

## SGOG/EPRI PWR 蒸氣發生器 2次系 化學洗滌工程(II)\*

梁 慶 麟

한국에너지연구소

(1985.5.13 접수)

### 4.5. 實證試驗

SGOG/EPRI計劃에서는 모든 參與者가 모여서 共同으로 4-TUBE CE POT BOILER를 사용해서 1981年 7월에 實證試驗을 수행한 바 있으며 곧 이어서 9월에는 19-TUBE CE MODEL BOILER를 사용해서 最終的인 實證試驗을 수행하고 있다. 兩次에 걸친 試驗結果는 EPRI에서 규정한 工程性能과 材料腐蝕에 관한 指針과 건주어 評價되고 있다. 이 內容은 特定發電所에 대한 固有特性試驗을 수행함에 있어 좋은 參考資料가 될것으로 생각되어 그 內容을 간추려 소개한다.

#### 4.5.1. EPRI計劃의 洗滌工程 遂行指針

洗滌工程을 개발해 나가는 과정에서 工程의 洗滌效果와 蒸氣發生器의 構成材料에 대한 腐蝕性에 대한 포괄적인 基準를 규정할 필요가 있었다. 이러한 규정은 계획의 시작단계에서 요청되었으며 美國內 核蒸氣發生器의 供給者(Babcock & Wilcox, Combustion Engineering 및 Westinghouse)들이 사용하고 있는 構成材料로서 洗滌工程에서 洗滌劑에 노출되는 모든 主要 材料의 확인과 이들에 대하여 許容할수 있는 金屬의 손실을 규정할 필요가 있었다. 그러나 意義있는 有效한 受容適合基準는 發電所의 年齡, 發電所의 稼動으로 발생한 腐蝕으로 인한 金屬의 손실, 예상되는 洗滌回數 그리고 1次와 2次冷却材의 설정된 流動에 기인하는 蒸氣發生器細管의 振動特性과 같은 것을 감안할때 特定發電所에 대해서만 또는 事例別 基準으로서만 규정할 수 있을 것이다. 따라서 이러한 점을 고려하여 基準 대신에 洗滌工程의 性能 특히 實證試驗에 있어서의 性能을 측정할 수 있는 指針을 확립하기로 결정되었다. 이와 같은 指針은 이 計劃에 참여한 사람들에 의해서 確定되었으며 이 指針은 엄격한 基準이 아니고 評價의 대상이 되는 工程試驗 또는 段階에 대한 指針이라는 것이 강조되고 있다. 이 洗滌工程은 成功的으로 수행될 수 있을 것으로 생각되고 있으나 어떤 개별적인 指針값은

아마도 일치하지 않을 수도 있을 것 같다.

#### 4.5.1.1 化學洗滌效能에 관한 指針

##### A. sludge cycle

###### ○性 能

實際發電所 및 模似된 sludge를 最高 17.5g/l까지 제한 것을 95%이상 제거하여야 한다.

###### ○論 據

Crevice cycle이 필요할 경우 殘留 sludge는 95%이상 crevice cycle이 시작되기 전에 効果적으로 제거되어야 한다.

##### B. Crevice Cycle

###### ○性 能

Crevice 洗滌工程에서는 腐蝕生成物은 實驗室 또는 Pot Boiler에서 생산된 Dent試片 으로부터 1 in/s보다 크지 않은 流速下에서 성공적으로 洗滌되어야 한다. Dent試片들은 指定된 試驗裝置 內部 및 監視用 分岐流路에 裝填된다.

###### ○論 據

溶劑—crevice 境界面에서 溶劑의 流速과 휘저음이 요구되는 工程에서 實機適用에서 얻을수 있는 조건을 넘어선 것은 합당하다고 간주할 수 없다. 이 指針의 監視目標에서는 0.75 in 깊이의 crevice에 대해서는 100時間보다 많지 않은 crevice 洗滌時間이 그리고 1.0 in. 깊이의 틈새에 대해서는 150時間보다 많지 않은 crevice 洗滌時間이 적절한 時間으로 간주될 것이다. 溶劑를 휘젓기 위한 독특한 방법들은 실제 현장상태에서 꼭같이 적용시킬수 있는지에 대하여 평가되어야 한다.

##### C. 溶劑 容積

###### ○性 能

完壁한 化學洗滌工程은 蒸氣發生器別로 8회보다 많지 않은 회수의 溶劑充填을 적용시키므로써 성공적으로 성취되어야 한다. 적어도 한가지의 현재 적용 가능한 廢棄物處理技術이 廢棄溶液을 濃縮 그리고 / 또는

\* 17권 1호에 이은 연재분임.

固化하는데 적용시킬 수 있음이 實證되어야 한다. 아마도 적용하게 될 洗淨水과정에 대한 횡수의 제한은 없을 것이다.

#### ◦ 論 據

處分을 위한 處理가 필요한 濃縮된 化學廢棄物의 과잉생산은 洗滌後 發電所再稼動에 영향을 줄수 있다. 위의 指針에 근거를 둔 예상되는 濃縮廢棄物의 最大容量은 다음과 같다.

3-SG Westinghouse 發電所; 360,000 gal

4-SG Westinghouse 發電所; 480,000 gal

2-SG Combustion Engineering 發電所; 400,000 gal

現在 稼動中에 있는 대부분의 發電所는 위의 容量을 다루기 위한 임시 貯藏槽를 추가해야만 할것이다. 化學洗滌 廢棄物을 저장했거나 處理하는데 사용된 모든 發電所의 貯藏槽 또는 廢棄物 處理裝備는 發電所 運轉을 위하여 재빨리 원상복구되어야 한다.

#### D. 溶劑 組成

##### ◦ 性 能

蒸氣發生器 化學洗滌을 성공적으로 성취하는데 사용되는 모든 溶劑의 成分은 非特許品이어야 한다. 모든 溶劑의 成分은 모든 願買者가 제한받지 않은 상태에서 완벽한 현장 洗滌作業을 수행할 수 있는 充分한 量을 경쟁적 가격으로 구입할 수 있어야 한다. 成功的 洗滌作業을 확인 하는데 필요한 어떤 特殊作業 또는 적용 기술 또한 非特許이어야 한다.

#### ◦ 論 據

特許 溶劑 또는 洗滌工程은 效能에 관한 모든 사항에 대하여 충분히 평가할 수가 없다. 그리고 그들의 사용은 임의로 제한을 받게 될 것이다.

#### E. 不動態化

##### ◦ 性 能

化學 洗滌工程은 不動態狀態의 蒸氣發生器를 남겨두고 終了되어야 한다. 그리고 신속한 洗滌後 酸化 또는 계속되는 運轉中에 活性腐蝕이 일어나지 않도록 하여야 한다.

#### ◦ 論 據

단일 洗滌後에 신속한 腐蝕이 발생하여 腐蝕生成物의 堆積으로 細管과 支持板 사이의 고리모양 틈새를 다시 꼭 채우게 되면 蒸氣發生器 Denting을 경감하기 위하여 성공리에 적용된 工程의 이익은 최소가 될것이다.

#### F. 溶劑 取扱

##### ◦ 性 能

工程은 操作面에서 安全하여야 한다. 그리고 作業者에게 運命에 달기는 危險要因을 주어서는 안된다.

#### ◦ 論 據

作業者와 發電所의 安全은 언제나 核心 考慮對象이다. 특히 原子力産業과 관련된 作業을 수행할때 그러하다.

#### 4.5.1.2 腐蝕 容認 指針

##### A. 發電所 特性

蒸氣發生器를 洗滌하기로 한다는 결정은 成功的인 化學洗滌作業이 洗滌된 特定 蒸氣發生器의 계속되는 稼動을 해치지 않는다는 사전 實證을 필요로 한다.

#### ◦ 評 價

1. 細管과 細管支持板의 여유는 洗滌後 과도하게 변하지 않는다. 즉

$X = \text{臨界 여유(位置 의존)}$

$Y_x = \text{臨界 여유를 초과한 하나 또는 그 이상의 여유를 가지고 있는 細管의 수}$

$Y_0 = \text{蒸氣發生器 細管數}$

$Z = \text{사용할 수 있는 細管의 最小數, 洗滌 } Y_0 = Y_x \geq Z$

2. 細管 支持板의 龜裂은 洗滌後 loose parts 또는 상실된 넓은 면적에서 초래되는 것과 같이 과도한 것은 아니다. 즉

$a = \text{支持板當 龜裂된 交叉點 數(位置와 領域 의존)}$

$b = \text{支持板當 받아 들일수 있는 龜裂된 最大 交叉點의 數, 洗滌 } a \leq b$

B. Westinghouse와 Combustion Engineering의 蒸氣發生器에 대한 腐蝕 容認 指針

蒸氣發生器 化學洗滌工程의 適合性を 評價하기 위하여 다음과 같은 指針을 적용한다. 이들 指針의 評價는 分岐流監視裝備 또는 지정된 試驗裝置에 놓아둔 腐蝕試片의 重量損失과 檢査에 근거를 두게 될것이다.

#### 1. 支持板 材料

##### ◦ 腐蝕限界

Westinghouse 蒸氣發生器 支持板 合金(5A 285C)의 균일한 腐蝕은 化學洗滌의 全工程에 대하여 3 mils로 제한되어야 한다.

#### ◦ 論 據

Westinghouse 蒸氣發生器 支持板의 臨界領域은 細管孔과 인접한 流路孔 사이의 가는 띠 부분이다 ligament의 건전성의 상실은 蒸氣發生器 細管의 振動을 증가시키고 아마도 계속되는 運轉中에 蒸氣發生器에 격심한 손상을 줄 수도 있는 支持板의 loose part가 생기게 할것이다. 公稱의 띠의 두께는 設計值로서 60 mils이다. 指針은 3 mils의 腐蝕이 溶劑에 노출된 양쪽 表面에서 발생할 것을 가정하여 띠두께 10%의 감소를 허용하고 있다.

#### 2. Egg Crate material

### ○ 腐蝕限界

CE SG의 Egg Crate Strip 합금(SA 570 GR C 또는 D)과 局部 支持板 합금(SA36)에서의 均一腐蝕은 化學洗滌 全工程에서 4.5mils로 제한되어야 한다.

### ○ 論 據

Egg crate strip은 CE SG에서 기본적인 細管의 支持構造物로서 90mils의 公稱 두께를 가지고 있다. 指針은 洗滌劑에 노출된 Egg Crate Strip양면에 4.5mils의 腐蝕을 가정하여 設計 두께에서 10%의 감소를 허용하고 있다. CE SG의 局部 支持板은 1in. 길이 이고 細管孔은 여섯개의 0.25in. 流路孔으로 둘러 싸여져 있다. Egg crate에 대한 4.5mils의 腐蝕許容은 公稱 90mils의 두께를 가진 支持板 4개의 總 9mils의 감소를 허용하게 된다.

### 3. 殘餘 材料

#### ○ 腐蝕限界

細管 支持板과 Egg crate strip에 대하여 적용시켰던 것 이외의 모든 SG의 炭素鋼과 低合金鋼材料에 대한 均一腐蝕은 化學洗滌을 成功裡에 종료함에 있어서 10mils로 限定될 것이다. Inconel 600管에 대한 均一腐蝕은 0.25mils보다 적어야 한다.

### ○ 論 據

상기의 指針들은 細管 支持板 이외의 SG 構造物의 設計值에서 1%보다 적은 均一한 감소를 취하고 있는 것으로 運轉狀態에서 SG의 健全성에 逆效果를 나타내지 않을 것이다. 이 가정을 확인하기 위하여 NSSS 供給者의 應力報告書와 設計上의 腐蝕許容值에 대한 검토를 필요로 한다. 1%의 치수감소 한계내에서 10mils의 均一한 腐蝕許容은 腐蝕으로 인하여 초래되는 總溶存鐵의 濃度를 10g/l보다 적게 제한하기 위하여 선정된 것이다. 여기서 企圖하고 있는 것은 洗滌劑 방출로 인한 廢棄物의 생산을 극소화하고 洗滌效能을 최고로 유지하는 것이다. Westinghouse series 44 SG를 洗滌할때 다음과 같은 상태에 대한 指針은 :

- Shell 腐蝕限界: <SA 533 GR A, 10mils
- shell두께의 감소: <0.3%
- 溶存 鐵 <4.3g/l (22cm<sup>2</sup>/l의 表面/容積比에서)
- 細管固定臺 腐蝕限界: <SA 508, 10mils
- 두께의 감소: <0.05%
- 溶存 鐵: <0.2g/l(1cm<sup>2</sup>/l의 表面/容積比에서)
- Inconel 600管 腐蝕限界: <0.25mils
- 두께의 감소: <0.5%
- 溶存 鐵, Cr, Ni: <5.8g/l(909cm<sup>2</sup>/l의 表面/容積比에서)

### 4. 局部(不均一)腐蝕

### ○ 腐蝕限界

Galvanic 效果, 熔接效果, 틈새 腐蝕, 金屬應力等으로 부터 초래되는 SG構成物의 局部腐蝕이나 點蝕은 해당 합금 또는 構成物의 均一腐蝕에 대한 限界值의 2배보다 크지 않은 침투 깊이로 한정될 것이다. 더우기 局部腐蝕은 化學洗滌後 적절한 기간동안 계속된 SG 運轉의 결과 위의 限界值를 넘어서 진전되지 않는다는 것이 실증되어야 한다.

### ○ 論 據

均一腐蝕 限界에 대한 指針들은 SG의 健全성에 유해한 영향없이 局部腐蝕效果에 대하여 許容할 수 있는 충분히 조심스러운 것이라고 믿어지고 있다. 均一腐蝕의 2배라는 것은 任意的인 것으로 각 경우에 대하여 구체화하면 다음과 같다.

#### 1. Westinghouse 支持板

流路孔 4개의 반대쪽에서의 局部腐蝕의 가장 나쁜 경우인 두 면중 어떤 면에서 든지간에 6mils의 局部 攻擊은 設計 두께로 부터 12mils (20%)의 감소를 초래하게 될 것이다.

#### 2. Combustion Engineering Egg Crates

9mils의 局部 攻擊은 設計 두께로부터 최고 18mils (20%)의 감소를 초래할 것이다.

#### 3. Inconel 600管

0.5mils의 최대 局部 攻擊(두께의 1%)

#### 4. 其他 SG 材料

20mils의 최대 局部 攻擊

#### C. Babcock & Wilcox 蒸氣發生器에 대한 腐蝕容認 指針

主構成材料에 대한 指針

材 料	腐蝕 率 (침투깊이, mils 全洗滌工程)
A36 支持板	0.70
SA515 GR 70 Ring	0.50
SA 516 GR 70 Ring	0.65
SA 533 GR B Ring	0.55
SA 508 C1 2	1.0
SA 508/SA 516 Weld Ring	0.65
Inconel Alloy 600 Tubing	0.002

### ○ 論 據

위 表에 실려있는 값들은 현재 sludge의 溶解에 대하여 試驗中에 있는 溶劑系統 工程에서 예견되는 金屬 손실 이내의 값이다. 각 材料들에 대한 金屬 손실은 제작상의 여유범위내에 있다. 壓力境界 構成物에 대한 基質金屬의 손실은 應力報告書의 精確성 限界內에 있

으며 구조상의 문제는 없다.

#### 4.5.2. 試驗條件

1981年 7월에 수행된 POT BOILER를 사용한 洗滌 實證試驗이 끝난 후에 SGOG의 관여자와 EPRI의 契約者들은 公開된 SG 洗滌工程의 개발과 개량은 성공적이다. 그러나 이 洗滌工程의 實證試驗은 약간의 수정을 가지고 또는 수정 없이라도 CE의 Model Boiler를 사용해서 한번 더 수행되어야 한다는데 意見의 일치를 보이고 있다. 工程의 향상을 기하기 위하여 요망되는 세가지 분야가 한정된 試驗에서 評價되어 가능한 성공적인 개량이 Model Boiler 洗滌工程에 도입되고 있다. 이들 개량된 내용은 다음과 같다.

1. 洗滌溶劑를 주기적으로 混合槽로 빼어냄으로써 過酸化水素의 濃度를 최초의 2%로 회복시켜 유지함으로써 銅의 溶解段階의 效能向上을 도모하고 있다. 모든 過酸化水素는 混合槽에서의 모든 溶劑의 分解를 회피하기 위하여 model boiler에 再充填할때 注入 配管을 통하여 첨가되었다.

2. 펌프의 캐비테이션으로 인한 빈번한 溶劑 흐름의 상실 없이 주기적인 排氣를 하면서 조작할 수 있도록 하기 위한 化學洗滌系統의 수정 즉 CE의 化學洗滌系統의 전반적인 재조립이 이 요구조건을 만족시키기 위하여 이루어 졌다.

3. 腐蝕 試驗用 試片을 장전하는데 Stainless steel를 배제하여 SA 533 U bend와 熔接試片에서 발생하는 과도 腐蝕의 감축 즉 試驗用 金屬片의 stainless steel과 的 Galvanic coupling은 조심스럽게 회피되었다.

이와 같은 변경을 가지고 1981年 7월의 Pot Boiler 實證試驗에서 사용된 SGOG의 공개된 工程은 1981年 9월에 19개의 管이 있는 CE의 model boiler를 사용해서 實證試驗이 수행되었으며 실증되었다. 모든 EPRI SG 洗滌計劃의 契約者들이 참여하고 있으며 2개의 다른 EPRI Steam Generator Project Office 契約者들도 참여하여 이들은 NDE 技術을 사용한 틸새세척 효능의 감시를 맡고 있다. 참가한 契約者들과 이들이 model boiler 洗滌實證試驗에서 맡고 있는 일은 다음과 같다.

UNC: 技術監督, 工程監視, 化學分析과 工程制御, 工程效能의 評價

CE: 試驗裝備, 裝置 및 化學藥品의 제공, 化學洗滌系統 操作, 殘留效果를 위한 洗滌後의 model boiler의 作動

TOL: 腐蝕抑制劑의 제공과 洗滌工程에서의 腐蝕特性의 評價

B&W: 선정된 腐蝕試驗用 金屬片의 제공, 腐蝕監視 및 工程 評價分野에서의 助力

ANCO Engineers (ANCO): model boiler 管一支持板 틸새 交叉點에서의 振動 探查針을 사용한 遠隔檢査에 의한 틸새세척 工程에서의 洗滌效能의 監視

Colorado State Univ. (CSU): 渦電流 探查針에 의한 틸새세척 監視

#### 4.5.2.1 試驗條件

本 洗滌實證試驗에서 사용한 model boiler는 No. 7으로서 CE에 의해서 그들의 chattanooga, Tennessee에 있는 시설에서 약 123日間 缺陷化學條件下에서 運轉되어 이 裝置를 더럽히고 denting이 발생하도록 하였다. 이 作業이 끝난 후에 이 model boiler는 CE의 Windsor, Connecticut에 있는 施設로 본 洗滌實證試驗을 하기 위하여 이송되었다. model boiler를 받았던 당시 696g의 sludge가 들어 있었으며 이는 缺陷運轉 기간중에 생성되어 축적된 것이다. 3504g의 銅의 含量이 많은 模似 sludge가 추가로 가해져서 총 sludge의 裝填량은 240L의 洗滌系統 容量에 따라 17.5g/L가 되도록 하였다. sludge의 주된 구성성분은 表10과 같다.

그림 3은 1981年 9月 洗滌實證試驗 시작 직전의 model boiler를 보여주고 있다. Boiler의 뚜껑(보이지 않음)의 內面에 Inconel을 부쳐서 表面積과 容積의 비가 실제 SG와 가깝게 模似되도록 하고 있다(表 11)

積荷된 sludge, dent試片 그리고 腐蝕試驗用 金屬片 試料는 SG 化學洗滌裝備의 現場 設置를 模似하기 위하여 48時間에 걸친 wet layup과 24時間의 大氣露出이 끝난 후에 裝填되었다. model boiler를 洗滌하기 위하여 사용된 化學洗滌系統은 stainless steel로 만들어졌으며 전 試驗期間에 걸쳐 신빙성있게 작동되었다. model Boiler 洗滌에서 사용된 試驗條件과 溶劑의 成分은 表 12와 13에 각각 실려있다.

Sludge鐵과 銅 No. 1과 No. 2 段階는 注入一浸漬一配水로 적용시켰으며 매 사이클마다 1.5時間의 model

Table 10. Elemental Sludge Composition

	model boiler fault sludge	sludge synthetic	Total composited sludge
Sludge Loading(g/L)	2.9	14.6	17.5
Copper(wt %)	15.0	56.0	49.3
Iron(wt %)	53.0	29.0	33.0

Table 11. Surface to Volume Ratio

Ratio	CE Series 67	Model Boiler No. 7
Inconel S/V	520in <sup>2</sup> /gal	454in <sup>2</sup> /gal
Carbon steel S/V	71in <sup>2</sup> /gal	62in <sup>2</sup> /gal

Table 12. Summary of test Conditions for Model Boiler Cleaning Demonstration

PROCESS STEP	TIME(hr)	TEMPERATURE	FLOW CONDITION
Wet Lay-up	48	Ambient	Stagnant
Air Exposure	24	Ambient	Drained and open
Checkout/heatup	4	200°F	0.5in./S down flow
Sludge Fe	9	200°F	Fill, Soak, & drain, 1.5hr cycles
Sludge Cu #1	6	100°F	Fill, Soak, & drain, 1.5hr cycles
Sludge Cu #2	4.5	100°F	Fill, Soak, & drain, 1.5hr cycles
Crevice #1	192	250°F	0.25in/S down flow, periodic venting
Sludge Cu #3	4	100°F	0.25in/S down flow
Crevice #2	33	250°F	0.25in/S down flow periodic venting
Sludge Cu #4	3	100°F	0.25in/S down flow
Passivation	8	200°F	0.25in/S down flow
Open/Inspect	NA	120°F	Drained and open

NOTE: 260hr at cleaning conditions

Table 13. Model Boiler Cleaning—Solvent Formulations

WET LAY-UP	SLUDGE Cu #1 and #2
pH 10 with $\text{NH}_4\text{OH}$ 200PPM $\text{N}_2\text{H}_4$	5% EDTA, pH 7 with $\text{NH}_4\text{OH}$ pH 10 with EDA, 2% $\text{H}_2\text{O}_2$ with additions to maintain 2%
SLUDGE Fe	CREVICE CLEANING #1 and #2
10% EDTA 1% $\text{N}_2\text{H}_4$ pH 7 with $\text{NH}_4\text{OH}$ 0.5% CCI-801	20% EDTA, pH 6 with $\text{NH}_4\text{OH}$ 1% CCI-801
PASSIVATION	SLUDGE Cu #3 and #4
pH 10 with $\text{NH}_4\text{OH}$ 300PPM $\text{N}_2\text{H}_4$	5% EDTA, pH 7 with $\text{NH}_4\text{OH}$ pH 10 with EDA, 3% $\text{H}_2\text{O}_2$

boiler와 溶劑의 접촉이 이루어 지도록 하였다. 흐름은 각싸이클에 따라 달리하였으며 現場洗滌에서 예상되는 充填과 排水作業을 模似하기 위하여 다음과 같이 하였

模 似	時 間	흐름의 方向	流 速
SG 充 填	30分	下→上	0.5 in/S
再 循 環	30分	上→下	0.25in/S
SG 配 水	30分	上→下	0.5 in/S

다. 30분에 걸친 SG 充填과 排水作業은 이 實證試驗에서 사용된 모든 溶劑와 洗淨段階에서 模似되었다.

銅의 No. 1과 No. 2 段階에서는 溶劑는 주기적으로 混合槽로 빼어내어서 再充填되기 전에 過酸化水素는 최초의 2%농도로 복원시켰다. 그러나 이와 같은 運轉節

次에도 불구하고 銅 溶劑의 效能이 명백하게 증가되지 않았기 때문에 銅 No. 3과 No. 4 段階에서는 1981年 7月の Pot boiler 試驗에서와 같이 낮은 흐름(0.25in/S 上→下)으로 계속해서 순환시켰다. 그리고 또한 初期의 過酸化水素의 濃度는 3%로 증가시켰다.

틈새세척 단계는 ~17 psig의 飽和蒸氣壓下에서 수행되었다. 주기적인 배기가 model boiler 및 工程監視器의 양쪽에서 각각 이루어 졌다. 틈새세척 效能은 model boiler와 工程監視器에서 dent drop detector가 부착된 正常 dent試料를 가지고 監視되었다. 그리고 주기적으로 model boiler 支持板 交叉點이 On-line으로 설치된 管振動探查針과 高溫 渦電流 探查針을 사용해서 검사되었다.

總 56個의 denting을 발생시킨 또는 틈새가 sludge

Quantity	Dent Specimen Type
10	UNC 0.75in. normal dents
5	CE 1.0in. dents from pot boiler 2k
4	CE 1.0in. reverse dents
Quantity	Model Boiler 0.75in. Support Plate <sup>a</sup>
11	Intersections with measurable denting
26	Intersections impacted but no measurable denting

<sup>a</sup>One support plate intersection was open to light and is not included in the total.

로 꽂 채워진 Denting試片이 포함되었다. 그들의 내용은 위와 같다.

CE, UNC, 그리고 B & W 등에 의해서 공급된 대단히 많은 수의 다양한 색의 腐蝕試驗用 金屬片들이 model boiler에 포함되었다. 金屬試片들은 sudge pile, 溶劑層 그리고 蒸氣相에서의 腐蝕을 감지할 수 있는 위치에 자리하였다. 추가적인 金屬試片들이 工程監視器에 포함되었다. 약간의 試片들은 각 主要 工程 段階가 완료된 후에 제거되고 다음 洗滌段階가 시작되기 전에 새로운試片으로 대체되었다. 그외의 試片들은 제자리에서 全體工程에 걸쳐서 노출되었다.

#### 4.5.3. 工程 監視

腐蝕監視와 制御는 化學洗滌工程 수행과정에서 특별히 중요한 것으로 두가지의 주된 監視分野가 있다. 즉 腐蝕監視와 洗滌溶劑의 監視이다. 腐蝕監視는 工程制御와 蒸氣發生器材質의 보호를 위하여 중요하다. 溶劑의 監視는 蒸氣發生器에서 腐蝕制御와 최적 化學洗滌을 위한 條件들을 적절하게 조절하기 위하여 필요하다.

이 계획에서는 몇가지의 腐蝕監視 技術이 개발되어 사용되었다. Petrolite Corporation은 電氣化學의 原理를 이용한 腐蝕監視用 探查針을 개발하였다. 이것은 잘 작동되었으며 腐蝕試片에서의 결과와 잘 일치함을 알수있다. 探查針에서 얻어진 腐蝕資料는 腐蝕試片의 重量減少로 부터 얻어진 腐蝕資料보다 높고 낮은 양쪽으로 오르내리고 있다. 따라서 特定 發電所의 化學洗滌에서 探查針 監視技術을 적절하게 적용시키기 위하여서는 探查針 資料와 重量減少資料의 相關關係를 정확하게 측정할 수 있는 계속적인 試驗이 필요하다. 이 試驗에서 얻어지는 情報는 실제 化學洗滌作業에서 얻어지는 腐蝕探查針의 資料를 보다 정확하게 해줄것이다. Petrolite는 두개 또는 그 이상의 腐蝕監視 探查針을 蒸氣發生器 内部에 設置하여 사용할 것을 촉구하고 있다.

UNC Nuclear Industries는 dent 試片과 腐蝕試驗用 試片 두가지를 담고 있는 分岐流路 監視器를 개발하고

있다. 이 監視器는 UNC의 mock up test facility(MTF)와 CE의 pot and model boiler test에서 사용된다. 分岐流路 監視器를 사용한 試驗의 결과는 같은 試驗에서 MTF, POT 그리고 model boiler에서의 腐蝕試驗用 試片의 결과와 좋은 일치를 보여주고 있다. UNC는 分岐流路 監視器는 全體規模의 蒸氣發生器 化學洗滌에서 필요하고 쓸모있는 방법이라고 느끼고 있다. 分岐流路 監視器의 설치장소는 그의 效能面에서 볼 때 아주 중요하다. 監視器는 가장 신중한 腐蝕資料를 생산할 수 있도록 설치되어야만 한다. 그리고 化學洗滌工程이 진행되는 동안 큰 역점을 두고 사용되어야 한다.

CE는 대체적으로 分岐流路 監視器와 腐蝕監視 探查針의 사용에 동의하고 있다. 그러나 CE은 또한 工程進行中에 꺼내볼 수 있는 腐蝕試驗用 金屬片, 熔接試片과 dent試片의 사용을 化學洗滌工程의 적절한 制御를 확실하게 하기 위한 추가적 監視資料를 얻어내기 위하여 探查針에 추가하여 추천하고 있다. B&W는 腐蝕監視 문제에 있어서 CE와 의견을 같이 하고 있다.

腐蝕監視에서 중요한 사항은 다음과 같다.

#### (1) 探查針과 쿠폰의 위치

監視裝置와 쿠폰은 반드시 가장 신중한 腐蝕資料를 생산할 수 있는 위치에 놓아야 한다. 溶劑나 腐蝕抑制劑의 소모가 일어날 수 있는 가능성있는 "dead zones"에 腐蝕監視裝置가 놓아져야 한다는 뜻이다.

#### (2) 妥當性있는 材料의 監視

化學洗滌 기간중에는 잠재적으로 예민한 材料 또는 結合體에 특별한 관심을 가지고 發電所 固有材料, 적절한 Galvanic couple 그리고 熔接試片등이 반드시 腐蝕行動을 監視하기 위하여 사용되어야 한다.

#### (3) 工程수행중 資料의 수집

腐蝕探查針 資料는 工程 수행중에 용이하게 수집된다. 그러나 腐蝕쿠폰을 꺼내서 重量減少資料를 얻을 수 있는 능력이 무엇보다도 가장 중요하다는 것이 契約者들의 일치된 의견이었다. 이들 資料가 蒸氣發生器에서 실제로 일어나고 있는 腐蝕을 가장 가깝게 監視해 줄

수 있을 것이라는 생각이다.

溶劑의 監視는 化學洗滌工程 수 행중에 蒸氣發生器의 化學環境을 制御하기 위하여 중요하다. 監視되어야 할 化學的 項目들은 다음과 같다.

- pH
- 鐵과 銅
- EDTA
- Hydrazine

이들 項目은 On-line (pH와 Hydrazine) 또는 직접 試料를 採取하여 (Fe, Cu와 EDTA) 측정할 수가 있다. 鐵과 銅은 原子吸光 分光分析法(AA) 또는 Inductively Coupled Plasma(ICP)을 사용하여 分析할 수가 있다. 이 試驗計劃에서는 鐵은 AA法으로 分析하였는데 分析結果의 精確성은 分析者와 分析節次에 크게 의존함을 보여주고 있다. 잘 訓練된 分析者와 잘 다듬어진 節次는 일반적으로 精確한 鐵의 分析值를 생산해 주었다. ICP는 더 한층 精確하고 신속하다는 것을 알수 있었다. 그러나 모든 發電所가 ICP장치를 갖기는 힘들다는 것에 留意하였다. 그리고 AA法에 의해서 얻어진 鐵의 分析值가 쓸모가 있는 것인가를 확인하기 위한 특별한 배려가 반드시 취해져야 한다. pH의 조절이 Ferric ion腐蝕을 감축하기 위하여 취해야 할 가장 중요한 일이다. 이 조절은 充填—浸漬—排水 方法에서 溶劑가 주기적으로 Boiler로 부터 混合槽로 排水되었을 때 溶劑의 分析과 調整에 의해서 이루어진다. 이렇게 하므로서 腐蝕抑制劑 또는 hydrazine의 소모로 인하여 높은 腐蝕性 酸性化學種의 생성을 초래하게 될 “dead area”의 발생 가능성과 溶劑固濁에 의한 不充分한 sludge의 제거를 극소화할 수 있을 것이다.

直接 測定할 수 없는 한가지 項目은 腐蝕抑制劑의 濃度이다. 이것은 腐蝕資料로 부터 추정할수 밖에 없다. 따라서 過度腐蝕에 대한 잠재성 때문에 工程이 수행되는 동안 특별한 배려가 좋은 監視技法을 유지하고 빈틈없는 腐蝕制御를 할 수 있도록 주어져야 한다. 單純化된 腐蝕抑制劑의 分析은 더 좋은 腐蝕制御를 할수 있게 할것이나 현재는 이용할 수 없다.

工程의 化學的 監視는 蒸氣發生器를 충분히 보호할 수 있도록 광범위하고 精確해야 한다. 試料 採取와 分析의 빈도는 發電所 固有特性 試驗計劃을 작성할 때 분명하게 규정하여야 한다. 이는 洗滌工程의 特定 目的에 대한 溶劑의 分析項目을 완벽하게 하고 엄밀하게 監視해야 할 중요한 項目과 腐蝕制御에 있어서들 중요한 역할을 하는 項目을 확인하게 될 것이다.

#### 4.5.3.1 On-line 工程監視器

UNC에서 개발하여 사용한 On-line Process Monitor

(PM)의 容器는 6 in의 Inconel pipe로 제작되었다(그림 8). PM 容器는 洗滌作業을 저해하지 않고 PM으로부터 개별적으로 꺼낼수 있는 몇개의 腐蝕쿠폰 홀더를 넣을수 있도록 설계되어 있다. 쿠폰 홀더는 Uniform, Stressed Crevice, Galvanic Couple과 U-bend를 포함한 여러가지 형태의 쿠폰을 보유하게 된다. 腐蝕試片을 裝填한 상태에서 PM에서의 Inconel과 炭素鋼의 表面積/容積 比들은 실제 SG의 그것과 같도록 한다. 이

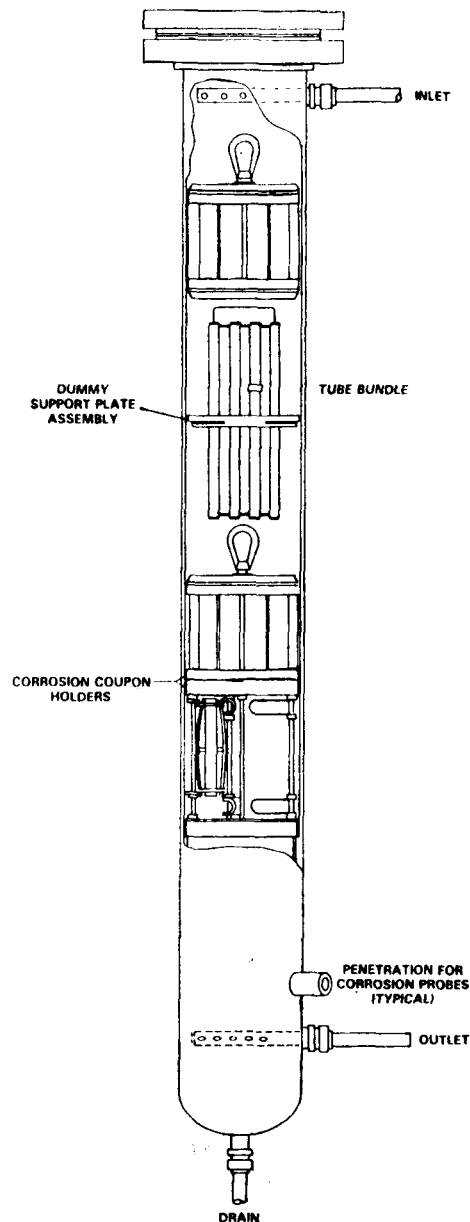
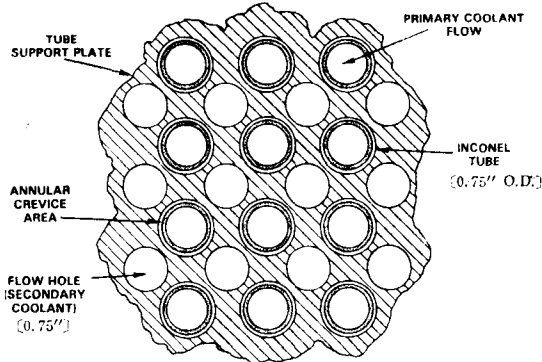


Fig. 8. Process Monitoring Assembly Typical Test Configuration



**Fig. 9. Westinghouse Tube Support Plate.** Drilled hole design used in several Westinghouse steam generator models.

容器는 또한 Linear Polarization Probes인 Petrolite Pair Meter와 Magna Corrotor 腐蝕監視器를 장착할 수 있는 7개의 浸透孔을 가지고 있다.

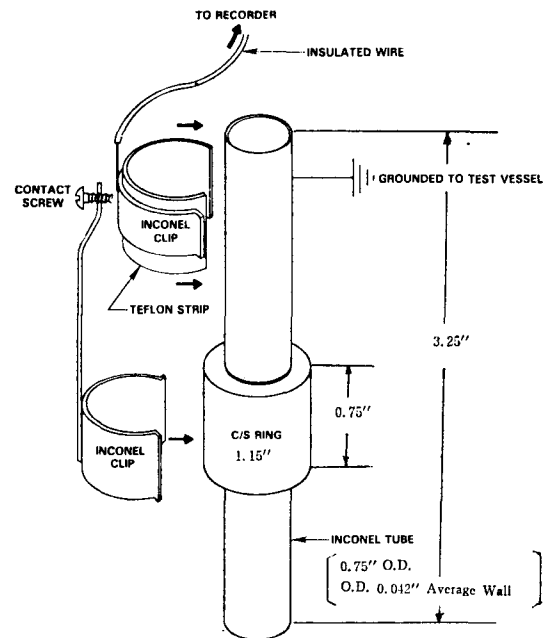
SA 285C로 만든 支持板은 Westinghouse 蒸氣發生器 支持板(그림 9)의 흐름양상과 같게 되어 있으며 선정된 腐蝕쿠폰의 接地와 正常 및 逆덴트 試片을 장전하는데 사용된다. 支持板에서 사용되지 않은 管孔은 dummy tube를 끼워서 洗滌溶劑의 흐름양상이 실제 SG의 흐름양상을 模倣하도록 한다.

系統의 總 洗滌容積에 따라 17.5g/l의 總 sludge積荷를 하기위하여 充分한 量의 sludge를 洗滌할 試驗容器에 넣는다. 이 외에 腐蝕쿠폰과 denting을 발생시킨 管試片들이 추가로 PM 容器에 포함된다. 溶解되지 않고 남은 sludge는 試驗終了時에 化學分析 結果의 확인과 material balance의 분석을 위하여 회수된다.

틈새세척 作業은 보통 250°F에서 실시되므로 dent 試片의 제거와 틈새세척의 진전을 物理的으로 측정하기 위하여 PM의 격리와 냉각이 필요하게 된다. 이 방법은 귀찮은 일일뿐 아니라 洗滌工程을 완료하는데 소요되는 시간을 연장시키는 동시에 틈새세척과 腐蝕率에 영향을 주게 될것이다.

#### 4.5.3.2 Dent Drop Detector

1981年初에 洗滌工程을 중단시키지 않고 틈새세척을 監視할수 있는 새로운 裝置가 UNC에 의해서 개발되었다(그림 10). 이 Dent drop detector는 炭素鋼 고리와 正常 dent試片의 Inconel管 사이에 형성된 電氣回路에 의해서 계속적인 監視를 하게 된다. 틈새가 洗滌되어 管에 붙어있던 炭素鋼 고리가 떨어지면 output signal을 내게된다. Dent Drop Detector System은 하나의 記錄裝置와 Dent試片에 부착된 두개의 Inconel Clips로 되어 있다. Inconel Clip의 하나는 炭



**Fig. 10. Dent Drop Detector Assembly.** Used for monitoring when C/S ring drops (complete cleaning).

素鋼 고리와 연결되어 있고 다른 하나는 Teflon을 사용해서 계통으로 부터 절연되어 있다. 腐蝕抵抗性 導線이 절연된 clip에 부착되어 容器 밖으로 compression fitting을 통하여 이어진다. 炭素鋼 고리에 연결된 clip에 있는 가느다란 金屬 막대에 부착된 set screw는 틈새 腐蝕生成物이 완전히 溶解되어 炭素鋼 고리가 管으로 부터 떨어져 나갈 때까지 電氣가 계속해 흐르도록 조절되어 있다. 檢出器들은 電流의 흐름이 없어졌을 때 전눈금의 편향을 나타내도록 조정된 多一接點一記錄裝置에 연결되어 있다. Dent Drop Detector는 아주 신빙성이 있는 것으로 입증되고 있다.

#### 4.5.4 工程의 洗滌效能

總 6회의 sludge—鐵 洗滌工程(9時間의 洗滌狀態)에서 그림 11에서 보여주는 바와 같이 sludge—鐵의 약 90%를 溶解시켰다. 少量의 殘留 鐵 堆積은 계속된 틈새세척 工程에서 溶解되었다.

銅의 No. 1과 No. 2 工程에서는 약 63%와 25%의 sludge銅을 그림 12에서 보여주는 바와 같이 각각 용해시키고 있다. 銅의 No. 1 단계에서 보여 주고 있는 유효한 銅(7.6g/l)은 sludge—鐵 段階에서 溶解된 銅과 鐵溶劑와 冷却洗淨溶液의 排水에 따라서 model boiler로부터 제거된 固形物에 대한 수정이 가해진 것이다.



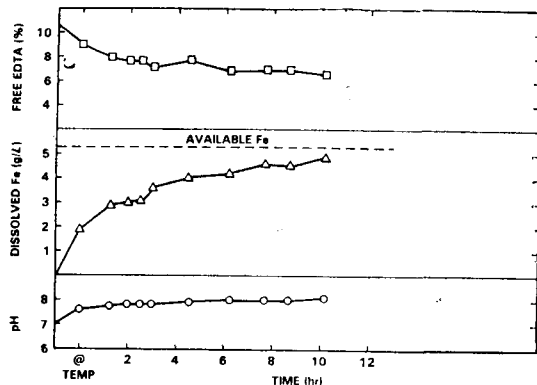


Fig. 11. Dissolved Iron, Free EDTA and Solvent pH vs Time for Model Boiler Sludge Iron Step

(總除去된銅은  $\sim 1.0\text{g/l}$ 이다). 같은 내용의 수정은銅의 No. 3 및 No. 4 段階에 대해서도 그림 13에서 보여주는 바와 같이 적용되었다. 4회의 sludge-銅 工程

Taebi 14. Effectiveness of Sludge Copper Steps

STEP	Available Cu (g/l)	Final Conc. Dissolved Cu (g/l)	Percent of Available Cu
Sludge Cu #1	7.6	4.8	63%
Sludge Cu #2	2.8	0.7	25%
Sludge Cu #3	2.1	1.6	76%
Sludge Cu #4	0.5	0.7	100%

의 각각에 대하여 계산된 效能은 表 14에 취합되어 있다. sludge 洗滌工程의 계산된 效能은 實證試驗 終了後 肉眼檢査에 의하여 效能이 100%임이 확인되었다. model boiler에는 1g 미만의 sludge-銅이 남아 있었다. 系統의 작동과 工程化學은 전 試驗過程에 걸쳐 대단히 安定하였다. 침세세척 段階 No. 1과 No. 2에서의 工程監視 分析結果는 그림 14와 같다. 침세세척은 工程의 初期段階에서 대단히 效能이 있음을 보여 주고 있다. 즉 15개의 正常 Dent 試片中 Dent drop detector

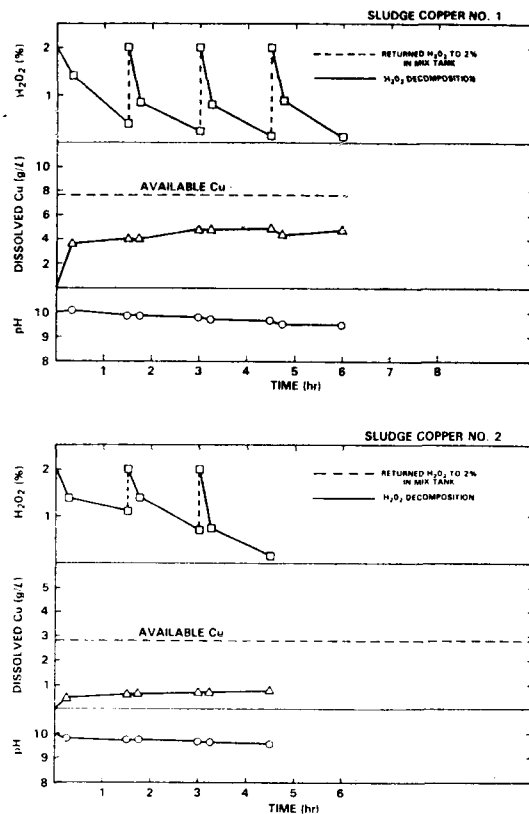


Fig. 12. Dissolved Copper, Hydrogen Peroxide and Solvent pH vs Time for Model Boiler Sludge Copper No. 1 and No. 2 Steps

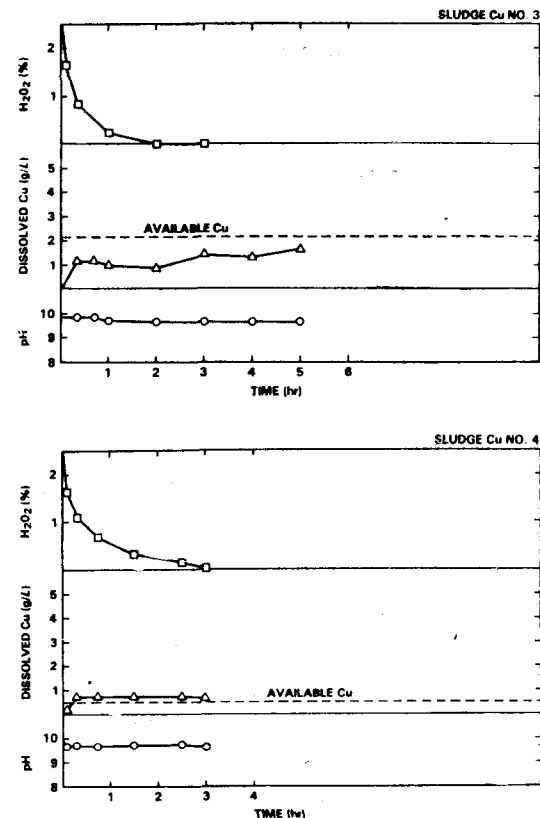


Fig. 13. Dissolved Copper, Hydrogen Peroxide and Solvent pH vs Time for Model Boiler Sludge Copper No. 3 and No. 3 and No. 4 Steps

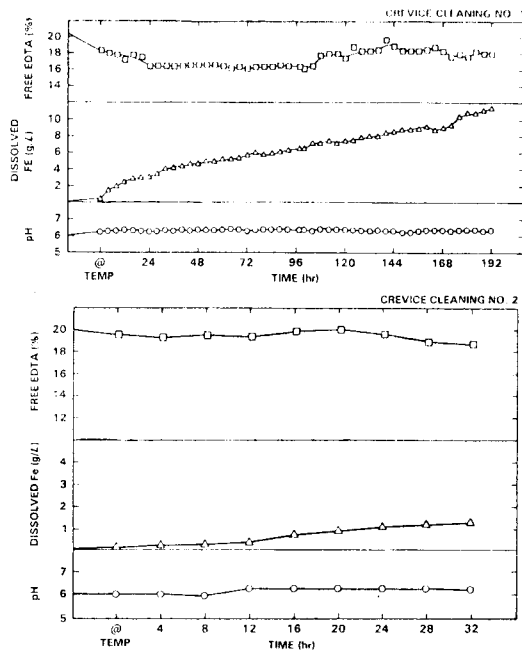


Fig. 14. Dissolved Iron, Free EDTA and Solvent pH vs Time for Crevice Cleaning Steps No. 1 and No. 2

를 장치한 6개의 試片에서 洗滌은 처음 60時間 이내에 완결됨을 보여주고 있다. 그러나 60時間後에는 表15에

기술된 Dent 洗滌時間에서 볼 수 있는 바와 같이 洗滌은 극적으로 늦어짐을 볼 수 있다. 96時間에서 더 이상의 洗滌은 이루어 지지 않아 PM은 밸브가 잠겨져 試驗系統으로 부터 격리되고 檢査를 하기 위하여 뚜껑을 열었다. 다섯개의 正常 dent 試片은 모두 거의 같은 洗滌效果를 보여주었으며 그 범위는 60~70%가 洗滌되어 있었다. 檢査後에 이들 dent試片은 완전한 洗滌을 위하여 다시 PM에 넣었다. 그러나 이번에는 系統의 밸브에서 흐름의 조절을 Outlet 대신에 inlet에서 하도록 변경하였다. 이 變化는 펌프의 discharge head pressure를 배제하므로서 PM에서의 壓力을 효과적으로 줄일 수 있었다. PM에 있는 2개의 dent試片이 추가된 7時間에서 13時間 사이에 완전한 洗滌을 보여 주었다. 洗滌效能이 다시 낮아졌을 때 다음과 같은 調查와 變化가 系統作動에서 틈새 세척 效能을 되찾기 위하여 시도 되었다.

(1) 排氣時間과 빈도를 매시간마다 1分에서 매 30分마다 2分으로 증가시켰다. 그리고 순환펌프는 排氣를 하는 동안에는 멈추도록 하였다. 그러나 裂點은 발견되지 않았다.

(2) 160時間後에 CE의 POT BOILER에서 만들어진 dent試片은 PM으로 부터 제거되어 分解檢査를 받았다. 그러나 고리모양의 틈새에서 틈새에 있는 腐蝕生成物과 溶劑의 積축을 阻害할 수도 있는 堆積이나 有機物

Table 15. Model Boiler Crevice Cleaning Summary, From UNC Dent Drop Detectors

Dent size and Identification	Location of Dent Sample	Crevice Cleaning Time (hr) (Dent Drop)
0.75-in. UNC #890	Model Boiler	9.5
#910	Model Boiler	13
1.0-in CE Pot 2K #3C	Model Boiler	17.5
0.75-in UNC #82E	Model Boiler	32
1.0-in CE Pot 2K #1H	Model Boiler	47
0.75-in UNC #86E	Model Boiler	48
81D	Model Boiler	54
92D	Process Monitor	103
87D	Process Monitor	109
90E	Process Monitor	143
83E	Process Monitor	180
76E	Process Monitor	182
Ppned Model Boiler for risual inspection after 225hr		
1.0-in. CE Pot 2K #4H	Model Boiler(a)	80% cleaned (open)
#2C	Model Boiler(a)	60% cleaned (not open)

註: UNC와 CE의 모든 正常 DENT試片은 UNC의 DENT DROP DETECTOR에 의해서 틈새 세척의 완결에 소요되는 시간이 측정되었다.

(a) Model Boiler에서 支持板 바로 위 正常溶劑準位 밑 24 in.의 자리.

Table 16. Summary of Moidel Boiler Crevice Cleaning Results

Size/Type of Dent	Location	Number Tested	Number Cleaned
0.75-in. UNC normal dent	Model Boiler	6	6
0.75-in. UNC normal dent	Process Monitor	4	4
1.0-in. CE Pot 2K dent(a)	Model Boiler	4	2
1.0-in. CE reverse dent	Model Boiler	4	3
0.75-in. support plate intersection	Model Boiler	37	37
	Total	55	52

(a) 한개의 CE의 DENT 試片이 PM에 포함되었다. 그러나 이것은 160時間後에 分解檢査를 위하여 제거되었다. 틈새는 제거하였을 당시 60%가 세척되었다.

殘渣는 발견되지 않았다.

(3) Model Boiler에서의 흐름은 溫度를 維持하는데 필요한 最少의 흐름상태와 停滯狀態로 번갈아가며 유지되었다. 거의 停滯狀態에서의 작동에서도 별다른 效果는 볼 수 없었다.

(4) Model Boiler에서의 流向을 0.15in/S에서 up flow로 방향을 바꾸었다. 그러나 틈새세척을 향상에 아무 效果도 없었다.

(5) 192時間에서 틈새세척 溶劑는 새것으로 대체되었고 洗滌은 그때부터 33時間 계속되었으나 별로 명백한 效果는 없었다.

2개의 나머지 正常 DENT 試片과 Model Boiler 支持板의 交叉部位가 새 溶劑를 가지고 완전하게 洗滌되는 것을 보여주지 못하자 工程을 終了시켰다. 왜냐하면 Model Boiler는 洗滌後에 殘留效果를 알아보기 위하여 運轉될 계획을 가지고 있었기 때문이다. 系統을 열고 DENT DROP DETECTOR에 의해서 측정된 틈새세척 결과는 肉眼檢査로 확인되었다. Model Boiler에서 支持板 바로 위에 놓은 2개의 CE의 1.0in DENT 試片과 4개중의 1개인 CE의 1.0in 逆 DENT 試片을 제외하고는 모든 DENT 試片은 洗滌되어 있었다. 그러나 Model Boiler의 모든 支持板 交叉部位는 완전히 洗滌되었다. 이것은 5개의 支持板 交叉部位가 아직도 淸차있음을 지적한 ANCO의 管振動試驗結果와 상반되는 것이었다. 이들 管은 구부러짐에 의하여 支持板에 淸꺼어들어 振動할수가 없음이 발견되었다. 完全한 틈새세척 결과는 表16에 취합되어 있다.

#### 4.5.5. 腐蝕結果

PM과 Model Boiler에 포함된 UNC의 모든 쿠폰의 腐蝕結果는 表17과 表18에 각각 실려 있다. 腐蝕結果는 대체적으로 MTF 10과 1981年 7月の POT BOILER 試驗에서 얻어진 資料와 일치되는 것이다. 모든 腐蝕結果는 公開된 EPRI의 腐蝕指針을 충족시키고 있다. 예외로서는

• 全工程에 걸쳐서 또는 225時間을 틈새세척 工程에서 노출된 接地된 RA 285C 쿠폰의 腐蝕은 3mils인 指針을 상회하고 있다.

• 4개의 U-BEND熔接 쿠폰중의 하나에서 심한 腐蝕이 나타났다.

Model Boiler의 틈새세척 工程을 指針인 105時間을 초과하여 계속할 것을 결정할 때 추가적인 腐蝕刑罰을 경험하게 될 것으로 생각되었다.

모든 腐蝕指針을 초과하는 것을 회피하고 느린 틈새세척을 수정하기 위한 모든 기도를 성취하면서도 效能에 관한 指針을 100% 충족시키기 위하여 언제 工程을 終了할 것인가를 결정하는데 대한 몇가지 기준이 제정되었다. 이들 基準는 현장 洗滌에서 적용하게 될 工程監視結果에만 依存하고 있으며 그 내용은 다음과 같다.

(1) PM에 들어 있는 SA285C dummy支持板의 細管과 流路孔에 대한 放射狀腐蝕의 制限値는 3mils로 한다. 성취할 수 있을 것으로 생각되는 이 限界는 1981年 7月の POT BOILER實證試驗에서 얻어진 腐蝕結果와 이에 對應하는 試驗에서 溶解된 鐵의 濃度와의 比較에 기초를 두고 計算된 것이다.

(2) Model Boiler 支持板 틈새의 완전한 洗滌은 ANCO의 振動探査針에 의해서 측정한다.

(3) 모든 正常 DENT의 完全한 洗滌은 DENT DROP DETECTOR의 結果로 測定한다.

틈새세척 工程은 SA285C 支持板의 腐蝕基準에 따라 255時間 만에 종결되었다. 그러나 監視結果는 틈새세척은 아직 完結되지 않았음을 지적하고 있었다. SA 285C 支持板에서 試驗終了時에 측정된 平均放射狀 腐蝕은 다음과 같다.

管孔  $\bar{X}_{10}=1.6$  mils

流孔  $\bar{X}_{12}=1.5$  mils

이 기준에서 볼때 ligament가 얇아지는데 대한 한側面當 3 mils의 SA 285C에 대한 指針에서의 腐蝕限界와

Table 17. Corrosion Results for Model Boiler Cleaning (Process Monitor)<sup>a</sup>

Coupon Condition	Alloy	Sludge Fe	Sludge Cu Steps #1 & #2	Crevice Step #1	Crevice Step #2 <sup>b</sup>	Total Process <sup>c</sup>
		Corrosion (mils) <sup>a</sup>				
Uniform (Insulated)	SA 105 Gr 2	0.16	<.01	0.49	0.08	0.74
	SA 106 Gr B	0.17	<.01	0.40	0.07	0.68
	SA 516 Gr 70	0.16	<.01	0.36	0.08	0.71
	SA 533 Gr A	0.34	<.01	0.83 <sup>e</sup>	0.06	1.18 <sup>e</sup>
	SA 533 Gr B	0.20	<.01	0.26	0.05	0.49
Uniform (Grounded to Inc)	SA 285C Gr C	0.40	<0.1		4.26 <sup>d</sup>	4.13
	SA 508 Cl 2	0.37	<.01		0.70 <sup>d</sup>	1.04
	Anti-Vibration Bar		NOT TESTED			0.003
Galvanic Couples (Insulated)	SA 285C	0.17	<.01	1.67 <sup>e</sup>	0.48	2.38 <sup>e</sup>
	Inc 600	<0.001	<.001	0.005	0.004	0.009
	SA 508	0.27	<.01	1.72 <sup>e</sup>	0.27	2.46 <sup>e</sup>
	Inc 600	<0.001	<.001	0.005	0.003	0.010
Stressed-Crevice Pairs(Insulated)	SA 285C		NOT TESTED			4.86
	Inc 600					0.11
	SA 508					1.37
	Inc 600					0.009
U-Bends (Insulated)	SA 105 Gr 2		NOT TESTED			0.75
	SA 106 Gr 8					0.59
	SA 285 Gr C					0.49
	SA 508 Cl 2					0.66
	SA 516 Gr 70					0.69
	SA 533 Gr A	0.49			1.10	1.71
	SA 533 Gr B					0.65
	Inc 600					0.003

a) 모든 결과는 2개의 쿠폰의 평균腐蝕이다.

b) 쿠폰들은 또한銅 No. 3와 No. 4 및不動態化段階에서 노출되었다.

c) 쿠폰들은全體洗滌工程에 노출되었다.(260 時間)

d) 쿠폰들은 또한 틸새세척단계 No. 1에 노출되었다.

e) 肉眼檢査에서 가볍고 보통의點蝕이 관찰되었다.

管孔 여유의 증가는 만족스러운 것이었다.

실패한 한개의 UNC가 供給한 熔接 쿠폰은 不注意로 인해서 인접한 接地된 쿠폰과의 접촉으로 인하여 Model Boiler에 접촉되어 있었다. 나머지 세개의 熔接 쿠폰은 系統으로 부터 格離돼 있었고 아주 가벼운 腐蝕을 보여주고 있다. 앞서 수행된 POT BOILER洗滌實證試驗에서 실패한 바 있는 SA 533A U-BEND 쿠폰들은 MODEL BOILER試驗에서는 stainless steel製 쿠폰支持棒의 사용을 배제한 利點을 보이면서 選擇的인 攻擊은 받지 않고 있다.

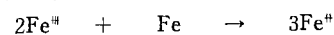
UNC의 腐蝕쿠폰의 결과들은 CE와 B&W에서 공급한 같은 材料의 쿠폰으로 부터 얻어진 결과와 좋은 일치를 보여주고 있다. 그러나 CE(SA533A TO SA

533A)와 B&W(SA533A TO SA516)에 의해서 공급된 熔接쿠폰의 몇개는 심한 熔接金屬 攻擊을 보여주고 있다.

#### 4.5.6. 特記事項

##### (1) Ferric Ion Corrosion

Ferric Ion Corrosion은 ferric ion (Fe<sup>3+</sup>)에 의한 基質金屬의 攻擊이다. 즉



(Ferric ion) (基質金屬) (Ferrous ion)

magnetite의 溶解가 ferric ion의 源泉이다. ferric ion의 腐蝕性은 EDTA-Ferric ion 錯化物的 安定性에 달려있다. EDTA-Ferric ion錯化物的 安定性을 極大化함으로써 ferric ion의 腐蝕性은 極小化될 수 있을 것이

Table 18. Corrosion Results for Model Boiler Cleaning (Model Boiler)

Coupon Type Condition	Alloy	Vapor phase	Bulk solvent phase	Sludge <sup>b</sup> phase
		Corrosion (mils) <sup>a</sup>		
Uniform (Insulated)	SA 105 Gr 2	0.06	0.99	1.03
	SA 106 Gr B	.9	.85	.91
	SA 516 Gr 70	.6	.81	1.01
	SA 533 Gr A	.10	1.55	2.11
	SA 533 Gr B	.11	.69	.80
Uniform (grounded)	SA 285 Gr C	0.12	4.07	4.46
	SA 508 Gr 2	not tested	1.07	1.32
Welded U-bend (insulated)	SA 508 SA 533A	not tested	1.57	3.26 <sup>c</sup>

註: Model Boiler의 모든 쿠폰은全體化學洗滌工程(260時間)에 노출되었다.

a) 結果들은 2개의 쿠폰에서 얻어진 平均腐蝕이다.

b) 모든 쿠폰이 sludge pile과 접촉한 것은 아니다.

c) 熔接熱 攻撃部位에서 깨진 2개의 쿠폰의 平均腐蝕. 파괴된 쿠폰은 隣接한 쿠폰과의 접촉을 통하여 系統에 接地態 있었다. 다른 3개의 熔接된 U-BENDS들은 격리態 있었고 심한 局部腐蝕을 보여주지 않고 있다.

다. 이 錯化物的 安定性은 pH를 7로 유지함으로써 향상시킬수 있다. 이에 더하여 溶劑의 腐蝕性으로 부터 基質金屬을 보호하는 腐蝕抑制劑의 기능을 알아야만 한다. 그러나 이것은 ferric ion 腐蝕으로부터 基質金屬을 보호하는데 效果의이 못된다. 또한 蓄積된 sludge인 ferric ion의 主源泉의 제거는 ferric ion 腐蝕의 效果를 極小化하는 또 다른 방법이 될 것이다. 그리고 또한 ferric ion의 濃度에 영향을 미치는 또 다른 要因은 炭素鋼의 表面積이다. 즉 주어진 양의 magnetite에 대하여 炭素鋼 表面이 넓을수록 全般的인 腐蝕은 낮아진다. 炭素鋼 表面積은 고정되어 있으므로 ferric ion 腐蝕의 제어는 pH를 적절하게 유지함으로써 또한 洗滌 溶劑에 노출되기 전에 sludge堆積을 제거하므로써 유지된다.

#### (2) 表面積 對 溶劑容量 比

洗滌溶劑에 노출되는 表面積이 넓을수록 전반적인材質의 腐蝕은 적어진다. 이것은 條件을 적절하게 조정

할 수 있는 實驗室試驗과 全體規模에 대한 적용 양자의 경우에 있어서 중요한 考慮의 대상이 된다. 蒸氣發生器의 完全한 充填은 더 많은 炭素鋼表面이 포함되게 되어 腐蝕이 넓은 表面에 分布되므로 部分的으로 充填된 蒸氣發生器보다 均一腐蝕浸透를 極小化하는 方法이 될것이다.

#### (3) A533A의 심한 腐蝕

ASTM 533A 合金은 sludge의 제거와 틈새세척 工程을 적용시켰을 때 즉 장시간 노출되었을 때 심한 點蝕을 보여주고 있다. 이 材料에 대한 상세한 연구는 그의 야금학적 조직이 點蝕에 대하여 대단히 낮은 저항에 기여하고 있음을 지적하고 있다. 특히 熔接部位에서 그러하다. 表19에 취합한 實驗室資料들은 더 한층 심한 攻撃을 받는 533A材料의 領域은 533A와 Inconel 600의 面積比가 1:50인 곳이었다. 이와 같은 結果는 點蝕은 電氣化學的 性格의 것일 거라는 것을 지적하고 있다. 그리고 特定發電所에 대한 固有特性試驗에서는

Table 19. SA-533A Weld Corrosion Data

Inconel Couple	SA-533A		WELD		HAZ*	
	1:1	1:50	1:1	1:50	1:1	1:50
Pitting	No Pitting	Visible Pitting	No Pitting	Severe Pitting	Small Pits	Pitting
Depth	0.7~1 mil	0.4~17 mils	1mil	24mil	1~10 mils	14~21 mils

\*HAZ-Heat affected zone

Table 20. Summary of Pit Depths and Densities (5)\*\*

Material	Sludge***			Bulk			Vapor		
	Density/Depth (Mils)			Density/Depth (Mils)			Density/Depth (Mils)		
		Max.	Ave.		Max.	Ave.		Max.	Ave.
SA 106 Gr B	LR* 8/Coupon	9.6	9.6	28/Coupon	12.0	7.7	No Sample	—	—
	SM* 82/cm <sup>2</sup>	5.2	3.3	88/dm <sup>2</sup>	5.2	3.6	—	—	—
SA 533 Gr B Cl 1	LR 8/Coupon	10.8	5.4	16/Coupon	6.7	4.6	4/Coupon	8.0	6.4
	SM 230/cm <sup>2</sup>	3.3	1.7	295/cm <sup>2</sup>	3.0	1.6	37/cm <sup>2</sup>	2.0	1.3
SA 508 Cl 2	LR 14/Coupon	26.8	11.1	0/Coupon	—	—	No Sample	—	—
	SM 68/cm <sup>2</sup>	10.0	4.8	71/cm <sup>2</sup>	4.8	2.1	—	—	—
405 SS	LR 0/Coupon	—	—	0/Coupon	—	—	No Sample	—	—
	SM 10/cm <sup>2</sup>	0.8	0.6	4/cm <sup>2</sup>	1.6	1.0	—	—	—
INC 600 (Sens.)	—	—	—	No Pits	—	—	—	—	—
Inc. 600 (MA)	—	—	—	No Pits	—	—	—	—	—

\*LR=Large pits greater than 20 mils diameter.

SM=Small pits 2-20 mils diameter.

Pits less than 2 mils diameter not counted.

\*\*CE Pot Boiler 5H included four sludge removal steps and a crevice cleaning step totaling 146 hours of solvent exposure.

\*\*\*Coupon located in the sludge pile region.

Galvanic Potential의 측정이 필요할 것이라는 것을 지적하고 있다. Galvanic 腐蝕은 面積比에 부가하여 實驗室試驗에서는 模倣하지 않았던 表面과 構造物사이의 거리의 函數라는 것을 명심해야 한다. 왜냐하면 Geometry는 PWR 蒸氣發生器에서 더 한층 알맞는 것 같다. 蒸氣發生器에서의 533A-Inconel 600의 Galvanic腐蝕行動은 表19에 보고된 결과에서 面積比 1:50에서의 값보다는 面積比 1:1에서의 값에 좀 더 근사한 값을 보여줄 것으로 생각된다. 또한 틈새세척工程에서 적용된 ICI 801 腐蝕抑制劑의 높은 濃度(~1%)는 심한 點蝕을 감축함을 볼 수 있었음에 유의하여야 한다. 그러나 증가된 腐蝕抑制劑의 濃度에 대하여서는 앞으로 定量的인 檢討가 필요한 것이다.

## (4) 點蝕

點蝕은 A533A에서와 마찬가지로 試驗된 다른 材料에서도 관찰되고 있다. CE POT BOILER 5H 試驗에서 보고된 點蝕資料는 表 20에 취합되어 있다. 比較的 낮은 準位の 點蝕이라 할지라도 蒸氣發生器의 完全性에 영향을 주게 될 것으로 생각되고 있다. 따라서 特定發電所에 洗滌工程을 적용시킴에 있어서 만나게 될 것으로 생각되는 點蝕의 정도에 대한 評價를 수행하는 것이 바람직 할 것이다.

## (5) 腐蝕抑制劑의 濃度

鐵-sludge 除去 段階에서의 腐蝕抑制劑의 濃度는 0.5%가 최적이었다. 그러나 틈새세척 段階에서는 1%의 腐蝕抑制劑가 필요하였다. 發電所-固有條件에서는 더 한층의 최적화가 아마도 필요하게 될 것이다. 그러나 1%보다 큰 腐蝕抑制劑의 濃度는 바람직 하지 못한 硫黃殘渣問題를 초래하게 될 것이다.

## (6) Hydrazine의 영향

Hydrazine(N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)은 magnetite의 溶解를 돕기 위해서 化學洗滌 溶劑에 첨가된다. 현재까지 얻어진 資料는 ferric ion과 Hydrazine의 錯化物 形成에 의한 溶解는 ferric ion에 의한 腐蝕을 極小化하지만 Hydrazine은 基質金屬을 攻撃한다 A533A는 다른 모든 조건을 일정하게 유지한 試驗에서 1% N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>에서 0.23 mil인 것이 2%에서 1.75 mils로 증가하고 있다. sludge-鐵 溶解 工程에서 pH를 7로 조심스럽게 조절 하므로서 Hydrazine의 有效效果 즉 sludge의 溶解와 ferric ion 腐蝕의 조절은 향상될 수 있을 것이고 hydrazine의 腐蝕性을 極小化할 수 있을 것이다.

## (7) pH의 영향

앞서 언급한 바와 같이 化學洗滌 溶劑의 적절한 pH는 化學洗滌工程 수행중에 ferric ion과 Hydrazine에 의한 腐蝕에 대한 보호를 제공하는데 아주 중요한 것이다. 安定된 EDTA-Ferric ion과Hydrazine-Ferric ion

錯化물의 적절한 환경을 유지하기 위하여서는 pH 7이 가장 이상적 임이 알려져 있다. 이 pH는 最大의 腐蝕抑制를 제공해 주는 한편 溶劑效果 상실을 極小化 해준다.

#### (8) 殘留效果

Combustion Engineering은 Model Boiler 7 化學洗滌試驗이 끝난후에 이 model boiler를 AVT 化學處理下에 4~5週間을 運轉하였다. Boiler로 부터 제거된 대표적인 材料의 檢査結果는 殘留 洗滌化學劑로 부터 손상을 받고 있지 않으며 Inconel 600管에서 硫黃 攻擊은 발견되지 않았다. 특히 sleeved 또는 plugged tube에서의 殘留化學劑의 영향을 관찰하기 위한 계속된 試驗이 계획되고 있다.

이와는 별도로 Babcock & Wilcox는 ANO-1과 OC-ONEE-1을 위해서 公開된 化學洗滌 sludge除去 工程의 최적화를 위한 試驗을 수행한 바 있다. 初期에 얻어진 資料들은 sludge 除去工程이 끝난후 金屬表面에 硫黃이 있음을 지적하고 있다. 管 固定臺 틈새 특히 sensitized Inconel Tube에서 硫黃 殘留物의 영향을 관찰하기 위한 계속된 試驗이 진행중에 있다. 殘留 硫黃은 化學洗滌過程에서 또는 후에 發電所에 있는 sensitized materials에 대하여 유의해야 할 한 項目이다. 이제까지 수행된 어떤 試驗에서도 殘留 硫黃으로 부터의 惡影響의 징후는 발견되지 않고 있다.

#### (9) 工程 監視

工程 監視는 腐蝕監視와 化學分析의 兩者를 포함한 다. 效果的인 洗滌과 적절한 腐蝕制御는 적절한 監視에 달려있다. 電氣化學의 腐蝕探査針 資料는 어떤 材質에 대해서는 腐蝕監視面에서 아주 成功의이었다. 그러나 이 監視方法만을 유일하게 사용하는 것은 추천할 수 없다. 腐蝕 쿠폰은 아직도 적절한 腐蝕制御를 위하여 必要하다. 상세한 監視方法이 發電所 固有特性 試驗에서 다루어져야 한다.

#### (10) 發電所 固有特性 試驗

이 試驗은 公開된 化學洗滌工程을 全體 規模 蒸氣發生器에 적용시키기 전에 必要하게 될 것이다. 이 作業에서는 發電所 固有材料, 熔接材料 그리고 發電所 sludge의 化學的 物理的 特性調査가 포함될 것이다. 요약하면 化學洗滌工程 수행중에 관심이 있는 材料의 예상되는 腐蝕行動을 암시해 주는데 사용될 수 있도록 광범위한 腐蝕資料가 입수 가능 하여야 한다. 그리고 發電所 固有特性 試驗은 洗滌工程의 固有-全體-系統-一適用을 위한 資格證明을 얻기 위해서 必要하다.

### 參 考 文 獻

1. Steam Generator Chemical Cleaning Demonstration test No. 1 in a pot Boiler (PWR), Key, G. L.; Helyer, M.H., Combustion Engineering, Inc., EPRI-NP-1789, APR 1981, 133p.
2. Chemical Cleaning Demonstration test No. 1 in a Mock-up Steam Generator. (PWR), Jevco, J.M.; Leedy, W.S.; Potterton, S.J., Babcock and Wilcox Co., EPRI-NP-1829, APR 1981, 93p.
3. Steam Generator Chemical Cleaning: Demonstration test No. 2 in a pot Boiler, Key, G.L.; Fnk, G.C.; Helyer, M.H., Combustion Engineering, Inc., EPRI-NP-1976, Aug 1981, 91p.
4. Chemical Cleaning Demonstration test No. 2 in a Mock-up Steam Generator. (PWR), Jevco, J.M.; Leedy, W.S., Babcock and Wilcox co., EPRI-NP-3008, APR 1983, 62p.
5. Chemical-Cleaning Solvent and Process Testing. Final Report. (PWR), Jevco, J.M.; Leedy, W.S., Babcox and Wilcox co., EPRI-NP-2976, APR 1983, 284p.
6. Steam-Generator Chemical-Cleaning Demonstration test No. 3 in a Pot Boiler. (PWR), G.C.; Helyer, M.H.; Key, G.L., Combustion Engineering, Inc. EPRI-NP-2983 APR 2983, 132p.
7. Chemical-Cleaning Process Evaluation: Westinghouse Steam Generators. Final Report. (PWR), Cleary, W.F.; Gockley G.B., Westinghouse Electric Corp., EPRI-NP-2987, APR 1983, 132p.
8. Steam-Generator Chemical-Cleaning Process Development, Final Report. (PWR), Schneidm: Ller, D.; Stiteler, D., UNC Nuclear Industries, Inc., EPRI-NP-3009, APR 1983, 258p.
9. Nonproprietary Corrosion Inhibitors for Solvent to Clean Steam Generators. Final Report, Annand, R.R.; Hausler, R.H., Petrolite Corp., EPRI-NP-3030, JUN 1983, 369p.
10. Steam Generator Sludge Pile Model Boiler Testing: Sludge Characterization, Becker, L.F.; Esposito, N.E., Westinghouse Electric Corp., EPRI-NP-2041, SEPT 1481, 144p.
11. A Chemical Cleaning Process for Nuclear Steam Generators, Balakrishnan, P.V.; Mc Sweeney, P.;

- Frost, C.R.; Walmsley, P., CRNL, Nuclear Technology Vol. 55, NOV 1981, 13p.
12. Chemical-Cleaning Solvent and Process Testing, Final Report, Jevec, J.M.; Leedy, W.S.; Babcock and Wilcox Co., EPRI-NP-2976, APR 1983, 284p.