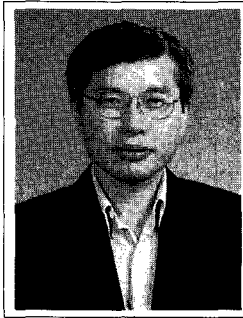




양성자 가속기 시스템

최 병 호

한국원자력연구소 핵물리공학팀장



KOMAC은 향후 가속기 구동 장치(ADS, Accelerator Driven System)의 개발에 사용하여 핵종 변환 연구, 새로운 청정 원자력 에너지 개발, 핵 파쇄 중성자원, 핵자료 생산, 방사성 동위원소 생산 등 21세기를 향한 새로운 원자력 기술 개발을 위한 국가 기반 연구 시설로서 대용량 양성자 가속기를 중심으로 한 복합 연구 시설로 계획하여 추진하고 있다.

이 장치는 수십 mA급의 대전류 가속에 적합한 선형 양성자 가속기로서 입사기, RFQ(Radio Frequency Quadrupole), CCDTL(Coupled Cavity Drift Tube Linac) 및 SL(Superconducting Linac) 등의 가속기단으로 구성되며, 특히 양성자(H⁺)와 H를 동시에 가속하여 여러 실험 목적에 빔을 제공할 수 있는 고유한 특성을 갖도록 설계되어 있다.

양성자빔은 1GeV까지 가속하여 핵변환 연구 등에 사용하고, H빔은 가속하는 도중에 100MeV, 260MeV

중간단에서 부분적으로 인출하여 산업·의료·국방·기초 학술 연구에 이용하도록 하는 여러 목적의 이용도 고려하여 단계적으로 장치 및 이용 시설을 개발하고 있다.

또한 이 시설을 국가 연구 시설의 하나로써 활용하고자, 국내외 여러 분야의 전문가 그룹의 협력을 얻어 KOMAC 이용자 프로그램을 구성, 개발하고 있다.

원자력과 양성자 가속기

원자력 분야에 있어서 양성자 가속기는 1940년대 원자력 기술 개발 초창기부터 지금까지 핵반응 연구, 중성자 발생, 핵자료 생산, RI 생산, 방사선 이용, 원자력 재료 개발 등 원자핵을 다룰 수 있는 중요한 수단으로서 그 역할을 담당하여 왔다.

양성자 가속기는 수소 원자의 핵인 양성자를 고주파 전기장을 이용하여 운동 속도, 즉 운동 에너지를 높이는

한 국원자력연구소에서는 원자력연구개발 중·장기사업의 일환으로 97년 7월부터 「양성자빔 가속 장치 개발」 과제를 수행하고 있다.

이 과제는 원자력 산업용 양성자 가속기, KOMAC(KOrea Multipurpose Accelerator Complex, 1GeV, 20mA)의 종합적 설계 및 시설 진단부인 20MeV까지 가속 장치 개발을 목표로, 현재 세계적인 대용량 양성자 가속기 개발 추세에 발맞추어 추진하고 있다.



장치로서 쉽게 인공적인 핵반응(Nuclear Reaction)을 일으킬 수가 있기 때문이다.

수십 MeV 정도로 가속된 양성자를 핵에 충돌시킬 때 '+' 전하를 갖는 양성자는 역시 '+'로 대전되어 있는 핵과의 전기적 척력을 뚫고 들어가 핵에 흡수되거나 일부 핵자(양성자 및 중성자)들을 떼어내기도 하는 등 여러 핵반응을 일으키게 된다.

이러한 핵반응을 이용하면 중성자, 양성자, 입자 및 각종 방사성 동위원소들을 만들 수 있다.

이 때 방출되는 중성자로 핵반응 단면적을 측정하여 원자료를 비롯한 원자력 시설의 설계에 필요한 핵자료(Nuclear Data)를 측정하고, 원자력 재료의 조사 시험에도 사용한다.

양성자를 더욱 가속하여 에너지가 100MeV ~ 수 GeV에 이르면 양성자는 납·우라늄 등과 같은 무거운 원자핵 속에 들어가서 핵자들을 여기 시킴으로써 핵을 산산이 부순다.

이를 핵파쇄(Nuclear Spallation) 반응이라고 부르며, 이 때 다량의 고속 중성자, 양성자 및 경원소 입자들이 방출된다.

또 적당한 표적을 택하여 수백 MeV 양성자를 조사시키면 중간자(Pion), 뮤온(Muon) 및 중성미자(Neutrino) 등 소립자들도 다량으로 만들 수 있게 된다.

특히 뮤온은 스핀 및 공명 현상을 이용하여 재료 과학 연구나 뮤온 축

매 핵융합 연구에 매우 유용하게 사용된다.

또한 양성자를 이용해 생산된 방사성 동위원소(RI)는 원자로에서 생성되는 중성자 과잉 핵종인 RI와는 달리 양성자 과잉 핵종으로 양전자(Positron)를 방출함으로써 의료 분야에서 PET(Positron Emission Tomography) 등의 진단용으로 널리 이용되고 있다.

양성자 에너지가 200~250 MeV 인 경우 인체 내 심부의 암 치료에 상당한 성과를 이룩한 것으로 보고되고 있어, 양성자 치료 분야도 양성자 가속기의 중요한 이용 분야로 대두되고 있다.

대용량 양성자 가속기의 세계적인 개발 현황

80년대 미국의 전략방위계획(SDI : Strategic Defense Initiative)의 빔 병기 개발의 일환으로 양성자 빔 전류 수십mA급의 대용량 양성자 가속기 기술이 개발되었다.

이 혁신적인 기술 개발로 인하여 이전의 가속기보다 빔 전류가 1,000배 내지는 10,000배 큰 장치들이 실용 가능하여져, 그 때까지 빔 전류의 한계로 실현할 수 없었던 많은 과학적인 아이디어들을 실현할 수 있는 기틀이 마련되었다.

선진국에서는 이 기술을 곧 바로 활용하여 핵파쇄 중성자원(Spallation

Neutron Source) 개발에 따른 중성자 과학(Neutron Science)의 실현, 가속기 구동 핵변환 기술(Accelerator Driven Transmutation)의 실현, 삼중수소의 생산(Accelerator Production of Tritium) 등 광범위하게 적용하기에 이르렀다.

1GeV, 수십mA 정도의 양성자를 중원소에 쪼이면 양성자 한 개당 약 30여개 이상의 다량의 중성자(초당 약 10¹⁸개)가 방출되는데 이 때 중성자속(Neutron Flux)이 기존 원자로의 중성자속보다 10~100배의 강도를 갖게 된다(그림1).

이 때 발생하는 고강도의 중성자를 시료에 산란시킴으로써 재료의 물성 연구, 물질의 구조, 유전자, 단백질 구조 등 환경·생명 과학 연구 등에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

또한 발생하는 고에너지 중성자를 사용하여 고속로 재료, 핵융합 재료 조사 시험도 짧은 시간 내에 할 수 있게 된다.

이러한 핵파쇄 중성자원 전용으로는 현재 미국 Oak Ridge 국립연구소에 2004년도 완공을 목표로 건설하고 있는 SNS(Spallation Neutron Source)를 비롯하여, 일본의 JHF(Japanese Hardron Facility) 유럽연합의 ESS(European Spallation Source)가 있다.

선진국에서는 이 시설들이 완성되면 중성자 과학(Neutron Science)이라는 새로운 학술 연구 분야의 지평을

열 수 있을 것으로 기대하고 있다.

한편 이러한 핵파쇄 방법은 다른 방법보다 싼값으로 중성자를 대량 생산할 수 있어, 이를 외부 중성자원으로 사용하여 미임계 시스템을 구동하면 사용후 핵연료에 포함되어 있는 장반감기 핵종을 반감기가 수십년인 단수명 또는 안정 동위원소로 효과적으로 변환시킬 수 있다.

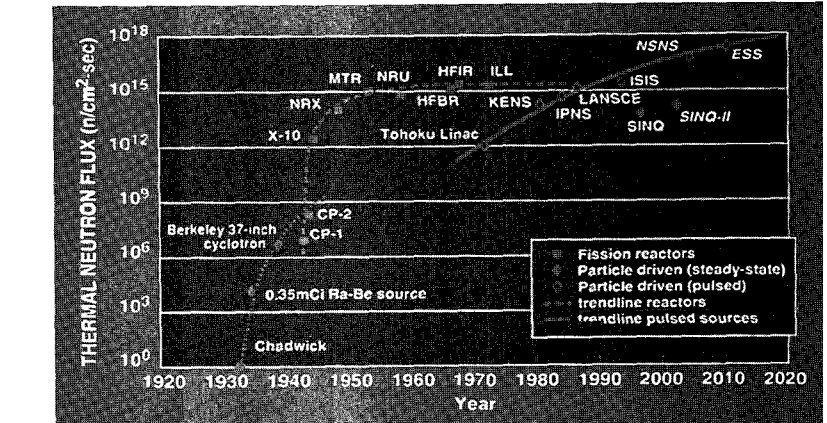
또한 핵분열 원료 물질인 Th-232, U-238 등을 핵분열성 물질인 U-233, Pu-239로 변환하여 새로운 핵연료로 이용할 수 있게 된다.

이를 가속기 구동 핵변환(Accelerator Driven Transmutation) 기술이라고 하며, 현재 관련 연구가 세계 각국에서 활발히 수행되고 있다.

이 기술은 현재 원자력 산업이 직면해있는 안전성, 방사성 폐기물 처리, 핵 확산성, 핵연료 자원의 한계성 등의 여러 가지 현안 문제점들을 해결해 줄 수 있는 하나의 대안으로 고려되어 각국이 이 기술 개발에 박차를 가하고 있다.

이러한 용도로 사용되는 양성자 가속기는 에너지가 GeV급이며 빔 전류가 수십 mA 정도로 앞서의 학술용보다는 $10^4 \sim 10^5$ 배의 대용량 장치이며 기술적으로도 제작하기가 어렵다.

주요 ADS 관련 가속기 개발 프로그램으로 미국 Los Alamos 국립연구소의 ATW(Accelerator Treatment of Waste), 일본 원자력연구소의 NSP(Neutron Science Project),



(그림 1) 세계의 중성자원 개발 현황

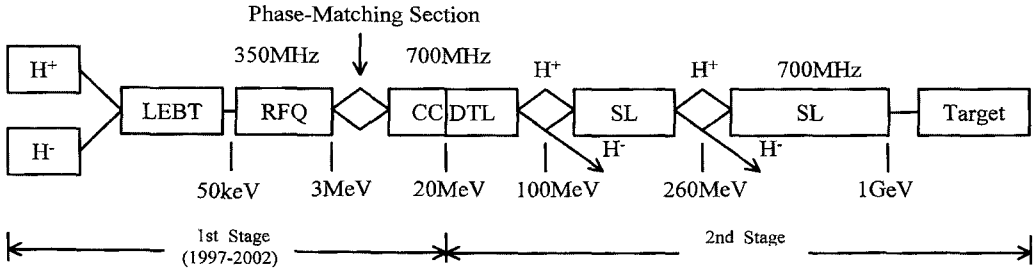
(표 1) 세계 대용량 가속기 프로젝트

국명	프로젝트명/기관	주요 특성	주요 용도	비고
미국	SNS / ORNL	1GeV, 1MW (4MW)	중성자원	2004 완성
	ATW / LANL	1GeV, 45MW	ADS	Roadmap
	APT / LANL	1GeV, 140MW	삼중수소 생산	Back-Up Option
일본	NSP / JAERI	1.5GeV, 8MW	ADS, 중성자원	NSP-JHF와
	JHF / KEK	3GeV, 0.6MW	중성자원, 유온	통합 추진중
유럽	ESS / PSI	1.3GeV, 5MW	중성자원	
	EM / CERN	1GeV, 10MW	ADS	
프랑스	Trispal/CEA	0.6MeV, 24MW	삼중수소 생산	
	GEDEON/Saclay	Not yet Specified	ADS	
이탈리아	TRASCO/ENEA	1GeV, 30MW	ADS	
중국	RCNPS/IHEP	0.15GeV, 0.45 MW	ADS, RI, Therapy	
한국	KOMAC/KAERI	1GeV, 20MW	ADS, RI, Therapy	

유럽핵공동연구소 CERN의 EM (Energy Amplifier), 프랑스의 GEDEON, 이탈리아의 TRASCO, 중국의 RCNPS 프로젝트 등이 추진 또는 계획 중에 있다(표 1).

KOMAC 개발 계획 및 전략

우리 나라는 지금까지 원자력 후발 국으로서 원자력 발전에 직결되는 연구 사업을 중점적으로 추진하여 왔음



(그림 2) KOMAC의 구성도

(표 2) KOMAC의 주요 제원

Beam Energy	1.0GeV
Beam Current / Power	20mA / 20MW
Particle	H ⁺ (18mA) / H ⁻ (20 mA)
Operational Mode	CW(Final), Pulse(Initial)
Accelerator Structures	Linear Accelerator (Injector-RFQ-CCDTL-SL)
Accelerator RF System	31Klystrons(700MHz)
Intermediate Beam Extraction	100MeV / 260MeV
Electricity	68.5MW
Water Cooling Capacity	60MW
Accelerator Length	705.4m

은 주지의 사실이다.

그러나 향후 21세기를 맞이하여 환경 친화적인 에너지원의 개발, 방사성 폐기물의 처리, 국민 복지를 위한 원자력 의료 기술의 개발, 국가 위상 제고를 위한 국가 기반 기술의 확립 차원에서 이러한 여러 목적을 종합적으로 달성할 수 있는 양성자 가속기 사업이 필요하다고 본다.

KOMAC 사업은 궁극적으로 방사성 폐기물 처리와 신에너지원 개발에의 사용을 목표로 설정하여, 이의 실증을 위한 미입계 시스템을 고려할 때 필요한 빔 전력이 20MW급이 소요된다.

개발 계획의 중간 목표로 100MeV, 260MeV 중간 단에서 빔을 연속적으로 인출하여 고속 중성자 이용, Proton Therapy, RI 생산 등 의료 이용, 기초 학술 연구에도 활용하도록 되어 있다.

그리고 향후 확장할 수 있는 목표로서 핵파쇄 중성자원, 중간자원, 신종 RI 생산과 이용 및 ISOL(Isotope Separation On-Line)에 이용도 고

려하였다.

이들 목표를 달성하기 위한 대용량 양성자 가속기 주요 제원은 <표 2>와 같다.

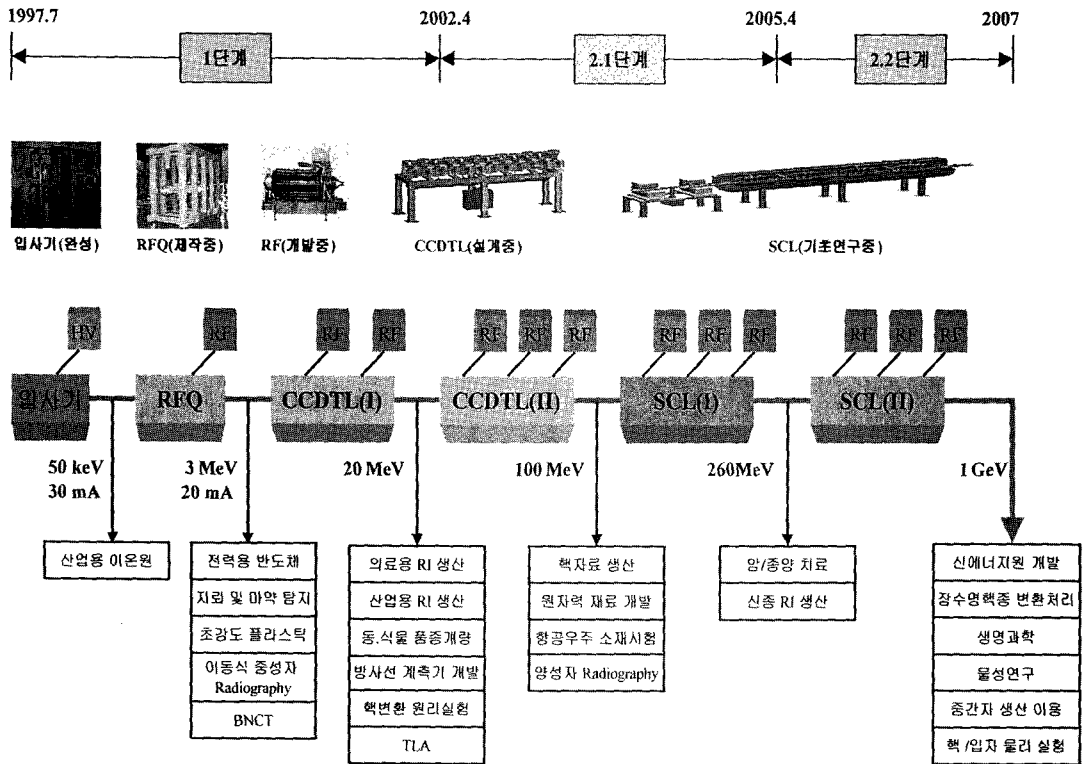
1GeV, 18mA 양성자 빔은 미입계 핵변환 시스템에 이용되고 다른 부차적인 목적에 이용하기 위해 2mA의 H⁻빔을 양성자와 동시에 가속한다.

KOMAC은 <그림 2>와 같이 여러 종류의 가속단으로 이루어지며, 각 가속단은 그 지점의 입자 속도에서 양성자를 가장 효율적으로 가속하도록 설계되었다.

이온원에서 50keV의 에너지를 갖는 양성자와 H⁻를 만들어 350MHz RFQ에 입사시키며, 이 RFQ는 3MeV까지 양성자와 H⁻를 동시에 가속한다.

3MeV에서 100MeV 영역의 가속에는 700MHz CCDTL을 이용한다. 100MeV 이후에서는 700MHz 초전도 선형 가속기 SL을 이용하여 최종 에너지 1GeV까지 가속한다.

SL의 전단 및 중간단인 각각 100MeV, 260MeV에서 H⁻빔을 분리하고, 이를 Magnetic Stripping



(그림 3) KOMAC 개발 전략

장치를 이용하여 H⁰ 중성빔을 만든 후 이를 인출하여 부차적인 목적에 사용한다.

현재 원자력 선진국인 미국·일본·프랑스·유럽 등에서는 핵폐쇄 중성자원과 핵변환 연구용으로 대용량 양성자 가속기를 개발하고 있다.

따라서 우리의 개발 전략도 이 계획들을 고려하여 관련 기관들과의 상호 정보 및 인력 교류가 용이하도록 협력 체제를 구성하였다.

외국 시설의 경우 핵폐쇄용 중성자원, 삼중 수소 생산용 등으로 가속기를 단일 목적으로 건설하고 있으나, 우리 나라 실정에서는 대용량 양성자

가속기는 원자력 분야뿐만 아니라 여러 분야에 이용할 수 있게 개발하는 것이 바람직하다고 본다.

이유는 외국의 경우에는 다양한 대형 가속기 시설이 많으나, 국내에는 장치를 건설할 재원의 제한으로 한 장치로서 여러 목적을 동시에 달성할 수 있도록 장치 및 프로그램을 구성하는 것이 필요하기 때문이다.

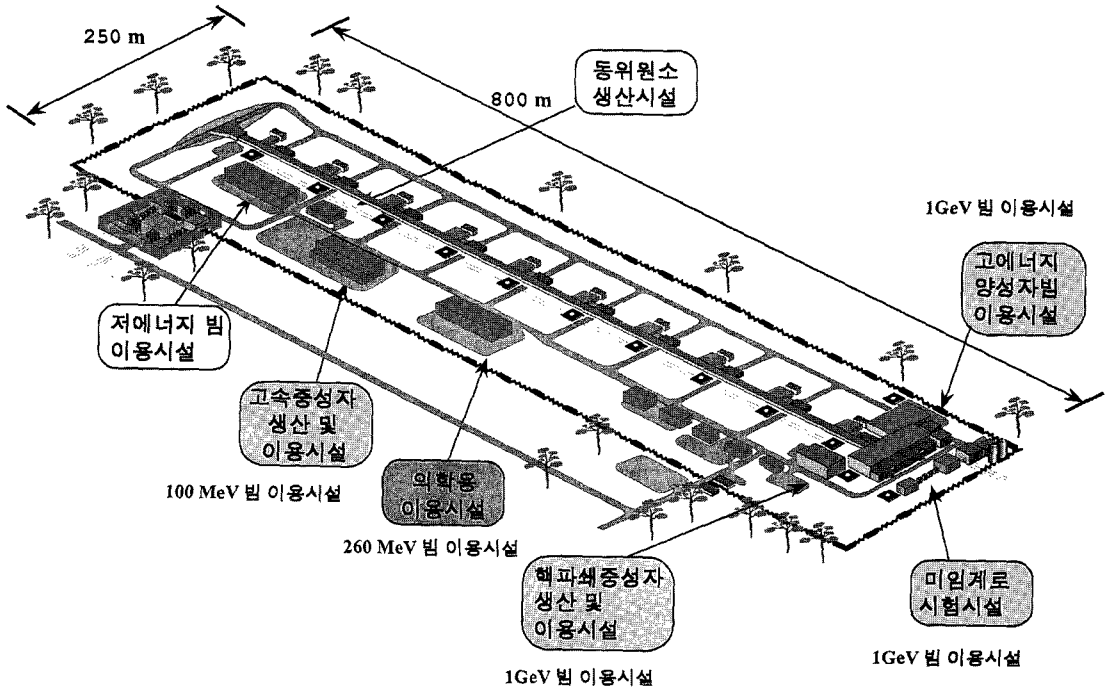
특히 우리 나라의 경우 대용량 양성자 가속기 개발 경험이 일천하므로 국내 가속기 분야의 기술 인력을 동원하고 가속기 기술의 산업적 파급 효과도 고려하여 산·학·연 협동으로 프로그램을 구성하여 운영하고 있다.

KOMAC 프로그램 구성 중 다른 프로그램과 구별되는 특징은 낮은 에너지부터 가속기를 순차적으로 개발하면서, 동시에 개발된 가속기 기술을 이용하여 각종 빔 이용/응용 프로그램도 구성할 수 있다는 것이다.

즉 앞단부터 가속기를 개발하면서 중간 결과를 내고 기술적인 점검을 하면서 수행할 수 있다는 특징이 있다.

이렇게 함으로써 대형 가속기 시설 건설시 야기될지도 모르는 기술적 정책적인 위험도를 줄이면서 개발 사업을 추진할 수 있게 된다.

(그림 3)은 현재 추진되고 있는 가



〈그림 4〉 KOMAC 시설 배치도

속기 및 빔 이용 기술의 단계적인 개발 일정이다.

97년 7월부터 1단계 과제가 시작되어 현재 50keV, 40mA의 입사기는 완성되었고, 3MeV RFQ 및 CCDTL은 개발중에 있으며, 2002년 3월에 1단계가 종료될 것이다.

1단계 기간에 입사기-RFQ-CCDTL(I)이 완성되어 20MeV 가속기와 관련 저에너지 빔 이용 기술이 개발될 예정이다.

2단계는 1단계 연구 개발의 경험과 설계 자료를 토대로 하여 본격적으로 1GeV까지 본 장치 완성 및 이용 시

설 건설을 정부에 건의하고 있다.

KOMAC의 이용 시설 및 응용 분야

KOMAC의 이용 시설은 〈그림 4〉와 같이 각 가속단에서 인출되는 양성자의 에너지별로 이용 시설을 분류하여 구성하였다. 각 이용 시설을 간략히 소개하면 다음과 같다.

가. 저에너지 이용 시설

입사기와 RFQ 가속기의 keV급 및 MeV급 가속기 기술을 이용하여 본 장치에서 분리된 독립적인 전용 장치 시설을 건조하여 운영한다.

이용/응용 분야는 주로 산업용으로 저에너지 산업용 이온빔 장치, 전도성 플라스틱 개발, 전력 반도체 개발, 지뢰 및 폭발물 검색, 이동형 중성자 Radiography, 플라스틱 강화 처리 등이며, 의료용으로는 BNCT 장치 개발 등이 이 범주에 속한다.

나. 방사성 동위원소 생산 시설

20MeV 이상의 영역에서 mA급 대전류 양성자 빔을 사용하여 여러 의료용 방사성 동위원소를 다량으로 생산하여, 반감기가 비교적 긴 것은 국내 수요에 충족하고 단반감기 핵종은 인근 지역에 공급토록 한다.

다. 고속 중성자 이용 시설

100MeV 양성자에 의하여 발생되는 수십 MeV급 고속 중성자를 사용하여 고에너지 중성자 핵반응 연구와 핵자료 생산에 사용한다.

고속 중성자에 의한 고속로 및 핵융합로 재료 시험에도 활용한다.

산업용으로는 항공 우주 소자의 특성 시험 장치로도, 의료용으로는 신체 얇은 부위에 위치하는 암 및 종양 등의 양성자선 치료에 활용한다.

라. 의학용 이용 시설

초전도 가속기의 전 단인 260MeV에서 소량의 빔을 인출하여 양성자선 치료 연구 및 임상에 전용으로 사용한다. 핵파쇄 반응을 이용한 새로운 종류의 방사성 동위원소의 생산 및 이용 연구도 수행한다.

마. 미임계 핵변환시스템 실험 시설

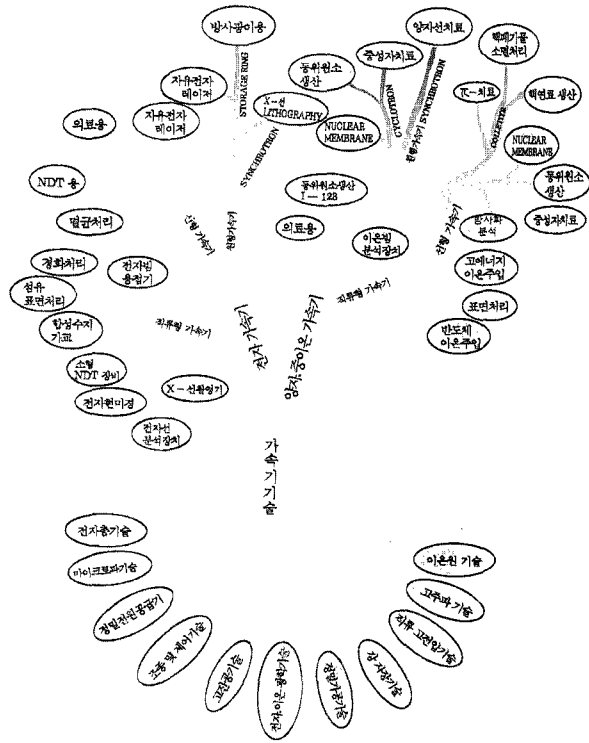
1GeV 18mA의 양성자 빔을 연속적으로 미임계 시스템에 주입하여 핵종 변환 실험, 토륨 주기의 청정 원자력 에너지 생산을 위한 실증 장치 개발에 사용한다.

바. 고에너지 양성자 빔 이용 시설

1GeV 양성자빔을 사용 고밀도의 중간자 및 뉴트리노를 생산한다. 이를 이용하여 입자 물리 실험, 재료 시험 및 뮤온 촉매 핵융합 등을 연구한다.

사. 핵파쇄 중성자원 이용 시설

1GeV의 빔을 수은 등 중원소 표적에 조사하여 핵파쇄 중성자를 생성하여 중성자 산란법을 이용한 재료의 물성 연구, 단백질 및 DNA 구조 규



(그림 5) 가속기 기술 및 그 응용

명을 비롯한 생명 과학 연구 등에 사용한다. 필요시 양성자 저장링을 건설하여 강한 펄스 중성자속을 얻도록 확장성도 고려되고 있다.

맺는 말

대용량 양성자 가속기는 그 자체의 광범위한 이용 및 응용성으로 인하여 사용후 핵연료의 처리 문제의 한 대안을 제시하고, 더 나아가 새로운 청정 원자력 에너지원 개발의 가능성을 제시하여, 현재 전세계적으로 침체된 원자력 분야의 새로운 개발 방향 및 활로를 제공해 줄 것으로 기대된다.

동시에 핵파쇄 중성자원을 확보하게 됨으로써 향후 전개될 중성자 과학이라는 새로운 과학의 지평을 전개함으로써 핵물리학·재료과학·생명

과학 등 응용 과학 및 순수 과학 분야 학술 연구를 한 차원 높일 수 있는 기반 연구 시설로서 널리 이용될 수 있을 것이다. 특히 가속기 장치 건설시 요구되는 고효율 RF 기술·초전도 기술·고진공 기술·정밀 가공 기술 등 개발 기술의 고도성에 비추어 의료·방위 산업·환경 산업 등 국내 산업 전반에 걸쳐 광범위한 기술적인 Spin-Off 효과를 이룩할 수 있다.

따라서 국내의 대용량 양성자 가속기 KOMAC 개발은 원자력 산업계는 물론 국가 기반 연구 시설로서 기초 과학 발전에 기여할 것이며, 더 나아가 산업계의 기술 경쟁력 강화에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 확신하며, 국가 경제에도 이바지할 수 있는 시발점이 될 수 있지 않을까 기대해 본다.