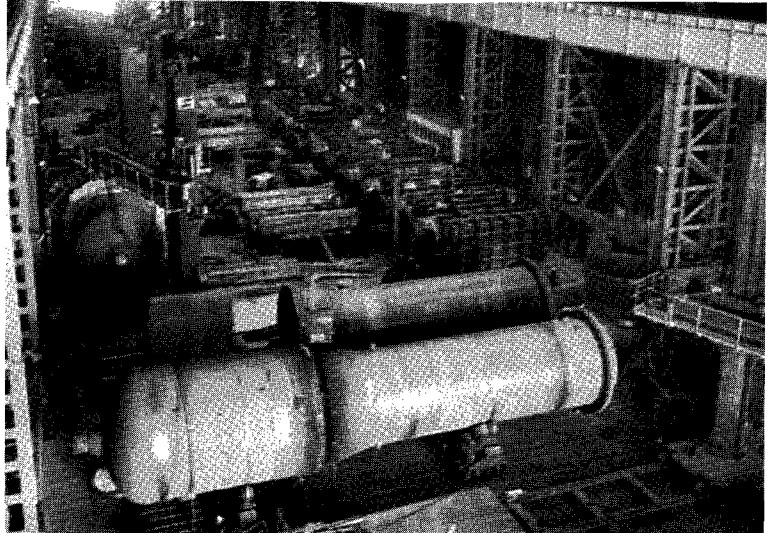


특 집

韓·日 原子力산업 세미나 발표 논문



〈제작 현장에서 제조되고 있는 증기발생기(한국중공업 현장)〉

古里 1호기 증기발생기 교체 電力增強에 지장없게 최단시일내 작업완료 구상

玄 幸 柱

한국전력공사
원자력발전처
광동 原電사업팀 팀장

古里 1號機는 1978년 4월에 상업가동한 한국최초의 원자력 발전소로 NSSS는 美國의 Westinghouse, Turbine은 영국의 GEC, 그리고 종합설계는 미국의 GCI社가 공급한 원자로 출력 1,728.5MWt, 전기출력 587MWe의 원자력발전소이다.

위치는 경남 梁山君 長安郡 古里이며, 동일 부지내에 용량 650MWe인 고리 2호기, 그리고 각각 용량 950

MWe인 고리 3, 4호기가 있다.

이 발표 내용은 한국전력공사에서 1993년 4월부터 검토한 “고리 1호기 증기발생기 교체 타당성” 내용을 요약한 것이다.

검토 방법은 1단계 및 2단계로 나누어 1단계에서는 古里 1호기 증기발생기 튜브 손상예측 및 기존 보수 방법과 증기발생기 교체와의 경제성을 비교·검토 하였으며, 2단계에서는

특집 : 한·일 原子力산업 세미나 논문

증기발생기 교체의 최적 교체방법에 대하여 검토하였다.

참고로 고리 1호기 증기발생기 교체에 대하여 말하면 고리 1호기 증기발생기는 미국 Westinghouse社가 제작, 공급한 51 Series로, 튜브는 3,388개이며, 튜브 size는 7/8"의 Inconel 600MA이다.

Tube Support Plate는 Carbon Steel Drilled Type이며, Tube와 Tube Support와의 Expansion방식은 기계식 Expansion방법으로 제작하였다.

고리 1호기는 1978년 상업운전을 개시한 이래 1985년 ECT 결과 pit-

ting이 발견되어 증기발생기 A에 235개, 증기발생기 B에 408개의 Plugging을 하였다.

1986년에는 Plug Rate가 12.4%로 고리 1호기 제한치인 15%에 접근한 적도 있었다.

1988년 이전의 증기발생기 튜브손상으로 인한 보수방법은 plugging 방법을 이용하였으나, 1988년부터는 Sleaving 방법을 채택하여 대규모 sleeve 작업을 실시한 결과 Plug Rate를 1.2%로 감소시켰다.

증기발생기의 보수방법을 Sleeve 방법을 채택하여 고리 1호기에 적용하고 있지만, 보수가 곤란한 위치의

튜브손상에 대하여는 Sleeve 대신 Plug를 계속하고 있다.

증기발생기 튜브손상 메커니즘은 복합적으로 작용하여 발생되는데 주요 손상은 Primary Water Stress Corrosion Crack(PWSCC), pitting, Denting 등이다.

고리 1호기의 경우 1990년도 Chemical Cleanning을 실시한 결과 pitting 현상은 감소 추세이나 PWSCC는 향후 주된 손상원인으로 예측된다.

여기서는 EPRI가 개발한 Weibull 방법 및 Westinghouse社가 개발한 Lognormal 방법을 원용하여 고리 1호기 증기발생기 튜브손상을 예측하였다.

위에서 적은 방법 모두가 향후는 Tube Support 부분에 PWSCC가 주종으로 예측되는 결과이다.

증기발생기 수명은 여러가지 형태로 평가될 수 있으나 가장 중요한 평가는 경제 수명이다.

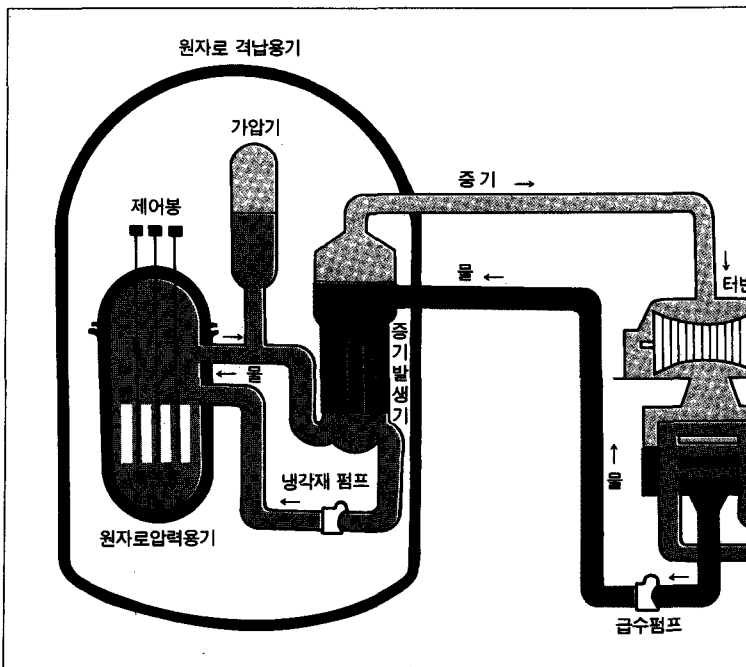
이는 발전소가 출력 감소로 인하여 원래의 계획에서 벗어나 운전을 하면 재정적 손실을 초래하기 때문이다.

즉 증기발생기(蒸氣發生機)의 plugging Limit 도달 시점이 증기발생기 경제수명(經濟壽命) 완료 시점이라고 할수 있을 것이다.

다음은 고리 1호기 증기발생기 튜브 plugging Limit를 예측한 결과로 분석방법은 EPRI와 Westinghouse 분석방법을 종합한 결과이다.

Plugging Limit 15% 도달시기는

가압경수로 증기발생기 설치장소 위치도



古里 1호기 증기발생기 교체

최악의 경우 : 1992년
 중간의 경우 : 2002년
 최선의 경우 : 2003년으로
 분석되었다.

증기발생기 보수 및 교체비용을 비교하기 위해서는 증기발생기 교체 경제성 분석이 필요하다. 그래서 기존의 보수 비용과 교체시의 비용을 비교·검토하여 경제성을 분석하였다.

보수의 비용으로 매년 정기 보수 시기에 소요되는 비용으로는 다음과 같은 입력자료를 사용하였다.

- ① ECT 및 UT 검사에 소요되는 비용
- ② 증기발생기 보수에 소요되는 Plugging 및 Sleeving 비용
- ③ Lancing 및 Chemical Cleaning 비용
- ④ 상기 작업에 소요되는 작업시기
- ⑤ 불시 정지 횟수
- ⑥ 대체 전력비용

등이다.

증기발생기 교체비용으로는 정확한 비용을 산출하여 입력시켜야 하나, 여기서는 외국의 교체 비용을 근거로 대략 1,000억원(약 1억2천만달러)을 입력자료로 사용하였다.

이와같은 분석을 위해 다음과 같은 6개의 시나리오를 가정하였다.

시나리오 #1 :

- 현행대로 Plug/Sleeve 계속하며 이때 Sluge Lancing과 Chemical Cleaning은 계속 병행하고

- Plug Limit 15% 도달후 출력감발(減發) 運轉한다.

시나리오 #2 :

- Plug Limit 18%로 상향조정하고
- Plug/Sleeve 계속시행 하며
- Plug Limit 도달후 감발운전한다.

시나리오 #3 :

- 최단 시일내 증기발생기 교체 (S/G 제작 기간고려 : 1998년)
- 교체시까지 Plug/Sleeve 계속한다.

시나리오 #4 :

- Plug Limit 15% 도달후 S/G 교체를 하고
- 교체시까지 Plug/Sleeve 계속한다.

시나리오 #5 :

- 시나리오 #3과 출력 4.8% 증가시키는 방안

시나리오 #6 :

- 시나리오 #4와 출력 4.8% 증가시키는 방안

여기서 출력증가 4.8%는 현재 고리 1호기의 설비 개선없이 TBN의 V/V Wide Open 상태로 Steam의 압력 및 온도 조절로 4.8%의 Power Uprate 가능함을 검토한 결과이다.

위의 6개 시나리오 가운데 가장 경제적인 경우는 시나리오 #5의 “조기 교체와 출력 증가”이나, 고리 1호기에서는 시나리오 #3의 우선 “조기교체” 쪽으로 선택하여 증기발생기를 교체할 예정이며, 출력 증가 분야는 추후 인허가 요건을 정밀 분석하여 적용할 계획이다.

증기발생기 교체를 결정하는 요인으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

① 중대사고를 유발시킬 수 있는 Tube 손상의 증가, Tube 파단(破端) 사고, SIS작동, 방사능의 대기방출 등을 유발시킬 수 있는 안전성 측면이 있다.

② 빈번한 Tube 누설(漏泄)로 인한 발전소 불시정지(不時停止) 증가, 증기발생기 튜브검토 및 보수에 기인한 정비기간의 연장, 전력계통의 안전성, 증기발생기 보수로 인한 작업원의 방사선 피폭증가 등의 운전성 문제가 있다.

③ 출력감발(減發)로 인한 손해비용의 증가, 튜브보수 비용증가 등의 경제적 측면이 있다.

④ 원자력 정책수립, 폐기물처리, 부지 확보 및 원자력 사고에 대한 PA 측면이 강조되어 증기발생기 교체요인으로 대두되고 있는 것도 실정(實情)의 하나이다.

고리 1호기에서는 안전성, 운전성, 경제성 및 PA측면 등을 종합적으로 고려하여 증기발생기 교체를 1998년 정기보수 기간에 시행할 예정이다.

특집 : 한 · 일 原子力산업 세미나 논문

한국전력공사에서는 1998년 증기발생기 교체를 위해 증기발생기 제작 분야에 대하여 지난 8월 ITB를 발급하여 Proposal을 접수받아 평가중에 있다.

신규 증기발생기 구입 조치에 따라 교체되는 증기발생기는 종전의 증기발생기와 비교하여 다음과 같이 개선된 점을 들 수 있다.

① 종전의 증기발생기 튜브손상은 1970년대 후반까지는 주로 Wastage, Denting과 같은 일반 부식이었으나, 수처리(水處理) 기술의 발달로 이러한 손상원인은 감소하고 응력(應力)부식 균열이 주요 손상의 원인으로 대두되고 있으며 이에 강한 재질인 Inconel 690 TT를 채택하였으며,

② Tube Support Plate가 Drilled Type여서 Sludge 누적, 취약성 때문에 개선된 Quarter-foil Type 또는 Lattice Type으로 결정할 예정이다.

③ Tube와 Tube Support 사이의 Expansion 방법은 종전은 기계식이었으나 입계(粒界)부식 및 튜브 외형 응력부식 균열에 강한 Hydraulic Expansion 방법을 채택할 예정이다.

그밖에 보수 용이성을 위해 Man-Way Cover Size를 16"에서 18"로, 증기발생기 외형 Size 및 기타 연결 부위는 기존의 증기발생기와 동일하게 제작할 예정이다.

증기발생기 교체방법 결정을 위해 한국전력공사에서는 외국의 사례 및 고리 1호기 여건 등을 고려하여,

① One piece 또는 Two Piece 교체

② 기존 Equipment Hatch 또는 격납건물벽의 임시 Wall Opening 이용

③ 1차측 배관 절단 방법 및 Channel Head 절단

④ 기존 Polar Crane 사용 및 임시 Crane 설치 등을 고려하였으며, 교체 방법으로는 5개의 시나리오를 중심으로 검토하였다.

시나리오 #1 : 기존 Equipment Hatch를 통한 One-Piecs 교체

시나리오 #2 : 기존 Equipment Hatch를 통한 Two-Piece 교체

시나리오 #3 : 격납건물 지붕의 임시 출입구를 통한 One-Piece 교체

시나리오 #4 : 격납건물 벽의 임시 출입 구를 통한 One-Piece 교체

시나리오 #5 : 격납건물 벽의 임시 출입 구를 통한 Two-Piece 교체

위의 각 시나리오별 검토 결과는 다음과 같다.

Two-Piece 교체 방법은 교체시 격납건물 내에서의 작업일수 및 작업자의 방사선 피폭 등의 사유로 불리하게 작용하고, 기존의 Equipment Hatch 이용은 고리 1호기의 여건상 불가능하였으므로 검토대상에서 제외하였

다.

고리 1호기 증기발생기 교체 방법에서 가장 유력한 방법이니 시나리오 #3의 격납건물 지붕을 통한 One-Piece 교체 방법 및 시나리오 #4의 격납건물 벽을 통한 One-Piece 교체 방법이다.

1970년대에 건설된 대부분의 原子力발전소에는 Equipment Hatch 위치가 S/G 교체를 고려하여 설계되지 못하였으므로 S/G 교체시 대부분 격납건물 벽을 해체하여 S/G를 하고 있다.

1996년에 실시예정인 미국의 GINNS 발전소에서는 격납건물 지붕에 임시 출입구를 설치하여 교체예정이나, GINNS 발전소의 경우 이 방법을 택한 결정적인 요인은 격납용기내에 Tendon이 설치되어 있기 때문이다.

참고로 말하면 고리 1호기는 격납용기이 Tendon이 설치되어 있지 않다. 따라서 고리 1호기에서는 격납건물벽에 임시 출입구를 만들어 One-Piece로 교체할 예정이다.

이러한 교체 시나리오를 놓고 기술성 사항을 비교·검토해 본 바로는 고리 원자력발전소 1호기 시나리오 #4를 택할 경우 기존의 설치되어 있는 Polar Crane의 보강이 필수적(必須的)이며, 증기발생기 주변의 Concrete 격실 절단을 하지 않기 위해서 보강시 Polar Crane의 높이도 보강되어야 한다는 것이다.

증기발생기 교체 작업은 신규 건설

古里 1호기 증기발생기 교체

당시 설치 작업과 비교할 때 방사선 구역에서 작업해야 하는 큰 차이점이 있으므로 작업중 방사선 피폭을 절감하기 위해서는

- ① 작업구역의 차폐
- ② 필요부분의 제염
- ③ 환기 시설 보강은 물론 ALARA 개념을 도입하여야 할 것이다.

또한, 한국전력공사에서는 사업 관리를 강화할 예정인데 사업 수행시에

- ① 방사선 작업자의 소수정예 작업자 투입
- ② 첨단기술장비 및 절차서 수립
- ③ 방사선 출입관리 철저
- ④ 공사 현황의 Monitoring 및 Feed back을 원칙으로 사업수행을 계획하고 있다.

이러한 계획하에 한국전력공사는

- ① Mockup 훈련을 강화하고
- ② 방사선 작업자의 방호 훈련을 실시하며
- ③ CCTV 활용 및 통신 시설을 확충하고
- ④ 원격장비 사용 및 방사선원의 제거 등을 사전에 수행할 예정이다.

증기발생기 교체와 관련된 인허가는 한국의 경우 처음으로 시행되는 작업이기 때문에 관심의 대상이다.

규제 검토대상은 설계, 재질선택, 제작, 안전해석 등이 될 것이다.

외국의 경우 증기발생기 교체(交替) 때에는

- ① 적용 규격 및 표준
- ② 품질보증

③ 열처리 및 화학처리

④ 공장 시험검사

⑤ 세관응력(細管應力)

⑥ 비파괴(非破壞)검사 등 설계, 제작 분야에 관심을 둔 것으로 나타나 있다.

古리 1호기의 경우 증기발생기의 교체는 국내 원자력법상 운영 허가의 변경으로 규정하고 있기 때문에 증기발생기 교체 방법 및 관련기술을 반영하여 FSAR을 포함한 모든 인허가 문서를 수정할 예정이다.

그러나 증기발생기의 교체는 한국에서는 처음 수행예정인 사업으로 외국의 사례인 10 CFR 50, 59의 적용 가능성 확인 등은 국내 규제 기관과 사전 협의를 실시함으로써 인허가 방향을 정착시킬 예정이다.

성공적인 증기발생기 교체 사업을 위해서는 사업착수 이전에 사업조직을 결성하고, 예비사업 조직을 편성하여 운영할 방침이다.

예비사업조직에서는,

- ① 구매 업무
- ② Engineering 업무
- ③ 교체작업 관리 업무 등을 담당할 것이며 인허가 조직도 결성할 방침이다.

또한 1998년 교체 이전에 2회의 정기 보수기간이 포함되어 있으므로 이 기간을 최대한으로 활용하여 미비점을 보완하여 공기 및 소요비용의 불확실성을 줄일 계획이다.

1998년 교체작업 이전의 착수항목

으로는

- ① 발전소 일반 상태 및 각종 Interface 파악
- ② 정확한 방사선 준위 측정
- ③ 광학 기계를 이용한 S/G Nozzle, Support, RES Loop 측정
- ④ S/G 이송설비 지지 부착물 설치
- ⑤ 이송주변 저해요인 재배치 및 철거
- ⑥ 배관계통 및 지지물의 신규설치 또는 재배치
- ⑦ 신규 및 폐(廢)증기발생기 저장소 설치
- ⑧ 실물 크기의 Mockup설비를 제작, 설치할 계획이다.

1998년 3월부터 예방 정비(豫防整備) 총 예상기간인 100여일 즉, 발전소정지에서 계통병입일(系統並入日)까지 예상기간의 100일내에서 증기발생기를 교체할 예정이다.