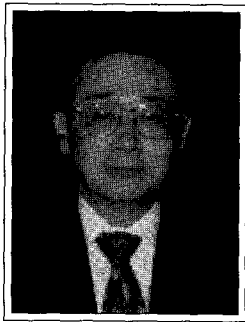


일본 원자력산업의 현황과 원자력 신기술

齋藤伸三

일본원자력학회 회장 · 일본원자력위원회 위원장대리



원자력의 현황과 전망

1953년 미국 대통령 아이젠하워가 유엔 연설을 통해 '원자력의 평화적 이용'을 주창한 지 50년이 지났다. 그 전까지 일본에서의 원자력 연구 개발은 금지되어 있었으나, 유엔 연설이 있는 후에는 평화적 이용을 위한 연구 개발을 국가 차원의 프로젝트로 시작할 수 있게 되었다.

1955년 원자력의 평화적 이용을 보증하기 위해 원자력법(Atomic Energy Basic Law)이 제정되었고, 1956년에는 일본원자력위원회(Atomic Energy Commission of Japan)가 설립되었다.

같은 해 일본 원자력연구소(Japan Atomic Energy Research Institute)가 출범하여 1년 후에는 최초의 연구용 원자로인 JRR-1이 처음으로 임계에 도달하였다.

원자력에 의해 전력이 성공적으로 생산된 것은 1963년 JPDR(Japan Power Demonstration

ration Reactor)에 의해서였다.

1966년에는 최초의 상업용 원자로(Tokai No. 1: 1998년에 폐쇄)가 운영을 시작하였다. 새로운 원자력발전소 건설 필요성이 대두된 계기는 1973년 최초의 오일 쇼크로, 에너지원에서 석유 의존도를 낮추기 위한 것이었다.

원자력발전소는 지난 20년간 꾸준히 증가하여, 일본에는 총설비용량이 45,752MWe에 이르는 52기의 원전이 현재 가동 중이다(그림 1).

〈그림 2〉에서 볼 수 있듯이, 1973년 총전력 생산의 2.4%에 불과하던 원자력은 2002년 현재 연간 총전력 생산의 31.2%인 950TWh를 공급하고 있다. 반면 같은 기간 석유의 비율은 71%에서 10.2%로 감소하였다(그림 2).

현재 국가 일차 에너지원에서 석유의 비중은 77%에서 50% 이하로 감소한 반면, 원자력은 13%를 차지하고 있다(그림 3). 그 사이 화석

“

원자력은 현재 일본의 전체 전력 생산의 3분의 1을 차지하고, 이산화탄소 배출을 줄이면서 자금을 높일 수 있는 주요 전원이다. 이와 함께 방사선 응용을 위한 연구 개발이 이루어지고 있고, 산업·농업·의료 분야에서 다양한 생산물을 얻고 있다. 중성자·전자·광자·양성자 등과 같은 다양한 종류의 방사선이 과학과 기술 진보에 훌륭한 수단으로 기여하고 있다.

”

연료 사용으로 인한 이산화탄소 배출이 전 세계적으로 가장 심각한 환경 문제로 대두되었다. 이와 관련하여 1997년 교토 의정서가 체결되었고, 일본은 평균 온실 가스 배출량을 2008년과 2012년 사이에 1990년도 수준 대비 6%를 감축하기로 하였다.

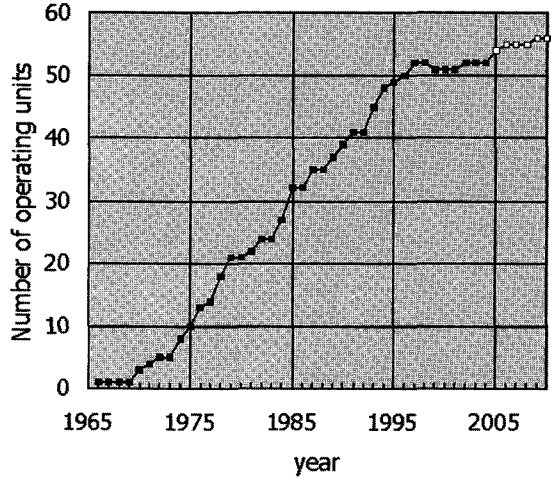
이산화탄소 배출량을 줄이기 위해서는 가능한 한 에너지를 절약하고 태양열이나 풍력과 같은 재생 에너지를 도입하는 것도 중요하지만, 원자력 발전량을 늘리는 것도 매우 중요하다.

원자력 발전량을 늘리기 위해 일본에서는 최소한 4기의 원자로가 건설 중에 있고, 여러 기가 계획 단계에 있다(그림 4)

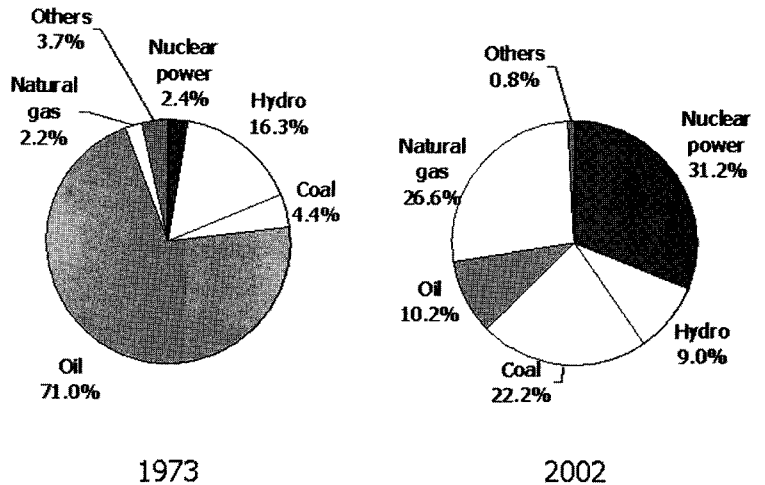
최근 수 년간, 일본 원자력발전소의 연평균 이용률은 85%를 유지하고 있다(그림 5). 13개월마다 주기적으로 50일 또는 그 이상이 소요되는 검사를 정부가 수행하고 있기 때문에 90% 이상의 이용률을 달성하기란 매우 어렵다.

〈그림 5〉를 보면 2002년 중반부터 작년까지 BWR의 이용률이 떨어지고 있는데, 이는 2002년 8월 동경전력의 모든 원전에 대한 운영 중지 때문이다.

동경전력은 1980년 이후 실시한 자체 검사에서 자사 소유 발전소들의 노심 슈라우드 결함을 발견하였음에도 불구하고 이를 규제 기관(원



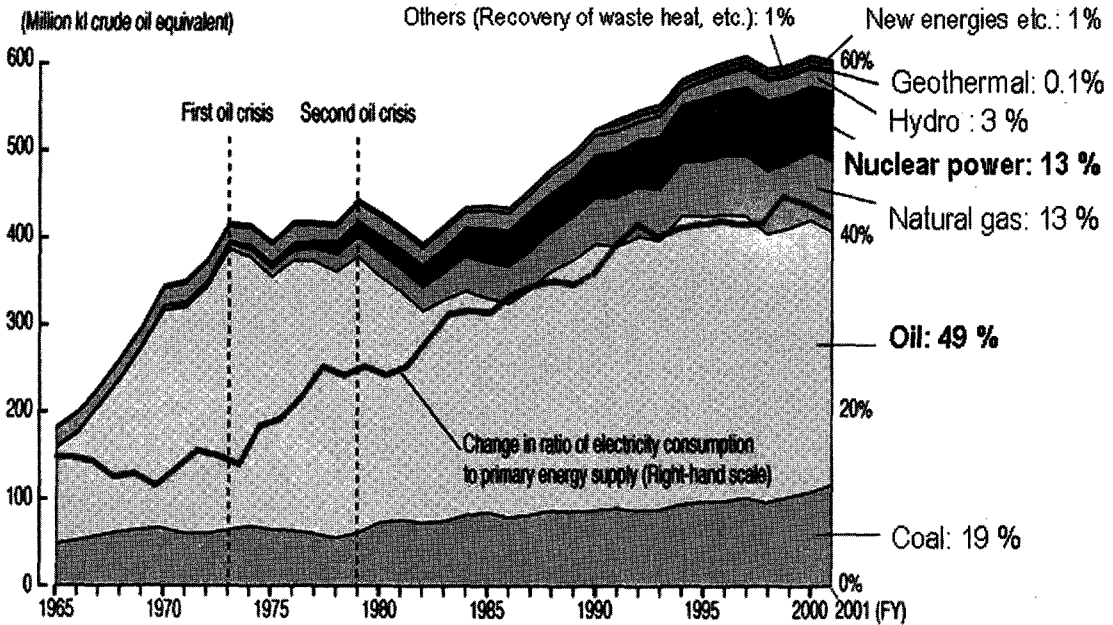
〈그림 1〉 일본 원자력발전소 수 변화



〈그림 2〉 일본의 전력 생산

자력 및 산업 안전위원회; Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA))에 알리지도 않고 균열에

대한 보수 기록을 삭제하거나 은폐 하였다. 이러한 데이터 위조가 1991년과



Note: Before FY1989, a different method was used to formulate statistics.

Source: General Energy Statistics (Energy Balance Table)

〈그림 3〉 일본의 1차 에너지원 변화. 「Energy in Japan 2003」 by METI.

1992년에 이루어진 규제기관의 현장 조사에서 발견되어 동경 전력뿐 아니라 원자력 산업계 전체가 신뢰를 잃었다. 동경전력은 자사 소유의 17개 원전을 정밀 안전 검사를 위해 정지해야만 했다.

이러한 사건의 재발을 막기 위해 관련 법규가 개정되어, 인허가자가 자체적으로 수행하던 검사는 규제기관의 주기적 검사로 바뀌었다.

그리고 2003년 10월에는「Rules on Fitness-for-Service for NPPs」가 주기적 검사에서 결함이 발견되면 보수하지 않고 운전을 재

개하는 것이 옳은지를 판단하기 위해 그 건전성을 평가하도록 강화되었다.

최근 전력 회사들은 BWR보다 더 크고 개선된 1,350MW 용량의 ABWR을 건설하려고 하고 있다. 또한 완전한 MOX 노심을 사용하는 ABWR의 건설이 계획중이다.

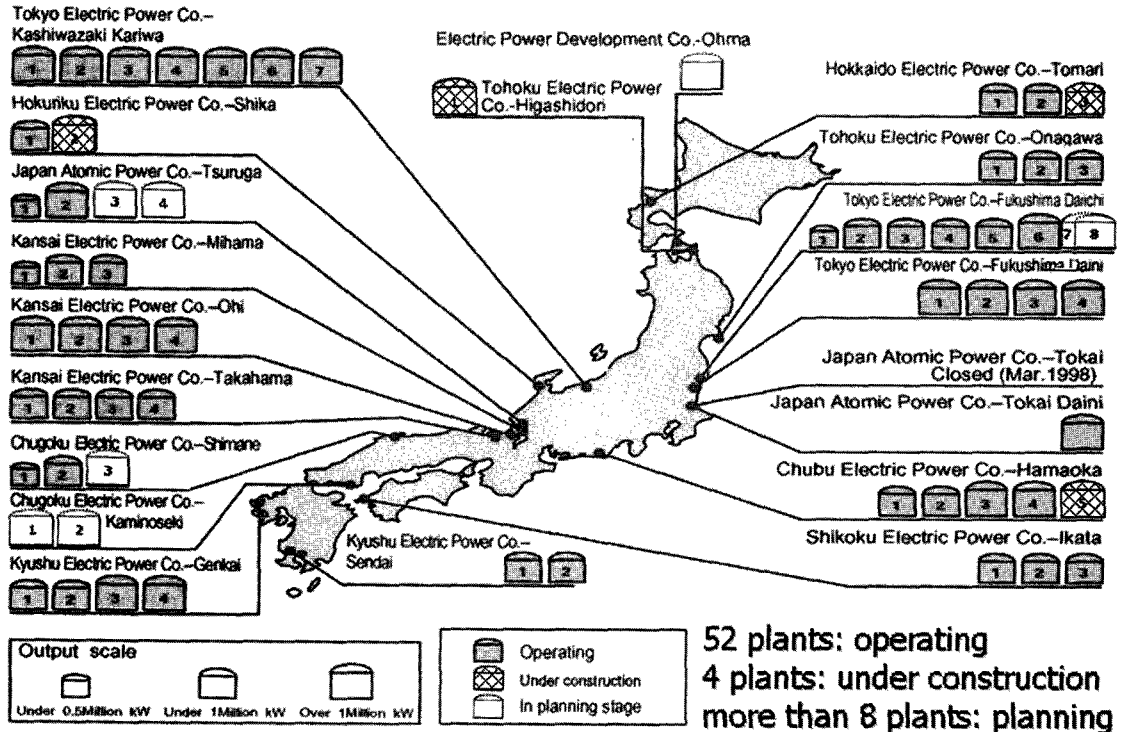
PWR은 연료의 연소도를 48,000MWd/t에서 55,000MWd/t으로 늘릴 계획이며, 1,500MW급의 APWR 건설 또한 계획 단계에 있다.

물론 에너지의 자급률이 4%에

불과하고 원자력을 포함하더라도 20%에 불과하다는 것이 여전히 문제로 남아 있다(그림 6)

2000년 3월부터 일본에서도 전력 시장의 자유화가 단계적으로 진행되고 있어, 원자력이 다른 에너지원에 비하여 가격 경쟁력이 있는지 논쟁이 이루어지고 있다.

논쟁의 근거로써 말기 비용-사용후연료의 중간 저장 시설, 재처리 시설, MOX 연료 가공 공장의 건설과 운영 및 정비 비용, TRU 폐기물과 고준위 방사성 폐기물 처리 비용, 재처리 시설의 철거 비용 등을

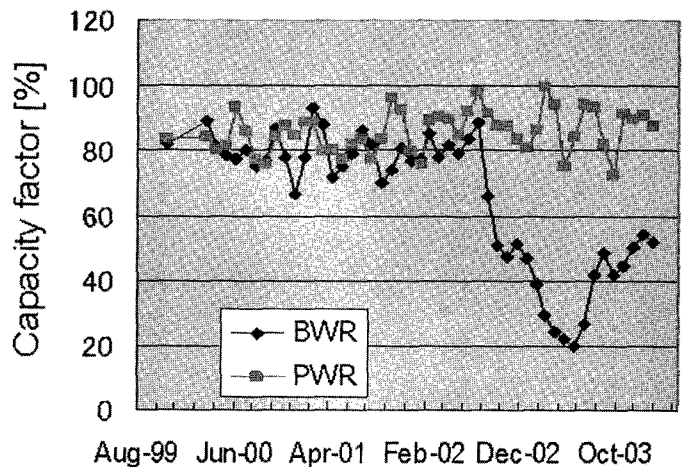


〈그림 4〉 일본의 원자력발전소 (2004.3 현재)

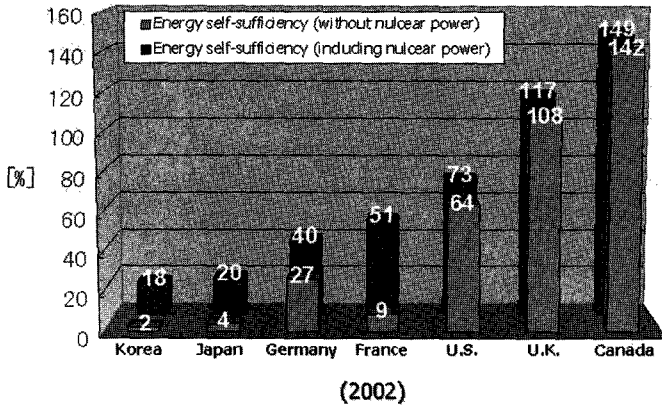
포함한 원자력의 가격 평가가 이루어졌다.

평가 결과 말기 비용은 0.81 엔/kWh으로 말기 비용을 포함한 원자력의 총전력 생산 비용은 5.3엔/kWh이다. 이를 토대로 다른 에너지원과 비교하더라도 원자력은 여전히 가격 경쟁력을 가지고 있다.

그러나 전력 시장이 점차 자유화 되는 환경에서 이산화탄소 배출을 줄이고 자급률을 높이기 위해 민영부분의 원자력을 어떻게 활성화시킬지 여전히 논의되고 있다. 왜냐하면 원자력 발전은 막대한 초기 투자비용뿐 아니라 부지 선정부터 방사



〈그림 5〉 일본의 원자력발전소 이용률 추이 (출처: Japan Atomic Industrial Forum, Inc.)



〈그림 6〉 각국의 에너지 자급률

성 폐기물 처리까지 매우 긴 시간이 소요되기 때문이다.

원전 연료 주기와 방사성 폐기물 처분

1. 플루토늄 이용

일본은 부존 자원이 빈약한 나라이고 원자력 발전이 주요 에너지원 중 하나이기 때문에, 천연 우라늄 자원을 더 효과적으로 이용할 수 있는 연료 주기를 구축하는 것이 필수적이다.

일본 원자력 정책의 첫 단계는 경수로에 플루토늄을 재사용하는 것이고, 최종 단계는 고속증식로를 이용해 다양한 플루토늄 재사용 사이클을 구축하는 것이다 〈그림 7〉.

일본 내 BWR과 PWR에서의

MOX 연료 부속 어셈블리의 조사 시험을 포함하여 플루토늄을 경수로에서 사용하기 위해 필요한 연구 개발 및 안전성 분석이 이미 끝났음에도 불구하고, MOX 연료 제조 공정에서 해외사의 데이터 위조 사건이 발생하여 플루토늄의 경수로 사용이 지연되고 있다.

최근에야 몇 개의 경수로에서 플루토늄 사용을 시작할 만한 우호적인 여건이 조성되었다. 최종적으로 16개 내지 18개 경수로가 MOX 연료를 사용할 것으로 예상된다.

2. 고속증식로 개발

일본에서 고속증식로 개발은 1960년대에 시작되어 지금까지 진행되고 있다. 나트륨 냉각 실험 고속로 「JOYO」와 프로토타입 고속

로「MONJU」가 건설되었다.

JOYO는 1977년 이래로 성공적으로 운영중이며, 현재 두 차례의 개선을 통해 140MWt로 운영되고 있다. MONJU는 나트륨 누설 사고 때문에 8년 동안 운영되지 못했으나, 지방 정부의 최종 승인에 따라 곧 발전소 변경 작업이 시작될 것이다.

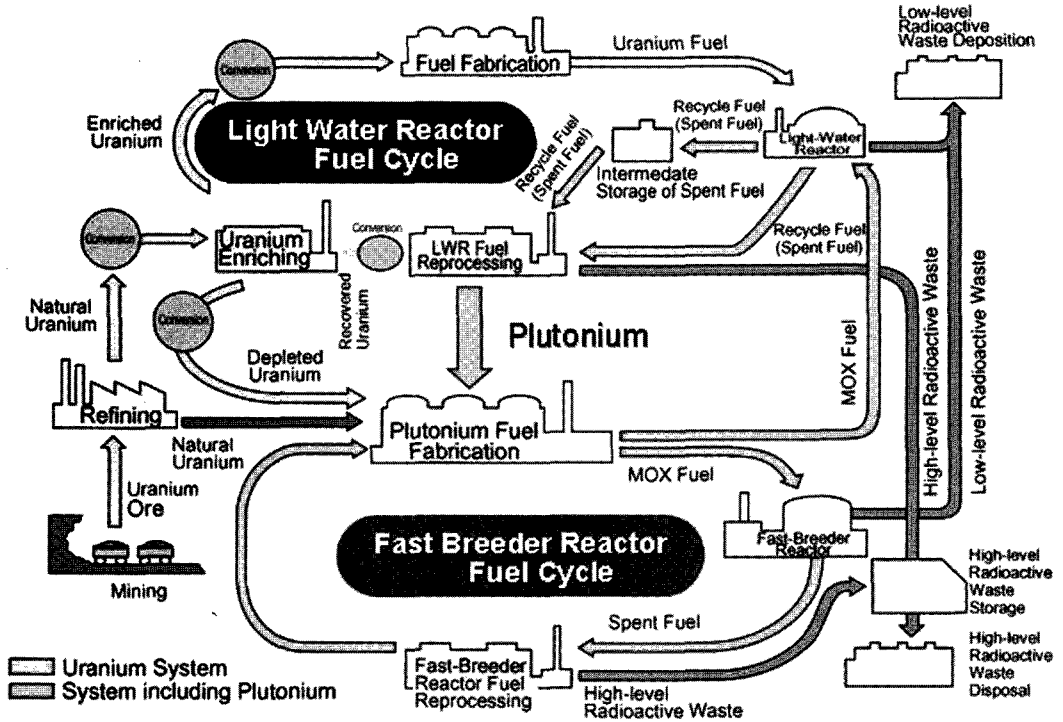
또한 고속증식로 계통-고속증식로 계통과 관련하여 평가해야만 하는 냉각재의 기술적 선택 사항, 연료 형태, 재처리 및 연료 제작 등 광범위한 분야에서-의 실용성 연구가 수행되고 있다.

또한 일본은 4세대 원자로 국제 포럼(Generation-IV International Forum: GIF)에도 적극적으로 참여하고 있다.

3. 재처리

〈그림 8〉에서 알 수 있듯이 일본에서 사용후연료 재처리의 연구 개발은 JAERI에서 처음 이루어졌고, 1968년 성공적으로 200그램의 플루토늄을 추출하였다.

1977년에는 「원자로와 원전연료 개발 토키아 공장(Tokai Works of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation; PNC)(전신 일본 핵주기 개발 협회(Japan Nuclear Cycle Development Institute : JNC))」이 0.7 t/day의 처리 용량을 가지



〈그림 7〉 고속증식로 사이클을 포함한 원전 연료 주기
(Genshiryoku Zumenshuu by FEPCO)

는 재처리 공장을 건설하였다. 이 공장은 지금까지 1,000t 이상의 사용후연료를 재처리하였다(그림 8).
 ○1958 JAERI에서의 재처리 연구
 ○1968 재처리 벤치 스케일 시험 (JAERI) (200g 플루토늄 추출)
 ○1970년대 해외 공장 재처리(영국과 프랑스)(약 7100t의 사용후연료)
 ○1977 도카이 재처리 공장(PNC) 0.7t/day (약 1000t의 사용후연료)
 ○2006 로카쇼 재처리 공장

(JNFL) 800t/year

전기 회사들은 국내 재처리와 병행하여 프랑스와 영국의 재처리업자들과 계약하여 총7,100톤의 사용후연료를 재처리했다.

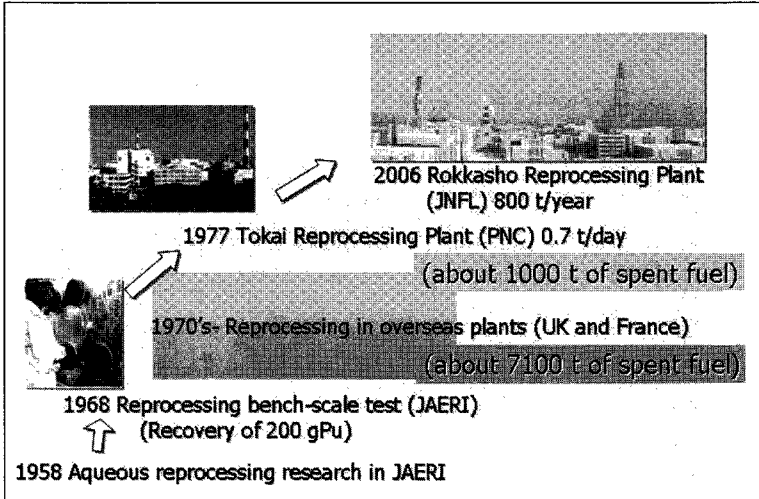
국내에 연간 800톤의 재처리 용량을 가지는 상용 공장 건설이 완료되어 2006년부터 재처리가 시작될 것이다.

또한 JAERI·JNC·CRIEPI(Central Research Institute of Electric Power Industry)와 같은 연구 기

관들은 환경 영향이 적으면서 더 경제적이고 확산이 적을 것으로 예상되는 단순화된 수화(aqueous) 재처리, 건식 재처리 등의 신기술 개발을 수행하고 있다.

4. 방사성 폐기물 처분

원자력 시설로부터 나오는 방사성 폐기물 관리에 대한 우려 때문에, 1995년부터 2000년까지 AEC에서 대대적인 논의가 이루어졌다. 폐기물은 〈표 1〉에서 표시된 바



〈그림 8〉 일본에서의 재처리 활동 과정

〈표 1〉 일본에서의 방사성 폐기물 분류

폐기물		공장
고준위 방사성 폐기물		재처리 공장
저준위 방사성 폐기물	원자력발전소	폐기물 원자력발전소(운영 및 정비와 해체)
	TRU 포함 폐기물	재처리 공장과 MOX 성형 공장
	우라늄 폐기물	농축 공장과 연료 가공 공장
	RI 시설 및 기관 폐기물	연구 실험실, 병원과 산업체

와 같이 고준위 방사성 폐기물과 저준위 방사성 폐기물로 구분된다. 저준위 방사성 폐기물은 원자력발전소로부터 나온 폐기물, 초우라늄원소(TRU)를 포함한 폐기물, 우라늄 폐기물과 RI 시설 및 기관으로부터 나온 폐기물을 포함한다.

종류별로 방사성 폐기물 처분 개념은 이미 수립되었고, 처분 개념에 따른 안전 규제, 안전 지침과 조치

들이 논의중으로 일본의 원자력안전위원회(NSC ; Nuclear Safety Commission)와 NISA에 의해 앞으로 제정될 것이다.

또한 방사성 폐기물로 다룰 필요가 없는 방사성 준위가 매우 낮은 폐기물에 대한 관리 방안이 논의중으로, NSC는 비방사성 폐기물로 분류하는 준위를 결정할 것이다(예-면제 준위 ;clearance level).

그 가운데 고준위 방사성 폐기물의 처분 사업을 수행하고 전기 회사가 적절한 처분 기금을 관리하기 위한 조직을 설립하기 위해 필요한 규정은 2000년에 만들어져, 처분 사업 수행 조직(일본 핵폐기물 관리조직 ; Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO)이 설립되었고 2002년에 부지와 토양에 대한 일차 조사를 통해 후보지를 모색하는 작업에 착수했다.

또한 처분에 관련된 연구와 개발이 이 분야에서 광범위하게 이루어지고 있다.

재처리 과정에서 발생하는 고준위 방사성 액체 폐기물의 독성을 최소 100분의 1로 줄이기 위한 방법으로 격막(partitioning) 기술과 변형(transmutation) 기술에 대한 연구 개발이 JAERI · JNC · CRIEPI에서 이루어지고 있다.

가속 유도 시스템(ADS; Accelerator driven system)과 고속증식로 시스템(FBR system)이 이러한 처리 방법의 후보 기술이다.

ADS 시스템은 경수로 연료 주기 시스템과 통용 가능성이 있고 더 안전한 특성을 보이기 때문에 큰 관심이 집중되고 있다. JAERI는 부분적으로 부악티나이드(minor actinides) 변형을 조사하기 위한 고밀도 양자가속기(J-PARC)를 건설하고 있다.

원자력 신기술

1. 방사선 응용 신기술

방사선은 산업·농업·의료 등 다양한 분야에서 사용되어 왔다. 특히 JAERI에서는 폴리머를 전자빔이나 감마선을 이용하여 공중합(grafting)하거나 교차 결합(cross-linking)하여 새로운 기능을 가진 신물질을 만들어내고 있다.

예를 들면 해수에서 우라늄을 흡착하는 새로운 흡착제와 연료 전지를 위한 전해막이 개발되었다. 해수에서 우라늄을 흡착하는 것은 해수 1톤당 3mg이 녹아있는 우라늄을 얻는 것이다. 다른 예로는 이온빔 조사를 통해 돌연변이를 만드는 것이다. 다양한 색과 모양을 가진 새로운 품종의 카네이션이 220MeV 탄소광을 이용해 개발되었다.

다양한 종류의 방사선이 새로운 과학 기술의 도구로써 사용될 수 있다. 중성자는 재료과학, 생명과학과 엔지니어링 기술 분야의 다양한 연구에 활용될 수 있다.

단백질의 구조 분석, 특히 단백질의 기능을 이해하는 데 매우 중요한 단백질 중의 수소와 수산화물의 구조 분석 연구에 이용된다.

중성자를 활용하는 또 다른 연구 활동으로는 Co-Cr 필름 내의 마그네틱 도메인의 구조 분석과 산업 생 산품 및 부품의 비파괴 잔류 스트레 스 분석이 있다.



〈그림 9〉 일본 고준위 방사성 폐기물 처분 계획 일정

이와 같은 연구에는 지금까지 연구용 원자로의 중성자가 이용되어 왔으나, 다수의 중성자 활용자의 요구에 부응하고 중성자 변형, 핵입자 물리학의 증진을 위해 JAERI와 고에너지 연구 조직(High Energy Research Organization; KEK)이 JAERI의 토카이 시설 내에 J-PARC를 건설하고 있다.

싱크로트론 방사선은 재료의 구조와 동특성(dynamic behavior)을 분석하는 훌륭한 수단이다.

일반적으로 고체 지지체에 미세하고 값비싼 금속 입자를 도포하여 자동차 엔진에서 배출되는 기체의 해로운 성분을 제거하는 촉매로 사용한다. 최근에, 일본의 다이하츠사(Daihatsu Motor company)는 촉매 능력 저하가 일어나지 않는 납

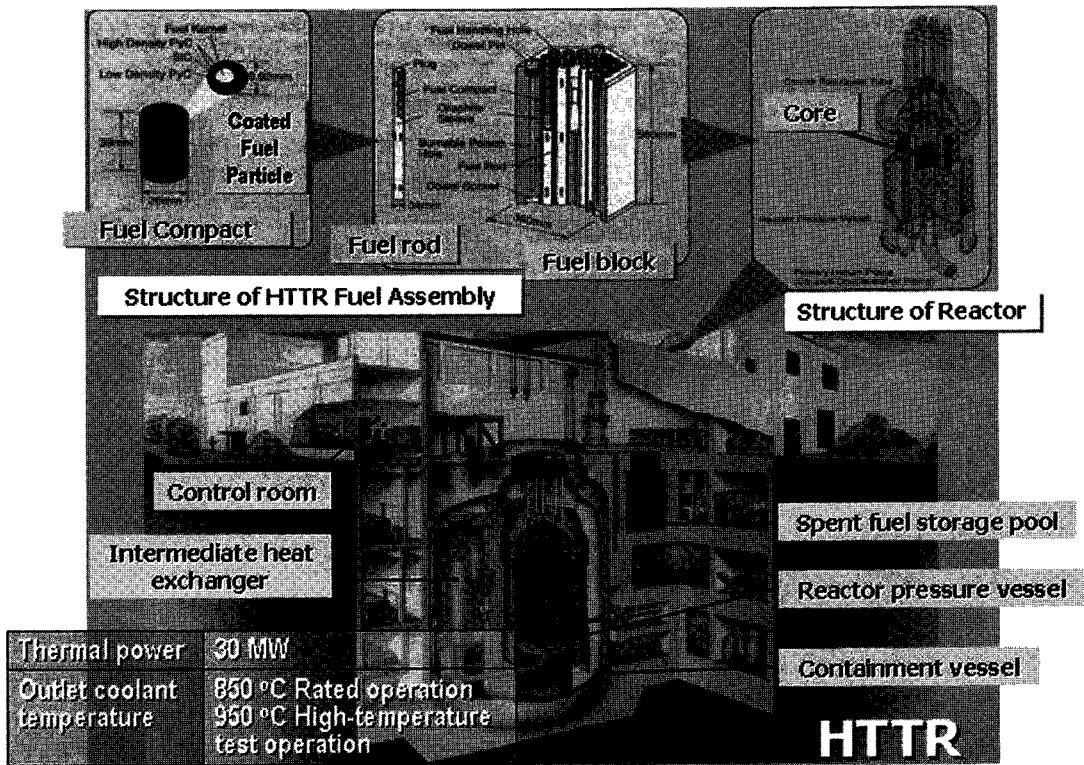
페로브스카이트(Pb-perovskite) 촉매를 개발하였다. 이는 JAERI 과학자들이 Super Photon ring 8 GeV(SPring-8)의 싱크로트론 방사선을 활용한 결과이다.

2. 고온 기체 냉각로와 수소 생산

고온 기체 냉각로 기술과 실용 원자로에서 수소 생산에 핵반응열을 활용하는 것은 새로운 원자력의 분야를 여는 데 매우 중요하다.

일본에서 30MW의 HTTR 시험로가 JAERI에서 건설되었고, 1998년 최초 임계에 도달하여 지금까지 운전중에 있다.

출구 냉각재 온도는 원자로 출구 온도로는 세계 최고로 높은 온도인 850℃로 열원으로써 광범위한 활용이 기대되는 수치이다. 조만간



〈그림 10〉 HTTR 개요

HTTR 중에서도 매우 높은 값인 출구 온도 950℃까지 얻을 수 있을 것이다.

탄소를 사용하지 않고 수소를 생산하는 방법인 물의 고온 열화학 분해에 핵반응열을 활용하는 것에 초점을 맞추고 있다. 요오드와 황(Iodine and Sulfur; IS) 공정이 선택되어 개발 중에 있다.

2003년 화학량적인 수치대로 20 시간 동안 30 liters/h의 비율로 연속 수소 생산이 이루어졌다. 현재

준비 중인 것은 시간당 1m³의 파일럿 스케일 테스트이다.

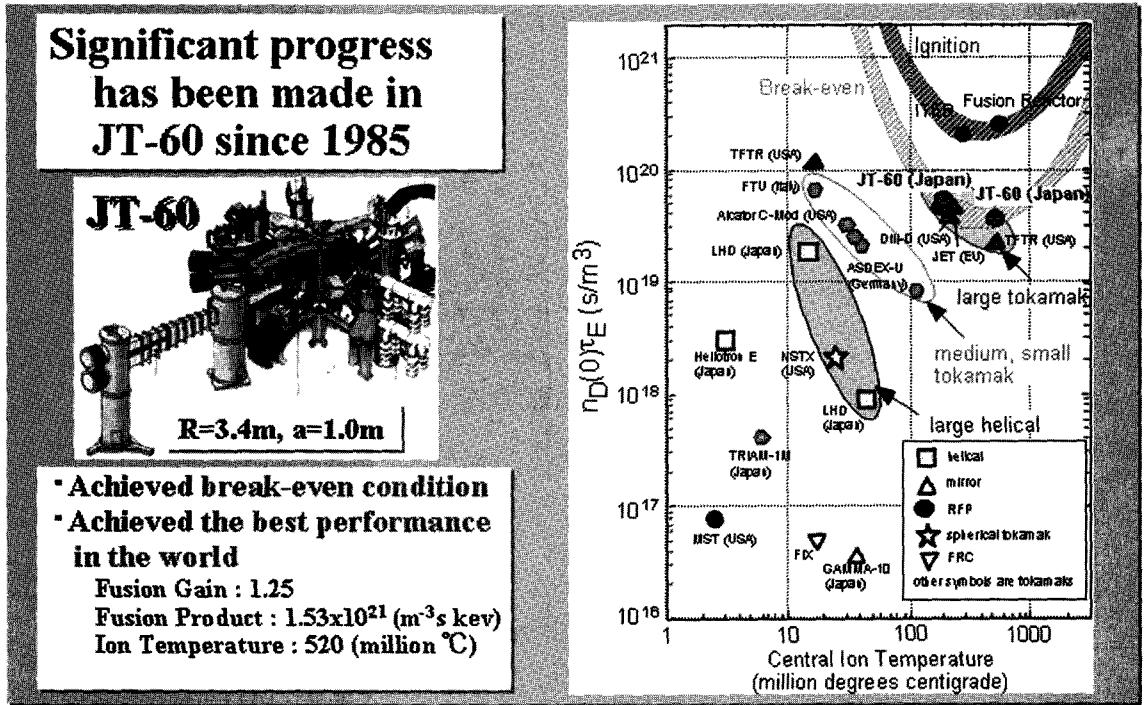
3. 핵융합 연구와 ITER 프로젝트

일본은 또한 장기간 핵융합 연구 개발에 투자해왔다. 대학과 국립연구소에서는 토카막·헬리컬·RFP, Mirror and Laser와 같은 다양한 핵융합 시스템을 연구하였다.

JAERI 토카막-60(JT-60)은 1985년 운전을 시작하여 1996년

가을에 브레이크이븐 상태(break-even condition)에 도달하여 〈그림 11〉에서 보는 바와 같이 핵융합 이득(fusion gain =1.25), 핵융합 생산량(fusion product = 1.77 × 1028m³ s °C), 이온 온도(Ion temperature = 520 million °C)의 세계 기록을 포함한 주목할만한 과학적 결과를 계속 생산하고 있다.

결론적으로, 〈그림 12〉에서 보는 바와 같이 JT-60은 국제 열핵실험로(ITER ; International



〈그림 11〉 JT - 60의 연구 개발 과정

Thermonuclear Experimental Reactor)의 설계 활동에 크게 기여해왔다.

ITER 프로젝트는 중수소-삼중수소의 연소 플라즈마를 얻고 핵융합 에너지의 과학적·기술적 실용성을 보여주기 위한 국제적인 합동 작업이다.

개념 설계 작업(CDA ; Conceptual Design Activities)은 1988년 유럽연합·일본·러시아 연방과 미국의 협력으로 시작되었다.

1988년부터 1990년까지 개념 설

계 작업을, 1992년부터 1998년까지 공학 설계 작업(EDA ; Engineering Design Activities)을 수행하였다.

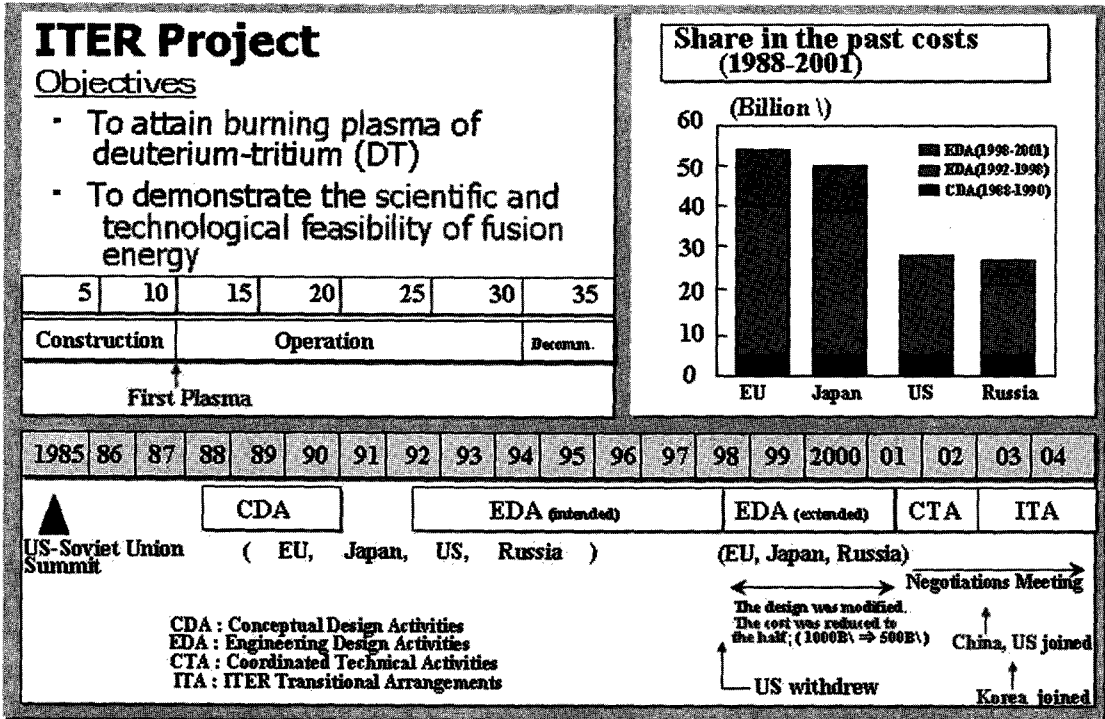
1998년 7월에 ITER 참여국은 재정적인 이유 때문에 제안된 설계대로 건설을 진행할 수 없었다. 그래서 비용을 줄이기 위해 선택 사항들을 조사하기로 결정하였다.

ITER 프로젝트에 소극적인 미국을 제외한 ITER 참여국에 의해 공학 설계 작업이 광범위하게 재수행되어 2001년 7월에 설계 변경이 완

료되었다. 결과적으로 ITER 건설을 위한 비용은 1조(1000B)엔에서 5천억(500B)엔으로 줄어들었다.

공학 설계 작업 과정에서 신기술의 실행 가능성을 입증하기 위한 확장된 연구 개발이 수행되었고 중앙솔레노이드 모델 코일과 진공 베셀 섹터와 같은 일곱 개의 대형 연구 개발 과제가 ITER의 주요 부품의 제작 가능성을 보이기 위해 이루어졌다.

개념 설계 작업을 시작한 이래로, 대략 1천 6백억(160 B)엔이 소



〈그림 15〉 ITER 프로젝트 진행 과정

요되었고 비용은 ITER 참가국인 유럽연합·일본·미국/러시아가 각각 대략 3분의 1씩 부담하였다.

이러한 ITER 활동을 통해 현재는 건설 전 준비는 모두 이루어진 상태이다. 2003년 미국이 프로젝트에 다시 참여하고, 중국과 한국이 새로이 참여하게 되었다.

결론

원자력은 현재 일본의 전체 전력 생산의 3분의 1을 차지하고, 이산화탄소 배출을 줄이면서 자급률을 높일 수 있는 주요 전원이다.

경수로에 플루토늄 이용을 추진하는 것은 고속중성자로 연료 주기와 병행할 필요가 있다.

그러나 전력 시장의 자유화가 이루어지면서 어떻게 민영 부분에 원자력을 활성화시킬지의 문제가 대두되었다.

방사선 응용을 위한 연구 개발이 이루어지고 있고, 산업·농업·의료 분야에서 다양한 생산물을 얻고 있다. 달리 말하면, 중성자·전자·광자·양성자 등과 같은 다양한 종류의 방사선이 과학과 기술 진보에 훌륭한 수단으로 기여하고 있다.

일본은 고온 기체 원자로의 개발 분야에서 세계적인 개척자의 위치에 있는 국가이고, 원자력 에너지를 수소 생산과 같은 비전력 생산 분야에 적용하기 위해 더 많은 노력을 기울이고 있다. IS 공정으로 물을 고온 열화학 분해하는 연구가 일본에서 진행중이다.

일본은 핵융합 연구에서 세계 최고 수준이며, ITER 프로젝트 시작 단계부터 깊이 관여해왔다. 일본은 ITER의 건설이 빠른 시일 안에 차질없이 시작되어 유용한 이득을 취할 수 있기를 기대하고 있다.