

표준 원전의 붕산희석 사고 시나리오 분석

Analysis of the Scenarios for Boron Dilution Accident in Korea Standard Nuclear Plant

임호곤, 박진균, 박진희, 김태운, 장승철
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 정지/저출력 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Analysis; PSA)를 위해 반응도 증가에 의한 노심손상을 유발시킬 가능성이 있는 초기사건을 도출하기 위한 것이다. 붕소 희석 사고 시나리오에 대한 다양한 모델이 검토되었으며 이 시나리오의 국내 원전 발생가능성이 검토되었다. 국내 표준형 발전소의 경우 발생 가능한 반응도 사고들을 최소화 할 수 있도록 설계된 것으로 판단되며 몇 개의 시나리오에 대해서는 추후 자세한 상세 분석이 필요하리라 판단된다. 본 연구에서 분석된 결과들에서 얻은 지식들을 발전소 비상, 비정상 및 정상운전 절차서 등에 추가시킨다면, 발전소 안전성 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

This study is intended to identify the initial event of reactivity excursion by boron dilution for the Low Power and Shutdown PSA. Various boron dilution scenarios were examined in view of the feasibility of occurrence of these scenarios in Korea Standard nuclear plant(KSNP). It was shown that the design of KSNP could meet most of scenarios. However, it was also shown that detailed quantitative analysis is need for some scenarios. Characteristics of each boron dilution scenarios that are addressed from this report will be helpful for the safety enhancement of nuclear power plants, if they are supplementally added to plant operating procedures including normal, abnormal and emergency operating procedures.

1. 서 론

본 연구는 정지/저출력 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Analysis; PSA)를 위해 반응도 증가에 의한 노심손상을 유발시킬 가능성이 있는 초기사건을 도출하기 위한 것이다. 지금까지 원자력 발전소의 안전성을 평가하기 위해 수행되는 PSA 및 사고해석에서는 다음과 같은 반응도 사고들이 주로 고려되었다. [2, 3]

- 제어봉 집합체의 인출: 원자로 냉각재 계통(Reactor Coolant System; RCS)의 압력으로 인해 제어봉집합체 구동부(Control Element Drive Mechanism; CEDM) 또는 제어봉구동장치 노즐이 파손되어 제어봉집합체가 노심에서 완전히 인출되는 사고
- 정지되어 있던 원자로 냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump; RCP)의 기동: 정지되어 있던 RCP의 기동으로 인해 노심의 온도가 감소하여 양의 반응도가 생성(Negative Isothermal Temperature Coefficient)되는 사고
- 부적절한 핵연료 집합체의 장전: 핵연료 재장전 도중, 두 개의 핵연료 집합체의 위치가 서로 바뀌어 삽입되는 바람에 국부적인 출력의 이상이 발생하는 사고
- 부적절한 붕소희석: 부적절한 운전원 조작이나 붕산수보충계통의 이상으로 인해, RCS에 포함된 냉각재의 전체적인 붕소농도가 미임계(Sub-critical)를 유지할 수 없을 정도로 희석되는 사건

이러한 사고들 중, 지금까지는 제어봉 집합체 인출에 의한 반응도 사고가 주된 반응도 사고로 고려되었다. 이는 제어봉 인출에 의한 사고는 매우 빠른 속도로 진행될 수 있는 반면, 비작동 원자로 냉각재 펌프의 기동이나 부적절한 핵연료 집합체의 장전으로 인한 반응도 증가효과는 다른 사고에 비해 그 효과가 미미하고, 붕소 희석에 의한 사고는 RCS 냉각재의 전체적인 붕소 희석(Global or Gradual Boron Dilution)을 고려하기 때문에 비교적 느리게 진행되고 또한 운전원에 의해 쉽게 제어될 수 있다고 판단되었기 때문이다. 또한 두 개의 핵연료 집합체의 위치가 서로 바뀌어 삽입되는 경우에 국부적인 출력의 이상이 발생하는 사고인 부적절한 핵연료 집합체 장전의 경우, 우라늄 235의 최대 농축도가 3.5W/O이하일 때는 부적절한 핵연료 집합체 장전이 발생하더라도 반응도 증가로 인한 노심손상은 무시할 수 있다는 연구결과도 발표되었다.[3]

그러나 최근 프랑스를 중심으로 미국 및 독일 등지에서 국부적 또는 급속 붕소희석(Local or Rapid Boron Dilution, 이하 단순히 “붕소희석”으로 기술)에 의한 반응도 사고에 대한 연구를 활발히 수행하고 있으며, 그 결과 발전소가 정지/저출력 상태일 경우 붕소희석에 의한 반응도 사고로 노심이 손상될 확률도 무시될 수 없는 수준이라는 것이 밝혀졌다. 특히 정지중 붕소희석사고는 RCS 내부의 유동이 적기 때문에 냉각재의 흐름이 적고, 일정 위치에 정체구간이 형성될 수 있기 때문에 국부적인 붕소희석이 핵연료 손상을 유발할 가능성이 상대적으로 높다.

프랑스가 가장 먼저 정지/저출력 상태일 경우에 대한 붕소희석사고의 연구를 시작하였고 그 결과를 반영한 운전절차개선 또는 계통의 설계를 통해 발전소의 안전성을 향상시켜왔다. 최근에 발표된 Sizewell B 발전소에 대한 분석결과에 의하면, 정지시 노심손상확률의 약 12%를 붕소희석에 의한 반응도 사고가 차지하고 있음이 밝혀졌다. [4] 미국의 경우는 NRC의 주도하에 설계기준사고의 재평가 측면에서 붕소희석사고를 다루었고, 일부 빠른 과도사건을 유발하는 희석사고에 대해서는 몇 개의 참조발전소를 선정하여 상세한 계산을 수행하였다. [5, 6] 독일의 경우에는 비교적 최근에서야 프랑스 및 미국의 결과를 참고하여 붕소희석으로 인한 반응도 사고에 대한 연구를 시작하였다. [7]

그러나 이러한 붕소희석으로 인한 반응도 사고에 대한 국내의 연구는 외국에 비해 매우 미비한 실정이다. 따라서 지금까지 연구된 붕소희석으로 인한 반응도 사고의 시나리오들에 대한 연구를 수행하고, 그 연구결과를 실제 설계 및 운전에 적용하여 원자력 발전소의 안전성을 최대한 향상시킬 수 있는 방안을 도출하기 위해, 다음과 연구를 수행하였다.

- ① 외국의 선행연구결과 및 운전경험으로부터 정지/저출력시 발생할 수 있는 붕소희석사고의 형태 및 시나리오 파악
- ② 정지/저출력시 도출된 붕소희석 사고 시나리오에 대한 발생빈도 및 결과의 심각성을 분석
- ③ 국내 표준형 발전소에 대해 발생 가능한 붕소희석 사고 시나리오를 선별한 후, 각각의 시나리오에 대해 외국의 경우와 비교하여 발생빈도 및 결과에 대한 정성적인 비교 평가를 수행하여 최종초기사건 선정

2. 붕소희석 사고의 정의 및 발생형태

붕소희석사건이란 반응도를 제어하기 위해 RCS에 포함된 붕소의 농도가 운전원의 실수 또는 기타 이유로 인해 희석되는 사건을 의미한다. 붕소희석으로 인한 반응도 사건은 붕소농도의 희석으로 인한 양의 반응도(Positive Reactivity)가 생성되어 국부적으로 노심의 반응도가 순간적으로 초임계(Super Critical)가 형성되고, 출력 및 핵연료의 온도가 급격히 상승하여 핵연료 손상(Fuel Damage)이 야기할 수 있다.

이러한 핵연료의 손상을 가져올 수 있는 임계 붕소농도(즉, 희석의 정도)는 다음과 같은 방법으로 계산될 수 있다.

$\text{임계 붕소농도} = \text{초기 붕소농도}^*) - (\text{정지여유도} + \text{즉발 임계값} - \text{임계값}) \times \text{붕소가}$
--

*) 초기 붕소농도는 붕소희석이 발생하기 직전의 노심 붕소농도를 의미한다.

붕소희석으로 인한 반응도 사고의 발생 형태는 RCS 외부에 존재하던 희석수가 일차냉각재 계통으로 유입되어 RCS 내부의 정체구간(Stagnant Zone)에 누적되어 누적된 희석수(Diluted Water)가 노심으로 유입되는 경로를 갖는다.

반응도 사고의 사고 전개 과정은 노심내의 내부순환 존재여부에 따라 크게 영향을 받는다.[6] 노심에 충분한 내부순환이 있을 경우 노심으로 유입된 희석수가 노심에 존재하던 희석되지 않은 냉각재와 충분히 혼합될 수 있기 때문에, 상대적으로 붕소희석의 정도가 줄어들어 짧은 시간 내의 급격한 출력증가 보다는 긴 시간동안의 점진적인 출력증가가 발생할 수 있다. 점진적인 출력증가는 운전원이 조치를 취할 수 있는 충분한 시간이 제공되기 때문에 적절한 운전원의 조치가 취해질 경우 반응도 사고의 발생확률은 매우 낮아질 수 있다. 따라서 반응도 사고에 대한 시나리오의 확률론적 평가를 수행할 때는 노심의 내부순환 존재여부가 중요한 인자로서 고려되어야 한다.

사고의 발생가능성을 평가하기 위해서는 RCS와 연결된 계통들 중 RCS로 희석수를 공급할 가능성이 있는 계통들의 분류가 선행되어야 한다. 표 1은 일반적인 가압경수로에 대해, RCS로 희석된 냉각재를 직접 공급할 수 있는 가능성을 가진 계통들을 보여준다.

표 1. 노심으로 희석된 냉각재를 공급할 수 있는 가능성을 가진 계통

관련 계통	냉각재 유입 경로
증기발생기 급수계통 (Steam Generator Feedwater System)	증기발생기 튜브 파열 (Steam Generator Tube Rupture; SGTR) 사고 발생시 운전원이 RCS 냉각을 위해 역보충(Backfilling) 방법을 사용할 경우
잔열제거계통 또는 정지냉각계통	정상 운전 중에는 사용되지 않는 잔열제거계통 또는 정지냉각계통에 포함된 냉각재가 희석되어 있을 경우, 잔열제거를 수행하기 위해 계통을 기동할 때
안전주입계통 (Safety Injection System; SIS)	- 핵연료 재장전수 탱크(Refueling Water Tank; RWT)에 포함된 냉각재가 희석되어 있을 경우, 부적절한 안전주입신호가 발생. - 안전주입탱크(Safety Injection Tank) 또는 축압기(Accumulator)에 포함된 냉각재가 이미 희석되어 있을 때 RCS 압력이 축압기의 압력보다 낮아질 경우, 축압기 차단밸브 개방
재순환 집수조 (Sump)	재순환 집수조에 모인 냉각재가 희석된 경우, 장기 재순환(Long-term Recirculation) 운전을 수행하려 할 때 희석된 냉각재가 노심으로 유입될 수 있다.

다음으로 정체구간의 존재 유무를 조사하기위해 일차측의 냉각재 순환형태를 분류하면 다음과 같은 세 가지 종류의 냉각재 순환을 고려할 수 있다.

- ① 발전소 정상운전 중 노심에서 발생하는 열을 제거하기 위해 한 대 이상의 RCP를 사용하는 강제순환
- ② 발전소 상온정지 운전모드에서, 노심에서 발생하는 잔열의 제거를 위해 잔열제거계통 또는 정지냉각계통 등을 사용하는 강제순환
- ③ RCP가 동작되지 않는 상태에서, 노심에서 발생하는 열로 인해 RCS 내부에서 발생하는 자연순환(Natural Circulation)

여기에서, RCP가 동작되는 경우는 모든 냉각재가 강제로 순환되므로 RCS 내에 정체 구간이 존재하지 않지만, 나머지 두 경우에 대해서는 정체구간이 생성될 가능성이 있다. ②의 경우를 도시하면 그림 1과 같다. 그림 2와 같은 잔열제거를 위한 RCS 냉각재 순환은 RCP들은 모두 정지되어 있는 상태에서 수행되기 때문에, 그림 1의 점선으로 표시된 부분은 냉각재가 순환되지 않게 된다. 따라서 이 부분은 잔열제거운전을 수행하는 동안 정체구간으로 남아있게 된다.

이 외에, RCS 냉각재가 자연순환을 하고 있을 경우에는 정체구간이 없지만, 만일 증기발생기가 손상되어 일차측의 압력과 이차측의 압력이 같아진다면 자연순환이 더 이상 유지될 수 없기 때문에 정체구간이 생성될 수 있다. 그림 3은 정상적인 증기발생기 2를 통한 자연순환 경로를 실선으로, 증기발생기 1이 손상되었을 경우 생성될 수 있는 정체구간을 점선으로 표시하여 보여준다.

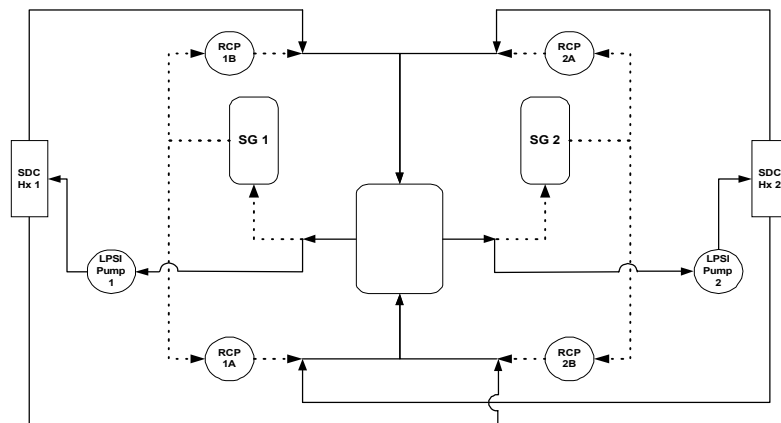


그림 1. 잔열제거를 위한 RCS 냉각재 순환

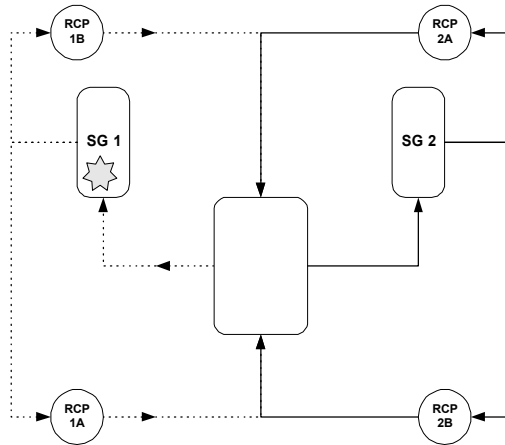


그림 2. 자연순환의 상실로 인해 생성될 수 있는 정체구간

RCS 내의 정체구간에 있는 희석된 냉각재를 노심으로 이동시킬 수 있는 유일한 수단은 RCP이다. 즉, 여러 가지 이유로 인해 정체구간에 존재하는 희석된 냉각재가 RCP의 기동으로 인해 급격히 노심으로 유입될 경우, 급격한 출력상승이 발생할 수 있는 것이다. 예를 들어, 자연순환의 상실로 인해 그림 2와 같은 정체구간이 생겼고, 정체구간에 포함된 냉각재가 충분히 희석된 후 RCP 1A 또는 1B가 기동된다면, 희석된 냉각재가 급격히 노심으로 유입되어 반응도 사고가 발생할 수 있다.

3. 붕소희석 사고 시나리오

붕소희석의 가능성들에 대해, 여러 참고 문헌 및 발전소 설계·분석자들의 경험으로부터 얻어진 발생 가능한 반응도 사고 시나리오를 정리하면 표 2와 같다. [2, 3, 5, 6]

표 2. 발생 가능한 반응도 사고 시나리오

관련 계통	설명	희석형태	시나리오
RWT (RWST)	Diluted RWST + Spurious SI	RCS 외부	1A
	Diluted RWST + Inadvertant Leakage to Reactor	RCS 외부	1B
	Diluted RWST during Reactor Cavity Filling (Cavity Flushing으로 인한 경우도 포함)	RCS 외부	1C
	LOCA + Diluted RWST	RCS 외부	1D
Accumulator (SIT)	Diluted Accumulator + Inadvertant Opening of MOV (Motor Operated Valve)	RCS 외부	2A
	Diluted Accumulator + Leaking MOV	RCS 외부	2B
	LOCA + Diluted Accumulator	RCS 외부	2C
Sump	LOCA + RAS + Diluted Sump Water	RCS 외부	3
SG	LOCA + SGTR	RCS 외부	4A
	SGTR + LOOP + Backfill Cooldown	RCS 내부	4B
	Dilution during SG Maintenance [Swedish Scenario]	RCS 내부	4C
CVCS	Blackout during Startup [French Scenario]	RCS 내부	5A
	Leaking RCP Seal during Pressurization	RCS 내부	5B
	Leaking RCP Thermal Barrier during Pressurization	RCS 내부	5C
RHRS	Diluted RHRS + RHRS Startup	RCS 외부	6

가. 핵연료 재장전수 탱크로 인한 반응도 사고

핵연료 재장전수 탱크(Refueling Water Tank; RWT 또는 Refueling Water Storage Tank; RWST)는 다음과 같은 기능을 수행할 수 있도록 설계된다.

- ① 냉각재 상실사고(Loss Of Coolant Accident; LOCA) 발생시, 노심의 미임계상태 유지 및 노심 냉각능력 확보를 위해 안전주입계통을 통해 주입되는 냉각재를 공급한다.
- ② 축압기(Accumulator)를 충수시키기 위한 붕산수를 제공한다.
- ③ 핵연료 재장전시, 고온관 및 개방된 원자로 상부를 통해 Cavity를 충수시키기 위한 붕산수를 제공한다.

이러한 기능을 수행하기 위해, 핵연료 재장전수 탱크에는 대기압 상태에서 2,000 ppm 정도의 붕소농도를 가지는 500,000 gal 정도의 냉각재가 채워져 있고, 붕소농도를 일정하게 유지하기 위해 최소한 1주일에 한번씩 붕소농도 및 부피를 측정하도록 기술지침서

(Technical Specification; TS)에 명시되어 있다. [5]

위에서 설명한 핵연료 재장전수 탱크의 기능들을 근거로, 표 3과 같은 발생 가능한 반응도 사고 시나리오를 고려해 볼 수 있다.

표 3. 핵연료 재장전수 탱크에 관련된 반응도 사고 시나리오

	시나리오의 개요
시나리오 1A	핵연료 재장전수 탱크가 회석되어 있고 안전주입 계통이 동작할 수 있는 상태이며 RCS의 압력이 대기압으로 유지되는 상태에서, 부적절하게 발생된 안전주입 신호에 의해 고압/저압 안전주입 펌프가 기동될 경우 회석수가 노심으로 유입된다.
시나리오 1B	핵연료 재장전수 탱크가 회석되어 있고 RCS의 압력이 대기압으로 유지되는 경우, 핵연료 재장전수 탱크부터 노심으로의 부적절한 밸브 배열로 인한 유로가 형성되면, 핵연료 재장전수 탱크와 노심의 높이 차이에 의해 회석수가 노심으로 유입된다.
시나리오 1C	핵연료 재장전수 탱크가 회석되어 있는 경우, 핵연료 재장전수 탱크에서 물을 공급받아 수행하는 Cavity 충수나 Water Flushing을 사용한 Cavity 청소 작업시 회석수가 고온관을 통해 노심으로 유입된다.
시나리오 1D	핵연료 재장전수 탱크가 회석되어 있는 경우, LOCA로 인해 발생된 안전주입 신호가 발생하고, 이때 기동된 고압/저압 안전주입 펌프를 통해 회석수가 노심으로 유입된다.

여기에서, 표 3과 같은 시나리오들에 대해 공통적으로 요구되는 전제 조건은 핵연료 재장전수 탱크의 회석이고, 다음과 같은 두 가지 가능성이 고려될 수 있다.

- ① 운전원 실수/기기의 오동작으로 인한 회석
- ② 순수(Demineralized Water 또는 Pure Water) 공급으로 인한 회석

핵연료 재장전수 탱크의 회석에 대한 기존의 분석결과에 따르면, Westinghouse 형태의 발전소인 Zion의 경우, 설치된 핵연료 재장전수 탱크의 붕소농도가 어느 순간 기술지침서의 제한치 보다 낮게 회석되어 있을 확률 값은 약 2.8×10^{-5} 로 보고 되어 있다. [5] 그러나 이 확률 값은 회석의 정도를 반영하기 보다는, 어떤 순간에 측정된 핵연료 재장전수 탱크의 붕소농도가 기술지침서의 제한치 이하로 측정될 경우만을 고려한 것이기 때문에 반응도 사고를 발생시킬 정도로 심하게 회석될 확률 값은 이보다 더 낮을 것으로 판단된다.

이 시나리오들의 발생하기 위해서는 핵연료 재장전수 탱크의 회석이 공통적으로 요구된다. 따라서 표준원전의 핵연료 재장전수 탱크 회석확률이 무시할 수 있을 정도로 작다면, 표준원전에서 이들 시나리오가 발생할 가능성 역시 무시할 수 있을 정도로 낮다고 판단할 수 있다. 즉, 앞에서 설명한 바와 같이, Westinghouse 형태의 발전소인 Zion의 경우 어떤 순간에 측정된 핵연료 재장전수 탱크의 붕소농도가 기술지침서의 제한치 이하일 확

를 값은 약 2.8×10^{-5} 로 계산되었고, 이때 Zion 및 표준원전에 포함된 핵연료 재장전수 탱크의 설계사양은 표 4와 같이 비교될 수 있다. [9-11]

표 4. 참조발전소와 표준원전에 포함된 핵연료 재장전수 탱크의 설계사양 비교

	참조발전소 (Zion)	표준원전
이름	RWST(Refueling Water Storage Tank)	RWT (Refueling Water Tank)
개수	1개	1개
탱크 체적	425,000gal ($1.608 \times 10^6 \ell$)	698,000gal ($2.642 \times 10^6 \ell$)
붕소 농도	1900 ~ 2100 ppm	4000 ~ 4400 ppm
RAS 발생조건	RWST 수위 $\leq 5\%$	RWT 수위 $\leq 7.6\%$
충전펌프 Suction	VCT 수위 ≤ 3 인치 또는 13% (VCT 체적 = 약 2,900gal)	VCT 수위 $\leq 5\%$ (VCT 체적 = 4,917gal)
기술지침서 (TS) 요구사항	최소 7일에 한번씩 붕소농도 및 저장된 붕산수의 체적을 확인	- 최소 7일에 한번씩 붕소농도 및 저장된 붕산수의 체적을 확인 (운전모드 1, 2, 3, 4) - 최소 72시간에 한번씩 RCS 및 RWT의 붕소농도를 확인 (운전모드 5 및 6)
희석 확률	2.8×10^{-5}	$\ll 2.8 \times 10^{-5}$

표 4에서 볼 수 있는 바와 같이, 표준원전의 경우 참조발전소에 비해 용량이 약 60% 크고 붕소농도 또한 약 2배 높게 유지되고 있으며 특히 발전소가 운전모드 5와 6에 있을 경우에는 72시간에 한번씩 RCS와 핵연료 재장전수 탱크의 붕소농도를 확인하게 되어 있다. 따라서 이러한 설계 특성들 및 기술지침서 요구사항들을 모두 고려해 볼 때, 핵연료 재장전수 탱크의 붕소농도 희석확률은 참조발전소에 비해 현저히 낮을 것으로 예측되기 때문에 표준원전에 대한 시나리오 1A, 1B, 1C 및 1D의 발생확률은 매우 낮다고 판단되어 초기사건으로 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

나. 축압기로 인한 반응도 사고

그림 3은 가압경수로에 포함된 전형적인 축압기(Accumulator) 또는 안전주입탱크(Safety Injection Tank; SIT)의 개략적인 계통도를 보여준다.

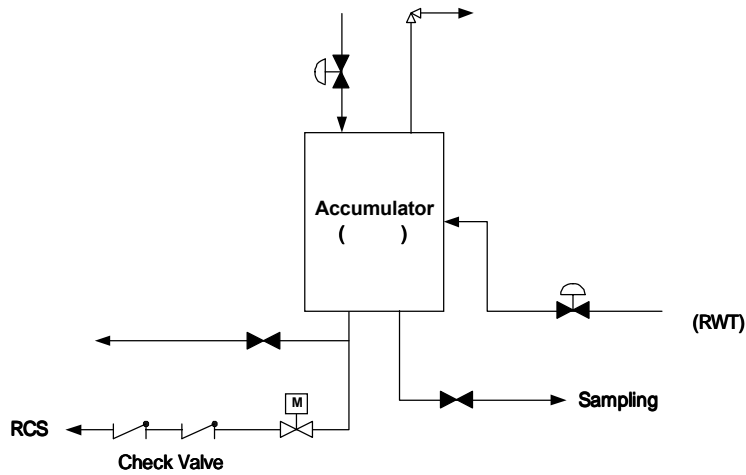


그림 3. 축압기의 개략적인 계통도

축압기의 주요 기능은 LOCA 발생시 안전주입펌프에 의한 유량 주입에 앞서 신속하게 냉각재를 주입하여 노심을 미임계상태로 유지하고 필요한 노심 냉각능력을 확보하는 것이다. 축압기에는 높은 붕소농도를 가지는 냉각재(약 2,000 ppm)가 채워져 있고 내부압력은 질소가스에 의해 약 625psig로 유지되기 때문에 RCS의 압력이 설정치 이하로 감소할 경우 자동적으로 냉각재를 주입하도록 설계되어 있다.

정상운전 중에는 RCS의 압력이 축압기의 압력보다 높기 때문에, RCS에서 축압기로의 냉각재 누출을 방지하기 위해 직렬로 연결된 2개의 Check Valve가 설치되어 있다. 또한 정기 점검 등을 위해 RCS의 압력을 축압기의 압력보다 낮게 유지시켜야 할 경우에는 축압기와 Check Valve 사이에 있는 차단밸브를 닫아 축압기의 물이 RCS로 누출되는 것을 방지하게 된다. 축압기의 수위는 Holdup Tank나 Drain Tank로의 방출과 RWT로부터의 충수를 통해 유지되고, 축압기의 질소 압력은 탱크 상단에 설치된 가스방출밸브 및 질소 충전밸브를 통해 일정하게 유지된다. 또한 축압기의 붕소농도를 일정하게 유지하기 위해, 축압기의 붕소농도는 최소한 한달에 한번 또는 축압기 부피의 1% 이상을 초과하는 부피 변화가 발생했을 경우에는 6시간 이내에 붕소농도를 확인하도록 기술지침서에 명시되어 있다. [5]

앞에서 설명한 축압기의 기능을 근거로, 발생 가능한 반응도 사고 시나리오를 표 5와 같이 고려해 볼 수 있다.

표 5에서 볼 수 있는 바와 같이, 축압기로 인한 반응도 사고가 발생하려면 일단 축압기가 회석되어 있어야 한다. 이때 축압기 회석의 원인으로 다음과 같은 두 가지 경우를 생각해

볼 수 있다.

- ① 핵연료 재장전수 탱크가 회석되어 있는 상태에서 축압기를 충수한 경우
- ② 정상 운전중 축압기보다 붕소농도가 낮은 RCS의 냉각재가 축압기의 Check Valve를 역류하여 축압기로 유입

표 5. 축압기에 관련된 반응도 사고 시나리오

	시나리오의 개요
시나리오 2A	축압기가 회석된 상태이고 RCS 압력이 축압기 압력보다 낮게 유지되고 있을 때, 축압기 차단밸브의 개방으로 인해 회석수가 노심으로 유입된다.
시나리오 2B	축압기가 회석된 상태이고 RCS 압력이 축압기 압력보다 낮게 유지되고 있을 때, 축압기 차단밸브의 누설로 인해 회석수가 노심으로 유입된다.
시나리오 2C	축압기가 회석된 상태에서 LOCA 발생으로 인해 RCS의 압력이 축압기 압력 이하로 감소할 경우, 회석수가 노심으로 유입된다.

이러한 원인으로 발생할 수 있는 축압기의 회석에 대한 기존의 분석결과에 따르면, Westinghouse 형태의 발전소인 Zion의 경우, 축압기의 붕소농도가 어느 순간 기술지침서의 제한치 보다 낮게 회석되어 있을 확률 값은 약 9.7×10^{-5} 로 계산되어 있다. [5] 그러나 이 확률 값은 회석의 정도를 반영하기 보다는, 어떤 순간에 측정된 축압기의 붕소농도가 기술지침서의 제한치 이하로 측정될 경우만을 고려한 것이기 때문에, 반응도 사고를 발생시킬 정도로 심하게 회석될 확률 값은 이보다 더 낮을 것으로 판단된다. 표준원전에 포함된 축압기의 회석 확률이 무시할 수 있을 정도로 작다면 이들 시나리오가 발생할 가능성 역시 무시할 수 있을 정도로 낮다고 판단된다. 이를 살펴보기 위해, 앞에서 이미 설명한 Westinghouse 형태의 발전소인 Zion의 축압기 설계사양과 표준원전의 안전주입탱크(Safety Injection Tank)의 설계사양을 표 6과 같이 비교하였다. [9-11]

표 5에서 볼 수 있는 바와 같이, 표준원전의 경우 참조발전소에 비해 축압기의 용량 및 붕소농도가 약 2배이고, 특히 축압기의 수위 및 압력은 운전조(Operating Crew)의 교대 때마다 확인하도록 되어 있기 때문에, 참조 발전소인 Zion의 경우와 비교해 볼 때 RCS 냉각재의 유입으로 인한 축압기의 붕소농도 회석 회석확률은 참조발전소에 비해 현저히 낮을 것으로 예측된다. 또한 정상운전 절차서에 따르면 원자로 정지 후 RCS 감압시, RCS 압력의 감소에 따라 SIT의 질소압력을 적절히 조절하여 주입압력을 감소시키다가

RCS 압력이 약 400 psi에 도달하면 SIT를 배기시키면서 SIT 차단밸브를 닫고 동시에 차단밸브의 전원도 차단하도록 명시하고 있다. [12] 따라서 이러한 설계 특성 및 기술지침서 요구사항들을 바탕으로 생각해 볼 때, 표준원전에 대한 시나리오 2A, 2B 및 2C의 발생확률은 매우 낮다고 판단되므로 초기사건으로 고려할 필요가 없다.

표 6. 참조발전소와 표준원전의 축압기 설계사양 비교

	참조발전소 (Zion)	표준원전
이름	Accumulator	SIT (Safety Injection Tank)
개수	4개	4개
탱크 체적	7,000 gal (2.65×10 ⁴ ℓ)	13,898 gal (5.26×10 ⁴ ℓ)
N ₂ 압력	625 psig	625 psig
붕소농도	1900 ~ 2100 ppm	4000 ~ 4400 ppm
기술지침서 (TS) 요구사항	<ul style="list-style-type: none"> - 최소 31일에 한번씩 붕소농도를 확인 - 탱크 배수시, 체적의 1% 이상을 초과하는 부피변화가 발생한 경우 6시간 내에 붕소농도를 확인 	<ul style="list-style-type: none"> - 최대 9시간마다 한번씩 탱크 수위 및 압력을 확인 (근무일지 기입사항) - 최소 31일에 한번씩 붕소농도를 확인 - 탱크 배수시 붕소농도를 확인
희석 확률	9.7×10 ⁻⁵	<< 9.7×10 ⁻⁵

다. 재순환 집수조로 인한 반응도 사고

격납용기 내에 위치한 재순환 집수조는 냉각재 상실사고가 발생했을 때 상실된 RCS 냉각재가 재순환 집수조에 모일 수 있도록 격납용기 바닥보다 낮은 위치에 설치되어 있고, 재순환 작동신호(Recirculation Actuation Signal; RAS) 발생시 공학적 안전설비계통의 붕산수원 역할을 수행한다. 따라서 냉각재 상실사고에 의한 재순환 작동신호 발생 후, 집수조의 물을 노심으로 주입시키는 장기 재순환(Long-term Recirculation) 운전을 수행하게 된다.

이러한 집수조의 기능을 근거로 생각해 볼 때, 집수조의 냉각재가 희석된 상태에서 RAS 발생에 따른 장기 재순환 운전을 수행할 때 희석된 냉각재가 노심으로 유입되는 경우를 고려해 볼 수 있다. 즉, 집수조로 붕소농도가 매우 낮거나 붕소를 거의 포함하지 않는 순수가 유입되어 집수조에 있는 냉각재의 붕소농도를 반응도 사고가 일어날 수 있는 제한치 이하로 희석시킨 경우, RAS가 발생되면 희석된 냉각재가 대규모로 노심에 유입되게 된다. 따라서 집수조를 희석시킬 수 있는 수원의 종류 및 희석 가능성을 표 7과 같이 정

리해 볼 수 있다.

표 7. 집수조의 희석을 위한 수원(Water Source) 및 희석 가능성 [5]

수원(Water Source)	희석 가능성
장기 재순환 운전 중 지진이 발생하여 Non-seismic 배관인 High Pressure Fire Protection 또는 Primary Water 계통의 배관이 파손되고, 누출된 순수가 집수조로 유입되는 경우	미국의 자료에 의하면, LOCA 발생 후 100일 내에 지진이 발생할 확률 값이 2.8×10^{-6} 이므로 LOCA 발생 후 지진으로 인한 순수유입 가능성은 무시할 수 있다.
배관의 Whip, Jet Impingement 및 missile 등으로 인해 Essential Raw Cooling Water, High Pressure Fire Protection 또는 Primary Water 계통 등의 배관이 파손되어 순수가 집수조로 유입되는 경우	발전소의 설계에 따라 고려할 필요가 있을 수도 있지만, 대부분 무시가 가능하다.
Primary Water 차단밸브의 손상으로 인해 Primary Water 계통의 냉각재가 PRT로 유입되어 압력이 높아지고, 이로 인한 PRT Rupture Disk 파손으로 인해 누출된 냉각재가 집수조로 유입되는 경우	무시가 가능하다.
RCP 모터 상부의 Springkler에서 누설이 발생하여 집수조로 유입되는 경우	무시가 가능하다.

재순환 집수조로 인한 사고가 발생할 경우, 대규모의 희석된 냉각재가 노심으로 유입될 수 있기 때문에 사고진행 속도는 빠르다고 생각할 수 있다. 그러나 집수조에 있는 냉각재의 붕소농도를 반응도 사고가 일어날 수 있는 제한치 이하로 희석시키려면 대단히 많은 양의 순수가 유입되어야 하고, 이렇게 많은 양의 순수가 유입될 경우 집수조 수위 증가로 인한 경보가 발생되므로 운전원이 쉽게 사고의 진행을 감지할 수 있을 것이다. 또한 표 6에서도 볼 수 있는 바와 같이, 비록 발전소에 따라 약간의 차이는 있을 수 있지만, 집수조의 희석가능성도 대부분 무시할 수 있을 정도로 낮다고 판단되기 때문에, 집수조로 인해 발생할 수 있는 반응도 사고의 방지를 위한 조치나 추후연구는 필요하지는 않을 것으로 판단된다. [3, 5]

라. 증기발생기로 인한 반응도 사고

2차측 냉각재는 붕소를 포함하지 않기 때문에, 2차측 냉각재를 RCS의 붕소농도를 희석시킬 수 있는 수원으로서 생각해 볼 때, 표 8과 같은 사고 시나리오들이 증기발생기로 인해 발생할 수 있는 반응도 사고 시나리오로 고려될 수 있다.

표 8. 증기발생기로 인해 발생할 수 있는 반응도 사고의 시나리오

	시나리오의 개요
시나리오 4A	LOCA 발생으로 인해 RCS 압력이 급격히 떨어지고 있을 때 증기발생기 튜브 파열(Steam Generator Tube Rupture; SGTR)이 발생하여 2차측 냉각재가 1차측으로 급격히 유입된다.
시나리오 4B	SGTR 발생시 소외전원상실도 발생하여 RCP가 정지된 경우, 운전원이 RCS 후속냉각 방법으로 역처리(Backfilling) 방법을 선택하면 2차측 냉각재가 정체구간으로 유입되기 때문에, RCP가 다시 기동될 경우 정체구간에 포함된 희석된 냉각재가 노심으로 급격히 유입된다.
시나리오 4C	원자로가 정지된 상태이고 잔열제거시스템이 동작중일 때, 증기발생기의 보수나 검사를 수행한 작업자의 실수로 인해 증기발생기 튜브의 누설이 발생할 경우 2차측 냉각재가 정체구간으로 유입되기 때문에, RCP가 다시 기동될 경우 정체구간에 포함된 희석된 냉각재가 노심으로 급격히 유입된다.

여기에서 Westinghouse 형태의 발전소에 적용되는 비상운전절차서에는 이러한 시나리오가 발생할 수 있지만, 한국형 표준원전 형태의 발전소에 적용되는 비상운전절차서에는 역보충 냉각방법이 없고 오직 주증기 덤프를 통한 RCS 냉각이 수행된다. [13] 또한 SGTR 발생시 적용해야 하는 E-3 비상운전절차서에서는 증기발생기를 통한 2차측 냉각재의 유입으로 인한 RCS 붕소희석을 방지하기 위해 제 16.0 단계에서 “RCS 압력이 증기발생기 압력보다 낮을 때, 주기적인 RCS 붕소농도 확인을 수행한다”라고 명시하였기 때문에, [13] 증기발생기를 통한 2차측 냉각재의 유입으로 인한 붕소희석의 발생 가능성은 매우 낮다고 예상할 수 있다. 따라서 이러한 형태의 반응도 사고는 초기사건으로 고려할 필요가 없다. 그러나 시나리오 4C의 경우는 고려해야 하는 작업자의 오류 형태가 다양할 뿐 아니라 현실적으로 이용 가능한 자료가 빈약하기 때문에, 인간오류에 대한 상세한 연구가 수행된 후에 정량적 상세 분석이 이루어져야 한다고 판단된다.

마. 화학 및 체적제어계통으로 인한 반응도 사고

화학 및 체적제어계통(Chemical and Volume Control System; CVCS)은 크게 RCS의 체적제어, RCP의 밀봉수 공급, 노심의 붕소농도 제어 및 RCS의 불순물 여과기능을 수행하는 계통으로 RCS의 붕소농도 증가 및 감소는 체적제어탱크(Volume Control Tank; VCT)내의 붕소농도를 조절하여 수행된다. 즉, 원자로 보충수 탱크에서 공급되는 순수의 양을 증가시키면서 핵연료 재장전수 탱크를 통해 주입되는 붕산수 양을 감소시키면 VCT의 붕소농도를 감소시킬 수 있고, 반대로 순수의 양을 감소시키면서 붕산수 양을 증가시키면 원하는 정도까지 VCT의 붕소농도를 증가시킬 수 있다. 이러한 방법으로 VCT의 붕

소농도를 조절한 후, 충전펌프를 통해 RCS의 저온관으로 주입하여 RCS의 붕소농도를 조절하게 된다. 또한 충전펌프는 RCP의 밀봉을 위한 밀봉수(Seal Water)도 공급해 주는 역할을 한다.

위에서 설명한 CVCS의 기능을 바탕으로, 발생 가능한 사고 시나리오를 표 9와 같이 생각해 볼 수 있다.

표 9. CVCS로 인해 발생할 수 있는 반응도 사고의 시나리오

	시나리오의 개요
시나리오 5A	발전소 재기동 도중, RCS의 붕소농도 회석을 위해 VCT의 붕소농도를 낮추고 있을 때, 소외전원상실사고가 발생하여 RCP는 정지되고 RCS 내에 정체구간이 생성된다. 그러나 디젤발전기에 의해 전원이 공급되는 충전펌프는 소외전원 상실시에도 계속 기동되어 VCT에 있던 회석된 냉각재가 모두 정체구간으로 주입되고, 소외전원이 회복되어 RCP가 재기동 될 때 노심으로 급격하게 유입된다.
시나리오 5B	간열제거계통 또는 정지냉각계통이 운전중이고 RCS의 붕소농도 회석을 위해 VCT의 붕소농도를 낮추고 있을 때, RCP 밀봉수가 누출되어 RCS의 정체구간으로 유입된다. 이렇게 정체구간으로 유입된 밀봉수는 RCP 기동시 노심으로 급격히 유입된다.
시나리오 5C	간열제거계통 또는 정지냉각계통이 운전중일 때, 기기냉각계통의 순수가 RCP 열 차단벽(Thermal Barrier)을 통해 누출되어 RCS의 정체구간으로 유입된다. 이렇게 정체구간으로 유입된 밀봉수는 RCP 기동시 노심으로 급격히 유입된다.

시나리오 5A는 RCS 회석운전도중 소외전원상실사고가 발생하여 RCP가 정지된 상태에서, 충전펌프만 디젤 발전기로부터 전원을 공급받아 회석된 냉각재를 RCS에 계속 공급하는 경우를 고려하고 있다. 따라서 이 사고가 발생하려면 소외전원상실사고 발생시 다음과 같은 조건들이 만족되어야 한다.

- ① 발전소 기동을 위해 VCT의 붕소농도를 낮춘 후 충전펌프를 통해 RCS로 공급하는 붕소회석운전을 수행중이다.
- ② 소외전원상실사고 발생시 RCP는 정지되지만, 충전펌프는 디젤발전기로부터 전원을 공급받기 때문에 정지되지 않는다.
- ③ 충전펌프가 VCT의 회석된 냉각재를 RCS로 계속 주입해도, 운전원은 RCS 회석을 막기 위한 어떠한 조치도 취하지 않는다.

표준원전의 경우는, 그림 15에서 알 수 있는 바와 같이, 소외전원상실사고가 발생하면 RCP로 공급되는 전원이 상실되면 디젤 발전기가 가동되어 충전펌프에 전원은 공급되지만, 운전원이 충전펌프의 기동스위치를 누르기 전에는 기동되지 않도록 설계되어 있다.

[9, 11]그러나 전원이 공급되면 운전 절차서에 따라 운전원은 1차계통의 냉각재 재고량 및 가압기의 수위조절을 위해 충전펌프를 기동하는 것으로 기술되어 있으므로 시나리오 5A는 표준원전에서도 상당한 빈도를 갖는 사건으로 분류될 수 있다.

시나리오 5B 및 5C에서는 각각 RCP 밀봉수 및 열 차단벽(Thermal Barrier)을 통해 희석된 냉각재가 RCS의 정체구간으로 유입되는 경우를 고려하고 있다. 그러나 표준원전의 경우, 원자로가 정지상태일 때 RCP는 Stop Seal을 사용한 기계적인 밀봉상태를 유지하기 때문에 상당히 낮은 밀봉수 누출가능성을 가질 것으로 판단된다. [11] 또한 표준원전과 같은 CE 형태의 발전소는 Westinghouse 형태의 발전소와는 달리 RCP에 열 차단벽이 없기 때문에, 열 차단벽을 통한 누출 가능성은 고려할 필요가 없다. [11]

바. 잔열제거계통으로 인한 반응도 사고

잔열제거계통(RHRS) 또는 정지냉각계통(SCS)은 노심에서 생성된 잔열을 냉각시키는 기능을 수행한다. 잔열을 제거하기 위한 냉각재 순환 경로는 고온관에서 RCS 냉각재를 추출한 후 열교환기를 거쳐 저온관으로 주입하게 되어 있고, 이때 RHR 열교환기는 기기 냉각수 계통 냉각재와의 열교환을 통해 노심에서 발생한 열을 제거한다. 이러한 RHR 계통의 기능을 바탕으로 발생 가능한 반응도 사고 시나리오를 표 10처럼 생각해 볼 수 있다.

프랑스에서 수행한 분석결과에 의하면, RHR 계통에 포함된 모든 배관이 순수(Demineralized Water)로 가득 차있고 노심의 내부순환이 없을 때 RHR 계통이 연결될 경우 약 75초 만에 RCS 붕소농도가 1500 ppm에서 0 ppm으로 감소할 수 있음이 보고되었고, 이러한 시나리오의 발생 확률은 약 $1.0 \times 10^{-8}/RY$ 로 계산되었다. [3]

표 10. RHR 계통으로 인해 발생할 수 있는 반응도 사고의 시나리오

시나리오의 개요	
시나리오 6	노심의 잔열제거를 위해 RHR 계통을 RCS에 연결시킬 때, RHR 계통이 희석된 냉각재를 포함하고 있는 사실을 알지 못하고 RCS에 연결시킬 경우 희석된 냉각재가 노심으로 급격히 유입된다.

그러나 이와 같은 빠른 사고 진행속도에도 불구하고, 일반적인 발전소의 경우 RHR 계통이 순수로 가득 채워져 있다는 가정은 너무 극단적이다. 또한 RHR 계통의 기동전에 RCS와 RHR 계통의 붕소농도를 비교하여 차이가 있을 때는 RHR 계통을 기동시키지 않는다는 점을 고려한다면 실제적인 사건 발생 가능성은 계산된 발생 확률보다 낮을 것으로

로 예측된다.

표준원전의 경우 정지냉각계통을 RCS로 연결하기 전에 두 계통간의 붕소농도 차이를 측정하도록 계통운전절차에 명시하고 있고, 특히 정지냉각계통이 운전 중일 때는 1시간 간격으로 붕소농도를 감시하도록 명시하고 있다. [12] 따라서 참조발전소의 발생확률인 1.0×10^{-8} 보다 훨씬 낮은 값을 가질 것으로 예상되기 때문에, 정지냉각계통에 포함된 희석수로 인한 반응도 사고는 초기사건으로 고려될 필요가 없다.

5. 결 론

지금까지 살펴본 바와 같이, 현재까지 연구된 반응도 사고 시나리오들을 바탕으로 표준원전에 대한 반응도 사고 가능성을 정성적으로 평가하였다. 그 결과 대부분의 시나리오들에 대해 충분히 낮은 발생확률을 가질 것으로 예측되었고 일부의 시나리오에 대해서는 정량적인 분석이 수행되어야 함을 지적하였다.

표준원전의 경우는 대용량·고농도의 RWT 및 SIT가 설치되어서 붕소의 희석확률이 참조발전소(ZION)에 비해 현저히 낮을것으로 예상된다. 그러나 시나리오 5A와 같이 사고의 발생확률도 무시할 수 없을 정도이고 사고로 인한 위험도(사고진행속도)도 상당히 커서, 프랑스나 미국에서도 관심을 갖고 연구를 수행하고 있는 소외전원상실로 인한 반응도 사고 시나리오들에 대해서는 비교적 높은 발생확률을 가질 것으로 예상되며 이에 따른 정량적 평가가 이루어져야 한다.

표준원전에서는 운전원이 기동 스위치를 눌러야만 충전펌프가 기동되기 때문에 사고 발생확률이 크게 낮아질 것이라고 예측된다. 그러나 전원 재공급 시 운전원은 운전절차서에 따라 충전펌프를 기동하여 1차측 냉각재 재고량 및 가압기 수위조절을 하여야 하므로 표준원전에서도 시나리오 5A는 PSA 수행 시 고려되어야 한다. 또한 증기발생기의 보수작업을 수행하던 작업자의 실수로 인한 2차측 냉각재 유입을 고려하는 Swedish Scenario의 경우, 고려해야 하는 작업자의 오류 형태가 다양할 뿐 아니라 현실적으로 이용 가능한 자료가 빈약하기 때문에, 인간오류에 대한 상세한 연구가 수행된 후에 정량적 상세 분석이 이루어져야 한다고 판단된다.

최근에는 시나리오 4A와 유사한 경우로써 냉각재 상실사고(LOCA)발생 후 이차측으로의 잔열제거 시 응축된 순수가 증기발생기의 출구에 모일 경우 이에 따른 붕산희석에 의한

영향이 여러 실험을 통하여 활발히 진행되고 있다.[14] 일반적인 정지저출력 PSA에서는 이러한 시나리오는 아직 고려되고 있지 않으나 이러한 사고 시나리오에 대해서도 정량적인 연구가 수행되어야 한다.

본 보고서에서 언급한 각 시나리오의 특성들을 발전소 비상, 비정상 및 정상운전 절차서 등에 주의사항으로 추가시킨다면, 발전소 안전성 향상에 한층 더 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 한국전력공사, "Final Safety Analysis Report for YGN 3/4"
- [2] Sven Jacobson, "Some Local Dilution Transients in a Pressurized Water Reactor," Thesis, No. 171, Linköping Studies in Science and Technology, November 1989.
- [3] Westinghouse Electric Corporation, "Risk of PWR Inadvertant Criticality During Shutdown and Refueling," NSAC-183, December 1992.
- [4] A. K. Brook, "The Sizewell B Shutdown PSA," Presentation to the IAEA Technical Committee Meeting on "Procedures for PSA for Shutdown and other Low Power Operating Modes," Arnhem, Netherlands, November 1994.
- [5] D. J. Diamond, C. J. Hsu, R. Fitzpatrick, "Reactivity Accidents-A Reassessment of Design-Basis Events," NUREG/CR-5368, U.S. Nuclear Regulatory Commission, January 1990.
- [6] D. J. Diamond, P. Kohut, H. Nourbakhsh, K. Valtonen, P. Secker, "Probability and Consequences of Rapid Boron Dilution in a PWR," NUREG/CR-5819, U.S. Nuclear Regulatory Commission, June 1992.
- [7] M. Simon, "Identification of Adverse Initiating Events in PWR during Power & Shutdown States and the Assessment of Their Consequences on Plant Safety," Presentation to the IAEA Technical Committee Meeting on "Procedures for PSA for Shutdown and other Low Power Operating Modes," Arnhem, Netherlands, November 1994.
- [8] 한국전력공사 고리연수원, "비상운전지침개요 (II)," 주제어실-24-나, 1989.
- [9] 한국전력공사 영광원전훈련센터, "표준경수로 계통설비 (상)," 1996.
- [10] 한국전력공사 울진원자력본부, "운영기술지침서," 1998.

- [11] 한국원자력연구소 원자력연수원, “한국형 표준원전 계통실무,” KAERI/GP-108/96, 1996.
- [12] 한국전력공사 울진원자력본부, “울진 제2 발전소 운영절차서 (종합운전),” 1997.
- [13] 한국전력공사 울진원자력본부, “울진 제2 발전소 운영절차서 (비상운전),” 1997.
- [14] K.Umminger et al, “Thermal hydraulics of PWRS with respect to boron dilution phenomena. Experimental results from the test facilities PKL and UPTF”, Nuclear Engineering and Design 204, 2001, pp 191-203