

유럽형 가압경수로(EPR) 개발 현황

F. Bouteille

NPI사 부회장

H. Seidelberger

NPI사 EPR 프로젝트 부장

다 음 세기의 에너지 수요를 충족시키기 위한 신세대 가압 경수로(PWR)인 유럽형 가압 경수로(EPR : European Pressurized Water Reactor)의 기본 설계가 97년 6월 완성되었다.

이 사업의 주요 일정인 예비 안전성 분석 보고서가 97년 10월 프랑스 및 독일의 원자력 안전 당국에 보내질 것이다.

그러나 이미 몇년간 침체되어 온 원자력 시장은 개선되지 않고 있다.

대부분의 선진 공업국에서 만연된 과잉 설비 용량과 화력 발전소의 과감한 투자비 감소로 인하여 경쟁은 더욱 치열해지고 있다.

그럼에도 불구하고 원자력이 경쟁력을 회복할 수 있고, 온실 효과 및 산성비와 같은 환경 문제에 대한 진실한 해답으로서 인식될 것이라는 것이 우리의 견해이다.

97년도 세계에너지회의(WEC)의 메시지는 에너지에 대한 자기 만족이 지속성을 위협하고 있다는 것이다.

여전히 세계 인구의 상당 부분이 상업용 에너지를 이용할 수 없으며, 인구 증가가 에너지 부족을 일으키는 스트레스를 악화시킬 것이다.

몇몇 다른 목표 중에서 WEC는 원자력이 에너지 공급에 크게 기여할 수 있는 조건을 확립하는 것을 옹호하고 있다.

이것은 높은 안전성과 훌륭한 운영 실적의 확보를 의미한다.

바로 이러한 정신하에 EPR 참여자들은 이 사업의 개발에 기여하고 있다.

미래의 원자로 개발에 협력하기로 결정한 프라마툼사와 지멘스사는 89년 공동 자회사인 「뉴클리어 파워 인터내셔널(NPI)」사를 설립하였다.

NPI사의 역할은 EPR, 즉 다음 세기의 필요를 만족시키는 신 PWR 설계의 개발을 조정하는 것이다.

은 95년 2월에 체결되었다.

기본 설계에 관한 엔지니어링 작업은 계획대로 진행되어, 97년 6월말에 완료되었다.

가장 경험있는 유럽의 두 원자력 공급사인 프라마툼사와 지멘스사가 공동 출자한 NPI사를 통하여 제작자 입장에서 함께 일하고 있다.

이 강력한 설계팀을 프랑스전력공사(EDF)의 엔지니어링 및 건설 부서가 지원하고 있다.

운영자 입장에서 EDF 및 주요 독일 전력 사업자들은 EPR의 미래 소유에 대한 관심을 나타내면서 마찬가지로 강력한 그룹을 형성하고 있다.

그들은 개발의 주요 분야를 재정 지원하고 있을 뿐만 아니라, EPR의 개발에 그들의 가장 경험있는 직원들을 설계·검토 및 승인 과정에 투입함으로써 동 사업을 지원하고 있다.

한편 프랑스 및 독일의 원자력 규제 당국 및 안전 전문가들은 프랑스 및 독일에서 이룩한 걸출한 안전성 기록을 바탕으로 건설에 밀접하게 공

사업의 구성

EPR 기본 설계 개발을 위한 계약

조하고 있다.

그들의 주요 목표는 프랑스 및 독일의 인허가 요건의 수렴을 나타내는 공통 규정 및 규제의 확립이다.

93년말 이래 그들은 공동으로 발행한 「미래의 가압 경수로를 위한 공통 안전성 방안 제안」을 토대로 한 EPR 안전성 개념을 적극적으로 집중적으로 검토하고 있다.

또한 전력 사업자와 제작자들은 그들의 입장에서 EPR 설계 요건을 확립할 공통 코드를 개발하기 위한 조직을 구성하였다.

공통 코드는 EPR이 한 국가 이상에서 균일한 기준으로 개발될 수 있도록, 그리고 안전성 사례를 구성하는 단 한 개의 '안전성 파일'을 발행하는 것이 필요하며 이를 확립시켜야 한다.

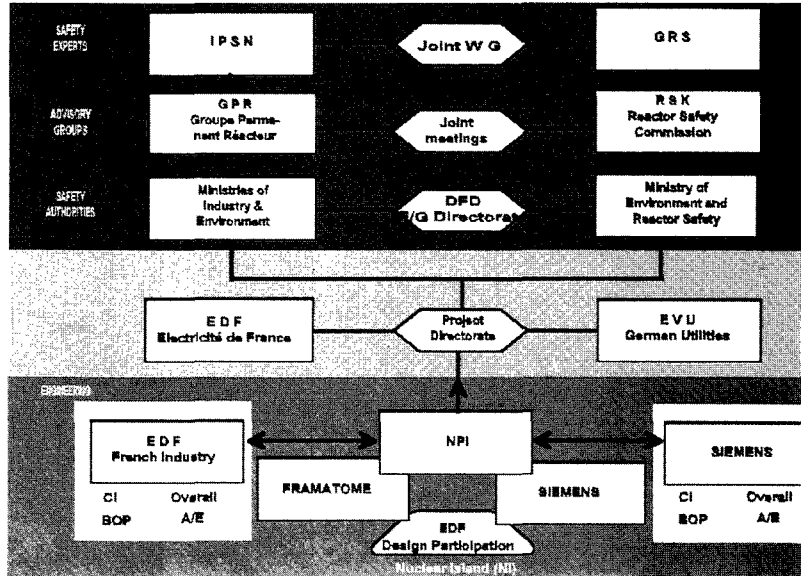
이들 공통 코드들은 EPR 기술 코드(ETC)의 특정 파일 속에 모아질 것이다.

ETC의 중요 부분은 기본 설계 단계에서 확립되었다.

기기 설계와 계통의 일반 건축에 관련된 요건들이 물론 우선 항목이었다.

최종적으로 EPR의 유럽 전력 사업자 요건(EUR)과의 부합은 특별한 유럽의 안전 당국 또는 고객의 요구 조건을 만족시킬 특별한 조정에 대한 필요성 없이 광범위한 수용성을 위한 토대를 마련할 것이다.

EUR 행정 그룹과의 협력 속에 수



EPR 사업의 전체 조직

행된 EPR의 부합성 검토는 EPR과 EUR 사이에 높은 수준의 일관성을 나타낸다.

이러한 분석은 EUR의 제3권을 작성하는 데에 사용될 것이며, 그것은 EPR에 기여할 것이다.

모든 원자력 산업계를 포함하는 EPR의 기본 설계 사업 구조는 이미 장래의 원전 기술을 개발하기 위한 건전한 산업 토대를 구축하고 있다.

또한 프랑스 및 독일의 R&D 조직들이 이 사업의 가장 혁신적인 측면(주로 중대 사고 완화 대책)에 채택되었다.

EPR 설계 개념

EPR 설계 개념은 3가지 기본 목표에 의해 지배된다.

- ① 결정론적 또는 확률론적 고려에

따라 기존 원전과 비교된 안전 수준의 개선

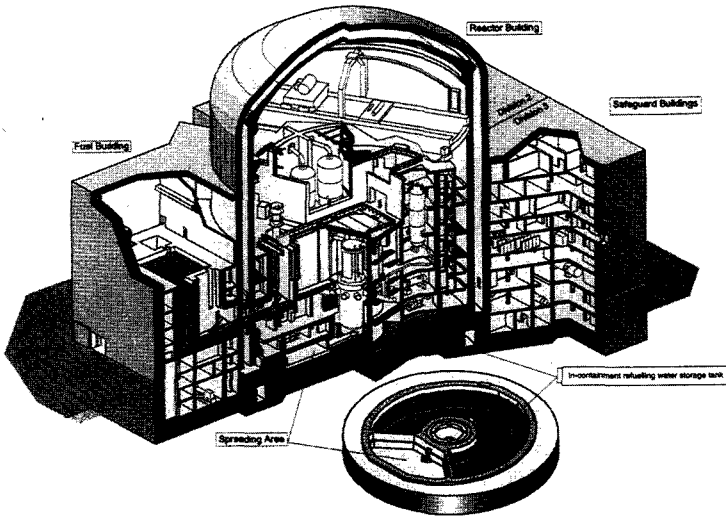
- ② 발전소 자체에 사고의 결과를 제한함으로써 가장 중대 사고의 제한

- ③ 다른 주요 에너지원과 경쟁적인 경제적 발전 비용

경제적 요건은 MW당 투자비가 경제성이 있는 약 1,525MW의 대용량 전기 출력으로 유도되었다.

MW당 투자비를 더욱 줄이고, 대용량 EPR 노심 고유의 큰 여유도를 고려하여, 다음 엔지니어링 단계에서 출력 증가를 연구할 것이며, 98년말에 최종 결정될 것이다.

연료 주기 비용은 높은 평균 연료 연소도(60GWd/t까지)를 달성함으로써 개선될 것이며, 더욱이 노심 설계는 우라늄 농축 준위를 절감시킬 것이다.



원자로 계통의 배치

이들 요건들은 강력한 결정론적 토대 위에 발전소를 설계함으로써 위험 감소 대책을 고려하여 수행된다.

사고 예방은 다음 사항을 고려하여 달성된다.

- ① 안전 계통의 단순화
- ② 물리적 격리를 통한 공동 모드 상실의 배제 및 안전 기능의 다양한 백업 기능
- ③ 가압기, 증기발생기 같은 기기를 더 큰 여유 용량을 갖도록, 즉 과도 현상을 완화하도록 설계함으로써 운전원 조치의 유예 시간을 증가

- ④ 디지털 계측 제어 계통 및 현상 중심 정보를 제공하는 현대식 운전원 정보 계통과 함께 최적화된 인간 공학을 고려하여 인적 실수에 따른 민감도를 저감

그럼에도 불구하고 결정론적 설계 토대를 넘어서 전체 안전 등급 계통의 상실을 포함하는 다중 상실 및 동시 발생 사고를 고려하도록 의도된다.

국제 원자력 기구(IAEA)의 INSAG-3 보고서에 기술된 목표를 참고하여(노심 용융 확률이 모든 사고 및 모든 원자로 상태를 포함하여 10^{-5} /원자로·년 이하), EPR의 지침치로서 고려되는 다음 목표가 프랑스 및 독일의 원자력 안전 당국에 의해 명시된다.

21세기의 잠재적 요건을 기대하면서, 설계 또한 플루토늄 재순환을 고려한다(노심의 50%까지).

설계는 12~24개월 사이의 주기 길이를 감안하며, 18개월 주기가 기본적 선택일 것이다.

설계의 평균 가동률 목표는 60년이라는 전 발전소 수명에 걸쳐 87%로 정해졌다.

그러므로 예방 정비의 특징은 가동 정지 기간을 최소화하기 위하여 초기부터 설계에 반영된다.

17일간의 연료 재장전 가동 정지 기간이 예상되며, 이의 타당성이 설명된다.

지금 이용 가능한 설계 정보는 발전 비용의 꽤 정확한 계산을 허용한다.

기대치는 최신의 석탄 화력 발전소

보다 10%가 더 낮다.

최근의 기본 설계를 이용하여 보다는 최적화가 다음달에 이루어질 것이다.

이로써 약 10%의 생산비를 절감하는 것이 가능하다.

안전 요건

안전 요건 분야에서는 이중의 전략이 EPR에 적용되었다.

- ① 사고에 대한 예방 대책의 개선
- ② 노심 용융을 포함하는 중대 사고의 가능성은 감소되지만, 주로 격납 용기 건전성에 관련된 결과를 완화시킬 특징을 도입, 사고를 다룰 중요 대책에 대한 필요성이 발전소의 직접적인 영역 내에만 있음

- ① 종합 노심 용융 빈도(CMF)가 10^{-6} /원자로·년 이하여야 한다.
- ② 원자로 정지 상태에서 내부 사고(CMF)에 대한 종합 CMF가 출력 상태에서보다 작아야 한다.

이들을 EPR 사업의 초기 설계 기간 동안 지침으로서 사용된 실제적 값으로 전환하면 다음과 같다.

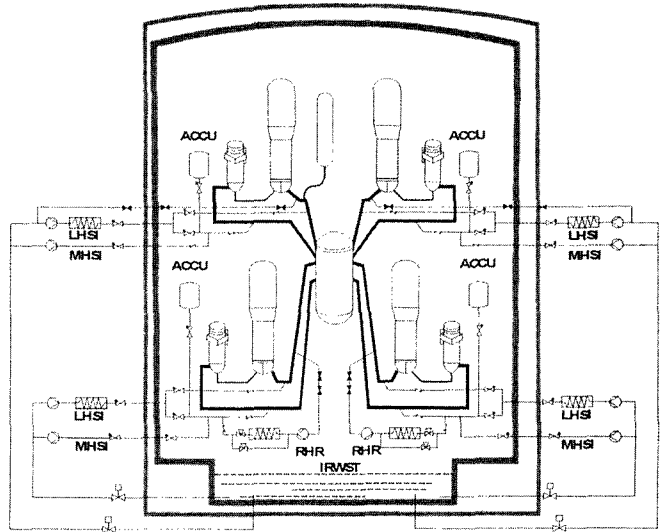
초기 격납 용기 상실과 연관된 종합 CMF는 10^{-7} /원자로·년 이하여야 한다.

2가지의 위험도 감소, 즉 노심 용융 예방 및 대규모 방출 예방이 고려되며, 위험도 감소 특징에 대한 설계 토대를 주기 위하여 대표적 시나리오들이 다음과 같이 정의된다.

- ① 노심 용융 예방을 위하여, 총 2차 계통 냉각 상실의 경우에 격납 용기 내 재장전수 저장 탱크에서 1차 계통으로 방출
- ② 대규모 방출 예방을 위하여, 중대 사고시 진피(corium) 확산 및 냉각, 수소 재결합 및 격납 용기 열 제거

따라서 EPR 설계는 노심 용융 완화 및 대규모 방출 예방을 위한 다음 특징을 반영한다.

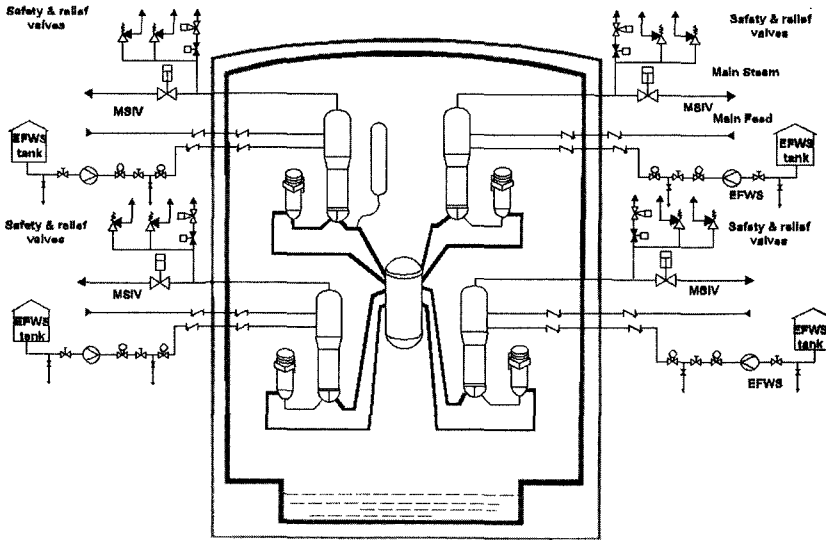
- ① 감압에 의해 보충되는 매우 신뢰성있는 붕괴열 제거 계통을 가짐으로써 고압 노심 용융의 예방. 노심 손상을 일으킬 수 있는 사고를 다루기 위하여 전용



EPR의 1차측 안전 계통

- 배관이 가압기에 설치될 것이다.
- ② 고부하를 일으키는 수소 연소는 촉매성 H₂-재결합기에 의하여 또 필요하다면 선택적으로 정렬된 점화기에 의하여, 초기 단계에 격납 용기 내의 수소 농도를 감소시킴으로써 예방된다.
- ③ 보호층을 갖춘 전용 확산 구역과 건전성을 확인할 콘크리트 구조의 냉각용 계통에 진피를 확산시킴으로써 용융된 노심-콘크리트 상호 작용의 예방
- ④ 전용 격납 용기 잔열 제거 계통

- (CHRS)에 의한 격납 용기 압력 상승의 제한. 이것은 가능한 한 며칠간 격납 용기 압력을 대기압으로 낮추기 위한 분무 계통으로 구성된다.
 - ⑤ 이중벽의 격납 용기는 모든 누설의 억제 및 수집됨을 보장하며, 우회를 예방한다.
- 이 조치들을 통하여 엄중한 비상 대책, 즉 주변 인구의 재배치 및 소개의 필요성이 발전소의 직접적인 영역에 제한되고, 식량 이용의 제한이 수확 첫해에 제한되도록 외부 방사선원량이 제한된다.



EPR의 2차측 안전 계통

또는 모든 증기발생기의 완전한 급수 상실, 또는 모든 중앙 안전 주입 계통의 완전한 상실의 경우에 안전하게 발전을 유지할 수 있다는 것이 설계에 의하여 보장된다.

안전 주입 계통은 격납 용기 내의 재장전수 저장 탱크(IRWST)로부터 취수된다.

그것은 RCS의 고온관 및 저온관 양측에서 주입된다.

저압 안전 주입(LHSI) 유로상의 열 교환과 함께, 이러한 개념은 설계 기준 사고시 격납 용기 살수 계통의 필요성없이 비상 노심

기술적 특징

혁신적인 접근 방법이 EPR의 개발에 취해져 왔으며, 프랑스 및 독일의 현존하는 발전소의 건설 및 운영을 통하여 얻어진 경험을 토대로 하여 개발된다.

1차 계통 설계, 루프 구성 및 주기관의 설계가 현재의 원전 설계와 매우 유사하며, 또한 입증된 것으로 고려될 수 있다.

중요 안전 계통 및 지원 기능(안전 주입, 비상 급수, 기기 냉각, 비상 전원)은 명백한 계통 분리 및 단순한 운전 모드와 함께 4계열로 구성된다.

복잡한 계통에는 몇몇 안전 기능의

조합은 회피된다.

따라서 운전원과 정비원들은 모든 상태에서 발전소 상황의 더 명확한 이해를 얻게 된다.

다른 중복된 계열의 모든 안전 계통이 4개의 별도 구역에 설치되며, 엄격한 격리가 예를 들어 내부 위해로 인한 공통 모드 상실이 제거될 수 있도록 보장된다.

공통 모드 상실 잠재성의 대폭적인 감소는 체계적 기능의 다양화를 보장함으로써 얻어진다.

모든 중복적 계열의 안전 계통의 완전한 상실이 가정된다.

기능적으로 다양한 다른 계통들이 예를 들어 RHR 계통의 완전한 상실,

냉각을 보장한다(감소된 만큼의 분부 계통은 중대 사고시에 격납 용기 냉각을 위하여 공급된다).

격납 용기 내의 재장전수 저장 탱크는 비상 노심 냉각수원으로 공급된다.

그것은 주입으로부터 재순환 모드로의 전환을 피하기 위하여 격납 용기 내에 설치된다.

방출의 경우 격납 용기 외부로의 직접적 방출이 방지되도록 증기는 IRWST로 덤프된다.

노심 용융 사고의 경우, 그것은 진피 냉각수를 공급한다.

비상 급수 계통은 4개의 분리된 독립적인 계열로 구성되며, 각각은 4개

의 증기 발생기 중 하나에 급수한다.

각각의 비상 급수 펌프는 비상 급수 탱크로부터 흡입을 취한다.

이들 탱크와 관련 계통들은 안전 건물의 4구획에 위치된다.

4개의 비상 급수 펌프들은 비상 전력시에 4개의 디젤 발전기가 공급하는 전기 모터로 구동된다.

확률론적인 목표를 충족시키기 위하여 2개의 보조 디젤 발전기가 2개의 비상 급수 펌프의 전원을 공급한다.

기동 및 정지 조건에 대하여 전용 계통인 기동 및 정지 계통이 설치된다.

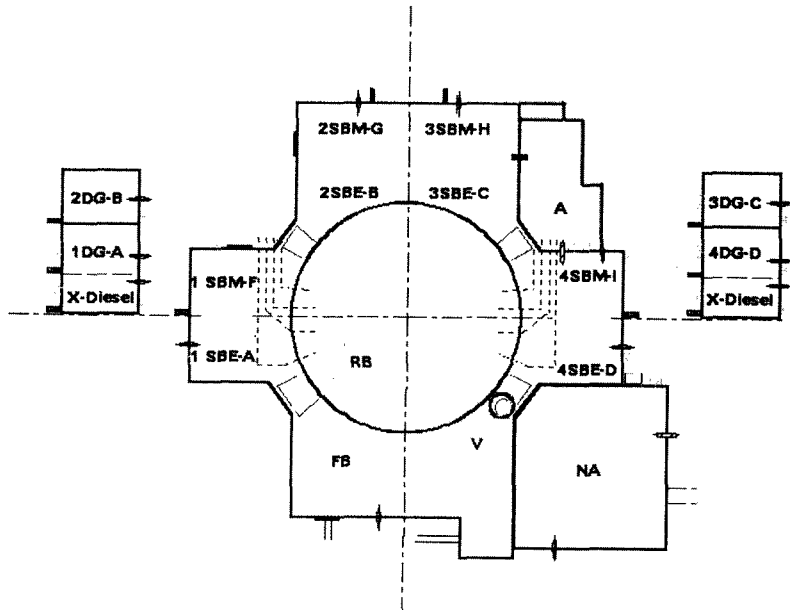
이 계통은 비상 급수 계통의 구동 빈도를 줄이며, 급수 공급의 전반적 신뢰에 기여할 것이다.

잔열 제거 계통은 증기 발생기를 통한 열 제거가 충분치 않을 때, RCS로부터 기기 냉각수 계통 및 2차 기기 냉각수 계통으로 구성되는 연쇄 냉각을 거쳐 궁극적 열침원으로 잔열을 이전하도록 설계된다.

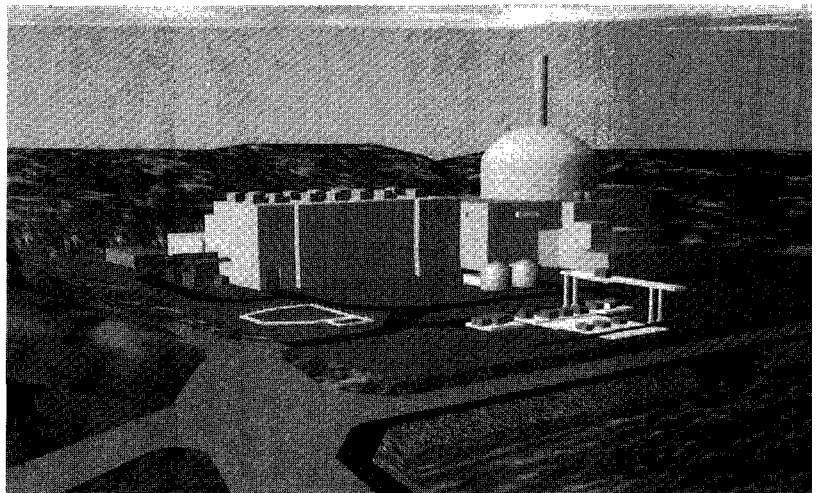
또 그것은 정지 냉각 또는 재장전 상태 동안에 원자로 냉각재 계통 또는 격납 용기 내 재장전수 저장 탱크로부터의 계속적인 열 전달을 보장한다.

중대 사고 후 격납 용기 내의 잔열 제거를 위하여 전용 격납 용기 잔열 제거 계통이 설치된다.

그것의 주요 기능은 잔열로 인한 격납 용기 내의 압력 증가를 제한하



EPR 원자로 계통의 설계안



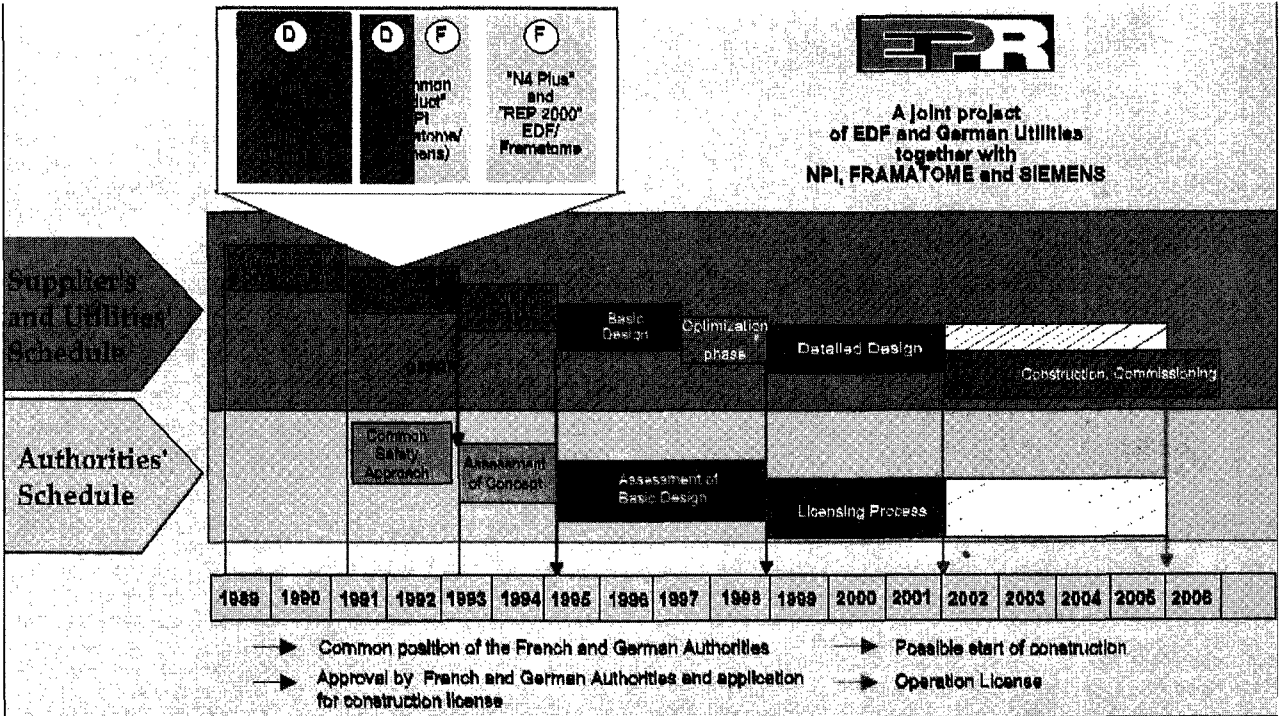
발전소 배치도

고, 중대 사고 동안 격납 용기 설계 압력이 초과되지 않는 것을 보장하도록 압력을 감소시키는 것이다.

압력 감소에 대한 높은 효율과 적

절한 장기 냉각을 유지하는 능력 때문에 열교환기를 가진 분부 계통이 이 역할을 위하여 선택되었다.

계통 조직은 다양화의 원칙뿐만 아



EPR 개발 일정

나라 단순화 원칙을 충족시키는데, 어떤 안전 등급 계통 기능도 다른 계통에 의해 백업할 수 있기 때문이다.

안전 기능의 자동 동작 및 제어를 위하여 사용되는 I&C 계통은 전기 및 유체 안전 계통과 같은 4개의 분리된 구획 속에 조직되며, 따라서 높은 수준의 중복성과 함께 높은 신호 신뢰성을 보장한다.

가능한 한 당장 이용 가능한 부품의 사용과 함께 디지털 기술에 의존하는 기기가 선호된다.

인적 요소는 시험 및 정비뿐만 아니라 운전 상황을 고려하여 EPR의 설계 단계에서 충분히 고려된다.

인간 공학 개념은 운전원의 성격과 능력을 존중하며, 운전원에게 과부담

을 주지 않고 최적의 운전 및 안전 업무를 위한 I&C 계통의 기능성을 이용한다.

중대 사고 조건하를 포함하는 발전소 상태의 명확한 이해와 운전원 조치의 결과에 대한 명확한 평가를 위하여 충분하고도 적절한 정보가 운전원에게 주어진다.

운전원을 지원하기 위하여 신뢰성 있는 진단을 위한 전산 기술이 강조된다.

축약된 정보를 주는 전산화 화면과 접촉에 민감한 화면을 가진 운전원 제어가 널리 사용된다.

모든 사고 후 조치들은 처음 30분 이내에 자동적으로 수행되도록 기대되고 있지만, 운전원이 계통에 유지되

고 어떤 상황하에서 자동 과정을 극복할 수 있어야 한다는 조건이 있다.

발전소 구성

원자로 건물은 설계의 중심이다. 격납 용기는 안전 계통을 포함하는 안전 및 연료 건물에 의해 둘러싸인다.

모든 안전 관련 계통은 4개로 중복되게 설계되며, 물리적으로 완전히 분리된 구획에 위치된다.

각 구획은 관계된 중간 냉각 계통을 가진 저압 주입 계통, 중압 주입 계통 및 비상 급수 계통으로 구성된다.

I&C 계통뿐만 아니라 관계된 전기 계통도 이를 구획에 배치되지만 좀

더 높은 건물 위치에 배치된다.

격납 용기의 내부는 타원형 지붕과 강화 콘크리트 기초를 가진 보강된 (pre-stressed) 콘크리트 원통형 벽을 갖고 있다.

높은 설계 압력과 관련된 큰 내부 체적은 전체적인 수소 폭발의 위험을 제거하며, 폭연의 위험은 촉매 재결합기의 설치로 인하여 제한되어, 폭연 조건에 대한 여유도를 주게 된다.

격납 용기 외부는 같은 기초에 의존하는 강화 콘크리트와 강화 콘크리트 돔으로 구성된다.

이들은 외부 공격에 대한 보호막으로서 작용한다.

중대 사고 완화 방안이 격납 용기의 억제 기능에 관한 특별한 요건을 부과하기 때문에 격리, 억류 및 누설 제한을 위한 계통이 요구된다.

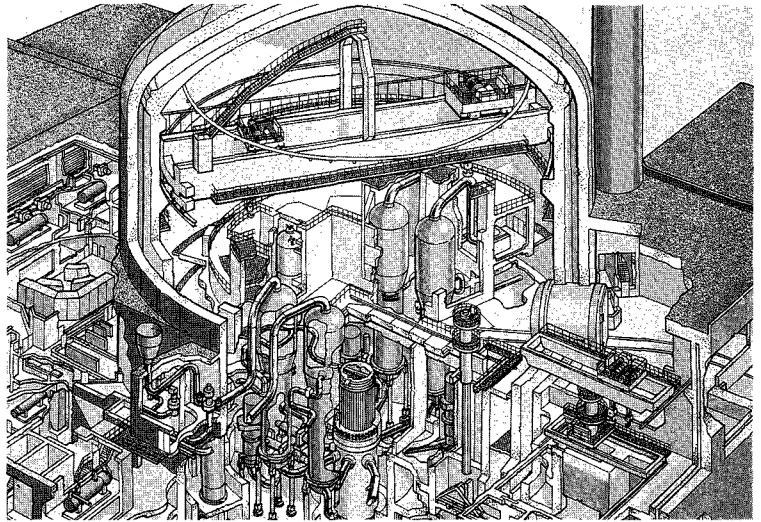
격납 용기 내부벽을 통한 누설은 여과되며, 환형 공기 추출 계통을 통하여 배출된다.

직원 출입구 또는 기기 출입구를 통한 격납 용기 내부로의 누설은 출입구를 영구히 폐쇄시킴으로써 또는 출입구를 양측에서 이중으로 밀폐시킴으로써 방지된다.

격납 용기 내부의 누설률은 사고 압력하에서 일일 격납 용기 체적의 1% 미만일 것이다.

원자로 건물, 연료 건물 및 4개의 안전 건물들은 지진·폭발의 압력과 같은 외부 위해를 방지한다.

모든 이들 건물들은 공동 거점 위



EPR 원자로 내부 단면도

에 놓여진다.

비행기의 충돌에 대한 보호는 안전 건물 2, 3, 원자로 건물 및 연료 건물의 벙커화에 의해 달성된다.

주제어실 및 원격 조종실은 또한 벙커화된 안전 건물에 위치한다.

안전 건물 1, 4는 벙커화되지는 않지만, 단지 한 구획만이 영향을 받도록 하고 구획은 운전 가능하도록 지리적으로 분리된다.

사용후 연료 저장조는 사용후 연료 적재가 바깥에서 이루어지도록 하며, 가능한 한 낮게 격납 용기 직경을 유지하도록 위치한다.

연료 다발은 격납 용기 내부에서 외부로 또는 외부에서 내부로 이송관을 통하여 이송된다.

주요 일정

혁신적인 설계 특징을 갖춘 EPR

은 장래 원자력 발전 엔지니어링 기술을 선도할 것이다.

유럽 원자력 산업계의 주요 기관 및 조직의 강력한 지원은 EPR 원전 사업의 실현에 대한 책임있고 효과적인 접근을 보장한다.

기초 설계 단계 말에는 주요 엔지니어링 작업이 완료된다.

예비 안전성 분석 보고서(PSAR)가 이용 가능하다.

이 서류는 주요 요소에 대한 확률론적 안전성 평가(PRA)뿐만 아니라 예상된 과도 현상, 사고의 분석 결과를 포함한다.

이 서류는 프랑스 및 독일의 원자력안전 당국에 보내질 예정이며, EPR 개발의 중요한 신기원을 이룩할 것이다. ☞

<Nuclear Engineering Int'l>

Vol. 519