

# 스웨덴의 原子力産業



玄 雄

(스웨덴 원자력회사 고문)

## ◇ 원자력산업의 현황

1981년 스웨덴의 1인당 원자력 발전 평균소비량은 4,400kwh로, 세계 최고의 소비량을 기록했다. 현재 가동중인 9기의 원자력발전소는 시설용량이 총650만 kwe이며,年間 총 발전량은 무려 36억 kwe에 달해, 스웨덴전체의 100kwe中 36%를 점하는 주요 電力源이 되어있다.

이러한 원자력 중심의 發電을 뒷받침 하기 위해 스웨덴 정부는 발전시설용량의 확충은 물론 원자력산업전반에 걸친 下部구조 강화를 강력히 추진하여 왔으며, 이러한 노력의 일환으로 원자력기술의 自主의 確立에 역점을 두어 왔다.

이러한 目的을 달성하기 위하여 전력을 기울여 온 결과 스웨덴은 그간 括目할 만한 성과를 이룩해 있으며 제한된 人力資源과 資本의 한계성을 극복하여 자급상태에 이른 원자력開發을 시행할 수 있게 되었다.

스웨덴은 원자력발전소의 높은 신뢰성과 안전성을 확보·유지하기 위하여 탁월한 그들의 기술을 발휘하여 왔으며 특히 원자력발전소 운용에 부수되는 각종 放射性廢棄物의 處理·處分을 위한 장기대책을 수립하여 놓았다. 더

나아가서 원자력과 밀접한 관련이 있는 기타 산업의 개발도 이미 성숙단계에 이르고 있다.

원자력發電産業을 위한 下部構造로는 첫째 우수한 원자력科學技術이 있겠으며, 원자력발전소에 대한 제반 技術用役機關과 補修전문용역단체, 원자력安全과 放射線防護, 品質管理 및 원자력安全措置對策 등을 담당하는 관련기관이 있게 된다. 스웨덴은 이 분야에서 오랜 경험과 빛나는傳統을 쌓아 왔다. 오늘날 원자력발전소의 기획, 機資材供給 및 建設監理에 있어서 기술과 工業能力이 독보적인 위치에 서있다.

또한 원자력發電所 運轉要員의 양성을 위해서 각 發電公社 소유의 훈련시설과 원자로 제작사와 발전회사가 공동으로 운영하는 시뮬레이터시설을 적극 활용하고 있다. 스웨덴이 개발한 시뮬레이터는 세계 첨단의 기술로 만들어졌으며, 원자력발전소 운전요원들의 시운전훈련은 물론 이들에 대한 재훈련용으로도 사용된다.

스웨덴의 우라늄매장량은 유럽 최대이다. 현재 시범규모로 이에 대한 채광 활동을 펴고 있으며, 이에 관련된 채광기술 또한 제반 문제점들의 철저한 파악과 더불어 그 개발이 활발히 진행되고 있다.

현재 스웨덴 원자력발전공사들은 우라늄농축만을 해외에 의존

하고 있을뿐 六弗化우라늄(UF<sub>6</sub>)을 二酸化우라늄(UO<sub>2</sub>)으로 교환하는 공정과 핵연료의 成型加工을 독자적으로 해내고 있다.

## ◇ BWR (沸騰式 輕水爐)

### ① BWR의 효율성

현재 스웨덴에서 가동 중인 9기의 원자력 발전소 가운데 7대가 BWR 爐型이다. 현재 건설 중인 3기의 원자력발전소 중 2기도 BWR이며, 그 나머지는 美國 웨스팅 하우스社의 加壓式 輕水爐 즉, PWR 爐型이다.

이 3대가 竣工되는 '80년대 중반에는 스웨덴 內에서의 원자력 占有率은 50%에 이르게 되며 人口 100萬名 當 1.5기의 動力爐가 가동되게 된다. 이 중에 3/4은 BWR이 접하게 되는 것이다.

스웨덴이 자랑하는 이 BWR 爐型은 스웨덴 유일의 원자力會社 ASEA-ATOM이 설계 제작한다.

스웨덴 원자力産業의 가장 괄목할 만한 발전의 하나로 ASEA-ATOM社의 BWR의 개발을 들어야 할 것이다. 1969년 ASEA 그룹의 子會社로 출발한 이레 스웨덴 원자力産業발전의 핵심을 이루어 왔던 ASEA-ATOM社는 꾸준한 연구개발을 통하여 독자적인 설계로 이 爐型을 개발해 내었고 세계 첨단의 기술을 인정받

았다. 사실 스웨덴의 원자력산업은 ASEA-ATOM을 母體로 성장한 것이며 ASEA-ATOM이 원자력분야에서 이룩한 눈부신 업적과 기술발전은 바로 스웨덴의 국가적인 원자력개발사업의 가장 직접적이고도 강력한 요소가 되어 오고 있는 것이다.

이 BWR은 그간 총 40爐年(reactor years)의 商業稼動을 실현해냄으로써 높은 신뢰성과 효율성을 입증하였다.

② BWR爐型의 기본원리

BWR방식의 원자력발전소는 다음과 같은 특징과 원리를 지닌다.

첫째, 輕水는 冷却材와 減速材 구실을 하며, 蒸氣는 爐心内에서 沸騰하는 물에서 생긴다.

둘째, 蒸氣循環系統은 직접순환식으로 원자로 내부에서 생긴 증기는 중간의 熱交換器를 거치지 않고 직접 터빈으로 들어간다.

셋째, 原子爐부분의 기계구성은 원자로 壓力容器와 그 안에 들어 있는 機器 즉, 爐心과 爐心支持用部品들이며, 그밖에 減速材 탱크와 그 支持物과 뚜껍 핵연료 支持板, 上部爐心 그리드제어봉의 導管과 爐心内 計測器, 蒸氣分離器, 증기乾燥器가 있고 최신형의 BWR에는 内部 재순환펌프가 추가된다. 일반적으로 制御棒과 제어봉驅動裝置도 원자로 부분에 포함시키는 것이 상례이다.

핵연료는 二酸化농축우라늄으로 구성되어 있으며 Zircaloy-2를 被覆材로 쓰고 있다. 운전초기에는 대부분의 熱이 U-235原子核이 분열할때 발생하는 에너지에 기인하지만 연소가 진행됨에 따라 U-238 원자핵이 플루토늄으로 변환하므로 점차적으로 플루토늄핵분열로 말미암은 에너지로 인한 열도 상당한 몫을 차지하게 된다.

네째, 원자로의 핵연료 再裝填

은 매년 실시하도록 설계되어 있다. 일반적으로 爐心の 20~25%를 해마다 교체하는 것이 관례로 되어 있다.

다섯째, BWR방식의 증기순환과정은 간편하고 단순하다. 노심에서 발생한 증기는 직접 터빈으로 가게 되고 그 다음 復水器를 거쳐 爐心으로 되돌아 오게 된다. 凝縮된 물은 精製와 예열과정을 거쳐 供給水로서 원자로 안으로 되돌아 온다.

BWR발전소의 증기순환과정은 여러면에서 在來式 火力發電所의 경우와 유사한 점이 많이 있다. 초기의 火力發電所에서는 冷却材의 自然對流에 의존하고 있었으나 시대가 바뀌어 기술개발이 활발해짐에 따라 후기의 발전소에서는 強制循環式을 채택하게 되었는데 그 이유는 비등과정에서의 熱出力을 높이기 위한 목적 때문이다. 같은 이유로 최근의 BWR 설계에서 強制再循環系統을 도입하고 있는 이유는 爐心内的 出力密度를 높이기 위해서이다.

爐心은 原子爐容器안에 들어 있는데 최신식 BWR에는 이 외에도 증기분리기, 증기전조기, 공급수살포기와 재순환임펠라가 설치되어 있다. 이렇게 하므로써 蒸氣供給系統을 되도록 간편하게 설계하고 또한 壓力容器에 부착하는 大口徑의 파이프 數를 줄이는 효과를 얻게 되었다. 뿐만 아니라 증기供給系統을 이 처럼 간편하게 만들었기 때문에 단순한 格納容器설계가 가능하다.

③ BWR과

PWR(加壓式 輕水爐)

비등식 경수로(BWR)와 가압식 경수로(PWR)는 여러 면에서 서로 유사하다. 두 爐型이 다 輕水를 冷却材와 減速材로 사용하

며 低濃縮 二酸化우라늄을 연료로 쓰고 있다. 또한 두가지 모두 동일한 原子爐安全基準을 토대로 설계되었으며 기획과 설계 및 건설에 있어서도 同型의 시설과 기술을 필요로 한다. 발전소의 運轉과 補修要員 또한 동일 유형의 인력으로써 충분히 가능하다.

그러므로 대부분의 원자력발전 국가에서는 BWR과 PWR이 동시에 長期 원자력개발계획에 사용되어 성공을 거두고 있는데 이는 이 두가지 爐型이 동일한 産業의 下部構造를 근간으로 하여 동시에 平行的으로 추진 될수 있음을 입증하는 것이다.

BWR과 PWR의 가장 큰 차이점은 蒸氣 발생기의 有無에 있다.

ASEA-ATOM BWR 原子爐설계에서는 말쑥하고 골치아픈 증기발생기와 가압기는 물론 재순환용 배관 계통을 배제하고 있다. 爐内에서 생긴 에너지는 직접 증기로 변환되어 電氣에너지를 생성하게 되어 있기 때문이다.

PWR의 증기발생기는 조건이 안좋은 경우 이를 냉각시키는데는 장시간이 요구되며 까다로운 기술이 필요하게 된다. 압력이 떨어지게 되면 증기의 흐름이 방해되어 유일한 熱收容器인 蒸氣發生器로 증기가 흘러 冷却材의 유입을 방해하기 때문이다.

BWR방식은 증기가 原子爐 容器안에서 생성되어 터빈으로 직접 공급된다(直接循環式). 이에 비해 PWR방식은 증기가 蒸氣發生器에서 생성되게 되어 있다(間接循環式). 그런데 바로 이 증기발생기의 작동이 매우 까다로와 단일 고장이 나게 되면 修理作業이 너무 복잡해 보통 오랜기간 발전소가동이 중지되며 이경우 비용의 손실은 매우 엄청나다. 현재까지의 조사에 의하면 증기

발생기의 수명은 15년 이상 가기가 힘든 것으로 나타나 있다. 따라서 BWR과 PWR을 비교 평가할 때 PWR의 증기발생기 고장 또는 수리가 불가능할 경우, 交替해야 할 때 소요되는 비용은 대단히 크다. 그리고 이 교체작업시 작업원들에게 가해지는 放射線 集積被曝量이 무려 2000 Man-rems에 이른다는 사실도 주시해야 할 것이다.

원자력발전소에 대한 요구조건과 수요는 시대와 더불어 발전하게 된다.

원자력발전소는 항상 基底負荷로 운전한다는 개념을 근본적으로 수정해야 할 때가 온 것이다. 원자력발전소의 제어, 운전 및 핵연료관리에 대한 방법도 새로이 정립되어, 발전소운전비를 절감해야 할 것이다. 비등식경수로는 기술과 상업성에 있어서 이미 성숙단계에 도달하였으며, 이 爐型에 의한 각국의 발전 점유율은 이미 상당한 수준에 이르고 있다.

## ◇ 原子爐心과 설계 핵연료

商業用 輕水爐의 개발에 있어서 가장 해결하기 힘든 어려운 과제 중의 하나는 핵연료의 出力密度(Power density)와 핵연료봉의 線出力密度(Linear heat rating)의 강화로서 이는 輕水爐의 경제성 향상에 결정적인 구실을 하는 것이다. 현재 그 간의 개발에 힘입어 BWR의 出力密度는 경제적 最適值인 23~25w/cc에 이르게 되었다. 또한 최근에는 8×8 格子 핵연료다발의 線出力密度가 점차 감소하는 추세에 있으며, ASEA-ATOM社의 革新的設計인 Oskarshamn 1號機가 그 좋은 예이다. 지난 10년간 스웨덴에서는 원

자력 산업의 발전이 활발하게 이루어져 왔으며 동시에 발전소운영의 융통성에 대한 필요성이 점차 증가되어 正常稼動時는 물론, 비상시에도 爐心の 성능이 제 기능을 발휘해야 할 경우가 한결 많아 졌다.

이 무렵 ASEA-ATOM에서는 原子爐心の 作動狀態를 자동적으로 기록·평가하는 컴퓨터 프로그램을 발전소에 설치하여 原子爐의 효율성향상을 꾀하였다. 또한 可燃性 吸收體(Burnable Absorber; BA) 핵연료를 사용하여 制御棒을 보조함은 물론, 爐心の 出力分布을 효과적으로 관리하고 尖頭出力比를 낮추고자 하였다. BA物質로는 Gadolinia( $Gd_2O_3$ )를 사용하며 이것은 爐心内の 半徑方向과 軸方向에 따라 각기 다른 함유량으로 각 핵연료봉에 분산되어 있다. 또한 BA물질은 原子爐의 운전주기 중에 생기는 반응들의 급격한 변화를 억제해 줌으로써 反應度 制御部分의 필요 용량을 감소시켜주는 역할을 한다. 制御棒操作에 單一節次 運轉方法을 적용함으로써 원자로의 出力 制御技能은 冷却材 再循環泵프로 조절할 수 있게 되었으며 發電所 内部의 온라인 컴퓨터·프로그램을 통해 爐心内の 작동상태를 적시에 효율적으로 통제 할 수 있도록 설계하였다.

또한 제어봉의 단일절차운용방식은 PCI(Pellet Clad Interpretation, 핵연료와 被覆材의 상호작용)를 예방하는데 중요한 구실을 한다. PCI는 輕水爐에서 일반적으로 나타나는 현상으로서 제어봉의 작동으로 인해 局部的으로 생기게 되는 급격한 出力增強으로 말미암아 발생한다.

ASEA-ATOM에서 개발한 정밀작동용 제어봉스크류와 너트식

구동장치는 제어봉의 저속적인 운동을 가능하게 함으로써 PCI 현상예방에 역점을 두고 있는 혁신적인 장치이다. 더우기 단일절차 운전방식을 채택하였기 때문에 제어봉작동은 발전소의 始動時에만 필요하게 된다. 그 결과 PCI로 인해 발생하는 발전소의 利用率 低下가 他 輕水爐발전소의 경우에는 1~3% 이지만 ASEA-ATOM의 경우 0.4%에 지나지 않게 되었다.

원자력발전소에는 핵연료비가 비교적 낮아 총 발전비에 극히 일부분을 차지 하고 있으나 濃縮費와 後行 핵연료週期費가 점차 상승세에 있어 핵연료의 이용비도 이에 따라 증가추세에 있다.

이러한 핵연료 비용의 증가에 대비하여 새로 개발된 것이 ASEA-ATOM의 개량형 BWR 핵연료集合體 즉, SVEA이다. 이 集合體 안에는 十字型의 물 공간이 마련되어 있어 반응도를 현저히 높임과 동시에 局部出力과 尖頭出力比를 낮출 수가 있게 되었다.

이렇게 함으로써 중성자의 경제성이 현저하게 높아지며 핵연료의 平均濃縮度를 낮추게 되어 궁극적으로 핵연료의 평균연소도가 증가하는 효과를 보게 되는 것이다. 핵연료週期費가 실제로 얼마만큼 절감될 것인가는 각 原子爐에 裝填하는 SVEA型 핵연료의 양에 따라 달라지겠지만, 대체로 약 10%, 즉 핵연료의 成型加工費에 해당하는 금액 만큼이 절감되리라 본다.

## ◇ 原子力 地域煖房

원자력을 대규모의 발전에 응용하기 시작한지 25년 이상의 세월이 흘렀다. 그간 핵분열時 발

생되는 熱로서 증기를 만들어 여러분야에 응용해 보려는 시도가 꾸준히 있어왔고, 아이디어 또한 다양했다. 그중에는 실용화 단계에서 실패로 끝나버린 것도 있으나 꾸준한 개발의 결과 상업가동에 성공한 것도 많다.

난방용 에너지源에서 석탄 및 석유의 비중을 줄여야 한다는 사실은 지극히 당연하다.

그렇다면 가장 완벽하고도 경제적인 난방용 에너지源은 원자력이 될것이다. 그런데 이 원자력을 난방용으로 대치할 경우 두가지 방안이 생긴다. 하나는 熱併合 原子力발전소에서 熱과 전력을 동시에 생산하는 방법이고, 하나는 小型熱生産專用 原子爐에서 熱만을 생산하는 방법이다.

열생산전용의 低溫·低壓原子爐는 아주 독특하게 설계되어 있어서 原子爐稼動이 정지되거나 爐心을 냉각해야 할 경우 아주 간단한 물리적 절차로서 이 문제를 해결할 수 있고 공학적 안전설비 또한 거의 필요없다.

스웨덴의 ASEA-ATOM 社가 개발한 열생산용 SECURE 원자로가 바로 이 저온·저압원자로도 특히 열출력 150MW 이상의 수요가 있는 밀집지역에서 활용될 수 있는 가장 이상적인 爐型이다.

또한 설계의 안전성으로 인하여 原子爐부지를 도심과 같은 열수요 중심부에도 설치할 수가 있어 궁극적으로는 열수송용 배관계통의 건설비용을 절감할 수 있다.

### ◇ 後行 核燃料 週期

스웨덴은 後行 核燃料주기에 대한 연구와 개발을 여러 각도에서 추진하고 있다.

초기의 스웨덴 원자력정책은 재

처리와 플루토늄 재순환에 우선적인 주안점을 두고 시행되었으며 지금도 원자력의 계약조건 관련 법률에는 原子爐 認許可의 전제조건으로서 高準位 폐기물이나 사용후 핵연료는 반드시 방사성 폐기물로 취급되어야 하며 이에 대한 처분方式을 제시하도록 되어 있다.

핵연료의 후행 주기에 대한 스웨덴의 공식적인 입장은 다분히 객관적이고도 관망적이다. 그러나 재처리에 의한 폐기물과 사용후 핵연료의 최종 처분에 대해서 위에서 언급한 바와 같이 아주 구체적이고도 명백하다.

그들은 세계 최초로 사용후 핵연료의 爐外隔離貯藏(Away from Reactor : A. F. R.)을 위한 시설 설계를 완료하여 현재 건설중에 있다. 이 시설로 스웨덴은 서기 2000년 까지 자국내에서 배출될 사용후 핵연료의 전량을 수용하게 된다. 또한 고준위 폐기물과 사용후 핵연료를 저장하기에 적당한 토질조사도 이미 착수해서 활발히 진행 중이다.

이 AFR 시설에는 사용후 핵연료의 해상운송단에 대한 설계 및 그의 시행도 포함되어 있다.

### ◇ 맺는말 : 韓·瑞協力の 새로운 地平

스웨덴은 原子力 발전의 풍부한 경험을 살려 발전소 전체의 신뢰성향상과 이용율의 증진은 물론, 발전소설계의 최적화에 궁극적인 목표를 두고 연구와 개발에 끊임 없는 노력을 쏟고 있다. 현재 ASEA-ATOM에서는 Process-Computer를 개발하여 발전소 운영의 완전 전산화를 꾀하고 있다.

ASEA-ATOM은 BWR用 機器 및 部品の 공급 외에도 전반적인 原子力設備(Nuclear Island)에 대한 기술응역과 원자력발전소에 대한 一括都給引渡契約(Full-Scope Turnkey Delivery) 등도 취급한다.

대한민국은 원자력발전 개발에 있어서 세계에서 가장 야심적인 계획을 세우고 있는 나라 중의 하나이다. 원자력개발계획과 이에 대한 추진정책이 아주 완벽하게 작성되어 있어 조만간 원자력이 지금까지 발전연료의 주종을 이루고 있는 石油을 능가하리라고 전망된다.

원자력이용을 확대해 나가려면 이 분야를 지원하는 제반 산업의 下部構造도 아울러 확장해야 하는 바, 이를 추진함에 있어서 특히 유의할 점은 원자력 개발계획을 국내 주도형으로 이끌어야 한다는 것이다.

스웨덴은 지난 30년간 원자력 개발을 국내 주도형으로 자주적으로 추진해 온 결과 세계 최고의 1人當 原子力發電量을 이룩할 수 있었다. 전 세계는 스웨덴을 原子力事業의 標本國家로 공인하였고 “原子力 스웨덴”의 명예로운 칭호를 부여하였다.

“原子力 스웨덴”은 이제 “原子力 韓國”의 염원이 이루어 지도록 그들이 지닌 先進技術知識과 技術秘法(Technology and know-how)을 우리와 나누어 가지려는 준비를 서두르고 있다.

이 기술이양의 과정에는 핵연료의 成型加工기술도 포함되며 ASEA-ATOM의 경우 그들의 한국 측 被免許權者에게 技術秘法을 전부 이양하여 줌으로써, 장차 한국시장에서 독자적인 원자력발전소 공급이 가능하게 되도록 계획을 추진하고 있다.