

# 日本原電의 故障經驗과 解決策

石井 一典 (四國電力(株) 原子力運營課長)

## 1. 序 論

現在日本の原子力發電所는 世界 여러나라의 經驗에 비하여 우수한 運轉經驗을 가지고 있으며, 이와 같이 우수한 運轉實績은 주로 다음과 같은 努力에 의해서 達成되었다.

- 定期的인 檢査를 위한 補修期間의 短縮.
- 長週期運轉의 導入.
- 故障停止回數의 減少.

比較적 적은 故障停止回數는 다음과 같은 要因에 의해서 成就될 수 있었다고 믿는다.

- 豫防補修에 중점을 둔 철저한 檢査와 補修.
- 一貫性 있는  $\theta A/\theta C$  活動.

○ 日本 國內과 國外的 故障 및 事故情報를 反映한 豫防作業에 注力.

○ 技術的인 혁신을 도입함으로써 시스템의 信賴性을 改善.

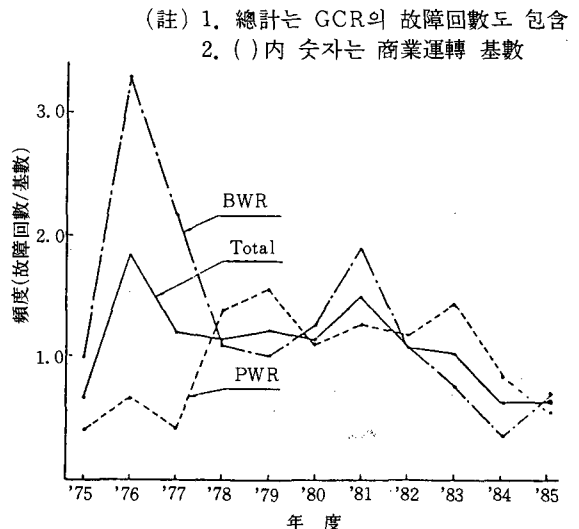
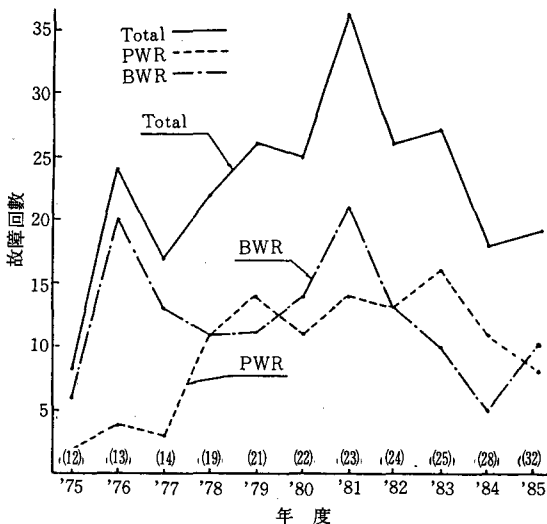
本稿에서는 日本에서의 故障經驗, 豫防補修, 故障 및 그 解決策에 대하여 概述코자 한다.

## 2. 故障經驗의 概要

### 2.1 統計的 分析

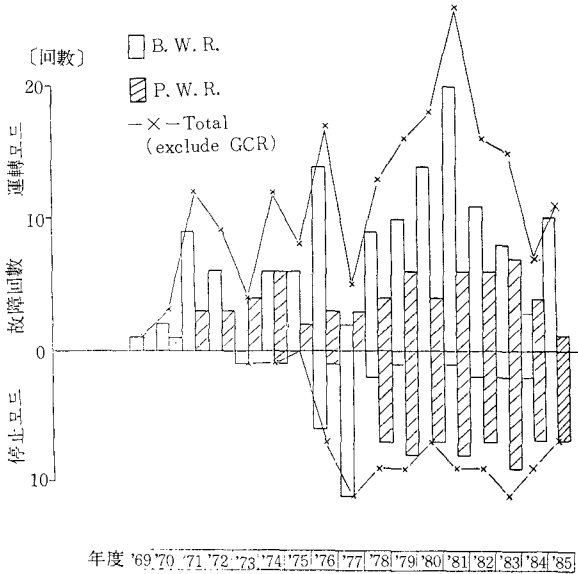
그림 1은 法에 의해서 通商産業省(MITI)에 報告된 年度別 故障回數와 頻度を 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 商業運轉

〈그림 1〉 日本의 原電 故障回數 및 頻度

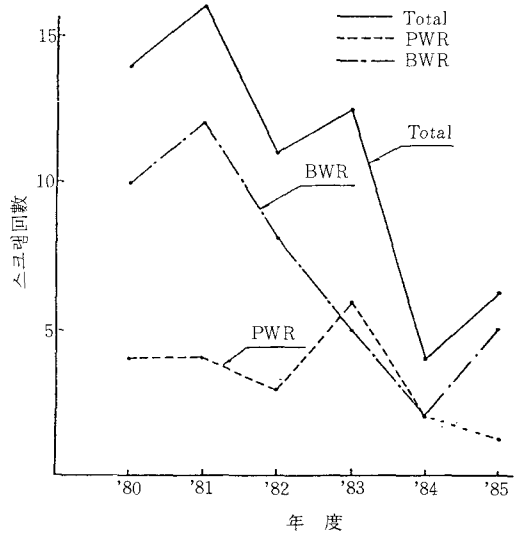


(註) 1. 總計는 GCR의 故障回數도 包含  
2. ( ) 內 숫자는 商業運轉 基數

〈그림 2〉 日本 原電의 故障回數 傾向

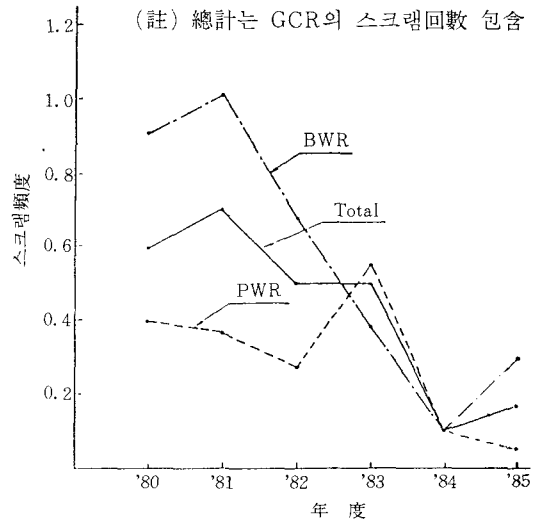


〈그림 3〉 日本 原電의 스크램 回數 및 頻度の 傾向



基数가 增加함에도 불구하고 近年에는 故障回數가 增加하지 않았다. 이것은 故障頻度가 減少하고 있음을 의미한다. 이러한 故障은 그림 2에 나타나 있듯이 運転모드(手動 또는 自動 스크램)에서 發生한 것과 停止모드(主로 定期檢査를 위한 運転停止期間中)에서 發見되는 것으로 區分이 되는데, BWR에서의 故障은 主로 自動原子炉스크램을 수반하는 運転모드中에 일어나고, PWR에서의 故障은 制御棒案内管의 지지핀이나 증기발생기튜브의 性能 低下 등과 같이 定期檢査期間中에 主로 發見되는 傾向을 나타내고 있다.

그림 3은 스크램 回數와 빈도의 추세를 나타낸 것이다. 回數와 빈도는 平均적으로 꾸준히 減少하고 있으며, 特히 最近의 데이터는 0.2회/原子炉年이라는 아주 경이적인 實績을 보여주고 있다. 이와 같이 우수한 結果는 앞에서 언급한 바와 같이 철저한 豫防補修를 통한 系統의 信賴度 向上과 더불어 체계적인 教育을 통하여 運転員 및 補修要員의 能力 開發이 主要因이라고 믿는 바이다.



## 2.2 1985年度의 故障經驗

表 1은 1985年度의 原子力發電所 故障 件數를 나타낸 것으로서 모두 19件이었다. 이中 PWR에서의 故障은 8件인데, 증기발생기튜브의 性能 低下가 6件을 차지하고 있다.

## 3. 豫防補修

### 3.1 基本概念

系統과 機器의 補修는 豫防補修와 故障補修

〈表 1〉 1985年度 原電 故障 狀況

TYPE	No.	UNIT NAME	INCIDENTS
PWR	1	GENKA - 1	Degradation of S/G tubes
	2	OHI - 1	"
	3	IKATA - 1	"
	4	TAKAHAMA - 1	"
	5	MIHAMA - 3	Damage of the leaf spring clamp of a fuel assembly
	6	MIHAMA - 3	Degradation of S/G tubes
	7	OHI - 2	"
	8	TAKAHAMA - 1	Manual reactor scram to the rise of C/V sump pit level
	9	FUKUSHIMA II-1	"
	10	TSURUGA - 1	Leakage at steam piping for emergency condenser - B
	11	ONAGAWA - 1	Automatic reactor scram due to the trouble in turbine governor valve No.1
	12	TOKAI - 2	Manual reactor scram to the leakage at drain line to a hand valve

TYPE	No.	UNIT NAME	INCIDENTS
BWR	13	FUKUSHIMA I - 1	Automatic reactor scram due to unexpected closure of MSIV
	14	FUKUSHIMA I - 1	"
	15	FUKUSHIMA I - 5	Manual reactor scram to the increase of water drain in C/V
	16	FUKASHIMA I - 3	Automatic reactor scram due to low R/V level
	17	FUKUSHIMA I - 4	Manual reactor scram to the increase of water drain in C/V
	18	TSURUGA - 1	Manual reactor scram to the leakage at main steam drain line
GCR	19	TOKAI	Unexpected opening of a safety valve in primary cooling system of No.2 heat exchanger

두 그룹으로 區分할 수 있다.

豫防補修는

○問題가 發生되기 전에 性能이 低下된 部品  
이나 機器의 交替,

○다른 發電所의 問題點을 反映하여 系統과  
機器의 檢査, 補修 및 改良

등을 包含한다. 반면에 故障補修는 發電所 運轉  
中에 故障이 發生한 다음에 실시하는 檢査와 補  
修를 말한다.

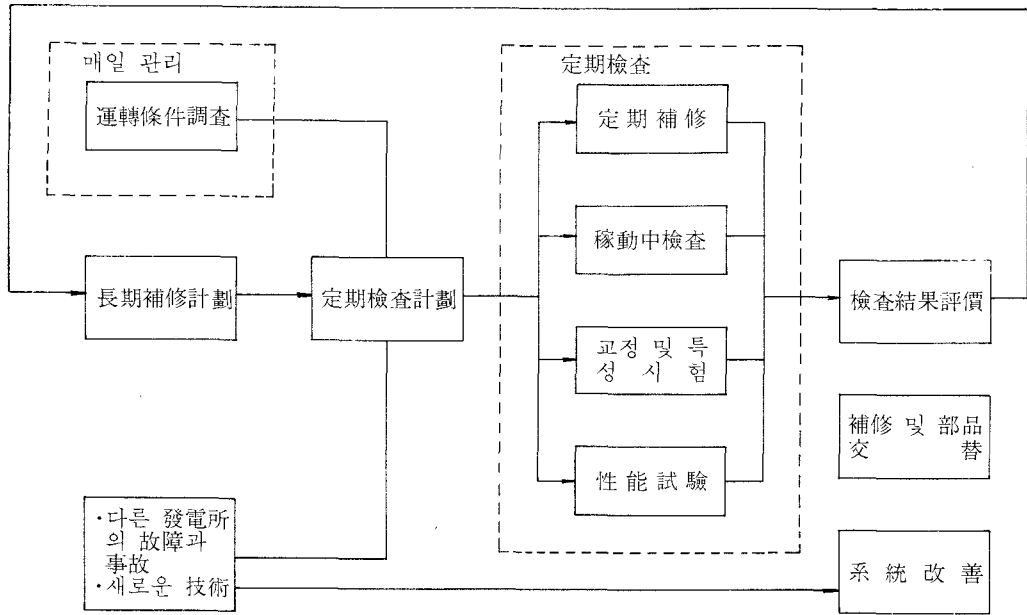
原子力發電所의 우선 순위가 發電所의 安全과  
안정된 運轉이므로 運轉中 故障의 減少는 매우  
重要的한 것이다. 이러한 目的을 達成하기 위하여  
日本은 定期檢査期間에 철저한 檢査와 補修를  
통하여 될 수 있는 한 발전소 운전중에 故障의

發生을 減少시키도록 豫防補修와 系統 및 機器  
의 改良 등에 최우선을 두고 있다. 그림 4는  
일본의 豫防補修 概略圖이다. 日本의 基本政策  
과 計劃을 要約하면 다음과 같다.

(1) 發電所 모니터링 등에서 부터의 情報 反映

系統과 機器들은 수명기간동안 소모부품을 제  
외하고는 요구되는 性能을 維持하도록 設計되  
었다. 그러나 예상치 않았던 性能 低下가 나타  
나 機器 및 部品の 交替, 재질의 改良 등이 요  
구되는 경우가 發生한다. 그러므로 運轉모드  
에서의 서베이런스와 定期檢査를 통하여 機器와  
部品の 狀態를 추적하는 것이 필수적이라고 생  
각된다. 여기서 얻어지는 情報은 철저하게 分  
析・研究되며, 문제점이 발견되는 系統이나 機

〈그림 4〉 豫防補修의 概略圖



器는 정밀검사를 하여 필요하다면 보수될 것이다.

電氣나 計裝部門의 어떤 機器나 部品은 비교적 설계수명이 짧게 되어 있으므로 적절한 週期로 시험과 交替를 해야 한다. 앞에서 언급한 바와 같이 豫防補修의 基本政策은 가능한한 빠르고 정확하게 비정상적인 징조를 發見하여 必要한 補修를 수행하는 것이다.

#### (2)故障 및 事故情報의 反映

故障이나 事故의 再發 防止를 위하여 다른 發電所에서의 故障이나 事故에 관한 자료를 有用하게 利用하는 것이 매우 效果的인 方法이다. 이를 위하여 日本은 通商産業省, 日本電力研究所의 原子力情報센터, 供給者 및 “原子力電力經驗”과 같은 간행물을 통하여 다른 發電所의 運轉經驗에 관한 情報의 蒐集에 많은 努力을 기울였으며, 各 電力會社內에 “故障 및 事故 評價會合”을 조직하여 이 정보들을 分析 및 研究하여 왔다. 이러한 結果는 運轉管理와 補修에 反映되었으며, 必要한 경우 問題가 되는 機器나 系統은 改良되었다.

또한 通商産業省의 “故障 및 事故 評價 委員會”와 原子力情報센터의 “重要運轉經驗報告書 (SOER) 評價委員會”에서도 故障과 事故를 研究·評價하며, 그 結果도 必要에 따라 各 發電所에 反映되었다.

#### (3)새로운 技術의 反映

새로 建設되는 發電所에 채택된 새로운 技術은 그 효용성을 評價한후 既存 發電所에 적용하였으며, 이것 또한 系統의 信賴性 向上에 기여하고 있다.

### 3.2 豫防補修의 例

豫防補修의 몇가지 例를 表2에 나타내었다.

## 4. 故障 및 解決策의 例

### 4.1 蒸氣發生器의 補修

#### 4.1.1 日本 蒸氣發生器의 履歷

1970년에 加圧輕水炉(PWR)인 Mihama 1号 機가 商業運轉에 들어간 이후 1985年末 現在 15基의 PWR이 運轉中이며, 表3에 나타난 바와 같이 180SGEY (Steam Generator Effective Years)가 된다. 多樣한 國內外 運轉經驗을 기

〈表 2〉豫防補修의 例

구 분	항 목	채택한 예방보수 개요
1. 발전소 모니터링 등에서 부터의 정보 반영	1. 캐패시터와 가변저항기 등과 같은 제기 부품	○주기시험과 교체 ○고온에 견디는 알루미늄 케미칼 복수기의 개선
	2. 프린트 보드나 밸브와 같은 제기	○주기시험과 교체 ○고온에 견디는 솔레노이드 밸브의 개선
	3. 밸브 그랜드 패킹	○패킹 설치방법의 개선
	4. 추기관과 같은 탄소강관의 침식	○장수명 재질 선택
	5. 복수기 열교환튜브와 같은 해수에 의한 튜브 부식	○두께 측정, 스테인레스강관으로 교체 ○ECT 시험 및 튜브 교체
	6. 전기 및 제기분야의 기기나 부품의 수명기간 평가	○사용기간에 따른 성능 저하 데이터 분석
2. 고장이나 사고에 관한 정보의 반영	7. SCC IGA 와 같은 S/G 튜브 성능 저하	○특수 탐촉자를 사용한 ECP 시행, 보수, 2 차측 수질 개선
	8. 제어봉안내관 지지핀의 SCC	○모양과 열처리 과정 개선
	9. 플렌지 가스켓의 누설	○조인절차서 개선
	10. 원자로용기 스테드 볼트의 부식	○유황물을 포함한 antiseize 장치로 교환
	11. LP 터빈 디스크의 SCC	○보강된 디스크로 교체
3. 새로운 기술의 반영	12. RCP 밀봉성능의 안정	○MHI 밀봉의 교체
	13. 발전소 전산기	○CRT 사용으로 운전원 보조기능 강화

〈表 3〉日本의 蒸氣發生器

※ 1 PLANT	CAPACITY (MWe)	COMMERCIAL OPERATION	No. OF LOOPS	STEAM GENERATOR			
				MANUFACTURER (Type of SG)	No. OF TUBES	TUBE MATERIAL	TUBE SIZE
M-1	340	1970	2	CE	4426×2	MA600	3/4"
M-2	500	1972	2	MHI (44)	3260×2	MA600	7/8"
T-1	826	1974	3	WH (51)	3388×3	MA600	7/8"
T-2	826	1975	3	MHI (51)	3388×3	MA600	7/8"
G-1	559	1975	2	MHI (51)	3388×2	MA600	7/8"
M-3	826	1976	3	MHI (51)	3388×3	MA600	7/8"
I-1	566	1977	2	MHI (51)	3388×3	MA600	7/8"
O-1	1175	1979	4	WH (51A)	3388×4	MA600	7/8"
O-2	1175	1979	4	MHI (51A)	3388×4	MA600	7/8"
G-2	559	1981	2	MHI (51M)	3382×2	MA600	7/8"
I-2	566	1982	2	MHI (51M)	3382×2	MA600	7/8"
S-1	890	1984	3	MHI (51M)	3382×3	TT600	7/8"
T-3	870	1985	3	MHI (51F)	3382×3	TT600	7/8"
T-4	870	1985	3	MHI (51F)	3382×3	TT600	7/8"
S-2	890	1985	3	MHI (51F)	3382×3	TT600	7/8"

※ 1 M : MIHAMA, T : TAKAHAMA, G : GENKAI, I : IKATA, O : OHI, S : SENDAI

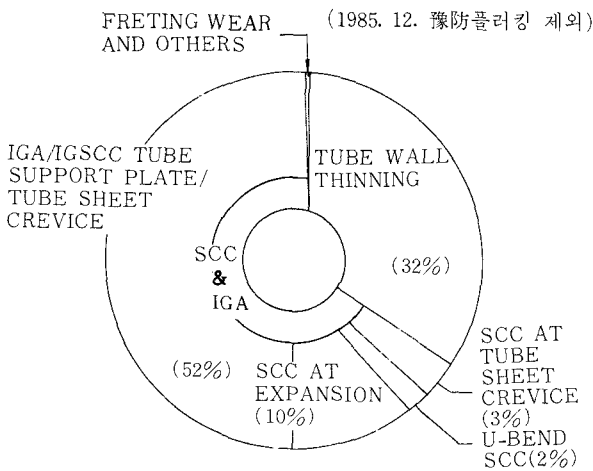
반으로 근본적인 信賴度의 向上을 위해 蒸氣發生器設計에서 많은 改善이 이루어져 왔다. 日本의 증기발생기를 연대순으로 보면 CE형, WH 44형, WH51형, MHI51M형 및 MHI51F형으

로 區分할 수 있다. 오늘밤 44형과 51형 증기발생기에서는 튜브의 性能 低下가 發生하였으나, 51M형과 51F형 증기발생기에서는 問題가 發生하지 않았다.

4.1.2 튜브 성능 低下의 運轉經驗

PWR의 증기발생기는 1次系統과 2次系統의 경계면으로서, 이 증기발생기의 主要安全要求條件은 튜브가 정상과다운전조건이나 예상치 않았던 事故時 충분한 耐漏洩이어야 한다는 것이다. 증기발생기에서의 튜브 마모는 1972년에 처음 發生한 이래 - 튜브의 성능 低下는 1次 및 2次側 모두 發生 - 1985年12月 現在 예방측면의 關係해(플러깅)를 제외한 튜브 성능저하 原因

<그림 5> 튜브 성능 低下 比率



別 비율은 그림 5와 같으며, 이러한 발생에 대해서 分析 및 再發試驗이 수행되어 問題點들을 解決하였다. 그림 6에 問題部位를 나타내었다.

(1) 1次側 튜브의 성능 低下

a. U 벤드에서의 응력부식균열

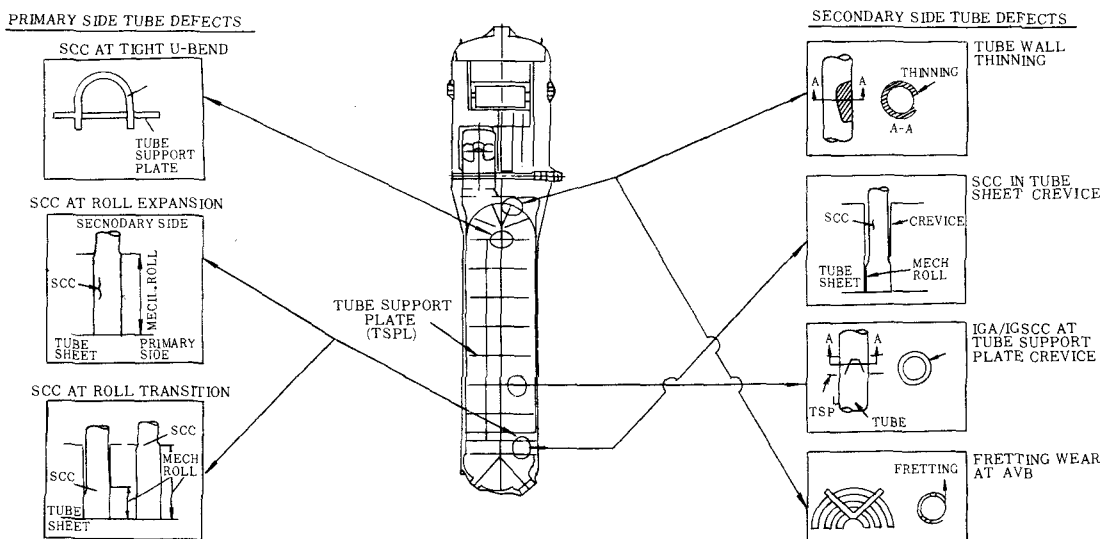
U 벤드部分에서의 튜브 성능 低下는 튜브의 製造時 局部過渡구부림에 의해서 나타나는 높은 殘留應力로 인해 구부린 部分의 안쪽에서 發生한다. 또한 作業應力이 2차적인 重要한 原因이 되고 있다. 日本에서 이러한 現象은 特別한 경우로서 輸入한 2基의 原子炉에서만 發生하였다. 이들 發電所의 小半徑 U 벤드 튜브의 상당 부분이 1980年과 1981년에 豫防措置로 플러깅을 하였다.

가능한 한가지 해결책은 현재 그 타당성이 평가되고 있는 열처리에 의해서 높은 殘留應力을 감소시키는 것이다.

b. roll expansion regions에서의 응력부식균열

튜브시트에서의 튜브 성능 低下는 高殘留應力을 誘導하는 부적당한 팽창작용으로 인해서 mechanical roll expansion 부분에서 發生된다. 作

<그림 6> 日本에서의 튜브 성능 低下



業應力 또한 重要한 2次要素로 作用한다. 解決策으로 運轉中인 發電所에서 슬리빙이 설치되었다.

c. roll transition 部位에서의 응력부식균열

튜브시트 2차측 表面 부근의 튜브 性能 低下는 畚殘留應力이 誘導되는 mechanical roll transition 部位에서 발생되었으며, 作業能力도 重要한 2次要素로 作用한다. roll transition 部位에서의 튜브 性能 저하 件數는 roll expansion 部位에서 발생하는 件數보다 적다.

(2) 2次側 튜브의 性能低下

a. 튜브 두께의 얇아짐

튜브의 마모나 두께가 얇아지는 것은 2次側 水質管理를 위하여 인산염나트륨을 使用하는 發電所의 증기발생기에서 發生되었다. Mihama 1 호기에서 마모현상이 처음 발견되었는데, 비교적 넓은 防振스트랩 부근과 높은 비율의 그림블랭키트가 있는 部位에서 가장 심하였다. 인산염나트륨이 증기와 액체가 접촉하는 이 部位에 蓄積되어 튜브가 부식되었다.

b. 튜브 시트 틈에서의 응력부식균열

튜브 마모를 經驗한 후에 1975년에 모든 運轉中인 發電所와 試驗轉 發電所의 2次側 水質管理가 휘발처리방법으로 바뀌었다. 그러나 튜브와 튜브 시트 사이와 같은 틈에 인산염나트륨이 남아있어 이것이 화학적으로 가성소다로 변하여 응력부식균열이 發見되곤 하였다. 균열은 튜브 시트 2차측 外부분에서 부터 비교적 길게 發生되었다.

c. 결정입계의 침투(Intergranular Attack)

IGA는 주로 下部 튜브 지지판과 증기발생기의 튜브 시트 外부분 바로 아래에서 發生되었다. 발전소 정지기간동안 또는 보충수를 통해서 2차계통에 들어온 부유부식체가 건조와 습한 현상에 의해서 튜브 지지판 틈이나 튜브와 튜브 시트 사이의 틈에 축적되는데, 外部表面에 축적된 산화물은 부식을 촉진시킨다는 것이 알려져

있다.

d. 덴팅

지지판과 튜브 사이의 틈에 탄소강판으로 부터 生成되는 腐蝕物의 축적에 의해 發生되는 덴팅은 튜브지지판 튜브의 소성변형 原因이 된다. 튜브 内部表面의 소성변형으로 인한 커다란 張力應力은 응력부식균열을 유발할 수 있다. 덴팅은 증기발생기에 심각한 손상을 주어 교체가 요구될 정도로 영향을 주나 아직 日本에서는 덴팅으로 인해서 튜브를 플러그한 일은 없다.

e. 腐蝕마모

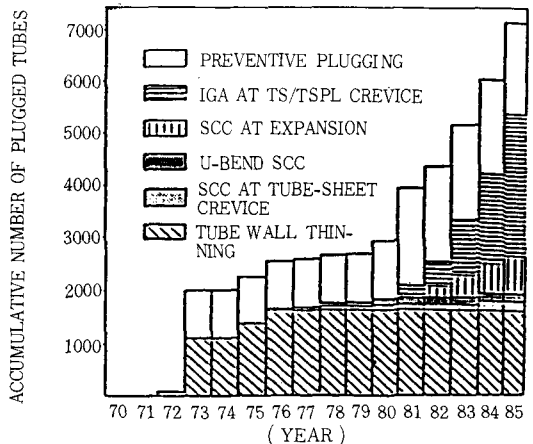
튜브 OD의 腐蝕마모는 2基의 發電所에서 不適切한 간격으로 設置된 防振바(AVB)에서 發見되었다. 부식마모에 의한 튜브의 숫자가 적고 마모율이 매우 낮으므로 심각한 問題는 아니다.

4. 1.3 튜브 性能 低下의 解決方法

年例檢査에서 外류탐상시험에 의해 새로운 種類의 튜브 性能 低下가 처음 檢査되면, 결함 튜브를 뽑아내어서 금속학적 檢査와 튜브 두께를 分析하여 必要한 경우 豫防策 또는 解決策이 수행된다.

初期에는 폭발 또는 용접 플러그가 利用되었으나, 1981年 이후에는 기계적인 플러그가 補修時間의 短縮과 放射線被曝量을 減少하기 위하여 채택되었다. 플러그의 역사는 그림 7에 圖示되

〈그림 7〉 튜브플러킹歷史



어 있는데, 發電所 性能의 觀點에서 許容할 수 있는 플러깅의 여유가 더이상 減少되지 않도록 하기 위하여 플러깅 대신 슬리빙하는 方法의 使用이 必要하게 되었다. 이 기계적인 슬리빙技術은 1980년에 開發되었고, 튜브 시트 틈에서의 2차측 결정입계 응력부식균열을 補修하는데 使用되어 졌었다. 같은 技術이 1次水質應力부식균열(PWSCC)의 補修에 使用되었고, 現在까지 여러가지 형태의 漏洩슬리브가 튜브 시트 部位에 대해서 開發되어 졌으며 튜브 확장방법과 P-WSCC의 엘리베이션 경우에 適用되어 졌다. 여기에는 선택적인 4 가지 接合이 있으며, 슬리브 형태는 그림 8 과 같이 복합적으로 선택되어 진다.

(1) 용접형접합

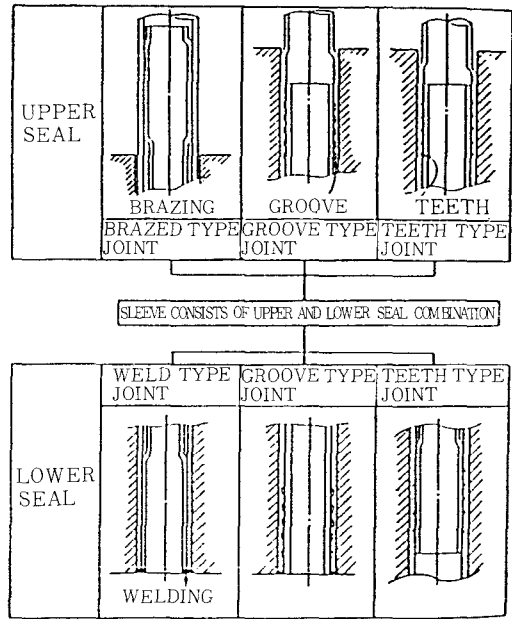
일반적으로 이 접합은 하부 접합에 適用되며, 비교적 下部 均열 엘리베이션 경우에 선택된다. 슬리브의 끝은 튜브와 튜브 시트에 용접된다.

(2) Teeth형접합

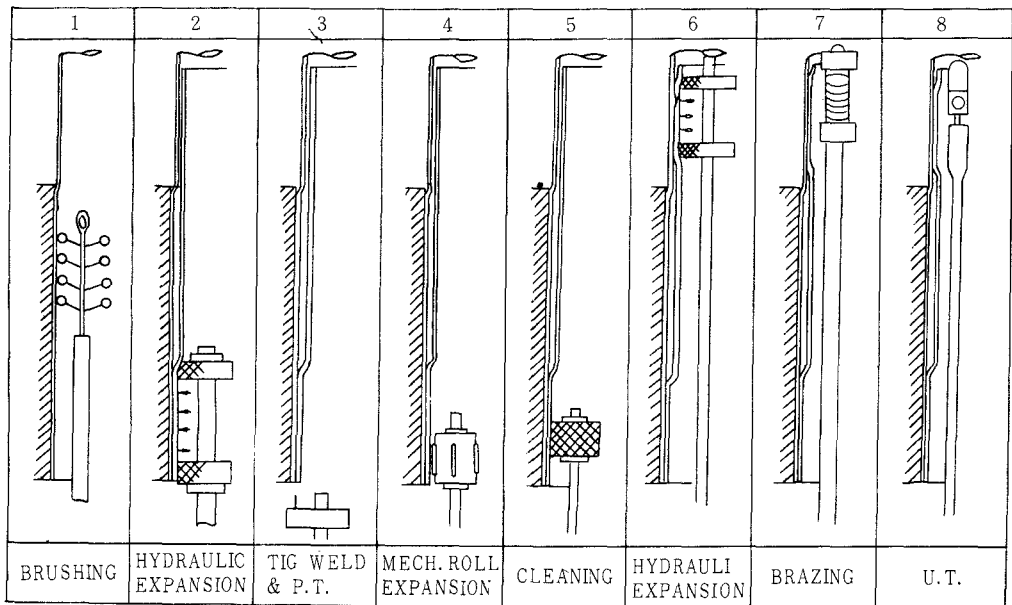
一般的으로 이 접합은 水力學的으로 팽창되었거나 팽창되지 않은 튜브부분의 경우 상부와 하

부 밀봉에 이용할 수 있다. 그러나 이 접합의 teeth가 Cold rolled hard 튜브의 표면에는 충분히 접촉하지 않기 때문에 기계적인 rolled 튜브에는 使用할 수 없다.

<그림 8> 여러가지 슬리브接合



<그림 9> B-W슬리브의 節次





(3) Groove형 접합

一般的으로 이 접합은 쏘 깊이 rolled expansion과 같은 기계적 rolled 튜브의 경우에 상부 및 하부 접합에 사용할 수 있다.

(4) Braze형 접합

一般的으로 이 접합은 튜브 시트의 2차측을 넘는 균열엘리베이션인 경우 상부 접합으로 사용할 수 있다. 이 접합형태는 MHI와 WH사가 공동으로 개발하였다.

슬리빙기술의 하나인 B-W슬리브는 그림 9와 같이 이용되며, 그림 10은 이 접합의 최종상태를 보여 준다. 튜브지지판部位에서의 構造의 條件은 튜브시트部位의 條件과 比較할 수 없으며, 기계적인 접합에 의해 누설을 막기는 어렵다. 따라서 brazed 슬리빙이 개발되었다. 確認試驗과 保證試驗이 政府의 承認을 얻기 위해 수행되었고, 長期間의 信賴性이 모델루프試驗設備에 의하여 確認될 것이다.

豫防補修作業으로 튜브 시트部位에서 부분적으로 확장된 튜브에 대해서 틈새 막음이 수행되었다. 이 틈새 막음의 목적은 roll transition部

位에서 PWSCC를 감지하기 위한 새로운 hydraulic expanded transition을 하기 위함이다. 그리고 2次側 IGSCC를 防止하기 위해서 2차측 튜브와 튜브 시트 틈을 막는 것이다.

4.1.4 設計 및 製作에 反映

運轉經驗을 基盤으로 새로운 증기발생기가 開發된다. 設計어프로치는 基本設計를 변경하지 않고 단계별로 信賴性의 改善을 確認하는 것이다.

다음의 設計原則에 의거 改善을 위해 강력한 努力이 경주되었다.

(1) 튜브지지구조는 만약 不純物이 2차계통으로 流入될 경우 이 不純物의 농도가 最少가 되도록 한다.

(2) 構造는 틈새 形成을 防止하기 위하여 튜브 시트에 슬러지가 축적하기 어렵도록 設計되어야 한다.

(3) 튜브와 튜브지지판에는 우수한 부식방지재질을 선택하여 사용한다.

(4) 응력부식균열을 最少로 하기 위하여 튜브는 殘留應力이 最少가 되도록 제조하여야 한다.

증기발생기의 역사를 그림 11에 나타내었는데, 이것은 앞에서 언급한 原則에 의거 새로운 設計方法이 51M형과 51F형 증기발생기에 반영되었음을 보여준다.

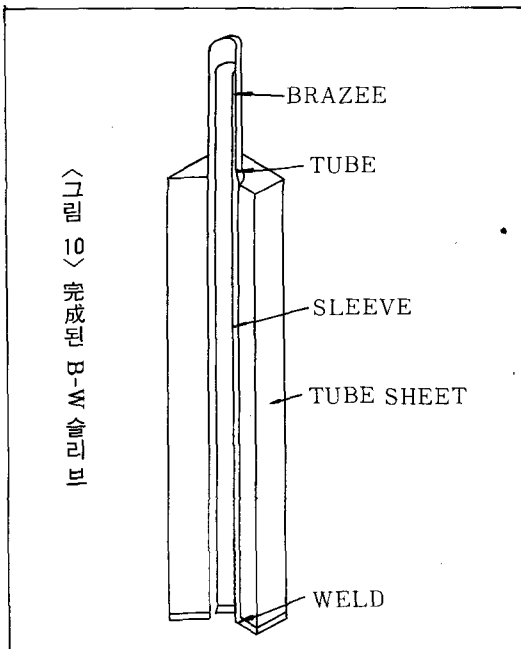
4.1.5 IGA의 對策

日本에서 증기발생기 튜브 性能 低下 事故中 남아있는 重要問題는 IGA이다. 이것의 명확한 發生메카니즘이 完全하게 명백해지지는 않았으나, 다음과 같은 對策이 취하여 지고 있다.

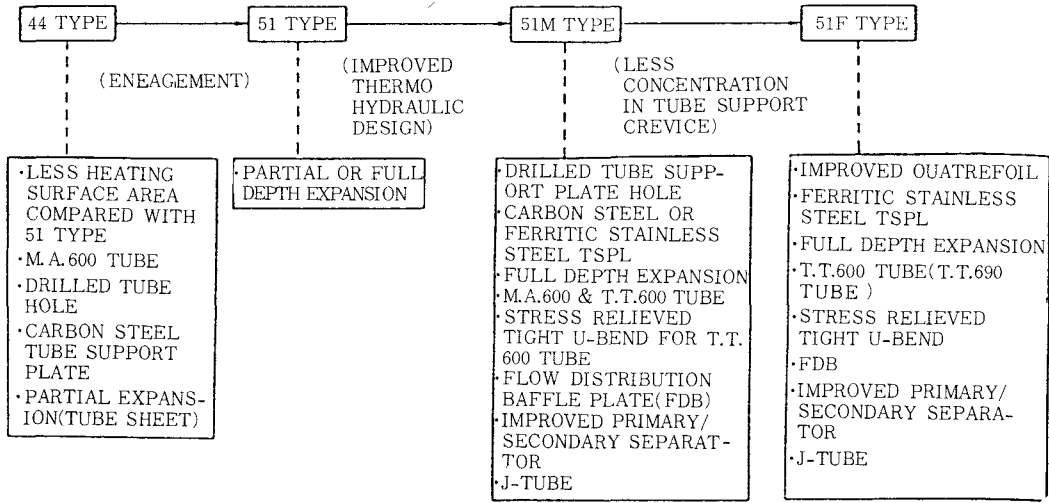
a. 定期檢驗時 高圧力水로 튜브시트의 슬러지를 제거.

b. 定期檢驗時 틈새에 축적된 殘留溶解不純物을 제거하기 위해서 증기발생기의 内部를 씻어낸다.

c. 定期檢驗期間동안 순수한 고농도 하이드라진을 부어 넣어 증기발생기안의 산화물을 減少시킨다.



〈그림 11〉 蒸氣發生器의 歷史와 설계결합



d. 運轉中 가능한 한 빨리 계통으로 부터 환원 적철광을 제거하기 위해 2 차계통에 하이드라진의 고농도 條件을 유지시킨다.

e. 부유알칼리부식제에 의한 부식을 緩和하기 위해서 급수계통에 붕산을 注入한다.

f. 초기보다 Na/Cl 몰比率를 적게 하여 부유알칼리부식제가 生成되지 않는 條件을 유지한다.

4. 2 Ikata 1号機 低圧터빈디스크 交替

4. 2. 1 事故概要와 解決策

(1) 事故概要

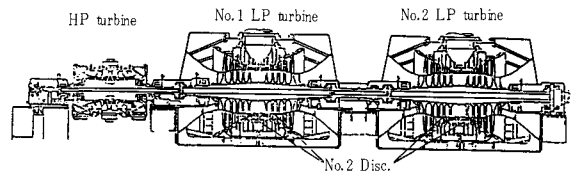
1984年 定期檢査期間에 수행된 비과과검사 자본탐상시험 (이것은 定期檢査時마다 低圧터빈에 대한 가동중검사 (ISI) 중 한 항목으로 수행)에서 제2번 디스크 가장자리에 결함이 發見되었다. 관련 블레이드를 해체하여 調査한 結果 그림 12와 같이 조그만 균열이 發見되었으며, 다음 사항이 정밀조사에서 밝혀졌다.

○ 균열은 제2번 디스크의 5, 6번 스테이지의 가장자리에서만 發見되었다.

○ 균열의 最大 깊이는 12mm이다.

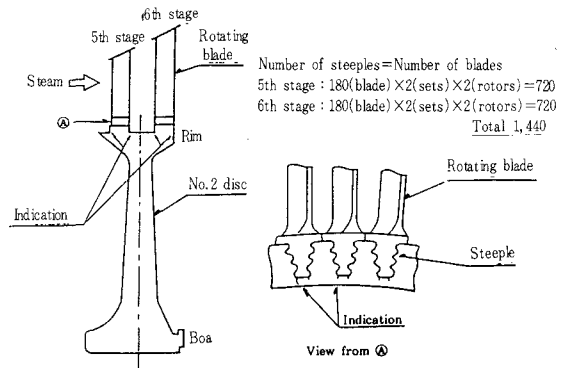
○ 균열은 스티플의 밑부분 가장 끝에서 發見되었다.

〈그림 12〉 低壓터빈 2번디스크 가장자리에서의 균열



Cross section of Ikata-1 turbine set.

- Type : TC-4F44
- Output : 566Mwe
- Speed : 1,800rpm
- Steam pressure : HP turbine inlet-55.2kg/cm<sup>2</sup> LP turbine inlet-9.7kg/cm<sup>2</sup>
- Steam temperature : HP turbine inlet-270.1℃ LP turbine inlet-254.6℃



Number of steeples=Number of blades  
 5th stage : 180(blade) × 2(sets) × 2(rotors) = 720  
 6th stage : 180(blade) × 2(sets) × 2(rotors) = 720  
 Total 1,440

이러한 현상은 다음과 같은 試驗結果에 의해서 응력부식균열이 원인이었음을 알았다.

a. 走査式 전자현미경에 의한 調査를 통하여 결정입계균열이 발견 되었다.

b. 균열은 건증기와 습증기가 교대로 存在하는 回轉날개 5, 6 번 스테이지에서만 나타났다.

c. 응력집중작용에 의한 국부응력 부위에서 부터 균열이 시작되었다.

이와 유사한 事故가 1979년경부터 미국에서 報告되어졌으며, 美國도 SCC가 原因이라고 보고하였다. 미국에서 SCC는 디스크가 熱박음되는 보스의 키홈과 디스크의 가장자리에서 발견되어 큰 問題를 惹起시켰다. 日本에서는 미국에서 부터 이와 같은 情報를 입수한 후 초음파탐상시험을 실시한 어떠한 PWR에서도 키홈部位에서 결함이 發見되지 않았다.

(2) 균열의 補修

균열의 깊이가 最大 12mm이기 때문에 綜合評價는 비교적 高強度 여유가 있는 것으로 나타나 다음 定期檢査까지 터빈의 運轉이 가능하다고 판단되어 예방조치로 균열을 잘라내기로 決定하였으며, 추가로 스티플의 밑부분 모서리 半徑을 그림13과 같이 2.2mm에서 5mm로 확장하여 高應力이 집중되지 않도록 하였다. 이와 같은 조치의 結果, SCC의 한가지 원인인 국부응력이 약 15% 감소되었다.

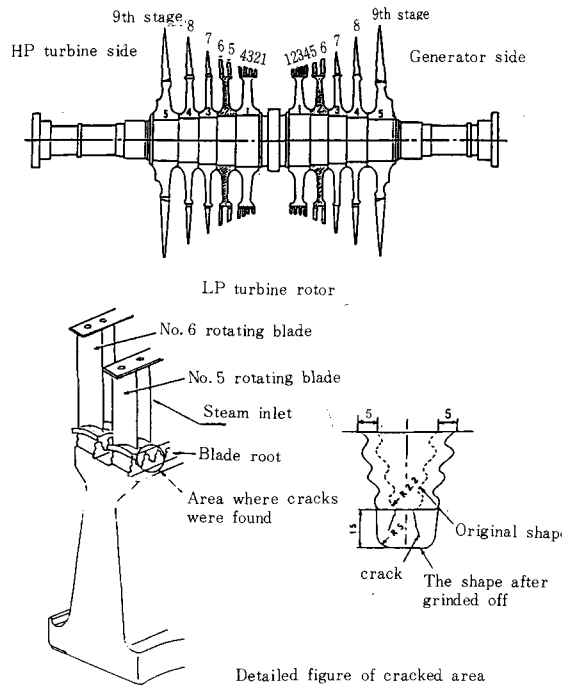
미국의 運轉經驗에 의하면, 가장자리에서 問題가 없다는 것은 비교적 국부응력이 낮은 터빈의 경우이다. 그것은 Ikata 發電所에서 수행된 국부응력의 減少가 SCC에 効果적인 대응책임을 의미하는 것이다.

4.2.2 改造된 디스크로 交替

(1) 交替의 理由

Ikata 發電所에서 실시된 균열부위를 잘라내고, 국부응력을 감소시키는 것과 같은 解決策은 터빈 디스크의 가장자리에서 SCC가 再發할 가능성을 훨씬 적게 하였다. 補修後 발전소는 계통에 병입되어 아무런 問題없이 運轉되었다. 그러나 이러한 解決策은 SCC의 한가지 原因에 대한 대응책일 뿐이다. Ikata 1 호기의 제 2 번 디스크는 아주 단단한 물질로서 SCC에 아주

〈그림 13〉 균열디스크의 補修



敏感하므로 SCC의 다른 原因에 대한 대응책, 즉 재질의 교환이 바람직한 方法이었다. 그래서 長期的인 信賴性 側面에서 日本은 다음 定期檢査時 豫防補修로 기존 디스크를 재질의 변경을 포함한 改造된 디스크로 交替하였다.

미국에서 原子炉發電所의 PWR 터빈은 디스크의 키홈에 균열 問題가 있었기 때문에 一體型 로터로 交替되었다. 日本에서 PWR 터빈의 경우는 키홈部分에 別問題가 없으므로 단지 디스크만을 交替하였다.

(2) 改造된 디스크의 概要

그림14는 재질과 응력 집중에 대해서 改善된 디스크이다.

a. 낮은 降伏点 材質의 채택

새로운 디스크는 材質構成에는 變化가 없으나 대신 熱처리 과정이 改善되었다. 이러한 改良은 가장자리의 降伏應力을 미국에서 균열이 發見되지 않는 그런 水準으로 減少시키는데 도

〈그림 14〉 低壓터빈 2번디스크의 改造

1. Employment of low yield-point material

- Employed the material whose hardness (yield-point) is adequate to mitigate SCC

(km/mm<sup>2</sup>)

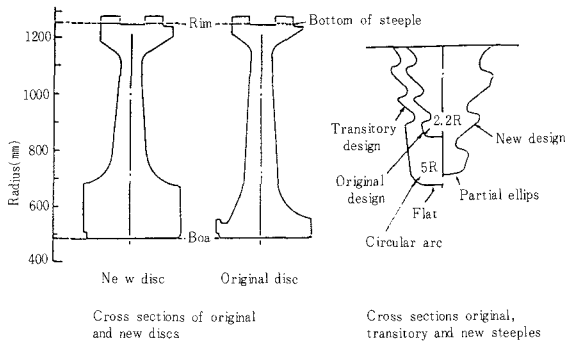
		New material	Original material
Yield stress	Rim	70.3	91.4
	Boa	84.4	

2. Reduction of stress

- Reduced the stress by the modification of the disc and steeple.

(km/mm<sup>2</sup>)

	New design	Transitory design	Original design
Local stress at the bottom of steeples	44.3	49.6	57.7



움을 주었다. 그밖에 보어部位에서의 降伏應力이 SCC 抵抗을 增加시키기 위한 許容強度限界

值 보다 낮지 않은 수준까지 減少되었다. 이것은 디스크의 中央部分과 바깥部分 表面의 降伏應力이 다르다는 것을 의미한다. 이와 같은 종류의 디스크가 많은 原子力發電所의 PWR 터빈에 使用되고 있는데, 가장자리에서 問題點이 없는 것으로 報告되었다. 따라서 日本은 이와 같은 설계가 높은 信賴性이 있는 것으로 결론지었다.

b. 應力減少

“重디스크型”이라고 부르는 두꺼운 디스크設計가 全体 디스크의 應力을 減少시키도록 채택되었다. 또한 스티플의 크기가 커졌고, 스티플 밑부분 모서리의 모양이 應力集中을 완화시키기 위하여 圓弧에서 部分 橢圓으로 變更되었다. 그 結果 약23%의 屈부應力이 減少되었다.

(3) 一体型터빈로터

日本에서는 최근에 建設된 發電所에 키홈部位에서의 均열 發生 可能性을 排除하기 위하여 部分 一体型 또는 一体型 로터가 채택되어지고 있다.

지금까지의 例는 기존디스크형 터빈의 디스크 교체이다. 日本에서는 미국에서와 같이 로터를 一体型으로 교체한 일은 없다.

附 錄

1985年度 事故事例 (PWR)

題目: 蒸氣發生器 튜브의 性能 低下

號機: Genkai 1 號機 (PWR), 559MWE

事故概要

Genkai 1 号機에서 1985. 4. 19에 시작된 第 8 週期 核燃料 交替 및 定期補修期間에 實施한 外류탐상시험 (ECT)에서 288개 증기발생기 튜브에 결함이 發見되었다. 이 결함들은 튜브시트의 上端部와 튜브지지판에서 나타났는데, 이것은 微細한 IGA 영

향으로 생각되었다. 問題의 根本原因을 調査하기 위하여 결함이 있는 튜브중 一部를 뽑아냈으며, 모든 결함이 있는 튜브는 슬리브로 補修되거나 泫러 그되었다.

題目: 蒸氣發生器 튜브의 性能 低下

號機: ohi 1 號機 (PWR), 1,175Mwe

事故概要

關西電力의 Ohi 1 号機는 1985. 4. 1부터 시작된

第5週期 核燃料 交替 및 定期補修期間에 實施한 와류탐상시험에 의해서 1,111개의 증기발생기 튜브에서 결함이 發見되었다. 이 중 916개는 튜브지지판에서, 210개는 튜브시트에서, 그리고 나머지 15개는 튜브지지판과 튜브 시트 양쪽에서 發見되었다.

事故原因

결함 튜브 10개를 뽑아내어서 정밀검사를 實施하였다. 튜브지지판에서 나타난 결함은 微細한 IGA 영향으로 생각되는데, 이 IGA는 산화시키는 外氣와 함께 인산염나트륨이 집적된 결과라고 추측된다. 또한 튜브 시트에서의 결함은 運轉應力과 함께 튜브팽창과정에서의 殘留應力으로 인한 IGSCC에 의한 것으로 생각되었다.

對 策

451개의 튜브는 슬리브로 補修되었고, 661개는 플러그되었다. 또한 蒸氣發生器의 2 차측은 높은 온도의 물로 씻어내었다.

題目: 蒸氣發生器 튜브의 性能 低下

號機: Ikata 1號機(PWR), 566Mwe

事故概要

四國電力의 Ikata 1號機는 1985. 6. 5부터 시작한 第7週期 核燃料 交替 및 定期補修期間에서의 와류탐상시험에서 증기발생기 튜브 시트 hot leg 側의 기계적인 rolled 팽창부위에서 6개의 튜브(2개는 증기발생기 "A", 4개는 증기발생기 "B")가 결함이 있는 것으로 나타났다.

事故原因

튜브 결함의 原因은 기계적인 rolled 팽창부위의 1차측에서 부터의 SCC라고 추측된다. MRE部位에서의 SCC는 MRE에 의한 殘留應力과 運轉中 内部應力에 의한 應力이 原因인 것으로 생각되었다.

對 策

결함이 발견된 6개의 튜브는 예방보수의 조치로 플러그하였다.

題目: 蒸氣發生器 튜브의 性能 低下

號機: Takahama 1號機(PWR), 826Mwe

事故概要

關西電力의 Takahama 1號機는 第8週期 核燃料 交替 및 定期補修期間에 實施한 와류탐상시험에서

15개의 튜브에서 결함이 發見되었다. 그 중 2개는 증기발생기 "B"의 U밴드 防振바에서, 7개는 튜브 지지판부분에서 2개는 튜브 시트 틈 부위에서, 4개는 튜브시트 팽창부위이다.

事故原因

1. U밴드 防振바部分 결함의 原因은 벤딩과정에서의 殘留應力과 運轉中 内部壓力에 의한 應力에 기인한다고 생각되는 SCC라고 추측된다.

2. 튜브지지판部分의 결함은 IGA가 原因이라고 추측된다.

3. 튜브시트 틈부위 결함의 原因은 運轉中 内部壓力에 의한 應力과 試運轉期間에 使用하였던 인산염 나트륨에서 부터 生成된 가성소다에 의한 SCC로 생각된다.

4. 팽창부위의 결함은 이 부위가 틈지역의 一部分이기 때문에 運轉中 内部壓力에 의한 應力과 試運轉期間에 使用하였던 인산염 나트륨에서 부터 生成된 가성소다에 의한 SCC 때문이라고 추측된다.

對 策

다음과 대응조치를 취한 후 1985. 10. 4. 계통병입을 하였다.

1. 豫防補修의 次元에서 결함이 있는 튜브는 모두 플러그하였다.

2. 남아있는 不純物을 제거하기 위해서 증기발생기를 더운 물로 씻어냈으며, 殘留 가성소다를 중화하기 위하여 崩산을 注入한 급수를 使用하였다.

3. 증기발생기의 급수계통은 증기발생기內의 공기를 減少하기 위해서 高농도의 하이드라진을 注入하였다.

題目: 核燃料集團體 리프 스프링 클램프의 損傷

號機: Mihama 3號機(PWR), 826 MWe

事故概要

關西電力의 Mihama 3號機에서는 1985. 8. 24부터 第7週期 核燃料 交替와 定期補修作業이 시작되었는데, 1985. 9. 6. 核燃料를 裝眞하기 前에 水中 TV에 의한 炉心檢査에서 다음과 같은 사항이 관측되었다.

1. 核燃料集團體 하나에서 리프 스프링 클램프 2個中 1個가 이탈되어 스프링 나사가 하나 부러짐에 따라 制御棒클러스터의 스파이더 hub과 연결된

배인위에 떨어져 있는 것이 발견되었다.

2. 制御棒클러스터의 16個 배인중 1個가 스카 이더 hub에서 빠졌다.

**事故原因**

調査 結果, 이 事故의 原因은 다음과 같은 것으 로 생각된다.

1. 부러진 스프링나사는 IGC 결함을 가지고 있 었으며, 組立段階에서 IGC와 높은 殘留應力을 유 발할 정도로 과도하게 조여졌기 때문인 것으로 생 각되었다.

2. 問題의 스카 이더 hub의 풀림은 外部 物質에 의해 案内管 内部 클러스터의 제한된 움직임 때문 인 것으로 판단되었다.

**對 策**

1. 損傷된 核燃料集合體는 새것으로 交替하였고, 나머지 集合體는 健全性을 確認하기 위해 調査를 하였다.

2. 損傷된 制御棒 클러스터는 새로운 것으로 交替되었고, 나머지 클러스터에 대해서는 健全性을 確認하기 위한 調査를 하였다.

**題目 : 蒸氣發生器 튜브의 性能 低下**

**號機 : Mihama 3號機 (PWR), 826Mwe**

**事故概要**

關西電力의 Mihama 3號機에서 1985. 8. 24부터 시작한 第7週期 核燃料 交替와 定期補修期間中에 實施한 와류탐상시험에서 19個 튜브에 결함이 發見 되었는데 그중 2個는 U밴드 防振바 部分에서, 17個는 hot leg側 튜브 시트의 기계적인 rolled 팽창부 위에서 發見되었다.

**事故原因**

1. U밴드 防振바 부위 결함의 原因은 U밴드防 振바 부위의 不完全한 지지에 의한 프레팅부식으로 생각된다.

2. MRE부위 결함의 原因은 1차측에서 2차측 으로의 SCC에 의한 것으로 추측된다.

3. SCC는 MRE에 의한 殘留應력과 運轉中 内部 圧力에 의한 應力 때문인 것으로 생각된다.

**對 策**

모든 결함이 發見된 튜브는 豫防補修로 플러그한 후, 發電所는 1985. 11. 29. 계통병입을 하였다.

**題目 : 蒸氣發生器 튜브의 性能 低下**

**號機 : ohi 1號機 (PWR), 1,175Mwe**

**事故概要**

關西電力의 Ohi 2號機는 1985. 9. 3부터 시작된 第5週期 核燃料 交替 및 補修期間동안에 와류탐상 시험을 하여, 증기발생기 튜브 시트 hot leg側의 팽창부분에서 8個의 튜브가 결함이 있는 것이 發見되었는데 그중 4個는 증기발생기 "B"에서, 2個는 증기발생기 "C"에서, 나머지 2個는 증기발생기 "D"에서 發見되었다.

**事故原因**

증기발생기 튜브의 결함은 튜브 시트 팽창부분의 1차측에서 2차측으로의 SCC 때문인 것으로 생각 되었다. 팽창부분의 SCC는 팽창에 의한 殘留應力과 運轉中 内部 圧力에 의한 應力 때문인 것으로 생 각되었다.

**對 策**

豫防補修次元에서 결함이 發見된 튜브를 모두 플 러그한 후 1985. 12. 17 계통병입 하였다.

**題目 : 格納容器 섬프피트水位上昇에 原子爐手動停止**

**號機 : Takahama 1號機 (PWR), 826Mwe**

**事故概要**

關西電力의 Takahama 1號機에서는 100% 出力 運轉中 格納容器內的 바다배수펌프로 流入되는 流量이 1986. 3. 3부터 증가 추세에 있음이 나타났다. 바닥으로의 누설이 TV모니터링으로 감지되었고, 發電所는 1986. 3. 8. 12:00에 檢査를 위하여 手動停止 하였다.

**事故原因**

調査에서 누설은 RCP 모터 베어링 냉각을 위한 오일 쿨러의 밀부분에 있는 프렌지에서 發生하여 바다 배수섬프로 흘러들어온 것이다. 누설의 原因은 플렌지 패킹에 固定하는 힘이 약화된 것에 기인한 다고 생각되었다.

**對 策**

固定 패킹을 새 것으로 交替하여 충분히 固定하 였다. 또한 다른 RCP의 유사한 部分의 健全性을 確認하였고, 發電所는 1986. 3. 10 19:00에 계통 병입 되었다.