

보안과제( ), 일반과제( O )

PE-68000-RZ-Z009  
(KAERI/CM-1217/2009)  
UCN3177-8781-9

# 파쇄중성자원 표적시설 사전 연구

Study of Facilities and Instruments for Spallation Neutron Sources

한국과학기술연구원

한국원자력연구원  
양성자기반공학기술개발사업단

## 제 출 문

한국원자력연구원 양성자기반공학기술개발사업단장 귀하

이 보고서를 "파쇄중성자원 표적시설 사전 연구" 과제(세부과제: "이용자프로그램 개발 및 운영")의 보고서로 제출합니다.

2010 . 04 .

주관연구기관명 :한국과학기술연구원 (KIST)

주관연구책임자 :김 만 호

연구 원 :한승희

" :최원국

" :채근화

## 보고서 요약서

과제고유번호	B-3-1	해당단계 연구기간	2009.04.01 ~ 2010.03.31	단계구분	(2차년도)/ (3 단계)
연구사업명	양성자기반공학기술개발사업				
연구과제명	세부과제명	이용자프로그램 개발 및 운영			
	위탁과제명	파쇄중성자원 표적시설 사전 연구			
연구책임자	김만호	해당단계 참여 연구원수	총 : 4 명 내부 : 4 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 30,000천원 기업 : 0 천원 계: 30,000천원
		총연구기간 참여 연구원수	총 : 4 명 내부 : 4 명 외부 : 명	총연구비	정부 :30,000천원 기업 : 0 천원 계: 30,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국과학기술연구원 (나노분석센터)		참여기업명	해당 없음	
국제공동연구	상대국명 : -		상대국연구기관명 : -		
위탁연구	연구기관명 : -		연구책임자 : 해당없음		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	
<p>100MeV 대용량 선형 양성자 가속기가 2012년까지 경주(건천)에 건설될 예정이며, 추후 성능확장을 고려할 수 있다. 양성자 가속기 이용을 극대화하기 위해서 파쇄중성자 생산 및 과학적 이용분야에서 개발의 필요성이 있으므로, 다음의 연구를 수행하였다.</p> <p>(i) 빔이용 국제학술대회 (The 13th International Conference on Accelerator &amp; Beam Utilization)세션에서 파쇄중성자 학술대회를 개최하여, 잠재적 중성자 이용자들에게 파쇄중성자원 소개, (ii) 파쇄중성자 워크숍 (제1회 양성자 가속기를 이용한 파쇄중성자원 및 표적시설 개발 워크숍)을 통한 국내 중성자전문가들의 의견 수렴, (iii) 해외 파쇄중성자 전문가 및 연구기관과의 네트워크 형성, (iv) 가속기 (파쇄, 펄스형)와 연구용원자로 (연속형)의 중성자 유량변천 비교 (v) 파쇄중성자의 특징과 표적시설 사전 조사, (v) 100MeV 이상의 성능으로 확장시 고려되는 가속기의 조합.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한글	양성자 가속기, 파쇄중성자, 파쇄중성자원 표적시설, 중성자 산란 장치, 펄스형 연속형 중성자원			
	영어	proton accelerator, spallation neutron sources, scattering instruments for spallation neutron sources, pulsed neutron source, continuous neutron sources, neutron spectrometers			

## 요 약 문

100MeV 대용량 선형 양성자 가속기가 2012년까지 경주(건천)에 건설될 예정이며, 추후 성능확장을 고려할 수 있다. 양성자 가속기 이용을 극대화하기 위해서 파쇄중성자 생산 및 과학적 이용분야에서 개발의 필요성이 있으므로, 다음의 연구를 수행하였다.

(i) 빔이용 국제학술대회 (The 13th International Conference on Accelerator & Beam Utilization)세션에서 파쇄중성자 학술대회를 개최하여, 잠재적 중성자 이용자들에게 파쇄중성자원을 소개, (ii) 파쇄중성자 워크숍 (제1회 양성자 가속기를 이용한 파쇄중성자원 및 표적시설 개발 워크숍)을 통한 국내 중성자전문가들의 의견 수렴, (iii) 해외 파쇄중성자 전문가 및 연구기관과의 네트워크 형성, (iv) 가속기 (파쇄, 펄스형)와 연구용원자로 (연속형)의 중성자 유량변천 비교 (v) 파쇄중성자의 특징과 표적시설 사전 조사, (v) 100MeV 이상의 성능으로 확장시 고려되는 가속기의 조합.



KAERI

## SUMMARY

The 100MeV Linac proton accelerator is planned to be built at Gyungju, Korea by 2012 and a future upgrade of the facility can be considered. For maximizing the utilization of the PEFP accelerator, the following studies on spallation neutron facility and its scientific applications were performed: (i) Introduction & discussion of spallation neutron sciences through organization of a neutron session in The 13ICABU conference and organization of the 1st workshop on the development of spallation neutron source using the proton accelerator and its spectrometers, (ii) networking the experts abroad, (iii) the flux history of accelerator-based (spallation) neutron sources and reactor-based (continuous) neutron sources, (v) the features and spectrometers of spallation neutron sources, (vi) discussion on upgrade of the 100 MeV PEFP accelerator

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized atomic symbol with three elliptical orbits and three spheres representing protons and neutrons. The word "KAERI" is written in a bold, sans-serif font across the center of the logo.

KAERI

# CONTENTS

I. Title	
Study of Facilities and Instruments for Spallation Neutron Sources .....	13
II. Purpose and Necessity .....	13
II.1. Background .....	13
II.2. Statistics of papers published in neutron sciences .....	15
II.2.1. Papers published annually in neutron sciences .....	15
II.2.2. papers published in different research field and countries .....	17
II.3. Neutron Scattering Instruments in Korea .....	20
II.4. Purpose and Necessity .....	20
III. Contents and Results .....	21
III.1. Facilities of spallation neutron sources with energy, current, and power .....	21
III.1.1. Comparison of the scattering instruments between spallation and continuous neutron sources .....	21
III.1.2. History of neutron flux in spallation (accelerator-based) and continuous (reactor-based) neutron sources .....	22
III.1.3. Generation of spallation neutron sources using the proton accelerator with 100MeV or higher energy and power .....	24
III.1.3.1. Power, energy, and current of the facilities of spallation neutron sources	24
III.1.3.2. Target materials for neutron production from accelerator .....	24
III.1.3.3. Pulse length .....	25
III.1.3.4. Neutron scattering instruments for pulsed (spallation) sources .....	25
III.1.3.5. Strategic models for upgrading the PEFP (100 MeV) proton accelerator for producing spallation neutron sources. ....	28
III.2. Conference and Workshop of Spallation Neutron Sources .....	30
IV. Applications and conclusions .....	33
V. References .....	35
VI. Appendix .....	37

# 목 차

I. 제목: 파쇄중성자원 표적시설 사전 연구 .....	13
II. 연구개발의 목적 및 필요성 .....	13
II.1. 연구의 배경 .....	13
II.2. 중성자과학 논문 통계 .....	15
II.2.1. 중성자과학 분야의 세계 연간 논문 발표 수 변화 .....	15
II.2.2. 중성자과학이 타 연구 분야에 발표된 논문 수 및 국가별 발표 논문 수 .....	17
II.3. 국내중성자표적시설의 개발현황 .....	20
II.4. 연구개발의 목적 및 필요성 .....	20
III. 연구개발의 내용 및 결과 .....	21
III.1. 에너지, 파워, 및 유량별 파쇄 중성자중성자 시설 및 표적 조사 .....	21
III.1.1. 파쇄(spallation)중성자 및 연속형(continuous)중성자용 표적시설 비교 .....	21
III.1.2. 파쇄중성자원과 연속형 중성자원 유량변천 .....	22
III.1.3. 100 MeV와 1~2GeV 양성자빔을 이용한 파쇄중성자 생성 및 관련 가속기 조사 .....	24
III.1.3.1. Current vs powers of proton accelerator 양성자 가속기 에너지와 파워 .....	24
III.1.3.2. 중성자생성 표적물질 .....	24
III.1.3.3. 펄스 길이 .....	25
III.1.3.4. 펄스형 중성자표적시설 .....	25
III.1.3.5. PEFP 가속기를 이용한 파쇄중성자의 생성시 고려되는 가속기 모델 .....	28
III.2. 파쇄중성자 학술대회 .....	30
IV. 연구개발 결과 및 활용계획 .....	33
V. 첨부 .....	35
VI. 참고문헌 .....	37

# I. 제목: 파쇄중성자원 표적 시설 개발 사전 개념 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

### II.1. 연구의 배경

중성자는 1932년에 영국의 James Chadwick(1935년, 노벨 물리학상 수상)이 전기적으로 중성이며  $1/2$ 스핀을 갖는 중성자 입자를 발견하였다. 이 후 1940년대 미국의 Clifford G. Shull과 캐나다의 B. Brookhouse (1994년 노벨 물리학상 공동 수상)가 각각 독립적으로, 중성자를 이용하여 물질의 구조 및 분자 운동을 측정할 수 방법을 알아낸 후로, 기술, 실험, 이론등에서 미국, 유럽 및 일본에서 많은 발전을 해왔다. 다수의 노벨상 수상자들이 직간접적으로 중성자 과학과 연관을 갖고 있으며 원자/분자/거대분자의 구조와 이들의 운동을 연구하는 기초/응용 과학 분야에 유용하게 쓰여 왔다. 국내에서는 2000년대에 들어와서야 국내 유일의 연구용 원자로인 하나로 중성자 산란 시설을 이용하는 중성자 과학 분야에 관심을 가지게 되었다. 중성자 산란이 이용되는 순수 및 응용과학 분야는 매우 넓으며 타 분야와 융합연구가 되는 분야이며, 새로운 응용 분야가 지속적으로 개발되고 있다. 일반적으로 중성자는 경성 물질 (세라믹, 금속, 자성체등)과 연성물질 (고분자, 바이오등)등 거의 모든 물질의 구조 및 원자 분자 운동 분야에서 응용되고 있으며, 고체 액체 기체, 투명, 불투명한 시료에 적용할 수 있다. 나노, 메조, 마이크론 크기의 구조 및 분산등의 연구에 이용되고 수 있으며, 특정분자 운동이 일어나는 에너지 영역에서의 다양한 분자/원자운동 (대략 피코 ~ 마이크론 초)의 측정 및 기타 물리적인 현상을 정량적으로 연구하는데 이용된다. 중성자는 구조를 분석하는 이론이나 기술에서는 x-ray와 거의 같으나, x-ray와 구별되는 중성자만의 독특한 성질이 있다. 중성자는 전하가 없어 전기적으로 중성이며, 원자의 핵과 친화력이 있음으로 두꺼운 물질을 쉽게 투과하며, 원자핵의 상대적인 위치나 운동을 측정한다. 중성자는 동위원소간의 산란길이가 서로 틀림으로 이를 구별하는 것이 가능하다. 중성자는 스핀( $1/2$ )을 갖고 있어서 작으나 자성의 성질이 있다. 이는 자성체와 간접 산란을 일으켜, 자성체구조, 자성 모멘트 분포등의 연구에 이용된다. 또한 중성자 산란에 이용되는 에너지는 meV로 아주 작음으로 분자 운동등의 연구에 유용하게 이용된다[1]. 그러나 거대 중성자 시설은 x-ray 장비 및 시설과 달리 일부 국가에만 있음으로 소수의 제한된 이용자만이 중성자를 이용할 수 있으며, 중성자는 유량 ( $\#/cm^2sec$ )이 작기 때문에 x-ray에 비해 장시간의 측정시간을 필요로 하는 등의 제약이 있으며, 또한 세계 여러 과학 선진 국가들은 첨단 기초과학 분야에서 앞서고자 하는 국가적인 목표가 있다. 새로운 중성자 시설을 건설하거나, 기존의 시설의 성능을 확장하기 위해서 국가적으로, 많은 비용과, 시간, 인력을 투자해 오고 있다. 뒷 장에서 구체적으로 언급되겠지만, 중성자과학목적을 충족시키는 중성자 유량을 생성하기 위해서는 크게 연구용 원자로와 가속기를 이용하는 방법이 있으며 이는 뒷장에서 따로 언급하고자 한다.



표 1. 중성자 (Neutron)와 X-선 (X-ray)의 성질 비교

Neutron	X-ray
Neutral (electrically no charge) :	Electromagnetic (charged):
High Penetration in most bulk materials	Shallow penetration
Interacts with Nuclei	Interacts with Electron Clouds
see H Atom	See Heavy Atoms
Low energy (meV)	High energy (> eV)
Magnetic moment, Spin (1/2)	
Sensitive to Isotope	Cannot see Isotope
Excellent for Contrast Matching Expt	No good for Contrast Matching
Bulk sample	Small and thin Samples
Sample cell can be made with heavy atoms (Al, Si, SiO <sub>2</sub> ...)	Be, Kapton
Neutron sources are very <b>expensive</b> to build and maintain (much in fuel and electrical bill)	Small instrument available
Low Flux	High Flux (Synchrotron X-rays)

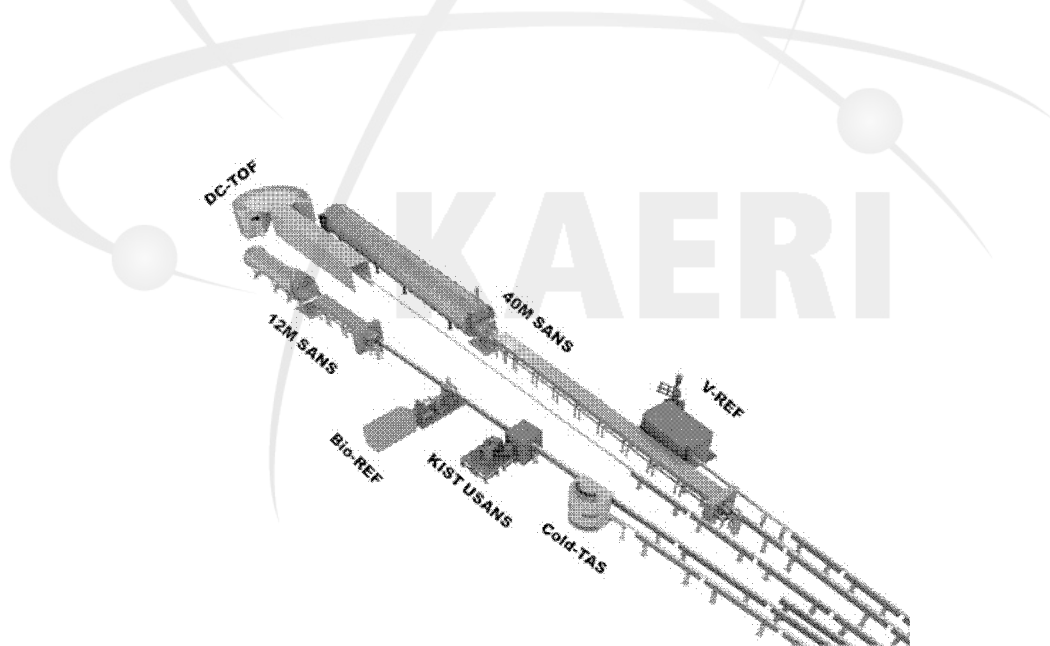


그림 1. 하나로(연구용원자로) 냉중성자 산란장비

## II.2. 중성자과학 논문 통계

중성자는 과학 선진국에서는 광범위한 기초 응용과학 분야에서 응용되어, 많은 우수한 결과가 얻어지고 있다. 그 결과는 다양한 과학 분야 (응집물리, 화학, 고분자, 에너지, 바이오, 재료, 광학, 공학등)의 발전에 공헌하고 있다. 국내의 많은 과학 분야가 질적/양적으로 많은 발전을 해왔으나, 아직 미개척 과학 분야가 중성자 과학 분야이다. 국제학회나 양질의 저널에 발표되는 논문들 가운데, 중성자를 이용한 분야는 미비한 상태이다. 이는 중성자과학의 진입 장벽이 높다는 데 있다. 초대형 인프라 시설의 필요, 다양한 분야의 전문 인력 및 지식의 부족, 시설 접근의 어려움 등이 그 요인이라 할 수 있다. 그러나, 국내 한국원자력연구원 하나로 냉중성자 실험동의 건립 및 연속형중성자 (열중성자와 냉중성자)를 이용한 중성자산란 장비들이 개발되고 있음으로, 국내에서도 중성자 과학 분야에서 많은 발전이 예상된다.

중성자과학은 그 자체만으로도 많은 과학적/기술적으로도 매력적인 연구 분야이며, 다른 과학분야 (물리, 화학, 소재, 광물, 고분자, 바이오등.)에 응용함으로써 타 과학 분야의 발전에 기여하고 있다. 참고로 중성자 과학과 타 학문과의 연계 관계를 보여주기 위한 자료가 그림 2. 와 표 2. ~ 표 5. 에서 보여주고 있다[2].

### II.2.1. 중성자과학 분야의 세계 연간 논문 발표 수 변화

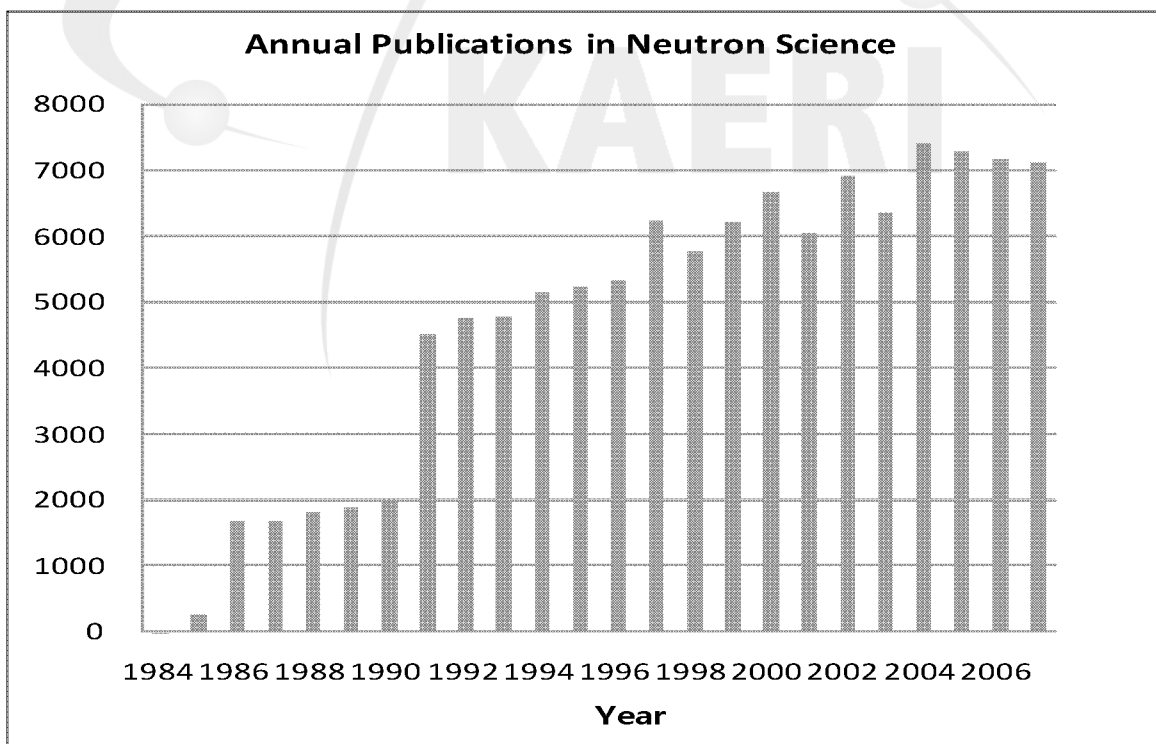


그림 2. 중성자과학 분야의 세계 연간 논문 발표 수 추세

중성자 관련 논문은 매년 증가하다 2004년을 기준으로 변화 없음. 이는 기존의 중성자 시설이 포화 상태임을 암시한다. 그러나 최근 (2006년 이후) 미국 오크리지국립연구소(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)에 세계최고 성능의 파쇄중성자원(Spallation Neutron Source,SNS) 시설의 완공및 제2 실험동 추가 건립, HFIR에 냉중성자 시설의 추가 완공, 미국 표준연구원(NIST)의 냉중성자실험동의 추가 건설, 일본 JPARC의 파쇄중성자시설 완공, 영국 ISIS의 중성자 실험동 추가 건립, 호주 ANSTO의 중성자 산란 시설 건설 완공등으로 앞으로 이들 시설들의 중성자산란장비들의 개발이 완료되면, 중성자 이용자의 수는 기하급수적으로 증가하리라 기대된다. 이외에도 유럽연합체의 ESS (European Spallation Neutron Source), CSN (China Spallation Neutron Source)의 건설이 진행중에 있다.



## II.2.2. 중성자과학이 타 연구 분야에 발표된 논문 수 및 국가별 발표 논문 수

표 2. 중성자 과학 연구 분야별 논문 발표 수 (순위)

Subject Area	1980-1989	1990-1999	2000-2008, March
Total	7383	50157	56401
Nuclear Science & Tech	2150	8596 (1)	8640 (1)
Physics, Condensed Matter	823	8577 (2)	8275 (2)
Physics, Multidisciplinary	923	5120 (3)	5130 (3)
Physics, Nuclear	650	4933 (4)	6252 (4)
Materials Science, Multidisciplinary	475	4786 (5)	6228 (6)
Chemistry, Physical		4417 (6)	6245 (5)
Chemistry, Analytical		1800 (14)	1454(18)
Biophysics/Biology/		1143 (17)	935 (21)
Polymer Science		1461 (18)	1671 (16)
Crystallography		1140 (19)	1278 (19)
Metallurgy & Metallurgical Eng.		1137 (20)	1473 (17)
Nanoscience & nanotechnology		155 (42)	469 (31)

과거에는 핵물리/핵공학쪽에서 중성자 관련 연구가 대다수였으나, 표 2 에서 보여주듯이 최근에는 응집물리, 물리화학, 금속, 세라믹, 고분자, 바이오, 나노및 금속분야등 다양한 과학분야에서 많은 논문이 발표되고 있다. 일부 산업체 (IBM, Exxon, DuPont등)에서도 중성자 과학이 다양하게 이용되고 있으나, 산업체의 특성상 연구결과는 극히 일부만 발표되고 있으며, 연구 결과는 내부적으로만 물질의 성능 향상 및 신물질 개발에 이용되고 있다. 이들 중 일부 산업체는 빔라인을 운영 또는 건설에 참여하고 있다 [3]. 예를들어 Exxon은 미국표준연구원 (NIST)의 빔라인 건설에 참여하여 일정시간 빔타임을 배정 받고 있으며, DuPont 및 Dow Chemical은 Arogonne National Laboratory의 방사선 가속기에 독자적으로 x-ray 빔라인을 운영하고 있다.

국가별 중성자과학 관련 논문발표의 통계는 표 3에 있다.

표 3. 중성자 과학분야의 국가별 논문 발표 수 (순위)

Countries	1980-1989	1990-1999	2000-2008 (March)
USA (1)	2079 (1)	15041 (1)	16186 (1)
Germany (2)	857 (3)	7635 (2)	9095 (2)
France (3)	989 (2)	7284 (3)	8585 (3)
Japan (4)	688 (5)	6506 (4)	7720 (4)
England (5)	723 (4)	5337 (5)	5886 (5)
Korea (30)	11 (52)	293 (30)	1062 (18)

국가별 중성자 관련 논문은 5위까지는 시대별로 큰 변화는 없으나, 한국이 80년대 50위에서 2000년대에 18위까지 상승하였다. 이는 전반적인 논문 수에서의 증가의 영향일 수도 있으나, 한편으론 국내 중성자 시설 이용자의 증가와 함께 중성자 과학도 함께 발전하고 있음을 보여 주고 있다. 표 3 에서 알 수 있듯이 경제 선진국인 미국 유럽 일본등이 중성자과학 논문발표수에서도 앞서 있음을 알 수 있다. 이는 이들 국가가 생산 및 경제적 이익과 직접 관련은 없으나, 장기적인 관점에서 기초 및 응용과학 분야의 중요성을 알고, 이에 많은 투자를 하는 것으로 이해된다.

앞에서도 언급했듯이 중성자 과학은 중성자과학 자체뿐만 아니라, 타 학문 및 연구 분야와의 융합연구가 필요한 분야이다. 표 4는 연성물질, 금속, 바이오, 고분자, 화학, 물리화학, 물리 등을대표하는 저널에 많은 수의 중성자 과학관련 논문이 발표 되고 있음을 보여주고 있다. 이는 표2와 같은 결과를 보여 주고 있다 [3].

세계 각국의 연구기관별 중성자과학 발표 논문 수는 표 5와 같이 중성자원 (연구용원자로 또는 양성자가속기)을 갖고 있거나 중성자 빔라인을 갖고 있는 기관들에서 많은 논문이 나오고 있다. 그러나 이들 논문의 많은 수는 외부 중성자 이용자 (학교, 산업체, 중성자시설이 없는 연구기관) 들과의 공동 연구로 발표 되고 있다. 이는 중성자 과학이 융합연구 및 국가간 과학 협력에 많은 공헌을 하고 있는 분야임을 나타낸다 [3]. 단일연구 기관으로는 프랑스 ILL이 중성자 분야에서 가장 많은 논문을 발표하고 있으며, 흥미 롭게도 일본 도쿄대학과 교토대학이 10위 안에 들어있다. 이는 이 대학이 중성자 빔라인을 갖고있기 때문이며, 영국/미국의 대학들도 중성자 과학에 활발한 것을 알 수 있다. 한국원자력연구원은 2000년이후 100위안에 들어가 있다. [3] 국내 중성자 이용자의 활성화와 냉중성자 시설 및 관련 산란장치의 개발이 완성되면, 앞으로 연구결과에서 더 많은 발전이 있으리라 기대된다. 참고로 논문 발표수는 운영되는 중성자 산란장치의 수, 중성자원의 운전일 수, 이용자 수등에 의존함으로 논문 수가 특정 연구 기관의 우열을 의미하지는 않는다.

표 4. 특정 저널에 발표된 중성자 과학 논문 발표 수 (순위)

Journals	1980-1989	1990-1999	2000- 2008,3월
Physical Review B (1)	174(5)	2132 (1)	2668 (1)
Physical Review Letters (8)	95 (14)	969 (8)	1123 (7)
Macromolecules (11)	47(39)	737 (11)	697 (15)
Journal of Alloys and Compounds (15)		582 (15)	694 (17)
Journal of Chemical Physics (16)	37 (53)	581 (16)	
Langmuir(23)		405 (23)	814 (11)
Journal of Physical Chemistry, B (31)	27(69)	341 (31)	789 (12)
J. of the American Chemical Society (46)		228 (46)	
Nature (56)	32(62)	171(56)	127 (84)
Science (89)		108 (89)	
Biochemistry (92)		106 (92)	

표 5. 중성자 과학의 연구기관 별 논문 발표 수 (순위)

Institutions	1980-1989	1990-1999	2000- 2008,3월
Instut Laue=Langevin (ILL) (1)	523 (1)	2029 (1)	2155 (1)
Rutherford Appleton Lab (2)	122 (7)	1482 (2)	1674(2)
Univ. Tokyo (3)	96 (12)	1093(3)	1292 (4)
Argonne National Lab (4)	186 (3)	1053 (4)	1158 (8)
NIST (5)	147 (6)	1040 (5)	1382 (3)
Oak Ridge National Lab (6)	183 (4)	987 (6)	1254 (6)
Kyoto Univ (9)	112 (10)		1243 (7)
Brookhaven NatL Lab (11)	195 (2)	861	572 (25)
Univ of Oxford (14)	69 (21)	636	542 (28)
Los Alamos Natl Lab (17)	143 (6)	591	1114 (10)
MIT (20)	70 (20)	566	770 (19)
Univ Calif Berkeley (22)		488	679 (22)
Univ Cambridge (23)	23 (72)	474	427 (42)
AT&T Bell Labs	33 (56)		
Exxon Res & Eng Co	23 (61)		
한국원자력연구원(KAERI)			270 (78)

### II.3. 국내중성자표적시설의 개발현황

대략 북미에 7개, 유럽에 15개, 아시아에 7개의 중성자 생성 시설이 있다. 중성자 과학은 유럽, 미국, 일본등이 협력과 선의의 경쟁을 하는 분야이다. 미국의 6개 DOE 산하 연구소들이 참여하고 있는 Spallation Neutron Source (SNS), 유럽의 8개국 10여개의 연구소들이 참여하고 (ESS), 일본의 J-PARK등 첨단 대형 중성자 산란 시설이 국가적 차원에서 건설 (또는 예정), 운용되고 있으며, 장기 지속적으로 투자되고 있다. 국내는 1995년부터 중성자 과학의 중요성을 깨닫고, 국내 유일의 중성자 생성 연구용 원자로 (하나로)를 보유하고 있는 한국원자력연구원이 이 분야에 참여하고 있으며, 현재 냉중성자 실험동내에 7개의 중성자산란장비 국가적 차원에서 건설 중에 있다. 이 냉중성자 실험동내에 다양한 중성자 산란 실험 장비들(예, 40m-SANS, Horizontal-Reflectometer, Vertical Reflectometer, Time-of-Flight-DC, Triple Axis Spectrometer, KIST-USANS등)이 원자력연구원과 학연이 공동으로 개발되고 있다[2]. 이는 국내에서도 중성자 산란장비 개발의 능력을 갖추고 있음을 의미하며 이는 양성자가속기를 이용한 파쇄중성자원 표적시설개발에 많은 도움이 되리라 기대된다.

### II.4. 연구의 목적 및 필요성

앞에서 보여주듯이 중성자는 과학 선진국에서는 광범위한 기초 응용과학 분야에서 응용되어, 많은 우수한 결과가 얻어지고 있다. 그 결과는 다양한 과학 분야 (응집물리, 화학, 고분자, 바이오, 재료, 광학, 공학등)의 발전에 공헌하고 있다. 국내에서는 국내 유일의 연구용원자로 하나로가 연속형 중성자원 (냉중성자와 열중성자)을 생성하고 있으며 이를 이용한 중성자 산란장치들을 운영중이거나 개발 중에 있다. 이와 함께 국내 유일의 100MeV 규모의 다목적 양성자가속기가 경주 건천에 1012년에 건설될 예정이다. 양성자 가속기는 동위원소 생산 및 의료용으로의 이용 이외에도 파쇄중성자원을 생성할 수 성능을 갖고 있다. 따라서 국내 유일의 양성자가속기 이용을 극대화하기 위해서 파쇄중성자 생산 및 과학적 이용분야에서 개발의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 학술대회 및 워크샵을 통한 파쇄중성자의 소개, 파쇄중성자의 특징과 표적시설에 대한 사전 조사, 경주 양성자 가속기가 추 후 100MeV 이상으로 성능 향상 시 고려되는 국내 전문가들의 의견을 수렴등을 목적으로 하고있다.

### III. 연구개발의 내용 및 결과

#### III.1 에너지, 파워, 및 유량별 파쇄 중성자중성자 시설 및 표적 조사

##### III.1.1. 파쇄(spallation)중성자 및 연속형(continuous)중성자용 표적시설 비교

파쇄중성자원과 연속형 중성자원이 특징은 그림3에서 잘 보여준다. 연구용 원자로는 중성자 유량이 시간에 상관없이 일정한 정상상태의 연속형 중성자원을 생성한다. 양성자가속기는 원자핵을 파쇄하여 일정 주기를 갖는 펄스형 중성자를 생산한다. 이는 연속형인 경우 power를 증가 시킬 경우 중성자원의 냉각이 용이 하지 않다는 것을 의미하며, 펄스형인 경우 펄스가 없는 기간에 중성자원을 냉각 시킬 수 있으므로 파워를 증가시킬 경우 냉각이 용이하다는 장점이 있다.

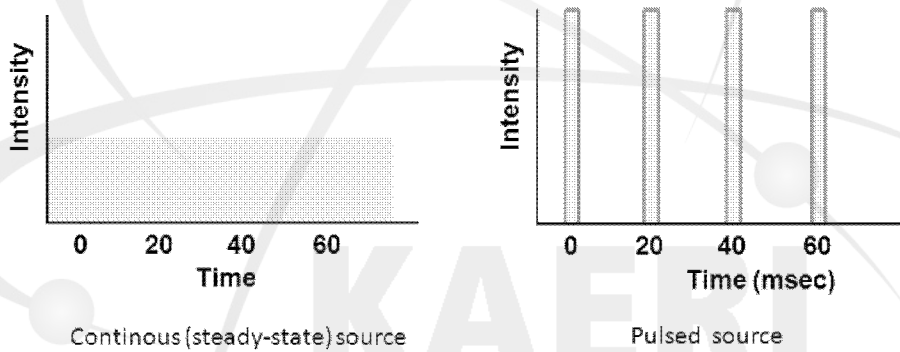


그림 3 연속형 (continuous)과 파쇄 (spallation, pulsed) 중성자원의 중성자

파쇄중성자의 특징인 펄스형 중성자는 에너지나 피크 유량은 연속형보다 크다는 특징이 있다[4]. 연속형 중성자원은 파장 1A (100 meV 이하의 저 에너지) 이상에서 최대 유량을 나타내지만, 시간 평균을 한 파쇄중성자원은 1A 이하의 단파장 (100 meV 이상의 고에너지)에서 최대 유량을 나타낸다. 이는 고에너지 단파장 (epithermal)을 이용한 중성자분광기의 개발에 이용될 수 있다. 물론 적절한 Moderator시설을 첨부하면 저 에너지의 펄스형 열중성자 및 냉중성자를 이용한 파쇄중성자 표적시설을 개발 할 수 있다



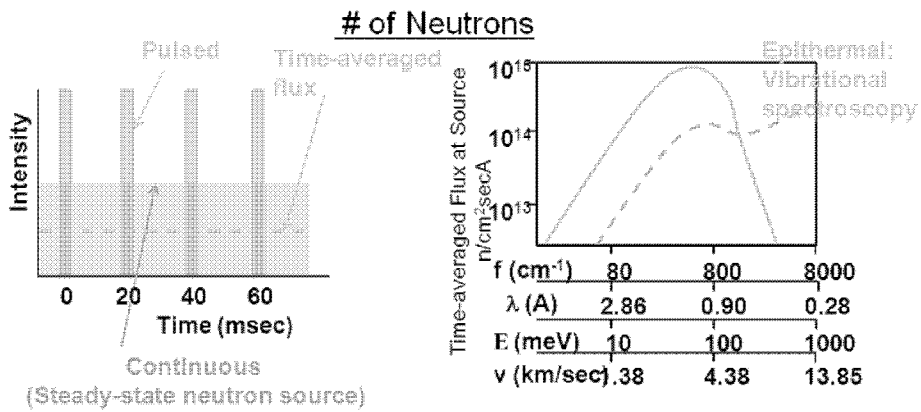


그림 4 파쇄 및 연속형 중성자 유량 스펙트럼 특성

### III.1.2. 파쇄중성자원과 연속형 중성자원 유량변천

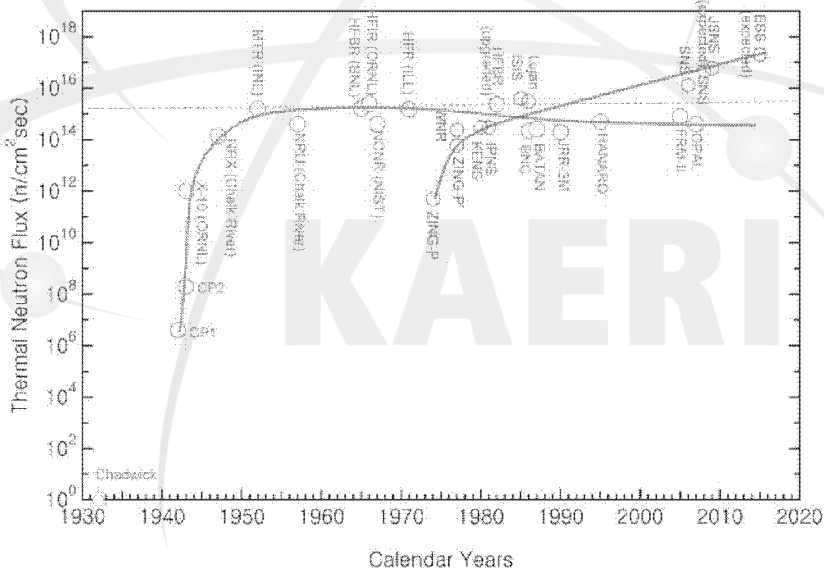


그림 5 연구로 원자로 (연속형) 중성자원 과 가속기형 (파쇄중성자)의 연도별 유량 변화 [부록참조. updated from Jack Carpenter's ORNL Presentation and D.L. Price [6]

연속형중성자원 (원자로에서 생성)은 1940년대에 미국 Chicago Pile I 과 2의 연구용원자로 (CP1, CP2)부터 중성자를 생성한 이래 10여년의 짧은 기간에 열중성자 유량에서  $10^8$  배의 급격한 유량증가를 가져왔다. 그 후 1960 ~ 1970년대에 건설된 ORNL HFIR(미국 100MW 규모, 80MW에서 운영) 와 ILL(프랑스 75MW) 원자로의 중성자유량 (대략  $\sim 10^{15}n/cm^2sec$ )이 40여년이 지난 현재까지 최고 유량을 유지하고 있다. 1980년대 이후 한국

하나로 연구용 원자로를 포함하여 세계 각국에서 건설된 연구용원자로들 (280 여개)은 오히려 유량에서 대략 10배정도의 감소를 보여 주고 있다. 이는 과거에는 고농축 우라늄 연료 (20% 이상의  $^{235}\text{U}$  동위원소 포함) 사용이 가능하였지만, 현재는 핵물질 확산 방지등의 정치, 환경적인 이유로 저농축 연료를 사용함으로써 중성자 유량 증가가 더 이상 가능하지 않은 것으로 이해된다. 따라서 연구용 원자로로 부터의 중성자 유량 증가는 당분간 기대되지 않는다고 할 수 있겠다. 원자로중성자원(연속형 중성자)과는 달리 파쇄중성자원 (펄스형 중성자원)은 그 1970년대 중반에서야 John Carpenter등이 ZING-P를 아르곤 국립연구소에 설치한 이래 10여년에 걸쳐 IPNS (미국), ISIS(영국), Lujan(미국)등에 가속기를 이용한 중성자원이 건설되었다. 전 세계적으로 중성자 과학 분야의 발전으로 중성자 유량의 증가와 연속형 중성자와는 다른 특성을 갖는 펄스형 중성자의 필요성의 증가로 인해 미국 오크리지 국립연구소에 1.4조원이 들어간 파쇄중성자시설(SNS)을 2007년에 건설하게 되었다. 중성자 유량은 1MW 이상의 Power에 도달 할 경우  $10^{16}$  이상이 될 것으로 예상되며 이는 기존의 연속형 중성자원 보다 10배 이상의 중성자 유량의 증가를 가져올 것으로 기대된다. 2008년 건설된 일본의 J-PARC 파쇄중성자원과 최근(2009년)에서야 설치 위치가 스웨덴으로 결정된 ESS (유럽) 파쇄중성자원은 SNS 이상의 중성자 유량의 증가가 예상된다. 원자로를 이용한 중성자원의 그 기술이 잘 알려져 있어 운영을 안전하게 할 수 있는 특징이 있으며, 가속기를 이용한 파쇄중성자원의 개발은 아직도 발전하는 기술이라고 볼 수 있다.

참고로 연속형 중성자원과 파쇄중성자원 (양성자가속기)의 장단점을 표 6. 에 요약했다.

**표 6. 연구용 원자로(연속형중성자원)와 양성자 가속기 (파쇄중성자원)의 정치관점에서의 비교.**

연구용 원자로 (연속형 중성자원)	양성자 가속기 (파쇄중성자원)
기술적으로 잘 알려져 있고 경험이 많음	새로운 기술이며, 발전하는 기술
정치/환경적인 염려로 고농축 우라늄에서 저농축 우라늄으로 원자로 연료가 바뀜	우라늄(핵분열 물질)/원자로를 사용하지 않음으로 정치/환경적으로 친환경적인 기술로 인식됨
	방사선편폐기물 (중성자 생성 표적물질)은 원자로에 비해 상대적으로 작음.
안정된 중성자를 공급함.	

연속형 중성자원은 오랜 경험이 축적된 기술을 기반으로 안정되게 중성자를 공급한다는 장점이 있으나, 우라늄이나 원자로와 같은 단어가 우리 사회에서 거부감으로 받아 들여지고 있다. 이와달리 양성자가속기를 이용한 파쇄중성자원의 생성은 발전하는 기술로서 핵분열 물질을 사용 안함으로, 사회에서 상대적으로 친환경기술로 받아들여진다.

### III.1.3. 100 MeV와 1~2GeV 양성자빔을 이용한 파쇄중성자 생성 및 관련 가속기 조사.

#### III.1.3.1. 양성자 가속기 에너지와 파워

2012년 완성 예정인 PEFP 선형가속기(100MeV, 1.6mA)는 0.16 MW의 파워를 갖는다. PEFP 가속기의 파워는 ISIS(영국) 파쇄중성자 시설의 초기성능 (0.16 MW)과 유사하나, 에너지 (100 MeV)는 ISIS의 에너지 (800 MeV)보다 작다. 중성자수율 (neutrons/s-uA)은 대략 500 MeV 이상의 에너지에서는 파워에 비례하여 증가하나, 그 이하에서는 에너지에 비례하므로, 100 MeV PEFP 가속기가 추후 성능향상이 고려될 경우 이를 고려해야 할 것이다. 1

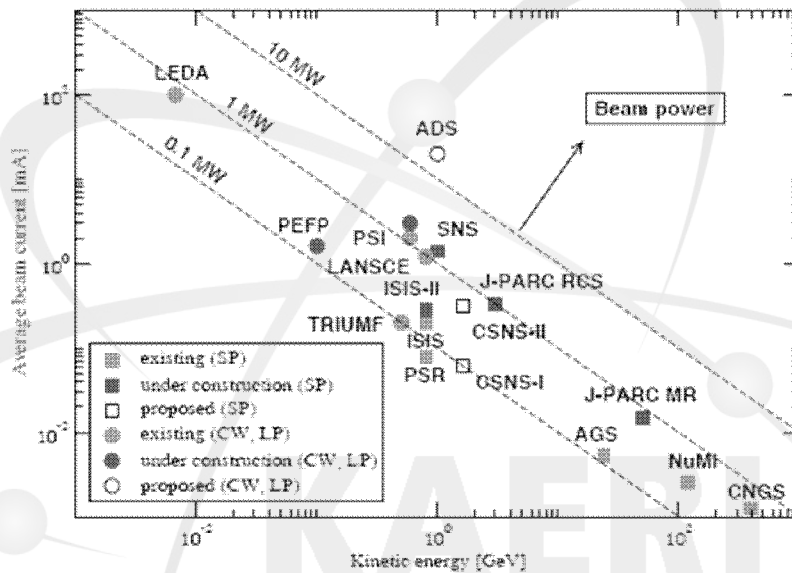


그림 6 세계 파쇄중성자시설의 에너지, 전류 및 파워의 비교

#### III.1.3.2. 중성자생성 표적물질

100MeV에서 중성자 생성용 표적물질은 중성자 수율을 증가 시킬 수 있는 인자임으로, 낮은 에너지에서는 적절한 표적물질의 선택은 중요하다. 중성자 생성표적(Traget) 후보 물질중에서 500MeV미만에서 가장 많은 중성자유량을 생산하는 depleted  $^{238}\text{U}$ 을 선택하면 타 후보 물질 (W, Be, Ta) 보다 대략 수 배 정도의 중성자 수율을 더 얻을 수 있을 것이다[그림 참조]. 그러나 U에 대한 일반의 거부감있는 경우, 대안으로 W, Be을 고려 할 수 있다. W, Be이 고에너지에 노출될시 물에 부식성이 있음으로, 적절한 코팅으로 부식을 방지할 수 있다. 부식을 피하며, 중성자 유량의 증가를 고려하지 않을 경우 Ta이 차선의 표적물질로 고려 될 수 있다

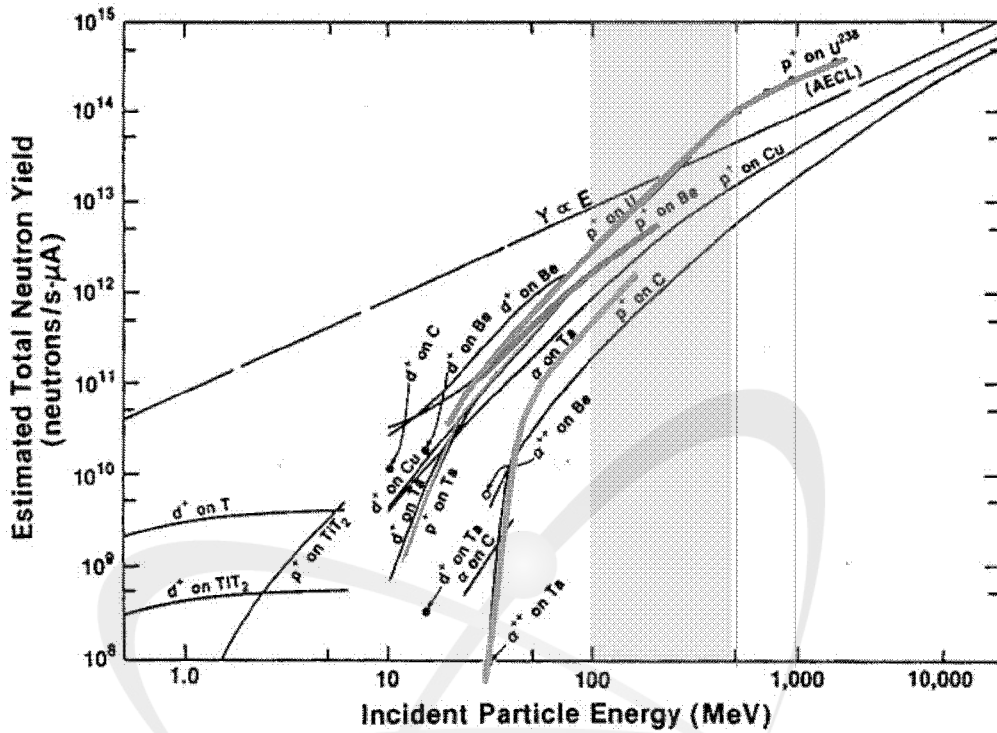


FIG. 2. Global thick-target neutron yields for various charged particle reactions versus particle energy. (Adapted from Stevens and Miller.<sup>11)</sup> Ref) Methods of Experimental Physics, vol 23 (1986)

그림 7 입사에너지의 변화에 따른 여러 중성자생성표적의 중성자 수율(4)

### III.1.3.3. 펄스 길이

파쇄중성자는 일반적으로 펄스 형태로 생성됨으로 펄스의 길이는 파쇄중성자 표적시설 선정시 고려되어야할 인자중의 하나이다. PEFP 파쇄중성자의 경우 장펄스와 단펄스인 경우를 고려해 볼 수 있다. 장펄스 (100 ~ 1000 usec 또는 그 이상의 길이를 갖는 펄스)는 넓은 파장분해능 ( $\Delta\lambda/\lambda \sim 10\%$ )을 갖는 중성자소각산란이나 반사율 장비에 유리할 수 있다. 단펄스는 파장분해능이 우수한 ( $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.1\%$ ) TOF-powder diffractometer와 같은 중성자 장비에 유리할 수 있다. PEFP가속기는 장 펄스와 단펄스를 생성하는 2개 이상의 Moderator 시설을 필요할 수 있다.

### III.1.3.4 펄스형 중성자표적시설

중성자 표적시설은 중성자원의 특성 (연속형, 펄스형)의 특성과 연구하고자하는 중성자 과학분야 (크게 나누어, 물질의 구조 또는 분자운동)의 우선성을 고려하는 것이 필요하다. 중성자 표적시설 (중성자 산란장치)은 물질의 구조나 분자운동을 연구하기 위해서, 이에 대응하는 여

러 산란현상 (탄성산란, 준탄성산란, 비탄성산란, 간섭산란, 비간섭산란) 을 측정하는 장치이다. 따라서 다음의 여러 산란 현상과 파쇄중성자원의 펄스 특성을 이용한 파쇄중성자 산란 장치의 개발이 요구된다. 펄스형 중성자는 중성자의 비행시간(time-of-flight, TOF)을 측정하여 에너지 나 파장을 측정하는 TOF-spectrometer의 개발에 유용하다

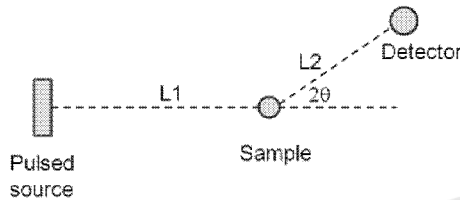
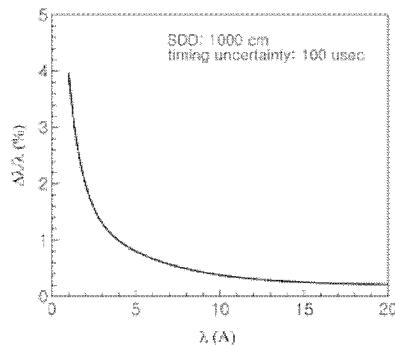


그림 8 간단한 TOF산란장치개념

펄스형 중성자는 일반적으로 그림 8에서와 같이 , 전체 비행거리 (L=L1+L2)를 고정시키고, 비행시간(t, Time-of Flight, TOF)을 측정하는 중성자산란기술에 유용하다. 중성자 파장은 다음의 De Brogli의 관계로부터 얻어진다.

$$\lambda(\text{Å}) \approx \frac{4t(\text{msec})}{L(\text{m})}$$

한 응용예로, 탄성산란을 이용하는 소각산란의 경우 비행시간 측정에서 100 usec의 오차가 있는 경우에도 파장분해능 Δλ/λ 3% 미만의 작은 파장분포를 갖으며, 측정가능한 모든 중성자 파장을 사용함으로써 넓은 산란벡터를 동시에 측정하는 것이 가능하다 (그림 9). 이외에도 반사산란, 극소각산란, 회절기등을 개발 할 수 있다.



또한 펄스형 파쇄중성자에 가장적합한 TOF-spectrometer는 비탄성산란을 이용한 장비로 크게 다음과 같이 나눌 수 있다. 비탄성중성자산란장비는 크게 직접형과 간접형으로 구분되며 시료 전후의 에너지차를 측정하는 장치이다

○ 직접형 비행시간 산란분광기(direct-geomery TOF-spectrometer)는 chopper 나 단색기등으로 입사에너지를 측정 한 후, 시료에서 산란된 중성자의 에너지를 TOF로 측정한다

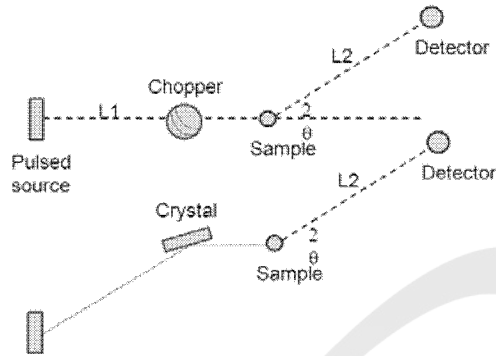


그림 10 직접형 비행시간 분광기 개략도

대표적인 장비로는 Fermi Chopper 분광기와 Disk Chopper 분광기등이 있다.

- Fermi chopper: 15 ~ 1000meV까지의 에너지를 측정하며, 주로 vibration excitation, 스핀상관관계, 초전도등을 연구하는데 이용됨.
- 냉중성자용 Disk 초퍼 분광기: 0~ 20 meV의 에너지를 측정하며, 주로 복합유체, 연성물질, 물등의 dynamics를 측정하며, 양자유체, 자성체등의 여기(excitation)등을 연구하는데 이용됨.

○ 간접형 비행시간 산란분광기(indirect-geomery TOF-spectrometer)는 입사중성자의 에너지를 TOF로 먼저 측정하고, 분석기의 Bragg회절을 이용하여, 시료를 지난 중성자의 에너지차를 측정한다.

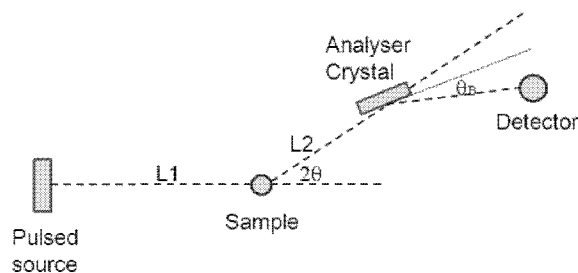


그림 11 간접형 비행시간 분

대표적인 산란장비로는 backscattering spectrometer (~ 18 meV)이 있으며, dynamics, 수소, 이온등의 확산, qunatum tunneling등의 연구에 응용됨.

이상에서 몇몇 파쇄중성자 표적시설 예를 살펴보았다. 모든 중성자 표적시설은 그림 12에서 보여 주듯이 특정에너지 (분자 운동과 관련)와 산란벡터(구조의 크기와 관련) 등과 측정하고자 고려하여 개발된다.

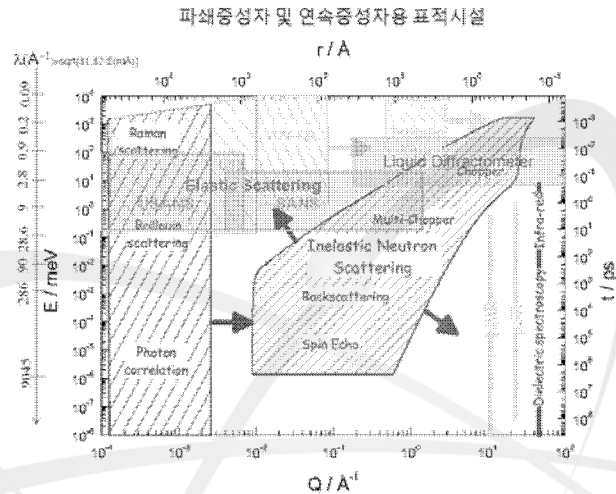


그림 12 에너지, 산란벡터, 시간, 및 크기별 산란장치

### III.1.3.5. PEFP 가속기를 이용한 파쇄중성자의 생성시 고려되는 가속기 모델

100 MeV 선형 양성자가속기는 2012년 경주 (건천)에 건설될 예정이다. PEFP 가속기의 특성은 표 7 에 나타냈다.

표 7. PEFP양성자 가속기의 특성 [7]

Particle	Proton	
Beam Energy	20 MeV (완공)	100 MeV (1012년 완공 예정)
Beam Spread	<1%	< 1%
Max. Beam power	96 kW	160 kW
Operation mode	Pulsed	Pulsed
Max. Peak Current	1 ~20 (meV)	1~20 (meV)
Max. Repetition Rate	120 Hz	60 Hz
Pulse Width	0.1 ~ 2	0.1 ~ 1.33
Max. Beam Duty	8%	24%

100 MeV의 PEFP 가속기에서 파쇄중성자를 발생 시키기는 경우와 추 후 이를 성능 향상시키는 경우에 여러 조합이 있을 수 있다 [그림 13].

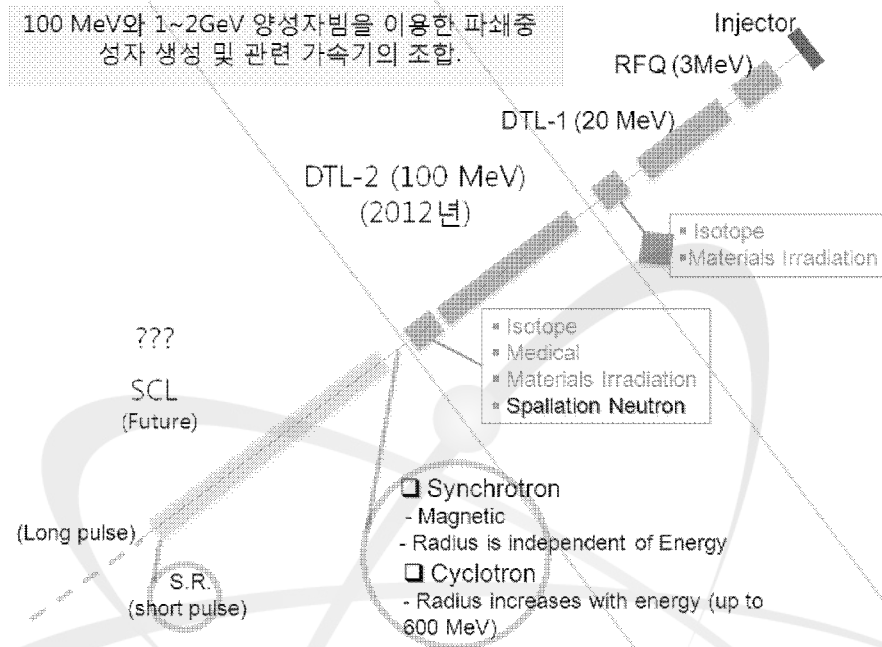


그림 13 100 MeV 와 1~2GeV 양성자 가속기를 이용한 파쇄중성자 생성을 위한 여러 가속기의 가능한 조합.

- **이용자 시설이 아닌 경우:** 100 MeV의 선형가속기를 이용한 파쇄중성자는 교육용이나, 파쇄중성자산란 장치개발용으로 이용할 경우 기존의 DTL 가속장치를 사용하면 장파장의 펄스를 얻을 수 있음.
- **이용자 시설인 경우:** 100 MeV 선형가속기에 1GeV Superconducting LINAC을 연결하여 장파장을 어든 방법과, 100 MeV LINAC에 Synchrotron 이나 Cyclotron을 연결하여 단파장을 얻을 수 있음.
- **펄스의 길이를 고려하지 않을 경우:** 1GeV Linac만으로는 대략 1msec의 장펄스를 생산한다. 100MeV 양성자가속기 시설에 synchrotron를 결합할 경우 대략 1usec의 짧은 펄스를 생산할 것으로 기대됨.
- **단펄스를 고려할 경우:** 1GeV Linac으로 확장한 후 Storage Ring 시설을 설치하는 방안과, 100 MeV DTL에 Synchrotron이나 cyclotron 시설로 확장하는 방안있을 수 있다. 후자 (100 DTL+synchrotron 이나 cyclotron)는 1GeV Linac 보다 비용이 작게 든다. 1GeV Linac인 경우는 에너지 증가나, 장파장을 얻기 위한 성능 확장에 유리함[8].



### III.2. 파쇄중성자 학술대회

국제학술대회[그림 14] (참석인원 40-50여명) 및 국내워크샵[그림 15] (참석인원 30여명)를 각각 한차례씩 추진하여 국내에 파쇄중성자과학을 소개하고, 전문가들과 정보 및 의견을 교환하였다. 또한 매년 파쇄중성자과학관련 학술 대회가 개최될 기틀을 마련하였다.

Conference Program  
CHAERUNG, KIST, KOS, Korea's National Science Center

**CONFERENCE: The 13<sup>th</sup> International Conference on Accelerator & Beam Utilization**

- Date : Oct 13, 2009
- Place : DIAMOND HALL (B1)
- Parallel Session : Spallation Neutron Source (Chairperson : S. H. Han, KIST, Korea)

Time	Contents	Person
10:00 - 10:30	Scientific Opportunities at the Spallation Neutron Source	Ian Anderson (ORNL, USA)
10:30 - 11:00	Opportunities and Challenges of Neutron Science in Korea	Sung-Min Choi (KAIST, Korea)
11:00 - 11:30	Current status of neutron facility in J-PARC/MLF	Jun-ichi Suzuki (JPARC, JAPAN)
11:30 - 12:00	Introduction of Instruments for Spallation Neutrons	Man-He Kim (KIST, Korea)
12:20 - 13:20	Registration	

그림 14 제 13회 가속기 빔이용 국제회의의 중성자 세션 (2009년 10월 13일, 경주)

### 제1회 양성자가속기를 이용한 파쇄중성자원 및 표적시설 개발 워크샵

- 일시: 2010년 03월 12일(금요일) 오전 10시 ~ 오후 5시
- 장소: 한국과학기술연구원 본관 4기 국제회의실 제2회의실
- 주최: 한국과학기술연구원 양성자가속기개발사업단, 양자원기초공동연구실(KIST)
- 주관: 양자원기초공동연구실(KIST), 고에너지연구소



그림 15 제 1회 양성자 가속기를 이용한 파쇄중성자원 및 표적시설개발 워크샵 (2010년 03월 12일, 한국과학기술연구원 KIST)

### 초대외국

민병학선교, 2010년부터 100MeV 대용량 선형 양성자 가속기와 결합된 선형 중성자원 개발이후  
후후 실험회장을 고려중에 있습니다. 양성자 가속기 적용을 확대하기 위해선  
파쇄중성자원 생산 및 과학적 이용분야에서 개발의 필요성이 대두되고 있습니다.  
국내에 파쇄중성자원 시설이 설치될 경우 학자로 일컫는 중성자원과 더불어 기초 및  
응용학 과학분야에 많은 기여를 할 것으로 기대됩니다. 파쇄중성원의 특징과 이해 및는 표적시설에 대한  
신뢰성 적용자들의 의견을 수렴하여 양성자 가속기 성능향상 및 파쇄중성자원 표적시설 개발에  
참고하고자 일정을 계획하고자 하오니 참여 부탁드립니다.

한국과학기술연구원(KIST) 강만호  
고에너지연구소장

### 프로그램 (사석 한일 회의)

10:00	축사 (김병호 - 한국원자력연구원, 양자원기초공동연구실장)
10:10	Introduction to Neutron Scattering at Spallation Neutron Sources (박재관 - 서울대)
10:30	The PEFF and its Future (김귀영 - 한국원자력연구원)
10:50	Possible Features of PEFF-Spallation Neutron Source (김원호 - KIST)
11:10	Polarized Neutron Reflectivity Researches at Spallation Neutron Source (박성문 - 부산대)
11:30	중성자 이용자 현황 (이기홍 - 한국원자력연구원)
11:50	Total Scattering Intensity Analysis using Time-of-Flight Neutrons from Spallation Sources (김재호 - 고려대)
12:20 ~ 13:50	점심 및 토론 (장소: KIST 국제회의실 및반관)

학술대회를 통한 국내 중성자 전문가들의 다양한 의견은 다음과 같았다.

(인력) 기술인력 확보를 위해 해외 중성자시설에 인력 파견 및 훈련이 필요함.

(기술/훈련/운영) 해외중성자시설에 빔라인을 운영 함. 장시간이 걸림.

(지역적/공동연구) 일본 1GeV J-PARC 시설이 있으므로 이를 이용함이 타당함.

(규모) - 일차적으로 1GeV보다 작은 가속기를 고려할 수 있음.

- 100 MeV 건설 후 1GeV로 확장가능.

(비용) 일회성 시설비보다는 지속적인 비용이 필요한 운영비가 문제임.

(접근성) 경주 (건천)까지 KTX가 운행될 예정임.

(용도) 100MeV 양성자 가속기인 경우 이용자 지원보다는 파쇄중성자 장치개발을 위한 시설로 이용.

(하나로) 연속형중성자원인 하나로의 성과를 지켜볼 필요가 있음

(시점) 가속기는 오랜 시간이 걸리는 시설임으로 건설 시점을 고려해야 함.

(지역적 요인) - 지역적요인 으로 , 중국 등 인접국가에 양성자가속기를 이용한

파쇄중성자원이 건설되었거나 건설될 예정임을 고려해야 함.

- 일본보다는 뒤쳐졌지만 중국보다는 기술이 앞서 있으므로 지속적인 개발이 중단될 경우 중국에 뒤쳐질 수 있음.

(상호보완) 하나로(연속형)와 보완적인 접근이 필요함.

(외국인력) 해외 전문가의 영입이 필요할 수 있음.

(외국자본) 1GeV 이상으로 성능향상시 외국과 공동개발/공동운영도 고려해 봄.

#### IV. 연구개발결과의 활용계획 및 결론

원자 파쇄시 생성되는 파쇄중성자는 사용 용도에 따라 다양한 과학적 응용이 가능하며, 과학, 나노, 바이오, IT, 공학 분야등 여러 분야에 이용될 수 있다. 적절한 에너지의 선택은 분자나 원자의 성질을 바꾸거나, 에너지 스펙트럼의 응용에 장점이 있을 것으로 기대 된다. 보다 중요한 것은 양성자/중성자등을 과학자들이 어떻게 이용하는가에 따라 새로운 개념의 과학이 나올 수 있는 분야이기도 하다. 과거에 알려져 있던 과학적 사실들이 첨단 파쇄중성자를 이용한 재실험을 통해 검증 받는등 과학 전반에 많은 발전을 유도하리라 기대된다. 본 연구의 최종결과는 진입 장벽이 높은 파쇄중성자 표적시설을 사전 조사함으로 100MeV 양성자 가속기의 용도를 극대화하기 위해서 필요한 파쇄중성자원으로서의 이용과 관련 표적 시설들 후보군의 선정에 활용될 수 있다. 100MeV 이상으로 양성자가속기의 성능을 향상시키는 건에 대한 국내 여러 파쇄전문가들의 다양한 의견을 수렴하였다.



KAERI

## V. 첨부

연속형 및 파쇄 중성자 시설들의 특성

표] Specifications of neutron sources in the world (modified & updated [9])

Reactor (continuous steady state) sources				
Year	ThermalFlux (n/cm <sup>2</sup> /sec)	Power (MW)	Facility	Status
1942	4.00E+06	0.0002	CP1	Shutdown
1943	2.00E+08	0.002	Cp2	Shutdown
1943	1.00E+12	2	X-10 (Oak Ridge)	Shutdown
1947	1.40E+14	42	NRX (Chalk River,CA)	Shutdown
1952	1.60E+15	40	MTR (Idaho National laboratory)	Operating
1957	4.00E+14	135	NRU (Chalk River, CA)	Shutdown
1965	1.60E+15	40	HFBR(Brook Heaven Nat. Lab, USA)	Shutdown
1966	2.50E+15	85	HFIR (Oak Ridge USA)	Operating
1967	4.00E+14	20	NIST-CNR (Gaithersburg USA)	Operating
1971	1.50E+15	58.3	HFR(ILL, Greboble France)	Operating
1982	2.40E+15	60	HFBR(Upgraded 1982)Brook Heaven Nat. Lab)	Shutdown
1986	2.20E+14	10	BNC (Budapest, Hungary)	Operating
1987	2.50E+14	30	BATAN (Serpong, Indonnesia)	Operating
1990	2.00E+14	20	JRR-3M(JAERI ,Japan Atomic Energy Res. Inst.)	Operating
1995	5.00E+14	30	HANARO (KAERI, Korea)	Operating
2005	8.00E+14	20	FRM-II (Germany)	Operating
2007	4.00E+14	20	ANSTO (OPAL, Australia)	Operating

CP: Chicago Pile

MTR: Material Test research Reactor

HFIR: High Flux Isotope Reactor)

HFBR: High Flux Beam Reactor

NIST-CNR: NIST-Center for Neutron Research

NRU: National Research Universal

HFR: High Flux Reactor

BNC: Budapest Neutron Centre

FRM-II: Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz Garching

ANSTO: The Australian Nuclear Science and Technology Organisation

### Spallation Neutron (Pulsed) Sources

Facility	Thermal Flux (n/cm <sup>2</sup> /sec)	Power (MW)	Energy (MeV)	Current Amp(mA)	Pulse Repetition (Hz)	Target Materials	Moderators
ZINC-P (ArgonneUSA)	5E+11		200		30	Pb brick	PE
ZINC-P' (ArgonneUSA)	2.4E+14				30	W, nat. U	PE, liq. H <sub>2</sub>
SNS (Rutherford, UK)	4.00E+16		800			Ta,W (nat.U)	
LAMPF-WNR (Los Alamos USA)	1.50E+16		800				
KENS (Tsukuba, Japan)	3.00E+14	0.005	500	0.01	20	W (nat.U)	liq.H <sub>2</sub> O(RT), sldCH <sub>4</sub> (27K)
IPNS (Argonne, USA)	1.50E+15	0.006	500	0.012	30	nat. U (enr.U)	CH <sub>4</sub> (27K), sld. CH <sub>4</sub> 100K
WNR/PSR (Los Alamos, USA)	1.20E+16	0.08	800	0.1			
ISIS (Ruherford, UK 1st TS)	4.00E+15	0.16	800	0.2	50	Ta,W (nat.U)	H <sub>2</sub> O(316K), liq.CH <sub>4</sub> (100K) liq. H <sub>2</sub> (20K)
Lujan (LANSCE USA)	1.00E+16	0.064	800	0.1	20	W	liq.H <sub>2</sub> O (RT), liq.H <sub>2</sub> (20K)
Lujan (LANSCE USA)	1.00E+16	0.064	800	0.1	20	W	liq.H <sub>2</sub> O(RT), liq. H <sub>2</sub> (20K)
KENS II (Tsukuba, Japan)	1.00E+17	0.4	800	0.5			
SNQ (kfa Julich, W. Germany)	1.50E+18	5.5	1100	5			
IN-6 (INR Troisk, Russia)		0.3	600	0.5	50	W	PE, H
SNS (Oak Ridge)	1.30E+16	0.3	1000	1.4	60	liquid Hg	liq.CH <sub>4</sub> (27K),sld.CH <sub>4</sub> (100K)
ISIS (2nd Target station)		0.06	800	0.06	10		
J-SNS (J-PARC, Japan)	1.20E+17	1	3000	0.33			liq.CH <sub>4</sub> (27K),sldCH <sub>4</sub> (100K)
PEFP-SNS (proposed, Korea)		0.16	100	1.6			
Spallation Neutron (Pulsed) Under construction or Proposed							
ESS (Lund, Sweden, Europe)		5	1330	4	50	liquid Hg	
CSNS (Beijing, China)		0.1	1600	0.062	25W		H <sub>2</sub> O(300K), liq.CH <sub>4</sub> (100K) liq.H <sub>2</sub> (20K)
Austron (Austria)	3.70E+16	0.5	1600	0.32	10W, Re		

### Spallation Neutron (Continuous) (i.e. steady-state)

CW Spallation	(n/cm <sup>2</sup> /sec)	(MW)	Amp (current)		
SINQ (PSI)	1.20E+14	0.83	6001mA		liq.D <sub>2</sub> O(25K)

PE: polyethylene

nat.: natural

enr. enriched

liq.: liquid

sld.:solid

## VI. 참고문헌

1. M. -H. Kim, "중성자 이용분석법의 소개", *Polymer Science and Technology*, 19(4), 338-342, (2008)
2. UCE2084-8594-9 "중성자장치(고분해능중성자소각산란장비) 및 응용분야 개발", 한국과학기술연구원 (2008)
3. UCV0133-8598-9 "중성자과학연구회" 한국과학기술연구원 (2008)
4. Mitchell et. al, *Vibrational Spectroscopy with Neutrons* (2005)
5. J. Wei et.al, WEZMA02, APAC 2007, Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (PRCAT), Indore, India
6. *Methods of Experimental Physics* vol 23 (1986)
7. Byung-Ho Choi et.al , APAC 2007, Raja Ramanna Centre for Adv. Tech. (RRCAT), Indore, India 315
8. Private communication of John Carpenter at ANL-IPNS
9. Future access to neutron sources, A stragy for the UK, CCLRC (2005)  
<http://www.neutrons.cclrc.ac.uk/Download/home.aspx>

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁연구지원기관 보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/CM-1217/2009			
제목/부제	이용자프로그램개발 및 운영 파쇄중성자원 표적시설 사전 연구		
연구책임자 및 부서명	김만호 (나노분석센터)		
연구자 및 부서명	한승희 (태양전지센터) 최원국 (광전자재료센터) 채근화 (나노분석센터)		
출판지	대전	발행기관	한국과학기술연구원 (KIST)      발행년      2010. 04
페이지	37 p.	도표	있음(○), 없음( )      크기      Cm.
참고사항			
비밀여부	공개(✓), 대외비( ), __ 급비밀	보고서종류	
연구수행기관	한국과학기술연구원 (KIST)	계약 번호	해당없음
초록 (15-20줄내외)	<p>100MeV 대용량 선형 양성자 가속기가 2012년까지 경주(건천)에 건설될 예정이며, 추후 성능확장을 고려할 수 있다. 양성자 가속기 이용을 극대화하기 위해서 파쇄중성자 생산 및 과학적 이용분야에서 개발의 필요성이 있으므로, 다음의 연구를 수행하였다.</p> <p>(i) 빔이용 국제학술대회 (The 13th International Conference on Accelerator &amp; Beam Utilization)세션에서 파쇄중성자 학술대회를 개최하여, 잠재적 중성자 이용자들에게 파쇄중성자원 소개, (ii) 파쇄중성자 워크숍 (제1회 양성자 가속기를 이용한 파쇄중성자원 및 표적시설 개발 워크숍)을 통한 국내 중성자전문가들의 의견 수렴, (iii) 해외 파쇄중성자 전문가 및 연구기관과의 네트워크 형성, (iv) 가속기 (파쇄, 펄스형)와 연구용원자로 (연속형)의 중성자 유량변천 비교 (v) 파쇄중성자의 특징과 표적시설 사전 조사, (v) 100MeV 이상의 성능으로 확장시 고려되는 가속기의 조합.</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	양성자 가속기, 파쇄중성자, 파쇄중성자원 표적시설, 중성자 산란 장치, 펄스형 연속형 중성자원		



BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
<b>Performing Org. Report No.</b>		<b>Sponsoring Org. Report No.</b>		<b>Standard Report No.</b>		<b>INIS Subject Code</b>	
KAERI/CM-1217/2009							
<b>T i t l e / Subtitle</b>		Development and Management of Proton Accelerator User Program Study of Facilities and Instruments for Spallation Neutron Sources					
<b>Project Manager and Department</b>		Kim, Man-Ho					
<b>Researcher and Department</b>		Han, S. H. Choi, W. K Chae, K H					
<b>Publication Place</b>	Daejeon	<b>Publisher</b>	Korea Institute of Science and Technology (KIST)		<b>Publication Date</b>	2010.04	
<b>Page</b>	37 p.	<b>Ill. &amp; Tab.</b>	Yes( <input type="radio"/> ), No ( <input type="radio"/> )		<b>Size</b>	Cm.	
<b>Note</b>							
<b>Classified</b>	Open( <input checked="" type="checkbox"/> ), Restricted( <input type="checkbox"/> ), ___ Class Document			<b>Report Type</b>			
<b>Performing Organization</b>				<b>Contract No.</b>			
<b>Abstract (15-20 Lines)</b>		<p>The 100MeV Linac proton accelerator is planned to be built at Gyungju, Korea by 2012 and a future upgrade of the facility can be considered. For maximizing the utilization of the PEFP accelerator, the following studies on spallation neutron facility and its scientific applications were performed: (i) Introduction &amp; discussion of spallation neutron sciences through organization of a neutron session in The 13ICABU conference and organization of the 1st workshop on the development of spallation neutron source using the proton accelerator and its spectrometers, (ii) networking the experts abroad, (iii) the flux history of accelerator-based (spallation) neutron sources and reactor-based (continuous) neutron sources, (v) the features and spectrometers of spallation neutron sources, (vi) discussion on upgrade of the 100 MeV PEFP accelerator</p>					
<b>Subject Keywords (About 10 words)</b>		proton accelerator, spallation neutron sources, scattering instruments for spallation neutron sources, pulsed neutron source, continuous neutron sources, neutron spectrometers					