

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 노심 용융을 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의 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

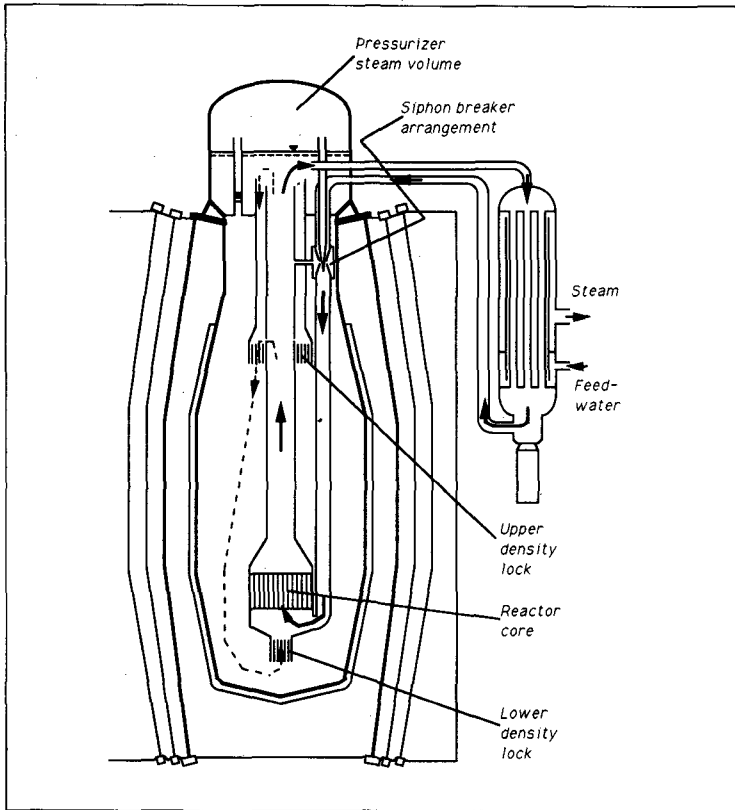
ABB Atom社는 PIUS 형태의 원자로를 10년 이상 추진해 오고 있는데 설계와 분석은 수차례 변경됐다. PIUS 설계는 잘 축적된 LWR 기술과 입증된 기기제작기술을 최대한으로 활용한 기술기반을

근간으로 하고 있고, 개발사업은 전력사와 그밖의 의견들을 수렴하여 추진한다.

현재의 경수로와 비교하면 1차계통이 재배열됐다. ABB Atom社는 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는 말한다.

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

원자로의 반응도는 냉각재 붕소농도와 온도에 의해 제어되고 제어



〈그림 1〉 PIUS 기본배치도

실선으로 된 화살표는 정상운전중 강제냉각재순환로를 가리킨다. 노심으로부터 냉각재가 상승관을 통해 올라와서 상부 강철부분에서 원자로용기를 빠져나간다. 직관관류형 증기발생기가 4개 있으며 저온관은 고온관노즐과 같은 높이에서 원자로용기로 들어가고 환류된 유량은 하향유로를 통해 노심 아래쪽으로 보내진다. 주냉각재펌프는 밀봉장치가 없고 습식전동기설계이다. 점선으로 된 화살표는 자연순환모드에서의 흐름을 가리킨다(도면은 ABB Atom社 제공).

봉은 사용되지 않는다. 현재의 PWR 설계와 비교하여 열부하, 온도, 유량, 압력강하와 같은 노심운전변수들의 여유가 현저히 증가했다. 연료봉에 약간의 있는 가연흡수제(Gadolinium)에 의해 연소보상이 되며 감속재 온도반응도계수는 전체 운전주기 동안에 큰 음의 값을 갖는다.

노심에서 냉각재는 상승관을 통해 지나가고 상부 강철부분에서 원자로용기를 빠져나간다(그림 1).

증기발생기는 직관관류형으로서 4개가 있다. 주냉각재펌프는 밀봉장치가 없고 습식전동기설계이며 ABB Atom社 비등형경수로(BWR)의 순환수펌프를 대형화한 것이다.

저온관은 고온관노즐과 같은 높이로 원자로용기에 연결되어 있고 환류된 유량은 하향유로를 통하여 노심 아래쪽으로 보내진다. 냉각수가 아래로 내려가는 도중에 하향유로와 가압기 사이에 Siphon 차단기가 있어 저온관 가상사고시에 원

자로수조의 저장수가 빠져나가는 것을 방지한다.

노심입구 공간 아래 부분에 원자로수조를 향해 하나의 관이 열려 있고 이 관 안에는 세관다발이 있어 저장수의 혼합을 최소화하여 저온 원자로수조 저장수 상부에 고온 원자로루프 냉각수를 안정되게 층을 형성시키도록 한다. 세관다발이 있는 관과 층상화된 물을 하부 밀도차차단(Density Lock)이라고 한다. 고온과 저온냉각수 경계면의 위치는 정상운전중 그 경계면을 일정 수위로 유지하기 위한 주냉각수 펌프의 속도를 조정하는데 이용된다.

수조 상부에도 Density Lock이 있어 상부 상승관공간과 연결되는 여러개의 작은 구멍이 나있다. 이러한 계통구성이 PIUS 발전소의 계획적이고 탁월한 안전성의 근간이 된다고 ABB Atom社는 말한다. 개방형 자연순환은 항상 노심을 통과하면서 다음과 같은 경로를 거친다. 하부 Density Lock을 지나 수에서 노심으로, 노심을 지나서는 상승관, 상부상승관 공간과 상부 Density Lock을 지나서 수조로 되 돌아온다. 정상운전 동안에 자연순환루프는 주순환수펌프가 작동하므로 형성되지 않는다.

원자로수조의 냉각수는 두 계통에 의해 냉각되는데 하나는 원자로용기 외부의 열교환기와 펌프를 이용한 수조냉각수의 강제순환에 의해 냉각되고, 다른 하나는 피동적 시스템으로 원자로수조 내부의 냉각기와 냉각수를 원자로건물 상단에 설치한 자연통풍 쿨링타워로 이

송시키는 자연순환루프를 이용하는 방식이다. 자연순환계통은 사고시 원자로수조의 냉각을 확실하게 하고 원자로수조에 저장된 냉각수의 비등을 방지한다. 1차계통의 고온부분은 금속형태의 습식열차단방식으로 저온 원자로수조로부터 격리된다.

프리스트레스드 콘크리트용기의 공간은 지름이 약 12m이고 3,300m<sup>3</sup>정도의 물을 담는다. 콘크리트용기 전체의 단면은 약 27m이고 높이는 약 43m이다. 내압능력은 수많은 수평, 수직 프리스트레스철근과 보강철근이 있어 충분하다.

원자로건물 내부는 스테인레스강판으로 되어 있다. 또한 원자로수조 냉각수가 강판누설에 의해 상부 Density Lock 이하로 상실되지 않도록 고착된 강철판막인 2차방벽이 상부 Density Lock 위에까지 걸쳐 있다. 콘크리트용기의 관통부도 이 높이 이하에서는 허용되지 않는다.

콘크리트용기의 상단에는 강철용기의 연장부분이 있는데 이는 별도의 철근으로 콘크리트 바닥에 박혀 있다. 이 연장부분에는 저온, 고온 냉각배관과 원자로수조 강제냉각계통루프의 관노즐이 들어 있고 상부 상승공간과 가압기를 둘러싸고 있다. 강철돔을 원자로용기 위의 축을 싸고 있다.

콘크리트용기와 원자로계통은 압력억제형태의 대형 격납구조물로 둘러싸여 있다. 구조물은 비행기 충돌에 의한 충격도 견딜 수 있을 만큼 충분한 강도의 보강 콘크리트가 되어 있다. 모든 격납구조물은 누설을 방지하기 위해 강판으로 내

장되어 있다.

재장전기간 동안에는 격납구조물 돔과 원자로용기 두껍이 제거되고 돔 상부의 공간에는 물로 채워진다. 원자로 내부 구조물은 부분적으로 들어 올려서 물이 채워진 공간에 둔다. 재장전작업은 원자로 작업구역에서 종래의 기계를 가지고 한다. 새로운 연료는 원자로건물의 신연료저장소에서 옮겨지고 연소된 연료는 원자로 작업구역과 같은 층이고 인접한 사용후연료저장소로 운반된다. 연료를 올바르게 취급하는 시간은 현재의 경수로설계보다 다소 많이 걸리지만 전체 재장전정지기간은 다른 ABB Atom社 발전소와 같이 약 3주가 걸릴 것으로 보고 있다.

증기배관의 압력방출밸브는 원자로압력용기의 압력방출밸브와 마찬가지로 격납구조물 내의 응축수로 방출한다.

터빈계통은 종래의 것과 같다. 주증기 조건이 4.0MPa, 270°C 이므로 기존의 경수로 발전소보다 큰 터빈이 필요하다. 발전소 조건에 따라 다르지만 단위 터빈의 정상출력은 635~665MWe이 될 것이다.

원자로출력은 붕소의 농도와 원자로냉각수 온도로 제어된다. 정상 운전중에는 냉각수 붕소농도를 조절하지 않고 강한 부냉각재온도 반응도계수값으로 출력을 제어한다. 원자로 출력변화는 주급수유량으로 조정하게 되는데 주급수유량을 증가시키면 노심입구 온도가 떨어지고 감속냉각수의 평균온도를 저하시켜 원자로출력을 증가시킨다. 이 방법은 20%/min 출력변화율로 3

0% 출력구간까지 적용된다. 이 구간 이상에서는 원자로 노심냉각수 출구온도를 제한치 이내로 유지하기 위해 붕소농도의 조절이 필요하다. 출력 100%와 50% 사이의 일일부하추종운전은 첫날 운전주기의 시초에 붕소농도를 약간만 조정함으로써 가능하다.

노심은 격납구조물과 두꺼운 벽으로 된 콘크리트용기에 의해 물리적으로 보호된다. 과열과 연료손상을 방지하기 위하여 노심은 대형 봉산수수조에 담겨 있다. 즉 비정상상태를 감지하여 조치를 취하거나 기기를 작동시키지 않고서도 원자로의 정지와 자연순환형태로 노심을 냉각시킬 수 있기 때문에 제어봉, 제어봉구동장치, 솔레노이드 밸브 또는 역류방지밸브 등과 같은 밸브장치(Relay/Breaker)를 작동시키지 않는다.

발전소에는 비정상상태를 감지하기 위한 감시기기가 있고 또 원자로보호계통이 작동하지만 안전성이 여기에 달려 있는 것은 아니다. 원자로정지와 자연순환형태로의 전환은 자동으로 진행되어 감시기기나 원자로보호계통의 작동에 의존하지 않는다.

현재의 경수로와 같이 PIUS도 계장계통이 있다. 즉 원자로정지를 위한 방호, 보호논리, 발동작용계통, 잔열제거(RHR), 격납용기 등이다. PIUS 안전성확보에서 이러한 계통의 중요도가 많이 낮아졌다. 2/4 동시작동논리로 구성된 원자로보호계통은 원자로운전변수가 한계치를 초과하는 경우에 출력감발을 시작하고 원자로를 긴급정지

시킨다.

대부분의 경우 주급수유량을 조절하여 출력을 낮추고, 고농도붕소를 1차계통냉각수에 주입하여 고온대기 또는 고온정지의 상태로 더욱 출력을 낮추는 것이 적절한 대책일 것이다. 몇몇 사고의 경우에만 정지밸브를 개방하여 수조의 물이 1차계통으로 유입되고 고온 아임계 상태로 보내 원자로를 긴급정지시킨다.

현행의 상업 운전 경수로와 비교하면 많은 안전등급계통이 생략됐다. 제어봉과 안전주입봉소계통은 Density Lock로 대체됐고, 자동감압계통은 필요로 하지 않는다. 잔열제거(RHR)를 위한 보조급수공급계통은 원자로수조로 대체됐고 격납용기 열제거 및 살수계통은 원

자로수조 피동형냉각방법으로 바뀌었다.

비안전등급계통으로 바꾸어 가장 많이 단순화시킨 것은 안전등급 폐쇄냉각수계통과 난방, 공기조화계통 그리고 직류전원공급계통이다. 나머지 안전등급기능들은 원자로보호계통, 격납용기격리계통, 원자로용기안전밸브 그리고 피동형 원자로수조냉각계통이다. 그렇지만 이러한 기능들이 노심보호를 위해 필요한 것들은 아니다.

능동형 공학적 안전감시계통에의 의존도가 낮아짐으로 계장과 제어계통의 단순화가 가능해졌고 이는 컴퓨터장치계통을 이용하고 최대한으로 다용화했기 때문이다. 특별히 주제어실에서의 인간-기계 의사소통은 많은 컬러비디오화면과 관련

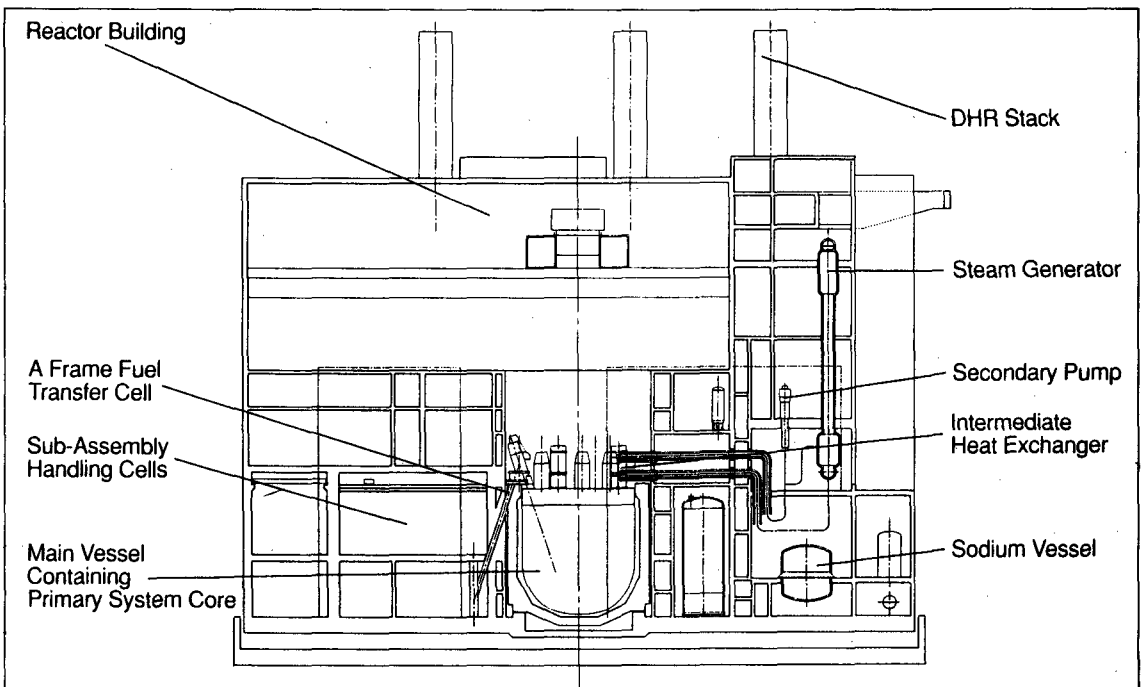
자판기를 통하여 이루어진다.

### 원자력안전

PIUS와 현행 경수로 사이에는 격납용기요건에 매우 중요한 몇가지의 차이점이 있다. PIUS의 연료건전성은 고유의 자체보호피동형기능으로 보호되고 노심노출이나 연료과열이 어떤 확실한 사고 이후에도 발생치 않는다고 ABB Atom社는 말한다.

배관과열사고 후 격납용기로 방출되는 방사성물질은 사고발생 이전에 노심내부 연료봉누설로 발생할 가능성이 있으나 사고로 인하여 더 이상의 연료손상은 없다.

ABB Atom社는 대형 냉각재상실사고에 의한 발전소부지 경계에



<그림 1> 유럽형고속로 1차계통 단면도(EFR협회 제공)

서의 방사선량이 매우 낮게 계산됐고 단지 1밀리렘의 전신선량은 미국환경보호기구의 보호행동지침인 1렘 전신선량과 5렘 갑상선량보다도 훨씬 낮다고 한다.

### 발전소건설과 비용

ABB Atom社에 따르면 PIUS의 건설공기는 최초 콘크리트타설부터 상업운전시작까지는 42개월이 소요된다(연료장전까지는 36개월 소요).

스칸디나비아 조건에서 600MWe PIUS와 ABB Atom社 700MWe 개량형 BWR과의 비용을 상세히 비교하면 단기비용(금융비용 제외)에서 순전기출력은 kWe당 PIUS가 10%의 이득이 있다.

PIUS는 주증기압력과 온도가 낮기 때문에 열효율이 낮고 연료주기 비용이 좀 더 소요된다고 ABB Atom社는 말하면서도 건설기간이 더 짧고 인건비가 더 적게 소요된다고 부연한다. 결론적으로 kWe당 총비용은 700MWe BWR 발전소보다 저렴한 것으로 평가된다.

### 전 망

PIUS의 실용화를 위해 이탈리아 국영전력회사인 ENEL社에서 상당 기간 평가했다. Cconsorzio PIUS社는 최근 이탈리아 회사인 Ansaldo 및 Fiat社와 함께 PIUS를 이탈리아의 조건과 요건에 맞도록 합작설계연구를 ENEL社에 제의했다.

실용연구가 中國에서도 수행중이고 다른 나라들에서는 평가연구가 진행중이다. 미국에서는 미국원자

력위원회와 허가가능성검토가 진행중에 있어 1994년 봄에는 안전성분

석보고서가 나올 것이라고 ABB Atom社에서 말하고 있다.■

## 유럽형 高速爐(EFR)

유럽 몇개국의 발전사업자, 연구기관, 설계 및 건설회사들은 유럽형고속로(European Fast Reactor)의 상업설계를 공동으로 개발하기 위한 장기계획에 참여하여 왔다. 합작설계기구인 「EFR 협회」는 프랑스 프라마토프社의 한 사업본부인 Novatome社, 독일의 Siemens KWU社, 영국의 NNC社로 구성되어 있다.

EFR 협회는 유럽형고속로(EFR) 설계의 목적을 기존설계의 기본 특성인 Sodium 냉각재, 수조형태, 산화연료를 유지하도록 하는데 합의했다. 전기출력 1,500MWe, 열출력 3,600MWt 규모로 경제적인 면에서 가장 유리한 것으로 보여진다.

1990년 3월까지 수행한 2년간의 개념설계는 다양한 설계사양들을 평가하고 점진적으로 선택사양들을 추려서 최초의 합의된 설계로 확정했다.

현재까지 3년동안 수행하고 있는 개념확증단계에서는 합의설계의 힘든 설계사항과 안전성, 신뢰도 및 비용측면에서 유리하고, 좀 더 진보된 대안에 관한 분석을 위하여

세부연구에 집중하고 있다.

### 주요설계사항

노심은 6년의 잔류시간에 근거한 원자연료관리계획에 따라 3개의 농축도구역으로 구분되어 있다. 최대 연소도는 중금속원소의 20%까지 연소시키는 것이 목표인데, 이는 고속증성자에 의해 원자당 190회 변위하는 것과 상응하는 양이다 (Norgett, Robinson 및 Torens에 의해 표준화된 수치).

2가지의 노심사양이 선택됐는데 하나는 균질노심이고, 다른 하나는 축방향의 비균질노심이다. 연료봉 피복재는 AIM 1(티타늄 오스테나이트계 스테인리스강의 진보된 변형) 또는 PE16 (44% 니모닉합금)으로 선택했다. 또한 발전소설계는 증식육선의 변동폭을 수용할 수 있고 플루토늄 사용가능성도 고려했다.

비증식노심은 반경방향 증식로 소조립부품이 없지만 고속증식노심은 2열의 증식로 소조립부품의 구성이 가능하다. 균질노심설계에는 387개의 연료부속집합체와 78개의 증식부속집합체가 있다.