

차세대 원자로 PIUS

단지 환경적인 이유라면 원자력에너지 사용의 대규모 확장은 다음 세기에 필요할 것이라는 인식이 증가하고 있다. 불행하게도 원자로의 안전에 대한 일반대중의 신뢰문제 때문에 어느 정도까지 현 원자로 발전을 피하고, 확장이라기 보다는 오히려 감소가 몇 국가에서 고려되고 있다. 이러한 상황에서 원자력 선택의 부활을 위해 하나의 가능한 전제는 인식된 안전성의 대폭 증가와 기술의 복잡성이 감소되는 것이다.

간단하고 쉽게 이해할 수 있는 방법으로 원자로 노심의 건전성이 상실될 수도 있는 모든 의심스러운 방법을 제거함으로써 이것을 성취하는 것을 목적으로 하고 있는 PIUS 프로그램은 원자로 수명의 모든 단계에서 인간적 취약성의 영향을 고려한 비관적인 가정하에서조차도 환경으로의 방사성물질의 중대한 방출은 발전소의 여타 부분에서 무엇이 일어나든 배제될 수 있다.

PIUS는 저출력 밀도의 기존 입증된 LWR 기술을 사용하여 재구성된 PWR이지만 안전성 개념은 완전히 다르다. 기존 LWR에 비해 차이점은 다음과 같이 설명된다.

기존 LWR은 그 안전성이 능동적 기기(밸브, 계기, 스위치 기어, 제어봉 구동 등)의 외부 조정에 기초를 두며, 종종 안전성 관련 고장시 운전원의 정확한 조치에 근간을 두고 있다. 운전중 요구되는 기기의 실제 기능상태는 법칙

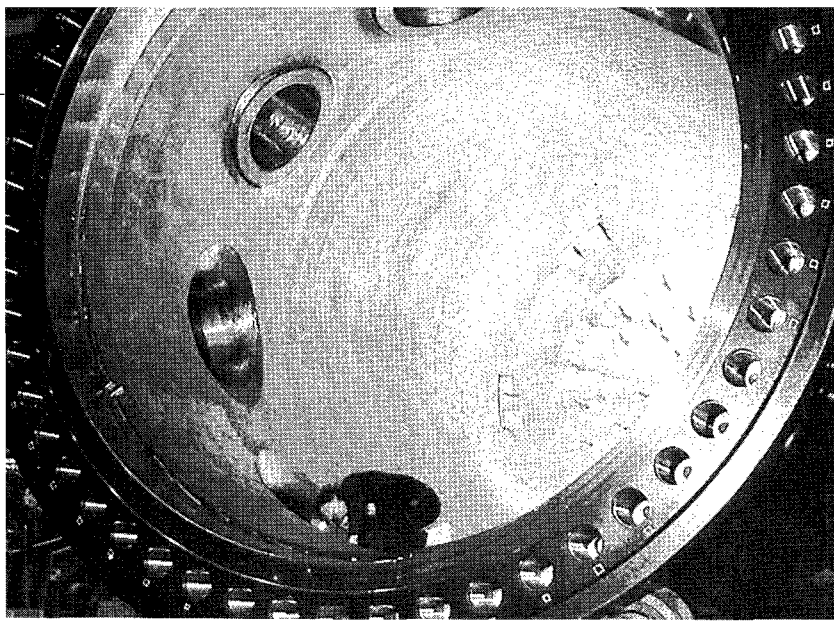
처럼 확인될 수 없으므로 비상시 인적실수를 배제할 수 없다. 피할 수 없는 영향은 고장결과 의 불확실성이다. 그것은 전문가의 마음에는 작은 것이지만 비전문가에게는 굉장한 것으로 부각된다.

대조적으로 PIUS에서는 어떤 안전성관련 운전 고장시 안전한 결과(즉 노심손상의 방지)를 확신하기 위해 필요한 조건 유무가 운전중 일상적이면서 계속적으로 확인되는 것이다. 하나 또는 여러 조건이 미비된 것이 발견되면 원자로로는 순차적으로 정지될 수 있다. 다른 LWR에 영향을 미치는 불확실성은 거기에 더 이상 존재하지 않는다. 이것을 가능케 하는 것은 아래와 같은 법칙준수를 요구한다.

- 안전성관련 고장에서 능동적 기기의 적절한 기능을 위한 어떤 보장도 주어지지 않는다.
- 비상시 운전원의 정확한 조치를 위한 어떤 보장도 주어지지 않는다.
- 언제라도 부하가 걸린 기기가 미발견된 결함으로 고장이 날 수 있다는 가정을 한다.
- 외부 사건을 고려하여 부정적인 가정이 수립된다.

원자로 설계

경제성과 운전성능 면에서 중대한 양보없이 전술의 것들을 달성하기 위해 채택된 설계 원칙은, 간단히 말하면 노심의 건전성은 모든 조



건하에서 노심을 물속에 침수시킴으로써 보증되고, 출력은 들어가는 물의 냉각능력을 초과하지 않도록 1차계통형태를 선전함으로써 보증되며, 그리하여 파괴적인 과온도를 피한다. 침수되는지를 보증하기 위하여 2중의 누설방지 설비를 갖고 있는 대규모의 프리스트레스드 콘크리트 원자로용기(PCRV)를 채용하는데, 이는 완전히 증발에 의한 수동적인 잔열제거의 1주 동안 충분한 물을 노심으로 직접 제공한다. 현장에서 극도의 파괴가 가정되지 않는다면 이 1주간은 대기로의 수동적 열제거를 통해서 불 명확하게 된다.

외부점검 및 조정에 의하지 않고 파괴적인 과출력을 피하는 것은 유압평형계통(Hydraulic Balancing System)에 의해서 달성되는데, 이 계통은 정상운전중에 뜨거운 순환 원자로 냉각재를 대용량 물저장조와 접촉시킨다. 이 물저장조는 PCRV의 대부분을 채우고 고농도 보론을 함유하고 있다. 이 계통은 원자로정지로 자연상태로 전환시켜 주며, 자연순환으로 냉각되게 한다. 노심손상으로 연계될 수 있는 중대 천 이상태에는 유압평형계통은 이러한 경향을 더 이상 고집하지 않고 저장조로부터 보론이 주입되어 안전조건으로 돌아가게 한다. 이는 어떠한 외부점검 및 조정에 관계없이 일어난다.

고온 1차냉각재는 노심을 떠나 상승배관(Riser)을 통해 올라가며 크고 원통형의 내부 흐름을 안내하는 구조물의 주변까지 이동한다.

다수의 수직 텐던에 의해 PCRV에 고정된 상부 강철돔의 높이까지 도달한 후 원자로용기를 지나 4개의(Once-Through Straight-Tube 증기발생기(OTSG)의 꼭대기 입구까지 흐른다. Wet Motor Type 냉각재 펌프는 OTST 밀바닥에 있다. 거기에서 저온관 흐름은 강철 돔까지 가서 Downcomer Pipe의 상부 끝으로 들어간다. 내려가면서 주변으로 방향을 바꾸어 노심 밑을 통해 노심으로 다시 들어간다.

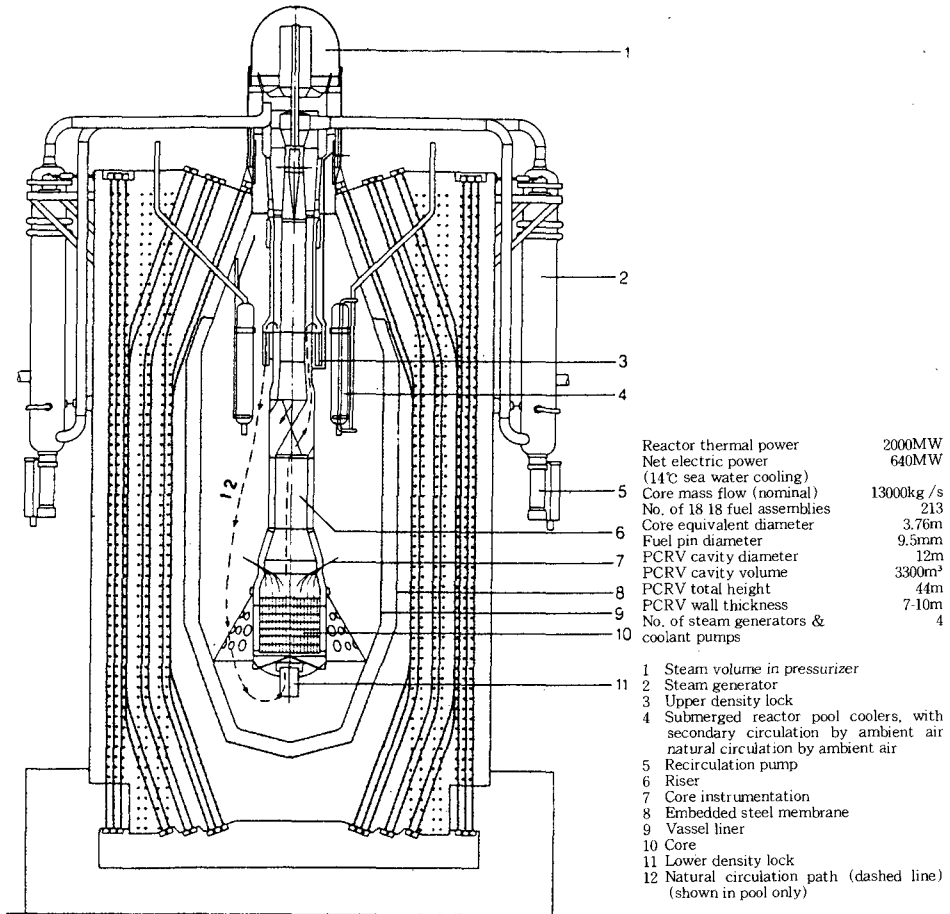
PIUS의 유일한 특성은 노심을 통하여 항상 자유로운 자연순환 통로이고, 대규모의 보론수 저장조이다. 이는 앞에서도 언급했지만 이 통로의 흐름은 유압평형계통에 의해서 정상운전 중에 억제되고 있다. 저장조의 밑부분 근처에서 출발하여 이 통로는 순환 냉각재와 저장수 사이의 밀 접촉영역으로 들어간다.

노심과 상승배관은 자연순환과 강제순환 회로에 모두 적용된다. 상승배관의 꼭대기로 부터 자연순환 통로는 수직 환형공간(Annulus)을 지나 상부 밀도차 출입문(Density Lock)까지 계속되며, 거기에서 고온 냉각재는 다시 저온 저장조수 위에 층층이 쌓이고, 밖에서 저장조로 들어가 다시 하부 밀도차 출입문(Density Lock)으로 되돌아간다. 유압평형계통은 하부 밀도차 출입문안에서 高/低접촉영역(Hot /-Cold Interface)을 요구되는 수준으로 유지시켜 주는데 이는 냉각재펌프의 속도를 조절하여 가능한 것이다. 저온 저장수와 고온 냉각재간

의 높이를 증가시킴으로써 압력저하는 정압 (Static Pressure) 상실시 차이에 의해 균형이 유지된다. 두 밀도차 출입문간의 높이 차이는 22m로서 약 50kPa의 노심압력저하를 의미한다. 부적절한 냉각이나 과출력으로 인해 노심 출구 온도가 더욱 증가하면, 하부 밀도차 출입문에서의 高/低점축영역은 위로 올라가 수위를 일정하게 유지하기 위해 펌프속도를 증가시킨다. 결국 펌프속도는 한계에 도달하고 외부 점점의 개입없이 저장조로부터 보론 주입이 발생한다. 실제로 이러한 점점은 있으며, 원자로 보호계통이 보통 개재한다. PIUS의 독특한 특성은 안전성이 더 이상 그 기능에 의존하지 않는다는 것이다.

노심은 다소 표준 PWR연료를 채택했으며, 18×18 장방형 핀번들(Pin Bundle)로 구성되어 있다. 주요 차이점은 제어봉이 없다는 것이고 원자로 제어는 단지 냉각재 보론 함유 및 온도에 의해서만 달성된다. 이는 연료에서 Burnable Absorber의 대량 사용에 의하여 가능하다. 기존 PWR노심과 다르게 핵비동이탈 (Departure from Nucleate Boiling)을 피하는 것은 저출력밀도로 인해 주요 관심이 아니다. 대신 온도제한은 Sub-Cooled Boiling을 억제하기 위한 필요성때문에 주어진다.

NSSS는 압력감압 격납건물안에 위치한다. 기술적 기반위에 격납건물의 필요성은 논란여지가 있다. 그러나 TMI와 체르노빌사고후 이



Design of the PIUS Reactor with a Power Output of about 600 MW

논의는 별 의미가 없어졌다. 기존 PWR과 비교하면 2차 계통은 많은 수의 안전성관련 계통을 감소시켰기 때문에 매우 단순화되었다.

안 전 성

PIUS의 안전성에 대한 원리와 기술기반은 앞에서 설명되었다. 중대 천이상태에서 안전반응에 대한 심도깊은 연구를 위해 특별한 컴퓨터 모의코드, RIGEL이 개발되었다. RIGEL은 대부분의 확인 가능한 중대 천이상태 및 과열상태(예: 주냉각재 배관 전면파열, 배관라인 파단, 개방 고착상태의 안전밸브에 의한 감압, 모든 전력공급원의 상실, 모든 급수의 상실 등)를 모의했다. 이 모두 어떤 안전계통의 개재없이 수행되었다. 어떠한 경우에도 노심의 건전성에 대한 중대한 영향을 미치는 사항은 발견되지 않았다. 사실 안전 결과를 보장하는데 필요한 유일한 운전조건은

- 저장수가 있어야 하고 정확한 온도범위(이 계통은 PCRV가 차가운 저장수로 채워지지 않으면 운전될 수 없다)

- PCRV내 두개의 연속 누설방벽의 밀폐 정도

- 저장수의 보론 농도

- 노심을 통하는 자연순환회로의 열립상태

이런 조건의 존재여부는 운전중 일상적이고 계속적으로 확인이 된다.

인 허 가

PIUS는 전혀 다른 안전개념에 근간하였기 때문에 규제체계 문제에 봉착하게 될 것이다. 엄격하고 면밀한 시행은 PIUS를 복잡하고 매력 없는 것으로 만들지 모른다. 이리하여 이 운명은 실용적이나 형식적이나 하는 접근방법 사이에서 규제기관이 취할 평형에 따라 정해될 것이다. ABB Atom사는 미국 NRC에 PIUS의 인허가 가능성을 검토하도록 요청했으며, Preliminary Safety Information Document는 이러한 목적으로 제공되었다.

경 제 성

투자비는 동일 규모의 기존 LWR보다 다소 낮다고 평가된다. 대규모의 PCRV 가격이 2차 계통의 단순화로 보상된다. 연료비는 기존 PWR에 비해 다소 높는데 이는 PCRV내 하부 1차 압력에 의해 필요한 하부 스팀압력 때문이다. 그러나 이는 낮은 운전유지비로 많이 상쇄될 수 있다. 운영요원의 감축은 기본적인 단순성, 안전성 확보에 운전원 역할의 간소화, 보안을 위한 필요성 감소 등으로 가능하다.

확 인

PIUS의 새로운 특성은 본질적으로 PCRV와 유압평형계통이다. 이것들은 광범위한 확인 프로그램을 마쳤다. 특히 대규모 非원자력 PIUS형 계통은 ABB Atom사의 엔지니어링 시험실에서 시험되었고, 천이상태에서의 동태는 RIGEL 코드의 예견을 확인하였다. 선두 발전소 건설을 진행시킬 향후 확인은 주로 상세설계 특성의 광범위한 연속단계 시험(Folw Testing)을 포함할 것이다.

전 망

지금 이용가능한 PIUS 프로그램의 결과로 ABB Atom사는 LWR기술의 단순화와 미래의 원자력 확장에 대한 국민적 합의를 확보하기 위해 요구되는 안전성의 향상된 수준으로의 적응에 투자하고 있다.

21세기초에 대규모의 건설은 분명히 선두 발전소의 실증된 운전성능에 근간이 되어야 한다. 이러한 발전소의 실현은 여러 국가에서 논의되어왔다. 현재 가장 큰 관심은 이탈리아에 있다. 이탈리아는 기존 LWR이 일반 국민의 압력으로 철회되었다. PIUS 같은 개량형 LWR개념의 연구는 에너지계획 1990~94에 따라 투자될 것이다. 이탈리아 산업과의 상담이 진행중이다.