

## 6회 물 전기분해 수소제조 연구 동향 (한국에너지기술연구원 수소연구실)

### I. 기술 개요

웹스터 사전에 따르면 전기분해라는 말은 1834년에 생겨난 용어로, “전해질에 전류를 통했을 때 화학적인 변화가 생기는 것”을 뜻한다고 설명되어 있다. 이러한 현상이 처음 발견된 것은 1789년 네덜란드의 상인과 의사에 의한 것으로 알려지고 있지만, 1820년도부터 이 분야를 연구하여 1834년에 전기분해란 용어를 쓴 것은 우리가 익히 들어온 학자인 Michael Faraday인 것이다.

상업화 이용 역사는 이미 100년이 넘어, 1900년 필터프레스와 같은 형태를 가진 공업용 수전해조가 쥐리히의 O.Schmidt 에 의해 만들어진 이래, 1902년에는 이미 400기 정도 운용되고 있었으며, 1920년대와 1930년대에는 암모니아 비료 공업에서 널리 쓰이게 되었다. 노르웨이와 캐나다에는 수력전기를 이용하여 100MW급의 장치도 만들어지게 되었다. 1939년에는 단일 수전해장치에서 10,000m<sup>3</sup>/hr 까지 생산하게 되었다. 이 무렵이 장치의 저가화, 유지보수 용이성, 소형화 등을 추구하는 다양한 관련 특허도 대량 출원된 시기이기도 하다. 100기압에 이르는 고압운전도 이 당시에 이미 출원되거나 만들어졌다. 화석연료를 사용한 제조법과 비교하여 가격경쟁력, 장치의 대형화가 곤란하다는 점 때문에 화석연료(특히 천연가스)로 대체되었다.

1972년 로마클럽에서 성장의 한계라는 보고서가 나오고, 뒤이어 1973년 석유위기가 닥치면서 자원부족에 대한 우려로 원유를 대신할 에너지로 수소에 대한 관심을 갖게 되었다. 지금은 이러한 알칼리수전해 장치 외에도 PEM형 수전해장치와 고체전해질을 이용한 고온수전해 장치가 연구 개발되고 있다.

수전해 장치는 에너지 변환 효율이 높고, 경제성과 함께 부하 변동 범위가 넓어야 하며, 빠른 응답성, 소형화 역시 필수 조건이다. 세계 곳곳에서, 풍력과 태양광과 수소저장을 연계하는 에너지시스템의 실증이 이루어지고 있다. 산업용 수소는 수요처에 따라서는 직접 현장에서 수소를 생산하기를 원하기도 하는데, 이 목적으로는 개질법이나 수전해법이 쓰인다. 미 수소협회에서 발간한 자료에 따르면, 2008년 미국에는 18개의 새로운 수전해시설이 설치되어 하루 145kg의 수소를 생산하였다. 2007년과 비교하여 수전해 수소생산능력은 5% 증가되어, 2008년 말 기준 미국의 수전해 수소 생산 능력은 215기, 총 2300kg/일으로 미국의 상업용 수소유통량의 0.03%였다.

### II. 주요 동향과 기술개발 현황

수전해방식에 따라 연구개발부터 상용화 단계까지 있지만, 효율 개선 및 내구성 확보는 아직도 중요한 이슈이다.

고체고분자 연료전지에 이용되고 있는 막전극접합체를 수전해 기술에 그대로 이용한다면 대량 가스발생에 의해 생성되는 기계적 힘에 의한 촉매입자의 탈착현상 등이 발생하여 효율 및 수명이 감소한다. 고체고분자 전해법(PEM) 및 고온수증기 전해법(HTE)의 기술개발은 전류효율을 크게 좌우하는 막과 전극(양.음극)의 개발 및 이들의 접합체 제조기술, 셀 전압을 좌우하는 집전체 제조기술, 과전압 저하를 위한 유로 구조기술, 셀 제작 및 대형화(스택) 기술이 필요하다.

PEM 수전해 방식은 알칼리 수전해와 비교하면 좀 더 효율이 높다는 장점이 있으나, 상대적

으로 비싼 촉매를 사용한다는 단점이 있다. 통상 양극에서 산소 발생용 촉매로는 이리듐/루테튬 산화물이 쓰이고, 음극에서의 수소발생용으로는 백금이 쓰이고 있다. 경쟁력을 높이기 위해서는 비싼 백금의 사용량을 줄이거나 대체 촉매개발, 비용효과적인 설계와 수명을 늘리는 일이 필요하며, 이를 위해서는 촉매 열화에 대한 이해가 필요하다. 한 예를 들어보자. 상용 PEM 수전해 시스템은 전류 입력을 끈 후에 개방회로 포텐셜 (전류가 0일때의 전압)의 감쇠(decay)를 보여준다. 이것은 일반적으로 열화를 일으키는 양극 촉매의 환원산화 상태의 변화에 기인한다고 알려져 왔다. 하지만, 최근 연구결과에 따르면, 포텐셜의 감쇠가 전적으로 음극 때문이며, 이는 쉷다운후에 백금 표면의 산화로, 백금촉매의 전기화학적 표면적의 현저한 감소 때문이라고 보고하고 있다.<sup>1)</sup>

### 1) 에너지제조 및 저장 수단으로서의 실증사업

- 독일에서는 1985년 이후 SWB프로젝트(태양광 발전- 알칼리 수전해, 80kW급), HYSOLAR 프로젝트(태양광 발전(PV)- 알칼리 수전해, 350kW급)를 수행한 바 있으며, 유사한 실증이 지금도 꾸준히 지속되고 있다. 독일은 2050년까지 전기의 80%를 재생에너지에서부터 만드는 목표를 가지고 있어, 효율적인 에너지 저장 시스템은 필수라고 인식하고 있다.

독일 연방정부는 BMWi(연방경제기술부, German Federal Ministries of Economics and Technology), 환경,자연보전과원자력안전부 (BMU, German Federal Ministries of the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety), 교육연구부(BMBF, German Federal Ministries of Education and Research) 등이 에너지 저장을 위한 60개의 혁신적 연구 프로젝트를 발표하였다.<sup>2)</sup> 이 중 수전해와 관련된 대표적인 내용으로는 서비스 수명 최적화와 가격 저감을 위한 PEM수전해장치의 부품개선을 위한 ekolyser 프로젝트, 풍력과 같은 부하변동이 심한 재생전원에 맞는 PEM 전기분해방식용 촉매와 전해질을 개발하는 LastELSys 프로젝트가 있다.

미국에서는 현재 분산형 재생에너지자원 이용 수소생산과 저가화를 위한 연구가 진행되고 있으며, 자연에너지- 수전해 기술을 적용한 실증 프로젝트도 운용중이다.

- 일본에서는 고체고분자 전해법(PEM)을 이용하여 대규모 수소 생산의 효율 향상을 위한 자체 기술개발을 대면적화 및 고성능화에 역점을 두어 진행하였으며, 이를 이용한 수소충전소를 운영중이다.

- 프랑스 회사인 맥피와 스페인의 Ecowill 사의 전략적 제휴로 콜롬비아의 보고타 근처에 재생에너지저장 시설을 만든다고 2013년 보도되었다.<sup>3)</sup> 수소는 풍력과 태양광의 전원을 이용하여 수전해 방식으로 제조하며, 마그네슘과 반응시켜 하이드라이드 형태로 저장하게 된다.

- 영국의 에너지와기후변화부<sup>4)</sup>는 물분해에서 나오는 수소와 이산화탄소를 반응시켜 합성천연가스를 만드는 만드는 공정의 기술, 재정 및 운전가능성을 검토하며, 수전해 업체인 ITM Power가 주도하여 Scottish utility SSE, Scotia Gas Networks, energy consultancy Logan Energy Ltd, Kiwa Gastec at CRE (Gastec) 등이 참여한다.<sup>5)</sup>

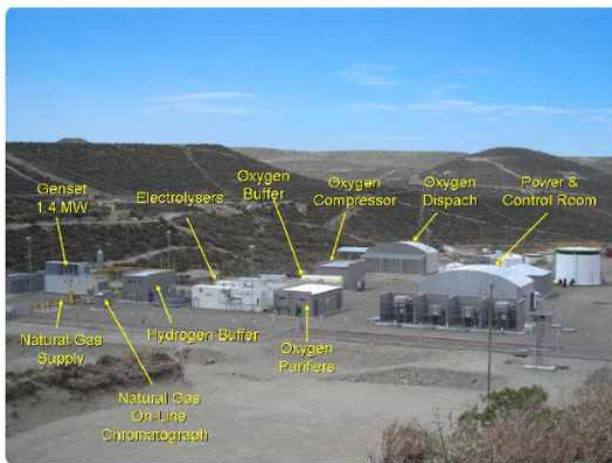
- 유럽을 중심으로 연구되고 있는 재생에너지저장 시스템 연구에 참여중인 대표적인 수전해업체인 프로톤도 2014년 1MW급 수전해장치를 판매시작할 것이라고 보도되었다.<sup>6)</sup>

- 수전해업체인 ITM Power의 수전해 수소제조비용 전망에 따르면, 유럽의 2025년 목표 가격인 5.5 유로/kg H2를 이미 달성했다.<sup>7)</sup>

- 가장 큰 육상용 풍력발전시설은 1000MW의 규모이며, 해상풍력발전 시설은 500MW이다.

그리드 안정을 위해서는 수전해조의 용량을 키우는 것이 이슈이다. 현재 가장 큰 것은 하이드로제닉스의 1MW급 시스템으로 독일 함부르크의 E-On의 플란트에 설치되어 있다. 알칼리수전해조는 짐바브웨의 Sable Chemicals에 총 100MW용량이 설치되어 있다. 모듈의 크기를 크게 하고 단가를 낮추는 것이 중요하다.<sup>8)</sup>

- GM연구개발센터에 따르면, 그동안 많은 사람들이 태양광-수소 (STH) 효율이 통상 2-6% 수준에 불과하다는 연구보고를 하여 왔으나, 수전해과정에서는 전압,전류, 온도와 수소압력 등이 주요 변수가 되는데, 이를 감안하여 최대의 효율을 얻을 수 있도록 시스템을 최적화하면 12.4%까지 극대화할 수 있다고 보고 있다.<sup>9)</sup>
- 영국 최초의 재생에너지를 이용한 풍력-수소 충전소가 유럽의 HyFIVE 프로젝트로 2015년 9월 15일 Rotherham에 설치<sup>10)</sup> 되었는데, ITM Power가 참여하였으며, 하루 20대의 수소 자동차에 충전할 수 있는 규모이다.



- 아르헨티나의 파타고니아 지방의 풍속은 평균 11.1m/sec, 최대 14.9m/sec로서 설비이용율 (net average capacity factor)이 47%로 세계 평균적인 설비이용율 25% 보다 높다. 파타고니아의 Hychico사는 이 지역의 풍력을 이용하여 수소를 만드는 프로젝트를 수행하고 있는데, 6.3MW의 풍력단지에서 0.8MW를 공급받아 2기의 325kW급 수전해장치로 120M<sup>3</sup>/hr의 수소와 60m<sup>3</sup>/hr의 산소를 만든다. 수소는 바이오가스나 천연가스와 혼합하여 1.4MW급의 Genset 발전용 연료로 쓰고 산소는 지역업체에 판매한다.<sup>11)</sup>
- 미국 에너지부 (U.S. Department of Energy, DOE)는 수소연료 생산과 운송을 위한 잠재적 비용 경쟁력을 갖춘 경로를 평가 및 분석하기 위해 100만 달러를 투자하고 있는데, 알링턴의 Strategic Analysis사에 의해 주도되는 이 사업은 재생에너지원으로부터 수소를 생산하기 위한 프로세스와 효율적, 비용 효과적 원료를 파악하는 것을 목적으로 한다. 미 에너지부의 2020년 수소연료 가격을 2~4\$ GGE까지 낮추겠다는 목표를 가지고 있다. 분석대상으로는 그리드 및 재생전원을 이용한 수전해도 포함된다.<sup>12)</sup>
- 노르웨이는 6기의 수소충전소를 운영중이며, 1만대 수소자동차는 15-20개소의 충전소가 필요할 것으로 보고 있다. 충분한 수력이 있어서, 1만대인 경우 145TWh 수력의 0.05%, 1백만대의 경우 5%를 사용하면 수전해로 수소를 공급할 수 있을 것으로 말하고 있다.

## 2) 고압화 기술

효율 향상을 위해 다음과 같은 방향으로 각국에서 연구개발을 진행하고 있다. 수전해셀의

내구성능이 낮으면 고압수소를 발생시킬 수 없으며, 수소압축기는 수소를 압축하는 부분이 피스톤과 다이어프램 등을 복수로 조합하는 구조로 되어있어 수천 시간마다 주요 부품의 교환이 필요하고, 승압으로 전력을 소비해 총괄 에너지효율을 낮추는 원인이 된다.

- 1) 고온으로 작동하여 전해 전압을 낮추어 에너지 효율을 올릴 것.
- 2) 고압에서 전류밀도를 증가시켜 장치를 소형화 시킬 것.
- 3) 기포 발생 방지, 수증기 발생의 방지.

일본의 미쯔비시상사는 압축기 없이도 350기압의 고압수소를 시간당 2.5m<sup>3</sup> 발생시킬 수 있는 '고압수소에너지발생장치 HHEG (High-compressed Hydrogen Energy Generator)'를 개발하였다고 말하고 있다. 혼다도 일본 환경성의 지구온난화대책기술개발사업으로 "소형 솔라-수소 스테이션 및 연료전지차를 조합시킨 CO<sub>2</sub> 배출 제로 시스템 개발"을 통해 수전해만으로 350기압까지 가압할 수 있는 고압수전해 시스템을 개발하였다. 혼다의 수전해시스템 수소발생량은 0.7Nm<sup>3</sup>/hr (1.5kg/day), 압력은 최대 350 기압으로 차압식 고압수전해시스템 (0.37 m<sup>3</sup>)이다.

미국의 중소기업인 아벨런스사는 448기압 (6500psig) 까지의 수소를 압축기 없이도 만들어 낼 수 있는 수전해장치를 개발했다고 발표했다.<sup>13)</sup> 지금까지 미국 에너지부의 지원으로 기술개발을 하여 왔으며, 수송용, 산업용, 재생에너지 저장용, 군용 등의 용도로 사용될 수 있을 것으로 보고 있다.

우리나라 엘켄텍(<http://www.elchemtech.com/>)에서도 100기압이상의 수소를 생산가능한 수전해시스템의 700시간 운전에 성공한 바 있다.

2) 알칼리 수전해의 기술개발 동향은 다음과 같다.

국내기업 <http://www.yesemk.com/kor/main/main.html>

(1) 전해온도의 고온화와 내구성 재료의 개발

전해온도가 상승하면 전극 과전압은 감소하고 효율은 상승한다. 또한 KOH, NaOH수용액의 전도도는 150°C부근에서 최대가 된다. 이를 위해 가압형 전해조의 개발과 장치 재료의 내구성 향상이 중요한 관건이 된다.

(2) 격막 재료의 개발

분리막의 역할은 이온 전도도는 가지고 있으면서 기체는 통과시키지 않아서, 양극에서 발생하는 수소와 산소가 섞이지 않도록 해준다. 폴리설파폰(polysulphone)에 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 혼합한 것, 고온용으로는 PTFE 혹은 불소계 이온교환막, 니켈 망에 BaTiO<sub>3</sub> 혹은 CaTiO<sub>3</sub>을 부착시킨 무기계 막도 검토되었다. 최근에는 유체의 기계적인 힘 사이의 균형을 이용하여, 두 전극사이에, 전통적인 수전해 시스템에서 사용하는 멤브레인이 없어도 수소와 산소가 분리 생성시키려는 시도도 있었다.<sup>14)</sup>

(3) 신 전극재료의 개발

낮은 과전압, 높은 내구성의 전극은 전해시스템에 중요하다. 음극 재료로서는 니켈 전극의 높은 활성화, 미량의 백금 이용이 고려되었고, 양극 재료로서의 RuO<sub>2</sub>는 활성화는 높지만, 단일

로는 불안정하고, 실용성이 없기 때문에 스피넬구조의  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{NiCo}_2\text{O}_4$ , 페롭스카이트구조의  $\text{LaCoO}_3$ ,  $\text{LaNiO}_3$  등의 도전성 산화물이 고려된 바 있다. 최근 조성이나 구조를 바꾸지 않고 촉매 성능을 개선하는 방법에 대한 연구논문이 네이처 커뮤니케이션에 실렸다.<sup>15)</sup> 알칼리 조건에서는 단일층 나노쉬트가 이중 구조를 갖는 쉬트보다 좋은 활성을 보인다고 한다. 니켈-철, 니켈-코발트 수산화물의 나노쉬트는 상용으로 쓰이는 이리듐 산화물보다 안정도와 활성 면에서 좋은 특성을 보이며, 박리시키면 좀더 많은 활성 사이트를 만들어, 전기전도도를 좋게 한다는 것이 주요 내용이다.

### 3) 고분자 전해질 막 수전해법의 특징과 기술개발 방향

이온교환막으로는 슬폰산기 혹은 카보닐염기를 갖는 불소계 고분자가 사용되고 있으며, 부식의 문제가 없기 때문에(상온, 상압에서의 작동도 가능) 120~150°C의 고온에서의 전해도 가능하고 효율이 높다. 이온교환막이 수소와 산소를 격리하고 있는 격벽의 역할도 담당하고 있기 때문에 고순도의 수소를 얻을 수 있다. 시스템의 소형화가 가능하고 경제성이 높은 시스템으로 개량될 가능성을 갖고 있다.

#### (1) 전극재료의 고성능화와 안정성 향상

전극촉매는 에너지효율을 좌우하는 큰 인자이다. 특히, 고분자 전해질막 수전해와 같이 저온에서 동작하는 시스템에서는 그 영향이 크다. 또한, 이온교환막은 강산의 전해질로 되어 있기 때문에, 알칼리 수전해와 같이 니켈 혹은 철과 같은 가격이 싼 재료는 사용이 불가능하고, 비싼 가격의 백금족 계열의 재료가 좋다.

양극 재료로는 활성화된 산화루테늄( $\text{RuO}_2$ )에 백금, 이리듐, 탄탈 등을 첨가하여 안정화 하는 방법이 사용되고 있다. GE사에서는 루테늄/이리듐/탄탈계의 복합산화물이, ABB사에서는 루테늄/이리듐의 산화물 고용체가 사용되고 있지만, 사용량을 줄이면서도 활성과 안정성이 유지되는 것을 요구하고 있다.

음극은 촉매성능, 안정성의 양면에서 백금이 제일 뛰어나지만, 사용량을 줄이거나 백금족을 대체할 저가, 고효성의 안정한 전극개발과 촉매에 대한 이해는 여전히 중요하다. 효율적인 촉매는 반응 중간체(Reaction Intermediates)와 너무 약하게 결합이 되지 않아야 반응물이 촉매표면에 결합하는데 실패하지 않는다. 하지만, 너무 강하게 결합하면 반응생성물이 촉매표면에서 떨어져 나가기 어려워진다. 즉, 결합에너지는 적당한 수준이어야 한다는 것이 지금까지 잘 알려진 연구결과이다.

백금을 나노입자화하여 반응촉매로서 그 효과를 더 높여보려고 하지만, 3nm 이하로 떨어지게 되면 오히려 촉매성능이 저하되는 실험결과를 보여준다. 연구에 따르면, 작은 백금입자의 엣지사이트(edge site)는 수소원자와 너무 강하게 결합을 해서 촉매성능이 떨어지고, 면사이트(face site)는 수소와 적당한 에너지를 가지고 결합한다는 것을 알아냈다.<sup>16)</sup> 이는 나노입자의 형상이 나노입자 촉매성능의 최적화를 가능하게 해줄 수 있음을 말해준다.

#### (2) 이온교환막의 성능 향상

불소수지계 이온교환막으로는 듀폰사가 개발한 나피온117, 혹은 120이 주로 사용되어 왔다. 최근에는 많은 이온교환막의 연구가 진행되어, 듀폰사의 나피온, 미국 다우(Dow)사의 막 이외에, 아사히글라스의 프레미온, 아사히카세히의 아시프렉스 등이 개발되었다.

막의 성능향상은 이온교환 용량의 증대에 의한 이온전도도의 향상과 강도, 안정성의 향상에

있다. 그러나 높은 전류밀도에서 운전하려고 하면, 막의 저항이 커서 문제가 되기 때문에 더욱 전도도를 높이는 것이 요구되고 있다. 전도도를 높이기 위해서는 막을 얇게 하는 것도 한 방법이다. 그러나 막을 얇게 하면 막을 통하여 생성가스의 투과가 용이하게 되고, 전류효율의 저하를 가져오게 된다. 어느 정도의 막 두께는 반드시 필요하다.

현재 PEME에서 상용화되어 있는 Nafion 등의 과불소계 고체 고분자 전해질 막들은 가격이 비싸고, 80 °C 이상의 고온에서 이온전도도의 감소와 기계적인 강도의 열화 등 막성능이 현저하게 저하되는 단점이 있으므로 이를 보완할 수 있는 탄화수소계 유-무기 복합막의 연구도 진행되고 있다.<sup>17)</sup>

### (3) 전해온도의 고온화

효율 향상을 위해서는 운전온도를 높이는 것이 좋고, 150°C가 목표이다. 그러나 고온으로 함으로써 막을 통한 가스 확산의 증대, 막을 포함한 전해조 재료의 내구성 저하, 음극 복극판의 수소취성 등 해결해야할 문제점이 많다.

### 4) 고온 수증기 수전해법

안정화 지르코니아(Zirconia) 등 산소이온 도전성 고체 전해질을 이용하여 900~1,000°C의 고온에서 수증기를 전기분해하여 수소와 산소를 얻는 기술이다. 고온 수증기 전해에서는 수소와 산소로 분해할 때 필요한 에너지를 전기에 더하여 열로부터도 얻을 수 있기 때문에 통상의 전기분해보다도 적은 전기에너지로 분해가능하다. 종합 효율은 다른 전해법에 비교하여 10% 정도 향상되며, 단위투입 전력당 수소발생량의 증가, 즉 수소제조에 필요한 전력가격을 크게 낮출 수 있다. 전기화학적으로는 고체전해질형 연료전지(SOFC)의 역반응으로, 사용하는 전해질, 장치구성 등은 거의 같다. 1970년대부터 미국의 브루크헤븐 국립연구소(BNL), 독일의 Dornier사, 일본 오사카공업기술연구소 등을 통해 실험실 규모에서는 높은 성능이 확인된 장래 유망한 시스템이지만, 재료, 가공기술면 등 대용량화, 저가화를 위한 연구개발이 필요하다. 우리나라에서도, 한국에너지기술연구원 이상국 박사팀은 평판형 고체산화물 수전해 장치로 850°C 이상의 고온에서 물로부터 시간당 200 L 이상의 수소를 만들어내는 시스템을 2000 시간 이상 실증한 바 있다.

## III. 전망

1) 수소는 차세대 운송 장치인 수소 연료전지 자동차의 운영이 다양하게 실용화 될 경우, 그 잠재 시장 규모는 막대하므로, 재생에너지기반 수전해기술은 중요하다. 현재, 셀 구성 재료의 저가화, 내구성 등 기계적 안정성 면에서 실용화를 위해 한층 더 개선이 필요한 상태이다. 국내에서도 에너지기술평가원, 연구재단등을 통해 지원하고 있거나 지원될 예정이다.

2) 고분자 전해질막법을 이용한 대량 수소제조 설비는 아직 실용화 되어있지 않지만, 소규모 설비(~100Nm<sup>3</sup>/hr정도)는 실용화 되었다. 고순도 수소에 대한 수요가 왕성한 반도체 산업을 주요 고객으로 하여 on-site로 고순도 고압수소를 공급하는 등 시장 확대를 모색하고 있다.

3) 수소충전소용의 수전해, 재생에너지저장용 수전해기술은 실증되고 있으며, 대용량화가 진행 중이다.

---

1) Edward Brightman, James Dodwell, Nick van Dijk and Gareth Hinds, "In situ characterisation of PEM water electrolyzers using a novel reference electrode",

- Electrochemistry Communications, Vol 52, (2015), pp 1-4.
- 2) <http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2012/july/german-ministries-announce-lighthouse-wind-hydrogen-projects-under-energy-storage-initiative>)
  - 3) <http://www.greenetvert.fr/2013/03/02/des-piles-a-hydrogene-geantes-pour-stocker-lenergie-renouvelable/72106>
  - 4) DECC, Department of Energy and Climate Change
  - 5) <http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2012/november/uk-consortium-to-examine-feasibility-of-synthesising-methane-from-electrolytic-hydrogen-and-industrial-carbon-dioxide>
  - 6) <http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2012/november/proton-onsite-1-mw-pem-electrolyser-to-launch-by-2014>
  - 7) <http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2013/july/itm-power-releases-improved-electrolytic-hydrogen-cost-projections>)
  - 8) <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/analyst-views/2013/13-04-24-size-matters-fuel-cells-and-electrolysers-on-the-power-grid>
  - 9) A) Thomas L. Gibson, Nelson A. Kelly; Int.J.Hydrogen Energy, 35 (2010) 900-911, B) N.A.Kelly, T.L.Gibson, M.Cai, J.A.Spearot, D.B.Ouwerkerk; Int.J.Hydrogen Energy, 35(2010) 892-899.
  - 10) <http://www.bbc.com/news/uk-england-south-yorkshire-34278051>
  - 11) S. Raballo, J. Llera, A. Pérez, J. C. Bolcich, "Clean Hydrogen Production in Patagonia Argentina", Proceedings of the WHEC, May 16.-21. 2010, Essen
  - 12) [http://apps1.eere.energy.gov/news/progress\\_alerts.cfm/pa\\_id=841](http://apps1.eere.energy.gov/news/progress_alerts.cfm/pa_id=841) (2013.2.14.)
  - 13) <http://www.avalence.com>
  - 14) A membrane-less electrolyzer for hydrogen production across the pH scale, Energy Environ. Sci., 2015, Advance Article, DOI: 10.1039/C5EE00083A
  - 15) I.Song F, Hu X. Exfoliation of layered double hydroxides for enhanced oxygen evolution catalysis. Nat. Comm. DOI: 10.1038/ncomms5477
  - 16) 1."Platinum nanoparticle during electrochemical hydrogen evolution: Adsorbate distribution, active reaction species, and size effect." ACS Catalysis 5, 2376-2383 (2015).
  - 17) I. Y. Jang, O. W. Kweon, K. E. Kim, G. J. Hwang, S. B. Moon, and A. S. Kang, "Covalently cross-linked sulfonated poly(ether ether ketone)/tungstophosphoric acid composite membranes for water electrolysis application", J. Power Sources, Vol. 181, No. 1, 2008, pp.129~134