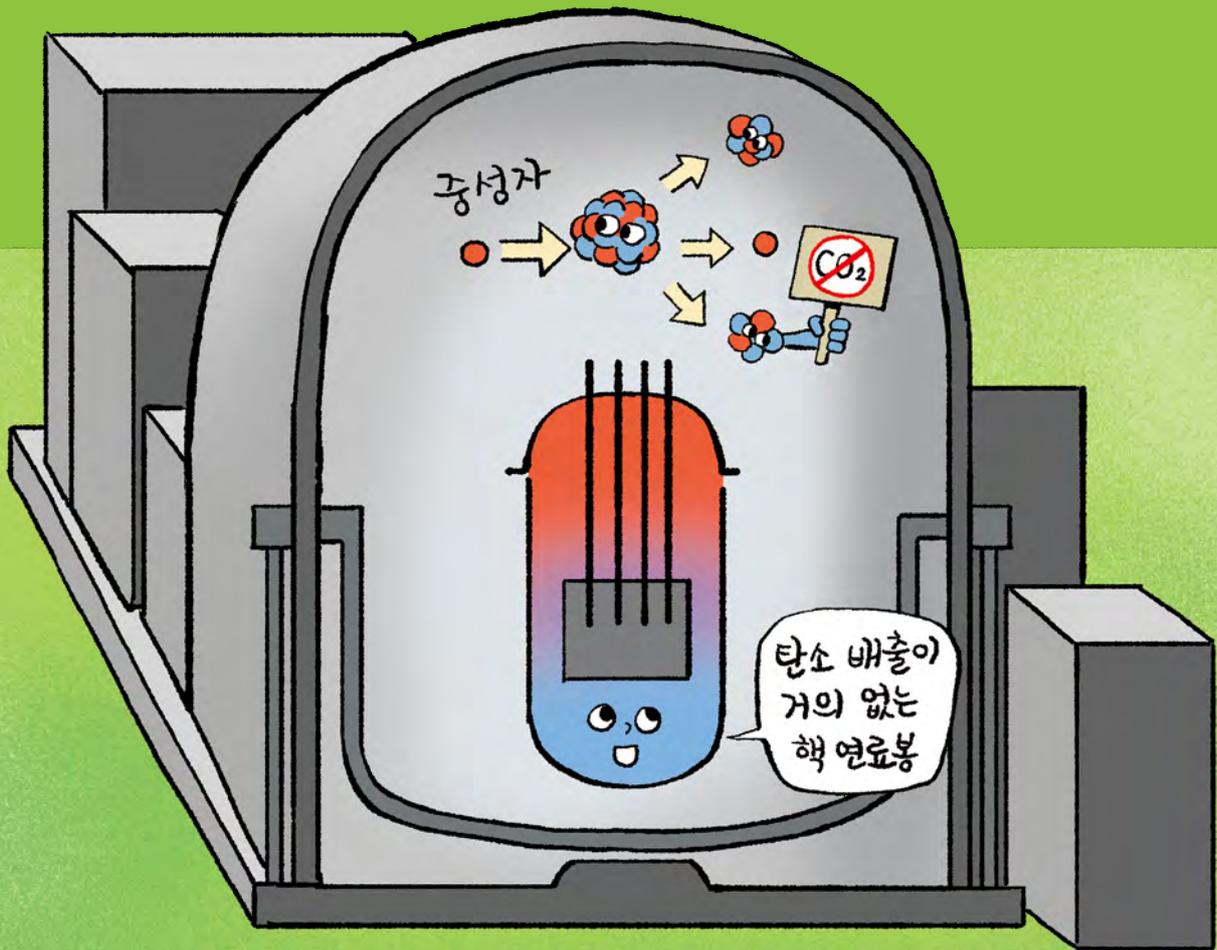


전기를 만드는 다양한 방법 ②

# 핵분열 이용하는 원자력발전

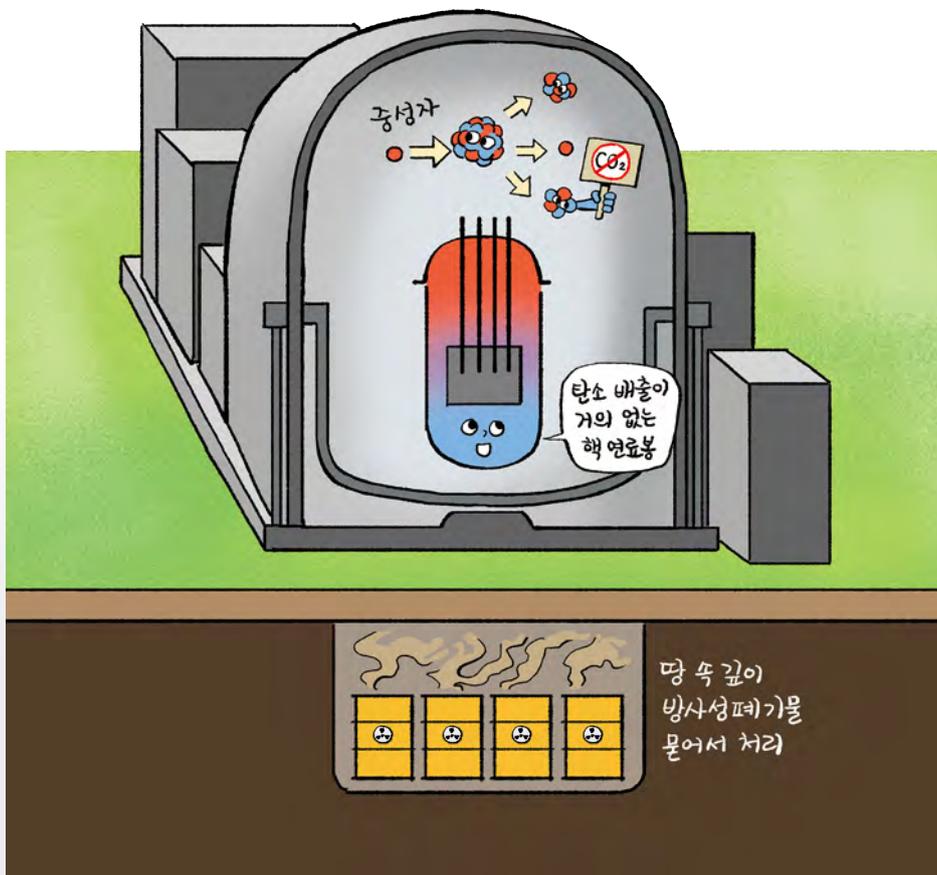


땅 속 깊이  
방사성폐기물  
묻어서 처리



## 전기를 만드는 다양한 방법 ②

## 핵분열 이용하는 원자력발전



## 쪼개지면 힘이 난다? 핵분열의 원리

오늘부터는 전기를 만드는 다양한 방법을 본격적으로 알아보겠습니다. 그 첫 번째로 물질 그 자체의 힘을 이용한 발전들을 소개합니다. 우리 몸은 물론 이 세계 모든 물질을 구성하는 가장 기본적인 단위, 원자에서 발생한 힘을 이용하는 것이예요.

원자는 크게 원자핵과 전자라는 두 가지 아주 작은 알갱이로 이루어졌어요. 거대한 태양 주위를 지구, 화성, 목성같은 행성들이 둘러싸고 있는 것처럼, 원자 역시 단단하고 무거운 원자핵을 전자가 둘러싸고 있는 모습이에요. 나머지 공간은 그냥 비워져 있답니다.

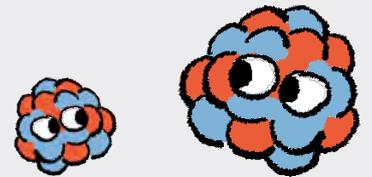
그런데 실제 태양계에서도 태양이 어마어마하게 크듯이, 원자도 원자핵과 전자의 크기가 많이 차이 나요. 만약 원자를 축구장이라고 가정한다면, 원자핵은 축구장 가운데 있는 축구공, 전자는 축구공 근처를 떠도는 먼지 한 톨 수준에 불과합니다. 이 말은 곧, 원자핵이 가지고 있는 에너지가 전자에 비해 엄청나게 많다는 뜻입니다.

이제 원자의 구조를 알았으니 어떻게 여기서 에너지를 만들어 낼 지 살펴볼까요? 매우 큰 에너지를 가진 원자핵에 중성자라는 알갱이를 강하게 충돌시키면 놀랍게도 원자핵이 쪼개집니다. 원자핵 자체도 양성자와 중성자라는 더 작은 알갱이가 모인 것이어서 그래요. 마치 아주 단단한 야구공을 던져 매우 튼튼하게 결합된 조립 로봇을 쪼개는 것과 비슷하지요.

그런데 여기서 정말 신기한 현상이 벌어집니다. 조립 로봇은 쪼개져 흩어져도 팔, 다리 같은 각 부위가 그대로 있는데, 원자핵이 쪼개지면 알갱이의 일부가 아주 조금 사라져버려요. 그리고 그 과정에서 어마어마한 에너지가 만들어진답니다. 그 유명한 아인슈타인의 'E=mc<sup>2</sup>' 공식에 따른 것이죠. 너무 어렵다고요? 간단히 말해, 질량이 있는 물질은 에너지로 변할 수 있다는 뜻이에요. 원자핵이 쪼개지면서, 사라진 부분이 그대로 에너지가 되는 것이에요.

### 장점도, 단점도 명확한 원자력 발전

원자력 발전은 이렇게 원자'핵'을 '분열'시키는 '핵분열'을 통해 에너지를 얻어요. 현재 원자력 발전에서 사용하고 있는 연료는 우라늄이라는 물질인데요, 신기하게도 하나의 우라늄에 중성자를 충돌시켜 그 원자핵을 분열시키면, 쪼개진 원자핵에서 또 중성자가 튀어나옵니다. 그러면 이 중성자가 또 다른 우라늄 원자핵을 쪼갤 수 있겠죠? 마치 도미노처럼 연쇄적으로 반응이 일어나면서 아주 큰 에너지를 얻을 수 있답니다. 이 에너지로 물을 끓여 터빈을 돌리면 우리가 아는 전기가 발생하게 돼요.



원자력 발전은 지난 시간에 살펴본 기력발전, 즉 뜨거운 열로 증기를 만들어서 터빈을 돌려 전기를 생산하는 방법 중 하나입니다. 하지만 열을 얻는 방식이 화력 발전과 많은 점에서 달라요. 가장 큰 차이는 바로 환경에 미치는 영향입니다. 화력 발전은 그 연료(석탄, 석유)를 태우면서 이산화탄소와 미세먼지가 많이 발생하지만, 원자력 발전은 발전하는 동안 이산화탄소와 미세먼지가 거의 발생하지 않습니다. 원자력 발전의 연료는 타지 않고 쪼개지면서 순수한 에너지로 바뀌기 때문이지요.

경제적으로도 원자력 발전은 장점을 갖고 있어요. 원자력 발전은 원료비가 적게 들고 발전 효율이 좋아 발전단가가 낮기 때문인데요, 2021년 기준 1kWh의 전기를 생산하는 비용이 56.15원이라고 해요. 석탄발전이 99.06원/kWh, 다른 발전방식을 모두 포함한 평균 발전단가가 94.98원/kWh인 것을 감안한다면, 상당히 싸게 전기를 생산할 수 있다는 것을 알 수 있어요(출처: 연료원별 정산단가-한국전력거래소 전력시장통계).

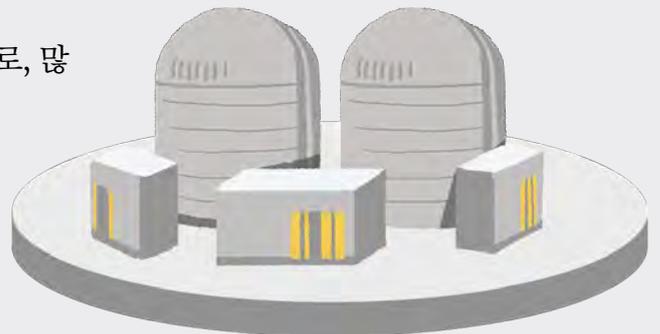
그런데 여기서 드는 의문 하나. 원자력 발전이 이렇게 저렴하고 친환경적인데 왜 모든 발전을 원자력

으로 하지 않는 것일까요? 원자력에도 단점이 존재하기 때문이라합니다. 바로 핵분열 때 생기는 방사성폐기물이죠. 방사성폐기물은 강한 방사선을 아주 오랜 기간 내뿜는 물질이기에, 현재 운영 중인 3세대 원자력 발전소는 무려 5중으로 방호체계를 구성해 방사능이 새어나갈 가능성을 줄이고 있어요. 여기에 더해 지진과 같은 자연재해에 대해서도 대비 방법을 마련하고 있습니다.

방사성폐기물을 보관하는 것도 큰 문제예요. 원자력 발전이 지속될수록 방사성폐기물은 계속 생기고 있는데, 이를 보관할 만한 마땅한 장소가 없기 때문이죠. 그나마 방사능 세기가 작은 중·저준위폐기물은 경주 방사성폐기물처분장에 보관하고 있지만, 강력한 고준위방사성폐기물(사용후핵연료)은 아직 보관할 장소를 확보하지 못해 원자력 발전소 내에 임시저장시설에서 보관하고 있답니다. 결국 이런 어려움을 생각한다면, 원자력 발전의 경제성은 단순히 발전단가로만 계산해서는 안 된다는 목소리가 높아지고 있어요. 물론 여기에 대해서도 우리나라를 비롯한 여러 나라에서 체계적인 계획을 세워서 고준위방사성폐기물을 처리하는 방법을 고안하고 있답니다. 최근에는 방사성폐기물에 강한 에너지를 가해서 방사선도 적도 빠르게 방사능이 사라지는 물질로 바꾸는 연구도 이루어지면서 단순히 땅에 묻는 것보다 효율적인 처리방법도 개발되고 있습니다.

### 지치지 않는 태양의 비결, 꿈의 에너지 핵융합

이렇게 원자력은 장단점이 매우 명확한 에너지원으로, 많은 사람들이 그 사용에 대해 서로 다른 생각을 하고 있습니다. 장점만 보자면 저렴하고 이산화탄소 배출 없이 전기를 생산할 수 있는 최고의 발전 수단이지만, 결국 방사능이라는 위험부담이 크고 이를 해결하는 비용도 무시할 수 없다는 입장이 팽팽히 맞



서고 있어요. 그런데 원자력과 달리 방사능 위험도 없으면서 큰 에너지를 얻을 수 있는 방법이 있다면 어떨까요? 바로 원자를 쪼개는 ‘핵분열’이 아닌, 원자를 합치는 ‘핵융합’입니다.

핵융합은 말 그대로 가벼운 원소를 합치는 과정이에요. 이들의 원자핵을 아주아주 높은 온도로 가열시키면 각 원소의 원자핵 간 거리가 가까워지면서 서로 결합하게 되지요. 이렇게 원자핵이 융합하는 과정에서 어마어마한 에너지가 발생한다는 겁니다. 우리에게 매일 에너지를 제공해주는 태양 역시 이러한 핵융합을 통해 에너지를 만들고 있어요.

이런 핵융합 발전은 그 원료인 수소를 구하기가 아주 쉽고, 방사능도 발생시키지 않아요. 이산화탄소 역시 발생시키지 않고, 폭발 위험이 적어 안전하기까지 하니 미래를 이끌 에너지로 손색이 없지요. 여러분들이 잘 아는 <아이언 맨> 역시 가슴에서 만드는 핵융합 에너지로 악당을 물리치는 거랍니다.

문제는 핵을 융합시키기 위해 1억°C가 넘는 플라즈마 상태(전자가 원자 주위를 벗어나 자유롭게 돌아다니는 상태)를 약 300초 이상 유지해야 한다는 점이에요. 이를 위해선 ‘토카막’이라는 특수한 장치에

플라즈마를 가두어야 하는데요, 작년 11월 우리나라 연구진이 30초까지 플라즈마를 유지하는 데 성공하며 세계 신기록을 세우기도 했어요. 비록 300초까지는 갈 길이 멀지만, 핵융합 발전의 가능성만큼은 어느 정도 증명한 셈이에요. 최근에는 미국에서 핵융합실험으로 핵융합에 투입한 에너지보다 더 많은 에너지를 얻는 데 성공하기도 했지요. 이는 매우 중요한 의미가 있습니다. 이전까지는 핵융합을 일으키는 데 들이는 에너지보다 더 적은 에너지만을 얻을 수 있었어요. 핵융합을 할수록 에너지는 손해를 보는 구조였지요. 그러나 이제는 핵융합에 들이는 에너지보다 더 많은 에너지를 얻을 수 있다는 사실이 확인된 것입니다.

이에 우리나라뿐만 아니라, 전 세계 과학자들이 힘을 모아 핵융합 발전에 나섰어요. 총 34개 나라가 공동으로 국제핵융합실험로(ITER) 건설을 위해 손을 잡은 것이에요. 만물의 근본인 '원자'에서 발생한 에너지가 전 세계 에너지 문제를 해결할 '꿈의 에너지'가 될 수 있을지, 여러분도 모두 기대해봐요.



## 전기를 만드는 다양한 방법 ②

## 핵분열 이용하는 원자력발전

우리가 사는 세상의 모든 것은 원자로 이루어져 있습니다. 그리고 원자에는 엄청나게 큰 에너지가 숨어 있지요. 원자에는 숨은 에너지의 비밀은 무엇일까요? 우리는 이 에너지를 어떻게 이용할 수 있을까요?



원자력 발전을 둘러싸고 찬성과 반대 의견이 종종 맞서곤 합니다. 원자력 발전의 장점과 단점은 무엇일까요? 그리고 우리나라의 환경에서는 원자력 발전이 어떤 역할을 할 수 있을까요? 다음 표에 자신의 의견을 적어보세요. 되도록 긍정 의견과 부정 의견을 모두 적어보고 종합해보세요.

장점	생각할 주제	단점
	<p>화력발전과 비교했을 때 원자력발전은 탄소배출량이 적다고 합니다. 탄소 배출과 에너지 사용으로 보면 원자력발전에는 어떤 장단점이 있을까요?</p>	

원자력발전에 사용하는 연료봉은 한 번 교체하면 2년 이상 사용 가능합니다. 반면 사용하고 난 연료 처리가 쉽지 않지요. 연료 부분에서 원자력발전에는 어떤 장단점이 있을까요?

재생에너지와 달리 원자력발전은 한번에 많은 양의 전기를 생산할 수 있습니다. 한국 기업의 경쟁력도 높지요. 그렇다면 경제적 측면에서 원자력의 장단점은 무엇일까요?

위에서 정리한 의견을 바탕으로 원자력발전이 우리나라에 필요한지 자신의 생각을 이야기해보세요.



2020년 이후 원자력발전소가 다시 주목받고 있습니다. 화석연료를 최대한 줄이면서도 충분한 양의 전기를 꾸준히 얻을 수 있는 대표적인 방법이기 때문인데요, 다양한 필요에 따라 사용할 수 있도록 소규모 원자력발전소인 '모듈형 원자로'도 활발하게 개발중이지요. 다만 사용후핵연료는 원자력발전이 해결해야 하는 중요한 과제 중 하나입니다. 다음은 사용후핵연료의 문제점입니다. 각각의 문제점을 어떻게 해결하는 것이 좋을지, 그리고 사용후핵연료를 어떻게 처리하면 좋을지 의견을 이야기해보세요.

사용후핵연료의 문제점	해결방법
<p>사용후핵연료는 생명체에 해로운 방사선을 내보냅니다. 이러한 방사선은 종이로도 막을 수 있는 것이 있는 반면 두꺼운 납이나 콘크리트로 간신히 막을 수 있는 것도 있습니다.</p>	
<p>사용후핵연료의 방사선은 연료봉에 포함된 방사성물질에서 나옵니다. 이러한 물질이 공기중에 새어나오면 주변을 오염시킬 수도 있습니다.</p>	
<p>사용후핵연료에 포함된 방사성물질 중에는 수만 년 이상 방사선을 내보내는 것도 포함되어 있습니다. 이러한 물질만 따로 분리할 수도 있기는 하지만, 많은 비용이 들지요.</p>	

위에서 정리한 해결방법을 바탕으로 여러분만의 사용후핵연료 처리방법을 생각해봅시다.



## 전기를 만드는 다양한 방법 ②

## 핵분열 이용하는 원자력발전

원자력과 핵융합은 화력발전과 기본적인 메커니즘은 동일하나 연료를 연소하지 않는다는 점에서 큰 차이가 있습니다. 이러한 특성 때문에 원자력과 핵융합에 대한 이해는 발전 메커니즘 자체보다 물질로부터 에너지를 얻는 방법이 무엇이며, 다른 에너지원과 달리 유의해야 할 점은 무엇인지를 중심으로 이해해야 합니다.



## 생각해 볼 문제

## 원자력 발전은 왜 폭탄이 되지 않는가?

원자력 발전은 핵분열 과정에서 발생한 중성자가 다른 원자의 핵분열을 일으키는, 중성자 연쇄반응을 이용합니다. 그리고 이 반응은 원자폭탄이 폭발할 때 일어나는 반응과 그 원리와 절차가 동일합니다. 원자력 발전이 원자폭탄 개발 과정에서 파생된 기술이라는 데서 알 수 있듯, 원자폭탄과 원자력 발전은 동전의 양면같은 관계입니다. 에너지가 한순간에 크게 터져나오면 원자폭탄, 긴 시간에 걸쳐 조금씩 나오면 원자력 발전인 셈입니다. 이 때문에 학생에게 원자력 발전에 대해 알려줄 때는 차이점을 들어 폭탄과는 분명하게 구분해줘야 합니다.

물론 핵분열 반응의 상세한 원리는 고등학교 2학년 이상에서나 다루기에 초등~중등 과정에서 제대로 이해하기는 어렵습니다. 따라서 핵분열에서 에너지가 발생하는 물리화적인 메커니즘을 자세히 설명하기보다, 핵분열에서 에너지가 발생한다는 사실은 별도의 원리 설명 없이 받아들이는 한편 핵분열 반응 속도를 어떻게 늦추는지 다뤄야 합니다. 실제로 원자력 발전과 원자폭탄의 원리가 같다는 이야기를 들으면 왜 원자력 발전소가 폭발하지 않는지 궁금해할 테니까요.

이는 화석연료와 비유함으로써 쉽게 전달할 수 있습니다. 가스가 모여있는 곳에 불길이 닿으면 한꺼번에 연소해 폭발해버리지만, 가스가 조금씩 새어나오게 하고 여기에 불을 붙이면 불이 붙은 채 그대로 연소하는 현상과 비교할 수 있지요. 한번에 연소되는 가스의 양을 조절해서 폭발하지 않게 하듯, 핵

분열 역시 한번에 반응이 일어나는 속도를 조절하면 연료를 사용할 수 있습니다.

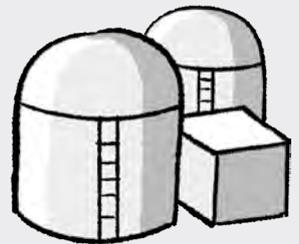
이처럼 원자력은 반응속도를 일부러 늦춰야 하기에 발전용 원자로에 사용하는 연료봉의 핵분열 물질은 순도가 폭탄에 비해 낮다는 점도 알려줘야 합니다. 연료로 치면 잘 타지 않는 연료를 사용하는 셈이지요. 여기에 중성자의 속도를 늦춰서 반응속도를 조절하는 감속재를 추가하여 반응이 천천히 일어나게 하지요. 이처럼 반응속도를 조절하는 메커니즘이 있는 데다 기력발전의 특성상 원자로 내부 환경과 터빈에 전달되는 기체를 분리할 수 있어 안전성이 높습니다.



### 생각해 볼 문제

#### 원자력 발전의 해결 과제, 고준위방사성폐기물

원자력에는 다양한 장점이 있음에도 원자력을 반대하는 목소리가 여전히 있습니다. 가장 큰 이유가 바로 고준위방사성폐기물입니다. 고준위방사성폐기물은 강한 방사선이 나오는 폐기물을 뜻하는 것으로, 사용을 완전히 마치고 난 후의 연료봉이 대표적입니다. 사용하고 남은 연료봉에는 다양한 방사성 핵종이 있어서 위험하지요. 따라서 원자력 발전의 필요성을 받아들여려면 방사성폐기물을 어떻게 처리해야 하는지와 같은 다소 곁끄러운 문제도 직접 언급할 필요가 있습니다. 문제는 현재로서는 고준위방사성폐기물에 포함된 위험물질인 방사성 핵종을 빠르게 제거하는 방법이 없다는 것입니다. 자연적인 방사성 붕괴 과정을 거쳐 천천히 줄어들기만을 바라는 수밖에 없지요. 반감기가 짧은 핵종은 큰 문제가 되지 않지만 플루토늄처럼 긴 기간 동안 강력한 방사선을 내는 원소도 섞여 있어 이들이 자연적으로 줄어들 때까지 방사성이 통과할 수 없는 밀폐된 장소에 두어야 합니다.



원자력 발전소의 안전성이 어느 정도 입증된 데다 화석연료를 사용하지 않는 대규모 기력발전의 대표주자로 떠오른 지금, 원자력 발전소를 둘러싼 논란 대부분은 고준위방사성폐기물과 관련되어 있습니다. 핀란드, 스웨덴 등의 고준위방사성폐기물 처리계획을 소개함으로써 우리나라에서도 사용후핵연료 처리 및 관리에 대한 구체적 논의가 필요한 상황이라는 점을 보여줄 수 있습니다.



### MEMO

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Blank lined writing area with horizontal dotted lines.