

III. ATWS에 대한 原子爐製作會社 및 電力會社の 입장

盧 潤 來 · 洪 承 烈

韓電技術研究院 原子力研究室

1. 緒 論

原子力發電所에서의 ATWS에 관한 主案點은 制御棒을 포함한 原子爐 停止系統의 신뢰도 및 이 계통의 共通因者失敗(Common Mode Failure)에 대한 評價問題였다. 原子爐 停止系統은 높은 신뢰도를 갖도록 설계되어 있지만 Kahl(1963) 事故, Monticello(1980) 事故 및 Brown Ferry 3號機(1980) 事故는 모두 ATWS 事故 가능성을 示事한 例라고 할 수 있다. 상업발전소에 대한 最初의 ATWS事故는 1983年 2月 22日 Salem 1號機에서 發生했으나, 사고당시는 이것이 ATWS 事故라는 것을 알지 못했으며 두번째 事故가 같은 발전소에서 3日 後인 2月 25日 發生했다.¹⁾ 다행히 運轉員의 빠른 手動 原子爐停止에 의해 심각한 피해는 없었지만 原子爐 停止系統의 신뢰도 및 發電所管理 측면에서 볼 때 이 事故는 중요한 意味를 內包하고 있다. 특히 Salem 發電所와 同一한 停止遮斷器(Trip Breaker DB-50)를 사용하고 있는 原子力 1號機는 유사사고 發生에 대비하지 않을 수 없다.

본문에서는 Salem 事故 및 NRC 후속조치 내용을 간단히 살펴보고, ATWS 事故에 대한 W (Westinghouse)의 分析 및 立場을 검토하며, Salem 事故後 ATWS 事故에 대비한 國內 조치사항 및 現況과 앞으로의 계획을 살펴보고자 한다.

2. Salem 發電所의 ATWS 事故 및 후속조치

Salem-1 原子力發電所는 용량 1136MWe의 Westinghouse社 PWR을 원자로로 사용하며 原子爐 停止系統에 DB-50 停止遮斷器를 사용하고 있다. 따라서 Salem 發電所와 同一한 遮斷器를 사용하고 있는 原子力 1號機에 대해 Salem의 事故는 중요한 意味를 갖고 있다. 아래에서는 이 發電所의 事故內容 및 事故後 NRC 조치사항 등을 추적해 보기로 한다.

2.1 Salem 發電所 ATWS 事故¹⁾

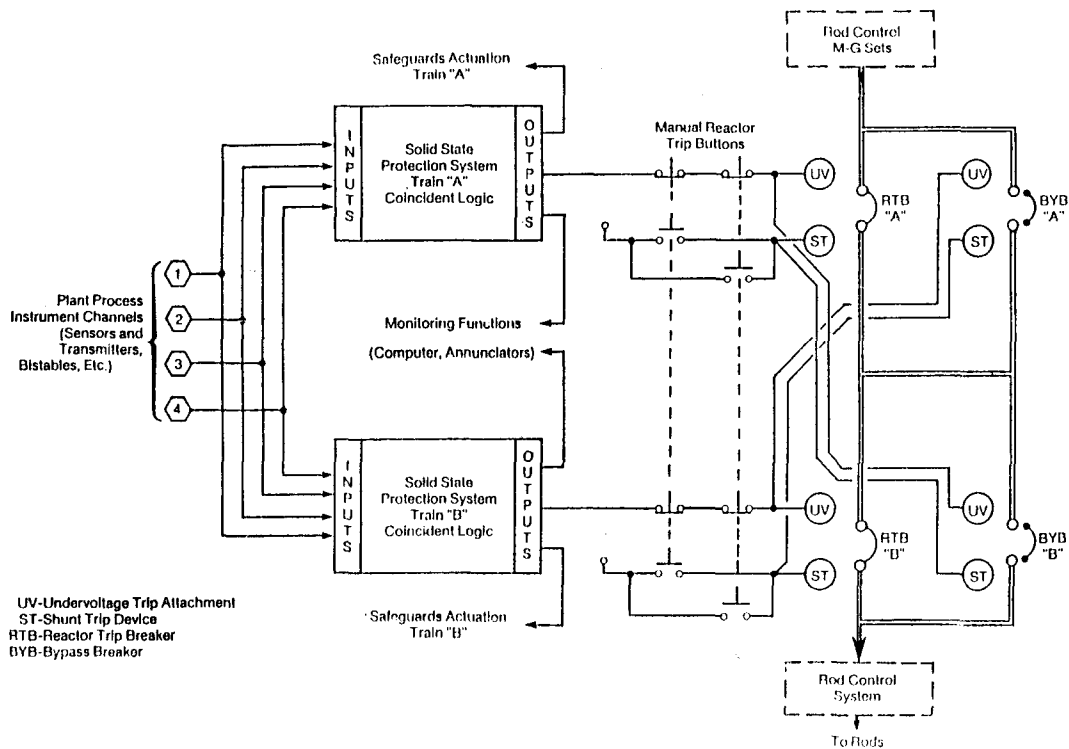
Salem 發電所의 첫번째 事故는 83年 2月 22日에 발생했다. 20% 出力에서 IF 4KV Bus 전원상실 事故가 발생했으며, 이로 인하여 원자로 냉각수펌프와 주급수 펌프가 정지되고 증기발생기의 수위는 급격히 감소하였다. 증기발생기의 底底水位로 인한 原子爐停止信號가 발생되었으나 停止遮斷器가 이信號에 의하여 作動하지 않았다. 이와 거의 同時에 運轉員이 原子爐停止信號에 따라서 手動으로 原子爐를 停止시켰다. 運轉員의 手動停止信號에 의해 실제로 原子爐는 停止되었지만, 停止遮斷器가 自動停止信號에 대해 作動하지 않았었다는 事實은 밝혀지지 않은채 原子爐는 再稼動되었다.

두번째 事故는 2月 25日 原子爐出力 12%에서 出力 增發中 증기발생기의 底底水位로 인한 原子爐 停止信號로부터 시작되었다. 運轉員은 증기발생기의 底底水位停止信號를 接하고 原子爐가 停止되었다고 判斷하고 原子爐가 停止되었음을 所內에 방송하였다. 그러나 主制御室에 있던 다른 運轉員이 制御棒 位置指示計를 확인한 結果 原子爐가 停止되지 않았음을 알려왔다. 原子爐 運轉交代組長은 原子爐가 停止하면 당연히 停止해야 하는 터빈이 停止하지 않았음을 확인하고, 관련指示計들을 점검한 結果 原子爐가 停止하지 않은 것으로 斷定하고 手動으로 原子爐를 停止시켰다. 自動停止信號로 부터 手動停止時까지 경과한 시간은 25초가량이었으며 原子爐는 곧 高溫停止상태로 안정되었다.

그후 停止遮斷器 점검결과 遮斷器 2個(RTB "A" "B", 그림 1 참고)가 모두 作動하지 않았음이 확인되었고, 이는 Undervoltage Trip Attachment의 機械的인 固着으로 판명되었다.

2.2 Salem 事故 후속조치 내용

Slam 事故로 다행히 큰 피해는 없었으나 그 事故가 原子力發電所의 安全측면에서 內包하고 있는 중요성에 비추어, NRC는 Salem 發電所에 長短期 조치사항을 지시하는 한편 다른 發電所에 대해서도 3회에 걸쳐 'IE Bulletin'을 통하여 단기 일반조치사항을 示達했다. 그 첫번째 사항은 'IEB 83-01'²⁾으로, Salem 發電所



〈그림 1〉 Typical Westinghouse Reactor Trip System

의事故가 W BD-50 遮斷器의 Undervoltage Trip Attachment의 고착에 의한事故이기 때문에 同種의 遮斷器를 사용하는 다른 發電所에 대해서도 그 작동상태를 확인하는 점검을 수행하라는 내용이었다. 두번째 사항(IEB 83-04)³⁾은 Undervoltage Trip Attachment를 사용하고 있는 모든 發電所에 대해 점검을 要求하는 사항이며, 세번째 사항(IEB 83-18)⁴⁾은 점검결과 異狀이 있는 内容들에 대한 告知였다.

이와같이 短期조치사항을 示達하는 한편 NRC는 Salem 事故의 内容을 상세히 검토하고(NUREG-1000), 중간조치사항을 83년 6월 8일 'Generic Letter 83-28'⁵⁾로 電力會社에 示達했다. 그 内容은 원자로 不停止 原因糾明, 安全관련 機器分類, 補修후 점검 및 원자로 停止系統 신뢰도향상 등을 포함하고 있다.

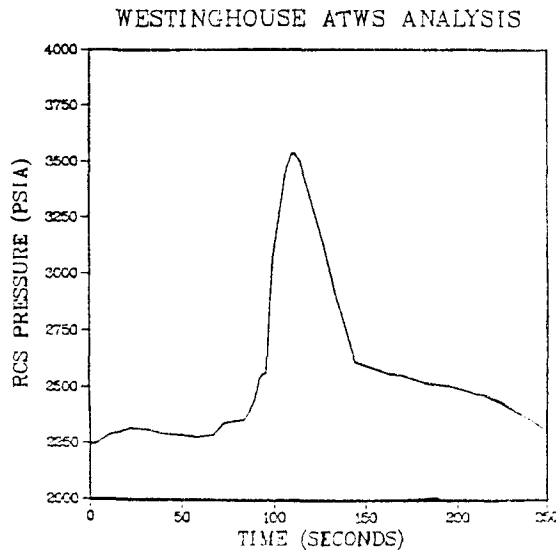
3. ATWS에 대한 原子爐 製作會社 및 電力會社의 立場

3.1 原子爐 製作會社의 立場

國內에서 稼動中이거나 稼動예정인 原子爐는 대부분 W社 製作이기 때문에, ATWS 事故時 發電所의 性能分析, 原子爐停止系統의 신뢰도分析, ATWS 事故의

代案에 대한 경제성分析 및 原子爐 製作會社의 立場을 W發電所를 중심으로 검토해 보기로 한다. ATWS 事故時 W 發電所에 대한 性能分析은 Salem 事故以前 WCAP-8330에, Salem 事故에 대해서는 NS-EPR-2737에 나타나 있으며 이 보고서의 分析을 중심으로 살펴 보기로 한다.⁶⁾

먼저 定格出力에서 주급수의 完全喪失事故가 발생하고 原子爐가 自動停止系統의 事故로 인하여 停止되지 않으며 터빈도 自動停止되지 않은 ATWS 事故를 가정한다. 이 事故는 1次系統에서 生産되는 熱量과 2次系統에서 除去되는 熱量의 커다란 차이로 原子爐 냉각수의 온도와 압력을 급격히 상승시킨다. 이때 압력은 급격히 상승하였다가 減速材의 溫度負反應度에 의해 다시 감소하는데, 경과시간에 따른 압력의 變化는 그림 2에 나타나 있다. 그림 2에 의하면 最大壓力은 사고후 約 2分後에 3650 psia가 되어 NRC의 安全限界值 3200 psia를 크게 초과하고 있다. 만약 運轉員이 1.25分 以內에 原子爐를 停止시킨다면 1次系統의 압력은 정상압력인 2250 psia로 維持될 수 있으나 1.5分 以後에 停止시킨다면 最大壓力을 감소시키는데는 도움을 주지 못하는 것으로 나타나고 있다. 만약 運轉員이 事故後 30초 以內에 터빈을 停止시킨다면 최대압력은 2700 psia



〈그림 2〉 Loss of Feedwater-No Turbine Trip(pressurizer pressure vs. time) Source: WCA P-8330

로서 NRC의 基準値以內로 維持시킬 수 있다. 이와같이 W 원자로는 他社의 원자로에 비해 ATWS 事故時 가장 소규모의 壓力過渡現狀을 나타내며 터빈停止만 보장된다면 ATWS 事故時에도 發電所가 安全할 수 있다는 이유로 1982年 ATWS에 관한 法規制定時에도 W PWR 發電所는 AMSAC만 설치하고 DSS(Diverse Scram System)에 대해서는 免除할 것을 주장하였다. 그러나 Salem 事故以後 W 發電所에 대해서도 DSS설치에 대한 재검토가 시작 되었다. 재검토는 原子爐 停止系統의 신뢰도에 대해 PRA (Probabilistic Risk Assessment) 기법을 통한 理論的인 分析, 發電所 운전경험에 의한 데이터 分析 및 각 代案에 대한 경제성 分析을 통해 이루어졌다. 原子爐停止系統의 世界的인 事故 경험치를 토대로한 分析에 의하면 W 原子爐 停止系統

의 稼動失敗率(Unavailability)이 $2 \times 10^{-4}/\text{demand}$ 로서 他社보다 6배나 높으며, NRC 評價로는 W의 原子爐 停止系統이 最小의 多重性(Redundancy)과 높은 稼動 失敗率을 갖는 것으로 나타났다. ATWS 事故로 인하여 發電所가 관련 許容限界値를 초과할 확률에 대한 PRA 分析結果와, 이러한 가능성을 줄일 수 있는 여러 가지 代案들에 대한 경제성 分析은 表 1과 같이 나타나고 있다. 이 表에서 Base Case의 값은 W 發電所에 대해 Salem 事故 후속조치사항(Generic Letter 83-28)인 Auto Shunt Trip의 設置를 가정한 값이다. 表 1에서 보는바와 같은 여러案에 대한 경제성 分析을 바탕으로 NRC는 W 發電所에 대하여 第2案을 권고하였다⁷⁾ AMSAC設置 以外에 DSS 追加設置에 대한 NRC 권고는 V/I 비율에 있어서도 경제성이 있을뿐만 아니라 Salem 사고 分析結果 W 發電所는 原子爐 停止系統의 신뢰도를 크게 높여야 한다는데 기인한 것이다. 그러나 W는 NRC의 分析이 너무 保守的이며 W 發電所는 設計상의 利點때문에 AMSAC 設置만으로도 ATWS 事故時 發電所가 安全할 수 있다는 이유를 들어 AMSAC의 設置만을 계속 주장하였으며, 이러한 W의 주장은 NRC 투표에서 받아들여졌다.⁸⁾

3.2 ATWS事故에 대한 國內 조치內容 및 立場

短期조치

한국전력공사는 83年 3月 2日 W로부터 Salem 事故에 따른 DB-50 原子爐停止遮斷器의 점검 및 NRC 권고사항(IEB 83-01)을 수행하도록 권고받았다. 이에 따라 고리현장에서는 Salem 發電所의 遮斷器가 原子力 1號機와 同種임을 감안, 類似事故 발생의 가능성이 있다고 判斷하고 IEB 83-01에 대한 조치사항의 수행에 즉각 착수했으며 그 內容에 대한 要約은 表 2에 나타나 있다.

原子力 1號機 기술지침서⁹⁾ (Technical Specification)에 의하면 原子爐 停止遮斷器는 每 原子爐起動前과 月

表 1. Cost and Benefits of ATWS Rulemaking

Generic Options	W				CE/B&W			
	Patws/year	Value (Millions)	Impact (Million)	V/I	Patws/year	Value (Millions)	Impact (Millions)	V/I
0. Base Case	3.7×10^{-5}				8.0×10^{-5}			
1a. AMSAC	5.8×10^{-6}	\$ 9.4M	\$ 2.8M	3.3				
1b. DSS	5.3×10^{-6}	\$ 9.5M	\$ 2.8M	3.4				
2. AMSAC and DSS	2×10^{-6}	\$ 10.5M	\$ 3.8	2.8	2.2×10^{-5}	\$ 17.4M	\$ 5.5M	3.2

註: Patws=probability of an ATWS sequence leading to unacceptable plant condition

Impact=cost to implement given option

Value=expected benefits through implementing given option

AMSAC=diverse auxiliary feedwater actuation and turbine trip syetem

表 2. IE Bulletin 83-10 조치결과

項 目	原子力 1 號機(DB-50)	原子力 2 號機(DS-416)
1. Surveillance Test	가. 月間 Surveillance Test 時期에 따라 施行하고 있음 나. 83.3.9 動作狀態 확인결과 양호 4.7 再試驗결과 양호	83.3.11 試驗결과 양호
2. 보수절차서 및 정기 점검方法 再整備	W NSD Data Letter 74-2에 의거 原子爐 停止遮斷器 점검 절차서 作成 가. W에서 권고한 Spray Kote (Molybdenum Sulfide)나 Mohy Kote-88 윤활유 사용토록 명시. 나. W권고대로 半年週기로 施行명시	보수절차서(MP-2-2) 및 정기점검절차서 (STP-33)에 既 반영
3. 運轉員 敎育 및 비상 운전절차서 재검토	가. 現 運轉勤務者 및 研修院敎育生에 대한 敎育 나 原子爐 비상운전절차서(3-3-103) 改訂	비상운전절차서 (ES-0.1)에 既 반영

1회 性能試驗을 하도록 規定하고 있다. Salem 事故後 IEB 83-01에 의거 3月 9日 1號機(DB-50)에, 3月 11日 2號機(DS-416)에 試驗한 결과 양호하게 作動하는 것으로 나타났으며 4月 7日 1號機 O/H(Overhaul)時再試驗한 결과 역시 自動停止信號에 대하여 양호하게 作動하는 것으로 나타났다. 1號機遮斷器 점검절차서는 W의 NSD Data Letter 74-2¹⁰⁾ (Reactor Trip Breaker Maintenance)에 의거 W의 권고에 따라 만년주기로 보수할 것과 윤활유로서는 W에서 권고한 Spray Kote나 Moly Kote-88을 使用할 것을 명시하였으며, 2號機의 보수절차서 및 정기점검 절차서에는 이러한 事項들이 既 반영되어 있으므로 수정이 불필요했다. 現 運轉勤務者 및 研修院敎育生에게는 Salem 發電所 事故內容과 原子爐가 停止設定値에 도달되어도 自動停止 되지 않을 경우에는 즉시 手動으로 停止시켜야 한다는 사항을 再敎育시켰고, 手動停止方法을 1號機 原子爐 비상운전절차서 3-3-103에 반영하였다. 2號機의 경우는 비상운전절차서 ES-0.1에 既 반영되어 있으므로 수정이 불필요하였다. 이와같이 Salem 事故에 대한 NRC 조치사항을(IEB 83-01) 4월까지 완료하였으며, W의 추가 권고사항인

—原子爐 手動停止試驗時 作動하는 Undervoltage Coil과 Shunt Coil이 獨立的으로 原子爐를 停止시키는 與否確認(WNSD TB-83-03, 83, 3, 25)

에 대해서도 Undervoltage Coil과 Shunt Coil 各各에 대한 성능시험을 수행할 수 있도록 점검절차서를 改訂하고, 試驗을 수행한 결과 獨立的인 作動與否는 양호하였다. 또한 W에서는 美國內 發電所에 대한 DS-416遮斷器 作動試驗中 2號機의 發電所에서 誤動作한 事例를 通報해오는 한편 同種의 遮斷器를 使用하고 있는 2號機에 대해서도 기술사양에 대해 다음과같이 確認하여 줄것을 요청해 온바 있다. (83, 3, 31)

—DS-416 遮斷器의 間歇的인 作動不能原因으로 看做되는 검토사항 1) 遮斷器內의 Roller Bracket사이의 間隔確認 2) Undervoltage Trip Reset Lever와 遮斷器 Bar Pin 사이의 最小間隔確認.

이러한 요청에 따라 고리 현장에서는 그 내용을 確認하여 結果를 W에 通報하였으며, W의 應信結果에 따라 部品 교체 作業을 수행할 것을 결정했다. W는 DS-416 遮斷器의 점검결과를 綜合하여 종래의 Undervoltage Trip Attachment의 缺點을 보완하는 새로운 製品을 製作하였고, 原子力 2號機에서는 이 新製品으로 교체작업을 완료했다. 同種의 遮斷器를 使用하고 있는 原子力 5,6號機에 대해서도 이미 이 新製品으로 교체를 하였으며 7,8號機에 대해서는 이 製品으로 設置할 예정이다.

中間조치

W와 WOG(Westinghouse Owners Group)은 Salem 事故 中間 조치사항인 Auto Shunt Trip에 관한 設計를 완료하고 NRC에 提出하여 승인을 받았으며, 原子力 1,2號機에 대해서도 이의 設置를 提議해 온 바있다(84. 4). 알려진바에 의하면(84. 4), 이 장치는 Farley Unit-2에 設置되어 시험이 끝났으며 V.C. Summer Station에도 設置예정인 것으로 되어있다.¹¹⁾ 이 장치는 現在 自動停止信號에 의해 Undervoltage Trip Attachment만 作動하고 Shunt Trip Attachment는 手動停止信號에 의해서만 作動하는 기존 설계를 自動停止信號에 의해서도 모두 作動할수 있도록 변경시킨 장치를 말하며, 그에대한 設計는 그림 3에서 보는 바와 같다.¹²⁾한 국전력공사는 W의 提議에 대하여 검토한 결과 W의 提議비용이 과다산정 되어 있으며 이 장치는 自體 기술진으로도 設備變更이 가능하다고 판단하고, W의 基本 設計方案을 채택하여 部品를 구매추진중에 있으며 次期 O/H時 原子力 1,2號機에 設置예정인 것으로 있고, 原

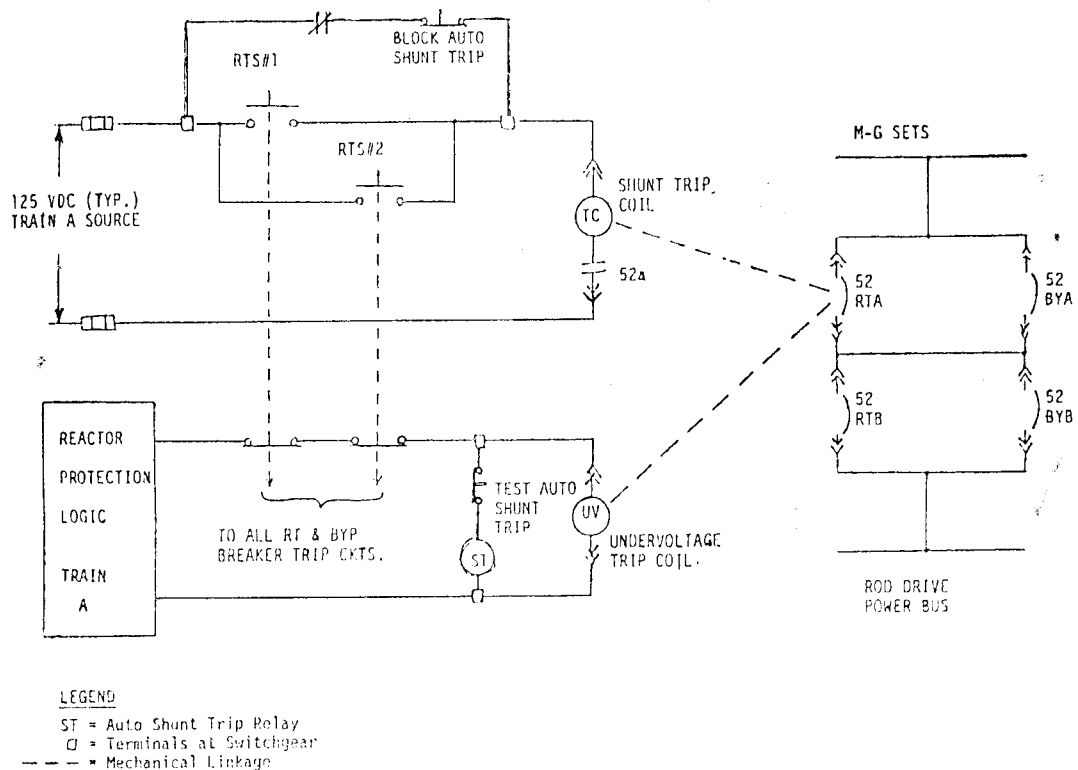


그림 3. Simplified Schematic of Automatic Shunt Trip of Reactor Trip Breakers

子力 5, 6號機에 대해서는 이의 設置를 검토중이다. 특히 이 裝置는 ATWS要件인 AMSAC와 比較하여 그 경제성을 고려해 볼때

$$P_{ATWS}(\text{Withort Auto Shunt}) = 2.2 \times 10^{-4} / \text{year}$$

$$P_{ATWS}(\text{With Auto Shunt}) = 3.7 \times 10^{-5} / \text{year}$$

$$\text{Value} = (2.2 \times 10^{-4} - 3.7 \times 10^{-5}) \times 10^{10} \$ / \text{ATWS} \times 30 \text{ years}$$

$$= \$ 5.5 \text{ Million}$$

* Auto Shunt 設置에 의한 原子爐 停止 系統의 신뢰도향상은 約 6倍 및 ATWS 事故로인한 피해는 \$ 10 Billion으로 가정⁷⁾

으로서 Auto Shunt Trip 設置에 의한 效果는 월등한 것으로 나타나 있다. 더우기 Auto Shunt Trip 設置비용을 추정하여 V/I 비율을 계산해보면 V/I ≈ 690으로서 그 경제성이 매우 높은 것으로 나타나 있다. 이는 Auto Shunt Trip이 AMSAC에 비해서 設置비용이 매우저렴(AMSAC 設置비용의 約 1/30 정도) 할뿐만 아니라 原子爐 停止系統의 신뢰도 향상에도 效果의이 라는데에 기인한다. W의 原子爐 停止系統은 單一事故를 防止하기 위하여 비록 2個의 遮斷器가 並列로 연결되어 있지만 이 遮斷器들이 共通因者失敗에 의한 事故

가능성이 크기 때문에 Auto Shunt Trip은 遮斷器의 共通因者失敗에 대한 多樣性(Undervoltage Trip Attachment는 deenergize 됨으로서 作動하고 Shunt Trip Attachment는 energize됨으로서 作動)을 제공한다는데에도 큰 意味를 갖고있다.

長期조치

原子力發電所의 ATWS에 대한 要件으로 法規化(10 CFR 50.62)된 사항, 즉 W 發電所에서의 AMSAC(ATWS 事故時 既存의 系統과는 獨立의으로 보조급 수계통과 터빈停止를 作動시킬 수 있는 系統) 設置에 대해서는 現在 WOG에서 이 要件을 充足시킬 수 있는 系統의 設計를 개발하고 있으나 아직까지 그 內容은 發表되지 않고 있다. 더욱 이 要件에대한 施行은 NRC의 QA Guidance 發表後 180日 以內에 各電力會社가 NRC에 그 施行計劃을 提出하게 되어있으나, 85年 2月 頃 發表예정으로 있던 QA Guidance가 아직 發表되지 않고 있다.¹³⁾

AMSAC의 設置는 비록 10 CFR 50.62로 規定되어 있으나 設置비용이 과중하며(\$ 2.8 Million), 그 경제성分析 과정에서도 ATWS 事故時의 損失에 대한 推定(\$ 10 Billion) 등에 대해 의문점이 있고, 따라서 V/I

효과 3.3에 대해서도 確實性이 의심시 되고있다. AMSAC의 設置문제는 WOG의 設計가 끝나는대로 資料를 入手하여 검토할 예정이며, 國外 發電所에 이 設備 設置의 趨勢를 보아가면서 國內 發電所의 狀況을 고려하여 追後결정할 예정이다.

W 發電所의 DSS 設置에 관한 要件은 84年 12月 NRC 투표결과 否決되었으므로 韓電에서도 더이상 검토를 고려치 않고 있다.

4. 結 論

지금까지 Salem發電所의 ATWS事故 및 NRC의 조치內容, ATWS 事故에 대한 原子爐製作會社의 分析 및 立場, Salem 事故後 國內 조치사항 및 現 狀況에 대하여 살펴 보았다. 國內에서는 Salem의 ATWS事故以後 原子力 1,2號機에 대하여 NRC 권고에따라 필요한 제반 조치사항을 施行하는 한편, DS-416 遮斷器에 대해서는 종래의 缺點을 보완한 W 新製品으로 교체완료(2, 5, 6號機), 혹은 設置예정(7, 8號機)으로 있다.

NRC의 중간 조치사항으로 示達된 Auto Shunt Trip에 관해서는 共通因者失敗의 가능성이 큰 現 設計에 대해 Auto Shunt Trip은 이 共通因者失敗 防止에 效果的이고 경제성면에서도 타당하다고 판단되었다. 韓電은 W 設計를 基本으로하여 現在 部品을 구매 추진중에있고 次期 O/H時 原子力 1,2號機에 設置예정이며, 5, 6號機에 대해서도 이의 設置를 검토중이다.

ATWS 要件으로 法規化된 AMSAC의 設置는 WOG의 設計가 끝나는대로 資料를 入手하여 검토할 예정이며, AMSAC 設置에 대한 國外 發電所의 趨勢와 NRC의 경제성分析 內容 및 國內 發電所의 여건을 감안하여 관련 기관과 協議後 追後에 決定할 豫定이다.

參 考 文 獻

2. "Failure of Reactor Trip Breakers (W DB-50) to

Open on Automatic Trip Signal", IEB 83-0, USNRC, Feb. (1983)

3. "Failure of the Undervoltage Trip Function of Reactor Trip Breakers," IEB 83-04, USNRC, Mar. (1983)
4. "IE Information Notice No. 83-18; Failure of the Undervoltage Trip Function of Reactor Trip Breakers," IEB 83-18, USNRC, Apr. (1983)
5. "Required Actions Based on Generic Implications of Salem ATWS Events," Generic Letter 83-28, USNRC, July (1983)
6. "Generic Implications of ATWS Events at the Salem Nuclear Power Plant," NUREG-1000 Vol. 1 USNRC, Apr. (1983)
7. "Rulemaking Issue", SECY-83-293, USNRC, July (1983)
8. "Recent Nuclear Regulatory Commission Activities," Doub and Muntzing chartered Monthly Report to Dec. (1984)
9. "Nuclear plant No. 1 Standard Technical Specification" KEPCO, Apr. (1984)
10. "Reactor Trip Breaker Maintenance", NSD Data Letter 74-2, Westinghouse, Feb. (1974)
11. "KEPCD KoRi Units 1 and 2 Automatic Shunt Trip Modification," W Letter to KEPCO, Apr. (1984)
12. "Preliminary Design Document for Automatic Reactor Trip Breaker Shunt Coil Actuation," WOG-83-186, May (1983)
13. "Issuance for Comment of QA Guidance Related to ATWS Equipment That is Not Safety-Related" NRC Generic Letter 84-01527, USNRC, Oct (1984)