

次世代輕水爐의 開發動向 AP600, SBWR, NPI, REP – 2000

入江敏雄

日本原子力發電(株) 研究開発本部 研究開発部長

□ 국, 유럽에서는 2000년을 목표로 차세대의 표준화경수로 개발이 추진되고 있다.

신규의 원자로발주가 10년 이상 중단되고 있는 미국에서는 장래의

전력수요 증가에 대비하는 한편 지역환경문제를 감안해 원자력산업의 재활성화방안으로 정부기관을 포함해 차세대원자로 개발이 국가적인 재활성화 프로젝트로 추진되고 있

고, 프랑스와 독일에서도 차세대원자로 공동개발이 이루어지고 있다.

미국의 동향

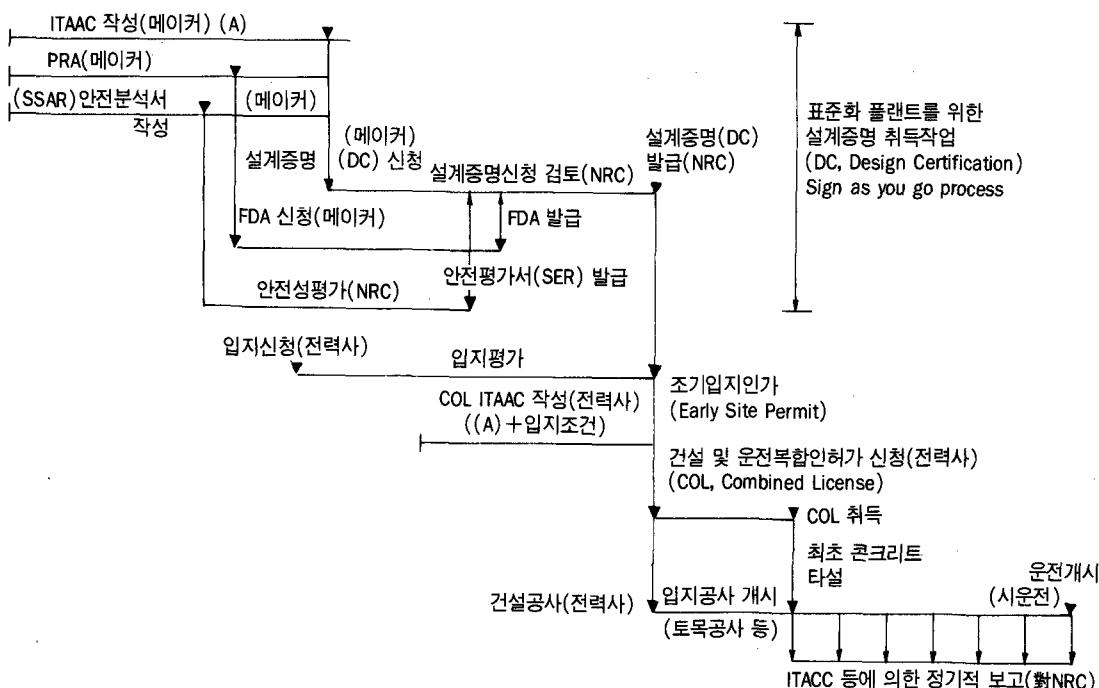
원자력 선택을 부활시키려는 미국의 전력사업계획은 원자력발전감시위원회(NPOC) 주도하에 설계표준화를 도모하고 투자위험부담의 경감을 겨냥한 것이다.

1. 법적수속의 간소화

새로운 규정인 10CFR52에 공개청문과정과 인허가절차를 일원화하고 설계표준화를 달성한다.

이 10CFR52는 심사업무의 합리화, 간소화를 도모하고 있는데 그 요지는 다음과 같다〈그림 1〉。

(1) 早期입지허가



〈그림 1〉 Advanced Reactor 첫 호기의 운전개시까지의 인허가과정

건설허가수속중에 입지평가부분은 미리 심사를 받을 수 있다(유효기간 10~20년).

(2) 설계증명

신규발전소에 설계증명을 취득한 플랜트를 채택하는 경우에는 해당 설계부분은 인허가상의 심사가 면제된다(유효기간 15년).

(3) 복합허가

종래의 건설허가와 운전허가를 일괄해서 발급한다(One Step License).

(4) ITAAC

신설될 플랜트가 설계대로 시공됐는지를 확인하기 위한 것으로 검사방법, 시험방법, 분석방법 및 그 판정기준 등을 제시한다. 설계증명 취득을 위해 SSAR(표준안전분석서)과 PRA(확률론적 안전평가)를 함께 제출해야 한다.

2. 설계증명대상 경수로

130만kW급의 Evolutionary爐(GE社 ABWR, ABB-CE社의 System 80+)와 60만kW급의 Passive爐(WH社의 AP600, GE社의 SBWR)가 설계증명대상 플랜트가 됐다. 여기에서는 보다 혁신적인 원자로인 Passive爐를 소개하기로 한다.

1983년 미국 에너지성(DOE)의 위촉을 받은 MIT 공대의 라스무센 교수가 1990년대에 예상되는 전력 수요에 대응하기 위해 『전력회사 주도하에 정부와 산업계는 신규 원자력발전소의 선택의 하나로 대폭 단순화한 원자력발전소를 개발할 것』을 제언했다. 「Simple is the best」 개념을 받아들이는 형식으로 전력연구소(EPRI), DOE에서 설정

한 경수로개발사업에 AP600과 SBWR이 응모함으로써 Passive爐의 개념연구가 시작됐다.

이 두 플랜트에 공통되는 최대의 특징은 만일의 사고시에 노심냉각을 하는 공학적 안전설비(안전계통)에 중력이나 유체의 자연순환 등의 자연력을 이용한다는 데 있다. 즉 안전계통에서 펌프, 팬 등 교류전원으로 작동되는 것과 디젤발전기를 제외하기 때문에 기기수를 줄일 수 있고 또한 사고시 동작을 계속하는 기기가 없기 때문에 인적요인의 영향도 줄일 수 있다는 이점이 있다. 즉 사람이 실수하거나 기계 고장이 나도 자연현상에 의해 안전을 유지할 수 있다고 하는 사고시 대응능력이 강하고 사람에게 친절한 플랜트라고 할 수 있다.

또한 60만kW라는 출력은 당시 EPRI가 설문조사한 결과 미국에서

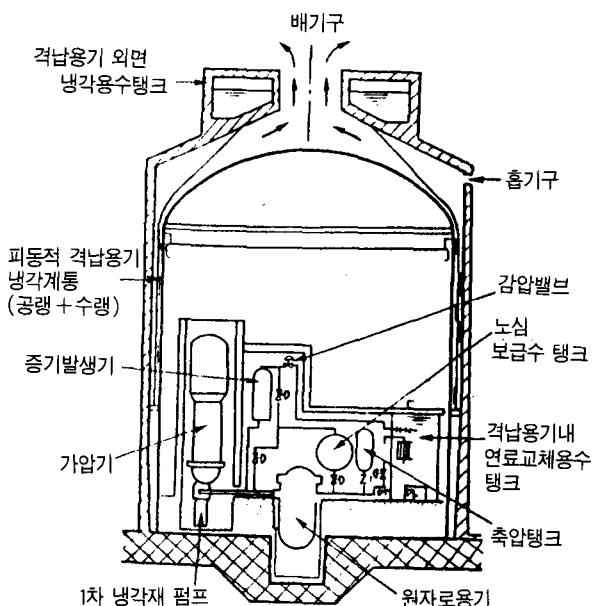
는 전력회사의 규모 및 투자위험부담 측면에서 60만kW급이 전력수요가 높다고 하는 판단에 따른 것이다.

(I) AP600(Advanced Passive 600)

① 개발경위

WH社는 1983년경 정부와 함께 1만kW급의 초소형 원자력발전소의 공동개발을 시작했다. 사고가 나도 얼마동안 외부전원에 의존하지 않고 자체수습이 가능해야 한다는 것이 설계상의 요구조건이었다.

자연력을 안전계통의 구동력으로 이용한다고 하는 Passive爐의 기본 개념은 이 시기에 고안돼 「걸어서 제어실에서 피난할 수 있는 시간적 여유」 또는 「운전원이 파난해도 플랜트는 안전」이라는 뜻을 내포한 「Walk Away Safety」라는 말이 이 때부터 사용되기 시작했다고 한다. 가압수형원자로(PWR)인 AP600은



〈그림 2〉 AP600의 개념

1985년 이후 DOE와 EPRI의 지원을 받아 WH社가 주체가 되어 개발되고 있는 노형이다. 실증이 끝난 기기나 기술을 사용해 단순화와 함께 피동적 안전(Passive Safety) 개념을 도입한 것이다. 이 개발계획은 국제협력사업으로 미국의 설계 및 건설 엔지니어링회사, 메이커, 대학, 유럽의 메이커, 전력회사, 연구소 및 아시아의 전력회사, 연구소 등이 이 사업에 참여하고 있다.

② 기술적 특징

ⓐ 개량점

AP600은 전형적인 2루트 플랜트 및 APWR과 유사점이 많을 뿐만 아니라 다음과 같은 혁신적인 설계도 포함하고 있다.

㉠ 새로운 안전개념인 피동적 안전성<그림 2>

㉡ 1차냉각재계통(RCS)에 Canned Pump 방식의 순환펌프(RCP)를 사용하는 동시에 증기발생기와 일체화하는 등의 단순화<그림 3>

㉢ 철저한 Module 공법을 기본으로 한 건설계획과 배치 등

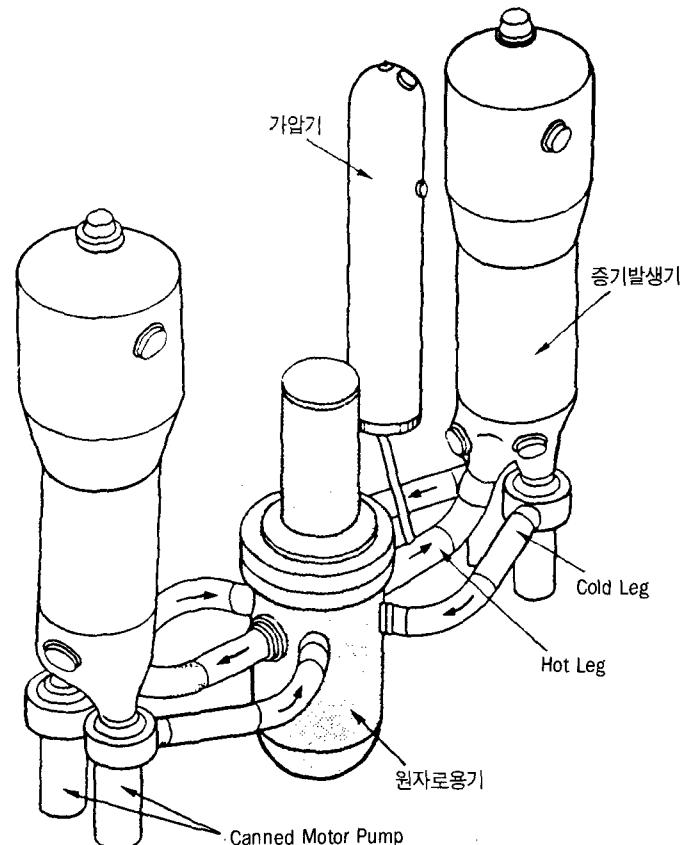
또 기존 플랜트의 주요 개선사항은 다음과 같다.

㉠ 안전계통의 펌프, 밸브, 배관의 복잡한 구성이 피동적 방식에 의해 단순화됐다.

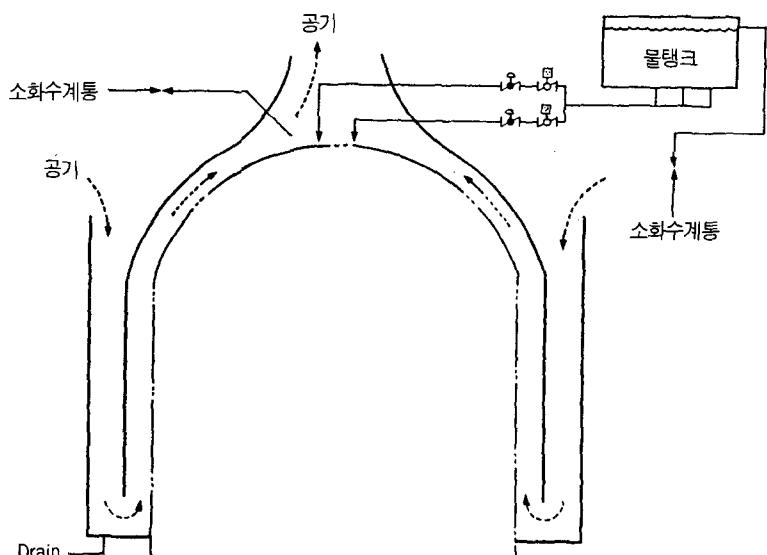
㉡ 사고시의 최종 Heat Sink 방식도 간단한 격납용기냉각방식으로 됐다.

㉢ 常用계통설비에 대해서도 대폭적인 단순화, 간소화가 이루어져 재료물량이 대폭 감소했다.

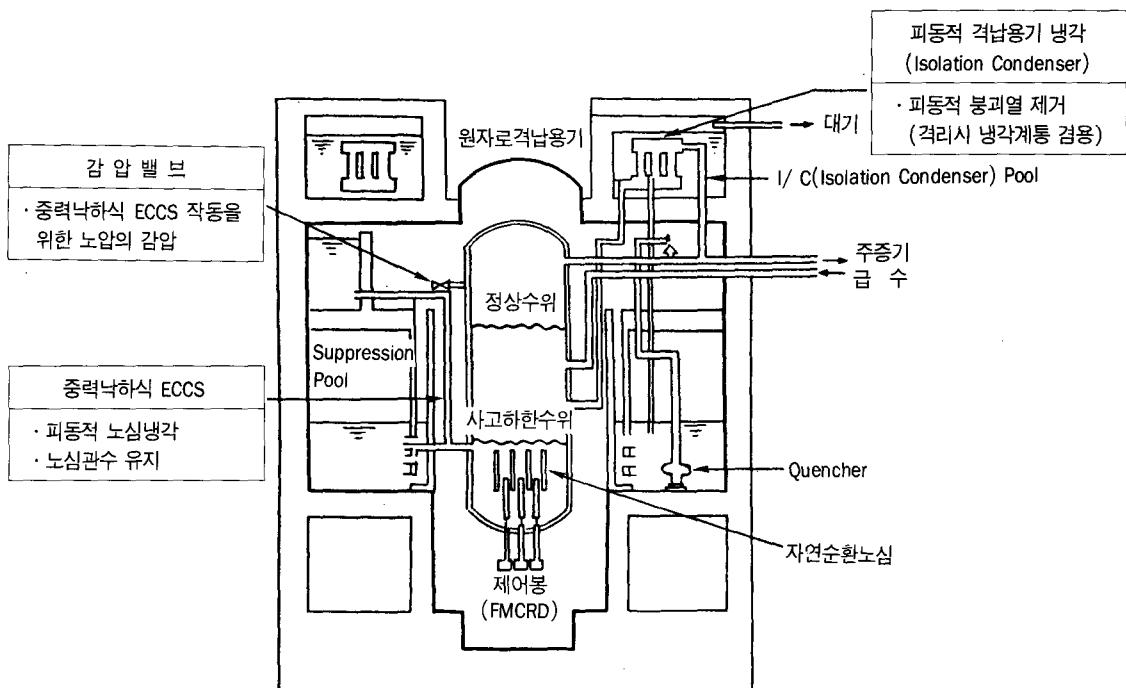
㉣ 설계를 간소화했지만 자연력이라고 하는 결코 훼손되지 않는 구동력에 따라 설계했기 때문에 안



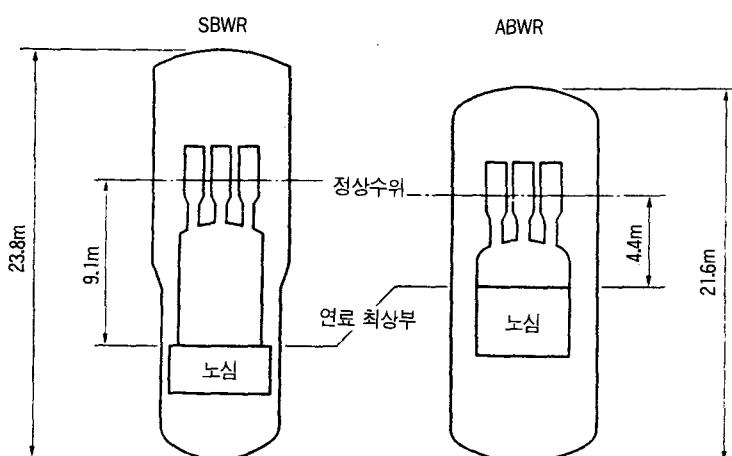
<그림 3> AP600의 원자로냉각재계통



<그림 4> 피동적 격납용기 냉각계통



〈그림 5〉 SBWR의 개념



〈그림 6〉 SBWR과 ABWR의 비교

전성, 신뢰성은 오히려 높아졌다.

④ 격납용기냉각계통(PCCS)의 냉각능력이 뛰어나 격납용기 자체가 파손되지 않기 때문에 안전상 가장

중요한 일반 대중에의 대량 방사능 방출 가능성이 중대사고에서도 대폭 줄어들었다. 이같은 특징으로 인해 「긴급시 대피계획」이 불필요

하게 될 가능성이 있다.

⑤ 저출력밀도 노심에 의해 원자로용기는 크게 되는 반면 열적 여유가 커져 過渡반응도 완만하고 또 장기 사이클운전(18개월)도 가능해진다.

⑥ 격납용기냉각계통(기술적 특징의 예)

최종 Heat Sink는 격납용기 외벽의 자연공기냉각과 상부 물탱크로부터 격납용기에 중력 살포된 물의 증발잠열을 이용해 사고 후의 봉괴열은 장기간에 걸쳐 제거된다(그림 4).

AP600의 확증시험 19건 중 이 격납용기냉각계통 관계가 5건을 차지하고 있는 것을 보아도 그 중요성과 참신성을 엿볼 수 있다.

③ 현황

표준안전분석서(SSAR)가 예정대로 92년 6월 미국원자력규제위원회(NRC)에 제출됐다. 또 ITAAC가 92년 12월에 제출돼 1995년에는 설계증명을 NRC로부터 취득해 그 첫 호기를 2000년쯤에 운전개시할 예정이다.

(2) SBWR(Simplified BWR)

① 개발경위

GE社도 1983년경에 초소형 원자력발전소의 공동연구를 미국 정부와 함께 했다. SBWR은 AP600과 같이 1985년 이후 DOE와 EPR I의 지원을 받아 GE社가 개발주체가 돼 있는 60만kW급 비등수형원자로(BWR)다.

기본적인 설계목표는 AP600과 같이 전력요구서에 따른 것으로 피동적 안전성, 단순화설계를 도모하고 안전성과 경제성을 동시에 추구하고 있는 점은 AP600과 같다.

이 원자로의 개발은 AP600 이상으로 국제협력하에 이루어지고 있다.

② 기술적 특징

BWR은 노심부에서 발생한 증기 를 직접 터빈에 보내는 등 원래부터 PWR에 비해 단순화가 이루어지고 또 연료의 출력밀도도 낮기 때문에 사고, 과도현상에 대한 반응이 둔감하다는 잠재적인 장점을 갖고 있다.

③ 개량점

SBWR은 전형적인 60만kW급 원자로 및 ABWR과 유사점이 많고 단순화를 목적으로 한 고유의 계통기를 사용하고 있다. 그 목표는 AP600과 거의 같은 것으로

다음과 같다.

④ 새로운 안전개념인 피동적 안전성(그림 5)

⑤ 정상운전중의 노심냉각은 浮力效果와 노심상부의 Chimney에 의한 자연순환냉각방식을 채용, 재 순환계통 등을 제외한 단순화

⑥ Module 공법 채용으로 대폭적인 건설공기 단축

또한 기존플랜트의 경험을 살린 주요한 개선점도 AP600과 거의 같다.

⑦ 자연순환로(기술적 특징의 예)

원래 BWR은 그 노심유량의 50% 정도가 자연순환에 의한 것인데 이 자연순환력에 의한 노심유량을 보다 더 충분히 확보하기 위해 SBWR에서는 현행의 3/4(9피트)의 짧은 연료를 사용해 노심의 압력손실을 줄이는 동시에 Chimney 설치로 냉각재 구동력을 높이고 있다. 그 결과 원자로압력용기는 130만kW

급의 ABWR 정도까지 커지고(그림 6) 또 제어봉수(그림 7)도 늘어났지만 Internal Pump, 배전반, 제어반 등을 제외할 수 있어 간소화를 기할 수 있다. 또 저출력밀도 노심에 의해 약 2년간의 장시간 사이클운전이 가능하다.

자연순환로로서의 실적은 네덜란드의 Dodewaard爐(5만kW), 日本原子力研究所의 JPDR 등이 있지만 대형로에서의 실증은 분석에 의해 제시되고 있다.

③ 현황

SSAR을 1992년 8월에 NRC에 이미 제출했고 ITAAC를 1993년 2월에 제출할 예정인데 현재 1995년 까지 설계증명을 취득할 예정으로 일이 추진되고 있다.

日本의 단순화경수로 연구

미국에서의 단순화로 개발동향을

	S B W R	A B W R
노심 배치도		
사양	연료집합체 수 : 732 제어봉 수 : 177 LPRM 수 : 41 SRNM 수 : 10	연료집합체 수 : 872 제어봉 수 : 205 LPRM 수 : 52 SRNM 수 : 10

(주) LPRM : Local Power Range Monitor

SRNM : Start up Range Neutron Monitor

〈그림 7〉 SBWR 노심설계의 특징

주시하면서 日本에서는 플랜트의 안전성 향상, 사고시의 용이한 대응책 그리고 앞으로의 질과 양면에서의 노동력 확보난 대책의 일환으로 설계의 단순화 및 새로운 안전 개념을 갖춘 원자로에 관해 전력업계가 공동연구를 실시하고 있다(그림 8).

1. 단순화 PWR 연구

AP600을 설계 Reference 플랜트로 삼고 출력규모를 100만kW급으로 대형화시키는 한편 日本 고유의 조건, 인허가에의 적합성, 운전성 등을 검토함으로써 플랜트(단순화 PWR)로서의 성립성 평가를 1992년도 상반기까지 실시해 왔다.

日本原子力發電(株)를 간사로 P

WR 전력회사(北海道, 關西, 四國, 九州) 및 WH社, 미쓰비시社, 프랑스전력공사(EdF)가 그룹을 형성해 다음과 같은 공동연구를 실시하고 있다.

(1) 안전계통의 합리화 검토 및 선량당량(상정사고 후 주변환경에서의 피폭선량) 감소를 위한 要素시험

(2) 1차냉각계통(RCS), 격납용기, 차폐건물의 耐震분석과 구조분석

(3) 확률론적 안전평가

(4) 피동적 플랜트의 운전성 평가(손실)

(5) 계통, 기기용량면에서 본 경제성 평가

(6) 이상의 연구결과를 바탕으로 한 기술적 성립성의 평가

(7) 출력규모 확대검토(130만kW급)과 그 전략의 성립성 평가 등

2. 단순화 BWR 연구

日本原子力發電(株)를 간사로 BWR 소유 전력회사(東北, 東京, 中部, 北陸, 中國) 및 GE社, 도시바社, 히다치社가 그룹을 형성해 출력을 100만kW급의 단순화 BWR에 대해 피동적안전화, 단순화에 관한 要素기술의 검토 및 이들 요소기술을 도입한 개념의 검토, 평가를 1992년말까지 끝낼 예정으로 실시중이다.

(1) 세계최대급의 대형장치에 의한 傳熱시험을 포함한 격납용기냉각계통의 형상, 구조

(2) 컴퓨터분석에 의한 중력낙하비상용 노심냉각계통의 검토

(3) (1), (2)항의 연구결과를 도입한 격납용기의 형상, 구조

(4) 컴퓨터분석에 의한 대형 자연순환노심의 안전성과 운전성 평가

(5) 플랜트 장기냉각수단의 검토

(6) 이상의 연구결과를 바탕으로 한 기술적 성립성 및 개략적인 경제성 평가 등

3. EPRI 개발계획 Phase 3에의 참여

EPRI가 1991년부터 1995년까지의 예정으로 실시하고 있는 AP600, SBWR의 개발계획 Phase 3에 日本의 전력회사들은 日本原子力發電(株)를 창구로 기술자파견을 포함해 이에 참여하고 있다. 이 계획에서는 전력요구서 작성과 AP600, SBWR의 설계검토를 하고 있다.

	연 구	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995~1998
미	EPRI 개발 계획	GE SBWR WH AP600, B&W										
	· Phase I	[]										
	· Phase II				GE, SBWR WH AP600							
국	DOE 개발계획											
	· 검증시험, 설계 · NRC 설계 증명 취득			GE 5건	WH 3건						NRC 인가 (예정)	
日	단순화 BWR	원전 - GE 공동연구 (1년간)				요소기술의 연구 Phase I	Phase II					
	단순화 PWR			예비적 개략연구		성립성평가를 위한 연구 (EdF 참가에 추가연구)						따른

〈그림 8〉 국내외의 단순화경수로 연구일정

- (1) 새로운 안전개념을 파악해 이를 단순화경수로 연구에 반영
- (2) 전력요구서 작성작업에 참여
- (3) 국제협력

유럽(프랑스를 중심)의 동향

스웨덴에서는 고유안전로 PIUS에 대한 연구가 진행되고는 있지만 유럽에서는 차세대로로 종래의 대형 PWR의 고도화가 중요시되고 있다.

1. NPI(Nuclear Power International)社

(1) 경 위

1989년말에 프랑스 프라마톰社와 독일의 지멘스社가 50%씩 공동 출자해 원자력설계회사 NPI社를 설립, 선진국의 장래수요와 규제당국의 요구조건에 부합되고 또한 국제동향을 감안한 새로운 원자로 개념의 수출용 원자력발전소 개발을 시작했다.

(2) 기술적 특징

양국의 기술과 경험을 조화시키면서 출력을 N4, KONVOI 정도의 PWR 4루프 140만kW급으로 하고 보다 높은 안전성을 확보하기 위해 노심용융확률은 더 낮추는 한편 중대사고에 대한 설계대응을 하고 노심손상시의 주민피난 가능성에 대폭 줄이는 것을 목표로 하고 있다.

주요특징으로는

- ① 안전계통의 계통구조에 대해서는 기본적으로 독일식으로 하고 여기에 일부 프랑스식의 합리화를 곁들여 안전계통의 직접설비(ECC

S 등)는 완전히 독립된 N + 1으로 하고 플랜트 운전중에도 사용되는 안전계통의 간접설비(CCW, 서비스 급수설비)는 N + 2 구성으로 돼 있다.

② 각국에서 연구중인 피동적 안전설비의 적용성 검토를 하고 노심 손상의 지배적 변수인 급수계통을 강화하기 위해 피동적 안전설비인 Safety Condenser 설치도 유망시되고 있다(그림 9).

③ 항공기, 미사일에 대해서는 세스나機 정도를 상정해 격납용기 방어대책을 강구하고 있다.

(3) 현 상

프랑스전력공사(EdF社)와 독일 전기사업연합회(VDEW)는 사용자 입장에서 검토를 하고 있다.

프라마톰社, 지멘스社 각사의 대체 개념설계를 최종적으로 일원화하기 위해 조정중이지만 메이커의 관행, 규제내용면에 차이가 있어

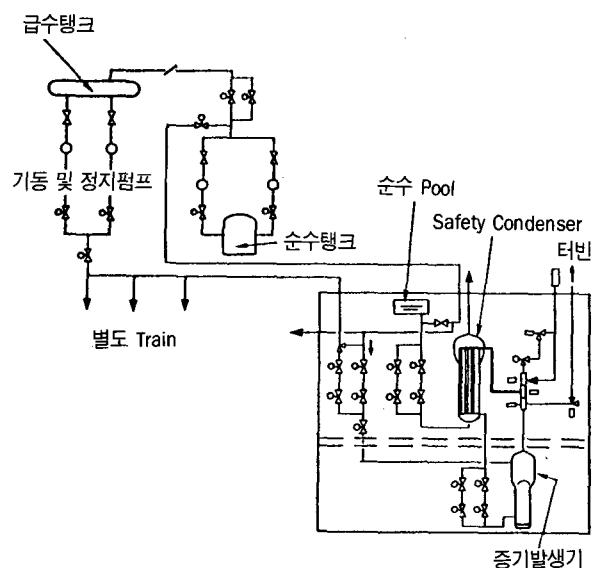
조화시키기가 어려운 실정이다.

1992년도에 개념설계를 하고 1995년까지 기본설계를 마치고 1998년 중반까지 세부설계, 건설인허가 검토를 종결, 1998년 이후 Post N4, KONVOI로서 건설이 시작하게 되기를 NPI社는 기대하고 있다.

2. REP-2000(2000년의 PWR)

REP-2000이란 EdF社가 입안한 차세대경수로 개발계획의 총칭이다.

1998년경까지는 당분간 N4의 건설을 추진하지만 그 이후는 유럽통합을 감안해 차세대로로 대형 PWR을 대상으로 최신기술개발과 경험을 받아들여 안전, 환경, 경제성면에서 유럽에 적용할 수 있는 계획을 세워놓고 있다. 미국 그룹에 대해서 장래의 세계안전기준에 맞는 기술을 적용할 것을 목표로 하고 있다.



〈그림 9〉 Safety Condenser의 개념(NEI, 1992년 4월호)

REP-2000은 다음 3가지 프로젝트로 이루어져 있다.

(1) 유럽전력요구서(EPRI 전력요구서의 유럽판)

유럽전력요구서(ERD)는 유럽의 5개 전력그룹(독일 전기사업연합회 VDEW, 벨기에 전력업체 Tractebel社, 스페인 전기사업연합회 UNE SA, 영국 전력업체 Nuclear Electric社, 프랑스전력공사 EdF)이 그 작성작업에 참여하고 있다. 또 공동적 안전과 관련된 부분에 관해서만 이탈리아 전력공사 ENEL社가 참여할 계획이다.

이 ERD는 2000년의 원자력발전소에 대한 요구서로 다음의 4권으로 구성돼 있다.

① Volume 1

총괄요구

② Volume 2

일반적 요구

③ Volume 3

1차계통에 대한 개별적인 요구

④ Volume 4

2차계통에 대한 개별적인 요구
1992년도까지 작성해 순차적으로 검토해 갈 계획이다.

(2) N + 4/EPR 검토

N + 4/EPR(European Pressurized Reactor)에 대해서는 원자력계에서 협력체제를 강화하기 위해 조인된 佛獨협정에 따라 독일그룹, NPI社, 프랑스그룹의 각 플랜트에 대해 각각의 설계목표, 사양의 검토를 해간다. 위의 3개 그룹 중 프랑스그룹(EdF社와 프라마톰社)에서 검토하고 있는 것이 N+4 플랜트다(N4를 개량발전시킨 것).

1992년말까지 개념설계를 마치

고 그후 플랜트 개념을 선정, 1994년말 기본설계를 시작할 예정이다.

N4+는 N4와 KONVOI의 경험을 살려 유럽 요구조건에 맞고 안전성을 훨씬 더 개선하는 동시에 코스트를 억제하는 것을 목표로 삼고 있는 것으로 다른 지역으로의 수출도 가능하도록 배려하고 있는 것이다. 그 설계목표의 주요 대목은 다음과 같다.

① 안전

중대사고시에도 대량의 방사능방출을 억제할 수 있는 격납용기의 거동

② 단순화 및 신뢰성 확보

보다 신뢰성이 높은 기기를 설계하는 한편 계통을 단순화해 기기수를 줄이고 보수성, 안전성을 높인다.

③ 코스트

건설비는 N4 정도로 하지만 운전, 보수원과 연료사이클비가 적어 지도록 한다.

N4+의 기술적 특징으로는 다음 항목을 옵션으로 검토중이지만 기본적으로 N4의 NSSS(원자로계통)를 사용하고 여기에 중대사고 대책을 추가하는 한편, 일부 독일 기술의 영향도 받고 있다.

① 안전계통

직접, 간접계통을 모두 각각 50% × 4trains로 구성하고 전원계통을 2trains로 하고 있다.

② 격납용기 Spray

독일식의 양 Leg 주입방식에 따라 원자로용기 내에서 증기를 응축시켜 Spray를 제외한다.

③ 격납용기 내 수소폭발대책

콘크리트 격납용기의 설계압력을

10~11bar로 높여 수소폭발에 견딜 수 있게 한다.

(3) 국제프로젝트에 의한 혁신기술 및 코스트의 조사와 평가

① 세계의 기술발전상황을 항상 파악한다.

② 프로젝트의 국제적인 연관성을 점검한다.

③ 필요한 연구개발을 EdF社, 프랑스 원자력청(CEA)의 관련그룹과 함께 조정한다.

④ 기술상의 옵션을 설정하는 등의 작업을 실시한다.

현재 EPRI 계획 Phase 3, 日本의 단순화 PWR의 연구개발에도 참여하고 있고 EdF社에서 평가중에 있다.

맺음말

세계적으로 재래식 대형경수로의 발전형(Evolutionary Plant)과 파동적 안전화, 단순화형의 중형경수로(Passive Plant)의 2가지 노형이 병행해서 개발되고 있지만 각국의 반응은 기술적인 면보다도 현재의 사회적인 일반대중에 안전의식, 장래의 국내사정 등에 좌우되고 있는 감이 있다. 이 2가지의 흐름은 모두 안전성, 신뢰성의 향상, 「사람에 대한 친절」을 목표로 삼고 또한 컴퓨터기술, Sensor 기술, 신소재 등 관련기술의 개발성과를 도입한 차세대 표준화플랜트의 설계를 굳히는 단계에 이르고 있다. 어쨌든 대형의 새로운 안전개념을 갖춘 플랜트의 연구를 추진하는 것이 매우 중요하다고 생각된다.(日本原子力工業 92年 11月號)■