



사단법인 한국원자력학회  
KOREAN NUCLEAR SOCIETY  
소통위원회

대전광역시 유성구 유성대로 794 (장대동, 뉴토피아빌딩 4층)  
Tel 042)826-2613~5 / 2677 Fax 042)826-2617 www.kns.org



KOREAN NUCLEAR SOCIETY

2017. 5.

# 원자력 문고 답하기



사단법인 한국원자력학회  
KOREAN NUCLEAR SOCIETY  
소통위원회



KOREAN NUCLEAR SOCIETY

2017. 5.

# 원자력 묻고 답하기

한국원자력학회 소통위원회

김진원, 백 훈

윤병조, 윤지웅

이기복, 이나영

이승숙, 이재영

임채영, 전은주

제무성, 조건우

주한규

(가나다순)



05  
인사말

06  
1. 원자력은 안전한가요?

39  
2. 원자력 발전이 필요한가요?

54  
3. 신재생에너지로 충분하지 않나요?

66  
4. 사용후핵연료가 궁금해요

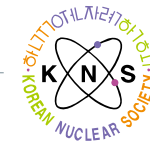
85  
5. 우리는 핵무기를 왜 만들지 않나요?

---

## | 인사말 |



우리 학회는 국내외 원자력관련 현안에 대한 학회의 전문 기술적 의견이나 입장을 전하고, 국민의 알 권리 충족을 위해 신속하고 정확한 정보를 공유하고 의견을 수렴하여 국민과 소통하기 위하여 2015년 11월 소통위원회를 새로이 신설하게 되었습니다. 이 위원회는 중립적이고 균형 잡힌 시각에서 국민이 원자력을 바르게 이해할 수 있는 환경을 조성하고 또한 원자력 현안에 대한 과학적이고 객관적인 정보를 제공하도록 노력하고 있으며 국민 홍보를 위한 방사선관련 동영상 제작과 SNS를 통한 공정한 지식정보 전달을 위하여 콘텐츠를 생산하고 있습니다. 이러한 노력의 일환으로 국민이 궁금해하고 있는 원전안전, 고준위 폐기물 처리방안 등 중요 현안에 대하여 소통위원회 위원(위원장: 제무성 교수, 부위원장: 이승숙 박사, 위원: 김진원, 백훈, 윤병조, 윤지웅, 이기복, 이나영, 이재영, 임채영, 전은주, 조건우, 주한규)이 모두 저자로 참여하여 “원자력 묻고 답하기”를 발간하게 되었습니다.



이 책의 내용은 원자력 안전, 원자력 발전, 신재생에너지, 사용후핵연료, 핵무기관련 묻고 답하기 순으로 구성되어 있으며 원자력에 대해 국민들이 궁금해하고 있는 중요 분야의 질문들에 대한 객관적이고 중립적인 설명으로 구성되어 있습니다. 가능한 한 쉽게 작성하여 고교 수준의 학생이면 이해할 수 있는 답변으로 작성되었습니다. 원자력과 관련한 사실과 과학적 전문성에 기반을 두어 작성된 본 책자가 원자력에 대한 국민들의 이해를 돕는데 도움이 되기를 바랍니다. 감사합니다.

2017년 5월  
한국원자력학회 학회장 황 주 호

---



# 원자력은 안전한가요?

---

원 자 력 문 고 답 하 기 2 0 1 7

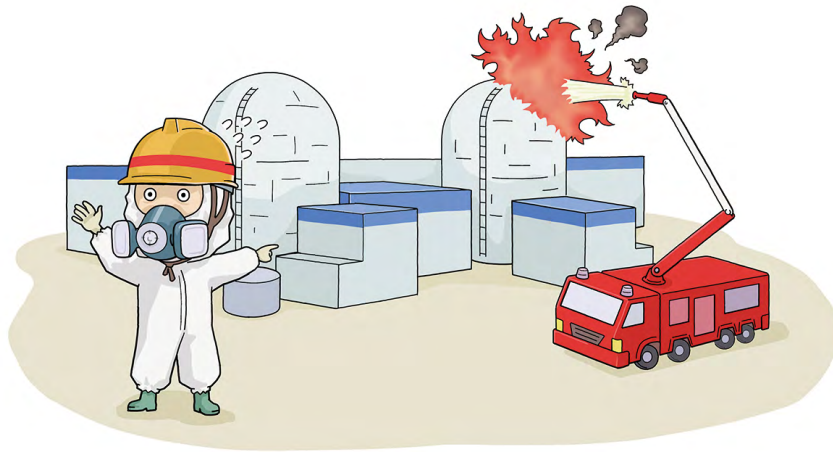
chapter

01

## Q. 기본개념 1

## 원자력 사고란 무엇인가요?

원자력 사고란 원자력시설이나 원자력을 이용하는 과정에서 발생하는 사고로서, 시설 내부로 국한되는 사고에서부터 외부로 방사능이 누출되어 사람들이 방사선에 피폭되는 사고까지 다양합니다.



## Q. 기본개념 2

## 얼마나 안전해야 충분히 안전한가요?

우리가 생활하면서 필요한 모든 물건은 에너지를 사용하여 만들 수 있고, 에너지 원에는 석탄, 석유, 가스, 수력, 원자력, 신재생에너지 등이 있는데 에너지를 생산하기 위해 탄광에서만 매년 약 4,000명이 사망합니다. 신재생에너지인 풍력과 태양광의 경우도 예외일 수 없습니다. 결국 에너지의 혜택을 누리기 위해서 위험을 감수해야 한다는 의미입니다.

세계보건기구(WHO) 보고에 의하면 자동차, 기차 등의 교통사고로도 매년 100만 명 이상이 사망합니다.

그래서, 미국과 영국 등에서는 원자력발전소 주변 16km 반경 이내에서 원전사고의 위험성이 자동차사고, 화재사고 등 각종 사고로 발생하는 사망 위험의 천분의 일(0.1%)에 해당하는 값, 즉 연간  $5 \times 10^{-7}$ 명 보다 적어야 한다는 안전 목표치를 설정하고 원전의 건설, 운영허가를 위한 의사결정에 중요 기준으로 사용하고 있습니다.



## 자세히 알아봅시다

2012년 2월 고리 1호기는 정기점검 과정에서 외부전력 공급 시 바로 작동해야 할 비상 디젤 발전기가 고장이 나서 12분 동안 정전돼 냉각수의 온도가 22도 상승했습니다.

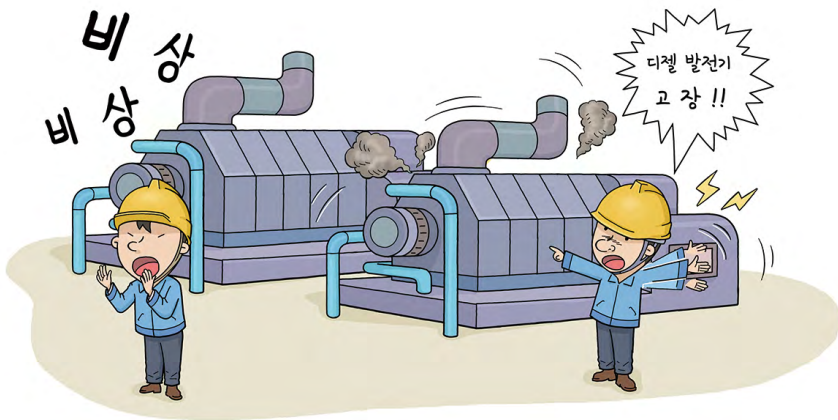
두 개 외부선로 중 한 선로가 곧 복구되어 사고로 진행되기 전에 상황이 종료된 사고였지만 이 사고에서 예비 전력인 비상발전기가 고장 난 것을 알지 못하고 여분의 장치 없이 외부에

서 공급되는 전기 공급만으로 핵연료 이송작업을 계속 수행한 것입니다. 이 사건으로 이미 큰 쇠신이 있었고 동시에 비상발전기 계통의 기계적 안전성이 크게 보강되었습니다.

이 사고가 충분히 안전하게 통제 가능했을까요?

우리나라에서 운전중인 25기의 원전은 유사시 충분히 제어가 가능하다고 생각합니다. 원전의 사고예방은 100% 예방할 수는 없지만, 인적 실수나 기계적 고장, 전기적 고장 등으로 인해 사고가 발생한다고 하더라도 국내 원전의 경우 기술적으로 충분히 통제될 수 있다고 평가하고 있습니다.

고리1호기에서 보면 12분 만에 그 외부 선로가 복구되지 않았더라도 다른 하나의 외부선로가 준비되어 있었고, 또 하나의 추가 안전장치인 대체교류발전기가 인접호기에 예비되어 있었습니다.



### Q. 기본개념 3

## 원전 안전이 왜 중요한가요?

1986년 4월에 구소련의 체르노빌 원자력발전소에서 발생한 화재에 의한 방사능 누출 사고는 현재까지 사상 최악의 원자로 사고로 화재 진화에 동원된 소방수 31명이 사망했고, 203명이 급성 방사선 장애로 입원하였으며, 발전소로부터 반경 30km 이내의 주민 13만 5천 명이 피난했습니다. 또한 방출된 방사성 물질은 국경을 넘어 인접한 유럽 국가들까지 날아가 넓은 범위에 방사능 오염을 일으켰습니다.

또한 2011년 3월 일본 후쿠시마 원자력발전소에서는 강도 9.0 지진에 이어 발생한 높이 15m 수준에 이르는 초대형 쓰나미로 인해 후쿠시마 제1원전 1, 2, 3, 4호기가 바닷물에 의해 침수되어 모든 교류전원이 단절되었고, 열 제거 기능과 관련된 거의 모든 설비들도 심하게 훼손되어 제 기능을 수행할 수 없었습니다. 결국, 냉각 기능이 상실되어 핵연료가 녹아 내리고 원자로건물에서 수소폭발이 발생하였으며 원자로건물의 손상으로 많은 양의 방사성물질이 외부 환경으로 누출되어 주변 지역의 토양과 바다가 방사능에 오염되었고 많은 주민들이 대피하는 사회적 위기를 초래하였습니다.

이처럼 체르노빌과 후쿠시마 사고에서 보듯이 원자력발전소에서 중대사고로 인한 경제적, 사회적, 심리적 피해 및 주위 환경에 대한 영향은 상당합니다. 따라서 이러한 피해를 예방하기 위해서는 체계적인 관리 및 규제를 통해 원전 안전성을 가능한 수준까지 높이는 게 중요합니다.

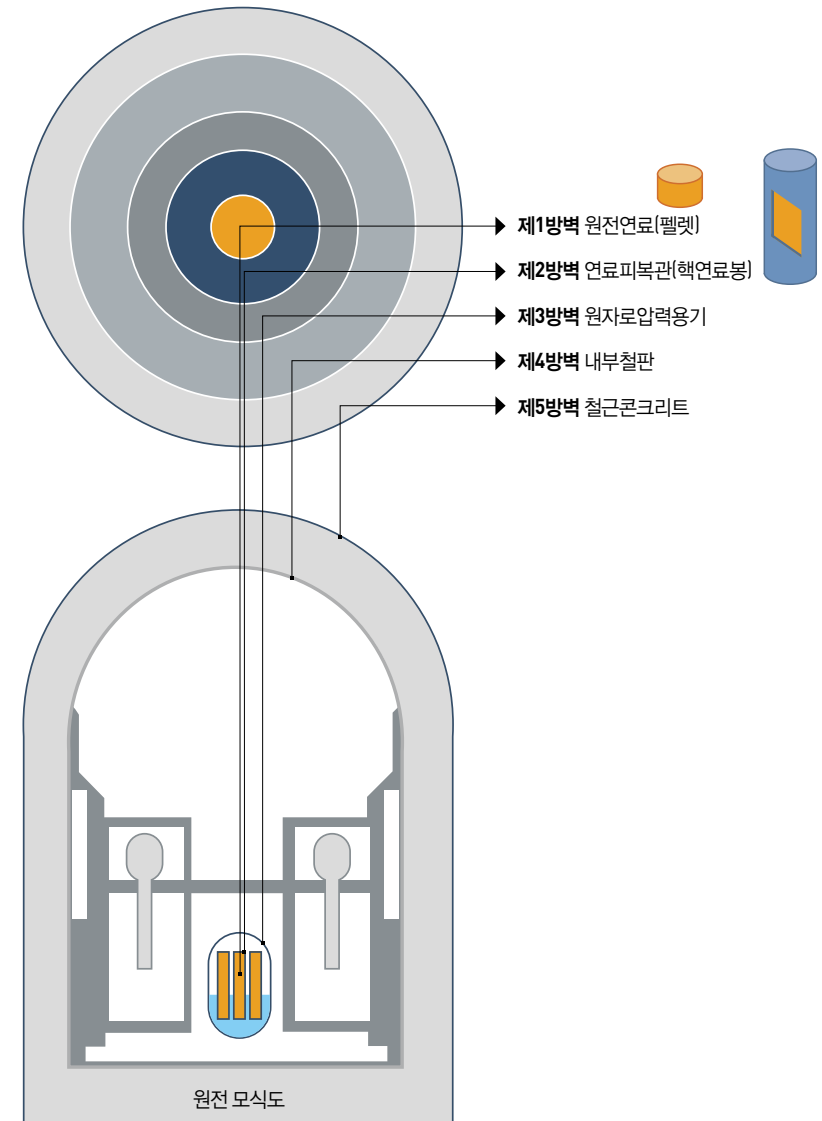
## Q. 원전 안전관리 1

## 우리나라 원전은 안전한가요?

국내 원자력발전소는 심층방어의 개념으로 설계되어 있습니다. 원전의 설계에는 오차가 존재하고, 설비는 작동하지 않거나 오작동을 할 가능성이 있고, 운전원은 실수를 하기 마련이라는 가정하에 원전의 비정상적인 이상 상태 발생 방지를 위해 여유 있는 안전설계를 하고 있으며, 인적 오류와 고장에 대비해 다중 설비를 갖추고 있습니다. 또한 원자력발전소에서 비정상적인 이상 상태가 발생하게 되면 원자로보호설비가 자동으로 감지하고 정지하게 되며, 중대사고가 발생하게 되면 안전계통설비가 사고의 진행을 완화시키고 방사성 물질이 외부로 누출되는 것을 방지할 수 있도록 다양한 설비들이 갖추어져 있습니다.

이러한 심층방어의 핵심은 다중방호로서, 다중방호란 여러 겹의 방호벽을 설치하여 방사성 물질이 외부로 누출되는 것을 막고자 하는 것입니다. 국내 원전은 연료 펠릿, 피복관, 원자로 용기, 원자로건물 내부 철판, 원자로건물 외벽 등 총 5중 방호벽을 갖추고 있습니다.

또한 국내 원전은 다중성, 다양성, 독립성의 기본적인 설계 특성을 가지고 사고 예방을 위한 각종 안전 설비를 갖추고 있습니다. 이 외에도 고장시 안전작동개념, 연동장치, 피동개념 등을 설계단계에서부터 고려하여 안전성을 확보하고 있습니다.





## Q. 원전 안전관리 2

## 우리나라 원전의 안전규제는 누가 관리하나요?

우리나라에서 원자력 안전규제를 담당하는 기관은 원자력안전위원회(<http://www.nssc.go.kr/>)입니다. 원자력안전위원회는 2011년 제정된 ‘원자력안전위원회의 설치 및 운영에 관한 법률’에 따라 세워진 독립적 행정 기구입니다. 원자력과 방사선 안전관리 및 핵안보에 관한 중요한 결정은 원자력안전위원회에서 맡고 있지요. 그리고 산하 전문기관으로 한국원자력안전기술원(KINS)(<http://www.kins.re.kr/>)과 한국원자력통제기술원(KINAC)(<http://www.kinac.re.kr/>)을 두고 있습니다.

원자력안전위원회는 원자력과 방사선의 위험으로부터 국민과 환경을 보호하려는 목적으로 설립되었습니다. 원자력발전소를 비롯한 원자력시설의 안전관리, 그리고 7,300 여개에 이르는 방사성동위원소 이용업체와 생활주변방사선의 안전관리를 맡고 있어요. 또 방사선비상이 발생할 경우를 대비하여 방재대책을 마련하고, 원자력 관련시설을 테러 등의 외부 위협으로부터 보호하며, 핵안보에 관련된 여러 가지 일들을 하고 있지요.

## Q. 원전 안전관리 3

## 원자력 안전관련 법령에는 무엇이 있고 어디에서 볼 수 있나요?

우리나라의 원자력안전 관련 법령에는 원자력안전법, 원자력시설 등의 방호 및 방사능방재대책법, 생활주변방사선 안전관리법 등 여러 가지가 있어요. 이 중 원자력의 안전한 이용과 안전규제에 관한 대표적인 법이 원자력안전법입니다.

또한 원자력안전위원회에서는 산하기관인 한국원자력안전기술원을 통하여 원자력안전에 관한 법령을 통합하여 쉽고 편리하게 찾아 볼 수 있는 ‘원자력안전법령정보시스템(SCALE)’(<http://scale.kins.re.kr/>)을 운영하고 있습니다. 원자력안전법, 생활주변방사선 안전관리법을 비롯한 각 법령의 전문을 볼 수 있으며, 각각의 법령을 체계에 따라 법-시행령-시행규칙-고시로 분류하여 이해하기 쉽게 제공합니다. 또 법령의 제·개정 정보 및 별표, 서식 등도 통합적으로 제공하고 있지요.

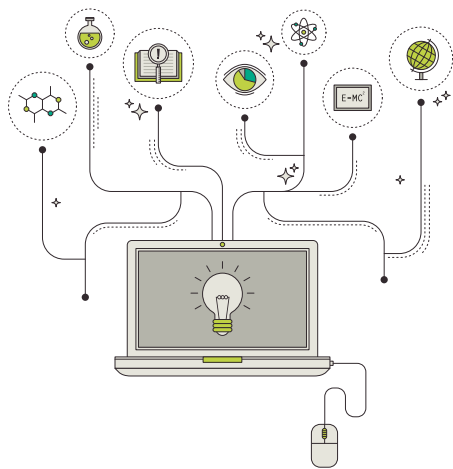
만약 ‘정기검사’에 관하여 어떤 법령이 있는지, 또 각 법령이 어떤 내용을 규정하고 있는지 궁금하다면, 검색어를 통해 여러 법령의 내용을 한꺼번에 비교하여 볼 수도 있습니다.

## Q. 원전 안전관리 4

원자력 건설,  
운전에 관한 공개정보는 어디에서 볼 수 있나요?

원자력발전소의 건설 및 운전 현황은 우리나라의 유일한 원전 사업자인 한국수력 원자력 홈페이지(<http://www.khnp.co.kr>)에서 찾아볼 수 있습니다. 또한 원전의 안전에 관한 정보는 규제기관인 원자력안전위원회 홈페이지(<http://www.nssc.go.kr>)와 산하기관인 한국원자력안전기술원 (<http://www.kins.re.kr>) 및 한국원자력통제기술원(<http://www.kinac.re.kr>) 홈페이지를 이용하면 편리합니다.

이 외에도 원자력안전위원회에서 운영 중인 원자력안전정보공개센터 홈페이지 (<http://nsic.nssc.go.kr/>) 등을 이용하면, 일반 국민이 쉽게 이해할 수 있도록 제공되는 안전정보와 각종 원자력 및 방사선 심·검사 자료를 확인할 수 있습니다.



## Q. 원전 안전관리 5

외국의 원자력 규제기관은  
무엇이고 어떤 일을 하고 있나요?

**미국 원자력규제위원회(USNRC)** 미국은 2016년 현재 약 100기의 가동원전을 운영 중인 세계 최대의 원전운영국입니다. 미국의 원자력안전규제를 담당하는 ‘원자력 규제위원회’는 대통령 직속 기관으로 1975년부터 활동을 시작했지요. 원전 이용의 역사가 길고 경험이 풍부하여, 세계 각국의 원자력안전규제 정책과 방법에도 주요한 영향을 미치고 있어요. 우리나라는 미국 원자력규제위원회와 직원 교환 프로그램 등 다양한 방식으로 협력하고있습니다.

**프랑스원자력안전규제기관(ASN)** 프랑스는 미국에 이어 가장 많은 58개의 가동원전을 보유하고, 전력의 80% 정도를 원자력 발전으로 생산하는 나라입니다. 프랑스의 원자력안전규제를 맡고 있는 원자력안전규제청(ASN)은 2006년부터 독립 행정기관으로 활동을 시작했어요. 주요 업무는 크게 규제, 인허가, 감독, 정보공개, 비상대응으로 나눌 수 있지요.

**캐나다원자력안전위원회(CNSC)** 19개 가동원전을 운영 중인 캐나다는 총리실 직속으로 원자력안전규제를 전담하는 원자력안전위원회를 두고 있어요. 원자력발전소의 운영허가를 5년마다 재심사하여 갱신하고, 모든 의사 결정에서 주민 공청회의 의견을 중요하게 반영하는 캐나다의 안전규제 정책은 우리나라 안전규제에도 여러 가지 시사점을 줍니다.

## Q. 원전 안전관리 6

원전이 안전하다는데  
왜 독일을 비롯한 다른 나라들은 원전을 폐쇄하나요?

후쿠시마 사고 발생 초기, 원자력발전소를 운영하는 여러 나라에서는 원전 가동의 점진적 중단이나 신규 원전 건설 취소를 결정하였습니다.

일례로 독일의 경우 2022년까지 가동 중인 모든 원자력발전소의 가동을 중단하고 신재생에너지를 중심으로 에너지 구조를 개편한다고 발표한 바 있습니다.

하지만 후쿠시마 사고에 대한 평가와 조치가 진행되고 있고, 이 사고는 원자력발전소의 근본적인 결함이 아니라 쓰나미에 대한 대비 부족이 사고의 주된 원인으로 판명되면서 대부분의 국가에서는 이 사고 직후와는 달리 원전 축소 정책을 재고하고 있습니다. 비록 원전의 안전성에 대한 우려 때문에 사고 이전보다 원전의 신규 건설 추진이 줄어들기는 하였지만, 영국, 핀란드, 중국 등 많은 나라에서 신규 원전 건설을 추진하고 있습니다.

## Q. 원전 안전관리 7

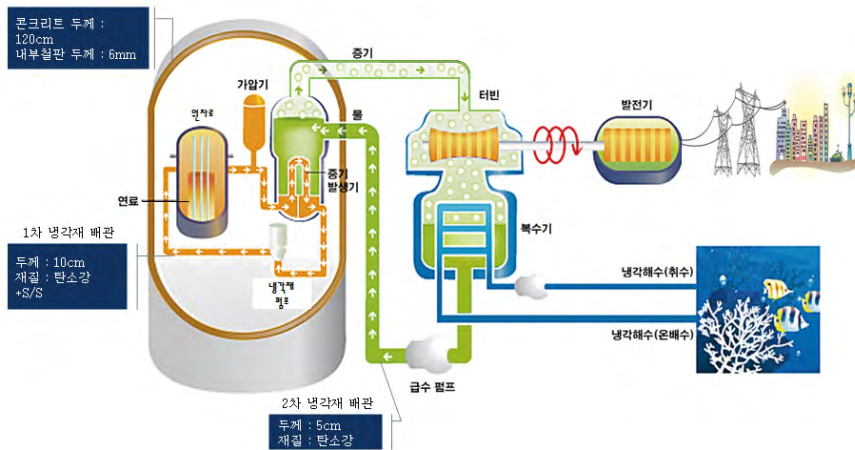
아무리 낮은 확률이라고 해도  
큰 사고가 한번 나면 우리나라처럼 면적이 작은 나라는  
전 국토가 오염되어 사람이 살지 못하게 되는 것 아닌가요?



큰 사고가 발생하게 되면 많은 피해가 발생하는 것은 사실입니다. 하지만, 이를 미연에 방지하기 위해 설계단계에서부터 심층방어, 안전 설비의 다중성, 독립성, 다양성 등 많은 안전 개념을 도입하여 사고 방지 및 완화에 많은 노력을 기울이고 있는 상황입니다.

## Q. 원자로 설계의 안전성 1

### 원자로 계통이란 무엇인가요?



‘계통’은 영어의 ‘시스템’을 표현한 말이에요. ‘시스템’은 어떤 것에 관련된 여러 가지 것들이 각각 하는 일과 특성에 맞게 배열된 것입니다. 예를 들면 ‘컴퓨터 시스템’은 모니터, 키보드, 마우스, 프린터 등을 합친 것들이지요.

원자력발전소의 계통은 크게 1차 계통과 2차 계통으로 구분됩니다.

1차 계통’은 영어로 ‘프라이머리(primary) 시스템’입니다. ‘primary’는 ‘주된, 주요한, 기본적인’이라는 뜻이지요.

원자력발전소의 1차 계통은 가장 ‘중요하고 기본적인’ 것들로 구성되어 있어요. 원자력발전소에서 가장 중요한 기기는 원자로이며, 여기에서 원자력 에너지를 생산하고 원자로 냉각재펌프는 이를 증기발생기로 전달하는 임무를 수행합니다. 1차 계통에 속하는 기기와 설비는 격납건물 안에 있습니다.

2차 계통은 터빈 발전기에 관련된 기기와 설비입니다. 2차 계통의 중요 임무는 발전기를 통해 전기를 생산하는 일, 그리고 증기를 물로 되돌리는 일입니다. 2차 계통은 전기 생산에 필요한 터빈과 발전기, 그리고 증기를 물로 되돌리는 복수기가 중심이 되고, 여기에 물을 증기발생기로 공급하는 각종 설비들이 더해집니다. 증기는 터빈을 돌린 뒤 복수기에서 물로 바뀌어 2차 계통 내부를 순환합니다.

## Q. 원자로 설계의 안전성 2

격납건물은 어떻게 만들어져 있고 어떤 기능을 하나요?



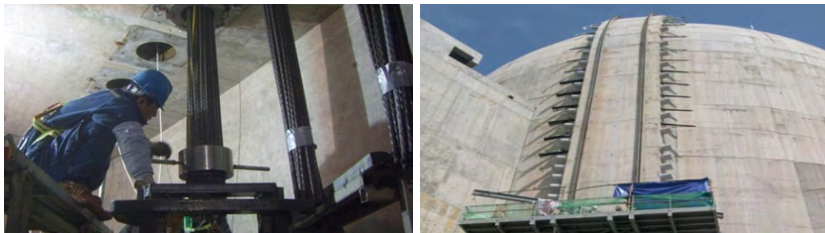
내진임반

6mm철판

120cm철근콘크리트

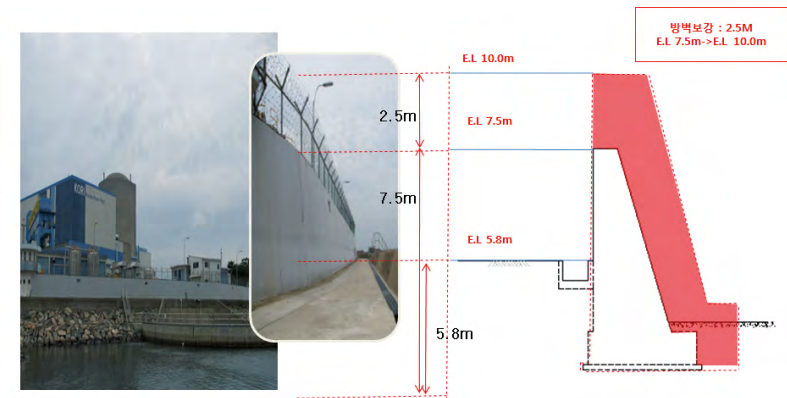
‘원자력발전소’하면 떠오르는 둥근 돔 형태의 외벽이 바로 원자로 건물이지요. 원자로건물은 다른 말로 ‘격납건물’이라고도 합니다. ‘격납’이란 ‘막다, 가두다[格]’, ‘넣어 둠[納]’이란 뜻이에요. 즉 ‘충격으로부터 보호해 주고, 외부로의 누출은 막아 준다’는 뜻이지요. 원자로건물 내벽에는 강철판으로 된 격납용기가 들어 있습니다.

우리나라 원자력발전소의 경우, 중대사고를 대비하여 다중의 방호체계를 갖추고 있어요. 이 중에서 격납건물은 최종 방호벽에 해당합니다. 격납건물은 안전에 매우 중요한 시설로, 내부의 압력이나 온도가 급격히 올라갈 때, 외부에서 심한 충격을 받았을 때에도 쉽게 파손되지 않아야 합니다. 따라서 건설허가 심사 때 두께와 강도, 재료 등을 정밀히 검토하게 됩니다.



## Q. 원자로 설계의 안전성 3

원전 앞에 방파제가 있는 까닭은 무엇인가요?



원자력발전소에 존재하는 복수기는 터빈을 돌리고 남은 증기를 다시 물로 바꾸어 증기발생기로 공급하는 역할을 수행하는데, 이때 복수기에서 증기를 냉각하여 물로 바꾸기 위해 필요한 차가운 냉각수로 바닷물을 사용합니다.

이 바닷물은 발전소 외부에 연결된 해수 펌프를 통해 복수기를 통과한 후 다시 바다로 방출되는데, 이 해수펌프가 제대로 작동하려면 수위 변동이 적어야 합니다. 따라서 펌프가 설치된 바다에 큰 방파제를 설치하여 해수면을 잔잔하게 유지시켜 주는 역할을 합니다.

또한 방파제는 해안 방벽과 함께 해일로부터 원자력발전소를 보호하는 구조물의 역할도 하는데, 후쿠시마 원전 사고 이후 초대형 지진해일 발생 시 원전의 안전을 지키기 위해 이러한 방파제를 한층 높이도록 하였습니다.

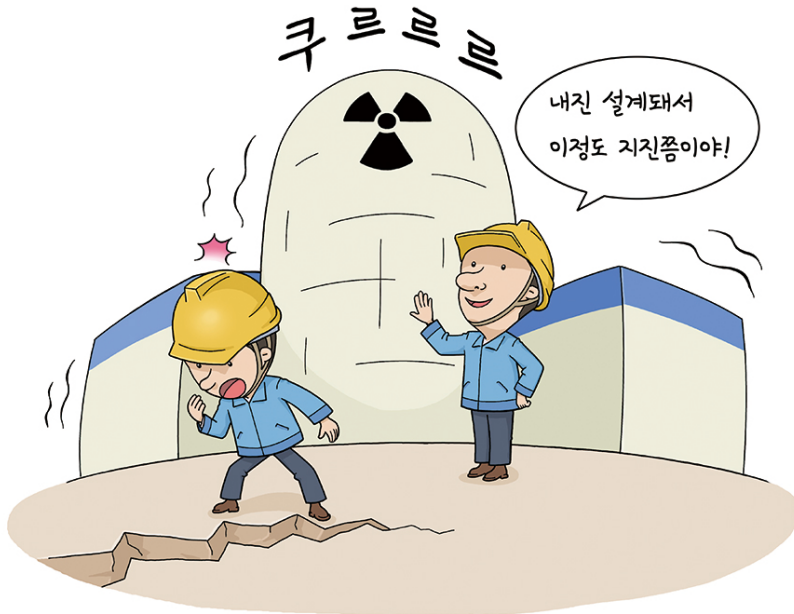


## Q. 원자로 설계의 안전성 4

원전 내진설계가 무엇이고 어떤 기능을 하나요?

‘내진설계’는 원자력발전소뿐만 아니라 건물을 설계할 때 흔히 쓰이는 말입니다. ‘내(耐, 견딜 내)’, ‘진(震, 지진 진)’, 즉 지진에도 건물이나 기계가 무너지거나 피해를 입지 않고 견딜 수 있도록 설계하는 것을 말합니다.

지구 표면은 여러 개의 판으로 나뉘어 있는데, 이 판들이 움직이면서 발생하는 에너지가 지구 표면에 영향을 주는 것이 지진입니다.



## Q. 원자로 설계의 안전성 5

원전 운전의 안전여유도는 무엇이고 어떻게 그것을 설정하나요?

자동차를 운전할 때에는 앞 차량과 일정한 안전거리를 유지해야 합니다. 원자력발전소를 운전할 때에도 마찬가지로 일정한 여유가 필요하지요. 이를 ‘운전여유도’라고 합니다. 운전여유도 이내에서 발전소가 운전된다면, 사고가 발생하더라도 발전소는 정지되고 안전하게 유지될 것입니다. 원자력발전소의 건설, 설계, 운전 등 모든 분야에 운전여유도가 적용되고 있습니다.

운전여유도는 원자력발전소를 설계할 때에 설정하는 것으로, 사고나 안전뿐만 아니라 기술적 여유도까지 충분히 반영하여 설계해야 합니다.

운전여유도를 설정하더라도 만약의 경우, 안전성에 위협을 줄 가능성이 있으므로 이를 사전에 막기 위하여 ‘운전제한조건’을 설정합니다. 만약 원자력발전소의 상태가 운전제한조건에 해당될 경우, 운영자는 원자로를 정지시키거나 또는 더욱 안전한 상태를 만들기 위한 조치를 실시합니다.

## Q. 원자로 설계의 안전성 6

## 심층방어란 무엇이고 어떻게 이루어지나요?

원자력발전소의 안전조치를 한 마디로 말하면 ‘심층방어’라고 정리할 수 있습니다. ‘심층(深깊을 심, 層여러 층)’, 즉 여러 겹의 깊이있는 안전장치를 말하지요. 심층방어는 발전소 내부의 고장이나 사고, 그리고 외부의 충격이나 테러 같은 고의적 파괴 행위가 벌어질 경우에도 발전소가 안전하게 지켜질 수 있도록 구성됩니다.

심층방어는 크게 5단계 원칙과 목표로 이루어집니다. 원자력안전위원회에서는 원자력시설의 심층방어를 위해 다음과 같은 목표를 설정하고, 사업자가 다양한 안전장치를 마련하도록 하고 있습니다.

**1단계** 심각한 사고가 일어날 가능성을 최소화할 것

**2단계** 문제 발생시 초기에 탐지하고 최대한 신속하게 대응할 것

**3단계** 사고 발생시 그 범위가 설계기준 이내로 국한되게 할 것

**4단계** 심각한 사고가 발생할 경우 그 피해가 원자력시설을 넘어서지 않도록 할 것

**5단계** 중대사고 발생시 피해를 최소화하기 위해 외부에서 비상조치를 시행할 것

## Q. 원자로 설계의 안전성 7

원전 설계의 원칙에 있는  
다중성, 독립성, 다양성이란 무엇인가요?

원자력시설의 안전을 확보하기 위한 설비나 기기, 계통에는 다중성, 독립성, 다양성의 원칙이 적용되고 있습니다. 이들 원칙은 원자력시설에서 만약의 사고가 발생할 경우라도 그 영향과 피해를 최소화하기 위한 것입니다.

**다중성** 중요한 안전 기능을 가진 모든 설비는 2개 이상 중복해서 설치하게 되어 있어요. 이것을 ‘다중성’의 원칙이라 합니다. 안전설비를 중복해서 설치하는 까닭은, 만약 한 설비가 제대로 작동하지 못하더라도 다른 설비에 의해 피해를 최소화하고 안전성을 유지하기 위해서입니다. 예를 들어, 원자력발전소의 경우 안전에 중요한 펌프, 밸브, 전원 등은 하나만 두지 않고 반드시 복수로 설치하여야 합니다.

**독립성** 중요한 설비가 한곳에 몰려 있지 않도록 분산 설치하며, 각각이 독립적으로 작동할 수 있도록 하는 원칙입니다. 원자력발전소의 경우, 각 호기별로 중요한 안전설비가 독립적으로 설치되도록 하고 있어요. 예를 들면 비상디젤발전기나 수소 제거 설비등은 한 곳이 아니라 매 호기마다 설치되어야 하는 것이 원칙입니다.

**다양성** 설계의 다양성이란 중요한 설비들의 작동 원리를 다양하게 구성하는 것입니다. 그래야 한 가지 원인에 의해 모든 설비가 중단되지않도록 막을 수 있습니다. 예를 들면, 원자력발전소에 전력 공급이 중단되는 사고가 발생할 경우를 대비하여 모터 구동 펌프 대신 터빈의 힘으로 돌아가는 터빈 구동 펌프 등도 함께 마련되는 것이 다양성의 원칙입니다.

## Q. 원자력시설 사고 1

### 체르노빌 vs 후쿠시마, TMI 사고는 어떻게 다른가요?

체르노빌 사고는 격납건물이 없는 상태에서 원자로에 화재가 발생하여 방사성 물질이 대량 누출되었습니다. 사고 발생 후 시멘트와 콘크리트를 쏟아 부어 수습을 시도했으나 결국 심각한 방사능 피해를 발생시켰습니다.

후쿠시마 원전사고는 격납건물이 지나치게 작고 두께도 얇아 내부에서 발생한 수소 폭발을 감당하지 못하고 훼손되었습니다. 방사성 물질이 대기와 바다로 대량 유출되어 큰 피해를 일으켰습니다.

반면 TMI 원전사고는 1979년 3월 28일, 냉각수 공급이 중단되면서 내부에서 원자로 노심이 녹아내려 원자로가 훼손되어 발생했습니다. 그러나 두께 1미터에 달하는 격납건물이 훼손되지 않아 방사성 물질은 외부환경으로 누출되지 않았습니다.

## Q. 원자력시설 사고 2

### 원자력발전소의 사고와 고장은 어떻게 다른가요?

원자력시설의 정상적인 가동에 문제가 될 만한 사건이 발생할 경우, 이러한 문제 상황을 ‘사건’이라고 합니다.

국제원자력기구(IAEA)에서 수립, 운영 중인 ‘국제 원자력사고·고장 등급(INES)’에 의하면, 시설에 손상을 끼쳤거나, 환경에 방사선 피해를 미칠 수 있는 사건은 ‘사고’, 그렇지 않은 사건은 ‘고장’으로 구분합니다.



#### 자세히 알아봅시다

원자력시설에서 발생한 사고나 고장의 심각성이나 위험성을 나타내는 지표로, ‘INES (International Nuclear Event Scale)’라고 합니다.

우리나라는 1993년부터 국내 원자력발전소에서 발생하는 사고·고장에 대해 INES를 적용하여 등급을 평가하고, 그 결과를 공개하고 있습니다.

원자력 사고·고장 등급은 총 7등급으로 구분됩니다. 사고와 고장은 주변 지역에 미치는 방사선 영향 및 노심의 손상 여부로 구분되며, 그 영향과 손상 정도에 따라 등급이 나뉘게 됩니다. 안전에 중요하지 않은 사건은 등급 이하(0등급)의 경미한 고장이며, 1등급에서 3등급까지는 ‘고장’, 4등급부터 7등급까지는 ‘사고’로 분류됩니다.



### Q. 원자력시설 사고 3

원자로는 어떤 경우에 정지되고 어떤 조치가 취해지나요?

핵연료를 교체하거나 정비가 필요한 경우 원자력발전소의 운전원이 원자로를 정지시킵니다. 만약 사고나 고장이 발생했을 경우, 원자로가 수동 또는 자동으로 정지되지요. 원자력발전소는 사고나 고장시 원자로의 핵분열을 반드시 정지시킬 수 있도록 하는 안전장치를 설치해 놓고 있습니다. 이러한 안전장치의 작동, 즉 원자로 노심에 제어봉을 삽입하여 핵분열 연쇄반응을 안전하게 중지시키는 것을 ‘원자로 안전정지’라고 합니다.

또한 원자로가 계획된 상태가 아닌 조건에서 정지되면 원자력안전위원회에서는 보고를 받는 즉시 전문가를 파견하여 현장 조사를 실시합니다. 문제의 원인 분석 및 문제 발생시 발전소 측의 조치와 대응, 그리고 재발방지대책 등이 주요 조사 대상이지요.

만약 이 과정에서 원자력사업자의 법령 위반, 규정 위반 사항이 발생하거나, 운영 기술지침서 위반 사항 등이 발견될 경우 원자력안전위원회는 강력한 법적 제재 조치를 취할 수 있습니다.

### Q. 원자력시설 사고 4

원전의 절대안전은 없다는데  
설계기준사고와 중대사고의 차이는 무엇인가요?

원자력발전소 등의 시설은 사고와 고장이 발생하더라도 안전을 유지할 수 있도록, 설계 단계에서부터 안전장치를 마련하여야 합니다. 또 발생 가능성이 매우 낮은 사고에 대해서도 안전을 관리하고 사고를 신속히 수습할 수 있도록 구조물, 계통 및 기기를 설계하지요. 이와 같은 설계를 위하여 상정된 일련의 가상 사고를 ‘설계기준사고’라고 합니다. 원자력시설의 운전 과정에서 발생할 수 있는 최악의 상황을 설계기준사고로 가정, 각종 안전장치를 마련하는 것이지요.

한편 중대사고는 원자력발전소의 설계기준사고를 초과하여, 원자로 노심의 손상을 일으키는 사고를 말합니다. 안전설계에서 고려하고 있는 수단으로는 적절한 제어가 불가능하여 노심에 중대한 손상을 끼치는 사건이지요. 미국의 스리마일 아일랜드(TMI) 사고와 구 소련(현재의 우크라이나)의 체르노빌 사고, 그리고 일본 후쿠시마 사고가 중대사고에 해당합니다.

중대사고는 ‘노심용융사고’와 동의어로 사용되기도 합니다. ‘용융(溶融)’이란 ‘녹아 내린다’는 뜻이에요. 원자로 노심에 발생한 열을 식히지 못하면 핵연료가 녹아내리기 때문에 ‘용융사고’라는 것이지요.

## Q. 원자력시설 사고 5

### 원전의 안전성에 대한 종합적인 평가방법은 어떤 것들이 있나요?

원자력안전위원회는 정기적인 심·검사 외에도 원자력발전소의 안전성을 종합적으로 평가하고 있어요. 이 중 우리나라에서는 주기적 안전성평가(PSR)를 실시하고 있습니다.

주기적 안전성평가 제도는 국제원자력기구(IAEA)의 권장으로 우리나라에서 2000년부터 실시되었습니다. 말 그대로 ‘주기적’으로 안전성을 평가하는 일이지요. 원자력안전법 제23조 및 시행령 36조에 의하면, 주기적 안전성평가는 운영허가를 받은 날부터 10년마다 가동중인 원전 시설 전체를 대상으로 실시하여야 합니다.

사업자는 1년~1년 6개월 정도에 걸쳐 전반적인 안전성을 점검한 뒤, 평가보고서를 작성해 원자력안전위원회로부터 심사를 받게 되지요.

주기적 안전성평가는 원자로시설의 물리적 상태, 안전성 분석, 기기검증, 안전 성능, 경년열화(원자력발전소의 장기간 운전에 따른 기기와 구조물 등의 손상), 방사선 환경영향, 인적 요소, 조직 및 행정 등 11개 분야에서 종합적으로 이루어집니다.

원자력안전위원회는 2012년부터 주기적 안전성평가 항목을 14개 분야로 세분화하고, 20년 이상 가동되는 원전에 대해서는 주요 기기의 성능 감시 기준을 한층 강화하고 있습니다.

## Q. 종합 1

### 원전의 스트레스 테스트는 무엇인가요?

‘스트레스 테스트’는 원자력발전소가 극한 상황에서도 안전할 수 있는지 확인하기 위한 테스트입니다. 여기서 말하는 ‘극한 상황’이란, 원자력발전소를 설계할 때 가정하는 문제 상황보다 훨씬 심각한 상황입니다.

원전 스트레스 테스트에서 가정하는 ‘극한 상황’이란 다음과 같습니다.

첫째는 원전의 설계기준을 초과하는 지진이나 해일이 발생할 경우입니다.

둘째는 이의 영향으로 전원이 상실되거나, 안전계통 고장 등으로 발전소가 최악의 상황에 처했을 경우이지요. 즉 노심 및 핵연료 저장조 냉각기능이 상실되거나, 격납건물이 파손될 가능성이 발생할 경우입니다.

스트레스 테스트는 이처럼 극단적인 상황이 발생할 경우 원자력발전소의 대응 능력과 안전성 유지 방법을 테스트 합니다.

## Q. 종합 2

장기가동 원전의 안전은 어떻게 관리하나요?



장기가동 원전의 경우 주기적 안전성 평가(Periodic Safety Review)를 통해 안전 관리를 합니다.

주기적 안전성 평가란 국제원자력기구(IAEA)가 원전보유국들에게 권장하고 있는 제도로써, 가동 원전에 대해 10년을 주기로 설계, 기기기능 등의 이상 유

무를 대대적으로 점검하는 제도를 말합니다. 가동중인 원전에 대해 설계변경, 운전경험, 기술발전 등의 누적 영향을 고려, 수명기간 동안 안전수준 유지를 보증하기 위한 제도로 주요 지침은 다음과 같습니다.

1. 평가주기: 10년
2. 평가범위: 11개의 안전인자에 대해 평가
3. 평가주체: 원전운영자가 수행, 규제기관이 심사
4. 평가결과: 계속 운전허용 여부에 대한 판단근거로 활용

우리나라의 경우 국제원자력기구의 권장으로 2000년부터 실시하였습니다. 원자력안전법 제23조 및 시행령 36조에 따라서 주기적 안전성 평가는 운영허가를 받은 날부터 10년마다 가동 중인 원전시설 전체를 대상으로 실시해야 합니다. 사업자는 1년 ~ 1년 6개월 정도에 걸쳐 전반적인 안전성을 점검한 뒤, 평가보고서를 작성해 원자력안전위원회로부터 심사를 받게 됩니다.

## Q. 종합 3

국내 원전 부지별 발전 호기(원자로 기준)  
수 현황은 어떻게 되나요?  
하나의 부지에 원전이 다수로 있으면 더 위험한가요?

국내 원전 부지는 지역별로 크게 4개(고리, 월성, 한빛, 한울)로 구분할 수 있으며, 2017년 5월 현재 고리 부지에는 총 7기(즉 7개의 원자로 건물)가 가동 중이며, 월성, 한빛, 한울 부지는 각각 6기가 가동 중에 있습니다. 현재 건설 중인 호기를 포함하면 고리 부지는 총 10기, 한울 부지는 총 8기가 존재하게 될 것입니다.

원자력발전소의 건설 및 운영으로 인한 위험성은 단순히 부지 내 호기 수가 얼마나 많은지에 의해 좌우되는 것이 아니라, 각 호기가 어떤 원자로 유형에 해당하는지, 그리고 원자로 건물을 포함한 구조물 및 각종 안전설비들이 외부 자연재해를 포함한 여러 종류의 사고에 얼마나 잘 대처할 수 있는지에 따라 달라집니다. 이러한 관점에서 볼 때, 국내에서 가동 중인 원전들은 원자로 노심이 손상되는 중대사고가 발생했던 미국 쓰리마일섬(Three Mile Island) 원전, 체르노빌 원전, 후쿠시마 원전에 비해 훨씬 안전한 원전이며, 최근에 건설되었거나 건설 중인 원전들은 안전성이 이전보다 더욱 강화된 유형(APR-1400)의 원전입니다.

또한, 국내 원전은 안전에 중요한 설비들을 호기 간에 공유하지 않고 각 호기 별로 독립적으로 설치되어 있어 한 호기내 특정 설비의 고장이 다른 호기의 안전 설비 작동에 영향을 미치지 않습니다. 더군다나 후쿠시마 원전사고 발생 이후 고리 원전 해안방벽 증축, 이동형 발전차량 설치 등 다수 호기 동시 사고를 예방하거나 발생 시 대처하기 위한 여러 가지 개선 방안들이 확충되어 있습니다.

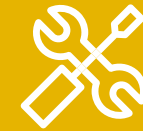


## Q. 종합4

세계적으로 다수 호기 사고가 발생한 사례는 어떤 것이 있고, 국내 원전에서 다수 호기 사고가 발생할 가능성은 얼마나 되나요?

국내외를 통틀어 원전에서 원자로 노심이 손상되는 수준의 다수 호기 사고가 발생한 것은 2011년 3월 일본에서 발생한 후쿠시마 원전사고가 유일합니다. 다만, 원전에 설치된 안전 설비들이 제대로 작동하여 원자로 노심이 손상되지 않은 수준의 다수 호기 사고들은 다수 발생한 바 있으며, 국내에서도 태풍 또는 폭설로 인해 동일 부지 내 2기 이상의 원전에서 동시에 소외전원이 상실된 사고가 3건 있었습니다.

따라서 국내 원전에서도 다수 호기가 동시에 영향 받는 사건이 발생할 가능성은 낮다고 할 수 없으나, 이러한 사건이 발생하더라도 이를 대비해 설계되어 있는 안전 설비들이 모두 한꺼번에 작동되지 않아 다수 호기에서 노심이 손상될 확률은 매우 낮으며, 또한 다수 호기에서 노심 손상이 발생하더라도 120cm 두께의 철근 콘크리트로 되어 있는 원자로 격납건물이 파손되어 방사성 물질이 외부로 누출될 확률은 이보다 훨씬 낮습니다.



원자력

발전이 필요한가요?

원 자 력 문 고 답 하 기 2 0 1 7

chapter

02

## Q. 부지 소요

우리나라는 국토가 협소합니다.

협소한 국토에서 식량생산과, 산업시설, 주거시설을 모두 만족시켜야 하므로 전력시설의 국토소요가 최소화되어야 할 필요가 있습니다. 이런 관점에서 원자력발전소와 화석연료 발전소, 수력발전소, 태양광 발전소, 풍력발전소를 비교할 때 부지 측면에서 어떤 발전소가 유리한지 살펴보겠습니다.

(단위 발전량당 부지면적)

원자력발전소를 방문하면 아파트 단지보다 적은 부지에서 엄청난 전기를 생산하는 것에 놀라게 됩니다. 가장 적은 면적을 사용하면서 가장 많은 에너지를 낸다는 점에서 원자력에너지는 부지사용효율이 높습니다. 다음은 1000MW의 전기를 생산하는데 필요한 부지면적에 대한 자료입니다.

에너지 기술	1000MW를 생산하는 필요한 평방마일	1000MW를 생산하는 필요한 평수	대전광역시 면적과 비교 (%)
풍 력 [1]	260-360	2억평 - 2억8천 평	125-175
태양광 [2]	45-75	3500만평 - 5800만평	21.8- 36.2
원자력 [3]	1.3	100만평	0.6%

[1] Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States, U.S. Department of Energy, March 2015, p 102

2] Land-Use Requirements for Solar Power Plant in United States, U.S. Department of Energy, National Renewable Technology Laboratory, NREL/TP-6A20-56290, June 2013,

[3] 미국 59개 원자력발전소 부지 평균(통상 6개 이상의 다수호기가 존재하여 이를 환산): Land Requirements for Carbon-free Technology, 2015, NEI(Nuclear Energy Institute)

발전량: kWh/m2

종류 내용	원자력	석탄 화력	태양광	풍력	목재
발전량	12,500	9,600	24	21	2

1000MW의 전기를 생산하는데 필요한 부지는 원자력의 경우 100만평이 필요합니다. 그러나 태양광에너지의 경우 이보다 35배에서 58배 정도로 매우 넓은 면적이 필요합니다. 즉 3,500만평에서 5,800만평이 필요합니다. 풍력의 경우는 200배에서 277배에 해당하여 2억평에서 2억 7천 7백만평의 부지를 사용해야 합니다.

대전광역시의 넓이가 대략 1억 6천평 정도가 되므로, 만일 전체를 태양광으로 덮는다면 발생하는 태양광에너지는 원전 3개에서 5개 사이에서 생산하는 전기량과 같습니다. 그런데 실제로는 비가 오거나 흐린 날이 있어 전기를 생산하지 못하거나 지형이 굴곡져서 음지가 발생하게 되므로 원하는 만큼 전기를 생산하지 못하게 됩니다. 만약 남쪽을 향한 산에 설치하는 경우 북향의 경사면은 사용할 수 없게 되어 실제 원하는 양의 전기를 생산하기 위해서는 훨씬 더 넓은 면적이 있어야 가능합니다.

세계 10위의 수출에 근거한 경제력을 유지하기 위해 우리는 세계 10위에 해당하는 에너지를 소비하고 있습니다. 좁은 국토에서 이를 감당하기 위해서는 원자력발전이 면적당 에너지생산 집적도가 가장 높아 큰 장점을 갖는다는 것을 알 수 있습니다.

## Q. 발전단가

우리나라는 다른 나라에 비해 저렴한 전기요금때문에  
생산 경쟁 우위를 갖고 있으며, 이것이 국가 경제 발전에 매우  
중요한 요소입니다. 이런 관점에서 원자력 발전은  
다른 에너지원에 비해 전기요금 인하능력을 갖고 있나요?

에너지원의 발전단가는 각기 다릅니다. 우리나라의 에너지원 별 발전단가는 조금  
씩 달라져 왔습니다. 다음 표에는 2008년에서 최근 2015년의 에너지원 별 발전 단  
가의 변화를 나타냈습니다.

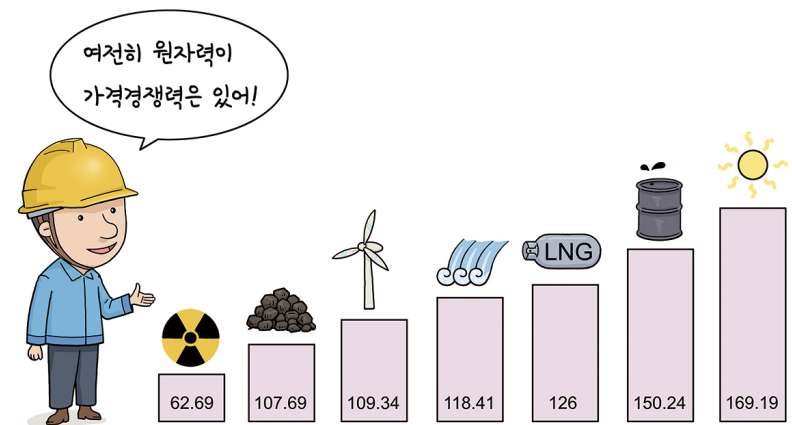
단위: 원/kWh

년도	원자력	석탄	풍력	LNG	유류	태양광	수력
2008	39.02	51.151	133.76	168.83	191.97	677.38	134.30
2012	39.61	66.34	100.98	210.11	253.04	599.3	180.95
2015	62.69	107.69	109.34	126	150.24	169.19	118.41

이 표에서 두드러진 특징은 원자력/석탄/태양광 입니다. 원자력은 2012년까지  
39.02원/kWh로 안정적이며 최저가격이었으나 2015년에 62.69원/kWh로 거의 두  
배나 상승했습니다. 원자력 발전단가는 원자로의 해체비용, 사용후핵연료 처분비  
용, 중·저준위 폐기물 관리 비용까지 모두 포함된 가격인데 최근 이 비용이 상승  
한 결과입니다. 이 점을 고려해도 여전히 원자력은 가장 우수한 가격경쟁력을 갖  
고 있습니다.

석탄의 경우도 60원대의 유지되던 것이 107.69원으로 상승한 것은 온실가스 저감,  
미세먼지 저감등을 위한 비용과 탄소 세 등이 반영되는 과정에 생긴 상승입니다.  
반면 태양광은 700원/kWh 대에서 200원/kWh로 급격히 낮아졌는데, 이것은 태양  
광에 부여한 일종의 인센티브를 제거하여 태양광 에너지 산업이 보조나 후원 없이  
든든한 기간에너지로 성장하도록 시장에서 경쟁 가능한 가격을 부여한 까닭입니  
다. 유류나 LNG는 그 사이에 매우 큰 폭의 가격 변동을 보이고 있어 발전단가 면  
에서는 불안요인이 매우 큽니다. 가격 면에서 풍력 발전단가가 최근 석탄화력에 근  
접하고 있지만 적합한 부지 선정과 주민수용성의 문제가 최근 대두되고 있습니다.

에너지원을 선택하는 데에 있어 경제적으로 값싼 에너지를 선호하는 것은 당연하지  
만, 그 외에 환경보호나 안전, 주민수용성 등 다른 요소도 고려해야 할 것입니다.





## Q. 전력 안정성

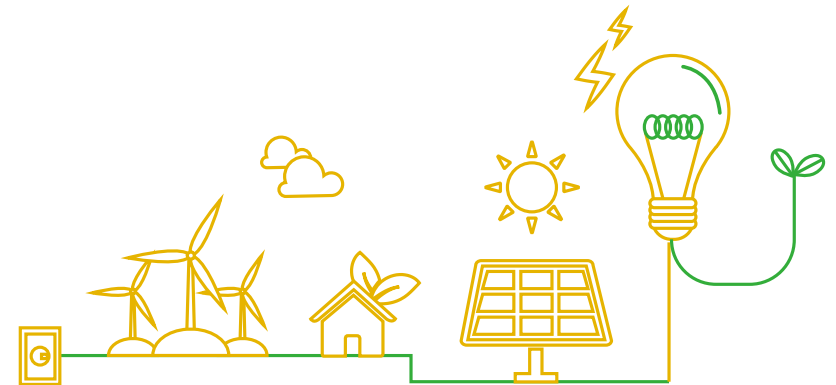
우리나라의 전자, 자동차를 비롯한 핵심 산업 생산품은  
안정적인 전력 공급을 요구합니다.  
환경의 변화에 크게 좌우되지 않는 안정적인 전기 공급의  
측면에서 원자력은 신재생에너지와 비교하여  
얼마나 안정성을 갖고 있을까요?

화력발전소나 원자력발전소는 에너지원이 다를 뿐이고 전기를 생산하는 에너지 시스템은 물과 증기를 이용하는 방식(대표적으로 Rankine cycle을 사용)에서 유사하며, 이 전기 발생 시스템은 연료가 공급되는 한 설계된 대로 에너지를 생산해주는 시스템입니다. 이 시스템에서 생산되는 전력은 매우 안정적으로, 그 전류와 전압 그리고 교류의 변화 빈도 등에 있어 변화가 매우 적습니다. 이러한 전류의 안정성은 이를 이용해 제품을 생산하는 기계들의 작동을 안정화시켜 정밀 생산을 가능하게 합니다.

반면 태양광, 풍력 등 대체에너지의 경우, 에너지 생산량이 시시각각으로 달라집니다. 태양광의 경우 아침부터 저녁까지 하루에도 햇빛의 각도가 다르며 사계절에 따라 다릅니다. 구름이 끼면 에너지를 생산할 수 없으며 우리나라의 경우 장마철에는 매우 긴 기간 에너지를 생산할 수 없습니다. 풍력의 경우는 일부 지역을 제외하면 풍향의 변화가 심하고 돌풍성 바람으로 전기 생산이 고르지 않습니다.

이러한 불안정한 전기에너지를 안정화 하기 위해, 생산된 불안정한 전기를 에너지 저장 시스템(ESS)에 저장한 다음 이를 사회와 산업이 요구하는 정도의 전류와 전압, 교류의 변화 빈도를 만드는 기구를 통과시켜 전력망에 연결해야 합니다. 그러나 만일 이것이 충분치 않거나 여러개의 대체에너지원에서 잠시 잠시 공급을 하는 과정에 공급과 휴지의 흔들림이 발생하게 되는데, 이것은 고스란히 전력망의 안정화를 해치는 결과를 줍니다. 따라서 안정적인 전력망을 구축하기 위해서는 기존의 대용량 발전소에서 보여주는 규모의 전력을 안정적으로 계절이나, 날씨에 상관없이 공급하는 것이 중요합니다.

물속에 잠긴 핵연료의 핵분열은 날씨나 바람에 영향을 받지 않고 일어나는 물리적 현상이므로, 가장 안정적인 전력의 구성 요소가 될 것입니다. 원자력발전소도 핵연료 교체와 정비 등을 위해 1년에 1회씩 멈추는 기간이 있습니다만 이것은 계획에 의해 이루어지므로 전력망 입장에서는 충분히 대비가 가능합니다.





## Q. 에너지 자원의 한계

우리나라도 석유나 석탄과 마찬가지로 지하에 매장되어 있는  
자원이므로 많이 사용하면 고갈되지 않나요?

석유파동 이후 다시 떠오른 셰일가스의 경우, 석유자원이 거의 없는 중국도 매장량이 풍부하고, 미국 캐나다 등도 풍부합니다. 그러나 우리나라에는 매장량이 없습니다. 원자력 에너지 연료인 우라늄은 러시아나 오스트리아에 풍부합니다. 그러나 이것도 무한정 있는 것이 아닙니다. 현재의 방식으로 소모하면 대략 60년이 지나면 없어질 것으로 예상됩니다. 이처럼 에너지 자원은 지역적으로 편중되어 있고, 동시에 매장량이 한정되어 있어 언젠가 고갈되고 마는 것입니다.

하지만 고속증식기술을 사용하면 우리나라 자원의 이용 효율이 높아져 60배 이상 이용할 수 있습니다. 이 경우 금세기 안에 고갈될 것이 향후 3,600년까지 지탱해 줄 가능성을 갖고 있습니다. 화석 연료가 모두 소모된 이후 인류는 태양으로부터 얻는 태양에너지, 수력, 풍력 그리고 아직 개발이 요원한 인공 태양인 핵융합발전소 이외에 에너지원이 없습니다. 따라서 에너지 자원의 안정성을 위해 당분간 원자력은 꼭 필요한 에너지원입니다.

단위: 년

에너지원	석탄	석유	LNG	셰일가스	우라늄	태양	바람
고갈시점	112	54	63	100	60*	∞	∞

\*고속증식기술 사용시 3,600년

## Q. 폐기물의 양과 상태

발전소에서는 연료의 연소과정에서 폐기물이 발생합니다.  
폐기물의 부피 측면에서 원자력발전소와 화력발전소 중  
어느 발전소가 유리합니까?

신재생에너지인 태양광, 풍력은 에너지 발생 과정에 폐기물이 발생되지 않습니다. 원자력은 사용후 핵연료가 18개월에 한번씩 나옵니다. 화력 발전의 경우 석탄, 석유, LNG 등을 연소하는 과정에서 생성되는 반응물이 대기 중으로 방출됩니다. 기체 반응물에는 온실가스인 이산화탄소도 다량 포함되어 있습니다. 뿐만 아니라 고체 폐기물인 석탄재도 다량 발생합니다.

1,000MWe의 전기를 생산하는 표준형 원자력발전소에서는 연간 27톤의 사용후 핵연료가 발생하지만, 동일한 전기 출력을 갖는 석탄 화력은 석탄재만 40만톤이 발생합니다. 원자력발전소의 폐기물은 시간이 지날수록 방사능원소가 붕괴하여 열과 방사능이 줄어듭니다. 반면 화력발전소의 폐기물은 시간이 지나도 독성이 변하지 않습니다.

반면 태양열은 패널 제작 과정에서 폐기물이 발생합니다. 태양광 패널을 만들기 위해 실리콘 웨이퍼 처리 공정에 사용되는 독극물이 유출되어 공장이 폐쇄되고, 환경유출의 우려를 하는 경우도 많기 때문에 에너지 생산 전 영역에서 발생하는 폐기물에 대한 처리를 고려해야 합니다.

1년 방출 폐기물량 기준

	발생량	상태
화력발전 (550MW 석탄화력발전소)	9.5 톤 1,500,000 톤	고체 폐기물 (중금속) 기체 폐기물 (이산화탄소)
원자력발전(1000MW 급)	1,810 드럼(1 드럼 당 200리터)	중·저준위 고체 폐기물

## Q. 온실가스 배출 정도

원자력에너지와 대비하여  
타 에너지원의 온실가스 발생량은 어느 정도인가요?

인류는 산업혁명 이후 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료를 사용하면서 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 비롯한 온실가스를 대량 배출하게 되었습니다. 이산화탄소는 신재생 에너지나 원자력발전소에서도 발생합니다. 화력발전소의 경우는 석탄, 석유등을 연소시키는 과정에서 이산화탄소가 생겨나지만, 원자력발전소의 경우는 광산에서 우라늄을 채취하고 이것을 가공하여 핵연료를 만드는 과정에서 그리고 원자력발전소를 건설하는 과정에서 발생합니다.

국제원자력기구(IAEA)에서 추정한 에너지원 별 이산화탄소 배출량은 다음과 같습니다.

발전원	CO <sub>2</sub> 배출량 (g/kWh)	발전원	CO <sub>2</sub> 배출량 (g/kWh)
석탄	991	태양광	57
석유	782	풍력	14
천연가스	549	원자력	10
바이오매스	70	수력	8

표에서와 같이 온실가스 배출이 가장 작은 에너지원은 수력입니다. 원자력은 태양광이나 풍력보다 이산화탄소 배출량이 작습니다. 반면 석탄에너지는 원자력에 비해 100배 정도 많이 배출합니다.

## Q. 미세먼지 배출 정도

원자력발전소와 화석연료 발전소에서  
발생되는 미세먼지 양은 어느 정도입니까?

미세먼지와 스모그는 호흡기 질환을 유발하는 등 인체 유해성이 매우 높습니다. 원자력발전소를 비롯한 태양광, 수력, 풍력은 발전과정에서 배기가스배출이 없어 미세먼지가 거의 배출되지 않습니다.

반면 석탄 화력발전소의 경우 연소과정에서 '1차 초미세 먼지'라고 부르는 다량의 가스를 배출합니다. 2011년 기준으로 PM2.5 (2.5 μm) 의 매우 적은 미세먼지는 유연탄에서 2.8톤, 무연탄에서 0.03톤 발생했으며, 이보다 입자 크기가 큰 PM10 (10 μm) 미세먼지는 유연탄에서 3.6톤, 무연탄에서 0.03톤이 발생했습니다. 최근 중국에서 날아오는 미세먼지에 대한 위험을 많이 접하고 있으나, 국내에서 화력발전소나 자동차 배기가스에서 나오는 미세먼지가 무시할 수 없음을 지적하는 언론 보도가 많습니다.

미세먼지는 앞서 설명한 '1차 초미세 먼지'뿐만 아니라, 공기 중에 배출된 질소산화물(NOx)과 황산화물(SOx) 등이 화학반응을 일으켜 '2차 초미세 먼지'를 생성한다는 것은 주목할 만합니다.

화력발전소에서 배출되는 배기가스에는 1차 초미세 먼지뿐만 아니라, 질소산화물, 이산화황, 매연, 먼지, 수은, 비소 등의 유해성분이 있습니다. 최근의 화력발전소들은 이를 제거 또는 저감하기 위한 장치들을 설치하고 있습니다. 다음은 국내 석탄화력 오염물질 배출 현황입니다.

단위: 톤/년

구분		SOx	NOx	TSP*	PM10	PM2.5
국내전체		417,645	1,075,207	182,744	119,980	76,287
석탄 화력	배출량	64,645	95,272	3,284	3,218	2,590
	기여율(%)	15.48	8.86	1.80	2.68	3.40

### Q. 삼중수소 포함한 인공 및 자연 방사선 문제

원자력발전소 주변지역의 삼중수소 문제가 많이 지적됩니다.  
원자력발전소와 화력발전소를 비교할 때  
어느 발전소가 더 많은 삼중수소를 방출합니까?

원자로에서는 핵반응의 결과로 인공 방사성물질이 생성됩니다. 그러나 화력발전소에서 방사성물질이 나온다는 것은 잘 알려져 있지 않습니다. 화력발전소는 원자핵 반응이 없으나 화력발전소의 연료로 사용되는 석탄, 석유, LNG 등을 구성하는 탄소, 수소 등에 포함된 방사성 동위원소가 대기 중으로 나오기 때문에 화력발전소에서는 자연 방사성물질이 방출됩니다.

NCRP의 보고서에 의하면, 미국의 경우 154개의 화력발전소에서 400만톤의 석탄을 연소시킬 경우 97.3126 TBq의 방사능이 나와서 화력발전소 1기당 0.6319 TBq의 방사능이 나옵니다.

NCRP가 1000MWe 급의 발전소에 대해 비교한 자료는 다음과 같습니다.

구분	방사능 방출 (man·Sv/yr)*	비율
석탄화력 1000MWe	4.9 man·Sv/yr	100
원자력 1000MWe	1.1 man·Sv/yr	1

\*1 man·Sv/yr은 1000명이 연간 1 mSv의 방사선량을 받는 것을 의미함

※ 흉부X선 측정의 평균적으로 0.01 mSv/회

삼중수소(H-3)와 탄소방사성동위원소(C-14)는 자연에도 존재하고, 원자력 발전에서 핵반응의 결과 인공적으로도 만들어집니다. 미국의 환경부는 발전소에서 50마일(80km) 안에 사는 사람들의 피폭방사선량을 석탄화력의 경우는 0.3 μSv로 원자력발전의 경우 0.09 μSv에 비해 매우 관대하게 설정하고 있습니다. 이는 석탄발전소의 규제치를 원자력발전소 수준으로 낮출 경우 발전소를 가동할 수 없으므로, 현실을 반영한 경우입니다.

한편, 유엔방사선영향위원회(UNSCEAR) 2016년 보고서에 따르면, 발전소 운전으로 인해 주변 주민들이 받는 방사선량이 man·Sv/(GW a) 단위로 오래된 석탄화력의 경우는 0.8, 최신 석탄화력의 경우는 0.1 그리고 원자력발전의 경우는 0.2 정도이며, 주변 주민들의 총 집단 선량으로는 man·Sv 단위로 오래된 석탄화력의 경우는 780, 최신 석탄화력의 경우는 60 그리고 원자력발전의 경우는 68이라고 보고하고 있습니다.

결론적으로 정상 운전 시 원자력발전소는 화력발전소에 비해 방사능 물질을 주변 환경에 훨씬 적게 배출합니다.

## Q. 에너지 안보

석유파동과 금융위기의 경험을 통해 에너지는 국가안보와 직결됨을 경험했습니다. 극단적으로 에너지자원 공급이 원활하지 않은 상황에서 충격을 완화할 수 있는 에너지원은 무엇입니까?

에너지는 오늘날 식량과 마찬가지로 필요한 양만큼 공급이 되지 않을 경우, 국가나 개인의 생존에 위협이 됨으로 안보의 입장에서 매우 중요한 항목입니다.

6.25 전쟁이 발발하기 직전 북한에서 남한으로 공급하던 전력을 끊은 것은 대표적인 에너지 안보 위협의 사례입니다. 1970년대 석유 파동 때에도 우리나라가 2개월을 버틸 석유만을 비축하고 있었기에, 국가적 위기는 심각했습니다. 우리나라는 남북이 대치하고 있고 에너지 자원이 거의 없어 에너지의 섬과 같습니다.

현재 우리나라는 자급자족 에너지인 수력 6471MW (6.6%)와 폐기물 소각, 태양광 및 풍력 등의 대체에너지 5,649 MW(5.9%)를 보유하고 있으며 이는 설비 용량으로는 약 12.5%에 해당합니다. 그러나 수력은 가뭄으로 인한 저수율 부족으로, 대체에너지는 풍량, 일조량 부족에 따른 낮은 가동률로 총 발전량의 4.4%만 감당하고 있습니다. 설비율 대비 발전량을 비교하면 가동 효율은 30%정도를 보여줍니다. (2015년 한국전력 전력통계속보)

반면 원자력은 18개월 주기로 핵연료를 장전하면 18개월을 가동하므로, 에너지 수입이 금지되어도 18개월동안 전기를 안정적으로 생산해 줍니다. 더욱이 적은 공간에 많은 연료를 저장할 수 있습니다.

우리는 석탄, 유류 LNG 등이 정치적 이유로 가격이 폭등하는 것을 경험하였습니다. 이런 상황에서 안정적으로 전기를 공급하는 것은 원자력임을 알 수 있어, 원자력은 에너지 안보의 지킴이입니다.

## Q. 전력 수요

전력수요 증가가 정체되어도 원전을 지속해야 하는 이유는 무엇인가?

원자력은 대체에너지에 비해 발전단가 면에서 유리할 뿐 아니라 좁은 국토를 고려할 때 작은 면적에서 에너지를 생산하여 면적대비 높은 효율을 갖고 있습니다. 더욱이 연료의 양이 적어 비축과 가공이 용이합니다. 따라서 안정적으로 장기간 에너지 수입에 위협이 생겨도 장기간 안정적으로 에너지를 생산할 수 있습니다.

대지 효율 면에서는 다소 떨어지지만 화력 에너지의 경우도 국가의 에너지 소비의 중요한 축으로 자리하고 있습니다. 그러나 화력에너지는 지구 온난화의 원인이 되는 온실 가스와 미세먼지 등 인체에 유해한 물질을 배출하고 있으며 기후변화 방지를 위한 파리기후협약 이행을 위해서는 청정 화력으로 개선하거나 줄여나가야 합니다.

반면 좁은 국토의 특성상 수력은 한계에 도달해 있고, 태양광은 많은 부지 소요와 평시 사용을 위한 대용량 전력 저장 시스템(ESS)의 개발 및 설치가 필요합니다. 아직 배터리 기술이 태양광으로 산업용 전기를 감당할 안정적인 ESS를 지원하지 못하므로 태양광과 풍력의 확대는 기술적, 경제적, 주민 수용성에서 어려움이 있습니다.



# 신재생에너지로 충분하지 않나요?

원 자 력 문 고 답 하 기 2 0 1 7

chapter

# 03

## Q. 공급잠재량

우리나라는 일조량이 풍부하고 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 바람도 풍부하기 때문에 신재생에너지로 전력공급이 충분히 가능하지 않나요?

이론적으로 개발 가능한 잠재량은 충분하지만 경제적 타당성을 확보할 수 있는 잠재량은 제한적일 수밖에 없습니다.

자연에너지를 이용하는 풍력과 태양광 발전은 에너지 밀도가 낮고 전력을 생산할 수 있는 시간도 짧아 우리가 필요로 하는 전력을 생산하기 위해서는 매우 넓은 면 태양광으로 전기를 생산하는 경우 원자력과 비교하여 최소 100배 이상의 면적이 필요합니다.



## 자세히 알아봅시다

현재의 기술력으로 동일한 전기를 생산하려면 신재생에너지는 기존의 에너지 자원에 비해 대규모의 부지가 필요합니다.

- 1,000 MWe 기준으로 원전 부지는 30만㎡이 필요한 반면 태양광 발전은 3,300만㎡(원전의 100배) 풍력은 1억 6500만㎡(원전의 500배)의 부지가 필요한 것으로 알려져 있습니다.
  - 만약 가동중인 원전의 운영허가를 연장하지 않고, 신규원전을 건설하지 않는다면, 2029년에는 계획대비 약 20GW의 원전 발전량이 감소하게 되는데 이를 풍력과 태양광으로 대체할 경우 서울시 면적의 3배정도가 필요합니다.
- (가정: 풍력(이용률 22%)과 태양광(이용률 15%)을 50:50으로 설치)

## Q. 신재생에너지 환경영향

사고 위험이 있고 방사성폐기물이 발생하는 원전에 비해 신재생에너지는 자연에너지를 사용하기 때문에 부작용이 없지 않나요?

흔히들 신재생에너지를 자연에 존재하는 에너지인 바람이나 햇빛 등을 이용하기 때문에 깨끗하고 부작용이 없을 것이라고 생각합니다.

하지만 우리나라에도 풍력과 태양광과 같은 신재생에너지 시설이 늘어남에 따라 이와 관련된 갈등도 점점 늘어나고 있습니다.

풍력발전의 경우 날개가 회전하는 과정에서 발생하는 소음이 주변 주민의 건강과 생활에 악영향을 미치고 회전하는 날개에 부딪혀 철새나 박쥐가 죽기도 합니다. 또한 발전단지 조성과정에서 산림 훼손이 발생하기도 하여 많은 민원이 발생합니다. 대규모 풍력단지의 경우 조성 면적이 매우 넓기 때문에 이 경우 부작용이 더욱 커지고 있습니다. 실제로 2016년도에는 국내 언론에 전남 풍력발전의 부작용을 호소하는 지역주민에 관한 기사가 실리기도 했습니다.

태양광 발전의 경우에도 발전단지 조성과정에서의 산림 및 농지 훼손, 반사와 빛가림으로 인한 피해 등으로 지역의 반대가 점차 증가하고 있는 실정입니다.

물론 사업 계획단계부터 환경 및 지역사회에 미치는 영향을 충분히 고려하여 발전단지를 조성한다면 이러한 부작용을 줄일 수는 있겠지만 좁은 국토에서 에너지밀도가 낮은 신재생에너지를 대규모로 조성하는 경우 이러한 부작용을 없애기는 어려운 일이라 하겠습니다.

## Q. 신재생에너지 경제성 1

신재생에너지 기술개발이 빠르게 이루어지고 있어 경제성이 가까운 시일 내에 원전과 같은 수준에 도달할 것이므로 한번 지으면 수 십 년간 폐기가 어려운 원전 건설은 자제해야 하는 것 아닌가요?

풍력발전, 태양광 발전과 같은 신재생에너지 발전 기술이 빠르게 발전하고 있는 것은 사실입니다. 그러나 전력을 생산하는 비용은 원전과 비교하여 여전히 높은 수준이고 앞으로도 상당 기간 보조금과 같은 외부의 지원이 없는 상황에서는 경제성이 비슷한 수준에 도달하는 것이 한계가 있을 것입니다.

우리나라는 발전소에서 만든 전기를 전력거래소라는 도매시장에서 생산에 들어간 비용을 고려하여 전력원에 따라 다른 가격으로 전기를 구매합니다. 2015년도의 도매시장에서의 전력 구매가격을 살펴보면 풍력과 태양광이 원자력과 비교하여 여전히 비싼 것을 알 수 있습니다.

단위: 원/kWh

년도	원자력	석탄	풍력	LNG	유류	태양광	수력
2015	62.69	107.69	109.34	126	150.24	169.19	118.41

이 비용이 얼마나 더 내려갈 수 있는지는 알 수 없지만 단기간에 원전과 비교할 만큼 내려가지는 않을 것이라는게 일반적인 예상입니다. 또한 햇빛과 바람의 유무에 따라 발전량이 급변하는 신재생에너지는 전력공급의 불안정성 등의 숨겨진 비용을 요구합니다. 현재 기술로 원전없이 신재생에너지만으로 전력을 공급하는 것은 전기요금 상승으로 이어져 산업과 가계에 부정적인 영향을 미칠 수 있습니다.

## Q. 신재생에너지 경제성 2

원전 사고비용, 사용후핵연료 등 방사성폐기물 관리비용 등을 모두 고려하면 원전의 비용이 신재생에너지보다 오히려 비싸다는데요?

가장 최근에 수립된 제7차 전력수급기본계획에서는 원전뿐 아니라 석탄, LNG복합화력 등 주요 발전원에 대해 사고위험비용, 폐기물 관리비용, 환경오염 비용 등의 외부비용을 모두 포함하여 비용을 산정하였습니다.

산정 결과, 원자력의 외부비용은 10.73원/kWh으로 발전비용과 외부비용을 모두 포함해도 이용률에 따라 52.05원~56.51원/kWh로 나타났습니다. 이러한 결과는 이러한 모든 비용을 포함해도 원전이 다른 발전에 비해 경제적이며 특히 kWh당 외부비용을 제외한 직접비용이 100원을 상회하는 신재생발전에 비해서는 크게 차이가 나는 것입니다.

또한 이러한 차이는 신재생에너지의 외부비용(부지 조성 및 운영에 따른 환경 파괴, 전력송전망 공급의 불안정성 증가로 인한 정전위험 증가 등)을 추가하다면 더욱 커질 것입니다.



## 자세히 알아봅시다

제7차 전력수급계획에 따르면 사회적 비용을 포함하는 경우에도 원자력발전과 석탄발전 그리고 LNG복합발전의 발전비용 순위는 바뀌지 않음을 알 수 있습니다. 원자력발전의 경우 사고위험대응비용, 정책비용, 송전비용 등의 외부비용을 포함하여도 석탄발전보다 이용률



에 따라 33원/kWh~35원/kWh 더 낮습니다. 외부비용을 포함한 LNG복합발전의 발전비용은 원자력발전보다 93원/kWh~95원/kWh 더 높은 것으로 나타나 원자력발전이 가장 경제적인 것으로 나타났습니다.

(단위: 원/kWh)

비용구분		이용률[%]	원자력발전	유연탄발전	LNG 복합발전
직접 비용		80	45.78	56.56	135.20
		90	41.32	54.20	133.66
외부 비용	대기오염비용		0.00	9.43	2.38
	송전비용		4.25	3.78	2.95
	정책비용		0.76	0.65	0.33
	사고위험대응비용		5.72	0.00	0.00
	이산화탄소 비용 (25,000원/t-CO <sub>2</sub> )		0.00	18.97	8.18
총비용(사회적 비용)		80	56.51	89.39	149.04
		90	52.05	87.03	147.50
원자력발전과의 비용 차이		80	-	32.88	92.53
		90	-	34.98	95.45

자료원 : 원자력발전의 경제적 사회적 비용을 고려한 적정 전원믹스 연구, 에너지경제연구원, 2015 [자료 재편집]

## Q. 독일과 일본 사례

주요국은 신재생에너지를 확대하고 있는데  
우리나라는 소극적이라는데요. 독일은 원전을 포기하고  
신재생에너지만으로도 잘 살고 있지 않는가?  
또 일본도 원전이 가동 중단되었지만 정전 문제가 없었다는데요.

유럽의 일부 국가를 제외한 대부분의 국가들은 신재생에너지를 확대하는 동시에 원전을 유지 혹은 확대하는 정책을 추진하고 있습니다. 이는 신재생에너지만으로는 에너지 안보, 경제성, 온실가스 감축 등을 달성할 수 없기 때문입니다.

독일도 원전 정지후 신재생에너지를 지원하기 위해 kWh당 6.24 유로센트의 추가 비용을 소비자에게 부담시키고 있습니다. 이 결과 독일의 소비자들은 유럽연합 국가 가운데 덴마크 다음으로 비싼 전기 요금을 지불하고 있습니다. 또한 독일의 경우는 전력망이 다른 나라와 연결되어 있어 전기를 사오는 것이 가능하고 신재생에너지의 변동성을 완화할 수 있으며 대규모의 신재생에너지 도입이 용이한 상황입니다.

일본은 후쿠시마 원전사고 이후 특단의 조치로 원전의 가동을 중단하였는데 이는 기존의 유류 화력발전이 존재했기 때문에 단기적으로 대응이 가능했던 특수한 상황입니다. 하지만 일본도 원전 가동 중단에 따라 화석연료 수입이 증가하여 무역수지가 적자로 전환되는 등 어려움을 겪고 있습니다. 이에 일본 정부는 원전 포기 정책을 수정하고 원전 재가동을 추진하고 있습니다.



## Q. 적정 비중

## 원자력과 신재생의 적정 비중은?

한 나라의 적절한 에너지 공급 조합은 기후변화 대응, 에너지 안정 공급과 같은 국가의 정책 목표를 달성하기에 가장 효율적이고 바람직한 수준으로 결정하여야 합니다.

따라서 에너지와 전력 공급원의 적정 비중은 다양한 조건에 따라 달라질 수 있지만 원자력이나 신재생 하나만으로는 에너지안보, 경제성 확보, 안정적 공급, 기후변화 대응 등의 정책 목표 달성이 불가능하다는 것이 일반적인 견해입니다.



## Q. 전기요금 왜곡

우리나라는 경제활동에 사용하는 에너지가 너무 많아 에너지 가격 변동에 취약하고 에너지 가격의 상승이 수출경쟁력에 영향을 크게 미칠 수 있습니다. 원자력으로 인한 값싼 전기의 공급이 에너지 소비구조를 왜곡시키고 경제의 취약성을 높이는 게 아닌가요?

국가간의 전력사용 형태를 비교할 때, 흔히 사용하는 지표가 전력원단위입니다. 에너지원단위는 전체 전력사용량을 인구로 나눈 일인당 전력원단위와 GDP를 전체 전력사용량으로 나눈 GDP원단위가 있습니다.

이러한 수치가 다른 나라와 비교하여 크면, 국민들이나 산업체가 전기를 낭비하고 있다고 해석하곤 합니다. 그러나 이러한 해석은 자칫 우리의 문제를 잘못 이해하게 만들 수 있기 때문에 신중해야 합니다.

일반 국민들이 전기를 낭비하고 있다는 주장이 사실이 되려면 전체전력사용량이 아닌 가정용 전력사용량을 인구로 나누어서 비교해야 합니다. 우리나라의 일인당 가정용 전력소비는 주요 선진국에 비해 절반 수준입니다. 우리나라도 취사, 난방 등에 전기 사용이 늘어나면서 가정용 전기 소비량이 증가할 가능성이 더욱 큼니다.

GDP원단위의 경우도 공장에서의 전력효율이 낮은 것만으로는 설명할 수 없습니다. 왜냐하면 부가가치 당 에너지사용량이 큰 것은 에너지를 과소비해서라기보다는 기술 격차에 따른 낮은 부가가치가 더 큰 원인이 되기 때문입니다. 예를 들어 국내 제철소의 에너지효율은 일본의 신일본제철에 비해 같거나 더욱 높은 수준인데, 에너지 원단위가 더 높습니다. 이는 동일한 에너지를 투입하여 생산된 철강재의

가치가 다르기 때문입니다. 즉, 기술 부족 등 여러 가지 원인으로 고급제품을 만들지 못하는 것이 문제이지 에너지 과소비가 문제는 아닌 것입니다.

따라서 낮은 전기요금이 경제구조를 왜곡한다는 것은 문제의 한 측면만을 바라본 것으로 올바른 주장이 아닙니다.



### Q. 전력소비 정체

최근의 전력 소비가 정체되고 있는데도 정부는 원전을 추가로 건설하기 위해 미래의 전력소비 증가를 너무 크게 전망하고 있지 않은가요? 전력 소비가 늘지 않으면 원전 건설도 필요없는 것 아닌가요?

최근 몇 년간 전력소비가 정체되고 있으나 추세가 변한 것인지는 아직 확실히 알 수 없습니다. 오히려 중장기적인 추세를 예상해보면 사용의 편의성, 전기자동차 등 전기사회로의 전환 등으로 전기 이용 확대가 예상됩니다.

또한 전기 소비가 정체된다하더라도 미세먼지 문제 완화, 온실가스 감축을 위해서는 원자력과 신재생에너지 비중을 높여나가야 합니다.





# 사용후핵연료가 공금해요

---

원 자 력 문 고 답 하 기 2 0 1 7

chapter

04

## Q. 사용후핵연료 1

## 사용후핵연료란 무엇인가요? 그리고 왜 이 문제가 중요한가요?

사용후핵연료란 원자력발전소에 장전되어 일정기간 에너지를 발생시킨 후 원자로 외부로 방출된 연료를 말합니다. 사용후핵연료에서는 여전히 많은 양의 잔열과 물질 손상을 유발할 수 있는 강한 방사선이 나오므로 냉각과 차폐를 해주어야 하고, 방사능 물질이 환경에 위해를 주지 않도록 오랜 기간 동안 철저히 격리시켜야 하므로 사용후핵연료의 관리와 처분은 아주 중요한 문제입니다.



## 자세히 알아봅시다

사용후핵연료가 강한 방사능을 내는 이유와 냉각 필요성

- 불안정한 핵분열 생성물 함유 원자로에 장전된 핵연료에서 우라늄이 핵분열을 일으키면 질량결손에 따른 에너지의 발생과 함께 세슘 137 등 핵분열생성물(Fission Products, FP)이 생깁니다. 이런 핵분열생성물들은 안정한 핵이 되기 위해서 방사성 붕괴를 통해 에너지를 외부로 방출하고 자신은 안정된 핵으로 변환됩니다.
- 방사성 붕괴 과정의 발열 방사성 붕괴란 감마선이나 베타선 같은 고에너지 방사선이 외부로 방출되는 것을 말합니다. 이들 방사선은 주위 물질에 그 에너지를 전달해서 주위 물질에서의 발열을 유발하고 물질 또는 생체 조직의 손상을 초래할 수 있습니다.

- 수조내 저장을 통한 냉각과 격리 그런데 이러한 핵분열생성물에는 수개월 이내의 짧은 반감기를 가지고 방사성 붕괴를 하는 것들도 있으므로 사용후핵연료 방출 초기에는 아주 강한 방사능이 발생하게 되어 수년간은 수조에 넣어 냉각과 차폐를 해주어야 합니다.

사용후핵연료의 장기 특별 관리 필요성

- 초우라늄원소의 생성 우라늄에 중성자가 입사되면 항상 핵분열이 일어나는 것이 아니고 중성자가 우라늄에 흡수되어 우라늄보다 무거운 플루토늄 등 초우라늄원소(TransUranic Elements, TRU)가 만들어 집니다. 플루토늄은 일부 핵분열을 하기도 하지만 중성자를 추가로 흡수하여 아메리슘과 같은 더 무거운 초우라늄원소로 전환되기도 합니다. 이러한 초우라늄원소들은 불안정하여 대개 알파선을 내며 방사성 붕괴를 하는데 반감기가 수천 년 이상으로 매우 깁니다.
- 지층 처분시 지하수로 유출 가능성 현재 가장 유력한 사용후핵연료 처분 방식은 깊은 지층에 묻는 방식인데 오랜 시간 경과 후 지하수가 사용후핵연료에 침투하여 그 때까지 사라지지 않은 초우라늄 원소와 같은 방사성물질들이 지하수를 오염시키고 오염된 물을 사람이 음용할 경우 인체 건강에 위해를 줄 수 있습니다. 우리의 후손에게 큰 지장을 줄 수 있는 이러한 문제 때문에 사용후핵연료는 수백년 이상의 장기간 동안 특별히 잘 관리되어야 합니다.



## Q. 사용후핵연료 2

## 사용후핵연료와 방사성폐기물은 어떻게 다른가요?

방사성폐기물은 방사선을 방출하는 모든 폐기물을 말합니다. 사용후핵연료도 방사선을 방출하므로 방사성폐기물에 속합니다. 그런데 방사성폐기물은 방사능 강도에 따라 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위 폐기물로 구분합니다. 극저준위 방사성폐기물은 일반 매립이 가능하지만 중저준위 폐기물은 경주 방사성폐기물 처분장과 같은 특별 시설에 처분해야 하고 사용후핵연료 같은 고준위폐기물은 지하 500 m 이상의 안정된 지반에 처분해야 합니다.

하지만 사용후핵연료에는 아직 핵분열반응을 일으킬 수 있는 우라늄과 플루토늄이 들어 있어 재처리를 통해 다시 핵연료로 만들어 사용할 수 있습니다. 따라서 사용후핵연료는 고준위방사성물질이지만 동시에 잠재적인 자원이라고 할 수 있습니다.



## 자세히 알아봅시다

## 방사성폐기물의 유형

- 원자로 시설 폐기물 원전 시설, 연구용 원자로 등에서 사용된 것으로서 방사성 물질에 오염되어 있는 작업복, 장갑, 신발, 보호복, 도구, 교체 부품, 폐필터 등이 있습니다.

- 방사선 치료 폐기물 방사선 진단과 치료를 하는 병원 등 시설에서 사용된 것으로서 방사성 물질에 오염되어 있는 시약, 주사기, 용기 등이 있습니다.

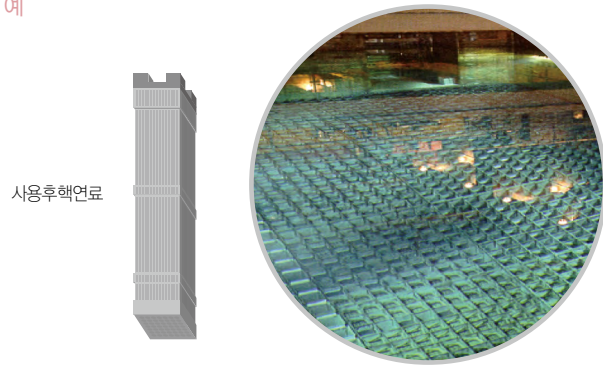
- 사용후핵연료 가동 중인 원자로에서 주기적으로 배출되는 이미 사용한 핵연료로서 열과 방사능을 장기간 방출하는 물질입니다.

## 방사성폐기물의 분류 기준

방사성 폐기물	규제해제 폐기물	피폭시 연간 10 $\mu$ Sv 미만의 매우 낮은 방사선량을 전달하므로 특별한 관리가 필요 없는 폐기물로 각 핵종별 농도가 관련 규정에 명시 (예: I-129는 0.01 Bq/g 이하, H-3는 100 Bq/g 이하)	
	극저준위 방사성 폐기물	중·저준위 방사성 폐기물	저준위 방사성 폐기물
	중·저준위 방사성 폐기물	저준위 방사성 폐기물	중준위 방사성 폐기물
	중·저준위 방사성 폐기물	저준위 방사성 폐기물	고준위 방사성 폐기물
	고준위 방사성 폐기물	반감기가 20년 이상의 알파선을 배출하는 핵종을 포함하는 물질로 방사능 농도가 4000 Bq/g 이상이고 열발생율은 2 kW/m <sup>3</sup> 이상인 폐기물	

자료: 방사성폐기물 분류 및 가체처분 기준에 관한 규칙(원자력안전위원회, 2014.9)

## 고준위폐기물의 예



## 중·저준위폐기물의 예



## Q. 사용후핵연료 3

사용후핵연료를 일단 발전소에 저장한다고 하는데 어떻게 저장하나요?

사용후핵연료는 일단 발전소에서 설치된 특별 공간에 저장합니다. 저장 방식은 크게 두 가지가 있는데 건물 내에 설치된 큰 수조에 저장하는 습식 방식과 건물 외부 소내 부지에 설치한 특수 저장 용기들을 사용하는 건식 방식이 있습니다. 습식 방식에서는 펌프로 물을 순환시켜 냉각 시키고 건식 방식에서는 공기로 냉각시킵니다. 현재 건식 방식은 월성발전소에서만 쓰이고 나머지 발전소에는 다 습식 방식이 사용됩니다.



## 자세히 알아봅시다

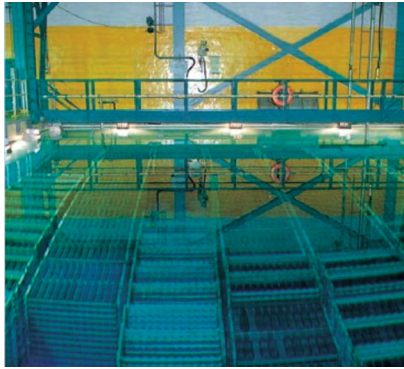
## 사용후핵연료 저장방식

- **습식 방식** 원자력발전소에는 큰 수조가 설치되어 있는 핵연료 건물이 원자로 건물에 붙어 있고 수조안에는 신연료 뿐만 아니라 사용후핵연료가 저장되어 있습니다. 이 수조에는 중성자를 잘 흡수하는 붕소를 함유한 물이 약 10m 정도 차 있고 그 물은 펌프를 통해 순환 냉각이 되어 수조 온도가 30~40 도로 유지됩니다. 사용후핵연료 다발은 수조안에 격자형태의 틀 안에 저장되게 되는데 수조의 용량이 건설당시의 용량으로 정해져 있기 때문에 수조 내 사용후핵연료의 최대 저장량은 한정되어 있습니다. 그러나 격자 구조체의 구성 물질에 붕소를 넣어서 격자 간격을 줄인 조밀 랙을 설치하면 사용후핵연료 저장량을 50% 정도 더 늘릴 수 있습니다.

- **건식 방식** 사용후핵연료의 발열량은 지수함수적으로 줄어들어 5년이 지나면 공기로 냉각해도 충분합니다. 이러한 저발열 사용후핵연료를 금속통에 담아 발전소 건물 외곽 부지에 설치된 별도의 다수의 소규모 저장 용기에 채워 저장하거나 모듈형으로 된 소형 저장 건물 내부에 쌓아 저장하는 방식이 건식 저장 방식입니다. 건식 저장 방식은 자연 순환 공랭식으로 냉각하므로 단순하고 쉽게 저장소를 확장할 수 있는 장점이 있습니다.



건식저장



습식저장

#### Q. 사용후핵연료 4

### 발전소 내의 사용후핵연료 저장조가 다 차면 어떻게 되나요?

발전소에 내부에 있는 사용후핵연료 저장조는 조밀랙 등을 설치하여 용량을 다소 확장할 수 있다고 하더라도 머지않아 포화가 될 수밖에 없기 때문에 최종 영구 처분되기 전까지는 중간 저장시설로 옮겨 보관해야 합니다.



#### 자세히 알아봅시다

##### 중간 저장의 정의와 방식

- **중간 저장** 사용후핵연료를 영구 처분 혹은 재처리 할 때 까지 약 50년간 한시적으로 저장하는 것입니다.
- **소내 독립 시설 저장** 각 원자력발전소 부지 내에 독립된 건식 사용후핵연료 저장시설을 설치하여 저장하는 방식입니다.
- **별도 부지 저장소 운영** 지반 등 입지 조건을 고려해 별도의 부지를 정하고 충분한 용량의 건식 저장 시설을 건설하여 사전에 정해진 기한까지만 운영하는 것입니다.

##### 사용후핵연료 공론화위원회의 중간저장 권고안

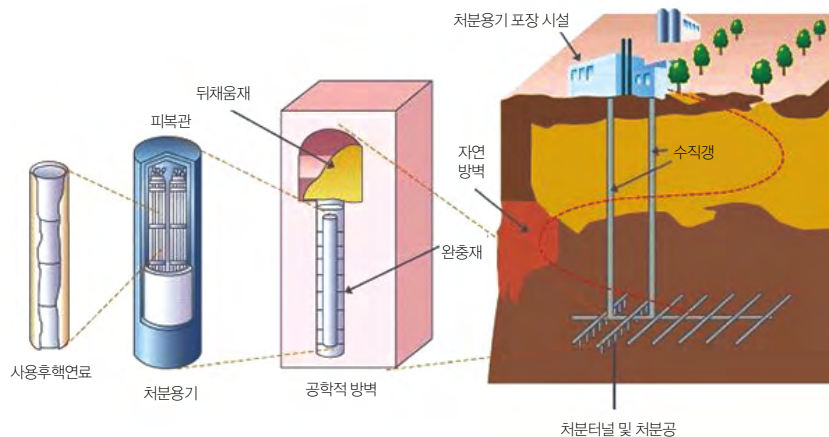
- **영구처분부지 확보 및 건설** 사용후핵연료 공론화위원회는 2051년 운영 개시를 목표로 영구 처분 시설 건설을 완료하고 그 이전에 적절한 시점까지 부지 확보를 위한 지하처분연구시설을 건설하고 운용하도록 권고하였습니다.
- **소내 단기 저장 시설 운용** 이와 더불어 사용후핵연료 저장조 조기 포화를 대비하여 2051년 이 되기전 20~30년 동안만 저장하는 단기 소내 저장 시설을 건식방식으로 건설하여 운용하며, 다만 그 기간동안 사용후핵연료 보관비용을 지역자치단체에 지불하도록 권고하였습니다.



## Q. 사용후핵연료 5

## 영구 처분은 어떻게 하나요?

사용후핵연료 영구처분은 지하처분, 해양처분, 우주처분 등을 생각할 수 있으나 현실적으로 가장 유력한 방식은 지하처분입니다. 지하처분에는 약 500~1,000m 깊이의 심층부 안정된 지층까지 갱도를 굴착하고 그 지층위에 처분공을 만들어 묻는 심층처분 방법과 지표에서 3~5km의 시추공을 뚫어 여러 개의 사용후핵연료를 수직으로 묻는 심부시추공 방식이 있습니다. 심층처분 방법은 이미 기술이 검증되어 핀란드에서 처분장을 건설중이며 심부시추공 방식은 현재 기술 개발이 진행 중입니다.



## 자세히 알아봅시다

## 심층처분 방식

- **처분 터널 건설** 지하 500~1,000m에 지하수 생성 가능성이 적고 안정된 지반을 찾아 수평으로 터널을 건설하고 지표에서 터널까지는 완만한 경사의 터널을 뚫어 연결합니다.
- **사용후핵연료 처분용기내 밀봉** 부식과 압력에 견딜 수 있도록 제작된 견고한 처분용기 내에 사용후핵연료를 장입하여 밀봉합니다.
- **처분공 굴착 및 처분용기 매립** 처분용기를 매립할 처분공을 적절한 간격으로 굴착하고 처분용기를 삽입한 후 충전재를 주위에 채우고 매립합니다. 이렇게 동굴내에 매립된 사용후핵연료는 재활용 기술이 발전할 경우 회수가 가능합니다.

## 심부시추공 방식

- **심부시추공 굴착** 직경이 50 cm 정도되는 시추공을 지하 3~5 km까지 굴착합니다. 현재까지 개발된 석유 시추 기술을 바탕으로 직경을 충분히 넓게 확보하여 시추공을 굴착하는 기술이 미국 Sandia National Lab을 중심으로 개발 중입니다.
- **사용후핵연료집합체 장입** 하단 1km 정도까지 사용후핵연료집합체를 삽입을 용기를 장입하여 적체 합니다. 용기의 높이를 5m로 하면 1개 시추공당 사용후핵연료 약 200개를 장입할 수 있습니다. 시추공 상층부는 매립합니다.

## 지하 처분장 설계 특징점

- **저장용기 건전성 보장** 사용후핵연료에서는 발열이 지속되므로 처분공 주위로 열확산과 이로 인한 처분장 터널 내 온도 상승에 대한 평가를 정확하게 하여 수증기가 발생하지 않도록 온도가 100도 이하가 되게 설계해야 합니다. 또한 용기의 건전성이 장기간 유지될 수 있는지 평가해야 합니다.
- **지하 연구시설 운영 필요** 이러한 설계와 평가 자료를 확보하기 위해 영구처분장 설계전 지하연구시설을 건설하고 실측자료를 입수하여 분석하는 것이 필수적입니다.



## Q. 사용후핵연료 6

## 사용후핵연료를 재활용 할 수 있다는데 어떻게 하는 건가요?

사용후핵연료의 약 93%는 우라늄이고 1.4% 정도는 우라늄 보다 무거운 초우라늄 원소입니다. 보통의 우라늄은 현재 가동 중인 원자로에서는 핵분열을 잘 일으키지 않지만 개발 중인 고속 중성자 원자로(고속로)에서는 핵분열을 비교적 잘 일으켜 연료로 사용될 수 있습니다. 또 고속로에 있는 중성자는 장수명 초우라늄 원소까지 핵분열을 시켜 단수명 핵종으로 변환시킬 수 있습니다. 이렇게 되면 심층처분 방식으로 사용후핵연료를 관리해야 할 시간과 처분 대상 양을 대폭 줄여 처분장 건설 부담을 획기적으로 줄일 수 있습니다.



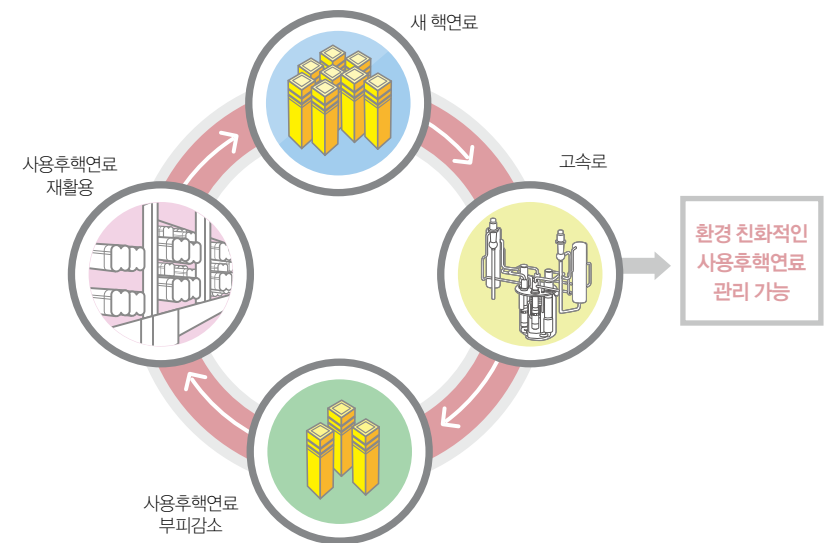
## 자세히 알아봅시다

## 고속로를 통한 우라늄 이용

- **고속중성자 원자로** 고속중성자원자로를 고속로라고 줄여서 부릅니다. 고속로 내부의 중성자는 속도가 높게 유지되는 관계로 에너지가 높아 낮은 에너지 중성자로는 핵분열이 일어나지 않은 보통의 우라늄(U-238)이나 초우라늄 원소조차 핵분열시켜 에너지를 발생시키는 원자로입니다. 핵분열 후에는 대개 평균 2.4 개씩의 중성자가 방출되는데 고에너지 중성자로 핵분열을 시키면 3개 이상의 중성자가 생성되어 잉여 중성자를 U-238과 반응시켜 핵분열이 좀 더 용이한 Pu-239로 변환시키는 데 사용할 수도 있습니다. 그래서 고속로는 U-238을 효과적으로 연료로 사용하는 수단이 됩니다.

## 고속로를 이용한 사용후핵연료 재활용

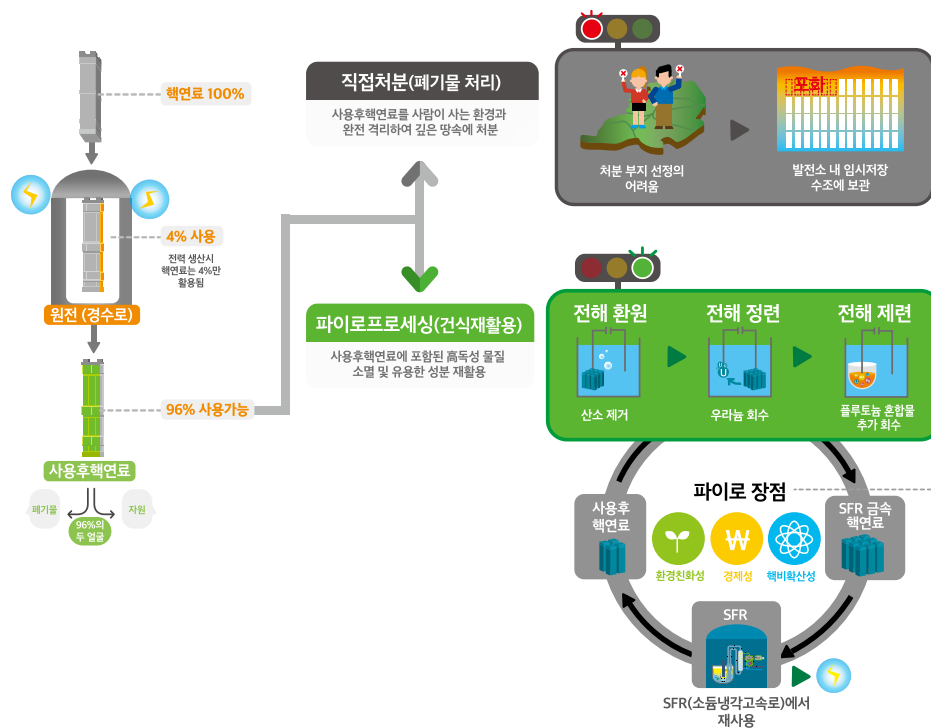
- **사용후핵연료 재처리를 통한 고속로 연료 물질 분리** 사용후핵연료의 92%를 차지하는 우라늄과 1.3%를 차지하는 초우라늄 원소를 고속로의 연료로 사용하려면 이들 물질을 사용후핵연료에서 별도로 분리하는 과정을 거쳐야 합니다. 이런 분리 과정을 재처리라고 합니다. 재처리 과정에서는 5% 정도를 차지하는 비교적 반감기가 짧은 핵분열 생성물들도 따로 분리해 낼 수 있으므로 이들만 따로 처분하고 우라늄과 초우라늄원소들은 재활용을 하게 될 경우 영구 처분대상 물질의 양을 1/20 이하로 줄일 수가 있습니다.
- **초우라늄원소의 반복 사용을 통한 방사성 독성 감소** 우라늄보다 원자번호가 큰 인공원소인 초우라늄 원소 중 플루토늄을 제외한 원소들은 핵분열 확률이 상대적으로 작기 때문에 핵연료를 한번 장전하면 그 일부만 다른 원소로 변화됩니다. 따라서 초우라늄원소들은 여러 번 고속로에 장전하여 핵분열을 반복시키는 방법으로 방사성 독성을 줄일 수 있습니다.



## Q. 사용후핵연료 7

사용후핵연료 문제를 해결하기 위해 우리나라에서는  
파이로 프로세싱이라는 것을 해야 한데 왜 그렇지요?

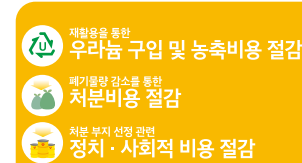
## 파이로프로세싱 Pyroprocessing



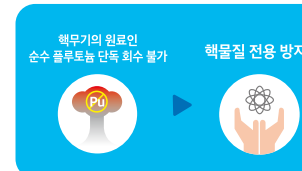
### 환경친화성



### 경제성



### 핵비확산성



사용후핵연료를 재처리하는 방식 중 하나가 사용후핵연료를 고온으로 녹여 용융염 형태로 만든 후 전기 분해 방식으로 물질을 추출해 내는 파이로 프로세싱이라는 것입니다. 파이로 프로세싱은 질산 같이 물이 포함된 용매를 쓰지 않고 열과 전기만 이용한다는 점에서 건식 재처리 방식이라고 합니다. 이 파이로 프로세싱 방식은 기존의 습식 방식과는 다르게 핵무기의 원료가 되는 플루토늄 원소만을 정밀하게 추출해내기가 어려워 핵비확산성이 높은 재처리 과정으로 인정되기 때문에 비확산을 선언한 우리나라에서 사용후핵연료 재처리를 위해 도입할 수 있는 적절한 방식입니다.



## 자세히 알아봅시다

## 파이로 프로세싱의 주요소와 핵확산 저항성

- **전해 3단계** 전해환원, 전해정련, 전해제련으로 구성된 전해 처리의 3단계는 모두 사용후 핵연료를 포함한 용융염을 전해질로 하여 전기 분해하는 과정입니다. 첫 번째 전해환원 과정에서는 고온공기산화 과정을 거쳐 U3O8과 기타 사용후핵연료 잔존 물질로 구성된 분말형 사용후핵연료를 650 도의 고온으로 가열된 LiCl-Li2O 용융염에 넣어 녹인 후 전기분해를 통한 환원 과정을 거쳐 우라늄, 초우라늄, 핵분열 생성물 금속으로 구성된 금속 전환체를 만듭니다. 두 번째의 전해정련 과정에서는 여러 물질로 구성된 금속전환체에 전해환원과는 다른 방식의 전기분해 과정을 거쳐 우라늄만 포함된 금속만을 추출합니다. 마지막 전해제련 과정에서는 용융염에 녹아 있는 초우라늄 원소를 석출시켜 초우라늄 금속체를 얻습니다.

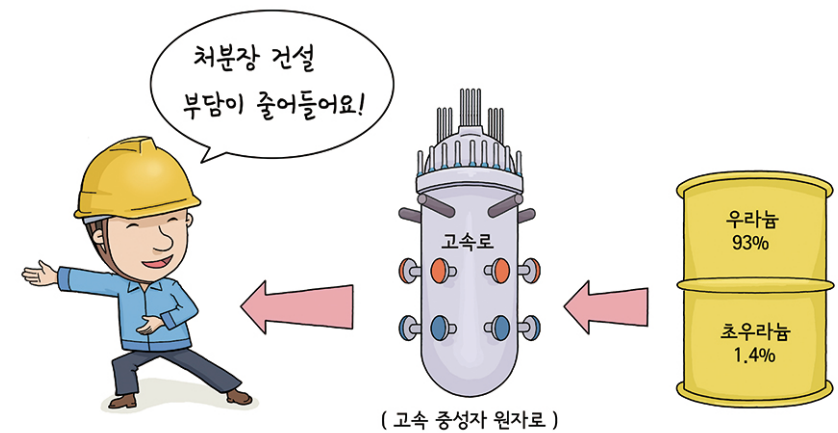
- **전해 정련시 초우라늄 원소 동시 석출** 전해제련 과정에서는 전기분해시 초우라늄 원소 별로 아주 미세한 차이를 두어 인가되는 전압을 조절하지 못하는 한 각 원소별 석출이 곤란하고 이에 따라 생성된 금속에는 플루토늄의 동위원소 뿐만 아니라 아메리슘, 넵트늄, 큐륨 등 모든 초우라늄 원소가 동시에 석출되기 때문에 순도 높은 플루토늄만의 석출이 불가능하여 파이로 프로세싱은 핵확산 저항성이 높은 기술로 인정되고 있습니다.

## 파이로 프로세싱과 고속로 기반 핵변환 처리의 도전 과제

- **초우라늄원소 다 주기 반복 연소의 효율성 증대** 파이로 프로세싱과 고속로를 결합한 사용후핵연료 핵변환 처리 기술은 처분대상 사용후핵연료의 양과 반감기를 대폭 줄임으로써 사용후핵연료 처리에 아주 효과적인 기술로 발전시킬 수 있습니다. 그러나 초우라늄 원소의 중성자 반응확률이 작은 관계로 여러 주기에 걸친 고속로내 연소 과정을 거치거나 다수의 고속로가 필요합니다. 따라서 안전성을 해치지 않으면서 초우라늄원소 소멸처리 효율을 높여야 하는 과제가 있습니다.

- **핵변환 소멸 처리의 경제성 확보** 파이로 프로세싱과 소듐냉각고속로 기술은 아직 상용화에 이르지 못한 개발 단계의 기술이기 때문에 직접처분 방식과 비교하여 경제성을 판단하기에는 시기상조입니다. 하지만 그동안의 여러 연구결과를 살펴보면 기존의 직접처

분 방식과 비슷하거나 약간 비싼 것으로 분석됩니다. 따라서 개발과정에서 최적화를 통해 경제성을 향상시켜야 합니다. 만약 우리 사회가 사용후핵연료에 대한 우리의 책임을 후손에게 부당하게 전가하지 않기 위해서 우리 세대에서 반드시 그 해결기술을 확보해야 하기로 결정한다면 어느 정도의 경제적 비용을 수용할 것인지를 결정해야 합니다.



## Q. 사용후핵연료 8

우리나라에서는 사용후핵연료 영구처분장 부지를 구하기가 정말 어려울 것 같은데 영구처분에 다른 대안은 있나요?

우리나라는 국토가 협소하여 사람의 생활권과 수십 km 이상 격리된 원격지를 찾을 수가 없어 남한에서 사용후핵연료 영구처분장 부지를 확보하여 2051년까지 운영될 수 있도록 하는 것이 사실상 굉장히 어려울 수 있습니다. 그 대안으로 해외 위탁 처분을 생각할 수 있습니다.



## 자세히 알아봅시다

## 사용후핵연료 국제공동처분 추진 현황

- **오스트레일리아 남부지역 사용후핵연료 처분시설 제안** 2016년 2월 남부 오스트레일리아의 주정부 기관인 왕립 핵주기 위원회에서는 외국에서 발생한 사용후핵연료를 저장, 처분하는 시설을 설치하는 안에 대한 제안에 대한 검토 보고서 초안을 발표하였습니다. 이 제안은 사용후핵연료를 처분하기에 최적인 지질여건 즉 강력한 암반구조와 안정된 정치 상황, 사용후핵연료 수용으로 인한 경제적 이득에 기반을 두고 있습니다. 그렇지만 이 제안이 오스트레일리아 국민의 동의를 구할 수 있을지, 또 동의가 구해지더라도 얼마나 많은 비용이 들지는 아직 미지수입니다.
- **국제 원자력 협력체제 핵연료 서비스 워킹그룹의 활동** IFNEC (International Framework for Nuclear Energy Cooperation)의 핵연료서비스 워킹 그룹에서는 핵비확산 측면에서 민감한 사안이 핵연료의 공급 및 처분을 국제 공동으로 실시하기 위한 각국의 필요성 및 여건을 분석하고 특별히 사용후핵연료 국제공동 저장 혹은 처분 시설의 확보를 목표로 논의를 진행하고 있습니다.



# 우리는 핵무기를 왜 만들지 않나요?

원 자 력 문 고 답 하 기 2 0 1 7

chapter

05

### Q. 핵무기개발을 하지 않는 이유 1

핵무기를 만들기 위해서 필요한 것은 무엇인가요?

일반적으로 핵무기를 만들기 위해서는 △핵분열성 물질(우라늄, 플루토늄 등) △ 기폭장치 △운반체제(전폭기, 잠수함, 미사일 등)가 필요합니다.

핵분열성 물질과 기폭장치가 있으나 운반체제에 탑재하지 않은 경우는 핵무기(Nuclear Weapon)보다는 핵장치(Nuclear Device)라는 표현으로 사용되기도 합니다.



#### 자세히 알아봅시다

**핵분열성 물질** 핵분열을 통해 에너지를 방출하는 원천으로서 일반적으로 고농축우라늄과 플루토늄이 사용됩니다.

**기폭장치** 핵분열을 매우 짧은 시간 내에 대량으로 일으킬 수 있도록 하는 장치로써, 기폭장치의 성능을 확인하기 위하여 고폭실험을 수행하기도 합니다.

**운반체제** 핵무기를 폭발시키고자 하는 장소까지 운반하는 수단으로써 전략핵 폭격기, 대륙간 탄도미사일, 잠수함발사 탄도 미사일 등이 있습니다.

### Q. 핵무기개발을 하지 않는 이유 2

핵무기에 필요한 물질은 어떻게 생산할 수 있나요?

일반적으로 핵무기에 사용되는 핵분열성 물질은 고농축우라늄과 플루토늄입니다. 천연우라늄의 경우 핵분열이 잘 일어나는 우라늄-235 동위원소 조성이 0.7%에 불과하기 때문에 우라늄-235 동위원소의 조성을 90%이상까지 높이기 위한 농축작업이 수행되어야 합니다. 농축 작업은 다양한 기법을 활용할 수 있는데, 원심분리법이나 기체확산법이 많이 사용됩니다.

플루토늄의 경우 자연상태에 존재하지 않는 원소이지만, 사용후핵연료에는 약 1%의 플루토늄이 존재하게 됩니다. 사용후핵연료에 있는 플루토늄은 다양한 조성의 동위원소로 구성되어 있지만, 플루토늄-238이나 플루토늄-240이 많이 포함될 경우 핵무기 사용에 적합하지 않기 때문에 사용후핵연료에 포함되어 있는 플루토늄 중에서도 특히 플루토늄-239를 화학적으로 재처리하여 이를 분리합니다.

### Q. 핵무기개발을 하지 않는 이유 3

핵무기를 만드는 것과 원자력발전소를 운영하는데  
필요한 기술은 많이 다른가요?

두 기술은 완전히 다른 기술이라고 보시면 됩니다. 핵무기에는 고농축우라늄이 사용되고 원자력발전소의 연료로는 저농축우라늄이 사용되며 농축 우라늄 생산 기술은 비슷하지만 핵물질 생산 이외에 필요한 기술은 완전히 다릅니다.

핵무기 제조를 위해서는 고품기술, 운반체 기술 등이 필수적으로 요구되지만 원자력발전소의 경우 안전성을 최우선으로 고온/고압의 환경에서 핵분열을 통해 생성된 에너지를 전기로 변환하기 위한 다양한 설비와 장치들을 구현해내야 하기 때문에 훨씬 복잡하고 고난이도의 기술이 필요합니다.

### Q. 핵무기개발을 하지 않는 이유 4

플루토늄탄과 우라늄탄은 무엇이 다른가요?

핵무기에 사용되는 핵분열성 물질의 차이입니다. 또한 고농축우라늄과 플루토늄 자체의 물질 특성에 따라서 무기의 형태와 모양이 서로 달라질 수 있습니다.

고농축우라늄 생산을 위해서는 고도의 농축기술이 필요하기 때문에 핵물질 확보가 어려우나 합체형으로 무기 제작이 가능하고, 플루토늄은 합체형으로 무기를 만들 경우 부분폭발(fizzle)현상이 심하여 원하는 폭발력을 내기가 어렵기 때문에 내폭형으로 제작해야 한다는 특징이 있습니다.

즉, 플루토늄탄의 경우 재처리를 통한 플루토늄 확보는 우라늄 농축에 비해 상대적으로 수월한 편이지만 플루토늄의 불안정한 동위원소 특성상 정교한 기폭기술 등이 필요하여 제작이 상대적으로 어렵고 핵실험이 필수적으로 요구된다는 차이점이 있습니다.

## Q. 핵무기개발을 하지 않는 이유 5

## 핵융합탄은 일반적인 핵무기와 무엇이 다른가요? 다른 종류의 핵무기도 있나요?

흔히 핵무기라고 불리는 원자폭탄은 핵분열성 물질(우라늄 또는 플루토늄)의 원자핵이 분열하면서 발생하는 에너지를 이용한 폭탄이고, 핵융합탄은 수소폭탄으로도 불리는데 이는 중수소와 삼중수소가 핵융합을 일으키면서 발생하는 에너지를 이용한 폭탄입니다. 그러나 핵융합 반응을 일으키기 위해서는 매우 높은 온도가 필요하기 때문에 그에 필요한 에너지원으로 원자폭탄을 이용하게 됩니다.

이밖에도 전술 핵무기로 개발된 중성자탄은 원자폭탄이나 수소폭탄에 비해 폭발력은 작으나 무기 내에서 발생하는 중성자를 무기 외부로 방출하도록 설계하여 대량의 중성자와 감마선을 통해 미사일의 전자장치 등을 무력화시키기도 하며, 원자폭탄이나 수소폭탄처럼 폭풍이나 열복사선을 이용하는 것이 아니기에 건물 등은 파괴하지 않지만 대량의 중성자로 인해 치명적인 살상효과가 나타나게 됩니다.

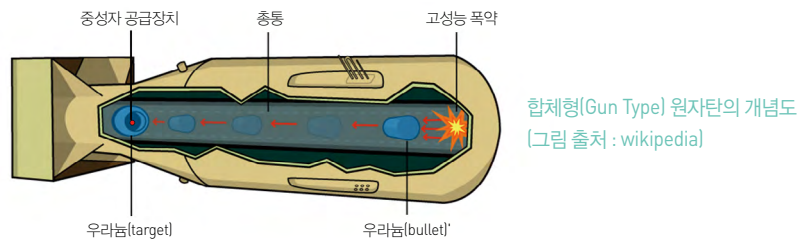
## 자세히 알아봅시다

실제 핵무기 중에서는 원자폭탄과 수소폭탄의 중간정도로 여겨지는 증폭 핵분열탄도 찾아볼 수 있습니다. 증폭 핵분열탄은 원자폭탄에 중수소-삼중수소 혼합물을 첨가하여 폭발력을 증강시킨 것으로 핵분열 반응으로 만들어진 고온/고압 환경이 중수소-삼중수소간 핵융합 반응을 일으키게 되어 동일한 핵분열성 물질을 사용한 원자폭탄의 2-5배의 폭발력을 갖게 됩니다.

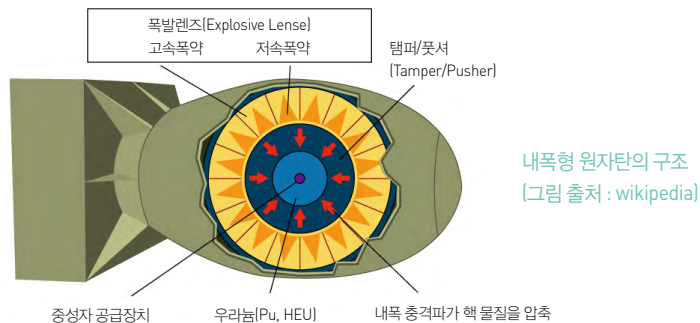
## 자세히 알아봅시다

핵물질을 순간적으로 합쳐져서 핵분열에 이르게 하는 방법은 합체와 압축(내폭)이 있습니다.

- **합체** 핵분열성 물질을 2개 또는 3개로 나누어 두었다가 폭발을 일으킬 때 급속히 한 개의 덩어리로 합쳐서 핵분열이 가능한 상태로 만드는 방법으로 이 방식을 사용한 폭발장치는 합체형(Gun Type)이라 불리우며 고농축우라늄을 사용하는 우라늄탄은 합체형으로 많이 제작합니다.



- **압축(내폭)** 핵물질의 밀도가 증가하면 핵분열에 이르는 핵물질의 양이 줄어든다는 원리를 이용하는 것입니다. 핵물질 주위에 고성능 폭약을 설치하고, 이를 폭발시켜 그 압력으로 핵물질을 압축하여 핵분열이 가능한 상태로 만드는 방법으로 이 방식을 사용한 폭발장치는 내폭형(Impllosion Type)이라 불리우며 플루토늄탄은 내폭형으로 많이 제작합니다.





## Q. 핵무기개발을 하지 않는 이유 6

## 핵실험을 했다는 것은 어떻게 확인할 수 있나요?

핵실험의 관측 방법은 핵실험의 종류에 따라 주 관측 방법이 달라집니다. 우선 핵실험은 공중, 대기권외, 지하, 수중 등에서 시행할 수 있습니다.

수십 Km의 공중에서 실시되는 공중 실험은 방사능의 대부분이 성층권으로 날아간 후 지구의 대기상층을 돌면서 서서히 지표로 내려오기 때문에 공중포집장치를 활용한 방사성 물질 분석을 통해 확인할 수 있습니다.

대기권외실험은 방사성 물질 강하(降下)나 대기오염은 거의 일어나지 않지만, 폭발 시에 방출되는 미립자와 방사선 때문에 이온층에 이변이 일어나 통신에 장애가 발생하기 때문에 이의 확인이 가능합니다.

수중 핵실험의 경우 수중 충격파가 원거리까지 전파되며 국지적인 해일이 발생되기도 하며, 인근 해역이 방사성 물질로 심하게 오염됩니다.

그리고 가장 많은 유형인 지하 핵실험의 경우 인공 지진파를 통해 확인이 가능합니다. 진파에는 지진파가 전파되는 방향과 같은 방향으로 진동하는 종파(P파)와 다른 방향으로 진동하는 횡파(S파)가 있는데, 지하 핵실험의 경우 강한 P파 및 약한 S파가 나타나며, 일반지진은 약한 P파 및 강한 S파의 특성이 나타납니다. 지하 핵실험의 경우 방사성 물질이 다량으로 새어나오는 경우가 많지 않기 때문에 핵실험에 사용된 물질 등을 정확히 파악하기가 어렵습니다.



## 자세히 알아봅시다

핵실험에 사용된 핵분열성 물질(우라늄 또는 플루토늄)을 확인하기 위해서는 핵폭발후 대기 로 방출된 비활성 가스들( $^{135}\text{Xe}/^{85}\text{Kr}$ )을 분석하여 확인할 수 있습니다.

☞ 특히  $^{85}\text{Kr}$ 는 사용된 핵분열성 물질에 따라 발생하는 양이 크게 차이가 남에 따라 핵실험에 사용된 폭탄 구분에 활용하기 적절한 핵종입니다..

- 단, 핵실험 후 2-3일 이내에는  $^{85}\text{Kr}$ 보다 양이 많은(포집과 측정이 용이한)  $^{85}\text{mKr}$ 을 사용하는 것이 적절합니다.

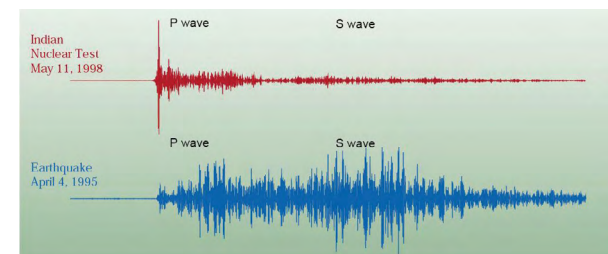
☞ Xe의 측정 가능한 핵종들간 반감기의 차이에 따른 생성량과 감소율 등을 고려하여 단기(2-3일 이내), 중기(3-6일), 장기(1주일 정도)로 구분하여 활용 가능합니다.

- 단기( $^{135}\text{mXe}$ ) 반감기 15.29분, 초기 생성량이 많아 검출이 용이하나 2-3일후에는 그 양이 급격히 줄어들며, Kr- $^{85}\text{m}$ 과 유사한 감소 현상을 보입니다.

- 중기( $^{135}\text{Xe}$ ) 반감기 9.14 시간, 핵폭발 후 3-4일 정도에 생성량이 많은 반면 그 이후 양이 급격히 줄어듭니다.

- 장기( $^{133}\text{Xe}$ ) 반감기 5.243일, 가장 장기간 동안 생성됩니다.

지하 핵실험의 경우 폭발에 의한 충격이 구 대칭으로 퍼져나가기 때문에 P파가 효율적으로 전달되는 반면, 지하 단층면을 따라 미끄러지거나 붕괴되는 지진의 경우는 S파의 횡적 운동을 가속화합니다.



인도 핵실험과 일반 지진시 지진파 비교 (출처 : U.S National Data Center)

## Q. 핵무기개발을 하지 않는 이유 7

## 전 세계에서 핵실험은 몇 차례나 수행되었나요?

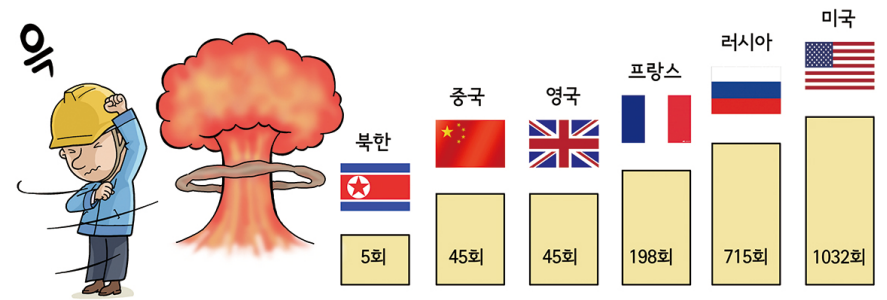
전세계에서 핵실험이 얼마나 수행되었는지 정확히 확인하기는 어렵습니다. 과거에는 매우 경쟁적으로 핵실험을 해왔으며, 핵실험 탐지 기술이 현재처럼 개발되기 전에는 다른 나라의 핵실험을 정확히 파악하기 어려웠기 때문입니다.

하지만 현재까지 알려진 바로는 총 2,055회 정도 핵실험이 이루어진 것으로 추정<sup>1)</sup>되며, 미국이 1,032회, 러시아가 715회 정도 핵실험을 수행하여 인류 역사상 이루어진 핵실험의 90% 이상을 차지하고 있다고 알려지고 있습니다.

이 밖에도 프랑스가 198회, 영국이 45회, 중국 45회, 북한 5회, 인도 3회 및 파키스탄 2회 등으로 알려져 있으며, 이스라엘도 몇 차례 핵실험을 수행했을 것으로 추정하고 있지만 정확한 횟수는 확인하지 못하고 있는 상황입니다. 21세기 들어서는 북한이 유일하게 핵실험을 수행한 국가입니다.



자세히 알아보시다



핵실험 중에서 역사상 가장 강력한 위력을 지닌 핵실험은 러시아가 1961년 북극해 노바야 제믈랴제도에서 실시한 'Tsar Bomba' 수소폭탄 실험으로 러시아는 이 수소폭탄의 위력이 히로시마에 떨어진 원자폭탄의 3,800배 이상에 이르는 50MT의 위력이었다고 밝혔습니다.<sup>2)</sup> 폭발 당시 발생한 버섯구름이 60km 높이에 이르렀으며, 100km 밖에 있는 사람에게도 3도 화상을 입힐 정도였고, 1000km 떨어진 핀란드에서도 유리창이 깨질 정도의 위력이었다고 알려집니다.

1) Johnston's Archive, State Department, Bulletin of the Atomic Scientists. Published Nov. 27, 2015.

2) Wikipedia 참조

## Q. 핵무기개발을 하지 않는 이유 8

북한은 핵무기를 보유했으니  
우리나라보다 기술이 앞선 것인가요?

핵무기는 핵분열성 물질과 중성자간의 반응을 극대화시켜 핵분열 반응으로 한 번에 많은 에너지가 나오도록 만든 것이고, 원자력발전소는 이러한 핵분열 반응을 제어하여 필요한 만큼의 에너지를 이용하는 것입니다.

즉, 핵분열로 발생하는 에너지를 사용한다는 원리는 같지만 그 에너지를 활용하는 방식과 제어하는 방식이 다르기 때문에 어느 기술이 앞선다고 평가하기는 어렵습니다.

다만 북한은 이러한 기술을 군사용으로 활용하는 길을 택한 것이고 우리는 평화적인 목적에 한정하여 활용하는 길을 택한 것입니다.



## 자세히 알아봅시다

북한의 경우 2006년부터 2016년까지 5차례 핵실험을 수행한 바 있으며, 핵무기에 필요한 핵 물질인 고농축우라늄 및 플루토늄 확보를 위한 농축 시설과 재처리 시설을 보유하고 있지만, 2010년 착공하여 2012년 완공하겠다는 계획의 100MWth 실험용 경수로를 2016년 7월 현재까지도 완공하지 못하고 있는 상황입니다.

## Q. 핵무기개발을 하지 않는 이유 9

우리나라가 핵무기를 개발하지 않는 이유가 무엇인가요?

한국은 핵비확산 조약(NPT, Treaty on the Non-proliferation of Nuclear Weapons)을 비롯하여 다양한 국제 핵비확산 체제, 양자간 협정 및 자발적 선언<sup>9)</sup> 등을 통해 원자력 에너지를 평화적 목적으로만 활용할 것임을 천명하였고, 이를 굳건한 국가 정책으로 추진하고 있습니다.

만약 한국이 이러한 국제 체제를 위반하고 핵무기 개발 의지를 표명하게 된다면 국제사회의 제재를 받게 될 것임을 물론 국제사회에서 고립이 될 것입니다.

또한 우리나라의 핵 개발은 일본, 대만 등 주변국들의 핵무장을 부추기는 도미노 현상을 일으킬 수 있으며, 결국에는 동북아 지역의 긴장이 더욱 고조되는 부작용도 우려됩니다.



## 자세히 알아봅시다

한국은 폐쇄경제체제인 북한에 비해 국제 사회와의 경제 교류를 통해 국가 경제가 유지<sup>10)</sup>되는 만큼 핵무기 개발을 추진할 경우 제재로 인해 국민이 매우 심각한 경제난을 겪게 될 것입니다. 국가 안보를 위해 핵보유가 필요하다고 주장해온 국가들 역시 국제사회의 제재에 굴복하여 핵보유를 포기했습니다. 특히, 이란은 2015년 13년간 추진해 온 핵개발을 포기했으

며, 리비아, 우크라이나 등 역시 같은 이유로 핵보유를 포기한 바 있습니다.

또한 국제사회의 제재에도 불구하고 핵폭발 장치를 개발한다 할지라도, 이에 걸맞는 군사력이 뒷받침되어야 합니다. 특히, 핵무기를 전략적으로 사용하기 위해서는 Nuclear triad(핵전략 폭격기, ICBM, SLBM)가 필수이지만 한국은 이들에 관한 자체 개발 능력이 없으며, 한국이 국제 핵비확산 체제 위반으로 미국을 비롯한 국가들의 제재를 받을 경우 이에 접근하기는 더욱 어려워질 것입니다.



3) 1992년 남북간 “한반도 비핵화 선언” 및 2004년 “평화적 핵이용에 관한 4대 원칙”

4) 한국의 대외무역의존도는 99.5%임(2015년 한국은행)

KOREAN NUCLEAR SOCIETY

2017. 5.

## 원자력 묻고 답하기

발행일 2017년 5월 15일

발행처 한국원자력학회

주 소 대전광역시 유성구 유성대로 794

전 화 042-826-2613-5 / 2677

팩 스 042-826-2617

홈페이지 <https://www.kns.org>

