

혁신적 원자로개념의 개관

원자력발전소 사업의 경기침체로 인해 많은 공급자 및 연구기관은 부흥을 위한 새로운 방안을 모색하고 있으며, 꽤 활발한 활동이 진행 중에 있다. 이들의 공통된 목적으로 고유안전성의 향상으로 지지도를 한층 개선하고 설비용량의 축소와 더불어 단순화되고 표준화된 기술로 건설기간의 단축과 투자감소로 상업적 위험성을 관리하는 것이다. 기술적 진전상태로 보면 완전히 엔지니어링이 완료된 상태로부터 전혀 새로운 개념으로 이어진 상태까지 폭넓다.

유럽 공급자들은 이러한 개발을 낙관하는 미국 동료자들보다 부정적으로 바라보고 있으며, 일본은 이미 개발된 기술을 선호하는 입장이다. 예측되는 특성이나 가격에 대해서 신뢰할 수 있는 논평은 보다 제시한 프로젝트 문서에 근간하여야만 가능할 것이다.

이런 시점에서 추천할 만한 것은 개량형 원자로의 개발을 잘 관찰하는 것뿐만 아니라 그들의 개발과정을 예의 주시하는 것이다. 특히 안전성면에서 원자력에너지의 진일보된 개발로 신뢰성 및 지지도 개선에 기여하여야 한다. 이러한 개발로 젊은 産·學 기술자의 유도가 필요하다.

체르노빌 사고이후 “고유안전성 / 발전소의 새로운 세대”는 공공적인 문제가 되었으며, 신규 원자력발전소의 건설반대는 전세계에 걸쳐 있고, 이는 부분적으로 “불만족스러운”기술로 인식하고 있기 때문이다.

정 의

능동적 안전시스템 및 기계식 기기는 안전기능을 이행하기 위하여 부품을 움직일 필요가 있는 것들이다. 수동적 안전시스템 및 기계식 기기는 안전기능을 이행하기 위하여 부품을 움직일 필요가 없는 것들이지만 부하조건(압력, 온도, 유량 등)에 따라 변화된다.

“고유안전(固有安全)”이란 표준화된 정의는 아니나 건설 및 재료의 물리적·화학적 특성에 근간을 두고 있다. 즉 헬륨은 화학적으로 불활성이고, 고온원자로는 固有로 負(-)의 온도계수를 갖고 있다. “고유안전성”은 자연법칙에 따라 필연적으로 발생하는 안전성 관련 연속적 작용 또는 기계적 작용(mechanism)이다.

경 수 로

미국에서는 웨스팅하우스사의 AP-600과 제너럴 일렉트릭사의 SBWR이 비슷한 목적으로 개발되었다. 1000MW 이하에서 3000MW에 이르는 개량된 원자로의 대책으로 안전시스템 및 인허가절차의 단순화 및 건설공기의 단축이다.

AP-600은 기수립된 PWR기술의 풍부한 경험이 기반이다. 비교적 저출력 밀도와 負(-)온도계수는 발전소의 자율조정(Self-Regulation) 능력을 향상시키고, 여러 사고의 연속발생의 결

과를 허용범위내로 유지시켜 주는데 기여한다.

캡슐화된 주냉각재펌프는 무거운 플라이휠로 인해 쉽게 장치될 수 없어, 충분한 기간동안 펌프 런다운(Rundown) 시간이 보장될지는 아직 불확실하다.

잔열제거는 자연순환과 격납용기안 원자로저장수(Reactor well water)내 열교환기에 의해 보장되고 있다. 저장수탱크는 비등이 발생하기 전에 몇시간 동안, 그리고 물전체가 증발하기 전에 몇일 동안 잔열을 감당할 수 있다.

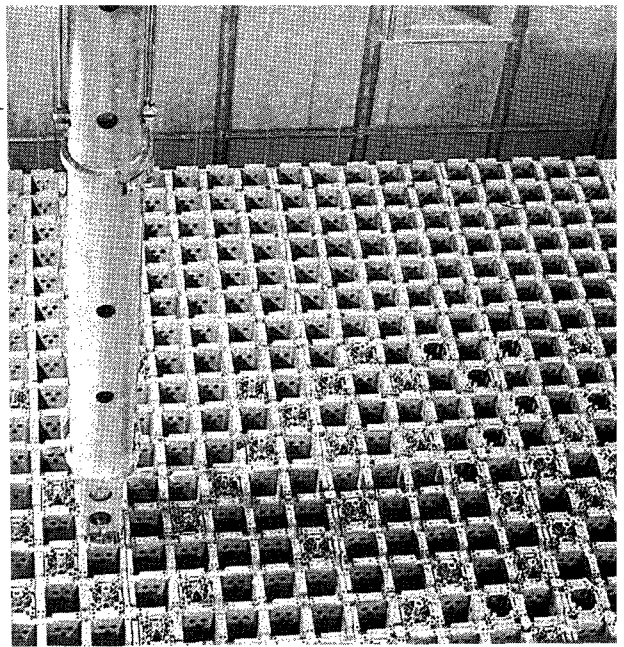
외부에서 물(증발열, 자연대류)로 냉각되는 격납건물내 장기간 극도의 열제거원(heat sink) 기능을 갖고 있다.

비상노심냉각은 2대의 보통의 압력저장조와 2대의 가압된 추가 물탱크에 의해 보장되는데 물은 중력에 의해 원자로용기안으로 이동된다. 장기간측면에 격납건물내 연료저장조안의 저장물은 원자로용기의 재충전에 활용된다.

제너럴 일렉트릭사의 SBWR은 기존 BWR 기술의 폭넓은 경험에 근간을 두고 있다. 자연순환, 비교적 낮은 출력밀도와 $(-)$ 의 증기 기포계수는 원자로의 자율조정능력을 증가시킨다.

없어지는 증기기포가 대용량 BWR보다 거의 문제를 일으키지 않지만, 이 문제는 증기기포에 관련된 상당한 반응도이라는 관점에서 중대하게 조사되어야 한다. 더 나아가 자연순환 설계의 의미는 대용량 BWR에 비교해서, 재순환 펌프의 정지 역할이 제어봉 삽입을 대신한 보조용으로 사용될 수 없다는 것을 의미한다. 보론삽입은 현재로는 계획이 없다. 압력감압풀의 격리 응축기는 천이상태동안 열제거원으로 사용된다. 노심은 소규모 냉각재상실시 잠겨있는 것으로 설계되었고, 만약 원자로 압력이 심하게 감소된다면 노심은 중력에 의한 더 높은 압력감압풀로 부터 냉각되고 침수된다. 격납건물 냉각은 수동적이다.

SIMENS사 SBWR 200의 고유안전성 평가는 일반적으로 제너럴 일렉트릭사의 SBWR의 것과 비슷하다. 유압(hydraulic)식의 제어봉 작동, 즉 위로부터 제어봉 삽입의 새로운 자동



(Self-Acting) 개념, 증기기포량의 획기적 감소와 노심내 $(-)$ 반응도 증가, 격납건물내 모든 배관연결은 노심위로 10m위치, 냉각재상실에 대처할 격납건물내의 충분한 물저장, 잔열제거를 위한 종합적 열교환기들, 원자로 및 터빈설비의 단일 격납건물 채용, 그리고 압력감압계통의 미설치 등에 특별한 주의가 환기되고 있다.

ABB Atom사의 PIUS개념은 모든 중요한 안전요건을 충족시키는 것 같다. 원자로를 둘러싼 대형 보론수 저장풀은 자동(Self-Acting) 정지시스템으로 작용하며 열제거원 역할을 한다. 프리스트레스드(Pre-Stressed) 콘크리트 격납건물내 냉각재 상실 또는 연료Pit저장수 상실의 경우에 안전성을 확보해 준다.

제기되는 문제점으로는 안전성보다는 비용과 신뢰성인 것 같다. 단일 콘크리트 격납건물내의 여러 모듈이 있는 개념이 더욱 추진된다면 연료재장전과 검사의 기간 및 복잡성이 증가될 것으로 확실시 되고 있으며, 한 모듈에서의 사고는 다른 것에게 영향을 줄 수 있다. 이러한 혁신적 개념은 기능과 신뢰성의 확증을 위해 더 개발되어야 한다.

SIR개념의 장점은 간소한 건설, 많은 물량의 先조립기기, 그리고 짧은 건설기간에서 찾을 수 있다. 이렇게 함으로써 固有의 수동적 안전성을 이용하고 있다. 원자로 노심, 증기발생기, 펌프 및 가압기는 높이 26m이고 1100

MWe급 PWR과 같은 직경과 벽두께를 갖는 가압용기안에 설치되는 총합적 원자로 개념이다. 이 개념은 주로 기존 PWR 및 잠수함 기술에 근간을 두고 있다. 이 노형의 후원자로는 Rolls-Royce and Associates사, AEA Technology사, CE사, Stone & Webster사이다. 이 설계는 공장조립을 최대로 이용하여 기존 엔지니어링 및 건설 기술의 장점을 갖고 있다. 수동적 고유안전성을 채용하여 안전문제를 단순화했으며, 비상디젤 발전공급없이 설계기준사고시 2시간이상으로 자율(Hands-Off) 운전을 보장하고 있다.

고온원자로

HTR 500은 고온상태하에서도 화학적인 불활성 특성, 핵분열물질의 우수한 포획특성, 이러한 원자로의 자율조정(Seif-Regulation) 특성 및 프리스트레스트(pre-stressed) 콘크리트 격납건물은 우수한 고유안전성으로 평가된다. 발전소의 영구 손상을 방지하기 위하여 전력공급 및 열제거원으로 가상사고후 어느정도 시간내 다시 기능이 회복되어야 하나, 환경보호를 위해서는 특별히 요구되지 않는다.

고유특성이 충분히 보호해 주지 못하는 유일한 사고는 증기발생기 누설문제이다. 증기발생기 격리는 능동적 안전시스템으로 처리되어야 한다.

Modular HTR은 고유안전성을 갖고 있으며, 강제순환냉각 기능과 열제거원의 상실시, 그리고 제어봉이 삽입되지 않은 시에는 매우 뛰어난 고유안전성을 갖고 있다.

냉각재 상실후 노심으로부터의 방사능방출은 매우 낮고, 느리고 또한 안정치로 제한되어 있다. 강철 격납용기와 증기발생기 누설에 대처할 능동적 안전시스템이 없는 점이 "고유안전성"시비를 손상시키는 요인이다. 그러나 설계기준사고시 원자력기술에서 정상적이고 만족스럽다고 고려되는 위험을 초과하는 일은 결코

없다. LWR에서 압력용기고장의 가능성은 설계기준사고를 넘는 종합가능성에 대해 미미하다. 이러한 가능성은 소용량 HTR에 높다고 믿을 하등의 이유가 없으며, 사고의 결과는 치명적이지 못할 것이다. Modular HTR에서 兩용기간의 연결부를 지진설계 관점에서 특별한 주의를 요한다. 이러한 유형의 원자로에 대해서는 가장 가능성 있는 사고 결과는 증기발생기 누설후 격리에 실패하는 경우이다.

그러나 관련 위험은 적다. 결합있는 증기발생기의 격리는 Modular HTR에서는 쉽다. 왜냐하면 누설이 발생하는 부분이 어디인지 결정하는 것이 불필요하기 때문이다. 증기발생기는 하나이며 어느 사고과정에서도 열제거원으로 사용되지 않는다. Modular HTR은 양호한 고유안전성 때문에 위험가능성이 적다고 예견될지라도 충분한 확신을 제공하기 위하여 개발작업이 수행되어야 한다.

나트륨냉각 고속로

PRISM의 유리한 고유안전성은 나트륨의 뛰어난 핵분열생성물의 포획, 나트륨저장조의 대량 열용적과 운전온도와 나트륨비등온도 사이의 큰 격차, 저운전 압력, 그리고 원자로냉각재의 가압격납용기의 낮은 사고 가능성, 負(-)온도계수로 인한 자율조정성, 수동적 비상 열제거원, 운전원의 낮은 방사선조임량 등이다. 한편, 그 개념은 고유적으로 갖고 있는, 그러나 보상되어야 하는 문제점에 근간을 두고 있다. 즉, 플루토늄 및 짧은 수명의 핵분열생성물의 농도 증가로 인한 높은 Source Term과 물과 공기에 대한 나트륨의 화학적 반응강도, 연료에서 국부 비등 또는 가스포획으로 인한 반응도 영향 그리고 나트륨내에서 유지보수의 어려움이다.

제너럴 일렉트릭사의 PRISM개념은 개발 초기단계이기 때문에 문제가 없다고 극언하기에는 너무 이르다.

Summarized Schedules for Development and First Plant

REACTOR CONCEPT	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000	01	02	03	04	05	
PWR 600*** Siemens				Construction time from contract signature until handover 60 months														
HTR 500 HTR GmbH		Preparation of design work		Design work up to concept approval			Design work up to construction permit			Erection								
CANDU 3 AECL		Proposed	Construction time from first concrete up to full load operation 42 months															
PHWR (Argos)		Proposed	Construction time from first concrete 60 month															
SIR CE + RRA + UKAEA + S&W		Preliminary design			Detailed design and licensing			Construction			Commissioning							
NP 300 Framatome	Proposed	Construction time from contract signature until take-over 60 months																
B 600NSS und CNSS 400 B & W	Acc. to personal info. from B & W, this project does not have any time schedule at present																	
SBWR GE		Design and additional tests				FDA ¹ Evaluation and approval by DOE			Construction and erection until take-over									
SBWR 200 Siemens	Internal study	Proposal	preparation Detailed design			Concept approval			Erection									
AP 600 GE	Design and development contract by DOE ; 1995 design certification											Construction		Commissioning				
PIUS ABB Atom	NRC concept approval			ABB is convinced that a demonstration plant is not necessary for PIUS approval														
Hitachi	Same as SBWR GE, own project has no time schedule																	
Toshiba	Own project has no time schedule																	
Mitsubishi	Same as AP 600 Own project has no time schedule																	
PRISM GE	PSID approved			PSAR approved			NI FSAR approved			BOP FSAR					Prototype plant		Standard plant	
SAFR Rockwell	Concept design			PDA ³ Final design			FDA		Procurement		Erection		Commissioning		Take-over			
HTR 100 (BBC)	Cancelled																	
Modular HTR HTR GmbH	Proposed	Construction time up to take-over 48 months																
MHTGR GA	Preliminary Design		PDA		Final Design		FDA		Design approval			Demonstration plant take-over			Reference Plant			
	PSAR		FSAR		FSAR		FSAR		Erection and demonstration tests			Erection and demonstration tests			Erection and demonstration tests			

- 1 FDA - Final Design Acceptance by DOE
- 2 CP - Construction Permit by NRC/DOE
- 3 PDA - Preliminary Design Acceptance by DOE
- *** As of 1989 Framatome/Siemens, NPI Nuclear Power International