

출력증가 현황과 안전현안

Current Status of Power Uprates and Safety Issues

박 중 석, 송 재 호, 이 승 혁
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

출력증가(power uprates)는 측정 불확실성을 줄이거나 설계 단계에서 확보하고 있는 열적 여유도 및 설계 여유도를 활용하여 상업용 원전에 허용된 정격출력을 증가시키는 것으로 계측오차 감소, 설정치 변경, BOP기기 변경의 3가지 방법이 활용되고 있다.

미국의 경우, 1977년에 설정치 변경을 통해 노심의 허용 정격출력을 5.5% 증가시킨 Calvert Cliffs 1호기를 선두로 하여 2002년 6월까지 81개 원전이 허용 정격출력을 증가시켜 운영되고 있으며 2006년까지 16기 원전이 출력증가 허가를 신청할 예정이다.

1978년에 원전의 상업운전을 시작한 우리나라의 경우, 16개 원전에서 총 노심열출력은 4만 MWt에 이르고 있어 노심 정격출력의 증가가 허용될 경우 상당한 경제적 이득이 기대되므로 조만간 국내에서도 정격 출력증가 허용에 대한 사업자의 요구가 높아질 것으로 예상된다.

출력증가는 단순한 설계변경이 아니며, 발전소 계통 전반에 대한 안전성 평가 및 해석을 통해 확보되는 사항이므로 앞으로의 규제수요에 미리 대비하여 기기 건전성, 기기/계통의 성능, 사고해석, 운영기술지침서의 재평가와 변경 필요성, 등 관련 규제사항들의 사전정비 필요성을 제시하는 데 본 연구의 목적이 있다.

Abstract

The power uprates is the process for increasing the available rated power of commercial nuclear power reactor, utilizing thermal and design margin already secured at the stage of design, or by reducing measurement uncertainty of thermal power. Power uprates can be classified in three categories: (1) measurement uncertainty recapture power uprates, (2) stretch power uprates, and (3) extended power uprates.

In the United states, Calvert Cliffs Unit 1 increased 5.5 percent of the rated power of reactor power by means of stretch power uprates for the first time in 1977, and 81 more nuclear power plants are in operation with the licensed rated power increase as of June 2002. The applications of power uprate amendment of 16 nuclear power plants are scheduled to be submitted by the year 2006.

With the commercial operation of nuclear power plant started in 1978, Korea now has a total thermal power marking at 40,000 MWt. If the power uprates is approved, a considerable cost benefit is expected. Therefore, regulatory demand for power uprates from the utility is anticipated in near future.

The power uprates is not simply to change the design but to get it through assessments and analyses of overall systems of nuclear power plant. For this reason, the aims of this research is to present the need of preliminary provisions of relevant regulations considering the reassessment of the components integrity, the performance of components/systems, the accident analysis, and the technical specifications against the coming regulatory demand.

1. 서 론

출력증가는 측정 불확실성을 줄이거나 설계 단계에서 확보하고 있는 열적 여유도 및 설계 여유도를 활용하여 상업용 원전에 허용된 정격 출력을 증가시키는 것으로 ① 계기 측정오차 감소 (measurement uncertainty recapture power uprates ; MURPU), ② 설정치 변경 (stretch power uprates; SPU), ③ BOP기기 변경 (extended power uprates; EPU)의 3가지 방법이 활용되고 있다. MURPU 방법은 급수유량 측정방법을 변경하는 방법으로 노심 정격출력을 최대 2%까지 증가시킬 수 있으며, SPU 방법은 열적여유도 및 설계여유도에 대한 재평가를 통해 노심 정격출력을 약 7%까지, EPU 방법은 고압터빈, 응축수펌프, 주발전기, 등과 같은 BOP 주요설비를 변경하여 노심 정격출력을 약 20%까지 증가시키게 된다.

미국의 경우, 1977년에 설정치 변경을 통해 노심의 허용 정격출력을 5.5% 증가시킨 Calvert Cliffs 1호기를 선두로 하여 2002년 6월까지 81개 원전에서 노심 정격출력을 증가시켜 운영하고 있으며 2006년까지 16기 원전이 출력증가 허가를 신청할 예정으로 있다.

1978년에 원전의 상업운전을 시작한 우리나라의 경우, 16개 원전에서 총 노심열출력은 4만 MWt에 이르고 있어 노심 정격출력의 증가가 허용될 경우 상당한 경제적 이득이 기

대되므로 조만간 국내에서도 정격 출력증가 허용에 대한 사업자의 요구가 높아질 것으로 예상된다.

출력증가는 단순한 설계변경이 아니며, 발전소 계통 전반에 대한 안전성 평가 및 해석을 통해 확보되는 사항이므로 앞으로의 규제수요에 미리 대비하여 기기 건전성, 기기/계통의 성능, 사고해석, 운영기술지침서의 재평가와 변경 필요성, 등 관련 규제사항들의 사전정비 필요성을 제시하는 데 본 연구의 목적이 있다.

2. 출력증가 현황

2.1 출력증가 절차

출력증가는 노심 열출력을 증가시켜 궁극적으로는 전기출력을 증가시키는 것을 의미한다. 노심 열출력은 원자력발전소 안전성평가에서 중요한 의미를 가지고 있는 반면 전기출력은 출력증가의 성공여부를 결정하는 관건이 된다.

노심의 열출력이 증가하면 그만큼 증기발생기를 통해 2차측으로 전달되는 열이 증가되어야 한다. 증기발생기의 열전달량은 1차측과 2차측 온도차에 따라 증가된다. 증가된 노심 열출력을 2차측으로 전달하기 위해서는 1차측 온도를 올리거나 2차측 온도를 낮추어야 한다. 그러나 1차측 온도를 올릴 경우, 증기발생기 세관의 부식 문제 등이 증가될 수 있고 2차측 온도를 낮추면 증기의 온도 및 압력이 낮아지게 된다.

노심 열출력 증가시 증기압력이 감소할 경우, 터빈 및 발전기의 효율에 따라 열출력 증가의 효과가 일부만 나타날 수도 있다. 즉 전기출력이 노심 열출력에 반드시 비례하는 것이 아니기 때문에 출력증가는 발전소를 전반적으로 재평가하여 얻게 된다.

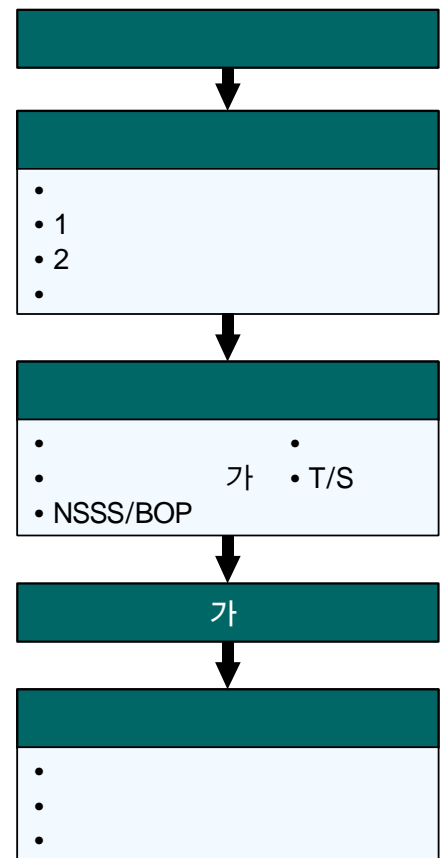


그림 1. 출력증가 절차

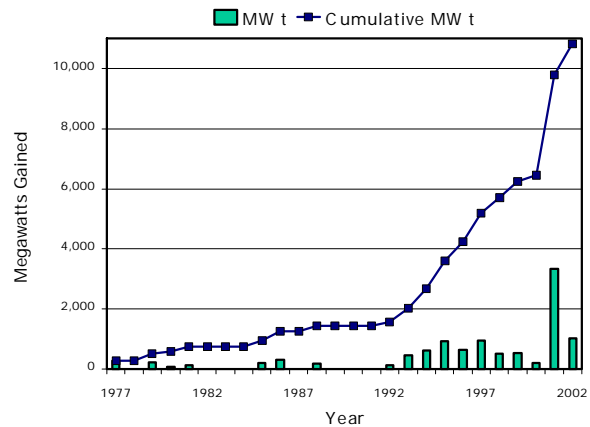
출력증가 설계절차는 그림 1에서 보는 바와 같이 우선 목표 출력을 선정하 뒤 ① 운전

조건 결정, ② 성능 및 안전성 확인, ③ 허가 획득, ④ 시험운전 및 적용의 순으로 진행된다.

2.2 출력증가 사례

1) 미국

1979년 TMI사고이후 원전의 건설이 중단된 미국 전력산업계는 원전 수명연장, 출력증가, 장주기 운전 등을 통해 전력에너지의 수요를 충족하고 있다. 1977년 설정치 변경방법을 통해 출력을 5.5% 증가시킨 Calvert Cliffs 1호기를 선두로 하여 2002년 6월까지 81개 원전들이 출력증가 허가를 취득하였으며 그림 2에서 보는 바와 같이 전체 원전의 열출력을 10,828 MWt 증가시켰다. NRC는 2001년도에만 22개 원전의 출력증가 심사를 완료하였고 12개 원전의 출력증가 신청에 대한 심사를 진행 중에 있다.



2. Power Capacity Increase

General Electric Nuclear Energy (GENE)는 BWR형 원전의 MUR 출력증가와 EPU에 대한 특정기술 주제보고서를 각각 발간하여 2000년 7월, 2001년 3월에 NRC에 승인을 신청하였다. NRC는 이러한 특정기술 주제보고서가 출력증가 신청을 표준화하고 제출서류를 규격화할 수 있어 효율적인 안전심사에 크게 도움을 줄 것으로 기대하고 있다.

2) 유럽

표 1은 유럽에서 출력증가를 수행한 발전소들을 기술하고 있다. 유럽원전들은 대부분 출력증가를 증기발생기 교체와 함께 추진하고 있는 관계로 표 1에서 보는 바와 같이 미국의 EPU에 해당하는 대규모의 출력증가율을 가지고 있다.

가) 벨기에

벨기에 규제당국인 Association Vincotte Nucleaire(AVN)는 2001년 4월 27일 Tihange 2 원전의 10% 출력증가를 허가하였다. 10% 출력증가는 2001년 여름으로 계획된 증기발생기 교체와 함께 수행된 것으로 최근 승인된 해석방법을 적용하여 발전소 기본설계를 전면적으로 재검토하였다. 특히 DNB 여유도를 증가시키는 열속방정식과 Cathare열수력코드를 사용한 대형LOCA 해석방법은 10% 출력증가에 결정적인 역할을 한 것으로 평가

되고 있다.¹⁾

표 1. Approved Applications for Power Upgrades in Europe

Country	Plant	% Uprate	Year Approved	Reactor Type	etc
Belgium	Doel 3	10	1993	PWR 900	SGR
	Tihange 1	8	1996	PWR 870	SGR
	Tihange 2	10	2001	PWR 900	SGR
Finland	Olkiluoto 1,2	18.3	1998	BWR 700	SGR
	Loviisa	9.1	1998	VVER 440	
France	Chinon 3,4	4.5	1987	PWR 900	
Germany	Konvoi	2.2	1991		
	Isar 2	2.6		PWR 1300	
	Grafenheinfeld	6	In progress	PWR 1300	
	GKN 1,2	4	2000	PWR	
	Unterweser	4.4	1998	PWR 1300	
Slovenia	Krsko	6.3		PWR	
Spain	Cofrentes	10	2002	BWR	
Sweden	Ringhals 2	9	1989	PWR 900	SGR
	Ringhals 3	12	1995	PWR 900	SGR
Swiss	Leibstadt	4	1995	BWR 1000	990 MWe

(* SGR : Steam Generator Replacement

나) 핀란드

핀란드는 10년 주기로 원전의 운영허가를 갱신하고 있으며 Olkiluoto발전소를 운영하고 있는 Teollisuuden Voima Oy(TVO)는 새로운 운영허가갱신 과정에서 발전소 용량과 안전성을 향상시키고 운전수명을 연장하기 위한 Olkiluoto 발전소 현대화 계획을 추진하였다. 이러한 현대화 계획의 일환으로 TVO는 1998년에 주순환펌프의 전기구동장치와 터빈 압력가버너를 교체하여 Olkiluoto 발전소의 15.7% 출력증가를 완료하였다.

출력증가 관련 사고해석은 주로 노심 출력과 유량의 변경, 연료봉과 노심 내부구조물의 구조적 변경에 대해 수행되었다. 해석범위의 타당성을 확인하기 위해 TVO는 손상결말분석(failure consequence analysis)을 수행하였고 규제기관의 감독 하에 장기간에 걸쳐 시험운전을 실시하였다. 시험운전의 목적은 정상운전조건 및 예상되는 과도상태에서 출력증가로 인해 설계 변경된 시스템이나 발전소 전체가 안전하게 운전할 수 있는지를 현장에서 확인하는 데 있다. 시험운전은 계통관련시험, 과도상태조건시험, 그리고 장기운전시험으로 구성되어 있으며 계통관련시험은 출력증가로 인해 설계 변경된 설비가 포함된 시스

템에 관한 시험이며 과도상태조건시험 중에서 주요 시험은 부하감발시험, 터빈정지시험, 고압 예열기 우회시험, 그리고 응축수와 급수 펌프의 정지시험이 있다. 장기시험은 노심 거동, 응축수 및 노심 냉각수 정화계통의 기능, 침식 및 부식 효과, 배관 및 터빈발전기의 진동, 발전소 내부 방사능 준위, 등에 대한 모니터링을 하는 시험이며 핀란드 규제기관인 STUK는 장기시험은 적어도 2개월 동안 지속되어야 한다고 판단하고 있다.²⁾

나) 슬로베니아

웨스팅하우스형 원전인 Krsko 발전소는 증기발생기 교체, 시뮬레이터 설치와 함께 출력증가를 장기 현대화계획으로 추진하고 있다. 1997년에 시작된 현대화계획의 주요 내용은 다음과 같다.

- 방사능물질의 환경방출위험 최소화 및 발전소 운전정지와 불시정지 횟수 감소
- 운전원의 자질향상 및 국제표준 만족
- 발전소 이용률을 85% 이상 및 정기검사기간을 약 35일로 표준화
- 열출력 1882 MWt를 2000 MWt로 6.3% 출력증가

증기발생기 교체에 대한 사전조사의 일환으로 웨스팅하우스는 출력증가 타당성을 검토하여 발전소 계통의 많은 설계변경 없이 열출력을 6.3% 증가할 수 있음을 제시하였다. 설계변경에 관련된 열수력 조건 및 기기구조물에 대한 안전성평가와 분석은 모든 과도상태 및 사고 조건이 허용기준 범위 내에 있는 지를 확인하기 위해 수행된다. 기존 해석은 한가지의 운전조건에 대해 수행되었으나 본 평가와 분석에서는 많은 운전 여유도를 제공하는 운전범위에 대해 수행되었다. Jozef Stefan 연구소, 오스트리아의 Enconet, 등 4개 기관이 웨스팅하우스의 분석결과를 독립적으로 검토하여 출력증가의 타당성을 재확인하였다.

다) 스페인

BWR형 원전인 Cofrentes발전소는 4.2%의 출력증가에 이어 5.8%의 출력증가를 2002년도 정기검사후 시행할 예정으로 있다. Cofrentes발전소를 운영하고 있는 IBERDROLA는 지난 2주기동안 핵연료 및 노심 설계 그리고 인허가를 위해 자체 설계 및 재장전 인허가 방법론을 개발하였고 이 방법론을 본 출력증가에 적용하였다. 출력증가 계획은 ① 기술적, 경제적 분석을 통한 가능성 타진, ② 계통평가 및 안전해석, ③ 설비보완, 시험 및 운전의 3단계로 진행되었으며 1, 2단계를 통해 Cofrentes발전소의 출력증가 가능성을 확인하였다. 표 2는 주요 안전해석에 사용된 전산코드를 보여주고 있다.

표 2. Safety Analysis and Codes in Power Upgrades Project

Safety Analysis	Computer Code
Reactor Heat Balance	SIMULATE-3
Core and Fuel Performance	SIMULATE-3 and CASMO-4
Thermal Hydraulic Stability	LAPUR
ECCS LOCA Evaluation	TRAC-BF1/ARK
Fast Transient Analysis	RETRAN-3
Slow Transient Analysis	SIMULATE-3
Anticipated Transient Without Scram (ATWS)	RETRAN-3 and FRAP-T6/APK
Station Blackout (SBO)	RETRAN-3

3) 우리나라

현재까지 출력증가관련 허가신청이 추진된 바 없으나, 전력산업 구조개편에 따른 원가 절감 및 원자력 발전의 경제성 제고가 절실히 요구되는 경영환경에 따라 한수원(주)는 WH형 원전인 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기에 대해 2006년까지 5%출력증가 인허가 획득을 목표로 전력산업기술개발 과제(“가동원전 출력증강 기술개발”)를 추진하고 있다.

전력연구원은 1995년 “원전 정격출력 증가 사전조사연구”, 1998년 “원전 열출력 증가를 위한 조사연구”, 1999년 “울진 1,2호기 S/G 교체시 정격 출력증가에 대한 LOCA해석” 등 출력증가 관련 연구를 수행하여 왔고 2001년 7월부터 “WH형 경수로의 출력증가 기획조사 연구”를 수행하였다.

2.3 안전현안

출력증가를 추진한 원전에서 일어난 일련의 사건으로부터 안전성에 대한 우려가 제기되고 있다.³⁾ 1995년 12월 제기된 Maine Yankee 발전소의 출력증가 허가변경신청서류의 문제점과 출력 증가된 여러 원전에서 나타난 운영상의 문제점들은 출력증가 신청서류와 안전심사 과정의 부적합성, 그리고 여러 가지 운전상의 문제점들이 복합적으로 함께 일어나는 시너지효과(synergistic effect)에 의해 나타난 것이다.

시너지 효과는 주로 열수력 조건의 변화가 다른 물리적 변수와 연계되어 나타나게 된

다. 예를 들면, 장주기 운전과 1차계통 유량의 증가는 연료봉의 성능에 영향을 주며 장주기 운전은 지르칼로이 안내관의 방사능조사성장 및 축방향 확장 그리고 변형을 유발시킬 수 있다. 또한 출력증가를 위한 1차계통 유량증가는 제어봉 안내관의 fretting과 기계적 마모를 촉진하게 된다. 따라서 장주기 운전과 유량증가는 제어봉 안내관의 성능저하를 유발시키는 원인으로 볼 수 있다.

1) Maine Yankee LOCA 사건

1995년 12월 NRC는 출력증가 허가신청서류에 기재되어 있는 냉각재상실사고 해석보고서에서 부적절한 붕괴열과 임계유량 모델이 사용되었다는 익명의 내부고발을 접수하였다. 내부고발에 대한 NRC 감찰국은 조사결과보고서⁴⁾를 발표하였고 이 보고서에서 나타난 문제들의 후속조치를 위해 NRR은 실무추진반을 구성하여 ① 전산코드 적용과 출력증가에 대한 심사과정, ② 사업책임자의 역할과 책임, 그리고 ③ TMI후속조치 종결에 대한 해결방안⁵⁾을 제시하였다. 주요 내용은 다음과 같다.

① 전산코드 심사과정

- ECCS 방법론에 대한 특정기술주제보고서의 표준양식지침을 개발하여야 한다.
- NUREG-0390 ("Topical Report Review Status")을 보완하여 특정기술 주제 보고서의 승인본에는 NRC의 요구사항과 사업자의 이행내용을 포함시킨다.
- 전산코드와 방법론의 승인신청서에는 해당 코드와 방법론의 적용사례를 기술하여야 한다.
- 제작자 또는 사업자의 사전협의 없이 특정기술주제보고서의 적용조건 또는 제한사항을 특정기술 주제보고서의 심사보고서에 기술할 수 없다.
- 규제요원은 제작자와 사업자의 협의사항에 대한 행정집행과 규제현황을 항상 파악하고 있어야 한다.

② 출력증가 심사 절차서 개발시 고려사항

- 해석코드와 적용에 대한 심사방법
- 사업자의 분석과 기술지침서의 심사방법
- 안전여유도에 영향을 주는 출력증가를 포함한 기존 설계 및 절차서 변경사항
- 심사 담당부서
- 발전소 운영이력과 보완사항
- 허가조건과 FSAR개정에 관련된 후속조치사항
- SPU와 EPU의 심사방법에 대한 차이
- 심사범위와 깊이는 BWR 원전의 출력증가 심사보고서와 규제입장(position paper), 그리고 출력증가 신청서류를 참고하여 수립

③ TMI 후속조치 종결 관련 사항

- 사업책임자는 사업자와의 회의시 회의록을 작성

- 사업책임자의 책임과 권한을 분명히 하고 조직표에 이를 명기
- 심사과정의 균일성과 일관성을 유지
- 사업자와의 합의사항 기록에 대한 지침을 수립

2) Wolf Creek 제어봉 사건

1996년 1월 Wolf Creek 발전소에서 80% 출력에서 수동정지(manual scram)로 가는 동안 5개 제어봉이 완전삽입을 실패하였다. 사고원인은 과도한 방사능조사성장에 의한 제어봉 삽입관의 비틀림에 의한 것으로 밝혀졌다.⁶⁾ 이 제어봉들은 47.5 GWD/MTU 이상의 고연소도를 가진 웨스팅하우스의 17x17 Vantage-5H 연료봉 집합체에 설치되어 있는 제어봉이다.

불완전한 제어봉삽입은 정지여유도의 상실을 가져올 수 있어 안전성관점에서 중요한 의미를 가진다. 제어봉삽입실패에 영향을 주는 인자는 연소도, 출력이력(power history), 그리고 온도이나 이들 인자의 상호작용은 분명하게 확인되지 않고 있다. 이러한 문제의 해결방안으로 NRC는

- (1) Enhanced requirements for lead test assemblies (LTAs)
- (2) Surveillance to detect metallurgical problems
- (3) Fuel management guidelines

를 제안하였다. 기존 LTAs는 방사선조사성장 징후와 삽입관의 비틀림 현상을 제대로 인식하지 못하는 문제를 가지고 있으며 연료봉의 운전조건과 동일한 조건 하에서 시험이 수행되지 않았다. 금속학적 문제를 파악하기 위해 주기적인 시험요건을 추가하였으며 제어봉의 운전성(operability)을 보장하기 위해 연료봉 관리지침을 제시한 것이다. 관리지침의 주요 항목은 ① 개별 집합체의 온도, ② 노심 높이, ③ 반응도 및 반응율, ④ 중간 유동혼합격자 (intermediate flow mixing grids)이다.

3) 배관 파열 사건

1988년에 4.5% 출력을 증가한 Callaway 원전에서 1999년 11월 급수가열기에 연결된 8" 증기배관의 용접부에서 파열이 일어났다. 파열의 주원인은 유량증가에 의한 부식이며 이러한 부식은 유량이 증가할수록 심해진다. 출력증가는 유량증가를 동반하므로 이에 대한 심도있는 검토가 요구되고 있다.

이상의 사건이외에도 증가된 출력의 노심에서 핵연료주기 형상의 차이로 인해 부적절하거나 잘못된 재장전해석으로 인한 사건들이 발생하고 있다.⁷⁾ 즉 1995년 4월 Duane Arnold 원전에서 노물리 확인시험에서 기술지침서의 0.38-% Δ -K/K 최소여유도에 비해 정지여유도가 0.33-% Δ -K/K 로 나타났으며 WNP-2에서는 xenon붕괴모델의 오류로 인해 임계가 예측값보다 일찍 발생하였다.

2.4 US NRC 규제동향

출력증가를 위한 허가변경신청의 안전심사를 수행한 NRC는 기존 규제요건의 만족여부와 증가된 출력에서의 안전운전 가능성을 확인하고 있다. NRC는 홈페이지 개설, 공개 워크숍, 규제현안요약 2002-03 발행, 2002년도 규제정보회의에서 출력증가세션 개최, ACRS 업무현황 브리핑, 2001년 6월과 2002년 1월 설문조사, 등을 통해 출력증가와 관련한 심사 경험과 이해관계자들의 의견을 수렴하고, 인허가절차의 표준화, 심사과정의 효율화, 지침 개발 등을 추진하고 있다. 출력증가의 운전경험 및 향후 계획 등에 관한 이해관계자들과 의견교환을 위해 NRC는 2001년 7월, 8월, 그리고 2002년 3월에 각각 회의를 개최하였다.

웨스팅하우스사의 요청으로 이루어진 2001년 7월 회의⁸⁾에서는 웨스팅하우스의 출력증가 경험과 향후 WH형 원전의 출력증가 계획을 논의하였으며 여기서 웨스팅하우스는 EPU방법에 의한 10~20%의 출력증가를 고려하고 있음을 밝힌 바 있다. 2001년 8월에 개최된 공개 워크숍⁹⁾에서는 MUR 출력증가 허가신청서 작성지침 초안에 대하여 토론하였고 이러한 과정을 거쳐 NRC는 상기 지침을 2002년 1월 규제현안요약 2002-03으로 발간하였다. 효율적이고 효과적인 안전심사를 위해 NRC는 MUR형태의 소규모 출력증가에 대한 안전심사지침(Standard Review Plan; SRP)의 개발을 고려하고 있다¹⁰⁾.

2002년 3월 회의¹¹⁾에서는 최근 완료된 EPU 심사에 대한 경험을 토의하였다. EPU 심사에 필요한 추가자료 요청을 감소하기 위해 참가자들은 기계공학 분야와 PSA 검토시 현장감사를 수행하는 방안을 제안하였다. 또한 출력증가와 관련한 SRP는 사업자들의 출력증가 일정에 맞추어 개발하기 어려우며 출력증가 관련 사항들이 발전소에 따라 많은 차이를 보이고 있기 때문에 일반적인 심사지침을 개발하는 것은 적절하지 않은 것으로 보고 노형별 작성지침을 개발하여 NRC의 승인을 받는 방안을 제안하였다.

출력증가와 관련하여 운영허가 및 기술지침서 변경신청과정은 기존 변경허가 신청과 동일하므로 출력증가 인허가사항은 10CFR 50.90, 50.91, 그리고 50.92의 규제요건에 따라 처리된다. 출력증가 변경허가신청이 접수되면 NRC는 연방관보에 관련 사항을 게재하고 30일 동안 이해관계자들의 의견을 수집한다. NRC는 허가신청서와 이해관계자들의 의견을 심사하여 안전심사보고서를 작성하며 심사과정에서 나타난 문제에 따라 변경허가의 가부를 결정하여 이를 일반에게 공지하고 있다.

출력증가에 관한 표준심사지침은 현재 작성되어 있지 않으나 NRC는 효율적이고 일관된 안전심사를 위해 1997년과 1998년에 각각 발간된 BWR형 원전인 Monticello발전소와

PWR형 원전인 Farley발전소의 안전심사보고서를 향후 출력증가 심사의 표본으로 NRC는 사용하고 있다.¹²⁾ 또한 NRC는 허가신청의 표준화 및 안전심사의 효율성 및 효과성 제고를 위해 공개회의를 개최하여 이해관계자들의 의견을 수렴하고 있으며 수립된 규제 정책은 SECY보고서를 통해 발표하고 있다.

1) SECY-02-0115

업무지시사항(SRM M020129, 2002년 2월)에 따라 운영국장 W. D. Travers는 NRC 위원들에게 출력증가의 효율성과 효과성 계획보고서(SECY-02-0115)를 제출하였다.

규제당국은 출력증가 신청 및 안전심사 과정의 효율성과 효과성을 개선하고 개선된 사항을 구체화하기 위해 허가갱신과정의 경험과 출력증가 심사경험, 내부 및 외부 이해관계자들의 의견을 수렴하였다. 구체화 계획의 내용은

- (1) 계획 및 일정 수립,
- (2) 심사재원의 효율화,
- (3) 출력증가 프로그램 관리기술 강화,
- (4) 과거 심사 및 교훈 평가,
- (5) 심사방법의 평가를 포함한 출력증가과정의 표준화,
- (6) 출력증가과정에서의 의견수렴 방안

의 6가지이다. 또한 구체화 계획수립에서는 보다 심도 있는 심사과정의 개선이 필요하다는 원자로안전자문위원회(ACRS)의 권고를 고려하였고 EPU 방법에 대한 심사범위를 평가하였다. 구체화 계획은 2002년 말까지 완료할 예정이다

2) SECY-02-0106

출력증가 안전심사의 효과성제고를 위해 표준안전심사지침을 개발하여야 한다는 ACRS의 권고를 검토한 결과, NRC는 안전심사의 표준화에 포함시켜야할 항목으로 다음 3가지를 제시하였다.

- (1) 명확한 검토범위
- (2) 기존 검토 기준
- (3) BWR형 및 PWR형 안전심사 표본 (template safety evaluation)

3) SECY-01-0124

사업자들은 발전소출력(power output)을 증가시키는 방법으로서 1970년대부터 출력증가를 사용하여 왔으며 이에 따라 NRC는 출력증가 안전심사를 수행하였고 57기의 원전에 대한 심사를 완료하였다. 특정발전소의 출력증가와 더불어 GENE (General Electric Nuclear Energy)는 BWR형 원전에 대한 출력증가 허가신청의 지침으로 사용하기 위한 특정기술주제보고서 4편(1990년, 1991년, 1995년, 1996년 각각 1편씩)의 승인을 신청하였

다. NRC는 SPU와 EPU 출력증가 방법을 기술한 본 특정기술주제보고서를 승인하였다. 2000년 7월 11일에 제출된 GENE의 MURPU 출력증가에 대한 특정기술주제보고서는 현재 NRC의 검토 중에 있다. 이러한 특정기술주제보고서는 출력증가 신청을 표준화하고 사업자의 허가신청 방식을 개선하며 안전심사의 효율성향상에 도움을 주고 있다.

4) Regulatory Issue Summary 2002-03

본 규제현안요약은 작성 배경, MUR 출력증가 신청서 작성지침, 공개 워크숍에서 제기된 현안정리로 구성되어 있으며 MUR 출력증가에 대한 효율적인 안전심사를 위해 NRC는 출력증가 허가신청에 대한 지침(안)을 개발하였고 2001년 8월 23일 개최된 공개 워크숍을 거쳐 2002년 1월 31일 본 작성지침을 확정·발표하였다.

개선된 급수유량 측정기술을 사용하여 열출력 산정오차를 감소시킨 출력증가는 제한된 범위(affected area)에서 기기와 안전해석에 영향을 주게 되므로 안전심사는 이러한 제한된 범위에 대한 타당성 확인에 무게를 두고 있다. 안전심사는 통상 6~8개월이 소요되며 이러한 소요기간은 심사과정에서 추가자료 요청이 없다면 2~3개월 단축될 수 있다. 그러나 출력증가 허가신청에 다른 추가변경이 있다면 기존의 NRC 심사기간목표(인·허가신청 심사의 95%는 1년 이내에 완료, 2년 이내에 100% 완료)를 적용하고 있다.

MUR 출력증가에 대한 안전심사는 기존의 안전분석 결과가 출력증가로 인해 허용기준을 초과하는 부품, 계통, 사고해석에 대해서 상세 검토가 수행되는 bounding 개념에 의해 수행된다

3. 결론

출력증가는 노심 열출력을 증가시켜 궁극적으로는 전기출력을 증가시키는 것을 의미한다. 노심 열출력은 원자력발전소 안전성평가에서 중요한 의미를 가지고 있는 반면 전기출력은 출력증가의 성공여부를 결정하는 관건이 된다. 즉, 안전성이 확보될 수 있다면 출력증가로 인해 상당한 경제적인 이득이 가능한 것이다. 미국을 비롯한 전세계의 많은 국가에서 가동 원전들의 출력증가를 실행하고 있으며 US NRC는 출력증가 인허가신청을 변경허가사항으로 처리하고 있다.

우리나라에서는 현재까지 출력증가관련 허가신청이 추진된 바 없으나, 전력산업 구조개편에 따른 원가 절감 및 원자력 발전의 경제성 제고가 요구되는 경영환경에 따라 한수원(주)는 WH형 원전인 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기에 대해 2006년까지 5% 출력증가 허가 획득을 목표로 전력산업기술개발 과제(“가동원전 출력증강 기술개발”)를 추진 중에 있다.

출력증가는 단순한 설계변경이 아니며, 발전소 계통 전반에 대한 안전성 평가 및 해석을 통해 확보되는 사항이므로 앞으로의 규제수요에 미리 대비하여 기기 건전성, 기기/계통의 성능, 사고해석, 운영기술지침서의 재평가와 변경 필요성, 등 관련 규제사항들의 사전정비가 필요하다.

참고문헌

- 1) The magazine of Framatome ANP, "www.framatech.com/envision/summer2001/nuke_notes_01.htm", Aug. 2001.
- 2) STUK, "Compliance with the general regulations for the safety of nuclear power plants (Decision 395/1991) The Olkiluoto plant", Aug. 2001
- 3) A.W. Cronenberg, et al., "Operational Events Noted for Power Uprated Plants and Potential Safety Implications", ICONE10-22123, Proceedings of ICONE10, April 14-18, 2002.
- 4) NRC Office of Investigator General, "The NRC Staff's Actions Related to Regulation at Maine Yankee". Case No. 96-045, May 8, 1996
- 5) P. Cota et al., "Report of the Maine Yankee Lessons Learned Task Force", Internal NRC Report, Dec. 1996.
- 6) S. Ray, "Root Cause of Incomplete Control Rod Insertion at Westinghouse Reactors", Proc. 24th NRC WRSN, NUREG/CP-0157, pp201-210, Oct. 1996.
- 7) Institute of Nuclear Power Operation, "Design & Operating Considerations for Reactor Cores", SOER 96-2, Nov. 1996
- 8) M. L. Scott, "Summary of July 21 2001 Meeting with Westinghouse on Power Uprates", Memorandum to S. A. Richards, US NRC, Aug. 10. 2001.
- 9) M. Shraibi, "Meeting Summary for Aug. 23, 2001 Workshop Related to Draft Guidance for Measurement Uncertainty Recapture Power Uprates", Memorandum to C. Craig, US NRC, Sep. 21, 2001.
- 10) J. S. Merrifield, "History's Lessons for Our Future Challenges", 14th Annual Regulatory Information Conference (RIC), pp 7, US NRC Commissioner, March 2002.
- 11) M. Shuaibi, "Meeting Summary for March 19, 2002, Public Workshop Related to Lessons Learned From Recent Extended Power Uprates", Memorandum to L. Raghavan, US NRC, April 15, 2002
- 12) W. D. Travers, "Power Uprate Application Reviews", SECY-01-0124, pp 6, US NRC, July 9, 2001