



스웨덴 원전 운영과 현대화 작업

〈NEI〉

2001년은 스웨덴 원전에 있어서 기록적인 해로서 2000년에 비해 발전량이 25% 증가했다. Oskarshamn 원전은 역대 최고의 발전량을 기록했고, Ringhals 원전은 동 원전 운영 중 세 번째로 높은 발전량을 기록했다. 다음은 Karnkraftsakerhet 및 Utbildning의 사건분석부가 발표한 스웨덴 원전의 운영실적이다.

안전성에 관하여 2001년은 매우 우수한 해였다. 어떤 중대 사고도 없었으며, 국제 수준에서 높은 안전성을 유지했다. 발전량에 있어서도 2001년은 스웨덴 원전에 있어서 기록적인 해였다. 총 발전량은 69.2TWh에 달하여 2000년보다 25% 증가했다.

Oskarshamn 원전은 역대 최고의 발전량을 기록했고, Ringhals 원전은 동 원전 운영 중 세 번째로 높은 발전량을 기록했다. 핵연료 재장전 정지에 앞서 연료를 최대한 활용하게 하는 'Coastdown' 운전으로 5% 이하의 발전 손실률을 가져왔다. 전력 계통 문제로 발전 감소

에 따른 발전 손실률은 1% 이하였다.

3기의 Ringhals 가압경수로는 평균 87.9%의 이용률을 기록했고, 8기의 비등수로는 90%를 기록했다. Forsmark 1·2호기 및 Oskarshamn 2·3호기는 이용률 90% 이상을 기록했다.

전력 생산

2001년에 스웨덴의 총전력 생산량은 157.6TWh으로서 역대 최고 기록이다. 원자력 발전량은 2000년 54.7TWh에서 26.4% 증가한 69.2TWh를 기록했다. 이것은 역대 최고 기록인 1991년의 73.5TWh에 비교될 수 있는데 1991년에 운전중이었던 Barseback 1호기의 발전량을 빼면 69.0TWh로서 2001년의 기록은 평가할 만하다.

스웨덴의 총전기소비량은 2000년보다 3% 증가한 150.2TWh이다. 이러한 증가는 대부분 경제 사정의 지속적인 호전과 난방용으로 전기 사용 증대를 가져온 고유가 때

문이다.

1. Barseback 2호기

Barseback의 연차 재장전 정비 기간은 30일간으로 계획되었으나, 6일이 연장되었다. 정지 기간 동안 수행된 주요 작업은 다음과 같다.

- 보조 급수 계통에 전력 공급선의 수를 증가시킴으로써 안전성이 향상되었다. 이전에 Barseback 1호기에서 사용된 전력 공급선을 이용하여 2호기의 전력 공급선은 2개에서 4개로 늘어났다.

- 원자로 압력 용기의 내장품이 원격 비디오에 의해 광범위하게 점검되었으며, 내년도 격납 용기내 1차 계통 설비 교체를 위한 준비가 진행되었다.

정지 기간 동안 집적 선량은 0.54manSv로서 예상보다 0.10manSv 증가했다.

Barseback 2호기는 2001년에 2번의 원자로 정지를 가져왔다. 4월 18일, 안전 계통의 시험 동안 각각 2개의 내부 및 외부 격리 밸브가 불시에 닫혀 원자로가 정지되었다.



밸브의 닫힘은 릴레이 카드의 고저항 때문이었다.

7월 31일, 연차 정지 후 재기동시 원자로 정지가 발생되었다. 당시에 원자로로는 핵저출력 상태에 있었으며, 출력 운전 동안 중성자속을 감시하는 계통이 현행 절차서에 따라 조정되어 있었다. 5% 이상의 출력 증가가 원자로 정지를 가져왔는데, 저출력 범위에서 교정될 때 계통이 너무 민감해진 것으로 나타났다.

2. Forsmark 1호기

연차 재장전 정비 기간이 10일 남짓으로 계획되었으나, 수많은 예상치 못한 작업이 수행되어야 했다. 특히 원자로 정지 냉각 계통의 격리 밸브와 누설된 제어봉 구동축 밀봉에서의 작업을 포함했다. 최종 정지 시간은 11일 15시간이었다. 정지 기간 동안 수행된 주요 작업은 다음과 같다.

- 3건의 연료 손상이 작년에 발생했는데 연료봉들은 확인 후 노심에서 제거되었다.
- 원자로 정지 냉각 계통과 급수 계통의 밸브 누설이 정비되었다.
- 4개의 주순환 펌프가 정비되었는데 모든 펌프 모터에 절연 저항이 측정되었으며, 2개의 모터가 고정자 절연의 열화 증상을 보여 재권선되었다.
- 펌프가 고속에서 진동 문제의 위험성이 있는지 결정하기 위하여

공명시험이 수행되었는데 결과는 4개의 펌프가 불균형에 더 민감하고 다른 펌프보다 덜 굳건히 지지됨을 보였다.

- 몇몇 회로 차단기가 이전 정지 기간 동안 설치된 인버터 계통에서 교체되었다.

- 봉입 큐플라의 온도가 1997년 정지 동안의 토로이드 작업 이후 매우 상승되어 왔다. 절연에서의 수많은 결함이 1999년 정지 기간 동안 정비되었으며, 추가 작업 후에 수용 가능한 온도인 59°C가 달성되었다.

정지 기간 동안 집적 선량은 0.25manSv로서 예상보다 0.08manSv 높았는데 이러한 차이의 주요 원인은 격납 용기에서의 방사선 준위 상승 때문이다.

3. Forsmark 2호기

연차 재장전 정비 기간이 10일로 계획되었으나, 실제로 12.5일이 소요되었다. 제어봉 계통에서 밀봉 누설, 잔열 제거 계통에서 파일롯 밸브의 교정 및 연료 장전기에서 점검 카메라의 오작동에 대한 정비 등이 추가되었다.

정기 재장전 작업 이외에 수행된 주요 작업은 다음과 같다.

- 주순환 펌프의 디퓨저 잠금 링의 검사 결과 4개의 핀 볼트와 잠금 탭이 빠져있음이 나타났다. 높은 연소와 출력 감소 중 오신포 발생으로 인하여 1개의 중성자속 검출기가

교체되었으며, 7개의 제어봉 계통도 교체되었다.

- 잔열 제거 냉각 계통의 내부 격리 밸브의 파일롯 밸브들이 교정되었으며, 주순환 펌프의 인버터 교체 작업이 추가로 수행되었다.

2001년에 운전 주기 말 연료 경제성을 위한 'coastdown' 운전이 296.2 GWh의 발전 가능 손실을 가져왔는데 이것은 13일의 100% 출력 생산에 해당한다.

4. Forsmark 3호기

연차 재장전 정비 기간에 주요 현대화 작업이 이루어졌다. 정지는 계획보다 이틀 증가한 48일간 계속되었다. 원자로 및 터빈 제어 기기가 교체되었으며, 터빈 로타 점검 결과 3개의 LP 로터의 균열 성장이 확인되었다. 수행된 주요 작업은 다음과 같다.

- 원자로 관련 계통의 배관 교체에 따른 작업이 성공적으로 수행되었다. 관련 계통의 선량률은 99.5%까지 감소되었다. 배관 교체는 정지 중 가장 큰 기계적 작업이었으며, 정지에 요구되는 시간을 결정했다. 계획된 시간과 지방사선 피폭을 유지하면서 작업은 잘 진행되었다. 배관 작업으로부터 어떤 이물질들이 원자로에 유입되거나 연료를 손상시키는 것을 예방하기 위하여 계통들이 광범위하게 청소되었다.
- 원자로 격납 용기 강철 라이너

가 점검되었으며, 밀봉판의 부식 성장에 대하여 응축 수조가 검사되었다.

- 제어봉 운전 및 지시 계통의 현대화 작업이 결정되어 30개의 제어봉 조작기가 정비되었다.

- 중성자속 측정 계통에 더욱 현대적인 장비가 설치되었다.

- 주순환 펌프의 인버터가 교체되었으며, 4개의 기계적 에너지 저장 장치가 설치되었다.

- 2개의 주순환 펌프, 격리 밸브 및 대형 주밸브의 파일럿 밸브들이 정비되었다.

정지 기간 동안 집적 선량은 1.18manSv로 서 예상보다 0.82manSv 낮았는데 이것은 정지초에 계통 제어의 성공적인 수행 때문이다.

운전 기간 동안 연료 경제성의 관심 속에 'coastdown' 운전은 451.3 GWh의 발전 가능 손실을 가져왔는데 이것은 약 16일의 100% 출력 생산에 해당한다.

5 Oskarshamn 1호기

2001년에 Oskarshamn 1호기는 3회의 원자로 정지를 경험했다. 첫 번째는 1월 6일이었는데 당시 발전소는 내부 격리 밸브에 대한 시험이 과도한 운전 시간을 나타낸 후 증기 배관의 단힘으로 인하여 감소된 출력으로 운전되고 있었다.

원자로 압력 안전 계통의 시험 동

안에 압력 상승이 일어나 고(高)원자로 압력으로 인한 원자로 정지가 발생되었다. 이것은 증기 배관의 이용 불능으로 인한 터빈 우회 계통의 이용 불능에 의해 발생되었다.

1월 10일에 정지후 기동시 고압 급수 재열기에서 응축수 고수위가 발생했다. 급수 재열기 온도가 상승하면서 급수 가열기가 응축된 배수로 채워져 수동으로 배출되어야 했다. 응축수는 빠르게 충분히 배출되지 않았으며, 응축수 고수위로 원자로 정지가 일어났다.

3월 28일에 원자로가 100% 출력 운전중에 주증기 격리 밸브 중의 1개가 갑자기 닫혀졌으며, 20초 후 고 원자로 압력으로 인하여 원자로가 정지되었다. 사건 분석에 따르면, 새로이 설치된 파일럿 밸브의 회로 단락에 의하여 소형 회로 차단기가 차단되었다.

Oskarshamn 1호기의 현대화 작업이 2001년 12월에 시작되어 10개월 동안 진행될 예정이다. 이것은 Oskarshamn 3호기의 건설 이래 소유 회사인 OKG에 수행된 최대 사업이다. OKG의 정책은 소유 발전소들이 어느 순간에도 20년간의 잠재적 잔여 수명을 갖고 있어야 한다는 것이다. 동 사업은 4개 분야로 구분될 수 있다.

- 안전성 개선 : 현재의 안전 기능을 제고하고 보완하는 새로운 안전성 개념이 도입된다.

- 컴퓨터 제어 계통 : 입증된 기술의 사용은 OKG 안전성 정책의 중요한 부분이다. 컴퓨터 제어 계통의 개발은 이제 새로운 기술이 원자력의 높은 요건을 만족시킬 수 있는 단계에 이르렀다. Oskarshamn 1호기는 스웨덴에서 컴퓨터에 의해 제어되는 첫 번째 원전일 것이다.

- 제어실 개선 : 새로운 기술은 화면을 통한 현대적인 계통 제어 같은 새로운 기회를 준다. 이것은 원자력산업 바깥에서는 새로운 것이 아니지만, OKG가 입증된 기술로 간주하고 원자력에 적합하다고 느낀 것은 최근이다.

현대화 이후, 제어실 요원들은 지금의 제어반 대신에 컴퓨터 화면을 통하여 발전소의 많은 부분을 감시하고 제어할 것이다. 사용될 새로운 기기들은 OKG의 높은 요건을 만족함을 입증하기 위하여 수많은 여러 가지 시험을 겪어왔다. 현대화 이후 Oskarshamn 1호기는 스웨덴의 가장 현대적인 원전 제어실을 갖게 될 것이다.

- 신규 터빈 : OKG는 더욱 효율적인 터빈으로 교체함으로써 이용률을 개선하고자 한다. 새로운 터빈의 이점 중의 하나는 정비 요건의 감소이다. 더 높은 이용률에 대하여 출력이 15MWe 증가하여 총 460MWe의 출력을 갖게 될 것이다.

주순환 펌프의 케이싱 교체는 수



행될 대형 작업 중의 하나이다.

12월 7일~31일 기간 동안 집적 선량은 0.35manSv로서 예상보다 0.06manSv 적었다.

6. Oskarshamn 2호기

연차 재장전 정지 기간을 25일로 계획하였으나, 일정보다 1일 앞서 종료되었다. 노심 살수 버팀목에 대한 시험은 어떤 새로운 손상을 드러내지 않았는데 이것은 추가 시험이 필요치 않음을 나타냈다.

수행된 주요 작업은 다음과 같다.

- 붕소 주입 계통의 잔여 작업
- 복수기의 흡인관측 보조 급수 펌프에 분리 장치 설치

정지 기간 동안 집적 선량은 0.66manSv로서 예상보다 0.16manSv 높았는데, 추가 피폭의 대부분은 주증기 밸브 정비의 여러 가지 문제와 향후 정비 업무의 준비를 위한 수많은 측정 때문이었다.

8월 9일에 원자로 정지가 있었다. 2개의 제어봉 작동 밀봉의 누설 문제 때문에 저온 정지 원자로 상태로 정지하기로 결정되었는데, 터빈이 계통에서 분리되고 부분 진공 상실로 터빈이 정지되도록 동작되었을 때 복수기 압력 측정에 오류가 발생했다. 결과적으로 진공 차단 밸브가 너무 오랫동안 열려 복수기 압력이 원자로 정지 설치까지 상승

했다.

7. Oskarshamn 3호기

연차 재장전 정지가 16년간의 가동 기간 동안 가장 짧았으며, 처음으로 계획된 대로 모두 완전히 종료되었다. 총정지 기간은 16일 8시간이었다. 수행된 주요 작업은 다음과 같다.

- 원자로 주증기 배관 밸브의 파일럿 밸브 교체

• 정지 원자로 냉각용 냉각수 계통의 뮤셀 필터의 제어 기기 교체
정지 기간 동안 집적 선량은 0.19manSv로서 새로운 기록이며, 예상보다 0.02manSv가 적었다.

연료 경제성을 개선하기 위한 'coastdown' 운전이 15.1GWh의 발전 손실을 가져왔는데 이것은 0.6일의 100% 출력 생산에 해당한다.

12월 1일에 원자로 정지가 있었는데 이 정지는 원자로 자동 정지 계통의 운전성을 검증하기 위한 시험 기간 동안 일어났으며, 시험 사이의 온도를 상승시켰을 때 출력이 너무 빠르게 증가했다.

8. Ringhals 1호기

연차 재장전 정지 기간을 28일로 계획하였으나, 실제로 32일이 소요되었는데, 몇몇 변경과 기타 작업들이 수행되었다. 예방 정비와 시험 이외에 수행된 주요 작업은 다음과

같다.

- 내년도 원자로 노심 슈라우드 헤드 교체를 위한 준비 검사

• 노심 살수의 검사
터빈에 수행된 일부 작업은 다음과 같다.

- 3개의 저압 터빈 로타 중 1개에 부식 균열 보호층을 가진 터빈 블레이드의 검사 및 교체

• 누설 시험, 유량 측정, 고정자 권선의 압력 및 진공 시험, 로타의 압력시험, 브러쉬 챔버 및 터닝 슬립링의 세정을 포함하는 발전기 검사

• 원자로 출력의 110% 상승 및 변경되지 않은 증기 자료와 함께 출력을 증가시킬 수 있는 체제 도입 : 이것은 고압 터빈 주위의 우회 방식을 취하여 일부 증기가 저압 터빈에 직접 공급되어 터빈 출력을 증가시킨다.

정지 기간 동안 집적 선량은 0.80manSv로서 예상보다 0.30manSv가 낮았다.

9. Ringhals 2호기

연차 재장전 정지 기간을 28일로 계획하였으나, 실제로 29일이 소요되었는데, 새로운 발전소 제어 계통을 설치하는 첫 번째 단계의 작업이 시작되었다.

발전소의 현대화 작업이 향후 연차 정지에 걸쳐 단계별로 계속될 것이다. 정규 일상적인 검사 및 재장

전 운전이 추가하여 조작 감시 기기가 현대화되었으며, 수많은 연료봉의 상부판이 교체되었다.

정지 기간 동안 집적 선량은 0.3manSv로서 예상보다 0.15manSv가 낮았다.

7월 17일, 주변압기 중 1개에서 작은 오일 누설이 발견되었다. 단지 누설 연결 부위를 체결하려는 시도가 오히려 누설을 악화시켰고, 발전소는 정지되었다. 그러나 이것이 이루어지기 전에 변압기가 멈추고 전기계통 부품으로의 전력이 끊겨 원자로 냉각재 펌프가 정지되었다. 전 출력 운전중에 모든 원자로 냉각재 펌프가 운전되어야 하므로 원자로 자동정지가 일어났다.

10. Ringhals 3호기

연차 재장전 정지 기간을 25일로 계획하였으나, 실제로 32일이 소요되었는데, 주요 원인은 원자로 용기와 원자로 냉각재 배관 사이의 용접 문제 때문이었다. 정지 기간을 연장시킨 다른 추가적인 작업은 가압기에 있는 밸브와 기기 냉각수 계통 밸브의 정비였다.

정규 일상적인 검사 및 재장전 운전에 추가하여, 정지 동안 작업은 위에서 언급한 용접의 점검, 원자로 압력 용기 헤드 및 원자로 격납 용기 환기 계통의 필터 건물의 점검을 포함했다. 또한 특별 프로그램에 따른 증기발생기의 작업이 시행되었

고, 전기 공급 계통의 정류기가 교체되었다. 정지 기간 동안 집적 선량은 0.27manSv로서 예상보다 0.05manSv가 낮았다.

2개의 균열 정후가 원자로 용기 노즐과 원자로 냉각재 고온관 사이의 용접 부위에서 확인되었다. 3개의 균열이 용접의 내부 표면에서 확인되었는데, 이들 3개의 결함들은 주변 부위를 절단함으로써 제거되었다. 다른 부위들이 점검되었고 추가 결함이 없는 것으로 확인되었다.

한편 또 다른 3개의 내부 결함이 이 용접에서 발견되었다. 균열의 원인은 충분히 설명되지 않았지만, 균열이 제작 과정에서 재질 구조의 변형에 의하여 발생된 것으로 추정되었다.

계산에 따르면, 발견된 균열은 원자로 배관의 강도에 거의 영향이 없으며, 안전 여유도가 영향받지 않는 것으로 나타났다. 장기적으로 새로운 균열이 기존 재질에서 발생할 가능성이 있으므로, Ringhals는 지금 영향있는 용접과 배관 부분을 새로운 상태로 복원하려는 준비를 하고 있다. Ringhals 4호기의 용접 부위는 2002년 재장전 정지 기간 동안 정비될 것이며, Ringhals 3호기는 2003년 재장전 정지 기간 동안 정비될 것이다.

지금까지 균열을 검출하는 데 사용되어 온 비파괴 측정 방법은 균열의 깊이를 정확히 측정하지 못했다.

그러므로 Ringhals는 측정 장비와 시험 방법을 개선하기 위한 연구 작업을 시작했다. 그러한 개선된 기기 및 방법이 이용 가능하게 되면, 징후 주변의 재질의 시료를 절단하지 않고 균열의 깊이가 결정될 수 있을 것으로 기대된다.

또 다른 목표는 이들 개선된 방법들을 규제 기관에서 인증하도록 하는 것이다. 그러한 인증을 받게 되면 이들 원자로 배관들이 매 10년마다 시험될 때 새로운 상태로 복원되게 될 것이다

11. Ringhals 4호기

연차 재장전 정지 기간을 30일로 계획하였으나, 실제로 39일이 소요되었는데, 주요 원인은 3호기와 유사한 원자로 용기와 원자로 냉각재 배관 사이의 용접 문제 때문이었다.

정규 일상적인 검사 및 재장전 운전에 추가하여 정지 동안 작업은 위에서 언급한 용접, 원자로 압력 용기 헤드, 증기발생기 및 스위치 기어의 점검을 포함했다. 전기 공급 계통의 정류기가 교체되었고, 원자로 격납 용기의 누설이 시험되었다.

정지 기간 동안 집적 선량은 0.30manSv로서 예상보다 0.03manSv가 낮았다.

4월 17일, 원자로 보호 계통의 시험중에 운전원 실수로 인하여 100% 출력에서 원자로가 정지되었다. 시험을 수행하는 한 운전원이



회로 차단기를 조작해야만 하는데 다른 유사한 회로 차단기를 조작했으며, 결국 발전소 정지를 야기했다. 모든 안전 계통은 의도된 대로 작동했다.

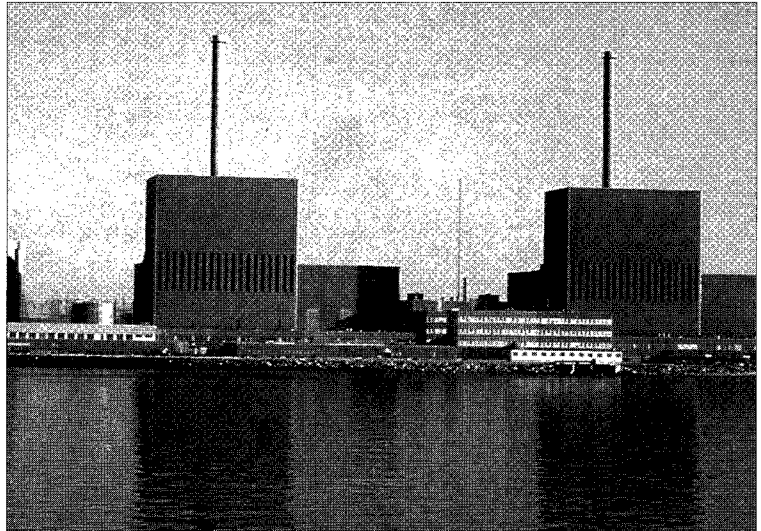
기타 현안

1. Barsebäck 2호기의 파열 디스크

필터 격납 건물 배기 계통에 설치된 파열 디스크를 시험할 때 2개의 디스크가 바뀌어졌음이 드러났다. 결과적으로 격납 건물과 배기 계통 사이의 경로를 작동시키는 설정치가 너무 낮았고, 필터 용기의 과압을 방지하는 비상 안전 배관의 설정치는 너무 높았다.

2개의 파열 디스크는 2개의 동일한 어댑터 링에 장치되었다. 단지 차이는 밸브 숫자를 표시한 디스크 가장자리의 작은 금속 꼬리표 뿐이었다. 그 꼬리표는 디스크가 어댑터 링에 장치될 때 숨겨진다. 발전소에 파열 디스크를 설치한 계약사는 2개의 디스크가 다른 압력에서 파손된 것을 알지 못했다.

앞서 이들 디스크들은 같은 정지 기간 동안 교체되지 않았으며, 따라서 디스크가 바뀌는 것은 불가능하다. 이 경우에는 그들의 어댑터 링에 장치된 2개의 거의 동일한 디스크가 설치되었다. 새로운 파열 디스크가 배기 계통에 장치되었으며, 사



Barsebäck 원전

용된 절차서가 개정되었다.

2. Ringhals 2호기의 과부하 보호 장치

6월 20일, Ringhals 2호기가 정격 출력으로 운전중이었다. 전기 공급 계통의 비(非) 우선 기기의 부하 절체 후에 계획된 과부하 보호 장치가 불시에 정지되었다. 그 장치는 예상된 정지 기준의 단지 60%의 부하에서 정지되었다.

과부하 보호 장치는 이들 기능들이 단기적으로 필요치 않다고 입증되어 연결되지 않았다. 이들 장치들은 소프트웨어 오류가 수정된 후에 다시 설치될 것이다. 그 장치의 소프트웨어에서 잘못된 전산 알고리즘이 정지를 유발했다.

그러한 오류는 2001년 연차 재장전 정지 기간 동안 잔여 조치를 마감하면서 알려졌다. 현대적인 계획

된 과부하 방지 장치가 Ringhals 2호기의 전기 공급 계통의 현대화 작업 동안 설치되었다. 이들 보호 장치들은 릴레이 보호 기기에 설치되며, 열적 부하로부터 케이블 및 변압기를 보호하도록 의도된다.

Ringhals 요원들은 계획된 조치를 기존 기기의 조정으로 생각했는데 기기 공급사의 의도는 기기를 교체하는 것이었다. 잘못된 해석으로 인하여 그 작업은 통상적인 일상 정비에 따라 취급되었다. 이들 일상 정비에 의해 요구된 시험은 소프트웨어 결함을 발견하기에 충분히 광범위하지 않았다. 사건 조사의 결과에 따르면, 총 58개의 과부하 장치 중 44개가 이 잘못된 소프트웨어로 인하여 예상보다 낮은 부하에서 정지될 것임을 나타냈다. ❀

〈NEI〉 Vol.47 No.574