

固有의 安全性

# PIUS爐의 開發現況

## — 安全性 및 運轉原理 —

### 1. 概 要

오늘날 세계적으로 發電用原子爐의 주류는 輕水爐인데 PWR와 BWR가 거의 2:1의 비율로 이용되고 있다. 그러나 이것은 輕水爐가 이미 확립된 원자로시스템인 것을 뜻하는 것은 아니다. 사실 수명을 다한 원자로의 수는 아직은 적으며, 이때까지의 원자로의 設計에는 과거의 경험을 충분히 고려할 만한 여유가 없었다. 말하자면 원자로의 수명에 비하면 도입이 너무 갑작스러웠다고도 할 수 있다. 승용차의 개발에서 보는 바와 같이 이와같은 종류의 기계장치의 개발에서는 加速試驗이 행해지는 것이나 원자로의 경우 자본비의 크기에 비해 爐全體시험방법의 하나로서 이 방법이 취해지지 않았었다. 그에 대체하는 것으로서 TMI를 위시해서 과거의 운전경험을 기초로 하면서 運轉中の 原子爐改良이 自主的으로, 또는 規制變更의 적용이라는 형태로 추진되었다. 주된 대상은 물론 원자로의 安全性에 관한 부분이었다.

이와같은 개발상황과 세계적인 전력수요의 신장이 둔화된 결과 원자력발전도입의 속도도 둔화되어 미국에서는 1978년 이후의 新規發注는 없었다. 오히려 100基 이상의 爐가 취소되었다. 한편, 核燃料의 입수가능성이 증가하여 유리해지는 반면 앞으로 원자로의 老化和 함께 발생

하는 여러 문제에 적극적으로 대처해나가야 할 것이다. 그러나 이것이 장래 원자력발전의 경제성악화에 이어질지도 모른다. 또 TMI원자로 사고의 보기는 말할 것도 없이 많은 사고의 원인 또는 그 定量化나 원인저하시키는 시스템 개발에 많은 노력이 집중되고 있다.

한편, 과거 20년 이상의 輕水爐 運轉經驗에서 보면 환경에 대한 방사능 배출은 거의 발생하지 않았으며, 稼動率도 향상되어 원자력발전이 안정된 전력원의 하나가 되었음을 나타내고 있다. 이와같은 상황을 감안하여 최근 앞으로의 원자력개발에 대한 새로운 검토가 미국, 일본 등의 나라에서 행해지기 시작했다. 이 내용중 이미 하나는 과거의 경험에 따라 문제가 되는 원자로의 改良, 設計變更에 새로운 접근이 시도되어 이미 改良型爐(APWR, ABWR)로서 미국, 일본의 메이커들이 공동개발을 추진하고 있다.

그외 원자로가 가져야 할 기본요건을 확인하면서 安全性을 確保하기 위해 直接的으로 自然攝理에 의존하는 設計(重力, 熱容量 등)이며 간소화, 단순화가 기본적인 設計概念이다. 이에 대한 움직임의 하나로서 북구, 스웨덴에서는 이미 '76, '77년에 핀란드와 공동설계로 熱供給爐, SECURE爐의 設計를 실시한 바 있다. 그후 후 ASEA-ATOM社가 發電用으로 기본설계를 행

한 爐가 SECURE-P이며, 미국에서는 PIUS (Process Inherent Ultimate Safety) 爐의 약칭으로 불리고 있다.

## 2. PIUS 플랜트의 設計條件 및 目標

PIUS에서는 플랜트용량과 경제성에 관련해서 다음의 목표를 추구하고 있다.

- ① 許認可手續의 一括化, 簡素化(設計의 事前承認),
- ② 經濟性, 運轉性能 優位性(인센티브 채용),
- ③ 原子爐의 모듈化, 工場에서의 大量生産性, (廣域利用發電裝置),
- ④ 小型爐(15萬kWe 以上)에서의 經濟優位性,
- ⑤ 天變地變 等, 비교적 어려운 환경조건에서 公衆의 안전과 電力會社의 財産保全性 등으로 구체적인 立地條件을 다음과 같이 설정해 놓고 있다.

외부영향에 대한 脆弱性 및 플랜트로 부터의 公衆에 대한 영향을 현저하게 내리게 함으로써 도시근교 및 負荷近接地를 가능하게 하는 設計(送電線의 短縮, 敷地의 狹少化가 可能), 또한 PIUS에서는 安全性確保方式으로 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 플랜트사고후의 公衆安全이 PIUS原理에 의해 지켜질 것,
- 2) 사고후의 안전유지에 오퍼레이터, 機器에 거의 의존하지 않을 것,
- 3) 爐心固有安全性에 의해 事故輕減努力이 통상산업규모이며, 시간적으로도 충분히 여유가 있을 것(이것은 운전요원이 일시적으로 현장을 떠나더라도 문제가 없다는 뜻으로 Walkaway機能이라 불려진다),
- 4) 원자로에 대한 意圖의 破壞行爲, 過渡的인 人的操作에 강한 耐性이 있을 것(책임을 개발자에 집중시켜 電力會社 責任者, 運轉補修 要員의 책임을 경감한다. 이것은 Forgivingness機能이라 불려진다).

## 3. PIUS爐에서의 安全要求領域의 分離 (Shrinking Safety Envelope: SSE)

PIUS는 기본적으로는 PWR로 大容量 콘크리트 壓力容器(PCAV)와 内部構造物로서 되는 原子爐部(Nuclear Island)와 그 외의 在來機器系統(Balance of Plant)의 사이에서 放射能의 移行을 제한하는 설계방침으로 되어 있다. 따라서 後者에 대한 안전요구는 簡素化 및 輕減되어 通常時 對策 및 사고시의 장기적인 事故輕減 機能만으로서 이것은 SSE라 불려지며 경제성향상에 기여한다.

## 4. PIUS爐의 運轉原理

PIUS爐의 기본은 물로 채워진 爐內에 原子爐 1次系統을 배치하는데 있다.

그림 1에서는,

A: 低出力에서의 自然循環,

B: A에 대한 強制循環,

C: B에서의 出力運轉 이때 1차 루프內 물의 밀도는 爐內의 물에 비해 작아지고 그림에서 橢狀으로 되어있는 상부와 하부의 경계부에 각각 高低溫의 水境界面을 형성시킬 수 있다. 이것이 密度록이라 불려지는 통상시에서의 爐과 1次系統사이의 流水封鎖機構이다.

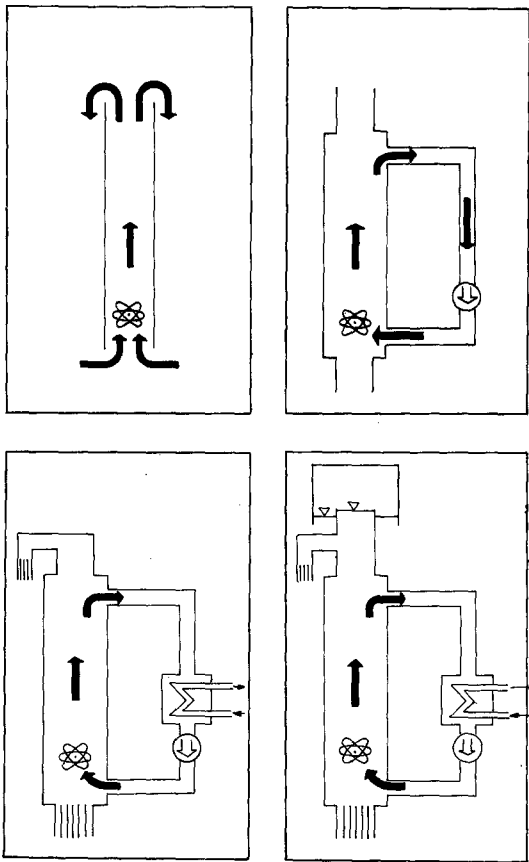
D: 加壓器를 부착시켜 高出力運轉이 가능해진 상황을 나타낸다.

이상의 통상운전상황에서 일정 규모 이상의 壓力이 증가하는 1次系統의 압력균형이 무너져 爐內의 물이 1次系統에 침입한다. 爐內의 물은 2,000ppm의 보론濃度로 되어 있으며, 스크램이 되면 爐停止와 동시에 爐心の 自然循環冷却狀態가 유지된다. 즉 爐系統이 殘留熱除(RHRS)를 겸하고 있다.

## 5. 原子爐部分(500~600MWe)

앞에서 언급한 바와 같이 PIUS爐의 최대의 특징은 대형의 물 爐속에 1次系統이 들어있는

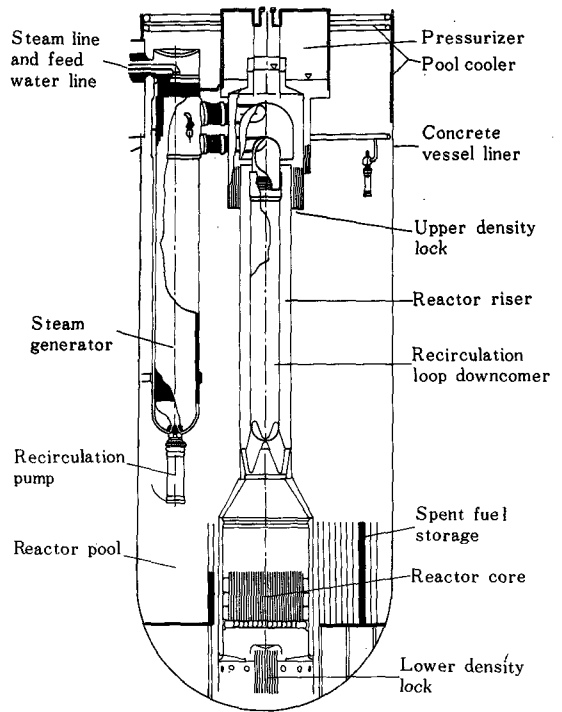
〈그림 1〉 The operating principles of the PIUS primary system



것이다. 풀은 8-10m 두께로 13mφ(内徑), 30mφ(外徑), 35m(내부높이), 60m(외부높이), 重量10萬톤의 Prestressed Concrete Reactor Vessel로서 되어 있으며, 壓力 바운더리(90氣壓)를 형성하고 있으므로 1次系統의 機器에 대한 對壓性能要求는 작다. 풀의 물, 約4000m<sup>3</sup>는 7일간분의 崩壞熱을 증발에 의해 放散하는데 충분하다.

이 풀속에는 2루우프의 1次系統, 加壓器, 使用後核燃料 貯藏施設, 計測센서, 케이블, 補機系統이 포함되어 있다. 또한 이 풀은 通常 經水爐의 ECCS, RHR를 겸해 비치되어 있음과 동시에 15~30년분의 사용한 核燃料의 貯藏도 가능하다.

〈그림 2〉 The primary system of a non-modularized 500MW(e) PIUS plant



### 6. 爐心設計 및 反應度制御系統

PIUS는 기본적으로 PWR이다. 爐心은 BWR의 爐心設計를 기준으로 하고 있으며, 保守的인 설계로 되어 있다. 또 爐心の 높이를 약 2미터로 하여 압력손실을 적게 했다.

反應度制御는 Sm, 可燃性毒物과 보론(1次系統은 500ppm)에 의해 행해진다. 制御棒은 원칙적으로는 사용하지 않고 보론의 농도만으로서 콘트롤하는 것이 특징이다.

### 7. 1次系統

爐心部 以外の 機器는 ① 密度록, ② 再循環펌프, 루프, ③ 蒸氣發生器(貫流式) 등이다. 이들을 전체적으로 그림 2에 표시한다. 최근의 PIUS設計에서는 爐心을 포함해서 계통의 1차 루우프로 구성된 유니트를 2~4개 유니트의 PCRV 內에 收納했으며, 모듈型的의 設計로서 이때의 容

량은 20萬KWe이다.

### 8. PIUS의 BOP

1次系統 이외의 계통인 BOP (Balance of plant) 시스템은 補助機器, 터빈플랜트, 計測制御系統과 건물 및 給水 서비스系統으로 이루어진다.

#### 1) 補助機器

原子爐에서는 안전밸브부분이 콘크리트에 격납되어 있으며, BOP의 補助機器로서는 다음의 것이 있다.

反應度制御系統(보론補給), 1次系統 및 물의 淨化系統, 放射性廢棄物處理系統, 殘留熱除去系統(물 冷却用), 汽水凝縮系統.

#### 2) 터빈系統

터빈系統은 압력이 비교적 높은(580psi) 것을 제외하고는 통상의 것과 다름이 없다. PIUS 플랜트의 熱效率은 原子爐 물에서 1次系統에 대한 열손실이 많아 냉각수의 온도가 30℃일때 30%, 10℃일때 32%의 熱效率을 나타내고 있다.

#### 3) 電氣 및 콘트롤系統

PIUS의 安全性은 이들의 기능이 없더라도 유지된다. 또 이들에 대한 要求性能 및 관련되는 安全系統은 火력정도로도 충분하다. 일반적인 디젤발전기, 전지 등도 필요하기는 하나 耐震要求는 엄하지 않으며, 計測制御系統은 모두 計算機化 可能하다. PIUS設計에서는 기본적으로 통상의 뜻의 余分設計는 불필요하다(PIUS原理에 의해 커버된다).

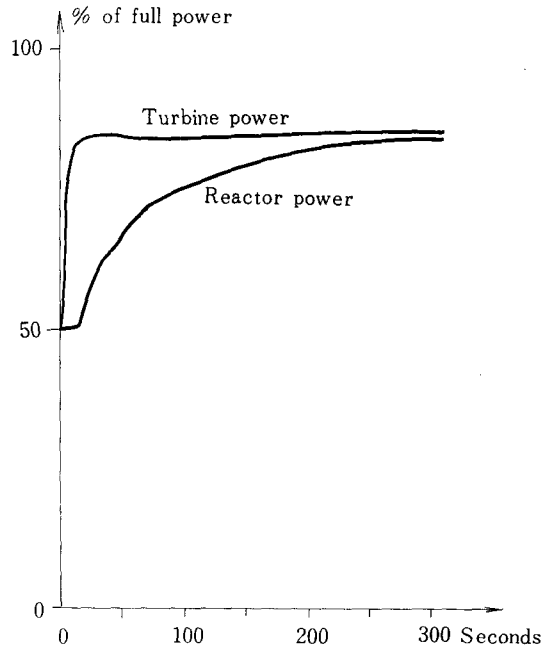
### 9. PIUS의 運轉制御

原子爐制御를 위한 출력 모니터의 내역은 1次系統의 流量과 爐心出入口溫度, 中性子束測定, 發生電力 등으로 出力制御는 아래의 방식에 의해 정해진다.

#### 1) 각 모드制御方式

○起動時: 反應度制御系統에 의한 보론 濃度 制御

〈그림 3〉 Rapid increase in PIUS plant power from 50 to 80% of full power



○出力急上昇時: 給水量에 의한 冷却水 溫度 制御 (그림3 參照)

○急束 爐停止時: 反應度制御 및 보론이 포함된 물의 스크램 밸브

○異常 爐停止時: PIUS原理(密度폭 破壞)

○出力空間分布: 可燃性毒物質, 集合體出口溫度, 1次冷却에 의한 制御.

#### 2) 플랜트 制御

出力上昇은 급수펌프구동터빈의 制御로 밸브를 열어 급수량을 증가시킴으로써 SG 出口溫度가 내려가면 原子爐 爐心の 入口溫度가 내려가므로 그 결과 爐心出力은 상승한다. 또한 보론 制御系統에 의한 反應度 置換도 가능하며 거의 下端部에 와 있도록 제어된다.

펌프정지시에는 5초내에 爐内の 물이 爐心에 도달하여 10초만에 爐는 급정지 한다.

### 10. PIUS의 플랜트 建設

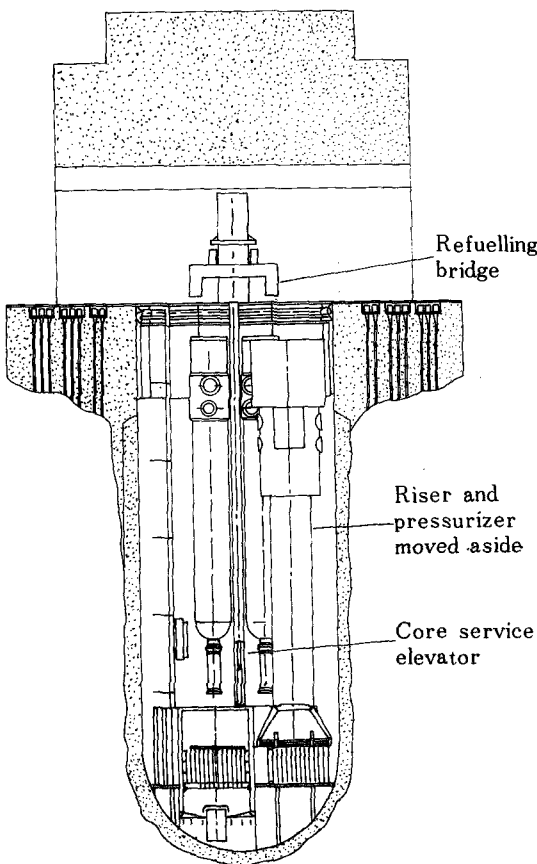
PIUS는 高壓配管이 적고 放射能汚染部도 적

으므로 많은 부분이 종래의 原子爐建設에 비해 간소화된다. PIUS의 PCRV工事에서는 鋼材와 混合材의 유지가 중요하며, 통상에 비해 2배정도 튼튼한 지반이 필요하나 바닥을 깊게 함으로써 대처할 수 있다. 또 플랜트의 工期도 약 4.5년으로 통상의 BWR工期보다 약반년가량 짧다고 한다.

### 11. 메인テナンス 및 燃料交換

PIUS爐內 燃料交換은 상부플러그를 橫方向으로 밀어내어 개방한 상태에서 행해진다(그림 4 參照). 메인テナンス 補修期間은 BWR와 비해 거의 변하지 않는다. 메인テナンス에 있어서

〈그림 4〉 Refuelling of non-modularized PIUS reactor



유리한 점으로서는

- ① 機器의 수가 통상 플랜트에 비해 적다.
- ② 1次系統은 물의 물속에 들어가 있어 접근이 가능하다.
- ③ SG檢査: 플러그처리시 被曝이 없으며, SG 교환도 가능하다.
- ④ PCRV의 라이너는 검사가능 하도록 기기 배치가 되어 있는 점 등이다.

### 12. PIUS의 經濟性

ASEA-ATOM社는 1984년에 건설을 개시한다는 조건으로 PIUS, BWR, 석탄 플랜트에 대해 코스트 비교를 실시하였다.

프로젝트經費, 現場諸施設, 要員訓練, 豫備費, 建設中利子(實質 4%) 등 電力會社의 부담코스트를 포함해서 모든 코스트를 비교하였다. PIUS(非 moduler, 500MWe)에 대해서는 ASEA-ATOM社의 BWR비용과 全機器 및 시스템의 설치비, 品質管理費, 豫備費 등에 대해서도 비교하였다.

BWR의 코스트는 터키플랜트의 PIUS600MWe(200×3)를 비교하면 KWe 당 初期投資는 BWR에 비해 PIUS쪽이 훨씬 싸다. 또 발전코스트도 PIUS쪽이 약간 유리한 것으로 나타난다. 한편, 1,000MWe의 PIUS는 현재로서는 설계되어 있지 않고 있으므로 500MWe와 1,050MWe BWR를 비교하면 初期投資에서 PIUS쪽이 10%높고 발전코스트에서는 5%가량 비싸다.

### 13. PIUS爐의 將來

현재 PIUS의 개발단계는 ASEA-ATOM社에서 이미 基本原理, 確認을 위한 30kW 히터에 의한 루프實驗을 끝마치고, 지금은 3MWt熱交換器를 計算機制御로서 模擬爐心化한 大型루프를 사용해서 각 부분의 상세설계에 들어갈려 하고 있다. 또한 앞으로 美國의 협력을 얻어 爐를 건설할 희망을 가지고 있다.