



# THEME 04

## 초고온가스로와 원자력 이용 확대

김 용 완 | 한국원자력연구원 수소생산원자로기술개발부, 부장 | e-mail : ywkim@kaeri.re.kr

이 글에서는 제4세대 원자로 노형으로 수소생산 및 열공급을 목적으로 하는 초고온가스로의 특징과 우수한 안전성, 그리고 다양한 응용 분야에 대해 소개하고자 한다.

### 가스로에서 초고온가스로

원자로는 에너지를 생산하기 위해 핵연료의 열을 전달하는 냉각재의 종류에 따라 노형을 분류하는 경우가 많다. 냉각재가 물(경수)인 경우에는 경수로, 가스인 경우에는 가스로, 그리고 액체금속인 경우에는 액체금속로라 칭한다. 가스로는 냉각재의 원자로 출구온도에 따라 출구온도가 600도 전후인 가스로(Gas Cooled Reactor), 출구온도가 750도 이상인 고온가스로(High Temperature Gas-cooled Reactor), 그리고 출구온도가 950도인 초고온가스로(Very High Temperature Reactor)로 구분할 수 있다.

1950년대에서 1960년대 중반까지 건설된 초기 가스로는 냉각재로 이산화탄소를 사용하였고 핵연료의 형태는 봉집합체이며, 냉각재의 원자로 출구의 온도는 600도 전후이다. 1970년대 이후 높은 열효율과 대용량 발전을 위해 냉각재의 원자로 출구 온도가 750도 이상인 고온가스로가 개발되었

다. 초창기 가스로와 최근 제4세대 원자로로 주목을 받고 있는 초고온가스로는 핵연료, 냉각재, 원자로의 안전성에 대한 기술적 차이는 매우 크다.

다. 노심용융, 갑작스런 원자로 용기 파손, 방사능물질 방출 등을 막기 위해 흑연 노심 구조물, 헬륨 냉각재, 세라믹으로 피복된 피복입자핵연료를 채택하면서 고온가스로의 경제성과 안전성을 향상시켰다. 최근에는 완전한 피동안전개념의 채택이 가능한 모듈형 강철압력용기를 사용하고 냉각재의 원자로 출구온도를 950도까지 올려서 경제성과 안전성을 획기적으로 향상시킨 초고온가스로가 개발 중이다. 초고온가스로는 현재 개발 중인 제4세대 원자로 중 안전성과 경제성이 가장 우수한 것으로 평가되었다.

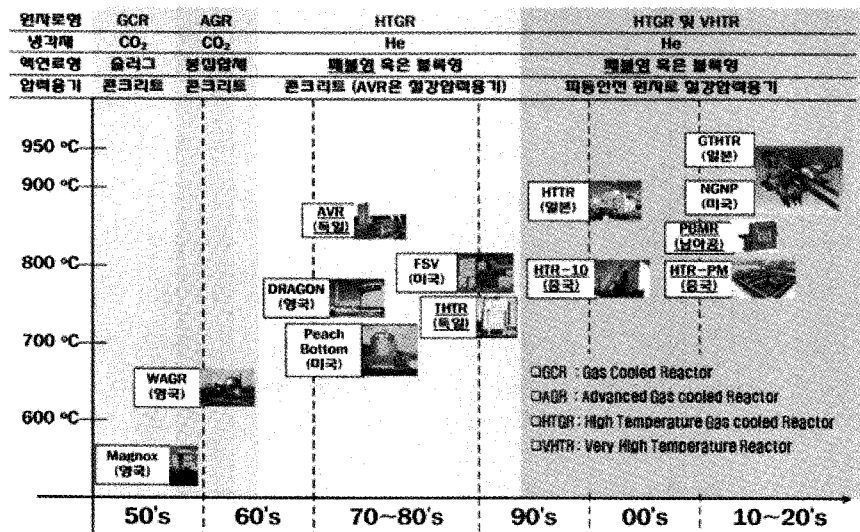


그림 1 가스로, 고온가스로, 초고온가스로의 기술적 변천

초고온가스로 특징

기존의 가스로와 구분되는 고온 가스로의 핵심적인 차별성은 핵분열생성물을 가두어 둘 수 있는 미세 피복입자연료인 TRISO(tri-isotropic coated fuel)를 사용하는 것이다. 미세피복입자연료는 직경

0.5mm 내외의 산화우라늄을 초열탄소(PyC), 탄화규소(SiC), 초열탄소를 삼중으로 피복한 것으로서 직경이 1mm 정도이다. 삼중 코팅된 피복층이 핵분열에서 발생하는 대부분의 분열파편을 차단하여 외부로 누설되는 방사선량이 극히 적다. 실제로 피복입자연료를 1,600℃에서 수백시간 운전실험한 결과 외부로 누설된 방사선량은 전체 핵분열 방사능의 10<sup>-6</sup> 이하로 보고되었다. TRISO 기반의 핵연료는 구조 특성상 핵분열 생성물의 누설량이 극히 낮아 안전성이 높고 핵확산성에 대한 저항성이 크다.

초고온가스로 및 고온가스로는 사용하는 연료의 형태에 따라 크게 블록형(block)과 페블형(pebble)으로 구분된다. 블록형의 대표적인 노형으로는 미국에서 개발한 GT-MHR이고, 페블형의 대표적인 예로는 현재 중국에서 건설 중인 HTR-PM이다. 블록형은 TRISO 입자를 분필 모양의 컴팩트로 성형한 후 이것을 육각형의 흑연 블록에 채워 넣은 핵연료를 의미하며, 페블형

초고온가스로는 후쿠시마와 동일한 사고에서도 외부 전원 및 냉각수의 공급 등 별다른 조치 없이 지속적으로 원자로냉각이 가능하여 제4세대 원자로 중 안전성이 가장 우수하다.

은 TRISO 입자를 몽친 후 외부로 다시 초열탄소로 피복한 직경 6cm의 구형 핵연료를 칭한다.

초고온가스로를 이용한 원자력수소생산계통은 크게 초고온가스로계통, 중간열교환계통, 그리고 수소생산계통으로 분류된다. 초고온가스로의 핵연료에서 생산된 고온의 열을 중간열교환기에 전달하고

중간열교환기는 헬륨-헬륨 열교환을 통해 초고온가스로의 열에너지를 수소생산계통에 전달한다. 수소생산계통에서는 물과 초고온열을 이용하여 수소를 생산하게 된다. 초고온가스로의 초고온열은 수소생산뿐만 아니라 공정열 공급 및 고효율 전력 생산으로 이용이 가능하다.

원자로의 안전성을 확보하기 위해서는 방사성물질의 누출이 없어야 하고 원자로 정지 후 붕괴열이 안정적으로 지속 제거되어야 한다.

초고온가스로는 출력밀도가 다른 원자로에 비해 작기 때문에 원자로 용기 표면의 복사로 원자로 출력의 0.1~0.2%인 붕괴열을 지속적으로 제거하는 것이 가능하다. 이는 지진, 해일 등으로 발전소 내 배관, 전기 시설 및 격납건물이 손상되어도, 다른 원자로형과 달리 별도의 외부 전원 및 냉각재 공급 없이 원자로용기의 복사와 공랭만으로 원자로 붕괴열을 안정적으로 제거할 수 있다. 또한, 원자로 내 일억 개 이상의 TRISO인 미세피복입자연료는 1,800℃의 고온에서도 방사능물질이 외부로 유출되지 않으며, 개개의 피복입자연료가 다량으로 파손되어, 체르노빌과 후쿠시마와 같은 방사능 물질의 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

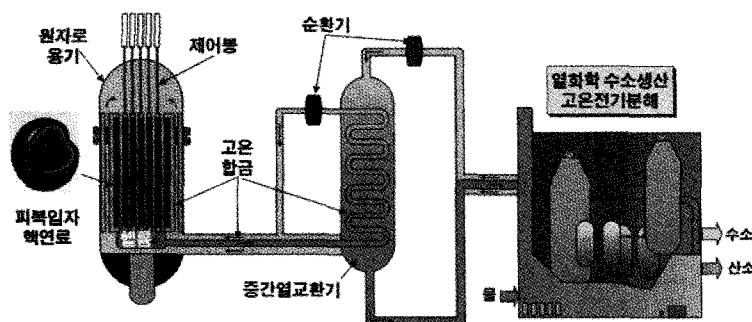


그림 2 초고온가스로와 원자력수소생산시스템 개요

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 높고 응용분야가 넓은 뿐만 아니라, 대규모 해수 냉각이 요구되지 않으므로 내륙 건설이 가능하고 지진, 해일 등의 천재지변 상황에서도 별도의 조치 없이 자연적으로 원자로 붕괴열이 냉각되는 완전피동안전성을 확보하고 있다고 볼 수 있다.

### 초고온가스로의 기계 및 기기 기술

초고온가스로 기술 중 기계공학 분야와 밀접한 관계를 갖는 기술 분야는 고온재료, 설계기술기준, 주요 기기 설계 및 제작 등이다. 초고온가스로 개발을 위해서는 950℃에 이르는 노심의 출구온도로 인해 초고온에서 하중을 견딜 수 있는 소재 선정과 설계 관련 물성치 자료 생산이 우선적으로 이루어져야 한다. 초고온 조건에서의 금속재료는 크리프 자료 및 피로와 크리프의 연계성이 요구된다. 재료 온도가 1,000℃를 넘어가는 경우나 높은 하중지지능력이 필요한 경우에는 규화탄소와 같은 세라믹소재를 사용하게 된다.

원자로에 설치되는 기기 및 구조물은 설계 단계에서 적절한 사용 재료 및 운전 조건에 적합한 신뢰성 있는 설계 기준이 사용되어야 한다. 현재 국내원자로설계기술기준인 전력산업기술기준에는 고온가스로 및 초고온가스로를 위한 설계기준이 없는 상황이다. 미국의 ASME 코드에서는 고온가스로에서 1등급 기기의 설계를 위한 Section III Subsection NH가 제정되어 있으나,

최근 ASME에서는 고온가스로 및 초고온가스로의 설계에 필요한 설계기술기준을 제정하여 ASME Sec.III Division 5에 High Temperature Reactors, Rules for Construction of Nuclear Facility Components로 2011년에 등재 예정이다.

아직 적용 가능한 소재가 한정되어 있고 최대 적용온도가 초고온가스로 설계 온도에 미치지 못 하고 있다. Section III-NH는 기존 경수로 구조물 설계 코드인 Section III Subsection-NB의 원자로 수명 기간 동안의 비탄성 변형을 제한 요건뿐만 아니라 크리프-피로 손상과 고온 좌굴 요건이 추가된다.

초고온가스로 압력용기 소재의 선정은 관련 설계의 기술성 및 안전성뿐만 아니라 소재의 수급성, 제조성 및 경제성 측면까지 고려되어야 한다. 정상상태 압력용기 온도 최소화를 위하여 흑연구조물 내부로 냉각재 유로를 형성하여야 하며, 압력용기 냉각계통의 설계와 사고 시 원자로 붕괴열 제거를 위한 원자로공동 냉각계통 성능 향상을 위한 설계 등이 필요하다. ASME에서는 Code Case N499-1에서 경수로와 동일한 원자로 용기 재료로 설계하는 경우 사고 시에 압력용기의 온도가 일시적으로 크리프 발생 온도 이상으로 올라가는 것을 허용하고 있다. 원자로용기 내부는 대부분 흑연 노심으로 이루어져 있다. 블록형 원자로에서 노심은 금속 노심지지배럴 안에 설치되어 수평방향으로 지지된다. 노심과 노심지지배럴 사이에는 노심 외곽의 불균일 형상과 원통 노심지지배럴 사이를 채울 수 있도록 측면 흑연반사체가 설치된다. 노심 하부에는 흑연으로 된 지지기둥들이 설치되며 그 아래에는 금속 노심지지구조물이 설치되어 노심을 지지한다. 최종적으로 노심지지배럴과 노심지지구조물은 원자로용기에 의해 지지되는 구조이다. 폐블형 원자로에서도 원자로 내부의 대부분의 공간은 흑연반사체와 당구공 크기의 폐블핵연료가 차지하고 있다. 원자로 내부구조물의 설계에서 가장 중요한 핵심 설계 기술은 흑연 노심 구조물에 대한 진동 및 내진평가기술이다. 블록형 원자로에서는 특히 레고블록처럼 쌓여진 구조에 대한 내진

해석기술이 중요하다.

원자력수소생산계통에서 많은 연구가 필요한 핵심 기기들은 중간열교환기, 헬륨 순환기, 삼산화황 분해를 위한 공정열교환기 등이 있다. 중간열교환기는 950℃ 고온에서 약 70bar 압력의 원자로계통으로부터 약 40bar 압력의 중간루프로 열에너지를 전달하는 기기이다. 중간열교환기는 나선형 튜브열교환기, 판-핀형, 그리고 판형열교환기의 변형인 PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger) 등이 주요 후보로 검토되고 있다. 나선형 튜브 형태의 열교환기의 경우 초고온 및 높은 차압을 만족시키려면, 크기가 너무 커져 경제성 및 제작에 어려움이 있다. 반면 치밀한 구조인 PCHE는 작은 공간에 설치가 가능하고 높은 차압을 견딜 수 있으나, 유지 보수가 현실적으로 매우 어렵고 분진에 취약한 단점이 있다. 원자력수소생산계통에서 초고온가스로계통과 중간열교환계통의 냉각재인 헬륨을 순환시키는 순환기의 용량은 전체 수소생산효율에 큰 영향을 미치는 주요 인자이다. 헬륨가스분위기에 사용되는 순환기의 핵심기술은 베어링이다. 가스베어링의 경우, 윤활유가 필요하지는 않지만, 높은 하중을 지지할 수 없어 원자력수소생산계통과 같은 대용량 순환기에는 부적합하다. 최근에는 전자석베어링 순환기가 많이 검토되고 있으며 원자력수소생산계통의 고온 운전 조건에서 베어링에 설치된 전자석의 수명과 제어 기술에 대한 연구가 진행 중이다. 공정열교환기는 황-요오드 열화학 공정으로 수소를 생산하는 경우, 삼산화황 가스를 이산화황과 산소로 분해시키기 위해 중간열교환계통의 열에너지를 황산분해공정에 공급하는 열교환기이다. 따라서 이 열교환기는 운전온도가 850~920℃의 초고온 및 20~40bar의 차압을 견디고, 부식성이 큰 황산가스에 대한 내식성이 요구된다. 삼산화황 분해를 위한 공정열교환기는 원자력수소생산의 핵심기술로서 미국, 일본, 프랑스가 각각 독자적인 기술로 기술경쟁을 하고 있다. 현재 한국원자력연구원에서는 내식성

금속재의 황산가스 접촉 표면 개질을 시킨 공정열교환기를 개발하여 시험 중에 있다. 일반적인 세라믹 코팅의 경우 고온 조건에서 코팅층과 금속 모재의 열팽창 계수 차이에 의해 코팅층이 손상되는 문제점이 있다. 한국원자력연구원은 고온 조건에서 코팅층과 금속 모재 사이의 열응력 감소를 위해 금속 모재 표면에 탄화규소를 전자빔으로 코팅하고, 계면을 이온빔으로 때려 금속 모재의 분자와 코팅층의 분자를 혼합시킨 후 재차 탄화규소를 전자빔으로 코팅하는 표면 개질 방법을 개발하였다.

### 원자력 열공급 및 수소시장 전망

현재 국내에서 사용되는 에너지원 중 원자력은 13.6% 차지하며 이는 모두 전력을 생산하는 데 사용되고 있다. 우리나라는 97%의 에너지원을 국외에서 수입하고 있는 상황을 고려하면, 에너지 사용량이 많은 산업으로의 준국산에너지원인 원자력의 이용확대를 통해 에너지원의 해외의존도를 감소시키는 것이 필요하다. 특히 고온가스로(출구온도 750℃)가 현재 고온열/증기 공급시장 및 향후 증가될 합성 연료 생산에 이용되면, 화석연료를 온실가스를 배출하지 않는 에너지원으로 대체할 수 있다. 고온가스로 및 초고온가스로의 열을 이용할 수 있는 분야를 온도 범위로 분류하면, 석유정제(250~550℃), 석탄액화 및 가스화(400~900℃), 메탄올 등 합성연료 생산을 위한 수증기 개질(500~900℃), 유사 및 혈압 처리를 위한 고온증기 생산(300~600℃), 그리고 해수담수화(80~200℃) 등이 있다. 기존의 경우로는 해수담수화만이 가능하다. 일반적으로 천연가스를 에너지원으로 사용하는 공정에 500MWt 고온가스로가 설치될 경우 연간 100만 톤의 이산화탄소 방출을 감축할 수 있다. 북미의 경우 화공, 저급석유채굴, 혹은 석탄액화시장의 85%를 원자력으로 대체할 경우 300GWt 고온가스로 필요하다. 국내의

경우 여천, 울산 등 대규모 산업단지  
에 필요한 공정열을 원자력으로  
전부 공급할 경우 약 50GWt이  
필요하다.

21세기에 들면서 미국은 온실  
가스 감소 및 화석연료 대체를 위  
해 수송부문과 휴대 및 분산전원의 연료전지의 확대를  
위해서 수소경제를 주창하였다. 그러나 국내에서는 최  
근 주요 온실가스 배출원 중 하나인 제철산업에서 수  
소 이용에 많은 관심을 기울이고 있다. 현재 국내 이산  
화탄소 배출의 약 12%를 차지하는 제철산업은 원광석  
에서 산소를 떼어내는 데 탄소 즉, 유연탄을 사용하고  
있고, 1톤 조강에 약 2톤의 이산화탄소가 배출되고 있  
다. 그러나 환원재로 수소를 사용할 경우 이산화탄소  
의 배출은 거의 없어지고, 대신 수증기가 배출되게 된  
다. 국내 1년 조강량에 해당하는 3,000만 톤을 조강하  
는 데 환원재로 수소를 사용할 경우 약 160만 톤의 수  
소가 필요하며, 이는 초고온가스로 16GWt에 해당한

수소시장은 **현존하는 화공  
산업시장, 미래 수소경제  
의 연료전지시장, 그리고  
잠재적인 수소환원제철시  
장이다.**

다. 우리나라는 산업체에서 열에너지로  
국가 전체 에너지의 약 40%를 소비하고  
있으므로, 이산화탄소 배출 감소와 화석  
연료 대체를 위한 대안으로 원자력을 직  
접 산업체 공정열로 활용하는 기술개발  
과 투자가 필요하다.

현재 우리나라에서는 2004년에 원자력수소생산기  
술개발을 착수한 이래 2006년부터 원자력연구개발사  
업의 일환으로 원자력수소핵심기술개발을 추진하고  
있다. 원자력수소핵심기술개발은 2011년 현재 1단계  
연구가 종료되고 2016년에 원자력수소생산시스템실  
증에 필요한 핵심기술개발을 완료할 예정이다. 제4세  
대 원자로 국제공동연구 및 다양한 국제 공동연구를  
통해 원자력수소생산 기술 현안 해소 및 재료 물성치  
자료 기반 확보에 노력하고 있다. 그리고 원자력 업체  
뿐만 아니라 수소 및 공정열 관련 산업계 등 총 12개의  
업체가 원자력수소협약체를 구성하여 원자력수소실  
증사업 추진을 위해 협력하고 있다.



**기계 용어해설**

**트로멜(Trommel)**

원통의 외벽이 체로 둘러쌓여 있고, 그 축을 수평보다  
1/8~1/10경사로 기울여 회전시키면서 고체입자를 체  
로 쳐서 분리하는 장치.

**중간 <트랜지션> 끼워맞춤(Transition Fit)**

구멍의 최소 치수보다 축의 최대 치수가 크거나 같고,  
또한 구멍의 최대 치수보다 축의 최소 치수가 작은 경우  
의 끼워맞춤.

**긁기경도시험(Scratch Test)**

다이아몬드의 압자를 시료면에 대고 하중을 가하여 입  
자를 시료면에 따라 움직였을 때 생기는 긁힌 자국의 폭  
으로 시료의 경도와 연도를 판정하는 시험.

**스크리닝(Screening)**

견포 등의 스크린 위에 가공 패턴을 반전시킨 상을 왁스  
등으로 그린 후 내식성 잉크를 고무 롤러 등으로 압입하  
여 잉크의 패턴을 형성하는 마스킹의 일종.

**나사운동(Screw Motion)**

나사를 회전시킬 때와 같이 1개의 축 주위를 회전함과  
동시에 축방향으로 일정한 비율로 직선운동을 이루게  
하는 운동을 조합시킨 운동.

**시 앵커(Sea Anchor)**

풍량이 높을 때 배에서 바닷물 속으로 던져 물의 저항을  
이용하여 배를 바람이 불어오는 쪽으로 향하게 하거나  
바람에 의한 표류를 적게 하는 데 쓰이는 것.