

美國에서의 蒸氣發生器 交替

최근 원자력산업계에서는 PWR의 아킬레스腱이라고 하는 증기발생기의 교체에 대한 논란이 한창이다. 따라서 本誌에서는 “原子力工業 10月號”에 다루어진 내용을 소개한다.

ANS의 토론주제

전세계의 원자력산업계는 주문감소로 특히 원자로 메이커들이 심각한 사태를 맞고 있지만 금년 4월 미국 유타州的 솔트레이크 시에서 열렸던 미원자력학회(ANS)에서 장래사업으로 주목을 끈 것은 증기발생기(SG)의 교체문제였다. 2000년에는 보수작업의 핵심이 될 것이라는 전망이다. 증기발생기의 보수·수명연장에 관한 토론회 석상에서 B&W Nuclear Service사의 “본”씨가 밝혔듯이 미국에서는 확신을 갖고 이러한 사태를 맞이하고 있다. 일본에서도 關西電力의 다카하마(高浜)발전소 사고로 증기발생기가 비판의 대상이 되었지만 이같은 움직임이 전세계에 파급될 것이 틀림없기 때문에 원자로 메이커에서도 본격적인 기술개발에 역점을 둘 것으로 보인다.

PWR의 아킬레스腱

PWR의 아킬레스腱이라고 하는 증기발생기. 이같은 증기발생기를 가지고 있는 PWR은 현재 세계에서 운전중인 경수로의 약 70%를 차지하고 있다. 미국도 같은 비율로 돼있다.

이 ANS 토론회에서 참가자 모두가 미국의

실정을 신랄하게 비판하고 있다. 이 석상에서 “본”씨는 「증기발생기의 수명을 20년으로 하면 2000년에는 많은 원자력발전소가 증기발생기의 내용년수에서 오는 劣化문제에 직면하게 될 것」이라고 했다.

또 버지니아州 엔지니어링회사의 “고맨”씨는 「미국에서는 이미 많은 원자력발전소에서 “튜브”의 심한 劣化가 일어나고 있다」고 지적해 이 문제가 현실화되고 있음을 시사한 바 있다.

전력연구소(EPRI)의 “웰티”씨는 더 신랄하게 비판했다. 「증기발생기의 건전성은 운전개시한 날로부터 계획적으로 다루어나가지 않으면 안되는데 많은 전력회사에서는 손도 대지 않고 있다.」

NRC의 Plugging 기준의 재검토

증기발생기의 수명연장문제에 관해 NRC의 “머피” 선임검사관은 구멍이 난 튜브를 플러깅해서 이 튜브에 증기가 통하지 않도록 하는 플러깅 기준의 대안을 생각하는 것도 수명연장의 가능성을 모색하는 것이라고 하면서 다음과 같이 말했다.

「현행 기술사양서에서는 튜브에 균열이 일어

나 두께의 40%에 달하면 플라깅해서 본체와 분리할 것을 요구하고 있다. 이것은 기준을 변경함으로써 튜브의 사용기간을 연장할 수 있다는 것을 의미한다. 또 열화된 튜브의 교체도 유효하고 또한 실증이 끝난 수명연장기술이다. 미국의 원자력발전소에서는 지금까지 2만 3천 개의 튜브가 교체되었다. 그 운전실적도 좋다. 실제로 Southern California Edison社의 San Onofre-1호기에서는 1981년 이후 교체된 튜브로 아무 지장없이 운전하고 있다.」

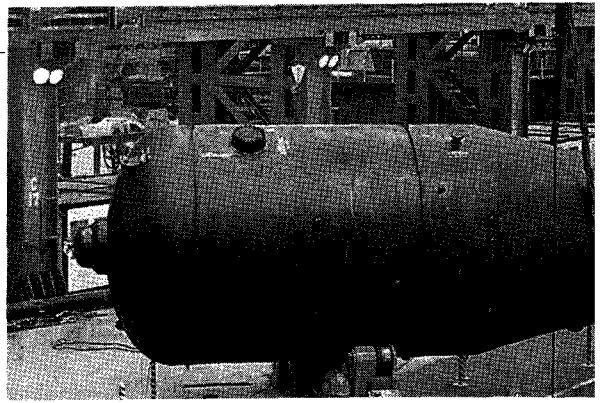
WH社는 이미 체제강화

PWR 메이커인 WH社는 이미 플로리다州의 「펜사코라」 공장에 교체용 증기발생기의 생산라인을 설치하고 「버지니아」 전력회사의 North Anna-1호기의 증기발생기 하부 튜브 assembly 제작에 들어갔지만 장래 전망이 밝아 확장도 가능한 것으로 알려져 있다.

인원면에서도 원자로설계부문의 많은 기술자들을 2차계통부문으로 재배치해 보수공사 등의 서비스부문을 확장 강화하는데 노력하고 있다.

Palisades 원전의 증기발생기 교체

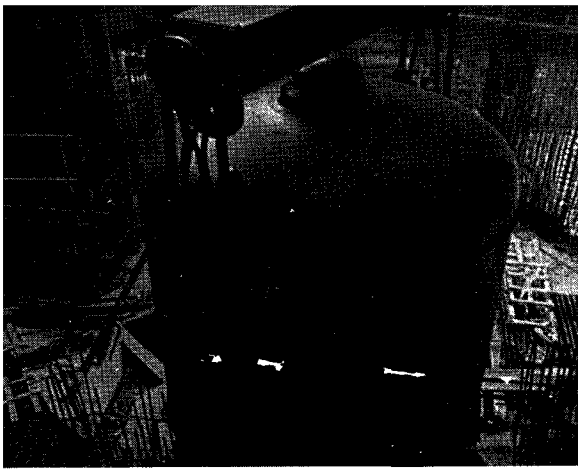
미국의 Palisades 원전(CE사제 74만kW, 71년 12월 운전개시)에서는 튜브두께 마모로 상당히 많은 튜브를 플라깅했지만(87년 12월 현재 4,040개) 결국 2대의 증기발생기를 신제품으로 교체했다. 이 공사는 지난 3월 중순에 끝났지만 완공까지 6개월간이나 원자로를 정지시켰다. 지금까지 WH사제의 원자로에서는 몇대의 교체 사례가 보고되어 있는데 CE사제의 것이 교체되기는 이번 것이 처음이다. 교체비용은 9,100만달러였는데 이것은 당초의 추정액보다 1,200만달러나 적은 것이다. 이 공사에 참여했던 작업원의 집단피폭선량은 487人·렘으로 이것은 지금까지 미국에서 시행된 교체공사 중에서는 최소치를 기록한 것이다. 또 아직 최종적인 결론에는 이르지 못했지만 방사능에 오염된 폐기물의 반출량도 지금까지 시행된 공사 중에서



최소치를 기록하고 있다. 원자로로는 6개월 정도 정지되었지만(90년 9월 15일~91년 3월 14일) 실제 교체공사에 소요된 기간은 93일이었다. 스웨덴의 Ringhals-2호기는 74일을 기록했고 또 최근에는 독일의 KWU社가 40~50일에 교체가능하다고 발표한 일이 있다. 이로 미루어 보아 Palisades 원전의 93일은 보통의 공사기간이라고 볼 수 있다. 이 공사는 당초 67일로 예정했으나 이보다 26일이 늦어졌다.

공사기간이 연장된 것은 신품의 증기발생기를 설치할 때 cold leg쪽의 용접을 다시 했기 때문이었다. 프로젝트 매니저인 David Joos씨는 「교체하기로 결정하고 나서 완성할 때까지 2년 밖에 걸리지 않아 매우 빠빠한 일정이었지만 결과적으로 대성공이었다」고 이 프로젝트를 평가하고 있다.

기존의 증기발생기는 逆U자형 튜브로 되어 있는 수직형으로 높이가 18m 외경이 6m나 된다. 1대의 증기발생기 무게는 460톤으로 Inconel-600으로 되어있는 8,519개의 튜브가 12개의 탄소강 지지판과 2개의 Egg-crate형 spacer grid로 고정되어 있다. WH사제의 것과는 크게 다르다. 또한 같은 CE사제의 것인데도 일본의 미하마(美浜)-1호기의 것과는 다르다. 이 증기발생기의 튜브가 최초로 파손된 것은 운전을 개시하고 나서 1년도 안돼서였는데 원인은 「튜브두께 마모」였다. 최근에는 「입자간 부식균열」로 고심하고 있다. 증기발생기 2차측의 수질관리를 74년에 磷酸 나트륨(PO_2Na_4)에서 舍취발성 약품처리(All Volatile Treatment, 약칭 AVT)로 바꾸고 나서 「튜브두께 마모」는 격감하고 있다. 그 원인이 되어 crevis부분(튜브와 지지판 사이의 틈)에 부식



생성물이 모여 튜브를 강하게 누르는 「denting 현상」(denting의 dent에는 톱니 모양의 돌기물이라는 뜻이 있다)이 서서히 발생했다. 미하마(美浜)-1호기는 Palisades 원전과 같은 시기에 운전을 개시했고 같은 CE사제의 증기발생기를 갖추고 있다. 「튜브두께 마모」와 그 해결책에 있어서도 똑같은 방법을 취하고 있고 또한 튜브와 지지판의 재질이 같은데도 불구하고 미하마-1호기에서는 denting 현상이 일어나지 않고 있다. 튜브 고장은 아주 미묘한 것이다. Palisades 원전에서는 80년대에 튜브에 원주방향의 균열이 생기는 것이 관측되었는데 이것은 denting의 영향이라고 풀이되고 있다. 보다 엄밀하게 말하면 튜브와 증기발생기 동체의 열팽창 차이때문에 그 반응이 지지판을 통해 튜브로 전달되어 마치 denting 현상이 일어난 것 같이 보인다. 교체전에는 플러깅률이 26%에 달했었다.

4,000개의 플러그가 26%의 플러깅률이 된다면 튜브의 총수는 16,000개가 된다. 또 Palisades 원전에서는 89년 중반부터 정격출력의 80%로 운전을 계속하고 있다.

교체용의 것은 기존의 것과는 좀 달라 튜브 개수는 8,519개에서 8,219개로 또 튜브두께는 1.22mm에서 1.07mm로 변경되어 있다. 그러나 열교환 특성은 같아지도록 배려돼있다. 기존의 것인 교체용도 20%의 마진으로 오버·디자인 되어 있다. 또한 교체용의 것에는 다음과 같은 개량이 가해졌다. ① 스테인레스 스틸로 되어 있는 Egg-crate 지지구조물을 장착한 drill 구멍이 나 있는 탄소강 지지판 사용, ② 2차측의 유동현상을 개선, ③ Blowdown 시스템의 개

선, ④ 검사가 용이하도록 구조 개선, ⑤ Sampling水의 採水口를 추가, 등이다. 튜브의 재질로 Inconel 690이 당초 물망에 올랐지만 검토 결과 종래의 Inconel 600을 그대로 사용하기로 했다. Inconel 690은 600에 비해 응력부식균열에 강하지만 그 반면에 열손실이 많아 투자한 비용에 상응하는 이득을 얻기는 어려운 것으로 돼있다. 교체용 증기발생기는 이미 70년대 후반에 제조되어 테네시州的 Chattanooga 공장에서 10년 이상이나 잠자고 있다. 증기발생기를 교체하기 위해 원자로 격납용기에는 높이 8.4m, 폭 7.8m의 반출구를 냈다. 반출된 기존의 증기발생기는 시설내의 임시보관장으로 옮겨져 여기서 최소한 5년간은 안전하게 관리할 수 있게 되어 있다. CE사제의 증기발생기에는 1개의 hot leg와 2개의 cold leg가 갖추어져 있다. 설치할 때의 미조정에는 Laser beam법이 사용되고 또 용접은 재래식의 V-groove법 대신에 narrow gap법이 사용되었다. 후자의 용접방법으로 하면 잔류응력을 재래식보다 적게 할 수 있다. Babcock Hitachi사에서는 압력용기를 제조할 때 동체부분은 이 narrow gap법으로 용접하고 있다. 이 방법은 Babcock Hitachi사에서 개발한 것으로 알려져 있다. 압력용기의 경우 용접하는 동체부분에는 불과 1cm의 U자형 gap 밖에 없다. 압력용기쪽을 서서히 회전시켜 자동용접한다. Palisades 원전의 프로젝트 매니저인 Joos씨는 「Palisades 원전에서는 수동으로 용접하고 있으며 스테인레스 스틸로 피복된 탄소강 배관에 narrow gap법이 사용된 것은 이번의 교체작업이 처음이다」라고 말했다.

미국, 프랑스, 스웨덴에 있는 WH사제의 PWR에는 스테인레스 스틸의 배관이 사용되고 있다. Palisades 원전에서는 용접 후에 비파괴 검사를 실시한 결과 cold leg의 8개의 용접부분 중 6개에서 결함이 발견되어 V-groove법으로 용접을 다시 한 일이 있다. Joos씨는 또 「집단피폭선량이 적은 것은 사전에 배관을 잘 제염한 것과, 모형을 사용해서 충분한 훈련을 했기 때문이다」라고 강조하고 있다.