

최적평가방법의 도입과 경제성 고찰

이원재, 이상용, 김시환
한국원자력연구소

I. 서 론

미국의 비상노심냉각계통의 규제지침은 1973년 12월 공표되었으며, 1974년 1월부터 10CFR50.46 (Code of Federal Regulation, Title 10, Section 50.46)의 비상노심냉각계통 허용기준, 10CFR50 Appendix K의 비상노심냉각계통 평가방법과 함께 공식적으로 유효하게 되었다. 당시의 설계기준 및 평가방법은 냉각재상실사고의 현상학적, 해석적인 기술적 배경의 제한으로 보수적, 결정론적 방법에 의거하여 설정되었다. 당시, 미국 원자력규제위원회(NRC: Nuclear Regulatory Commission)의 전신이었던 AEC(Atomic Energy Commission)는 냉각재상실사고관련 해석 및 평가의 불확실성이 밝혀질 경우, 비상노심냉각계통 평가방법의 개정을 시사한 바 있다[1].

이후 15년간에 걸친 비상노심냉각계통의 성능평가와 관련한 많은 연구를 통하여 냉각재상실사고의 현상 및 비상노심냉각계통의 거동에 대한 이해가 향상되었으며, 냉각재상실사고 해석에 따른 불확실성의 많은 부분이 정량화되었다[1]. 특히, 기존의 Appen-

dix K 평가방법은 실제의 발전소 거동과는 현저한 보수성을 보유하고 있음이 입증되었다[2, 3]

이에 따라, 미국 원자력규제위원회는 기존 Appendix K 평가방법의 보수성을 인정하고 1983년 SECY-83-472[4]을 통하여 최적계산방법과 기존 Appendix K 평가방법을 결합한 비상노심냉각계통의 평가를 승인 한 바 있다. 그 후, 1988년 9월에는 10CFR 50.46과 Appendix K의 비상노심냉각 계통 규제지침 및 평가방법과 관련한 규정을 개정하여, 기존의 보수적, 결정론적인 평가방법과 함께 최적계산방법 및 불확실성의 정량화에 따른 비상노심냉각계통의 최적평가방법을 승인하였다[5].

비상노심냉각계통 규정의 개정 및 최적평가방법의 도입에 의하여 기대되는 효과는 실제적인 발전소 안전여유도의 평가를 통한 기존 평가방법의 과보수성을 제거함으로써, 발전소 운전 및 설계상의 경제성 향상효과와 실질적인 안전성향상 효과를 들 수 있다. 경제성향상 효과로는 핵연료 및 노심설계 개선, 그리고 핵주기관리(Fuel Cycle Management) 전략 개선, 운전여유도(Operational Flexibility) 증진 등을 통한 발전소의 가동율/이용율 향상과 발전소의 출력증가(Power Uprating), 수명연장(Life Extension) 등을 들 수 있다. 실질적인 안전성 향상 효과로는 기존 평가방법의 보수성으로부터 기인한 가압열충격(Pressurized Thermal Shock)등 안전성 저해요인의 제거와 냉각재상실사고의 실제적인 거동에 근거한 운전원 능력 배양, 비상운전절차(EOP: Emergency Operating Procedure)의 개발등 가동안전성 확보를 들 수 있다. 또한, 보고 및 재분석 관련 규정의 완화를 통하여 안전성을 크게 저해하지 않는 변경사항에 대한 불필요한 작업이 감소될 수 있다.

본 고찰에서는 최적평가방법의 도입과 이에 따른 경수형원자로의 경제성향상 효과, 실질적인 안전성 증진 효과를 중점적으로 다루어 본다. 또한, 경제성 향상 효과에 따른 실질적인 경제적 이득을 조사, 분석하였다.

II. 최적평가방법의 도입

최적평가방법에 의한 비상노심냉각계통의 평가는 미국내에서는 이미 개발되어 적용되고 있거나, 개발 중에 있다. SECY-83-472에 의거 Westinghouse사

는 UPI(Upper Plenum Injection) 발전소에 대하여 WCOBRA-TRAC [6]을, GE(General Electric)사는 대형냉각재상실사고에 대하여 SAFER-GESTR [7] 평가방법을 개발하여 이미 적용하고 있으며, SIEMENS-ANF(Advanced Nuclear Fuel)사, Yankee Utility, Northeast Utility는 RELAP5 시리즈 코드를 사용한 최적평가방법을 개발 혹은 원자력 규제위원회의 승인 신청중에 있다[10]. 또한, 유럽에서는 유럽공동체(EC: European Community)를 중심으로 최적평가방법을 현재 개발중에 있으며 [8], 독일의 SIEMENS-KWU(Kraftwerk Union)사는 미국의 방법론과는 다르나 최적계산방법에 근거한 비상노심냉각제통 평가방법을 개발 중에 있다[9].

국내에서는 최적평가방법의 도입을 위하여 원자력 안전기술원을 중심으로하여, 서울대학교, 한국과학기술원, 한국원자력연구소, 국외 전문가 등 국내·외학계 및 연구기관의 전문인력을 동원하여 지난 3년간 비상노심냉각제통의 규제지침 설정 및 최적평가방법개발 연구가 수행되었다[10]. 이를 토대로, 최적평가방법에 의한 비상노심냉각제통의 국내 규제지침이 설정 단계에 있으며, 최적평가방법에 의한 국내원전의 비상노심냉각제통 평가가 한국원자력연구소에서 추진중에 있다.

III. 최적평가방법의 도입에 따른 경제성 향상 효과

대부분 가압경수로의 설계 및 운전은 핵비등이탈율(DNB: Departure from Nucleate Boiling) 및 냉각재상실사고와 관련한 출력첨두계수(Fq: Power Peaking Factor) 또는 국부최대출력(Local Heat Generation Rate)에 의하여 제한 된다. 최근의 핵비등이탈율 성능평가방법의 개선(Westinghouse사의 ITDP(Improved Thermal Design Procedure)[11], KAERI/KWU의 STDP(Statistical Thermal Design Procedure)[12])에 따라, 냉각재상실 사고가 원자로의 출력제한사고로 분류되었으며, 이러한 안전성 측면에서 제기되는 원자로의 출력제한은 발전소의 경제성 및 원자로의 안전운전에 주요한 제한요소가 된다.

냉각재상실사고의 안전여유도는 발전소 유형, 핵연료/핵연료봉의 설계제원 등 핵연료 및 노심의 설

계특성과 비상노심냉각제통의 성능, 그리고 비상노심냉각제통 평가방법에 의하여 영향을 받는다. 이는 Westinghouse사 유형의 발전소의 경우 출력첨두계수로서 Combustion Engineering사 원자로의 경우에는 국부최대출력으로서 기술지침서(Technical Specification)에 제한되어 있다. 이러한 노심의 출력첨두계수 및 국부최대출력은 출력분포의 측정 및 주기적인 감시(Surveillance)를 통하여 확인되며, 이들은 노심의 장전모형, 연소도, 부하추종운전 여부, 가연성독물봉의 분포등에 의하여 영향을 받는다.

비상노심냉각제통의 평가에 최적평가방법의 도입은 실제적인 발전소 안전여유도의 평가를 통하여 기존의 평가방법에 의한 보수성을 제거함으로써, 출력첨두계수 또는 국부 최대출력으로 제한되는 냉각재상실사고의 안전여유도를 크게 증가시킨다. 그림 1에는 기존 Appendix K에 제시된 주요 평가모델의 보수성이 최적모델을 사용한 결과와 비교, 제시되어 있다[2]. 그림에서 보듯이, 붕괴열모델, 피복재-냉각재반응모델, 비상노심냉각수 우회 모델등의 보수성은 냉각재상실사고의 주요안전변수인 최대핵연료 피복재온도에 각각 222°F, 141°F, 96°F의 과보수성을 부여함을 알 수 있다. 그림 2에는 최적계산방법에 의한 결과가 기존 Appendix K 평가모델에 의한 결과와 비교, 제시되어 있다[3]. 그림에서 보듯이, 계산방법의 최적화 및 계통거동의 최적화는 최대피복

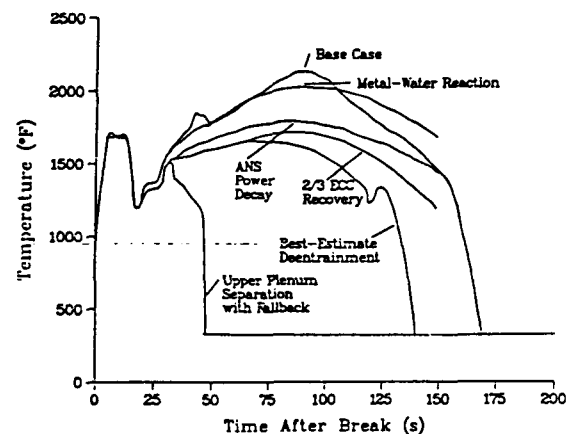


그림 1. Appendix K 주요 평가모델의 보수성에 대한 민감도분석

동을 크게 변화시킴을 알수 있으며, 이를 통하여 기존 평가방법의 보수성을 확인할 수 있다. 이러한 보수성에 근거한 발전소의 설계 및 운전은 발전소의 건설단가 및 운전단가를 상승시켜 원자력 발전소의 경제성을 저해하는 요인이 되었다.

기존 평가방법의 보수성 제거에 따른 냉각재상실 사고의 안전여유도 증가는 핵연료 및 노심설계 개선

등 설계의 최적화에 따른 경제성 향상 효과, 장주기 운전, 장전모형 최적화, 연소도증가, 가연성 독물봉의 감소 등 핵주기관리기술의 개선에 따른 경제성 향상효과, 그리고 부하추종운전, 증기발생기판 폐쇄율 증가, 기술지침서 완화 등 운전여유도 증진에 따른 경제성 향상 효과를 준다. 또한, 이는 발전소 출력증가의 요소를 제공하며, 장전모형의 최적화에 따른 원자로 압력용기 중성자 조사량의 감소는 원자로의 수명연장 효과를 줄 수 있다.

상기 경제성향상 효과에 따른 가압경수로의 경제적인 이득은 미국 Westinghouse사에서 조사, 분석된 바 있으며, 이는 표 1에 제시된 바와 같다[2, 10]. 이는 Westinghouse사가 미국 원자력규제위원회의 요청에 의하여 냉각재상실사고가 출력제한사고가 아닐 경우, 원자력 발전소가 가질수 있는 제반 경제성 향상 효과를 미국의 발전단가에 대비 정량화 한 것이다. 경제성향상 효과는 운전여유도 증진, 핵주기관리기술 향상, 출력증가등 크게 3분야로 분류되었으며, 분야별 주요항목중 핵주기관리기술 향상 분야에 대하여는 경제적 이득 효과가 정량화되어 제시되어 있다. 표에 제시된 바와 같이, 장주기운전의 도

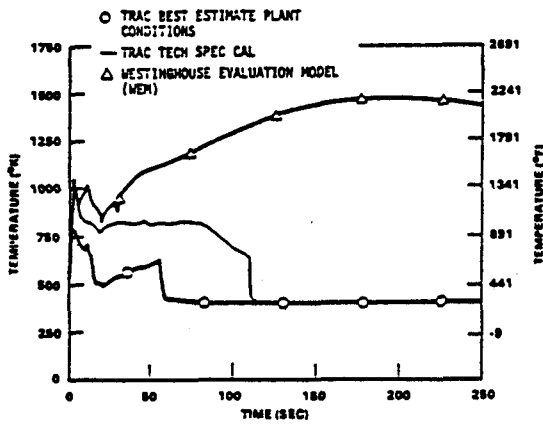


그림 2. 최적계산과 보수적계산결과의 비교

표 1. 비상노심냉각계통 규정 개정을 통한 경제성향상 기대효과

항 목	기 대 효 과
Increased Operational Flexibility	-Reduced peaking factor (Fq) Surveillance -More rapid return to power -Improved load follow operation -Wider cycle burnup window -Improved S/G tube plugging capability -Justification of selected equipment outages which now could cause shutdown and loss of availability
Improved Fuel Cycle Management	-Increased discharge burnup (\$0.5M)+ -Utilization of low leakage fuel load patterns (\$1.0M)+ (also mitigate PTS issue by reducing fuel fluence) -Longer fuel cycles (12 to 18 months) (\$5.0M)++ -New fuel design (W optimized fuel) (\$2.0M)+ -Utilization of axial blankets (\$0.65M)+ -Reduced number of burnable poison rods (\$0.65M)+
Power Upratings	-10% or greater from results of W scoping calculations

+ Estimated annual savings per typical 4-loop PWR with 12 foot core

++ Savings based on displacement of higher cost power due to increased availability

입에 따라 5백만 달러/년, 핵연료설계 개선에 따라 2백만 달러/년 등 설계 및 운전에서의 경제적 이득은 매우 큰 것으로 분석되었다. 표 2는 상기 경제성향상 요소와 출력첨두계수의 여유도 감소를 대비한 것으로, Westinghouse사의 분석 결과이다[13]. 냉각재 상실사고의 안전여유도 증가에 따른 경제성향상 효과는 각절에서 상세히 기술되어 있다. 이들 경제성향상 요소는 동시에 적용되는 사항은 아니며, 발전소의 유형별로 다르게 적용될 수 있다.

III-1. 핵연료 및 노심설계의 개선[14]

냉각재 상실사고의 안전여유도 증가는 최대피복재 온도와 관련한 재관수(Reflood) 유량의 여유도를 증가시키며, 이는 재관수유량과 관련한 유로면적의 증가 가능성을 의미한다. 이에 따른 핵연료봉 직경의 감소설계는 핵연료/냉각재물의 최적화에 따른 핵주기의 경제성 향상 효과를 갖는다. 피복재 열유속의 여유도 증가는 열전달 특성 향상을 위한 핵연료봉 격자(Spacer Grid)의 설계에 부과되는 설계여유도를 증가시킬 수 있다.

또한, 출력첨두계수의 증가에 따른 축방향 출력첨두계수의 증가는, 노심 양단에 축방향 반사체의 설계를 가능하게 한다. 이는, 중성자 누출율을 감소시켜 핵주기의 경제성을 향상시키며, 농축 핵연료 사용의 감소에 따른 핵연료 가공비의 절감효과를 준다.

III-2. 핵주기관리기술의 개선

핵주기관리기술의 개선은 경제성 향상의 측면에서

큰 역할을 담당하며, 이는 장주기운전(18-24 개월), 장전모형의 최적화(Low Leakage Loading Pattern), 핵연료 연소도 증가(35-50 GWD/MTU) 등으로 구분될 수 있다[15].

장주기운전의 도입은 핵연료 농축도의 증가 및 이에 따른 핵연료 이용율의 감소를 의미하나, 장주기운전에 따른 발전소 정기정지의 감소에 의한 발전소의 이용율(Availability Factor) 향상 효과를 고려할 때 전반적인 경제성 향상 효과는 매우 큰 것으로 조사, 분석되었다[3]. 이에 따라, 미국내 90% 이상의 비등수형원자로, 60% 이상의 가압경수형원자로가 장주기운전을 이미 도입, 적용하고 있다. 장주기운전의 도입에 따른 단점으로서 사용후핵연료저장조의 용량 증가, 가연성독물봉사용의 증가, 출력첨두계수의 증가 등을 들 수 있다.

장전모형의 최적화를 통하여 중성자 경제성향상 효과를 기대할 수 있다. 또한, 기사용 핵연료를 노심의 주변에 재사용 하거나 노심 양단에 축방향 반사체를 설치함으로써, 핵연료의 이용율을 증대시킬 수 있다. 이러한 장전모형의 최적화를 위하여는 첨두출력계수의 증가가 요구된다.

핵연료 연소도의 증가는 핵연료 이용율의 향상을 의미하며, 이는 재장전 핵연료 수를 감소시키며, 방출 핵연료의 농축도를 감소시키므로, 사용후핵연료 저장조의 용량이 제한되어 있는 발전소의 경우 큰 이득을 줄 수 있다. 또한, 핵연료 이용율의 향상은 핵연료 단가, 핵연료 가공비, 수송비, 저장비의 절감 등 경제성 향상 효과를 준다.

상기 핵주기관리 기술의 개선 요소는 출력첨두계수의 증가와 밀접히 연관되어 있다. 따라서, 최적평

표 2. 경제성향상 효과와 출력첨두계수의 여유도 감소

Benefit	Loca Margin Cost(Fg)
○Increased burnup	~0.10F _q (100°F)
○Low leakage	~0.10F _q
○Longer cycles	~0.10F _q
○Axial blankets	~0.10F _q
○Steam generator tube plugging(10%)	~0.10F _q
○Power uprating(5%)	~0.10F _q
○Advanced fuel designs	~0.10F _q

가방법의 도입에 따른 출력첨두계수의 증가는, 상기 핵주기관리기술 개선의 요소를 제공하며, 이에따라 기대되는 경제성 향상 효과는 매우 크다. 또한, 출력첨두계수의 증가는 이를 제어하기 위하여 요구되는 가연성독물봉의 사용을 감소시키는 효과를 제공한다.

III-3. 운전여유도 증진

기존의 비상노심냉각계통 평가방법의 보수성은 발전소 설계 및 운전의 여유도를 제한하였으며, 불필요한 원자로정지, 기기의 점검 및 감시(Surveillance) 등 실질적으로 발전소의 안전성 향상에 기여하지 않는 제한요건을 기술지침서에 부과함으로써, 발전소의 설계 및 운전 경제성의 저해요소가 되었다. 따라서, 최적평가방법의 도입에 따른 기존의 보수성 제거는 상기 제한요건에 대한 기술지침서의 완화를 제공할 수 있다. 특히, 출력분포제한, 출력첨두계수 측정 및 감시, 그리고 비상노심냉각계통과 관련한 기기의 성능 및 감시 요건에 대한 기술지침서의 완화는 발전소 운전의 효율성, 실질적인 안전성 및 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 표 3에는 GE사의 최적평가방법인 SAFER/GESTR 평가방법을 근거

로 4 루프 비등수형원자로에 대하여 평가된 비상노심냉각계통 관련 기술지침서의 완화가 제시되어 있으며, 표 4에는 이러한 기술지침서의 완화에 따른 발전소의 성능, 안전성 및 신뢰도 향상 효과가 제시되어 있다[16]. 최적평가방법의 도입에 따른 Westinghouse 4 루프 발전소의 디젤발전기 기동시간에 대한 기술지침서의 완화가 분석된 바 있으며, 약 30초의 기동지연이 냉각재상실사고 및 격납용기 분석에 의하여 가능한 것으로 분석되었다[16]. 이러한 계통성능과 관련된 기술지침서의 완화는 급작한 계통의 기동을 방지하여, 계통의 Wear-out 방지등 계통 신뢰도를 향상시키는 효과를 줄 수 있다.

발전소의 부하추종운전 능력은 원자력 발전의 점유율이 높아질수록 경제성 측면에서 중요도가 증가한다. 발전소의 부하추종운전은 제논안정성(Xenon Stability)에 의하여 제어되며, 이는 축방향 출력첨두계수에 의하여 제한된다. 따라서, 최적평가방법의 도입에 따른 축방향 출력첨두계수의 증가는 부하추종운전의 여유도를 증진시키며, 또한 축방향 출력첨두계수의 측정 및 감시와 관련된 운전제한 요건의 완화를 통한 운전여유도의 증가효과를 준다.

표 3. 비상노심냉각계통 관련 기술지침서 완화

Parameter	Relaxation
- Diesel Generator Start Up Time	+10 seconds
- LPCS Flow Rate	90% of Rated
- LPCS Injection Valve :	
Pressure Permissive	-100 psi
Stroke Time	+10 seconds
- LPCS Pump Start Up Time	+20 seconds
- LPCI Flow Rate	90% of Rated
- LPCI Injection Valve :	
Pressure Permissive	-100 psi
Stroke Time	+18 seconds
- LPCI Pump Start Up Time	+25 seconds
- Recirculation Discharge Valve	
Stroke Time	+10 seconds
- HPCI Start Up Time	+30 seconds
- ECCS Water Level Setpoints	
Level 3(Scram)	-12 inches
Level 2(HPCI/RCIC Initiation)	-12 inches
Level 1(LPCS/LPCI/ADS Initiation)	-8 inches

최적평가방법의 도입에 따른 냉각재상실사고의 안전여유도 증가는 증기발생기관 폐쇄율 증가, 원자로 냉각재유량 감소, 안전주입계통유량 감소등에 의한 냉각재상실사고의 안전여유도 감소를 보상할 수 있다. 따라서, 과지의 경우와 같은 출력 감발운전을 배제하고 운전제한 요소를 보상함으로써 발전소 경제성 향상 효과를 준다. 또한, 냉각재상실사고의 안전여유도 증가는 출력의 감발 없이 발전소의 연장운전을 가능하게 하여(Extended Burnup Window), 노심의 재설계 없이 운전의 여유도를 향상시키는 효과를 갖는다.

III-4. 출력증가

최적평가방법의 도입에 따른 출력첨두계수의 증가는 냉각재상실사고에 의하여 제한되는 발전소에 대하여 출력증가(5-10%) 요소를 제공할 수 있다. 발전소의 출력증가는 가동중인 원전의 용량을 증가 시킴으로써 신규원전의 건설에 따르는 건설비 절감 등 경제적 측면에서 큰 이득을 준다. 이러한 출력의 증가는 적은 투자비로 단기간에 경제성을 향상시키는

효과를 갖으며, 출력증가에 따른 경제적인 이득을 Westinghouse는 연간 5백만 달러에 달할 것으로 예측하였다. [3]. 그러나, 이를 적용하기 위하여는 냉각재상실사고 외에도 핵비등이탈율과 관련한 고온수로 출력첨두계수($F_{\Delta H}$: Hot Channel Peaking Factor)의 최적평가방법 도입, 출력증가에 따른 터빈 설계용량 등 발전소 제통의 성능 및 구조성능의 재평가, 그리고 관련된 사고의 재해석이 요구된다.

최적평가방법의 도입 및 발전소 성능개선계획의 일환으로 현재 미국내 비등수형원자로중 16기의 발전소가 2%에서 20%로 출력이 증가되었으며, 14기의 발전소에 대하여는 현재 5%에서 15%로의 출력증가가 추진중에 있다. Westinghouse사의 가압경수로중 13기의 발전소에 대하여 2.2%에서 26.3%로의 출력증가가 이미 수행된 바 있다[17].

III-5. 수명연장

원자로의 첨두출력계수 증가 및 장전모형의 최적화에 따른 반경방향 출력첨두계수의 증가는 원자로 압력용기의 증성자 조사량을 감소시켜 가압열충격

표 4. 비상노심냉각계통 기술지침서 완화에 따른 실질적인 안전성 향상 효과

Parameter Improvements	Plant Safety Benefits
-Increased Diesel Generator Start Up Time	-Allows for slower start time which can reduce the wear associated with cold starts. Slower starts can also be utilized to improve lube oil preheat systems. These can also improve the reliability of the system.
-Increased ECCS Pump Start Up Time	-The extension in start up time can be utilized to restagger the loading sequence for the ECCS pumps and other equipment on the emergency busses. This may also lead to improved reliability of the emergency power system.
-Increased Valve Stroke Times	-Relaxed valve stroke time requirements are useful since less stringent requirements will be placed upon replacment parts. Additionally, the valves will experience less wear with a slower stroke.
-Increased HPCI Start Up time	-A longer HPCI start up time can be utilized to throttle back the turbine speed up rate which can both reduce wear on the system as well as improve the overall system reliability.
-Relaxed ECCS Flow Rate Requirements	-Relaxed flow rate requirements can allow simplification of the ECCS logic which will, in turn, improve the system reliability.
-Relaxed Water Level Trip Setpoints	-Relaxed water level setpoints can reduce the number of inadvertent scrams and trips experienced by a plant. Additionally, a larger uncertainty in instrument requirements can be accommodated. Reductions in the surveillance and calibration requirements may also be achievable.

문제에 의하여 제한되는 압력용기 수명의 연장을 가능하게 한다. 또한, 기술지침서 완화를 통한 발전소 기기의 Wear-out 감소는 기기의 수명을 연장시켜 전체적인 발전소의 수명연장(10-20년)효과를 제공할 수 있다. 발전소의 운전수명 연장 및 이에따른 신규 원자력발전소에 대한 건설비 투자 시기의 연기는 현저한 경제적인 이득을 제공한다.

IV. 실질적인 안전성 향상 효과

기존의 비상노심냉각계통 평가방법의 보수성은 발전소의 실질적인 안전성을 저해하는 요소를 제공하였다. 출력첨두계수의 제한으로부터 기인한 원자로 압력용기의 중성자 조사량 증가에 따른 가압열충격 문제, 비상노심냉각계통 관련 기기의 제한된 기동시간, 과도한 감시 요구조건에 따른 주요안전계통의 Wear-out 및 신뢰도 저하, 안전계통 작동설점치(Setpoints)의 보수적인 설정으로 인한 불필요한 원자로정지 및 비상노심냉각계통의 작동 등이 실질적인 안전성 저해요소이다. 최적평가방법의 도입은 이러한 문제점의 해결을 통한 실질적인 안전성 향상 효과를 제공할 수 있다.

또한, 냉각재상실사고의 실제현상에 근거한 운전원 교육자료 생산, 비상운전 절차서 개발, USI/GSI(Unresolved Safety Issue/Generic Safety Issue)의 해결을 통하여, 가동중 원자력발전소의 안전성 향상에 기여할 수 있다. 그리고, 안전성을 크게 저해하지 않는 변경사항에 대한 보고 및 재분석 지침의 완화는 불필요한 작업 및 인력의 낭비를 방지하여 인력관리의 효율성을 향상시킬 수 있다.

V. 결론

보수적, 결정론적 방법에 근거한 기존의 비상노심냉각계통 평가방법은 냉각재상실사고에 의하여 제한되는 발전소의 운전 및 설계에 과보수성을 부여하였다. 최근의 비상노심냉각계통 평가에 최적 평가방법의 도입으로 기존의 평가방법에 의한 보수성이 제거됨으로써, 냉각재상실사고 관련 안전여유도가 증가되었다. 본 고찰에서는 최적평가방법의 도입과 이에따른 핵연료 및 노심 설계개선, 핵주기관리기술개선, 운전여유도 증진, 발전소 출력증가, 수명연장

등 발전소의 경제성 향상 효과와 기존 평가방법의 보수성으로부터 기인한 안전성 저해요인의 제거등 실질적인 안전성 향상 효과를 중점적으로 조사, 분석하였다. 최적평가방법의 적용에 따른 냉각재상실사고의 안전여유도 증가는 본문에 제시된 바와 같이 여러가지 측면으로 활용될 수 있을 것이며, 이에따른 경제적 이득은 현저히 클 것으로 판단된다. 또한, 최적평가방법의 도입에 따른 비상노심냉각계통 설계의 최적화는 발전소 건설단가 및 운전단가의 절감을 통한 원자력발전소의 경제성 향상 효과를 제공할 것이다.

참고문헌

1. Compendium of ECCS Research for Realistic LOCA Analysis", NUREG-1230, Dec., 1988.
2. L.H.Sullivan, "Uncertainty in LOCA Analysis Historical Discussion", LANL, Presented in EPRI Workshop on Appendix K Relief using Best Estimate Methods: The Revised LOCA/ECCS Rule, Aug., 1988.
3. F.F.Cadek et.al., "Best Estimate Approach for Effective Plant Operation and Improved Economy", Westinghouse, Presented in EPRI Workshop on Appendix K Relief using Best Estimate Methods: The Revised LOCA/ECCS Rule, Aug., 1988.
4. "Emergency Core Cooling Analysis Methods", SECY-83-472, Nov., 1983.
5. United States Code of Federal Regulations, Title 10, Section 50 (10CFR50), Section 50.46, "Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems for Light Water Nuclear Power Reactors" and Appendix K, "ECCS Evaluation Models", Revised on Sep., 1988.
6. USNRC SER, "Acceptance for Referencing of Licensing Topical Report, WCAP-10924, 'Westinghouse Large Break LOCA Best Estimate Methodology'", 1988.
7. USNRC SER, "Acceptance for Referencing of Licensing Topical Report, NEDE-23785 Revision 1, Volume III (P), 'The GESTR-LOCA and SAFER Models for the Evaluation of the

- Loss-of-Coolant Accident", Jun, 1984.
8. "Thermohydraulics of ECC in Light Water Reactors", A State-of-the-Art Report by a Group of Experts of the NEA Committee on the Safety of Nuclear Installation, CSNI Draft Report, 1989.
 9. Private Communications with SIEMENS-KWU, 1990.
 10. "비상노심냉각계통 평가방법 개발 및 응용", 중간보고서, KAERI/NSC-458/89, 1989., 최종보고서, KINS/GR-009, 1990.
 11. H.Chelemer, et.al., "Improved Thermal Design Procedure", WCAP-8567, Jul., 1975.
 12. Mistelberger, "Topical Report on the KWU Statistical Thermal Design Procedure on W/Framatome Plants", Sep., 1987.
 13. "LOCA Margin Improvement", Westinghouse Presentation Material, 1990.
 14. R.E.Collingham, "Impact of Appendix K on Fuel Designs", ANF, Presented in EPRI Workshop on Appendix K Relief using Best Estimate Methods: The Revised LOCA/ECCS Rule, Aug., 1988.
 15. M.L.Van Haltern, "Impact of Appendix K on Plant Operation and Fuel Cycle Planning", Northeast Utilities Service Co., Presented in EPRI Workshop on Appendix K Relief using Best Estimate Methods: The Revised LOCA/ECCS Rule, Aug., 1988.
 16. B.Chexal, et.al., "Tech Specs Relaxation using Realistic ECCS Methodology", EPRI, Presented in EPRI Workshop on Appendix K Relief using Best Estimate Methods: The Revised LOCA/ECCS Rule, Aug., 1988.
 17. "Performance Improvement Programs", GE Presentation Material, 1990.