

유럽형 PWR의 개발현황

NPI(Nuclear Power International)사와 그 모기업인 지멘스(Siemens)사와 프라마툼(Framatome)사는 유럽의 주요 전력업체들의 지원을 받아 차세대원자로인 유럽형 가압경수로(European Pressurized Water Reactor : EPR)를 지금까지 개발해 왔다.

EPR은 높은 안전성과 경제성, 평이성, 향상된 운전성 등의 차세대원자로의 당면과제를 만족스럽게 해결함으로써 앞으로 세계 원자력산업에 크게 기여할 것으로 본다. EPR의 개발현황을 살펴본다.

M. 악토우

NPI사 기술담당 부사장

H. 자이델 버거

NPI사 프로젝트 매니저

EP

R 개발사업은 독일 지멘사와 프랑스 프라마툼사의 풍부한 설계경험과

프랑스·독일 양국의 지원업체들의 오랜 운전경험에 힘입은 바 크다.

높은 안전성과 개선된 운전성 및 보수성·경쟁력 등은 90년대 후반부터 받게 될 주문을 충족시키기 위해 마련된 EPR의 기본원칙으로 돼 있다.

이같은 경험을 최대한 활용해 지금까지 성공적으로 추진해온 EPR 개발사업을 더욱 발전시키기 위해 NPI는 EPR을 설계함에 있어 혁신적인 기술을 도입하는 등 발전적인 접근방식을 취했다.

안전성에 관해서 NPI는 중대사고의 영향을 최소화하기 위해 보완대책

을 마련하고 철저한 방어태세를 갖추므로써, 현재 프랑스와 독일의 원전에서 이미 매우 높은 수준에 이르고 있는 안전성을 더욱 개선하려는 노력을 기울이고 있다.

경제적인 면에서 EPR이 추구하고 있는 발전원가 목표는, 기저부하 운전시 다른 어떠한 발전형식과도 경쟁력을 갖추도록 하는 것이다.

EPR 개발계획에 따르면, 최초의 EPR 입지선정작업을 97년 초까지 마치고 콘크리트 타설작업을 99년에 시작하도록 돼 있다.

예정대로라면 EPR의 상업운전은 2005년경이 될 것으로 전망된다.

EPR의 설계개념

NPI는 EPR을 개발하면서 프랑스·독일의 풍부한 경험과 성공적인 개발과정을 바탕으로 발전적인 설계방식을 따르는 한편, 많은 혁신적인 기술을 도입하는데 힘썼다.

이는 이같은 노력이 제품의 안전성과 신뢰성을 확보하는데 큰 도움이 될 것이라는 판단 때문이다.

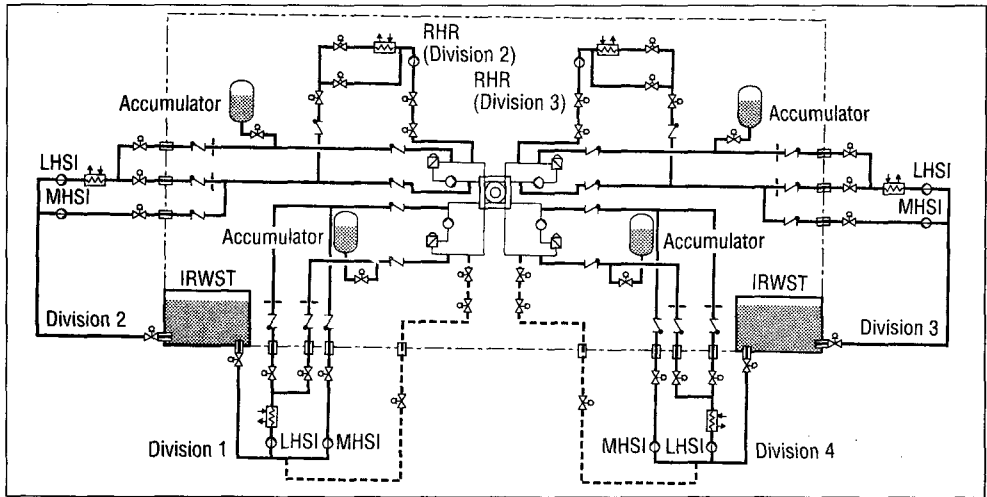
1. 안전성

EPR의 전체적인 안전설계방식은 프랑스·독일 양국의 원자로안전위원회가 공동 작성한 GPR-RSK 보고서에서 제시한 방법에 따른 것으로, 결정론적인 분석을 바탕으로 하여 이를 확률론적인 분석으로 보완한 것이다.

이미 정착돼 있는 프라마툼사와 지멘스사 기술의 높은 안전수준을 더욱 높이기 위해 두가지 안전전략이 모색되고 있다.

첫째는, 사고예방대책을 강화하는 것이고, 둘째는, 중대사고(노심용융사고 등)의 가능성을 최소화하는 동시에 이같은 사고로 인한 피해를 줄이기 위해 격납용기와 같은 주요설비에 대해서는 보완대책을 강구하는 것이다.

이같은 안전대책의 궁극적인 목적은 발생가능성이 극히 희박한 사고일



EPR의 1차측 안전시스템

지라도 발전소 인근지역 밖으로 주민들을 대피시키거나 이주시키는 일이 없도록 하기 위한 것이다. 이같은 목표는 최근 독일에서 발효된 원자력법 수정내용과 일치하는 것이다.

확률론적인 위험성 평가는 EPR의 안전성에 대해서 결정론적이며 기본적인 평가를 보완하기 위해 절대 필요한 것이다. 이같은 평가는 예상되는 사고 또는 이상상태가 중대사고로 확대될 가능성을 예측하는데 이용되고, 또한 다량의 방사능누출사고 발생 가능성이 매우 희박하다는 것을 입증하는 데서도 이용된다.

EPR은 두가지 안전목표를 달성할 것으로 기대된다.

첫째는 노·년 당 10만분의 1 이하의 노심용융사고 발생확률(INSAG-3의 기준치)이고, 둘째는 노·년 당 1 백만분의 1 이하의 방사능누출 대형

사고 발생확률이다.

이밖에 고압 노심용융사고 발생확률은 전체적인 사고발생확률의 10% 이내로 목표를 세워놓고 있다.

2. 경쟁력

EPR의 발전원가 달성목표는 다른 어떠한 개량형 원전 유니트와도 경쟁이 되는 것이다.

특히 기저부하원전 최신행의 화력발전소보다 경제적으로 유리하다는 것을 보여주려는 것이다. 140만~150만kW급의 대용량의 경우, EPR의 kW당 건설단가는 매우 낮다.

특히 유럽의 선진공업국 같이 대용량 발전설비를 수용하기에 충분한 전력망을 갖추고 있으면서도 발전소 부지확보가 어려운 경우에는 EPR을 선택하는 것이 매우 유리하다.

이렇게 개발된 기술은 나중에 보다

소용량의 유니트가 필요한 경우 이를 이용할 수 있을 것으로 전망된다.

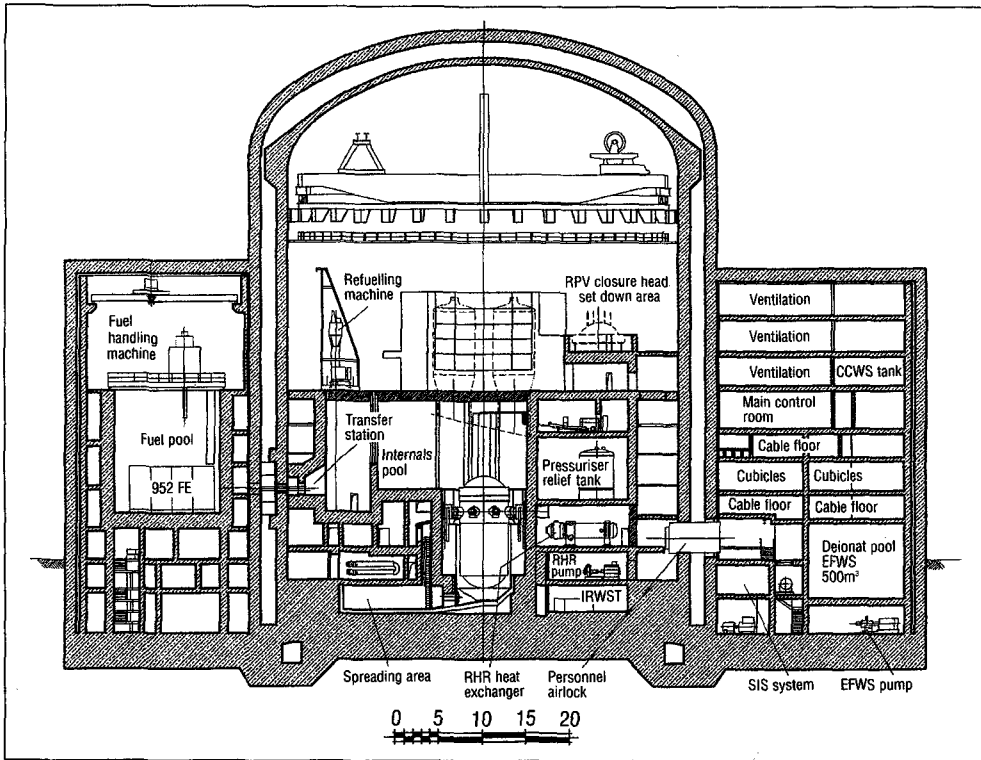
기존의 원전 유니트의 경우는 안전성 개선을 위해 추가비용이 필요하지만 EPR의 경우는 안전성은 물론, 연료주기비용과 운전보수비 등의 다른 발전원가 요소들도 개선하도록 설계돼 있다.

연료주기 원가절감은 연료의 평균 연소율을 55~60Gwd/t까지 높이고, 이를 유지하는데 필요한 우라늄 농축도를 낮게 잡을 수 있도록 노심을 설계함으로써 가능하다.

운전보수비 절감도 가동중 검사 및 연료장전 소요시간의 단축과 작업원의 피폭선량을 낮춤으로써 가능하다.

EPR은 또 부하추종과 주파수조정 운전이 가능하도록 설계돼 있다.

이렇게 함으로써 유럽전력계통의 요구조건들을 충족시키고, 높은 연소율과 플루토늄의 재활용 등 21세기



EPR 건물 단면도

초의 전력업체 수요에 적합한 연료사이클을 개발할 수 있게 되는 것이다.

EPR은 현재 EUR(유럽전력업체 설계기준)에 따라 평가되고 있다.

유럽 몇개국의 우수한 전력업체들이 마련한 이 설계기준에 맞춤으로써, EPR은 각국의 인허가 당국 또는 고객의 요구조건에 맞게 특별히 설비변경을 하지 않아도 그대로 받아들여지게 돼 있다.

EPR의 설계상의 특성

EPR의 주요설계 기준치는 <표 1>

과 같다. 이 설계기준치는 어떤 면에서는 예비적인 것이라고 할 수 있으며, 앞으로 설계작업이 진행됨에 따라 일부 변경될 가능성도 있다.

1.1·2차측 안전시스템

EPR의 개념설계는 전혀 별개의 4개 디비전(division)으로 나뉘어 있으며, 각 디비전은 별도의 비상전원을 갖추고 있다.

각 안전시스템의 기능은 <표 2>와 같다.

안전주입시스템은 엄격한 설계기준에 맞춘 것으로, 소·중형급의 냉각제

상실사고(LOCA)가 일어나도 노심미노출되지 않고, 대규모 파열로 인한 LOCA 사고에도 한정된 범위내에서 노심손상이 일어나도록 돼 있다.

각 디비전 안전시스템은 저·중압 안전주입펌프와 어큐뮬레이터(accumulator)를 갖추고 있다.

안전주입시스템은 격납용기 아래쪽에 있는 탱크에서 물을 공급받는데, 격납용기내의 파열로 인한 누수는 이 탱크로 모이게 돼 있다.

이 저장탱크는 「격납용기내 재장전수조(IRWST)」라고 불리며, 원자로 캐비티(cavity)를 채우는데도 사용

된다. 이것은 또 중대사고 발생시 코리움(corium) 비상냉각용수를 공급하는데도 사용된다.

중간급의 안전주입압력은 증기발생기의 안전밸브 및 감압밸브를 최종치보다 낮게 설정할 계획이다.

따라서 증기발생기 튜브 파열시에

〈표 1〉 EPR의 주요설계기준치

NSSS 열출력(MWt)	4,270
전기출력(gross MWe)	~1,500
원자로 냉각제시스템	
루프수	4
운전압력(bar abs)	155
원자로압력용기 출구/입구온도(°C)	291/326
총유량(kg/s)	21,050
증기발생기포화압력(bar abs)	72.5
노심	
연료다발수	241
제어봉 클러스터 어셈블리수	81
연료다발배열	17×17
유효높이(cm)	420
평균열량(W/cm)	155

〈표 2〉 EPR의 안전시스템별 기능

주요기능	보조기능
중압안전주입(MHSI) 시스템	2차측 압력완화+여류물레이터주입시스템+LHSI
저압안전주입(LHSI) 시스템	MHSI+RHR시스템 또는 2차측HR시스템(소규모파열사고시)
전류열제거(RHR) 시스템	2차측 HR 또는 LHSI
연료풀냉각시스템	연료풀 가열(비등)+냉각재 충전
2차측 열제거(HR) 시스템	1차측 배수 및 공수

는, 초기의 압력변동과 고장난 증기발생기의 격리가 이루어진 다음에, 1·2차측 압력이 같아져 방사능누출이 무시할 수 있을 정도로 정지된다.

고압노심용융사고 예방을 위해 신뢰성이 높은 2차측 열제거기능과 안전한 1차측 배출기능을 갖추도록 설계돼 있다.

이것은 EPR 설계상의 중요한 부분이다.

운전성과 원가에 대해서는 물론, 신뢰성에 대해서도 세밀한 분석이 이루어져 능동적 시스템과 피동적 시스템이 비교·검토되었다.

즉 신뢰성을 높이기 위해 다변화된 전원을 갖추고 있는 능동적인 비상급수시스템과 폐쇄루프로 가동되는 피동적인 2차측 냉각시스템이 비교·검토되었다.

검토 결과 능동적인 비상급수 시스템이 선택되었다. 이것은 4개의 독립적인 시스템으로 구성돼 있는데, 각 시스템은 4개의 증기발생기중 하나에 물을 공급하는 비상용 급수펌프를 갖추고 있다.

각 펌프는 비상용급수탱크로부터 물을 공급받으며, 탱크와 펌프들은 각 디비전전로 안전건물내에 설치돼 있다.

따라서 EPR의 확률론적인 목표달성을 위해 설비의 다중화와 다변화가 이루어졌다고 볼 수 있다.

2. 격납용기 및 차폐시설

원자로 격납용기는 다중방어개념상

세번째의 마지막 장벽으로 중대사고를 포함한 모든 원자력사고 피해를 최소화하는데 특히 필요하다.

원통형의 이중벽 구조의 격납용기가 EPR에 채택되었는데, 이것은 수소 爆燃과 사고시의 압력상승에 견딜 수 있도록 돼 있는 스트레스 콘크리트 구조의 내벽과 외부장해에 견딜 수 있도록 돼 있는 철근콘크리트 구조의 외벽, 그리고 콘크리트 구조의 바닥면으로 구성돼 있다.

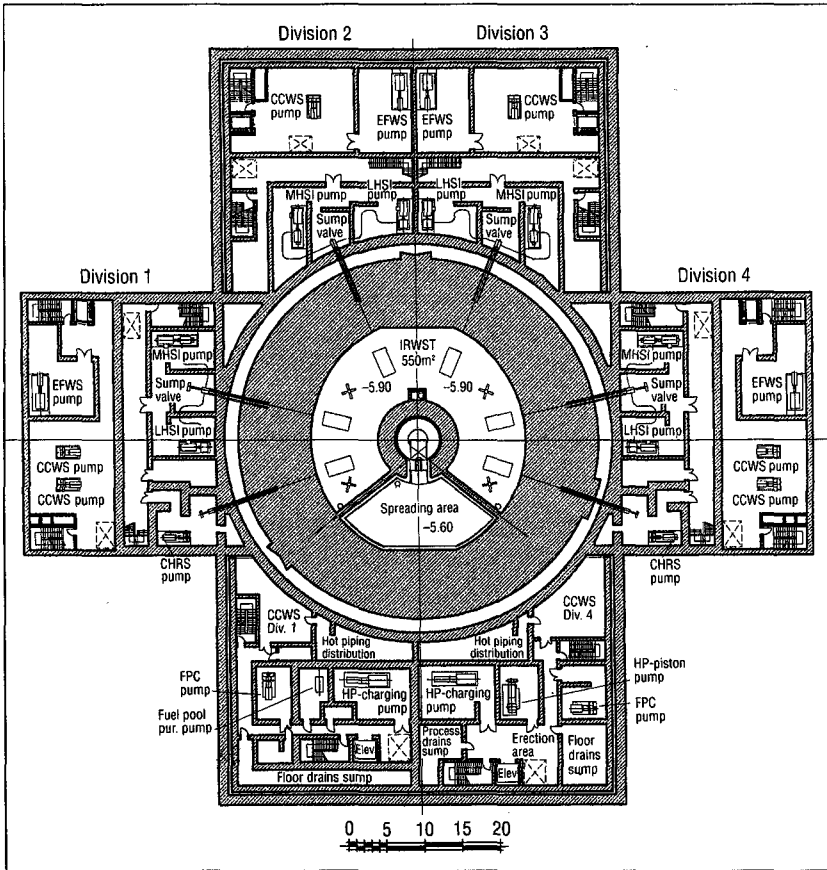
내벽과 외벽사이의 공간은 외기 압력보다 약간 낮게 유지하는데, 이는 내벽 또는 관통부를 통해 누출되는 공기를 모아 이를 여과시킨 다음 굴뚝을 통해 대기로 방출하기 위해서이다.

노심용융과 같은 중대사고를 수습하기 위해 원자로용기 아래에 코리움을 보관하고 냉각시키는 장치가 마련돼 있는데, 이 장치는 격납용기로부터 열을 완전히 제거하기 위해 사용되는 것이다.

격납용기내에 코리움을 보관하기 위해 용해된 코리움을 물로 냉각해 안정시키는 방법을 채택하고 있다.

원자로 압력용기에 이상이 생겼을 때 용해된 코리움은 원자로 피트(pit)에 모인 다음 경사진 배출채널을 통해 스프레딩 컴파트먼트(spreading compartment)로 유입된다.

스프레딩 컴파트먼트는 앞서 말한 IRWST와 파이프로 연결돼 있으며, 이 배관은 가용성 재료로 만든 플러그로 차단할 수 있게 돼 있다.



EPR 건물 평면도

의 각 시스템들은 4개의 안전건물내에 각각 별도로 설치돼 있다.

유동체시스템은 이 건물의 아래쪽에 설치돼 있으며, 전기 및 계장·제어설비(중앙제어 및 원격조정 정지장치 포함)는 그 윗부분에 설치돼 있다.

사용후연료 저장수조와 신연료 저장소(조작·운반설비 포함)는 연료건물내에 있는데, 이 건물에는 화학처리 및 減容장비도 설치돼 있다.

4. 외부장해에 대한 방호대책

원자로건물과 안전건물, 연료건물들은 모두 지진이나 폭발충격파에 견딜 수 있도록 설계돼 있으며 이 모든 건물들은 같은 기초 위에 놓여 있다.

독일과 프랑스의 안전규정에 따라 EPR은 균용기 충돌사고시에도 견딜 수 있도록 설계돼 있는데 그 내용은 다음과 같다.

- △ 원자로건물 외벽을 보강
 - △ 안전건물 2·3동과 연료건물을 철근콘크리트 구조의 방호벽으로 둘러쌌(외부장해로 인한 진동을 최소한으로 줄이기 위해 내부의 건물구조물과 방호벽을 분리)
 - △ 안전건물 1동과 4동을 격리 배치해 가상사고 발생시 한쪽 건물만 파괴되도록 배려
- 중앙제어실과 원격조정 정지장치는

이 가용성 플러그는 코리움 열에 의해 용해되므로 IRWST의 물이 스프레딩 컴파트먼트로 흘러들어가 코리움을 냉각시키게 된다.

3. 원자로설비 배치

안전관련 시스템(전기 및 I&C 시스템 등), 중앙제어실 및 원격조정 정지시스템, 사용후연료 및 신연료 저장설비(조작 및 운반장치 포함) 등은 원자로건물 옆 건물에 설치돼 있다.

완전히 분리된 4개의 안전시스템은 각각 별개의 구역에 설치돼 다른 계통에서 일어난 고압파이프 파열이나 물의 범람 등의 내부적인 장애의 확산을 방지하도록 돼 있다.

이들 시스템과 원자로 냉각재시스템(RCS)과의 연결관 길이를 단축하기 위해 각 시스템은 원자로 주변에 방사형으로 배치돼 있다(시스템별 1차측 RCS 루프 등).

안전주입시스템과 비상급수시스템

비행기 충돌사고시에도 작동이 가능하도록 병커형의 안전건물 2·3동안에 설치해 놓았다.

5. 맨·머신 인터페이스와 I & C 시스템

전기 및 유동체 시스템의 경우와 같이 안전장치의 자동작동 및 제어에 사용되는 I&C 시스템도 여유도와 신호의 신뢰성을 높이기 위해 4개의 분리된 디비전에 격리 수용돼 있다.

이 시스템들은 디지털방식의 설비로 이들 설비에는 가급적 구하기 쉬운 부품들을 사용하도록 했다.

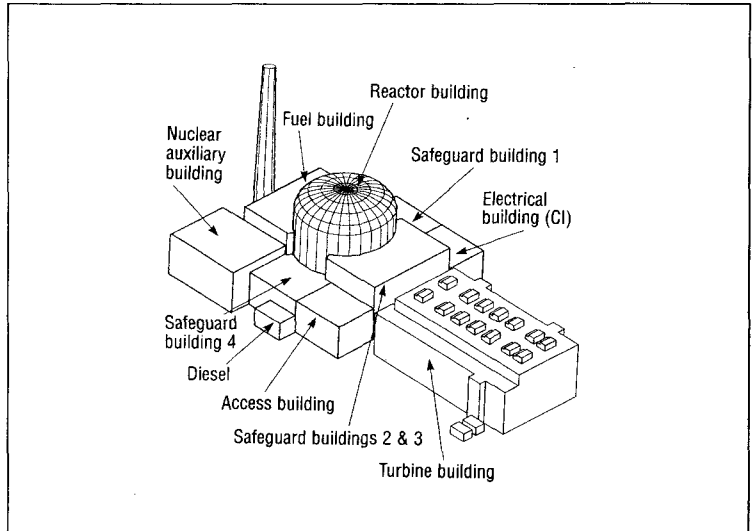
인적 요인들도 운전상황과 시험, 보수 등을 고려해 설계상에 충분히 반영했다.

맨·머신(man·machine) 인터페이스(interface)는 운전원의 자질과 능력을 존중하고, 운전원들에게 과부하가 걸리지 않는 상태에서 운전 및 안전상의 업무를 가장 적절하게 수행할 수 있도록 하는 I&C 시스템 이용 방법을 채택하고 있다.

중대사고시의 상황을 포함해 원자로의 운전상황을 정확히 파악하고 그 결과를 정확히 예측할 수 있도록 하기 위해 운전원에게 충분한 정보를 제공하도록 배려했다.

또한 운전원들을 돕기 위해 진단시스템에 컴퓨터방식을 채택했다.

집약된 정보를 제공하고 접촉감응형 디스플레이에 의한 운전조작이 가능하도록 전산화된 디스플레이가 광



EPR 건물 배치도

범하게 사용되고 있다.

사고후의 모든 조치는 사고발생후 30분 이내에 자동적으로 이루어지도록 돼 있지만, 경우에 따라서는 운전원들이 수동으로 조작할 수 있도록 배려했다.

국제협력

국제협력은 오늘날 첨단기술 제품을 개발하는데 흔히 통용되고 있는 필요한 조치이다.

EPR을 개발하는데도 이같은 조치가 취해졌는데, 그 이유는 프랑스와 독일의 모든 참여업체들이 가지고 있는 기술과 경험을 살릴 수가 있고, 또 한편으로는 프랑스·독일 양국의 국내시장과 국제시장에 맞는 PWR 원자로설비를 개발할 수 있는 기회가 주

어졌기 때문이다.

그동안 EPR을 개발하는데 있어서 는 두가지 어려움이 있었다.

그 하나는 양국간에 사고방식과 일 처리방식의 차이를 서로 인정하는 일이고, 또 하나는 양국에서 이미 보유하고 있는 원자로형식의 기술적인 배경과 해결방법의 차이를 서로 이해하는 일이었다.

서로 경쟁적인 관계에서 솔직하고 믿을 수 있는 협력관계로 발전시키는데는 많은 노력과 시간이 필요했다.

이제는 이같은 특별한 국제협력관계가 EPR 개발사업을 추진하는데 있어 장애요인이 되지 않고 있다.

장래 사업을 위해 설립된 이 협력기구는 현재 안전전문가·전력업체·공급업체들간의 긴밀한 협력관계를 통해 잘 운영되고 있다(NEI誌 483號).