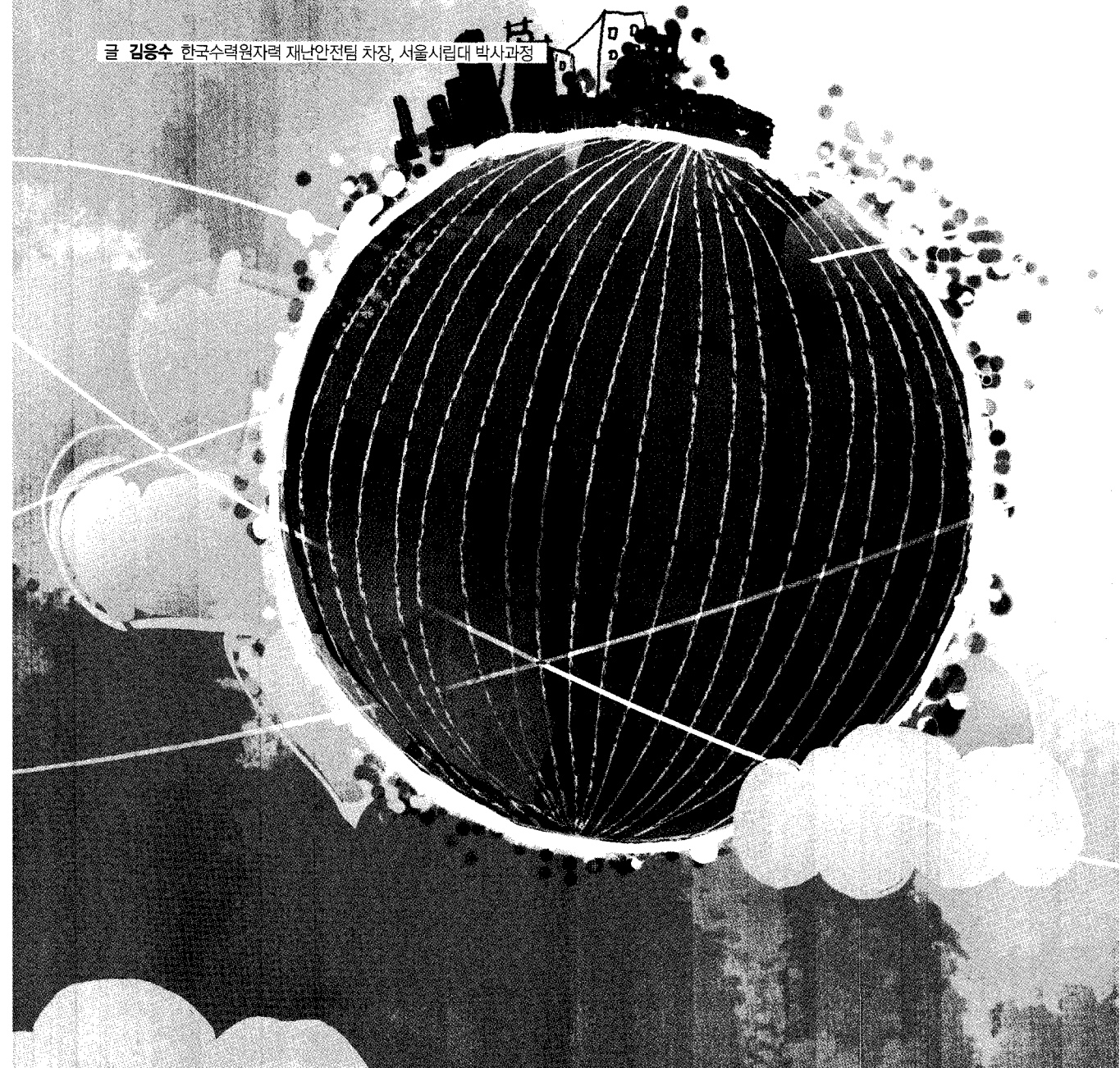


국내 원자력발전소 현황과 안전관리 실태

글 김응수 한국수력원자력 재난안전팀 차장, 서울시립대 박사과정



1. 머리말

최근 지구 온난화와 각국의 에너지 자원 확보 경쟁의 심화로 전 세계가 친환경적이면서 경제적인 원자력 에너지에 주목하고 있는 시점에서 지난 3월 11일 일본 후쿠시마 원전 사고는 원자력산업계에 새로운 과제를 던져주었다.

부존자원 빈국으로 세계정세에 따라 에너지 공급이 불안정하게 변하는 취약한 에너지 안보구조를 갖고 있는 우리나라에서 원자력발전은 급증하는 전력수요에 맞춰 안정적인 전력공급으로 국가 산업발전의 원동력인 한편, '저탄소 녹색성장'이라는 국가 비전에 가장 부합하는 중추적 에너지원으로 자리를 확보하고 있다고 볼 수 있다.

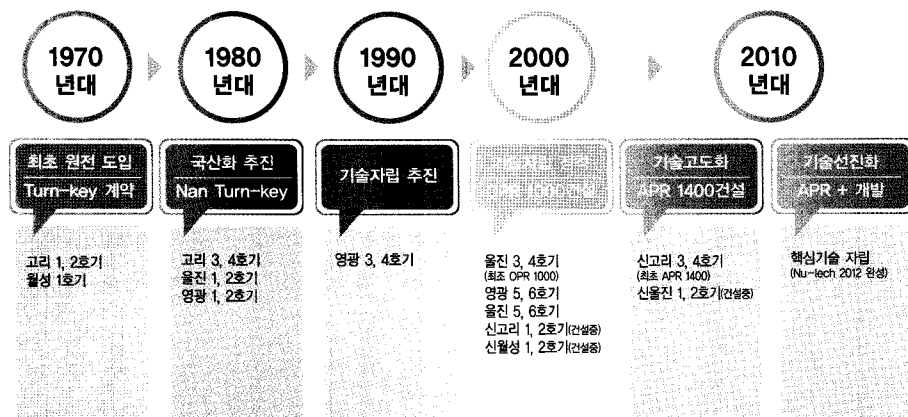
이러한 시점에서 대한민국 경제의 버팀목 역할을 하고 있는 원자력발전에 대한 막연한 불안감과 부정적 입지보다는 정확한 이해와 냉철한 판단이 무엇보다 절실하다. 그런 뜻에서 국내 원전에 대한 현황과 안전성, 그리고 일본 원전 사고 현황에 대해 간략히 살펴보고자 한다.

2. 국내 원자력발전 현황

에너지 다변화 및 탈석유 전원정책으로 1978년 고리1호기를 턴키베이스로 건설한 이후 30여년의 세월동안 한국표준형원전(OPR1000), 신형경수로(APR1400)에 이어 APR+까지 새로운 노형을 개발하면서 세계 역사상 유례가 없는 짧은 기간 안에 세계 6위의 원자력발전 강대국이 되었다.

2011년 1월 기준 우리나라 전력생산량의 31%를 점유하고 있는 원자력 발전설비 용량은 전력설비용량 77,078MW의 24.3%를 차지하고 있으며, 국가 에너지 기본계획에 따르면 2030년에는 원전 설비용량이 41%까지 확대하는 것으로 되어 있다.

이는 원자력발전은 발전원가 중 연료비의 비율이 13% 정도로 매우 낮고 우라늄 연료는 준 국산에너지로 연료의 수급이 화석연료에 비해 훨씬 안정적이며 무엇보다도 이산화탄소 배출증가율이 OECD 국가 중 1위로 온실가스 문제가 어느 나라보다도 심각한 우리나라에서 선택할 수 있는 최선의 대안일 것이다.

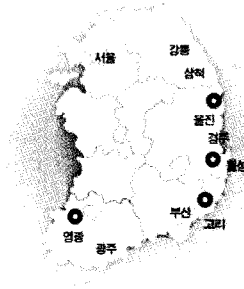


[그림 1] 국내 원자력발전의 역사

Special Theme 1

국내 원자력발전소 현황과 안전관리 실태

- 건설중
- 가동중
- 건설준비



울진원자력

울진 1, 2, 3, 4, 5, 6호기 ■■■■■■
 신울진 1, 2호기 ■■

월성원자력

월성 1, 2, 3, 4호기 ■■■■
 신월성 1, 2호기 ■■

고리원자력

고리 1, 2, 3, 4호기 ■■■■
 신고리 1, 2, 3, 4, 5, 6호기 ■■■■■■

영광원자력

영광 1, 2, 3, 4, 5, 6호기 ■■■■■■

호기	위치	용량(만KW)	원자로형	상업업전일
고리#1		58.7		'78. 4. 29
고리#2		65.0		'83. 7. 25
고리#3	부산시	95.0	가압경로수	'85. 9. 30
고리#4	기장군	95.0		'86. 4. 29
신고리#1		100.0	가압경로수	'11. 2. 28
신고리#2		100.0		('11. 12)
신고리#3	울산시	140.0	신형경로수	('13. 9)
신고리#4	울주군	140.0		('14. 9)
월성#1		65.9		'83. 4. 22
월성#2		70.0		'97. 7. 1
월성#3	경북	70.0	가압경로수	'98. 7. 1
월성#4	경주시	70.0		'99. 10. 1
신월성#1		100.0	가압경로수	('12. 3)
신월성#2		100.0		('13. 1)
영광#1		95.0		'86. 6. 25
영광#2		95.0		'87. 6. 10
영광#3	전남	100.0		'95. 3. 31
영광#4	영광군	100.0	가압경로수	'96. 1. 1
영광#5		100.0		'02. 5. 21
영광#6		100.0		'02. 12. 24
울진#1		95.0		'88. 9. 10
울진#2		95.0		'89. 9. 30
울진#3	경북	100.0	가압경로수	'98. 8. 11
울진#4	울진군	100.0		'99. 12. 31
울진#5		100.0		'04. 7. 29
울진#6		100.0		'05. 4. 22
신울진#1	경북	140.0		('16. 6)
신울진#2	울진군	140.0	신형경로수	('17. 6)

※ 설계수명 : 고리 1호기, 월성 1~4호기 : 30년, 이외의 원전 : 40년

[그림 2] 국내 원자력발전소 현황

- 운전중 : 441기
- 건설중 : 65기 (PWR 55, PHWR 3, BWR 4, FBR 2, LWGR 1)
- 30년 이상 운전중 : 174기 (총 가동원전의 39.4%)
- 40년 이상 운전중 : 26기 (총 가동원전의 5.9%)

[도표 1] 세계 원전 종합 현황(2011. 1. IAEA PRIS)

다른 한편으로 원자력발전을 시작할 당시 석유발전 비중이 70% 이상이었으나 지금은 5% 미만으로 낮추어져 있으며, 한국에서 1982년부터 2009년까지 물가는 230% 상승한 반면 전기요금은 약 14%에 그칠 정도로 저렴한 가격으로 전력을 안정적으로 공급하여 왔는데 이는 원자력발전 비중을 지속적으로 높였기 때문에 가능한 결과라고 볼 수 있다.

이렇듯 원자력발전은 에너지수요 급증, 다소비형 산업구조, 대체에너지 개발한계, 이산화탄소 배출급증, 에너지 안보위협 등 우리의 어려운 에너지 환경을 감안할 때 필수적인 국가에너지임에는 틀림없다.

현재 우리나라는 원자력발전소는 가압경수로(PWR) 17기, 가압중수로(PHWR) 4기로 총 21기가 상업운전중이며, 개선형 한국표준 원전인 신고리 2호기와 신월성 1,2호기, 신형경수로원전인 신고리 3,4호기, 신울진 1,2호기가 건설 중에 있다.

고리1호기는 설계수명 이후 계속 운전 중이며, 월성1호기가 설계수명기한이 다가옴에 따라 계속운전을 준비하고 있다. 설계수명이란 원전 설계 시 설정한 기간으로서 원전의 안전성과 성능기준을 만족하면서 운전 가능한 최소한의 기간을 말하는 것이다. 설계수명에 도달한 원전은 법에 규정된 기준에 따라 안전성을 평가하여 만족하는 경우에는 계속운전이 가능하다.

최근 과학기술의 발달에 따라 원전 설계수명을 재

평가한 결과, 설계 당시에 지나치게 보수적으로 설계수명을 설정하였다는 점과 정비, 운영기술의 발달로 설계수명 이후에도 충분히 안전성 확보가 가능하다는 것이 밝혀져 미국, 영국, 일본 등과 같은 선진국에서도 설계수명이 도래한 원전에 대해 경년 열화 등 안전성을 평가하여 만족할 경우에는 설계수명 이후 계속운전을 허용하고 있다.

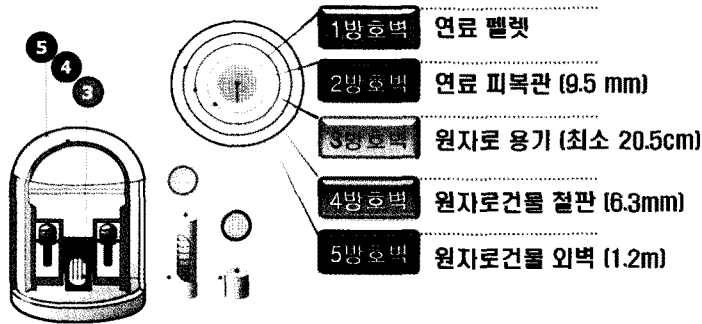
이는 최근 의료기술 및 생활수준의 향상으로 한국인의 평균수명이 연장되는 것처럼, 원자로 시설도 최상의 상태로 유지 관리하면 설계수명 이상으로 계속운전이 가능하다고 보면 되겠다.

3. 국내 원전설비 안전대책

원전 설비는 고도의 안전성을 갖추기 위해 건설 및 운영의 전 과정에 걸쳐 보통의 산업시설과는 비교할 수 없는 까다로운 기준을 적용하고 있다.

가. 원자력발전의 안전설계

원자력발전은 안전성을 최우선으로 하고 있어 심층방어개념 아래 다중성, 다양성, 독립성을 설계 기준으로 삼고 있다. 심층방어개념이란 사고방지와 방사성물질의 누출방지를 위해 안전설비를 다중으로 마련한 것으로, 기기고장이나 운전원 실수가 발생해도 발전소 종사자나 일반국민에 큰 피해 없이



[그림 3] 다중방호 개념의 예 : 방사능물질 외부누출 방지를 위한 물리적 방호

파급효과가 완화될 수 있도록 설계, 건설, 운영 등 모든 단계에서 적용되는 안전성 확보 원칙을 말한다. 이러한 안전성을 물리적 개념으로 설명할 수 있는 다중방호개념은 방사성 물질이 발전소 외부로 누출되는 것을 방지하기 위하여 5중 방호벽을 갖추는 것이다.

나. 원자력발전의 안전설비

원자력발전의 안전설비를 '공학적 안전설비' 라고 한다. 여기에는 사고방지설비와 사고완화설비가 있다. 사고방지설비는 운전 중 비정상상태가 발생할 경우 안전하게 원자로를 정지시켜 냉각시키는 설비이다. 사고완화설비는 방사성물질이 외부로 누출되는 것을 방지하기 위해 사고를 완화해주는 설비이다.

먼저 이상상태의 발생을 가능한 방지하되, 이상상태가 발생하였을 때에는 이의 확대를 최대한 억제한다. 만일 이상상태가 확대되어 큰 사고로 진전되었을 때에는 그 영향을 최소화하고, 주변주민을 보호하도록 사고의 진전 단계마다 적절한 방어체계를 갖추는 것을 말한다.

이상상태의 발생 방지수단으로서 모든 시설에 대하여 충분한 안전여유도를 갖도록 설계하고 있으며, 안전에 중요한 설비는 고장에 대비하여 설비를

다중으로 갖추어 두고 있다. 따라서 확률적으로 이 이상상태의 발생가능성이 매우 낮지만, 만일 기기의 고장이나 운전원의 실수가 겹쳐 이상상태가 발생하면 원자로보호설비가 이를 자동적으로 감지하여 원자로를 안전하게 정지시킴으로써 원전연료가 손상되는 등의 중대한 사고로 진전되는 것을 방지해 준다. 그럼에도 불구하고 만에 하나 중대한 사고가 발생하거나 발생할 가능성이 있는 경우, 비상노심 냉각장치와 원자로건물 등 안전설비가 사고의 진전을 완화시키고 방사성물질이 주변환경으로 누출되는 것을 방지하도록 설계되어 있다.

다. 자연재해 철저 대비

원자력발전은 이러한 안전설비 외에 지진이나 태풍 등 자연재해에 대해서도 충분한 안전성이 확보하도록 되어 있다.

우선 원자력발전소 부지 결정은 여러 항목에 대한 조사과정을 거쳐 이루어지지만 특히 지질 및 지진 조사는 부지결정 과정 중에서 가장 중요한 항목에 포함된다.

원자력법 및 교육과학기술부 고시에 따라 준용하고 있는 미국연방법(10 CFR Part. 100 부록 A, 부지평가기준)에 의해 부지를 중심으로 반경 320km

이내에 광역 지질조사와 지진조사를 통하여 가장 크게 영향을 미칠 수 있는 지진을 선정할 후 여기에 여유도를 더해 원자력발전소 부지가 결정되며, 또한 원자력발전소가 세워지는 부지의 반경 40km, 8km, 1km 이내 지역에 대하여는 보다 정밀한 방법으로 조사를 실시하는데 지질구조, 단층분포, 암질 등을 확인하기 위하여 암석 등을 봉 형태의 코아로 천공 조사 등 가능한 모든 방법으로 조사하고 검토하여 부지를 선정하게 된다.

원자력발전소의 내진설계는 일반 건물과는 달리 부지조사단계에서 분석한 부지주변의 단층과 과거 발생 지진을 토대로 부지에 영향을 미칠 수 있는 최대지진값을 산정한 후 여기에 안전 여유를 감안하여 내진설계값을 정하고 있다. 우리나라는 기존 가동원전에 대해서는 0.2g(규모 6.5), 신형원전은 0.3g(규모 7.0)로 정하고 있으나, 기존 원전에 대한

재평가('07. 8~'08. 12) 결과, 모든 구조물이 최소 0.4g의 지진에도 안전기능을 유지하는 것으로 확인(예시 : 격납건물 0.97g 등)되었다.

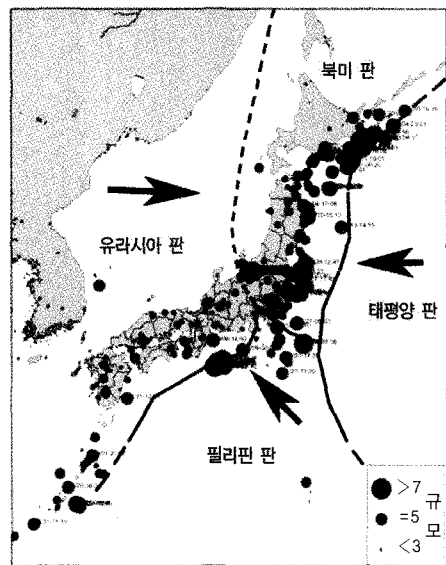
국내원전 해일 안전성에 대해서는 발생가능 최대 지진해일, 폭풍해일 등 제반 요인을 모두 고려한 경우에도 원전부지별로 0.33~3.0m의 해수면 상승 영향이 있는 것으로 평가되어 설계 홍수위에 여유고를 더해 부지 표고를 결정함으로써 부지 및 시설이 침수가능성 없이 안전하게 방호되도록 설계되어 있다.

우리나라는 지리적으로 일본이나 대만과는 달리 환태평양 지진대로부터 약 600km 이상 떨어진 유라시아 판 내부에 위치하고 있어 설계지진을 초과하는 대지진이 발생할 가능성이 없는 것으로 밝혀졌으며, 국내 계측지진 최고값은 규모 5.3으로 현재까지 규모 6.0이상 지진이 발생한 사례가 없다.(그림 4 참조)

규모	한국	일본	전세계
3.0이상	10회/년	1,200회/년	1,000,000회/년
4.0이상	0.7회/년	400회/년	15,000회/년
5.0이상	0.1회/년	100회/년	3,000회/년
6.0이상	-	10회/년	100회/년

한반도 주요 지진발생 현황

NO	발생 일시	규모	발생지역
		M	
1	1978.09.16	5.2	충북 속리산
2	1978.10.07	5.0	충남 홍성읍
3	1980.01.08	5.3	평북 삭주
4	2003.03.30	5.0	인천 백령도
5	2004.05.29	5.2	경북 울진



[그림 4] 한국, 일본 및 전 세계 지진발생빈도 비교

4. 우리나라와 일본의 원자력발전소 설계특성 및 안전성 비교

최근 지구 온난화와 각국의 에너지 자원 확보 경쟁의 심화로 전 세계가 친환경적이면서 경제적인 원자력 에너지에 주목하고 있는 시점에서 지난 3월 11일 일본 후쿠시마 원전 사고는 원자력산업계에 새로운 과제를 던져주었다.

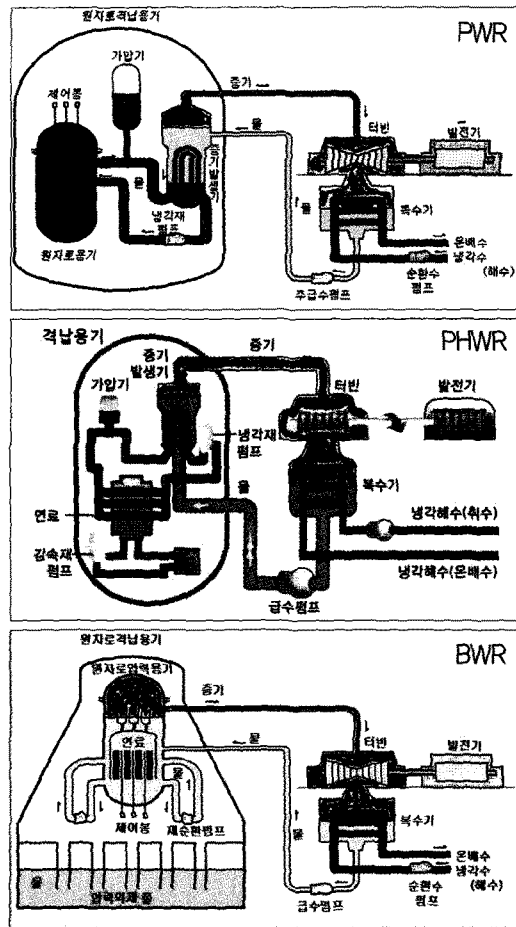
가. 일본 후쿠시마 원전 사고 개요

2011년 3월 11일 발생한 후쿠시마 원전사고는 일본 동북 지방의 미야기현 동쪽 해저에서 발생한 리히터 규모 9.0의 대형 지진이다. 진앙지 근접지역인 미야기현(오나가와 원전), 후쿠시마현(후쿠시마 1, 2 원전)에서 가동 중이던 10기의 원자로가 자동 정지 되었으며, 지진에 연이어 발생한 쓰나미에 의한 침수여파로 전기설비의 기능이 마비됨으로써 일부 원자로 및 사용후핵연료 저장수조의 냉각기능이 상실되어 대형 사고를 촉발하는 계기가 되었다.

사고가 발생한 후쿠시마 제1원전의 경우에도 지진으로 인해 외부와의 전원공급이 모두 상실되었으나, 초기에 발전소 내 설치된 비상디젤발전기와 축전지가 정상 작동하여 원자로 냉각 등 필수적인 안전기능이 유지되었다. 그러나 이번 사고확대의 주요 계기가 된 대형 쓰나미로 인한 해수 범람으로 인해 비상디젤발전기가 제 기능을 상실하였으며, 수 시간 후 축전지마저도 용량이 고갈되어 원자로 냉각기능이 완전히 상실된 상태에서 장기간 외부 전원공급이 늦어졌다. 이에 따라 핵연료봉의 과열로 인해 노심용융이 발생하였고, 사고 진행과정에서 고온의 핵연료 피복재와 냉각재와의 반응에 의해 생성된 수소가 폭발하면서 대형 사고로 확대된 것이다.

나. 일본 원자로형과 우리 원전노형의 차이점

원자력발전의 원리는 우라늄이 핵분열 할 때 나오는 에너지로 물을 끓이고 이 물이 증기가 되어 터빈을 돌려 전기를 만드는 것이다. 전기를 생산하는 원자로로는 사용하는 냉각재와 감속재의 종류에 따라 경수로, 중수로, 기체냉각로 등으로 나뉜다. 이 중 경수로로는 냉각재로 경수, 즉 보통 물을 사용하며, 비등경수로(Boiling Water Reactor; BWR)와 가압경수로(Pressurized Water Reactor; PWR)로 구분할 수 있다.



[그림 5] 원자로 노형간 차이점

비등경수로(형)은 물(1차 냉각수)을 원자로 내에서 직접 끓여 생성된 증기로 터빈을 회전시켜 발전하는 형식을 말하는 한편, 가압경수로(형)은 원자로 내에서 고온 고압의 물(1차 냉각수, 150~160kg/cm², 300℃)이 증기발생기를 통해 2차 계통의 냉각수를 증기로 만들고 터빈을 회전시켜 발전하는 형식이다.

일본의 비등경수로로는 가압경수로와 달리 증기발생기가 없어 설비가 간단하고, 냉각재가 직접 비등해 증기가 되므로 높은 압력을 유지할 필요가 없다는 장점이 있으나, 방사성 물질을 함유한 증기가 터빈까지 순환하게 되어 방사성 물질의 외부 유출 가능성이 높다. 또한 격납용기가 한국원전보다 1/5정도로 작아, 이번 후쿠시마 사고와 같이 전원 상실 후 비상노심냉각기능 상실에 의한 노심용융 사고 발생 시 급격한 압력상승에 대처할 수 있는 시간이 부족하다는 단점이 있다.

국내 가압경수로로는 증기발생기와 관련 설비가 필요하고, 고압력 운전을 하는 등 비등경수로보다 많은 기기와 기술이 필요하며 건설비용이 더 높으나 열을 생산하는 원자로와 증기를 발생시키는 증기발생기가 완전 분리되어 있으며, 방사성 물질이 함유된 냉각재가 격납건물 내에 위치하여 비상시에도 방사능 유출 가능성이 거의 없다고 할 수 있다. 또한 전력공급이 중단되어도 자연대류현상으로 냉각수가 순환 냉각되어 원자로 온도를 낮출 수 있다.(표 3 참조)

전 세계 가동 원자로의 71%를 점유하고 있는 가압수(PWR/ PHWR)형 원전이 원자로 안전운전 및 방사성 물질 확산 방지 측면에서는 비등경수로보다 기술적으로 우월하다고 평가받고 있다.

5. 맺음말

인류의 삶을 위협하는 지구온난화, 온실가스로 인한 지구의 온도상승으로 일어나는 각종재해는 원자력재해 이상의 무서운 재앙을 불러올 수 있다. 사실 우리 생활을 편리하게 하는 현대의 과학 문명은 모두 잠재적인 위험을 떠안고 있으며, 원자력발전이 다른 에너지원에 비해 장점이 월등히 많지만 방사선 때문에 안전성 측면에서 많은 우려를 하고 있는 것도 사실이다.

원자력발전이 최근의 신고유가 시대와 에너지 무기화에 대비할 수 있는 가장 현실적인 에너지라고 본다면 원자력의 역사에서 새로운 도전이 되고 있는 이번 후쿠시마 원전사고를 또 다른 기회로 활용하는 것이 중요하다고 본다.

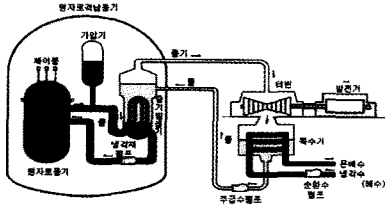
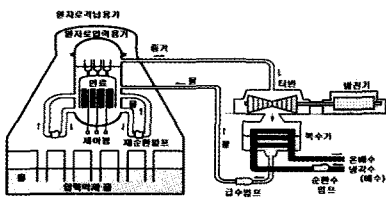
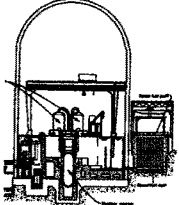
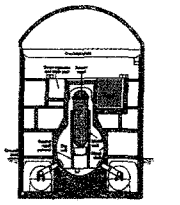
대형 사고의 원인 및 대응수단 등 심층 분석을 통하여 원자력이라는 대안이 후세에도 편안하고 안전한 문명의利器가 될 수 있도록 각종 시스템의 안전성 강화는 물론 원자력 안전에 대한 기술력을 획기적으로 발전시켜 나가야 할 것이다. ☉

〈표 2〉 세계 가동중 원자로형 구성 현황

(2011. 1. IAEA)

원자로형	PWR (가압경수로형)	PHWR (가압중수로형)	BWR (비등경수로형)	기타	합계
기수	269	46	92	34	441
점유율	61%	10%	21%	8%	100%

〈표 3〉 가압경수로 및 비등형경수로 원전 특성비교

구분	가압경수로(PWR)	비등경수로(BWR)
<p>설계특성</p> <p>증기발생기에서 증기 발생</p>  <p>증기발생기에서 증기 발생</p>	<p>증기발생기에서 증기 발생</p>  <p>원자로에서 증기 발생</p>	
<p>설계특성</p>	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 냉각재에 의해 증기발생기의 급수가 가열되어 생성된 증기가 터빈·발전기를 구동시켜 전기 생산 노심 내 비등을 허용하지 않음 증기발생기 및 가압기 설치 원자로계통이 높은 압력 (158kg/cm²)에 견디도록 설계 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로에서 발생된 증기가 터빈·발전기를 직접 구동시켜 전기 생산 (증기발생기 없음) 노심 내 비등을 허용 증기발생기 및 가압기 없음 계통압력이 낮아 (71kg/cm²) 원자로용기 두께가 얇음
<p>구조적 안전성</p>	<ul style="list-style-type: none"> 정지신호 발생 시 원자로 상부에 설치된 제어봉이 노심으로 자유 낙하(구동원 필요 없음) 격납용기 내부에 가압기, 증기발생기, 안전주입 탱크 등이 설치되어 BWR 원전에 비해 격납용기 용적이 큼 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 하부에 설치된 제어봉이 탱크에 저장된 질소 압력으로 노심에 삽입 재순환펌프를 제외한 대부분의 설비가 격납용기 외부 원자로건물에 설치되어 격납용기 용적이 작음
<p>사고시 환경영향</p>	<ul style="list-style-type: none"> 원자로냉각재와 급수 및 증기계통이 격리되어 있어 2차 계통 파단시 방사성 물질의 외부 누출 가능성이 낮음 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로에서 발생된 증기가 터빈에 직접 공급되므로 계통 파단 시 방사성 물질이 외부로 누출될 가능성이 높음
<p>전원상실시 노심냉각</p>	<ul style="list-style-type: none"> 터빈구동 보조급수펌프로 증기발생기에 급수 주입 원자로 냉각재는 증기발생기에서 열교환 시 생기는 온도차에 의하여 자연적인 흐름을 유지하며 냉각 (자연순환) 증기발생기에서 열교환하며 만들어진 증기는 대기로 방출 (방사성 물질 불포함) * 원자로에서 발생하는 열을 격납건물 외부로 지속적으로 방출하여 원자로내부 압력 상승 방지 	<ul style="list-style-type: none"> 터빈구동 고압노심살수펌프로 원자로에 냉각수 주입 노심을 냉각하면서 생성된 증기는 압력방출 밸브를 통해 압력 억제물 내부 저장수로 배출 전원상실로 압력 억제물을 냉각할 수 없으므로 시간이 지남에 따라 격납용기 압력 증가 압력 상승에 의한 격납용기 파손 방지 위해 격납용기 배기 불가피 (방사성물질 포함 공기가 외부로 방출됨)
<p>사용후 연료 저장조 안전성</p>	 <ul style="list-style-type: none"> 사용후 연료 저장조의 냉각수 상실시 비상용수 (소방용수 등)공급을 위한 접근성 용이 * 위치 : 별도의 건물 	 <ul style="list-style-type: none"> 격납건물 손상발생시 방사선준위가 높아져 작업자 접근에 제약이 있음 * 위치 : 격납건물