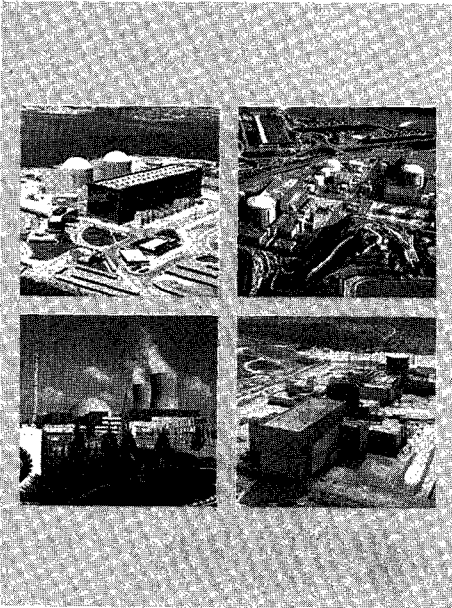


특집 : '94 ANS 冬季年次대회 발표 논문



위험도에 입각한 점검과 관리조직요소

原電관련조직내에 失手率영향주는 요소있으면 과감히 조직편제 개선해야

모든 원전은 위험도에 입각한 점검이 필요하며 실수율의 감소를 위해서는 관리적 요소의 개선이 중요한 것으로 지적됐다.

덜 중요한 인간실수라면 매번 저질러도 노심손상빈도 낮아 NRC점검 평점 나빠 정지기간 연장 따른 손실 연 3억 달러

Herschel Specter

미국 뉴욕 전력청

미국 원자력규제위원회(USNRC)는 원자력발전소에 대해서 危險度에 입각한 點檢을 적용하기로 하였다.

내가 알기로는 이 점검은 2단계 공정인데 發電所 個別 安全度 評價(IPE)로 부터 얻은 구체적인 자료를 토대로 하여 먼저 위험도가 충분히 높은 계통, 구조 및 부품(SSC)을 먼저 도출한다.

NRC검사관들은 이러한 SSC들의 상대적 중요도 등급을 기준으로 하여

서 그들의 점검 시간을 적절하게 배분함으로써 가장 중요한 부분에 가장 많은 관심을 가질 수 있도록 한다.

두번째 단계에서는 위험도의 크기에 따라서 여러가지 點檢着眼事項을 평가한다.

본인은 NRC의 이러한 노력이 이른바 兩者勝(모두 이기는) 전략(Win-Win)에 비유될 만큼 안정성을 향상시키고 비용을 절감할 수 있는 중요한 인허가 개선조치라고 평가한다.

위험도에 입각한 점검과 관리조직 요소

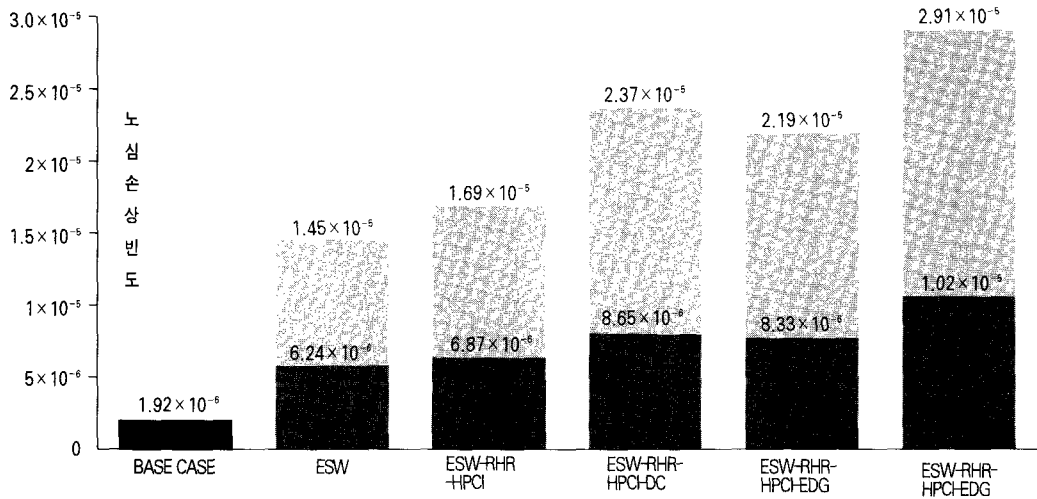


그림 1 : 진단평가팀(DET)이 주목한 계통의 利用不能度를 3배 및 5배 올렸을 때 노심 손상빈도(CDF) 계산치의 증가

먼저 비용 절감에 대해서 언급하고자 한다.

규제행위를 좀 더 매끄럽게 함으로써 NRC가 얻을 수 있는 잠재적 절감 이외에도 좀 더 定量化되고 透明하게 점검을 수행할 수 있으며 원자력 전력 회사들의 경제적 부담도 줄여 줄 수 있다.

PRISM Consulting社의 「로버트 커드린」氏는 NRC점검과정에서 나쁜 評點을 받음으로써 발전소 정지기간이 늘어나고, 이에 따라 원자력발전소의 생산성이 평균적으로 얼마나 떨어지는가를 계산한 바 있다. 그는 원자력산업계 전체로 볼 때 이용률로 따져서 약 4%정도 손실이 된다고 보았다.

이는 발전소 1기당 연 320만달러에 상당하며 원자력산업계 전체로는 약 3억달러가 된다. 상황을 더욱 어렵게

하는 것은 이렇게 큰 경제적 부담이 몇몇 발전소에 집중된다는 점이다.

경쟁이 더욱 치열해져가는 전력업계의 사정을 감안하면 운전 정지기간이 늘어나면 극단적으로는 발전소의 永久閉鎖로 이어질 수도 있다.

전력회사들은 원자력발전소를 안전하게 가동하고 있음을 보여 주어야 하는 것은 전과 다름이 없지만 그래도 위험도에 입각하여 좀 더 해석적이고 집중된 점검과 검사가 실시됨에 따라 나쁜 평점을 받을 가능성은 줄어들고 있다.

한가지 예를 들어 이해를 돕고자 한다. 얼마전 뉴욕전력청(NYPA)의 James A. FitzPatrick(JAF)발전소는 NRC의 진단 평가팀(DET)의 검사를 받은 적이 있었다.

DET는 시설물 및 절차서에 대해

구체적인 의견을 그리고 經營不實에 대해 일반적인 우려를 나타내었다. 거의 같은 시기에 NYPA는 JAF발전소에 대한 안전도 평가(IPE)결과를 NRC에 제출하였다.

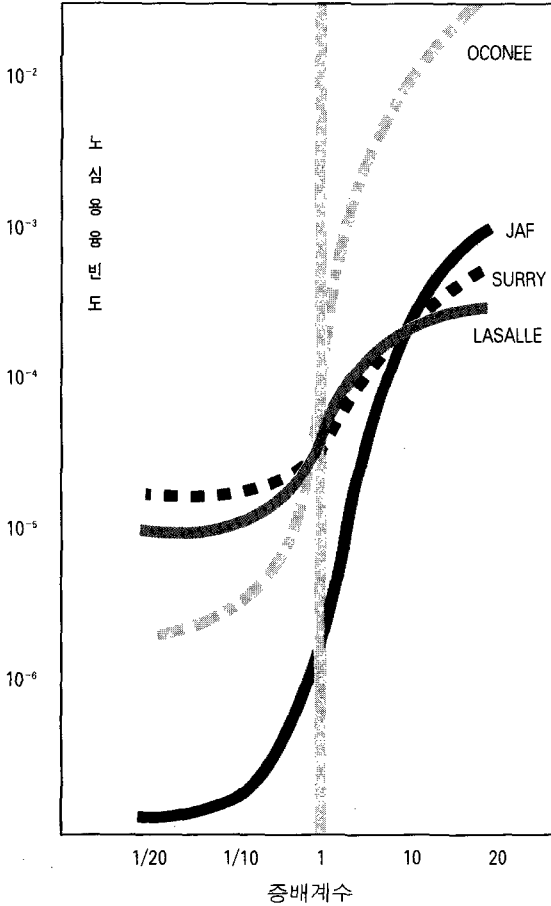
爐心 損傷頻度(CDF) 계산치는 평균적으로 연간 1.9×10^{-6} 으로서 지금까지 발표된 값들 중에서는 가장 낮은 편이었다.

솔직히 말해 이렇게 낮은 노심손상빈도는 믿을 수 없는 것이라고 본 사람도 있었다. 따라서 JAF의 IPE결과는 그 어떤 다른 원자력발전소의 NRC의 철저히 검토대상이 되었는데 NRC의 安全性評價報告書는 JAF의 IPE에 대해 매우 높은 점수를 주었다.

한편 NYPA는 NRC로부터 서신을 하나 받았는데 그 내용은 DET가

위험도에 입각한 점검과 관리조직 요소

그림 2 : 4개의 原電에서 増배계수 M에 따른 노심 용융 빈도



여러 가지 사항을 지적했는데도 이렇게 낮은 CDF가 나온 차이를 규명해 주기를 요청하는 것이었다.

NYPA는 이 서신에 응하기로 결정하고 검토에 착수하였다. 그 결과 DET가 시설물 및 절차서에 대해 지적한 것중 어떤 것은 JAF의 IPE와는 전혀 관련이 없었음을 알았다.

일부는 火災防護문제에 대한 것이었는데 이는 발전소 内部事件

(internal events)만을 다루는 JAF IPE의 범위를 벗어난 것이었고 또 일부 지적은 사고를 가정하더라도 CDF에는 관련이 없기 때문이었다.

예를 들면 가스 감쇄탱크가 깨지더라도 이는 노심손상으로는 이어지지 않는다.

DET 지적사항중 어떤 것은 IPE에서 평가해 본 결과에 따르면 위험도 측면에서 중요하지 않았으며, 어떤 것

은 위험도 측면에서 중요하지 않은 SSC와 관련이 되었던 것으로 나타났다.

DET 지적사항을 하나씩 분석하는 과정을 계속한 결과 지적사항중 약 75%를 버릴 수 있었다.

이렇게 하여 남은 지적사항은 위험도 측면에서 중요하다고 밝혀진 것으로 더 이상 버릴 것이 없었다.

이러한 결과는 맨 먼저 NYPA와 DET의 해결담을 딜레마에 빠지게 하였다. JAF IPE에 사용된 데이터 베이스의 大多數는 IPE제출시점에 맞추어 모두 현실화되어 있었지만 系統 利用不能率에 대한 발전소 데이터는 IPE가 착수되던 1986년 9월자로 凍結되어 있었던 것이다.

IPE를 시작하기 위해서는 이러한 데이터 베이스를 어떤 시점을 기준으로 동결하는 것이 현실적으로 필요하였겠지만 IPE 수행과정에서 위험도 측면에서 중요한 계통들의 성능이 더 나빠졌는지 좋아졌는지에 대한 답을 주는 것이 매우 어려웠다.

그렇다고 해서 이들 데이터 베이스를 현실화하는데는 상당한 시간과 자금이 소요되므로 이 방법도 실질적이지 못하였으며 특히 발전소 직원중 상당수는 DET 지적사항을 해결하기에 매우 분주한 상태였다.

그래서 JAF의 IPE를 써서 여러 가지 敏感度解析을 해보기로 하였다.

DET 지적사항중에서 아직 해결되지 않은 사항에 대해 사전분석을 실시

위험도에 입각한 점검과 관리조직 요소

하여 위험도 측면에서 중요하다고 판단된 계통들에 노력을 집중하였다. 즉 非常用水系統(ESW), 殘熱除去系統(RHR), 非常디젤發電機(EDG), 直流電源(DC), 그리고 高壓注入系統(HPCI) 등을 대상으로 점검하였다.

이러한 계통들에 대해 계통 이용불능을 당초 사용한 값의 3배 혹은 5배 증가되었다고 가정하여 JAF의 노심손상빈도를 다시 계산하여 보았다.

또한 여러 계통간 상호작용 여부를 보기 위하여 3개, 4개 혹은 5개의 계통이 동시에 이용 불능률 증가를 보였을 경우도 분석하여 보았다(그림 1 참조).

그 결과 노심손상빈도는 非常用水系統의 이용불능률에 좌우된다는 것을 모든 경우에서 알 수 있었다. 바꾸어 말하자면 다른 계통들의 이용불능률이 1986년 9월 이후에 엄청나게 높아졌더라도 만약 비상용수계통만 잘 작동하였다면 그 영향은 별 것이 아니라는 뜻이다.

예를 들면 JAF의 데이터 베이스에 의한 노심손상빈도는 연간 1.9×10^{-6} 이었는데 ESW, RHR, HPCI, EDG 및 DC가 동시에 5배의 이용불능률 증가를 보이면 노심손상빈도는 2.9×10^{-5} 으로 증가할 것으로 계산되었다.

그중에서 ESW가 약 절반인 1.45×10^{-5} 의 책임을 지게 되는 것으로 나타났다. 즉 ESW계통의 성능저하에 따른 노심손상빈도 증가분이 다른 여

러 계통그룹을 해석했을 때의 증가분보다 훨씬 컸다.

따라서 1986년 9월 이후 위험도 증가가 있었다면 비상용수계통(ESW)이 가장 큰 요인이었을 것이라는 관점에서 ESW에 대해 관심을 집중하였다.

그러나 NRC는 DET의 후속팀으로 별도의 點檢팀을 JAF에 보내었다. 그들은 ESW에 대해 安全系統機能檢査(SSFI)를 실시하고 이 계통의 성능은 매우 양호하다고 결론지었다.

JAF에서 가장 위험도가 높은 것으로 결론을 맺었던 종전의 NYPA 위험도 분석결과에 기초하여 NRC는 ESW에 그들의 검사노력을 집중하였던 것이다. 만약 다섯 가지 중요 계통의 이용불능률이 5배 증가하였을 때의 노심손상 빈도 증가분에서 ESW

의 기여분을 빼 버리면 노심손상빈도는 대략 1.5×10^{-5} 정도가 될 것이다.

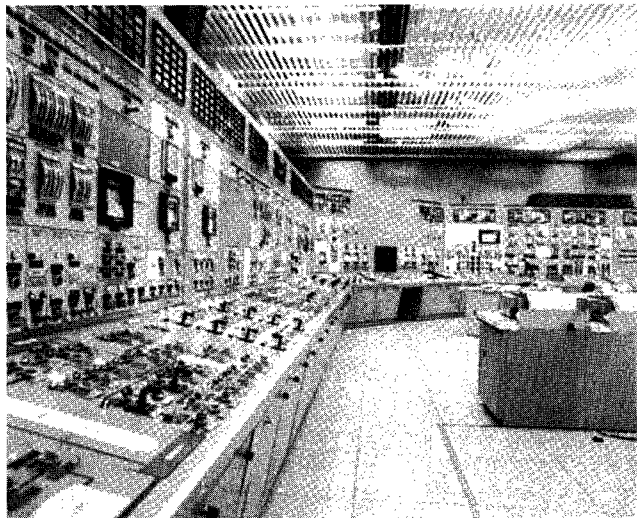
이러한 값은 다른 비등수형로(BWR)에서 계산된 노심손상빈도와 대략 비슷한 수준이다.

이를 근거로 해서 NYPA는 1986년 9월 이후에 상당한 위험도 증가가 있었을 가능성은 별로 없다는 결론을 맺었다.

아마도 NYPA는 NRC의 위험도에 기초한 검사방식의 첫 번째 수혜자일 것이다.

이제 위험도에 입각한 점검과 검사가 안전 측면에 미치는 영향에 대해 보기로 하자.

산업계, NRC 혹은 그 누구든간에 위험도 측면에서 중요한 SSC에 대해 관심을 집중한다면 안전성이 대폭 향상될 것은 명확하다.



“위험도에 입각한 점검”에서 휴먼에러(Human Error) 등에 영향을 주는 요소가 있으면 조직을 개선해야 한다.(原電중앙제어실)

위험도에 입각한 점검과 관리조직 요소

그러나 위험도에 기초한 점검과 검사는 組織要素에 관해 해묵은 숙제를 푸는 데에도 가치가 있을 수 있다.

DET/IPE 검토과정에서 NRC가 제기했던 두번째 이슈는 모든 IPE가 풀어야 할 도전적 과제였다. 즉 IPE 분석과정에서 인간행동을 평가할 때 상당한 정도의 불확실성이 인정되므로, NRC의 관심은 經營不實이 施設材에서 적용되는 共通發生原因(Common Cause)과 같은 효과를 내지 않을까 하는 것이었다.

발전소 경영부실이 운전원의 失手增加를 유발하여 위험도를 심각하게 증가시키지는 않을까? NRC가 종전에 후원한 연구 결과들에 따르면 Lasalle, Surry, Oconee발전소의 경우 운전원 실수율이 높을 때 노심손상빈도도 같이 높아진다고 나타났다.

이번 분석에서는 운전원의 모든 각각의 실수율을 모두 같이 M배 올리고 이에 따른 노심손상빈도를 다시 계산하였다. M 자체는 여러 가지 조직 요소의 함수가 된다. 계산결과, 노심손상빈도가 매우 큰 증가를 보였기 때문에 노력을 집중하여 여러가지 조직구조를 대상으로 조직 요소가 CDF에 미치는 영향을 숫자로 나타내어 보자 하였다.

즉, 이러한 인문사회과학 연구결과를 IPE CDF 결과에 정량화할 수 있도록 補正係數化하고자 하는 의도가 있었다. 결론부터 말하자면 이러한 노력은 성공적이지 못하였다.

일반적으로 경영이 부실하면 위험도를 증가시킨다고 믿는 경향이 있다. 본인도 개인적으로 이것이 사실이라고 믿는다.

그러나 경영부실이 모든 인간행위에 있어서 실수를 일으키는 共通發生原因으로 작용한다고 보는 增倍係數 M 방법은 전반적으로 틀린 것으로 보인다.

NRC의 진단평가팀(DET)은 JAF의 운영·관리조직에 있어서 대부분의 부서는 제대로 기능을 발휘하고 있지만 반드시 그렇지 않은 부서도 있다고 보고하였다. M모델이 가정한 것처럼 부실경영이 모든 사람에게 영향을 준다면 DET의 조직에 관한 결론은 좀더 포괄적이어야 했을 것이다.

좀 더 넓은 次元에서 보면 한 전력회사가 여러 발전소를 보유·운영하는 경우가 더러 있는데, 어떤 발전소는 NRC로부터 좋은 評點을 얻고 어떤 곳은 나쁜 評點을 얻지만, 사실은 모두 같은 최고 經營陣에 의해 운영되고 있다.

따라서 M값으로 單一數值를 쓸 것이 아니라 경영 환경에 따라 여러 가지 값을 쓰는 방식으로 바꿀 필요가 있다.

대상이 되는 사람들이 틀릴 뿐만 아니라 종사자들이 교육을 받고 주어진 절차를 제대로 따르는지 확인된다면 이는 경영부실이나 여러 가지 바람직하지 않은 조직 요소에 대해 부분적

이지만 하나의 防禦壁으로 간주될 수 있을 것이다.

뉴욕전력청(NYPA)는 NRC가 조직 요소에 대해 갖고 있는 해묵은 관심사항을 알아 보기 위해 JAF발전소의 IPE를 다시 한번 활용하였다.

事故前 및 事故後의 인간 실수율에 대해 우리가 갖고 있는 자료에 근거하여 여러 가지 증배계수 M을 설정하고 NRC가 그린 것과 같은 커브를 JAF에 대해 한 번 만들어 보았는데 그 결과는 그림 2에 정리되어 있다.

이 실험으로부터 인간 실수는 비교적 중요하지 않으며 여러 가지 인간 실수에 대해 定量化하고 그 順位를 매길 수 있다는 매우 중요한 사실을 발견했다.

JAF의 경우 사고 전의 중요한 인간실수는 약 10개를 손꼽을 수 있는데, 10번째로 중요한 인간 실수는 첫 번째로 중요한 인간실수에 비해 그 중요성이 67분의 1밖에 되지 않았다. 게다가 위험도에 영향을 주는 인간 실수는 몇 개에 지나지 않았다.

만약 운전원이 10번째로 중요한 事故後 運轉行爲를 매번 반드시 잘못한다고 하면 노심손상빈도는 단지 6.8×10^{-8} /년 밖에 증가하지 않는다.

발전소 상태를 조정하는 운전 행위를 제외한다면 사고전 및 사고후의 비중있는 운전행위가 20개 정도에 불과하다는 사실이 매우 중요하다. 이러한 인식 아래 조직 요소에 대해서 새로운 접근이 가능하다.

위험도에 입각한 점검과 관리조직 요소

첫째, 이렇게 중요한 20여개의 운전 행위에만 집중하여야 한다.

절차서는 제대로 쓰여져 있으며, 교육·훈련은 적절하며, 운전행위를 하기에 적절하도록 각종 정보가 충분히 운전원에게 주어지는지, 모든 필요한 기자재가 제자리에 있어 쉽게 접근할 수 있는지, 온도·방사선 세기와 같은 현장 조건은 괜찮은지, 운전행위 중에는 자동화 할것은 없는지, 운전원에게 좀 더 시간을 주고 좀 더 나은 대책을 수행할 수 있도록 설계를 개선할 사항은 없는지, 이 모든 것이 유용한 의문사항이다.

조직 요소 모델이나 인간의 신뢰도 분석이 향상되지 않더라도 운전원의 실수중 중요한 몇 가지에만 집중하면 인간 실수율은 줄어 들 수 있는 것이다.

둘째, 실제 연습, 시뮬레이터 혹은 기타 방법으로 인간실수율을 측정해 보는 것이 실질적일 수도 있다는 것이다.

위험도에 기초한 검사와 마찬가지로 조직 개선이 위험도에 미치는 영향은 조직개선 전후의 실수율(失手率)을 측정하여 노심손상빈도(爐心損傷頻度) CDF를 계산해 보면 정량화할 수 있을 것이다.

즉, 우리는 성능에 기초한 규제와 위험도에 기초한 규제를 조합하여 사용함으로써 조직 요소를 실제로 계량화할 수 있는 것이다. 위험도 측면에서 조직 요소의 중요성을 분석하는 이

러한 접근방법은 중전의 시도와는 정 반대라는 점이 매우 중요한 발전이라 할 수 있다.

여기서 우리는 성능측정과 확률론적 안전성 평가방법론(PRA)을 이용하여 여러가지 조직 구조가 위험도 측면에서 얼마나 중요한지를 평가할 수 있다.

조직 요소와 위험도간에 어떤 관계가 있다는 가정 아래 PRA결과를 수정하려고 노력하기보다는 PRA결과에 기초하여 조직구조를 개선하는 것이다.

위험도에 기초한 점검·검사와 조직 요소를 연결하는 더욱 원초적인 질문은 그림 1로 부터 유추할 수 있다.

여러 계통의 이용불능도가 한꺼번에 심각하게 올라 가더라도 기본이 되는 노심손상빈도는 크게 증가하지 않

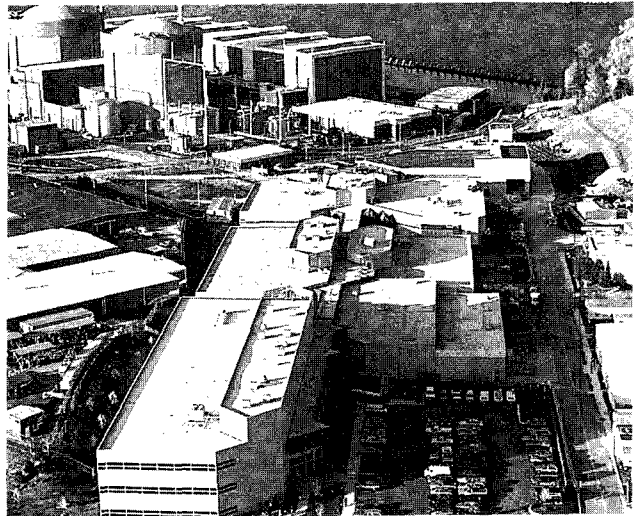
는다.

그렇지만 NUREG/CR-5641 “운전 위험도에 기초한 형태관리 연구”에서는 위험도가 엄청나게 증가한다고 하는 결과도 있기는 하다.

이러한 위험도 증가는 한 두가지 특정기기가 동시에 이용불능상태에 있다고 보았기 때문에 일어났다. 따라서 그림 1에 나타나 있듯이 연평균 이용불능률은 한 가지 정보만을 보여주며 위험도가 높은 문제를 언급하지는 않는다.

이용불능률이 증가하면 연평균 CDF값이 약간 영향을 받지만 위험도가 높은 형태의 頻度에는 상당한 영향을 줄 수도 있다.

따라서 위험도에 기초한 점검·검사를 좀 더 완벽하게 시행하려면 위험도가 높은 형태와 연평균 위험도 문제를



미국의 Calvert Cliffs 原電의 全景