

印度의 새로운 世代의 原電인 Narora原電

“인도는 새로운 설계와 건설공법을 개발하여 앞으로는 원자력발전소의 건설공기가 단축될 것으로 기대하고 있다.”

원자력발전용량을 증가시키기 위해 집중적인 노력을 기울여온 인도는 21세기 초까지 자국기술로 원전을 설계·건설하려는 야심적인 계획을 세워놓고 있다. 첫번째 목표는 2000년까지 10,000 MWe의 원자력발전설비를 건설하는 것이다.

Rajasthan주에 건설된 인도 최초의 CANDU 중수형원자로에 대한 캐나다의 기술지원이 1974년 인도의 핵실험 이후에 중단된 이래 인도는 235MWe급의 새로운 세대의 원전을 건설하고 있으며, 500MWe급의 후속기는 바로 이 원전을 확대설계한 것이다.

인도의 원자력발전은 Maharashtra주의 Tarapur원자력발전소(TAPS)에서 시작되었다. TAPS는 GE社가 설계·제작한 비등수형 원전으로서 2기가 각각 160MWe출력으로 운전중인데 1969년 10월에 상업운전을 개시했다.

Rajasthan주 Kota근교에 있는 Rajasthan원자력발전소(RAPS)는 220MWe PHWR로 1호기는 1973년 12월에, 2호기는 1984년 4월에 각각 상업운전을 개시했다.

RAPS의 건설에 이어 Tamil Nadu주 Kalpakkam의 Madras 원자력발전소에 235MWe PHWR 2기가 건설되었다. 1,2호기는 1984년 1월과 1986년 3월에 각각 상업운전에 들어갔다. 최초의 인도産 원전인 MAPS의 설계에는 RAPS의 운전경험을 바탕으로 한 여러 부분의 설계변경이 포함되었다.

Narora原電

Uttar Pradesh주 Ganges강유역 Narora 고대촌락 근처에 위치한 2기의 Narora원자력발전소(NAPS)는 인도과학기술자가 개발한 최초의 표준형 235MWe PHWR 설계이다.

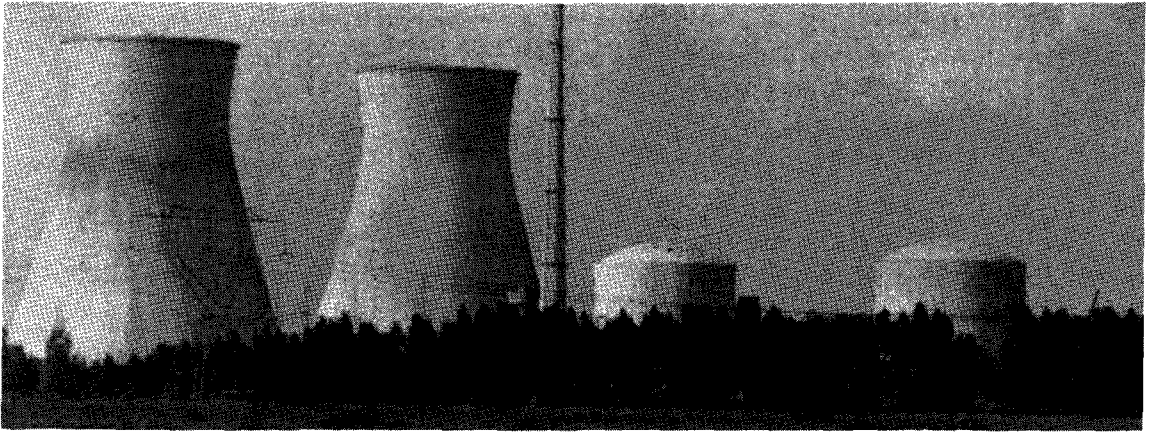
NAPS의 설계는 MAPS에 비해 많이 개선되었다고 Narora프로젝트 책임자인 Y. S. R. Prasad씨가 평가하면서 “이 두 발전소 모두가 국내기술로 건설되었다”고 말하였다. NAPS의 국산화율은 약 90%에 이른다.

NAPS 1호기는 1989년 6월 계통에 병입되었고, 1990년 4월에 상업운전을 시작할 예정이다. NAPS 2호기는 1990년 말에 상업운전을 시작할 것으로 전망된다.

NAPS 1호기를 운전해본 짧은 기간에 “우리는 이 발전소가 바위처럼 안전함을 알게 되었다”라고 NAPS소장인 C.M. Kothari씨가 말했다. 이 발전소는 300일 연속 무사고운전도 가능할 것이라고 그는 예측했다.

“이 발전소건설에 유난히 오랜 기간이 소요되었다. 우리는 설계하면서 동시에 건설했기 때문이다. 설계가 진행되면 그것을 현장에 반영했다”고 프로젝트 주임기술자인 R.C. Arya씨가 말했다. “그 결과 어떤 때에는 설계가 늦어져서 우리는 기다려야만 했다.”

NAPS 1호기를 완공하기까지 12년이 소요되



었다고 Arya씨가 말했다. 처음 5년은 토목공사에, 그 다음 5년은 기계설비의 설치에, 그리고 마지막 2년은 시운전과 임계도달에 소요되었다. 앞으로는 이 세 단계를 각각 30~36개월, 30개월, 그리고 18개월 이내에 완료하는 것이 목표라고 말했다.

건설이 지연된 또다른 이유로는 인도에서 제작한 증기발생기 등의 설비가 적기에 공급되지 않은 점을 들 수 있다. 그러나 제작경험이 축적됨에 따라 앞으로는 증기발생기의 공급이 보다 시기적절하게 이루어질 것이라고 Prasad씨는 전망했다.

그와 같은 공급지연에 대처하기 위해 발전소의 설비설치순서를 변경하여 공기 손실을 줄였다고 Arya씨는 설명했다. 예를 들면, 일반적인 절차와는 반대로 가벼운 배관을 무거운 배관 보다 먼저 설치했다.

앞으로 다른 발전소를 건설할 때 반드시 고려해야 할 사항은 기계화와 작업조 수의 증가라고 Arya씨는 말했다. “각 작업의 맨아워를 줄이는데에는 한계가 있기 때문에 우리는 연인원이 아니라 시간을 최소화하려 한다. 그래서 우리는 24시간 일하기를 원한다... 그런데 하부조직을 완성하지 않으면 24시간 작업의 의미가 없다. 따라서 최우선 과제는 하부조직을 확보하는 일이다.”

이 원자로의 설계는 천연우라늄연료와 중수 감속재 및 냉각재를 이용한다. 경수는 2차측에 사용된다. 인도의 초창기 원자로설계에 포함되지

않았던 특징중의 하나는 발전소내의 고압고온 중수구역을 고압고온 경수구역과 분리하는 일이었다 (누수가 발생했을 때 고순도의 순수한 중수의 회수를 용이하게 하기 위해서).

원자로용기에는 306개의 칼란드리아튜브가 있고, 이들은 엔드샐드에 의해 지지되며 중수감속재로 둘러 싸여있다. 칼란드리아튜브 내부에는 핵연료다발과 중수냉각수를 갖고 있는 압력튜브가 들어있다. 압력튜브는 19개의 핵연료펜슬로 구성된 핵연료다발 12개를 내장하고 있다. 칼란드리아 양단에서는 컴퓨터로 제어되는 핵연료장전기에 의해 가동중 핵연료장전이 수행된다.

인도내 모든 원전의 핵연료는 Hyderabad주에 있는 원자력부(DAE) 산하의 핵연료단지(NFC)에서 제작된다. 그곳에서 국산 천연우라늄을 가압중수형 원전의 핵연료로 가공한다. 또한 프랑스에서 수입한 농축우라늄으로는 Tarapur주에 있는 2기의 비등수형 원전용 핵연료를 제작한다.

RAPS와 MAPS에는 비상운전정지용 감속재 덤프계통이 설치되어 있으나, NAPS에는 이와 달리 2개의 서로 독립된 급속작동정지계통(fast-acting shutdown system)과 하나의 완속작동정지계통(slow-acting shutdown system)이 설치되어 있다. 주정지계통은 중력에 의해 낙하되는 카드뮴봉이고, 보조정지계통은 원자로용기내에 설치되어 있는 중성자 흡수물질인 LiB₆용액으로 가득 채워져있는 12개의 수직관이 다. 완속작동정지계통은 감속재에 보론을 주입하

는 것이다. 발전소 전체가 정전되면 모든 자동계통이 작동하지 않는데, 이때에는 중력에 의해 중성자흡수물질이 추가될 것이다.

냉각재상실사고 이후에 충분한 냉각을 보장하기 위해 각 원자로는 4단계의 비상노심냉각계통이 설비되어 있다. 즉, 고압중수 주입, 중압경수 주입, 저압경수 주입, 저압장기 재순환 등이다. 대부분의 경우 안전계통은 2/3작동논리를 채택한다. 다만 채널온도감시계통처럼 계통의 복잡성으로 인해 신뢰도가 낮은 경우에는 2/2작동논리를 택한다.

이 발전소에는 각 호기마다 하나의 열교환기를 갖는 4대의 버섯형 증기발생기와 4대의 열전달펌프가 설비되어 있다.

이 발전소가 지진학적으로 안전하지 않은 지역에 위치하고 있다는 비난이 있다. 그러나 어지간한 지진 가능성은 발전소설계시에 이미 고려되어 있다. “이 발전소는 지진학적으로 매우 견고하게 설계되어 있다”고 Prasad씨는 단언했다. 여러 연구소와 독립기구로 부터 받은 광범위한 자료가 입력되어 있다.

NAPS는 어떤 의미에서 장차 인도원자력공사(NPC)에 의해 건설될 500MWe급 원전의 선구자적 역할을 하고 있다. 이 두 노형은 여러가지 공통된 특성이 있다(표1 참조). 잠정적인 경험을 얻기 위해 일부 설비는 확대설계했다. 예를 들면, RAPS의 각 발전소에는 8대의 증기발생기와 8대의 열전달펌프가 있다. 반면에 NAPS에는 규모가 큰 4대의 증기발생기와 4대의 열전달펌프가 설치되어 있다.

주위환경으로 방사능이 누출될 가능성을 극소화하기 위해 각 원자로건물은 2중의 격납용기로 되어 있다. 한편, RAPS에는 하나의 격납용기가 설치되어 있고, MAPS에는 부분적 이중격납용기가 설치되어 있다(2중의 벽면과 단점의 돔형 지붕). 1차격납용기는 기밀유지와 제염이 용이하도록 비닐과 에폭시로 코팅한 프레스트레스트 콘크리트로 건설되었고, 2차격납용기는 철근콘크리트로 건설되었다. 두 격납용기사이의 공간은 대기압보다 낮은 상태로 유지된다.

이 발전소에는 복수기냉각수용 자연통풍냉각

탑과 방사화프로세스냉각수용 강제통풍냉각탑이 각각 2개씩 설치되어 있다.

NAPS의 이용률을 향상시키기 위한 특징중 하나로 밸브나 펌프 등의 설비품목 수를 줄인 것을 들 수 있다고 Kothari씨가 말했다. 또한 펌프 등의 설비용량을 대형화시키고, 예비설비를 충분히 준비하고 있다.

운전절차는 현재 컴퓨터에 입력되어 제어실은 전원은 CRT를 통해 접근할 수 있다. 여기에는 발전소의 Flow Diagram도 포함될 것이다.

인적요소와 관련하여 이전의 다른 발전소에서는 제어반이 “극히 소형화”되어 있었다고 Kothari씨가 말했다. 실제로 수작동 스위치가 너무 근접해 있어서 의도와는 달리 다른 스위치를 건드릴 수도 있었다. 반면 NAPS의 제어실 스위치는 비교적 크고 작동시키려면 더 큰 힘이 필요하기 때문에 신중한 행위가 요구된다.

각 발전소의 제어실에는 6개의 CRT가 설치되어 있어서 운전원이 발전소 운전정보를 그들의 책상에 앉은 채로 파악할 수 있다. 정보수집은 전산화되어 있어서 “사고진단에 유용한 정보가 모두 기록된다”고 Kothari씨가 설명하면서 발전소 제어에 마이크로프로세서를 사용하는 것은 이제 아주 보편화되었고 부연했다.

전산화된 유지보수관리시스템을 1990년 3월부터 실제로 적용하기로 했다고 Kothari씨가 말했다. 그것은 두가지 계획으로 구성되어 있는데 하나는 예방유지보수계획을 위한 것으로 전체계통에서 설비를 격리시키는 것을 가능하게 하고, 다른 하나는 설비연혁과 예비부품을 관리하며 재고량이 어떤 수준 이하로 떨어지면 자동적으로 주문하는 것이다.

각 발전소에서 유지보수를 위한 운전정지는 “18개월마다 1회씩, 또는 매년 말에 15일간 운전정지하고 2년째에는 1.5개월 운전정지한다”고 Kothari씨가 말했다. 이러한 운전정지시기는 두 기구에 의해서 통합 조정한다. 하나는 설계·건설·운전하고 있는 인도원자력공사의 본사로서 산하의 전체 원전중 한번에 한 발전소만 유지보수를 위한 운전정지를 하도록 허용하고, 나머지 하나는 그 지역의 송전망계통이다.



발전소 운전원에 대한 교육훈련이 개선되었다고 Kothari씨는 밝혔다. “과거에는 일정기간동안 교육훈련시킨 다음에 18개월이 지나면 재훈련을 시켰는데, 이 재훈련이 보다 개선되었다”고 설명했다. “우리가 하는 일은 매 20일이나, 또는 한번의 운전주기마다 한 운전조 전원을 소집교육한다. 그래서 우리는 4개 운전조기 아니라 5개 운전조로 운영되고 있다.”

재훈련에서는 인도내 및 해외 원전의 최신 운전경험에 대해서도 교육을 한다.

Rajasthan 原電 3,4號機

Rajasthan 원자력발전소에서는 235MWe 표준설계 원전 3,4호기 건설을 위한 기초공사가 시작되고 있다. 3,4호기는 1,2호기에서 700m 정도 떨어진 곳에 건설된다. 3호기와 4호기는 1994년과 1995년에 각각 상업운전을 시작할 예정이라고 이 건설계획의 주임기술자인 B.S. Panchar-mukhi씨가 말하면서 건설방법상의 변화는 원자로건물을 건설하면서 동시에 설비를 설치하는 것이라고 설명했다.

Rebar, 사다리, 계단부분을 제외하고 이 발전소는 모두 콘크리트로 건설된다.

“구조강은 1온스도 사용하지 않는다”라고 말하면서 “1,2호기 원자로건물은 7.25psi의 압력에

견디도록 건설되어 있는 반면, 3,4호기의 경우에는 35psi까지 견딜 수 있도록 설계되었다”고 강조했다.

이 발전소에는 복수기냉각용 자연통풍냉각탑과 용수냉각용 강제통풍냉각탑이 건설될 것이다. 이 냉각탑들은 발전소 근처에 있는 호수의 열공해를 방지하고, 또한 방사능 누출위험을 감소시키기 위한 것이다.

발전소부지가 단단한 암반으로 구성되어 있으므로 필요한 깊이 만큼 굴착하기 위해 폭발물이 사용된다. 사용하는 폭발물의 규모는 1,2호기가 근접해 있기 때문에 제한된다. 이 지역은 지진학적으로 안전한 곳이다.

또한 새로운 500 MWe급 PHWR 원전 4기(RAPS 5~8호기)를 RAPS부지에 건설할 예정이다. 각 발전소의 상업운전은 1998년 4월, 1997년 10월, 1998년 4월, 1997년 10월로 예정되어 있다고 4개 발전소 건설책임자 S.S. Sachdev씨가 말했다. 건설될 4기중에 6호기가 가장 먼저 운전에 들어가게 될 것이라고 말했다.

“현재 정부는 단지 6기의 500MWe 원전에 대하여 승인했다”고 말했다. 이 6기는 Rajasthan 5~8호기와 Tarapur 3,4호기이다.

“그밖의 6기의 원전은 절차상 여러 단계에 있으며 몇 곳의 부지가 제안되고 있는데 500MWe 발전소중에서는 Tarapur 4호기가 최초로 가동

될 것”이라고 Sachdev씨는 전망했다.

RAPS 5~8호기의 건설공기는 건설허가에서 임계에 도달할 때까지 약 91개월 정도로 예측되며, 상업운전 시작까지는 약 97개월이 소요될 것이라고 말했다. 91개월중에서 73개월은 실제 건설에 소요되고, 나머지 18개월은 시운전에 소요된다고 부언했다.

대형 크레인을 사용하면 공기를 1.5년 정도 단축할 수 있을 것이라고 말했다. 원자로건물을 건설하면서 병행하여 설비를 단계적으로 설치하며, 또 설계변경으로 원자로건물을 보다 빨리 완공할

<표 1> 인도원자력공사의 235MWe와 500MWe급 원전의 표준화 설계특성

1. 이중격납용기.
2. 물로 채워진 칼란드리아 저장실.
3. 304L형 스테인레스 스틸체의 엔드셸드.
4. 부품수의 감소, 예를 들면 밸브수를 줄이고, 큰 용량의 증기발생기와 열전달 펌프를 쓰되 수를 줄임.
5. 대부분의 제어를 전산화함.
6. 개선된 핵연료장전기 설치.
7. 덤프탱크 제거.
8. 설비설계를 표준화하고 설비주문을 미리 앞당겨 함. (펌프나 밸브 등).
9. 2개의 독립된 급속자동정지계통과 독소주입계통.
10. 사고상황에서 격납용기압력을 낮추기 위한 증기응축역압플 설치.
11. 운전중에 핵연료장전기를 볼트(vault)에서 서비스구역으로 이동 가능.
12. 신속한 건설을 위해 일시적으로 대형 크레인 사용(NAPS에는 사용되지 않음).
13. 주제어실에서 멀리 떨어진 곳에 비상제어실을 설치하여 사고시 발전소를 정지시키고 안전한 상태로 유지하며 안전상태를 감시함.
14. 방사능 누출을 방지하기 위한 폐쇄회로 냉각계통.
15. 복수기용 냉각탑을 설치하여 강이나 호수의 용수 사용량을 감소시키고 동시에 열공해도 줄임.
16. 발전소 설계시에 보수가 용이하도록 고려함.
17. 개선된 예측운전특성, 즉, 중수누출 감소, 가동률 향상, 피폭선량 감소, 발전단가 절감, 개선된 안전성.

<표 2> 인도원자력공사의 500MWe급 PHWR설계에 새로 추가된 특성

1. 핵연료장전기를 시험·보수하기 위해 이전과 등하도록 지하통로 설치.
2. 각 발전소에 독립된 사용후핵연료저장고 설치.
3. 격납용기들에 강철받침대 설치.
4. 304L형 스테인레스 스틸 칼란드리아튜브 볼트(vault).
5. 수평의 2차정지계통(예전에는 수직이었음)
6. 터빈건물과 원자로건물이 특정각도로 배치되어 터빈의 미사일효과에 의한 파손위험 방지.

수 있게 되었다. 원자로건물 설계변경으로 인해 비록 규모는 종전보다 커졌지만 건설기간은 235MWe급 원전의 경우보다 불과 4~5개월 정도만 더 소요된다.

냉각탑을 포함하여 안전과 관련된 모든 구조물은 터빈의 미사일구역 외부에 배치되어 있다고 Sachdev씨가 말했다. “현재 우리는 발전소 부지의 지질학적 특성을 연구하고 있으며, 여러 기관의 승인을 얻고 있다”고 말했다.

핵연료의 단위무게당 출력밀도는 종전의 235MWe급 발전소 보다 500MWe급 발전소가 더 높을 것이라고 Sachdev씨가 말했다. 핵연료 채널의 직경이 더 커졌다. 235MWe급 원전에서는 핵연료다발에 19개의 핵연료펜슬이 들어있는데, 500MWe급의 경우에는 크기가 줄어든 37개의 핵연료펜슬이 들어있다. 핵연료채널의 수도 기존 235MWe발전소의 306개에서 392개로 늘어났다.

각 발전소는 독립된 2개의 루프를 갖고 있어서 그중 하나가 누수되어도 열전달계통냉각재의 절반만 상실되기 때문에 결과적으로 모든 냉각재가 상실되는 경우와 비교하여 상대적으로 낮은 격납용기 압력에 도달하게 된다.

500MWe급 원전설계는 235MWe급 원전설계에 이어 더욱 개선되고 있다(표2 참조). RAPS 5~8호기에는 자연통풍 및 강제통풍 냉각탑이 각각 설치될 것이라고 Sachdev씨는 말했다.