

印度最初의 加壓重水爐 Rajasthan原電

“Rajasthan 원자력발전소(RAPS)는 인도에서 최초로 CANDU형 원자로 2기를 보유한 원전으로서 이 발전소의 운전경험에서 귀중한 교훈을 많이 획득할 수 있었다. 이 교훈은 인도의 과학기술자들이 후속 가압중수로를 설계하는데 긴요하게 응용되었으며, 특히 1호기는 인도 가압중수로계획의 파일로트플랜트 역할을 하였다.”

인도원자력발전공사(NPC)가 운영하고 있는 Rajasthan원전(RAPS)은 2기의 220MWe 가압중수로(PHWR)로서 캐나다원자력공사(AECL)가 설계한 것이다. 이 발전소는 CANDU형 원자로로서 천연우라늄을 연료로 사용하며 수평압력 튜브, 저압중수감속재, 고압중수냉각재, 가동중 핵연료장전 등의 특성을 갖고 있다.

발전소의 위치는 Rajasthan주 Kota 남서쪽 64km 지점의 두 댐사이에 형성된 Rana Pratap Sagar호수 옆이다.

1,2호기는 1973년 12월과 1981년 4월에 각각 상업운전을 시작했다.

背景

Rajasthan원전은 제1세대 가압중수형 원전으로서 캐나다 Ontario Hydro사가 운영하는 캐나다 Ontario주 Tiverton의 Douglas Point발전소와 동일한 설계이다. Douglas Point발전소는 1968년 9월에 상업운전을 시작하여 1984년 5월에 Ontario Hydro사에 의해 영구히 운전정지되었다.

1974년에 인도가 Rajasthan사막에서 핵실험을 한 다음에 캐나다는 기술지원을 중단했다. 그 당시 RAPS 2호기는 약 60%의 건설공정이 진행된 상태였다. 그러나 캐나다 기술진은 그때 이미

그들의 임무를 마치고 1971년 이전에 캐나다로 돌아간 다음이었다. 이같은 캐나다의 기술지원과 협력의 중단이 오히려 인도로 하여금 자국산 PHWR의 건설 및 설계 능력을 배양하게 하는 계기가 되었다.

그런데 캐나다는 기술지원을 중단하기 전부터 이미 인도의 기술자립을 원했었던 것으로 생각된다고 RAPS 1,2호기 소장인 G. R. Srinivasan씨는 다음과 같이 회고했다. “왜냐 하면 캐나다는 인도를 CANDU기술개발의 훌륭한 동반자로 생각했기 때문이다. 캐나다는 개발도상국이 스스로의 능력으로 CANDU기술을 유지할 수 있다면 그들 자신에게도 이익이 될 것이라고 생각했었다”고 말하였다. 인도가 캐나다와 정보교환을 하게된 주목적중의 하나는 인도의 국산화능력 배양이었다고 Srinivasan씨는 덧붙였다.

실제로 30여명의 인도과학자, 기술자, 관리자, 기능인이 Douglas Point발전소의 시운전에 참여했다. “자신이 직접 해보는 것보다 좋은 것은 없다. 거기서 얻은 경험은 우리가 완벽한 지식을 습득하는데 큰 도움이 되었다”고 Srinivasan씨는 말했다. 캐나다의 Douglas Point발전소에 인도가 참여할 수 있었던 것은 Colombo계획의 후원에 의한 것이었다.

Douglas Point발전소에서 인도기술진은 캐나다기술진과 함께 현장교육 뿐만 아니라 강의실교

육도 받았다고 B.K.S, Nair 씨가 말했다. 그는 1967년부터 1982년까지 RAPS의 화학부서 책임자를 역임했고, 지금은 봄베이에 있는 NPC의 기술부서 책임자이다. 그는 그 당시를 다음과 같이 회상했다.

“현장교육과정에서 우리에게는 상당히 높은 지위에 상응하는 책임이 주어졌다. 예를 들면, 나의 경우 Rajasthan 발전소 화학책임자로 교육받았으며, Douglas Point 발전소의 화학책임자와 함께 일했다. 나는 그곳에서 2인자로 여겨졌고, 그가 없을 때에는 언제나 내가 그의 일을 대신했었다.”

“Douglas Point 발전소가 임계상태에 도달한 이후 화학적인 문제를 비롯한 여러가지 문제가 발생했다. 이것이 나에게서 그러한 문제의 해결방법을 익힐 수 있었던 좋은 기회가 되었고, 실제로 우리의 발전소에 적용할 수 있는 교훈을 얻을 수 있었다. 그래서 화학적 제어는 우리의 발전소에서 성능이 아주 우수한 부문중의 하나가 되었다.”

“우리와 캐나다의 유대는 아주 강하다고 생각한다. 그리고 그들의 도움을 우리는 결코 잊지 않을 것이다”라고 말했다.

캐나다의 기술지원중단 이후 설비의 공급자로부터 '예비부품과 정보가 단절된 것은 크나큰 문제점이었다고 Nair씨는 말했다. RAPS에서는 기술지원 중단문제를 해결하기 위해 여러 부서의 인력을 선발하여 “국산화 부서”를 신설했다. 이 부서의 임무는 캐나다로부터 더이상 공급받을 수 없는 설비를 인도의 제작업체로 하여금 생산하도록 유도하는 일이었다.

1974년까지 RAPS기술진은 원래의 설비제작업체에게 질문서를 보내서 그에 대한 답변을 신속하게 취득하는 일에만 주력했다. 그러나 기술지원 중단 이후 어떤 설비 하나를 유지보수하려고 하여도 우선 그 부품의 재질을 몰랐고, 설계도면도 없었다. 그래서 설계도를 작성하기 위해 설비를 분해해야만 했었다. 그뿐 아니라 고장관련자료도 전무했다. 자료부재는 단순히 정보단절 때문만은 아니었다. RAPS에 처음 제작 사용되는 부품에 관해서는 제작업체 조차 자료가 없었

으며, RAPS와 Douglas Point 발전소의 운전경험을 기다리고 있는 실정이었다.

Rajasthan 1,2호기의 운전담당 부소장인 K. M. Sinha씨는 이렇게 말했다. “1호기에는 근본적인 문제가 있었다. 이 발전소는 이와 같은 유형의 최초 발전소로서 원자력설비 뿐만 아니라 재래식 설비에도 문제가 있었다.”

“1971년부터 1979년까지 우리는 1호기와 씨름을 했다. 1979년~1980년에 이르러 비로소 우리는 1호기를 잘 운영할 수 있게 되었다. 이제 엔드실드(end-shield)문제만 제외하면 1호기는 2호기 만큼 잘 가동된다고 할 수 있다. 다만 운전효율이 조금 뒤떨어지고, 누수량이 약간 많을 따름이다”라고 말했다.

“중요한 설비문제는 거의 해결되었지만, 대신에 아주 세심한 감시를 계속해야 한다”라고 Sinha씨가 말했다. 발전소의 초기설계에 자동설비가 많이 포함되어 있지 않았기 때문에 운전원에 의한 요인이 아주 중요하다고 설명했다. 즉, 운전원은 발생가능한 문제점에 대하여 항상 경각심을 가지고 지켜봐야 하며, 이같은 감시방침은 부품의 신뢰성과 이용률을 향상시키는데 큰 기여를 했다고 부연했다.

RAPS에서 발생한 문제는 여러 설비의 고장과 송전망계통의 혼란, 그리고 1981년~1989년 사이에 몇 차례 발생한 남단 엔드실드의 누설 등이다.

문제가 된 설비는 열전달펌프, 감속재열펌프, 운전정지냉각열교환기, 감속재열교환기, 발전기의 고정자 도선 등이다. 그외에 파손된 부품으로는 고압 및 저압 터빈블레이드(현재 재설계하여 해결됨), 공기분리기 트레이스택(tray stack), 복수기와 재가열기의 튜브 등이 있다. 또한 연료장전기가 노후화되고 있으나 예비부품을 구할 수 없는 상태여서 여전히 문제점으로 남아있다.

RAPS가 병입되어 있던 소용량의 Chambel 전력계통이 대용량의 Nothern 계통에 일괄적으로 병입됨에 따라 전력계통의 혼란에 기인한 원전의 운전정지는 대폭 감소했다. “또한 우리는 특수한 고립구조를 이용한다. 즉, 전력계통에 어떤 문제가 발생하더라도 우리 발전소는 일정한 부하를 유지할 수 있도록 고립시킨다”고 Srinivasan씨

는 말했다.

“RAPS의 경우 발전소에서 약 250km 떨어진 곳에 공업도시가 있어서 약 200MW의 알맞은 부하를 발전소에 제공할 수 있다. 그래서 전력계통이 다시 정상으로 돌아올때까지 당분간 이 부하만을 연결시키는 독립방식으로 운전한다.”

“만약 부하가 없으면 비등수형이나 가압경수형 원자로와는 달리 우리 발전소는 정지되고 만다. 이것은 CANDU형 원자로만의 특수한 문제이다. 만약 200MW출력으로 운전하다가 부하가 완전히 없어질 경우 30분 이내에 부하를 다시 증가시키지 않으면 제논(xenon)의 농도가 증가하여 반응도가 감소한다. 그렇게 되면 약 36시간이 지나야 재임제가 가능해진다. 이것이 발전소의 이용률 저하에 직접적인 영향을 미친다. 한편 미국의 발전소에서는 2~3시간 이내에 출력을 되살릴 수 있는 충분한 여유반응도를 갖고 있다” 고 지적했다.

設 計

RAPS의 원자로용기에는 306개의 칼란드리아 튜브가 관통하고 있다. 칼란드리아 튜브의 바깥쪽은 중수감속재로 채워져 있고, 내부에는 핵연료 다발과 중수냉각재가 들어있는 압력튜브가 있다. 원자로용기를 관통하는 칼란드리아 튜브의 양단은 엔드실드(end-shield) 집합체로 둘러싸여 있으며 이 집합체는 엔드피팅(end-fitting)에 의해 지지되고 있다.

칼란드리아의 하부에는 덤프탱크가 설치되어 안전정지(safety shutdown)시에 중수감속재가 중력에 의해 배출될 수 있게 되어 있다. 감속재는 U자형의 배출구와 연결된 헬륨가스의 압력에 의해 위치가 정해진다.

압력튜브에는 19개의 핵연료펜슬(fuel pencil)로 구성된 핵연료다발 12개가 들어있다. 2대의 원격조정 핵연료장전기가 설치되어 압력튜브의 한쪽끝에서 핵연료다발을 장전하고, 반대쪽 끝으로 핵연료를 방출시킨다.

단기간의 원자로반응도 제어를 위해 12개의 코발트 흡수조정봉을 삽입 혹은 인출하여 실시하

는데, 발전소 시동시 반응도 제어를 위해서는 감속재의 보론농도를 조절하고 시동 및 정지시에 감속재 준위도 조절한다. 장기간의 반응도 제어는 핵연료 재장전을 조절에 의해 이루어진다.

각 발전소의 격납용기는 강화된 철근콘크리트로 제작된 벽과 반구형의 프레스트레스트 콘크리트 돔으로 구성되어 있다. 돔의 하부에는 400,000 갤런의 경수가 탱크에 저장되어 있어 냉각재상실사고시에 유발될 수 있는 물·증기혼합체의 고압력을 완화하기 위해서 스프레이계통에 냉각수를 공급한다.

발전소의 원자로 양단에는 각각 4대씩 총 8대의 증기발생기와 8대의 순환펌프가 설치되어 있다. 증기발생기튜브 안쪽에는 중수냉각재가 흐르고, 튜브 바깥쪽 쉘에는 2차 냉각재인 경수가 급수된다.

End-shield의 龜裂

RAPS에서 발생한 가장 심각했던 문제는 1호기 원자로의 남단 엔드실드 균열로서 한동안은 운전을 계속할 수 있을지에 대해 의구심이 들 정도였다. 엔드실드는 핵연료장전기측의 작업원들을 방사선으로부터 차폐하고 엔드피팅과 냉각재 튜브집합체를 지지하고 있다.

엔드실드는 3.5% 니켈탄소강으로 제작된 38.1mm 두께의 칼라드리아측 튜브시트(sheet)와 탄소강의 핵연료장전기측 튜브시트로 구성되어 있다. 2개의 튜브시트는 격자튜브로 용접되어 있고, 격자간의 공간에는 두꺼운 탄소강 차폐막이 설치되어 있다. 격자튜브 주위의 공간에는 탈염된 경수를 순환시켜서 엔드실드계통을 냉각시킨다.

최초의 균열은 계획된 운전정지기간중인 1981년 9월 20일 고준위방사선구역인 남단 엔드실드의 칼라드리아측 튜브시트에서 경수가 누출됨으로써 발견되었다. “캐나다 기술진들은 재질을 잘못 선택했다는 것을 어느 단계에서 인식했으며, 그들이 보다 명확히 이 사실을 알게되자 우리에게 이야기했다. 그러나 유감스럽게도 RAPS 1,2호기 뿐만 아니라 MAPS 1호기 경우에도 이미

때는 늦었었다”고 Srinivasan씨는 말했다. 즉, 같은 재질을 이 세 발전소의 여섯 부분의 엔드셴드에 사용했기 때문이다. 그 이후의 후속기에서는 이 부분을 저탄소 304L스테인레스스틸로 교체 제작했다.

“여러 요인이 복합되어 그러한 결함이 나타난 것으로 우리는 믿고 있다”고 Srinivasan씨는 말하면서 “이 복합된 요인이 RAPS 1호기의 남단 엔드셴드에서만 발생하였고, 나머지 다섯 곳의 엔드셴드에서는 다행히 결함이 나타나지 않았다”고 덧붙였다.

인도의 Bharat Heavy Electrical사가 캐나다에서 주형(Template)을 가져와서 엔드셴드를 주조하고 구멍을 뚫었다. 그런데 RAPS 1호기 남단 엔드셴드의 일부 격자구멍은 정확한 원형이 아닌 타원형이어서 다시 가공하여 수정하여야만 했다.

재가공작업은 국부응력집중을 야기시킬 것으로 인식되어 그 부위의 응력을 해소하기 위해 엔드셴드의 일부를 열처리했다. 그러나 이 열처리가 적절히 되지 않았을 것이라고 RAPS의 직원들은 전했다.

균열된 부분을 플러그하기 위한 첫 시도로 아연규산염젤리를 이용한 화학적 방법이 채택되었다. 이 방법을 선택한 것은 용접을 할 경우에 또 다른 문제가 발생할 것을 우려했기 때문이라고 RAPS 1,2호기의 보수담당 부소장인 R.S. Choudhary씨가 말했다. 화학적인 플러그ing으로 예상보다는 오래 유지되었지만 영구적인 플러그나 보수를 하여야 하지 않을까 하는 불확실성 때문에 “일시적인 조치”로 간주되었다고 Srinivasan씨는 말했다.

1호기는 1982년 1월 28일부터 다시 가동되어 그후 다시 누설이 발생한 1982년 3월 4일까지 계속 운전되었다. 3개 격자사이에서 2개의 깊은 균열이 발견되었다. 그 부위에 있는 냉각채널 3개를 절단, 제거하고 플러그하였다.

봄베이 근교에 있는 Bhabha원자력연구센터(BARC)의 과학자들과 함께 RAPS기술진은 공동으로 인듐차폐플러그를 개발했다. BARC에서 이 플러그에 대해 방사선조사와 열주기 실험을

하였고, 실물모형이 BARC와 RAPS에서 이용되었다.

이 방법으로 보수하는데 거의 3년이 걸렸다. 그후 1985년 2월 1일 발전소는 다시 가동을 시작했으나 1985년 5월 2일 누설이 다시 발생하여 운전을 정지하였다. 또다른 균열이 발견된 것이다. 보수를 위해서 균열이 생긴 부분의 핵연료채널에서 핵연료를 완전히 꺼낸 다음 절단, 제거시켰고, 또 응력과 튜브시트와의 온도구배를 감소시키기 위해 일부 핵연료채널에서도 핵연료를 제거시켰다.

1986년부터 1987년까지 사이에 기계적인 플러그와 그랩호일개스키트를 사용하는 새로운 방법이 개발되어 이 방법을 시행하였는데, 이미 플러그한 부분도 그랩호일개스키트로 모두 다시 보수하였다. 1987년 8월 9일 1호기는 재가동되었다. 그러나 1988년 12월 다시 새로운 균열이 발견되어 RAPS에서 개발한 그랩호일개스키트로 밀봉하고 1989년 3월에 재가동을 시작했다고 메인テナンス기술자인 D.K.Sisodia씨가 말했다. 1989년에 또다시 균열이 발견되었고, 같은 방식으로 플러그했다. RAPS 2호기에서는 엔드셴드균열이 발생하지 않았다.

1호기는 방사선조사로 열화된 엔드셴드재질이 손상받을 위험성을 감소시키고 더이상의 균열을 억제하기 위해 전출력의 50% 이내, 즉 복수기로 유입되는 호수의 냉각수온도에 따라서 약 90~95MWe의 출력으로 제한운전되고 있다. 이 출력제한은 원자력규제국(AERB)의 조치이다. 현재 출력을 75%로 증가시키는 방안을 검토중이라고 Srinivasan씨는 밝혔다. 그런데 1호기는 출력제한 이외에도 냉각, 가열, 배수 등의 속도에 대해서도 제한을 받고 있다.

마찬가지로 2호기도 운전제한을 받고있지만 그 범위는 훨씬 적으며, 이유도 1호기와 상이하다. 냉각수의 평균온도가 캐나다 공급자측이 예상했던 21℃보다 높은 28℃였기 때문에 복수기의 진공제한으로 인해 실제출력은 190MWe로 제한되고 있다.

RAPS 1호기 남단 엔드셴드 균열을 보수하면서 다각도의 안전분석이 수행되었다. 예를 들면,

중수가 흐르고 있는 뜨거운 냉각재튜브에 상대적으로 차가운 경수가 떨어질 경우 균열이 발생할 가능성이 있다는 시나리오를 설정하고, 이에 대비한 특수한 비상절차를 강구했다. “우리는 이런 상황에 대비할 수 있는 잘 훈련된 운전원을 각 운전조 별로 적어도 4명씩 배치했다. 그리고 이 운전원들을 정기적으로 재교육시키고 있다”고 Srinivasan씨는 말했다.

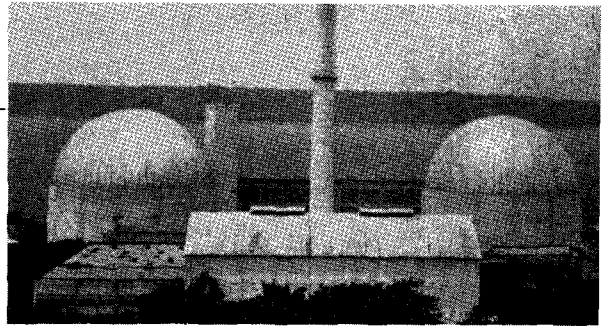
1호기의 출력제한 때문에 원자로 양단의 엔드셴드를 다른 재질로 하고 냉각방식도 변경시킨 새로운 설계의 엔드셴드로 교체하는 것을 진지하게 고려하고 있다고 RAPS 1,2호기의 기술책임자인 D.K.Banerjee씨가 말했다. 이것은 NPC사가 최근에 표준화한 235MWe급 PHWR의 엔드셴드를 이용함을 의미한다. 만약 1호기의 엔드셴드를 교체한다면 그 정지기간중에 2호기에서 이미 수행된 발전소 개조사항을 1호기에도 적용하게 될 것이다.

1호기 남단 엔드셴드의 균열위치를 확인하기 위해 초음파검사, 염색침투탐상시험 등 다양한 방법이 이용되었고, 밀봉고무합성재로 균열의 형상을 파악하였다. 보수작업은 고준위방사선구역에서 수행되었는데, Sisodia씨는 “플러깅을 할 때, 그 지역의 방사선량은 시간당 거의 5~8렘(rem) 정도였다. 작업할때마다 우리는 특수한 차폐장치를 이용했다. 신속하고 적절한 순서로 작업하고, 특히 방사선 비임구역을 피할 수 있도록 모형을 제작하여 작업원들을 훈련시켰다”고 말하였다.

엔드셴드 균열은 그 부위에서 탈염경수가 누출되면 감지된다. “누수는 즉각 감지되어 제어실에 기록된다”고 Choudhary씨가 말했다. 또한 엔드셴드의 하부에 습도계가 설치되어 있다.

維持補修

과거에는 RAPS의 유지보수를 위한 정기적인 운전정지가 매년 행해졌지만 요즘은 매 2년마다 실시되고 있다. 유지보수를 위한 정지기간은 약 6주 정도라고 Banerjee씨가 말했다. “연례적인 정기점검을 위해 운전정지를 하기 전에는 이



용률이 상당히 높다. 그런데 정기점검후 1개월 정도가 지나면 다시 이용률이 낮아져 마침내 그 전과 같은 수준으로 되돌아 간다는 사실을 알게 되었다”라고 Sinha씨는 말했다. 수년동안 이런 현상을 겪게 되자 유지보수를 위한 운전정지를 지나치게 자주 하고 있다는 결론에 도달했다. 그래서 2호기에서는 1988년에 연례정기점검을 위한 운전정지를 하지않아 사실상 운전주기를 2년으로 늘렸는데 그 결과가 아주 만족스러웠다. 즉, 아주 높은 이용률을 달성하였던 것이다.

RAPS에서는 안전계통에 대해 예방유지보수를 기술사양서에 의거하여 수행하고 있다. 그러나 비안전계통에 대해서는 접근방식을 달리하여 예방유지보수 보다 상태감시결과를 토대로 한 예측유지보수에 주력하고 있다. 이 방식은 보다 많은 시간과 인원을 안전관련계통에 할애할 수 있고, 비안전계통의 예방유지보수를 위한 불필요한 운전정지기간을 단축시킬 수 있다.

과거의 운전정지기간중에는 그전 운전주기의 경험을 토대로 발전소의 여러 부분을 개조하였는데, 그 결과 운전정지기간이 길어질 수 밖에 없었다고 Banerjee씨는 회상하였다. 그러나 최근에는 발전소의 성능이 현저히 향상되어 발전소 개조작업이 급격히 줄어들었다고 설명했다.

“우리는 높은 이용률을 확보할 수 있어야 한다. 그래서 아주 중요하거나 또는 안전계통과 직결된 문제가 아니면 더 이상 발전소 개조작업을 하지 않을 방침이다”라고 Sinha씨는 말했다.

“운전정지계획은 현재 잘 관리되고 있으며, 곧 전산화시킬 예정이다. 전산화계획은 현재 실시되고 있지 않으나 Madras의 한 발전소에 처음 적용할 예정이며, 그후 다른 모든 발전소에 대해서도 실시할 것이다”라고 Srinivasan씨는 말했다.

2호기에서는 캐나다가 기술지원을 중단하기 전에 권고한대로 발전소를 부분적으로 개조했다. 1974년까지는 양국이 공동으로 이같은 노력을 했다. RAPS에서는 캐나다측이 Douglas Point 발

전소에서 행한 상세한 변경사항을 입수하여 이용할 수가 있었다고 Srinivasan씨는 말했다. “그러나 유감스럽게도 1974년 이후에는 많은 어려움에 직면하게 되었고 그후 몇 회의 운전정지가 발생했으며, 우리가 운전하고 있는 방식에 대해서도 만족스럽지가 않았다.”

“그래서 우리는 두 위원회를 조직했다. 문제점을 정확히 파악하기 위해 원자로정지와 이용률 감소사례 등의 운전연혁을 체계적으로 분석 연구했다. 그리하여 여러 분야에서 개조해야 할 부분을 규명했다.”

1974년 이후에 인도가 입수할 수 있었던 정보에 근거하여 Srinivasan씨는 다음과 같이 말했다. “우리가 설계변경한 부분중 일부가 캐나다에서도 동시에 수행되었다. 비록 서로 독립적으로 이루어졌지만 기술적인 사고는 서로 일치한 것이다.”

인도는 RAPS 1호기의 운전경험을 토대로 2호기의 여러 부분을 개조했다. 수정한 내용은 본질적으로 사소한 것이지만 성능은 크게 개선되었다.

2호기에서는 약 1,100개 항목이 수정되었고, 1호기에서는 그보다 적은 약 800개 항목 정도가 수정되었다. 그것은 그 시점에서 1호기를 계속 운전할지 여부를 확신하지 못하여 수정계획을 유보했기 때문이라고 Srinivasan씨는 말했다. 1호기의 변경항목이 명확하게 정해지자 이 개조작업에 필요한 운전정지시간 확보가 문제로 등장했다. 지금까지 수행한 것보다 더 오랜 시간이 필요하기 때문이었다. “그러나 현재 우리는 일괄적으로 수행할 준비가 되어있다. 1호기를 장기간 운전정지하게 되더라도 우리는 그일을 수행할 것이다”라고 Srinivasan씨는 말했다.

2호기의 성능향상에 큰 영향을 준 개조항목에는 설비를 간략화하기 위해 펌프와 같은 부품의 제거가 포함되어 있다. 또한 잠재적인 누설부위라고 할 수 있는 여러 밸브도 제거했다.

TMI와 체르노빌에서 발생한 중대한 원전사고와 인도원전에서 큰 고장이 발생하면 운전중 원전안전성심의위원회라고 불리우는 안전기구가 이 사고를 체계적으로 검토한다. 이 심의위원회는 외부전문가로 조직된 기구로서 원자력규제국

(AERB)에 검토결과를 보고 하고, 운전중인 원전에 대하여 안전권고를 한다. 예를 들면, 미국 TMI-2발전소사고 직후에 이 심의위원회는 다양한 비정상 상태에 대처하기 위한 비상운전절차를 개발하기 시작했다.

RAPS에서 어떤 문제가 발생하면 발전소운전검토위원회(SORC)가 그 문제를 분석하여 해결책을 제안한다. 그러면 발전소설계그룹의 기술진이 개조계획을 수립한다. 실제로 앞으로 2년 이내에 1,2호기 모두에 안전과라미터표시계통(SPDS)을 설치할 것을 검토중이다.

개조 가능성이 큰 항목으로 현재 검토 중인 것은 (1)냉각수온도가 기준치보다 높기 때문에 유발되는 복수기의 낮은 효율 개선, (2)복수기튜브 손상과 그에 따른 튜브플러징을 감소시키는 것이다.

Sinha씨는 발전소 노후화에 따른 문제가 발생하고 있다고 말했다. 특히, 누설과 균열을 야기시키는 소규모의 이상유동(two-phase flow)배관이 문제이다. 이와 같은 성능열화를 감시하기 위해 가동중검사를 하고 있다. 여기에는 1차계통 중수배관과 지지대, 2차계통 지지대, 보일러 연결부위와 벤트 등이 포함된다. 또한 가동중검사에서는 1차 및 2차계통의 부식과 마모상태도 감시한다.

발전소설비중 일부는 1963년에 설치되었다. 이와 관련하여 Srinivasan씨는 이렇게 말했다. “그래서 우리는 발전소수명연장을 연구하는 전담부서를 조직하려고 한다. 그러나 이것은 발전소 전체의 수명연장을 의미하는 것은 아니며, 다만 신뢰도곡선상에서 하향세에 접어든 설비의 수명연장을 말한다.”

“아직도 우리가 만족스럽게 해결하지 못한 문제가 많이 남아있다. 그중 하나가 발전소의 이용률과 가동률이다. 현재는 팔목할만큼 개선은 되었지만 아직 여전히 만족스럽지 못하다. 우리는 앞으로 보다더 향상시키고 그 상태를 유지할 수 있을 것으로 생각한다”고 Srinivasan씨는 말했다.

“또 다른 문제는 작업원의 피폭선량이다”라고 지적하고, “RAPS의 작업원피폭선량은 다른 신

규발전소의 경우 보다 훨씬 많다. 이 문제만큼은 아직 우리가 해결하지 못했다”라고 말하였다. 피폭선량감소위원회가 매월 발전소에서 열리고 있다. “우리의 목표치는 두 발전소를 합하여 약 500~600man-rem이다”라고 집적피폭선량이 매년 증가하고 있다고 지적하고, “그러나 우리는 곧 제염작업을 실시할 것이고, 그 결과 600man-rem 이하로 유지될 것이다”라고 말했다.

두 발전소에서 열전달계통의 제염계획이 준비되어 있다. “방사성물질이 배관에 부착되어 점차 증가하고 있다”고 Sinha씨가 말했다. 첫번째 발전소 제염작업은 2호기의 다음번 유지보수를 위한 운전정지기간인 1991년에 실시할 예정이며, 그후에 1호기도 같은 방식으로 제염작업을 할 것이다.

피폭선량을 감소시키기 위한 다른 방법중의 하나로 “삼중수소제거”를 들며 Srinivasan씨는 다음과 같이 말했다. “그 작업은 아직 쉽지않다. 캐나다가 그 작업에 대해서 어느 정도 성과를 거두었다. 그래서 우리는 요즈음의 새로운 관계속에서 그들로 부터 도움을 얻을 수도 있을 것이다.” 인도는 1974년부터 CANDU사용자그룹에서 제외되었으나 1989년 여름에 다시 가입했다.

삼중수소가 포함된 냉각수가 누출되면 작업에 많은 장애가 따른다. “작업원들은 방호설비와 마스크를 착용하고 공기를 보급받으면서 일해야 한다”고 Sinha씨가 설명했다. 삼중수소가 제거되면 작업원들이 보다 적은 방호설비로 신속하게 일할 수 있으므로 작업효율이 크게 개선된다. 1, 2호기에서 삼중수소제거설비를 제작하기 위한 계획을 검토중인데, 현재 구체적 일정이 결정된 것은 아니라고 말했다.

RAPS의 두 발전소에서 증기발생기튜브 누설 사고가 일어난 적은 없다. 각 증기발생기에는 U자형 셀과 튜브로 구성된 10개의 열교환기와 스팀드럼을 갖고 있다. 튜브의 외경은 12.7mm이며 몬넬(Monel)로 제작되어 있다.

RAPS 증기발생기는 가동중점검이 용이하지 않게 설계되어 있다고 Nair씨는 지적하였다.

“와류탐상시험을 위해 튜브의 끝부분에 도달하려면 파이프 몇 개를 절단해야만 한다”고 말했

다. 그래서 튜브에 관한 가동중검사자료가 전무하다. “튜브에서 누설만 없다면 좋은 상태라고 볼 수 있다. 아주 미세한 누설이라 할지라도 2차 측의 삼중수소를 측정함으로써 감지할 수 있다”고 하면서 “잘 작동하고 있다. 삼중수소자료에 의거하여 평가해 보면 튜브두께에 이렇다할 변화가 없는 것으로 판단된다”고 하였다.

인도원자력공사(NPC)가 Narora발전소에 최초로 도입한 235MWe급 PHWR 2기에는 작업원출입구가 있고, 가동중검사가 용이한 버섯모양의 증기발생기가 설치되어 있다고 Nair씨는 말했다.

教育訓練

RAPS의 원자력연수원(Nuclear Training Center)은 1970년에 개원했다. Tamil Nadu주 Kalpakkam에 있는 235MWe급 원전인 MAPS와 현재 160MWe 출력으로 가동중인 2기의 비등수형 원전이 설치된 Maharashtra주 Tarapur 원자력발전소(TAPS)에도 각각 연수원이 있다.

Rajasthan연수원은 RAPS의 인원 뿐만 아니라 Uttar Pradesh주에서 현재 운전을 개시한 Narora 발전소와 Gujarat주에 건설 중인 Kakrapar발전소의 인원도 교육훈련시키고 있다.

상기의 세 원자력연수원은 엔지니어링, 건설, 유지보수, 운전 등에 직접 참여할 인도 원자력공사(NPC) 인력의 현장교육에 중점을 두고있다.

한편 BARC에서는 다른 형식의 교육이 실시되고 있다. 즉, 원자력부(DAE) 산하의 모든 원전에 근무하게 될 지원자들이 핵연료 전체주기에 관하여 강의를 듣고 현장을 견학한다.

현재 계획된 235MWe PHWR인 RAPS 3,4호기와 500MWe PHWR인 RAPS 5~8호기에 필요한 인력수급을 위해 RAPS원자력연수원의 규모를 2배로 늘릴 것이다. 연수원에서는 운전원 교육 이외에도 기계, 전기, 계장 및 제어분야의 보수인력과 관리자 교육훈련을 실시하고 있다고 연수원장 O.P.Madhvi씨가 설명했다. 또한 원자력공학, 원자핵물리, 핵연료기술, 차폐 및 보건물리 등도 교육하고 있다고 말했다.

연수원은 운전감독자(운전조장과 부조장)와 운전원(원자로제어운전원)의 면허시험도 관장하고 있다. 면허는 3년간 유효하다.

1호기 현장에 실규모 모의제어반시물레이터가 설치되어 1990년 초부터 시운전에 들어갔다.

초급보수기술자는 고용되기 전에 기초교육을 받는다고 Madhvi씨가 말했다. 그들은 공업훈련 학교(Industrial Training Institute)가 발급하는 자격증을 반드시 취득해야 한다. ITI는 인도 정부가 설립한 2년제 직업학교이다. ITI에서는 원자력에 관한 교육은 전혀 하지 않는다고 Madhvi씨가 말했다. 실제로 ITI의 계장 및 제어(I&C) 교육과정에서는 기본적으로 라디오와 TV에 관한 교육에 국한되어 있다.

운전조장이 되려면 종합대학 학사학위를 소지

해야 한다. 예를 들면, 5개 인도공과대학(IIT)중 한 학교에서 4년 과정을 마쳐야 한다. 5개 IIT는 지방에 있는데 인도 전역에서 입학가능하다. 제어운전원(원자로운전원)의 경우에는 공업기술을 중점적으로 교육하는 3년제 종합공과대학의 졸업증서가 필수요건이라고 Madhvi씨가 설명했다.

교육훈련의 결과로 RAPS에서는 몇몇 분야에서 인적 오류에 의한 사고가 거의 없어졌다고 Srinivasan씨가 말했다.

RAPS에서는 종사자에 대한 인센티브체계를 도입하고 있다. 이것은 발전소 성능에 바탕을 두고 있으며, 중수누출 등과 같은 부분에 대해서는 제한적이다. "우리는 이용률을 높이기 위해 다른 요소를 희생해 가면서 까지 집요하게 노력하지는 않는다"고 Srinivasan씨는 말했다.

남아시아의 安全保障措置 규정과 核擴散

캐나다가 인도에 원자력기술지원을 중단하기로 결정한 배경에는 1974년에 인도가 실시한 핵실험 뿐만 아니라 1973년에 핵확산금지조약(Nuclear Non-Proliferation Treaty)에 가입을 거부한 사실도 포함되어 있다. 파키스탄 및 중국과의 지역분쟁으로 인도는 그같은 선택을 했고, 국제원자력기구(IAEA)의 전면적인 안전보장조치규정 즉, 모든 원자력시설을 IAEA감시단에 전면 개방하는 일)을 전면적으로 수용하지 않았다. 그렇지만 인도의 Tarapur와 Rajasthan 원자력발전소는 IAEA규정을 받아들이고 있다.

파키스탄의 Karachi 원자력발전소(KANUPP)는 IAEA의 감시하에 있지만, 파키스탄 역시 NPT가입을 거부했고 IAEA의 규정도 전면적으로 수용하지 않았다. 그래서 캐나다는 KANUPP에 대한 지원을 중단했다. 이 발전소는 125MWe CANDU형 중수로발전소로 캐나다로 부터 기술 지원과 예비부품 및 핵연료를 공급받았었다.

파키스탄이 NPT 및 IAEA의 안전보장조치규정과 관련하여 인도에 몇번 제안을 했으나 합의

점에 도달하지는 못했다. 파키스탄이 제안한 것은 양국의 NPT가입, IAEA안전보장조치규정 수용, 양국 원자력시설의 상호감시, 핵무기의 취득과 개발 포기, 남아시아의 비핵무기구역 설정 및 이 지역내의 핵실험금지 등이었다.

그러나 인도는 NPT와 IAEA안전보장조치규정이 핵무기보유국의 약소국에 대한 핵주도권을 합법화하고 지속시켜주는 방편이라고 주장했다. 인도는 상호감시를 받아들이지 않을 것이다. 왜냐하면 인도가 그렇게 할 경우에 핵무기선택권을 상실하게 되고, 핵무기를 보유한 중국으로부터 공격받기 쉬운 상태가 될 것이라고 믿기 때문이다. 그리고 인도는 파키스탄이 비밀리에 핵무기원료를 보유하고 있을 경우를 두려워 하고있다. 또한 비핵무기구역협정에 중국의 가입이 보장되지 않는 한 인도도 가입하지 않을 것이다.

그런데 인도와 파키스탄은 한가지 합의점에는 도달하였다. 1985년에 양국은 상호간에 원자력설비를 공격하지 않기로 합의했다.