원자력수소 생산을 위한 초고온가스로

이 글에서는 제4세대 원자로형의 하나로서 국제적인 협력을 바탕으로 개발되고 있는 초고온가스로에 대해 소개하고 미래의 에너지원인 수소를 경제적으로 생산하기 위한 원자력의 역할을 살펴본다.

초고온가스로

고온가스로란 이산화탄소(CO_2)나 헬륨(He) 같은 기체를 냉각재로, 그리고 흑연을 감속재로 사용하는 원자로이다. 경수로가 300℃, 그리고 액체금속로가 500℃ 정도의 운전온도를 갖는데 비해 헬륨을 냉각재로 사용하는 고온가스로의 냉각재 온도는 700℃ 이상 최고 950℃ 정도이다. 수소생산용으로 거론되는 원자로는 헬륨을 냉각재로 사용하고 노심 출구온도 900℃ 이상 1,000℃를 목표로 하는 초고온가스로(VHTR)이며, 제4세대 원자로 시스템 중에서 가장 빨리 실현될 것으로 예상된다.

고온가스로는 900℃ 이상의 높은 열원을 생산하므로 전력생산뿐만 아니라 수소생산을 위한 에너지 공급 등 원자력의 응용 범위를 넓힐 수 있는 것이 장점이며, 발전에서도 45~50%의 높은 효율을 달성할 수 있다. 물을 냉각재로 사용하는 경우에는 374℃에서 임계점을 가지며 액체금속을 냉각재로 사용할 때는 600℃ 부근부터는 끓거나 부식이 커지게 된다. 그러나 헬륨(기체)의 경우에는 상변화가 없으므로 높은 온도에서의 사용이 가능하다. 즉, 기체 냉각재는 저압에서도 고온상태의 냉각재를 유지할 수 있어 열전달계통을 고압용기로 제작할 필요가 없다. 고온가스로는 노심 출력밀도가 매우 낮아서 사고시에도 고유안전성을 확보한 것이 특징이다. 반면에 기체의 열전달 특성이 액체보다 좋지 않기 때문에 원자로 용기 및 열교환기 사이즈가 크고 순환펌프의 용량이 커지는 문제점이 있다. 또, 운전온도가 매우 높기 때문에 이에 견딜 수 있는 고온재료의 선정과 개발이 중요하다.

고온가스로는 독일, 미국, 영국 등에서 이미 건설, 운영된 경험이 있으며 최근에는 일본과 중국에서 수소 생산을 위한 실험로가 운전 중에 있다. 그리고 남아프리카공화

박 근 배 | 한국원자력연구소 기계공학연구부, 부장 _ e-mail : kbpark2@kaeri.re.kr

국에서는 전력 생산 목적의 상용 고온가스로인 PBMR(Pebble Bed Modular Reactor)을 건설하고 있다. 원자로 중에서 고온의 열을 가장 손쉽게 생산할 수 있는 방법이 고온가스로이며, 우리나라를 비롯한 미국, 일본, 프랑스, 영국, 남아프리카공화국, 캐나다, 스위스, 브라질, 아르헨티나 등 10개국이 협력하여 보다 높은 열을 생산할 수 있는 초고온가스로를 제4세대 원자력 시스템으로 개발하고 있다.

수소경제와 원자력의 이용

인류의 에너지 사용을 살펴보면 나무, 석탄, 석유, 그리고 천연가스 순으로 단위 질량당 탄소의 수가 적어지는 탈(脫)탄소화의 방향으로, 사용하기 편리하면서도 보다 깨끗한 에너지를 찾아 변해온 것을 알 수 있다. 탈탄소화 여정의 끝에 수소가 있다. 수소에는 탄소 원자가 전혀 포함되어 있지 않다. 최근 고유가와 환경문제가 핵심 쟁점이 되고 있는 가운데 미래 청정에너지원인 수소와 이를 바탕으로 한 수소경제(hydrogen economy)에 대한 관심이 높아지고 있다. 수소가 미래의 궁극적인 에너지로 각광을 받는 이유는 지구상에 존재하는 풍부한 물을 원료로 생산할 수 있어 자원 제약이 없고, 이산화탄소 등 공해물질을 배출하지 않고 연소 후 물로 변환되는 재생 가능한 친환경 에너지일 뿐만 아니라, 무엇보다도 지정학적으로 편재되어 있는 화석에너지와 달리 기술만 있으면 누구나 생산해 낼 수 있는 기술주도형 에너지이기 때문이다.

수소경제란 용어는 저명한 경제학자이자 미래학자인 제레미 리프킨이 2002년 저술한 "수소경제 - 석유시대의 종말과 세계 경제의 미래"에서 비롯되었다(우리나라에서는 수소혁명이란 제목으로 번역). 이 책에서 리프킨은 산업혁명 이래 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료를 바탕으로 발전해온 탄소경제 시대가 끝나고 수소에너지에 기반을 둔 새로운 사회질서가 탄생하게 될 것임을 예고하고 있다. 즉, 기술만 있으면 어디서나 구할 수 있는 '영구 연료'인 수소는 필연적으로 고갈될 석유자원을 대신하여 앞으로 인류 문명을 재구성하고 세계 경제와 사회구조를 재편할 것이라고 예견하면서 에너지로부터의 자유, 해방, 평등 개념에서 수소를 '민주에너지'로 정의하였다. 허버트(M. K. Hubbert, 미국의 지구 물리학자)의 종형(鐘形)곡선 이론을 빌리면 석유 생산량은 전형적인 종형곡선을 따라 제로에서 시작해 꾸준히 증가하다가 회수 가능한 매장량의 절반 정도가 생산되는 시점에서 생산이 절정에 이른 뒤 미끄러지고, 그때부터 가격이 급격하게 상승한다. 현대문명과 세계 경제의 생명줄인 원유의 생산은 2020년경에 절정을 기록할 전망이다. 세계 석유 생산의 절정기에 대해서는 이견이 분분하지만 그 차이는 기껏해야 10년에서 길어야 30년일 뿐이다. 역사의 흐름에서 보면 매우 짧은 시간이다. 1970년대 처음 발생한 석유파동은 정치적 원인에서 비롯됐지만 앞으로 석유파동이 다시 일어날 경우 그 원인은 석유가 진짜로 모자라서일 것이다.

수소는 궁극적으로 인류가 당면하고 있는 에너지와 환경 문제를 동시에 해결할 수 있는 꿈의 에너지원임에 틀림없다. 수소는 우주에서 가장 풍부한 원소다. 수소는 물, 화석연료 등의 형태로 지구 어디에나 존재한다. 그러나 수소는 채굴 가능한 자원이 아니고 화합물로서 존재하며 따라서 수소를 얻기 위해서는 화석연료나 물을 분해하는 과정을 거쳐야 한다. 화석연료나 물은 안정된 화합물이므로 이들을 분해하여 수소를 얻기 위해서는 많은 에너지와 특별한 방법이 필요하다. 따라서 수소를 경제적으로 그리고 대량으로 생산할 수 있는 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 앞으로 수소경제가 실현되고 수소가 보편적인 에너지 담체로서 자리 잡기 위해서는 수소의 대량생산 기술과 아울러 저장, 수송, 공급 및 이용 분야에서의 인프라 구축이 함께 이루어져야 한다.

수소를 포함하고 있는 물질은 크게 물과 석유, 천연가스 등의 탄화수소이다. 현재 실용화되어 있는 수소 제조 방법으로는 메탄 등의 탄화수소 원료를 수증기와 반응시켜 수소를 발생시키는 수증기 개질

> 원자로 중에서 고온의 열을 가장 쉽게 생산할 수 있는 것이 고온가스로이다. 초고온가스로는 950℃ 이상의 고열을 발생할 수 있으므로 이 열을 직접 이용하면 수소를 경제적으로 대량 생산할 수 있다.

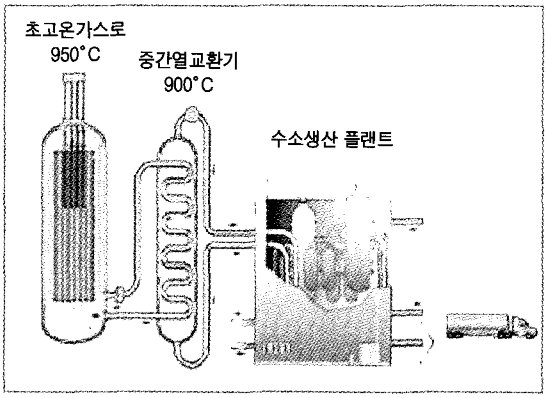

그림 1 원자력 수소생산 시스템

법과 물의 전기분해법이 주류를 이루고 있다. 그런데 탄화수소를 원료로 쓰는 모든 방법은 수소 생산 과정에서 이산화탄소를 발생시킨다. 화석연료에 의존하지 않고 수소를 만드는 가장 보편적인 방법은 물의 전기분해법이다. 하지만 물을 분해할 전기를 기존의 화석연료를 사용해서 만든다면 역시 이산화탄소를 배출할 뿐만 아니라 에너지 사용의 효율성이 떨어진다. 따라서 효과적인 탄소의 포집기술과 처분 방법이 확립되지 않는 한 환경친화성을 갖는 수소의 생산수단은 원자력이나 재생에너지를 이용해서 물로부터 수소를 얻는 방법뿐이다. 재생에너지로서는 태양에너지, 풍력, 수력, 바이오매스 등이 고려되지만 단위면적당 에너지 밀도가 낮고 현재의 기술수준으로는 수소의 대량생산이 불가능하다. 수소를 에너지원으로 개발하기 위해서는 물을 원료로 대량의 수소를 안전하고 경제적으로 생산하는 기술의 개발이 필요하다.

이런 논의를 겪으면서 최근 활발한 연구개발이 진행되고 있는 것이 원자력을 이용한 수소의 생산이다. 원자력 수소생산 시스템이란 원자로에서 발생하는 고온의 열을 이용하여 물을 분해하여 수소를 생산하는 것을 말한다. 물을 직접 수소와 산소로 분해하기 위해서는 열역학적으로 4,000K 이상의 고온을 필요로 하기 때문에 현실적으로 불가능하다. 대신, 보다 낮은 온도에서 물로부터 수소를 만들 수 있는 열화학 사이클에 대해 많은 연구개발이 수행되어 왔는데, 이들 방법은 800℃ 이상의 고열을 필요로 하기 때문에 연구는 주로 고온가스로 이용의 일환으로 수행되었다. 원자로 중에서 고온의 열을 가장 쉽게 생산할 수 있는 것이 고온가스로이다. 초고온가스로는 950℃ 이상의 고열을 발생할 수 있으므로 이 열을 직접 이용하면 높은 효율로 수소를 생산할 수 있다. 원자력에너지로 수소를 생산하기 위해서는 전기로 변환한 다음 물을 전기분해할 수도 있겠지만 이보다는 열을 직접 이용하는 것이 더 높은 에너지변환 효율을 얻을 수 있다. 이런 방법은 공급되는 열원의 온도가 높을수록 유리하며, 가장 유망한 요드-황(Iodine-Sulfur) 열화학 공정의 경우 최소 800℃ 이상의 고온이 필요하다.

초고온가스로의 구성과 주요 기기

초고온가스로는 헬륨을 냉각재로, 흑연을 감속재로 사용하는 원자로이다. 초고온가스로의 가장 큰 장점은 높은 열원의 생산이 가능해 수소 생산과 전력 생산이 가능한 복합발전 시스템이라는 점이다. 최고 수준의 피동안전성을 추구하는 초고온가스로는 제4세대 원자로 시스템 중에서 가장 가까운 미래에 실현될 것으로 예상되며 고온의 열에너지를 활용한 다양한 응용이 가능하여 여러 나라에서 기술개발이 활발하게 진행되고 있다.

표 1 경수로와 초고온가스로의 비교

항 목	경수로	초고온가스로
냉각재	물	헬륨 가스
최고온도	327℃	950℃~1,000℃
일차계통 압력	150기압	70~90기압
핵연료	UO_2핵연료집합체	피복입자(TRISO)
안전 시스템	능동형	피동형

그림 2 블록형 연료

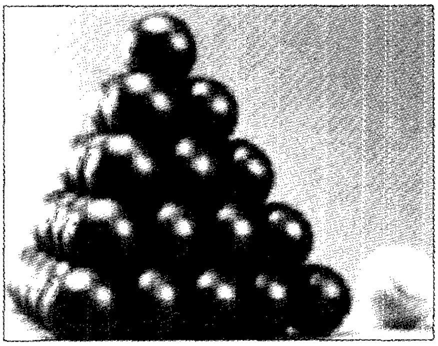
그림 3 페블형 연료

표 2 GT-MHR(블록형)과 PBMR(페블형)의 주요 제원

파라미터	GT-MHR	PBMR
열출력(MWth)	600	400
원자로 입구/출구온도(℃)	490/850	500/900
원자로용기 직경(OD, m)	7.6	6.5
원자로용기 높이(m)	24	30
원자로용기 재료	Mod. 9Cr-1Mo	SA 533/SA 508
원자로용기 온도(℃)	440	300
배관계통	coaxial	1 hot leg/2 cold legs
핵연료 재장전계통	fuel handling machine	continuous fueling & discharge
동력전달계통	integral type	separate type
설계수명(연)	60	40

고온가스로는 사용하는 연료의 형태에 따라 크게 블록형(block)과 페블형(pebble)으로 구분된다. 블록형의 대표적인 노형으로는 미국에서 개발한 GT-MHR을 들 수 있고 페블형의 대표적인 예로는 현재 남아프리카공화국에서 건설 추진 중인 PBMR이 있다. 두 노형 모두 직경 1mm 정도의 피복 핵연료 입자인 TRISO(TRI-ISotropic coated fuel)를 기반으로 사용하는데, TRISO 입자는 직경 0.6mm 정도의 미세 산화우라늄(UO_2)에 초열탄소(PyC)-탄화규소(SiC)-초열탄소(PyC)를 3중 피복한 것이다. 블록형은 프리즘형이라고도 하는데 TRISO 입자를 백묵 모양의 컴팩트로 성형한 후 이것을 육각형의 흑연 블록에 채워 넣은 핵연료를 사용하며, 페블형은 TRISO 입자를 뭉친 후 외부를 다시 초열탄소로 피복한 직경 6cm의 구형 핵연료를 사용한다. TRISO 기반의 핵연료는 구조 특성상 핵분열 생성물의 누설량이 극히 낮고 핵연료의 재처리가 물리적으로 불가능한 특성을 가지고 있다.

블록형의 연료 블록 높이는 약 80cm이며 원격 핵연료 취급장치를 사용하여 장전된다. 600MWt급 GT-MHR의 노심에는 12층으로 적층된 1,020개의 연료 블록이 장전되고 핵연료의 교체는 주기적으로 이루어진다. 페블형은 원자로 운전 중에 연료를 연속적으로 장전/방출하는데, 연료의 장전은 공압식으로 노심 상부에서 바로 떨어뜨린다. 노심으로 떨어진 페블은 중력에 의해 낙하하며 원자로용기 하부의 취출구에서 하나씩 꺼내어 연소도와 손상 여부를 검사한 후 다시 순환 장전된다. 400MWt급의 PBMR에는 약 45만 개의 페블이 장전되며 하나의 페블은 보통 10회 정도 재장전 된 후 폐기된다. 아래에서 GT-MHR과 PBMR의 원자로계통에 대해 간략히 살펴본다.

GT-MHR(Gas Turbine-Modular Helium Reactor)

GT-MHR은 미국 General Atomics 사가 개발한 열출력 600MWt의 블록형 고온가스로이며 원자로 출구온도는 850℃이다. GT-MHR 고온의 헬륨을 생산하는 원자로계통, 가스터빈을 돌려 전기를 생산하는 동력변환장치, 그리고 그 사이를 연결하는 고온덕트(cross vessel)의 3 부분으로 구성된다.

원자로용기의 재료는 Mod. 9Cr-1Mo강이며 직경 7.6m, 높이 약 24m, 두께 22cm이다. 동일 출력의 경수로와 비교할 때 원자로용기의 외형이 매우 큰 것을 알 수 있다. 원자로용기 내에서 냉각재의 유로를 조정하여 고온의 헬륨가스가 원자로용기와 직접 접촉하지 않으며, 정상 운전 시 압력용기 벽면의 온도는 440℃를 유지한다. 원자로용기와 동력변환장치를 연결하는 연결용기는 고온덕트라고 부르는 동축 이중배관(coaxial cylinder) 구조인데 원자로에서 나오는 고온의 헬륨 가스가 동축배관의 안쪽에서 동력변환장치로 흐르고, 에너지 전달 후 식은 헬륨은 바깥배관을 통해 원자로용기로 들어간다. 안쪽 배관의 내면에는 세라믹 파이버 절연체를 설치하여 벽면이 고온의 헬륨과 직접 접촉하지 않도록 하고 아울러 열손실을 막아준다. 수소 생산을 위한 열 공급이 목적인 경우에는 동력변환계통 대신에 중간열교환기(IHX : Intermediate Heat Exchanger)가 설치되어 수소생산 플랜트로 열을 전달한다. 중간열교환기의 전열기는 고온의 헬륨에 직접 노출되어야 하므로 건전성 확보 관점에서 가장 취약한 부분이며 고온재료의 선정 및 장치개발 등에 많은 노력이 필요하다.

고온가스로는 내부의 온도가 900℃ 이상 올라가므로 노심 내에는 금속재료를 사용할 수 없으며 따라서 반사체 등 내부구조물을 모

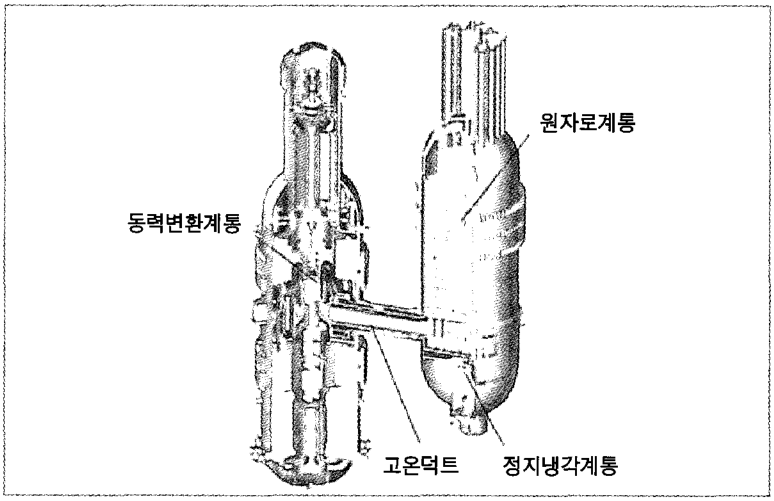

그림 4 GT-MHR 구성도

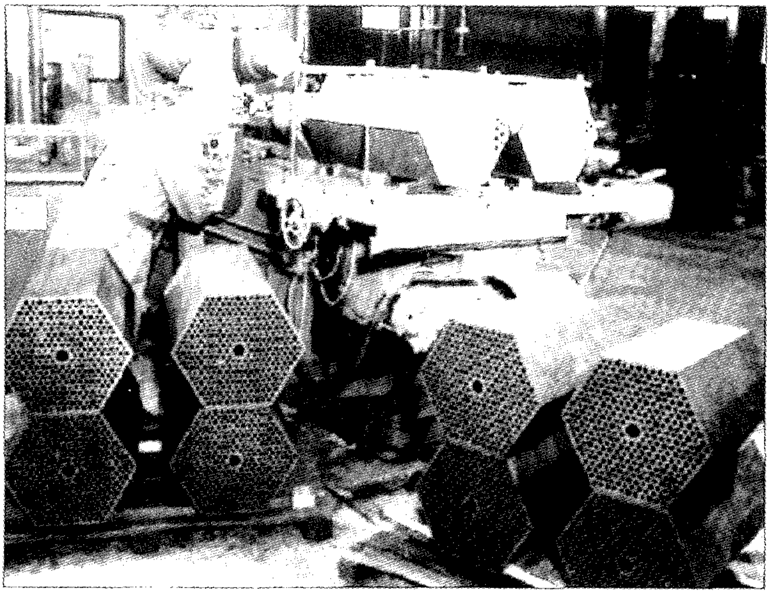

그림 5 노심 흑연블록(블록형)

두 흑연으로 제작한다. 흑연은 용접이 불가능하고 볼트 등의 체결장치도 사용할 수 없어 블록 형태로 제조 후 key를 사용하여 적층, 조립하게 되는데 이러한 구조는 필연적으로 복잡한 동적 해석과 함께 실험을 통한 검증을 필요로 한다. 특히 지진 시에 적층된 연료 블록과 반사체 블록의 이동으로 인해 유로의 왜곡이나 제어봉 유착이 발생하지 않도록 하여야 한다. 또, 정상운전 중에도 중성자 조사와 열팽창으로 인한 흑연 블록의 변형과 물성변화에 대한 고려가 필요하다.

구조설계에 사용되는 기술기준은 ASME III, Subsection NH를 기본으로 하고 보다 고온 영역의 설계에 확장 적용하기 위한 코드화(codification) 작업, 고온재료 개발 및 데이터베이스 구축 노력이 진행되고 있다.

원자력이용 수소생산시스템 개발사업은 초고온가스냉각로 기술개발 및 수소생산 실증을 통해 2020년까지 연간 3만톤 규모의 수소를 생산할 수 있는 원자력 수소생산 모듈 개발을 목표로 하고 있다.

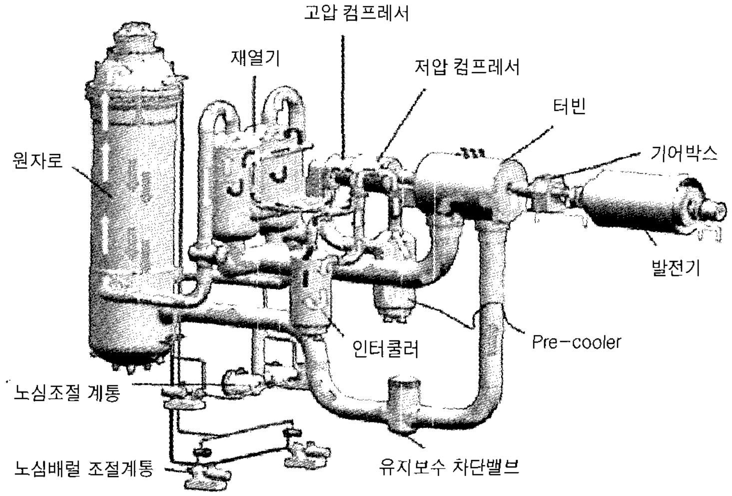

그림 6 PBMR 구성도

PBMR(Pebble Bed Modular Reactor)

PBMR은 현재 남아프리카공화국에서 건설이 추진되고 있는 전력생산 목적의 열출력 400MWt 페블형 고온가스로이며 원자로 출구 온도는 900℃이다. PBMR의 구성은 원자로계통, 동력변환계통, 그리고 배관계통의 세 부분으로 이루어진다. GT-MHR의 동력변환계통이 단일 용기에 내장되는 일체형임에 비해 PBMR의 경우는 각각의 기기들이 공간상에 독립적으로 배치되고 서로 배관을 통해 연결된다.

원자로용기의 재료는 SA 533/SA 508이며 직경 6.5m, 높이 약 30m, 두께 18cm의 대형 구조물이다. PBMR의 설계 특징은 ASME III, Subsection NB를 기본으로 하는 기존 상용 발전로 건설에 사용하는 기술기준을 그대로 준용한다는 것이다. 이를 위해서는 압력경계 금속재료 구조물의 온도를 371℃ 이하로 유지하여야 하는데 필요한 경우 별도의 냉각장치를 사용한다. 헬륨 가스의 노심 출구온도는 900℃이지만 정상운전 시 원자로용기의 온도는 RPVCS (Reactor Ppressure Vessel Conditioning System)를 설치하여 300℃ 이하로 유지한다. RPVCS는 원자로용기와 노심배럴 사이에 비교적 저온의 가스를 순환시켜 압력용기의 온도를 낮추고 균일한 온도분포를 갖도록 해준다.

원자로용기 내부의 대부분의 공간은 페블 핵연료와 흑연반사체가

차지하고 있다. 핵연료 페블은 원자로 상단에서 3개의 장전구를 통해 투입되고 하단에 있는 3개의 방출구를 통해 추출된다.

우리나라 원자력 이용 수소 생산시스템 개발

우리나라에서는 에너지 자립을 위한 미래 원자력 기술로서 수소에너지 생산기술 확보를 위해 과학기술부의 지원 아래 '원자력 수소 생산 기술개발 및 실증사업'을 2004년부터 착수하였으며 현재 전체 시스템의 개념을 도출하는 연구가 진행되고 있다. 원자력 수소 생산 시스템은 노심 출구온도가 950℃인 초고온가스로(VHTR)와 물을 분해하여 수소를 생산하는 화학플랜트로 구성되는데 초고온가스로 기술개발 및 수소생산 실증을 통해 2020년까지 연간 3만 톤 규모의 수소를 생산할 수 있는 원자력 수소생산 실증모듈 개발을 목표로 하고 있다. 이를 위해 한국원자력연구소(원자로계통 개발), 한국에너지기술연구원(열화학 수소생산 공정 개발), 한국과학기술연구원(황산분해공정 실증) 등 3개 기관을 중심으로 국내외 학계 · 연구소 · 산업계가 협력체계를 구축하고 있다.

원자력 이용 수소 생산시스템의 개발이 성공하면 2020년대에는 연간 원유 8,500만 배럴(국내 수송 에너지의 20% 상당)을 수소에너지로 대체할 수 있고 이를 통해 연간 3조 원의 석유 수입비용 절감과 함께 1,000만 톤의 탄산가스 배출 감축을 이룰 것으로 기대하고 있다. 수소경제는 먼 미래의 이야기가 아니라 이미 가까이에 다가온 현실이며, 그 길목에 원자력 수소 생산 시스템이 자리 잡고 있다. 원자력은 전력생산과 함께 수소 생산에서도 지속적이고 대량공급이 가능한 특징을 활용하여 이에 상응하는 역할을 할 것으로 기대된다. 머지 않아 도래할 수소경제 시대에 대비한 기술개발과 인프라 구축을 지금부터 서둘러야 할 것이며 국가적으로도 많은 지원이 뒤따라야 할 것이다.

기계용어해설

텔레스코픽 실린더(Telescopic Cylinder)
실린더 내부에 또 다른 실린더가 내장되어 있고 압력유체가 유입되면 차례로 실린더가 나오도록 만들어져서, 큰 스트로크를 얻을 수 있는 구조의 실린더.

향판접안 렌즈(Template Eyepiece)
공구현미경, 만능측정현미경 등에서 나사산의 윤곽, 원호, 원 등 다수의 표준도형을 그린 유리판이 초점면상에서 회전할 수 있도록 만든 접안 렌즈.

템플릿(Template)
기계를 설치할 때 기초 콘크리트 시공을 하면서 동시에 기초 볼트를 고정시키는 경우에 철판이나 형틀 또는 판자의 중심 위치에 구멍을 뚫은 후, 각 구멍을 통하여 기초 볼트의 위치를 결정하는 플레이트.

액체 호닝(Liquid Honing)
금속제품이나 재료에 미립자의 연마제를 첨가한 물 또는 그에 적당한 부식 억제제를 첨가한 것을 고속으로 뿜어서 균일한 스테인 다듬질을 하는 동시에 깨끗하게 하는 표면연마 가공법.

액체침투탐상검사(Liquid Penetrant Test)
도포된 액을 표면개구 결함부위에 침투시킨 후 표면의 침투액을 제거하고, 내부 결함 속의 침투액을 뽑아내어 직접 또는 자외선 등으로 비추어 결함의 장소와 크기를 알아내는 방법.