미래의 원자력 에너지-비전과 기술 개발

이익환 | 한국원자력기술(주) 회장

서문

프랑스의 원자력청(CEA)은 원자력의 현재와 미래 기술의 변천 과정의 예측과 미래의 중점 연구 개발 등 총괄적으로 분석한 보고서를 제시하고 있는 바, 이 보고서[1]를 중심으로 요약 정리한 내용을 소개한다.

프랑스의 국내 사항뿐 아니라 유럽, 나아가 세계의 원자력 비전을 투시하고 있어 흥미롭다.

1. 원자력 에너지의 역할

에너지 자원의 유한성과 공급의 불안정 그리고 온실 가스 배출에 따른 지구 온난화 문제 등으로 세계 에너지 사정은 매우 어려운 상태이다. 이에 이러한 문제를 해결해 줄 수 있는 원자력 발전의 신기술 출현이 기대되고 있다.

WEC(World Energy Council) 및 OECD 산하의 국제에너지기구(IEA)는 향후 2020년까지 국제적 에너지 사정에 대한 경향을 제시하고 있다.

- 에너지 수요는 2020년 이전에50~60% 증가하게 될 것임
- 수요 증가는 압도적으로 개발 도상 국가 위주가 될 것임
- 계속적으로 화석 연료가 주류를 이룸(총에너지 수요의 87%가 화석 연료)
- 각국의 노력에도 불구하고 CO_2 배출량은 종전의 교토 목표를 상회할 것임

장기적으로 볼 때, 핵에너지는 타에너지원에 비해 유한한 부존 자원의 문제점과 이산화탄소의 배출로 인한 환경 영향 등을 최소화하는 장점을 가지고 있다.

그러나 해결해야 할 두 가지 사안도 있다. 즉 국민들로부터 폭넓은 이해를 구해야 하고 이를 바탕으로 새로운 원자력 기술에 대한 안전성과 경제성도 입증해야 한다.

여기에 지속 가능한 발전과 핵 확산 방지 기준도 또한 무엇보다 우선되어야 한다.

2. 방사성폐기물 처리 처분

과거 15년 동안 원자력 발전의 개선 노력으로 발전소는 안전성 향상은 물론 운전 실적이 크게 향상되었다. 이는 대중의 지지를 얻는 데 기여하였다.

이것은 방사성폐기물 처리 처분에 대한 연구 개발의 결과가 가져온 가시적인 효과라고 할 수 있다.

예를 들면, 프랑스는 우선 폐기물을 장반감기 고준위 폐기물과 저준위 폐기물로 대별 처리한다. 전체 방사성 폐기물 부피의 90% 이상이 저준위 폐기물이다.

연구 개발의 결과는 곧바로 법규 변경 같은 조치로 이 사업을 뒷받침되고 있다.

3. 사용후핵연료의 재활용

프랑스는 사용후핵연료를 재처리하여 플루토늄을 재활용하고 있다. 사용후핵연료는 폐기물이 아니다. 사용후핵연료에서 실제 폐기물은 4%에 불과하고 나머지는 우라늄과 플루토늄이다.

따라서 에너지 자원을 재활용하고 매우 독성이 강한 폐기물을 감축하기 위해 사용후핵연료의 재활용은 필수적이다.

이러한 획기적인 부피 감소는 핵종 분리 및 변환(Partitioning & Transmutation) 방법에 의해 가능하다.

핵연료로 사용되고 있는 우라늄의 독성 수준을 기준으로 하여 사용후핵연료가 동일 수준의 독성에 도달하려면, ① 사용후핵연료를 재처리하지 않고 그냥 두면 몇 100,000년이 걸리게 된다 ② 사용후핵연료를 현재의 재처리 기술로서 재활용할 경우 10,000년 이상이 걸린다 ③ 핵분열 생성물만을 유리화하고 악티늄족 핵종을 중성자와 반응시켜 재활용하게 되면 불과 몇 100년이면 해결된다.

이러한 고준위 폐기물을 장기적으로 보관할 것인가 또는 영구 처분할 것인가를 결정해야 한다.

다시 말해, 유리화한 폐기물을 10,000년 이상 보관할 것인지, 새로운 장기 저장 개념을 택할 것인지, 또는 심지층 처분을 할 것인지를 선택해야 하는 시점에 있다.

미국은 사용후핵연료를 직접 폐기 처분할 목적으로 유카마운틴 처분장을 건설하였지만 최근에 사용후핵연료 처분에서 재활용 전략을 선택하였으며, 앞으로가 주목된다.

분명한 것은 악티늄족 핵종의 재활용으로 자원을 보존하고 폐기물의 독성을 적게 하며 부피를 줄이는 것이 세계의 조류라는 것이다.

4. 새로운 도전, 미래의 원자력 발전

2030~2040년을 바라보는 미래의 산업에 걸맞은 원자력 발전 시스템은 어떤 원자력 기술일까?

이는 우선 안전성이 탁월하고 경쟁력에서 뛰어나야 한다. 핵연료, 주기, 그리고 노심에서 한 차원 높은 기술이어야 한다.

미래 원자력 발전 기술은 전력 생산의 목적을 달성할 뿐만 아니라 수소 생산이나 바닷물 담수로의 역할도 해야 한다.

미래의 이 기술이 지속 가능한 발전을 달성하기 위해 만족해야 하는 다섯 가지 판단 기준은 ① 천연 자원의 효율적 사용, ② 안전성, ③ 경제성, ④ 폐기물 배출량의 최소화, ⑤ 핵확산 위험에서의 감소 등이다.

미래 기술의 한 사례로 미국이 제안하고 세계 10개국과 유럽연합이 참여하고 있는 국제 공동 연구인 제4세대 원자로(Gen VI) 기술을 들 수 있다.

지난 2년간의 타당성 연구에서 6개의 개념 노형을 확정하고 핵연료 주기 형태와 고속중성자를 활용하는 노형을 선정하였다.

CEA는 제4세대 원자력 발전 노형으로 소듐냉각고속로(SFR), 초고온 원자로(VHTR), 및 가스냉각고속로(GFR) 등 3 가지 노형에 대한 연구를 착수했다.

민간용 원자력 발전의 원천

1953년 미국의 아이젠하워 대통령이 원자력에 대한 평화적 이용을 제창하면서, 민간용 원자력 발전이 현실화되었다.

최초의 원전은 러시아에서 가동되었으며, 2004년 말 현재 440기의 원전이 30개 국가에서 운전중에 있다. 원자력 발전은 총시설 용량이 360GWe 규모로 전력의 약 16%를 담당하고 있다.

제1세대 원전은 미국, 러시아, 프랑스, 영국에서 1950~1960년대에 개발된 원전이다. 그 당시 프랑스는 천연 우라늄 연료와 흑연 감속재 등이 조합된 원자로를 개발하였다.

제2세대 원전은 1970~1990년대까지 개발된 원자로를 말한다. 이들이 대부분 운전중에 있다.

당시에 원자로 유형은 약 85%가 경수형 원자로로서 가압 경수로(PWR)와 비등 경수로(BWR)로 구분된다.

제2세대 원전의 운전 경험은 총 10,000원자로?년의 실적을 가지고 있다.

핵연료 및 핵연료 주기

1. 핵연료

원자로 내에 장전된 핵연료에 중성자를 흡수시켜 핵분열을 일으키게 하고 이때 발생하는 열을 전기 에너지로 전환하는 시스템이 원자력 발전이다.

핵연료인 UO_2 분말로 최소 단위인 핵연료 펠릿(pellet)을 만들고 이를 조립하여 연료봉(fuel rods)을 만든다.

발전소 설계에 따라 다르지만 여러 연료봉을 배열한 핵연료 집합체(fuel assembly)를 구성하고 이를 원자로에 장전하는 것이다.

경수로는 핵분열성 물질인 우라늄235가 약 4% 포함된 저농축 우라늄을 사용한다. 다시 말하면, 채광하는 천연 우라늄에서는 핵분열성 물질인 우라늄235는 0.7%에 불과하고 나머지는 우라늄238로 구성되어 있어 연료로 사용하기 위해서는 농축 과정이 필요하다.

현재는 4년에 한 번 핵연료를 교체하고 있지만 프랑스는 2010년 목표로 6년에 한 번 교체하는 계획을 세우고 있다.

기술의 개발로 원자력 발전은 에너지의 안정적 공급에 더욱 기여하고 있다는 뜻이 된다.

연료봉의 피복관은 기술적으로 매우 중요하다. 그 이유는 핵연료 피복관은 핵연료에서 발생하는 방사성 물질과 외부 환경 사이에서 제1차 방호벽이 되는 셈이기 때문이다. 따라서 피복관은 누설되지 않도록 밀봉되어야 한다.

사용후핵연료(SF, Spent Fuel)는 재활용 측면에서 충분한 가치가 있어 재처리 공정을 통해 핵분열성 물질인 플루토늄(Pu)을 추출하여 발전소에 재사용하고 있다.

2. 핵연료 주기

핵연료 주기는 우라늄 채광 및 추출 공정, 우라늄 선광 공정, UF_6 변환 공정, 우라늄 농축(핵분열성 물질 U-235 비율 증가) 공정, 핵연료 가공 ($UF_6 \Rightarrow UO_2$) 공정 등이다.

발전소에서 핵연료가 사용되고 나서 얻어진 SF를 재활용하게 되면 상기 요약된 공정 외에 Pu 추출을 위한 재처리 공정 및 MOX 연료 가공 공정이 추가된다.

Pu을 사용한 MOX 연료는 추출된 Pu와 산화 우라늄을 혼합하여 만든 연료이다. 이는 현재 운전 중인 경수로(PWR 및 BWR)에서 재활용 연료로 사용되고 있다. 이는 유한한 우라늄 자원을 고려할 때 바람직한 방안이 아닐 수 없다.

현재 Pu 재활용을 하고 있는 국가는 프랑스를 포함해 벨기에, 독일, 스위스 등이고, 일본이 오랫동안 준비하여 실현 단계에 있으며, 미국은 심각하게 이를 고려하고 있다. 프랑스의 국영전력회사인 EDF는 20

기의 원전에 MOX 연료를 사용하고 있다.

방사성폐기물 및 관리 현황

방사성폐기물은 원자력 발전 운전 중에 필연적으로 발생할 뿐 아니라 핵연료 주기 공정에서도 발생한다.

방사성 물질은 핵종에 따라 반감기와 방사능 세기가 달라, 폐기물 관리 방법이 다양하다. 우라늄같은 중 핵종이 중성자와 충돌하여 쪼개지면서 핵분열 생성물 및 방사성 물질이 발생한다.

방사성 핵종에 의해 물질이 오염되므로 별도의 관리를 해야 한다. 관리 중에 발생하는 것이 바로 방사성폐기물이다.

방사성 물질의 방사능 세기에 따라 저준위, 중준위, 그리고 고준위 폐기물로 구분하고 있다. 그러나 관리상 일반적으로 다음과 같이 3가지로 나눈다.

첫째는 반감기가 30년 이내인 저 · 중준위 방사성 폐기물(범주 A), 둘째는 반감기가 긴 저 · 중준위 폐기물(범주 B), 그리고 셋째는 장수명 고준위 핵종이 포함된 고준위 폐기물(범주 C). 범주A 폐기물은 지금~300년 사이에 방사선 방출이 일반 자연 환경 방사능 준위로 낮아져서 산업 폐기물이 되고 만다.

프랑스에서는 연간 약 15,000m^3의 범주 A 폐기물이 발생하며, 이는 로브(de l'Aube) 처분장의 콘크리트 시설에 처분된다.

이 처분장은 전체 수용력 1백만m^3의 시설이며, 적어도 2050년까지 수용될 수 있을 것 같다. 프랑스에서는 방사성폐기물 전담 조직 ANDRA가 이를 관리하고 있다.

범주 B 폐기물에서는 재처리시에 발생하는 핵연료 피복관이 대표적인 예이다. 이는 오랫동안 관리되어야 한다.

범주 C 폐기물에는 재처리시에 발생하는 핵분열 생성 물질이 있으며, 이는 안정화를 위해 유리화된 후에 별도로 관리되고 있다.

범주 B 와 범주 C 폐기물은 연간 700m^3이고, 이 중 유리화는 연간 200m^3을 넘지 않도록 관리하고 있다. 이들 모두는 La Hague 재처리 시설 장소에 임시 보관 중이다.

장수명 핵종 방사성폐기물의 영구 처분 대책과 관련하여, 1980년대에 전문가들의 공통된 의견은 심지층에 영구 처분하는 것으로 모아졌지만, 오랜 기간이 지나면서 부식으로 폐기물의 지하수 오염 문제가 제기되면서, 적절한 대책이 아직 확정되지 못하고 있다.

현재 염광, 점토층, 화강암, 현무암 등 지층에 대한 심지층 지질 연구가 몇몇 나라에서 수행되고 있다.

이러한 노력에도 아직까지 서방 세계에서는 고준위 폐기물 대책이 수립되지 못하고 있다.

이 문제에 대하여 프랑스는 과학 공동체의 의견을 수렴해 왔으며 국제적으로 축적된 기술의 장점을 살리려 하고 있다. 다음과 같은 세 가지 관점으로 의견이 모아지고 있는 실정이다.

첫 번째는, 핵종 분리 및 변환에 대한 방안으로 장수명 핵종을 단수명 핵종으로 변환하여 안정화시킨다는 것이다. 이 경우 재처리 공정은 필수적이다.

두 번째는, 심지층 처분으로 이를 연구하기 위해 심지층 연구실을 건설한다는 것이다.

세 번째는, 조건부로서 확보된 안전성을 전제로 필요하다면 폐기물을 장기간 보관한다는 것이다.

원전 시설의 폐로 및 해체

1. 원자력 시설 해체 관련 현안

원자력 연구 시설, 원전 시설, 이의 관리 시설, 시험 시설, 전기 생산 시설 등 모든 원자력 시설은 사용 연한에 따른 수명이 있게 마련이다.

시설이 낡게 되면 해체해야 되는데 원자력발전소의 경우 초기 단계에 건설된 것은 폐로의 절차를 밟고 있다.

방사성 물질과 관련된 이러한 시설을 해체할 때는 별도의 프로그램과 절차에 의해 추진되어야 한다.

폐로 및 해체(D-D, Decommissioning and

Dismantling)의 근본 목적은 원자력 시설 부지를 부분적 또는 전체적으로 자유롭게 사용하는 데 있다.

D-D는 3단계로 이루어지는데, 우선 원자력 시설을 영구 폐쇄하고, 다음은 제염과 해체 작업을 수행하며, 끝으로 부지의 철거와 개방 단계이다.

원자로 D-D 경우, 우선 사용후핵연료를 노심에서 꺼내 옮겨 저장하거나 재처리한다.

배관 계통은 배수를 하게 하고 건조시키며 운전 계통은 전기를 차단하며 바깥과는 잠금 장치를 하거나 밀봉한다.

물론 외부 환경의 오염 상태도 점검하여야 한다. 건물과 자재의 표면 제염도 이루어져야 한다.

제염 기술은 방사능을 줄여주는 데 기여하며, 작업자가 내부 출입 시 최소의 방사선 조사를 받도록 하여 법규나 기준을 만족하도록 한다.

세 단계의 D-D 절차를 밟아 부지를 개방하는데 어떤 경우는 수십 년이 걸리기도 한다.

2. CEA의 현안인 D-D

CEA는 과거에 수행하였던 경험을 잘 살려 발전된 D-D를 관리하려 한다. CEA는 그 동안 연구센터에 많은 원자력 시설을 설치한 바 있고 이 시설을 제염하고 해체하는 경험을 쌓아 왔다.

2002년부터 D-D단계에서 보다 공기를 단축하는 활동을 실행에 옮기고 있다. 더욱이 연구 개발의 결과가 접목되어 CEA는 D-D의 선도 그룹의 역할을 하고 있다.

2012년에 CEA는 Fontenay-aux-Roses 부지의 방사성 물질을 제염하고 2015년에는 연구소의 Grenoble 부지의 제염을 완료할 예정이다.

3. D-D : 중요한 새로운 시장으로 판명

D-D 업무는 새로운 시장으로 부상되고 있다. 현재 전 세계에서 운전 중이거나 건설되는 원자력발전소는 500여기에 이르며 2005년 현재 108기의 원자력 시설이 D-D된 것으로 나타나 있다. 여기에 핵연료 제조 공장이나 재처리 시설까지 추가로 고려되어야 한다.

일반적인 자료이지만 미국 규제 기관이 제시한 D-D 경비는 기존 경수로의 경우, 적어도 1.64억달러(2000년 가치)로 추정된다.

OECD국가에서는 운전 평균 수명이 15년이므로, 평균 수명을 30년으로 볼 때 2015년 근방이 D-D의 피크가 될 것 같다.

프랑스는 이미 6기의 흑연가스로를 운전 정지한 상태이고, 다수의 연구 개발 · 실증 발전소를 정지하고, D-D의 다음 단계를 예정하고 있다.

4. D-D 기술

해체 기술은 기존 기술의 경험에 의한 피드백 기술로 개발되고 있다. 제염 기술로는 화학적, 기계적 또는 열적 공정으로 분류되고, 때에 따라서는 혼용된 기술이 사용된다.

콘크리트와 금속의 표면 제염은 고속 방사 드라이아이스 미립 방식, 화학 젤 방식, 또는 제염 발포제 등을 사용한다.

콘크리트나 금속의 해체 기술은 기계적 방식(예: 절단, 고압 워터젯) 또는 열적 공정(예: 플라스마 토치 공정)을 사용한다.

제거 가능한 차폐체, 임시로 설치된 문, 모바일 여과/환기 계통 등에는 다양한 기술이 사용된다.

해체된 물질은 대부분 저준위 폐기물이며, 유럽연합은 원자력발전소의 평균 해체 폐기물의 양을 기당 10,000m^3로 추정하고 있다.

원자력 안전과 보안

1. 원자력 발전과 관련된 위험도

원자력 시설을 설치, 운영하는 데는 반드시 관련 규정을 만족해야 하고 인간이나 환경에 영향이 미치

지 않도록 관리해야 한다.

그리고 원자력 시설에 대한 대중의 수용성은 필수적이다. 예를 들면, 의료 측면에서 원자력 이용에 대한 위험도는 수용되고 있는 편인데 이는 환자에게 혜택과 위험도가 서로 잘 조화를 이루고 있기 때문이다.

프랑스의 국립 의학아카데미는 건강에 가장 영향을 주는 위험 인자로 에너지 공급 부족을 꼽았으며, 화석 연료, 바이오매스, 폐기물 소각 에너지 등과 비교하여 가장 경제적인 핵에너지를 권고하고 있다.

한편 원자력의 위험도를 다른 산업이나 일반 인간 생활에서 오는 위험도와 비교해 보면, 일반 대중은 장수명 방사성 폐기물과 이로 인해 후손에게까지 영향을 주게 되지 않을까 하는 우려에서 부정적이다.

따라서 원자력에 대한 대중의 수용성은 필수적이며 대화와 투명성을 유지하는 것이 중요하다.

2. 원자력 발전과 환경

우리는 살아가면서 환경으로부터 방사선을 받고 있다. 이러한 방사선은 자연히 생기는 것으로 우주선, 라돈, 마시는 공기, 우라늄 및 토륨 등의 동위원소 등 여러 분야에서 발생하는 방사선이다.

인공적으로 만든 동위원소에서 또는 핵실험이나 체르노빌과 같은 발전소 사고에서 방출되는 방사선을 받기도 한다.

따라서 마시는 물에서도 방사선이 나올 수 있으며, 방사선 피폭을 받은 생물체에서도 방사선이 검출될 수 있다.

원자력발전의 운전시에 환경 영향은 낮은 편이라 발전소에서 방출되는 방사선을 측정하기 힘들 정도이다.

La Hague 재처리공장에서의 방출은 조금 높은 편이다. 규제 기준에 의거, 요오드(I-129)와 삼중수소는 바다에 그리고 크립톤과 삼중수소는 대기에 방출된다. 이러한 방출은 환경에 영향을 주지 않을 정도임이 사전에 확인되고 있다.

모든 핵종이 동일한 방법으로 처리되지는 않는다. 화학적인 특성에 따라 처리되지만, 발전소의 격납 용기 내에서 대부분 분산시키거나 희석시켜 처리되고 있다.

3. 원자력 발전과 건강 위험도

방사선 피폭 통제는 방사선 방어의 주제가 되고 있다. 프랑스의 규제에 의하면 작업자 피폭은 연간(12개월 연속 개념) 20 밀리시버트(mSv) 이하로, 그리고 일반인 피폭은 연간 1 mSv로 규정하고 있다. 물론 위에서 이미 언급한, 누구나 받는 자연 방사선인 연간 2.5 mSv는 예외이다.

우리가 받는 연간 환경 방사선 2.5 mSv와 비교할 때 원전에서 방출되는 방사선은 매우 낮은 편이다. 그리고 원자력발전소에서 방출되는 방사선의 양은 같은 규모의 석탄 화력발전소에 비해 약 1/10 정도이다.

즉 원자력발전소의 경우 연간 생산 전력1GW?년 당 받는 피폭량(dose)은 1.6~2.6man-Sv 인 데 비해 석탄 발전소는 20man-Sv이다.

위에 언급된 수치를 건강 위험도 관점에서 상호 척도로 비교해 보면, 연간 방사선 피폭량이 mSv 단위로 20 이하는 무시(insignificant), 20~100 사이는 낮음(low), 100~1000 사이는 중요(significant) , 1000 이상은 위험(major) 등의 의미를 나타낸다.

4. 안전성과 안전성의 시현

원자력 시설의 운영에 위험도가 전무할 수는 없다. 안전 절차의 목적은 원자력 시설을 운영하는 과정에서 위험을 최소화하기 위한 것이다.

가상 사고를 가정하여 설계시에 매우 보수적으로 이를 반영한다. 사고가 발생하지 않도록 사전에 차단하는 관련 계통 및 사고를 가정하여 영향이 최소화되도록 하는 완화 시설을 설계에 반영한다.

또한 어떠한 경우에도 방사성 물질에 의한 방사선이 원자력 시설의 내부에서 외부의 환경으로 방출되

는 것을 차단하도록 다중 방호 대책을 수립한다.

프랑스의 규제에서는 사건이나 사고를 가상한 결정론적 계산 요건을 두고 있다.

내부 사고와 외부 사고를 즉, 지진, 화재, 정전, 펌프-구동 정지 등을 모두 고려하고 있으며, 온갖 종류의 사고 가상 시나리오를 망라하여 계산한다.

다중 방호의 개념은 이 결과를 수용하고 완화하는 방향으로 절차를 수립하고 조치 계획이 준비된다.

운전중인 발전소를 정지하게 하고 비상 계통이 작동하게 하며 발생한 방사능이 외부로 누출되지 않도록 하는 조치가 서로 연계하여 취해진다.

이러한 접근 방식은 방호벽의 파괴 가능 확률, 방사성 폐기 물질, 그리고 인근 주민에 대한 논리적 결말을 상호 평가한 확률론적 안전성 평가(PSA, Probabilistic Safety Assessment) 방식에 따라 이루어진다.

다른 한 가지 관점은 인간 인자(human factor)로서 이는 안전성 평가에 있어 발전적인 면이다. PSA에서 인간 행위는 계통의 신뢰도나 원자력 시설의 안전성에 매우 중요한 영향을 줄 수 있는 것으로 파악되고 있다.

원자력 문화에 중요하게 기여하는 또 다른 항목은 경험의 피드백이다. 사건이나 큰 사고(예: TMI 원전 사고, 체르노빌 원전 사고, 도카이무라 재처리 시설 사고)에서 얻은 경험의 피드백은 원자력 시설 운영을 크게 발전시킨 것으로 평가되고 있다.

여러 사건 사고가 많지도 않지만 수학적 방식으로 분석되고 있지 못하다는 것이 아쉬운 점이며 조그마한 사건에도 주의를 기울일 필요가 있다.

세계원자력운전자협회(WANO)를 창구로 운전원은 자신이 운전하는 원자력 시설뿐 아니라 다른 운전원과 정보를 교환하는 데 힘써야 한다.

국제원자력 기구(IAEA)는 모든 원자력 국가의 안전성에 관한 공통 사항을 종합하여 국제 규약과 기준을 채택해 오고 있다.

5. 핵확산에 대한 위험도

원자력의 평화적 이용 측면에 반해 또 다른 측면이 핵무기 개발인데 이는 세계의 안전을 위협할 수 있다.

핵무기 제조용 핵 물질을 확보하는 가장 쉬운 방법은 우라늄의 농축이다. 이는 우선 연구용 원자로용 고농축 우라늄 핵연료에서 확보될 수 있다. 미국이 연구로의 핵연료 농축도를 20% 이하로 금수 조치하는 것도 바로 이 때문이다.

또 다른 핵물질 확보 방안은 어려운 방법이기는 하지만 Pu의 확보이다. 1950년 이후 영국과 프랑스가 천연 우라늄을 연소시켜 군사용 Pu를 생산해 왔다.

하지만, 상용 원자력발전소용 농축 우라늄을 재처리하여 군사용 핵물질로 사용하기는 쉽지 않다. 고순도의 Pu를 추출하도록 핵연료를 적절하게 조사시키기란 그리 쉬운 일이 아니기 때문이다.

사실 기술적으로 불가능한 방법은 아니지만 대규모적이고 매우 비경제적이며 운전을 비밀스럽게 할 수도 없다.

핵 확산 방지를 위한 국제 협약으로 핵확산방지조약(NPT)이 있다. 세계의 거의 모든 나라가 이 조약에 가입하고 있지만 몇몇 국가는 가입하지 않고 있다. 가입한 국가는 IAEA가 확인하는 사찰 활동에 동의하고 있다. 1968년에 핵무기를 보유하고 있는 유엔 안전보장이사국인 5개국(미국, 영국, 프랑스, 러시아 및 중국)은 그들의 군사적 핵 프로그램을 IAEA에 제시하지 않아도 된다.

상대적이긴 하지만 아직도 NPT에 가입하지 않았거나 가입 후 탈퇴한 국가에 대한 통제의 어려움이 문제이다.

테러리스트 공격의 위험도는 특별히 2001년 9.11 테러를 겪으면서 언급되고 있다. 다중 방호 개념의 대책이 필요하다는 견해이다.

핵물질 운반의 위험도도 고려 대상이다. 핵연료의 변환, 농축, 가공 공정, 그리고 원자로나 재처리 공장에서 연료의 조사(照射) 과정에서 연료를 옮길 때 일어날 수 있는 위험도가 그것이다.

프랑스의 경우 연간 약 30만개의 방사능 포장 용기가 이동하는데 이 중 약 2% 이하가 위험 물질을 내포

하고 있다.

6. 방사성폐기물의 처분과 관련된 위험도

장수명이며 고준위 방사성폐기물의 저장이나 처분에 관련된 위험도는 4 기간으로 구분되어 관리된다.

첫 번째 기간에는 몇 십년 저장(MOX 사용후연료는 약 100년 저장)을 통한 단수명 핵분열성 물질이나 일부 악티늄족 핵종의 폐기물 관리이다.

두 번째 기간에는 폐기물의 냉각이 필요하지 않고 악티늄족 핵종 (안정화를 위해 유리화된 넵티늄, 아메리슘, 퀴륨)으로 유지되며 방사능 세기도 낮아진다. 이 때는 열적 하중에 따라 폐기물 규격, 포장 용기, 처분 장소 등이 정해진다.

세 번째 기간에는 고준위 폐기물이 수 십만년 동안 방사성 독성을 지니고 있다. 여기서는 유리화된 악티늄족 핵종과 재처리된 Pu등이 주류를 이룬다. 안전한 지질 처분 부지가 확보되어야 하고 처분 용기를 저장하는 격납 시설이 설치되어 기술적 방호벽의 역할을 하게 한다.

네 번째 기간은 10만~20만년 이후로 지질학적 방호벽인 격납 용기의 역할에 대한 안전성 분석 작업이 필요하다. IAEA의 보고 자료[2]에 따르면 이러한 고준위 폐기물의 처분을 위한 처분장을 확보하고 있는 나라는 스웨덴, 핀란드 그리고 미국을 제외하고는 아직까지 확보하지 못하고 있다. 기술의 개발 상황을 볼 때 2020년까지는 처분 시설의 완성이 어려울 것으로 보고 있다.

세계 에너지 사정

1. 에너지 사용

에너지 수요를 부문별로 보면, 주거 부문이 총수요의 1/3을 차지한다. 온수. 주거/서비스 부문 난방 등에서 태양열 이용이 증대되고 있으나, 재생 에너지의 수요는 아직도 미미하다.

수송 부문에서 에너지 수요는 가장 큰 몫을 차지하고 있으며, 액체 탄화수소 연료 이용은 단기간에 현실화될 것 같지 않다.

하이브리드 자동차나 전기 자동차는 이미 현실화되고 있다. 수소 이용과 연료 전지의 현실화 가능성도 석탄에서 제조되는 화학 연료와 경쟁하고 있다.

2. 전기 에너지

전기 에너지가 개발 도상 국가에서 에너지 수요의 증대를 차지하고 있다. 전기는 수송, 배전 그리고 최종 수요 단계에서 깨끗한 에너지 형태로 공해가 없고, 온실 가스 배출도 없으며, 어디에서나 어려움 없이 사용될 수 있다는 장점이 있다.

전기는 생산 단계에서도 깨끗함을 유지하며, 주로 화석 발전, 원자력 발전, 수력 발전 및 태양 발전 등으로 대별된다.

그러나 전기는 이점에 비해 결정적인 단점이 있다. 바로 전기 저장이 어렵다는 것이다. 따라서 수요에 대비하여 바로 생산하게 된다.

전기 저장 문제를 어느 정도 해결하기 위해 여러 종류의 재생 에너지원이 전력망에 연결되어 간헐적으로 송전하고 있다.

3. 1차 에너지의 국제 수요

석탄광, 석유공 및 수력댐 등은 1차 에너지라 불린다. 이를 사용하기 좋은 유용한 에너지(예 : 전기 에너지)로 전환하려면 1차 에너지의 약 3배가 필요하다.

향후 50년 동안 세계 에너지 수요는 인구 증가로 인해 지속적으로 증가할 것이다. 주로 삶의 질적 향상을 바라는 개발 도상 국가에서 수요가 높아질 것이다.

석유, 석탄, 가스 등이 에너지원이 될 것이며, 석유는 향후 10~20년 사이 정점을 지나 그 이후 감소할 것으로 추정된다. 즉, 지속적으로 증가하는 수요에 맞춰 그 부족분을 어떻게 채울 것인지가 문제이다.

오늘날 인류가 소비하는 에너지는 매년 90억

<표 1> 인구 1인당 국가별 에너지 수요(단위: toe/년)

국가	인도	중국	일본	프랑스	EU국가	미국
수요량	0.2	0.7	3.9	4.0	3.8	8.1

toe(ton oil equivalent)로서 이를 1인당 개인 사용량으로 계산하면 평균 2.3toe가 된다.

이를 에너지원별로 구분하면, 석탄 25.7%, 석유 40.7%, 가스 23.1%, 원자력 7.4%, 그리고 수력 2.5% 등이다. 재생 에너지는 0.6%에 불과한 미미한 상태이다.

이를 다시 지역별로 구분하면 북반구와 남반구가 크게 다르다. 미국의 경우 8toe이고, 유럽과 일본은 4teo인 반면, 인도는 0.2toe에 불과하여, 지역적으로 매우 편중되어 있음을 알 수 있다.

4. 화석 에너지

향후 약 10여 년까지 화석 에너지의 증가는 계속될 것으로 보인다. 국제에너지기구의 통계에 의하면 2030년까지 세계 에너지 공급의 약 90%가 산업용 에너지이고 석유 및 가스 등 탄화수소 연료가 65%를 차지할 것으로 보인다.

석유 매장량을 현재의 수요로 가정하면 약 40년 정도 공급이 가능하다. 1960년 이후 새롭게 발견되는 유전 지역의 발견율은 적어지고 있지만 다행히도 유전 지역의 매장량은 큰 편이다.

세계의 가스 수요는 지속적으로 증가할 것이며, 이는 석탄이나 석유보다 환경에 미치는 영향이 더 적다. 먼지도 없으며 복합 사이클로 전력을 생산할 수 있는 이점도 가지고 있다.

이러한 장점으로 가스는 석유/석탄보다 사용량을 증대시키고 있어 이대로라면 향후 60년 동안 공급될 것으로 보인다. 하지만 개발 측면에서 완벽한 기술이 실증되지는 않았다. 가스 매장량 측면에서 메탄 수화물까지 고려하면 가채년수는 배로 늘어날 수 있다.

사실 석탄 매장량 자체는 별로 중요하지 않다. 몇 백 년 후에도 현재의 상황이 유지될런지는 모르는 일이다. 기술적 개발(예 : 석탄의 가스화 시스템 개발)이 뒷받침될 것이기 때문인데, 깨끗한 석탄의 사용이 현실화될 수 있다. 미국이 주도하고 있는 'Futuregen 프로젝트'는 CO_2를 격리하여 깨끗한 석탄으로 전기를 생산할 수 있는 좋은 예이다.

5. 에너지와 기후 변화

우리는 향후 에너지 수요 공급에서 두 가지 관점의 주요한 이슈를 제기하고 있다. 첫째는 유한한 화석 연료에 대한 대책이고, 둘째는 화석 연료로 인한 지구의 기후 변화에 대한 대책이다.

이 이슈들을 서로 연계하여 그 대책을 조속히 수립하지 않으면 지구의 기후에 돌이킬 수 없는 악영향을 미치게 될 것이다.

현재 CO_2 감축을 위한 비용 저감 연구가 진행중이다. CO_2의 격리와 처분 부지의 장기적인 보호와 유지 비용으로 톤당 약 50~100유로가 추정되고 있다.

또한 CO_2에 관한 연구개발 프로그램이 진행 중에 있다. 이는 유럽 자체에서 추진되는 것이며 CO_2의 포획과 처분 문제점에 대한 부분적인 답을 얻고 있다.

그 답은 현재로선 대규모의 정적 구조에 대해서만 가능하다고 보는데, 이는 대규모의 CO_2 배출 부문인 수송 부문과 주거 부문이 제외된 것이다. CO_2 배출 없이 수소를 생산/이용하는 것이 가능하지만 단기적 측면에서는 불가능하다.

에너지원 별로 생산 전력 kWh 당 CO_2의 발생량을 비교해 보면 석탄 화력(892g)이 가장 높고 천연 가스(844g) 그리고 석유(839g)의 순이다. 다음은 디젤(726g)이다. 태양열, 원자력, 수력, 풍력은 운전 중 CO_2를 발생하지 않는다.

재생 에너지의 경우 유럽은 정책적 관심으로 온실가스 배출을 줄이려는 체계에 지원을 아끼지 않고 있다. 이와 관련하여 교토의정서가 첫 단계의 나침반이

되었고, 2001년 9월에 발표한 '유럽 명령(European directive)'이 그것을 뒷받침해 주었다.

유럽은 재생 에너지원에 의한 전력 생산을 현재의 13%에서 2010년에는 22%로 상향하는 것을 목표로 추진중에 있다. 이에 비하여 프랑스는 현재 15%에서 2010년에는 21%를 목표로 잡고 있다.

원자력 발전의 경제성

그 동안 원자력 발전의 경제성 분석은 많이 이루어져 왔다. 최근 프랑스 산업성에서 잘 알려진 프로그램(DGEMP)으로 수행한 경제성 분석은 거의 완료 단계에 와 있으며 핀란드 정부를 대신하여 Tarjanne 교수가 신규 원전을 대상으로 수행한 결과도 있다.

DGEMP 분석의 경우, CO_2 배출 대책 비용 등 외부 인자를 고려하지 않은 원자력 발전의 내부 발전 단가는 30유료달러/MWh로서 가스 복합 발전과 대등한 것으로 나타나고 있다.

건강 및 환경에 대한 외부 인자(예: CO_2)를 고려한 외부 발전 단가의 경우 대부분 석탄 및 석유 등 화석 연료가 높다(석탄 53, 석유 46, 가스 15, 바이오 6, 원자력 3, 태양 5, 풍력 2).

핀란드는 1,250MW의 신규 원전에 40년 발전소 수명 기간을 가정하여 비교 검토하였다. 그 결과, 원자력 발전이 <표 2>와 같이 가장 경제성이 있는 것으로 나타났다.

<표 2>에서는 실질 연간 이자율 5%를 가정한 것인데, 만일 이자율 8%로 고려하면 초기 투자비가 많은 원자력에 어느 정도 부담 요인이 된다.

이 경우 원자력과 석탄을 비교하면 원자력이 30.1유로/MWh, 석탄은 32.2유로/MWh 이다. 지구 변화에 대한 탄소세를 고려할 경우 CO_2톤당 20유러달러를 가정하면 원자력이 24.1유로/MWh, 석탄은 37.6유로/MWh 이다. 원자력 발전은 경제적인 면도 있지만 미래를 예측할 수 있다는 것이 장점이다. 우라늄 연료가 차지하는 비율이 아주 적기 때문에 가격에 크게 좌우되지 않는 것이 특성이 있다.

<표 2> 에너지원 별 경제성 분석(단위: 유로/MWh)

에너지원	원자력	석탄	가스	목탄	풍력
자본비	13.8	7.6	5.3	13.0	40.1
운전유지	7.2	7.4	1.5	8.2	10.0
연료	3.0	17.1	23.7	18.4	0.0
계	24.1	32.1	30.5	39.6	50.1

* 핀란드의 경제성 분석 결과

국가별 원자력 발전 현황

최근 원자력 발전의 장점에 대한 몇 가지 성과가 있었다. 그 중의 하나는 「유럽위원회 그린 북(European Commission Green Book)」이다.

이 보고서는 경제성을 가진 원자력 발전이 에너지의 안정적 공급에 기여하고 있고 온실 가스의 감축 측면에서 다루어지고 있다. 또한 원자력과 재생 에너지가 향후 온실 가스 배출 방지를 위한 장기 에너지 수급에서 역할을 하게 될 것으로 결론짓고 있다.

2001년에 발간된 다른 보고서인 「Report of the National Energy Policy Group」에서도 위와 비슷한 언급을 하고 있다.

전 세계의 1차 에너지의 수요가 증가하고 있는데 이를 해결하기 위해서는 공급을 늘려야 할 것인데 그 역할을 원자력 발전과 같이 온실 가스 배출이 없는 것이어야 한다.

대부분의 국가에서 2020년까지 단기뿐만 아니라 2020년 이후의 장기 계획에 원자력 발전을 에너지 정책에 포함시키고 있다. 참고로 에너지원별 세계 구성비를 보면 석탄화력 39%, 수력 19%, 원자력 16%, 가스 15% 그리고 석유 10%이다.

1. 미국

미국 행정부의 평가에 따르면 신규 전력과 노후화에 따른 전력 시설의 대체로 현재 1,300GWe 시설 용량은 2020년에는 1,900 GWe 규모로 늘어날 전망이다. 즉 400GWe 시설 용량이 이 기간 동안 추가 된다는 뜻이다.

미국의 원자력 발전 가동률은 괄목한 성장을 해왔다. 미국은

세계에서 가장 많은 104기의 원전을 보유한 국가로 그동안 발전소의 높은 운전 실적을 달성하기 위해 발전소의 낙후된 시설을 교체하는 쇄신 노력과 규제 기관으로부터 수명 연장을 승인받는 노력을 해 왔으며 운전중인 중고 원자력발전소가 신규 원전에 해당하는 가격으로 경영이 좋은 다른 전력 회사에 팔리기도 한다.

지난 2001년 국가에너지정책보고서가 대통령에게 보고되었다. 여기에는 탄화수소 공급과 환경 영향 평가가 포함되었다.

그 동안 신규 원전 건설에 침묵하고 있던 자세를 바꾸어 원전을 새로이 건설하기로 최종 결론을 내렸으며, 2010년까지 새로운 기술의 원자력발전소를 건설한다는 목표로 관계 당국의 뒷받침하에 추진되고 있다. 또한 그 동안 핵연료를 한번 사용하고 폐기한다는 정책(Once Through)에서 사용후핵연료를 재활용한다는 '신(新)핵연료 주기 정책(Advanced Fuel Cycle Initiative)'으로 선회하고 있다. 즉 연료를 재활용하여 에너지원의 효율을 높이면서 결국 폐기물의 양을 감축한다는 것이다. 이에 따라 유카마운틴 폐기물 처분장의 건설 목적도 수정되기에 이르렀다.

미국은 2020년까지 50GWe 원전의 추가 건설을 예상하고 있다.

2. 러시아

경제적 사정이 좋지 않지만 원자력 발전에 관해서는 전 세계에 적절한 목소리를 내면서 정책에 참여하고 있다. 좋은 예가 러시아의 INPRO 제의이다. 이는 외국이 사용료인 리스 비용만 내면 사용후핵연료를 러시아의 폐기물 처분장에 보관해 주겠다는 것이다.

러시아는 체르노빌 원전 사고로 건설이 중단되어 버린 상태를 복원하기 위해 원전의 건설~운전까지 민간 기업의 참여를 유도하고 있다. 그 밖에 러시아는 고속로 개발 계획도 가지고 있다.

러시아와 미국은 특정 분야에서 서로 협력하고 있는데, 핵무기 해체에 따른 핵물질을 원자력발전소의 핵연료로 사용하려는 노력이 바로 그것이다.

3. 중국

국민 총생산 년 10%의 고도 성장을 하고 있는 중국은 향후 20년간 매년 20GWe의 새로운 전력이 소요될 것으로 예상되고 있다.

1980년대에 중국은 프랑스와의 협정에 의해 원자력 기기 공급 분야에서 특별한 협력이 이루어져 왔다.

현재 8기의 원전이 운전 중이나 이는 전체 전력 시설 용량의 1.5%에 불과하다. 이에 향후 2020년까지 35GWe 시설 용량을 원자력으로 건설한다는 계획이다. 이는 20~30기의 신규 원전의 건설을 뜻하며 그럴 경우 원자력 점유율은 4~5%로 상향된다.

4. 일본

부존 자원이 거의 없는 일본은 1970~80 년대의 프랑스와 같은 전략을 수립하였다. 53기의 원전이 운전중이고 시설 용량은 45 GWe로서 원전 점유율은 34%이다. 현재 4기의 원전이 건설중에 있다.

일본 원자력위원회(JAEC)의 보고서에 따르면 2030년까지 20기의 원전이 추가로 건설된다고 한다. 그러나 일본 내의 여러 문제, 즉 낮은 인구 증가율과 원자력에 대한 대중의 이해 부족 등으로 이 규모가 줄어들지도 모른다.

5. 한국

한국은 20기의 원전을 운전 중에 있고 원자력이 전체 전력의 38%를 점유하고 있다. 현재 2기의 원전이 건설 중에 있다.

한국은 부존 자원이 전무하여 향후 12년간 8기의 원전을 추가 건설할 계획이다. 장기적인 관점에서 2000년의 원자력 발전 시설 용량 대비, 2배의 용량까지 원자력 시설을 확장한다는 계획을 가지고 있다.

6. 인도

10억 인구에도 불구하고 개인당 낮은 에너지 수요

(0.5toe/인/년)를 나타내고 있다. 14기의 소형 CANDU 원자로가 가동 중이나 원자로 단위 규모를 키우기를 원하고 있다.

현재의 원자력 시설 용량은3GWe 규모이나 2020년까지 20GWe 규모로 확장한다는 계획을 수립하고 있다. 원자로형도 경수로를 고려하고 있으며, 외국의 공급 업체와 협의 중이다.

7. 유럽

유럽 연합의 회원국은 각각 별도의 국가로서 에너지 선택권을 가지고 있다. 프랑스는 전체 전력의 80%를 원자력으로 공급하고 있으나, 아일랜드, 오스트리아, 노르웨이, 덴마크 및 이태리는 전혀 원자력 발전이 없다.

이태리와 오스트리아는 1980년대에 원전에 대한 반대 입장을 분명히 하였고, 스웨덴은 2010년까지 단계적 폐쇄를, 독일은 2000년에, 벨기에는 2001년에 각각 단계적 폐쇄를 결정하였다. 영국도 신규 원전 결정을 유보하기로 결정한 바 있다.

스위스는 2003년에 단계적 폐쇄를 결정하였으나, 핀란드는 신규 원전을 결정하여 유럽형 원전(EPR)을 건설중이고, 프랑스도 EPR을 새로운 부지에 건설하기로 결정하였다.

일부 원자력에 대해 부정적인 면이 있지만 유럽은 에너지 수요 관점에서 원자력이 절대적으로 필요하다.

- 현재 원자력의 점유율은 35%임
- 제3세대 원자로(EPR) 공급(Avera 제품)
- 방사성폐기물 관리 연구(프랑스 주축)
- 핵융합반응로의 국제 연구

스웨덴은 Barseback 1호기를 1999년 말 운전 정지하고 대신 덴마크의 화력 발전에서 부족분의 전력을 송전받고 있다.

이와 관련하여 산성비에 대한 국민 여론이 좋지 않고 원자력에 대한 지지층이 점점 늘고 있다.

스웨덴은 20년 전에 국민 투표로 단계적 폐쇄를 결정한 바 있다. 영국은 운전 연수가 오래된 원자로형인 Magnox를 10년 내에 모두 운전 정지하기로 결정하였다.

북해의 석유가 25년 내에 고갈될 것으로 보여 에너지 사정이 좋지 않다. 2003년 에너지 정책 백서가 나왔지만 재평가 중이다. 2020년까지 획기적인 CO_2 감축 계획을 가지고 있지만 원전 계획에 대한 분명한 입장은 유보하고 있다.

원자력 발전의 미래

1. 핵연료 효율 개선

돌이켜 보면 1970년대의 원자력 발전의 경제성은 핵연료가 차지하는 비율이 상대적으로 낮아 다른 에너지원과 경쟁을 해 왔다. 그 이후 연료비는 꾸준히 증가함으로써 핵연료의 효율 제고를 위한 연구가 필요하게 되었다.

최근의 경제성 분석 보고 중 핵연료 분야에서 생산성 제고와 관리 방안이 제시되고 있다. 즉, 핵연료의 연소도를 높이는 방안, 연소 기간을 늘리는 방안, 핵연료 재장전의 유연성 등 산업적 현안들이 그것이다.

최고 연소도는 현재 52GWd/t으로 1980년대의 33GWd/t과 확연히 비교되며, 이는 중요한 개선 사항이라 할 수 있다.

이같은 결과는 많은 연구 개발 결과에서 비롯된 것으로 PWR의 노심에서의 표준 및 실험적 조사 경험을 피드백하여 달성할 수 있었다. 핵연료 자체의 개선, 예를 들면 피복관 재질, 펠릿, 세라믹 재질 구조의 개선이 여기에 포함된다.

연소도 최종 목표는 70GWd/t으로서 향후 10년 내에 개발될 것으로 예측된다.

향후 핵연료 개선을 위한 연구 개발 분야를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 연소도를 향상시키고 핵연료 집합체 기계 구조의 특성과 신뢰도 향상을 꾀한다.

둘째, MOX 연료의 연소도를 제고하여 경쟁력을 향상시킨다. 이는 핵연료에서 발생하는 핵분열성 가

스를 효과적으로 견지할 수 있는 세라믹 개발과 관련된다.

셋째, 피복 재료를 개선한다. 예를 들어 현재의 피복관 재료인 지르코늄과 니오브의 합금(M5합금)의 특성에 고온산화 현상 및 수소화 현상에 강하고 보다 견고한 재질을 개발하는 것이 이에 해당한다.

넷째, 2010년까지 연료 펠릿과 피복관의 상호 작용의 민감도를 줄인다. 이는 신규 원전인 EPR에 곧바로 적용하는 것에 목표를 두고 있다.

2. 원전 수명 연장

발전 회사에게 수명 연장이야말로 중요 이슈이다. 프랑스 발전소는 세계 원전의 평균 운전 경력보다 적지만 전력 회사인 EDF는 수명 연장을 원하고 있다. 수명 연장은 모든 기기와 부품의 수명과 연관되어 있어 기술적인 충분한 검토가 전제되어야 한다.

따라서 CEA는 원자로 압력 용기(Reactor Vessel)의 수명 건전성을 확인하기 위한 관련 연구를 수행해 나가고 있다.

발전소의 수명 연장과 관련하여, 원자로 압력 용기는 교체 대상이 아닌 부품 중 하나이다. 어떠한 사고 조건에도 기계적 강도가 확인되어야 하고, 이는 매 10년마다 평가되고 있다. 또한 압력 용기의 건전성 확인에는 방사선 조사로 인한 영향도 평가된다.

주된 연구 개발 내용은 압력 용기 강도를 확인하는 물리적인 기준을 정하는 테스트 시편의 조사, 기계론적 방법 개발과 확률적 방법을 통한 파괴공학의 신기법 개발 등이다.

수명 연장과 관련해서는, 원자로 건물인 콘크리트 격납 용기(Containment)의 건전성 확인이 중요하다. 중대 사고시, 격납 용기는 다중-방호의 마지막 방벽으로, 격납 용기 내의 철판의 부식 상태와 격납 용기의 콘크리트 강도에 대한 성능 저하 여부 등의 확인이 필요하다.

기기나 구조물의 교체 가능성도 확인해야 한다. 예를 들면 증기발생기 세관의 누설은 심각한 파단 사고를 불러올 수 있기 때문에, 비파괴 검사를 통한 평가가 이루어져야 한다. 주로 응력에 의한 부식과 유체 유발 진동에 따른 마모 이론 등이 연구 개발 내용이다.

현재 원전의 교체

1. 제 1세대 원전

제1세대의 원전은 1950~60년대의 기술로서 핵연료 주기의 제약으로 인해 어려움을 가졌던 때였다. 우라늄 농축 기술의 부재로 핵분열에 의한 연쇄 반응을 할 수 있도록 자연스럽게 감속재로 중수를 사용한 원자로가 개발되었는데 가스흑연로(GGR)가 그 예이다.

CEA는 원자로 계통 개발에 깊이 참여 공정 계통 공급자의 능력을 갖출 능력을 갖기도 하였다. 같은 시기에 영국은 Magnox형의 원자로를 개발하였는데 이 원자로는 열역학적인 효율과 우라늄 이용도에 대한 특성을 가졌지만 안전성 제고와 원자로 용량 증대의 어려움도 갖게 되었다.

핵연료 주기에 대해서는 천연 우라늄을 사용함에 따라 사용후핵연료에서 발생된 Pu의 재활용을 고려하게 되어 후행 핵연료 개념을 개발, 정립하는 계기가 되었다.

2. 제 2세대 원전

운전중인 원전의 대부분이 이 부류에 속하고 있는데 화력 발전에 비해 월등한 경쟁력을 가지면서 개발되었다. 군사 목적으로 개발된 가스확산법에 의한 농축 공정으로 저농축 우라늄을 원전의 연료로 사용하게 되어 경수로(PWR및 BWR)가 전체 원전 450기의 85%를 차지하고 있다.

과거 수십 년 동안 운전을 통한 경험의 피드백으로 화석 연료와 비교하여 더욱 경쟁력 우위를 가져올 수 있었고 기술 개발에 의한 폐기물 량도 대폭 감소시킬 수 있었다. 원자로 운전 경험은 총 10,000원자로 · 년 이상의 실적이다.

<표 3 > 프랑스의 N4형과 EPR형의 비교

	N4형	EPR 형
전기 출력(MWe)	1,450	1,600
열출력(MWt)	4,250	4,450
연료 집합체 배열	17×17	17×17
집합체 당 연료봉 수	264	265
연료봉 길이(m)	4.3	4.6
집합체 수	205	241
평균 선형 출력비(kW/m)	19.8	16.3

3. 제 3세대 원전

제3세대의 원전은 최첨단 산업 기술로 분류된다. 이 원자로의 진화된 기술은 2세대 원자로의 운전 경험에서 피드백 기술이 접목된 것이다. 이미 2세대원전도 안전성이 입증 되었지만 3세대에는 더욱 안전성이 제고 되었다.

3세대 원전 건설의 국제적 청약이 많아지고 있다. 아시아에서는 이미 건설되고 있고 핀란드와 프랑스도 마찬가지이다.

제3세대로 분류되는 원자로 형은 가압경수로인AP 600, AP 1000, APR 1400, APWR+, EPR과 비등경수로인 ABWR II, ESBWR, HC-BWR, SWR-1000 등이며 중수로는 ACR-700(Advanced CANDU Reactor 700)이다.

그리고 중소형 원자로에는 CAREM, IMR, IRIS 및 SMART가 있고 고온가스로에는 GT-MTR, PBMR이 있다. CEA는 유럽형 EPR 개발에 프라마톰, 지멘스와 협력하여 왔다.

4. EPR의 산업적 현안과 주요 특성

유럽형 원전 EPR의 주요 목적은 두 가지로 볼 수 있는데, 우선 화력 발전과의 경쟁에서 보다 우위를 점하면서 오히려 원자로 안전성을 보다 강화한다는 것이다.

독립적인 4개의 안전 여유 계통이 고려되었고 수소 폭발에 대비한 새로운 콘크리트 격납 용기를 설계하는 등 중대사고에 대비하였다.

원전 용량 규모는 N4형 1,450MWe에서 EPR 1,600MWe로 증가됐으며, 에너지 효율도 증기발생기와 터빈의 실적을 제고하여 과거보다 약 10% 높은 36%를 목표로 하고 있다.

또한 핵연료의 사용 유연성을 높이고 있는데 UOX, MOX, 또는 100% MOX 등을 사용하는 여러 가능성을 열어두고 있다.

EPR 발전소 수명은 40년에서 60년으로 늘리고 있으며, 연료 교체 기간을 16일로 단축하는 등 여러 가지의 요인을 관리하여 운전비를 감축하고 건설 기간을 57개월 공기로 최적화하였다.

5. 연구 개발

EPR은 최적 원전 운전 관리를 달성하고 경쟁력에 초점을 둔 핵연료 사용의 유연성을 제고시킨다. 또한 안전성 측면에서 노심 용융 가상 사고에 대한 대중수용성 증진에 기여한다. 안전성과 핵연료 등 2가지 토픽은 여전히 중요한 연구 개발 도전 과제이다.

노심 관리 측면에서는 EPR은 현재 경수로 핵연료의 연료봉 규격과 동일하다. 다른 점이 있다면 낮은 선형 전력비(kW/m)와 경제적인 핵연료 관리 방안이라 할 수 있다.

원자로를 둘러싸고 있는 철판 조사체는 중성자 경제성에 도움을 준다. 동일 규모의 에너지 생산에서 연료 소모가 적어지며, 고에너지 중성자속을 감속시킨다. 원자로 압력 용기의 수명은 60년으로 설계되어 있다.

핵연료 UOX 관리는 표준 모드를 따른다. 원자로 내를 72개월 조사하고 매 1/4을 18개월마다 새 연료와 교체하여 연소도 목표 60 GWd/t을 달성하게 한다.

핵연료 MOX 관리는 벤치마킹 모드인데 50%의 MOX를 사용하는 혼합형이다. 재장전의 경우, UOX는 1/4을, MOX는 1/3을 교체한다. 교체 시기는 18개월로 하고, 연소도 목표는 두 가지로 60GWd/t과 55GWd/t이다.

목표 연소도를 관리하는 데는 중성자의 관리가 중요하다. 이를 위해 조사 연료봉의 동위원소 분석, 계산의 불확실성을 줄이는 단면적 분석, 연소도에 관련된 중성자 계산식의 최적화 등이 연구 내용이다.

EPR 원자로에서 중대 사고 평가는 다중 방호 안전 절차의 개념이며 프랑스와 독일의 안전 규제 기관은 공동 권고 사항을 1993년에 제시한 바 있다.

확률론적 안전성 검토에 따라서 수립되는 절차는 다음과 같은 목적을 두고 있다.

첫째는 단기적으로는 핵분열성 물질의 방출이 없도록 사고 조건을 제거하며, 또 한편으로는 어떠한 사고에도 농작물 생산 수요에 제약을 주지 않고 주민 대피가 없도록 한다는 것이다.

원자로 건물 내부 1차 계통의 압력 감압을 이끌어내고 발생한 수소는 내부에서 결집하여 제거한다는 전략이다.

격납 용기는 2중 방벽 개념으로, 생성된 방사성 물질에 의한 방사선 방출을 여과하여 환경 영향이 없도록 한다. 또한 1차 계통의 배관 파단으로 인한 냉각재 상실 사고는 배관 누설 확인 장치가 설치되어 있어 사고가 사전에 일어나지 않도록 하고 있다.

방사성폐기물의 연구

1. 교훈의 확인

재활용되지 않는 폐기물은 최종 처분 형태의 폐기물로 저장되는 기술에까지 와 있다. 즉 B형, C형(유리화) 폐기물은 최종 처분 폐기물 형태로 이미 우리 세대에 있는 것이다.

유리화된 폐기물(C형)은 저장된 지 약 30년이 흐른 것도 있는데 이미 핵종 변화가 일어나 일부 다르게 변해 있을 가능성도 있다. 이는 미량 악티늄족의 핵종 분리 및 변환을 통한 독성 감소의 가능성을 시사하고 있다.

최종 처분장을 위한 부지 확보도 이루어져야 한다. 심지층 처분 방법이 향후 후대의 지속적 통제 없이도 장기 관리가 가능한 방안으로 알려져 있다. 국제 기구인 IAEA, OECD/NEA는 물론 다른 국가에서도 같은 개념을 정리하고 있다.

미국 AFCI(Advanced Fuel Cycle Initiative) 정책이 전형적인 예로서 유카마운틴의 활용도를 새롭게 하고 있다.

미국은 과거의 핵연료 주기 정책에서 벗어나 핵연료 활용의 최적화와 폐기물의 감축을 통한 최소의 양을 지하 터널인 유카마운틴 처분장에 처분하려 하고 있다.

이러한 부지에 방사능이 충분히 붕괴되어 방사능이 약해질 때까지 장수명 핵종이 적절히 보관되어야 한다.

이와 관련된 연구, 예를 들면 폐기물 보관 용기에 관한 연구나, 고준위 방사능의 장수명 핵종을 변환하여 단수명 핵종으로 분리하는 연구 등이 추진되고 있다.

프랑스에서는 폐기물 책임 부서인 ANDRA가 Bure 부지에 심지층 연구소를 운영하고 있다.

2. 핵종 분리

사용후핵연료에 포함된 장수명 핵종은 주로 Pu(우라늄 포함)과 기타 Am 등이다. 방사능이 완전 붕괴되기까지는 약 십만 년 이상이 걸리는 장수명 핵종들이다.

유리화 핵분열성 물질은 100년이 지나면 급격한 붕괴로 방사능이 줄어 들지만 Am, Np등이 포함된 유리화 폐기물은 붕괴가 완료되려면 몇 백년이 지나야 한다.

사용후핵연료에서 Pu에 의한 방사능의 영향은 초기 단계에서 약 50%를 차지하며 이 중 90%가 100년 이상 지속한다.

현재 수행 중인 연구는 액티나이드 핵종(즉 Am,

Cm, Np)에 관한 핵종 변환인데 사용후핵연료의 양을 만족할 만큼 줄이는 시현을 한 바 있다. 이 방안은 PUREX 공정으로 La Hague 재처리 시설에서 이루어졌다. 기술적 측면에서 시현되었지만 양적으로 산업적 처리까지 가기에는 아직 만족할 단계는 아니다.

핵종 분리의 최종 목적(즉, 분리된 핵종의 제거 방법)이 구체화되어야 한다: 어떤 방사성 핵종이 분리되어야 하는지 어떤 분리 방법(modalities)이 지속되어야 하는지 등이다.

또한 장수명 핵종이면서 방사능 준위가 낮은 것(예: 요오드-129)은 갑상선 치료에 사용할 만큼 준위가 낮고 반감기가 짧아 바다에 폐기될 수도 있다. 하지만 이를 위해서는 ALARA 기준이 사전에 준비되어야 할 것이다.

3. 분리된 원소의 변환: 미래 연료 주기

핵변환이란 고독성 방사성 핵종을 저독성이나 무독성 핵종으로 변환하는 공정을 말한다. 이와 관련한 연구는 약 10여 년 이상 진행되고 있다.

대상 핵종을 확인하는 데는 여러 형태의 원자력발전소와 핵주기 관련 시설이 포함된다. 그러나 현실적으로 기술적인 면과 재정적인 면에서 볼 때 막대한 소요 경비가 뒤따른다.

그렇다고 모든 핵종의 핵변환이 가능한 것은 아니다. Pu는 계속적으로 연료로 재활용하게 될 것이다.

현재까지의 타당성 연구를 종합하면, 가속기와 미임계 원자로를 연결한 시스템을 활용하는 가속기-구동 시스템(ADS; Accelator-Driven System)이 핵변환 효율을 높일 수 있다는 결론이다.

관련된 연구가 프랑스에서는 고속증식로인 Phenix를 통해 이루어지고 있다. 다른 국가에서는 일본, 러시아 등이 이 연구를 추진 중이다.

미래 원전의 핵연료 주기

1. 추진 전략

미래 원전의 핵연료 주기의 선정에서는 지속 가능성, 경제성, 효율적 이용은 물론 안전성 등이 확인되어야 한다.

이 중에서 가장 중요한 것은 당연히 '지속 가능성'인데, 천연 우라늄 보전에 유리하고, 환경 영향이 없으며, 핵확산 방지 등이 고려되어야 한다.

현재의 경수로 주기 체계에서 사용후연료를 한 번 사용하고 폐기할 경우(Once Through Cycle), 폐기물은 매우 빠르게 증가하여 2040년이면 약 70만 HMt(Heavy Metal ton)을 상회할 것이다.

만일 경수로 체계에 고속로를 조합하여 Pu를 재활용하게 되면 2020년부터 사용후핵연료에서 발생하는 폐기물의 양이 줄어들어 2060년 이전에는 근본적으로 해결된다는 계산이 나온다.

이러한 계산은 우라늄-238의 에너지 잠재 능력을 최대한 활용한다는 전제와 Pu의 재활용은 물론 양은 적지만 악티늄족의 재활용이 폐기물의 발생을 최소화하는 데 따른 결과이다.

그러나 이는 어디까지나 이상적인 시나리오이며 현실은 그렇지 않을 수 있다. 우선 우라늄 자원의 유한성을 고려하여 검토해 보면 세계 우라늄 매장량은 경제적 가치가 있는 가격(130불/톤 이하)으로는 330만톤 정도에 불과하고 경제성을 고려하지 않은 매장량까지 고려하더라도 2천만톤 미만이다.

그리고 각국의 핵주기 관리 정책도 일률적일 수 없는 것이 변수가 되고 있다. 이는 물론 국제 기구를 통해 세계가 큰 틀에서 동일한 정책으로 간다는 가정에서 그러하다.

현재 경수로 위주의 핵주기로는 2060년이면 세계의 우라늄 부존 자원이 고갈되고 만다는 계산이다.

2050년에 고속로가 도입되어 다목적의 핵주기가 운용된다고 가정하면 이를 약 10년 연장할 수 있으나, 조금 빨리 만일 2030년에 고속로를 도입하면 지속 가능한 핵연료 주기 체제와 원전 운영이 가능하다는 계산이다.

핵분열성 동위원소인 악티늄족 원소의 재활용에 따른 그룹 관리 또한 매우 중요하다. 이 원소는 전략

적 가치가 있고 한편으로는 접근 가능한 원소이므로 핵확산 방지 관점에서 관리가 필요하다. 이의 활용은 경제성에 기여하고 공정 관리를 단순화시킨다는 이중의 장점이 있다.

투자 측면에서 기술의 집중화를 추구하는 것도 중요하다. 재처리 시설과 재활용 시설이 동일 부지에 위치하게 되면 많은 양의 사용후연료 수송을 피할 수 있을 것이다.

본 추진 전략과 연관된 국제적 공동 연구를 소개하면[2] 혁신적인 원전 기술을 개발하는 것으로, 하나는 Gen IV 연구를 위한 차세대 원자로 포럼(GIF)이며, 다른 하나는 핵연료 주기 프로젝트인 INPRO이다. 2020년까지 다양한 특성에 맞는 노형을 결정한다는 목표를 가지고 있다.

2. 핵연료 재활용 공정

어떤 핵주기 공정을 택할 것인가는 사용 핵연료와 어떤 사양의 선택을 할 것인가에 따라 달라진다. 과거의 경험을 토대로 위에서 언급한 기술성, 경제성, 핵비확산 등의 목적을 달성하기 위해 습식(Hydro-metllurgical, aqueous) 제련법 또는 고온 건식(Pyrometallurgical) 공정을 현재 추진 중이다.

습식 제련법은 이미 산업적 피드백이 가능하다는 장점을 가지고 있으며 La Hague에서 실증된 PUREX 공정을 통해 결과를 반영해 왔다.

고온건식법은 현재 여러 국가에서 진행되고 있는 새로운 방법이다. 이 방법은 몇 백도의 고온에서 용융염(molton salts)을 핵종 분리하는 방식으로 핵종 추출과 관련된 다양한 기술이 필요하다.

이 방법은 전해 분리 기술로 고온 용융염 전해 정련 조건을 확립하고, 고체 음극에 의해 우라늄을 분리하고 카드뮴 액체 음극에 의해 Pu을 별도로 분리하는 것으로, 시현적 기술성은 확립되었으나 대용량의 산업적 분리는 향후 연구해 나가야 할 주요한 과제이다.

3. 연구 대상

위에서 언급한 기본 개념, 즉 '핵연료의 자원 보존 차원과 핵비확산의 목표를 이루면서 지속 가능한 방안'의 틀에서 몇 가지 연구가 추진될 수 있다.

습식 제련 공정의 관점에서 두 가지를 지적할 수 있다.

첫째는, 새로운 핵연료의 특성에 현재의 공정을 접목하는 방안이다. 즉 핵연료 용해와 관련된 것으로 시약이나 기존 용해 조건이 적절하지 못할 수 있다는 것이다. 기존 연구는 PUREX 공정을 통해 우라늄, 탄화물이나 질소화물에 대해 진행되어 왔다.

둘째는, 핵종 그룹 관리를 원활하게 하기 위해 공정을 보완하는 것이다. 이는 용해 공정에서 모든 악티늄족 원소를 추출하는 방법에 대한 연구와 관련된 것으로, 지속적이고 계속하여 핵종 분리가 진행되도록 분자 구조와 적절한 공정도의 개발이 이루어져야 한다는 것이다. 이 연구는 GANEX라 하여 CEA가 제안해 놓고 있는 상태이다.

고온 건식 공정법은 궁극적으로 산업적 측면이 고려되어 대용량의 핵종 분리가 가능하여 사용후연료의 재활용이 가능한지에 대한 연구가 초점이 된다. 사실 현재까지 소규모의 Pu과 적은 악티늄족 원소를 분리하는 시현 연구가 진행되어 왔다.

다시 말하면 이 방법의 개념은 탐험적이고 실험실적인 연구이면서 기술 개발 측면은 매우 탁월하여 이제 연구가 시작되었다고 할 수 있다.

우라늄 자원

우라늄은 지구에 존재하는 원소 중 가장 무거운 원소로서 천연 우라늄에는 U-235와 U-238이 존재한다. 우라늄은 약 200여종의 광물에 섞여 있으며 지구 지각의 평균 0.3%에 우라늄이 포함되어 있다.

우라늄을 가장 많이 채광하는 국가는 캐나다이며 이어 호주, 나이지리아 순이다. 확인 매장량도 많을 뿐 아니라 순도가 좋은 곳은 호주와 캐나다이다.

우라늄 가격 80$/t 이하 범주의 확인 매장량은 약 250만톤이며 130$/t 범주는 330만이다. 현재까지 개

발 운전중인 원자로에서 약 2백만 톤의 우라늄을 이미 사용하였는데, 이는 현재 확인 매장량과 비슷한 수치이다.

사용한 우라늄 중 농축을 하고 남은 03% U-235의 열화 (劣化) 우라늄 120만 톤이 있다.

인산염 안에 포함된 우라늄량은 몇 백만 톤이 될 것이며 바닷물 속에 포함(백만 분의 3의 비율)된 양을 환산하면 그야말로 막대하다고 할 수 있다. 현재로는 경제적 가치가 없지만 향후 이에 대한 기술적 경제적인 개발 계획이 필요할 것이다. 추정 매장량은 발표원에 따라 약간의 차이가 있다. IAEA자료[2]에 의하면 130불선에 470만톤으로, 130불 가격대(인산염 포함)는 22백만톤으로 추정하고 있다.

이상을 종합해 보면 운전중인 경수로에 우라늄을 사용하는 것은 너무나 비경제적이다. 이 원자로 형에서 1g의 핵분열성 물질을 얻는 데는 200g의 천연 우라늄이 필요하다.

계속 현재의 원전 구조로 간다면 우라늄 자원의 미래는 물론 화석 연료와의 경쟁력에 대한 개념도 바뀌어야 할런지 모른다.

원자로형별 특성

1. 핵연료, 냉각재 및 감속재

핵분열성 물질로 경수로의 핵연료로 사용되는 것은 우라늄-235이다. 이 외 우라늄-238에 중성자의 충돌로 생성되는 홀수인 Pu-239와 Pu-241이 있다.

핵연료는 핵분열성 물질(fissile material)과 핵연료 원료성 물질(fertile material)이 동시에 섞여 있는데 이는 원자로 내의 핵연료 조사 기간을 늘려주는 효과가 있다.

즉 핵분열성 물질이 어느 정도 소진이 되면 원료성 물질이 중성자를 포획하여 핵분열성 물질인 Pu이 생겨 새로운 핵분열성 물질이 연쇄 반응을 돕게 된다.

냉각재의 선정은 다양하다. 중수, 경수, 헬륨, CO_2 및 액체 금속 등이다. 냉각재는 원자로 내부를 거쳐 터빈까지의 배관을 통해 열을 전달한다.

또 하나 중요한 것이 중성자의 보유 에너지와 속도인데 이를 조절해 주는 것이 감속재이다. 경수로의 경우 열중성자로라고 말한다. 고속중성자가 감속재의 핵과 충돌하면서 성공적으로 열중성자로 변한다. 감속된 열 중성자는 핵연료와 충돌할 확률이 높아지는데 경수를 감속재로 사용할 경우 천연 우라늄을 약간 농축하게 된다.

고속로는 중성자를 감속하지 않는다. 따라서 고속로는 중성자가 물질과 충돌할 확률이 적어지므로 고중성자속과 많은 핵분열성 물질을 필요로 하게 되는 것이다.

환언하면 중성자 에너지 영역에서는 핵분열 반응이 포획 반응과 비교해 보면 더 잘 일어난다는 것이다.

2. 운전중인 원자로형

가. 가스 원자로(Gas Reactor)

흑연 가스로는 천연 우라늄 사용이 가능하다. 이 원자로형은 영국, 프랑스, 일본, 스페인, 이태리 등 여러 국가에서 운전중이거나 폐로 또는 폐로 절차 절차를 밟고 있는데, 1950년대에 농축 우라늄을 독점하고 있던 미국이 농축 우라늄을 수출할 수 있다고 할 때까지 이 노형을 건설, 운영하였던 것이다. 이들 나라들은 모두 노형을 변경하여 지금은 경수로를 건설, 운전 중이다.

나. 경수로(Ordinary Water Reactor)

세계의 운전중인 원전의 86%와 건설중인 79%가 경수로이다. 구소련 형인 VVER 역시 일반적인 경수로이다.

이 원자로 형은 이용률, 연소도, 핵연료 교체 주기, 발전소 전력 수요에 따른 부하 조정 등 관점에서 건장하고 신뢰성이 높으며 좋은 운전 실적을 보여주고 있다.

BWR은 PWR에 비해 1/3 용량이고, 초기 단계의 결함으로 조금 뒤져 있지만 미국의 경우 가동률이 높아 PWR과 매우 경쟁적이다. 일본에서 가장 최근에

발주 건설되고 있는 원자로가 제3세대 BWR이다.

다. 흑연로(PBMK)

체르노빌 원전 사고를 일으킨 원자로형이다. 냉각재는 경수이며 핵연료는 저농축 우라늄을, 그리고 감속재는 흑연을 사용한다.

이 형은 어떤 운전b영역에서 불안하여 인간b오류를 일으킬 수 있는 가능성이 있다. 현재 서구 유럽의 강력한 요청에 의해 이 형의 원자로는 모두 폐쇄 조치될 것으로 알려졌다.

라. CANDU 중수로(Heavy Water Reactor)

이 원자로는 핵연료 압력관 내에 중수를 사용하여 냉각 역할을 하게 한다. 중수는 중성자 흡수율이 아주 적은 감속재이므로 천연 우라늄을 핵연료로 사용할 수 있다. 캐나다는 한국을 비롯, 인도, 파키스탄, 루마니아, 아르헨티나 및 중국에 공급하였다.

3. 미래의 원자로형

가. 고온로(HTR, High Temperature Reactor)

HTR은 열중성자로이며 감속재는 대용량의 흑연을 사용하고 헬륨에 의해 냉각시킨다. 핵연료는 당초 영국에서 설계한 'coated particle'이라는 연료를 사용한다. 탄소 세라믹으로 제작된 이 연료는 높은 효율의 열역학 사이클을 가능하도록 고온 운전이 되고, 고온 등 나쁜 환경의 노심 조건에 견딜 수 있게 하였다.

미국과 독일에서 개발된 이 원자로는 고온에 운전되므로 수소 생산로로서 적절하다는 평가를 받고 있다.

나. 고속중성자로(FR, Fast Neutron Reactor)

FR의 가장 큰 장점은 핵분열에 의한 연쇄 반응에서 사용한 핵분열성 물질보다 새롭게 핵분열성 물질이 더 만들어진다는 것이다. 따라서 증식로라고 부르기도 하는데 현재 운전중인 경수로보다 약 100배의 연료 효율을 높일 수 있다는 결론이다.

1GWe 규모의 PWR에 사용되는 핵연료(UOX) 양은 연간 약 110톤의 천연 우라늄이 필요하며, 발생하는 Pu는 0.25톤이다. 같은 용량에 대해 이는 고속로에서 Pu 15~20톤과 천연 우라늄 1~2톤에 불과하다.

미래의 원자력 시스템

1. 제4세대원자로 국제포럼(GIF)

위험을 줄이고 에너지 부족에 대비하여 미래의 원자력 시스템을 수립하고 핵심 기술을 달성한다는 활동은 매우 적극적인 국제 협력으로 평가된다. 특히 미국 정부를 주축으로 한 제4세대원자로(Gen IV) 국제포럼의 기조가 그러하다.

Gen VI의 미래 원자력 시스템에는 미국을 포함하여 유럽연합, 프랑스, 영국, 캐나다, 스위스, 일본, 한국, 남아연방, 아르헨티나 그리고 브라질 등 10개 국가가 공동 참여하고 있으며 주로 국제적 연구가 주축이다.

원자력 분야에서 두 가지 추진 사항을 소개하면 다음과 같다.

첫째는 미국의 단기 정책에 국한된 내용으로, '원자력 발전 2010 계획'에 의거, 2010년까지 새로운 원전의 건설을 평가하고 기술적인 면을 포함하여 모든 문제점을 제시하고, 짧은 기간에 설치되는 원전임을 감안해 제3세대 원전을 배치한다는 것이다.

둘째는 Gen IV 국제포럼에 대한 것으로, 조직의 목적에 동참하는 모든 회원국은 원자력의 장점을 함께 인식함은 물론 핵에너지를 통해 세계 에너지 수요를 해결하고 기후 변화의 위험을 막기 위해 지속 가능한 개발을 추진한다는 것이다.

이 내용은 포럼 헌장에 명시되어 있으며 이를 위해 관련 연구 개발 과제를 도출하고 이를 수행하여 2030년까지 차세대 원자로 기술로 제 4세대 원전을 배치한다는 계획이다.

포럼에서, 대상 원자로의 설계가 평가되었고(2002), 몇 개의 기술적 개념이 선택되었으며(2002), 국제 협력을 준비하기 위해 발간한 기술 개발 계획도

어렵게 완성되었다(2003).

Gen IV 계획과 절차에 대한 목적에 공감하면서 미래의 원자력 시스템을 특정화 하였다. 그 내용은 다음과 같다.

1) 천연 자원을 절약하고 환경을 존중하면서 지속 가능해야 한다.
2) 투자비, 연료비, 운전 유지비 등 경제성이 확보되어야 한다.
3) 안전성과 신뢰성이 확보되어야 한다.
4) 핵확산 위험에 대해 저항성을 가져야 한다.
5) 생산되는 폐기물은 독성이 적고 폐기물의 양도 대폭 줄일 수 있어야 한다.

2. 제4세대 원자로(Gen IV)의 대상

가. SFR(Sodium-cooled Fast Reactor)

이 소듐냉각고속로에서는 재활용-가능(즉, 모든 악티늄족 연료를 재활용) 핵연료 주기가 사용된다. 이는 Pu를 생산하므로 연속적으로 쉬지 않고 오랫동안 지속적으로 운전을 할 수 있는 원자로형이다.

금속 연료의 재처리 연료로 중간 규모인 150~500MWe 출력이 가능하다. 재처리에 의한 Pu와 혼합 연료인 MOX 연료 등을 사용하며 500~1,200MWe 출력이다.

프랑스의 Phenix, 일본의 Monju, 러시아의 BN 600 원자로가 이 노형에 속한다.

특히 프랑스가 이 원자로형 연구 개발에 많은 투자를 해왔다. 시험로인 563MWt Phenix와 3,000MWt 규모의 상용로 Superphenix를 건설하여 운전 경험을 쌓았다. 이에 앞서 40MWt의 Rapsodie 연구로를 운영한 바 있다.

이러한 산업적 노력은 우라늄 및 Pu 연료의 가공법과 사용후핵연료 재처리 기술 등을 완성으로 이끌어 낸 좋은 사례이다.

나. LFR(Lead-cooled Fast Reactor)

이 원자로는 액체 납을 냉각재로 사용하는 고속중성자 원자로이다. 우라늄 연료를 사용하는 노심에서 발생하는 악티늄족 원소를 재활용하면, 이론적으로는 정지 없이 10~30년까지 운전할 수 있다고 한다. 규모는 300~400MWe모듈형으로 설계에 따라 증가할 수 있어 1,200MWe 규모도 가능하다.

다. SCWR(Super-Critical Water Reactor)

이 초임계 경수 원자로는 두 가지 핵연료 주기를 사용하고 있는 노형으로서 열중성자를 이용하는 열중성자 원자로에서는 우라늄을 사용하고 교체하지만 고속중성자를 이용하는 고속로 주기의 경우는 악티늄족 핵연료를 재활용한다.

이러한 두 가지 선택 특성에 의해 원자로 내부의 물은 압력 25Mpa하에서 초임계수로 유지될 수 있어 열효율이 44%로 높아질 수 있다. 계산상으로는 규모 1,700MWe 출력을 얻을 수 있다.

라. VHTR (Very High Temperature Reactor)

이 초고온 원자로는 열중성자 원자로로 가스 냉각이며, 재활용 핵연료 주기가 아니다. 약 1,000°C 이상의 온도로 운전되므로 수소 생산이 가능하다. 원자로 시설 내에 전력 시설뿐 아니라 수소 생산 공장을 연결할 수 있다. 즉, 전력 생산과 수소 생산의 다목적 이용이 가능하다.

규모는 열출력으로 약 600MWt 정도이고, 냉각재로는 헬륨이 사용된다. 연구 내용은 내고온자재의 개발과 대용량의 수소 생산 관련 기술 개발에 관한 것이다.

미국 당국의 분석에 따르면, 수소 소비량은 연간 1,000만톤이 소요될 것으로 추정된다. 수소는 1차 에너지가 아니며, 천연 가스 등을 이용하여 생산되어야 한다. 이로 인해 다른 오염 물질이 만들어질 수 있으므로 VHTR을 이용한 수소 생산이 매우 매력적인 방식이 되고 있다.

VHTR의 기술적 문제에 관한 연구 개발이 필요하다. 독일의 AVR은 출력 온도가 950°C까지 쉽게 도달할 수 있으나 이론상 파단 사고가 일어날 가능성이 있다.

<표 4> 경수로와 VHTR 이용 열효율 비교

	구 분	열 이용 비율	온도 범위대
경수로	전력생산	35%	300~30℃
	폐열	65%	30℃이하
VHTR	수소 생산		950~600℃
	전력 생산		600~250℃
	공정열	70%	250~30℃
	폐열	30%	30℃이하

이에 대한 다양한 원자로 크기를 조정할 수 있는 계산 수단의 개발이 필요하며, 핵연료도 연구 내용이 된다. 현재 사용하고 있는 탄화 우라늄(UCO) 연료와 피복관 재료(ZrC)에서 미검증 문제점 해결이 연구 내용이다. 또 고중성자 플루언스와 고온에 견딜 수 있는 재질의 개발도 필요하다.

이외에 헬륨의 기술성 및 기기 부품의 개발도 이루어져야 한다.

마. GFR (Gas-cooled Fast Reactor)

이 가스냉각고속원자로는 핵연료 재활용 주기를 택하고 있는 고속원자로이다. 헬륨을 냉각재로 사용하며, 노심 핵연료 온도가 1,600°C로 유지될 수 있다. 천연우라늄을 사용하며 핵분열에 의해 생산되는 핵분열성 물질 악티늄족 연료를 재활용하게 되는데, 소모되는 핵분열성 물질보다 생성되는 핵분열성 물질이 더 많이 발생하는(즉, 증식이 되는) 이상적인 원자로 형이다. 열효율은 원자로형 중 가장 높은 48%이다. Gen IV국제포럼에서 이 원자로에 대해 깊은 관심이 있었다. 그 이유는 높은 온도를 유지할 수 있다는 것과 두 가지 핵연료 주기를 운용할 수 있다는 것은 핵확산 방지에도 도움이 될 것으로 보고 있기 때문이다. 연구 내용은 내고온재료 등을 포함한 원자로 재료 개발, 핵연료의 고밀도와 내화성에 관한 연구이다.

향후 Gen IV 원자로로서 채택될 GFR의 기술을 위해 여러 국가의 노력은 다음과 같다:

일본은 1998년부터 HTTR(30MWt)의 연구를 통해 고온 기술의 경험을 쌓고 있으며, 미국은 NGNP 600MWt을 통해 물의 열화학 및 전기화학적 분해에 대한 연구를 하고 있다. 2020년까지 중국, 한국도 이와 비슷한 프로젝트를 추진한다는 계획이다.

CEA는 Cadarache 연구소에서 고온과 수소 생산에 대한 연구를 수행 중에 있다. 즉 현재의 유럽 기술의 850~950°C에서 수소 생산의 고온 변환 기술에 대한 연구를 하고, 2단계 2020년 정도에는 GFR을 통해 특히 핵연료 관련 연구를 수행할 것이다.

관련 연구 개발 계획으로 제7차 유럽 연구 개발 체제에 대한 계획이 2007년에 발간된다.

바. MSR (Molton Salt Reactor)

이 용융염 원자로는 용융염에 의한 고온 열중성자 원자로로서 핵연료는 최적의 우라늄-토륨 주기를 이용한다. 기당 출력은 1,000MWe 규모이다. 감속재로는 흑연 반사체가 사용된다.

핵종 분리를 위한 재처리 시설(예: 고온 건식 핵종 분리/변환 시설)과 원자로를 한 부지에서 온라인으로 재활용한다. 따라서 온라인 재활용 기술을 확립하는 연구가 최우선 과제이다.

3. 미래 원자로 기술 연구 개발

미래 원자로 연구에서는 재질 개발이 기본이다. 또한 핵연료 개발은 특징적으로 까다로운 조건을 전제로 하고 있다.

어떤 원자로는 매우 높은 온도에서 고속 중성자의 높은 에너지에 의한 조사가 이루어지므로 이 분야의 연구도 추진되어야 한다. 또 이로 인한 부식에 대한 연구도 필요하다.

이러한 조건하의 조사에 의한 손상은 열중성자에 의한 조사와는 다르다. 내고온합금, 세라믹, 고화체 또는 복합 재료 등이 좋은 대상이다. 이 중 일부가 생산되어 산업체에 이용되고 있지만, 원자력에 사용하기 위한 요건을 만족하기 위한 연구가 필요하다.

Gen IV는 미래의 원자로일 뿐 아니라 미래의 핵연료 주기로의 역할을 담당해야 할 사명을 가지고 있다.

핵연료의 재처리를 통한 재활용 목표를 달성하기 위한 핵물질의 핵종 분리, 저장 그리고 변환과 관련된 부분이 연구 과제로 남아 있다.

Gen IV 원자로 기술의 실질적인 적용이 2050년에 적용된다면 우라늄 매장량은 절대적으로 부족해질 것이며, 2030년의 현실화가 이를 해결해 줄 수 있다는 것을 앞에서도 언급한 바 있다. 만일 2040년 도입을 가정한다면 관련 연구 개발도 이 일정에 따라 추진되어야 할 것이다.

현재 Pu은 MOX 연료로 사용되면서 일부 재활용되고 있다. 기술적인 효과를 가져올 수 있는 신기술 원자로인 제3세대 원자로(Gen III)는 2020년부터 건설이 시작되어야 한다. 열중성자로인 경수로 위주의 현재 역할은 2020년부터 점점 폐쇄되어야 한다.

토륨 주기, 복합 시스템 및 핵융합

1. 토륨 주기

토륨(Th)은 미래의 풍부한 핵연료 원료 중 하나이다. Th-232는 중성자를 흡수하게 되면 핵분열성 Pu-233이 되었다가 곧 U-233으로 된다.

그래서 1950년대 토륨-우라늄 주기가 실제로 미국 Shippingport 실험로에서 시험되었다. 이 과정에서 밝혀진 바에 의하면 토륨-우라늄 주기에서 발생하는 높은 방사선 에너지의 방출은 방사선 방호에 문제점을 주게 되어 현재의 우라늄-Pu 주기로 발전하게 된 것이라고 한다.

그러나 최근에 이에 대한 연구 결과가 나오면서 원격 조정에 의한 관리가 개발되는 단계로 진입하고 있어 다시 토륨 주기에 대한 관심이 고조되고 있다.

이론적으로 토륨 주기를 사용하는 원자로형인 용융염 열중성자로는 핵분열성 물질 재고량을 줄인다. 고속로에서 Th-Pu 주기는 U-Pu 주기보다 2배의 Pu을 소모하여 핵분열성 물질인 U-233을 더 많이 생성한다. 이는 한 번 운전되면 외부의 연료 공급 없이 자생적으로 운전될 수 있다.

또한 농축도 20% 이상은 핵비확산과 관련되어 고농축 U-233의 가능성에 대한 검토가 필요하다.

토륨 주기에 의해 1,000년이 넘는 방사성 독성에 대한 것과 부수되는 핵종인 Pa 231, U 232, U234, Np237 등에 대한 처리도 걸림돌 중 하나이다. 즉, 원격 로봇 기술 등의 개발이 관건이라고 할 수 있다.

2. 핵변환용 가속기

원자력 발전은 Pu와 같은 초우라늄 원소의 생성에 의해 이루어진다고 할 수 있다. 초우라늄 원소로 분류되는 몇 개의 악티늄족 원소(Np, Am 및 Cm)들도 장수명 핵종으로 고준위 폐기물이지만 고속로에서는 변화시킬 수 있다.

임계원자로의 핵연료에 포함된 악티늄족은 핵변환을 시키기에 매우 어려우나 미임계 모드 가속기에 의한 원자로에서는 핵변환이 가능하다. 즉, 가속기와 미임계 원자로를 연결한 시스템을 활용하는 ADS(Accelator Driven System)는 핵변환 효율을 높일 수 있다.

이 시스템을 혼합원자로(Hybrid Reactor)라고도 한다. 이 원리는 가속기의 가속된 양성자를 대상 노심에 충돌시킬 때 미임계 노심의 중성자 밸런스를 보완하기 위한 중성자를 생성하게 하는 원리이다.

양성자가 노심에 충돌하면 핵이 3개 이상으로 쪼개지면서 중성자가 발생하는데 이 원리를 파쇄(破碎) 공정이라 한다. 악티늄족 원소의 핵연료를 이 원리를 통해 핵종 변환시킬 수 있다.

상용화를 고려해 보면 ~1GWth 원자로에 몇 십 MW 출력에 이르는 양성자 가속기를 구성하는 것이다. 그러나 원리는 간단하지만 실제로는 복잡할 뿐 아니라 안전성에 대한 연구도 중요하다.

핵변환 목적으로 건설된 대규모 시설은 없지만 다른 목적으로 양성자가속기와 파쇄 중성자 생산 시설은 Los Alamos에 설치된 바 있다.

ADS 타당성 연구는 시작되었으며 CEA는 유럽 차원의 연구를 추진 중이다. 미국, 영국, 그리고 일본도

추진중이다.

3. 핵융합

핵융합은 가장 관심 있는 1차 에너지원으로서 무궁한 자원으로 특별히 저장할 필요가 없고, 방사성폐기물도 생성되지 않으며, 온실 가스를 배출하지 않고, 안전성이 높다는 특성이 있다.

그럼에도 불구하고 핵융합은 기술적으로 아직도 개발되어야 할 분야가 많아 상용과는 거리가 있다.

중수(D, Deuterium)와 삼중수소(T, Tritium)가 결합(융합)하게 되면 헬륨(He, Helium)이 생성되면서 반응과 함께 막대한 에너지가 동시에 발생하는데 바로 이 에너지를 이용하는 것이 목적이다.

$$D + T \Rightarrow {}^{4}He\ (\alpha: 3MeV) + n(14.1MeV)$$

위 반응은 D와 T 동위원소가 완전히 이온화될 때 생성될 수 있는 반응식이다. D, T의 운동 에너지가 몇십keV에서 이온화되면 반응이 이루어진다.

자기장을 이용한 플라스마 밀폐 장치를 고려한 방식이 자장 밀폐 방식이다.

플라스마로 채워진 원통관 둘레에 도선을 감아서 전류를 흐르게 하면 자장이 생긴다. 모든 플라스마 입자들이 정규 운동을 한다면 강한 자기장에 의하여 벽에 충돌하지 않게 되고, 따라서 에너지 손실은 없을 것이다. 그러나 원통관의 축 방향으로는 자유롭게 움직이므로 열린 원통관의 끝으로 플라스마 입자들이 빠져나가게 된다.

이 손실을 막는 방법으로 두 가지를 생각할 수 있는데 하나는 원통관을 구부려 양 끝을 맞대 마치 도넛 모양의 형태를 갖게 하는 것이고, 다른 하나의 방법은 원통관의 양 끝에 보다 강한 자장을 만들어주는 것이다. 이렇게 함으로써 플라스마 입자가 보다 강해진 자장 영역으로 들어오면 원통관 내로 되돌려 보내지게 된다.

전자와 같은 폐쇄형 구조를 토로이달 자장 용기(Toroidal Magnetic Trap)라고 부르는데, 이는 고온 플라스마 밀폐의 기본이 되는 구조이다. 이러한 자기장 밀폐 방식의 형태로 전 세계적으로 개발되고 있는 시스템이 Tokamak형이다.

하지만 대용량의 환경을 구성하는 데 아직 연구할 분야가 많다. 또 약 1억 도의 고온 플라스마 온도에서의 내성 재질의 개발과 밀폐 반응 시간의 지속성 등의 연구도 필요하다.

Tokamak 형태의 핵융합로의 국제 공동 연구가 세계 6개국의 합의로 연구 과제가 추진되고 있는데 이 프로젝트를 ITER라고 한다. 그 동안 이 시설을 어디에 설치할 것인지를 정하기 위해 유치 경쟁이 치열하였지만 결국 프랑스 Cadarache 부지로 정해졌다.

향후 12년간 건설 계획을 가지고 있으며, 45억 유로를 투자할 계획이다. 이 프로젝트 국제 공동 참가국은 유럽연합, 미국, 일본, 러시아, 중국 및 한국이다.

요약 및 결론

원자력 발전은 급격히 증가하고 있고 향후 증가 예측도 그러하다. 핵에너지는 향후 에너지 전개에 중요한 역할을 하게 될 것임을 국제에너지청(IEA)에서 확인하였다.

이는 가장 안정적인 공급원이며 또한 친환경 에너지로서 온실 가스 배출 억제에 기여할 것이라는 인식의 결과이다.

세계에서 가장 야심 찬 원전 개발 계획을 가지고 있는 프랑스는 원자력의 장점을 살려 외부에 에너지 정책을 선택할 수 있도록 할 수 있다.

그러나 지구 온난화 관련 교토협약에서 원자력 발전은 지구 온난화에 크게 기여함에도 불구하고 재정적 지원을 받지 못하는 것으로 되어 있다.

이러한 것을 바로 잡기 위해서는 산업체와 과학자들이 신뢰를 쌓고 대중과 환경 단체의 이해를 증진시키는 것이 중요하다.

원자력은 나이로 치면 50세에 불과한 매우 젊은 에너지원이다. 따라서, 이제 막 시작에 불과하며 긴 미래를 달려가야 한다.

하지만 전망이 마냥 밝지만은 않다. 단기적으로는

계속 개발 과정이 예측되고 현재 운전중인 시스템이 도움을 주게 될 것이다. 이것이 바로 연구의 목적이다.

즉 원자력의 안전에 대한 신뢰성을 제고하고 경제성을 향상시키는 데 초점이 맞춰져야 한다. 그러기 위해서는 안전성의 확보하에 발전소의 수명 기간을 늘리고 핵연료 연소도를 제고시켜야 한다.

장기적으로는 원자로의 개발과 진행이 급진적으로 바뀔 것으로 추정된다. 따라서 혁신적인 원자로 기술에 대한 연구의 중요성이 대두될 것이다.

연구는 독단적인 연구가 아니라 공동 연구가 될 것이며 핵연료 주기의 연구와 주기의 재활용으로 원자로는 지속 가능한 원자로가 될 것이다.

또한 전력의 생산뿐만 아니라 다목적의 원자로로서 열효율을 최대한 활용하게 될 것이다.

CEA는 관련 연구 개발의 국제 협력하에 선두 주자적 역할을 수행할 것이며, 무엇보다 Gen IV 국제포럼에서 중대한 역할을 하게 될 것이다.

이와 병행하여 유럽 프로그램 및 미국, 일본, 러시아, 중국과의 양자 간 협력 관계의 연구 과제도 수행하게 될 것이다.

방사성폐기물 이슈에 대한 것은 대중의 관점과 정치적 관점에서 매우 민감한 부분이다. 관련 연구에서 핵종 분리, 저장에 관한 기술적 측면은 해결책이 이미 준비되어 있다. 프랑스 법규가 폐기물 관리 방안에 대한 연구를 수행하도록 뒷받침하고 있다.

관련 연구를 위해서는 시점과 방법이 중요하다. CEA는 원자력산업이 판매되면서 지원을 받게 된다. 특히 거대한 세계적 사업체인 Avera 및 EDF의 도움을 받고 있다.

19세기 말~20세기 초에는 연구실 단위의 연구를 수행하였으나 지금은 국제적 협력에 의해 대단위 연구가 추진되는 변화를 가져왔다.

따라서 CEA는 국제 협력을 통해, 예를 들면 Gen IV 계획에 참여하여 종합적인 연구 개발 노력에 전력할 것이다.

발전소의 수명 기간을 늘리고 핵연료 연소도를 제고시켜야 한다. 현재의 경수로 기술에 의해 핵에너지를 활용할 경우, 2060년이 넘으면 핵연료 자원의 고갈을 맞게 된다.

전 세계가 공통적으로 이같은 사항을 예측하고 제4세대원자로 Gen IV 원자로(고속 소각로, Fast Burner Reactor)의 기술을 2040년경까지 개발해야 하는 당위성에 직면하게 되었다.

이 원자로를 이용하면 핵연료의 효율을 최대한 높여 지속 가능한 발전을 할 수 있으며, 원자력은 타에너지에 비해 막대한 경쟁력을 가지게 된다.

또한 폐기물 관점에서도 독성을 줄일 수 있으며 최종 처분할 폐기물의 양도 이론적으로 최대 100배까지 줄일 수 있다. 뿐만 아니라 핵 확산 방지를 용이하게 할 수도 있다.

이같은 목표를 달성하기 위해 여러 나라를 중심으로 국제 협력이 이루어지고 있으며, 우선 순위에 따라 관련 연구가 추진될 예정이다. 우리나라는 Gen IV 프로젝트에 회원국으로 참여하고 있으며 핵융합 ITER 국제 과제에도 회원으로 참여하고 있다.

핵연료 주기의 유연성과 관련하여, 참여의 폭이 매우 좁을 것으로 보여 안타까울 따름이다. 원자력 발전 기술은 Gen IV 참여로 국제 협력에 의한 기득권을 가질 수 있을 것이다.

하지만 핵연료 기술에서 우리나라는 현재 재처리를 하지 않는 국가로 분류되고 있다. 현재를 기준으로 재처리 시설이 있는 국가와 없는 국가로 구분하여 각각 공급국과 도입국으로 분류하려는 국제적 움직임에 따르면, 자칫 우리나라는 핵연료를 해외에 의존하게 되는 문제가 발생할지도 모른다. 이에 대한 국가 정책이 조속히 수립되어야 할 것으로 본다.

〈References〉

1. CEA, Nuclear energy of the future: what research for which objectives?, DEN monographs, 2006.
2. IAEA, Nuclear Technology Review 2006, GC(50)/INF/3, July 3 2006.