

KAERI/TR-3073/2005

**미국의 개량형 핵연료주기 방안
2005년도 비교보고서**

Advanced Fuel Cycle Initiative Comparison Report, FY 2005

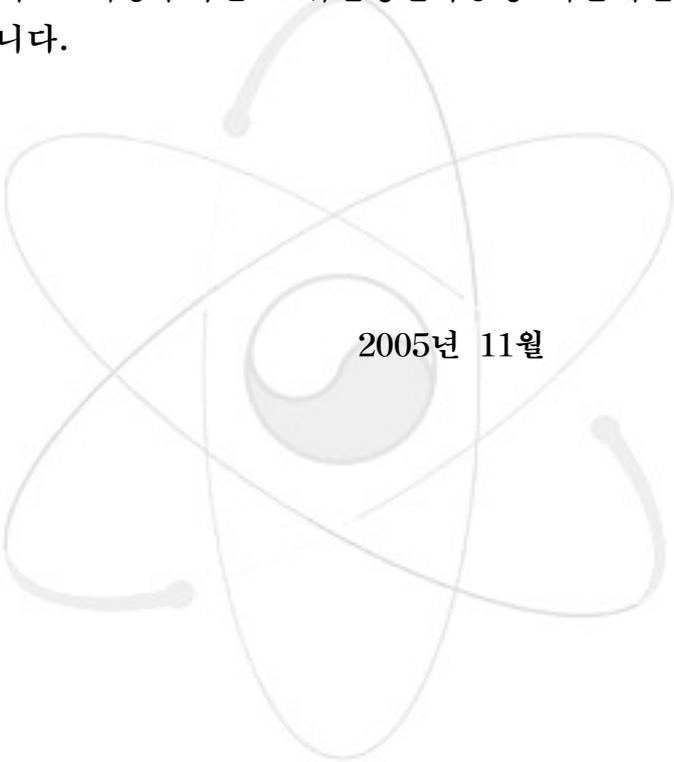
KAERI

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “경수로 사용후핵연료 휘발성산화공정 기술개발” 과제의 기술
보고서로 제출합니다.



2005년 11월

주저자 : 이호희

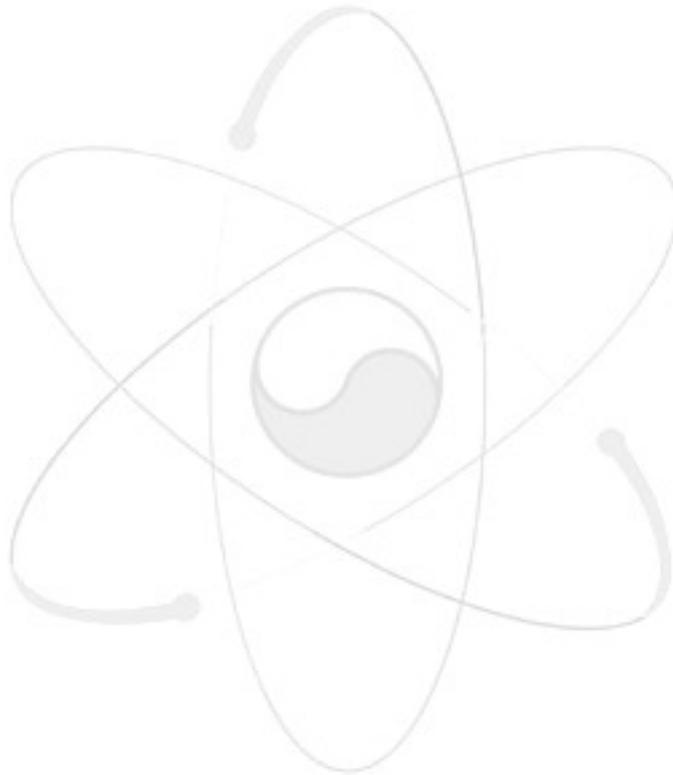
공저자 : 박장진, 신진명, 양명승
서중석

목 차

제 1 장 서 론	5
제 2 장 개량형 핵연료주기 전략의 비교	14
제 3 장 개량형 핵연료주기 기술의 비교	32
1. 분리 기술의 비교	32
2. 원자로 기술의 비교	38
3. 소멸처리 핵연료 기술의 비교	47
제 4 장 핵연료주기 방안의 연구현황	54
1. 시스템분석	54
2. 분리	55
3. 소멸처리	57
4. 핵연료	57
5. 대학공동연구	58
5. 향후 목표	58
제 5 장 요약	60

표 목차

Table 1. Comparison of Advanced Fuel Cycle Strategies	17
Table 2. Comparison of Separation Technologies	33
Table 3. Comparison of Reactor Technologies	39
Table 4. Comparison of Transmutation Fuel Technologies	48



제 1 장 서 론

2003 회계연도에 작성된 에너지 및 수자원 개발 충당금 법에 첨부된 협의회 보고서(의회보고서 108-8)의 조문에는 의회가 상용 사용후핵연료를 관리하는 다양한 전략과 기술방안을 비교할 수 있도록 정성적이고 정량적인 정보를 제공하는 AFCI 보고서를 미국 에너지부가 의회에 매년 제출하도록 명문화되어있다. 본 보고서는 2004 회계연도 보고서와 동일한 형식으로 작성된 2005 회계연도 에너지부의 보고서이다.

AFCI 프로그램은 원자력에너지의 지속가능성을 증가시키기 위해 과거, 현재 및 미래의 원자력에너지 이용과 관련된 국가의 중요한 요구에 역점을 두어 다룬다. 첫째, AFCI 프로그램은 상용 사용후핵연료와 고준위폐기물의 보다 효율적인 처분을 가능하게 하는 기술을 개발하여 추가 처분장의 수요를 다음 세기로 연기시킨다. 둘째, 모든 AFCI 핵연료주기는 현재 국제적으로 실용화된 것보다 더 우수한 핵확산 저항성 기술과 설계를 구체화하고, 핵무기 가용물질의 재고량을 줄이며, 궁극적으로 우라늄 농축의 수요를 감소시킨다. 셋째, AFCI 프로그램은 GEN IV 원자력에너지 시스템 방안과 협력하여 우라늄광 자원이 원자력에너지를 구축하지 않도록 보장하기 위해 폐기물 부담으로부터 에너지자원 자산으로 전환하는 핵연료주기를 연구한다. 이러한 목표의 달성과 더불어, AFCI 프로그램은 전체 핵연료주기에 대하여 경쟁력있는 경제성 및 우수한 안전성을 추구한다.

본 보고서의 제 1장에는 프로그램의 배경, AFCI 프로그램의 주요 목표 및 2004 회계연도 보고서와의 개략적인 변동사항을 기술한다. 의회에서 요구한 바에 따라 제 2장에서는 핵연료 전략을 비교하고, 제 3장에서는 기술을 비교한다. 비교는 목표 및 방안 전반에 걸쳐 실질적인 정보와 고려사항을 포함한다. 제 4장에는 기술현황 및 성과를 기술하고, 제 5장에는 요약을 기술한다.

AFCI 프로그램의 배경

AFCI 프로그램은 1999년에 제안된 원자력에너지과학기술국의 ATW(Accelerator Transmutation of Waste) 프로그램으로부터 발전되었다. ATW 프로그램과 이 프

로그래의 후속인 AAA(Advanced Accelerator Applications) 프로그램에 의해 생산된 연구 성과의 결과로서 AFCI 프로그램은 현재의 직접처분 핵연료주기를 증가하는 환경적, 핵비확산성, 지속가능성, 경제성 및 안전성의 이점을 제공하는 개량형 장기 핵연료주기를 미국과 다른 선진국이 실행할 수 있는 기술을 개발하고 실증하는데 초점을 맞추고 있다. 본 보고서는 직접처분과 대비하여 이점을 제공하는 다양한 방안을 다룬다. 이러한 새로운 기술은 기존 원전(GEN II) 및 GEN III 경수로와 GEN IV 원자로를 지원한다.

AFCI 프로그램은 에너지 생산에 있어서 원자력이 지속적인 역할을 할 수 있도록 원자력 에너지 기술과 시스템을 개발하는 DOE에서 수행하는 일련의 연구 활동 중의 일부이다. 원자력에너지과학기술국(DOE-NE)의 AFCI 프로그램은 DOE-EE (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy)와 협력하며 2010년대에 새로운 원자로를 배치하기 위한 원자력 2010 방안, 개량형 원자로 시스템을 개발하는 GEN IV 프로그램, 원자력 수소방안을 보완한다. 또한, AFCI 연구는 DOE-OCRWM(Office of Civilian Radioactive Waste Management)에서 수행 중인 심지층 처분장 개발 및 DOE-NNSA(National Nuclear Security Administration)에서 수행하는 국제 핵비확산 및 안전조치와 밀접한 관계가 있다.

AFCI의 목적

AFCI의 기본적인 목적은 환경적인 지속가능성과 에너지 안보를 향상시키며 원자력이 장기적으로 성장을 할 수 있는 기술 방안을 제공하는데 있다.

원자력 에너지의 성장 및 지속가능성과 에너지 안보의 향상은 폐기물관리, 핵확산저항성, 핵연료 이용, 경제성 및 안전성의 핵심 분야를 겨냥한 기술개발에 의해 증진된다. 따라서, AFCI 기술개발은 원자력폐기물의 장기적인 환경 부담을 감소시키고, 핵확산저항성을 증가시키며, 핵연료자원의 이용을 향상시키는데 초점을 맞춘다. AFCI 프로그램은 아래에 기술하는 바와 같이 이러한 3개의 고려사항 각각과 관련된 하나의 주요 목적을 갖고 있다. 또한, AFCI 프로그램은 안전하고 경제적인 원자력물질의 관리를 강조하는 네 번째의 시스템 관리 목적도 갖고 있다.

AFCI 프로그램은 원자력 에너지의 증대를 지원하면서 다단계 심지층 처분장의 건설 대안을 제공한다. 간단히 말하면, 이 대안은 감소시키고, 재사용하며, 재순환하

는 것이다.

AFCI의 단기 목표는 추가 심지층 처분장의 잠재적 수요에 관해 에너지부 장관에게 정보를 주기위해 관련 기술정보를 제공하는데 있다. 현행 법령에 의하면 에너지부 장관은 추가 처분장의 수요에 관해 빠르면 2007년 1월까지 늦어도 2010년 1월까지 의회에 보고해야 한다. DOE-OCRWM는 보고서의 입안책임이 있어 AFCI 프로그램과 밀접하게 연구를 수행하고 있다.

목적 1. 폐기물의 보다 효율적인 처분을 통해 원자력 에너지의 장기적 환경 부담을 줄인다.

원자력의 미래에 관한 모든 전략과 시나리오 하에서, 미국은 원자력발전소의 운영으로부터 발생하는 방사성폐기물을 취급하는 영구 심지층 처분장의 건설이 필요하다.

네바다주 유카산의 심지층 처분장 부지는 미국의 원전에서 발생했거나 발생할 모든 상용 사용후핵연료를 수용할 수 있는 기술적 능력을 갖고 있다. 만약 모든 발전소의 수명기간을 20년 더 연장허가를 받아 원전의 수명기간이 40년에서 60년으로 변경시킨다면 사용후핵연료의 예측 누적량은 약 120,000 MTU가 된다. 유카산 처분장의 법정 제한용량은 70,000 MTU이지만, 한정된 부지조사에 의하면 적어도 120,000 MTU까지 수용할 능력이 있는 것으로 조사되었다.

향후 새로운 원전이 많이 건설된다면 미국은 새로운 원전으로부터 발생하는 사용후핵연료를 다루기 위해 적어도 1개의 추가 처분장을 건설하거나 원자력 폐기물의 양과 수명을 감소시키기 위해 재순환을 시작하여야 한다. 새로운 원전에 의해 기존의 원전이 거의 대체되지 않는다고 가정한 보수적인 시나리오 하에서도 2100년까지 적어도 1개 많으면 3개의 추가 처분장이 필요하다. 원자력의 시장 점유율이 증가한다고 가정한 시나리오 하에서는 2100년까지 각각의 처분장 용량을 70,000 MTU라고 가정할 때 20개까지의 처분장이 필요하다.

그들의 기술적, 경제적 및 정치적 난제 때문에 심지층 처분장은 원자력 에너지의 이용에 영향을 미치는 중요한 고려사항이다. 사용후핵연료 내에 존재하는 우라늄은

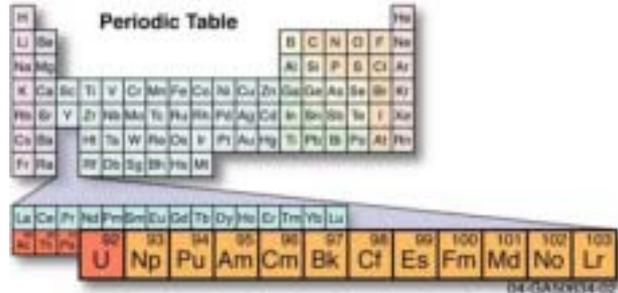
포장 폐기물의 중량과 부피에 가장 큰 영향을 미친다. 심지층 처분장 용량은 폐기물로부터 방사능의 가상 누출에 의한 장기 열부하와 장기 최대 선량에 의해 기술적으로 제한을 받는다. 이러한 특성은 Np, Pu, Am 및 Cm과 같은 TRU 원소에 의해 주로 영향을 받는다. AFCI 방안은 사용후핵연료로부터 우라늄과 TRU 원소를 분리한다. 우라늄은 새로운 핵연료에 재사용하거나 오늘날 처분하고 있는 감손우라늄처럼 저준위폐기물로서 천층처분할 수 있다. TRU 원소는 원자로에서 소멸처리를 위해 재순환시킬 수 있다.

Cs과 Sr은 사용후핵연료가 원자로에서 배출된 후 초기 수십년 동안 주요 열 발생원인 핵심 단수명 핵분열생성물이다. Cs과 Sr은 300년 저장한 후 오늘날 단수명 폐기물을 처분하는 것과 같은 방법으로 천층처분할 수 있다. Tc과 I은 핵심 장수명 핵분열생성물이므로 내구성있는 폐기물형태로 전환하여 심지층 처분장에 처분하거나 소멸처리한다. AFCI의 목적은 사용후핵연료 내에 존재하는 핵종을 분리하거나 재순환할 수 있는 핵종을 재순환시킴으로 제 2처분장의 수요를 적어도 다음 세기까지 늦추거나 잔류 폐기물 위해를 감소시키는데 있다.

목적 2. 사용후핵연료 관리 기술의 개선을 통해 전체 핵연료주기의 핵확산저항성을 향상시킨다.

AFCI 프로그램의 두 번째 목적은 사용후핵연료 내에 본질적으로 존재하는 핵무기 가용물질과 관련된 핵확산 잠재력을 감소시키는데 있다. 이것에는 사용후핵연료

TRU(Transuranics)는 무엇인가?



TRU는 주기율표에서 원자번호가 우라늄(원자번호 92) 보다 높은 원소를 의미한다.

왜 중요한가?

- TRU는 장기 열부하와 장기 방사성독성을 주로 발생시키기 때문에 처분장성능에 영향을 미친다.
- TRU와 농축우라늄은 핵확산과 관련된 물질이다.
- 원자로에 재순환시키면 TRU는 추가 에너지를 발생하면서 소멸된다.
- AFCI 프로그램에서 관심있는 주요 TRU는 Np, Pu, Am 및 Cm이다.

처리 및 재순환 핵연료의 제조 과정 중에 감시 및 계량장치의 개선뿐 아니라 저장 및 폐기물 흐름 중에 있는 이러한 물질의 감소 모두를 포함한다. 이 목적의 중요한 부분은 세계적으로 적용할 수 있는 보다 핵확산저항성이 우수한 재순환 기술을 개발하는데 있다.

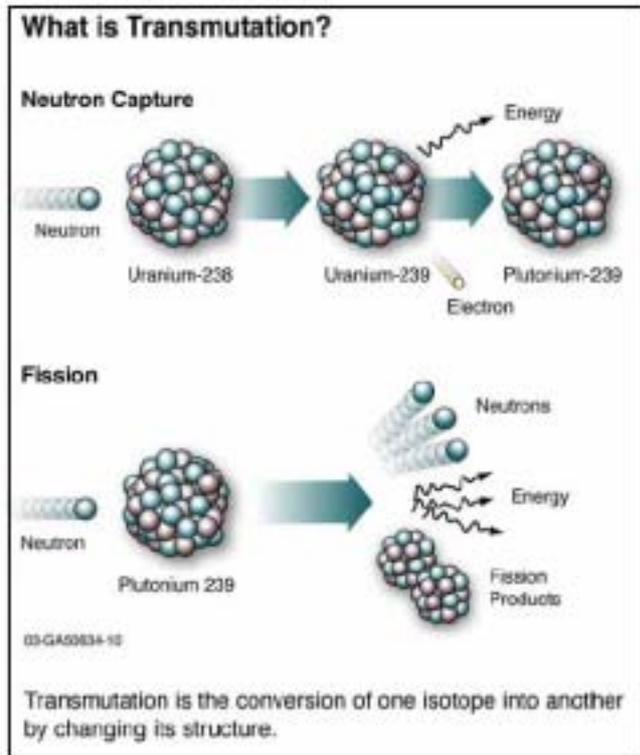
이러한 목적을 지원하는 정량적인 핵확산저항성의 목표는 다음과 같다.

- 단기적으로 고유 핵확산 방벽의 적용을 강화한 핵연료주기 기술을 개발한다.
- 단기적으로 재순환을 통해 이러한 물질을 소멸시킴으로 직접 처분하는 폐기물 흐름으로부터 핵무기 가용 TRU 물질의 99.5% 이상을 제거할 수 있는 능력을 실증한다.
- 장기적으로 지속적 에너지생산을 위해 TRU를 소비함으로써 저장중인 핵무기 가용물질의 재고량을 안정화시킨다.

목적 3. 사용후핵연료 및 감손우라늄에서 회수 가능한 에너지를 추출하여 에너지 안보를 강화함으로써 원자력발전용 우라늄 자원의 부족이 발생하지 않도록 보장한다.

우라늄 자원은 현재 풍부하고, 우라늄의 구매가격은 원자력 발전비용의 불과 수%만을 차지한다. 그러나 최근 수십년 동안 우라늄광 개발에 대한 인센티브가 거의 없었기 때문에 우라늄광 자원의 규모가 불확실하다. 원자력 에너지가 전 세계적으로 확대되고 최근의 재고량이 사용되고 나면 자원 고갈에 대비한 자국의 에너지 안보를 보장하기 위한 기술방안이 필요하다.

오늘날의 핵연료주기는 우라늄광에 존재하는 이론적인 에너지 함유량의 약 1%



만을 사용하고 있다. 사용후핵연료의 직접처분은 이러한 핵연료에 남아있는 에너지 함유량(Pu, U 등)을 버린다. 더욱이 현재의 원자력발전소는 감손 우라늄과 현행 핵연료를 제조하기 위해 천연우라늄을 농축하고 버려지는 우라늄을 사용할 수 없다. 원자력발전소는 2가지의 기준 노형이 있다. 현재 널리 사용하는 열중성자로는 핵분열성 핵종이라 불리는 농축우라늄과 TRU 원소의 일부핵종을 사용한다. 고속로는 감손우라늄을 포함한 모든 우라늄과 TRU 원소의 모든 핵종으로부터 에너지를 추출한다. 열중성자로는 고속로에 관해서는 제 3장에 좀더 자세히 기술한다.

기존 원자력 폐기물의 이론적 에너지 함유량을 평가하기 위해서 미국은 현재 모든 자원으로부터 매년 약 450 GWy의 전기를 생산하고 있음을 고려해야한다. 현재 중간저장 중인 상용 사용후핵연료는 50,000 MTU의 우라늄을 포함하고 있다. 1 MTU의 우라늄이(우라늄이 모두 소모된다면) 연간 약 1 GWe의 전기를 생산한다고 가정할 때 50,000 MTU의 우라늄은 100년 이상의 미국 전체 전기발생량과 동등하다. 미국은 현재 추가적으로 470,000 MT의 감손우라늄을 저장하고 있어서 현재 기준으로 1,000년간의 전기 생산을 위한 충분한 우라늄을 확보하고 있다. AFCI 기술과 GEN IV 고속로는 원자력 에너지를 지속시키면서 타 에너지 자원의 의존도를 감소시키기 위해 금세기 이후에도 미국의 우라늄자원이 충분하다는 것을 보장하기 위해 배치한다.

목적 4. 핵연료주기 관리를 개선하여 전체 핵연료주기 시스템이 경쟁력있는 핵연료주기 경제성과 우수한 안전성을 지속적으로 확보하도록 한다.

이 목적은 경쟁력있는 경제성, 우수한 안전성 및 전체 시스템관리의 세 가지 목표를 갖고 있다.

경쟁력있는 경제성

핵연료주기 경제성은 미래 원자력에너지에서 고려해야하는 필수적인 요소이다.

대부분의 기존 원자력발전소는 그들의 자본투자비를 거의 하락시킴에 따라 미국의 기존 원자력발전소의 평균 운영 및 유지비는 0.018 \$/kWhr 또는 18 mills/kWhr 보다 적다. 2010년대에 건설될 새로운 발전소의 추정비용은 47~71 mills/kWhr이고, 핵연료주기비는 약 6 mills/kWhr이다. 이중에서 1 mill/kWhr는

발전사업자가 예상 처분비용을 포함해 향후 심지층 처분을 위해 연방정부에 납부하는 비용이다. 유카산 프로젝트의 경험을 통해 심지층 처분의 실제비용은 좀더 확실해질 것으로 예상된다.

우수하고 안전한 성능의 지속

안전성과 신뢰성은 모든 원자력시설에 매우 중요하다. 미국에 설치되는 모든 상업용 원자력시설은 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)의 인허가를 받아야 하고 엄격한 안전요건을 만족시켜야 한다. 과거의 경험으로부터 습득한 지식과 기술향상에 의해 AFCI 연구로부터 파생하는 미래의 핵연료주기 시설은 적어도 현재 기술만큼은 안전할 것이다.

잘 설계된 원자로는 뛰어난 정도의 안전성을 갖고 있다. 진화에 의한 개선이든 아니든 원자로의 개선(개량형 경수로: ALW Reactors) 또는 GEN IV 방안에서 개발되는 시스템은 안전성에서 일관성있는 향상을 지향한다. 또한 개량형 핵연료주기 기술과 시스템도 최고의 안전성을 달성하고 작업자와 일반대중의 피폭을 최소화하도록 개발되고 있다.

원전 부지 내 저장을 감소시키도록 핵연료관리의 개선

현재 경수로에서 배출된 후 사용후핵연료는 단수명 핵분열생성물을 붕괴시키면서 수년동안 냉각수조에 저장해야 한다. 이러한 냉각기간은 처분을 위해 심지층 처분장으로 사용후핵연료의 수송 중 열 부하를 감소시키기 위해 반드시 필요하다.

심지층 처분장이 인허가를 받는 동안 일부 사용후핵연료는 냉각에 필요한 시간을 초과해서 현재 잘 저장되고 있다. 처분장이 운영을 시작할 때 장기 저장은 종료된다. 그러나 인허가 연장으로 인해 현재의 원자로는 제 1처분장의 법정용량보다 많은 사용후핵연료를 발생시킬 것으로 예상된다. 따라서 기존 및 미래의 원자로로부터 발생하는 사용후핵연료의 적기 처분은 추가 처분장의 부지확보 및 인허가 동안 또 다시 연기될 것으로 예상된다.

AFCI의 장기목표는 원자력발전소로부터 사용후핵연료의 적기 수송을 허용토록 개선된 핵연료주기 관리시스템을 가능하게 하는데 있다. 직접처분 대신에 사용후핵연료는 재순환을 위해 재처리시설로 수송된다. 개량형 핵연료주기 재순환은 추가 처분장의 부지확보와 인허가를 적어도 100년 동안은 하지 않아도 되도록 고준위폐

기물로서 처분되는 물질의 양을 현저하게 감소시킨다. 일단 제자리를 잡는다면, 하나의 심지층 처분장과 AFCI 기술의 조합은 냉각이 완료된 사용후핵연료의 일상적인 수송을 가능하게 한다.

2004 회계연도 비교보고서와의 변경내용

현 보고서는 두 가지가 보장된 상태에서 2004 회계연도 비교보고서와 동일한 구조, 형식 및 접근방법을 유지하고 있다. 첫째, 프로그램의 목적이 보다 명확해지고 정량화되어 전략과 기술방안의 비교 기준이 향상되었다. 둘째, 지난해 심층평가를 통해 가능성있는 미래의 많은 시나리오 중 하나의 현상으로부터 발전한 핵연료주기의 동적특성을 획득했다. 결과적으로 어떻게 핵연료주기가 발전할 수 있나를 더 잘 설명할 수 있도록 우선 직접처분, 제한 재순환 시작, 전환기 재순환으로 이동, 궁극적으로 지속 재순환의 프로그램의 네 가지 핵연료주기전략을 조정했다. 이러한 전략에 대해서는 제 2장에 기술한다.

지난해 수행된 연구개발은 AFCI 목적과 대비하여 방안의 비교를 향상시켰다. 이것은 향후 방안의 범위를 좁혀가기 전에 필요한 단계이다. AFCI 주요 목적을 달성하는 실질적인 방법이 있다는 확신이 증가되고 있다. 향후 연구는 잠재적 해결방안에 대한 확신을 증가시키고, 목적을 위한 해결방안을 최적화하며, 선정된 방안을 위한 매력적인 개발과 전개 경로를 개발한다. 이것은 미국이 원자력에너지를 보다 지속가능한 에너지방안으로 구축하면서 추가 심지층 처분장의 수요를 배제하는 것과 같은 단기적인 난제에 역점을 두어 수행한다.

현재의 비교

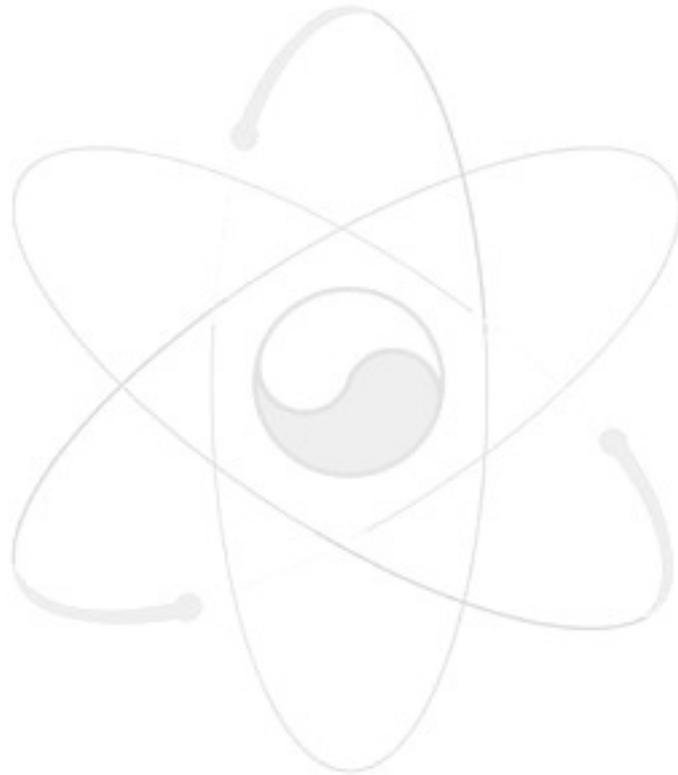
2004 회계연도처럼 본 보고서의 비교도 4개의 표로 구성된다.

- 표 1. 개량형 핵연료주기의 비교 (17쪽)
- 표 2. 분리기술의 비교 (33쪽)
- 표 3. 원자로 기술의 비교 (39쪽)
- 표 4. 소멸처리 핵연료 기술의 비교 (48쪽)

표 1은 AFCI 목적을 다루는 전략과 방안을 개발하기 위해 어떻게 분리, 원자로 및 핵연료기술을 조합할 것인가를 설명한다. 표 2~4는 분리, 원자로 및 소멸처리

핵연료 방안 각각에 대해 더 많은 정보를 제공한다.

표에는 많은 방안을 나타내었지만 현재의 AFCI 연구는 가장 유력한 방안에만 초점을 맞추고 있다. 추가방안들은 고려되는 방안의 확장을 실증하고, 만약 연구가 현재 선호하는 기술의 성능 문제를 밝혀내지 못한다면 미래에 보다 심층적으로 연구할 수 있는 대안을 포함하고 있다. 시스템 분석연구는 규모증대 개발을 위해 고려되는 방안을 축소하기 위해 연구결과와 산업경향을 조합한다. AFCI 연구현황 및 향후 계획은 본 보고서의 마지막 장에 요약해서 기술한다.



제 2 장 개량형 핵연료주기 전략의 비교

개량형 핵연료주기 계획은 4개의 실행 가능한 전략에 초점을 맞춘다. 본 보고서에서 전략은 유사한 기본 특성을 갖는 방안의 범위를 포함하는 핵연료관리에 대한 일반적인 접근방법을 의미한다. 전략은 재순환할 물질, 원자력발전소의 형식, 사용후핵연료 처리기술의 형태 및 심지층 처분대상 물질을 도출한다.

- 현재 미국의 전략은 직접처분이다 - 사용후핵연료의 모든 원소를 함께 저장하다가 궁극적으로 심지층 처분장으로 보낸다.
- 두 번째 전략은 TRU 원소를 1회 재순환하는 제한 재순환이다. 재순환 후 잔류하는 TRU 원소와 장수명 핵분열생성물은 심지층 처분장으로 보낸다. 사용후핵연료로부터 회수한 우라늄, 감손우라늄 및 단수명 핵분열생성물은 저준위 폐기물로 구분하여 천층처분한다. 이 전략은 모두 열중성자로인 기존의 원자력발전소를 이용하여 수행한다.
- 세 번째 전략은 사용후핵연료로부터 회수한 TRU 원소를 완전히 소멸할 때까지 반복적으로 재순환하는 전환기 재순환이다. 전환기 재순환은 제한 재순환보다 더 많은 기술적인 난관이 있으므로 더 많은 연구개발 및 배치가 필요하다. 사용후핵연료로부터 회수한 우라늄은 재사용하거나 처분한다. 본질적으로 TRU 원소는 심지층 처분하지 않는다. 장수명 핵분열생성물은 처분하거나 일부는 원자로에서 소멸처리한다. 단수명 핵분열생성물은 저준위폐기물로 구분하여 천층처분한다. 이 전략은 1차적으로 열중성자로를 이용하나 적은 비율의 고속로가 필요하다.
- 네 번째 전략은 지속 재순환으로 이 전략은 감손우라늄의 재순환이 가능함으로 현저하게 우라늄 자원을 확장할 수 있어 전환기 재순환과 근본적으로 다르다. 이 전략은 주로 GEN IV 고속로를 이용하여 수행한다.

본 보고서는 전략의 시간과 전개 계획을 다루지 않는다. 이러한 것들은 개량형 핵연료주기 방안에 관한 의회보고서“ Report to Congress Advanced Fuel Cycle Initiative: Objectives, Approach, and Technology Summary”에서 다루고 있다. 본 보고서는 다음과 같은 2가지의 전략적 시간목표를 기술한다.

- TRU의 재순환 및 핵종변환을 통한 소멸처리를 위해 핵확산저항성 방식으로 TRU를 분리할 수 있는 상용규모 사용후핵연료 처리시설을 2025년까지 배치하는데 필요한 분리기술을 개발하여 산업화가 가용하도록 한다.
- 전용 TRU 소멸처리로 또는 증식로와 소멸처리로의 조합으로 운영하는 고속 스펙트럼 원자로를 2040년까지 상용화하는데 필요한 핵연료기술을 개발하여 가용하도록 한다. 물론 고속로 배치에 대한 실제적인 결정은 시장수요에 따라 산업체가 주도할 것으로 전망된다.

이러한 전략적 목표는 21세기 말과 그 이후까지도 국가 에너지 수요의 일정부분을 원자력발전에 의존하도록 방안의 개방을 유지하면서 AFCI 프로그램에 본질적으로 기여한다. 첫 번째 전략목표는 재순환 전략으로부터 위에서 언급한 재순환 전략들 중의 다음 단계로 이동하도록 한다. 두 번째 전략목표는 지속 재순환 전략과 전환기 재순환의 고속로를 가능하도록 한다.

전략적 목표를 달성하기 위해서 AFCI는 본 보고서의 제 1장에서 언급한 바 있고, 제 2장과 3장에서 전략과 기술을 비교하는 기준이 될 뿐 아니라 연구를 안내하는 4가지 프로그램 목표를 개발하였다. 또한 비교에서는 잠재적 배치에 대비한 기술성숙도도 다룬다. 각 방안의 핵심기술에 대한 현재 연구의 목표가 되는 기술성숙도는 다음과 같이 구분한다.

- 개념개발(Concept Development) - 개념이 아직 기초 수준에 있다. 다양한 적용을 위해 적합한 방안은 우선 원리 및 기초지식을 토대로 정의한다. 이에 는 중요기술 문제 또는 장애요소(showstoppers) 도출, 장애요소 주변상황 정의, 입증계획 개발이 포함된다.
- 원리입증(Proof of Principle) - 개념은 기술적으로 가능한 것으로 밝혀졌으나 운영시설 성능에 대한 성능특성은 불확실하다. 개발은 실험실규모 실험 및 실제규모 거동에 대한 분석적 추정방법을 이용하여 수행한다.
- 성능입증(Proof of Performance) - 개념이 기술적으로 가능한 것으로 밝혀졌고, 고려할 만한 성능데이터가 있다. 그러나 상업규모의 확장은 불확실하다. 공정 부분들에 대한 대규모 실증을 수행하고 최종성능 시방서를 생산하고, 통계적인 분석과 경제성 초기평가를 수행한다.
- 상용화 경험(Commercial Experience) - 기술은 세계적으로 유사한 상용화 경험이 있고, 경제성을 잘 알고 있다.

표 1은 4개의 전략이 4개의 목적을 어떻게 다루는지를 나타낸다. 본 보고서가 회의의 지시와 일치하도록 직접처분 핵연료주기는 현재 상태로 간주한다. 표는 색깔로 의미를 나타내었다.

- 목적을 나타내는 각 열에서 목적을 만족시키는 전략은 짙은 녹색으로 표시하였다. 목적을 부분적으로 만족시키는 전략은 황색으로 나타내었고, 목적을 만족시키지 못하는 전략은 핑크색으로 나타냈다.
- 4가지 기술성숙도를 구별하기 위해 상용화 경험은 녹색, 성능입증은 황색, 원리입증은 황색사선과 핑크색, 개념개발은 핑크색으로 나타내었다.

표 1에 나타낸 4가지 프로그램 목적의 각 경우에는 몇 가지 목표가 있다. “단기”는 사용후핵연료 처리시설이 상용화되어 배치되기를 권고하는 시점인 2025년까지의 기간을 의미한다. “중기”는 2025년부터 GEN IV 고속 스펙트럼 원자로가 상용화될 것으로 권고되는 약 2040까지의 기간을 의미한다. “장기”는 이러한 고속로가 여러 기 건설된 시점을 의미한다.

네 개의 전략이 표의 왼쪽에서 오른쪽으로 진척될 때 목적 1~3의 달성도는 더 좋아진다. 그러나 목적 4(경제성, 안전성 및 시스템관리)는 상황이 복잡하다. 경제성에 있어서, 새로운 원자로를 요구하는(표의 오른쪽) 핵연료전략의 경제적 불확실성에 대비하여 추가 처분장을 요구하는(표의 왼쪽) 경제적 불확실성 간에 상반관계(trade-off)가 발생한다. 새로운 처분장 또는 새로운 원자로를 요구하지 않는 하나의 방안(전통적인 LWR 재순환)이 있으나 이 방안이 연구될지 및 연구된다면 성능이 다른 방안과 연계될지에 관한 기술적인 문제가 있다. 표 2(분리기술), 표 3(원자로기술) 및 표 4(핵연료기술)에 나타낸 바와 같이 전략의 실행에 필요한 기술은 표 1에서 오른쪽으로 이동할수록 기술개발이 덜 성숙된 단계를 나타낸다.

모든 재순환전략은 직접처분 핵연료주기와 비교하여 더 낮은 기술 준비수준을 나타내고 있으므로 연구개발이 더 필요하다. 특히 핵연료를 포함한 고속로와 분리기술을 갖춰야 하는 재순환 전략의 경우에는 기술 준비가 가장 낮은 상태에 있다.

Table 1. Comparison of Advanced Fuel Cycle Strategies(1/5)

Strategy	Once Through		Recycle			Comment
			Limited	Transitional	Sustained	
Reactors	LWR	Thermal reactors, e.g., LWRs or VHTRs		Thermal reactors with 10-20% fast reactors	Fast reactors with 0-30% thermal reactors	LWR = Light Water Reactor VHTR = Very High Temperature Reactor
	Uranium oxide (standard burn-up)	High burn-up uranium oxide for LWR (or oxycarbide for VHTRs)	Uranium-Pu mixed oxide (or oxycarbide)	TRU IMF or mixed oxide (or oxy-carbide), then add fast reactor fuel	TRU metal, mixed oxide	IMF = inert matrix fuel (fuel without any uranium) TRU=transuranic elements (Pu, Np, Am, Cm)
			TRU mixed oxide (or oxycarbide)	TRU IMF or mixed oxide (or oxycarbide)	TRU IMF or mixed oxide (or oxycarbide)	
Technology options that could implement strategy	Uranium oxide (standard burn-up)	High burn-up uranium oxide for LWR (or oxycarbide for VHTRs)	Recycled fuels have 1 pass through reactor		Repeated passes	Repeated passes
			Uranium-Pu mixed oxide (or oxycarbide)	TRU mixed oxide (or oxycarbide)	TRU IMF or mixed oxide (or oxycarbide)	
Separations	none		PUREX	UREX+, pyro process	pyro-process, UREX+	PUREX=Plutonium-Uranium Extraction UREX+=Uranium+TRU

Table 1. Comparison of Advanced Fuel Cycle Strategies(2/5)

Strategy	Once Through		Recycle		Comment
	Limited	Transitional	Sustained		
Status - Illustrative technologies at each Technology Readiness Level					
Commercial experience (shaded green)	LWR, uranium oxide fuel	LWR	LWR, Pu mixed oxide fuel, PUREX	LWR	See definitions and color code in text.
Proof of performance (shaded yellow)		VHTR	VHTR	VHTR, UREX+	Fast reactor, VHTR, UREX+
Proof of principle (hatched yellow/pink)		Uranium oxycarbide		TRU oxycarbide	TRU oxycarbide, fast reactor fuel, pyroprocess
Concept development (shaded pink)				TRU mixed oxide	TRU IMF or mixed oxide
Objective 1. Reduce the long-term environmental burden of nuclear energy through more efficient disposal of waste materials.					
Reduce long-term heat load in geologic repository, need fewer repositories	Status quo	1.1 to 1.2x improvement	1.5 to 1.8x improvement	Up to 40x improvement	40x to 60x improvement
Reduce long-term radiation dose and radiotoxicity sources in geologic repository	Status quo, no reduction	Less than 3x reduction of long-lived radiation and dose sources. Stays more radiotoxic than natural uranium for more than 100,000 years.		Radiotoxicity reduced by 100x after 500 years in repository. At that time, waste becomes less radiotoxic than natural uranium.	Combined short-term and intermediate-term goal: Decrease long-term heat load to repository by 30x, delaying the need for additional geologic repositories by a century or more. Intermediate-term and long-term goal: reduce the long-lived radiation dose sources by a factor of 10 and radiotoxicity by a factor of 100, simplifying the design of the repository.

Table 1. Comparison of Advanced Fuel Cycle Strategies(3/5)

Strategy	Once Through	Recycle			Comment	
		Limited	Transitional	Sustained		
Objective 2. Enhance overall nuclear fuel cycle proliferation resistance via improved technologies for spent fuel management.						
Enhance the use of intrinsic proliferation barriers	Status quo - At discharge, high gamma, high heat rate. However, such self-protecting attributes decay significantly in the first century after discharge. Low neutron emission.	Low gamma, heat rate, and neutron emission	Inclusion of Np, Am, or Cm makes detection easier via isotopic signatures. Inclusion of Am or Cm increases gamma (easier detection, more hazardous handling). Inclusion of Am or Cm increases heat rate (more difficult weapon design). Inclusion of Cm increases neutron emission (detection may be more difficult, more hazardous handling, more difficult weapon design).			Short-term goal: develop improved technologies that may displace existing technologies.
	Status quo -existing technologies provide substantial protection.	Improved monitoring technologies, taking advantage of inclusion of Np, Am, or Cm. "Safeguard by design," i.e., design of facilities such that any attempt to divert material is more difficult to accomplish ("tamper proof") or more easily detected.				
Reduce weapons-usable material from waste destined for geologic disposal	Status quo, all kept in waste	25% destroyed by recycling	30% destroyed by recycling	>99.5% destroyed by recycling over multiple cycles	Short-term goal: eliminate 99.5% of weapons-usable material from waste. Long-term goal: reduce production, Stabilize inventory.	
	Reduces net weapons-usable production 20%(but kept in waste)	Inventory stabilizes				
Stabilize inventory of weapons usable material in storage	Status quo, inventory does not stabilize					
Degree and amount of uranium enrichment technology required	Status quo	Slightly reduced due to higher burnup and/or recycle			Near-term proliferation risk may be dominated by spread of existing uranium enrichment technology.	
	Uranium enrichment not needed					

Table 1. Comparison of Advanced Fuel Cycle Strategies(4/5)

Strategy	Once Through	Recycle			Comment	
		Limited	Transitional	Sustained		
Objective 3. Enhance energy security by extracting energy recoverable in spent fuel and depleted uranium, ensuring that uranium resources do not become a limiting factor for nuclear power.						
Relative energy recovery from uranium ore	Status quo, discard spent nuclear fuel	Slight improvement due to higher burn-up	Up to 1.3x improvement	Up to 2x improvement	2-10x improvement, depending on thermal-fast reactor mix	Short-term goal: 1.15x more energy than once-through Long-term goal: 50x improvement
Objective 4. Improve fuel cycle management, while continuing competitive fuel cycle economics and excellent safety performance of the entire nuclear fuel cycle system.						
Cost of additional repositories	Status quo - beyond Yucca Mtn. 3 to 21 repositories needed this century depending on nuclear growth	10-20% fewer repositories than status quo, smaller waste volume	30-40% fewer repositories, smaller waste volume	No additional repositories needed		Cost of additional geologic repositories is uncertain, and not being studied.
	Benefit from producing hydrogen	Status quo, temperatures inadequate	Depends on VHTR entry into the future hydrogen production market			VHTR limited, most reactors must be fast Hydrogen production may be a new market for nuclear power, comparable in magnitude to electricity production.
Economic indicators	Need for new reactor types	Status quo, none required	Either LWR or VHTR could be used, VHTR would only be used if economic for electricity and/or hydrogen production.			New reactor and fuel cycles may be more expensive than current types.
	Fraction of spent fuel that is separated	Status quo, none required	85-90%	90-95%	100%	Separation costs uncertain. Costs of new systems are being studied by APCI and Generation IV programs.
Transmutation fuel that uses recycled material	Status quo, none required	10-15%	5-10%	10-35%	100%	

Table 1. Comparison of Advanced Fuel Cycle Strategies(5/5)

Strategy	Once Through	Recycle		Comment
		Limited	Sustained	
Use Generation IV reactors with enhanced safety	Status quo	LWR - evolutionary improvements only		A key Generation IV goal is increased reactor safety characteristics
		VHTR is a Generation IV concept with improved methods of decay heat removal, more robust fuel, and chemically inert coolant	VHTR and fast reactors are Generation IV concepts with various safety enhancements	
Safety indicators (minimize transport of spent and recycle fuels (considering both distance and mass flows))	Transportation of SNF is 50% of once-through burnup if burnup doubles.	Transport is similar to once-through for the same burnup, depending on location of separation-fuel fabrication plant, repository, and power plants.	With off-site recycling at 1.5 year fueling intervals, transport is 100-200% of once-through depending on facility locations.	Relative importance of transportation to be determined.
	Status quo	Either battery-type reactors (30-year fueling intervals) or onsite recycling reduce transport to 1-10% of once-through		
Reduce on-site storage at nuclear power plants	Removal rate unchanged, but accumulation cut in half because of higher burnup	In parallel to filling first geologic repository, can double the rate of removal of spent fuel at power plants by opening first recycling plant. However, need for additional repositories will inhibit meeting goal.	Because no additional repositories needed, storage at nuclear power plants will cease to be a problem.	Long-term goal: storage time no more than 5 years
Color code	Pink = strategies that do not meet each objective	Yellow = strategies that partially meet objective	Green = strategies that meet each objective	

목적 1. 폐기물의 보다 효율적인 처분을 통해 원자력 에너지의 장기적 환경 부담을 줄인다.

분리, 핵종변환 및 핵연료기술은 함께 연구함으로써 현재의 “직접처분/비분리” 접근방법과 비교하여 폐기물의 장기 환경 부담을 감소시킬 수 있는 완전한 에너지 시스템을 제공한다. 각각의 재순환전략은 사용후핵연료의 4가지 원소인 우라늄, TRU 원소, 단수명 핵분열생성물 및 장수명 핵분열생성물을 다룬다.

- 모든 AFCI 재순환 방안은 심지층 처분이 필요한 폐기물의 중량과 부피 및 폐기물 패키지의 수량과 비용을 감소시키기 위해 우라늄을 분리한다. 분리된 우라늄은 많은 양의 감소우라늄처럼 천층처분하거나 새로운 핵연료로 가공하여 재순환시킬 수 있다.
- 모든 AFCI 재순환 방안은 적어도 Pu와 Np를 재순환시킨다. 또한 일부는 다른 2가지 TRU 원소인 Am과 Cm도 재순환시킨다. 미국은 플루토늄 자체를 분리하는 어떤 방안도 추구하고 있지 않다. 심지층 처분해야 하는 TRU 원소를 소비함으로써, 재순환은 심지층 처분장의 용량을 증가시키고, 장기 폐기물 부담을 줄이며, 원래 우라늄 자원의 주어진 양으로부터 보다 많은 에너지를 추출할 수 있는 잠재력을 제공한다.
- 모든 AFCI 재순환 방안은 복잡한 장기 심지층 처분보다는 필요에 맞춘 시설에서 붕괴시킬 수 있도록 단수명 핵종인 Cs과 Sr을 분리한다. 또한 이렇게 함으로써 심지층 처분이 필요한 폐기물 패키지의 수량과 비용도 줄일 수 있다. 이렇게 절약된 비용은 분리, 재순환 및 저장 시스템을 위한 비용과 상쇄시킬 수 있다.
- 모든 AFCI 재순환 방안은 Tc-99 및 I-129와 같은 장수명 핵분열생성물을 개선된 폐기물형태로 심지층 처분한다. 그러나 AFCI 프로그램은 향후 대안으로 이러한 핵종의 소멸처리도 고려하고 있다.

필요한 처분장의 수

원자력폐기물 정책법(Nuclear Waste Policy Act)에 의하면 제 1처분장의 법정 초기용량은 70,000 MTU이다. 현재의 모든 원자력발전소의 수명기간을 20년 연장해서 40년에서 60년으로 연장시키고 새로운 발전소를 건설하지 않는다면 처분장 용량을 2배 증가시키면 발생하는 모든 사용후핵연료를 충분히 수용할 수 있는 처분

장 용량을 보장할 수 있다.

만약 원자력 발전의 시장 점유율을 현행으로 유지하거나 증가시킨다고 가정하면 (연간 성장률을 각각 0 %, 1.8 %, 3.2 %), 제 2처분장의 수요를 배제하고 2100년 까지 배출되는 사용후핵연료를 수용하기 위해서는 처분장 용량을 각각 4배, 9배 및 20배 증가시켜야 한다(이러한 숫자는 핵연료 형태, 우라늄 농축도 및 연소도를 현재 상태로 가정해서 산출되었음). 이러한 증가(4배, 9배 및 20배)는 제 1처분장의 물리적 확장, 추가 처분장 부지확보, 재순환 또는 앞의 세 가지 방안의 조합에 의해 만족시켜야 한다.

따라서 금세기에 걸쳐 원자력발전을 계속한다고 가정한다면, 현상유지를 위해서는 2100년까지 각각의 처분장 용량을 70,000 MTU라고 할 때 4개에서 20개의 심지층 처분장이 필요하다. 앞에서 언급한 배수만큼 제 1처분장의 물리적 확장은 거의 불가능할 것으로 예상되므로 추가 처분장의 수요를 배제하기 위해서 사용후핵연료를 재순환하여야 한다.

예를 들면, 제한 재순환은 고연소도 핵연료(처분장 용량 개선효과: 1.2배), IMF(inert matrix fuel) 핵연료 1회(개선효과: 1.8배) 및 제1 처분장의 물리적 용량 2배 확장의 세 가지 방안을 조합하면 처분장 용량이 약 4배정도 개선되는 잠재력을 갖고 있다. 이 방안은 조합해서 약 4배의 개선효과가 있어 성장률 0%(시장점유율 감소)인 경우에 적합하다. 모든 다른 경우에 있어서, 고연소도 또는 제한 재순환은 도움이 되나 다음 세기까지 제2 처분장을 연기하는 목적을 만족시킬 수 없다. 제한 재순환은 그럼에도 불구하고 보다 개량된 기술(전환기 혹은 지속 재순환)이 가용하기 전에 처분 수요를 만족시키도록 추가적인 융통성을 제공한다.

이와 대조하여 전환기 또는 지속 재순환은 보다 높은 처분장 용량 개선을 달성하면서 중요한 목적을 만족시킬 수 있다.

폐기물 위해의 지속기간

또 다른 하나의 문제는 사용후핵연료의 책임 관리기간이 길다는 점이다. 관리기간은 폐기물 구성물의 방사선 붕괴를 위해 필요한 시간으로 핵종에 따라 수년부터 백만년까지 다양하다. AFCI 기술과 GEN IV 원자로의 성공적인 적용은 심지층 처

분해야하는 방사성폐기물에 존재하는 장수명 TRU 원소를 크게 감소시킬 수 있다. 단지 핵분열생성물만 처분한다면, 관리기간은 수십만년이 아니라 수백년이면 충분하게 된다.

현재 상태에서 안전한 심지층 처분이 이러한 폐기물로부터 일반대중을 보호한다고 할지라도 폐기물은 본래의 천연우라늄보다 더 많은 방사성독성을 수십만년동안 유지한다. 전환기 또는 지속 재순환은 TRU 원소를 재순환시킴으로 심지층 처분 관리기간을 수십만년으로부터 수백년으로 줄일 수 있다. 이것은 TRU 원소를 폐기물관리 부담으로부터 에너지 자원 자산으로 전환시킨다.

목적 2. 사용후핵연료 관리 기술의 개선을 통해 전체 핵연료주기의 핵확산저항성을 향상시킨다.

현재 미국의 정책은 우라늄 농축 및 재처리 기술을 현재 상용 핵연료주기 기반이 확립되지 않은 국가에 이전을 억제하고 있다. AFCI 핵확산저항성 목표는 우라늄 농축보다 핵확산의 관점에서 덜 매력적인 경로를 제공한다. 또한, AFCI 물질과 기반시설의 물리적 방호 시스템은 시스템에서 관리하는 다른 물질과 같이 효율적으로 물질의 도난을 방지해야 한다.

표 1은 고유 핵확산 방벽, 안전조치기술, 처분되는 폐기물로부터 핵무기 가용물질의 저감, 저장 중인 핵무기 가용물질의 재고량 안정화, 우라늄 농축의 수요감소 등 다섯 가지의 핵확산저항성 인자를 포함하고 있다. 이러한 인자들은 핵무기 가용물질의 도난, NPT(Non-Proliferation Treaty) 조약에 따라 신고된 시설에서 물질의 은밀한 전용, 비신고시설에서 은밀한 생산, 조약을 떠난 국가에 의한 NPT 조약에 따른 책임의 회피 등 네 가지 위협전략에 관련이 있다.

물질 절도

다음과 같은 많은 인자들이 테러리스트 또는 준국가조직에 의한 절도에 대비한 보안조치를 잠재적으로 증가시킨다.

- 순수 플루토늄 또는 고농축 우라늄과 관련된 핵연료주기의 전체에 걸쳐서 핵

무기 가용물질의 취급 위험요소를 증가시킨다.

- 도난 물질의 탐지를 플루토늄 또는 고농축 우라늄의 탐지보다 용이하도록 하기 위해 핵무기 가용물질의 방사선준위를 증가시킨다.
- 재순환에 의해 핵무기 가용물질을 소비함으로 재고량을 저감하고, 폐기물흐름에서 핵무기 가용물질을 제거하며, 핵분열생성물의 방사능방벽이 저하되기 전에 오래된 사용후핵연료의 재고량을 없앤다.
- 핵분열생성물의 방사성 방벽이 저하되기 전에 처분 물질에 출입을 덜 하도록 심지층 처분장을 폐쇄한다.
- 시설과 수송시스템 설계에 경비원의 효율적인 배치 및 반응을 위해 접근하고 지원하는 거대한 물질적 방벽과 같은 절도 방지장치를 통합한다.
- 핵연료 분리와 핵연료 가공시설을 공동부지에 위치시킨다.

심지어 천연 원자력 장치의 폭발영향도 수용할 수 없기 때문에 테러리스트의 목적물이 될 수 있으므로 핵무기 가용물질의 질은 절도에 대해 중요한 고려사항이 아니다. 표1에 나타낸 첫 번째 네 가지 인자는 물질 절도에 대비한 보안조치의 증가에 현저하게 기여한다.

신고시설에서 은밀한 전용

AFCI 기술은 다음과 같이 함으로써 연구개발의 수행에 의해 은밀한 전용에 대비한 보안조치를 증가시킬 수 있다.

- 재순환 핵연료에 Np 또는 Am을 함유시킴으로 물질의 탐지가 더 용이하도록 한다.
- 감시기술을 향상시킨다.
- 설계에 안전조치를 반영한다. 즉, 물질 전용의 시도가 달성되기가 더 어렵거나 쉽게 탐지될 수 있도록 시설을 설계한다.
- 핵무기 가용물질의 질을 저하시켜 전용 물질의 사용이 어렵도록 한다(핵무기 가용물질의 질 저하는 고성능 핵무기를 가지려는 국가에 대한 방벽이 된다).

AFCI 기술은 고농축우라늄뿐 아니라 핵무기급 플루토늄과 같은 매력적인 직접 사용 가능물질을 생산하지 않는다. 표1에 나타낸 첫 번째, 두 번째, 네 번째 및 다섯 번째 인자(고유방벽, 안전조치기술, 재고량 안정화 및 우라늄 농축)는 은밀한 전

용에 대비한 안전조치 강화에 현저히 기여한다.

미신고시설에서 은밀한 생산

핵확산의 잠재적 전략을 제공하는 PUREX 또는 우라늄 농축의 기존 지식을 파괴시킬 수 있는 연구개발 프로그램은 없다. 잠재적인 핵확산 의도자는 미신고시설에서 은밀하게 기존지식을 이용할 수 있다. 따라서 AFCI의 목적은 위협을 방지하면서 수행하는데 있다. AFCI 기술은 농축기반시설을 포함한 강력한 핵비확산 자격 인증, 본질적인 원자력 전문기술 및 기반을 갖춘 핵연료주기 국가에만 수출될 예정이다. 우라늄 농축이 AFCI 경로보다 보다 더 매력적이기 때문에 어떤 국가도 은밀한 생산을 이용한 핵확산을 시도하지 않을 것으로 예상된다. AFCI 기술이 상용화 목적으로 가치가 입증될 때 PUREX와 관련된 제작, 구매의 탐지 또는 기술 장비의 사용은 더 확실한 핵확산 의도를 나타내는 것이 될 것이다. 표1에 나타난 첫 번째, 두 번째 및 다섯 번째 인자(고유방벽, 안전조치기술 및 우라늄 농축)는 은밀한 생산에 대비한 보안조치 강화에 약간의 도움을 준다.

파기(Abrogation)

NPT에 따른 국가의 책임을 파기하는 국가를 예방할 수 있는 연구개발 프로그램은 없다. 상용 우라늄 농축 기반시설을 갖춘 일부 핵연료주기 국가는 국가 책임을 파기하고, 기존의 기반시설을 이용하여 저농축 우라늄을 고농축 우라늄으로 신속하게 변환시킬 수 있는 능력을 이미 갖고 있다. AFCI 기반의 추가는 NPT에 따른 국가 책임의 파기를 위해 현저하게 더 매력적인 경로를 제공하지 못한다. 표1에 나타난 첫 번째, 두 번째, 네 번째 및 다섯 번째 인자(고유방벽, 안전조치기술, 재고량 안정화 및 우라늄 농축)는 파기에 대비한 안전조치 강화에 약간의 도움을 준다.

따라서 새로운 AFCI 기술은 다음사항을 제공해야 한다.

- 과거 문제의 재발을 방지하기 위해 새로운 국제 시스템과 합동으로 새로운 기술이 개발되어야 한다. 새로운 AFCI 기술들은 테러리스트 또는 준 정부조직에 의한 물질 절도, 신고시설에서 국가에 의한 은밀한 전용, 미신고시설에서 은밀한 전용 및 앞에서 언급한 NPT 책임의 파기와 관련된 위협을 줄일 수 있는 기회를 제공한다.

- 복잡한 프로그램의 목적(처분장 용량, 처분장 선량, 에너지 지속가능성, 안전성 및 경제성)을 다루는 능력의 장점에 의해 PUREX를 포기하고 핵연료주기 국가가 AFCI 기술을 선택할 가능성을 증가시킨다. 이것은 기술 관리를 위해 “백지(clean slate)”를 제공한다.

요약하면, 현재 상태는 미국의 기술지도력 포기, PUREX 기술의 국제적 지속이용 및 사용후핵연료 내에 존재하는 핵무기 가용물질 재고량의 끝없는 증가를 지속시킨다. AFCI 기술은 책임있는 핵연료주기 국가에 배치될 때 핵확산저항성을 갖도록 설계된다. AFCI 기술은 물질절도의 잠재력을 예방하도록 튼튼한 물리적 보안조치를 지원할 수 있도록 설계된다.

목적 3. 사용후핵연료 및 감손우라늄에서 회수 가능한 에너지를 추출하여 에너지 안보를 강화함으로써 원자력발전용 우라늄 자원의 부족이 발생하지 않도록 보장한다.

표1의 다음 부분은 지속가능성과 에너지회수에 관해 기술한다. 우라늄광의 에너지 함유량은 사용후핵연료의 에너지 함유량을 회수할 때 보다 효율적으로 사용할 수 있다. 지속 재순환은 본질적으로 에너지 회수의 개선을 필요로 한다.

직접처분 전략에서는 우라늄원광 에너지함유량의 불과 1%만이 사용되고, 99%는 버려진다. 결국, 이렇게 되면 우라늄 자원은 부족하게 될 것으로 전망된다. 또 사용후핵연료의 모든 성분은 부담으로 남는다.

제한 재순환의 경우에는 약간 개선되어 우라늄 에너지 함유량의 2%이하가 사용되고, 98%이상이 버려진다. TRU 원소의 일부는 부담으로부터 자산으로 전환되고, 나머지(감손우라늄과 사용후핵연료의 우라늄을 포함)는 부담으로 남는다.

전환기 재순환은 원래 우라늄광의 에너지 함유량의 약 10%를 사용할 수 있으나 아직도 약 90%가 버려진다. 사용률은 제 3장에 기술하는 원자로형의 혼합과 원자로의 전환비에 의존한다. TRU 원소는 부담으로부터 자산으로 전환된다.

지속 재순환에서는 본질적인 개선이 이루어져 원래 우라늄광의 에너지 함유량의

약 99% 이상을 사용할 수 있다. 사용물은 경제성과 공정손실 등에 의존한다. 재순환의 반복을 통해 손실이 누적되기 때문에 우라늄광이 갖고 있는 에너지 함유량의 불과 1%정도만 버려진다. 현재 저준위폐기물로 처분하는 감손우라늄도 폐기물 부담으로부터 에너지 자산으로 전환된다. 우라늄광 자원은 원자력발전을 제한하는 구속요건이 되지 못한다.

요약하면, 현재 상태에서 사용후핵연료 에너지는 버려지고 있다. 재순환 방안의 일부에서는 에너지 가치의 일부를 회수한다. 지속 재순환 전략은 원래 우라늄광으로부터 에너지 가치를 최대한 추출한다.

목적 4. 핵연료주기 관리를 개선하여 전체 핵연료주기 시스템이 경쟁력있는 핵연료주기 경제성과 우수한 안전성을 지속적으로 확보하도록 한다.

경쟁력있는 경제성

경제성에는 너무 많은 인자가 포함되고, 또 인자의 대부분이 높은 불확실성을 갖고 있기 때문에 비교할 수 있을 정도의 경제성 계산은 아직 시기상조이다. 표1에는 여러 가지의 핵심인자를 나열했다. 핵심인자들은 전체 핵연료주기 비용 영향에 동등하게 기여를 하지 않기 때문에 단순한 덧셈은 아니다. 또한, 전력과 수소생산의 잠재적인 두 가지 원자력시장을 갖는 복잡함도 존재한다.

추가 심지층 처분장의 비용과 관련된 큰 경제적 불확실성도 존재한다. 그뿐 아니라 직접처분 핵연료주기의 가능성은 추가 심지층 처분장의 부지 확보 및 건설 가능성과 비용의 확증을 요구한다.

SCWR(Super-Critical Water Reactor) 및 VHTR(Very High Temperature Reactor)과 같은 GEN IV 열 스펙트럼 원자로의 비용 불확실성의 중요성은 GEN IV 고속로의 그것과는 크게 다르다. 핵연료주기 관점에서 LWR과 GEN IV 열중성자로는 비교적 차이가 적다. GEN IV 중성자로의 현재 LWR 시장(전기생산) 및 수송에너지 연료 시장(수송생산)으로의 진출은 1차적으로 경제성에 달려있다. 이러한 관계에서 GEN IV 열중성자로는 관련된 비용 불확실성은 매우 중요하다. 그러나 핵연료주기 관점에서 GEN IV 열중성자로는 함께 하는 전략은 GEN IV 열중성자로는 없어도 수행할 수 있다. 예를 들면, LWR과 GEN IV 열중성자로는 모두는 핵연료 내

에 약간의 우라늄과 함께 또는 우라늄없이 IMF(inert matrix fuel) 핵연료로 TRU 을 소멸(연소)시킬 수 있다. 심층연소(deep burn)과 관련해서 VHTR의 옹호자들은 VHTR의 우수한 기술이 LWR에서 할 수 있는 것보다 더 쉽고 효율적으로 달성할 수 있다고 특별히 믿고 있다. 이러한 접근방법의 효율성은 IMF 핵연료의 각 종류를 원자로형의 각각에 얼마나 길게 유지시킬 수 있느냐에 달려있으며, 이는 수행 중인 연구 주제의 하나이다. GEN IV 열중성자로는 별도의 핵연료주기 전략을 필요로 하지 않는다.

이와 대비하여, GEN IV 고속로의 비용 불확실성은 AFCI와 밀접한 관계가 있다. 적어도 고속로 또는 ADS(Accelerator-Driven System)의 한 노형은 지속 재순환 전략을 실행하기 위해 경제적으로 만들어야 한다. 전환기 재순환 전략에 대한 고속로 경제성에 대한 불확실성의 중요성은 전략을 수행하기 위해 요구되는 고속로의 비율에 달려있고, 이것에 대해서는 더 많은 분석이 필요하다.

모든 재순환전략은 분리에 의존하고 있지만 분리비용은 불확실하다. 표1은 요구되는 분리비용의 총액은 재순환 방안 사이에 크게 변하지 않는다는 것을 보여준다.

모든 재순환 전략은 분리를 필요로 하지만, 재순환 TRU 원소를 사용할 수 있는 새로운 핵연료의 비용은 불확실하다. 그러나 표1 에는 사용되는 모든 핵연료의 극히 일부만 재순환 방안 간에 비용이 크게 바뀐다는 것을 보여준다. 그 범위는 IMF 핵연료를 적용하는 제한 재순환의 경우에는 5~10%로부터 지속 재순환의 경우에는 100%까지이다.

추가 처분장의 잠재적 비용을 제외한 제한 재순환과 관련된 경제적 불확실성은 고속로가 필요없기 때문에 전환기 및 지속 재순환과 관련된 경제적 불확실성보다 적다.

전환기 재순환의 경우, 추가 심지층 처분장과 관련된 경제적 불확실성은 감소되거나 새로운 원자로와 관련된 경제적 불확실성은 대부분의 방안들에 대해 증가한다. 단지 열중성자로만 사용한다면, 전환기 재순환의 실용성은 비교적 불확실하다. 만약 고속로가 추가된다면, 지속 재순환의 실용성은 의심스럽지 않으나 고속로와 그와 관련 시설의 비용 부담에 불확실성이 존재한다. GEN IV 프로그램에서 고속로의 개발은 고속로의 경제적 경쟁력에 따라 결정될 것으로 전망된다.

지속 재순환의 경우, 새로운 심지층 처분장의 수요와 관련된 경제적 불확실성은 존재하지 않으나 고속로와 관련시설은 필요하므로 이에 따른 비용 불확실성이 존재한다.

우수한 안전성능 유지

이 목적은 원자로를 포함한 전체 핵연료주기에 적용해야 한다. 전체 시스템의 안전성은 원자로가 심지층 처분장 또는 재순환 시설보다 다수이고 고속로의 핵연료가 핵연료주기의 다른 방안보다 수십배의 발전밀도를 갖기 때문에 원자로의 안전성에 큰 영향을 받을 것으로 예상된다.

- 직접처분의 경우, 원자로의 용량을 각각 1 GWe라고 가정할 때 100기의 원자로 당 적어도 1개의 처분장이 필요하다.
- 제한 재순환의 경우, 100기의 원자로 당 직접처분보다 약간 적은 수의 처분장과 약 1개의 재순환 시설이 필요하다.
- 전환기 및 지속 재순환의 경우, 원자로의 수와 관계없이 한 개의 처분장이 필요하다. 100 기의 원자로 당 1개의 중앙집중식 대형 재순환 시설 또는 각각의 원자로 당 독립된 재순환시설이 필요하다.

핵연료주기 안전성의 전반적인 평가는 원자로 운영에 새로운 재순환 핵연료의 영향을 포함한다. 게다가 원자로 안전성 파라메타에는 재순환 핵연료의 적절한 구성에 대한 조사도 일상적으로 포함된다.

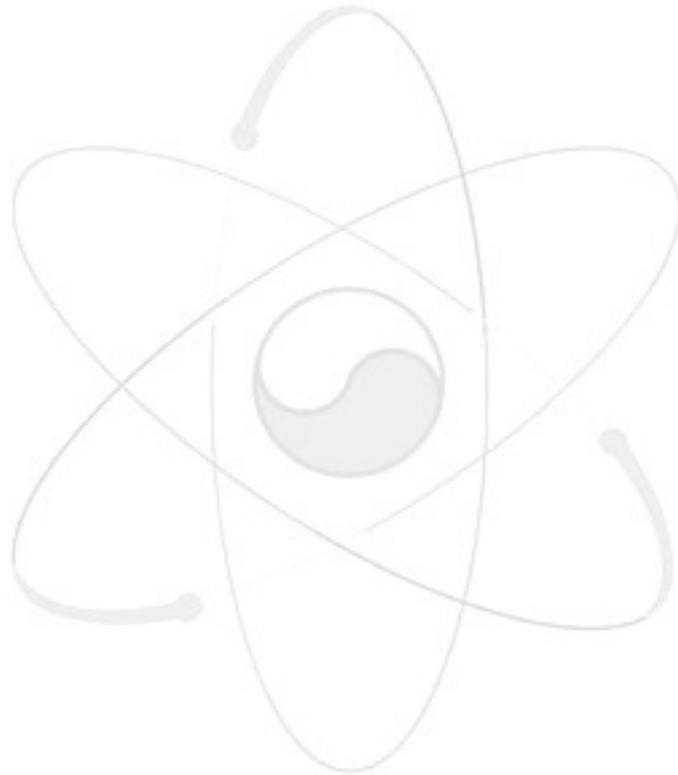
발전소내 저장을 감소시키기 위한 핵연료관리 개선

기존의 경수로에서 배출된 사용후핵연료는 단수명 핵분열생성물을 붕괴시키면서 수년동안 저장 수조에 저장하여야 한다. 이 냉각기간은 심지층 처분장으로 사용후핵연료의 수송동안 열 부하를 감소시키기 위해 필요하다. 일부 사용후핵연료는 심지층 처분장이 인허가를 받는 동안 냉각을 위해 필요한 기간을 초과하며 현재 잘 저장되고 있다. 상용 원전에 저장중인 사용후핵연료의 누적량은 이미 약 50,000 MTU 이다. 제1 처분장이 운영을 개시할 때까지 처분장의 법정용량을 다 채울 충분한 폐기물이 누적될 것으로 예상된다. 폐기물이 누적된 후 심지층 처분장을 건설

하는 이러한 패턴을 지속하는 것은 대용량의 중간저장시설을 갖추었을 때 가능하고, 대안으로 심지층 처분장의 건설속도를 가속시켜야 한다.

제한 재순환의 경우, 사용후핵연료를 1회 재순환하기 때문에 추가 중간저장 또는 심지층 처분장의 수요를 연기할 수 있다. 이것은 중간저장시설을 건설하거나 또는 추가 심지층 처분장을 건설하도록 시간적 여유를 제공한다.

전환기 또는 지속 재순환의 경우, 재순환 시설이 운영될 때 중간저장의 수요를 감소시킨다. 사용후핵연료 성분들은 저장보다는 일상적으로 재순환된다.



제 3 장 개량형 핵연료주기 기술의 비교

본 장은 표 1에서 언급한 전략과 관련된 기술방안을 좀더 자세하게 기술한다. 기술방안은 아래와 같이 3개의 분야로 나누고 관련 비교표를 작성하였다.

- 표 2 : 분리 기술의 비교(33쪽)
- 표 3 : 원자로 기술의 비교(39쪽)
- 표 4 : 소멸처리 핵연료의 비교(48쪽)

각 기술표의 첫 번째 열에는 각 기술이 지원하는 핵연료주기 전략을 나타낸다. 이러한 전략은 표 1에서 메인 칼럼의 제목과 일치한다. 그다음 각각의 표는 다른 두 기술표에 이것을 이어주는 기술양립성을 나타낸다. 이러한 열들은 전체 핵연료주기의 일부분으로 함께 연구할 수 있도록 분리, 원자로 및 소멸처리 핵연료기술의 조합을 나타내었다. 각 기술비교표의 다음부분은 기술의 개발현황에 관한 정보를 제공한다. 기술비교표의 하단부분은 제 1장에서 언급한 목적들을 달성하기 위한 주요 인자를 나타내었다.

1. 분리 기술의 비교

현재 미국은 직접처분(비분리) 정책을 견지하고 있고, 프랑스와 일본은 플루토늄의 상업적 분리 정책을 견지하고 있다. 플루토늄 분리의 1차적인 목적은 그것을 재순환시켜 에너지 함유량을 회수하는데 있다. 이러한 상업시설에 적용된 기술은 사용후핵연료로부터 플루토늄을 회수하는 PUREX 기술이다. 이 기술은 원래 1940년대 미국의 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)에 의해 개발되었다. 2001년 국가에너지정책은 폐기물을 감소시키고, 핵확산저항성을 향상시키며, 이러한 기술을 핵연료주기가 고도로 발달한 국가와 공유할 수 있는 대안 재처리 및 핵연료 처리기술의 개발을 권고하고 있다. 이렇게 함으로써 미국은 분리된 플루토늄의 누적량을 억제하면서 개량형 핵연료주기 경제성과 폐기물관리를 향상시키려고 한다.

표2는 사용후핵연료의 직접처분 및 PUREX와 대비하여 UREX+(Uranium Extraction Plus), 열화학처리(pyrochemical pyroprocess) 및 용융염핵연료처리(molten fuel salt treatment)의 세 가지 개량형 기술을 비교한다.

Table 2. Comparison of Separation Technologies(1/4)

Separation Option	None (Status quo in the United States)	PUREX (Status quo in the United States)	UREX+	Pyroprocess	Molten Fuel+ Coolant Salt Processing	Comments
Strategies Supported						
Once Through	Yes	----	----	----	Yes	Green=Yes Pink=No
Any of the recycle strategies	----	Yes	Yes	Yes	Yes	
Compatible Reactor Options						
Light Water Reactor (LWR)		Yes		To be clarified	----	
Very High Temperature Reactor(VHTR)	Yes		Yes	Yes	----	These are thermal reactor options.
Supercritical Water Reactor		Yes		To be clarified	----	
Molten Salt Reactor			----		Yes	Can be either thermal or fast.
Sodium Fast Reactor	----		Yes		----	These are fast reactor options.
Lead or Gas Fast Reactor		----	Yes, for nitride fuel	Yes	----	
Compatible Fuel Options						
Oxide (With or without uranium)		Yes		To be clarified	----	Green=Yes White=see details Pink=No
Carbide/oxycarbide	Yes	----	Yes	Yes	----	
Metal		----		Yes	----	
Nitride		----	Yes	Yes	----	
Molten salt			----		Yes	

Table 2. Comparison of Separation Technologies(2/4)

Separation Option	None (Status quo in the United States)	PUREX (Status quo in the United States)	UREX+	Pyroprocess	Molten Fuel+Coolant Salt Processing	Comments
Status Technology Readiness (Level)	None (Status quo in the United States)	PUREX (Status quo in the United States)	UREX+	Pyroprocess	Molten Fuel+Coolant Salt Processing	See definitions and color code in text.
Objective 1. Reduce the long-term environmental burden of nuclear energy through more efficient disposal of waste materials.	Commercial Experience	Proof of Performance	Proof of Principle	Proof of Principle	Proof of Principle	
Able to separate uranium	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Uranium dominates waste mass. Which are factors in separation and waste packaging costs. Thus, uranium separation may reduce costs.
Able to separate transuranic elements	No	Not developed	Yes	Yes	Yes	Pu, NP, and Am dominate long-term heat load, radiotoxicity, and hypothetical doses.
Able to separate cesium and strontium	No	Not developed	Yes	Not developed	Not developed	These dominate short-term heat load.
Able to separate technetium and iodine	No	Not developed	Yes	Yes	Yes	After transuranics, these elements dominate long-term dose because they are relatively transportable.
High-level waste/year	2,000 tonne heavy metal in spent nuclear fuel; 660 tonne cladding	490 tonne glass; 1,900 tonne uranium	230 tonne glass	490 tonne ceramic waste form	490 tonne ceramic waste form	In recycle strategies, most or all of the transuranic elements are recycled and are therefore high-level waste.
Low-level waste/year	-0-	350 tonne raffinates & process materials; 660 tonne cladding	1,900 tonne uranium; 660 tonne cesium-strontium waste	1,900 tonne uranium; no cladding; 10 tonne cesium-strontium waste	1,900 tonne uranium; no cladding; 10 tonne cesium-strontium waste	Waste from processing only. Does not include waste from uranium enrichment or reactor operation. In some strategies, this uranium will be recycled.

Table 2. Comparison of Separation Technologies(3/4)

Separation Option	None (Status quo in the United States)	PUREX (Status quo in the United States)	UREX+	Pyroprocess	Molten Fuel+ Coolant Salt Processing	Comments
Objective 2. Enhance overall nuclear fuel cycle proliferation resistance via improved technologies for spent fuel management.						
Avoid separation of weapons-usable elements with low intrinsic barriers to proliferation resistance	Yes	No (pure plutonium)		Yes		
Enable stabilization of weapons-usable inventories	No	No	Yes, via transitional or sustained recycle			
Objective 3. Enhance energy security by extracting energy recoverable in spent fuel and depleted uranium, ensuring that uranium resources do not become a limiting factor for nuclear power.						
Enable energy recovery from legacy spent fuel	No	Partial		Yes		Virtually all legacy spent fuel is uranium oxide.
Enable energy recovery from depleted uranium	No	Only for sodium fast reactors with oxide fuel		Yes		Must support transitional/ Sustained recycle in fast reactors

Table 2. Comparison of Separation Technologies(4/4)

Objective 4. Improve fuel cycle management, while continuing competitive fuel cycle economics and excellent safety performance of the entire nuclear fuel cycle system.			
Assists in continuing competitive nuclear energy economics?	Depends on the system in which the technology is used, see Table 1.		
Able to separate neutron-absorbing components from the transuranics to be recycled	No	Yes	May not be sufficient for thermal reactors Not developed Removal of these materials from recycled fuel improves fuel economic performance.
Assists in continuing excellent safety performance.	All power, separation, and fuel plants will meet rigorous safety objectives and requirements.		
Assists reducing storage of discharged fuel at power plants	No	Yes	
Color code for four Objectives	Pink=strategies that do not meet each objective	Yellow=strategies that partially meet objective	Green=strategies that meet each objective

분리, 원자로형 및 핵연료 간의 양립성을 고려할 경우, UREX+ 공정은 1차적으로 LWR(Light Water Reactors) 산화물핵연료의 처리를 위해 개발되었음을 주목한다. 열화학처리공정은 1차적으로 금속 핵연료의 처리를 위해 개발되었고, 질화물 핵연료와 같은 다른 핵연료에도 적용가능성이 크다. GFR(Gas Fast Reactor) 및 VHTR(Very High Temperature Reactor)에서 배출되는 사용후핵연료의 분리방안은 현재 주목을 덜 받고 있다. 연삭 후 용해(grind-then-leach) 공정을 적용한다면, UREX+ 공정은 이러한 핵연료에도 적용할 수 있다. 또한, 열화학처리공정도 후보공정이다. GFR 및 VHTR에서 배출되는 사용후핵연료를 분리하는 강력한 후보공정을 도출하기 위해서는 연구가 필요하다.

폐기물의 부담을 저감하는 목적 1의 관점에서, TRU 원소, 단수명 핵분열생성물인 Cs과 Sr, 장수명 핵분열생성물인 Tc과 I를 분리하는 다른 분리공정들의 능력을 주목한다. 사용후핵연료로부터 TRU 원소의 분리는 AFCI 목적을 만족시켜야 한다. UREX+는 두 종류의 핵분열생성물을 분리할 수 있는 것이 확실하다. Cs과 Sr을 분리하는 열화학처리공정의 능력은 아직 덜 확립되었다.

핵확산저항성을 향상시키는 목적 2의 관점에서, PUREX 공정에서는 선천적으로 플루토늄을 분리하나 AFCI의 세 가지 공정(UREX+, 열화학처리공정, 용융염공정) 모두는 플루토늄의 분리를 배제한다.

에너지 지속가능성을 향상시키는 목적 3의 관점에서, 현재 저장중인 약 50,000 MTU의 사용후핵연료는 우라늄 산화물임을 주목한다. 따라서 사용후핵연료로부터의 에너지 회수는 1차 후보공정인 UREX+ 공정과 양립할 수 있는 분리공정을 필요로 한다. 반면에 감손우라늄으로부터 에너지 회수는 1차 후보공정인 열화학처리공정과 같은 고속로 핵연료와 양립할 수 있는 분리공정이 필요하다.

핵연료주기 관리를 향상시키는 목적 4의 관점에서, 현재의 분석결과로는 모든 AFCI 방안(UREX+, 열화학처리공정, 용융염공정)이 핵연료주기 관리를 향상시키는 목적을 만족시키는 것으로 나타났다. 이러한 방안의 연구를 계속하면서 안전성과 경제적 잠재력을 좀 더 확실하게 평가할 예정이다.

요약하며, AFCI의 세 가지 방안 모두는 프로그램의 목표를 만족시키는 것으로 나타났다. UREX+ 는 좀더 많이 개발되어 불확실성이 상대적으로 적다. 기술의 선

정은 원자로와 핵연료 기술의 선정과 조화시켜야 한다.

2. 원자로 기술의 비교

표 3에서 현재의 원자로, 개량형 원자로(GEN IV) 및 ADS(Accelerator-Driven Systems)를 비교한다.

GEN 1 이란 용어는 첫 번째의 원자력발전소를 의미한다. 현재 미국의 모든 원자력발전소에 적용된 기술은 GEN II이다. GEN III/III+ 와 IV 원자로는 성능향상의 잠재력을 제공한다. AFCI 프로그램은 이러한 잠재적인 새로운 원자로형을 수용하여야 한다. 표1에 나타난 바와 같이 일부 AFCI 전략은 새로운 원자로형의 개발을 필요로 한다.

“GEN I” 실험 원자로는 1950년대와 1960년대 개발되었다. “GEN II” 대규모 중앙집중식 원자로는 1970년대 및 1980년대 건설되었다. 미국에서 운영 중인 104기의 원전을 포함한 오늘날 세계의 상용원전 대부분이 여기에 속한다. 이들의 거의 대부분은 냉각재로 비등수 또는 가압경수를 사용하는 경수로(LWRs)이다. 이들은 석탄, 천연가스 또는 석유를 태우는 발전소와 유사한 방법으로 에너지를 생산한다. 다른 점은 화석연료의 연소대신에 원자력 핵분열이 열원이다.

GEN III 개량형 경수로는 지역의 증가된 에너지 수요를 만족시키기 위해 1990년대 주로 동아시아에서 건설되었다. GEN III+ 개량형 원자로는 경제성과 안전성이 개선된 AP-1000 및 PBMR(Pebble Bed Modular reactors)과 같은 냉각수 냉각 및 가스 냉각 원자로 모두를 포함하며, 이들은 상용화 또는 개발 프로젝트를 수행 중에 있다.

미래에 대비한 GEN IV 개량형 원자력에너지 시스템은 향후 연구개발에 초점을 맞추고 있다. 12개국과 국제기구로부터 100여명 이상의 전문가가 참여하여 표 3에 나타난 바와 같은 GEN IV의 최적 개념을 선정하는 공동 작업을 수행했다. GIF(Generation IV International Forum)는 미래의 원자력에너지 시스템을 위한 목표를 공유하는 회원국으로 구성된다. GIF는 기술개발을 위한 가용한 자원을 증대시키기 위해 회원국의 연구개발 프로그램을 조정한다.

Table 3. Comparison of Reactor Technologies (1/5)

Reactor option	Light Water Reactor (LWR)	Very High Temperature Reactor (VHTR)	Super Critical Water Reactor	Molten Salt Reactor	Sodium Fast Reactor	Lead Fast Reactor	Gas Fast Reactor	Accelerator-Driven System	Comment
Strategies Supported									
Once Through		Yes		Yes					
Limited recycle		Yes		Yes					Green=Yes
Transitional recycle		Yes		Yes	Yes, for the fast reactor component (if any)			Yes	White=see details
Sustained recycle	Yes, for the thermal reactor component (if any)			Yes	Yes				Pink=No
Compatible Separation Options									
Aqueous processing, e.g. UREX+	Yes	Requires grind-leach first-step	Yes		Yes, if oxide or nitride fuel; No, if metal fuel				Green=Yes
Pyroprocess	Partial	Yes	Partial		Yes			Yes	White=see details
Molten Salt Processing				Built in					Pink=No
Compatible Fuel Options									
Mixed oxide		Yes			Yes		Yes		
Inert matrix fuel		Yes							
Americium targets		Yes							
Coated oxycarbide		Yes					Yes		Green=Yes
Metal					Yes			Yes	Pink=No
Nitride					Yes	Yes		Yes	
Dispersion					Yes	Yes			
Molten fluoride salt				Built in					

Table 3. Comparison of Reactor Technologies (2/5)

Reactor option	Light Water Reactor (LWR)	Very High Temperature Reactor (VHTR)	Super Critical Water Reactor	Molten Salt Reactor	Sodium Fast Reactor	Lead Fast Reactor	Gas Fast Reactor	Accelerator-Driven System	Comment	
Status										
Nuclear Power Plant Generation	I, II, III	These are the six Generation IV concepts.							Not applicable	See definitions in text
Technology Readiness Level	Commercial experience	Proof of performance	Concept development	Proof of Principle	Proof of performance	Proof of Principle	Concept development	Proof of principle	See definitions and color code in text.	
Objective 1. Reduce the long-term environmental burden of nuclear energy through more efficient disposal of waste materials.										
Potential for transitional or sustained recycle	Yes, with continued uranium enrichment and removal of curium from spent fuel		Yes							Repeated recycle minimizes geological waste.
Reduction of long-term heat load per fuel pass through reactor	1.5-1.8 for inert matrix fuel (no uranium)		Not defined	1.5		1.7			Higher values allow faster repository benefits.	
	1.0-1.2 for mixed oxide fuel (with uranium)									

Table 3. Comparison of Reactor Technologies (3/5)

Reactor option	Light Water Reactor (LWR)	Very High Temperature Reactor (VHTR)	Super Critical Water Reactor	Molten Salt Reactor	Sodium Fast Reactor	Lead Fast Reactor	Gas Fast Reactor	Accelerator-Driven System	Comment
Objective 2. Enhance overall nuclear fuel cycle proliferation resistance via improved technologies for spent fuel management.									
Destruction rate of transuranic elements, kg/year per MW(th) of capacity	0.31 for inert matrix fuel (no uranium)		Intermediate values depending on spectrum and design	0.24 (conversion ratio=0.25)		0.28 (conversion ratio=0.25)		Destruction of transuranics reduces inventory.	
	0.12 for mixed oxide fuel (with uranium)			0.0 (conversion ratio of 1.0)					
On-line versus batch refueling	Batch	On-line (pebble bed variant) or batch (prismatic)	Both	On-line	Batch	Batch (but infrequent in the "battery" design)	Batch	Batch processing may be a proliferation resistance advantage.	
Need for uranium enrichment	Yes; indeed, higher burnup requires either higher enrichment (if once-through) or transuranic elements (if recycle)		Not if in fast reactor mode	Generally not		No		Uranium enrichment technology is a potential proliferation pathway.	

Table 3. Comparison of Reactor Technologies (4/5)

Reactor option	Light Water Reactor (LWR)	Very High Temperature Reactor (VHTR)	Super Critical Water Reactor	Molten Salt Reactor	Sodium Fast Reactor	Lead Fast Reactor	Gas Fast Reactor	Accelerator-Driven System	Comment
Objective 3, Enhance energy security by extracting energy recoverable in spent fuel and depleted uranium, ensuring that uranium resources do not become a limiting factor for nuclear power.									
Maximum conversion ratio		0.8		0.8 (once through) to 1.1 (on-line processing)		1.3		< 1	Increased conversion ratio improves use of uranium ore.
Objective 4, Improve fuel cycle management, while continuing competitive fuel cycle economics and excellent safety performance of the entire nuclear fuel cycle system.									
Assists in continuing competitive nuclear energy economics?	Depends on the system in which the technology is used, see Table 1.								
Outlet temperature(°C)	320	850-1000	550	700-850	550	550-800	850	500	Temperatures > 850°C allow efficient hydrogen production, higher temperatures improve thermal efficiency
Assists in continuing excellent safety performance	All power, separation, and fuel plants will meet rigorous safety objectives and requirements.								

Table 3. Comparison of Reactor Technologies (5/5)

Reactor option	Light Water Reactor (LWR)	Very High Temperature Reactor (VHTR)	Super Critical Water Reactor	Molten Salt Reactor	Sodium Fast Reactor	Lead Fast Reactor	Gas Fast Reactor	Accelerator-Driven System	Comment	
Objective 4. Improve fuel cycle management, while continuing competitive fuel cycle economics and excellent safety performance of the entire nuclear fuel cycle system.										
Fuel processing location	Central plant			On-site	Either on-site or central plant					Multi-faced trade-offs are involved
Requires "wet" storage of discharged fuel	Yes	No	Yes	Fuel not discharged	Depends on reactor design and fuel type, but generally "wet" storage not expected.		Wet fuel storage more vulnerable than dry			
Coolant at high pressure	Yes			No		Yes	No Low coolant pressure is a safety benefit			
Coolant is chemically inert	Moderately	Yes	Moderately	Moderately	No	Yes		Coolants that are chemically inactive have a safety benefit		
Minimum required cooling time of discharged spent fuel before shipping off-site	Status quo	Lower than LWR because fuel must have higher heat capacity	Similar to LWR	Fuel not shipped off-site	Depends on reactor design and fuel type, expected to be less than or equal to baseline (LWR)					Desire discharged fuel with lower heat-rate and/or higher heat capacity
Color code	Pink-strategies that do not meet each objective			Yellow-strategies that partially meet objective		Green-strategies that meet each objective				

지속가능성, 핵확산저항성, 안전성, 신뢰성 및 경제성을 향상시키는 GEN IV 목표를 달성하기 위해 가장 유망한 6개의 GEN IV 원자로 개념이 기술지도에 추천되어 있다. 또한 이러한 원자로로는 공정열 등의 타 용도 특히, 수소생산 이용을 포함한 전력 생산에서 원자력 에너지의 이용을 확대시킬 잠재력을 갖고 있다. 개량형 GEN IV 원자로 개념은 냉각재로 가스(VHTR; Very High Temperature Reactor, GFR; Gas Fast Reactor), 초임계수(SCWR; Super Critical Water Reactor), 액체 나트륨 금속(SFR; Sodium Fast Reactor), 액체 납 금속(LFR; Lead Fast Reactor) 또는 용융염(MSR; Molten Salt Reactor)을 사용한다. GEN IV 방안들은 기술 준비측면에서 현저하게 차이가 존재한다. 초기 단계의 가스, 나트륨, 용융염 냉각 시험원자로로는 전부터 존재해 왔다. 러시아 잠수함은 납/비스무스 냉각 원자로이다.

원자로의 핵심특성 중 하나는 중성자, 열 또는 고속 에너지이다. 열중성자 원자로로는 핵분열반응을 유지하기 위해 낮은 열중성자 에너지를 이용한다. 열중성자로에서 핵분열반응을 돕는 핵종은 핵분열성물질로 불리는 U-235, Pu-239 및 Pu-241이다. U-235만이 자연에 존재하는 핵분열성 원소이다. 물에 포함된 수소가 핵분열 동안 발생한 고에너지 중성자를 효과적으로 서서히 낮출 수 있기 때문에 이러한 원자로로는 냉각재로 일반적으로 냉각수를 사용한다. 실제적으로 오늘날의 모든 상용 원자로로는 열중성자로이다. 6 가지의 GEN IV 개념 중 2 가지(VHTR과 SCWR)도 열중성자로이다(이에 LWR을 추가하면 열중성자로로는 3 가지가 된다). 원자로 설계와 핵연료 시방은 어떤 핵연료주기 전략을 적용할 것인가에 맞추어 결정한다.

MSR(Molten Salt Reactor)는 열중성자로 또는 고속로로 운영할 수 있다.

6 가지의 GEN IV 개념 중 3가지는 고속로(나트륨, 납, 가스 냉각)이다. 고속로는 고에너지 중성자로 운전되므로 핵분열성(U-235)과 핵원료 원소(U-238) 모두가 핵분열 공정을 지속시킬 잠재력을 갖고 있다. 전환비는 생산되는 새로운 핵분열성 연료의 총량을 소비되는 핵분열성 연료의 총량으로 나누는 것으로 정의된다. 전환비가 1보다 작다는 것(연소로 모드)은 핵분열성 원소가 정량 소멸되는 것을 의미한다. 전환비가 1보다 크다는 것(증식로 모드)은 핵분열성 원소가 정량 생산되는 것을 의미한다. 고속로 개념은 운영 모드 간에 이동할 수 있는 약간의 융통성이 있다. 연소로 모드는 TRU 총량을 감소시키는데 적합하다. 증식로 모드는 새로운 핵분열성 원소를 생산하여 새로운 원자로에 공급할 수 있어 고속로의 성장대열에 적합하다.

향후 시스템 분석연구는 원자로의 다양한 혼합, 전환비 등을 갖는 시나리오의 적절한 상반관계를 분명하게 할 것으로 예상된다.

GEN IV 개념 중에서 원자로 개념의 선정은 직접처분 핵연료주기 고려사항들보다 복잡한 요소들에 달려있다. 예를 들면, 잠재적으로 매우 높은 냉각재 출구온도를 갖는 개념은 수소생산과 같이 공정 열을 더 경제적으로 사용할 수 있게 한다. 또한, 안전성과 신뢰성은 현재와 미래의 원자력 발전에 중요하여 모든 원전은 엄격한 안전 목적과 요건을 지속적으로 만족시켜야 한다. GEN IV 원자로는 더욱 향상된 안전 특성을 추구한다. 개량형 원자로의 설계가 좀더 구체화되면 안전 인자는 향후 원자로 비교에 추가할 수 있다.

소멸처리 방안의 하나는 ADS(Accelerator Driven System)이며, 이 방안은 핵종을 소멸처리하기 위해 다른 방법을 제공한다. 입자가속기로부터 시스템에 가해지는 에너지는(가속기 타겟으로부터 생산되는 중성자에 의해) 핵분열성원소의 저 함유량을 보상한다. 이것은 원자로에서 소멸처리가 어려운 핵종을 소멸처리 하는데 더 많은 융통성을 제공하나 원자로로부터 에너지를 추출하는 것보다 가속기에 에너지를 공급하는 비용이 더 비싼 문제가 있다. ADS는 고속로의 역할을 대체하기 위해 전환기 재순환에 적용할 수 있다. 남아있는 감손플루토늄과 마이너 TRU 원소는 좀더 소멸처리를 하기위해 ADS로 보낼 수 있다. ADS는 주로 유럽과 일본에서 개발 중에 있으며, 저출력 실험은 완료된 바 있고, 몇 가지의 고출력 실증은 설계단계에 있다.

폐기물의 부담을 저감하는 목적 1의 관점에서, 두 가지 인자를 보여주고 있다. 표1은 전환기 또는 지속 재순환이 이러한 목적을 달성하기 위해 중요하다는 것을 보여주기 때문에 핵심 기술적 문제는 각각의 원자로형이 전환기/지속 재순환을 지원할 수 있느냐의 여부에 달려있다. 다른 인자는 원자로에서의 각 순환패스로부터 장기 열부하의 감소이다. 패스당 값은 재순환의 시작에 적용한다. 높은 값은 이익이 더 빨리 생긴다는 것을 의미한다. 혼합 산화물 및 고속로에서 그 값은 추가 재순환 패스를 위해 지속되는 경향이 있다. IMF(inert matrix fuel) 핵연료의 경우, 핵분열성 핵종의 빠른 소멸은 원자로를 통과하는 각 패스에 핵분열성 핵종을 추가해야 하는 것을 의미하므로 패스 당 향상은 이러한 핵종을 어떻게 관리하고 혼합하느냐에 달려있다.

핵확산저항성을 향상시키는 목적 2의 관점에서, 패턴은 목적 1과 유사하다. 예를 들어, TRU 원소의 잠재적인 소멸률을 고려한다. 전환비에 따른 고속로 TRU 소멸률의 민감도를 주목한다. 고 전환비 또는 증식으로 모드는 에너지 회수를 향상시킨다. 저 전환비(예를 들면 0.25)는 TRU 원소의 정량 소멸을 가져온다. 고속로는 수요 변경을 조정할 수 있는 융통성을 갖고 있다. 고속로는 같은 원자로 설계(냉각시스템, 핵심건물 등)에서 전환비를 0.25~1 사이에서 변경이 가능하다. 주 원자로 노심의 내부를 변경해야 할 경우는 많은 비용이 소요된다. 열중성자로는 중성자 밸런스가 불리하기 때문에 1이상의 전환비를 달성할 수 없다.

비록 전체 핵확산저항성에 대한 그들의 중요성을 설명하는 것이 필요하지만 두 가지의 다른 원자로-특성 인자를 언급하는 것이 필요하다. 첫째, 원자로는 핵연료를 온라인(원자로를 운영하면서) 또는 배치(원자로의 운전정지 필요) 방식으로 장전하느냐에 따라 핵확산저항성은 달라진다. 원자로로부터 핵연료의 제거는 원자로의 운영정지를 필요로 하기 때문에 배치공정은 우수한 핵확산저항성을 갖는다. 둘째, 고속로 시스템이 확립될 때 핵무기급 우라늄을 획득할 수 있는 나라에 의해 사용되고 있는 기술인 우라늄 농축이 불필요하다.

에너지지속성을 향상시키는 목적 3의 관점에서, 증식으로 모드로 운영될 때 고속로는 원자로가 소비하는 핵분열성핵종보다 많은 핵분열성핵종이 생산되므로 우라늄 공급을 근본적으로 확대하는 잠재력을 제공한다. 고속로는 모든 천연우라늄(U-235: 0.7%, U-238: 99.3%)을 핵연료로 유용하게 사용할 수 있다.

목적 4의 관점에서, 하나의 주요 차별적인 특성은 출구온도를 최대화할 수 있는 잠재력이다. VHTR 방안은 가장 높은 잠재적인 출구온도를 제공할 수 있는 것으로 나타나서 보다 큰 열효율과 수소생산의 잠재력을 갖고 있다. 반면에 SCWR은 더 알맞은 재료의 도전에 직면하고 있으나, 수동안전특성(passive safety features)을 제공한다.

원자로형의 이상적인 조합을 위한 잠재력을 조사하기 위해 향후 더 많은 연구가 필요하다.

3. 소멸처리 핵연료기술의 비교

표 4에는 기술 성숙도와 AFCI의 목적의 관점에서 몇 개의 소멸처리 기술을 비교하였다. 핵연료는 사실상 원자력발전소, 분리시설, 핵연료가공시설, 영구폐기물처분시설 등 핵연료주기의 다양한 시설과 연계된다. 그러므로 핵연료 방안과 이러한 핵연료주기 시설은 함께 연구하여야 한다. 또한, AFCI 목적에 대비한 핵연료의 자격인증은 사용되는 원자로와 적용된 분리공정 또는 모두를 지정하는 것을 일반적으로 요구한다.

폐기물의 부담을 저감하는 목적 1의 관점에서, 이상적인 핵연료는 고연소도이고, 처분장에서의 장기 열부하를 크게 감소시키며, 전환기/지속 재순환을 지원할 뿐 만 아니라 다양한 원자로형에서 사용할 수 있는 핵연료이다. LWR용 혼합 우라늄 + TRU 산화물 핵연료(또는 VHTR용 TRISO 핵연료)는 장기 열부하 감소의 관점에서 비교적 불충분하다. LWR용 TRU 핵연료(우라늄 없음)도 전환기/지속 재순환 지원의 관점에서 비교적 불충분하다. 고속로만을 위한 고속로 핵연료(금속, 질화물, 산화물, 분산)를 개발 중에 있다.

핵확산저항성을 향상시키는 목적 2의 관점에서, 표는 TRU 원소를 가장 잘 소멸시키는 핵연료(IMF 핵연료, 고속로 핵연료)는 핵무기 가용 재고량을 가장 잘 감소시키는 동일한 핵연료임을 보여주고 있다.

에너지지속성을 향상시키는 목적 3의 관점에서, 어떤 핵연료(Am 타킷의 특별한 경우 제외)도 사용후핵연료로부터 회수한 TRU 원소를 사용할 수 있다. 그러나 고속로 핵연료만이 감손우라늄으로부터 에너지를 회수할 수 있다.

목적 4에 대비한 핵연료 성능을 평가하기 위해서는 일반적으로 원자로형과 설계 시방을 필요로 한다.

Table 4. Comparison of Transmutation Fuel Technologies(1/5)

Transmutation Fuel Option	Transuratic mixed oxide fuel	Inert matrix fuel with transuranics	Americium targets	TRISO with transuranics (carbide, oxycarbide)	Metal (fast reactor fuel)	Nitride (fast reactor fuel)	Oxide (fast reactor fuel)	General Dispersion CERCER CERMET	Comment
Strategies Supported									
Once through	----	----	----	----	----	----	----	----	
Limited recycle	Yes	Yes	Yes			----		Yes	Green=Yes White=see details Pink=No
Transitional recycle	Yes	Yes	Yes		Yes, for the fast reactor component (if any)			Yes	
Sustained recycle	Yes, for the thermal reactor component (if any)			Yes		Yes		Yes	
Compatible Separation Options									
Aqueous processing. e.g., UREX+	Yes	Yes		Requires grind-leach first step	----	Yes	Yes	Yes	Green=Yes White=see details Pink=No
Pyroprocess	Partial	----	----	Yes	Yes	Yes	Partial	----	

Table 4. Comparison of Transmutation Fuel Technologies(2/6)

Transmutation Fuel Option	Transuranic mixed oxide fuel	Inert matrix fuel with transuranics	Americium targets	TRISO with transuranics (carbide, oxycarbide)	Metal (fast reactor fuel)	Nitride (fast reactor fuel)	Oxide reactor (fast reactor fuel)	General Dispersion CERCER CERMET	Comment
Compatible Reactor Options									
Light Water Reactor (LWR)		Yes		---		---		Yes	
Very High Temperature Reactor (VHTR)		Yes		Yes		---		---	Thermal reactor options
Supercritical Water Reactor		Yes		---		---		---	
Sodium Fast Reactor	Yes	---	---	---		Yes		Yes	Fast reactor options
Lead Fast Reactor		---		---		Yes		Yes	
Gas Fast Reactor Accelerator Driven System		---		Yes	---	Yes	Yes	Yes	
		---		---		Yes		---	
Status									
Technology Readiness Level	Concept development	Concept development	Ready to start proof of principle	Ready to start proof of principle	Early proof of principle		Concept development		See definitions and color code in text
Experience with uranium	Extensive	Not applicable (no uranium)		Extensive	Some		Some		Confidence increases as the fraction of Np-Am-Cm in fuel decreases.
Experience with plutonium	Some	Little	Not applicable	Some	Extensive	Little	Some		
Experience with Np, Am, Cm	Little	Little	Some	Little	Some		Little		

Table 4. Comparison of Transmutation Fuel Technologies(3/6)

Transmutation Fuel Option	Transuranic mixed oxide fuel	Inert matrix fuel with transuranics	Americium targets	TRISO with transuranics (carbide, oxycarbide)	Metal (fast reactor fuel)	Nitride (fast reactor fuel)	Oxide (fast reactor fuel)	General Dispersion CERCER CERMET	Comment
Objective 1. Reduce the long-term environmental burden of nuclear energy through more efficient disposal of waste materials.									
Allows recycle of transuranic elements	Yes, but inefficient (uranium produces more transuranics)	Yes, efficient (no uranium to produce more transuranics)	For americium only	Yes, efficient	Yes, very efficient	Yes, very efficient	Yes, very efficient	Potentially yes, but an effective matrix material has not been decided yet.	Transuranic isotopes typically dominate repository long-term heat and estimated dose.
	Yes	Depends on matrix material	Yes	If recycling is needed, materials and technology must be developed and tested					
Suitable form for repeated recycling	Yes	Depends on matrix material	Yes	1.5-1.8 without uranium	1.5-1.8 without uranium	1.5-1.8 without uranium	1.5	Potentially yes, but an effective matrix material has not been decided yet.	The higher the better.
	1.0-1.2	1.5-1.8	Should be high	1.0-1.2 without uranium					
Reduction of long-term heat load per fuel pass through reactor	1.0-1.2	1.5-1.8	Should be high	1.0-1.2 without uranium	1.5-1.8 without uranium	1.5-1.8 without uranium	1.5	Potentially yes, but an effective matrix material has not been decided yet.	The higher the better.

Table 4. Comparison of Transmutation Fuel Technologies(4/6)

Transmutation Fuel Option	Transuranic mixed oxide fuel	Inert matrix fuel with transuranics	Americium targets	TRISO with transuranics (carbide, oxycarbide)	Metal (fast reactor fuel)	Nitride (fast reactor fuel)	Oxide (fast reactor fuel)	General Dispersion CERCER CERMET	Comment
Maximum expected burn-up (MW-day per kg of initial heavy metal)	50-100	550	Not applicable	Stable fuel for very high burnup	250	500	Stable fuel for very high burnup		Higher burnup decreases the waste volume and mass generated per MW-day.
Suitable waste form if not recycled	Same as baseline (uranium oxide fuel)	Depends on matrix material	Yes, probably better waste form than baseline						Important if wish to stop recycling so that used fuel could be sent directly to a repository.
Objective 2. Enhance overall nuclear fuel cycle proliferation resistance via improved technologies for spent fuel management.									
Reduces weapons-usable inventory	Yes, but inefficient	Yes, efficient	Efficient for americium			Yes, efficient			Pattern similar to recycling of transuranics (objective 1)

Table 4. Comparison of Transmutation Fuel Technologies(5/6)

Transmutation Fuel Option	Transuranic mixed oxide fuel	Inert matrix fuel with transuranics	Americium targets	TRISO with transuranics (carbide, oxycarbide)	Metal (fast reactor fuel)	Nitride (fast reactor fuel)	Oxide (fast reactor fuel)	General Dispersion CERCER CERMET	Comment
Objective 3. Enhance energy security by extracting energy recoverable in spent fuel and depleted uranium, ensuring that uranium resources do not become a limiting factor for nuclear power.									
Enable energy recovery from legacy spent fuel		Yes	Can only recover the energy in americium			Yes			
Enable energy recovery from depleted uranium?	No, but see fast reactor analog		No			Yes			
Objective 4. Improve fuel cycle management, while continuing competitive fuel cycle economics and excellent safety performance of the entire nuclear fuel cycle system.									
Assists in continuing competitive nuclear energy economics?	<p>Depends on the system in which the technology is used . see Table 1.</p> <p>Key issue is the incremental costs relative to existing once-through, PUREX separation, and Pu-mixed oxide fabrication.</p>								

Table 4. Comparison of Transmutation Fuel Technologies(6/6)

Transmutation Fuel Option	Transuranic mixed oxide fuel	Inert matrix fuel with transuranics	Americium targets	TRISO with transuranics (carbide, oxycarbide)	Metal (fast reactor fuel)	Nitride (fast reactor fuel)	Oxide (fast reactor fuel)	General Dispersion CERCER CERMET	Comment
Objective 4. Improve fuel cycle management, while continuing competitive fuel cycle economics and excellent safety performance of the entire nuclear fuel cycle system.									
Assists in continuing excellent safety performance	All power, separation, and fuel plants will meet rigorous safety objectives and requirements.								
Requires wet storage of discharged fuel	Yes		Likely	No		Depends on reactor type and design, but generally wet storage not expected.			Wet fuel storage has higher vulnerability to contaminate water than dry storage.
Minimum required cooling time of discharged spent fuel before shipping off-site	Baseline (5years)		Likely same or higher than baseline	Likely lower (faster) than baseline		Depends on reactor type and design, but expected to be less than or equal to baseline.			Desire discharged fuel with lower heat-rate and/or heat capacity
Color code	Pink=strategies that do not meet each objective			Yellow=strategies that partially meet objective			Green=strategies that meet each objective		

제 4 장 핵연료주기 방안의 연구현황

본 장에서는 원자력에너지가 미래에도 지속가능하도록 지원하는 AFCI의 중요한 성과를 기술한다. 이 프로그램의 중요한 업적은 재순환 핵연료주기를 지향하게 해서 안전하고, 신뢰할 수 있고, 환경친화적인 에너지 자원을 보장하는데 있다. AFCI 연구는 시스템분석, 분리, 소멸처리 및 핵연료의 4개 기술 분야로 구성되며, 표 1~4에 나타낸 바와 같다. 대학 공동연구의 두드러진 성과도 기술한다. 본 장의 마지막 부분에는 계획된 향후 주요 이정표에 대해서도 기술한다.

1. 시스템 분석

시스템 분석은 프로그램 기술 분야들을 중개 및 통합하고, 설계와 전개방안의 타당성 분석에 필요한 모델, 도구 및 분석을 제공할 뿐 아니라 핵심 결정권자에게 정보를 제공한다. 시스템분석 연구는 GEN IV 프로그램과 공동으로 수행된다. 주요 성과는 다음과 같다.

- 본 보고서 및 다른 보고서에 개략적으로 묘사한 바와 같이 AFCI 목적의 범위를 분명하고 일목요연하게 정리하였다.
- 본 보고서 및 다른 보고서에 개략적으로 묘사한 바와 같이 목적의 범위에 대비하여 방안의 범위를 평가하였다.
- 수요가 발생한다면 기술을 단계적으로 축소하고 잠재적인 퇴장 또는 전환 접근방법 뿐 아니라 원자로의 상이한 조합 관계 및 다른 기술의 전개 영향을 조사하였다.
- LWR 및 가스 냉각로에서 플루토늄 연소도 증가, LWR에서 다른 TRU 소멸처리 가능성, 고속로 및 ADS(accelerator driven system)에서 TRU의 소멸을 포함한 소멸처리를 다루는 다양한 원자로 시스템의 능력을 평가하였다.
- 추가 심지층 처분장의 수요를 감소시키고, 제1 처분장을 보다 효율적으로 사용할 수 있는 개량형 핵연료주기의 이점을 평가하였다.
- 기반시설 요건을 정량화하고, 대안 간의 핵심 상반관계(trade-offs)를 도출하고, 하나의 원자로형에서 다른 원자로형으로 이동의 영향을 조사하기 위해 핵연료주기의 동적 시뮬레이션을 수행하였다.

- 다양한 핵연료주기, 원자로 시설요건 및 경제성 등을 비교하며 부피, 중량 및 열부하와 같은 처분장 특성을 평가하였다.

2. 분리

AFCI 분리연구는 단기적인 핵연료주기와 향후의 GEN IV 시스템 모두에 초점을 맞추고 있다. AFCI 분리연구는 개량형 습식처리와 건식 기술 모두를 포함한다. 개량형 습식처리는 UREX+ 공정에 초점을 맞추고, 건식처리는 열화학처리 전기야금학 기술(pyroprocessing electrometallurgical technique)에 초점을 맞춘다. 중요한 성취도는 다음과 같다.

- 실험실규모 UREX+ 실증 : UREX+ 공정은 상용 LWR 사용후핵연료의 처리를 위해 개발되고 있는 개량형 습식 용매추출공정이다. 또한, 이 공정은 일부 GEN IV 원자로 핵연료를 처리하기 위한 후보공정이다. 조사핵연료를 사용하여 실험실규모 다단계 분리를 실증하였다. UREX+ 공정의 핵심개선을 수행 중에 있으며, 모든 필요한 단계는 실험실규모로 연구하고 있다.
 - UREX : AFCI는 미국의 천층처분 기준 이하로 우라늄을 분리하여 처분할 수 있는 충분한 순도를 가진 우라늄의 실험실규모 분리를 실증하였다.
 - UREX+ 용매추출 실험(Hot Test) : 방사성물질을 사용하여 U/Pu/Np 공분리 공정의 실험실규모 실증을 완료하였다. 이 공정은 플루토늄 자체의 분리는 배제한다.
 - Am/Cm 분리 : 이러한 핵종의 UREX+ 그룹 분리시험을 실험실규모로 실증하였다.
 - 악티나이드 결정화 공정(Actinide Crystallization Process) : 악티나이드는 우라늄과 TRU를 포함한다. 이 공정은 UREX+ 추출 전의 우라늄 분리를 위한 전처리공정으로 처리하는 액체의 양을 크게 줄일 수 있다. 벤치규모 시험을 완료하였고, 실제규모 장치에 적용할 수 있는 데이터를 획득하기 위해 충분한 사이즈의 결정화장치를 제작 중에 있다.
 - 개량형 U/TRU 회수 : 운전 파라메타의 정의와 상용규모 전기분해 셀의 설계개념을 고려한 향후 효과를 반영한 완전히 통합된 전기분해장치의 운전을 성공적으로 수행하였다.
 - Cs/Sr 추출공정 개발 : 용매추출을 기반으로 한 CCD/PEG(chlorinated

cobalt dicarbollide /polyethylene glycol) 공정을 이용한 Cs과 Sr 분리 공정의 실험실 규모 실증을 완료하였다. 대안공정(calixarene/crown ether solvent process))의 실험실 규모 실증도 착수하여 초기의 예상결과를 얻었다.

- Tc/I 분리 : Tc/I과 같은 장수명 핵분열생성물 분리공정의 실험실규모 실증도 완료하였다.
- PYROX 공정 개발 : GEN IV 산화물핵연료의 처리를 위한 PYROX (pyrochemical reduction) 공정을 개발 중에 있다. 고용량 환원실험과 셀 설계 개선도 완료하였다.
- 열화학처리 실증 : 열화학처리는 금속핵연료를 위한 개량형 전기화학적 분리 기술이다. 또한 이 기술은 다른 GEN IV 핵연료 처리를 위한 후보기술이다.
 - EBR-II(Experimental Breeder Reactor-II) 핵연료의 EMT(Electro-metallurgical Treatment) : 기존의 EBR-II 구동핵연료는 나트륨 원소를 함유하고 있어 직접 심지층 처분에 부적합하다. 실험실규모보다 큰 159 kg/yr의 처리율을 달성하였다.
 - 표 2에 나타낸 바와 같이 TRU 원소 간의 분리는 실증하지 못했고, 이것은 아마도 불가능할 것으로 예상된다.
 - 표 2에 나타낸 바와 같이 Cs과 Sr의 분리는 아직 실증하지 못했다.
 - Tc/I 분리 : Tc/I과 같은 장수명 핵분열생성물 분리공정의 실험실규모 실증도 완료하였다.
- 새로운 공학적 생산물의 저장 및 처분 : AFCI 시나리오에서 다양한 물질을 장기 저장하거나 영구처분해야 한다.
 - Cs/Sr의 경우, 적합한 저장 컨테이너와 함께 유리화 제올라이트를 기반으로 한 폐기물 형태를 분석하고 있다.
 - Am/Cm의 경우, Pu-Np와 함께 저장은 매력적인 것으로 나타났지만 순수한 Cm은 가공의 난제 때문에 어려움이 있다.
 - 잔류 고준위폐기물의 경우, 실험실규모 시험은 퇴화거동의 특성화, 처분장 조건에서 장기 퇴화거동을 계산하는 모델 개발 및 모델 적용성의 확증에 의해 세라믹 폐기물형태의 자격인증을 지원한다.

3. 소멸처리

소멸처리는 원자력물질의 관리 및 폐기물처분의 난제에 큰 영향을 미치는 사용 후핵연료 내에 존재하는 핵종을 감소시키기 위해 중성자 유도 핵분열 또는 흡수를 통해 하나의 핵종을 다른 핵종으로 변환시키는 공정이다. 핵종변환은 LWR, GEN IV 열중성자로, 고속로, ADS 또는 이러한 시스템의 최적화된 조합에서 발생한다. 핵종변환 연구는 개량형 핵연료 및 냉각재와 관련된 재료문제도 다룬다. 주요 연구 성과는 다음과 같다.

- TRU 원소의 단면적(Cross-Section) 측정 : 핵분열과 흡수 단면적의 정확한 측정은 핵종변환 계산 및 소멸처리 핵연료 개발을 지원하기 위해 필요하다. Np-237 핵분열 단면적 데이터를 갱신하였다.
- DELTA 루프 부식시험 : 기술개발은 납-비스무스 시험루프에 집중하고 있으며, 대형 매트릭스 재료에 대해 550 °C까지의 온도에서 1,000시간 부식시험을 완료하였다. 시험시편의 분석은 부식의 완화에 있어서 산소제어와 안정한 보호 산화막을 형성하여 부식저항을 강화시키는 Si 및 Cr 합금의 적용 효력을 보여주었다.
- 조사손상 모델링 : 원자로와 핵연료 재료에 대한 조사손상의 이해를 향상시키기 위해 조사손상 모델을 개발하고 있다. 결함이동, 헬륨이동 및 헬륨포집의 특성화는 방사성-유도 점 결함을 묘사하기 위한 확률론적 3차원 코드를 개발하는데 이용되고 있다.
- TRADE(TRIGA Accelerator-Driven Experiment) : 계획된 TRADE 선원 증식실험을 성공적으로 완료하였다. 몇 개의 TRADE 배치에 대한 미임계 기준을 계산하고 실험결과와 비교하였다.

4. 핵연료

AFCI 핵연료 개발은 LWR용 핵확산저항성 핵연료, GEN IV 원자로용 TRU 소멸처리 핵연료, GEN IV 고속로용 모든 핵연료를 포함한다. 주요 성과는 다음과 같다.

- MOX(Mixed Oxide) 핵연료 : TRU의 열 스펙트럼 연소를 실증하기 위해 LWR용 혼합산화물 핵연료(U, Pu, Np)를 개발 중에 있다.
- FUTURIX 공동연구 : FUTURIX는 Pu, Np와 Am를 함유한 질화물 및 금

속핵연료를 미국에서 제조하고, 독일에서 집합체를 만들고, 프랑스에서 조사 시험을 수행한 후 최종적으로 미국으로 보내 조사후시험과 분리시험을 수행하는 공동실험이다.

- 금속핵연료 : 금속핵연료 연구는 차기연도에 대규모 핵연료 제조공정을 개발하기 위한 기준을 제공하는 작은 샘플 제조로부터 경험을 획득하며, 조사시험을 위해 잘 특성화된 미세구조의 작은 샘플을 제조하는데 초점을 맞추고 있다.
- 질화물 핵연료 : 고연소도이고, 원격 환경에서 쉽게 제조가 가능하고, 정상상태 및 비정상상태 사건동안 온화한 거동을 갖는 질화물핵연료를 개발 중에 있다.
- ATR(Advanced Test Reactor) 조사시험 : 핵연료 캡슐의 진행시험으로부터의 조사 성능시험 데이터는 핵연료의 복잡한 거동 모델을 개발하기 위해 노물리, 열 및 화학성분 데이터와 조합된다.

5. 대학 공동연구

AFCI 프로그램은 대학의 연구를 지원하고, 원자력공학을 전공하는 학생들에게 장학금을 지급한다. AFCI는 다수의 대학연구를 직접지원하고 있고, 다음과 같은 대학프로그램에 자금을 지원한다.

- 라스베가스 네바다 대학의 개량형 방사화학, 재료 및 소멸처리기술 프로그램
- 아이다호 가속기 센터의 원자력 및 방사선 과학에 입자 가속기를 이용한 연구 및 교육 시설
- 소멸처리 연구 및 기술개발 관련학과에 재학 중인 학생을 지원하는 협력프로그램을 관리하는 대학연구동맹

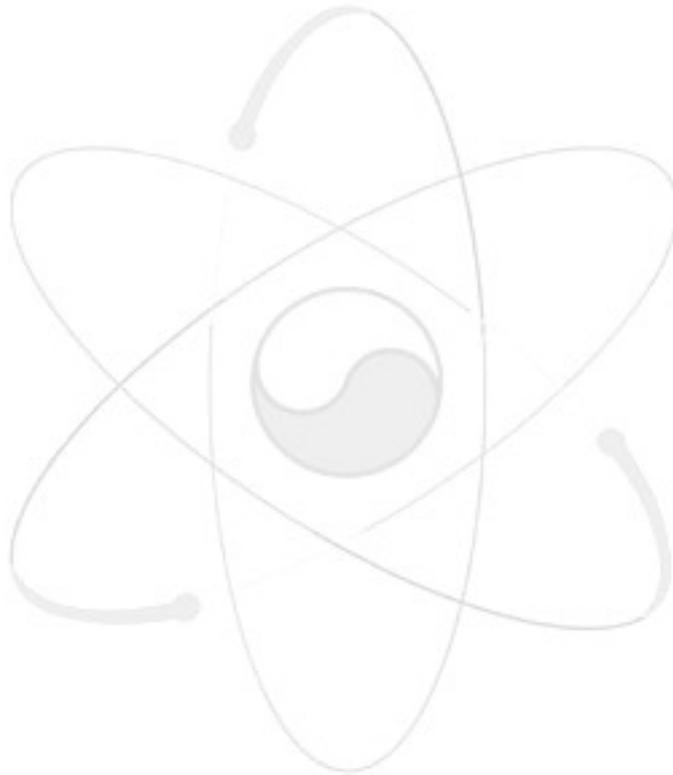
6. 향후 목표

AFCI 프로그램은 GEN IV에 적용하는 개량형 핵연료 및 핵연료주기를 지원하고, 제2 처분장의 기술적 수요에 대해 2007~2010년에 의회에 제출하는 에너지부 보고서에 정보를 제공하는 데 연구개발의 초점을 맞추고 있다. 향후 10년간 AFCI 프로그램의 주요 목표는 다음과 같다.

- 2008 : 제2 처분장의 기술적 수요에 대해 의회에 제출하는 에너지부 보고서

를 지원하기 위해 엔지니어링 데이터 및 분석을 제공한다.

- 2010 : 가용한 핵연료주기방안과 실행기술을 정량적으로 정의하고, 안정하고 장기적인 개량형 핵연료주기로 발전할 수 있는 핵연료주기 기술을 개발한다.
- 2015 : 원자력 폐기물관리를 위한 최적방안을 추천하는 엔지니어링 데이터를 제공하고, 단기적인 실행을 시작하기 위한 충분한 정보를 획득한다.
- 2015 : GEN IV 기술을 구체화하는 개량형 핵연료주기의 최적안을 추천할 수 있도록 엔지니어링 데이터 및 분석을 제공한다.



제 5 장 요약

핵연료주기 전략과 기술의 선정과 최적화는 복잡한 작업이다. 본 장의 요약은 다음과 같이 3개의 절로 나누어 기술한다.

- 우선 3가지 목적(폐기물관리, 핵확산저항성, 에너지 지속가능성)을 만족시키기 위해 필요한 것
- 네 번째 목적(경제성, 안전성, 시스템관리)을 만족시키기 위해 필요한 것
- 현재 상황으로부터 다양한 핵연료주기 전략으로 전진하기 위해 필요한 것

폐기물관리, 핵확산저항성 및 에너지 지속가능성

직접처분 핵연료주기는 우선 세가지 AFCI의 목적을 크게 개선시킬 수 없다. 최선의 경우인 고연소도 핵연료를 사용하는 경우에도 심지층 처분장의 수요 및 에너지 지속가능성을 20% 밖에 향상시키지 못한다. 매년 증가율을 0%, 1.8% 및 3.2%로 가정하고 각각의 처분장의 용량을 70,000 MTU라고 가정할 때 금세기 말까지 4~20개의 심지층 처분장이 필요하다. 직접처분 핵연료주기에서 미국의 기술향상은 지난 25년의 경험에 의하면 플루토늄의 국제적 재순환을 억제하지 못하고, 우라늄 농축의 수요가 존재하기 때문에 핵확산 저항성을 약간 향상시키거나 또는 거의 향상시킬 수 없다(우라늄 농축의 수요는 고연소도 핵연료의 사용으로 인해 실질적으로 약간 증가한다).

제한 재순환, 전환기 재순환, 지속 재순환의 재순환 전략으로 진척되었을 때 폐기물관리, 핵확산저항성 및 에너지 지속가능성에 대한 AFCI 목표는 만족도가 증가한다. 네 개의 주요 구분점(breakpoint)이 있다.

- 제한 재순환은 핵무기 가용물질의 감소가 시작되고, 미래 심지층 처분장, 폐기물관리 및 에너지 지속가능성에 대해 적어도 직접처분 핵연료주기에서의 고연소도 핵연료를 적용한 만큼의 향상을 가져오기 시작한다.
- 전환기 재순환은 처분장 공간이 원자력에너지를 제한하지 않는다는 것을 보장하며 다음 세기까지 제2 처분장의 수요를 배제하는 AFCI의 핵심 목적을

달성하게 한다. 또한 제한 재순환은 TRU 원소를 폐기물관리 부담에서 에너지 자원 자산으로 전환시킨다.

- 지속 재순환은 농축(감손우라늄) 및 사용후핵연료 모두로부터 발생하는 폐기물을 부담으로부터 에너지 자원 자산으로 전환한다. 우라늄 원광이 함유한 에너지의 99%이상을 사용하도록 해서 우라늄이 원자력에너지의 제한인자가 되지 않도록 보장한다.

경제성, 안전성 및 시스템관리

경제성과 관련해서 다음과 같은 3 가지의 불확실성이 존재한다.

- 직접처분 및 제한 재순환 전략을 적용할 경우에 대한 미래 심지층 처분장의 비용 및 방안이 불확실하다.
- GEN IV 고속로의 비용도 잘 알려져 있지 않아 연구 중에 있다. 고속로는 지속 재순환에서 중요하다. 전환기 재순환을 위해서도 고속로가 필요하나, 고속로는 전체 원자로의 10~20%로 제한되므로 전체비용에는 큰 영향을 미치지 않는다.
- 새로운 재순환 핵연료 및 관련 분리시설의 비용도 불확실하며, 이러한 비용에 대해 연구 중에 있다. 표 1에는 다양한 경향을 나타내었다. 단지 열중성자로만을 이용한 전환기 재순환의 접근방법은 비교적 경제적인 불확실성은 적으나 이러한 접근방법은 중요한 기술적 난제가 아니다.

안전성과 관련해서 다음과 같은 2 가지의 불확실성이 존재한다.

- 새로운 원자로형의 안전성은 실증되어야 한다.
- 원자로 안전성능에 대한 새로운 핵연료의 영향은 보증되어야 한다.

기술이 가용할 때 재순환 전략의 모두는 발전소로부터 사용후핵연료의 제거를 가속시키는 잠재력이 있다.

기 타

현재 운영 중인 방안을 제외한 모든 방안은 연구개발을 필요로 한다.

표1의 기술성숙도 열을 참조한다. 연구개발에서 얻어지는 이득은 축적된다. 거의 예외없이 실증되고 전개되는 각각의 새로운 기술은 만약 추가기술이 가용해진다면 나중에 이득을 제공한다.

- 재순환 TRU 혼합산화물 및 재순환 TRU IMF(inert matrix fuel) 핵연료는 제한 재순환에 이익을 제공(심지어 재순환이 더 진척되지 않아도)하기 시작할 뿐 만 아니라 전환기 재순환에도 이익을 제공한다. 지속 재순환이 적용되면 이러한 핵연료는 사용되지 않는다.
- UREX+는 제한 재순환, 전환기 재순환 및 아마도 지속 재순환(지속재순환에 적용되는 핵연료에 따라)에도 적용될 수 있다.
- 개량형 열중성자로와 관련 핵연료는 핵연료를 재순환할 수 있다면 핵연료주기에 악영향을 미치지 않는다.
- 고속로와 관련핵연료의 이행은 전환기 재순환을 더 용이하게 하고(고속로는 Cm의 문제가 없으므로) 지속 재순환을 가능하게 한다.
- 전환기 또는 지속 재순환에 적용할 수 없는 제한 재순환에만 잠재적으로 적용 가능한 기술은 IMF(inert matrix fuel)의 비순환 형태와 같은 새로운 비순환 핵연료이다.

표1에서 오른쪽으로 갈수록 더 개량화된 핵연료주기 전략의 달성에 의해 더 큰 이득을 얻을 수 있지만 이러한 방안의 기술성숙도는 일반적으로 덜 성숙되어있다. 필요한 기술의 대부분은 개념개발 및 원리입증 단계에 있다. 이러한 단계에서 대부분의 연구는 벤치규모이므로 비교적 비용이 많이 소요되지 않는다. 기술을 실용화하고 개량형 핵연료주기를 달성하기 전에 전형적인 규모증대 연구와 엔지니어링을 통한 성능입증 연구를 거쳐 기술성숙도를 높여야 한다.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서 번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-3073/2005			
제목 / 부제	미국의 개량형 핵연료주기 방안 2005년도 비교보고서		
주저자	이호희(건설교통부핵연료기술개발부)		
연구자 및 부서명	박장진(건설교통부핵연료기술개발부), 신진명(“), 양명승(”), 서중석(사용후핵연료기술개발부)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	62 p.	도 표	있음(V), 없음()
발행년월	2005. 11.	크 기	26 cm.
참고사항			
비밀여부	공개(V), 대외비(), __ 급비밀	보고서종류	기술보고서
연구위탁기관		계약 번호	
초록 (300단어내외)			
<p>우리나라뿐만 아니라 미국을 비롯한 원자력 선진국들은 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 관리에 따른 문제점을 줄일 수 있는 개량형 원자력기술을 찾기 위해 노력하고 있다. 이러한 연구의 일환으로 미국은 사용후핵연료의 부피 감용, 장반감기 및 고독성 원소의 분리와 사용후핵연료를 자원으로 재활용의 3가지 기본요건을 충족시키면서 안전성, 경제성, 환경친화성 및 핵확산저항성을 갖는 핵연료주기에 대한 연구의 일환으로 AFCI 프로그램을 수행하고 있다. 본 보고서에서는 2005년 5월 미국 DOE에서 발간한 “Advanced Fuel Cycle Initiative Comparison Report, FY 2005” 보고서의 주요 부분을 발췌하여 작성하였다.</p>			
주제명키워드 (10단어내외)	개량형 핵연료주기, 사용후핵연료, 소멸처리, 사용후핵연료 재활용, 핵연료주기		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-3073 /2005					
Title /Subtitle	Advanced Fuel Cycle Initiative Comparison Report, FY 2005				
Project Manager and Department	H. H. Lee(Dry Process Fuel Technology Development)				
Researcher and Department	J. J. Park(Dry Process Fuel Technology Development), J. M, Shin(""), M. S. Yang(""), C. S. Seo(Spent Fuel Technology Development)				
Publicatio n Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publicatio n Date	2005. 11.
Page	62 p.	Ill. & Tab.	Yes(V), No ()	Size	26 cm.
Note					
Classified	Open(V), Restricted(), - Class		Report Type	Technical Report	
Sponsorin g Org.			Contract No.		
Abstract					
<p>Not only Korea but also the nuclear advanced countries like USA are endeavoring to develop an advanced nuclear technology which enables us to handle the problems caused by the management of the spent fuel. As a part of this endeavor, USA is conducting a research under the AFCI program to develop a safe and economic fuel cycle satisfying environmental affinity and non-proliferation policy as well as 3 basic requirements of volume reduction, separation of long-lived and toxic nuclides and reuse of spent fuel as a natural resources. This report is prepared based on the "Advanced Fuel Cycle Initiative Comparison Report, FY 2005" published on the May of 2005, by DOE of USA.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)	advanced nuclear fuel cycle, AFCI, spent fuel, reuse of spent fuel, transmutation				