

# 영광 3호기 OCTF 달성의 의의와 과제

문 명 국

한전 영광원자력본부 제2발전소 소장



**한** 국 표준형 원전의 기본 모델 발전소인 영광 원자력 3호기가 한 주기 무정지 안전 운전(OCTF)을 달성하였다.

지난해 3월 31일 계획 예방 정비를 끝내고 발전을 재개한 후 이번 3월 31일 제3차 계획 예방 정비 착수 시까지 366일의 한 주기 운전 기간 동안 발전 정지 없이 계속 운전하는 기록을 세운 것이다.

OCTF는 국내에서 영광 3호기에 앞서 열두 번이나 달성한 바 있고 올 전 2호기와 고리 4호기는 2주기 연속

으로 기록을 달성한 바 있어, 이번 영광 3호기의 기록은 자랑거리로 내세울 만한 기록이 아닐 지도 모른다.

그렇지만 영광 3호기의 OCTF는 한국 표준형 원전의 안전성과 신뢰성을 다시 한번 입증하였을 뿐만 아니라, 우리 나라 원자력 산업의 해외 진출을 다지는 밑바탕을 이룬 쾌거라고 하겠다.

영광 3호기의 상업 운전 2년차인 지난 96년부터 발전소장을 맡아온 필자로서는 그 해에 고장 정지가 자주 발생하여 노심초사하였는데 이번의 기록으로 그 동안의 불명예를 다소 덜게 되었다.

오늘이 있기까지 묵묵히 안내하고 노력해 준 발전소 전 직원은 물론 안전 운전을 위하여 세심한 배려와 지적을 해준 안전 규제 관계자, 그리고 지금도 관심과 지원을 아끼지 않고 있는 설계 및 건설 관계자 모두와 이 기쁨을 나누고 싶다.

그러나 대부분의 국민과 언론들이 이번 영광 3호기의 운전 기록을 여전

히 냉담하게 보고 있을 뿐만 아니라, 앞으로 개선해야 할 일들이 너무도 많기 때문에 기쁨보다는 걱정이 앞서 있는 것이 솔직한 심정이다.

우리가 이룩한 오늘의 조그만 성취는 그 동안 우리가 헤쳐온 가시밭길의 끝이 아니라 앞으로 더 가야 할 '안전 운전'이라는 기나긴 여정의 시작일 뿐이라는 각오를 새삼 다져보게 된다.

바로 지금이 그 동안 앞만 보며 추구해 온 일들을 반추해 보며 앞으로 나아가 할 방향과 해야 할 일들이 무엇인지 검토해 보는 중요한 시점이라고 생각하고 그 동안의 경험과 실적을 간추려 본다.

## 영광 3·4호기의 사업 특성

### 1. 한국 표준형 원전의 호시

영광 3·4호기는 1,300MWe급 미국 팔로 버드(Palo-verde) 원전의 원자로 용량을 1,000MWe급으로 축소시켜 설계한 원형 발전소로서, 최

〈표 1〉 국내 원전 OCTF 달성 실적

순서	호기	운전주기	운전기간(운전일수)	비고
1	고리 3	3	87. 12. 10~88. 10. 9(304)	
2	고리 2	7	90. 3. 24~91. 4. 14(387)	
3	울진 2	3	91. 12. 5~92. 11. 1(333)	
4	고리 3	7	92. 2. 18~92. 12. 21(307)	
5	울진 1	4	92. 4. 8~93. 2. 11(310)	
6	울진 2	4	92. 12. 16~93. 10. 7(296)	2회 연속
7	영광 1	7	92. 10. 8~93. 11. 5(395)	
8	울진 1	6	94. 3. 7~95. 3. 23(382)	
9	고리 4	9	95. 2. 8~96. 4. 5(423)	
10	고리 1	17	96. 3. 31~97. 3. 30(365)	
11	고리 4	10	96. 6. 12~97. 9. 14(460)	2회 연속
12	고리 2	13	97. 4. 6~98. 2. 2(303)	
13	영광 3	3	97. 3. 31~98. 3. 31(366)	

신의 세계 공인 기술 기준과 국내의 원전의 건설 및 운영 경험을 반영하여 안전성과 신뢰성을 대폭 향상시킨 발전소이다.

그러나 설계 및 건설 초기 단계부터 한국 표준형 원전의 효시라는 명예보다는 짜깁기 발전소라는 오해와 안전성 시비로 사업 추진에 난관이 많았다.

다행히 관계자들의 진실 규명을 위한 헌신적인 노력과 좋은 국산 발전소를 짓겠다는 종사자들의 정성 어린 노력의 결과로 건설과 시운전을 성공적으로 마치고 3호기는 95년 3월 31일에, 4호기는 96년 1월 1일에 상업운전을 개시하였다.

**2. 최초의 국내 업체 주도형 사업**

그 동안 국내 원전의 건설 및 운영 기술은 크게 3단계를 거치면서 발전

하였다.

원전 1세대라 할 수 있는 초기에는 외국 계약자가 종합 관리하는 일괄도급 방식의 계약 형태로 출발하였고, 원전 제2세대에서는 한국전력공사가 전체 사업을 종합 관리하면서 외국 업체를 주계약자로, 국내 업체는 하도급 계약자로 참여하게 하였다.

그 후 원전 건설 자립을 위해 별도의 기술 전수 계약을 체결한 영광 3·4호기를 시발점으로, 한국전력공사가 전체 사업을 종합하면서 국내 업체를 주계약자로 하고 핵심 분야만 외국 업체에 하도급을 주는 국내 업체 분할 발주 방식을 통해 국내 업체 주도형 사업 체계를 확립하였다.

**3. 국내 산업체 참여 범위 확대**

영광 3·4호기는 플랜트 종합 설

계 분야에서의 국내 업체 참여뿐만 아니라 기자재 제작 분야에서도 국내 산업체의 참여폭을 대폭 확대시킨 계기가 되었다.

특히 핵연료 분야는 설계는 물론 제조 공정까지 100% 국내 기술진에 의해 이루어졌다.

그 밖에도 원자로 압력 용기, 증기 발생기, 가압기 등 1차측 주요 기기와 터빈/발전기 등 2차측 기기 제작을 국내 산업체가 담당함으로써 종전의 기자재 국산화율을 40%에서 74%까지 올렸다.

**영광 3·4호기 설계 특성**

**1. 최신의 설계 기준 및 요건 적용**

영광 3·4호기는 국내외의 최신 설계 기준과 안전 규제 요건을 반영하여 당시 운전중인 발전소에 비해 안전성을 10배 정도 향상시켰다.

미국 TMI 후속 조치 사항을 모두 반영시켰고, 안전성 관련 계통을 물리적으로 분리 배치하고 국내 최초로 파단전 누설 개념을 적용하였으며, 동양인 체형 등 인간 공학을 고려하여 주제어실을 설계하였다.

**2. 주요 설계 개선 사항**

가. 5개의 로둠 검출기를 노심 측 방향으로 분산 배치한 45개 세트의 자체 전원 공급 형식의 중성자 계측기를 원자로 내에 고정 설치하여 노심 상태를 연속적으로 감시할 수 있

게 하였다.

나. 운전 제한치를 초과하지 않도록 원자로 정지를 제공하고 공학적 안전 설비 작동 계통(ESFAS)을 도와 사고 결과를 완화시켜주는 노심 보호 연산기(CPC)와 노심의 주요 변수들을 감시하여 운전 제한 조건(LCO)을 초과할 경우 운전원들에게 이를 알려주는 노심 운전 제한치 감시 계통(COLSS)을 설치하여 안전성을 증진시켰다.

다. ATWS(Anticipated Transient Without Scram)의 위험으로부터 피

하기 위해 발전소 보호 계통과는 별도의 방법으로 원자로 및 터빈을 트립시키고, 보조 급수 계통을 동작시키는 다중 보호 계통(DPS)을 설치하였다.

라. 주급수 펌프 정지나 터빈 정지와 같은 큰 부하 감소시에 증기 우회 제어 계통, 원자로 조절 계통, 급수 제어 계통, 가압기 수위 및 압력 제어 계통과 함께 원자로 정지를 방지하고 1·2차측 안전 밸브 개방을 방지하는 역할을 수행하는 원자로 출력 급감발 계통(Reactor Power Cutback System)을 설치하였다.

마. 설계 기준 사고를 초과하는 주급수 및 보조 급수 완전 상실시 원자로 냉각재 계통의 안전 감압 능력을 확보하기 위해 가압기 상부에 안전 감압 계통(SDS)을 설치하였으며, 대

체 전원용 교류 발전기(AAC D/G)를 추가 설치하여 발전소 정전시(SBO)에도 원자로를 안전 정지시킬 수 있도록 하였다.

바. 그 외에도 증기발생기 급수 예열기 설치로 열효율을 향상시키는 등 2차 계통에서도 많은 설계 개선이 이루어졌다.

**영광 3·4호기 운영 실적**

**1. 고장 정지**

영광 3·4호기가 동일 설계의 선행 발전소 없이 최초로 운전되는 발전소이다 보니 비정상 상황 발생시 참조할 데가 없어 애로가 많았다.

또한 인원 구성 면에서 발전소 운영 경험이 없는 신입 직원들이 많아

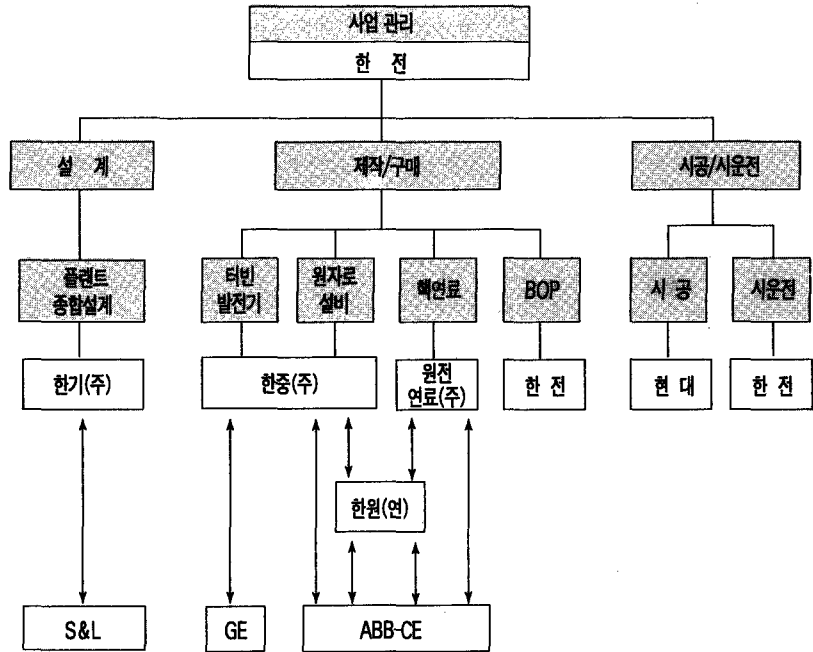
상업 운전 초기에 운영 측면에서도 적지 않은 어려움을 겪었다.

하드웨어 중 노심 보호 연산기(CPC), 제어봉 연산기(CEAC) 그리고 광모뎀 설비 등 국내에서 최초로 사용되는 설비에서 고장이 다수 발생하였는데, 일부 신호는 다중화되어 있지 않고 바로 원자로를 정지시키도록 되어 있어 1·2주기 중에 발전소가 여러 차례 정지되는 사태를 맞이하였다.

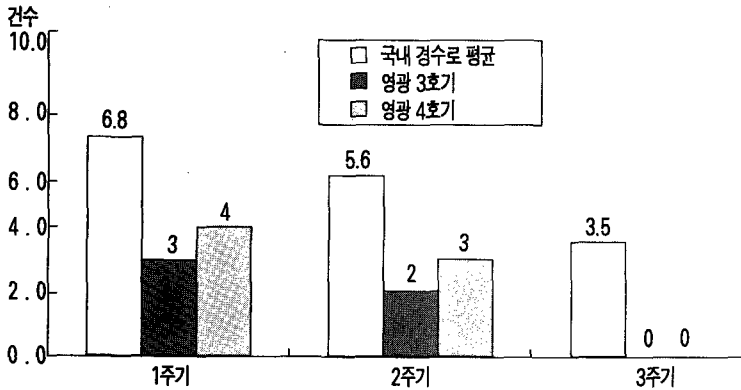
그러나 고장이 가장 많았던 광모뎀의 설계 보완이 이루어진 후에는 고장 정지가 크게 줄어들었다.

주기별 고장 정지 건수는 <그림 2>와 같다.

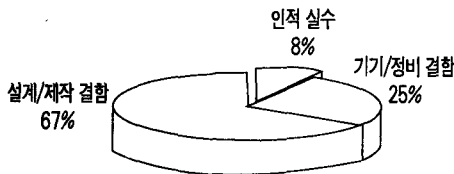
고장 정지를 원인별로 구분하면 설계 및 제작 결함이 8건(67%)으로 가



(그림 1) 영광 3·4호기 사업 계약 구조



(그림 2) 주기별 고장 정지 현황



(그림 3) 영광 3·4호기 정지 원인 분류

장 많고 그 다음이 정비 결함 3건 (25%), 인적 실수는 1건(8%)으로 가장 낮다.

## 2. 발전량과 이용률

영광 3호기의 연도별 이용률 및 발전량은 (그림 4)와 같다.

95년은 상업 운전 첫째로 계획 예방 정비 가 없었기 때문에 102.7%의 높은 이용률을 달성하였다.

96년에는 ASME Code 요건에 따라 실시된 격납 용기 종합 누설률 시험(ILRT)과 원자로 조립 과정에서 발생한 연료 상부와 제어봉 간의 간섭 등으로 92일의 계획 예방 정비 기

간이 소요됨으로써 연간 이용률이 76.6%로 떨어졌다.

97년에는 54일간의 계획 예방 정비 실시로 이용률이 전년도에 비해 높아졌다.

그러나 상업 운전 이후 3주기까지 계획 예방 정비를 제외한 평균 주기 이용률은 101.9%이다.

한편 영광 3호기가 제3주기 무정지 안전 운전 기간 중 생산한 전력량은 89.9억kWh로 중유 대비 987억원 (1,318만 배럴), LNG 대비 2,660억원(152만톤)의 수입 대체 효과를 거둬으로써 IMF 시대 외화 절감 효과에도 크게 기여하였다.

## 설비 개선 및 보완

영광 3호기가 3주기만에 한 주기 무정지 안전 운전을 달성할 수 있었던 원동력 중의 하나로 설비 개선 활동을 빼놓을 수 없다.

시운전 및 가동 초기 일부 기기들의 문제점을 조기에 발견하여 계약자 하자 보증으로 자재, 인력 및 기술 지원을 받아 조치하였으며, 국내의 운전의 운영 경험을 토대로 운영상 불합리한 사항이나 설비의 효율적 운영 측면에서 개선이 필요한 사항에 대해서는 자체 연구팀(Task Force Team)을 구성하여 연구하는 한편, 자체 해결이 어려운 경우에는 국내외 전문가들에게 자문을 구하여 해결하였다.

영광 3·4호기에서 발생한 문제점들에 대해 설비 개선을 통해 보완 및 해결한 사항 중 중요한 사항은 다음과 같다.

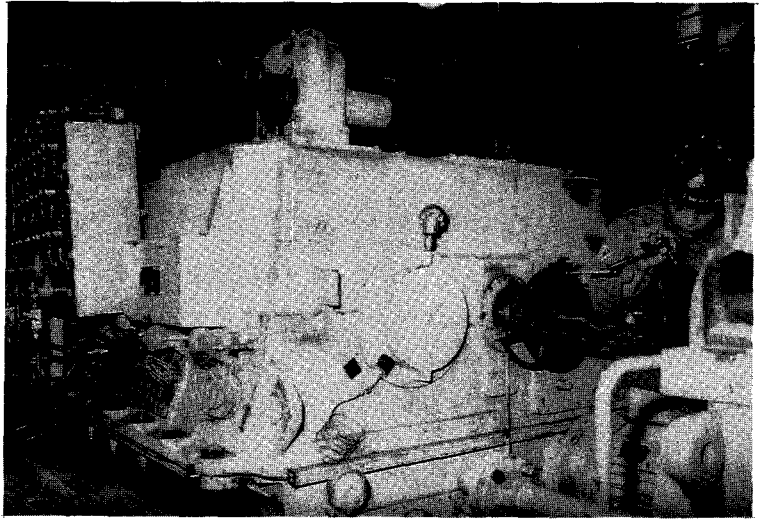
### 1. 노심보호연산기 제어봉 연산기 신뢰도 향상

영광 3·4호기에는 4채널의 노심보호 연산기(CPC)와 2채널의 제어봉 연산기(CEAC)가 있어 노심 상태를 감시하며, 1채널의 제어봉 연산기에서 고장이 발생할 경우 4채널의 노심 보호 연산기에 동시에 Penalty 계수를 전송하므로 원자로가 정지되는 사례가 있었다.

제작사인 ABB-CE와 함께 제어봉

연산기의 고장 원인을 정밀 검토하여 아날로그식 광모뎀을 자체 고장 진단 기능을 보유한 고 신뢰성 광모뎀으로 전량 교체하였고, 그 이후 고장률은 현저히 감소되었다.

또한 제어봉 위치 편차 자동 감시 프로그램을 자체 개발하여 운영함으로써 제어봉 연산기 계통의 운전 신뢰성을 제고하였다.



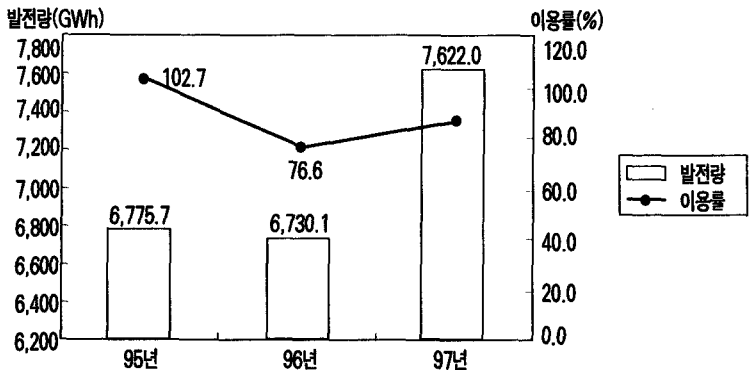
주급수펌프 축정 작업. 영광 3호기는 지난해 3월 31일 계획예방정비를 끝내고 발전을 재개한 후 올 3월 31일 제3차 계획 예방 정비 착수시까지 366일의 한 주기 무정지 안전 운전을 달성하였다.

## 2. 비상디젤발전기 운전신뢰도 제고

영광 3·4호기 비상 디젤 발전기 정기 점검중 엔진 배기 가스 고온도 신호에 의해 엔진이 정지되는가 하면, 엔진의 커플링(Coupling Rubber Element)이 파손되는 사례가 발생하였다.

제작사 측과 합동으로 문제점을 검토한 결과 엔진 배기 가스 고온도 정지 신호가 지나치게 보수적으로 설치되어 있었고, 발전기 양측에 디젤 엔진이 설치되어 있어 동기속도 유지를 위한 엔진 제어 과정에서 제어 불균형이 발생할 경우 커플링이 파손되는 것으로 밝혀졌다.

이와 같은 검토 결과를 배경으로 배기 가스 고온에 의한 엔진 정지 신호를 제거하고 경보로 대체하였으며, 비상 디젤 발전기 제작사의 전문 기술진과 합동으로 엔진 동기속도 제어 회로 등 각종 제어 회로를 전면 재검토하여 보완하였는데 그 이후로는 유사한 문제점은 재발하지 않고 있다.



(그림 4) 영광 3호기 발전량 및 이용률

## 3. 주급수 승압 펌프 및 복수 펌프 전동기 교체

영광 3·4호기 주급수 승압 펌프 전동기 각 3대씩 6대와 3호기 복수 펌프 전동기 2대에서 코로나 방전 및 절연 열화 현상이 발생하는 것을 상 업운전 초기에 발견, 계약자 측에 하자를 제기하여 조치하였다

원인이 기기 제작사인 ABB-CE의 제작 결함으로 밝혀짐에 따라 국내 공급업체에서 새로운 설계의 전동기

를 제작하여, 4호기는 2차 계획 예방 정비 기간중 교체 설치 완료하였고, 3호기는 3차 계획 예방 정비중에 교체 설치할 예정이다.

## 4. 1차 기기 냉각 해수 펌프 진동 문제 개선

1차 기기 냉각 해수 펌프(ESWP) 운전시 진동으로 베어링이 자주 손상 되는 사례가 있어 한전 전력연구원의 전문가팀에 의뢰하여 현장팀과 합동

으로 정밀 진단한 후 조치하였다.

모터 스탠드의 강도가 취약한데다가 펌프 하부에 어패류 등 이물질이 유입되어 상부 모터 부위에서 진동이 발생하면서 베어링이 손상되는 현상이었다.

이러한 원인 분석 결과를 토대로 베어링의 재질을 탄소강에서 Thordon XL로 교체하였고, 펌프 컬럼 지지대(Seismic Restraint)를 추가로 설치함으로써 진동 문제를 해결하였다.

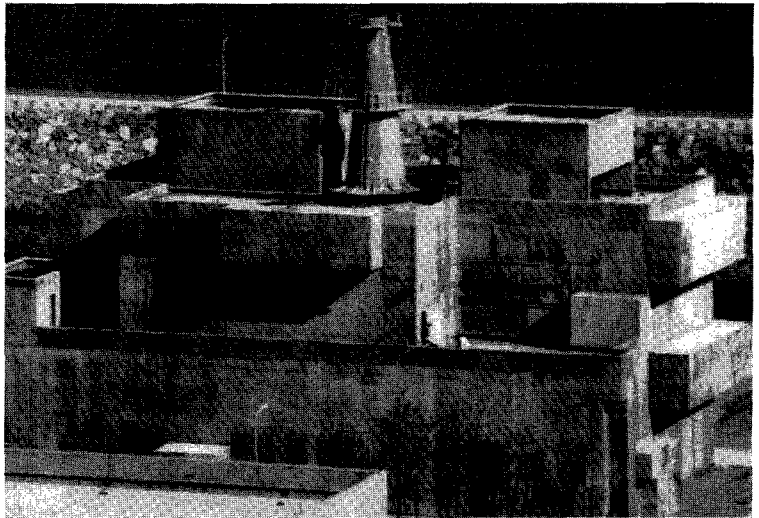
4호기는 지난 2차 계획 예방 정비 기간중에 작업을 완료하였고, 3호기는 이번 3차 계획 예방 정비 기간중에 작업할 예정이다.

**향후 과제**

노심 보호 연산기(CPC)/제어봉 연산기(CEAC) 등 영광 3·4호기 운영 초기에 제작사의 하자 사항이 발견된 일부 핵심 설비에 대해서는 설계 개선을 통해 현재 잘 운전되고 있지만 지속적인 주의 관찰이 필요하다.

비상 디젤 발전기의 신뢰도 향상과 관련하여 비상 디젤 발전기 정비 방법의 효율성을 제고하고, 정기 점검 주기 및 방법을 개선하여 발전소 비상 전력 계통의 신뢰도를 향상시키기 위해 한전 전력연구원에서 연구 과제로 채택하여 추진중에 있다.

이들 핵심 설비를 정비하고 운영하기 위한 전문가 양성도 지속추진



대체 교류 전원용 디젤 발전기 건물. 비상 디젤 발전기의 신뢰도 향상과 관련하여 비상 디젤 발전기 정비 방법의 효율성을 제고하고, 정기 점검 주기 및 방법을 개선하여 발전소 비상 전력 계통의 신뢰도를 향상시키기 위해 한전 전력연구원에서 연구 과제로 채택하여 추진하고 있다.

해야 할 과제이다.

그러나 가장 시급한 것은 예산과 설치 공간 등의 문제로, 영광 3·4호기에는 반영이 불가능하지만 후속기에 반영할 수 있는 사항에 대해서는 적시에 자료를 제공하여 설계, 제작 및 시공에 반영하는 일일 것이다.

한국 표준형 원전은 증기발생기 1기당 세관 숫자나 연료 집합체 수가 선행 호기에 비해 많아 증기발생기 세관 검사(ECT) 및 연료 재장전에 더 많은 시간이 소요되므로 장기간의 계획 예방 정비를 필요로 한다.

97년도에 실시한 영광 4호기 제2차 계획 예방 정비를 43일 20시간만에 종료함으로써 국내 경수로 원전 계획 예방 정비 최단 기간이라는 기록을 세우기는 하였으나, 정비 품질을 확보하면서 정비 기간을 단축해야 하는 것도 영광 3·4호기가 지속적인

로 추진해야 할 과제이다.

**맺음말**

발전소 건설과 기술 자립을 병행 추진하는 과정에서 수많은 애로와 난관을 극복해야만 했던 한국 표준형 원전의 효시인 영광 3호기가 달성한 주기 무정지 안전 운전은 우리의 설계 기술과 건설 및 운영 능력을 동시에 인정받는 계기가 되었다.

그러나 우리가 가야 할 길은 아직 멀고 해야 할 일도 많다.

좋은 운전 실적을 보이고 있는 국내의 타 발전소를 벤치마킹하여 열심히 배우는 한편, 우리가 경험하지 못한 어려움을 겪고 있는 후행 발전소의 경험들을 타산지석으로 삼아 영광 3·4호기가 더 좋은 발전소가 되도록 열심히 노력할 작정이다. ☞