

## 스웨덴 Ringhals 原電 蒸氣發生器 交替經驗

스웨덴의 Ringhals 原電 2號機는 70日이라는 경이적인 工期내에 3대의 증기발생기 교체작업을 완료하고, 현재 系統에 投入하였다. 다음은 이 증기발생기 교체작업에서 얻은 經驗을 소개한 것이다.

스웨덴의 가압경수로형 원자력발전소인 Ringhals 2호기가 그동안 증기발생기 3대를 새로운 것으로 교체·설치한 이 발전소의 시운전과정을 예의 주시하고 있던 스웨덴의 안전당국으로부터 허가를 받아 9월 5일 2,660Mwt의 증가된 열출력으로 운전을 개시하였다. 이 발전소의 전기출력은 원래 800MWe였으나 현재는 840MWe로 증가되었으며, 또한 내년 여름으로 계획된 정기점검기간에 터빈의 효율을 향상시키기 위한 작업을 추가로 시행하면 동일한 열출력에서 더한층 전기출력의 증가를 가져올 수 있게 될 것이다.

Ringhals 2호기는 증기발생기 교체작업으로 인한 운전정지기간을 100일로 예정하였었는데, 이보다 7시간이 경과된 8월 20일 계통에 다시 복귀하였다. 원자로 재가동에 대한 허가는 계획 보다 몇일 앞선 8월 4일에 받았으나, 최종검사과정에서 안전밸브가 누설되는 사소한 문제가 발견되어 계통으로의 재병입이 약간

지연되었다.

증기발생기 교체작업은 스웨덴에서 발전설비용량이 여유가 생기는 여름철로 계획되어 있던 정기점검을 위한 운전정지기간에 실시되었으며, 실제로 증기발생기를 제거하고 새로 설치하는데 소요된 기간은 예정하였던 70일로 완료되었다. 이 70일 동안에 증기발생기 3대를 완벽하게 교체한 성과는 그전까지 가장 우수한 실적이었던 서독 Obrigheim 원자로에서 증기발생기 2대를 74일만에 교체한 기록과 비교할때 괄목할 만하다.

이 짧은 공기는 별도로 하더라도 Ringhals 2호기 증기발생기 교체에는 다음과 같은 특징이 있다.

- 증기발생기를 분해하지 않고 통채로 제거 및 새로 설치할 수 있도록 격납용기에 구멍을 뚫음.

- 작업기간 동안 낮은 방사선 피폭선량 유지.

새로 교체된 증기발생기로 인해 운전성능 향상

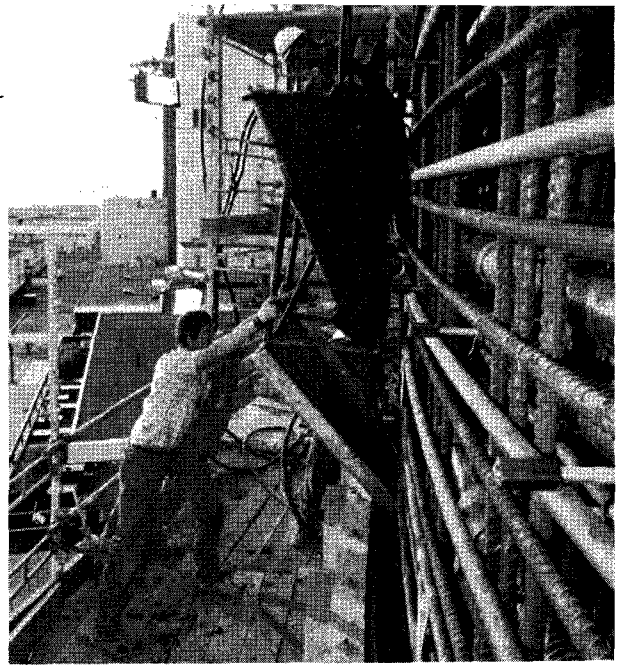
## 交替戰略

Ringhals 2호기에 설치되어 있었던 원래의 증기발생기는 웨스팅하우스사제 모델 51 C형이었는데, 전세계적으로 겪고 있는 전형적인 증기발생기의 문제점들을 사실상 모두 갖고 있었다.

1974년 운전을 개시한 초기에는 급수처리과정을 휘발성처리로 바꾸기 전까지 단기간 동안 인산염급수처리과정에서 어려움을 겪었으며, 또한 복수기에서 누설이 일어나 2차측 물이 오염되어 복수기튜브를 티타늄튜브로 교체하기도 하였다. 1979년에는 증기발생기튜브중 가장 작은 벤드반경을 갖는 가장 안쪽에 배열된 튜브들을 플라잉함으로써 원자로의 출력이 822MWe에서 800MWe로 감소하는 결과를 가져왔다.

그러나 증기발생기에서 결정적인 문제점이 발생한 것은 1981년 이후 튜브시트구역에 있는 튜브의 기저부에서였다. 즉, 튜브가 튜브시트에 충분한 깊이로 말려들어가 있지 않아 급수가 증발하는 동안 튜브와 튜브시트 사이의 틈이 부식생성물 침전을 유발하였는데, 그틈이 깊고 좁아서 이 침전물을 완벽하게 제거하는 것이 불가능하였다. 따라서 튜브의 외부표면에 대한 부식은 응력부식균열을 유발시켜 누설의 원인이 되었다. 이로 인해 운전기간중에 플라잉을 실시하기 위해서 수차례 운전정지를 해야만 하는 발전소의 성능 저하를 초래하였다.

그 결과 출력을 80% 감소하는 새로운 운전전략의 도입이 불가피하였다. 증기발생기에서 가장 고온부를 15℃ 낮추는 등 핫레그와 콜드레그의 온도를 낮춤으로써 온도에 비례하는 부식현상을 효과적으로 억제할 수 있었다. 따라서 Ringhals 2호기 원자로는 이러한 조치를 취한채



▲ 격납용기 벽에 뚫은 구멍 복구작업

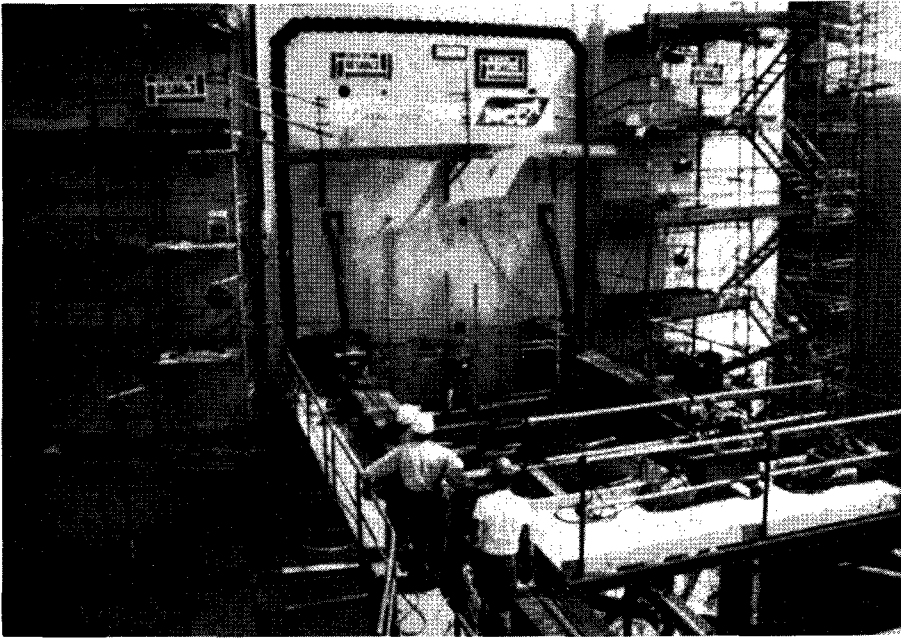
정상적인 핵연료교체를 위한 운전정지기간에 최소한의 플라잉과 슬리빙을 실시하면서 이번에 증기발생기를 새로 교체할 때까지 여러차례의 운전주기동안 운영되어 왔다.

Ringhals 2호기 보다 늦게 건설된 PWR인 Ringhals 3호기와 4호기는 개량된 웨스팅하우스사제 모델 D-3형 증기발생기로 설비되어 있지만, 수명연장을 위해 적어도 Ringhals 3호기의 경우에는 앞으로 이와 유사한 전략이 채택될 것으로 보인다.

## 格納容器的 切斷

Ringhals 2호기는 격납용기의 벽 내부에 있는 덕트 안으로 원주 및 수직형태의 인장케이블이 들어있는 프레스트레스트 콘크리트 격납용기로 건설되어 있다. 이러한 배열은 검사와 유지보수를 위해서 케이블을 꺼낼 수 있으며, 이번의 증기발생기 교체작업시에 매우 유용한 특징임이 입증되었다. 오직 29개의 케이블만을 느슨하게 풀고 빼냄으로써 증기발생기가 통과할 수 있도록 충분히 큰 구멍을 콘크리트벽에 뚫을 수가 있었다.

격납용기에 구멍을 뚫었다가 다시 복구하는데



▲격납용기 벽에 구멍을 뚫는 작업

대한 전반적인 안전성 분석이 수행되었다. 격납용기의 벽을 원상대로 복구한 다음에는 10CFR 50에 따라서 약 3의 절대대기압력으로 격납용기에 대한 시험을 실시하였다(Ringhals 2호기는 미국 웨스팅하우스사 설계의 발전소이기 때문에 미국원자력규제위원회의 규제를 따랐다).

5월11일 원자로를 운전정지시키고 냉각을 한 다음에 장전되어 있던 핵연료 전량을 핵연료 건물에 있는 저장풀로 옮겼다. 동시에 격납용기의 벽에 구멍을 내는 작업과 원래 설치되어 있는 증기발생기의 제염 및 철거작업을 시작하였다. 연결되어 있던 모든 파이프를 절단한후 격납건물 플라크레인의 지원을 받는 수압인양설비로 3대의 증기발생기를 들어올려 옆으로 옮긴 다음 이동장비 위에 수평상태가 되도록 내려 놓았다. 그 다음 증기발생기들은 슬라이딩 비임을 따라 격납용기 벽의 개구부를 통해 밖으로 옮겨진후 트레일러에 실려 인접해 있는 창고로 이송되었다. 새 증기발생기들도 같은 설비를 이용하여 격납용기의 내부로 옮겨졌다.

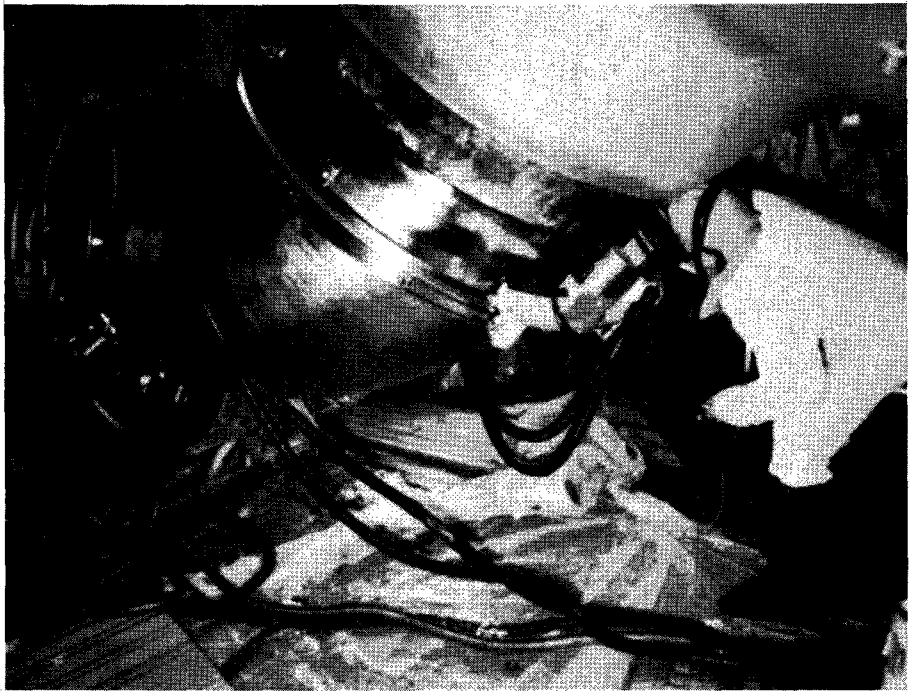
## 낮은 放射線被曝線量 管理

핵연료 인출, 핵연료 재장전, 유지보수작업, 증기발생기 철거 및 교체작업 등을 포함하여 Ringhals 2호기 운전정지기간의 총 집적선량은 약 3.8인Sv(380인렘)였으며, 이중 3.07인Sv가 실제로 증기발생기 교체작업으로 인한 것이었다. 이 피폭선량은 예상했던 수치의 반 이하였다.

약 300명이 증기발생기 교체작업에 참여했고, 500명 이상은 운전정지기간에 다른 업무에 종사하였다.

이번 운전정지기간의 총 집적선량은 전년도의 정상적인 운전정지기간과 비교하여 약 2배 정도 높았으나, 앞으로 예상되는 피폭선량은 이제 증기발생기 유지보수작업이 필요없기 때문에 매우 낮게 유지될 것으로 전망된다.

이처럼 피폭선량을 최소화시킬 수 있었던 중요한 요소는 Ringhals원전의 방사선방어요원들의 적극적인 노력과 교체작업에 대한 치밀한



▲연결 용접작업 광경

계획 덕분이었다. 계약자인 Siemens / KWU는 절단작업과 이와 연관된 모든 작업에 앞서 세밀한 계획을 수립하였다. 사용되는 모든 장비는 철저하게 시험되었고, 작업원들은 실규모의 증기발생기 기저부 모형으로 훈련을 받았다.

1차루프의 연결엘보를 교체하였는데, 새로 설치된 증기발생기를 연결시키기 위한 용접작업 시 방사선조건 개선에 큰 기여를 하였다. 배관의 중단부 역시 다시 맞출때 피폭선량의 저감을 위해서 전기화학기술을 사용하여 제염을 하였다. 1차배관작업의 백피팅을 위해 특별히 개발된 가는 튜브의 용접기술이 재결합시 이용되었다.

### 새로 設置된 蒸氣發生器

새로 설치된 증기발생기 1대의 무게는 약 300톤이고, 약 5,000개의 튜브가 들어있으며 면적은 이전의 것 보다 약 30% 더 크다. 따라서

늘어난 열전달면적으로 인해 출력이 9% 증가하게 되어 3대의 증기발생기 합계 열출력은 2,660MWt가 되었다.

이러한 이점을 최대한 살리기 위해서 추가 핵연료가 장전되었으며, 이에 따라 모든 안전성 분석이 재평가되었다.

두대의 터빈은 늘어난 증기유량을 수용할 수 있도록 운전정지기간에 개조가 이루어졌으며, 발전기는 70~80MWe의 추가 발전이 가능한 대형이다.

이번에 새로 설치된 증기발생기는 현재까지 겪었던 문제점들의 원인을 배제시킨 설계이다. 예를 들면, 튜브는 높은 내부식성 재질(인코넬 690)로 제작되었다. 또한 증발시 침전되는 불순물의 제거가 가능하도록 충분한 공간을 두었다. 그밖에 현재는 급수가 급수링을 통해 상부에서 주입되기 때문에 증기발생기로 들어가는 급수로 인해 튜브에 주는 직교류 영향이 없어졌다.