

초고온가스로를 이용한 원자력수소생산 기술개발

김용완*† · 김응선* · 이기영* · 김민환*

* 한국원자력연구원 수소생산원자로기술개발부

Nuclear Hydrogen Production Technology Development Using Very High Temperature Reactor

Yong-Wan Kim*†, Eung-Seon Kim*, Ki-yooung Lee* and Min-hwan Kim*

* Dept. of Nuclear Hydrogen Reactor Technology Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received July 9, 2015 ; Revised August 20, 2015 ; Accepted August 20, 2015)

Key Words: Nuclear Hydrogen Production(원자력수소생산), Very High Temperature Reactor(초고온가스로), Generation IV Nuclear Reactor(제4세대 원자로), Sulfur-Iodine Hydrogen Production Technology (황-요오드 수소생산방법)

초록: 미래에너지의 해법으로 원자력에너지를 이용한 물분해 수소생산시스템의 핵심기술을 개발하였다. 안전성을 보장할 수 있는 제4세대 원자로인 초고온가스로의 고열을 이용하여 황요오드 열화학적인 방법으로 물을 분해하여 수소를 생산하는 기술이다. 원자력수소생산 핵심기술은 초고온에서의 열을 공급하는 것을 모사하는 초고온 실험기술, 초고온가스로의 안전성을 모사하는 연구, 초고온가스로의 노심과 안전성을 해석할 수 있는 도구의 개발, 초고온가스로에 사용하는 연료제조기술, 물을 분해하여 열화학적인 방법으로 수소를 생산하는 기술로 구성된다. 원자력수소생산에 필요한 핵심기술을 개발하고 실험실 규모로 입증하였으며, 대규모 실용화를 위해서 선결되어야 할 미완성 기술을 제시하였다. 본 기술은 제4세대 원자로개발 국제공동연구로 수행한 기술로서 향후 미래의 원자로 기술이다.

Abstract: Nuclear hydrogen production technology is being developed for the future energy supply system. The sulfur-iodine thermo-chemical hydrogen production process directly splits water by using of the heat generated from very high temperature gas-cooled reactor, a typical Generation IV nuclear system. Nuclear hydrogen key technologies are composed of VHTR simulation technology at elevated temperature, computational tools, TRISO fuel, and sulfur iodine hydrogen production technology. Key technology for nuclear hydrogen production system were developed and demonstrated in a laboratory scale test facility. Technical challenges for the commercial hydrogen production system were discussed.

1. 서론

최근 온실가스에 대한 규제가 강화되고 있으며, 화석연료의 고갈과 개도국의 에너지 수요 증가에 따라 에너지 자원의 가격이 급변하고 있다. 이에 국내외에서 친환경적인 에너지의 필요성이 어느 때보다 강조되고 있으며, 그 중에서 미래 에너지원인 수소를 깨끗하고, 안전하며, 경제적인 방법으로 대량 생산할 수 있는 수소생산기술개발이 관심을 끌고 있다. 우리나라는 일차에너지의 97%를 수입에 의존하며, 에너지 믹스현황은 석유가 약 37%, 천연가스가 17%, 그리고 석탄이 30% 내외, 원자력이 약 12%를 차지하고 있다.⁽¹⁾ 화석연료에 해당하는 석유, 석탄, 천연가스의 소비가 전체 에너지 소비량의 약 86%이며, 이

† Corresponding Author, ywkim@kaeri.re.kr

들 화석연료 소비 과정에서 연간 약 6억 톤에 해당하는 이산화탄소를 배출하고 있다. 에너지 소비 형태를 분석하면 전력이 약 1/3, 나머지는 산업용 공정열, 수송연료 등 다른 형태로 사용되고 있다. 궁극적으로는 수소와 같은 미래형에너지 기술을 개발 것이 에너지수급의 안정성 측면과 온실가스 배출 저감에 더 큰 역할을 할 수 있다.⁽²⁾ 수소시장은 현존하는 화학산업시장, 미래 수소경제의 연료전지시장, 그리고 잠재적인 수소환원제철시장이 있다. 21세기에 들면서 온실가스 감소 및 화석연료 대체를 위해 수송부문과 휴대 및 분산전원 연료전지의 확대가 강조되고 있다. 최근 주요 온실가스 배출원 중 하나인 제철산업에서 수소 이용에 많은 관심이 있다. 철광석은 산화물형태로 존재(Fe_2O_3 , Fe_3O_4 등)하므로 철광석에서 산소를 떼어내어 철강을 생산한다. 현재의 탄소환원 제철공정은 철광석에서 탄소를 사용하여 산소를 제거하므로 1톤 철강생산에 약 2톤의 이산화탄소가 발생하는 문제점이 있으나 수소를 사용할 경우 이는 해결된다.

수소를 생산하는 방법은 여러 가지가 있으며 각 방법에 대한 비교는 Table 1과 같다. 화석연료에서 수소를 생산하는 대표적인 방법이 천연가스를 활용한 수증기 개질 공정이다. 수증기 개질이란 천연가스, 메탄, 가솔린 등과 같은 탄화수소를 수증기를 이용하여 수소와 일산화탄소의 혼합물(Syngas)로 전환하는 것이다. 천연가스는 촉매변환장치에서 수증기와 반응한다. 수증기개질 공정에서 수소원자들이 떨어져 나오는데 이때 이산화탄소가 부산물로 생성된다. 화석연료를 사용하지 않고도 수소를 생산할 수 있다. 전기분해를 이용하는 방법, 복수의 화학반응을 조합하여 열화학적으로 물을 직접 수소와 산소로 분해하는 방법, 그리고 이 두 가지를 조합하여 물을 분해하는 방법이 있다. 오래 전부터 이용되어온 전기분해법은 물을 산소와 수소로 분리시킨다. 전기분해는 수증기 개질공정 비용의 서너배에 이르는 전기료 때문에 수증기 개질 공정보다 경제성이 떨어진다. 전력은 크게 화석에너지, 원자력, 그리고 수력이나 풍력 같은 재생에너지로부터 생산된다. 전기분해가 효율적이기 위해서는 전력생산이 경제성을 가져야 한다. 태양광은 화석에너지를 이용한 전력생산에 비해 비싸고 풍력은 지역적인 영향이 크다. 이밖에 수력, 지열에너지, 동식물성 바이오매스도 수소생산을 위한 재생에너지 후보이지만 절대적인 공급량 혹은 경제성으로 인한 한계점을 극복해야 한다. 원자력을 이용한 수소생산은 고열 또는 고효율 전기를 이용하여 고온전기분해나 열화학적 방법으로 물을 직접 분해하여 수소를 생산하는 것이다. 이밖에도 광합성의 마지막 단계에서 수소효소를 사용함으로써 수소를 생산하는 생물학적 방법(Biophotolysis), 광촉매를 이용하여 물을 분해하는 광화학적방법(Photoelectrolysis)방법, 그리고 고에너지의 빛에 의해 물분자를 분해하는 방사화학적 방법(Radiolysis)이 있으나 아직까지는 경제성 문제와 기술적 완결성이 낮은 수준이다.

초고온가스로는 세라믹피복입자연료와 헬륨냉각재를 사용하여 950℃의 고온열을 생산할 수 있는 제4세대 고유안전로이다.^(3,4) 초기 가스냉각로는 냉각재로 이산화탄소를 사용하였고 핵연료의 형태는 붕집합체이며, 냉

Table 1 Hydrogen production methods

수소생산 방법	에너지원	수소자원	특징
수증기 개질법	화석연료	천연가스 석유	성숙기술, 고효율, 온실가스배출, 화석연료가격연동
석탄 기화법	화석연료	유연탄	성숙기술, 고효율, 온실가스배출, 자원편중
물 전기분해	전기	물	성숙기술, 저효율, 고비용
황-요오드 공정	원자력	물	대량생산, 미성숙 기술, 고온부식환경
수증기 전기분해	원자력	물	단순공정, 미성숙 기술, 규모확장취약
황-하이브리드 공정	원자력	물	미성숙 기술, 고온부식환경
생화학적 방법	신진대사 태양에너지	물	저에너지비용, 환경친화기술, 기초연구단계
광화학적 방법	태양에너지	물	저에너지비용, 환경친화기술, 기초연구단계

각재의 원자로 출구의 온도는 600도 전후이다. 이후 높은 열효율과 대용량 발전을 위해 냉각재의 원자로 출구 온도가 750도 이상인 pre-stressed 콘크리트를 사용한 고온가스로가 개발되었다. 노심용융, 갑작스런 원자로 용기 파손, 방사능물질 방출 등을 막기 위해 흑연 노심 구조물, 헬륨 냉각재, 세라믹으로 피복된 TRISO 피복 입자핵연료(tri-isotropic coated fuel)를 채택하면서 고온가스로의 경제성과 안전성을 향상시켰다. 최근에는 완전한 피동안전개념의 채택이 가능한 모듈형 강철압력용기를 사용하고 냉각재의 원자로 출구온도를 900도까지 올려서 경제성과 안전성을 획기적으로 향상시킨 제4세대 초고온가스로가 연구 중이다.⁽⁴⁾ 제4세대 원자로의 대표 개발노형중 하나인 초고온가스로는 우리나라 등 여러 원자력선진국이 참여하여 원자로설계, 연료, 초고온 재료, 그리고 원자력을 이용한 수소생산기술 분야에서 공동연구가 수행되고 있다.^(5,6) 본 연구는 원자력의 고온 열을 이용하여 열화학적인 방법으로 대량의 수소를 생산하는 기술에 대한 내용이다. 수소생산을 위해 필요한 900도 이상이 고온 열을 생산하기 위한 제4세대원자로 초고온가스로를 고온에서 실험적으로 모사하는 기술, 초고온가스로의 안전성을 모사하는 기술, 피복입자핵연료의 제조기술, 설계 및 해석을 위한 전산도구의 개발, 그리고 황요오드 열화학수소생산방법에 대해 핵심기술을 개발하고 이들 기술을 실험실 규모로 실증하였다. 개발된 실험실 규모 기술을 바탕으로 실증을 위해서 필요한 미완성 기술에 대해 제시하였다.

2. 초고온가스로를 이용한 수소생산 시스템 개념

2.1 원자력수소생산 시스템 구성

초고온가스로를 이용한 원자력수소 생산 계통은 크게 초고온가스로 계통, 중간 열교환 계통, 그리고 수소 생산 계통으로 Fig. 1에서 보는 것과 같이 구성된다. 초고온가스로계통은 핵연료에서 생산된 고온의 열을 중간열교환기에 전달하며, 중간열교환기는 헬륨-헬륨 열교환을 통해 초고온가스로의 열에너지를 수소 생산 계통에 전달한다. 일반적으로 중간계통과 수소생산계통사이의 격리밸브를 원자력시설의 경계로 분류한다. 수소 생산 계통에서는 물과 초고온열을 이용하여 수소를 생산하게 된다. 초고온가스로 열을 이용한 황요오드 수소생산시스템은 100MWt의 초고온가스로에서 연간 만 톤의 물분해 수소를 생산할 수 있다.

2.2 황요오드 열화학 수소생산공정

원자력의 고온열원을 이용한 황요오드(Sulfur-Iodine) 수소생산 공정은 물을 열화학적으로 분해하여 수소를 생산하는 방법으로 분해반응공정, 황산분해공정, 요오드산(HI) 분해공정으로 구성되며, 공정개념은 미국 General Atomics에서 이미 제시 되었으나 공정을 실증하기 위한 연구가 진행되고 있다. 한국, 일본, 중국이 실증을 위한 연구를 진행 중이며 한국이 2014년 실험실 규모로 가압공정을 실증하였다.⁽⁴⁾ 황요오드 열화학수소생산공정은 Fig. 2에서 보는 것과 같은데 황산(H₂SO₄)과 요오드(I₂)는 내부 순환물질이며, 물을 분해하여 수소가 생산되고 부산물로 산소가 나오는 공정이다.

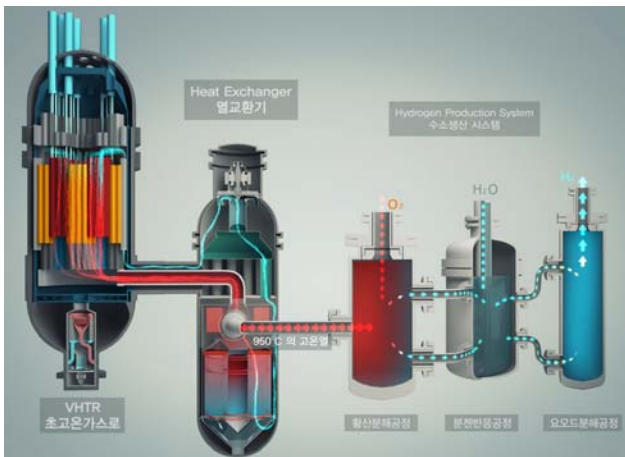


Fig. 1 Nuclear hydrogen production system

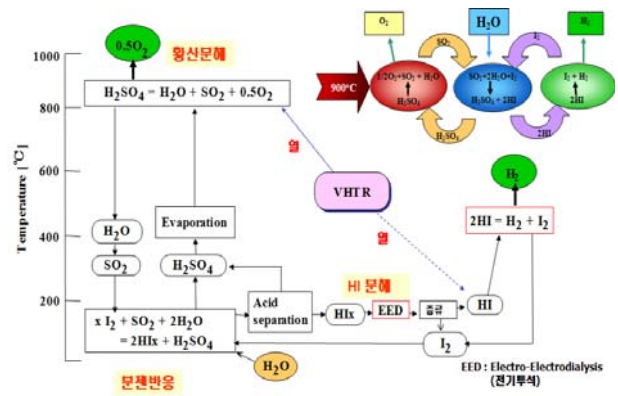


Fig. 2 Sulfur-Iodine thermo-chemical hydrogen production process

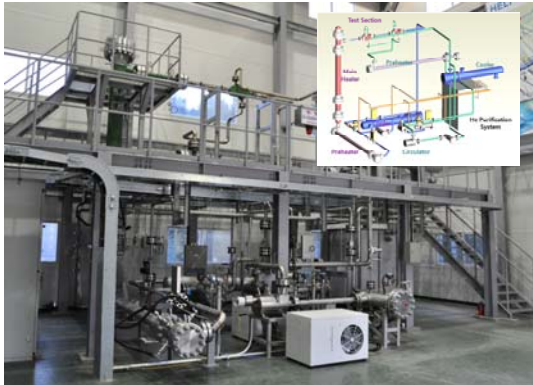


Fig. 3 Helium test loop simulating very high temperature reactor

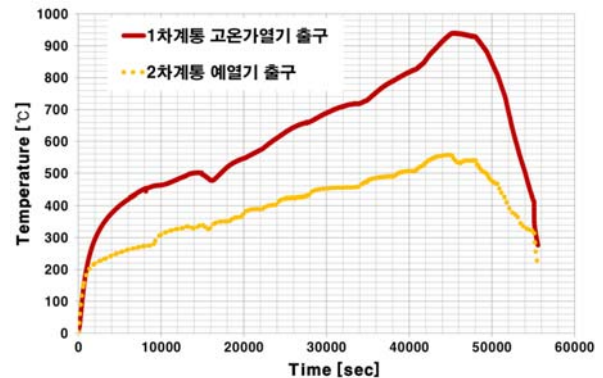


Fig. 4 Helium loop test for intermediate heat exchanger test

분젠반응공정은 순환물질인 요오드와 이산화황 및 원료물질인 물로부터 요오드산과 황산을 제조하고 황산은 황산분해공정으로 요오드산은 요오드산 분해공정으로 순환시키는 공정이다. 황산분해공정은 분젠반응공정으로부터 유입된 황산을 초고온가스로의 고온의 열을 이용하여 분해하고 생성물인 이산화황(SO₂), 물, 산소를 분젠반응공정으로 재순환시키는 공정이다. 요오드산 분해공정은 분젠반응공정으로부터 유입된 요오드산을 고온·고압 하에서 분해하여 수소와 요오드를 생성하여 생산된 수소는 수소저장탱크로 요오드는 분젠반응공정으로 재순환시키는 공정이다.

3. 원자력수소생산을 위한 핵심기술 개발

3.1 헬륨루프 초고온 시험

초고온가스로의 초고온 열공급 성능을 모사하기 위한 초고온헬륨루프를 건조하였으며 이는 Fig. 3과 같다. 헬륨루프의 히터 출력은 1MWt이며 열교환기 시험부위의 출력은 150kWt이다. 헬륨순환기는 공기 베어링을 사용한 순환기를 사용하고, 고온 운전 시 헬륨유동에 유입되는 내부단열재 분진 발생 억제를 위해 고온가열기 및 고온가스덕트 내부 단열재로 고온 버닝공정과 경화공정을 거친 단열재를 사용하였으며, 헬륨정화장치를 연결하였다. 헬륨루프에 고온소재인 Alloy 800HT로 설계 및 제작된 인쇄기관형 열교환기 설치하여 초고온 시험을 수행하여 Fig. 4에서 보는 것과 같이 20기압에서 최대 940°C의 수소생산 열을 공급할 수 있음을 모의했다.

3.2 원자력수소생산시스템의 안전성과 피복입자핵연료 기술

수소생산 고온 열을 공급하기 위한 초고온가스로는 지진, 해일로 인해 배관, 전기 시설 및 격납건물이 손상된 경우에도 별도의 외부 전원 및 냉각재 공급 없이 원자로압력용기의 복사와 대류현상을 활용한 공냉으로 원자로 붕괴열을 안정적으로 제거할 수 있다. 원자로 내에서 열을 생산하는 TRISO 피복입자연료는 1800도의 고온에서도 방사능물질이 외부로 유출되지 않으므로 체르노빌과 후쿠시마와 같은 방사능물질의 대량 외부 누출 가능성은 기존 원자로에 비해 매우 낮다. 방사성화가 어려운 헬륨 냉각재 사용으로 냉각재인 헬륨이 누설되어도 방사성물질의 유출이 타 냉각재에 비해 극히 낮다. 또한 원자로 내에 물과 금속피복재가 없기 때문에 수소 및 증기가 폭발적으로 생성되는 반응 자체가 근본적으로 배제되어 있어 체르노빌과 후쿠시마사고와 같은 증기 및 수소 폭발이 일어나지 않는다. 따라서 초고온가스로는 효율이 높아 대규모 해수 냉각이 요구되지 않으므로 내륙 건설이 가능하고 천재지변 상황에서도 별도의 조치 없이 자연적으로 원자로 붕괴열이 냉각되는 완전피동안전성을 확보하고 있다. 이러한 초고온가스로의 안전성을 입증하기 위해서 실제 실험용 원자로 HTTR을 이용하여 냉각재상실사고 및 전원 상실사고를 OECD/NEA 주관으로 국제공동으로 연구를 진행 중이다. 3개 시험 중 30%출력에서 냉각재 공급을 중단하는 시험을 종료하여 안전성을 입증하였고 100% 출력에서 동일한 시험이 계획되어 있다. 초고온가

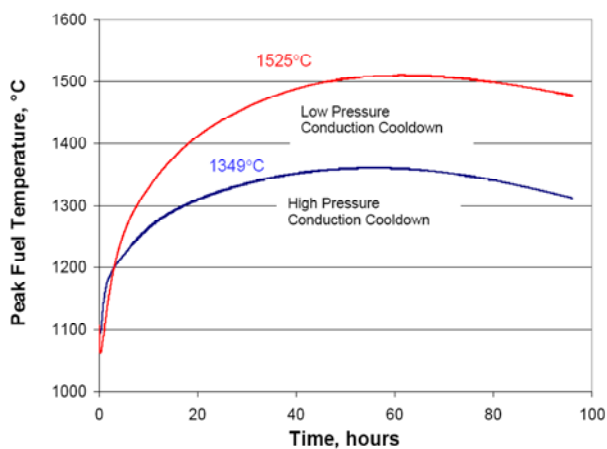


Fig. 5 Fuel temperature after accident condition

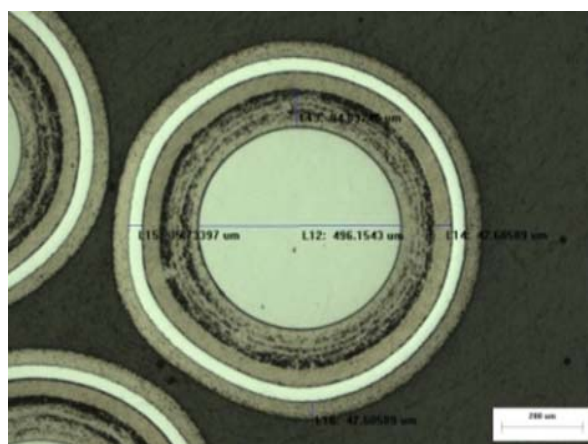


Fig. 6 Section view of fabricated TRISO fuel

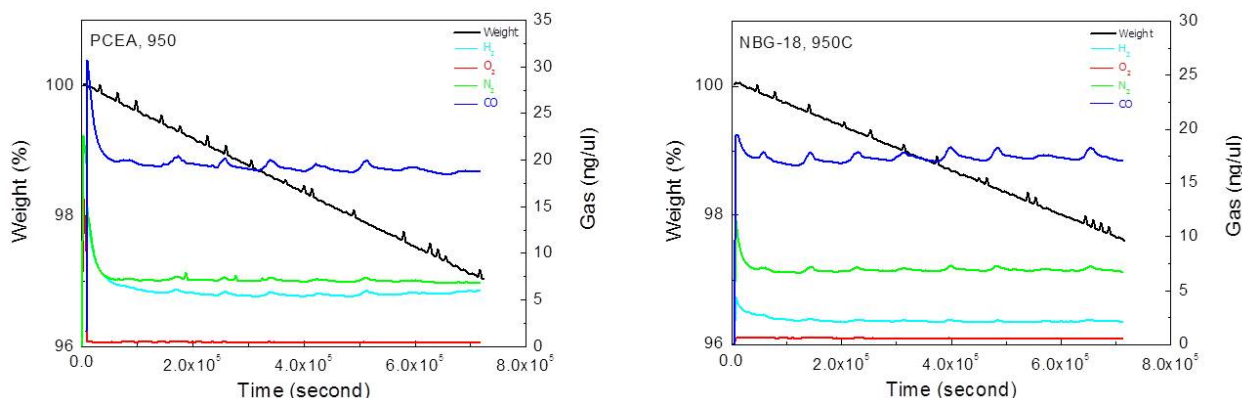


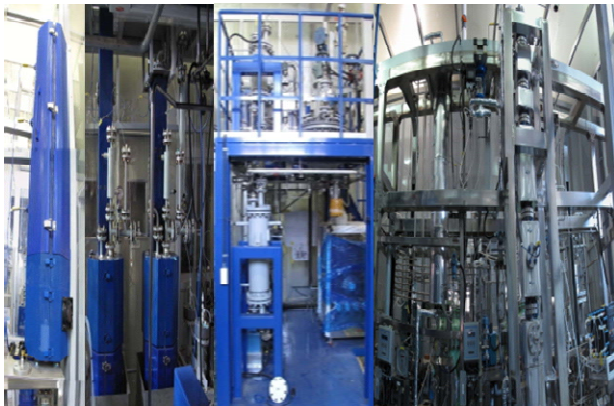
Fig. 7 Oxidation characteristics of nuclear graphite in elevated temperature He environment (PCEA and NBG stand for a kind of nuclear grade graphite)

스로에서는 냉각제가 상실된 이후에 대한 해석결과가 Fig. 5와 같으며 핵연료의 온도가 1600도 이내임을 보여준다. 초고온가스로에는 약 0.5mm 산화우라늄 입자를 고온 유동층 화학 증착법을 이용하여 3중의 탄소층 및 SiC층으로 피복, 제조한 TRISO 피복 입자가 사용한다. 피복된 입자는 직경이 1mm 내외로서 이를 흑연 분말과 함께 성형하여 구형 혹은 연필모양의 연료제로 제작한다. 원자력수소핵심기술개발로서 우라늄 입자를 피복하여 TRISO 피복입자핵연료를 실험실 규모인 20g/batch로 제조하는 공정은 개발을 완료하였으며 Fig. 6은 자체 개발된 핵연료의 단면이다.

초고온가스로의 유일한 안전계통인 원자로공동냉각계통(RCCS: Reactor Cavity Cooling System)은 비상시에 원자로에서 나오는 열을 원자로압력용기의 표면을 통해 복사 및 대류로 전달을 받아 공기순환으로 이를 냉각 시켜 주는 완전피동계통이다. 이러한 자연냉각장치를 모사하기 위하여 높이만 1/4로 축소한 자연냉각시험장치를 구축하였으며, 자연냉각시험장치 시운전 및 피동안전 성능시험은 RCCS의 1/4 축소 모형인 자연냉각시험장치를 이용하여 Low Pressure Conduction Cooling 사고 조건(원자로압력용기 외벽온도 : 404℃, 상승관의 온도 상승 : 100℃)에서 실험을 수행하여 자연냉각 성능을 입증하였다.⁽⁷⁾

3.3 흑연 및 초고온재료

초고온가스로의 주요 내부 구조물 소재인 흑연에 대한 산화 특성 평가 및 산화 후의 강도 평가 등에 관한 연구가 폭넓게 수행되었다. 고온 소재 관련 실험과 연구는 초고온 배관용 슈퍼알로이에 대한 공기 및 헬륨 환경에서의 크리프 및 피로 시험, 원자로용기 소재에 대한 후판 특성 평가 및 조사 시험용 시



황산공정 분젠공정 HI 공정

Fig. 8 SI hydrogen production facility (50L/hr)

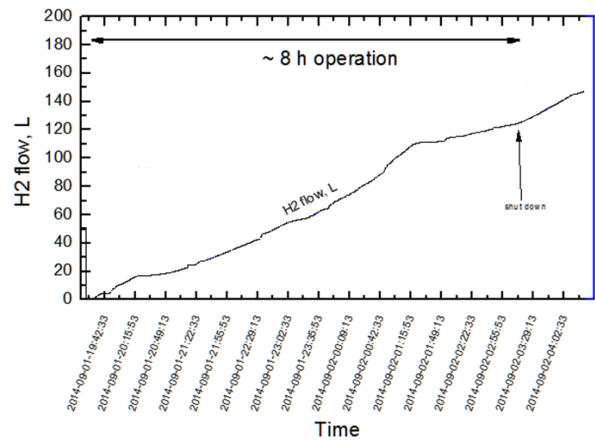


Fig. 9 Hydrogen production test results

편 및 조사 캡슐 제작, 초고온용 후보 탄소 복합 재료에 대한 산화 거동 평가, 황산 분해 반응기 재료에 대한 복합 환경 부식 특성 평가 등이 있다. Fig. 7은 대표적인 흑연산화특성시험 결과로서 상용 열중량계와 가스분석기를 이용하여 상용 원자력급 흑연재료에 대한 950℃, 헬륨 분위기 산화 특성을 비교, 평가하고 헬륨 분위기 산화 특성에 미치는 온도의 영향을 확인하였다. 상용 열중량계의 밀폐에 한계가 있어 99.9999%의 고순도 헬륨을 이용했으나 공기의 유입누설에 의하여 최저 산소농도는 10 ppm 정도로 유지되었다. 그럼에도 불구하고 기체 성분을 분석함으로써 산화에 따른 산소 농도의 감소 그리고 일산화탄소 농도의 증가 등 정량적인 관계를 확인함으로써 향후 헬륨 분위기 흑연 구조물 장기 산화특성 평가를 위한 기반기술을 확보하였다. 관련 실험 데이터는 Gen IV 국제 공동 연구로서 미국 ORNL의 데이터베이스에 저장하며 공동연구국은 데이터베이스에 대한 접근 권한을 갖고 있다.

3.4 열화학 수소생산 기술

열화학수소생산 공정을 구성하는 황산분해공정, 분젠반응공정, 그리고 요오드산분해공정 등 세가지 공정에 대해 개발적으로 시험을 수행한 후 종합연계실험을 수행 하였다. 900도 이상이 고열을 이용하여 물을 분해하여 수소를 생산하는 황요오드 수소생산공정을 실증하기 위한 실험실 규모의 장치를 건조하였다. 황산분해기의 반응압력은 5기압이었으며 시간당 50L의 수소를 생산 하도록 구성되었다. 실험실규모 수소생산을 실증하기 위하여 Fig. 8와 같이 장치를 설치하여 종합연계운전을 실시하였다. Fig. 9은 8시간 동안의 운전동안 수소생산 누적량을 보여준다. 최대 수소생산량은 50L/h이나 평균적으로는 약 30L/hr의 수소생산을 성공하였다.

3.5 실용화를 위한 기술 수요

원자력수소생산 실증을 위해서는 초고온가스로 설계를 위해 개발된 코드의 실용화기술, 열교환기 기술, 초고온재료기술, 수소생산기술의 실용화이다. 초고온가스로 개발을 위해서는 950℃에 이르는 노심의 출구온도로 인해 초고온에서 하중을 견딜 수 있는 소재선정 및 관련데이터의 생산이 우선되어야 한다. 특히, 고온용으로 개발된 Alloy617의 경우도 초고온에서는 장시간 크리프수명은 현저히 감소한다. 고온에서의 크리프 데이터, 피로와 크리프의 연계 데이터의 확보가 중요하다. 또한 제어봉가이드튜브와 같이 초고온에서 장시간 운전이 필요한 부위는 세라믹 혹은 탄소복합재료를 이용한 설계의 실용화가 필요하다. 초고온가스로 기기 및 구조물이 수명동안 건전성을 유지하면서 운전하기 위해서는 설계단계에서 적절한 사용재료 및 신뢰성 있는 설계기준을 사용해야 한다. 현재 국내원자로설계기술기준인 전력산업기술기준에는 초고온가스로의 설계에 대한 설계기준이 없는 상황이다. 미국의 ASME 코드에서는 ASME Section III Division 5에서 고온가스로의 설계에 사용할 수 있는 기술 기준이 2011년 판에 초판이 발행

된 이후 보완 중이다.⁽⁸⁾ 여기에는 기존 경수로에는 포함되지 않은 흑연 및 크리프설계절차와 기기등급의 구분을 포괄하고 있다. 2017년 판에는 950도에 사용이 가능한 Alloy 617에 대한 코드케이스가 포함될 예정이다. 헬륨가스분위기에 사용되는 순환기 기술의 장애는 베어링이다. 오일베어링, 가스베어링, 전자기 베어링을 사용할 수 있으나 성숙기술인 오일베어링은 높은 하중을 지지할 수 있으나 밀봉이 어렵다는 문제가 있으며 가스베어링은 높은 하중을 지지할 수 없다. 최근 연구는 전자석베어링에 집중되고 있으며 고온에서의 전자석의 수명과 제어기술의 완성도를 갖춘 큰 하중을 지지할 수 있는 전자석 베어링의 상용화가 필요하다. 원자력 수소생산공정은 실험실에서 실증되었으므로 엔지니어링 소재를 활용한 대형화 연구를 통한 실용화 기술이 필요하다. 마지막으로 설계를 위해 개발된 프로그램에 대해 실제 데이터를 활용한 검증이 필요하다.

4. 결 론

초고온가스로를 이용한 원자력수소 기술을 개발하였다. 실증을 위한 핵심기술로서 고온에서의 열을 공급하는 것을 모사하는 초고온 실험기술, 초고온가스로의 안전성을 모사 연구, 초고온가스로의 노심과 안전성을 해석할 수 있는 해석도구의 개발, 초고온가스로에 사용하는 연료제조기술, 물을 분해하여 열화학적인 방법으로 수소를 생산하는 기술을 개발하고 실험실 규모로 실증하였다. 상용화를 위해서 개발된 기술의 용량증대 기술과 실용화를 위해 초고온재료특성의 확보, 기술기준의 정립, 초고온기기와 설계프로그램에 대한 성능과 검증이 기술적 과제로 아직 남아 있다. 원자력수소는 원자력, 기계, 화공기술이 융합된 기술로서 화석에너지를 대체하고, 미래원자로의 안전성에 해답을 제공하는 미래에너지 기술이다.

후 기

This study was supported by Nuclear Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP). (Grant code: NRF-2012M2A8A2025682).

참고문헌 (References)

- (1) Korea Energy Management Corporation, 2015, 2015 Energy Statistics Handbook.
- (2) Jeremy, R., 2002, The Hydrogen Economy.
- (3) Chang, J.H., Kim, Y.W., Lee, K.Y., Lee, Y.W., Lee, W.J. Noh, J.M. Kim, M.H., Lim, H.S., Shin, Y.J., Bae, K.K. and Jung K.D., 2007, "A Study of a Nuclear Hydrogen Production Demonstration Plant," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.39, No.2, pp.111~122.
- (4) Kim, Y.W., et al., 2015, Development of Key Technologies for Nuclear Hydrogen, KAERI/RR-3936/2014.
- (5) Futterer, M.A., Li, F., Sink, S., Groot, S., Pouchon, M., Kim, Y.W., Carre, F. and Tachibana, Y., 2014, "Status of the Very High Temperature Reactor System," *Progress in Nuclear Energy*, Vol.77, pp.1~16.
- (6) OECD/NEA Generational IV International Forum, 2014, Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems.
- (7) Kim, J.H., Bae, Y.Y., Kim, C.S., Hong, S.D. and Kim, M.H., 2015, "The Test Results of the NACEF RCCS Test Facility," *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Jeju, Korea, May 7-8, 2015.
- (8) ASME, 2013, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Division 5.