

《기술보고》

고리원자력발전소 1호기 운전실적 및 전망

정 보 헌

한국전력주식회사 고리 원자력 본부  
(1978. 11. 9)

1. 개 요

고리원자력 발전소 제 1 호기는 1970년 9월 착공하여 1978년 4월 13일 최종적 사용전 검사를 완료 4월 29일 정부에 사용 개시 신고를 하므로써 한국 최초로 원자력 발전소가 상업운전을 개시하게 되었다.

착공 후 약 92개월(7년 8개월)이란 긴 세월동안 건설, 시운전기간을 거치면서 여러 가지 문제점도 많이 부딪혔으나, 계약자와 협력 최선의 노력을 경주하여 상업운전까지 이르게 된 것이다.

본래에는 제 1 호기가 75년 12월에 완공할 계획이었던 것이 계획보다 약 2년반이 지연되었는데 이는 73년의 석유 파동으로 인한 물가상승, 영국산업분쟁 등으로 인한 자재공급 지연이 그 중요한 원인이 되었다.

여기 시운전 경험과 상업운전 이후 지난 10월말 현재의 운전현황을 개설하고자 한다.

2. 고리 1호기의 설비개요

고리 1호기는 전기출력 587 MW의 가압경수형 원자로로서 2 Loop로 되어 있다. 주요 사양은 표 1과 같다.

3. 시운전 경과

3.1. 개 요

고리 1호기의 시운전은 크게 다음과 같이 세 단계로 구분하여 시행하였다.

1) 설치시험 (Construction Test)

단위기기 또는 설비의 설치완료 후 점검, 확인, 세정, 수압시험, 조정 및 최초의 작동 시험을 포함한다.

2) 기능 시험 (Functional Test)

상온 및 고온기능 시험이 있으며 단위기기를 상온 또는 정상운전 상태조건에서 설계기능을 확인하는 시험

표 1. 주 요 사 양

기 기 명	항 목	사 양
원 자 로	형 식	가압수형, 경수로
	열 출 력	1723. 5 MWth
	연 료	저농축 우라늄(UO <sub>2</sub> )
	초기장하연료량	약 48 ton
	제 어 방 식	화학 및 제어봉 제어
대 수	1대	
원자로계통	루 프 수	2개
	압 력	154 Bar
	평 균 온 도	286°C~301°C
	냉 각 재 펴 프	2대
	가 압 기	1대
	증 기 발 생 기	2대
터 빈	형 식	TC-4F45
	출 력	587 MW
	회 전 수	1, 800 rpm
	증기조건 온도	286°C~267°C
	" 압력	69Bar~51 Bar
발 전 기	형 식	3상회전 자계형 (수소냉각)
	정 격 용 량	700 MVA
	대 수	1대
	주 파 수	60 Hz
	역 율	85%

이며 또한 종합적인 계통으로서의 운전, 조정, 교정 시험과 핵연료 장전을 포함한다.

3) 운전 시험

초임계로 부터 전체 발전소를 운전하면서 하는 시험으로써 노물리시험, 과도운전특성시험, 최종 설정치 확인 및 성능시험 등 출력운전 시험을 포함한다.

고리 1호기 시운전에 대비하여 74년 8월 1일 고리원자력건설사무소 기구내에 시운전반을 조직하고, 1호기 인원중 해외실무 훈련을 마친 요원들을 중심으로 구성하여, 현장 교육 및 시운전에 필요한 각종 시험 절차서 및 운전절차서를 작성하기 시작하였으며, 1년간의 현장 교육 후 본격적으로 각종 시험 절차서 및 운전 지침서를 작성하였고 76년 9월 15일 발전과, 기술과, 보수과, 사무과, 공무과의 5개과로 구성된 발전소 기구발족과 함께 고온 기능시험, 핵연료장전 등 기능시험의 마지막단계 및 본격적인 운전 시험을 착수하게 되었다. 기능시험과 운전 시험에 필요한 세부 시험 절차서만도 144종으로써 참고자료 부족, 작성경험 부족, 훈련된 요원부족 및 계약자측으로부터의 기본적인 지침서 입수 지연등애로를 겪었으나 모두 시험공정에 지장이 없이 우리의 힘으로 작성하였다.

시운전 과정중의 조직, 시험 절차서의 작성, 검토, 승인 개정방법, 단기 시운전 계획, 설비 인제인수, 작업허가, 꼬리표발행, 시운전상 결합 보고 및 처리, 시험준비 및 시행, 시운전 중의 기록등을 규정한 모든 세부 시운전 시행지침으로서 SPAR Manual (Startup Program Administrative Requirements)를 사용하였다. 그림 1은 고리 1호기의 시운전 주요 공정을 보여 주고 있다.

3.2. 설치 시험

설치시험의 목적은 구조물, 기기 및 계통 등이 해당 설치 도면과 Codes and Standards에 따라 설치되었는가를 점검하고 올바르게 동작하는가를 확인하여 기능 및 운전시험에 대비키 위한 것으로서 압력시험, 세척작업, 전기공급계통 점검, 계기점검 및 예비작동 시험을 포

함한다.

이와 같은 설치 시험은 전계통의 설치가 완료되지 않더라도 완료된 부분에 대한 부분적인 시험을 할 수 있으나, 상온수압 시험에 필요한 계통을 우선적으로 수행하였으며, 주급수 계통은 핵연료, 장전후 까지도 세척작업을 계속하였다.

1) 세척작업(Flushing and Hand Cleaning)

배관 및 설비의 설치가 완료된 후 계통의 펌프 또는 임시 펌프를 사용하여 각 계통의 정상운전유속 이상으로 탈염수를 통과시켜 배관벽에 부착된 이물질 또는 설치작업 후 남아 있는 찌꺼기들을 펌프흡입측에 설치한 여과기로 제거하기 위한 작업과 직경이 큰 용기와 배관은 충분한 유속으로 세척할 수 없으므로 탈염수, 세척용 결레, 아세톤 등을 사용하여 일일이 손으로 세척작업을 하였다. 또한 계기용 공기 및 소내보조공기계통과 수소계통은 소내보조 공기압축기 및 계기용 공기압축기에서 공급되는 공기를 사용하여 세척을 수행하였으며, 주요 계통의 세척 실적은 그림 2와 같다.

2) 압력 시험

압력 시험은 가압 시험과 수압 시험으로 나눌 수 있다.

공기 및 깨스 계통에는 건조한 질소를 사용하여 설계 압력의 1.1배인 시험압력까지 가압하여 최소 10분간 유

	76											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R C S	—											
C V C S	—											
S I S	—											
R H R	—											
Aux. F. W. S	—											
Primary Makeup Water Sys.	—											
Instrument & Service Air	—											
F. W. Sys	—											
C. C. W. S	—											

그림 2. 주요 계통 세척 실적표

시험항목	시험기간																																			
	1976												1977												1978											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. 원자로 압력용기 수압시험	—																																			
2. 상온 기능 시험	—																																			
3. 고온 기능 시험	—																																			
4. 핵연료 장전 시험	—																																			
5. 가압용기 부품을 세척	—																																			
6. 초임계 및 열충격 시험	—																																			
7. 열적충격 시험 및 연속 경격운전 시험	—																																			

그림 1. 고리 1호기 시운전 주요 공정표

계통별	시험시간																													
	1976												1977												1978					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
1. R.C.S	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
2. CVCS	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
3. SIS	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
4. RHR	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
5. Boric Acid System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
6. Boron Recovery System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
7. H.V.A.C	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
8. Chilled Water System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
9. Component Cooling Water System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
10. Component Cooling Sea Water System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
11. Liquid Waste disposal System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
12. Solid Waste disposal System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
13. Gaseous Waste disposal System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
14. Radiation Monitoring System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
15. Primary Sampling System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
16. Main Steam System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
17. Aux. Steam System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
18. Feed Water System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
19. Aux. Feed Water System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
20. Condensate System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
21. Aux. Cooling System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
22. Service Cooling System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
23. Electrical System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
24. Instrument & Station Air System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					
25. Fire Protection System	[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]												[Bar chart showing test periods]					

그림 3. 고리 1호기 계통별 상온 기능 시험 공정표(76. 3. 20-78. 2. 4)

지하고 비눗물로 누설 검사를 시행하는 가압시험(Pneumatic Pressure Test)을 행하였다.

그 외의 모든 유체계통에는 수압시험을 시행하였으며, 수압 시험펌프를 사용하여, 배관속의 유체를 설계 압력의 1.5배가 되는 시험 압력에서 최소 10분간 유지한 후 누설검사를 시행하였다. 종합적으로 1차 계통의 수압 시험을 76년 8월 23일, 2차 계통의 수압 시험을 76년 8월 30일 완료함으로써 고온기능 시험에 필수적인 계통에 대해서는 압력 시험을 완료하였다. 그외 2차 통보조계통에 대해서는 설치 및 세척이 완료되는 대로 압력시험을 시행하였다.

종합적인 계통으로서의 수압시험 결과 각 시험 압력에서 용접부 및 구조물에 대한 누설과 결함은 발견하지 못하여 이차측과 이차측의 고압 부분의 수밀(Leak Tightness)과 보전(Integrity)은 완전함을 확인하였고 수압시험 경계내 및 대상이 되는 접속부 즉 발브, 플랜지 및 휘팅(Fitting) 등에서 발견된 누설에 대해서는 시험 후 수리조치하였다.

3.3. 기능 시험

개별적인 기기, 설비 또는 계통으로서 설치 시험이 완료되는 대로 기능시험을 수행하였다. 기능 시험은 상

온기능 시험과 고온기능 시험으로 구분하여 핵연료 장전전에 안전성에 관계되는 모든 기기 및 계통의 기능을 확인하는 가동전 검사로서 구체적으로 다음과 같은 목적을 가지고 시행된다.

- 1) 발전소 설계의 적합성 확인
- 2) 설치 공사가 설계와 일치여부 확인
- 3) 기기 및 설비가 가상 사고 및 이상 동작에 대한 응답이 적절한가 여부 확인
- 4) 발전소 운전 및 비상운전 절차의 적합성 확인
- 5) 발전소 요원에 대한 발전소 운전 경험 취득

기능 시험에 대비하여 보조 보일러의 운전개시와 더불어 76년 1월 16일부터 부분적인 운전원의 교대 근무가 시작되었고 부분적으로 상온기능 시험이 진행됨에 따라 76년 4월 6일부터 정상적인 24시간 교대 근무를 시작하였다.

(1) 상온 기능 시험(Cold Functional Test: CFT)

그림 3에 고리 1호기의 계통별 상온 기능 시험 공정표를 표시하였다. 본 공정표에서 보는 바와 같이 대부분의 상온 기능 시험이 76년 하반기와 77년 상반기에 시행되었으며, 특히 핵연료 장전에 필수적인 기기설비 및 계통의 시험 완료 여부는 핵연료 장전전의 QAR

표 2. 고온 기능 시험 항목

시험항목
1. RCS Heatup
2. RCS HFT
3. RCS Cooldown
4. CVCS HFT
5. SI HFT
6. RHR HFT
7. Sample System Print HFT
8. Stem Dump Control HFT
9. Incore Thermo and RTD Calib. (Post-Load).
10. T/G Startup Sequence and Test Procedure
11. HFT Cond. Air Removal System
12. Aur. FDW HFT
13. HFT S/G Blowdown
14. HFT T/G Sampling
15. HFT Main Steam
16. Secondary Chemical Treat
17. HFT TG Plant Drain
18. Prerequisite List of HFT
19. Hot Shutdown Remote Capabilities
20. Hot Functional Sequencing Document.

(Quality Assurance Release)에 의하여 확인되었으나 본 공정표에서는 각 계통의 모든 절차서가 완결된 시험을 기준으로 하였으므로 실제 보다는 장기간 소요된 것으로 나타나고 있다.

(2) 고온 기능 시험(Hot Functional Test: HFT)

76년 12월 24일 냉각제펌프 'A'와 'B'의 운전 시험을 마치고 고온 기능 시험을 위한 원자로 냉각수 계통의 가열을 시작하였다.

고온 기능 시험은 핵연료 장전전에 냉각제펌프 2대의 기계적인 에너지로 냉각제를 가열하여 정상운전 압력 및 온도를 유지하면서 냉각제 계통 및 주요 보조기 계통의 기기 및 설비가 설계대로 동작 및 제어되며, 종합적인 계통으로서의 실제 기능을 확인하는 동시에 펌프에 의한 열만으로 증기 발생기에서 증기를 발생하여 최초로 터빈발전기를 정격 속도로 회전시키고 또한 가능한 한 계통에 병입시켜 터빈발전기 수증기 계통 및 증기펌프 계통 등의 기능을 점검하기 위한 것이다.

고리 1호기는 76년 12월 25일부터 원자로 냉각수 계통의 가열을 시작하여 단계별로 가열 및 가압하면서 필요한 시험 및 점검을 하던 중 화학 및 체제제어 계통(CVCS)의 3대의 충전 펌프에 폴란자결합 및 모터베

어링 소손으로 77년 1월 13일 일단 고온 기능 시험을 중단하고 서서히 냉각시켰다.

77년 1월 26일 충전 펌프에 수리가 완료되고 그동안 발견된 벨브누설 등 잡다한 결함을 수리보완하여 77년 1월 30일 또 다시 원자로 냉각수 계통의 가열을 시작하여 77년 2월 1일 정상 운전 온도(286°C)와 압력 154 Bar 에 도달하여 일차 계통의 고온 기능 시험 항목을 완료하였다.

증기펌프 고온 기능 시험 및 터빈발전기 기동 시험 등 2차 계통의 고온 기능 시험은 설치가 완료되지 않아 후에 실시되었다.

고온 기능 시험의 시험 항목을 표 2에 열거하였다.

(3) 격납용기 누설율 시험(Containment Vessel Integrated Leak Rate Test-ILRT)

고리 1호기 원자로 격납용기는 1973년 진조 후 보전성 시험을 실시 후 그 내압 강도가 인정되었다. 그 후 각종 관통부(Penetrations) 및 출입구의 추가 작업으로 핵연료 장전 이전에 누설율 시험을 통하여 가상 사고시 방사성 물질의 외부 유출이 없음이 입증되어야 한다.

고리 1호기의 격납용기의 설계 개요는 표 3과 같다. 1976년 10월 28일~11월 10일(약 13일)에 걸쳐 정부 검사관(과학기술처 원자력국)과 우리 회사 직원 및 계약자의 합동 시험반에 의하여 누설율 시험을 시행하였다

시험과정은 12 psig 에서 격납용기 내외부점검, 내압 시험압력 48.4 psig 까지 가압, 21.5 psig 에서 감압누설율 확인, 43 psig 에서 누설율 확인 시험 등의 순서로 시행하였으며, 그림 (4)에 그 과정을 표시하였다. 내압시험 압력 48.4 psig 에서 1시간 25분 내압시험 결

표 3. 고리 1호기 격납용기 설계 개요

형	태	원통형(상부 및 하부 : 반구)
재	질	Carbon Steel
설	계	38.7 psig
설	계	270°F
가	상	43 psig
사	고	
기	최	
대	압	
력		
진	장	228 ft 3 inch
내	경	105 ft
동	관	1 7/16 inch
판	두	
두	께	
께		
용	적	1.45×10 <sup>6</sup> ft <sup>3</sup>

표 4. 43 psig 누설율 시험 결과

공기중량분석(Mass Point Analysis)	0.054%/24hr
메시점기준분석(Point to Point Analysis)	0.041%/24hr
전시간기준분석(Total Time Analysis)	0.0551%/24hr

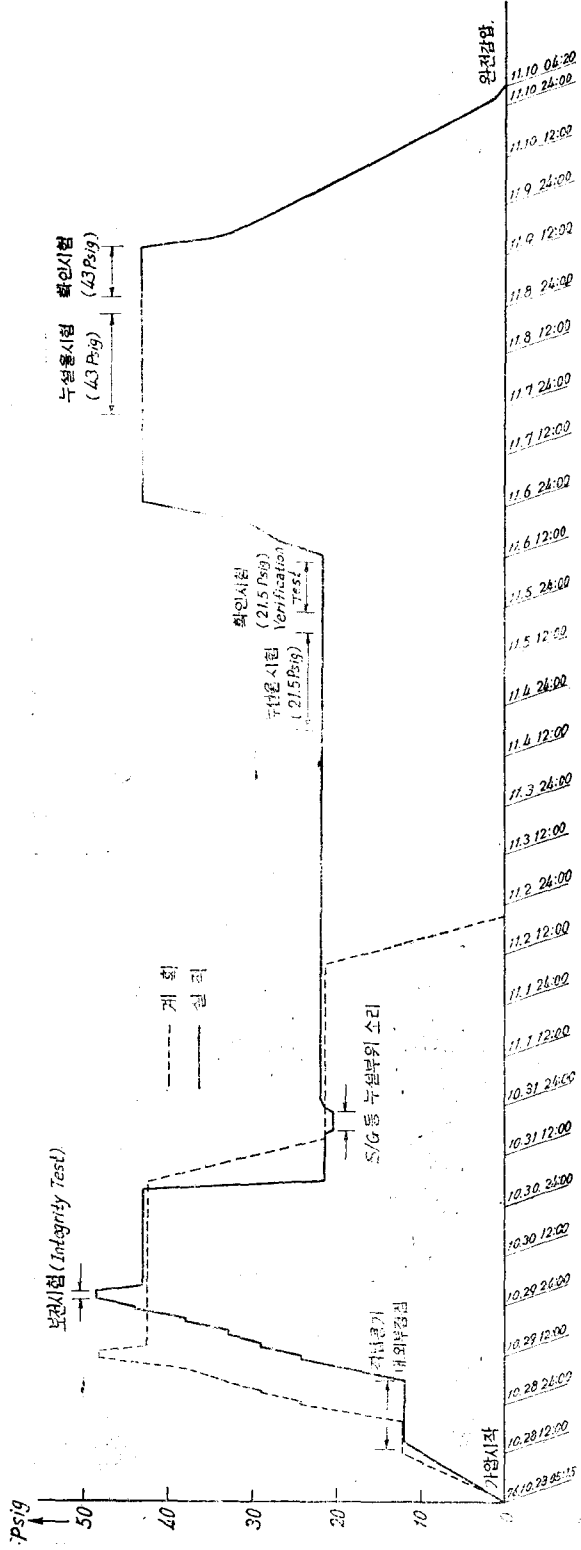


그림 4. 고리원자력 1호기 격납용기 누설률 시험

과 격납용기의 보전성이 확인되었고 최종 안전성 분석 보고서의 사고시 최대 압력 43 psig 에서 24시간 누설률 시험 결과를 세 가지 방법으로 계산한 결과 표 4와 같이 최종 안전성 분석 보고서의 사고 분석에서 사용한 0.1W/0/24hr 이내이었으며, 21.5 psig 에서의 누설률 시험 결과도 허용치 이내로서 성공적으로 완료되었다.

(4) 핵연료 장전(Initial Core Loading)

핵연료 장전 전 점검 절차(Prerequisite & Periodic Check off for Core Loading)에 따라 핵연료 장전에 필요한 모든 기능 시험의 완료 등 초기 조건을 확인하고 핵연료 장전에 따른 노냉각수 계통(RCS) 잔열 제거계통(RHRS) 노냉각수 제어계통(CVCS) 및 봉산주입수 계통(BAS) 등의 펌프 라인업(Line Up)을 완료한 후 사전에 일차 중성자원을 용접 취부한 2개 핵연료 중 하나인 B-32 핵연료를 77년 4월 23일 오후 핵연료 건물에서 격납용기 내로 이송함으로써 핵연료 장전작업은 시작되었다.

핵연료 장전절차서에 미리 정해진 순서에 따라 121개의 새연료를 77년 4월 26일 노심에 장전 완료함으로써 최초 핵연료 장전 후 만 72시간만에 핵연료 장전을 우리손으로 성공적으로 완료하였다.

핵연료 장전 전기간을 통하여 노냉각수의 붕소농도는 고리 1호기 기술운전 지침(Technical Specification)의 규정치인 2,100 ppm 이상을 유지하였으며, 핵연료 장전중의 미입계 중성자 증배율을 측정 감시하기 위하여 노내에 3개의 임시 BF<sub>3</sub> 검출기와 2개의 노외선원영

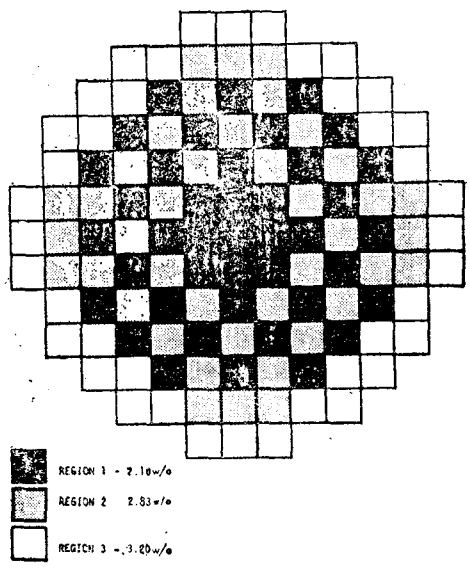


그림 5. 초기 노심 핵연료 배치

역 검출기(Source Range Detector)를 사용하였으며, 전기간을 통하여 핵연료 장전시 측정치가 이상하게 변화한 경우는 없었다. 그림 (5)에 고리 1호기의 노심내 핵연료 배치상태를 표시하였다.

### 3.4. 운전 시험

운전 시험의 목적은 다음과 같이 크게 다섯 가지로 나눌 수 있다.

1) 원자로 노물리 특성 시험을 통하여 핵설계의 타당성을 확인하는 동시에 원자로 안전성 분석의 타당성 및 보수성(Conservation)을 확인한다.

2) 원자로 및 증기발생기 수위 제어와 같은 자동제어 계통의 동작을 확인하고 부하변동시험, 부하상실 시험 등과 같은 과도시험(Transient Test)을 통하여 발전소 전체통이 설계대로 제어동작 되는가를 확인한다.

3) 단계별로 출력 상승 시험 운전을 통하여 종합적인 발전소로서의 각 계통의 상호 운전 상태를 점검 문제점을 발견하여 수리 보완한다.

4) 원자로 정상 및 비정상 상태에서의 각종 계측기의 반응을 확인하고 자료를 수집하여 계기의 교정 및 설정치를 확인한다.

5) 발전소 기동, 정상 운전, 정지 및 가상사고 시험 등을 통하여 발전소의 정상 및 비정상 운전 절차의 적합성을 확인하고 또한 발전소 요원의 운전 경험을 쌓는다.

초임계 및 출력 운전 시험은 NSSS Startup Sequence에 따라 시행하였으며, 영출력노물리 시험, 출력중 노물리 시험, 운전제어계통 시험, 과도 시험, 방사선 준위 측정시험 및 인수 시험 등을 포함한다. 그림 6에 핵연료 장전부터 100시간 연속 운전 시험 후 상업운전까지의 시운전 과정에 대한 이력을 보여 주고 있다.

#### (1) 초임계 시험(Initial Criticality)

핵연료 장전후에 만이 시행가능한 제어봉강하 시험, 제어봉 위치 지시제(Rod Position Indication) 기능 시험, 노내핵 계측계통 기능 시험 등 핵연료 장전 후 시험과 핵연료 장전에 직접 필요치 않았던 보조 계통 및 기시행한 기능 시험 중 미결 사항에 대한 시험을 완료하고 77년 6월 18일 제어봉을 인출하고 붕소농도를 희석하여 임계상태에 접근시킨 후 최종적으로 160 Step에 있던 Control Bank D를 5step씩 인출하여 1977년 6월 19일 17:40에 190 step에서 극적으로 초임계에 도달하여 세계에서 21번째 원자력 발전국이 되었다. 초임계후 바로 예비영출력 시험을 시행하여 핵연료가 설계대로 장전되었음을 확인하고 최소 안정성을 확인한 후 2차 계통 시운전 및 최초 송전 시험에 돌입하였다.

#### (2) 초송전(Initial Synchronization)

공기 촉진 협정의 주요 목표 중의 하나인 77년 6월 30일 내 10% 송전을 위하여 터빈 발전기 측과 2차 계통의 최종 점검 후 터빈 회전시험 및 계통 병입을 시도하였으나 수차에 걸쳐 원자로 정지와 터빈발전기 정지 끝에 77년 6월 26일 최초로 계통 병입하였으나 10도분 채안되어 증기발생기 저수위로 정지되었으며, 77년 6월 28일 재차 계통 병입하였으나, 바로 증기발생기 고수위로 터빈 정지되었다.

77년 6월 30일 17:11 마침내 세번째로, 계통 병입하여 약 1시간 24분 정도 10% 이상으로 출력 운전하여 송전하였으며, 운전원이 수동으로 터빈 정지시킬 때까지 2시간 13분동안 계통운전을 지속하였다.

#### (3) 영출력 및 출력 시험

77년 7월 7일부터 77년 7월 12일에 걸쳐 예비 영출력에서 시행한 시험 항목에 대한 제시험과 나머지 영출력 시험을 포함한 정규 영출력 시험을 완료함으로써 50% 출력상승에 필요한 최소 요건이 만족됨을 확인하였다.

영출력 노물리 시험 결과 원자로 특성은 핵설계와 아주 잘 일치하였으며, 최종 안정성 분석 보고서에서 가정한 값들이 모두 여유있게 만족되고 있다.

출력상승중 복수관 누설, 주급수 펌프 케이싱균열 등 기기 결합에 대한 보완과 증기발생기 U관에 대한 일부 와류 탐상 검사(ECT) 및 증기발생기 내의 급수관 개조작업 등으로 출력시험이 지연되어 77년 12월 25일 30% 출력시험을 완료하고 78년 1월 6일 50% 출력 시험완료, 78년 2월 13일 75% 출력 시험 완료, 78년 2월 25일 90% 출력 시험 완료하고 78년 2월 27일 최초로 100% 전출력 운전에 도달하여 100% 출력 시험을 78년 3월 4일 완료하고 인수 시험을 위한 각 계통의 최종 점검 작업에 돌입하였다.

출력 시험 결과는 설계치와 매우 좋은 일치를 보여 주었으며, 가상 제어봉 일탈 및 제어봉낙하 시험 등을 통하여 모두 최종 안전성 분석 보고서 제한치 이내로 원자로의 안전성이 매우 만족스럽게 확인되었다.

#### (4) 인수 시험

100% 출력 시험을 완료함으로써 전 시운전 시험 과정을 마치고 계약에 의거 발전소를 인수키 위한 인수 시험이 다음 두 가지로 실시되었다.

첫째 100% 전출력에서 100시간 연속 운전 시험으로 신뢰성을 확인하는 동시에 발전소의 정미 전기 출력을 측정하는 100시간 시험과 둘째는 상기 100시간 운전 중 24시간 동안의 열출력과 전기 출력을 정밀 측정하여 열 소비율을 측정하는 24시간 시험이다. 인수 시험의 실행조건 및 시험방법, 결과 평가 방법을 협의하기 위하

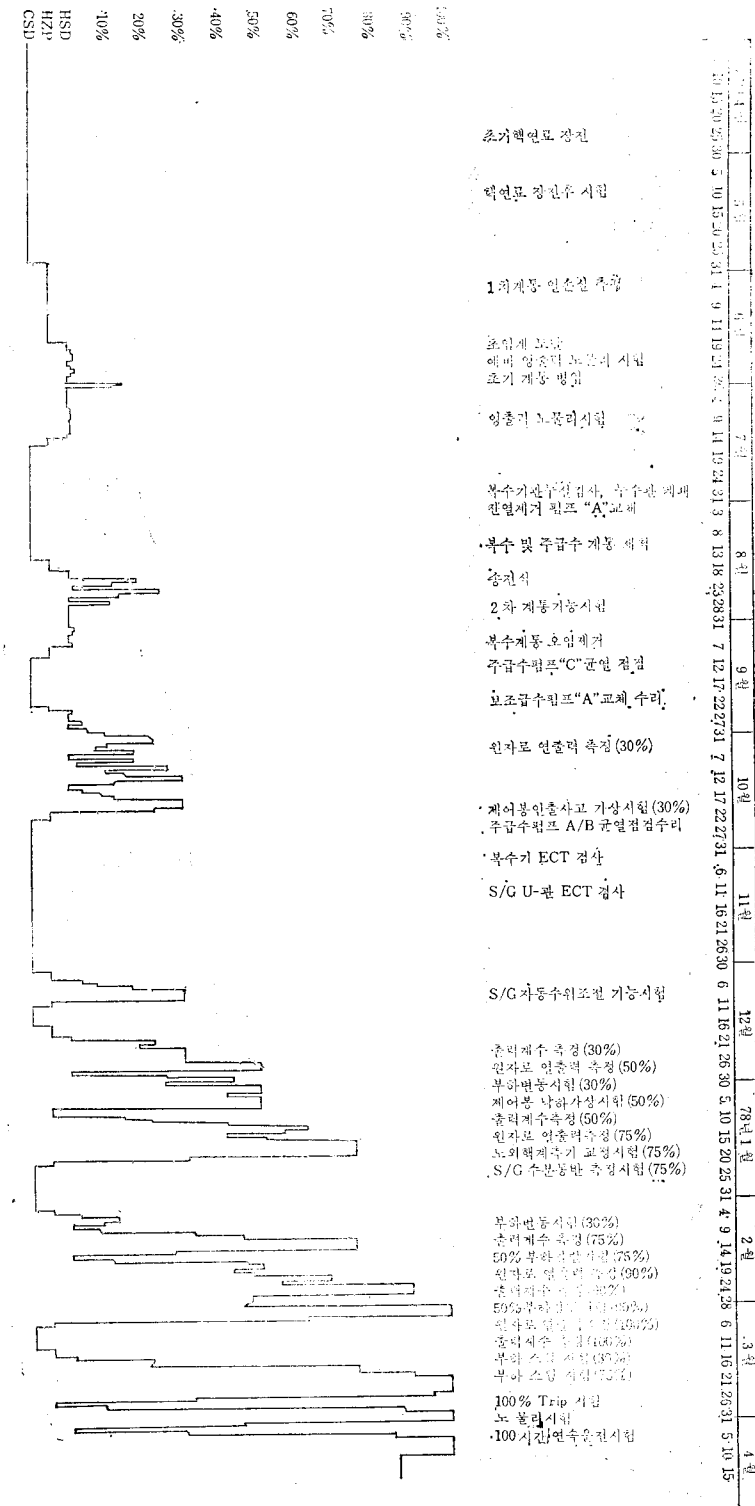


그림 6. 고리 1호기 노동리 시험 및 출력 시험

여 계약자와 수차 협의 끝에 78년 3월 31일 인수 시험 개시기로 합의되어 시행중 78년 4월 1일 주급수 유량 조정 발브가 결함이 발견되어 일단 시험을 중단하고 터빈을 수동 정지하였다.

78년 4월 3일 주급수 발브 수리완료하고 계통 병입하여 출력을 증발하여 78년 4월 5일 인수 시험을 재개하여 4월 9일 21:00 무사히 완료하였다.

인수 시험 결과는 100시간 연속 운전에 의한 신뢰성을 확인하였고 연소비율 시험 결과도 계약서의 보증치 이내였다. 상기 인수 시험 결과와 기기 불만족 사항(Punch List) 및 하자 보증에 대한 인수 조건에 합의하여 78년 4월 29일 조건부 인수하여 상업 운전을 개시하였다.

### 3.5. 주요 정지 및 기기 결함 내용

시운전 기간 중 일차 계통의 잔열 제거 펌프 결함 및 Diaphragm 발브 누설 등 결함을 발견하여 수리 보완하였으며, 2차 계통의 주급수 펌프 및 순환수 펌프 등 퇴진기기에 결함이 발견되어 수리 보완하였다. 그러나 이러한 기기 결함은 고리원자력 발전소만에 특유한 것은 아니며, 대규모 발전소 건설 시운전시 공통적으로 경험하는 문제이며, 외국의 원자력 발전소에서도 유사한 기기 결함 사고 등이 있었음은 주지의 사실이다. 초임계 이후 장기간에 걸친 발전소 정지를 가져온 주요 기기의 결함 및 보수 내용은 다음과 같다.

#### (1) 77년 7월 13일~77년 8월 17일 정지

영출력 시험을 완료하고 30% 출력 시험에 대비하여 2차 계통 기동을 위하여 순환 냉각수 펌프를 기동하여 복수기내 진공형성 중 복수기내의 염소 이온농도의 급격한 증가로 복수기관 누설여부 및 누설판 확인을 위하여 정지 후 36일간 정지하였으며, 이 기간동안의 주요 보수 및 항목은 다음과 같다.

##### (A) 복수기관 누설검사 및 누수판 폐쇄

수차에 걸친 검사 결과 132개의 복수관이 누설함을 발견하였는데 이는 복수기내의 공기 추출부위의 stainless steel 판이 해수에 부식되어 나타나는 현상이 판정되어 이들 stainless steel 판을 전부 폐쇄하고(1760개) 기타 Aluminum Brass 판중 누수하는 156개를 폐쇄하였다. 이는 전체판의 약 4.3%에 해당하는 것으로서 복수기의 성능에는 지장이 없으나 특히 해수에 약한 Stainless Steel 판을 사용한 점은 재질 선정에 문제가 있었던 것으로 추후 Cu-Ui 판으로 교체키 위하여 자재를 확보하였다.

##### (B) 잔열제거 펌프 교체

77년 7월 20일 잔열 제거 펌프 점검결과 임펠러, 축 및 베어링이 손상되었음을 발견하여 78년 8월 12일 2

대 모두 신품으로 교체 후 시험 결과 상태 양호하였으며, 손상원인은 펌프 베어링에의 윤활유유입상태 불량으로 추정되었다.

##### (C) 주요 시험 항목

발전기의 누설 시험, 터빈발전기의 베어링 점검, 질소 및 수소 공급 계통의 누설시험, 급수계통 및 복수계통의 세척 작업과 기사용 연료 저장조 및 냉각 계통의 세척 작업 등을 시행하였다.

#### (2) 77년 9월 6일~77년 9월 24일 정지

30% 출력 시험을 위하여 출력 운전 준비 증 증기발생기 및 복수 탱크 2대가 모두 해수 오염되어 발전소 정지함.

##### (A) 2차 계통 수질 오염 제거 및 증수 작업

2대의 복수저장 탱크를 모두 배수하고 세척한 후 다시 탈염수로 증수하였으며, 증기발생기도 배수시킨 후 재증수 하였고, 복수 계통은 세척 후 재순환하여 수질을 개선하였다. 오염 원인을 규명하기 위하여 복수기 누설 확인 시험을 하였으나 누설은 발견되지 않았으며, 순환수 계통의 복수기 배출구 측에서 복수 계통으로 해수가 오염된 것을 확인하고 수리하였다.

##### (B) 보조 급수 펌프 교체

77년 9월 14일 보조 급수 펌프 "A"를 해체 점검한 결과 펌프축 및 임펠러가 손상된 것을 발견하여 신품으로 교체하였다.

##### (C) 주급수 펌프 'C' 케이싱균열

78년 9월 14일 펌프의 케이싱에 균열이 발생한 것을 발견하고 해체하여 점검하고 신품 케이싱으로 교체 수리작업을 시행하여 77년 11월 30일 완료하였음.

#### (3) 77년 10월 20일~77년 12월 5일 정지

77년 10월 20일 30% 출력 노물리 시험 후 주급수 펌프 'A', 'B' 케이싱에 균열이 발생하여 발전 정지하였음.

##### (A) 주급수 펌프 케이싱 균열 수리

주급수 펌프 'A', 'B'의 케이싱에 펌프 'C'와 동일한 균열이 발생하여 모두 해체 점검하고 'A', 'B'는 현장에서 용접 수리키로 하여 작업 시행하였다. 점검 결과 배판내의 과도 응력, 공진현상, 수격현상, 지지물의 취약 등 몇 가지 원인으로 추정되어 임펠러의 베인(Vane)를 4개에서 7개로 개조하고 펌프당 2개의 지지대를 추가 설치하였으며 77년 12월 14일 펌프 수리 완료 하였음.

##### (B) 복수기관와류 탐상검사(Eddy Current Test)

77년 10월 29일부터 11월 18일에 걸쳐 복수기 'A' 'B'의 4242개의 판에 대한 와류 탐상검사(Eddy Current Test)를 시행한 결과 275개의 판에 결함이 발견되어



표 5. 상업 운전 이후 발전소 정지 내용 요약

월별	정지일시	복구일시	정지된시간	정 지 원 인	조 치 내 용	비고
5	13, 06 ; 13 16, 18 ; 20		84 ; 07	Gen. H <sub>2</sub> gas/eak 보수차	Bus duct flampe compounding	
	16, 18 ; 56 16, 21 ; 35		2 ; 39	급수 조절 밸브 고장	급수 조절 밸브 교정	
	17, 18 ; 20 16, 21 ; 47		3 ; 37	급수 조절 제어 계통 고장	"	
	17, 22 ; 36 18, 01 ; 15		2 ; 39	TBN GOV 계통 고장	GOV. Panel 2/3 Reset	
	29, 23 ; 58 30, 13 ; 02		13 ; 04	TBN 밀봉 증기 누설 수리	Orffice gasket 보수	
	31, 13 ; 36 31, 18 ; 08		4 ; 32	MFWP Motor 고장	MFWP 수리	
6	8, 18 ; 41 9, 07 ; 56		13 ; 15	Inverter 'D' OCR 소손	소손된 OCR 분리	
	20, 05 ; 40 20, 14 ; 55		9 ; 15	MFP Gland Seal Wtr Pp Trip	Pump 점검	
	22, 12 ; 40 28, 21 ; 28		152 ; 48	LP TBN Extraction Tomt 파손	Exponson Joint	
	30, 08 ; 12 30, 21 ; 28		13 ; 06	MFWP Gland Seal Wtr Pp Trip	G. S. W Pp Brg 수리	
7	9, 00 ; 38 10, 14 ; 51		38 ; 13	여자기 냉각기 수리	냉각기 Gasket 교체	
	16, 17 ; 24 17, 04 ; 52		11 ; 28	주증기차단 밸브 Solenoid 소손	Solenoid spare 부착	
8	2, 20 ; 24 3, 17 ; 55		21 ; 31	소내용 변압기접지 계전기 동작	소내용 변압기유 교체	
	6, 02 ; 40 7, 02 ; 22		23 ; 22	해수냉각수 Pump 고장	펌프 수리	
	21, 09 ; 48 21, 22 ; 31		12 ; 31	345KV 신울산 S/S 계전기 사고	신울산에 조치	
9	5, 22 ; 22 6, 06 ; 35		8 ; 13	XSW-IB Under Voltage 계전기 동작	fuse 교체	
	15, 02 ; 57 15, 19 ; 36		16 ; 39	MFP 'C' Thermal Over load Ry 동작	PCV-431A Valve 수리	
계			17			

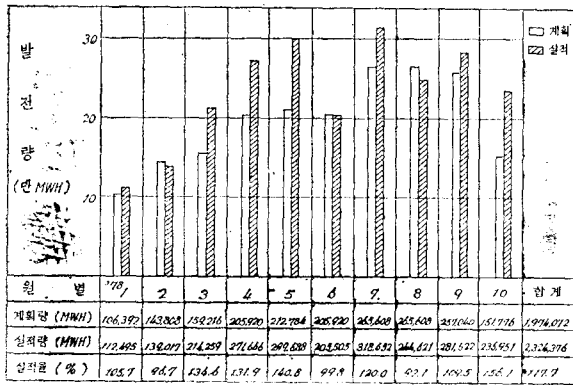


그림 7. 고리 1호기 발전량

폐쇄하였다. 기폐쇄된 복수기관 1916개를 합하여 총 2191개의 관(전체의 4.95%)를 폐쇄하였으나, 복수기 성능상 약 10.8%의 여유를 갖고 있으므로 큰 지장은 없으며 78년 10월 정기 보수시 신품 Al-Brass 및 Cu-Ni 판으로 교체할 계획이다.

(C) 증기발생기(S/G)관 와류 탐상검사(ECT)

증기발생기 U-관에 대한 기본 자료를 구하고 그간의 운전에서 따른 결함 여부를 확인하기 위하여 77년 11월 4일~11월 7일 걸쳐 S/G 'A' 'B'에 대하여 자기 451개관

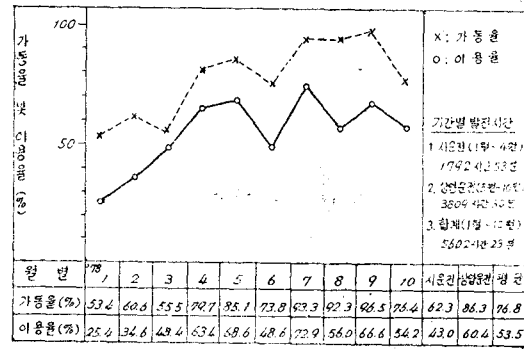


그림 8. 고리 1호기 가동률 및 이용률

(13%)씩 ECT 를 시행하였다. 검사 결과 Denting 또는 Permeability Indication 이 나타난 튜브수는 61개 이었으나 모두 허용 범위 이내로 양호하였으며, S/G ECT 와 동시에 Sludge 검사를 시행한 바 S/G 'A' Tube Sheet 위에는 1/4"-3/4", 'B'의 Tube Sheet 에는 1/2"-2"의 Sludge 가 누적되어 있음을 확인하였으나 이 정도는 양호한 것으로 판단되었다. 이와 관련하여 78년말 정기보수시에는 S/G의 전 U-관에 대한 ECT 를 시행할 계획이다.

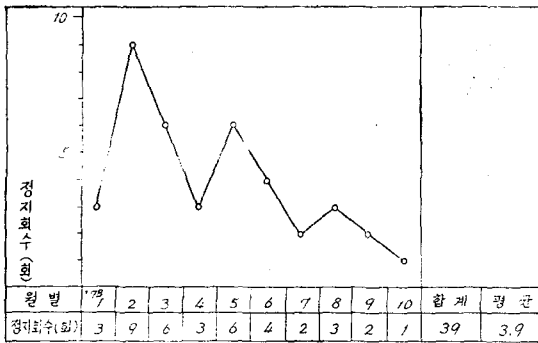


그림 9. 고리 1호기 정지 실적

(D) 증기발생기 급수관 개조

중전에는 증기발생기 상부로 주급수가 공급되는 급수관(Feed Ring)이 하부에 구멍이 뚫려 있어 이를 통하여 급수가 Plenum을 타고 밑으로 공급되어 U-관을 따라 상승되면서 가열되어 증기로 변환되도록 되어 있었다. 이 경우 급수가 중단되었다가 재개될 경우 찬물이 주입됨으로써 Steam Vapour가 Collaps되어 Water Hammer 등을 유발할 가능성이 크다.

이러한 위험성을 줄이기 위하여 하부 구멍을 용접하여 막고 상부에 J-튜브를 취부하여 급수가 흘러 넘어가도록 하여 급수 중단시에도 급수관내에는 급수가 차 있도록 급수관을 개조하였다.

77년 11월 9일부터 작업을 시행하던 중 77년 11월 15일 S/G 'B'의 급수관에 Crack이 생긴 것을 발견하고 Crack 발생 부분을 절단하고 신품 Ring으로 교체하였다.

(E) 순환수 펌프(Circulating Water Pump) 기아박스(gear box) 교체

고리 1호의 해수 냉각수 펌프는 2300마력 용량 4대로서 고속 모터와 저속 펌프를 감속 기아를 사용하여 연결한 바 설계 불량으로 진동이 심하고 기아 박스가 부서지는 등 결함이 발생하여 77년 11월 15일~77년 11월 24일간에 걸쳐 제 1 단계 보수조치로 4대의 기아 박스를 모두 신설계에 의한 질화표면 경화 처리한 신품 기아로 교체 완료하였으며, 현재까지 이상없이 운전되고 있다.

제 2 단계로 위의 신기아로 운전 상태를 점검한 후 필요시는 78년말 침탄 표면 처리된 개량 기아로 교체 예정이다.

4. 상업 운전 후 운전 현황

4.1. 운전 실적

78년 4월 29일 발전소를 인수하여 상업 운전을 개시

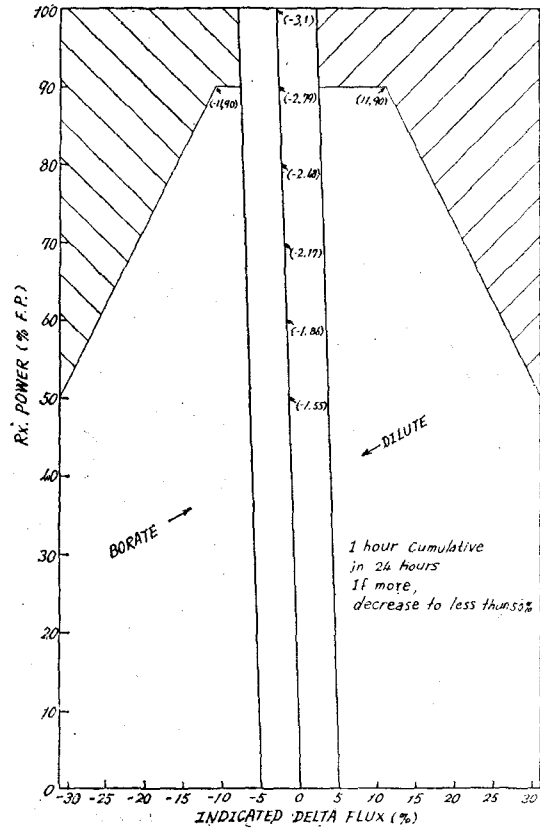


그림 10. Axial Offset Target Band

한 이래 발전 설비의 운전 상태가 점차 호전되어 가동률 향상으로 발전량은 78년 10월말 현재 78년 목표치인 2,135,520MWH 보다 약 8.8% 초과한 2,324,376MWH를 발전하였다. 그림 7 이용율은 53.5%를 기록하여 그림 8 당초 계획 40%를 훨씬 상회하는 실적을 보였다. 원래 상업 운전 초년도는 높은 이용율을 기대할 수 없는 안정기간(Shakedown)으로 미국에서도 평균 이용율이 40%(WASH-1139, 1974, 2)를 보아도 알 수 있다. 더우기 월별정지 통계(그림 9)에서 나타난 바와 같이 점차 정지 회수가 줄어 들고 있으며, 특히 정기보수를 위한 78년 10월 24일 계획 정지전까지 39일동안 연속운전 기록을 수립하였다.

발전소 정지 내용을 살펴 보면 2차 계통의 기기 결함이 대부분이고 오동작, 운전원 오조작 등의 원인이었으며, 안전성과 관련된 원자로 계통의 결함으로 인한 사고정지는 없었다. 표 5에 상업운전 이후의 정지내용을 요약했다. 시운전과 상업운전 전 기간을 통하여 총발전량은 2,395,842 MWH 이고 핵연료 누적 연소도는 6474 MWD/MTU 에 달하였다.

매월 시행되는 Flux Map 결과를 검토한 결과 노심의 이상 출력 분포 경향이 전혀 없으며, 10월의 Hot Channel Factor (Fa)는 1.804로 초기 start up 시의 1.982에 비하여 전체 flux 모양이 평평해 졌음을 알 수 있다. 핵연료의 결합 여부를 판단하기 위한  $I^{131}/I^{133}$  Ratio도 계속 추적하고 있는 바 안전된 경향을 보여 주고 있어 이상없는 것으로 판단된다.

운전의 제한 요소로서 안전성에 관계되는 것으로서는 핵연료를 보호하기 위하여 출력 증가율 시간당 5% 이내로 제한하고 있으며 출력 증감시 원자로 출력의 axial offset를 그림 10과 같은 Target band 내로 유지하고 있다. 그리고 장기간 고정부로 운전시에는 노심의 균일한 연소를 위하여 제어봉을 모두 뽑아 놓고 운전한다. 2차측 수질관리 또한 엄격한 기준에 따라 시행하고 있다.

급번 정기 보수시의 주요 보수 작업 및 시험은 표 6과 같다. 연말까지 전기 보수 완료한 후 1979년 이용율은 60%로 계획하고 있으며, 이에 의하여 계산한 결과 제 1차 핵연료 교체는 79년 10월경으로 예정되며, 이를 위하여 기본 계획 작성 및 사전준비 작업을 시행하고 있다.

**4.2. 방사선 안전 관리**

**1. 방사선 관리 기본 방침**

가. 불필요한 피폭을 최대한 억제 (As Low As Reasonably Achievable에 따라) 한다.

나. 10 CFR 20등 NRC 관계규정과 NCRP 및 ICRP의 권고 최대한 준용한다.

다. 판례 규제 조항이 상치하는 경우 보다 보수적인 규정 적용한다.

**2. 보건 물리 훈련**

가. 개개인의 수행업무에 따라 이에 상응하는 교육 실시한다.

나. 과장급 및 운전원은 보직 부여 즉시 40시간의 이론교육을 하고 방사선 관리요원은 보직 부여전 40시간

**표 6. 78년말 정기 보수시 주요 보수 및 시험 항목**

1. 증기 발생기 전 U-관 ECT 검사
2. 복수기 폐쇄판 교체 및 ECT 검사
3. 주급수 펌프 케이싱 (3) 교체
4. 원자로 냉각수 펌프 셀 점검
5. 순환수 펌프 기어박스 점검
6. 발전기 수소 밀봉 점검
7. 비상 디젤 발전기 분해 점검
8. 터빈베어링 점검
9. 소내 전원 제동기 점검

의 이론교육과 1개월의 현장 실습을 필하도록 한다.

**3. 방사선 피폭 선량 제한**

10 CFR 20의 체외 피폭 선량 제한치 및 공기중 수중 최대 허용 농도 제한치에 따른다.

**4. 방사선 구역 관리 설정**

발전소내 구역을 제한 구역(발전소 철책내), 비제한 구역(철책밖), 관리구역 및 비관리 구역으로 나누어 관리하고 있으며 소내에서 방사능도가 가장 높은 관리구역의 출입시는 반드시 방사선 작업 허가를 득하도록 하고 이 구역 출입은 Access Control Point를 통하여만 하도록 하고 있다. 방사선 작업 허가서는 각 작업장의 방사선 상태에 따라 휴대할 각종 계측기와 작업시간 제한 등 작업 중 유의 사항을 기재하고 있다.

**5. 환경 방사능 감시**

6개의 Monitoring post 및 환경 방사능 자료 분석을 통하여 고리 주변의 환경 방사능을 감시하고 있다.

**6. 의료 검사**

**가. 신체 검사**

X-ray 등 일반적인 신체 검사 외에 백혈구, 적혈구 측정 및 피부 검사를 부산 대학병원 또는 부산 침례병원에 의뢰하여 발전소 전 직원이 년 2회 실시하고 있다.

**나. Whole Body Counting**

Whole Body Counter를 78년 9월에 설치하여 Whole Body Counting을 실시하고 있으며, 앞으로 발전소 전 직원에 대한 보수 요원에 대해서는 년 2회, 기타 1차 계통 근무 직원에게 년 1회 정기적으로 실시 예정이다.

**다. Bio-assay 검사**

체내 피폭의 우려가 있는 경우에만 수시 실시할 계획으로 아직 과피폭 사고가 없어 실시 실적은 없다.

**7. 피폭 환자 치료 계획**

현재 국내에 피폭 환자 치료 병원이 없어 부속병원인 한일병원을 피폭 환자 치료 병원으로 육성할 계획으로 78년 15종의 치료 장비를 구매 조치하였으며, 79년중 43종의 치료 장비를 구매할 예정이다. 장기적으로 고리 2호기, 월성 원자력, 원자력 5, 6호기에 대비 울산에 한일병원 분원을 설치할 것을 검토중이며, 앞으로 의료진에 대한 해외 훈련도 실시할 것을 검토중에 있다.

**8. 직업 방사선 피폭 기록(78년 1월 1일~6월 30일)**

‘78년 상반기 중 10 CFR 20의 제한치 이상 피폭된 직원은 없었으며, 537명의 발전소 직원 중 대부분인 507명의 피폭선량은 100 MR 이하였다.

**4.3. 방사선 폐기물 관리**

**1. 교체 폐기물**

‘78년 1월 1일~9월 30일까지 교체 폐기물 발생량을

363드럼이다. 고리의 고체 폐기물 저장 능력은 약 5,000드럼으로서 향후 10년간은 폐기물 저장에 별문제 없겠으나 장기적인 고체 폐기물 처리에 대한 정부측의 방침이 조속히 결정되었으면 한다.

2. 액체 폐기물

가. 4개의 Liquid Monitoring System 및 시료 분석을 통하여 액체 폐기물 중 방사능도를 감시하고 있으며 '78년 1월 1일~9월 30일까지 액체 폐기물 방출시 각 동위원소별 함유량 분석 결과 10 CFR 20의 비제한구역에 대한 제한치의 1/100 이하였다.

나. 당초 폐기물 처리 시설 중 Waste Evaporator의 용량이 2 gpm이었으므로 부족한 것으로 검토되었으나 운전해 본 결과 정상운전시에는 별문제 없는 것으로 판명되었다. 그러나 여유를 갖기 위하여 Waste Evaporator의 용량증강도 검토 중에 있다.

3. 기체 폐기물

4개의 atmospheric Monitoring System을 이용 기체 폐기물 중 방사능도 감시하고 있으며, '78년 중 기체 폐기물 방출 실적은 없었다.

4.4. 설비 개선

고리 1호기는 1968년 10월 미국 공업 규역을 기준으로 계약설계된 발전소로 건설 및 시운전 중 설비상 미비점을 발견하고 이를 개선하여 신뢰성 있는 발전소로 만들고져 77년 8월 고리 1호기 설비 개선 계획을 착수하였다.

이 계획은 77년부터 장기에 걸쳐 년차적으로 추진하고 있으며, 총 33건에 약 56억원의 예산이 소요되는 방대한 계획이다. 이와 같이 개선될 경우 설비는 어느 정도 이상의 신뢰도를 가진 발전소가 될 것이다.

년도별 중요 설비개선 사항을 보면 다음 표 7과 같다.

5. 전 망

지금은 운전 초기로 어느 시기까지(발전소 운전 후

표 7. 년도별 주요 설비 개선 사항

년도별	주요항목
77년도	1. 복수기 Hot Well에 Na 분석기 설치 2. 지진 감지 장치 설치 3. 복수기 와류 탐상기 구입 사용 4. 핵연료 검사용 수중 텔레비전 설치
78년도	1. 순수 제조설비 증설 2. 일차 계통 밸브류 신뢰성 검토 및 교체 3. 증기 발생기 와류 탐상기 구입 사용 4. 질소 공급 계통 옥외 이설
79년도	1. 고방사능 구역 감시용 텔레비전 설치 장 기 1. 복수 정화 장치(Polishing Plant) 2. Taprogge 계통 설치

약 2-3년 후)는 기기들의 안정(Shakedown)이 필요하므로 돌발사고 발생가능성을 배제할 수 없으나 시운전 기간 중 미비점을 많이 보완하였으며 현재도 설비개선 계획에 의거 계속 보완중에 있으므로 설비 이용율의 향상은 물론 설비상의 문제점으로 인한 발전소 정지율은 급감할 것으로 예상된다.

한편 고리 1호기에서는 다른 화력 발전소와는 달리 운전 교대 근무를 5개조로 하고 있어 4개조가 운전을 하는동안 나머지 1조는 운전 교육을 실시하여 운전 기술을 계속 연마하고 있으며 더우기 79년 6월말경 도입 운영 예정인 원자력 발전소용 모의 제어반이 가동된 후에는 운전원들의 운전 기술향상에 박차를 가하게 될 것이다. 따라서 앞으로 약 1년내에 돌발사고를 제외하고는 안전하고 안정된 원자력 발전소로 운전이 가능할 것으로 기대한다.