

美國의 原電 維持補修技術 開發動向

美國의 電力會社들과 原子力産業界는 原子力발전소 維持補修프로그램의 品質向上을 위해 부단한 노력을 기울이고 있다. 다음은 현재 미국에서 費用, 利用率, 강제운전정지율, 발전소 종합성능평가치 (SALP Ratings) 등의 분야에서 이루어지고 있는 改善動向이다.

미국에서는 원자력발전소의 유지보수 개선에 꾸준한 노력을 기울일 것을 강조하고 있다. 이러한 예는 많은 지시(Direction)들을 통하여 알 수 있는데, 미국 원자력규제위원회(NRC)는 발전소 유지보수에 관한 규정을 고려하고 있으며, 미국전력연구소(EPRI)도 연구개발을 증가시키고 있다.

또한 미국원자력발전운전협회(INPO)는 정상시 발전소의 유지보수에 대한 평가를 강조하고 있으며, 유지보수의 질과 효율성 향상에 대하여 요청하는 발전소에 대해서 특별프로그램을 갖고 있다. 그리고 가장 중요한 것은 전력회사들이 유지보수에 대해서 경비와 인력을 점점 더 증가시키고 있다는 사실이다.

현재 고조되고 있는 주된 관심사항은 비효율적인 유지보수로 인한 잠재적 중대사고의 발생, 발전소 가동률 향상에 대한 강조, 운전 및 유지보수비용에 대한 관리 등이다. 이러한 발전소의 세가지 요인, 즉 안전성, 신뢰도 및 경제성 등은

서로 밀접하게 연결되어 있다. 안전성 향상과 경제성 향상은 직접적으로 관련이 없는 것처럼 보일 수 있으나, 이들은 신뢰도를 통하여 연결되고 있다. 신뢰도가 떨어지면 안전성이 저하되고 강제운전정지율이 증가한다. 따라서 경제성 및 안전성 모두 저하된다. 완벽한 유지보수는 장비 및 계통의 신뢰도를 향상시켜 안전성 및 경제성을 향상시킨다.

1. 維持補修의 發端

유지보수의 개선을 통한 안전성, 신뢰도 및 경제성에 대한 자극이 주어지자 전력회사, 발전소 공급업체, INPO 및 EPRI 등은 상당한 노력을 해왔다. 이러한 노력들이 지난 몇년 동안 공식화되었지만 많은 것들은 원자력발전소 초창기부터 존재하고 있었다.

발전소 유지보수개선프로그램에서 주체는 전력회사이다. 전력회사는 유지보수에 대한 책임,

권한 및 동기부여를 갖고 있으며, 타 기관들은 보조역할을 한다. 따라서 프로그램이 성공을 거두기 위해서는 전력회사가 지도적인 역할을 해야 한다.

원자력발전을 하는 대부분의 전력회사들은 양호한 초기 유지보수프로그램을 수립하였었고, 그후 적절히 수정되어 왔다. 유지보수프로그램의 일관성 유지와 개선지침의 제공을 위하여 전력회사는 주목할 만한 조치를 취해왔다. 이러한 조치들은 유지보수프로그램의 개선을 위한 경영층의 참여를 자극하기 위하여 원자력관리 및 자원위원회(Nuclear Management and Resource Council : NUMARC)의 후원하에 국가적인 조직으로 까지 확대되었다. 유지보수의 자체평가 및 성능감시 등과 함께 회사 내부 및 외부 사이의 정보교환도 강조되었다. 발전소 공급업체들은 발전소 유지보수의 거의 모든 분야에서 전력회사를 지원하고 있다. 공급업체는 NSSS제작업체, 종합설계회사, 용역회사 및 자문회사들이다. 전력회사는 모든 용역을 제공할 수 있는 단일 종합업체에서 부터 좁은 영역의 특수한 자문을 전달하는 자문회사에 이르기까지 선택의 폭이 넓다. 그러나 전력회사가 어떤 업체를 선정하던지 전력회사의 용역관리 및 유지보수운영은 중요하다.

INPO는 창설 초기에도 유지보수에 관심을 두었지만, 가장 중점을 둔 것은 발전소의 운전이었다. 그러나 1985년 이후부터 유지보수의 개선에 점점 더 초점을 맞추고 있다. INPO의 업무 가운데 주목할 것은 전력회사 자체평가기준을 형성하고 있는 유지보수프로그램의 개선을 요구하는 전력회사들을 위한 유지보수 지원 및 검토 프로그램이다.

EPRI는 1974년 이후 유지보수의 개선에 대한 연구개발에 노력해 왔으며, 이 프로젝트에 2,500만달러 이상을 투자하였다. 이 프로젝트의 내용을 표 4에 나타냈다. 한가지 특별한 능동적인 프로그램은 개인의 생산성과 안전성을 직접

개선시키는 것이고, 또 다른 하나는 발전소 유지보수프로그램 수립과 개선에 대한 지침을 제공하는 것이다. 하드웨어의 개선과 유지보수지침이 연구의 성과로 이루어졌으며, 경제적인 방사선관리기술과 지침이 마련되었다.

원자력 유지보수지원센터(Nuclear Maintenance Assistance Center : NMAC)의 설립은 주목

〈表 1〉 유지보수향상을 위한 전력회사의 활동

- 장비개선
- 회사참여 증가
- BOP 보수에 대한 관심
- 정보교환(국내, 국외)
- 보수프로그램 검토 및 개선
- 보수자체 평가
- 보수에 대한 NUMARC 실무위원회
 - 집행부의 인식
 - 산업계활동의 단일화
- 워크숍 참여
- 성능감시
- 보수부품관리프로그램 향상
- 교육훈련증가
- 방사선량 감소

〈表 2〉 유지보수개선을 위한 공급업체의 활동

- 보수훈련
- 정보교환
- 보강작업
- 계획
- 장비개발
- 현장지원
- 기술용역

〈表 3〉 INPO의 활동

- 보수관련 사상분석
- 보수프로그램지침
- 훈련
- 발전소 보수 평가
- 보수검토 및 보조프로그램
- 정보계통

〈表 4〉 EPRI의 활동

○인간오류-작업자 생산성 및 실수감소
○보수 및 보수성
○발전소 수명연장(정책적 보수)
○보수기기 개선
○보수지침
○개인 방사선 피폭량 감소
○보수관련기관
-MEAC (Maintenance Equipment Applications Center)
-NDEC (Non-Destructive Evaluation Center)
-M & DC (Monitoring & Diagnostics Center)
-NMAC (Nuclear Maintenance Assistance Center)

할 만한데, 이 NMAC는 유지보수기술에 관한 정보를 종합하기 위하여 최근에 설립되었다. 이 센터는 현재의 지식과 발전소 경험에서 나타난 기술적 문제를 우선순위에 따라 처리하고 있으며, 장비의 특수부분에 대한 유지보수기술지침을 작성하고 있다.

2. 最近의 動向

원자력발전소의 유지보수 개선과 이에 따른 경제성 향상을 달성하기 위하여 다음의 다섯가지에 대하여 검토하였다.

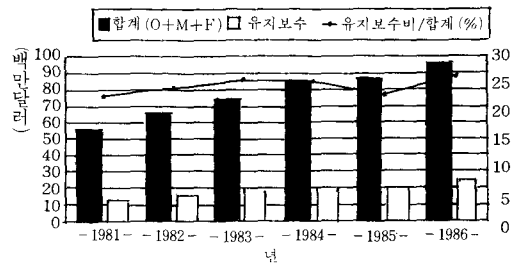
- 유지보수비용
- 강제운전정지율
- 발전소 이용률
- NRC의 SALP(Systematic Analysis of Licensee Performance) Ratings(발전소 종합성능평가치)
- 전력생산비용

(1) 維持補修費用

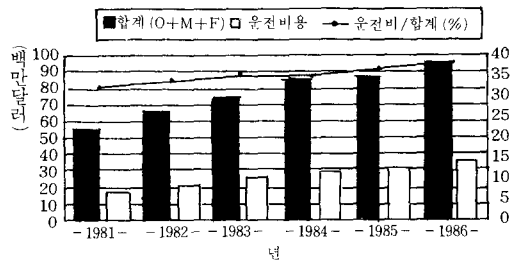
평균적으로 지난 5년 동안 운전 및 유지보수 비용이 60% 이상 증가하였다. 그림 1, 2, 및 3은 각각 유지보수, 운전 및 핵연료비용의 동향을

나타내고 있다. 이 그림들은 총생산비용에서 각각 차지하는 비율과 달러화로 나타낸 평균 비용 두가지 관점에서 나타내고 있다. 총생산비용은 운전, 유지보수 및 핵연료비용을 포함한 것이

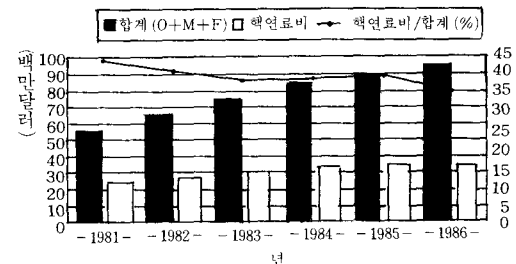
다. 몇가지 동향이 명확하게 도출되는데, 우선 유지보수비용의 경우 절대금액은 증가하였지만 총생산비용의 25%로 고정되어 있다. 반면에 운전비용은 절대금액 뿐만이 아니라 상대금액도 증가하였다. 지난 5년간에 걸쳐 1981년 33%에서 1986년 38%로 증가하였으며, 이러한 경향은 앞으로도 계속될 전망이다. 한편 핵연료비용의 경우는 동일 기간 동안에 절대금액은 약간 증가하였으나, 총생산비용에서의 비율은 감소하였다.



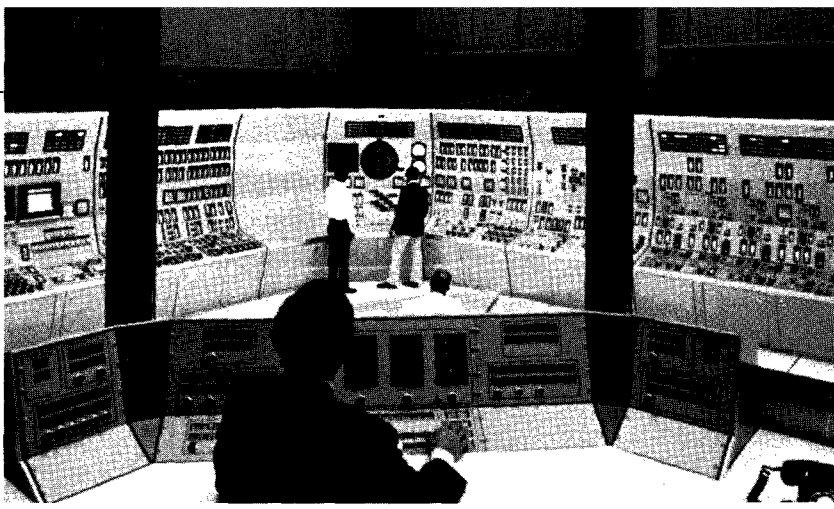
〈그림 1〉 유지보수비용의 추이 (1981~1986)



〈그림 2〉 운전비용의 추이 (1981~1986)



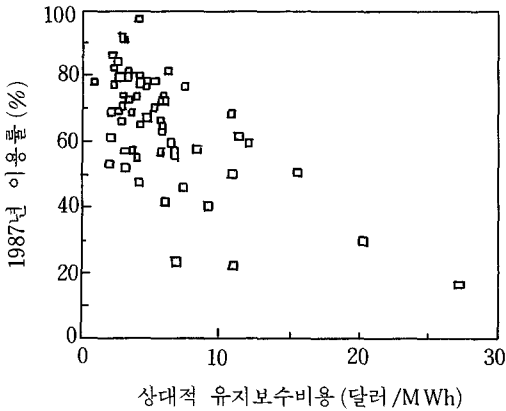
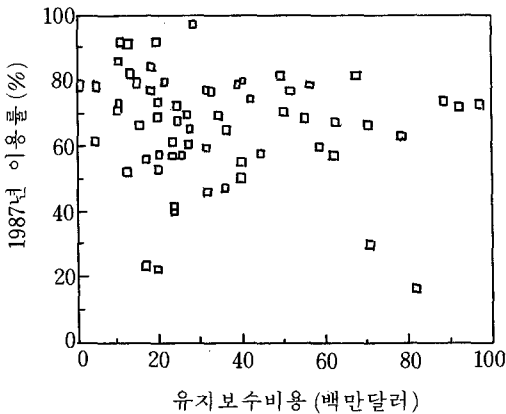
〈그림 3〉 핵연료비의 추이 (1981~1986)



유지보수비용은 발전소에 따라 큰 차이가 있었다. 예를 들어 미연방에너지규제위원회에 제출된 전력회사데이터협회(Utility Data Institute: UDI)의 자료에 의하면 각 발전소의 유지보수비용은 900만달러에서 4,500만달러까지 투자되

었다.

유지보수비용을 증가시켰을때 발전소의 신뢰도와 생산성이 향상되는지를 검토하는 것이 중요하다. 1987년 UDI의 신뢰도와 생산성에 대한 유지보수비용의 상대성 자료에 의하면 두가지 결론을 내릴 수 있다. 그림4는 절대금액과 단위 전력생산시 유지보수비용에 대한 이용률 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 이용률과 유지보수비용이 서로 강하게 연관성을 갖고 있지는 않으며, 유지보수비용 증가시 이용률이 필연적으로 증가함을 보이지는 않았다. 이는 효과적인 결과를 얻기 위하여서는 유지보수비용의 수준 보다 자원의 효과적인 할당에 있는 것으로 유추된다.



(그림 4) 유지보수비용 및 상대적인 이용률 현황

(2) 強制運轉停止率

강제운전정지율은 발전소 운전의 효율성을 나타내는 합리적인 변수이다.

한가지 확실한 것은 적절한 유지보수프로그램 없이 강제운전정지율을 낮추는 것은 불가능하다는 사실이다. 그림5에 나타난 최근의 자료에 의하면 점진적으로 유지보수가 개선되고 있다고 결론을 내릴 수 있다.

(3) 利用率

발전소의 성능을 측정할 수 있는 가장 좋은 인자는 발전소의 생산성이라고 할 수 있다. 발전소 생산성 지표로 가장 적합한 것이 이용률이라고 할 수 있는데, 미국은 동형의 원자로형을 보

유하고 있는 국가들 중에서 이용률이 낮다.

1985년과 1986년 동안 미국 및 그밖의 국가의 PWR, BWR 발전소에 대한 이용률 분포가 그림 6에 나타나 있다. 그림에서 주목할 사항은 다음과 같다.

- 미국 BWR 발전소는 타국의 BWR 발전소보다 이용률이 상당히 낮다(중간값으로 20% 낮다).

- 타국 BWR 발전소와 경쟁할 만한 미국 BWR 발전소가 거의 없다(이용률에 있어 타국 BWR 발전소 75%가 미국 BWR 발전소 상위 10%보다 높다).

- 미국 PWR 발전소는 타국 PWR 발전소와 거의 동등하다(중간값으로 7% 낮다).

- 가장 양호한 미국 PWR 발전소와 가장 기록이 좋은 타국 PWR 발전소가 동등하다.

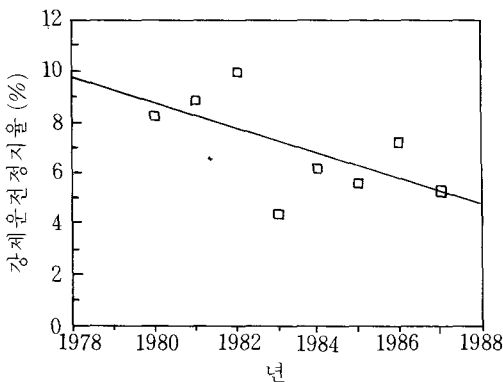
왜 BWR 발전소는 큰 차이가 있는가? 여기에는 세가지의 기본적인 이유가 있다.

첫째로 재순환 배관의 교체로 인해서 이용률의 6% 손실을,

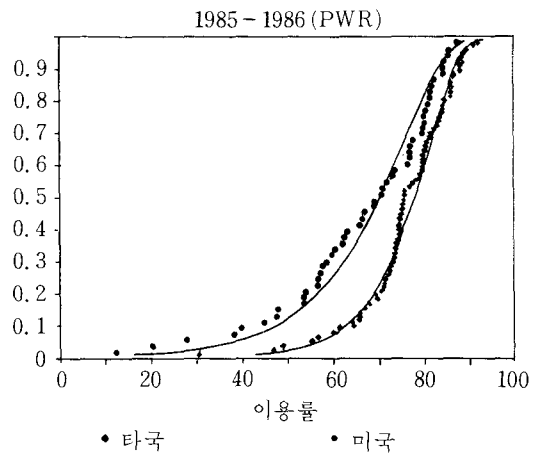
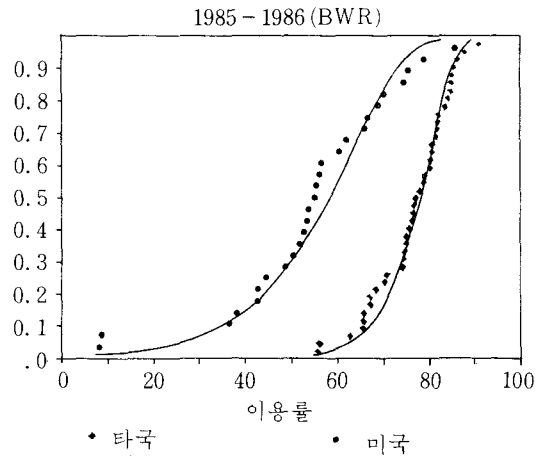
둘째로 NRC의 운전정지명령에 의해서 6.8%의 손실을,

세째로 장비검증(Equipment Qualification)이 49%의 손실을 가져왔다.

미국 경수로 발전소의 동향은 어떠한가? 발전소의 성능은 이용률 증가로 측정된 바와 같이



〈그림 5〉 강제운전정지율 추이



〈그림 6〉 BWR, PWR 발전소의 이용률 분포

다음 분야에서 향상되었다(이 변화는 1968년에서 1984년까지의 평균값과 1985년과 1986년 데이터를 비교한 값이다).

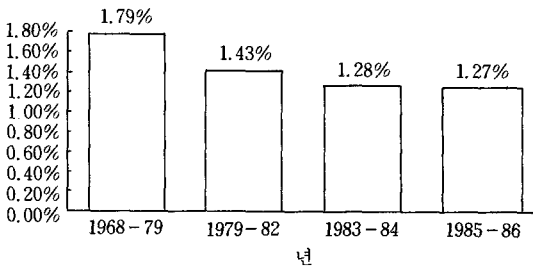
- 핵연료 신뢰도 : 1.5% 이용률 증가
- 증기발생기 신뢰도 : 1.5% 이용률 증가
- 터빈 신뢰도 : 1% 이용률 증가
- TMI사후조치 감소 : 0.5% 이용률 증가
- 열효율 증가 : 0.25% 이용률 증가

그러나 다음 분야에서 이용률 감소가 발생하였다.

- NRC 요구 : 4% 이용률 감소
- 원자로계통 : 0.5% 이용률 감소
- 안전계통 : 0.33% 이용률 감소

전체의 성능은 0.4% 정도 향상되었다. 이용률 저하의 주요 원인들이 반드시 유지보수와 관련되어 있지는 않으나, 일부 이용률 향상은 좋은 유지보수에 기인한다. 예를 들면, 증기발생기의 신뢰도 향상은 좋은 수처리와 검사프로그램과 같은 좋은 예방보수에 기인하며, 또한 열효율의 증가는 직접적으로 BOP계통의 좋은 유지보수에 기인한다(그림7 참조).

강제운전정지율 감소와 해외에 비하여 낮은 이용률에 대하여 검토를 함으로써 이를 기반으로 하여 계획운전정지율을 낮춤에 따라 큰 이익을 얻을 수 있었다. 유지보수에 대한 계획, 일정 및 수행 모두 계획운전정지기간을 결정하는 주요한 역할을 한다.



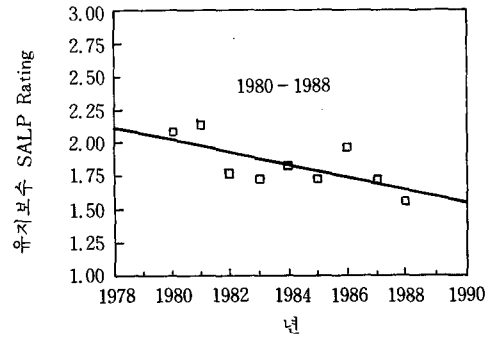
〈그림 7〉 열효율손실에 따른 원전이용률 손실

(4) 發電所 綜合性能評價值 (SALP Ratings)

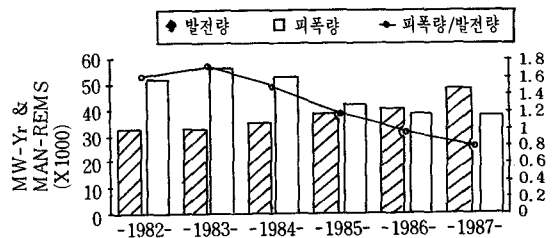
미국 원자력규제위원회(NRC)는 정기적으로 발전소의 성능을 여러 분야에서 종합·검토한다. 유지보수는 이러한 검토분야의 하나인데, 최근 NRC가 후원한 워크숍에서 NUMARC는 원자력발전소의 유지보수가 향상되고 있다는 자료를 제출하였다(그림8 참조).

(5) 放射線 被曝量 減少

노심 이외의 방사선량을 감소시킴으로써 보수요원들이 오랜시간 동안 방사선구역에서 작업이 가능하다. 방사선량의 감소는 유지보수작업의 질을 향상시키고, 작업 완료를 위하여 여러 팀이 투입되지 않으므로 비용을 줄일 수 있다.



〈그림 8〉 평균 SALP Ratings

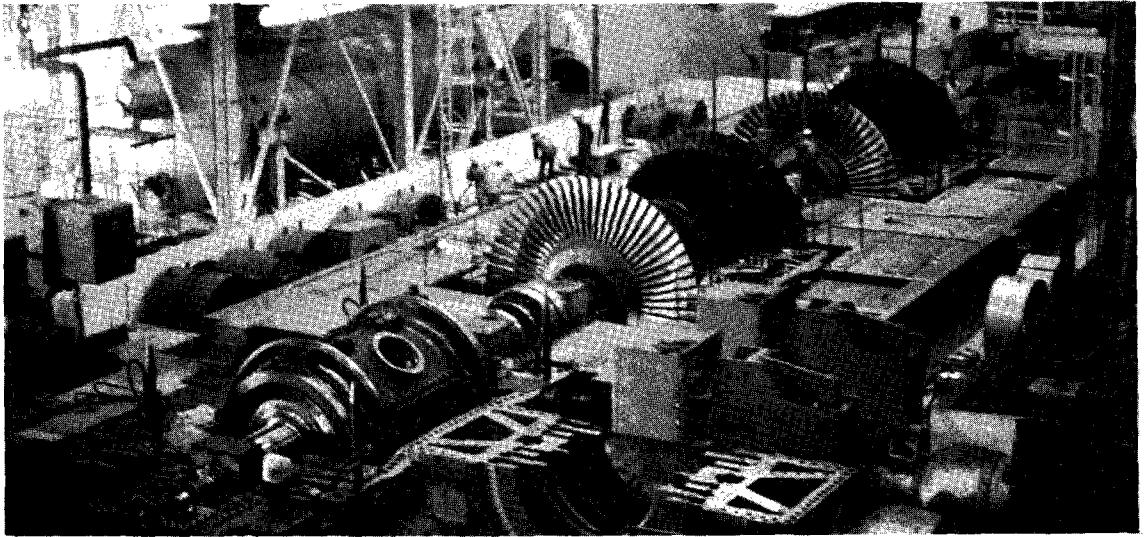


〈그림 9〉 방사선 피폭량과 발전량

지난 4년 동안 발전소 숫자의 증가에도 불구하고 전체 종사자 피폭량이 계속적으로 감소하였다. 이 기간 동안 전체 발전량에 대한 man-rem의 비율이 반감되었다(그림9 참조).

(6) 電力生産費用

원자력발전소의 경제성 추이는 어떠한가? 1986년 국제통계에 따르면 원자력발전비용에 대한 화력발전비용의 생산비율은 프랑스가 1.8, 서독 1.68, 벨기에 1.62, 일본 1.37, 핀란드 1.33, 스페인 1.2 등이다. 이러한 일반적인 경향과는 달리 미국은 1987년에 이 비율이 1.0 미만이었다. 그러나 각 발전소 기준으로 볼 때 일부 미국 원자력발전소는 화력발전소 보다 비용면에서 우수하였다. 예를 들면, 미국에서 운전중인 경제적인 발전소 20기중 16기의 발전소가 원자력발전소였다. 그러나 최근의 1987년 데이터는 부정적이었다. 경제적인 발전소 상위 20기중 원자력발전소는 16기에서 5기로 떨어졌다. 1987년 하위의 20기 발전소는 가스발전소 1기, 원자력발전소



5기, 석탄발전소 14기 등이다.

이상의 검토로 부터 비용이 효율적으로 관리 되어야 함은 명백하다. 전체적인 이익은 발전소 생산성, 즉 이용률을 높임으로 달성될 수 있다.

어떻게 유지보수 개선이 이용률 향상을 가져올 수 있는가? 원자력발전소의 신뢰도, 효율 및 안전성은 실제로 유지보수가 필요한 곳에 자원과 자금 및 인력을 최적으로 투입하여 유지보수의 조화를 이룸으로써 향상될 수 있다.

1차계통 및 안전관련계통의 유지보수는 대부분 발전소 운영기술지침에 따라 관리된다. 정기적인 시험 및 검사 등이 이들의 대부분을 차지한다. 운전경험을 통하여 이러한 정기시험 및 검사중 많은 부분이 실제로 불필요하며, 어떤 경우에는 오히려 운전 및 예비계통의 성능을 저하시키기도 함을 알 수 있었다. 반면에 어떤 부분에는 시험 및 검사를 증가하는 것이 안전성, 신뢰도 및 경제성 향상에 적합하기도 하였다.

원자력산업계는 유지보수자원의 투자에 따른 보상이 없는 유지보수업무와 신뢰도, 안전성 및 경제성 관점에서 높은 투자효과를 나타내는 유지보수업무를 확인하는데 초점을 맞추어야 한다. 현재 원자력산업계와 NRC에서는 운영기술지침을 최적화시키는데 노력을 기울이고 있다.

3. 結 論

원자력산업계는 유지보수 개선에 상당한 노력을 경주하고 있다. 이러한 관점에서 장래의 전망은 어떠한가? 궁극적으로 전체 성능은 향상될 것이다. 즉, 안전성이 향상될 것이며, 가동률 및 성능의 향상으로 이용률이 높아질 것이며, 유지보수비용이 현재의 수준 보다 낮아질 것이다. 이러한 전망은 현실적으로 너무 낙관적인 것들이지만, 달성 가능한 것들이다. 그러나 쉽게 달성할 수 있는 것은 아니다. 최초의 이익을 얻는데 3~5년 정도 소요되며, 완전히 이익을 얻는데는 10년 정도 소요된다. 초기에 나타나는 징후는 혼합되어 있어서 혼동될 것이다.

목표 달성을 위하여는 원자력산업계와 규제기관이 공동으로 협의·노력하여야 하며, 협의시 공동의 목표와 함께 비공유부분도 고려하여야 한다. 불행하게도 유지보수에 관하여 NRC가 고려중인 규정이 일부 발전소에서의 유지보수 개선 초기 진전을 지연시키고 있으며, 원자력산업계 주도의 효율성에 의심을 갖고 있는 듯하다. 그리함에도 불구하고 현재의 유지보수 개선을 달성하는 것은 미국에서 원자력발전의 신뢰도와 기술성 및 자립의 관점에서 필연적이다.