

日本の 액체금속냉각고속로 도입 현황

近藤 駿介
동경대학교 교수

일본은 우라늄 자원의 이용률을 크게 증대시킬 수 있는 액체금속냉각고속로(이하 액체금속로)와 그 연료주기 시스템의 연구개발을 진행해오고 있다. 현재는 제 1단계로서 실험로 「조요(常陽)」를 운전하고 있으며, 제 2단계인 원형로 「몬쥬」의 입계를 눈앞에 두고 실용화의 중단 단계인 실증로의 건설 방향에 대해 검토하고 있는 단계이다.

그러나 그 동안 국제환경과 사회환경은 변화를 거듭하였고, 지구환경문제와 남북문제가 대두됨에 따라 액체금속로 계획의 목표 등에 대한 수정이 불가피하게 되었다. 본고에서는 앞으로의 사회 Norm 「자원재순환」과 「사회(인

간) 중심」에 두고 의견을 서술하고자 한다.

악티나이드 재순환

최근에 환경보호의 관점에서 자원을 재순환하여 이용함으로써 폐기물 배출량을 감소시키는 것에 대한 관심이 고조되고 있다. 자원 재순환 프로세스를 설계할 때 중요한 점은, 어느 정도의 안전성과 신뢰성 및 경제성을 가지며, 폐기물의 양을 줄이고 유효 성분의 회수율을 크게 하는 것이다. 원자로의 사용후연료에는 장전시의 親物質인 우라늄-238, 핵분열성 물질인 우라늄

-238와 플루토늄(친물질인 플루토늄 동위원소 포함) 이외에 마이너 악티나이드 및 핵분열생성물이 포함되어 있다.

이들 중 어느 것이 유용 성분이고 어느 것이 폐기물인지는, 재사용 방침에 따라 결정된다.

우라늄 자원을 이용하는 원자로의 경우에는 ① 사용후연료를 그대로 폐기물로 한다. ② 사용후연료를 재처리하여 우라늄(회수 우라늄이라 함)과 플루토늄을 회수, 재순환하여 사용하고 나머지는 폐기물로 한다. ③ 사용후연료를 재처리하여 플루토늄을 포함한 악티나이드를 회수, 재순환하여 사용하고 나머지는 폐기물로 한다. ④ 이와 더불어 핵분열생성

물중 회소자원인 백금속원소나 방사선원으로서 이용할 수 있는 세슘 등을 회수 이용하고 나머지는 폐기물로 한다. ⑤ 폐기물로서 회수한 악티나이드와 핵분열생성물중 장반감기 핵종은 원자로와 가속기에서 단반감기 핵종으로 전환하는 소멸처리 등의 방안이 고려되고 있다.

일본은 지금까지 ②의 방안을 방침으로 정하여 이들 폐기물을 고준위폐기물로 처분하기 위해 준비해 오고 있다. 한편 ③의 방안은 ②의 방안을 폐기물 감소라는 관점에서 더욱 철저히 하는 것으로서 최근에 특히 미국을 중심으로 연구개발이 진행되고 있고 일본에서도 그 가능성의 검토가 중요하다고 인식되고 있다. 또한 ⑤는 ③의 방안을 보완한 것으로서 일본은 오메가 계획을 통하여 연구를 추진하고 있다.

플루토늄을 중심으로 한 악티나이드를 원자로에 재순환하는 방법으로 과거부터 경수로에 플루토늄만을 재순환하는 것이 검토되어 실시되어 왔다. 이 경우 노심의 1/3 정도를 플루토늄연료로 사용하면 사용후연료에서는 장전량과 같은 양의 플루토늄이 회수될 수 있다.

이것은 원자로와 같이 중성자에 의한 핵변환으로 동반한 에너지를 이용할 경우에는 친물질이 핵분열생성물질로 변화하는데 결국 자원의 일부가 개질된다는 특정을 가지고 있기 때문이다. 이

경우 회수된 감소 우라늄을 재조정하여 이용하지 않는 경우에도 kWh당 천연우라늄 소요량은 사용후연료 전체를 폐기물로 하는 경우의 2/3가 되고, 우라늄 채광과 농축에 따른 폐기우라늄량이 2/3로 줄어 들게 된다. 이 때 마이너 악티나이드를 함께 장전하면 그 일부가 중성자를 포획하게 되는데 전체적으로는 전혀 감소하지 않으며, 새로운 발생분과 합쳐지면 장전시에 비하여 약간 증가하게 된다.

현재 개발중인 액체금속로에 악티나이드를 재순환하면 노심의 중성자에너지가 높기 때문에 핵분열생성물 등에 의한 중성자 흡수율은 줄어들게 되는데, 노심에서의 중성자 누출이 크기 때문에 특히 소형로심의 경우에는 악티나이드 재생률이 크게 작아지게 되어 회수량이 장전량을 밑돌게 된다.

따라서 악티나이드 축적량을 감소시키려고 하는 경우에는 이와 같은 액체금속로에 의한 재순환이 유력한 수단인 된다.

한편 노심을 대형화시켜 연료중 친물질 비율을 크게 하고 노심 내외부에 친물질을 배치하게 되면 이 중에서 우라늄이 플루토늄으로 전환되는 현상이 발생하기 때문에, 이들을 포함하여 재처리하면 장전된 이상의 플루토늄을 포함한 악티나이드가 얻어진다.

따라서 이렇게 재생률이 높은

액체금속로에서 악티나이드를 재순환하면, 연료의 조정과정에서 외부에서 순환시켜 공급해야 하는 양은 핵분열할 중금속양과 거의 같은 양의 우라늄만으로 한정되기 때문에, kWh당 자원소요량은 사용후연료를 모두 폐기물로 할 때보다 1/60 정도밖에 되지 않게 된다. 또한 이 경우 수십년 동안 재순환을 반복하게 되면 동일노형의 1기를 운전개시하기에 충분한 악티나이드가 축적되게 된다.

결국 액체금속로는 악티나이드 재순환에 의하여 마이너 악티나이드의 증대를 방지하면서 메이저 악티나이드인 플루토늄의 stock을 증가/감소시킬 수 있기 때문에 폐기물량이 적은 우라늄 자원의 효율적인 이용이 가능하게 하고, 非放射能인 높은 마이너 악티나이드를 플루토늄과 열체화함으로써 흡수하기 때문에, 이 시스템을 보다 경제적으로 실현할 수 있다.

물론 마이너 악티나이드 전체를 원자로내에서 재순환해야 하는 것은 앞으로도 검토해야 할 과제이다.

기술현황

액체금속로 기술에 대해서 살펴보면 이미 100만kW급의 액체금속냉각로가 건설·운전되고 있기 때문에 그 실현가능성을 부정할 이유가 없다. 이들은 Trouble

에 휩쓸리고 있다는 지적이 올라
르기는 하지만, 예를 들어 수퍼피
닉스의 Trouble을 분석하여 보면
기술 고유의 곤란함이라고 말하
기 보다는 기술에 대한 과신과
안전문화에 결함이 있었기 때문
에 발생한 것으로, 기술 고유의
곤란함에 의하여 발생하였다고
생각되지 않는다면 하지 않을 이
유는 없다.

일본에서도 「조요(常陽)」를 15
년간 운전하였고 「원슈」도 최근
에 나트륨을 순환하여 기기성능
시험을 실시하게 되었는데 이것
만으로는 대형로의 나트륨 기술
에 자만이 있다고 하기에는 경험
이 부족하지만, 대형로의 설계,
건설, 운전을 실시할 기원은 확실
하게 정비되고 있다고 평가될 수
있다.

안전성에 대해 살펴보면, 과거
20년 이상에 걸쳐 세계 각국의
연구개발담당자와 규제관계자가
10기 이상의 원자로 설치허가를
둘러싸고 관련 학과 내외에서 연
구개발에 경진한 결과, 설계, 건
설, 운전이 일하여 주의해야 할
점에 관한 일반 인식은 확립할
수 있었고, 경수로 도입기와 비교
하여 컴퓨터 시뮬레이션 기술과
재료기술이 진보하였기 때문에,
오랫동안 안전성에 관한 지식들
을 풍부하게 가지고 있어서 실용
화에서도 문제가 없다고 보여진
다.

한편, 액체금속로를 광범위
로 실용화할 수 있는지, 즉 경수

로와의 경쟁가능성 관점에서 합
리적인 건설비로서 발전소를 건
설하고 높은 가동률을 확보할 수
있는지에 관하여 살펴보면 「몬
슈」의 건설비가 같은 출력을 가
진 경수로의 약 3배 정도라고 하
는 것 때문에 길이 없다고 말하
기도 하지만 유럽에서 설계된 대
형 액체금속로는 연속 발주가 가
능하게 되면 경쟁할 수 있다고
보여진다.

물론 일본은 지진조건이 유럽
과는 다르기 때문에 북부해안의
일부 지역을 제외하고는 이를 그
대로 건설하기에는 무리가 있으
므로 이 결과가 그대로 꼭 들어
맞는다고는 생각되지 않지만, 어
느 정도 출력을 크게 하고, 급속
하게 進歩하고 다양화하고 있는
압반 메를로부터 시작하여 積層
고무에서 해수 floating 방식에
이르는 passive 내진, 또는 active
내진 등을 효과적으로 이용하여
설계를 합리적으로 실시하면 경
수에 따라서는 경수로보다는 경
계성면에서 우세할 수 있다는 전
망도 있기 때문에 비판적일 필요
는 없다.

또한 가동률에 대하여 살펴보
면, 지금까지 액체금속로에서는
원자로 용기 내부에 trouble이 발
생한 경우에는 경수로보다도 대
용에 시간이 걸린다는 지적이 있
어서 설계환경이 실시되는 방향
에 있는데, 이것은 지금까지 해외
에서는 이 노의 운전관리 방식이
다르므로 이와 같은 trouble은 경

수로와 비교하여 확률이 낮다는
인식에서 출발하여 설계되어 왔
기 때문에 이와 같이 지적받게
될 것으로 볼 수 있다.

일본에서는 경수로의 trouble
경험을 반영하여 이미 이 같은
trouble에 대응할 수 있도록 설계
조건을 정하고 있고 또한 정상운
전시에는 경수로의 차이를 들이
유가 없다는 것을 지적할 수 있
다.

남은 과제로서는, 차세대 원자
로 설계에서 사회(인간) 중심의
approach가 중요하지만, 액체금
속냉각로의 개발에 있어서 반드시
이러한 관점이 고려되어야 하
는 것은 아니다. 따라서 앞으로는
앞에서 기술한 경제성 향상을 위
한 기술개발과 더불어 이와 같은
관점에서의 기술개발을 목표로
잡는 것에 합의하고 이를 계획에
반영하는 것이 중요하다고 볼 수
있다.

검토과제

이상에 따르면, 일본의 현 시점
에서 검토해야 할 것으로는 원자
력이용에 따른 폐기물의 배출량
을 극소화한다는 관점에서 악티
나이드 계순환형 연료주기에 기
초한 액체금속로 시스템의 실용
화 과정을 어떻게 설계하고 그
외에 실용성에 대해 갖어야 할
역할이다.

실용화라는 것은 일반적으로
말하면 장원자 이익을 추구하는

자가 해당 기술을 판매해서 사용되기 시작하여 시장점유율이 어느 정도 이르게 되는 때를 일컫지만, 해당 기술이 다른 선행기술과 경쟁할 수 있어야 하기 때문에 여기에 이르기까지의 중간단계인 실증로 규모의 경제성은 충분히 예측된 범위내에서 규모를 크게 하지 않고, 실용 규모에서 factor 2 정도 이내에서 외삽 가능한 동시에 주요 기기는 「몬쥬」의 factor 3 정도로 scale up 하는 데 머물도록 하며, 그 때에 경제성 향상 관점에서 실용화를 위하여 필요한 아이디어를 가능한 적용하는 것을 기본으로 하여야 할 것이다.

이와 같은 방침을 취하게 되면 새로운 기술에 대한 연구개발과 실증에서 지금보다 적은 시간이 걸릴 것이다.

현재의 장기계획에 설정되어 있는 이 노의 착공시기인 1990년대 후반은 어느 정도 지연되었지만 내외의 원자력발전 규모의 추이 동향에 비춰 보면 이 기간에 연구개발이 활발하게 실시된다는 조건하에서는 문제되는 것은 없을 것이다.

한편, 연료주기에 대해서 살펴보면 지금까지 악티나이드 재순환을 염두에 두지 않았기 때문에 먼저 「조요(常陽)」 「몬쥬」 및 그 연료제조, 사용후연료의 재처리 시험시설에서 악티나이드 재순환 연구를 실시하는 체제를 순차적으로 확립할 필요가 있다.

여기에서 비약하여 기존의 연료주기시설 규모와의 적합성을 고려하여 실증로를 위의 사명을 가진 원형로로 병행하게 하는 것은 소위 제 2원형로론에 이르게 되는 것이다.

이것은 실증로를 대폭 지연하게 되면 합리성을 가지는 것이되거나 병행개발은 무리한 전략일 것이다.

다음으로 결정해야 하는 것은 이러한 연구개발과 건설을 누가 담당하느냐이다. 이것은 말을 바꾸면 어떤 자금으로 이들 과제에 도전하겠는가 하는 문제도 있지만, 플랜트는 민간이 출자하고 이를 주체로 하여 국가가 연구개발면에서는 이를 지원해 가는 것이 합리적이다.

이 경우 개발 주체는 국민들이 이 분야에 투자한 성과를 발생시킬 의무와 책임을 자각하고 또한 이러한 성과의 담당자인 연구원, 기술자 등이 속한 조직들이 삶의 보람을 가지도록 배려할 필요가 있다.

또한 실증로 2호는 사실상 실용화 직전부터 경쟁적 수주자가 있어야 한다는 점을 고려하여 실증로 수주 및 발주에 대한 조건정비를 미리 염두해 둘 필요가 있다.

한편, 연료주기는 국가가 개발 주체가 되어야 할 것이다. 국가의 조직은 경직되기 쉬운 결점을 가지고 있음을 충분히 고려하여 위의 새로운 사명하에서 국민의 꿈

과 희망에 따른 연구개발을 유연하게 진행하도록 하여야 할 것이다.

맺음말

지금까지 고속증식로는 인류의 에너지수요에 대응하는 수단으로서 개발되어 왔지만, 국내의 환경과 가치관의 변화를 고려하면 자원의 재순환, 폐기물 발생량의 억제, 인간을 위한 원자력이라는 데 주의를 기울인 시스템으로서 구상되어야 한다는 점에서 이를 실현하기 위해 노력해야 할 방향에 대해서 기술하였다.

마지막으로 남은 과제는 인류의 에너지수요 증가 대부분을 일본이 차지하지 않는데도 불구하고 이 기술을 개발하고 있고 이 경우 일본은 어떠한 방향에서 이러한 기술개발을 실시해야 할 것인가 하는 문제이다. 이것을 국민들에게 물으면 다른 사람들에게 의지하겠다고 말하지 않을 것이다. 그러나 이것은 원자력분야에서 독자적으로 approach하도록 허락된 것도 아니며, 일본이 마음대로 결정할 수 있는 것도 아닐 것이다. 어쩌면 국제적인 approach라고 불리워져야 하는 새로운 개발전략의 구축이 요구되고 있고, 그 위에서 새로운 국제공동사업이 시작되어야 할 것으로 판단된다.