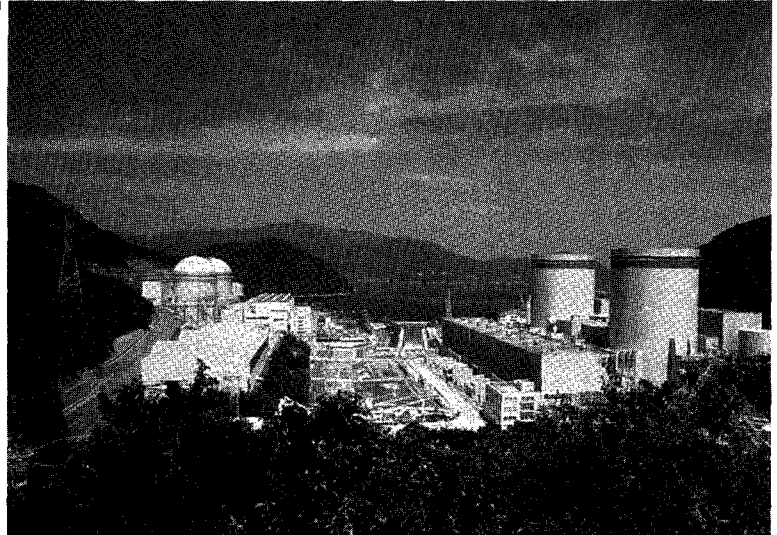


특 집

韓·日原子力산업 세미나 발표 논문



<「증기발생기」교체가 이미 끝나고(2호기), 내년에 또 시작할(1호기) 關西電力
다카하마 原電 >

일본의 증기발생기 교체

시설의 年數증가 따라 보수비용 커지고 경제성 저하

도오토오 다까시
(百百降)

일본 關西전력주식회사
原子力·火力본부(原子力관리)

조 사 역

I. 서 론

1994년 9월 현재 일본에는 21기의 가압경수로가 가동중에 있는데 법령에 따라 매년 정기적으로 검사하도록 되어 있다.

증기발생기의 정기검사시에는 모든 傳熱管을 처음부터 끝까지 검사하게

된다.

검사결과와 보수방법은 숨김없이 일반시민에게 공개된다. 발전소의 운전중에는 증기발생기 전열관의 누설이 용납되지 않는다.

손상 징후를 보여주는 모든 전열관은 관막음(plugging) 또는 덧씌우기(sleeving)하는 방법으로 보수한다.

꽤 오래전에 가동을 개시한 원자력 발전소에서는 운전년수가 오래됨에

일본의 증기발생기 교체

표 1 : 증기발생기 비교

| | 미하마-1 | | 미하마-2 | | 다카하마-2, 오히-1, 겐카이-1 | | 오히-3, 다카하마-1, 오히-2 | |
|----------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | 기존 SG | 신규 SG | 기존 SG | 신규 SG | 기존 SG | 신규 SG | 기존 SG | 신규 SG |
| 모델 | CE | 35 F | 44 | 46 F | 51(A) | 52 F(A) | 51(A) | 54F(A) |
| 총길이 | 14.6 | 17.2 | 19.3 | 19.4 | 20.6 | 20.8 | 20.6 | 21.2 |
| 하부몸체 내경 | 2.8 | 3.2 | 3.1 | 3.3 | 3.3 | 3.3 | 3.3 | 3.3 |
| 상부몸체 내경 | 3.6 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.3 | 4.3 | 4.3 | 4.3 |
| 표면적 × 10 ³ sq.m | 3.4 | 3.3 | 4.1 | 4.3 | 4.8 | 4.9 | 4.8 | 5.1 |
| 전열관수 | 4,426 | 2,918 | 3,260 | 3,382 | 3,388 | 3,382 | 3,388 | 3,382 |
| 전열관 외경, mm | 19.05 | 22.23 | 22.23 | 22.23 | 22.23 | 22.23 | 22.23 | 22.23 |
| 전열관 재질 | MA-600 | TT-690 | MA-600 | TT-690 | MA-600 | TT-690 | MA-600 | TT-690 |
| 전열관 벽두께 | 1.42 | 1.27 | 1.27 | 1.27 | 1.27 | 1.27 | 1.27 | 1.27 |
| 전열관 간격, mm/ 배열 | 25.4/ trl | 32.54/ sq | 31.35/ sq | 32.54/ sq | 32.54/ sq | 32.54/ sq | 32.54/ sq | 32.54/ sq |
| 전열관지지판 설계/ 재질 | Egg Crate/CS | BEC/ SUS405 | Drill/ SB42 | BEC/ SUS405 | Drill/ SB42 | BEC/ SUS405 | Drill/ SB42 | BEC/ SUS405 |
| 전열관 확장 방법 | Explosion Full | Hydro Full, Onestep Roller | Roller Partial | Hydro Full, Onestep Roller | Roller Partial(Full) | Hydro Full, Onestep Roller | Roller Partial(Full) | Hydro Full, Onestep Roller |
| 전열관 지지판의 수 | - | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 |
| AVB 세트수 | - | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| 총중량(건조), ton | 234 | 260 | 277 | 293 | 300 | 321 | 300 | 328 |

따라 전열관의 성능저하가 나타나기 시작했다. 이러한 성능저하는 매회 정기검사후 언론을 통하여 보도되어 원자력발전에 대한 국민의 신뢰에 악영향을 주었다.

또한 정기검사 기간이 길어지고 보수비용이 커짐에 따라 원자력발전의 경제성이 떨어지고 방사선 쏘임량(被曝量)이 증가하는 매우 중대한 문제가 대두되기 시작하였다.

한편, 증기발생기 교체기술은 외국에서는 충분히 개발입증되었다.

사실 증기발생기 교체는 관서전력이 증기발생기 교체를 결정할 무렵에는 이미 12곳의 발전소에서 이루어질 정도로 보수방법이 정립되어 있었다.

이에 기초하여 關西電力은 모두 7기의 PWR 발전소 증기발생기를 교체하기로 결정하였다. 즉, 미하마 1, 2, 3호기, 다카하마 1, 2호기, 오히 1, 2호기이다.

九州電力도 겐카이 1호기의 증기발생기를 교체하기로 하였다. 관서전력의 미하마 2호기 증기발생기 교체는

지난 1991년 2월에 발생한 증기발생기 전열관 파단사고 및 이에 따른 원인조사에 따른 대책의 일환으로 결정된 바 있다.

四國電力도 이카타 1호기의 증기발생기 교체를 생각하고 있다.

II. 증기발생기 교체 계획

그림 1은 일본에서 증기발생기 교체계획을 나타낸다.

특집 : 한·일 原子力산업 세미나 논문

표 2-1 : 교체작업(제1그룹)

| 항 목 | 미하마-2 | 다카하마-2 | 오히-1 | 겐카이-1 |
|---------------|------------------------------|----------|-------------------------|-------|
| 건설용 임시 出入口 | ○ | ○ | × | ○ |
| 폐기를 임시건물 | - | - | ○ | - |
| 주냉각배관 절단수 | 3-Cut (4-Cut for Loop B) | | 3-Cut | |
| 주냉각배관 절단방법 | Mechanical Cutting | | | |
| 주냉각배관 용접방법 | Narrow Gap TIG Welding | | | |
| 주냉각배관 방사성오염제거 | Mechanical | | | |
| 부속배관 절단방법 | Flame Cutting, Mechanical | | | |
| 콘크리트 절단방법 | Wire-saw Cutter(for C/ W) | Wire-saw | Wall-saw Core Boring | |
| 접합부위 보강방법 | Enclosed-arc Welding | | | |

증기발생기 교체는 다카하마 2호기 및 미하마 2호기에서는 이미 완료되어 상운전에 들어가 있다. 겐카이 1호기 증기발생기 교체도 완료되어 정기검사가 거의 마무리단계에 있다.

증기발생기 교체는 오히 1호기에서도 진행중인데 기존의 증기발생기는 다음 달에 꺼내고 새 증기발생기는 12월에 설치할 예정이다.

Ⅲ. 새로운 증기발생기

새로운 증기발생기는 원래 있던 증기발생기와 열출력 및 온도 조건이 똑 같도록 최신설계에 따라 만들어졌다.

이 증기발생기는 운전경험을 살려 전열관의 성능저하를 사전에 막을 수 있도록 되어 있다. 표 1에는 새 증기

발생기의 주요 기술규격을 보여준다.

새 증기발생기는 다음과 같은 점에서 원래의 것과 차이가 있다.

① Inconel TT690이라는 재료를 전열관에 썼다.

② 삼중의 스텐레스 강철로 된 AVB를 사용했다.

③ 스텐레스 강으로 만든 전열관 지지판은 BEC 형태이다.

④ 숏깊이(full depth) 유압식 管擴張方法을 사용했다.

미하마 1, 3호기, 다카하마 1호기, 오히 2호기의 증기발생기를 새로 설계함에 있어서 열전달면적은 다카하마 2호기의 새 증기발생기에 비하여 더욱 커졌는데, 이는 최근의 발전소 운전경험 및 기타 관련 자료를 참조할 때 Inconel TT690의 熱傳導度가 Inconel TT690에 비하여 8% 정도 적다는 가정에 근거한 것이다.

또한 관서전력의 새 증기발생기에는 슬러지 수집기가 설치되어 있기 때문에 튜브 판과 기타 표면에 축적되는 마그네타이트의 양을 줄일 수 있다.

표 2-2 : 증기발생기 교체작업 개요(제1그룹)

| | 미하마-2 | 다카하마-2 | 오히-1 | 겐카이-1 |
|------------|--------------------------------|---|------------------|-----------------------------|
| 기존 SG | 44(MHI) | 51(MHI) | 51A(WH) | 51(MHI) |
| 신규 SG | 46(MHI) | 52F(MHI) | 52FA(WHI) | 52F(MHI) |
| SG 취급 | 한덩어리로 취급 | | | |
| SG 리브 및 반입 | O/S, C/V, C/W에 임시 出入口 건설 | O/S, C/W에 임시出入口 건 설(갠트리인 양장치 이용) | 기존의 기기 반입구 이용 | O/S, C/V 에 임시 出 入口 건설 |
| CN 크레인 보강 | 임시 Jacking System | | | |
| SG 보관건물 | 부지내 철근 콘크리트 건물 | | | |
| 교체작업 계약자 | MHI | | | |

MHI : Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

WH : Westinghouse Electric Corporation

그림 2에는 교체 전후의 증기발생기의 모습을 보여준다(그림 생략).

IV. 교체작업의 특징

표 2는 증기발생기 교체작업의 주요 단계를 보여준다.

모든 발전소에서 증기발생기는 한덩어리로 교체되었다.

격납건물 구조와 부지조건이 다르기 때문에 증기발생기를 취급하는 방법은 발전소마다 달랐다. 지금부터 증기발생기 교체의 주요단계를 설명하고자 한다.

1. 격납건물에 임시 출입구 건설

미하마 1, 2호기와 다카하마 1, 2호기 그리고 켄카이 1호기에서는 외부 방호벽과 격납건물에 건설용 임시 출입구를 만들었다. 왜냐하면 기존의 기기 반입구는 크기가 작거나 위치가 적절하지 못하다는 등의 이유로 쓸 수가 없었기 때문이다.

미하마 1, 2호기와 다카하마 2호기에는 임시로 철구조물 또는 갠트리(Gantry) 형태의 인양장치를 설치하였는데 이는 임시 출입구와 진입도로 사이에 거리가 있었기 때문이다.

그림 3에서부터 6까지는(5·6은 생략) 미하마 및 다카하마 2호기의 증기발생기 교체 과정을 보여준다.

표 2-3 : 증기발생기 교체작업 개요(제2그룹)

| | 미하마-2 | 미하마-2 | 다카하마-1 | 오히-2 |
|------------|--|---------------|-------------------------------|--------------|
| 기존 SG | CE | 51(MHI) | 51(WH) | 51A(MHI) |
| 신규 SG | 35F(WH) | 54F(MHI) | 54F(MHI) | 54FA(MHI) |
| SG 취급 | 한덩어리로 취급 | | | |
| SG引出 및 반입 | O/S, C/V, C/W에 임시 出入口 건설. O/S바깥에 갠트리 인양 장치 | 기존 기기 반 입구 이용 | O/S, C/V 에 임시出入 口 건설(이 동식크레인) | 기존 기기 반입구 이용 |
| C/V 크레인 보강 | 임시 재킹시스템(미하마-3호는 기존의 C/V 크레인 보강 예정) | | | |
| SG 보관건물 | 부지내 철근 콘크리트 건물 | | | |
| SG 교체계약자 | MHI(*) | | | |

(*): 최종계약은 通産省에서 건설허가 받은 후 체결 예정

2. 냉각계통 배관 절단 및 복원

원자로 냉각계통 배관 절단과 관련하여 미하마 2호기는 B 번 유로를 4조각으로 잘라서 용접시편을 얻었다.

미하마 2호기의 A번 유로와 다카하마 2호기, 켄카이 1호기에는 모두 3조각 방식을 사용했다. 3조각으로 절단하는 방법은 오히 1호기에, 4조각 절단방법은 미하마 1호기에 사용할 예정인데 이렇게 하면 유로 격리 밸브를 뜯어 낼 수 있게 된다.

다른 발전소의 절단방법은 아직 확정되지 않았다.

3. 인양

기존의 크레인 용량 및 높이는 모두 충분하지 않기 때문에 보조용 트롤리를 크레인 거더에 설치하여 증기발생기를 들어 올렸다.

다카하마 2호기, 미하마 2호기 및 켄카이 1호기에는 철선 잭 형태(wire jack-type)의 보조 트롤리를 썼으며 오히 1호기에서는 체인 잭 형태(chain jack-type)의 트롤리를 썼다.

앞으로도 발전소 조건에 따라 다른 형태의 보조 트롤리를 사용하게 될 것이다. 그림 7은(생략) 미하마 2호기에서 기초의 증기발생기를 들어올리는

표 4 : 방사선 쏘임량 및 폐기물 발생량

| 구 분 | | 기본계획 | 세부계획 | 결 과 |
|--------|-----------------------|-------|-------|-----|
| 다카하마-2 | 방사선 쏘임량 (man · Sv) | 4 | 3.9 | 1.5 |
| | 폐기물발생량 (Drum cans) | 3,000 | 1,200 | 930 |
| 미하마-2 | 방사선 쏘임량 (man · Sv) | 3 | 2.8 | 1.5 |
| | 폐기물발생량 (Drum cans) | 1,500 | 1,100 | 750 |

장면이다.

V. 폐기물 처리

그림 8에는 증기발생기 교체과정에서 폐기물의 종류와 처리방법을 정리하였다.

뜯어낸 증기발생기는 발전소 부지 내 철근 콘크리트 구조로 새로 건설한 증기발생기 저장 건물에 보관한다.

그림 9는(생략) 증기발생기 저장고의 한 예를 보여준다.

미하마 2호기의 증기발생기 저장건물에는 담유리로 둘러싸인 관람실이 함께 있어 증기발생기 전열관 파손사고가 일어났던 과정을 방문객들에게 보여주고 있다.

격납건물안에서 발생한 폐기물에는 배관, 콘크리트, 증기발생기 지지대 등이 있는데 이는 방사성폐기물로서 간주하여 증기발생기 저장건물 혹은

(敷地内)에 매립한다.

VI. 방사선 피폭 저감 대책

냉각재 배관 복원에 참여하는 작업자의 방사선피폭을 줄이기 위하여 방사능 오염 제거작업을 배관절단 직후에 배관 절단부위의 1m 거리까지 실시한다.

알루미늄과 유리 알맹이를 배관 표면에 쏘아서 배관 내벽에 붙어 있는 방사성물질을 얇게 벗겨내는 기계적 제거방법을 사용하였다.

그리고 원격 혹은 자동화된 절단 및 용접작업, 방사선차폐벽의 임시설치, 사전교육을 통한 작업시간 단축 등을 통하여 방사선피폭을 줄였다.

기존의 고체폐기물 저장건물에 보관한다.

외부 차폐벽 및 보조건물 출입구 연결부위에서 발생하는 콘크리트는 방사선관리구역에서 발생하는 것이기는 하지만 외부에 방사능오염도 없고 내부도 放射化되지 않았기 때문에 일반 폐기물로서 간주하여 발전소 부지내

그림 1 : 교체 공정표

| | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 |
|--------|------|------|------|------|------|
| 미하마-1 | | 11月 | | 1月 | |
| 미하마-2 | 7月 | | 11月 | | |
| 미하마-3 | | | | 8月 | 4月 |
| 다카하마-1 | | | 12月 | 8月 | |
| 다카하마-2 | 1月 | | 8月 | | |
| 오히-1 | | 9月 | | 6月 | |
| 오히-2 | | | | 1月 | 10月 |
| 겐카이-1 | | 5月 | 10月 | | |

Ⅶ. 증기발생기 교체 작업 실적

그림 3 : 증기발생기 인양(미하마-2)

1. 공 정

표 3(생략)에는 증기발생기 교체 공정을 나타냈다.

증기발생기 교체는 통상적인 정기 검사 기간중에 해야 하기 때문에 일요일을 제외하고는 매일 24시간 작업을 계속해야만 하는 가장 시간에 쫓기는 공정(critical path)이다.

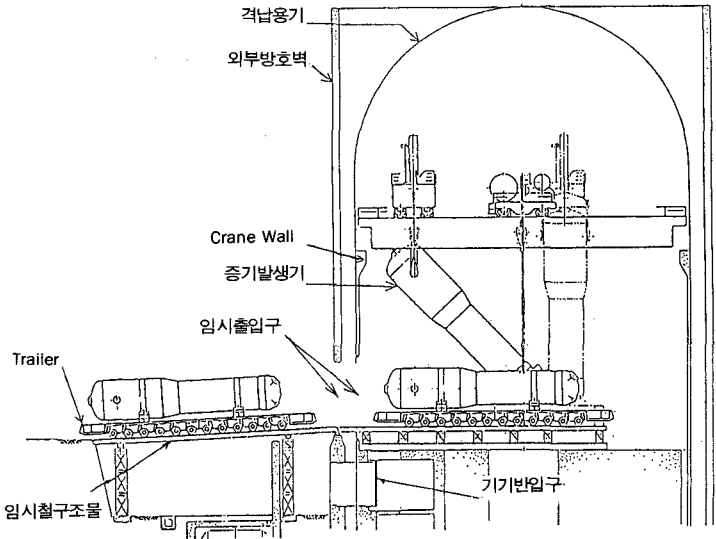
일본에서 증기발생기 교체는 다른 나라에 비하여 길게 잡혀 있는데 이는 일본에서는 처음 있는 일이고 외부 방호벽(防護壁)에 임시 출입구를 내야 하며 품질관리에 충분한 시간을 두기 위함이다.

미하마 2호기의 경우에는 1991년에 증기발생기 전열관 파손으로 발전소가동이 중단상태에 있었으므로 교체작업이 즉각 착수되었다.

증기발생기 교체과정에 있어서 증기발생기 저장소(貯藏所) 건설 및 새 증기발생기 제작이 가장 시간을 필요로 하였다.

따라서 교체관련 작업은 이 때까지는 晝間작업으로 추진되었으며 그 시점 이후부터는 일요일을 제외하고는 하루 24시간 작업으로 바뀌었다.

발전소 정지기간중에는 발전소 설비에 대하여 여러가지 보강공사(補強



工事)도 동시에 이루어지기 때문에 작업완료후 시운전과정에 특히 신경을 많이 썼다.

2. 방사선 쪼임

표 4에는 미하마 2호기 및 다카하마 2호기의 증기발생기 교체과정에서의 방사선 쪼임량을 정리하였다.

두 발전소 모두 방사선 쪼임량은 예상치보다 훨씬 적었다.

다카하마 2호기의 경우 1개 유로당 0.5인-Sv 이하로서 세계 최저 수준을 달성하였다.

이렇게 방사선 쪼임량이 적은 이유

는 사전의 철저한 교육실시, 예상보다 좋았던 방사성오염 제거 결과, 추가로 설치한 차폐체의 방사선 차단효과, 그리고 매우 신중한 사전 계획 및 평가에 따른 것이다.

3. 방사성폐기물 발생량

증기발생기 교체과정에서 뜯어낸 증기발생기, 콘크리트 덩어리 및 기타 雜資材 등 폐기물이 많이 발생하였다

증기발생기 콘크리트 덩어리를 제외한 방사성폐기물은 드럼통에 넣어 보관중이다. 폐기물 발생량 전망치와 실제 발생량은 표 4에 정리하였다.

관서전력은 폐기물을 작게 잘라 압축처리함으로써 기본계획상의 발생 목표치보다 훨씬 적은 양을, 시행계획상의 목표치보다는 비교적 적은 양을 발생시키는데 성공하였다.

VIII. 결 론

미하마 2호기 및 다카하마 2호기의 증기발생기 교체는 일본에서는 처음 있었던 일로서 성공적으로 완료되었다.

현재 두 발전소는 정격 출력으로 운전중에 있다. 겐카이 1호기 및 오히 1호기도 착실한 진전을 보이고 있다.

증기발생기 교체는 매우 큰 규모의

프로젝트로서 발전소의 건설 및 보수 경험과 충분한 사전계획을 기초로 하여 시간과 예산이 합리적으로 확보된 상태에서만 안전하게 이루어질 수 있는 것이다.

증기발생기 교체는 일본내 다른 原電에서도 계획되어 있으며 앞으로도 방사선 조임량과 폐기물발생량을 더욱 적게 하면서 안전하게 수행되기를 기원한다.

그림 8 : 교체과정에서 발생한 폐기물과 처리방법

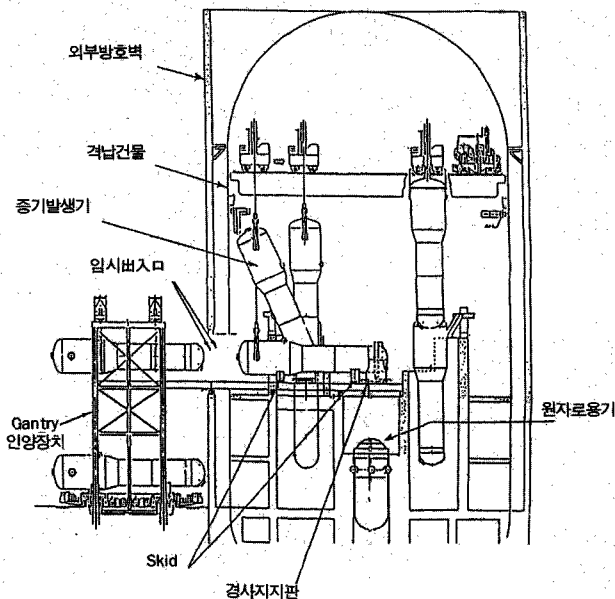
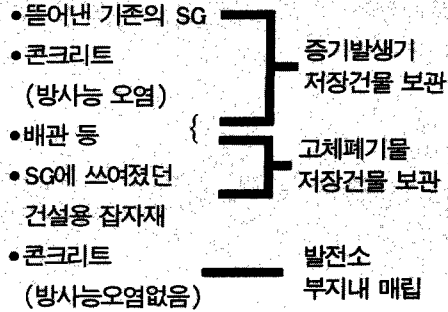


그림 4 : 증기발생기 인양 (다카하마-2)