

4. 解 説

水電解水素製造技術の最近の動向

— 第5回世界水素エネルギー会議を中心に —

日本化学工業協会 阿 部 勲 夫

1. はじめに

第5回世界水素エネルギー会議は1984年7月15日～19日まで、カナダのトロントで行われた。全部で約230編の論文が発表されたが、そのうち水電解に関する論文は42であり、一分野としては非常に多数の発表が行われた。水素エネルギーに関する技術の中でも極めて数少ない商業的に実用化されている分野であり、開催地であるカナダでは水電解が用いられているためもあって力が入ったのかもしれない。第1表に水電解のセッションの論文数とその分野別、国別内訳を示す。なお、表中には予稿のみで会議に欠席したもの、予稿集には間に合わなかったが発表が行われたものを含んでいる。表中のSPEは高分子固体電解質電解、IMEはベルギーで開発中の無機イオン交換膜電解である。

分野別に見た場合、電極の研究が基礎と応用を合わせると11件となり最も多いが、これは電解にとっては永遠の課題であるので当然のことかもしれない。高温で水蒸気を電解する方式の研究が9件であり、電極の研究について多いことは注目に値する。この方法は未だ実験室規模でしか行われていない新しい電解方法である。つぎにシステムの研究がこれに次いで多い。これは一定規模以上のパイロットプラントの運転結果の報告であり、すべてアルカリ水電解である。これから見ると水電解の研究の主流が、水蒸気電解のように極めて新しいものとアルカリ電解のパイロットプラントの実証試験とに分離してしまった感がある。隔膜についてはアスベストにかわり得る材料の模索がされている。

SPEに関しては2件の報告だけであり、その2件もSPEによる小規模実用プラントのフィールドテストと日本からのAZEC法の報告であり、純粹のSPE水電解の研究開発の報告は1件も行われなかった。SPEによる水電解システムは一応の研究開発を終了したが、極めて小規模の水素発生機を除くと未だ実用化にはコストなどの難点があるものと見られる。また、米国においてSPE研究への研究補助をDOEがうち切ったことや、SPE研究の中心であったGE社がこの部門をUTC社に売却したことなどもこの分野のアクティビティを低下させているものとみられる。

今回のWHECでは報告がなかったが米国ではDOEが陽極減極による省電力水電解の研究に力を入れている。水電解を行うとき、陽極で有機物の酸化反応を行うことにより酸素の発生を抑制してその分だけ低いセル電解で電解を行うというものであり、厨介を粉碎したものを陽

極の周りに入れるという極端なアイデアさえある。W H E C にひき続いて行われた I E A の水電解ワークショップではこれに関する報告が行われた。

第1表 5th W H E C における水電解報告数

ポスター	13 (10)	欠席	3
口頭発表	29		
合計	42 (39)		

	米	加	独	仏	ブラジル	日	伊	英	ベルギー	ノルウェー	その他	計
電極(基礎)	1	2		1							1	5
S P E	1					1						2
I M E									1			1
水蒸気電解	3	1	2			1	1				1	9
電極		1	1		2		1	1				6
隔膜	1	1	1	1			1					5
システム	2	1	1	2		1					1	8
コスト・性能計算				1						1		2
その他			1		2			1				4
合計	8	6	6	5	4	3	3	2	1	1	3	42

2. アルカリ水電解

2・1 システム研究

電解槽の性能は電極や隔膜，セル構造や運転条件の組合わせにより決定される。したがってある程度以上の規模を有するパイロットプラントを作動させる事が一番確かな性能推定となる。1 KW 以上の電解装置の運転結果が7件報告されている。テレダイン社のSalzmanらは2年前のW H E C IVで同社が発電機冷却用の水素を発生するためのアルカリ水電解槽H G Sの概要を発表した。これはNi-Mo合金の陰極とアスベスト隔膜を有するコンパクトな水素発生量 $13.5 m^3/時$ の装置である。今回のW H E Cではこの装置を社内および発電所で運転した実績を報告している。¹⁾これによると1年間平均の稼働率は81.8%であり稼働率の良い時の電力原単位は $7.4 KWH/m^3$ であった。エレクトロライザー社のHufnagel²⁾らは、やはり2年前に建設した新しいユニポーラー電解槽の運転実績を発表している。この電解槽は単極式ながら $24.2 A/dm^2$ という複極式と同程度の高い電流密度を有し、触媒電極の利用によって1.85 Vのセル電圧を得ている。1 MWという実験設備としてはきわめて能力が大きい。2年間の運転の結果予定通りの性能を示したという。新しい電解槽の開発が、ほとんど複極式を旨とするうちで唯一社Stuart槽以来の伝統ある単極式を開発している同社は単極式の方

が構造が簡単でコストが安く、広い設置面積を有するという欠点も高電密の採用で克服されつつあるとしている。この電解槽は即実用可能な規模であり、従来の装置より20%のコストダウンができるという。単極式でありながら複極式に近い性能を有しているのは電極を複極式と同様に隔膜に密着した前置電極方式（ゼロギャップ構造）をとっていること、内部冷却の装置を有すること、改良された給電方式等によるものと推定される。Vandenborre ら³⁾はポリアンチモン酸という無機イオン交換物質を隔膜としたアルカリ水電解（IME法）を開発してきたが、硫化ニッケルの陰極とコバルトのスピネル酸化物の陽極とを組合わせて、120℃、40 A/dm²で1.60 V、100 A/dm²で1.75 Vという低いセル電圧を0.2 m²の有効面積を有する大型のセルで得ている。このセルを30枚スタックしたプロトタイプ電解槽を開発し報告している。これは100 A/dm²の高い電流密度を有し、100℃、5気圧で作動する。水素発生量は25 m³/hでセル電圧は1.85 V程度である。この性能はきわめて秀れており、アルカリ電解槽でありながらSPEと同程度の性能を有している。同氏はこの電解槽のコストはルギ社の商用高压電解槽と同程度であり、SPE方式の約半分であると主張している。現在のところこの程度の規模のパイロットプラントの中では技術的に最も優秀なシステムと言えよう。筆者ら⁴⁾は日本におけるサンシャイン計画で開発されたパイロットプラントについて報告した。この装置は20気圧、120℃で作動する高压電解槽で、前回報告されたテストプラントの5倍のスケール（80 KW水素発生量20 m³/時）を有するが、セル電圧はテストプラントより40 A/dm²で0.02 V高く1.67 Vであった。なおこのプロジェクトは1984年3月末に当初の目標を達成して終了した。Belle ら⁵⁾は120℃、30気圧で作動する30 KW（約6 m³/時）のフィルタープレス型ラストセルを試験した。このセルは0.1 mmのNi薄板上にニッケル微粉を0.3 mmの厚さに焼結し、さらにNi-Moの酸化物を触媒としてつけて電極としている。セル構成でゼロギャップ構造をとってないこと、セルスタックに耐圧を持たせずセル全体を耐圧容器中に収容していること、高温にもかかわらずアスベストをニッケルで補強して隔膜に用いていること等が特徴であるが、セル電圧は100 A/dm²で2.2 Vとやや劣る。この構造をベースに2.4 MWの大型プラントの概念を説明し、セルフレームをプラスチックで製作することができるとしている。Nenner ら⁶⁾は0.2 m²のセルを4枚スタックした複極型セルを試作した。陽極にSr_{0.5}La_{0.5}CoO₄のペロブスカイト、陰極にTiの入ったRaney Niを使用し、隔膜には特殊な薄いアスベストを用い、ポリスルホン製のセルフレームで2気圧、110℃の運転を行ない40 A/dm²で2.1 Vのセル電圧を得た。温度の高い割にはセル電圧が高くあまり良い成績とは言えない。ノルスクヒドロ社のChristiansenら⁷⁾は同社の大型商用電解槽（常圧、80℃、472 m³/時）の概要を紹介し、最近各所で開発されている高温高压型電解槽と経済的に比較し、高温高压型はあまり有利でないとしている。そして現在の商用電解槽の温度を10℃増加して90℃にし、電流密度を第

1段階で60 A/dm²まで、第2段階で100 A/dm²に増加する漸進的改良を計画し、100 A/dm²でセル電圧1.7 V(電力原単位4.2 KWH/m³)を目ざしている。しかし新しいセルの実験成果は示されていない。ライフシステム社のKovachら⁸⁾は同社が開発している静的供給型電解槽(Static Feed Electrolysis)を紹介している。この装置は水を蒸気圧でアルカリ電解質に供給するユニークな電解槽であり、補給水が蒸気で供給されるので純水でなくても良く海水を用いることもできる。0.1 ft²のセルを12枚スタックしたモジュールで21 A/dm²の電流密度と82℃で1.63 Vのセル電圧を得たと報告しているが、同社は2年前に1 ft²のセルの結果を報告しており、それと比較してあまり進歩がない様である。以上現在研究が行われている電解槽を概観したが、現在商用電解槽を製作しているテレダイン、エレクトロライザー、ノルスクヒドロの各社が現用の電解槽をベースに一步進歩したプラントを開発しているのに対し、新しく水電解槽の開発に加わったところが1足跳びに高温高压型で高性能を狙っているのは興味がある。あくまで経済的に引合う改良とコストよりは性能を優先にしているちがいであろう。

2・2 電 極

2・2・1 電極の基礎研究

水素エネルギー会議で発表される研究は具体的な応用に関するものが多いが、電極の基礎的な研究や解説も数編寄せられている。Yeagerら⁹⁾はアノードとカソードの各々について電極反応のメカニズムを検討し、各種金属や化合物の電極触媒についてのレビューを行い、現在の商業電解槽では陽極側の過電圧がまだ大きい事を指摘している。Jaksic¹⁰⁾は水素発生用の電極触媒に関して金属の電子配置と触媒活性について論じ、d軌道に空のある遷移金属と内部で対になったd軌道電子を有する遷移金属の化合物が高い活性を持つとし、MoCo₃、WNi₃、LaNi₅等がすぐれた触媒となりうるとしている。一方Vijhら¹¹⁾はAg-Pd合金の比率を変えて電極電位を測定し、電極活性とd電子とは直接の関係がないと主張している。Conwayら¹²⁾はNi-Mo-Cdの電極の水素発生の挙動を動的な電気化学的手法を用いて測定し、この触媒の高い活性はTofelスロープの低傾斜領域によるものとしている。Tenanら¹³⁾は電極上の気泡発生メカニズムを検討し、気泡発生部における局所的な電流密度を考慮したモデルをつくり、実験の結果とより一致を示したとしている。

2・2・2 電極材料

水電解において、電解電圧は水素を発生させるのに必要なエネルギーに比例するので、電極の過電圧を低下させることはエネルギーの変換効率を向上するために重要である。このため電極における電気化学反応を促進するため、電極に触媒活性を有する材料を用いることが研究されている。陰極材料としては従来鋼板が用いられ、やや活性のある材料とし

てロダン塩を含むニッケルメッキ浴で硫黄を含有したニッケルメッキを施した鋼板が用いられてきた。今年の世界水素エネルギー会議では数種の触媒が報告されているが特に新しいものではなく、従来から研究してきた材料をパイロットプラント等で少し大きなスケールアップをしたり、多少変化させたものが多い。材料はニッケルベースのものが多い。ニッケルの表面を拡大したタイプとしてはRaney Ni が最も一般的である。Nennerら⁶⁾はNi-Al-Ti をプラズマスプレーしてチタンを含有したRaney Ni の電極を作った。筆者ら⁴⁾は大阪工業技術試験所の鳥養氏等の開発した超微粉ニッケルを発泡ニッケル基体より焼付けた表面拡大電極(HSA)を80KWパイロットプラントで試験した。表面拡大ニッケル以外にはNi-Mo合金¹⁾¹⁴⁾、硫化ニッケル³⁾、がパイロットプラントのレベルで試験されすぐれた耐久性を示している。Nidolaら¹⁵⁾は硫化モリブデン粉末を懸濁したロダンニッケルメッキ浴でメッキを行った陰極は単なる硫化ニッケルより50mV過電圧が低くだけでなく、鉄やコバルトの硫化物と異って電解液中の鉄成分により活性低下をおこさず、90℃25A/dm²で20,000時間経過後も活性変化を示さなかったと報告している。Tseung¹⁶⁾らはNiCoS₄が陰極として秀れているが電解を停止したときにニッケルとコバルトの電位差のため腐蝕されると報告し、高活性の陰極触媒はすべて同様の問題を有するとして電解セルの停止時に微量の電流を通電する等の方法で陰極を保護する必要があると説いている。鉄による汚染と電解停止による腐蝕は電極の大きな問題点であり、実用に供された場合も具体的な電解槽の構造や運転状況により異なるので実験データからのみでは正確な評価は困難である。陽極は電極材料の腐蝕や酸化による経時変化があるため、陰極よりさらに複雑である。従来はニッケルメッキを施した鋼板が用いられてきた。いくつかの電極触媒が研究されてきているがまだ必ずしも満足のいくような活性電極は得られていない。陽極材料としてはRaney Ni等の表面拡大ニッケル、ペロブスカイト型酸化物、スピネル型酸化物が電極材料として研究されてきた。表面拡大ニッケルは陽極として使用中に酸化が進行して活性が向上し、さらに酸化が進むと再び活性が低下する。このようにやや不安定であるが比較的作りやすいのでよく研究されている。Murrayら¹⁴⁾はニッケル粉末でコーティングした金網を陽極として試験し、各種の開口比率を持つ金網をテストした結果、開口面積が40%のとき最も電解電圧が低いとしている。Divisekら¹⁷⁾はLaNiO₃、SrCoO₃、Co₃O₄等のペロブスカイト酸化物、スピネル酸化物としてNiCo₂O₄、ニッケルと亜鉛を電着してアルカリ処理により作ったRaney Niについて陽極電位を100℃、10MKOH水溶液中で比較測定した。その結果、触媒をベレット状で測定した場合はLaNiO₃が最も低い電圧を示すが実際に利用できる形状の電極としてニッケル基体上に付けた状態ではRaney Niが最も電圧が低かったとしている。またRaney Ni上にペロブスカイト酸化物を添加する方法を試みたが添加による活性向上より加熱するための失活効果の方が大き

く、改良にならなかったと報告している。筆者ら⁴⁾は $20\text{ m}^3/\text{時}$ のパイロットプラントの陽極に陰極と同じH S A表面拡大ニッケル電極を用い 1.67 V のセル電圧を得ている。またVandenborre³⁾はコバルトのスピネル酸化物を $25\text{ m}^3/\text{時}$ のパイロットプラントの陽極として試験している。電極材料の試験法に関してJanjua¹⁸⁾らは小規模な試験装置とその結果から大型の商業槽の性能を推算する方法をのべ、商業槽の電極は単に連続運転の耐久性が良いだけでなく装置の停止時にも安定でなければならないとして周期的に逆電位を加える試験法を提唱している。電極の過電圧を測定するにはカレントインタラプト法が用いられるが、大規模な商業槽には適用が不可能である。Soares¹⁹⁾はフルサイズの商業槽の過電圧を測定する方法として商用交流を整流した脈流をセルに加える装置を報告している。Tseung¹⁶⁾は陽極の製作方法を熱分解によりニッケル網上に析出させるのと触媒粉末をフッ素系高分子のFEPの粉末で網上に固定する方法とを Co_3O_4 と NiCo_2O_4 について各種メッシュ(20~100メッシュ)上で比較し、FEPでボンドした方がすべての場合に活性が良く、またメッシュの細かい方が良いとしている。Schnurnberger³³⁾は低圧プラズマプレ法(LPPS)によりRaney Niと NiCo_2O_4 スピネル酸化物をニッケル板上にコーティングし、結晶構造に変化がないが機械的な接着力の不足から十分な厚さに被覆できないと述べている。以上のように電極触媒材料は単に電気化学的活性や耐久性ばかりでなく、実用的な電極をつくる成型性、実際の操業条件での安定性やさらに製造コストまでを含めて総合的に評価されねばならない。したがって報告から優劣をつけるのは難しく、今後実用化されてゆくうちに自然淘汰がなされるであろう。著者の予想では陰極としては硫化ニッケル又は表面拡大ニッケル、陽極としては同じく表面拡大ニッケルかコバルト酸化物ではなかろうか。いずれにしても安価に製作できるものでなければ商業的な使用は困難である。

2・3 隔膜材料

アルカリ水電解の隔膜としては現在アスベストが使用されている。しかし 80°C 以上の温度になると成分中の珪酸がアルカリに浸されるため使用できない。また電気抵抗もやや大きい。このため高温・高電密での運転を目標とする新しい電解槽のための隔膜材料が探索されてきた。親水化処理した多孔質PTFEのような耐熱高分子、チタン酸カリウム、酸化ニッケル、ポリアンチモン酸等の無機物等が研究されている。筆者ら⁴⁾は多孔質のPTFE膜をチタン酸カリウムの含浸によって親水化し、 80 KW パイロットプラントで試験した。この膜は 120°C の高温で $40\text{ A}/\text{dm}^2$ の電流密度で1年間トラブルなく使用できた。テレダイン社のMurray¹⁴⁾はチタン酸カリウムのファイバーを20%のポリベンゾイミダゾール(PBI)で固めた隔膜を 75 cm^2 の小型セルで試験したが、 100°C では短時間でPBIが消失した。その後圧縮して密度を上げた膜で 70°C 、6,000時間の運転に成功し、より高温の試験を目

ざしている。Vandenborreら³⁾は前項で述べたように無機のイオン交換体であるポリアンチモン酸隔膜を開発したが、これは $0.2m^2$ という大型セルで実証されている事や性能の点で非常にすぐれたものといえる。ニッケル金網で補強したセラミックで隔膜をつくる試みも行われつつある。Divisekら¹⁷⁾は酸化ニッケルをニッケル金網に担持した隔膜をつくり、 $90^\circ C$ で $0.25\Omega \cdot cm^2$ の抵抗値を得ている。この数値は新しい隔膜のほぼ平均的な値であり、触媒電極との組合わせで $100^\circ C$ 、 $40A/dm^2$ で $1.59V$ という秀れた成果を得ている。Wendtら²⁰⁾はニッケル金網上にチタン酸バリウムを焼結した膜をつくり、 $125^\circ C$ で $0.26\Omega \cdot cm^2$ の抵抗値と $120^\circ C$ で5,000時間の耐久性を得ている。アスベストを補強したり、珪酸カリウムを電解液に飽和させることによりやや強引に高温で使用しようという試みもある。Belleら⁵⁾はニッケル金網で補強したアスベストを用い $120^\circ C$ で10,000時間をこえる電解試験を行った。Nennerら⁶⁾は各種隔膜材料を試験したが長いファイバーの特別なアスベスト膜を製作し、珪酸塩を溶解した電解液で $110^\circ C$ で $0.2\Omega cm^2$ の低い抵抗値と10,000時間をこえた耐久力を得た。Giuffreら²¹⁾はアスベストを各種ポリマー(ポリスチレンージビニルベンゼン等)で補強した膜を試作したが機械的に硬く隔膜として成型できていない。この他にも芳香族ポリエーテルのカルボン酸を合成して高温に耐える隔膜を製作しようという試みもある³²⁾が、まだ本格的な電解試験には至っていない。隔膜の材料としては $90^\circ C$ 以下はアスベスト、 $90^\circ C \sim 120^\circ C$ の間はPTFEやポリアンチモン酸、および他の高分子含有材料、 $120^\circ C$ を越える高い温度領域にはセラミックが用いられよう。高温領域では隔膜だけではなく構造用金属やガスケット材もまだ問題があり実用化の見込みはたっていない。 $120^\circ C$ までの中温領域は技術的にほぼ満足できる材料ができたが、経済的に引合うコストにするという問題点は必ずしもまだ解決されていない。

3. 高温水蒸気電解 (HTE)

この方式は高温でイオン導電性を有する固体を隔膜として使用し気相で水を電解する方法である。固体イオン伝導体としては酸化ジルコニウムが用いられ、これをイットリウムなどでドーブして安定化したイットリア安定化ジルコニア (YSZ) が一般的に用いられている。これを $800 \sim 1,000^\circ C$ の高温にすると酸素イオン伝導性を有するようになり、この薄板の両側に電極を付け陰極側に水蒸気を入れて直流を印加すると水蒸気が電解されて酸素のみが陽極側に現われる。そして同時に陰極側は水蒸気が減少して水素に富むようになる。この方式は他のアルカリやSPEのような溶液の電解と異なり、陰極側の水蒸気が減少して水素が増加すると水蒸気の拡散による過電圧が増大するため水蒸気を完全に水素に転化することができない。電解セルは通常電解質のジルコニアの円筒で作られ、内部、外部に電極を付してこれをパイプ状に接続してマルチセルとする。材料がこわれ易いうえに電氣的に直列にするためには管の内外壁

を交互に電氣的に接続しなければならない等、構造上の困難がある。E C イスプラ研究の Barbi ら²²⁾は白金を陽極とした Y S Z にセリウム酸化物を陰極として付け、この陰極作用を調べている。Dornier System の Dönitz ら²³⁾は図 1 のような構造で内部を陰極としたパイプ状のマルチセルを作り、1,000℃で10セル運転を行ない 0.37 A/cm^2 で1セル当り 1.33 V のセル電圧を得ており、陰極側の水素濃度 85% を得ている。現在 3.5 KW ($1 \text{ m}^3/\text{H}$) のプレパイロットプラントを製作中とのことである。Dönitz らと共同で研究している Lurgi 社の Streicher ら²⁴⁾は 3.5 MW の実用規模プラント HOT ELLY の概念を紹介し、吸熱、発熱、熱中立の運転モードとそれぞれのシステム構成について検討している。吸熱および発熱のあるセル電圧領域での運転では前者は電力が $2.6 \text{ KWA/m}^3\text{H}_2$ と少なく済むが高温の熱源が必要なので設備費がかさむこと、後者は $3.2 \text{ KWh/m}^3\text{H}_2$ の電力が必要だが 200℃の低温蒸気のみを供給すればよいので設備費が安くなるとし、発電効率を 38% とした場合の総合効率は前者の場合、44.7%、後者でも 39.3% でいずれの場合も通常の水電解の 31.4% より良いとしている。そして設備費は $3,000 \text{ 独マルク/m}^3\text{H}_2$ であり、電力が $2 \sim 3 \text{ 円/KWh}$ 以下なら天然ガスのスチームフォーミングに対抗できるとしている。Westinghouse の Maskalick²⁵⁾も Y S Z の電解質を有する高温燃料電池のセルを用いて水蒸気電解を行い、1,000℃ 300 mA/cm^2 で 1.23 V のセル電圧を得ている。この電圧は約 450 時間は保持し得た。Brookhaven 研究所の Salzano ら²⁶⁾は H T E の開発状況を概説し、この電解方式のシステム効率を検討している。それによると 25℃の水を 1,000℃で電解するために第 2 表のように理論電解電圧 0.919 V の他に、熱として 0.79 V を供給する必要がある、この分を全部熱で供給して一部を回収したとしても発電の熱効率を 35% とすると総合的な効率は 47% にしかならない。実際には過電圧やオーム損により電解電圧は高くなり、その分だけ熱供給を減少できるが低い効率で発電された電力を用いなくてはならないため、総合的な効率は低下する。また、熱回収も熱交換器の大きさにより左右される。電解電圧と熱回収率は共に設備コストとトレードオフの状態にあり、セル数を増加し、転化率と電流密度を下げればセル電圧は下るが設備コストが増大し、熱回収についても同様なことと言える。さらに石炭燃焼の発電ボイラーと高温水蒸気電解の組合わせたシステムの効率を検討し、セル電圧が多少高くなっても総合効率はそれほど悪くならないが、セル電圧を低下するため転化率を小さくすると供給蒸気の加熱のため効率が極端に悪くなることを示している。そして現実的に最も良い効率の条件で総合熱効率 40% であり、100℃の低温蒸気を作る熱以外はすべて電力が供給すると 35% であり現在の水電解の 29% より良くなるとしている。さらに、詳細に検討するためにより具体的な装置設計の必要性を説いている。M I T の Liepa ら²⁷⁾は石炭燃焼炉を熱源とした H T E のシステムのコスト、熱効率を計算し、熱源から高熱を供給して水蒸気の転化率を 90% にすると 38.2% の熱効率で電力費が 5 円/KWh のとき 18 円/m^3 のコストで水素が製造でき、石炭のガス化による水素とほぼ匹敵する

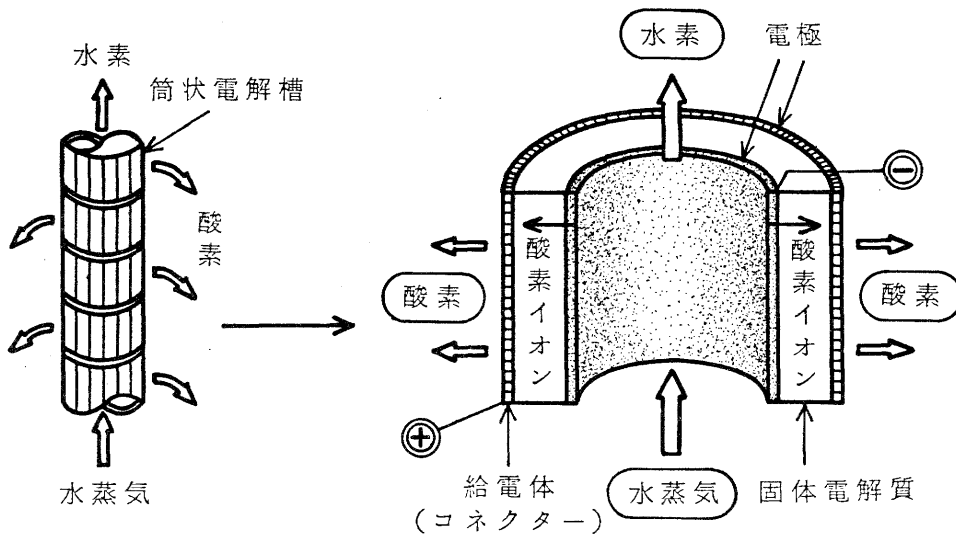


図1 高温水蒸気電解槽の構成

第2表

Energy Additions for a Water Vapor Electrolysis Process
At 1000°C With Input Liquid Water at 25°C

Step	Incremental Addition Volts	Cumulative Total Added Volts
Energy Invested		
(a-b) Heat liquid to 100°C	0.0293	0.0293
(b-c) Vaporization at 100°C	0.212	0.241
(c-d) Heat vapor from 100°C to 1000°C	0.176	0.417
(d-e) Entropy of Reaction TΔS	0.373	0.790
(e-f) Minimum Electric Energy ΔF	0.919	—
TOTAL		1.71
Product Energy Recoverable	0.25	
Net Energy Invested (based on liquid H ₂ O at 25°C)		1.46
Net Energy Invested (based on steam at 100°C)		1.25
Minimum Voltage		0.919
Maximum Thermal Energy Added		0.544
Maximum Efficiency (Reference, liquid H ₂ O at 25°C) (1.481/.919/.35 + 0.544)		47%
Maximum Efficiency (Reference, Steam at 100°C)		50%

としている。また、設備費は転化率を極めて低くしない限り水素コストに大きく影響せず、この点でも石炭ガス化より良いとしている。日本原子力研の小西ら²⁸⁾は核融合炉における三重水の電解を目的としたHTEの基礎実験を行いYSZと白金電極を用いて99.9%の転化率に達成した。Queens UniversityのBellら²⁹⁾はこれらとは別の β'' アルミナをプロトン伝導体とした低温の水蒸気電解について基礎的な研究を行い、100°Cにおける水蒸気電解を1,000時間にわたり行なったが、低温のため電流密度は数mA/cm²しかとれなかった。この方法は現在のところ高いイオン伝導率を有する β アルミナを製作することがYSZ以上に困難であり、性能的には実験室規模ですら通常のアルカリ水電解に及ばない。しかし、まだ極めて基礎的な段階にあるため他の方法との比較は困難である。

総じて水蒸気の電解はHTEですら未だ数KWクラスの装置が計画中に過ぎず基礎研究段階である。しかし、HTEについては数MWの大規模プラントが概念設計されている。このような大型プラントを作るには未だ技術的問題が山積しており、それらがもし解決できた場合でもかなり複雑なシステムとなり、通常の水電解が有する簡便さという特徴に欠ける。したがってその実用化は安価な高熱源（高温ガス炉など）の出現を待つ必要があり、かなり将来のこととなろう。

4. その他

SPE方式の電解に関する報告はGrahamら³⁰⁾による1件のみであった。GE製の20KW電解槽を発電機冷却用に使用した実績を報告し、18ヶ月間に70%の稼働率を得たとしている。旭硝子の森本ら³¹⁾は同社の陽イオン交換膜フレミオンを隔膜としてアルカリ液を電解する新しい電解について報告した。AZEC法という独自のセル構造を採用し、陰極にRaney Ni陽極はRe-Rhを添加したRaney Niを用いて110°C、70A/dm²で1.7Vという低いセル電圧を得ている。セルのサイズは20cm²であるが今後の開発が期待される。

5. おわりに

水素エネルギーのブームと共に動きはじめた水電解槽の再開発も実用化が始まった。新世代の常温（80°C以下）型アルカリ電解槽、小型SPE電解槽がすでに実用とされている。これからは100°Cを越える電解槽が商業的に建設され、並行してHTEのような新しい方式がパイロットプラントのレベルまで早く開発されることを期待したい。

参 考 文 献

Hydrogen Energy progress V
Proceedings of 5th World Hydrogen Energy Conference
Toronto, Canada

15-20 July, 1984

上記文献中の頁を示す。なおAのついているものはAbstractsの頁である。

- 1) THE TELEDYNE HGS PROTOTYPE, FACTORY AND FIELD TEST PROGRESS
M. P. Saltzman (U.S.A) 737
- 2) INDUSTRIAL DEMONSTRATION OF ADVANCED TECHNOLOGY FOR HYDROGEN PRODUCTION BY WATER ELECTROLYSIS
A. F. Hufnagl, R. L. LeRoy and R. Renaud (Canada) A29
- 3) ADVANCED ALKALINE WATER ELECTROLYSIS USING INORGANIC-MEMBRANE-ELECTROLYTE (I.M.E) TECHNOLOGY
H. Vandendorre, R. Leysen, H. Nackaerts, D. Van Der Eecken, Ph. Van Asbroeck, W. Smets and J. Piepers (Belgium) 703
- 4) HYDROGEN PRODUCTION BY HIGH-TEMPERATURE, HIGH-PRESSURE WATER ELECTROLYSIS III: RESULTS OF 80 KW PILOT PLANT OPERATION
I. Abe, T. Fujimaki, M. Matsubara and Y. Yokoo (Japan) 727
- 5) ALSTHOM ATLANTIQUE PROGRAMME IN THE FIELD OF HIGH POWER ELECTROLYSIS
P. Belle, P. Demange, A. Petiot and J. P. Pompom (France) 689
- 6) L'AUTONOME: AN ADVANCED AUTOMATIC ELECTROLYSER
T. Nenner, M. Roux and B. Roz (France) 681
- 7) INDUSTRIAL ELECTROLYTIC HYDROGEN PRODUCTION
K. Christiansen and K. Andreassen (Norway) 715
- 8) STATIC FEED WATER ELECTROLYSIS FOR STAND ALONE HYDROGEN GENERATORS
A. J. Kovach and F. H. Schubert (U.S.A) 671
- 9) REVIEW: MECHANISMS FOR THE HYDROGEN AND OXYGEN ELECTROCHEMICAL GENERATION REACTIONS
E. Yeager and D. Tryk (U.S.A) 827
- 10) TOWARDS THE REVERSIBLE ELECTRODE FOR HYDROGEN EVOLUTION IN INDUSTRIALLY IMPORTANT ELECTROCHEMICAL PROCESSES
M. M. Jaksic (Yugoslavia) 845
- 11) ELECTROCATALYSIS OF THE HYDROGEN EVOLUTION REACTION BY METALS AND ALLOYS IN RELATION TO THEIR ELECTRONIC CONFIGURATION
A. K. Vijh and A. Belanger (Canada) 863
- 12) H₂ EVOLUTION KINETICS AT HIGH ACTIVITY Ni-Mo-Cd ELECTROCOATED CATHODE MATERIALS AND THE STATE OF ADSORBED H
B. E. Conway and L. Bai (Canada) 879
- 13) A NEW MODEL FOR ELECTROLYTIC HYDROGEN BUBBLE EVOLUTION
M. A. Tenan and O. Teschke (Brazil) 593
- 14) ALKALINE SOLUTION ELECTROLYSIS: ADVANCES
J. N. Murray (U.S.A) 583
- 15) NEW SULPHIDE COATINGS FOR HYDROGEN EVOLUTION IN KOH ELECTROLYSIS
A. Nidola and R. Schira (Italy) 909
- 16) SOME FUNDAMENTAL AND PRACTICAL ASPECTS OF ELECTROCATALYSIS FOR WATER ELECTROLYSIS
A. C. C. Tseung and J. Botejue (U.K) 903
- 17) IMPROVED CONSTRUCTION OF AN ELECTROLYTIC CELL FOR ADVANCED ALKALINE WATER ELECTROLYSIS

- J. Divisek, P. Malinowski, J. Mergel and H. Schmitz(F.R.G).....655
- 18) ELECTROCATALYST PERFORMANCE IN INDUSTRIAL WATER
ELECTROLYSERS
M. B. I. Janjua and R. L. LeRoy(Canada).....605
- 19) SINE WAVE ELECTRODE TESTER FOR FULL SIZE ELECTROLYSERS
D. M. Saores, O. Teschke and M. A. B. de Moraes(Brazil).....555
- 20) INTEGRATED ELECTRODE/DIAPHRAGM UNITS FOR ADVANCED
ALKALINE WATER ELECTROLYSIS
H. Wendt and H. Hofmann(F.R.G).....893
- 21) REINFORCED ASBESTOS SEPARATORS FOR THE ELECTROLYSIS
OF WATER
L. Giuffre, G. Modis, E. Montneri and E. Tempesti(Italy).....751
- 22) ELECTROCHEMICAL SPLITTING OF STEAM: THE BEHAVIOUR OF
 $CeO_2-x/YTTRIA$ STABILIZED ZIRCONIA(YSZ)CATHODIC
INTERFACE
G. B. Barbi and C. M. Mari(Italy).....A 3 7
- 23) HIGH TEMPERATURE ELECTROLYSIS OF WATER VAPOUR: STATUS
OF DEVELOPMENT AND PERSPECTIVES FOR APPLICATION
W. Donitz and E. Erdle(F.R.G).....7 6 7
- 24) CONCEPT AND DESIGN OF A 3.5 MW PILOT PLANT FOR HIGH
TEMPERATURE ELECTROLYSIS OF WATER VAPOUR
R. Streicher and K.H. Quandt(F.R.G).....777
- 25) HIGH TEMPERATURE ELECTROLYSIS CELL PERFORMANCE
CHARACTERIZATION
N. J. Maskalick(U.S.A).....801
- 26) WATER VAPOUR ELECTROLYSIS: SYSTEMS CONSIDERATIONS AND
COST/PERFORMANCE BENEFITS
F. J. Salzano, G. Skaperdas and A. Mezzina(U.S.A).....787
- 27) HIGH TEMPERATURE STEAM ELECTROLYSIS: TECHNICAL AND
ECONOMIC EVALUATION OF ALTERNATIVE PROCESS DESIGNS
M. Liepa and A. Borhan(U.S.A).....813
- 28) SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL FOR DECOMPOSITION OF
TRITIATED WATER
S. Konishi, H. Ohno, H. Yoshida, H. Katsuta, and Y. Naruse(Japan).....537
- 29) LOW TEMPERATURE VAPOUR PHASE ELECTROLYSIS USING
 B^{II} -ALUMINAS
M. F. Bell, M. Sayer, P. S. Nicholson and K. Yamashita(Canada).....571
- 30) ON-SITE PRODUCTION OF HYDROGEN BY ELECTROLYSIS
A. B. Graham and J. A. Hynds(U.S.A).....665
- 31) ALKALINE TYPE ION EXCHANGE MEMBRANE WATER ELECTROLYSIS
T. Morimoto, M. Yoshitake, S. Morikawa and Y. Oda(Japan).....647
- 32) EVALUATION OF AROMATIC IONOMER SEPARATORS FOR USE IN
ADVANCED ALKALINE WATER ELECTROLYZERS
A. E. Steck and H. L. Yeager(Canada).....561
- 33) LOW PRESSURE PLASMA SPRAYED ELECTRODE COATINGS FOR
ALKALINE WATER ELECTROLYSIS
W. Schnurnberger, R. Henne and M. Von Bradke(F.R.G).....933