

IV. 設計엔지니어링에 미치는 影響

申 載 仁

韓國電力技術(株)

1. 序 論

원자력발전소는 운전중에 주요변수들을 항상 監視하여 비정상적인 狀態가 발생하면 원자로트립계통에 의하여 원자로를 停止시키도록 設計되어 있다. 그러나 원자로 트립이 要求되는 비정상적인 발전소상태에서도 원자로가 트립되지 않는 事故 즉, ATWS가 발생할 수 있으며 이때 다량의 핵연료파손과 그로 인한 고방사성 물질의 과대한 외부누출이 가능하다. 따라서 ATWS를 예방하거나 사고발생시 결과의 심각성을 완화하는 것은 원자력발전소 안전성 확보에 있어서 매우중요하다.

본 문에서는 ATWS에 대한 최종규제 요건과 NUREG-1000의 措置事項으로 추가 또는 설계변경되는 부분을 NSSS제작회사 별로 살펴보고 그것이 설계엔지니어링에 미치는 영향에 대하여 論하고자 한다.

2. ATWS 要件移行을 爲한 設計變更

ATWS규정과 Salem unit, 1에서 발생했던 ATWS 사고 후 提示된 措置事項(NUREG-1000)에 의하여 설계변경되는 부분을 각 NSSS 공급자 별로 區分하여 살펴보면 다음과 같다.

가. Westinghouse의 設計變更과 FRAMATOME의 設計

Westinghouse가 설계한 PWR에 適用되는 ATWS규정은 AFWS 발생시 그 후속영향(consequences)을 減少시키기 위하여 보조급수계통의 自動動作 및 터빈트립장치의 추가설치에 대한 사항이다. 이때 설치되어야 하는 裝置는 感知器 信號에서 최종 구동장치까지 기존의 원자로트립계통과 獨立의이며 多樣할 것이 要求되고 있다.

현재 Westinghouse발전소의 설계를 살펴보면 AFWS (Auxiliary Feedwater System) 작동에는 증기발전기 급수펌프 정지, 증기발전기 저-저 준위, 안전주입,

4.16KV 모선의 저 전압 및 手動信號가 사용되며 터빈 정지에는 원자로트립, 증기발전기 고수위, 터빈 과속도, 복수기 저진공, 발전기정지, 수동 및 기타 기계적 고장신호가 利用되고 있다. 따라서 ATWS발생을 지시하는 신호의 選定과 이를 AFWS작동과 터빈트립로직(logic)에 連結시키는 문제가 Westinghouse PWR에 적용되는 사항이다.

Salem unit 1의 ATWS사고와 關聯된 조치사항으로서 Westinghouse PWR에 대한 설계변경이 요구되는 것은 원자로트립계통의 신뢰도를 向上시키기 위한 트립계통의 설계변경이다. Westinghouse의 원자로트립계통은 그림 1에 나타난 바와 같이 자동트립신호는 Undervoltage Trip Attachment만을 作動시키도록 되어있으며 수동트립신호는 Undervoltage Trip Attachment와 Shunt Trip Attachment를 동시에 作動시키도록 되어있다. Salem 사고에 의한 조치사항은 자동트립신호에 의하여 2種의 attachment가 모두 作動되도록 요구하고 있다.

Westinghouse의 PWR에 適用되는 AFWS작동 및 터빈트립장치와 類似한 ATWS완화책이 프랑스 1300MW급 발전소 설계에 考慮되어 있다. FRAMATOME 1300MW에 적용된 ATWS완화책 設計內容은 EDF-CEA 공동연구팀에 의하여 2차계통의 주증기상실에 의한 터빈트립, AFWS작동 및 원자로트립신호에 대한 다양성 부여가능성이 研究되었으며, 이 結果 원자로트립계통의 감지기와는 다른 기존 感知器 신호를 이용하는 diverse system을 모색하기로 하였다. 이 공동연구에 의하여 "ATWS diversification system of SPIN"이 完成되었다.

그림 2에 의하면 爐心出力을 나타내는 Tavg(15% 이상 출력운전시)와 주급수계통의 유량을 利用하여 ATWS발생을 지시하도록 되어있다 이들 2개의 신호를 AFWS 作動 Logic train B에 연결함으로써 ATWS발생시 AFWS작동 및 터빈트립을 誘發하도록 설계되어 있다. 이와 같은 해결방법은 원자로보호계통에서 發生되는 증기유량불량에 의한 터빈트립과 AFWS작동 및

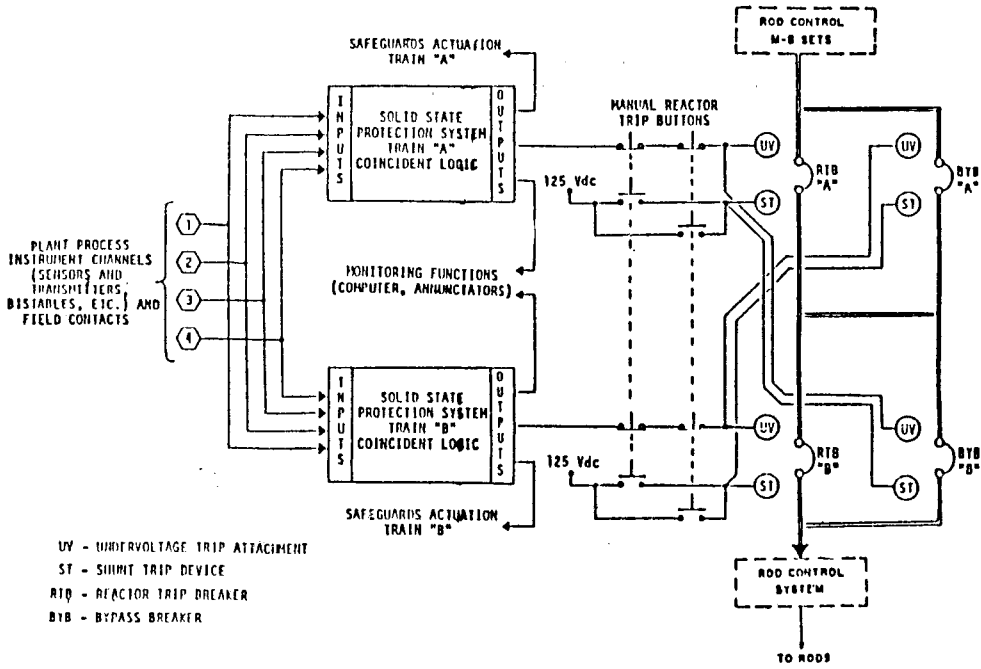


그림 1. Westinghouse 원자로트립계통

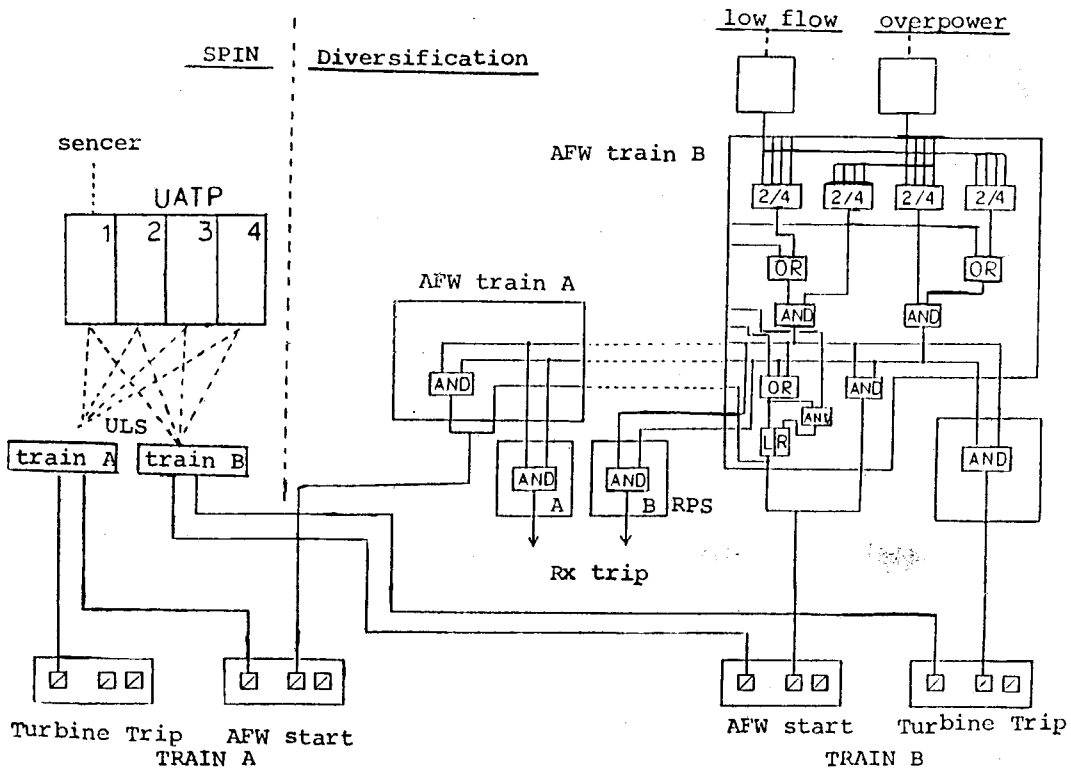


그림 2. ATWS Diversification System of Spin

表 1. LOFW에 의한 1차계통 최대압력(PWR)

NSS 제작자 노 형	W			CE			B&W	
	2-loop	3-loop	4-loop	2560 MWt	3410 MWt	3800 MWt	177 FA	205 FA
노심출력 (MWt)	1,650	2,785	3,423	2,710	3,410	3,817	2,772	3,800
보호밸브방출능력 (lbm/hr/MWt)	648	522	491	330	330	529	249	329
S/G 2차측 水量 (lbm/MWt)	123	114	119	95	96	86	33	23
최대압력 (psia)	2,753	2,784	2,848	4,220*	4,290*	3,800*	3,464	3,762

* 원자로용기 플랜지를 통한 누설을 고려한 수치임.

원자로트립신호와는 完全한 獨立性 및 다양성을 보장하고 있다. 또한 本 channel은 기존 원자로보호계통의 4개 channel에 덧붙여 다섯번째의 channel기능을 遂行하므로 이 系統을 AFWS train A에 연결시킬, 즉 다중(redundent)으로 설치할 必要가 없다.

나. CE 및 B&W의 設計變更

CE와 B&W가 製作한 PWR에는 ATWS발생에 의한 작동 및 터빈정지계통의 추가 설치 이외에 기존 원자로트립계통과 다양하며 獨立的인 보조원자로트립계통의 추가설치가 요구되고 있다. 이들 NSSS 제작회사의 PWR에 適用되는 AFWS작동 및 터빈트립계통의 추가설치는 Westinghouse의 경우와 별다른 差異가 없으며 보조원자로트립계통의 추가설치에 대한 內容을 說明하면 다음과 같다.

CE와 B&W의 PWR에 보조원자로트립계통의 추가설치가 요구되는 理由는 Westinghouse의 원자로트립계통에 比하여 이들 제작회사의 원자로트립계통의 신뢰도가 낮기 때문이 아니라 ATWS발생시 CE와 B&W에서 제작한 PWR 1차계통의 압력상승폭이 Westing-

house 원자로계통에 比하여 크고, 따라서 핵연료파손 및 방사능누출 可能性이 높기 때문이다.

표에 나타난 바와 같이 壓力이 크게 상승하는 理由는 가압기보호밸브의 방출능력과 증기발생기 2차측 水量이 적어 ATWS 발생시 계통내의 압력상승을 억제하는 능력이 不足하기 때문이다.

이러한 원자로트립계통의 추가설치에 대하여 CE는 Supplement Protection System (SPS), B&W는 Backup Scram System (BUSS)의 추가설치를 考慮하고 있으며, B&W사의 BUSS입력신호에는 가압기의 압력 및 수위신호가 사용될 것으로 되어있다.

Salem의 ATWS事故에 의하여 기존 원자로트립계통 변경에 대한 조치사항은 B&W의 PWR에만 적용되며, CE의 원자로트립계통은 이 조치사항을 이미 滿足하도록 설계되어있다.

다. GE의 BWR 설계변경

BWR 에 要求되고 있는 Alternate Rod Injection (ARI)계통 설치요건은 원자로트립계통의 신뢰성을 向上시키므로써 ATWS발생을 예방하고, 냉각재순환

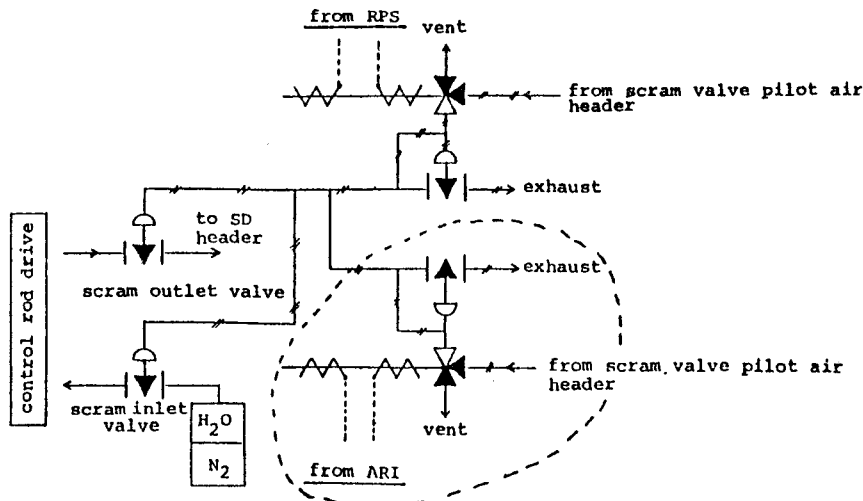


그림 3. BWR Scram Air Header Exhaust Valve 추가설치

프정지(RPT) 및 SLCS(Standby Liquid Control System)의 설계변경은 ATWS발생시 그에 의한 영향을 완화시키는 것을 목적으로 하고 있다.

ARI의 設置要件은 CE와 B&W의 PWR에 적용되는 보조원자로트립제통의 설치요건과 그 목적상 類似한 것으로 간주할 수 있다. ARI계통에는 다중의 Scram air header exhaust valve가 포함되어야 할 것이 요구되고 있으므로 그림 3에 나타난 바와 같은 valve의 추가 설치가 必要하다(점선내부). ARI의 입력신호에는 일차계통 고압력과 냉각제 저준위 신호가 使用될 것으로 예상되며 이를 이용하여 새로 추가되는 Scram air header exhaust valve를 개방하여 원자로트립을 誘導할 것으로 되어 있다. ARI계통은 기존의 원자로트립제통과 다량할 것이 요구되고 있으므로 이를 위하여 "energized-to-trip"回路가 使用될 것이다. 참고로 기존 원자로트립제통에는 "deenergized-to-trip"회로가 使用되고 있다. 또한 부품의 다양성을 보장하기 爲하여 제작자가 다른 논리매트릭스릴레이등의 使用이 必要하다.

SLCS에 대한 ATWS요건은 현재의 13W/O 소듐벤탈레이트 水溶液을 43GPM으로 주입할 수 있는 계통 용량을 86 GPM에 상당하는 주입용량을 갖도록 설계 변경하도록 요구하고 있으며 또한 계통의 운전이 ATWS 발생시 自動으로 이루어 지도록 요구하고 있다. 이러한 계통의 주입용량변경은 2가지방법으로 이루어 질 수 있다. 첫째는 계통의 配管을 변경하여 주입유량을 증가시키는 방법과 주입되는 붕소농도를 증가시키는 방법이다. 따라서 두가지 방법중 어떠한 방법을 적

表 2. 붕소제거에 필요한 시간 및 경비(BWR)

소 요 시 간	비 용(백만불)
54 時 間	0.2~0.3
2 週	1.5~1.8
2 月	6.5~7.8

용할 것을 決定하기 위한 타당성 검토가 必要할 것으로 判斷된다. 이러한 요구사항에 대하여 G.E사는 현재 並列로 연결되어 있는 2대의 펌프를 同時에 작동시도록 설계변경을 하고 있으며, SLCS의 자동동작에 對한 요구조건을 만족시키기 위하여 제어봉이 완전히 삽입되지 않고, 중성자속 測定에 의한 노심출력이 0이 아님을 지시하는 信號에 의하여 동작되도록 설계하고 있다. SLCS의 오동작에 의하여 붕소가 계통내에 주입되었을 경우 이를 제거하는데 소요되는 시간은 발전소의 폐기물 저장탱크 및 증발기 容量에 따라 다르지만 GE사는 3일 내지 2달이 所要될 것으로 예상하고 있으며 이에 소요되는 경비를 USNRC는 표 2와 같이 推定하고 있다.

SLCS의 오동작에 의하여 1차계통에 붕소가 주입될 경우 上記와 같은 많은 시간과 경비가 소요되므로, 이와같은 계통의 오동작을 最少로 줄이기 위하여 SLCS 자동동작계통이 充分한 신뢰성을 갖도록 설계하여야 할 것이다.

냉각재순환펌프의 자동정지에 對한 ATWS 요건은, ATWS발생시 냉각재순환펌프를 정지시킴으로써 원자로의 出力을 감소시켜 1차계통의 압력상승을 억제하며 그로인한 핵연료손상을 防止하는데 목적이 있다. 이러한 냉각재순환펌프의 자동정지에 대한 要件은 이미 NRC의 명령에 의하여 미국내 BWR에는 적용되고 있다. 냉각재순환펌프정지제통의 ATWS발생신호로써 원자로 용기내의 高壓力 및 냉각제 저준위 신호가 使用되고 있으며 2개의 압력신호와 2개의 냉각제 저준위 신호를 받아 1/4논리에 의하여 펌프의 전력공급 차단기를 開放하도록 되어 있다.

3. ATWS 要件適用에 對한 經濟性 및 安全性 分析

ATWS요건적용시 설계엔지니어링 단계에서 檢討되어야 할 부분 중에서 가장 중요한 것이 설비추가 또는 變更에 대한 경제성·안전성분석이다. 이러한 분석을 수행하기 위하여는 所要되는 비용과 그로인한 이득을 算出하여야 한다.

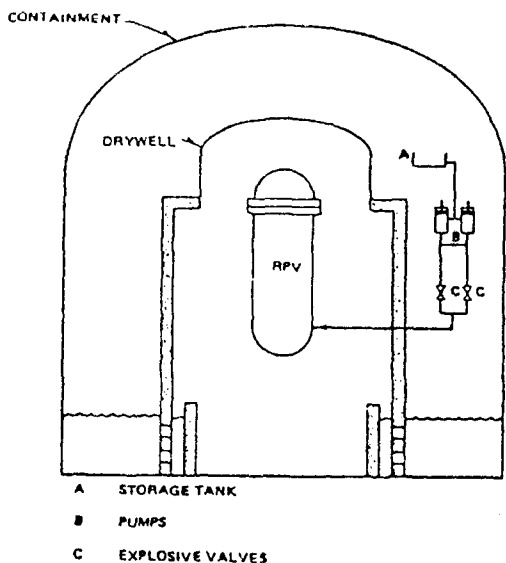


그림 4. BWR Standby Liquid Control System

表 3. ATWS 요건에 대한 Value-Impact Analysis

	ATWS 발생률		V/I			
	W	CE/B&W	W		CE/B&W	
			cost	V/I	cost	V/I
現設計상태	2.8×10^{-5}	7.5×10^{-5}	—	—	—	—
ATW 요건 적용시	3.0×10^{-6}	2.1×10^{-5}	\$ 2.8M	2.7	\$ 5.5M	2.9
트립계통 추설가치 (W)	1.0×10^{-6}	—	\$ 3.0M	0.2	—	—
밸브 또는 BP樑추가 (CE/B&W)	—	4.0×10^{-6}	—	—	\$ 10.0M	0.5

비용은 직접경비와 간접경비로 구분할 수 있으며 직접경비는 부품비와 설치비용으로 構成되어 있다. 일반적으로 발전소상태에 따라 다르지만 간접경비는 직접경비와 비슷할 것으로 評價되고 있다. ATWS방지 또는 완화시설의 추가설치로 인한 利得에는 안전성향상, 가동율증가 및 기타 효과등이 있으며 이를 세분화하면 피폭선량 감소, 所内外 재산피해 감소, ATWS에 의하여 손상된 발전소 폐쇄비용 감소, ATWS발생으로 인한 다른 발전소의 운전정지 및 에너지 대체비용 감소등이 있다.

ATWS요건을 滿足하기 爲하여 소요되는 비용은 Westinghouse PWR의 경우 \$ 2.8M, CE와 B&W PWR의 경우 \$ 5.5M이 필요할 것으로 推定되고 있으며 이로 인한 V/I(Value-Impact) 비율은 各各 2.7과 2.9로 평가되고 있으며 이를 整理하면 표3과 같다.

최종 ATWS요건에서 要求되는 사항은 아니지만 Westinghouse PWR에 대한 원자로트립계통 추가설치나 CE와 B&W PWR에 대한 안전 및 보호밸브 또는 BP (Burnable Poison) 봉의 수량증가는 표에서 보는 바와 같이 ATWS에 의한 위험발생율을 3~5배 이하로 감소시키지만 경제성 側面에서 볼때 V/I 비율이 0.2와 0.5로써 설치의 타당성이 충분하지 못한 것으로 評價되고 있다. 반면에 ATWS요건 즉 AMSAC(ATWS Mitigating System Actuation Circuitry) 설치(W, CE, B&W)와 BUSS(B&W) 및 SPS(CE)의 추가설치는 경제성 및 안전성 면에서 充分한 타당성이 있는 것으로 평가되고 있다.

4. 設計엔지니어링의 檢討事項

ATWS예방 또는 완화설비를 추가설치하기 위하여 설계엔지니어링에서 고려하여야할 몇가지 事項에 대하여 살펴보고자 한다.

ATWS요건에 의하여 설치요구되는 계통들은 대부분이 ATWS발생에 의하여 作動 되도록 되어있으므로 ATWS발생을 지시할수 있는 신호를 選定하는 것이 때

우 重要한 문제가 된다. 이러한 ATWS발생신호는 제어봉위치, 중성자속, 가압기압력과 수위, 보호 및 안전밸브 상태, 터빈정지밸브와 주증기관 격리밸브 상태 및 급수와 증기유량등을 적절히 조합함으로써 얻을수 있을 것으로 判斷된다.

추가되는 설비중 기존 원자로트립계통과 독립적이며 다양할 것이 要求되는 계통이 많으므로 독립성과 다양성을 부여할 수 있는 방법도 설계엔지니어링 段階에서 고려하여야 할 사항이다. 다양성을 부여 할 수 있는 方法에는 다른 제조회사에서 제작된 부품사용, 전자식 장치에 대한 전자기계식 장치의 使用, 'deenergized'에 대한 'energized'방식의 使用, 직류전원에 대한 교류전원 사용, 측정원리가 다른 감지기의 사용등이 있으며, 이러한 방법을 적절히 사용하여 계통의 다양성을 부여 하여야 한다.

ATWS사고 완화를 위하여 추가설치 또는 변경되는 설비는 원자로트립계통이외의 일반제어계통과의 獨立性이 요구되지 않고 있으므로 AFWS작동 및 터빈트립계통의 설계에는 불란서 1300 MWe PWR의 경우와 같이 기존 발전소내의 제어계통, 기기 및 부품을 利用할 수 있다. 이때에 이용되는 제어계통부품 및 기기들도 ATWS요건, 卽 기존 원자로트립계통과의 독립성을 滿足하여야 할 것으로 판단된다. 그러므로 ATWS완화 계통에 이용되는 기존의 제어계통이 원자로트립계통과의 독립성과 다양성을 유지하고 있는지 여부도 설계단계에서 考慮되어야 할 부분이며 共有되는 部分을 포함하는 제어계통의 고장으로 인하여 ATWS방지 및 경감장치가 機能을 상실하지 않음을 증명하기 위한 해석도 설계엔지니어링 단계에서 遂行되어야 할 것으로 판단된다.

ATWS예방 및 완화설비를 추가설치함으로써 전반적인 발전소 운전상에 미치는 불필요한 영향을 最少로 감소시키기 위한 충분한 해석이 必要할 것으로 判斷된다. 불란서 1300 MWe발전소 설계에는 앞에서 언급된 바와 같은 ATWS완화책이 설계에 考慮되어 있다. 최근 운전을 시작한 1300 MWe급 발전소인 Paluel의 운

전 경험에 의하면 爐心出力 측정을 위하여 노심입구관에 設置되어 있는 온도 감지기가 실제 온도상승보다 온도상승을 크게 測定하여 노심출력을 과대하게 평가함으로써 필요 以上の 원자로 트립을 誘發시켰다. 이러한 이유는 노심입구관의 온도감지기가 적절한 곳에 설치되어 있지 않기 때문이라고 판단되며 이와같은 現象에 의하여 발생된 불필요한 원자로트립 횟수는 동 발전소 기동시험기간 중에 발생한 총 트립횟수의 3분의 1을 차지하고 있다.

上記와 같은 형상을 설계단계에서 豫想하기는 매우 어려운 것이지만 그러한 현상을 최소로 줄이기 위한 研究가 설계엔지니어링에 反映되어야 할 것이다.

5. 結 論

ATWS에 대한 최종규제요건의 확정으로 추가되거나 변경되는 계통과 이것이 엔지니어링에 미치는 영향을 簡略히 살펴보았다.

현재 국내에서 建設 또는 운전중인 원자력발전소중 KNU 1&2, KNU 5&6, KNU 7&8은 Westinghouse가 설계한 PWR을 사용하며 KNU 9&10은FRAMATOME이 설계製作한 PWR을 사용한다. 이들 모든 國內의 원자력발전소 設計에는 ATWS에 대한 要件 또는 Salem의 ATWS사고에 대한 조치사항 發表 以前の 규제요건으로 적용되므로 ATWS방지를 爲한 원자로트립계통의 설계변경 事項이나 ATWS완화를 위한 AFWS자동작동 및 自動 터빈트립장치가 설계에 考慮되어 있지 않다. 따라서 AFWS사고의 심각성에 비추어 볼 때 ATWS예방 또는 완화를 위한 관련 규제조항의 新設 또는 변경이 必要하며 그에 따라 설계를 변경함으로써 國內 원자력발전소의 安全性을 向上시키는 것이 바람직할 것으로 判斷된다.

또한 계통의 定期檢査 및 시험등을 철저히 수행함으로써 系統이나 부품의 기능상실을 豫防하고 비상운전 절차서에 ATWS에 관련된 事項을 추가 또는 강화함은

물론 運轉員에 대한 敎育을 통하여 발전소의 安全性을 최대한으로 유지하는 것이 物理的인 보완대책에 先行되어야 할 것으로 判斷된다.

참 고 문 헌

1. WASH-1270, "Technical Report on Anticipated Transients Without Scram for Water-Cooled Power Reactors" U.S. Atomic Energy Commission, September 1973.
2. NUREG-0460, "Anticipated Transients Without Scram for Light-Water Reactors" Vol. 1-2, NRC, April 1978
3. NUREG-0460, "Anticipated Transients Without Scram for Light-Water Reactors" Vol. 3, NRC, December 1978
4. NUREG-0460, "Anticipated Transients Without Scram for Light-Water Reactors" Vol. 4, NRC, March 1980
5. WCAP-8330, "Westinghouse Anticipated Transients Without Trip Analysis", Westinghouse Elec. CO., August 1974
6. 10 CFR Part 50.62 "Requirements for Reduction of Risk from ATWS events for Light-Water Cooled Nuclear Power Plants", NRC, June 1984
7. IAEA, "Nuclear Power Training Course in Advanced Safety Analysis Review" Vol. 1 1984
8. "Generic Issues Summary", NUS Corporation, April 1983
9. GESSAR II
10. NUREG-0979 "Safety Evaluation Report related to the final design approval of the GESSAR II BWR/6 Nuclear Island Design", NRC, April 1983
11. E.W. Hagen, *Nuclear Safety*, 21, 731 (1980)
12. *Nuclear Safety*, 24, 540 (1983)