

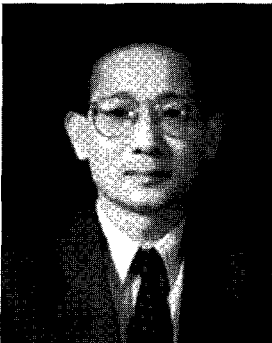
## 한국표준형경수로 발전소

# 한국주관, 미국보조 개발작품

영광 3·4호기 기준  
울진 3·4호기 건설

제3단계 개발 끝내면 기술자립도 95%  
佛·獨 등 모델도 모두 美國 모델이 바탕

서 중 석 처장



첫 한국형原電 建設分掌 한국전력 종합사업관리  
韓技 플랜트, 原研 원자로, 韓重 기기, 原燃핵연료 등

서 중 석

한국전력공사 기술연구원 원자력연구실 처장

북한 핵 문제가 세계의 관심사가 되고있는 가운데 북한이 건설중인 흑연 감속로의 경수로 전환을 위한 지원이 북핵문제 해결에 중요한 이슈로 대두되고 있다.

우리 정부는 북한에 건설될 원자력 발전소는 한국형 경수로가 되어야 하며 건설 비용을 국제사회와 공동부담 하겠다는 입장이다.

이와 관련하여 원자력 발전의 원리

와 한구경 경수로란 무엇인가에 대해서 알아본다.

### I. 핵분열 에너지

우라늄 235나 플루토늄 239와 같은 원자핵은 외부에서 오는 중성자를 흡수하면 원자핵이 불안정해져 두개 이상의 파편으로 쪼개진다.

이 현상을 핵분열이라고 하는데 핵분열이 일어나면 Einstein의 질량결손 법칙에 의하여 약 200Mev의 에너지와 2~3개의 새로운 중성자가 방출된다.

200Mev는 주울(joule)로 환산하면 단지  $3.2 \times 10^{-11}$ 주울에 불과하지만 우라늄 235 1g에는  $2.5 \times 10^{21}$ 개의 우라늄 원자핵이 들어있어 하루 1MW 에너지를 생산하는데 우라늄 1g이면

충분하다.

핵분열시 방출된 2~3개의 중성자는 또 다른 우라늄 원자핵에 흡수되어 핵분열을 일으키고, 이때 생겨난 중성자가 다시 다른 우라늄 원자핵을 분열시키는 연속적인 핵분열 반응이 일어나는데 이런 현상을 핵분열 연쇄반응이라 한다.

이 연쇄반응을 그대로 방치할 경우에는 면적이 없는 신체내에서 평균이 기하급수적으로 늘어나듯이 핵분열이 급속히 증가하여 폭발상태에 도달할 수도 있다.

따라서 원자로에는 이 연쇄반응을 조정하는 제어봉이 설치되어 있다.

제어봉은 보통 붕소, 카드뮴, 인디

움 및 은과 같이 중성자의 흡수 단면적이 큰 재질로 만들어지는데, 핵분열이 과도해지면 제어봉이 원자로내로 삽입되어 중성자를 흡수하여 연쇄반응을 억제하고, 반대로 출력에 비하여 중성자수가 적으면 제어봉이 원자로 밖으로 인출되어 연쇄반응을 촉진시켜 출력이 증가한다.

사고시에는 제어봉이 중력에 의하여 자동으로 원자로내에 삽입되어 원자로를 안전하게 정지시킨다.

핵 분열시 나오는 중성자들은 매우 큰속도를 가지고 있기 때문에 우리는 이들을 속(fast) 중성자라 부른다.

중성자의 속도가 너무 빠르면 우라늄원자핵과 충돌하여 핵분열을 일으

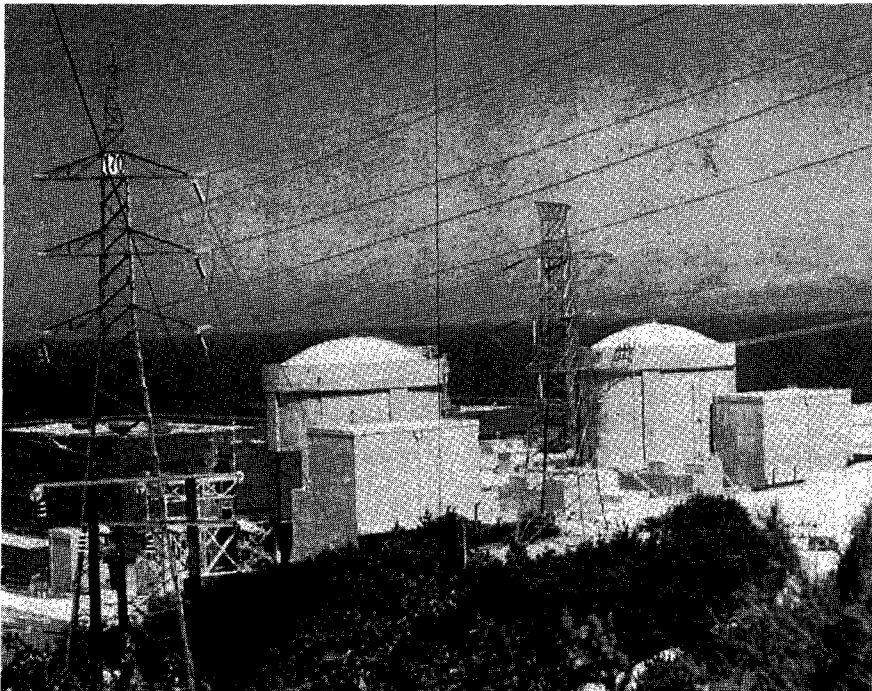
키는 확률이 적어지기 때문에 속중성자를 감속재(moderator)의 원자핵과 탄성 충돌시켜 중성자 속도를 2200 m/s로 감속시킨다.

이렇게 속도가 떨어진 중성자를 열(thermal) 중성자라 부른다.

감속재로는 질량이 중성자와 비슷한 원소를 포함하고 있는 물질이 효과적이는데 보통 물(輕水), 중수(重水) 및 흑연이 사용된다.

## II. 원자로 분류

원자로의 종류는 사용목적이나 기술특성 등에 따라 여러가지로 분류할



최초의 「한국표준형 경수로 원자력발전소」인 울진原子力 3, 4호기는 이 울진原子力 1, 2호기 옆에 나란히 자리 잡을 예정이다.

수 있으나 상업용 원자로로는 보통 사용하는 감속재 종류에 따라 구분한다.

### 1. 경수로 (Light-Water Reactor)

경수로는 물(輕水)을 원자로 냉각재와 중성자 감속재로 사용하며 세계 상용로(商用爐)의 약 80%를 차지하고 있다.

물은 감속능력이 좋고 거의 돈이 안 든다는 이점이 있는 반면, 열중성자의 흡수 단면적이 커서 우라늄 235 함유량이 0.7% 밖에 되지않는 천연 우라늄으로는 지속적인 연쇄반응, 즉 임계를 유지할 수가 없다.

따라서 임계를 위해서는 천연우라

늄을 농축하여 우라늄 235 함량을 3~4% 정도 올려서 사용해야 한다.

우라늄 농축에는 기체 확산법이나 원심 분리법이 이용된다.

원자로 운전방식에 따라 경수로는 가압경수로(PWR)와 비등경수로(BWR) 두가지 타입으로 나누어진다.

가압경수로는 그림 처럼 냉각수가 원자로 하부에 들어와 노심을 지나면서 핵분열에 의해 뜨거워진 핵연료로부터 열을 흡수하여 원자로를 떠날 때는 섭씨 약 320도 정도의 뜨거운 물이 된다.

냉각수는 노심을 통과하면서 핵분열 열을 회수하는 동시에 속중성자를 열중성자로 변환시키는 감속재 역할

도 한다.

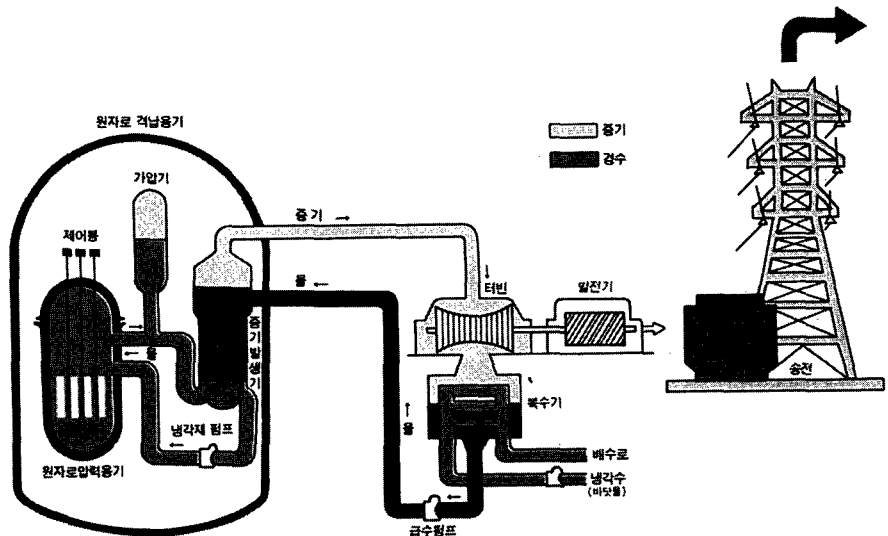
이렇게 가열된 냉각수는 증기발생기(蒸氣發生器)에서 열교환기를 통하여 터빈계통(2차 계통)의 급수를 끓여 증기를 발생하며 이 증기가 터빈-발전기를 돌려서 전기를 생산하게 된다.

운전중에는 가압기에 의하여 원자로 냉각계통(1차 계통)의 압력이 약 155기압 정도의 고압으로 유지되기 때문에 노심내에서 비등(沸騰)이 일어나지 않는다.

비등경수로는 가압경수로와 달리 원자로내에서 냉각수를 끓여서 발생한 증기를 직접 터빈에 보내어 발전기를 돌린다.

따라서 증기발생기가 필요없게 되

가압경수로형 原子力발전소 모형도



어 건설 및 운전 유지비가 절약되나 냉각수가 노심을 통과하면서 방사능을 띄게되어 2차 계통의 기기들을 방사선 차폐해야 한다.

비등경수로의 원자로 압력은 가압경수로의 절반인 약 70기압이다. 따라서 비등경수로의 원자로 용기는 가압경수로처럼 두꺼울 필요가 없다.

그러나 노심 출력 밀도가 가압경수로 보다 낮기 때문에 원자로 용기의 부피가 커진다.

결국 원자로 용기 비용면에서 본다면 이 두가지 장단점이 서로 상쇄하게 된다.

원자로 제어 측면에서 보면 노심내 존재하는 기포 때문에 비등형이 가압

경수로보다 복잡한 특성을 가진다.

이와같이 비등형과 가압형 경수로 는 서로 고유 특성을 가지고 있을뿐 아니라 안전이나 경제성이 충분히 입증된 상태이기 때문에 이들 경수로의 우열을 말하기는 어렵다.

그런데 점유율면에서 보면 세계 경수로 원전중 약 70%가 가압경수로이다.

북한은 경수로 지원 대상 노형으로 러시아와 독일 경수로를 거론한 바 있다.

독일의 CONVOY형 가압경수로 는 대체로 한국형 경수로와 비슷하나 한국형은 격납용기 형태가 원통형인데 반해서 CONVOY는 구형(球形)이며

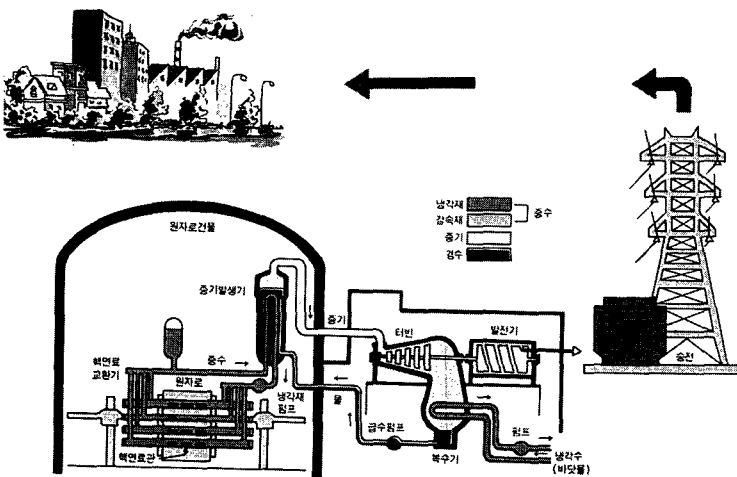
안전계통 설계가 한국형보다 복잡하다.

러시아의 VVER은 Water-Water Reactor란 뜻인데 44만kW와 100만 kW 두가지 형이 있다.

VVER은 물을 원자로 냉각재와 감속재로 사용하며 약 3% 정도의 농축우라늄을 연료로 사용하는 등 한국형 가압경수로와 기본적으로는 대략 비슷하나, 안전성 보다는 경제성 위주로 설계되어 원자로 제어와 보호계통의 다중화와 분리가 미흡하고 기기들의 안전 여유도가 낮다고 알려져 있다.

독일은 통독후 구 동독의 VVE-R-440 5기를 안전성 때문에 폐로(廢爐)기로 결정하였으며 이외에도 많은 VVER이 운전중지 되거나 건설이 중단되었다.

가압중수로형 原子力발전소 모형도



## 2. 중수로 (Heavy Water Reactor)

중수로는 원자로 냉각재와 감속재로 중수를 사용한다.

캐나다가 개발한 중수로를 CANDU라고도 부르는데 이말은 Canada Deuterium Uranium을 뜻한다.

중수소는 보통의 수소 원자에 중성자가 한개 더 들어있어 질량이 수소의 두배가 되는데 이 중수소를 포함하고 있는 물을 중수라 한다.

중수소는 보통수소보다 중성자 흡수단면적이 적다. 따라서 중수로서는 천연우라늄을 연료로 사용할 수 있어 농축이 필요없다.

반면에 중수소는 보통수소에 비하여 감속능력이 떨어져 중성자의 비행 거리가 길다.

이러한 이유때문에 중수로는 경수로보다 큰 원자로 용기를 가져야 하는데 CANDU는 그림에서 처럼 압력관을 사용하여 이 문제를 해결하였다.

이 압력관내에는 12개의 핵연료 다발이 들어있고 10기압의 중수냉각수가 흐른다.

60만kW 중수로는 380개의 압력관을 가지고 있는데 이들 압력관들은 감속재 역할을 하는 대기압의 중수로 둘러 싸여 있다.

CANDU의 특징은 운전중 핵연료 교체이다.

경수로에서는 12내지 18개월마다 원자로를 정지하고 약 1/3 정도의 핵연료를 신연료로 교체한다. 그러나 CANDU에서는 압력관 한쪽끝에 신연료를 밀어 넣으면 다른쪽끝으로 압력관내에 있던 연료 다발이 밀려 나오므로 원자로를 정지하지 않고 소량의 연료다발을 수시로 교체할 수 있다.

따라서 CANDU에서는 높은 발전소 이용률을 얻을 수 있는데 CANDU 발전소인 우리나라 월성 1호기는 85년 이래 세번이나 98% 이상의 이용률을 기록해 이용률 부문에서 세계 1위를 차지하였다.

### 3. 흑연 감속로 (Graphite Moderated Reactor)

천연우라늄과 감속재로 흑연을 사용하는 흑연감속로는 세계 2차대전중 미국에서 우라늄 238을 플루토늄 239로 변환하는 군사적 목적을 위하여 개발되었다.

전쟁이 끝난후 우라늄 농축 시설을 보유하고 있지 않던 영국은 자연히 흑연감속로 원자력발전소에 치중하게 되었으나, 흑연감속로의 낮은 경제성 때문에 1979년에 경수로 발전으로 정책을 전환 하였다.

흑연감속로에서는 연료주위를 감속재인 흑연이 둘러싸고 연료와 감속재 사이를 냉각재가 흐른다.

냉각재로는 탄산가스나 물이 사용된다.

영국의 흑연감속로는 냉각재가 탄산가스이며, 러시아의 RBMK 흑연감속로는 물을 사용한다.

지난 1986년 방사능 누출 사고를 일으킨 체르노빌 발전소는, 과열로 흑연감속재에 화재가 발생하자 냉각수분의 물이 분해하여 발생한 수소가 폭발하여 핵연료에 손상이 일어나 방사능이 누출 되었다.

특히 이 발전소에는 격납용기가 설치되어 있지 않아 많은 방사능이 대기중으로 누출되었다.

## Ⅲ. 한국형 경수로

서구권의 상업용 경수로들은 미국의 경수로 기술에 뿌리를 두고 있다고

할 수 있다.

미국은 군사적 목적의 핵개발 프로그램에서 쌓은 기술을 바탕으로 세계 최초의 상용가압경수로인 Shippingport(60MWe)와 비등경수로 Dresden 1(210MWe)를 건설한 이래 세계의 경수로 건설을 주도하고 경수로 기술을 여러나라에 전수하였다.

프랑스는 가압경수로 기술을 전수받아 프랑스형 표준발전소인 P-series, N-series 경수로를 개발하였고 독일과 공동으로 개량형 가압경수로 EPR을 개발중이다.

독일도 전수받은 가압경수로 기술을 토대로 자체 모델인 CONVOY형 가압경수로를 개발하였다.

일본은 비등형과 가압형 경수로 기술을 도입하여 원전 국산화를 달성하였다.

우리나라도 미국 콤버션 엔지니어링(CE)으로 부터 가압경수로 기술을 도입하여 영광 3, 4호기를 통하여 기술을 자립하고 한국 표준형 경수로 발전소 올진 3, 4호기를 자체 설계하였다.

국가경제 발전을 위해서는 안정된 전력공급이 필수적이다.

에너지 부존자원이 거의없는 우리나라 형편으로는 석유나 석탄, 우라늄과 같은 연료를 외국에서 수입하는 것이 불가피하나, 발전소 건설도 계속 외국에 의존한다면 현재와 같은 무한 경쟁시대에서 생존하기가 힘들 것이다.

한국전력은 에너지 다변화 정책의 일환으로 1978년에 고리 1호기를 준공하고 이후 건설되는 원자력발전소의 건설을 통하여 국내 산업계가 원전 기술을 배워서 기술자립을 할 수 있도록 많은 투자와 노력을 해왔다.

원전기술 국산화는 3단계로 추진되었다.

제1단계에서는 외국업체와 일괄 계약한 고리 1, 2호기의 인허가와 설치 공사에 참여하여 설계개념과 시공 기술을 습득하였다.

제2단계인 고리 3, 4호기, 울진 1, 2호기, 그리고 영광 3, 4호기에서는 발전소를 핵증기공급계통, 터빈-발전기 그리고 엔지니어링의 3개 콤포넌트로 나누어 외국업체들과 계약을 하고, 국내업체들은 이들 외국업체들의 설계 및 제작에 직접 참여하여 노우하우(Know-how)를 습득하였다.

제3단계인 영광 3, 4호기에서 한전은 기술자립을 촉진하기 위하여 국내업체들이 콤포넌트의 주계약자가 되고 외국업체들은 하청계약자로 참여토록 과감하게 계약방식을 전환하였다.

그리고 국내업체들이 외국업체와 기술 전수협정을 맺어 발전소 설계 및 기기 제작에 필요한 일체의 전산코드 및 설계절차서 등 소프트웨어를 도입하여 노우하이(Know-why)를 전수받도록 하고 소비비용을 부담하였다.

제3단계가 끝나는 내년에는 경제성의 이유 때문에 국산화에서 배제된 일

부 기술을 제외하고는 95% 기술자립을 이룩하게 된다.

북한 경수로 지원에서 거론되고 있는 한국형원자로는 영광 3, 4호기를 기준으로 하고 미국전력연구소와 한국이 공동으로 개발한 설계요건을 반영하여 우리 실정에 맞도록 개량한 울진 3, 4호기를 말한다.

현재 건설이 진행중인 울진 3, 4호기는 한전의 종합사업관리하에 한전기술주식회사는 플랜트 종합설계, 한국중공업은 기기설계 및 제작, 원전연료주식회사는 핵연료 제작, 원자력연구소는 원자로 계통설계를 수행하고, 국내 건설업체들은 발전소 시공을 담당하고 있다.

#### IV. 안전한 원자력 발전

원자력발전소 설계개념은 원자로 운전중 중대한 이상이 발생하더라도 안전계통이 적절히 동작하여 방사능 피폭 사고가 발생하지 않도록 하는데 목표를 두고 있다.

이를 위해 안전계통의 기기와 설비들이 충분한 용량과 안전 여유도를 갖도록 설계하고 중요기기와 설비를 다중화하여 한쪽이 고장나더라도 다른 쪽의 기기나 설비가 즉시 그 기능을 맡을 수 있도록 되어있다.

또한 이들 기기들이 지진에도 견딜 수 있도록 설계되어 있다.

발전소 운전상태가 제한치 이상이

되면 원자로 보호계통이 작동하여 제어봉을 원자로에 삽입하여 즉시 원자로를 정지한다.

원자로 보호계통은 제어계통과 전기 및 물리적으로 분리되어 서로 간섭을 받지 않도록 설계되어 있고 신호채널이 다중화 되어 한 채널이 고장나더라도 다른 채널이 신호를 전달토록 되어있다.

가장 심각한 사고인 냉각수 상실 사고가 발생하더라도 이 원자로 보호계통이 원자로를 즉각 정지시키고 비상노심냉각수가 탱크로부터 자동으로 원자로에 주입되어 핵연료 손상이 일어나지 않는다.

위에서 설명한 바와 같이 원자력발전소는 사고가 일어나더라도 각종 안전장치와 원자로 격납용기에 의해 방사능 누출이 일어나지 않도록 설계되어 있다.

그러나 한국전력은 여기에 만족하지 않고 원자력발전소의 안전성 향상을 위하여 계속 노력하고 있다.

더 구체적으로 말하면 한전은 국내 원자력 산업계를 주도하여 한국 표준형 경수로 발전소의 후속 사업으로 2000년까지를 개발목표로 하여 노심용융사고에 대한 대처 능력을 보강한 차세대 원자로 설계를 위해 原子力界의 모든 힘을 결집하여 연구 개발사업에 박차를 가하고 있다.