

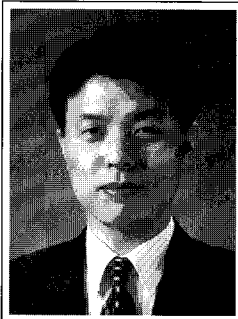


유럽형 가압경수로(EPR)의 특성 및 핀란드 올킬루오토(Olkiluoto) 3호기 원전 건설 지연 사유 - APRI400 대비 EPR 설계 특성 비교 -

강 기 식

IAEA 원자력발전국 가동원전기술팀장

배 경



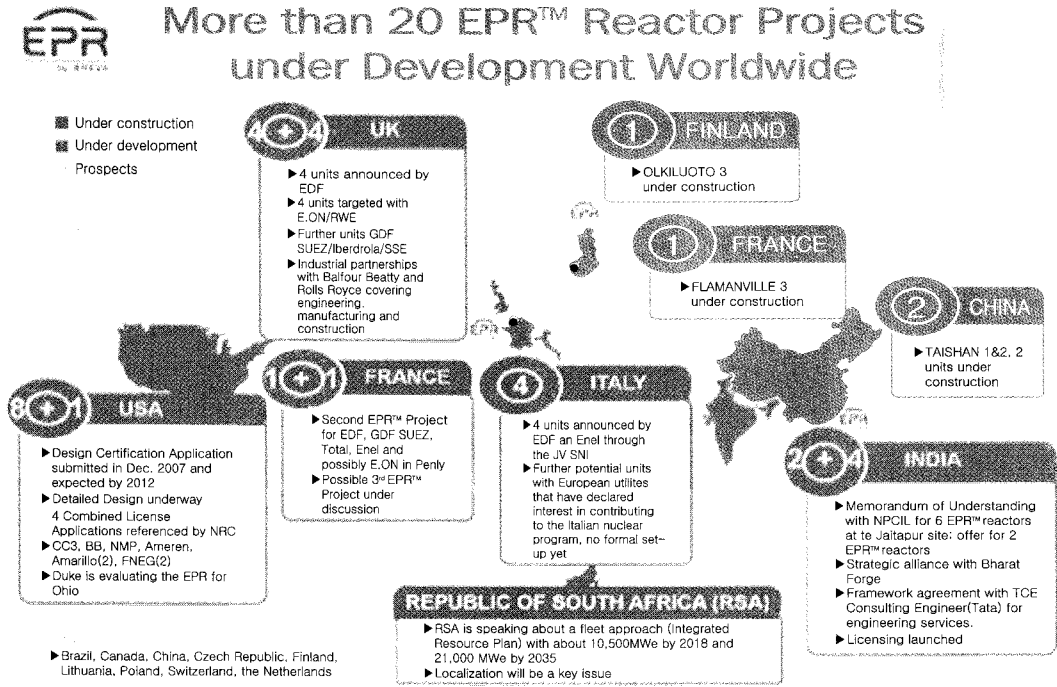
부산대 기계공학과 졸업
한국과학기술원 원자력공학과 석사, 박사과정 수료
한국전력기술(주) 영광 1, 2호기 건설사업, 가동원전 수명관리, 증기발생기 교체사업 참여, 원자로사업개발실장 역임
IAEA 원자력발전국 근무(2000~)
IAEA Merit Award 수상(2002, 2006)
Distinguish Service Award 수상(2007)
IAEA 가동원전 및 신규원전건설기술팀장

유럽연합 (European Union : EU)이 유럽의 원자력 발전 관련 요건 (European Utility Requirement : EUR)을 국제적 표준으로 확대하기 위한 외교적 시도를 본격화했다. 원자력 강국 프랑스가 2009년 12월 아랍에미리트(UAE) 원전 수주 경쟁에서 한국에 밀린 뒤 나온 움직임이다.

조제 마누엘 두랑 바호주 EU 집행위원장은 금년 3월 8일 프랑스가 주관하여 파리에서 열린 '민간 원자력 기술 협력' 이라는 국제 회의에서 "EU는 원자력의 에너지 개발의 국제적 안전 규정을 만드는 데 그 어느 나라보다 앞서 노력해 왔고, 다른 국가들도 EU에서 개발한 규정을 따라야 한다."고 말했다. 이에 따라 EU는 27개 회원국이 EUR 규정에 모두 동의할 경우 이를 4월 버락 오바마 미 대통령이 주재하에 미국 워싱턴에서 열린 핵안보 정상회의 때 공식 제안하려고 했으나 회원국의 동의를 얻는 데 어려움이 있어 제안치 못했다.

이에 앞서 EU는 지난해 국제원자력기구(IAEA)의 원자력안전기준(IAEA safety standards)을 바탕으로 유럽의 안전기준을 법제화했다. 여기에는 원자로 건설 및 운영과 관련된 안전 규정에서부터 방사능 물질 관리, 폐기물 처리, 대중을 상대로 한 정보 공개, 안전 규제 당국의 독립성, 원자로 폐쇄 과정의 안전 관리 등이 포괄적으로 포함되어 있다.

EU는 엄격한 유럽의 원자력 안전기준을 국제 표준화 하면 평화적 원자력 개발과 기술 확산에 도움이 될 것이라고 강조했다. 2030년까지 세계적으로 200~300여 기의 새 원전이 건설되는 등 신규 원자력 건설의 속도가 붙은 상황이고 이 중 70% 이상이 중국 등 신흥 개발국에서 이



〈그림 1〉 2010년 현재 Areva가 추진중에 있는 EPR 협상 대상국 및 예상 원전 수

뤄질 가능성이 높은 만큼 원전의 안전한 설계 및 운전을 위하여 안전 관련 규정도 강화되어야 한다는 것이다.

하지만 안전규정을 표준화하고자 하는 배경은 한국 등 뒤늦게 원자력 기술 개발에 나선 신흥 강국들을 견제하려는 의도도 깔려 있다. 일찍부터 EU의 안전성 기준에 맞춰온 유럽 국가가 글로벌 수주 경쟁에서 유리한 위치를 선점할 수 있기 때문이다.

특히 프랑스는 세계 제2위의 원자력 개발국이며 수 차례 니콜라 사르코지 프랑스 대통령이 UAE를 방문했음에도 불구하고 지난해 Areva가 UAE 원전 수주 경쟁에서 한국에 밀린 뒤 대응책 마련에 부심해온 것으로 알려졌다.

Areva가 프랑스 플라망빌

(Flamanville 3)과 핀란드 올킬루오토(Olkiluoto 3, 이하 OL 3)에 건설 중인 원자력발전소 역시 과도한 건설비와 공기 지연 문제에 부딪힌 상태다.

프랑스가 주관한 ‘민간 원자력 기술 협력’이라는 국제 회의에서 사르코지 프랑스 대통령이 기조연설을 하였는데, 연설의 내용 중 3세대 원전으로 개발된 각 개량형 원전의 안전을 IAEA가 검토하여 안전 등급을 부여하자고 제안을 하였다.

원전을 도입하고자 하는 국가가 보다 안전하고 투명하게 안전을 기준으로 선택함으로써 합리적이고 투명한 경쟁을 할 수 있는 방법이며 건설 후 가동중에 원전의 안전성을 확보할 수 있다는 근거에서 이러한 주장을 한다고 제시

하였다.

또한 그는 “최근 원자력발전소 시장이 가격 경쟁력에만 치우쳐 있다.”며 한국의 APR1400 원자로형에 대한 불편한 심기를 드러낸 것도 이런 속내를 보여주는 대목이다.

프랑스 원자력산업 개편을 위해 프랑수아 루슬리 프랑수아전력공사 명예회장이 2010년 6월에 작성한 <프랑스 민수용 원자력의 미래> 보고서에 의하면, 프랑스 정부의 역할을 강화하기 위하여 에너지부/대통령 산하 에너지 사무국 설립 및 원전 수출을 위한 전담 산업 체계를 구축할 것을 권고하였다.

또한 UAE 원전 수주 실패는 UAE의 사업 요구 분석 및 EDF의 뒤늦은 참여 등 프랑스 컨소시엄 구성의 한계를 반영한 사례이다



로, EDF가 국내의 원전 프로젝트의 주축이 되는 것을 원칙으로 하고, 원전 국제 입찰시 EDF의 원전 운영 및 종합 사업 관리 경험을 바탕으로 통합하고자 하는 방안을 제안하였다.

EDF와 Areva의 전략적 협력 관계는 Areva의 주고객(EDF) 및 EDF의 주공급자(Areva)로서 기술·산업적 측면에서 긴밀한 관계를 구축하여 왔으나, 최근EDF의 공급자 다변화(선행 연료주기 관련) 등 상업적 견해의 차이로 악화되었다고 지적하였다.

향후 긴밀한 관계 유지를 위하여 EDF와 Areva 경영진은 전략적 협력 협정을 체결, 향후 해외 원전 수출 등을 통하여 프랑스 경제 성장에 기여해야 한다고 주장하였다.

안전기준에 대하여 국제원자력기구(IAEA)의 안전 요건(IAEA Safety Standards) 이외에는 전세계에서 통용되는 민수용 원자력 안전 기준이 확립되지 않아 각국 정부가 안전기준을 규정하고 있으므로 프랑스의 안전기준을 정립하여 해외에 홍보하는 방안을 권고하였다.

이와 같은 주장은 Areva가 개발한 유럽형경수로(EPR)에 이중 격납건물 및 핵연료의 용융물인 코어를 포집할 수 있는 Core catcher를 설치하였다는 데 근거를 두고, EPR이 다른 어떤 원전보다 안전할 것이라는 믿음하에 이러한 주장을 하는 것으로 인식된다.

그러나 이중격납 건물은 항공기 충돌에 대한 기술적인 대응 설계

라는 개념보다 사회적 수용성을 만족하기 위한 설계 방안으로 고려될 수도 있을 것이다.

비록 EPR인 OL 3의 건설이 3년 정도 지연되고 있지만, EPR은 핀란드, 프랑스 및 중국(2기)에서 건설되고 있으며, 19기가 미국, 인도, 이탈리아, 프랑스, 영국 등지에서 구체적으로 협의되고, 또한 남아공, 브라질, 리투아니아, 폴란드, 스위스, 네덜란드 등에서 의사 타진을 하고 있다. <그림 1>에 나타난 바대로 Areva가 추진하고 있는 협상대상국을 보면 자세히 알 수 있다. 따라서 EPR의 기술적 우수성에 대한 보다 자세한 파악이 필요할 것이다.

막연하게 APR1400이 EPR보다 우수하다고 하는 일반적인 이야기보다 EPR의 설계 특성을 분석하여 향후에도 지속적으로 문제가 제기될 수 있는 APR1400과의 설계 비교에 대한 기본 자료를 제공하기 위하여 EPR에 대한 기술적인 특성을 분석함으로써EPR의 안전성, 경제성 그리고 유지 보수성 등을 살펴보고 한국의 APR1400이 나아갈 방향을 검토하고자 한다.

유럽형 가압경수로(European Pressurized Reactor : EPR) 개발 배경

1989년 4월 프랑스의 Framatome과 독일의 Siemens는1990년대에는 신규 원전의 수요가 적지만 향후 가동 원전의 수명 후 이를 대체하기 위한 신규 원전이 필요할 것이라는 가정 하에 'Nuclear

Power International(NPI)' 라는 합작회사를 설립하고, Framatome과 Siemens의 충분한 원전 건설 경험을 이용하여 새로운 노형을 개발하기로 하였다.

예를 들면, 증기발생기 교체 사업 등으로 서로간에 이미 업무를 분담하여 수행한 경험이 있는 두 회사는 NPI를 중심으로 장기간 협조하여 새로운 노형을 개발하기로 한 것이다.

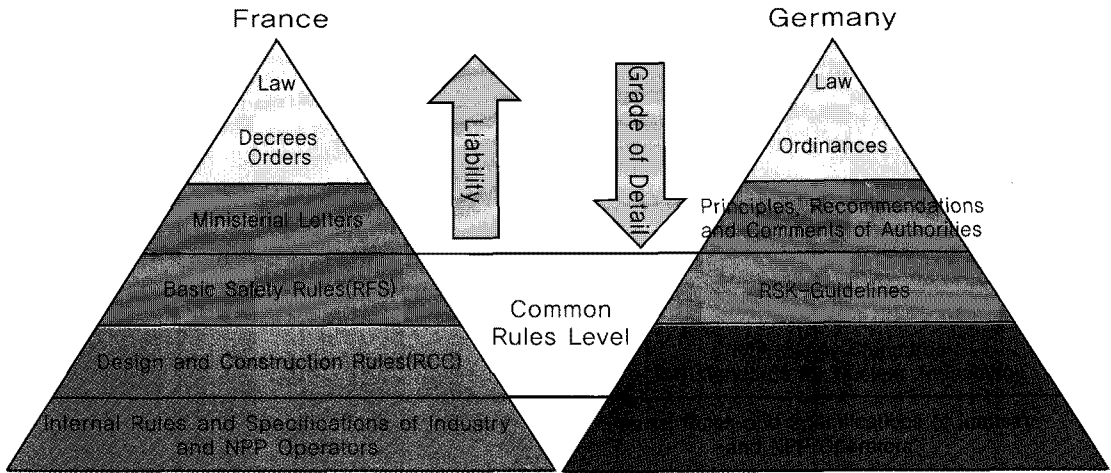
노형의 개발에 앞서 노형의 개발 방향을 결정하기 위하여 혁신적으로 개선된 노형을 선택할 것인지, 아니면 개량형 노형을 결정할 것인지 협의하였다. 그러나 아래의 3 가지 이유로 개량형 노형을 선택하게 되었다.

1) Framatome과 Siemens는 이미 100기 이상의 원전, 즉 10,000MWe이상의 원전을 건설하고 1200 reactor years 이상의 가동 원전 경험을 바탕으로 혁신적 노형보다는 개량형 원전에 운전 경험을 반영하여 개발하는 것을 기본으로 하여 혁신적인 설계 개념 중 일부는 개량형 원전에 반영하고,

2) 가동중 운전 경험이 반영된 개량형 원전의 개념을 도입함으로써 발전소의 이용률을 향상시키고, 새로운 설계에 대한 위험을 최소화할 수 있고,

3) 또한 이미 입증된 설계 개념을 도입함으로써 인허가시 발생하는 불필요한 위험을 최소화 할 수가 있다.

위의 3 가지 이유로 NPI는 1450MWe 용량의 가압경수로를



〈그림 2〉 프랑스와 독일의 기술 기준 체계

프랑스의 N4노형 및 독일의 Konvoi 노형을 기준으로 개발하기 시작하였다.

첫번째의 결과물로 Common Product로 불리는 프로젝트 엔지니어링 매뉴얼을 개발하였는데, 개발하기 전 3가지의 중요한 기준이 먼저 설정되었다.

- 1) 혁신적인 개념보다 개량형 원전 개념을 설계에 반영
- 2) 노심 용융 가능성을 현저하게 줄이고, 중대 사고의 경우를 대비하여 격납건물의 능력을 향상
- 3) 운전 조건을 향상하여 방사선 방호, 폐기물 관리, 유지 보수 및 인적 오류의 저감

위의 3 가지 중대한 기준은 설계 과정에 참여한 프랑스 발전사(EDF), 독일 원전사업자, 규제기관(GRS(독일) & IPSN(프랑스))의 협의를 통하여 선정되었다.

NPI는 1991년 개발된 준비 현황을 프랑스의 발전사업자와 독일의 발전사업자들에게 발표하고, 발전사업자들은 신형 노형의 개발에 참여하기로 결정하였다.

1992년 NPI는 기본 개념 설계에 앞서 발전사업자의 요구 사항인 Conceptual Safety Features Review File (CSFRF)을 개발하였다. 준비 단계에서 CSFRF에 발전사업자들의 요구 사항이 충분히 반영되었으며, 또한 CSFRF는 독일이나 프랑스의 규제 기관의 심사시 기본 기준으로 사용되었다. <그림 2>는 독일과 프랑스의 원자력법령에 근거한 안전 요건 및 기술기준을 비교하여 보여준다.

EPR의 초기 설계 목표는 다음과 같다.

◇ 경제적인 관점 : 초기 건설비 및 운전 유지비의 감소

- 운전 유지 보수의 최적화를 위한 설계

- Economizer를 가진 개량된 증기발생기

- 정기 보수 기간의 단축

- 60년까지 설계 수명 기간 연장(교체할 수 없는 구조물 및 원자로 용기에만 적용)

◇ 안전 및 다양한 시스템 설계

- 다중 및 다양성의 결합을 통한

사고 방지 영역의 개선

- 확률론적 평가 방법을 통한 설계의 조직적인 평가

- 안전 정지에 따른 시스템 고려

- 중대 사고의 완화 방안 구축

◇ 구조물 배치 측면

- 안전 및 운전 측면을 고려한

개선된 빌딩 분산 개념

- 유지 보수 지역의 확대

- 2중 격벽 사이의 환형 유지를

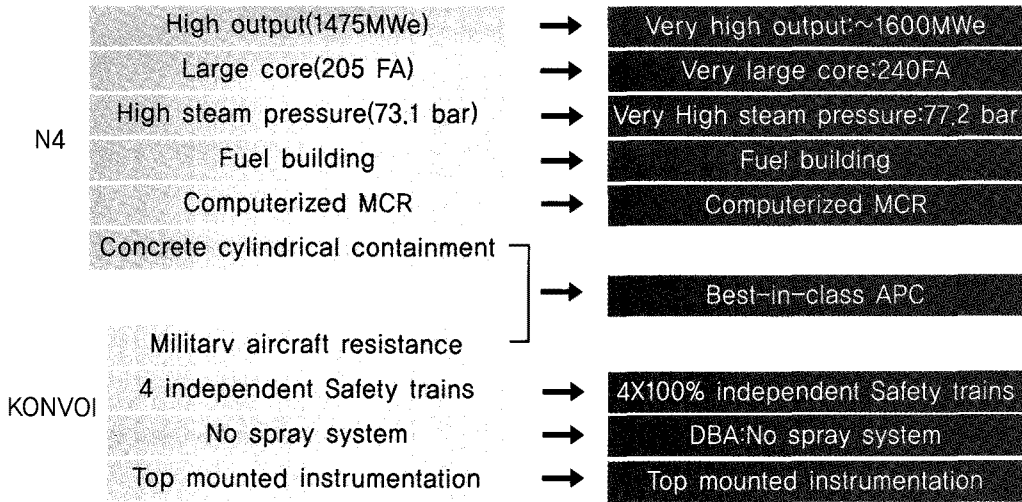
통한 격납 건물 내의 유출 방지

- 사용후핵연료 저장고의 확대

(약 950여기의 사용후핵연료 보관)

1993년 프랑스와 독일의 규제 기관인 GRS/IPSN는 EPR의 안전성 접근 방법을 제시하였고 1998년 EPR의 기본 개념이 완료되었으며, 2003년까지 기본 개념을 바탕으로 기본 설계가 진행되었다.

2002년부터 핀란드와 신규 원전 건설 협상을 거쳐, 2005년에 핀란드의 Olkiluoto 3호기 건설 허가를 받았으며, 2007년에는 프랑스의 Flamanville 3 원전의 건설 허가를 받았다. 또한 영국 신규 원전의 일반 설계 평가를 위하여 규제기



〈그림 3〉 프랑스와 독일의 원전 설계 개념을 통합한 EPR의 설계 특성

관에 제출하였고, 2008년 미국 원자력규제위원회에 설계인증을 받기 위하여 제출, 검토중에 있다.

1. EPR의 기술적 관점

프랑스와 독일의 원자력산업계는 여러 가지 측면에서 확연히 다르다. 프랑스의 경우에는 국가 소유인 EDF가 단일 원전 사업자로 원전의 건설시 사업 관리 및 종합설계(Architecture Engineering)를 책임지고 표준화된 노형을 Framatome에 발주하여, EDF가 건설 관리, BOP계통에 대한 설계 등을 책임지고 하나의 부지에 2~4 기의 원전을 운영하고 있지만, 독일의 경우에는 여러 개의 원전 사업자가 단일 부지에 한 기 혹은 두 기의 원전을 운영하고 있으며, Siemens가 턴키베이스로 원전을 설계, 건설하였다.

역사 이래 끊임없이 프랑스와 독일 두 민족은 반목과 질서, 전쟁으로 이어졌다. 프러시아가 탄생하기 전 프랑스는 독일을 야만 국

가로 단정하고 침략하였으며, 또한 독일 국민들조차도 프랑스어를 고급, 귀족 언어로 여기고 상류 사회에서 사용할 정도로 프랑스에 대하여 항상 동경하는 마음을 가지고 있었으나, '철혈제상'이라고 불리는 비스마르크 재상의 독일 통일 이후 2차 세계대전 이전까지 프랑스는 한 번도 전쟁에서 독일을 이겨본 적이 없었다.

독일과 프랑스의 거리를 보면, 독일은 깨끗함과 질서가 유지되어 군대의 병정같은 분위기이고 자동차 공업을 비롯한 제조공업이 발전하였지만, 프랑스의 경우에는 거리가 항상 지저분하고 노조가 파업을 하는 것이 일상적이지만, 창조적이고 유행에 민감한 소비제품을 생산하고 있다. 예를 들면 루비통 같은 고급 가방, 사넬 향수와 같은 소비제품은 유행을 선도하고 있다. 그러나 항공기 제작 분야, 원자력, 그리고 고속철도 같이 몇 가지 기술에 대해선 세계적인 기술을 유지하고 있다.

이렇게 생활 습관이나, 약속을 지키는 것 등 모든 것이 다른 국민이 한자리에 모여서 새로운 노형을 개발하기로 약속을 하였지만, 세부적인 설계를 추진함에 있어 언어 문제를 비롯한 생활 습관이 다른 사람들이 새로운 노형을 개발한다는 것이 얼마나 어려운지 모를 것이다. 그러나 이와 같이 성격과 민족 특성이 다른 두 민족이 힘을 합쳐서 새로운 노형을 개발하는 것을 보면 역시 대단하다는 생각이 든다.

만약 한국과 일본이 한자리에 모여 공동 노형을 개발한다고 하면 가능할까? 아마 거의 불가능할 것이다.

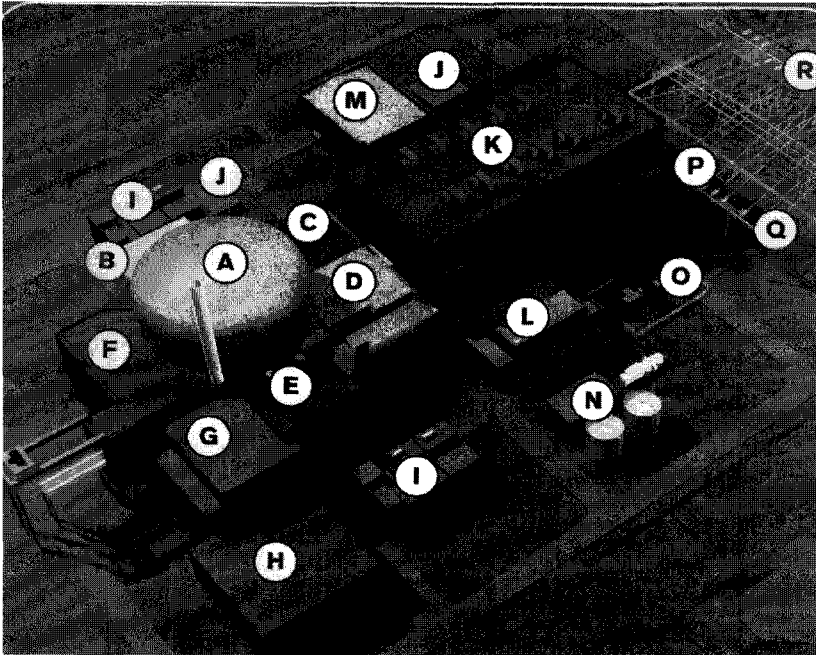
새로운 노형은 기존 노형의 운전 경험 및 설계 경험을 최대한 반영하기로 이미 기본 방침에서 결정되었다. 이러한 관점에서 프랑스 N4 발전소와 독일의 Konvoi 발전소의 설계 특성을 비교 분석하여 아래의 시스템에 프랑스 혹은 독일의 노형의 설계 특성을 적

〈표 1〉 EPR, N4 및 Konvoi의 주요 제원 비교

주요 제원	Unit	EPR	N4	Konvoi
Power (net)	MWe	>1500	1475	1360
Power(th)	MWt	4250	4250	3850
Feedwater temperature	℃	230	229.5	218
Steam flow rate	kg/s	2400	2400	2050
Coolant flow	kg/s	21895	20194	19875
SG heat transfer surface	m ²	7308	7308	5400

〈표 2〉 Olkiluoto 3호기 주요 설계 특성

General	Reactor pressure vessel
<ul style="list-style-type: none"> - Reactor thermal power 4,300MWth - Electrical power, gross 1,720MWe - Electrical power, net 1,600MWe - Efficiency ca. 37% - The annual electricity output ca. 13TWh - Total capacity of buildings ca. 1,000,000m³ - Operating life ca. 60 years - Sea water flow 57m³/s 	<ul style="list-style-type: none"> - Inner diameter 4.9m - Inner height 12.3m - Weight with cover 526ton - Wall thickness 50mm - Design pressure 176bar - Design temperature 351° C
Nuclear Island	Turbine Island
<ul style="list-style-type: none"> - Primary coolant flow 23,135kg/s - Reactor pressure 155 bar - Average temperature of coolant in the reactor pressure vessel 312° C - Design pressure for containment building 5.3 bar - Amount of uranium in the reactor ca. 128tU - Reactor containment building : height ca. 65m, outer diameter ca. 57m, distance from vent - stack to the ground ca. 100m 	<ul style="list-style-type: none"> - Turbine generator unit : one high-pressure turbine (produces 40% of the gross electric capacity of the unit), three low-pressure turbines (produce 60% of the gross electric capacity of the unit) - Generator : Gross electrical output 1,720MW - Rated speed 1,500rpm - Steam temperature 290° C - Steam flow 2,443kg/s - Last stage of the low-pressure turbine : blade length 1,830 mm, overall diameter ca. 7m - Length of the turbine generator shaft 68m
Fuel Assemblies	Turbine Building
<ul style="list-style-type: none"> - mount 241 - length 4.8 m - weight 735 kg - Fuel uranium dioxide UO₂ - Annual fuel consumption ca. 32 tU - Annual fuel consumption as assemblies ca. 60 assemblies 	<ul style="list-style-type: none"> - length ca. 100m - width ca. 60m - height ca. 46m - volume ca. 250,000m³



- A. REACTOR BUILDING
- B. SAFE GUARD BUILDING-1
- C. SAFE GUARD BUILDING-2
- D. SAFE GUARD BUILDING-3
- E. SAFE GUARD BUILDING-4
- F. FUEL BUILDING
- G. NUCLEAR AUXILIARY BUILDING
- H. RADIOACTIVE WASTE PROCESSING BUILDING
- I. EMERGENCY DIESEL GENERATOR BUILDING
- J. ESSENTIAL WATER PUMP BUILDING
- K. TURBINE BUILDING
- L. SWITCHGEAR BUILDING
- M. CIRCULATING WATER STRUCTURE
- N. AUXILIARY BOILER BUILDING
- O. OFF-SITE TRANSFORMERS
- P. GENERAL TRANSFORMER
- Q. AUXILIARY TRANSFORMERS

〈그림 4〉 EPR의 건물 배치도

용할 것인지를 협의하였다.

중요한 설계 항목을 언급하기 전에 프랑스와 독일의 설계 개념을 정확하게 검토하는 것이 필요하다. 기본 설계를 시작하기 전 개념 도출을 위하여 아래의 주요 설계 항목에 대한 각 기술간의 연계성, 주요 특성에 대하여 상세하게 검토하였다.

- Confinement concept with a double-wall concrete containment
- System configuration in a four division/ four train structure
- Severe accident approach
- General accident approach
- I&C architecture
- Man-machine interface
- Break preclusion concept
- In-core instrumentation from the top of the reactor

pressure vessel

〈그림 3〉에서 보여주는 바와 같이 EPR은 프랑스의 N4발전소와 독일의 Konvoi의 장점을 결합하여 구성하였다.

2. 경제적인 관점

기본 설계 개념을 바탕으로 EPR에 대한 경제적 분석이 1996년에 행하여졌다. 만약 독일 원전 사업자가 턴키베이스로 1525MWe의 EPR을 건설한다고 가정하였을 때 약 2750DM (독일 마르크)/kWe이 소요될 것으로 계산되었다.

2750DM은 유로로 변환하면 1325 유로/kWe이며, 이 비용은 first-of-a-kind-cost가 포함된 것으로 15% 정도의 비용이 절감되었다고 1996년에 발표하였다.

제시한 가격은 당시 유럽의 원전 사업자들에게 긍정적인 수치로

평가될 것이라고 NPI측은 발표하였다. 핀란드 Olkiluoto 3호기의 경우 약 2700 유로/kWe 정도인 것으로 추정하면 1996년과 Olkiluoto 3호기가 계약된 시점인 2002년 12월과는 6년 정도의 차이는 있지만 소비자 물가 상승률을 고려하더라도 정확하게 절반 정도의 가격으로 산정한 것은 비현실적인 건설 가격으로 제시된 것을 알 수 있다.

용량에 대해서도 협의하였다. 유럽의 경우에는 Grid의 용량이 충분함으로 1500MWe 이상으로 용량을 격상시킬 수 있지만, 유럽 외에 EPR을 건설하는 경우 Grid의 문제로 1500MWe이하로 용량을 감소시켜 EPR을 수출할 수 있을 것이라고 가정하였다.

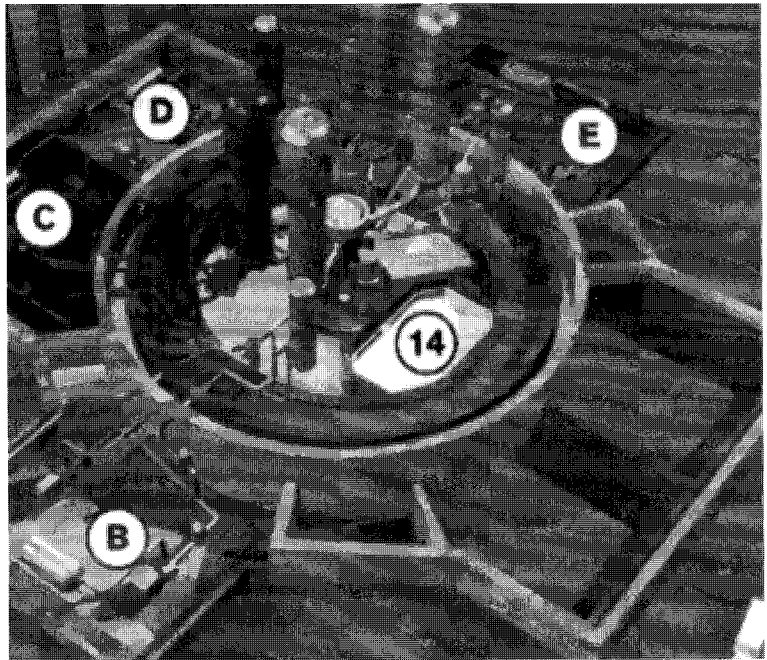
기본계획이 확정됨에 따라 다음과 같은 여러 가지 중요한 이정표가 제시되었다.

- 프랑스와 독일의 규제 기관은 EPR의 주요한 안전성에 대하여 긍정적으로 평가

- 1995년 2월 23일, EDF와 독일의 원전 사업자는 기본 설계 진행을 위하여 NPI와 계약 체결

- European utility requirements (EUR) 위원회는 EPR이 규정에 일치한다고 승인

- 2002년 가을, Framatome ANP (Areva 이전의 회사)는 핀란드의 Olkiluoto 3에 EPR 계약을 체결



〈그림 5〉 방사형 형태의 안전 계통 배치도

EPR의 주요 설계 특징

EPR의 안전 설계 측면에서 가장 큰 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 외부 비행기의 충돌에 대비한 격납 건물 및 사용후핵연료 건물, 안전 계통 보조 건물에 대한 이중 격벽 설계
- 각각 100%의 기능을 수행할 수 있는 4 계열 시스템이 방사형 형태로 배치되어 있는 설계로 각 안전 시스템의 독립화 기능 유지
- 중대 사고시 핵연료의 용융물을 포집할 수 있는 코아 비산 설비

격납 건물은 이중벽으로, 내부 벽은 liner plate 없이 pre-stressed 콘크리트, 외부벽은 reinforced concrete, 그리고 basemat는 reinforced concrete로 설계되었다.

내벽과 외벽은 약 20cm 간격을 유지하는 환형으로 되어 있으며,

환형은 부압을 유지함으로써 내벽에서 누출된 방사성 물질을 포집하는 역할도 하고 있다.

또한 B, C, D, 그리고 E 빌딩에 각각 100%의 안전 계통 기능을 가지고 방사 형태로 배열되어 있다. 〈그림 5〉를 보면 보다 자세히 알 수 있다.

1. 원자로 압력용기(Reactor Pressure Vessel)의 주요 설계 특징

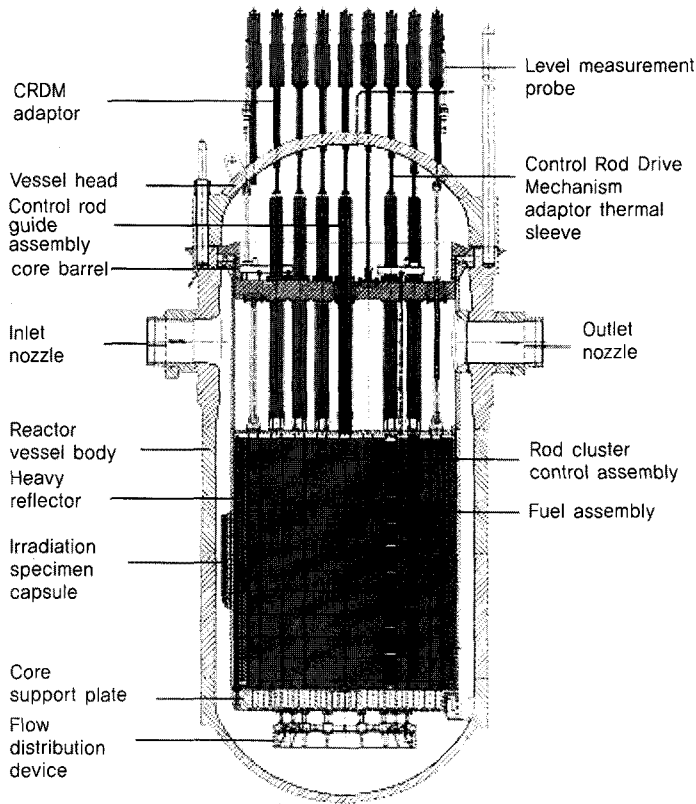
원자로용기는 Konvoi 원전의 기술을 이용하여 용기의 노즐 및 프렌지를 단조 제작하여 사용전 검사 및 가동중 검사(In service inspection, ISI) 시간을 줄이고, 냉각재 배관 파단 사고를 고려하여 노즐의 위치를 active core보다 조금 위에 설치하였다.

원자로용기의 상부에 In-core 관통구를 설치하여 원자로용기의

하부 관통부를 제거함으로써 응력 부식 균열(Stress Corrosion Crack, SCC)의 현상이 발생하는 것을 사전에 차단하였다. 중대 사고를 고려하여 핵연료 용융으로 인한 코리움(corium)이 코아 포집소(core catcher)에 균등하게 분배되도록 설계하였고, 냉각을 위하여 용기 하부에 in-containment refuelling water storage tank (IRWST)를 설치하였다.

또한 중성자에 의해 취화되는 것을 방지하기 위하여 인코넬 600합금 대신에 인코넬 690을 사용하였으며, 중성자의 누출이 최소화되도록 설계하여 핵연료의 경제성 향상과 압력용기의 중성자로 인한 경년열화를 방지하고, 압력용기의 상부를 단일체로 제작하여 용접 작업을 제거하였다. 또한 Irradiation surveillance program을 적용하였다.

60년 운전 후에 중성자의 예상



Reactor pressure vessel

〈그림 6〉 원자로 압력용기 개략도

〈표 3〉 원자로 압력용기의 설계 조건

Design Pressure	176 bar	2550 psia
Design Temperature	351°C	664°C
Base Metal material	16MND 5 SA-508	Grade 3 class 1
Overall Height with Closure Head	12.71m	41' 8"
Inside Diameter (under cladding)	4.89m	16' 1/2"
Wall thickness (under cladding)	250mm	9.8"

된 Fluence는 두 가지 방법으로 계산되었다. 핵연료 관리를 In-Out으로 하는 경우와 Out-in으로 하는 경우는 아래와 같이 계산되었다.

• Fluence in-out operating

fuel management

$$= 1.2 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$$

• Fluence out-in operating fuel management

$$= 2.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$$

원자로용기의 재질 중 화학적인

특성은 • Sulphur < 0.005 %, • Phosphorus < 0.008 %, • Copper < 0.008%로 구성되어 중성자 취화에 현상을 최소화 하였다.

또한 설계시 RTND가 20°C로 설계되어, 60년 운전 후 중성자의 누출을 최소화하여 경년열화에 의한 취성 온도(RTND)가 30°C 이하를 유지하도록 하여 가압 열충격의 가능성을 최소화하였다.

〈그림 6〉은 EPR의 원자로 압력용기를 보여준다.

핵연료 집합체로부터 원자로 용기로 중성자의 누출을 줄이기 위하여 원자로 내부 구조물을 일체형으로 제작하여 중성자의 경제성을 높였고, 또한 원자로 용기의 크기를 증가시켜 중성자 조사로 인한 영향을 최소화 하였다. 또한 하부 부분의 진동을 줄였다. 압력용기 자체도 단조물의 형태로 제작하여 ISI의 기간을 최소화 하였다.

취성 조사를 위하여 응력 및 피로 분석, 금속 파괴 분석을 수행할 수 있도록 2군데 취성 조사 프로그램(irradiation surveillance program)을 위한 바스켓을 설치 하였다.

2. EPR 내부 구조물의 설계 특징

원자로를 장기간 운전하면 유체의 유동이 균일하지 않고 구조물의 온도 또한 안과 밖이 다르므로 인하여 온도의 차이로 인한 응력으로 응력 부식 균열(SCC)이 발생하므로 원전의 수명 연장시 중요한 문제점으로 지적되고 있는 것이 원자로 내부 구조물이다. 또

한 내부 구조물에 설치된 볼트등 부속품이 경년열화로 인하여 구조물에서 분리되어 원자로 내부의 Loose part로 되어 유동하는 현상이 발견된다.

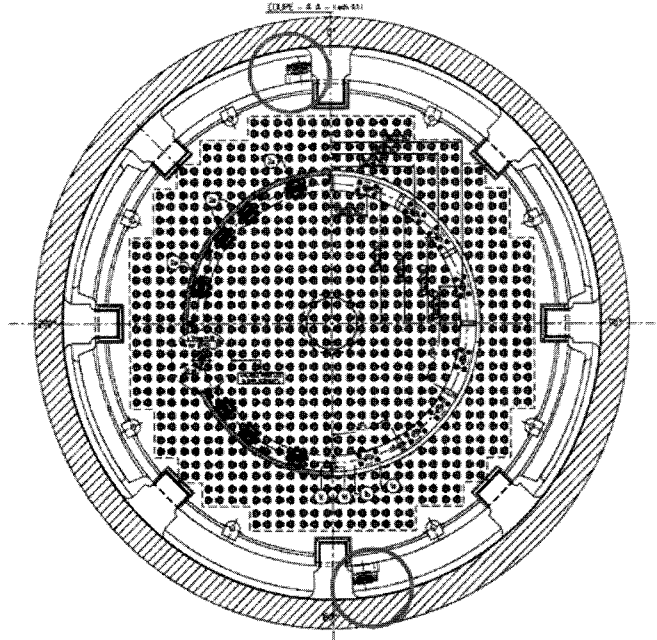
EPR의 경우에는 기존의 판 타입 내부 구조물을 얇은 스테인리스 판의 용접 및 볼트 조임에서 원통 구조물의 형태로 바꾸고, 또한 유체의 유동을 원활하게 하기 위하여 노심 지지판 아래 Flow Distribution Device(FDD)을 설치하였다. <그림 8>

따라서 핵연료의 연소를 극대화함으로써 연료 비용을 2~3% 절약할 수 있으며, 장수명 핵종의 발생을 15% 정도 감소시키고, 내부 구조물의 온도 분포가 적절하게 관리되어 응력 부식 균열이 발생하는 요인을 제거하였으며, 볼트의 절단으로 인한 Loose part의 가능성을 제거하였다. LOCA시에도 잠열로 인한 내부 구조물의 변형이 최소화될 것이며 중성자의 누출로 인한 원자로 압력용기 재질의 물성취성이 최소화될 것이다.

원자로 내부 구조물의 설치로 약 15% 이상 우라늄 사용을 절감하도록 설계하였다. 따라서 23%의 사용후핵연료를 줄이고 방사성 폐기물은 10% 정도 줄일 수 있다고 한다. 원자로 내부 구조물의 시험을 위하여 아래의 실험이 행하여졌다.

- 원자로 하부 내부 구조물의 열유동 시험을 위하여 JULIETTE 시험이 Areva Le Creusot R&D Centre에서 수행되었다.

- 원자로 내부 구조물의 유동에



<그림 7> 취성 조사 프로그램(irradiation surveillance program)을 위한 바스켓

의한 진동 시험을 위하여 HYD-RAVIB이 Areva Le Creusot R&D Centre에서 수행되었다.

- Control Rod Guide Assemblies (CRGAs) and Control Rod Drive Mechanisms (CRDMs) validation tests를 위하여 MAGALY tests(CRGA 설계 적합성 시험) 및 KOPRA tests (제어봉 구동장치의 낙하 및 조건 시험)가 Areva Erlangen R&D Centre에서 각각 수행되었다.

3. 냉각재 배관

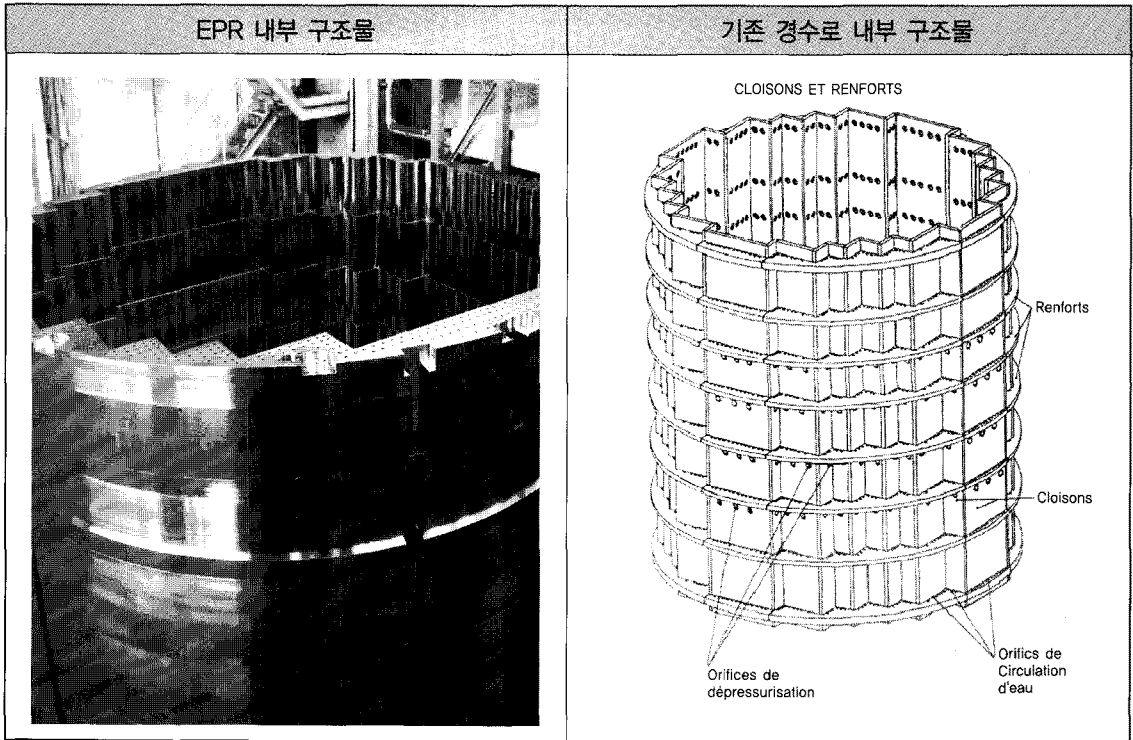
원자로 냉각재 배관은 오스테나이트 스테인리스 재질 Z2 CN 19.10 N2 로 단조로 제작되었다. 단조로 제작된 냉각재 배관은 요구된 재질의 기계적인 성질을 유지하고 용접 부분을 최소화하여

배관의 건전성을 유지할수 있다. 단 연결되는 소구경 배관은 제작시 용접하는 방법을 사용하였다.

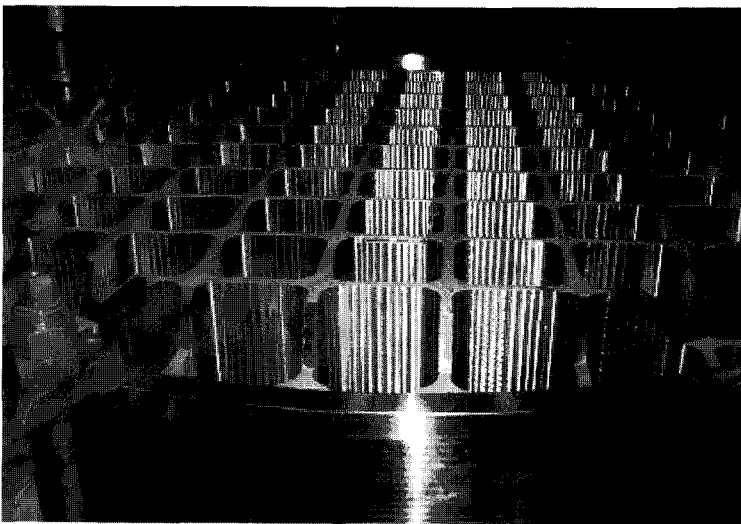
가압기의 surge line piping and small welded nozzles 은 열충격되는 현상을 고려하여 단조된 오스테나이트 스테인리스 재질 Z2 CN 18.12 N2 을 사용하여 제작하였다.

단조로 제작된 냉각재 배관은 용접 부위를 최소화하여 운전시 가동중 검사를 최소화하므로 운전 비용을 줄일 수 있고 운전성을 향상할 수 있을 것이다. 이러한 설계는 CIVAUX 2 발전소의 경험을 근거로 하여 냉각재 배관의 단조화를 추진하였다.

핵연료의 용융으로 인하여 원자로 용기가 파손되는 경우, 코륨이 격납 건물의 콘크리트와 직접 접촉하는 것을 방지하고 토양 및 지하수가



〈그림 8〉 원자로 내부 구조물의 비교



〈그림 9〉 원자로 내부 구조물 유동을 위한 FDD

오염되는 것을 방지하기 위하여 코륨의 포집소가 설치되었다.

원자로 압력용기의 파손 후 코륨을 일시적으로 용기 아래에 있는 Pit에 저장할 것이며 저장된 코륨은 피트 아래 쪽에 있는 철문 쪽

으로 이동하여 원자로 용기의 밖에 있는 Spreading 공간으로 천천히 퍼질 것이다.

Spreading 공간으로 모아진 코륨은 원자로 냉각재 저장탱크 (IRWST)에 저장된 물에 의해서

천천히 냉각되며 이와 같이 모든 과정 (retention, spreading, flooding, cooling)이 Passvie 형태로 설계되어 있어 안전성을 높일 수 있다.

5. 격납건물의 외부 충격에 대한 설계

EPR은 외부 사건으로 지진, 비행기의 충격, 폭발적인 압력과, 그리고 사보타지를 고려하여 설계되었다. 격납건물의 이중 격벽의 충격 및 화재에 의한 파손 위험도 계산은 확률론적인 방법이 사용되었으며, 가능한 사고를 고려하여 계산하였다. 확률론적인 방법으로 계산하였다고 하여 보수적인 사항을 고려치 않았다는 것은 아니다.

가. 확률론적 접근 방법

비행기의 충돌은 비행기의 종류에 따라 위험도가 여러 가지로 분류될 수 있을 것이며 원자력발전소가 설치되는 장소에 따라 변할 수 있을 것이다. EPR의 경우에는 3가지의 비행기 충돌을 고려하였다.

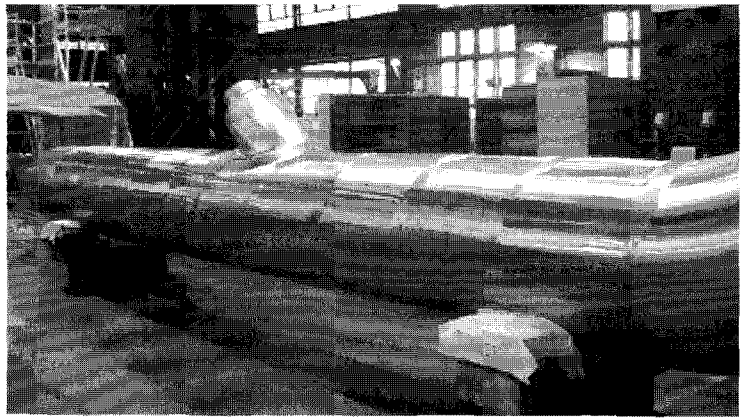
- 일반 비행기에 의한 충돌 : 5.7톤 이하의 중량을 가진 일반 상용 비행기의 경우
- 민간 중형 항공기에 의한 충돌 : 보잉 747을 고려하여 5.7톤 이상에서 300톤까지의 중량을 고려한 상용 비행기의 경우
- 군사용 전투기에 의한 충돌 : 무기를 장착한 군사용 전투기에 의한 충돌

위에서 열거한 3종류의 항공기가 원자력발전소에 충돌하는 경우, 아래의 3 가지 안전 기능의 손상으로 다른 결과를 추론할 것을 고려하여 선정되었다.

- 원자로 안전 정지 및 잔열 제거 계통의 손상
- 사용후핵연료 저장조의 손상
- 방사성 물질의 보관 저장고 및 관련 계통의 손상

방호 시스템이 필요한지 아니면 안전 기능을 유지할 수 없을 것인지를 판단하기 위하여 충돌에 대한 확률론적 안전성 평가를 각 분류에 대하여 실시하였다.

확률론적 목표는 외부 사건에 의한 방사성 물질이 유출될 수 있



〈그림 10〉 단조로 제작된 냉각재 배관

는 확률의 상한치를 사건당 10-7/년으로 산정하였고, 충돌시 위의 3개의 계통에 대한 구조물 및 기기가 건전성을 유지하고 있는지 포함하였다.

나. 확률론적 계산

3가지 인자를 고려하여 확률론적 인 방법을 이용하여 계산하였다.

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3$$

• P₁ : 안전 계통에 충돌될 수 있는 확률

- 확률을 계산하는 방법 : 안전 계통 구조물의 전체 면적(m²) / 충돌될 m²

• P₂ : 충돌 후 안전 계통의 기능이 손상될 확률

- 빌딩이 충격에 견딜 수 있으면 0으로 가정, 그러나 견딜 수가 없으면 확률론적인 방법을 이용하여 P₂ 값을 계산

• P₃ : 방사성 물질이 일정 한계를 벗어나 누출될 확률

- 일정 한계를 벗어나는 경우 1로 가정하고 한계치 이내인 경우 0으로 가정하여 계산.

① 설계 가정

- 건물 배치 및 구조: 항공기 충돌 사건이 설계 기준 사고로 고려됨에 따라 항공기의 충돌이 발

생로 인한 결과를 고려하여 건물의 배치가 설계되어야 하고 기기 및 건물 구조가 항공기의 충돌 사고를 가정하여 설계되어야 한다.

② 고려된 하중

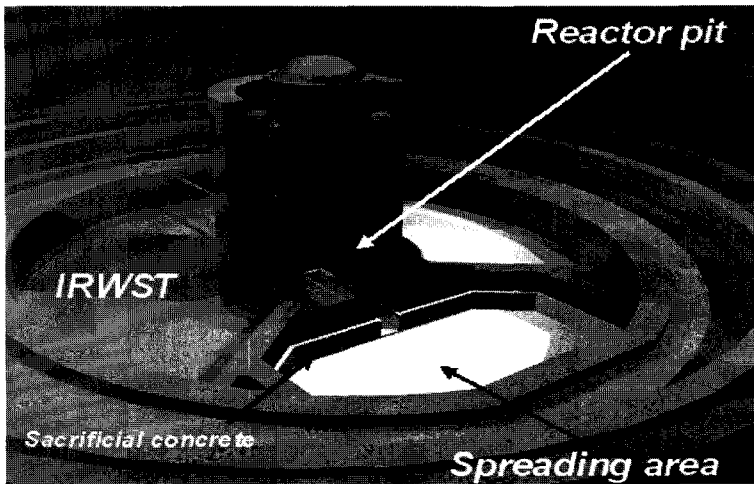
- 비행기의 충격 하중은 보수적으로 비행기의 속도를 고려하였다. 고려된 하중은 속도와 시간으로 대표된다. 건물의 벽에 수직의 충돌에 대하여 대각선 방향으로 충돌하여 하중은 건물에 일정하게 분포된다고 가정하였다. 충돌 후 벽이 진동하는 것은 지진 해석으로 분석하였고, 벽을 통과하는 것에 대해서는 건물, 바닥 및 빌딩의 안전도 해석을 고려하여 계산하였다.

③ 건물 보호와 관련된 안전 원칙

- 건물에 충돌시 발생된 진동, 건물의 파손 및 통과와 별도로 충돌시 발생하는 화염이 주요한 고려 사항이다. 건물은 항공기의 충돌시 발생하는 화염에 대한 대책도 충분히 고려되어야 한다.

- 그러나 항공기의 충돌과 동시에 건물 내부 사고가 발생하는 것은 고려치 않았다.

- 항공기 충돌에 대하여 확률론적으로 고려함으로써 단일 손상



(그림 11) 코룸(Corium)의 분배 및 포집소

요건(Single Failure Criterion)은 고려되지 않았고, 이는 확률론적으로 발생할 확률이 낮으므로 고려치 않았다.

다. EPR의 설계기준

발전소 부지의 특성을 고려치 않고 일반적으로 항공기가 발전소에 충돌한 확률은 다음과 같다.

- 일반적인 소형 항공기의 경우 충돌 확률 : $10^{-10}/\text{year}-\text{m}^2$
- 군사 비행기의 경우 충돌 확률 : $10^{-11}/\text{year}-\text{m}^2$
- 대형 민간 항공기의 경우 충돌 확률 : $10^{-12}/\text{year}-\text{m}^2$

일반적으로 원전 부지를 10^4m^2 으로 가정하면, 원전부지에 대한 충돌할 확률은 아래와 같이 구하여진다.

- 일반적인 소형 항공기 충돌 확률 : $10^{-10}/\text{year}-\text{m}^2 \times 10^4\text{m}^2 = 10^{-6}/\text{년}$
- 군사 비행기 충돌 확률 : $10^{-11}/\text{year}-\text{m}^2 \times 10^4\text{m}^2 = 10^{-7}/\text{년}$
- 대형 민간 항공기 충돌 확률 :

$$10^{-12}/\text{year}-\text{m}^2 \times 10^4\text{m}^2 = 10^{-8}/\text{년}$$

EPR의 사고 결과를 고려하여 항공기 충돌로 인한 방사성 물질의 노출의 확률은 $10^{-7}/\text{년}$ 으로 결정하고 이를 위하여 아래의 조치가 취해지도록 설계하였다.

- 일반적인 소형 항공기의 충돌의 경우를 대비한 보호 조치는 설계에 반영되어 방호 대책이 마련되어야 한다.
- 군용 비행기 충돌을 고려한 방호 조치는 충돌 확률의 값이 EPR의 방사성 물질 노출 값에 근접하므로 EPR의 설계에 포함되어 방호 대책이 마련되었다.
- 대형 민간 항공기의 충돌을 고려한 방호 조치는 충돌 확률이 대단히 낮으므로 특별한 방호 설계를 고려치 않았다.

라. 충돌 하중의 계산 및 정의

- 일반 소형 항공기의 충돌시 안전 계통 건물의 보호

2가지 경우의 소형 항공기가 고려되었다. Cessna 210(1,500kg) 비행기와 Lear Jet 23 (5,700kg) 비행기가 100m/s의 속도로 충돌하는 것으로 고려하여 계산한 결과, 현재의 설계로 충분히 만족하는 것으로 분석되었다.

- 군용 비행기의 충돌시 안전 계통 건물의 보호

여러 종류의 군용 비행기가 고려되었지만, 하중은 Rafale 전투기가 13,850kg이므로 14ton 정도의 군용 비행기가 고려되었고, 180m/s의 속도로 충돌을 하여 약 7m²의 면적이 영향을 받을 것으로 가정하더라도 안전 계통의 건물이 제 기능을 유지하고 있는 것으로 분석되었다.

핀란드 Olkiluoto 3 원전의 건설 지연 사유

1999년에 기본 설계를 마친 NPI는 EPR을 유럽에 소개하기 위하여 노력하던 중 핀란드가 원전을 건설할 계획이 있다는 것을 알고 핀란드와 접촉을 시작하여 2002년 12월 계약하게 되었다. 2003년 6월에 원자로 압력용기 제작을 위해 Japan Steel 제작 계약을 체결하였다.

25년 만에 원전을 서유럽에 건설함에 있어, 서유럽은 새로운 원전을 건설한다는 기대감에 모두들 들떠 있었다. 신문과 방송에 연일 소개되고 수많은 사람들이 OL 3의 현장을 방문하였다. 특히 핀란드 사람들이 가지는 자부심은 엄

청났다. 계약서에 명시된 건설 일정은 <표 4>와 같다.

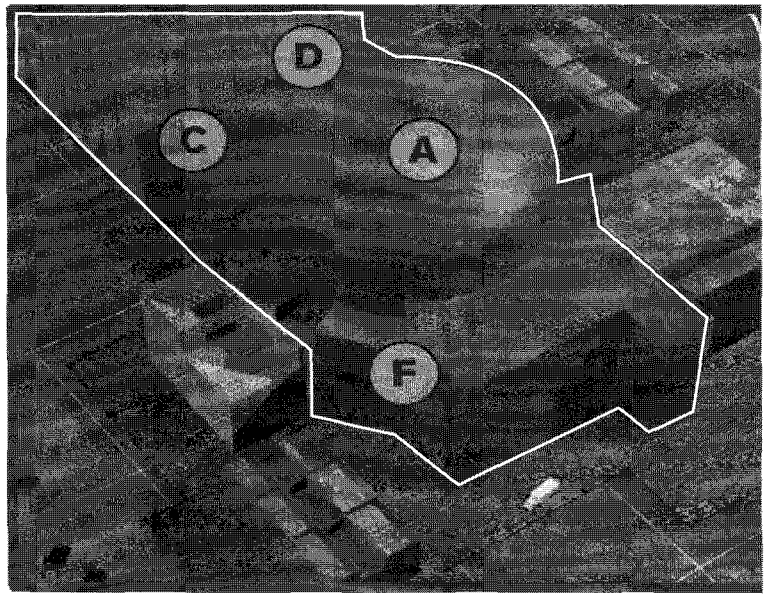
계약에 의하면 2009년 4월에는 시험 운전을 통하여 전기를 생산하여야 하나 사진에서 보여 주는 바와 같이 격납건물의 돔도 닫지 못한 상태이다.

Areva와 같이 세계적인 회사에서 3년 이상 건설이 지연되는 근본적인 이유가 무엇일까? 전 세계 약 45,000명의 직원을 거느리고, 우라늄 광산에서 채처리 시설 사업까지 주관하는 Areva가 4년 원전 건설 계약 기간을 3년 이상 지연하는 이유 중 주요한 사항에 대하여 살펴본다..

Areva가 감지하지 못한 사실은, 핀란드의 원전 운영 기술이 세계 top이고, 지난 10년간 가동중인 4기의 원전 가동률이 한 번을 제외하고는 매년 1위를 할 정도로 원전에 대한 엄청난 지식 보유와 함께 규제 기관인 STUK이 핀란드 안전 요건을 운용하면서 최신 기술을 적용하여 원전을 잘 규제하고 있다는 사실이다.

신규 원전 건설을 위한 계획 단계에서, 미국과 유럽의 경우는 1970년대와 환경이 다르다는 것을 인식하여야 한다. 1970년 대의 경우에는 주기기 공급자는 대규모 실험 장치와 함께 설계, 제작 능력 및 숙련된 기술자를 보유하고 있으므로 하청 계약이 많이 필요치 않았다. 또한 지속적으로 원전을 건설함에 있어 참조 발전소의 설계를 참고하여 설계하였고, 사업 관리에 대한 경험도 충분하였다.

그러나 2000년의 주기기 공급



<그림 12> 선 안의 건물은 비행기 충돌에 의한 사고를 방지하도록 설계

자는 단지 지난날의 영광스러운

Areva와 같이 세계적인 회사에서 3년 이상 건설이 지연되는 근본적인 이유가 무엇일까? 전 세계 약 45,000명의 직원을 거느리고, 우라늄 광산에서 채처리 시설 사업까지 주관하는 Areva가 4년 원전 건설 계약 기간을 3년 이상 지연하는 이유 중 주요한 사항에 대하여 살펴본다..

Areva가 감지하지 못한 사실은, 핀란드의 원전 운영 기술이 세계 top이고, 지난 10년간 가동중인 4기의 원전 가동률이 한 번을 제외하고는 매년 1위를 할 정도로 원전에 대한 엄청난 지식 보유와 함께 규제 기관인 STUK이 핀란드 안전 요건을 운용하면서 최신 기술을 적용하여 원전을 잘 규제하고 있다는 사실이다.

신규 원전 건설을 위한 계획 단계에서, 미국과 유럽의 경우는 1970년대와 환경이 다르다는 것을 인식하여야 한다. 1970년 대의 경우에는 주기기 공급자는 대규모 실험 장치와 함께 설계, 제작 능력 및 숙련된 기술자를 보유하고 있

<표 4> OL 3의 계약 일정

2005 5월	원자로 건물을 위한 콘크리트 타설
2007 5월	원자로 압력용기 설치
2008 5월	고압 기능 시험 실시
2008 8월	핵연료 장입
2008 11월	초임계 달성
2009 4월	상업운전 시작

으므로 하청 계약이 많이 필요치 않았다. 또한 지속적으로 원전을 건설함에 있어 참조 발전소의 설계를 참고하여 설계하였고, 사업 관리에 대한 경험도 충분하였다.

그러나 2000년의 주기기 공급자는 단지 지난날의 영광스러운 이름만 가지고 있을 뿐이지 설계 능력이나 제작 능력 등이 부족하며 많은 부분을 하청 계약에 의존하고 또한 충분한 공급망이 확립되지 않고 있다는 사실을 직시했어야 했다.

더욱이 기존 전문 하청 기관의 전문 기술자가 은퇴함으로써 생긴 기술의 단절, 새로운 기술 및 장비

EPR: DANGEROUS WASTE OF TIME

Current delay on completion of the Olkiluoto 3 EPR* nuclear plant

Days	Hrs	Min	Sec
447	0	04	32

Cost of delay to electricity users and tax payers

€ 3 169 734 194

▶ EXPECTED DELAY OF 3 YEARS - FIND OUT MORE

*EPR - European Pressurised Reactor due to be completed 01-05-2009

〈그림 13〉 유럽 환경단체 Web 사이트에 표시된 핀란드 OL 3의 건설 지연에 대한 추가 비용 부담 및 건설 지연 일수

의 도입에 따른 전문 기술 획득 필요, 또한 원전 건설시 안전문화에 대한 인식을 교육할 필요 등이 있을 것이다.

Framatome과 Siemens가 Areva라는 하나의 회사로 합병되고 난 후 처음으로 시행하는 대규모 사업이므로 사업 관리의 능력이 아직 제대로 갖추어지지 않은 상태에서 사업이 시작되었다.

새로운 안전 요건을 사업자는 충분히 이해하여 건설시 안전 요건의 위배로 건설이 지연되는 사유를 사전에 방지하여야 한다. 또한 입찰 안에서 작성시 안전 요건

이 충분히 반영되어야 한다.

핀란드 Olkiluoto-3의 건설 공기 48개월은 시공 착수 전 30~40%의 낮은 설계 완성률로 인해 3년 이상 공기 지연이 초래되었으며, 이에 따라 프랑스 Flamanville-3 건설 공정은 54개월, 중국 Taishan-1은 50개월로 조정되었다(콘크리트 타설에서 핵연료 장입, 시운전 기간은 제외).

1. 건설 지연의 주요 원인 분석

건설 착수시 설계 완성률 부족이 주요한 원인으로 지목된다. 시공 착수 전 30~40%의 낮은 설계 완성률로 인해 건설 도중에 많은 설계 변경으로 인하여 공기가 지연되고 또한 동시다발적 해외 사업으로 설계의 변경이 원활하게 수행되지 못하였다.

또한 건설 중 설계 변경이 다수 발생하였다. 예를 들면 안전 관련 계통의 설비 여유도 부족으로 기기 용량이 증가하고, 중대 사고 관련 계통 설비 여유도 부족으로 계열 추가, 주요 건물 방호 설비 보강 등 기본 설계의 변경으로 많은 부분의 하부 설계 변경이 시도되었다.

Areva는 설계의 승인 기간을 약 7주간으로 예상하였다. 그러나 사업자인 TVO는 핀란드 안전기준에 의한 설계 검토를 하여 설계 검토 기간만 9개월이 소요되어, 설계 검토 기간의 지연으로 기차 재 발주가 늦어지고 또한 기기 용량 중대 및 설계 변경으로 인해 초도품 기기의 성능 및 품질 검증 미

흡으로 리콜 및 재작업 사례가 빈번하였다.

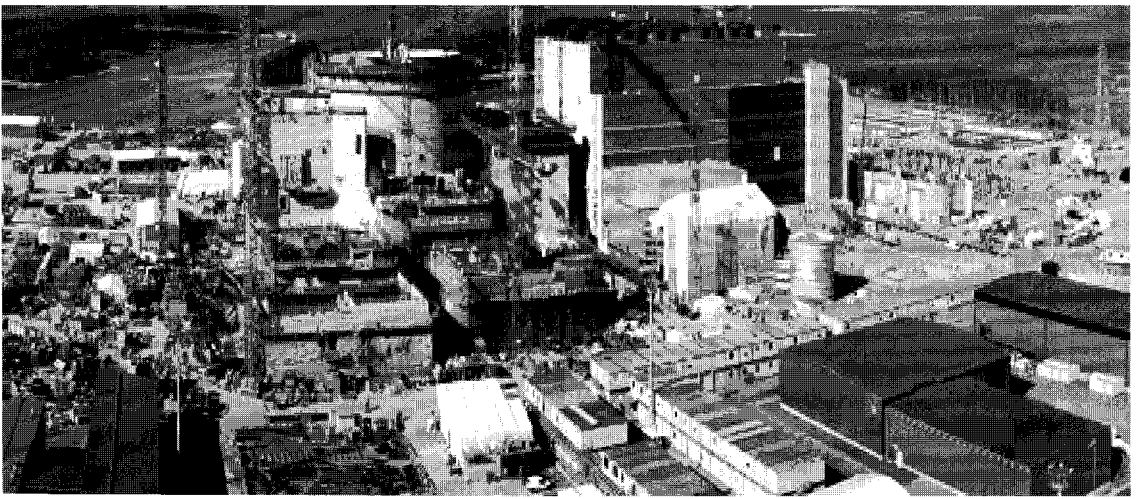
계측제어 시스템의 디지털화를 도모하였으나 I&C 안전계통과 비안전계통 간 독립성 확보가 미흡하여 비안전계통의 신호가 안전계통으로 전달되는 등 신호 전달 체계에 문제가 발생하였고, 또한 필수 안전계통에 대한 Hard-wired Backup System의 적용을 요구하여 계측제어 시스템의 기본적인 구조 변경이 요구되었다.

지난 30년간 대규모 토목 및 기전 공사를 수행한 경험의 미비로 시공 문제점이 다수 발생하였고, 다수의 시공사, 기기 공급자 선정으로 업무 연계가 미흡하고 촉박한 시공 일정 및 품질 관리 미흡으로 불량, 제작업 사례가 발생하였다.

Areva는 핀란드에서 요구하는 안전 요건을 충분히 파악치 못하였다. EPR은 RCC-M, RCC-E를 기준으로 설계, 제작되었으나 코드보다 한 단계 상위 규정인 안전 요건에 대한 프랑스와 핀란드의 차이를 충분히 고려치 아니하였다.

또한 규제 기관의 관행의 이해가 성공적인 사업의 수행을 위해서 중요하다. 핀란드의 경우에는 Areva가 세계 각지에서 수행하였던 규제 관행과 다르다는 사실을 인식하지 못하였다. 성공적 사업을 위해서는 규제 기관, 사업자 및 기기 공급자는 안전 요건을 충분히 이해하여야 한다.

유럽 각국에서 50여개 국적을 가진 약 4,500명 정도의 건설 인력이 현장에 상주하여, 영어를 공통 언어로 사용하나 의사 소통상



Olkiluoto 3 원전 건설 장면 (2009년 4월 말, 사진 제공 TVO)

의 오해와 언어의 장벽으로 인하여 충분하게 작업 방법, 작업 후 검사가 이루어지지 않았으며, 그리고 많은 국적의 사람으로 인하여 원전 건설 안전문화의 부재로 인하여 잦은 화재가 발생, 안전 계통의 작업에 대한 안전문화 준수, 그리고 하청업체와의 대화 부족으로 긴밀한 협조가 되지 않았다.

축박한 시공 일정 및 품질 관리로 인해 콘크리트 타설, Liner Plate 용접 및 냉각수 터널 시공 등에서 다량의 불량 발생, 제작업에 의한 지연 등의 문제점 발생하고, 핀란드의 극심한 추위 기간에 콘크리트가 양성된 후 콘크리트 검사를 받았으나 불합격됨으로 인한 제작업으로 공기가 지연되었다.

또한 동시다발적인 해외 사업 (핀란드/프랑스/중국에서의 건설, 미국 NRC DC 심사 등)으로 인한 설계 및 시공 인력 부족 현상이 발생하였다.

건설 사업을 시작하기 전에 충분한 계획과 준비가 있어야 한다. 불필요한 사업의 지연을 방지하기 위하여 사업자, 규제 기관, 그리고 기기 공급자는 아래의 사항에 대하여 준비를 하여야 할 것이다.

- 규제 기관의 능력 및 인원을 적절하게 유지
- 기기 공급자의 인력 및 공급 능력 확인
- 부지 특성과 관계되는 상세한 부분까지 검토 완료
- 자격이 있는 하청업체 사전에 선정

2. 건설중 주요 설계 변경 사항

- ① 안전 관련 계통의 설비 여유도 부족이 규제 기관으로부터 지적되어 안전 주입 계통 용량을 증가하였다.
 - 4계열/34% 를 4계열/50%로 증가하였고 원자로 건물 잔열 제거 계통도 2계열/50% 에서 2계열/100%로 용량을 증가하였다.
 - 중대 사고 관련 계통 설비 여유도 부족으로 1계열/100%에서 2계열/100%로 일차측 전용 감압 밸브를 추가로 설치하였다.

- ② 원자로 건물 내벽에 Steel Liner Plate를 추가로 설치하여 방사능 방호 기능을 보강하고 격납 건물 내벽과 외벽 사이의 거리를 200 mm에서

600 mm로 증가하였다.

- ③ I&C 계통간 독립성 확보 미흡이 지적되었다.
 - 비안전등급 제어 계통에서 안전등급에 신호를 제공함으로써 독립성 요건을 만족시키지 못하였다.
 - 서로 다른 기기 공급자 선정으로 인한 정보 공유 문제, 산업표준 및 안전등급 차이점이 발생했다(AREVA: 보호계통 공급, Siemens AG: 정보 및 제어계통 공급).
 - 추가로 안전 등급에 대한 Back-up 시스템 보강이 권고되었다.
- ④ 기기 용량 증대 및 설계 변경으로 인해 초도품 기기에 대한 성능 및 품질 검증 체계 미흡으로 리콜 및 제작업으로 인한 건설 공정 지연 사례가 발생했다.


APR1400 대비 EPR 설계 특성 비교

<표 5>에 EPR과 APR1400의 설계 특성을 비교하였다. 단순히 수치만 비교함으로써 어떤 노형이 우수하다고 할 수가 없고, 각 계통



〈표 5〉 APR1400 대비 EPR 설계 특성 비교

분야	항목	APR1400	EPR
설계 일반	배치	2기 병행	1기 단독
RCS	고온관/저온관 온도	615 / 555 °F	624 / 564 °F
안전 주입	안전 주입 펌프 용량 및 수량	고압 안전 주입 100% 4대	중압 안전 주입 50% 4대 저압 안전 주입 50% 4대
	안전 주입 탱크(SIT)	FD(Fluidic Device) 설치	없음
	안전 주입 유로	용기 직접 분사	고온관/ 저온관 주입
	IRWST	- POSRV 방출 열침원	- LOCA 및 중대사고시 냉각수원
중대사고 대처	중대사고 설비	원자로 공동 침수 계통 Cavity Flooding System	Core Catcher
	대처 설비	수소완화계통	40 ~ 50 Passive Autocatalytic Recombiner
운전	주기기 수량	2 LOOP, 2 SG	4 LOOP, 4 SG
건설성	건설 공기 (F/C~F/L, Nth 호기 기준)	- 47개월 - 80 여개의 Item 모듈화	- 48개월 - 모듈화 공법 일부 적용
구조 배치	원자로 건물	단일 원자로 건물 (원통형 PS 콘크리트 + Liner Plate)	이중 원자로 건물 (PS Concrete+ Liner Plate + Concrete)
	복합 건물	양호기 공용	1기 고유 설계
안전성	노심 손상 빈도	2.3×10^{-6}	5.9×10^{-7}
포괄 부지	내진 설계값	SSE 0.3g	SSE 0.25g (단, US-EPR 0.3g)

의 건설성, 운전성 및 유지 보수성은 다시 면밀히 검토되어야 할 것이다. 

〈참고 문헌〉

1. Wulf Bukle, Siemens AG and Serge Charbonneau, Framatome, "The EPR- the Vendor's View", Technical Proceedings on The European Pressurized Water Reactor organized by German

Nuclear Society (KTG) and French Nuclear Energy Society (SFEN), 19-21 October 1997, Hotel Maritim Cologne, Germany.

2. Michel De Valekeneer, Maurice Roch, Tractebel, "The European Utility Requirements for Future ALWRs" Technical Proceedings on The European Pressurized Water Reactor organized by German Nuclear Society (KTG) and French Nuclear Energy Society, (SFEN),

19-21 October 1997, Hotel Maritim Cologne, Germany.

3. Report on Civil Nuclear Future of France from former EdF Chief, Francois Roussely.

4. Jukka Laaksonen Director General Radiation and Nuclear Safety Authority, "Experiences from construction of Olkiluoto 3 plant" Presented NPE, Amsterdam, 8 June, 2010.