

원자력발전소의 수명관리기술 동향

국내 원자력발전산업계는 국가경제규모의 팽창에 따라 1978년 고리원자력 1호기의 첫 상업운전 이래 비약적인 발전을 거듭하여 왔다. 현재 가동중인 원전이 9기이고 6기가 건설중이며 국가 전체전력공급의 절반을 원자력이 책임지고 있다. 그러나 최근에는 초기 원자력발전산업계와는 달리 많은 제약 조건과 어려움이 있다. 특히 신규 원자력발전소 건설부지 확보, 전력수요의 증가로 인한 전력난문제, 가동년수증가에 따른 기기의 수명관리 등이 주요 관심사항이다.



홍 승 열
한전기술연구원 원자력연구실 책임연구원

그 중 원자력발전소 수명관리(Nuclear Power Plant Lifetime Management) 연구는 80년대 초반 미국에서부터 시작되어 지금은 전세계적으로 관심을 보이고 많은 연구가 수행되고 있다. 국내에서는 주로 화력발전소의 수명관리를 위한 연구가 재질열화평가를 중심으로 진행되어 왔고, 원자력의

경우에는 1987년 기초조사연구 이후에 특별한 후속연구가 이어지지 못하고 있었다. 원자로압력용기의 재질열화에 대한 연구는 발전소 가동중검사의 일환인 원자로압력용기 감시시험수행과 함께 꾸준히 진행되어 왔다.

고리 1호기는 운전년수가 금년으로 14년이 되고 이제 수명중반에

접어들게 되므로, 운전기간 후반부의 성능관리가 기기 노후화(Ageing)문제와 더불어 발전소운영에 중요한 부분을 차지할 것으로 예상된다. 또 장기전원개발계획에 의하면 고리 1호기는 <표 1>에서 보는 바와 같이 발전소 경제수명을 기준으로 2004년에 폐지(Decommissioning)하도록 계획되어 있으므로, 대체발전소 건설기간을 고려하면 지금부터 고리 1호기 수명연장에 대한 가능성 여부를 판단하기 위한 연구가 시작되어야 한다.

본 논문에서는 원자력산업계에서 관심사항으로 대두되고 있는 원전 수명관리의 기본적인 개념을 설명하여 수명관리에 대한 이해를 돕고, 국내외 연구동향과 금년에 착수할 「고리 1호기 수명관리연구(I)」내용을 소개하고, 수명관리 대상기기 중 가장 중요한 단일기기인 원자로압력용기에 대하여 설명하고자 한다.

원자력발전소 수명관리

1. 수명관리개념

(1) 개념

원자력발전소의 수명관리(Nuclear Power Plant Lifetime Management)란 발전소성능과 안전성을 유지하면서 경제적으로 최적인 시점까지 발전소를 운전하는데 필요한 제반사항들이다. 우리들의 일상생활에서도 유년시절과 청장년시절의 충분한 건강관리 없이는 노후의 건강과 장수를 기대할 수 없는 것처럼, 원자력발전소도 초기부터 전수명기간동안에 걸쳐 경상보수,

〈표 1〉 국내 원자력발전소 호기별 폐지년도

호기명	용 량 (MWe)	상업운전 개시일	폐지년도	경제수명	설계수명	비 고
고리 1호기	587	1978. 4. 29	2004	25	30	
고리 2호기	650	1983. 7. 25	2009	25	40	
월성 1호기	678.7	1983. 4. 22	2008	25	30	
고리 3호기	950	1985. 9. 30	2010	25	40	
고리 4호기	950	1986. 4. 29	2011	25	40	
영광 1호기	950	1986. 8. 25	2011	25	40	
영광 2호기	950	1987. 6. 10	2012	25	40	

* 폐지년도는 경제수명 25년에 근거한 장기전원개발계획상의 폐지시기임

연차보수, 예방보수를 포함한 성능 관리를 효과적으로 수행하여야만 수명말기의 발전소성능을 보장할 수 있고 나아가 수명연장문제도 고려할 수 있는 것이다. 그러므로 원자력발전소 수명관리에는 경상보수, 예방보수, 예측보수, 기기교체 및 개보수, 발전소성능 및 안전성 향상, 최적운전방안, 인허가갱신문제들이 포함되어야 한다. 이는 발전소수명관리란 어떤 특별한 기술을 운전중인 발전소에 적용하여 새로운 성능의 발전소로 재창조하는 것이 아니라, 기존의 밝혀진 기술들을 효과적으로 이용하여 발전소 수명 말기까지 가능한 최고의 성능을 유지하기 위한 노력이라 할 수 있다. 다시 말하면 수명관리는 방법론이고, 수명연장은 방법론시행에 의한 결과물이 되는 것이다.

장기전원개발계획상의 발전소수명분류에 의하면, 사용목적에 따라 기계수명(Mechanical Lifetime), 경제수명(Economic Lifetime), 회계수명(Financial Lifetime)으로 분류하고 있다. 기계수명은 안전하게 발전가능한 물리적 수명 즉, 발전

소의 실제수명(Real Lifetime)을 뜻하고, 경제수명은 노령화에 따라 효율저하, 유지보수비증가 등으로 저원가 신규설비의 대체가 경제적이라고 예상되는 시점까지의 수명이고, 회계수명은 감가상각을 통한 투자비회수기간까지의 수명이다. 그외에 수명관리에서 사용하고 있는 발전소수명에는 설계수명(Design Lifetime)이 있는데, 이는 발전소설계시 모든 계통, 구조물, 기기의 내구년수의 목표치로서 대부분의 주요기기들은 설계수명까지 견디도록 설계되고 있다.

(2) 발전소운영과 수명관리

그러면 수명관리와 일상적인 발전소 운영(Management)과의 차이점은 무엇일까. 간단히 말해서 발전소의 경제성을 고려하는 운전기간 즉, 수명에 대한 개념의 차이로 볼 수 있다. 기존의 발전소 경제성 분석에서는 투자비에 대한 이득의 회수기간을 경제수명(Economic Lifetime)기간동안에 국한시켜 고려한다. 그러나 수명관리에서는 운전기간동안에 적절한 유지보수와 상태관리로 발전소수명 말기에도 여

전히 성능이 우수하다면, 원래의 인허가수명을 연장하여 계속운전할 수 있다는 개념이다. 그리고 경제성은 연장운전을 위하여 투자되는 비용과 대체발전소 건설비용을 비교하여 결정한다. 그러므로 수명관리란 연장운전 그 자체보다는 어떻게 하면 발전소를 가장 잘 관리하여 오랫동안 경제적으로 운전할 수 있을까하는 측면과 경제적으로 최적인 운전종료시점을 찾아내는 과정인 것이다. 경상보수와 수명관리의 관계를 보면 경상보수는 일상의 발전소운전에서 나타나는 계통 및 기기의 고장수리, 문제점해결을 위한 것이고, 수명관리에서는 개별기기의 성능유지기간에 관심을 두고 있기 때문에 모든 기기의 개보수이력관리가 중요하고 기기보수후에도 차기보수시기 등을 계획하는 등 예방/예측보수(Preventive/Predictive Maintenance)측면에서 기기를 관리하게 된다.

(3) 주요기기교체

원자력발전소의 운전년수가 경과함에 따라 때로는 발전소성능에 결정적인 영향을 미치는 주요기기를 설계수명 이전에 교체하여야 하는 경우가 발생하게 된다. 대표적인 경우로 증기발전기 교체문제를 들 수 있다. 원전의 주요기기 수명관리는 부분적인 개보수로 연장운전 기간동안에 계속운전이 가능할 것인지 또는 성능저하된 기기를 교체해야 할 것인지를 판단하여야 한다. 그러나 주요기기와 하더라도 설계수명 중반에 교체가 불가피한 것은 연장운전과 상관없이 발전소 설계수명까지의 안전운전을 위하여

수명기간중에 교체하여야 한다. 발전소 주요기기의 교체 및 개보수를 위한 의사결정과정에는 그 기기의 수명종료시점이 경제성검토에서 중요한 변수가 되므로 발전소 전체의 수명관리와 밀접한 관계를 유지하게 된다. 따라서 발전소수명관리에 필요한 운전기록, 기기별 유지보수 기록 등에 대한 데이터베이스를 구축하고, 주요기기의 운전상태를 감시하기 위한 발전소 감시계통(On-Line Monitoring System)을 설치하는 등 발전소 초기부터 수명관리계획을 수립하여 발전소를 관리한다면 주요기기의 교체시기도 효과적으로 결정할 수 있다.

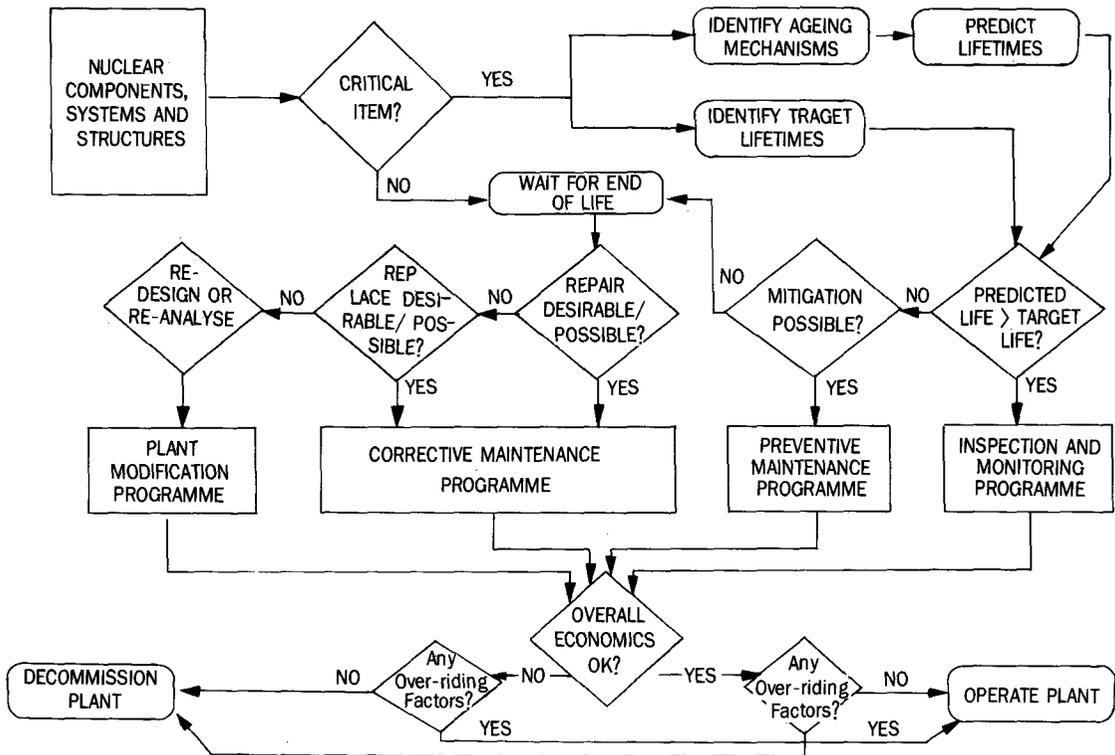
(4) 기술검토분야

원자력발전소 수명관리는 크게 기술성(Technical Aspect), 경제성(Economical Aspect), 규제측면(Regulatory Aspect)의 분야로 나눌 수 있다. 이 중 기술성분야는 관련되는 기기들의 노화현상규명 및 수명을 평가하는 분야로서 시간과 노력이 가장 많이 소요되는 부분이다. 규제분야는 설계수명 이상 운전하고자 할 경우 검토가 필요하며 정부의 인허가를 받아야 한다.

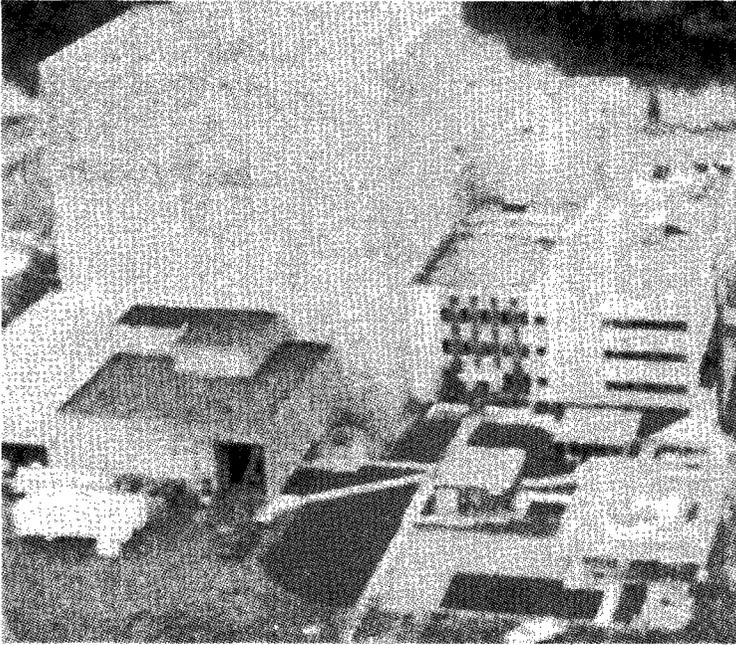
2. 수명관리절차

〈그림 1〉은 수명관리 의사결정의 과정을 설명하는 자료로서 수명평

가, 수명예측, 발전소개보수, 정상보수, 예방보수, 발전소감시 및 상대진단들의 상호관계를 잘 나타내고 있다. 수명관리에 대한 일반적인 이해를 돕기 위하여 〈그림 1〉을 좀 더 자세히 설명하면 다음과 같다. 원자력발전소의 수명관리는 발전소의 모든 기기가 대상이 되기는 하지만, 중요한 기기(Critical Item)들에 대하여 집중적인 검토, 분석, 관리를 수행한다. 즉 주요기기를 제외한 나머지 기기들에 대하여는 정상적인 개보수를 수행하면서 개별기기의 수명까지 사용하고 발전소수명 이전에 기능이 다하면 교체하여 사용한다는 개념이다. 그러



〈그림 1〉 원전수명관리 의사결정흐름도



나 발전소수명에 중요한 영향을 끼치는 주요기기들에 대하여는 그림에서 보는바와 같이 우선 대상기기의 경년열화 및 노후화원인을 분석(Identify Ageing Mechanism)하고 앞으로 계속운전 가능한 잔여수명을 예측(Predict Lifetime)한다. 개별기기의 분석을 통하여 예측된 잔여수명은 목표수명과 비교하여 우리가 원하는대로 잔여수명이 목표수명보다 길다면 수명연장운전에 지장이 없으므로 별다른 개보수나 기기교체가 필요치 않으나, 기기의 성능관리 및 확인을 위한 발전소상태진단 및 감시시스템(Inspection and Monitoring Programme)운용은 필요하다. 잔여수명이 목표수명보다 작은 경우에는 기기노후화완화를 위하여 예방보수계획(Preventive Maintenance Programme)을 수립하여 예방보수를 시행하게

되며, 노후화완화대책이 없는 경우에는 해당기기의 수명시점까지의 운전후 교체하게 된다. 연장운전은 상기의 모든 수명관리사항들에 필요한 투자비에 대하여 분석하고 경제적 타당성이 있고 특별한 사유가 없으면 발전소의 연장운전에 들어가게 된다.

현재 세계 각국의 수명관리기술 수준은 <그림 1>의 우측상단의 노화현상규명(Identify Ageing Mechanism), 수명예측(Predict Lifetimes), 목표수명설정(Identify Target Lifetimes)분야에서 집중적인 연구개발이 진행되고 있는 상태이다. 이와 같은 수명관리기술은 모두가 완전히 확립되어 있는 단계는 아니고 아직도 지속적인 연구개발이 진행되고 있지만, 지금까지의 세계 각국의 연구결과는 원자력발전소 연장운전이 기술적인 면에서

는 큰 문제가 없을 것으로 보고 있다.

3. 경제성

지금까지 발표된바에 의하면 원자력발전소를 20년 이상 연장운전하는 것이 기술적으로 해결 가능하고 경제성도 충분한 것으로 보고되고 있다. 그러나 우리는 수명연장운전이 일반적으로 경제성이 있다고 해서 특정발전소의 경제성을 현 상태에서 정확하게 말할 수 없다. 이는 특정발전소의 상태, 수명관리에 관한 규제요건, 국민여론의 변화에 따라 전체 수명관리에 필요한 경비 및 투자비의 변동이 크므로 정확한 수치를 예측한다는 것은 매우 힘든 일이다. 또 수명관리의 경제성문제는 국내외상황, 발전운영자의 자체상황, 발전소상태에 따라 많은 차이가 날 수 있기 때문에 누구도 경제성문제에 대하여 자신있게 말할 수 없다. 그럼에도 불구하고 수명관리연구를 수행하는 이유는 지금까지의 연구 및 조사결과에 의해 경제성이 매우 높은 것으로 예측하고 신규원전 부지확보문제와 전력난해결에 도움을 줄 수 있다고 판단하기 때문에 동분야의 연구개발을 추진하는 것이다.

원자력발전소의 수명관리비용은 대상발전소의 상태와 형편에 따라 차이가 많이 나기 때문에 정확하게 산출하기는 어렵지만, 미국의 원전 수명관리 선도발전소(Lead Plants)인 Yankee Rowe(PWR, 175 MW)의 경우에는 150달러/kWe, Monticello(BWR, 536MW)는 200달러/kWe가 소요될 것으로 예상

하였고, 최근의 미국원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Committee, NRC)보고에 의하면, 1,000 MWe급 원전을 20년 수명연장하는데 수명관리 총비용이 5억달러(500달러/kWe) 정도 소요될 것으로 예상하고 있다. 연장운전을 통한 이득에 대하여는 계속 연구가 진행중이나 미국내 공식적인 손익 분석보고서에 따르면 Monticello와 Prairie발전소의 수명연장운전을 통하여 1990년 기준시가로 약 3억달러 정도의 이득을 얻을 수 있을 것으로 보고하고 있다.

4. 장기전원개발계획

한국전력공사에서는 장기전력수급계획에 따라 발전소를 건설하고 전력을 공급하고 있는데, 장기전력수급계획에서는 우선 장기전력수요를 예측하고 장기전원개발계획을 수립하게 된다. 장기전원개발계획은 경제적수명을 장기전원개발계획 수립시의 발전소 기준수명으로 사용하고 있으며, 발전소의 폐지여부는 경제수명시점에서 재검토하도록 되어 있다. <표 1>은 현재 장기전원개발계획에 반영되어 있는 국내 원전의 폐지시점을 명기하고 있다. 원자력발전소의 경우에는 경제수명이 25년으로 규정되어 있고 고리 1호기의 경우에는 운전년수가 14년이 경과하였기 때문에, 지금부터 장기전원개발계획에 반영할 수 있는 고리 1호기의 수명관리정책자료의 생산이 필요한 시점이다.

여기에서 검토해 보아야 할 사항은 장기전원개발계획상의 기준수명인 경제수명 25년의 적합성문제가

다. 경제수명은 「발전소 노령화에 따라 효율저하, 유지보수비증가 등으로 저원이 신규발전소의 대체가 경제적이라고 예상되는 시점까지의 수명」으로 정의되어 있다. 즉 발전소의 폐지여부는 그 발전소의 운전 성능과 노후화, 경제성에 전적으로 의존하는 것이므로, 25년이 지나서 발전소안전성에 이상이 없고 기술적으로 계속운전이 가능하고 경제성이 있다면 그 이상 연장운전을 하지 않을 이유가 없는 것이다. 또 개별발전소의 노후화는 그동안의 운전이력과 계통의 특성, 발전소역할 등에 따라 다르므로 일률적으로 25년을 적용할 수도 없다. 그러므로 실제로 발전소를 운영하고 폐지하는 경우에는 검토시점에서의 발전소 실제수명인 기계적수명을 개별적으로 평가하여 결정할 일이다.

원전수명관리 해외동향

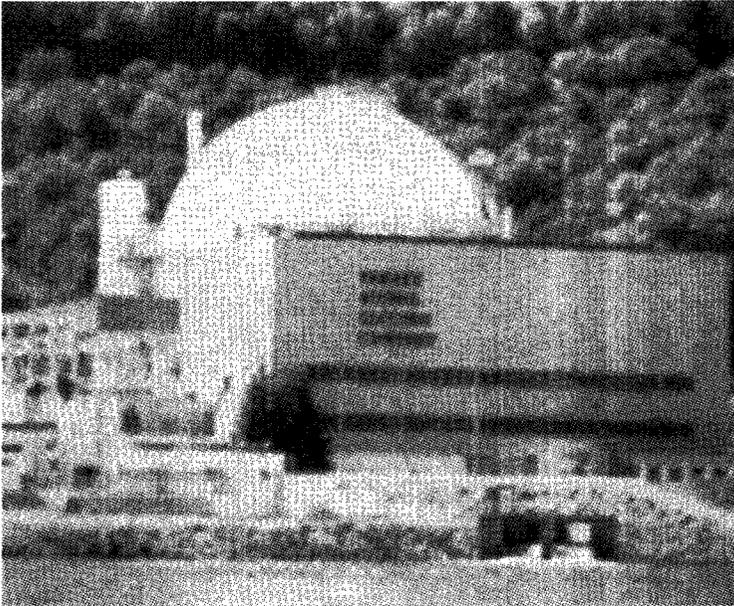
1. 일반동향

원자력발전소 수명관리연구는 미국을 중심으로 유럽 각국 및 IAEA에서 80년대 초반부터 활발하게 연구하여 왔다. 일반적으로 수명관리사업을 수행하는 방법면에서 크게 2그룹으로 나눌 수 있다. 하나는 미국을 중심으로 한 그룹이고, 다른 하나는 미국을 제외한 세계 각국의 그룹이다. 이는 발전소 운전면허기간증진제도의 차이에서 오는 것인데, 미국의 경우에는 원자력법에 원전의 운전면허기간을 40년으로 한정하고 있기 때문에 운전면허기간을 갱신(License Renewal)하기 위한 관련법규개정 및 제

정에 1차적인 초점을 맞추고 있다. 미국을 제외한 유럽의 대부분 국가와 日本은 운전면허연장보다는 실제수명평가 및 관리방안에 힘을 기울이고 있다. 왜냐하면 이들 국가는 매년 연차보수시 정기검사를 실시하여 발전소안전에 이상이 없으면 다음 주기까지 운전면허를 승인하여 주고 있기 때문이다.

2. 미 국

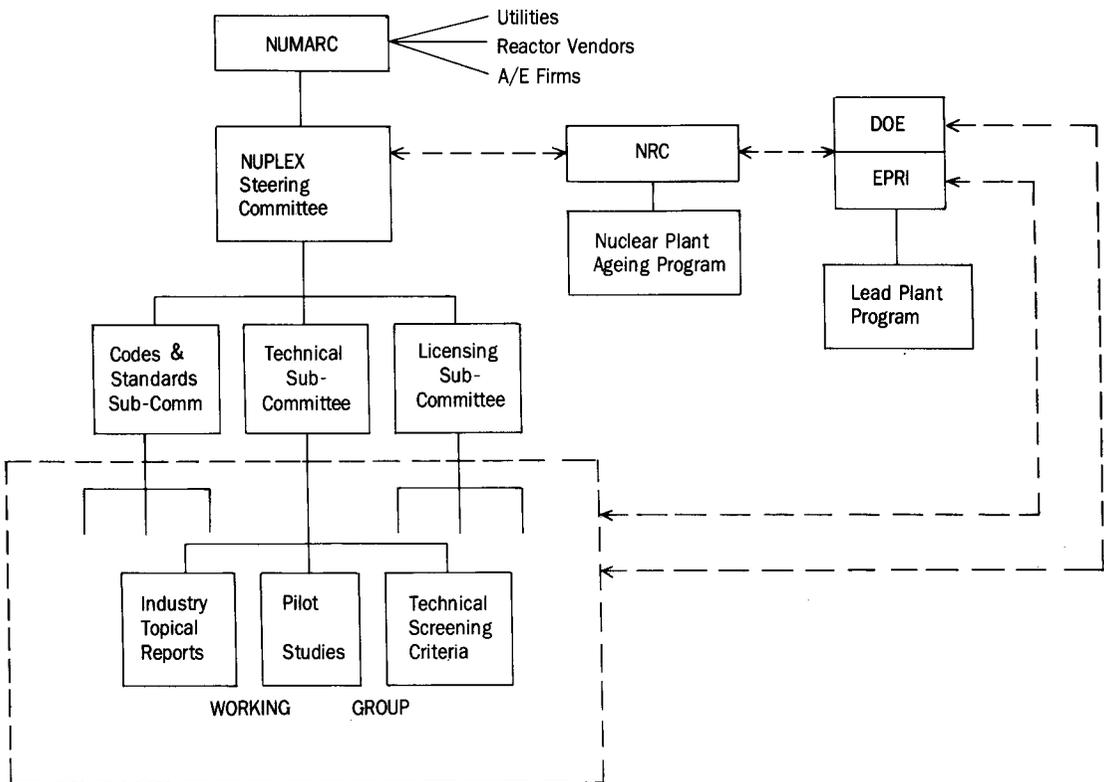
작년(1991. 12) 미국에서는 원전 운전면허기간갱신(Licensed Lifetime Renewal)에 관련된 규정인 10CFR54를 개정하여 기존발전소의 인허가수명이 종료된후 20년까지 연장할 수 있는 규제요건(Regulatory Requirement)을 최종 승인하였다. 미국에서는 US NRC에서 운전면허기간갱신을 위한 규제요건을 제정하기 위하여 필요한 연구를 수행하고 있고, 산업계에서는 NUCLEAR MANAGEMENT AND RESOURCES COUNCIL이 중심이 되어 에너지성(Department of Energy, DOE)과 전력연구소(Electric Power Research Institute, EPRI)의 후원으로 Yankee Rowe(PWR)와 Monticello(BWR)발전소를 선도발전소(Lead Plant)로 결정하고 수명연장연구를 진행하여 왔다. 그러나 Yankee Rowe발전소는 작년 10월 이후 NRC의 권고에 따라 가동중지상태에 있던 동일발전소를 재가동하는데 필요한 경비의 경제성을 이유로 1992년 2월26일 발전소영구폐쇄를 결정하고 발전소해체작업을 추진중에 있다. 이와 같이 Yankee Rowe원전이 수명관리연



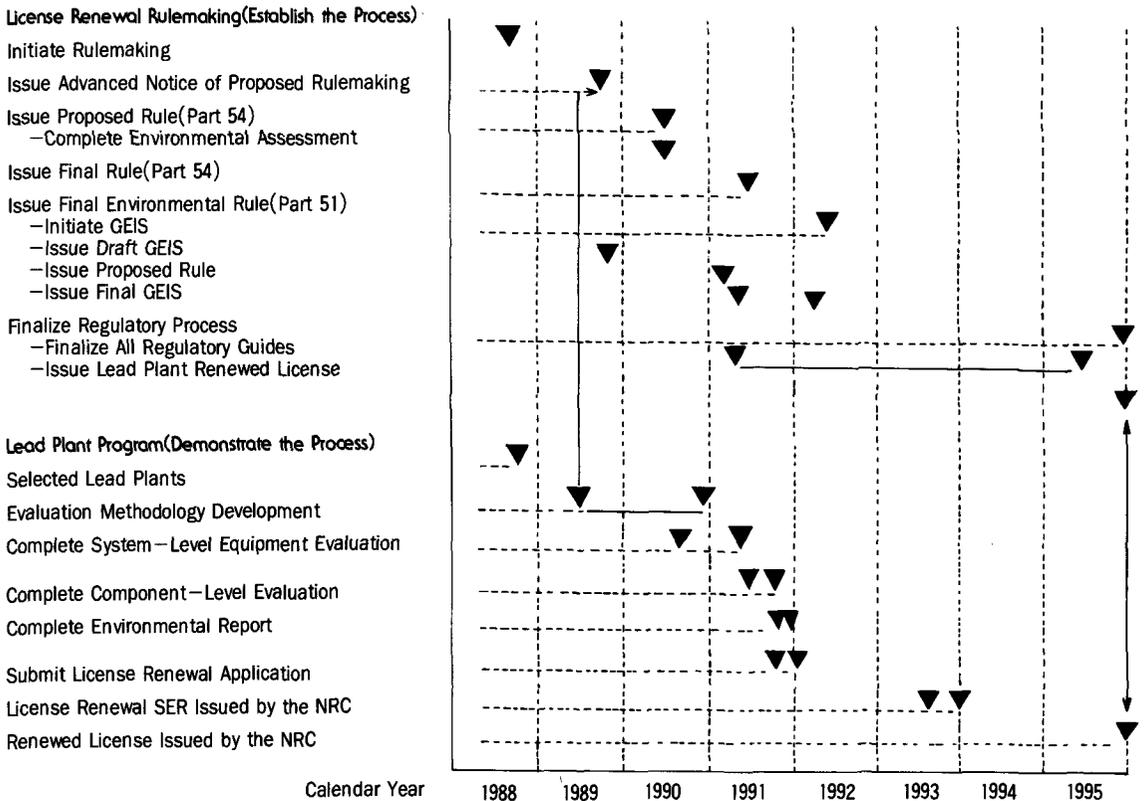
구 선도발전소를 포기함에 따라 현재 선도대상발전소를 모색하고 있다. 미국내 수명관리연구에 관련된 연구기관으로는 앞에서 언급한 NRC, DOE, EPRI와 NUMARC, 이외에 직접 연구를 수행하는 국립 연구소, 전력기술회사들이 있다. <그림 2>는 관련연구기관들 사이의 관계를 나타내는 조직표이고 <그림 3>은 미국내 수명관리연구의 계획 일정을 보여주고 있다.

3. 기타 국가

미국을 제외한 다른 나라들의 수명관리연구동향을 살펴보면 영국의 경우에는 Magnox원자로를 이미



<그림 2> 미국의 수명관리연구 관련조직도



〈그림 3〉 미국내 원자력발전소 운전기간갱신 및 선도발전소 연구계획

설계수명(20년) 이상 연장운전하고 있다. 영국은 설계수명 이후 매 5년마다 발전소 전체의 안전성평가를 실시하고 계속운전에 이상이 없으면 규제기관과 전력회사의 합의 하에 연장운전에 들어가게 된다. 프랑스, 日本, 독일 등에서는 개별 기기 중심으로 실제수명에 의거한 기기관리기술개발에 역점을 두고 있다. 프랑스는 발전소운영허가를 건설초기에 일정기간 정하여 허가하는 것이 아니라 매년 정기검사후 운영허가를 받기 때문에, 수명관리 개념도 발전소의 안전성이 저해되지 않고 경제성이 있는 범위 이내

에서 발전소의 실제수명이 다할 때까지 운전하는 것으로 하고 있다. 日本의 수명관리는 通産省 후원하에 JAPEC(Japan Power Engineering Inspection Corporation)이 주도하여 수행하고 있으며 관련연구기관들이 참여하여 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 그의 수명이 오래되지 않은 원전을 보유하고 있는 국가에서는 국내사정과 유사하게 원전수명향상을 위한 기본 개념정립, 접근방안모색 및 타당성 연구에 관심을 보이고 있는 초기단계이다.

臺灣의 경우에는 발전소운영허가

기간을 매 10년 단위로 하여 발급하는데, 운영허가후 10년이 지나면 운영허가를 재신청하여 10년의 운영허가를 다시 받는다. 재신청시에는 臺灣 원자력 관련법규에 따라 지난 10년동안의 발전소운전이력을 분석하고 현상태를 점검하여 안전성을 재평가한후 보고서를 정부에 제출하여 승인을 받도록 되어 있다. 臺灣에서도 원전건설계획을 수립할 때에는 25년이라는 경제수명을 사용하고 있으나, 이를 발전소 폐지의 시점으로 사용하지는 않고 있다.

국제원자력기구인 IAEA(Inte-

International Atomic Energy Agency)와 경제협력개발기구의 OECD/NEA(Organization of Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency)에서는 원자력발전소 수명관리연구에 관심을 가지고, 91년에는 세계 각국의 수명관리전문가그룹(Ad-hoc Expert Group on Plant Life Management)을 공동으로 구성하였다. 여기에서 논의하고 있는 사항으로는 원전노후화, 수명관리의사결정(Decision Making Process)에 필요한 중요사항의 도출, 수명관리의사결정에 필요한 안전성, 기술성, 경제성정보들의 특성에 관한 논의와 관련정보의 소재파악 및 생산방안 등이 논의되고, 본 회의에서 논의된 내용들은 보고 서로 발간되어 세계 각국의 수명관리 의사결정자들인 규제기관, 정책입안자, 원전운영회사 최고경영자들이 참고자료로 사용할 수 있도록 할 계획이다.

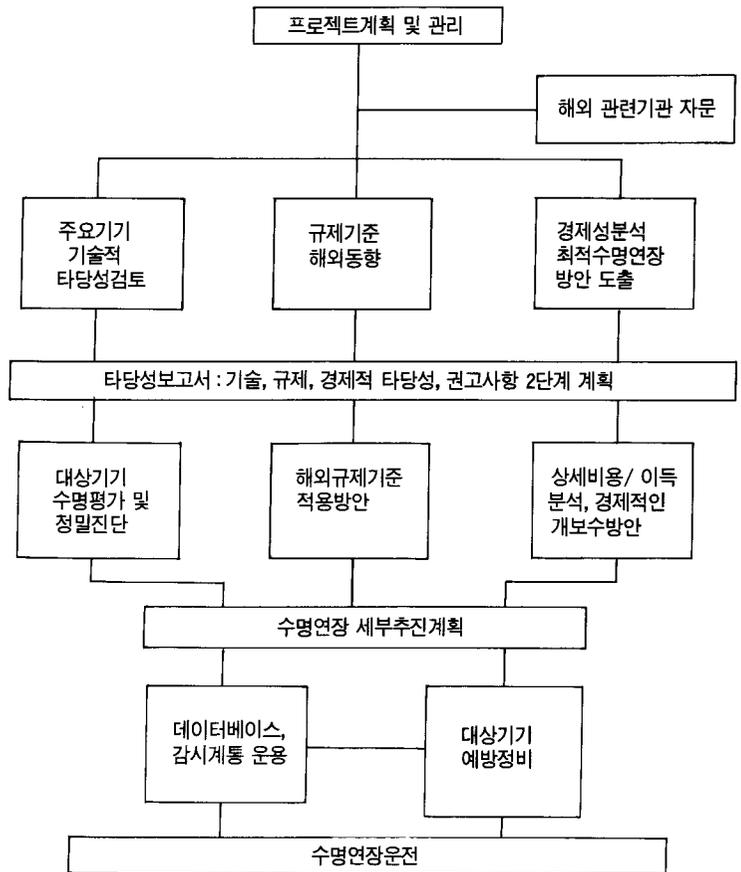
고리원자력 1호기 수명관리연구

1. 개요

국내 원자력발전소 중에서 가동년수가 가장 오래된 고리 1호기는 남은 수명기간동안의 효과적인 안전운전을 위하여 기존의 경상 및 연차보수와 더불어 수명관리차원에서의 예방/예측보수(Preventive/Predictive Maintenance) 방안수립 및 현장적용연구가 필요하다. 특히 주요기기에 대한 수명평가와 운전상태감시 및 자료관리방안수립은 발전소성능관리 뿐만 아

니라 수명연장운전을 위하여도 선결해야 할 과제이다. 또 장기전원개발계획상 고리 1호기의 폐지시기가 2004년으로 계획되어 있으므로 발전소폐지, 대체발전소 건설기간 등을 고려하여 1994년까지는 고리 1호기 수명관리에 대한 정책방향이 결정되어야 하므로, 한국전력공사 관련부서에서 원자력발전소 수명관리기본계획을 수립하고 있는중이고 기술연구원에서는 기본계획에 따라 금년부터 「고리 1호기수명관리연구(I)」를 수행할 예정이다.

원자력발전소의 수명관리연구는 크게 타당성연구, 발전소정밀진단 및 상세수명평가 그리고 연장운전을 위한 사전작업사항인 기기교체 및 개보수작업으로 나눌 수 있다. 첫째와 둘째 단계는 연구 및 기술개발단계이고, 셋째 단계는 발전소 운영부서가 주관이 되어 1, 2단계의 연구결과에 따른 노후기기교체 및 개보수, 시스템성능개선을 위한 개조작업 등을 시행하게 된다. <표 2>는 단계별 수명관리연구의 세부 내역이고, <그림 4>는 단계별 연구내용의 상관관계를 설명하고 있다.



<그림 4> 원전수명관리 단계별 연구내용관계

〈표 2〉 원전수명관리 단계별 상세연구내용

Task 분류		1 단계 92 ~ 95	2 단계 95 ~ 98	3 단계 98 ~ 2003
기 술	1	◦ Project 계획 및 관리	◦ 수명관리상세계획작성 및 관리 ◦ 계획운전정지기간관리 ◦ 수명관리홍보	◦ 계획수행관리 ◦ 정지기간관리 ◦ 수명관리홍보 ◦ D/B 운용, 보완
	2	◦ 대상기분류 및 선정 ◦ 관련자료수집 및 D/B 1차구축	◦ D/B 구축완료 및 보완	◦ D/B 운용, 보완
	3	◦ 중성자조사취화실험 및 평가 ◦ 피로현상분석 및 평가	◦ 원자로압력용기 정밀평가 및 실험	◦ 압력용기감시 계통 운용
	4	◦ 기기분류에 따른 대상기평가 ◦ 1발전소 요청기기평가	◦ 1단계대상기기 상세평가 및 실험 ◦ 기존평가결과 활용방안검토 ◦ 기타 주요기기/일반기기 수명평가	
	5	◦ 수명평가기술개발동향검토 ◦ 기술기준검토 ◦ 결합 및 재료 관련평가기술검토 ◦ 적용가능신기술검토	◦ 기술기준검토 ◦ 결합 및 재료관련 평가기술개발 ◦ 적용가능신기술 개발	◦ 기술기준검토 ◦ 잔여수명증가대책 개발
	6	◦ 원자로압력용기건전성평가	◦ 부식침식 관련 감시기술	◦ 감시기술운용
	결과물	◦ 수명관리기술성평가보고서 ◦ 2단계 수명평가 및 정밀진단계획 ◦ 수명관리권고사항	◦ 3단계수명관리실제추진방안 ◦ 수명관리권고사항	
규 제	7	◦ NRC규제동향검토 ◦ 수명연장운전기간 규제여부검토 ◦ 안전성평가종합보고서 작성여부 ◦ 환경평가종합보고서 작성여부 ◦ 발전소감독시스템 운영여부	◦ 안전성평가종합보고서 작성 ◦ 환경영향평가보고서 작성 ◦ 발전소감독시스템 개발	◦ 발전소감독 시스템 운용
	결 과	◦ 수명관리인허가보고서	◦ 허가갱신신청 및 취득	
경 제	8	◦ 경제성평가프로그램 개발/도입 ◦ 개발적비용/이득분석 ◦ 최적수명기간 및 연장운전방안결정	◦ 상세비용/이득분석 ◦ 실제보수 및 교체비용	◦ 기기별 경제적 보수/교체방안
	결 과	◦ 수명관리경제성평가보고서	◦ 허가갱신신청 및 취득	
시 행	9			◦ 연장운전기기 보수
	10			◦ 연장운전기기 교체

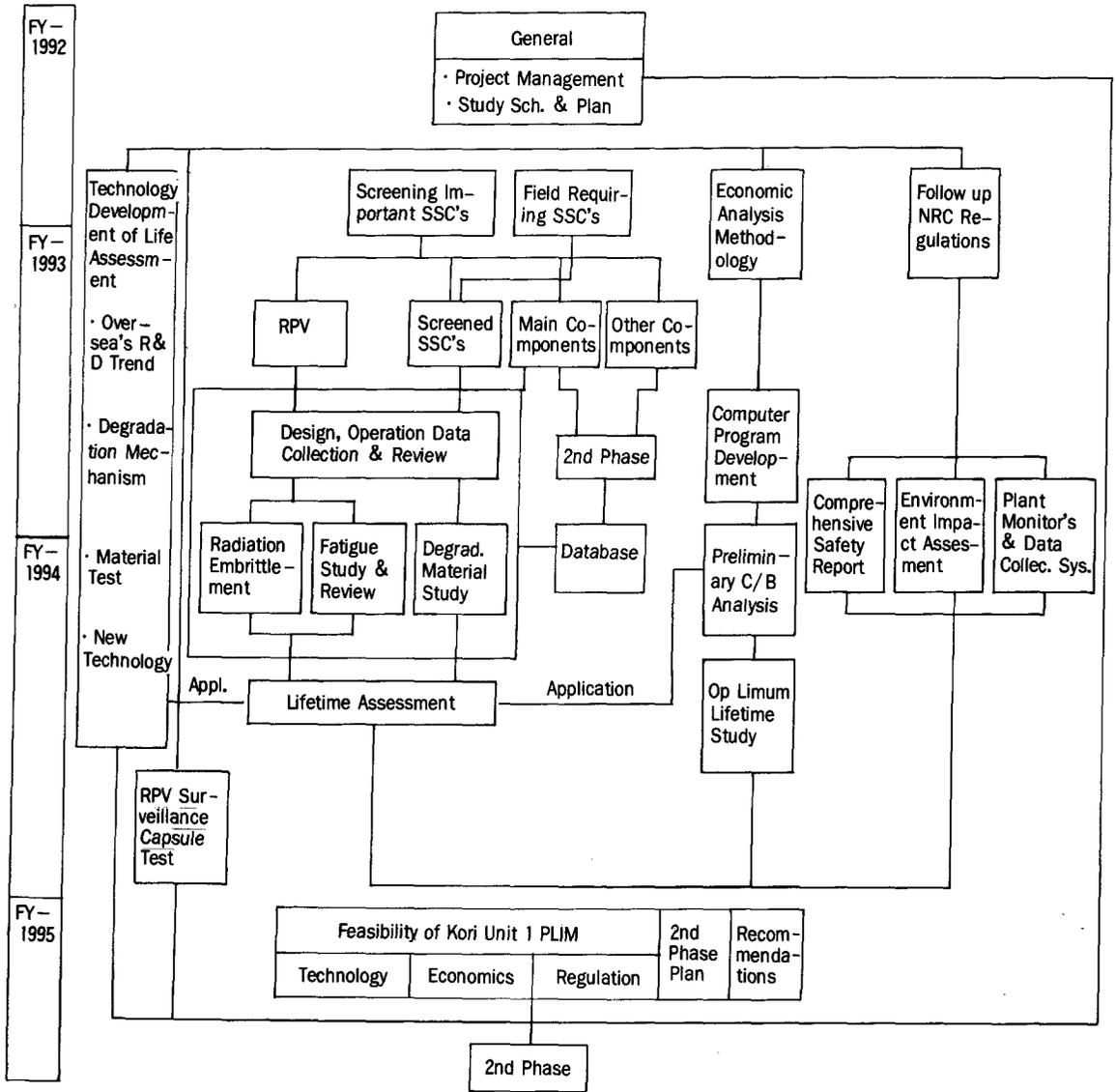
2. 고리 1호기 수명관리연구(I)

금년에 시작하는 「고리 1호기 수명관리연구(I)」은 고리원자력 1호기의 수명관리연구의 첫단계로서 기술적, 경제적, 인허가측면에서의 수명관리사항을 검토하기 위함이다. 본 연구의 목적은 고리 1호기의 실제수명을 평가하고자 함이 그 첫번째이며, 연구결과 연장운전에 대한 타당성이 인정되면 다음 단계

연구인 발전소정밀진단 및 상세수명평가를 위한 세부시행계획을 수립하게 된다. 국내에서는 아직까지 이와 같은 연구를 수행한 경험이 없어 국내 관련연구기관과 공동으로 외국기술회사의 기술자문을 받아 수행할 예정이며 선진기술도입에 주력할 예정이다. 〈그림 5〉는 본 과제의 연구수행흐름을 보여주고 있다.

(1) 기술성평가

기술성평가는 관련자료와 기술사항들을 조사, 분석한후에 검토할 대상계통, 구조물, 기기(System, Structure and Component, SSC)를 분류하고, 집중검토대상인 주요기기를 선정한다. 〈표 3〉은 참고로 미국의 수명관리연구 시범발전소(Pilot Plant)인 Surry 1호기의 주요기기 선정결과이다. 선정된 주



〈그림 5〉 고리 1호기 수명관리연구(I) 연구흐름도

요 SSC에 대하여는 각종 설계 및 시운전자료, 운전 및 보수이력, 시험 및 가동중검사자료 등을 검토하여 기기의 손상부위, 손상원인 및 진전형태 등을 조사하고 손상기기에 따른 기기별 소비수명과 잔존수명을 산출하게 된다. 기기별 소비

수명과 잔존수명을 결정하고 나면 수명연장운전에 대한 기술적 가능성이 판단되고 다음으로 수명연장운전에 대한 경제성을 평가하게 된다. 본 과제의 전체 연구내용에서 기술성평가부분이 약 70% 정도의 비중을 차지하고 있다.

(2) 경제성평가

1단계 연구에서의 경제성평가는 개괄적 수명관리비용에 대한 회수이득의 분석을 통하여 최적수명종료시점을 결정하기 위한 것이다. 수명관리비용으로는 수명관리를 위한 연구 및 기술개발, 발전소진단,

〈표 3〉 Surry 1 수명관리 주요기기 분류표

Components/ Structures	Ranking
Reactor Pressure Vessel	1
Containment(Including Basemat)	2
RPV Supports	3
R.C. Piping(cat 1 & 2)	4
Steam Generators	5
Emergency Diesel Generators	6
RPV Internals (Upper & Lower)	7
R.C. Pump Body(3)	8
Pressurizer	9
Neutron Shield Tank	10
CRDM's	11
Spent Fuel Pool & Transfer Canal	12
R.C. Isolation Valves(6)	13
Main Turbine	14
Containment Internal Structures	15
Cable in Containment	16
Intake /Discharge Structures	17
Containment Penetrations	18
Primary Shield Waterwalls	19
Other Structures(FB, AB, SB, TB)	20
Station Transformers	21
Main Generator	22
Accumulator	23
Intake /Discharge Canal	24
Major Concrete Embedments	25
NSSS Supports	26
Turbine Pedestal	27
Electrical Raceways & Supports	28
Cable Outside Containment	29
Major Concrete Anchors	30
Containment Subsurface Drain	31
Primary Shield Penetration Coolers	32
Control Room and I&C	33
Major Piping(Other than RCS)	34

개보수 및 기기교체비용, 개보수기간동안의 대체전력생산비용 등이 포함되며, 이득으로는 발전소폐지에 따른 대체원자력 또는 화력발전소 신규건설비용절감액, 수명연장 운전에 따른 발전소폐지비용절감액이 된다.

(3) 인허가사항

인허가 관련사항은 수명관리연구

선두주자인 미국 NRC의 규정을 중심으로 하여 각국의 인허가사항을 검토한다. 검토사항으로는 국내 수명관리 관련규제요건제정시 고려하여야 할 사항, 현재 사용하고 있는 기술기준과 규격(Code and Standard)의 수명연장운전 이후의 적용가능성 등 국내 적용방안관점에서 검토한다.

(4) 예상연구결과물

본 연구의 결과로는 고리 1호기 수명관리 및 연장운전에 대한 타당성 여부를 기술적, 경제적, 인허가 측면에서 검토한 보고서와 원자로 용압력기 건전성평가보고서가 발간되는 이외에, 다음 단계의 연구인 발전소정밀진단 및 상세수명평가 계획서 작성, 수명관리를 위한 장단기권고사항들을 제안하게 될 것이다. 그외 간접적인 효과로는 다음과 같은 성과를 기대할 수 있다.

우선 주요기기들의 노화현상을 규명하고 수명평가 및 관리기술의 향상을 기대할 수 있다. 고리 1호기의 최적수명시점과 수명관리방안을 제시하면 이는 다른 원자력발전소의 수명관리연구의 기본모델로 활용할 수 있다.

고리 1호기 원자로압력용기

원자로압력용기는 원전수명관리에서 가장 중요한 기기로서 지금까지는 교체를 한 사례도 없기 때문에 원전수명결정에 결정적인 영향을 미친다. 고리 1호기의 원자로압력용기는 60년대에 설계제작된 관계로 압력용기 벨트라인 용접부위에는 산화방지와 용접성(Fluidity)을 용이하게 하기 위하여 구리(Cu)원소가 함유되어 있다. 70년대에 와서 원자로압력용기 벨트라인 용접부위의 구리성분이 중성자조사취화현상의 주요원인으로 밝혀지자 미국 NRC에서는 10CFR50 App. G와 Reg. Guide 1.99에 원자로압력용기 중성자조사취화현상을 완화시키기 위하여 구리와 니켈

(Ni)의 원소함량을 줄이는 규제요건을 포함시켰다. 한국전력공사에서도 1호기 상업운전 이후 1979년부터 원자로압력용기 감시시험(Surveillance Test)을 국내 원자력법과 US NRC 10CFR50 App. G, H에 따라 시행하고 있으며, 1988년에는 파괴해석을 이용한 안전성평가도 실시한바가 있다. 금번 고리 1호기 수명관리연구에서는 고리 1호기 원자로압력용기 건전성평가를 함께 수행하여 원자로압력용기의 건전성을 수명관리측면에서 재평가하고자 한다.

1. 원자로압력용기 감시시험

원자로압력용기 감시시험은 원자로의 노심대지역(Reactor Vessel Core Beltline Region)재료의 중성

자조사에 의한 재료성질의 변화를 추적하기 위한 것이다. 중성자조사는 강재의 강도(Strength) 및 경도(Hardness)를 증가시키는 반면에, 연성(Ductility) 및 인성(Toughness)을 감소시킨다. 이 중에서 연성과 인성의 감소는 취성파괴(Brittle Fracture)의 위험을 증대시키기 때문에 원자력발전소의 안전성에 지대한 영향을 주는 것이다. 고리 1호기의 최종안전성분석 보고서에도 감시시험을 수행하도록 규정되어 있고, 시험목적은 감시시험 및 그 결과의 해석으로 원자로압력용기 조사취화의 정도를 파악하고 그 결과를 원자로 운전조건 및 앞으로의 감시시험계획에 반영하도록 함으로써 원자로압력용기의 취성파괴에 대한 안전성을 확보하

는데 있다.

〈표 4〉에 보는바와 같이 고리 1호기에는 총 6개의 감시시험용 캡슐(Capsule)이 원자로내에 장착되어 있으며, 운전기간에 따라 순차적으로 인출하여 시험토록 계획되어 있다. 각 캡슐에는 시험편(Specimen)이 들어 있는데 충격시험용 48개, 인장시험용 9개, WOL(Wedge Opening Loading)시험용 9개가 들어 있다. 또 캡슐내 시험편의 중성자조사량과 온도를 측정하기 위한 시험편이 각각 14개, 2개 들어 있다. 감시시험수행은 캡슐의 인출, 수송, 해체, 재료의 기계적 시험(충격시험, 인장시험, WOL시험), 조사량측정 및 온도감시시험, 화학성분의 분석, 고속중성자속분포해석, 압력-온도 한계

〈표 4〉 고리 1호기 감시시험시험 현황

캡슐	V 1차	T 2차	S 3차	R 4차	P -	N -
시험수	충격시험: 48개 (KL, KH, KW 각 12개) 인장시험: 9개 (KL, KH, KW 각 3개) WOL시험: 9개 (KL, KH, KW 각 3개)	좌동	좌동	좌동	좌동	좌동
잔여시험	없음	충격시험: 3개 (KH46, 47, 48)	WOL시험 7개 (KT 3개, KL 3개, KW 1개)	충격시험 2개 (KH 2개) 인장시험 2개 (KL 1개, KT 1개) WOL시험 9개	전량	전량
사용계획*	없음	없음	WOL시험 1개 (KW 1개)	WOL시험 3개 (KW 3개)	없음	없음
수행기관	SWRI**	SWRI, KAERI	KAERI	KAERI	-	-
보관장소	KAERI	KAERI	KAERI	KAERI	Rx Core	Rx Core

* 사용계획은 금번 고리 1호기 원자로압력용기 건전성평가연구에서 사용할 계획임

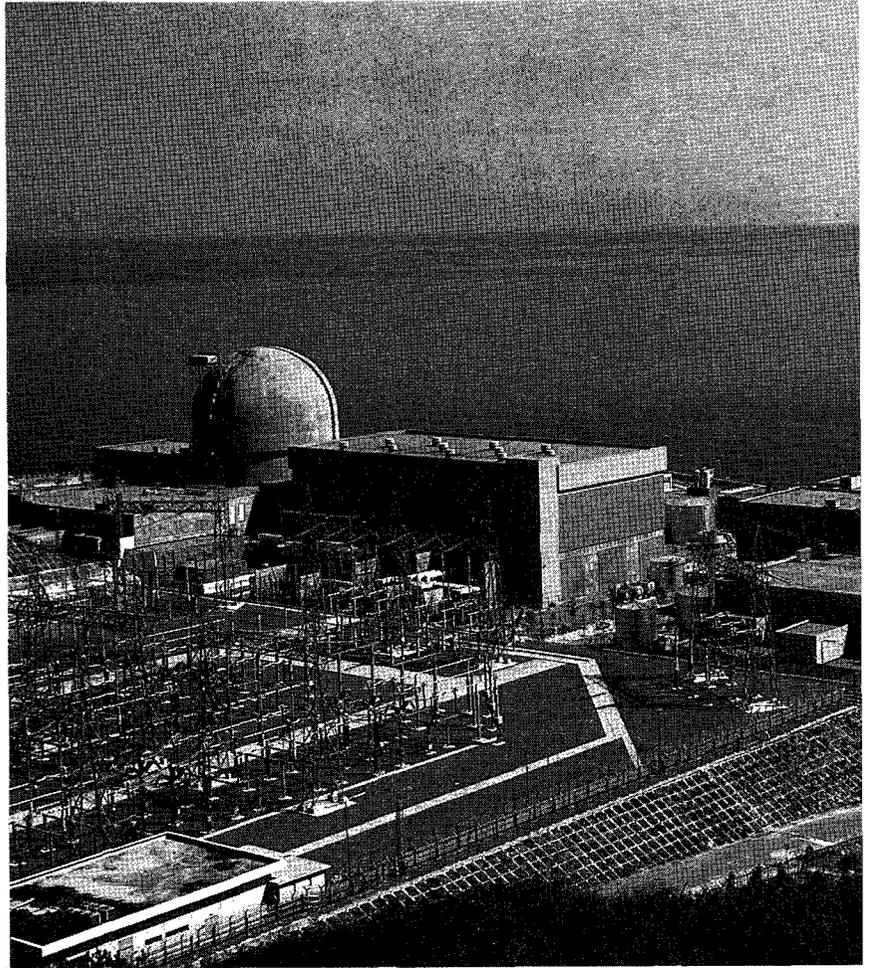
** South West Research Institute

곡선(Pressure-Temperature Limit Curve)의 산출, 새로운 감시시험 일정의 결정 등이 포함된다. 이러한 내용을 요약하여 보면 원자로압력용기 감시시험은 경수로원자로의 노심대지역에서 증성자조사에 의한 파괴인성의 저하를 평가하여 그 이후의 운전상태에서 급격한 취성파괴의 위험성을 제거하고자 하는 일련의 감시활동이라고 할 수 있다.

2. 건전성평가방법

원자로압력용기의 구조건전성(Structural Integrity Analysis)을 평가하고 잔존수명을 예측하기 위하여는 <그림 6>과 같은 4개의 분야에서 검토하여 종합적인 평가를 수행하여야 한다. 먼저 US NRC 10CFR50, App. G와 NUREG-0744에 의한 저인성파괴문제(Low Toughness Problem)를 검토하여야 한다. 10CFR50, App. G의 요구조건에 따르면 가압경수로형 원자로압력용기 재료에 대한 사피충격시험의 최대흡수에너지(Upper Shelf Energy, USE)는 발전소 전 수명기간동안 50ft-lb 이상을 유지하여야 하며, 조정된 무연성천이 온도(Adjusted RT_{MT} , ART)가 200°C 이하를 유지하여야 한다. 그러나 이 요구조건의 보수성이 커 60년대에 설계, 제작된 원자로압력용기는 대부분 이 요건을 만족시킬 수가 없어 동법 App. V. C에 의해 다음 3가지의 요건을 모두 만족시키는 기간까지는 발전소를 운전할 수 있도록 하였다.

(1) 문제가 되는 노심대지역에 대한 100% 체적비파괴검사를 수행



하여 균열의 존재 여부확인 및 균열존재시 ASME XI에 따른 결함 평가 실시

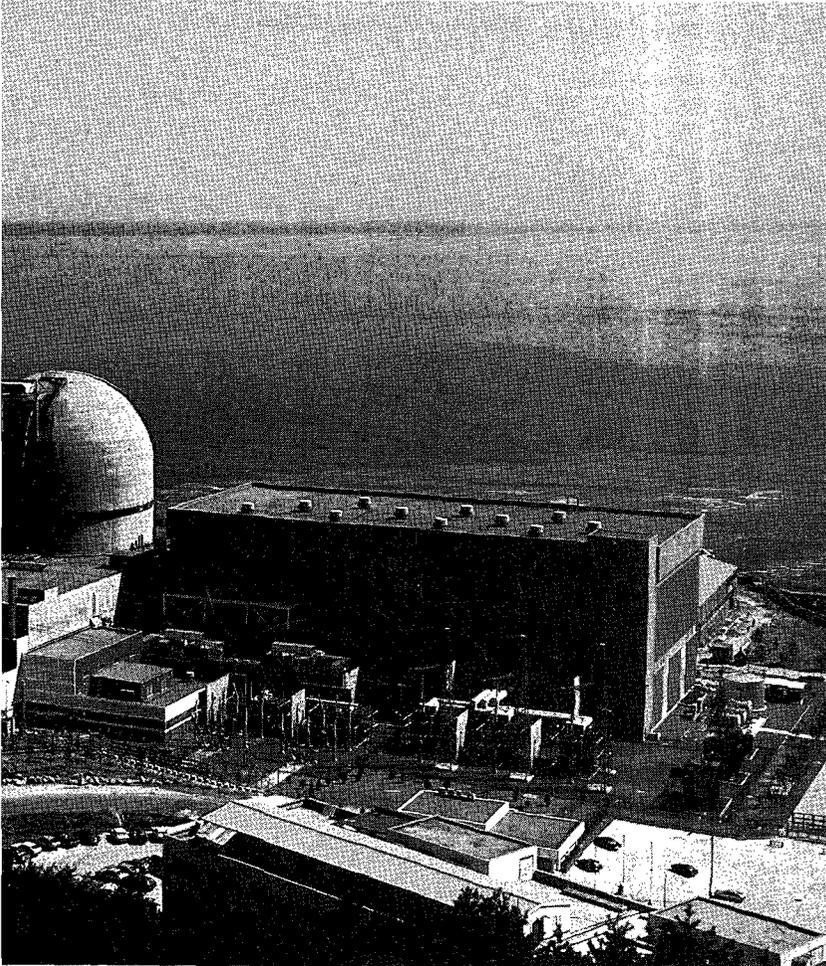
(2) 파괴해석을 위한 추가적인 파괴인성시험 실시

(3) 지속적인 발전소운전을 위하여 파괴해석을 통한 안전여유확인

본 연구에서는 고리 1호기 제4차 감시시험 중 WOL시험(용접부위 금속) 3개의 파괴인성시험을 수행하는 것으로서 Tearing Instability Method(J/T Method)와

DPFAD(Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram) Method에 따른 탄소성파괴해석 및 안전성평가를 수행하여, 어느 시기까지 원자로압력용기가 10CFR50 App. G의 파괴인성요구사항을 만족시키면서 안전하게 운전될 수 있을 것인가를 평가하게 된다.

피로손상평가(Fatigue analysis)는 고리 1호기 운전자료 중 정지, 과도상태, 가열, 냉각 등 모든 과도상태의 발생횟수를 조사하고, 취약



부위에 대한 최대 누적사용계수 (Cumulative Usage Factor)를 계산하여 피로손상을 해석하게 된다. 계산 및 평가절차는 ASME III, Division I의 반복하중분석절차 (Procedure for Analysis for Cyclic Loading)에 따라 평가하게 된다. 피로파괴취약부위인 압력용기 플랜지, 입출구노즐, 용접부위 등에서 계산된 누적사용계수의 값이 기기별 설계제한치 이내이어야 하며, 모든 누적사용계수는 그 정의

에 의해 최대치 1.0을 넘지 못한다. 피로반복하중을 일으킨 계통과도상태의 종류와 수명기간동안의 설계 발생빈도는 발전소 최종안전성분석 보고서에 명시되어 있다.

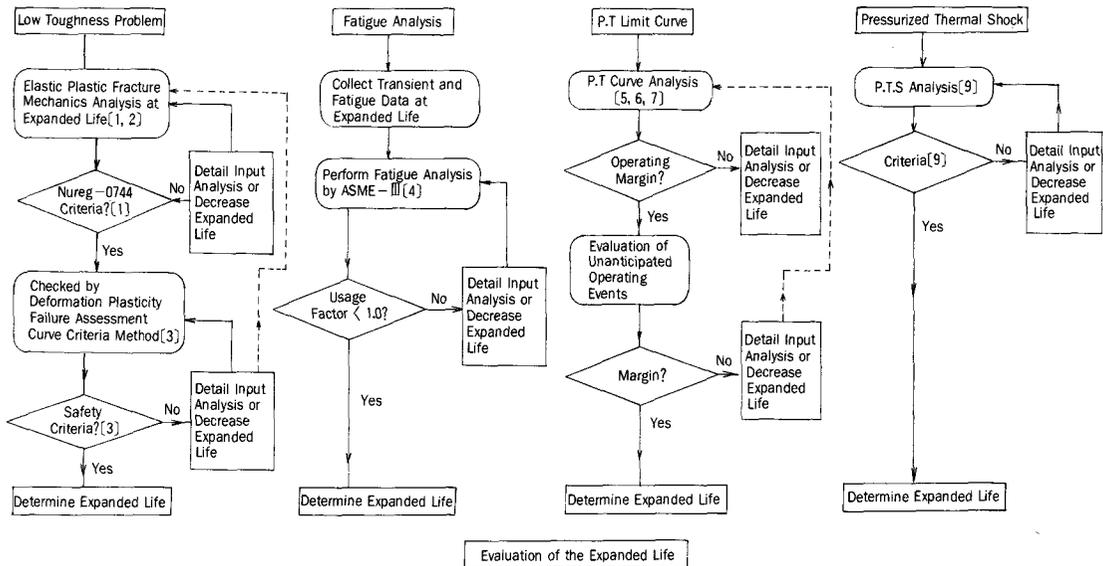
압력-온도 한계곡선(P-T Limit Curve)분석은 조사취화를 고려하여 저온과부하(Low Temperature over Pressure)에 의한 압력용기 취성파괴 여부를 판단하기 위한 평가로서 10CFR50 App. G, H 및 Reg. Guide 1.99, rev. 2의 방

법에 따라 예측한다. 압력-온도 한계곡선은 중성자조사에 의한 취성파괴를 방지하기 위하여 설정한 최대온도, 압력한계치로 작성되며, 압력용기 조사취화에 대한 10CFR50 App. G의 안전여유를 만족하면서 계속운전이 가능한지를 판단하게 된다. 도출된 압력-온도 한계곡선을 이용하여 발전소수명기간 동안의 발전소가열, 냉각, 수압시험조건 등이 분석된 압력, 온도한계를 초과한 것인지의 여부를 분석하게 된다.

가압열충격(Pressurized Thermal Shock, PTS)발생을 방지하기 위한 운전제한조건(Screening Criteria)과 RT_{PTS} 계산식은 10CFR50.61에 제시되어 있다. 이는 발전소 비상사고시 원자로내에 저온의 냉각수가 일시에 주입되는 경우에 그 온도차에 의한 응력발생으로 압력용기가 파괴될 수 있는 가능성을 배제하기 위함이다. 분석기준은 가압열충격현상이 발생할 수 있는 원자로압력용기 내벽의 온도를 제시하고 있는데, 원주방향, 축방향의 용접부위, 압력용기 모재(Base Metal)에서는 Adjusted RT_{PTS} 가 각각 300°F, 270°F, 270°F 이상 유지하여야만 파괴가 일어나지 않는다고 보고 있다.

3. 고리 1호기 원자로압력용기의 건전성평가

고리 1호기 원자로압력용기의 건전성은 수명관리연구를 수행하는데 있어서 가장 중요한 부분 중의 하나로서 앞에서 설명한 압력용기 건전성평가방법을 사용하여 수명기간



〈그림 6〉 원자로압력용기 건전성평가

동안의 구조건전성을 평가하고 운전기간을 연장하여 운전하는데 필요한 준비 및 조치사항들을 도출하게 된다. 고리 1호기 원자로압력용기는 그동안 원자로감시시험일정에 따라 압력용기의 상태와 조사취화 경향을 평가하여 왔으나 이는 발전소가동중검사의 일환으로 볼 수 있다. 수명관리측면에서는 감시시험 결과 이외에 압력용기 건전성유지를 위한 모든 요건을 만족하면서 언제까지 발전소의 안전운전이 가능한가를 예측하는 것이다. 1988년 9월 파괴해석에 의한 안전성평가보고서에 의하면 가동년수 약 21년에 해당하는 17.5EFPY(Effective Full Power Year)까지는 압력용기가 안전한 것으로 밝혀졌으나, 설계수명인 24EFPY 또는 그 이상에 대하여 평가하기 위하여는 운전년수 약 50년에 해당하는 36EFPY의 캡

슐 R을 이용하여 안전성평가를 실시하여야만 수명관리를 위한 최적 운전종료시점을 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 3차 S캡슐의 WOL시편 1개와 4차 R캡슐의 WOL시편 중 용접재료 3개에 대한 파괴시험, 해석을 수행할 예정이다.

결론

본 논문에서는 최근 원자력산업계에서 활발하게 연구가 진행되고 있는 원자력발전소 수명관리에 대한 국내외기술동향에 대하여 알아보았다. 원전수명관리개념과 절차를 파악하고 일상적인 발전소운영, 장기전원개발계획과의 관계를 설명하였다.

해외기술동향으로는 미국을 비롯한 유럽, 日本, 臺灣, IAEA, OECD 등에서의 연구동향을 알아

보았고, 국내동향으로는 기술연구원의 금년도 신규과제인 고리 1호기 수명관리연구(I)와 고리 1호기 원자로압력용기 건전성평가에 대한 연구계획을 소개하였다.

원자력발전소의 수명관리연구란 전수명기간동안에 발전소성능과 안전성을 유지할 수 있는 기술적인 방안과 경제적으로 최적인 운전종료시점을 찾는 과정이다. 또 수명관리란 현재의 개발된 기술로 미래에 발생할 일에 대한 예측을 하는데 있어서 불확실성을 줄여 나가는 과정이므로, 지금 현재의 단계에서는 해당발전소의 연장운전가능성을 누구도 명확히 말할 수 없다. 따라서 수명관리연구는 연장운전 그 자체보다 어떻게 하면 발전소를 잘 관리하여 오랫동안 경제적으로 운전할 수 있을까하는 측면에서 수행되어져야 한다. ▣