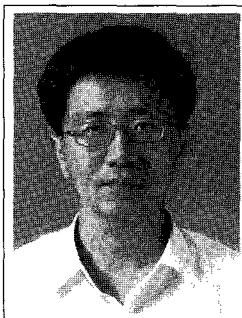




핵변환 기술 현황과 전망

박 원 석

한국원자력연구소 핵물리공학팀 책임연구원



안전성에 대한 지속적인 도전, 그리고 사용후 핵연료 문제에 대한 대중적 거부감은 원자력 발전이 가지는 다양한 장점에도 불구하고 쉽사리 회색되지 않고 있다.

그러나 기후 온난화를 유발하는 주범이 화석 연료라는 점이 가시화되고, 대중들이 이상 기후에 대해서 가지는 체감성이 차츰 심각해지면서 비록 매우 느리지만 원자력에 대한 시각의 변화를 감지할 수 있다.

따라서 원자력 발전이 화석 연료에 대해 조만간 확실한 비교 우위를 차지할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 이러한 미래 원자력 수요가 단지 대안 부재의 선택이 아닌 최선의 선택이 되도록 하기 위해서는 기존 원자력 에너지가 가지고 있는 문제점들에 대한 해결책을 찾는 기술 개발 연구가 보다 적극적으로 수행되어야 한다.

기준의 원자력 발전이 가지고 있는 가장 심각한 문제 중의 하나가 사용후 핵연료 문제이다.

그리고 이를 해결하기 위하여 미국·일본·유럽 등 선진국을 중심으로 다양한 목소리와 기술적 대안이 제시되었으며 전문가들 사이에 수많은 논쟁이 진행중이다.

사용후 핵연료 문제의 해결책은 크게 두 가지 측면에서 접근되고 있다. 첫 번째는 일면 수동적인 방안으로서 지하 깊은 곳에 묻어두는 「심지층 처분법」이고 두 번째 방안은 보다 적극

적인 방법으로서 사용후 핵연료에서 문제가 되는 장수명 악티나이드 핵종을 모두 소각시키자는 「핵변환 방법」이다.

심지층 처분법이 현재의 공학적 기술로 예측할 수 없는 오랜 기간의 관리를 요구한다는 점과 사용후 핵연료는 또 다른 에너지 자원이라는 측면에서, 핵변환법 개발에 대한 필요성이 제기되고 있다.

특히 최근 들어 핵변환 기술이 미래 원자력 기술의 중요한 축의 하나로 부각됨으로써 보다 큰 힘을 얻고 있다.

기술적 고찰

핵분열 반응에 의해 에너지를 얻고 나면 그 부산물로 방사성 붕괴(Radioactive)를 하는 핵종들이 생성된다. 원자력발전소에서 방출되는 사용후 핵연료에는 초우라늄 원소(Transuranium), 핵분열 생성물 등

과 같은 장반감기의 방사성 핵종이 다양 포함되어 있으며 이들이 환경에 노출될 때 또 다른 환경 문제를 유발 시킨다.

따라서 원자력 발전이 도입된 초기부터 이를 방사성 핵종을 다시금 비방사성 핵종으로 전환시키는 일명 핵종 변환(또는 핵종 소멸) 기술을 연구해왔다.

핵변환 기술은 물질의 물리 화학적 특성을 바꾸는 기술로서 핵의 구조를 변환시키는 것이다.

원자핵은 중성자와 양성자로 구성되어 있으며 두꺼운 전자층에 쌓여 있다. 따라서 핵의 구조를 바꾸기 위해서는 전자층을 뚫고 들어갈 수 있어야 한다.

이들 핵의 구조를 바꿀 수 있는 기술적인 방법으로서는 <표 1>에 제시된 바와 같이 ① 핵파쇄법 ② 광핵반응법 ③ 핵반응법 등이 주로 사용된다.

핵파쇄법은 높은 에너지로 가속된 무거운 입자를 원자핵과 충돌시켜 핵을 파괴하는 방법이다.

주로 양성자가 충돌 입자로 사용되며, 가속기의 발달과 더불어 중성자 생산 목적, 또는 물질 특성 분석을 위해 많이 사용되어 왔다.

그러나 현실적으로 가속기에서 생산된 고에너지 입자의 핵파쇄(Spallation) 반응을 이용하여 원자력발전소에서 생성된 초우라늄 원소와 장수명 핵분열 생성물을 직접 핵변환 시킨다는 것은 그 비용 및 요구

(표 1) 주요 핵변환 방법

| 핵변환법 | 사용 입자 | 원리 | 대상 핵종 | 비고 |
|------|---------------------------------|----------------------|--------|-------------|
| 핵파쇄 | 가속된 양성자 ($E > 500\text{MeV}$) | 핵자와 충돌시켜 핵자체를 파괴시킴 | 모든 핵종 | 경제성이 없음 |
| 광핵반응 | 가속된 전자 ($E > 20\text{MeV}$) | Bremsstrahlung 반응 이용 | Cs, Sr | 경제성이 없음 |
| 핵반응 | 중성자 | 중성자에 의한 포획 또는 핵분열 반응 | 모든 핵종 | 현실적으로 가장 타당 |

되는 가속기 기술 측면에서 많은 문제점을 가지고 있다.

예를 들어 1GWe 가압 경수형 원자력발전소에서 방출되는 장수명 악티나이드와 핵분열 생성물을 생성률과 동일한 비율로 소각시키기 위해서는 약 700mA의 1GeV 양성자가 요구된다.

이에 투입되어야 할 입자 가속에너지만도 1GW 이상이 소요된다. 따라서 현실적으로 제작이 거의 불가능할 뿐더러 매우 비경제적이다.

광핵반응법은 전자를 20MeV 이상 가속하여 핵자와 충돌시킴으로써 Bremsstrahlung 반응을 유도하는 방식이다.

그러나 광핵반응법은 모든 핵자에 적용할 수 있는 방법은 아니다. 알려진 바에 의하면 Cs · Sr 등과 같은 핵자에만 적용이 가능하다.

현재 사용후 핵연료에서 문제가 되는 대부분의 핵종이 악티나이드임을 감안하면 기술적 한계성이 크다. 따라서 광핵반응법은 사용후 핵연료 핵변환 방법으로는 적절하지 못하다.

핵반응법은 중성자를 핵자와 반응시켜 포획 또는 분열 반응을 유도함으로써 핵종을 변환시키는 방법이다.

장수명 악티나이드의 핵변환은 엄밀한 의미에서 핵분열 반응을 통해서만 발생한다. 그리고 악티나이드의 핵분열은 막대한 에너지의 생산과 더불어 핵변환에 사용이 가능한 새로운 중성자를 방출한다.

따라서 핵반응법에 의한 사용후 핵연료 핵변환은 필요한 에너지도 얻고 불필요한 물질을 소각하는 일종의 소각로 개념으로서 충분한 기술적 타당성과 경제성을 갖춘 방법이다.

현재 전세계적으로 수행되고 있는 핵변환 연구는 상기에서 언급한 방법 중 대부분 세 번째 방법인 핵반응법을 기본으로 하고 있고, 결국 핵변환 연구는 일면 핵변환용 원자로 개발로 이어지고 있다.

세계적 개발 현황

핵변환 연구는 미국 · 유럽 공동체 · 일본 · 프랑스 등 원자력 선진국



을 중심으로 국가 프로그램 형식으로 수행되고 있다.

각국이 추구하고자 하는 시스템 특성은 해당 국가의 핵연료 주기 정책에 따라서 약간씩 다르지만 기술적으로 매우 유사한 양상을 띠고 있다.

초기 핵변환 연구는 경수로 또는 고속 증식로 등과 같은 기존의 원자로에 부분적으로 장수명 핵종을 장전하여 소각시키는 방안이 주류를 이루었다.

그러나 기존 열증성자로인 경수로의 경우 악티나이드 소멸 특성이 좋지 못하고, 일면 다량의 높은 원자 번호의 악티나이드 생성을 유발한다는 측면에서 점차적으로 관심의 대상에서 벗어져 갔다.

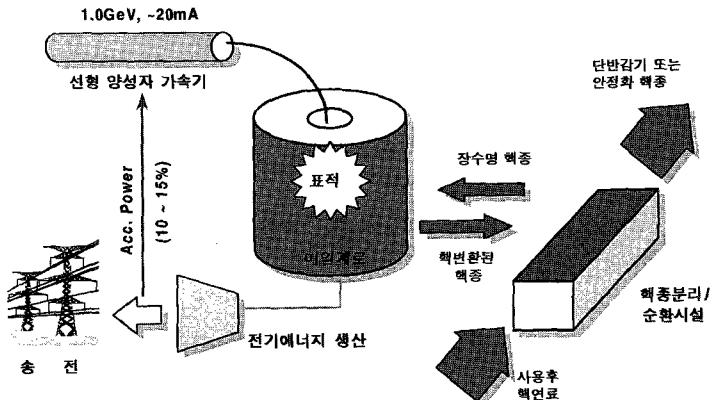
고속 증식로를 사용하는 개념은 종식으로 프로그램 자체가 여러 가지 연유로 흔들리면서 연구 활동이 줄었다.

최근 들어서는 핵변환 전용로를 이용한 소각에 연구가 집중되고 있으며, 핵변환이라는 물리적 현상보다는 핵변환로 설계 측면에 많은 연구가 진행되고 있다.

특히 원자력 선진국에서 수행되고 있는 대부분의 핵변환 관련 국가 프로그램이 핵적 안전성과 소각 능력 그리고 높은 핵비확산성을 가지는 가속기 미임계 핵변환로 연구에 집중되어 있다(그림 1).

1. 미국

미국은 사용후 핵연료를 Yucca



〈그림 1〉 가속기 미임계 핵변환 시스템 개념

Mountain에 처분하기로 이미 정책적 결정을 내린 바 있다. 그러나 예산상의 문제가 생기고 또한 전체 공정이 연기되는 등 계속적으로 많은 문제점이 제기되었다.

현재 알려진 바로는 2005년까지 인허가를 완료하고 2010년부터 운영을 시작하는 것으로 되어있다.

지층 처분이 가지는 문제점을 보완할 목적으로 91년 LANL(Los Alamos National Lab.)은 가속기 미임계 핵변환 시스템 ATW(Accelerator Transmutation of Waste)를 제안하였다.

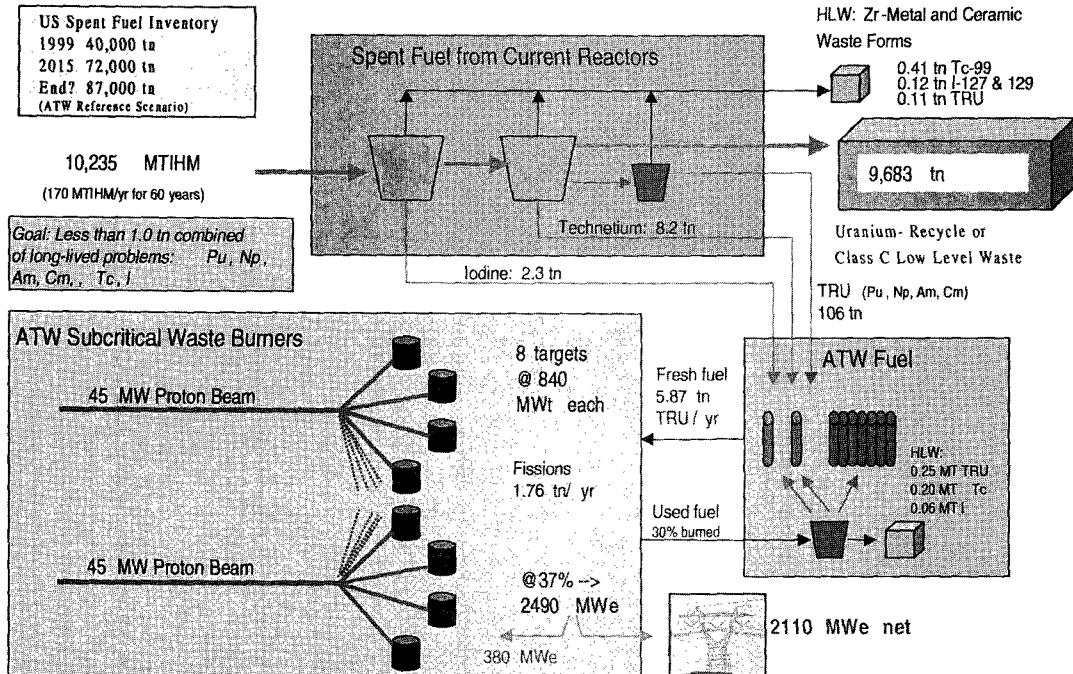
비슷한 시점에 에너지부(DOE) 장관의 요청에 의해 91년 국가연구위원회(National Research Council)가 주관이 되어 STAT(Separation Technology and Transmutation System) 위원회를 구성하여 핵종 변

환 기술에 대한 타당성 분석 연구를 수행한 바 있다.

96년 그 결론이 도출되었는데, 당시의 시점에서는 경제적인 이유 때문에 크게 이득이 없을 수 있지만 향후 10년 이내에 연구 개발에 착수할 필요가 있다고 지적하였다.

98년도 가을에 들어서 미국 국회(Congress)는 에너지부에 99년도 회계가 끝나는 99년 9월 말까지 LANL에서 수행중인 ATW 개념에 대한 연구를 수행하여 그 개발에 필요한 Roadmap을 작성하여 보고하라고 지시하였다.

에너지부는 99년 2월 DOE, LANL, ANL, BNL, National Academy of Science로부터 10명의 전문가를 차출하여 운영위원회를 구성하였고 Roadmap 작성을 위한 활



(그림 2) ATW를 이용한 장수명 핵종 처리 개념

동을 개시하였다.

현재 전체 계통 시나리오 개발 및 통합 분야, 가속기 분야, 표적 및 미 임계로 분야, 핵종 분리 및 처분 분야 와 같이 4개의 기술 그룹(Technical Working Group)을 중심으로 보고서 초안을 거의 완성한 상태이다.

대략적인 개요를 살펴 보면 2020~2030년에 대규모 데모용 시스템을 구축하고 이후 약 100년에 걸쳐서 미국 내 사용후 핵연료를 핵변환할 계획으로 있다.

Roadmap에서 제시한 장수명 핵종 처분 개념은 <그림 2>와 같다.

ATW 시스템은 고속 중성자를 이용하여 TRU와 Tc-99 · I-129 등과 같은 핵분열 생성물 소각에 설계 목표를 두고 있다.

또한 납-비스모스 혼합물을 냉각재로 사용함과 동시에 핵파쇄 표적으로 사용한다는 개념이다.

납-비스모스 냉각재 사용시 발생하는 여러 가지 재료학적 문제 및 핵파쇄 표적으로서의 문제점을 점검하기 위하여 ISTC(International Science and Technology Center)를 통하여 관련 실험 연구를 수행하고 있으며, 현재 LANL 내에 재료

시험을 위한 Pb-Bi Loop를 제작하여 기초 시험을 수행하고 있다.

그리고 표적 실험 장치를 러시아 IPPE에서 제작하고 있으며 2000년 가을 LANL로 수송하여 올 계획이다.

또한 ANL(Argonne National Laboratory)에서 개발한 건식 핵종 분리 기술(Pyrochemical Process)을 근간으로 보다 핵비확산성이 뛰어난 핵종 분리 기술을 개발하기 위하여 노력하고 있다.



2. 일본

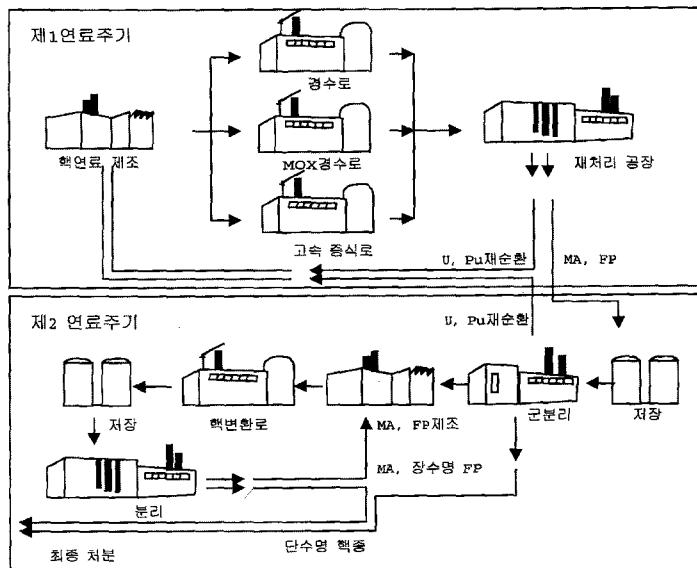
73년 일본원자력산업회의(Japan Atomic Energy Industry Forum)는 2년여간의 연구끝에 사용후 핵연료 관리의 한 방안으로서 핵종 변환에 대한 기술보고서를 출판하였다. 이후 일본에서는 핵변환에 대한 연구가 기초 연구 과제로서 장기적 관점에서 지속되어 왔다.

이러한 기초 연구 결과에 근거하여 87년 일본원자력위원회(Atomic Energy Commission)는 원자력발전소의 사용후 핵연료는 폐기물이라기 보다는 재생 가능한 유용한 자원이라는 결론을 내렸고, 이에 근거하여 88년 10월에 2000년까지 연구개발을 목표로 하는 장기 연구 프로젝트 OMEGA(Options Making Extra Gains from Actinide and fission products)를 제안하였다.

OMEGA 프로젝트에는 일본원자력연구소를 위시해서 전력중앙연구소(CRIEPI), 핵연료사이클개발기구(JNC) 등이 참여하게 되었고, 일본 정부는 89년 1월 OMEGA 프로젝트를 OECD를 통한 국제 공동 연구 형태로 확장 발전시켰다.

일본의 핵변환 연구는 JAERI와 JNC가 상호 경쟁 및 보완체제로 수행되고 있다.

JNC는 몬주 기술에 바탕을 두고 서 임계 고속 핵변환 시스템 연구를 수행하고 있다. 반면 JAERI에서는 가속기 미임계 기술에 바탕을 둔 핵



〈그림 3〉 JAERI의 Double Strata 개념

변환 시스템 연구를 수행하고 있다.

〈그림 3〉은 JAERI가 주장하고 있는 'Double Strata' 핵연료 주기 개념이다.

제1연료 주기는 상용 발전로 주기로서 플루토늄 재활용 개념이 도입되어 있고, 제2연료 주기는 제1주기에서 배출된 고준위 폐기물 등을 소각시키는 연료 사이클이다.

JAERI가 개발하고자 하는 가속기 미임계 핵변환 시스템은 고준위 폐기물에 있는 장수명 소수 악티나이드(Minor Actinide : 플루토늄이 제거된 초우라늄 원소들)과 핵분열 생성물을 소각시키는 데 목적이 있다.

미국과 비교해 소각 대상 핵종에

있어서 약간의 차이가 있다. 핵변환 기술을 개발하는 데 있어서 미국이 핵비확산성을 강조한 데 반해, 일본은 기술성과 경제성에만 주요 초점을 맞추고 있다.

JAERI 시스템의 특징은 미국과 마찬가지로 고속 중성자 시스템을 지향하고 있으며, 소수 악티나이드를 질화연료 형태로 제작하여 사용한다. 그리고 최근 들어 냉각재를 소듐에서 Pb-Bi로 수정하여 설계하고 있다.

3. 유럽공동체

90년대 초부터 유럽공동체 연구소인 스위스 CERN연구소에서 노벨 물리학상을 수상한 바 있는 Rubbia 박

사를 중심으로 연구가 진행되어 왔다.

시스템 개념은 가속기 미임계 개념이다. 원형 및 선형 가속기를 사용하는 방안에 대해 연구해 왔으며 주로 원형 가속기의 이용에 무게 중심을 두어왔다.

현재 가속기 미임계 시스템 관련 요소 기술의 공학적 검증에 많은 노력을 기울이고 있으며, 이미 핵파쇄 표적 및 미임계 핵분열 시스템 등에 대한 다양한 기초 실험을 완료하였다.

최근에는 가속기 미임계 핵변환 시스템의 관심 고조로 유럽연합 내 몇몇 주요 연구 기관들이 협력하여 프로젝트 IABAT(Impact of the Accelerator Based Technology)를 탄생시켰다.

IABAT는 연구 비용·시설 등을 상호 공유하여 가속기 미임계 시스템의 타당성에 대한 유럽연합의 평가를 수행하는 것을 목표로 하고 있다.

IABAT 프로젝트를 통해서 보다 보편성을 가지는 가속기 미임계 시스템의 기술적·경제적 타당성이 도출될 것으로 기대되며, 이는 향후 본격적인 국제 공동 연구 프로젝트의 시발점이 될 수 있을 것으로 평가된다.

4. 프랑스

프랑스 정부는 2006년까지 사용후 핵연료에 대한 최종적인 관리 방안을 결정할 예정이며, 이에 앞서 91년 프랑스 국회법을 통하여 여러 가지 기술적 대안들에 대한 연구 개발을 요

〈표 2〉 프랑스의 핵변환 시스템 특성

| 원자로 노형 | 임계로 | 미임계로 |
|-----------|------------|------------------|
| 출력 (MWth) | 130 | 130 |
| 중성자 스펙트럼 | 고속 중성자 | 고속 중성자 |
| 냉각재 | Pb/Bi | Pb/Bi |
| 소각 핵종 | MA | MA |
| MA 소각률 | ~78kg/TWhe | ~99kg/TWhe |
| 지발중성자 분율 | ~170pcm | - |
| 표적/빔 | | Pb/Bi, 1GeV, 1mA |

정하였다.

따라서 프랑스는 유럽연합과는 별개로 자체의 법에 근거하여 사용후 핵연료 관리방안에 대한 하나의 기술적 대안으로서 핵변환 연구 프로젝트 SPIN (Separation and Incineration)을 추진시켰다.

그리고 뒤이어 93년 IN2P3 연구소를 중심으로 하여 핵종 분리 기술 개발에 주안점을 둔 PRACEN 연구 프로그램을 가동하였다.

이후 95년 프랑스 원자력청(CEA)은 핵변환 기술의 한 방안으로서 가속기 미임계 핵변환 시스템을 연구하기 위하여 SPIN 프로젝트의 범주 내에서 ISSAC 프로그램을 구성시행하고 있다.

프랑스가 고려하고 있는 핵변환 시스템 핵연료 주기 개념은 일본과 유사한 'Double Strata' 개념으로서 Np·Am·Cm 등이 소각 대상 핵종이다.

프랑스가 제안하고 있는 핵변환 시스템 역시 일본과 유사하게 고속 임계 핵변환로와 가속기 미임계 핵변환

로로서 〈표 2〉와 같다.

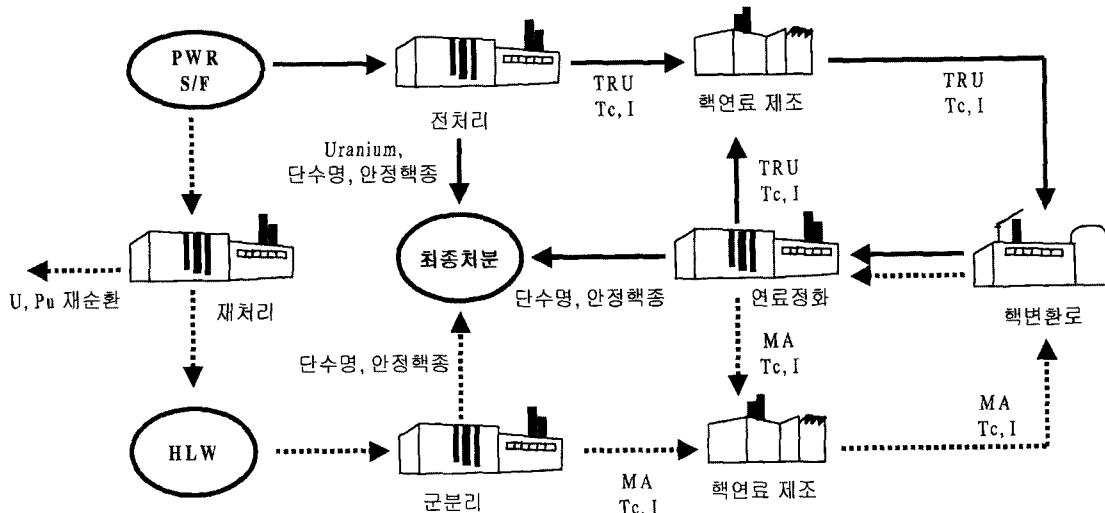
CEA 산하 여러 실험실들이 가속기 미임계 핵변환 시스템 연구 프로그램인 ISSAC에 참여하고 있다.

가속기 미임계 핵변환 시스템을 크게 가속기, 미임계 시스템, 핵파쇄 표적 분야로 나누어 각 분야의 선택 가능핚 여러 기술적 방안에 대해 이론적 그리고 실험적 고찰을 진행 중이다.

MASURCA에 있는 MUSE 실험장치를 이용하여 미임계 시스템 특성 실험을 수행하였고, SATURNE에 있는 장치를 이용하여 핵파쇄 실험을 수행하고 있다.

가속기 미임계 시스템의 타당성 검증을 위한 데모 시스템 건설을 위해 HADRON이라 불리는 제안서를 제출하였으며, HADRON에서는 미임계도 0.95 그리고 열출력 50~100 MWth 시스템의 건조를 목표로 하고 있다.

96년 국가적 차원에서 ISSAC과 PRACEN 프로그램의 중복되는 분야를 다루기 위하여 GEDEON 프로



〈그림 4〉 해변화 여료 주기 개념

그램을 착수하였다.

가속기 미입계 시스템에 대한 전반적인 평가와 관련 핵종 분리 기술을 연구하는 것이 GEDEON 프로그램의 핵심이다.

현재 유럽연합과의 공동 연구도 GEDEON 프로그램 내에서 수행하고 있다.

국내 개발 현황 및 향후 계획

국내에는 98년 말 기준으로 14기의 원자력발전소가 운전중이며 전력설비 용량 측면에서 전체의 27.5%를 점하고 있다.

2010년에 이르면 약 25기가 운전
되며 전체 전력의 31.4%를 점유하게
될 것이다

그리고 98년 말 기준 연간 약 370
톤에 달하는 사용후 핵연료가 발생하
고 있다. 따라서 우리도 매우 시급한
사용후 핵연료 문제를 안고 있다.

정부의 사용후 핵연료 관리 방안에
하나의 기술적 대안을 제시하기 위해
여 국내에서도 80년대 말부터 핵변환
기술 연구에 관심을 가지기 시작했으
며 92년 원자력 중장기 연구를 통해
본격화 되었다.

초기에는 주로 중성자를 사용하여
초우라늄 원소와 장수명 핵분열 생성
물을 소멸시킬 수 있는 여러 가지 방
법론에 대한 비교 평가 연구가 수행
되었다.

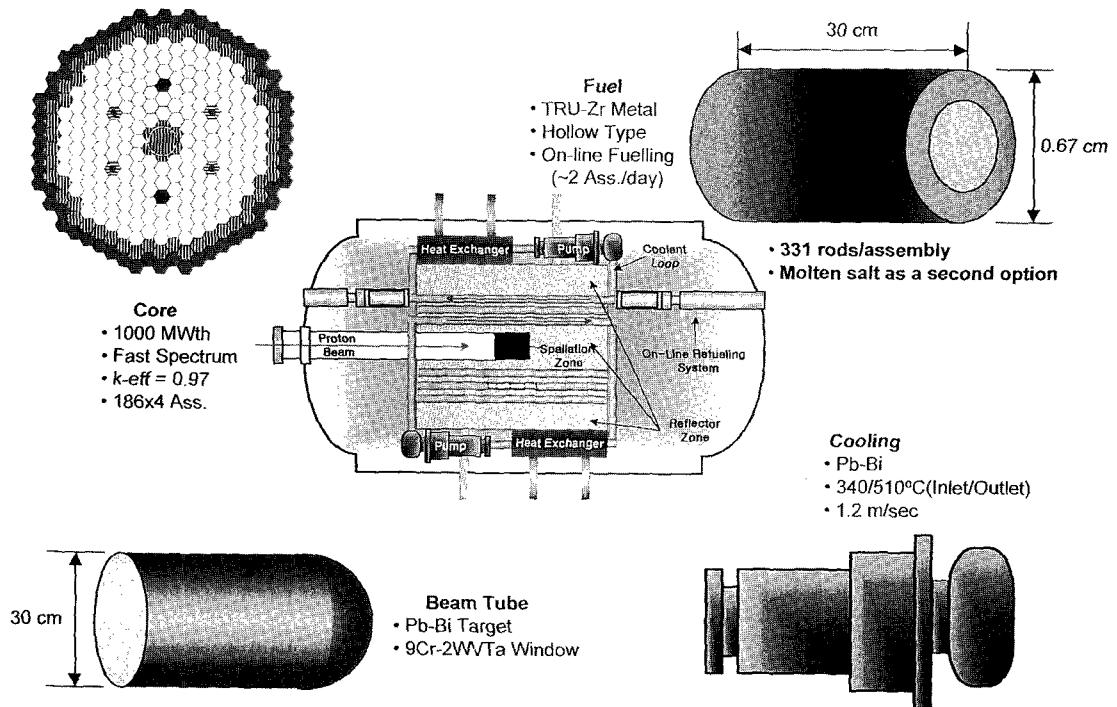
96년 중장기 연구 중간 결과물로서 여러 가지 핵변환 방법론에 대한 비교 결과가 도출되었는데 현재 한

국이 처한 정치·사회·기술적 상황에서 가속기 미임계 핵변환 방법이 가장 적합한 방법 중의 하나로 보고 되었다.

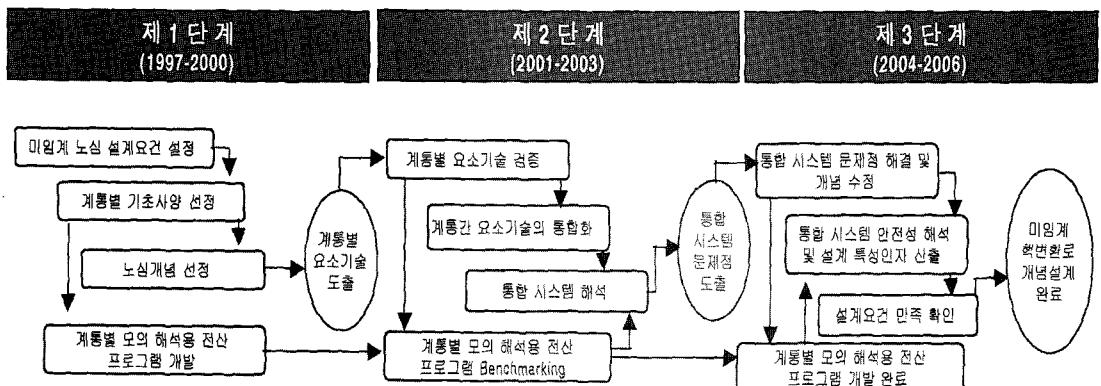
97년 원자력 중장기 연구 사업의 재편 과정에서 초기 연구 결과물로 도출된 가속기 미임계 핵변환 시스템에 대한 심도있는 연구의 필요성이 제기되었다.

이에 한국원자력연구소가 주축이 되어 가속기 미임계 핵변환 시스템 연구 개발 프로젝트 HYPER(Hybrid Power Extraction Reactor)를 추진하게 되었다.

HYPER 시스템이 추구하는 핵연료 주기는 핵비확산성 추구에 근거한 것으로서 핵물질 흐름도는 〈그림 4〉와 같다.



〈그림 5〉 HYPER 시스템 설계 특성



〈그림 6〉 HYPER 시스템 개발 일정



아직 국가의 후행 핵주기 정책 방향이 매우 유동적인 관계로 기존 경수로 또는 고속로에서의 플루토늄 재순환 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 기술 개발을 수행하고 있다.

미임계 핵변환로인 HYPER 시스템은 고속 중성자를 핵변환에 기여하는 주요 중성자원으로 하고 있으며, 핵분열 열을 제거하기 위하여 납-비스모스 혼합 액체 금속을 냉각재로 사용하고 있다.

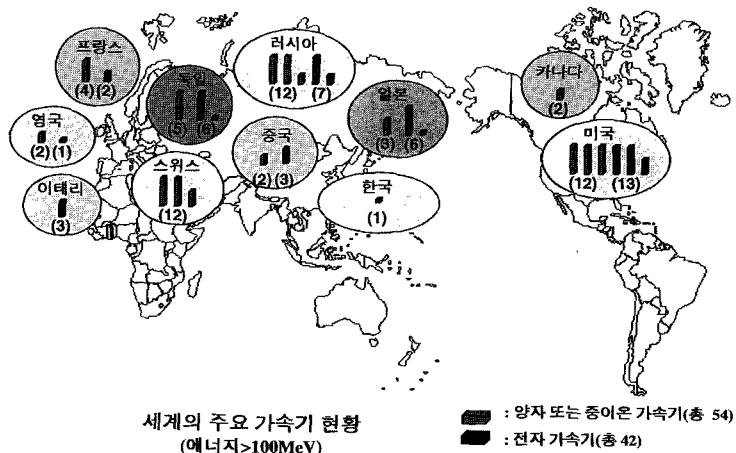
그리고 핵파쇄 표적에 사용할 양성자는 1GeV로 설계하였고 요구 빔출력은 ~13 mA로 하였다.

또한 미임계 시스템의 핵분열 반응 능력(반응도)이 급속히 감소하는 것을 방지하기 위하여 운전중 연료 주입이 가능한 On-line fuelling 개념을 미임계 시스템에 도입하였다.

<그림 5>는 HYPER 시스템의 주요 설계 특성을 나타낸다.

HYPRE 시스템 개발 연구는 크게 노심 설계, 연료 설계, 냉각재 설계, 표적 설계 분야로 나누어 수행되고 있다. 노심 설계를 제외한 대부분의 기술 분야가 초기 연구 단계에 있다.

그리고 일부 기술의 경우 국내 학보가 어려운 실정인데, 이러한 분야에 대해서는 ISTC(International Science and Technology Center) 프로그램 또는 국제 공동 연구 체계를 활용함으로써 신기술 개발에 따른 비용 부담과 결과의 불확정성에서 오는 투자 위험도를 최소화할 예정이다.



전체적인 연구 일정은 원자력계가 수행하고 있는 중장기 연구 일정에 맞추어 3단계 총 10년간을 계획하고 있다.

제1단계인 1997~2000년까지는 시스템 전반에 대한 개념 확립과 더불어 시스템의 실현을 위해 요구되는 요소 기술을 도출하며, 제2단계인 2001~2003 기간에는 도출된 요소 기술에 대한 공학적 실증 시험을 완료하는 것이다.

그리고 제3단계인 2002~2006년까지는 개념 설계를 완료할 예정이다. <그림 6>은 HYPER 시스템 개발 일정을 나타낸다.

법을 가지고 있지 못하다.

특히 우리의 경우는 '기다려보자(Wait and See)'라는 매우 엉거주춤한 정책적 입장을 견지하고 있다. 원자력 관련 기술 개발에 있어서 자유스럽지 못한 우리로서는 어쩔 수 없는 선택인지도 모르겠다.

그러나 2000년 초반이면 사용후 핵연료는 더 이상 기다릴 수 없는 문제가 될 것이다.

아마 사용후 핵연료 문제에 대한 완전한 해결책을 찾기란 불가능할지도 모른다. 그러나 미래의 불확실성에 끝없이 도전하여 최적의 해법을 찾아온 것이 일면 과학 기술의 역사이다.

핵변환 기술도 그러한 과학 기술의 연장선상에 있다. 비록 완벽한 해법을 제시할 수 없을지는 모르지만, 우리가 사용후 핵연료 문제에 대한 결정을 내려야 할 시점에서 하나의 선택 가능한 훌륭한 기술적 대안을 제시할 수 있을 것이다. ☺

맺음말

현재 원자력 에너지원이 직면해 있는 가장 큰 문제는 사용후 핵연료 처분이다. 그러나 대부분의 국가에서는 20세기가 저물어 가는 현재까지도 사용후 핵연료 문제에 대한 명확한 해