maintenance	Possibility of material corrosion	None	High
	Other	None	Concentration of alkaline electrolyte must be controlled.
Wastewater treatment		Not necessary	Necessary

OG のガスに比べてガス純度が低い。

2) 電流密度

アルカリ水電解の電流密度は、約0.2~0.4 A/cm²である。HHOG の電流密度は、0.7 A/cm²であり、ガス発生に必要な膜面積を少なくすることが出来る。また、アルカリ水電解では、アルカリ成分が隔膜中に濃縮し、電流密度が不均一になり、電流の集中により隔膜の破損や構成材料の腐食がおこることがある。HHOG は超純水を使用しているため、このような電流の集中がおこることはない。

3) ガス発生量制御

HHOG は電解電流の制御により、ガス発生量を 0~100% の範囲で自由にコントロール出来る。使用量の変化により供給圧が変化した場合、直ちに電流制御により発生量を変化させ、ガス供給圧を一定に保つことが出来る。アルカリ水電解では、隔膜に多孔質のアスベストを使用しており停止時にそれぞれのガスの混入の危険があるため20%以下の発生量を制御することは困難である。

4) 差圧制御

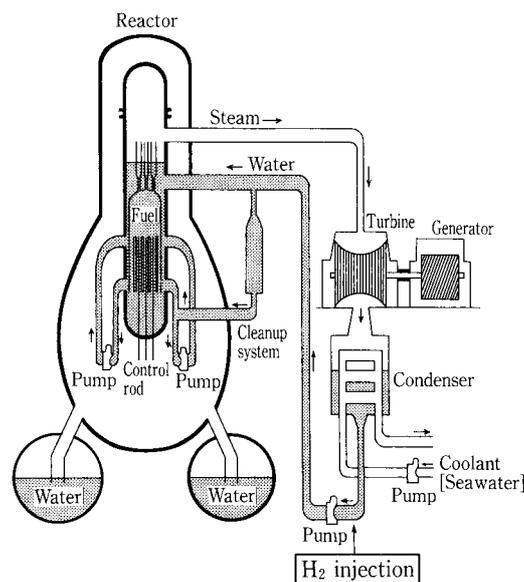
アルカリ水電解は、隔膜間に差圧がつくと、隔膜を通して対極側に発生ガスが混入するため、陽極側と陰極側の厳密な同圧制御が必要である。HHOG の固体高分子電解質膜は水素イオンのみを通すため、対極の発生ガスが混入することがない。固体高分子電解質膜は、差圧 2 kg/cm²での運転が可能のため厳密な差圧制御は必要ない。

5) メンテナンス

アルカリ水電解は、アルカリ液濃度の管理が必要である。また、循環液がアルカリ液なので、構成機器材料を腐食させる可能性が高い。HHOG は超純水を使用しているため、濃度管理、腐食対策は不要で、安定した長期連続運転が可能である。

6) 廃液処理設備

アルカリ水電解は、電解液やスクラバーからの廃液の処理設備が必要である。HHOG は、システム全体から廃水は全く発生しないので、処理設備は不要で、クローズドシステムとすることが出来る。



第 3 図 沸騰水型原子炉の概念図
Fig. 3 Boiling water reactor.

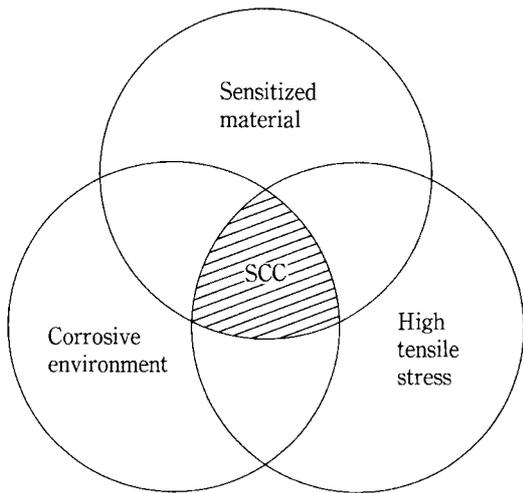
3. 原子力発電所への適用

3. 1 沸騰水型原子炉

3. 1. 1 概要

沸騰水型原子炉 (BWR : Boiling Water Reactor) の概念図を第 3 図に示す。BWR は蒸気を発生させる原子炉とその周辺機器で構成される。原子炉水は原子炉で加熱され蒸気となる。発生した蒸気は、タービンを回転させ、直結した発電機で電気を起こす。タービンを通った蒸気は復水器で水に戻り、フィルターやイオン交換装置等の浄化装置で浄化されて、再び原子炉水として原子炉に戻される。

BWR の原子炉内は、圧力約 70 kg/cm²、温度約 280 °C で運転される。BWR の温水接触部の材料は、高温高圧の水または蒸気に曝される他に、炉心付近の水の放射線分解や高密度の中性子照射等の通常と異なる環境下におかれるため、炭素鋼、ステンレス鋼、ニッケル合金、ジルコニウム合金等が用いられている。原子炉水の配管には、オーステナイト系ステンレス鋼が使用されてきた。しかし、1970年代に米国を初めとする世界各地の BWR の原子炉水の配管



第4図 応力腐食割れの要因
Fig. 4 Causes of SCC (stress corrosion cracking).

に応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) が発生し、世界中のBWRの稼働率が低下する事故が起こった。そこで、現在では、SCCを防止するために様々な対策が実施されている。

3. 1. 2 応力腐食割れ

SCCは、第4図に示すように、材料、応力、環境の3つの要因が重畳したときに発生する。SCC発生は、これらの3要因のうち少なくとも1要因を完全に除去すれば抑制出来る。3つの要因に対して、それぞれ次のような抑制策が考案された²⁾。

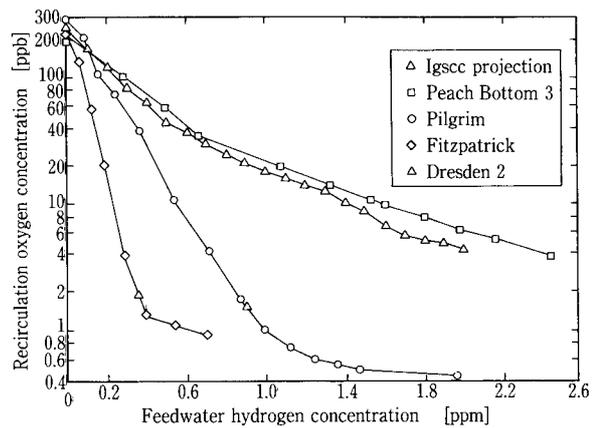
1) 材料要因

従来、BWRの冷却水配管にはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 が使用されていた。SCC発生の原因である溶接熱影響部のクロム炭化物の析出は、ステンレス鋼中の炭素量の影響が大きく、炭素量が0.02%以下で割れ感受性が小さくなる。割れ感受性が小さい低炭素鋼の中で、さらにSCC抑制に有効なMoを含むSUS316LはSUS304Lより割れ感受性が小さい。原子力用として高い機械的強度の信頼性を得るために、炭素量を0.02%以下に低減した上に、微量の窒素を添加したSUS316NG (NG : Nuclear Grade) 等の原子力用耐SCCステンレス鋼が開発された。現在、国内の新設の原子炉では、原子力用ステンレス鋼が全面的に採用されている。

2) 応力要因

SCC発生の応力要因は、溶接の引張残留応力である。応力要因の改善策として、溶接時に配管内面を流水やスプレー水で冷却し、溶接後の残留応力を、圧縮応力にする管内面溶接法 (HSW : Heat Sink Welding) が採用されている。また、既設溶接部には、溶接部を局部加熱することにより、管内面引張応力を圧縮応力に反転させる高周波加熱応力改善法 (IHSI : Induction Heating Stress Improvement) が採用されている。

3) 環境要因



第5図 水素注入の効果⁴⁾
Fig. 5 Effect of hydrogen injection in BWR plant.⁴⁾

オーステナイト系ステンレス鋼のSCCは、高温高圧水中で塩素イオンと溶存酸素が共存するときに発生する。そこで、原子炉水の塩素イオン濃度は厳重に監視され、特に、海水を冷却水に利用して蒸気を水に戻しているタービン復水器からの海水漏洩に対しては、復水脱塩器や原子炉水の導電率変化の監視を行って海水の混入を防いでいる。

また鋭敏化したオーステナイト系ステンレス鋼は、塩素イオンが共存しない条件下においても、高温水中で溶存酸素濃度が200ppb以上のときSCCを発生する。運転停止時は原子炉は大気に解放され、原子炉水の溶存酸素濃度は約8ppmになり、再起動時、原子炉水の温度と溶存酸素濃度は、SCCが発生する条件となる。これを避けるために、原子炉水が高温になる前に溶存酸素濃度を低減する起動時の脱気運転が広く採用されている³⁾。

一方、起動時の脱気運転にかかわらず、運転中の原子炉水は炉心付近で放射線分解され、溶存酸素濃度は約200~400ppbとなる。そこで、運転中の原子炉水に水素を注入し、溶存酸素濃度を低減する方法 (HWC : Hydrogen Water Chemistry) が考案された。原子炉水中に注入された水素は、弱い放射線照射場で酸素と水相反応し、溶存酸素濃度を低減する。第5図に示すように、米国のBWR原子炉で、水素注入により炉水中の溶存酸素濃度が低減することが実証されている⁴⁾。米国では、EPRI (Electric Power Research Institute) と関連電力会社により水素注入法が検討され、ガイドラインが作成された⁵⁾。鋭敏化したステンレス鋼は、高温水 (280℃付近) 中で腐食電位が-400mVvs. SHE (標準水素電極 : Standard Hydrogen Electrode) 以下のときSCCは発生せず、このときの溶存酸素濃度は40ppb以下である。また、BWR実システムでの水素注入実験の結果、原子炉水の腐食電位を-230mVvs. SHE以下にすると、SCCが発生しないと報告されている^{5) 6)}。原子炉水への水素注入量は、原子炉水の腐食電位で制御されている。

3. 1. 3 水素注入による水質管理

水素注入法は、アメリカ、スウェーデン等の数カ所の

BWR 原子炉で実施され、SCC 抑制に対する効果が認められている。第 4 表に水素注入を短期間テストまたは長期間実施した原子炉を示す⁴⁾。国内では、SCC 抑制に対して、材料改善、残留応力緩和が実施され、水素注入はほとんど注目されていなかった。しかし、材料や応力要因の改善が困難な既設システムの延命対策として、水素注入が検討されている。1985年から新型転換炉「ふげん」で国内で初めて原子炉水への水素注入が実施され、水素注入による SCC 抑制効果が確認された。

3. 1. 4 水素供給設備

原子力発電所内での水素供給設備は、出来る限り安全で、安定した長期連続運転が出来る設備が望ましいため、ポンプ等のガス貯蔵設備よりオンサイト発生装置が適している。一般に、国内外の原子力発電所では、短期の水素注入テストの場合はポンプを使用しているが、長期の水素注入の場合はアルカリ水電解による水素発生装置が使用されはじめています。しかし、原子力発電所では、廃液処理やメンテナンスが不要な装置が望まれる。また原子炉水に不純物が混入すると、放射線量増加やクラッド発生の原因となるため、注入水素ガス中の不純物や酸素ガス混入は好ましくない。これらの点を考慮すると、第 3 表に示すように、システム型 HHOG は BWR 原子炉水中への水素供給設備としてアルカリ水電解装置より適しているといえる。水素注入量や圧力は原子炉により異なるが、およそ 10~60 N^m/hr、9~40 kg/cm²の範囲であり、システム型 HHOG はこれらに十分対応出来る能力をもっている。

3. 2 加圧水型原子炉

3. 2. 1 概要

加圧水型原子炉 (PWR: Pressurised Water Reactor) の概念図を第 6 図に示す。PWR は原子炉から熱を取り出す 1 次系と蒸気を発生させてタービンを回す 2 次系が、蒸気発生器を介して完全に分離されている。1 次系は、1 次冷却水 (約 300 °C、160 kg/cm²) を閉サイクルで循環し、原子炉内で発生した熱を蒸気発生器へ運ぶ。2 次系は、蒸気

発生器で 1 次冷却水からの熱を受け取り、2 次冷却水から蒸気を発生させる。発生した蒸気はタービンを回転させ、直結した発電機で電気を起こす。タービンを通った蒸気は復水器で水に戻り、浄化装置を通して再び 2 次冷却水として蒸気発生器へ送られる。

3. 2. 2 水素注入による水質管理

PWR の 1 次冷却水の配管は BWR と同様、ステンレス鋼で構成され、SCC 発生の可能性がある。PWR の 1 次系は、BWR と異なり加圧された液相の密閉循環系なので、厳密な水質管理が可能である。PWR 1 次系では、SCC 抑制に対して、BWR と同様に 1 次冷却水中に水素を注入して溶存酸素濃度を低減している。SCC 抑制に必要な溶存酸素濃度は 5 ppb 以下、溶存水素注入率は 14Nml/kg・H₂O である。しかし、溶存水素注入率は、炉内の燃料被覆材に使用されているジルコニウム合金の水素吸収による水素脆性割れを最小限に抑えるために、15~50Nml/kg・H₂O に制限され、通常 30Nml/kg・H₂O 程度で運転されている^{4) 7)}。

3. 2. 3 水素供給設備

3. 1. 4 項で記述したように、システム型 HHOG は原子力発電所の水素供給設備に非常に適している。しかし、PWR 1 次系は密閉循環系であるため、BWR のように注入水素が復水器からオフガスとして排気されることはなく、水素注入量は少ない。システム型 HHOG ではなく、ユニット型 HHOG が適している。

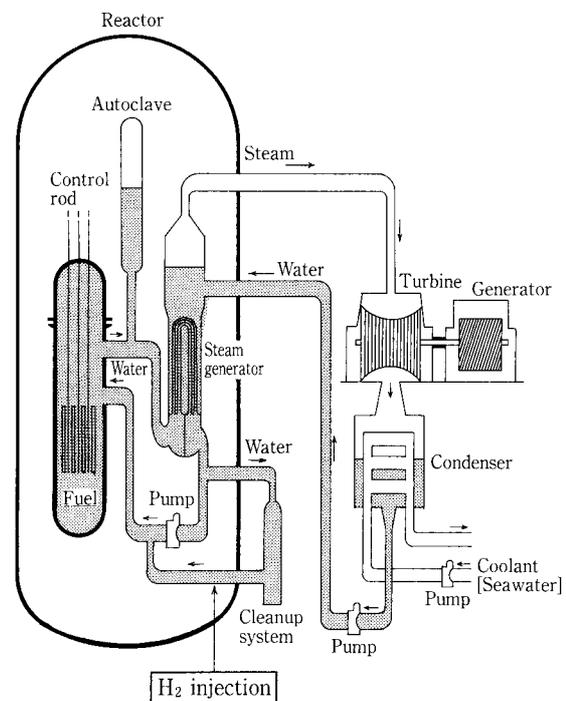
4. 火力発電所への適用

4. 1 タービン発電機の水素冷却⁸⁾

タービン発電機の水素冷却方式は 1930 年代に実用化され

第 4 表 世界の水素注入試験の実例
Table 4 Examples of hydrogen injection in BWR plants in the world

Country	BWR plant	Hydrogen supply system
U.S.A	Dresden 2	—
	Peach Bottom 3	—
	Pilgrim	1994~ alkaline water electrolyzer
	Fitzpatrick	—
	Oyster Creek	—
	Hatch 1	—
	Milestone	—
	Duan-Arnold	—
Sweden	Nine Mile Point 1	—
	Oskarshamn 2	—
	Ringhals 1	—
	Forsmark	—
Japan	Barseback	1991~ alkaline water electrolyzer
	Fugen	1985~ alkaline water electrolyzer



第 6 図 加圧水型原子炉の概念図
Fig. 6 Pressurized water reactor.

た。水素冷却方式は空気冷却方式と比較すると、次のような利点がある。

- 1) 水素の比熱は空気の14倍であるため冷却効果が大きい
- 2) 水素の比重は小さいため風損が小さくなる
- 3) 水素の密度は小さいため騒音が減少する
- 4) コロナ放電による構成材料の酸化が起らない

さらに、冷却効果を上げてタービン発電機の出力を増加させるために、固定子及び回転子コイルを中空とし、その中に水素を通して導体を冷却する直接冷却方式がある。

4. 2 水素供給設備

国内の火力発電所では、タービン発電機の冷却用水素はポンペ等の貯蔵設備で供給している。海外の火力発電所の中には、地理的にポンペ輸送や交換が困難な場合がある。このような場合は、貯蔵設備よりもオンサイト発生設備の方が低コストである。このような水素供給設備には、日常のメンテナンスが不要で、安定して連続運転出来るシステムが望まれる。システム型HHOGは、第3表に示すように、メンテナンス、操作性の面で火力発電所での水素供給装置としてアルカリ水電解装置より適していると言える。

タービン発電機の冷却用水素は、定期補修後の発電機立ち上げ時にはおおよそ500 Nm³必要とするが、定常状態の発電中はおおよそ3~20 Nm³/hr使用される。水素供給装置は、定常状態での発電機に使用する水素量より幾分多い発生量の機種を選定し、立ち上げのために発生水素の一部をポンペに高圧充填して貯蔵しながら使用される。火力発電所向けのHHOGは高圧充填用の昇圧装置をもったシステム型HHOGが適している。

5. 半導体工場への適用

5. 1 プロセスガス

半導体産業において、例えば高純度の水素ガスは熱処理工程の雰囲気ガスとして使用され、高純度の酸素ガスは酸化膜の生成処理のプロセスガスとして使用されている。これらの製造工程では、ガスの純度が製品の良否に与える影響が大きい。そこで、高純度のガスを供給するための配管やバルブの構成材料、ガス精製装置、分析技術の開発が進められてきた。

5. 2 水素供給設備

一般に、半導体工場において、水素は高圧充填されたローダーで、工場内のガス貯蔵エリアに一括して貯蔵される。水素は、ガス貯蔵エリアから配管で供給され、各ユースポイントで個別に精製されて使用される。カードルに充填された水素は、PSA精製方法や触媒燃焼精製方法等で1次

精製されているが、炭化水素、窒素、一酸化炭素、二酸化炭素等の不純物ガスが完全に除去されていない。また、大容量の高圧ガスを貯蔵しているため、高圧ガス取締法に規制され、さらに、地震や火災等の不測の災害時に爆発の心配があり、安全性に問題がある。

システム型HHOGは、オンサイト発生設備であるため、2.1項に記述したようにローダー等の貯蔵設備と比較すると安全性に優れ、安定した長期連続運転が可能である。また、第1表に示すように、ガス中の炭化水素等の不純物は極微量で、ローダーよりも高純度の水素を供給出来る。さらに、水素とともに発生する高純度の酸素を供給することも出来る。これらの点を考慮すると、システム型HHOGは、半導体工場のガス集中供給設備として、非常に適しているといえる。

む す び

HHOGは、オンサイト水素酸素供給装置として、優れた特性を示し、また少容量から大容量まで広い範囲の供給に対応出来る。小容量供給ユニットは、半導体工場のクリーンルーム内での使用や各分野の研究用装置等高純度ガスを必要とする分野に最適である。大容量供給用のシステム型HHOGは、原子力発電所、火力発電所、半導体工場等のガス供給設備に最適である。また、ファインセラミックス製造用等の前述以外の分野でも適用が可能である。

〔参考文献〕

- 1) 腐食防食協会：防食技術便覧, (1992), 日刊工業新聞社
- 2) 小林宏子ほか：神鋼パンテック技報 Vol.38, No. 1 (1994)
- 3) 藤井信一：防錆管理 Vol.37, No. 9, p.353 (1993)
- 4) 平原靖通ほか：火力原子力発電 Vol.43, No.10, p. 1340 (1992)
- 5) 石樽顕吉ほか：原子炉冷却系の水化学, (1987), 日本原子力協会
- 6) C. J. WOOD et al. : BWR Water Chemistry Guidelines - 1993 Revision (Normal and Hydrogen Water Chemistry), (1994), EPRI
- 7) L. G. LJUNGBERG et al. : Corrosion-NACE Vol. 42, No. 5, p.263 (1986)
- 8) 日野裕一ほか：火力原子力発電 Vol.43, No.10, p. 1322 (1992)
- 9) 益山正人：火力・原子力発電, (1984), 東京電機大学出版局