

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.

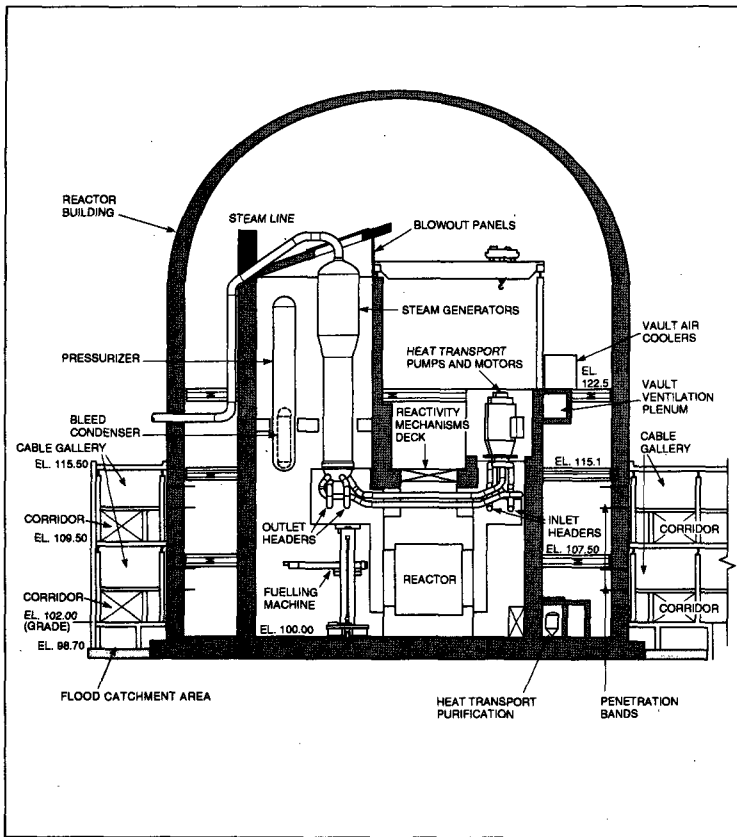
그밖에 두드러진 특징으로는 출

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.



〈그림 1〉 CANDU 3형 원자로건물 단면도(AECL社 제공)

그 결과 Candu 3형은 건설기간 및 비용을 최소화할 수 있는 표준화된 발전설비일 뿐만 아니라 지진과 폭풍우에서부터 냉각수조건 및 전기주파수와 전압에 이르기까지 다양한 부지여건에도 적합한 공학적 조립식 발전설비라고 AECL社는 말하고 있다.

이러한 사실의 핵심은 기존의 Candu 발전설비보다 부품이 더 적다는 단순성에 기인한다. Candu 6형이 4개의 증기발생기와 380개의 연료관을 가지고 있는 반면, Candu 3형은 2개의 증기발생기와 232개의 연료관을 가지고 있다. 발전

소에는 2개가 아닌 1개의 연료장전기계를 사용함으로써 보다 단순하게 재장전을 출력중 한 쪽 방향으로 할 수 있다. 또 격납용기 밖에 위치한 신형 연료교환장비를 사용함으로써 연료장전 기술자가 격납용기 속으로 들어갈 필요가 없도록 했다.

그밖에 Candu 3형의 반응도 제어를 위한 간소화된 기기로는 Candu 6형에서 사용되던 14개의 경수영역 제어장치 대신 교체된 8개의 기계영역 제어장치를 들 수 있다.

Candu 3형의 원자로건물구조와

칼란드리아/차폐탱크설비의 설계수명은 40년이 넘는다. 기타 모든 핵심부품의 설계수명기간도 최소설계수명이 30년인 연료관을 제외하고는 40년이다.

원자로 내 연료관의 설계를 개선함으로써 더욱 단순해진 초기설치는 물론 보다 신속히 연료를 교체할 수 있게 했다. 발전소는 모듈에 의한 건설 즉, 재래식 방식이나 현장조립식으로도 건설할 수 있도록 설계배치가 되어 있다. 발전소 배치 또한 발전소의 운전과 보수가 용이하도록 향상시켜 모든 작업구역에 직접 접근하여 융통성 있게 기자재를 설치할 수 있게 함으로써 건설공기를 더욱 단축시켰다.

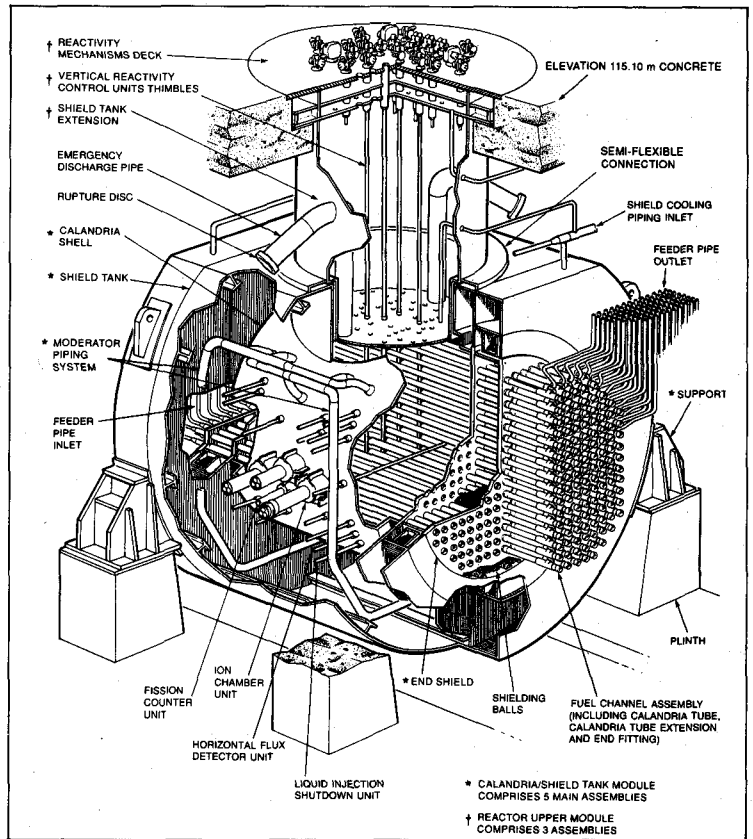
Candu 3형의 핵심적 특징은 건설부지특성부설계를 최소화함으로써 다양한 부지특성에도 적합하도록 설계를 표준화한 데 있다. 선 기술 후 건설시공과 사업착수 전에 규제당국에 의한 일반설계허가를 취득한다는 접근방식은 근본적으로 운전허가취득을 위해 부지선정, 건설 및 시운전중에 발생하는 규제당국과의 승인관련 문제만 남긴다.

건설계획 초기단계에서 모든 기술 및 부지관련 허가절차를 완료한다는 Candu 3형 접근방식은 현장 건설중 설계변경을 크게 감소시킬 수 있다고 AECL社는 말하고 있다. 또한 콘크리트 타설 전 발생가능한 문제점들을 밝혀냄으로써 이들 문제점들을 적기에 효과적으로 해결할 수 있도록 한다는 접근방식은 건설기간중 새로운 개선의 필요성이나 건설공기 지연을 크게 감소시킨다.

AECL社에 의하면 Candu 3형은 건설상 탁월한 이점이 있다고 한다. 계통을 적절히 분산시키고 보수운전을 위한 접근 및 건설공정을 융통성 있게 하기 위하여 발전소 배치상 장애물을 더욱 감소시켜 왔다. 지진 또는 환경요인에 필요한 기자재 물량은 이들을 면밀하게 분리 배치함으로써 감소시켜 왔다. 이러한 설계배치로 건설중 많은 개별 계약자간에 자재취급면에서 커다란 지장이 없도록 조화시키고 있다.

대형 초중량물 인양기로 개방된 원자로건물 상부를 통하여 원자로 설비를 포함하여 주요 모듈들을 설치할 수 있게 함으로써 장비출입을 위하여 전통적으로 개방상태로 남겨두던 구역의 작업을 조기에 완료할 수 있어 건설기간을 단축시킨다.

Candu 3형의 모듈은 콤팩트형이고 건설하기가 용이하여 캐나다내의 여러 공장이나 외국에서의 조립도 가능하다. 각 모듈에서 장비보관대, 배관, 케이블 트레이의 조립은 거의 완제품으로 현장설치 이전에 점검만 하게 됨으로써 생산성을 향상시키고 공기를 단축시키며 건설비용도 절감시킨다. 따라서 현장작업을 단지 최종설치 및 연결과 모듈의 성능시험만 하면 된다. 초기 Candu 설계에서 사용되던 중앙제어와 감시계통이 Candu 3형에서는 대리기능성 분산제어계통과 현대화된 발전설비 디스플레이시스템으로 교체됐다. 종전의 Candu 모델에서 많이 사용되던 트렁크케이블 대신에 채널화된 데이터 하이웨



〈그림 2〉 CANDU 3형 원자로설계 개요도(AECL社 제공)

이로 교체함으로써 건설공기를 단축시키고 인건비를 절감시키게 됐다.

제어설계, 인적요인, 경보취급, 자동화 및 사고관리를 위해서는 지속적이고도 논리적인 접근방법을 사용하고 있다.

### 안전관리

AECL社에 의하면 Candu 3형은 또한 안전면에서 현저한 이점이 있다고 한다. 즉 발전소 배치면에서의 개선으로 저수준의 기존 Candu 형보다 50%나 원전근무자들의 방

사선피폭량을 감소시킬 수 있다고 예상된다.

안전에의 접근방법으로는 불시사고의 경우에 여러 독립적인 안전계통들이 자동적으로 작동되게 하여 원자로를 정지시키고 냉각시키며, 가장사고중에 어떠한 방사성물질도 누출되지 않도록 설계되어 있다. 이러한 접근방식은 두 개의 완벽한 성능의 원자로정지계통 즉 비상노심냉각계통과 격납용기계통으로 구성되며 이들 안전계통은 통상의 발전설비계통과는 완전히 독립적으로 설계되어 있다.

Candu 3형 안전계통은 가동률

확보를 위하여 일상적으로 시험이 가능하다. 두 정지계통은 각각 핵연쇄반응을 중지시킬 수 있고, 어떤 돌발사고 상황하에서도 운전원의 조치없이도 낮은 수준까지 원자로의 열발생을 감소시킬 수 있다. 이 두 정지계통은 상호 독립적이고 다양한 계통으로 이들의 제어장비도 별도구역에 설치되어 있어 두 계통을 물리적으로 격리시키고 있다. 각 계통의 계측장비도 분리되어 있어 대리기능성과 함께 상호연계는 물론 시험도 가능하다.

비상노심냉각계통은 신뢰성 있는 고압주입을 위하여 가스충전탱크로부터 저장된 에너지를 사용한다. 원자로노심이 대량의 예비급수에 의한 침수가 지속되도록 하기 위해 운전원이 취할 조치는 전혀 없다. 긴급노심냉각계통은 연료다발의 잔열을 장기적으로 제거하기 위하여 열교환기에 정상적인 물론 보조로도 냉각수를 공급한다.

Candu 3형 격납용기계통은 종전 Candu 설계에 있던 살수계통을 제거하고 보강 콘크리트 격납건물내부에 탄소강철판을 추가함으로써 단순화는 물론 더욱 피동적으로 됐다. Candu 3형 격납건물은 최악의 사고시에 발생하는 압력도 견딜 수 있도록 설계되어 있으며, 동 건물내의 냉각기는 증기를 압축시키며 장기간에 걸쳐 그러한 압력은 감소시키는 데도 보조역할을 한다.

또다른 특성은 원자로의 정상가동중 격납용기의 어떤 중대한 고장도 감지할 수 있는 총량누출 온라인 감시계통이다. 점진적인 중대사고에 대해 Candu 설비는 작동상

급격한 변화를 초래하지 않고 점진적으로 대응한다. 비상냉각재주입의 가상실패와 관련하여 극심한 냉각재상실사고 발생시에는 저압, 저온 감속재계통이 연료봉피열을 제거하기 위하여 다양한 긴급 Heat Sink 역할을 함으로써 원자로 노심용융을 방지한다.

안전계통의 단순성과 개선 덕분에 운전원의 개입 필요성을 크게 감소시킨다.

AECL社에 따르면 독립적으로 개발된 Candu 3형 설계요건은 미국전력연구소(EPRI)의 개량형경수로(ALWR)의 모든 핵심목표를 충족시킨다고 한다.■

## ABB Atom社の PIUS

**P**IOUS(Process Inherent Ultimate Safety)란 중대사고에 대한 안전성을 원자로설계 그 자체에 내재시킴으로써 기기오동작이나 인적작위에 의한 사고가 결코 발생치 않도록 원전을 설계하려는 노력을 의미한다.

PIUS는 다른 에너지원과 비교하여 건설기간과 비용 측면에서 경쟁력이 있다고 ABB Atom社에서 말하고 있으며, 현재의 경수로(LWR)보다 운전, 보수가 더 간단할 것으로 전망하고 있다.

### 설 계

ABB Atom社は PIUS 형태의 원자로를 10년 이상 추진해 오고 있는데 설계와 분석은 수차례 변경됐다. PIUS 설계는 잘 축적된 LWR 기술과 입증된 기기제작기술을 최대한으로 활용한 기술기반을

근간으로 하고 있고, 개발사업은 전력사와 그밖의 의견들을 수렴하여 추진한다.

현재의 경수로와 비교하면 1차계통이 재배열됐다. ABB Atom社は 특히 안전성과 운전성 개념에 대해 기술적 가능성과 실현성에 대한 염려를 없애기 위해 새로운 특성을 충분히 연구했다고 한다. 앞으로 최종설계검증을 위한 제한적 시험만이 남아 있다고 ABB Atom社は 말한다.

열출력 2,000MWt(순전기출력 640MWe) PWR형 노심에는 표준 PWR 연료봉과 같은 직경에 높이가 축소된 213개의 연료집합체가 있다. 노심은 프리스트레스트 콘크리트용기 내부에 고농도의 붕산수가 들어 있는 원자로수조의 바닥에 위치하고 있다.

원자로의 반응도는 냉각재 붕소농도와 온도에 의해 제어되고 제어