

# 원자력발전의 구조와 이해

글 | 임형희 | 플랜트공사부 과장 || 전화 : 02-3433-7808 || E-mail : hhlhm@ssyenc.com

## 1. 원자력발전과 화력발전의 차이

원자력이란 핵분열이 연쇄적으로 일어나면서 생기는 막대한 에너지를 말한다. 원자력발전은 우라늄이 핵분열을 할 때 나오는 열로 증기를 만들어 그 힘으로 터빈을 돌려 전기를 생산한다.

21세기에는 석유 경제시대가 저물고 수소 경제시대가 도래할 것이다. 우리나라는 오는 2020년까지 국내 수송에너지의 20%(원유 8,500만 배럴)를 감당할 원자력 수소생산시스템을 구축할 계획이다. 원자력 수소생산시스템은 원자로에서 나오는 섭씨 1천도의 열을 이용해 물을 열화학반응으로 분해하는 과정에서 수소를 얻는 원리를 이용한다. 연간 수소 1톤을 생산하려면 풍력 400평, 태양열 110평이 필요한 반면, 원자력은 0.65평 정도만 소요된다.

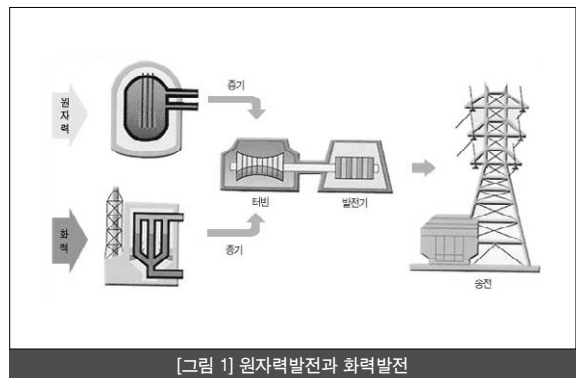
댐에서 떨어지는 물의 힘으로 터빈을 돌려 전기를 만드는 것이 수력발전이다. 화력발전은 석유나 석탄을 태워서 물을 끓이고 여기서 나오는 증기의 힘으로 터빈을 돌려서 전기를 만든다.

원자력발전도 화력발전과 마찬가지로 증기의 힘으로 터빈을 돌려서 전기를 만든다. 다만 원자력발전은 우라늄을 원료로 하여 핵분열을 할 때 나오는 열로 증기를 만든다는 점이 차이가 있을 뿐이다. 원자력발전에서는 원자로가 화력발전의 보일러와 똑같은 역할을 하고 있다.

말하자면 원자로는 우라늄이 핵분열하여 에너지를 낼 수 있도록 만들어진 우라늄 전용 보일러라고 할 수 있다. 원자로는 원자로의 기능과 개발단계에 따라 여러 가지로 구분된다. 먼저 기능에 따라 분류해 보면 연구용 원자로, 동력용 원자로, 플루토늄 생산용 원자로로 구분할 수 있다.

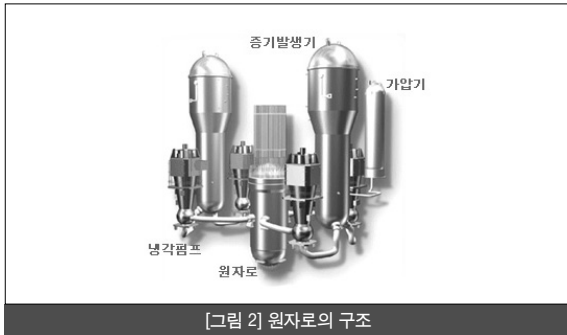
연구용 원자로는 동위원소 생산, 재료시험, 그리고 중성자 조사 연구 등에 이용되는 원자로이다. 동력용 원자로는 선박 추진이나 전력

생산 및 열원으로 이용되는 원자로이고, 플루토늄 생산용 원자로는 폭탄용 플루토늄 생산을 위해 만들어진 군사용 원자로를 말한다. 개발단계에 따라 구분해 보면 원자로에 관한 이론의 실증을 위한 '실험로', 실용화 가능성을 확인하기 위한 '원형로', 원자로의 안전성과 경제성을 입증하기 위한 '실증로' 그리고 상업적으로 이용하기 위한 '상용로' 로 구분할 수 있다.



모든 물질을 구성하는 원자는 양성자와 중성자로 구성된 원자핵과 그 주위를 돌고 있는 전자로 구성된다.

우라늄과 같이 무거운 원자핵이 중성자를 흡수하면 원자핵이 쪼개지는데, 이를 핵분열이라고 한다. 원자핵이 분열하면 많은 에너지와 함께 2~3개의 중성자가 나온다. 이 중성자가 다른 원자핵과 부딪치면 또 다시 핵분열이 일어난다. 이런 식으로 계속해서 핵분열이 이어지는 것을 핵분열 연쇄반응이라고 하며, 이 과정에서 생기는 막대한 에너지가 바로 원자력이다. 우라늄 1g이 핵분열 할 때 나오는 에너지는 석유 9드럼, 석탄 3톤을 태울 때 나오는 에너지와 맞먹는 양이다.



[그림 2] 원자로의 구조

## 2. 핵융합

중수소(重水素)와 같은 가벼운 원자핵 2개가 어떤 작용(보통 핵력이라고 부름)에 의하여 무서운 힘으로 충돌하여 하나의 다른 원자핵으로 변환되는 경우가 생길 수 있다. 이것을 우리는 핵융합 반응이라고 하고 이때도 역시 굉장히 큰 에너지 발생된다.

### 1) 핵융합 반응과 에너지의 크기

그런데 이때에 발생하는 에너지량은 핵분열 시에 발생하는 에너지 양보다 훨씬 더 크기 때문에 흔히 말하는 원자탄(핵분열 반응을 이용한 핵폭탄)보다는 수소탄(핵융합 반응을 이용한 핵폭탄)의 위력이 훨씬 더 크다는 것을 알 수 있다.



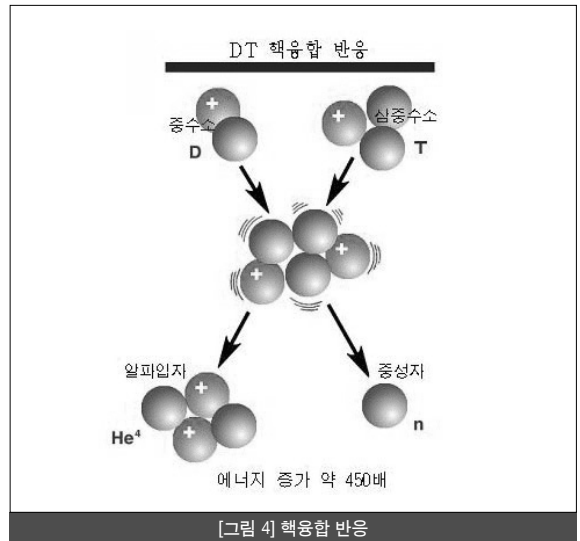
[그림 3] 플라즈마 상태

### 2) 핵융합 반응의 형성

일반적으로 모든 물질은 온도를 높임에 따라 고체 → 액체 → 기체로 변해간다는 것은 누구나 아는 상식이다. 그런데 더욱 더 온도를 높여서 수백만도(°C) 이상(예를 들면 태양의 외곽)이 되면 원자를 구성하고 있는 원자핵과 전자의 결합 상태가 허물어져서 제각기 맹렬한 속도로 불규칙하게 흩어져 공간을 떠돌게 된다. 원자의 이러한 상태를 '플라즈마(Plasma) 상태라고 한다. 이런

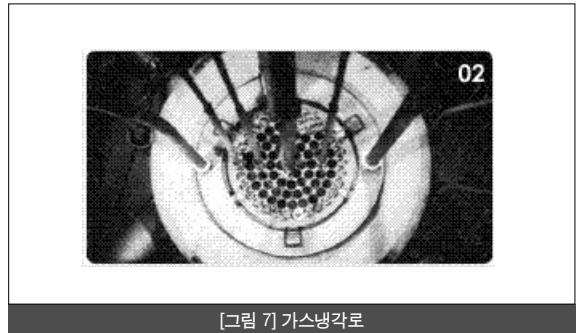
'플라즈마' 상태에서 1억도(°C) 이상이 되면 핵융합 반응이 일어난다. 이 핵융합 반응을 일명 '열핵반응'이라고도 한다. 그런데 이 핵융합 반응을 우리들의 생활에 실용화하기란 그리 쉬운 일이 아니다.

우선 그와 같은 초고온(超高温)에서 이루어지는 핵융합 반응은 핵분열 반응 때와는 비교할 수 없는 초고열을 발생하기 때문에 거기에 견딜 수 있는 용기를 만들어 낼 수 있는 방법과 기술이 문제이다. 일반적인 핵분열 반응 시에 발생하는 온도는 환경에 따라 다르지만 수백도 정도라고 생각하면 된다.



[그림 4] 핵융합 반응

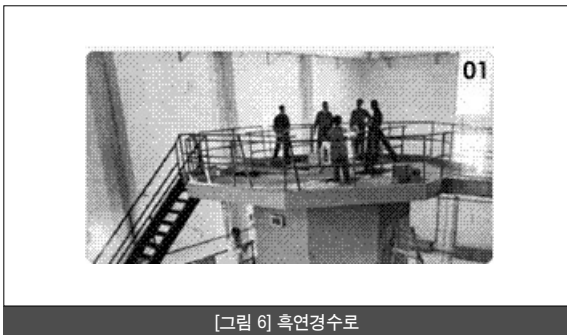
만일 핵융합 반응을 통제할 수 있는 핵융합로와 같은 기구를 만들어 실용화할 수 있는 시대가 온다면 우리 인류가 걱정하는 에너지 문제는 거의 영원히 해결된다고 말할 수 있을 것이다. 왜냐하면 핵융합 반응의 원료가 되는 중수소(2H 또는 D(Deuterium)이라고도 표기함)는 바닷물이든 호수 물이든 또는 강물이든 시냇물이든 간에 모든 물속에 중수(重水)로써 약 0.015%의 비율로 함유되어 있기 때문이다. 좀 더 구체적으로 설명하면 이 지구상에 있는 바닷물의 양은 무려  $1.5 \times 10^{18}$ 의 18제곱 톤(1조 톤의 150만 배)이나 되며, 바닷물 1톤 속에 들어 있는 중수소로부터 얻을 수 있는 에너지는 석탄 270톤을 태웠을 때 나오는 에너지와 같다고 한다. 그러므로 바닷물 속의 모든 중수소로부터 얻을 수 있는 에너지의 총량은 4억 년 이상 인류가 사용할 수 있는 에너지양에 해당한다.



### 3. 원자로의 종류

#### 1) 흑연경수로

이 원자로는 1954년 초 구소련(현 러시아) 모스크바 교외의 오브닌스크에 세워진 것으로 비록 크기는 작지만 세계 최초의 발전용 원자로라 할 수 있다. 이 원자로는 5천kW의 발전을 할 수 있는 것으로 핵연료는 농축우라늄이며 감속재는 흑연, 냉각재는 경수를 사용한 원자로이다.



#### 2) 가스냉각로

이 원자로는 1956년 영국에 세워진 콜더홀발전소에 설치된 92,000kW 규모의 현대식 원자력발전 형태를 갖추고 있다. 이 발전소가 세계 최초의 상업용 원자력 발전소이다. 이 원자로는 천연우라늄을 사용했으며 감속재로는 흑연, 냉각재로는 이산화탄소를 사용했다. 이산화탄소(가스 형태)로 원자로 안에 있는 열을 뽑아내 그 열을 이용해 수증기를 만든다. '흑연 가스형 원자로' 또는 '흑연 가스'라고도 한다.

#### 3) 가압경수로

세계 원전의 60% 정도를 차지하고 있다. 냉각재와 감속제로 일반 물인 경수( $\text{H}_2\text{O}$ )를, 연료로는 핵분열이 가능한 우라늄 235가 2~5% 들어있는 저농축우라늄을 사용한다. 냉각재에 높은 압력을 가해 고온에서도 액체 상태를 유지하도록 하며, 이것이 열 교환을 통해 2차 계통의 물을 증기로 만든다. 보통 12~18개월마다 발전소를 정지하고, 전체 연료의 3분의 1씩을 교체한다.



#### 4) 비등경수로

전체 원전의 22% 정도를 차지하는 원자로로 냉각재와 감속제로 경수를 사용한다. 연료로는 우라늄 235가 2% 들어있는 저농축우라늄을 사용해 가압경수로와 유사하다. 그러나 냉각재가 직접 비등해 증기가 되

로 높은 압력을 유지하는 것이 불필요하고, 원자로계통과 터빈계통이 완전 분리되지 않아서 방사선 차폐가 어렵다는 단점이 있다.

### 5) 가압중수로

캐나다에서 개발해 캔두(CANDU)라고도 불리는 원자로로 냉각재와 감속재로 중수를, 연료로는 천연우라늄을 사용하는 것이 가장 큰 특징이다.

연료가 천연우라늄이기 때문에 핵분열 확률을 높여주기 위해 감속재로 경수보다 중성자의 속도를 더 잘 감속시켜주는 중수를 사용한다. 연료는 보통 별도의 운전정지 없이 매일 일정량을 교체하기 때문에 경수로보다 이용률이 높다.

## 4. 일체형 원자로의 장점

기존 원자로가 노심과 압력용기, 가압기, 냉각재 펌프 등으로 분리된 데 반해 원자로의 각종 기기가 하나의 압력용기에 포함된 일체형으로 설계된 것이 특징이다.

### 1) 안정성 측면

- 대형 연결배관이 없으므로 대형냉각재 상실사고 근원적 배제 (노심손상 확률 감소)
- 피동 안전기술 접목이 용이하여 안전성을 증대
- 냉각수량이 상대적으로 많아 원자로 이상 상태 자체흡수가 용이하여 원자로 고유 안전성 증대

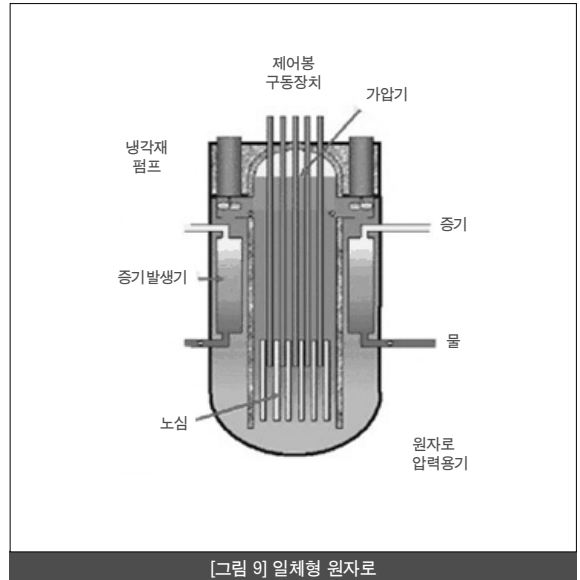
### 2) 경제성 측면

- 계통의 단순화(배관, 밸브, 펌프, 센서 등 절대적 감소)
- 주기기용 압력용기 별도 설치 불필요
- 기기의 모듈화와 On-Shop Fabrication 가능과 건설공기 단축 가능
- 플랜트 모듈화와 표준화가 용이하여 다수 호기 건설이 용이

### 3) 건설 측면

- 분리형 원자로에 비해 안전성이 획기적으로 제고되므로 주민거주 인근지역에 건설이 용이
- 건설 소요 부지면적이 작아 건설부지 확보 용이

## 5. 우리나라의 일체형 원자로 SMART



[그림 9] 일체형 원자로

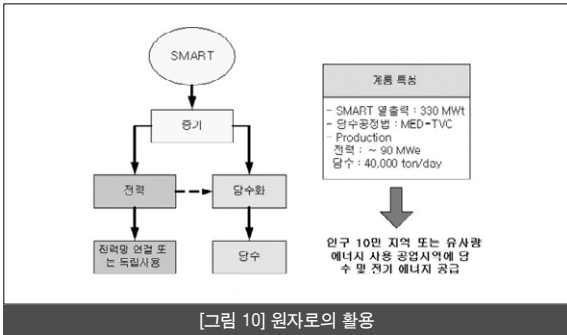
SMART는 원자력 중장기 사업의 일환으로 한국원자력연구소에서 주도적으로 연구개발하고 있는 원자로 이름이다.

SMART는 'System- integrated Modular Advanced Reactor' 에서 따온 말로 신형 일체형 모듈식 원자로란 의미를 내포하고 있다. SMART는 향후 미래 원자력 수요 환경에 대비하고 증가 일로의 해수 담수화 수요 등 원자력에너지의 비전력 분야 활용을 위해 대용량 원자로에 비해 활용성이 다양한 다목적 중소형원자로로 개발되고 있다.

중소형 원자로인 SMART는 대용량 발전용 원자로와는 달리 고유 안전 또는 피동안전 등의 신안전기술 접목이 용이하며 이는 궁극적으로 한 단계 높은 원자로 안전성을 보장할 수 있다.

또한 모듈 개념 적용과 기기제작공장에서 제작·조립하여 현장에서 모듈 단위로 설치하는 방법 활용으로 품질향상에 따른 안전성 향상, 건설기간을 단축하여 경제성을 높일 수 있는 기술 집약적 원자로이다.

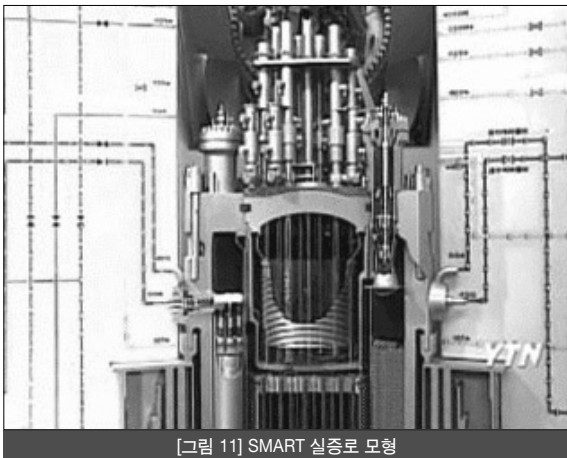




[그림 10] 원자로의 활용

기존 원자로에 비해 안전성이 100배 이상 향상된 새로운 개념의 일체형 원자로는 순수 우리 기술로 개발 중인 원자로로써 해수담수화로 부족한 수자원을 확보하고 소규모 전력생산을 통해 국가 경쟁력에 기여할 것으로 전망된다.

[그림 11]은 한국원자력연구소가 개발 중인 일체형 소형원자로 SMART의 실증로 모형이다.



[그림 11] SMART 실증로 모형

## 6. 원전 연료

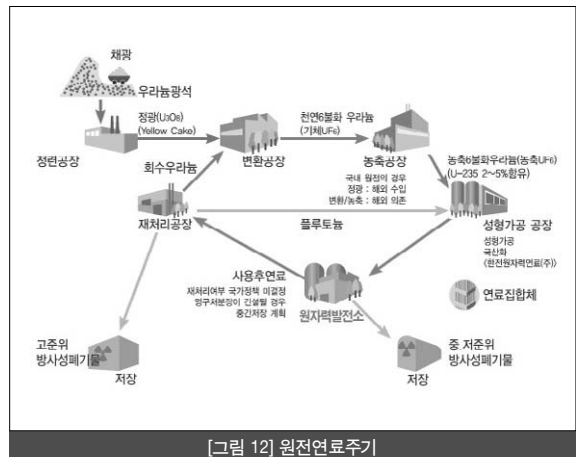
우라늄은 석탄처럼 땅속에 묻혀 있기 때문에 먼저 채굴작업을 통해서 캐내야 한다. 광산에서 캐낸 우라늄 원광 속에는 흙과 같은 불순물을 제거하는 정련 작업이 필요하다. 자연 속에 존재하는 천연 우라늄에는 원자핵분열이 가능한 우라늄 235가 약 0.7% 밖에 없고 나머지는 우라늄 238로 구성되어 있다.

우라늄을 원자력발전소의 연료로 사용하기 위해서는 천연우라늄

에 포함되어 있는 우라늄 235의 비율을 2~5%로 높여 주어야 한다. 이러한 작업을 농축이라고 부른다. 농축공장에서 만들어진 농축우라늄을 담배필터 모양으로 만들어서 고온처리를 하게 되면 원자력발전소에서 사용되는 원전연료의 소자(펠렛)가 된다. 이를 지르코늄으로 만든 가느다란 튜브에 수백 개를 집어넣고 원전 연료봉을 만든다. 이렇게 만들어진 원전 연료봉을 여러 개로 묶어 하나의 다발로 만든다.

원자로에 들어가는 원전연료의 최종 형태는 바로 이러한 원전연료 집합체가 된다. 이렇게 원전연료 집합체를 만드는 작업과정을 원전연료 성형가공이라고 한다. 원자로에 장전된 원전연료는 발전연료로서의 역할을 수행한 뒤 원자로에서 고집어내는데, 이것을 사용 후 연료라고 한다. 이 사용 후 연료에는 연료로 다시 사용할 수 있는 우라늄 235와 플루토늄 239가 남아 있다.

이처럼 사용 후 연료에 남아 있는 유효성분을 다시 활용하기 위하여 분리하는 작업을 재처리라고 한다. 이와 같이 땅속에 묻혀 있던 우라늄을 원전연료로 만들어 전기를 만드는 데 사용하고, 사용하고 난 후의 원전연료를 재처리하여 다시 원전연료로 활용하는 우라늄의 일생을 원전연료주기라고 한다.



[그림 12] 원전연료주기

## 7. 원자력발전의 안정성

모든 기계가 그렇듯이 원자력발전소도 아무리 완벽하게 설계해서 건설하고 운영하더라도 고장이나 사고를 완전히 배제할 수는 없다. 그러므로 만일의 사고가 일어나더라도 그 피해가 확대되지 않

도록 철저히 방지하는 일이 매우 중요하다. 이를 위해 우리나라 원자력발전소는 방사선을 완벽하게 가둘 수 있도록 5중 방호벽으로 이루어져 있다.

**1) 제1 방호벽(연료펠릿)**

핵분열에 의해 생기는 방사성 물질의 대부분을 1차 밀폐시킨다.

**2) 제2 방호벽(연료피복관)**

재질은 열, 방사선, 부식에 강한 지르코늄 합금이며, 연료펠릿에서 새어나온 소량의 기체 방사성물질까지 밀폐시킨다.

**3) 제3 방호벽(원자로 용기)**

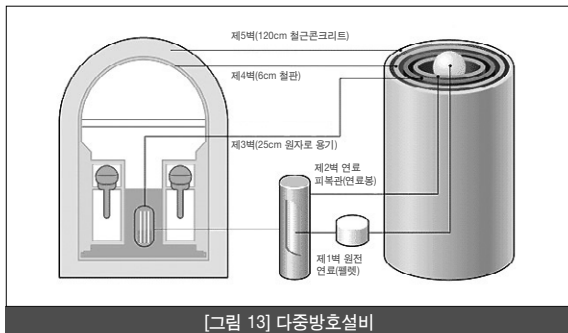
연료피복관에 결함이 생겨 방사성물질이 새어 나와도 25cm 두께의 강철로 된 원자로 용기와 배관에 의해 방사성물질이 누출되지 못하도록 되어있다.

**4) 제4 방호벽(원자로건물 내벽)**

원자로건물 내벽에 6cm 두께의 두꺼운 강철판이 설치돼 있어 중대사고 시 원자로에서 누출돼 나온 방사성물질을 격납용기 안에 가둔다.

**5) 제5 방호벽(원자로건물 외벽)**

최종적으로 120cm 두께의 철근콘크리트 원자로건물 외벽이 있어서 어떤 경우에도 방사성물질은 이 건물 안에 갇혀 밖으로 나오지 못하도록 설계되어 있다.

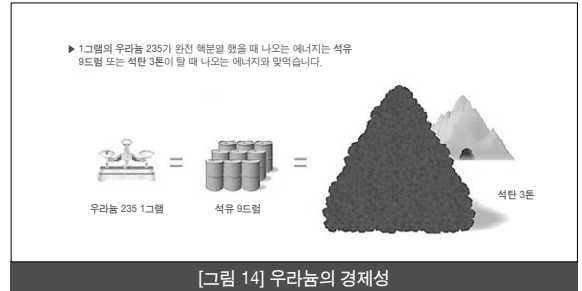


**8. 원자력발전의 경제성**

원자력발전은 화력발전 등 다른 종류의 발전방식보다 건설비가 다소 비싼 단점이 있다.

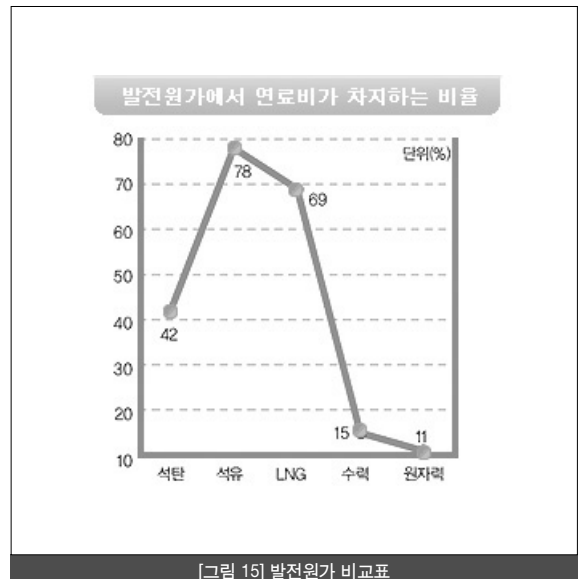
하지만 우리나라는 석유나 천연가스에 비해 월등히 싸기 때문에 매우 경제적이다. 또한 석유나 석탄, 천연가스 등은 발전원가 중 연료

비가 차지하는 비율이 보통 50% 이상으로 연료가격이 오르면 그만큼 발전원가에 영향을 많이 미친다.



우라늄은 가격이 쌀 뿐만 아니라, 연료비가 차지하는 비율이 10% 정도로 낮아서 우라늄 가격이 오르더라도 발전원가에는 크게 영향을 주지 못한다.

특히 앞으로 우리나라가 개발한 한국형표준원전을 건설함으로써 공사기간이 단축돼 건설비가 줄어들 것이다. 또한 발전원가 산정 시 중요 요소인 '발전소 이용률'도 점점 높아지고 있어서 경제성도 더욱 높아질 것이다. S



참고문헌  
1. 한국원자력 문화재단(KNEF)