

## 기술논문

# 原子力發電：安全性의 水準

本稿는 美國 MIT大學 原子核工學科의 Lawrence Lidsky氏가 Nuclear Power : Levels of Safety 라는 題目으로 發表한 논문이다.

美國에서 原子力發電은 이미 사양길에 있다. 미국의 전력 각사는 1970년대 중반에 원자력발전플랜트의 발주를 중지했으며, 앞으로도 재개될 전망은 없다. 사실 현재 건설중인 플랜트의 완성을 제외하고는 원자력이나 化石연료를 불문하고 과거 10년간에 미국의 발전설비베이스로드에 실질적인 추가는 없었다.

그러나 이런 원전플랜트의 발주중단이 적어도 미국의 전력소비자에게 있어서는 그다지 고통을 주는 일은 아니었다. 전력에너지의 보존노력을 비롯, 부하증가의 저성장 및 민간소유소규모 전력공급원의 증가 등이 결합되어 전력수요에 부응할 수 있었기 때문이다. 그러나 플랜트의 신설을 뒤로 미루는 자유도 현재 과잉상태에 있는 설비용량이 부하성장에 따라 서서히 침식되었다. 그 보다 더 중요한 것은 既設플랜트의 대부분이 수명을 끝내고 멀지않아 전열에서 이탈한다는 이유에서 그리멀지 않은 시기에 전력공급량이 부족할 것으로 생각된다. 비교적 소극적인 부하성장률의 예측에서도“평균적인 사이즈”의 원자력발전플랜트 10~15기 상당이 실질적인 설비추가용량으로서 미국 전

력 각사에 의해 1995년 쯤부터 매년 설치되어야 할 상황에 있다.

구체적인 신설플랜트의 설치시기 및 설치장소는 지금 현재로서는 명확하지 않지만, 적어도 뭔가 질적인(그것도 종래보다는 양호한) 변경이 이루어지지 않는 한 신설플랜트가 원자력 이외의 형태가 되는 것은 명백하다. 미국의 전력설비용량계획의 관계자는 개인적인 의견이라고 하면서 다시 원자력발전플랜트를 발주할 계획은 전혀 없다고 말했다. 설비용량의 증가는 가능한 한 뒤로 미루어져 그후 여러가지 비핵자원으로 조달하게 되겠지만, 그 주역을 맡는 것은 개량형 석탄전소발전플랜트가 될 공산이 크다고 한다. 만약 현상에 아무런 변경도 이룰 수 없다면 총 발전량에 대한 원전의 기여율은 현재 건설중인 원전플랜트가 가동을 개시하는 시점에서 달성하도록 되어 있는 20%가 최고 수준이 되며, 그것을 정점으로 이후 그 기여율은 감소될 전망이다.

미국 이외의 공업선진제국에서 원자력발전의 現狀은 현존하는 플랜트를 단계적으로 소멸시켜 간다고 선거에서 공약한 스웨덴에서(同國

에서는 현재 총 발전량의 50% 가까이가 원자력으로 조달되고 있다)부터 이미 전력소비총량의 3/4을 원자력으로 생산하고 있고 「그 성장증가는 수요가 있을 경우에 한한다」고 하고 있는 프랑스에 이르기까지 여러가지이다. 그러나 대부분의 국가는 중간적인 입장에 있고, 대체로 자국 발전생산량의 15%에서 30% 정도를 원자력발전으로 조달하고 성장률도 완만하다(물론 이런 경향에는 체르노빌사고가 큰 영향을 미쳤다고 생각되지만).

미국 이외의 각국에서 원자력발전으로의 의존이유는 대부분이 단순히 원자력 이외의 연료 자원이 충분하지 않은 데 있다. 비공식적인 몇가지의 원자력발전 슬로건은 “가스가 없다, 석유도 석탄도 없다, 그렇다면 선택의 여지도 없다”는 것인데, 그러나 언제나 이런 간단한 이유로 해서 해결이 날 수 있는 성질의 것은 아니다. 원자력발전은 실사 이용가능한 代替策이 있다 해도 대부분의 나라에 있어서는 단순히 「보다 경제적인 좋은 선택」으로 되어 있다. 왜냐 하면 代替策은 어느 것이나 高價인데 비해, 원전플랜트는 높은 신뢰도로 운전이 가능하며 또 동시에 높은 효율도 기대할 수 있기 때문이다.

어느 나라나 원자력발전플랜트의 대다수가 미국설계의 直系이거나, 그렇지 않으며 미국의 공급업자에 의해 건설된 것임에도 불구하고 이것들은 모두가 미국에서 보다도 훨씬 높은 신뢰도로 운전되고 있는 것처럼 보여지고 있다. 고도의 신뢰성으로 뒷받침된 운전과, 높은 코스트의 化石연료를 피하고자 하는 경향이 함께 하여 원자력발전은 실질적인 경제적 유리성을 부여하는 것으로 되어있다. 이같은 사실은 만약 신뢰할 수 있는 운전과 타당성 있는 건설코스트가 결부된다면 미국에서도 충분히 실현가능성이 있을 것이다.

만약 변경이 이루어지지 않는 채 시간이 경과하면, 다음 세기 초에는 유럽 및 아시아 주변의 공업국은 원자력으로 전력의 대부분을 충당

시킬 수 있는 상태에 이르게 되는데도 불구하고, 미국은 전력니즈에 대해 原電플랜트가 중요한 기여를 할 수 없게 되며, 그 정도도 점차 감소되는 사태를 맞이하게 된다. 이런 상황은 화석연료의 사용이 환경에 심각한 영향(대기중의 CO<sub>2</sub> 증가와 산성비의 문제 등)을 주는 것과 맥을 같이 하여 미국을 競合性 면에서 불리한 국면으로 몰아넣게 될지도 모른다.

원자력발전은 현재 이용가능한 대규모 전력원으로서 가장 경제성이 높으며 환경에 주는 손해가 가장 적은 잠재적인 가능성을 갖고 있다. 이 가능성을 실현시키기 위해서는 건전하고 가장 적합한 원자로가 필요하게 될 뿐 아니라, 신규연료물질 취득 및 폐기물 처분의 양면에 걸쳐 세심한 관리가 필요하게 된다. 이것은 미국 이외의 나라들에 의한 경험에 근거를 두고 있는데, 그 가장 좋은 예가 프랑스와 일본이다.

채굴 및 처분을 적절히 관리하는 기술은 오늘날에 와서는 확립되어 수용되는 단계에 있으나, 원자력발전 개발의 초기 단계에 요구되었던 것 보다는 훨씬 경비가 드는 것이다. 이것은 당시 이와 같은 소위 “비생산적인”영역에 자금을 투입한다는 것은 그다지 경비가 들지 않는 원전시스템에 적지않은 영향을 미치게 될 것이라고 생각을 하였었기 때문이다. 채굴과 폐기물의 처분에 자금을 투자하고 싶지 않았던 초기 단계의 소극적인 경향이 그후 경솔하다고 생각되는 각종 계획의 “확산”의 원인이 되기도 하여, 나아가서는 「원전계획에 동의하지 않는다」는 대중의 대규모 반대운동을 낳는 결과로 결부되고 있다. 현재의 상황은 상당히 개선되기는 하였으나, 그래도 대부분의 원전 추진자는 채굴 및 폐기물 처분의 진정한 의미에서의 코스트를 충분히 이해하기에 이르지 못하고 있다. 채굴 및 폐기물 처분문제야말로 현재로서는 기술적이라기 보다 오히려 사회적인 문제로 되어 있는데서 이러한 수용가능한 기술이

현존하고 있는 것을 증명하는데 충분한 증거자료를 꼭 정책적인 곳에 제공해야 할 것이다. 전력회사의 운전원 및 일반대중의 쌍방이 받아들일 수 있는 원자로가 이용가능해졌을 때 비로서 원자력발전은 미국에 있어서 바람직한 옵션이 될 수 있을 것이다.

## 무엇이 잘못되어 있는가?

왜 원자력발전은 미국내에서 잘 되지않고, 다른 나라(프랑스, 일본, 벨기에, 서독 등)에서는 순조로운 것일까? 이 의문에 대해 과거 몇 년에 걸쳐 철저한 검토가 거듭되었고 또 전문적인 보고서가 거의 매달 발행되었다. 근본적인 이유는 간단하며, 또 대부분의 보고서도 기본적으로는 의견을 같이 하고 있다. 즉, 현재의 원자로가 모두 미국의 제도적인 기구와 잘 합치되지 못하는 점에 문제가 있다.

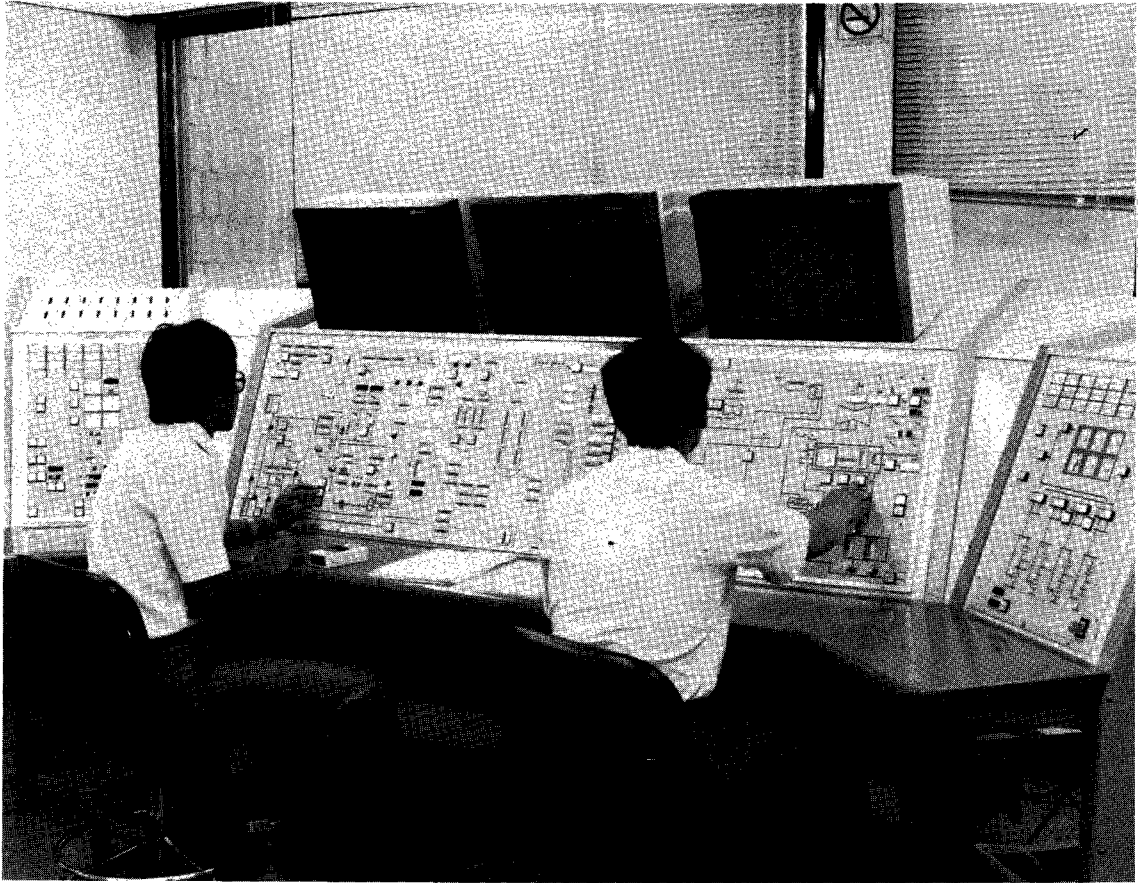
현세대의 여러가지 원자로는 그 기본적인 설계사상에 근거하여 고유적으로 대규모인 외에도 복잡한 장치로 되어있다. 미국의 발전시스템 또한 민간, 공공 및 연방의 소유 등에 관련되는 발전설비의 혼합체이기 때문에 당연히 복잡화되고 있으며 그 성능, 경험, 건설기간 등도 크게 다르다. 또 시스템 개개의 요소는 각기 다른 무수한 제도상·규제상의 제약을 받고 있다. 즉, 우리는 복잡하고 다기에 걸친 각종 기술과 복잡하게 얽힌 경제적·정책적 기구와의 整合性을 도모하는 노력을 강요당하고 있는 것이며, 따라서 성공률이 매우 낮은 것도 그다지 놀랄 것이 못된다. 다른 나라에서는 이미 이런 사회기구를 복잡한 기술과 잘 적합하도록 조정하고 있든가, 혹은 원자력기술의 요청에 합치되도록 자국의 각종 기구에 배려를 하고 있는 실정이다.

이 곤란한 문제도 가령 미국의 각종 제도, 특히 규제기구가 합리화·간소화될 수만 있다면 그것 만으로 해결될 수 있다고 “원자력커뮤니

티”의 멤버는 기회있을 때 마다 반복하여 주장하고 있다. 그러나 지금까지의 역사를 더듬어 보면 이러한 의론은 전혀 무익한 것임을 알 수 있다. 미국의 일반대중은 그들이 최대한으로 참가할 수 있으며 명확한 전력배분과 여러가지 보장조치 및 매력을 겸비한 다원적인 시스템을 요망하고 있어서 이 문제 해결은 그만큼 간단한 것은 아니다. 확실한 콘센션스가 확립되어 있지 않는 한 이런 시스템은 대부분 장황한 많은 의론을 낳게 하며 욕구불만을 일으킴과 동시에 효율을 저하시킬 우려가 있다. 그러나 극단으로 긴급을 요하는 것을 제외하면 바람직한 조작모드라고 할 수 있다. “원자력옵션을 오픈으로 해 둘 필요성”은 이런 종류의 긴급사항에는 속하지 않는다고 감득되고 있는 것은 올바른 것이며, 따라서 현재의 복잡한 기술에 정책기구형성을 보다 좋게 합치시키려는 시도도 지금까지 거의 성공하지 못했고 성공의 찬스도 부여받지 못했던 셈이다. 기술의 변경이 필수적이며, 그 변경은 먼저 현실적으로 인지된 안전성문제에 집중하는 것이 중요하다.

## 어떻게 안전해야 하나(How Safe?)

거의 모든 원전플랜트는 비판하는 측의 말을 들으면 수용할 수 없을 정도로 위험한 것이며, 한편 수비측의 평가로는 분명히 “충분히 안전(safe enough)”하다(수 많은 “증거 자료”가 수반되는 것이 보통)고 말하고 있다. 위험성에 관해서는 다른 “通常”의 사회적 리스크 및 보험통계요인 등과 비교하기 위해 전산기에 의한 계량도 실시되고 있으나, 그 이상 의론의 진전을 보기에 이르지 못하고 있다. 리스크의 정량적인 측정법의 개발은 곤란하며, 그 검증은 거의 불가능하고, 그것을 방지하는 것 또한 더욱 어렵다. 이에 비해 定性的인 순위설정은 전제가 되는 안전성의 레벨을 달성한다는 기본적인 생각에 준거하고 있는 점에서 실질적으로는 보



다 유용하다는 것이 밝혀지고 있다. 정성적인 그룹내에서 상대적인 위치설정을 하는 데 관해서는 의문의 여지가 없지 않다고 생각할 수 있으나, 그룹자체에 관해서는 전혀 이론의 여지가 없다고 했다. 그 이유의 하나는 전혀 필요없는, 따라서 결코 포함되지 않는 각 기기의 고장 발생확률에 관해서는 의견의 일치를 요하지 않는다는 점을 들 수 있다. 이와 같은 순위설정의 기준은 다음과 같다.

레벨0의 안전성을 달성할 수 있는 원자력시스템은 아직 실현되지 못했다. 핵분열프로세스에서는 몇백이라는 여러 종류의 폐기물이 생산된다. 그 중 어떤 것은 방사성을 띠고 있으며, 또 어떤 것은 유독하다. 그리고 유독성·방사성·휘발성 등 세 종류의 성질을 띠고 있는 것도 실제 존재한다. 따라서 핵분열은 기본적으로

로 위험물질을 내포하고 있는 것이라고 말할 수 밖에 없다.

바람직하지 못한, 그러나 피할 수 없는 폐기물의 발생과 함께 핵분열은 순간적인 열발생(핵분열 생성물이 정지할 때)을 동반할 뿐 아니라, 여러가지 핵분열폐기물이 붕괴됨에 따라 부가적 열의 遲滯發生을 초래한다. 물론 순간발생열의 방출이 순프로세스의 목표이지만 원자로 설계자에게 부과된 과제는 이 순간발생열의 방출을 시설의 발전부문에 효율적으로 인도함과 동시에 방사성폐기물이 결코 환경 속에 방출되지 않도록 그 확실화를 도모하는 데 있다. 설계담당자는 또 遲發性열방출이 냉각에 지장을 주었을 경우에도 원자로에 손상을 입히지 않도록 보증하는 노력을 기울여야 한다. 이와 같은 설계상의 제문제를 해결해야 할 각종

방책이 검토된 결과 여러가지 원자로설계가 창출되었고 그것을 각종 안전카테고리에 위치를 정하는 일이 시행되었다.

이 위치설정은 그 대부분이 燃料體배열 및 냉각재 선택에 의해 결정되어야 한다고 말하고 있다. 다음의 논의는 원자로를 레벨3에서 레벨1로, 가능한 한 보다 고도의 단계에 도달시키기 위한 것이다. 보다 안전성이 높은 레벨1의 원자로에 비해 놀랄만큼 소규모이며 간결한 것이 될 것으로 생각된다. 현존하는 원자로는 대체될 장래의 爐와 비교했을 경우 훨씬 복잡한 구조임은 사실이지만, 그 간결화는 다른 많은 사례와 마찬가지로 이해도가 깊어지고 각종 재료가 개량이 된 후에 실현되는 것이다.

**<表1> 定性的 안전성의 구분**

**레벨0 :**

재해를 주는 물질, 또는 폐쇄된 에너지源을 전혀 수반하지 않는 것.

**레벨1 :**

서브시스템 파손시에 능동적인 시스템을 필요로 하지 않고, 주요한 구조상의 파손 및 운전원의 오조작 등의 영향을 받지 않는 것.

**레벨2 :**

서브시스템 파손시 능동적인 시스템을 요하지 않는 것. 단 주요한 구조상의 파손 및 운전원의 오조작 영향을 받는다.

**레벨3 :**

시스템의 작동불량 또는 운전원의 오조작에 적극적인 대응을 요하는 것. 縱深防禦의 대상이 된다. 중대한 구조상 파손의 영향을 입는다.

\* 상기의 각 레벨에는 記述的인 평가를 수반하는 일이 많지만 이 평가(“受動的”, “固有的”, “絶對的” 등)는 정의에 통일성이 결여되어 있고, 감정적인 의미를 포함하는 것으로 되어있으므로 여기서는 채용하지 않았다.

**레벨 3**

설계관계자의 책임이 얼마나 중요한가는 가

장 일반적인 원자로타입인 경수로에서 연료거동을 조사함으로써 밝혀진다. 현재 미국에서 운전중인 대체로 100基의 발전용 원자로의 거의 대부분은 한두 종류의 경수로이다. 이런 원자로는 水冷却되는 얇은 연료관내에 넣어진 산화우라늄연료를 사용하고 있으며, 되도록이면 효율적인 발전을 하도록 고온으로 운전되고 있다. 충분한 열을 연료봉 표면에 전달하기 위해서는 산화우라늄연료의 중심부는 매우 고온으로 운전할 필요가 있고, 전달된 열은 연료봉 표면에서 냉각재에 의해 운반된다. 만약 모든 냉각재를 표면에서 상실하면 설사 모든 핵반응이 즉시 정지되었을 경우라도 불과 5초동안에 연료봉을 손상시키고, 20초 후에는 연료봉 전체의 건전성을 파괴하기에 충분한 에너지가 연료봉내에 축적되게끔 되어 있다. 바꿔 말하면 펌프의 고장 또는 밸브의 오조작에 의해 냉각기능이 5초간 중단되면 사고발생의 우려가 크다는 의미이다.

실제의 상황은 이 보다는 약간 좋은 조건에 있으나(왜냐 하면, 냉각기능을 순간적으로 상실하는 일은 매우 드물다), 중대한 손상을 면하기 위해서는 1~3분 내에 강제냉각으로 복귀시켜야 한다. 이는 파실 또는 사고에 대응하기 위해서는 긴급을 요하기 때문이다. 원자로 설계자에게 있어서 매우 도전적이라고도 할 수 있는 이 문제에 대한 대응책은 냉각재의 완전상실 가능성을 최소한의 것으로 하기 위해 중복된 급수장치를 갖는 것이며, 동시에 또 연료봉이 파손되었을 경우, 외부에서 냉각을 할 수 있는 시스템 및 격납시스템을 준비하는 것이다. 각기 독립된 多重方式의 안전시스템에 대한 신뢰성은 “縱深防禦(defense-in depth)”라 하고 NRC 규제원리의 기초를 형성하는 것이다. 縱深방어의 원리가 운용된 실례로서는 드리마일 아일랜드의 경우를 들 수 있는데, 이 때에는 외곽의 원자로격납용기 자체가 그 밖의 배리어-연료체 및 원자로용기-가 파손되었을 때 방

사성물질의 환경 내로의 방출에 대한 최후의 (그리고 없어서는 안되는) 배리어 역할을 해냈다.

그러나 설사 순간적 열방출이라는 단기적인 문제가 해결되었다 해도 아직 그 이외의 문제가 남는다. 방사성폐기물의 붕괴에 의해 발생하는 殘留發熱은 정상적인 운전기간중에 발생하는 열에 비하면 별로 강렬한 것은 아니지만 그래도 무시할 수 없는 문제이다. 이 잔류발열의 強度는 운전출력밀도와 연료요소의 裝填 이후에 방출된 열총량의 쌍방에 따라 좌우된다. 경제적인 압력에 의해 원자로 설계자는 개개의 연료요소에서 되도록 다량의 발열을 얻어야 하며, 또 가능한 한 장기간 사용할 수 있도록 최선을 다하게 되었다. 이런 연료의 “가혹” 또한 “장시간” 사용에서 발생하는 잔류발열은 원자로가 정지되고나서 상당한 시간이 경과한 후에도, 또 원자로에서 연료가 꺼내진 후 한동안 경과하고 나서도 냉각되어 있지 않은 연료의 온도를 파손점까지 상승시키는데 충분한 것이다. 이런 이유에서 잔류발열 문제는 원자로 설계자에게 低레벨 냉각을 몇개월이나, 또 경우에 따라서는 몇년이나 유지해 갈 필요가 있다는 요건을 새롭게 부가하게 되었다. 이 냉각작용은 능동적인 공학시스템에 따르고 있으므로 既設原電은 모두 이 시스템을 갖춘 레벨3에 속하는 것이다.

레벨3의 원자로로는 미국의 원자력계에 있어서는 “충분히 안전한(safe-enough)” 원자로일 수는 없었다. 문제는 복잡한 縱深방어시스템에 따른 건설·保守·운전 등 각종 코스트 및 이런 코스트의 지불을 자진해서 떠맡으려는 우리들의 자세에 있다. 미국에서 이와 같은 코스트 계량용의 기준은 재래형 발전플랜트이지만 이런 종류의 플랜트의 경미한 오조작에 대한 허용도는 매우 크다.

레벨3의 경수로는 적어도 현재까지 유럽과 아시아 대부분의 나라에서는 “충분히 안전한”

원자로임이 입증되었다. 레벨3의 경수로는 미국의 상업용 항공수송시스템이 충분히 안전한 것과 거의 같은 의미에서 충분히 안전하다. 레벨3의 원자로와 비슷하게 항공수송시스템은 중복된 능동적인 고장대응시스템을 갖추고 운전원의 수정조치에 크게 의존하는 수 많은 상호작용식 서브시스템으로 구성되어 있다. 개개의 원자로 보다는 훨씬 복잡화된 항공수송시스템은 실로 잘 작동하고 있으나 이것은 우리가 이와 같은 시스템을 운전유지하는데 필요한 대가를 지불해도 좋다고 합의하고 있기 때문이다. 그렇게 하는 이외에 선택의 여지가 없기 때문이며 사실 원거리를 신속히 커버할 수 있는 다른 방법은 없다. 그 대신 발전방식에는 많은 가능성을 생각할 수 있고 게다가 많은 전력회사는 “충분한 안전”을 달성하기 위해 필요한 대가를 지불하려는 열의가 부족한 것이 실정이다.

縱深防禦구상에 관해서는 이밖에 극히 최근에 와서 확인된 코스트 고유의 문제가 있다. 가령 원자력발전이 경제적인 경합성을 유지하려면 多重方式의 과잉시스템에 포함된 복잡성은 그 때문에 초래되는 高코스트를 보다 대규모의 발전용량으로서 보충할 필요성을 낳게 한다. 그 결과 원전플랜트는 화석연료플랜트에 비해 훨씬 대규모로 되어 있다. 따라서 미국의 대부분의 전력회사에 있어서 단일 유니트에 요구되는 방대한 투자요청은 이 이상 허용할 수 없는 것으로 되어 있다. 이 점에서 항공수송과의 유사성은 비교적 소형의 다수 항공기로 구성되는 편이 훨씬 바람직한 경우에도 각 항공로선에 각각 1대 내지 2대 정도의 747형기를 취항시키는 것과 비슷하다.

이와 같은 각종 제약의 결과 소규모이며 안전한 원자로 개발에 주의가 기울여지게 되었다. 개발이 실현되면 앞에서 말한 목표[즉, 안전과 소규모]는 용이한 동시달성을 기대할 수 있다. 만약 현재 전개되고 있는 원자력플랜트 보다는 훨씬 소규모의 설계라면 지극히 용이하게 레벨

1 또는 레벨2의 안전성을 달성할 수 있다는 공동작용(synergy)이 자연스럽게 작용하는 것이다.

## 레벨 2

연료의 건전성은 방호의 제1선이다. 만약 연료의 건전성을 운전원에 의한 수정조치 또는 능동적인 기기의 응답을 기다리지 않고 유지할 수 있다면, 어떤 일이 일어나도 방사능이 방출되는 사태는 전혀 발생되지 않는다. 현재의 원자로타입에 적절하게 적용이 되면 레벨2의 안전성은 비교적 용이하게 달성할 수 있다.

연료의 건전성은 다음 조건이 갖추어지면 확보된다.

a) 출력밀도가 충분히 낮고, 강제순환이 실시되지 않아도 단지 냉각재가 존재하는 것만으로 정상운전기간중 연료의 냉각이 과부족 없이 실시되는 것.

b) 爐心自體 설계상의 특징으로서 정상운전에서 이탈이 발생하면 핵반응이 반드시 정지된다는 것.

c) 레벨의 잔류발열을 적극적인 냉각에 의하지 않고 확실히 제거할 수 있는 설비가 되어 있는 것.

만약 이런 조건이 충족되면 레벨2의 달성에 필요한 것은 노심이 냉각재의 대형풀에 잠겨 있는 것, 그리고 냉각재를 정위치로 유지하기 위한 설비가 되어 있는 것 뿐이다. 레벨2의 세계에서 가장 잘 알려져 있는 것으로 PIUS(Process Inherent Ultimate Safety) 원자로가 있는데, 이 爐는 경수로를 기초로 하여 스웨덴에서 개발된 것이다. PIUS는 적극적인 고유안전 프로세스의 생략어인데, 이 타이틀은 여기서 사용되고 있는 정성적인 레벨의 記述에는 충분히 적합한 것은 아니지만(또 큰 의미를 갖는 것도 아니다), 그 설계는 레벨2의 각종 요건을 충족시키는 것이기는 하다. PIUS는 기본적으로

로 소형이며 저밀도의 노심으로 구성되어 있고, 노심은 매우 大容量 물(水)풀에 잠겨 있다. 풀은 충분히 크며 일주일에 걸쳐 잔류발열을 냉각시킬 수 있지만, 이 기간에 어떤 수단으로 만약 필요하다면 소화호스로 풀의 注水보충을 할 수 있다고 상정되고 있다.

PIUS의 독창적인 설계특징은 정상운전에서 이탈이 발생했을 때에는 핵반응이 정지되는 것을 보증하는 창의적인 연구가 되어 있는 점에 있다. 실제로는 풀 속의 물은 2개의 회로로 나누어져 있으며, 한 회로는 경수로의 경우에서와 마찬가지로 정상운전시에는 노심을 통해 순환되고 있다. 이에 비해 또 하나의 풀내 대량의 물에는 매우 고농도의 붕산이 함유되어 있다. 이 두가지로 나뉜 물은 자연압 및 浮力으로 분산되어 있는데 불과하고, 분리용 밸브는 별도로 설치되어 있지 않다. 냉각수와 붕산수의 界面은 음식의 빠르페에(아이스크림의 한가지)에서 볼 수 있는 약간 밀도가 다른 액체상호간의 인터페이스와 비슷하다. 시스템이 혼란상태에 빠졌을 때에는 미묘한 밸런스가 깨지고, 풀내의 물은 노심내의 냉각수와 혼합된다. 제어봉에 사용되고 있는 것과 같은 원소인 물속의 붕소의 작용에 의해 핵반응은 즉시 정지된다.

專門家의 대부분은 PIUS가 시스템의 혼란시에는 매우 신속하게 그 자체를 정지시킬 것이라는 확신을 가지면서도 이 원자로가 모든 플랜트가 경험하고 있는 정상적인 불안정요소와 작은 변동에 지극히 민감한 점에서 원자로가 장시간에 걸쳐 운전유지할 수 있는가에 대해서는 또한 확신을 갖지 못하고 있다. 문제는 PIUS가 정지된 후 노심에서의 붕산수 제거에 의외로 시간이 걸리고, 다시 적절한 운전조건을 창출하는데에 장시간을 요한다는 점에 있다.

매우 비슷한 어프로치가 극히 최근까지 액체 금속냉각증식로 LMFBR(Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactor)에 관심을 갖고 있던 몇몇 제조업자에 의해 채용되고 있다. 증식로는

경비가 드는 것과 동시에 긴급하게 회사가 필요로 하지 않는다는 개괄적인 인식의 정착과 함께 가까운 장래의 수요에 따라 많이 합치되는 원자로설계에 관심이 쏠리게 되었다. 제너럴·일렉트릭社가 설계한 PRISM(Power Reactor Inherently Safe Module, 138MWe 모듈 3基를 한 조의 터빈발전기와 편성하여, 3조로 1,245MWe의 발전소로 하는 것을 단위로 생각하고 있다) 爐는 종래의 LMFBR기술에 근거한 설계 중 어찌면 가장 발전된 레벨2의 설계로 생각된다. PRISM은 PIUS의 산화우라늄노심(水) 풀로 유지되고 있는 것과 비슷하게, 대용량의 나트륨 풀로 지지되는 금속우라늄노심을 갖추고 있다. 잔류발열은 공기에 의해 운반되지만 이 공기는 항상 해방되어 있는 벤트를 통해 원자로용기의 外表面을 순환하고 있다. 원자로용기는 파손시에 공기와 나트륨과의 접촉을 방지하기 위해 이중벽 구조로 되어 있다. 제어봉이 노정지 달성에 실패했을 때에는 노심 설계된 고유의 자연 피드백·프로세스에 의해 원자로는 정지되고 저출력레벨로 하강한다. 정지시의 온도는 통상운전온도 보다도 훨씬 높아진다고 생각되지만 그래로 충분히 낮아 연료체의 손상은 피할 수 있다고 생각된다. 이 시스템은 外側셀을 흐르는 공기가 연료체의 손상방지에 충분한 열제거를 할 수 있도록 설계되어 있는 것이다.

레벨2 설계와 레벨1 설계의 상이한 열쇠가 되는 점은 레벨2 시스템은 냉각재 유체가 언제나 없어지지 않도록 요구하고 있는 점이다. 다시 말해서 풀 자체를 유지하고 있는 총체적인 구조가 보전되어야 한다는 점이다. 이 조건은 PIUS의 경우에는 매우 합리적으로 확보되고 있는 것처럼 보일 수 있으나, PRISM의 이중방식 금속용기에 관해서는 몇가지 경시할 수 없는 문제점이 존재한다. 나트륨화재는 용기가 파손되었을 경우 의외로 성가신 것이 될 우려가 있으므로 그 경우에도 공기순환이 저해받는

일이 없는 유지설비가 필요하게 되었다.

현존하는 경수로에 비해 PRISM 및 PIUS는 허용성이 훨씬 큰 것이 아닌가하는 점에 관해서는 이것을 의문시하는 측은 적다. 그러나 이 兩爐型이 과연 “충분히 안전한” 것인지를 결정할 필요성은 쌍방 모두가 “충분하고 값싼(cheap-enough)” 것이 아님이 분명하기 때문에 아마 생기지 않으리라 생각된다. 안전성의 달성은 PIUS의 경우에는 운전상의 복잡성을 희생한 것이며, PRISM의 경우에는 연료사이클의 복잡성을 무시하는 데서 초래되고 있어, 그때문에 소비되는 코스트는 상업상의 실현가능성을 감퇴시키고 있다.

PIUS 및 PRISM은 모두 분명히 대폭적인 개량이 가해진 원자로이긴 하지만 레벨2 원자로가 과연 미국내에서 원자력발전을 결합성이 있는 것으로 밀어올릴 수 있는지에 대해서는 의문이 정해져 있지 않다. 만약 레벨2의 원자로가 원전시대의 初期부터 설치되어 있었다면 아마 상황은 크게 달라졌을 것이다.

## 레벨 1

출력밀도를 저감시켜 냉각재를 항상 연료체와 접촉을 유지할 수 있도록 형상적 조건을 개량하는 등 혁신적인 프로세스를 채용함으로써 원자로를 레벨3에서 레벨2로 올리는 것은 가능하다. 이런 방식으로 레벨3에서 레벨2로 발전한 원자로는 때로는 중대한 결함을 갖는 경향이 있지만, 이것은 연료형태가 본래 고출력밀도의 경제적인 운전을 목표로 하여 설계된 점, 그리고 실제로 일어날 가능성은 매우 낮더라도 전반적인 구조상의 파손에 의한 냉각재상실의 가능성이 늘 남겨져 있는 점에 있다. 레벨1 안전성에 도달할 수 있는 열쇠는 경제적인 전력생산과 균형을 이룬 출력밀도에서의 운전 후에도 냉각재가 전혀 없어도 살아 남을 수 있는 연료체를 이용하는 데 있다. 오랫동안 원자력산



업에 종사해 온 많은 사람에게 있어서도 이와 같은 연료가 현존하고 있는 점, 그리고 이와 같은 연료를 사용하고 있는 원자로가 실제로 1966년 이래 운전되고 있는 점을 알면 놀랄 것이다.

유일하게 현존하는 레벨1 원자로의 기본적인 특징은 총체적으로 특이한 연료체시스템을 이용하고 있는 점이다. 이 색다른 연료체는 多重 조립방식의 球體에 微小(직경0.4mm) 우라늄 산화물 核을 캡슐封入하는 방식에 근거하고 있다. 연료핵은 저밀도의 흑연 열분해탄소 및 탄화규소 그리고 열분해탄소로 구성된 셀에 잘 캡슐봉입되어 있다. 캡슐봉입된 미세연료의 지름은 불과 1mm에 불과하며, 1인치의 1/40이다. 캡슐봉입된 球狀연료를 세밀히 테스트한 결과 이 구체는 1,800℃의 온도 이하에서는 본질적으로 완벽한 폐쇄용기임이 밝혀졌다. 1,800℃ 이상의 온도에서 球體에 漏洩이 시작되지만, 몇가지 현저한 파손이 발행하기 시작한 것은 2,000℃를 충분히 넘은 시점부터였다. 취급을 용이하게 하기 위해 10,000부터 20,000정도의 구체가 6cm의 흑연 볼 또는 “페블(pebbles)”의 내부에 묻혀 버린다. 페블의 크기는 거의 당구공 만하다.

이런 페블을 대량으로 모음으로써 임계량이 구성되고 또 발생열 제거에 필요한 충분한 표면적이 제공된다. 고압헬륨은 이 목적에 적합한 이상적인 냉각재이다. 1966년 이래 西獨에서 운전되고 있는 AVR(Arbeitsgemeinschaft Versuchs Reaktor Jülich)는 이 구상을 물리적으로 구체화한 원자로이다. 주로 연료개발의 테스트·베드로서 설계된 AVR은 대체로 열출력 50MW를 발생한다. AVR은 상업목적으로는 너무 작지만 대규모 상용로의 모델로서 유익한 것이다.

원자로에서 생각할 수 있는 최악의 사고는 모든 제어봉이 빠지고 동시에 모든 냉각재를 상실하는 상태이다. 이 최악의 상태에서 열전도 및 방사선의 자연프로세스가 원자로내의 최고

온 영역의 온도를 연료파손온도 이하로 억제할 수 있을 경우 이 원자로는 비로소 레벨1의 원자로로 분류된다. 이런 어려운 필요조건에 의한 직접적인 영향은 원자로 크기의 제약이라는 형태에서 나온다(발생된 열이 보다 원거리까지 도달해야 하는 것이라면 그만큼 원자로의 중심은 뜨거워 진다). AVR은 이 레벨1까지 용이하게 도달할 수 있었지만, 아직 同 原理로 대규모의 상용원자로를 만들 여지는 남아 있다.

레벨1의 운전은 모듈방식의 가스냉각로(MGR-Modular Gas Cooled Reactor)의 설계로 달성되지만, 이 설계는 AVR의 설계를 기본으로 하여 원자로를 地下의 사일로에 설치하고 노심직경을 3m 이하로 억제한다는 것이다. 열은 원자로의 중심부에서 압력용기의 외측을 통해 사일로를 거쳐 주변토양에 운반된다. 만약 노심의 크기가 3m를 넘으면 원자로 중심부는 너무 뜨거워진다. 이 치수상의 제한치는 열출력총량을 200MWth로 제한하는 것과 같다.

이 정도의 熱定格 모듈의 전기출력은 현재 미국에서 가까운 미래의 展開대상으로서 최적이라고 생각되고 있는 재래형의 플랜트와 비교해도 적다는 점에서 몇개의 동형 원자로플랜트(모듈)를 묶어 각각이 독립의 열원으로써 발전 플랜트를 구성하는 것이 필요하다고 생각된다. 모듈양식의 가스냉각로는 그 자체가 모듈로 구성되어 있기 때문에 이 이름이 붙여져 있는 것이 아니라, 오히려 통상규모의 발전플랜트에서는 구성하는 개개 원자로 자체가 각각 하나의 모듈이 되는 점에 있다.

최근에 제작되고 있는 경수로는 열출력에서 3,000MW 또는 그것을 웃도는 것이 전형적이다. 이 거대한 사이즈는 예상되는 스케일 경제 효과를 활용하려는 희망이 동기가 되어 있다(이와 같은 경제성은 반드시 언제나 실현된다고는 할 수 없지만).

MGR은 극히 소형임에도 불구하고 그 보다도 대규모인 유사한 원자로와 충분히 경합할

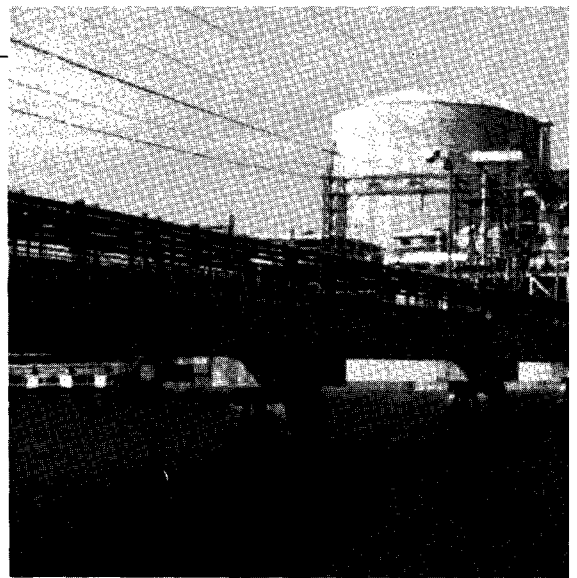
수 있다고 본다. MGR의 중요한 유리성(有利性)은 MGR이 복잡한(따라서 경비가 더 든다) 안전계통을 필요로 하지 않는다는 점에 있다. 똑같이 중요한 이점으로서 이와 같은 小型爐는 중추적으로 공장에서 대량으로 생산할 수 있는 점도 들 수 있다. 스케일면에 있어 경제성이 있는지 없는지의 유무를 불문하고 시리즈생산이 경제적인 것은 매우 분명하며, 또 그것을 실증하는 것도 손 쉽다.

별로 명확하진 않지만 MGR에는 또 하나 경제적으로 유리한 면이 있다. 사고발생기간중에도 핵분열생성물을 운전중인 노심중앙부에 묶어 둘 수 있는 연료체는 그것 보다도 훨씬 평온한 조건하에서 실시되는 장기폐기물의 처분에 적합하다는 것이 명백하다. 다시 말해서 MGR의 연료체는 이미 처분에 대비하여 포장되어 있는 것과 같은 것이다. 따라서 재처리를 필요로 하지 않고 또 그로 인한 코스트가 발전코스트에 할당되는 일도 없다.

### 原子力이 復活하는 것은 可能할까?

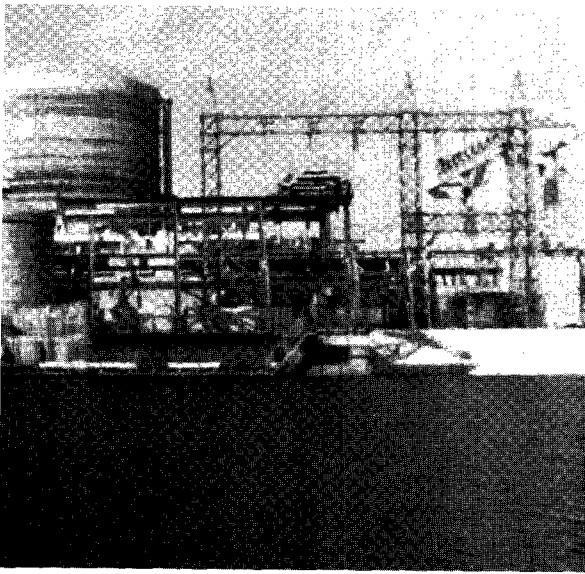
원자력발전이 미국내에서 발전용에 이용될 전망은 대중과 전력회사의 쌍방이 「원자력발전은 다른 가능성 있는 전력원에 비해 경제상 및 환경상의 리스크가 분명히 적다」고 확신할 수 있을 때 비로소 성립된다. 물론 원자로 설계자가 충분히 신중하게 사고발생의 확률을 산출하고 絶滅的이라고 할 수 있을 만큼 낮은(vanishingly small) 것이라고 판정해도 대중 및 전력회사 양자에게 보증을 준다는 것은 현재로서는 불충분하다. 대중은 충분한 이유 아래 이러한 선언에는 이미 전혀 신뢰를 하지 않기로 하고 있다.

안전레벨 상호간의 질적인 相違는 대중의 수용가능성을 획득하는 능력에 현저하게 영향을 미친다. 레벨1과 레벨3의 본질적인 차이는 레벨1 원자로의 궁극적인 안전성은 실제로 테스



트를 실시하여 실증할 수 있다는 점에 있다. 레벨3의 시스템은 매우 복잡한 다중방식의 과잉 시스템에 의존하는 것으로 되어 있으며 따라서 생각할 수 있는 모든 파손모드가 빠짐없이 테스트를 받았다고 보증할 수 없다. 즉, 중요한 것은 레벨3의 원자로는 縱深防禦에 의존하고 있고 따라서 각 테스트는 손상을 받지 않았던 잔여부분이 과연 안전성을 확보하고 있는지를 실증하기 위해 부분적인 대규모 파손을 요구하는 것으로 되어 있다는 것이다. 예를 들면, 격납용기가 최종적인 배리어가 될 수 있는지를 확실히 실증하기 위한 유일한 방법은 실제로 상업 규모의 원자로爐心을 熔融해보는 것이다. 더구나 한번에 한하지 않고 조금씩 다른 상황하에서 몇번이나 반복해서 테스트를 해 보는 것이다. 그러나 이 테스트에 의해 방사능이 방출되지 않는다고 대중을 만족시킬 수 있었다 해도 이와 같은 용융은 도저히 발생할 수 없다는 전력 각사의 요건에 부응할 수는 없을 것이다.

한편 레벨1 원자로는 방사능방출을 수반하지 않을 뿐 아니라 플랜트에 손상을 주지도 않고 최악의 사고에도 남을 수 있다. 따라서 이러한 테스트의 경제적인 영향은 경미하다. 왜냐 하면 레벨1 원자로는 분명히 매우 소형인 것이 될터이고 시험용 모듈의 건설초기코스트도 또 이치에 맞는 공업적 제약의 범위내에 들어 갈



것이기 때문이다.

전력회사 및 대중에게 확신을 갖게 하기 위해 필요로 하는 테스트는 이 외에도 인허가의 프로세스를 간소화하는 방법을 제공한다. 레벨 1의 원자로는 규제에 관한 설계증명방법과 같이 “테스트에 의한 인허가(License-by-Test)”에 특히 적합하다고 시사되고 있으나, 설계증명방법은 다른 면에 있어서도 유용하다는 점이 밝혀졌다. 상업용 항공기에 주어지는 FAA보증의 耐空性증명서와의 유사성은 가끔 언급되는 바이지만 사실 이 유사성은 매우 적용가능한 것이다. 그것은 단일 原型爐모듈의 건설 및 테스트에 필요한 노력과 경비는 새로운 상업용 항공기를 테스트하기 위한 노력 및 경비에 거의 필적할 정도의 것이기 때문이다. 그리고 항공기의 경우와 마찬가지로 原型모듈은 테스트 후에도 실용가능한 형태로 남을 수 있다고 기대되고 있다.

## 結 論

미국에 있어서 원자력발전산업의 성쇠는 수많은 전문서적 및 준전문서적을 사회적, 기술적 분쟁기사로 다 매울 수 있을 정도로 한가지로 되어있다. 우리들이 현재 당면하고 있는 상황이 어떤 이유에 근거를 두고 있는, 또 그 비

난하는 곳을 어디로 돌리든 간에 미국내에서 원자력발전을 이용하고 안하고의 최종적 선택을 하는 것은 전력회사이며 대중이다. 이 선택은 최종적으로는 몇가지 형태에서의 리스크·베네피트해석에 근거하게 된다. 결국 전력회사의 경우에는 충분히 입증된 분명히 논리적인 형태에서 선택되며, 또 대중의 경우에는 어느 쪽인가 하면 불완전한 형태에서 그러나 정확한 면에서는 그다지 뒤떨어지지 않는 양식에서 선택된다. 미국내에는 진정한 리스크 및 인식된 리스크의 양자 모두가 원자력발전의 잠재적인 은혜를 과신하는 점에서 결과적으로는 실패로 돌아갔다. 미국국민이 현상대로의 원자력발전에는 의존하지 않는다고 결정한 것도 반드시 불합리하다고 만든 단언할 수 없는 것이다.

대중이 일정한 기술적 구축물에 수반되는 리스크를 평가할 수 있도록 하기 위해서는 광범위에 걸친 리스크와 베네피트사이의 공공적 조화에 관해 먼저 명확히 신용할 수 있는 리스크의 분류화가 요구된다. 여기에 나타난 정성적인 4단계의 안전레벨은 이와 같은 분류화의 기준을 제공하는 것이다. 지금까지 설계되어 온 원자로는 생각할 수 있는 定性的인 안전레벨의 어느 것인가에 적합한 것으로 되어 있다. 놀랄 만한 것은 「보다 안전하다」는 것은 「보다 값싸다」는 것을 의미하는 것과 같다.

중요한 국가적 결단을 내리기 위한 知的 및 기술적 전제조건은 이미 갖추어져 있다. 질적으로 다른 제2세대의 원자로 전개는 미국에 중요한 은혜를 초래할 수 있다. 놀랍게도 제2세대의 원자로를 완강하게 거부하고 있는 것은 실은 현존하는 원자력시스템에 방대한 투자를 하고 그것을 금지로 느끼고 있는 “원자력체제”자신이라고 충분히 생각할 수 있다. 그 경우에는 제2세대의 원자로 실현은 제1세대의 원자력기술진 및 원자력추진자가 제1선을 물러날 때까지는 기대할 수 없는 것이다.