

印度의 原子力發電 開發計劃

“인도는 의욕적으로 원자력발전 개발계획을 추진하여 2000년까지 10,000MWe의 원자력발전설비를 보유하게 될 것이다.”

인도의 원자력발전계획은 인도 원자력과학기술의 선구자라 할 수 있는 Homi Bhabha박사가 1954년도에 설립한 Tata기초과학연구소에서 비롯된다.

인도에는 세계에서 가장 많은 양의 토륨(Th-232)이 부존되어 있으며, 이에 따라서 고속증식로를 이용하여 토륨을 우라늄-233으로 변환하여 최종적으로 활용하기 위한 장기적인 계획이 수립되어 있다. 그러나 현재의 원자력발전계획은 기본적으로 이미 입증된 자원인 천연 우라늄을 이용하는 발전소를 건설하고, 이에 필요한 중수를 국내생산하는데 주력하고 있다.

우선은 기술·경제적인 이유 뿐만 아니라 원전의 운전에 필요한 초기경험을 습득하기 위해 Bhabha박사는 Maharashtra주 Tatapur에 2기의 동형 비등수형(BWR) 원전을 건설하기로 결정했었다.

發電所의 建設

미국 GE社의 BWR형 발전소 건설제외에는 경제적인 매력 외에도 발전소의 설계, 건설 및 시운전 등 전단계에 걸쳐 인도의 과학기술진이 조직적인 교육훈련계획에 입각하여 참여할 수 있는 기회가 포함되어 있었다. 바로 이 점이 1964년에 GE社와 2기의 원전 건설을 턴키방식으로 계약하게 된 동기이다.

이 발전소의 출력은 각각 210MWe로서 평균 2.4%의 저농축우라늄을 이용하며, 경수를 감속재와 냉각재로 사용한다. 이 두 원자력발전소는 5년만에 완공되어 1969년 10월 상업운전에 들어갔다.

인도와 캐나다정부 사이에 체결된 협력협정에 의거하여 Rajasthan주 Rawatbhata에 2기의 220MWe 가압중수형 원자로(PHWR)를 설비한 인도 최초의 CANDU형 원자력발전소를 건설하기로 1963년에 결정했다. 1964년 12월에 건설이 시작되어 8년의 건설공기를 거쳐 1호기는 1973년 12월에 상업운전을 시작했다. 그러나 1974년에 인도에 의한 핵실험 이후 캐나다와의 관계가 긴장되었고 그 여파로 캐나다의 기술지원이 중단되어 2호기는 1981년 4월에 비로소 상업운전을 개시하게 되었다.

전적으로 인도의 기술로 PHWR을 설계, 건설, 운전하기 위한 노력은 1983년에 Tamil Nadu주 Kalpakkam에 건설된 Madras원자력발전소 1호기를 당시 수상이던 인디라 간디(Indira Gandhi)가 정식으로 계통에 병입함으로써 비로소 그 결실을 맺게 되었다. 이 발전소는 그 이듬해인 1984년 1월에 상업운전을 시작했다. 2호기는 1985년 9월에 계통에 병입되었고, 1986년 3월에 상업운전에 들어갔다.

네번째 원자력발전소는 Uttar Pradesh주 Narora에 건설된 2기의 235MWe 가압중수형 원

전으로서 1호기는 1989년 6월에 계통에 병입되어 1990년 4월에 상업운전을 시작할 예정이고, 2호기는 1990년말에 상업운전을 시작할 예정으로 일정이 정해져 있다.

다섯번째의 원자력발전소는 Gujarat 주 Kakrapar에, 여섯번째는 Karnatake주 Kaiga에, 일곱번째는 Rajasthan발전소부지에 2기의 235MWe 발전소를 건설중이다. 또한 다수의 235MWe PHWR과 500MWe PHWR을 계획중이다(표1 참조).

이와 같은 국산 원전 이외에도 소련으로부터 가압수형 원자로인 VVER-1000형 원자로를 2기 도입하여 Tamil Nadu주 Kudankulam에 건설할 계획이다.

核燃料資源

현재 확인된 인도의 우라늄자원은 약 10,000 MWe의 PHWR 전원개발계획을 충족시킬 수 있다. 신규의 중수로원전 발주계획과 건설이 이 전원개발계획을 뒷받침하기 위해 수립되었다.

진행중인 원자력발전 개발계획과 관련하여 여러 분야의 제작업자들은 원자력과 재래식 설비의 규제요건을 만족시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 설비의 제작과 공급에 필요한 새로운 자원을 확인하기 위한 작업이 민간부문과 정부사이에서

서로 협력하여 추진되었다. 필수적인 품질기준을 충족하는 엔드실드(end-shields), 칼란드리아, 증기발생기, 1차계통 열전달펌프 등의 원자력발전소설비 제작·공급과 관련하여 현재의 제작업체 여건은 지난 10여년 전 보다 훨씬 고무적이다.

장차 가압중수로의 발전(제1단계 원자로)에서 생산되는 플루토늄은 고속증식로(제2단계 원자로)의 연료로 이용될 것인데, 만약 이때 토륨을 블랭킷으로 사용하면 더 많은 양의 플루토늄과 핵분열성 우라늄을 생산할 수 있을 것이다.

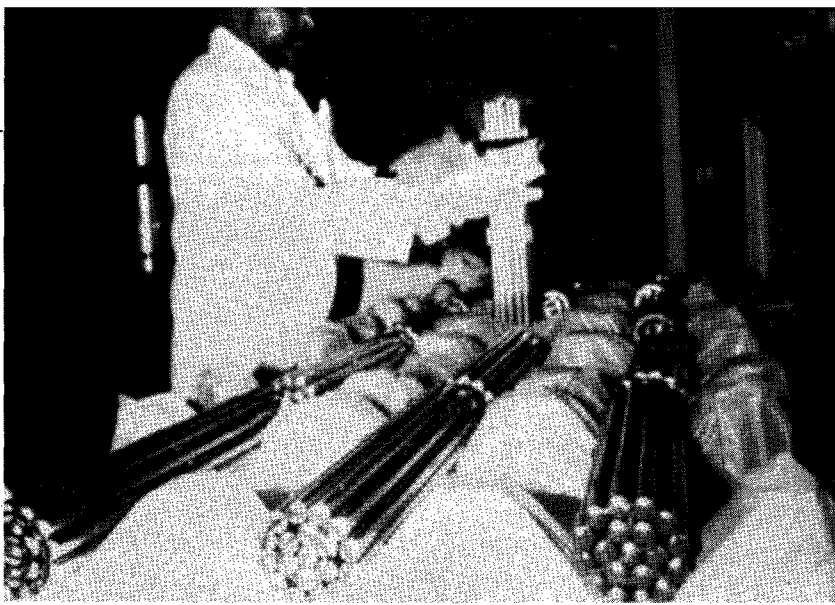
제2단계 원자로 개발계획은 Kalpakkam에 40MWe의 시험용 고속증식로를 건설함으로써 시작되었고, 500MWe 용량의 원형 고속증식로를 현재 설계중인데 2000년까지 시운전에 들어갈 계획이다.

제3단계 원자로는 증식을 위해 우라늄-233과 함께 토륨을 연료로 이용할 것이며, 그렇게 함으로써 인도에 부존된 다량의 토륨을 차세대의 발전에 활용하게 될 것으로 기대하고 있다.

원자력과 비원자력을 합한 인도의 총 발전시설 용량은 현재 58,000MWe이다. 인도중앙전력청은 2000년까지 시설용량을 174,000MWe로 확충할 계획이며, 이중에서 원자력이 차지하는 비중은 5.8%정도가 될 것이다. 인도에는 총 전기에너지수요를 충족시킬 수 있는 단일 자원이 없기

〈표1〉 인도의 원자력발전 개발계획

용량 (MWe, Gross)	노형	발전소명(위치)	합계(MWe)	상황
2×160	BWR	TAPS(Tarapur, Maharashtra)	320	운전중
2×220	PHWR	RAPS(Kota, Rajasthan)	760	운전중
2×235	PHWR	MAPS(Kalpakkam, Tamil Nadu)	1,230	운전중
1×235	PHWR	NAPS-1(Narora, Uttar Pradesh)	1,465	운전중비중
1×235	PHWR	NAPS-2(Narora, Uttar Pradesh)	1,700	시운전중
2×235	PHWR	KAPP(Kakrapar, Gujarat)	2,170	건설중
2×235	PHWR	Kaiga(Kaiga, Karnataka)	2,640	건설중
2×235	PHWR	RAPP-3&-4(Kota, Rajasthan)	3,110	건설중
2×500	PHWR	TAPP-3&-4(Tarapur, Maharashtra)	4,110	규제기관의 인가를 받음
4×235	PHWR	Kaiga(Kaiga, Karnataka)	5,050	계획중
4×500	PHWR	RAPP(Kota, Rajasthan)	7,050	계획중
6×500	PHWR	(Not announced)	10,050	계획중
2×1000	PWR	Kudankulam(Tirunelveli, Tamil Nadu)	12,050	계획중



때문에 석탄, 가스, 석유, 수력, 원자력 등을 포함한 다양한 전원의 혼용이 필수적이다.

Tarapur原電

Tarapur 원자력발전소(TAPS)는 40로·년(reactor·year)간 운전되었고 그동안 소중한 경험을 제공해 왔다. 1호기와 2호기의 누적이용률은 1989년 말까지 각각 51.8%와 53.4%이다.

이 발전소의 성능에 가장 큰 영향을 준 요소는 부하추중운전에 사용되며 전출력의 25%를 담당하고 있는 2차증기발생기(SSG)튜브에서 발생한 누설현상이다. 증기발생기튜브는 응력부식에 강한 특성을 갖도록 304L형 스테인레스스틸로 제작되었는데, 이 튜브가 사용후 3~4년이 지나면서 누설이 시작되었고 확실한 원인이 명확하게 밝혀지지 않았다.

튜브를 통한 누설이 점점 증가함에 따라 발전소의 장기간 운전정지가 빈번해졌으며, 튜브 플러깅에 따른 작업원의 방사선 피폭선량도 증가했다. 또한 튜브의 누설은 다량의 액체 방사성폐기물을 생성시켰으며, 이 폐기물이 소내의 폐기물 처리능력을 초과했기 때문에 폐기물관리설비를 확장해야만 했다.

튜브의 보수가 거의 불가능해짐에 따라 4대의 2차증기발생기 모듈을 7~8년 정도 사용후 사실상 격리시켰다. 따라서 1985년에 각 발전소의 출력을 200MWe에서 160MWe로 공식적으로 감소시켰다. 각 발전소를 160MWe 출력으로 운전함으로써 (1)액체폐기물 발생량이 감소되었고, (2)작

업원의 피폭선량 또한 감소되었으며, (3)간접적인 영향으로 핵연료다발의 파손률이 줄어들었다.

2기의 Tarapur 원자력발전소 운전성능에 영향을 준 다른 요인을 살펴보면 다음과 같다 (표2참고).

- 터빈발전기의 베어링이 윤활장치의 이상으로 인해 파손되었으며, 4개월의 수리기간이 소요되었다.

- 오일냉각기로 부터 해수가 유입되어 1호기 발전기의 변압기가 손상을 입었으며, 12개월의 수리기간이 소요되었다.

- 제어봉구동안내관과 붙어있는 썬덜슬리브(thermal sleeve) 회전방지러그가 미숙한 설계로 인해 파손되어 원자로용기 하부로 부터 개조가 이루어졌는데, 각 발전소에서 이 작업에 6개월이 소요되었다.

- 터빈제어오일계통배관에서 누설과 기계식 압력제어장치의 원활치 못한 작동으로 인해 터빈

<표 2> 상업운전기간중 운전실적

(1989년말 현재)

발전소명	이용률(%)	가동률(%)
TAPS-1	51.8	72.1
TAPS-2	53.4	69.6
RAPS-1	23.3	37.2
RAPS-2 증기제외*	54.7	72.7
RAPS-2 증기포함*	58.5	72.7
MAPS-1	50.4	62.9
MAPS-2	39.9	54.9

*RAPS-2에서 인근의 중수공장에 공급하는 증기를 전기에너지로 환산한 값을 계산에 포함하거나, 포함시키지 않은 경우

이 정지되었으며, 그 결과 원자로가 수시로 정지되었다.

- 해변의 배전반과 송전선로의 절연체에 염분이 부착되어 코로나와 스파크가 발생하였고 그에 따라 발전소가 운전정지되었다.

- 복수기튜브에서 수시로 누설이 발생하였으며 밸브연결부위와 보네트를 통해 증기와 물이 누설되었다.

- 초기에 수입한 핵연료의 품질불량으로 인해 핵연료요소에서 누설이 생겨 최초의 핵연료재장전시 90~100개의 핵연료다발을 각 발전소에서 꺼냈다. 핵연료요소를 새로 설계하고, 발전소 재시동기간에 핵연료집합체를 미리 검사하여 핵연료다발의 파손률을 감소시켰다.

- 오스테나이틱 스테인레스스틸로 제작된 1차계통의 배관 일부가 격자간 응력부식으로 인해 초기에 손상을 입었다. 미국에서 가동되고 있는 유사한 비등수형 원자로에서 성능이 좋지 않은 것으로 밝혀진 주급수관 노즐을 검사했으며 1호기의 스퍼저(sparger)를 1988년에 교체했다. 이 작업에 거의 6개월이 소요되었으나 심각한 균열은 발견되지 않았다.

Rajasthan 原電

인도 최초의 가압중수형 원자로 실현은 1973년에 Rajasthan 원자력발전소(RAPS) 1호기의 시운전으로 출범했다. 이후 가압중수형 원자로는 인도 원자력발전 개발계획의 기반이 되었다.

2호기는 1981년에 시운전을 시작했는데, Rajasthan 발전소는 몇가지 요인으로 인해 성능이 저조했다.

Rajasthan 1호기가 처음 병입된 송전선망의 총 전력 용량은 RAPS 1호기를 포함하여 500MWe에 불과했고, 그나마 불안정했다. 어떤 이유로 인해 송전망 주파수에 장애가 발생하면 1차계통에 직접적인 영향을 미치는 증기발생장치를 포함하여 1차 및 2차계통 전체가 불안정해지고, 그 결과 RAPS의 원자로와 터빈이 정지되었다. 여러가지 원인으로 인해 1호기는 1974년부터 1976년까지 연간 각각 49, 31, 35회 정지되었으

며, 이로 인해 발전소 설비와 부품에 심각한 악영향을 미쳤다.

그후 RAPS가 병입되어 있던 Chambal 송전망이 5,000MWe 용량의 Nothern 송전망에 연결된 후에 비로소 발전소의 성능이 개선되었다.

터빈발전기에는 여러가지 문제점이 있었다. 최초의 운전개시기간에 2차서보모터로 부터 주조사(foundry sand)가 용해되어 들어가서 베어링이 고온으로 과열되었다. 오일계통을 배수하고 증기로 세척한후 베어링의 길이 對 직경의 비율을 늘려 베어링부하를 감소시켰다.

1호기의 터빈블레이드가 1974년부터 1976년까지 각각 1회씩 파손되어 평균 3.5개월 정도의 수리기간동안 원자로가 정지되었다. 그후 1982년 12월에 다시 파손되어 예비의 로우터(rotor)로 교체했다.

1980년 12월 1호기에서 안전계통이 오작동하여 원자로건물 상부탱크에 저장된 180만리터의 경수가 누출되었다. 원자로는 안전하게 정지되었고, 물은 펌프로 배수되었으며, 물에 잠긴 장비는 복구되었다. 발전소는 40일후에 완전히 정상적인 운영상태로 복구되었다.

1호기 운전에서 가장 어려웠던 점은 1981년 9월에 발생한 엔드월드(end-shield) 칼란드리아 측 튜브시트의 균열이었다. 처음에는 튜브시트의 균열을 화학적인 방법으로 플러그하였는데 이는 임시적인 조치였다. 그후 인듐개스킷트를 이용한 기계적 방법으로 균열을 밀폐시켰다. 그러나 3개월만에 다시 누설이 일어났다. 1987년 8월에 개선했던 기계식 플러그와 그래프호일개스킷트를 이용하여 누설부위를 최종적으로 밀봉했다. 그동안 이 발전소는 전출력의 50%로 제한운전되어 왔는데, 누설부위를 밀봉함으로써 더이상의 누설위험성이 감소되어 정상적인 발전소운전이 용이해졌다. 1989년에 다시 균열이 발생했는데, 이와 유사한 방법으로 플러그를 했다. 이 플러그 당시에 균열부위에 도달하기 위해 15개의 핵연료채널에서 핵연료를 제거했으며, 이 핵연료채널은 핵연료가 제거된 상태로 남아있다.

RAPS 2호기는 1981년 4월 상업운전을 개시했다. 1호기의 가동에서 얻은 교훈을 바탕으로

여러 부문을 개조하고 개선했다.

2호기의 성능은 제2단계 터빈블레이드가 두차례 파손된 처음 2년간을 제외하면 아주 만족스러웠다. 1985년에 1차냉각펌프모터로 전원을 공급하기 위해 보일러실에 설치한 3.3kV케이블조인트가 과열되어 화재가 발생하여 근처에 있던 전선과 제어케이블이 소실되었다. 발전소는 안전하게 정지되어 냉각되었다. 화재로 소실된 케이블을 복구하는데 72일이 소요되었다. 그후 후속발전소에서는 접근하기 힘든 지역에는 케이블조인트를 가급적 사용하지 않게 되었다.

1989년 말까지 2호기의 누계이용률과 가동률은 각각 58.5%와 72.7%였다. 이 실적에는 2호기가 근처의 중수공장에 공급하는 증기를 전기에너지로 환산한 값이 포함되어 있다. 이 발전소는 100일 이상의 무사고운전을 여러번 기록했다.

Madras原電

인도가 자국기술로 가압중수형 원자로를 설계·건설하기 위해 전력용 기울인 결과 Madras원자력발전소(MAPS)가 1983년 7월에 시운전을 시작하게 되었다.

RAPS의 운전정험을 토대로 MAPS의 성능과 신뢰도를 향상시키기 위해 여러 부문을 개조했다. MAPS의 설비와 부품중 90% 정도는 인도産이었다. 1989년 말까지 1호기의 누계이용률과 가동률은 각각 50.4%와 62.9%이다.

몇가지 문제점이 원자력 및 재래식 설비에서 나타났다. 재래식 설비에서 발생한 문제점은 터빈의 진동, 각 호기의 고압터빈블레이드 파손, 1호기의 발전기 변압기 파손, 해수냉각계통의 이상 등이었다. 한편 원자력 설비에는 근본적인 두가지 문제, 즉 2호기의 핵연료이송계통에서 핵연료다발이 쌍으로 고착된 것과 각 호기의 감속재 입구배플(baffle)이 파손되는 문제가 있었다.

사용후핵연료저장소로 핵연료를 이송하는 과정에서 핵연료다발의 유연한 통과를 위해 사용되는 가이드 슬리브의 위치가 잘못 표시되어 운전원이 결과적으로 오조작하게 되었다. 슬리브가 없는 상태에서 한 쌍의 연료다발이 엔드피팅

(end-fitting)의 캐버티로 떨어지게 되었고, 그 충격으로 연료다발이 손상되었는데 하나의 연료다발이 다른 연료다발을 압착하게 되었다.

이 핵연료다발을 복구하기 위해서 폐쇄회로 TV 등을 포함하여 주의깊게 계획된 원격조작방법이 동원됐다. 핵연료장전기로 취급이 가능한 특수 스테인레스 스틸캔(can)을 설계·제작하였다. 광범위한 모형실험을 거친 다음에 핵연료다발을 사용후핵연료 이송포트에서 핵연료장전기에 있는 캔으로 밀어넣었다. 핵연료장전기에서 캔을 분리시킨 다음 앞으로의 처분에 대비해서 그 캔을 핵연료장전기 가동구역내에 위치하고 있는 특수설계된 차폐플라스크에 넣어 두었다.

1988년 8월 MAPS 2호기의 칼란드리아튜브에서 누설이 발생했다. 비파괴음향방출시험과 음향소음분석을 통해 누설되는 칼란드리아 튜브의 위치를 확인했다. 파이프로스코프(fibroscope)로 확인한 결과 3개의 핀홀이 발견되었다. 모형을 이용하여 필요한 실험을 한 다음, 누설되는 칼란드리아튜브의 양쪽 끝부분을 그랩호일개스킷로 스테인레스스틸 플러깅을 이용하여 밀봉했다.

몇 조각의 칼란드리아튜브가 감속재펌프임펠러에서 발견되었다. 연속되는 진동으로 인해서 이 파편을 발견하게 되었고, 또한 칼란드리아튜브내부의 감속재 유입구배관 정면에 위치한 유동조절 배플이 파손되었음을 알게 되었다. 이와 같은 파손은 두 발전소에서 모두 발생했다. 폐쇄회로 TV와 원격조작장치를 이용하여 일시적으로 관찰한 결과 파손된 배플조각은 각 칼란드리아내부의 안전포켓에 자리잡고있었다. 규제기관의 승인을 받아 칼란드리아의 유입구와 출구의 유로를 변경시켰다. 그후 발전소를 재가동시켰는데 초기에는 출력을 전출력의 50%로 제한하였고, 후에 75%로 증가시켰다. 이 출력제한은 칼란드리아내의 중수감속재 유동양상을 바꾸었기 때문이다.

1989년에 1호기와 2호기에서 각각 발생한 사고로 임시보수작업을 위해 두 발전소는 각각 82일과 156일간 운전정지하였었다. 현재 이 두 발전소의 출력을 전출력으로 복귀시키기 위한 연구를 수행하고있다.