

# 原子爐의 構造健全성과 安全性

最近 原子爐의 壓力容器와 配管系統에 대한 健全성이 安全性와 함께 논의되는 경우가 있으나, 지금까지는 構造와 材料의 健全성이 安全性論議 表면에 직접 제기되는 일은 별로 없었다. 따라서 原子爐構造의 健全성과 安全性에 대해 다시 한번 생각해 보는 것도 앞으로 原子力發展의 한단계로서 의의있는 일이다.

## 1. 多重防禦와 原子爐構造健全성

原子爐의 안전설계에 있어서는 「多重防禦 (Defense in Depth)」라는 사고방식이 채택되고 있다. 현재의 설계에서는 3단계의 레벨이 있고, 각각 다음과 같은 역할을 담당한다.

먼저 제1레벨은 이상 발생을 방지하고, 다음으로 제2레벨은 이상이 발생했을 때에 그 확대를 억제하고, 마지막 제3레벨에서는 큰 사고가 났을 때에 그 영향을 완화시켜 주변대중의 안전을 확보한다는 것이다.

원자로의 안전에 관한 견해에서 보면 제1레벨, 즉 이상의 발생을 방지하는 것이 가장 기본적인 방책이다. 이 제1레벨에서는 방사성물질을 엄격히 밀폐해 두기 위한 1차계통 압력경계의 건전성 확보가 가장 중요하다. 건전성 확보를 위해서는 재료와 기기컴포넌트의 설계·제조단계에서 엄격한 관리가 이루어지며, 플랜트 완성 후에도 사용전검사에 의해 품질이 검사된다.

특히, 설계에서는 확률적으로 想定할 수 있는 모든 荷重狀態에 대해 손상을 일으키지 않도록

노력이 기울여진다. 특히, 크랙은 커지면 구조물의 불안정적인 파괴(파단)가 일어날 우려가 있으므로 非破壞檢査에서 충분히 발견가능한 큰 크랙이 만약 존재한다 해도 상정할 수 있는 모든 하중하에서 파괴되지 않는 재료가 선택된다.

예상을 넘는 하중, 응력해석의 오차, 예상외로 나쁜 소재, 시공상의 미스 등을 고려하기 때문에 안전률을 높여서 항상 수치를 정한다. 이렇게 하여 현시점의 기술에서 보아 완벽한 제품이 완성된다.

엔지니어가 완벽하다고 믿는 제품이 이렇게 하여 완성되는데, 주의에 주의를 거듭하는 것이 원자로 등 중요구조물의 특징이다.

제2레벨의 역할, 즉 이상이 발생했을 때에 그 확대를 억제할 수 있다면 사고는 방지될 수 있을 것이다. 예를 들면, 1차계통 압력경계에서 크랙이 발생하여 냉각수의 누설이 일어났을 경우에 누설에 대한 검출이 몇가지 다른 방법으로 이루어져 즉시 경고를 한다. 압력용기나 배관내면의 微小크랙은 정기검사에 의해 검사된다. 이 때 만약 크랙이 발견되면 보수를 하는 것이 지

금까지의 관례이다.

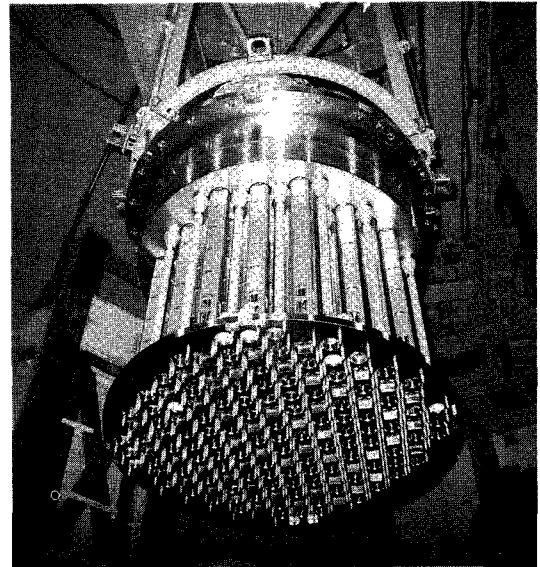
한편 파괴역학적인 조사에서 발견된 크랙의 규모가 상당히 적거나, 또는 성장속도가 완만하여 파괴를 일으키는 크랙으로 성장할 때까지 충분한 시간적 여유가 있다고 판정되면 모니터링만으로 그대로 일정 기간동안 보수없이 운전을 계속한다는 歐美式의 생각도 있을 수 있다.

제2레벨에서 최근의 중요한 과제는 LBB(Leak Before Break, 파단전 누설)이다. 파괴역학분야의 오랜 연구에 의하면, 원자로 1차계통배관의 길로틴파단과 같은 순간적 파단은 바로 일어나지 않으며, 리크先行型이 됨을 알게 되었다. 즉, 이 리크를 발견하고 바로 플랜트를 안전하게 정지시킬 수 있다는 것이다. 이런 종류의 파괴모델은 準固有安全的 성질이라고 할 수 있을 것이다.

제3레벨에서는 안정된 운전은 고사하고 재산보호도 할 수 없을 정도의 대형사고에 대한 대책을 강구하여 일반대중을 방사선피폭에서 구하게 된다. 예로서 원자로 이외의 구조물로 점보여객기의 불시착을 생각할 수 있다. 여행중에 약간의 이유로 기체의 중요부분이 손상받은 점보여객기가 불시착에 성공했다고 한다면 여기서 논하는 제3레벨이 완수된 것이다. 4년전 여름에 御菓鷹山에 추락하여 520명의 목숨을 앗아간 日航점보기사고는 시공과 검사의 미스로 壓力隔壁의 피로크랙 발생을 방지하지 못하였고(제1레벨에서의 실패), 비행중에 유압계통과 垂直尾翼에 까지 파괴가 진전되어(제2레벨에서의 실패) 조종불능으로 추락(제3레벨에서의 실패)하는 최악의 사태가 되고 말았다.

원자로 안전설계에 있어서 다중방어의 제3레벨은 (a)원자로의 정지, (b)노심의 냉각, 그리고 (c)방사능의 밀폐가 필요한 항목이다.

원자로 구조 건전성과 관련된 것은 특히 (b)노심의 냉각과 (c)방사능의 밀폐이다. (b)에 대해서는 비상노심냉각계통(ECCS) 작동시의 부작용인 열충격하중이 계기가 되는 원자로압력용기의 파괴사고, 즉 PTS(Pressurized Thermal



Shock)사고가 과제가 되고 있다. 또 (c)에 대해서는 설계베이스사상(DBE)을 넘는 사고시의 건전성이 과제가 되고 있다. 이런 것들을 설계에서 어떤 형태로 고려해야 하는지에 대해서는 사상의 발생확률을 포함해서 당연히 논의가 필요하다.

前者에 대해서는 압력용기 내측표면 근방의 照射脆化가 논의되고 있다. 이 문제는 많은 악조건이 겹쳐 내표면의 脆化部에서 크랙이 정지되느냐 아니냐의 판정에 의해 건전성을 평가할 수 있다.

## 2. Incident와 Accident

定性的이긴 하지만 Incident(고장, 소사고)와 Accident(대형사고)에 대해서는 배관에 생긴 크랙에서의 냉각수 누설이 전자의 전형적인 예이며, 후자는 그것을 넘는 중대한 사상을 설명하는 말이라고 할 수 있다. 그러나 兩者의 내용에는 사고를 야기시키기에 이른 요인이라는 의미에서는 본질적인 차이는 없다고 생각된다.

산업재해에 관한 「하인리히의 법칙」과 「하드의 법칙」에 의하면, 재해의 重度와 輕度の 관계는 「重度」를 정점으로 삼각형의 구조를 형성하

고 있다고 한다. 즉, 1건의 대형사고의 배경에는 수백건의 고장과 소사고가 현실적으로 발생하고 있다는 것이다.

원자로의 Incident에 대해 구조와 재료에 관한 것이 압도적으로 많다는 사실은 신문 등에 자주 보도되고 있는 대로이다. 이런 종류의 Incident 하나하나를 세밀히 조사하는 것은 TMI사고와 체르노빌사고를 조사하는데 필적할 만큼 중요하다. 그 이유는

(a)전수가 많으므로 각종 다른 사상을 조사할 수 있다,

(b)외부에서의 개입없이 순수하게 기술적 입장에서 조사할 수 있으며, 또 대형사고와 달리 격정없이 관계자가 솔직해질 수 있다는 점 등이다.

(a)에 대해서는 종래부터도 원자로의 개량에 피드백되고 있는 것은 잘 알려져 있는 일이다. 1차계통배관의 SCC대책과 열피로대책, 증기발생기細管의 減肉대책 등 헤아릴 수 없이 많다. 이 점에 대해서는 앞으로도 産·學·官이 일체가 되어 보다 좋은 플랜트로 개량이 계속될 것이다.

(b)에 대해서는 좀 생각해야 할 점이 있다.

1차계통에 크랙이 발생하여 리크가 발견된 사실이 있다고 하자. 이것은 하나의 Incident이며, 제1레벨이 파괴된 것이 제2레벨로 대처된 경우이다. 이 경우 엔지니어라면 무엇이 원인이 되어 크랙이 발생·진전되었고, 최종크랙은 어떤 형태에서 어떤 상황에서 리크가 발견되어 爐를 청지시켰는지가 궁금할 것이다. 이 정도의 정보가 있으면 전문가라면 어느 정도 그 「니어미스」의 “정도”가 판단되는 것이다.

십여년 전보다는 훨씬 좋아졌다고 생각되지만, 특히 일본에서는 마스크의 사고방식, 또는 정신풍토가 반영되어 반드시 성숙된 보도가 이 점에 관해 이루어지고 있다고는 생각할 수 없다. 원자력안전의 실적을 어느 정도 깊이 아는 것이 일반인들에 있어서 올바른 이해의 지름길이라면, 해설 등으로 원인의 진실과 상세한 것

을 이해하기 쉽게 보도해 주었으면 한다 (후일 이라도 좋다). 情緒的인 내용 만의 보도로는 대형사고 방지의 관점에서 보아 진취적이라고는 생각할 수 없다.

형벌·처분을 위한 「누가 했는가」를 추궁하기 보다는도 과학적, 합리적 관점에서 「앞으로 어떻게 하면 되는가」에 중점을 둘 필요가 있다. 이 점에 대해서는 법에 대한 사고방식에도 관련되는 것으로 상당히 어려운 문제이지만, 약간의 개선의 여지는 있다고 생각된다.

### 3. LBB와 DBE

파괴역학의 진보에 따라 LBB의 사고방식을 설계에 도입하려는 움직임을 각국에서 볼 수 있다. LBB에 근거한 사고방식이란 배관과 압력용기에 있어서 돌연한 파괴(불안정파괴)에 이르기까지는 리크 등 그에 대한 약간의 징후가 잠깐 동안 관찰되므로 그 동안에 플랜트를 안정된 상태로 할 수 있다는 것이다. 현재 각국 모두 이 사고방식의 적용은 직접적인 범위에 한정되어 있다.

예를 들면, 배관의 길로틴파단대책으로서의 배관손상방지장치를 설치하지 않는 방침 등이다. 이것 만으로도 경제적인 면 뿐만 아니라, 검사원의 피폭량 저하 등 안전면에서도 취할 점이 많다고 한다.

다음으로 생각할 수 있는 것은 LBB를 간접적인 것, 즉 ECCS, 격납용기, 환경평가 등의 설계, 평가에 까지 적용을 확장하는 방향에서 생각해야 할지의 문제이다.

최근에 미국 NRC가 발표한 공식문서에 따르면, LBB를 이러한 간접적 영향평가에 까지 확장할 가능성을 시사하고 있다.

배관의 길로틴형 순간적인 파단은 DBE의 하나이다. DBE의 개념은 현실의 사고를 포함하기 위해 편의적으로 가정한 것으로서 설계의 책임 범위를 명확히 할 수 있다는 의미에서 매우 중요한 생각이라고 할 수 있다. 그러나 DBE는 당

시의 경험적·공학적 판단에 근거하여 결정된 것으로서 배관의 길로틴형 파단에 대해서는 최근 20년간의 파괴역학연구 이전의 산물인 것이 자명하다. 법률과 규칙은 사회상황과 기술축적의 동향에 따라 그때마다 재평가되어야 한다면, 최근의 연구성과를 도입한 새로운 논의가 필요하다고 생각된다. DBE 개개의 현상은 현재의 경수로 뿐만 아니라, 장래의 신형원자로나 핵연료사이클플랜트의 설계에도 큰 영향을 주고 있는 것이다.

#### 4. 確率論的 評價

원자로나 超LSI등 “거대시스템”의 안전성과 신뢰성을 논할 경우 확률론적 평가방법이 채용된다. 원자로의 구조설계에 있어서도 이미 연료계통에서는 일부 확률의 사고방식이 도입되고

있다. 또한 원자로압력용기와 배관계통의 파괴 확률이 영국의 마살보고서 등에서 안전평가에 사용되었다.

확률론을 원자로구조기기의 건전성에 사용할 경우의 문제는 평가에 적합한 각종 데이터가 불충분한 점과 안전성에 있다. 전자의 예는 초기 크랙의 존재확률과 비파괴검사에서 간과되는 크랙의 확률데이터 등으로서 앞으로의 노력에 의해 데이터를 축적할 필요가 있다. 후자에 대해서는 간과되고 있는 파손모드와 하중상태가 전무한가 하는 의문이지만, SCC와 같은 현상이 감지되지 않은 상태로 새롭게 발생할 수 있느냐 하는 점이다.

기본적으로 재료파손거동에 미지의 불연속 현상이 발생하는 것은 생각하기 어렵고, 또 하중형태에 대해서도 마찬가지로 이 점에 대해서도 안심할 수 있는 것이 아닐까.

## 새로운 核融合技術 實驗成功

美國과 英國의 과학자들이 종전에 비해 간단한 방법으로 核을 융합, 에너지부문의 혁명을 일으킬 수 있는 계기가 되는 실험에 성공했다고 발표하였다.

美國 유타大 화학부장인 스탠리·폰스교수는 자신과 영국 사우스햄튼大 마틴·플레이시먼교수 두사람이 지난 5년6개월간 연구한 끝에 이같은 기술을 개발했다고 밝혔다.

유타大의 바버라셀리대변인은 電氣化學을 전공한 이들 두교수의 연구결과가 物理學者들로 부터 회의를 불러일으킬 것으로 예상되나 學會에서 그 내용이 입증될 것이라고 전하면서 이 핵융합연구가 계속 진행되고 있다고 하였다.

영국의 파이낸셜·타임스紙는 이번이 개발된 핵융합공정으로 인해 「무한정하고 깨끗하며 값싼 에너지를 얻을 수 있게 될것」이라고 논평하였다.

核融合에 의한 에너지는 원자핵을 쪼개는 방법으로 에너지를 얻는 核分裂과는 달리 원자핵을 결합

시킬때 나오는 에너지를 말하는 것으로 이 핵융합에너지를 손쉽게 얻을 수 있는 방법을 개발해내는 문제는 과학자들이 당면한 커다란 미개척분야였다.

핵융합은 기존의 원자로에서 사용되고 있는 핵분열과는 달리 核廢棄物을 거의 생성해내지 않을 뿐만 아니라 燃料이 되는 중수소는 바다물에서 무한정 추출해낼 수 있으며, 핵융합원자로에서 이상이 발생했을 때는 즉시 폐쇄되어 기존의 핵분열원자로에 비해 훨씬 더 안전하다는 특징을 지니고 있다.

타임스紙는 폰스와 플레이시먼 두교수가 달성한 방법은 기술적으로 대학 화학부에서 실제로 해 내기에 그리 복잡하지 않으며, 이들이 사용한 기술은 중수소를 백금과 유사한 팔라듐으로 만든 전극내에 가두어 핵융합을 일으키도록 한 것이라고 설명하였다.