

2000 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

핵변환 시스템의 현황과 전망

- 기술성, 경제성, 환경친화성 및 수용성을 중심으로 -

Current Status and Prospect of Partitioning and Transmutation

- Challenge on technology, Economics, Environmental Impact, and Acceptability-

황 용수, 이 연명, 강 철형

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

고준위 방사성폐기물을 소멸 처리하기 위한 연구는 70년대부터 진행되어 왔다 최근 국내에서도 활발히 연구되고 있는 PNT 핵연료주기에 대한 기술성, 경제성, 환경친화성, 수용성 측면의 현안들을 조명하여 에너지 자원 확보와 고준위 방사성폐기물 저감을 목표로 추진 중인 PNT 연구의 향후 개발 방향을 제시하고자 하였다. 분석 결과 PNT 핵연료주기 연구를 활성화하기 위해서는 환경 친화성에 관한 자세한 분석과 전체 핵연료주기 측면에서의 경제성 및 시설에 대한 해당 지역 주민들과 국제 사회의 수용성 향상을 위한 노력이 필요하며 이를 위해서는 우선 핵변환 시설에 대한 개념 설계 연구가 수행되어 보다 정확한 기술성, 경제성, 환경친화성을 평가할 수 있는 기본 자료들이 도출되어야겠다.

Summary

Basic R&D on the PNT fuel cycle aiming at burning HLW up has been pursued since 70's. In this paper, feasibility of PNT technology, economics, environmental aspect, and acceptability are reviewed to steer up the future R&D directions. Results show that it is important to quantify the environmental benefit of the PNT cycle through a sensitivity study. In addition, the economy of the whole PNT system including storage of solidified residual wastes and local and international acceptability turn out to be critical issues. To answer these the basic R&D to accomplish the conceptual design of the system is needed to make sure whether the proposed system is good for not only energy security but also commercial electricity generation.

1. 서론

현재 국내에는 가속기와 미임계형 원자로를 함께 사용하는 핵변환 시스템(이하 ADS)과 임계형 원자로와 같은 2 종류의 핵변환 시스템이 한국원자력연구소 등을 중심으로 개발되고 있다. 이러한 연구는 현재 개념 개발 단계에 머물고 있으며 세계적으로도 핵변환 연구 시스템은 개념적 수준에서 접근되고 있다.

핵변환이 성공적으로 수행되기 위해서는 초우라늄 계열 원소(이하 TRU)들과 핵분열 생성 물질(이하 FP)들을 분리 정제하는 기술이 요구되는데 이와 같은 분리 기술은 습식과 건식 분리 기술로 대별된다. 현재 습식 분리 기술은 핵확산방지조약(이하 NPT)과 관련하여 개발에 제약이 많아 국내에서는 고온 야금법(이하 pyro-processing)이나 전기 정제법(electro-refining)등의 건식분리법이 연구되고 있다. 특히 플루토늄과 우라늄 등을 따로 분리하지 않는 군분리법(group separation)은 핵비확산성이 우수한 것으로 판명되고 있다.

핵변환 시스템은 기본적으로 사용후핵연료에서 발생하는 TRU, FP, 희토류(rare earth) 등을 99% 이상 군분리를 통하여 회수한 다음 여기서 발생하는 잔여 방사성폐기물을 포집하여 일정 기간 저장한 후 지층 처분함을 목적으로 하고 있다. 특히 임계로의 경우에는 발생한 방사성 핵종들을 미국 NRC 저준위 방사성폐기물 분류 기준 이하 준위로 희석한 다음 모든 방사성폐기물을 천층처분(land disposal)하는 것을 목표로 하고 있다. 연료에 포함된 방사성 핵종들은 임계로 혹은 미임계로와 ADS에 의해 연소되는데 현재 개념적 수준에서는 TRU와 FP의 약 30% 정도가 핵연료 주기 당 소멸될 수 있으며 ADS 방안에서는 FP의 연소율을 향상시키기 위하여 대전류 가속기를 사용할 예정이다.

핵변환 시스템은 현세대가 사용한 고준위 방사성폐기물에 대한 후세대의 부담을 최소화하고 자원을 재활용하여 전력을 생산한다는 점에 있어서 이상적이라고 할 수 있다. 그러나 현재까지 가속기 개발, 새로운 연료 사용에 따른 노심 특성 등과 같은 기술성, 실질적인 환경 친화성과 경제성, 그리고 재활용에 따른 국제 사회의 수용성 등 많은 문제를 안고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 핵변환 시스템 장단점을 보다 자세히 분석하여 향후 연구 방향 설정에 기여하고자 한다.

2. 핵변환 시스템의 현안

본 절에서는 현재 개념 연구가 진행 중인 핵변환 시스템의 현안에 대해 논의하기로 하겠다. 핵변환 시스템의 장점은 무엇보다도 현세대가 원자력발전으로 향유한 값싼 에너지 지원 사용의 부산물인 방사성폐기물에 대한 부담감을 후세대로 전가하는 것을 최소화한다는 윤리적인 점이다. 우리 나라를 포함한 많은 나라들이 고준위 방사성폐기물 영구 처분은 물론 중저준위 방사성폐기물 처분에도 많은 어려움을 겪고 있다. 따라서 방사성폐기

물의 발생량을 경감하는 시스템은 방사성폐기물 처분에 대한 국민 수용성을 증진시키고 처분 비용을 줄임으로서 원자력발전 전반에 대한 신뢰감을 향상시키는데 기여할 것으로 판단된다. 또한 방사성폐기물을 재활용하여 전력을 생산하는 현재의 개념은 우리 나라와 같은 자원 빈국의 입장에서는 매우 고무적인 일이다.

(1) 기술적 개선

ADS 시스템의 기술적 난제는 대전류 양자 가속기 개발에 있다. 최근 미국과 일본 등에서 100 mA급 대전류 양자 가속기가 개발되고 있다. 그러나 ADS가 핵물질을 연소하고 발전을 하기 위해서는 많은 난제들이 남아있다. 우선 가속기가 pulse 형이 아닌 상시 출력으로 100 mA, GV 급 출력을 발생하기 위해서는 디자인, 재료, 운영 측면 등에서 해결해야 할 문제들이 있다.

또한 현재 제안대로 ADS와 임계로가 고준위 방사성폐기물을 발생하기 않는 무한 순환 주기 목표를 달성하기 위해서는 이를 뒷받침할 세부 공정 개념 개발 및 재료적 측면에서의 건전성 규명 등 많은 기술적 난제들을 해결해야 할 것이다. 또한 이차 방사성폐기물의 발생을 막기 위해 전기 정련 시스템을 개발하여야 한다. 만일 이러한 점이 기술적으로 뒷받침되지 않으면 핵변환 시스템은 다른 종류의 고준위, 중저준위 폐기물을 양산하게 될 것이다.

또한 표 1과 같이 전기 정련 과정에서 TRU, FP 등의 회수율 달성을 위해서 보다 구체적이며 경제적인 회수 공정이 제시되어야 할 것이다. 이밖에 만일 무한 순환 주기나 다중 순환 주기를 택할 경우 연료에 누적될 독성 물질과 TRU 등으로 인해 원자로의 성능 변화 문제를 해결하는 연구가 수행되어야 하며, 현재 30% 정도에 머무르고 있는 소멸 이론치를 향상시키는 기술도 개발되어야 할 것이다.

(2) 경제성 제고

핵변환 시스템이 상용화되기 위해서는 무엇보다도 경제성이 뒷받침되어야 하겠다. 우선 핵변환 시스템이 장점으로 내세우고 있는 환경 친화성을 경제적인 관점에서 분석할 때 핵변환 시스템으로 인해 발생하는 환경 친화성이 원자력 산업 전반에 얼마만큼 경제적 이득을 주는지 정량적으로 분석되어야 하겠다. 그리고 ADS와 임계로와 같은 핵변환 시스템의 호기 당 총 후행핵연료주기 비용은 얼마이고 규모의 경제를 위해서 몇 기가 건설되어야 하는지 검토되어야 할 것이다. 또한 현재 핵변환 시스템을 논의할 때 언급되고 있지 않은 사용후핵연료 중간 저장 비용, 전기 정련 본공정 전후의 전처리 및 후처리 비용, 잔류폐기물에 대한 고화 비용 및 중간 저장 비용 등도 계산되어야 할 것이다.

이와 함께 현재 국내 사용후핵연료의 발생량의 50% 가량을 차지하고 있는 가압중수로(이하 CANDU) 사용후핵연료를 어떻게 최종 처리 처분하는가에 대한 방안 분석도 수반되어야 한다. 일반적인 재활용 방식을 적용하면 CANDU 사용후핵연료의 재활용 단가가

높기 때문에 현재의 개념에서 진일보한 경제성이 향상된 균분리 기술과 CANDU 사용후 핵연료 특성에 맞는 ADS가 개발되어야 할 것이다. 만일 CANDU 사용후핵연료를 ADS 등으로 소멸처리할 수 없다면 직접처분해야 할 것이다.

또한 핵변환 시스템의 도입 시점에 따른 후행핵연료주기 경제성이 분석되어야 할 것이다. 핵변환시스템이 도입되는 시점이 언제고 또 그때까지 국내의 직접 처분이 이루어지지 않을 것인지 아니면 미국과 같이 제 1의 직접 처분장은 건설되고 핵변환은 제 2의 직접처분장을 대체할 대안으로 할 것인지에 관한 시나리오 분석과 이에 따른 경제성 분석이 수반되어야겠다.

핵변환 시스템이 경쟁력을 가지기 위해서는 석탄 발전과의 단가 비교, 그리고 에너지 자립화 측면을 고려할 때에는 국내 재생 에너지원인 풍력, 조력 등의 대체 에너지 수단과 단가 비교 등이 요구된다. 만일 핵변환 시스템을 포함한 원자력의 발전 단가가 조력 풍력 등 대체 에너지원의 단가보다 비싸다면 핵변환을 통한 에너지 국산화는 어려울 것이다.

(3) 환경 친화성 현안

핵변환 시스템이 방사성폐기물의 발생량을 획기적으로 감소시킨다면 이들을 지층 처분할 경우 유출되는 시간 폭이 직접 처분에 비하여 줄어들 수 있다. 비록 핵변환으로 인하여 생태계에서의 연간 개인 선량율의 최고치에는 크게 변화가 없더라도 총량이 경감함에 따라 유출 시간이 줄어들는다. 이와 같이 핵변환 시스템을 사용할 경우 전체 핵종 재고가 경감하기 때문에 유출 시간이 줄어드는 긍정적인 효과를 가져다 줄 것으로 판단된다.

국내 고준위 방사성폐기물 영구 처분 연구 결과에 따르면[1] 약 36,000 톤 규모의 사용후 핵연료를 영구 심지층 처분하기 위하여 약 4 평방 킬로미터 면적의 처분장을 건설하여야 한다. 국내 처분 대상 암반은 화강암과 같은 결정질 암반이 유력한데 이러한 결정질 암반에는 방사성 핵종들이 이동 경로가 되는 단열이 발달해 있다. 특히 단열 폭이나 길이가 큰 주요 단열대가 발달한 지역에 처분하는 것은 안전성을 저감시키게 된다. 4 평방 킬로미터의 지역 내에 이러한 주요 단열대가 포함되지 않는 부지를 선정하기 위해서는 많은 노력이 필요하다. 만일 핵변환 시스템이 고준위 방사성폐기물의 발생량을 경감시키고 또한 처분장 면적 결정에서 가장 중요한 발열량을 저감시킨다면 처분장 후보 부지를 선정하는데 있어 핵변환 시스템은 기여를 할 것으로 판단된다.

핵변환 시스템이 현재 목표로 삼고 있는 TRU, FP 회수율을 달성하고 무한 순환 주기 운영을 통해 고준위 폐기물을 발생하지 않는다면 환경으로 방출되는 총량을 저감하는 효과가 있을 것으로 판단된다. 그러나 현실적으로 무한 순환 주기가 가능한지는 앞으로의 연구를 통하여 입증해야 하며 만일 불가능할 경우 몇 번의 재활용이 가능한지에 대한 연구와 이에 따른 환경 영향 및 경제성에 대한 민감도 분석이 수반되어야 할 것이다.

또한 전후처리 시설에서 발생하는 중저준위 방사성폐기물의 발생량과 전기 정련 시설 해체 운영 등에서 발생하는 2차 방사성폐기물량을 산정하는 것이 중요하다. 만일 재활용

과정에서 중준위 방사성폐기물이 발생한다면 이들 방사성폐기물은 미국, 영국 등 외국의 예를 볼 때 천층처분 방식이 아닌 심지층처분 방식으로 매립되어야 안전성이 확보될 것이다.

KBS-3와 같은 방식을 채택할 경우 사용후핵연료를 직접 처분하여도 현재 ICRP 60과 같은 국제 기준과 국내외 기준을 만족시키는데 어려움이 없다. 따라서 핵변환 시스템이 단순히 안전성을 어느 정도 향상시키는 것은 기회-비용 측면에서 볼 때 아무런 이득을 가져다 줄 수 없을지도 모르며 이와 같은 논의는 영국과 핀란드의 관련 연구에서도 지적되었다. 따라서 환경친화성에 대한 논의는 안전성 향상이란 측면보다 미래의 불확실성에 따른 문제들을 해결하는 대안으로, 혹은 방사성 붕괴열을 발생하는 핵종들을 따로 모아 분리 처분하는 개념으로 처분장 면적을 적게 차지하는데 따른 이득을 얻는 점을 강조하는 것이 국내 상황에서는 더욱 현실성이 있다 하겠다.

(4) 수용성

현재 국내에서 활발하게 논의되고 있는 수용성은 주로 미국 등 해외 국가들의 입장에서 바라본 국제적 수용성 문제이다. 본 논문에서는 이와 같은 정치적 수용성에 관한 현안은 다루지 않는 대신 현재 국내에서 간과하고 있는 우리나라 지역 주민의 수용성에 관해 간략히 언급하고자 한다. PNT의 주요 장점 중의 하나는 방사성폐기물 영구처분에 관한 주민들의 혐오감이 높기 때문에 이를 해결하기 위한 방안의 하나로 PNT 시설을 세운다는 것인데 영국 Sellafield 등의 예를 보더라도 사용후핵연료 재활용 시설 입지에 관한 주민 반대 또한 아주 높다. 따라서 전기 정련 등 핵종 분리 시설에 관한 주민 수용성은 어떠한지 이를 높일 수 있는 방안은 무엇인지에 대한 논의가 향후 국내에서도 활발히 논의되어야 하겠다.

3. 결론

고준위 방사성폐기물 발생량을 저감시키면서도 전력을 생산하여 국내 에너지 자립에 기여하는 시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있는 PNT 핵연료주기 연구는 여러 가지 장점과 앞으로 해결해야 할 현안들에 직면하고 있다.

현재의 기초 연구 단계에서는 우선 핵변환 시스템으로 인한 환경 친화성이 어떻게 향상되는지를 분석하는 연구가 필요하다. 그러나 현재로서는 어느 정도 TRU, FP를 회수, 연소하는가에 대한 목표치들은 나와 있으나 이들을 달성할 기술들은 개발되어 있지 않으므로 우선 민감도 분석을 통해 어느 정도 환경 친화성을 보장하는 시스템 설정 요건을 도출하고 이런 시스템이 과연 노심 특성상 가능하며 전기 정련, 처리 과정들을 포함한 전체 비용은 얼마인가를 산정하는 연구가 필요하고 CANDU 사용후핵연료 소멸처리에 따른 경제성 분석도 수반되어야 한다. 또한 이런 시설에 대한 국내외적 수용성을 증진시키

는 방안을 도출하고 국내에서 동시 다발적으로 수행되고 있는 후행핵연료 주기들과의 경제성, 기술성, 환경친화성에 대한 상대 비교 및 국내 대체 에너지와의 경쟁력 분석 등이 수행되어야 하겠다.

표 1. 전기 정련 과정에서 방사성 핵종별 회수 목표치

| 핵종 | U | Am | Cm | Np | Pu | Tc | I | Cs | Sr |
|---------|------|-------|------|-------|------|----|----|------|------|
| 최대치 (%) | 99.9 | 99.99 | 99.9 | 99.95 | 99.9 | 99 | 99 | 99.9 | 99.9 |
| 최소치 (%) | 99.9 | 99.9 | 99.9 | 99.9 | 99 | 95 | 95 | 95 | 95 |

참고 문헌

1. 강 철형 외, “심지층처분시스템개발”, KAERI/RR-2013/99, 한국원자력연구소, 2000.