특·별·강·연

인류의 지속적인 개발을 위한 원자력 에너지 시스템

- 일본의 미래 원자력 시스템 -

후지이에 요이치

히로시마대학교 학술고문, 동경공업대학 명예교수

전 일본원자력위원회 위원장

"일본은 북쪽 지역(홋카이도)에서부터 남쪽 지역(큐슈)에 걸쳐 55기의 원자력 발전소의 건설에 성공하였다. 따라서 그것은 높은 안전 수준에서 전력 수요의 30% 이상과 에너지 수요의 16% 이상을 감당하는 주요한 전력 시스템이 되었다."

일본의 원자력 연구 개발을 위한 기본 정책

일본의 원자력 연구 개발을 위한 기본 자세에는 그 시발점에서 두 가지 원칙이 있다고 하겠다. 그것은 핵폭탄에 대한 반대와 원자력의 평화적 이용이다.

그러한 기본 자세는 1945년 10월 타카하시 나가이 박사가 나가사키 원폭 투하 직후 2개월 만에 저술한 '원폭 희생자들을 위한 구조대'에 관한 보고서에서 발견할 수 있다.

일본은 이러한 입장을 취하고 있으며 1955년에 제정된 원자력 기본법에서 이러한 원자력의 기본 정책을 나타내고 있다.

전자의 원칙은 히로시마와 나가사키 두 곳에서 원폭의 피해를 입은 세계 유일의 국가라는 사실에서 기인될 수 있겠다. 그러한 비극은 일본인들로 하여금 핵폭탄에 반대하게 만들었다.

후자의 원칙은 그러한 전쟁의 비참함에 반대하는 정서가 일본인들로 하여금 원자력의 평화적 이용으로 이끌게 하는 요인 중의 하나이며 이것은 일본인들로 하여금 부족한 부존 자원에 대해 남의 나라를 괴롭히지 않고 평화적으로 에너지를 확보할 수 있도록 하고 있다.

우리는 기본적인 원자력 정책을 유지하고 과학 기술을 발전시켰으며 그 성과는 원자력 발전에서 모두 보여질 수 있다.

이러한 두 가지 원칙에 더하여 일본의 원자력기본법은 원자력 연구 개발을 통하여 국제 사회에 기여하는 것을 표명하고 있다.

20세기 후반기에서의 결과 및 성과

원자력 연구 개발을 위한 20세기의 후반기는 아이젠하워 미국 대통령의 '평화를 위한 원자력'에 관한 메시지와 함께 시작되었다. 원자력의 평화적 이용을 위한 지속적인 원자력 과학 기술의 연구 개발은 냉전 시대에도 불구하고 가속되었다.

우리는 지금 20세기 후반기에서의 개발의 결과와 성과를 평가하는 시기에 있다. 나는 그 결과를 긍정적으로 평가하고 원자력 과학 기술의 넓이와 깊이는 핵반응에 기초한 미래의 문명을 뒷받침할 것임을 확신하는 입장에 서 있다.

1. 일본의 원자력 발전

20세기 후반의 개발 성과의 하나는 의심의 여지가 없이 주로 경수로에 의한 원자력 발전의 확립이다. 일본에서의 원자력발전소의 도입은 주로 전력 회사들에 의해 이루어졌다. 그 내용들은 전력 생산을 위한 변형 및 표준화된 가압수형원자로(PWR)와 비등수형원자로(BWR), 핵연료 요소, 증기발생기 재료, 냉각 시스템, 안전 회로 등이다.

일본은 북쪽 지역(홋카이도)에서부터 남쪽 지역(큐슈)에 걸쳐 55기의 원자력발전소의 건설에 성공하였다. 따라서 그것은 높은 안전 수준에서 전력 수요의 30% 이상과 에너지 수요의 16% 이상을 감당하는 주요한 전력 시스템이 되었다.

우리는 경수로(LWR) 역사상 가장 큰 사건으로 여겨지는 TMI-2 사고가 용융으로 인한 전반적인 노심 손상에서 비롯되었으나 경수로 고유의 안전 특성 덕택에 방사성 물질의 가시적 발산은 없었다는 것을 알고 있다.

2. 핵연료 주기 및 혼합 산화물 핵연료(MOX) 장전

원자력 발전에서의 성공에도 불구하고 핵연료주기의 상업화는 지체되고 있다. 핵연료주기를 위한 주요 기능에 대한 연구 개발은 일본원자력연구개발기구(JAEA)에 의해 수행되었으나 우라늄 농축이나 경수로에서 배출된 사용후 연료의 재처리와 MOX 제조는 민간 기업인 일본원연(JNFL)에 의해 수행되었으며 또한 유리화 폐기물과 저준위 방사성 폐기물의 저장을 취급하고 있다.

도카이(Tokai) 재처리실험공장(JAEA)에 이어 롯카쇼에서의 상업적인 재처리공장(JNFL)이 상업 운영을 위해 대기 중에 있다.

그러나 우리는 운전중인 여러 개의 원자로에서 MOX 장전의 시기를 기대하고 있다. JNFL의 MOX 공장 상업 운영은 2012년으로 예정되어 있으므로 MOX 연료는 프랑스에서 제조되어 일본으로 수송되었다.

미래 경수로를 위한 논제의 하나로서, 노심 전체에 MOX를 장전할 예정인 개량형비등수형원자로(ABWR)는 아오모리(Aomori)에 있는 오마(Ohma)에서 건설중(전원 개발 : J-Power)이다. 이는 핵연료주기를 통하여 경수로(LWR)와 고속로(FR)의 공존을 위한 방안이다.

고준위 폐기물(HLW)의 지질학적 처분에 관해서는 원자력발전환경정비기구(NUMO)가 담당하고 있으며 현재 부지 선정 과정에 있다.

3. HTR, FR과 같은 신형 원자력 시스템

차세대 시스템으로서 고온가스로(HTR)는 안전하고 견고한 운전을 수행하였으며 원자력으로부터 화학 에너지를 생산하는 주요 아이템의 하나로서 수소생산을 기대하고 있다.

고속실험로 Joyo와 원형 고속로(FR) Monju가 건설되었다. Joyo는 훌륭한 운전 기록을 갖고 있지만 Monju는 소듐 누출로 인해 여전히 오랜 지체 후에 가동을 기대하고 있다.

4. 방사선 응용

문명에 있어서의 원자력 과학 기술을 위한 요구와 필요성에 부응하면서 방사선 응용은 20세기에 있어서 대학뿐만 아니라 산업 및 학계 등 다양한 영역에서 증진되었고 확장되었다.

대학과 산업계에 있어서 방사선 과학 기술로부터 완전히 독립적인 영역을 발견하는 것은 거의 불가능하다.

최첨단 과학 기술을 위하여 일본은 J-Park, SpRing-8, RIBF, HIMAC 및 레이저 시스템과 같은 시설의 운영을 채택하였다. 그들의 일부는 신형 원자력 시스템의 개발을 위한 한 부분으로 동시에 지원할 수 있다.

미래 문명을 위한 원자력 과학 기술

1. 미래에 대한 현대 문명의 방향

우리는 지금 화학 반응에 기초한 현대 문명으로부터 원자력 반응에 기초한 현대 문명으로의 점진적인 변천에 직면하고 있다.

이러한 때에 과학 기술이 문명의 토대를 어떻게 뒷받침하였는지를 되돌아보고 미래의 문명의 토대를 위한 원자력 과학 기술의 요건에 대해 생각해 보는 것이 중요하다.

우리가 핵반응에 기초한 문명을 발달시키기를 원할 때 우리는 자연, 우주, 에 대해 학습하고 이해해야 하며 그곳에서 우리는 지구상에서 원자력 과학기술의 도구와 이기(利器)로서 채택하고자 하는 모든 시스템과 현상을 발견하게 된다.

그러한 연구 개발을 통하여 종합적인 원자력 과학 기술은 문명의 토대를 최대한 뒷받침하도록 발전될 것이다.

2. 핵반응에 기초한 문명

극히 미세한 양자 세계에 있어서의 핵반응은 에너지와 물질의 근원으로서 매우 거대한 공간인 우주에서의 그 광대한 힘을 보여주었다.

극히 미세한 양자 세계뿐만 아니라 거대한 우주에 있어서의 시스템과 현상에 대한 학습과 이해는 우리의 사회에 미래 문명의 토대를 가져다 줄 것이다.

미래 문명의 토대를 뒷받침하는 기대주로서 원자력 과학 기술은 뢴트겐(Roentgen)이 X-ray를 발견했을 때 이미 시작되었으며 19세기 마지막 시기에 극히 미세한 세계를 열었고 그 후 한 세기가 지났다.

그들은 미래 문명을 뒷받침하는 토대를 형성하기 위해 많은 분야와 영역에서의 집중적이고 광대한 개발을 보여주었다.

우리는 화학 반응만으로는 생각될 수 없는 새로운 최첨단 영역과 분야를 발견하였으며 그들은 극히 미세한 양자 세계의 고유한 특성에 영향을 주고 있다.

과학 기술에 있어서 문명의 발달을 위해 기대되는 분야는 에너지, 재료, 정보 및 기술이다. 그들 모두는 종합적인 원자력 과학 기술을 구성하기 위한 중요한 영역이지만 에너지는 다른 영역들을 위해서도 일반적이며 중요하다. 앞으로 나는 주로 에너지에 관해 논의하고 싶다.

3. 원자력 르네상스

오늘날 세계적으로 원자력 르네상스라는 이름하에(특히 원자력계에서) 원자력 과학 기술을 수용하려는 경향이 있다. 나의 견해로는 이러한 경향은 20세기 후반기에서 높은 안전 성과를 이룩한 경수로의 응용을 통한 원자력의 평화적 이용의 성공에 직접적으로 영향을 줄 수 있다고 본다.

이러한 상황에서 많은 나라들이 환경 보호를 위한 요구와 에너지 수요를 충족시키기 위해 원자력발전소와 핵연료주기 시스템을 건설하고 있다.

이러한 시기에 국내외적으로 원자력 개발의 목표와 원자력 과학 기술의 전반적인 관점에 대해 논의하는 것이 절대적으로 요구되고 있다. 그러한 논의는 원자력 과학 기술이 미래 문명의 토대를 뒷받침하고 화학적 반응에 기초한 현대 문명과의 확실한 관계 수립과 협력을 이루고 있다는 점에 입각해야

한다.

나는 원자력 과학 기술을 '핵반응에 기초한 물질과 방사선 간의 상호 작용'의 이용으로서 이해하고 있다.

이러한 상호 작용으로 1) 에너지는 생산되고 2) 물질은 변화되어 새로운 물질로 만들어지며 3) 새로운 기술은 문명으로 전달되며 4) 물리학의 잠재적 정보와 법칙은 학습되어질 수 있다.

이러한 상호 작용들을 촉진시키는 이기(利器)로서 우리는 1) 에너지 관련 핵분열과 핵융합 원자로 2) 비에너지 관련 가속기 및 레이저들을 갖고 있다. 이것은 종합적인 원자력 과학 기술의 관점으로부터 원자력 개발의 전체 모습을 광범위하게 이해하는 중요한 견해라고 생각한다.

신형 원자로 시스템으로서 HTR은 핵반응으로부터 얻어진 화학 에너지의 대표적 물질인 수소를 생산하고 또한 FR은 에너지원과 환경 보호를 위한 요건을 동시에 만족시키는 주요한 원자로 시스템으로서 인증되었으며 이에 관련된 핵연료주기는 매우 긴요하다.

원자로 및 관련된 핵연료주기를 어떻게 연합시키는가 하는 것은 입자가속기와 레이저의 도움으로 핵연료를 조화롭게 공급시키기 위한 중요한 문제이다.

4. 시스템을 완성시키기 위한 핵분열 관련 생성물들을 이용하는 법

핵분열 에너지 시스템의 미래 전망에 관하여 핵분열 반응 관련 생성물들을 최대한 이용하는 것이 요구된다. 핵분열 반응 관련 생성물들은 핵분열 반응에 의해 방출된 3개의 중성자와 200MeV 에너지이다.

그러나 미래 사회뿐만 아니라 미래 문명은 원자력 과학 기술의 단순한 이용보다는 오히려 조화(harmornization)를 기대하고 있음을 고려해야 하는 것이 중요하다.

그러므로 재이용 기반의 사회에 적용할 수 있는 원자력 시스템은 장기 존속 자원 및 환경 보호의 조건을 충족시켜야 한다. 그것은 핵반응이 핵분열 반응으로부터 나오는 생성물들 내에서 할 수 있는 것에 관해 논의할 수 있도록 한다.

미래 원자력 시스템 SCNES에 대한 도전

1. 핵분열 반응의 생성물 내에서의 5가지 역할

미래 원자력 시스템은 미래 문명을 위해 동시에 실현화되기 위해 다음과 같은 5가지 역할을 가져야 한다.

1) 에너지 (전력, 수소) 생산

2) U238로부터 핵연료를 생산하는 연료 생산

3) 방사성 원소의 변종, 주로 악티나이드(actinide) 및 핵분열 생성물

4) 주로 임계 문제를 피하기 위한 안전성

5) 비확산

2. SCNES에 관한 연구

SCNES (Self-Consistent Nuclear Energy System)에 관한 연구는 5가지 역할의 성취를 위해 핵분열반응의 생성물을 최대한 이용함으로써 과학적 가능성을 보여주는 것을 목적으로 하고 있다.

가. SCNES를 위한 원자력 시스템

SCNES에 부합하는 원자력 시스템은 입구가 천연 우라늄이고 출구가 안정된 핵분열 생성 물질(FP)인 시스템으로 나타낼 수 있다.

단순히 말해서 이것은 내장된 우라늄의 핵분열 반응을 이용하여 에너지를 생산하고 그 결과로서 시스템 외부로 안정된 핵분열 생성물을 방출하는 것을 의미한다.

핵연료를 성공적으로 완전하게 재이용할 수 있고 동시에 방사성 물질을 배출하지 않는 그러한 재이용 지향의 문명을 위해 적합한 원자력 시스템이 있는가?

과학적인 의미에서 궁극적인 목표는 핵분열 반응의 생성물 내에서 SCNES를 위한 원자력 시스템을 건설하는 것이다. SCNES의 과학적 탐구는 이것이 적어도 과학적 타당하에서 가능하다는 것을 나타낸다.

1991년에 발표된 SCNES의 개념은 이러한 목적, 즉 자원을 최대한 이용하고 방사성 물질을 배출하지 않는 것이 과학적으로 가능한 것인지를 논의하는 것이었다. 달리 표현하면 그것은 재이용과 무방출을 달성하는 것이 가능할 것인지에 대한 논점을 제시하는 것이다.

나. 미래 원자력 시스템의 구성

미래 원자력 시스템의 구성은 두 개의 부문으로 이루어진다. 한 부문은 핵연료 생산뿐만 아니라 에너지 변환을 위해 핵반응을 일으키고 또한 원소와 핵종을 핵변환시킨다. 그것은 입자가속기를 포함한 핵분열 원자로 시스템이다. 그리고 다른 한 부문은 원자로 시스템에 공급하기 위한 원소와 핵종을 준비하는 것이다. 그것은 실제로 가능하면 다음 사용을 위해 재이용된 연료와 안전한 핵분열 생성물을 준비하기 위해 원소와 핵종의 분리를 취급하는 핵연료주기이다.

핵연료주기는 화학적·물리학적 작용뿐만 아니라 레이저와 혼합된 양자의 작용을 포함한다.

간단하게 말해서 우리가 천연 우라늄을 도입하여 원자로 시스템으로부터 비방사선 핵종 또는 원소를 추출하는 것을 고려한다면 SCNES를 위한 핵연료주기의 필요성을 설명하는 것은 쉬운 일이다.

SCNES를 위한 핵분열 중성자의 공유는 우리들에게 핵분열 중성자 수의 결여를 말해준다. 재이용된 연료의 재료는 필요한 중성자를 줄이기 위해 핵연료주기에서의 분리 공정을 통하여 요구된다.

이러한 단순한 사실은 핵연료주기가 핵종 및 원소의 분리 후에 원소와 핵종을 원자로 시스템에 공급하므로 원자로 시스템은 핵반응을 지향하도록 요구되고 있다.

과학은 SCNES의 가능성을 추구하고 있지만 기술은 과학적 개념을 토대로 독립적 방법으로 효율성을 추구하고 있다고 생각된다. 위에서 언급한 5가지 역할은 원칙적으로는 경수로 또는 열중성자를 사용하는 고온가스냉각로에 의해서는 실현될 수 없으나 이론적으로는 고속중성자 원자력 시스템에 의해서만 가능하다.

이것은 에너지원과 방사성 물질의 비활성화를 위한 요건을 만족시키는 자산의 효율적인 이용에 의해 나타나는 과학적인 가능성이다.

문명화에 공헌하기 위해 우리가 첫 번째로 고려해야 할 가장 중요한 점은 에너지원과 환경 문제를 동시에 해결해주는 우수한 원자력 시스템을 공급하는 것이다.

이러한 목적을 위해서는 과학적 논의보다는 오히려 효율성이 주요한 역할을 하는 독립적 방법과 이기(利器)들을 갖고 있는 기술적 가능성에 들어가기에 앞서 과학적 가능성은 보다 더 나은 방향으로 논의되어야 한다.

원자력 시스템은 미래 문명에 기여하는 것이 실현되도록 5가지 역할을 갖고 있어야 한다.

다. 비확산 목적을 갖는 SCNES

과학적인 관점에서 비확산 문제는 2가지 면으로 분류될 수 있는데 한 가지는 핵물질의 공간적 배치이고 나머지는 핵물질 자체의 특성이다.

논점은 핵폭발 또는 핵무기로의 용도 변경이다. 핵연료의 물질이 사용되는 장소에서는 핵연료의 물질 성분에 의해 이러한 문제를 다루는 것이 적절하다.

그것은 열화우라늄으로 만들어진 일반적인 블랭킷(blanket)의 채택을 피하도록 한다. 열화우라늄을 블랭킷으로 주입할 경우 핵무기로 쓸 수 있는 플루토늄의 생산을 가져오기 때문에 핵비확산을 위한 기대는 블랭킷이 없는 노심으로 귀결된다.

여러 번 재이용된 초우라늄원소(TRU) 연료의 연소와 플루토늄의 동위원소 변성은 핵분열, 연료 생산, 방사성폐기물의 변종에 더하여 좀 더 많은 중성자를 요구하므로 물질 특성의 변화에 의한 핵확산 억제를 증진시키기 위해 SCNES에서의 가장 중요한 물리학적인 면은 중성자 수지(收支)이다.

비확산의 의미를 갖고 있는 SCNES에서의 중성자 수지를 재고(再考)하기 위해서 짝수 질량수의 플루토늄 동위원소에 의한 플루토늄의 변성을 위해 필

미래 원자력 시스템의 구성은 두 개의 부문으로 이루어진다. 한 부문은 핵연료 생산뿐만 아니라 에너지 변환을 위해 핵반응을 일으키고 또한 원소와 핵종을 핵변환시킨다. 그것은 입자가속기를 포함한 핵분열 원자로 시스템이다. 그리고 다른 한 부문은 원자로 시스템에 공급하기 위한 원소와 핵종을 준비하는 것이다.

요한 중성자가 산정된다. 그 결과는 SCNES 내의 연료주기에서 핵분열성의 플루토늄은 항상 짝수 질량수의 플루토늄 동위원소와 함께하고 플루토늄 동위원소 혼합물은 원자로급의 플루토늄의 수준을 만족시킨다는 것을 나타낸다.

핵분열 생성물의 동위원소 분리와 함께 산소와의 중성자 수지와 초우라늄원소가 반복 재이용되는 금속연료 고속로에 대한 확실한 전망이 있다.

결론적으로 비확산으로의 과학적 접근은 SCNES 시스템 내에서 다루어질 수 있다.

라. 재임계가 없는 노심을 갖는 SCNES의 안전성

원자력 시스템의 안전성에 관한 사항은 그것의 단순한 안전 특성들, 즉 '정지(stop), 냉각(cool), 격납(contain)'에 대해서 종종 논의되었다.

가장 긴요한 안전 대책은 노심이 용융되는 동안에 핵물질이 시스템 외부로 이동하는 것을 방지하는 것이다. 특히 고속로 시스템에서는 정상 및 비정상 운전 조건 모두에 있어서의 임계 문제가 고속로 노심 구성의 주요한 안전 특성과 관련되어 있기 때문에 그것은 노심이 물질 재배치에 관련된 최대 반응도 구성을 나타내지 않는다는 것을 의미한다.

이에 반하여 시스템의 냉각 능력에 대해서는 소듐 냉각시스템처럼 저압 운전으로 고열 수송 물질을 갖는 시스템을 이용하는 것이 가능하다.

UTOP 및 ULOF와 같은 가상 노심 붕괴 사고(HCDA) 문제는 발생 확률이 10-7/reactor×year 처럼 매우 작지만 세계적으로 FBR의 안전성 평가를 위해 취급되었다.

SCNES에서 우리는 재임계 문제에 초점을 두고 있다. 만약 우리가 낮은 발생 확률을 고려한다면 안전 회로와 같은 그러한 능동적인 요소를 갖는 시스템을 갖추는 것은 가능하지 않다.

우리는 중력의 존재 하에서 위상의 변화에 기인한 용융점과 재배치와 같은 물리학적인 특성을 이용하기 위해 안전 시스템을 채택하기로 결정하였다.

카자흐스탄에서는 흑연추진로(IGR)를 이용한 원자로 내 실험이 수행되었고 재임계 문제에 대한 실증적인 결과들이 도출되었다.