

KAERI/TR-3243/2006

핵비확산성 핵연료주기 완성을 위한  
새로운 비전과 전략

**New Visions and Strategies for Completion of  
Proliferation-Resistant Nuclear Fuel Cycle in Korea**

*KAERI*

2006. 9

한국원자력연구소

# 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 "사용후핵연료 관리·이용 기술개발" 과제 (세부과제: "사용후핵연료 특성계량화 기술개발 분야")의 기술보고서로 제출합니다.

2006. 9

주 저 자 : 고 원 일 (사용후핵연료기술개발부)  
공 저 자 : 권 은 하 (사용후핵연료기술개발부)  
          황 용 수 (방사성폐기물처분기술개발부)  
          박 성 원 (핵연료주기기술개발단)

# 목 차

요 약 문 .....	4
제 1 장 서 언 .....	10
제 2 장 에너지 패러다임의 전환 .....	12
1. 문제의 진단 .....	12
2. 에너지정책의 전환 필요성 .....	15
3. 에너지자원으로서의 원자력 .....	17
제 3 장 핵비확산성 핵연료주기 개발의 시도 .....	20
1. 핵비확산성 핵연료주기 개발의 필요성 .....	20
2. 핵비확산성 핵연료주기 개발의 국내외 동향 .....	26
제 4 장 미래를 위한 전략 .....	29
1. 연구개발 로드맵 .....	29
2. 해결해야 할 이슈 .....	33
제 5 장 결론 및 건의사항 .....	35
부록 : 세계 주요국의 원자력발전 확대전망 .....	38

## 표 목 차

표 1. 에너지 소비규모의 국제적 비교 .....	12
표 2. GEN-IV 원자로 후보 노형 .....	26

## 그림 목 차

그림 1. 에너지 수입액의 비중 .....	14
그림 2. 에너지성격의 변화 .....	15
그림 3. 자원의존형에서 기술주도형 체계로의 전환 .....	16
그림 4. 원자력의 역할 .....	18
그림 5. 핵연료주기에 따른 우리나라자원의 소요량 .....	22
그림 6. 전세계 사용후핵연료 발생 시나리오 .....	23
그림 7. 실험실규모 전해환원용 핫셀내부 전경 .....	28
그림 8. 순환형 핵연료주기 완성을 위한 연계도 .....	29
그림 9. 핵비확산성 핵연료주기 개발의 순환도 .....	32

## 핵비확산성 핵연료주기 완성을 위한 새로운 비전과 전략

### <요 약 문>

#### 에너지소비량 증가에 따른 문제점

- 현대사회에서 에너지는 국가산업의 발전 및 국민경제의 필수적인 요소임. 한 국가가 생산·소비하는 에너지의 규모는 그 나라의 경제적 능력을 의미하며, 이는 곧 그 나라의 국부수준을 결정함. 우리나라의 경우에도 지난 20여년 동안 경제성장과 더불어 에너지소비가 꾸준히 증가하여, 현재 에너지소비는 세계 10위, 원유소비는 세계 7위의 수준에 이르고 있음.
- 국가산업이 발전하고 국민경제가 성장할수록 국민 1인당 에너지소비량이 증가함을 감안할 때, 우리나라의 에너지소비는 계속 증가할 것으로 예상됨.
- 그러나, 이러한 에너지소비의 증가는 대량의 온실가스 배출로 인한 지구 온난화현상, 에너지자원의 과도한 해외 수입의존으로 인한 국가경제에 대한 부담, 자원의 불균형적 분포로 인한 에너지수급의 불안 등의 많은 문제를 초래함. 따라서, 에너지 부존자원이 빈약한 우리나라의 경우 향후 국가의 존립을 위협할 수 있는 요소로 작용할 수 있음 (현재 우리나라의 에너지 해외의존도는 97%를 상회하고 있으며, 석유수입의 경우 대부분 중동에 의존하고 있는 실정임).

#### 에너지 패러다임의 전환 필요성

- 이러한 문제의 해결을 위해서는 첨단기술혁신을 통하여 에너지원을 창출하고, 그 비용이 기술비용에 의하여 결정되는 새로운 에너지, 즉 기술주

도형 에너지의 개발이 필요함.

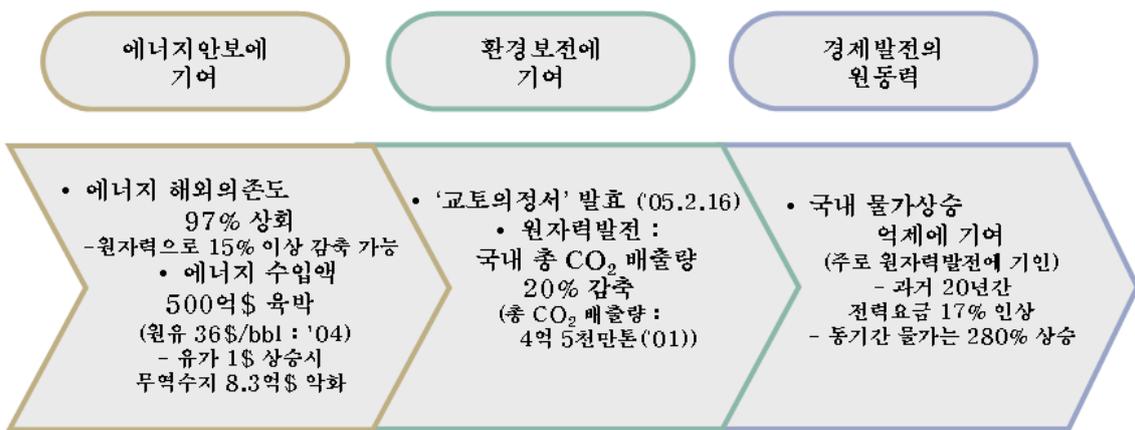
- 우리나라가 2025년까지 에너지정책을 기존의 자원의존형 에너지에서 기술주도형 에너지체계로 전환하여 기술주도형 에너지에 대한 의존도를 현재의 18%에서 40%까지 확대할 경우, 연간 1억8천만톤의 이산화탄소 감축효과를 가져올 수 있으며, 연간 4.3억배럴의 석유수입 절감효과(430억불/년)를 기대할 수 있음.

### 에너지자원으로서의 원자력의 가치

- 이러한 기술주도형 에너지에는 재생·수소·원자력 등이 있는데, 재생에너지의 경우 지속적인 대량생산이 어려울 뿐만 아니라 경제성이 매우 낮음. 또한, 수소에너지의 경우에도 원자력을 이용하지 않는 한 대량으로 얻기가 불가능하기 때문에 현재로서는 원자력이 우리나라의 에너지공급원으로서 최상의 대안이라 판단됨.
- 우리나라가 2025년까지 에너지공급원으로서 원자력에 대한 의존도를 현재의 15%에서 24%까지 확대할 경우, 현재 97%를 상회하는 우리나라의 에너지 해외의존도를 15% 이상 감축할 수 있으며, 에너지수입액을 25% 정도 절약할 수 있어서 에너지안보에 크게 기여할 수 있음.
- 또한, 이산화탄소의 배출량을 20% 정도 줄임으로써 연간 약 3조원의 대기오염비용을 감축하는 효과를 얻을 수 있으므로 환경보전에도 크게 기여할 것으로 판단됨.
- 또한, 원자력은 경제발전의 원동력으로서의 역할을 할 수 있을 것이라고 보여지는데, 이는 과거의 경험에서도 나타나고 있음. 우리나라에서 원자력발전의 도입은 국가경제발전의 큰 공헌을 하였음. 원자력발전을 통하여 생산된 양질의 전력공급으로 국가산업발전에 기여한 것은 물론, 과거 20

년간 국내의 물가는 280% 상승하였는데 비하여 같은 기간의 전력요금은 17% 인상에 머물렀는데, 이는 주로 발전비용이 저렴한 원자력발전에 기인한 것으로 풀이됨.

- 이처럼, 원자력은 우리나라의 에너지안보와 환경보전에 기여할 뿐만 아니라, 경제발전의 원동력으로서 그 역할이 기대됨.

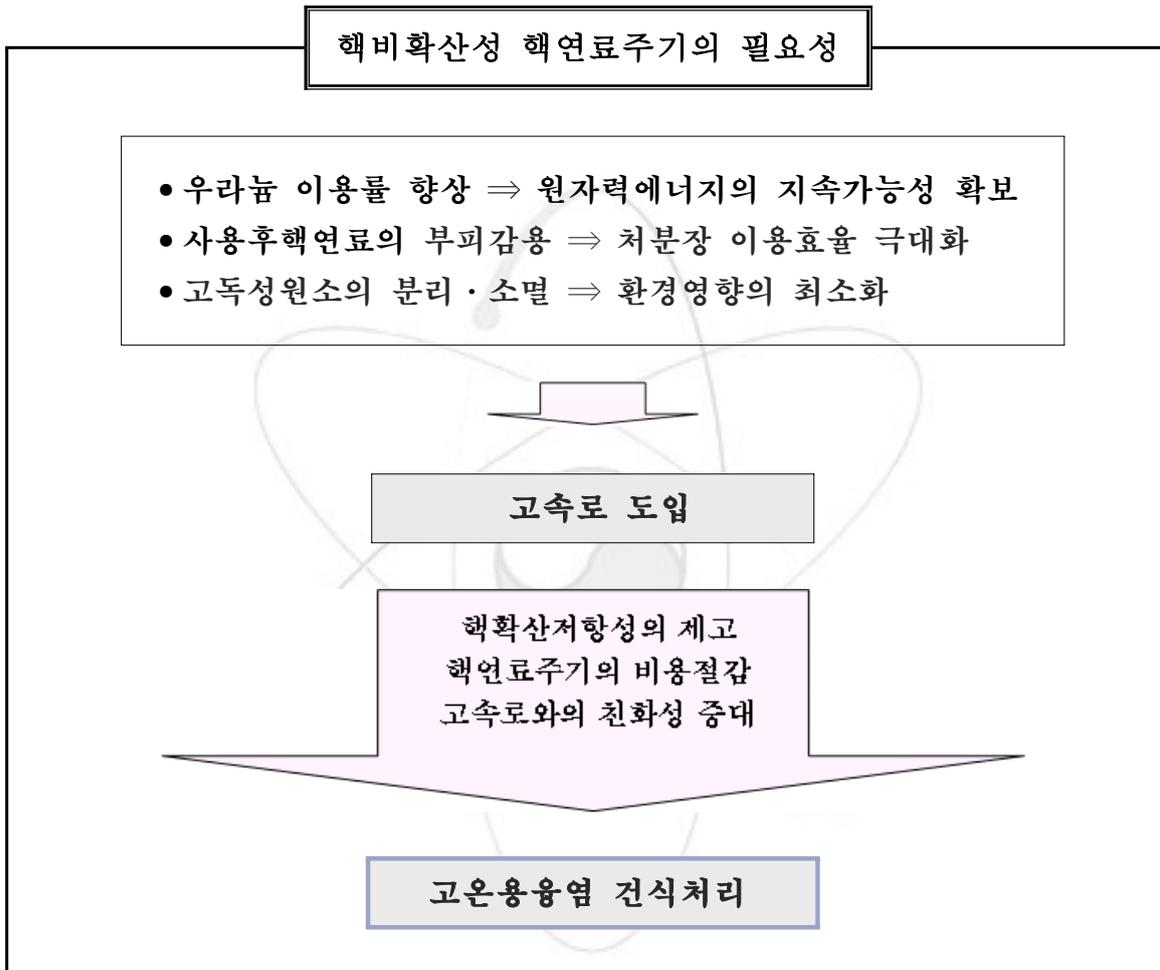


### <원자력의 역할>

#### 핵비확산성 핵연료주기 개발의 필요성

- 에너지공급의 측면에서 원자력이 다른 에너지공급원보다 우수하다는 것은 이론의 여지가 없으나, 미래의 에너지수요의 증가를 고려할 때 그 수요를 단순히 현재 운전되고 있는 전력생산방식에 의한 양적 팽창만으로 충족시키기에는 한계가 있음.
- 따라서, 미래에는 한정적인 천연우라늄의 부존문제를 해결하면서 사용후 핵연료를 효율적으로 관리할 수 있고, 또 환경에 미치는 영향이 최소화된 청정하고 안전한 원자력에너지의 공급체계가 필요함. 이를 위하여 고속로

의 도입이 바람직하며, 그 처리방식으로는 핵확산저항성을 제고하고 핵연료주기의 비용을 절감하며 고연소도 핵연료의 처리에 알맞은 고온용융염 건식처리방식이 적합하다고 판단됨.



### 미래를 위한 전략

- 미래형 고속로 순환형 핵연료주기를 도입하기 위해서는 그 핵심공정인 고온용융염 건식처리기술을 개발하는 것이 시급함. 이를 위한 향후 20년간의 기술개발 로드맵을 다음과 같이 제안함.

○ 2005 ~ 2010 : 원리검증

- 실험실규모의 소규모 모의시설에서 천연우라늄을 이용하여 고온용융염 건식처리방식의 기본원리를 규명함.
- 소규모의 실증시설에서 수행할 실험적 변수들을 도출함.
- 소규모의 시험시설에서 사용후핵연료를 이용하여 공학규모에 필요한 공정데이터를 생산하고, 전처리기술·원격운전에 필요한 유지보수기술·핵물질계량기술 등을 시험함.
- 미국의 아이다호국립연구소(Idaho National Laboratory; INL)에서 우리나라가 설계·제작한 장치를 이용하여 실증실험을 수행함.

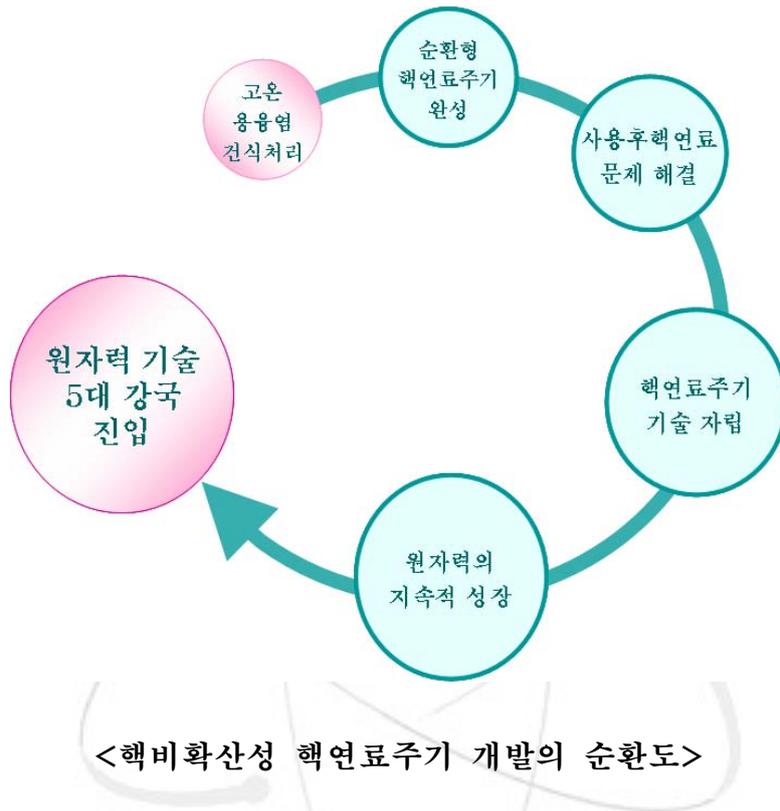
○ 2011 ~ 2020 : 기술검증

- 고온용융염 건식처리기술의 상용화를 위하여 공학규모의 실증시설에서 기술검증을 수행함.
- 공학규모 모의시설과 기존의 소규모 실증시설을 개조하여 공학규모 실증을 위한 데이터를 생산하고, 데이터생산과 병행하여 공학규모의 실증시설을 2016년까지 확보함.
- 2016년부터 2020년까지 공학규모의 실증시설을 이용하여 기술검증을 하는 한편, 상용화의 타당성 평가를 완료함.
- 한·미원자력협정을 개정하여 순환형 핵연료주기의 상용화를 위한 기반을 마련함.

○ 2021 ~ 2025 : 실용화

- 2020년까지 상용규모의 원형시설을 확보하여 고온용융염 건식처리 공정을 실용화함.
- 2026년부터는 고속로의 초기노심용 금속핵연료를 생산하여 2030년대 초 도입예정인 고속로에 공급함.
- 사용후핵연료의 부피감용을 위해서 경수로의 사용후핵연료를 전해정련처리하여 대량의 우라늄을 회수, 중·저준위화하는 작업을 병행함.

- 이상과 같은 기술개발 로드맵이 실현되는 경우, 우리나라는 순환형 핵연료주기 완성을 위한 기반시스템을 갖추고 21세기 원자력 르네상스시대를 맞아 세계의 기술리더로서 자리매김할 수 있을 것으로 기대됨.



- 고온용융염 건식처리기술을 이용한 고속로 순환형 핵연료주기의 성공적 추진을 위해서는 한·미 원자력협력의 증대, 안정적인 재원의 확보, 국민 수용성의 확보 등의 기술외적인 요소가 전제되어야 하므로, 그 어느 때보다 정부의 강력한 의지표명과 정책추진이 필요한 시점임.

## 제 1 장 서 언

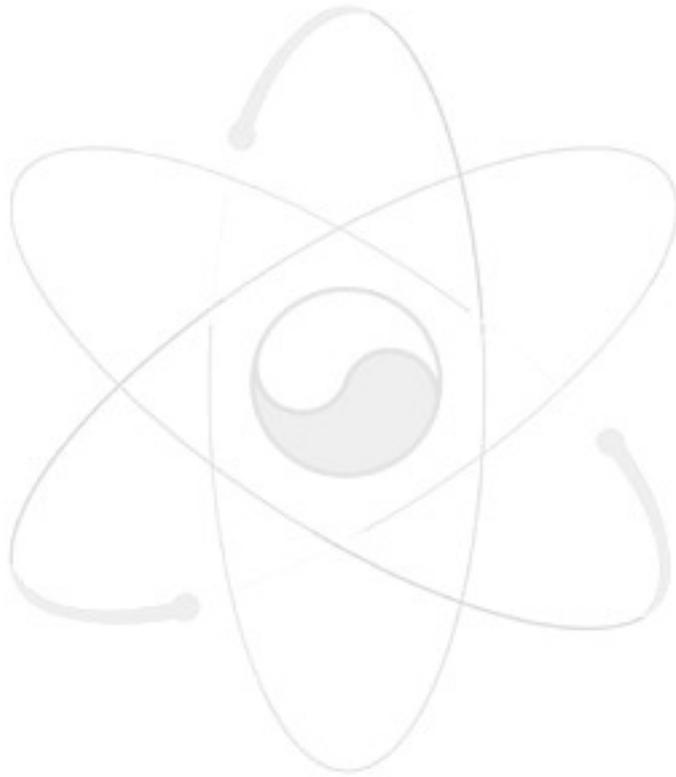
2050년의 세계인구는 현재의 약 60억에서 90억까지 증가할 전망이다. 이는 삶의 질 향상을 추구하는 인간의 욕구와 더불어 에너지수요의 증대를 촉진하는 원인이 되고 있다. 그러나, 이러한 에너지수요의 증가는 대량의 온실가스 배출로 인한 지구온난화현상, 에너지자원의 과도한 해외 수입의존으로 인한 국가경제에 대한 부담, 자원의 불균형적 분포로 인한 에너지수급의 불안 등 많은 문제를 초래하게 된다.

이러한 문제의 해결을 위하여 화석연료에너지를 대체할 공급원으로서 ‘원자력’에 대한 관심이 증폭되고 있다. 우리나라를 비롯한 동아시아 국가들은 에너지공급원으로서 원자력에 대한 의존도를 계속 확대해 나갈 전망이다, 미국의 경우에도 부시행정부가 출범하면서 ‘탈석유’를 목표로 신규 원전건설촉진에 주력하고 있다. 최근 미국이 발표한 국제에너지파트너십(Global Nuclear Energy Partnership; GNEP)도 이러한 노력의 일환이라고 볼 수 있다.

에너지공급의 측면에서 원자력이 다른 에너지공급원보다 우수하다는 것은 이론의 여지가 없으나, 원자력발전이 수반하여 불가피하게 발생하는 사용후핵연료의 효율적인 관리·처분이 해결되어야 할 시급한 과제이다. 현재 우리나라에서는 연간 7백여톤의 사용후핵연료가 발생하며, 이미 누적되어 있는 사용후핵연료만도 약 8천여톤에 이르고 있다. 그럼에도 불구하고, 현재까지 사용후핵연료의 관리에 대한 정책방향이 설정되어 있지 않으며, 다만 지난 2004년 원자력위원회에서는 국민적 공감대를 얻기 위한 방안으로 공론화과정을 거쳐 사용후핵연료의 관리정책을 수립하기로 결정한 바 있을 뿐이다. 사용후핵연료의 소내 저장용량의 한계를 고려할 때 공론화를 통한 핵연료주기 정책의 수립이 시급히 요청되고 있다.

본 보고서는 이러한 요청에 따라, 원자력선진국의 핵연료주기 기술개발의

동향과 국내여건을 분석하고, 이를 토대로 하여 핵연료주기에 관한 국가의 정책을 수립하는 데 필요한 방향을 제시하고자 작성되었다.



## 제 2 장 에너지 패러다임의 전환

### 1. 문제의 진단

#### 문제의 진단

- 에너지와 전력소비량의 꾸준한 증가
- 온실가스 감축의무의 부담가중
- 에너지자원 수입액의 증가
- 에너지수급의 불안 상존

현대사회에서 에너지는 국가산업의 발전 및 국민경제의 필수적인 요소이다. 한 국가가 생산·소비하는 에너지의 규모는 그 나라의 경제능력을 의미하며, 이는 곧 그 나라의 국부수준을 결정한다. 우리나라의 경우에도 지난 20여년 동안 경제성장과 더불어 에너지소비가 꾸준히 증가하여, 2005년 현재 에너지소비는 세계 10위, 원유소비는 세계 7위의 수준에 이르고 있다.<sup>1)</sup>

표 1. 에너지 소비규모의 국제적 비교

순 위	에너지소비 ('05) (백만TOE)		원유소비 ('05) (천B/일)	
	1	미국	2,337	미국
2	중국	1,554	중국	6,988
3	러시아	680	일본	5,360
4	일본	525	러시아	2,753
5	인도	387	독일	2,586
6	독일	324	인도	2,485
7	캐나다	318	<b>한국</b>	<b>2,308</b>
8	프랑스	262	캐나다	2,241
9	영국	227	멕시코	1,978
<b>10</b>	<b>한국</b>	<b>225</b>	프랑스	1,961

\*자료: BP Statistical Review of World Energy June 2005

또한, 에너지는 인간의 삶의 질 향상의 기본요소라고 할 수 있는데, 유엔의 통계자료에서도 인간개발지수(Human Development Index; HDI)가 증가할수록 1인당 에너지와 전력소비량이 증가하는 것으로 나타나 있다. 이는 우리나라의 에너지와 전력소비량이 향후 적어도 일정기간 동안에는 계속 증가할 것임을 의미한다.

그러나, 지속적인 에너지소비량의 증가는 또 다른 문제를 유발한다. 즉, (1) 대량의 온실가스 배출로 인한 지구온난화현상, (2) 에너지자원의 과도한 해외 수입의존으로 인한 국가경제에 대한 부담, (3) 자원의 불균형적 분포로 인한 에너지수급의 불안 등이 그것이다.

지구온난화현상은 석유나 석탄 등 화석에너지의 사용에 의하여 발생하는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>) 등의 온실가스에 의하여 야기되는데, 특히 이산화탄소의 경우 그 농도변화는 산업혁명 이전의 280ppm에서 꾸준히 증가하여 현재 약 370ppm에 이르고 있으며, 앞으로도 계속 증가할 것으로 전망된다.<sup>2)</sup> 지구온난화현상으로 말미암아 지구에 미치는 영향으로는 기상이변, 해수면의 상승으로 인한 해변의 침식과 홍수피해, 열대우림의 파괴와 사막화, 생태계의 파괴와 생물종의 변화 등이 있다.

따라서, 국제사회는 이러한 온실가스의 증가를 범지구적 문제로 인식하고, 기술이나 정책수단을 통하여 온실가스의 배출을 줄이고자 공동의 노력을 경주하고 있다. 하나의 예로, 지난 2005년 2월 ‘교토의정서’가 발효된 바 있으며, 이는 각국의 온실가스 감축의무의 부담을 가중시키고 있다. 우리나라의 경우, 2013년 감축의무 이행당사국이 될 것으로 전망된다.

한편, 에너지 부존자원이 빈약한 우리나라의 경우에 에너지 해외의존도는 계속 증가되어 현재 97%를 상회하고 있다. 이를 구체적으로 살펴보면, 2005년 에너지수입액은 667억불로 우리나라 총수입액(2,612억불)의 25.5%를 차지하며, 반도체와 자동차 수출총액(595억불)을 능가하고 있음을 알 수 있다

(그림 1 참조).<sup>3)</sup> 향후 에너지와 전력소비량의 증가를 고려할 때, 이러한 에너지수입액의 비중은 더욱 늘어날 것으로 전망된다.

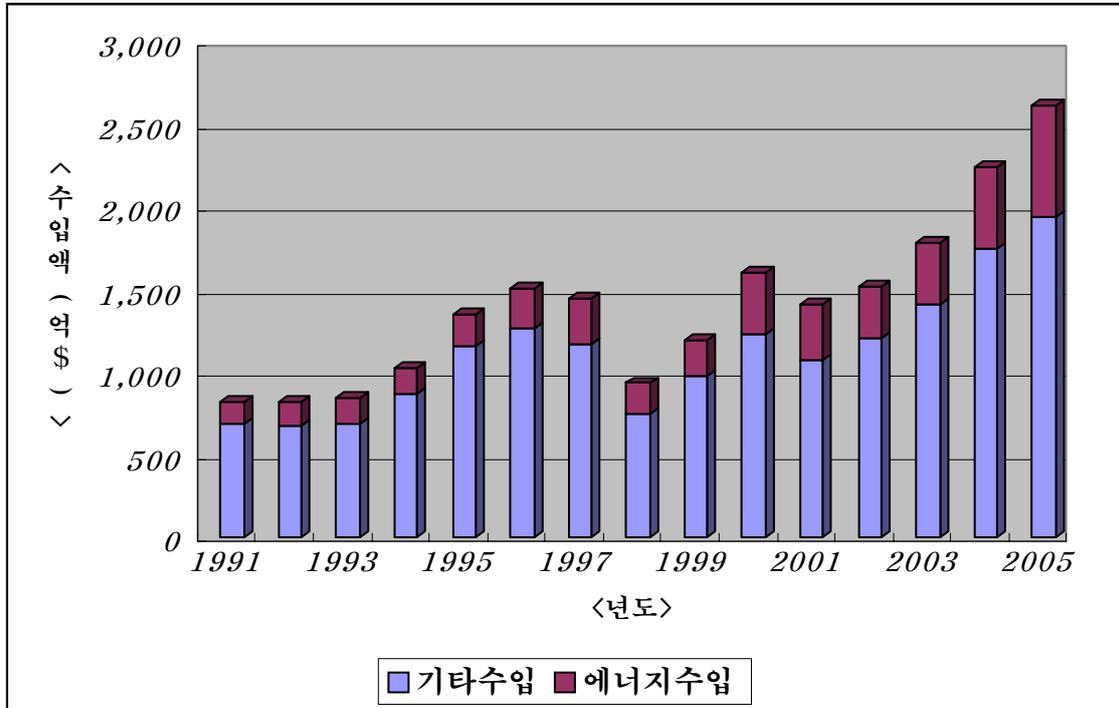


그림 1. 에너지 수입액의 비중

더욱이, 이러한 화석연료는 그의 불균형적 분포로 인하여 에너지수급의 불안정을 야기한다. 우리나라의 경우에도 석유수입의 대부분을 중동에 의존하고 있다(70% 이상).<sup>4)</sup> 현재 유가는 계속 상승하고 있고, 중국 및 인도의 엄청난 에너지소비의 증가가 예상되므로 향후 에너지문제는 국가의 존립을 위협할 수 있는 요소로 작용할 가능성이 있다.

## 2. 에너지정책의 전환 필요성

### 에너지 패러다임의 전환

#### ■ 자원의존형 에너지공급체계에서 기술주도형 에너지공급체계로의 전환

산업혁명 이후 현재에 이르기까지 인류가 최종 소비하는 에너지의 형태는 대부분 원재료를 적절히 가공한 것으로서, 그 비용이 주로 원료가격에 의하여 결정되는 자원의존형 에너지였다. 그러나, 금세기 중반 화석연료의 고갈로 인한 에너지공급의 수급불균형이 예상되는 현시점에서는 이러한 자원의존형 에너지만으로 전세계의 에너지수요를 감당하기는 어려울 것으로 예측된다. 따라서, 가까운 장래에 첨단기술혁신을 통하여 에너지원을 창출하고 그 비용이 기술비용에 의하여 결정되는 새로운 에너지, 즉 기술주도형 에너지의 개발이 필수불가결하다 (그림 2 참조).

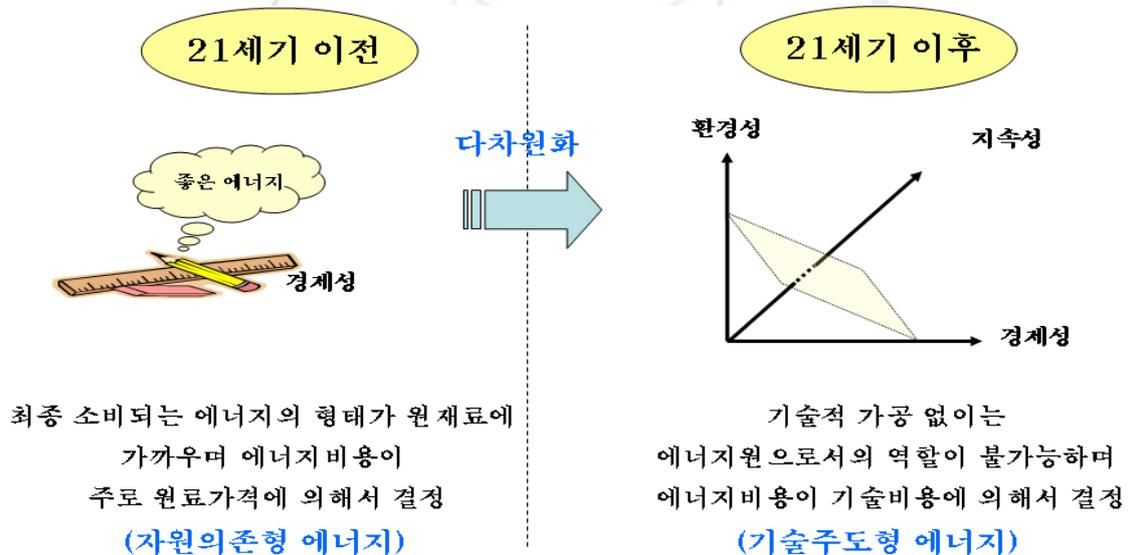


그림 2. 에너지성격의 변화

우리나라가 2025년까지 에너지정책을 그림 3에 나타난 바와 같이 자원의  
 존형 에너지에서 기술주도형 에너지체계로 전환하여 기술주도형 에너지에  
 대한 의존도를 현재의 18%에서 40%까지 확대할 경우, 연간 1억8천만톤의  
 이산화탄소 감축효과를 가져올 수 있으며, 연간 4.3억배럴의 석유수입 절감  
 효과(430억불/년)를 기대할 수 있다 (그림 3 참조).<sup>5)</sup>

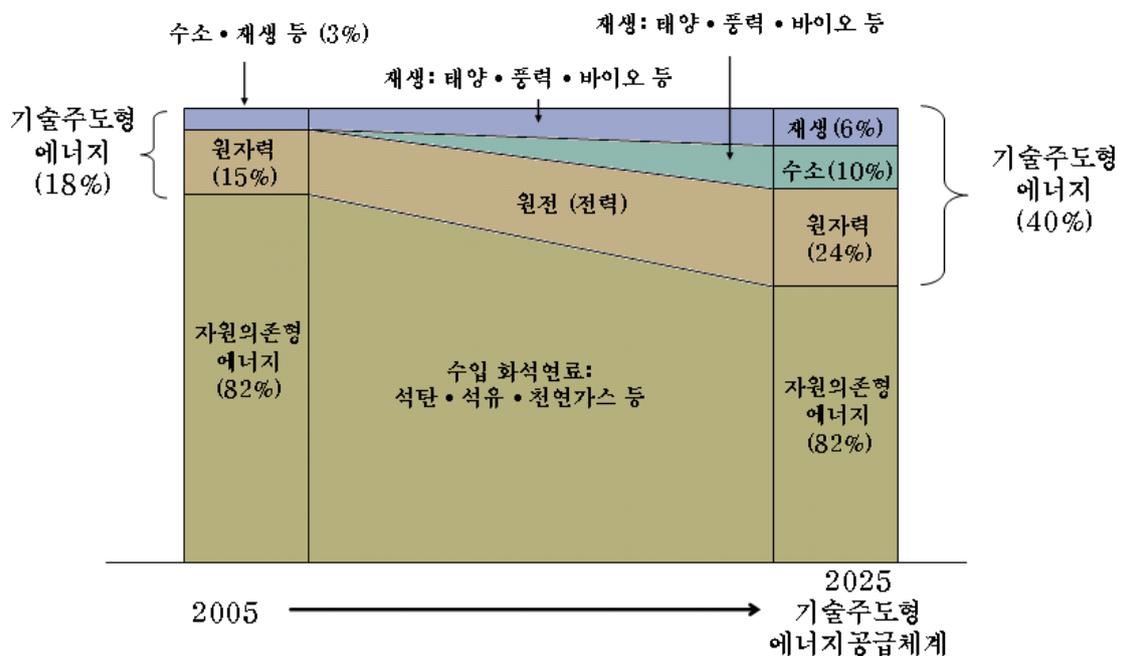


그림 3. 자원의존형에서 기술주도형 체계로의 전환

### 3. 에너지자원으로서의 원자력

#### 우리나라에서의 원자력의 의미

- 기술주도형 에너지로서 에너지안보에 기여
- 온실가스배출 감소로 인한 환경보전에 기여
- 저렴한 전력공급을 통한 경제발전의 원동력

이러한 기술주도형 에너지에는 재생·수소·원자력 등이 있는데, 재생에너지의 경우 지속적인 대량생산이 어려울 뿐만 아니라 경제성이 매우 낮다. 특히, 우리나라의 경우 여러 가지 여건상 이를 개발하는 데 많은 제약이 따르는데, 즉 태양열이나 풍력은 햇빛이 비치거나 바람이 부는 시간이 아니면 발전이 불가능하므로 반드시 보조설비를 갖추어야 한다. 뿐만 아니라, 반사경이나 풍차를 설치하는 데에는 넓은 공간을 필요로 하는데, 우리나라와 같이 국토의 면적이 좁고 산악지대가 많은 나라에서는 이를 이용하여 대량의 에너지를 얻기가 거의 불가능하다. 또한, 프랑스나 영국의 사례에서 나타나듯이 풍력발전소의 건설에 따른 경관훼손, 저주파소음 등으로 인한 지역주민의 반대가 높을 것으로 예상된다. 영국과 같은 일부국가에서는 입지문제를 해결하기 위하여 바다에 풍력발전소를 건설하기도 하지만, 우리나라의 경우 어민들의 생활터전인 바다의 보호와 환경보전문제로 말미암아 이러한 시설을 바다위에 대규모로 건설하는 데에는 많은 어려움이 따른다.

또한, 수소에너지의 경우에도 원자력을 이용하지 않는 한 대량으로 얻기가 불가능하기 때문에, 현재로서는 원자력이 우리나라의 에너지공급원으로서 최상의 대안이라 판단된다. 우리나라가 2025년까지 에너지공급원으로서 원자력에 대한 의존도를 24%까지 확대할 경우, 현재 97%를 상회하는 에너지 해외의존도를 15% 이상 감축할 수 있으며, 에너지수입액을 25% 정도 절약할 수 있어서 에너지안보에 크게 기여할 수 있다. 또한, 이산화탄소의 배출

량을 20% 정도 감축함으로써 연간 약 3조원의 대기오염비용을 절감하는 효과를 얻을 수 있어서 환경보전에도 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.<sup>6)</sup>

또한, 원자력은 경제발전의 원동력으로서의 역할을 할 수 있을 것으로 보여지는데, 이는 과거의 경험에서도 알 수 있다. 우리나라에서 원자력발전의 도입은 국가경제발전의 큰 공헌을 하였다고 평가된다. 원자력발전을 통하여 생산된 양질의 전력공급으로 국가산업발전에 기여한 것은 물론, 과거 20년간 국내의 물가는 280% 상승하였는데 비하여 같은 기간의 전력요금은 17% 인상에 머물렀는데, 이는 주로 발전비용이 저렴한 원자력발전에 기인한 것으로 풀이되고 있다 (그림 4 참조).<sup>7)</sup>

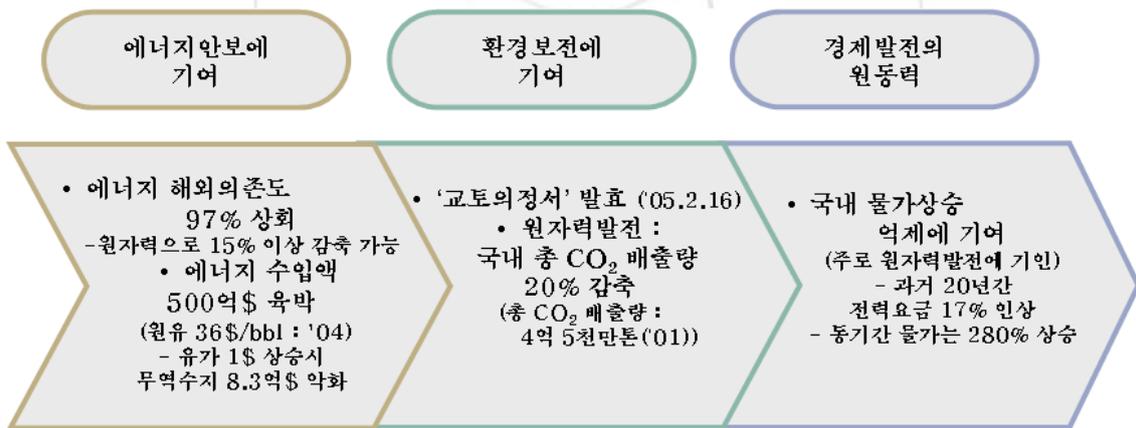
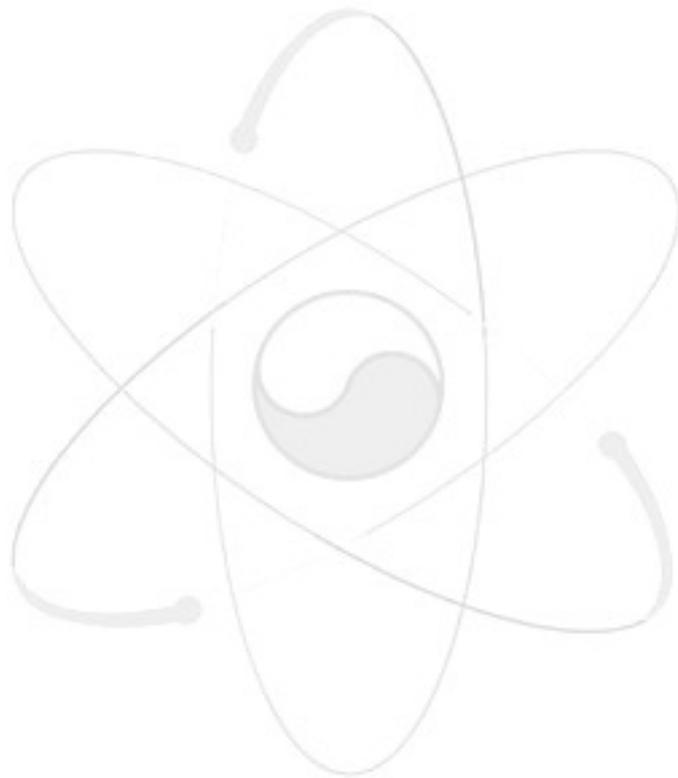


그림 4. 원자력의 역할

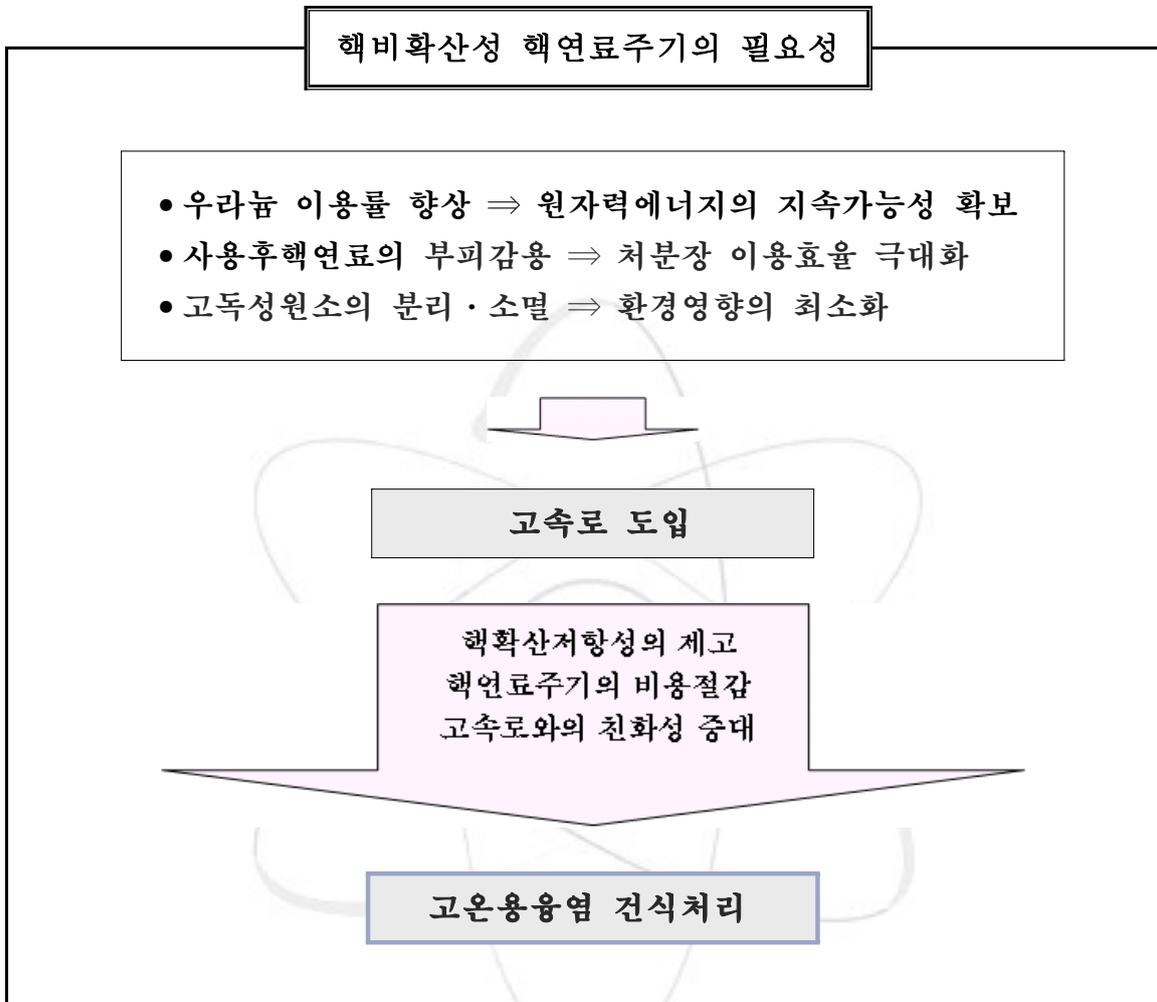
이처럼, 원자력은 대표적인 기술주도형 에너지로서 에너지안보에 기여하고, 온실가스의 배출감소로 환경보전에 기여하며, 또한 안정적이고 저렴한 전력공급을 통하여 경제발전의 원동력으로서 그 역할이 크게 기대된다. 따라서, 미국을 비롯한 세계 각국은 원자력개발을 지속적으로 추진해 나가고 있다. 2006년 8월 현재 전세계 30여개국에서 운전 중인 원전은 총 442기(총발전설비용량 370GWe)로서 전력수요의 약 16%를 공급하고 있으며, 중국·인

도 등 아시아지역을 중심으로 원자력에 대한 의존도를 점차 늘려가고 있다.<sup>8)</sup>  
(부록 참조)



### 제 3 장 핵비확산성 핵연료주기 개발의 시도

#### 1. 핵비확산성 핵연료주기 개발의 필요성



앞에서 검토한 바와 같이 원자력은 다른 에너지공급원과 비교하여 여러 가지 이점을 가지고 있으며, 더욱이 근래에 들어와 유가가 급격히 상승하면서 그 상대적 경제성이 향상되고 있다. 그러나, 미래의 에너지수요의 증가를 고려할 때, 그 수요를 단순히 현재 운전되고 있는 전력생산방식에 의한 양적 팽창만으로 충족시키기에는 다음과 같은 문제가 있다.

(1) 현재 천연우라늄의 경우, 적당한 가격수준내에서 수요·공급이 이루어

지고 있다. 그러나, 최근 들어 그 가격이 급격하게 상승하고 있으며 이러한 추세가 향후 계속될 전망이다. 현재의 우라늄공급체계는 구소련의 핵탄두해체에서 나오는 고농축우라늄의 민간 전용에 크게 의존하고 있는 바, 이와 같은 체계는 현재 미국-러시아간의 1차계약이 만료되는 2013년 이후에는 소멸되며, 따라서 천연우라늄자원의 고갈우려에 따른 우라늄가격의 추가적인 상승이 전망된다.

- (2) 원자력발전은 불가피하게 사용후핵연료의 발생을 야기한다. 따라서, 지속적인 원자력발전을 위해서는 사용후핵연료의 누적문제를 해결해야 하는데, 미국의 유카산(Yucca Mt.) 프로젝트 사례에서도 나타나듯이 대규모의 원자력발전을 추진하는 국가들에 있어서는 사용후핵연료의 관리·처분문제가 큰 부담이 되고 있다.
- (3) 사용후핵연료는 환경위해도가 큰 장반감기핵종을 함유하고 있어서 직접처분을 하더라도 수만년에서 수십만년에 이르는 처분장의 관리기간을 필요로 한다. 이는 인류의 역사를 초월하는 상상하기 어려운 매우 긴 시간이다.

따라서, 미래에는 한정적인 천연우라늄의 부존문제를 해결하면서 사용후핵연료를 효율적으로 관리할 수 있고, 또 환경에 미치는 영향이 최소화된 청정하고 안전한 원자력에너지의 공급체계가 필요하다. 이를 위하여 고속로의 도입이 바람직하다고 판단되며, 고속로를 도입하여 전력생산과 함께 장수명핵종을 소멸시키는 경우 다음과 같은 이점이 기대된다.

- (1) 한정적 자원인 우라늄의 이용률을 증대(최대 100배까지)시켜 원자력에너지의 지속가능성을 확보할 수 있다. 고속로는 고속중성자에 기인하여 우라늄-238이 플루토늄으로 변환할 확률이 높고, 또한 사용후핵연료를 처리하여 타다 남은 사용후핵연료내의 유용한 핵물질을 재이용하기 때문에 기존 경수로에 바탕을 둔 직접처분주기에 비하여 우라늄자원의 소모량을 크게 줄일 수 있다. 그림 5에 나타난 바와 같이 고속로

를 도입하지 않는 직접처분의 경우, 우라늄채광법에서 혁신적 기술의 진전이 이루어지지 않으면 2060년경에 이르러서는 우라늄자원(미발견한 우라늄 포함)이 고갈될 것으로 전망된다. 반면, 2030년에 사용후핵연료를 재활용하는 고속로를 도입하는 경우에는 우라늄자원의 이용을 2100년 이후까지 지속시킬 수 있다 (그림 5 참조).<sup>9)</sup>

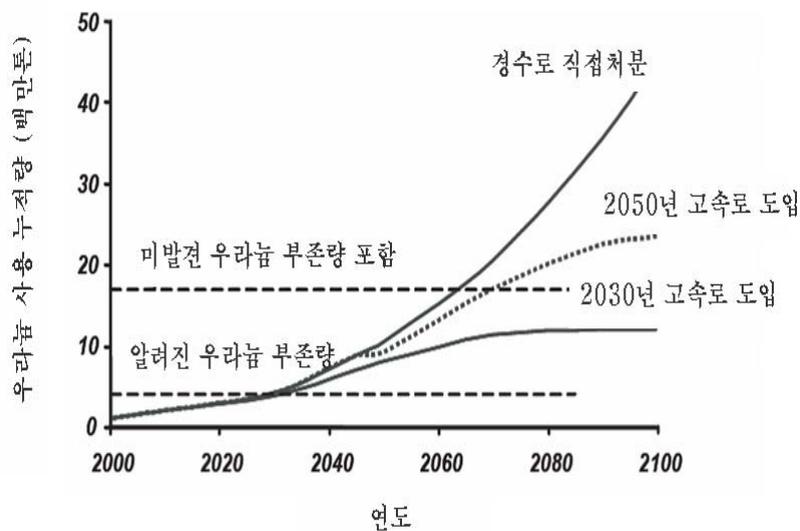


그림 5. 핵연료주기에 따른 우라늄자원의 소요량

- (2) 원자력발전으로 발생하는 사용후핵연료의 양을 감축하여 처분장이용의 효율을 극대화할 수 있다. 현재, 세계적으로 약 20만톤의 사용후핵연료가 누적되어 있으며, 매년 약 1만여톤의 사용후핵연료가 추가적으로 발생하고 있다. 향후 사용후핵연료를 재활용하지 않고 직접처분하는 방식을 채택하는 경우, 그림 6에서 보는 바와 같이 사용후핵연료의 누적량은 급증하게 된다. 현재의 원자력발전규모가 유지될 경우, 2050년경에 이르러서는 70여만톤 이상의 사용후핵연료가 누적될 것으로 예상된다. 반면, 기존의 경수로 사용후핵연료를 재처리하여 그 속에 포함된

악티나이드(Minor Actinide)를 연소시키는 고속로를 활용할 경우, 사용후핵연료의 누적량은 급감하게 된다.<sup>10)</sup>

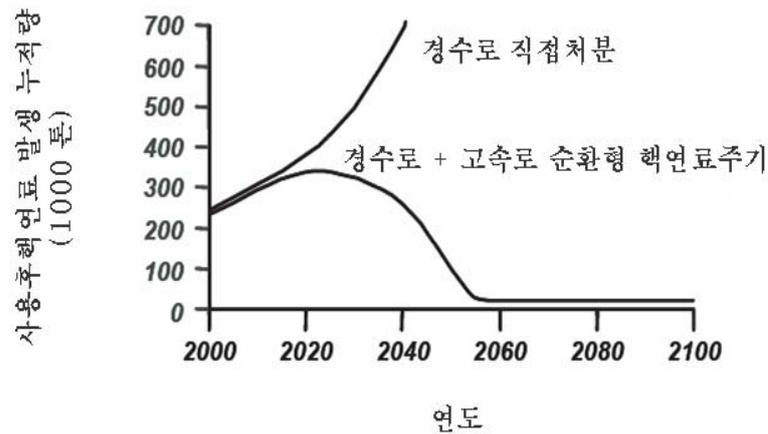


그림 6. 전세계 사용후핵연료 발생 시나리오

(3) 고독성원소를 분리·소멸하여 사용후핵연료의 처분에 따른 환경영향을 최소화할 수 있다. 고속로는 아주 경한(hard) 중성자에너지 스펙트럼을 갖고 있어서 악티나이드계열 원소들을 소멸시키는 데 그 효과가 기존의 경수로에 비하여 아주 뛰어나다. 현재 일본·프랑스를 포함한 몇몇 국가에서는 기존의 경수로에 혼합핵연료를 이용하여 플루토늄을 소비하는데, 이처럼 경수로를 이용하는 경우 우라늄이 전혀 없는 핵연료를 사용한다고 하더라도 플루토늄을 완전히 소모할 수는 없다. 열중성자 에너지스펙트럼에 기인한 짝수 동위원소의 증가로 인하여 2~3회 이상의 재순환이 불가능하기 때문이다. 따라서, 플루토늄과 장반감기를 갖는 고독성 잔여 악티나이드의 완전한 소멸을 위해서는 고속로가 필수적이다.

이와 같이, 고속로를 이용한 순환형 핵연료주기를 채택함으로써 우라늄의

이용률을 향상시키고, 사용후핵연료 처분장의 이용효율을 극대화하며, 사용후핵연료의 처분에 따른 환경영향을 최소화할 수 있다. 그러나, 이러한 순환형 핵연료주기의 많은 이점에도 불구하고, 현재 영국·프랑스·일본 등에서 상용화하고 있는 습식재처리방식을 도입, 순환형 핵연료주기를 채택할 경우 다음과 같은 몇 가지 문제점이 있다.

- (1) 습식재처리에서는 퓨렉스(PUREX)공정을 이용하여 핵무기원료인 순수 플루토늄을 회수할 수 있기 때문에 핵확산의 위험성을 내포하고 있다.
- (2) 현재 상용화된 습식재처리는 공정이 복잡하여 시설의 건설비와 운영비가 많이 소요된다.
- (3) 습식방식으로 재처리하기 위해서는 사용후핵연료를 장기간(15년 이상) 냉각하여야 한다. 이는 하나의 핵연료사이클을 완성하기 위해서는 수십년의 기간을 필요로 함을 의미하며, 따라서 불필요한 사용후핵연료의 저장공간과 관리비용이 소요된다.

이와 같은 기존의 습식재처리 공정의 문제점을 보완하기 위하여 전세계적으로 고온용융염 건식처리방식의 연구가 각광받고 있다. 고온용융염 건식처리기술을 이용한 고속로 순환형 핵연료주기를 채택할 경우, 다음과 같은 이점이 있다.

- (1) 핵확산저항성의 제고 : 고온용융염 건식처리는 플루토늄을 따로 분리하지 않고 초우란원소(넵티늄·플루토늄·아메리슘·큐리움 등)를 함께 회수하여 재활용하기 때문에 기존의 습식재처리공정에 비하여 핵확산저항성이 매우 높은 것으로 평가되고 있다.
- (2) 핵연료주기의 비용절감 : 고온용융염 건식처리와 고속로 핵연료로 각광받고 있는 금속연료의 제조를 위한 야금처리기술은 매우 간단할 뿐만 아니라, 기존의 습식방법으로 재처리하는 데 필요한 화학적 전환단계를 생략하고 금속을 직접 생산함으로써, 전체 핵연료주기의 비용을 크게 절감시킬 수 있다.

(3) 고속로와의 친화성 증대 : 습식재처리의 경우, 고연소도에 기인하여 장기간(15년 이상)의 냉각을 필요로 하는 반면, 고온용융염 건식처리기술은 냉각기간에 상관없이 바로 처리가 가능하다. 따라서, 고온용융염 건식처리기술은 습식처리에 비하여 고속로와의 친화성이 매우 크다고 할 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 향후 증가하는 에너지수요량을 충족시키고 원자력발전의 규모를 확대하기 위해서는 우리나라의 이용률을 높이고 사용후핵연료 처분장의 이용효율을 극대화하며 사용후핵연료의 처분에 따른 환경영향을 최소화할 수 있는 고속로 순환형 핵연료주기의 채택이 바람직하다. 그리고, 그 처리방식으로는 핵확산저항성을 제고하고 핵연료주기의 비용을 절감하며, 고연소도 핵연료의 처리에 알맞은 고온용융염 건식처리방식이 적합하다고 할 수 있다.

## 2. 핵비확산성 핵연료주기 개발의 국내외 동향

### 핵비확산성 핵연료주기 개발의 국제동향

- GEN-IV 프로그램 (국제포럼 10개국)
- 국제에너지파트너십 (GNEP) (미국)
- 고속로 타당성 개발 프로그램 (일본)
- 국제 혁신 원자로 및 핵연료주기 프로젝트 (IAEA)

1990년대부터 미국을 비롯한 원자력선진국에서는 고속로 순환형 핵연료주기와 고온용융염 건식처리방식과 관련하여 기술개발을 활발히 추진하고 있다. 예컨대, 미국의 주도로 세계 10개국(남아프리카공화국·미국·브라질·스위스·아르헨티나·영국·일본·캐나다·프랑스 및 한국)은 혁신적 개념의 제4세대 원자로인 GEN-IV 원자로를 국제공동연구로 개발하기로 합의하고 2002년 그 기술개발 로드맵을 발표하였는데, 액체금속로·가스냉각고속로 등 순환형 핵연료주기에 연구의 초점을 맞추고 있으며, 고온용융염 건식처리 기술을 기본공정으로 채택하고 있다 (표 2 참조).<sup>11)</sup>

표 2. GEN-IV 원자로 후보 노형

원자로형	중성자 스펙트럼	핵연료주기	규모	응용 분야
액체금속로 (SFR)	고속	순환	중·대	전력생산, 악티나이드소멸
납합금고속로 (LFR)	고속	순환	소·중·대	전력생산, 수소생산
가스냉각고속로 (GFR)	고속	순환	중	전력생산, 수소생산, 악티나이드소멸
초고온가스로 (VHTR)	저속	비순환	중	전력생산, 수소생산, 공정열생산
초임계로 (SCWR)	저속, 고속	비순환, 순환	대	전력생산
용융염로 (MSR)	저속	순환	대	전력생산, 수소생산, 악티나이드소멸

\*자료: Advanced Fuel Cycle Initiative: Objectives, Approach, and Technology Summary

미국은 또한 선진핵연료주기(AFCI) 프로그램을 통하여, 고온용융염 건식 처리인 PYROX 기술에 관한 연구를 수행 중이며,<sup>12)</sup> 이 외에 최근 부시대통령 연두교서에서 언급된 국제에너지파트너쉽(GNEP)에서 나타나듯이 모든 초우란원소를 함께 회수하여 개량형연소로(ABR)에서 재순환 및 소멸하는 것을 목표로 연구를 진행 중이다.<sup>13)</sup>

일본의 경우에는 지난 1999년 7월부터 전기사업자를 비롯하여 중앙전력연구소·핵연료주기센터 및 일본원자력연구소 등이 공동으로 “고속증식로 사이클의 실용화 전략조사” 연구를 본격적으로 착수하고, 차세대 핵연료주기에 대한 평가연구를 수행하고 있다. 이를 통하여, 일본은 최적의 원자로 및 핵연료주기, 핵연료의 형태 및 제조방법 등을 포함하는 차세대 핵연료주기를 중점적으로 추진하며, 4단계가 완료되는 2015년까지 독자적인 고속로 및 고속로의 핵연료주기를 완성할 것을 목표로 설정하고 있다. 1단계(1997~1999)에서는 모든 원자로 및 핵연료주기, 핵연료의 형태 및 제조방법 등에 대한 검토를 수행하여 2단계에서 분석할 기술을 도출하였다. 2단계(2000~2005)에서는 네 가지의 고속로주기 개념에 대하여 타당성 분석을 수행하여 최종적으로 액체금속로와 선진습식재처리를 통한 산화핵연료의 개념을, 그리고 보완개념으로 액체금속로와 고온용융염 건식처리를 통한 금속연료를 대안으로 선정한 바 있다.<sup>14)</sup>

그리고, 러시아는 1960년대 초반 고속로의 시험로인 BOR-60 건설계획을 확정하면서 이의 핵연료주기를 완성하기 위하여 독자적인 고온용융염 건식 처리의 연구개발을 본격적으로 착수하였다. 이에, 원자로연구소(RIAR)에서는 전해제련방법인 디디피(Dimitrovgrad Dry Process; DDP)공정을 개발하였으며, 여기서 회수한 핵연료물질을 고속로에 재순환하기 위한 진동충진법(VIPAC) 핵연료의 제조공정도 병행하여 개발하였다.<sup>15)</sup>

이 외에도, IAEA에서는 국제공동연구를 통하여 21세기 지속가능한 혁신 원자력시스템의 도출을 위한 평가시스템을 구축하기 위한 INPRO 국제공동 연구를 수행 중이며,<sup>13)</sup> 또한 “지속가능한 원자력에너지를 위한 핵물질관리전

략”이라는 주제를 설정하고 전문가그룹을 결성, 핵연료주기 전략수립을 위하여 노력하고 있다.<sup>16)</sup> OECD/NEA 역시 국제전문가그룹을 결성하여 “선진 핵연료주기가 방사성폐기물관리에 미치는 영향”에 관한 연구를 수행하는 등 전세계적으로 고속로 순환형 핵연료주기와 고온용융염 건식처리를 위한 연구개발이 활발히 추진되고 있다.<sup>17)</sup>

우리나라에서도 지난 1997년 원자력증장기사업을 통하여 고온용융염 건식처리의 연구개발에 착수하여 고온용융염계에서 우라늄산화물의 금속전환과 리튬산화물(Li<sub>2</sub>O) 전해반응이 동시에 진행되는 통합반응메카니즘을 기초로 한 전해환원공정을 독자적으로 개발하는 성과를 거둔 바 있다. 또한, 2005년부터는 실험실규모의 실증용 전해환원시스템을 설계·제작하여 성능평가를 수행하였고, 사용후핵연료를 이용한 실험을 수행할 수 있는 핫셀을 건조하였다. 이로써, 우리나라는 고온용융염 건식처리의 연구에 대한 기반을 마련하였다고 평가받고 있다.



그림 7. 실험실규모 전해환원용 핫셀내부 전경

## 제 4 장 미래를 위한 전략

### 1. 연구개발 로드맵

원자력선진국들은 2030년경 상용화를 목표로, 안전성·폐기물관리·핵확산저항성 및 대중수용성을 만족시키면서 가격경쟁력과 신뢰성을 갖춘 원자력시스템 및 핵연료주기의 기술개발에 박차를 가하고 있다. 따라서, 우리나라가 21세기 원자력기술의 종속국으로 전락하지 않기 위해서, 그리고 현재 원자력 6대강국으로서의 지위를 공고히 유지하기 위해서는 고속로 순환형 핵연료주기와 고온용융염 건식처리방식의 기술개발이 시급한 실정이다.

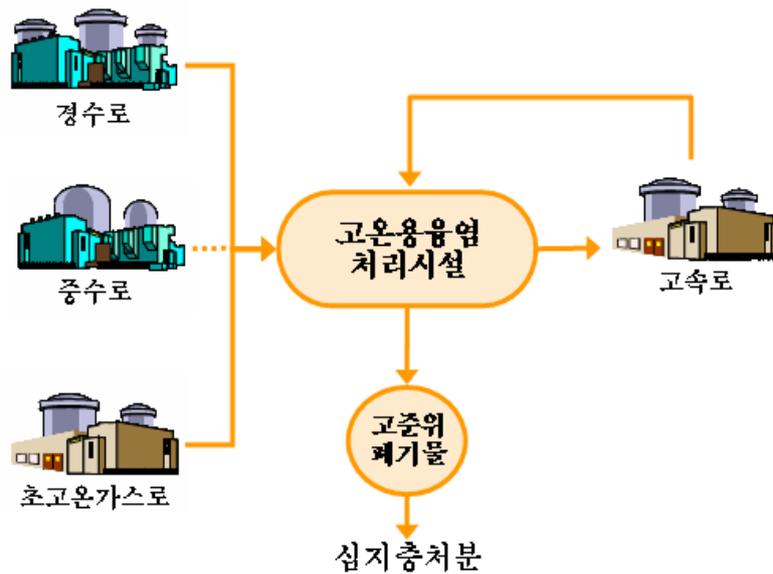


그림 8. 순환형 핵연료주기 완성을 위한 연계도

위의 그림 8은 우리가 지향해야 할 핵연료주기의 연계도를 나타낸 것이다. 여기에는 경수로 사용후핵연료의 건식처리와 수소생산원자로인 초고온가스로 사용후핵연료의 처리, 고속로 순환형 핵연료주기의 완성 및 이러한 핵연

료주기에서 발생하는 고준위 방사성폐기물을 안전하게 영구처분할 수 있는 심지층처분을 포함하고 있다.

- (1) 경수로 사용후핵연료는 고온용융염 건식처리 후 우라늄만을 회수하여 중·저준위화하고 초우란원소는 고속로 금속핵연료로 가공하여 재활용 및 소멸시킨다.
- (2) 고속로 사용후핵연료는 고온용융염 건식처리 후 다시 고속로에서 재활용한다.
- (3) 초고온가스로 사용후핵연료는 처분장의 부담을 줄이기 위하여 건식처리 후 부피를 감소시켜 심지층에 처분한다.

고온용융염 건식처리기술은 순환형 핵연료주기를 완성하는 데 매우 중요하다. 당연히 기술개발의 우선순위는 핵심공정인 고온용융염 처리기술을 개발하는 것에 초점이 모아져야 할 것이다. 이 기술은 현재 한국원자력연구소가 집중적으로 연구개발 중인 수소생산원자로 및 고속로와 연계되어 향후 원자력발전의 규모를 확대해 나가는 데 큰 역할을 담당할 수 있을 것으로 전망된다.

2030년대 초반에 도입예정인 고속로에 고온용융염 건식처리한 핵연료를 공급하기 위하여 다음과 같은 기술개발 로드맵을 제안하고자 한다.

○ 2005 ~ 2010 : 원리검증

실험실규모의 소규모 모의시설에서 천연우라늄을 이용하여 고온용융염 건식처리방식의 기본원리를 규명하는 한편, 소규모의 실증시설에서 수행할 실

협적 변수들을 도출한다. 그 후, 소규모의 시험시설에서 사용후핵연료를 이용하여 공학규모에 필요한 공정데이터를 생산하고, 전처리기술·원격운전에 필요한 유지보수기술·핵물질계량기술 등을 시험한다. 미국으로부터 사용후핵연료 형질변경에 대한 공동결의가 지연되는 경우에 대비, 미국의 아이다호 국립연구소(Idaho National Laboratory; INL)에서 우리나라가 설계·제작한 장치를 이용하여 실증실험을 수행한다.

○ 2011 ~ 2020 : 기술검증

고온용융염 건식처리기술의 상용화를 위하여 공학규모의 실증시설에서 기술검증을 수행한다. 먼저, 공학규모 모의시설과 기존의 소규모 실증시설을 개조하여 공학규모실증을 위한 데이터를 생산하고, 데이터생산과 병행하여 공학규모의 실증시설을 2016년까지 확보한다. 2016년부터 2020년까지 공학규모의 실증시설을 이용하여 기술검증을 하는 한편, 상용화의 타당성 평가를 완료한다. 2014년에 만료되는 한·미원자력협정을 개정하여 순환형 핵연료 주기의 상용화를 위한 기반을 마련한다.

○ 2021 ~ 2025 : 실용화

2020년까지 상용규모의 원형시설을 확보하여 고온용융염 건식처리 공정을 실용화하고, 2026년부터는 고속로의 초기노심용 금속핵연료를 생산하여 2030년대초 도입예정인 고속로에 공급한다. 사용후핵연료의 부피감용을 위해서 경수로의 사용후핵연료를 전해정련처리하여 대량의 우라늄을 회수, 중·저준위화하는 작업을 병행한다.

이상과 같은 기술개발 로드맵이 실현되는 경우, 우리나라는 순환형 핵연료 주기 완성을 위한 기반시스템을 갖추고 21세기 원자력 르네상스시대를 맞아 세계의 기술리더로서 자리매김할 수 있을 것으로 기대된다.

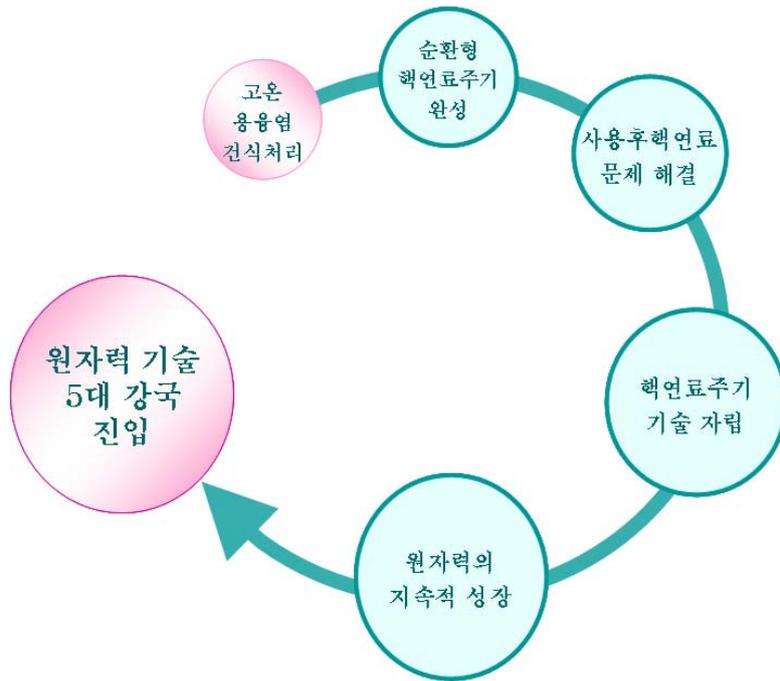


그림 9. 핵비확산성 핵연료주기 개발의 순환도

## 2. 해결해야 할 이슈

위에서 검토한 연구개발 로드맵을 성공적으로 추진하기 위하여 몇 가지 해결해야 할 문제들이 있다.

### (1) 한·미 원자력 협력의 증대

1974년 미국과 원자력협력에 관한 협정을 체결한 이래 우리나라의 원자력 연구개발 및 평화적 이용의 범위는 대미 원자력정책에 의하여 설정되어 왔다. 미국이 가지고 있는 다양한 규제권 가운데서, 특히 사용후핵연료의 형상 및 내용의 변경, 핵물질의 이전, 핵연료주기 관련 기술·장비·물질 등의 이전 등에 대한 ‘사전동의권’(또는 ‘공동결정권’)은 우리나라의 원자력발전에 있어서의 가장 큰 제약요인으로 작용하고 있다. 예컨대, 순환형 핵연료주기를 완성하기 위해서는 현재 개발하고 있거나 향후 개발될 관련 기술들의 실증이 필수적인데, 이는 우리나라에서의 사용후핵연료 취급을 전제로 한다. 이를 위하여 현재의 한·미 원자력협정하에서는 미국의 ‘사전동의권’을 필요로 하는데, 미국은 이 ‘사전동의권’을 최대한 미국의 국익에 합치되는 방향으로 행사하고 있다. 이에선 실질적으로 우리의 연구개발활동을 감독하고 제한함으로써 기술유출의 가능성과 함께 기술종속국으로 전락할 우려를 내포하고 있다.

따라서, 우리나라의 원자력 연구개발수준을 한 단계 끌어올리고, 앞에서 논의된 핵비확산성 핵연료주기를 완성하기 위해서는 2014년에 만료되는 한·미 원자력협정을 우리나라의 실정에 맞는 방향으로 개정할 필요가 있다. 이를 위해서는 미국과의 원자력 협력증대가 무엇보다도 중요하며, 이와 더불어 한·미 원자력협정의 개정을 위하여 국회·관계부처·원자력산업계·학계 등의 적절한 역할분담과 치밀한 사전준비가 필요하다.

## (2) 안정적인 재원의 확보

원자력연구개발의 특성상 장기간이 소요되고, 그 성공 여부에 대한 불확실성이 존재하고 있기 때문에 현재로서는 고속로 순환형 핵연료주기와 고온융용염 건식처리기술을 연구·개발하는 데 산업체가 참여하기에는 시기상조라고 할 수 있다. 따라서, 국가차원에서 안정적 재원을 확보하기 위한 노력이 필요하다. 이와 더불어, 기술개발이 종료되고 원형시설이 건설되는 시점인 2020년경에는 산업체의 참여를 고려해 볼 수 있을 것이다.

## (3) 국민수용성의 확보

우리나라가 원자력분야에서 새로운 기술을 계속 개발하기 위해서는 사회 전반에 걸쳐 원자력에 대한 긍정적 환경이 조성되어 있어야 한다. 원자력발전이 우리 사회에 제공할 수 있는 수많은 혜택에도 불구하고, 일반국민들은 부정확한 사실의 유포, 감정적 태도에 호소하는 이익집단의 여론조성, 이에 대응하는 원자력계의 미온적 태도 등으로 인하여 원자력에 대한 막연한 부정적인 인식을 가지고 있다. 이는 원자력사업을 추진하는 데 있어서 커다란 장애요인으로 작용하고 있다. 일반국민이 가지고 있는 원자력에 대한 부정적 인식은 우리나라가 선진원자력기술을 확보해 나가는 데 있어서 어려운 상황을 초래할 뿐만 아니라, 원자력정책을 추진하는 정부의 수행능력에 걸림돌이 된다. 따라서, 향후 원자력발전을 지속하기 위해서는 국민적 합의가 최우선 조건이라는 인식을 가지고 원자력에 대한 국민의 이해를 조성해 나갈 필요가 있다.

## 제 5 장 결론 및 건의사항

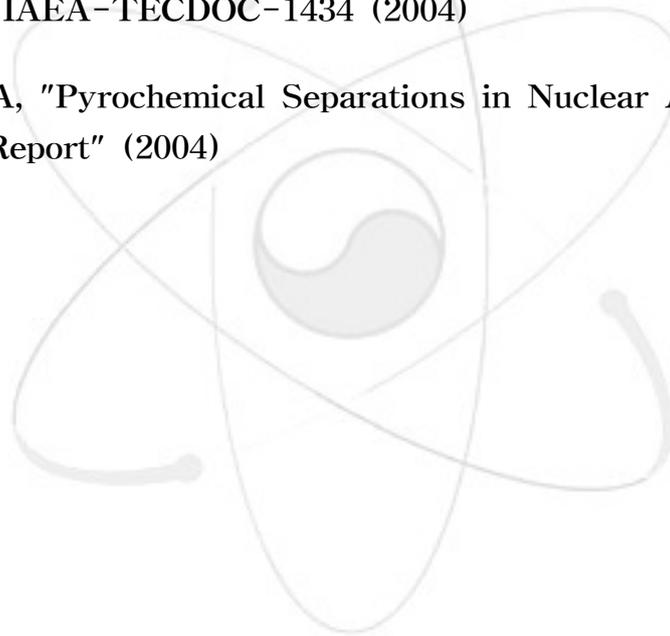
- 우리나라의 에너지와 전력소비량은 계속 증가하고 있으며, 이로 인하여 온실가스 감축의무의 부담가중, 에너지자원의 수입액 증가, 에너지수급의 불안상존 등의 문제가 발생하고 있다. 에너지 부족자원이 빈약한 우리나라의 경우, 이는 향후 국가의 존립을 위협할 수 있는 요소로 작용할 수 있다. 따라서, 에너지안보의 확보가 그 어느 때보다도 중대한 시점이다.
- 이를 위하여 기존의 자원의존형 에너지공급체계에서 기술주도형 에너지 공급체계로의 전환이 불가피하다. 특히, 원자력은 우리나라의 에너지안보에 기여할 뿐만 아니라 온실가스의 배출감소로 환경보전에 기여하며, 또한 안정적이고 저렴한 전력공급을 통하여 경제발전의 원동력으로서 그 역할이 크게 기대된다.
- 원자력발전의 규모를 확대하기 위해서는 한정적인 천연우라늄의 부족문제를 해결하면서 사용후핵연료를 효율적으로 관리할 수 있고, 또 환경에 미치는 영향이 최소화된 청정하고 안전한 원자력에너지의 공급체계가 필요하며, 이를 위하여 고속로 순환형 핵연료주기의 채택이 바람직하다고 판단된다.
- 그리고, 그 처리방식으로는 핵확산저항성을 제고하고 핵연료주기의 비용을 절감하며, 고연소도 핵연료의 처리에 알맞은 고온용융염 건식처리방식이 적합하다.
- 고온용융염 건식처리기술을 이용한 고속로 순환형 핵연료주기의 완성을 위해서는 연구개발투자의 안정적인 재원확보가 필요하다. 원자력 연구개발의 특성상 장기간의 자본회임기간이 요구되므로 국가차원에서의 안정적인 재원의 확보가 요구된다.
- 또한, 고속로 순환형 핵연료주기는 한·미 원자력협정의 개정 등 기술외적인 요소가 관련되어 있기 때문에 이를 성공적으로 추진하기 위해서는 핵투명성을 증진하고자 하는 정부의 강력한 의지표명이 매우 중요하다.

## 【주】

- 1) "BP Statistical Review of World Energy June 2006" (2006)
- 2) 한국원자력연구소, "원자력 에너지와 교토의정서,"  
KAERI/TS-201/2005 (2005)
- 3) 산업자원부/자원정책과, 산업통계정보, 2006. 7. 15  
<http://www.mocie.go.kr/>
- 4) 산업자원부/자원정책실, "자원 · 에너지 주요통계" (2004)
- 5) 한국원자력연구소, "유가 100불 시대에 대비한 원자력의 역할" (2006)
- 6) Ibid.
- 7) Ibid.
- 8) World Nuclear Association, "World Nuclear Power Reactors  
2005-06 and Uranium Requirements," 2006. 8. 15,  
<http://www.world-nuclear.org/info/reactors.htm>.
- 9) U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the  
Neneration IV International Forum, "A Technology Roadmap for  
the Generation IV Nuclear Energy Systems" (2002)
- 10) Ibid.
- 11) U.S. DOE Office of Nuclear Energy, Science, and Technology,  
Report to Congress, "Advanced Fuel Cycle Initiative: Objectives,  
Approach, and Technology Summary" (2005)
- 12) Ibid.
- 13) U.S. Department of Energy, The Global Nuclear Energy

Partnership, 2006. 9. 6, <http://www.gnep.energy.gov/>

- 14) Japan Atomic Energy Agency and Japan Atomic Power Company, "Phase II Final Report of Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems Executive Summary" (2006)
- 15) OECD/NEA, "Trends in the Nuclear Fuel Cycle: Economic, Environmental and Social Aspects" (2002)
- 16) IAEA, "Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycle: Report of Phase IB of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)," IAEA-TECDOC-1434 (2004)
- 17) OECD/NEA, "Pyrochemical Separations in Nuclear Applications: A Status Report" (2004)



## 부록 : 세계 주요국의 원자력발전 확대전망

### 【미국<sup>a)</sup>】

미국은 2006년 8월 현재 총 103기의 원전을 운영하고 있다(전체 발전량의 약 20%). 미국은 1979년의 쓰리마일아일랜드(Three Mile Island; TMI) 사고 이후 원전에 대한 불안감이 확산되어 지난 20여년 동안 원전을 건설하지 않았으나, 최근 캘리포니아 정전사태, 온실가스 감축의무 등에 대비하기 위하여 원전의 역할을 점차 증대해 나가고 있는 추세이다. 그 결과, 현재 3개의 전력회사가 원전건설부지의 확보를 위한 조기부지허가(Early Site Permit; ESP)를 신청한 상태이고, 2006년 7월 현재 원전 44기의 인허가가 기존의 40년에서 60년으로 갱신되었으며, 앞으로 총 85기 정도의 원전이 인허가갱신을 할 것으로 예상된다. 미국은 2006년 2월에 발표한 새로운 에너지정책의 구상(Global Nuclear Energy Partnership; GNEP)을 통하여 원자력에너지의 확대정책을 분명히 하고 있다.

### 【일본】

일본은 총 55기(48GWe)의 원전을 운영하고 있으며, 온실가스 감축 및 에너지의 안정적인 공급을 위하여 원자력을 에너지공급의 주축으로 하는 정책기조를 유지하고 있다. 다만, 2004년의 경우 원자력의 발전량은 전체 발전량의 25.5%로, 2001년 34.5%에 비하여 급격히 감소하였는데, 이는 원전검사를 위한 일시적 정지로 인하여 전체 발전량의 비중이 낮아진 것으로 풀이된다. 그러나, 2050년까지 원자력발전량을 현재의 2배(90GWe) 이상으로 증가시킬 예정이다.<sup>b)</sup> 일본은 핵연료주기 전사이클을 완성하였으며, 또한 1997년부터 수행된 고속로시스템의 타당성 평가를 통하여 2015년까지 공학규모의 사용후핵연료 처리시설을 완료할 계획을 세워 놓고 있다.<sup>c)</sup>

#### 【프랑스<sup>d)</sup>】

프랑스는 2006년 8월 현재 총 59기의 원전을 운영하고 있으며, 원자력이 전체 발전량의 75%를 차지하고 있다. 원자력이 갖고 있는 에너지안보·경제성·온실가스 감축 등의 이점을 유지하는 것을 중요하게 인식하고 있다. 최근 하원에서 유럽형경수로(European Pressurized Water Reactor; EPR) 원전건설을 지지하는 에너지법을 제정한 바 있으며(2004. 6. 1), 핀란드에 건설예정인 EPR 원전의 실증을 위하여 핀란드보다 앞서 프랑스내에 EPR 건설을 추진 중에 있다.

#### 【중국<sup>e)</sup>】

중국에서는 2006년 7월 현재 9기의 원전을 운영하고 있으며, 6기가 건설 중에 있다. 2020년까지 40GWe의 원자력 발전량을 계획하고 있으며, 2050년경까지 약 240GWe로 증가시킬 장기계획을 세워놓고 있다. 국가 제10차 5개년계획('01~'05)에서 원전국산화를 추진하였으며, 과학기술진흥계획('06~'20)에서는 고속로를 중점사업으로 선정한 바 있다.

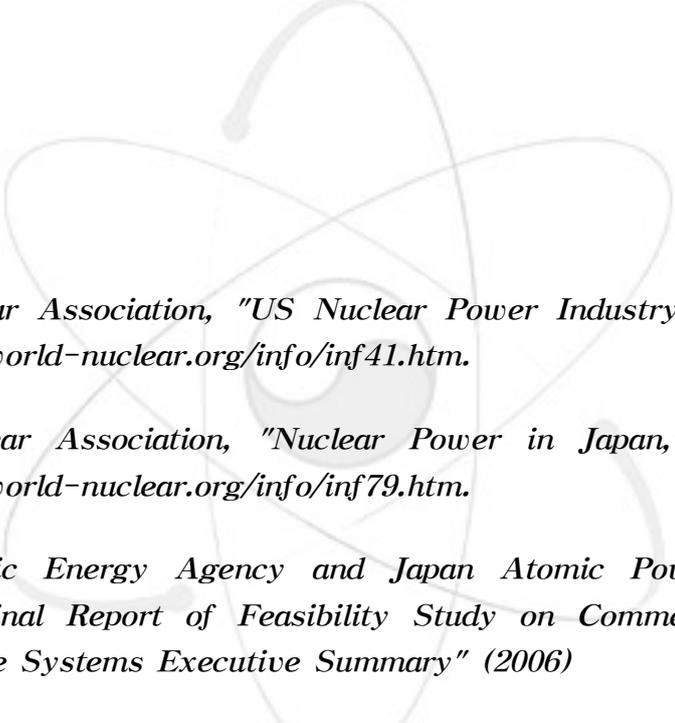
#### 【인도<sup>f)</sup>】

인도는 2006년 7월 현재 15기(3.6GWe)의 원전을 운영하고 있으며, 8기의 원전을 건설 중에 있다. 최근 미국 대통령과의 정상회담을 통하여 미국·인도 양국간 원자력협정을 체결함으로써 군사용과 상업용 원자력시스템을 분리하고 본격적으로 상업용 원자로의 개발에 착수할 계획을 세워놓고 있다. 현재 인도는 2020년까지 24기의 원전을 추가로 건설할 예정으로 있다.

#### 【한국<sup>g)</sup>】

우리나라는 1978년 고리 1호기를 가동한 이래 꾸준히 원자력발전소를 건설하여 현재 20기의 원전을 가동하고 있으며, 전체 발전량의 약 47%를 원

자력으로 충당하고 있다. 2004년에 발표된 제2차 전력수급기본계획에 의하면, 2015년까지 8기의 원전을 추가로 건설할 예정이다.

- 
- a) *World Nuclear Association, "US Nuclear Power Industry," 2006. 8. 1, <http://www.world-nuclear.org/info/inf41.htm>.*
  - b) *World Nuclear Association, "Nuclear Power in Japan," 2006. 9. 5, <http://www.world-nuclear.org/info/inf79.htm>.*
  - c) *Japan Atomic Energy Agency and Japan Atomic Power Company, "Phase II Final Report of Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems Executive Summary" (2006)*
  - d) *World Nuclear Association, "French Nuclear Power Program," 2006. 8. 1, <http://www.world-nuclear.org/info/inf40.htm>.*
  - e) *World Nuclear Association, "Nuclear Power in China," 2006. 8. 1, <http://www.world-nuclear.org/info/inf63.htm>.*
  - f) *World Nuclear Association, "Nuclear Power in India and Pakistan," 2006. 8. 1, <http://www.world-nuclear.org/info/inf53.htm>.*
  - (g) *World Nuclear Association, "Nuclear Power in South Korea," 2006. 8. 1, <http://www.world-nuclear.org/info/inf81.htm>.*
-

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
<b>Performing Org. Report No.</b>		<b>Sponsoring Org. Report No.</b>		<b>Standard Report No.</b>	<b>INIS Subject Code</b>
KAERI/TR-3243/2006					
<b>Title/Subtitle</b>		New Visions and Strategies for Completion of Proliferation-Resistant Nuclear Fuel Cycle in Korea			
<b>Project Manager and Dept. (or Main Author)</b>		Ko, Won Il (Div. of Spent Fuel Technology Development)			
<b>Researcher and Department</b>		Kwon, Eun Ha (Div. of Spent Fuel Technology Development) Hwang, Yong Soo (Div. of Radioactive Waste Disposal) Park, Seong Won (Dept. of Nuclear Fuel Cycle Development)			
<b>Publication Place</b>	Daejeon	<b>Publisher</b>	KAERI	<b>Publication Date</b>	2005. 6.
<b>Page</b>	43 p.	<b>Ill. &amp; Tab.</b>	Yes(V), No ( )	<b>Size</b>	26 Cm.
<b>Note</b>					
<b>Classified</b>	Open (O), Restricted ( ), __ Class Document, Internal Use Only ( )		<b>Report Type</b>	Technical Report	
<b>Sponsoring Org.</b>			<b>Contract No.</b>		
<b>Abstract (15-20 Lines)</b>					
<p>The consumption of energy is growing worldwide; in developing countries it derives the country's economic growth, while in developed countries improves the quality of lives of people. Such large consumption of energy, however, causes such problems as global warming caused by a large amount of greenhouse gas emissions, a burden on the national economy due to unbalanced energy imports and insecurity of energy supply caused by uneven distribution of energy resources.</p> <p>'Nuclear energy' seems to be an answer to solve these problems; increasing interests have recently shown over 'nuclear energy' as an alternative energy source to fossil fuels. Considering the rapidly growing energy consumption of the future, however, it will not be sufficient simply by increasing the number of nuclear power plants operated.</p> <p>This paper briefly describes the importance of nuclear power in the future energy supply system and challenges accompanied by it. To overcome such challenges, this paper argues that "fast reactor recycle" and "pyroprocessing" are desirable.</p>					
<b>Subject Keywords (About 10 words)</b>		nuclear energy, fast reactor recycle, pyroprocessing, proliferation-resistance			

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
<b>수행기관보고서번호</b>		위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드	
KAERI/TR-3243/2006					
제목/부제		핵비확산성 핵연료주기 완성을 위한 새로운 비전과 전략			
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)		고원일 (사용후핵연료기술개발부)			
연구자 및 부서명		권은하 (사용후핵연료기술개발부) 황용수 (방사성폐기물처분기술개발부) 박성원 (핵연료주기기술개발단)			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2006. 9.
페이지	43 p.	도표	있음( O ), 없음( )	크기	26 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개( O ), 대외비( ), __ 급비밀, 소내만 공개 ( )		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관		계약번호			
초록 (15-20줄내외)		<p>본 보고서에서는 최근 에너지소비량 증가에 따른 문제점을 분석하고, 이러한 문제의 해결을 위하여 화석연료에너지를 대체할 에너지공급원으로서의 '원자력'의 가치에 대하여 논의하였다. 그러나, 미래의 에너지수요의 증가를 고려할 때, 그 수요를 단순히 현재 운전되고 있는 전력생산방식에 의한 양적 팽창만으로 충족시키기에는 여러 가지 문제가 있다. 향후 증가하는 에너지수요량을 충족시키고 원자력발전의 규모를 확대하기 위해서는, 우리나라의 이용률을 향상시키고 사용후핵연료 처분장의 이용효율을 극대화하며 사용후핵연료 처분에 따른 환경영향을 최소화할 수 있는 고속로 순환형 핵연료주기의 채택이 바람직하며, 그 처리방식으로는 핵확산저항성을 제고하고 핵연료주기의 비용을 절감하며 고연소도 핵연료의 처리에 알맞은 고온용융염 건식처리방식이 적합한 것으로 분석되었다. 고온용융염 건식처리방식을 이용한 고속로 순환형 핵연료주기를 도입함으로써, 핵확산저항성의 증가, 핵연료주기의 비용절감, 고준위폐기물량의 감소, 고속로와의 친화성 등의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 더 나아가, 핵연료주기 기술자립을 통하여 원자력의 지속적 성장과 진정한 원자력기술 5대강국으로의 진입을 실현할 수 있을 것이다.</p>			
주제명키워드 (10단어내외)	원자력에너지, 고속로 순환형 핵연료주기, 고온용융염 건식처리방식, 핵확산저항성				