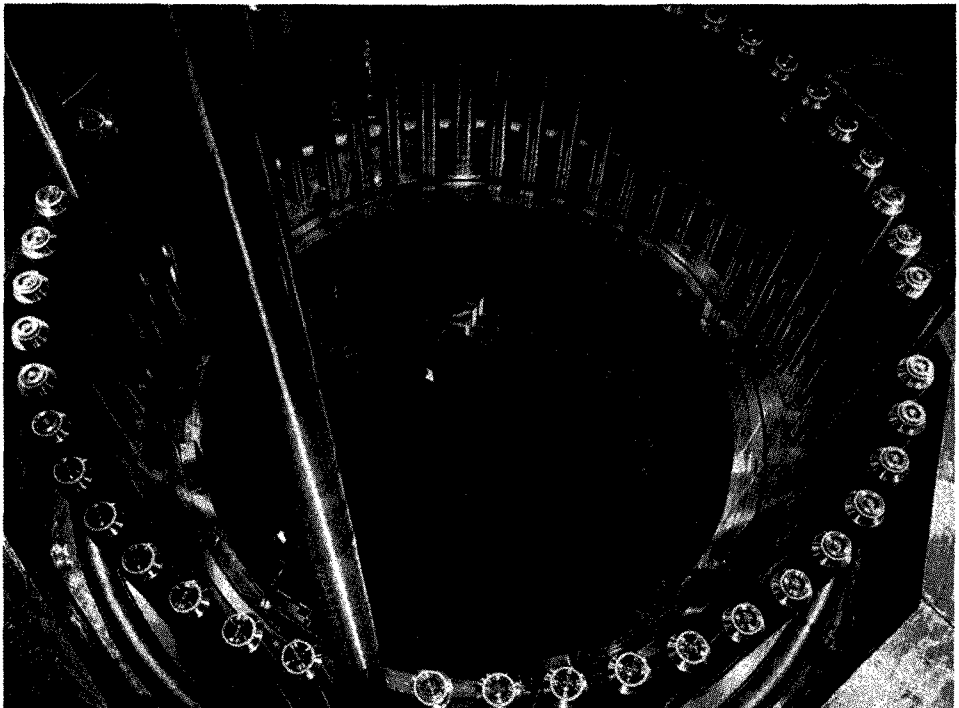
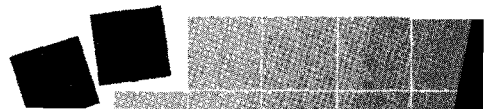


## 特輯：原子爐의 長壽命化 對策

美國을 비롯한 일부 先進國에서 初期에 건설된 原子力發電所는 이제 그 耐用年限이 다 되어가고 있으며, 또한 全世界的으로 原電建設에 대한 투자가 저조한 가운데 기존 原子力發電所의 壽命을 연장시킴으로써 發電所 全壽命期間의 發電코스트를 저감시켜 경제성 향상을 도모하고자 하는 研究가 美國, 프랑스, 일본 등에서 활발히 進行되고 있다. 다음은 우리나라 人접국인 日本에서 현재 실시되고 있는 原子爐 長壽命化 對策을 중심으로 美國과 프랑스의 研究開發 動向을 소개한 것이다.



日本에서의 原子爐 長壽命化 對策/原子力플랜트 保全과 長壽命化/輕水爐壓力容器的 壽命評價/輕水爐發電플랜트의 長壽命化 研究



# 日本에서의 原子爐 長壽命化 對策

## 1. 美國과 日本의 背景차이

미국에서 Plant Life Extension(PLEX)이라는 말이 나온 배경은 첫째로 建設工期가 일본에 비해 매우 긴데다가 金利가 높아 전력회사의 자금력이 부족하여 원자력발전소가 다른 발전방식에 비해 비싸기 때문에 1970년대 말부터 新規發注가 전혀 없었던 점과, 둘째로 초기에 건설된 발전소는 이제 高齡으로 폐쇄의 시기가 가까와졌기 때문에 가까운 장래 발전총량의 저하가 우려되는 점 등이다.

이밖에 발전총량을 줄이는 이유로 미국에서는 수년전부터 문제가 되고 있는 PTS(Pressurize Thermal Shock, 加壓熱衝擊)의 문제가 있고, 그 검토결과 출력을 저하시키던가 폐쇄를 시켜야 할 발전소가 나올지도 모른다는 걱정도 있다.

이상의 점을 인간에게 비유한다면, 신입사원이 들어오지 않기 때문에 연배자의 「停年」을 연장시켜 일하도록 하는 것이 가능한지를 검토하는 것에 해당되며, 이를 위해 중년이후 어떻게 돌봐주면 좋을까 하는 것이다. 즉, 의사에게 다니며 항상 검사를 받고, 아픈 곳을 빨리 발견하여 돌봐주는 생활을 하면 정년을 연장해도 일할 수 있지 않을까 하는 생각이다.

이에 대해 일본의 경우는 미국에서 문제화된 PTS는 재료와 용접기술이 우수하여 걱정할 필요가 없다. 그러나 일본에서도 1990년대 중반경이 되면 초기의 발전소가 고령이 되므로 「停年」을 몇년으로 해야 할지를 의론해야 할 시기가 올 것이다. 그래서 거기에 대비하여 定量的인 의론을 할 수 있도록 데이터를 수집하는 노력을 시작하고 있으나 일본은 매년 신설되는 발전소도 있고, 또 당초 예측한 耐用年數인 30년, 40년보다 앞서 폐쇄를 우려하고 있는 미국과 같은 일은 그다지 없으므로 사정은 매우 다르다.

또 일본에서 輕水爐發電이 開始한지 17년이지만 초기의 것에서 여러가지 불량상태를 경험했다. 인간으로 말하면 선배가 여러가지 병을 앓았기 때문에 그 치료의 경험을 교훈삼아 후배가 주의해야 할 점도 알고, 병을 앓지 않게도 된다. 그러므로 신중을 기해 想定하고 있던 「停年」을 이 상태로 건강하다면 더 일해도 건강하지 않을까 하는 생각이다.

이상이 일본의 사정으로서 같은 PLEX라도 미국과는 상당히 다른 것이다.

일본에서의 PLEX는 耐用年限의 연장을 어디까지 할 수 있는지를 검토하는 것이다. 안전규제측이 연장을 인정하도록 하기 위해서는 定

性的으로 “아직 일할 수 있다”가 아니라, 定量的으로 그것을 나타내는 데이터를 사전에 集積해 두기 위해서 추진되고 있다.

## 2. 輕水爐高度化計劃의 一環으로 日本의 耐用期間延長計劃

작년 6월에 발표된 原子力開發利用長期計劃을 보면, 고속증식로의 실용화시기가 1955년경에 예측하였던 1980년대 중반에서 오늘날에는 2030년으로 50년 가까이 연장되었다.

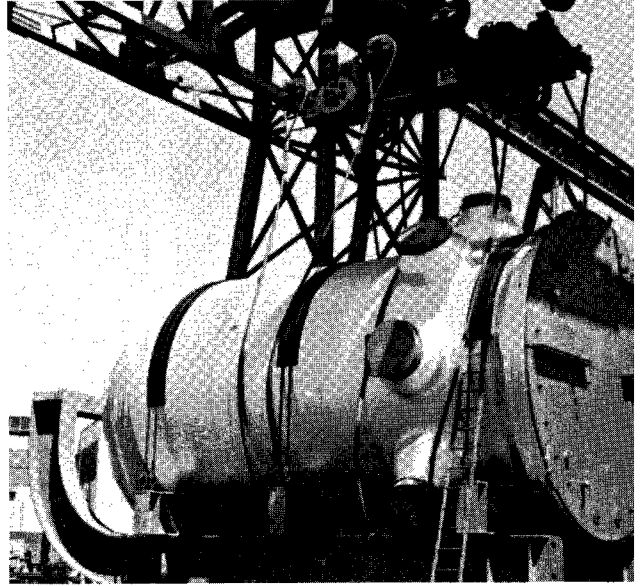
또 高速爐가 실용화되면 즉시 경수로를 일체 제조하지 않는다고 생각하는 것은 잘못이며, 고속로가 실용화되었을 경우에도 당분간은 고속로와 경수로의 共用시대가 계속되리라 전망된다.

이처럼 경수로가 과거에 예상했던 것에 비해 오래 가동된다면, 더 한층 신뢰성을 높이고 능력을 높여 전기를 더욱 저렴하게 發電할 수 있도록 개량하는 노력을 추진하게 되었다. 개량의 방향은, 예를 들면 첫째로 그동안 우리나라의 가격이 조금씩 오르는 경향이 있으므로 이에 대비하여 연료의 이용효율을 높이는 노력을 한다.

둘째로 원자력은 건설비가 비싼 것이 특징이기 때문에 모처럼 건설한 바에는 되도록 오랫동안 가동시켜 폐쇄할 때까지의 수명기간 동안에 발생하는 총전력량을 가능하면 크게 하는 것이 유리하다. 그러므로 안전상 지장이 없는 한 되도록이면 오래 가동시키기를 희망하며, 또 이 기간중에도 전혀 쉬지 않고 가동되기를 바라게 된다.

이상과 같은 목적으로 경수로를 개량해 가려고 계획된 것이 「경수로 고도화계획」으로 영어로는 Up-grading계획이라고 하고 있다.

이 계획중에는 연료를 高燃燒로 하려는 것과 신소재를 가능하면 사용하려는 것도 포함되어 있으나 플랜트의 耐用年限(Life)을 연장시키는



것도 계획의 일환이며, 이런 배경에서 일본의 耐用期間延長計劃이 수립되어 있는 것이다.

## 3. 耐用期間延長에 대한 見解

이 耐用期間의 연장을 고려함에 있어서 어떤 것을 조사해야 되는 것일까. 인간의 경우라면 「停年」을 지금까지의 55세에서 60세로 연장시킬 때 무엇을 기준으로 결정할 것인가. 지금의 60세는 건강의 면에서 옛날의 60세 사람 보다 육체적으로 튼튼해져 있다. 일본에서 평균수명이 연장된 이유의 하나는 40대 중반부터는 정기검진을 하여 조기에 病因을 찾아내어, 조기에 치료하거나, 대책에 맞는 생활을 하도록 했으므로 그와 같은 것을 발전소에서도 실시하면 되는 것이다.

인간의 정기검진에서 폐, 위, 심장, 혈관 등을 중점적으로 체크하듯이 발전소에서 폐쇄의 원인이 되는 중요한 부품부터 주의해서 보아야 한다. 발전플랜트의 기기에는 크기는 압력용기에서 부터 작게는 나사못 하나까지 굉장히 많다. 이것들은 사용되는 동안에 역학적, 화학적, 열적효과에 의해서 劣化되어가고, 원자력 특유

인 방사선의 照射도 받아 치수형상의 변화, 국부부식에 의한 孔空과 파손 등 여러가지 형태가 나타나 사용상 지장을 초래한다.

이런 원인에 신중하게 대처하여, 나이를 먹음에 따라 여러 부분의 낡아지는 상태를 추적할 필요가 있다. 즉, 사람이 혈액검사를 하고 뇌검사를 하는데 해당된다.

그 결과에 따라 어떤 부품을 정기검사시기에 교환한다고 하자. 그러나 교환에 어느 정도 시간이 걸리며, 그 때문에 정기검사일수가 어느 정도 연장될지, 그 부품의 교환작업을 하는 사람이 어느 정도 피폭될지, 또 그 부품교환의 경비는 어느 정도 인지 등을 검토하여 정년에 대한 영향이 큰기기(Critical Equipment)를 정해서 중요도에 따라 순서를 정하여, 그 上位부터 개선대책을 추진하는 것이 효율적이라고 할 수 있으나, 개선을 도모할 수 있는 전망, 연구개발의 難易와 요하는 시간, 드는 경비도 검토해야 한다.

그런 관점에서 보아 종합적인 평가를 하고, 이제부터 신규로 건설되는 발전소에서는 이것을 교환하는 형태로 설계를 하지만, 이것은 一生의 것으로서 「停年」까지 교환하지 않는다는 생각으로 설계를 한다. 그렇게 하면 어떤 재료를 사용하여야 하는지에 대한 결론이 나온다.

이에 대해 이미 가동중에 있는 발전소의 경우에는 정기검진, 조기대책이라는 豫防保全(P-reventive Maintenance)을 잘 수행하는 것이다.

작년 빈의 IAEA 회의에서도 지적되었듯이 외국에 비해 일본은 종래부터 이 예방보전이 잘 실시되고 있는 것이 특색이며, 따라서 최근에는 고장이 거의 없다. 이 검사를 계속 잘해서 나이 먹는 것을 보아 가며, 안전에 제대로 한몫을 할 수 있는 한에서의 정년연장은 어디까지 할 수 있을 것인지를 결정하게 되겠다.

가까운 장래 일본에서의 「停年」은 몇살로 할 것인가 하는 의론을 할 때에 확고한 결론이 나오게 하려면, 세계에서 가장 엄격한 일본의 안

● 중요도에 따라 순서를 정하여, 그 上位부터 개선대책을 추진하는 것이 효율적이라고 할 수 있으나, 개선을 도모할 수 있는 전망, 연구개발의 難易와 요하는 시간, 드는 경비도 검토해야 한다. ●

전규제에 통용되는 定量的인 데이터를 갖추는 노력을 해야 한다.

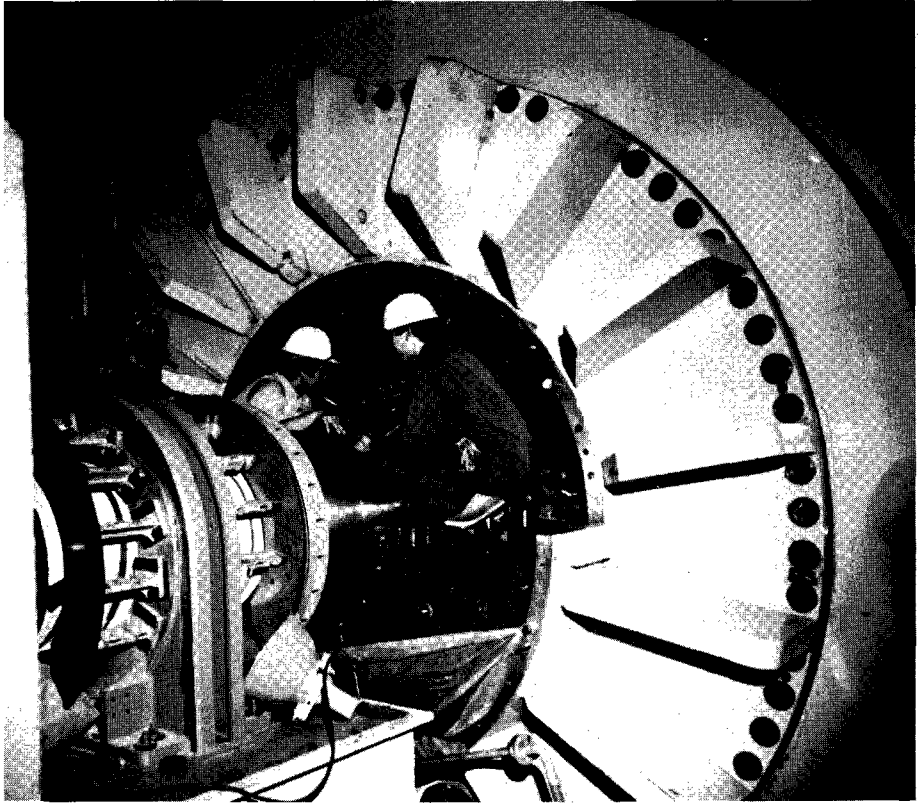
야구를 예로 들어 보면, 지금까지의 안전규제에 대한 견해는 4개의 안타를 치지 않으면 점수가 나지 않는다는 의견이었다. 그러므로 주자 1,2루에서 안타가 나왔을 때, 2루주자가 홈에 들어오려 해도 안전규제측인 3루코치가 제지해 버리는 정도의 생각이다.

그러나 누가 보아도 주자 1,2루에서 안타가 나오면 여간한 둔족이 아니면 점수가 난다고 생각되며, 2안타라도 안타를 친 선수가 도루를 하고, 다음 안타로 홈인 할 수도 있다고 생각된다.

그러나 도루를 할까 말까, 베이스 2개를 달린다는 것은 확실히 그 주자가 둔족이며 틀림없이 아웃되지 않고 그 임무를 수행할 수 있음을 定量的으로 코치가 알때까지는 안전에 만전을 기하는 입장에서 제지하고 있었다. 앞으로 고도화를 추진하여 耐用期間을 연장해 나갈 때에는 定量的인 데이터를 나타내 이 코치가 “홈”이라고 팔을 흔들도록 해야 하는 것이다.

#### 4. 計劃推進을 위한 體制

「장수명화계획」은 종합에너지조사회 원자력부회내의 경수로고도화소위원회(委員長 三島良續)가 재작년 초에 답신을 보내고, 그해 여름



▶ 철저한 豫防保全  
이 發電所 壽命延長  
에 있어서 중요한 困  
子이다.

에 인정받은 것이다.

이 계획을 실시하기 위해서는 전체적으로는 작년 봄부터 開始한 고도화계획추진위원회가 있으며, 그 밑에 여러 분과회가 있어 주제별로 활동하고 있다. 예를 들면, 연료의 燃燒度 신장, 차세대爐 등을 담당한다. 그중의 하나로 장수명화의 기술위원회도 있고, 발전설비기술검사 협회에 위탁하여 계획을 입안·실시하는 것도 있다.

이와 같은 체제로 추진해 나가면서 이 耐用期間의 연장을 고려할 때에 앞에서 언급했듯이 이미 건설되어 가동되고 있는 발전소의 경우와, 앞으로 건설할 것과는 다르므로 이것을 정리해 둘 필요가 있다.

또 이미 가동되고 있는 것이라도 극히 초기의 것과 중기 이후의 것은 달리 생각하는 것이 좋다. 지금 고도화계획중에서 먼저 A가 붙은

(Advanced) PWR, BWR에는 이미 이런 경향이 다소 반영되어 있지만 앞으로 신규 설계하는 차세대형로라면 처음부터, 예를 들면 80년 사용할 계획으로 이에 적합한 설계를 하는 것도 가능하듯이 단계적으로 나누어 몇가지로 정리하여 그에 따른 노력을 경주하여야 한다.

작년 여름 IAEA 회의에서 일본이 제안했듯이 가능하면 여러나라의 운용방법이 다른 발전소의 운전데이터를 수집, 정리하여 이 결과를 자국의 발전소에 인용해 나이가 드는 것을 예측하는 컴퓨터코드를 작성하는 것이 좋겠다. 특히, 질적으로 우수한 發電爐를 세계에 정평 있는 예방보전으로 건전하게 사용해 온 일본에서는 그 특수사정을 고려하면서 모두가 서로 의견을 내어 “장수명화계획”을 추진해 가는 것이 중요하다.

# 原子力플랜트 保全과 長壽命化

— 日本 關西電力의 對策과 美·佛의 動向 —

## 1. 序 論

原子力發電은 일본과 같은 자원소국에 있어서 중요한 에너지원이며, 그 개발의 우위성은 높다.

이런 견지에서 關西電力에서도 예의 원자력 개발에 대처하고 있으며 착실히 그 성과를 올리고 있다. 關西電力에서 운전중인 원자력플랜트는 1970년에 美浜 1호기가 운전개시한 이래, 현재 9기에 달하며, 원자력발전의 설비용량은 7,408MW로 關西電力 전체의 약 26%를 점유하고 있다.

그동안 원자력플랜트설비의 신뢰성은 정기 검사시의 철저한 점검에 의한 불량상태의 조기 발견과 수리, 국내외의 정보활용에 의한 설비 개선 등에 의해 해마다 향상되어 최근 수년간 이용률은 계속 70%를 넘었다. 그리고 앞으로 「원자력 발전의 안전확보와 안정공급」을 달성하기 위해 關西電力은 원자력플랜트설비의 보전기술고도화에 대해 검토를 추진하고 있다.

다음은 그 검토상황과 앞으로의 과제에 대한 소개이다.

## 2. 安全技術의 高度化

關西電力은 경수로중 加壓水型(Pressurized

Water Reactor:PWR)플랜트를 채택하여 이 플랜트를 구성하는 기기의 보전기술을 종래의 국내의 발전플랜트의 사고·고장의 반영 및 기점검빈도의 적정화 등에 의해 향상시켜 왔으며, 앞으로 더욱 기기의 신뢰성을 유지향상시키기 위하여 종래의 보전기술에 추가하여 원자력플랜트 보전기술의 고도화에 대처하기로 했다. 즉, 원자력플랜트를 구성하는 모든 기기를 대상으로 과거의 운전경험 및 연구조사 등에서 고려할 수 있는 劣化모드와 그 진전속도 등을 파악함과 동시에 기기 또는 부품별로 수명평가를 체계적으로 하려는 것이다.

이 대처는 원자력플랜트 보전내용의 충실과 기기수명의 연장, 나아가서는 플랜트의 수명연장에 크게 공헌할 것으로 기대되고 있다.

## 3. 檢討節次

보전기술의 고도화는 그림1과 같은 원자력플랜트 보전기술고도화의 검토절차에 따라 추진되고 있다.

즉, 원자력플랜트를 구성하는 기기는 현재의 기술로는 재생·교환이 어렵고, 앞으로 재생·교환 등의 보수기술을 개발할 필요가 있는 기기(크리티칼기기)와 그밖의 기기로 大別된다. 그리고 각각에 고려되는 劣化모드의 추출과 각

모드의 진전속도 등을 검토·평가하여 다음과 같은 두가지 기술을 확립한다.

(1) 効率的 保全技術

크리티칼기기를 제외한 모든 기기에 대해 고려할 수 있는 劣化모드와 그 진전속도 등을 파악하여 운전기간중의 점검·교환·개선 등의 보전을 효율적으로 실시한다.

(2) 長壽命化技術

a. 크리티칼기기에 대해 고려할 수 있는 열화 모드와 그 진전속도 등을 파악함과 동시에 기기의 재생·교환 등의 보수기술을 개발한다.

b. 플랜트를 구성하는 모든 기기에 대해 보전 상황 및 補修기술의 개발상황 등을 파악하여 플랜트전체의 안전성·신뢰성 그리고 경제성을 평가한 후 플랜트의 수명을 설정한다.

이런 기술을 확립함으로써 원자력플랜트의 한층 더 안전운전과 장기간 운전을 달성할 수 있을 것으로 기대된다. 本稿에서는 장수명화기술의 검토상황에 대해 기술한다.

4. 長壽命化에 대한 見解

원자력플랜트는 그 운전기간중에 플랜트의 안전성 및 신뢰성을 확보함과 동시에 경제성도 향상시킬 필요가 있다. 따라서 원자력플랜트의 수명은 재생·교환 등 보수가 어려운 기기가 수명에 도달할 때까지의 기간, 또는 기기 각각에 대해서는 보전이 가능해도 플랜트전체의 보전비용이 증가되어 경제적인 이득이 없어질 때까지의 기간 중 어느 짧은 기간으로 생각할 수 있다.

한편 원자력플랜트의 건설에 대해서는 종래의 경험에서 플랜트의 수명목표를 약 40년으로 하여 각종 운전과도상태, 환경조건 등을 고려해도 플랜트의 건전성을 유지할 수 있도록 설계하고 있으며, 현실의 플랜트 운전실적·각종

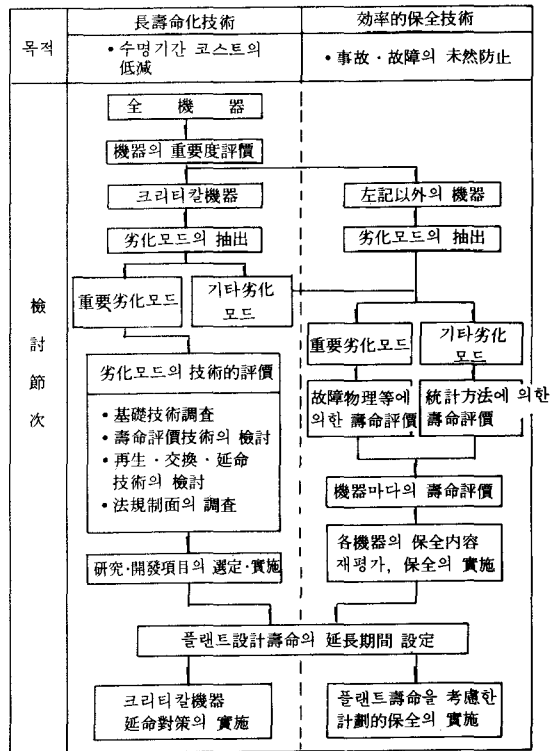
조사시험결과 등에서는 설계에서 고려하고 있는 조건에 비해 현실의 플랜트가 갖는 운전여유가 상당히 큰 것으로 나타나고 있다.

따라서 40년을 넘는 운전기간의 연장이 가능하다고 판단되며, 수명기간 동안의 발전전력량의 증대에 의해서 全壽命 동안의 발전비용의 저감을 기대할 수 있다. 이를 위해서, 원자력플랜트기기의 재생·교환 등의 보수기술 개발과 이에 근거한 플랜트 수명의 설정, 즉 장수명화 기술에 대해 검토를 추진하고 있다.

5. 長壽命化技術의 檢討狀況

원자력플랜트 장수명화의 검토는 그림 1의 왼쪽에 나타나 있는 절차에 따라 추진되고 있다.

〈그림 1〉 原子力플랜트 보전기술고도화의 檢討節次



### (1) 크리티칼 機器의 選定

원자력플랜트를 구성하는 모든 기기에 대해 다음과 같은 평가를 하여 검토해야 할 크리티칼기기를 선정했다. 그 예를 表 1에 나타내었다.

- 설계상 교환고려의 유무
- 재생·교환에 필요한 공사량·피폭량의 大小
- 재생·교환을 위한 기술개발의 要·不要

〈表 1〉 크리티칼機器의 例

No.	機 器 名
1	原子爐容器
2	加 壓 器
3	蒸氣發生器
4	一次冷却材 펌프
5	爐心構造物
6	主冷却材管
7	制御棒驅動裝置
8	格納容器
9	케이블(格納容器內)

### (2) 劣化모드의 抽出

크리티칼기기를 部品準位까지 분해하여 각각의 부품에 대해 과거의 운전경험·일반적인 기술지식 및 연구조사 등을 근거로 장애에 발생할 가능성이 있는 열화모드를 모두 파악하여 개략적인 수명평가를 한다. 그리고 기기의 수명을 지배할 가능성이 있는 중요한 열화모드를 추출했다.

(중요한 열화모드의 예)

피로·照射弱화·부식·마모 등

### (3) 劣化모드의 技術的 評價

추출한 중요한 열화모드에 대해 각종 문헌조사를 근거로 하여 앞으로 검토가 필요한 항목을 정리했다. 그 예는 다음과 같다.

- 기기재료열화 등의 기초기술조사
- 기기수명평가기술의 검토
- 재생·교환 등 延命技術의 검토

### (4) 研究開發項目的 選定

(3) 항에서 정리한 검토항목 중에서 다음과 같은 연구개발항목을 선정했다.

- 기기재료의 열화시험연구
- 열화모니터링시스템의 개발
- 기기재생 등 延命技術의 개발

현재는 선정한 항목마다 상세히 계획을 검토하여 차례로 실시에 옮기는 중이다. 그 예를 表 2에 나타냈다.

앞으로는 이 연구개발항목의 성과를 근거로 하여 기술적 평가에 의한 원자력플랜트의 개략적인 수명을 선정할 예정이다.

〈表 2〉 研究開發項目的 例

研究開發項目	
材料試驗	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 低合金鋼의 腐蝕環境下材料試驗</li> <li>· 低合金鋼의 照射脆化의 研究</li> <li>· 스테인레스鋼의 熱時效의 研究</li> <li>· 스테인레스鋼의 照射脆化의 研究</li> </ul>
모니터링	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 疲勞모니터링시스템의 開發</li> <li>· 材料劣化모니터링시스템의 開發</li> <li>· AE 모니터링시스템의 開發</li> <li>· 回轉機器모니터링시스템의 開發</li> </ul>
延命技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 大型機器의 再生</li> <li>· 交換技術의 開發</li> <li>· 劣化緩和策의 開發</li> </ul>

## 6. 長壽命化技術의 檢討日程

원자력플랜트의 장수명화에 있어서는 안전성·신뢰성·경제성의 면에서 광범위하게 검토평가가 필요하다. 따라서 이 활동에는 장기간을 요하기 때문에 계획적·효율적으로 검토를 추진해야 한다.

따라서 關西電力의 경우는 장수명화기술의 검토에 대해서 1985년부터 약 5개년 계획으로 되어 있으며, 먼저 장수명화기술의 전망에 대한 검토를 하기로 했다.

## 7. 長壽命化技術의 開發動向

원자력플랜트의 장수명화는 여러 분야에 걸



한편 해외에서도 歐美를 중심으로 원자력 플랜트의 장수명화를 위한 검토가 추진되고 있다. 이런 동향에 근거하면서 효율적으로 장수명화기술의 검토를 추진할 필요가 있다.

친 기술개발 및 여러 각도에서의 평가가 필요하며, 전력회사만의 대처로는 달성할 수 없으므로 관계기관이 일체가 되어 현재 기술검토를 추진하고 있다.

한편 해외에서도 歐美를 중심으로 원자력 플랜트의 장수명화를 위한 검토가 추진되고 있다. 이런 동향에 근거하면서 효율적으로 장수명화기술의 검토를 추진할 필요가 있다.

세계에서 PWR 플랜트의 보유국은 약 15개국에 이르지만 장수명화기술의 검토는 미국·프랑스에서 활발하다. 다음은 日本, 미국, 프랑스에서의 동향이다.

### (1) 日本의 動向

1985년경부터 정부·대학·연구소·전력회사 및 메이커에서 재료열화시험과 기기의 延命技術·수명평가방법 등에 관한 기술개발이 약 8~11년의 계획으로 추진되고 있다.

### (2) 美國의 動向

규제상 원자력플랜트의 운전허가연한(40년)이 정해져 있으며, 앞으로 이 연한의 연장이 이루어질 수 있을지 없을지가 큰 과제로 되어 있다.

이와 같은 상황에서 EPRI(미국전력연구소), DOE(미국에너지청) 등이 중심이 되어 1993년까지 그 기술적 문제점과 인허가상의 취급법을 명확히 하려고 활동중이다.

### (3) 프랑스의 動向

원자력발전이 전력공급의 대부분을 차지하고 있는 프랑스에서는 EDF(프랑스전력공사)에 장수명화프로젝트를 설치하고 1991년에는 장수명화기술의 일단을 평가하여 결과를 내기 위해 활동중이다.

## 8. 앞으로의 課題

원자력플랜트 장수명화기술의 검토에 있어서는 다음과 같은 과제가 있고, 앞으로의 적극적인 대처가 필요하다고 생각된다.

### (1) 原子力플랜트 壽命概念의 明確化

장수명화를 도모함에 있어서 안전성·경제성을 어떻게 고려하느냐에 따라 검토의 범위·내용이 크게 달라질 수 있다. 따라서 각 관계기관 공통의 장수명화개념을 명확히 하여야 한다.

### (2) 마스터플랜의 作成

장수명화에 관한 활동은 각처에서 폭넓게 수행되고 있으며, 연구개발해야 할 항목도 여러 가지가 있다.

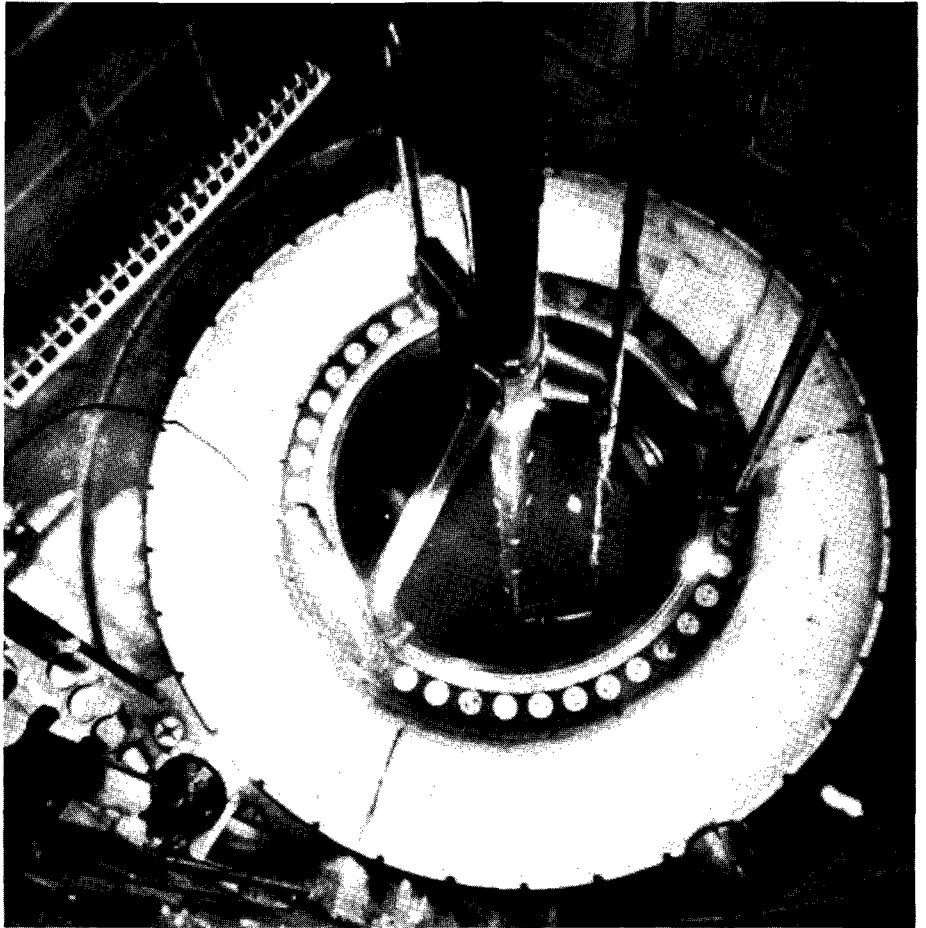
따라서 각처가 효율적인 연구를 수행할 수 있도록 원자력플랜트 장수명화에 관한 체계적인 계획을 설정할 필요가 있다.

### (3) 機器壽命 豫測方法의 確立

플랜트수명의 연장을 추진함에 있어서 기기의 수명예측을 하는 것이 불가결하지만, 현재 확립된 수명예측방법이 적으므로 앞으로의 검토가 필요하다.

### (4) 플랜트 壽命設定모델의 作成

(3)항의 검토를 받고 플랜트 전체의 안전성·신뢰성·경제성을 고려하여 플랜트의 수명을 설정해야 되지만, 국내의 모두 참고로 할 모델이 적어 앞으로 검토할 필요가 있다.



▶原子爐心에 대한 원격검사 광경.

### (5) 専門家の養成

플랜트장수명화활동의 전모를 파악하고, 연구개발을 실시하고 있는 각처에 연구개발의 위치설정·중요성 등 적절한 자문을 주는 전문가(조직)를 양성할 필요가 있다.

### (6) 海外情報の活用

해외에서의 장수명화에 관한 활동은 미국이 일본보다 선행되고 있으며, 그밖의 나라에서도 앞으로 활발해지리라 기대된다.

따라서 일본이 효율적인 연구개발을 실시할 수 있도록 해외의 장수명화기술에 관한 정보를 수집해 활용할 수 있는 구조를 수립할 필요가 있다.

## 9. 結 論

本稿에서는 원자력플랜트의 장수명화기술의 검토절차와 검토상황을 소개했다. 이 기술의 연구개발은 시작된지 얼마 안되어 앞으로 이 기술의 확립에는 장기간을 요하기 때문에 계획적이며 효율적으로 검토가 추진될 예정이다.

그리고 이 장수명화기술을 확립함으로써 현재 운전중인 원자력플랜트의 수명연장 뿐만 아니라 앞으로 건설될 원자력플랜트의 안전성·신뢰성 그리고 경제성의 향상에도 기여할 것으로 전망되며, 그 효과는 클 것으로 기대되고 있다.

# 輕水爐壓力容器的 壽命評價

— 日本原研의 材料工學的 檢討 —

## 1. 序 論

플랜트의 耐用年數를 결정하는 것은 기술과 경제 接點의 문제로서 공학적 분야를 담당하는 기술자와 연구자에게 있어서도 흥미있는 과제라 할 수 있다. 플랜트의 내용년수는 일반적으로 시설규모가 크면 클수록 그 지배인자가 복잡해지지만, 경수로발전코스트의 경우에는 경수로 실용화시점에서의 화력발전 등 재래기술이 갖는 경험을 참조하였다고 할 수 있다.

경수로발전의 경험이 축적됨에 따라 장기간發電한 爐의 취급이 경수로 보유국에 있어서 큰 문제로 대두되고 있다. 이러한 원자로에 관해서는 원자로해체기술을 확립하기 위한 기술개발이 추진되는 한편, 축적된 운전경험과 기술수준의 향상에 근거하여 플랜트의 經年變化評價와 壽命豫測技術의 확립, 나아가 이것을 기반으로 한 수명연장의 가능성을 진지하게 고려하게 되었다.

이와 같은 배경하에서 원자력플랜트의 經年變化評價와 수명예측에 관한 국제회의가 다수 개최되고 있으며, 일본에서도 통산성과 전력업체가 조사와 시험연구를 개시했다. 本稿에서는 日本原子力研究所의 연구그룹이 上記會議에서 보고한 「경수로압력용기의 수명평가에 관한 재

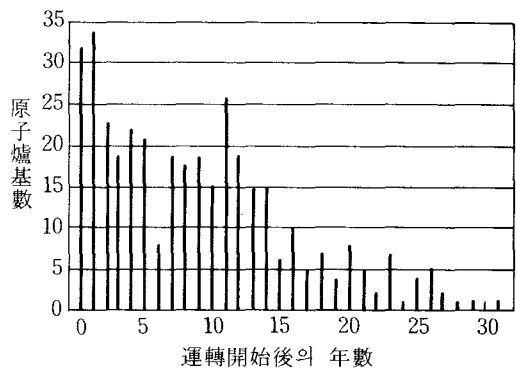
료공학적 검토」 내용을 중심으로 論하였다.

## 2. 研究의 意義와 그 動向

### (1) 輕水爐플랜트의 運轉狀況

원자력발전이 시작된지는 이미 30년 이상 경과되었으며, 약 400기의 플랜트가 세계의 26개국에서 현재 가동되고 있다. 발전을 개시한후 플랜트의 운전년수와 플랜트基數의 관계를 1985년 12월 시점에서 정리한 것이 그림1이다.

경수로 발전플랜트의 수명에 관해서는 구체적인 연한을 확일적으로 규정하지 않고, 플랜트의 유지관리기준을 충족시키지 못했을 때를 플랜트수명으로 할 방침을 채용하고 있는 국가도

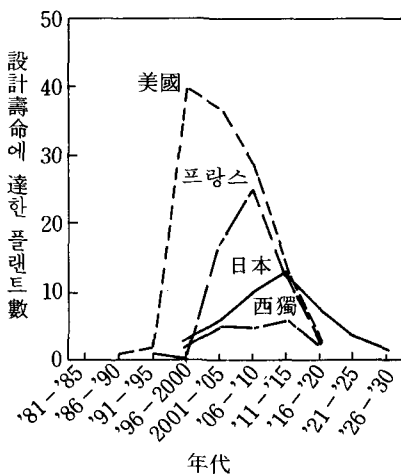


〈그림 1〉 世界 動力用原子爐의 運轉開始後 年數와 原子爐基數의 關係 (1985年 12月 現在)

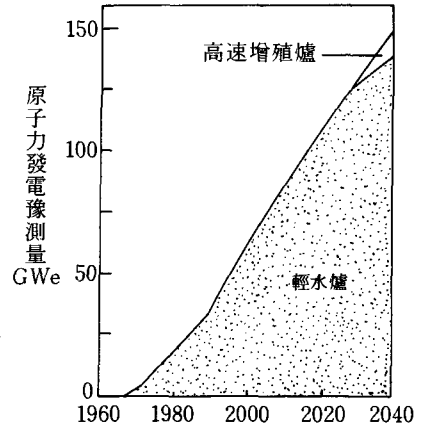
있기 때문에 설계수명을 맞이하는 플랜트基數와 年代의 관계를 분명히 하는 것은 현재로서는 불가능하다.

그래서 경수로플랜트의 설계수명으로서 沸騰水型爐(BWR)에서 40년, 加壓水型爐(PWR)에서 30년으로 가정하여 설계수명을 맞이하는 경수로플랜트基數와 연대관계를 주요 경수로보유국에 대해 정리한 것이 그림2이다. 전술한 가정에 따르면, 경수로플랜트의 라이프사이클 관점에서 미국에서는 가까운 장래에 설계수명에 달하는 플랜트가 출현할 전망이다, 그 수효는 10년 이내에 급증할 것으로 전망된다. 일본에서도 미국보다 약 10년 후에 같은 상황이 될 것으로 보인다.

일본에는 건설중인 발전플랜트를 포함하여 40基 이상의 플랜트가 존재한다. 그 내역은 탄산가스냉각로 1基, 기타는 경수로이며 BWR과 PWR이 거의 절반인 상황에 있다. 플랜트의 가동률은 현재 75% 이상이며, 원자력발전은 총 발전량의 약 30%를 점유하고 있기 때문에 경수로발전은 안전가동상태에 있다고 말할 수 있다. 또 그림3에 나타나 있듯이 21세기 중반까지는 경수로가 원자력발전플랜트의 주체가 될 것으로 예상되고 있다.



〈그림 2〉 主要輕水爐保有國에서 設計壽命을 맞는 플랜트數의 年代別推移



〈그림 3〉 일본의 原子力發電豫測量의 年代別 推移

이상과 같이 경수로발전플랜트의 경년변화 평가와 수명예측에 관련된 연구는 사회적으로도 중요한 과제라 할 수 있으며, 조속히 연구에 착수할 필요가 있다.

## (2) 研究動向

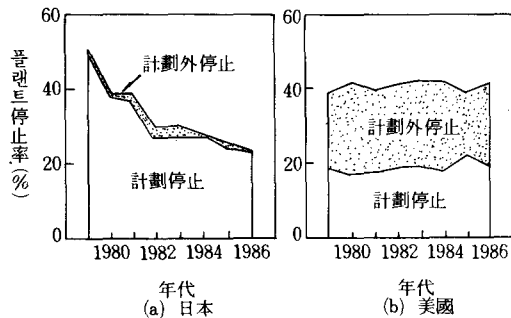
경수로플랜트의 경년변화평가와 수명예측에 관련된 연구의 필요성은 초기에 건설된 경수로플랜트의 운전경험이 20년을 지난 1980년대 초기부터 인식되었다. 현재는 當核研究의 배경과의 그리고 플랜트의 장수명화를 달성하기 위해 필요한 연구과제가 점차 밝혀지고 있다.

이 영역에서 앞서 가고 있는 미국의 경우를 예로 들어 경수로의 경년변화와 장수명화에 관한 연구를 상기 국제회의에서의 발표를 참고로 정리하면 表1과 같다. 이와 같이 경수로플랜트의 경년변화와 장수명화에 관한 연구에는 단기적인 계획(表中의 1에 상당)과 장기적인 계획(表中의 2에 상당)이 있다. 연구중점을 두는 방법은 각국플랜트의 상황에 따라 다르다.

즉, 그림에서 알 수 있듯이 노후화된 플랜트를 많이 보유하고 있으며, 또한 그림4에 나타나 있듯이 플랜트의 計劃外停止率이 비교적 높은 미국에서의 구체적인 연구전개는 前記(1)을 주체로 할 계획이다.

(表 1) 輕水爐의 經年變化와 長壽命化에 관한 研究의 分類 (美國의 경우)

	(1) NPAR (Nuclear Plant Aging Research) 프로그램	(2) NUPLEX (Nuclear Utility Plant Life Extension) 프로그램
期 間	1985~1989	1985~1993
機 關	NRC	EPRI, DOE 및 NRC
的 的	計劃外 停止率의 低減과 라이선스內에서의 플랜트의 長壽命化	라이선스의 變更에 의한 長壽命의 大폭  연장
內 容	플랜트의 故障와 經年變化의 關聯,  사용이  끝난  플랜트의  現狀調査,  메인  터빈의  適正化 및  規  制에  의한  對應方法	라이선스의 更新에  필요한  關聯技術,  基準規格 및  許認可手續의  檢討
研究對象	밸브류, 펌프류, 배터리모터, 비상용 발전기 등	壓力容器, 格納容器, 콘크리트 構造物, 케이블 등



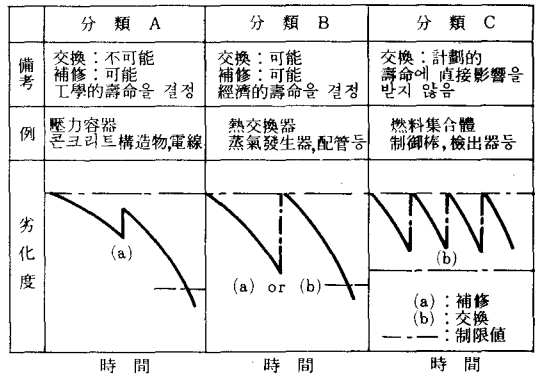
(그림 4) 日本 및 美國의 動力用原子爐의 停止率 年代別 推移

대형경수로플랜트를 비교적 근년에 도입한 국가에서는 당연히 노후화된 경수로플랜트의 수가 적다. 그러나 프랑스의 예를 보면 정부의 에너지정책에서 차지하는 원자력에너지의 비중이 크므로, 前記(1)에 상응하는 플랜트의 고장데이터의 정리와 대책기술에 대한 반응을 지금부터 유의해 갈 것으로 전망된다. 서독에서는 어떤 방향으로 당해연구를 추진할지는 지금 현재로서는 분명하지 않지만, 종래부터의 연구 과정을 고려하면 前記(2)의 방향에 힘을 기울일 것으로 예측된다. 일본에서는 (財)發電設備技術檢査協會가 1985년부터 8개년계획으로 「플랜트장수명화 기술개발」에 관한 연구를 通商産業省 資源에너지廳의 위탁에 의해 추진하고 있을 뿐 아니라 電力會社(電力中研을 포함), 플랜

트제조기업 등에서도 실시하고 있다.

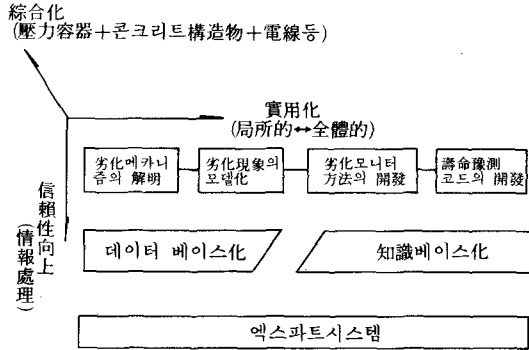
### 3. 輕水爐플랜트의 壽命評價에 관한 基礎的 檢討

플랜트 전체의 수명을 지배하는 요소가 많기 때문에 구성요소별로 劣化와 損傷의 발생과 관련하여 보수, 교환의 가부 또는 난이도를 고려하여 연구대상으로 다루어야 할 구성요소의 중요도를 평가함이 타당하다고 판단했다. 이런 사고방식을 기반으로 하여 구성요소를 분석한 결과 그림5와 같이 정리되었으며, 압력용기, 콘크리트 구조물 및 전선류가 플랜트수명을 결정하는 구성요소로서 특히 중요함이 재인식되었다.



(그림 5) 플랜트 壽命의 觀點에서의 構成요소 分類와 特徵

이밖에 직접적인 수명결정인자는 아니지만 모니터링을 포함한 원자로계측제어기술, 비파괴검사 등의 신뢰성 관련분야의 연구도 종합적인 수명평가 기술체계로서 필요한 요소라고 생각되었다. 이러한 수명예측방법의 개발과정에서 각종 요소기술의 위치 설정을 개념적으로 정리하면 그림6과 같다. 이제부터 수명예측방법을 확립하기 위해서는 폭넓은 연구요소에 대해 유기적인 연구개발을 전개할 필요가 있다.

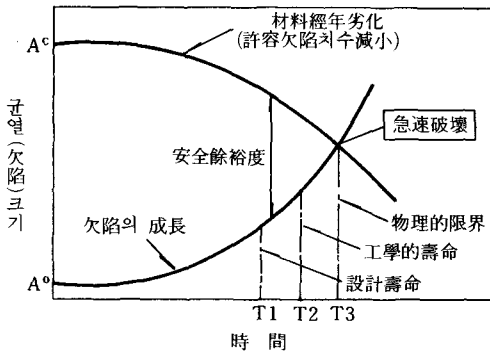


(그림 6) 壽命豫測方法의 開發過程概念圖

#### 4. 壓力容器的 壽命시나리오와 壽命支配因子

##### (1) 壓力容器的 壽命시나리오

원자로압력용기는 안전상의 중요도가 매우 높으므로 強度設計, 제조, 검사에서 엄격한 기준이 부여되고 있다. ASME(미국기계학회)의 설계코드에 의하면 압력용기의 수명은 (1) 材質劣化와, (2) 構造缺陷의 관계에서 예측이 가능하다고 생각된다(그림7 참조). 즉, (1)에 관해서는 예를 들면 원자로운전에 수반하여 받는 中性子照射 등에 의한 재료경년열화(허용결함치 수감소) 경향의 평가로 예측되며, (2)에 관해서는 원자로의 운전에서 수반하는 荷重의 변동에 의한 결함 발생과 성장 또는 잠재표면결함의



(그림 7) 輕水爐壓力容器 壽命의 概念圖

성장 경향의 평가로 예측하고, 이것을 종합적으로 평가함으로써 수명예측이 가능해진다.

##### (2) 壽命豫測試計算에 의한 工學的 因子의 抽出

경수로압력용기의 수명평가와 밀접하게 관련된 재료시험상 과정의 추출을 목적으로 하여, 전문화된 수명시나리오를 기본으로 한 외에 또 몇가지 가정을 설정하여 원자로압력용기의 수명예측을 실시하기 위한 계산프로그램을 작성하여 각 입력인자의 수명에 미치는 영향을 검토했다. 이 試計算에서는 특히 ① 부식피로균열성장, ② 中性子照射후의 파괴靱性 및 ③ 균열형상(에스펙트비)의 인자에 주목하고 있다. 試計算의 결과에서 압력용기의 수명에 관련된 공학적 인자를 정리한 것이 表2이다. 여기에서 압력용기의 수명에는 材料因子, 運轉因子 및 人的因子가 복잡하게 관여되어 있음을 알 수 있다.

압력용기의 수명과 압력용기鋼의 균열성장 거동과의 관련에 대해 다음 장에서 서술한다.

(表 2) 壽命豫測試計算에서 얻어진 壓力容器的 壽命에 關聯된 主要因子

研究項目	變動因子	균열 成長	破壞 抵抗
材料 因子		• 鋼中硫黃量 • 균열形狀	• 鋼中鋼 및 燻量 • 破壞靱性值
運轉 因子	負荷	• 正常運轉時의 負荷振幅 • 下限界特性 • 欠陷形狀	• 過渡狀態의 負荷振幅
	環境	• 冷却材의 流速	• 溫度 • 中性子照射量
人的 因子		• 균열모니터의 不確實性 (길이, 形狀, 分布)	• 中性子도지메트리의 不確實性(靱性)

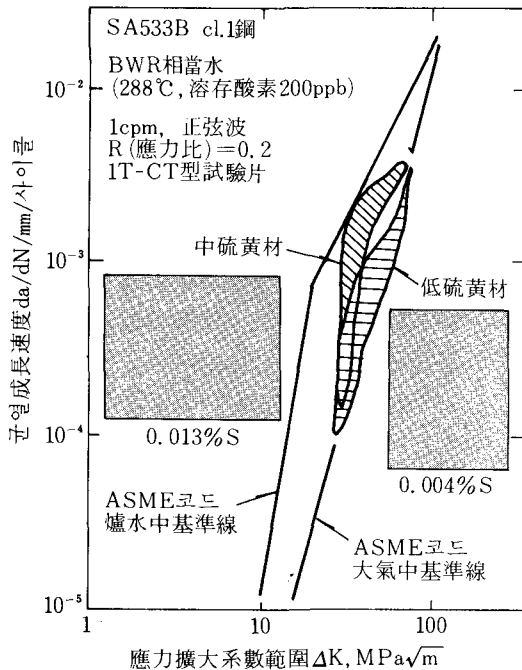
#### 5. 龜裂成長舉動과 壓力容器的 壽命

##### (1) 鋼中硫黃含有量의 영향

경수로 압력용기鋼의 원자로 1차계통 냉각수 환경과 유사한 高温水中에서 부식피로균열 성장에 관한 연구진전에 따라 鋼材中の 微量의

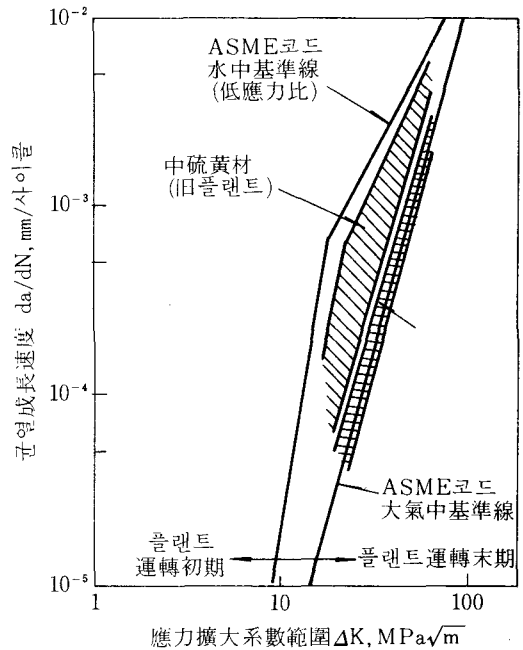
유황함유량이 高温水에 의한 균열성장속도를 가속시키는 주요한 支配因子임을 알게 되었다. 때문에 日本原研 構造安全研究委員會 腐蝕疲勞專門部會가 중심이 되어 일본 국내 플랜트에 사용되고 있는 압력용기강의 유황량상한(S=0.013 W/O)과 하한(S=0.004W/O)에 상당하는 유황을 함유한 두종류의 재료를 대상으로 한 일본 국내 공통재료시험을 실시했다. 소재의 유황분포상황과 대응시켜 BWR相當水 조건하의 균열성장속도 측정결과와 한 예를 그림8에 나타냈다. 低硫黃材에서는 거의 유황의 偏析이 인정되는데 반해, 中硫黃材에서는 壓延 방향을 따른 MnS 介在物이 인정된다.

또 中硫黃材의 破面觀察를 한 결과 MnS 개재물에 인접하여 일부에 擬劈開龜裂을 나타내고 있음을 알았다. 즉, 破面上의 특색은 低硫黃材 및 中硫黃材의 高温水中에서의 균열성장속도

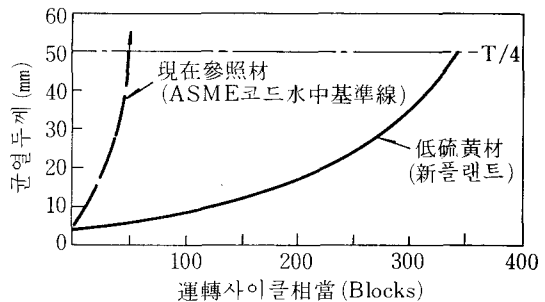


〈그림 8〉 BWR 1次冷却系近似水中에서 壓力容器鋼材의 疲勞균열成長速度와 應力擴大係數範圍의 關係 (構造安全研究委員會·腐蝕疲勞專門部會의 國內7機關의 協力에 의한 共通材料試驗結果)

데이터와 定性的으로 대응해 있으며, 高温水에 의한 균열성장의 가속효과는 鋼中硫黃量의 저감에 의해 상당 정도 억제된다고 할 수 있다. 이와 같은 균열 성장거동의 差가 압력용기의 수명에 어떤 영향을 초래하는지 밝히기 위해 유황함유량이 다른 압력용기鋼의 균열성장속도 데이터밴드를 그림9와 같이 가정하여 低硫黃材에서 얻을 수 있는 데이터밴드의 상한 및 ASME 水中기준선을 이용하여 압력용기의 수명예측 계산프로그램에 의한 계산결과와 한 예를 그림10에 나타냈다.

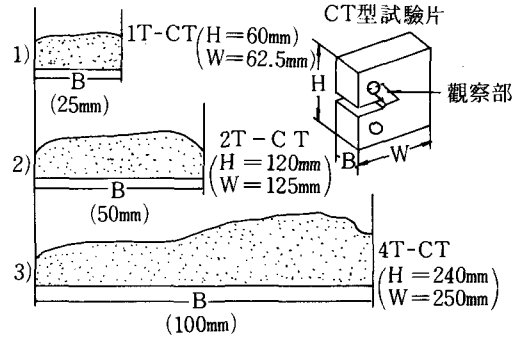


〈그림 9〉 硫黃含有量이 다른 原子爐壓力容器鋼의 均열成長速度데이터

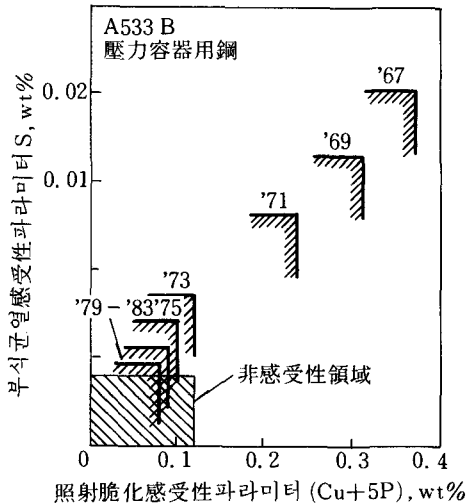


〈그림 10〉 輕水爐壓力容器的 殘存壽命에 미치는 均열成長速度데이터의 影響

일반적으로 일본의 플랜트는 외국과 비교해 유황함유량이 적은 압력용기鋼을 사용하고 있기 때문에 이 결과는 일본 국내 플랜트의 구조 건전성 여유가 큰 것을 상대적으로 나타내고 있음과 동시에 압력용기의 수명에 있어서 재료 품질관리의 중요성을 시사하고 있다고 할 수 있다. 압력용기鋼의 중성자조사약화 및 부식피로 균열성장의 관점에서 유해하다고 생각되는 불순물 원소 함유량은 일본의 철강제조기술의 진보에 따라 낮게 억제할 수 있게 되었다(그림11 참조).



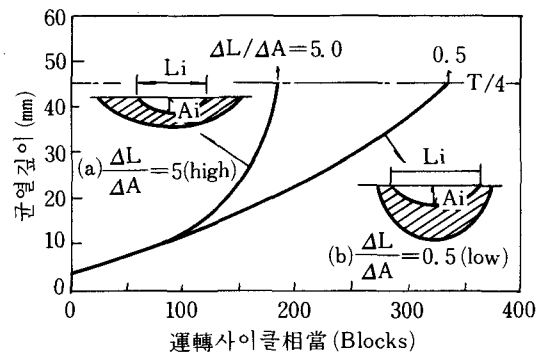
〈그림 12〉 BWR相當水中에서 腐蝕疲勞균열成長에 따라 生成된 破面の 先端部形狀의 특징과 試驗片두께의 關係(模式圖)



〈그림 11〉 壓力容器用鋼의 不純物元素의 最大含有量을 기초로 計算한 照射脆化感受성과 腐蝕균열감수성 關係 年代別推移

## (2) 腐蝕疲勞現象에 미치는 試驗片두께의 影響(균열형상의 영향)

압력용기관의 두께가 200~300mm임을 감안하면 종래부터 이런 종류의 시험에 사용되고 있는 표준적인 試驗片(두께 25mm)은 현저하게 얇다. 그래서 역학적인 相似性 또는 균열내의 물환경에 기인한 流體力學的인 효과가 부식피로균열거동에 미치는 영향을 밝히기 위해 두께 25mm, 50mm 및 100mm로 相似的으로 확대되는 세 종류의 試驗片을 사용하여 BWR相當

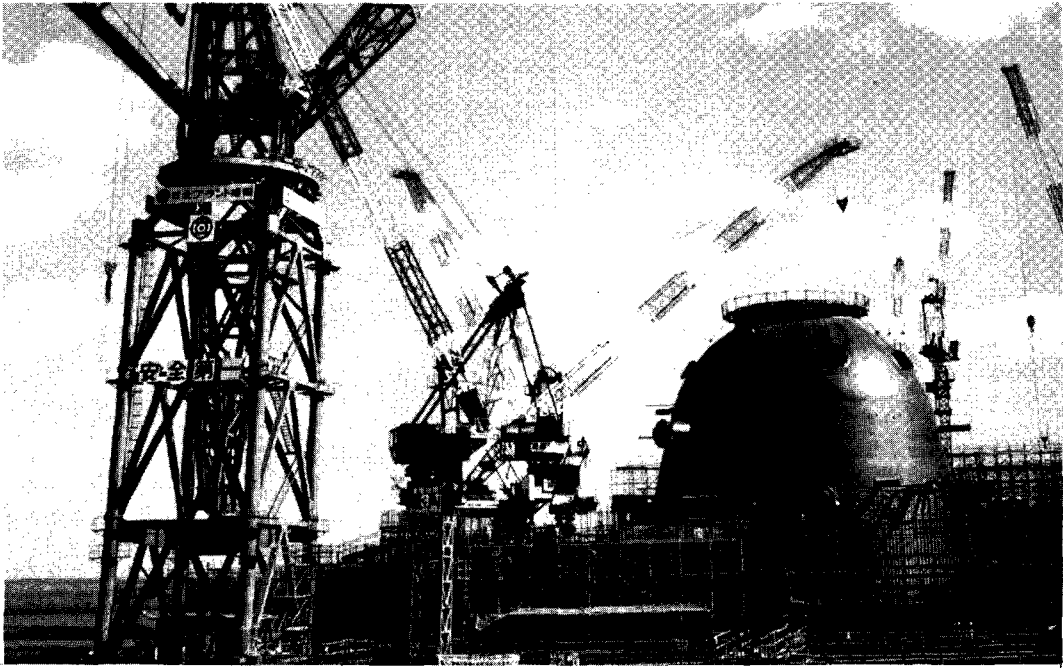


〈그림 13〉 輕水爐壓力容器的 殘存壽命에 미치는 균열形狀의 影響

수 조건하에서 시험을 실시하여 대기중의 경우와 비교했다. 그림12에 高温水中에서 시험했을 경우의 試驗片 두께와 균열破面の 形상을 나타냈다. 대기중에서는 試驗片두께에 의존하지 않고 균열첨단부는 거의 일직선상이 되어 있었다.

한편 高温水中에서는 試驗片 표면근방에 해당되는 양단부에 비해 균열내부의 균열돌출도가 크며, 형상이 복잡해져 있다. 또 이 경향은 試驗片이 두꺼워질수록 현저했다. 실제의 압력용기에서 예측되는 주된 결함은 3차원적인 확산을 하는 표면균열이기 때문에 전술한 바와 같은 水化學的이고 유체역학적인 효과에 주안을 둔 압력용기의 壽命試算을 실시했다. 이 계산에서는 3차원 균열에 대해 (1)式에서 나타





나는 표면균열 성장계수 F의 개념을 도입했다.

$$F = \Delta L / \Delta A \dots \dots \dots (1)$$

여기서

$\Delta L$  = 표면균열의 開口방향으로의 성장량이

며,

$\Delta A$  = 표면균열의 깊이방향으로의 성장량이

다.

이 (1)식의 분모, 분자를 단위시간당 荷重반복數(dN)로 나눔으로써 (2)식을 얻을 수 있다.

$$F = \frac{dL / dN}{dA / dN} \dots \dots \dots (2)$$

(2)식의 분모는 종래의 標準型試驗片(콤팩트·턴션型)의 데이터포시와 같은 의미를 갖고 있다. 실제 압력용기의 환경인 냉각수의 화학적 상태는 잘 제어되고 있는 점, 그리고 표준형 시험편에 비해 균열開口量이 극히 적은 점을 고려하면, 이 (1)식의 계수 F는 상당히 적어질 것이 예측된다. F=5 및 0.5의 경우에 대해 전술한 압력용기의 수명예측 계산프로그램에 의한 계산결과를 그림13에 나타냈다. 여기에서 압력용기의 수명에 대해 균열형상도 크게 영향을

미치기 때문에 實機를 模擬한 3차원적인 확산을 하는 표면균열시험을 고온수환경중에서 실시하는데 대한 중요성도 시사된다.

## 6. 結 論

경수로발전플랜트의 경년변화평가와 수명예측에 관한 현재의 지식수준에서 생각하면, 이런 기술체계의 전체상은 완전히 밝혀졌다고는 말할 수 없다. 그러나 일본에 있어서 경수로발전의 장기전망과 플랜트의 운전상황에서 판단하여 플랜트의 경년변화평가와 수명을 예측하는 기술을 10년 이내에 작성하는데 대한 의의는 크다. 이 명제를 달성하기 위해서는 경수로의 안전성연구에 관해 축적되어 온 다방면에 걸친 연구포텐셜과 플랜트의 운전경험에서 얻어진 지식을 최대한 활용해야 된다고 생각한다. 현재까지의 연구에서 분명해진 일본 국내의 플랜트가 갖는 안전여유가 큰 것을 반영하여 일본에 있는 플랜트의 수명을 대폭 연장할 수 있을 것으로 기대된다.

# 輕水爐發電플랜트의 長壽命化研究

— 日本 電中研의 研究活動 —

## 1. 序 論

현재 대부분의 산업계에서는 기존설비·자원의 유효이용을 모색하고 있다. 앞으로 장기에 걸쳐 주전력원이 될 원자력발전의 코스트저감화 대책의 확립은 중요한 과제이며, 既設爐에 대한 장수명화의 실현은 설비의 유효이용에 의한 발전코스트 저감에 기여할 것으로 기대된다.

일본의 경수로발전플랜트는 고가동률 및 고신뢰성 운전을 계속하고 있으며, 미국 등의 경수로선진국도 일본의 운전보수기술을 주목하고 있는 상황에 있다. 최근의 원자력이용 장기계획에서는 일본의 경수로로는 2030경까지는 주력전원이 될 것으로 想定하고 있다. 한편, 일본의 既設爐는 2010년경부터 順次壽命에 도달한다고 인식되고 있다. 그러나 다수의 기기중 플랜트의 수명을 제약하는 것은 일부기기로 상정되며, 그런 기기의 열화부분을 보수·재생·교환하면 플랜트 전체의 耐用壽命은 현저히 신장되리라고 기대된다.

상기의 관점에서 日本電中研은 1987년도 부터 경수로 장수명화기술의 개발연구에 착수했다. 本稿에서는 電中研이 대처하고 있는 장수명화연구의 개요를 소개한다.

## 2. 研究計劃策定の 經緯

일본의 가장 초기의 경수형발전플랜트로서는 1970년에 운전이 개시된 敦賀 1호기와 美浜 1호기이지만, 미국에서는 거의 같은 정도의 출력규모인 경수로가 일본보다 약 10년전 부터 가동되었기 때문에 미국에서 초기에 건설된 상업적 규모의 경수로발전플랜트는 1990년대 말기부터 수명을 맞이한다.

미국에서는 최근 경수로의 운전인허가기간을 종래 플랜트건설개시부터 40년간이었던 것을 운전개시후 40년간으로 변경하여 일부 플랜트에 적용했다. 한편 일본의 운전인허가기간은 미국의 경우와 달라 특별히 정해져 있지 않으나 매년 정기검사에서 다음 정기검사때까지 기간의 운전허가가 주어졌다.

미국에서는 경수로플랜트의 장수명화에 관해 미국전력연구소(Electric Power Research Institute, EPRI)가 타당성 연구를 1970년대 말부터 착수하여, 현재 규제측 및 원자력관련 산업계 등 광범위하고 체계적인 연구개발이 추진되고 있다. 日本電中研은 EPRI와 정기적인 회합을 비롯하여 각종 연구정보의 교환과 공동연구 등을 적극적으로 추진하고 있으며, 또 경수로의 장수명화 연구에 관해서도 공동연구의 구

체화를 추진하고 있는 단계에 있다.

日本電中研은 1984-1985년도 2년간에 걸쳐 경수로의 장수명화에 관해 日本電中研이 실시해야 할 과제탐색의 조사를 실시했다. 이 조사에서는 본건에 관련된 연구를 선행 실시하고 있는 EPRI의 보고서 등을 중심으로 원자로압력용기, 爐內구조물, 증기발생기, 냉각계배관, 증기터빈, 콘크리트구조물, 전기·신호케이בל 등의 기기·구조물에 대해 장수명화상 해결해야 할 항목 및 교환의 난이도 등을 검토했다. 그결과 플랜트의 장수명화는 기술적으로는 가능성이 크다는 인식하에 이것을 실현하기 위한 기술과제의 방향으로

(A) 수명을 제약한다고 생각되는 중요기기의 열화를 정확히 진단·평가하기 위한 방법의 확립,

(B) 이에 근거한 기기수명의 평가·예측,

(C) 그리고 補修·재생·교환기술의 개발 등 세가지로 집약했다.

이 조사결과와 그후 계속하여 연구정세의 조사·분석을 추진하여 日本電中研이 실시해야 할 연구과제를 선정했다. 이 연구과제와 日程

을 表 1에 나타냈다.

### 3. 實施課題의 概要

일본의 경수로로는 미국형(GE社型的 BWR 및 WH社型的 PWR)인데, 미국은 경수로의 선진국·개발국으로서 약 100基라는 다수의 원자력 발전플랜트를 소유하고 있기 때문에 미국의 장수명화 기술개발의 정보는 일본에 있어서 유익하다. 한편, 일본보다 다수의 경수로를 가진 프랑스는 운전경험이 일본보다 짧기 때문에 장수명화 기술개발의 긴급성은 일본보다 적다고 생각되지만, 이미 장수명화 기술개발에 착수하고 있는 상황에 있다. 또 일본의 플랜트운전·保守는 미국보다도 섬세하게 시행되고 있기 때문에 미국과는 다른 일본에 적합한 장수명화의 기술전략을 가져야 함은 물론이다. 그러나 장수명화 연구의 선행적·체계적 대처를 추진하고 있는 미국의 연구정보수집·분석과 그 성과의 활용은 일본의 장수명화 기술개발 연구의 효율적 추진에 유익한 것으로 판단되는 상황에 있다.

(表 1) 研究課題와 日程

研 究 課 題		I 단 계			II 단 계					
		87年度	88	89	90	91	92	93	94	95
1. 技術의 壽命化要素 開發	(1) 爐內構造物 中性子照射效果의 評價	照射關聯技術의 開發		照射效果의 評價			壽命評價			
		基本特性의 評價								
	(2) 蒸氣發生器의 長期健全性評價·長壽命化	傳熱管의 局部腐蝕·機械的劣化因子의 評價		劣化의 複合效果評價·豫防技術의 確立			壽命評價			
	(3) 劣化監視·診斷技術의 開發	非破壞的技法의 實機適用性調査·基本試驗					經年劣化의 評價			
(4) 材料데이터 베이스의 構築	作成·收集法의 검토		重要機器材料데이터베이스의 構築							
2. 壽命化分野의 運轉·保守데이터 베이스의 構築	(1) 長壽命化分野의 運轉·保守데이터 베이스의 構築	플랜트 데이터베이스의 作成·收集法의 檢討		플랜트 데이터 베이스의 構築						
	(2) 運轉·保守데이터 評價法의 開發			重要機器의 플랜트데이터 評價方法의 確立						
	(3) 機器壽命評價技術의 開發			壽命評價技法의 確立			壽命評價·豫測			
3. 裝置壽命化평가 技術의 體系化	(1) 國內外規制의 方向性 調査·分析	動向調査		調査·分析						
	(2) 經濟性評價			評價方法의 檢討			評價			
	(3) 長壽命化技術의 體系化			플랜트시스템으로  종합평가						

日本電中研은 경수로의 장수명화 연구를 추진하고 있는 일본의 전기사업 및 통상산업성 자원에너지청(실시주체는 (財)발전설비기술검사협회) 등과의 협조를 도모하면서, 또한 미국 전력회사의 中核研究機關인 EPRI와의 정보교환, 공동연구 등에 의해 일본의 경수형발전플랜트의 장수명화의 실현에 기여하기 위해 본 연구를 추진하고 있다.

日本電中研의 연구과제를 表 1에 나타냈지만, 연구특징은 1) 중요기기라고 생각되는 爐內구조물과 증기발생기의 장수명화를 도모하기 위한 시험연구 등을 포함한 「장수명화 요소기술의 개발」, 2) 電中研의 원자력정보센터(NIC)의 정보네트워크의 활용에 의한 「플랜트 운전·보수기술평가법의 개발」, 3) 내외 기술연구의 성과를 도입하고, 電中研이 종합연구기관으로서의 역할을 완수할 수 있는 「장수명화 평가기술의 체계화·종합화」 등 세가지로 구성되는 과제를 종합적으로 추진하는 점이다.

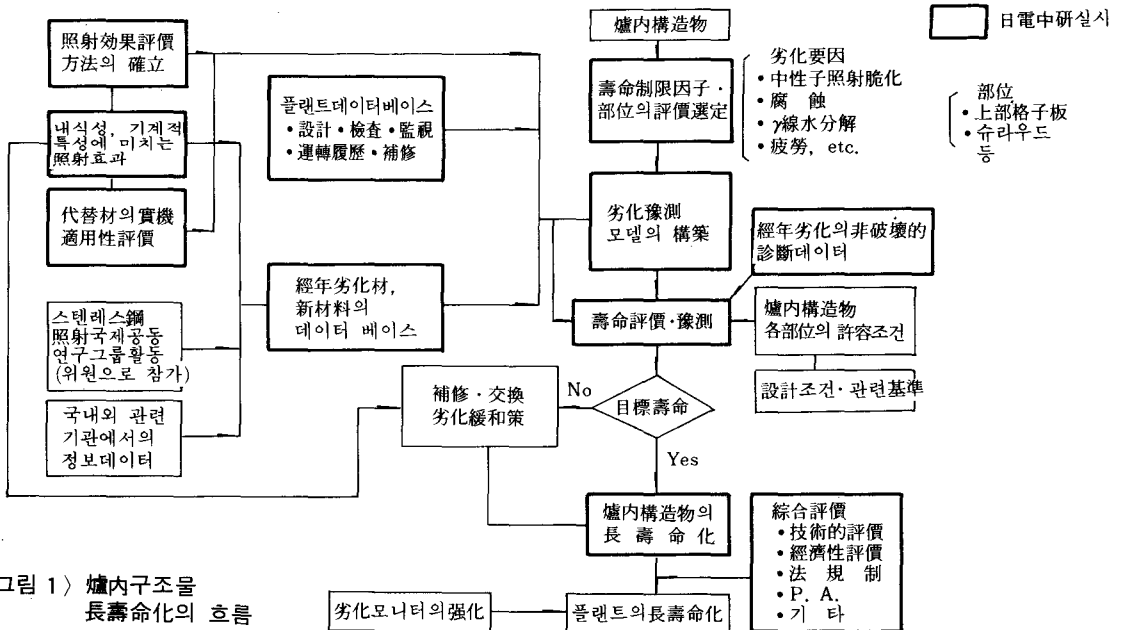
### 3.1 長壽命化要素技術의 開發

#### 3.1.1 爐內構造物의 中性子 照射效果의 評價

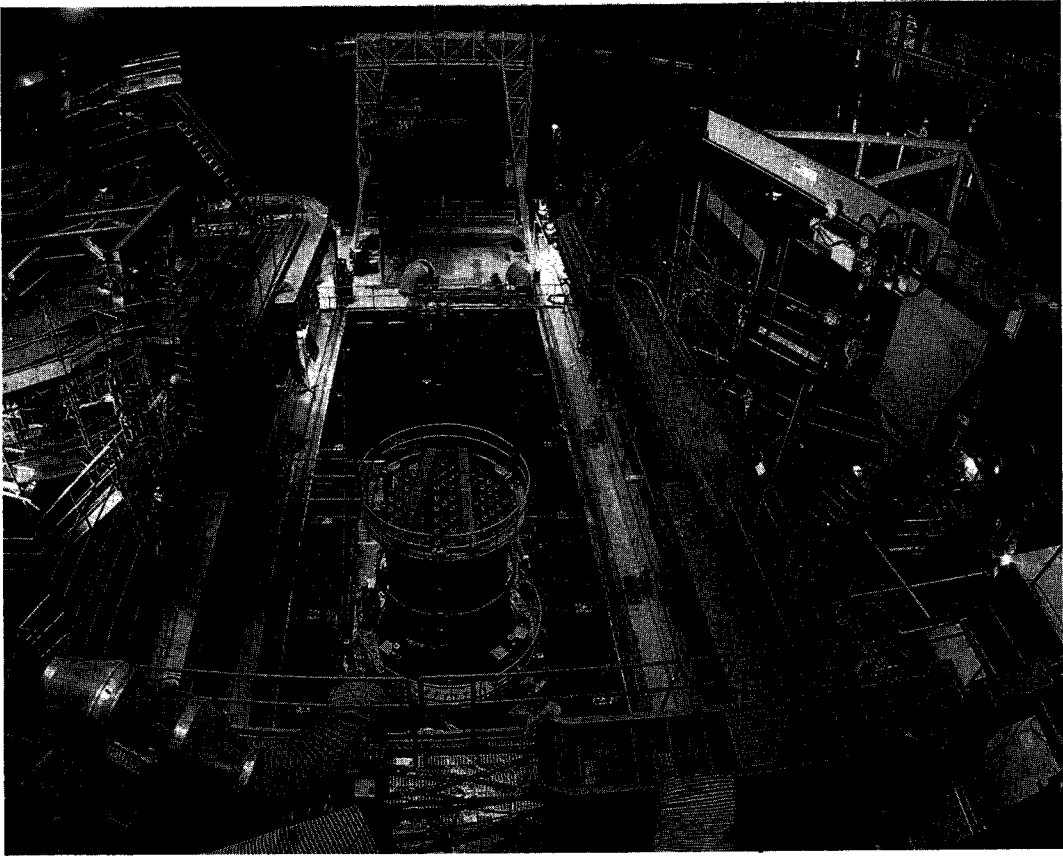
爐心支持板, 爐心슈라우드, 爐心배플 등의 爐內構造物은 核燃料(集合體)를 소정의 위치에 고정시키는 기능을 갖는 중요한 구조물이며, 노심에 가깝기 때문에 중성자照射 및 고온수의 환경에 처해 있다. 현재 長期使用에 의한 노내 구조물재료의 諸特性에 미치는 중성자照射 효과의 지식이 적다고 판단된다. 때문에 現用材 및 장래 候補材를 대상으로 하여 기계적 성질 및 耐蝕性에 미치는 중성자照射 효과데이터의 취득을 도모함과 동시에 EPRI주최의 국제공동연구그룹을 중심으로 하는 내외의 데이터 수집·해석에 의해 열화예측모델의 구축 및 수명의 평가·예측법을 개발하여 노내구조물의 장수명화 종합화를 도모한다. 노내구조물 장수명화 기술개발연구의 흐름을 그림 1에 나타냈다.

이 연구는 1987년 6월부터 일본원자력연구소(大洗研究所)와의 공동연구로 추진되고 있으며, 다음과 같은 점이 특징이다.

- (1) 플랜트의 수명연장기간을 고려한 高照射量까지의 데이터를 취득한다.
- (2) BWR 및 PWR 兩爐水의 模擬環境중에서 耐蝕性에 미치는 照射效果를 평가한다.



(그림 1) 爐內구조물 長壽命化의 흐름



(3) 기계적 특성으로 중요한 破壞靱성에 미치는 照射效果의 규명에도 역점을 둔다.

### 3.1.2 蒸氣發生器의 長期健全性評價·長壽命化

증기발생기의 장수명화상 주요한 검토 대상 부위는 傳熱管이라고 생각된다. 그러므로 당면은 pH 및 水中不純物 등의 水質因子, 온도, 응력, 빈틈의 沸騰·불순물농축 등에 관한 腐蝕의 요인 및 支持板과의 충돌·진동에 의한 전열관의 기계적 損耗에 대해 개개의 열화영향을 규명한다. 다음에 부식 및 기계적 열화요인의 복합효과도 고려한 재료 건전성의 종합평가 방법을 확립하여 열화모델의 구축과 수명평가·예측법을 개발한다.<sup>1)</sup>

또 전열관 이외에도 管板, 支持板, 水室, 冷却材出入口노즐, 胴에 대해서도 열화요인의 調

査·檢討를 추진하고, 증기발생기 전체로서의 수명평가·예측을 한다. 그리고 장기건전성 확보와 장수명화를 도모하기 위해 최적수질관리법 등의 예방보전책의 제안도 수립하고자 한다. 또한 상기 연구의 효율적 추진을 도모하기 위해 EPRI 주최의 증기발생기 신뢰성 실증프로젝트연구(SGRP) 등을 포함한 내외정보·데이터 및 電中研의 NIC를 통해 얻을 수 있는 플랜트데이터를 유효하게 활용하여 증기발생기의 장수명화 평가방법의 체계화·종합화를 도모한다.

### 3.1.3 劣化監視·診斷技術의 開發

중요한 기기의 수명평가 및 장수명화 후의 건전성의 감시·진단을 하기 위해서는 기기의 장기간 사용에 의한 기기재질의 열화(경년열화)를 비파괴적 방법에 의해 평가하는 것이 중요

하다. 여기서는 超音波法, 磁氣法, 레이저法 등의 기법에 대해 먼저 현재기술의 특징과 앞으로의 기술향상 가능성을 조사·검토함과 동시에 實 플랜트에 대한 적용가능성을 평가한다.

다음에 경수로 기기구조물의 경년열화재 및 劣化模擬材에 대해 열화정도의 검출·진단의 精度評價 및 열화의 高精度檢出을 가능하게 하는 장치의 개량·개발과 진단·평가를 위한 데이터처리시스템의 개발, 그리고 각종 경년열화 모드에 대한 기준데이터의 축적과 검증을 하여 실용화를 도모하여 기기의 수명평가를 정확히 하기 위한 하나의 수단으로서 활용한다.

### 3.1.4 材料데이터베이스의 構築

장수명화의 시책시에는 기기·배관의 보수·재생·교환이 필요하다고 상정된다. 그때 재료의 선정, 그리고 기기의 수명평가에 반영하기 위해 중요기기의 재료데이터베이스를 구축한다. 日本電中研에서는 현재 경년화력발전플랜트의 남은 수명평가 기술확립의 일환으로서 경년화력 기기재료의 데이터베이스를 구축중이며, 이 경험을 살려 본 과제를 추진한다. 그리고 앞으로 데이터수집네트워크의 하나로서 電中研의 NIC가 중요한 역할을 완수할 것으로 기대된다.

### 3.2 플랜트 運轉·保守技術評價法の 開發

중요기기의 수명평가를 하기 위해 장수명화의 관점에서 기기의 운전·보수이력에 관한 플랜트데이터베이스의 구축 및 데이터의 평가·활용방법 개발 등을 한다. 플랜트데이터베이스 작성에 즈음해서는 이미 日本電中研內에 설치되어 있는 NIC의 정보네트워크를 활용하여 일본 뿐만 아니라 외국의 유용한 플랜트데이터도 취득한다.

중요기기의 수명평가는 그 한 例를 그림 1에 나타냈듯이 日本電中研 및 일본내외의 제연구 정보, 재료데이터, 플랜트데이터, 비파괴적 방법에 의한 기기구조물의 재질열화진단데이터

등을 체계화·종합화함으로써 실시한다.

### 3.3 長壽命化評價技術의 體系化·綜合化

플랜트의 장수명화 실현에 있어서는 기술면 외에 규제면(法 등), 안전성, 경제성, 장수명화 시책시의 방사선피폭면 등을 체계적·종합적으로 평가할 필요가 있다고 판단된다.

먼저 운전기간의 인허가법이 미국과 일본에서는 현저히 다르므로 日本電中研에서는 장수명화의 인허가에 관한 미국의 규제법 동향을 조사·분석한다.

한편 장수명화에 관한 경제성평가는 EPRI에 의하면 출력 50만kWe급의 경수로를 30년간 연장하면 장수명화를 위한 투자에 대한 이익은 약 4배로 시산되어 코스트 이익이 크다고 한다. 日本電中研에서는 장수명화의 코스트평가모델의 구축을 도모한다. 또 補修·재생·교환해야 할 기기의 내구성·신뢰성에 대해 각 기기간의 整合性 평가 및 열화평가기법의 체계화 등 플랜트시스템으로서의 종합평가방법을 개발할 예정이다.

## 4. 結 論

경수로의 장수명화 연구에 관해 日本電中研의 對處方案을 소개했는데, 앞으로 내외 제관련기관과의 협력과 조정을 한층 더 도모하고자 한다.

다행히 일본의 기설 경수로로는 장수명화의 시책까지는 약 20년의 유예기간이 있다고 상정되기 때문에 일본에서는 앞으로 10년간쯤은 차분한 기술개발이 가능하다고 생각되며, 일본 독자의 신뢰성이 높은 장수명화기술의 확립을 기대할 수 있다. 日本電中研에서는 상기와 같은 연구를 실시하여 장래 장기에 걸쳐 주력전원이 될 경수로의 장수명화 실현에 기여할 것으로 기대된다.