

原電 長壽命化研究의 開發現況 및 計劃

町田 祐三

東京電力 原子力研究所 輕水爐研究室

日本에서는 원자력발전소 운전 기간을 정하는 법규는 없고 전기사업법 47조에 규정된 정기검사에 합격함으로써 다음번 정기검사까지 운전이 허용된다.

원자력발전소의 경우 정기검사 대상이 되는 설비는 발전용 원자로와 그 부대설비로 원자로본체, 원자로냉각계통설비, 계측제어계통설비, 연료설비, 방사선관리설비, 폐기설비, 원자로격납시설, 보조보일러 및 비상용 예비발전장치, 증기터빈 등이다.

정기검사는 증기터빈에 대해서는 매 2년마다(정확하게는 2년을 경과한 날의 전후 1개월을 넘지 않은 시기), 그외의 전기공작물에 대해서는 매 1년마다(정확하게는 1년을 경과한 날의 전후 1개월을 넘지 않은 시기) 시행하지 않으면 안된다.

배 경

미국에서는 원자력발전소의 운전기간을 원자력법에서 40년간으로 규정하고 있지만 운전인가의 갱신이 가능하고 1992년 1월 최대 20년간 연장가능한 것으로 규정한 인가갱신규칙(10CFR54)이 발효되었다. 따라서 日本과 미국의 운전인가에 대한 생각은 서로 다르다.

日本에서는 운전중 및 정기검사, 보수작업에서 얻은 데이터를 정리, 발전소 상태를 정확히 파악, 평가해서 기기에 經年劣化 경향이 보이면 예방보전 차원에서 그 기기에 대한 보수, 교환 등의 대책을 강구해 발전소의 신뢰성, 안전성을 유지, 개선해 나간다. 이에 따라 장수명화도 달성된다고 보고 있는 것이다.

앞으로 원자력발전소의 안전성,

신뢰성을 더욱 개선하기 위해 노후 발전소부터 차례로 안전성검토를 실시할 것이며, 경년열화대책의 일환으로 앞으로 정기검사 방법과 기준을 재검토해 나간다.

1984년 경수로기술고도화 소위원회에서 앞으로의 기술개발과제로 원자력발전소의 장수명화 문제가 거론돼 그후 지금까지 각종 연구가 실시되고 있다. 여기서 그 개요를 소개한다.

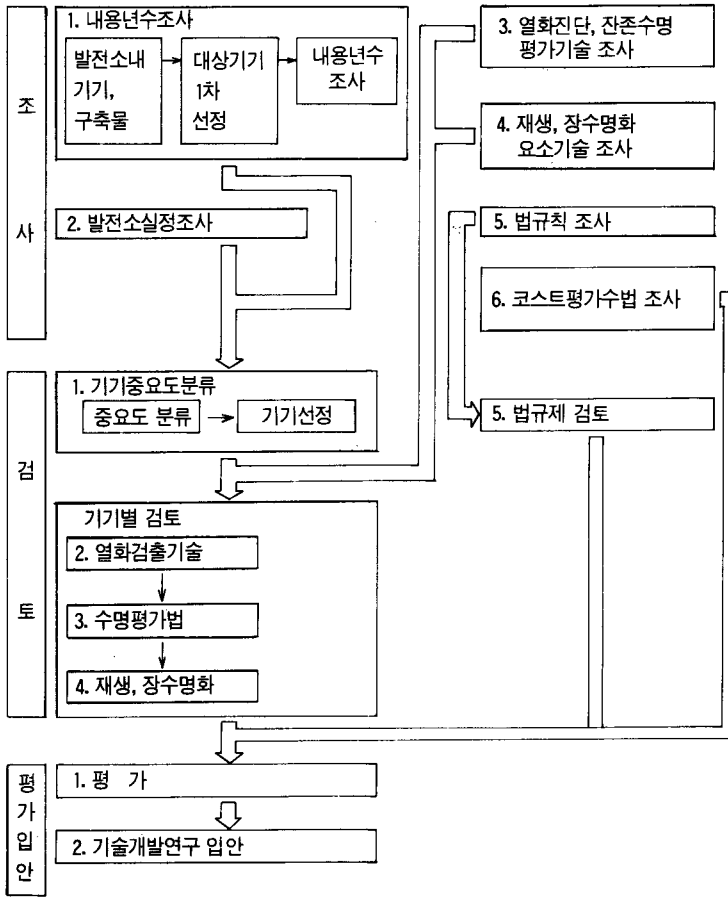
전기사업자의 연구개발

1. 원자력발전소 운전기간연장에 관한 연구(1985~86)

이 연구에서는 원자력발전소의 운전기간연장(장수명화)을 위해 (1)발전소의 열화진단기술 및 그 평가수법 (2) 殘存수명예측수법 (3) 재생, 장수명화에 필요한 要素기술, 보수기술 및 공법 등에 관해 실현성조사를 실시해 그 결과에 따라 앞으로 실시해야 할 연구과제를 선정했다.

구체적으로는 우선 발전소 운전기간을 제약하는 것으로 생각되는 주요기기 및 구조물의 설계내용년수와 그 열화요인을 조사했다. 또한 열화진단, 잔존수명평가기술과 재생, 장수명화의 要素기술에 관한 조사도 실시했다. 다음에 운전기간연장을 도모하는 데 있어 중요한 기기를 선정, 이들 기기에 대해 경년열화검출기술, 수명평가법, 재생 및 장수명화라는 관점에서 검토를 했다. 이 연구의 흐름을 〈그림 1〉에 보였다.

그 결과 발전소기기의 설계내용



〈그림 1〉 운전기간연장에 관한 연구의 흐름(PWR 電共研)

년한이 원자로 1차계통기기가 40년 이상, 터빈계통기기가 30년 이상으로 돼 운전기간 40년의 경우 거의 모든 기기가 달성가능하고 운전기간 60년의 경우는 대부분의 기기가 재검토의 여지는 있지만 교환가능하고 문제되는 것은 압력용기, 노내구조물, 건축물(콘크리트 철근)이라는 결론을 얻었다(표 1).

위의 검토결과와 그외의 관련연구계획을 감안해 운전기간연장 차원에서 다음과 같은 연구과제를 선

정했다.

- (1) 원자로운전이력 모니터링기술
- (2) 원자로압력용기 및 노내구조물에 대한 원격조작에 의한 비파괴 검사기술
- (3) 원자로압력용기의 용접보수 기술
- (4) 배관 등의 재료열화 모니터링기술
- (5) 매입배관의 점검, 보수기술

2. 운전이력 모니터링 시스템 개발(1987~88)

원자력발전소 장수명화를 위해서는 장기간 발전소의 데이터를 기록, 보관하고 이들 데이터에 의해 수명평가를 해서 수시로 기기의 건전성을 확인할 수 있도록 운전이력 모니터링 시스템이 필요하다. 따라서 수명평가상 중요하다고 생각되는 설비에 대해 운전상태 및 이력을 모니터링해 이들 데이터를 토대로 수명평가를 할 수 있는 시스템을 연구했다.

장수명화과정에서 고려해야 할 열화현상, 각 기기의 열화요인을 조사하고 모니터링 대상기기, 부위, 열화요인을 선정해서 모니터링 변수를 적출했다. 이 연구에서는(열화평가수법이 확립돼 있어 열화평가시에 각종 모니터링 변수를 사용한다) 압력용기의 피로를 대상으로 한 운전이력 모니터링 시스템 개발을 했다.

3. 원자로압력용기 등의 진단기술개발연구(1989~92)

이 연구에서는 접근하기 어렵고 모양이 복잡해 점검이 곤란한 압력용기의 바닥부이나 노내를 대상으로 한 目視 및 초음파기술을 이용한 검사과정(수중검사장치, 원격검사장치 등)의 개발을 했다.

4. 원자로 1차계통 재료의 피로 특성 평가연구(1981~88)

원자로기기의 설계피로곡선은 실내온도에서 10⁶회 수명 이하 피로 데이터를 토대로하여 정해지지만 이 연구에서는 스테인레스강(SUS

〈표 1〉 운전기간연장 시의 중요도분류 검토결과(운전기간 60년의 경우)

점검, 열화 교환, 재생, 보수 진단수명 예측	문제 有 (×)	잠재적 문제 有 (△)	문제 無 (○)
문제 有(×)	I 원자로압력용기 노내구조물 건축물(콘크리트, 철근)	II	III
잠재적 문제 有(△)	해수배관 매입배관 전기케이블	재순환배관 1종배관 재순환펌프 펌프류 원자로격납용기	
문제 無(○)	III	일반배관, 배관지 지구조물, 원자로 계열교환기, 전동기, 발전기, 변압기(주조 소내 기동) 건축물(철골 기타)	IV 그외의 기기

(주) 그룹 I : 최중요기기
 그룹 II : 중요기기
 그룹 III : 중요도가 낮은 기기
 그룹 IV : 문제가 없는 기기

304, 316NG), 저합금강(SFVV2), 탄소강(STS42), 니켈합금(인코넬 X-750, 600) 등에 대해 실내용도 및 고온純水(288°C, 용존산소농도 0.2ppm) 중에서 10³회 수명 이하에서의 피로강도특성을 평가해 설계곡선을 밀도는 것은 없다는 것을 확인했다.

5. 노내 구성재료의 조사영향연구(1987~현재)

노내 구성재료로 사용되고 있는 스테인레스강의 경년열화특성에 미치는 중성자조사영향에 대해서는 (1) 중성자조사에 의한 기계특성의 변화 (2) 중성자조사에 의한 성분

원소의 粒界偏析 (3) 중성자조사에 의한 粒界부식의 진행 등의 관점에서 연구평가를 하고 있다.

이들 연구결과를 반영해 耐부식성을 개선한 재료의 개발연구도 예방보수 차원에서 진행되고 있다.

6. 노내수질개선을 위한 수소주입기술의 개발연구(1989~92)

급수중에 수소를 주입하는 방법은 미국, 스웨덴 등에서 1차계통 배관의 응력부식균열(SCC) 방지 대책으로 실시되고 있다.

수소주입기술은 급수계통에 소량의 수소를 주입함으로써 爐水의 溶存산소농도를 낮추고 1차계통 재료

의 부식환경을 개선하는 것으로 耐응력부식균열성을 개선해 발전소의 장수명화를 도모하는 것이다.

이 연구는 발전소 장수명화대책의 하나로 수소주입기술을 개발하기 위한 것으로 단기수소주입계획을 수립, 1992년 2~3월에 후쿠시마(福島) 第1 원자력발전소 3호기에서 단기적으로 수소를 주입, 爐水 중의 용존산소농도가 급격히 낮아지는 것을 확인했다.

電力中央研究所의 연구개발

電力中央研究所는 1987년부터 10개년 계획으로 1. 경수로발전소의 수명에 직접 관계되는 압력용기나 노내구조물, 증기발생기 등의 주요기기에 대해 열화요인 분석과 수명예측 2. 관련되는 데이터베이스 구성 3. 경수로발전소의 장수명화기술의 체계화라는 관점에서 기술평가, 경제성평가를 토대로 한 발전소수명의 종합평가지원 시스템의 개발 등의 연구를 추진하고 있다.

주요기기를 대상으로 한 요소기술연구는 다음과 같다.

1. 압력용기의 중성자조사脆化에 따른 건전성분석 평가수법으로 확률론적 파괴역학코드 「PROFMA C」을 개발해 압력용기鋼의 가압열충격(PTS) 발생시의 파괴학을 건전성 여유도를 정량적으로 평가하는 분석을 하고 있다.

2. 노내구조재의 중성자조사 손상에 대해서는 日本原子力研究所와의 공동연구로 원자로용 스테인레스鋼을 재료시험로에서 경수로조건

〈표 2〉 電力中央研究所에서의 원자력발전소 장수명화연구

과 제 항 목		Phase I			Phase II			Phase III			
		87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
요소기술의 개발	(1) 압력용기의 건전성평가 (소내연구, EPRI 공동연구)				압력용기의 건전성 분석			건전성평가의 고정밀화			
	(2) 노내구조물의 경년열화대책 수명평가(노내연구, 原研공동연구)	현재 사용중인 재료의 경년열화						경년열화되기 어려운 재료개발			
	(3) 증기발생기의 장수명화	전열관의 SCC 대책 Fretting 손상평가						장수명화대책			
데이터베이스 구성	(4) 재료데이터베이스				RP 검사 데이터			노내구조재료데이터베이스 SG 전열관재료데이터베이스			
	(5) 운전(보수)데이터베이스							데이터베이스 기본구성			
경제성평가와 종합평가 시스템 개발	(6) 경제성평가				평가수법 개발			평가수법 개량			
	(7) 종합평가시스템				구상과 개념 검토			시스템 개발			

으로 조사해 조사손상 메커니즘의 분석을 하고 있다. 또 EPRI(미국 전력연구소)와의 공동연구로 해외의 상업용 원자로에서 현재 사용중인 재료시험을 실시하고 있다.

3. 증기발생기 전열관의 손상평가와 장수명화기술 개발에서는 봉산첨가로 인코넬600 합금의 균열발생과 진전을 억제할 수 있다는 것을 확인했고 Fretting 손상의 정략적 평가법을 개발하고 있다. 앞으로는 부식의 억제, Fretting 등의 기계적 손상의 양면에서 장수명화 대책을 강구할 작정이다.

수명평가에서는 기기 구성재료의 사용전 데이터, 사용환경조건하에서의 특성변화 데이터, 발전소설계시의 데이터 및 운전보수 데이터 등도 필요하기 때문에 데이터베이스 구성도 추진하고 있다.

수리 및 교환이나 검사, 모니터링 등을 기술 및 경제성 양면에서 종합평가해 장수명화 시나리오를

설정하기 위한 종합평가지원 시스템을 개발하고 있다. 그 일환으로 기기의 경년열화를 감안해 발전원가를 계산하는 수법을 개발하고 있다.

日本原子力研究所 연구개발

日本原子力研究所는 1986년부터 1990년까지 경수로 경년변화방지대책을 검토하고 경수로 수명평가법 개발에 따른 많은 문제를 해결하는 것이 장수명화에 이어진다고 보고 압력용기, 전선 및 케이블, 콘크리트 구조물을 중심으로 경년변화 모델, 모니터링 및 수명평가법에 관한 연구계획을 세웠다(표 3).

1. 압력용기의 경년변화 모델 및 수명평가수법의 연구

원자로압력용기의 중요한 경년변화현상으로는 (1) 균열발생, 성장 (2) 鋼材의 재결열화 등을 들 수

있다.

균열의 발생, 성장과정에서는 응력, 환경, 재료의 복잡한 결합 등에 의해 압력용기내면에서 발생하는 응력부식균열에 의한 균열발생이나 그 미소한 균열을 기점으로 하는 피로에 의한 균열성장이 있고 특히 고온고압수 환경에 의해 가속되는 부식피로현상이 중요하다.

균열성장의 주요인으로 균열 先端에서의 유속, 용존산소농도 및 온도 외에 母材 중의 유황함유량에 주목하고 있다.

중성자조사脆化에 관해서는 해체된 JPDR(日本原子力研究所의 日本動力試驗爐)를 이용한 시험을 추진하는 한편 JMTR(日本材料試驗爐)에 의한 조사시험연구도 추진하고 있다.

2. 전선, 케이블류 경년변화연구

전선, 케이블류의 경년변화연구는 유기절연재료의 低선량률의 방

〈표 3〉 日本原研 経年변화연구

항목	연도								
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	
1. 압력용기 1) 경년변화모델의 연구 ① 재질열화시험 ② 균열거동시험 ③ JPDR 경년변화시험 • 재질열화조사 • 균열조사 2) 모니터법연구 3) 수명평가법연구									
	시료채취								
2. 전선, 케이블 1) 축진열화법연구 2) 열화모니터법연구 3) 잔존수명평가기술연구									
3. 콘크리트구조물 1) 경년변화모델연구 ① 시험연구 ② JPDR 조사 2) 모니터법연구									
	생체차폐체				격납용기				

사선과 열의 복합환경에서의 경년 변화현상의 해명, 경년변화 모델의 확립 및 재질변화를 정확히 파악할 수 있는 모니터법의 개발을 목적으로 한 것이다.

3. 콘크리트 구조물의 경년변화 연구

원자력발전소의 콘크리트 구조물에는 사고시 방사성물질의 환경방출을 방지하는 콘크리트체 격납용기 및 원자로건물, 방사선을 감쇠시키는 생체차폐벽이 있고 콘크리트 구조물에 요구되는 기능으로는 밀폐, 차폐, 지지의 3가지 기능이 있다.

이들 기능에 영향을 미치는 경년 변화현상으로는 다음과 같은 것을 생각할 수 있다.

- (1) 밀폐기능
콘크리트의 균열, 라이너의 부식
- (2) 지지기능
재질열화(철근, 앵커볼트의 부식 포함), 균열
- (3) 차폐기능
균열
따라서 재질열화와 균열에 대해 경년변화 모델과 경년변화 모니터법에 관한 연구를 하고 있다.

發電設備技術檢査協會의 연구개발

경수로고도화 소위원회 의 중간보고(1984년)를 받고 1985년 通産省으로부터 「원자력발전소 장수명화 기술개발」을 의뢰받아 현재 11개년 계획으로 실시중에 있다(표 4).

이 계획은 Phase - I, II, III로 구성된다.

1. Phase - I 실현성조사(1985~1986)

- (1) 각국의 장수명화에 관한 활동상황조사
- (2) 발전소수명을 결정하는 Critical 기기 분류(표 5)
- (3) 대표적인 PWR, BWR의 운전기간에 대한 예비적 예측(설비, 기기는 60년 이상, 콘크리트 구조물은 80년 이상으로 추정)

2. Phase - II 확증시험/ 장수명 화기술평가(1987~95)

- (1) 확증시험
① 탄소강, 低합금강, 스테인레스강, 니켈합금 등의 고온수환경하에서의 재료시험

원자로냉각재 Boundary를 구성하는 재료에 대해 운전기간연장에 상당하는 熱時效(Aging)를 준 劣化模擬材를 사용, 고온수환경하에서의 피로강도 데이터를 얻어 수명평가방법 확립에 이용한다. 이 시험에서는 시험재료에 운전기간연장을 상징한 열시효 및 변형시효를 준 뒤 실제 발전소의 1차냉각수를 모의한 고온수환경하에서 피로강도 시험을 실시한다. 현재 데이터를 수집중이다.

② 2相 스테인레스강의 열시효에 관한 시험

1차냉각계통의 배관, 펌프, 밸브 등에 사용되는 2상 스테인레스강에 운전기간 연장을 상징한 열시효를 주어 그 韌性저하상태를 파악하고 인성저하예측법을 개발하기 위한

〈표 4〉 원자력발전소 장수명화기술 개발실시계획

	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
(1) 원자력발전소설비, 기기 1. 실현성조사 2. 확증시험 3. 장수명화 기술평가	Phase I 실현성 조사 현재의 기술조사, Critical 기기 적출, 경년변화요인 적출, 확증시험항목 선정 등				Phase II 확증시험 <ul style="list-style-type: none"> • 저합금강, 스테인레스강 등 고온수환경하의 재료시험 • 2상 스테인레스강 열시효시험 • 스테인레스강 조사과피인성시험 • 스테인레스강 조사 SCC 시험 • 원자로압력용기 감시시험편 재생확인시험 • 초전도응용재료 열화모니터링기술 실현성 조사 • 원격자동 Half-Bead 용접장치 개발 Phase II 장수명화기술 평가 수명예측수법 확립, 수명예측, 장수명화대책 검토 등						
(2) 원자력발전소 콘크리트구조물 1. 실현성조사 2. 장수명화기술계획	Phase II 실현성 조사 현재의 기술조사, 내용성 평가		Phase II 장수명화기술 평가 기본방침검토, 개략의 수명예측 등								
(3) 종합평가										Phase III 종합평가 장수명화시나리오 확립 등 종합평가	

것이다. 현재 데이터 수집과 분석을 하고 있다.

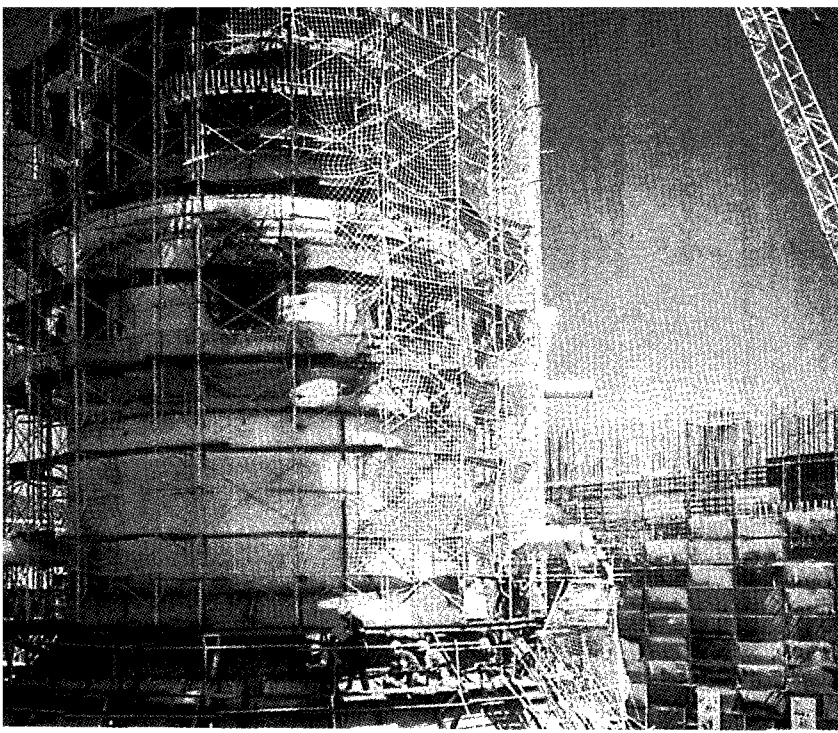
③ 조사된 스테인레스강의 파괴인성에 관한 시험

미국의 실제 원자로에서 중성자

조사를 받은 재료를 채취해 그 인성저하 정도를 파악해서 중성자조사에 의한 인성저하예측법을 개발하는 동시에 파괴역학평가도 실시하고 있다.

④ 스테인레스강의 조사하에서의 응력부식현상에 관한 시험

BWR 노내구조물에서 사용되고 있는 오스티나이트계열 스테인레스강에 대해서는 중성자조사량 증가



〈표 5-1〉 Critical 기기, 설비

B W R	P W R
① 원자로압력용기	① 노내구조물
② 원자로압력용기지지구조물	② 제어봉구동장치
③ 노내구조물	③ 원자로용기 및 원자로용기지지구조물
④ 1차냉각재압력 Boundary 배관	④ 증기발생기
⑤ 원자로냉각재순환펌프	⑤ 1차냉각재펌프
⑥ 원자로냉각재순환펌프 출입구 밸브	⑥ 가압기
⑦ Drywell	⑦ 1차냉각재관
⑧ Suppression Chamber	⑧ 잔유열제거펌프
⑨ Diaphragm Follower	⑨ 잔유열제거냉각기
⑩ Bent 관 및 Down Comer	⑩ 원자로격납용기
⑪ 잔유열제거통펌프	⑪ 재생열교환기
⑫ Cable 및 Cable Tray	⑫ 배재생열교환기
⑬ 原子爐 Well Seal Bellow	⑬ 체적제어탱크
⑭ 급수펌프구동터빈	⑭ 충전수펌프(충전/고압주입펌프)
	⑮ Cable 및 Cable Tray

〈표 5-2〉 콘크리트 구조물

①	Base Mat
②	원자로 Pedestal
③	증기발생기
④	차폐벽
⑤	Diaphragm Follower
⑥	취수구조물

가 응력부식균열에 미치는 영향에 관해 검토하고 BWR 노내구조물의 수명평가방법을 확립하기 위한

것이다.

⑤ 원자로압력용기 감시시험편의 재생확인시험

압력용기 내에는 30~40년 수명을 전제로 중성자조사에 의한 인성 저하를 모니터링하는 감시시험편이 장전돼 있다. 발전소 수명연장에 따라 시험편 수량이 부족할 것을 예상해 파열시험편의 塑性변형부분을 제거하고 양단에 새로 추가 시

험편을 용접해서 시험편을 재생, 재장전할 수 있도록 재생 전후의 충격치에 차가 나지 않는다는 것을 미조사재료를 사용해 확인했다.

⑥ 원격자동 Half-Bead 용접장치의 개념검토

後熱處理가 없이 용접 가능한 Half-Bead 용접을 원격자동으로 할 수 있는 용접장치의 개념검토를 했다.

⑦ 재료열화 모니터링기술의 실시상황 조사

강도, 인성의 재료특성변화를 비파괴적으로 검출가능할 것으로 생각되는 超電導, 磁氣, 超音波 등의 기술을 응용한 재료의 열화모니터링기술의 실증성을 조사해 발전소 장수명화기술에의 적용가능성을 검토한다.

(2) 장수명화기술 평가

Phase-I에서 적출한 Critical 설비, 기기에 대해 재료의 경년변화 데이터 등을 수집해 수명예측 검토를 한다. 또 경년변화완화기술, 교환, 보수기술 등의 검토로 필요에 따라 한다.

콘크리트 구조물에 대해서는 주요변화요인으로 鹽分, 중성자, 열, 방사선, 알칼리骨材 반응 등을 적출해 현재 기술수준에 의한 개략적인 수명예측을 실시 한 결과 주요 구조물은 약 80년 이상의 수명을 갖는 것으로 평가되었다.

3. Phase-III 종합평가(1993~95)

장수명화 시나리오의 확립 등 종합평가를 한다.■