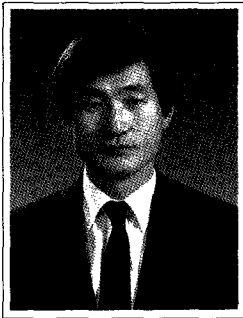


# 양성자가속기 KOMAC 및 미임계로 HYPER

박 창 규

한국원자력연구소 응용연구그룹 그룹장



## 과

학 기술의 발달은 에너지 자원에 대한 선택의 폭을 지속적으로 확장시켜왔다.

단순한 광석을 기술력에 의해서 에너지 자원화한 대표적인 예가 원자력이라 할 수 있다.

그러나 초기의 장밋빛 기대와는 달리 현재 원자력 산업은 여러 가지 위기 국면에 접해 있다.

70년대와 80년대에 걸친 대형 사고의 여파로 원자력의 안전성에 대한 불신의 벽이 높아졌고, 뒤이어 90년대에 들어서는 환경 문제에 대한 관심의 고조로 사용후 핵연료 처분 문제가 원자력 산업의 발목을 잡게 되었다.

안전성에 대한 요구는 그 정도가 갈수록 심화되어 철저한 검증 절차를 거친 기술만이 원자력 산업에 접목될 수 있었으며, 그 결과 여타 다른 산업에 비해 가장 느린 속도로 기술 진보가 이루어져왔다.

더 나아가 초기 원자력의 태동이 핵무기란 파괴적 수단에 의한 것에서부터 시작되어, 그 이후 계속적으로 전략적·정치적 이해가 상업적 목적의 우위에 있었기 때문에 기술 개발 자체에도 많은 제약이 따랐다.

원자력 산업의 침체 국면은 갈수록 심화되고 있는 것이 세계적인 현실이다.

특히 우리의 경우 원자력 산업 자체가 원자력 발전이라는 대명제하에서 출발한 연유로, 원자력 산업이 원자력 발전을 의미하는 협의의 원자력 산업이 되어버린 까닭에 그 위기 국면의 심각성이 더하다 하겠다.

원자력 산업의 다각화를 통해서, 그리고 새로운 개념의 접목을 시도함으로써만이 침체 국면의 원자력 산업을 회생시킬 수 있을 것이다.

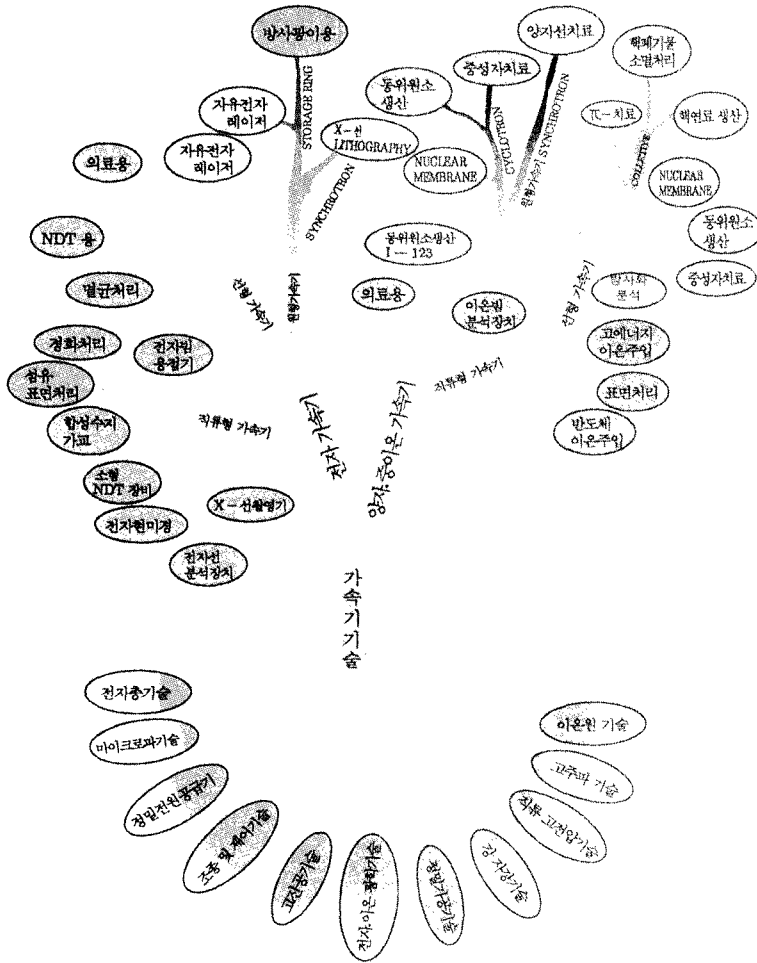
이러한 목적을 가진 일련의 방안으로서 양성자 가속기의 도입과 그 응용을 들 수 있다.

양성자 가속기는 핵의 발견과 함께 개발되어 초기 원자력 산업의 기반을 다지는 데 크게 기여하였다.

초기 원자력 산업 탄생의 산과 역할을 했던 양성자 가속기가 정체 국면에 접해있는 원자력 산업에 새로운 돌파구를 제공할 수 있으리라는 기대와 함께, 한국원자력연구소에서는 ① 원자력 산업용 양성자 가속기 KOMAC 개발 ② 가속기를 이용한 미임계 원자로 HYPER 개발 등과 같은 새로운 연구 과제를 계획하여 추진중에 있다.

### 양성자 가속기 KOMAC의 개발

가속기란 '철학적' 장치는 한 시대가 가지고 있는 첨단 기술의 복합체이다. <그림 1>에서와 같이 가속 장치를 개발하기 위해서는 대전력 고주파 기술, 감자장 기술, 초전도 기술, 하전 입자 광학 기술, 고진공 고전압 기술 등 다양한 분야의 기술이 요구된다. 이러한 연유로 가속기 개발은 일명 거대 과학(Big Science)이라 불리어 왔으며, 한 국가가 가지고 있는 과학 기술을 가늠할 수 있는 척도로



(그림 1) 가속기 기술 및 응용

여겨지기도 한다.

초기 가속기는 주로 과학적 사고의 확장을 주도하기 위해서 개발되었지만, 차츰 그 활용의 범위가 발견되면서 최근에 와서는 다양한 산업적·군사적·의료적 응용을 위해서 개발되고 있다.

철학 개념의 고유 가속 장치에서는 입자의 가속 에너지 크기가 주 관건

이었으나, 산업적 응용 측면에서는 한꺼번에 가속할 수 있는 입자의 전류(개수)가 주요한 요인이 된다.

입자의 가속 에너지는 가속기 크기를 계속적으로 늘려가면 어느 정도 달성이 가능하지만(예를 들어 미국에서 한때 추진했던 SSC 계획에서는 가속기의 원주 길이가 무려 92km였음), 전류를 늘리는 것은 가속 입자들

상호간의 전기적 반발력 때문에 그리 용이하지가 않다. 따라서 산업적 응용 측면에서 현재 가속기 기술의 주요 기술적 목표는 안정된 대전류 가속 장치를 만드는 것이다.

가속하고자 하는 입자의 종류에 따라 양성자, 중이온, 전자 가속기 등으로 분류되며, 장치의 형태에 따라 선형 또는 원형의 가속기로 분류된다.

(그림 1)에서 보이고 있는 바와 같이 입자의 종류, 가속 입자의 에너지에 따라서 다양한 응용성을 가지고 있다. 이들 중 원자력 산업과 가장 밀접한 관계를 가지고 발전해온 것이 양성자 가속기이다.

### 1. 세계의 가속기 개발 현황

원자력 선진국은 모두 적게는 두세 개에서 많게는 수십 개의 가속기를 보유하고 있다.

최근에 들어서는 일본·미국·유럽에서 새로운 대용량 양성자 가속기 건조 계획을 세우고 있다.

일본의 경우 원자력 산업이 갖는 커다란 문제인 장수명 방사성 핵종의 소멸을 목표로 하여 건설을 서두르고 있다.

반면 미국은 군사적 목적에 우선하여 삼중수소 생산용 양성자 가속기인 APT (Accelerator Production of Tritium) 건조 계획을 추진중에 있다.

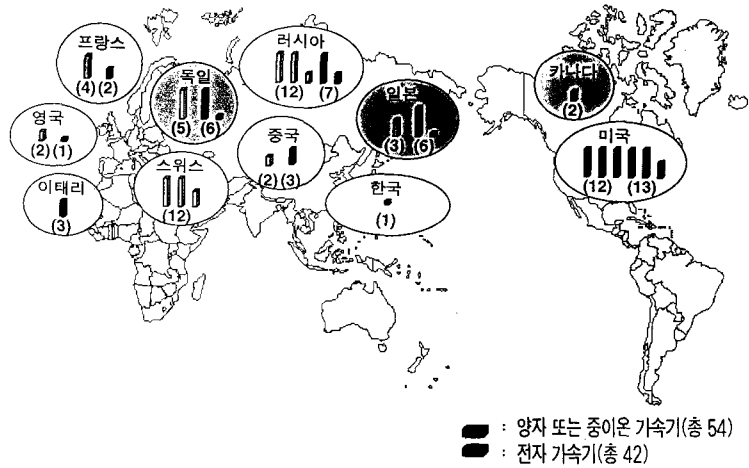
유럽에서는 핵폐쇄 중성자 생산을 목적으로 대전류 양성자 가속기를 건조하기 위하여 ESS 및 TRISPAL

Project를 추진중에 있다. <그림 2>는 현재 전세계적으로 운전중인 가속기의 국가별 분포를 나타낸다.

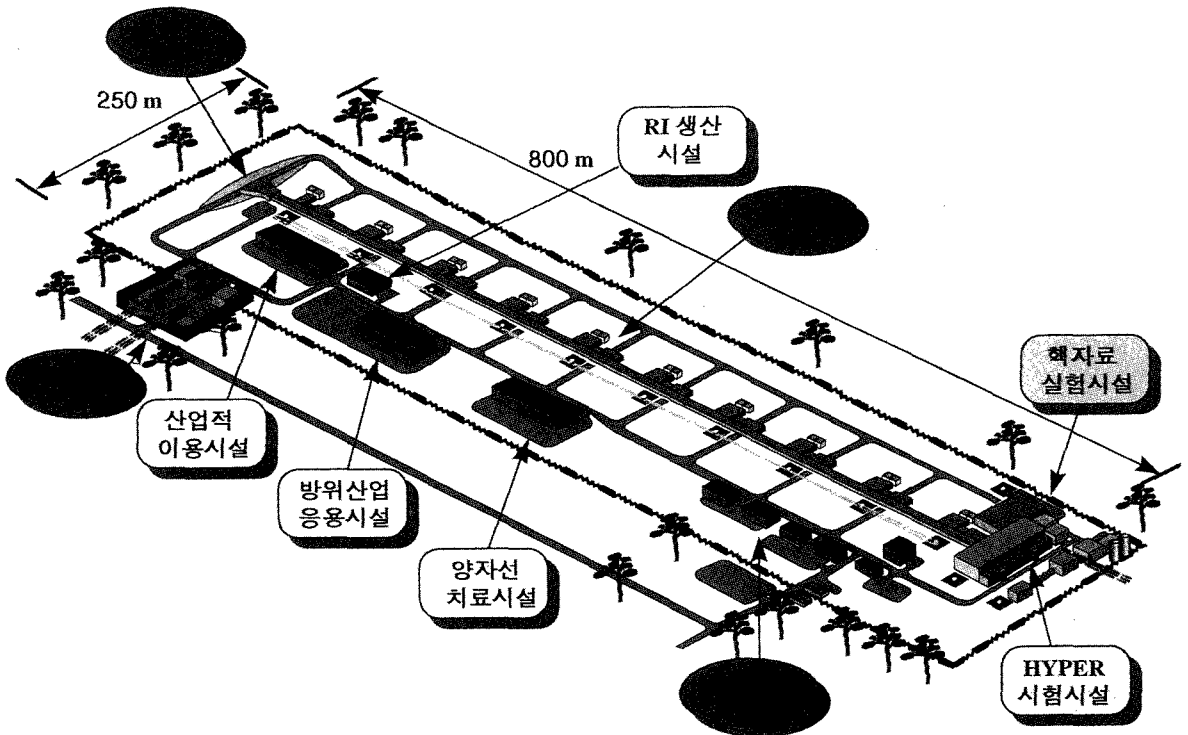
## 2. 국내의 가속기 개발 현황

80년대까지만 하여도 경제적·기술적 이유 때문에 국내 가속기 개발은 주로 소형 직류 가속기 수준에 머물러 왔다.

그러나 국내 산업의 발전과 더불어 차츰 가속기에 대한 수요가 증가하면서 가속기 프로그램들이 학계 및 연구계에서 자연스럽게 토의되었고, 그 결과로 마침내 94년 한국 최초로 대



<그림 2> 세계의 주요 가속기 분포 현황 (에너지 <math>< 100\text{MeV}</math>)



<그림 3> KOMAC 시설 배치도

형 전자 가속기인 PLS (Pohang Light Source)가 완공되었다.

그러나 이는 주로 학술 및 기초 연구에 목적을 둔 빛을 생산하는 방사광 가속기로서, 원자력 산업계에서 중요하게 쓰이고 있는 중이온/양성자 가속기와는 그 특성과 기능 면에서 많은 차이를 보이고 있다.

한국원자력연구소에서는 중이온 가속기 개발에 대비하여 80년대 초반부터 그 준비를 수행하여 왔다.

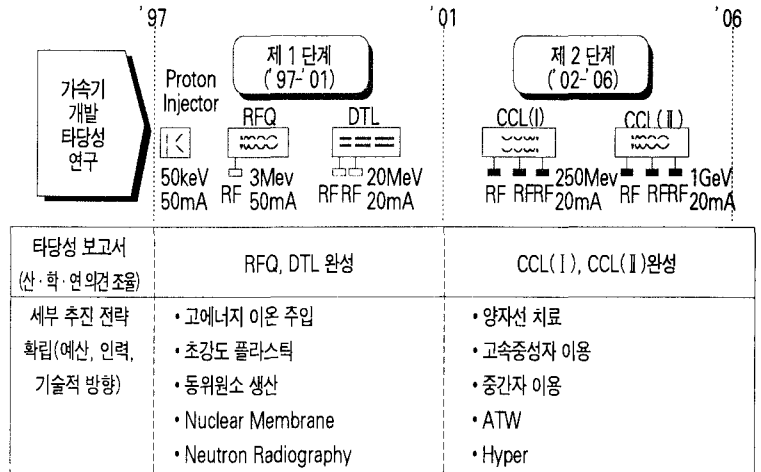
양성자 가속기의 진단부로 사용되는 양성자 또는 중이온 원을 여러 차례 자체 제작하였으며, 일부 기술은 이온 주입기 개발에 응용되어 다양한 산업용 이온 주입기를 자체 개발하였고 이들의 산업화를 추진한 바 있다.

### 3. KOMAC 개발 계획

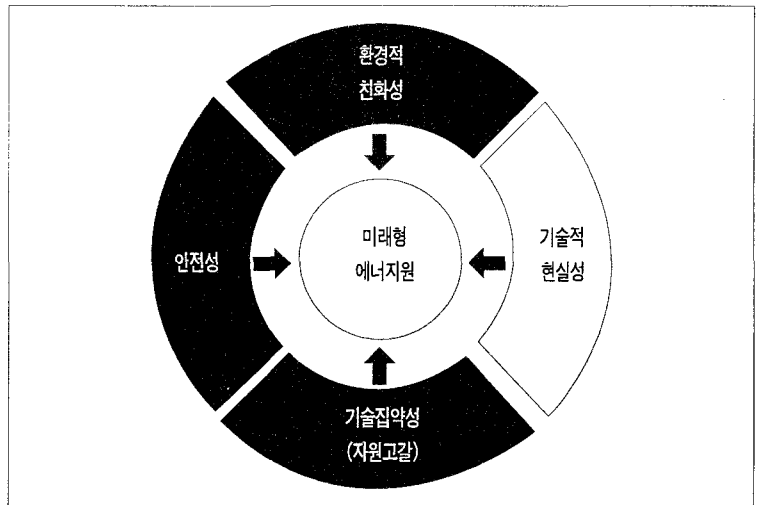
한국원자력연구소에서 개발하려고 하는 양성자 가속기 KOMAC (Korea Multipurpose Accelerator Complex)은 원자력 연구 개발 뿐만 아니라 학술적 및 산업적·의료적 응용을 목적으로 한 다기능 가속기로서 향후 약 10년간에 걸쳐서 개발할 계획이다. <그림 3>은 제안된 KOMAC의 시설 조감도이다.

앞에서 언급하였듯이 가속기 개발은 일련의 Big Science로서 관련 분야의 총체적 기술 결집이 요구되며 또한 많은 예산이 요구된다.

따라서 보다 구체적이고 타당성 있는 계획을 세우고 가속기 개발에 대



<그림 4> KOMAC 추진 일정 및 단계별 목표



<그림 5> 미래형 에너지원의 조건

한 전문가 의견을 수렴하기 위하여, 과학기술처의 지원을 받아 96~97년 2년여간에 걸쳐 가속기 개발에 대한 타당성 연구를 수행하고 있다.

국내외 전문가 의견 수렴 결과 가

속기 개발 일정과 더불어 가속기 사용자 프로그램 및 관련 응용기술을 동시에 개발하는 것이 가속기 기술의 산업체 파급 효과를 극대화하는 데 효과적이라는 의견이 제시되었다.

따라서 가속기 개발과 더불어 그 응용 기술 개발도 병행할 계획이다. 제시된 전체적인 개발 일정은 <그림 4>와 같다.

**가속기 미입계로 HYPER 개발**

단순히 '불'이라는 개념의 에너지원에서부터 시작하여 기술의 발달과 함께 에너지원의 형태도 다양하게 변화되어왔다.

그리고 시대의 흐름과 더불어 차츰 고품질의 에너지를 요구하게 되었고 그 결과 고품질의 미래 에너지원으로서는 자격을 갖추기 위해서는 몇 가지 조건을 만족하여야 하게 되었다(그림 5).

첫 번째, 에너지원의 환경 친화성이다.

에너지 생산 장치가 주변의 환경과 함께 어울릴 수 있어야 한다.

에너지 생산 장치가 환경을 파괴하고 그 결과로 삶의 환경이 위협받는다면 주객전도의 양상이 아닐 수 없다.

두 번째, 이렇게 에너지 생산 장치와 환경이 어울릴 수 있고 또 사람들이 아무런 두려움 없이 살 수 있으려면 에너지 생산 장치가 고도의 안전성을 지니고 있어야 한다.

세 번째, 기술 집약성이다.

자원의 고갈에 대비하여 자원 활용을 가장 효율적으로 할 수 있는 기술에 근거한 에너지 생산 장치여야 한다.

에너지는 자원과 기술의 결합이다. 미래에는 기술 집약형 에너지원만이

(표) 각국의 가속기 미입계 시스템 설계 특성 비교

연구 기관	가속기 특성	핵특성	연료 계통	냉각 계통	표 적
LANL	선형 양성자	고속 중성자	액체 금속 또는 용융염	액체 납	액체 납
CERN	선형 양성자	고속 중성자	고체 금속	액체 납	액체 납
JAERI	선형 양성자	고속 중성자	용융염 또는 Nitride Fuel	용융염 또는 Liquid Na	용융염 또는 고체 텅스텐
프랑스	선형 양성자	고속 중성자	-	-	-

살아남을 수 있다.

네 번째, 현실성이다.

현실성은 크게 기술적 현실성과 경제적 현실성으로 나눌 수 있다.

아무리 좋은 에너지원이라도 현실성이 없으면 에너지 생산 장치로서의 가치를 상실한다.

상기의 조건을 만족할 것으로 예측되는 여러 가지 형태의 에너지 생산 장치가 연구 개발되고 있다.

핵융합로, 태양열, 새로운 원자력 에너지 등이 바로 그것이다.

그러나 핵융합로의 경우는 아직 연구 실험 단계를 벗어나지 못하고 있고, 태양열은 경제성 때문에 소규모의 난방용 정도로만 이용되고 있다.

따라서 앞으로도 상당 기간 핵분열을 기본으로 하는 원자력 에너지 생산 장치가 인류의 주요 에너지원으로 남아있을 것으로 기대된다.

기존의 원자력 에너지는 안전성과 사용후 핵연료에 의한 환경 문제, 그리고 핵확산에 대한 우려 때문에 여러 곳에서 대중적 거부감을 유발하고 있다.

따라서 이들 문제를 포괄적으로 해

결할 수 있는 원자력 에너지원 개발에 대한 시대적 요청은 당연한 것이 되었고, 그 결과로 탄생한 것이 가속기 미입계 시스템인 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)이다.

**1. 시스템 특성**

고에너지 입자 가속기와 토륨을 연료로 하는 미입계로를 결합한 HYPER는 기존의 원자력 에너지를 혁신적으로 개선하기 위하여 도입된 것으로서 전체적인 시스템 개념은 <그림 6>과 같다.

HYPER시스템이 가지고 있는 특징을 고품질 에너지원의 조건 측면에서 살펴보면 다음과 같다.

**가. 환경친화성**

미입계로는 핵분열 에너지의 일부를 가속기를 이용한 중성자 생산에 사용하므로 임계로에 비해 단위 핵분열당 보다 많은 중성자를 생성시킨다.

그리고 임계로의 경우 원자로의 주기 길이 또는 여러 가지 반응도 계수에 의해서 원자로의 동특성이 크게 영향을 받기 때문에, 노심에 장전할 수 있는 핵종의 다양성 등에서 어느

정도 제약을 받는다.

그러나 미입계로의 경우 노심이 소화할 수 있는 반응도 변화 폭이 크므로 보다 다양한 종류의 핵종을 큰 제약 없이 장전할 수 있다.

따라서 장수명 핵종의 소멸 처리에 매우 적합한 특성을 갖는다.

뿐만 아니라 HYPER에서 연료로 간주하고 있는 토륨은 핵분열 에너지 생산 과정에서 기존의 우라늄 연료에 비해 훨씬 적은 장수명 방사성 핵종을 만들어낸다.

그러므로 기존의 임계 원자로에 비해 뛰어난 환경 친화성을 갖는다.

나. 안전성

HYPER시스템 개념은 미입계로이다. 미입계로이든 임계로이든 자체의 핵분열 에너지원을 가지고 자체 유지(self-sustain)반응을 유지해간다는 데는 크게 차이가 없다.

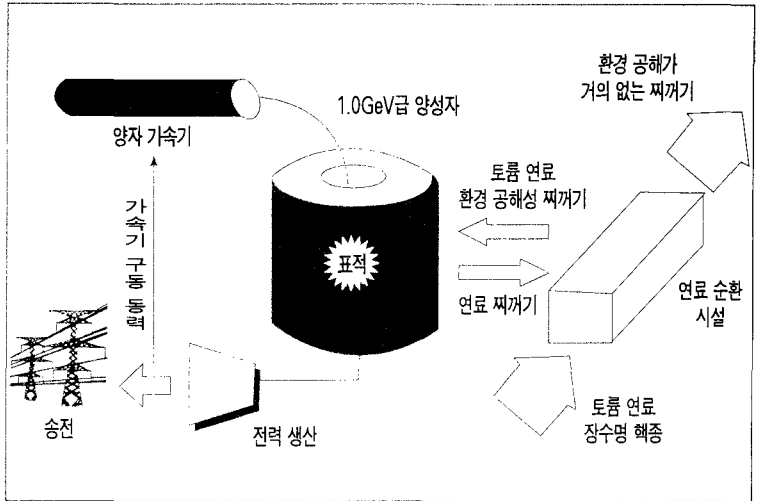
그러나 미입계로가 원자로의 안전성에 주는 기술적·심리적 안전성의 차이는 매우 크다.

미입계로이기 때문에 가지는 장점으로서 크게 두 가지를 들 수 있다.

첫 번째가 임계 사고 가능성의 배제이다.

아직도 많은 사람들에게 원자력 에너지는 영화 '차이나 신드롬'과 같은 초임계 사고의 가능성을 가진 에너지 원으로 인식되고 있다.

그리고 일부나마 체르노빌 사고를 통해 그들의 우려가 한낱 기우가 아니었음을 확인하였다고 생각하고 있다.



(그림 6) HYPER 시스템 개념

HYPER 시스템이 채택한 미입계는 이러한 대중의 우려를 불식시키는데 크게 도움이 될 것이다.

두 번째로는 시스템 제어의 용이성이다.

임계 시스템의 출력 제어는 제어봉 등을 통해서 이루어지며 이들은 반응도 제어 장치이다.

따라서 제어 계통의 오동작은 곧바로 원자로의 반응도에 영향을 주고 초임계 사고 등 여러 가지 반응도 사고를 유발할 수가 있다.

뿐만 아니라 급격한 출력 감발의 경우 제어봉이 빠른 속도로 원자로 내부에서 이동을 하여야 하는 데 이 경우 국부 최대 출력(power peaking)이 설계 제한값 등을 위배할 수가 있으며 그 결과 연료봉 손상 사고를 유발하며 방사성 물질이 냉각수를 통해 유출될 수 있다.

반면 미입계 출력을 제어하는 가속기는 반응도 제어 장치가 아니고 단순한 에너지를 중성자로 변환시키는 장치이므로 가속기의 오동작은 반응도 사고와 같은 노심 사고를 결코 유발하지는 않는다는 점이다.

뿐만 아니라 핵분열 연쇄 반응이 가속기라는 추가적인 과정을 통해서 이루어지도록 함으로써 여러 가지 사고시 운전원이 개입할 수 있는 여지를 훨씬 크게 만들어 놓았다는 점이다.

HYPER 시스템은 모든 냉각 loop 및 열교환기를 원자로 용기(vessel) 내부에 포함한 일체형을 선택하고 있다.

기존의 원자로 설계에서 가장 심각한 사고로 고려하고 있는 것이 냉각관 파단 사고에 의한 냉각재 상실 노심 손상 사고이다.

그러나 일체형 원자로는 모든 냉각관과 열교환기가 원자로 용기 내부에

존재하므로 냉각재 상실 사고를 근본적으로 차단할 수 있다.

**다. 기술집약성**

기술집약성이 의미하는 바는 에너지원으로 사용되는 천연 자원 또는 인공 자원의 풍부성이며, 우리의 입장에서 에너지 안보성이라 할 수 있다.

HYPER가 사용하려고 하는 자원은 토륨이며 이는 우리 나라에도 상당량(약 2만톤)이 매장되어있는 것으로 확인되었다.

이 정도의 양이면 현재의 우리 나라 연간 전력 수요를 기준으로 하였을 때 향후 몇 세기간은 충분히 사용할 수 있다.

기존의 자원을 최대한 절약해서 쓸 수 있게 하는 요체가 바로 기술집약성이다.

**라. 현실성**

HYPER시스템은 기존의 원자로 기술과 가속기 기술의 결합이다.

물론 일부 분야에 대해서는 새로운 기술 개발이 필요할 수도 있지만 개념을 구체화하는 데 요구되는 공학적인 기술 측면에서는 크게 어려움이 없을 것이다.

일부에서는 가속기의 부착에 따른 경제성을 우려하는 면도 있다.

그러나 HYPER 시스템이 갖는 후행 핵주기 비용이 매우 저렴할 것이라는 점을 간과한 것으로, 전체 핵주기 측면에서 살펴보면 충분한 경제성을 가질 수 있을 것으로 기대된다.

위에서 언급한 여러 가지 이점 이외에도 HYPER 시스템이 갖는 특징으로서는 시스템 핵주기의 비핵확산성 및 운전의 유연성을 들 수 있다.

에너지의 효율적 이용 및 장수명 방사성 핵종의 소각 측면에서 연료의 재순환은 필요하다.

임계로의 경우 노심에 사용되는 핵연료의 핵종비가 매우 엄격한 제한을 받는다.

임계로에서 핵연료를 재순환시키기 위해서는 고급의 핵연료 순환 시설이 요구되며, 이는 세계가 추구하고 있는 핵확산금지조약(NPT)에 배치된다.

따라서 임계로의 경우 연료 재순환 시설을 확보하는 것이 우리의 입장에서는 매우 어려운 정치적인 문제가 되어버렸다.

그러나 미임계로는 노심이 장전 핵종에 대해서 큰 탄력성을 가지므로 핵무기 제조에 사용이 불가능한 저급의 핵연료 재순환 시설로서도 시스템 운영이 충분하다.

따라서 HYPER시스템 핵주기는 보다 비핵확산성을 가지며, 그 결과 핵연료 재순환에 대해서도 보다 높은 가능성을 갖는다 하겠다.

임계로의 경우 원자로의 구동력은 노심이 갖는 초임계도이다.

따라서 임계로의 경우에 잉여 반응도가 0.0이 되면 원자로 운전이 더 이상은 불가능해진다.

그러나 HYPER 시스템은 구동력이 가속기의 고에너지 입자이므로 필요할 경우 경제성 측면에서는 약간 불리할 수 있으나 계획된 운전 기간을 초과해서라도 계속적으로 운전이 가능하다.

**2. 세계의 HYPER 연구 현황**

미국 · 유럽공동체 · 일본 · 프랑스 등 여러 선진국에서 HYPER시스템을 연구하고 있다.

그러나 그들의 원자력 정책이 서로 상이한 만큼이나 시스템 연구의 목적도 상이하다.

미국의 경우엔 70년대 초반부터 BNL의 Phoenix 계획 등을 통해 여러 번 연구를 시도하였으나, 90년대 들어 핵무기로부터 방출된 잉여 플루토늄이 국제 문제화 되면서 플루토늄 소멸을 목적으로 LANL이 중심이 되어 연구가 본격화되었다.

초기엔 플루토늄 소멸을 주목적으로 연구가 시작되었으나, 차츰 장수명 핵종 소멸 그리고 토륨을 이용한 에너지 생산 쪽으로 개념이 확대되어 갔다.

현재까지 미국의 원자력 정책이 비핵확산에 있는 만큼 시스템 핵주기도 미국의 정책이 요구하는 비핵확산성에 초점을 맞추어 연구되고 있다.

유럽공동체 연구소인 스위스 CERN 연구소의 경우, 노벨 물리학상을 수상한 바있는 Rubbia박사를 중심으로 연구가 진행되고 있다.

초기엔 토륨을 사용한 단순한 에너지 생산 장치로서 연구를 시작하였으나, 최근 들어 사회적 관심이 사용후 핵연료에 들어있는 장수명 방사성 핵종 소멸에 있음을 감안하여 토륨을 이용한 에너지 생산 및 장수명 방사성 핵종 소멸 처리에 초점을 두고 연구를 수행하고 있다.

현재까지 세계적으로 가장 심도 있게 연구가 진행된 곳이며, 미국과 마찬가지로 핵비확산성 시스템 핵주기를 추구하고 있다.

일본은 80년대말 OMEGA Project의 시작과 함께 일본원자력연구소(JAERI)를 중심으로 연구가 수행되고 있다.

따라서 연구 초창기부터 효과적인 장수명 핵종 소멸 처리 시스템 개발이 주 목표였다.

일본의 경우는 미국 및 CERN과는 달리 핵비확산성 핵주기 개발에는 크게 관심이 없다. 가속기 미임계 시스템의 공학적 검증 장치 설계/제작을 위해 JAERI는 Neutron Science Project를 제안해놓고 있는 상태이다.

Neutron Science Project가 추구하는 시스템 규모는 30MWth이다.

프랑스는 가속기 미임계로 연구를 위해 ISSAC Project를 수행하고 있다.

MASURCA에 있는 MUSE실험 장치를 이용하여 미임계 시스템 특성 실험을 수행하고 있고, SATURNE에 있는 장치를 이용하여 핵파쇄 실험을 수행하고 있다.

최근에는 CNRS, CEA 및 EDF로 구성된 GEDEON 연구팀을 형성하여 가속기 미임계로에 대한 연구를 강화하고 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.

위에서 언급한 국가 이외에도 체코·러시아·스웨덴·독일 등지에서 연구가 진행중이다.

〈표〉는 미국 LANL, 스위스의 CERN, 일본 JAERI, 프랑스가 개념 연구중인 가속기 미임계 시스템의 설계 특성을 상호 비교한 것이다.

### 3. 국내 연구 현황 및 향후 계획

국내 연구는 장수명 핵종 소멸 처리를 목적으로 96년 중반부터 본격적으로 시작되었다.

아직 HYPER 시스템의 설계 사양은 도출되지 않은 상태이나 기본 연구를 위해 전산 시스템 등이 구축되었고, 미임계 시스템이 갖는 기본적인 핵특성 및 표적 특성 연구가 진행되었다.

그리고 97년도부터는 개략적인 시스템 설정을 위해 연료 시스템, 냉각 시스템에 대한 비교 우위 평가 연구를 수행하며 토륨 연료 주기에 대해서도 심도 있는 연구를 수행할 예정

이다.

HYPER 개념은 노심 설계를 제외한 대부분의 기술 분야가 초기 연구 단계에 있다.

따라서 각 분야에 대한 기술 개발을 기본 개념 연구, 공학적 연구, 실증 장치 제작 등과 같이 크게 3분야로 구분하여 산·학·연이 공동 또는 협동으로 연구를 수행할 계획이다.

그리고 국내 확보가 어려운 시험 시설 또는 기술 개발 분야에 대해서는 국제 공동 연구 체계를 구축하여 활용함으로써 신기술 개발에 따른 비용 부담과 결과의 불확정성에서 오는 투자 위험도를 최소화할 것이다.

특히 토륨 핵연료 주기 기술 등과 같이 국제적으로 민감한 기술 분야에 대해서는 국제원자력기구(IAEA) 등과 같은 국제 기구를 적극적으로 활용하여 수행할 것이다.

전체적인 연구 일정은 원자력계가 수행하고 있는 중장기 연구 일정에 맞추어 2단계 총 10년간을 계획하고 있다.

제 1단계인 1997~2001년까지는 시스템 전반에 대한 개념 확립과 더불어 시스템의 실현을 위해 요구되는 요소 기술을 도출하고 이들에 대한 공학적 실증 시험을 완료하는 것이다.

그리고 제 2단계인 2002~2006년까지 소규모의 실증 장치를 구성하여, HYPER 시스템의 전체 계통에 대한 검증을 완료할 예정이다. ☼