

‘98 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고리원자력 1호기 수명관리 연구 동향

Lifetime Management Research Trend of Kori-1 nuclear power plant

김중석, 정일석, 홍승열

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

전력연구원에서는 고리원자력 1호기의 후반기 수명관리를 위해 “원전수명관리 연구(Ⅱ)”를 착수하였다. 고리 1호기 수명연장의 타당성을 평가하기 위한 수명관리 1단계 연구(1993-1996)를 수행하고 이를 바탕으로 주요 기기 상세 수명평가 및 노화관리 방안 수립을 위한 2단계연구를 착수하였다(1998.7~2001.6). 1단계 연구결과 고리 1호기는 설계수명 이상 연장운전 하는 것이 기술적, 경제적 타당성이 있음을 확인하였다. 국내에서는 연장운전 인허가에 대한 정부의 규제정책이 확정되지 않아 수명관리 2단계 연구에서는 노화원전의 실제 수명관리 활동에 필요한 최소 범위의 연구만을 추진하고 향후 원전 연장운전에 대한 정부의 방향과 정책이 결정되면 별도의 인허가 신청서를 작성하는 연구를 수행할 계획이다. 본 논문에서는 원전 연장운전과 관련한 국내외 동향과 고리 1호기 수명연장에 대한 기술적, 경제적 타당성 평가 결과 및 원전 수명관리 2단계 연구의 개요에 대해 기술하였다.

Abstract

KEPRI launched the Nuclear Power Plant Lifetime Management Study(Ⅱ) for the management of the latter half life of Kori-1. Main goal of LCM(Ⅱ) study is the detail evaluation of main equipment life and establishment of aging management based on LCM(Ⅰ) result. The result of LCM(Ⅰ) on the kori-1 confirmed the technical & economical feasibility of life extension beyond the design life. Owing to absence of The regulatory policy for the life extension in korea, LCM(Ⅱ) will focus on the minimum study which is essential for the actual lifetime management for the old nuclear power plant. License renewal study is expected after the establishment of Regulatory policy about the life extension of nuclear power plant. LCM trend in korea and abroad, result of technical and economical feasibility study and summary of LCM(Ⅱ) is described on this paper.

1. 서론

고리 원자력 1호기는 1998년 4월 상업운전 이후 20년 동안 운영하여 왔으며 인허가 수명 30년이 만료되는 2008년에 폐로 하는 것으로 한국전력공사의 장기전원개발 계획이 수립되어 있으나 원전 수명관리 1단계 연구(1993-1996)를 통해 고리원자력 1호기 연장운전의 타당성을 평가한 결과 인허가 수명 30년(1978~2008) 이상 연장 운전하는 것이 기술적으로 가능하고 경제적 이득이 있음을 확인하였다. 따라서 전력연구원은 고리 1호기의 연장운전 타당성 평가결과를 바탕으로 주요 기기의 상세 수명을 평가하고 잔여 수명기간 동안의 노화관리 방안을 수립하기 위한 수명관리 2단계 연구를 착수하였다. 본 논문에서는 현재 국내외의 원전 수명관리 연구 및 규제 동향, 고리원자력 1호기의 수명관리 1단계 연구결과 및 2단계 연구계획에 대해 소개하였다.

2. 원전 수명관리 기술 일반

2.1 수명관리 개념

원전 수명관리란 LR¹⁾ 또는 PSR²⁾ 규정에 따라 발전소 수명기간 동안 노화관리 프로그램을 수행하여 발전소의 성능, 안전성 및 경제성을 유지하는 것을 말한다. LR 및 PSR의 연관 관계 및 노화관리 프로그램 내용은 “그림 1”에 나타내었다.

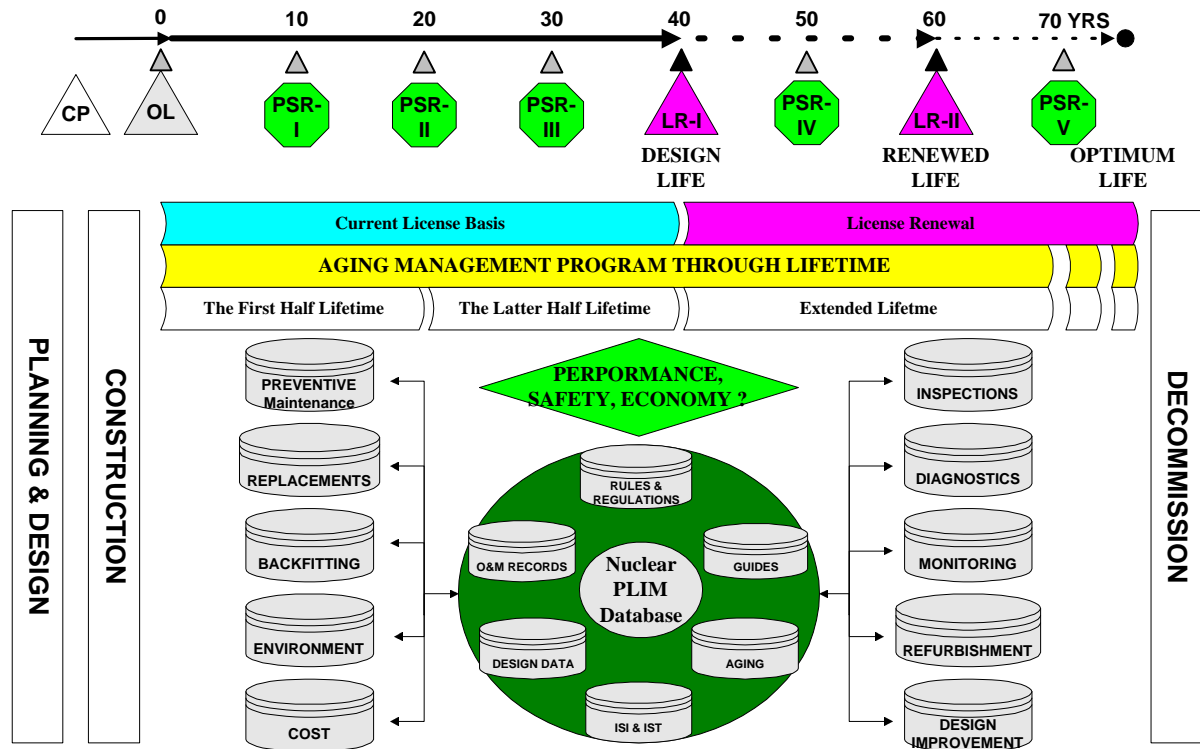


그림 1 : 원전 수명관리 개념도

1) License Renewal
2) Periodic safety review

2.2 원전 수명관리 프로그램 단계별 추진내용

원전 수명관리 프로그램은 크게 원전 수명연장 타당성 검토를 위한 1단계 연구, 상세 수명 평가 및 노화관리 방안 수립을 위한 2단계 연구, 2단계 연구결과에 따른 연차별 기기 교체 및 개 보수 시행을 위한 3단계 연구로 나눌 수 있다. 그림 2에서는 원전 수명관리 연구의 단계별 추진 내용에 대해 나타내었다.

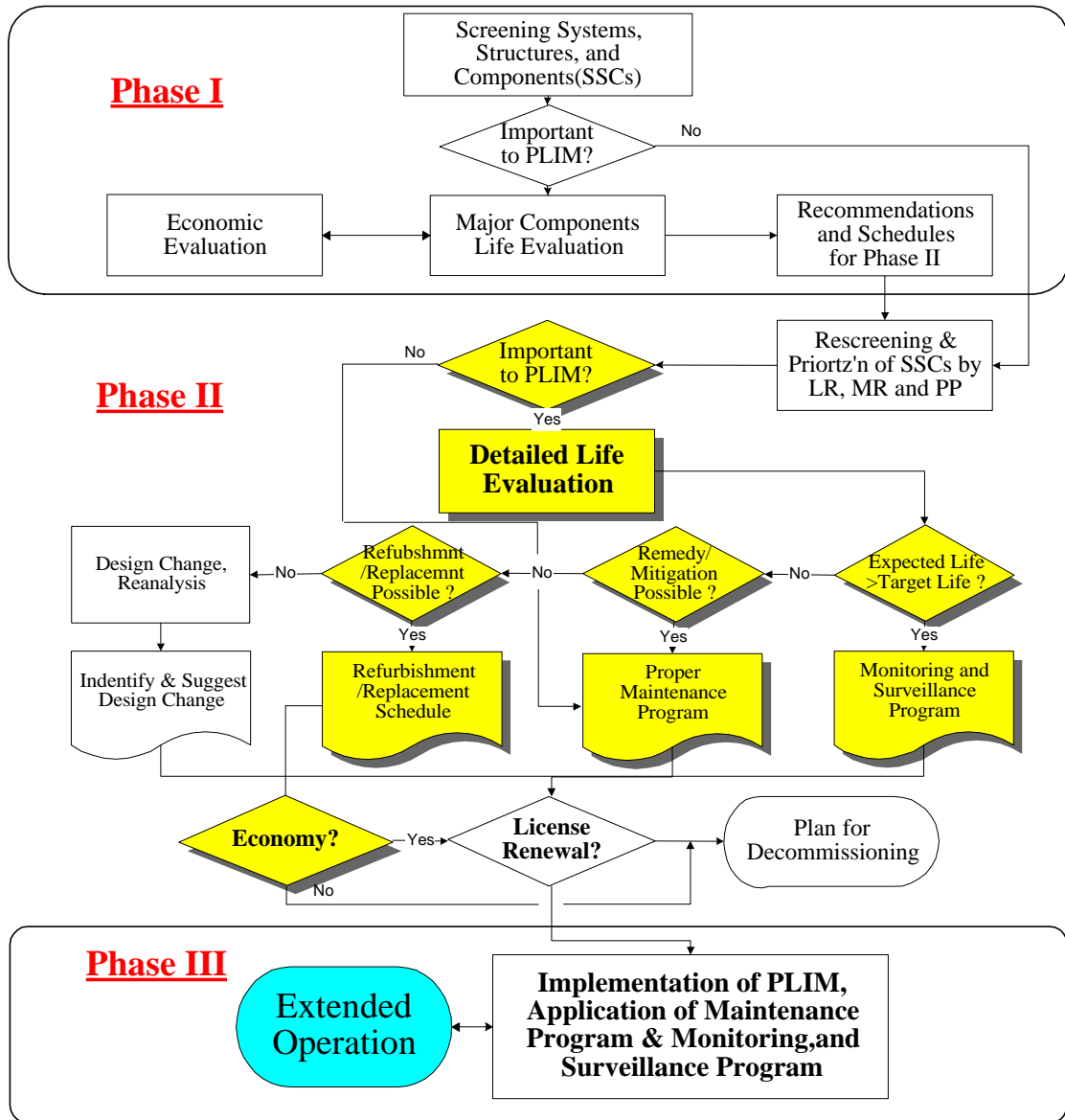


그림 2 : 원전 수명관리 단계별 추진내용

3. 국내외 연구 동향

3.1 국외

미국의 경우는 연장운전 관련 기술은 DOE, EPRI, 국립연구소들을 중심으로 80년대 초반부터 기초연구가 시작되었으며 80년대 후반에는 Owners Group과 Nuclear Energy Institute(NEI)를 중심으로 인허가 갱신을 위한 기술이 개발되었다. 90년대에 들어와서는 발전소별로 인허가 갱신 신청서 작성을 위한 연구를 수행하였으며 1998년에는 DOE, EPRI가 공동으로 가동 중 원전의 노화관리와 인허가 갱신, 운전성 향상을 위한 연구개발 전략을 수립하는 등 수명관리 연구가 활발히 진행되고 있다. NRC는 1997. 10 에 원자력발전소 인허가 갱신 신청 검토를 위한 표준 검토 계획(SRP)¹⁾을 발간하였는데 이것은 10CFR Part 54에 따라 NRC에 제출된 원자력발전소 인허가 갱신 신청서의 내용을 평가할 때 NRC 스텝들의 평가기준을 일원화하기 위한 안내서의 목적으로 발행되었으며 행정적 검토내용, 노화관리 검토 대상 구조물 및 기기 선정방법, 발전소 종합평가 및 노화관리 방법, 시간제한 노화분석에 대한 검토기준에 대해 기술하고 있다. 현재 SRP는 발전소 인허가 갱신 신청서에 들어가는 모든 구조물 및 기기들에 대해 노화관리방법 및 시간제한 노화분석을 언급하고 있지는 않으며 특정한 인증기준도 제시하지 않고 있다. 그러나 향후 인허가 갱신 신청서 검토 기간 중 얻어지는 경험을 바탕으로 추가 인증기준들을 삽입할 것으로 보인다.

일본은 매년 Overhaul 후 안전성 평가를 하여 다음 Overhaul까지 운전을 승인해 주는 제도를 택하고 있다. 1996년 4월 통산성(MITI)에서는 원자력발전소 노화에 대처하기 위한 기본 계획을 수립하여 발표하였다. 전체적인 계획의 수립과 추진, 점검은 통산성에서 하지만 실제 업무는 연구기관, 전력회사, 제작사, 인허가 기관(JAPEIC)이 역할 분담을 하여 추진하며 정부 소속기관이라 할 수 있는 JAPEIC이 총괄 조정역할을 한다.²⁾

캐나다도 수명관리 연구범위 검토를 위한 1단계 연구를 1994~1998에 시행하고, 상세 수명평가를 위한 2단계 연구를 1998~2008에, 2단계 연구결과에 따른 기기교체 및 수리작업을 2008~2012에 시행하는 등 한국과 매우 흡사한 원전 수명관리 연구계획을 수립해 놓고 있다.

3.2 국내

원자력안전기술원에서는 원자력 규제발전을 위한 정책방안 연구(1996.5-1996.12)로 미국의 인허가 갱신 규정에 근거한 국내 법 초안을 작성하여 1997년 정기국회에 원자력법 개정을 위한 안건으로 과기처에 제출하였으나 불 채택되었고, 안전규제 체계화 개선 및 효율화 연구(1997.7-1998.3)를 통해 인허가 갱신 규정 관련 추가 연구를 수행하여 국내 의견을 수렴하고 법제화를 추진한바 있다.

전력연구원에서는 “원전 수명관리 연구(I)”를 1993년부터 3년 동안 수행하여 고리 1호기 연장운전에 대한 타당성을 평가하여 경수로형 원전 주요 기기의 상세 수명평가를 위한 기초 기술을 확보하였고 노후 원전에 대한 상세 수명평가를 위해 “원전 수명관리 연구(II)”를 1998. 7에 착수하였다. 본 연구는 장기 사용으로 인한 발전소의 성능저하를 예방하고 기기 별 상세 수명을 평가하여 수명 후반기의 발전소 노화관리방안을 수립하기 위한 연구를 우선적으로 추진하고 있다. 또한 현재까지의 국내 원전 수명관리 연구는 경수로형 원전에 대해서만 치중하였으나 앞으로는 중수로형 원전에 대한 수명관리 연구도 추진할 계획이다.

4. 규제동향

4.1 License Renewal 제도

원자력 발전소의 License Renewal 제도는 최초 인허가 수명인 40년이 종료된 후 20년씩 연장운전이 가능하도록 하는 규정이며 NRC는 원자력 발전소의 수명연장을 위한 인허가 갱신규정(10CFR54)을 1991년에 제정되었다. License Renewal의 기본개념은 발전소의 종합평가 계획(IP A³⁾)을 수립한 뒤 수명관리 대상 기기에 대한 상세 수명평가 및 노화관리 방안을 수립하여 인허

3) Integrated Plant Assessment

가 기관으로 부터 연장운전 승인을 받는 것이다. 발전소가 소급규제 적용방안⁴⁾을 수행하고 있고 연장운전 기간동안 적절한 노화관리 프로그램을 수행할 수 있다고 판단되면 인허가 기관은 20년 연장운전을 허가한다. 그러나 수명연장 기간 중 인허가 갱신 신청서에 기록된 내용대로 적절한 수명관리가 수행되지 않으면 언제든지 연장운전을 취소할 수 있다. Calvert Cliffs 발전소는 '97년도에 NRC에 인허가 갱신을 위한 기술보고서를 제출하였고 '98. 3에 인허가 갱신 신청서를 제출하였다. '98. 7 Oconee 도 인허가 신청서를 제출하였고 Point Beach 외 다수 발전소가 인허가 갱신을 위한 준비를 하고 있다.

4.2 PSR 제도⁵⁾

PSR⁵⁾이란 “안전성에 중요한 모든 측면들을 규칙적으로 다루기 위해 원전의 가동 이후 규칙적인 주기로 수행되는 종합적인 안전성 평가”를 의미한다. 이 제도는 1950년 후반부터 가동에 들어간 원전들이 노후화 되고 원자력 안전에 대한 새로운 지식들이 축적 되면서 그 필요성이 제기되었으며 1970년대 후반 유럽 국가들로부터 시작하여 본격적으로 도입되었다. 현재 PSR제도는 원자력 발전소를 운영하고 있는 국제 원자력 기구(IAEA)의 거의 모든 회원국들(영국, 스웨덴, 프랑스, 일본, 독일, 미국 등 대부분의 원자력 선진국)이 PSR을 채택하고 있거나 이에 상응하는 제도를 시행하고 있다. PSR은 원자력발전소의 실제 물리적 상태, 안전해석, 기기검증, 노화관리, 안전성능, 타 발전소의 운전경험 및 연구성과의 활용, 절차서, 조직 및 행정, 인적요소, 비상계획, 환경영향의 전체 11개 항목을 분석하여 발전소의 안전성을 평가하는데 그중 노화관리 항목은 License Renewal 제도의 AMR⁶⁾과 동일한 내용으로 볼 수 있다.

5. 고리 1호기 수명관리 연구

5.1 1단계 타당성 평가 결과⁴⁾

고리 1호기는 연장운전의 기술적 타당성을 검토하기 위하여 주요 기기에 대해 해외 선행사례 및 경험, 국내외 운전 및 정비경험 등을 반영하여 주요 손상부위, 손상형태, 손상구조를 도출하고 개별 기기의 수명을 평가하였다. 13개 주요 기기의 수명을 평가한 결과 원자로 압력용기와 저압터빈을 제외한 11개 기기 들은 40년 이상 운전이 가능한 것으로 평가되었다. 저압터빈은 1997년에 교체되었고 원자로 압력용기는 RT_{PTS}가 34년 운전시 기준치인 300°F를 초과할 것으로 분석되어 별도의 연구과제로 “원자로 가압 열충격 평가 연구”를 시행하고 있으며 RG 1.154의 Plant Specific PTS 기준을 만족할 것으로 예상된다. 연장 운전에 따른 경제성을 평가한 결과 10년 연장 운전 시 2009년 현재로 연장운전을 위한 투자비가 2,300억원, 이득이 약5,600억원, 이득비용비는 2.4이며 순 이득은 약 3,300억원 정도로 경제적 타당성이 있는 것으로 평가되었다. 고리 1호기에서는 발전소 운전성능 유지를 위해 증기발생기, 저압터빈, 발전소 공정제어 계통 I&C 설비 등의 교체공사를 실시하여 발전소 수명연장의 필요성에 긍정적 효과를 가져왔다. 그러나 본 교체비용은 발전소 수명연장과는 별개로 현 수명기간 동안의 운영효율 개선을 위해 투자된 비용인바 발전소 수명연장을 위한 경제성 평가 시의 소요경비 항목에서는 제외되었다.

5.2 2단계 상세수명 평가 개요

원전 수명관리 기술은 미국을 중심으로 일본, 영국 등에서 연구 개발되어 왔으나 각국은 수명연장에 대한 규제 요건과 원자력 산업의 환경이 달라 국가별로 기술개발의 방향과 적용 전략을 달리하고 있다. 국내에서는 해외에서 개발 또는 적용하고 있는 원전 수명관리 기술을 바탕으로 하여 우리의 원자력 산업 환경과 현실에 적합한 수명관리 기술을 개발하여야 한다. 원전 수명관리 기술 개발은 국내에서 처음 시도되고 있는 기술이고 향후 가동 중 원전에 지속적으로 적용될

4) Fire Protection, EQ, PTS, ATWS, Station Blackout

5) Periodic Safety Review

6) Aging Management Review

것이므로 고리 1호기를 모델 발전소로 국내 기술을 개발할 계획이다. 본 연구에서는 노후 원전 노화관리 방안이 가장 잘 개발된 미국의 연장운전 인허가 갱신 법규인 10CFR54에 따라 개발된 연장운전 인허가 신청서 작성 양식 및 내용(DG-1047), 연장운전 인허가 신청서 검토 계획 초안(SRP, '97.9), 연장운전을 위한 수명평가 및 노화관리 방안 수립 지침(NEI 95-10/EPRI TR-105090) 등을 기본으로 하여 고리 1호기 노화관리 방안을 수립할 계획이다. 주요 기기/구조물의 상세 수명평가를 위하여는 Calvert Cliffs 발전소의 정성적인 방법론과 WOG의 정량적인 방법을 근간으로 하여 가장 합리적인 수명평가 방법론을 도출할 것이며 경제적인 최적 노화관리 방안을 수립하기 위해 확률론적 기법을 도입한 의사결정 분석(Decision Making Analysis)방법을 활용할 것이다.

연구 수행중 발전소 종합평가 기술지침 및 수명평가 방법론의 완성도를 높이고 향후 후속 호기는 개발된 기술지침과 절차서에 따라 수행하도록 한다. “그림 3”에서는 원전 수명관리 연구(II)의 Task별 추진계획을 나타내었다.

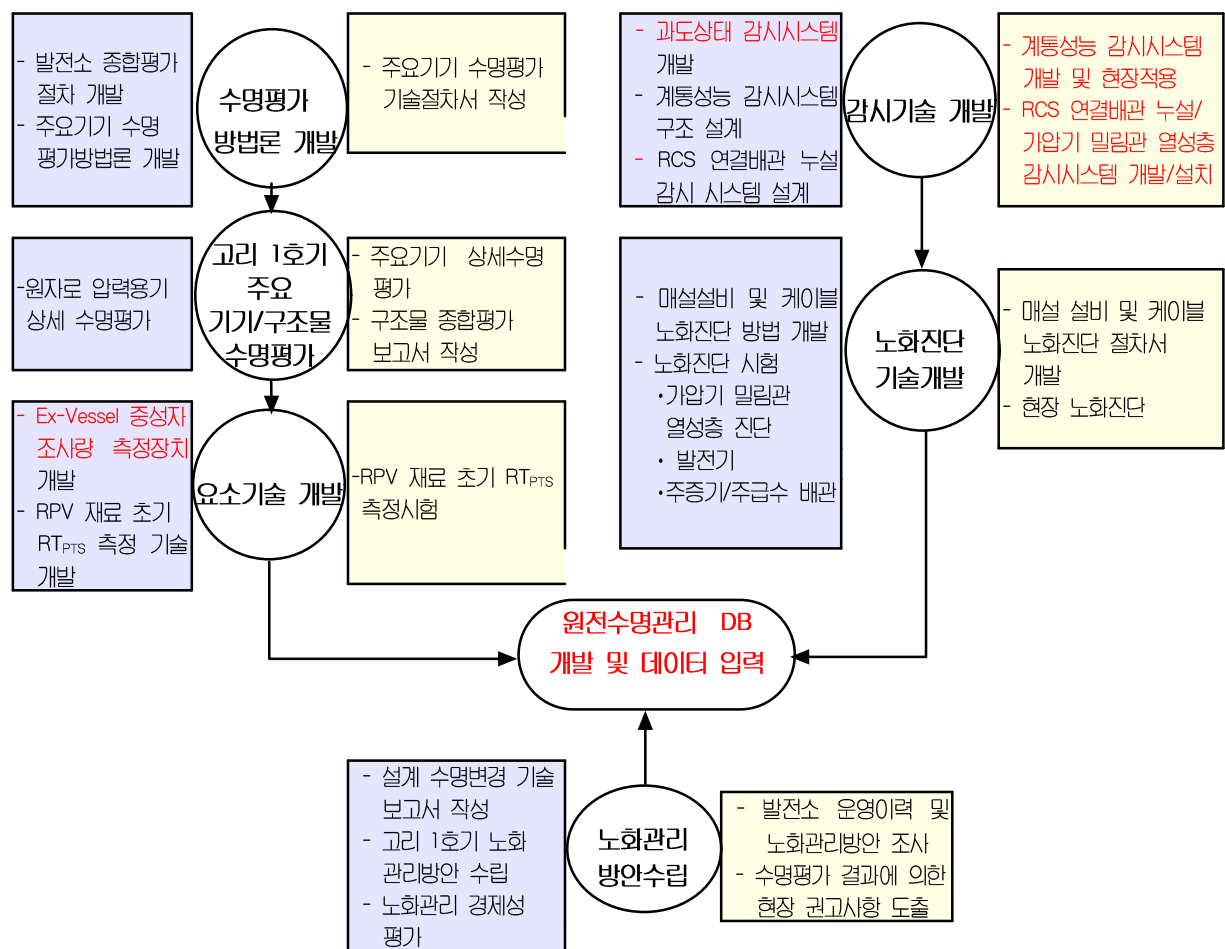


그림 3 : 원전 수명관리 연구(II) 추진 Flow Chart

5.3 원자로 압력용기 가압 열충격 평가

원자로 압력용기는 노심에서 생산되는 중성자에 의한 조사취화 현상으로 무연성 천이온도 (RT_{NDT})가 증가되며 파괴 인성치가 저하된다. 원자로 용기의 파괴 인성치가 저하된 상태에서 과도상태나 사고에 의해 안전주입신호가 발생하면 저온의 냉각수가 노심으로 주입되고 가압 또는 과압 상태의 압력용기는 과 냉각(Overcooling)에 의한 가압 열충격 현상이 발생하여 원자로 압력용기가 파손될 수 있다. 국내의 경우, 원자로 도입국의 규제 지침을 적용한다는 규제 방침에 따라 미국 NRC 규정의 PTS 요건을 만족시키도록 규제기관에서 요구하고 있다. 특히 1970년대 초반에 제작된 고리 1호기의 압력용기는 연장운전시 RT_{PTS} 가 PTS Screening Criteria(원주방향 용접부 $\leq 300^{\circ}F$)를 운전년수 34년(27EFPY)인 2012년에 제한치를 초과할 것으로 분석되었다. 2012년은 고리 1호기 원자로 설계수명인 40년인 2018년에 미치지 못하므로 원자로 압력용기의 Plant Specific PTS Analysis를 수행하여 원자로의 건전성을 입증하는 연구를 수행하였다. 본 원자로 압력용기 가압 열충격 평가 연구는 1999. 1에 완료될 예정이며 현재까지의 연구를 종합해 보면 50년까지 R.G 1.154의 요건을 만족할 수 있을 것으로 예상된다.

6. 결 론

고리 1호기 수명연장의 타당성을 평가하기 위한 수명관리 1단계를 수행하고 이를 바탕으로 주요 기기 상세 수명평가 및 노화관리 방안 수립을 위한 2단계 연구를 착수하였다. 1단계 연구결과 고리 1호기는 설계수명 이상 연장운전 하는 것이 기술적으로 가능하고 경제적 이득이 있음을 확인하였다. 국내에서는 아직 원전 연장운전에 대한 규제정책이 확정되지 않아 원전 수명관리 연구 2단계에서는 노화원전의 실제 수명관리 활동에 필요한 최소범위의 연구만을 추진하고 향후 원전 연장운전에 대한 정부의 방향과 정책이 결정되면 별도의 인허가 관련 연구를 수행하게 될 것이다.

참고문헌

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan for the Review of License Renewal Applications for Nuclear Power Plants, Sep 1997
2. 홍승열, IAEA 원자력발전소 수명관리 International Working Group 참석, 1997.11
3. 과기원 김효정 외, “원자력환경 변화에 따른 안전규제 정책현안 평가”, 원자력 안전규제 체제 개선 및 효율화 연구 1차년도 연차보고서, 한국 원자력안전기술원(1998. 3)
4. 전력연구원 원전설비운영그룹, 원전 수명관리 연구(Ⅰ) 최종보고서, '96.11