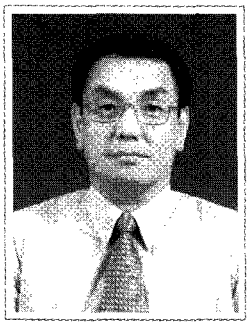
울진 2호기 계획 예방 정비 33일 9시간

"20일대 정비 수행 목표"

정 대 헌
한국수력원자력(주) 울진원자력본부
제1발전소장



울진 원자력 2호기가 지난 5월 15일 00 : 00부터 계획 예방 정비를 시작하여 6월 17일 09시 40분 계통에 병입함으로써, 지난 1998년 울진 2호기가 수립한 바 있는 33일 21시간의 종전 기록을 11시간 앞당긴 또 한번의 신기록 수립과 함께 향후 원자력발전소 계획 예방 정비 20일대 수행에 대한 가능성을 보여주었다.

금년 1월 주증기 격리 밸브 부분 닫힘 시험중 논리 회로 오작동으로 인한 원자로 정지 및 5월 초 대량의 새우떼 유입에 따른 원자로 정지를 경험한 울진 1발전소는 금년도 무정지 운전과 발전량 목표 달성을 위해 노력하고 있던 전직원의 사기를 저하시켰으나, 금번 42일로 계획되었던 계획 예방 정비 기간을 8일 14시간 단축함으로써 금년도 발전량 목표를 무사히 달성할 수 있겠다는 자신감을 갖게 되었다.

금번 울진 원자력 2호기 제10차 계획 예방 정비를 성공적으로 수행하기 위하여 발전소에서 취한 사전 준비 사항, 주요 작업 사항 및 주요 작업 공정 단축 요인을 살펴본다.

사전 준비 사항

1. 사전 준비 회의 개최

계획 예방 정비 착수 4개월 전부터 매월 1회, 1개월 전부터는 매주 1회 사전 준비 회의를 개최, 세부 작업 항목 및 병행 가능 작업 검토를 통해 주공정을 선정하였으며, 세부 작업 항목 검토시 필요 자재의 보유 여부 및 적기 확보 대책을 마련하였다.

2. 가동중 정비 물량 확대

저압 전동기 및 펌프 분해 점검, 밸브 · 환기 계통 팬 등 발전소 안전 및 안정 운전에 영향을 주지 않고 가동중 정비가 가능한 기기를 지속적으로 발굴하여 가동중 정비 물량을 확대함으로써 계획 예방 정비 물량을 감소시켰다.

3. 운전 및 정비 경험 사례 교육

인적 실수로 인한 재작업 발생을 사전에 방지하고, 작업간 간섭 사항 조정 등을 용이하게 하기 위하여 국내 타원전 및 해외 원전의 운전 및 정비 경험 사례, 그 동안 수행한 계획 예방 정비 경험 사례를 교육하였다.

4. 작업 의뢰서 사전 발급 및 계통 배열 목록 작성

계획 예방 정비 착수 3개월 전 모든 작업 사항에 대한 작업 의뢰서를 발급하여 1개월 전까지 운전 부서

및 정비 부서에서 작업에 필요한 계통 배열 목록 작성, 작업 가능 시기 및 안전성 검토를 사전에 합동으로 수행함으로써 공정 지연 요소를 차단하도록 하였다.

5. 특수 작업대 고안 및 제작

원전 연료 집합체 상단 고정체 교체 작업 검토 결과, 원전 연료 인출 작업중에는 상단 고정체 교체 작업을 위해 사용후 연료 취급 기중기 및 보조 크레인의 사용이 불가할 것으로 판단되어, 별도의 연료 집합체 상단 고정체 교체 작업용 호이스트 및 특수 작업대를 고안, 제작하여 병행 작업이 가능하도록 준비하였다.

6. Mock-up 훈련 실시

증기발생기 와전류 탐상 시험과 증기발생기 2차측 이물질 제거 작업을 위한 사전 Mock-up 훈련을 실시하여 숙달함으로써, 장비 설치 및 제거, 조작, 관막음 작업 시간을 최소화하여 방사선 피폭량 감소를 추구하였다. 특히 증기발생기 2차측 이물질 제거 작업에 사용된 CECIL-2 장비는 미국 Forster-Miller사로부터 구입한 신장비로서 공급사의 지원하에 장비 설치 및 사용 방법 숙달을 위한 Mock-up 훈련을 일주일간 실시하였다.

7. 주요 공정 업무 지원팀 구성

원자로 냉각재 감압 및 배수, 원전 연료 재장전 기중기 점검, 연료 교체 및 상단 고정체 교체, 충수 및 배기, 특성 시험 및 정주기 시험 등 중요하고 복잡한 작업 공정을 원활히 수행하고, 문제점 발생시 신속히 조치할 수 있도록 관련 부서의 담당 직원들로 공정별 업무 지원팀을 구성하였다.

주요 작업 사항

1. 원전 연료 교체 장전

10주기 운전중 연소한 157다발의 연료를 인출하여 사용후 연료 저장조로 이송한 후, 재장전 대상 60다발에 대한 초음파 검사, 육안 검사 및 연료 상단 고정체를 교체하고, 신연료 60다발과 사용후 연료 저장조에 저장중이던 37다발을 포함하여 157다발을 11주기 노심 설계에 따라 재장전하였다.

2. 원전 연료 상단 고정체 교체 작업

Inconel-600으로 제작된 원전 연료 상단 고정체 스프링 고정 나사의 운전중 손상 사례가 발견되어, 동일 사례 재발 방지를 위하여 재장전 대상 연료의 상단 고정체 스프링 고정 나사를 Inconel-718로 제작하여 총 81다발 연료 상단 고정체를 교체하였다.

상단 고정체 교체 작업중 3개의 연료 다발에서 상단 고정체 스프링 고정 나사가 손상된 것을 발견하였으며, 이 중 1개는 제 위치에 있지 않아 이를 찾기 위해 Task Force Team을 운영하여 유실된 나사를 회수하였다.

3. 원자로 용기 자동 초음파 검사

울진 2호기 제2주기 가동중 검사 계획(매 10년다 수립)에 따라 원자로 용기 자동 초음파 검사 및 원자로 내부 육안 검사를 수행하였으며, 결함은 발견되지 않았다.

금번 원자로 용기 자동 초음파 검사에 사용한 장비는 미국 웨스팅하우스가 개발한 최신 로봇인 SUPREEM으로서, 검사 수행에 만전을 기하기 위하여 지난 2월 웨스팅하우스 직원의 기술 지원을 받으며 사전에 장비 점검 및 사용 방법을 익혔다.

4. 증기발생기 전열관 건전성 확인 및 관막음

증기발생기 전열관의 건전성을 확인하기 위하여 전체 증기발생기 전열관(3,330개/증기발생기)의 50%에 대해 와전류 탐상 검사 기법(ECT)을 이용, 반장 검사(Half-scan)를 수행하고, 추가로 고온관 확관부 100%, 저온관 확관부 10% 및 슬리브 설치관 33%에 대해 회전 탐촉자 기술(MRPC)을 적용한 정밀 검사를 수행하였다.

검사 결과 정비 기준을 초과하여 정비가 필요한 전열관은 없었으나, 발전소 운전중 증기발생기 전열관을 통한 누설 가능성을 최대한 억제하고자, 정밀 검사 결과를 토대로 13개 전열관(증기발생기 No.1 4개

및 증기발생기 No.2 9개)을 예방 관막음하였다.

5. 증기발생기 2차측 이물질 제거

이물질로부터 증기발생기 전열관 손상 방지를 위하여 증기발생기 2차측 전열관 하단부에 대한 슬러지 제거 작업을 수행하였다. 기존 장비인 Booy Clean 대신 새로 구입한 신장비 CECIL-2를 사용하여 침적된 이물질의 위치를 명확하게 확인하고, 보다 높은 압력(350kg/cm^2)으로 증기발생기 전열관 쉬트에 침적된 슬러지를 제거하였다.

6. 저압 터빈 점검 및 결함 동익 교체

저압 터빈 동익 및 내부 구조물에 대한 건전성 확인을 위해 저압 터빈 3대를 완전 분해하고, 동익에 대해 초음파 탐상 검사(UT) 및 자분 탐상 시험(MT)을 수행하였으며, 검사 결과 LP-2 3단 전방 동익 1개의 하부 삽입 부분(root)에 균열이 발견되어 신품 동익으로 교체하였다.

7. 발전기 부하 차단기 정밀 점검 및 부품 교체

발전기 부하 차단기(Generator Load Breaker Switch)는 발전기와 주변압기 사이에 설치된 차단기로서, 공급사의 권고에 따라 발전소 상업 운전 이래 처음으로 정밀 점검을 수행하였다.

금번 정밀 점검시에는 부하 차단기 공급사인 Alstom사의 전문가가 입회하여 완전 분해한 후 주요 부품에 대한 정밀 점검을 수행하면서 필요한 부품을 교체하였다.

8. 원자로 냉각재 펌프 전동기 교체

12년간 운전한 후 분해 점검을 수행하라는 제작사의 지침에 따라, 매 계획 예방 정비 기간중 원자로 냉각 재펌프 전동기를 한 대씩 교체하고 있다. 전동기 분해 점검에는 50일 이상의 장기간이 소요되기 때문에, 울진 1발전소에서는 예비 전동기 1대를 구입하여 정상 운전중에 예비로 사용하고 있는 전동기를 완전 분해 점검한 후, 계획 예방 정비 기간에는 교체 작업만 수행한다.

금번에는 울진 2호기 원자로 냉각재 펌프 1번 전동기를 교체하였으며, 교체된 전동기는 곧 바로 분해 점검을 시작하여 금년 10월 초에 착수하는 울진 1호기 계획 예방 정비시 1호기 원자로 냉각재 펌프 3번 전동기와 교체할 계획이다.

9. 설계 변경 작업

운전 및 정비 경험 피드백, 타원전 및 해외 원전 설비 개선 사례를 검토하여, 울진 2호기의 운전 및 정비 편이성 제공, 설비 성능 개선, 안전성 증진을 위한 설계 변경 작업을 수행하였으며, 주요 설계 변경 작업은 주급수 제어 밸브 솔레노이드 이중화, 터빈 진동 감시 설비 개선, 울진 2호기 취수구 트레블링 스크린 추가 설치 등으로서 총39건을 작업하였다.

주요 공정 단축 내용

1. 연료 다발 상단 고정체 교체 작업 사전 수행

울진 2호기 11주기 노심 설계는 신연료 60다발, 10주기에 장전되었던 연료 60다발과 이전 주기에 연소된 후 사용후 연료 저장조에 보관중이던 연료 37다발을 장전하도록 되어 있었다.

사용후 연료 저장조에 보관중이던 연료 37다발 중 상단 고정체 교체가 필요한 21다발을 계획 예방 정비 착수 이전 사용후 연료 저장조에서 교체하면서 경험을 축적하고, 특수 작업대 고안 및 제작 활용으로 처음에는 연료 한 다발의 상단 고정체 교체에 4시간이 소요되었으나, 계획 예방 정비 기간중에는 2시간만에 교체할 수 있었으며, 핵연료 인출 공정과 병행함으로써 주공정을 177시간 단축하였다.

2. 정전 작업 시기 변경

주공정으로 계획되어 있던 6.6KV 교류 전원 계통의 정전 작업을 원자로 분해 작업 공정과 병행하여 수행함으로써 주공정을 4시간 단축하였다. 이는 연료봉 결함으로 계통 내 방사능 준위가 증가되어 원자로 헤드 개방 시기가 지연됨에 따라 가능하였다.

3. 노즐 댐 제거 및 M/W 설치 부공정으로 전환

증기발생기 전열관 건전성 검사를 위해 설치한 노즐 댐 제거 작업이 주공정 작업으로 계획되어 있었으나, 증기발생기 전열관 건전성 검사와 안전성 관련 모터 구동 밸브 동적 시험 조기 완료에 따라, 연료 상단 고정체 교체 작업과 병행하여 수행하는 부공정으로 전환, 주공정을 16시간 단축하였다.

4. 원자로 분해 및 조립 작업 근무 형태 변경

원자로 분해 및 조립 공정은 두 개의 공정 수행에 3조 2교대로 총 120시간이 소요될 것으로 계획하였으나, 원자로 용기 헤드 스터드 볼트 58개 중 1개가 고착되어 분해 공정이 지연될 것으로 판단되어, 근무 형태를 3조 3교대로 변경하여 작업 대기 시간 및 인수 인계 시간을 최소화한 결과, 원자로 분해 작업은 계획된 시간을 2.5시간 초과하였으나, 원자로 조립 공정은 세부 작업 사항을 면밀히 검토하여 공정 일부를 부대 공정으로 전환하면서 오히려 10.4시간을 단축하여, 원자로 분해 및 조립 작업에 총112시간이 소요되었다.

5. 제어봉 집합체 육안 점검 및 VTR 녹화 부공정으로 전환

사용후 연료 저장조에서 수행되는 연료 집합체 육안 점검 및 VTR 녹화 작업은 사용후 연료 취급 기중기를 사용함에 따라 주공정으로 관리하여 왔으나, 검토 결과 연료 다발 상단 고정체 교체를 위해 개발한 특수 작업대를 사용하여 점검이 가능함을 확인하고, 연료 이송 작업과 병행하여 제어봉 집합체 육안 점검 및 VTR 녹화 작업을 부공정으로 전환, 주공정을 12시간을 단축하였다.

〈표 1〉 울진 2호기 10차 계획 예방 정비 주공정 소요 시간 비교

번호	공정명	소요 시간(Hr)			비고
		계획	실적	편차	
1	냉각 및 배수	98	107	9	· 연료봉 결함으로 계통 내 방사능 준위 증가 · 원자로 분해중 스터드 볼트 1개(#51) 제거 불가 발생
2	MW 제거/노즐댐 설치	14	16.5	2.5	
3	원자로 분해	48	50.5	2.5	
4	정전 작업(LHA)	4	0	-4	· 원자로 분해 공정과 병행(방사능 준위 증가에 의한 자연으로 공정 조정)
5	연료 Top Nozzle VT	6	4.5	-1.5	
6	연료 인출	88	104.5	16.5	· 상단 고정체 결합 연료 정밀 검사 및 기중기 고장
7	연료 UT/Top Nozzle 수리	381	203.6	-177.4	· 경상중 수리 시행(21다발)으로 경험 축적 및 특수 작업대 고안 제작으로 작업성 개선, 연료 검사(VT) 및 RCCA 검사와 병행(공정 개선)
8	RCCA VT, VTR 녹화	12	0	-12	· 연료 수리와 병행
9	정전 작업(LHB)	4	0	-4	· 연료 수리와 병행
10	연료 장전	88	95.4	7.4	· 연료 집합체 뒤틀림
11	상부 내장물 정밀 검사		3.4	3.4	· 크램프 볼트 이탈부 검사를 위한 추가 수행 공정
12	원자로 조립	72	61.6	-10.4	· 근무 형태(3조 2교대→3조 3교대) 변경, 일부 공정을 부대 공정으로 전환
13	노즐 댐 제거/MW 설치	16	0	-16	· 부공정으로 전환(연료 수리 공정 수행중 실시 : ECT, MOV 동적 시험 조기 수행)
14	충수 및 배기	48	46.7	-1.3	· 운전원 근무 시간 연장, 일근 운전원 투입
15	RCP 가열	48	41.4	-6.6	· 운전원 근무 시간 연장, 일근 운전원 투입
16	임계전 시험	22	24.2	2.2	· 시험 불만족으로 재시험 수행
17	원자로 특성 시험	40	32.4	-7.6	· 특성 시험 수행중 2차측 배관/기기 예열시 주증기 압력/온도 및 증기발생기 수위 변화 최소, 1차측 온도/압력 시험 조건 최적 유지, RIC 구동 설비 속도 개선
18	터빈/발전기 기동	19	10.0	-9	· 2차측 기기 및 배관 예열을 원자로 특성 시험과 병행
총계		1008	801.7	-206.3	· 계획 : 42일 실적 : 33.4일

결 어

이상과 같이 금번 계획 예방 정비는 공기 단축을 통한 이용률 향상을 최고의 목표로 정함과 동시에, 한

〈표〉 울진 2호기 제10차 계획 예방 정비 주공정(34일)

	작업 항목	기 간	착수일	종료일
1	주공정	801.67h	05/15 00:00	06/17 09:40
2	냉각 및 배수	107h	05/15 00:00	05/19 11:00
3	M/W 제거 및 노즐 댐 설치	16.05h	05/19 11:00	05/20 03:30
4	원자로 분해	50.50h	05/20 03:30	05/22 06:00
5	PMC WET TEST	12h	05/22 06:00	05/22 18:00
6	연료 TOP NOZZLE VT	4.50h	05/22 18:00	05/22 22:30
7	연료 인출	92.57h	05/22 22:30	05/26 19:04
8	연료 UT/TOP NOZZLE 수리	203.60h	05/26 19:04	06/04 06:40
9	연료 장전	95.42h	06/04 06:40	06/08 06:05
10	상부 내장물 정밀 검사	3.42h	06/08 06:05	06/08 09:30
11	원자로 조립	61.67h	06/08 09:30	06/10 23:10
12	충수 및 배기	46.67h	06/10 23:10	06/12/21:50
13	RCP 가열	41.33h	06/12 21:50	06/14 15:10
14	임계전 시험	24.13h	06/14 15:10	06/15 15:18
15	원자로 특성 시험	32.37h	06/15 15:18	06/16 23:40
16	터빈 발전기 가동	10h	06/16 23:40	06/17 09:40

주기 무고장 운전을 달성할 수 있도록 완벽한 정비에 중점을 두고 추진하였으며, 기동 공정에서 각종 시험이 성공적으로 수행되고 기기에 아무런 문제없이 전출력에 도달한 것으로 보아, 이러한 목표가 무난히 달성될 수 있을 것으로 예상된다.

2000년도 발전원별 원가 계산 결과를 보면 원자력의 발전 원가가 유연탄의 발전 원가보다 높은 것으로 되어 있다. 원자력 사업을 계속 발전시켜 나가기 위해서는 타발전원에 비해 원자력이 비교 우위의 위치를 확보해야 하며, 이를 위해서는 계획 예방 정비 공기 단축을 통한 이용률 향상으로 발전 원가를 절감하는 것이 가장 확실한 방법이라 하겠다.

금번 울진 2호기에서 수행한 계획 예방 정비 실적 공정을 검토한 결과, 지속적인 연구 · 검토를 통해 공정을 개선하고 사전 준비 작업을 철저히 한다면, 조만간 국내 원전에서도 20일대 계획 예방 정비 수행 기록을 달성하는 발전소가 나올 것으로 확신한다.

끝으로, 이번 계획 예방 정비를 성공적으로 수행하기 위해 근무 교대 시간보다 한 두 시간 일찍 출근, 작업 상태를 철저히 파악하여 운전원 교대 시간중의 작업 대기 시간 발생을 방지해 준 운전원과 작업에 필요한 계통 배열을 조기에 수행하기 위해 투입된 일근조 운전원, 그리고 발전부와 유기적인 협조 체제를 유지하며 밤낮을 가리지 않고 정비 작업을 수행한 정비 부서 전 직원, 또한 울진 1발전소 직원과 호흡을 같이하며 최선을 다해준 협력사 전직원께 감사드리며, 하절기 냉방 수요 급증에 따른 하계 부하가 우리의 적정 공급 예비률을 위협하고 있는 시기에 금번 최단기 계획 예방 정비 기록이 더욱 빛날 수 있도록 울진 2호기 한주기 무고장 운전 달성을 목표로 각자가 자신의 임무에 최선을 다해 줄 것을 당부 드린다.