



중국의 고온가스로(HTGR) 개발 현황

서 중 석

한국원자력산업회의 사무총장

최근에 발효된 기후 변화 협약에 대처할 수 있는 청정 에너지원으로서 수소가 큰 기대를 받고 있다. 이에 따라 미국을 비롯한 선진국들은 수소 생산과 수소 활용을 위한 기술 개발을 적극적으로 추진하고 있다. 수소 생산 방법으로는 탄화수소에 고온의 수증기를 붙여넣어 수소를 분리해 내는 증기개질법이 현재로서는 가장 효율적인 방법으로 알려져 있으며, 고온가스로(HTGR)가 가장 경제적인 열원으로 대두되고 있다.

중국은 2020년까지 3000만kW의 신규 원자력발전소(주로 PWR) 건설을 계획하고 있으며, 발전과 수소 생산을 위한 열을 동시에 공급할 수 있는 고온가스로의 상용화 개발 프로그램을 추진 중이다. <Nuclear Engineering International> 2005년 3월호에 게재된 중국의 HTGR 개발 관련 기사를 소개한다

북 경 칭화대학 내 「원자력 및 신에너지 기술연구소(INET)」는 10MWt HTGR 시험 모듈인 HTR-10을 건설하여 2003년부터 운전을 하고 있는데, 이 HTR-10이 중국의 고온가스로 프로그램 성공의 열쇠가 되고 있다.

HTR-10은 27,000개의 구형 핵연료(Spherical Fuel Elements)를 사용하는데, 이들 각 구(또는 펠)에는 약 8,300개의 코팅된 우라늄 입자들이 들어있다.

HTR-10은 헬륨 가스로 냉각되

기 때문에 상 변화 없이 고온에도 달할 수 있다. 원자로는 고유 안전성을 갖도록 설계되었으며 재래식 경수로보다 효율이 높다

냉각재 상실 경우에도 핵연료 온도가 1600°C 이하로 유지된다. INET 기술자들은 HTR-10이 정지되지 않은 상태에서 헬륨 순환을 중지시키는 시험을 수행하여 이러한 특성을 입증하였다.

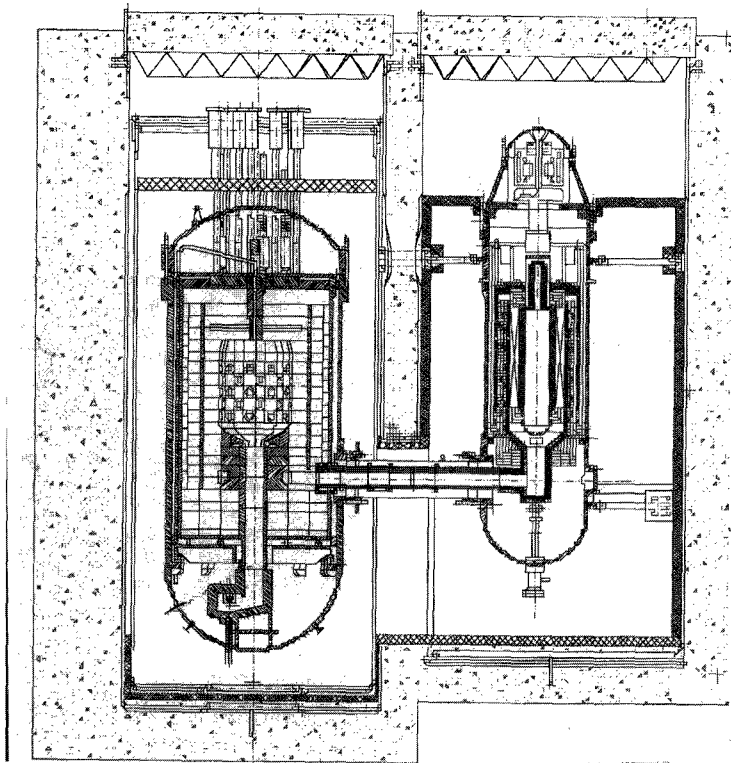
중국이 HTGR을 선택한 이유는 700°C 이상이 되는 냉각재 온도 덕분에 높은 효율의 발전과 산업체가 필요로 하는 프로세스 열 공급이 가

능하기 때문이다.

또한 HTGR에 모듈화 설계를 적용함으로써 안전성 향상과 비용 절감 이외에도 건설 시공과 용량 증가가 용이하도록 하였다.

중국은 발전용 경수로 보완과 산업체가 필요로 하는 다양한 온도의 프로세스 열 생산을 위하여 HTGR을 사용할 계획이다

HTGR 기술에 관한 중국에서의 연구 개발은 1970년대에 시작하였다. 1992년에 HTR-10 프로젝트의 최종 승인이 있기까지 연구 개발은 핵연료 제조, 헬륨 기술, 설계 방법



〈그림 1〉 HTR-10의 1차 회로 단면도

론, 개념 설계 및 잠재적인 응용 연구에 집중되었다

HTGR-10은 국가 고도 기술연구 개발 프로그램(National High Technology Research and Development Program)의 핵심 부분이었다. HTGR-10 건설의 주요 목적은 아래와 같다.

- HTGR의 설계, 건설 및 운전 노하우 확보
- 시험 설비 구축
- HTGR의 고유 안전성 증명
- 열병합 발전과 가스 터빈 기술 시험
- 고온 프로세서 열 응용 지원

설계 특성

HTR-10 노심과 증기발생기는

서로 인접한 2개의 압력 용기 내에 들어있으며, 이 두 용기는 고온 가스 도관으로 사용되는 용기에 의해 서로 연결되어 있다.

이들 3개 용기는 저온 헬륨(약 250℃)이 증기발생기 상부에 설치된 순환기를 떠나면서 저온 헬륨과 접촉을 하게 된다.

헬륨은 주순환기에 들어가서 고온 가스 덕트의 외부 동축 배관으로 흘러 들어가기 전에 가압된다.

헬륨은 측면에 설치된 반사체 내의 채널에 들어가 이 채널을 따라 하부에서 상부로 흐른다.

저온 가스는 원자로심에 직접 유입되어 700℃로 가열된 페블베드(Pebble Bed)를 위에서 아래로 통과한다.

고온 헬륨은 반사체 하부에 있는

고온 가스실을 떠나 고온 가스 덕트를 통하여 증기발생기로 흘러 들어간다. 이곳에서 열이 2차 계통의 물로 전달되어 헬륨의 온도는 250℃ 정도로 다시 떨어진다

원자로심은 직경이 1.8m, 평균 높이가 1.97m이고 체적은 5.0m³이다. 원자로 열출력은 10MW이며 평균 출력 밀도는 2MW/m³이다.

노심 구조물의 주재료는 흑연이며, 상하부 및 측면 반사체의 재질이 흑연이다.

측면 반사체는 반사체 외부를 둘러싸고 있는 22.5cm 두께의 붕소가 주입된 흑연 벽돌들을 포함하여 두께가 100cm 정도 되며, 노심 구조물과 원자로 압력 용기의 열 및 중성자 차폐 기능을 수행한다.

모든 흑연과 흑연 벽돌들은 키-키웨이 시스템으로 연결되어 서로 상대적 위치를 유지할 수 있도록 되어 있다. 세라믹 노심구는 원자로 압력 용기에 의해 지지되는 금속 노심 용기에 내장되어 있다

직경 6cm의 구형(spherical) 핵연료 엘리먼트(element)는 저밀도 내고온 흑연으로 코팅된 직경 0.5mm의 UO₂ 핵(kernel)이 들어있는 트리소(Triso)형 입자들을 내포하고 있으며, 내부는 고밀도 내고온 흑연층과 실리콘 카바이드로, 그리고 외부는 고밀도 내고온 흑연층으로 코팅되어 있다.

각 핵연료 엘리먼트에는 농축도

〈표 1〉 HTR-10 주요 설계 사양

변수	단위	설계치
원자로 열출력	MW	10
노심 용적	m ³	5
평균 출력 밀도	MW/m ³	2
1차 계통 헬륨 압력	MPa	3
헬륨 입구 온도	℃	250/300
헬륨 출구 온도	℃	700/900
헬륨 유량	kg/s	4.3/3.2
핵연료		UO ₂
U-235 농축도	%	17
구형 핵연료 직경	Mm	60
구형 핵연료 element 수		27,000
재장전 모드		Multi-pass, 연속
평균 방출 연소도	GWd/t	80

가 17%인 우라늄 5g이 들어있으며, 원자로심에는 약 27,000개의 핵연료 엘리먼트가 장전되어 있다. 평균 방출 연소도는 80GWd/t이다. 핵연료 엘리먼트는 노심내를 멀티 패스 패턴(multi-pass pattern)으로 움직인다.

핵연료 엘리먼트는 펄스공기 핵연료취급 시스템에 의하여 계속하여 장전, 방출된다.

방출된 핵연료 엘리먼트가 연소도 측정 결과 설계 연소도에 도달하지 않은 것으로 판명되면 공기 주입식에 의하여 노심으로 핵연료 엘리먼트를 되돌려 보낸다

HTGR-10에는 2개의 독립된 원자로 정지 시스템이 있다.

첫 번째 시스템은 10개의 제어봉으로, 두 번째 시스템은 160×60mm 크기의 7개 구멍에 들어있는 작은 중성자 흡수볼(absorber ball)로 구성되어 있다.

이들 원자로 정지 시스템은 모두 측면 방사체에 설치되어 있으며, 원자로의 상온 정지 상태가 유지되도록 한다. 원자로는 높은 부반응도 계수를 가지며 붕괴열 제거를 위하여 헬륨 냉각재의 순환을 필요로 하지 않는다. 이것은 헬륨 순환기가 정지되면 원자로도 따라서 정지된다는 것을 의미한다.

원자로 제어 및 보호 계통은 디지털 시스템이며 컴퓨터에 의해서 자료가 관리 및 기록된다.

HTR-10은 일체형 증기발생기를 가지고 있다. 증기발생기는 일관형(once-through type)으로서 증기발생기 압력 용기 내에 있는 2개의 절연통 사이에 원형으로 배열된 30개의 나선형 튜브를 포함하고 있다. HTR-10의 붕괴열 제거 시스템은 전적으로 수동형으로 설계되었다.

압력 상실 사고가 발생하면 붕괴열이 전도와 복사에 의하여 노심 구조물을 거쳐 표면 냉각 시스템이 설치되어 있는 콘크리트 캐비티 벽을 통하여 원자로 압력 용기 외부로 방사된다.

물의 자연 순환 원리에 따라 동작하는 이 시스템은 붕괴열을 공기 냉각기를 통하여 대기로 방출하여 원자로 용기와 콘크리트 캐비티 구조물을 과열로부터 보호한다

원자로는 압력 및 누설 밀봉을 위한 격납 건물을 가지고 있지 않다.

원자로, 증기발생기 및 기타 1차 계통 압력 경계 내 기기들을 둘러싸고 있는 콘크리트 캐비티들이 격납 건물 역할을 한다. 이들 콘크리트

캐비티들은 사고 환기 시스템과 더불어 환경으로의 방사능 유출을 막는 마지막 장벽이다.

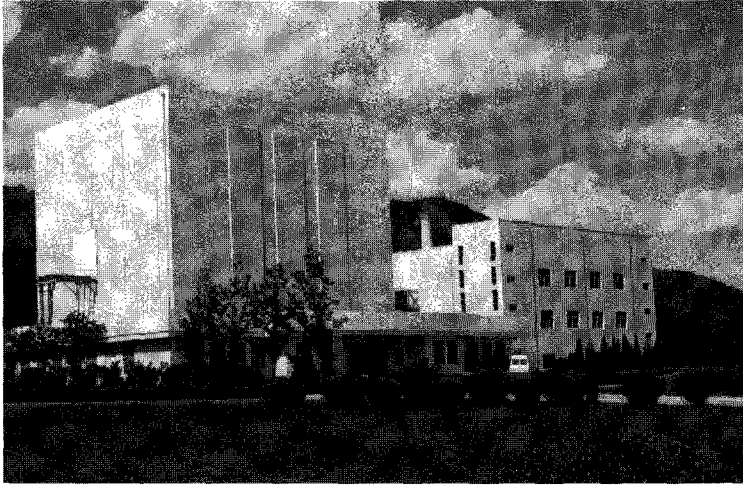
2차 계통에는 열 병합 발전을 위한 3000kW 표준 과열 증기 터빈 발전기가 설치되어 있으며, 온도 440℃ 및 압력 4.0MPa 과열 증기를 사용하여 전 출력이 약 2500kW의 전기를 생산한다.

열 병합 모드 발전 경우에는 전기와 지역 난방을 위한 고온수를 공급할 수 있다. 〈표 1〉은 HTR-10의 주요 설계 사양을 보여주고 있다

건설과 인허가

INET은 1991-1992 동안에 타당성 연구와 필요한 행정적 절차를 완료하였다. HTR-10 건설 허가를 국가회의(State Council)로부터 1992년 3월에 발급받았다.

수 개월 후 INET은 환경보호청(NEPA: National Environmental Protection Administration)에 환경 영향 보고서를 제출하였으며, 동 보고서는 전문위원



HTR-10 전경

회의 검토를 거쳐 1992년 12월에 승인을 받았다.

부지 및 내진 보고서가 국가핵안 전국(NNSA: National Nuclear Safety Administration)에 제출되었으며, 1992년 12월에 북경 서북부에 위치한 부지 승인을 받았다.

개념 설계는 Siemens/Interatom과 공동으로 수행하였다. NNSA가 승인한 기준에 부합하도록 기본 설계를 완료한 후 HTGR 건설 및 운전 경험을 보유하고 있는 Siemens/Interatom에 설계 검토를 의뢰하여 1994년 8월에 완료하였다.

INET은 이후 중국 학술 기관들과 상세 설계를 수행하였다. 칭화대학의 건축연구소는 원자로 빌딩 설계를, 그리고 중국전력기술수출입 공사는 전력 변환 계통 설계를 담당하였다. 나머지 계통들의 설계는

INET 산하의 팀들이 맡아 수행하였다

HTR-10은 중국 내 다른 원자로에 적용되는 동일한 인허가 절차를 따라서 건설되었다. 즉, 건설 허가 와 핵연료 장전 허가 취득이다.

INET은 예비 안전 분석 보고서를 1993년 12월에 NNSA에 제출하였으며, NNSA는 NEPA의 환경 영향 평가 보고서 승인 후인 1994년 12월에 건설 허가를 발급하였다.

최초 콘크리트가 1995년에 타설되어 1차 계통(Nuclear Island) 건물이 1997년 10월에, 그리고 2차 계통(Conventional Island) 건물이 1999년에 준공되었다.

HTR-10 주기는 상해에 소재하고 있는 여러 회사들에 의해 제작되었으며, 3개의 압력 용기와 증기 발생기가 1998년 11월에 설치되었다.

금속 및 세라믹 원자로심 구조물은 1999년 12월에, 그리고 제어봉 계통, 흡수볼(absorber ball) 계통, 헬륨 순환기와 전력 변환기들의 설치가 2000년 5월에 완료되었다.

최종 안전 분석 보고서와 환경 영향 평가 보고서가 1999년 10월에 각각 NNSA 및 NEPA에 제출되었다.

시운전(Commissioning)

HTR-10의 시운전은 3단계로 진행되었다.

기기 및 계통을 위한 가동전 시험(pre-operational test), 최초 핵연료 장전, 최초 임계, 영 출력 시험, 고온 및 저출력 시험, 그리고 마지막 단계인 전출력 운전 시험이다.

가동전 시험을 2000년 10월에 완료하고 핵연료 장전을 11월에 시작하였다.

처음에는 방출관과 노심 하부에 핵연료가 들어있지 않은 탄소볼(dummy ball)을 장전한다.

그리고 나서 서서히 임계에 접근할 수 있도록 핵연료와 탄소 모조볼을 섞어서 장전하여 2000년 12월 21일에 최초 임계를 달성하였다.

HTR-10은 2003년 1월 전출력에 도달하여 계통에 전력 공급을 시작하였다. HTR-10 핵연료는 러시아 Nikiet(Russian Institute of Design and Power Engineering)의 IVV-2M 원자로에서 정

상 및 사고 시험 결과 모두 기술 사양을 만족하는 것으로 확인되었다

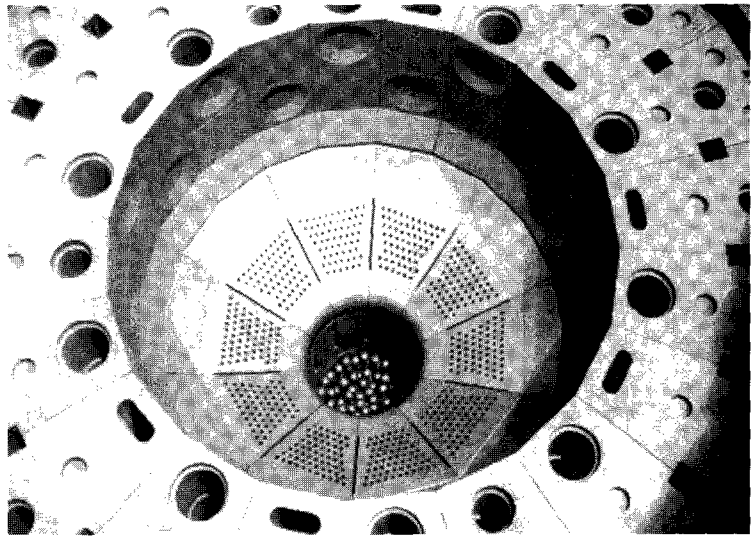
현재 HTR-10은 HTGR의 운전 특성과 잠재력을 연구하고 HTGR에 대한 이해를 높이는 데 사용되고 있다.

지금까지 여섯 가지의 안전성 실증 시험을 실시하였다. 이들 시험은 30% 정격 출력에서 헬륨 상실, 정격 출력에서 터빈 정지, 30% 정격 출력에서 소의 전원 상실, 30% 정격 출력에서 원자로 정지 없이 헬륨 순환기 정지, 30% 정격 출력에서 원자로 정지 없이 반응도 주입됨(5mk), 30% 정격 출력에서 출구 차단 밸브가 열린 상태에서 헬륨 순환기를 정지를 포함하고 있다.

이들 안전성 시험 결과로부터 HTR-10의 고유 안전성 특성을 확인하고, HTR-10 설계에 사용된 컴퓨터 코드들의 정확도를 입증하였다.

한편 가스 터빈 사이클을 가진 HTGR의 운전 경험을 축적하기 위하여 2단계 중국 기술 개발 프로그램(China High Technology Programme: 2001-2005)에 HTR-10을 위한 가스 터빈 사이클 프로젝트가 포함되었다.

INET은 HTR-10을 위한 가스 터빈 사이클의 출력 변환기 개념 설계 개발을 위하여 OKBM(러시아)과 2000년 말에 계약을 체결하여 2002년에 공동으로 개념 설계 개



HTR-10 노심

발을 완료하였다.

INET은 2003년에 기본 설계를 완료하였고, 현재 주기는 제작중에 있으며 2006년에 운전이 시작될 예정이다

향후 계획

모든 시험들의 목적은 HTGR의 상용화를 위한 발판을 준비하는 데 있다. 국가전력공사(State Power Corporation)와 INET은 중국 실정에 가장 적합한 HTGR 시스템을 선정하기 위한 예비 조사를 수행하였다.

국가개발/개혁위원회는 2007년에 실증 HTGR (Demonstration HTGR)의 건설을 시작하는 프로젝트를 지지하고 있다.

실증 HTGR은 2차 계통이 증기 터빈 사이클인 페블 베드형(pebble

bed type) HTGR, 즉 HTR-PM이 될 것이다. HTR-PM은 아래와 같은 장점을 가지고 있다:

- 낮은 비용과 적은 환경 영향으로 전력 생산
- 안전성이 높아서 도시, 화학 공장 및 정유 시설 근방에 건설 가능
- 원유 정제, 화학 산업계 및 수소 생산이 필요로 하는 열을 화학 연료를 사용하지 않고 생산

HTR-PM 개발이 이미 시작되었다. 2004년에 중국환경그룹(CHNG), 중국핵설계/건설공사(CNECC) 및 칭화대학은 공동으로 HTR-PM을 건설하기 위한 협정에 서명하였다. HTR-10에 기반을 두고 있는 HTR-PM은 출력이 195MWe인 모듈화 페블베드 HTGR으로서, 초기에는 증기 터빈 순환 시스템을 사용하게 될 것이다.



〈표 2〉 HTR-PM 설계 사항

Parameters	Unit	Value
Reactor thermal power	MW	458
Designed operational lifetime	years	60
Expected load factor	%	85
Diameter of fuel elements	mm	60
Nuclear fuel		UO ₂
U-235 enrichment	%	9.08
Heavy metalloading per fuel element	g	7
Number of fuel balls		520,000
Number of graphite balls		225,530
Average discharge burnup	GWd/tU	80
Fuel loading scheme		Multi-pass(6 times)
Number of fuel balls discharged each day		4821
Number of fresh fuel balls required each day		804
Number of graphite balls discharged each day		2091
Diameter of central graphite reflector	cm	220
Inner/outer diameter of fuel zone	cm	220/400
Average height of active core	cm	1100
Mean power density of fuel zone	MW/m ³	4.75
Number of control rods		18
Number of absorber ball units		18
Reactor pressure vessel		
Inner diameter	m	6.7
Height	m	23.9
Primary helium pressure	MPa	7.0
Helium temperature at reactor outlet	℃	750
Helium temperature at reactor inlet	℃	250
Primary helium flow rate	kg/s	176
Maximum fuel temperature under normal operation	℃	1055
Maximum fuel temperature under accident	℃	1520
Main steam flow rate	t/h	559.4
Feedwater temperature	℃	205.3
Main steam pressure at turbine inlet	MPa	13.5
Main steam temperature at turbine inlet	℃	538
Generator power	MWe	195

HTR-PM이 추구하는 목표는 다음과 같다.

- \$1500/kWe 수준의 투자비
- 4년 건설공기 (최초 콘크리트

타설부터)

- 0.5/kWh 수준의 전기 요금
- 사고에 대비한 비상 계획 불필요
- 모듈 설계에 따른 건설 유연성
- 경제적인 부지 및 용수 사용

위에서 언급한 3개 기관은 HTR-PM 프로젝트를 위하여 회사를 설립하였으며, 각 기관의 지분은 CHNG-50%, CNECC-35%, 칭화대학-5%. 나머지 10%는 신규 투자 기관이 부담하게 된다.

타당성 조사에서 HTR-PM 후보 부지로서 2개 장소가 선정되었다. 하나는 안위성에, 그리고 다른 하나는 산동성에 위치한다. 2005년 초에 사업 설립과 부지선정을 위한 신청서를 제출하여 승인을 받아, 2007년에 최초 콘크리트를 타설하는 일정으로 사업이 추진되고 있다.

모든 것이 계획대로 진행된다면 2010년에 최초 임계에 도달하여 발전소가 준공될 것이다.

HTR-PM 사업은 중국의 HTGR 기술의 상용화를 촉진하는 데 목적을 두고 있다. 앞으로 실증 발전소로부터 습득한 경험을 바탕으로 4-모듈 또는 6-모듈 수기를 대규모로 건설하게 되면 HTGR의 발전 점유율이 크게 증가하게 될 것이다.

HTR-PM의 열 출력은 458MWt, 그리고 전기 출력은 195MWe이며, 원자로는 85% 부하율에서 60년 운전 수명을 갖도록 설계된다. ☞