

독일서 첫개발, 수소 생산에 적합

초고온가스로(VHTR)

글_ 장종화 한국원자력연구소 GIF VHTR운영위원 jhchang@karei.re.kr

제 4세대 원자력시스템 국제포럼(GIF)에서 선택한 6개 노형 중의 하나인 초고온가스로 (Very High Temperature Reactor, VHTR)의 개발목표는 수소생산에 적합한 원자료를 개발하자는 것이다. 이를 위해 기존기술인 고온가스로보다 출구냉각재온도를 50℃ 정도를 더 높은 1천℃의 열을 공급하는 것을 목표로 정하고 있다.

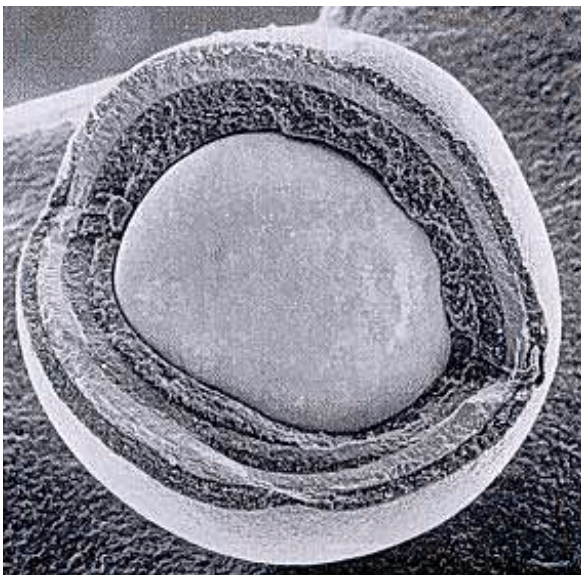
GIF의 VHTR 운영위원회에서는 초고온가스로의 국제 공동연구개발을 위해서 노심설계, 핵연료, 재료, 수소생산, 가스터빈의 5개의 과제관리위원회를 구성했다.

노심설계부분에서의 연구개발 중점은 예비개념설계, 안전성향상, 수소의 삼중수소 오염, 여타 분야의 종합에 있다. 핵연료부분에서는 SiC 피복과 ZrC 피복연료, 핵연료 성능,

고연소도 달성이 중점사항이다. 재료 및 부품부분에서는 재료개발과 부식과 방사선조사를 포함한 특성평가, 재료거동 모형개발, 탄소 복합재, 고온열이용을 위한 중간열교환기, 격리밸브 등이 중점사항이다.

수소생산부분에서는 고온 수증기전기분해, 열화학법 특히 황-요드법(Sulfur-Iodine Thermochemical Cycle)의 공정개발과 열화학데이터베이스개발, 격리밸브 등 원자력과 화학공장의 연결이 중점사항이다. 가스터빈부분에서는 Braton Cycle을 이용하는 직접발전용 고효율 헬륨가스컴프레서 및 가스터빈의 개발이 중점사항이다.

핵연료주기에 대한 연구개발로는 액티나이드 연소를 위한 Deep Burn 개념, 직접 처분, 재처리 등이 있으나 향후 연구 항목으로 분류하였다. VHTR의 운영위원회에는 우리 나라, 프랑스, 일본, 미국, 영국, EU의 유라툼, 남아공, 스위스, 캐나다 등 9개국이 참여하고 있는 등 GIF에서 가장 관심도가 높다. 우리 나라는 가스터빈분야를 제외한 4개 프로젝트에 참여하고 있다.



TRISO 구조

고온가스로 방사선량 경수로의 1/1000 수준

고온가스로는 독일 아헨공대의 슐텐 교수가 주창하여 독일 옐리히 연구소를 중심으로 개발한 원자료이다. 고온가스로의 핵심적인 아이디어는 핵분열생성물을 가두어 둘 수 있는 미세피복핵연료(이하 TRISO)를 사용하는 것이다.

현재 표준으로 자리 잡은 TRISO 피복연료입자는 직경 0.6 mm 정도의 이산화우라늄핵(UO₂ kernel)에 초열탄소(PyC), 탄화규소(SiC), 초열탄소를 3중으로 피복한것이다. 이러한 구조는 핵분열에서 발생하는 대부분의 분열파편을

차단하여 외부로 누설되는 방사선이 극히 적다. TRISO를 1,600℃로 수백시간 운전한 실험에서 외부로 누설된 방사능량은 전체 핵분열방사능의 10^{-6} 이하로 알려졌다. 이 값은 동급의 경수로에서 방출되는 방사선량의 1/1000 이하에 해당된다(그림 1 참조).

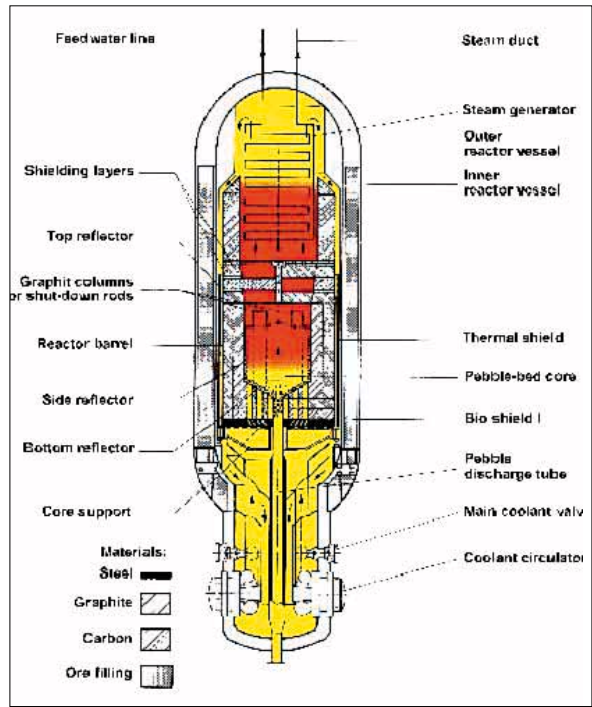
고온가스로는 높은 온도를 내기 위해 기체를 냉각재로 사용하고 있다. 기체 중에서 화학반응이 전혀없는 헬륨을 냉각재로 사용하는 가스냉각로를 고온가스냉각로라고 분류하며, 이산화탄소를 사용하는 원자로를 보통 가스냉각로로 분류한다. 물을 냉각재로 사용하는 경우에는 350℃에서 삼중점을 나타내며, 액체금속을 냉각재로 사용할 때는 600℃부근부터는 끓거나 부식이 커지게 된다.

그러나 헬륨의 경우에는 상변화가 없으므로 높은 온도에서도 사용이 가능하다. 그러나 가스냉각로는 액체보다 냉각능력이 작기 때문에 노심의 열출력 밀도를 6W/cc 이하로 유지해야 한다.



핵연료 집합체

가스냉각로에서는 기체의 밀도가 낮아서 감속능력이 떨어지므로 흑연을 감속재로 사용하게 된다. 흑연은 중성자흡수가 적고 산란단면적이 큰 재료로 최초의 원자로인 시카고 파일(Chicago Pile-1)에서부터 각광을 받아 왔으나 장시간 사용시 산소, 수증기, 이산화탄소 등과의 화학반응으로 부식이 발생하는 문제점이 있다. 또한, 저온 상태의 흑연은 중성자피폭에 따른 위그너 에너지 축적현상이 나타난다. 흑연을 저온에서 중성자를 장시간 조사하면 결정격자가 바뀌면서 에너지가 축적된다. 이 에너지는 흑연의 균열을 초래하며 과도하게 축적된 경우에는 폭발적 에너지방출이 야기된다. 흑연감속로에서 위그너 에너지 축적을 해소하기 위해서는 300~400℃로 가열하여 서서히 냉각시키는 방법을 사용하고 있다. 그러나, 고온가스로는 700℃ 이상의 온도로 운전하므로 위그너 에너지가 축적되지 않는다.



AVR 구조

미국·일본·중국 등 고온가스로 상용화

고온가스로는 핵연료의 형태에 따라 펄베형과 블록형으로 나뉜다. 펄베형은 TRISO 입자를 구형으로 봉쳐 외곽을 초열탄소로 다시 한번 피복한 형태의 핵연료(Pebble 핵연료)를 사용한다. 블록형은 TRISO 입자를 백묵모양으로 봉쳐 연료 덩어리를 만든 후 이것을 육각형의 흑연블록에 꽂아 넣은 핵연료(Prism)를 사용한다(그림 2 참조).

펄베형으로는 1962년 유럽에서 건설한 드래곤(Dragon) 원자로로부터 시작하여 독일에서 개발한 AVR, THTR 이 있으나 현재는 모두 폐쇄되었다. AVR는 열출력 4MW의 일체형 고온가스로 실험로로 직경 6cm의 펄베형 핵연료 9만2천 개를 장전하였다.

노심상부에 증기발생기를 설치하여 고온배관문제를 회피하였다. AVR는 1956년 개발에 착수하고 1961년 착공한 후 1966년 초임계를 달성했으며 1974년 이후에는 출구온도 950℃로 운전하고 1986년 발생한 체르노빌 사고 여파로 1988년 폐쇄하였다(그림 3 참조).

AVR의 성공적 운전에 힘입어 독일은 용량을 증가시킨 원형로 THTR를 건설하였다. THTR는 열출력 750MW급의 대형 고온가스로이나, 노심이 과대해져 노심중앙에 제어봉을 삽입해야 했으며 이로 말미암아 펄베 핵연료 파손이 발생했다.

이런 종류의 사고와 경제성, 독일의 원전폐쇄정책 등에 따라 THTR는 1989년에 폐쇄되었다. THTR에서의 경험은 노심에 제어봉을 삽입하지 않고 사고시 피동잔열제거가 가능한 열출력 300MW 소용량 모듈형 원자로 개념 도입의 초석이 되었다.

중국은 폐블형 고온가스를 도입하기로 하고 1995년 착공하여 2000년 초임계를 달성한 실험로 HTR-10을 운전중이며 가스터빈을 장착한 전기출력 80MW급의 상용발전로 HTR-PM 건설계획을 추진중이다. 남아프리카공화국도 헬륨가스터빈직접발전방식의 상용발전소로 PBMR의 건설계획을 추진중이다.

프리즈형으로는 1967년 미국에서 건설한 피치 보텀(Peach Bottom-1)이 시작이며, 열출력 842MW, 전기출력 330MW의 원형로가 건설되어 1981년부터 운전하였으나 헬륨순환펌프 부분에서 증기 누설로 반응도가 증가되어 원자로가 트립되는 사고가 자주 발생하였다. 잦은 사고와 이를 개량하기 위한 경제적인 비용 때문에 1989년 폐쇄되었다.


일본은 이 노형을 개량한 고온 실험로 HTTR를 1991년부터 건설하여 1998년말 초임계를 달성하고 운전중이다. 미국 제너럴 아토믹사는 헬륨가스터빈 직접발전방식의 GT-MHR 개념을 개발하고 구소련의 핵무기 플루토늄을 연료로 사용하는 발전소건설을 ISTC 프로젝트로 추진하였다.

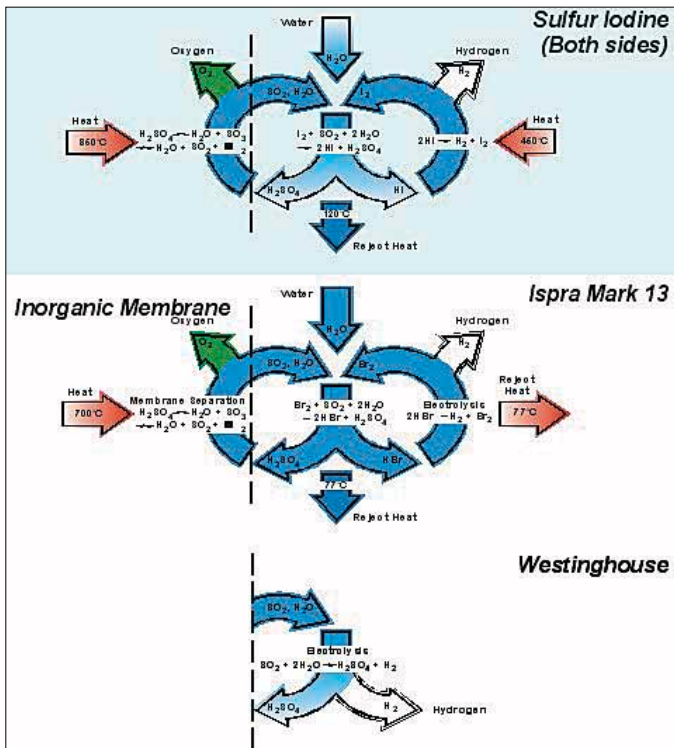
수소생산, 해수담수화 등 다양한 능력 보유

고온가스로는 900℃의 높은 열을 공급하므로 여타 노형보다 활용범위가 높아 고효율 발전뿐 아니라, 해수담수화, 공정열 제공, 석탄액화, 천연가스증기개질, DME 생산, 수소생산 등의 다양한 가능성을 가지고 있다. 그러나 2020년 이후의 상용화를 목표로 설정한다면, 석유자원의 품귀와 지구온난화를 고려하여 물을 원료로 수소를 생산하는 방법이 연구개발의 목표가 될 것이다.

물을 분해하기 위해서는 4천℃ 이상의 고온이나, 전기분해 방법을 사용해야 한다. 그러나 전기는 생산하는데 비용이 많이 들어가는 에너지이기 때문에 가능한 한 저렴한 열 에너지를 많이 사용하여야 한다. 초고온가스로(VHTR)로 제공할 수 있는 1천℃ 이내에서 가능한 방법으로는 열화학법과 고온전기분해법이 있다.

열화학법은 물을 원료로 수소와 산소를 발생시키는 방법이며, 여러 가지의 화학반응을 조합하여 다양한 구성을 생각할 수 있다. 1970년대 이후 200여 개의 열화학법이 제안되었으나, 대량 수소생산에 적합한 유체기반의 방법으로는 황산을 사용하는 것이 가장 유망할 것으로 알려 졌다(그림 4 참조).

일본 JAERI에서는 황산과 요오드를 사용하는 방법을 선정하여 연구를 계속해왔으며, 1999년 시간당 1l 규모의 연속수소생산에 성공한 후 2003년 8월에는 시간당 50l 의 연속수소전에 성공하였다. 고온전기분해는 연료전지기술 중 고온 고효율 연료전지인 SOFC(Sulfur Oxide Fuel Cell)의 역반응이므로 SOFC 기술이 발전하면 실용화에 필요한 많은 문제가 해결될 것으로 기대된다. 



(그림 4) 황산 사이클

글쓴이는 서울대학교 원자력공학과를 졸업 후, 동대학원에서 석사·박사학위를 받았다.

우리도 '원자력으로 수소 생산' 착수

- 올해 연구 시작해 2020년에 개발 완료

울진 3,4 호기 전경



우리 나라도 2020년에 원자력을 이용한 수소생산시스템을 완성한다는 목표 아래 금년부터 정부과제로 '원자력 이용 수소생산시스템 개발사업(Nuclear Hydrogen Development and Demonstration, 이하 NHDD)'을 추진하기 시작했다.

이 사업은 원자력수소 생산기술 개발 및 실증으로 수소생산실증로 설계 및 건설, 실증, 초고온가스로 핵심기술개발, 피복입자핵연료 기술개발 및 제조, 열화학수소제조 핵심기술개발 및 실증을 최종목표로 제시하였다. 구체적으로는 2017년까지 수소생산에 적합한 실증로와 수소생산플랜트를 건설하고 2020년까지는 실증을 완료한다. 또한 여기에 사용할 핵연료도 개발하고, 제조하도록 하였다.

현재의 연구방향은 각종 관련 요소기술을 파악, 개발하여 기술적 능력을 향상시키려는 노력과 함께 수소생산용 고온가스원자로로서 우리나라의 2020년대 수소수요에 적합한 단위 모듈의 용량을 조사하여 수요자의 요구조건을 파악하고, 펄스형과 프리즘형 중 어느 노형이 수소생산에 적합한 것인가 하는 기술적 적합성, 건설을 위한 인허가 가능성, 부족한 외국기술의 도입 가능성을 검토하고

있다. 또한, 국내 핵연료 생산을 위한 선행연구로서 TRISO 제조기술과 황산-요오드 열화학법에 대한 기초 실험을 수행하여 전체 수소생산 플랜트의 기본 디자인데이터를 생산하고 있다.

각종 설계코드의 개발 및 검증, 설계데이터베이스의 확보를 위해서는 실험이 불가피하며 고온가스로에 관련된 실험을 수행할 수 있는 장치가 국내에는 전무하므로 제4세대원자력 VHTR 참여국을 비롯하여 고온가스실험로인 HTR-10을 운전하고 발전로 HTR-PM을 개발중인 중국과도 협력하여 핵심기술을 확보할 예정이다.

고온가스로 개발 위한 기본 데이터 생산

NHDD계획의 목표는 수소생산에 적합한 고온가스로를 개발하는 것이며 제4세대원자력 VHTR계획과는 많은 부분이 공통된다. 더구나, 고온가스로기술에 대해 집중적인 연구개발을 수행한 적이 없는 우리나라의 입장에서는 선진외국의 경험, 실험장치 등을 공유하고 GIF/VHTR 목표 중의 하나인 과거 기술의 재현에 동참함으로써 설계, 인허가, 운전에 필요한 방법론과 데이터베이스의 개발 및 검증, 이를 위한 실험시설의 공동이용을 할 수 있다.

또한, 상용로를 건설하기 위해 필요한 재료의 표준규격 정립, 무누설격납용기를 채택하는 문제, 발전소 비상계획 구간의 설정 등 경제성에 중대한 영향을 미치는 인허가 이슈에 대해 공동으로 해결책을 찾을 수 있을 것으로 기대한다.

우리나라의 NHDD 뿐만 아니라 미국의 NGNP 및 NHI 계획, 일본의 HTTR를 중심으로 진행중인 원자력수소개발, 프랑스의 ETDR 계획, EURATOM의 HTR 계획, 남아공의 PBMR 등 각국의 독자적이고 구체적인 개발계획 아래 GIF/VHTR 국제공동연구를 수행하므로 GIF/VHTR의 진행은 다른 어떤 GIF 노형보다 구체적이고 집중적인 것이다.