

## 모듈형 高温가스冷却爐(MHTGR)

**모**듈형고온가스냉각로( Modular High-Temperature Gas-cooled Reactor, MHTGR)의 개념은 가스냉각로에 대한 30년이 넘는 설계, 개발 및 운전경험에 기초를 두고 있다. 단상 헬륨냉각재와 열용량이 큰 흑연감속재의 기본특성과 함께 동 개념은 내화피복입자료를 사용함과 동시에 피동적 열 제거를 위해 채택된 원자로 규모, 형태 및 출력밀도 등을 통하여 발전되어 왔다.

MHTGR은 미국에너지성이 General Atomics社, ABB-CE社, Bechtel National社, Stone & Webster Engineering社 그리고 Oak Ridge 국립연구소를 포함한 산업팀과 개발중에 있으며, 동 원자로의 개발과정에서 전기사업자와 사용자들의 요구조건 및 의견은 잠정적 소유주와 운전자들을 대표하는 가스냉각로협회(GCRA)를 통해 제공되어 왔다.

### 발전설비개요

MHTGR의 참조발전소는 4개의 동일 열출력 350MWt 원자로모듈

로서 순진기출력 합계는 538MWe이다. 각 모듈은 수직원통형 콘크리트 사일로에 설치되며 각 사일로는 개별통풍쇄구구조로 되어 있다.

4개의 원자로구조물은 헬륨정제, 정지냉각, Hot Cell 보수, 출력조정, 난방과 환기 및 공기조절계통을 내장하고 있는 다른 구조물과 함께 1차계통을 구성하고 있다. 4개의 원자로구조물과 원자로작업구역은 같은 덮개로 덮혀 있어 보조 크레인과 연료취급장비를 공용으로 사용할 수 있다.

에너지변환구역 또는 터빈계통은 안전성과는 무관하게 1차계통과 분리되어 있어 건설 및 운전에서 재래식 화석연료 사용시의 기준을 적용할 수 있다. 터빈계통을 1차계통에 인접하여 설치함으로써 터빈건물과 개별 원자로건물 사이의 주증기 및 급수통로를 가능한 짧고 직선으로 하였다. 에너지변환구역에는 2대의 275MWe급 Non-Reheat 터빈발전기가 있는데 각각 한 쌍의 원자로와 연결되어 있다.

1차계통부품들은 3개의 강철용기 즉 원자로용기, 증기발생기용기 그리고 대각연결용기에 내장되어 있

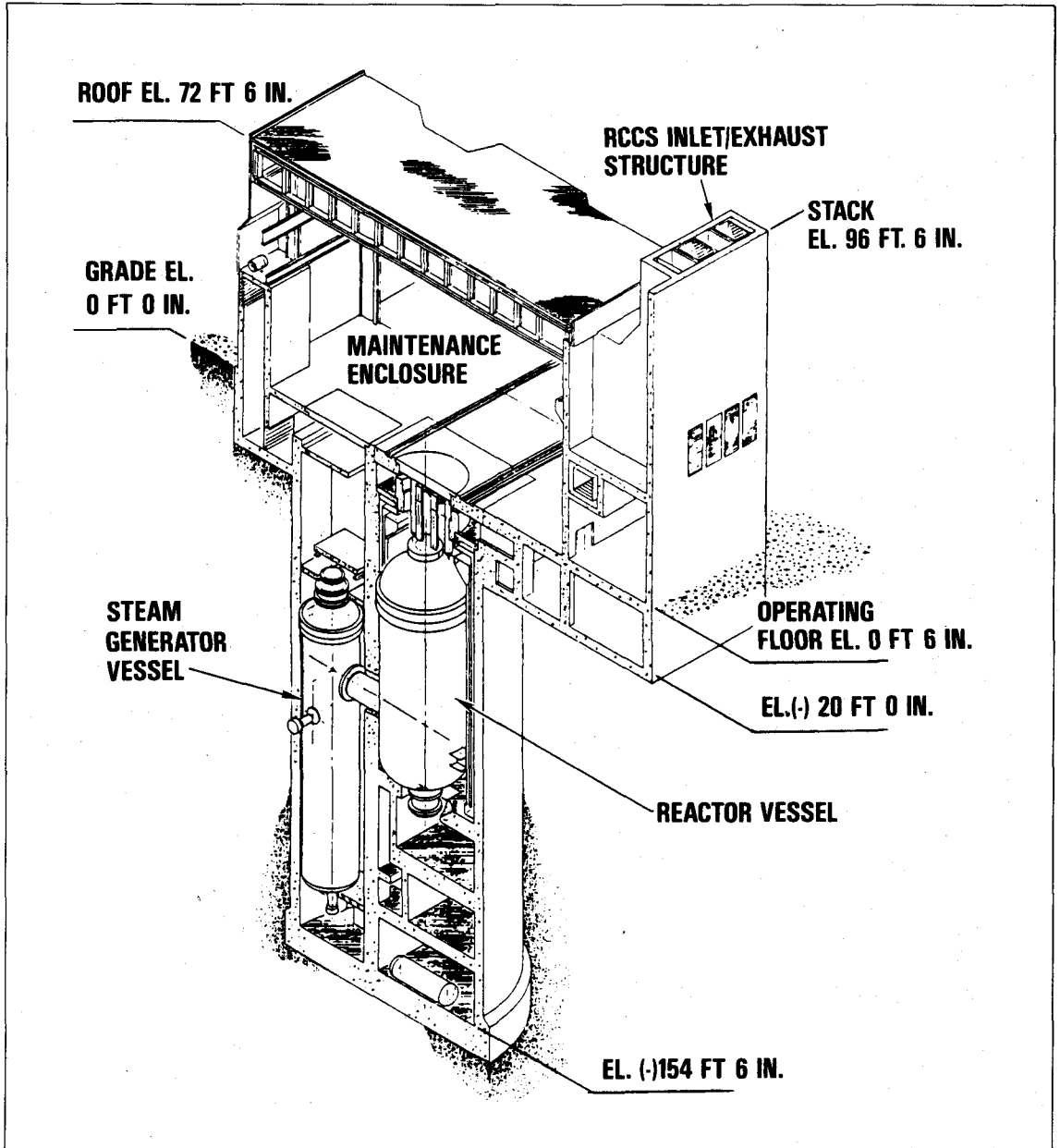
다. 원자로노심은 Fort St. Vrain 원자력발전소(현재 가동중지)에서 사용된 것과 같은 6각 각주형 흑연블록의 결합체로 되어 있다.

연료장전구역은 3개의 환형고리 안에 배열된 연료블록으로 되어 있으며 노심중앙 및 외곽부분은 연료가 장전되지 않은 반사판 블록으로 구성되어 있다. 노심부분은 강철노심원통에 둘러싸여 비절연 원자로 압력용기 내에 내장된다.

연료는 2가지의 피복입자로 되어 있다. 핵분열성 연료는 19.9% 농축우라늄 옥시카바이드 커널이고 핵분열증식용 연료는 토륨옥사이드 커널이다. 이 입자들은 서로 결합되어 연료봉을 형성하여 흑연 연료블록의 끝이 막힌 수직구멍 속에 삽입되며 수직으로 된 냉각재구멍은 연료블록을 통과한다.

연료주기는 3년 주기로 재처리를 하지 않으며 매 20개월마다 노심의 절반을 재장전한다. 노심반응도는 내부 및 외곽의 반사판의 제어봉에 의해 조절된다. 여유정지계통은 노심공간 상부의 Hopper에 들어있는 붕소봉을 사용함으로써 다양한 반응도제어를 가능하게 한다.

헬륨은 노심을 지나 노심 하부공간까지 흘러내려 가서 축방향 연결 압력용기의 내부를 통과해서 증기발생기로 흘러간다. 헬륨은 증기발생기 나선형 직류세관다발을 통해 아래로 흘러내려 간다. 급수는 증기발생기의 하부에서, 증기는 상부에서 배출된다. 냉각헬륨은 세관다발 외곽을 거쳐 상승했다가 마그네틱 베어링 장착 전기모터로 구동되는 일단축형 압축기로 흘러가며,



〈그림 1〉 모듈형고온가스냉각로의 원자로건물 설계도(제너럴 아토믹社 제공)

Shroud 및 흐름장치가 헬륨을 축 방향연결 압력용기 외곽으로 유도한다. 원자로용기로 들어갔던 헬륨은 노심 Barrel 외곽을 따라 상향, 노심 상부까지 올라간다.

원자로의 잔열제거는 3가지의 다른 경로를 통해 이루어진다. 증기 발생기와 주순환기로 구성되는 1차 열전달계통은 발전소 정지기간중 원자로를 냉각하는 경우에 통상 사

용된다. 수냉열교환기와 원자로용기 바닥에 위치한 마그네틱 베어링이 있는 전기모터에 의해 구동되는 1단원심형 압축기를 포함한 분리정지냉각계통은 주열전달계통의 보조

역할을 한다.

만약 이 2개의 강제냉각계통에 이상이 생기면 원자로용기 외부의 하부 콘크리트구조물에 위치한 원자로공동냉각계통(RCCS)이 발전소의 잔열을 제거한다. RCCS는 폐쇄배관을 통하여 외부 공기를 자연적으로 하향시키는 상부 흡입구조물과 더워진 공기가 상부 배기구조물을 통해 환류되기 전에 하부 노심공동 주위를 감싸는 패널로 되어 있다.

이 RCCS는 완전 피동형으로 열은 노심에서 RCCS로 전도, 대류, 복사에 의해 전달된다. 이 계통에는 제어장치나 밸브, 환풍기 또는 다른 능동적 부품은 없다. RCCS는 MHTGR에서 사용하고 있는 안전관련 열제거계통이다.

발전소 제어, 자료 및 계장계통은 통합된 최신 상업용 마이크로프로세서를 이용한 분산제어시스템으로, 복수 원자로, 복수 터빈발전기가 2명이 운전하는 하나의 제어실에서 자동제어와 운전이 가능하다. 발전소 제어, 자료 및 계장계통은 자동 또는 발전소 운전원의 명령에 따라 제어, 감시 및 자료관리를 수행하며 제어, 자료처리와 신호전송에는 디지털 컴퓨터를 사용한다.

원자로보호계통은 분리되어 기능적으로도 발전소 제어계통과는 독립되어 있으며 발전소 공정변수를 감지하고 비정상적인 상태도 감시하며 원자로보호작동을 주도한다. 각 원자로모듈에는 분리된 독립 원자로보호계통이 있어 보호작동을 지시하는 4개의 분리(다중)안전신

호계통과 4개 중 2개의 동일신호에 의해 원자로를 정지시키는 다중 Solid-State-Logic 신호체계로 되어 있다.

### 안전특성

MHTGR의 구체적 안전특성은 단상의 불활성 헬륨냉각재, 연료의 고온, 고압 내구성, 흑연노심과 지지구조물의 고열용량 및 고온안전성을 이용하는데 있다.

MHTGR에서 사용되는 안전성 원리는 전운전기간과 허가기준 조건하에서 핵종누출의 원천적 봉쇄 즉 내화성 피복연료입자 내부에 감금함으로써 제어하는 것이다. 동시에 방사성핵종의 누출을 막는 재래식 차폐방법도 유지하여 추가의 안전성 여유를 확보하고 있다. 연료 건전성 유지와 연료 내부에 핵분열 생성물이 머물게 함으로써 모든 발생가능한 사고의 경우에도 공중의 안전성에 대해 납득할 수 있게 된다.

모듈당 소규모 단위용량, 환형노심, 비단열 원자로용기, 큰 음(-)의 반응도계수 및 피동적 잔열제거 특성을 갖고 있는 하부 사일로 설치 등을 포함한 선택설계로 안전성이 더욱 향상됐다. 이러한 개념의 도입으로 발전소 외부의 국민대중의 건강과 안전성 확보를 위한 능동적 계통 또는 운전원 조치에 대한 의존도를 최소화한다.

발생 가능성이 극히 희박한 사고까지 광범위한 세부평가로 방사성핵종을 연료내부에 확실히 감금하려는 MHTGR의 고유기능에 대해

심도 있게 고찰할 수 있게 됐다. General Atomics社에 의하면 허가 기준 외의 사고로 인해 일반공중에 미치는 잠재위험은 무시해도 좋은 것으로 밝혀졌으며, 핵분열생성물질을 연료입자 내부에 감금할 수 있는 능력을 저해할 지도 모를 어떠한 사고의 발생가능성도 확인된 바는 없다고 한다. 더구나 발생가능성이 극히 희박한 기상사고의 경우에도 주민의 소개나 대피 등의 조치가 필요없을 것으로 보고 있다.

### 설계현황

참조용 350MWt MHTGR은 최고 수준의 요건을 충족하는 설계정의 및 시행가능 여부 평가에 중점을 두고 있다.

1990년에 끝난 비공식 가능성검토에서는 MHTGR의 경제적 경쟁력 제고를 위하여 동 설계를 더욱 최적화할 수 있다는 결론을 내렸다.

이 연구결과를 수용하여 참조용 MHTGR의 설계최적화와 원가절감연구가 추진됐으며 주된 목적은 안전특성을 유지하면서 전반적으로 발전원가를 절감하는데 있었다. 동 연구결과로 참조용 350MWt 발전소에 대해 몇가지 중요한 변경을 권유하게 됐는데 주요 권유사항은 원자로 모듈 출력력을 350MWt에서 450MWt로 증가시키는 것으로, 이는 노심출력밀도를 변경하지 않고도 노심의 연료칼럼을 66개에서 88개로 증가시킴으로써 가능하다.

4개 모듈발전소의 전기출력은 53

8MWe에서 692MWe로 증가했으며 연료주기도 저농축우라늄/토륨 주기로 저농축우라늄/천연우라늄 주기로 변경함으로써 안전여유를 더욱 향상시켰다.

대규모 설비의 에너지변환구역에 대한 권유사항으로는 4개의 독립원자로 터빈을 설치하는 것이다. 이렇게 표준화된 1 원자로-1 터빈구조는 보다 적은 단위의 출력을 증가(약 175MWe)시킬 경우에 MHTGR의 유연성을 제고시킨다.

General Atomics社에 따르면 동권유된 변경사항으로 발전원가를 현저하게 감소시키는데 따른 규정된 안전수행능력의 유지와 MHTGR의 경쟁력제고 여부는 현재 확인과정에 있으며 이 확인이 완료되는 1992년에는 최종설계추천을 하게 될 것으로 기대된다고 한다.

## 허가상황

350MWt MHTGR은 원자력규제위원회(NRC)에 의해 확률론적 안전성평가서(Probabilistic Risk Assessment)와 함께 이렇게 독특한 개량형 원자로에 적용하기 위해 제의된 규제기준과 예비안전성보고서를 포함한 상세제출서류를 기초로 광범위하게 검토됐다.

동 검토와 독립적 분석의 후속조치로 NRC는 사전적용안전성평가보고서(PSER) 초안을 발급하면서 동 설계가 안전성을 전반적으로 향상시켜야 하며 재래식 격납용기와 국민의 대피, 소개와 같은 발전소 외부 긴급구조훈련 없이도 최고수준의 안전성을 유지할 능력이 있어

야 한다고 결론을 내렸다. 1993년 4월에 NRC의 최종 PSER 발급목표와 함께 사전적용검토과정에서 도출된 문제점과 관련, NRC와 허가를 위한 노력을 계속 기울이고 있다. PSER을 발급받으면 1996년 10월에 예비표준안전성분석보고서(PSSAR)를 제출할 계획이며 약 3년 후에는 예비설계인증(PDA)도 받게 될 것으로 보인다.

최종설계인증(FDA)의 발급을 위해 2000년 9월에는 최종표준안전성

분석보고서(FSSAR)가 제출될 계획이다. 설계인증서는 분리효과시험과 연계하여 MHTGR의 상업화를 위하여 실증시험요건을 만족하는 시운전시험과 출력상승시험을 거쳐 2003년 12월에는 발급될 것으로 기대된다. 미국에너지성(DOE)에 의하면 MHTGR이 신발전용원자로(NPR)로 선정되지 않는다면 MHTGR 계획을 재평가하고 재구성해야 할 것이라고 한다.■

## AECL社의 Candu 3型 原子爐

CandU 3형 가압중수로는 CandU 설계의 최신형 혁신적 원자로이다. 캐나다원자력공사(AECL)에 따르면 이는 탁월한 CADD 설계기법을 활용하여 사전에 조립된 소형의 경제적인 고성능 450MWe 급 발전설비로서 단위기당 인구 20만명의 도시에 필요한 전력수요를 공급할 수 있다고 한다.

AECL社에 의하면 이 모듈형 발전설비는 최초의 콘크리트타설에서부터 3년 후면 건설될 수 있다고 한다. 모든 CandU 설계와 같이 CandU 3형도 성형가공이 용이한 천연우라늄 연료다발을 사용하고 있다.

그밖에 두드러진 특징으로는 출

력중 연료재장전, 노심내의 교체가 가능한 지르코늄합금 압력세관, 경수로보다 낮은 중수로 냉각재의 온도 및 압력과 저온과 저압의 중수로감속재 등이 있다.

연간보수정지를 감안할 때 동 원자로의 설비이용률은 94%가 된다.

## 설계 및 건설

CandU 3형은 고성능 신형 컴퓨터 기술 시스템인 CANDID(CandU Integrated Design)를 이용하여 개발됐다. 개량된 설계공법으로 표준화되고 완벽하게 통합시킨 컴퓨터 데이터베이스에 입각하여 도면과 절차서를 작성할 수 있게 했다.