

KAERI/RR-2286/2002

최종보고서

양성자공학기술의 국제협력방안 수립 및 사회적 수용성 증진 연구

Promoting International Cooperation and Public Acceptance
in Utilizing Proton Accelerator Technology

연구기관
한국원자력연구소

과학기술부

제 출 문

과 학 기 술 부 장 관 귀하

본 보고서를 “양성자공학기술의 국제협력방안 수립 및 사회적 수용성 증진 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2002. 11. 30.

연 구 기 관 명	: 한국원자력연구소
연 구 책 임 자	: 최 병 호
연 구 원	: 한 봉 오
연 구 원	: 이 재 형
연 구 원	: 김 계 령
연 구 원	: 주 포 국
연 구 원	: 김 인 규
연 구 원	: 김 현 준

요 약 문

I. 제 목

양성자공학기술의 국제협력방안 수립 및 사회적 수용성 증진 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

핵자(양성자와 중성자)를 다루는 양성자공학기술의 핵심시설인 대용량 양성자가속기가 국내에서 프론티어사업인 양성자기반공학기술개발사업으로 향후 10년간에 걸쳐 개발·건조될 예정이다. 연구기반시설로서의 양성자가속기를 확보하고 이를 활용하여 21세기 미래원천기술을 개발하고 산업적 응용으로 벤처 창출기반을 구축하려는 이 사업의 필요성을 일반 국민들에게 알리고 지지를 얻어 부지확보를 비롯한 사업의 업무를 차질 없이 수행하고자 함이다. 또한 이 분야에서 취약한 국내기반을 강화하고 가속기의 원활한 활용을 도모하기 위하여, 국제협력방안을 마련하고 NT/BT 등의 첨단기술에 가속기를 활용하는 방안을 수립하며, 국내에서의 활용기반을 구축하기 위한 이용자프로그램 개발 등의 준비업무를 수행하고자 함이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

선진국 양성자가속기 시설들의 활용실태와 개발현황을 파악하여 국민과 과학기술계에 널리 알리기 위하여 신문방송 기자단과 교수들을 포함한 민·관·연의 합동취재단을 구성하여 2회에 걸쳐 유럽의 세계적인 가속기시설들과 연구현황을 취재하였다. 이와 더불어 신문방송을 통한 홍보활동을 수행하였으며, 외부의 연구기관, 학계, 지방자치단체, 등에서 요청하는 20회 이상의 사업설명회에 참석하여 사업에 대한 지지를 이끌어 내었다.

국내외에서 수집한 자료를 분석정리하고 이를 바탕으로 국내 기술수준의 취약점을 보완하기 위한 국제협력 추진방안을 수립하고 해외 연구소들과의 협의를 추진하였다. 특히, 일본의 KEK와 중국의 IHEP와의 협력을 근간으로 하는 한·중·일 3국간의 양성자가속기 장치기술 및 활용기술 개발과 가속기시설의 공동활용을 위한 협력을 구체화하고 있다.

자원의 집중과 선택의 전략을 고려하면서 사업에서 구축되는 양성자가속기를 활용하는 NT/BT/IT 등의 분야의 연구과제들을 선정하고 기획하였으며, 미래의 양성자가속기 활용을 극대화하고 국내 활용연구인력을 육성하기 위한 이용자프로그램 개발 과제를 기획하였다. 또한, 가속기 활용의 저변을 확대하고 미래의 연구인력을 양성하기 위하여 가속기 여름학교를 기획하고, 국내외 강사진을 초빙하여 대학원생들을 대상으로 제1회 여름학교를 개최하였다.

IV. 연구개발 결과

신문방송을 통한 홍보를 필두로 하여 연구소 내외에서 수행한 설명회, Workshop, 시설 안내 등을 통하여 양성자가속기와 그 활용분야에 대한 국민의 이해와 지지를 이끌어 냈으며, 나아가서는 21세기 미래원천기술을 개발하여 산업화하는데 양성자공학의 역할과 필요성을 널리 알렸다. 그 결과로 양성자기반공학기술개발사업의 부지 유치를 희망하는 대학과 지방자치단체들이 현저하게 증가하였다.

양성자빔을 활용하는 국제적으로 차별화 되고 조기에 산업화 가능성이 있는 연구과제들을 기획하고 양성자기반공학기술개발사업의 기획보완과 연구과제계획에 반영하였다. 미래의 대용량 양성자가속기 활용기반 구축과 국내 관련 과학기술인력의 저변확대를 위하여 이용자프로그램 개발과제를 기획하고 사업수행에 반영하였다.

수집·정리된 해외 가속기시설 및 활용연구 자료를 바탕으로 국제협력방안을 구축하고 사업의 과제계획에 반영하고 해외기관들과의 협력관계 구축을 추진하고 있다. 기존의 세계적인 가속기시설 보유기관들과는 가속기 활용과 빔이용시설 구축분야에서, 대용량 가속기시설 구축사업 수행기관들과는 가속장치 기술개발과 미래의 시설공동활용에서 다양한 형태의 협력을 추진하고 있다. 가속기 여름학교를 기획하고 개최함으로써 가속기 활용기반 구축을 위한 젊은 과학기술인력 양성을 제도화하였다.

V. 연구개발 결과의 활용계획

수집된 정보와 자료는 양성자기반공학기술개발사업의 수행에서 다방면으로 활용될 것이다. 사업에 필요한 부지의 공모와 부지개발계획에 활용될 것이며, 해외기관들과의 협력관계 구축과 구체적인 협력방안 수행에 활용될 것이다. 또한, 이 과제의 수행을 통하여 구축된 협력관계를 토대로 국제전문가들에 의한 사업의 과제수행과정의 검토와 국제 양성자가속기 워크샵 및 가속기 여름학교 개최의 지원으로 사업의 내실을 기할 수 있을 것이다. 국내 양성자가속기시설 구축 이전에도 가속기 활용연구를 선진국 가속기시설에서 수행할 수 있도록 조치하여 사업의 빔이용연구와 이용자프로그램의 소과제 수행을 지원할 것이다.

미래의 첨단과학기술 개발에 필수적인 대용량 양성자가속기시설의 구축과 활용을 위한 기반 조성의 노력은 앞으로도 지속적으로 수행되어야 한다. 관심 있는 젊은 과학기술인력을 양성하고, 활용기술의 경험을 쌓으며 활용분야를 확대하여 다양한 신산업기술을 창출하기 위한 효과적인 계획 수립이 요구된다. 동북아 3국간에 상호 보완적인 연구시설 구축과 시설의 공동활용을 모색하여 구미 선진국들과의 21세기 과학기술 경쟁에 대처하도록 국제협력을 강화하여야 할 것이다. 선진국들과 차별화 되는 양성자빔을 활용하는 첨단산업기술의 개발과 사업화를 우선적으로 추구하여야 한다. 또한, 21세기의 기반연구시설이 될 파쇄중성자원을 우리의 목적에 맞게 효과적으로 기획하고 구축하여야 할 것이다. 이에 본 과제의 수행결과와 경험은 매우 요긴하게 활용될 것이다.

S U M M A R Y

I. Title of the Study

Promoting International Cooperation and Public Acceptance in Utilizing Proton Accelerator Technology

II. Necessity and Objectives of the Study

Proton engineering is to deal with nucleons (protons and neutrons), and its main tool will be a high power proton accelerator which is to be established within next 10 years in the frame of Proton Engineering Frontier Project. The Project will be able to realize the accelerator as a national fundamental research facility so as to be utilized in achieving future original technologies which can be promoted to venture businesses.

It is necessary for public to understand the meaning and importance of the Project and support it so that Project activities such as site preparation can be efficiently completed. And, in order to strengthen domestic technical background of the Proton Engineering and to enhance research activities using the accelerator, it is required to establish a sound plan of international cooperation, to plan beam utilization researches to support important future industrial technology development in NT/BT/ST, and to develop user program to establish domestic foundation in utilizing the accelerator.

III. Contents and Scope of the Study

In order to convey informations on the status of proton accelerators in the advanced countries toward public and domestic science societies, 2 teams consisting of reporters, professors, researchers and government officers were dispatched to famous accelerator organizations in Europe. Along with public relations activities through newspapers and broadcasting, there were more than 20 times of Project presentations requested by various local governments, universities, and scientific societies, which resulted in strong support of the Project from various societies.

Based on collected informations through actual visits to and internet surveys on foreign accelerators, a recommendation of international cooperation scheme has been made to complement domestic technological weak points, and there were preliminary discussions with some foreign organizations for that purpose. Especially, KEK of Japan, IHEP of China and KAERI are deliberating on planning detail cooperation programs in developing and utilizing accelerators among 3 countries.

Considering selective and focussed supporting strategy due to limited resources, some research items related with NT/BT/IT and utilizing proton beam were selected and planned to be implemented in the Project. And a user program development project was planned and implemented in the Project in order to be prepared for future use of the accelerator. In addition, in

order to increase the number of accelerator users and to upbringing junior researchers for future days, an accelerator summer school was planned and held in KAERI inviting prominent foreign and domestic lecturers.

IV. Results of the Study

Following public relations activities through newspapers and broadcasting, numerous Project presentations, along with workshop activities and guides through KAERI's facilities, greatly contributed to enhancing public understanding of and support to the Project. Further more, it was widely accepted that Proton Engineering would be essential in developing 21 century's original technologies. As a result, significant number of universities and local governments are willing to donate a site, and therefore, to invite the Project.

Complementary planning of the Project as well as implementation of its research programs were performed considering possibility of early industrialization of research items utilizing proton beams. Established international cooperation scheme was reflected into the Project plan and are partly being implemented in cooperation with some foreign organizations. It is recommended that, with those organizations with world famous accelerator facilities, KAERI is to cooperate in the field of beam utilization in their facilities and of user facility establishment, and with those organizations executing a high power proton accelerator project, in the field of accelerator technology development and for future use of their accelerator facilities. The accelerator summer school will form a concrete pattern of upbringing young scientists endeavoring to use accelerators.

V. Application of the Results

It is expected that the results of the study including collected informations will be widely applied to the execution of the Project, such as in securing a site for the Project, in establishing international cooperative relationships with foreign accelerator organizations and implementing detail collaborative activities. Taking advantage of well-established relationships with some foreign organizations through this study, progress of the Project will be periodically reviewed by foreign experts and international accelerator workshop as well as summer school will be held with foreign experts' support. Even before the accelerator installation of the Project, researchers involved in beam utilization studies and in the user program will be able to have access to foreign accelerators.

Efforts should be continued to establish a firm foundation of securing and utilizing a domestic high power proton accelerator. In this respect, young scientists should be cultivated, beam utilization experiences be added and its research fields be widened, and plans of achieving industrial technologies and generating ventures be established. Our priority should be given to developing industrial technologies utilizing medium energy proton beams, where advanced countries are not concerned much. And, among 3 far-eastern countries, technical cooperation should be strengthened to the extent of coordination in planning accelerator facilities and in sharing the use of facilities. Our spallation neutron source should be planned to meet domestic needs as a 21st century's fundamental research facility in Korea. All of these tasks require applications of resulted informations and experiences from this study.

CONTENTS

Chapter 1. Summary

Chapter 2. Status of Worldwide and Domestic Research Activities

Section 1. Status of Domestic Research Activities

Section 2. Status of Worldwide Research Activities

Chapter 3. Contents and Results of the Study

Section 1. International Cooperation Scheme related with Accelerator Development and User Group Activities

Section 2. Application Plan of Proton Beam to R&D of NT/BT/ET.

Section 3. User Program Development to Support Domestic User Group

Section 4. Enhancement of Public Acceptance on the Proton Engineering Frontier Project

Chapter 4. Achievement of the Study Goal and Contribution to related R&D Activities

Section 1. Achievement of the Study Goal

Section 2. Contribution to related R&D Activities

Chapter 5. Application Plan of the Study Results

Section 1. International Cooperation

Section 2. Upbringing R&D Manpower

Chapter 6. Related Informations Collected during the Study

Section 1. Status of Oversea's Major Proton Accelerator Related Organizations

Section 2. Collection of Press Reports

여 백

목 차

제 1 장	과제의 개요	1
제 2 장	국내·외 기술개발 현황	3
제 1 절	국내 기술개발 현황	3
제 2 절	해외 기술개발 현황	4
제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	9
제 1 절	양성자가속장치 기술개발과 이용자그룹의 국제협력방안	9
제 2 절	양성자빔의 NT/BT/ET 기술개발에의 활용	22
제 3 절	국내 산학연 이용자그룹의 이용자프로그램 개발	25
제 4 절	양성자가속기사업에 대한 기술적, 사회적 인식 및 수용성 제고	30
제 4 장	목표 달성도 및 관련 분야에의 기여도	39
제 1 절	목표 달성도	39
제 2 절	기술개발에의 기여도	42
제 5 장	연구개발결과의 활용계획	43
제 1 절	국제협력	43
제 2 절	과학기술 인력양성	43
제 6 장	관련 수집자료	45
제 1 절	해외 주요 양성자가속기관 관련 기관 현황	45
제 2 절	홍보기사 모음	84

제 1 장 과제의 개요

21세기의 과학기술은 20세기의 마이크로(Micro)시대를 지나, 더욱 정밀하고 근원적인 영역으로 발전되어 과거의 분자의 거시적인 집단을 다루었던 학문 분야가 이제는 날개의 분자 및 원자 수준의 탐구와 조작을 필요로 하는 나노(Nano)시대를 향해 가고 있다. 따라서 이러한 극미시세계의 연구개발을 위해서는 여러 연구 수단들이 필요한데, 그 중 중요한 수단이 원자보다 훨씬 작은 (약10만분의 1) 양성자와 중성자를 사용하여 물질을 탐지하고 다루는 것으로, 미국, 일본, 유럽 등에서는 물질의 탐침 수단인 양성자와 중성자를 대량으로 만들어낼 수 있는 양성자가속기 개발을 서두르고 있고, 이는 향후 나노과학과 생명공학을 그 장치의 첫 번째 이용분야로 잡고 있음을 의미한다. 이와 아울러 산업, 의료, 기초학술 연구의 중요한 수단으로 넓은 활용을 계획하고 있다.

양성자공학기술이란 양성자와 중성자를 대량으로 생산하여, 만물의 구성 요소인 분자 및 원자를 탐지하고 조작하는 수단으로서 가속장치 및 빔 이용기술을 포괄하며, 그 활용도가 광범위한 원천기반기술이다. 이 기술의 기반이 되는 양성자가속기는 20세기에 소립자물리연구와 핵자료 생산의 도구로 이용되어 왔으며, 이를 기반으로 하는 가속장치기술이 이미 부분적으로는 반도체 제조공정과 같은 첨단산업분야에서 이용되고 있으며 의료장비와 방사선동위원소 생산장비로서도 활용되고 있다. 전자계산기가 연구개발의 계산도구로 개발되어 점진적으로 우리의 일상생활의 도구로 변모한 것처럼 양성자가속장치기술도 점진적으로 우리의 일상 생활과 산업에 필요 불가결한 도구로 발전될 것으로 예상된다. 이러한 양성자공학기술의 중요성과 활용성을 고려하여, 일반대중의 위치에서 성찰하고 이 기술분야에서 국가와 국민의 지지를 받으면서 선진국들에 뒤떨어지지 않는 기술기반을 구축하고 기술의 활성화를 꾀할 수 있는 정책을 수립하여야 한다.

양성자기반공학기술개발사업이 2002년도 프론티어사업으로 선정되어 기획보완단계를 거쳐 2002년 7월에 사업단이 출범하였다. 이 사업단은 2010년까지 100MeV/20mA 대용량 양성자가속기를 개발하고, 향후 10년간에 걸쳐 NT, BT, IT, ST, RT 등 최첨단 분야에서의 양성자빔 이용기술 개발을 통한 미래원천기술 확보 및 벤처기술 분야 창출한다는 목표로 금년 9월부터 1차년도 세부과제 수행에 착수하였다. 이에 맞추어 이 과제에서는 양성자기반공학기술개발사업 수행의 기반을 공고히 하기 위한 업무를 수행하였다. 이 사업의 의미와 중요성을 일반대중에게 알리고 협력을 구하기 위한 사회적 인식 및 수용성 제고방안을 수립시행하고, 취약한 국내 기술기반을 경제적으로 향상시키기 위한 국제협력방안을 수립하고 추진하였으며, 사업의 장기적인 결실을 도모하기 위하여 양성자가속기의 NT/BT/ET 기술개발에 활용하는 방안과 이용자프로그램개발 방안을 제시하였다.

특히, 2차에 걸쳐 국내 주요 신문방송 기자들을 비롯한 민·관·연의 합동방문단을 결성하여 유럽의 선진 양성자가속장치 시설들과 생산업체를 방문 취재하는 기회를 가졌으며, 이를 통하

여 해외 기술정보의 수집과 대 국민 홍보의 성과를 거두었다. 이는 장차 양성자기반공학기술개발사업의 부지확보에 매우 긍정적인 영향을 줄 것으로 사료된다.

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

1. 양성자가속기 개발

한국원자력연구소에서는 1997년부터 2002년초까지 원자력중장기사업의 “양성자빔 가속 장치 개발과제를 통하여 6MeV 가속장치 기술개발과 산업적 빔 이용/응용기술개발을 수행 하였으며, 이와 병행하여 매년 “양성자가속기 국제 Workshop (2002년도 6회째)”을 개최 하여 가속장치 기술검증, 국내 산학연 이용자 개발과 아울러 국제협력기반을 구축하고 있음. 특히 2000년 아시아가속기학회 (ACFA; Asian Committee for Future Accelerator) 내에 양성자가속기 분과를 설치하여 아시아 지역 다자간 협력 및 한-중 및 한-일간의 국가 간의 국제협력 체제도 구축하고 있음.

제품/기술 분야명	기관명	연구기간	연구내용	연구결과
양성자빔 가속장치개발	KAERI	1997~2002	양성자빔가속장치 개발 (입사기, RFQ, CCDTL)	6MeV급 양성자 가속장치 개발
폭약 탐지 장치	KAERI	1999~2002	정전 양성자 가속기 및 탐지시스템	1MV 정전 가속기
클라이스트론	KAPRA	1999.4~2002.3	클라이스트론 설계 및 제작	현재 조립시험 중

2. 장치응용 및 빔이용 기술개발

가. 이온원과 수백 keV의 양성자 및 중이온 가속장치 기술 및 이를 이용한 이온주입기술은 한국원자력연구소에서 보유하고 있으며, 1990년도부터 이온주입법에 의한 기능성 신소재 연구 개발을 수행 중임.

나. 나노가공기술 개발과 관련해서는 고에너지 입자빔을 나노기술에 적용하여 체계적으로 연구한 예는 전무한 실정이며, 본 연구의 바탕이 되는 고에너지 Ion Beam Engineering에 관한 기반기술은 한국자원연구원, 한국원자력연구소, KIST 등 극히 일부의 기관에서 보유하고 있음. 이들 기관에서 수소이온 주입 기술을 활용하여 일부의 연구를 수행하여 왔으나, Smart-Cut 기술 개발은 거의 이루어지지 않고 있는 실정임.

- 다. 국내의 유전자 연구는 주로 감마선을 이용하는 방법에 국한되어 왔으나, 이온빔이 감마선에 비해 6배 이상 큰 유전자 변이 효과를 나타내는 것으로 알려져 있어 이에 대한 관심이 높아지면서 이온빔 조사법을 이용한 화훼 작물 개발에 관한 연구가 순천대학교와 일본의 이화학연구소 (RIKEN)와의 공동연구를 통해 수행된 바 있음.
- 라. 과학기술원에서는 우리별 1, 2, 3호 및 아리랑 1호 우주관측자료를 이용하여 고에너지 방사선 입자에 의한 전자부품 영향 연구를 1992년부터 수행해오고 있음. 그러나, 우주방사선을 모사할 수 있는 실험시설이 없어 그에 대한 연구가 매우 더디게 진행되고 있음. 현재, 위성설계 시 우주 방사선 입자에 의한 영향은 기존의 heritage에만 의존하고 있으며, 위성개발 시 우주환경은 열 진공 시험만 수행하고 있음.

3. 사업 정책연구 분야

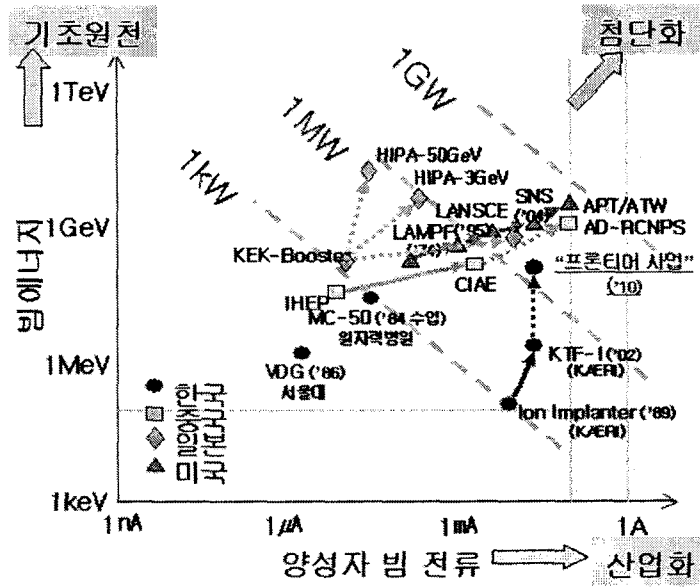
- 가. 한국원자력연구소에서는 1996년도에 특정연구개발사업으로 ‘양성자가속기 개발을 위한 타당성연구’를 국내 우수한 가속기분야 전문가들과 함께 수행하였으며, 결론으로 국내에서 1GeV 20mA의 선형양성자가속기 건설을 조속히 추진할 것을 건의하였다.
- 나. KAPRA가 추진하는 “KOMAC 협력그룹”에서는 2000년 5-6월 국내 양성자가속기사업의 수요조사 및 사업 참여의향을 아래와 같이 조사하였음.
 - 사업 수요조사 (7일간) ; 전문가 1,043명 응답
 - 사업참여 의향조사 (10일간); 산업체 144, 대학교 27, 기관 17 (총 188기관)
기관참여 의향 및 부지제공 의사 표명
- 다. 또한 선진국에서 양성자가속장치의 사용하여 연구한 경험을 가지고 있는 국내 전문가들을 중심으로 가속장치 활용에 관한 Workshop과 세미나를 열어 NT, BT, ST, ET 등의 첨단기술개발에 활용하기 위한 예비 이용 프로그램을 수립하였음.
 - 양성자가속기 협력그룹 구성 ; BT, NT, ET, ST 등 15그룹
 - 그룹별 예비과제계획서 제출 ; BT(6), NT(1), ET(4)등 21과제

제 2 절 해외 기술개발 동향

1. 양성자가속장치 개발

- 가. 현재 세계적으로 1 GeV급 (Beam Power 1~10MW급) 이상의 대형 양성자가속장치 개발이 진행되고 있으며, 특히, 미국, 일본 및 유럽은 21세기 생명과학과 신물질 개발을 목표로 국가 프로젝트로서 추진중임.

나. 국외 대형 양성자가속장치 개발 현황



다. 기존 양성자가속기

국가	기관	시설명	규격(에너지/전류)	주요용도	비고
미국	LANL	LANSCE	800MeV/1mA	핵중변환 연구, 중성자 응용	
영국	RAL	ISIS	800MeV/0.2mA	중성자 과학	
스위스	PSI	SINQ	590MeV/1.8mA	중성자 과학, 표적 개발	

※ 세계적으로 50여기 100MeV이상 대용량 양성자 가속기 중 평균 빔전류가 0.1mA 이상인 장치.

라. 개발 중인 대용량 양성자 가속기

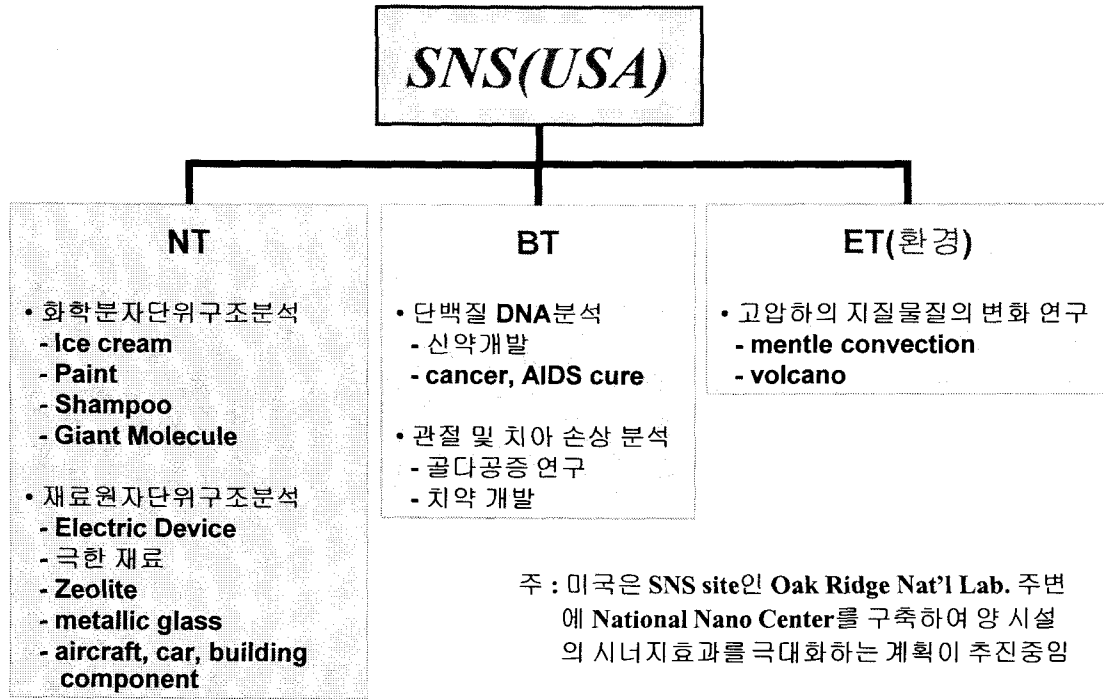
국가	기관	시설명	규격	주요 용도	완공년도
미국	ORNL	SNS	1.0GeV/2mA	<ul style="list-style-type: none"> 중성자과학(NT,BT,ET 연구용) NNI의 User Facility 	2006
일본	JAERI KEK	HIPA	0.4GeV/0.7mA 3.0GeV/0.3mA 50.0GeV/20uA	<ul style="list-style-type: none"> 핵중변환용 중성자과학(BT,NT,ST 연구용) 입자물리용 	2006
EU	Joint CERN	EA ESS	1.0GeV/10mA 1.33GeV/10mA	<ul style="list-style-type: none"> 신 에너지 개발(토륨연료) 중성자과학 	2008
프랑스, 이태리	각국별 프로그램추진		1.0~1.6GeV/ ~10mA	<ul style="list-style-type: none"> 핵중변환 시스템 개발 	-
중국	CIAE, IHEP	AD-RCNPS	1.0GeV/20mA	<ul style="list-style-type: none"> 핵중변환 및 중성자과학 	2010(계획)

※ NNI (National Nanotechnology Initiative)

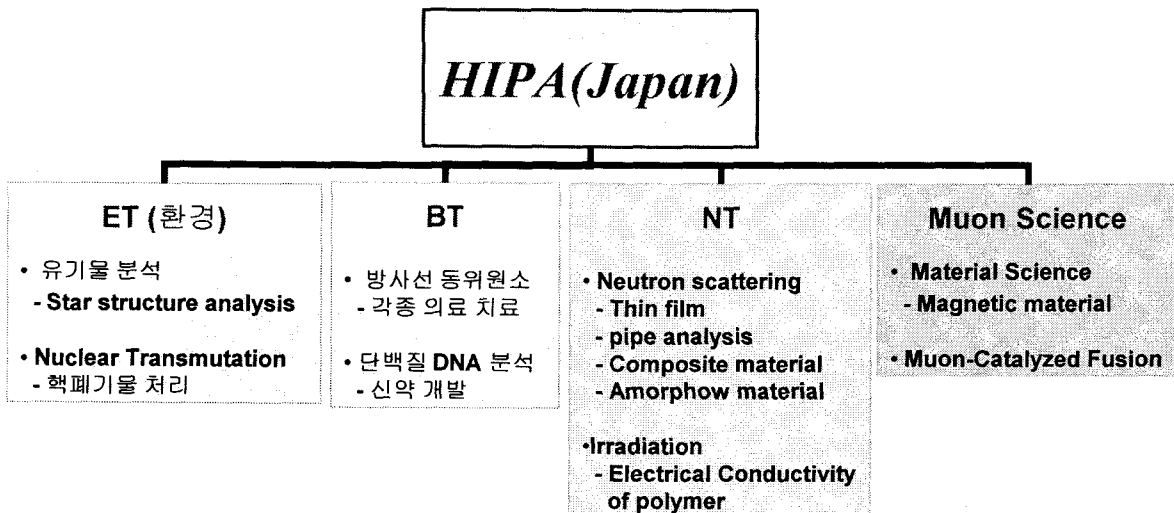
2. 장치응용 및 빔이용 기술 개발

가. 현재 미국(SNS/LANSCE), 일본(HIPA), 유럽(ESS) 등에서 대용량 양성자가속기 사업이 진행되고 있으며, NT, BT, ET 등의 최첨단 과학기술 분야에 활용할 계획이다.

나. SNS Project (미국)



다. HIPA Project (일본)



- 라. 미국은 나노기술분야를 21세기 핵심 과학기술 분야로 선정하고 2001 회계연도에 5억 달러의 연구비를 책정하였다. 특히 반도체 나노결정 및 양자점을 합성하고자 하는 노력이 전 세계적으로 널리 이루어지고 있고 비록 제한적이지만 smart-cut 기술을 이용하여 제작한 SOI wafer들이 프랑스 SOITEC사에 의해 UNIBOND란 상품명으로 공급되고 있다. 이러한 이유는 결정의 크기가 원자규모에 접근하면 전기적, 광학적, 자기적, 열역학적 특성이 bulk의 경우에 비해 크게 변하는 특성이 있기 때문이다. 현재 SOI 시장이 연 4천만불이던 것이 매년 40~50%씩 증가하여 2005년경 Si 시장의 약 10%를 점하여 연 2.5억불로 예상하고 있다.
- 마. 일본의 경우 1990년대 이후 타카사기 원자력연구소에서 애기장대를 이용한 이온빔 조사 연구를, 이화학연구소(RIKEN, 和光本所)에서는 다양한 작물을 이용한 유전자원, 품종육성, 기초연구를 135MeV급 가속기를 이용하여 수행하고 있으며, 영국의 ZENECA Bio Products사는 *Alcaligenes eutrophus* 균주를 이용하여 glucose 농도를 10-20 g/L로 조절함으로써 fed-batch culture 동안 121 g/L의 P(HB-co-HV)를 BIOPOL이라는 상표로 생산 중임.
- 바. 선진국에서 IGBT(Insulated Gated Bipolar transistor), pn 접합 다이오드 등의 빠른 스위칭을 요구하는 소자의 스위칭 특성 개선을 위해 소자에 축적된 캐리어를 빠르게 제거하기 위한 목적으로 양성자 조사방법을 개발하고 있다. 일본 및 유럽의 경우 대학 및 조사설비업체에서 체계적이고 폭넓은 연구 수행 중이며, 일본에서는 전력계통(고전압 DC 송전, HVDC Transmission)용 8,000V급 광구동 사이리스터 (Light-Activated Thyristor), 고속전철(노조미호)용 6,000V 급 GTO (Gate Turn-Off) 사이리스터 개발 및 상용화에 성공하여 실제 사용 중임.
- 사. 우주환경 영향에 대한 자료는 미국 NASA, 유럽 ESA 등에서 확보하고 있으며, 이 자료들을 활용하여 위성개발 시 시뮬레이션을 통한 선행연구를 수행하고 있다. 뿐만 아니라, 위성 및 핵 시설 사용 부품에 대한 내방사선 연구를 고속 하전입자를 사용하여 지속적으로 수행해오고 있다. 가속기를 이용하여 우주 환경 영향 평가를 수행 중인 국외연구소로는 Texas A&M Cyclotron Facility, Indiana Univ. Cyclotron Facility, UC-Davis Crocker Nuclear Lab., Paul Scherrer Institute, Brookhaven National Lab. 등이 있다.

여 백

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 양성자가속장치 기술개발과 이용자그룹의 국제협력방안

1. 대용량 양성자가속장치 제작 및 설치를 수행하고 있는 연구소들과의 협력

- 미국 SNS Project에 참여하고 있는 ORNL의 조양래 박사, 전동오 박사, BNL의 이용영 박사 등의 한국계 전문가들을 개인적으로 활용하고, SNS 자료의 활용가능성을 고려하여 SNS Project와의 프로젝트간 협력관계의 수립을 추진할 예정이다. 이들 한국계 전문가들은 이미 우리의 양성자가속기사업과 관련한 Workshop과 Summer School을 통하여 긴밀히 협력하고 있으며 국제협력관계 수립을 포함한 가속기 관련 다방면의 지원을 약속하고 있다. 우리의 사업 범위가 Superconductive Linac의 기술개발에 착수하게 되면 추가로 관련 한국계 전문가들을 확보할 예정이다.
- 일본 Joint Project의 양성자가속기부문을 담당하고 있는 KEK(고에너지 가속기연구 기구)와 공식적인 협력관계를 수립하여 가속기부품들의 설계와 제작에 관련된 경험을 간접적으로 습득하도록 한다. 특히 일본과의 부품공급시장의 공유가능성이 높으므로 부품들의 개발 또는 구매 시에 경제적 및 기술적 관점에서 일본 Joint Project의 경험을 최대한 활용하여야 한다. 이를 위하여 KEK와 기관간 협력약정을 체결키로 지난 2월에 합의하였으며, 일본의 KEK에서 열린 동남아 3국(한·중·일)간의 Mini-Workshop 기간 중에 ACFA HPPA Working Group Meeting을 갖고 이를 재확인하였다. 다음은 KEK가 준비한 회의록(안)이다.

ACFA HPPA Working Group Meeting Minute (Draft)

Participants: Shouxian Fang (IHEP), Yoshishige Yamazaki(JAERI), Kazuo Hasegawa(JAERI), Xialing Guan (IHEP), Po Kook Joo(KAERI), Yong-Sub Cho(KAERI), Shuichi Noguchi(KEK), Satish Chandra Joshi(CAT), Hitoshi Kobayashi(KEK)

Time: December 11th, 2002

Place: Meeting Room, 1F, Building 3, KEK

First, Joo (KAERI) gives an introductory talk entitled "What should we prepare for international cooperation?" After this talk discussion started. Following is a brief summary of the discussion.

1. We should not refer to ADS in the HPPA collaboration for the time being, in order to avoid the unnecessary confusion with the politically delicate matter.

2. Establish communication channels. Bilateral agreement will be easier to form than multilateral one. Multilateral collaboration will be encouraged by, for example, mini-workshop like this.
3. Collaboration by exchanging experts is useful. Although the funding of the travel expenses is a problem, the following scheme may work: the air ticket is supported by the institute of the expert, while the local expense is supported by the host institute.
4. The working group supports the workshop which will be held 22-23 of May, 2002 in KAERI, the second summer school 7-12 July, 2003 in KAERI, and the accelerator school Oct. or Nov. 2003 in CAT India.
5. The J-PARC is a very unique facility in Asia and international collaboration for this project should be strongly promoted.
6. Next mini-workshop will be held in KAERI autumn 2004. The topics will be on DTL.

- 일본 방문시의 주요 면담 인사

- Dr. Shoji NAGAMIYA, Director, KEK-JAERI Joint Project (KEK)
 - Prof. Yoshishige YAMAZAKI, Group Leader, Joint Accelerator Group for HIPA (JAERI)
 - Prof. Hitishi KOBAYASHI, Chief, Proton Accelerator R&D, KEK
 - Dr. Kazuo HASEGAWA, Center for Proton Accelerator Facilities, JAERI
 - Dr. Nobuo OUCHI, Center for Proton Accelerator Facilities, JAERI
 - Dr. Hidetomo OGURI, Center for Neutron Science, JAERI
 - Dr. A. UENO, Proton Accelerator R&D, KEK
 - Dr. Y. KONDO, Proton Accelerator R&D, KEK
 - Dr. S. YAMAGUCHI, Proton Accelerator R&D, KEK
- 일본에서 진행중인 대형 양성자 가속기 사업인 JAERI-KEK Joint Project의 공식명칭을 J-PARC (Japan Proton Accelerator Complex)로 변경하였으며 이 Project에 참여하는 각 분야별 책임자 (선형 가속기 부문)는 아래와 같다.

성명	직위 및 소속	담당 분야
Yoshi Yamazaki	group leader (JAERI)	J-PARC Accelerator
Kazuo Hasegawa	group leader (JAERI)	J-PARC Linac
Masanori Ikegami	Professor (KEK)	빔 광학
Hidetomo Oguri	Research staff (JAERI)	이온원 개발
Arika Ueno	Professor (KEK)	RFQ 개발
Fujio Naito	Professor (KEK)	DTL 개발
Takao Kato	Professor (KEK)	SDTL 개발
Kenzi Saito	Professor (KEK)	초전도 가속기 개발
Seiya Yamaguchi	Professor (KEK)	고주파 시스템 개발

- 현재 KAERI가 준비중인 KEK와의 협력약정안

IMPLEMENTING ARRANGEMENT

between

HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION

and

KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE

THIS IMPLEMENTING ARRANGEMENT is made as of the **th day of ****, 2002 between the High Energy Accelerator Research Organization (hereafter referred to as "KEK") and the Korea Atomic Energy Research Institute, a corporate body established under the Korea Atomic Energy Research Institute Law, 1973, having its principal place of business at 150 Duckjin-dong, Yusong-ku, Taejon, the Republic of Korea (hereinafter referred to as "KAERI")

WHEREAS, KEK and KAERI (hereafter called the "Parties") consider the common desire of both Parties cooperation on the basis of equality, reciprocity and mutual benefit, in the development and applications of high power proton accelerators (hereafter called "Accelerators") and their user facilities ;

WHEREAS, Article 5 of the Agreement between the Government of the Republic of Korea and the Government of Japan on Cooperation in the Field of Science and

Technology, which entered into force on 20 December 1985, provides that implementing arrangements may be made between the two Governments or their agencies, whichever is appropriate ;

WHEREAS, the Arrangement between the Government of the Republic of Korea and the Government of Japan Concerning Cooperation in Nuclear Energy entered into force on 25 May 1990 ;

NOW THEREFORE, in consideration of the mutual covenants contained in this Arrangement and other good and valuable consideration, the Parties agree as follows :

1. Interpretation

As used in this Arrangement, the following terms shall have the definitions respectively assigned to them hereunder unless the subject or context requires otherwise ;

- (a) "Collaborative Program" means a program to be established by both Parties' representatives specified in the Clause 3 of this Arrangement and to be carried out by both Parties to achieve the objectives of this Arrangement,
- (b) "Contract researcher" means a technical expert who is not an employee but a contractual participant in a research program of KEK or KAERI,
- (c) "Assigning Party" means the Party which has agreed to assign its employees or contractual researchers to the other Party as stipulated in a Collaborative Program,
- (d) "Receiving Party" means the Party which has agreed to accept employees or contractual researchers of the other Party as stipulated in a Collaborative Program,
- (e) "Proprietary Information" means information of a confidential nature such as trade secrets, patentable information and know-how which is marked as "in confidence" provided such information:
 - (1) Is not generally known or publicly available from other sources;
 - (2) Has not previously been made available by the owner to others without obligation concerning its confidentiality; and
 - (3) Is not already in the possession of the recipient without obligation concerning its confidentiality.

2. Objectives

Both Parties shall in the spirit of encouragement collaborate in research and development relevant to accelerators and their applications, and cooperate with each

other to provide opportunities to exchange information, technology, personnel and to collaborate on subject matters of mutual interest in the manner and to the extent provided hereunder subject to the applicable laws and regulations in force in the respective countries.

3. Coordination

Each Party shall nominate a representative and all administrative contacts between the Parties shall be effected through the representatives. The representatives shall implement Collaborative Programs within the scope of this Arrangement.

4. Methods of Cooperation

The implementation of Collaborative Programs may include, but not be limited to, the following activities ;

- (a) Transfer of scientific and technical informations,
- (b) Dispatch of scientists, engineers, or other experts (hereafter called "participants") who are employees or contract researchers of each Party to the facilities of the other Party,
- (c) Short-term visits by employees or contract researchers of each Party to the facilities of the other Party,
- (d) Holding of seminars and meetings,
- (e) Supply of equipment or components developed by each Party,
- (f) Joint research and development, and
- (g) Other activities as agreed upon by the Parties.

5. Finance

The implementation of each Collaborative Program shall be subject to the availability of appropriate funds. Each Collaborative Program shall specify detailed terms and conditions including financial resources. Except as otherwise agreed upon by the Parties, each Party shall bear the entire cost of its activities under this Arrangement.

6. Exchange of Proprietary Information

- (a) All proprietary information under this Arrangement shall be clearly identified and marked as such by the providing Party and the receiving Party shall respect the privileged nature thereof, and shall not disseminate such information to any third party without prior written consent of the providing Party. Such information may be disseminated by the receiving Party and made available for the use of the receiving Party, concerned government departments, and government agencies in

the country of the receiving Party, provided that any proprietary information so disseminated shall be pursuant to an agreement of confidentiality.

- (b) No proprietary information orally communicated shall be subjected to the above non-dissemination provision unless the providing Party of such information places the recipient notice in due time as to the proprietary information communicated.
- (c) If either of the Parties becomes aware that it will, or it may reasonably be expected to become unable to meet the above non-dissemination provision, the Party recognizing this shall immediately notify the other Party. The Parties shall thereafter consult to define an appropriate course of action.

7. Disclaimer

The application or use of any information (including computer codes, results of experiments, design drawings and specifications) and of any proprietary information transferred under this Arrangement shall be the responsibility of the receiving Party, and the transmitting Party does not warrant the suitability of such information for any particular use or application, nor does it provide warranty or assurances as to the accuracy of such information. The transmitting Party will do its best to furnish such information which will meet the requirements associated with cooperative activities under the related Collaborative Program.

8. Exchange of personnel

- (a) The Assigning Party may designate Participant(s), subject to approval by the Receiving Party, to work or to be trained under the direction of the Receiving Party on aspects of the related Collaborative Program.
- (b) The nature, extent and period of each Participant's assignment shall be described in the related Collaborative Program. Recall of the Participant may be requested when deemed necessary or desirable.
- (c) The participant will be required to observe all rules, regulations and requirements of the Receiving Party, including, but not limited to, safety, health, hours of work and conduct. Leave or vacations of the Participant shall be in accordance with the policy of the Assigning Party, which may be coordinated with the requirement of the Receiving Party.
- (d) The Assigning Party shall be responsible for all costs and expenses incurred by the assignment unless otherwise provided for in the related Collaborative Program.
- (e) The Receiving Party shall grant to the Participant access to all necessary information to allow the Participant to fulfil his obligations with respect to his assignment under the related Collaborative Program.

- (f) The Participant shall provide the Receiving Party with a copy of such notes, writings, designs, drawings, memoranda, written reports, and other technical data as developed in connection with his assignment.
- (g) The Participant shall not transmit or disseminate to any party other than the Receiving Party and its staff any information bearing a restrictive designation without approval of the Receiving Party. Any information which is to be delivered to the Assigning Party or to others or to be prepared for publication or public distribution by the Participant shall be submitted to the Receiving Party for review and clearance prior to such delivery.
- (h) Where the Participant is to be engaged in radiation work, the Assigning Party shall furnish the Receiving Party with a statement that the Participant is fit to engage in radiation work and shall furnish particulars of the Participant's cumulative radiation doses to the latest practical date. The Receiving Party shall furnish particulars to the Assigning Party of the radiation dose received by the Participant during the course of the assignment.
- (i) The Receiving Party shall put forth its best efforts to assist each Participant in obtaining a visa for the visit of the Participant and the Participant's family, and shall arrange for adequate accommodations for them, and shall provide all assistance to them as regards administrative formalities.

9. Patent

The Parties shall take necessary steps under the applicable laws and regulation of the relevant country or countries to achieve the equitable distribution of industrial property resulting from implementing any Collaborative Program, as follows ;

- (a) Inventions made or conceived shall be identified and reported promptly by the inventing Party to the other Party. Patentable information on which patent protection is to be obtained shall not be published or publicly disclosed by the Parties until a patent application has been filed in either country of the Parties, provided, however, that this restriction on publication or disclosure shall not extend beyond one year from the date of the invention.
- (b) Each Party shall assume the responsibility of paying awards or compensation required to be paid to its own inventors according to its own rules or regulations. Each Party shall, without prejudice to any rights of inventors under its national laws, take all necessary steps to provide the cooperation from its inventors required to carry out the provisions of this Clause.
- (c) With respect to any invention made or conceived or to which an identifiable contribution is made by the Participant while assigned to the Receiving Party:

- (1) The Receiving Party shall acquire all rights and titles to, and interests in any such invention in its own country.
- (2) The Assigning Party shall acquire all rights and titles to, and interests in any such invention in its own country.
- (3) The Receiving Party shall be entitled to lodge patent applications in any third country. The distribution of rights in third countries shall be in equal shares.
- (d) With respect to any invention made or conceived by a Party as a direct result of employing information which has been transmitted to it or communicated during seminars or other joint meetings by the other Party, the Party making the invention shall acquire all rights and titles to and interests in such invention in all countries.
- (e) The Party which owns rights, titles and interests covering an invention referred to in paragraphs above shall grant, upon request of the other Party, the ordinary license of such rights, titles, and interests, to the other Party, its Government, and nationals of its country designated by it. These licenses shall be free of charge for research, safety, regulatory and developmental activities, but for all other purposes it shall be subject to a just compensation.
- (f) The provisions of the preceding paragraphs of this Clause shall apply mutatis-mutandis to the protection of utility model and of design.

10. Liability

- (a) Each Party shall alone be responsible for accidents to its staff or damages to its property, regardless of where the damages have been incurred, and shall not bring suit or lodge any other claims against the other Party for damages to its property or accidents to its staff, unless the claim is based on gross negligence or intentional misconduct as otherwise noted in paragraph (b) below.
- (b) If damages to the staff or property of one Party are due to the gross negligence or international misconduct of the staff of the other Party, the latter Party shall compensate the former for the damages incurred.
- (c) In the event of a person from a third party being injured as a result of the actions of a Participant under directions of the Receiving Party, then the responsibility for any claims for damages or injuries by such third party shall be the responsibility of the Receiving Party.
- (d) The foregoing provisions of this Article shall have no applicability to damages caused by a nuclear accident. Nuclear accident will be defined by the laws of the countries to which the Parties belong. Compensation for damages caused by such a nuclear accident shall be made according to the laws of the countries of the Parties.

11. Dispute

The Collaborative Programs shall be in accordance with the laws of the respective countries and the regulations of the respective Parties. All questions relating to the Collaborative Programs or activities carried out under the Collaborative Programs shall be settled by amicable efforts of the Parties to this Arrangement. Compensation for damages under the Collaborative Programs shall be done according to the applicable laws of the countries of the Parties.

12. Term of Arrangement

- (a) This Arrangement becomes effective as of the date of signature by both Parties and shall remain in force for a period of five (5) years.
- (b) This Arrangement may be extended automatically for additional periods of five (5) years, unless it is terminated at any time at the discretion of either Party upon six (6) months advance notice in writing by the Party seeking to terminate the Arrangement.
- (c) The obligations under the Articles 6 and 10 of this Arrangement shall be continuing and shall not cease upon the expiration of or other determination of the term of this Arrangement. The obligations under the Article 9 of this Agreement shall continue for a period of five(5) years following the expiration of or other determination of the term of this Arrangement.
- (d) This Arrangement may be amended by the mutual consent of the Parties, at the request of either of them. All amendments must be in writing and executed by authorized signing officers of both Parties.

13. Force Majeure

Neither Parties shall be responsible for failure to perform any of the obligations imposed by this Arrangement and/or subsequent Collaborative programs, provided such failure is beyond reasonable control of either Party

14. Notices

Any notices given pursuant to this Arrangement shall be by registered air mail and by facsimile,
and in the case of KEK, shall be addressed to;

and in the case of KAERI, shall be addressed to;

Korea Atomic Energy Research Institute

P.O. Box 7, Daeduk-Danji, Yusong-Ku

Daejeon 305-600

Korea

Fax: 82+42-868-8881

15. Conflict

In the event of any inconsistency or conflict between the terms of this Arrangement and any Collaborative Program which will be agreed on between the Parties in fulfilment of the terms of this Arrangement, the terms of this Arrangement shall prevail unless specifically excluded or modified by such Collaborative Program.

IN WITNESS WHEREOF, the Parties hereto have caused this Technical Cooperation Agreement to be executed by their duly authorized officers effective on the date first written above.

2. 대용량 양성자가속장치의 개발을 추진하고 있는 기관들과의 협력

- 중국은 IHEP(Institute of High Energy Physics)를 중심으로 대용량 양성자 가속장 치에 의한 Spallation Neutron Source를 추진하고 있으며, CIAE(China Institute of Atomic Energy)를 중심으로 핵폐기물 처리를 위한 ADS(Accelerator-Driven System) 의 추진을 준비하고 있다. 중국 IHEP는 가속기 기술개발의 오랜 경험 을 가지고 있고 가속장치 부품의 개발과 제작을 위한 시설과 인력을 갖추고 있어, 우리 사업에서 부품공급 또는 인력 지원으로 경제적으로 협력 가능한 기관으로 주목 된다. 이들과의 협력은 한·중 원자력 공동위원회의 합의의제(B-4 가속기 활용기술개발)로 채택되어 별도의 협력약정의 체결이 없이 공동협력하기로 합의되었으며, 구체적인 협력방안을 2002년 11월 중순에 KAERI의 대표단 5명이 북경을 방문하여 아래와 같이 협의하였다.

Meeting Minutes

Date : Nov. 18th 2002 (Mon)

Place : IHEP Lecture Hall

Participants :

IHEP : Chuang ZHANG, Shinian FU, Sheng-Chu ZHAO, Linlin WANG,
Shaowang XU, Xialing GUAN, Qiangchang YU, Tongzhou XU

KAERI : Byung-Ho CHOI, Po-Kook JOO, Jae-Hyung LEE, Jang-Min HAN,
Kye-Ryung KIM

-
1. KAERI's delegation headed by Dr. B. H. Choi, Project Director of PEFP, visited IHEP, CIAE and Peking University during Nov. 14th-18th to support the technical Cooperation Project, B-4. Development of Advanced Accelerator Technology and its Applications (KAERI-IHEP), as described in the Agenda of the 3rd JCNE (Joint Committee on Peaceful Uses of Nuclear Energy) Meeting
 2. Thanks to IHEP's coordination, KAERI's delegation could visit accelerator related facilities in the above Chinese Institutions and have constructive discussions on expediting collaborative activities from both sides.
 3. IHEP and KAERI agree that concrete measures of mutual cooperation would be beneficial to both parties related technology development and would result in cost reductions in both countries related projects. KAERI will inform IHEP of actual progress of collaborative activities between KAERI/PEFP's participating organizations and CIAE/Peking University, and IHEP will support KAERI in expediting such activities as a part of the above mentioned project B-4.
 4. Both IHEP and KAERI have organized a Working Group consisting of 3 experts from each party at the initial stage in order to establish and implement mutual collaborative activities for the development of accelerator technology. The following is the list of the members of the Working Group;
IHEP: Shinian FU, XU Shaowang, Guan Xialing
KAERI: Yong-Sub Cho, Jang-Min Han, Hyuk-Joong Kwon

5. Both sides agree on the following activity items to be dealt with by the Working Group.

- A. KAERI will send IHEP design materials of its DTL(1) and other related information in order for IHEP to review the design of KAERI's DTL(1). On receiving them, IHEP will study and work out suggestions on DTL(1) design within one month.
- B. As KAERI hopes to check the possibility of achieving efficient procurement of accelerator components for its PEFP, KAERI will progressively inform IHEP of required specifications and information of its components. And IHEP will suggest recommendations and other measures to be taken by KAERI for each component.
- C. IHEP will perform a hot test of CCDTL in KAERI and KAERI will provide the facility including 30kW RF system for the test.
- D. KAERI and IHEP will exchange information in their RFQ research. KAERI will invite IHEP researchers to participate in the beam test of KAERI's RFQ at a time mutually agreed on.
- E. KAERI and IHEP will inform each other of their plans of performing super-conducting accelerator technology research and will suggest detail provisions of mutual cooperation for the research.



Prof. Zhang Chuang
Deputy Director
IHEP

Nov. 19th 2002



Dr. B. H. Choi
Project Director
PEFP, KAERI

Nov. 19th 2002

- 프랑스의 CEA는 유럽 ESS(European Spallation Source) 사업의 주도적 역할을 담당 할 것으로 사료되어 상호 방문하는 정도의 협력관계를 유지하고 있으며, ESS 사업추진의 추이를 관망하면서 CEA가 담당하는 Superconductive Linac 부문의 개발경험을 받아들이는 기술협력관계를 수립할 필요가 있다. 2001년 12월에 기자단과 함께 CEA Saclay를 방문하여 아래의 인사들과 상호협력에 관한 협의를 가진 바 있다.

- Philippe Brossier, Deputy Director, DSM(Material Science Div.)
- Etienne Klein, DSM
- Bernard Aune, Accelerator Research, DAPNIA, DSM
- Guillaume Fusai, International Relations Div.
- Marc Ponchet, Area Manager, International Relations Div.

3. 기존 양성자가속기 보유기관들과의 이용자그룹 지원을 위한 국제협력

- 영국 RAL(Rutherford Appleton Laboratory)의 ISIS는 현재 세계 최고 수준의 중성자원으로서 국제적으로 활용되고 있다. 국내의 중성자원을 이용한 과학기술 연구 수준이 이 가속기에서 빔타임을 확보하기 어려운 경우가 많을 것이나, KAERI와 RAL간의 기관간 협력관계를 수립하여 우리 사업에 관계되는 이용자들이 손쉽게 ISIS를 활용할 수 있도록 하여야 한다. 이는 우리의 과학기술계가 주변에 적정한 핵파쇄 중성자원이 없어도 어느 정도 국제수준의 연구를 수행할 수 있도록 하고 장기적으로 우리의 핵파쇄 중성자원이 건조될 때를 대비한 이용자 기반구축을 위하여 필요하다. 2001년 12월과 2002년 5월의 2회에 걸친 기자단의 취재방문 시에 아래의 인사들과 접촉하여 상호협력에 관한 의견을 교환하였다.

- Dr. Andrew Taylor, Director of ISIS.
- Dr. Uschi Steigenberger, Head, ISIS Spectroscopy and Support Division.
- Mrs. Jacky Hutchinson, Press Officer, Press and Public Relations, RAL

- 스위스 PSI(Paul Scherrer Institute)의 SINQ 가속기는 양성자빔을 이용한 첨단과학기술과 암치료기술 개발에 활용되고 있다. 현재 우리 사업의 주요 목표가 양성자빔의 산업적 이용기술 개발에 있으므로 우리와 가장 유사하게 양성자가속기를 활용하고 있는 PSI와의 협력이 매우 필요하다. 일차적으로 PSI의 양성자빔 이용 기술개발 경험을 활용하여야 할 것이며, 우리 사업에서의 이용자시설 구축을 위한 기술지원은 기술자문의 길을 확보하여야 한다. 추가로 우리 시설의 구축 이전에 국내 양성자빔 이용자들이 PSI의 시설을 활용할 수 있도록 협력 관계를 수립하여야 한다. 2001년 12월과 2002년 5월의 2회에 걸친 기자단의 취재방문 시에 아래의 인사들과 접촉하여 상호협력에 관한 의견을 교환하였다.

- Dr. Martin Jerman, Head of Staff, Member of the General Management, PSI.

- Dr. Walter Fischer, Head of Research-Department, Solid State Physics at Large Facilities, PSI

- 일본의 KEK와 JAERI 및 RIKEN에서는 중소형 양성자가속기들이 재료연구나 생명과학 연구에 활용되고 있는 것으로 알려지고 있다. 2003년중에 이들 기관들과의 협력관계를 수립한다면 지리적 이점을 활용하여 우리 사업에 관계되는 대부분의 이용자들이 일본의 시설들을 손쉽게 활용할 수 있게 될 것이다.

4. 장기적인 세계 최선의 핵파쇄 중성자원 이용을 위한 국제협력

- 2006년경에 건설이 완료되는 미국의 SNS와 일본 Joint Project의 HIPA(High Intensity Proton Accelerator)를 우리나라 과학기술자들이 활용할 수 있도록 관계 수립하고, 우리의 이용자그룹과 선진국 이용자그룹들과의 교류를 통하여 이 시설들에서 선진국 이용자들이 어떠한 연구를 수행할 계획인가 또는 수행하는가를 파악하여, 우리의 이용연구 계획을 수립하고 관련 인력양성과 저변확대를 위한 방안을 수립·시행하여야 할 것이다. 특히 지리적으로 가까운 일본 HIPA를 활용하기 위한 종합적인 계획을 국내 이용자그룹과 가속기연구그룹이 협력하여 HIPA의 완공 이전에 구체화하고 KEK/JAERI와 협의하여야 할 것이다. 또한 이러한 선진국 시설들에서의 User Facilities를 위한 최선의 Instrument들의 개발현황을 파악하여 장래 우리 시설에서의 NT/BT/IT/ET의 연구에 지장이 없도록 Instrument계획에 활용하여야 한다. 우리의 핵파쇄 중성자원은 2010년대 말을 목표로 미국, 일본, 등의 핵파쇄 중성자원의 성능과 역할을 면밀히 검토하여 건설시점에서 세계에서 가장 우수하고 효율적인 시설이 되도록 계획하고 준비하여야 할 것이다.

제 2 절 양성자빔의 NT/BT/IT 기술개발에의 활용방안

1. 양성자가속기와 NT

- 가. 양성자가속장치의 나노기술 분야에서의 역할은 기존의 다른 기술의 단점을 보완하고 더 나아가 새로운 기술 세계를 열어줄 수 있다는 점에서 더 큰 기대를 모으고 있다. 나노기술이란 원자단위의 조작성을 가능케 하는 기술이라 할 수 있으며, 인간이 만들어낼 수 있는 가장 작은 분자단위의 전자기계의 개발 가능성을 의미한다. 분자 단위의 전자기계를 대표하는 MEMS 개발의 기본공정인 원자단위의 빔 에칭, 빔 스퍼 터링 등의 핵심 기술은 양성자 가속장치의 이온원 및 입사기기술을 바탕으로 한다.
- 나. 이러한 극미세기술은 초기엔 소형센서와 모터가 개발되어 점차 복잡한 전자기계시스템으로 발전되어 가는 추세이다. 극미세기술의 응용분야는 현재 개발, 사용되어지는 자동차 에어백 동작감지기에서부터 차세대 고밀도 집적회로 개발, 건축물 안전 시스템의 미소압

력감지센서 이용, 항공기 날개의 양력감지센서 이용 등의 다양한 산업적 적용이 가능하고 나아가 혈관 노폐물 제거 MEMS, 암세포파괴 MEMS, 원자크기의 슈퍼컴퓨터 등을 개발할 수 있다. 이렇게 산업적 응용분야가 확대됨에 따라 현재 세계 시장규모가 22억불 규모인 MEMS산업은 2010년에는 150억불을 훨씬 넘는 규모가 될 것으로 기대되고 있으며, 이들 세계 시장 선점에 크게 기여할 수 있을 것이다.

다. 주요 연구개발 대상분야

- 이온빔 Micro-machining 기술
- 고에너지빔을 이용한 초미세 성분/구조 분석기술 (ERD-TOF, HIRBS, micro-PIXE, ERD, STIM, RBS)
- 입자빔 장치기술 (FIB등)
- 반도체공정용 리소그래피기술
- 나노결정 생성 및 활용 기술

라. 양성자기반공학기술개발사업에서의 NT 관련 주요 연구개발 분야

본 사업에서는 NT 분야 활용을 위하여 세부연구과제와 이용자 프로그램 내 소과제로 다음과 같은 연구 개발을 수행 중에 있다

- 세부과제
 - ① “Ion-cut에 의한 SOI 웨이퍼 제조기술 개발”
 - ② “SOI 웨이퍼 제조를 위한 CMP 기술 개발” (위탁과제)
- 이용자 프로그램
 - ① “자성재료와 중성자 산란 연구”
 - ② “중성자 산란법을 이용한 자기조립법으로 합성된 기능성 나노소재의 구조 분석에 관한 연구”

상기 연구개발 과제 중 SOI 웨이퍼 제조기술 개발 연구의 경우, 2002년부터 2008년까지 6년간 2단계에 걸쳐 양성자빔을 이용하여 4" 크기의 100~200nm의 두께를 가지는 Si-웨이퍼를 제조하는 기술을 개발하고 추후 수요에 따라 화합물 반도체를 비롯하여 여러 가지 두께의 주문형 SOI 웨이퍼를 제조하는 공정을 개발하는 것으로 목표로 하고 있다.

2. 양성자가속기와 BT

가. 양성자 가속장치를 이용한 신중 유전자원 개발의 경우, 기존의 방사선(주로 감마선)과는 매우 다른 에너지의 강도를 가지므로 동식물 및 미생물에의 조사를 통한 신 품종개발에 있어 새로운 지평을 열 것으로 기대된다. 이러한 식물체의 신품종개발 은 내재해성 고 품질 작물개발, 고부가가치 화훼품종 개발 등을 통해 점차 가중되고 있는 식량난과 현재 급신장하고 있는 국내 화훼류 수출(2000만불/년)에 큰 역할을 담당할 수 있을 것이다. 특히 양성자가속기를 사용한 핵과채 중성자원이 활용될 경 우에는 단백질의 3차원적 구조분석이 가능하여 향후 신약 개발에 중요한 역할을 할 것이다.

나. 주요 연구개발 대상분야

- 신종 유전자원 : 내재해성/고품질 작물 개발, 고부가가치 화훼품종 개발과 변이체 해석
- 양성자방사선 수술장치 개발
- 양성자 암치료기술

다. 양성자기반공학기술개발사업에서의 BT 관련 주요 연구개발 분야

본 사업에서는 BT 분야 활용을 위하여 세부연구과제와 이용자 프로그램 내 소과제로 다음과 같은 연구 개발을 수행 중에 있다

- 세부과제
 - ① “양성자빔을 이용한 환경친화적 유용 유전자원의 개발”
 - ② “양성자빔을 이용한 환경재해 저항성 및 산업 이용 가능 맥류 개발” (위탁과제)
 - ③ “양성자빔 이용 화훼 및 채소 박물의 고부가 신품종 개발 및 변이체 해석”
- 이용자 프로그램
 - ① “재료 및 생체계의 수소 결합에 대한 양성자 조사 효과”
 - ② “양성자빔을 이용한 새로운 생체 적합성 박막 개발”

양성자빔을 이용한 환경 친화적 유용 우주자원 개발 연구의 경우, 수십 MeV의 양성자빔을 이용하여 유용한 미생물 자원을 확보하고 이를 생분해성 플라스틱 제조에 응용하는 것을 목표로 하는 과제로서 개발이 성공적으로 이루어질 경우, 환경학적 측면에서도 그 효과가 매우 클 것으로 기대된다. 또한, 양성자빔을 이용하여 저항성 맥류나 고부가가치 화훼류 및 채소류 등의 유전자원 개발에 성공하면 직접적으로 산업화가 가능해 2009년경에는 이러한 기술을 이용한 새로운 색상이나 모양의 진기한 꽃들을 시장에서 볼 수도 있게 될 것이다.

3. 양성자가속기와 IT

가. 양성자기반공학기술개발사업에서의 IT 관련 주요 연구개발 분야

IT 분야에서의 양성자빔 활용을 위하여 세부연구과제와 이용자 프로그램 내 소과제로 다음과 같은 연구 개발을 수행 중에 있다

- 세부과제
 - ① “양성자빔 균일 조사 기술 및 Si-반도체 내 양성자 유도결합 분석 기술 개발”
- 이용자 프로그램
 - ① “양성자와 중성자빔을 이용한 화합물 반도체의 원소 전이 연구”
 - ② “양성자 감지기 어레이 제작 및 응용기술 연구”

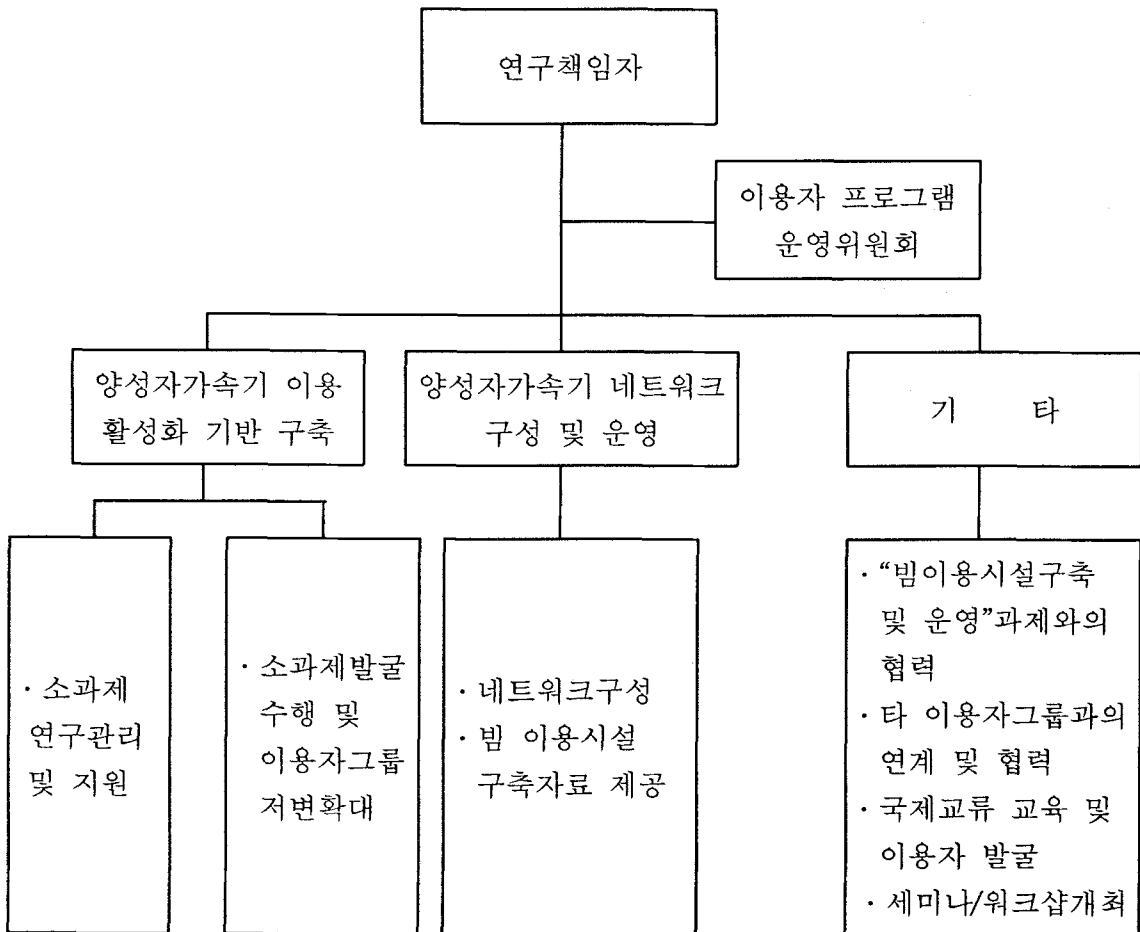
양성자빔 균일 조사 기술 및 Si- 반도체 내 양성자 유도 결합 분석기술은 양성자빔 조사에 의한 저손실 고속스위칭 전력반도체 제조에 기초가 되는 핵심기술로서, 1단계에 이 기술들이 확보되면 2단계에서는 전력 반도체 생산업체와의 공동연구를 통하여 IGBT, FRD, BJT 등의 대전력 소자에 대해 양성자빔 조사를 통한 소자 제조기술 및 공정을 개발하고 이를 실용화할 계획이다.

제 3 절 국내 산학연 이용자그룹의 이용자프로그램 개발

1. 개발의 필요성

대용량 양성자가속기 시설을 효율적으로 이용, 운영하여 21세기 프론티어 시설로서의 파급효과를 극대화하기 위해서는, 첫째 앞으로 양성자가속기 시설을 이용하게 될 이용자들의 의견을 적극적으로 수렴하여 교육 및 장치 건설에 반영하기 위한 네트워크의 구성 및 운영이 필요하며, 둘째 양성자 및 중성자 빔을 이용하는 과제 수행 또는 지원을 통해 양성자가속기의 이용을 활성화하기 위한 기반의 구축이 매우 중요하다. 이러한 양성자가속기 이용 활성화를 위한 기반 구축 및 네트워크 구성은 양성자 빔의 단계적 인출을 고려한 양성자가속기 이용자 프로그램 개발 및 운영을 통하여 효과적으로 수행될 수 있다.

2. 이용자프로그램의 추진전략



가. 양성자가속기를 이용하는 다양한 소과제들을 발굴하고 이들의 수행을 지원하여 중장기적

으로 양성자 가속기이용 저변확대 및 활성화를 위한 기반을 구축한다. 또한 이러한 활동이 지속적으로 광범위하게 이루어지기 위하여 가속기 활용네트워크를 구성하며, 공정하고 합리적인 절차에 따라 소과제를 선정, 관리, 지원함으로써 소과제 수행 연구자의 연구성과의 극대화과 참여자들의 선의의 자유경쟁을 유도하기 위하여 산학연전문가들로 위원회를 구성하고 운영한다.

- 나. 양성자 가속기활용 네트워크를 통하여 이용자를 위한 빔 이용시설 구축자료를 적기에 가속기시설 건설에 반영하도록 제공하며, 국내 타 연구시설 이용자그룹들과의 연계활동을 수행하여 국내 연구인력들간의 정보교환을 촉진하고 양성자가속기 활용의 저변을 확대한다. 또한, 선진국들의 가속기 이용자그룹들과 협력관계를 구축하고 단기적으로 국내에서 수행 불가능한 연구를 해외 가속기를 활용하여 수행함과 아울러 양성자가속기를 활용하는 해외 첨단연구동향을 파악하기 위한 국제기술교류를 추진한다.
- 다. 빔이용 연구 워크샵, 세미나 및 교육프로그램을 마련하여 유사분야 연구자들간의 교류를 통하여 시너지효과를 얻을 수 있도록 추진한다.

라. 단계별 추진전략

- 1단계 (2002~2005)
 - 양성자가속기 활용 네트워크 구성
 - 양성자가속기 이용 소과제 발굴·이용자그룹 저변확대
 - 양성자가속기 이용자 소과제 연구관리 및 지원
 - 이용자를 위한 빔 이용시설 구축자료 제공(20 MeV)
 - 소과제 수행(8개 이상)
- 2단계 (2005~2008)
 - 양성자가속기 활용 네트워크 운영 및 보완
 - 양성자가속기 이용 소과제 발굴·이용자그룹 저변확대
 - 양성자가속기 이용 소과제 연구관리 및 지원
 - 이용자를 위한 빔 이용시설 구축자료 제공(100 MeV)
 - 소과제 수행(10개 이상)
- 3단계 (2008~2012)
 - 양성자 가속기 활용 네트워크 운영 및 보완
 - 양성자가속기 이용 소과제 발굴·이용자그룹 저변확대
 - 기초과학 지원을 위한 양성자가속기 활용방안 수립
 - 양성자가속기 이용 소과제 연구관리 및 지원
 - 소과제 수행(10개 이상)

3. 이용자프로그램 활용분야

대용량 양성자가속기를 활용하는 기술인 양성자공학과 중성자과학은 21세기를 이끌어갈 핵심기술로서 NT, BT, ET 등의 분야에 새로운 지평을 여는데 기여할 것으로 예상된다. 원자단위구조분석, 분자단위구조분석, 단백질DNA분석, 고압하의 물질분석, 동위원소, 입자물리 연구 등의 과학기술연구와 신소재, 나노, 반도체, 의료, 신약, 동위원소, 방사선 등과 관련된 21세기의 첨단 전략산업에도 응용된다. 국제수준의 대형 시설인 양성자가속기를 활용하여 국제적인 연구성과와 이를 기반으로 하는 첨단산업의 창출을 통하여 21세기의 신산업혁명을 리드함으로써 국제 경쟁력과 우위를 확보할 수 있다.

가. 이용자프로그램 1단계 추진일정에 따른 소과제 위탁연구에의 활용

현재 기초과학 4개분야, 응용분야 4개분야에 소과제 위탁연구를 수행중이다. 이러한 소과제 위탁연구는 양성자가속기시설의 잠재적 이용자를 개발 및 확보하여 NT, BT, ET 등의 각 분야의 원활한 연구기반을 확충한다. 이용자프로그램에서 진행하는 소과제 위탁연구는 제반 학문분야 및 국방과학기술분야에 까지 걸친 광범위한 이용자확보를 위해 선정되었으며 특히 학제간연구의 장려로 특정학문분야의 지엽적 연구가 갖는 단점을 극복하려 노력하고 있다.

분과	분야	과제명	연구기관
기 초 과 학	물리학	자성재료의 중성자 산란연구	성균관대학교
	물리학	양성자와 중성자빔을 이용한 화합물 반도체의 원소전이 연구	단국대학교
	학제간 (화학+물리학)	중성자 산란법을 이용한 자기조립법으로 합성된 기능성 나노소재의 구조분석에 대한연구	단국대학교
	학제간 (생물학+물리학)	재료 및 생체계의 수소결합에 대한 양성자 조사효과	고려대학교
응 용 과 학	전자공학	양성자 감지기 어레이 제작 및 응용기술연구	선문대학교
	재료공학	양성자 빔을 이용한 새로운 생체적합성 박막 개발	광주과학기술원
	원자력공학	GaAs계열 태양전지에 대한 고에너지 양성자 조사효과 연구	한국과학기술원
	국방과학기술	양성자가속기의 국방과학기술에의 응용	서강대학교 산업기술연구소

나. 이용자프로그램 1단계 추진일정에 따른 이용자간 네트워크구성에의 활용

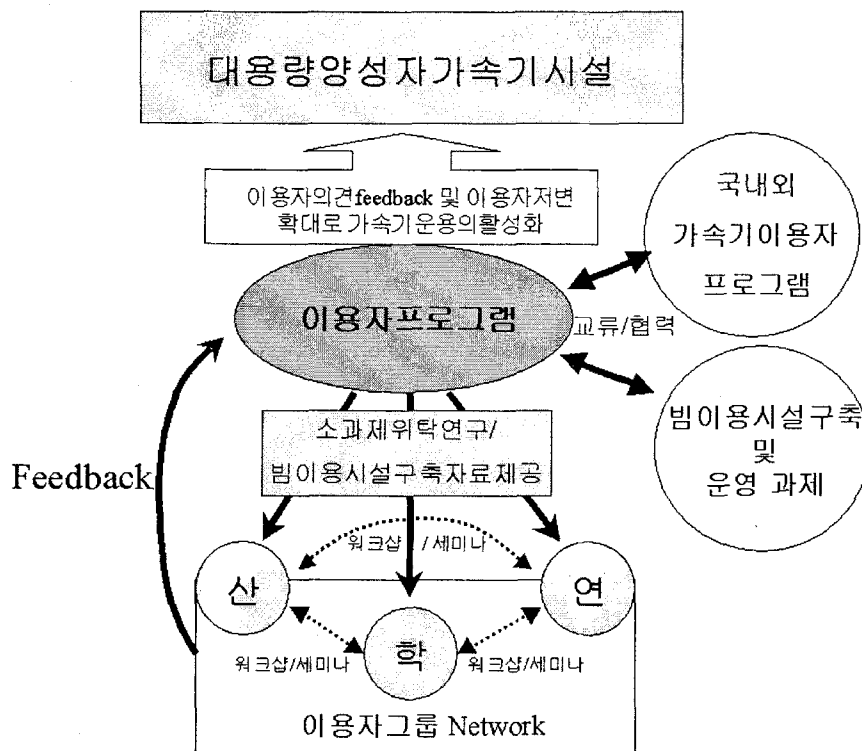
소과제 위탁연구자간의 워크샵개최로 타분야간 정보교류를 유도하고 있으며 소과제위탁공모과정 및 각종 세미나개최에서 확보된 잠재적 이용자들의 연락처와 연구분야를 정리하여 그룹별로 분류하고 있다. 이러한 잠재적 이용자 및 연구인력에 대한 정보로서 네트워크가 구성되면 향후 폭 넓은 학제간 공동연구를 비롯한 연구활동의 활성화에 크게 기여할 것이다. 또, 기타 양성자시설에서 요구하는 이용자들에게 대한 정보와 시설의 개량에 필요한 이용자들의 피드백자료를 제공하고있다.

4. 이용자프로그램 개발의 목표

가. 중장기적 양성자가속기 이용 활성화를 위한 기반구축

- 양성자가속기 이용 소과제 발굴·이용자그룹 저변확대
- 양성자가속기 이용 소과제 관리 및 지원
- 양성자 빔 및 중성자 이용 소과제 수행

나. 가속기 활용 네트워크 구성



이용자프로그램 개념도

5. 양성자 빔의 기술적 활용과 이용자그룹의 국제협력

가. 양성자 빔의 기술적 활용

- 1) 저 에너지 빔: 입사기와 RFQ가속기의 MeV급 가속기기술을 이용하여 본 장치에서 분리된 독립적인 전용장치시설에서 제공되는 저에너지빔의 이용/응용분야는 주로 산업용으로는 전력용 반도체의 조사, 지뢰 및 폭발물 검색, 이동형 중성자 radiography, 플라스틱 강화 처리 등이며 의료용으로는 BNCT 장치개발 등에 활용할 수 있다. 선진국에서는 이 분야들에 대한 기초연구가 많이 수행되었으나 빔 전류의 제한으로 상용화되지 못한 기술들이 많은 것으로 알려지고 있다. 이용자그룹은 국제협력을 통하여 양성자 빔을 활용하는 기술의 저변확대와 조기 상용화를 추진하여야 할 것이다.
- 2) 방사성 동위원소의 생산: 20 MeV 이상의 영역에서 mA급 대전류 양성자 빔을 사용하여 여러 의료용 방사성동위원소를 다량으로 생산하여, 반감기가 비교적 긴 것은 국내 수요에 충족하고 단 반감기 핵종은 인근지역에 공급하는데 활용할 수 있다. 이용자그룹의 국제협력으로 새로운 동위원소의 개발과 상용화를 지원할 수 있을 것이다.
- 3) 고속중성자 이용시설: 100 MeV 양성자에 의하여 발생하는 수십 MeV급 고속중성자를 사용하여 고 에너지 중성자 핵반응 연구와 핵자료 생산에 사용하는데 이용가능하다. 고속중성자에 의한 고속로 및 핵융합로 재료 시험에도 활용할 수 있으며 산업용으로는 항공 우주소자의 특성시험 장치로도 활용하고, 의료용으로는 신체 얇은 부위에 위치하는 암 및 종양 등의 양성자선 치료와 같은 양성자 치료장치(Proton Therapy)에도 활용할 수 있다. 향후 양성자가속기의 에너지를 1GeV까지 올리고 파쇄중성자원의 시설을 확보한다면 특히 나노/바이오분야에서의 중성자산란기술에의 응용은 그 부가가치가 무한해 이 분야에 대한 중요한 기술활용이 될 것이다. 양성자공학과 중성자과학을 기반으로 하는 첨단산업기술 및 기초과학기술의 증진을 위하여 이용자그룹은 선진국 가속기 보유기관들의 이용자그룹들과의 활발한 국제협력과 기술교류가 요구된다.
- 4) 양성자가속기 건조기술의 확보 : 벨기에 브리셀 근교에 있는 IBA와 MDS노르디안은 첨단 과학기술도 충분히 상품화할 수 있다는 것을 보여준 사례로 꼽히는데 이 두 회사는 암진단 및 치료에 필요한 방사선동위원소를 생산하고 있다. 특히 방사선 동위원소 생산 장치, 방사선 살균장치, 양성자 치료기 등 다양한가속기를 개발해 판매하고 있다. IBA 최고연구책임자(CRO)인 이브론건 박사는 "일본과 미국에 2대의 양성자 치료장치를 구축했으며 현재 중국에 보낼 양성자 치료기를 만

들고 있다"며 "이 시장은 앞으로 매우 커질 것"이라고 예측한 사례가 있다. 이 IBA 공장에서 조립하고 있는 양성자 가속기는 한 대당 5천만유로(5백50억원)에 달하는 고부가가치 상품이다. 이와 같이 국내에서도 양성자가속기 건조기술을 확보하여 세계시장에 진출 할 수 있을 것이다.

나. 이용자그룹의 국제협력

현재 프론티어사업으로 계획된 100MeV 양성자가속기시설을 첨단산업기술개발에 적극 활용하고 미래에 이를 확장하여 파쇄중성자원을 개발하고 활용하기 위하여 광범위한 국제 협력이 요구된다. 특히, 이용자그룹은 선진국 시설의 활용실태와 활용기술개발의 동향을 파악하고, 국내의 활용기술개발의 수요를 고려한 세계적 수준의 시설을 기획하고 장기적으로 시설을 활용할 유능한 관련 연구인력(이용자)들을 양성하기 위한 국제협력을 적극적으로 수행하여야 할 것이다. 이러한 국제협력을 위하여 ISIS(UK), PSI(Swiss), BNL(USA), LANCE(USA)등과 국제협력을 예정하고 있으며 장치개발중인 SNS(USA), HIPA(Japan)등과도 교류를 예정하고 있다. 이러한 기관들과의 원활한 교류를 위하여는 유럽에서 중성자빔 연구를 위해 구성되어있는 European Neutron Science Association이 시행하고 있는 summer school인 Hercules program, 미국의 Neutron Scattering Society 에서 x-ray scattering과 중성자 산란을 교류시키기 위해 격년으로 개설되는 여름학교와 같은 프로그램이 필요하다. 그러므로 국내에서도 유사한 모임을 만들어 적극적인 참여를 유도하고 양성자가속기 이용자프로그램을 중심으로 하여 차세대 인력 양성을 위한 tutorial이나 summer school의 개최를 유도해서 국내 대학원생들을 교육시키는 한편 앞서 제시한 유수의 외국기관들과의 연구인력교류를 활성화하는 것이 필요하며 이를 위해 ISIS(UK), PSI(Swiss), BNL(USA), LANCE(USA), SNS(USA), HIPA(Japan)등과 국제협력예정이다.

제 4 절 양성자가속기사업에 대한 기술적, 사회적 인식 및 수용성 제고

1. 주요 활동내용

선진국에서 고에너지양성자가속기를 이용한 연구개발의 경험을 가진 국내 과학기술인력은 매우 제한적이다. 현재 국내에 있는 양성자가속기는 종합병원들의 방사선동위원소 생산용 싸이크로트론들과 서울대와 자원연구원의 가속기들로서 주로 특정연구분야에서만 활용되고 있다. 이러한 가속기들조차도 μ A급의 소전류로 산업기술개발의 용도에 미흡하여 국내 양성자가속기 활용 연구인력 양성에 크게 기여하지 못하고 있다. 대용량 양성자가속기의 역할에 대한 이해가 부족한 일반 대중은 이를 위한 대규모 투자에 의구심을 가질 수 있다. 따라서 대용량 양성자가속기의 활용기반을 구축하기 위하여는 가속기의 역할에 대하여 국민과 과학기술계의 이해를 확보하기 위한 지속적인 홍보가 필요하다. 또한, 관심 있는 젊은 층의 과학기술인력의 양성에 노력하여야 한다. 이를 고려하여 신문방송을 통한 홍보를 포함한 다양한 형태의 기술적, 사회적 인식 제고를 위한 활동을 수행하였다. 과제

수행 기간 중에 2차에 걸친 기자단의 유럽 주요 양성자가속기 시설 및 관련기관 취재가 이루어 졌으며, 해외의 저명한 가속기 개발 도는 가속기 활용 전문가들을 초빙하여 제6회 국제 양성자가속기 Workshop을 개최하였다. 지난 8월말에는 젊은 과학자들의 가속기에 대한 이해를 넓히기 위하여 국내외 전문가들을 강사진으로 모시고 국내 최초로 Accelerator Summer School을 열었다. 현재로서는 선진국의 시설과 업적 및 전문가들을 동원하여 사회적인 관심을 끌어낼 수밖에 없으나, 가장 확실한 홍보수단은 양성자기반기술개발사업의 수행 중에 조속히 괄목할 만한 연구개발 결과를 제시하는 것이다.

과제 주요 활동 내역

(과제명: 양성자공학기술의 국제협력방안 수립 및 사회적 수용성 증진 연구)

- 2001 12. 1 과제 착수
- 12. 6 삼성종합기술원 방문 → 사업설명 및 협력방안 협의
- 12. 9-17 제1차 유럽 양성자가속기시설 취재단 파견 → 시찰 및 협력방안 협의
 - 영국 RAL, 스위스 PSI, 불란서 Saclay 연구소
 - MBC, 매일경제 기자단 및 KAPRA, KAERI 관계자

- 2002. 1. 9 중성자과학 심포지움(원연) → 양성자가속기 사업소개
- 1. 25 전남 동신대 관계자(최정식 교수 일행) 연구소 방문 → 사업설명
- 1. 29 전라북도 중등 과학교사 일행 연구소 방문 → 사업설명

- 2. 1 고려대 관계자 (박성근 교수 일행) 연구소 방문 → 사업설명
- 2. 2 포항공대 관계자 (고인수 교수) 연구소 방문 → 사업설명
- 2. 20 MBC 양성자가속기 사업 취재
- 2. 21 YTN 양성자가속기 사업 취재
- 2. 22-23 제6회 대용량 양성자가속기 Workshop 개최
 - (장소 : INTECH, 5개국 53개 기관, 138명 참석)
- 2. 27 KIST 관계자 (서상희 박사) 연구소 방문 → 나노분야 협력방안 협의
- 2. 28 21세기 프론티어사업 1차 기획회의

- 3. 5-8 러시아 MRTI Dr. Shumakov 박사 방문 → ISTC 과제 중간보고 및 상호 협력 방안 협의
- 3. 6 21세기 프론티어사업 2차 기획회의
- 3. 27 포항가속기연구소 방문 → 협력방안 협의

- 4. 17-18 KAIF/KNS 연차대회 → 양성자가속기 개발품 전시 및 사업설명
 - (서울 르네상스 호텔)
- 4. 26 중앙대학교 방문 → 사업설명 및 협력방안 협의

- 5. 2 대진대학교 관계자 (안준수 교수일행) 연구소 방문 → 사업설명
- 5. 18 한국과학기술원 관계자 (최성민 교수) 연구소 방문 → 사업설명
- 5. 21-29 제2차 유럽 양성자가속기시설 취재단 파견 → 시찰 및 협력방안 협의
 - 영국 RAL/ISIS, 벨기에 IBA 및 MDS/Nordion, 스위스 PSI/SINQ
 - 동아일보, 한국경제, 과학신문, 파이낸셜 뉴스, 국민일보, 문화일보, YTN, KAERI 관계자

- 6. 4 경희대 콜로키엄 → 양성자가속기 개발 현황 및 사업설명
- 6. 7 (주) 포스콘 경영진 연구소 방문 → 사업설명
- 6. 12 한국지질자원연구원 방문 → 사업 협력 협의
- 6. 13 한국가속기 및 플라즈마 연구협회 방문 → 사업 협력협의
- 6. 14 한국전기연구원 방문 → 사업협력 협의
- 2002. 6.17 한국과학기술원 방문 → 사업협력 협의
- 6. 27 디지털 타임즈 양성자가속기사업 취재

- 7. 12 제1차 프론티어사업 보완기획 회의
- 7. 18 제2차 프론티어사업 보완기획 회의
- 7. 23 제3차 프론티어사업 보완기획 회의
- 7. 26 최종 프론티어사업 보완기획 회의 → 과제 RFP 및 사업내용 확정
- 7. 31 보완 기획결과 설명 → 물리학회 핵물리분과, 한국가속기 및 플라즈마 연구협회 등

- 8. 1 중앙대 방문 연구소 방문 → 이춘식, 정재국교수 사업 설명
- 8. 2 연세대 관계자 (조승연 교수) 연구소 방문 → 사업설명
- 8. 6 전북 완주군 방문 → 사업설명
- 8. 9 제1차 사업단 운영위원회 개최
- 8. 13 전남 동신대 관계자(최정식 교수 일행) 연구소 방문 → 사업현황 설명
- 8. 14 제1회 사업 및 과제 설명회 개최 (대전, 원연 INTECH)
- 8. 16 제2회 사업 및 과제 설명회 개최 (서울 교육문화회관)
- 8. 20 제3회 사업 및 과제 설명회 개최 (경주 현대호텔)
- 8. 19-23 국제선형가속기학회 (LINAC2002) 참석→ 양성자가속기 논문 발표
 - 경주, 국내외 300여명 참석
- 8. 23 전북대 방문 → 사업설명
- 8. 26-30 제1회 Accelerator Summer School 개최
 - (참가인원 55명 ; 국내 대학원생 및 연구원
 - 강사 : 미국(3), 중국(1), 일본(3), 국내(7) 전문가 14명 강의)

- 9. 5 강원대 관계자(박용광 교수 일행) 연구소 방문 → 사업설명
- 9. 6 전라북도 도의원 기자단 연구소 방문 → 사업설명
전라북도 익산시 관계자 연구소 방문 → 사업설명
- 9. 11 제1회 사업단 Workshop 개최 → 선정과제 의견 조율
- 9. 16 제2차 사업단 운영위원회 개최
- 9. 18 중앙대 및 익산시 사업설명자료 요청 → 송부
- 10. 2-5 호주 멜버른, 아시아가속기 평의회 (ACFA) 참석
- 아시아 각국 회원들에게 가속기 사업 소개
- 10. 17 중국 CIAE 원장 및 OECD/NEA 국장 방문 연구소 방문 → 사업설명
- 10. 19 전북대 양성자가속기연구소 개소식 참석 → 사업설명
- 10. 25 한국물리학회 핵물리분과 심포지움 참석 → 관련 논문발표
- 10. 25 양성자가속기 이용자 프로그램 (User Program) 과제설명
- 서울 올림픽파크텔, KAPRA, 산.학.연 기관 대상

- 11. 1 원광대 관계자(윤권하 교수) 연구소 방문 → 사업설명
- 11.13-19 중국 가속기 관련 연구기관 방문 → 협력방안 협의
- 중국 IHEP, CIAE, 북경대, 청화대 방문

2. 기자단 취재방문 준비

가. 기자단 방문 후보시설

구분	기관명	위치	시설명	비고
일본	○ High Energy Accelerator Research Organization (KEK)	Tsukuba, Ibaraki	12GeV PS(Proton Synchrotron)	양성자가속기
			Photon Factory	방사광가속기
	○ JAERI	Tokai, Ibaraki	JRR-3M	연구로(중성자원)
			High Intensity Proton Accelerator Facility	양성자가속기 건설현장
		Naka, Chiba	JT-60	핵융합시설
	○ National Institute of Radiological Science (NIRS)	Chiba	HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)	중이온 암치료 (가속기)
○ Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)	Mikazuki, Hyogo	Spring-8	방사광가속기	
○ Tsukuba University	Tsukuba, Ibaraki	Proton Medical Research Center	양성자 암치료 (가속기)	
유럽	○ Rutherford Appleton Lab., Central Laboratory for the Research Councils (CLRC)	Didcot, UK	ISIS	양성자가속기 (중성자원)
			Central Laser Facility (CLF)	고출력레이저시설
	○ IBA(Ion Beam Application)	Louvain-la-Neuve, Belgium	양성자가속기, 전자가속기, 등 상용 가속기 생산시설	의료용 및 산업용 가속기 전문 생산업체
	○ PSI (Paul Scherrer Institut)	Villigen, Swiss	SINQ (Spallation Neutron Source)	양성자가속기(중성자원) 양성자 암치료
	○ CERN (European Organization for Nuclear Research)	Geneva, Swiss	SPS (Super Proton Synchrotron)	양성자 가속기
LEP (Large Electron-Positron Collider)			전자-양전자 충돌장치 (입자물리)	
○ GSI (Gesellschaft fuer Schwerionenforschung mbH)	Darmstadt, Germany	UNILAC/SIS/ESR	중이온가속기	

나. 방문시설 검토

(1) KEK (High Energy Accelerator Research Organization)

(가) 방문기관명 : KEK(고에너지가속기연구기구)

(나) 소재지 : 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

(다) 참고자료 : www.kek.jp

(라) 연혁 :

- 1955년 Institute of Nuclear Study (INS) 창립
- 1966년 1.3GeV ES (Electron Synchrotron) 완성
- 1971년 National Laboratory for High Energy Physics (KEK) 창립
- 1977년 12GeV PS (Proton Synchrotron) 완성
- 1983년 2.5GeV PF (Photon Factory) 완성
- 1988년 Meson Science Laboratory (MSL) 창립
- 1997년 INS, KEK, MSL 통합
- 1999년 KEKB B-Factory 완성

(마) 연구 분야 :

- 입자 물리, 소립자 물리 등 기초 과학 분야의 첨단 연구
- 화학, 생물, 공학, 의료 및 농업 분야에서의 빔을 이용한 첨단 연구
- 기초 과학 및 응용 분야 이용시설로서의 가속기 연구

(바) 주요 시설 :

- 12GeV Proton Synchrotron
- KEKB B-Factory
- 기초 및 응용 연구용 빔 이용 시설

(사) 특기 사항 :

- 일본 최대의 가속기 연구소 (일본 문부과학성 산하)
- 초전도 가속기 등 다수 분야에서 세계 최첨단 기술을 보유
- **JAERI와 함께 1MW 50GeV 양성자가속기 건설중 (KEK-JAERI Joint Project)**
- Proton Medical Research Center (Tsukuba Univ.)의 빔시험 및 가속기건설 지원
- 대학원 과정을 두어 인재 양성
- 시설은 공동이용시설로서 일반 연구에 개방됨
- 21세기 국제적 연구기관 역할 확대 및 공동이용시설의 서비스 향상이 현재 목표
- KAERI와 가속기 기술개발 국제협력 추진예정

(2) JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute)

(가) 참고자료 : www.jaeri.re.kr

(나) 연혁 :

- 1956년 일본원자력연구소 창립
- 1957년 Tokai Site 설치
- 1957년 일본 최초 원자로 JRR-1 완성 (Tokai Site)
- 1965년 재료 시험로 JRR-4 완성 (Tokai Site)

- 1985년 Naka Site 설치
- 1985년 JT-60 토카막 핵융합 장치 운전 개시 (Naka Site)
- 1990년 시험용 원자로 JRR-3M 완성 (Tokai Site)
- 1993년 이온 조사 시설 (TIARA) 완성 (Takasaki Site)
- 1996년 JT-60U 토카막 핵융합 장치 운전 개시 (Naka Site)

(다) 연구 분야 :

- 원자로, 핵융합 등 원자력 에너지에 관한 연구
- 이온빔 조사를 비롯한 방사선 이용 연구
- 중성자원, 핵변환 등 이용시설로서의 가속기 연구

(라) 주요 시설 :

- 연구용 원자로 JRR-3M
- JT-60U 토카막 핵융합 장치
- 이온빔 조사 연구 시설
- 기타 연구용 원자로 4기, 임계시험장치 5기, 가속기 9기, 조사시설 4기

(마) 특기 사항 :

- 일본 문부과학성 산하의 원자력 연구소
- 5개 Site 운영 (Tokai, Naka, Takasaki, Oarai, Kansai)
- KEK와 함께 1MW 50GeV 양성자 가속기 건설중 (KEK-JAERI Joint Project)
- 일본 이화학연구소 (RIKEN)와 함께 방사광 가속기 (SPring-8) 건설
- 국제 핵융합 실험로 (ITER) 프로젝트 참여
- 시험로, 가속기 등 대형 연구 시설은 대학 등 일반 연구에 개방

(3) RAL (Rutherford Appleton Laboratory)

(가) 방문기관명 : RAL(CLRC 소속기관)

(나) 소재지 : Chilton, Didcot Oxon, UK, OX11 0QX

(다) 참고자료 : www.clrc.ac.uk or www.isis.rl.ac.uk

(라) 간략한 소개

RAL(Rutherford Appleton Laboratory)은 대용량 양성자가속기 시설인 ISIS를 중심으로 고출력 Laser 시설 등의 다양한 첨단 연구시설을 갖춘 **기반연구시설(User Facilities)**이다. 약 1200명의 연구진이 1만명 이상의 대학과 산업계 과학기술자들의 연구를 지원해 주고 있다.

RAL은 1957년에 설립된 National Institute for Research in Nuclear Science의 Rutherford High Energy Laboratory를 주축으로, 1921년에 설립된 Appleton Laboratory 등을 통합하여 이룩되었으며(1979년), 현재는 1995년에 구성된 영국 CLRC(Central Laboratory of the Research Councils)에 소속된 가장 중요한 연구소이다.

(마) 방문요점

RAL의 가장 중요한 연구시설인 ISIS는 1977년부터 1985년에 걸쳐 완공되었으며 70MeV(22mA Pulse)의 Linac(선형가속기)와 800MeV(0~5kA Pulse) Synchrotron으로 양성자를 가속하여, 중금속인 Tantalum 표적에 때려 중성자빔을 공급하며, 일부 양성자는 Graphite 표적에 충돌시켜 muon빔을 만들어 낸다. ISIS는 미국 SNS가 완공되기까지는 세계 제일의 중성자원/Muon원이며, 원자단위에서 고분자에 이르는 (from the subatomic to the macromolecular) 물질의 정적 및 동적 구조의 연구를 비롯한 "small" science (Nanotechnology)를 지향하는 연구시설이다. 중성자원과 muon원을 이용하는 방대한 User Facility를 갖추고 있다.

RAL은 ISIS외에도 CLF(Central Laser Facility), CMF(Central Microstructure Facility), Meteorological radar facility, Space test facility 등 다양한 첨단 연구시설들을 갖추고 있으며, 산업계 및 학계와 함께 Biotechnology, Material science, Engineering application 등의 많은 연구를 수행하고 있다.

(4) IBA 사

(가) 방문사명 : IBA (Ion Beam Application)

(나) 소재지 : Louvain-la-Neuve, Belgium

(다) 참고자료: www.iba-worldwide.com or www.iba.be

(라) 간략한 소개

IBA사는 1986년도에 설립된 벤처 성격의 회사로서 가속기, 방사선 장치 및 RI 관련 사업체로, 1300명의 종업원과 연간매출 236M EUR (2000년도) 정도로 가속분야의 첨단기술들을 산업화하여 급성장하고 있는 업체임.

주요 사업품목으로는,

- PET용 Cyclotron 생산
- 동위원소 생산용 양성자가속기 생산
- 암 치료용 양성자가속기 생산
- 의료 소독 및 식품 멸균용 전자가속기 생산
- 산업용 전자가속기 생산
- 의료용 RI 생산 판매

등 임.

국내에서도 몇몇 병원에서 이 회사제품의 Cyclotron을 구입 또는 구입 예정에 있음.

(마) 방문 요점

핵물리, 원자력 연구용으로 개발된 각종 첨단 가속장치가, 어떻게 산업화 내지는 상용화가 되는지를 볼 수 있으며, 이 기술을 적용한 특히 의료, 생명과학 분야의 기술혁신 및 이에 따른 신제품, 신시장 개발 현황과 향후 발전 가능성을 추적해 볼 수 있음.

특히 원자력분야의 개발된 기술들이 어떠한 전략으로 어떻게 타 분야, 타 산업에 응용 과급되고 있고, 그 규모 및 고용효과 등을 가늠해볼 수 있음.

여 백

제 4 장 목표 달성도 및 관련 분야에의 기여도

제 1 절 목표 달성도

1. 국제협력방안

가. 목표 :

양성자 가속장치기술 개발과 이용자그룹의 국제협력방안을 제시하고 시범적으로 1~2개국과 협약을 체결한다.

나. 달성도

세계적으로 주목되는 양성자가속기 시설 또는 사업의 내용을 조사하고 정리하는 성과를 거두었으며, 협력대상기관들을 선정하고 협력분야와 협력가능성에 대한 타진을 포함한 협력 준비작업을 수행하였다.

기관(시설)명	예상협력분야	접촉인사	현상태
KEK(HIPA), Japan	- 가속장치기술 - 이용자프로그램 - 빔시설 이용 - 실험장치기술	Dr. Hitoshi Kobayashi Dr. Susumu Ikeda	기관간 협약 추진 합의
RIKEN, Japan	- 빔시설 이용 - 실험장치기술		향후 구체적인 필요에 따라 협의 추진 예정
IHEP, China	- 가속기 부품제작 - 인력지원, - 빔시설 이용	Prof. Fang, Shou Xian Dr. Fu, Shinian	한·중 원자력 공동위의 안건으로 협력을 구체화하면서 별도로 기관간 협약추진 합의
CIAE, China	- 빔시설 이용	Prof. Guan, Xialing	한·중 원자력 공동위의 안건으로 협력을 구체화
PSI, Swiss	- 양성자빔 시설이용 - 이용자프로그램 - 실험장치 기술	Dr. Martin Jerman Dr. Walter Fischer	2차 방문 협의, 구체적인 협력 필요시 재협의 예정
RAL(ISIS), U.K.	- 중성자원 이용 - 실험장치기술	Dr. Andrew Taylor Dr. Uschi Steimberger	"
CEA-Saday, France	- 초전도가속관 기술	Dr. Philippe Brossier Dr. Bernard Aune	1차 방문 협의
ORNL(SNS), USA	- 가속장치기술 - 이용자프로그램 - 빔시설 이용	Dr. Yanglai Cho Dr. Marion White	국내 초청 협의

특히, 한·중·일 3국간에 긴밀한 협력관계를 유지하고 있으며, 2002년 12월에 일본 KEK에서 개최된 3국간 양성자가속기 Mini-workshop에서 3국간의 지속적인 Mini-workshop의 개최와 관련 기관들간의 협력약정 추진을 합의하였다. 한·중간에는 양국간 원자력공동위원회의 협력의제 'B-4 Development of Advanced Accelerator Technology and its

Applications'의 채택으로 현재도 협력을 추진 중이며, 2002년 11월 중순에 한국원자력연구소의 연구원들이 중국의 IHEP, CIAE, 북경대(Heavy Ion Institute) 및 청화대(Accelerator Lab.)를 방문하여 구체적인 협력방안을 협의하고 수행중이다. 국제협력방안의 구체적 실현은 기본적으로 양성자기반공학기술개발사업에서의 필요와 진도추이에 따라 추진 예정이다.

2. NT/BT/IT 기술개발에의 활용방안

가. 목표

선택과 집중 전략과의 연계방안을 제시하고, 선진국과 차별화 되는 합리적인 추진전략을 수립한다. 장기적으로는 고에너지(1GeV급) 양성자가속기에 의한 Spallation Neutron Source의 확보시에 대비하는 활용방안을 마련한다.

나. 달성도

일차적으로 현재 양성자기반공학기술개발사업에서 목표로 하고 있는 100MeV 20mA 양성자가속기의 활용에 맞추어 가장 효과적으로 산업기술화 할 수 있는 과제들을 선정하였다. 특히, 국내 산업계 실정을 감안하여 국제경쟁력을 갖출 수 있는 기술분야의 발굴에 중점을 두었다. 세계적으로 스위스 PSI에서를 제외하고는 중에너지 양성자빔을 활용하는 산업기술개발은 간과되고 있는 상황이므로 이 분야에서 선진국들과 차별화 하여 집중적인 과제개발을 수행함이 필요하다. 특히, 우리 고유의 식물자원에 대한 다양한 유전자원 확보에 의한 산업화추진은 대표적으로 효과적인 전략으로 사료된다.

구 분	과 제
NT	- Smart-cut 기술을 이용한 SOI 웨이퍼 제조기술 개발 - 다양한 단결정 반도체박막 형성기술 개발
BT	-내재해성 맥류, 채소류 및 기호성 화훼류의 유용유전자원 개발 -환경친화적 생분해성물질을 위한 유용숙주의 개발

장기적으로는 NT를 지원하는 Focussed Beam 장치기술을 확보하여 나노가공의 산업화를 촉진하고 Spallation Neutron Source에 의한 나노측정 기술개발과 BT의 Post-genome 연구, 및 ET의 ADS의 기술개발을 중점적으로 추진하여야 할 것이다.

3. 이용자프로그램 개발

가. 목표

장기적인 국내 산학연 이용자그룹의 저변확대 방안을 제시한다.

나. 달성도

대용량 양성자가속기의 활용에 대비한 이용자프로그램 개발과제를 양성자기반공학기술개발사업의 기획에 반영하였다. 추진전략으로는, 외국의 양성자가속기 이용자그룹들과의 교류

를 통하여 선진국들에서의 활용분야와 기술수준을 탐색하고, 국내 타 연구시설들의 이용자 그룹들과의 협력을 통하여 상호보완관계의 연구에 대한 시너지효과와 연구인력 저변확대를 꾀하며, 조기에 핵파쇄중성자원 활용 연구인력을 양성하기 위하여 외국시설을 원활하게 이용하는 국제협력을 추진하는 것이다. 일차적으로는, 활용의 효율성을 타진하기 위하여 수 규모의 다수과제를 공정하게 공모하여 가속기를 이용한 실험을 통한 논문 위주의 연구를 수행토록 하면서 이용자들의 네트워크를 구성한다.

4. 사회적 수용성 제고

가. 목표

양성자가속기 사업에 대한 기술적, 사회적 인식 및 수용성 제고방안을 정립하고 제고실적을 제시한다. 장기적으로는, 대규모 투자를 필요로 하는 양성자공학의 국내 기반구축에 국민의 이해와 지지를 획득하고 과학기술계의 폭 넓은 참여를 이끌어 내어, 이 분야에서 선진국들과 경쟁할 수 있도록 지원하는 것이다.

나. 달성도

- 양성자공학의 사회적 수용성 제고 측면에서 목표치를 초과하는 기대이상의 성과를 거두었다. 과제 수행기간 중에 사회적 수용성 제고를 위한 노력은 과제 착수 이전과 비교할 수 없을 정도로 다양한 형태와 빈도로 이루어 졌다.
- 문화방송, YTN 등의 방송매체와 동아일보, 중앙일보, 문화일보, 매일경제 등의 일간지를 통하여 기사전달이 이루어 졌다. 이를 기폭제로 양성자가속기 시설에 관심을 보이는 대학, 학회, 지방자치단체들이 줄을 이어 사업에 대한 설명회를 요청하여 과제책임자가 출장 방문하여 설명회를 가졌으며, 관심 있는 교수들과 자치단체 공무원들의 한국원자력연구소 관련시설 방문 견학들이 있었다.
- 제6회 국제 양성자가속기 워크샵과 제1회 Accelerator Summer School 개최를 통하여 과학기술계의 관심을 이끌어내고 젊은 과학도들의 참여를 일궈내었다. 장기적으로 신문방송을 통한 홍보는 양성자공학 기술개발 성과에 달려 있으며, 이는 또한 젊고 유능한 과학기술인력의 참여를 필요로 한다. 제1회 가속기 여름학교를 성공적으로 개최한 것은 사업의 성공적인 정착을 위한 첫 걸음이며 유능한 인재 양성을 통한 사업의 역동적 추진의 청신호로 간주된다.
- 양성자가속기사업의 사회적 수용성 제고의 가장 현실적인 결과는 이 사업에 필요한 부지, 연구지원시설 및 부대시설의 확보를 위한 유치기관 공모계획의 추진에서 보여지고 있다. 현재 프론티어사업인 양성자기반공학기술개발사업에서는 약 500억원 이상이 소요될 것으로 예상되는 부지, 연구지원시설 및 부대시설에 소요되는 예산이 책정되어 있지 않고 이를 유치기관에서 부담하도록 계획되어 있으며 이를 위한 유치기관 공모를 2003년 초에 추진 예정이다. 사회적 수용성 제고의 결과, 다음과 같이 국내 유수의 지방자치단체들과 대학들이 막대한 재원의 부담에도 불구하고 이 사업의 유치를 희망하고 준비중이다.

유치희망기관	담당자	전화번호
전라북도	유철수박사/양연숙	063-280-2175
전라남도	박종열(지식기반산업과)	062-607-4914
강원도	임재철(중소기업유치)	033-249-3215
익산시	서동훈(지역경제과장)	063-840-3370/850-4420
완주군	노한(지역경제담당)	063-240-4351
철원군	김명배(기획실장)/강영동	033-450-5206
보령시	김현(시의회 사무국)	041-930-3508
영광군	강명원(영광원전관리계장)	061-360-5439
중앙대	김석규과장	031-670-3367
대진대	안준수교수	031-539-1952
경희대	황주호교수	031-201-2573
동신대	최정식교수	061-330-3323
강원대	박용광/남순권교수	033-250-7274/8463

제 2 절 기술발전에의 기여도

1. 양성자기반공학기술개발사업 기획

본 과제에서 수행한 결과들은 대부분 2002년도 전반기에 이루어진 양성자기반공학기술개발사업의 기획보완에 반영되었다. 이 사업의 국제협력, 이용자프로그램 및 NT/BT분야의 활용방안 등이 본 과제의 결과로 제시된 방안에 따라 기획되었고 관련 과제계획을 수립하여 수행하고있다.

2. 신기술에 대한 비전 제시

각계 각층의 인사들을 대상으로 20여회의 설명회를 통하여 21세기 과학기술 패러다임의 변화와 핵자(양성자/중성자) 활용의 신기술시대에 대한 비전을 제시하고 이에 대한 지지를 획득하였다. 21세기의 새로운 과학기술시대에 대비하여, 대용량 양성자가속기의 중요성을 인식하고 이 분야의 세계적인 동향을 파악하고 선진국들과 경쟁할 수 있는 과학기술인력을 양성하는 노력이 필수적임을 알렸다. 또한 새로운 과학기술을 기반으로 21세기 첨단산업을 꽃피우는 벤처 육성방안을 제시하였다.

제 5 장 결과의 활용계획

제 1 절 국제협력

본과제의 수행을 통하여 이룩한 국제협력관계는 양성자기반공학기술개발사업에서 계승하여 발전되어 갈 것이며, 수집하고 분석한 선진국 시설과 기관들에 대한 자료들은 이 사업에서 매우 유용하게 활용될 것이다. 한·중·일 3국간에 긴밀한 협조관계를 유지하여 유럽 및 미국과의 가속장치기술개발 및 가속기 활용 첨단기술개발에서의 경쟁력을 갖추어 나갈 것이다. 금년 말에 3국간의 협력방안 구체화작업이 예정되어 있다. 유럽에서는 EU체제 내에서 ESS(European Spallation Source)사업에서와 같이 대형 가속기시설의 공동 건설과 활용을 목표로 하고 있다. 장기적으로는 구미와의 경쟁과 지리적 여건을 감안하여 극동 3국간에 상호 보완적인 협력관계를 이룩하도록 미래의 프로그램들을 조정해 나가고 상호 시설들의 교체활용을 도모해 나가야 할 것이다. 이를 위하여 가속기분야에서 3국이 공동으로 현재 상황에 대한 조사 및 분석과 미래의 계획에 대한 조율작업을 위한 국제공동 정책연구가 필요할 것으로 사료된다. 이러한 협력관계가 이루어진다면 우리의 과학기술자들이 폭 넓게 가속기시설들을 활용하고 투자를 최소화하면서 우리의 특색 있는 시설을 구축하여 시설의 활용도를 세계로 넓힐 수 있을 것이다.

제 2 절 과학기술 인력양성

가속기 여름학교의 유지발전을 통하여 젊은 과학기술인력의 양성을 추진하고, 이용자프로그램의 개발을 통하여 국내 과학기술계의 양성자가속기 활용 저변확대를 기하게 될 것이다. 이에 는 국내의 제한적인 기술수준을 고려하여 적극적인 국제협력으로 선진국의 과학자들을 강사로 초빙하고 젊은 과학자들이 세계적인 양성자가속기시설들을 활용할 수 있도록 지원함이 필요하다. 선진국들의 여름학교 프로그램과도 기술교류를 추진하여 국내의 학생들도 같은 강의를 받을 수 있도록 배려하여야 할 것이다. 또한, 대용량 양성자가속기를 활용하는 NT/BT/IT분야의 젊은 연구인력 양성을 위하여 장기적(1-2년)으로 해외 가속기 활용 연구시설들에 Post-Doc을 파견하는 프로그램의 개발이 필요하다. 3국의 젊은 과학자들이 협력 수행하는 과제도 개발 가능할 것이다.

여 백

제 6 장 관련 수집자료

제 1 절 해외 주요 양성자가속기 관련 기관현황

1. RAL(Rutherford Appleton Laboratory)

- (1) 국가명 : 영국
- (2) 소재지 : Oxfordshire near Didcot
- (3) 홈페이지 : <http://www.rl.ac.uk>



- (4) RAL은 1995년 4월에 설립된 CCLRC (The Council for the Central Laboratory of the Research Councils)라는 독립법인체의 산하에 있는 연구기관으로 Staff의 수는 약 1,200명에 이릅니다.
- (5) CCLRC는 1995년 4월에 설립된 영국정부 통산부 (Department of Trade and Industry)의 과학기술국(Office of Science and Technology) 산하의 독립법인체로서
 - RAL (Rutherford Appleton Laboratory), Oxfordshire
 - DL (Daresbury Laboratory), Cheshire
 - Chilbolton Facility, Hampshire의 3개의 연구소를 산하에 두고 있음.
- (6) 영국정부 통산부 (Department of Trade and Industry)의 과학기술국(Office of Science and Technology)산하에 CCLRC(The Council for the Central Laboratory of the Research Councils)라는 독립법인체가 1995년 4월에 설립되었음. 이들은 다음과 같은 부서로 나누어 운영되고 있음.
 - Business and Information Technology
 - Central Laser Facility (CLF)
 - Computational Science and Engineering
 - Engineering (Support of science)
 - e-Science
 - Instrumentation
 - ISIS
 - Particle Physics
 - Radio Communications Research Unit (RCRU)

- Space Science and Technology
- Surface and Nuclear Division
- Synchrotron Radiation (SRS)
- Marketing and Business Development

(7) CLRC의 2000년도 (회계년도) 지출은 9,810만 파운드(약 1,800억원)로 이중 약 80%는 다른 영국국영 Research Council들로부터 조달되고 있으며, 나머지 20%는 Marketing and Business Development 부서를 통하여 국내외 기관들과의 연구 협력으로 조달된다.

(8) CLRC는 전체인원이 약 1,700명을 넘는 수준으로 RAL에 1,200명 (Chilbolton Observatory는 행정적으로 RAL에 포함), DL (Daresbury Laboratory)에 500명정도 근무하고 있다. DL은 1962년에 설립된 원자력연구소이나, 1995년에 CLRC에 통합되었으며, 방사광 가속기를 비롯한 재료과학 시설들을 보유하고 있다.

(9) RAL은 두 개의 CCLRC의 주된 facilities를 보유하고 있으며, 이 외에도 다수의 관련시설들을 보유하고 있음.

- British Atmospheric Data Centre (BADC)
 - : The NERC designated data centre for atmospheric sciences
- Central Laser Facility (CLF) : world-class high-power laser facilities
- Central Microstructure Facility
 - : Providing state-of-the-art microfabrication services and R&D facilities, based on electron-beam lithography, to universities and industry
- Chilbolton Facility : Meteorological radar facility
- e-Science : next generation e-science facilities
- Energy Research Unit : Renewable energy research, including wind turbines
- Engineering Instrument Pool (EIP)
 - : Portable research instruments for loan by UK research grant and studentship holders
- ISIS : the world's leading pulsed neutron and muon source
- Library Information Services
- Library Information Services for external users
- Molecular Spectroscopy Facility
 - : Infrared, visible and ultraviolet spectroscopy
- MST radar facility : The NERC meteorological radar facility
- NERC Earth Observation Data Centre
 - : The NERC designated data centre for satellite and airborne Earth observation data
- Radio Communications Research Unit (RCRU)
 - : radio communications, radiowave propagation and atmospheric sensing
- RAL satellite ground station

: S-band antenna for spacecraft telemetry and command

- Research Services
- Space test facility : Imitating the conditions in space
- Starlink : Using computers to process and analyse astronomical data
- World Data Centre (WDC) : World Data Centre for Solar-Terrestrial Physics

(10) RAL은 CCLRC 산하의 제일 큰 규모의 연구소로서 ISIS와 CLF를 비롯한 재료과학, 전자 통신, 우주항공, 천문, 입자물리 등 많은 연구시설들을 보유하여 영국 학계와 산업계의 연구를 지원하고 있음.

(11) RAL은 1921년에 설립된 Appleton Laboratory와 1957년에 원자력연구를 위하여 설립된 Rutherford High Energy Laboratory가 1979년에 통합되어 이루어졌으며, 1995년에 CLRC산하의 연구소가 되었다. Rutherford는 1908년 노벨 화학상 수상자로 α 입자가 He 원자핵임을 밝힌 Lord Ernest Rutherford (1871-1937)의 이름에서, Appleton은 1947년 노벨 물리학 수상자로 라디오파를 반사하는 이온층을 발견하였으며, 2차 세계대전 중 원자탄과 레이더의 개발에 공헌한 Sir Edward Victor Appleton (1892-1965)의 이름에서 유래되었다.

(12) ISIS

(가) ISIS는 RAL(Rutherford Appleton Laboratory) 산하의 연구 부서로서 양성자가속기 및 응용에 대한 전반적인 연구개발을 수행하고 있음. RAL은 영국 런던에서 약 80km (자동차로 1시간 30분 거리) 떨어진 Oxfordshire의 Didcot 교외에 위치하고 있으며, RAL에는 약 1,200명의 스태프가 10,000명이 넘는 과학기술자의 연구를 지원하고 있음.

(나) CLRC 산하의 가장 중요한 3개 연구시설들이 ISIS, CLF (Central Laser Facility) 및 방사광가속기인 SRS (Synchrotron Radiation Source)이며, 이중 ISIS가 CLRC 전체 연구비의 ¼ 이상을 사용하는 가장 중요한 연구시설로 알려지고 있음.

(다) CLRC의 주목적이 기초/전략/응용연구계획들을 지원하기 위한 시설과 기술을 제공함으로써 영국과학기술의 발전을 촉진함에 있으므로 ISIS와 같은 주요 연구부서들은 연구시설/장비에 대한 연구·제작과 User program의 운영을 주 업무로 하고 있다. 따라서 ISIS의 연구개발 현황은 ISIS를 이용하고 있는 User group들의 연구 성과를 보여주고 있는 것이다.

(라) ISIS에서는 특히 영국 이용자의 ⅔가 박사 후 또는 박사과정의 연수생들이고 영국 이용자의 60%가 30세 이하이다. 지난 15년간에 물리, 화학, 생물분야의 대학생들의 이용이 크게 증가하였다. User facilities 의 제공을 주임무로 하고 있는 CLRC에서 ISIS가 가장 중요하고 가장 크게 활용되는 User facility로 자리잡고 있다.

(마) RAL 사이트에 위치한 ISIS는, 약 2,000년전 로마의 식민지 시절에 로마인들이 테임즈강을 테임시스라고 부르던 것을 후에 이 지방사람들이 앞부분을 빼고 ISIS라고

부르던 데에 기인한다고 한다. ISIS에는 약 200명의 스태프가 1,500명이 넘는 과학 기술자의 연구를 지원하고 있다. ISIS의 2001년도 예산은 3,100만파운드(약 570억원)이며 이중 2,300만파운드(약420 억원)는 가속기운영비로 800만파운드(150억원)는 시설개발비로 지출하고 있다. 가속기운영비의 20%와 시설개발비의 50%는 외국 9개국(스위스, 호주, 미국, 인도, 일본, 프랑스, 독일, 이탈리아, 스웨덴)이 지원하고 있으며, 이용자의 25%는 외국의 과학자이다. 지난 10년간 4,000여편의 논문을 출판하여 연평균 400편의 논문을 출판하고 있으며, 현재는 연간 500편 이상의 논문이 나오고 있다. 논문 한편당 8만불이 소요되며, 이는 매우 경제적으로 논문을 생산하는 것이라고 한다.

(바) ISIS는 양성자빔(800MeV/160kW/200 μ A/50Hz)을 이용하는 세계에서 가장 강력한 핵 파쇄 중성자원이다. 현재 21개의 중성자빔 포트와 7개의 뮤온빔 포트가 있으며, 현재 수행 중인 연구분야는 다음과 같음.

(사) 나노테크놀로지 관련분야

- Soft Condensed Matter
 - Polymer-polymer inter-diffusion
 - Surfactant adsorption (complex mixture at interfaces)
 - Complex fluids under shear
 - Aggregation in super-critical fluids (complex environments)
 - Surface adsorption and ordering(예정)
 - Flow and processing(예정)
 - Self-assembly(예정)
 - In-situ electrochemistry(예정)
 - Thin film devices(예정)
- Dynamics of Molecules
 - Catalyst poisoning by metal groups
- Structure of Crystalline materials
 - Solid state chemistry
 - Structure of solids under very high pressures
- Hard Condensed Matter
 - High- T_c superconductors
 - Colossal magnetoresistance
 - Magnetic thin films
- Disordered Materials
 - Structure of high and low density
 - Structure of water around ions and molecules in solution
- Advanced Materials in crystalline, magnetic, and disordered materials(예정)

(아) 바이오테크놀로지 관련분야

- Bio-molecular Sciences

- Structure of Immunnoglobulin A
- Protein adsorption at interfaces
- Macromolecular assemblies(예정)
- Interfaces and membranes(예정)
- Food science and technology(예정)
- Low and high resolution crystallography(예정)

※ (예정)은 현재 설계중인 표적스테이션 II(빔전류를 300 μ A로 증가)의 수행예정 과제임.

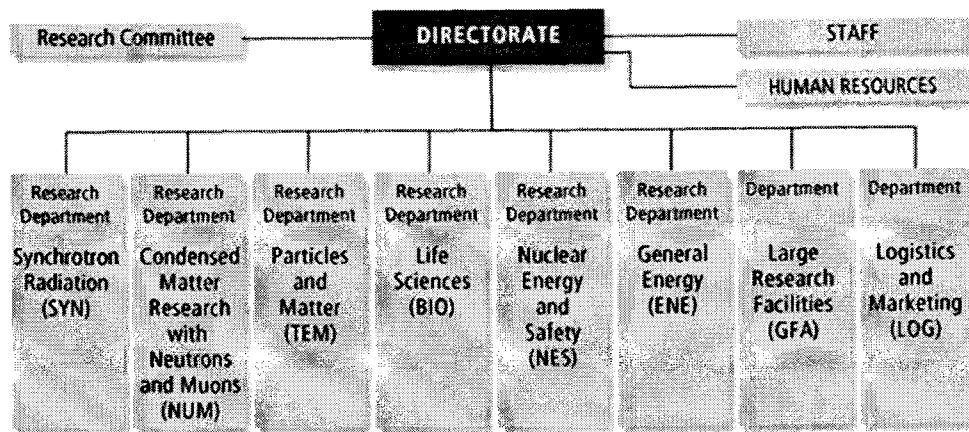
(자) ISIS시설의 이용수요가 시설능력을 크게 초과하여 새로운 중성자원인 2nd Target Station을 건설하기로 결정하였다고 함. 현재 200 μ Amp인 양성자 빔을 300 μ Amp 까지 높이고 가속기에서 첫 번째 Target Station으로 나가는 빔 라인에 Branch 빔 라인을 설치하여 2nd Target Station (분석 instrument들 포함)을 건설할 예정이다. 가속기에서 나온 양성자 빔의 펄스 중 $\frac{1}{5}$ 을 2nd Target Station으로 돌리게 되어 빔 출력 36kW의 펄스 양성자 빔으로 텐타럼 표적을 때려 중성자를 만들어낸다. 두개의 25K 고체 메테인 Moderator (중성자 감속제)와 한 개의 100K 액체 메테인 Moderator를 이용하여 냉 중성자를 공급하게 된다. 기존의 Target Station에서 6개의 Instrument들을 옮기고 9개의 새로운 instrument들을 제작하여 2nd Target Station의 instrument들을 갖추게 되며, 또한 기존 Target Station에도 새로운 instrument 들이 추가된다. 2nd Target Station은 출력(36kW)은 기존 Station (160kW)에 비하여 낮지만 최적의 냉 중성자 및 instrument로 더 미세한 시스템들과 더 복잡한 시스템들의 연구, 더 광범위한 형태의 샘플환경조건하의 연구, 더 선명한 측정이 가능할 것이라고 한다.

(차) 주 연구대상으로는 Soft condensed matter, Bio-molecular sciences 및 Advanced materials 를 들고 있다. 또한 2nd Target Station을 건설함에 따라 복잡하고 다양한 User program을 수용하기 위한 실험환경개선 및 instrument R&D가 요구되며, RAL에 새로이 건설되는 방사광가속기(Diamond)와 ISIS의 User program을 통합 관리하는 User Office and Reception Center가 예상된다고 한다.

(13) RAL에 신설되는 Diamond라는 이름의 방사광가속기는 전자를 3Gev로 가속하여 약 550m 길이의 저장링에서 회전시킴으로써 적외선에서 hard X-ray까지의 photon(양자)을 생성시키게 된다. Diamond에 초기에는 7개의 experimental station(빔라인)들이 설치될 예정이며, 궁극적으로 30개 이상의 experimental station들이 설치될 것이라고 한다.

2. PSI(PAUL SCHERRER INSTITUTE)

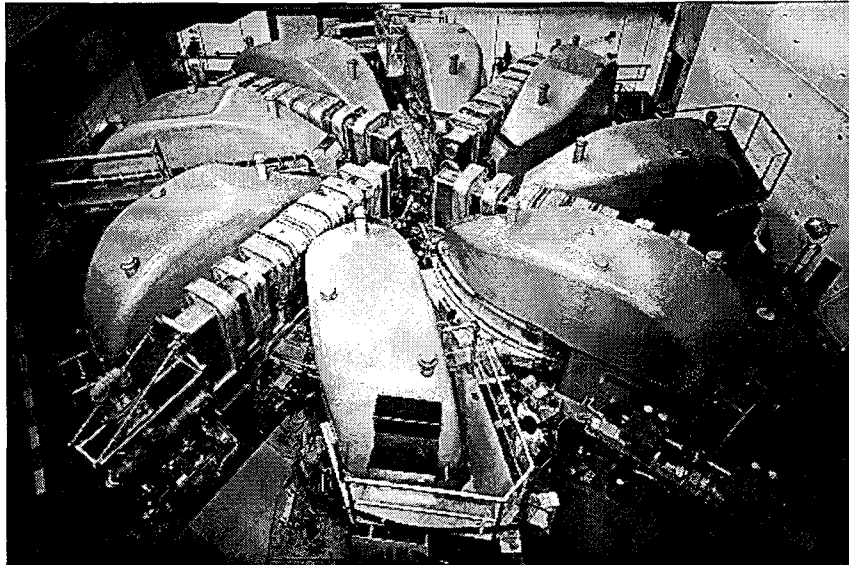
- (1) 위치 : 스위스
- (2) 홈페이지 : <http://www.psi.ch>
- (3) PSI는 취리히 북서쪽 Baden과 Brugg 의 중간쯤에 위치, Limat강의 양쪽 강변에 나뉘어 있음.
- (4) 약 1200명의 스태프가 종사하는 스위스에서 가장 큰 국립연구센터이며 유일한 원자력연구기관임. 금년 예산은 250M CHF(약 2천억원)으로 이중 정부출연이 222M CHF이라고 함.
- (5) 당초 2개의 원자력연구소를 통합하여 스위스 연방기구인 ETH-bereich (ETH : Eidgenoessisch Technische Hochschule, 스위스 연방공대) 산하의 연구기관으로 설립된 PSI는 현재 스위스의 원자력발전이 정체되면서 과학기술의 학제간 연구(multi-disciplinary research) 센터로 자리잡고 있음.
- (6) 조직



(7) Facility

- 590 MeV Proton Ring Cyclotron
- Philips Cyclotron
- Pion/Muon Beams
- Spallation Neutron Source (SINQ)
 - SINQ Instrumentation
- Swiss Light Source (SLS)
- Tandem Accelerator
- μ SR Facilities

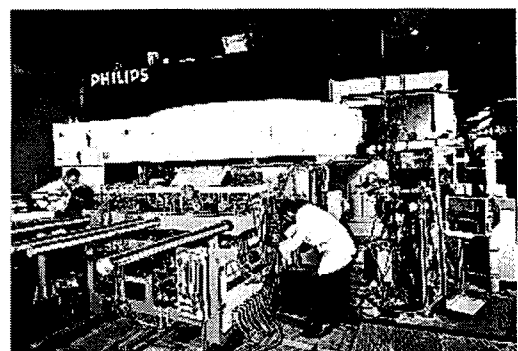
(8) 590MeV Ring Cyclotron



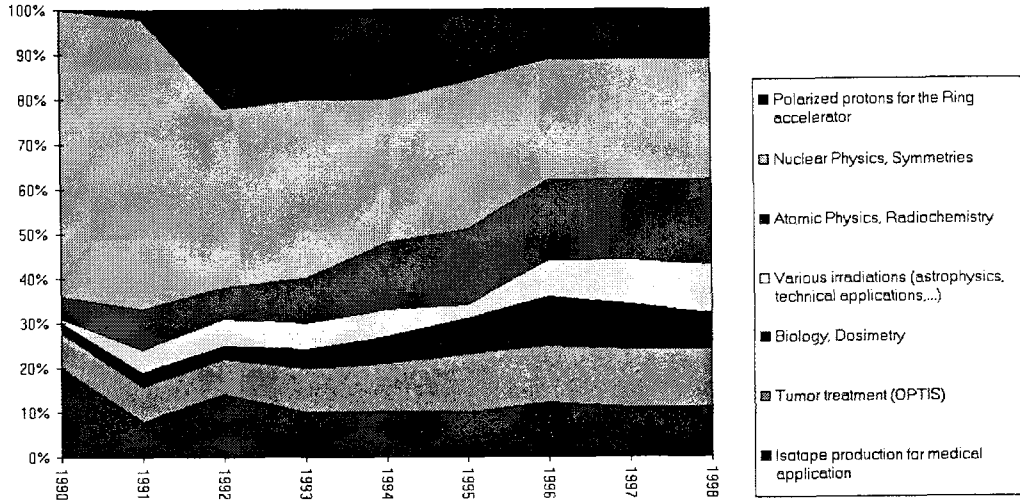
• Injection Energy	72 MeV
• Extraction Energy	590 MeV
• Extraction Momentum	1.2 GeV/c
• Energy spread (FWHM)	ca. 0.2 %
• Beam Emittance	ca. 2 pi mm x mrad
• Beam Current	1.6 mA DC
• Accelerator Frequency	50.63 MHz
• Time Between Pulses	19.75 ns
• Bunch Width	ca. 0.3 ns
• Extraction Losses	ca. 0.03 %

(9) Philips Cyclotron (Injector 1)

(가) Injector 1은 독일회사인 Philips Gloeilampen-fabrieken에 의해 제작된 에너지가 변형 cyclotron임. 양성자 빔의 경우 최대 에너지가 72MeV에 이르며, 전하량이 Z이고 질량수가 A인 이온의 최대 에너지는 120 MeV Z^2/A 이며, 다수의 이온원을 이용하면 proton, deuterons, 중이온빔까지 제공이 가능함.



(나) 1990년부터 1998년까지 Injector 1의 이용과 관련된 변화추이를 살펴보면, 핵물리 분야에의 이용이 줄어드는 반면 atomic physics와 biotechnology 등의 다른 분야에의 이용이 확대되고 있는 것을 볼 수 있음.



(다) Typical Beam Property

- Emittance: for all beams 30 mm mrad
- Energy resolution
 - dispersionless mode E/E down to 2.5×10^{-3} ,
 - analysed mode E/E down to 2×10^{-4}
- Intensities
 - p 150 μA as injector for the Ring, <100 μA for IP
 - p, d limited to 10 μA for low energy experiments (shielding)
 - Polarized p, d up to 13 μA depending on energy
 - a up to 15 μA depending on energy
 - Heavy Ions strongly depending on ion type and energy, for example:
 - 2 μA 16O at 200 MeV; 10 nA 208Pb at 600 MeV (design values).
 - Routinely produced species are: 12C, 16O, 18O, 20Ne, 22Ne
 - n up to $5 \times 10^5 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, <70 MeV, monoenergetic, polarized

(라) OPTIS (Ophtalmologic Proton Therapy Installation Switzerland) project의 경우, 서유럽 최초의 proton therapy facility로서 약 3,000명 이상의 환자들의 치료에 이용된 바 있음.

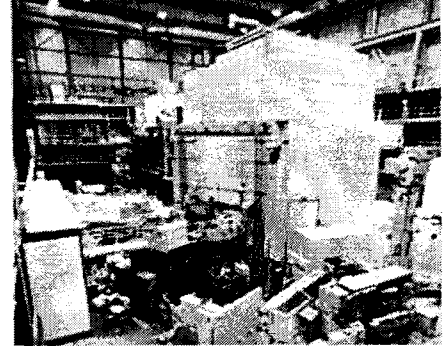
(10) Pion and Muon Beam Lines

- PSI는 particle physics와 다른 실험들을 위해 beam time을 제공하고 있음. Momentum이 최대 수백 MeV/c에 이르는 high intensity의 pion 및 muon 빔들이

제공되며, 이러한 빔라인들은 Laboratory for Particle Physics과 Department of Large Research Facilities들이 공동으로 운영한다.

(11) Swiss Spallation Neutron Source (SINQ)

- 핵파쇄 중성자원 SINQ는 continuous source로서 flux가 최대 약 10^{14} n/cm²/s에 이른다. 열중성자 외에도 중수의 cold moderator를 이용하여 cold neutron을 생산하며, 이들은 재료연구와 생물 구조분석 등에 효과적으로 활용됨.



(12) 현재 Nuclear Power 관련 연구는 전체의 약 20% 수준으로 축소되었다고 함.

- 2000년의 부분별 예산은 다음과 같음.

- | | |
|---------------------|-----|
| • SLS (방사광 가속기) 건설 | 22% |
| • 고체물리/재료과학 | 21% |
| • 입자물리/천체물리 | 11% |
| • Nuclear Energy 연구 | 19% |
| • 일반에너지 연구 | 15% |
| • 생명과학 | 12% |

(13) PSI의 조직은 Directorate (Director, Deputy Director, Head of Staff) 산하에 다음과 같이 7개 부서로 나뉘어 있음.

- Particles and Matter (TEM) Research Department.
- Life Sciences (BIO) Research Department.
- Condensed Matter Research with Neutrons (FUN) Research Department.
- Nuclear Energy and Safety (NES) Research Department.
- General Energy (ENE) Research Department.
- Large Research Facilities (GFA) Department.
- and Marketing (LOG) Department.
- Swiss Light Source (SLS) Project

(14) PSI는 국내외 산업계와 학계의 연구를 지원하는 User Facility로서의 위치를 강화하고 있으며, 다음이 User들의 이용연구시설임.

- 양성자가속기 (양성자빔)
- SINQ (중성자원)
- 뮤온빔
- 양성자 암치료 시설
- SLS (방사광가속기)

- (15) 2000년에는 약 800여명의 외부연구자들이 양성자가속기 (싸이크로트론) 및 중성자원 (SINQ) 시설을 이용.
- (16) 금년에 전자(방사광)가속기인 SLS(Swiss Synchrotron Light Source)를 준공하여 물질연구의 User Facility의 기능을 보완하였으며, 앞으로 연간 약 1,500명의 외부 연구원들이 PSI 시설들을 이용할 것이라고 한다.

(17) PSI의 연구개발현황

- (가) 연구개발은 대체로 Solids and Materials, Particles and Matter, Biology and Medicine 및 Energy and Environment의 4개 부분으로 나눌 수 있다. 대부분의 연구들이 양성자가속기에 의한 중성자원(SINQ)을 활용하며, 새로운 물질/재료의 연구와 더불어 Nano-structure와 BT의 연구를 강화하고 있다.
- (나) 고체재료분야에서는, 20K 이하의 온도에서 새로운 냉각재료(e.g. cerium antimonide)를 개발하고 있으며, 실온에서는 도체의 특성을 갖지만 냉각하면 부도체의 특성을 보이는 ytterbium arsenide (Yb_4As_3)의 구조분석 및 온도특성을 연구 중에 있다. 또한 중성자 source인 SINQ를 사용하는 연구원들은 고온 초전도체의 동위핵 효과 (isotope effect)를 측정해 오고 있다.
- (다) 오늘날 데이터저장의 소형화가 계속 요구되면서 많은 정보들을 나노입자에 저장하려는 시도가 이루어지고 있다. 따라서 PSI의 고체물리 이론연구 그룹에서는 자화시뮬레이션을 통해 나노입자의 자기특성을 매우 심도 있게 연구 중에 있다.
- (라) Condensed Matter Research :
- Condensed Matter Theory (e.g. Strongly correlated electron systems),
 - High Temperature Superconductors,
 - Highly Correlated Electron Systems,
 - Low Dimensional Magnetism,
 - f-Electron Magnetism,
 - d-Electron Magnetism,
 - Structure and Dynamics (e.g. Hydrogen diffusion in carbon nanotubes),
 - Multilayers and Surfaces (e.g. V/Ni multilayers for polarization analysis),
 - Instrumental and Support Activities (e.g. Multilayer neutron monochromator).
- (마) Particles and Matter Research :
- Particle Physics Theory (e.g. The structure of scalar mesons)
 - Particle Physics Experiments
(e.g. Search for muon-electron conversion on gold)
 - Nuclear Physics (e.g. Modelling fission in nuclear reactions)

- Detectors and Experimental Facilities
(e.g. An ultracold neutron facility in PSI)
- Astrophysics
(e.g. XMM-Newton (X-ray satellite);from calibration to first results)
- Muon Spin Spectroscopy (Superconductivity, Magnetism, Semiconductors, Liquid Crystals, etc.)
- Micro and Nano Technology (Nano Factory and X-ray Optics, Silicon Based Nanomaterials and Nanoelectronics, Molecular Nanotechnology)
- Radio- and Environmental Chemistry (Heavy elements, Surface/Analytical/Cement Chemistry, Radwaste Project)
- Ion Beam Physics (Tandem accelerator facility, Accelerator massspectrometry, etc.)

- (18) 환경 에너지분야의 경우, PSI 전문가그룹의 분석에 따르면, 온실가스 배출 감소와 비용절감 측면에서 원자력에너지의 활용이 매우 고무적이다. 융프라우의 높은 곳에 위치한 연구소에서는 PSI의 전문가들이 아주 미세한 먼지입자들(에어로졸 입자)이 온실효과에 미치는 영향을 연구하고 있다.
- (19) PSI의 SINQ와 같은 중성자 source는 표적(target)을 포함하는데, 이때 최적의 냉각방법이 필수적이다. SINQ의 표적은 납을 사용하며 감속 및 냉각재로 D2O를 사용한다. 그러나 액체 금속타겟(lead-bismuth alloy) 같은 재료는 추가적인 냉각제를 필요로 하지 않기 때문에 전 세계적인 주목을 받고 있으며 ISTC연구의 일환으로 2005년까지 Lead- bismuth target의 연구를 완료 예정이다.
- (20) PSI의 양성자가속기는 2개의 Proton Cyclotron으로 구성되며, 첫째 사이크로트론에서 70MeV으로 가속되며, 다음 사이크로트론에서 590MeV으로 가속된다. 현재 최대 1.65mA (CW)를 내고 있으나 앞으로 2mA까지 올릴 수 있을 것이라고 함. Pion/muon source 를 갖추고 있으며, 중성자원인 SINQ에 1mA를 공급. SINQ는 1996년말에 준공 (flux:10¹⁴/cm²/sec). 양성자가속기는 연간 9개월 운전한다. 사이크로트론의 1회전당 6MeV정도 가속되며, Beam loss를 0.02% 이내로 유지하고 있음. Time of Flight 기법을 사용하기 위하여 일부의 중성자빔을 Chopping하여 CW를 pulse로 만들어 특정 instrument에서 사용하고 함.
- (21) 양성자빔에 의한 종양(암)치료는 수술다음으로 효과적인 치료이며, 수술처럼 국소 부위만을 처리하는 방법으로 화학적 또는 면역적 치료방법과 같은 전신을 대상으로 하는 방법과 차별화된다.
- (22) 세계최초의 양성자암치료는 1954년 미국 캘리포니아의 Lawrence Berkeley Lab. 에서 시행되었고 현재 미국, 일본, 러시아 등에서 시술되고 있다. PSI에서는 1984년에 처음으로 양성자 암치료를 시도하였고, OPTIS 시설에서 눈의 뒷편의 3cm² 이 내의 낮은 투자력을 요하는 종양(암)치료를 수행하여 1999년 말까지 3천건 이상의 눈 종양을 치료하였다. 치료의 성공률이 90%이상을 기록하였으며, 유럽에서 양성자암치료의 선구적 역할을 수행했

다. 현재 유럽에는 4개소의 양성자암치료 시설이 있고 이외에 3개소의 시설이 계획 또는 건설중이다. 세계적으로는 18개소에서 2만7천명 이상의 환자가 양성자암치료를 받았다.

- (23) 1996년 말에는 유럽에서 최초로 PSI에서 심층부 종양에 대한 양성자암치료를 시작하여 현재 60명 이상의 환자가 성공적으로 치료받았다.
- (24) 양성자 빔은 양전기를 띄므로 자장으로 휘어지게 할 수 있으므로 초점에 맞출 수가 있다. 또한 양성자 빔은 에너지에 따라 특정깊이에서 그 에너지를 발산하면서 정지한다 (이를 Bragg peak라고 한다). 이러한 성질을 이용하여 특정부위의 병소를 양성자빔으로 괴멸시킬 수 있다.
- (25) 양성자 암치료에서는 양성자 빔을 정확히 조정하여 병소 부위로 집중 투입하는 기술이 필요하다. PSI 기술은 양성자 선형 빔 (Proton pencil beam, 직경 5~7mm)을 자유자재로 방향을 조절하고, Spot Scanning 기법으로 1리터 이내의 신체부위를 9천개 이상의 개소로 나누어 조사선량을 각 개소별로 조정할 수 있다는 것이다.
- (26) PSI 가 개발한 양성자 암 치료용 Gantry는 미국 로마린다 병원의 것에 비하여 1/2의 크기 하며 빔을 휘게 하는 자석기술의 발전 때문이라고 함.
- (27) PSI는 양성자암치료에 대한 사업타당성검토를 수행한 바 있으며, 암치료비용이 환자당 약 4만불로 화학치료보다 저렴하다고 결론을 내리고 양성자암치료의 상업화를 준비하고 있음. 1단계로 현재 공동 사용하는 양성자가속기 대신에 양성자 암치료 전용가속기를 설치하기로 함.

3. CEA-Saclay

가. CEA 일반현황 소개 (Mr. Guillaume Fusai)

(1) CEA 1945년 설립, 정규직원 16,000명, 9개 연구센터,

- Fontenay-aux-Roses
- Saclay
- DAM/Ile de France (국방)
- Le Ripault (국방)
- Cesta (국방)
- Valduc (국방)
- Grenoble
- Valrho
- Cadarache

(2) CEA가 지분 78%를 보유하고 있는 지주회사인 AREVA(이전의 CEA-Industrie 개편) 산하에 Framatome ANP (66%지분소유, Framatome과 Siemens 원자력 부문통합), COGEMA

(100%)등의 원전관련 기업들과 FCI (60%), ST Microelectronics 등의 신기술산업회사들이 있음.

(3) CEA의 2001년도 예산은 20BFr (3.5조원)이며 이중 약 40%는 국방관련임. 비군사적 예산의 60%는 정부출연으로 충당되고 40%는 CEA자체의 재원으로 충당된다. CEA 자체 재원은 20%정도가 원전관련 R&D 서비스 수입이고, 40%는 비원전부문 서비스수입 (기술료 포함)이며, 잔여 40%는 AREVA를 통한 투자이익배당임.

(4) CEA의 4개 R&D 분야

(가) Defence (4,500명) :

- 핵탄두의 설계, 제작 및 공급
- (핵실험대체) Simulation 프로그램
- 핵추진(잠수함/항공모함) 설계 및 지원
- 국제협약 준수 감시

(나) Nuclear Energy (5,000명)

- 운전중 원전 지원 (원자로/핵연료)
- 미래형 원자로/핵연료 설계
- 모의 및 실험 시설 (hot lab/연구로 등)
- 폐기시설의 제염 해체

(다) Fundamental Research (Physics & Life science) (2,500명)

- 물리학(핵물리, 입자물리, 천체물리, 기상, 물질상태, 핵융합 등)
- 생명과학(방사선생물학, 핵독물학, 구조생물학, 분자공학, 의료영상, BT등)

(라) Technological Research (Industrial R&D) (1,500명)

- 정보통신(IT), 마이크로/나노 기술(NT), Instrumentation and complex systems
- 엔지니어링 재료와 공정 및 모델링
- 신에너지 기술 (수소/연료 전지, 태양광 전지, 에너지 합리화)

(5) CEA는 2000년도에 연구활동을 4개 부문으로 정리하는 구조개편을 단행 했다. 이 개편에서 원자로, 핵연료 및 폐기물 관련연구를 DEN (Nuclear Power Division)으로 통합하고, 비원자력 산업기술관련연구를 DRT (Technical Research Division)으로 통합하였다. CEA 산하의 산업체들도 재편되어 Framatome ANP와 COGEMA를 중심으로 하는 원전사업과 ST Microelectronics와 FCI를 중심으로 하는 신기술사업의 두 부문으로 개편하고 CEA-Industrie대신에 새로운 지주회사인 AREVA가 설립되었다. 원자력안전 규제 기구인 IPSN(Institute for Protection and Nuclear Safety)이 CEA 산하에서 분리되었다.

(6) CEA의 민간연구부문의 우선 추진사항 :

- 핵 폐기물 처리에 대한 기술적 해결방안 제시
- 원자력 활동의 건강과 환경에 미치는 영향 연구
(생체에 대한 방사선의 영향 등 생물학 연구 증진)
- 유망 신기술 개발 지원
(대체에너지, 마이크로/나노기술, Integrated Systems, 신재료, BT)

· 원자력기술 장치를 활용한 물리학, 생물학 및 의료 연구를 통한 주요 과학적 문제들의 해결.

(7) CEA는 2000년에 210건의 특허권을 출원하였으며, 2000년 말 기준으로 약 7,500건의 국내외 특허권을 관리하고 있으며, 1,550건의 발명특허를 보유하고 있다. 발명 특허를 분야별로 구분하면 아래와 같다.

· Optronics and microtechnologies	420건 (27.1%)
· Microelectronics	103건 (6.6%)
· Electronics	144건 (9.3%)
· Technologies dissemination	73건 (4.7%)
· Physics	90건 (5.8%)
· Protection of man and the environment	120건 (7.7%)
· Cleaning up and waste management	80건 (5.2%)
· Reprocessing	131건 (8.5%)
· Enrichment	46건 (3.0%)
· Reactors and nuclear fuels	91건 (5.8%)
· Safety	1건 (0.1%)
· Defence	186건 (12.0%)
· Materials engineering	65건 (4.2%)

(8) CEA는 1983년부터 직원들의 창업을 장려, 69건의 기술창업이 이루어졌음. CEA의 100% 자회사인 CEA -Valorisation은 창업회사들을 기술제공 또는 연구협력을 통하여 지원하며 창업회사들의 incubator 역할을 한다. CEA가 34%소유인 Emertec은 창업기금을 관리한다.

(9) CEA의 기능적 인력분포 (2000년 말 기준)

· Administrative executives :	620명 (3.8 %)
· Engineers/Researchers :	7,215명 (44.7 %)
· Research technicians :	4,897명 (30.3 %)
· Support for research (safety, etc.) :	1,914명 (11.9 %)
· Administrative technicians :	1,493명 (9.3 %)
Total	16,139명

(10) CEA의 연구업무별 인력분포 (2000년 말 기준)

· Defence :	4,604명 (39.3 %)
· Nuclear Energy :	3,248명 (27.7 %)
· Technological and Fundamental :	3,861명 (33.0 %)
Total	11,713명

(11) CEA의 인력관련 기타사항

- 평균연령 : 1999년 43.8세
2000년 43.3세
- 여성인력 : 전체의 $\frac{1}{3}$ (10년전 $< \frac{1}{4}$)
2000년 신입사원의 37.1%가 여성

(12) Saclay는 CEA산하의 최대 연구소로 2.2km²(약 65만평)의 Site에 약 6,500명 (외부인력 포함)의 인원이 근무하며, Nuclear Research (1,800명), Physics (1,300명), Life science (300명), Technological research (300명) 및 Education (100명)의 업무를 수행하고 있으며 Saclay는 OSIRIS와 Orphee의 2개 연구로를 보유하고 있음.

나. 연구개발 현황

(1) 국방

(가) 모의(Simulation) 프로그램

- Airix(내폭 재료의 급속변형을 관찰하기 위한 X선 레디오그래피 장비)준비완료
- 핵폭발 상태의 실험조건을 생성하기 위한 LMJ (Megajoule Laser) 개발
- Compaq사의 병렬구조의 5 tetraflop 슈퍼컴퓨터 제작
(전산력을 2010년 100teraflop으로 증대 계획)

(나) 핵탄두 생산

- 차세대 핵추진 미사일장착 잠수함용 핵탄두
- 2007년 대체할 항공용 및 2015년 대체할 해상용 핵탄두

(다) Vallee du Rhone의 공장들의 제염해체 (Clean up)

- 재처리공장 UP1을 2040년까지 제염해체 (Codem JV설립)
- Pierrelatte의 가스확산농축공장 해체착수

(라) 핵추진 함정

- 잠수함 건조 : Le Vigilant, Le Terrible
- 항공모함 Charles-de-Gaulle호 시운전
- 핵추진 실험설비 쇄신을 위한 시험용 원자로 RES의 건설추진

(마) CTBT 준수

- 전 세계에 321개 관측소(지진, 수중음파, infrasound, 방사성핵종 감시기술)와 16개 미세핵 화학 분석실험실로 구성되는 국제감시체제 Network를 구축
- 이 중 프랑스는 국내 16개, 해외 10개 관측소 구축 담당

(2) Civil Nuclear Research

(가) 원자력산업 지원

- 원전수명연장 (40년 또는 그이상) : 재료노화연구
- 핵연료연소도 개선 (PWR 50Gwd/t →60→70 Gwd/t, Mox 52parity 프로그램)
- 재처리 공정개선 (고연소도 핵연료, Mox 연료)
- 신형 저온 도가니로를 사용한 유리화(Vitrification) 연구
- 안전연구 (가상 열수력사고, 노심용융/Corium 형성 등 중대사고 통제)

(나) 미래원자력시스템 설계

- 차세대 EPR 개발(1500MW 개발완료, 핵주기 최적화 및 핵폐기물 최소화 연구)
- 미래형 원자로 개발 (경쟁력/수동안전성/고온)- 국제협력
- 신농축공정 연구 (Ultra Centrifuging, Silva Laser)
- 방사성 폐기물 관리연구
(2006년에 결정될 관리방안 제시, P&T와 회수가능 폐기물 저장 포함)
- Hybrid 시스템 연구 (Muse4 실험, 핵종변환 연구)

(다) 시뮬레이션 및 실험도구

- Digital Simulation 개발
(모든 형태의 원자력시설 입증을 위한 새로운 계산 프로그램들을 총체적으로 개발)
- 실험설비 합리화/최적화 (LHA, Lama등 폐쇄, 원자력실험설비 site 2개소로 통합 (Marcoule와 Cadarache), Jules Horowitz Reactor 등 새로운 실험설비 검토)

(라) 시설해체 및 원상복구

- 민간부문 시설들의 해체 및 복구 종합계획
(30년이상 400조프랑 투입필요, 원자력산업 재편과 연계하여 자금조달방안 수립)
- CEA의 방사성 폐기물 관리
(연구로 사용후 핵연료의 종류에 따라 20~50년 저장 필요)
- 운전정지시설들의 청소
(Siloe 연구로를 포함한 20여개의 폐쇄시설 해체 및 원상 복구)
- 특정부지들의 방사능 완전제거(Fontenay-aux-Roses, Grenoble등의 방사능 제거)
- 방사성 폐기물관리시설 혁신 및 시스템 수립
(각자 특정처리시스템이 필요한 44종의 폐기물 처리)

(마) 이온화시키는 방사선의 생물학적 영향 (Life Science Div.)

- 방사생물학적 및 의료적 연구
(분자생물학과 Post-Genome의 기술을 사용한 분자 및 세포단위의 생물학적 메카니즘 규명, 자외선으로 손상된 DNA를 복구하는 효소의 작동 원리 연구)
- 독물학 (Post-Genome 기술에 의한 원자력독소의 생명체 유입경로 및 단백질과 독소의 상호작용 규명, 이를 위한 별도 부서 설립)

(3) Technological Research for Industry

(가) 전자, 정보 및 통신기술

- ※ CEA는 유럽에서 두 번째로 큰 마이크로/나노 전자연구소인 Leti (Electronic and information Technology Lab)을 유지하고 있으며 여기에 약 1,000명 (CEA직원 750명, 외부인력250명)이 종사하고 있다.
- Silicon기술 (CMOS, SOI 등, TI사에 기술 제공)
- 미래 Microsystems and optronics (DVD-RAM개발)
- 장거리통신 (미래 통신장비 및 계통연구)
- 계장 및 복합시스템
(450명 규모의 연구소인 List (Systems and Technology Integration Lab.) 신설)
- 계통의 고도화 및 신뢰성향상
(복합계통들에서의 자체진단 및 수리기능, 동시대 규모 데이터/영상 등 처리계통개발)
- Man-machine interface (Robotics, 원격운전, 설계업무/사업운영 CAD 등 개발)
- 계장 및 건강계통 (의료영상화장비, 토목/항공의 구조물 검사 및 정비 장비)

(나) 신재료 (Emerging materials)

- ※ 단기적인 산업계 시장수요를 위한 응용개발 (재료접합, 재료경량화, 등)과 잠재력이 큰 기초연구 (나노재료, 생체재료, 나노제조, 등)
- 수소/연료전지(PEMFC-양성자 교환전지, SOFE-고체산화물 연료전지, 탄소나노튜브)
- 광전지 (Phovoltaic cells) 및 에너지 저장 (효율증대, 소형화, 비용감축)
- 합리적 에너지 이용(고효율장비, 신냉각기술, 에너지계통 오염감축)

(4) 기초연구 (Fundamental Research)

(가) 물리학 (전문연구기관들과 협력)

- CEA는 국내외 대형 연구시설 사업에 참여 (가속기, 레이저, 위성)
- 입자물리 (Violation of CP - 물질과 반물질의 비대칭성 규명, Higgs' boson 규명, 표준입자물리모델 입증, 우주의 숨겨진 질량 규명, 블랙홀 연구, 등)
- 핵물리 (Exotic Nuclei(희귀단수명 동위원소)연구, 초중량핵 연구, 원자핵내의 양성자와 중성자의 결합력 연구, 등)
- 천체물리 (지상 또는 위성의 관측용 장비개발 - XMM-Newton 위성의 우주망원경 (X-ray), Herschel 위성의 Submillimetric Camera, 하와이 CFHT망원경에 장착될 CCD 광학카메라 등)
- 원자력(중성자 빔을 이용한 재처리 분리공정 및 핵폐기물 핵종변환 연구, 핵종변환용 핵파쇄중성자생산을 위한 양성자가속기 표적연구, 미래 Hybrid System (양성자가속기와 원자로의 결합) 기초연구, CEA가 조정역을 담당하는 유럽연합의 양성자가속기 건설사업인 Concert(Combined Neutron Center For European Research and Technology) Project 추진)
- 기상 및 환경(CNRS(국립과학연구센터)와 공동으로 LSCE(기후와 환경과학연구소)

를 설립하여 탄산가스의 기후변화에 대한 영향을 규명하기 위한 해양/식물/대기를 결합한 기상모델 연구)

- 미래기술 연구 (타 전공분야 팀들과 협력하여 나노기술, 계측기, 저온자기학, 연료 전지 등 연구)
- 대형시설 CNRS와 협력하여, Soleil 방사광가속기 건설사업 추진, 2005년 준공 예정
- 핵융합 (유럽의 핵융합연구에 불란서를 대표, 영국 JET (Joint European Torus)에서 초 단위 출력실험 계속 ('97년 16MW 도달), Cadarache의 Tore-Supra Tokamak에서 1,000초간 20MW 출력실험 준비, 유럽연합의 500초간 400MW출력의 ITER 사업 추진 및 이의 Cadarache 유치 추진)

(나) 생명과학

- 방사선의 생명체에 대한 영향 연구 (방사생물학 및 핵 독물학)
- 원자력 기술의 생물학 및 의료분야에의 응용(생명체의 분자단위에서의 구조 및 기능, 생체조직의 기능규명을 위한 의료적인 레이블링 및 영상기술)
- 생명공학적인 신분석기술 개발 (광우병 진단 등)
- 구조생물학 (NMR, X-diffraction등 응용, α -lactalbumin등 단백질구조 규명)

(다) 의료영상

- 동위원소 표지 및 의료영상 기술(PET, 기능성 IRM등)
- 인간 뇌기능 연구 (뇌기능 지도작성, 헌팅톤씨병 치료)
- 유전자 요법에 의한 파킨스씨병 치료연구
- 근육세포이식에 의한 심장결함 치료연구

다. 특기사항

(1) DAPNIA (Department of Astrophysics, Particle physics, Nuclear physics and Associated Instrumentation) 활동소개 (Mr. Bernard Aune);

(가) Fundamental Research에 속하는 DSM (재료과학부문)의 부서로서 국내외 기관들과 다양한 협력프로그램들을 수행중.

(나) CNRS 산하의 IN2P3 (Institut National de Physique Nucleaire et de Physique des Particules) 및 INSU (National Universe Sciences Institute)와 함께 입자 물리 연구에 참여하고, 2005년경 완공될 CERN의 LHC (Large Hardron Collider)에 참여하고 있음.

(다) ESA(European Space Agency)의 관측 프로그램들에 참여하고 있으며, 첨단 관측 기구들을 개발하고 있음.

(라) CONCERT (Combined Neutron Centre for European Research and Technology) Project로 유럽공동체의 ESS (European Spallation Source) 추진을 주도하고 있음.

- (마) 금년에 SOLEIL Project로, RAL 및 PSI와 유사하게 양성자가속기와 보완적인 전자(방사광)가속기의 건설에 착수하였음.
- (바) ESS (1.3 GeV, 25MW) 가속기의 개발연구를 수행중이며, 내년 중에는 ESS에 대한 유럽국가들간의 합의결정이 예상된다고 하며 설립위치는 독일 (뮌니히 근처)이 될 것이라고 함.
- (사) ESS에는 95KeV, 104mA H⁺ 및 2×55mA H⁻의 3개 이온원이 사용된다고함. 수년간에 걸쳐 이온원의 Beam Test를 수행중이며, 98% availability를 자랑하였음. 5MeV RFQ를 개발 중 (Cold Test)
- (아) ESS에는 200MeV ($\beta=0.65$)에서부터 SCL(Super Conductive Linac)을 사용하며, 이에 필요한 Cavity를 약 6년간에 걸쳐 개발하고 있으며 앞으로 2년 이내에 완료될 것이라고 함.
- (자) 빔 이용관련으로는 미래기술개발을 위한 전자, 물리, 생물 등의 Multi-disciplinary projects를 추진하고있음 ; nano-objects, nanostructures, molecular architecture (new materials), detectors and cryomagnetism.
- (차) CEA는 기본적으로 핵폐기물처리를 위한 ADS (Accelerator Driven System)를 위하여 가속기 개발을 추진.

4. KEK (High Energy Accelerator Research Organization; 고에너지 가속기연구기구)

- (1) 위치 : 일본 Tsukuba
- (2) 홈페이지 : <http://www.kek.jp>
- (3) 설립년월 : 1997년 4월
- (4) 고에너지 가속기 연구기구 (KEK)는 1997년 4월에 National Laboratory for High Energy Physics, Institute for Nuclear Study, Tokyo 대학의 Meson Science Laboratory가 합쳐져서 설립되었다. 이들 연구소들은 입자가속기를 개발하고 이를 이용한 핵/입자 물리와 재료 구조 및 물성에 대해 주로 연구하였다.
- (5) KEK 조직
 - Institute of Particle and Nuclear Study (IPNS)
 - Institute of Materials Structure Science (IMSS)
 - Accelerator Laboratory

- Applied Research Laboratories
 - Radiation Science Center
 - Computing Research Center
 - Cryogenics Science Center
 - Mechanical Engineering Center
- Japan Hadron Facility (JHF) Project Office
- Engineering Department
- Administration Bureau
 - Dept. of General Management
 - Dept. of International Research Cooperation
 - Dept. of Plant and Facilities

(6) KEK의 연구 프로그램

- 12GeV PS
- Lepton Colliders
- Theoretical and Numerical Physics
- Accelerator Research
- Neutron and Meson
- Joint Hadron Facility Project
- Synchrotron Radiation
- International Collaborations
- Other Projects

(7) IPNS(Institute of Particle and Nuclear Study)의 연구그룹

- BELLE (KEKB)
 - : KEK B-factory에서의 실험으로 CP violation의 근원을 밝히는 것이 목적임.
- ※ KEK B-factory : An Asymmetric Electron-Positron Collider for B Physics

- 12GeV PS Experiment
 - K2K(Neutrino Oscillation Exp.)
 - K Rare Decay
 - Nuclear Physics
- **High Intensity Proton Accelerator Facility**
- Unstable Nuclei Beam
- Fundamental Physics with Neutrons
- JLC (Electron-Positron Linear Collider Project) : Future



5. High Intensity Proton Accelerator Facility

(JAERI/KEK Joint Project for High Intensity Proton Accelerator Project)

(1) 홈페이지 : <http://jkj.tokai.jaeri.go.jp>

(2) Project Director : Shoji Nagamiya

(3) HIPA는 MW급의 3GeV 및 50GeV 대용량 양성자 가속기를 건설하는 것을 목적으로 하며, 2001년 4월 건설에 착공하였음. 첫 번째 빔은 2007년 봄에 발생될 예정이며, 현재, 선형 가속기를 위한 RFQ, DTL 등과 synchrotron에 쓰일 전자석 등의 제작이 진행 중임.

(4) HIPA Facility Project는 KEK의 JHF(Japan Hadron Facility) Project와 JAER의 Neutron Science Project(NSP)가 합쳐진 것으로 두 과제가 대용량 양성자 빔을 필요로 한다는 공통점을 가지고 있는 점을 감안하여 4년 전 이들 과제를 합쳐 현재의 Joint Project를 만듦.

- 현재 가속기는 JAERI의 Tokai site에 건설 중이며, HIPA Project는 2단계로 나누어 진행되며, 1단계에서

a) MW-class 3 GeV Proton Synchrotron

together with a linac as an injector,

b) MW-class 50 GeV Proton Synchrotron,

c) major part of the 3 GeV neutron/meson experimental facility

d) a portion of the 50 GeV experimental hall

을 완료하고 2단계에서는 neutrino 실험, 핵변환 연구 등을 수행할 계획임.

- 총 사업기간 (1단계) : 6년

- 예산 (1단계) : 1,335억엔

- HIPA Project의 Accelerator Complex는 다음과 같은 4종류의 가속기로 구성됨.

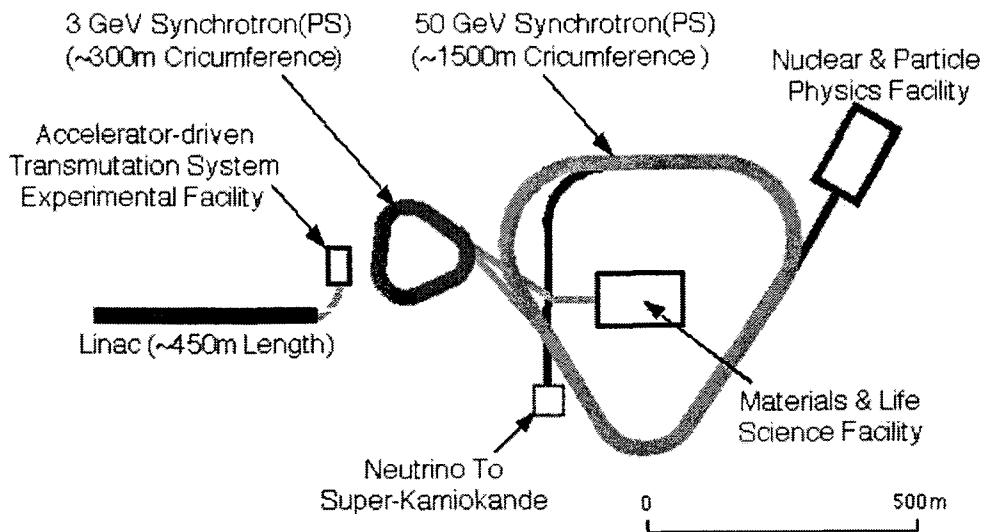
• 400MeV 상전도 선형가속기

• 600MeV 초전도 선형가속기

• 3GeV Synchrotron Ring (333uA, 1MW)

• 50GeV Synchrotron Ring (15uA, 0.75MW)

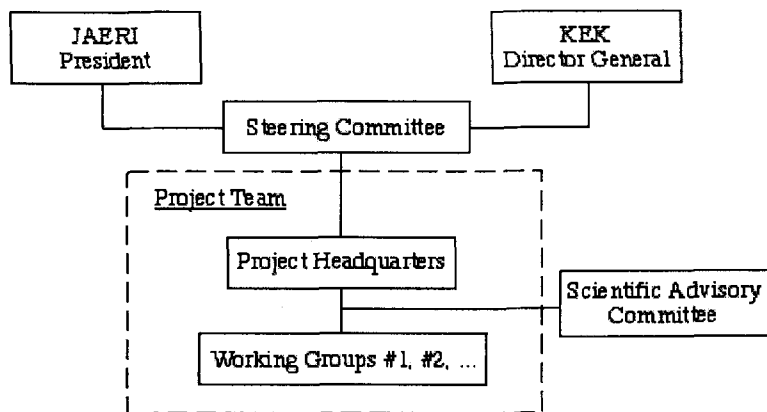
추가로 수 GeV 에너지 영역에서의 5MW 양성자빔 인출을 위한 upgrade도 다음 단계로 제안되고 있음



Configuration of the Accelerator Complex

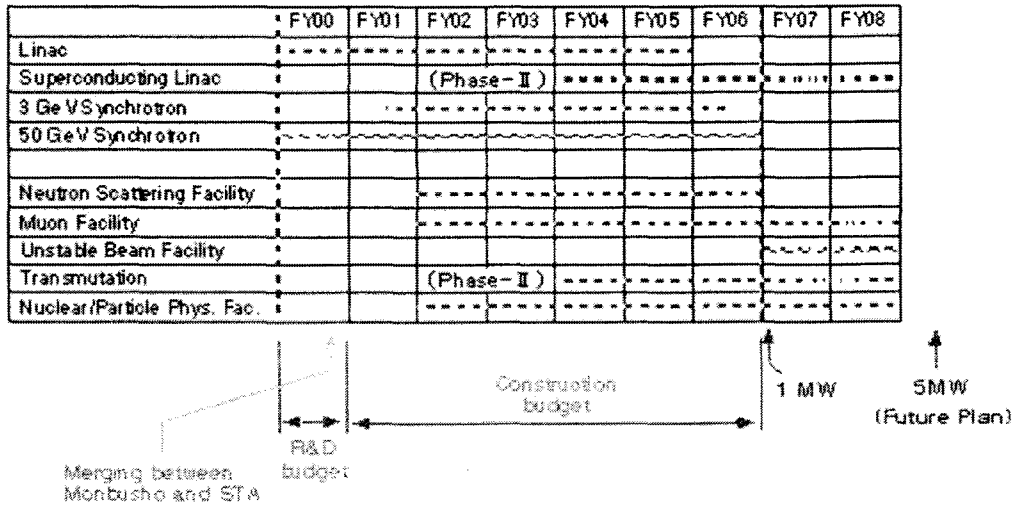
50GeV Proton Synchrotron(PS)에서는 kaon beams, antiproton beams, hyperon beams, primary proton beams를 이용한 핵/입자 물리 실험이 계획되어 있고, 3GeV ring은 50GeV main ring의 booster synchrotron 으로 이용될 것임. 3GeV ring은 1MW의 양성자빔 인출도 가능하도록 설계되어 있음. 이를 이용해서는 핵/입자 물리, condensed matter 물리, 재료과학과 구조생물학 등의 연구가 이루어질 것임. 그리고, 600MeV 선형 가속기에서는 Accelerator-driven nuclear transmutation의 연구가 이루어질 것임.

조직 :



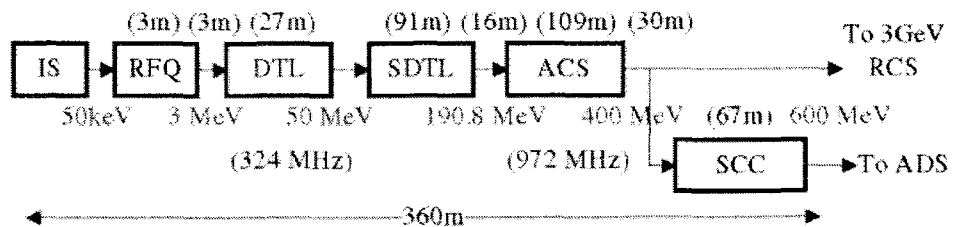
추진 일정

Proposed Schedule



Linac

- 선형가속기는 400MeV까지는 상전도 Cavity를 400~600MeV까지는 초전도 Cavity를 사용하여 가속시킴. 전체 길이는 360m에 이릅니다.



Block Diagram of LINAC

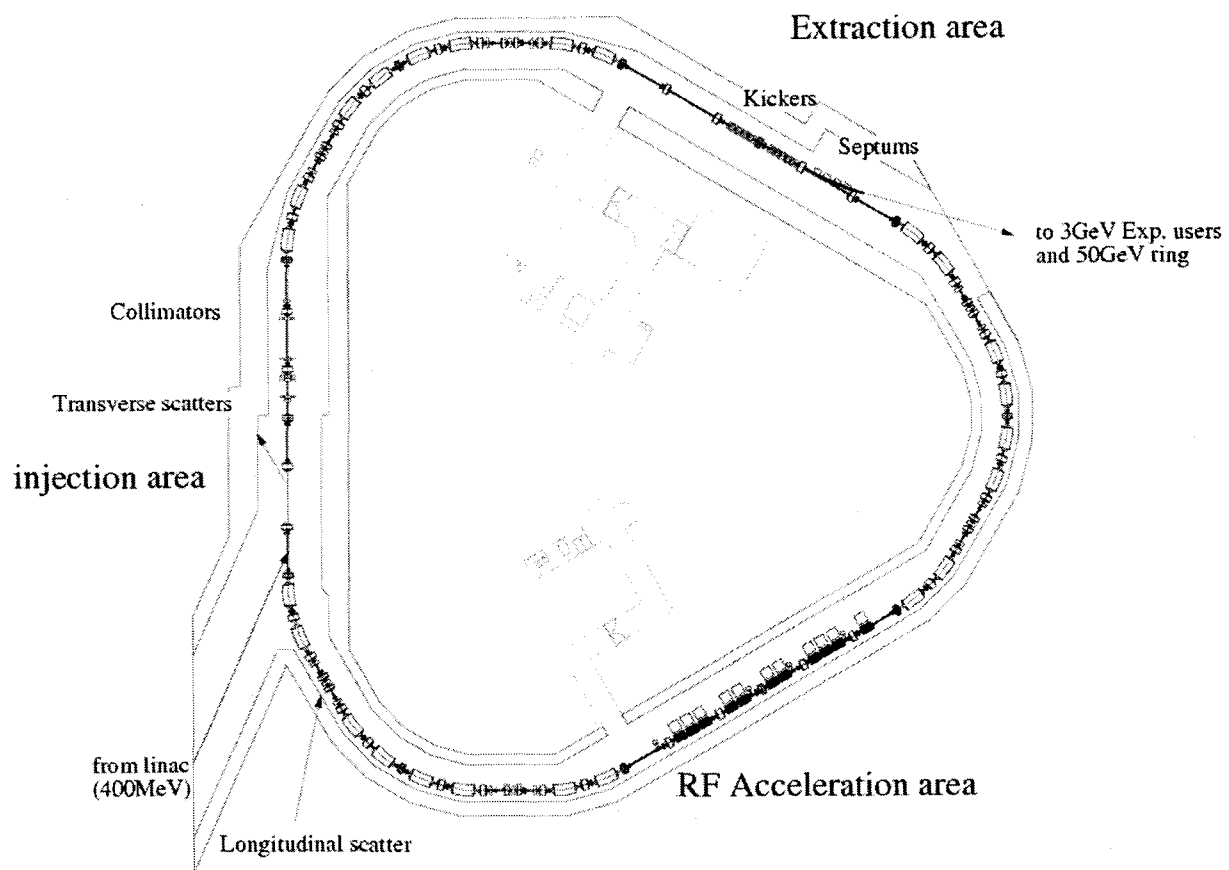
- Main Parameters

Accelerator Particle	H
Energy	450MeV
Repetition	50Hz
Beam Pulse Length	500microsec
Chopping Rate	54%
RFQ, DTL, SDTL Frequency	324MHz
CCL Frequency	972MHz
Peak Current	50mA
Linac Average Current	675microA
Average Current after Chopping	338microA
Total Length	360m

- 3GeV Proton Synchrotron

- Main Parameters

Injection Energy	400MeV
Extraction Energy	3GeV
Beam Intensity	8×10^{13} ppp
Repetition Rate	25Hz
Averaging Beam Current	333microA
Beam Power at 3GeV	1MW
Circumference	313.5m
Magnetic Rigidity	3.18 ~ 12.76Tm
Lattice Cell Structure	3-Cell DOFO \times 2module+3-Straight Cell
Typical Tune	Hor. 7.35, Vert. 5.8
Momentum Compaction Factor	0.013
Total Number of Cells	27
The Number of Bending Magnets	24
Magnetic Field	0.27 ~ 1.1T
The Number of Quadrapole	60
Maximum Field Gradient of Q-Mag.	5T/m
RF Frequency	1.36 ~ 1.86MHz
Accelerating Voltage	421kV(Max.)
RF Voltage/Cavity	43kV(Max., Field Gradient of 26kV/m)
The Number of RF Cavities	10
Average Circulating Beam Current	9 ~ 12.4A
Beam Emittance at Injection	144 pi mm mrad
Beam Emittance at Extraction	54 pi mm mrad
Harmonic Number	2
RF Frequency	1.36 ~ 1.86MHz



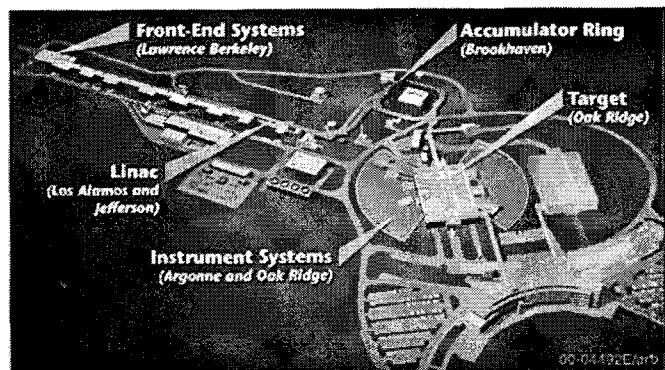
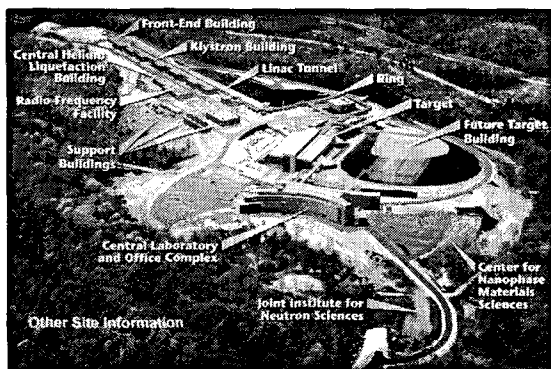
Schematic view of 3GeV Ring

6. SNS (Spallation Neutron Source) Project

(1) 위치 : 미국

(2) 홈페이지 : <http://www.sns.gov>

(3) SNS(Spallation Neutron Source)는 미국 Oak Ridge, Tennessee에 건설되고 있는 accelerator-based neutron source로서 현존하는 중성자원보다 약 10배 이상의 Intensity를 가지는 중성자빔을 제공할 수 있는 facility로서 DOE 산하의 6개 연구기관이 공동으로 개발에 참여하고 있음.



<Artist's conception of the SNS>

(4) 예산 : 14억불

(5) SNS Project의 Partner Lab.

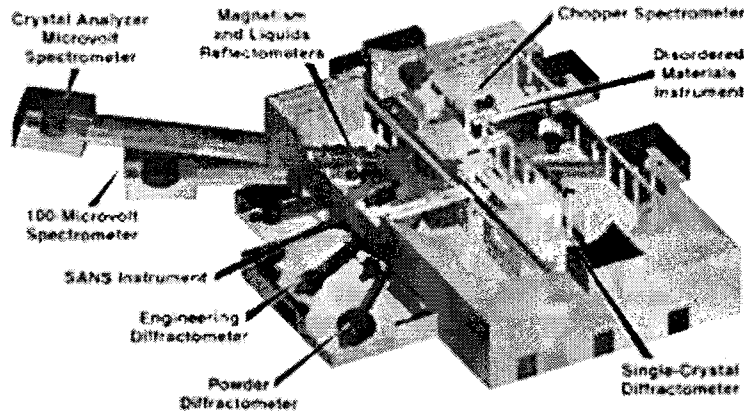
- ANL (Argonne National Laboratory)
- BNL (Brookhaven National Laboratory)
- LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)
- LANL (Los Alamos National Laboratory)
- ORNL (Oak Ridge National Laboratory)
- JLab (Thomas Jefferson National Accelerator Facility)

(6) ANL (Algonne National Laboratory)

[<http://www.anl.gov>]

- 주로 Neutron Scattering Instrumentation의 개발을 담당하고 있음.
- 현재 개발 중인 Instruments system ;
 - Backscattering Spectrometer
 - Extended Q-Range Small Angle Neutron Diffractometer (EQ-SANS).
 - Magnetism (vertical surface) Reflectometer

- Liquids (horizontal surface) Reflectometer
- Powder Diffractometer (POW-GEN3)



<Schematic instrument suite for the SNS>

- Engineering Diffractometer (VULCAN)
- Cold Neutron Chopper Spectrometer (CNCS)
- Fermi Chopper Spectrometer (ARCS)
- Disordered Materials Diffractometer
- High Pressure Diffractometer (SNAP)
- Single Crystal Diffractometer (SCD)

(7) BNL (Brookhaven National Laboratory)

[<http://www.bnl.gov>]

- accumulation ring의 개발을 전담하고 있음.

(8) LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)

[<http://www.lbl.gov>]

- Front-end system의 설계 및 제작을 담당하고 있음. Front-end system은 이온원, beam formation과 control H/W, 저에너지 빔 수송 및 가속 시스템 등을 포함하며, 이온원은 negative 수소이온을 생산하고 약 2.5MeV까지 가속시킨 후 다음 단계의 선형 가속기에 입사됨.

(9) LANL (Los Alamos National Laboratory)

[<http://www.lanl.gov>]

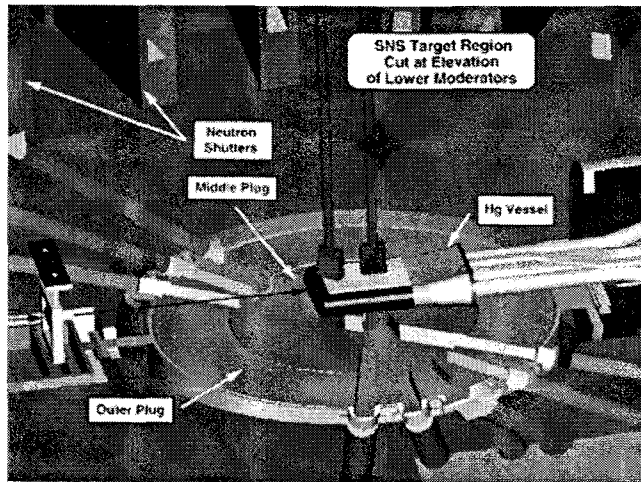
- Linac의 개발을 담당. Linac은 H⁺ 빔을 2.5MeV에서 1GeV까지 가속시키며, 200 MeV까지는 구리로 만들어진 상전도 가속관 DTL (Drift-Tube Linac)과 CCL (Coupled-Cavity Linac)을 이용하여 가속함. 200MeV에서 1GeV까지는 초전도 Niobium Cavity를 이용해 가속시키며, Thomas Jefferson National Accelerator

Facility (JLab)에서 담당함. 이 cavity들은 액체 헬륨을 이용해 2K까지 냉각시켜 사용함. 진단 장치들은 빔 전류, shape, timing 등을 측정해 accumulator ring으로 입사시키기에 적합한 빔인지 판단할 수 있도록 함.

(10) ORNL (Oak Ridge National Laboratory)

[<http://www.ornl.gov>]

- Liquid mercury target의 설계와 제작을 담당. SNS는 표적에 deposit되는 에너지가 큰 것을 감안하여, tantalum이나 tungsten 같은 고체형의 표적대신에 액체 수은을 표적으로 사용하기로 결정하였으며, 전 세계적으로 양성자빔을 위한 표적으로 액체형을 사용한 최초의 장치가 될 것임.
- 수은을 선택한 이유
 - Radiation에 의한 손상이 없음
 - 높은 원자번호를 가지고 있어 중성자원으로 적합함
 - 상온에서 액체상태이기 때문에 고에너지의 pulsed beam의 입사로 인해 생겨나는 급격한 온도 상승과 그에 따른 충격을 잘 흡수할 수 있음



<SNS target region - elevation view of lower moderators>

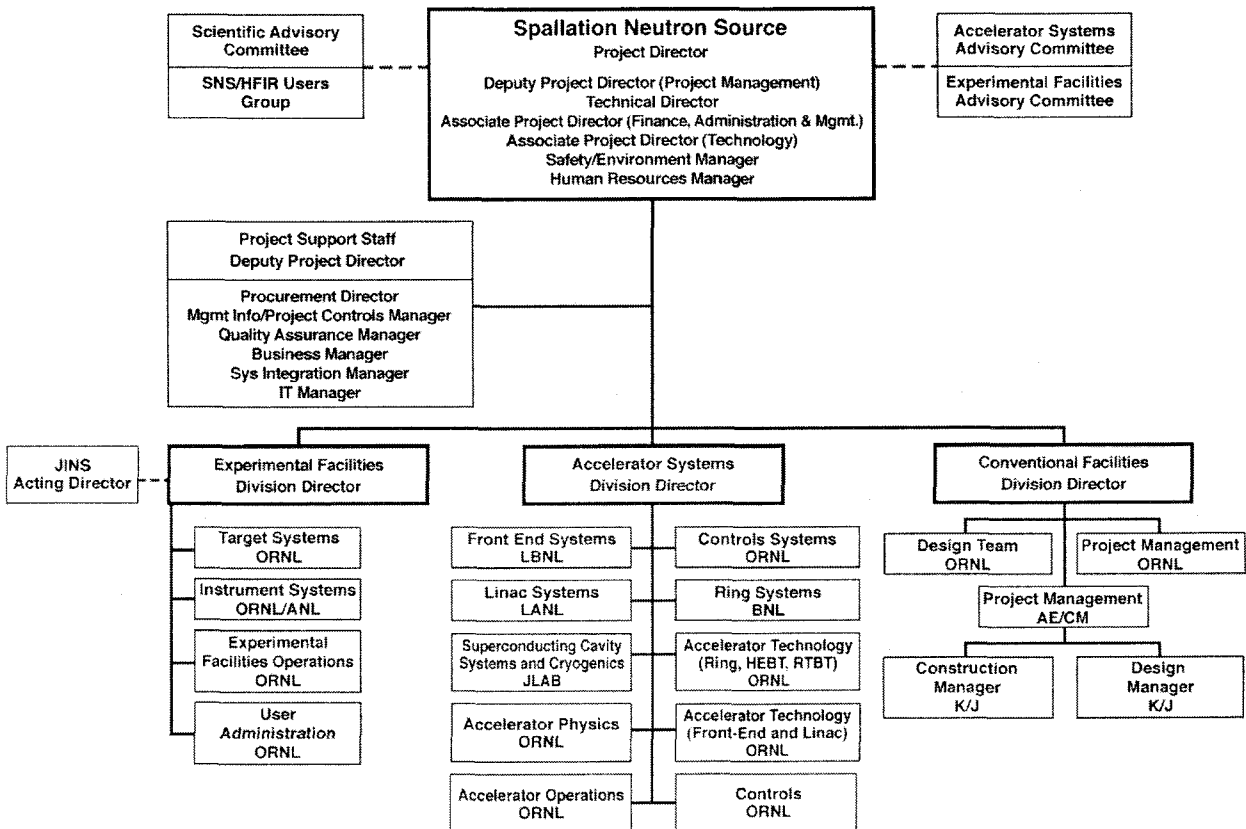
- Tennessee 주는 ORNL과 UT(University of Tennessee)에 JINS(Joint Institute for Neutron Science) 설립을 위해 8백만불을 지원. JINS는 SNS와 ORNL의 HFIR (High Flux Isotope Reactor)의 이용자들을 위한 창구역할과 연구센터로서의 역할을 하게 될 것임.

(11) JLab (Thomas Jefferson National Accelerator Facility)

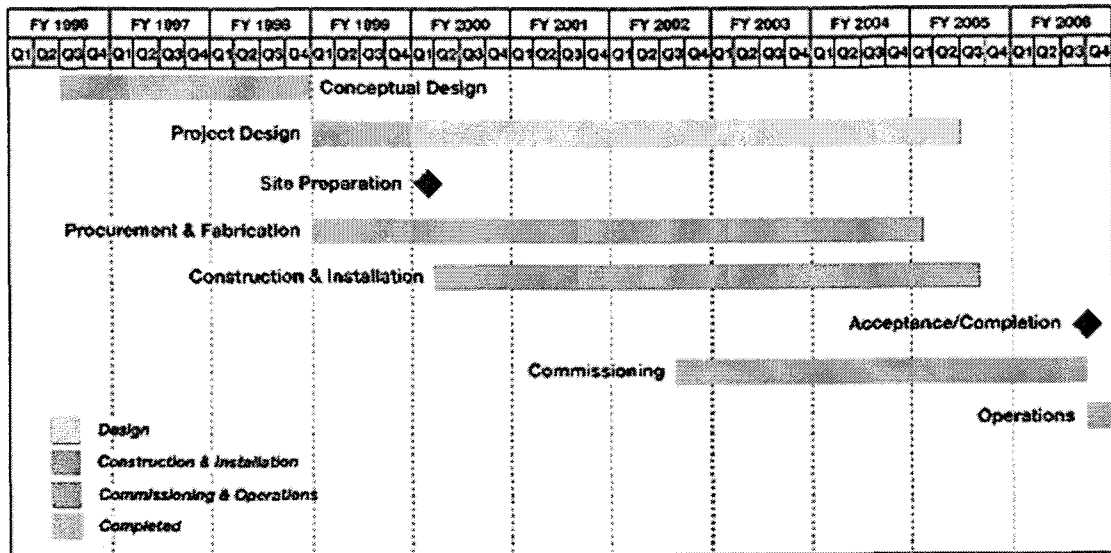
[<http://www.jlab.org>]

- JLab은 SNS의 초전도 Nb(Niobium) 공동(cavity)의 개발을 담당함. Nb 공동은 액체헬륨으로 냉각되어 2K의 온도에서 운전됨. H- 이온을 2.5MeV에서 1000GeV까지 가속시키는 Linac에서 200MeV이상의 에너지로 가속시키는 데 쓰임

(12) 조직



(13) Schedule



(14) Design Parameters

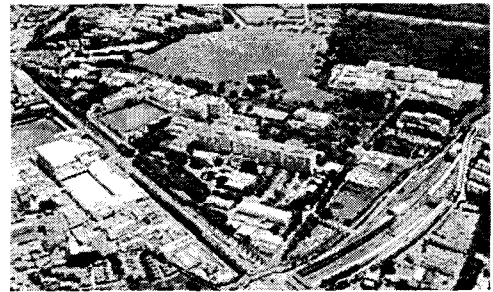
Proton beam power on target	1.4 MW
Proton beam kinetic energy on target	1.0 GeV
Average beam current on target	1.4 mA
Pulse repetition rate	60 Hz
Protons per pulse on target	1.5×10^{14} protons
Charge per pulse on target	24 μ C
Energy per pulse on target	24 kJ
Proton pulse length on target	695 ns
Ion type (Front end, Linac, HEBT)	H minus
Average linac macropulse H- current	26 mA
Linac beam macropulse duty factor	6 %
Front end length	7.5 m
Linac length	331 m
HEBT length	170 m
Ring circumference	248 m
RTBT length	150 m
Ion type (Ring, RTBT, Target)	proton
Ring filling time	1.0 ms
Ring revolution frequency	1.058 MHz
Number of injected turns	1060
Ring filling fraction	68 %
Ring extraction beam gap	250 ns
Maximum uncontrolled beam loss	1 W/m
Target material	Hg
Number of ambient / cold moderators	1/3
Number of neutron beam shutters	18
Initial number of Instruments	5

6. RIKEN (이화학연구소; The Institute of Physical and Chemical Research)

(1) 위치 : 일본

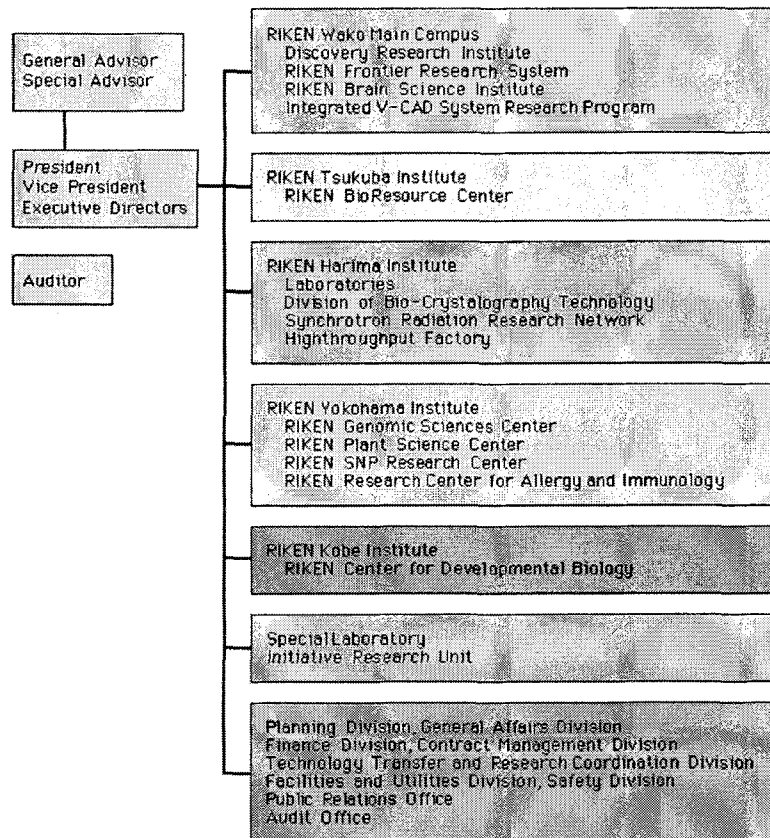
(2) 홈페이지 : <http://www.riken.go.jp>

(3) RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research) 은 1917에 사립 연구재단으로 설립되었으며, 2차 세계대전 후인 1958년에 현재와 같은 공적인 기관으로 재구성되었으며 staff의 수가 약 670명에 이르며, 2002년도 예산은 약 798억엔임.



<RIKEN Wako Main Campus>

(4) 조직



(5) RIKEN의 연구 프로그램

(가) Frontier Research System (FRS)

- Supra-Biomolecular System Research (Wako City)
- Spatio-Temporal Function Materials Research (Wako City)
- Photodynamics Research Center (Sendai City)
- Bio-Mimetic Control Research Center (Nagoya City)
- International Frontier Research Program on Earthquakes (Shimizu City)

(나) Brain Science Institute (BSI)

- Understanding the Brain
 - Neuronal Function Research
 - Neuronal Circuit Mechanisms Research
 - Cognitive Brain Science Research
- Protecting the Brain
 - Developmental Brain Science
 - Molecular Neuropathology
 - Aging and Psychiatric Research
 - Recovery Control Research
- Creating the Brain
 - Brainway Research
 - Brain-style Intelligence Research
 - Brain-Style Information Systems Research
- Advanced Technology Development

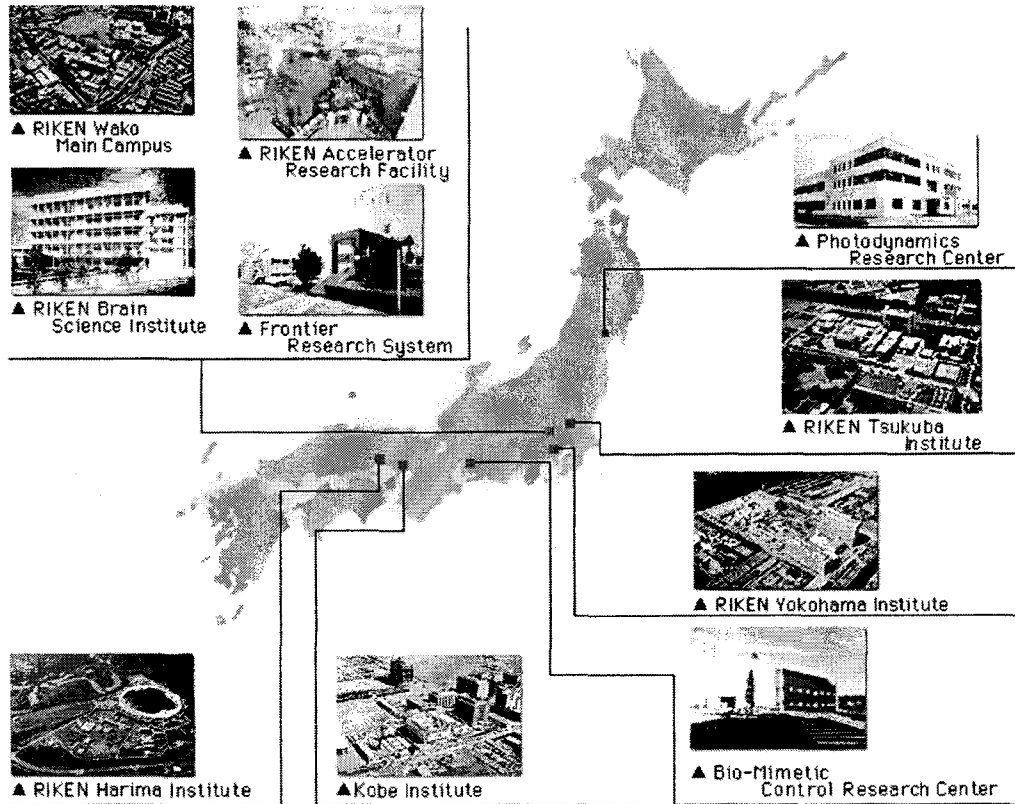
(다) RIKEN Genomic Sciences Center (GSC)

- Genome Exploration Research
- Human Genome Research
- Protein Research
- Mouse Functional Genomics Research
- Plant Functional Genomics Research
- Bioinformatics

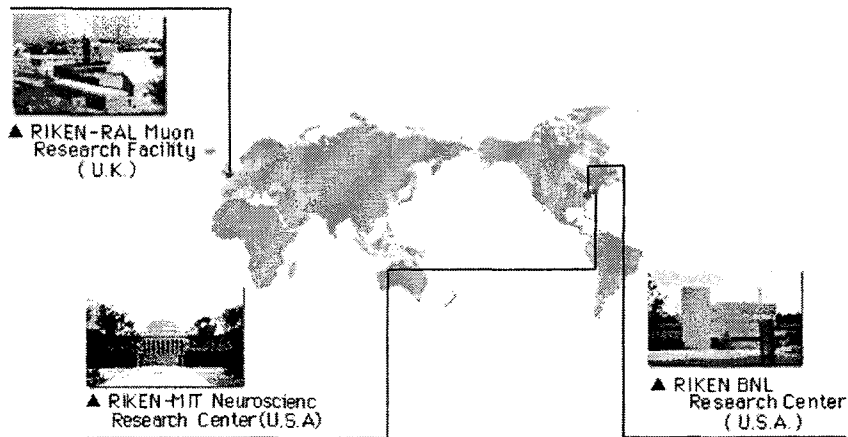
(라) 영국의 RAL에 RAL Muon Research Facility를 세우고 muon을 이용해 basic physics of condensed matter, nuclear fusion 등을 연구함.

(마) 미국의 BNL에 BNL Research Center를 설치, 일본과 미국 사이의 협조를 통해 BNL의 Relativistic Heavy Ion Collider를 이용해 quarks와 gluons의 거동을 연구함. 이를 통해 물질의 근원을 밝혀낼 수 있을 것으로 기대.

(6) RIKEN의 일본 내 연구 site



(7) RIKEN의 해외 연구 site



(8) RIKEN Wako main campus에는 RARF (RIKEN Accelerator Research Facility)를 포함해 41개의 연구실들이 있음. RARF은 K540 ring cyclotron (RRC), 중이온빔 가속기 injector (RILAC), K70 AVF cyclotron을 포함함. 이 가속기들은 양성자에서부터 bismuth까지 넓은 범위의 이온들을 가속시키는 데 이용되고 있음.

- Cosmic Radiation Laboratory
- RI Beam Science Laboratory
- Atomic Physics Laboratory
- Molecular Spectroscopy Laboratory
- Supramolecular Science Laboratory
- Muon Science Laboratory
- Beam Physics and Engineering Laboratory
- Theoretical Physics Laboratory
- Laser Technology Laboratory
- Nanomaterial Processing Laboratory
- Condensed-Matter Theory Laboratory
- Materials Fabrication Laboratory
- Bioengineering Laboratory
- Condensed Molecular Materials Laboratory
- Chemical Dynamics Laboratory
- Synthetic Organic Chemistry Laboratory
- Polymer Chemistry Laboratory
- Antibiotics Laboratory
- Cellular & Molecular Biology Laboratory
- Cellular Physiology Laboratory
- **Plant Functions Laboratory**
- Molecular Entomology and Baculovirology Laboratory
- Synthetic Cellular Chemistry Laboratory
- Animal and Cellular Systems Laboratory
- Molecular Membrane Biology Laboratory
- Molecular Cell Science Laboratory
- Genome Science Laboratory
- Radiation Laboratory
- Applied Nuclear Physics Laboratory
- Heavy Ion Nuclear Physics Laboratory
- Magnetic Materials Laboratory
- Low Temperature Physics Laboratory
- Nanophotonics Laboratory
- Semiconductors Laboratory
- Organometallic Chemistry Laboratory
- Surface Chemistry Laboratory
- Cellular Biochemistry Laboratory
- Cellular Dynamics Laboratory
- Chemical Genetics Laboratory

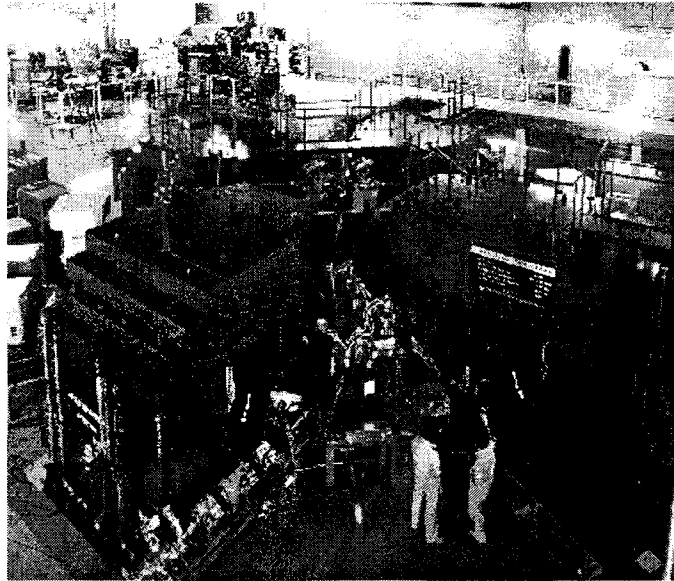
(9) Wako campus 연구센터들

- **Cyclotron Center**
- Characterization Center
- Advanced Computing Center
- Advanced Engineering Center
- Bioscience Technology Center

(10) RARF (RIKEN Accelerator Research Facility)

- RIKEN heavy-ion accelerator facility는 K540 ring cyclotron의 주 가속기와 injector인 heavy-ion linac (RILAC) 및 K70 AVF cyclotron으로 구성되어 있음.

(11) K540 Ring Cyclotron (Main Accelerator)



<K540 Ring Cyclotron>

(가) Ring Cyclotron의 규격

• Injection	
type	45 deg. against the medium plane
• Main Magnet	
K-value	540 MeV
Sector Magnets	4 sector
Sector Angle	50 deg.
Pole Gap	8 cm
Max. Flux Density	1.67 Tesla
Injection Radius	0.89 m on the average
Extraction Radius	3.56 m on the average
Trim Coils	26 pairs per sector magnet
Total Weight	2,100 tons
• Accelerator System	
RF Amp. final tube	RS2042SK tetrode (Siemens)
RF output power	300KW(CW) for each Amp.

Resonator	Lambda/2 type, two sets
Dee angle	23.5 deg
Frequency Range	18-45 MHz
Max. Dee Voltage	275 KV
Harmonic No.	9,10,11 for RILAC injection, 5 for AVF injection
RF final tube	RS2042SK tetrode (Siemens)
RF output power	300KW(CW) for each amp
• Dimensions	
Diameter	12.6 m
Hight	6.0 m

(12) 빔 이용시설

- E1: Search for Superheavy Elements (SHE)
- E2: Large Scattering Chamber ASCHRA
- E3: 2-pi counter array
- E4: Spectrograph SMART
- **E5: Biology and medicine**
- E6: Projectile-Fragment Separator RIPS
- E7: Condensed matter (Large Omega/Slow)
- E1,E3,E5: Nuclear physics and Chemistry (lasers/Falling Ball)
- E2: Atomic Physics Beam Line

(13) E5 Beamline for Biology and Medicine

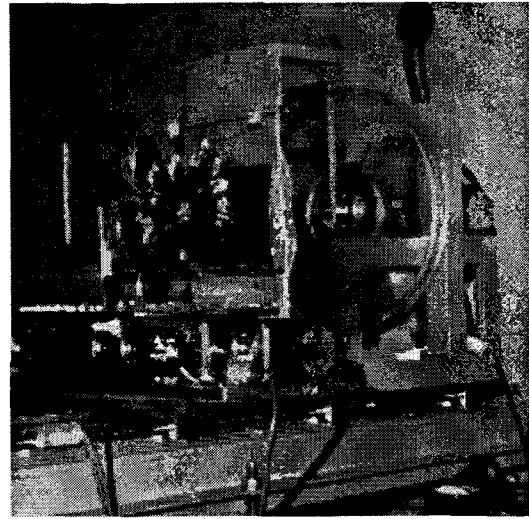
(가) 생체 조사를 위한 빔라인은 균일한 조사가 이루어지도록 하는 장치와 빔을 모니터링 하는 장치인 gold-foil scatterer를 포함하고 있는 wobbler magnet, PPAC, ionization chamber 등으로 구성되어 있음. 조사장치는 이 빔라인의 맨 마지막에 설치되며, $50 \times 50\text{mm}^2$ 면적에서의 빔 균일도는 10% 이하임.

(나) 수행 중인 연구

- Neoplastic cell transformation by heavy ions.
- Effect of heavy ions on fish embryonic development.



<E5 Beamline Facility>



<Irradiation Apparatus>

(14) RRC에서 가능한 빔 종류 및 특성

Particle	Charge	RF F	h	Energy	Intensity
		(MHz)	(MeV/nucleon)	(pnA)	
p	1	34.2	5	150	410
	1	38.7	5	210	340
	1	42.2	5	270	-
H2	1	24.6	5	70	100
	1	26.2	5	80	100
	1	27.6	5	90	1000
	1	29.0	5	100	300
	1	30.1	5	110	800
	1	30.45	5	113	1000
	1	31.2	5	120	1000
	1	32.6	5	135	870
d	1	24.6	5	70	50
	1	29.0	5	100	300
	1	32.0	5	130	10
	1	32.6	5	134	30
pol. d	1	32.6	5	134	280
11B	5	24.6	5	70	200
12C	5	35.0	9	42	40
	6	27.9	5	92	330
	6	29.0	5	100	60
	6	32.6	5	135	500

13C	6	35.0	9	42	10
	6	24.6	5	70	100
	6	29.0	5	100	160
14N	4	25.4	9	21	120
	6	28.0	9	26	30
	6	35.0	10	34	30
	6	32.0	9	35	110
	6	35.0	9	42	30
	7	24.6	5	70	80
	7	26.0	5	80	100
	7	32.6	5	135	230
15N	5	20.2	10	10.7	20
	4	25.4	9	21.2	120
	6	35.0	10	34	8
	6	35.0	9	42	8
	7	24.6	5	70	160
	7	30.5	5	115	30
16O	8	26.2	5	80	250
	8	32.6	5	135	300
18O	7	35.0	9	42	70
	8	24.6	5	70	210
	8	29.0	5	100	380
20Ne	9	33.0	9	37	17
	10	32.6	5	135	70
22Ne	8	28.0	10	21	5
	9	24.6	5	70	100
	10	29.0	5	100	100
	10	30.1	5	110	150
24Mg	11	29.0	5	100	3
	12	29.0	5	100	50
27Al	13	29.0	5	100	5
28Si	14	32.6	5	135	6
36Ar	5	18.7	11	7.5	150
40Ar	5	18.0	11	7	60
	5	18.7	11	7.5	500
	11	18.6	10	9	80
	11	20.0	10	10.3	140
	12	28.0	10	21	17
	13	28.0	9	26	46
	14	30.0	9	30	3
	14	32.5	9	35	50
	14	33.0	9	37	10

	14	34.4	9	40	13
	15	34.4	9	40	6
	16	26.0	5	80	2.5
	17	27.6	5	90	30
	17	28.1	5	95	60
40Ca	14	28.0	9	26	0.7
50Ti	20	26.2	5	80	0.5
58Ni	13	18.0	11	7	2
	8	18.0	11	7	18
	9	19.5	10	10	30
	25	28.1	5	95	2
59Co	24	26.2	5	80	4
64Zn	20	25.0	9	20.6	0.5
65Cu	8	18.0	11	7	3
	18	25.0	10	17	0.5
84Kr	13	20.0	10	10.5	6
	18	20.0	10	10.5	4
	25	32.7	9	36	0.8
129Xe	22	18.7	11	7.5	5
130Te	22	18.7	11	7.5	5
132Xe	21	18.0	11	7	2.4
136Xe	21	18.7	11	7.5	6
	23	18.0	10	8.5	4
	23	18.6	10	9	10
	23	19.5	10	10	3
	31	28.0	9	26	2
166Er	32	22.3	9	16	2
170Er	24	18.0	11	7	1.5
181Ta	37	25.4	9	21.2	0.1

제 2 절 홍보기사 모음

첨단과학 실험 '핵심 열쇠' 확보

장재선 기자/jeijej@munhwa.co.kr

원자력연구소가 1997년부터 시작한 '양성자가속기 프로그램(KOMAC)'이 내년 3월에 1단계 사업을 마친다. 일반인에게 그 용어조차 생소한 양성자가속기는 산업, 의료, 생명과학뿐만 아니라 국방에도 응용될 수 있는 첨단 장치. 21세기 과학기술의 패러다임을 바꿀 수 있는 것으로 평가받고 있다. 미국이 1980년대부터 전략방위계획(SDI)의 일환으로 소형 양성자가속기 프로젝트를 추진한 이래 각국의 개발경쟁이 치열하게 전개되고 있다(표 참조).

정부가 원자력중장기사업으로서 지원한 우리나라의 1단계 프로그램은 원자력연의 핵물리공학팀을 주축으로 25명의 전문가가 참여하고 있다. 대덕연구단지의 원자력연에서 만난 최병호팀장 등 연구원들은 1단계 프로그램이 순조롭게 진행돼왔다고 밝히고 현장 실험실의 성과물들을 공개했다.

이에 따르면, 연구팀은 그간 50keV(킬로 전자볼트=10MeV)의 에너지를 가진 양성자빔을 40mA(밀리 암페어=10mA)까지 인출할 수 있는 입사기 및 3MeV(메가 전자볼트=10MeV)의 '고주파 사중극 가속기(RFQ)'를 완성시켰다.

현재 고주파 발생장치와 6MeV의 '표류튜브 선형가속기(CCTDL)' 개발 작업을 마무리하고 있으며 초전도 선형가속기(SCL)의 기초연구를 진행시키고 있다.

국내의 양성자가속기 프로그램이 외국의 다른 프로그램과 다른 것은 가속기를 순차적으로 만들면서 동시에 응용 기술을 개발한다는 것. 그래서 1단계에서 만들어진 가속장치를 이용해 산업용 이온빔 장치, 전도성 플라스틱을 개발했고 지뢰·마약탐지, 전력반도체 초기기술 등도 연구중이다.

KOMAC를 지휘하고 있는 최병호 팀장은 "우리나라의 양성자가속기 개발 수준은 미국·일본보다는 뒤떨어지지만 프랑스·이탈리아 등 유럽 선진국과는 비슷하다"고 말하고 "우리보다 뒤진 중국이 맹추격하고 있는 양상이어서 눈여겨보고 있다"고 말했다.

프로그램 기획 책임자인 주포국 원자력연 연구원은 "선진국이 더 높은 수준의 양성자가속기를 얻기 위해 국가적으로 사업을 벌이고 있는 것을 주목할 필요가 있다"며 "원자력 개발의 걸림돌이 돼 왔던 원자로의 안전성, 사용한 핵 연료의 처리 등의 문제를 양성자가속기 구동 핵 변환 기술로 해결할 수 있다"고 강조했다.

KOMAC의 1단계 이후 사업은 현재 정부의 21세기 프런티어사업(10년간) 후보로 선정돼 있다. 이 계획에 따르면 2010년까지 250MeV 선형가속기를 만들고 양성자 암치료, 단백질 및 DNA구조 규명, 나노가공, 신종유전자원, 내방사선 반도체소자 기술도 함께 개발한다.

30대 연구자중의 한 사람인 김계령 선임연구원은 "힘들고 까다로운 작업이지만 누군가는 해야

한다는 소명감으로 일하고 있다”며 “국가경쟁력을 좌우할 사업이니 만큼 일반 국민의 관심과 정부의 지속적 지원이 절실하다”고 말했다.

/대전=장재선기자 jeijej@munhwa.co.kr

2001/12/10

<인터뷰>재료 미세구조 분석 선진화 이끌어

장재선 기자/jeijej@munhwa.co.kr

세라믹, 금속, 생체고분자 등 재료의 나노구조를 분석할 수 있는 ‘중성자소각산란(中性子小角散亂)장치·SANS’가 국산화됐다.

원자력연구소 중성자빔이용연구팀(팀장 이창희박사·사진)은 국내 유일의 연구용원자로인 ‘하나로’의 중성자 빔을 이용해 이 장치를 개발한 후 그 성능과 유용성 확인 절차도 마쳤다고 지난 6일 밝혔다. 다음은 이창희 팀장과의 일문일답.

—중성자소각산란장치란.

“재료의 미세구조와 결합, 석출물(析出物)을 중성자를 이용해 측정하고 분석하는 장치다. 중성자 속도선별기, 시료고정장치, 2차원 중성자검출기 등으로 구성돼 있다. ‘하나로’에서 발생하는 중성자를 시료(試料)에 입사시켜 10도미만의 작은 각(角) 영역에서 어지럽게 흩어진 중성자들을 2차원 공간에서 검출해 시료안에 존재하는 미세구조를 측정, 분석한다. 이번에 우리가 개발한 장치가 독일, 미국, 일본 등이 가지고 있는 것과 동등한 성능을 가진 것을 실험을 통해 입증했다.”

—포항방사광가속기 X레이와 어떻게 다른가.

“분석정보가 다르다. 생체고분자를 예로 들자면, X레이는 수소와 중수소가 구분되지 않지만, 중성자빔으로는 가능하다.”

—어디에 활용되는가.

“전자재료, 자기회합 고분자, 나노기공재료, 약물전달물질, 환경친화용 자동차 개발 등 나노·생명공학·환경공학에 폭넓게 이용된다. 국내 관련산업체의 기술력 증진에 크게 기여할 것이다.”

—외부 연구자들이 이용할 수 있는가.

“대학, 연구기관, 산업체 연구자들에 개방한다. 연구용 원자로 ‘하나로’처럼 국내 산학연 연구자들이 활발히 이용하기 바란다.”

중성자빔연구팀은 같은 연구소의 양성자가속기 개발팀과 공동 연구하나.

“현재로는 그렇지 않다. 분야가 다르다. 그러나 10년쯤 후면 원자력 응용을 위한 통합 연구가 진행될 것이다.”

/장재선기자

2001/12/10

양성자 가속기 암치료에 새 빛

신동호 기자

2002년 6월 5일

dongho@donga.com



스위스 플세러국립연구소가 개발한 양성자 암치료장치. 사진제공 플세러국립연구소

맨해튼 프로젝트에 참여해 원자폭탄을 개발했던 많은 과학자들이 2차 세계대전 뒤 입자 가속기 개발에 뛰어 들었다. 그동안 과학자들은 가속한 양성자로 원자핵을 파괴해 쿼크 등 물질의 궁극 입자를 찾아냈다. 양성자는 중성자와 함께 원자핵을 이루는 입자로, 전자보다 1840배 무겁고 + 전기를 띠고 있어 전자석으로 가속할 수 있다.

90년 美대학서 첫 치료

이 가속기가 암 치료에 새 희망을 주고 있다. 양성자 가속기를 암 치료에 쓸 수 있다는 아이디어는 맨해튼 프로젝트에 참여했던 물리학자 로버트 윌슨이 1946년에 내놓았다. 하지만 기술이 어려워 실현되지 못하다가 90년 미국 로마린다대 메디컬센터가 암 환자를 성공적으로 치료하기 시작하면서 급속도로 보급되고 있다.

지난 10여년 동안 양성자 치료 시설을 보유한 곳은 하버드대 매사추세츠종합병원, 일본 국립암센터 등 11개국 19곳으로 늘어났고 27000여명의 암 환자 등을 치료했다. 우리나라도 국립암센터가 이달 중 장비 입찰을 해 2005년 양성자 치료센터를 완공한다. 지하4층, 지상1층의 이 센터는 전체 건설비가 480억원이나 되는 초대형 시설이다.

눈癌 치료 90% 성공률

벨기에 브뤼셀 근교에 위치한 양성자 가속기 제조 전문업체 IBA사를 방문했을 때 이곳 연구진들은 중국이 발주한 2개의 양성자 암치료장치를 제작하느라 눈코 뜰새 없이 바빴다. 이 치료장치의 핵심은 진공의 원형 전자석 속에서 +전기를 띤 양성자들을 가속시켜 양성자 빔을 만들어내는 사이클로트론이다.

이 회사 이반 라테니스트 부회장은 “기존의 방사선 치료 방법은 방사선을 쬐이는 과정에서 암 세

포 뿐 아니라 근처의 정상 세포까지 손상을 줘 방사선을 강하게 하지 못하는 것이 큰 단점이었다”고 말했다. 그는 “양성자는 X선과 달리 몸 속 수십cm 깊은 곳에 도달해서야 파괴 에너지의 대부분을 잃게 되므로 건강한 세포를 손상시키지 않고 암 조직만을 정조준해서 파괴할 수 있다”며 “특히 양성자 빔의 에너지를 조절하면 파괴할 조직의 깊이도 조절할 수 있다”고 말했다.

그는 “양성자 치료는 전통적 방사선 요법으로 치료하는 기존의 암에 모두 적용할 수 있으며, 특히 몸 속 깊은 곳에 있어 기존의 방법으로 치료하기 어려운 눈암, 뇌종양, 전립선암과 어린이의 암을 치료하는 데 적합하다”고 밝혔다.

취리히 근교의 리마트 강변에 위치한 스위스 최대의 국립연구소인 폴세러연구소는 96년 유럽에서 처음으로 양성자 암 치료를 시작한 곳이다. 이 연구소는 그동안 3000여건의 눈암을 90% 이상의 성공률로 치료했고, 몸 속 깊은 곳에 암이 생긴 환자도 99명을 치료했다.

2011년 가속기 건설

이 연구소 에로스 페드로니 박사는 온 몸을 CT로 스캐닝해서 암의 위치를 정확히 파악한 다음 이 자료를 치료장치에 넣어 1mm의 오차로 환자의 암을 치료할 수 있는 양성자 치료장치를 개발했다. 페드로니 박사는 “우리가 개발한 장치는 자석으로 양성자 빔(지름 5~7mm)을 자유자재로 휘게 할 수 있고, 신체를 9천 개 이상으로 나누어 조사선량을 각 부위 별로 조절할 수 있다”고 말했다.

양성자가속기는 수십 나노미터까지 물질의 미세 구조를 파악하는 데도 위력을 발휘하고 있다. 이 때문에 암 치료 뿐 아니라 최근에는 나노테크놀로지, 단백질 구조 규명, 첨단반도체 개발, 재료공학 등 첨단 분야에서 없어서는 안될 중요한 도구가 되고 있다.

우리나라에서도 과학기술부가 2011년까지 1280억원을 들여 길이 100m의 선형 양성자가속기를 건설할 예정이다. 이 사업을 맡은 원자력연구소 최병호 양성자기술개발사업단장은 “미국의 방사선이 용산업은 발전 대 비발전의 비율이 20대80, 일본은 46대54이지만 한국은 90대10으로 의료 등 비발전 분야의 매출 비중이 매우 낮다”며 “양성자 가속기의 건설이 선진형 원자력산업구조로 개편하는 계기가 될 수 있을 것”이라고 강조했다.

방사선 이용기술 'RT' 뜬다..유럽각국 암치료등 고부가가치 창출

게재일: 2002-06-25

한국경제신문(산업/기업)

영국 런던에서 차로 한 시간 남짓 거리에 있는 기초분야 연구기관 러드포드 애플턴연구소(RAL) 산하의 가속기 연구센터 아이시스(ISIS).

이곳에선 매년 전세계에서 모여든 1천5백여명의 과학자들이 중성자와 뮤온 빔으로 물리학 화학 지구과학 재료과학 공학 생물학 등에 대한 6백여가지 실험을 한다.

ISIS는 '작은 과학 실험을 위한 거대한 시설'로 통한다.

축구 운동장보다 큰 거대한 가속기로 눈으로 볼 수 없는 초미세 세계를 연구하고 있는 것.이곳에서 이뤄지는 실험을 살펴보면 세계 과학기술의 방향을 가늠해 볼 수 있다.

우시 슈타이젠베르크 박사는 "예전엔 가속기로 물질구조 규명 등 순수 과학실험을 주로 했지만 최근엔 바이오 및 나노기술에 대한 연구가 늘어나고 있다"고 설명했다.

◆방사선 이용기술(RT)의 핵심은 가속기=가속기는 원자를 이루는 전자나 양성자의 속도를 높이는 것으로 물질의 최소단위를 밝혀 내 우주가 어떻게 태어났는지 규명하는 실마리를 제공한다.

순수 과학탐구는 물론 암 치료,반도체 제작 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

암 치료에 새로운 희망을 주고 있는 양성자 치료장치(Proton Therapy)도 가속기의 일종이다.

가속기는 인간 생명활동의 근본인 단백질 연구에도 활용되고 있다.

◆RT 활용경쟁 가열=스위스에 자리잡은 세계 최고 가속기연구소 PSI는 간에서 해독작용을 하는 단백질인 알데하이드디하이드로지네이즈(ALDH)의 구조를 최초로 분석해 단백질체 연구에 새로운 장을 열었다.

PSI는 양성자 치료기 분야에 대한 연구도 활발하게 추진 중이다.

'갠트리'라고 불리는 양성자 치료기는 일반 방사선 치료보다 효과가 훨씬 우수하다.

PSI의 갠트리 분야 책임자인 에로스 페드로니 박사는 "양성자 치료기로 몸 속 깊숙이 있는 암세포를 1mm 정확도로 파괴할 수 있다"며 "PSI에 설치된 갠트리로 지난해까지 3천4백여명의 환자를 치료했다"고 말했다.

벨기에 브뤼셀 근교에 있는 IBA와 MDS 노르디안은 첨단 과학기술도 충분히 상품화할 수 있다는 것을 보여준 사례로 꼽힌다.

두 회사는 암 진단 및 치료에 필요한 방사선 동위원소를 생산하고 있다.

특히 방사선 동위원소 생산장치,방사선 살균장치,양성자 치료기 등 다양한 가속기를 개발해 판매 중이다.

과학 실험에 주로 사용되던 가속기를 의료용으로 개발,시장을 창출해 낸 것이다.

IBA는 작년 매출이 2억5천8백유로(약 2천8백억원)에 달했다.

전체 매출에서 가속기가 61.1%,방사선 동위원소 생산 27.3%,양성자 치료장치가 11.7%를 차지했다.

IBA 최고연구책임자(CRO)인 이브온건 박사는 "일본과 미국에 2대의 양성자 치료장치를 구축했으며 현재 중국에 보낼 양성자 치료기를 만들고 있다"며 "이 시장은 앞으로 매우 커질 것"이라고 내다봤다.

캐나다에 본사가 있는 MDS 노르디안은 방사선 동위원소 생산을 주력으로 하고 있다.

이 회사의 매니징 디렉터 프랑수아 쿠이야르는 "전세계 의료용 방사선 동위원소 시장 50%을 MDS노르디안이 차지하고 있다"고 말했다.

◆한국도 가속기 관련 기술개발 나서야=한국에서도 최근 양성자 가속기 기술 개발을 위한 프런티어사업단이 꾸러졌다.

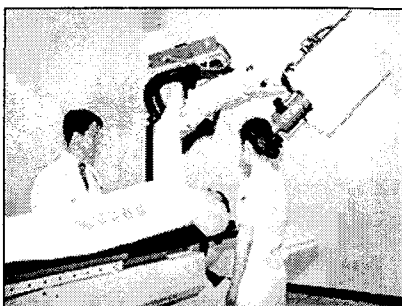
프런티어사업단은 오는 2011년까지 1천2백80억원을 들여 양성자 가속기를 구축할 예정이다.

RT 기술이 한 단계 도약할 수 있는 길이 열린 것이다.

양성자기술개발사업단장인 한국원자력연구소 최병호 박사는 "국내 양성자 가속기 기술이 선진국을 따라가선 곤란하다"며 "선택과 집중을 통해 선진국에서 산업화하지 못한 틈새기술을 연구해야 할 것"이라고 강조했다.

런던(영국)·취리히(스위스)·브뤼셀(벨기에)=김경근 기자 choice@hankyung.com

방사선 이용 '꿈의 암 치료기' 수년내 도입



'꿈의 암 치료기'로 알려진 양성자 암 치료기보다 효과가 수십배 뛰어난 방사선 암치료기가 수년내 국내에 도입될 것으로 보인다.

'카본 빔 하이엘리티 방사선 치료기'라 불리는 이 암 치료장치는 일본 방사선의학총합연구소(NIRS)가 개발해 99년부터 임상에 적용하고 있는 장비로, 국내엔 원자력의학원(구 원자력병원)이 일본 NIRS로부터 도입을 추진중이다.

원자력의학원에 따르면 NIRS가 ‘하이맥’이라 이름 붙인 이 장비는 기존의 양성자 암치료기처럼 양성자가속장치를 이용한다는 점은 같지만 치료효과는 최소 10배에서 최고 50배까지 더 우수하다는 것. 이 장비가 원자력의학원에 도입되면 일산 국립암센터의 양성자 암치료기와 함께 국내 암 치료 역사에 새로운 장이 열리게 될 것으로 보인다.

현재 개발이 완료돼 임상에 적용되고 있는 첨단 방사선 암치료 장비로는 뇌종양 치료에 쓰이는 초정밀 방사선 치료장치인 ‘감마나이프’와 뇌는 물론 전신에까지 확대해 적용할 수 있는 ‘사이버나이프’가 있다. 또 기존 방사선 치료에 비해 암세포 파괴능력이 탁월하면서도 부작용은 미미해 ‘꿈의 암 치료장비’로 각광받고 있는 양성자 암 치료기가 있다.

감마나이프는 국립암센터 등 주요병원에 모두 4대가 도입돼 운용중이며 이보다 한단계 진보된 사이버나이프는 원자력의학원에 1대가 도입돼 지난 6월부터 운용중이다. 일반 방사선 치료기가 수십차례에 걸친 시술로 많은 부작용을 유발하는 것과 달리 감마나이프와 사이버나이프는 암세포 환부에만 정확히 조사(照査)하기 때문에 불과 몇 차례의 시술만으로 소기의 목적을 달성할 수 있는 강점이 있다. 양성자 암 치료기는 현재 일산 국립암센터가 500억원의 예산을 들여 캐나다 MDS노르디온사로부터 장비를 도입키로 결정, 오는 2005년 가동을 목표로 설치공사를 진행중이다.

원자력의학원 방사선종양학과 조철구부장은 “하이맥은 장치가격이 3000억원에 달할 정도로 초고가여서 현재 상품화를 위해 콤팩트화하는 작업이 진행중”이라며 “이 작업에 원자력의학원팀도 참여키로 NIRS와 협의가 돼 있다”고 말했다. 그는 또 “하이맥은 양성자치료기와 사이버나이프를 합쳐놓은 것으로 보면 된다”며 “3~4년뒤 상품화가 완료돼 500억원 정도로 가격이 하락하면 국내에 들여올 수 있을 것”이라고 말했다.

/ lim648@fnnews.com 임정호기자

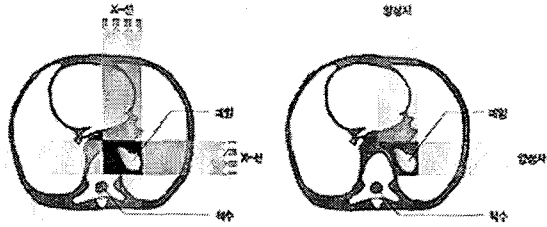
양성자 암치료 ‘각광’

방사선 치료 후유증을 없앨 수 있을 전망이다. 효과가 탁월하면서도 후유증은 미미한 양성자 암치료법이 본격 도입되고 있기 때문. 소형 의료용 양성자가속기를 이용한 양성자 암 치료기술은 이미 도입기를 넘어 구미 선진국을 중심으로 상용화단계에 들어섰다.

국내에서도 양성자 암치료에 시동이 걸렸다. 국립암센터(센터장 조관호)는 약 500억원의 예산을 확보, 2005년 1월 치료개시를 목표로 이 장비 도입을 추진중이다.

방사선 치료를 받은 암환자들은 심한 후유증에 시달리는 것이 보통이다. 방사선(X선)을 쬐이면 암세포 뿐 아니라 방사선에 노출되는 정상세포들도 대량으로 파괴되기 때문. X선은 처음에 선량이 높았다가 몸속으로 들어갈수록 점점 약해지기 때문에 가까이 노출되는 정상세포가 암세포보다 훨씬 큰 타격을 입기 마련이다. 정상세포의 피해를 최대한 줄이기 위해 암세포를 가운데 두고 약한 X선을 사방에서 쬐는 방법을 쓰지만 한계가 있다.

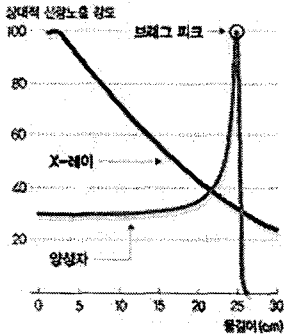
X-선 치료와 양성자 치료의 부작용 비교



X-선 조사에 의한 폐암 치료
암 부위에 한정된 선량을 조사하기 위하여
주변 정상조직에 상당한 선량 흡수

양성자 조사에 의한 폐암 치료
정상부위의 선량까지 거의 없어 암 부위만 손상

에너지전달 특성 비교



그러나 양성자는 정상세포에 별 영향을 주지 않고 그냥 통과한 다음 몸 속에 숨어있는 암세포에 도달해 파괴력을 순간적으로 극대화한 후 그 자리에서 소멸돼 버린다. 이는 양성자 빔이 에너지의 크기에 따라 특정 깊이에서 에너지를 집중발산하고 정지하는 성질(브래그 피크)이 있기 때문이다. 또 양성자는 양전기를 띠기 때문에 자장(전자석 이용)을 이용, 빔을 마음대로 쫓 수 있어 병소에 빔을 집중 투입할 수 있다. 때문에 암세포를 정밀하고 강력하게 파괴하면서도 정상세포의 피해는 최소화할 수 있다.

◇양성자 암치료, 미·일·유럽서 돌풍=양성자를 암 치료에 처음 도입한 곳은 미국 캘리포니아 팜 스프링즈 인근에 위치한 로마린다대학 메디컬센터. 소규모 병원이지만 양성자치료로 세계적인 유명세를 타고 있는 곳이다. 원래 양성자치료 계획은 이 병원의 방사선 종양학자였던 제임스 스테터에 의해 1970년대

대에 수립됐지만 자금부족으로 90년에야 시설을 완성, 치료에 들어갔다. 현재까지 이곳에서 양성자 치료를 받은 암 환자수는 6000여명. 지금은 연간 1300명이 치료를 받을 정도로 폭발적인 인기를 누리고 있다.

1억달러란 막대한 시설투자비와 고가의 치료비에도 불구하고, 로마린다가 짝짤한 수익을 올리자 일본과 유럽이 경쟁적으로 이 사업에 뛰어들었고 현재 양성자 치료시설은 일본 국립암센터, 하버드대 매사추세츠종합병원 등 19곳으로 늘어났다.

유럽지역에서 양성자 암치료가 가장 활발한 곳은 스위스 국립 ‘폴 세러 연구소’ (PSI). 1996년 처음 치료를 시작한 이 연구소는 지난해 말까지 양성자로 3429건의 눈 종양을 치료해 90% 이상의 성공을 거뒀고 99명의 심층부 암환자를 성공적으로 치료했다. 이 연구소는 그동안의 성공적인 치료성과를 바탕으로 지난해 양성자치료 전용 소형양성자가속기와 두 개의 치료시스템, 그리고 연구시스템을 갖추는 대형시설 건설(PROSCAN 프로젝트)에 착수했다. 이 연구소의 양성자 암치료 부문 책임자인 엘로스 페드로리 박사는 “높은 방사선량을 쏘아야 하는 종양엔 양성자 치료가 탁월한 효과를 낸다”며 “새 시설이 완공되는 대로 환자치료를 대폭 늘리는 것은 물론 양성자치료 기술의 약점 보완에도 착수할 계획”이라고 말했다.

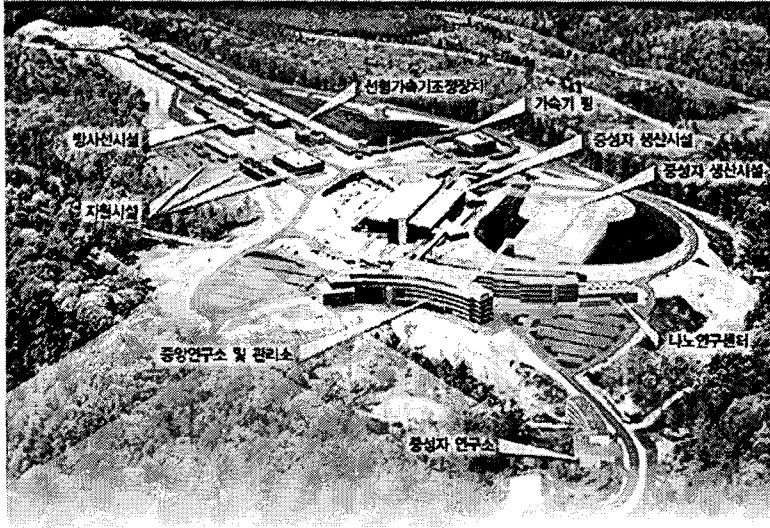
◇치료설비 개발 활발=양성자 치료설비는 양성자를 몸 속에 투과시키기 위한 양성자가속기와 빔을 정밀하게 조절해 환부에 쏘이는 갠트리 설비, 그리고 환자의 환부를 3차원 영상으로 분석해주는 컴퓨터 영상 장비 등으로 구성된다.

현재 암 치료용 양성자가속기 설비의 상업화를 주도하고 있는 곳은 일본과 유럽업체들이다. 벨기에 IBA사와 독일의 엑셀, 일본의 미쯔비시 전기, 쓰미토모 중공업, 히타치 등이 그 주인공들. 이들은 모두 우리나라 국립 암센터의 양성자치료 설비 입찰에 참여해 있기도 하다. 또 스위스 PSI도 장비 상용화를 위해 1억 스위스프랑(약 6000만달러)을 투입하는 새 프로젝트를 추진 중이다.

/ lim648@fnnews.com 임정호기자

극세기술에 양성자 혁명

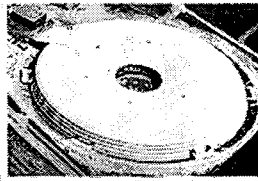
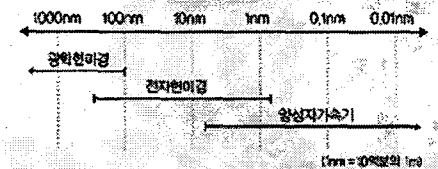
▼ 오르저국립연구소에 건설중인 양성자가속기 SNS 조감도



‘후유증 없는 방사선 암치료, 수소의 위치까지 확인되는 단백질 3차원구조 규명, 지금보다 배 이상 정밀한 나노빔 가공(리소그래피), 복잡한 나노소재 공정의 단순화...’

전자현미경으로도 불가능한 분자·원자수준의 미세기술에 대한 양성자가속기 활용 사례들이다. 이런 사례는 얼마든지 있다. DNA에 감마선을 쬐어 유전자를 변형시키는 기존 방법 대신 양성자를 DNA에 부딪히면 다양한 유전자변종이 쉽게 만들어진다. 전력기기의 핵심부품인 전력반도체의 특정위치에 양성자 빔을 쬐어주면 높은 스위칭 특성을 갖는 고품위 반도체로 바뀐다. 이렇게 만들어진 전력반도체는 전력기기의 소형화, 고효율화에 필수적이어서 그 시장규모를 가늠하기조차 어렵다.

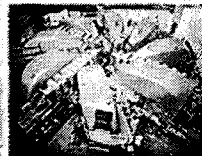
극미시세계의 탐구수단 양성자가속기



스위스 전자연구소의 피어블로르프 가속기 내부 모습

양성자 속도에 따른 양성자와 물질의 반응

속도	반응	여용분야
500km/초	전자·원자 떼어내기	나노가공·빔가공
5000km/초	원자 표면에 투입	표면개질·나노경량
5만km/초	물질의 형체와 반응	방사선동위원소 생산, 방사선의료기기
132만km/초	전자핵 파괴	중성자 생성, 신종 방사선동위원소
26만km/초	핵 마개로 소립자 생성	유연 중 소립자 연구



양성자 가속기 피어블로르프

나노·바이오 등 극미시기술에 양봉·이용 혁명이 일고 있다. 분자·원자와 같은 극미시 세계의 측정과 조작이 첨단기술의 핵으로 갈수록 우주의 형성신비와 물리를 깨는데 쓰이던 양성자가속기가 산업설비로 탈바꿈하고 있는 것이다.

형편이 이렇다보니 양성자가속기 건설과 이용기술 개발을 위한 불꽃 튀는 경쟁이 벌어지고 있다. 거대 자금이 투입되는 초대형 양성자가속기가 앞다투어 건설되고 있고 기존시설을 확대하려는 움직임도 활발하다.

관련기사

· [인터뷰] 우슈 슈타이겐버그 영국 RAL 아이시스지원부문 최고책임자

◇양성자 활용법=양성자는 핵을 구성하는 두 물질 중 하나다. 원자는 핵과 전자로 이루어져 있고 핵은 양성자와 중성자로 구성돼 있다. 양성자는 양(+)전하를 띠기 때문에 이것을 긴 진공관에 넣고 전압을 걸어주면 음극방향으로 빠르게 움직인다. 이 가속장치가 양성자가속기다.

양성자를 초당 500km로 가속해 물질에 부딪히면 물질표면의 원자가 툭툭 떨어져 나온다. 이 원리

는 극미세 나노가공에 이용된다. 양성자를 초당 5000km로 가속해 물질에 부딪히면 양성자가 물체 표면을 뚫고 속 들어간다. 이렇게 하면 소재표면을 다른 물질로 바꿀 수 있다. 이 원리는 반도체의 전도성을 강화하는 이온주입이나 나노크리스탈 제조에 이용된다. 전력용 반도체나 전기를 통하는 전도성 플라스틱도 이 방식으로 만들어진다. 양성자를 초당 14만km로 가속해 부딪히면 양성자가 원자핵과 반응해 2000여종의 방사성 동위원소를 만들어 낸다. 방사성 동위원소는 의료용, 연구용, 산업용으로 광범위하게 쓰인다.

또 초당 26만km(빛 속도의 90%)로 가속해 물질에 부딪히면 물질의 원자핵이 부서져 양성자, 중성자 외에 유온, 파이온 등의 소립자가 다량 만들어진다. 중성자는 다른 방사선이 투과하지 못하는 두꺼운 물질도 잘 투과할 뿐 아니라 자기장의 영향을 받지 않아 빔이 투과과정에서 휘지 않는다. 이때문에 물질의 내부구조를 분자·원자 수준에서 밝혀내거나 단백질 3차원 구조를 규명하는데 쓴다.

◇불붙은 양성자가속기 건설경쟁=미·일·유럽 등 선진국들은 차세대 신물질 개발 및 생명공학연구에 기존 시설의 한계를 느끼고 새 가속기 건설에 열을 올리고 있다. 미국은 1984년에 새 양성자가속장치 건설을 위해 수립된 SNS프로젝트(Spallation Neutron Source Project)에 따라 지난 97년부터 12억9600만달러의 자금을 투입, 대규모 가속기를 건설중이다. 테네시주 오크리지 국립연구소에 건설중인 이 가속기는 오는 2006년 완공 예정이다. 미국은 이 사업의 효과를 극대화하기 위해 대규모 나노연구시설인 나노랩을 이곳에 건설하는 것도 검토중이다.

유럽은 유럽핵물리연구소(CERN)와 영국 러드포드애플톤연구소(RAL) 등 9개국 20개 기관이 참가하는 ESS프로젝트를 수립, 대형 양성자가속기를 건설중이다. 1998년 시작된 이 사업엔 9억3500만 달러가 투입되며 2008년에 완공된다. 또 세계 최강의 핵 파쇄력과 높은 신뢰도를 자랑하는 RAL은 생명공학연구 등을 위해 기존 양성자가속기에 2차 빔타깃장치를 건설중이다. 한편 일본은 지난해 1300억엔을 투입하는 HIPA양성자가속기 건설을 시작했으며 오는 2006년 완공예정이다.

/ lim648@fnnews.com 임정호기자

「건강-국립암센터 심포지엄서 밝혀」 양성자 치료로 ‘암정복’ 새지평

국립암센터가 최근 양성자 치료에 대한 이해를 높이기 위해 개최한 심포지엄에서 양성자로 암세포를 치료하는 방법이 큰 관심을 끌었다. 양성자 치료란 암 치료시 수술 및 화학요법과 함께 사용되는 방사선 치료의 일종이다.

국립암센터 방사선종양학과 박성용 박사는 “양성자 치료란 원하는 깊이에서 많은 방사선을 방출하도록 조절하는 양성자의 성질을 치료에 이용한 것”이라며 “특히 기존 X선을 이용하는 방사선이 종양에 도달하면서 거치는 모든 종양 주위세포에 일정한 강도의 영향을 미치는 것과는 다르다”고 강조했다.

미국 로마린다대 방사선외학과 교수인 르지 요네모토 박사는 “국소종양을 방사선으로 치료할 경

우 치료율이 50~60%에 달한다” 고 말했다. 요네모토 박사는 “더 많은 양의 방사선을 이용하면 치료율은 더 올라갈 수 있으나 기존의 방법으로는 방사선 치료시 주변세포에 미치는 영향을 고려해야 하는 등 많은 제약이 따라왔다” 고 지적했다. 그러나 그는 “양성자 치료를 할 경우 주변조직에 미치는 영향은 최소화하면서 종양에 더 많은 방사선을 이용, 치료율을 높일 수 있게 된다” 고 설명했다.

양성자 치료는 거의 모든 종양치료에 사용될 수 있으나 특히 중추신경계·안구·두경부·폐·간·전립선 등에 생긴 암과 소아암 등에 좋은 효과가 있는 것으로 발표됐다.

이날 연사로 참여한 일본 방사선과학국립연구소(NIRS) 하전입자연구센터 병원장 주지 히로히코 박사도 “양성자 치료를 실시한 결과 현재 방사선 치료에 가장 많이 사용되는 X선을 이용한 방사선 치료에 비해 치료효과가 높은 것으로 나타났다” 고 밝혔다.

국립암센터 화학요법센터 박영석 박사는 “양성자 치료는 1946년 처음 개발된 이후 지난 90년 미국 캘리포니아주 로마린다에서 본격적으로 암환자를 대상으로 치료를 시작, 현재 전세계적으로 20여개 병원에서 시술하고 있다” 고 말했다.

/조남욱기자

<유럽 양성자 가속기>영국 ISIS

원자력분야의 양성자 가속기가 21세기 과학의 총아로 떠오르고 있다. 양성자 가속기는 원자핵의 양성자를 가속시켜 얻는 양성자에너지를 암치료(의료), 핵 쓰레기 처리(환경), 지뢰탐지(국방), 전력용 반도체 생산(산업) 등 과학기술의 모든 분야에 응용할 수 있는 첨단 장치. 한국원자력연구소는 지난 97년부터 양성자가속기프로그램(KOMAC·팀장 최병호)을 가동시켜 더 높은 수준의 양성자에너지를 얻을 수 있는 장치 개발에 전력을 기울여왔다. <본보 12월10일자 23면 참조> 세계 각국의 개발 경쟁이 뜨거운 가운데 영국·스위스·프랑스 등 유럽국가들이 선두국인 미국·일본의 뒤를 바짝 추격하고 있는 것으로 알려지고 있다. 그 현장을 직접 찾아 연구시설을 둘러보고 담당 연구원들과 이야기를 나눠봤다. /런던·바덴·파리=장재선기자 jeijej@munhwa.co.kr

아이시스(ISIS)는 영국 런던에서 80여km 떨어진 옥스퍼드셔에 위치한 랄(RAL·Rutherford Appleton Laboratory)산하의 연구소. 양성자 가속기 및 응용에 관한 연구개발을 하고 있는 이 연구소는 한낮에도 안개가 자욱이 끼어있는 교외의 풍경을 배경으로 갖고 있다. 연구소의 이름은 주변의 강 이름에서 따온 것.

이 연구소의 지원부장인 여성과학자 우시 스타이겐버거의 안내로 양성자 가속기 시설을 둘러보니, 단계별 여러 장치가 한 눈에 들어오게 잘 정돈돼 있다는 느낌을 주었다.

ISIS는 양성자 가속기 응용 분야를 강조하는 연구소답게 방문자에게 연구개발 현황을 설명하기

위해 모형룸을 갖춰놓고, 실험동의 각 시설 앞에도 도판을 설치해 놓았다. 각 분야의 전문가들은 그 도판 앞에서 양성자 가속기 시설의 나노과학, 생명과학, 재료과학(특히 금속피로현상 분석) 응용 전망을 열정적으로 설명했다. 그들은 이 분야가 21세기 과학의 프런티어라는 확신을 갖고 있는 듯했다.

스타이겐버거 박사에 따르면 이 연구소는 양성자빔(에너지=800MeV·메가 전자볼트, 빔파워=160kW, 빔전류=200 μ A·마이크로 암페어)을 이용하는 세계에서 가장 강력한 핵파쇄중성자원 시설을 갖췄다.

그는 이 연구소가 중성자빔라인 21개와 뮤온빔라인 7개를 갖고 있는데, 이 중 뮤온빔라인시설은 일본에서 자금을 대서 만든 것이라고 설명했다. ISIS 연구진은 세계 양성자 가속기 개발 현황을 말할 때 일본의 경우를 자주 언급했다. 그만큼 일본이 이 분야에서 앞서가고 있다는 방증일 것이다.

실험동을 둘러보다 한 사무실의 문에 ‘理研(이연)’이란 한자가 크게 써어있어 무슨 뜻인지를 물으니, 중국에서 온 시설이용자의 연구실이라는 대답. 이 분야에서 우리보다 다소 뒤진 것으로 평가받고 있는 중국도 선진국과의 연구교류의 폭을 넓히기 위해 노력하고 있다는 걸 확인할 수 있었다.

실험동을 나오다가 뜻밖에 한국에서 온 젊은 연구자를 만났다. 성균관대 물리학과 박제근(36)교수. 그는 ISIS와 ‘양자물질 자성(磁性)연구’를 공동진행하고 있어 1년에 2~3번 이 연구소를 방문한다고 했다. 그는 이번 취재 여정에 동행한 한국 원자력연구소의 KOMAC 기획책임자인 주포국 연구원과 단국대 응용물리학과 노승정·현준원 교수와 반갑게 인사를 나누고, ISIS의 양성자가속기 개발·응용 현황에 대한 의견을 교환했다. 이들이 내린 결론은 “ISIS가 가속기 기술 자체로는 우리보다 나을 것이 없지만, 그 응용만큼은 우리가 배울 게 많다”는 것.

<유럽 양성자 가속기>스위스 PSI

PSI는 스위스 바덴 교외에 위치한 국립과학연구센터. 연구원이 1150명, 정부의 올해 예산 지원은 1700여억원, 외부 기금은 218억여원에 달한다. 외부의 시설 이용자는 700~800명, 그 중에 50%가 외국인이다. 연구소 이름은 지난 50~60년대 스위스의 원자력연구를 이끌던 폴 세러 박사를 기리는 의미로 붙인 것.

총괄 관리부장인 마틴 저먼 박사 등 연구진의 안내에 따라 양성자 가속기 시설을 둘러보니 규모는 영국의 ISIS보다 작은 듯했다. 그러나 사이클로트론(모기향처럼 연속되는 원형을 가진 가속기)을 통한 양성자빔이 연속파의 형태를 갖고 그 출력이 매우 크다는 것이 연구진의 설명.

실험동을 함께 돌아본 단국대 현준원 교수는 “가속기 시설·기술은 우리와 비슷한데 상품·실용화에 신경을 쓰고 있는 점이 주목할 만하다”고 말했다.

그의 말대로 PSI 고체물리 이론연구그룹에서는 자화(磁化) 시뮬레이션을 통해 나노입자의 자기 특성을 심도있게 연구하고 있으며, 유럽의 ‘우주환경 프로젝트’에 참여해 인공위성 환경에 대한 실험을 주도적으로 하고 있다.

PSI는 무엇보다 양성자 치료(Proton Therapy)분야에서 큰 진전을 이뤘다. 이 연구소의 에로스 페드로니 박사는 양성자를 통한 병진단 시설과 암 치료를 위한 갠트리(Gantry·환자 지지대)를 소개하며, 인체의 다른 세포를 건드리지 않고 암종만 제거하는 양성자 치료의 장점에 대해 강조했다.

PSI는 양성자 암치료기 1대를 개발하는 데 112억원을 투입했다. 당연히 환자 이용비도 높을 수밖에 없다. 저먼 박사는 암치료기 1대를 더 만들고 있는데, 경제성을 갖추기 위한 노력을 함께 기울이고 있다고 귀띔했다.

이 연구소는 양성자 가속기 시설을 중심으로 연구현황에 관한 전시관을 갖춰 학생들의 견학을 돕고 있다. ‘우주환경’ ‘태양열 전지’ ‘양성자 암치료기’ 등 아이들이 흥미로워할 모형시설들로 가득찬 이 전시관은 과학을 홀대하는 먼 나라에서 온 기자에게 조용히 말하고 있는 듯했다. “과학이야말로 삶을 풍요롭게 하는 친근한 벗” 이라고.

<유럽 양성자 가속기>프랑스 SACLAY

프랑스 파리 근교에 자리한 사클라이(SACLAY)연구소. 1년 예산 2조원을 쓰는 프랑스원자력위원회(CEA)에서 가장 큰 연구소로 건물 400여동에 6000명이 근무하고 있다. ‘원자과학’이란 뜻의 이름을 가진 SACLAY는 양성자 가속기 연구를 주도하고 있다.

방문 취재를 사전에 통보했는데도 입구에서 여권을 검사할 정도로 방문객을 엄격히 통제하고 있었다. 그러나 일단 신분 확인되자 대외협력부 직원들이 나와 가속기 프로젝트가 진행되고 있는 연구동으로 친절하게 안내했다.

가속기 연구 책임자인 에티엔 클랭 박사 등 SACLAY의 연구진은 한국원자력연구소의 주포국 연구원으로부터 코맥크(KOMAC)의 현황을 설명받고 큰 관심을 표시했다. 한국과 프랑스의 가속기 프로그램이 모두 지속적인 연구를 위해 정부에 기금 지원을 해 놓고 있는 상태라는 것을 알게 되자 크게 웃기도 했다.

이곳의 연구원들은 지난 45년에 창설된 CEA를 소개하며 프랑스가 원자력 에너지 분야에서 초강국이라는 점을 강조하고 싶어했다. 하지만 프랑스는 양성자 가속기 분야에선 미국 일본보다 늦다. 클랭 박사를 따라 가속기 제작 현장을 둘러보니 이 사실을 새삼 확인할 수 있었다.

빔전류가 상대적으로 크긴 했지만 이온원(源)시설은 우리도 갖추고 있는 것. 고주파 사중극 가속기(RFQ)는 우리가 이미 테스트를 끝낸 시설인데 알루미늄으로 만든 시뮬레이션을 가동하고 있었

다. 연구원들이 자랑스럽게 강조한 표류선형가속기(DTL) 제작은 우리나라도 진행하고 있는 것이다.

클랭 박사는 SACLAY가 양성자 가속기와 더불어 전자 가속기 프로그램도 진행할 계획이라고 밝혔다. 응용분야가 다르지만 시너지 효과를 가져올 수 있다는 것.

주연구원은 “프랑스가 양성자 가속기 연구에 박차를 가하고 있다는 것을 알게 됐다”며 “KOMAC는 가장 효율적인 시설을 만들어야 하기 때문에 가속기 제작부터 해외과학자들과 공동 연구해야 한다”고 말했다. 노승정 교수는 “영국·스위스·프랑스의 영국 스위스 프랑스의 가속기 연구는 유럽이라는 틀 속에서 긴밀하게 협조하고 있다”며 “우리도 연구에 박차를 가해 장기적으로 에너지와 환경분야에까지 응용할 수 있는 단계까지 가야 할 것”이라고 강조했다.

앤드루 테일러 ISIS소장

“과학은 아름다운 것입니다.” 앤드루 테일러(사진) ISIS소장은 양성자 가속기 연구가 지난 60년 대 물리학부문부터 시작해 화학, 기계 재료, 구조지질학, 생명과학까지 그 응용 영역을 넓힌 것을 나타낸 도표를 보여주며 스스로 감탄했다. 부채살 모양의 그림은 과연 아름다웠다.

—ISIS의 운영 현황은.

“현재 200여명의 스태프가 일하고 있고, 연간 예산은 3100만파운드(약 570억원). 이 중 2300만파운드(약 420억원)는 가속기 운영비로, 나머지는 시설개발비로 쓰고 있다. 연구소에서 1년에 논문이 400편 정도 나온다. 돈 들어가는 것에 비하면 엄청난 생산량 아닌가.”

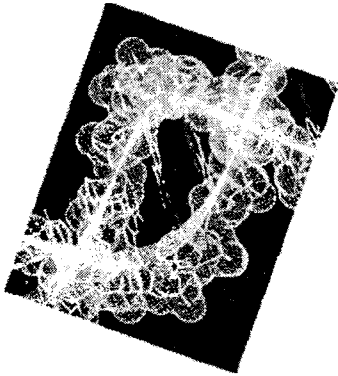
—ISIS의 양성자 가속기 수준을 자체 평가하면.

“현재 빔파워를 300 μ A(마이크로 암페어)로 올릴 수 있는 2차 타겟(중성자빔을 생산할 수 있도록 양성자빔이 충돌하는 표적으로 탄탈륨·텅스텐과 같은 무거운 금속으로 만든다)을 설치 중이다. 우리의 핵파쇄 중성자원은 오는 2010년까지 세계 최고수준을 유지할 수 있을 것이다.”

—실험동 앞에 영국뿐만 아니라 다른 나라의 국기가 걸려 있던데.

“ISIS의 연구개발 협력국가(미국 일본 프랑스 스위스 호주 인도 독일 이탈리아 스웨덴)의 국기를 걸어놨다. 그들로부터 가속기 운영비의 20%, 시설개선비의 50%를 지원받고 있다. 외부의 시설 이용자가 1년에 1500명에 달하는데, 그 중의 25%가 해외 연구자들이다. 우리 연구소의 국제적 공헌도가 높다고 말할 수 있지 않겠느냐. 이 분야의 한국전문가들과도 활발히 교류할 수 있기를 희망한다.” 테일러 소장은 한국의 양성자 가속기 프로그램 진행 상황에 대해 주의깊게 들은 뒤 “ISIS는 모든 연구자에게 개방되어 있으니 서로 활발한 교류를 통해 협력하자”고 말했다.

지놈 입체구조의 비밀 '양성자 가속기'가 푼다



양성자 가속기로 밝힌 DNA의 입체구조. 이중 나선의 중앙에 사다리처럼 가로지르는 것들은 유전자의 기본 단위인 염기쌍이다. 황색과 적색을 연결하는 선은 수소 결합 부위. 양성자 가속기가 아니면 수소결합 부위를 정확히 알 수 없다.

▶ 지놈 입체구조의 비밀
'양성자 가속기'가 푼다

DNA와 인슐린 등 단백질의 구조를 밝히는 것이 포스트 지놈 시대를 여는 열쇠 중 하나다. 신약 개발이나 유전자 치료, 장기 복제 등이 훨씬 쉽고 정교해지기 때문이다.

그러나 인슐린의 분자 구조를 알려면 초당 cm^3 에 1경(京)개의 중성자를 쏘아 줘야 한다.

그래야 인슐린 분자를 구성하는 수백만개 수소 원자의 위치를 밝혀낼 수 있다.

지금까지 사용했던 X선으로는 분자 속의 탄소,질소 원자의 위치밖에 알아 낼 수가 없었다.

또 양성자로 핵폐기물의 원자핵을 쪼개면 그 수명을 아주 짧게 할 수 있다. 이같은 일을 가능케 하는 것이 양성자 가속기다.

이에 따라 미,일,유럽 등 주요 국가들은 21세기 기술 패권을 차지하기 위해 대규모 양성자 가속기 건설을 서두르고 있다. 양성자 가속기 없이는 생명공학,나노테크,우주공학,환경공학 등의 첨단기술을 개발하는 데 한계가 있기 때문이다.

미국은 11억달러(약 1조4천억원)를 들여 2005년 완공 목표로 1기가 전자볼트(GeV)급 양성자 가속장치인 '핵 파쇄 중성자원(SNS)'을 건설 중이다.

유럽연합(EU) 역시 약 9억3천만달러(약1조2천억원)를 들여 2008년 완공 목표로 1.3기가 전자볼트급을,일본은 2006년 완공목표로 18억달러(약 2조3천억원)를 들여 3기가 전자볼트급을 건설 중이다. 중국,인도도 경쟁 대열에 뛰어 들었다. 우리나라는 국책 프로젝트로 검토하는 단계다.

한국원자력연구소의 최병호 박사는 "선진국의 양성자 가속기 건설 붐은 1990년대의 중성자 공학 시대를 거쳐 양성자 공학 시대가 도래하고 있음을 예고한다"고 말했다.

양성자는 물질의 기본 단위인 원자핵을 쪼개면 중성자와 함께 나오는 입자·양성자는 원자의 10만분의 1정도의 크기로 아주 작지만 이를 초속 수백km~빛의 속도(초속 30만km)로 가속하기에 따라 그 용도가 무궁무진하다.

초고속 양성자로 물질을 때리면 원자의 구조 자체가 변하고 이는 물질의 성질까지도 변하게 한다. 이를 이용하면 핵폐기물에서 방사능이 나오는 기간을 획기적으로 줄일 수 있다. 보통 핵연료 폐기물의 경우 그냥 놔두면 수 만년 동안 방사능이 나오는데 양성자 가속기로 가공하면 30년 만에 일반 쓰레기와 똑같이 취급할 수 있다. 핵폐기물의 처리 부담을 후손에 물려주지 않아도 된다.

원자 날개를 조작하는 나노테크에도 양성자 가속기는 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다. 양성자나 중성자가 원자보다 아주 작기 때문에 원자의 위치와 운동 상태를 알아내는 탐침으로 사용할 수 있다. 원자용 고성능 탐침 개발은 과학계의 큰 과제 중 하나다.

양성자 가속기에서 소량의 양성자 빔을 꺼내 암 덩어리를 죽이는 데도 활용할 수 있다.

미국의 한 병원은 양성자로 약 5천명의 암환자를 치료했다. 첨단 암진단 장치인 양전자 단층촬영장치(PET)용 고성능 방사성 동위원소도 생산할 수 있다.

이런 점이 기존 방사광 가속기와 다르다. 방사광가속기는 전자를 가속해 빛을 만들어 물질의 구조를 파악하거나 초정밀 가공 등에 사용한다.

미국이나 독일 등은 방사광 가속기와 양성자 가속기의 장점을 동시에 활용하기 위해 두 종류를 함께 설치하는 추세다.

21세기의 첨단 기술이 꽃 피는데 양성자 가속기의 역할은 절대적일 것으로 보인다.

박방주 기자 <bpark@joongang.co.kr>