

초고전압 투과전자현미경 설치 · 운영 사업

Installation of an Ultra-High Voltage Transmission
Electron Microscope

한국기초과학지원연구원

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “초고전압 투과전자현미경 설치·운영 사업”과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2003. 12.

주관연구기관명 : 한국기초과학지원연구원

주관연구책임자 : 김 윤 중

연 구 원 : 이 석 훈 이 영 부
 정 종 만 김 영 민
 고 영 철 송 지 호
 김 진 규 박 종 일
 박 병 규 김 경 현
 정 완 우 김 상 균
 신 정 화 이 수 정
 장 영 식 김 경 애
 윤 수 병 이 정 민
 김 종 윤 최 상 환
 조 일 현 이 경 재
 도 철 진 홍 권 희
 최 인 식 권 경 훈
 김 미 옥

최종보고서 초록

과제관리번호	98-FA-01-01 -A-01	총연구기간	1998. 12. 15 ~ 2003. 10. 14		
연구사업명	중사업명	연구기반 구축사업			
	세부사업명	초고전압 투과전자현미경 설치·운영 사업			
연구책임자	김 윤 중	총참여 연구원수	총 : 28명 내부 : 16명 외부 : 12명	연구비	정부 : 14,000백만원 기업 : 만원 계 : 14,000백만원
연구기관명 및 소속부서명	한국기초과학 지원연구원	나노환경 연구부	참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위 탁 연 구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	269쪽
<p>○ 본 사업에서 목적하였던 기초과학 및 응용과학 분야에서 국가적인 공동 연구장비로 활용할 수 있는 최첨단 초고전압 투과전자현미경(가속전압 1.3 MV)을 한국기초과학지원연구원 대덕본원에 성공적으로 설치함.</p> <p>○ 세계 최초로 원자분해능(0.12nm)과 고경사각($\pm 60^\circ$)을 동시 실행할 수 있는 장비로 무기 및 유기 신물질의 삼차원적 구조를 원자 수준으로 분석이 가능함. 차세대 반도체 개발 및 뇌세포 연구에 핵심 장비로 활용되리라 전망함.</p> <p>○ 최첨단 에너지여과장치를 본체에 부착하여 생물시료의 효과적인 관찰뿐만 아니라 시료의 화학성분, 화학분포 및 전자구조를 정밀 분석할 수 있어 차세대 소재로 주목되고 있는 경원소 소재나 생체 소재의 분석에 유용함.</p> <p>○ 역동적 연구에 필요한 다양한 시료지지대를 구비하여 변온 실험(액체헬륨 온도 ~ 1500°C)과 변형 실험을 역동적으로 수행할 수 있음. 저온 시료지지대는 단백질 구조분석, 초전도체 연구 등에 필수적이며 고온 및 변형 시료지지대는 고온 소재 연구 및 역동적인 상변이 연구 등 신물질 및 신공정 개발에 활발히 이용할 수 있음.</p> <p>○ 원격제어로 기기 운용이 가능함. PC-base로 운용되며 직접운용도 가능하기 때문에 사용자에게 접근이 용이하고 친근한 운용환경을 제공하여 장비의 활용도를 극대화시키고 필요시 기기의 성능을 손쉽게 개선시킬 수 있음.</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	초고전압 투과전자현미경, 가속전압, 삼차원적 구조, 원자분해능, 에너지 여과장치, 역동적 실험, 국가적 공동이용시설			
	영 어	Ultra-High Voltage TEM, Acceleration Voltage, 3-D Structure, Atomic Resolution, Energy Filtering, In Situ Study, National User's Facility			

요 약 문

I. 제 목

초고전압 투과전자현미경 설치·운영 사업

II. 연구개발의 목적 및 필요성

원자단위의 구조까지 직접 관찰할 수 있는 가속전압 1 MV 이상의 최첨단 초고전압 투과전자현미경을 한국기초과학지원연구원(기초연, KBSI) 대덕본원에 설치하여 기초과학 및 응용과학 분야에서 국가적인 공동연구 장비로 활용하고 국제 수준의 전자현미경 공동연구센터의 주장비로 육성하고자 하였다. 국제적인 무한 기술경쟁이 본격화하는 21세기에 국내의 연구생산성 및 연구경쟁력을 획기적으로 제고시키기 위해서는 차세대 나노반도체를 포함한 신물질의 원자단위 구조분석, 뇌세포를 포함한 생체의 삼차원적 구조분석, 소재의 역동적 구조 및 물성 변화 연구, 전자빔 및 이온빔을 이용한 극한 소재의 개발 등 핵심 NT/BT 분야에서 과학기술 발전에 기여할 수 있는 초정밀 분석 장비 및 기술을 본 사업을 통해 국내의 과학기술자에게 조기에 제공하는 것이 필요하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

(1) 제 1 차년도에는 기기의 개념설계와 기종 및 사양의 선정을 수행하였다. 즉, 초고전압 투과전자현미경의 고분해능, 고투과력, 고에너지 기능을 극대화할 수 있는 본체의 개념설계와, 기초과학과 응용과학의 다양한 분야의 활용에 필요한 부수 기기의 개념설계 및 사양을 작성하였고, 소정의 절차에 따라 장비제조사 선정 완료하였다. 또한, 기기의 최대 성능을 발휘할 수 있는 특수실험실 및 보조시설의 개념설계도 수행하였다.

(2) 제 2 차년도에는 기기의 세부설계를 수행하였다. 본체는 일본 JEOL 본사가, 주요 부대 장비인 에너지 여과장치(HV-GIF)는 미국 Gatan사가, 원격제어장치는 JEOL U.S.A.사가 주관이 되어 기초연과 협력하여 설계를 수행하였다. 장비의 가장 중요한 특성인 3-D 분석기능을 강화하기 위해 기초연에서는 초정밀시료대 보조장치의 개발을 담당하였다.

(3) 제 3 차년도와 4 차년도에는 본체 및 부수 기기의 제작 및 공장조립을 수행하였

다. 기초연에서는 초정밀시료대 보조장치의 제작과 특수시료지지대의 성능을 유지하는데 필수적인 Dry Pumping System의 개발 및 제작을 진행하였다. 한편, 정부에서 별도의 예산을 배정받아 장비를 설치할 특수실험실(전자현미경동)의 건립을 본격적으로 추진하였다.

(4) 제 5 차년도에는 기기의 현지(기초연) 설치 및 성능시험을 수행하였다. 공장 조립이 완료된 장비는 성능시험을 마친 후 분해, 포장되어 부산항을 통해 기초연에 운송되었다. 장비의 재조립은 새로 건립된 전자현미경동에서 이루어졌다. 장비가 조립되는 동안 성능 유지 및 향상에 필요한 안정장치와 보조시설의 설치를 지속하였으며 재조립이 완료된 장비의 성능시험 및 운용요원 훈련도 수행하였다.

IV. 연구개발결과

본 사업에서 목적하였던 기초과학 및 응용과학 분야에서 국가적인 공동 연구장비로 활용할 수 있는 최첨단 초고전압 투과전자현미경(가속전압 1.3 MV)을 한국기초과학지원연구원 대덕본원에 성공적으로 설치하였다. 설치된 장비는 최근 일본, 독일 및 미국에 설치된 동급 장비에 비교하여 아래와 같은 다섯 가지 특징을 가지고 있다.

(1) 원자분해능(0.12nm)과 고경사각($\pm 60^\circ$)의 동시 실행:

세계적으로도 처음 갖는 기능으로 무기 및 유기 신물질의 삼차원적 구조를 원자 수준으로 분석하는 것이 가능하다. 장비의 성능시험 중 세계 최초로 Si wafer의 원자분해능 사진을 [110]-[100]-[111] 방향에서 얻을 수 있었다. 분해능 면만을 보면 현재 일본의 동북대와 동경대, 그리고 독일의 MPI(Max-Planck-Institute, Stuttgart)에 설치된 동급 장비의 0.10nm에 미치지 못하나 이들 장비는 $\pm 40^\circ$ 이상의 경사가 불가능하기 때문에 삼차원적 구조분석이 크게 제한된다. 이러한 새로운 기능은 21세기 국가 전략사업이 될 나노미터 단위의 다층 복합구조 반도체의 평가 및 개발은 물론, 최근 프론티어 사업 등을 통해 국내에서도 본격화하고 있는 뇌세포 및 뇌질환과 관련된 연구개발에도 획기적인 기여를 하리라고 기대한다.

(2) 최첨단 에너지 여과장치 부착:

에너지 여과장치는 명암대비가 약한 시료, 특히 생물시료의 관찰에 효과적이다. 또한, 시료의 화학성분, 화학분포 및 전자구조를 정밀 분석할 수 있어 차세대 소재로 주목되고 있는 경원소 소재나 생체 소재의 분석에 유용하다. 본체에 부착된 에너지 여과장치(HV-GIF)는 새롭게 개발된 기종으로 독일의 MPI와 일본의 국립재료연구소에 부착된 동

일 기종에 비해서 모든 기능이 향상되었으며 특히 plasmon-loss 영역에서도($\Delta V \sim 20\text{eV}$) 원자분해능 관찰이 가능함을 확인하였다. 이런 경우 정량적인 작업을 수행한다면 신물질의 분석에서 서로 다른 원자의 종류까지도 직접 구별할 수 있는 새로운 길을 열 수 있기 때문에 장비의 시험가동 기간에 이 분야를 집중적으로 점검할 예정이다.

(3) 역동적 연구에 필요한 다양한 시료지지대의 구비:

넓은 범위(액체헬륨 온도 $\sim 1500^\circ\text{C}$)의 변온 실험과 변형 실험을 역동적으로 할 수 있는 시료지지대를 준비하였다. 저온 시료지지대는 단백질 구조분석, 초전도물질 연구 등에 필수적이며 고온 및 변형 시료지지대는 고온 소재 연구 및 역동적인 상변이 연구 등 신물질 및 신공정 개발에 활발히 이용할 수 있다. 특기할 사항은 고온 시료지지대의 성능시험 중 1100°C 에서도 원자분해능 이미지를 얻을 수 있었다. 고온 가열실험 시에 시편의 유동을 막기 위해 새롭게 제작된 water recirculator를 사용하였다.

(4) 원격제어로 기기 운용:

세계에서 세 번째이며 JEOL 장비로서는 처음 시도되는 원격운용 방식이다. 일본 Hitachi 사에서 오오사카 대학과 Hitachi 중앙연구소에 각각 설치한 동급 장비는 Workstation-base로 운용되며 원격운용만이 가능함에 비해 본 장비는 PC-base로 운용되며 직접운용도 가능하다. 세계적으로도 선진화된 국내의 IT 기술과 접목하면 사용자에게 접근이 용이하고 친근한 운용환경을 제공하여 초고전압 투과전자현미경의 활용도를 극대화할 수 있고 급속히 발달하는 컴퓨터 산업에 발맞추어 필요시 기기의 성능을 손쉽게 개선시킬 수 있는 장점이 있다.

(5) 이온빔 가속기 장착 가능:

장래에 꼭 필요하다고 생각되는 이온빔 가속기의 부착을 위하여 장비의 본체에 접속 부위를 제작하였으며 전자현미경동에 이온빔 가속기를 설치할 수 있는 공간 및 부대시설을 확보하였다. 이온빔 가속기의 부착은 일본의 국립재료연구소와 후카이도 대학, 그리고 미국의 국립아르곤연구소의 장비를 대표적으로 들 수 있는데 전통적인 원자로와 핵융합로의 재료연구에 활용하는 외에도 최근 신소재 개발에도 활용이 증가하고 있다. 국내의 원자력연구소는 이온빔 가속기를 자체 제작할 수 있는 기술력을 가지고 있기 때문에 우리나라의 현실에 필요한 사양의 이온빔 가속기를 적기에 국내 제작하고 부착하여 장비의 활용성을 더욱 넓힐 예정이다.

V. 연구개발결과의 활용계획

(1) 국가적인 전략산업인 차세대 반도체 개발, 나노구조 신소재 개발에 필수적인 삼차원적 원자분해능 및 에너지 여과분석 기능을 제공하여 NT 분야의 독자적인 기술 개발을 촉진한다. 또한, 국가적 공동연구장비인 초고전압투과전자현미경(전자 회절분석), 포항방사광가속기(X-선 회절분석) 및 하나로 시설(중성자 회절분석)을 연계하여 국가 전략물질 개발에 필요한 정밀구조분석 프로그램을 공동 수행한다.

(2) 생명과학의 핵심 연구 분야인 뇌 구조 연구, 단백질 구조 연구, 신약 개발 등에 필요한 삼차원적 이미징 기능과 구조분석 기능을 제공함으로써 BT 분야의 선진적인 연구 및 개발을 유도한다. 또한, 국가적 공동연구장비인 초고전압투과전자현미경(원자~분자 수준 이미징 가능, 급속냉각한 세포)과 포항방사광가속기(sub- μm 수준 이미징 가능, 살아있는 세포), 차세대자기공명장치(μm 수준 이미징 가능, 살아있는 세포)를 연계하여 국가적인 BT 발전에 필요한 생체 이미징 및 정밀구조분석 프로그램을 공동 수행한다.

(3) 장비의 초고전압 에너지를 이용한 전자빔과 다양한 시료지지대, 그리고 추후 부착 예정인 이온빔을 종합 활용하여 국가 전략적인 극한 소재와 신 기능성 물질의 개발을 추진한다. 또한, 관련 연구기관과 함께 항공우주 소재(항공우주연구원), 원자로 물질(원자력연구소), 핵융합로 물질(기초과학지원연구원) 등 방사능 조사를 효과적으로 차단해야 하는 극한 소재의 연구개발 프로그램을 공동 수행한다.

(4) 본·분소 간에 초고속통신망과 원격제어 기능을 이용하여 전국 어디에서나 장비의 접근 및 사용을 용이하게 하고, 국가간의 초고속통신망을 이용하여 해외에서도 장비를 직접 운용을 할 수 있도록 함으로써 국내 및 국제적인 공동연구의 활성화와 함께 21세기 국가적인 공동연구 장비 운영의 새로운 모델을 제시한다.

S U M M A R Y

I. Title

Installation of an Ultra-High Voltage Transmission Electron Microscope

II. Object and Importance of R&D

The main object of this national project is to install an advanced ultra-high voltage transmission electron microscope (UHV-TEM), acceleration voltages higher than 1 MV, at the Daeduk headquarter of the Korea Basic Science Institute (KBSI). The instrument will be used not only as a national user's facility in the fields of basic and applied sciences, but also as a key facility of a world-class electron microscopy center in future. Early in the 21th century of increasing international competition in technology ever, this new instrument is expected to provide national researchers with advanced analytical capability in core NT/BT fields such as atomic-level analysis of next-generation nano-scale semiconductors, 3-D structural analysis of large cells like neuron, in situ study of new materials and their properties, and development of extreme materials utilizing its high-energy electron beam and ion beam (attached in the future) as well. This advanced analytical capability hopefully contributes to drastic enhancement of national research products and compatibility.

III. Content and Scope of R&D

(1) Conceptional design of the instrument, decision of the specification, and confirmation of the manufacturer had been carried out during the first year of the project. The conceptional design of the main body was focused on how to utilize its high resolution, high penetration power and high energy of UHV-TEM, while its specification mainly involved in selecting optional functions and accessories which are useful for diverse research fields. Confirmation of the manufacturer followed the formal institutional process. Conceptional design of the EM building and auxiliary

facilities which guarantee the best performance of the instrument was also carried out.

(2) Detailed design of the instrument had been carried out during the second year of the project. In cooperation with KBSI, JEOL headquarter (Japan) charged in design of the main body, Gatan (U.S.A.) charged in design of the main accessory, imaging energy-filter (HV-GIF), and JEOL U.S.A. charged in design of the remote control system. KBSI developed a precise tilt/rotation controller in order to reinforce the 3-D function of the instrument.

(3) Manufacturing and factory installation of the instrument had been carried out during the third and fourth years of the project. KBSI continued to up-grade the precise tilt/rotation controller and develop a dry pumping system which is necessary to use the special specimen holders properly. On the other hand, construction of the EM building was carried out during these years using a different budget from the Korean government.

(4) KBSI installation and performance test of the instrument had been carried out during the fifth year of the project. After final assembly and performance test in the JEOL factory, the instrument was disassembled, packed and transported to KBSI through the Busan port. Re-assembling of the instrument was carried out inside of the new EM building. Various auxiliary facilities were constructed during the re-assembling time. Final performance test of the instrument as well as operator training was carried out.

IV. Results of R&D

The main purpose of the project to install an advanced UHV-TEM, acceleration voltage of 1.3 MV, at the Daeduk headquarter of the Korea Basic Science Institute (KBSI) has been achieved. Compared to the UHV-TEMs recently installed in Japan, Germany and U.S.A., KBSI instrument has five characteristics listed below:

(1) Atomic resolution (0.12 nm) together with high tilting ($\pm 60^\circ$) capability:

This is a new function capable of 3-D structural analysis of inorganic and organic materials in atomic level. During the performance test of the instrument, it was

possible to obtain atomic images of Si in [110]-[100]-[111] orientations from the same area. In terms of resolution only, UHV-TEMs installed at the Tohoku and Tokyo Universities in Japan, and MPI (Max-Planck-Institute, Stuttgart) in Germany, for example, have better resolution of 0.10 nm, but their tilting capability of about $\pm 40^\circ$ is not suitable to do 3-D structural analysis. It is expected that this unique function facilitates advanced national R&D for the 21st century, such as evaluation of nano-scale semiconductors in complex system and brain-related researches, which are currently key subjects among the Frontier R&D Projects in Korea.

(2) Attachment of an advanced imaging energy-filter (HV-GIF):

The energy-filter is effective on imaging of low contrast specimens, especially biological ones. In addition, because of its capability in chemical analysis, chemical mapping and electronic structure analysis of the specimen, it is useful to study new materials consist of light elements or bio-materials. The HV-GIF attached to the main body is a newly developed system whose functions are superior to those of MPI in Germany and NIMS (National Institute in Materials Science) in Japan. It was possible to do atomic imaging of Si using even the plasmon-loss peak. In this case, a new way of distinguishing atomic species through direct imaging may be open if quantitative work is accompanied. This important function will be intensively examined during the test-run period of the instrument.

(3) Various specimen holders for in situ study:

Specimen holders for wide range of in situ cooling and heating studies (liquid helium temperatures $\sim 1500^\circ\text{C}$) as well as in situ straining studies have been prepared. The low temperature holders are necessary to study protein structures and superconducting materials among others, while the high temperature and straining holders are useful to develop new materials and processes through examining material properties and phase changes at high temperature. During the performance test, it was possible to obtain atomic imaging even at 1100°C . A new water recirculation system was used to prevent specimen drifting during the heating experiment.

(4) Remote operation:

It is the third UHV-TEM in the world, but the first JEOL UHV-TEM which is

remotely controllable. While two Hitachi UHV-TEMs installed at the Osaka University and the Hitachi Central Laboratory adapted Workstation-base operation and their direct operation is impossible, the KBSI one adapted PC-base operation and both remote and direct operation is possible. If the advanced IT system of the nation is well incorporated with the instrument, this remote function has advantage of providing large user groups with easy approach, user-friendly operation and easier up-grade of the system in parallel with rapid advance in computer technology.

(5) IBA (Ion Beam Accelerator) is attachable to the column:

In order to attach the IBA in the future, its connection parts to the main body as well as the installation space and supporting facilities in the EM building have been prepared. The IBA attachment is useful not only to traditional fields such as to develop extreme materials for nuclear and fusion researches at NIMS and Hokkaido University in Japan, and ANL (Argon National Laboratory) in U.S.A., but also to new fields to develop new functional materials. Since the KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) has technology to manufacture IBA, it is planned to expand application fields of the KBSI UHV-TEM through choosing proper specification of IBA for national researchers and proper attachment time in the future.

V. Application Plan of R&D Results

(1) The 3-D atomic resolution and energy-filtering function of the instrument facilitate technical breakthrough in core NT fields in nation such as development of next-generation semiconductors and new materials in nm scale. In cooperation with other national user's facilities, such as PLS (Pohang Light Source; x-ray diffraction) and Hanaro (neutron diffraction), the KBSI UHV-TEM (electron diffraction and imaging) carries out advanced structure analysis programs for strategic NT materials in nation.

(2) The 3-D imaging and structure analysis functions of the instrument facilitate advanced R&D in core BT fields such as brain researches, protein researches and new medicine researches. In cooperation with other national user's facilities, such as Next-generation NMR (μm -level imaging, live cells) and PLS (sub μm -level imaging,

live cells), the KBSI UHV-TEM (atomic~molecular level imaging, rapidly frozen cells) carries out advanced 3-D imaging and structure analysis programs for strategic BT materials in nation.

(3) The high-energy electron beam and various specimen holders of the instrument together with the IBA attached in the future, facilitate development of extreme materials and new functional materials. In cooperation with other national research institutions, such as KARI (Korean Aerospace Research Institute; aero-space materials), KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute; atomic-furnace materials (KAERI) and KBSI (materials related to nuclear fusion researches), the KBSI UHV-TEM carries out advanced R&D programs for developing extreme materials protecting radiation damage.

(4) The remote operation function of the KBSI UHV-TEM introduces a new model for operation of national user's facilities in the 21th century, such as easy approach and usage of the instrument via national and international ultra-high speed network systems, which will enhance national and international cooperations and research activities.

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	16
Section 1	Background of R&D	16
Section 2	Object and Importance of R&D	22
Section 3	Content and Scope of R&D	24
Chapter 2	Status of R&D in the World	26
Section 1	National Status	26
Section 2	International Status	28
Chapter 3	Results of R&D	32
Section 1	Content of R&D	32
Section 2	Results of R&D	38
Chapter 4	Achievement of R&D Goals and Contribution	67
Section 1	Achievement of R&D Goals	67
Section 2	Contribution to Relevant Fields	70
Chapter 5	Application Plan of R&D Results	73
Section 1	Overview of Application Plan	73
Section 2	Operation Plan of the Instrument	76
Chapter 6	Information Abroad Collected During R&D	80
Chapter 7	References	81

Appendix 1.	Data for Domestic Installation of TEM -----	82
Appendix 2.	Data for Designs of Instruments -----	93
Appendix 3.	Data for Factory Installation & Test -----	114
Appendix 4.	Data for KBSI Installation & Test -----	145
Appendix 5.	Data for Auxiliary Instruments -----	169
Appendix 6.	Data for EM Building & Auxiliary Facilities -----	180
Appendix 7.	International Papers Relevant to UHV-TEM -----	201
Appendix 8.	Presentation Data Relevant to R&D -----	257
Appendix 9.	Application Plan of R&D Results -----	265

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	16
제 1 절	연구개발의 배경 및 추진 경위	16
제 2 절	연구개발의 목적 및 필요성	22
제 3 절	연구개발의 내용 및 범위	24
제 2 장	국내외 기술개발 현황	26
제 1 절	국내 기술개발 현황	26
제 2 절	국외 기술개발 현황	28
제 3 장	연구개발 수행내용 및 결과	32
제 1 절	연구개발 수행내용	32
제 2 절	연구개발 결과	38
제 4 장	연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도	67
제 1 절	연구개발 목표 달성도	67
제 2 절	관련분야에의 기여도	70
제 5 장	연구개발결과의 활용계획	73
제 1 절	활용계획 개요	73
제 2 절	장비 운영계획	76
제 6 장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	80
제 7 장	참고문헌	81

첨부 1.	국내 투과전자현미경 설치현황 자료 -----	82
첨부 2.	장비 설계 관련 자료 -----	93
첨부 3.	장비 공장 제작·조립·설치 및 성능시험 자료 -----	114
첨부 4.	장비 현지 조립·설치 및 성능시험 자료 -----	145
첨부 5.	보조장치 개발 및 제작 자료 -----	169
첨부 6.	전자현미경동 건설 및 보조시설 설치 자료 -----	180
첨부 7.	초고전압 투과전자현미경 관련 해외 학술정보 자료 -----	201
첨부 8.	사업관련 학회 및 학술지 발표자료 -----	257
첨부 9.	연구개발 활용계획서 -----	265

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 배경 및 추진 경위

1. 연구개발의 배경

선진국의 기술보호 장벽이 어느 때보다도 높은 시점에서 21세기의 국가 과학기술의 경쟁력의 확보를 위해서는 우리나라도 지금까지의 기술모방을 탈피하고 창의력을 발휘하여 한 차원 높은 기술 발전을 추구해 나아가야 한다. 이를 위해서는 연구역량을 집중하고 발전시켜 나가는데 필요한 공동연구 기반시설과 관련 장비의 확충이 필요 불가결하다. 국내에서는 과학기술부가 산·학·연간 협동연구 및 인접 연구분야간 학제적 연구를 활성화시키기 위해 ‘연구기반구축사업’을 추진하여 선진국 수준의 국가적인 공동연구시설을 구축해 나아가고 있다. 포항 방사광가속기의 설치 및 운영이 그의 대표적인 예로써 운영 초기의 우려를 떨리하고 현재는 20여기의 빔라인을 가동함으로써 새로운 연구 결과들을 생산해 내고 있다.

초고전압 투과전자현미경(UHV-TEM)은 전자의 가속전압이 1 MV(1,000,000 Volt) 이상인 투과전자현미경으로 고분해능, 고투과력 및 고에너지의 전자빔을 이용하여 기존 물질과 신물질을 원자단위 구조까지 직접 관찰하면서 연구할 수 있는 대형 장비로 기초과학 및 응용과학의 다양한 분야에서 산·학·연 공동 활용이 가능하다. 사업이 시작하는 시점인 1998년까지 외국에는 이미 30대 이상의 UHV-TEM이 설치되어 활용되고 있으나 국내에는 1대도 설치되어 있지 않은 상태였다. 그러나, 미국, 일본을 비롯한 선진 각국에서 21세기의 전략산업으로 중점적으로 육성하고자 하는 나노 신소재의 개발은 소재를 원자 수준(0.1 ~ 0.2nm)에서 제어해야 하기 때문에 원자단위의 구조를 직접 관찰할 수 있는 고성능의 투과전자현미경의 설치가 우리나라에서도 절실히 요구되었다.

한편, 초고전압 투과전자현미경의 설치는 고정밀도의 초고전압 발생 장치 및 가속 장치, 전자광학 장치, 진공 장치의 개발과 고정밀도의 전자기장 차폐 및 방진 기술을 이용한 특수실험실의 건립 등으로 이루어진 최첨단 복합장치 기술을 필요로 하기 때문에 장비의 도입 및 설치 과정을 통하여 이러한 기술들을 습득하여 국내의 고부가 장치산업기술을 한 단계 향상시키는데 기여할 수 있으리라 기대되었다. 또한, 과학기술이 국력을 좌

우하는 시점에서 초미시의 세계를 직접 관찰할 수 있는 초고전압 투과전자현미경의 설치
는 국민의 과학기술에 대한 관심과 이해를 크게 증진시킬 수 있으며, 초미시의 세계에서
보여주는 다양하고 아름다운 구조들은 예술적인 가치뿐만 아니라 산업 디자인에도 활용
할 수 있다는 사회, 문화적인 측면도 부각되었다.

2. 연구개발의 추진 경위

기초과학지원센터(현재 한국기초과학지원연구원)의 창립 이래, 연구소가 장비해야 할
국가적인 공동이용 설비의 하나로 초고전압 투과전자현미경을 선정하고 연구소의 장기
발전계획(1992년) 및 전문화 발전계획(1994년)에서 전자현미경 분야의 체계적인 발전 방
안을 제시하였다. 1994년 투과전자현미경의 전문적인 자료조사를 통하여 국내의 투과전
자현미경의 현황과 국외의 초고전압 투과전자현미경의 현황을 구체적으로 파악하고, 국가
적으로 필요한 전자현미경 기술분야와 필요한 장비 내용을 제시하였다. 전자현미경의 센
터화의 필요성을 제시하고 센터의 가장 중심이 되는 장비로 1990년 이후에 개발된 에너
지여과 투과전자현미경(EF-TEM)과 초고전압 투과전자현미경(UHV-TEM)을 제안하였다
(김윤중과 이석훈, 1995).

학계의 전자현미경 전문가로 구성된 기기전문위원회(재료, 생물, 지구과학, 농학 분야)
를 통하여 제안된 계획의 타당성을 점검하고 제 1 단계로 에너지여과 투과전자현미경의
도입을 확정하여 1996년 동양권 최초로 에너지여과 투과전자현미경을 독일의 Carl Zeiss
사에서 도입하여 설치하였다. 기기 성능의 유지를 위해 국내에서 제작된 방진대를 이용하
여 기기를 설치하였다. 일반적인 분석지원 외에도 국내의 전자현미경의 취약 분야인 특수
화학분석법(EELS와 ESI) 및 변온 시료지지대를 이용한 역동적인 구조분석법 개발을 수
행하였다.

1997년 과학기술부의 공동연구시설 선진화사업의 일환으로 초고전압 투과전자현미경
의 도입을 추진하였다. 1994년 조사된 국외의 초고전압 투과전자현미경 현황을 최근의 자
료까지 입수하여 정리하고 기술적인 변화 상황을 파악하였다. 기기와 관련된 국내외의 최
근 기술 현황을 파악하고 기존의 전자현미경 기기전문위원회와 재료, 의학 및 생물 분야
의 국내외의 기기관련 학·연·산 전문가로부터 초고전압 투과전자현미경 설치운영·사
업 계획을 점검받고 기술적인 사항을 자문 받았다. 그림 1.1에 사업 추진체계도를, 표 1.1
과 1.2에 사업 실무위원 및 자문위원의 명단을 각각 수록한다.

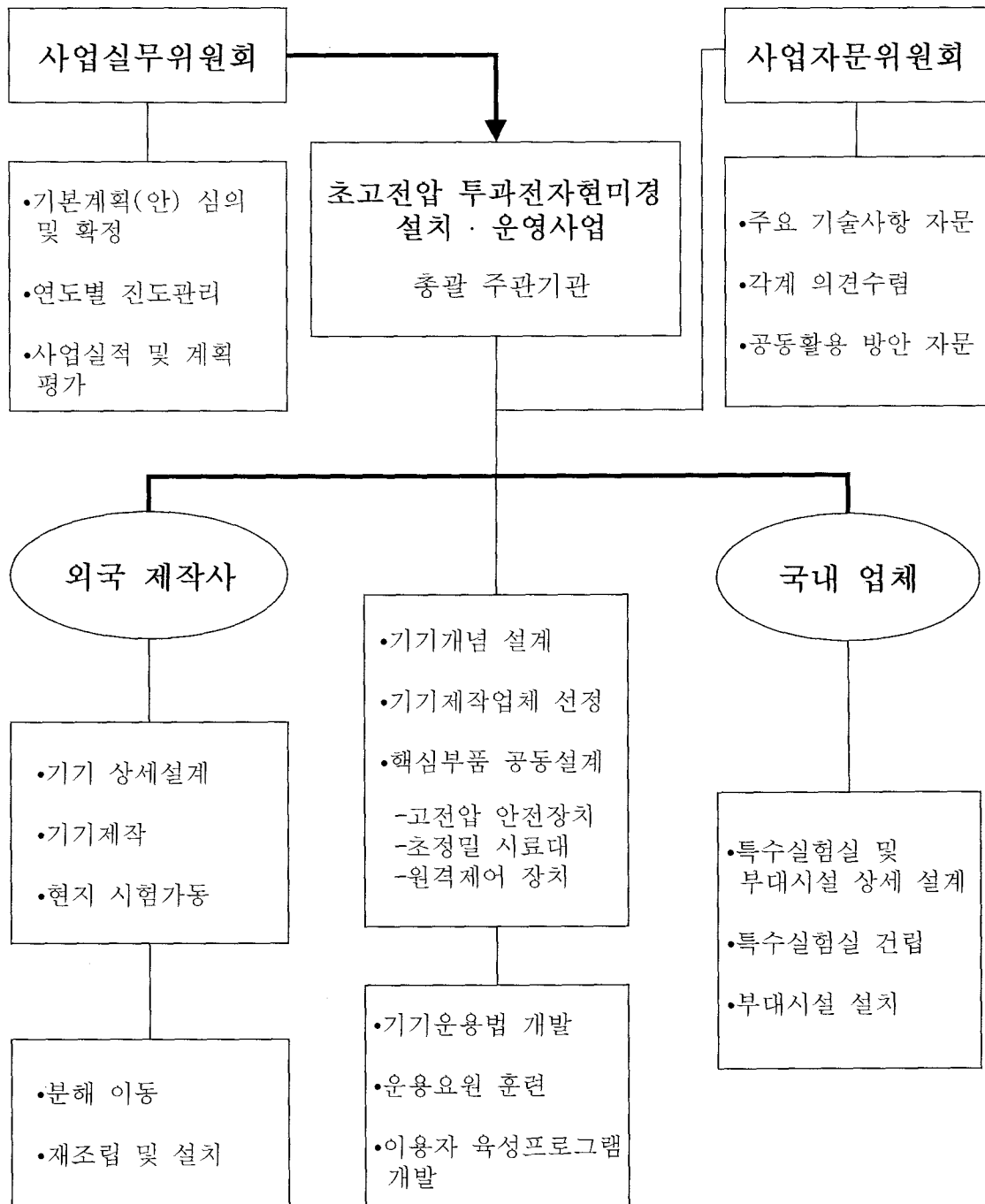


그림 1.1. 사업 추진체계도.

표 1.1. 사업 실무위원 명단.

성명	소속	연락처 (전화/FAX)	참고사항
	과학기술부 기초과학인력국장	(02)503-7616 (02)503-2226	위원장 (당연직)
황덕호	서울대 의대	(02)740-8214 (02)745-9528	해부학
김은수	건국대 생물학과	(02)450-3430 (02)3436-5432	식물학
김용수	한양대 원자력공학과	(02)2290-0467 (02)2281-5131	원자로 재료
박중근	KAIST 재료공학과	(042)869-3323 (042)869-3310	재료공학
	기초과학(연) 원장	(042)865-3400 (042)865-3405	당연직
천창환	국방과학(연)	(042)821-2460 (042)821-2229	금속재료
김학민	KISTEP	(02)589-2206 (02)589-2250	재료공학
송세안	삼성종합기술원	(031)280-9388 (031)280-9157	폴리머재료/반도체재료
이정수	LG전자기술원	(02)526-4560 (02)526-4153	전자재료
	과학기술부 기초과학지원과장	(02)504-2361 (02)503-2226	간사

표 1.2. 사업 자문위원 명단.

성명	소속	연락처 (전화/FAX)	참고사항
윤권상	강원대학교 미생물학과	(033)250-8541 (033)241-4627	위원장 곰팡이류
이후철	서울대학교 금속공학과	(02)880-7094 (02)885-9671	금속재료
이정후	전북대학교 지구환경과학과	(063)270-3394 (063)270-3399	광물학
한성식	고려대학교 농생물학과	(02)3290-3424 (02)928-8647	농생물학
조남희	인하대학교 무기재료공학과	(032)860-7527 (032)874-3382	무기재료
정강원	경상대학교 생화학과	(055)751-5962 (055)752-7062	단백질구조
이확주	표준(연) 신소재특성분석센터	(042)868-5321 (042)868-5027	금속재료
양준모	하이닉스 반도체 메모리연구소 분석개발팀	(031)639-1871 (031)630-4545	반도체재료

1998년 12월 장비 실무위원회의 의결을 통해 5년간(1998. 12 ~ 2003. 12) 총 150억원을 투자하는 『초고전압투과전자현미경 설치·운영 기본계획』을 수립하였다. 그 주요 내용은 최고 가속전압 1,000 kV 이상, 가속안정도 1×10^{-6} /min 이하, 최고 분해능 0.12nm 이하, 대물렌즈 전류안정도 1×10^{-6} /min 이하의 투과전자현미경을 한국기초과학지원연구원 대덕본원에 설치하여 국가적인 공동 연구장비로 운영한다는 것이었다.

1999년 4월에서 6월까지의 기간 동안 국가과학기술위원회에서 동 사업의 평가 및 전문가의 재평가를 거쳐 총사업규모를 조정하였는데 사업 성격이 연구사업이 아니기 때문에 해외 기자재 도입에 필요한 직접경비 위주로 사업을 추진하도록 총사업비를 150억원에서 140억원으로 삭감하였다. 동년 12월에는 장비 실무위원회 심의를 거쳐 사업 기간이 조정되었는데, 매년 연말이 되어서야 당해의 회계연도가 시작되는 문제점을 보완하기 위해 2차년도 사업 기간을 2개월 단축하기로 결정하였다. 즉, 2차년도 사업 기간은 1999년 12월 15일부터 2000년 10월 14일까지의 10개월로 단축하고 3차년도 사업부터는 당해 10월 15일부터 다음 해 10월 14일까지의 12개월을 그 해의 회계연도로 잡게 되었다. 이렇게 최종적으로 조정된 사업의 전체적인 개요를 보면 아래와 같다.

- 총괄주관기관 : 한국기초과학지원연구원(KBSI)
- 총 사업기간 : 1998년 12월 15일 ~ 2003년 10월 14일 (총 4년 10개월)
- 총 사업비 : 140억원

(단위: 백만원)

사업연도	1998	1999	2000	2001	2002	합계
정부	1,500	1,000	1,500	4,000	6,000	14,000

제 2 절 연구개발의 목적 및 필요성

원자단위의 구조까지 직접 관찰할 수 있는 가속전압 1 MV 이상의 최첨단 초고전압 투과전자현미경을 한국기초과학지원연구원(기초연, KBSI) 대덕본원에 설치하여 기초과학 및 응용과학 분야에서 국가적인 공동 연구장비로 활용하고 국제 수준의 전자현미경 공동 연구센터의 주장비로 육성하고자 하였다.

국제적인 무한 기술경쟁이 본격화하는 21세기에 국내의 연구생산성 및 연구경쟁력을 획기적으로 제고시키기 위해서는 차세대 나노반도체를 포함한 신물질의 원자단위 구조분석, 뇌세포를 포함한 생체의 삼차원적 구조분석, 소재의 역동적 구조 및 물성 변화 연구, 전자빔 및 이온빔을 이용한 극한 소재의 개발 등 핵심 NT/BT 분야에서 과학기술 발전에 기여할 수 있는 초정밀 분석 장비 및 기술을 본 사업을 통해 국내의 과학기술자에게 조기에 제공하는 것이 필요하다.

표 1.3에는 일반 TEM과 UHV-TEM과의 기본 성능의 비교를, 표 1.4에는 UHV-TEM의 주 활용 기능, 활용 분야 및 활용 예를 열거한다.

표 1.3. 일반 투과전자현미경과 초고전압 투과전자현미경과의 성능 비교.

비교사항	일반 투과전자현미경	초고전압 투과전자현미경	참고사항
가속전압	200kV	1,300kV	원자분해능 요건: - 가속전압 1,000kV 이상 - 전압오차: 백만분의 1 이하 - 분해능: 0.15nm 이하 *원자간 간격(0.1~0.2nm)보다 작은 분해능 필수
분해능	0.2nm	0.12nm	
투과력	0.2 μ m	1.3 μ m	소재의 물성 측정을 위해서는 1 μ m 이상의 시료 두께 필요
에너지	200keV	1,300keV	고에너지를 이용한 방사능 파괴효과의 실험을 위해서는 1,000keV 이상의 에너지 필요

표 1.4. 초고전압 투과전자현미경의 주 활용 기능, 활용 분야 및 활용 예.

활용 기능	활용 분야	활용 예
고분해능	○ 신소재의 내부구조 연구	○ 차세대용 나노 반도체의 개발 ○ 고온초전도체의 결손된 산소 위치 결정
고투과력	○ 생체의 3차원적 구조 연구 (Electron Tomography)	○ 뇌신경세포의 삼차원적 구조 연구 ○ 단백질의 삼차원적 구조 연구
	○ 물질의 역동적인 구조/화학/물성 연구 (온도, 압력, 성분 변화에 따른 구조 및 물성의 변화)	○ 금속 소재의 온도변화에 따른 변이 조직의 생성과 이동 연구 ○ 구조세라믹 소재의 외력에 의한 crack의 생성과 강도 변화 연구 ○ 수소 공급에 따른 고강도 소재의 구조 및 강도변화 연구
고에너지	○ 전자빔에 의한 방사능 파괴현상 연구	○ 생체의 전자빔 조사에 의한 세포변화 연구 ○ 항공우주 소재의 전자빔에 의한 물성변화 및 파괴 효과 연구 ○ 원자로 및 핵융합로 소재의 전자빔 및 이온빔에 의한 방사능 파괴현상 연구
	○ 전자빔 조사에 의한 표면 구조 및 조직의 변화 연구	○ 반도체 소재의 전자빔조사에 의한 표면물성 변화 연구 ○ 벤젠고리 등 불가용성 폐기물의 전자빔 조사에 의한 가용성 물질로의 전환과정 연구

제 3 절 연구개발의 내용 및 범위

연구개발은 아래와 같이 크게 2 단계로 나눌 수 있다. 제 1 단계(1998. 12 ~ 2000. 10)는 기기제작의 준비 단계로써 기기사양의 확정, 제작업체의 선정 및 계약체결이 이루어졌고 선정된 제작업체에 의해 기기의 상세설계가 수행되었다. 제 2 단계(2000. 12 ~ 2003. 10)에서는 실질적인 기기의 제작, 설치 및 성능시험이 수행되었다. 이들을 연차별로 살펴보면 아래와 같다.

(1) 제 1 차년도에는 기기의 개념설계와 기종 및 사양의 선정을 수행하였다. 즉, 초고전압 투과전자현미경의 고분해능, 고투과력, 고에너지 기능을 극대화할 수 있는 본체의 개념설계와, 기초과학과 응용과학의 다양한 분야의 활용에 필요한 부수 기기의 개념설계 및 사양을 작성하였고, 소정의 절차에 따라 장비제조사의 선정을 완료하였다. 또한, 기기의 최대 성능을 발휘할 수 있는 특수실험실 및 보조시설의 개념설계도 수행하였다.

(2) 제 2 차년도에는 기기의 세부설계를 수행하였다. 본체는 일본 JEOL 본사가, 주요 부대 장비인 에너지 여과장치(HV-GIF)는 미국 Gatan사가, 원격제어장치는 JEOL U.S.A.사가 주관이 되어 기초연과 협력하여 설계를 수행하였다. 장비의 가장 중요한 특성인 3-D 분석기능을 강화하기 위해 기초연에서는 초정밀시료대 보조장치의 개발을 담당하였다.

(3) 제 3 차년도와 4 차년도에는 본체 및 부수 기기의 제작 및 공장조립을 수행하였다. 기초연에서는 초정밀시료대 보조장치의 제작과 특수시료지지대의 성능을 유지하는데 필수적인 Dry Pumping System의 개발 및 제작을 진행하였다. 한편, 정부에서 별도의 예산을 배정받아 장비를 설치할 특수실험실(전자현미경동)의 건립이 본격적으로 추진하였다.

(4) 제 5 차년도에는 기기의 현지(기초연) 설치 및 성능시험을 수행하였다. 공장 조립이 완료된 장비는 성능시험을 마친 후 분해, 포장되어 부산항을 통해 기초연에 운송되었다. 장비의 재조립은 새로 건립된 전자현미경동에서 이루어졌다. 장비가 조립되는 동안 성능 유지 및 향상에 필요한 안정장치와 보조시설의 설치를 지속하였으며 재조립이 완료된 장비의 성능시험 및 운용요원 훈련도 수행하였다.

표 1.5.에 사업의 전체 추진 일정을 요약한다.

표 1.5. 사업추진 일정표.

사 업 내 용	1차년도 (1998.12 ~ 1999.12)	2차년도 (‘99.12 ~ ‘00.10)	3차년도 (2000.10 ~ 2001.10)	4차년도 (2001.10 ~ 2002.10)	5차년도 (2002.10 ~ 2003.10)
- 기기 및 실험실의 개념설계 - 기종 및 사양의 선정 (KBSI)					
- 기기 및 실험실의 세부설계 (JEOL, Gatan, KBSI)					
- 본체 및 부수기기 개발 및 제작 (JEOL, Gatan, KBSI) (초고전압 발생장치 및 안정장치, 전자광학장치, 진공장치, 특수 분석장치, 특수시료대 등)					
- 특수실험실 건립 (KBSI)					
- 안전장치 및 보조시설 개발 및 제작 (KBSI, JEOL) (방진장치, 방사능 안전장치, 전자기장 차폐장치, 통합적 안전장치, 항온항습시설 등)					
- 기기 설치 및 운행 (JEOL, Gatan, KBSI)					
- 기기 운용법 개발 (KBSI) (장비 활용기법 개발, 운용요 원 훈련, 장비 및 기술 관련 D/B 구축)					

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

국내에는 본 연구사업의 시작 전인 1997년 말까지 170여대의 일반용 투과전자현미경이 설치되어 있었는데, 가속전압 100 kV급의 저전압용 전자현미경이 전체의 약 70%를 차지하며 가속전압 300 kV급 이상의 중전압형 전자현미경은 10여대가 설치되어 있었으나 초고전압 투과전자현미경의 설치는 전혀 없었다. 기기가 설치된 장소는 대학에 약 60%, 연구 및 산업체 기관에 약 40%이며, 그 중 37%가 재료공학 분야에서, 약 35%가 의학 분야에서, 그리고 약 12%가 수의학 분야에서 이용되고 있었고, 나머진 약 16%가 물리·화학·생물·지구과학의 기초과학 분야에서 이용되고 있었다.

투과전자현미경 본체 및 부수 기기의 국내 제작도 당시까지 전무하였다. 초고전압 투과전자현미경과 관련된 국내 기술로는 대전의 삼성중공업 중앙연구소에서 1993년 러시아와 합작하여 개발한 1 ~ 2 MV급의 산업용 전자가속기가 유일하나, 제작된 기기의 가속전압의 오차가 약 5%로 초고전압 투과전자현미경용 전자가속기에서 요구하는 백만분의 1 이하의 오차와는 큰 차이가 있었다.

특수실험실 및 보조 시설과 관련된 기술로는 기초연에서 핵융합 특수실험동의 건립을 통해 특수실험실 건립을 위한 know-how를 축적한 상태였다. 그러나, 장비 성능의 보장을 위한 핵심 보조시설 중 하나인 방진장치(제진대)는 국내에서는 소규모의 전자현미경에 필요한 장치 밖에 제작한 경험이 없으며, 특히 투과전자현미경의 제진대는 1996년 기초연에서 에너지여과 투과전자현미경(120kV)을 설치할 때 처음 시도된 실정이었다.

이렇게 국내의 초고전압 투과전자현미경 관련기술이 취약한 상태에서는 외국의 전문 제조업체에 특화된 사양으로 장비를 주문 제작하고 설치하도록 하고 장비의 성능을 좌우하는 제진대도 장비 제조업체에서 공급하도록 하는 것이 가장 현실적인 방법이라고 사료되었다. 즉, 초고전압 투과전자현미경이 0.1nm에 이르는 분해능을 발휘하기 위해서는 분당 백만분의 1 이하의 가속전압 안정도와 대물렌즈의 전류 안정도가 기본적으로 필요하고 부수적인 많은 장비에 대한 know-how가 필요하기 때문에 현재 관련기술이 거의 전무한 상태에서 독자적인 기기의 제작 및 설치하는 기술면에서나 비용면에서나 타당하지 않다고 판단되었다. 외국에서도 초고전압 투과전자현미경 제작 및 설치하는 초고정밀도의 성

능을 발휘하기 위해서 일종의 주문 생산 방식으로 진행되고 있는데 사용자가 필요한 기기의 개념 및 사양을 결정하면 선정된 제작업체는 거기에 맞추어 기기의 세부 설계와 제작을 시작한다. 기기의 제작이 완료될 때까지 제조 공장에서 계속적으로 조립되고 정밀 점검되며, 제작이 완료되고 최종 성능시험을 마친 후에 사용자가 원하는 장소에 제작업체가 기기를 설치하여 성능을 재점검하는 과정을 거친다.

위에 언급한 상황은 장비의 설치가 완료된 2003년 10월까지도 유사한데 그 동안 일반 투과전자현미경의 도입이 지속되어 현재 230여대가 설치되었다(첨부자료 1 참조). 특기할 사항으로는 2000년부터 (주)미래로 시스템에서 러시아 기술의 도움을 받아 국내에서도 주사전자현미경을 제작하기 시작하였고 최근에는 투과전자현미경의 제작도 시도 중이라는 점이다. 또 한국표준연구원 등 국내의 연구기관에서도 일반 전자현미경의 자체제작에 필요한 연구를 수행하기 시작하였다.

제 2 절 국외 기술개발 현황

일반 투과전자현미경은 국제적으로 현재 4 개의 전문 제작업체(일본의 JEOL사와 Hitachi사; 미국의 FEI사(전 네덜란드의 Philips사); 독일과 영국의 합작회사인 LEO사(전 독일의 Carl Zeiss사))에서 제작하고 있다. 초고전압 투과전자현미경은 재료공학의 발달과 함께 1960대부터 국가적인 차원에서 설치하기 시작하여 1970년 이후부터 현재까지 세계적으로 30대 이상이 설치되었으나 기술과 판매상의 이유로 현재는 일본의 JEOL사와 Hitachi사 만이 제작·설치하고 있다. 전자 가속장치의 제작 기술과 전자광학 기기의 제작기술이 확보된 외국에서도 초고전압 투과전자현미경 제작 및 설치하는 기기의 안정도와 초고성능의 발휘를 위해 일본의 JEOL사와 Hitachi사에 주문 생산하는 방식으로 진행하고 있는데 원자배열의 직접 관찰이 가능한 분해능이 0.15nm에 이르는 장비는 1980년 이후부터 생산되었으며, 분해능이 0.1nm에 이르는 장비는 1989년 이후부터 생산되기 시작하였다. 설치된 장비는 대부분 재료 연구용이며 의생물 연구 전용으로 설치된 장비는 1970년대에 미국의 동부(Univ. of New York, Albany), 중부(Univ. of Wisconsin, Madson) 및 서부(Univ. of Colorado, Denver)에 설치된 장비와 1980년 초 일본의 국립생리학연구소(Okazaki)에 설치된 장비를 들 수 있다.

전자광학의 급속한 발전으로 21세기에 들어서는 수차가 없는 전자렌즈가 활발히 개발되고 있다. 따라서 물질의 원자단위 구조를 관찰할 수 있는 고분해능 기능은 200 ~ 300 kV급의 일반 투과전자현미경에서도 수행할 수 있으리라 예측되기 때문에, 초고전압 투과전자현미경 제조업체는 고분해능의 향상보다는 기기의 고유한 영역인 고투과력 및 고에너지의 기능을 극대화하고 복잡화하는 방향으로 개발을 유도하고 있다. JEOL사가 일본의 Hokkaido 대학에 1998년에 설치한 초고전압 투과전자현미경은 전자빔 외에도 2개의 이온빔을 주입하여 물질 변화를 역동적으로 연구할 수 있도록 하였고, Hitachi사가 제작하여 2000년에 설치한 초고전압 투과전자현미경은 Field Emission Gun을 장착하여 두꺼운 시편에서도 Electron Holography를 수행할 수 있도록 하였다.

표 2.1에 1980년 이후에 해외에 설치된 초고전압 투과전자현미경의 현황을 정리한다. 특기할만한 점은 총 12대의 장비 중 일본에 10대가 설치되었고 일본 이외의 지역으로는 미국의 NCEM과 독일의 MPI에 JEOL 장비가 설치되었다는 점이다.

표 2.1. 최신 초고전압 투과전자현미경 설치 현황.

설치 기기 (제조회사)	설치 장소	설치 연도	책임자	주소	특성 및 주요 응용분야
H-1250M (Hitachi)	National Institute of Pysiology	1982	Hama	Okasaki, Japan	$\pm 60^\circ$ Tilting; 삼차원적 생체구조 연구 전용
H-1250M (Hitachi)	Nagoya University	1983	Habino	Nagoya, Japan	FEG 장착; STEM 기능
H-1500 (Hitachi)	National Institute for Inorganic Materials	1990	Horiuchi	Tsukuba, Japan	PEELS 장착; 고분해능 전용 특히 초전도체 연구
H-3000 (Hitachi)	Research Center for UHVEM (Osaka Univ.)	1995	Takaoka	Osaka, Japan	Remote Control; 소재의 역동적 연구 및 방사선 파괴 연구 전용
H-1000 (Hitachi)	Hitachi Advanced Research Lab	2000	Tonomura	Japan	FEG 장착; Holography 전용
JEM-1000 (JEOL)	National Center for EM (Lawrence Berkeley Lab.)	1983	Dahman	Berkeley, California, U.S.A.	고분해능 전용; 무기소재 연구
JEM-1000 (JEOL)	Univ. of Kyoto	1989	Kobayashi	Kyoto, Japan	고분해능 전용; 유기물질 연구
JEM-1250 (JEOL)	Univ. of Tohoku	1991	Hiraga	Sendai, Japan	고분해능 전용; 무기소재 연구
JEM-1250 (JEOL)	Univ. of Tokyo	1992	Ishida Ichinose	Tokyo, Japan	고분해능 전용; 무기소재 연구
JEM-1250 (JEOL)	Max-Planck-Institut fur Metallforschung	1993	Seeger Ruhler	Stuttgart, Germany	Imaging Filter 장착; 고분해능/역동적 연구; 고체물리, 무기소재 연구
JEM-1000 (JEOL)	National Research Institute for Metal	1994	Furuya	Tsukuba, Japan	EDS, Imaging Filter 장착; 이온주입장치 장착; 금속 연구
JEM-1300 (JEOL)	Univ. of Hokkaido	1998	Takahashi	Hokkaido, Japan	이온주입장치 장착; 재료 연구

기기를 설치할 특수실험실은 기종과 사용자의 요구에 따라 달라진다. 장비 제작업체는 기기의 성능을 발휘하는데 필요한 사양과 사용자의 특수한 요구에 맞추어 기본 설계도면을 제공하고, 사용자는 설계도면에 따라 원하는 장소에 특수실험실의 설립을 시작하는 것이 상례이다.

최근 NT 분야의 국제적인 경쟁이 치열해 짐에 따라 nano-beam을 이용하여 NT 연구를 할 수 있는 FE(Field Emission)-TEM의 설치가 세계적으로 크게 늘어나고 있다. UHV-TEM의 성능을 보조하기 위하여 기초연에서도 본 사업의 일환으로 200kV의 가속 전압을 가진 최신 FE-TEM이 설치될 예정이다. 또한 근래에 전자현미경 분야에서 계속적으로 논의되어 왔던 가속전압 200kV~400kV(중전압)급의 원자분해능 투과전자현미경의 개발이 독일의 Carl Zeiss(LEO)사에서 독일 정부의 재정지원 아래 1999년부터 약 4개년 계획으로 본격화 되었다. 개발목표로 하는 분해능이 초고전압 투과전자현미경의 수준이기 때문에 초고전압이 가지고 있는 고분해능 외의 특성, 즉 고투과력 및 고에너지 기능을 최대한 활용하는 노력이 더욱 요구된다. 이러한 점에서 $\pm 60^\circ$ 경사 기능 및 이온빔 가속기의 부착성은 매우 중요하다. 독일에서 개발 중인 중전압용 원자분해능 투과전자현미경의 경사 기능은 최대 $\pm 30^\circ$ 로써 삼차원적 구조의 원자분해능 분석을 하기에는 적절하지 못하기 때문이다.

다른 선진국도 나노기술을 선점하기 위해 관련 장비의 개발에 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 대표적인 예가 Cs-corrected TEM/STEM으로 독일에서 개발을 처음 시작하였으나 미국과 일본도 국가적 지원 아래 총력을 다한 결과 2002년 중반 미국 IBM 연구소에서 첫 개발품을 발표하였다(Batson et al, 2002). 최종 목표는 100~300kV의 가속전압에서 0.5Å의 분해능을 달성하는 것인데 2003년부터 초기 모델이지만 상업적인 장비가 출현하기 시작하였고 2005년부터는 장비의 보급이 확산되리라 예측된다. 이럴 경우 초고전압 투과전자현미경의 고분해능을 이용한 활용 분야는 축소하고 고투과력과 고에너지를 이용한 활용 분야를 확장하는 것이 더욱 필요하며 이 시기에 이온빔 가속기의 부착을 추진하는 것이 바람직하다.

BT 분야의 투과전자현미경의 활용은 단백질 구조분석이 학문적인 면에서나 기술개발 면에서나 가장 중요한 분야로 대두되고 있다. 단백질 구조분석은 현재 세계적으로 대부분 300kV급의 투과전자현미경을 이용하여 이루어지고 있으며 분해능을 높이기 위하여 최대한 낮은 온도(LHe 온도)에서 작업할 수 있도록 장비를 전용화하는 추세이다. 2002년 5월 25일 ~ 30일 미국 텍사스 주의 San Antonio시에서 열린 미국 결정학회에 참석하여 Electron Crystallography에 관한 최신 동향을 파악하였다. BT 분야에서는 전자현미경을

이용한 막단백질의 구조분석이 주류를 이루었는데 단백질의 기능 파악 및 신약 개발과 관련된 내용이 많았다. 단백질 구조분석 기능을 전용화한 300kV급의 Cryo-TEM(액체 헬륨 사용)을 이용하여 미국 NIH 및 Berkeley대, 일본 교토대, 영국의 Cambridge대(MRC), 독일의 Max-Plank 연구소 등에서 선진 연구 결과를 활발하게 생산하고 있음을 파악하였다. 이 분야의 국제적 경쟁력 확보를 위해서는 단백질 구조분석 전문가와 전용장비의 설치가 필수적이다. 원자분해능 초고전압 투과전자현미경을 이용한 이 분야의 연구는 아직까지 본격적으로 시도되지 않았기 때문에 체계적인 노력을 한다면 앞으로 국제적인 경쟁력을 확보할 수 있다고 본다. 이를 위해서는 정밀한 시료대의 제어를 통한 고분해능의 자료 획득과 더불어 저온용 시료준비시설의 확보(특히, High-pressure Freezer와 Freeze Fracture) 및 최신 슈퍼컴퓨터를 이용한 자료의 정량적인 해석이 필수적이기 때문에 이에 대한 대비가 필요하다.

BT 분야에서 초고전압 투과전자현미경의 특성을 최대한 이용할 수 있는 분야는 단백질 구조분석 분야보다는 오히려 고투과력을 요구하는 뇌 신경세포를 비롯한 거대 세포의 연구 분야라고 사료된다. 특히 뇌 분야의 연구는 1982년 일본 Okasaki의 국립생리학 연구소에 설치된 장비를 이용하여 지속적으로 이루어져 왔는데 국내에서도 1990년대 후반부터 이 분야의 연구에 참여하고 있으며 소수이지만 Okasaki의 장비를 사용한 연구자도 있다. KBSI에 설치될 장비는 이러한 연구를 선진적으로 할 수 있는 기능을 골고루 갖추고 있기 때문에 보다 쉽게 국제적 경쟁력을 확보할 수 있다고 본다. 가장 관심을 끄는 연구 분야는 치매 등 뇌 정신질환을 가진 neuron의 구조적/기능적 특징을 밝히는 것으로 장비의 삼차원적 구조분석 기능을 효과적으로 활용할 수 있는 분야이다.

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 연구개발 수행내용

연차별 연구개발 목표와 그 내용 및 범위를 표 3.1에 요약한다.

표 3.1. 연차별 연구개발 목표, 내용 및 범위.

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도 (1998)	기기 및 실험실의 개념설계와 기종 및 사양의 선정	<ul style="list-style-type: none"> - 초고전압 투과전자현미경의 고분해능, 고투과력, 고에너지 기능을 극대화할 수 있는 본체의 개념 설계와 기종 및 사양의 선정 - 기초과학과 응용과학의 다양한 분야의 활용에 필요한 부수 기기의 개념설계 및 사양의 선정 - 선정된 기기의 최대 성능을 발휘할 수 있는 특수 실험실 및 보조시설의 기본설계
2차년도 (1999)	기기의 실험실의 세부설계	<ul style="list-style-type: none"> - 본체 및 부수기기의 세부설계 - 특수실험실의 세부설계
3차년도 (2000)	기기 개발 및 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 본체 및 부수기기의 개발 및 제작 - 보조장치의 개발 및 제작
4차년도 (2001)		<ul style="list-style-type: none"> - 특수실험실 건립
5차년도 (2002)	기기 설치 및 성능시험	<ul style="list-style-type: none"> - 본체 및 부수 기기의 조립 및 설치 - 보조장치 제작 및 보조시설의 설치 - 장비의 시험운행 - 운용요원 훈련

1. 제 1 차년도 과제수행 내용 (1998. 12. 15 ~ 1999. 12. 14)

제 1 차년도는 장비의 기종 및 사양을 결정하는 중요한 시기로 표 3.2와 같이 과제를 수행하였다.

표 3.2. 제 1 차년도 과제수행 내용 요약.

연구범위	연구수행 방법	구체적인 내용
본체 및 부수기기의 개념설계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기기전문가로 구성된 자문위원회 활용 ○ 장비도입·설치 관련자로 구성된 실무위원회 활용 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초고전압 투과전자현미경의 개념설계 및 시스템제안요구서(RFP) 초안 작성 ○ 자문위원회 회의 및 전자우편 등을 통하여 작성된 장비의 개념설계 및 시스템제안요구서(RFP) 초안을 점검 및 조정 ○ 실무위원회 회의 및 전자우편 등을 통하여 조정된 장비의 개념설계 및 시스템제안요구서(RFP)를 재점검 및 재조정
기종 및 사양 선정	<ul style="list-style-type: none"> ○ 자문위원회와 실무위원회를 활용하여 제안요구서(RFP) 확정 ○ 제출된 제안서 평가 및 기종 선정을 담당할 도입추진위원회 활용 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 제안요구서(RFP) 공고 및 설명회 개최 ○ 평가 방법 확정 (도입추진위원회) ○ 제안서 접수 및 설명회 개최 ○ 기술/지원 평가 및 가격평가 (평가위원) ○ 종합평가 및 업체 선정 (도입추진위원회) ○ 선정 통보 및 계약 체결
특수실험실 및 보조시설의 기본설계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비설치 조건 파악 ○ 특수실험실 입지조건 및 설치 비용 파악 ○ 추후 본체에 부착하여 사용할 계획인 이온빔 가속기의 설치 조건 및 방법 파악 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 제조업체로부터 장비설치 조건에 관한 자료 입수 및 정리 후 기본안 마련 (선정된 장비 제조업체와 긴밀히 협조) ○ 가용한 특수실험실 입지조건 평가 및 설치 비용 산정 (건설관계 담당부서) ○ 현재 해외에 설치된 최신 이온빔 가속기의 사양 및 설치 자료 입수 후 전체적인 설치 계획안 수립 (이온빔 가속기 전문가 및 주요 사용 대상자와 협의)

2. 제 2 차년도 과제수행 내용 (1999. 12. 15 ~ 2000. 10. 14)

제 2 차년도에는 기기의 세부설계를 중점적으로 수행하였다. 본체는 JEOL 본사가, 에너지 여과장치(HV-GIF)는 Gatan사가, 원격제어장치는 JEOL U.S.A.사가 주관이 되어 기초연과 협력하여 설계를 수행하였다. 장비의 3-D 분석기능을 강화하기 위해 KBSI에서는 초정밀시료대 보조장치의 개발을 담당하였는데 주요 내용은 표 3.3과 같다.

표 3.3. 제 2 차년도 과제수행 내용 요약.

연구범위	연구수행 방법	구체적인 연구내용
기기 세부설계 (JEOL, KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기본설계는 JEOL사 전담 ○ 아래의 특수설계는 JEOL사와 KBSI가 상호 협조 하에 진행 <ul style="list-style-type: none"> - 가속장치 및 대물렌즈 안정장치 - 초정밀시료대 - 원격제어장치 ○ 초정밀시료대 보조장치는 KBSI에서 전담 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가속장치, 전자광학장치, 진공장치 등 ○ 특수설계: <ul style="list-style-type: none"> - 가속전압 안정장치 - 대물렌즈 전류 안정장치 - 초정밀시료대 제어장치 - 시료지지대 안정장치 - Aperture 및 시료대의 원격제어장치 ○ 시료지지대의 정밀 경사를 위한 보조장치 (특히 β각 경사 보조장치 집중 개발)
특수실험실 세부설계 (JEOL, KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ JEOL사에서 특수실험실 관련자료를 KBSI 제공 ○ KBSI에서 자료 점검, 세부 건설계획 수립 및 예산확보 ○ KBSI에서 특수실험실의 세부설계 추진 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 설치조건 및 최근에 설치된 장비의 특수실험실 자료 제공 ○ KBSI 건설 관계자의 자료 점검, 추가자료 수집, 건설 세부계획 수립 및 소요비용 파악 ○ 연구소 차원에서 건설 예산의 확보 (2001년도 연구소 예산에 반영) ○ 특수실험실 건설팀의 구성, 세부설계 업체 선정 및 세부설계 착수
기기 운용법 개발 (KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현재 운용 중인 EF-TEM을 이용한 예비 실험 ○ 기구입한 역동적 실험을 위한 시료지지대를 이용하여 실험 ○ 전자현미경 장비 및 기법 관련 전문학술지의 구독 및 인터넷 등을 통한 자료 획득 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 도입 장비의 주기능을 활용하는데 필요한 예비 실험 수행 <ul style="list-style-type: none"> - ESI 기법 집중 개발 ○ 역동적 실험방법의 예비실험을 통해 실험이 장비에 주는 위험 요소의 파악 <ul style="list-style-type: none"> - Heating 및 Heating/Straining 기법 집중 개발 ○ 주장비와 활용 기법에 관련된 자료 정리 및 인터넷을 통한 자료 활용 system 구축

3. 제 3 차년도 과제수행 내용(2000. 10. 15 ~ 2001. 10. 14)

제 3 차년도에는 본체 및 부수 기기의 제작을 수행하였다. 한편, 정부에서 별도의 예산을 배정받아 장비를 설치할 특수실험실의 건립을 본격적으로 추진하였다. 그 주요 내용은 표 3.4와 같다.

표 3.4. 제 3 차년도 과제수행 내용 요약.

연구범위	연구수행 방법	구체적인 연구내용
본체 및 부수기기 제작 (JEOL, Gatan)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본체 제작은 JEOL 본사에서 담당 ○ 원격제어장치는 JEOL, U.S.A.에서 제작 	<ul style="list-style-type: none"> - 초고전압 발생장치/가속전압 안정장치 - 전자광학장치 - 초정밀시료대 포함 - 조리개 제어장치 포함 - 초정밀시료대 제어장치 포함 (5축 제어)
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 특수 분석장치인 에너지여과 장치는 Gatan, U.S.A.에서 제작 ○ 특수 시료지지대는 Gatan, U.S.A.에서 제작 ○ 1500℃ 고온시료지지대는 JEOL 본사에서 제작 	<ul style="list-style-type: none"> - Post-column 에너지 여과장치 - TV/SS-CCD 포함 - 고온시료지지대 (1000℃, 1300℃) - 냉각시료지지대 (LN₂, LHe 온도) - 왜력시료지지대 - Mesh-type 고온시료지지대
초정밀시대 보조장치 제작 (KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ KBSI 본원에 있는 EF-TEM을 이용하여 장치 제작 및 시험 	<ul style="list-style-type: none"> - 양축경사 정밀 측정장치 (특히 β각 경사 보조장치 집중 개발) - 시료지지대 안정화장치 포함
특수실험실 건립 (KBSI, JEOL)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본원의 건설담당팀, 선정된 업체 및 JEOL사와 긴밀한 협조 아래 설계 및 시공 시행 	<ul style="list-style-type: none"> - 특수실험실 세부설계 완료 (이온빔가속기 부착 설비 및 방진설비 포함) - 본체 방진설비는 일본 Showa사와 협력
기기 운용법 개발 (KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현재 운용 중인 EF-TEM을 이용한 예비 실험 ○ 역동적 실험에 필요한 다양한 시료지지대를 이용하여 실험 ○ 정량적 구조분석 실험에 필요한 특수시편준비법 개발 ○ 전문학술지의 구독 및 인터넷 등을 통한 자료 획득 	<ul style="list-style-type: none"> - 정량적 3-D 구조분석 기법 개발 - 정량적 EELS, ESI 기법 개발 - In Situ Heating 기법 개발 (1300℃) - In Situ Cooling 기법 개발 (LN₂) - Ultramicrotome을 이용한 시편준비법 개발 - 고온실험용 시편준비법 개발 - 장비와 분석법에 관련된 자료 수집, 정리 및 인터넷을 통한 자료 활용 system 개발

4. 제 4 차년도 과제수행 내용(2001. 10. 15 ~ 2002. 10. 14)

제 4 차년도에는 주로 본체 및 부수 기기의 공장조립 및 기본 성능시험을 수행하였다. 특수실험실의 시공도 진행되었다. 그 주요 내용은 표 3.5와 같다.

표 3.5. 제 4 차년도 과제수행 내용 요약.

연구범위	연구수행 방법	구체적인 연구내용
본체 및 부수기기 제작 및 공장 성능시험 (JEOL, Gatan, KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본체 제작은 JEOL 본사에서 담당 ○ 본체의 공장 성능시험은 JEOL과 KBSI가 공동 수행 ○ 원격제어장치는 JEOL, U.S.A.에서 제작 	<ul style="list-style-type: none"> - 초고전압 발생 및 안정장치 제작 - 전자광학 및 진공장치 제작 - 초정밀시료대 제작 - 본체 전체의 공장 조립 및 성능시험 - 조리개 및 초정밀시료대 제어장치 포함 - Auto alignment 기능 포함
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 특수 분석장치인 에너지여과 장치는 Gatan에서 제작 ○ 특수 시료지지대는 Gatan에서 제작 ○ 1500℃ 고온시료지지대는 JEOL 본사에서 제작 	<ul style="list-style-type: none"> - Post-column 에너지 여과장치 - TV/SS-CCD 포함 - 고온시료지지대 (1000℃, 1300℃) - 냉각시료지지대 (LN₂, LHe 온도) - 왜력시료지지대 - Mesh-type 고온시료지지대
초정밀시대 보조장치 제작 및 개선 (KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ KBSI 본원에 있는 EF-TEM을 이용하여 장치 제작 및 시험 	<ul style="list-style-type: none"> - 경사/회전 시료지지대 회전각 측정장치 제작 - 측정작업 자동화 program 개발 - 시료지지대 경사/회전값 보정기 제작
특수실험실 건립 (KBSI, JEOL)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본원의 건설 담당팀, 건설회사 및 JEOL사와 긴밀한 협조 아래 설계 및 시공 시행 	<ul style="list-style-type: none"> - 특수실험실 및 장비운영실 건립 - 일본 Showa사와 협력하여 체진대 설치
기기 운용법 개발 (KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 활용기법 개발 - 현재 운용 중인 EF-TEM을 이용한 예비 실험 - 역동적 실험에 필요한 다양한 시료지지대를 이용하여 실험 - 정량적 구조분석 실험에 필요한 특수시편준비법 개발 ○ 장비 운용법 개발 - 본분소 장비운용망 구축 - 운용요원 훈련 - 장비 유지·보수 교육 	<ul style="list-style-type: none"> - 정량적 3-D 구조분석 기법 개발 - 정량적 EELS, ESI 기법 개발 - In Situ Heating 기법 개발 (1300℃) - In Situ Cooling 기법 개발 (LN₂) - Cryo-Ultramicrotome을 이용한 시편준비법 개발 - 장비 원격운용법 개발 - 장비 운용요원 교육 수행 - 장비 유지·보수 교육 수행 - 전자현미경 대중화교육 수행 (본원-분소)

5. 제 5 차년도 과제수행 내용(2002. 10. 15 ~ 2003. 10. 14)

제 5 차년도에는 기기의 설치 및 성능시험을 아래 표와 같이 수행하였다. 장비가 조립되는 동안 성능 유지 및 향상에 필요한 안정장치와 보조시설의 설치를 지속하였다.

표 3.6. 제 5 차년도 과제수행 내용 요약.

연구범위	연구수행 방법	구체적인 연구내용
장비의 공장설치 및 성능시험 (JEOL, Gatan, KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 일본 Akishima 공장에서 장비의 전체조립 및 기본 성능시험 수행 ○ KBSI의 연구진이 일본 Akishima 공장을 방문하여 장비의 종합 성능시험 수행 	<ul style="list-style-type: none"> - 본체 및 부수기기의 공장 완전 조립 - 분해능, 전압/전류 안정도, 기본 시료지지대 성능점검(JEOL, Standard 이용) - HV-GIF의 성능점검(Gatan, U.S.A.) - FasTEM의 성능점검(JEOL, U.S.A.) - 실제 연구시편을 이용한 성능점검(직접운용) - 실제 연구시편을 이용한 성능점검(원격운용)
장비의 현지설치 및 성능시험 (JEOL, Gatan, KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 분해 및 운송(JEOL) ○ 장비 재조립 및 성능시험 수행 ○ 장비 현지 종합 성능시험 수행 	<ul style="list-style-type: none"> - 부산항을 통하여 장비 운송 - 본체 및 부수기기의 현지 조립 및 성능시험 - 실제 연구시편을 이용한 성능점검(직접운용) - 실제 연구시편을 이용한 성능점검(원격운용)
보조장치 개발 및 보조시설 설치 (KBSI, JEOL)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초정밀시료대 보조장치 개발 ○ 특수 holder 보관장치 개발 ○ 방진, 방음, 항온항습장치 설치 ○ 자기장 차폐장치 설치 ○ 통합적 안전장치 설치 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 장치를 HVEM용으로 up-grade - 변온시료지지대 보관장치 제작 - 장비의 설치조건을 충족시키는 시설 설치 - 장비의 설치조건을 충족시키는 시설 설치 - 장비 및 시설의 모니터링 및 제어장치 설치
기기 운용법 개발 (KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비의 핵심 활용기법 개발: <ul style="list-style-type: none"> - 현재 운용 중인 EF-TEM을 이용한 예비 실험 - 역동적 실험에 필요한 변온 시료지지대를 이용하여 실험 - 정량적 구조분석 실험에 필요한 특수시편준비법 개발 	<ul style="list-style-type: none"> - 빔조사 효과의 정량화 방법 개발 - Imaging plate 자료의 정량화 방법 개발 - 정량적 3-D 구조분석 기법 개발 - In Situ Heating(1300℃) 및 Cooling 기법 개발 (LN₂) - Cryo-Ultramicrotome을 이용한 시편준비법 개발
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원격 장비운용법 개발 (본원의 원격운영사업과 병행) 	<ul style="list-style-type: none"> - TEM을 이용한 원격운영장치 개발 - 본분소 초고속통신망 구축 - 슈퍼컴퓨터를 이용한 자료해석법 개발
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 운용요원 훈련 	<ul style="list-style-type: none"> - 주장비 설치를 통한 장비의 운용 및 유지·보수 교육 수행 - 본원 및 분소의 장비 운용요원 교육 수행

제 2 절 연구개발 수행결과

1. 제 1 차년도 과제수행 결과(1998. 12. 15 ~ 1999. 12. 14)

그 동안 축적된 경험과 자료, 해외에 최근 설치된 장비의 방문 자료 및 전문가와의 토의 결과를 종합하여 초고전압 투과전자현미경의 고분해능, 고투과력 및 고에너지 기능을 극대화할 수 있는 본체와 다양한 분야의 활용에 필요한 부수 기기의 개념 설계를 수행하였다(김윤중과 이석훈, 1995; 김윤중 외, 2000; Horiuchi et al., 1991; Masui et al., 1991; Kim and Kriven, 1991, 1995; Phillips et al., 1994; Takaoka et al., 1997). 요망되는 기기의 사양은 아래와 같이 요약되었다.

① 원자단위의 구조를 직접 분해할 수 있는 사양:

- 최소 1.25 MV의 가속전압 필요; 간격이 좁은 Objective Pole Piece 필요
- 점분해능(point-to-point resolution)이 0.1 nm에 근접 요망

② 고투과력을 이용한 생체의 삼차원적 구조 연구를 할 수 있는 사양 및 부수기기:

- 생체시료의 투과력이 2 ~ 3 μm 이상 필요; 1.25 MV 이상의 가속전압 필요
- 간격이 넓은 Objective Pole Piece 필요
- $\pm 0.1^\circ$ 이하의 오차로 $\pm 60^\circ$ 까지 tilting이 가능한 특수시료대 필요
- 생체시료의 contrast를 증가시킬 수 있는 특수 대물렌즈 조리개 필요
- 시료 손상을 막는 minimum beam dose system과 beam deflector의 장착이 필요

③ 고투과력을 이용한 역동적인 물성 연구를 할 수 있는 사양 및 부수기기:

- 무기시료의 투과력이 1 μm 이상 필요; 1.25 MV 이상의 가속전압 필요
- 간격이 넓은 Objective Pole Piece 필요
- 가열시료대 필요 (heating holder: 상온 ~ 1500 $^\circ\text{C}$ 이상; double tilting이 가능)
- 냉각시료대 필요 (cooling holder: 상온 ~ 액체 He 온도; double tilting이 가능)
- 왜력시료대 필요 (straining holder: LN₂ ~ 500 $^\circ\text{C}$ 이상; double tilting이 가능)

④ 고에너지를 이용한 방사능 조사 연구를 할 수 있는 사양:

- 최소 1.25 MV의 가속전압 필요; 가능하면 1.5 MV 이상의 가속전압이 효과적
- 주사(Scanning) 기능 요망 (STEM)
- FEG(Field Emission Gun)의 장착이 유리
- 이온빔 가속기(Ion-Beam Accelerator)의 장착이 유리

- ⑤ 기기운용의 자동화 및 실험자료의 처리 및 공유가 가능한 사양:
 - 자동정렬이 가능 (automatic column alignment)
 - 자동 진단 및 조정이 가능 (self-diagnosis and correction)
 - 원격 조작용이 가능 (remote operation)
 - 인터넷 연결이 가능 (internet connection)
- ⑥ 시료의 화학분석 및 화상분석을 손쉽게 할 수 있는 사양:
 - EELS 분석과 Energy Filtering을 할 수 있는 부수기기의 장착
 - 고성능 TV 및 고분해능의 CCD Camera 장착
 - Imaging Plate의 장착 및 고분해능 구조분석 전용의 S/W 및 H/W 구비
- ⑦ 생체시료의 구조연구에 필요한 시설의 구비:
 - 삼차원적 구조 연구를 하는데 필요한 일련의 시편준비 장비
 - Cryo-EM을 하는데 필요한 일련의 시편준비 장비
- ⑧ 무기시료의 고분해능 연구에 필요한 시설의 구비:
 - FIB(Focused Ion Beam) 장비 (필요 부분만을 선택하여 ion milling)
 - etching/coating 장비 (전자빔의 전도를 위한 초박막을 입히는데 필요)
 - plasma cleaning 장비 (ion milling시 시료 위에 쌓이게 되는 오염층의 제거)

한편, 초고전압 투과전자현미경의 성능을 좌우하는 가장 중요한 요소로서는 초고전압의 안정도, 대물렌즈 전류의 안정도 및 방진설비를 들 수 있고 초고전압의 안정을 위해서는 기본적으로 twin tank system이 필요함을 파악하였다.

위의 내용들은 초고전압 투과전자현미경 설치·운영 사업의 합리적이고 효율적인 수행을 위해 전자현미경 전문가로 구성된 자문위원회와 전자현미경 사업을 평가, 감독하는 실무위원회에서 점검되고 조정되었다. 또한 장비제작사의 실무진들과 함께 기술적인 실현 가능성과 비용 문제도 점검하였다. 그 결과 위에 적은 사양 중 아래의 사양은 포함시키지 않기로 결정하였다.

- 주사(Scanning) 기능 (효용성, 비용 및 기술적인 문제점)
- FEG(Field Emission Gun)의 장착 (비용 및 기술적인 문제점)
- 이온빔 가속기의 장착 (시급성 및 비용의 문제점; 추후에 장착)
- ⑦항과 ⑧항의 시편준비시설 (비용 문제점; 별도 예산으로 준비)

또한 장비제조사인 JEOL사와 Hitachi사가 설치한 장비의 특성 및 기술사항도 파악하였는데 고려 대상인 장비의 주요 사양은 표 3.7과 같다.

표 3.7. 고려 대상인 대표적 장비의 특성 및 기술사항 비교.

비교항목	JEOL사		Hitachi사		참고사항
기종	JEM-1250		H-1500		- 좌측 기종은 1990년 이후 JEM-1250은 3대 설치; H-1500은 1대 설치됨
사용 가속전압 (최고 가속전압)	1.25 MV (1.3 MV)		1.3 MV (1.5 MV)		- JEOL사는 최대 1.3 MV 제품 생산 - Hitach사는 최대 3 MV의 제품 생산
가속전압 안정도	$< 1 \times 10^{-6} / \text{min}$		$1 \times 10^{-6} / \text{min}$		- 안정도가 높을수록 분해능 향상 - 가속전압이 높을수록 안정이 어려움
전자총	LaB ₆ (1개 장착 가능)		LaB ₆ (6개 장착 가능)		- 여러개 장착시 교환이 용이 - Hitachi사는 FEG 장착 기종도 생산
Objective Pole Piece 간격	10mm	15mm	7mm		- 간격이 넓을수록 역동적 연구에 유리 - Hitach사 3 MV: 22mm
시료대 경사각 (side entry)	$\pm 30^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 30^\circ$		- 경사각이 클수록 역동적 연구에 유리 - Hitach사 3 MV: $\pm 35^\circ$
최고 분해능	0.103nm	0.12nm	0.104nm		- 실제 분해능은 기기 및 건물의 조건에 따라 저하될 수 있음
대물렌즈 안정도	$6 \times 10^{-7} / \text{min}$		$2 \times 10^{-6} / \text{min}$		- 안정도가 높을수록 분해능 향상
원격조작	설치된 바 없음		설치 가능		- 방사선 안정도가 높으면 원격조작 불필요 - Hitach사 3 MV: 원격조작
특수실험실 기본 요구규격	13.6m(W) x 12.5m(D) x 12.8m(H)		9.9m(W) x 14.4m(D) x 12.8m(H)		- 실험실 크기는 사양 및 설계에 따라 변화 - JEOL사는 가속장치와 경통 전체를 방진 - Hitachi사는 가속장치를 중점적으로 방진

이러한 기술적인 자료를 바탕으로 하여 제안요구서(RFP)를 작성하고 장비도입추진위원회를 통하여 표 3.8과 같이 장비제조사의 선정 작업을 추진한 결과 일본 JEOL사가 제조사로 선정되었다. 표 3.9에서 장비의 주요 요구사항과 JEOL사가 제안한 내용을 요약한다.

표 3.8. 장비 선정 일정 및 활동 사항 요약 (2000. 10. 20 ~ 2000. 11. 22).

일자	내 용	예 상 활 동	비 고
10.20(수)	제안요구서(RFP) 설명회	- 1 시간 이내 발표 - 설명회 내용 녹화	- 도입추진위원회 (간사) 주관 - 자재과 협조
11.01(월)	제안서 접수 마감	- 가격과 기술 제안서 별도 접수 - 가격제안서 금고 보관 - 기술제안서 봉인 상태로 보관	- 자재과 주관 - 도입추진위원회 협조
11.02(화) ~ 11.06(토)	외부 평가위원 선정	- 자문위원 중 2인 - 실무위원 중 2인	- 도입추진위원회 (간사) 주관
11.08(월)	제안서 제출업체 설명회	- 각 제안사 1 시간 이내 발표 - 비디오 녹화 - 외부 평가위원 불참	- 도입추진위원회 (간사) 주관 - 자재과 협조
11.09(화) ~ 11.13(토)	기술/지원 평가	- 기술제안서 배부 (직접 전달) - 기술평가회의 개최, 개별 평가 - 개별 평가 결과를 봉인 후 보관	- 도입추진위원회 주관 - 비디오 녹화 참조
11.15(월) ~ 11.17(수)	가격 평가	- 가격 개봉 - 가격의 상세 내용 점검	- 자재과 주관 - 도입추진위원회 협조 - 가격 개봉 시 제안자 참관
11.18(목) ~ 11.20(토)	종합 평가	- 기술평가 결과 개봉 - 가격 및 기술평가 결과 합산 - 계약 조건 상세 점검 - 종합적인 평가	- 도입추진위원회 주관 - 자재과 협조
11.22(월)	시스템 선정	- 종합 평가 결과 고시 (내부) - 제안 업체에 개별 통보 - 과기부, 실무·자문위원회 보고	- 자재과 주관 - 도입추진위원회 협조

표 3.9. 장비 요구사항과 장비 제조사로 선정된 JEOL사의 제안사항 요약.

평가항목	요구사항	제안사항 (JEOL)
주 장 치	① 분해능 o 공간분해능: ≤ 0.12 nm o 에너지분해능: ≤ 1.5 eV (LaB ₆)	o 0.12 nm (1.25 MV) o 0.6 - 1.4 eV (1 MV)
	② 가속장치 o 최고 가속전압: ≥ 1 MV o 전압 안정도: $\leq 1 \times 10^{-6}/\text{min}$ (DC stability, HT ripple)	o 1.3 MV (1.25 MV) o DC stability: $\leq 1 \times 10^{-6}/\text{min}$ (1.25 MV) HT ripple: ≤ 1.25 V (1.25 MV)
	③ 대물렌즈와 Pole Piece 관련장치 o 대물렌즈 진류안정도: $\leq 1 \times 10^{-6}/\text{min}$ o 초정밀 시료대: - $\geq \pm 60^\circ$ tilting; $\leq \pm 0.1^\circ$ 오차 - step scan (2°간격 이하) - 위치저장 및 재현(X,Y,Z, θ , δ) o multi-specimen holder(표준) o 시편보호장치; beam blanker, MDS o 이온 빔 주입장치 부착 가능	o $\leq 7 \times 10^7/\text{min}$ ($f_0=6.3$, $C_s=2.65$, $C_c=4.1\text{mm}$) o 시료대: (10h) - $\pm 60^\circ$ tilting; $\pm 0.1^\circ$ 오차 - step scan (2°간격) - 10 points (X,Y,Z, θ , δ) o 4 specimens o (?), MDS 가능 o 부착 가능
	④ 원격 제어장치 o 원격 제어 및 관찰기능: - 통합적인 운용환경 - 독립된 제어관(본소, 분소) o 자동정렬/진단/조절 기능 o 자료분석 기능: - 분석 S/W 기본 제공 - Supercomputer와 연결 가능 - 삼차원적 구조의 해석 가능	o 원격 제어 및 관찰기능: - 제공 (JEOL, Gatan) - 제공(본소, 5개 분소) o 가능 (JEOL, Gatan) o 자료분석 기능: - DIFPACK 제공(Gatan) - 가능 - 삼차원적 구조분석 S/W 제공(JEOL)
보 조 장 치	⑤ 방진장치 - 방진 방법, 규모 제시 - 방진 재질 및 성능 제시 - 방진시설의 설치 조건 제시	- large pit type (H-1.7, V-1.5 Hz) - 자료 제시 - 설치 조건 제시
	⑥ 안전장치 - 통합적인 monitoring system	- 수동식 monitoring system 제시
	⑦ 기타장치 - 진공장치 포함	- 진공장치 제시; 5×10^6 Pa (시료지역)

평가항목	요구사항	제안사항 (JEOL)
⑧ 필수 부대장비	<ul style="list-style-type: none"> o Energy filter system: 저배율(2000배 이하) 관찰 가능 o 초정밀 시료지지대: <ul style="list-style-type: none"> - double tilting holder: - tilt-rotation holder: - heating holder: $\geq 1500^{\circ}\text{C}$, $\geq 1\text{T}$ - heating holder: $\geq 1000^{\circ}\text{C}$, 2T - cooling holder: $\leq \text{LN}_2$; 2T - cooling holder: $\leq \text{LHe}$; 2T - cryo-transfer holder: $\leq \text{LN}_2$; $\geq 1\text{T}$ - anticontaminator: $\leq \text{LN}_2$ - straining holder: $\geq 800^{\circ}\text{C}$; $\geq 1\text{T}$ 	<ul style="list-style-type: none"> o 400x - 400kx (Gatan) (HV-GIF 설치 경험: MPI, NRIM) o 시료지지대: <ul style="list-style-type: none"> - $\pm 60^{\circ}/\pm 45^{\circ}$(JEOL) - $\pm 60^{\circ}/\pm 180^{\circ}$(Gatan) - $\pm 30^{\circ}$; 1500°C; powder, disc (JEOL) - $\pm 60^{\circ}/\pm 30^{\circ}$; 1000°C (Gatan) - $\pm 60^{\circ}/\pm 30^{\circ}$; LN_2 (Gatan) 0.34 nm / 5 hours - $\pm 60^{\circ}/\pm 30^{\circ}$; LHe (Gatan) 0.34 nm / 20 minutes - $\pm 60^{\circ}$; LN_2 (Gatan) 0.34 nm / 5 hours - LN_2; 8 hours; retractable (Gatan) - $\pm 45^{\circ}$; 1000°C (Gatan)
⑨ 기술이전	<ul style="list-style-type: none"> o 이전 목록과 방법 제시 o 공동연구개발 목록과 방법 제시 	<ul style="list-style-type: none"> - 기술인력 교육 - 장비 설치 know-how 이전 - 이온빔가속기 부착 know-how 이전
⑩ 지원	<ul style="list-style-type: none"> o 전문인력 교육, 훈련 지원계획 o 장비운용 연구 지원계획 	<ul style="list-style-type: none"> - 분석기술 교육지원 - 기술인력 훈련지원 - Workshop 지원 (BIO, EF-TEM, FIB 등)
⑪ 유지보수	<ul style="list-style-type: none"> o ≥ 2년 무상, ≥ 10년 유지보수 가능 o 보수정비계획 제출 	<ul style="list-style-type: none"> - 2년 무상, (?) - 대전사무소 개설, Service망 제시
⑫ Off-set Program	<ul style="list-style-type: none"> o KBSI에 무상제공장비 제시 o KBSI에 무상제공 Program 제시 	<ul style="list-style-type: none"> - JEM-2010F/Gatan DigiPEELS - 이온빔가속기 Interface - 3-D Reconstruction S/W

또한 제 1 차년도에는 도입장비를 설치할 장소의 선정 작업을 하였고 장비를 설치할 건물(특수실험실)의 기본 설계와 관련 자료의 수집도 수행하였다. 일본 Hokkaido 대학의 장비 및 건물을 참조하여 추후에 본체에 부착할 예정인 이온빔가속기의 설치계획을 수립하고 필요한 설치공간을 특수실험실 설계에 반영하였다. 표 3.10.에 과제수행 결과를 요약한다.

표 3.10. 제 1 차년도 과제수행 결과 요약.

연구내용	연구 결과
본체의 개념설계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비는 기본적으로 외부 이용자의 공동활용을 위한 장비로 설계함. 활용 분야는 재료, 특히 반도체 분야의 활용이 중점이 되면서도 의생물 분야의 활용도 가능하도록 함. 특히 생체의 삼차원적구조 분석이 가능하도록 함. ○ 장비의 주성능은 0.12 nm 이하의 분해능을 유지하면서도 $\pm 0.1^\circ$ 이하의 오차로 $\pm 60^\circ$ 이상까지 정밀한 tilting이 가능하여 원자분해능 수준에서 삼차원적 구조 분석이 가능하도록 함. ○ 원자분해능의 손상없이 원격제어를 통한 기기의 운용이 가능하도록 함.
부수기기의 개념설계	<ul style="list-style-type: none"> ○ Energy filtering 기능, 재료용 양쪽 경사 시료지지대, 생체용 경사/회전 시료 지지대 및 변온 실험에 필요한 시료지지대는 필수 부대장비로 함. ○ 원자분해능의 손상없이 ion beam 주입 system, scanning system을 추후에라도 부착하여 사용할 수 있도록 함.
기종 및 사양 선정	<ul style="list-style-type: none"> ○ 제안요구서(RFP) 확정 ○ 평가 일정 및 방법 확정 ○ 제안서 접수, 평가 시행 및 결과 통보 ○ 계약 체결 및 신용장 개설
특수실험실 및 보조시설의 기본설계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 특수실험실 기본 설치조건 파악 ○ 특수실험실 설치장소에 관한 평가 및 비용 산정 ○ 이온빔 가속기 설치 계획 작성

2. 제 2 차년도 과제수행 결과 (1999. 12. 15 ~ 2000. 10. 14)

2000년부터는 장비의 세부설계를 시작하였다. JEOL 본사에서는 그때까지 설치되었던 장비를 바탕으로 하여 새롭게 변화되거나 추가되는 부품들의 세부설계를 중점적으로 추진하였다. 장비의 성능을 유지하는데 근본이 되는 가속전압은 KBSI의 요구에 따라 1250kV에서 DC 8×10^{-7} , AC 4.8×10^{-7} 를, 대물렌즈 전류는 DC 7×10^{-7} , AC 4.8×10^{-7} 의 안정도를 목표로 하고 안정도의 향상에 필요한 세부 작업을 수행하였다. 3-D 작업 및 원격운동을 위하여 Goniometer Stage와 운영 Panel은 완전히 새롭게 설계되었다.

에너지 여과장치는 미국 Gatan사에서 세부설계를 수행하였는데 기존 장비의 Optical System을 개선하여 2nd-order 렌즈 수차 및 Distortion을 최소화하고 생체시료의 작업에 필요한 저배율 관찰(2,000배 이하)이 가능하도록 설계되었다. 대부분의 시료지지대는 미국 Gatan사에서 설계되었으나, 3-D 구조분석에 주로 사용할 양축경사 시료지지대, 4개의 시편 장착이 가능한 시료지지대(Multi-specimen holder) 및 1500°C까지 고온 가열이 가능한 시료지지대는 JEOL 본사에서 설계하였다. JEOL U.S.A.사에서 설계를 담당할 원격 제어장치는 동사가 상업적으로 개발한 원격 System인 FasTEM System을 Up-grade 시킨 것으로 초고전압 장비의 운용에 필요한 기능을 추가하여 완전한 원격운용이 가능하도록 하였다. 전자빔에 약한 시편을 보호하기 위해 Beam Blanker 기능과 MDS(Minimum-beam Dose System) 기능을 추가하였다.

장비의 핵심 기능인 3-D 구조분석 기능을 보강하기 위하여 기초연에서는 초정밀시료대의 보조장치를 제작하였다. 3-D 작업에 주로 활용되는 양축경사 시료지지대의 α 각 경사는 Goniometer를 사용하기 때문에 오차가 작지만 β 각 경사는 holder 자체의 구동 모터를 사용하기 때문에 오차가 커서 3-D 작업, 특히 무기시료의 3-D 작업에는 부적절하다. 기 보유한 Gatan사의 EF-TEM용 양축경사 시료지지대의 β 각 경사의 정밀도를 측정할 수 있는 장비의 설계 및 제작을 수행하였다.

전자현미경 특수실험실의 설계 작업은 JEOL사의 협조 아래 구체적인 자료를 수집하고 정리하는 한편 필요한 건축 예산을 확보하는데 주력하였다. 장비의 원활한 운용을 위해 기존의 EF-TEM을 이용하여 3-D 분석기법, 에너지 여과기법, 역동적 실험방법 및 특수 시편준비법을 지속적으로 개발하였다. 장비의 운용과 관련된 자료도 수집, 정리하였다.

제 2 차년도 과제수행의 주요 결과를 요약하면 표 3.11과 같다.

표 3.11. 제 2 차년도 과제수행 결과 요약.

연구내용	연구결과
<p>기기 세부설계 (JEOL, KBSI)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기본 설계: JEOL사 제공 (첨부자료 2) ○ 특수 설계 (JEOL, KBSI): <ul style="list-style-type: none"> - 초고전압은 DC 8×10^7, AC 4.8×10^7의 안정도를, 대물렌즈 전류는 DC 7×10^7, AC 4.8×10^7의 안정도를 목표로 개발 - x, y, z 축: $\pm 0.01\mu\text{m}$ 이하의 오차; α, β축: $\pm 0.1^\circ$이하의 오차를 목표로 개발 - 현재 JEOL, U.S.A.에서 개발 중인 일반 투과전자현미경의 원격운용 장치에 초고전압 장비 운용에 필요한 기능을 추가하여 완전한 원격운용이 가능하도록 개선
<p>특수실험실 세부설계 (JEOL, KBSI) (첨부자료 6)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초정밀시료대 보조장치 (KBSI): 오차가 심한 β축 경사각을 정밀하게 측정할 수 있는 보조장치 개발 (첨부자료 5)
<p>기기 운용법 개발 (KBSI) (첨부자료 8)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 설치조건 및 특수실험실 관련 도면 제공 (JEOL) ○ KBSI 건설 관계자의 Hokkaido 대학 방문 및 세부 자료 수집 ○ 건설 세부계획 및 소요 예산 산정 ○ 건설 예산 확보 (기관고유사업 중 일부: 총 39억원/2년) ○ 특수실험실 건설팀의 구성, 세부설계 업체 선정 및 세부설계 착수 <ul style="list-style-type: none"> ○ 3-D 기법 개발: <ul style="list-style-type: none"> - Double-tilting holder와 PC에서 운용되는 program(CRISP, ELD, TriMerge, TriView)을 이용한 무기재료의 3-D 구조분석법 개발 - 생체의 3-D 구조분석법 개발을 위한 tilt-rotation holder의 구입 ○ 에너지여과기법 개발: <ul style="list-style-type: none"> - 함수물질의 가열 시 수산(OH)기의 이동 상태를 직접 관찰하는 기법(ESI)을 가열 시료지지대를 이용하여 개발 ○ 역동적 실험방법 개발: <ul style="list-style-type: none"> - Double-tilting(1000°C)과 single-tilting heating holder(1300°C)를 이용하여 함수물질의 역동적 가열실험법 개발 - Heating/straining holder(single-tilt; 1000°C; $2\mu\text{m}$ 인장력)를 도입 및 실험 기법 개발 ○ 특수시편 준비방법 개발: <ul style="list-style-type: none"> - 역동적 가열 및 인장 실험에 필요한 시편준비법 개발 <ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 및 기기운용법 관련 D/B 구축: (본문 6장 및 첨부자료 7 참조) <ul style="list-style-type: none"> - 전자현미경 장비 및 기법 관련 전문학술지의 구독 및 자료 수집/정리 - 인터넷 등을 통한 자료 수집/정리 및 자료 활용 system 구축

3. 제 3 차년도 과제수행 내용(2000. 10. 15 ~ 2001. 10. 14)

2000년 말까지 주장비(본체)의 세부설계를 마치고 2001년에는 장비의 핵심부품인 가속 장치와 전자광학장치를 일본 JEOL사의 공장에서 제작하여 조립한 후 전압 및 전류 안정도를 시험하였다. 1 MV의 가속전압에서 전압 및 대물렌즈 전류의 안정도가 백만분의 1 이하의 값을 성공적으로 유지하여 일차적인 목표를 달성하였다. 또 다른 핵심부품인 초정밀시료대는 일본 JEOL 본사에서, 원격제어장치는 JEOL, U.S.A.에서 별도로 제작하였다. 에너지 여과장치와 특수 시료지지대는 미국 Gatan사에서 세부설계를 마치고 2002년 중반까지 제작 및 현지 시험을 완료하고 일본 JEOL 공장으로 옮겨 본체에 부착할 예정이다. 에너지 여과장치는 기존 장치의 단점을 보완한 새로운 장치로 생체시료의 작업에 필요한 저배율 관찰이 가능하도록 설계되었다. 3-D 구조분석에 주로 사용할 양축경사 시료지지대도 일반용은 α 각이 $\pm 60^\circ$, β 각이 $\pm 30^\circ$ 가 경사 한계임에 비해 제작 중인 장비는 α 각은 $\pm 60^\circ$, β 각은 $\pm 45^\circ$ 까지 경사할 수 있도록 하였다. 1500°C 까지 고온 가열이 가능한 시료지지대는 KBSI와 협의 아래 JEOL 본사에서 제작 중인데 direct heating 방법을 채용하였고 최대 5 Ampere까지 전류를 부과할 수 있도록 하였다.

장비의 핵심 기능인 3-D 구조분석 기능을 보장하기 위하여 대덕본원에서는 초정밀시료대의 보조장치를 제작하였다. 정밀도가 낮은 양축경사 시료지지대의 β 각을 laser와 detector를 이용하여 $\pm 0.01^\circ$ 의 정밀도로 측정할 수 있도록 고안한 장치이다. 제작 후 시험과정에서 목표로 했던 정밀도가 달성되지 않아 성능 개선작업을 수행하였다. 먼저 motorized rotate stage 구동부의 수평형 ball bearing을 수직형 roller bearing으로 교체하여 정밀도를 $\pm 0.024^\circ$ 에서 $\pm 0.013^\circ$ 로 향상시켰다. 또한 motor축의 연결 방식을 간극 조절방식에서 고정 방식으로 변경하였다. 정밀도의 추가적인 향상을 위해 $\pm 0.001^\circ$ 의 정밀도를 갖는 rotary encoder와 linear encoder를 부착하고 encoder display unit를 설치하였다. 개선된 보조장치를 이용하여 현재 일반 TEM에서 사용 중인 양축 경사 시료지지대의 β 각 경사를 측정한 결과 약 $\pm 0.4^\circ$ 의 경사 오차가 있음을 확인하였다. 경사각의 1회 측정에도 수일이 소요되기 때문에 측정의 자동화를 위한 시스템을 구축이 필요하였다. 또한 경사각 오차를 보정하는 장치와 생체 시료의 3-D 구조분석에 많이 사용되는 경사/회전 시료지지대의 회전값 오차도 정밀하게 측정할 수 있는 장치도 개발이 필요하였다.

초고전압 투과전자현미경의 성능을 유지하는데 필수적인 특수실험실의 세부설계를 완료하고 시공 작업을 준비하였다. 주장비의 성능을 최대한 보장하도록 설계하는 한편 전자현미경센터로서의 역할을 수행할 수 있도록 보조장비를 설치할 공간을 지하층에 확보

하였다. 또한 추후에 주장비에 부착하여 사용할 이온빔가속기를 설치할 공간 및 부대시설도 설계에 고려하였다. 도입될 장비와 유사한 기종을 설치하여 사용하고 있는 일본의 Hokkaido 대학(1998년 장비 설치)과 금속연구소(1994년 장비 설치)를 방문하여 건물의 세부 사항과 문제점들을 점검하고 세부 자료를 구입하여 설계에 반영하였다. 특히, 공조실 및 전기실에서 오는 소음 및 진동을 최소화하기 위해 이들을 주장비와 최대한 이격시켜 배치하고 이중 차단벽을 설치하도록 하였다. Office zone은 외부 방문객의 편의와 방문객이 장비에 주는 영향을 동시에 고려하여 설계하였다. 세부설계 초안을 장비 제작사인 일본 JEOL사와 제진대 제작사인 일본 Showa Science사의 전문가들의 점검을 거쳐 조정하고 보완하였다. 장비의 성능에 중요한 영향을 주는 제진대와 관련된 설계는 실제로 제진대를 제작하여 설치할 일본 Showa사의 주문을 최대한 반영하였다. 건축 개요는 아래와 같다.

공 사 명	전자현미경 특수실험실동 신축공사	
층 수	지하 1층, 지상 2층	
건축면적	495.00m ² (149.70평)	
연 면 적	2,054.40m ² (621.46평)	
층별면적	지하 1층	1,064.40m ² (321.98평)
	지상 1층	495.00m ² (149.74평)
	지상 2층	495.00m ² (149.74평)
최고높이	G. L. + 17.0m	
구 조	철근콘크리트조	

장비의 유지 및 보수를 위한 준비도 2000년 말부터 시작하였다. 전압 및 대물렌즈 전류 안정도 점검 및 1차 유지보수 교육을 위해 앞으로 장비의 유지보수를 담당할 본원의 기술원 2명이 일주일 동안 일본을 방문하였다. 방문 결과 1 MV에서 가속전압은 DC가 6.7×10^{-7} 의 안정도를, AC가 6.0×10^{-7} 의 안정도를, 대물렌즈는 5.0×10^{-7} 의 전류 안정도를 보임을 확인하였다. 유지보수 교육은 장비 전반에 관한 교육 및 가속장치 부분에 관한 교육으로 나누어 수행되었다.

제 3 차년도 과제수행의 주요 결과를 요약하면 표 3.12와 같다.

표 3.12. 제 3 차년도 과제수행 결과 요약.

연구내용	연구결과
<p>본체 및 부수기기 제작 (JEOL, Gatan) (첨부자료 3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본체 제작 (JEOL): <ul style="list-style-type: none"> - 초고전압 발생장치는 accelerating tube를 제외하고는 제작, 조립 완료 - 전자광학/진공장치는 condensor lens 부분을 제외하고는 제작, 조립 완료 - 새로운 장비운용 pannel 제작, 조립 중 - 초정밀시료대, 원격제어장치는 별도로 제작 중 ○ 부수기기제작 (Gatan, JEOL): <ul style="list-style-type: none"> - Post-column 에너지여과장치는 Gatan에서 제작 중 - 특수시료지지대는 Gatan에서 제작 중 - 1500℃ 가열시료지지대는 JEOL에서 제작 중
<p>초정밀시료대 보조장치 제작 (KBSI) (첨부자료 5)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초정밀시료대 보조장치 제작 ○ 시험운행 및 개선작업 수행 ○ 추가적인 개선작업 계획수립
<p>특수실험실 건립 (KBSI, JEOL) (첨부자료 6)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 특수실험실 건설팀의 구성, 세부설계 업체 선정 및 세부설계 착수 ○ 세부설계 draft의 JEOL사 점검 및 방진설비 부분의 일본 Showa사 점검 ○ 세부설계 완료 ○ 시공업체 선정작업 수행
<p>기기 운용법 개발 (KBSI) (첨부자료 8)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3-D 구조분석기법 개발: <ul style="list-style-type: none"> - Si-O-H 화합물과 Al-O-H 화합물을 이용한 정량적인 구조분석 기법 개발 - 비정질(amorphous) 물질의 전자회절 강도의 정량적 측정법 및 구조해석법 개발 ○ 에너지여과기법 개발: <ul style="list-style-type: none"> - 함수물질의 가열 시 수산(OH)기의 이동 상태를 직접 관찰하는 기법(ESI)을 가열 시료지지대를 이용하여 개발 ○ 역동적 실험방법 개발: <ul style="list-style-type: none"> - Double-tilting(1000℃)과 single-tilting heating holder(1300℃)를 이용하여 함수물질의 역동적 가열실험법 개발 - Double-tilting(LN₂) cooling holder의 효과적인 이용법과 이를 이용한 CBED 기법 개발 ○ 특수시편 준비방법 개발: <ul style="list-style-type: none"> - Ultramicrotome을 이용한 특수시편준비법 개발 - In situ heating 실험용 특수시편준비법 개발 ○ 장비 및 기기운용법 관련 D/B 구축: (본문 6장 및 첨부자료 7 참조) <ul style="list-style-type: none"> - 전자현미경 장비 및 기법 관련 전문학술지의 구독 및 자료 수집/정리 - 인터넷 등을 통한 자료 수집/정리 및 자료 활용 system 구축

4. 제 4 차년도 과제수행 내용(2001. 10. 15 ~ 2002. 10. 14)

제 4 차년도 사업 기간에는 장비의 공장 조립 및 성능시험이 주로 진행되었다. 본체는 2002년 1월에 1,000kV에서 전자빔을 처음으로 관찰하였으며 3월에는 전체적인 조립을 마치고 정밀한 성능시험을 시작하였다. 에너지 여과장치는 2002년 5월까지 미국 Gatan사에서 제작 및 자체 성능시험을 마치고 일본 Akishima에 소재한 JEOL 공장으로 운송되어 7월부터는 본체와 연결한 상태에서 성능시험을 수행하였다. JEOL사와 Gatan사에서 제작한 시료지지대도 제작을 완료하고 성능시험을 수행하였다. 원격제어장치는 2002년 7월부터 본체와 연결하여 성능시험 및 개선작업을 진행하였다.

초정밀시료대 보조장치인 경사각 측정 장치의 자동화 및 측정 오차의 보정 장치의 제작 및 성능시험을 완료하였고, 경사/회전 시료지지대의 회전값 오차의 정밀 측정 장치도 개발하였다. 한편, 미국의 Gatan사에서 공급하는 특수 시료지지대의 보관 장치인 DPS(Dry Pumping System)의 문제점을 파악하고 1차적인 자체 제작을 수행하였다. 즉, 기존의 EF-TEM용 시료지지대를 활용하여 Gatan사 장비의 문제점들을 보완한 DPS를 제작하였다.

2002년 7월 초 일본 공장을 방문하여 장비의 전체적인 성능시험 결과를 점검하였는데, 분해능 등 주요 성능이 정상적임을 확인하였다. 가속전압 및 대물렌즈 전류 안정도의 추가적인 향상을 요구하였으며 특히 3-D 작업에 필요한 Step-scan 등을 보다 정밀하고 원활히 수행할 수 있도록 Goniometer 기능의 개선을 요구하였다.

특수실험실의 건립도 본격적으로 진행되었다. 장비 성능의 유지에 핵심적인 역할을 하는 제진대의 설치를 2002년 8월부터 건물 설립과 동시에 수행하기 위해서 시공업체, 일본 Showa사와 협의하여 전체 공기의 조정 및 안전 관리에 대한 구체적인 방안을 마련하였다. 장비의 활용기법의 개발도 지속하였는데 특기할 사항으로는 고분자나 생체 시료의 TEM용 시편을 준비할 수 있는 Cryo-Ultramicrotome의 활용법 개발과 SEM 장비를 이용한 원격운영 방법의 개발을 들 수 있다. 한편, 과학대중화 교육의 일환으로 초·중·고 학생 및 과학교사를 대상으로 한 전자현미경 교육을 본원과 분소의 광학현미경 및 전자현미경을 이용하여 수행하였는데 그 과정을 통하여 앞으로 초고전압 투과전자현미경을 분소에서도 직접 운용할 수 있는 시스템 구축과 장비 운용요원의 교류 및 훈련도 추진하였다.

제 4 차년도 과제수행의 주요 결과는 표 3.13과 같다.

표 3.13. 제 4 차년도 과제수행 결과 요약.

연구내용	연구 결과
<p>본체 및 부수기기 제작 및 공장 성능시험 (JEOL, Gatan, KBSI) (첨부자료 3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본체 제작 및 성능시험 (JEOL, KBSI): <ul style="list-style-type: none"> - 초고전압 발생장치 조립 완료 - 전자광학/진공장치 제작, 조립 완료 - 초정밀시료대, 원격제어장치 제작, 조립 완료 - 본체 1차 및 2차 성능시험 완료 ○ 부수기기 제작 및 성능시험 (Gatan, JEOL): <ul style="list-style-type: none"> - 에너지여과장치는 Gatan에서 제작 및 1차 성능시험 완료 - 특수시료지지대는 Gatan에서 제작 및 1차 성능시험 완료 - 1500℃ 가열시료지지대는 JEOL에서 제작 및 1차 성능시험 완료
<p>초정밀시료대 보조장치 제작 및 개선 (KBSI) (첨부자료 5)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초정밀시료대 보조장치(Tilt/Rotation) 제작 완료 ○ 측정작업 자동화 program 개발 ○ 경사/회전 보정기 제작 ○ 특수시료지지대 저장 및 운용을 위한 dry pumping system 개발
<p>특수실험실 건립 (KBSI, JEOL) (첨부자료 6)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시공업체 선정, 대아건설(주) ○ 특수실험실 건립의 정상적 진행 ○ 제진대 설치(일본 Showa사)의 정상적 진행
<p>기기 운용법 개발 (KBSI)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 활용기법 개발 (첨부자료 8) <ul style="list-style-type: none"> - 에너지여과된 전자회절도형 및 고분해능 영상의 정량적 자료획득 기법 및 자료해석 기법 개발 - 변온 시료지지대를 이용한 역동적 정량구조분석법 개발 - 나노 분말의 정량구조분석을 위한 시편준비법 개발 - 초박절편기 및 저온초박절편기(cryo-ultramicrotome)를 이용한 특수 시편 준비법 개발 ○ 원격 장비운용법 개발 (본원의 원격운영 사업과 병행) <ul style="list-style-type: none"> - SEM을 이용한 원격운영장치 개발 - 본원과 분소를 연결하는 초고속통신망 구축 및 전자현미경 전용선 설치 추진 - 기술정보원(KIST)의 슈퍼컴퓨터를 이용한 자료해석법 개발 추진 ○ 장비 운용, 유지·보수 및 교육 수행 <ul style="list-style-type: none"> - 본원 및 분소의 장비 운용망 구축 및 운용요원 교육 수행 - 초고전압 투과전자현미경의 1차 장비 유지·보수교육 수행 - 전자현미경의 대중화 교육 프로그램 수행 (과기부 정책사업)

5. 제 5 차년도 과제수행 내용(2002. 10. 15 ~ 2003. 10. 14)

2002년 11월 18일에서 30일까지 일본 공장을 재방문하여 장비의 최종 공장성능시험을 수행하였다. 가장 중요한 점검으로는 준비해 간 Si Wafer 시편의 3-D 원자분해능 Test 로 Si의 <110> 방향에서 Dumbbell 구조(원자간 거리 1.36 Å)에 관한 원자분해능의 획득 과 함께 동일 시편에 대해 고경사각 Tilting 기법을 적용하여 Si <100>와 <111> 방향의 원자 분해능 이미지도 아울러 획득하는 것이었다. 한 시편에서 세 방향의 원자분해능 이미징은 아직까지 세계적으로도 전례가 없기 때문에 장비의 주요한 성능을 평가하는데 적절한 항목인데 성공적인 결과를 얻을 수 있었다(첨부자료 3 참조).

핵심 부수장비인 에너지여과장치는 미국 Gatan 사에서 제작하여 본체에 부착하였는데 다음의 세 가지 관점에서 성능을 점검하였다: (1) Energy-loss를 이용한 이미징, (2) 에너지분해능, (3) EELS 기능. 이 중 항목 (2)와 (3)은 정상적인 기능을 보임에 비해 항목 (1)은 기대 이상의 뛰어난 성능을 보였다. 즉, 에너지 여과기능과 이미징에 필요한 추가적인 전자광학 장치에도 불구하고 본체가 가진 원자분해능이 그대로 유지됨을 확인하였다. 따라서 EELS(전자에너지손실스펙트럼) 중 강도가 좋은 Zero-loss Peak와 Plasmon-loss Peak를 이용한 원자분해능 이미징이 가능하였다(첨부자료 3 참조). 구성 원자의 종류나 구조에 따라 Peak 위치가 다르게 나타나는 Plasmon-loss를 이용한 이미징을 이용하면 이상적인 경우에는 구성 원소들의 Contrast 차이를 통하여 원자들의 위치를 정량적으로 결정할 수 도 있다. JEOL U.S.A.에서 개발한 원격제어장치의 기본 기능은 이상이 없으나 시편의 전체적 형상과 전자회절도형을 기록하는 장치의 보강이 추가적으로 필요함을 파악하였다.

공장 성능시험이 완료된 장비는 분해, 포장된 후 2003년 1월 말에 부산항을 통하여 들어오며 2월 중순부터 현지 설치작업이 시작되었다. 현지 설치 및 성능시험과 관련된 자료는 첨부자료 4에 수록하였는데 장비의 안정도의 향상 및 설치 환경의 개선으로 공장 성능시험 때보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

Heating holder나 cooling holder 등 UHV-TEM에 사용되는 특수 시료지지대는 특수한 보관장치(Dry Pumping System)에 보관하지 않으면 제 성능을 발휘하기 힘들다. 기존의 제품들의 단점을 보완하여 UHV-TEM용 Dry Pumping System을 자체 제작하였다(첨부자료 5 참조)

종합적인 장비 및 환경의 개선 사항은 다음 항목에서 정리하고 표 3.14에서는 제 5 차 년도의 과제수행 결과를 요약한다.

표 3.14. 제 5 차년도 과제수행 결과 요약.

연구내용	연구 결과
장비의 공장설치 및 성능시험 (JEOL, Gatan, KBSI) (첨부자료 3)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 공장조립 및 기본 성능시험 (JEOL, Gatan) <ul style="list-style-type: none"> - 장비 공장조립 완료 - 장비 기본 성능시험 완료 ○ 장비의 종합 공장성능시험 (KBSI) <ul style="list-style-type: none"> - 핵심 기능의 정상적 작동 확인 - 대물렌즈 전류의 안정도는 Spec 미달 (현지 설치 때 향상시키기로 합의)
장비의 현지설치 및 성능시험 (JEOL, Gatan, KBSI) (첨부자료 4)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비의 현지도입 및 재조립 수행 ○ 장비 및 시설의 현지 성능시험 수행 <ul style="list-style-type: none"> - 공장 기본 성능시험 때보다 향상된 기능 확인 - 설치된 제진대의 우수성 확인 ○ 장비의 현지 종합 성능시험 수행 <ul style="list-style-type: none"> - 공장 종합 성능시험 때보다 향상된 기능 확인(분해능, 안정도 등) - 대물렌즈 전류의 안정도 문제 해결 확인
보조장치 개발 및 보조시설 설치 (KBSI, JEOL)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 보조장치 개발 (첨부자료 5) <ul style="list-style-type: none"> - 초정밀시료대 보조장치 up-grade - 특수 holder 보관장치 개발 및 제작 ○ 보조시설 설치 (첨부자료 6) <ul style="list-style-type: none"> - 추가적인 방습, 방진, 방음, 항온항습장치, 전기시설 설치 <ul style="list-style-type: none"> · 실외 방습시설 설치; 공조실 실외기 소음기 설치; 방음문, 방음커튼 추가 · EM실 1층/2층 통로 흡음시설 설치; 가속탱크실 흡음재 부착 · 실외기 커버 설치; 전기실과 주전원실에 냉방기 추가 설치 · 주장비용 UPS 설치 (2 x 50kVA) - 자기장 차폐장치 설치 및 성능시험 완료 (일본 JEOL Datum사와 공동) - 주요 장비 및 시설의 모니터링 및 제어장치 설치
기기 운용법 개발 (KBSI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 활용기법 개발 (첨부자료 8) <ul style="list-style-type: none"> - Electron beam irradiation 효과의 정량적 파악 기법 개발 - 에너지여과된 전자회절도형 및 고분해능 영상의 정량적 자료획득 기법 및 자료해석 기법 개발 - Imaging plate를 이용한 정량적 자료획득 기법 및 자료해석 기법 개발 - 변온 시료지지대를 이용한 역동적 정량구조분석법 개발 - 나노 분말의 정량구조분석을 위한 시편준비법 개발 - 초박절편기 및 저온 초박절편기(cryo-ultramicrotome)를 이용한 특수 시편 준비법 개발 ○ 원격 장비운용법 개발 (본원의 원격운영 사업과 병행) <ul style="list-style-type: none"> - 서울분소에서 원격으로 장비운영 시연 - 본분소를 연결하는 초고속통신망 구축 및 전자현미경 전용선 설치 추진 - 기술정보원(KISTI)의 슈퍼컴퓨터를 이용한 자료해석법 개발 추진 ○ 장비 운용, 유지·보수 및 교육 수행 <ul style="list-style-type: none"> - 본원 및 분소의 장비 운용망 구축 및 운용요원 교육 수행 - 장비 보수·유지 요원의 현지 장비설치 참여 - 전자현미경의 대중화 교육 프로그램 수행

6. 설치 완료된 장비의 종합적 특성

2003년 10월까지 본 사업에서 목적하였던 기초과학 및 응용과학 분야에서 국가적인 공동 연구장비로 활용할 수 있는 최첨단 초고전압 투과전자현미경(가속전압 1.3 MV)을 한국기초과학지원연구원 대덕본원에 성공적으로 설치하였다. 설치된 장비는 최근 일본, 독일 및 미국에 설치된 동급 장비에 비교하여 아래와 같은 특징을 가지고 있다.

(1) 원자분해능(0.12nm)과 고경사각($\pm 60^\circ$)의 동시 실행:

세계적으로도 처음 갖는 기능으로써 무기 및 유기 신물질의 삼차원적 구조를 원자 수준으로 분석할 수 있다. 장비의 성능시험 중 세계 최초로 Si wafer의 원자분해능 사진을 [110]-[100]-[111] 방향에서 얻을 수 있었다. 분해능 면만을 보면 현재 일본의 동북대와 동경대, 그리고 독일의 MPI(Max-Plank-Institute, Stuttgart)에 설치된 동급 장비의 0.10nm에 미치지 못하나 이들 장비는 $\pm 40^\circ$ 이상의 경사가 불가능하기 때문에 삼차원적 구조분석이 크게 제한된다. 이러한 새로운 기능은 21세기 국가 전략사업이 될 나노미터 단위의 다층 복합구조 반도체의 평가 및 개발은 물론, 최근 프론티어 사업 등을 통해 국내에서도 본격화하고 있는 뇌세포 및 뇌질환과 관련된 연구개발에도 획기적인 기여를 하리라고 기대한다.

(2) 최첨단 에너지 여과장치 부착:

에너지 여과장치는 명암대비가 약한 시료, 특히 생물시료의 관찰에 효과적이다. 또한, 시료의 화학성분, 화학분포 및 전자구조를 정밀 분석할 수 있어 차세대 소재로 주목되고 있는 경원소 신소재의 분석에 유용하다. 본체에 부착된 에너지 여과장치(HV-GIF)는 가장 최근에 개발된 기종으로써 독일의 MPI와 일본의 국립재료연구소(NRIM)에 부착된 기종에 비해서 모든 기능이 향상되었으며 특히 plasmon-loss 영역에서도($\Delta V \sim 20\text{eV}$) 원자분해능 관찰이 가능함을 확인하였다. 이런 경우 정량적인 작업을 수행한다면 신물질의 분석에서 원자의 위치뿐만 아니라 서로 다른 원자의 종류까지도 직접 구별할 수 있는 새로운 길을 열 수 있기 때문에 장비의 시험가동 기간에 이 분야를 집중적으로 점검할 예정이다.

(3) 역동적 연구에 필요한 다양한 시료지지대의 구비:

넓은 범위(액체헬륨 온도 $\sim 1500^\circ\text{C}$)의 변온 실험과 변형 실험을 역동적으로 할 수 있는 시료지지대를 준비하였다. 저온 시료지지대는 단백질 구조분석, 초전도물질 연구 등에

필수적이며 고온 및 변형 시료지지대는 고온 소재 연구 및 역동적인 상변이 연구 등 신물질 및 신공정 개발에 활발히 이용할 수 있다. 특기할 사항은 고온 시료지지대의 성능시험 중 1100℃에서도 원자분해능 이미지를 얻었는데 이는 동급 장비에서 얻은 원자분해능 이미지 중 가장 고온에서 얻은 것이다. 고온 가열실험 시에 시편의 유동을 막기 위해 새롭게 개발, 제작된 water recirculator system을 사용하였다.

(4) 원격제어로 기기 운용:

세계에서 세 번째이며 JEOL 장비로서는 처음 시도되는 원격운용 방식이다. 일본 Hitachi 사에서 오오사카 대학과 Hitachi 중앙연구소에 각각 설치한 동급 장비는 Workstation-base로 운용되며 원격운용만이 가능함에 비해 본 장비는 사용이 일반화된 PC-base로 운용되며 직접운용도 가능하다. 특히, 세계적으로도 선진화된 국내의 IT 기술과 접목하면 사용자에게 접근이 용이하고 친근한 운용환경을 제공하여 초고전압 투과전자현미경의 활용도를 극대화할 수 있고 급속히 발달하는 컴퓨터 산업에 발맞추어 필요시 기기의 성능을 손쉽게 개선시킬 수 있는 장점이 있다.

(5) 이온빔 가속기 장착 가능:

장래에 꼭 필요하다고 생각되는 이온빔 가속기의 부착을 위하여 장비의 본체에 접속 부위를 제작하였으며 전자현미경동에 이온빔 가속기를 설치할 수 있는 공간 및 부대시설을 확보하였다. 이온빔 가속기의 부착은 일본의 국립재료연구소와 홋카이도 대학, 그리고 미국의 국립아르곤연구소(ANL)의 장비를 대표적으로 들 수 있는데 전통적인 원자로와 핵융합로의 재료연구에 활용하는 외에도 최근 신소재 개발에도 활용이 증가하고 있다. 국내의 원자력연구소는 이온빔 가속기를 자체 제작할 수 있는 기술력을 가지고 있기 때문에 우리나라의 현실에 필요한 사양의 이온빔 가속기를 적절한 시기에 국내 제작하고 본체에 부착하면 장비의 활용성을 더욱 넓힐 수 있다.

일본 JEOL 공장에서 조립 완료된 장비는 2002년 11월 하순에 종합 성능점검이 수행되었고, 그 후 분해, 이동되어 2003년 2월 중순부터 기초연에서 재조립이 수행되었다. 2003년 5월말까지 본체의 재조립이 완료되어 6월부터는 다양한 성능점검이 수행되었는데 그 중에서도 장비의 성능을 좌우하는 가속전압 안정도와 대물렌즈의 안정도 점검이 중점적으로 진행되었다. 아래의 표에 본 장비와 가장 유사한 모델인 일본 Hokkaido 대학의 장비(1998년 설치)의 점검 결과와 본 장비의 공장 및 현지 성능점검 결과를 표 3.15에서 비교한다. 장비의 현지 설치 때 성능이 뚜렷이 향상되었음을 볼 수 있다.

표 3.15. 가속전압 및 대물렌즈 전류 안정도의 측정 자료의 비교.

가속전압 안정도 측정결과					
가속전압	측정방법	KBSI (2003. 6)	JEOL 공장 (2002. 11)	Hokkaido 대학 (1998)	비 고
1250kV	DC	7.80×10^{-7}	7.89×10^{-7}	8.0×10^{-7}	Spec: 1.0×10^{-6}
	AC	3.30×10^{-7}	4.80×10^{-7}	8.0×10^{-7}	Spec: 1.0×10^{-6}
1000kV	DC	6.25×10^{-7}	6.70×10^{-7}	-	
	AC	4.57×10^{-7}	6.00×10^{-7}	-	
800kV	DC	7.20×10^{-7}	9.20×10^{-7}	-	
	AC	4.46×10^{-7}	6.25×10^{-7}	-	
600kV	DC	7.10×10^{-7}	-	-	
	AC	6.07×10^{-7}	-	-	
400kV	DC	7.50×10^{-7}	1.06×10^{-6}	-	
	AC	6.40×10^{-7}	8.57×10^{-7}	-	
대물렌즈 전류 안정도 측정결과					
가속전압	측정방법	KBSI (2003. 6)	JEOL 공장 (2002. 11)	Hokkaido 대학 (1998)	비 고
1250kV	DC	3.0×10^{-7}	4.70×10^{-7}	4.1×10^{-7}	Spec: 1.0×10^{-6}
	AC	6.4×10^{-7}	4.69×10^{-6}	-	Spec: 1.0×10^{-6}
1000kV	DC	2.4×10^{-7}	-	-	
	AC	7.8×10^{-7}	-	-	
800kV	DC	3.1×10^{-7}	6.90×10^{-7}	-	
	AC	8.1×10^{-7}	-	-	
600kV	DC	3.9×10^{-7}	-	-	
	AC	1.0×10^{-7}	-	-	
400kV	DC	3.9×10^{-7}	7.75×10^{-7}	-	
	AC	1.4×10^{-7}	-	-	

핵심 부수장비인 에너지여과장치(HV-GIF)의 성능 점검은 일본 JEOL 공장에서 장비가 본체에 조립된 시기(2002년 7월 ~ 8월)에 1차 점검이 있었고, 2002년 11월 하순에 장비의 종합 성능점검 때 2차 점검이 있었다. 기초연(KBSI)에서의 재조립은 2003년 7월 중에 수행되었는데 자기장 차폐시설의 설치(첨부자료 6 참조) 관계로 핵심 성능만 예비 점검을 하고 종합적인 성능점검은 2003년 9월과 10월 중에 수행되었다. 표 3.16에 HV-GIF의 성능점검 결과를 장비의 사양과 비교하여 요약한다.

표 3.16. HV-GIF의 성능점검 결과 요약.

Parameters	Test Results (1,250kV)	Specification (1,250kV)	Unit
Chromatic aberration (Center)	0.4	<2	Pixel/50eV
Chromatic aberration (Edge)	0.85	<2	Pixel/50eV
Distortion (RMS)	0.76	1.5	%
Magnification	12.5	12.5 ± 0.2	Times
Aspect ratio	1.001	1.00 ± 0.01	
Isochromaticity	± 0.77	± 1.5	eV
Slit width	2~50 ± 1		eV
Resolution of zero-loss peak (0.6mm aperture)	1.1	3.0	eV
Resolution of zero-loss peak (0.3mm aperture)	1.3		eV
Dispersion	0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0	0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0	eV/channel

2002년 11월말 일본 공장 조립 및 성능시험이 완료된 상태의 장비 모습은 그림 3.1과 같이 제진대를 제외한 장비의 전체 모습을 볼 수 있는 상태였으나, 2003년 10월 한국기초과학지원연구원에서 장비의 재조립 및 성능시험을 완료할 때에는 그림 3.2처럼 가속탱크 부분은 2층에 위치하고 본체(Column) 부분은 1층에 위치하기 때문에 장비의 전체 모습을 볼 수 없는 상태이다. 그림 3.2에 지하층에 위치한 제진대의 사진도 포함시켰는데 이렇게 가속장치-본체(Column)-제진대는 각 층에 따로 위치하지만 실제로는 하나로 연결되어 일체를 이룬다.

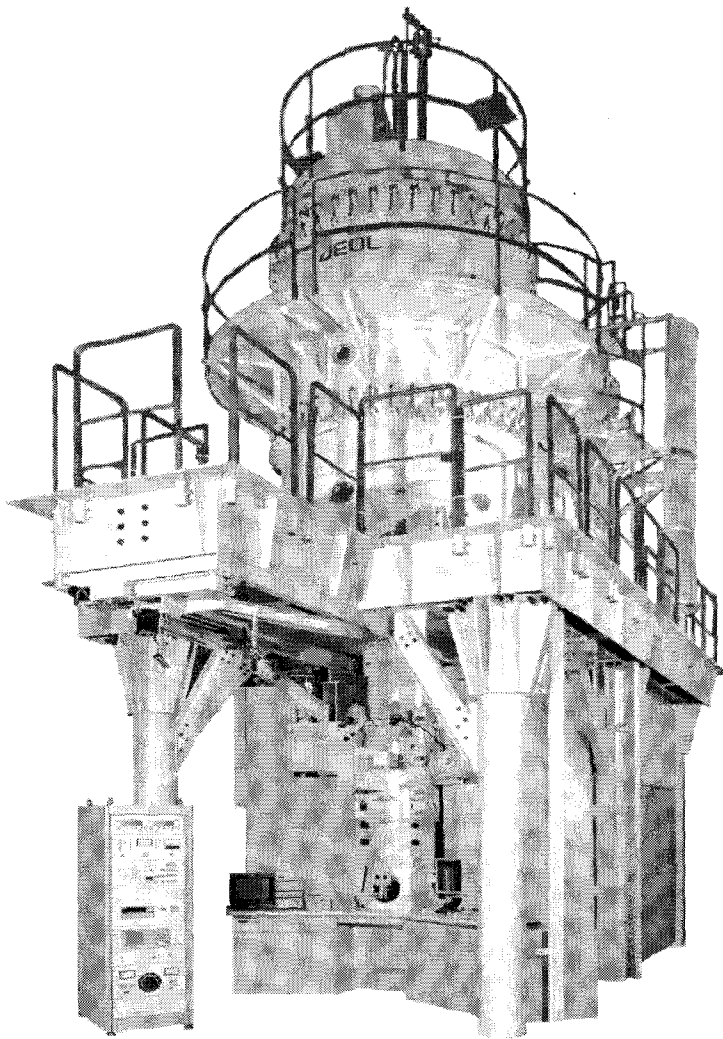


그림 3.1. 2002년 11월 공장 조립 및 성능시험 완료된 장비 모습

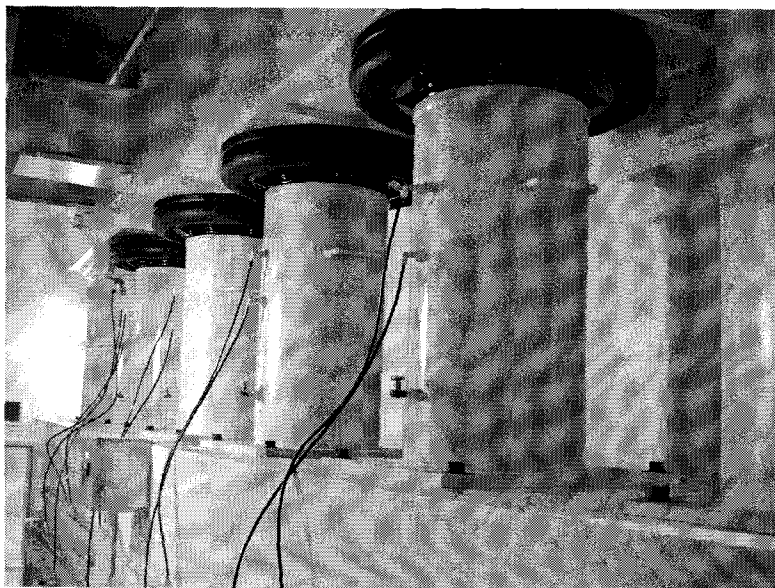
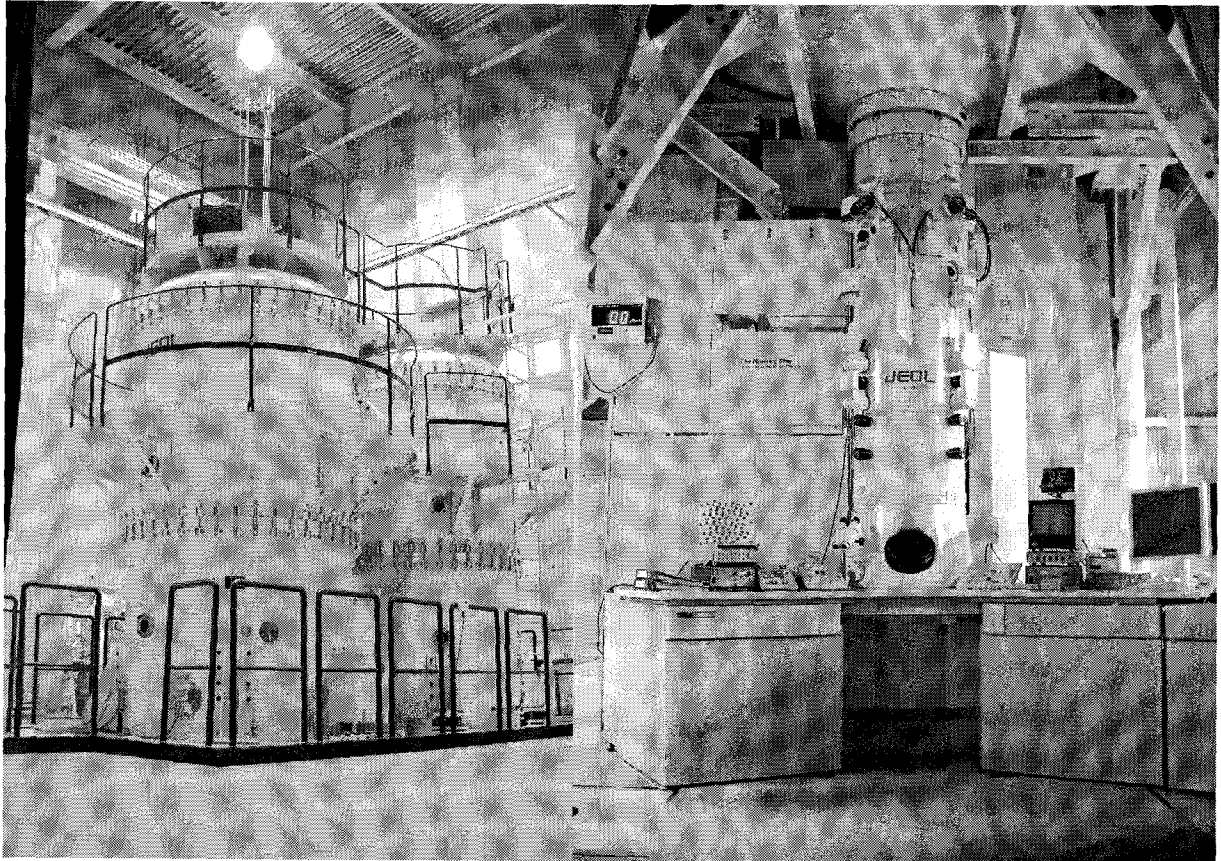


그림 3.2. 2003년 10월 현지 조립 및 성능시험 완료된 장비 모습. 가속탱크는 2층에, 본체(Column)는 1층에, 그리고 제진대는 지하층에 각각 위치한다.

현지 설치 및 성능시험을 마치고 최종적으로 완성된 장비의 주요 사양을 표 3.17에 요약한다.

표 3.17. KBSI UHV-TEM(모델이름: JEM-ARM1300S)의 주요 사양.

항 목 (Item)		사양 (Specification)
Resolution (at 1,250kV)	Point Resolution	0.12nm
	Lattice Resolution	0.10nm
	Energy Resolution (HV-GIF)	1.3eV
Accelerator	Accelerating Voltage	1250/1000/800/600/400kV (max. 1300kV)
	Minimum Variable Step	500V
	DC Stability	7.8×10^{-7} (at 1,250kV)
	HT Ripple	4.8×10^{-7} (at 1,250kV)
	Maximum Beam Current	10 μ A (at 1,250kV)
Objective Lens	Exciting Current Stability	DC: 3.0×10^{-7} (at 1,250kV) AC: 6.4×10^{-7} (at 1,250kV)
	Cs	2.65mm
	Cc	4.1mm
	Minimum Focus Step	4.0nm
Specimen Chamber	Tilting Angle(Goniometer)	$\pm 60^\circ$
	Specimen Movement	± 1 mm (X, Y); ± 0.5 mm (Z)
Magnification	LOW MAG Mode	200 ~ 1,500x (9 step)
	MAG Mode	2,000 ~ 2,000,000x (30 step)
	SA MAG Mode	20,000 ~ 150,000x (10 step)
	MM MAG Mode	200,000 ~ 500,000x (5 step)
	GIF MAG Mode	400 ~ 400,000x (30 step)
Electron Diffraction	SA DIFF Mode	1.2 ~ 10.0 nm · mm (10 step)
	MM DIFF Mode	0.6 ~ 1.0 nm · mm (3 step)
	GIF DIFF Mode	0.3 ~ 2.5 nm · mm (10 step)
Ultimate Pressure	Bottom of Acceleration Tube	8×10^{-6} Pa or less
	Specimen Chamber	5×10^{-6} Pa or less

7. 핵심 기술개발 사항 요약

(1) 장비 본체 (JEOL 일본 본사에서 주도적으로 개발):

가장 최근에 설치되고, 가장 유사한 모델인 홋카이도 대학의 장비(1998년 설치, 1.3 MV, Model JEM-ARM 1300)와 비교하여 본 장비(Model JEM-ARM 1300S)는 아래의 표 3.18과 같이 기술적으로 개선되었다.

표 3.18. JEOL사의 핵심 기술개발 사항 요약.

Subject		KBSI 장비	Hokkaido 대학 장비
System	CPU (ROM) for control of EM side	- New CPU (ROM) is employed for remote operation	- Conventional type CPU (ROM)
	Goniometer Stage	- Controlled by an exclusive PC through a tracker ball and switches - Exclusive graphic user interface is employed - Expansion of position memory and position recall memory	- Conventional type
	Conditions Indicator	- A small LCD is added to display lens voltage values and alignment voltage values at all time	- Operation conditions are indicated in several pages on a single monitor
	Water Alarm	- Pop up display on a small LCD is newly added besides of LED display	- LED display when a problem occurs
	Memory Area	- 512 kbit - Memory was expanded for full remote operation	- 8 kbit
	New Command	- To fill up operation, following new commands are added: Standard Focus, CL, Brightness Zoom, etc	- None
Appearance	Operation Pannel	- Flat table type (increase working space)	- Conventional type
	Power Console	- Total 7 units (reduce storing space)	- Total 8 units
Column	Specimen Chamber	- For checking of ion beam position, a viewing port is added on the left side	- Right viewing port only
	Viewing Chamber	- Added 2 ports for Wide View TV and pneumatic operation Beam Stopper	- None

Subject		KBSI 장비	Hokkaido 대학 장비
High Voltage Circuits	Stability Circuits	- To improve DC stability, removed a condenser from the detection part of feedback resistor/condensor column in HT Tank, and expanded DC stability frequency band	- Not applied
	Noise Compensator	- Low Frequency Compensator: by setting a noise detection circuit closer to a HT tank to reduce a noise in 50 Hz - Medium Frequency Compensator: power up of medium frequency noise compensator unit	- Not applied
	Filament Circuits	- Added ON/OFF switch control circuits built-in to be able to remote operation	- Manual potential meter operation
Lens Circuits	Objective Lens Circuits	- High stability control AMP built-in - Shorten cooling water hoses to increase cooling response to reduce drift amount	- Not applied
Vacuum System	Pumping Sequence 1	- Changed vacuum sequence to enable to evacuate ACC chamber and column independently when they are in atmospheric pressure	- When column and ACC chamber are in atmospheric pressure, column evacuation cannot be started until the pressure of ACC chamber goes high enough
	Pumping Sequence 2	- To reduce load of TMP, the sequence of rough pumping by TMP was changed to start from atmospheric pressure	- Not applied
	Balloon for leak vacuum chambers	- A balloon for leaking was replaced with low-pressure release valve and N ₂ cylinder (A ballon sometimes bursts when N ₂ gas is filled)	- Not applied
SF ₆ Gas Collector		- According to an agreement of environmental preservation at Kyoto Protocol, an oil-free scroll pump was employed to reduce atmospheric emission amount of SF ₆ gas - This pump automatically starts working after collection by compressor, and it enables to improve marginal vacuum level for gas collection up to 1.33 kPa	- Only a compressor is used for collection of SF ₆ gas, and marginal vacuum level for gas collection goes up to 380 Torr (50 kPa) only

(2) HV-GIF (미국 Gatan사에서 주도적으로 개발):

본체에 부착된 에너지여과장치(HV-GIF)는 가장 최근에 개발된 기종으로써 독일의 MPI와 일본의 국립재료연구소(NRIM)에 부착된 기종에 비해서 기능이 전반적으로 향상되었는데 주요 개선사항을 아래의 표 3.19에 요약한다.

표 3.19. Gatan사의 핵심 기술개발 사항 요약.

개선 항목	주요 개선사항	비 고
Enhanced Electron Optical Design	<ul style="list-style-type: none"> - completely redesigned optical system - free of all second- and third-order aberrations - collect much larger scattering angles (maximum angle > 20mrad) - built-in beam blander for increased exposure stability 	<ul style="list-style-type: none"> - 넓은 에너지손실 영역에 걸쳐 원자분해능을 유지하는데 핵심적인 기능; 상기한 바와 같이 성능이 확인됨 - 향상된 EELS 및 ESI data 획득에도 중요
Improved Electronics	<ul style="list-style-type: none"> - completely redesigned electronics - 16 bit resolution for precise control of all quadruple lenses at every operating voltage 	<ul style="list-style-type: none"> - 장비의 전체적인 안정성 증가
New High Voltage MultiScan CCD Camera	<ul style="list-style-type: none"> - higher read-out speed for increased experimental flexibility - 14 bit resolution - fast read out of up to five 512x512 pixel frames/second - increased sensitivity by 4 times 	<ul style="list-style-type: none"> - HVEM 작업에서 가장 어려운 문제점 중 하나인 image drifting 현상을 해결하는데 매우 중요한 기능 - 실제 test에서 0.1초의 노출시간으로도 해석 가능한 고분해능 영상을 기록함
New Intensified TV-rate CCD Camera	<ul style="list-style-type: none"> - TV rate imaging with much improved sensitivity, brightness and contrast compared to the older non-intensified camera's 	<ul style="list-style-type: none"> - 원자분해능 작업을 위한 장비의 alignment와 각종 수차들의 보정을 보다 손쉽게 수행할 수 있음
AutoFilter Applications Software and User Interface	<ul style="list-style-type: none"> - provides an easy to use, icon driven, graphical user interface to both the imaging and spectroscopy modes - unique auto-tuning routines which increase the ease of use, user friendliness and reliability 	<ul style="list-style-type: none"> - 방문연구자 등 HV-GIF system에 익숙하지 않은 이용자들에게 특히 편리한 기능 - 작업 도중에도 한 번 버튼을 누름으로써 전체적인 기능을 향상 시킴

(3) Remote Control System (JEOL U.S.A.사에서 주도적으로 개발):

본 장비에서 사용하는 원격제어 System(Sirius System)은 JEOL사의 일반 TEM을 원격 제어할 수 있도록 JEOL U.S.A.사에서 근래에 상업적으로 개발한 FasTEM System을 up-grade시킨 것이다. 핵심 기술개발 사항은 표 3.20과 같이 요약할 수 있다:

표 3.20. JEOL U.S.A.사의 핵심 기술개발 사항 요약.

기술적인 특징	KBSI 원격 System (Sirius System)	기존 FasTEM System
Improved Communications	<ul style="list-style-type: none"> - Uses both Arcnet and RS232 to control both the instrument and the goniometer subsystems resulting in an improved speed response over the FasTEM - Both systems are Asynchronous and do not require polling which can impede performance 	- Uses RS232 only
Expanded Internal Memory	<ul style="list-style-type: none"> - Memory expansion to 512k to facilitate new capabilities such as advanced MDS and aperture control 	- 8k
Extended High Tension Control	<ul style="list-style-type: none"> - Provides both the Total Current and Beam Current displayed on the client both locally and remote - Control of the Filament On/Off on the client, in addition to the current status of the High Tension (High Tension Ready, High Tension On, Filament Ready, Filament On) 	- None
Motorized Apertures	<ul style="list-style-type: none"> - Integrated aperture control with memory positions, coarse and fine control, both locally and remote 	- Partly integrated system
Alignment Memory	<ul style="list-style-type: none"> - A function to read and restore the complete alignment memory of the instrument. This functions takes about 4 minutes in comparison to 2 days to restore the alignment by an engineer 	- None
Complete Remote Operation	<ul style="list-style-type: none"> - Complete control of the instrument from a remote location: include control of the goniometer using a remote trackball, for x & y translation, z position, tilting, and rotation - Aperture control from the client GUI for Aperture Selection, Coarse Selection, and Fine Adjust - Reduced knob set for a commonly accepted means of controlling the instrument using knobs and buttons 	- Limited remote control
Seamless Integration	<ul style="list-style-type: none"> - Backward compatible to all third party integration packages that are meant for the FasTEM system 	- Limited integration
Advanced Minimum Dose System	<ul style="list-style-type: none"> - New minimum dose system provides 5 programmable modes that the user can setup for Search, Defocus Search, Focus, Photo, and Defocus Photo - Integrated control of Beam Blanker - Up to 20 positions can be used in the Focus mode for Focusing off axis and for tilt correction 	- None

(4) 특수 Holder 보관장치 (Dry Pumping System, KBSI에서 개발):

저온시료지지대, 가열시료지지대 등 역동적 실험에 필요한 특수 시료지지대는 고진공 상태에서의 보관이 필수적이다. 이러한 보관 용도로 현재 상업적으로 판매되고 있는 미국 Gatan사의 Dry Pumping System의 단점들을 보완한 새로운 System을 KBSI에서 자체 개발, 제작하였는데 아래의 표와 같은 특징이 있다(첨부자료 5 참조).

표 3.21. KBSI의 Dry Pumping System에 대한 핵심 기술개발 사항 요약.

Subject		KBSI 장비	Gatan 장비	비 고
Vacuum System	Turbo-drag Pump - Pumping speed - Ultimate pressure	- 50~100 l/s - 1×10^{-8} mbar	- 7.5 l/s - 2.67×10^{-6} mbar	진공도 및 진공도달 속도 향상
	Diaphragm Pump - Pumping speed	- 60 l/s	- 7.5 l/s	진공도 및 진공도달 속도 향상
	Measurement Range	- $1 \times 10^3 \sim 5 \times 10^9$	- $1 \times 10^3 \sim 5 \times 10^9$	동일
	Maximum Vacuum	- 6.4×10^7 mbar	- 2.67×10^5 mbar	진공도 및 진공도달 속도 향상
	Cooling	- Air	- Air	동일
	Vent	- Auto, N ₂	- Manual, Air	안전성 향상
Holder & Case	Holder 구성	- Central part - Upper part - Bottom part	- Holder (1 set) - Central part	Holder의 추가 및 변형이 용이
	Needle Valve	- 3 개	- 2 개	특수 holder의 교환 작업이 용이
	추가기능 장착	- Holder와 Case의 고정작업 - 안전장치 추가: holder lock	- None	Holder가 원위치에서 움직이거나 이탈하는 현상의 방지
	Frame Part	- 785(W) x 785(D) x 688(H) (mm)	- 420(W) x 266(D) x 343(H) (mm)	여러 개의 holder를 동시에 장착했을 때 무게 중심의 유지
추가 가능한 Holder 수	- 15 개	- 4 개	다수의 Holder 장착 가능	

(5) 장비 설치환경 (특수실험실 및 보조시설 설치, KBSI에서 주관):

장비의 원자분해능을 유지하기 위해서는 매우 까다로운 설치조건이 요구된다. 주변 환경이 곧 장비의 분해능 및 안정도에 영향을 미치기 때문이다. JEOL사에서 요구한 설치 조건보다 나은 설치환경을 조성하기 위해 면밀한 준비 아래 특수실험실을 건립하고 필요한 보조시설을 설치하였다. 표 3.22에 주요 사항을 요약한다.

표 3.22. 장비 설치환경 개선사항 요약.

항목	세부항목	JEOL 설치조건	KBSI 설치환경
EM Room	자장(AC/DC magnetic field fluctuation)	- 0.1 μ T 이하	- 1.0 μ T (자기장차폐장치 설치 전) - 0.01 μ T (자기장차폐장치 설치 후)
	소음(A-weighted sound pressure level)	- 45 dB(A) 이하	- 38 dB(A) 이하 (방음문, 소음기, 흡음재, 흡음커튼 등 설치)
	풍속(Air blow speed)	- 0.1 m/s 이하	- 0.01 m/s 수준 (유공판 설치)
	온도(Temperature)	- 20~25 $^{\circ}$ C - fluctuation: \pm 1 $^{\circ}$ C	- 22 $^{\circ}$ C (setting) - fluctuation: \pm 0.1 $^{\circ}$ C (공조기 조절)
	습도(Humidity)	- 40~60%	- 조건 충족
	Water Chiller (Electron Lens용)	- 20 $^{\circ}$ C - fluctuation: \pm 0.1 $^{\circ}$ C - 실외기 40 $^{\circ}$ C 이하 유지	- 20 $^{\circ}$ C - fluctuation: \pm 0.05 $^{\circ}$ C - 조건 충족 (Shade 설치)
제진대	바닥 진동 (Max. floor vibration)	- 0.2 μ m 이하 (1~5 Hz); - 0.1 μ m 이하 (5 Hz 이상)	- 0.01 μ m 이하 (전 주파수)
기타 환경	도로/철로	- 자동차 통행도로에서 30m 이상 이격 요구 - 철도, 지하철이나 고속도로 주변 최대 회피	- 조건 충족
	작업 공간	- 건물 옆에 22ton 트럭 정차 및 회전 공간 필요 - 이온빔가속기 설치시설 및 공간 필요	- 조건 충족
	기타 사항		- 주장비 UPS 설치 (2 x 50kVA) - 전기실 에어컨 설치 - 건물의 지하 방습시설 설치

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발 목표 달성도

연구개발 사업의 최종목표인 “원자단위의 구조까지 직접 관찰할 수 있는 고성능의 초고전압 투과전자현미경을 설치하여 국가적인 연구 장비로 공동 활용하고 국제 수준의 전자현미경 공동 연구센터의 주장비로 육성”은 목표한대로 달성하였다. 현지설치 및 성능시험이 완료된 장비는 전장에서 기술하였듯이 세계 최초로 삼차원적 원자분해능을 구현할 수 있는 장비이다. 본 장비는 이미 설치, 운영 중인 포항가속기나 하나로 시설과 같이 국가적인 공동 연구장비(National User's Facility)로 운영될 예정이며 이에 필요한 운영 예산도 확보하였다. 본 장비(UHV-TEM)를 중심으로 하여 보조 장비로 함께 도입된 최신형 전계방출 투과전자현미경(FE-TEM; 200kV)과 1996년 도입되어 활발한 연구지원을 수행하고 있는 에너지여과 투과전자현미경(EF-TEM; 120kV)을 적절히 연계하고 효과적으로 활용하면 국제적 수준의 전자현미경 공동 연구센터로서 역할을 수행할 수 있다고 판단된다. 세계적인 전자현미경 연구기관인 미국의 University of California at San Diego, 일본의 국립재료연구소(NIMS) 및 오오사카 대학에서 본 장비를 원격제어를 통해 직접 운용하고자 협약(MOU)을 맺었다. 한 동안 일본 지역 외에서는 설치가 중단되었던 초고전압 투과전자현미경의 설치를 현재 미국 및 중국에서도 추진 중에 있으며 일본도 본 장비와 비슷한 사양의 장비를 큐우슈우 대학에 설치하기로 결정하고 실무 작업 중인 것을 보더라도 본 장비의 국제적인 위상을 알 수 있다.

연차별 목표 달성도는 표 4.1에 정리하였다. 전반적으로 사업의 핵심 사항인 장비와 관련된 목표는 매년 달성하였다. 장비의 성능을 보장할 특수실험실의 건립과 관련된 목표는 별도의 예산확보가 어려웠기 때문에 예정보다 약간 지연되었으나 궁극적으로는 장비의 성능 보장이라는 목표를 달성하여 장비의 현지 성능시험 결과가 공장 성능시험 결과보다 좋을 수 있었다. 기기운용법 개발과 관련된 목표는 보유 중인 EF-TEM을 주로 이용하여 수행하였는데 장비 성능의 제한으로 변온시료지지대를 이용한 역동적 분석법과 에너지여과 분석법 개발에 치중하였다.

표 4.1. 연차별 목표 달성도.

연구 연차	목 표	달성도 (%)	달 성 내 용
1 차 년 도	초고전압 투과전자현미경의 고분해능, 고투과력, 고에너지 기능을 극대화할 수 있는 본체의 개념설계	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 보장된 원자분해능(0.12nm 이하) 활용 가능 ○ 원자분해능과 고투과력을 동시에 이용한 삼차원적 구조분석 가능 (세계 최초로 $\pm 0.1^\circ$ 이하의 오차로 $\pm 60^\circ$ 이상까지 정밀한 tilting이 가능한 시료대 활용) ○ 고에너지의 전자빔과 이온빔을 동시에 이용할 수 있는 본체의 설계 (이온빔 가속기 장착은 추후 예산 사정에 따라 부착 가능함)
	기초과학과 응용과학의 다양한 분야의 활용에 필요한 부수기기의 개념설계	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 재료 및 생물 분야 동시 이용 가능; 경원소나 생체 등 명암대비가 약한 시편 연구에 필요한 에너지여과 장치 부착 요구 ○ 다양한 분야에서 이용이 가능한 시료지지대 요구
	상기한 요건을 만족시키는 기종 및 사양 선정	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원하는 조건들을 만족시키는 기종을 사업의 예산 범위 안에서 선정, 계약
	선정된 기기의 최대 성능을 발휘할 수 있는 특수실험실 및 보조시설의 기본설계	90	<ul style="list-style-type: none"> ○ 특수실험실 건물, 설치 조건 및 입지 조건 파악 ○ 이온빔가속기 설치계획안 마련
2 차 년 도	기기의 세부설계: 기본설계 완료 및 특수설계 추진 (JEOL, KBSI)	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기기의 기본설계 완료 (JEOL) ○ 가속장치의 전압 및 대물렌즈 전류의 추가적인 안정도 향상을 위한 세부설계 추진 (JEOL, KBSI) ○ 초정밀시료대의 추가적인 정밀도 향상을 위한 세부설계 추진 (JEOL, KBSI) ○ 초정밀시료대의 추가적인 정밀도 향상을 위한 세부설계 추진 (JEOL, KBSI) ○ 오차가 심한 β축 경사각을 정밀하게 측정할 수 있는 보조장치 개발 추진 (KBSI)
	특수실험실의 세부설계 추진 (JEOL, KBSI)	80	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 설치에 필요한 세부자료 수집 완료 ○ 건설 세부계획 및 소요 예산 산정 및 필요예산 확보 ○ 건설팀 구성, 세부설계 업체 선정 및 세부설계 착수
	기기 운용법 개발 (KBSI)	90	<ul style="list-style-type: none"> ○ 무기시료의 3-D 구조분석 기법 개발 추진 ○ 가열에 의한 역동적 실험기법 개발 추진 ○ 인터넷을 통한 자료 수집, 정리 및 활용 system 구축 추진

연구 연차	목 표	달성도 (%)	달 성 내 용
3 차 년 도 및 4 차 년 도	본체 및 부수기기 제작 및 성능시험 (JEOL, Gatan, KBSI)	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초고전압 발생장치 및 가속장치 제작 및 성능시험 완료 ○ 전자광학장치 및 초정밀시료대 제작 및 성능시험 완료 ○ 원격제어장치 제작 및 성능시험 완료 ○ 특수분석장치 제작 및 성능시험 완료 ○ 특수시료지지대 제작 및 성능시험 완료
	초정밀시료대 보조장치 제작 및 개선 (KBSI)	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초정밀시료대 보조장치(T/R) 제작 완료 ○ 자동화 운용 program 개발 및 정밀도 측정 ○ 경사/회전 정밀도 보정기 제작
	특수실험실 건립 (KBSI, JEOL)	90	<ul style="list-style-type: none"> ○ 건설팀 구성, 세부설계 업체 선정 및 세부설계 착수 ○ 세부설계 완료 및 시공 준비 ○ 시공 업체 선정 ○ 특수실험실 건설 및 제진대 설치의 정상적 진행
	기기 운용법 개발 (KBSI)	90	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3-D 구조분석 기법 개발 ○ 에너지여과 및 EELS 기법 개발 ○ 가열/냉각에 의한 역동적 실험기법 개발 ○ 원격 장비운용법 개발 ○ 장비 운용, 유지·보수 훈련 및 교육 수행
5 차 년 도	장비의 공장설치 및 성능시험 (JEOL, Gatan, KBSI)	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본체 및 부수기기의 공장조립 완료 ○ 본체 및 부수기기의 기본 성능시험 완료 ○ KBSI의 연구진에 의한 장비의 종합 성능시험 완료
	장비의 현지설치 및 성능시험 (JEOL, Gatan, KBSI)	100	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 분해 및 운송 완료 ○ 본체 및 부수기기의 현지조립 완료 ○ KBSI의 연구진에 의한 장비의 현지 종합 성능시험 완료
	보조장치 및 보조시설 개발 (KBSI, JEOL)	90	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초정밀시료대 보조장치 up-grade 및 성능 시험 완료 ○ 특수 holder 보관장치 제작 완료 ○ 추가적인 방음, 방습, 방진 및 항온항습장치의 설치 완료 ○ 자기장 차폐장치 설치 및 성능시험 완료 ○ 주요 장비 및 시설의 모니터링 및 제어장치 설치 중
	기기 운용법 개발 (KBSI)	90	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 활용기법 개발 ○ 원격 장비운용법 개발 ○ 장비 운용, 유지·보수 훈련 및 교육 수행

제 2 절 관련분야에의 기여도

초고전압 투과전자현미경의 설치는 고정밀도의 초고전압 발생 및 가속 장치, 전자광학 장치, 진공 장치의 개발과 고정밀도의 전자기장 차폐 및 방진 기술을 이용한 특수실험실의 건립 등으로 이루어진 최첨단 복합장치 기술을 필요로 하기 때문에 장비의 설치 과정을 통하여 이러한 기술을 조기에 습득하여 국내의 고부가 장치산업기술을 향상시킬 수 있는 기틀을 마련할 수 있었다. 먼저 기술적 측면에서 보면 아래와 같은 기여도를 열거할 수 있다.

(1) 장비의 핵심기술인 고정밀도의 초고전압 발생장치와 안정장치의 기술적인 원리 및 안정도의 측정방법을 파악하였다. 이는 1993년 러시아와 합작하여 개발한 1 ~ 2 MV급의 산업용 전자가속기의 정밀도를 향상시키는데 이용할 수 있을 뿐만 아니라 보다 부가가치가 높은 초고전압 발생 장치를 개발하는데 긴요하게 이용할 수 있다.

(2) 최신 개발된 에너지 여과장치의 제작 및 설치 과정을 통해 고도의 기술력으로 세계적으로도 이 분야에서 독점권을 행사하고 있는 미국 Gatan사 제품의 특성 및 구성을 구체적으로 파악하였다. 에너지 여과장치는 전자구조를 정량적으로 연구할 수 있는 장치로 신소재의 개발에 활용도가 높으며 앞으로도 기술적으로 발전할 여지가 많기 때문에 이에 대한 정보는 새로운 분석 장치나 분석법의 개발에 기여할 수 있다.

(3) JEOL사의 초고전압 투과전자현미경으로서는 처음으로 개발된 원격제어장치는 현재 KISTI가 주관이 되어 국가적으로 추진하고 있는 e-Science Grid 사업에 이미 활용하고 있다. 우리의 선진화된 IT를 국가적 장비에 접목하면 장비의 접근과 사용을 용이하게 할 뿐만 아니라 공간의 제약을 넘어서 공동연구의 장을 쉽게 열 수 있기 때문에 이에 대한 know-how의 축적은 다른 국가적 대형장비의 원격운용법 개발에 기여할 수 있다.

(4) KBSI에서 자체 개발한 특수시료지지대 보관장치는 상용화된 미국 Gatan사의 제품에 비해 성능면이나 가격면에서 훨씬 우월하고 성능을 쉽게 개선시킬 수도 있다. 차세대 신소재의 개발에는 특수시료지지대를 이용한 역동적 실험이 많이 필요하리라 예측되기 때문에 국내의 관련 연구자들에게 보다 양질의 실험 환경을 제공할 수 있다.

(5) 특수실험실의 건설은 주로 일본의 Hokkaido 대학과 국립재료연구소의 건물을 참고로 하여 우리의 실정에 맞게 개선한 것이다. 진동, 소음, 온도 및 풍향 조절 등 매우 까다로운 장비의 설치조건들을 충분히 만족시킬 수 있는 기술력을 확보하였기 때문에 앞으로 있을 초정밀장비의 국내 설치에 좋은 참고자료가 될 수 있다.

(6) 자기장 차폐장치의 설치는 일본 동경대에서 약 5년에 걸쳐 축적한 기술력을 이용하여 약 6개월 동안에 수행한 것으로 가장 어려운 작업 중 하나인 Cable Tray의 제작 및 설치를 우리의 기술력으로 훌륭하게 마칠 수 있었다. 이러한 경험은 앞으로 고성능 전자현미경, MRI 등 이미징을 주로 하고 통행 차량, 지하철 등 자기장을 발생하는 환경에 취약한 초정밀장비의 설치에 좋은 참고자료가 될 수 있다.

(7) 일본의 방진장치 전문제조업체인 Showa Science에서 설계하고 국내의 관련 업체인 두레 Engineering에서 제작 설치한 제진대는 성능점검 결과 일본에서 설치한 어떠한 제진대보다 성능이 우수함이 드러났다. 이러한 기술력의 축적도 위에 든 경우와 같이 앞으로 예측할 수 있는 열악한 환경에서의 초정밀장비의 설치에 도움을 줄 수 있다.

한편, 21세기에 들어 NT와 BT 분야의 국제적인 경쟁이 치열하게 전개되고 있는 시점에서 양 분야에서 국가적인 공동 연구장비로 활용할 수 있는 최첨단 장비를 선진국보다 먼저 국내에 도입, 설치함으로써 산업생산성과 국가경쟁력을 재고할 수 기틀을 마련할 수 있었다. 경제 및 산업적 측면에서의 기여도는 아래와 같이 열거할 수 있다.

(1) 국가적인 전략산업인 차세대반도체 개발, 나노구조 신소재 개발에 필수적인 원자 분해능 분석기능을 제공함으로써 선진국의 기술보호 장벽을 극복하고 해당분야의 독자적인 기술 개발을 촉진시킨다. 특히, 앞으로 일본과 치열한 경쟁을 벌릴 차세대 반도체 개발에 필요한 분석 및 평가를 국내에서 수행할 수 있기 때문에 기술정보의 유출을 방지한다. 반면, 국외에서 개발된 극미세 신소재의 구조를 국내에서 분석함으로써 선진국의 기술보호 장벽을 극복하고 새로운 소재의 개발을 유도한다.

(2) 초고전압 투과전자현미경의 고투과력 및 고에너지 기능을 이용하면 역동적인 실험이 가능하기 때문에 신물질의 분석 및 평가뿐만 아니라 새로운 물성 개발 및 공정 개발에도 직접 기여한다. 특히 이온빔 가속기가 장착되면 항공우주 소재, 원자로 물질, 핵융합로 물질 등 방사능 조사를 효과적으로 차단해야 하는 극한 소재의 개발에 본격적으로 기여하리라 예측한다.

(3) 21세기 생명과학의 핵심 연구분야인 뇌세포 연구, 단백질 구조 연구 및 신약 개발 등에 필요한 삼차원적 구조분석 기능을 제공함으로써 해당분야의 선진적인 연구 및 개발을 활성화 한다.

(4) 전자현미경의 센터화를 이루어 재료·생명과학·의학 등의 다양한 분야에서 신물질이나 분석이 어려운 물질의 분석을 한 곳에서 완료할 수 있기 때문에 관련 분야의 기

술협력 및 융합 신기술 개발을 촉진시킨다.

(5) 국가적인 대형 연구장비의 설치·운영으로 국내의 기초과학 연구를 한 단계 up-grade한다. 특히, 초고전압 투과전자현미경을 포항가속기 및 하나로 시설과 연계하여 회절을 이용한 국가적인 물질 분석 및 개발 program을 마련하여 학·연·산 공동연구를 활성화시키고, 상이한 학문 및 기술분야의 교류를 촉진시켜 창의적인 연구활동을 유발하는데 기여한다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 활용계획 개요

초고전압 투과전자현미경의 고유한 특성인 고분해능, 고투과력 및 고에너지 기능을 적절히 활용하여 NT/BT 분야에서 국가적인 경쟁력을 높이는 것이 주된 활용계획이다. 특히, 세계 최초로 삼차원적 원자분해능을 구현할 수 있고 첨단 에너지 여과장치가 부착되어 있는 장비이기 때문에 이와 관련된 새로운 활용분야를 개척할 예정이다. 주요 활용계획을 아래에 요약한다.

(1) 국가적인 전략산업인 차세대 반도체 개발, 나노구조 신소재 개발에 필수적인 삼차원적 원자분해능 및 에너지 여과분석 기능을 제공하여 NT 분야의 독자적인 기술 개발을 촉진한다. 또한, 국가적 공동연구장비인 초고전압투과전자현미경(전자 회절분석), 포항방사광가속기(X-선 회절분석) 및 하나로 시설(중성자 회절분석)을 연계하여 국가 전략물질 개발에 필요한 정밀구조분석 프로그램을 공동 수행한다.

(2) 생명과학의 핵심 연구 분야인 뇌 구조 연구, 단백질 구조 연구, 신약 개발 등에 필요한 삼차원적 이미징 기능과 구조분석 기능을 제공함으로써 BT 분야의 선진적인 연구 및 개발을 유도한다. 또한, 국가적 공동연구장비인 초고전압투과전자현미경(원자~분자 수준 이미징 가능, 급속냉각한 세포)과 포항방사광가속기(sub- μm 수준 이미징 가능, 살아있는 세포), 차세대자기공명장치(μm 수준 이미징 가능, 살아있는 세포)를 연계하여 국가적인 BT 발전에 필요한 생체 이미징 및 정밀구조분석 프로그램을 공동 수행한다.

(3) 장비의 초고전압 에너지를 이용한 전자빔과 다양한 시료지지대, 그리고 추후 부착 예정인 이온빔을 종합 활용하여 국가 전략적인 극한 소재와 신 기능성 물질의 개발을 추진한다. 또한, 관련 연구기관과 함께 항공우주 소재(항공우주연구원), 원자로 물질(원자력연구소), 핵융합로 물질(기초과학지원연구원) 등 방사능 조사를 효과적으로 차단해야 하는 극한 소재의 연구개발 프로그램을 공동 수행한다.

(4) 본·분소 간에 초고속통신망과 원격제어 기능을 이용하여 전국 어디에서나 장비의 접근 및 사용을 용이하게 하고, 국가간의 초고속통신망을 이용하여 해외에서도 장비를 직접 운용을 할 수 있도록 함으로써 국내 및 국제적인 공동연구의 활성화와 함께 21세기

국가적인 공동연구 장비 운영의 새로운 모델을 제시한다.

본 사업의 시작 단계부터 장비의 핵심 활용분야로 선정된 반도체, 나노 신소재, 뇌세포 및 단백질 분야의 활용계획을 아래에 재정리한다.

(1) 차세대 반도체소자 개발 분야

차세대 극미세, 다층 복합구조 기본소자의 정밀한 분석과 평가 능력 확보를 통한 21세기 국가 경쟁력을 확보한다. 차세대 반도체 기술 개발의 핵심은 반도체 기본소자의 극미세화(submicrometer 단위에서 nanometer 단위로) 및 집적 방식의 복합화(2차원적인 단순 다층구조에서 3차원적인 다층 복합구조로)로 요약할 수 있다. 따라서 새롭게 개발된 반도체 소자의 정밀한 분석 및 평가는 21세기 국가 경쟁력 향상의 핵심 요소이다. 이러한 삼차원적 다층 복합구조는 초고전압 투과전자현미경의 고투과력과 원자분해능의 활용이 최적의 분석 방법이라 할 수 있다. 즉, 투과력이 약한 일반 투과전자현미경을 이용하여 이러한 신소재를 분석하려면 시료를 $0.3\mu\text{m}$ 이하의 두께로 절단하는 방법이 유일하다. 그럴 경우 정보를 얻을 수 있는 깊이의 제한과 함께 가공 시 시료의 손상으로 정확한 정보를 얻기가 힘들며 이러한 정보의 손실은 반도체 소자 개발에 큰 걸림돌이 될 수 있다. 초고전압 투과전자현미경의 우수한 투과력을 이용하면 두꺼운 시료($1\mu\text{m}$ 이상)를 절단없이 관찰할 수 있기 때문에 상기한 문제점을 해결할 수 있고 또한 우수한 분해능(0.12nm 이하)을 활용하면 차세대 반도체 소자의 기본단위가 될 nm 단위 소자의 분석은 물론 궁극적으로 개발하고자 하는 원자 단위 소자의 분석도 수행할 수 있다.

(2) 신소재 개발 분야

나노구조 신소재, 경원소 신소재, 고온초전도체, 고온용 고강도 소재 등 차세대 신소재의 연구 및 개발에 활용한다. 초고전압 투과전자현미경의 원자분해능과 본체에 부착된 에너지 여과장치를 이용하면 새롭게 개발된 소재의 초미세구조 및 화학은 물론 전자 구조까지 정밀한 분석이 가능하다. 또한 부수 장비로 확보된 변온 시료지지대(1500°C 에서 액체 He 온도)와 인장 시료지지대를 이용하면 물질의 구조 및 화학의 변화를 역동적으로 연구할 수 있기 때문에 신물질 및 신공정 개발에 효과적으로 활용할 수 있다. 한편, 고에너지 전자빔을 이용하여 항공우주소재, 원자로 및 핵융합로 재료 등 극한 물질의 개발과 추후 부착 예정인 이온빔을 전자빔과 함께 이용하면 방사능 조사, 초고진공, 초고온 등 극한 상황에서 견딜 수 있는 소재를 원자 수준에서 연구, 개발할 수 있을 뿐만 아니라 재료 가공 및 원자층 접합 등 새로운 개념의 물질의 연구와 개발에 활용할 수 있으리라 기

대된다.

(3) 뇌세포 연구 분야

21세기 생명과학 연구의 초점이 될 뇌과학 연구에의 활용을 추진한다. 즉, 초고전압 투과전자현미경의 고투과력을 이용하여 복잡한 구조를 가진 뇌신경세포를 여러 편으로 절단하지 않고 전체적으로 관찰함으로써 정밀하고 신뢰도 높은 삼차원적인 구조 정보를 획득할 수 있다. 세계적으로도 뇌신경세포의 연구에 초고전압 투과전자현미경을 본격적으로 이용하고 있는 곳은 일본 Okazaki의 생리학연구소가 대표적인데 1982년에 설치된 장비(1300kV)로도 꾸준한 연구 업적을 내고 있다. 상기 장비에 비해 분해능과 부대 장비(에너지 여과장치, 저온 시료지지대 등)가 크게 향상된 초고전압 투과전자현미경은 앞으로 우리나라가 지향하는 뇌과학 연구의 활성화와 선진화를 이룩하는데 중요한 역할을 하리라 기대한다.

(4) 단백질 구조분석 분야

현대 생명과학 연구의 화두인 단백질 구조분석에 활용을 추진한다. 단백질 구조분석이 학문적인 면에서나 신약 개발 등 기술적인 면에서나 생명과학 분야의 가장 중요한 분야로 이미 대두되었다. 단백질 구조의 삼차원적 구조분석의 최근 연구 결과는 노벨상 수상 후보로 자주 거론되고 있고 그 분야를 전공하는 한국인 신진연구자들도 증가하는 추세에 있다. 전자현미경을 이용한 단백질 구조분석은 현재 세계적으로 대부분 300kV급의 투과전자현미경을 이용하여 이루어지고 있으며 분해능을 높이기 위하여 최대한 저온 상태(LHe 온도)에서 작업할 수 있도록 장비를 전용화하는 추세이나 분해능과 투과력이 우수한 초고전압 투과전자현미경을 이용한 이 분야의 연구는 아직까지는 세계적으로도 본격적인 시도가 이루어지지 않고 있기 때문에 체계적인 노력을 한다면 앞으로 국제적인 경쟁력을 확보할 수 있다고 전망한다.

제 2 절 장비 운영계획

2004년 4월부터 외부 이용자의 장비 사용을 개시할 초고전압 투과전자현미경은 장비의 특성을 최대한 살릴 수 있는 분야(3-D 정량구조분석, 에너지 여과분석, 역동적분석 등)를 중점으로 하여 포항가속기나 하나로 시설과 같은 국가적 공동장비(National User's Facility) 개념으로 운영될 예정이다. 또한, 현재 한국기초과학지원연구원에서 보유하고 있는 에너지여과 투과전자현미경(EF-TEM)과 전계방출 투과전자현미경(FE-TEM)을 적절히 연계하고 추후 필요한 장비들을 보강하여 전자현미경 분석과 관련된 문제점을 한 곳에서 해결할 수 있는 국가적인 전자현미경센터로서의 역할을 수행할 예정이다. 한편, 그림 5.1에서 보는 바와 같이 앞으로 국내의 장비 이용자와 협력하여 핵심 분석기법을 지속적으로 개발하고 국가적 전략물질의 분석 등 공동 연구과제를 도출하며 국제적인 전자현미경 전문기관과의 교류를 통해서도 핵심 분석기법의 개발, 전문인력 교류 및 국제 협력과제의 도출을 추진하고자 한다.

장비의 객관적이며 효율적인 이용을 위해 학·연·산 전문가로 구성된 장비운영위원회를 설치하여 장비 운영 전반에 걸친 사항을 토의할 예정인데, 특히, 과제 심사, 과제 선정 및 장비 사용시간의 배정은 장비운영위원회에서 결정하게 된다. 보다 많은 이용자가 장비를 사용할 수 있도록 과제는 분기 별로 선정할 예정이며 분기 당 약 20 과제, 과제 당 2 ~ 3일 간의 장비 사용시간이 배정될 예정이다. 국내의 전자현미경 장비 중 유일하게 원자분해능 및 3-D 기능을 가지고 있기 때문에 차세대반도체 개발을 주도하는 산업체 및 국가적 연구기관(Nano-Fab 등)에서의 장비 사용이 필수적이라 예측되기 때문에 이들을 위한 장비의 야간운영도 계획하고 있다.

표 5.1에서 장비 외부사용이 시작되는 첫 분기인 2004년 4월부터 6월(2004년 2사분기)까지의 장비 운영계획을 예시한다. 분기 당 10주를 외부 사용자에게 배정할 예정인데 Filament 교환 등 장비의 보수·유지를 위해 5주간 사용 후에 1주간의 정비 기간을 가지며, 다시 5주간을 사용한 후부터 다음 분기 시작 전까지 2주간의 정비 기간을 가질 예정이다. 그 기간 동안에 아래에서 설명하는 이용자 육성 프로그램의 일환으로 장비이용자 발표회나 핵심 분석법과 관련된 교육 및 세미나를 개최하게 된다. 제 3 사분기(2004년 7월 ~ 9월)의 장비이용자 모집공고는 4월에, 이용자 선정 및 시간 배정은 5월에 이루어지게 된다.

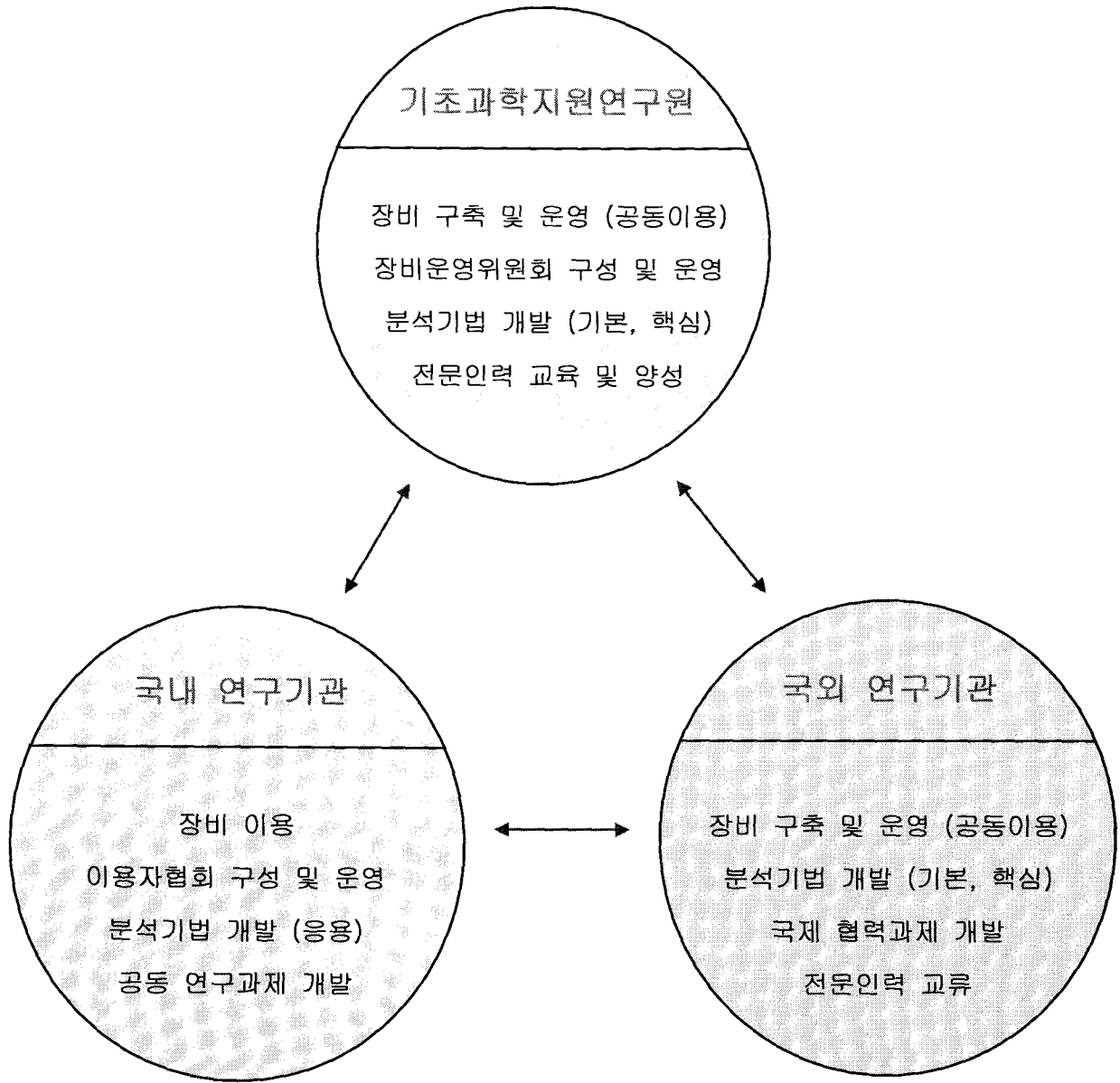


그림 5.1. 초고전압 투과전자현미경 장비의 전반적인 운영 체계 및 역할.

표 5.1. 장비 운영계획의 예시: 2004년 4월부터 2004년 6월까지의 일정표.

2004년 4월					1	2	3
	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17
	18	19	20	21	22	23	24
	25	26	27	28	29	30	
2004년 5월							1
	2	3	4	5	6	7	8
	9	10	11	12	13	14	15
	16	17	18	19	20	21	22
	23/30	24/31	25	26	27	28	29
2004년 6월			1	2	3	4	5
	6	7	8	9	10	11	12
	13	14	15	16	17	18	19
	20	21	22	23	24	25	26
	27	28	29	30			
녹색 - Operation Period; 황색 - Maintenance Period							
- 4월: 3사분기 장비이용자 모집 공고 (인터넷, 학회, 뉴스레터 등) - 5월: 3사분기 장비이용자 선정 및 시간 배정 (장비운영위원회 심의) - 6월: 장비이용자 발표회; 핵심 분석법관련 교육 및 세미나							

국내에 처음 설치되는 장비이기 때문에 장비의 핵심 성능을 최대한 활용할 수 있도록 이용자 육성 프로그램의 수행이 필요하다. 연구원의 내부인력이 국내외의 해당분야 전문가들과 공동으로 장비의 핵심 분석법의 개발, 각 분야에 따른 장비의 최적 운용법 개발 및 정량적인 자료분석법 개발을 수행할 예정인데, 이용자 육성 프로그램의 1차적인 수행은 2003년 12월 초부터 2004년 2월 말까지의 3개월 기간을 시범적으로 활용한다. 즉, 장비의 설치과정에 적극적으로 참여한 국내의 전자현미경 전문가를 우선적으로 초청하되 전공분야별로 그룹화 하여 장비를 직접 사용할 수 있게 한다. 그 과정을 통해 장비의 최적 운용법을 파악하고 핵심 분석기법을 공동 개발할 계획이다.

장비의 외부사용을 공식적으로 시작하는 2004년 4월부터는 이용자 육성 프로그램을 통해 주간 장비사용자의 장비이용료를 지원하고, 분기별 혹은 반기별로 장비 이용자의 연구발표회, 핵심 분석법 개발과 관련된 교육 및 전문가 초청세미나 등을 지원하며, 핵심 분석법 개발을 위해 국내 연구자의 해외교육이나 방문연구가 불가피할 경우에는 방문 경비를 지원하거나 해외 전문가를 초청할 경우 초청경비를 지원할 예정이다(단기간 방문 및 초청).

장비의 효율적인 활용을 위해서는 높은 수준의 유지·보수가 필수적인데, 이를 위해 기초연에서는 전자현미경 설치, 운용 및 유지·보수 경험이 풍부한 전문 기술인력 및 전문 시설관리 인력을 배정하여 유지·보수 교육을 지속적으로 수행하였으며, 특히, 장비 설치에 직접 참여함으로써 실질적인 경험을 쌓을 수 있었다. 장비의 안정적 사용을 위해 장비 및 시설 상태를 점검할 수 있는 통합적 제어시스템을 설치하였고, JEOL사 및 Gatan사와 협력하여 주요 유지·보수 부품을 사전 확보하였으며, 주요 부품 및 시설의 정기적 점검계획(일일-주간-월간-분기별-연간)을 수립하였다.

주장비의 제조사인 JEOL사에서도 장비의 유지·보수에 대한 체계적인 지원 계획을 수립하였는데 대전에 지사를 설립하여 KBSI 장비의 제작 및 설치에 지속적으로 참여한 전문 인력이 상주하면서 근접 지원을 담당하고 있고 1단계-2단계-3단계의 유지·보수망을 구축하여 문제가 발생했을 때 단계별로 신속히 대응할 수 있도록 준비하고 있다.

핵심 부수장비의 제조사인 Gatan사에서도 장비 전담인력을 국내에 배정한 후 장비의 설치에 참여하게 함으로써 집중적인 교육을 수행하였다. 문제가 발생했을 때 Specimen Holder는 2주일 이내에 보수할 수 있도록 시스템을 구축하였고, Camera Part는 국내에서 직접 보수할 수 있도록 하였다. 한편, 기술력이 많이 필요한 HV-GIF의 일반 고장은 국내에서도 보수할 수 있으나, 주요 부분의 고장은 본사의 전문가가 방문하여 수리하거나 미국의 공장에 보내어 수리해야 하기 때문에 보수 시간의 연장이 불가피한 실정이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

연구개발 수행과정에서 그 동안 발표되었던 초고전압 투과전자현미경 관련자료를 최대한 수집하고 정리하였다. 자료는 크게 전문 서적, 전문 학술지 논문, 학회 요약집, 연구 보고서 및 Video Tape 등 교육용 자료로 구별할 수 있다. 전문 학술지는 다시 연구 분야별로 세분할 수 있는데, 편의상 기술분야, 이론분야, 재료 연구분야, 의생물 연구분야로 나누든지 혹은 기능 및 활용을 중심으로 고분해능 활용분야, 에너지 여과장치 활용분야, 역동적 연구(in situ study) 활용분야 및 고에너지 활용분야 등으로 세분할 수 있다.

그 중 전문 학술지 논문과 학회 요약집 가운데서 주요 내용의 제목을 발췌하여 첨부자료 7에 수록한다. 자료는 발간 연대 순으로 배열하였으며 기능 및 활용을 중심으로 하여 아래와 같이 구분하였다.

- (1) 원자분해능 및 고분해능 활용분야 (211편)
- (2) 에너지 여과장치 활용분야 (197편)
- (3) 역동적 연구(in situ study) 활용분야 (216편)
- (4) 고에너지 활용분야 (42편)
- (5) 3차원 이미징 활용분야 (48편)

제 7 장 참고문헌

제 6 장에 초고전압 투과전자현미경과 관련된 참고문헌을 수록하였는데 여기서는 본문에 인용한 참고문헌만을 수록한다.

김윤중, 이석훈 (1995) 기초과학지원센터 설립 목적에 맞는 고성능 전자현미경의 구입, 설치 및 운용을 위한 자료조사, 기초과학지원센터(보고서), 43pp.

김윤중, 이석훈, 이영부, 정종만, 이정민, 이수정, 김경애, 김태정, 박정란, 박용순, 문정호, 박경훈 (2000) 전자현미경 내에서의 역동적인 실험을 통한 물질의 구조, 화학 및 물성연구, 과학기술부(보고서), 346pp.

Batson PE, Dellby N and Krivanek OL (2002) Sub-angstrom resolution using aberration corrected electron optics, *Nature*, 418/8, 617-620.

Horiuchi S, Matsui M, Kitami Y, Yokoyama M, Suehara S, Wu XJ, Matsui I and Katsuta T (1991) Ultra-High-Resolution HVEM (H-1500) newly constructed at NIRIM, II. Application to materials", *Ultramicroscopy*, 39, 231-237.

Kim YJ and Kriven WM (1991) TEM characterization of modulated microstructures in CaO-Dy₂O₃ solid solutions, *Ultramicroscopy*, 37, 351-361.

Kim YJ and Kriven WM (1995) A transmission electron microscopy study on the decomposition of synthetic hillebrandite (Ca₂SiO₄,H₂O), *J. Mater. Res.*, 10, 3084-3095.

Masui M, Horiuchi S, Bando Y, Kitami Y, Yokoyama M, Suehara S, Matsui I, and Katsuta T (1991) Ultra-High-Resolution HVEM (H-1500) newly constructed at NIRIM, I. Instrumentation, *Ultramicroscopy*, 39, 8-20.

Phillips F, Hoschen R, Osaki M, Mobus G, Ruhle M (1994) New high-voltage atomic resolution microscope approachong 1 point resolution installed in Stuttgart, *Ultramicroscopy* 56, 1-10.

Takaoka A, Ura K, Mori H, Katsuta T, Matsui I and Hayashi S (1997) Development of a new 3 MV Ultra-High Voltage Electron Microscope at Osaka University, *J. of Electron Microscopy* 46, 447-456.

(첨부 1)

국내 투과전자현미경
설치현황 자료

1. Hitachi TEM

NO	모델	설치기관명	부서	설치연도	담당자	연락처	부착장비
1	HS-7S	고려대 이과대학	생물학과	1978	박창현	02)3290-5114	
2	HU-12	전남대 의대	해부학교실	1978	오창석	062) 220-4200	
3	H-600	고려대 의대	해부학과	1982	박창현	02) 920-6297	
4	H-600	계명대학교 의과대학	병리과 (의대)	1983	김영호	053) 250-7477	
5	H-500	연세대 의대 병원	전자현미경실	1983	황경희	02) 361-5388-9	
6	H-600A	경북 대학교	병원	1984	김기욱	053) 420-6945,5243	
7	H-500	서울대 치과대학	구강병리과	1984	이대식	02)760-2361 (임)3621	
8	H-300	순천향병원	전자현미경실	1984	황의찬	02) 794-7191-5	
9	H-600	이화여대 의대	전자현미경실	1984	한정희	02)2650-5776	
10	H-600	한양대 의대	전자현미경실	1984	권중균	02) 293-2111	
11	H-600	연세대 공대	금속공학과	1985	이경철	02) 361-2744	
12	H-600	원광대 의대	해부학과	1985	최민규	0653) 50-6761	
13	H-600	경상대학교 의과대학 병원	해부병리과	1986	조자향	055)751-8228	
14	H-600	국립 식물 검역소	소독관리과	1986	이금희	0343) 45-1225	
15	H-800	농업기술연구소	병리과	1986	이준성	031) 292-6215	
16	H-600	서울대 의대 소아병원	병리과	1986	윤철종	02)760-3545	
17	H-600	경희대 의대 병원	해부병리과	1987	인재용	02) 966-5191 교 2749	
18	H-600	동아대학교	의과대학 해부학과	1987	유영현	051) 240-2926	
19	H-600	충북대 의대	해부학교실	1987	정구보	0431) 61-2874	
20	H-600	경남 대학교	이과대 생물학과	1988	이정훈	055)245-2238	
21	H-600	영남대	생물학과		남효관	053) 810-2391-2	
22	H-600	고신대 의대	병리과		박용태	051) 240-6324	
23	H-7000	경북 대학교	의대 병리학과	1989	김중길	053) 420-6940,6941	
24	H-7000B	영남대 의대	해부병리과		이효석	053) 620-4396	
25	H-600	동호칼슘(주)	연구소	1989		0545) 971-5401-4	
26	H-9000NA	삼성종합기술원	그룹시험분석실	1990	송인용	031)280-9082	
27	H-600	충남대 의대	병리학교실	1990	임병수	042) 220-7193,580-82	
28	H-9000NA	한국표준연구원	미세조직그룹	1991	유현	042) 868-5399	EDS
29	H-7000B	단국대학교	의과 대학	1992	이동석	041) 590-3931	
30	H-8100	홍익대학교	금속공학과	1992	김은수	02) 320-1128,1138	EDS

31	H-7100FA	수의과학검역원	병리과	1993	박중원	0343)49-2152	
32	H-7100	경희대학교	해부병리과	1994	김기연	02) 961-9203.958-873	
33	H-7100	기초과학지원연구소 (대구)		1994	황기주	053) 959-3404	
34	H-7100	삼성병원	진단병리과	1994	우희숙	02)3410-2779	
35	H-7100	인천 길병원	병리과	1994	박정남	032) 460-3070	
36	H-8100	울산대학교	공동기기실	1994	최원규	052)259-1608	EDS
37	H-7100	고령지 농업 시험장		1995	한영일	0374-330-7700	
38	H-7100	국립 수산진흥원	전자현미경실	1995	손상규	051) 465-0091	
39	H-7100	서울 대학교 부속병원	병리과	1996	노재요	02)769-2698	
40	H-7100FA	한국 산업 안전연구원(대전)	독성연구실	1996	정용현	042)863-8362	EDS
41	H-7100	인하대학교	해부병리	1998	동승모	032)890-2114	
42	H-7100	국립식물검역소 인천지소		1999	예미지	02) 662-6835	
43	H-7500	동국대학교 의과대학	전자현미경실	1999	김진용	054)770-2444	
44	H-7100	식물 검역소(제주 지소)	병리과	1999	강익범	064) 747-6242	
45	H-7500	식물검역소 (부산지소)	병리과	1999	정연승	051) 467-0443	
46	H-7500	서남 대학교	의과 대학	2000	신현환	063)620-0114	
47	H-7500	대구대학교	중앙기기센터	2001	이병찬	053) 850-5740-1	
48	H-7600	서울보건대	치위생과	2002	임도선	(031)740-7229	
49	H-7600	조선대학교	의대 전자현미경실	2002	정수만	062)230-6398	
50	H-7600	한양대학교 의대	전자현미경실	2003	권중균	02)2290-0587	

2. JEOL TEM

NO	MODEL	설치 기관명	부서	설치연도	담당자	연락처	부착장비
1	JEM-100C	서울대학교	공과대학	1977	안희성	880-7033	
2	JEM-100CX	국군서울지구병원	임상병리과	1981	서승희	3973-738	
3	JEM-100CX	국군의학연구소	병리과	1981	민호식	042-870-4875	
4	JEM-100CX	대구카톨릭대학교	중앙실험실	1981	이상구	053-850-3622	
5	JEM-100CX	LG화학기술연구원 동부단지	분석센터	1981	김정민	042-866-2435.6	TV
6	JEM-50B	서울대학교	사범대학	1981		880-7774	
7	JEM-100CXII	조선대학교	의과대학	1982	정수만	062-220-3672	
8	JEM-200CX	중앙대학교	전자현미경실	1982	장재일	820-5639	
9	JEM-100CXII	고려대학교	생물학과	1983	송익현	3290-3150	
10	JEM-100CXII	단국대학교 천안캠퍼스	이공대학	1983	문병진	041-550-3474,1800	
11	JEM-100CXII	서울대학교 수원캠퍼스	수의과대학	1983	박재학	031)290-2742,2705	
12	JEM-100CXII	서울대학교 의과대학	임상의학연구소	1983	최은경	760-3545	
13	JEM-100CXII	성균관대학교	생물과	1983	이정희	031-290-7001	STEM
14	JEM-100CXII	순천향대학교 의과대학	전자현미경실	1983	이정현	041-570-2490	
15	JEM-100S	경성대학교	중앙정밀기기실	1983	이진식	051-620-4709	
16	JEM-100S	한남대학교	생물과	1983	권선방	042-629-7480	
17	JEM-200CX	서울대학교	공과대학	1983	안희성	880-7033	
18	JEM-200CX	포항산업과학연구원	재료물성분석팀	1983	김기환	054-279-6954	STEM/EDS
19	JEM-100CXII	효성 안양공장	섬유화학연구소	1985	김동욱	031-452-4171	
20	JEM-200CX	한국과학기술연구원	특성분석센터	1985	김수철	958-5970	STEM/EDS
21	JEM-100CXII	새한미디어(주)	기술연구소	1987	이춘규	043-850-1376	
22	JEM-100SX	부산대학교	자연대학	1987	정익교	051-510-2279	
23	JEM-1200EX	한국화학연구원	분석실	1987	임현성	042-860-7712	EDS
24	JEM-4000FX	포항산업과학연구원	재료물성분석팀	1987	김충복	054-279-6965	EDS
25	JEM-1200EX	가톨릭대학교	의과대학	1988	이인식	590-1315	
26	JEM-1200EX	포항공과대학교	신소재공학과	1988	신재범	054-279-5550	EDS

27	JEM-1200EXII	연세대학교 원주의과대학	전자현미경실	1988	김 석	033-741-0264	TV
28	JEM-2000EX	한국과학기술원 대전	재료공학과	1988	정종석	042-869-4256	
29	JEM-2000FX	코오롱	기술연구소	1988	권태훈	054-469-3917	EDS
30	JEM-2000FX	한국기계연구원 창원	재료기술연구부	1988	한상호	055-280-3582	STEM/EDS
31	JEM-2000FX	한국뉴세라믹스연구소	실험분석실	1988	백한영	031-333-5515	STEM/EDS
32	JEM-100CXII	전남대학교병원	해부병리과	1989	김재성	062-220-5695	
33	JEM-1200EX	고려대학교	공농실험실	1989	임요환	3290-4085	
34	JEM-1200EXII	서울대학교 치과대학	전자현미경실	1989	최수진	740-8626	
35	JEM-1200EXII	서울중앙병원	해부병리과	1989	공미경	3010-4533,4534	
36	JEM-1200EXII	인제대학교	의과대학	1989	조극래	051-890-6640	
37	JEM-1200EXII	전남대학교 의과대학	병리학교실	1989	박창수	062-227-4302	
38	JEM-1200EXII	전남대학교 의과대학	해부학교실	1989	오창석	062-220-4205	
39	JEM-1200EXII	전북대학교 의과대학	의과대학	1989	최윤영	063-270-3102	
40	JEM-2000EXII	제일모직(주)	화성연구소	1989	엄영호	031-428-3286/3355	STEM
41	JEM-2000FX	삼성SDI(주)	기초연구소	1989	문시춘	031-288-4355	STEM/EDS
42	JEM-4000FX	국방과학연구소	제1기술연구본부	1989	김정선	042-821-2469	STEM/EDS/ MSC
43	JEM-1200EXII	건국대학교 충주CAMPUS	전자현미경실	1990	장병화	043-840-3748	
44	JEM-1200EXII	동부한농화학	유화기술연구소	1990	성우상	052-259-6868	
45	JEM-1200EXII	부산대학교 의과대학	해부학교실	1990	김봉선	051-240-7722	
46	JEM-1200EXII	서울대학교 의과대학	해부학교실	1990	박성재	740-8214	
47	JEM-2000EXII	한양대학교	공과대학 재료공학과	1990	윤종승	2290-1347	
48	JEM-2000FXII	하이닉스반도체 이천사업장	메모리개발연구소	1990	백태선	031-639-1878(2994)	STEM
49	JEM-2000FXII	한국원자력연구소	원자력재료기술개발팀	1990	조해동	042-868-2335	EDS
50	JEM-1200EXII	금호석유화학 울산공장	기술연구소	1991	김정근	052-259-6152	
51	JEM-1200EXII	서울대학교	유전공학연구소	1991	안영호	880-6776	
52	JEM-2000FXII	한국기계연구원 창원	재료기술연구부	1991	한상호	055-280-3582	STEM/EDS
53	JEM-1200EXII	부산대학교 의과대학	안과	1992	김상식	051-240-7325	

54	JEM-1210	국민대학교	금속재료공학부	1993	지충수	910-4666	
55	JEM-2000EXII	서울대학교	기초과학지원연구	1993	강미정	880-8033	STEM
56	JEM-2000FXII	전남대학교 공과대학	부속공장	1993	정도성	062-530-1928,1931	EDS
57	JEM-2000FXII	조선대학교	공과대학	1993	이영수	062-230-7164	EDS
58	JEM-2000FXII	한국원자력연구소	조사재시험평가실	1993	정양홍	042-868-8459	
59	JEM-1010	순천향대학교	생물학과	1994	신길상	041-549-1252	
60	JEM-1010	LG화학 여천공장	SR연구소	1994	김해영	061-680-1494	TV
61	JEM-1200EXII	제주대학교	공동실험실습관	1994	고정은	064-754-2295	
62	JEM-2000FX	국립기술표준원	신뢰성 기술과	1994	윤종구	509-7359	STEM/EDS
63	JEM-1010	전남농업기술원	식물환경과	1995	고숙주	061-330-2684/2687	TV
64	JEM-2010	광주과학기술원	신소재공학과	1995	육영우	062-970-2331	EDS
65	JEM-2010	하이닉스반도체 이천사업장	메모리개발연구소	1995	박태수	031-630-2994	EDS
66	JEM-3000F	국방과학연구소	제1기술연구본부	1995	김정선	042-821-2469	EDS/GIF
67	JEM-1010	경희대학교	치과대학	1996	신재원	961-0568	
68	JEM-1010	국립보건원	세균질환부	1996	심수경	380-1469,1470	TV
69	JEM-1010	서울대학교 수원캠퍼스	농업생명과학대학	1996	전용철	031-290-2479,2803	TV
70	JEM-1010	전북대학교	수의과대학	1996	양홍현	063-270-2196,3771	
71	JEM-1220	금호석유화학 이천연구소	연구부문	1996	양차섭	031-639-2361	
72	JEM-2010	경상대학교	공동실험실습관	1996	임선택	055-751-5149/5150	EDS
73	JEM-2010	안동대학교	공동실험실습관	1997	류상훈	054-820-5014	EDS
74	JEM-2010	전북대학교	공동실험실습관	1997	강종균	063-270-3317/3562,4	STEM/EDS
75	JEM-2010	충북대학교	공동실험실습관	1997	이정희	043-261-2940,2937	EDS
76	JEM-3010	한국과학기술원 대전	재료계면공학연구센터	1997	임은경	042-869-8914	EDS/TV
77	JEM-1010	건국대학교	축산대학	1998	이미연	450-3668	TV
78	JEM-2010	부경대학교 대연CAMPUS	공동실험실습관	1998	강순배	051-620-6309	EDS
79	JEM-2010	선문대학교	공동기기센터	1998	이경순	041-530-2877	EDS
80	JEM-2010	충남대학교	공과대학	1998	김선식	042-821-6291	EDS

81	JEM-2010	한국생산기술연구원 천안	재료분석 및 물성공 용	1998	박영록	041-589-8645	EDS
82	JEM-2010	한양대학교 안산CAMPUS	전자재료부품연구센 타	1998	김영욱	031-400-4099	STEM/EDS
83	JEM-1010	국립식물검역소 군산지소	전자현미경실	1999	이호기	063-467-8948	
84	JEM-1010	국립식물검역소 김해지소	남부격리재배관리소	1999	유선경	055-335-0211	
85	JEM-1010	국립식물검역소 수원지소		1999	주용범	031-204-0918	
86	JEM-2010	강원대학교	공동실험실습관	1999	박용익	033-250-7129	STEM/EDS
87	JEM-2010	기초과학지원연구원 부산	전자현미경실	1999	김종필	051-510-2981	STEM/EDS
88	JEM-2010	동아대학교	공동기기센터	1999	성대능	051-200-6690	EDS
89	JEM-2010	충남대학교	급속응고신소재연구 소	1999	원창환	042-821-6587	EDS
90	JEM-2010F	삼성전자 기흥사업장	2단지 오염제어기술	1999	인찬국	031-209-6899	STEM/MSC/ EDS
91	JEM-2010F	포항공과대학교	신소재공학과	1999	박찬경	054-279-2792	EDS/GIF
92	JEM-3000F	서울대학교	공과대학	1999	김현미	880-8033	STEM/MSC/ EDS
93	JEM-3010	성균관대학교	연구처	1999	주재선	031-299-6712	STEM/EDS/ TV
94	JEM-1010	경남농업기술원	식물환경과	2000	정선기	055-750-6318/626 1	TV
95	JEM-2010	한양대학교	공과대학 재료공학과	2000	윤종승	2290-1347	STEM/EDS
96	JEM-3011	강릉대학교	세라믹공학과	2000	박상엽	033-640-2363	STEM/EDS
97	JEM-1010	전북농업기술원		2000	문형철	063-833-1711	TV
98	JEM-3010	한국과학기술원 대전	연구지원팀	2001	이정용	042-866-2435	
99	JEM-2000EX	요업기술원	신소재분석평가센터	2002	서원선	3282-2496	
100	JEM-2010	공주대학교	공동실습관	2002	이병택	041-850-8677	
101	JEM-2010	서울산업대학교	재료공학과	2002	강계명	970-6629	STEM/MSC/ EDS
102	JEM-3010	안산테크노파크		2002	이승호	031-408-7200	MSC/EDS
103	JEM-4010	요업기술원	신소재분석평가센터	2002	서원선	3282-2496	TV
104	JEM-2010	서울대학교	화학공학과	2002	현택환	880-7150	MSC/EDS
105	JEM-2010F	서울대학교	공과대학	2003	김기범	880-7095	E-beam Litho.
106	JEM-2010F	성균관대학교	공동실험실습관	2003	양철웅	031-290-7362	STEM/EDS/ GIF
107	JEM-2010F	기초과학지원연구소	본원	2003	김윤중	042-865-3596	PEELS

108	JEM-2010F	포스코	광양 기술연구소	2003	홍문희	061-790-8667	TV/EDS/GIF
109	JEM-2010F	포항산업과학연구원	특성분석팀	2003	박신화	054-279-6588	STEM/EDS/ PEELS

3. FEI(Philips) TEM

NO	모 델	설치 기관명	부서	설치연도	담당자	연락처	부착장비
1	CM10	연세대학교		1992	황경희	02-361-6994/5	EDS
2	CM12	포항산업기술연구소		1996	유기열	054-279-6972	EDS
3	CM12	국립안전보건연구소		1990	안병우	02-350-3442	STEM
4	CM20	한국생명공학연구원		1993	오현우	042-860-4255/6	STEM
5	CM20	OCI		1990	이익범	032-832-4452	STEM/EDS
6	CM20	한국과학기술원		1991	이인환	042-869-5062	STEM/EDS
7	CM20	LG Electronics Research Center		1992	이정수	02-526-4559	STEM/EDS
8	CM20	Korea Material Analysis Coop.		1990	박종봉	042-860-3882	STEM/EDS
9	CM20	한국화학		1993	김기백	031-284-3281	STEM
10	CM20	서울대학교		1991	맹기호	02-880-8023	STEM/EDS
11	CM30	포항공과대학교		1990	신재범	054-279-5550	STEM
12	CM30	삼성전자		1989	이인규	031-280-6260	STEM/EDS
13	CM30	한국과학기술연구원		1991	김수철	02-958-5970	STEM/EDS
14	CM12	한국지질자원연구원		1992	남철우	042-868-3604	STEM/EDS
15	CM120	포항제철		1994	박정재	061-790-8669	EDS
16	CM200	한국중공업		1994	김삼진	055-278-3642	EDS
17	CM300FEG	삼성전자		1994	이경우	031 2081540	EDS/EELS
18	CM200	현대		1994	이덕원	031-30-4532	EDS
19	CM200FEG	LG 세미콘		1995	박주철	043-270-3418	STEM/EDS
20	CM300	LG 세미콘		1995	박주철	043-270-3418	EDS
21	CM200	포항산업기술연구소		1996	김기환	054-279-6972	STEM/EDS
22	CM120	한국알루미늄		1995	설창유	052-79-0714	STEM
23	CM200	영남대학교		1996	남효관	053-810-2391	STEM/EDS
24	CM200	인하대학교		1996	최명수	032-860-8381	STEM/EDS
25	CM12	포항산업기술연구소		1996	유기열	054-279-6972	EDS
26	CM200FEG	한국에너지기술연구원		1998	전진성	042-865-5952	STEM/EDS/GIF
27	Tecnai 12	NPFS		1999	장수복	031-976-3024	
28	Tecnai 12	경성대학교		2000	임선택	055-751-5149	Biofilter
30	Tecnai 20	경남대학교		2000	윤종도	055-49-2697	EDS
31	Tecnai 10	LG CALTEX		2000	홍성인	042-866-1663	EDS
32	Tecnai 20	LG 화학		2000	차병준	042-866-2436	EDS/GIF
33	Tecnai 20	인천대학교		2000	강원준	032-770-8900	STEM/EDS

34	Tecnai F30	삼성전자		2001	이경우	031-208-1540	EDS/GIF
35	Tecnai F30	삼성종합기술원		2001	송 신	031-280-8213	STEM/EDS/ EELS
36	Tecnai F20	동부전자		2001	이원학	043-879-6612	STEM
37	Tecnai F20	한국과학기술원		2001	이인환	042-869-5061	STEM/EDS
38	Tecnai 12	고려대학교		2001	한성석	02-929-0936	STEM/EDS
39	Tecnai F20	한국기초과학지원연구원(광주분소)		2001	송호준	062-530-0511	STEM/EDS
40	Tecnai G2 F30	삼성전자		2002	이경우	031-208-1540	STEM/EDS
41	Tecnai G2 F20	삼성종합기술원		2002	송 신	031-280-8213	STEM/EDS

4. LEO(Carl Zeiss) TEM

NO	MODEL	설치 기관명	부서	설치연도	담당자	연락처	부착장비
1	EM 109	전남대학교		1985	박남용	062) 530-2843	
2	EM 109	강원대학교		1985	최장경	033) 250-6432	
3	EM 10 C	전북대학교		1985	최상영	063) 270-2496	
4	EM 109	동국대학교		1985	오승희	02) 2260-2498	
5	EM 109	경북대학교		1987	이기운	053) 950-5761	
6	EM 109 TB	한림대학교		1989	주성철	033) 240-1838	
7	EM 900	서울시교육과학연구원		1990	정옥화	02) 311-1255	
8	EM 900	한국인삼연구소		1994	채순용	042) 866-5334	
9	EM 902 A	아주대병원		1995	권혁제	031) 219-4510	
10	EM 912	한국기초과학지원연구원(대덕본원)		1996	김윤중	042) 865-3596	EDS/STEM
11	LEO 906	관동대학교		1997	박재영	033) 649-7473	
12	EM 10 CA	원주 의과대학		1998	김석	033) 741-0264	
13	LEO 906 E	원예연구소		1998	최용문	031) 290-6220	
14	LEO 906E	경북농업기술원		2000	박인숙	053) 320-0233	
15	LEO 912AB	농업과학기술원		2001	이준성	031) 290-0560	
16	EM 109	충북대학교		2001	이정희	043) 261-2940	
17	LEO 912AB	국립식물검역소		2002	이금희	031) 445-1225	

5. Topcon(Akasi) TEM

NO	MODEL	설치 기관명	부서	설치연도	담당자	연락처	부착장비
1	EM -002B	충남대학교	금속공학과	1987	이갑호	062) 821-6287	EDS

(첨부 2)

장비 설계 관련 자료

장비의 세부설계 자료는 장비 제작사(JEOL)와 기초연(KBSI)과 맺은 비공개 계약(NDA: Non-Disclosure Agreement)에 의거 일반적으로는 공개할 수 없는 자료가 거의 대부분이다. 아래에 요약한 자료는 장비의 전체 Layout 자료이며 비공개 자료인 상세한 장비 세부설계 자료는 수록하지 않는다.

■ JEOL 본사 관련 자료:

1. 장비 배치도
2. High Tension Tank Part
3. Gun Part I
4. Gun Part II
5. Optical Column Part (Overview)
6. Beam Search Detector Part
7. Condenser Lens Part
8. Objective Lens Part
9. Goniometer Part
10. Projector Lens Part
11. Viewing Screen Part
12. Vacuum System
13. Cooling Water System
14. Vacuum-control Gas Line System
15. Power Supply System

■ Gatan사 관련 자료:

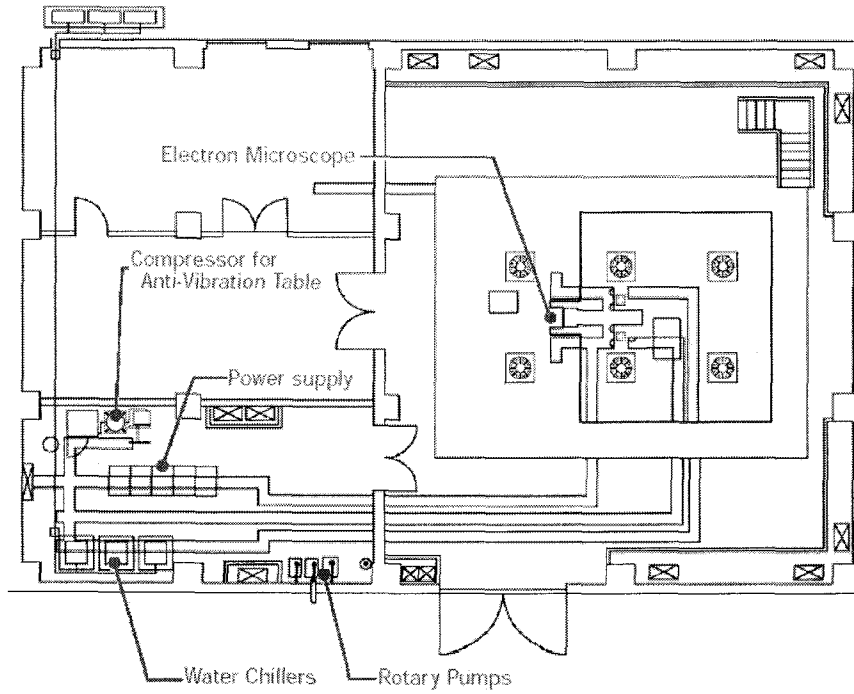
1. 에너지 여과장치(HV-GIF) 전체 구성도
2. HV-GIF의 3-D Design

■ JEOL U.S.A.사 관련 자료:

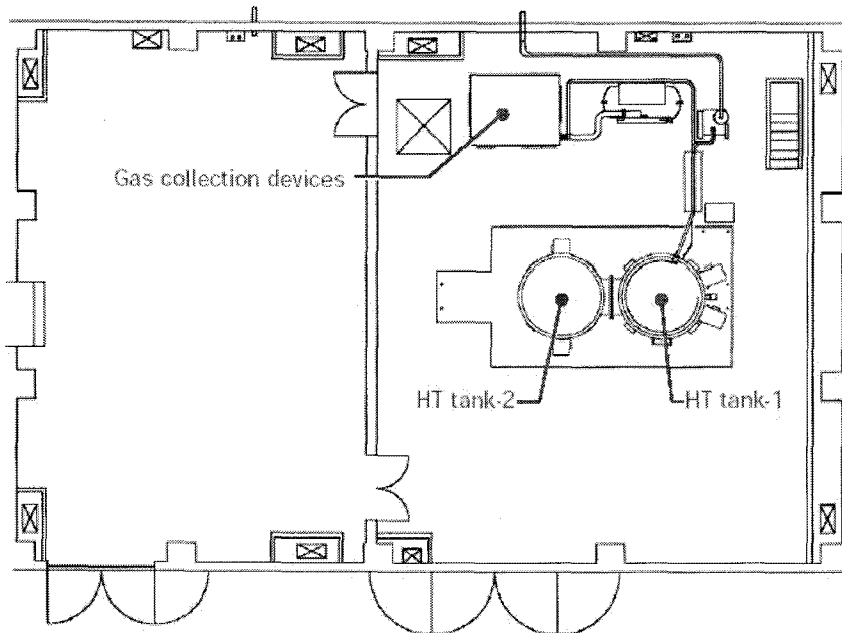
1. 일반 원격운용장치(FasTEM) Layout
2. UHV-TEM용 원격운용장치(FasTEM) 구성도면

■ JEOL 본사 관련 자료:

1. 장비 배치도

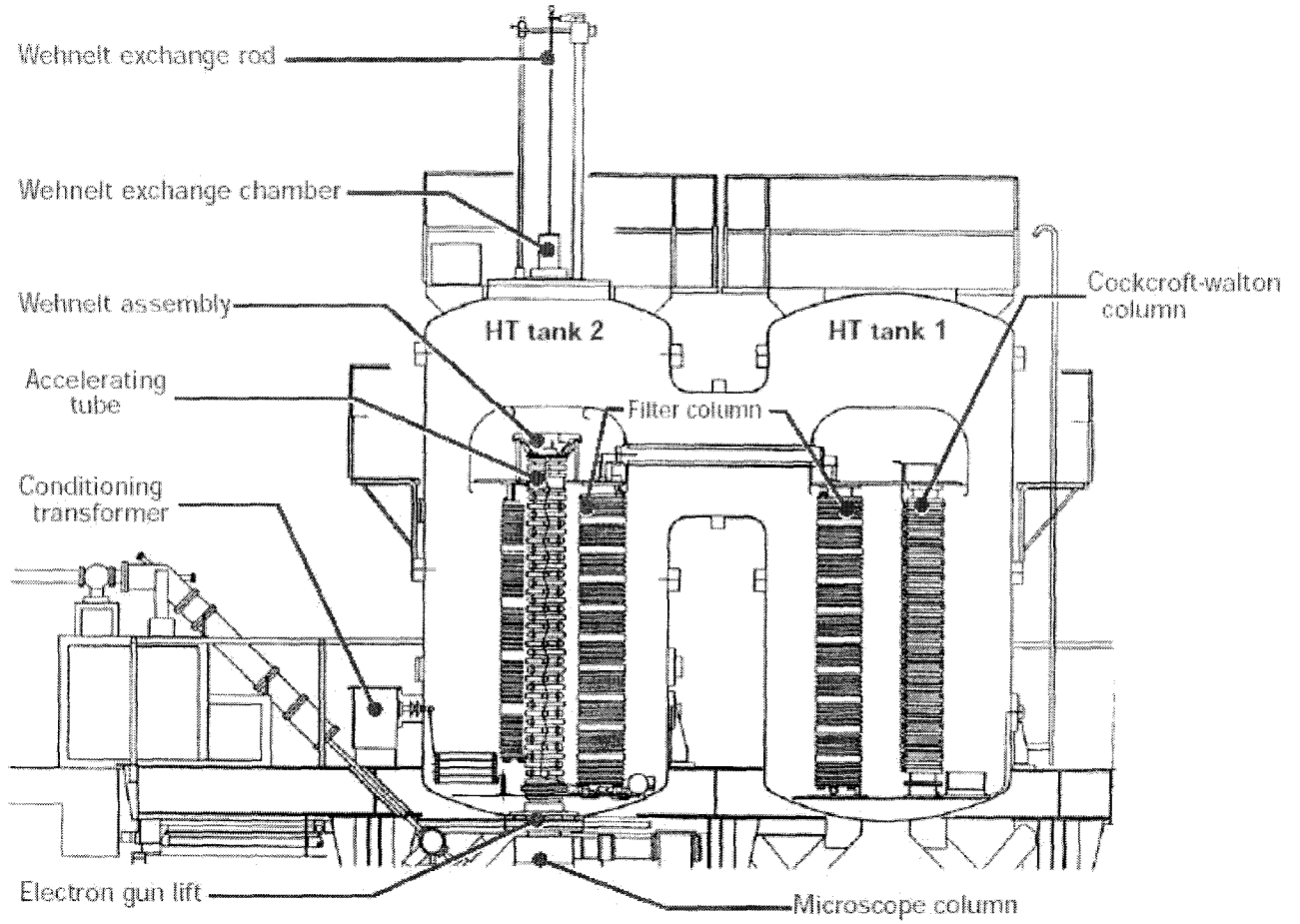


<1st Floor Layout>

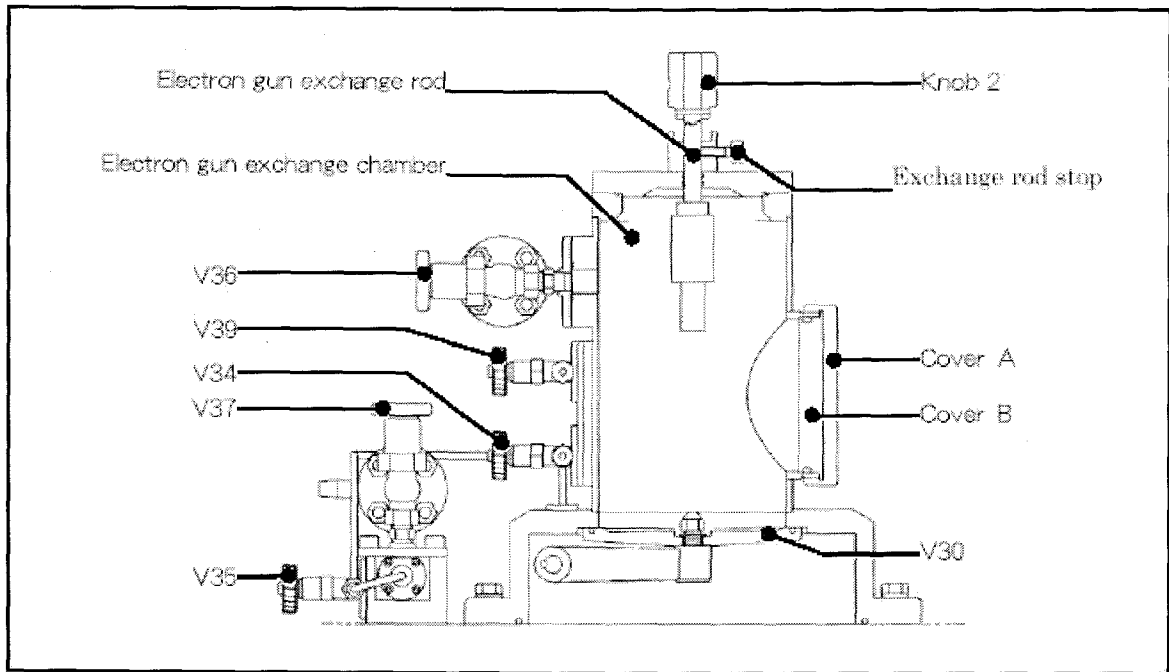


<2nd Floor Layout>

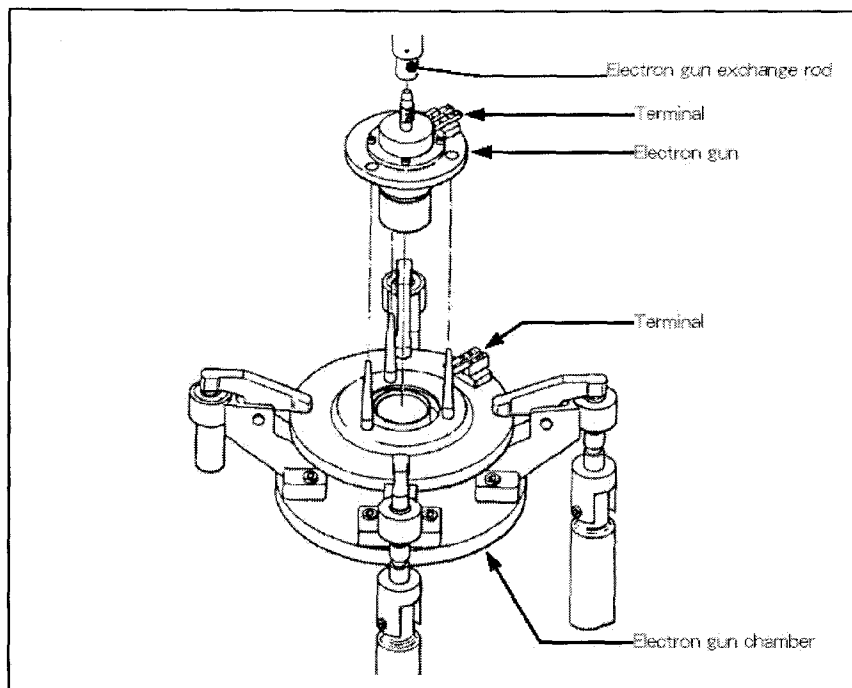
2.. High Tension Tank Part



3. Gun Part I

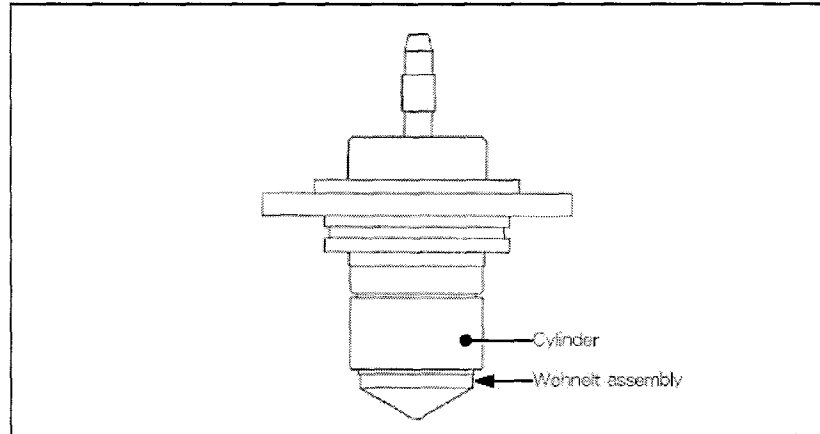


<Electron gun exchange chamber(cross-section)>

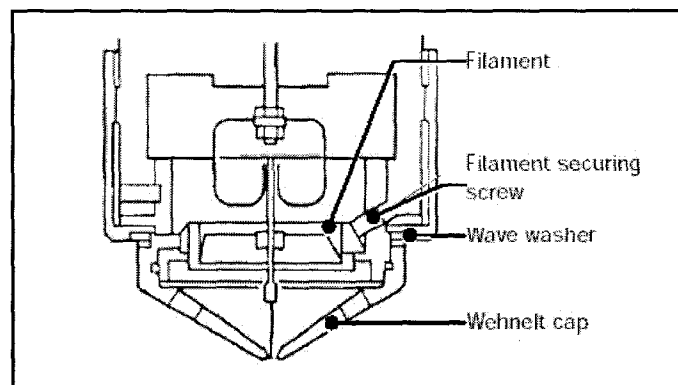


<Dismounting electron gun>

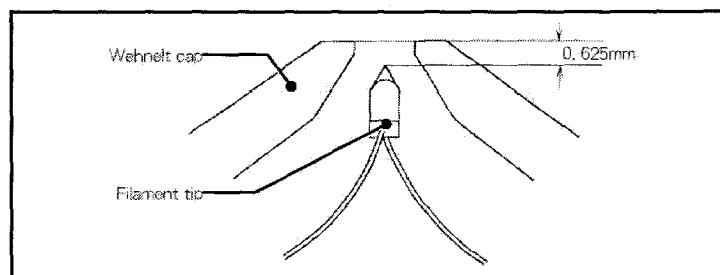
4. Gun Part II



<Electron gun>

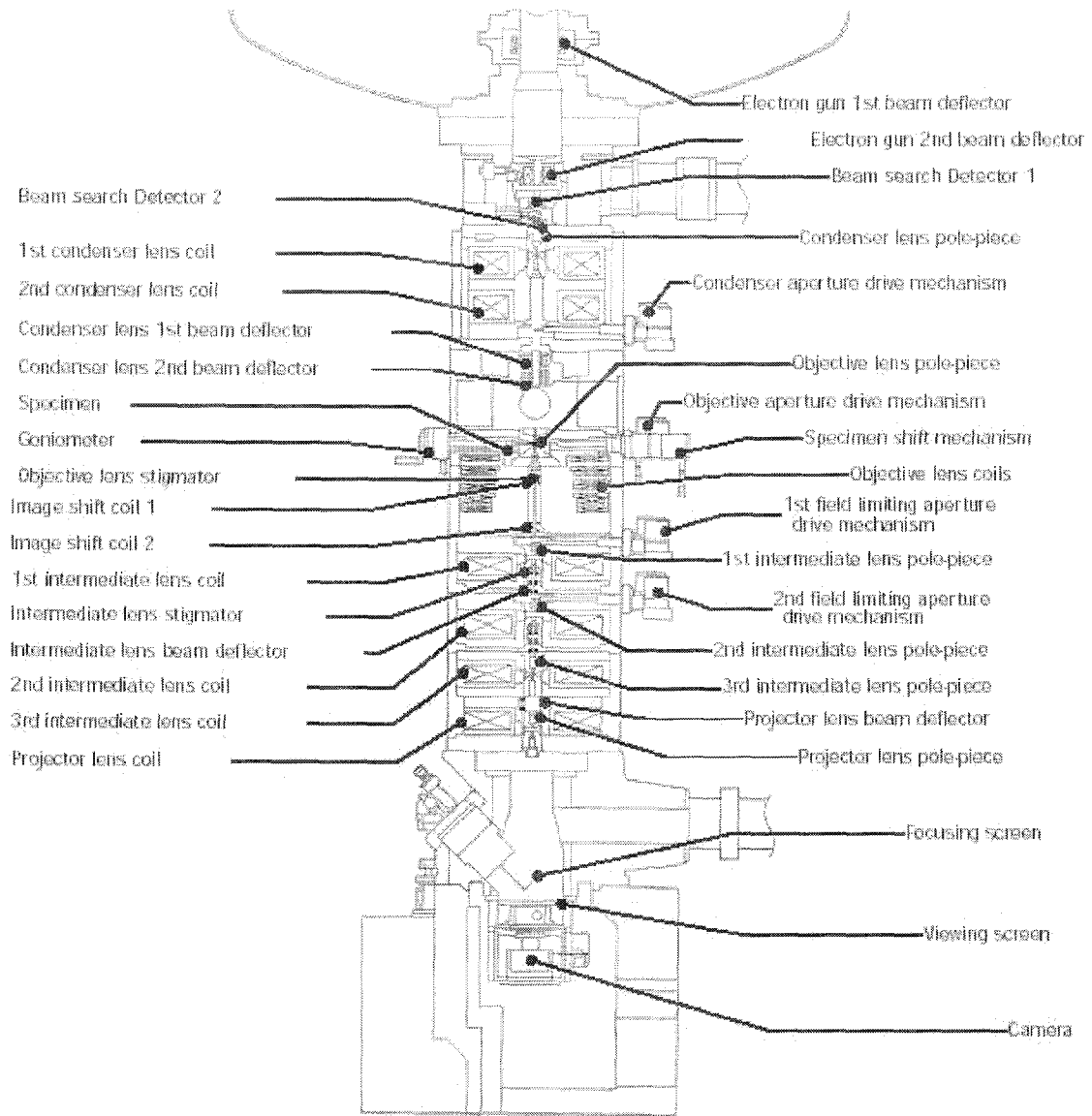


<Wehnelt assembly(cross-section)>

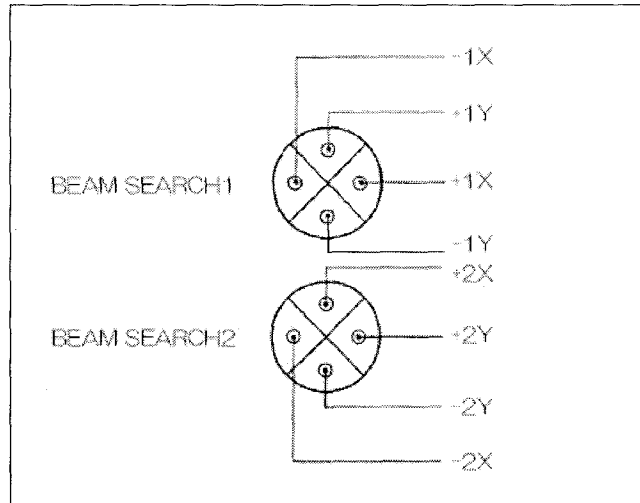


<Distance between filament and Wehnelt cap>

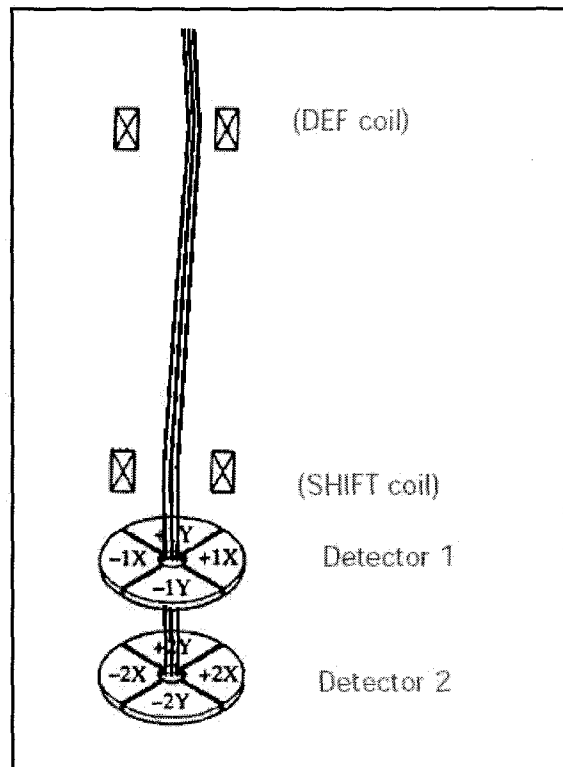
5. Optical Column Part (Overview)



6. Beam Search Detector Part

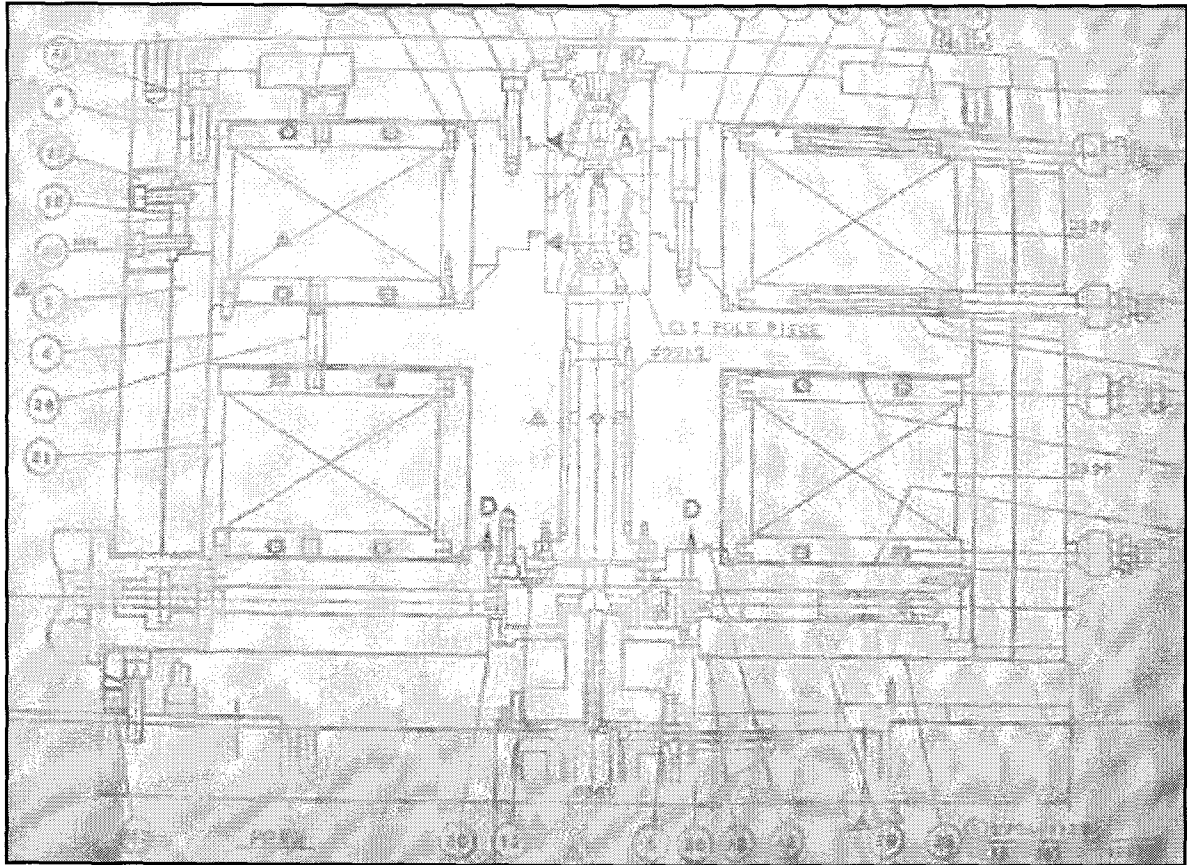


Beam-searching detector lamps(right control panel/key board)

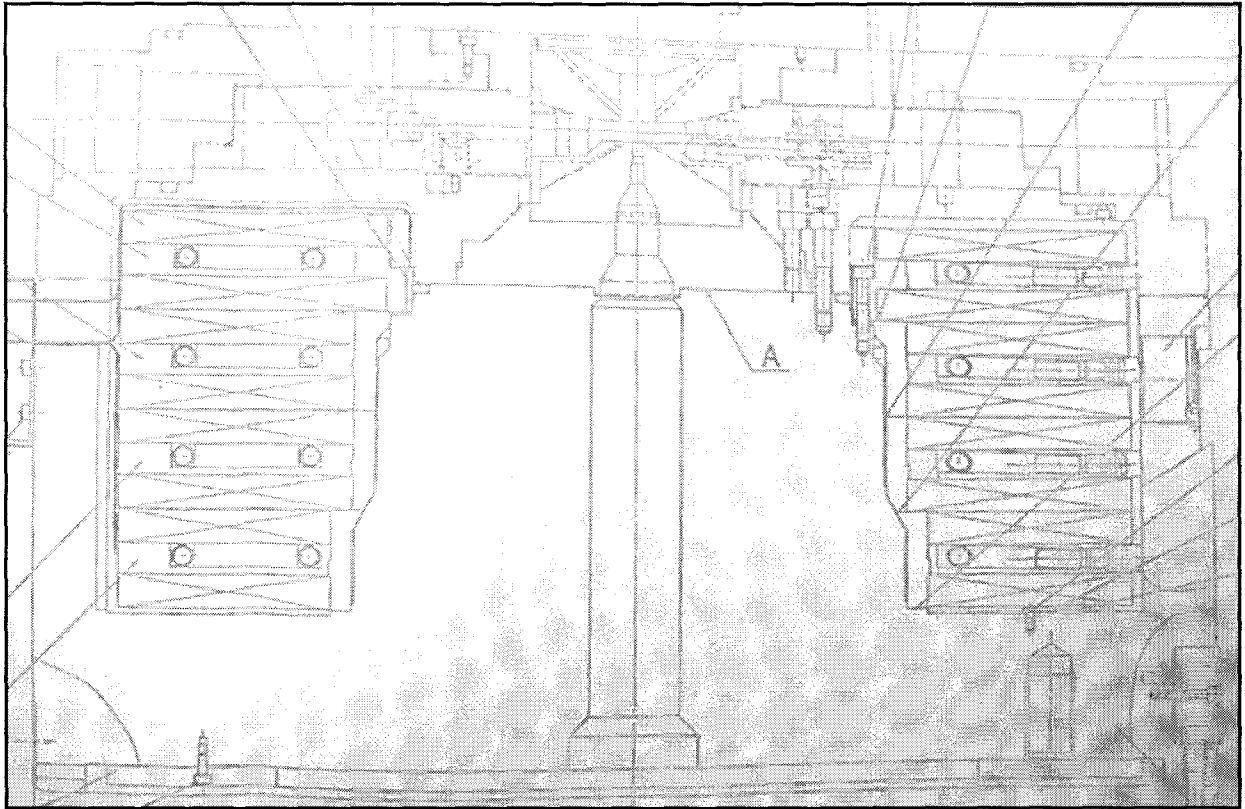


Aligning the beam to detectors 1 and 2

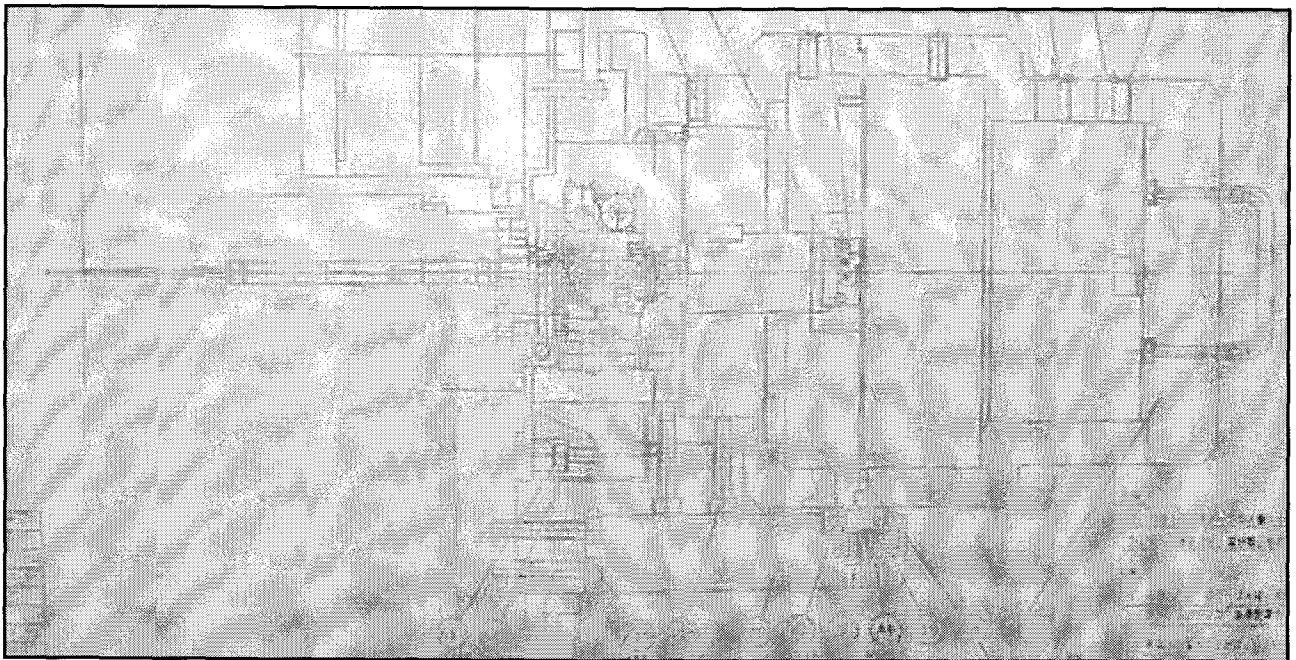
7. Condenser Lens Part



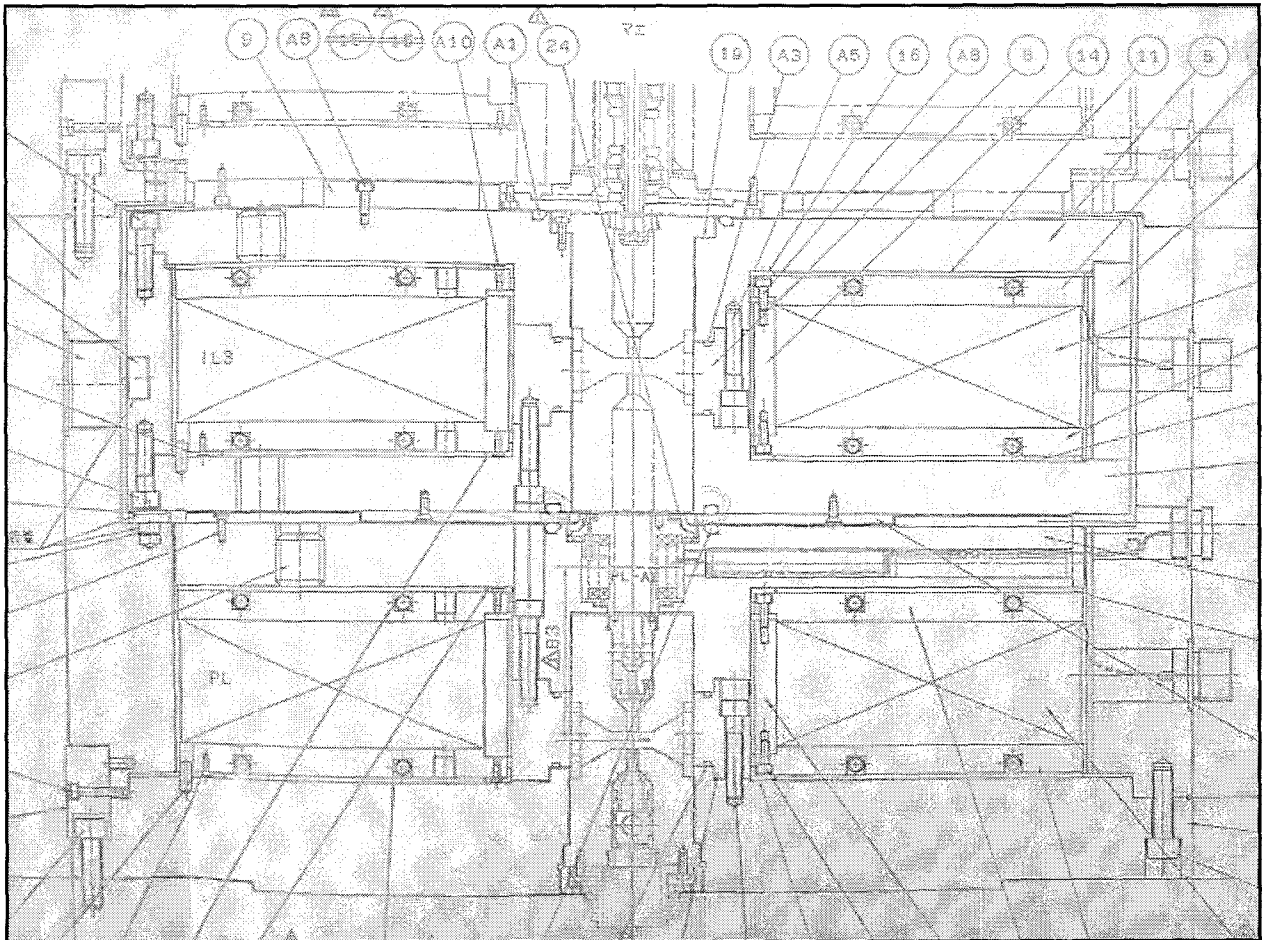
8. Objective Lens Part



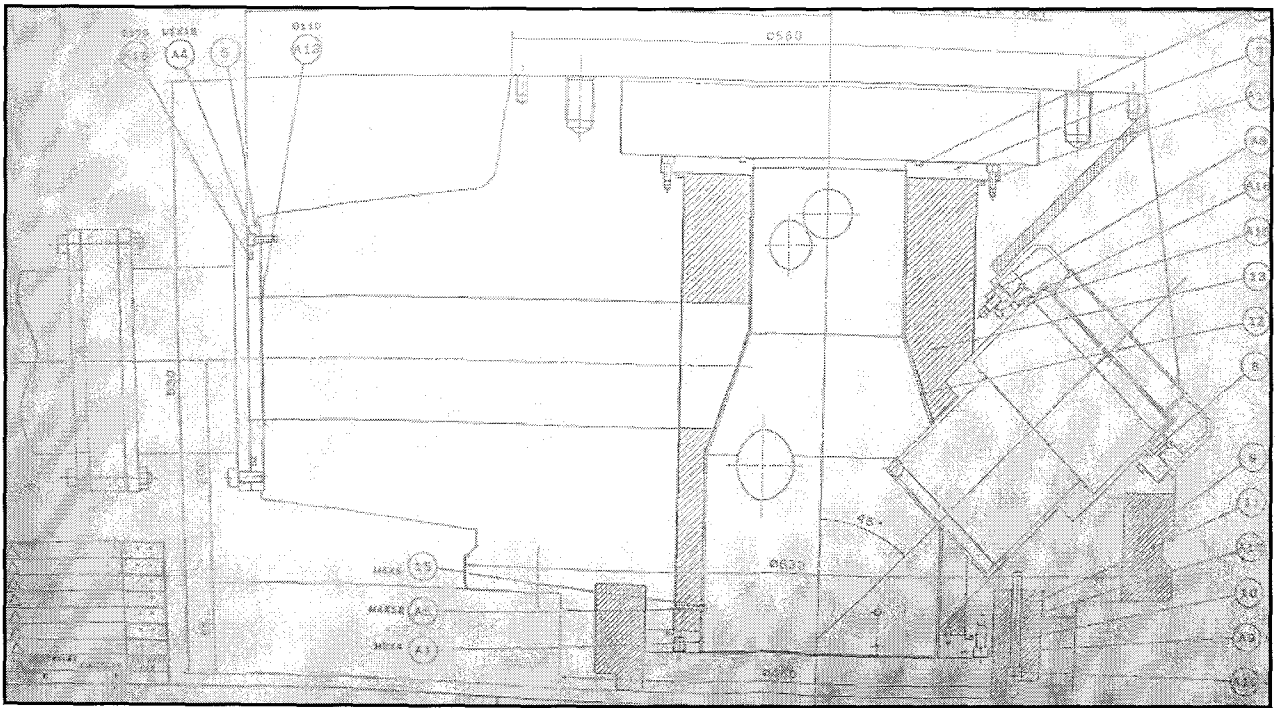
9. Goniometer Part



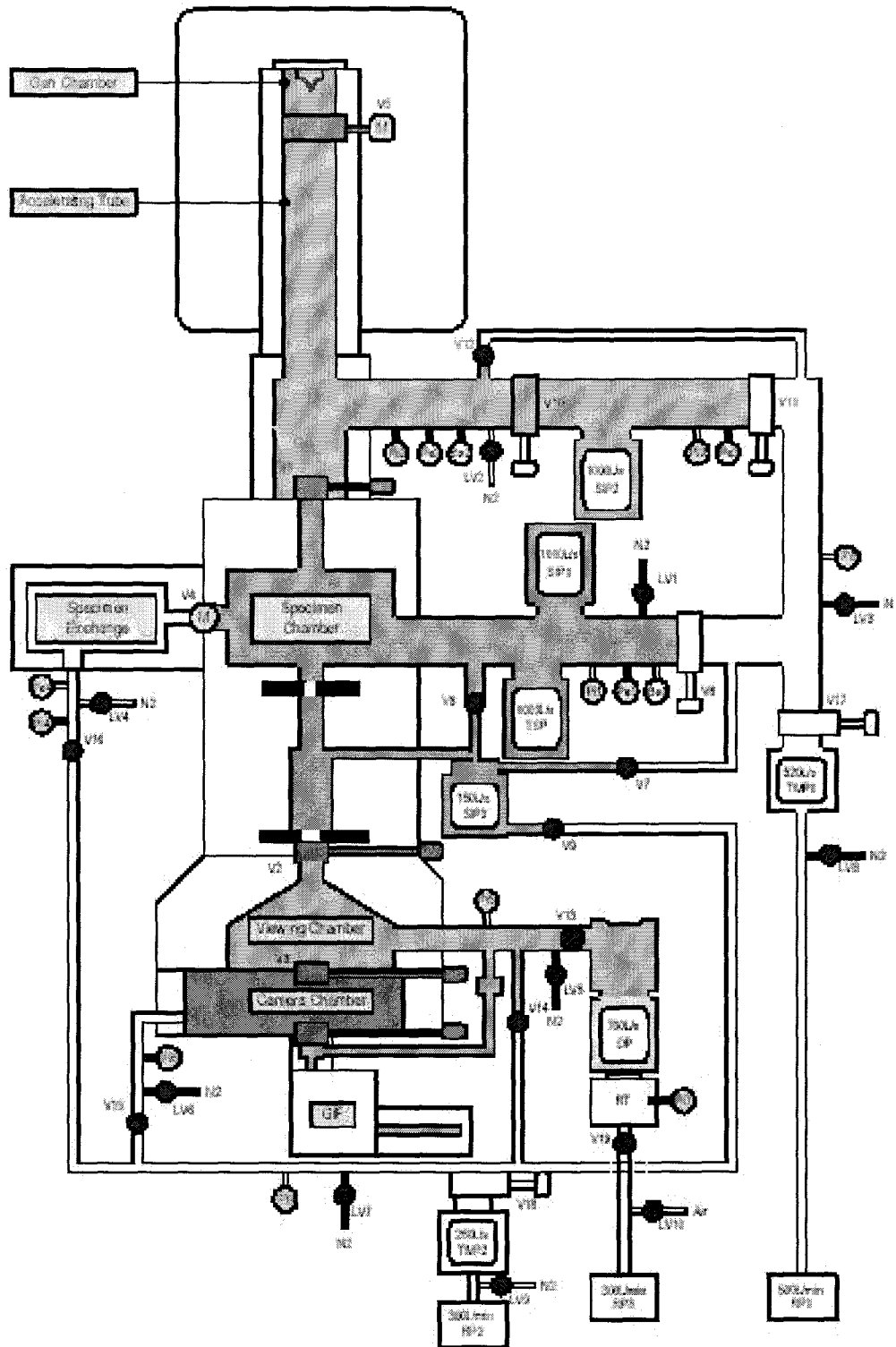
10. Projector Lens Part



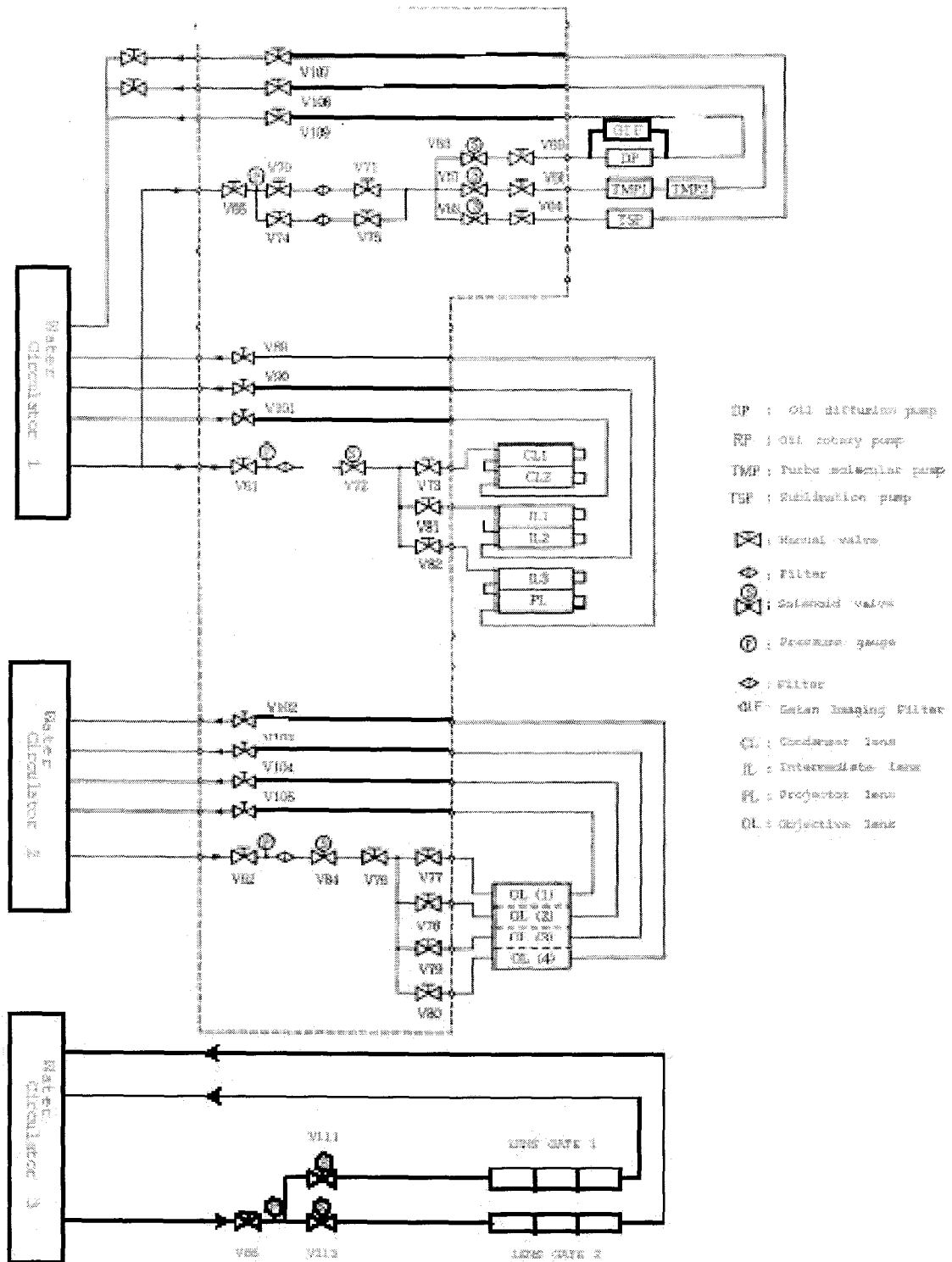
11. Viewing Screen Part



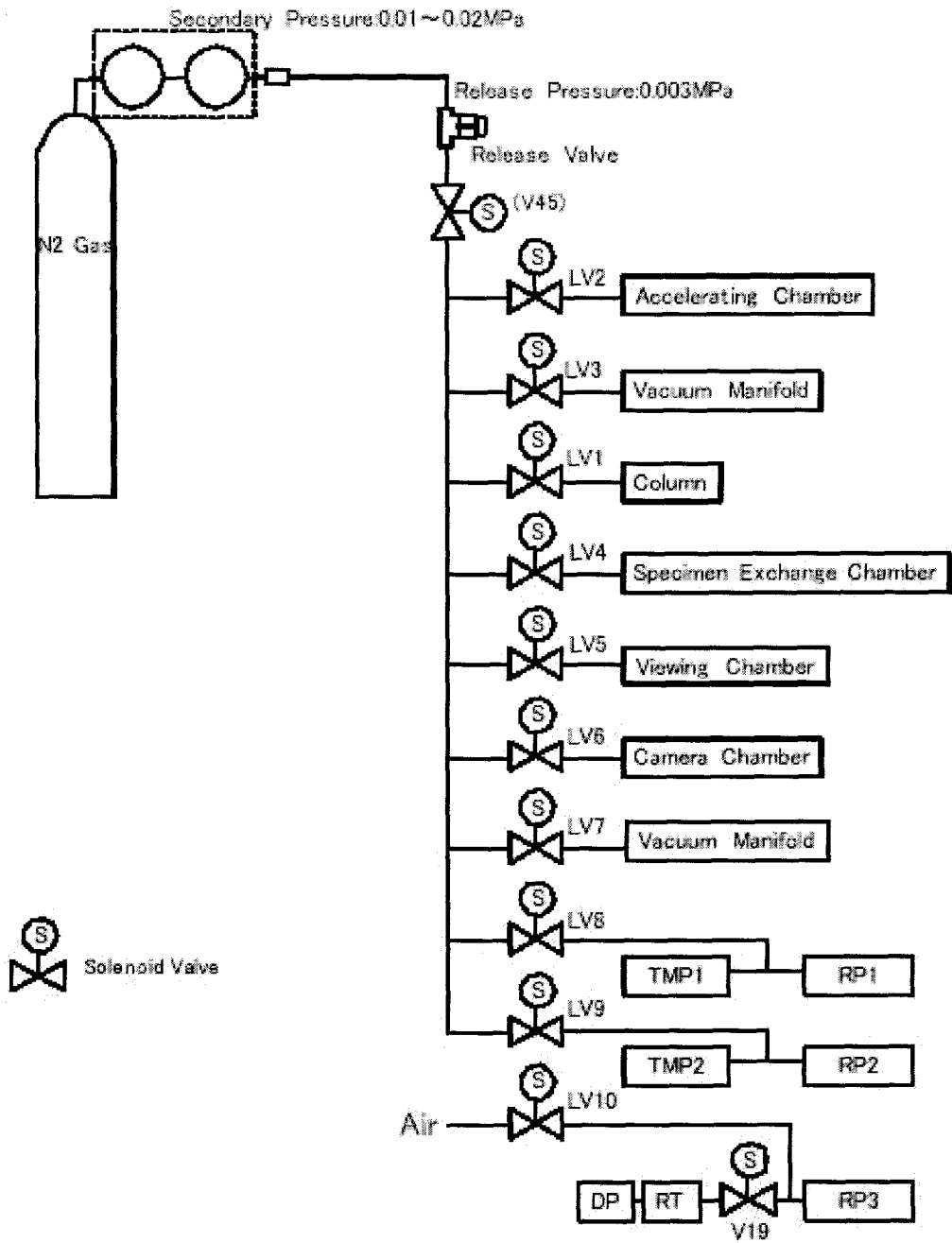
12. Vacuum System



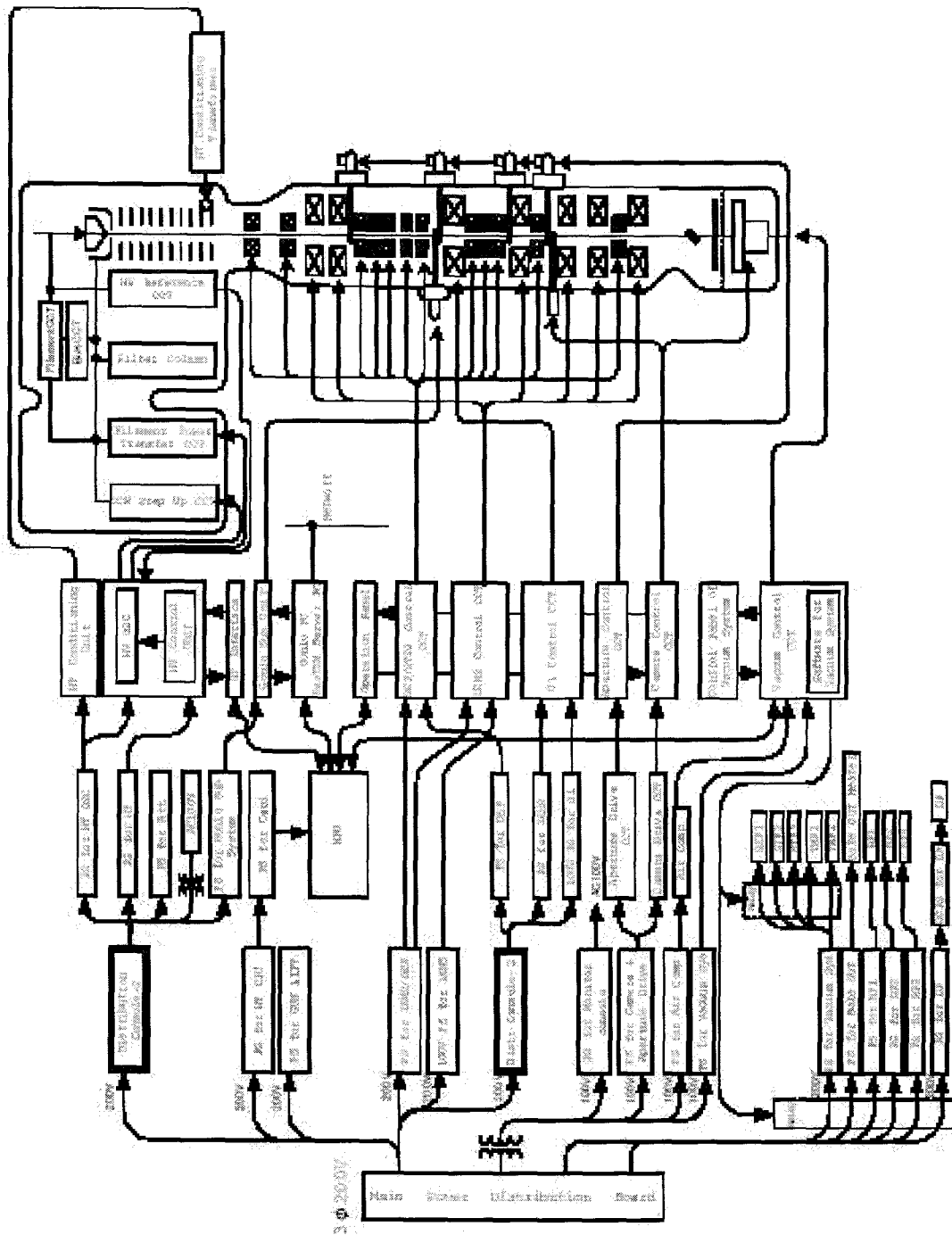
13. Cooling Water System



14. Vacuum-control Gas Line System

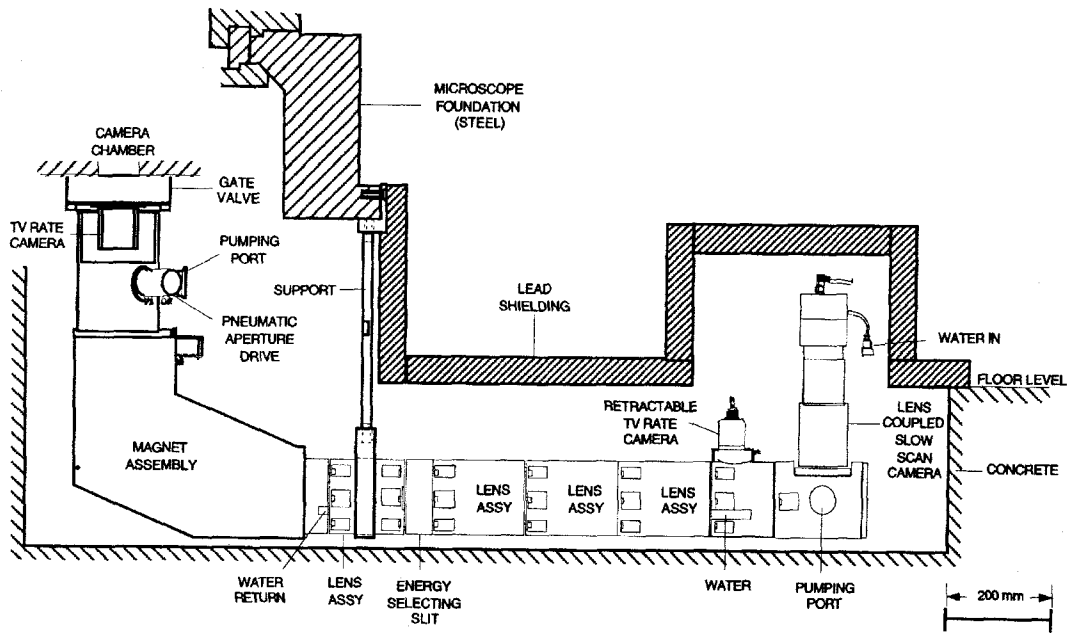


15. Power Supply System



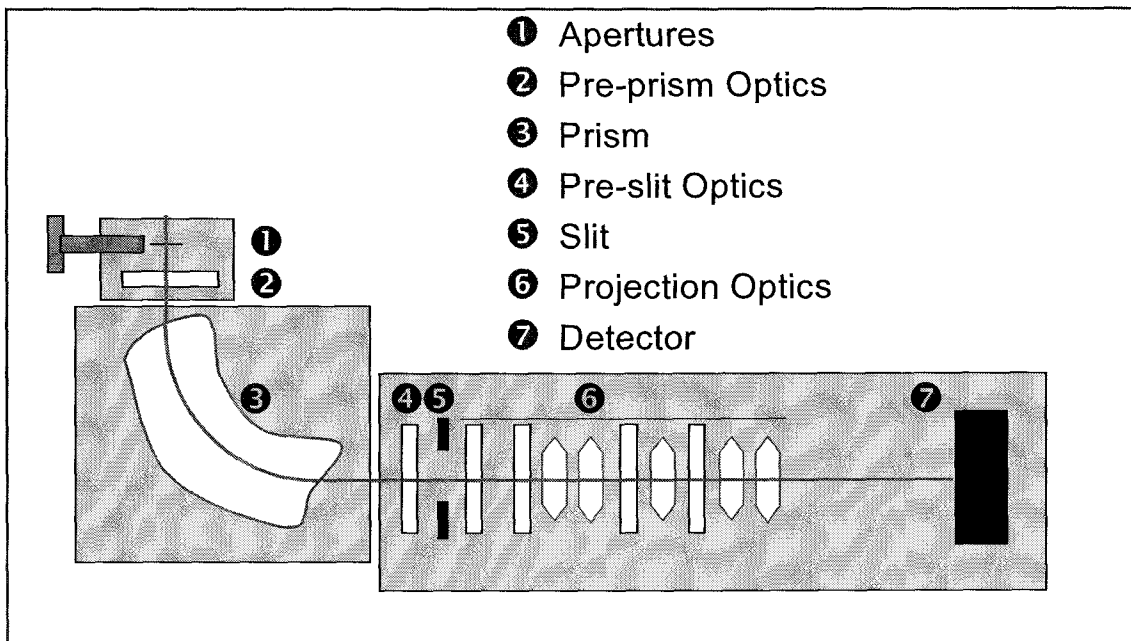
■ Gatan사 관련 자료:

1. 에너지 여과장치(HV-GIF) 전체 구성도



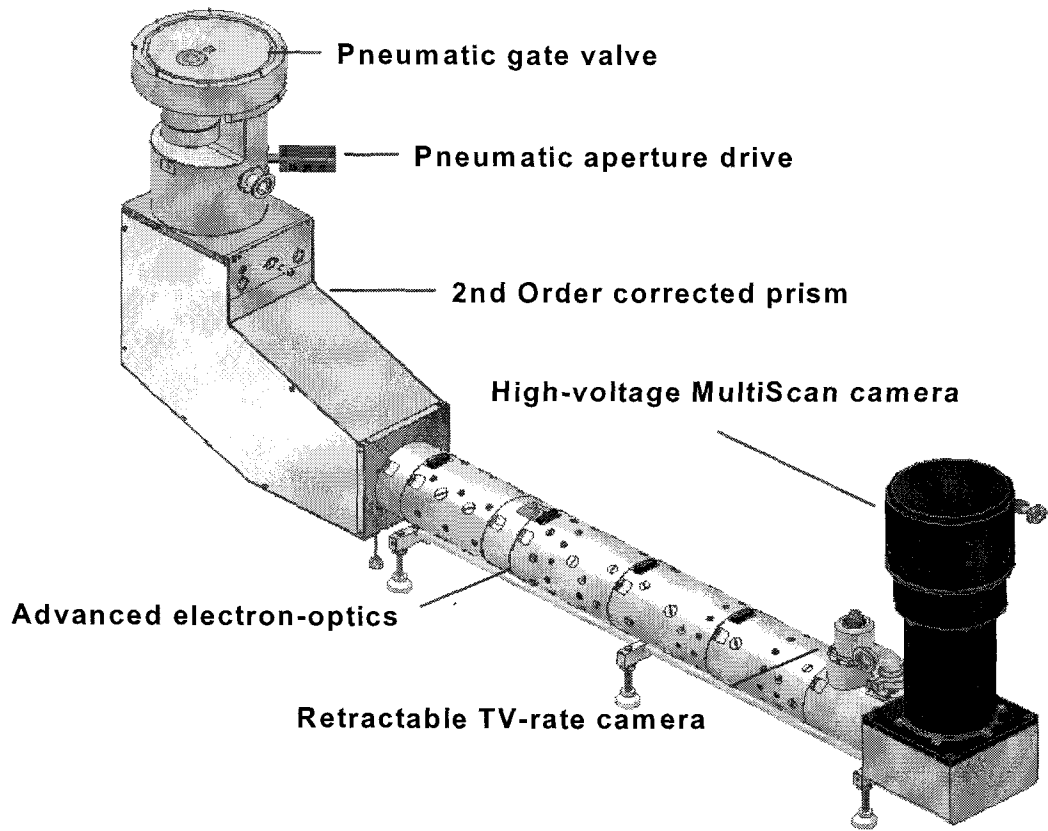
Design

<전체 구성도>

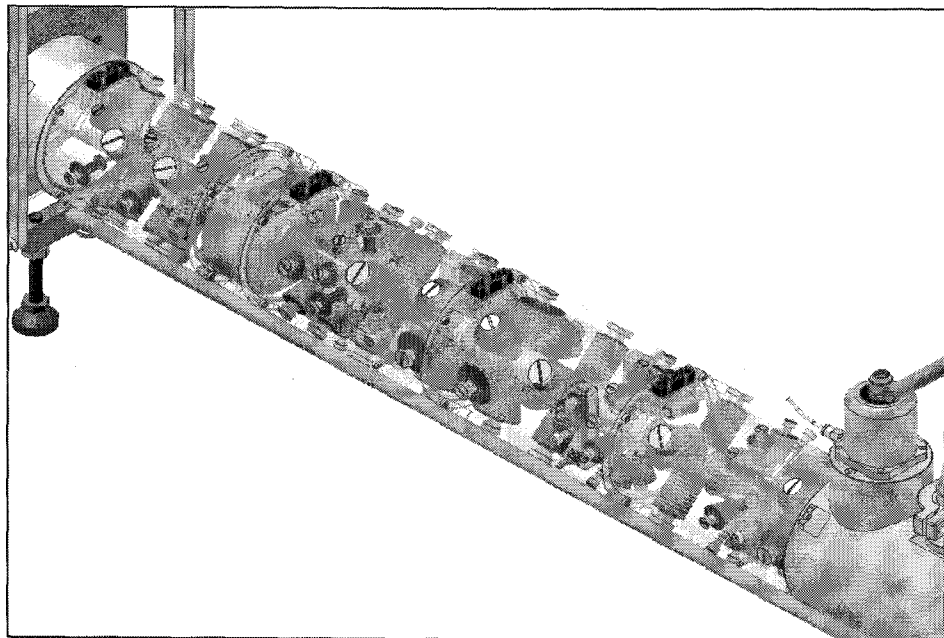


<부품 구성 단면도>

2. HV-GIF의 3-D Design

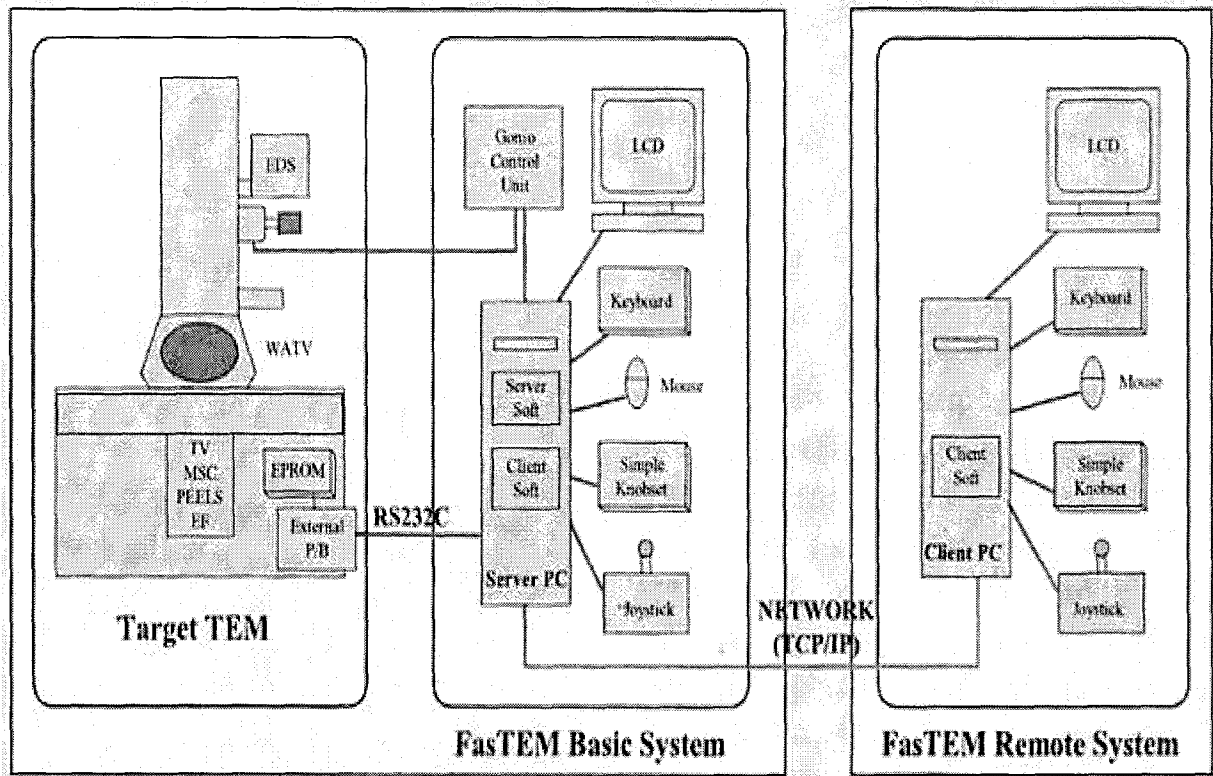


<전체 장비의 3-D Design>



<Imaging 렌즈부분의 3-D Design>

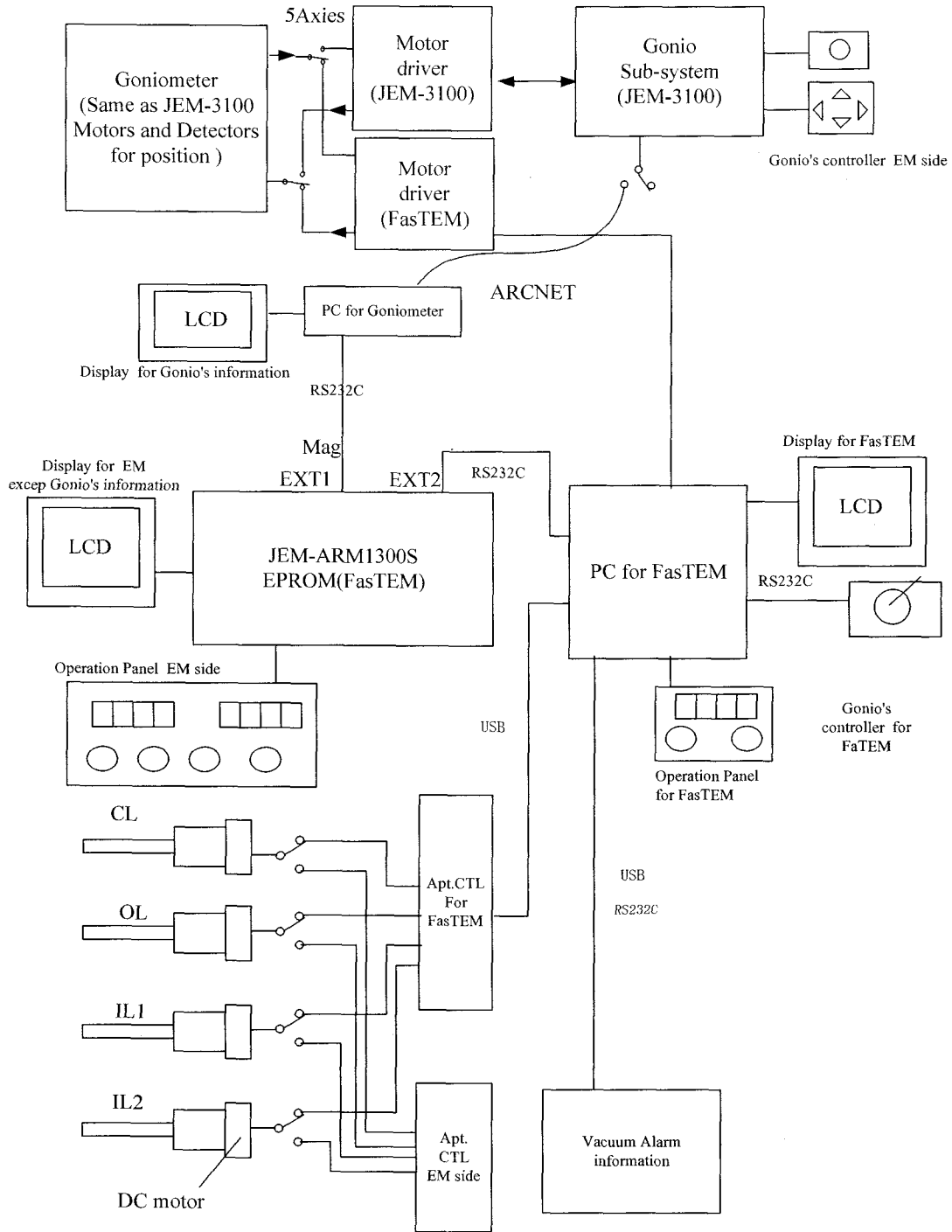
■ JEOL U.S.A.사 관련 자료:



<일반 원격운용장치(FasTEM) 개념도>

JEM-ARM1300S

**Control of Goniometer and Apt for EM side and FasTEM.
Display on the LCD of FasTEM for Vacuum alarm.**



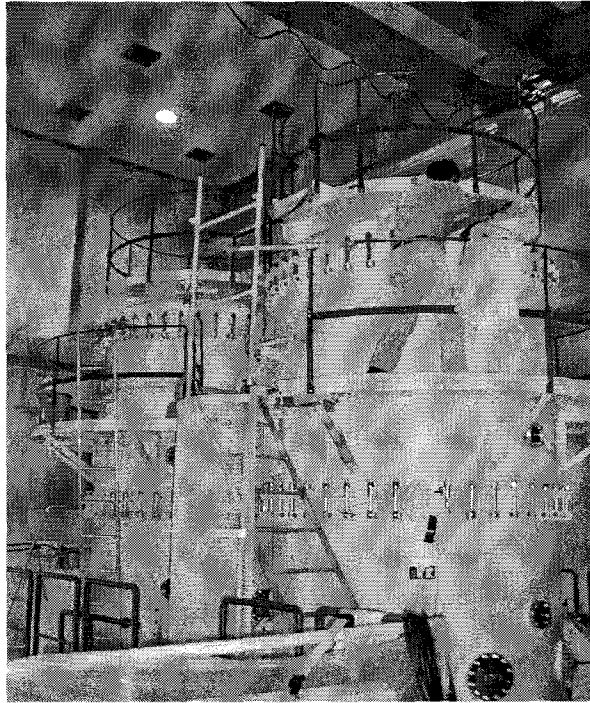
<UHV-TEM용 원격운용장치(FasTEM) 구성도면>

(첨부 3)

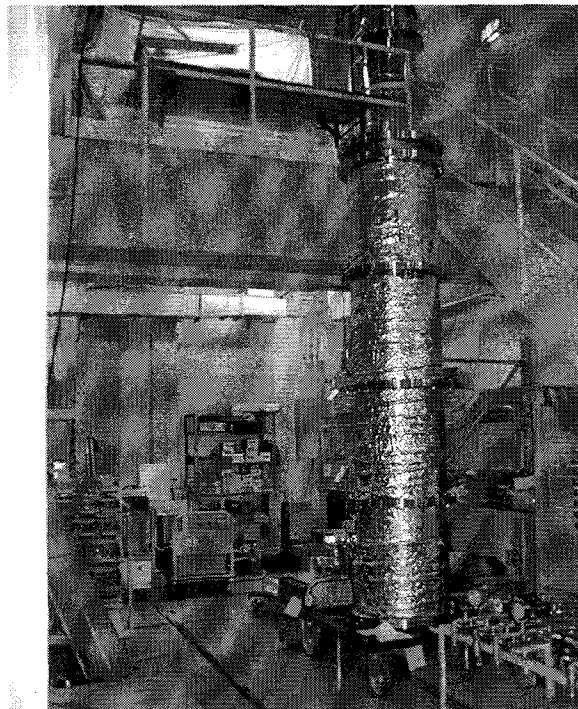
장비 공장 제작 · 조립 · 설치 및
성능시험 자료

■ 장비 공장 제작·조립·설치 사진 자료:

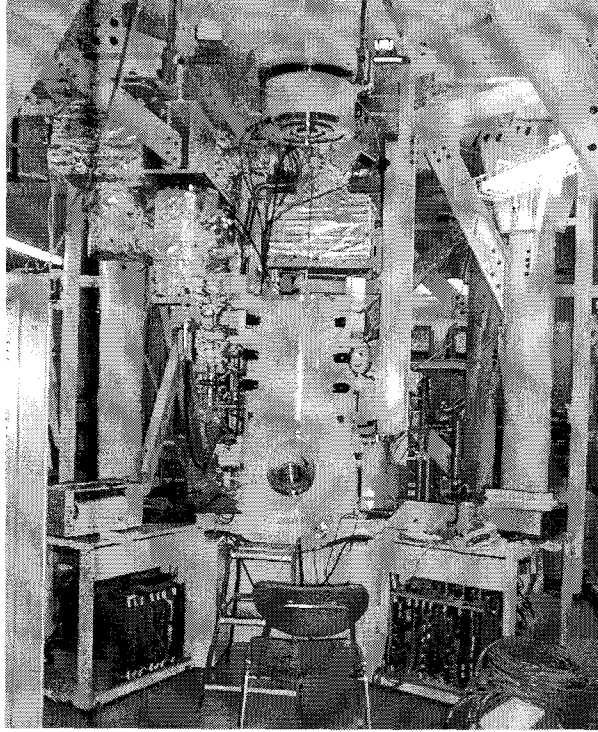
1. JEOL사 관련 자료:



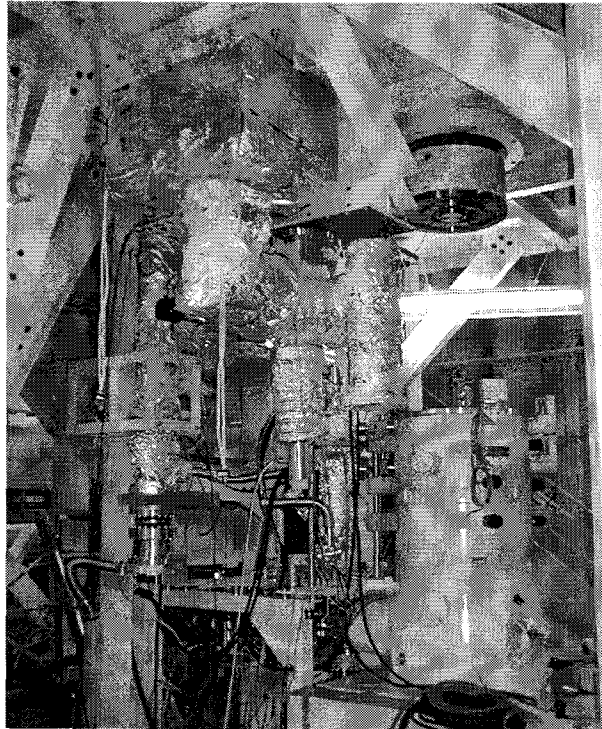
<가속탱크 외부조립 (2001. 9)>



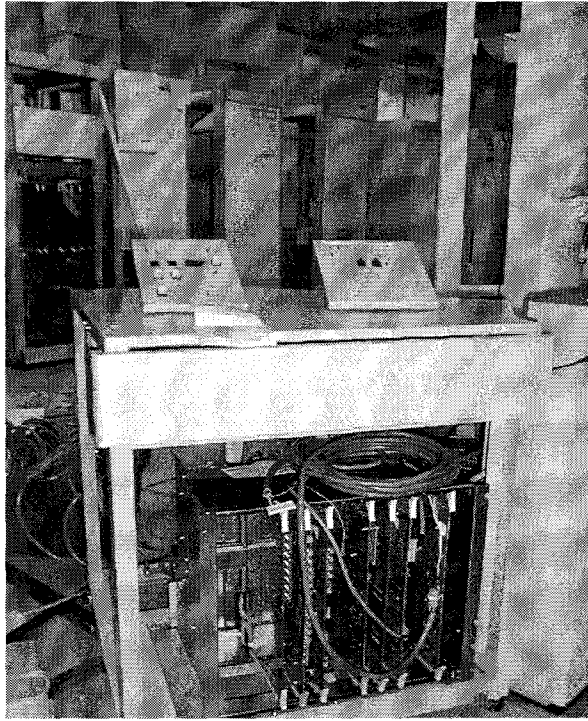
<조립된 가속관 (2001. 9)>



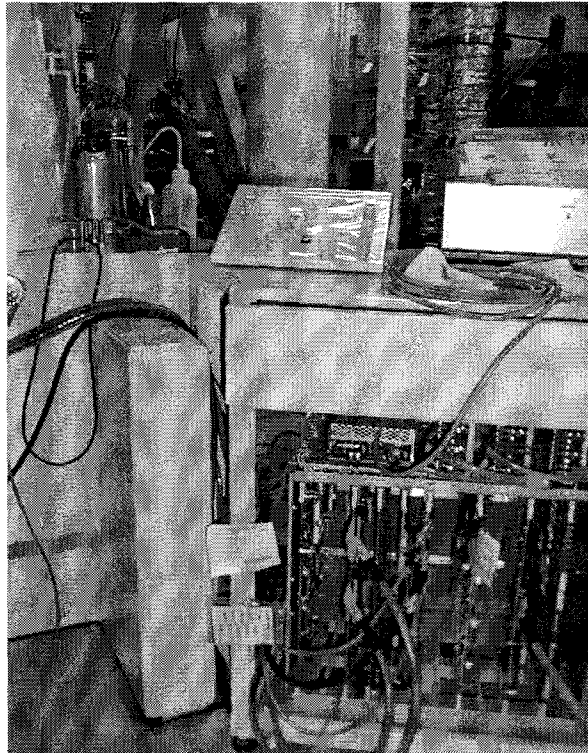
<전자광학장치 전면부 (2001. 9)>



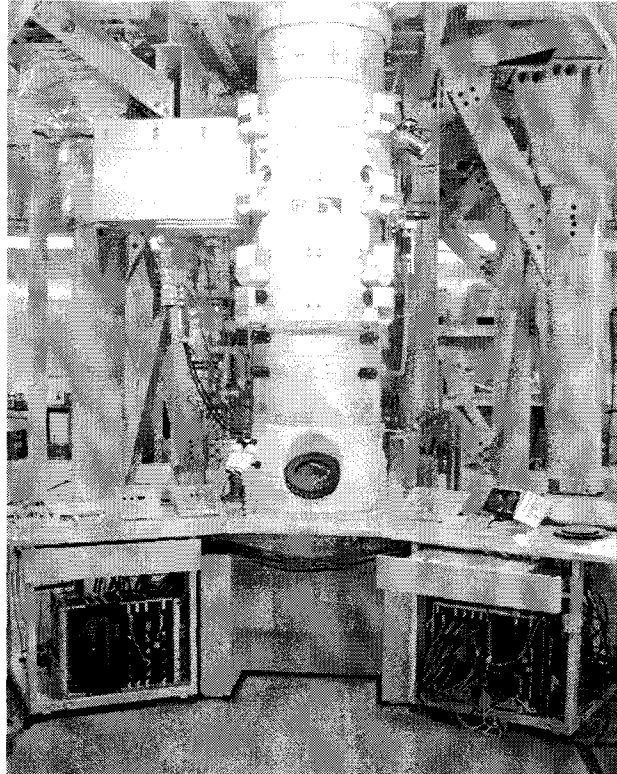
<진공장치 및 Column (2001. 9)>



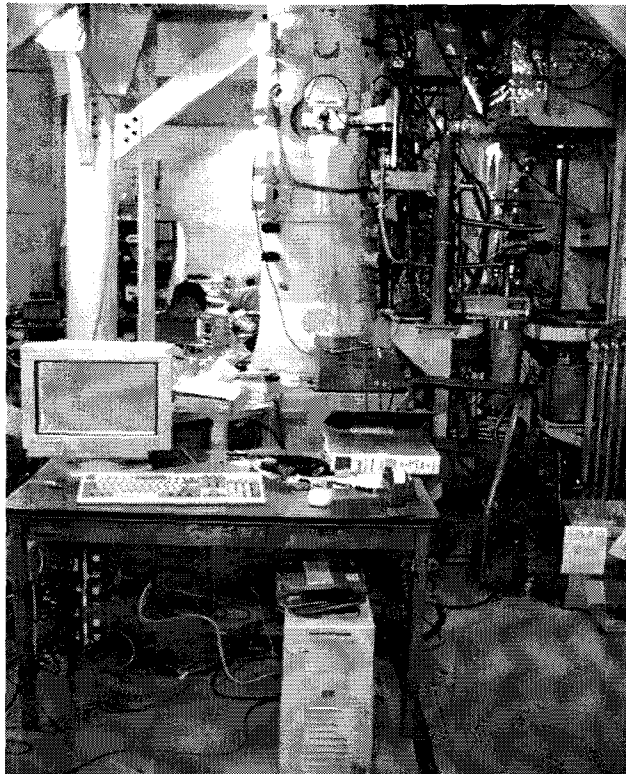
<장비운용 Panel 좌측부 (2001. 9)>



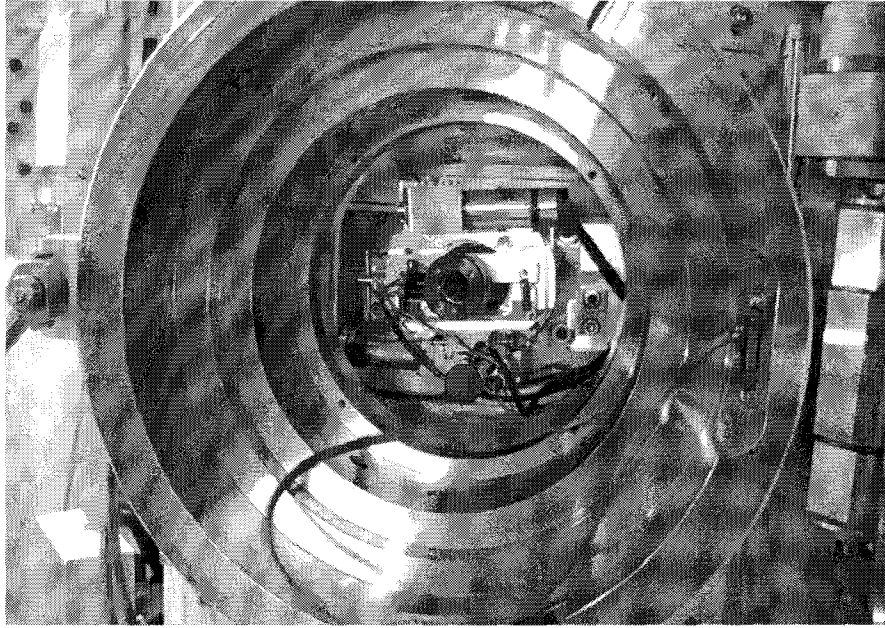
<장비운용 Panel 우측부 (2001. 9)>



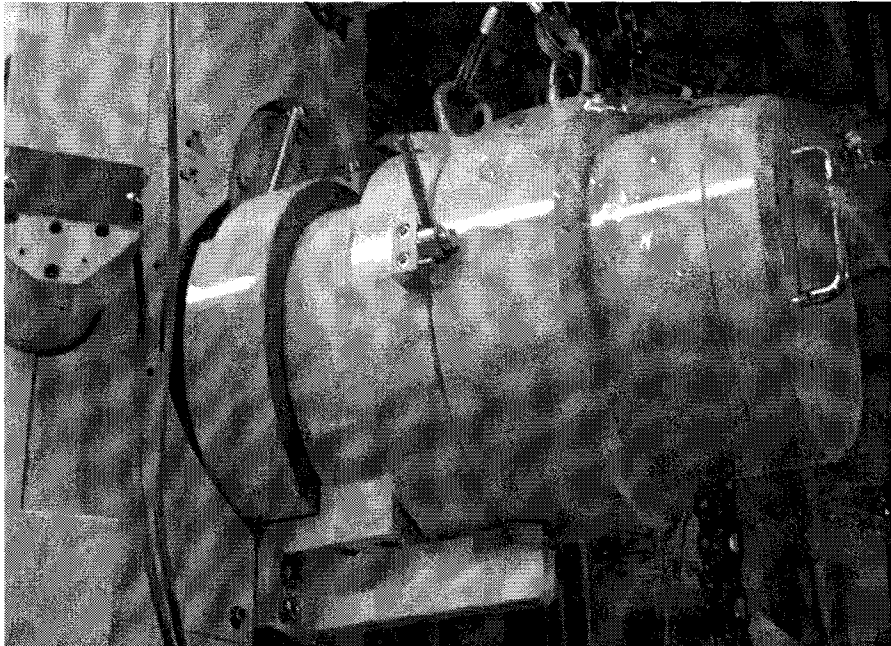
<Lens 결합이 완료된 Column의 전면부 (2002. 1)>



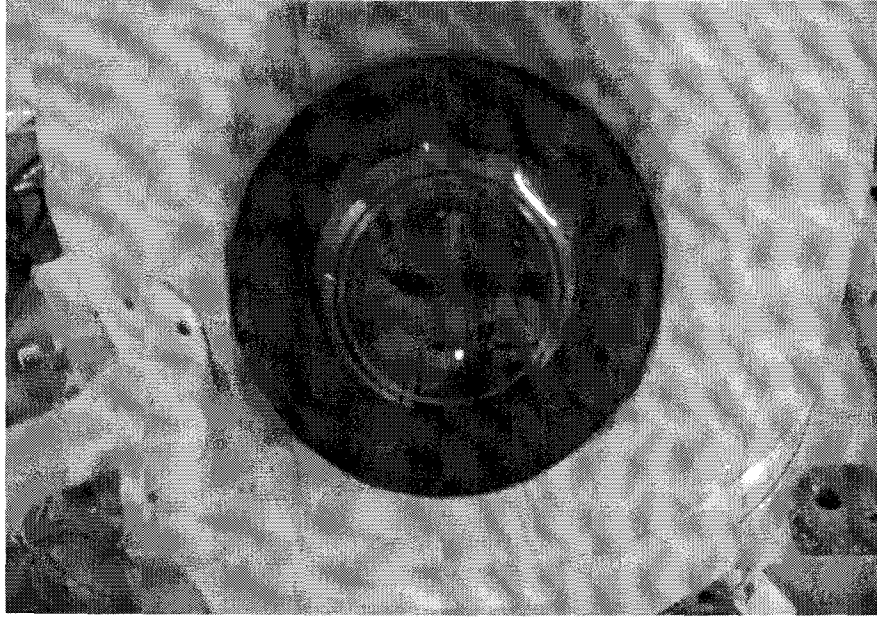
<Lens 결합이 완료된 Column의 후면부 (2002. 1)>



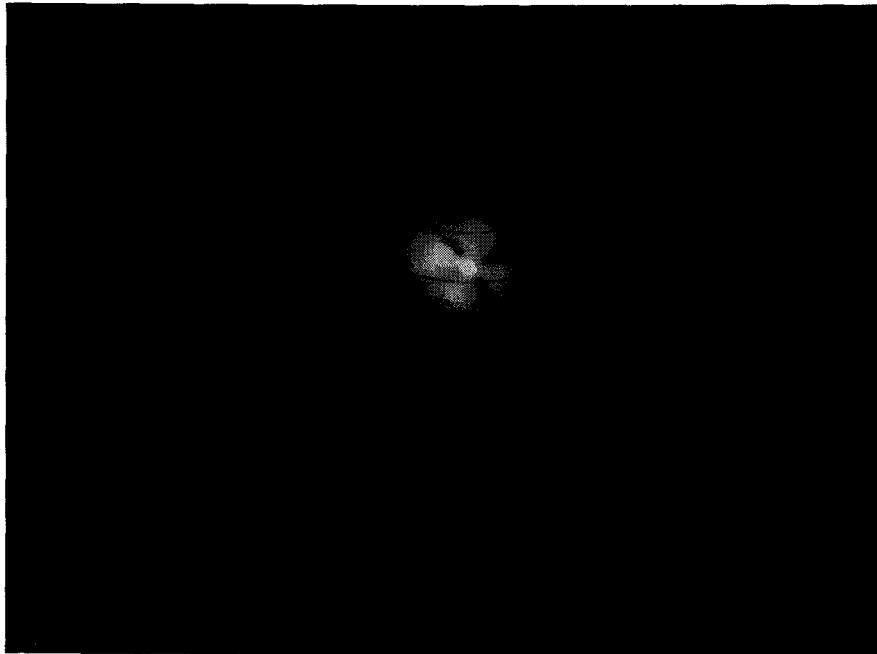
<Goniometer 부분 (2002. 1)>



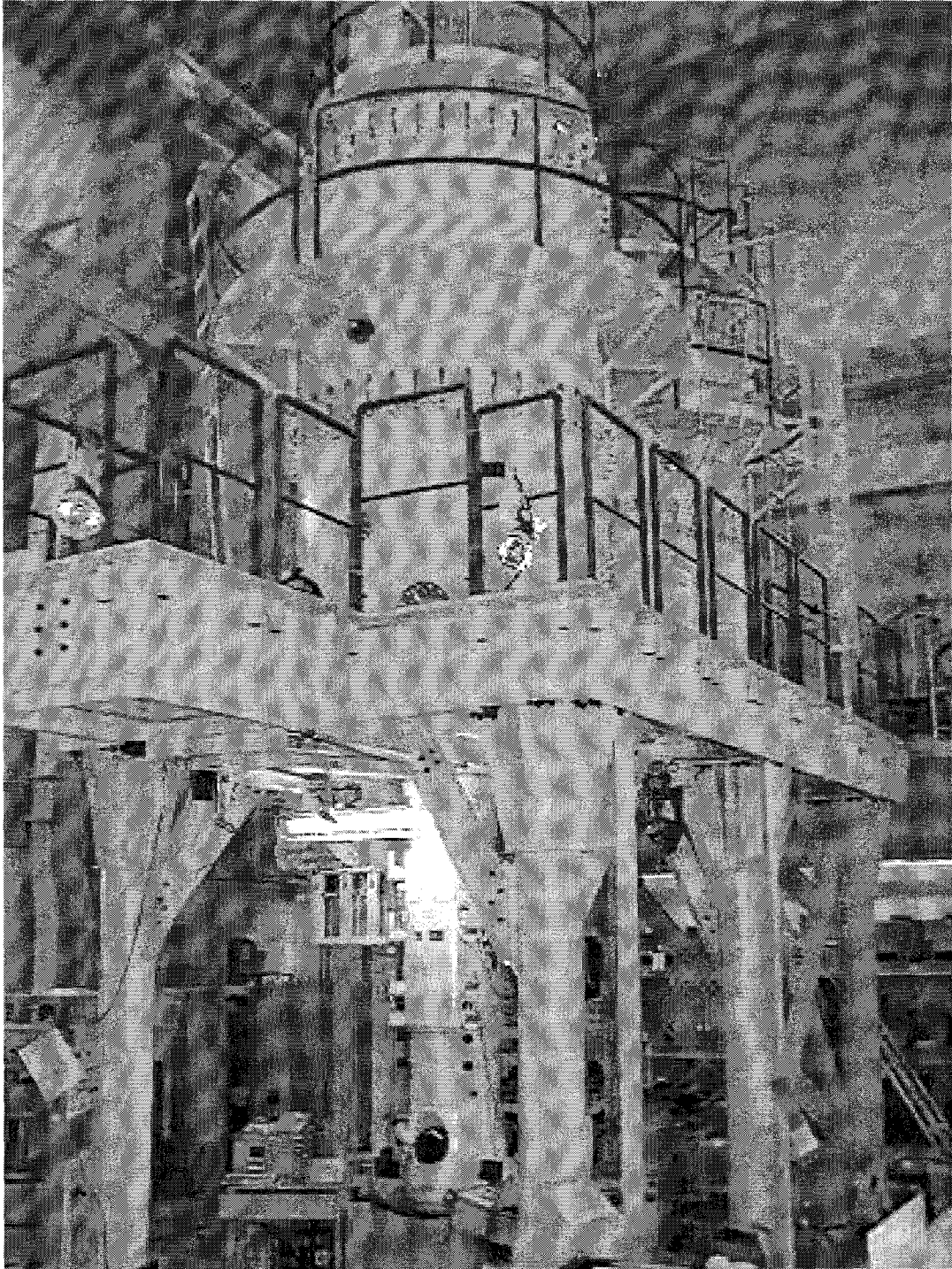
<Column에 부착된 Goniometer Cover (2002. 1)>



<1,000kV에서 최초의 Beam 인가 (2002. 1)>

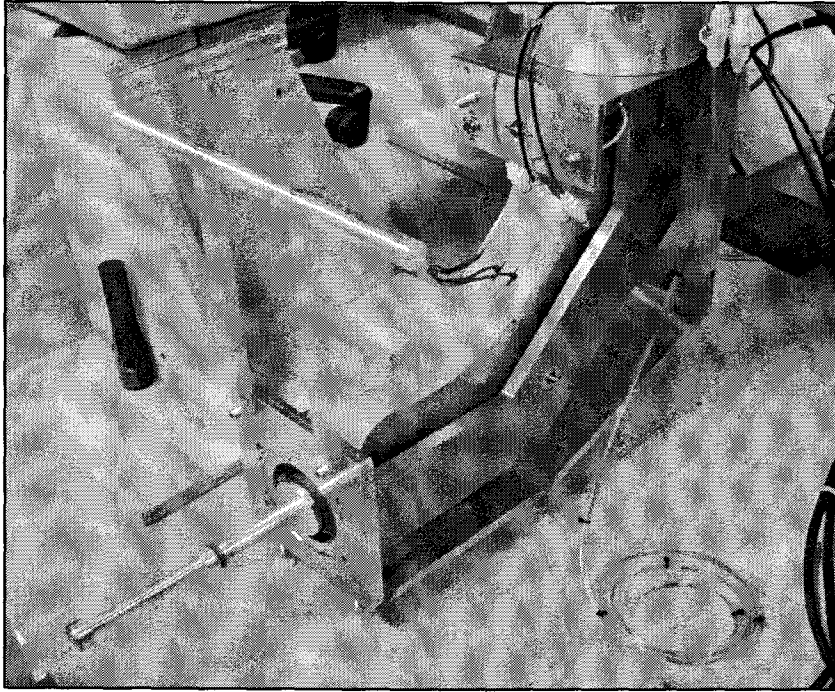


<인가된 Beam 모습, LaB₆ Filament 이미지 (2002. 1)>

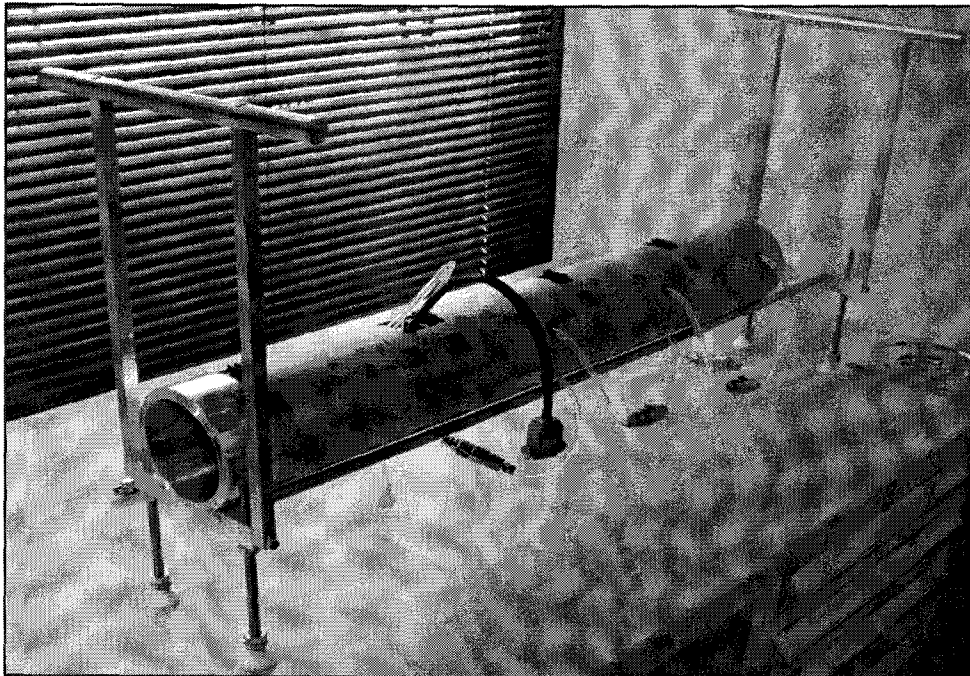


<공장조립 완료된 장비의 본체 모습 (2002. 3)>

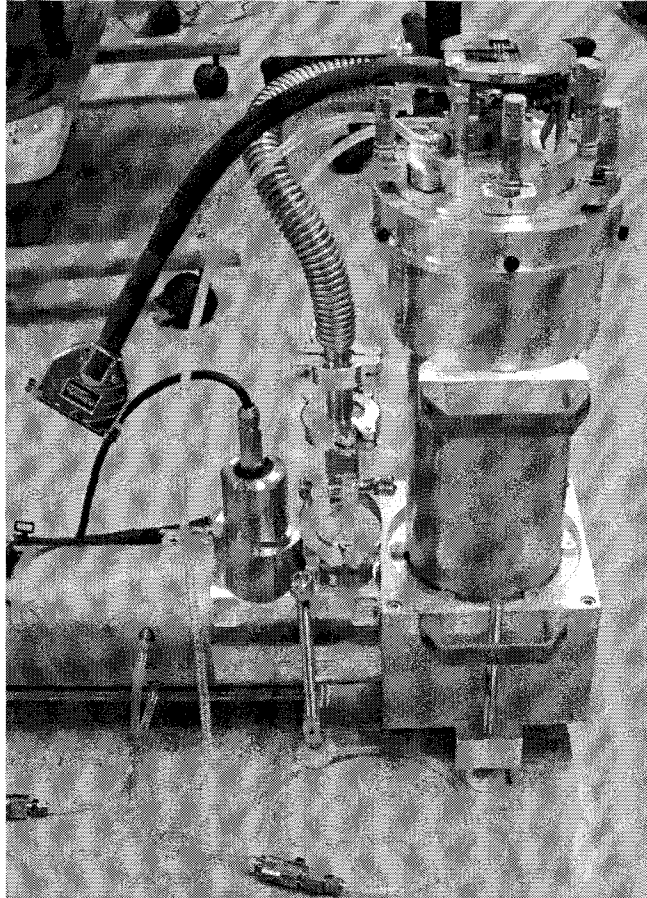
2. Gatan사 관련 자료:



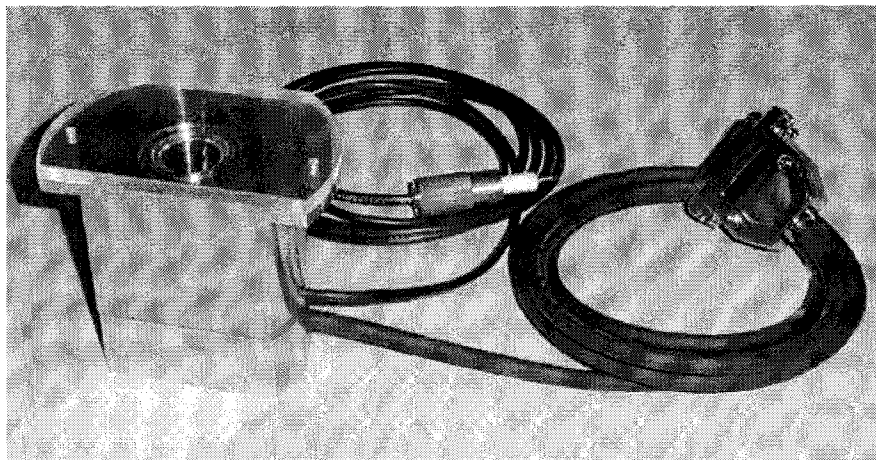
<제작된 Energy Spectrometer 부분 (2002. 3)>



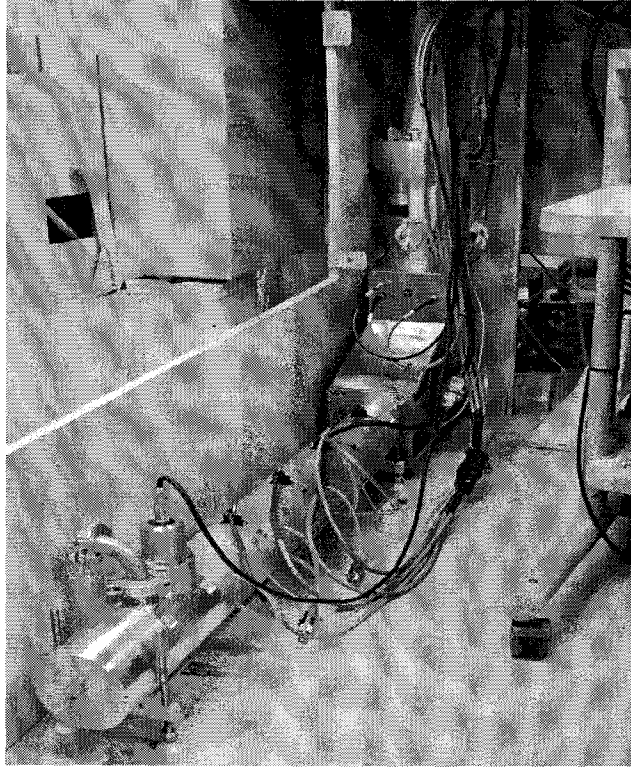
<제작된 Imaging Lens 부분 (2002. 3)>



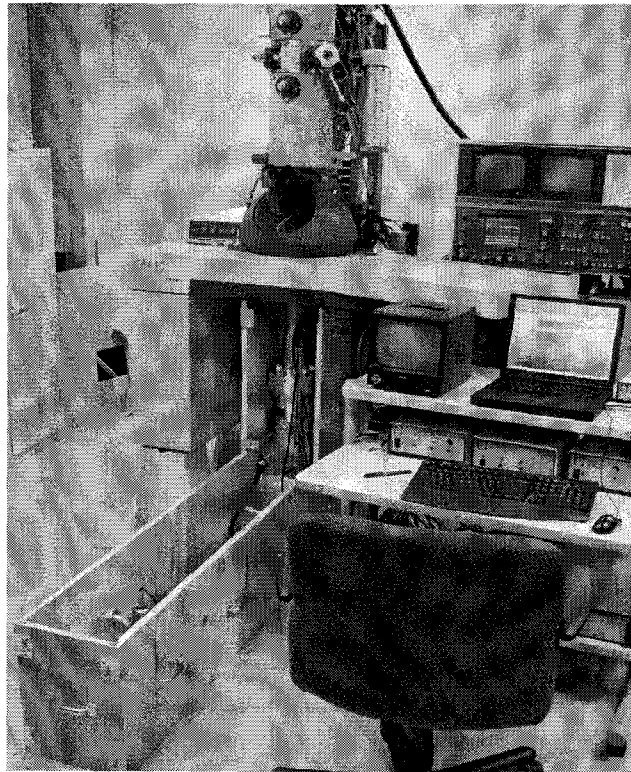
<제작된 MSC(Multi-Scan Camera) 부분 (2002. 3)>



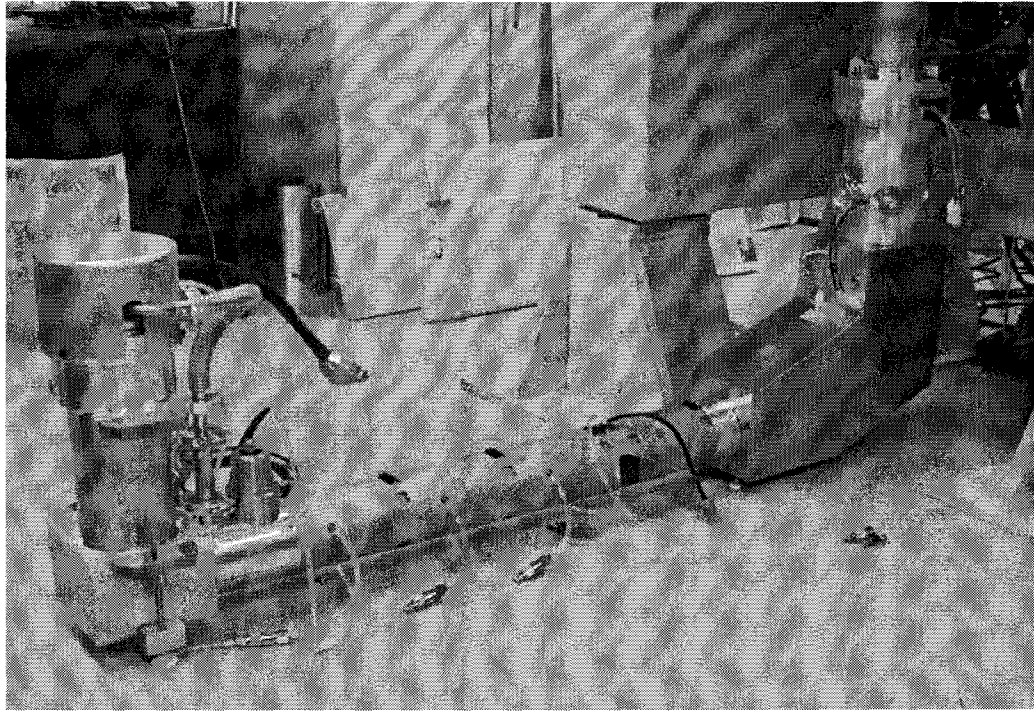
<제작된 676TV 부분 (2002. 3)>



<MSC를 제외하고 전체 결합된 HV-GIF (2003. 3)>



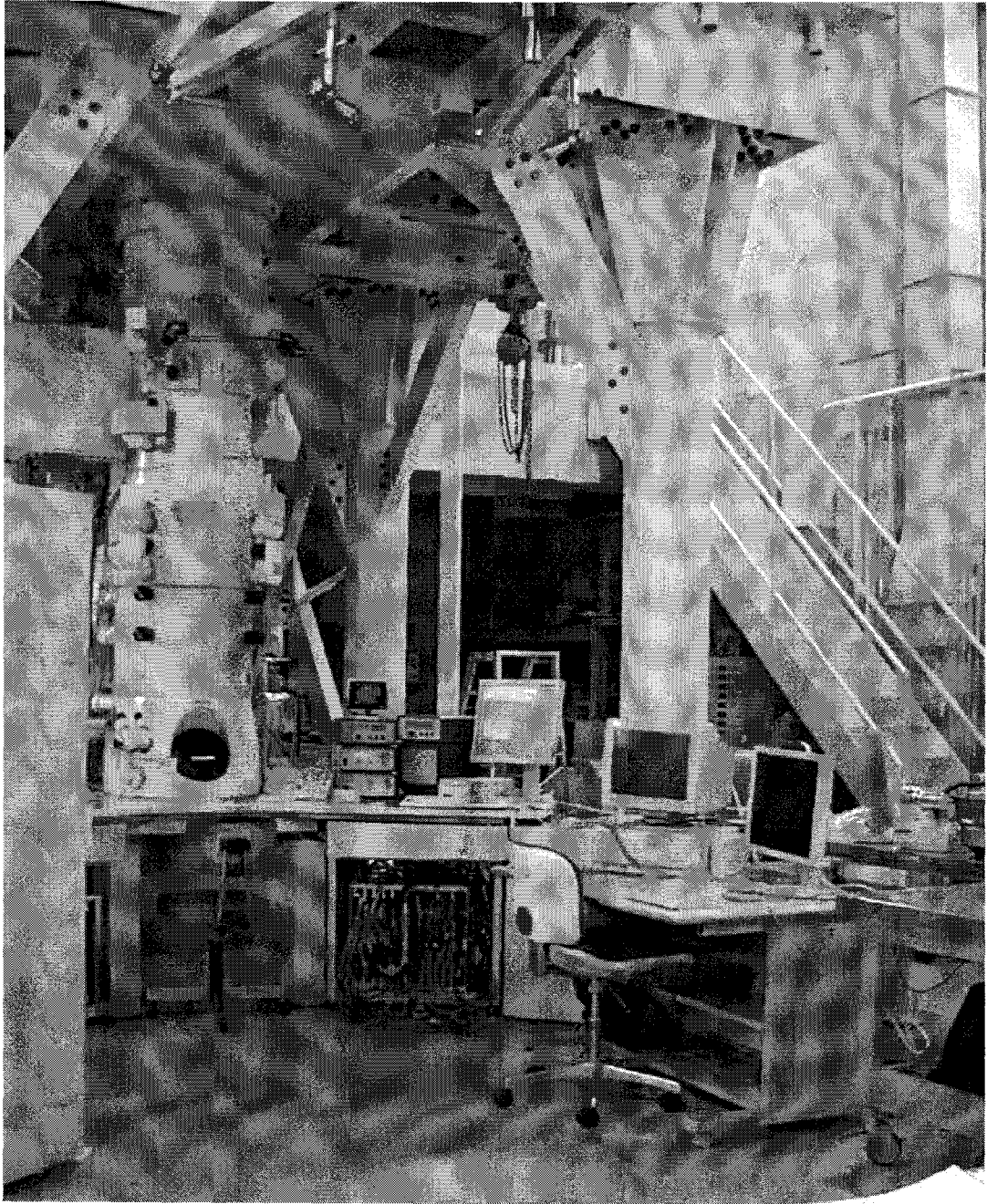
<120kV TEM에 부착하여 성능시험 중 (2003. 3)>



<HVEM 본체에 결합시키기 위해 Shipping 전의 HV-GIF (2002. 5)>



<일본 Akishima 공장에서 본체에 결합 중인 HV-GIF (2002. 7)>



<HV-GIF 및 FasTEM을 결합시키고 공장 성능시험 중인 장비 모습 (2002. 8)>

■ 장비 기본 성능시험 결과 요약:

1. 부수장비(HV-GIF 및 FasTEM)의 본체 부착 완료 (2002. 8)

2. 장비의 기본성능 점검:

(1) 가속전압 안정도

- 400-800-1000-1250kV(DC, AC)에서 수행
- 전체적으로 Spec(1.0×10^{-6})은 만족
- 현지설치 때 추가적인 안정도 향상 요구
- 현지설치 때 600kV의 안정도 측정 요구

(2) 대물렌즈 전류 안정도

- 400-800-1250kV(DC)에서 수행; AC는 1250kV에서만 수행
- DC 값은 전체적으로 Spec(1.0×10^{-6}) 만족
- AC 값(4.69×10^{-6})은 Spec(1.0×10^{-6}) 불만족
- 현지설치 때 추가적인 안정도 향상 강력히 요구
- 현지설치 때 400-600-800-1000-1250kV의 DC, AC 안정도 측정 요구

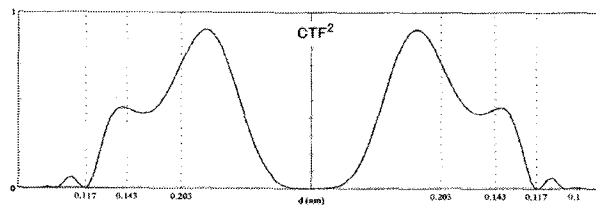
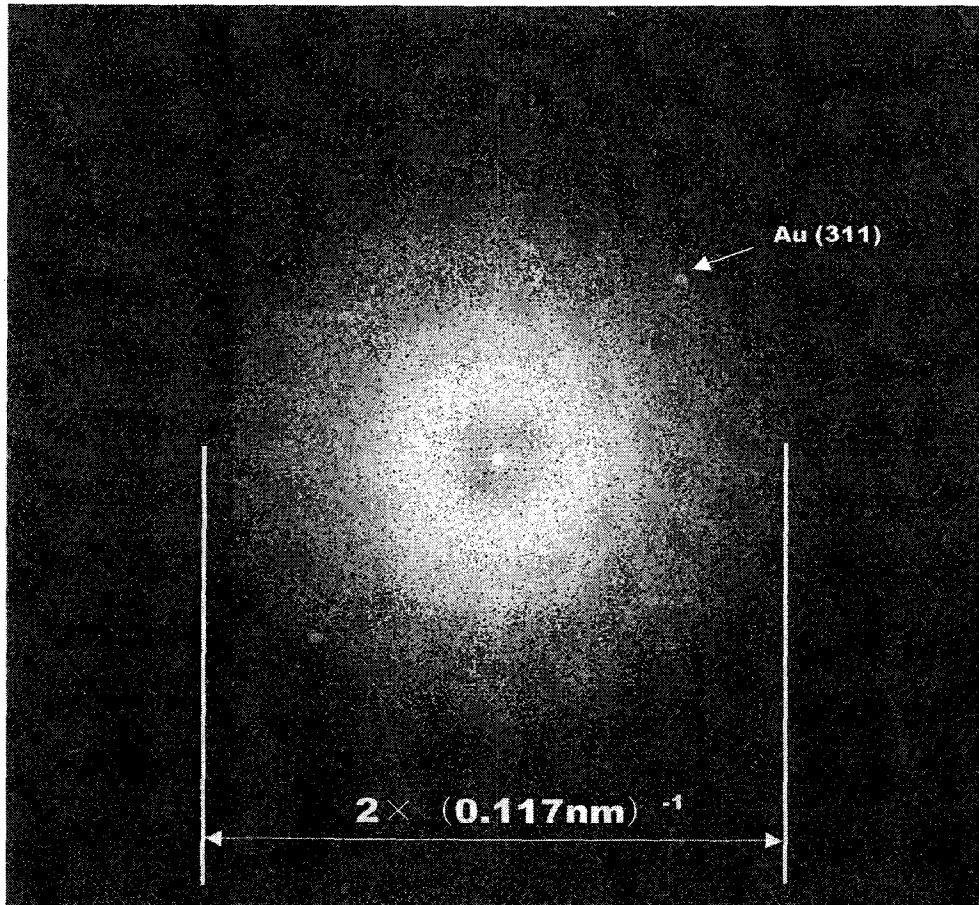
3. Standard 시편을 이용한 기본 성능시험 수행:

(1) 분해능 점검 (시편: Au particles on the amorphous Ge substrate)

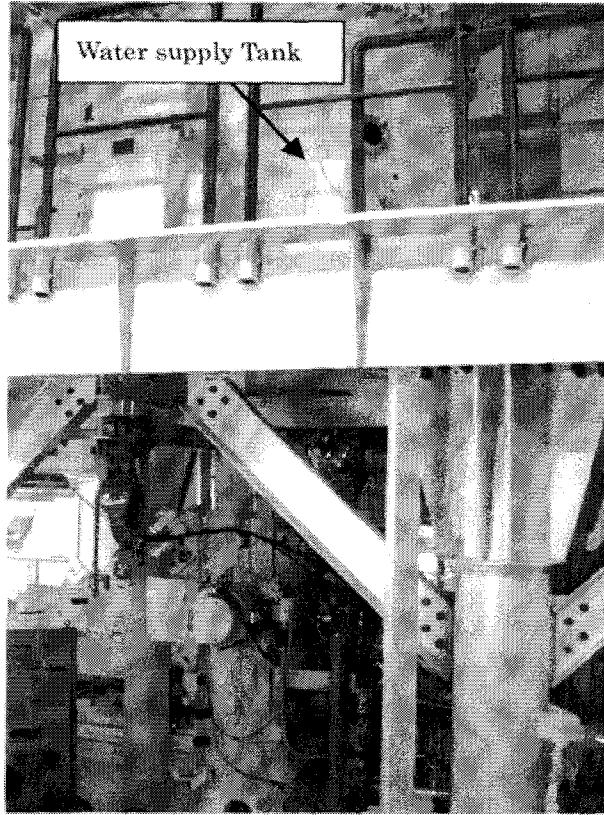
- Film을 이용한 작업: 0.118nm (Scherzer Defocus: 52nm)
- HV-GIF를 이용한 작업: 0.117nm (Spec: 0.12nm)

(2) Holder 성능점검 (시편: Carbon Graphite)

- Double-tilt heating holder: 1000℃에서 fringe(0.34nm) 관찰, 기록(film)
- Single-tilt heating holder: 1300℃에서 fringe(0.34nm) 관찰, 기록(film)
- Double-tilt cooling holder: -171℃에서 fringe(0.34nm) 관찰, 기록(film)
- Single-tilt cryo-transfer holder: -171℃에서 fringe(0.34nm) 관찰, 기록(film)
- 기타 특수 holder의 성능시험은 현지설치 때 수행



<Au Standard와 HV-GIF를 이용한 분해능 점검 (2002. 8)>



<자연 냉각방식을 이용한 Heating Holder의 분해능 측정 장면>

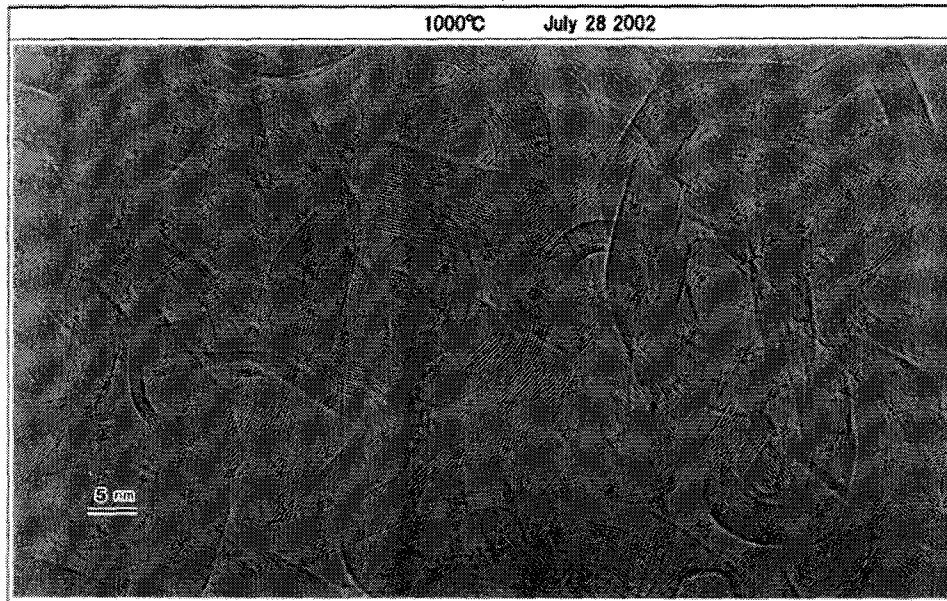
Resolution Test: Gatan Single Tilt Heating Holder

Flow rate 66cc/min.

Natural drop

1000°C

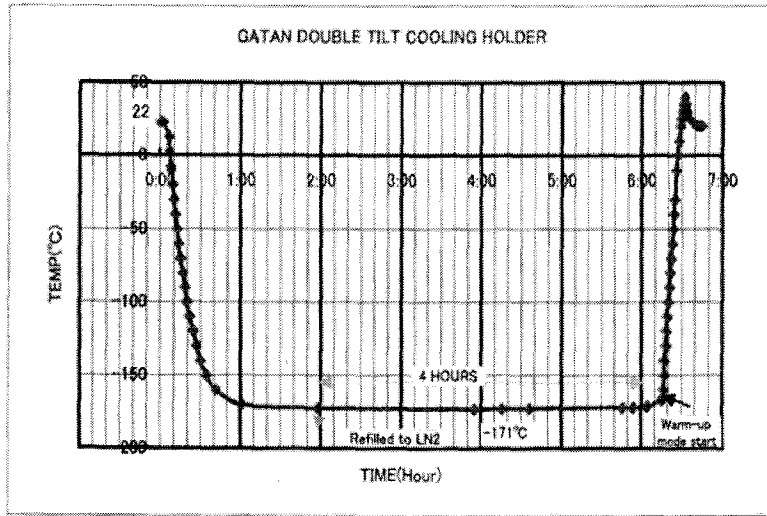
July 28 2002



<Gatan사의 1T-Heating Holder를 이용한 분해능 점검 결과 (2002. 7)>

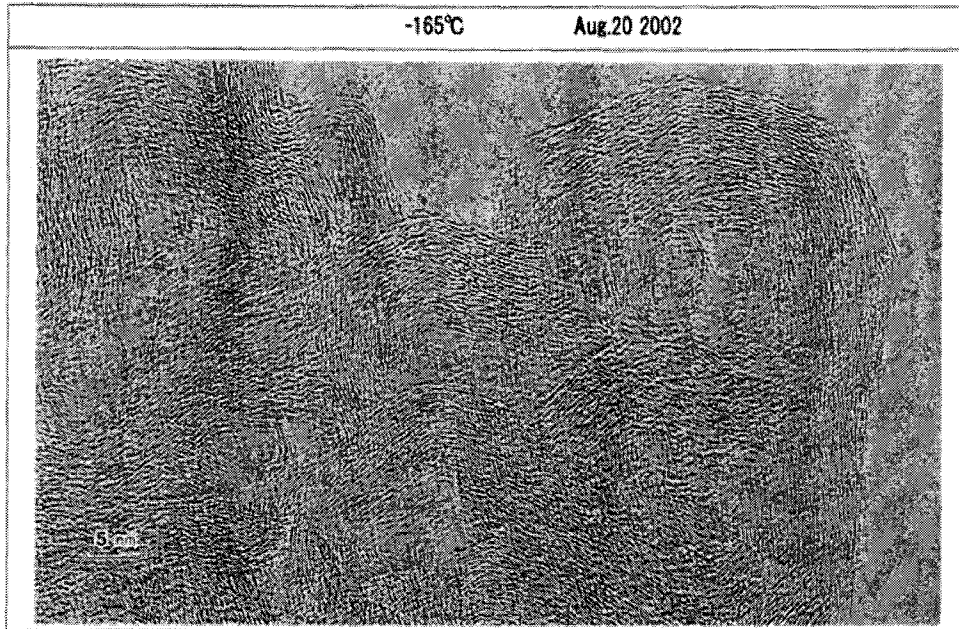
Double Tilt Cooling Holder

Characteristic of Cooling down



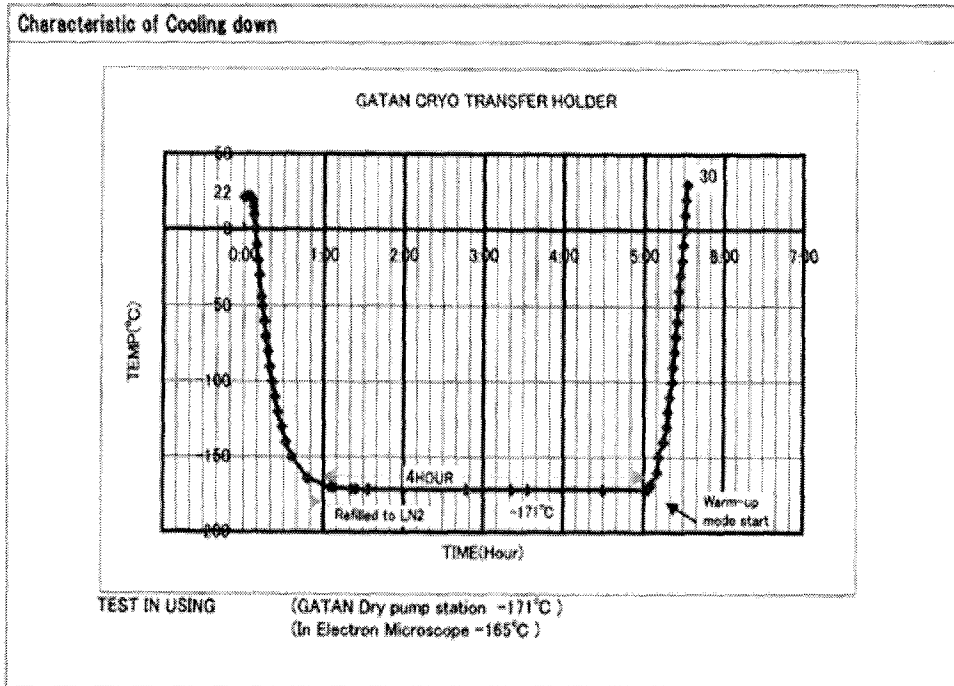
TEST IN USING (GATAN Dry pump station -171°C)
(In Electron Microscope -165°C)

Resolution Test:

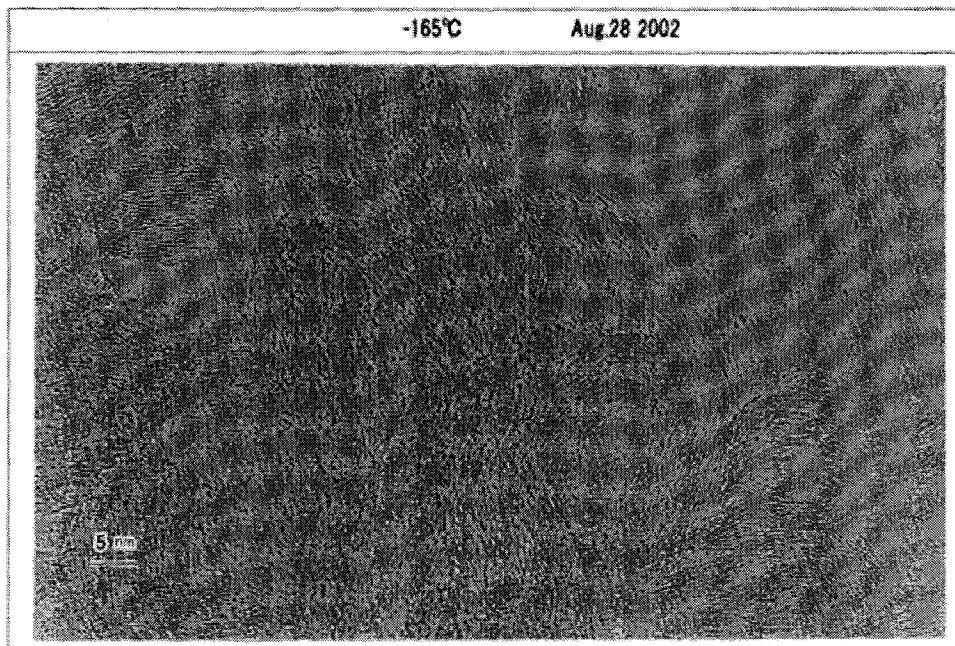


<Gatan사의 2T Cooling Holder를 이용한 분해능 점검 결과 (2002. 8)>

Single Tilt Cryotransfer Holder



Resolution Test:



<Gatan사의 Cryo-Transfer Holder를 이용한 분해능 점검 결과 (2002. 8)>

■ 종합 공장성능시험 세부사항 (2002. 11. 17 ~ 11. 30)

I. 개요

2003년 2월부터 본원 전자현미경 특수실험동에 설치될 초고전압 투과전자현미경의 최종 공장성능 시험 및 설치와 운영에 관한 제반 사항을 논의하기 위하여 일본 동경 Akishima에 위치한 JEOL공장을 방문함. 이는 2001년 12월의 장비 성능 1차 점검과 2002년 7월의 장비 성능 및 공정 2차 점검과 연계하여 장비 제작 현지에서의 최종적인 장비 성능을 평가하고 미비사항을 논의 및 개선하여 본원에서의 성공적인 장비 설치를 목적으로 함.

II. 공장 성능시험 일정

일 자	장 소	방문기관	면 담 자 (연락처)	주 요 활 동	비 고
11월 17일 (일)	출국 Tachikawa	Tachikawa Palace Hotel	(042) 527-1111		
11월 18일 (월) ~ 11월 29일 (금)	Akishima JEOL공장	JEOL 1000kv管	Mitsuaki Ohsaki (042) 542-2227	JEOL 현지 설치 장비 상태 점검	HVEM 전자광학기술 책임
			Daniel Moonen (925) 224-7304 USA	장비 설치, 유지 및 보수에 관한 논의	GIF Engineering
			O'Donell JEOL USA	장비 성능 개선을 위한 토의	Fas TEM 원격제어 프로그래밍
			Nobuyuki Terasaki (042) 542-2305	최종 공장 성능 Acceptance Test 실시	HVEM 생산기술
			Kazuma Kanbayashi (042) 526-5074	향후 Set-up 일정 조율 및 준비 사항 검토	전자광학부분 Engineering
11월 30일 (토)	입국	인천공항			

Ⅲ. 주요 점검사항

1. Acceptance Test 및 장비 설치 관련 회의

(1) 장비 출하전 TEST Data 요구(ISO) : HVEM과 JEM2300F의 Inspection Results

1) Basic Test Items : Voltage and Current Stability Test

Resolution Test (Si 3D atomic resolution)

Specimen Stability Test (Drift Test)

Specimen Contamination Test

GIF Performance Test (MSC, Energy Filtering, EELS)

FasTEM Remote Control Test

(2) 장비현황점검 및 대책

1) GIF Upper TV (676 Intensified TV Camera) 손상 문제

- 용도: Beam 및 Specimen Position Finding

- 원인: 작업자가 시편 위치 확인 중 Condensed Beam의 조사에 의해 Scintillator가 손상

- 대책: Gatan측 후송조치 및 장비 Set-up 일정에 맞춰 KBSI에 반입함

2) Objective Lens Current Stability Data 제출 요구

- 400, 800, 1250kV 각 가속전압에서 구현되는 Current 안정성 평가

3) FasTEM Remote Control Interface 개선

- X,Y Stage Control을 위한 Track Ball Controller 도입 (현재 GUI에서 Click하는 방식)

4) Gatan Holder Compatability 향상

- 현재 본체 시스템에서만 가능한 각 홀더 타입에 대한 Goniometer Stage Initialization이 FasTEM에서 가능하도록 보완

- Natural Water System 개선 방안 강구

5) Maintenance-용 장비 Drawing 요구

- HVEM 유지보수의 독립화 실현을 위한 자료

- Operation Manual 및 Instruction Manual CD File화 제공

6) 장비 설치 시 장비 성능 강화 방안 검토

7) 장비 Installation시 KBSI측 준비 항목 점검

2. FasTEM 및 GIF 원격 운용 점검

(1) 원격 Goniometer Control

- 1) Goniometer의 X, Y, Z, Goniometer Tilting, Holder Tilting의 개별적 혹은 통합적 Resetting기능이 보완됨.
- 2) 직접 운용 시 Stage Moving이나 Tilting 작업이 여타의 현미경에 비해 매우 유리함. 원격 운용 시 Computer Interface상에서 Goniometer Control을 하는 것이 부자연스러움. (추후 Trackball등과 같은 물리적인 조종 장치와 연동 예정)
- 3) Holder Type 원격 표시
Goniometer에 장착된 Holder의 종류에 따라 Goniometer의 동작 범위가 달라지므로 이를 프로그램 상에서 지정하게 되어 있음. 직접 운용 시에 선택된 홀더의 종류가 원격 모니터링 상에서는 상이하게 나타남. 프로그램 버그로서 본원 설치 시 까지 수정 완료함.

(2) FasTEM 원격 Monitoring Interface

- 1) Focusing Step, Focus 및 Spot Size등의 수치표현에서 단위표시 보강 예정
- 2) JEOL 사내 LAN은 E1 Base로서 원격 운용시 TEM 이미지 전송에 Delay가 발생(T1이상의 LAN 환경하에서는 이상 없을 것으로 판단)
- 3) 원격환경 하에서 시료의 회절패턴 관찰이 현재 불가능. (원격 Tilting 곤란)
본원 설치 시 Screen을 Monitoring 할 수 있는 CCD나 IR Camera를 부착하여 원격 환경하에서 시편회절패턴 관찰이 가능하도록 함.

(3) GIF 성능점검

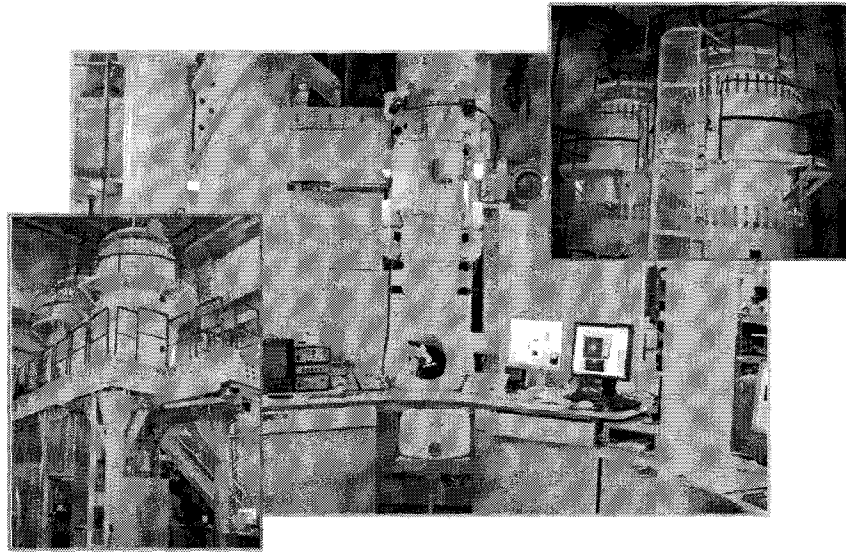
1) GIF(Gatan Image Filter)의 구성

- Detector System → 673 Top TV / 676 Off-axis TV / 692 Retractable TV / Multiscan Camera
- Entrance Slit Aperture → 2mm: Spectroscopy Mode
3mm: Image Mode
6mm: Diffraction Mode
- 배율관계 → Total Magnification (25 mm² MSC) = 12.5 x Microscope Magnification

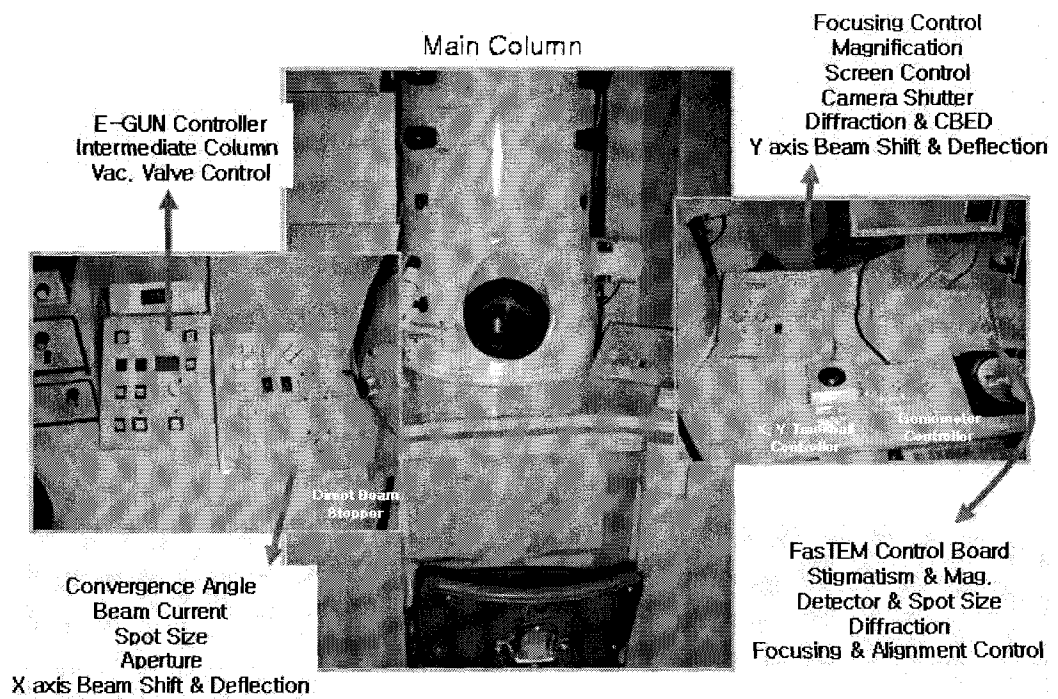
2) GIF Energy Filtering 기능 점검

- Si 시편을 이용한 Zeroloss Energy Filtering / Plasmon Energy Filtering 기능 수행.
- 이전에 설치된 어떤 HVEM도 갖지 못한 독특한 기능으로서 고정사각 Tilting 기능,
- 고투과력과 함께 본원 초고전압 전자현미경의 강력한 기능이 될 것임.

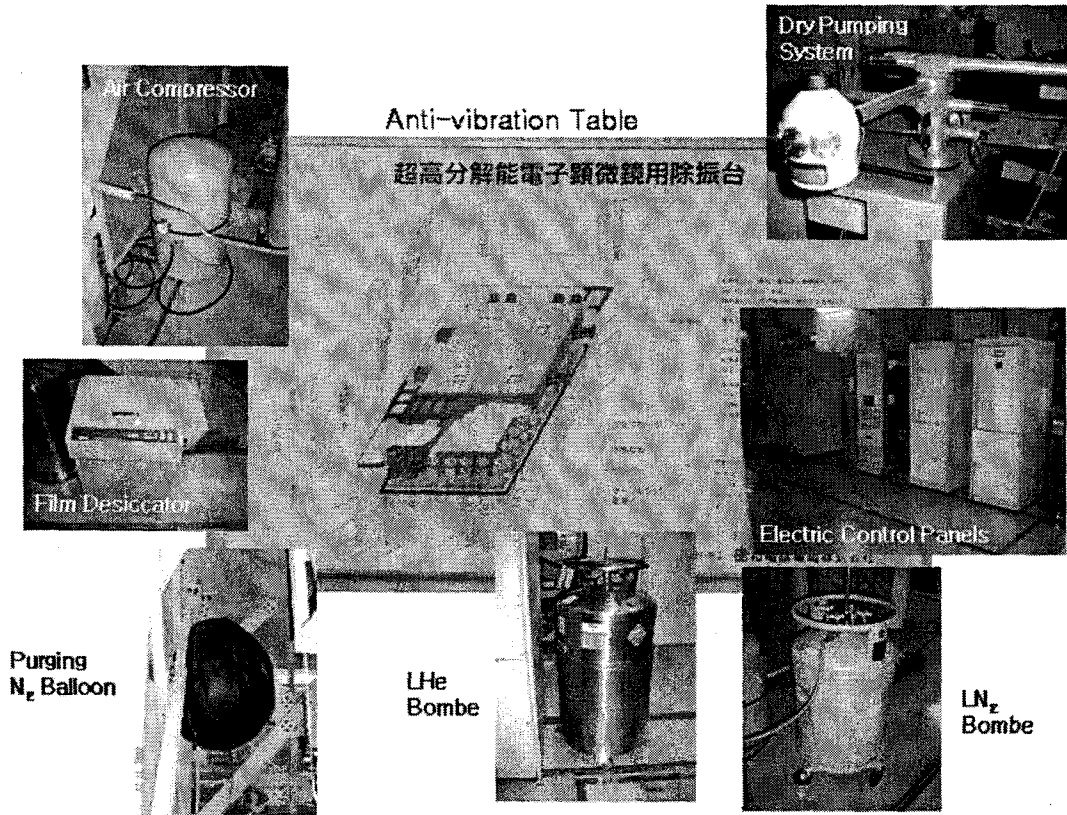
(4) 장비 직접 운용 환경 및 부대 장비



< JEOL 공장에서 완성된 초고전압 투과전자현미경 >



< 초고전압 투과전자현미경의 직접 운용 환경 >



< 초고전압 투과전자현미경 부대 장비들 >

3. 초고전압 전자현미경의 Acceptance Test

(1) 주요 Acceptance Test 항목

- 1) Si 3D Atomic Resolution Test (Principal Test Item)
- 2) Voltage and Current Stability Test (추후제공)
- 3) EELS Resolution Test
- 4) Specimen Contamination, Drifting, and Beam Damage Test
- 5) GIF and FasTEM Performance Test
- 6) Goniometer & Holder Compatibility Test
 - Double tilt holder (JEOL)
 - Multi-specimen holder (JEOL)
 - Single tilt heating holder (Gatan)
 - Double tilt heating holder (Gatan)
 - Double tilt cooling holder (Gatan)
- 7) Research Materials Application Test

· Superconductor, Neuron, CuAlO₂, Diatom, Hydroxides

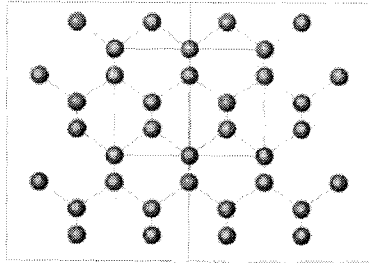
항목	결과	특사항
Si 3D Atomic Resolution	1. [110] 시편 및 고경사각 Tilting을 이용 2. [110], [111], [100] 방향의 Atomic Image	1. 고분해능 시편 제작법의 개발 2. 주변 환경 영향의 절대적 배제 3. 장비 사용 조건의 정립
Voltage and Current Stability	1. Objective Lens Current Stability Spec. Out 2. 본원 설치 시 Spec. In 확보 (장비 개선)	1. 렌즈 히스테리시스 (8 μ m) 2. LaB ₆ 수명 200h 3. Focusing 작업에 숙련 요
EELS Resolution	1. S Zero Loss Peak의 FWHM (1.2eV)	
Specimen Drifting and Beam Damage	1. 초기 약 10분간 시편 Drifting 극심 (일반적) 2. 빔 손상에 의한 Carbon막 Tearing (Holey일 경우 비교적 안정) 3. 장시간의 Focusing 작업: 시편의 빔 손상 → 비정질화 4. Beam Damage 및 Drifting 문제가 컸던 시료 : Diatom 초전도체(상온), Hydroxides	1. Minimum Dose Tech. 필수 2. Drifting 영향 최소화 방안 강구 : 시료 문제 / Goniometer 안정성 : Camera Acquisition 기법 (시편 유동 보상을 위한 Quick Freezing)
GIF and FasTEM Performance	1. Energy Filtering (Zero loss, Plasmon) 2. MSC Size: 1024x1024 3. 원격 제어 모드: 전송 속도 10MP 이상 반영 Microscope Parameter Monitoring 불가 (본원 설치 시 가능) Trackball Stage Control 도입 (추후) 원격 후 질량 필터 Monitoring (본원 설치 시 CCD-IR Camera 장착) 4. Focusing 작업 시 GIF의 Live FFT Fluctuation : Objective Lens Current 불안정성과 연관되는 것으로 시료	1. 676 Intensified TV Scintillator 손상 2. MSC Scintillator Fixel Defect 2곳 : 장비 본원 설치 시 교체 예정 3. Microscope Parameter : 16진수 → 10진수 Display
Goniometer and Hblder Compatibility	1. JEOL Hblder Tilting 작업 용이 (Tilting Range 1~15도 কে 세분화) 2. Gatan Hblder의 Hblder Tilting Control 초기 응답성 지연(정밀성 감소) 3. 각 Hblder별 Goniometer Parameter 상이 (초기 Setting 시 조정) : 원격 제어 시 선택 불가 (본원 설치 시 까다로한 원료) 4. Natural Water Dropping 방식 → ~15cc/min 5. Cooling Hblder LN ₂ 온도 유지 시간: 최소 2시간 30분 이상	1. Heating 및 Cooling Hblder Cabling : 접지 연결 필수 2. Goniometer Isolation 보강 방안 강구 3. Natural Water Dropping 방식 개선책 모색 4. Cooling Hblder의 LN ₂ 공급 Tool 제작

(3) Si 3D 원자 분해능 Test (Principal Test Item)

Si 110 방향의 Dumbbell 구조(원자간 거리 1.36 Å)에 관한 원자 분해능 획득과 함께 동일 시편에 대해 고경사각 Tilting 기법을 적용하여 Si 시편의 <100>, <111> 방향의 원자 분해능 이미지도 아울러 획득함. Si의 <110> 원자 분해능과 아울러 고경사각 Tilting에 의한 <100> 및 <111>에 대한 원자 분해능 이미징은 세계적으로 유례가 없으며 장비의 주요한 성능을 평가하는데 적절한 항목임.

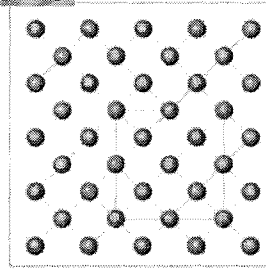
JEOL Double Tilting Holder 이용

- Si [110] 시편
 - $\Theta = 5.6^\circ$
 - $\Phi = -2.51^\circ$

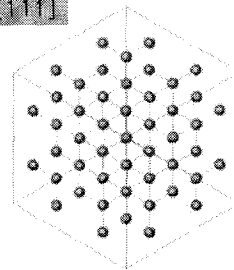


- $\Theta = -30.56^\circ$
- $\Phi = 21.27^\circ$

Si [100]



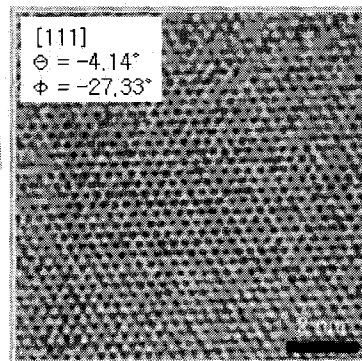
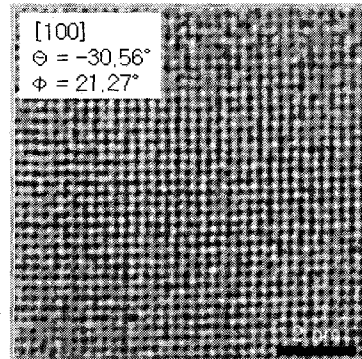
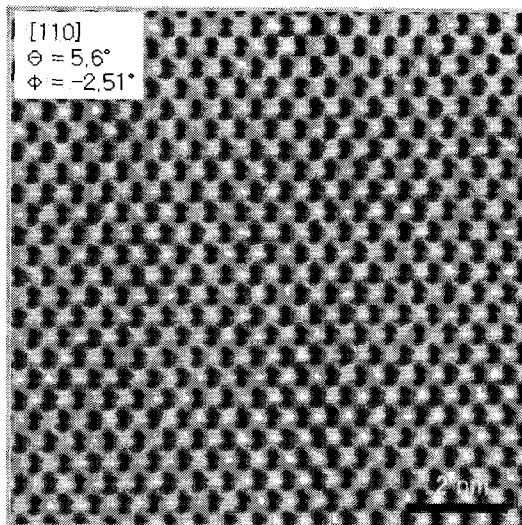
Si [111]



- $\Theta = -4.14^\circ$
- $\Phi = -27.33^\circ$

< Si 110 시편의 원자 모델링 >

JEOL Double Tilting Holder 이용



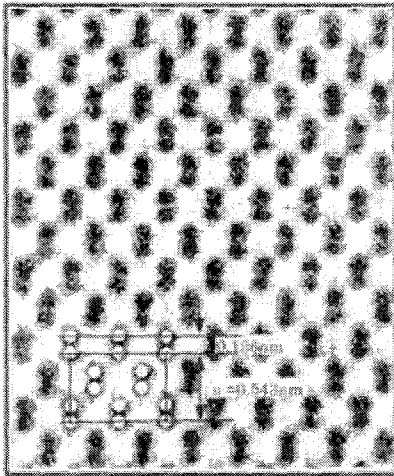
< Si 110 시편의 고정사각 Tilting을 이용한 3 Principal Orientation의 원자분해능 이미지 >

1) Si 110 시편을 이용한 3D Atomic Resolution Test 결과

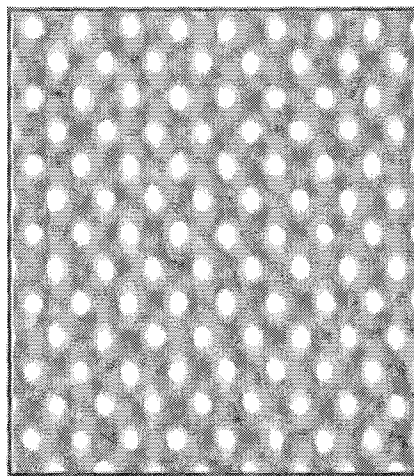
본 장비의 분해능 사양은 1.2\AA 으로서 Si 110의 Dumbbell 구조의 원자간 거리 1.36\AA 을 분해 할 수 있음을 증명함.

2) Si 110 시편에 대한 Atomic Resolution Test 결과의 비교

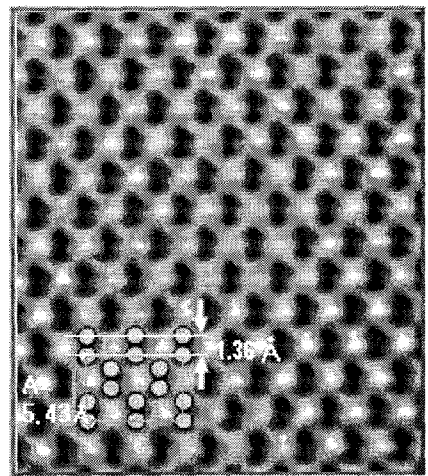
- 기록 조건 : 1250kV, Microscope Mag. 80,000X (Total Mag. 1,000,000X)
- MultiScan Camera Acquisition (GIF), Exposure Time 1 sec.
- Resolution Spec. : 1.2\AA
- Specimen : Si [110], Ion-Thinning



Hokkaido 대학
1998, 1250kV



요업기술원
2002, 400kV



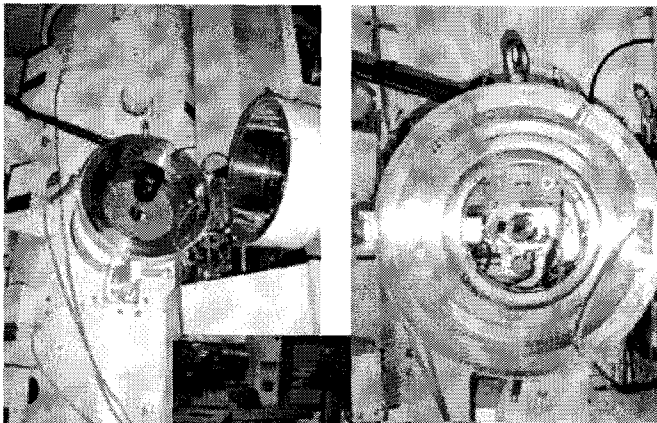
JEOL 공장 성능
2002, 1250kV

< Si [110]에 대한 원자 분해능 비교 >

3) 전자현미경 환경의 중요성

초고전압 전자 현미경의 원자 분해능을 구현하기 위해선 그 주변 환경에 대한 Isolation이 필수적으로 요구됨. 예정된 Test 일정보다 늦게 상기의 분해능 결과를 획득하였는데 이는 주변 환경으로부터 전달되는 저주파 진동의 영향(차량 통과, 바람 등)으로 원자분해능 작업에 큰 어려움이 있었고, 특히 Goniometer에 장입된 시료 홀더 로드와 맞닿아 있었던 Inner Cover로 인해 작업자로부터 유발되는 미세한 저주파 진동(음성, 보행, 기류 등)이 원자구조를 Focusing 하는데 심각한 장애 요인으로 밝혀졌음. 추후 내부 Cover의 Hole크기를 넓혀서 장착할 것이며 Goniometer쪽에 대한 Protection 보강 작업을 본원 설치 시 진행할 것임. 원자분해능 작업은 원격운용이 가장 바람직하며 향후 가용한 자원과 노력을 투입하여 최적의 성능 구현에 필요한 환경 형성과 보강에 만전을 기하여야 할 것으로 사료됨.

Unfitted Inner Cover – Vibration Media



Incorrect Ground



Environmental Obstacles to the Atomic resolution

- Human Effect : Voice, Walking,...
- Car Driving
- Light, Electric Tools
- Lens Current Instability
- Goniometer Protection

Absolute Need for the Isolation against Circumstance Influence

Environmental Challenges

- Electromagnetic Fields < 0.1 mG r.m.s.
- Temperature Changes < 0.1°C/h
- Airflow across the Column < 9.144 m/min
- Air Pressure Changes < a few pa/min

JEM 50[3], 219 – 226 (2001)

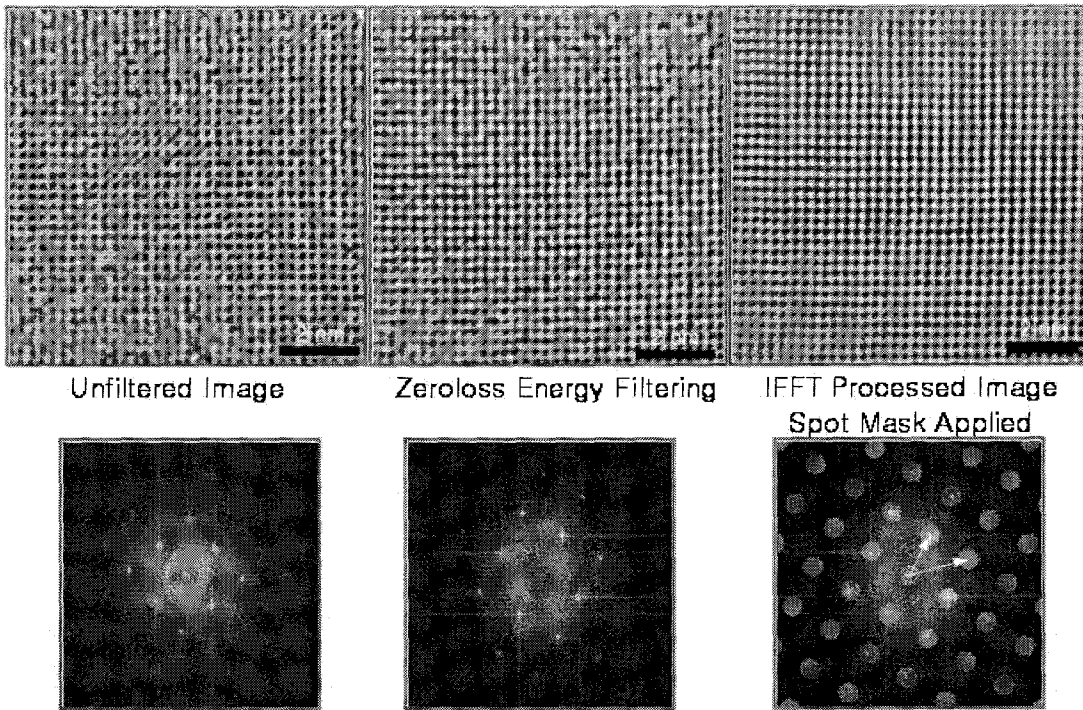
< 원자분해능 작업에 장애 요소로 작용했던 환경적 요인의 예 >

(4) Contrast Enhancement Technique

본원에 설치될 초고전압 전자 현미경은 여타의 초고전압 전자 현미경과는 달리 GIF시스템을 장착하여 원자분해능 작업 시 Energy Filtering 기능을 이용한 고대비 이미징 구현이 가능함. 이는 구성 원소들의 Contrast 차이를 구현함으로써 원자들의 위치를 정량적으로 결정할 수 있다는 가능성을 열어주는 것으로 본원 전자 현미경만의 탁월한 기능으로 사료됨.

1) Zeroloss 에너지 여과 이미지의 구현

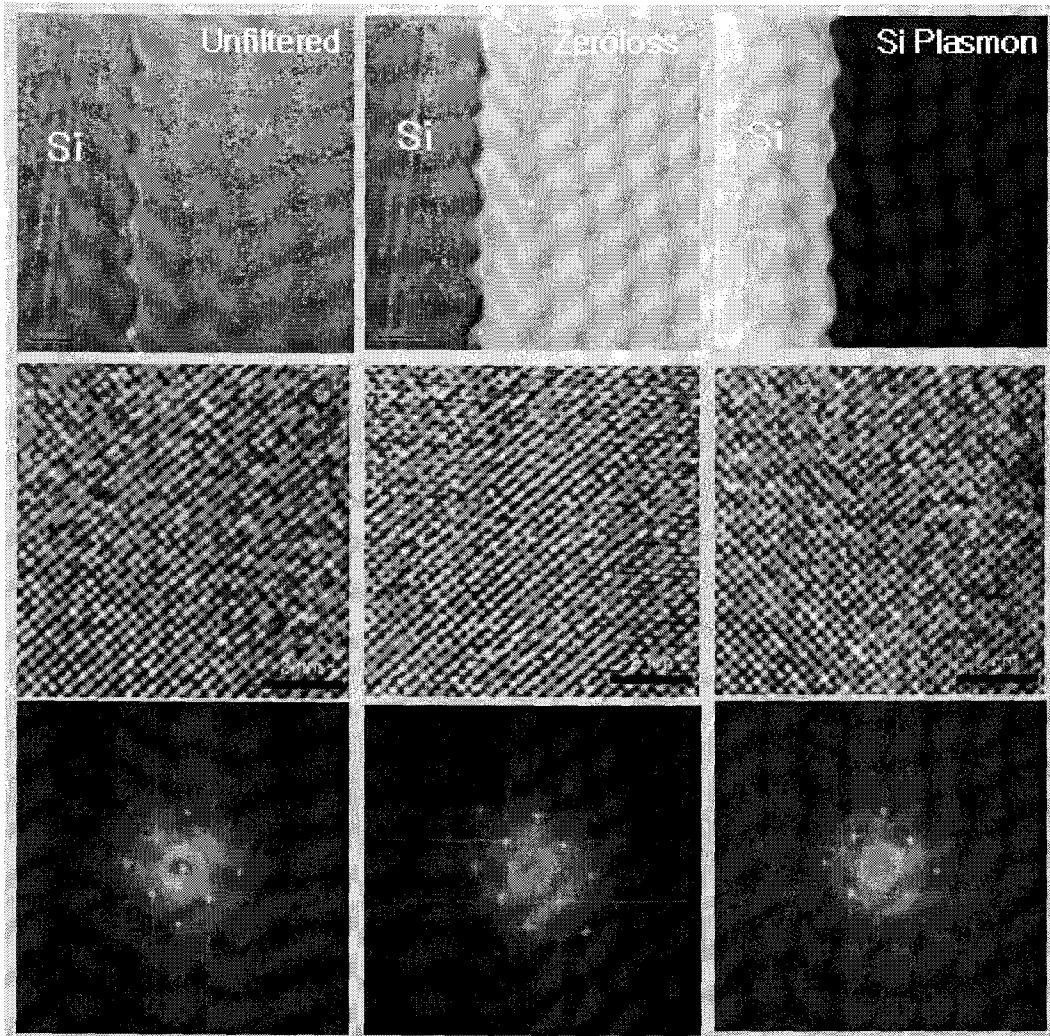
GIF의 투과빔 Energy Filtering을 적용하여 획득한 Si [100]의 원자 분해능 이미지와 Image Processing을 적용한 예



< Zeroloss 에너지 여과를 이용한 Si [100]의 고대비 원자분해능 구현 >

2) Plasmon 에너지 여과 이미지의 구현

GIF의 에너지 슬릿 위치 변화로부터 Si [100] 시편에 대한 Plasmon 에너지 여과 이미지를 구현함. Plasmon Energy는 각각의 원소마다 그 Peak 위치나 모양이 다른데 이를 선택적으로 여과하고 원자 분해능을 구현함으로써 원자 배열에서 각각의 원소에 대해 서로 다른 Contrast를 구현하여 원자의 위치를 정량적으로 결정할 수 있는 가능성을 보여줌.

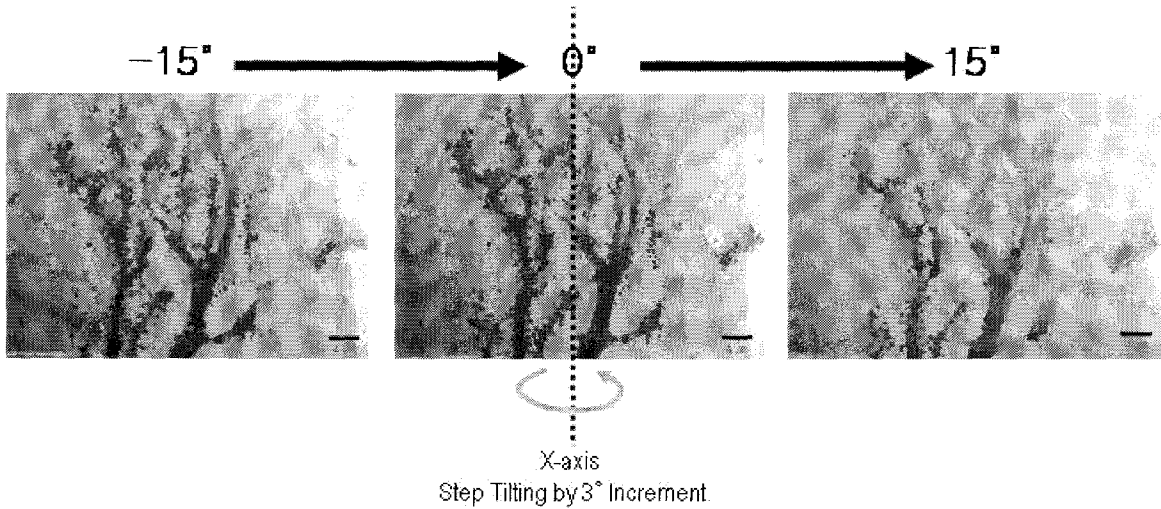


< Si [100]의 에너지 여과 기능을 이용한 고대비 이미징 구현의 예. 특히, Plasmon 에너지 여과 시 Si 원소의 고대비 구현이 탁월함.>

(5) Biomaterials를 위한 저배율 / 고투과력 이미징

고려대학교 의과대학으로부터 의뢰 받은 조롱박쥐의 뇌신경 거대세포의 삼차원 이미징을 위한 저배율 / Tilting 기법을 이용한 관찰 시도

- 적용 조건 : 1250kV, Microscope Magnification 2000X, Tilting $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$
(Step Tilting by 3° Increment)



< 조롱박쥐의 뇌신경 거대 세포에 대한 삼차원 이미징의 예 >

(6) 시료 유동 및 빔 손상 점검

고가속전압에 의한 고투과력 및 고분해능의 장점과 함께 필연적으로 수반되는 시료의 유동과 빔에 의한 시료 손상 정도를 검토하고자 다양한 연구시료들을 적용 검토하였음.

1) 적용 검토 시료

- Diatom, Hydroxides, Superconductor, CuAlO_2 , 뇌신경시료

2) 시료 유동 및 빔 손상의 관찰

- 시료 유동의 안정화에 최소 10 분 이상 소요
- 시료 유동 간 Stigmatism Correction 곤란 / 안정화 후 고분해능 작업
- 시료 유동 및 빔 손상이 심한 시료 → Diatom, Hydroxides과 같이 Hydroxyl Ion을 포함하는 시료
- 금속, 비금속, 산화물 및 뇌신경 거대 세포 등은 초기 빔 손상 정도가 크지 않으며 체계화 된 장비 운용 단계를 확립하면 시료 유동과 손상에 대한 영향을 배제할 수 있을 것으로 사료.
- 고가속전압을 이용한 Beam Irradiation Effect도 하나의 연구 응용 분야로

적용될 수 있음.

3) 개선 방안 모색

- CCD Acquisition Size 및 Speed의 기능강화 → 2K X 2K로 향후 업그레이드
- Goniometer 안정성 및 Isolation 확보
- 미접지 연결에 의한 White Noise와 구분 요
- 접지 및 Cabling 시 세심한 주의 요
- 변온 순간을 제외하고 변온조절기를 OFF
- 변온실험의 경우 시편유동과 빔 손상이 증가
- 시료에 따른 MDS(Minimum-beam Dose System) 적용, Beam Blanking
- 시료 유동을 줄일 수 있는 시료제작법 개선 강구

IV. 성능시험결과 요약

1. 장비의 가장 핵심적인 기능 (3-D 원자분해능 및 에너지여과기능)의 정상적 작동 확인

2. 최고 성능의 안정적인 유지를 위해 장비 현지설치 시 추가적 노력 필수:

(1) 장비개선 필요

- Goniometer Isolation 보강 (Drifting 의 최소화 긴급)
- 각종 Lens Stability 추가 향상 (특히 Objective Lens)
- Remote Control System 보강 (특히 DP Monitoring System 개발)
- LaB6 Gun의 Lifetime 증가방안 강구

(2) 최선의 설치환경 강구

- 추가적인 방음, 방진 필요; 공조, 전기 시설 등의 상세 점검
- 출입자 통제, 안전장치 보강

(3) 효율적인 장비 운용기술 확립

(첨부 4)

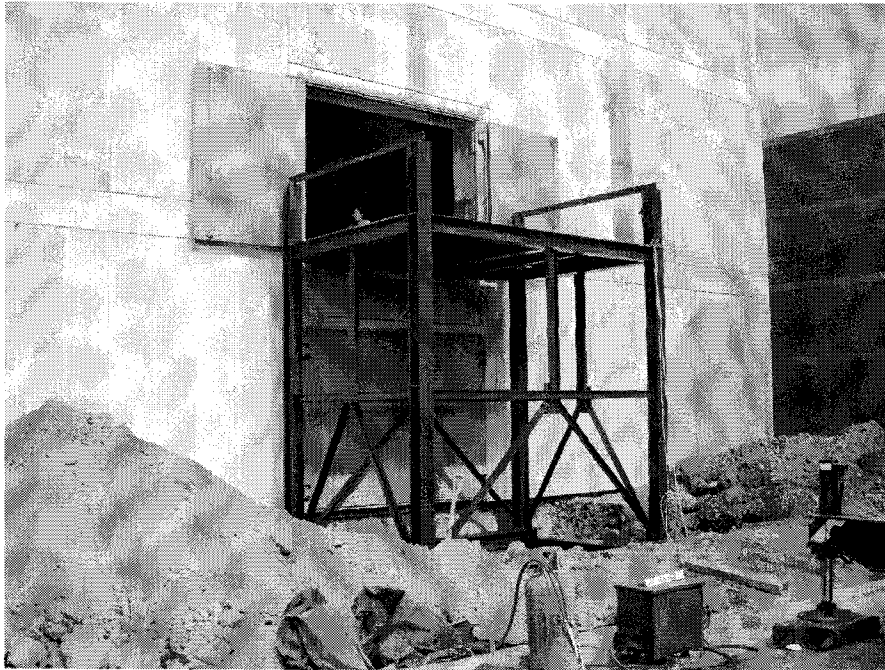
장비 현지 조립·설치 및
성능시험 자료

■ 장비 현지 조립·설치 및 성능시험 추진경과 요약 (2003. 2 ~ 2003. 8)

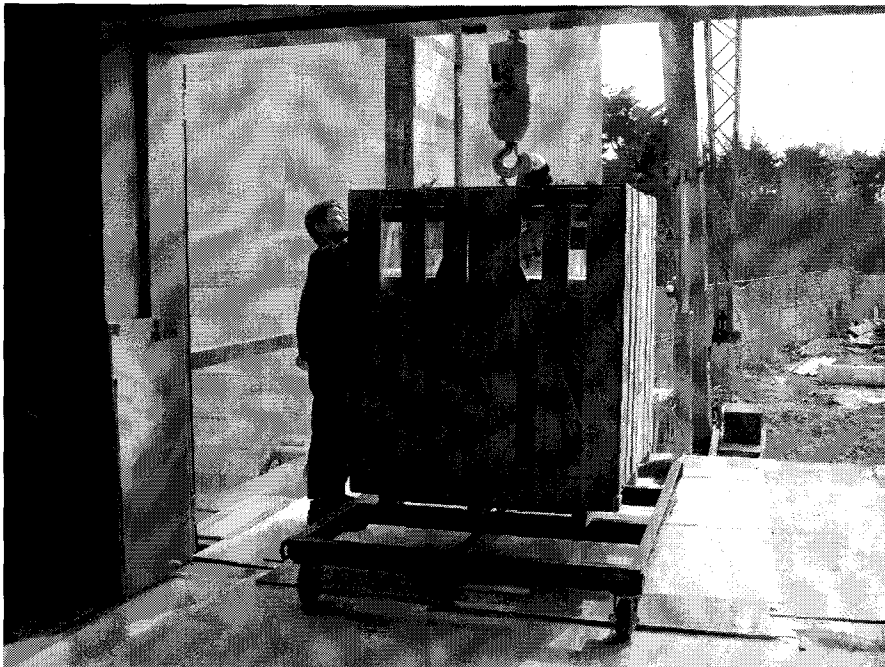
2002년 11월말까지 일본 Akishima에 위치한 JEOL 공장에서 조립·설치 및 성능시험이 완료된 장비는 2002년 12월 ~ 2003년 1월 동안에 분해되고 포장되어 2003년 1월 말에 선박 편으로 부산항에 운송되었다. 통관 절차를 거친 후 2003년 2월 17일부터 약 2주 동안에 걸쳐 Container Box 총 12개, 무게 약 70 ton의 분량이 부산항으로부터 한국기초과학지원연구원 대덕본원까지 주요 Part 별로 분리되어 운송되었다. 장비의 설치를 위해 JEOL 본사로부터 6명의 Engineer가 파견되어 대전에 지속적으로 상주하면서 작업을 진행하였고 설치 분야에 따라 일련의 전문 인력들이 내한하여 수 일 ~ 수 주간 상주하면서 설치 작업을 수행하였다. 실제로 수행된 설치 및 성능 시험 일정은 아래와 같다. 이 중 설치 초기에 예기하지 못했던 자기장 차폐시설의 설치 관계로 2003. 7. 14 ~ 8. 15의 작업은 매우 제한적으로 수행하였다.

- 2003. 2. 17 ~ 2. 28: 장비도입 및 장비의 기본틀 설치
- 2003. 3. 3 ~ 4. 25: 본체조립 및 Baking Out
- 2003. 4. 27 ~ 5. 30: 가속전압 인가 (400 - 600 - 800 - 1000 - 1250kV)
- 2003. 6. 2 ~ 7. 16: 1300kV 인가 및 Stability Test를 포함한 각종 성능 Test
- 2003. 7. 17 ~ 7. 25: 에너지여과장치(HV-GIF) 설치
- 2003. 7. 26 ~ 8. 15: 각종 성능 Test 및 1차 분해능 Test
- 2003. 8. 18 ~ 8. 29: 원격제어장치(FasTEM) 설치
- 2003. 9. 1 ~ 9. 12: 각종 성능 Test 및 2차 분해능 Test
- 2003. 9. 15 ~ 10. 14: 최종 현지 성능시험 및 Operation Instruction

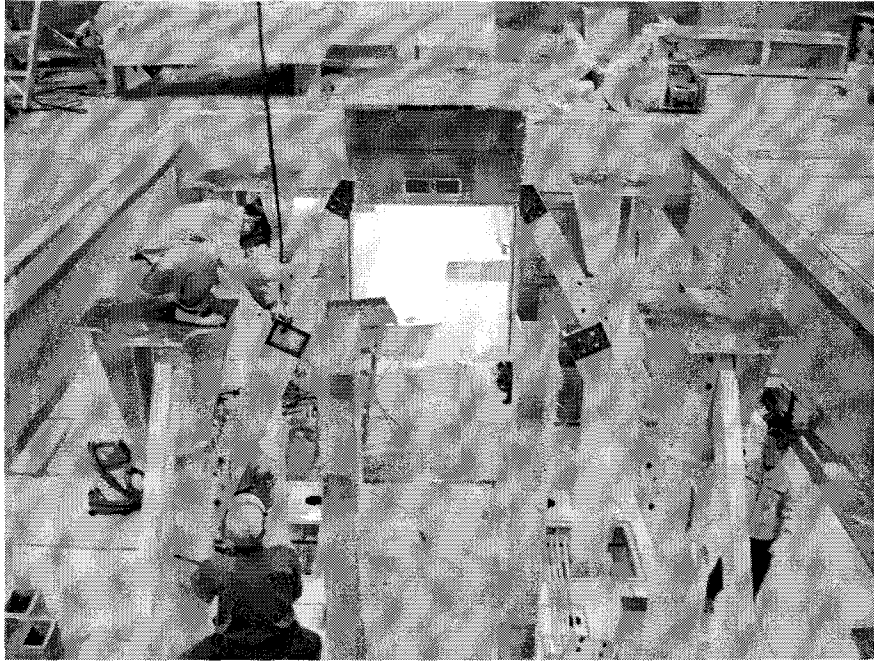
■ 장비 현지 조립·설치 자료



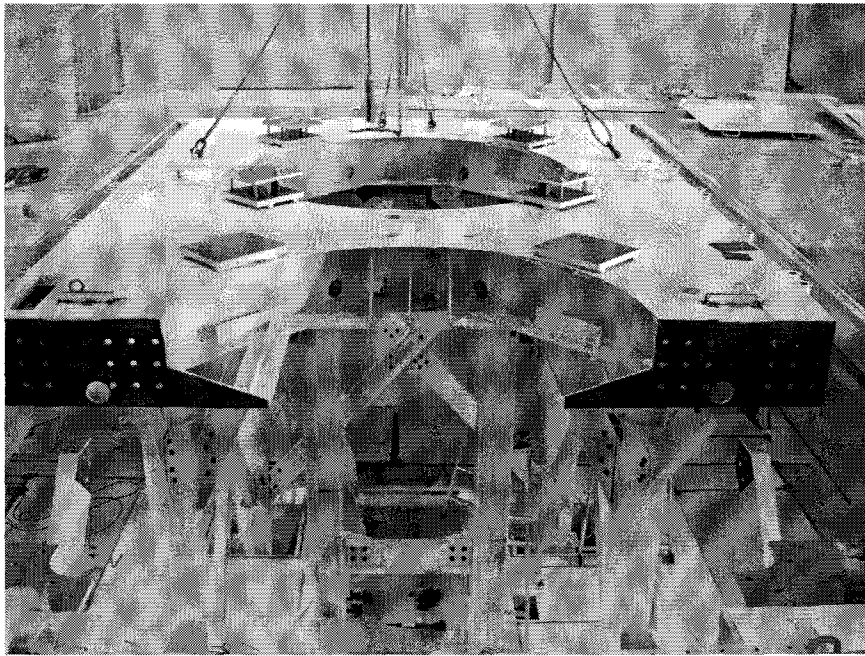
<장비의 EM실 반입을 위한 가설대 설치 (2003. 2. 17)>



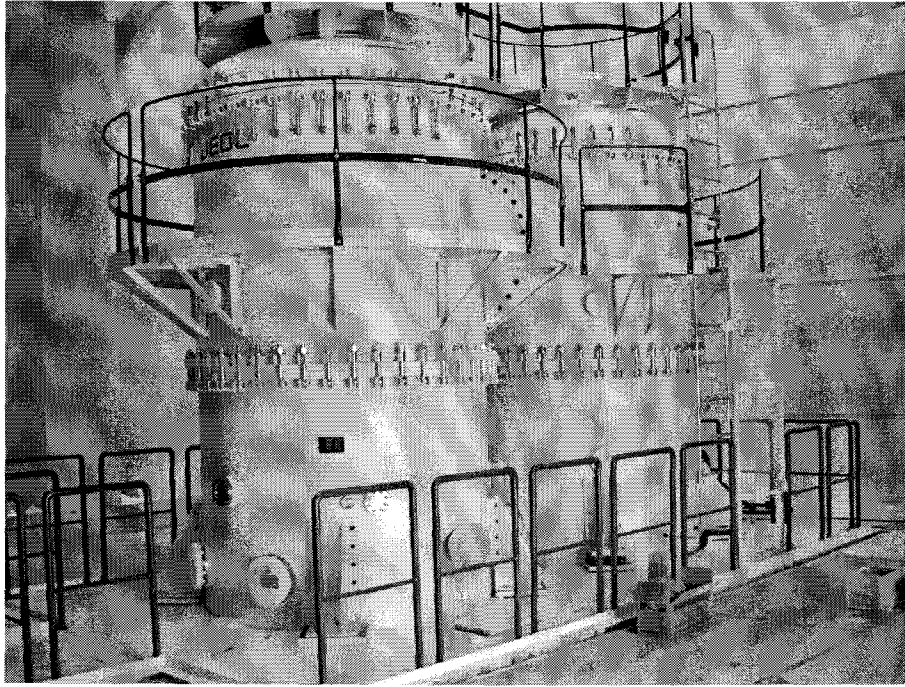
<외부 Crane을 이용한 부품 반입 작업 (2003. 2. 17)>



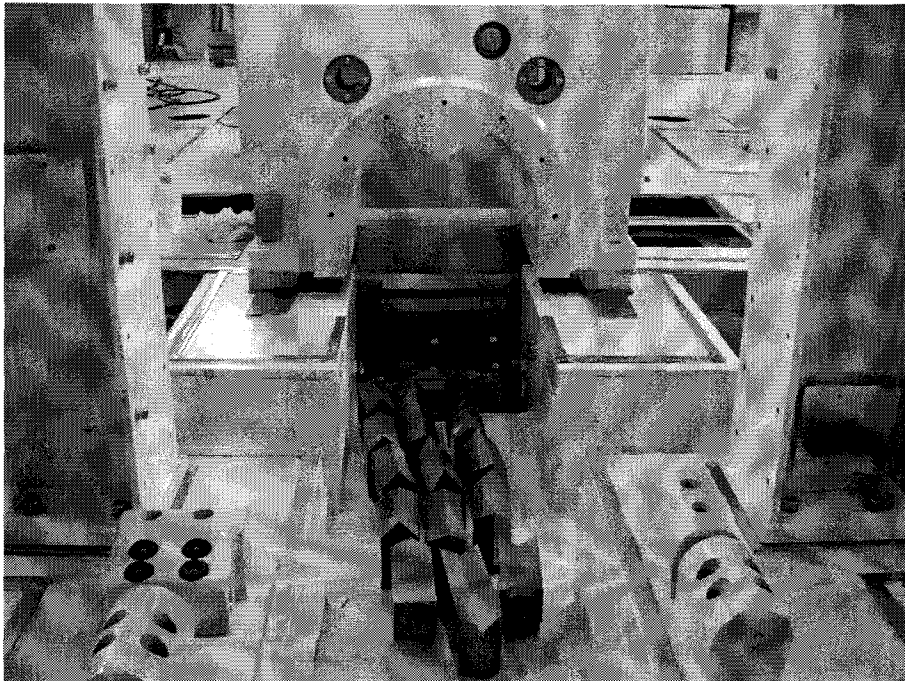
<장비의 기본틀 설치작업, 기둥 설치 (2003. 2. 18)>



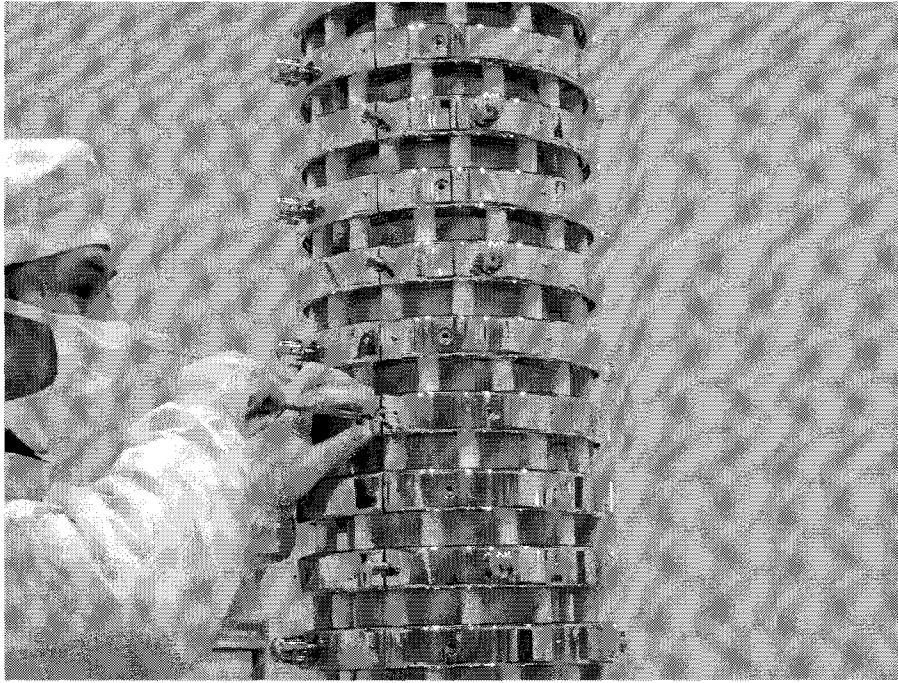
<장비의 기본틀 설치작업, 가속탱크 밀면 설치 (2003. 2. 19)>



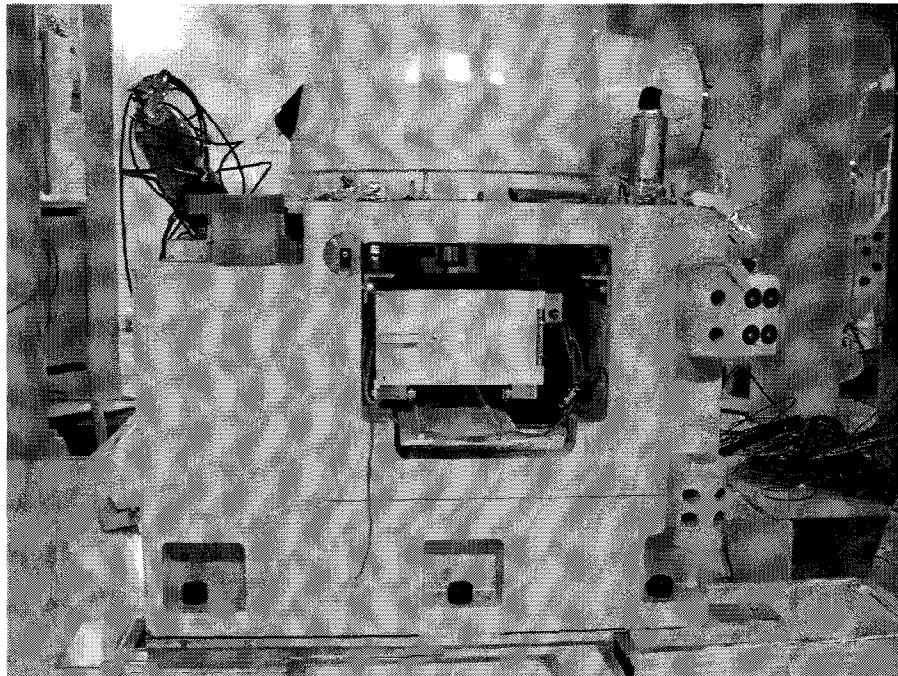
<장비의 기본틀 설치작업, 가속탱크 설치 (2003. 2. 21)>



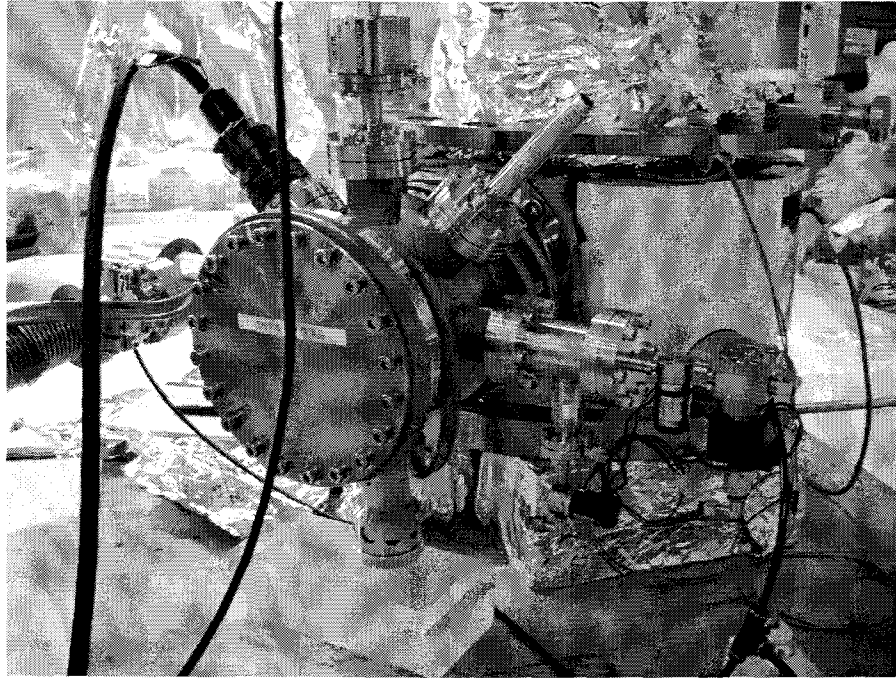
<장비의 기본틀 설치작업, Column 밑면 틀 설치 (2003. 2. 25)>



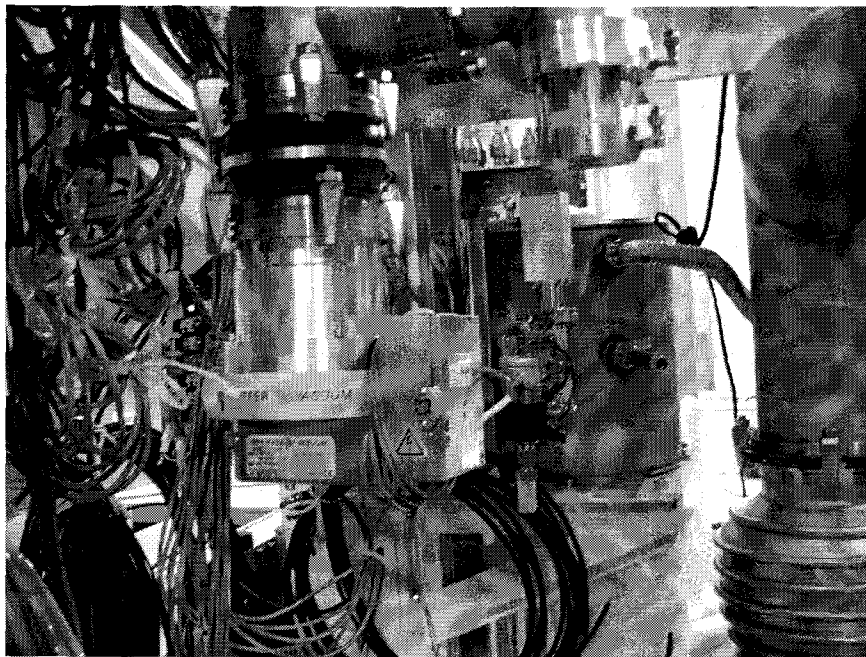
<가속관 조립작업 (2003. 3. 7)>>



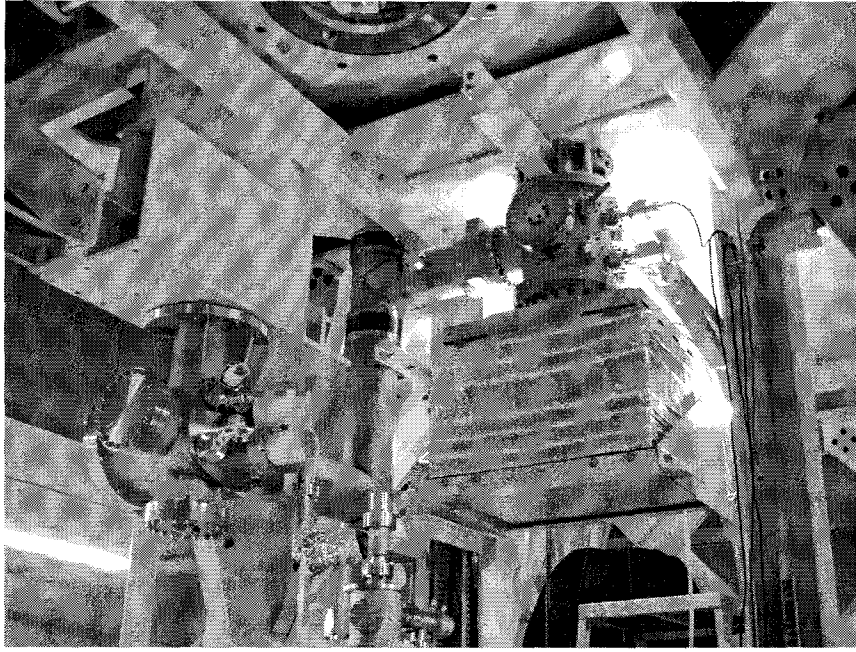
<Viewing Chamber 및 카메라 조립작업 (2003. 3. 10)>



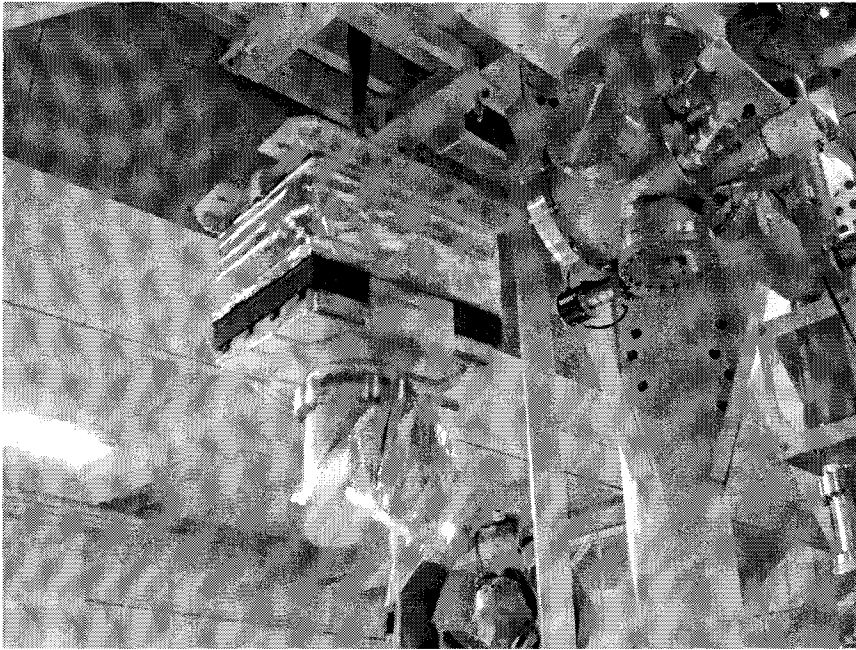
<진공장치 부착작업, Viewing Chamber에 부착(RP와 DP) (2003. 3. 12)>



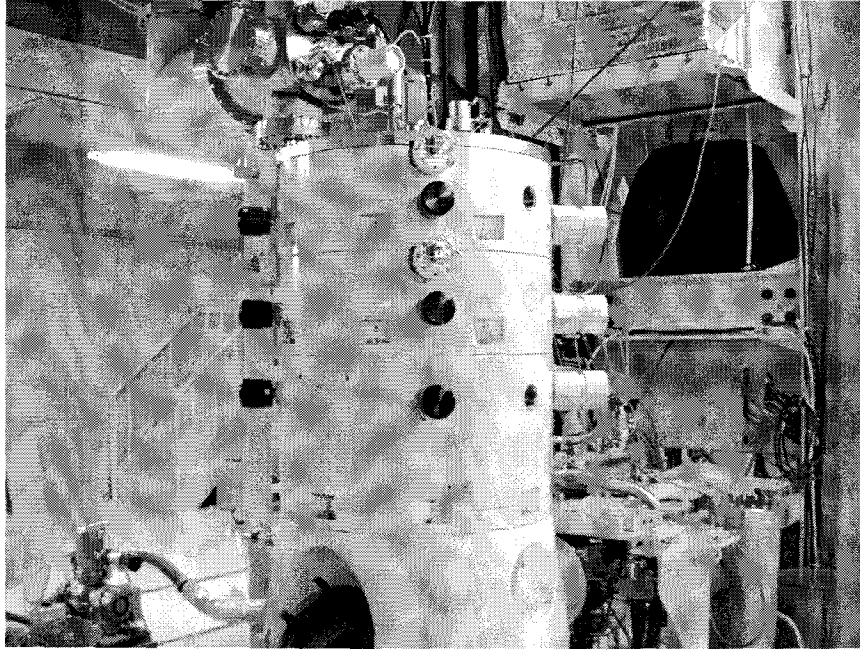
<진공장치 부착작업, Column에 부착(SIP 3) (2003. 3. 13)>



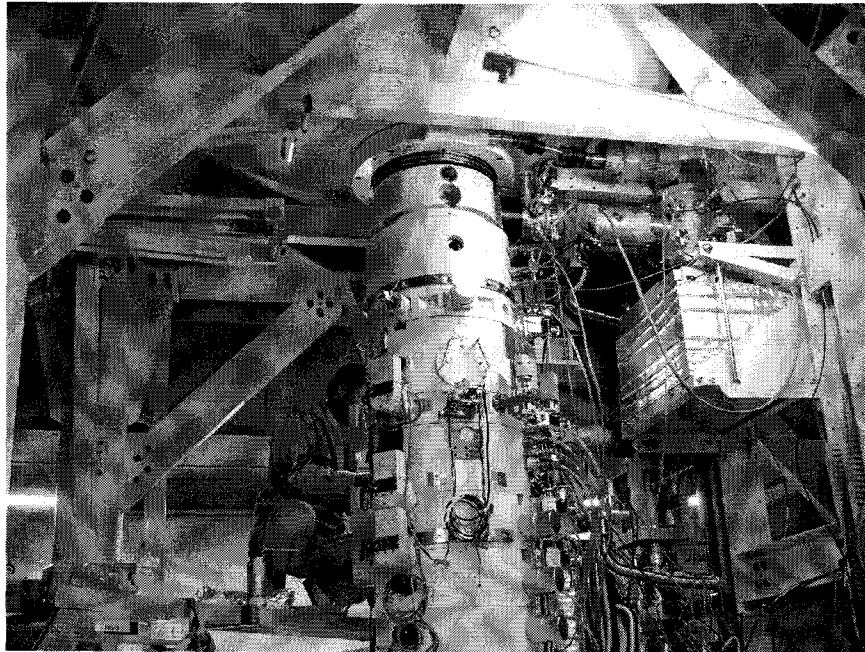
<진공장치 부착작업, 가속장치에 부착(SIP 2) (2003. 3. 18)>



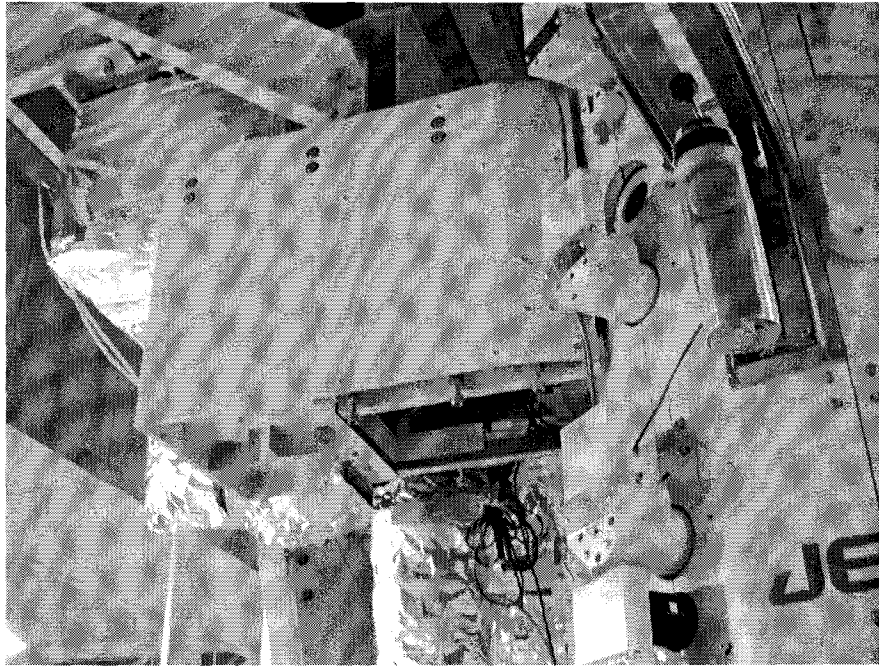
<진공장치 부착작업, Specimen Chamber에 부착(SIP 1) (2003. 3. 19)>



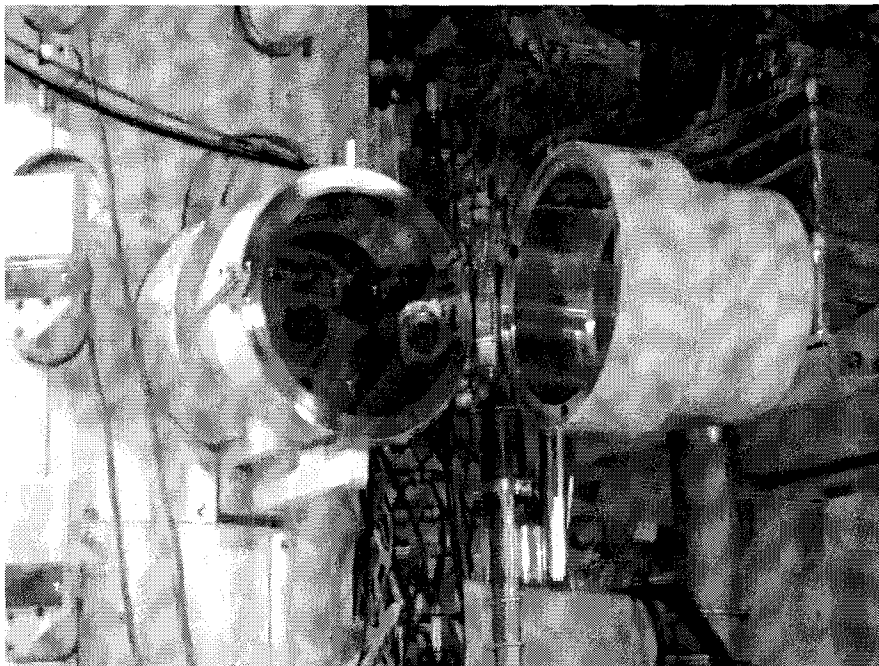
<Lens System 결합작업: Intermediate & Projection Lenses (2003. 3. 26)>



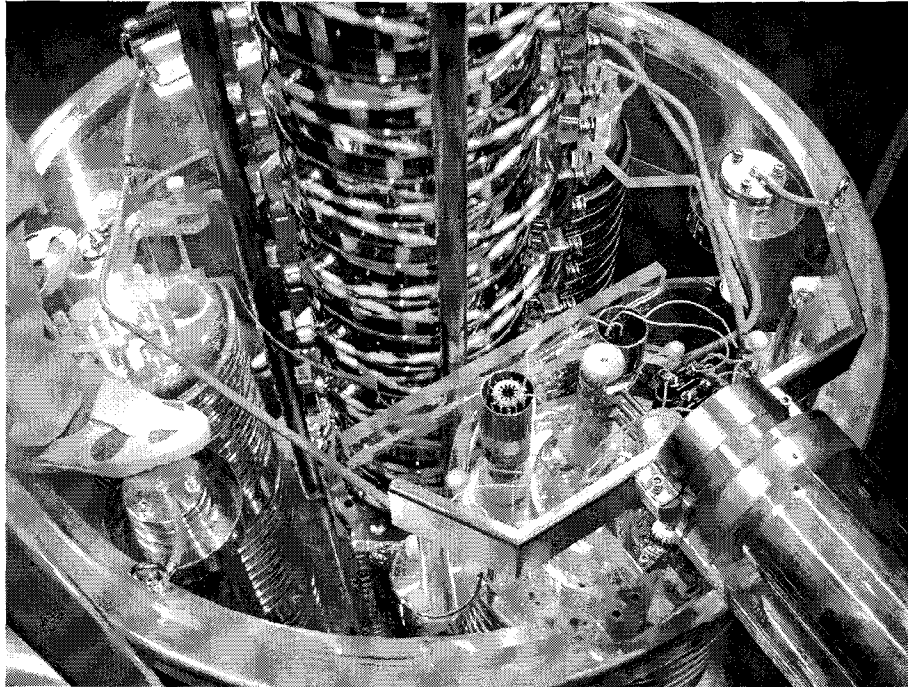
<Lens System 결합작업: Condensor & Objective Lenses (2003. 4. 3)>



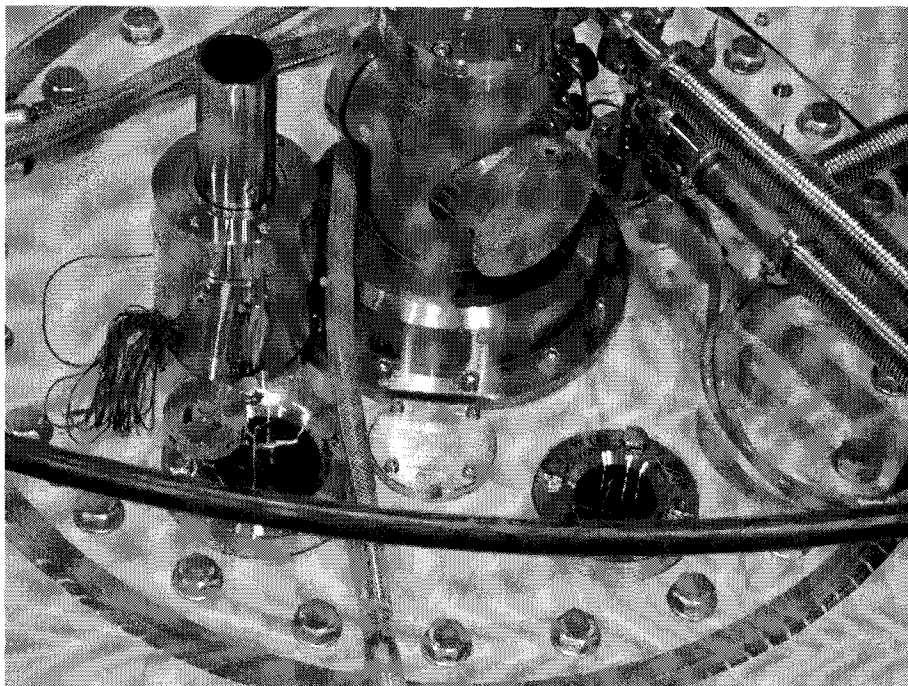
<Goniometer 및 Anticontaminator 부착 (2003. 4. 10)>



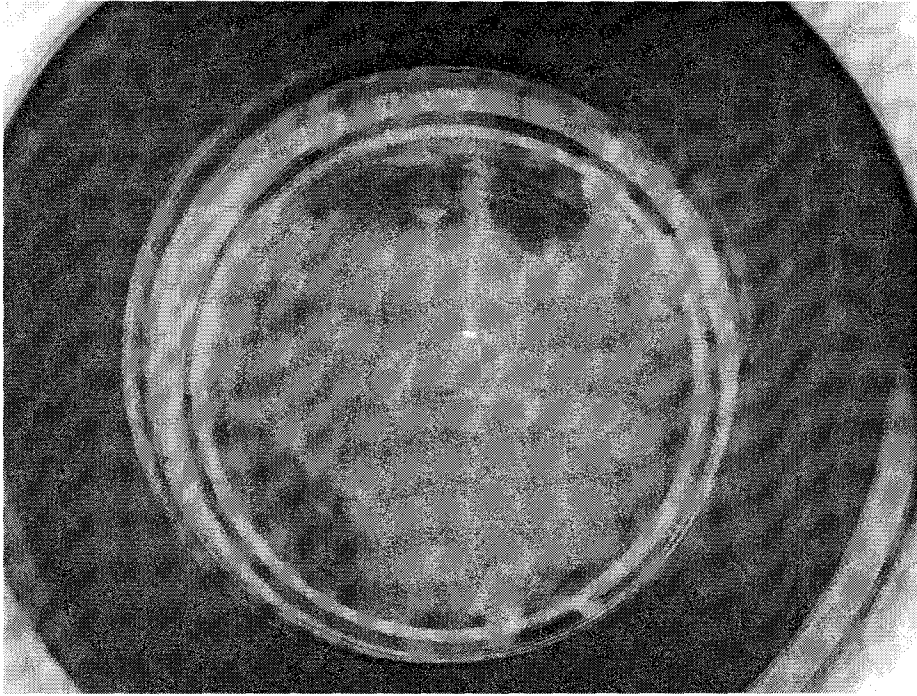
<Goniometer Cover 부착 (2003. 4. 17)>



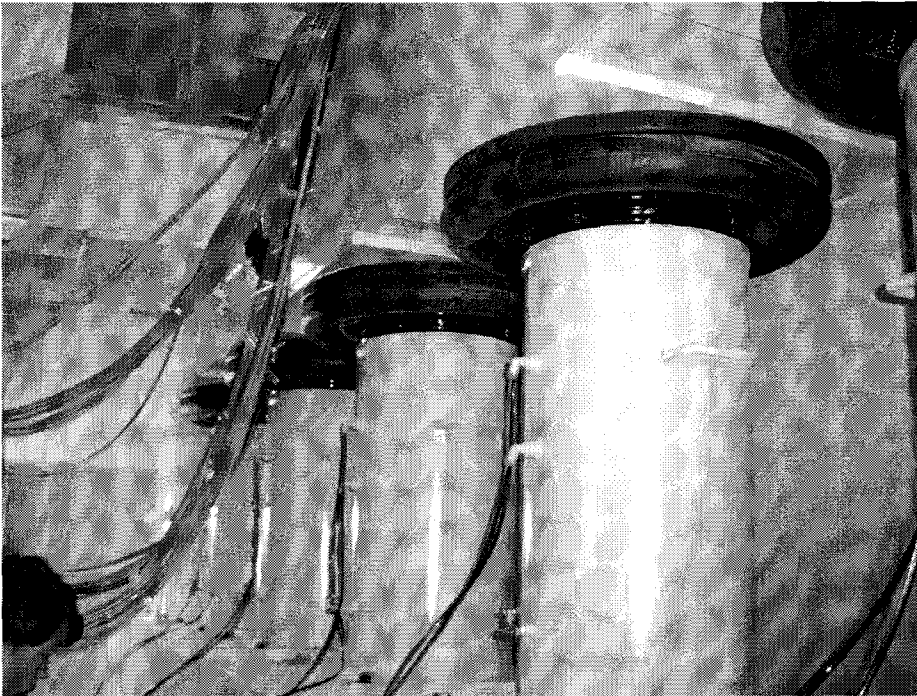
<가속탱크 안에 가속관 장착작업 (2003. 4. 18)>



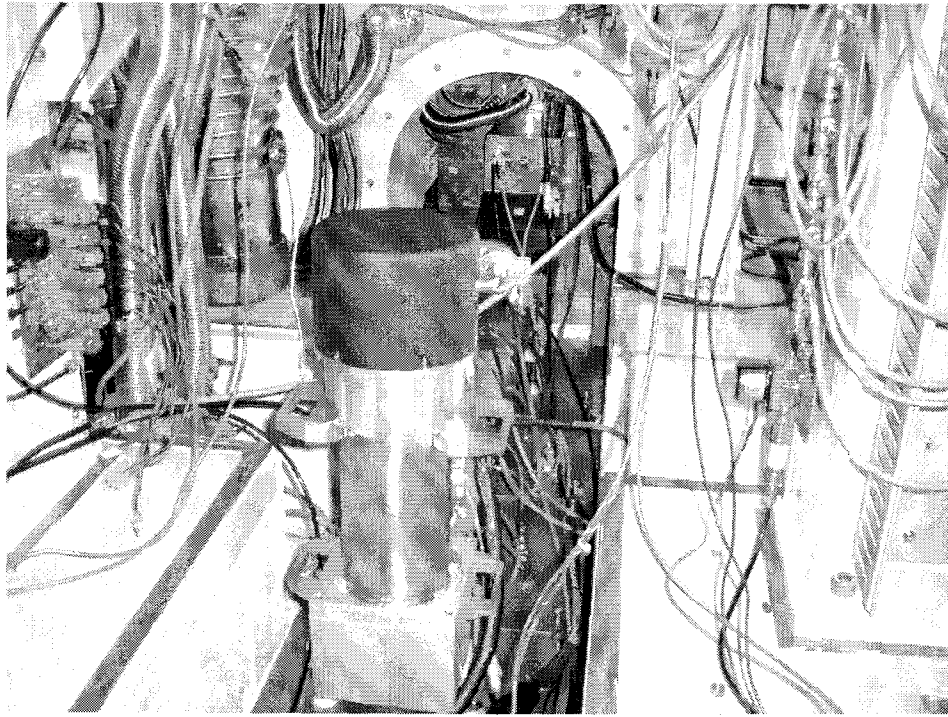
<가속관 장착 후 가속탱크 밀봉작업 (2003. 4. 22)>



<1,000kV에서 beam 상태 확인작업 (2003. 5. 1)>



<제진대의 Air Damper에 Air 주입 (2003. 5. 15)>

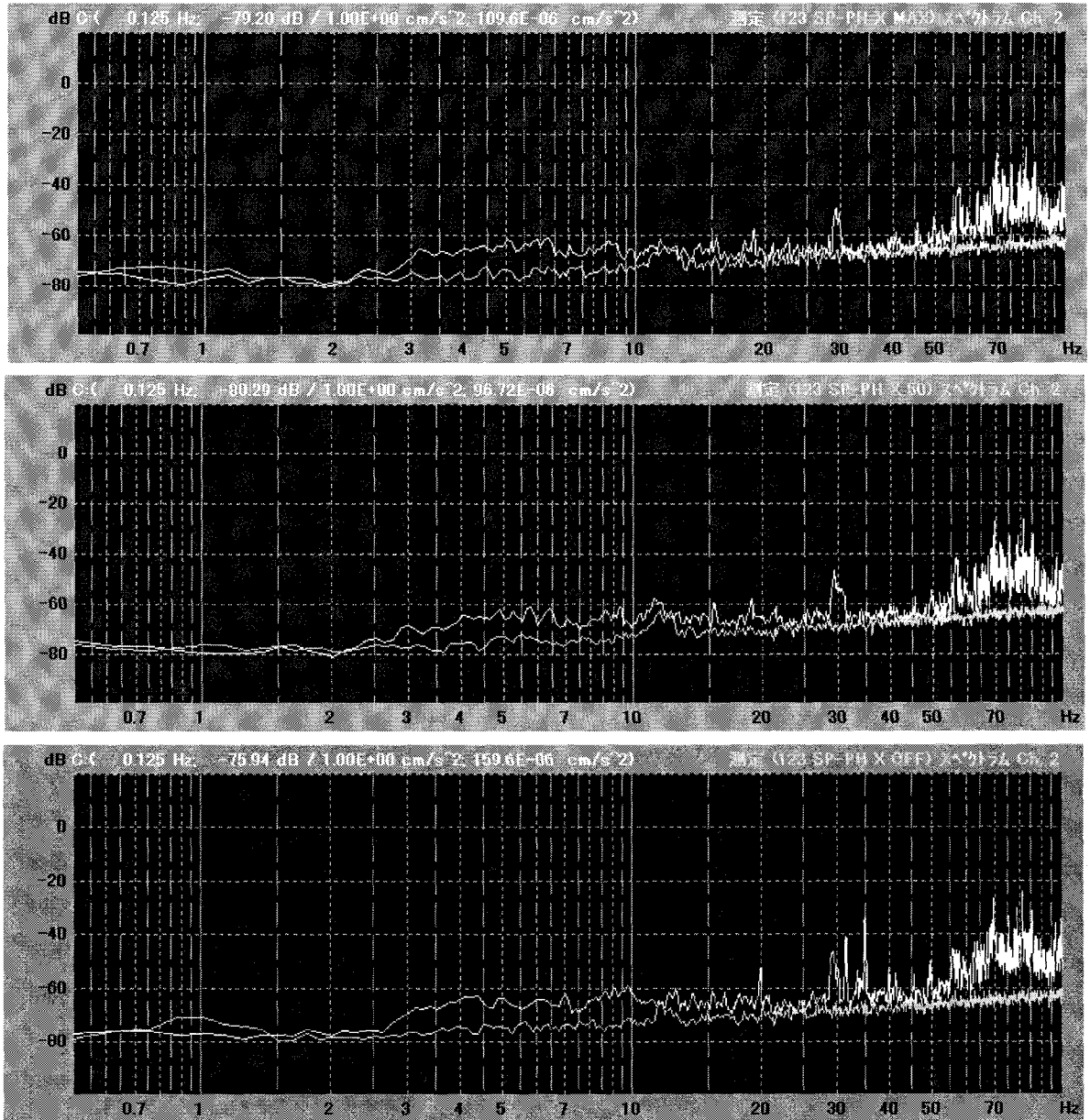


<에너지여과장치(HV-GIF) 설치작업 (2003. 7. 18)>

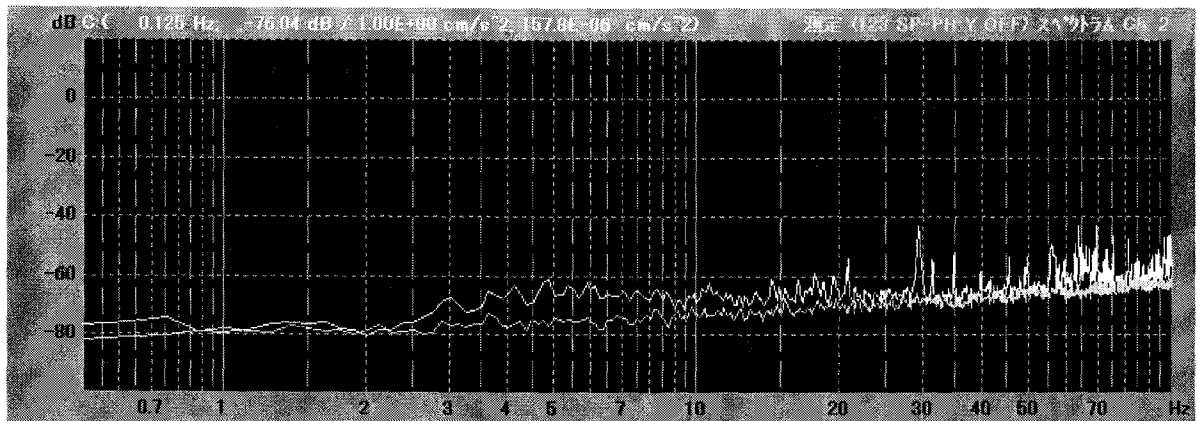
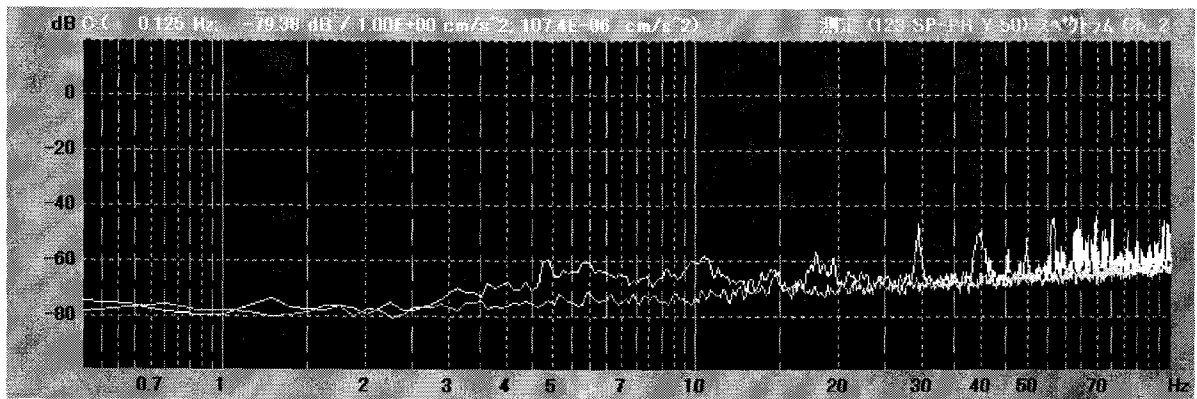
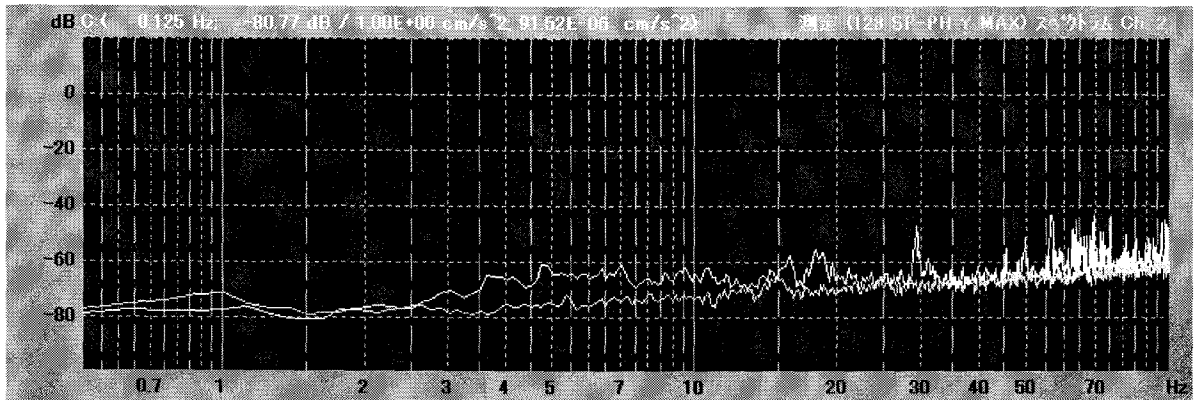


<에너지여과장치(HV-GIF) 조정작업 (2003. 7. 22)>

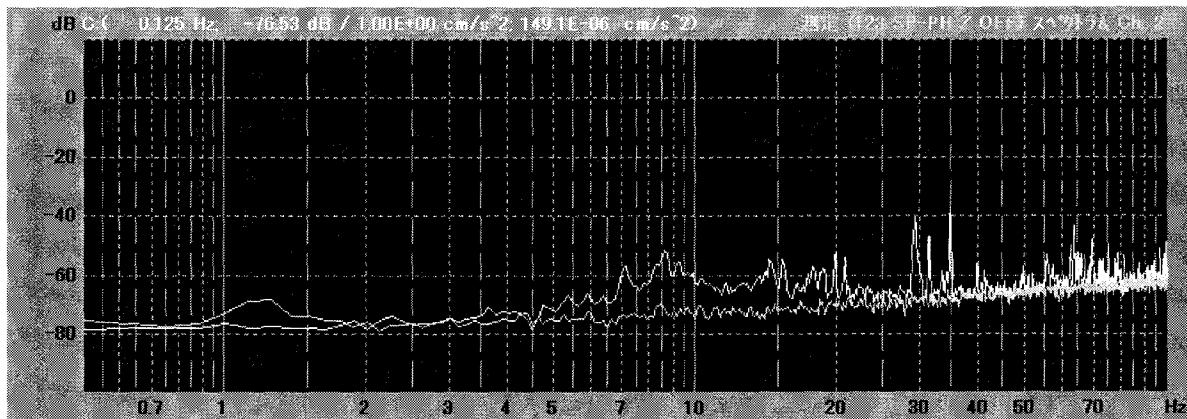
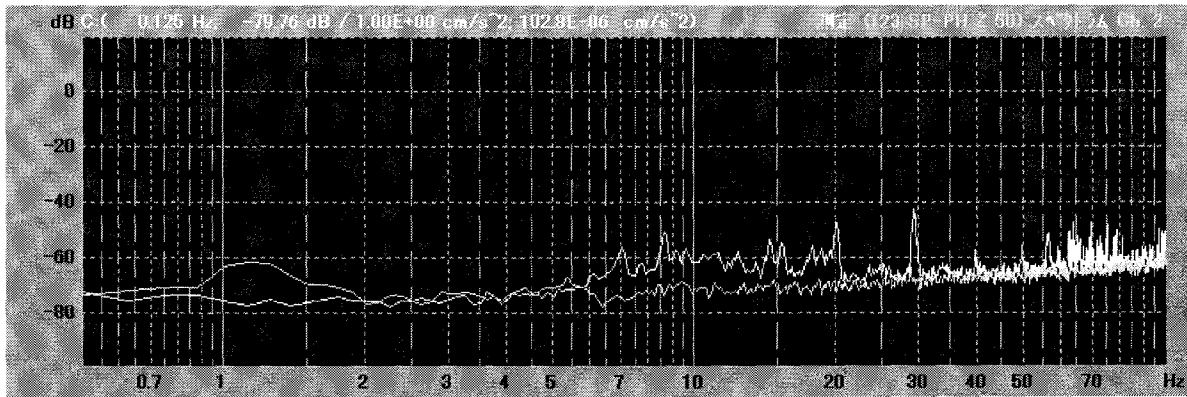
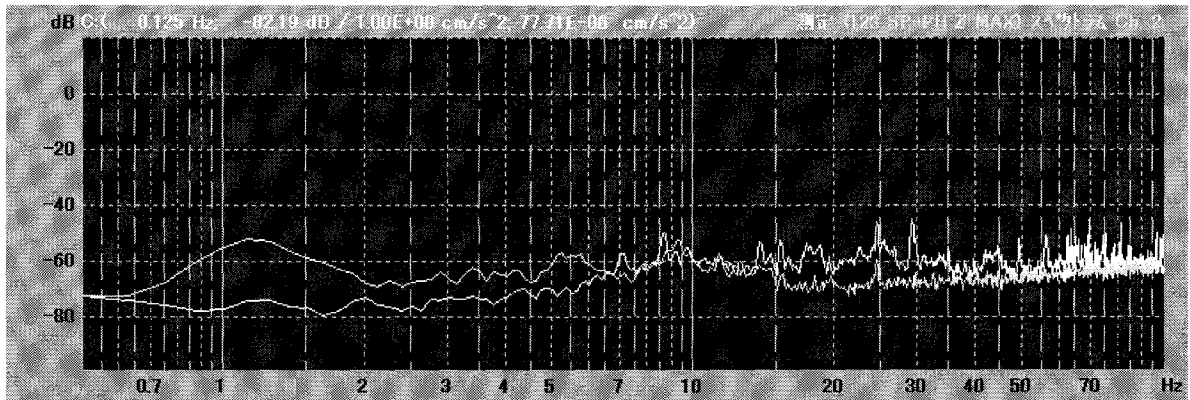
■ 장비 현지 성능시험 자료



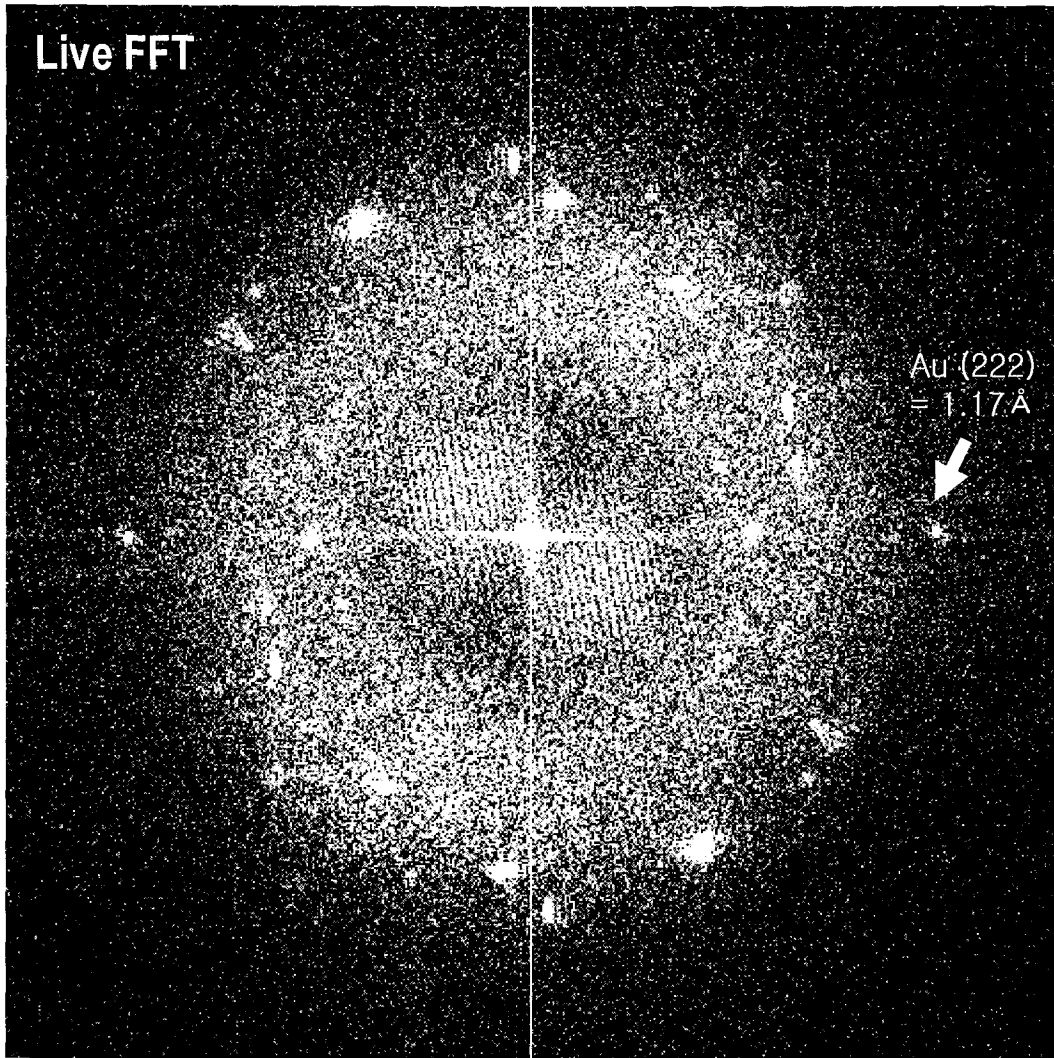
<제진대 성능측정 결과(X-axis): 공조기 100% 가동(위), 50% 가동(중간), Off(아래);
 윗선은 floor에서, 아랫선은 제진대 위에서 측정한 결과; 20dB ~ 0.1 μ m (2003. 6)>



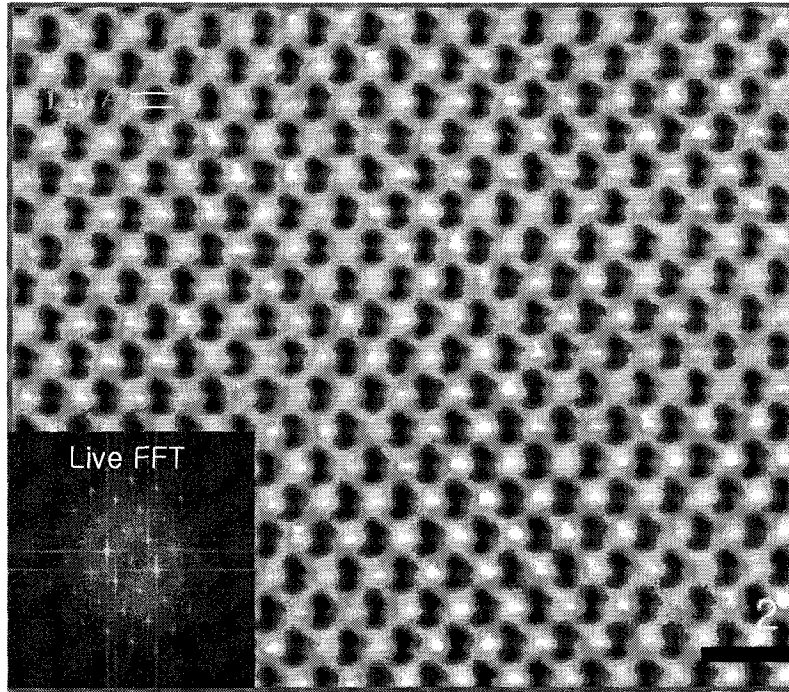
<제진대 성능측정 결과(Y-axis): 공조기 100% 가동(위), 50% 가동(중간), Off(아래);
 윗선은 floor에서, 아랫선은 제진대 위에서 측정한 결과; 20dB ~ 0.1 μ m (2003. 6)>



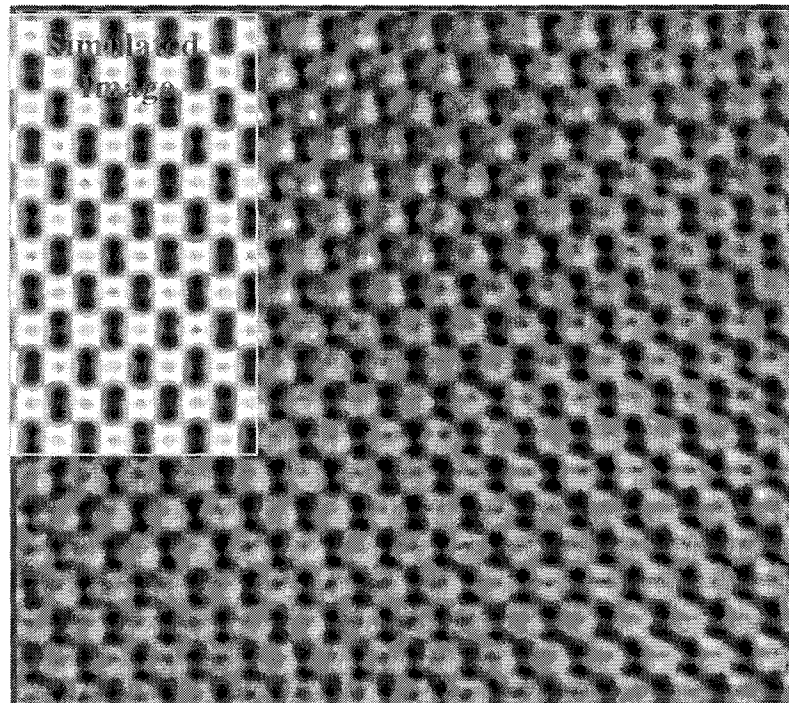
<제진대 성능측정 결과(Z-axis): 공조기 100% 가동(위), 50% 가동(중간), Off(아래);
 윗선은 floor에서, 아랫선은 제진대 위에서 측정한 결과; 20dB ~ 0.1 μ m (2003. 6)>



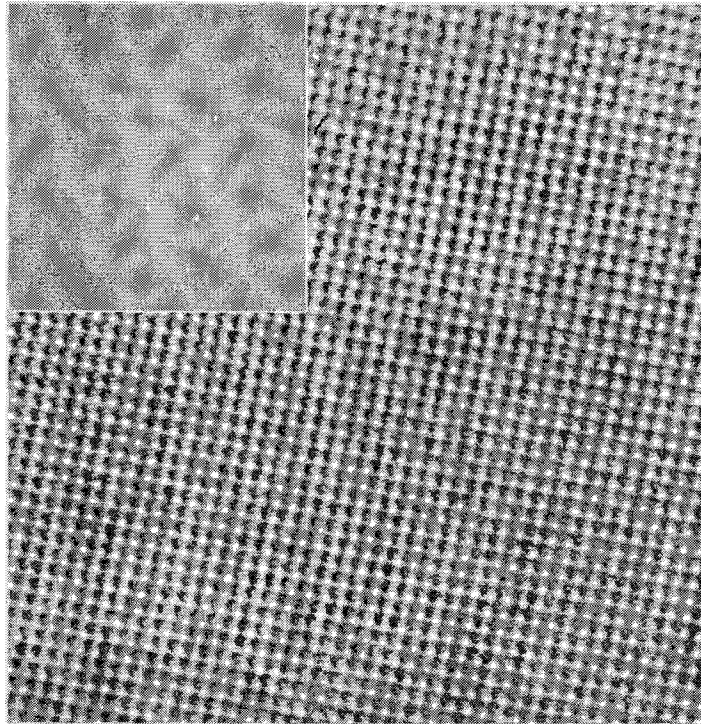
<Au Standard와 HV-GIF를 이용한 분해능 재점검 (2003. 7)>



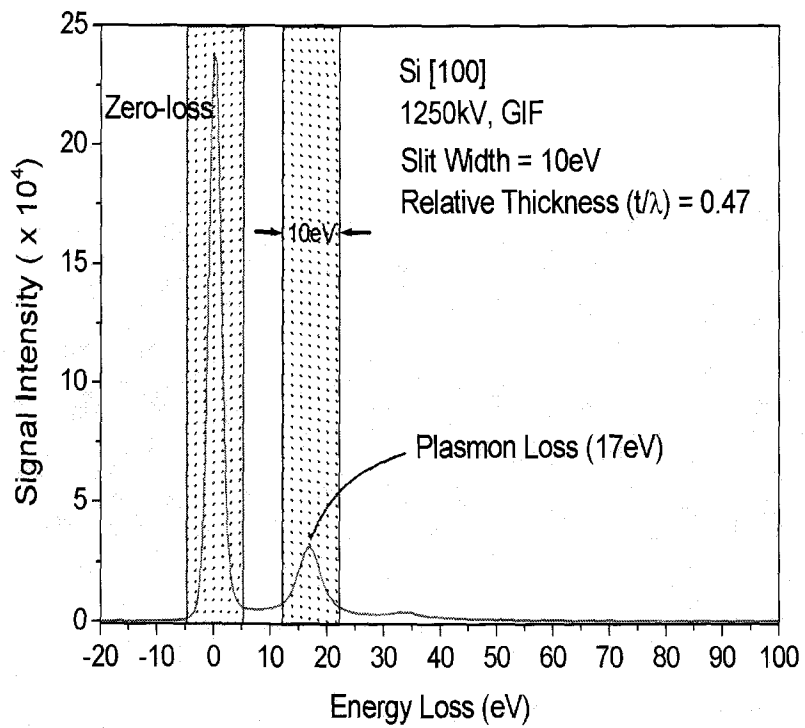
<Si Wafer를 이용한 원자분해능 점검: [110] 방향 (2002. 11; 일본 공장); 전압 및 전류의 안정도와 환경 요인 때문에 Si dumbbell(0.136nm)의 완전한 분리가 이루어지지 않음>



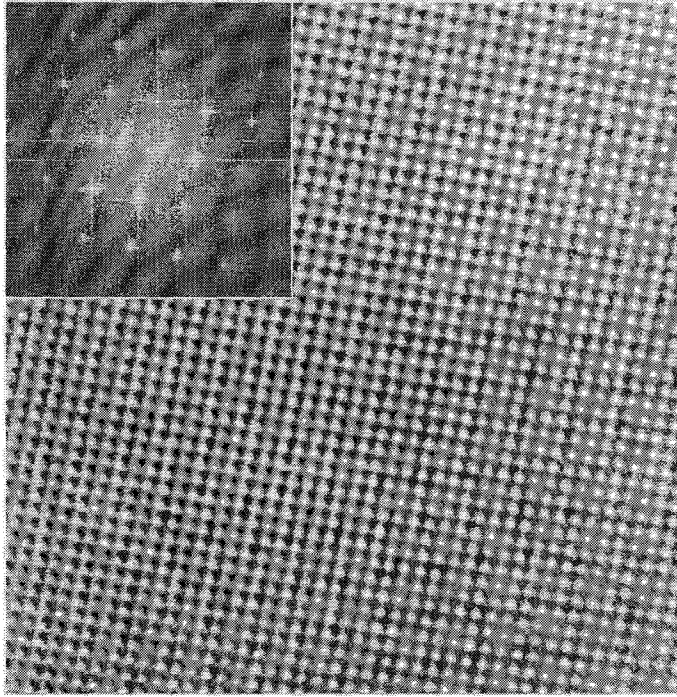
<Si Wafer를 이용한 원자분해능 재점검: [110] 방향 (2003. 9; KBSI); 전압 및 전류의 안정도와 환경의 개선으로 Si dumbbell(0.136nm)의 완전한 분리가 이루어 짐>



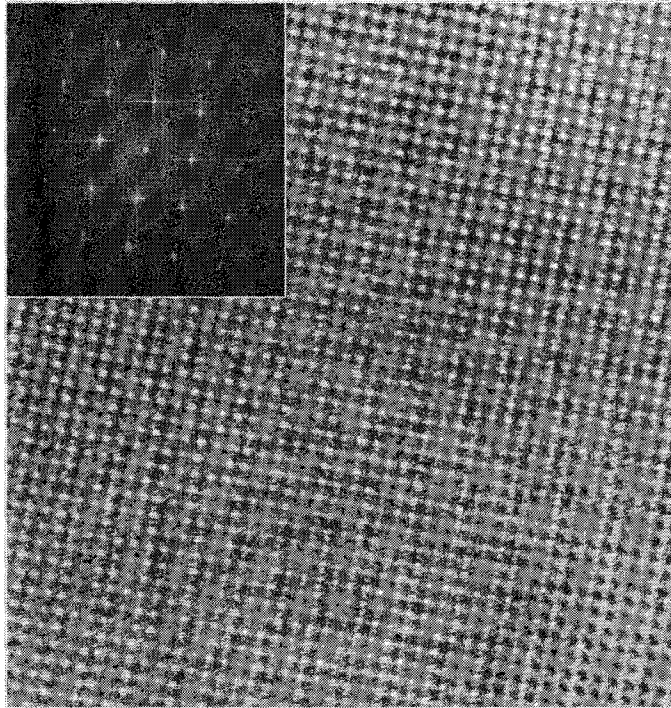
<에너지여과기능 재점검: Si [100] 방향, Unfiltered Image (2003. 10; KBSI)>



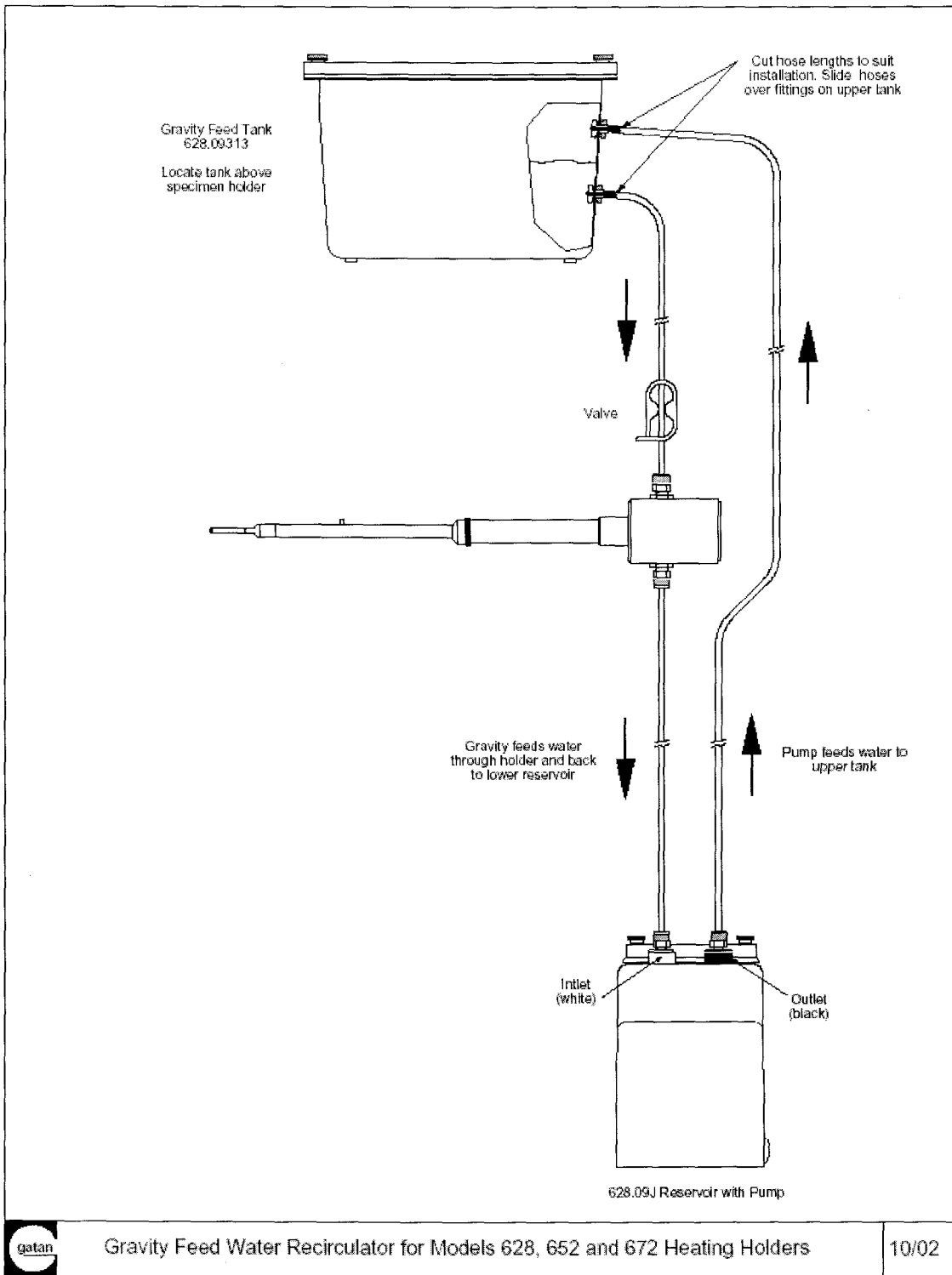
<Si의 에너지손실스펙트럼, Imaging 조건 및 Slit 위치>



<Zero-loss (Filtered) Image, Contrast의 향상이 두드러짐 (2003. 10; KBSI)>



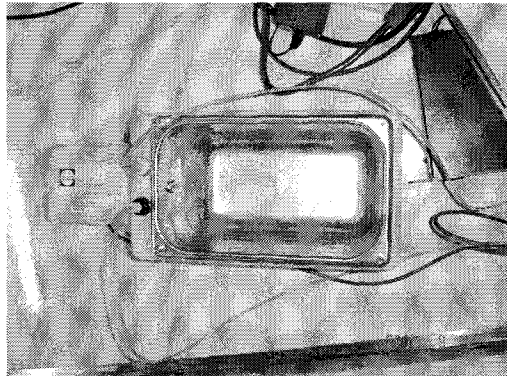
<Plasmon-loss (Filtered) Image, Slit의 위치 조정에도 불구하고 원자분해능이 유지됨을 확인함; 약간의 Image blurring은 기록시간의 연장(3 초)에 기인(?) (2003. 10; KBSI)>



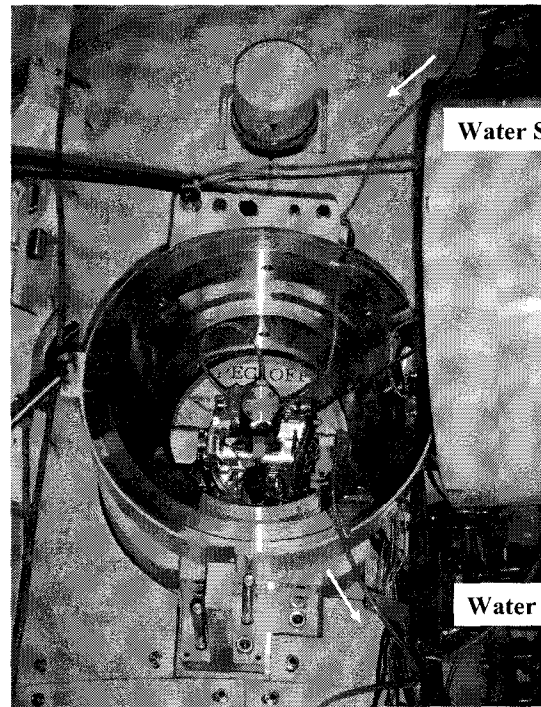
<Gatan사에서 새롭게 개발된 Heating Holder용 Water Recirculator의 도면>



Water Supply Tank



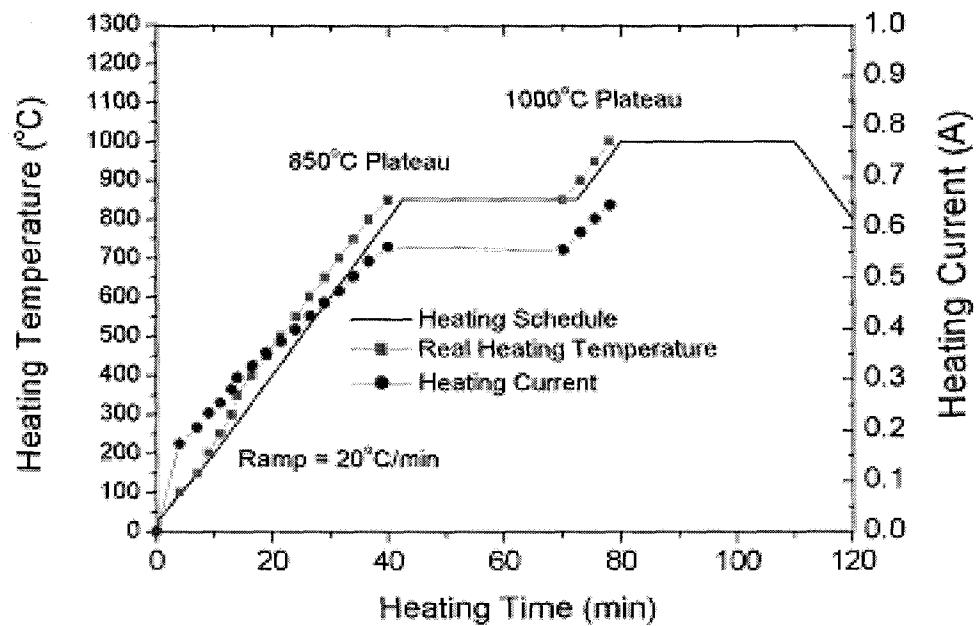
Water Return Tank



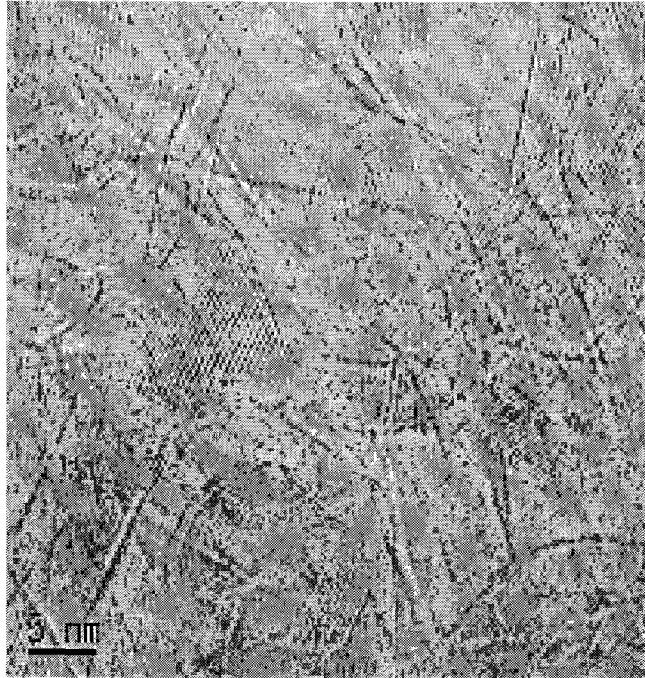
Water Supply

Water Return

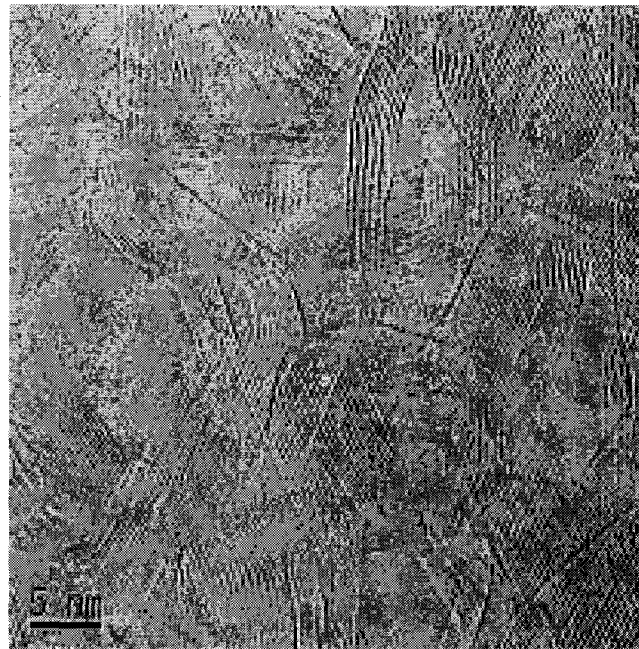
<성능시험 중인 새로운 Water Recirculator의 장비 모습>



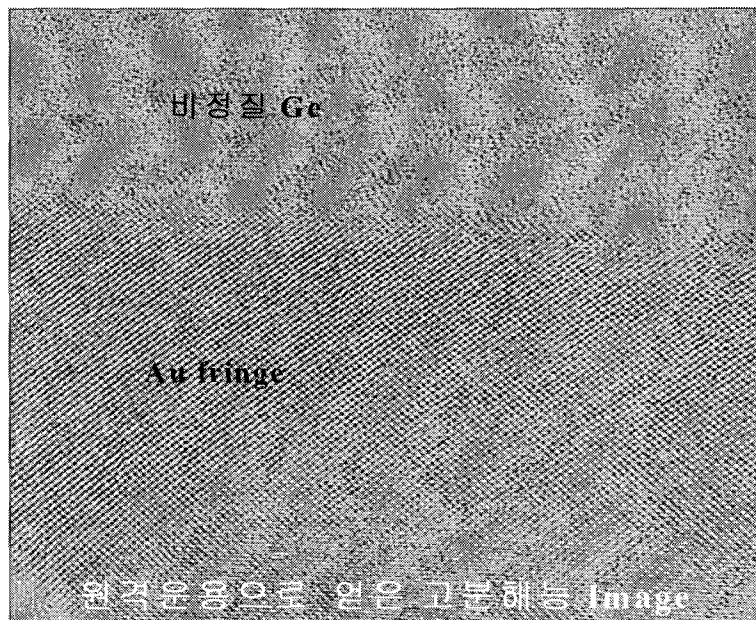
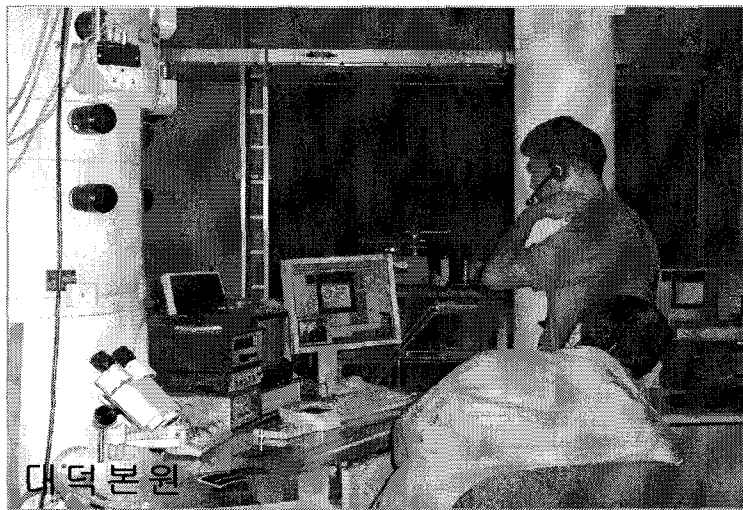
<1-T Heating Holder와 Carbon Graphite를 이용한 In Situ Heating Schedule>



<1000°C에서 기록한 carbon graphite의 fringe 사진: MS-CCD, 0.5초>



<1000°C에서 기록한 carbon graphite의 fringe 사진: MS-CCD, 1초>



<장비의 원격운용 시험; 서울분소에서 원격운용을 통해 Au standard의 lattice fringe(0.2nm)를 획득함 (2003. 9)>

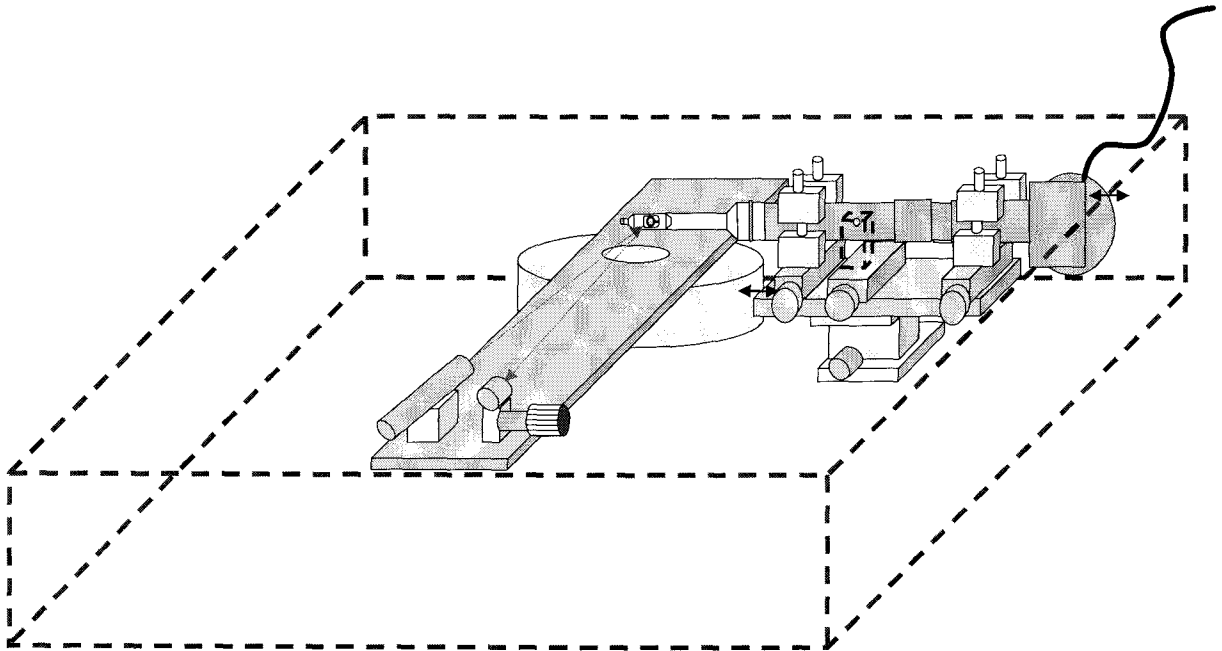
(첨부 5)

보조장치 개발 및 제작 자료

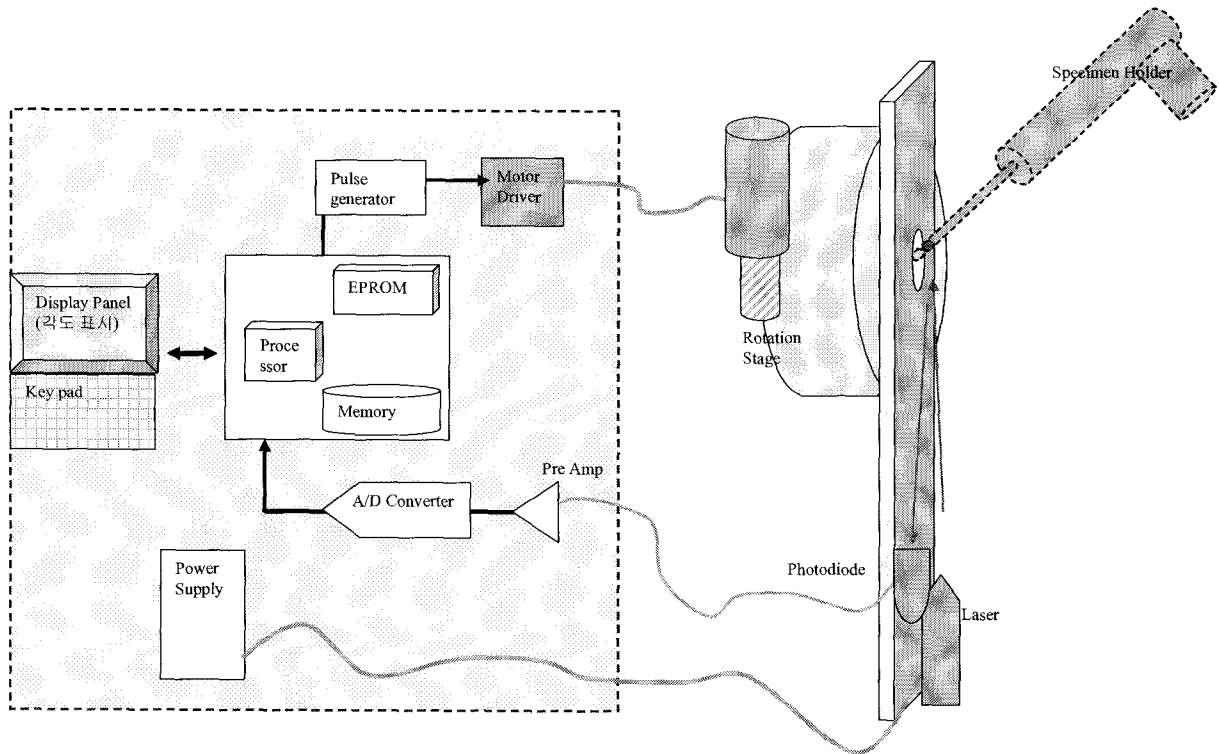
■ 초정밀시료대 보조장치 개요:

구 분	내 용
제작 목적	<ul style="list-style-type: none"> ○ 투과전자현미경에서 확대 관찰할 시료를 고정하고 삽입하는 Specimen Holder에는 시료를 좌우 및 앞뒤로 Tilting하는 기능을 갖고 있다. 그러나 제작사에서 제공하는 분해능(0.1°)으로는 2차원 또는 3차원적 구조 해석에 어려움이 많아서 이에 대한 해결 방안으로 우선 기존 Specimen Holder의 Tilting 정확성을 보다 정밀하게 측정 및 분석하고자 한다. ○ 또한 향후 Specimen Holder의 기능개선이나 독창적인 Specimen Holder의 제작에 기여하기 위하여 본 측정기를 제작하고자 한다. ○ 한편, Laser 및 Detector의 이동에 필요한 Motorized Rotation Stage는 0.001°분해능으로 최대 $\pm 0.01^\circ$정확도를 갖으며, 국내에서는 처음으로 제작되는 부속품으로 일반 제품의 약 5배 이상의 정밀도를 요구함이 특징이다.
경사각도 측정 방법	<ol style="list-style-type: none"> 1. Specimen의 중심선상에 Roatation Stage 설치하고 일정길이의 회전막대 위에 Laser와 Detector를 부착한다. 2. Laser Beam을 Specimen(mirror 삽입)에 주사하여 그 반사된 Beam의 위치를 Detector의 회전 이동을 이용하여 초기원점으로 인식한다. 3. Specimen Holder를 일정한 Tilting 각으로 이동시킨 후, 그 반사되는 Beam의 이동위치를 Detector가 최대 $\pm 60^\circ$회전하며 이동한 위치를 측정하여 환산함으로써 Specimen Holder가 원점에서 Tilting된 변위각을 정밀하게 측정한다.
장치 구성 요소	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rotation Stage Controller System 2. Laser Diode/Detector 3. Setting용 Mirror Controller System 4. Holder 고정대 5. System Case 6. 기타 기구물

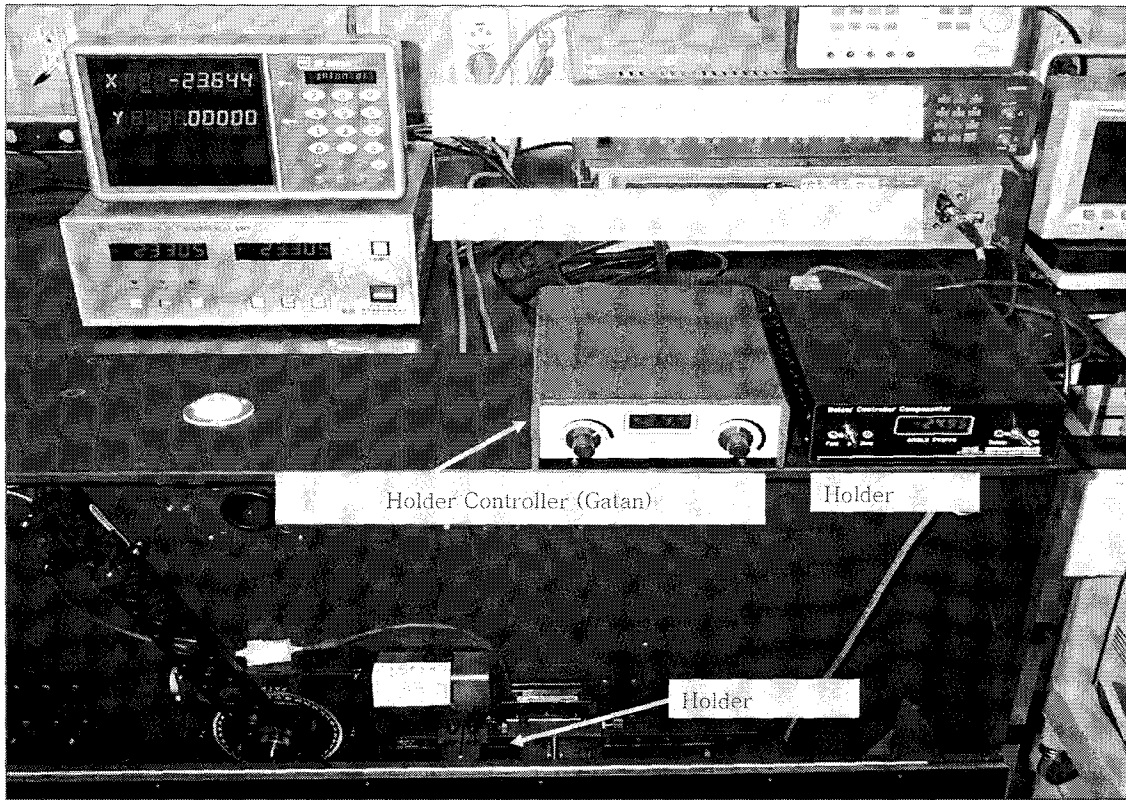
■ 초정밀시료대 보조장치 자료:



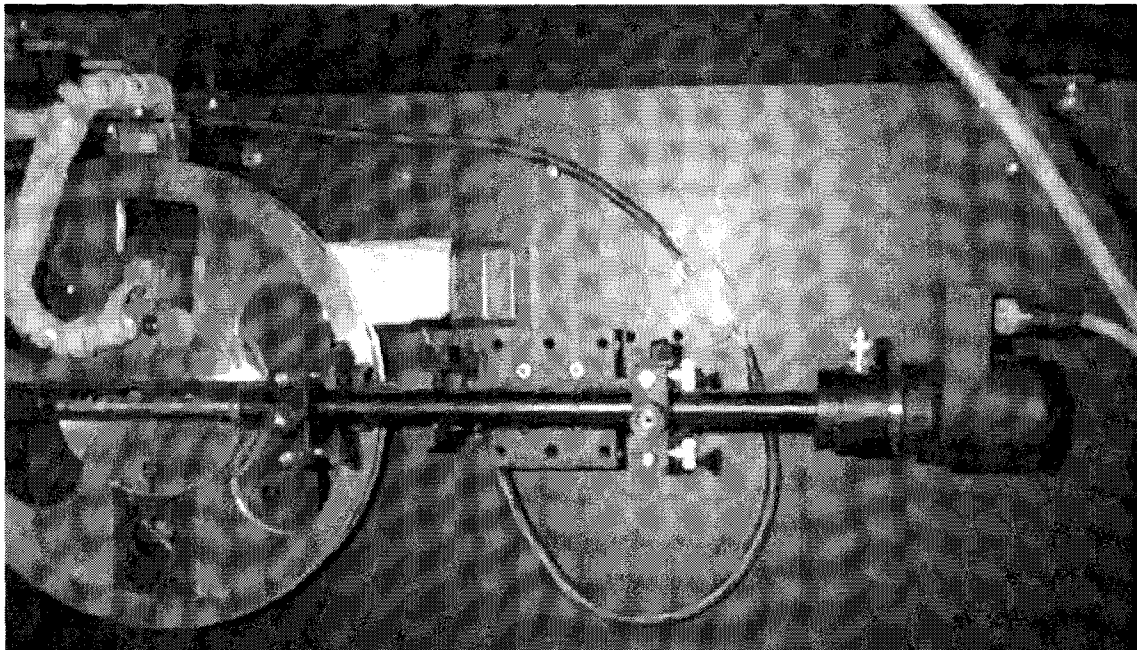
<β각 및 회전각 측정장치 전체 개념도>



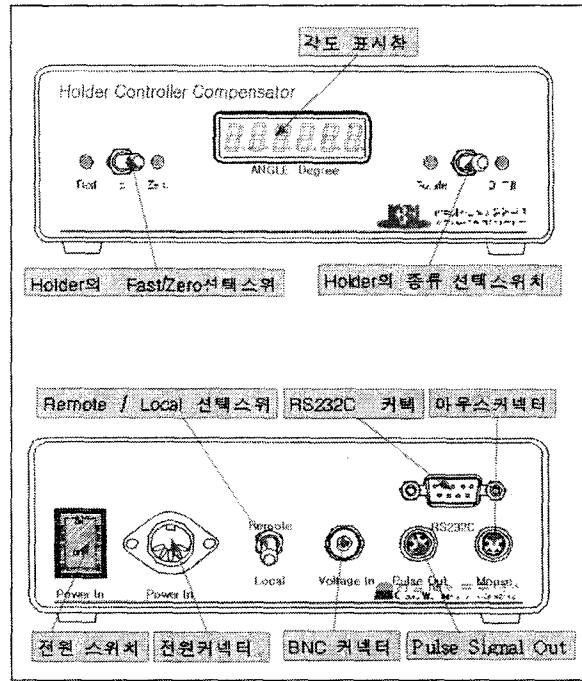
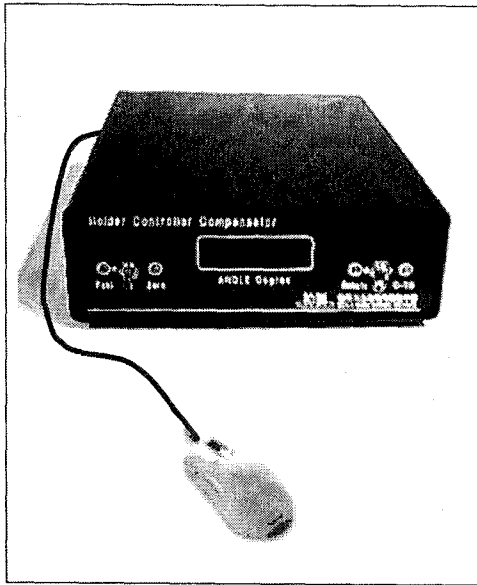
<β각 및 회전각 측정장치 Control Unit 개념도>



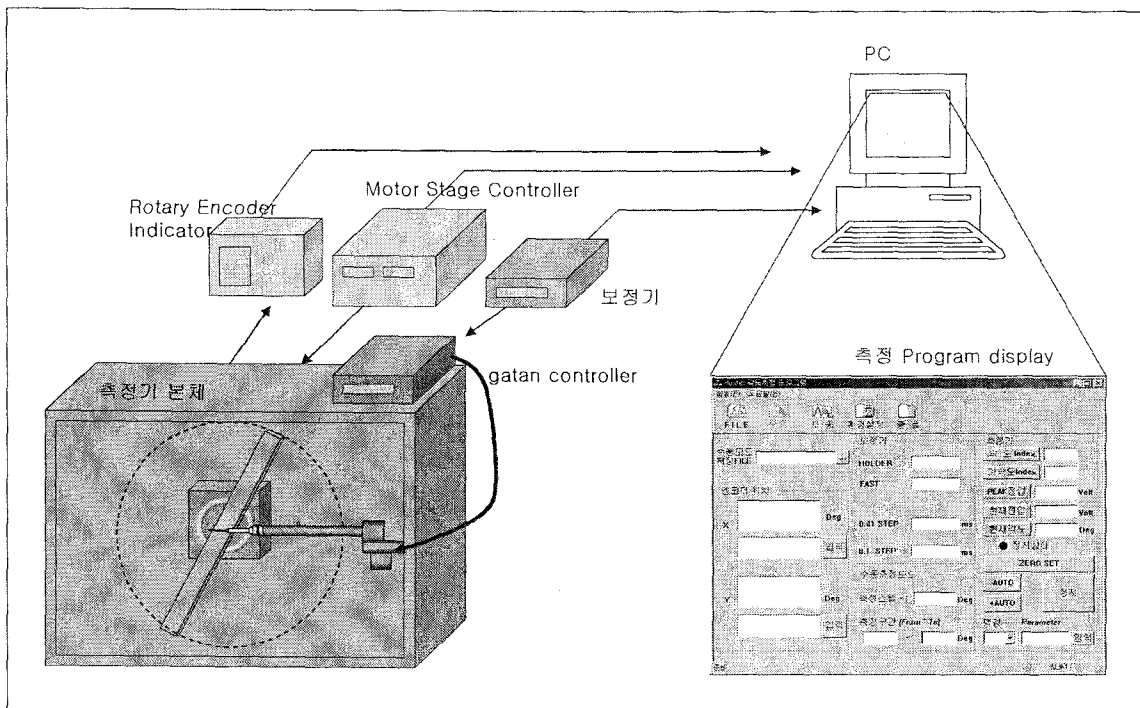
<제작 완료된 β 각 및 회전각 측정장치 구성 사진>



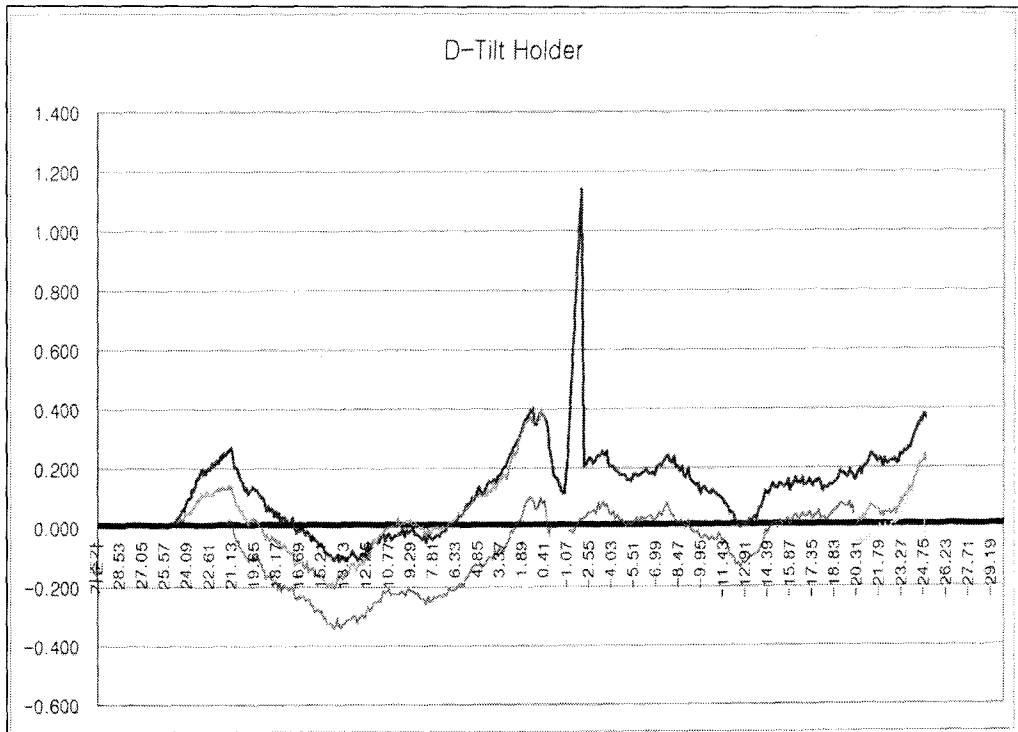
<각도 측정장치에 고정된 Double-Tilt Holder 사진>



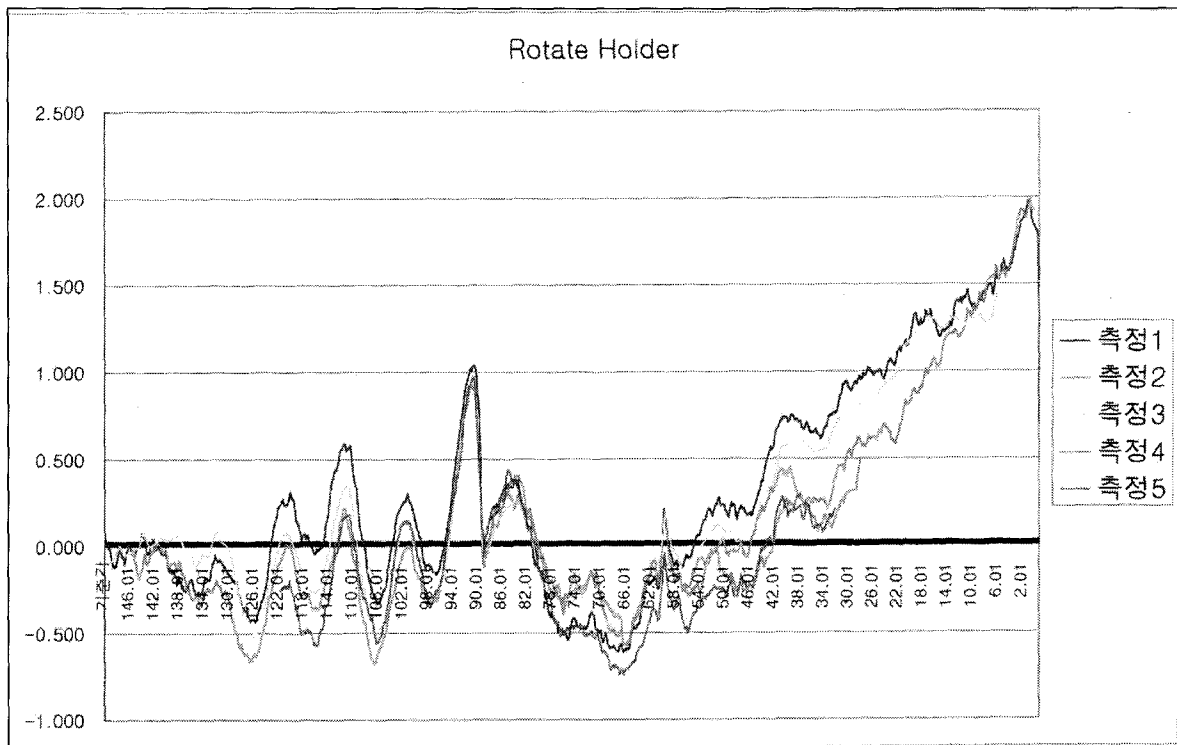
<제작된 Tilt/Rotation 보정장치 사진>



<자동측정 program 관련 Interface 구성도>



<자동 측정 program을 이용한 Gatan 2T Holder의 β 각 측정 결과>

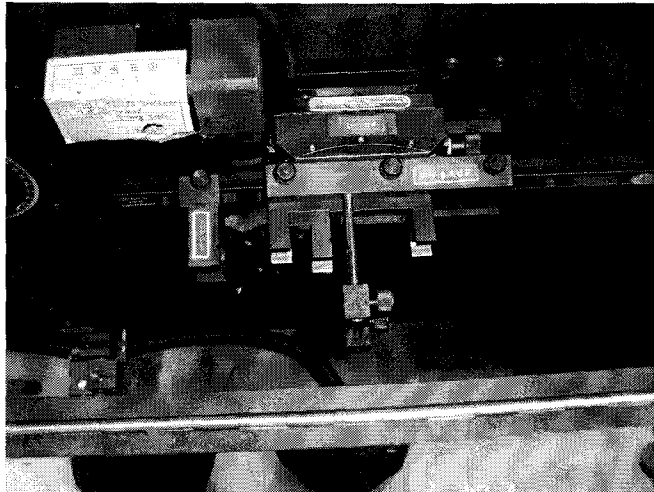


<자동 측정 program을 이용한 Gatan Rotation Holder의 회전각 측정 결과>

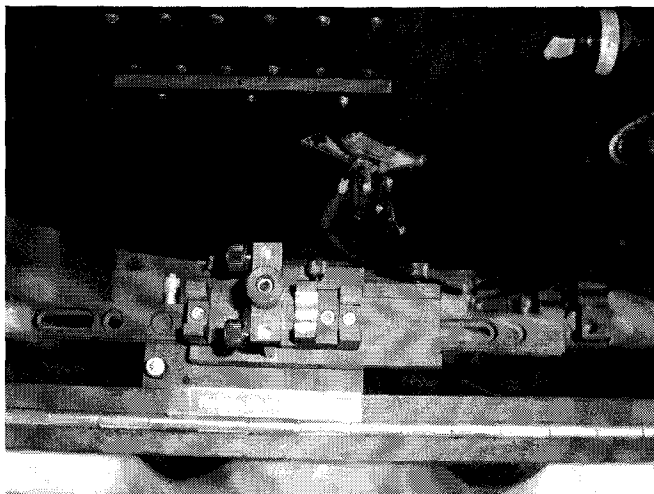
■ 초정밀시료대 보조장치 up-grade 자료:

2002년까지 개발, 제작된 장치는 HVEM이 국내에 반입되기 전이었기 때문에 기 보유한 EF-TEM용 holder(double-tilting holder와 tilt/rotation holder: Gatan사 제작)를 보조 장치에 부착할 수 있도록 adaptor를 제작한 후 성능이 점검 되었다. 2003년에는 도입된 HVEM용 holder(double-tilting holder와 tilt/rotation holder)에 맞는 adaptor를 추가적으로 제작하였다. Gatan사에서 제작한 tilt/rotation holder의 부착 및 구동에는 문제점이 없었으나 JEOL사에서 제작한 double-tilting holder는 부착은 가능하나 구동 방식의 차이에 의해 정상적인 작동이 어려웠으나 이를 기술적으로 해결하였다.

UHV-TEM용 Holder의 경사/회전각도 측정 장치

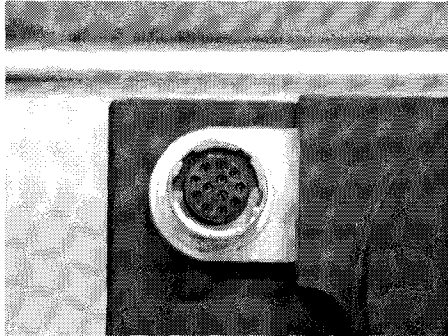


Tilt Holder 고정 장치 장착모습

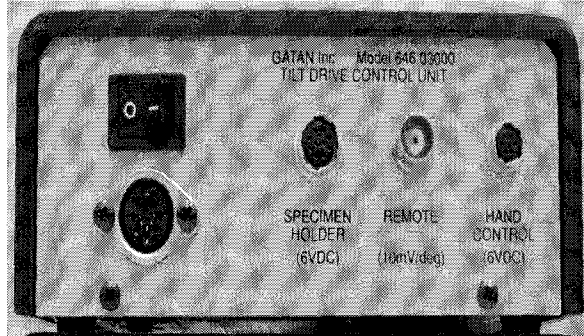


Rotation Holder 고정 장치 장착모습

UHV-TEM용 Holder의 경사/회전각도 측정 장치



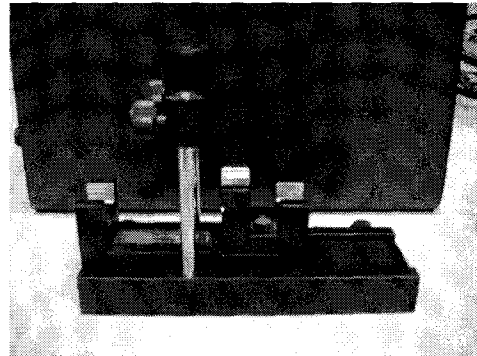
Holder Connection



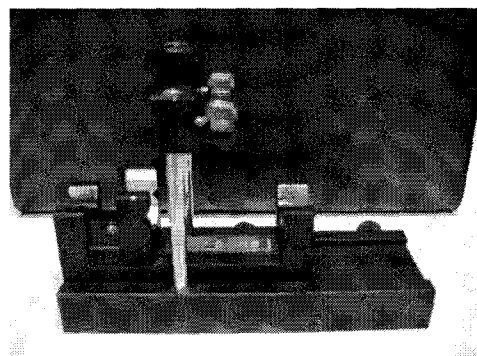
Tilt Drive Control Unit (뒷면)



Connector for Tilt Drive Control Unit



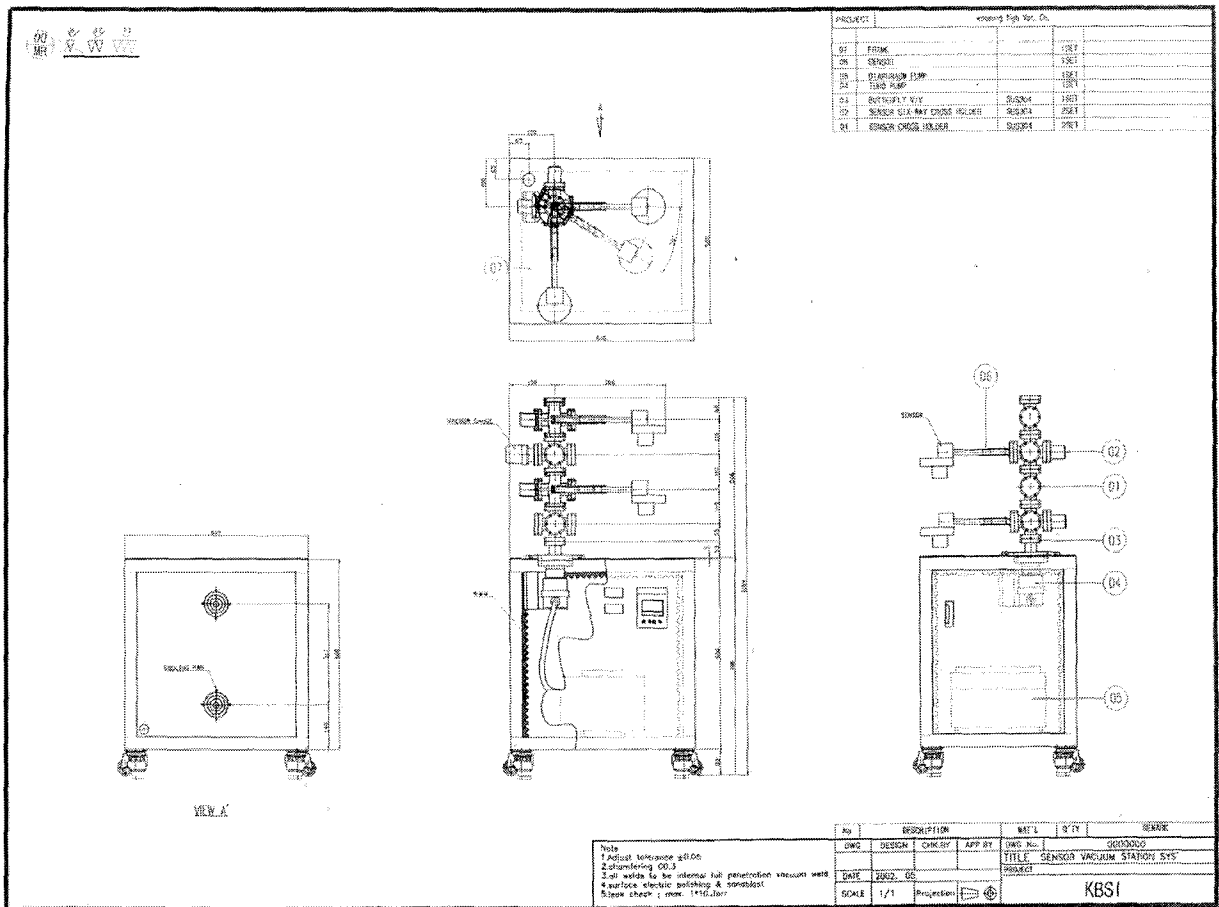
Rotation Holder 고정 장치



Tilt Holder 고정 장치

■ 특수 holder 보관장치(Dry Pumping System) 자료:

저온시료지지대, 가열시료지지대 등 역동적 실험에 필요한 특수 시료지지대는 고진공 상태에서의 보관이 필수적이다. 이러한 보관 용도로 현재 상업적으로 판매되고 있는 미국 Gatan사의 Dry Pumping System의 단점들을 보완한 새로운 System을 KBSI에서 자체 개발, 제작하였다. 1차 제작(2002년)은 기존의 EF-TEM의 Holder를 사용할 수 있는 사양으로 제작하였고, 2차 제작(2003년)은 UHV-TEM용 Holder를 사용할 수 있는 사양으로 개선 작업을 수행하였다.

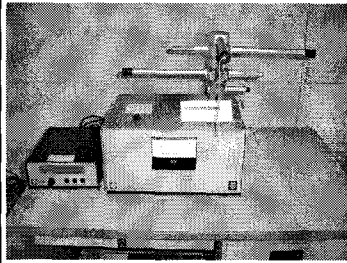

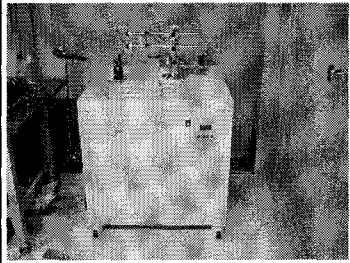
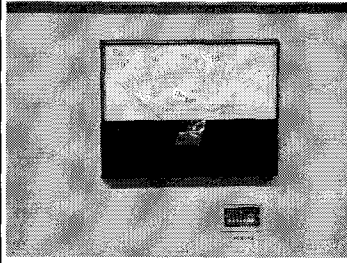
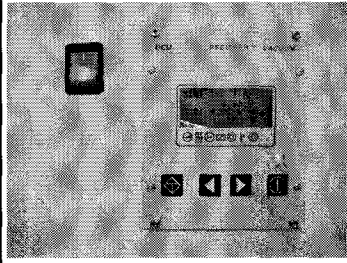
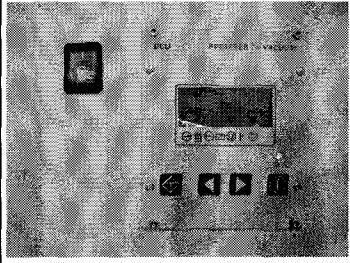
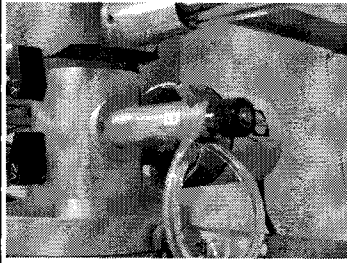
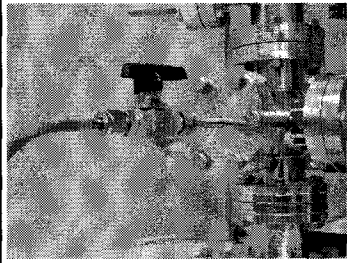


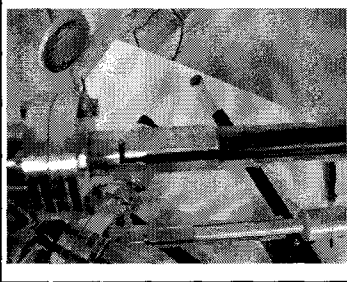
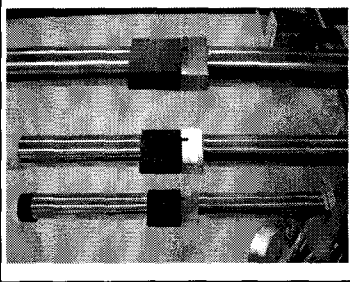


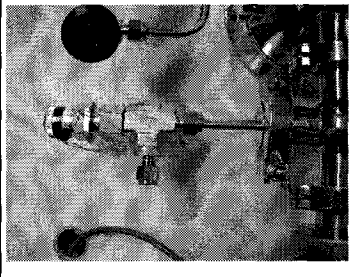


<1차 제작을 위한 Dry Pumping System의 설계도면>

기성장비(Gatan), 2002년 및 2003년 제작 장비의 장단점 비교표

Item		Gatan(655)	EM 912Q 용	UHV-TEM 용
			2002년 제작	2003년 제작
Vacuum System	* Turbo-drag Pump - Pumping Speed(N2) - Ultimate Pressure(mbar)	- 7.5 l/s - 2.67×10 ⁻⁶	- 50~100 l/s - 1×10 ⁻⁸	- 50~100 l/s - 1×10 ⁻⁸
	* Diaphragm Pump - Pumping Speed(liter/sec)	- 7.5	- 60	- 60
	* Full Range Gauge - Measurement range		- 1000~5×10 ⁻⁹	- 1000~5×10 ⁻⁹
	* Vacuum(MAX)	- 2.67×10 ⁻⁵	- 5.4×10 ⁻⁷	- 6.4×10 ⁻⁷
	* Cooling	- Air	- Air	- Air
	* Vent	- Manual, Air	- Auto, N2	- Auto, N2
Holder & Case	* Holder(1set) 구성	- Holder(1set) = Center part	- Holder Protectors - Blank holder - UHV 6way cross - Gasket - Bolt, Nut - Blank Cap - Blank Flange	- Center part - Upper part - Bottom part
	* 기타	- Needle valve = 2ea	- Needle valve = 1ea	- Needle valve = 3ea
	* 추가기능 장착		- 고정작업 = Holder 와 Case - 안전장치 = Holder Look	- 고정작업 = Holder 와 Case - Needle valve = +1ea - 안전장치 = c = Holder Look
	* Frame Part		- 610×520×688H	- 785×785×688H
	* 추가 가능한 holder 수량	- 4ea	- 15ea	- 15ea
기성품(Gatan)기준으로 비용 감소율(%)		- 0	- 40	- 36

기성장비(Gatan), 2002년 및 2003년 제작 장비의 부품 비교표

Item		Gatan(655)	EM 912 Ω 용	UHV-TEM 용
			2002년 제작	2003년 제작
Case	Vacuum System			
	Vacuum Gauge & Power			
Holder	Needle valve			
	Holder Look			
	Relief valve			

(첨부 6)

전자현미경동 건설 및
보조시설 설치 자료

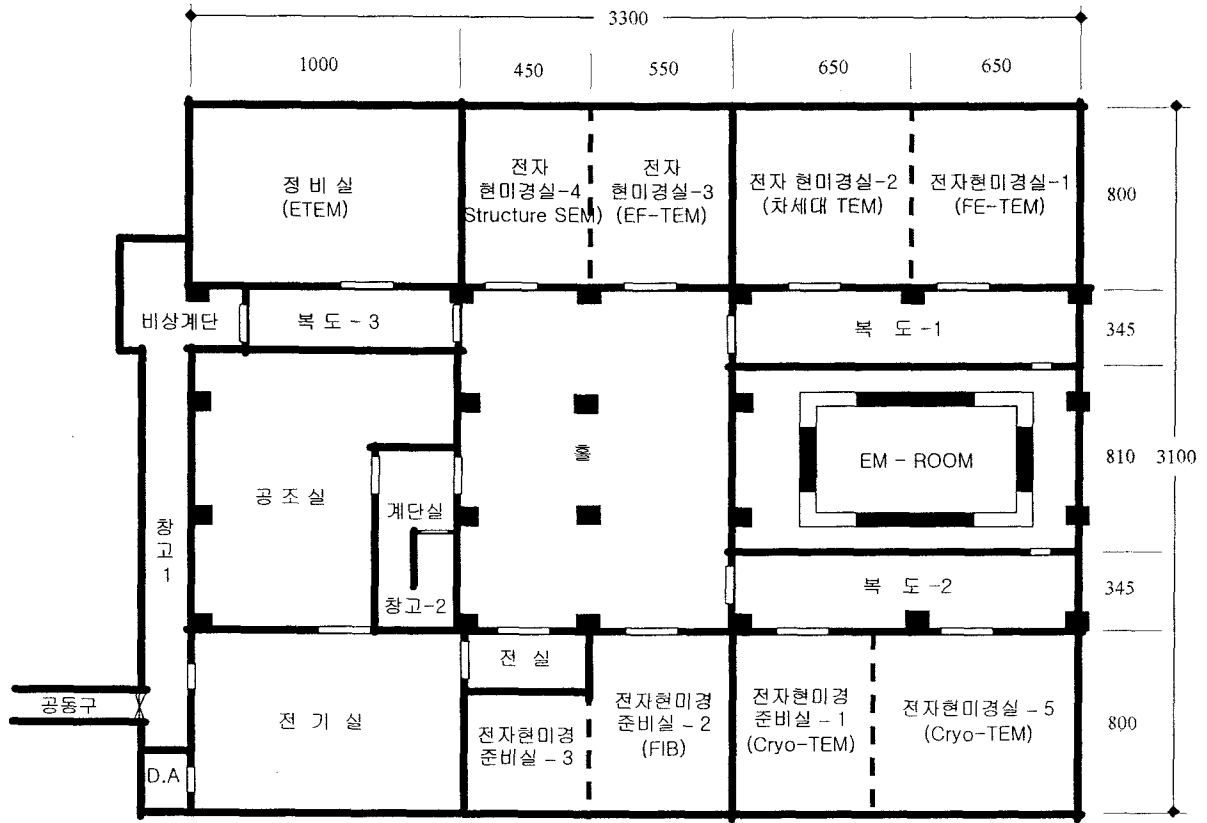
■ 전자현미경동 건설 추진경과 요약 (2001. 1 ~ 2002. 12)

- 2년간(2001. 1 ~ 2002. 12) 총 39억원을 투자하는 『초고전압투과전자현미경 특수 실험실 건설』 관련 예산의 별도 확보 (2000. 12)
 - 규 모 : 총 면적 2,054m² (621평)
 - 1층(15m x 33m): 495m² (150평)
 - 2층(15m x 33m): 495m² (150평)
 - 지하(31m x 33m): 1064m² (321평)
 - 높이: 지상 - 17.1m, 지하 - 7.85m
 - 부 지 : 한국기초과학지원연구원내
 - 특기사항 : 최적의 조건에서 전자현미경 실험을 위한 방진장치, 방음장치 및 실험실 온·습도 조절을 위한 항온항습시설 구비

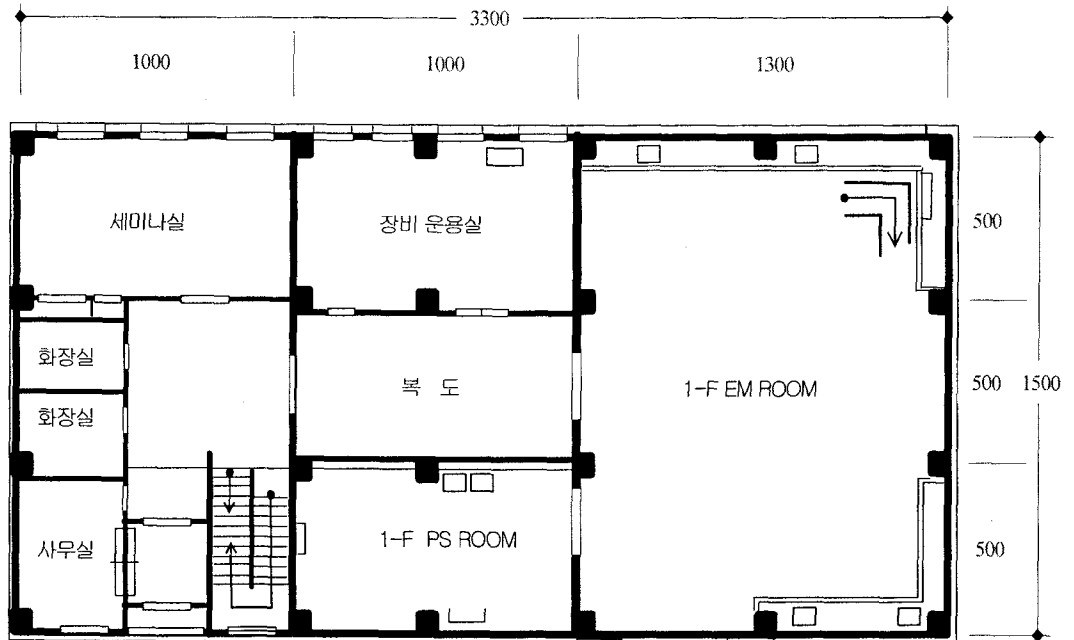
- 건물 세부설계 수행 (2001. 1 ~ 2001. 12)
 - 설계회사 : 삼성건설(주)
 - 특기사항 : 이온빔가속기 부착설비 및 주장비 제진설비 설계 포함; 장비 제작사인 일본 JEOL사 및 제진대 설비업체인 일본 Showa사와 긴밀한 협력 하에 설계 수행

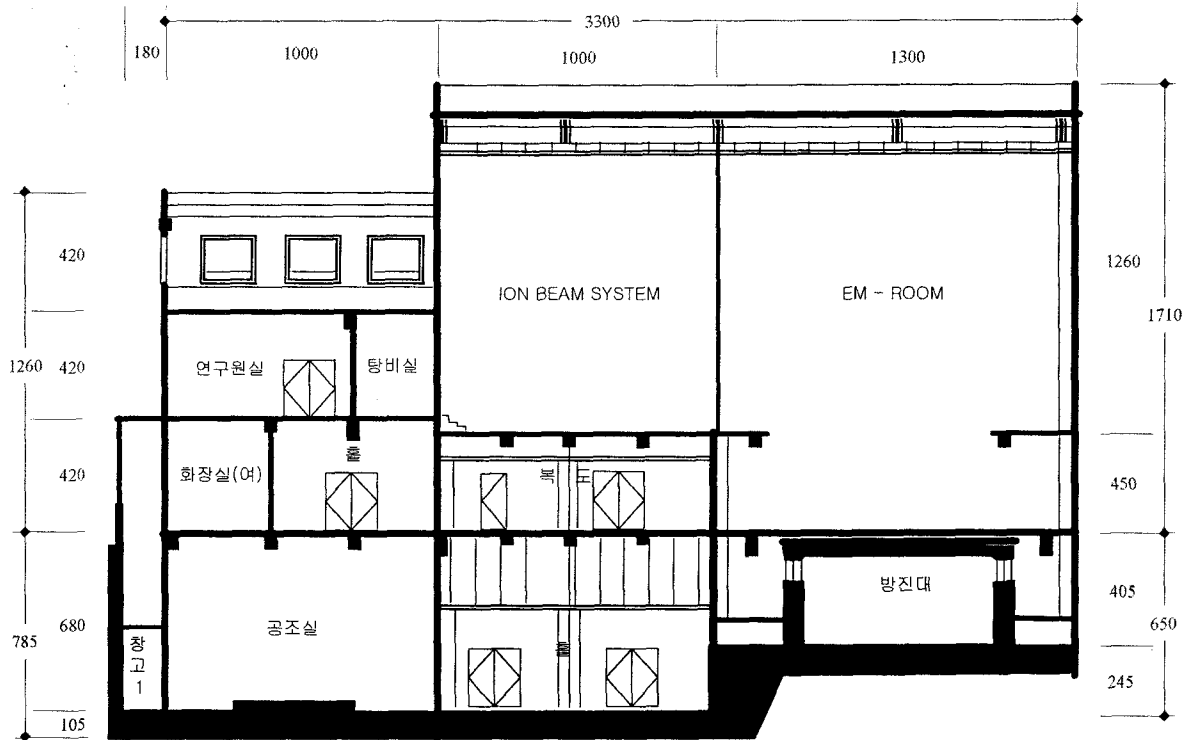
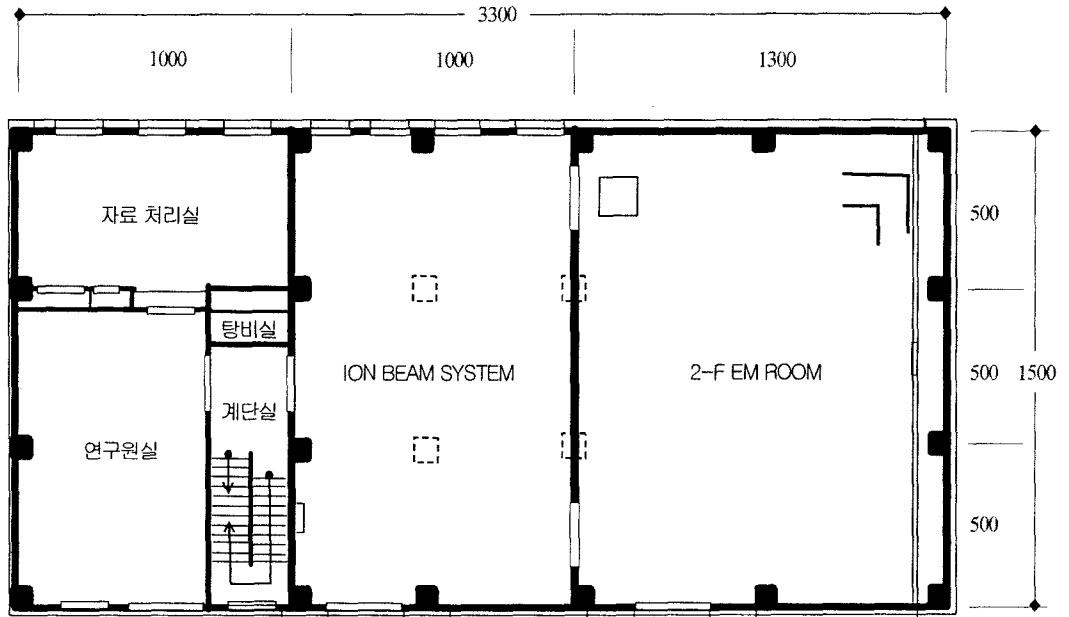
- 건물 시공 수행 (2002. 1 ~ 2002. 12)
 - 시공회사 : 대아건설(주)
 - 특기사항 : 제진대 설비는 일본 Showa사에서 설계 및 시공
실제 제진대 설치 작업은 두레 Engineering에서 수행

■ 전자현미경동 건설 자료:



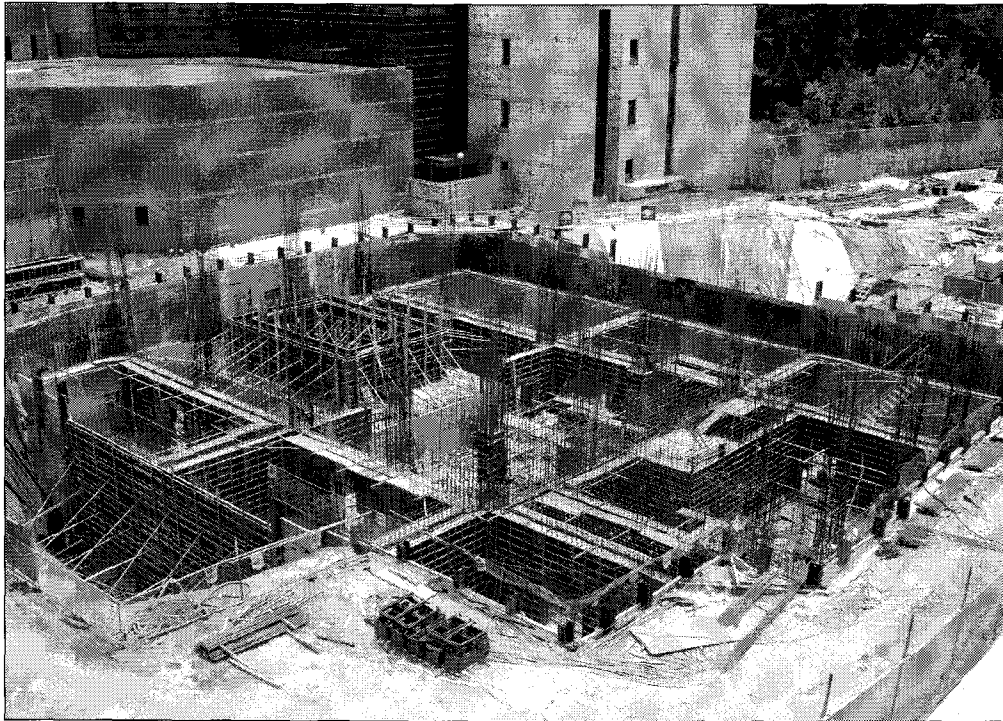
<지하실 평면도>







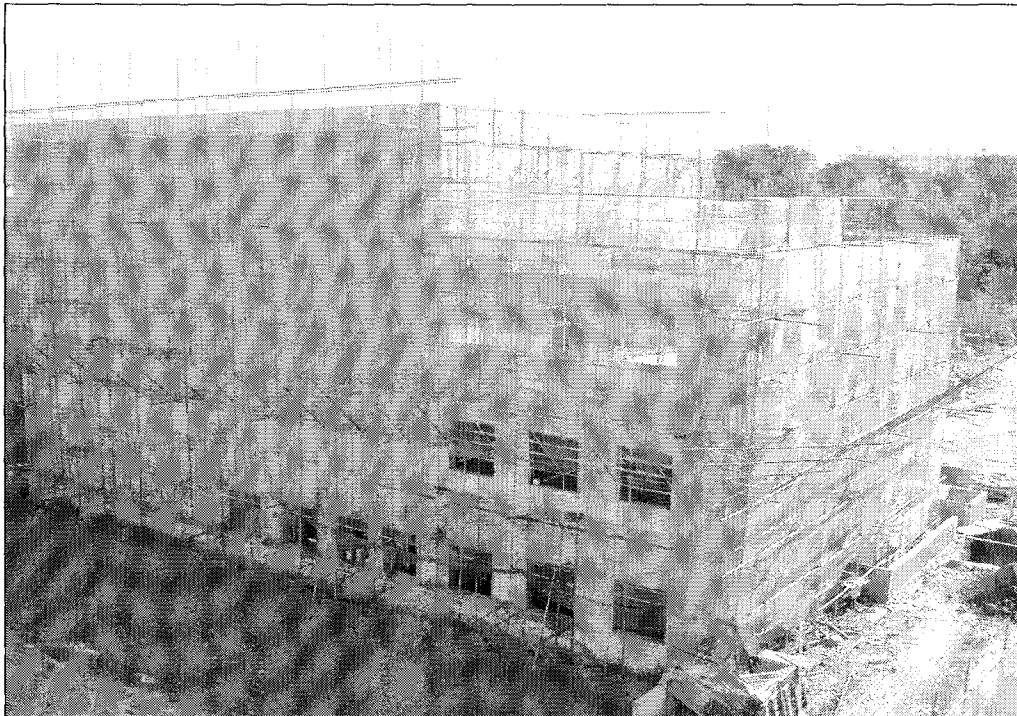
<토목작업 (2002. 3. 11)>



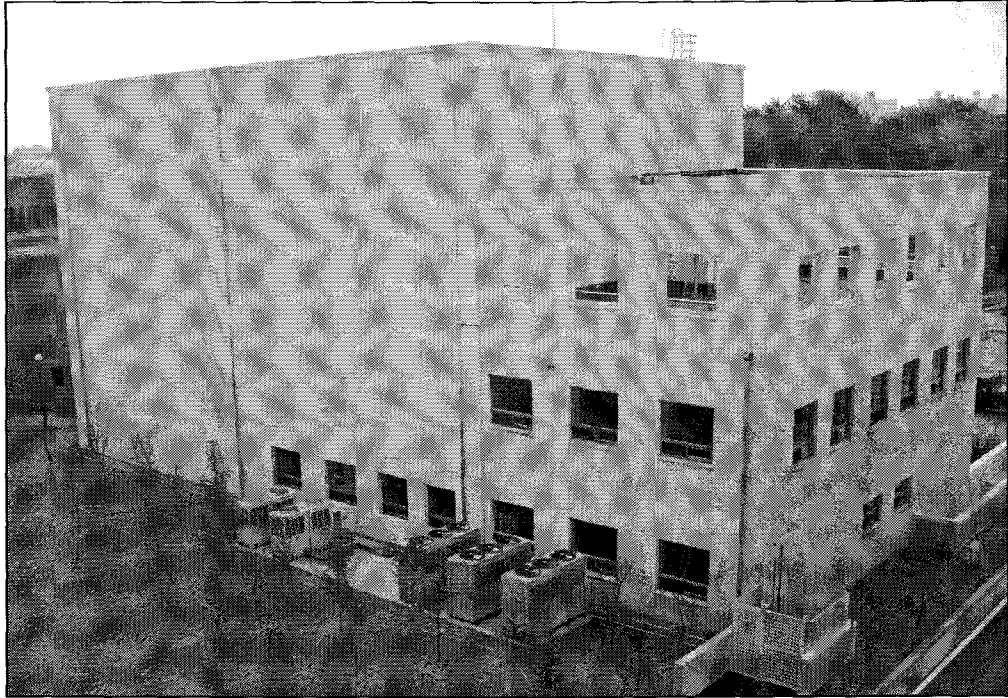
<지하층 건설작업 (2002. 6. 3)>



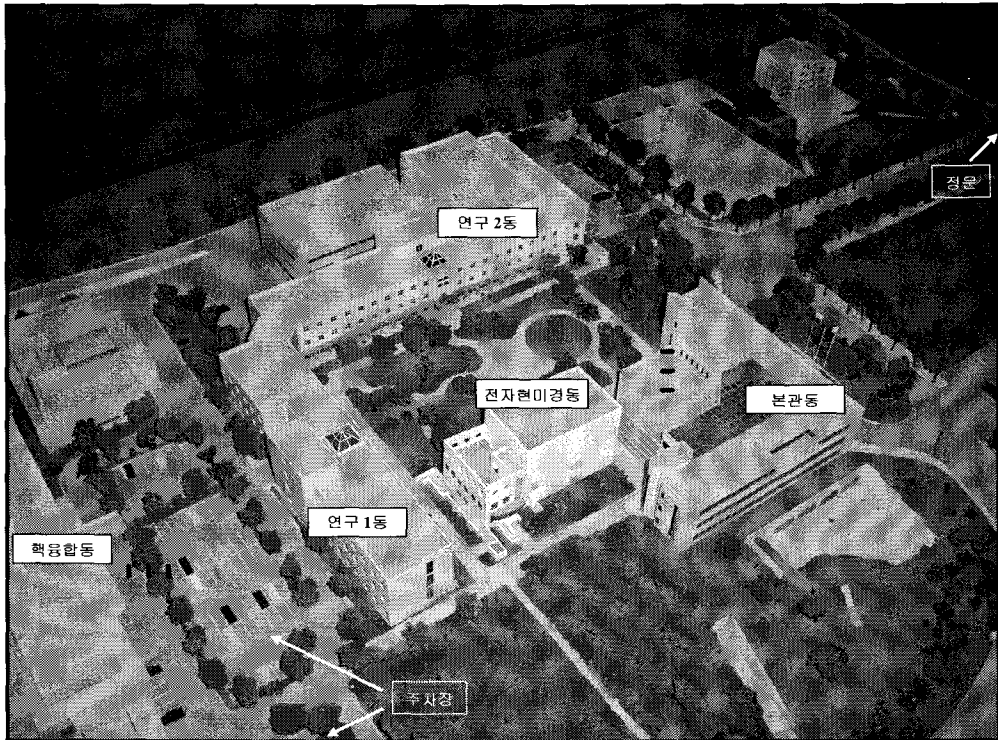
<지상층 건설작업(2002. 8. 5)>



<건물 외곽 완성작업 (2002. 11. 4)>

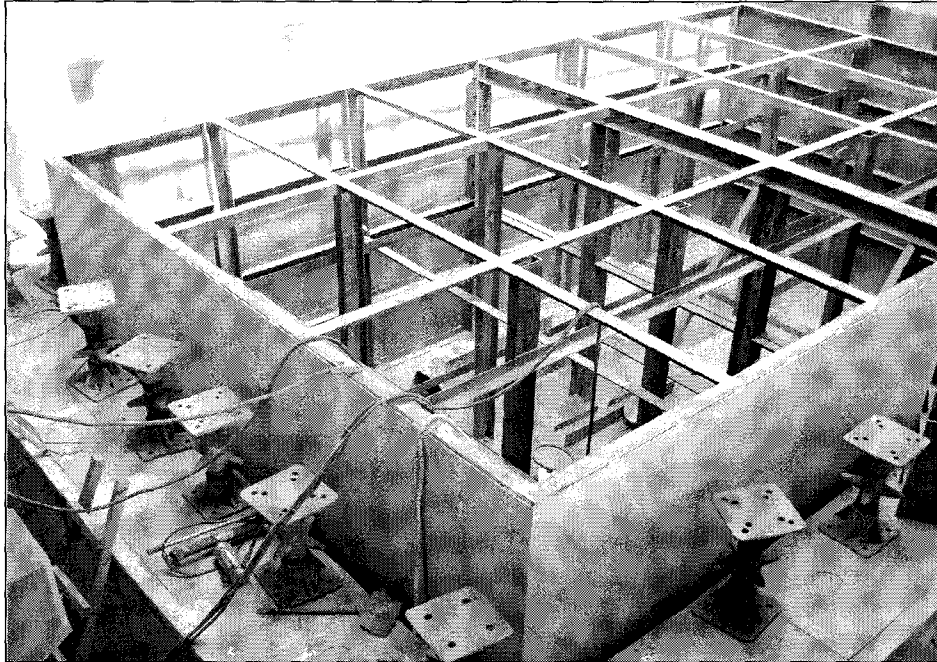


<준공 직전의 전자현미경동 (2003. 3. 28)>

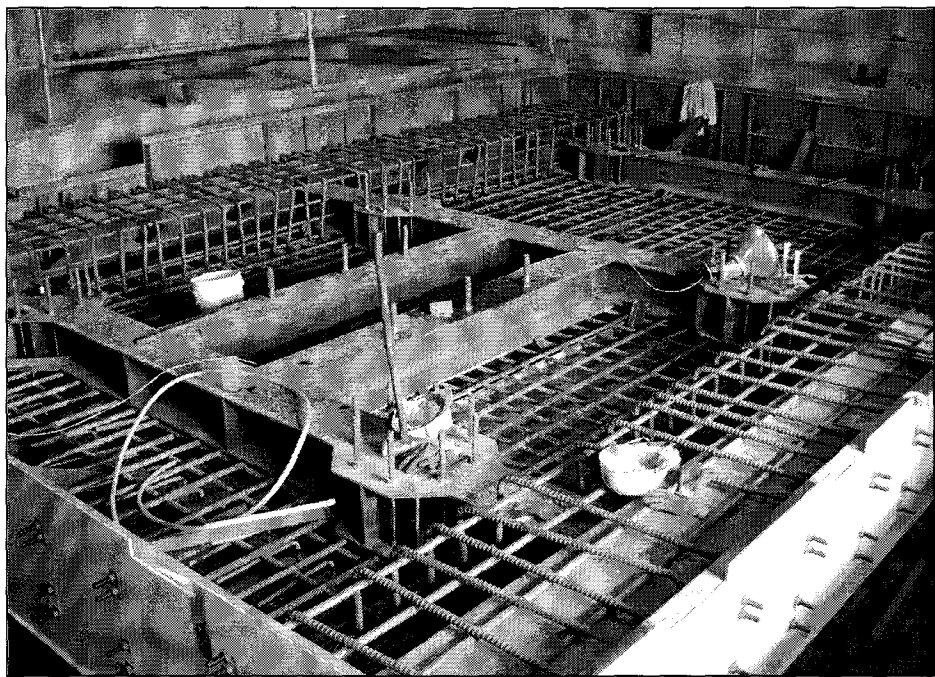


<KBSI 내의 전자현미경동 위치>

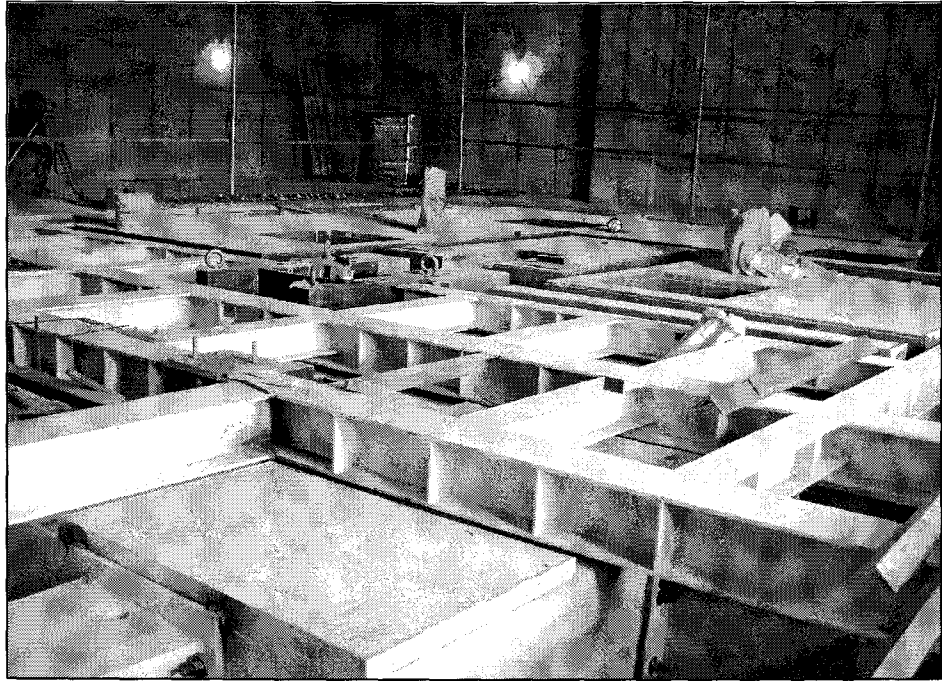
■ 제진대 설치 자료:



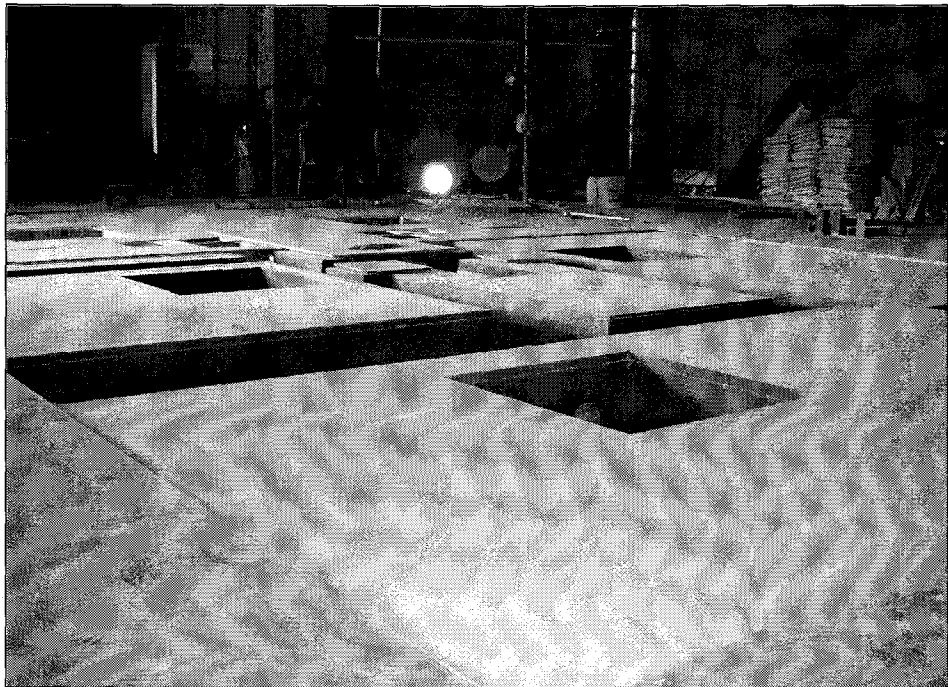
<기본 Frame 설치작업 (2002. 9. 10)>



<철골작업 (2002. 10. 7)>



<콘크리트 작업 (2002. 10. 28)>



<1차 평탄작업 (2002. 11. 13)>

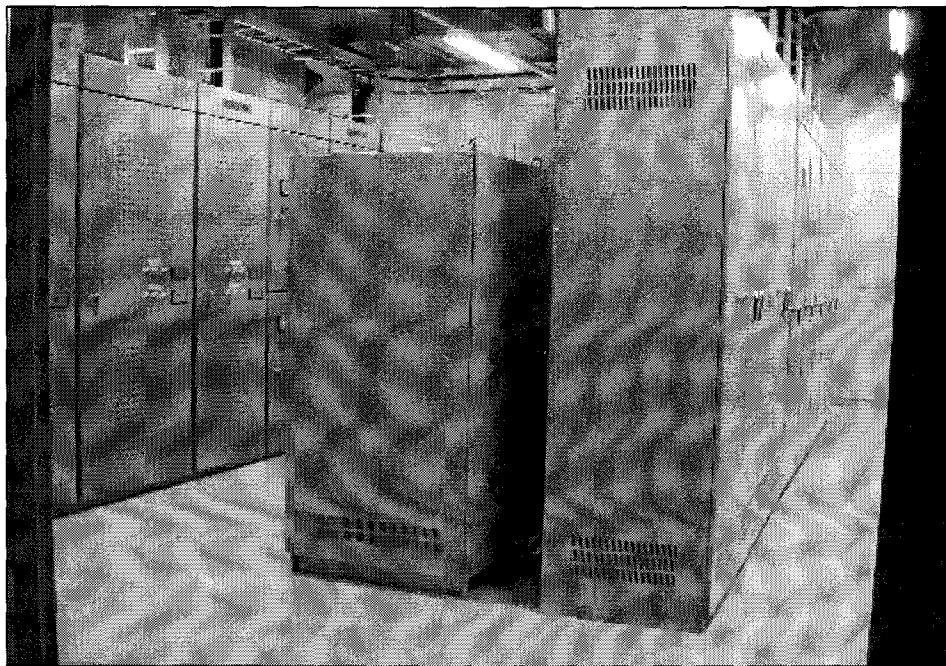
■ 보조시설 설치 추진경과 요약 (2003. 1 ~ 2003. 10)

- 전자현미경동 1차 건립완료 (2002. 12. 31)
- 방음시설 1차 보강작업 (2003년 1월 중)
- 제진대 정밀평탄작업 (2003년 2월 중)
- 전화 및 LAN선 설치 (2003년 2월 중)
- 전기 및 공조시설 점검 및 보강작업 (2003년 2월 ~ 3월)
- 전자현미경동 하자 보수작업 및 조경작업 (2003년 2월 ~ 3월)
- 실외 방습시설 설치 (2003년 5월 중)
- 전기시설 보강 및 주장비용 UPS 설치 (2003년 5월 중)
- 항온항습시설 보강작업 (2003년 5월 ~ 8월)
- 방음시설 2차 보강작업 (2003년 7월 ~ 9월)
- 자기장 차폐시설 설치 및 성능점검 (2003년 7월 ~ 9월)
- 통합적 안전장치 설치 (2003년 9월 ~ 10월)

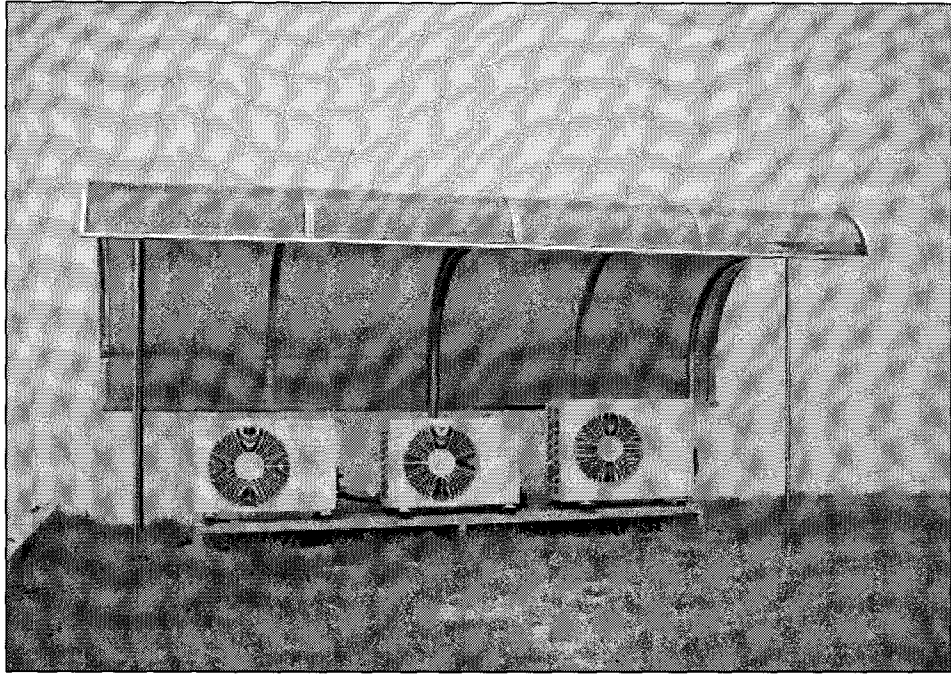
■ 주요 보조시설 설치 자료:



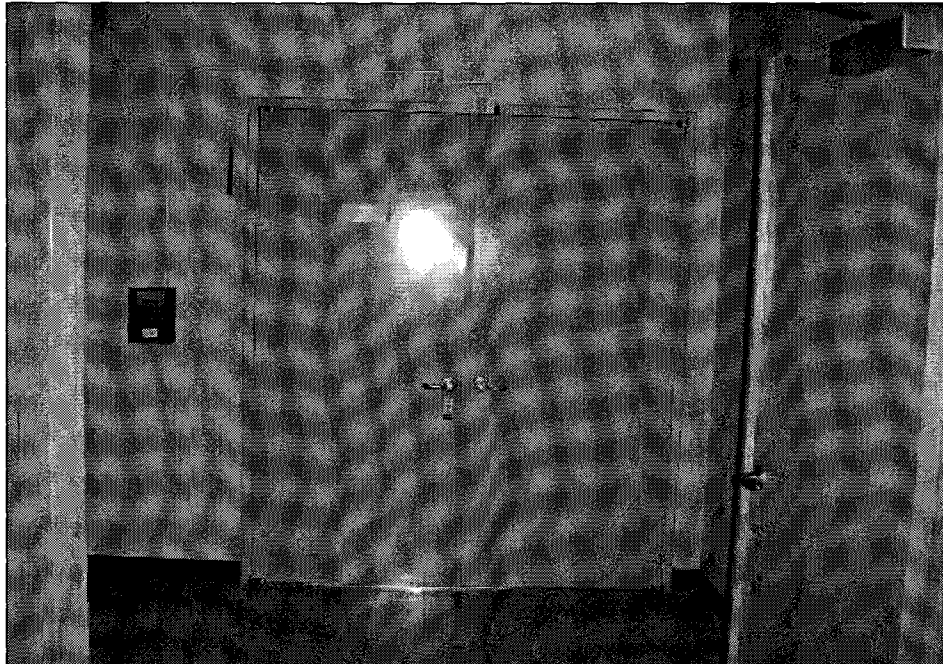
<지하 방습시설 설치 (2003. 5)>



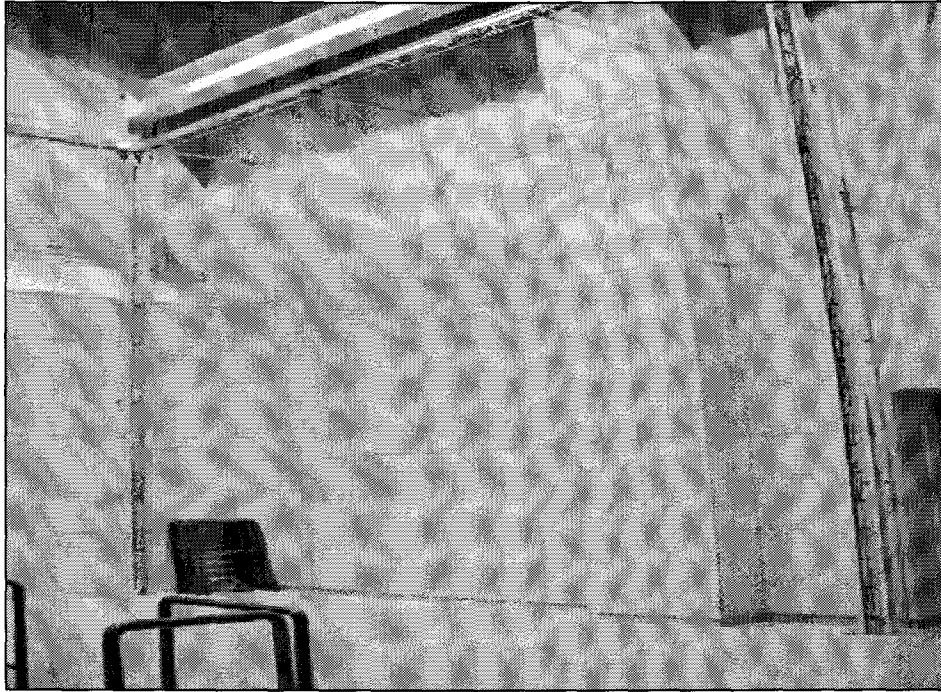
<주장비용 UPS 설치 (2003. 5)>>



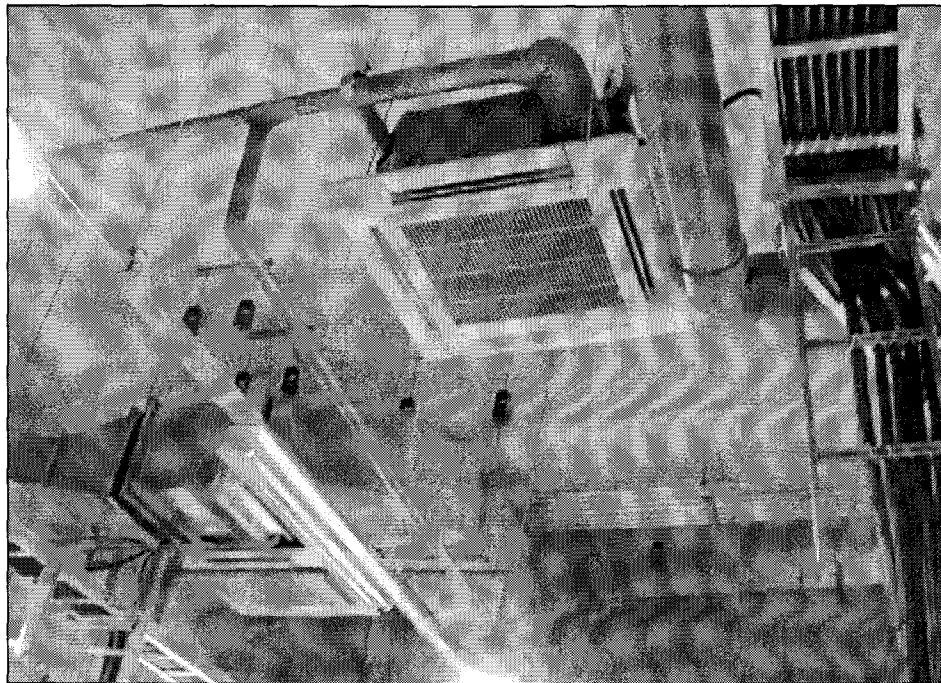
<주장비 Chiller 실외기의 지붕설치 (2003. 6)>



<지하 공조실 방음문 설치 (2003. 7)>



<주장비실 2층 흡음제 부착 (2003. 8)>



<전기실 냉방기 설치 (2003. 8)>



<통합적 안전점검을 위한 CCTV 설치; Main Controller (2003. 10)>



<외부 방문객을 위한 장비소개용 PDP 설치; 장비운영실 (2003. 10)>

■ 자기장 차폐시설 설치 경과 요약 (2003. 2 ~ 2003. 10)

- 차세대연구동 건설회의에서 JEOL사에서 제공한 전자현미경 장비 설치조건 중 자기장 조건에 대한 문제점 제기 (2003. 2. 25)
- 자기장 조건의 실상 파악 및 자기장 자체측정 (2003년 3월)
- 표준연에 의뢰하여 전자현미경동 주변의 모든 자기장 발생장치에 대한 정밀 자장 측정을 수행. 한빛 장치의 자기장 영향을 파악 (2003년 4월)
- 동경대를 방문하여 HVEM에 대한 자기장 차폐시설 파악. 본원에 설치 중인 장비를 임시 가동한 상태(1,000kV)에서 한빛 장치의 자기장에 대한 빔 drifting 영향을 측정 (2003년 5월)
- 자기장 차폐시설 설치를 위한 실무협의 (2003년 6월)
- 자기장 차폐시설 설치계획 수립 및 설치 착수 (2003년 7월)
- 자기장 차폐시설 설치 및 1차 성능시험 완료 (2003년 8월)
- 자기장 차폐시설의 최종 성능시험 (2003년 9월):

- 한빛 장치로부터 오는 DC Magnetic Stray Field 측정 결과 (장비 사양: 1 mG):

	(MK3DC-Off)	(MK3DC-On)
X-axis (max)	0.43 uT (4.3 mG)	nearly 0.0 uT (0.0 mG)
Y-axis (max)	0.44 uT (4.4 mG)	< 0.01 uT (0.1 mG)
Z-axis (max)	0.05 uT (0.5 mG)	< 0.01 uT (0.1 mG)
Beam Shift	180 mm on Screen (18 um)	1~2mm on Screen (0.1~0.2 um)

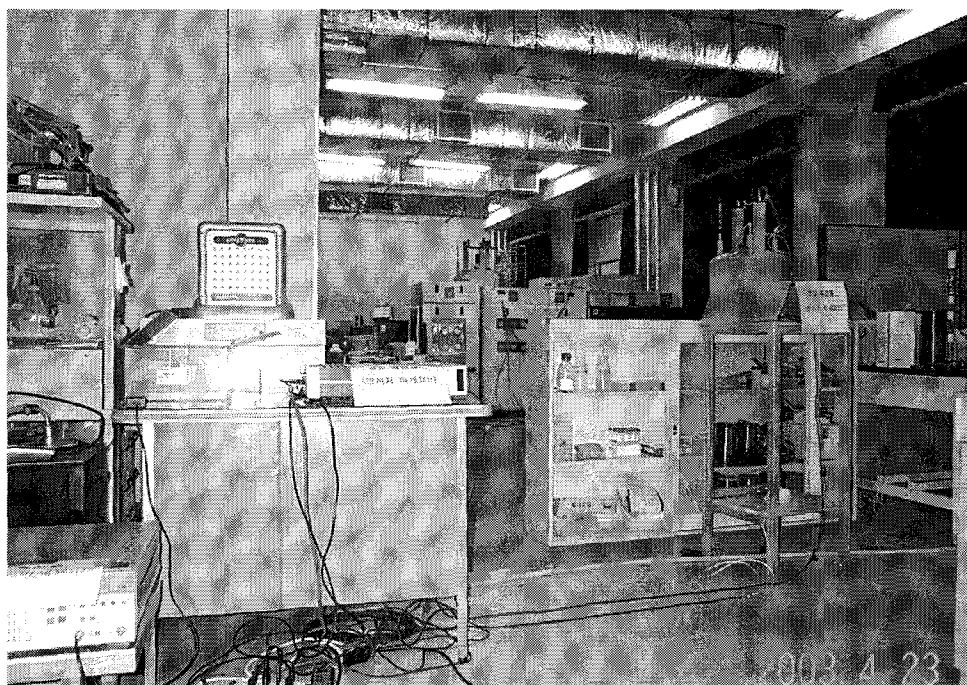
- Image 관찰 결과:

- 자장 Canceller를 켜고 작업했을 때는 한빛 장치의 영향을 전혀 받지 않음을 확인
- 에너지여과장치(HV-GIF)를 이용한 작업도 정상적임을 확인
- 한빛 장치의 가동 시 보이는 Beam Shift 현상은 추가적으로 설치하는 AIS(Automatic Illumination System)를 이용하여 조정 완료 (2003년 10월)

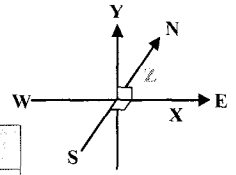
■ 주요 자기장 차폐시설 설치 자료:



<한빛 장치에서 오는 자기장의 정밀 측정작업 (2003. 4. 10)>

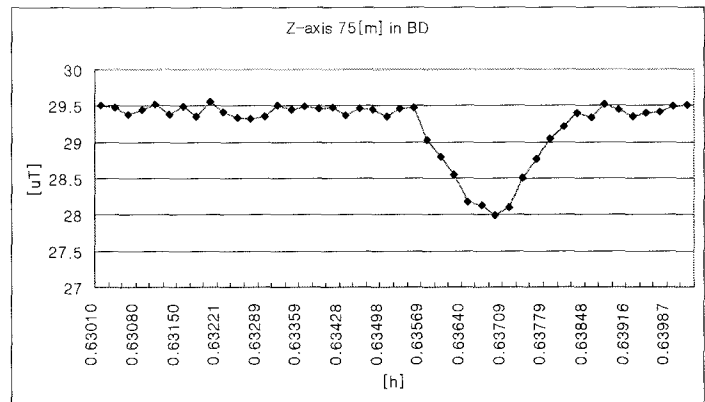
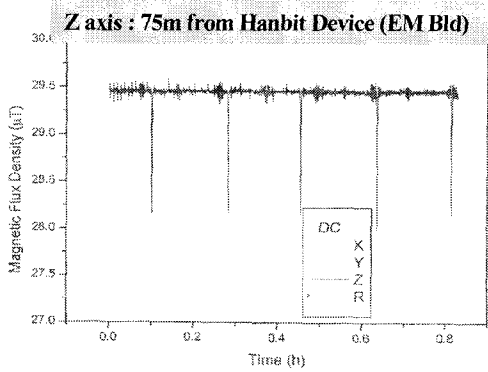


<NMR 장비에서 오는 자기장의 정밀 측정 작업 (2003. 4. 23)>

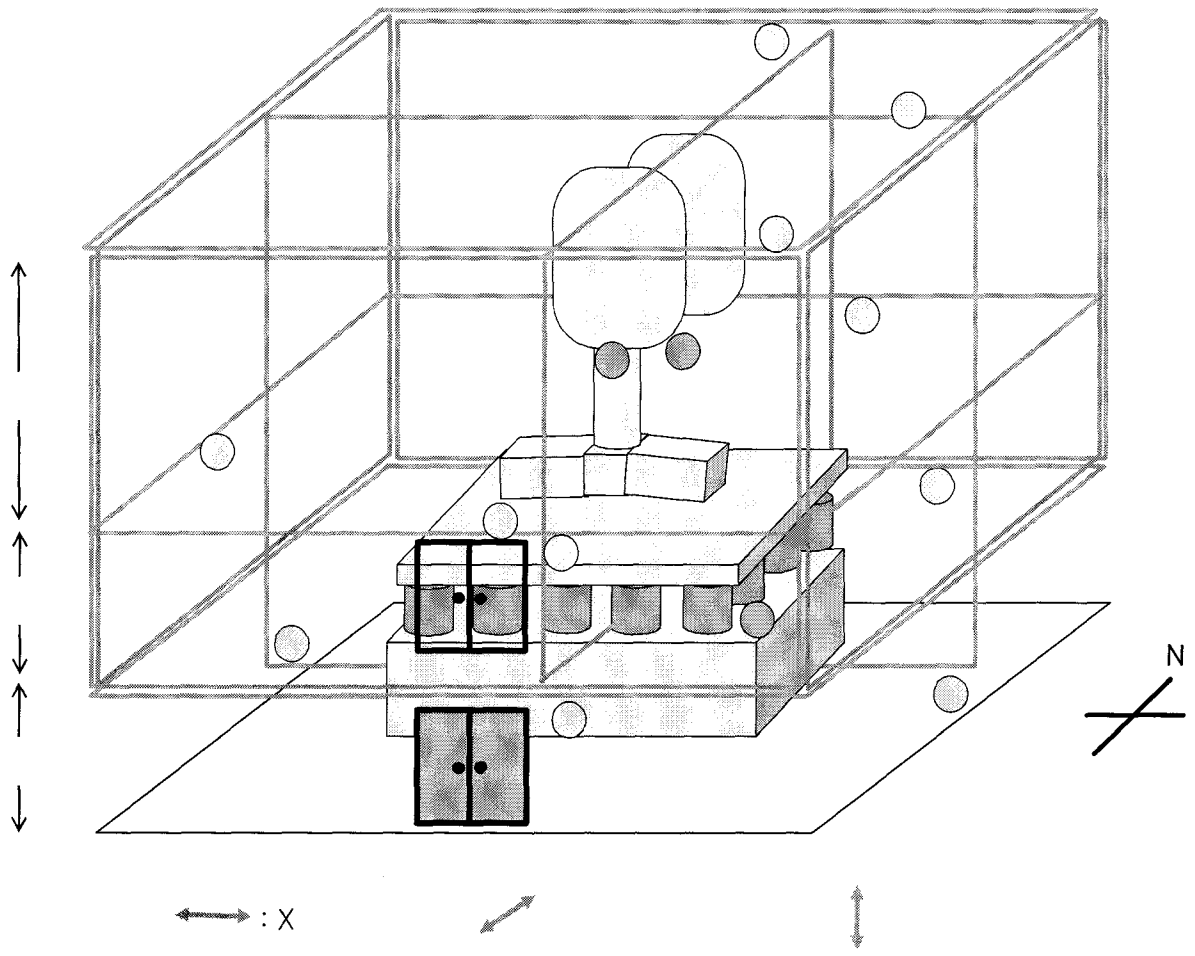


0.1 μT = 1 mG

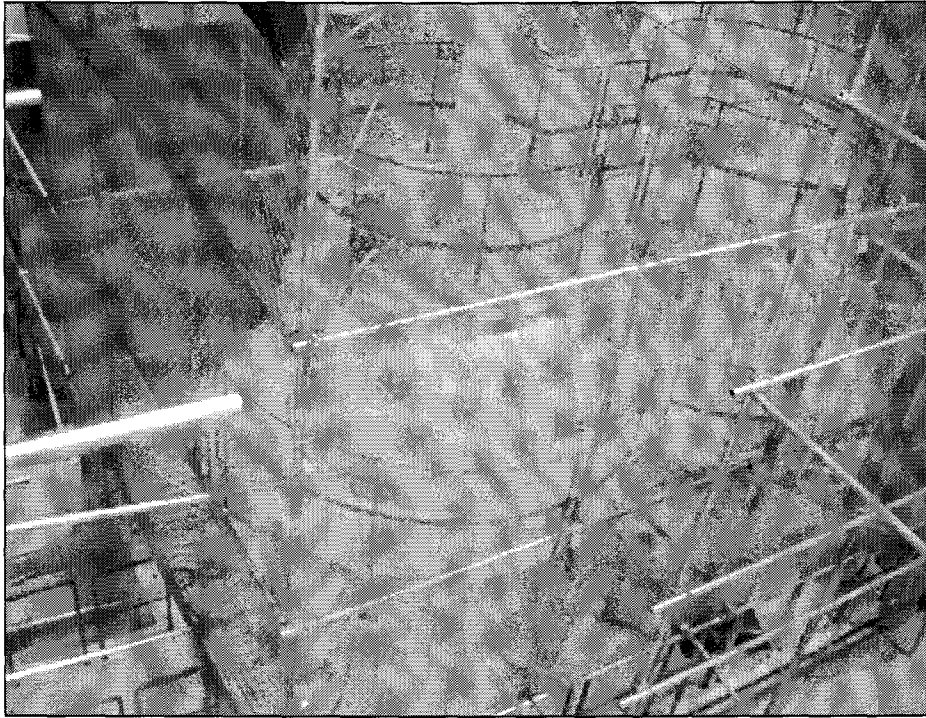
거리(m)	Hanbit (μT)					극한물성 - 9T (μT)					NMR 600 (μT)				
	A	DC				AC	DC				A	DC			
		C	X	Y	Z(m)		Z(c)	X	Y	Z		R	C	X	Y
10											*	*	*	*	*
20		3.275	4.505	32.9	46.38	0.15	*	0.14	0.19						
30											*	*	*	*	*
40		1.11	0.255	5.023	6.18	0.0309	*	*	*	*					
60		0.37	0.214	1.64	1.85	0.0091	*	*	*	*					
75(전원동)		0.105	0.179	1.302	0.92										
100		**	**	0.439	0.40										
120		**	**	0.28	0.23										



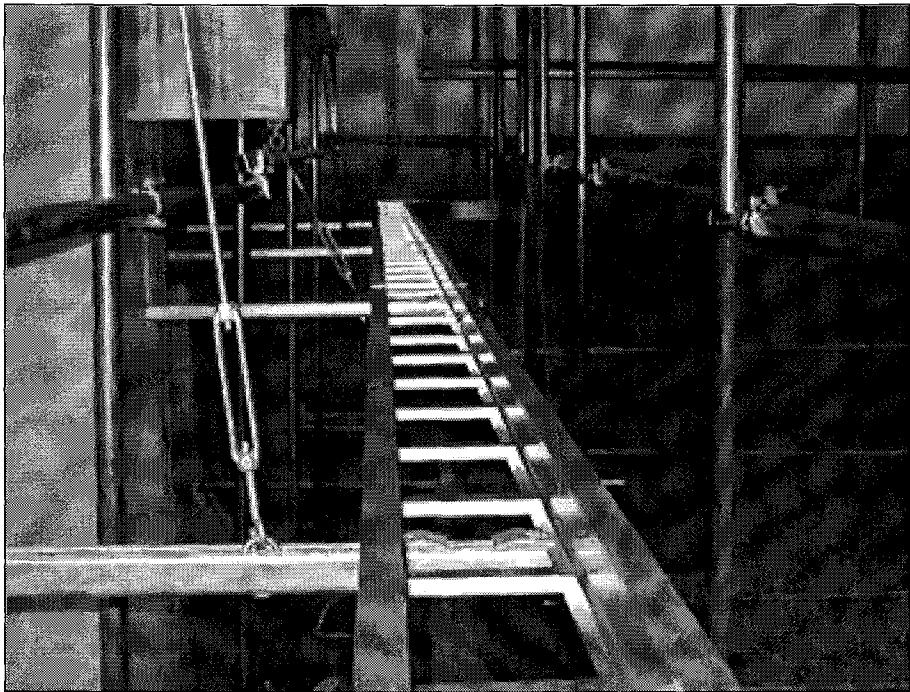
<KBSI 장비의 정밀 자기장 측정 결과 자료>



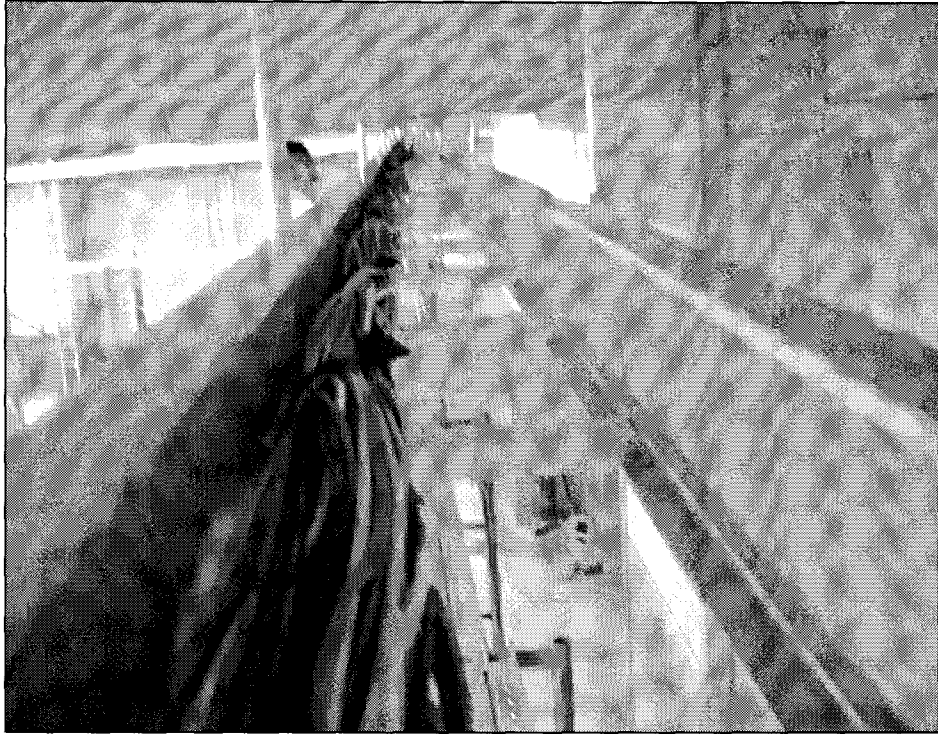
<자기장 차폐장치 모식도 (3-Axis Helmholtz Coil)>



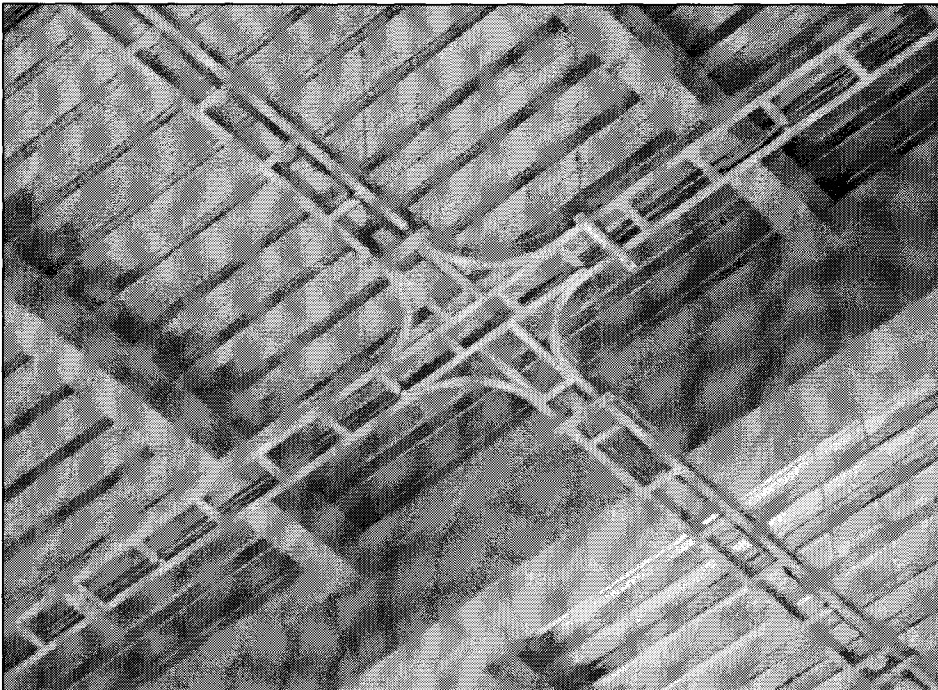
<장비 보호 및 비계 설치 작업 (2003. 7. 27)>



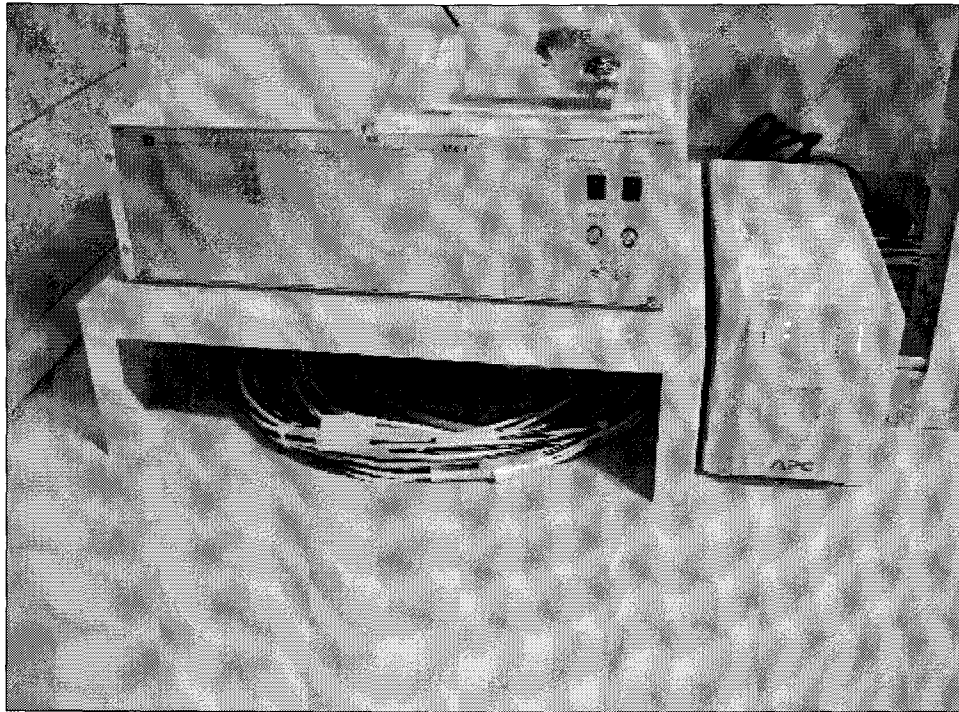
<Cable Tray 설치 작업 (2003. 8. 4)>



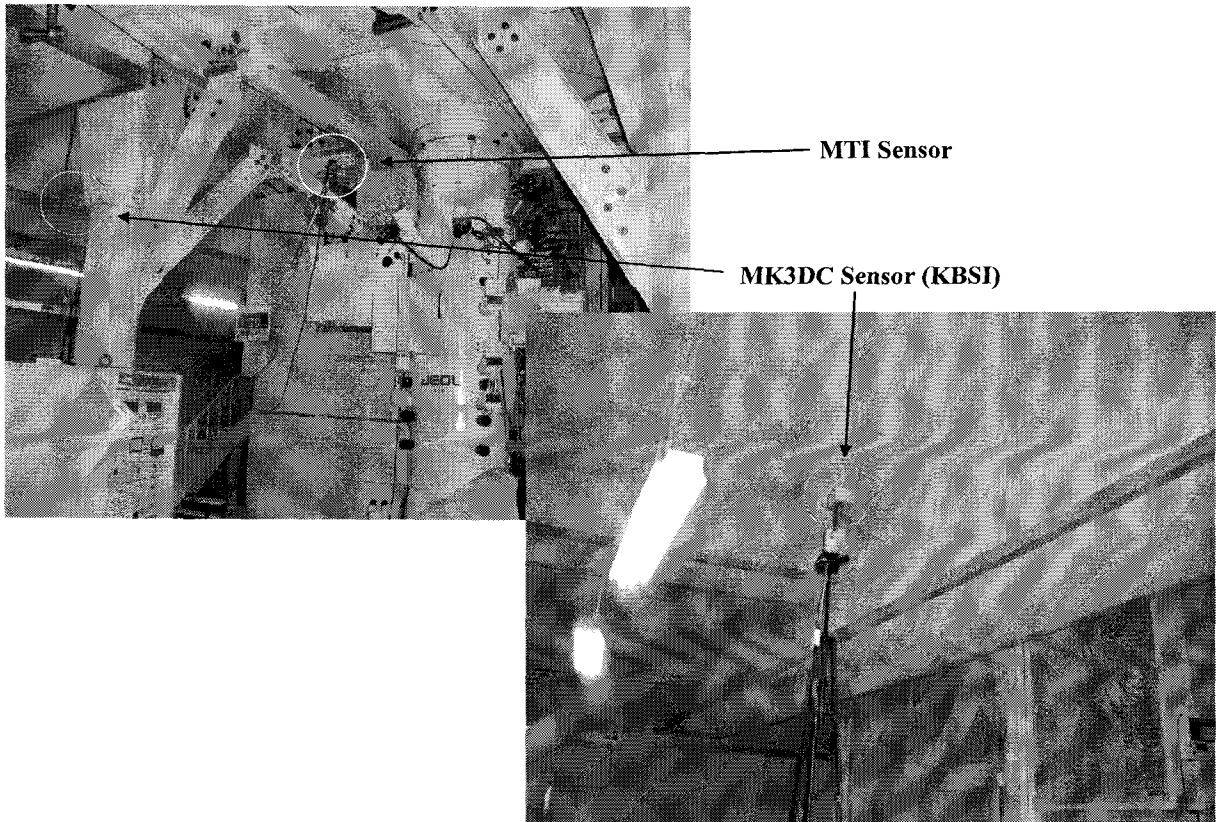
<Cable 설치 작업, EM실 1층 (2003. 8. 14)>



<Cable 설치 작업, EM실 2층 (2003. 8. 15)>



<자기장 차폐장치를 제어하는 Controller, MK3DC>



<외부 자기장을 감지하는 Sensor의 설치 및 위치 조정>

(첨부 7)

초고전압 투과전자현미경 관련
해외 학술정보 자료

1. 원자분해능 및 고분해능 활용분야

No.	Author	Year	Index	Subject	Journal	Vol	Page
1	Seidman, D.N., Current, M.I., Pramanik, D., Ching-Yeu, W.	1982	AR	Atomic resolution observations of the point defect structure of depleted zones in ion-irradiated metals	Journal of nuclear materials	108/109	67-68
2	Tsuno, K., Honda, T.	1983	AR	MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION AND OPTICAL PROPERTIES OF ASYMMETRICAL OBJECTIVE LENSES FOR AN ATOMIC RESOLUTION HIGH VOLTAGE ELECTRON MICROSCOPE	Optik	64(4)	367-378
3	Furuta, T., Sakaki, H., Ichinose, H., Ishida, Y., Sone, M., Onoe, M.	1984	AR	STRUCTURAL EVALUATION OF GaAs/AlGaAs HETEROINTERFACES BY ATOMIC-RESOLUTION ELECTRON MICROGRAPH WITH CLEAR CONTRAST	Japanese journal of applied physics Part 2, Letters	23(5)	265-267
4	Iijima, S.	1984	AR	ULTRA-FINE SPHERICAL PARTICLES OF gamma -ALUMINA: ELECTRON MICROSCOPY OF CRYSTAL STRUCTURE AND SURFACE MORPHOLOGY AT ATOMIC RESOLUTION	Japanese journal of applied physics Part 2, Letters	23(6)	347-350
5	Uyeda, N.	1985	AR	Direct imaging of organic molecules in crystals by high resolution electron microscopy at atomic level	Dyes and pigments : an international journal	6	115-134
6	Howe, J.M., Aaronson, H.I., Gronsky, R.	1985	AR	Atomic mechanisms of precipitate plate growth in the Al-Ag system-II. High-resolution transmission electron microscopy	Acta metallurgica	33	649-658
7	Horiuchi, S.	1985	AR	APPLICATION OF ATOMIC-RESOLUTION ELECTRON MICROSCOPY TO CERAMIC MATERIALS	American Ceramic Society bulletin	64	1590-1593
8	Hashimoto, H.	1985	AR	Achievement of ultra-high resolution by 400 kV analytical atomic-resolution electron microscopy	Ultramicroscopy	18(1/4)	19-31
9	Saxton, W.O., Smith, D.J.	1985	AR	The determination of atomic positions in high-resolution electron micrographs	Ultramicroscopy	18(1/4)	39-47
10	Smith, D.J., Camps, R.A., Freeman, L.A., O'Keefe, M.A., Saxton, W.O.,	1985	AR	Approaching atomic-resolution electron microscopy	Ultramicroscopy	18(1/4)	63-75

	Wood, G.J.						
11	Robinson, Arthur L.	1985	AR	ATOMIC-RESOLUTION TEM IMAGES OF SURFACES	Science	230 (4723)	304-306
12	Takeda, M., Hashimoto, H.	1985	AR	ATOMIC STRUCTURE OF CuAuII STUDIED BY HIGH RESOLUTION ELECTRON MICROSCOPY	Physica status solidi. A, Applied research	87(1)	141-149
13	Takeda, M., Yoshida, H., Hashimoto, H.	1985	AR	LOCAL TETRAGONALITY AND ATOMIC STRUCTURE IN Nb//3Sn SUPERCONDUCTOR STUDIED BY HIGH RESOLUTION ELECTRON MICROSCOPY	Physica status solidi. A, Applied research	87(2)	473-482
14	Wallenberg, L.R., Bovin, J.-O., Petford-Long, A.K., Smith, D.J.	1986	AR	Atomic-resolution study of structural rearrangements in small platinum crystals	Ultramicroscopy	20(1/2)	71-75
15	Merkle, K.L., Smith, D.J.	1987	AR	Atomic resolution electron microscopy of NiO grain boundaries	Ultramicroscopy	22(1/4)	57-70
16	Hovmoller, S., Wang, D.N., Zou, X., Vallet-Regi, M., Galvet, J.M.G.	1988	AR	Crystallographic image processing and phase extension to reach atomic resolution	Ultramicroscopy	26(4)	416-417
17	Glaser, R.M., Tong, L., Kim, S.-H.	1989	AR	Three-dimensional reconstructions from incomplete data: Interpretability of density maps at "atomic" resolution	Ultramicroscopy	27(93)	307-318
18	Boothroyd, C.B., Baxter, C.S., Bithell, E.G., Hytch, M.J., Ross, F.M., Sato, K., Stobbs, W.M.	1989	AR	The determination of the structure and composition at interfaces to atomic resolution	Ultramicroscopy	29(1/4)	18-30
19	Cochrane, H.D., Hutchison, J.L., White, D.	1989	AR	Surface studies of catalytic ceria using atomic-resolution tem	Ultramicroscopy	31(1)	138-142
20	Bullough, P.A.	1990	AR	Imaging of protein molecules-Towards atomic resolution	Electron Microscopy Reviews	3	249-267
21	Lee, Y.-S.	1990	AR	High-resolution electron microscopic investigation of crystalline cholesterol monohydrate in human atheroma at the atomic level	Micron and microscopica acta	21(1)	1-12
22	Henderson, R.	1990	AR	Atomic Resolution 3D Structures of Biological Molecules by Electron Microscopy	Electron		183-197
23	Hutchinson, J.L.	1991	AR	High resolution electron microscopy: An introduction to atomic imaging and its applications in materials science	Micron and microscopica acta	22(3)	290
24	Dorset, D.L., Tivol, W.F., Turner, J.N.	1991	AR	Electron crystallography at atomic resolution: ab initio structure analysis of copper perchlorophthalocyanine	Ultramicroscopy	38(1)	41-45
25	Barry, J. C.	1992	AR	Image-Matching as a Means of Atomic Structure Evaluation in High Resolution Transmission Electron Microscopy	Scanning microscopy. Supplement	6	209

26	Downing, K. H.	1992	AR	Three-Dimensional Crystallographic Reconstruction for Atomic Resolution	Scanning microscopy. Supplement	6	43-
27	Pennycook, S.J., Jesson, D.E.	1992	AR	Atomic resolution Z-contrast imaging of interfaces	Acta metallurgica et materialia	40	S149-S159
28	Yoshida, K., Yamada, T.	1992	AR	Atomic mixing of Bi and Mn by vacuum depositions and structure investigation of its products by high-resolution electron microscopy	Applied surface science	60	391-396
29	Endo, T., Yamada, H., Sumomogi, T., Kuwahara, K., Morita, S., Kino, T.	1992	AR	Atomic-resolution images of structural defects on microcrystalline graphite	Ultramicroscopy	42/44 pt.A	674-678
30	Thoma, S., Riechert, H., Mitwalsky, A., Oppolzer, H.	1992	AR	Determination of composition profile and atomic-scale roughness of GaAs/AlGaAs interfaces by high-resolution transmission electron microscopy	Journal of crystal growth	123(1/2)	287-305
31	Lee, Y.-S., Chen, H.-C., Lai, S.-M.	1992	AR	High Resolution Electron Microscopic Investigation of Atomic Structural Images in Human Atherosclerotic Plaque	Proceedings of the National Science Council, Republic of China. Part B	16(4)	169-
32	Merkle, K.L.	1992	AR	Quantification of atomic-scale grain boundary parameters by high-resolution electron microscopy	Ultramicroscopy	40(3)	281-290
33	Lang, H.P., Ramseyer, J.P., Brodbeck, D., Frey, T., Karpinski, J.	1992	AR	Atomic resolution of single-crystalline $Y_2Ba_4Cu_6+nO_{14+n}$ ($n=0, 1, 2$) and laser-ablated thin film $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ HT	Ultramicroscopy	42/44 pt. A	715-720
34	Downing, K. H.	1992	AR	Three-Dimensional Crystallographic Reconstruction for Atomic Resolution	Signal and image processing in microscopy and microanalysis		43-52
35	Pennycook, S. J., Browning, N. D., Jesson, D. E., Chisholm, M. F.	1993	AR	Atomic-Resolution Imaging and Spectroscopy of Semiconductor Interfaces	Applied physics. A, Solids and surfaces	57	385
36	Vergasov, V. L., Shkorniyakov, S. M.	1993	AR	Circular Images of Atomic Chains in High-Resolution Electron Microscopy	Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics	57	255-
37	Li, Z. G., Wan, H., Liu, J., Tsoukatos, A.	1993	AR	Microstructural investigation of granular Ag-Fe and Ag-Co thin films by atomic resolution and nanochemical analysis electron microscopy	Applied physics letters	63	3011-
38	Anazawa, K.	1993	AR	High-resolution electron microscope	Journal of	156/158	196-200

	Hirotsu, Y., Ichinose, Y.			observation of medium-range atomic ordering in amorphous alloy	non-crystalline solids		
39	Browning, N. D., Chisholm, M. F., Pennycook, S. J.	1993	AR	Atomic-resolution chemical analysis using a scanning transmission electron microscope	Nature	366 (6451)	143-
40	Lee, Y.-S.	1993	AR	Morphogenesis of Calcification in Porcine Bioprosthesis: Insight from High Resolution Electron Microscopic Investigation at Molecular and Atomic Resolution	Journal of electron microscopy	42(3)	156
41	Zhou, Z.H., Chiu, W.	1993	AR	Prospects for using an IVEM with a FEG for imaging macromolecules towards atomic resolution	Ultramicroscopy	49(1/4)	407-416
42	McGibbon, M. M., Browning, N. D., Chisholm, M. F., McGibbon, A. J.	1993	AR	Atomic-resolution characterization of an SrTiO ₃ grain boundary in the STEM	Joint Annual meeting		972-973
43	Phillipp, F., Hoeschen, R., Osaki, M., Ruehle, M.?	1994	AR	A New High-Voltage Atomic Resolution Microscope Approaching 1 Angstrom Point Resolution	Vol 1; Interdisciplinary developments and tools : Electron microscopy 1994	1	231-232
44	Von Harrach, H. S., Krause, D.	1994	AR	Maximum Entropy Reconstruction of Atomic Resolution STEM Images	Vol 1; Interdisciplinary developments and tools : Electron microscopy 1994	1	479-480
45	Browning, N. D., Chisholm, M. F., Pennycook, S. J.	1994	AR	Atomic Resolution Chemical Analysis	Advanced materials	4	328-
46	McGibbon, A. J., Pennycook, S. J., Wasilewski, Z.	1994	AR	Structural Characterization of Semiconductor Heterostructures by Atomic Resolution Z-Contrast Imaging at 300KV	Materials Research Society symposia proceedings	326	299-
47	Batson, P. E.	1994	AR	Atomic Resolution Electronic Structure Using Spatially Resolved Electron Energy Loss Spectroscopy	Materials Research Society symposia proceedings	332	275-
48	Browning, N. D., Chisholm, M. F., Pennycook, S. J.	1994	AR	Atomic-Resolution Chemical Analysis at 100 kV in the Scanning Transmission Electron Microscope	Materials Research Society symposia proceedings	332	297-
49	Smith, D. J., McCartney, M. R.	1994	AR	Trends in Atomic Resolution Electron Microscopy	Materials Research Society symposia proceedings	332	43-
50	O'Keefe, M. A., Downing, K. H., Wenk, H.-R., Hu, M.	1994	AR	3-D Imaging of Crystals at Atomic Resolution	Materials Research Society symposia proceedings	332	563-
51	Phillipp, F., Schaible, D., Jin-Philipp, N. Y.	1994	AR	Atomic Resolution Electron Microscopy of III-V Semiconductors	Vol 2A; Applications in materials sciences : Electron microscopy 1994	2A	593-594

52	Kizuka, T., Ishida, Y., .Tanaka, N.	1994	AR	Nanometer-Sized Electron Beam Processing and the In-Situ Dynamic Atomic Observation in High-Resolution Transmission Electron Microscope	Vol 2B: Applications in materials sciences : Electron microscopy 1994	2B	1303- 1304
53	Bleloch, A.L., Castell, M.R., Howie, A., Walsh, C.A.	1994	AR	Atomic and electronic Z-contrast effects in high-resolution imaging	Ultramicroscopy	54(2/4)	107-115
54	Sukedai, E., Liu, W., Awaji, M., Horiuchi, T.	1994	AR	Investigation of atomic structure of ω -phase crystals in Ti-Mo alloys using high-resolution electron microscopy	Ultramicroscopy	54(2/4)	192-200
55	Endoh, H., Hashimoto, H.	1994	AR	Atomic resolution electron microscope images formed by SiL ₃ -ionization electrons	Ultramicroscopy,	54(2/4)	351-356
56	Phillipp, F., Hoschen, R., Osaki, M., Mobus, G., Ruhle, M.	1994	AR	New high-voltage atomic resolution microscope approaching 1 Å point resolution installed in Stuttgart	Ultramicroscopy	56(1/3)	1-10
57	Chen, X., Frank, E. R., Hamers, R. J.	1994	AR	An atomic-resolution cryogenic scanning tunneling microscope	Review of scientific instruments	65(11)	3373-
58	Andersen, J.E.T., Moller, P.	1994	AR	Analysis and calibration of in situ scanning tunnelling microscopy images with atomic resolution influenced by surface drift phenomena	Surface & coatings technology	67(3)	213-220
59	Smith, D. J., McCartney, M. R.	1994	AR	Trends in Atomic Resolution Electron Microscopy	Determining nanoscale physical properties of materials by microscopy and spectroscopy		43-54
60	O'Keefe, M. A., Downing, K. H., Wenk, H.-R., Meisheng, H.	1994	AR	3-D Imaging of Crystals at Atomic Resolution	Determining nanoscale physical properties of materials by microscopy and spectroscopy		563-572
61	Dauter, Z., Lamzin, V.S., Wilson, K.S.	1995	AR	Proteins at atomic resolution	Current opinion in structural biology	5	784-790
62	Van Langeveld, A.D., Stockmann, R.M., Moulijn, J.A., Zandbergen, H.W.	1995	AR	Investigation of MoS ₂ on γ -Al ₂ O ₃ by HREM with atomic resolution	Journal of molecular catalysis A, Chemical	102(3)	147-161
63	Glas, F.	1995	AR	The consequences of the atomic size effect in quantitative high resolution electron microscopy	Ultramicroscopy	60(1)	91-102
64	Indenbom, V. L.,	1995	AR	How the atomic structure of a crystal can be	JETP letters	62(3)	268

	Tochilin, S. B.			seen without a high-resolution microscope			
65	Kizuka, T., Tanaka, N.	1995	AR	Nanometre scale electron beam processing and in situ atomic observation of vacuum-deposited MgO films in high-resolution transmission electron microscopy	Philosophical magazine. A	71(3)	631
66	Pennycook, S.J., Jesson, D.E., Browning, N.D.	1995	AR	Atomic-resolution electron energy loss spectroscopy in crystalline solids	Nuclear instruments & methods in physics research. Section B	96(3/4)	575-582
67	Phillipp, F.	1996	AR	Atomic Resolution with a Megavolt Electron Microscope	Festkörperprobleme	35	257-276
68	Lenz, F.	1996	AR	Towards Atomic Resolution	Advances in imaging and electron physics	96	791-804
69	Spence, J. C. H., Kolar, H. R., Huang, Y., Alexander, H.	1996	AR	Dislocation Kink Motion - Ab-Initio Calculations and Atomic Resolution Movies	Materials Research Society symposia proceedings	408	261-270
70	Shamsuzzoha, M., Vazquez, I., Deymier, P. A., Smith, D. J.	1996	AR	The Atomic Structure of a $\Sigma=5$ [001]/(310) Grain-Boundary in an Al-5% Mg Alloy by High-Resolution Electron Microscopy	Interface science	3(3)	227-234
71	Batson, P. E.	1996	AR	Atomic Resolution Electronic Structure in Silicon-Based Semiconductors	Journal of electron microscopy	45(1)	51-58
72	P. D. Nellist and S. J. Pennycook	1996	AR	Direct Imaging of the Atomic Configuration of Ultradispersed Catalysts	Science	274	413-415
73	Dauter, Z., Lamzin, V.S., Wilson, K.S.	1997	AR	The benefits of atomic resolution	Current opinion in structural biology	7	681-688
74	Lakner, H., Mendorf, C., Bollig, B., Prost, W., Tegude, F.-J.	1997	AR	Determination of interface composition in III-V heterojunction devices (HBT and RTD) with atomic resolution using STEM techniques	Materials science & engineering B	44	52-56
75	Nellist, P. D., Xin, Y., Pennycook, S. J.	1997	AR	Direct structure determination by atomic-resolution incoherent STEM imaging	Institute of Physics conference series	153	109-112
76	Nellist, P. D., Pennycook, S. J.	1997	AR	Atomic resolution Z-contrast imaging of ultradispersed catalysts	Institute of Physics conference series	153	399-402
77	Bursill, L. A.	1997	AR	Atomic Resolution Imaging of Ferroelectric Domains	Ferroelectrics	191	129-134
78	Inkson, B. J., Moebus, G., Ruehle, M.	1997	AR	Atomic-Resolution Electron Microscopy of TiB ₂ Precipitates in an Industrial TiAl Alloy	Materials Research Society symposia proceedings	466	151-156
79	Gu, H., Ceh, M.	1997	AR	Quantitative EELS Profiling of Planar Faults in CaTiO ₃ Perovskite Approaching Atomic Resolution: A Comparison with Z-Contrast Imaging	Materials Research Society symposia proceedings	466	253-258
80	Pennycook, S. J.,	1997	AR	Determination of Atomic Structure at Surfaces	Materials Research	466	3-12

	Nellist, P. D., Chisholm, M. F., Browning, N. D.			and Interfaces by High-Resolution STEM	Society symposia proceedings		
81	Dre[slzig]en, J., Hoffschulz, H., Stahl, H., Gu[uml ltherodt, G.	1997	AR	Preparation of BiSrCaCuO thin films by atomic layer-by-layer molecular-beam-epitaxy and high-resolution transmission electron microscopy analysis of the film/substrate interface and of growth defects	Journal of alloys and compounds	251(1/2)	44-47
82	Moebus, G., Phillipp, F., Gemming, T., Schweinfest, R., Ruehle, M.	1997	AR	Quantitative diffractometry at 0.1 nm resolution for testing lenses and recording media of a high-voltage atomic resolution microscope	Journal of electron microscopy	46(5)	381-396
83	Kizuka, T., Tanaka, N.	1997	AR	Atomic process of epitaxial growth of gold on magnesium oxide studied by cross-sectional time-resolved high-resolution electron microscopy	Physical review B	56(16)	R10 079- R10 082
84	Smith, David J	1997	AR	The realization of atomic resolution with the electron microscope	Reports on progress in physics	60(12)	1513- 1580
85	Indenbom, V. L.	1997	AR	Observation of the atomic structure of a crystal without a high-resolution electron microscope	JETP letters	66(6)	448-453
86	Cowley, J.M., Spence, J.C.H., Smirnov, V.V.	1997	AR	The enhancement of electron microscope resolution by use of atomic focusers	Ultramicroscopy	68(2)	135-148
87	Kizuka, T., Tanaka, N.	1997	AR	Atomic desorption process in nanometre-scale electron-beam drilling of MgO in high-resolution transmission electron microscopy	Philosophical magazine letters	76(4)	289-298
88	Bacia, M., Morillo, J., Penisson, J. M., Pontikis, V.	1997	AR	Atomic structure of the $\Sigma=5$, (210) and (310), [001] tilt axis grain boundaries in Mo: a joint study by computer simulation and high-resolution electron microscopy	Philosophical magazine. A	76(5)	945-964
89	Karnthaler, H. P., Waitz, T., Mingler, B., Rentenberger, C., Heinrich, H.	1997	AR	Atomic Resolution of Metals and Alloys using TEM Methods	Journal of computer-assisted microscopy	9(1)	9-12
90	Pennycook, S. J., Nellist, P. D., Chisholm, M. F., Browning, N. D.	1997	AR	Determination of Atomic Structure at Surfaces and Interfaces by High-Resolution STEM	Atomic resolution microscopy of surfaces and interfaces		37692
91	Inkson, B. J., Moebus, G., Ruehle, M.	1997	AR	Atomic-Resolution Electron Microscopy of TiB ₂ Precipitates in an Industrial TiAl Alloy	Atomic resolution microscopy of surfaces and interfaces		151-156
92	Tsong, T. T.	1997	AR	Studies of Atomic and Molecular Dynamics and Modifications of Surfaces with Atomic Resolution Microscopy	Asia Pacific physics conference		53-57
93	K. Suenaga, C.	1997	AR	Synthesis of Nanoparticles and Nanotubes with	Science	278	653-655

	Colliex, N. Demoncey, A. Loiseau, H. Pascard, and F. Willaime			Well-Separated Layers of Boron Nitride and Carbon			
94	Neubauer, B., Rosenauer, A., Gerthsen, D., Ambacher, O., Stutzmann, M.	1998	AR	Analysis of composition fluctuations on an atomic scale in Al _{0.25} Ga _{0.75} N by high-resolution transmission electron microscopy	Applied physics letters	73	930-932
95	Xin, Y., Pennycook, S. J., Browning, N. D., Nellist, P. D., Sivananthan, S.	1998	AR	Direct Observations of Atomic Structures of Defects in GaN by High Resolution Z-contrast Stem	Materials Research Society symposia proceedings	482	781-786
96	Henderson, R.	1998	AR	Atomic Resolution 3D Structures of Biological Molecules by Electron Microscopy	BOOK-INSTITUTE OF MATERIALS	687	183-197
97	Hashimoto, H., Endoh, H., Hashimoto, M., Luo, Z. P., Song, M. H.	1998	AR	Pseudo-aberration free focus condition for atomic resolution electron microscope images	Micron	29(2/3)	113-122
98	James, E. M., Browning, N. D., Nicholls, A. W., Kawasaki, M., Xin, E., Stemmer, S.	1998	AR	Demonstration of atomic resolution Z-contrast imaging by a JEOL JEM-2010F scanning transmission electron microscope	Journal of electron microscopy	47(6)	561-574
99	Hu, J. J., Tanaka, N.	1998	AR	Direct atomic observation of Ge/(001)Si interfaces by image processing methods in high-resolution electron microscopy	Journal of electron microscopy	47(6)	581-590
100	Kret, S., Delamarre, C., Laval, J. Y., Dubon, A.?	1998	AR	Atomic-scale mapping of local lattice distortions in highly strained coherent islands of In _x Ga _{1-x} As/GaAs by high-resolution electron microscopy and image processing	Philosophical magazine letters	77(5)	249-256
101	Banfield, J. F., Murakami, T.	1998	AR	Atomic-resolution transmission electron microscope evidence for the mechanism by which chlorite weathers to 1:1 semi-regular chlorite-vermiculite	The American mineralogist	83(3/4)	348-358
102	Phillipp, F.	1998	AR	High-voltage atomic resolution microscopy	Electron microscopy		629-630
103	Kizuka, T., Tanaka, N., Deguchi, S., Naruse, M.	1998	AR	High-resolution transmission electron microscopy using a piezo-driving specimen holder for atomic mechanics - I. Method and resolutions	Electron microscopy		629-630
104	Kizuka, T., Tanaka, N., Deguchi, S.	1998	AR	High-resolution transmission electron microscopy using a piezo-driving specimen holder for atomic mechanics - II. Atomistic	Electron microscopy		629-630

	Naruse, M.			contact in gold			
105	Kizuka, T., Tanaka, N., Deguchi, S., Naruse, M.	1998	AR	High-resolution transmission electron microscopy using a piezo-driving specimen holder for atomic mechanics - III. Contact and non contact surface scanning	Electron microscopy		629-630
106	Kizuka, T., Tanaka, N., Deguchi, S., Naruse, M.	1998	AR	High-resolution transmission electron microscopy using a piezo-driving specimen holder for atomic mechanics - IV. Deformation in gold	Electron microscopy		629-630
107	Kizuka, T., Mizutani, M., Tanaka, N., Deguchi, S.	1998	AR	High-resolution transmission electron microscopy using a piezo-driving specimen holder for atomic mechanics - V. Grain boundary sliding	Electron microscopy		629-630
108	Kizuka, T., Hosoki, K., Tanaka, N., Deguchi, S.	1998	AR	High-resolution transmission electron microscopy using a piezo-driving specimen holder for atomic mechanics - VI. Si/Si bonding	Electron microscopy		629-630
109	Kizuka, T., Hirahara, K., Tanaka, N., Deguchi, S.	1998	AR	High-resolution transmission electron microscopy using a piezo-driving specimen holder for atomic mechanics - VII. Fatigue of carbon nanotube	Electron microscopy ⁰		629-630
110	Liu, Y.	1998	AR	Uncertainty of atomic positions and resolution extension of an HRTEM micrograph	Electron microscopy		629-630
111	Teri Wang Odom, Jin-Lin Huang, Philip Kim, Charles M. Lieber	1998	AR	Atomic structure and electronic properties of single-walled carbon nanotubes	Nature	391	62-64
112	Gai, P. L.	1999	AR	Probing selective oxidation catalysis under reaction conditions to atomic scale environmental high resolution electron microscopy	Current opinion in solid state & materials science	4	63-73
113	Chaix, J.-M.	1999	AR	Atomic positions from high resolution transmission electron microscopy images of grain boundaries	Acta stereologica	17	321-326
114	Etheridge, J.	1999	AR	High-resolution electron-microscope images of crystals with correlated atomic displacements	Acta crystallographica. Section A	55	143-159
115	Rosenauer, A., Gerthsen, D.	1999	AR	Atomic Scale Strain and Composition Evaluation from High-Resolution Transmission Electron Microscopy Images	Advances in imaging and electron physics	107	121-231
116	James, E. M., Browning, N. D., Xin, Y., Reno, J. L., Baca, A. G.	1999	AR	Atomic resolution microscopy of semiconductor defects and interfaces	Institute of Physics conference series	164	37939
117	Hytch, M.J., Vermaut, P., Malarria, J., Portier, R.	1999	AR	Study of atomic displacement fields in shape memory alloys by high-resolution electron microscopy	Materials science & engineering. properties, microstructure and processing. A	273	266-270

118	Abe, E., Tsai, A. P.	1999	AR	The Atomic Structure of the Zn-Mg-Rare-Earth Quasicrystals Studied by High-Resolution Electron Microscopy	Materials Research Society symposia proceedings	553	123-128
119	Atamny, F., Spillecke, O., Schlitzouml;gl, R.	1999	AR	On the STM imaging contrast of graphite: towards a "true" atomic resolution	Physical chemistry chemical physics : PCCP	1(17)	4113-4118
120	Batson, P. E.	1999	AR	Atomic resolution EELS analysis of a misfit dislocation at a GeSi/Si interface	Physica. B, Condensed matter	273/274	593-597
121	Campbell, G. H., King, W. E., Foiles, S. M., Cohen, D.	1999	AR	Determination of Grain Boundary Atomic Structure Using Quantitative High Resolution Electron Microscopy	Materials science forum	294/296	293-296
122	Oku, T., Sun, Q., Ding-Sheng, W., Wang, Q., Kawazoe, Y., Schmid, G., Suganuma, K.	1999	AR	Atomic Structure of Pd-Intercalated Graphite by High-Resolution Electron Microscopy and First Principles Calculations	Materials transactions, JIM	40(11)	1213-1218
123	Ichinose, H., Sawada, H., Takuma, E., Osaki, M.	1999	AR	Atomic resolution HVEM and environmental noise	Journal of electron microscopy	48(6)	887-892
124	James, E.M., Browning, N.D.	1999	AR	Practical aspects of atomic resolution imaging and analysis in STEM - resolution and thickness effects	Ultramicroscopy	78(1/4)	125-139
125	Menon, N.K., Yuan, J.	1999	AR	Towards atomic resolution EELS of anisotropic materials	Ultramicroscopy	78(1/4)	185-205
126	Oku, T., Bovin, J. O.	1999	AR	Atomic disordering in YB56 detected by high-resolution electron microscopy with residual indices	Philosophical magazine. A	79(4)	821-834
127	Yan, Y., Xu, Z., Lu, X., Viehland, D., Al-Jassim, M., Pennycook, S.	1999	AR	Structural Determination Of A Novel Defect In SrBi2Ta2O9 Using Atomic-Resolution Z-Contrast Imaging	Microscopy and microanalysis	v.5 suppl.2	112-113
128	Jakana, J., Chiu, W.	1999	AR	400 KV Electron Cryo-Microscopic Imaging Of Large Icosahedral Viruses Towards Atomic Resolution	Microscopy and microanalysis	v.5 suppl.2	186-187
129	Yan, Y., Pennycook, S.	1999	AR	Atomic-Resolution Z-Contrast Imaging Of Decagonal Quasicrystals: A Nucleation And Growth Mechanism	Microscopy and microanalysis	v.5 suppl.2	192-193
130	Abe, E., Tsai, A. P.	1999	AR	The Atomic Structure of the Zn-Mg-Rare-Earth Quasicrystals Studied by High-Resolution Electron Microscopy	Quasicrystals		123-128
131	Campbell, G. H., King, W. E., Foiles, S. M., Cohen, D.	1999	AR	Determination of Grain Boundary Atomic Structure Using Quantitative High Resolution Electron Microscopy	Intergranular and interphase boundaries in materials		293-296

132	Hashimoto, H.	1999	AR	Pseudo-aberration-free focusing imaging method for atomic resolution electron microscopy of crystals	Topics in electron diffraction and microscopy of materials		42-64
133	Ichinose, H., Sawada, H., Takuma, E., Osaki, M.	1999	AR	Atomic resolution HVEM and environmental noise	Hybrid analyses for functional nanostructure		887-892
134	D. A. Muller, T. Sorsch, S. Moccio, F. H. Baumann, K. Evans-Lutterodt, G. Timp	1999	AR	The electronic structure at the atomic scale of ultrathin gate oxides	Nature	399	758-761
135	Y. Zhang, T. Ichihashi, E. Landree, F. Nihey, and S. Iijima	1999	AR	Heterostructures of Single-Walled Carbon Nanotubes and Carbide Nanorods	Science	285	1719-1722
136	Svetlana Mintova, Norman H. Olson, Valentin Valtchev, and Thomas Bein	1999	AR	Mechanism of Zeolite A Nanocrystal Growth from Colloids at Room Temperature	Science	283	958-960
137	Tsukihara, T., Aoyama, H.	2000	AR	Membrane protein assemblies - towards atomic resolution analysis	Current opinion in structural biology	10	208-212
138	Batson, P. E.	2000	AR	Atomic resolution analytical microscopy	IBM journal of research and development	44	477-488
139	Stirman, J. N., Ponce, F. A., Pavlovska, A., Tsong, I. S., Smith, D. J.	2000	AR	Polarity determination and atomic arrangements at a GaN/SiC interface using high-resolution image matching	Applied physics letters	76	822-824
140	Ottensmeyer, F. P., Davis, J. A., Heng, Y. M., Barfels, M. M. G.	2000	AR	Imaging of molecular and atomic distributions in biological specimens at high spatial resolution	Institute of Physics conference series	165	181-182
141	Browning, N. D., James, E. M., Xin, Y., Arslan, I.	2000	AR	Investigating the electronic structure of defects and interfaces using atomic resolution EELS	Institute of Physics conference series	165	239-240
142	Pennycook, S. J., Yan, Y., Norman, A., Zhang, Y., Al-Jassim	2000	AR	Atomic-Resolution Z-Contrast Imaging and Its Application to Compositional Ordering and Segregation	Materials Research Society symposia proceedings	583	235-242
143	Schaefer, H. E., Reimann, K., Straub, W., Phillipp, F., Tanimoto, H.	2000	AR	Interface structure studies by atomic resolution electron microscopy, order-disorder phenomena and atomic diffusion in gas-phase synthesized nanocrystalline solids	Materials science & engineering. properties, microstructure and processing. A	*	24-33
144	Oku, T.	2000	AR	Digital high-resolution electron microscopy of atomic disordering in YB56?	Journal of electron microscopy	4991)	41-52
145	Yamazaki, T.,	2000	AR	Two-dimensional distribution of As atoms	Physical review B	61(20)	13833-

	Watanabe, K., Kikuchi, Y., Kawasaki, M., Hashimoto, I., Shiojiri, M.			doped in a Si crystal by atomic-resolution high-angle annular dark field STEM			13839
146	Ikarashi, N., Watanabe, K., Miyamoto, Y.	2000	AR	High-resolution transmission electron microscopy of an atomic structure at a Si(001) oxidation front	Physical review B	62(23)	15989- 15995
147	Puglisi, J. D., Blanchard, S. C., Green, R.	2000	AR	Approaching translation at atomic resolution	Nature structural biology	7(10)	855-861
148	Duparc, O. H., Poulat, S., Larere, A., Thibault, J., Priester, L.	2000	AR	High-resolution transmission electron microscopy observations and atomic simulations of the structures of exact and near $\Sigma = 11$, {332} tilt grain boundaries in nickel	Philosophical magazine. A	80(4)	853-870
149	Navidi-Kasmai, T., Kohl, H.	2000	AR	Computation of contrasts in atomic resolution electron spectroscopic images of planar defects in crystalline specimens	Ultramicroscopy	81(3/4)	223-233
150	Xin, Y., Wallis, D. J., Browning, N. D., Sivananthan, S., Pennycook, S. J.	2000	AR	Interfaces and defects in opto-electronic semiconductor films studied by atomic resolution STEM	Microscopy and microanalysis	v.3 suppl.2	461-462
151	Batson, P. E., Domenicucci, A. G., Lemoine, E.	2000	AR	Atomic resolution electronic structure in device development	Microscopy and microanalysis	v.3 suppl.2	645-646
152	Pennycook, S. J., Dickey, E. C., Wallis, D. J., Browning, N. D., Nellis, P. D.	2000	AR	Atomic resolution electron energy loss spectroscopy of interfaces	Microscopy and microanalysis	v.3 suppl.2	947-948
153	Larson, D. J., Clifton, P. H., Martens, R. L., Kelly, T. F., Cerezo, A.	2000	AR	Atomic Resolution Imaging of Thin Film Interfaces	Microscopy and microanalysis	v.6 suppl.2	1060- 1061
154	Pankhurst, D. A., Botton, G. A., Humphreys, C. J.	2000	AR	The Effect of Local Symmetry on Atomic Resolution EELS Near-Edge Structures: Predictions for Grain Boundaries in NiAl	Microscopy and microanalysis	v.6 suppl.2	186-187
155	Arslan, I., Xin, Y., James, E. M., Sivananthan, S., Browning, N. D.	2000	AR	Determination of the Electronic Structures of Screw and Edge Dislocations in GaN using Atomic Resolution EELS	Microscopy and microanalysis	v.6 suppl.2	190-191
156	Yanfa Yan, Stephen J. Pennycook	2000	AR	Alloys: Atomic structure of the quasicrystal Al ₇₂ Ni ₂₀ Co ₈	Nature	403	266-267
157	Yukihito Kondo and Kunio Takayanagi	2000	AR	Synthesis and Characterization of Helical Multi-Shell Gold Nanowires	Science	289	606-608
158	Paredes, J. I., Martinez-Alonso,	2001	AR	Triangular versus honeycomb structure in atomic-resolution STM images of graphite	Carbon	39	476-479

	A., Tascon, J. M.						
159	Iwamoto, C., Shen, X. Q., Okumura, H., Matuhata, H., Ikuhara, Y.	2001	AR	Nanometric inversion domains in conventional molecular-beam-epitaxy GaN thin films observed by atomic-resolution high-voltage electron microscopy	Applied physics letters	79	3941-3943
160	Mobus, G., Nufer, S.	2001	AR	Is atomic resolution EELS possible?	CONFERENCE SERIES--INSTITUTE OF PHYSICS	168	151-154
161	Kadavanich, A. V., Kippeny, T. C., Erwin, M. M., Pennycook, S. J.	2001	AR	Sublattice Resolution Structural and Chemical Analysis of Individual CdSe Nanocrystals Using Atomic Number Contrast Scanning Transmission Electron Microscopy and Electron Energy Loss Spectroscopy	The journal of physical chemistry. B	105(2)	361-369
162	Oku, T.	2001	AR	Direct Analysis of Atomic Structures of Advanced Ceramics by High-Resolution Electron Microscopy	JOURNAL--CERAMIC SOCIETY JAPAN	109(2)	S17-S24
163	Oku, T., Bovin, J.-O., Higashi, I., Tanaka, T., Ishizawa, Y.	2001	AR	Atomic structure of YB56 studied by digital high-resolution electron microscopy and electron diffraction	Journal of materials research	16(1)	101-107
164	Sato, K., Kogure, T., Ikoma, T., Kumagai, Y., Tanaka, J.	2001	AR	Atomic Scale Interfacial Structure of Hydroxyapatite Observed with High-Resolution Transmission Electron Microscopy	Key engineering materials	192/195	283-286
165	Browning, N.D., Arslan, I., Moeck, P., Topuria, T.	2001	AR	Atomic Resolution Scanning Transmission Electron Microscopy	Physica status solidi. B, Basic research	227(1)	229-245
166	Mountjoy, G.	2001	AR	Atomic structure of amorphous solids from high resolution electron microscopy - a technique for the new millennium?	Journal of non-crystalline solids	293/295	458-463
167	Heine, A., DeSantis, G., Luz, J. G., Mitchell, M., Wong, C.-H., Wilson, I. A.	2001	AR	Observation of Covalent Intermediates in an Enzyme Mechanism at Atomic Resolution	Science	294 (5541)	369-373
168	Hansen, T. W., Wagner, J. B., Hansen, P. L., Dahl, S., Topsoe, H.	2001	AR	Atomic-Resolution in Situ Transmission Electron Microscopy of a Promoter of a Heterogeneous Catalyst	Science	294 (5546)	1508-1509
169	Abe, E., Takakura, H., Tsai, A. P.	2001	AR	Ho arrangement in the Zn6Mg3Ho icosahedral quasicrystal studied by atomic-resolution Z-contrast STEM	Journal of electron microscopy	50(3)	187-196
170	Ishizuka, K.	2001	AR	Prospects of atomic resolution imaging with an aberration-corrected STEM	Journal of electron microscopy	50(4)	291-306
171	Yamazaki, T., Kawasaki, M., Watanabe, K., Hashimoto, I., Shiojiri, M.	2001	AR	Artificial bright spots in atomic-resolution high-angle annular dark field STEM images	Journal of electron microscopy	50(6)	517-522
172	Watanabe, K.,	2001	AR	Atomic-resolution incoherent high-angle	Physical review B	63(8)	085316

	Yamazaki, T., Kikuchi, Y., Kotaka, Y., Kawasaki, M.			annular dark field STEM images of Si(011)			
173	Lancin, M., Ragaru, C., Godon, C.	2001	AR	Atomic structure and core composition of partial dislocations and dislocation fronts in β -SiC by high-resolution transmission electron microscopy	Philosophical magazine B	81(11)	1633-1648
174	Ichinose, H., Sawada, H., Takuma, E., Saito, H.	2001	AR	Grain Boundary Structure Analysis of Covalent Bonding Materials by Atomic Resolution Transmission Electron Microscopy	Microscopy and microanalysis	v.7 suppl.2	276-277
175	Sakaguchi, N., Watanabe, S., Shibayama, T., Kinoshita, H.	2001	AR	Dynamics of Grain Boundary Movement by In-situ Irradiation Using Atomic-Resolution HVEM	Advanced materials and processing		1485-1488
176	Clemens Barth, Michael Reichling	2001	AR	Imaging the atomic arrangements on the high-temperature reconstructed α -Al ₂ O ₃ (0001) surface	Nature	414	54-57
177	Watanabe, K., Yang, J. R., Nakanishi, N., Inoke, K., Yamazaki, T., Shiojiri, M.	2002	AR	Atomic-resolution structural and chemical analysis of multiple quantum wells InGaN/GaN	Electron microscopy; ICEM 15 : Vol 1; Physics and materials	1	505-506
178	Wang, H., Li, F.	2002	AR	Field-Emission High-Resolution Electron Microscope Image Processing for GaN-Possibility of Revealing Crystal Defects with Atomic Resolution in GaN Crystals	Acta metallurgica Sinica	38	589-592
179	Abe, E., Kawamura, Y., Hayashi, K., Inoue, A.	2002	AR	Long-period ordered structure in a high-strength nanocrystalline Mg-1 at% Zn-2 at% Y alloy studied by atomic-resolution Z-contrast STEM?	Acta materialia	50	3845-3857
180	Oku, T., Nakajima, S.	2002	AR	Atomic structures of surface and interface in (Hg,Tl,Pb)-based superconductors studied by high-resolution electron microscopy	Solid state communications	124(8)	305-309
181	Spence, J.	2002	AR	Achieving atomic resolution	Materials Today	4(3)	20-33
182	Iwamoto, C., Shen, X.-Q., Okumura, H., Matsuhata, H., Ikuhara, Y.	2002	AR	Structure Analysis of GaN Thin Film with Inversion Domains by High Voltage Atomic Resolution Microscopy	Materials transactions	43(7)	1542-1546
183	Klie, R. F., Browning, N. D.	2002	AR	Characterization of oxygen ordering in (La, Sr)FeO _{3-δ} by atomic resolution Z-contrast imaging and electron energy-loss spectroscopy	Journal of electron microscopy	51, Suppl	S59-S66
184	Ernst, F.	2002	AR	Assessing the mechanical strength of interfacial atomic bonds by quantitative high-resolution transmission electron microscopy	Philosophical magazine. A	82(14)	2677-2694
185	Ito, Y., Klie, R. F., Browning, N. D., Mazanec, T.	2002	AR	Atomic Resolution Analysis of the Defect Chemistry and Microdomain Structure of Brownmillerite-Type Strontium Cobaltite	Journal of the American Ceramic Society	85(4)	969-976

	J.						
186	Miao, J., Ohsuna, T., Terasaki, O., Hodgson, K. O., O Keefe, M. A.	2002	AR	Atomic Resolution Three-Dimensional Electron Diffraction Microscopy	Physical review letters	89(15)	155502
187	Esposito, L., Vitagliano, L., Mazzarella, L.	2002	AR	Recent Advances in Atomic Resolution Protein Crystallography	Protein and peptide letters	9(2)	95-106
188	Yamazaki, T., Kawasaki, M., Watanabe, K., Hashimoto, I., Shiojiri, M.	2002	AR	Effect of small crystal tilt on atomic-resolution high-angle annular dark field STEM imaging	Ultramicroscopy	92(3/4)	181-189
189	P. M. Voyles, D. A. Muller, J. L. Grazul, P. H. Citrin, H.-J. L. Gossmann	2002	AR	Atomic-scale imaging of individual dopant atoms and clusters in highly n-type bulk Si	Nature	416	826-829
190	P. E. Batson, N. Dellby, O. L. Krivanek	2002	AR	Sub-Angstrom resolution using aberration corrected electron optics	Nature	418	617-620
191	A. Ohtomo, D. A. Muller, J. L. Grazul, H. Y. Hwang	2002	AR	Artificial charge-modulation in atomic-scale perovskite titanate superlattices	Nature	419	378-380
192	Poul L. Hansen, Jakob B. Wagner, Stig Helveg, Jens R. Rostrup-Nielsen	2002	AR	Atom-Resolved Imaging of Dynamic Shape Changes in Supported Copper Nanocrystals	Science	295	2053-2055
193	Thomas, John Meurig, Zhou, Wuzong	2003	AR	Atomic Resolution of Oxygen in Solid Oxides by Electron Microscopy: What Next??	Chemphyschem	4	927-929
194	Carlino, E., Modesti, S., Furlanetto, D., Piccin, M., Rubini, S., Franciosi, A.	2003	AR	Atomic resolution composition analysis by scanning transmission electron microscopy high-angle annular dark-field imaging	Applied physics letters	83	662-664
195	Hytch, M. J.	2003	AR	Measurement of deformation at the atomic scale by high-resolution electron microscopy	Revue de m [?] tallurgie. Cahiers d'informations techniques	100(2)	211-222
196	Shao-Horn, Y., Croguennec, L., Delmas, C., Nelson, E. C., O'Keefe, M. A.	2003	AR	Atomic resolution of lithium ions in LiCoO ₂ ?	Nature materials	2(7)	464-467
197	Ikarashi, N., Watanabe, K., Miyamoto, Y.	2003	AR	Atomic structure analysis of SiO ₂ /Si and Si ₃ N ₄ /Si interfaces by high-resolution transmission electron microscopy	Journal of vacuum science & technology	21(2)	495-501
198	Jia, C. L.	2003	AR	Atomic-Resolution Imaging of Oxygen in	Science	294	870-872

	Lentzen, M., Urban, K.			Perovskite Ceramics		(5546)	
199	Zuo, J. M., Vartanyants, I., Gao, M., Zhang, R., Nagahara, L. A.	2003	AR	MATERIALS SCIENCE: Atomic Resolution Imaging of a Carbon Nanotube from Diffraction Intensities	Science	300 (5624)	1419- 1420
200	Abe, E., Kawamura, Y., Inoue, A.	2003	AR	Microstructure of a High-Strength Nanocrystalline Mg-1at.%Zn-2at.%Y Alloy Studied by Atomic-Resolution Z-Contrast STEM	Materials science forum	419/422	727-732
201	Ziegler, A., Kisielowski, C., Hoffmann, M. J., Ritchie, R. O.	2003	AR	Atomic Resolution Transmission Electron Microscopy of the Intergranular Structure of a Y2O3-Containing Silicon Nitride Ceramic	Journal of the American Ceramic Society	86(10)	1777- 1785
202	Allen, L. J., Findlay, S. D., Lupini, A. R., Oxley, M. P., Pennycook, S. J.	2003	AR	Atomic-Resolution Electron Energy Loss Spectroscopy Imaging in Aberration Corrected Scanning Transmission Electron Microscopy	Physical review letters	91(10)	?105503
203	Rossouw, C.J., Allen, L.J., Findlay, S.D., Oxley, M.P.	2003	AR	Channelling effects in atomic resolution STEM	Ultramicroscopy	96(3/4)	299-312
204	Urban, K.	2003	AR	Challenges of Atomic Resolution for Materials Science-Progress by Aberration Correction	Microscopy conference		2-3
205	Hytch, M. J.	2003	AR	Analysis of displacement and strain at the atomic level by high-resolution electron microscopy	Thermodynamics, microstructures and plasticity		485-496
206	Abe, E., Kawamura, Y., Inoue, A.	2003	AR	Microstructure of a High-Strength Nanocrystalline Mg-1at.%Zn-2at.%Y Alloy Studied by Atomic-Resolution Z-Contrast STEM	Platform science and technology for advanced magnesium alloys		727-732
207	Eiji Abe, S. J. Pennycook, A. P. Tsai	2003	AR	Direct observation of a local thermal vibration anomaly in a quasicrystal	Nature	421	347-350
208	Mingwei Chen, James W. McCauley, and Kevin J. Hemker	2003	AR	Shock-Induced Localized Amorphization in Boron Carbide	Science	299	1563- 1566
209	C. L. Jia, M. Lentzen, and K. Urban	2003	AR	Atomic-Resolution Imaging of Oxygen in Perovskite Ceramics	Science	299	870-873
210	Zaoli Zhang, Wilfried Sigle, Fritz Phillipp, and Manfred R?hle	2003	AR	Direct Atom-Resolved Imaging of Oxides and Their Grain Boundaries	Science	302	846-849
211	J. M. Zuo, I. Vartanyants, M. Gao, R. Zhang, and L. A. Nagahara	2003	AR	Atomic Resolution Imaging of a Carbon Nanotube from Diffraction Intensities	Science	300	1419- 1421

2. 에너지 여과장치 활용분야

No.	Author	Year	Index	Subject	Journal	Vol	Page
1	Egerton, R. F.	1976	EF	INELASTIC SCATTERING AND ENERGY FILTERING IN THE TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPE	The philosophical magazine	34(1)	49-65
2	Pearce-Percy, H. T., Cowley, J. M.	1976	EF	ON THE USE OF ENERGY FILTERING TO INCREASE THE CONTRAST OF STEM IMAGES OF THICK BIOLOGICAL MATERIALS	Optik	44(3)	273-288
3	Butler, J.H., Watari, F., Higgs, A.	1982	EF	Simultaneous collection and processing of energy-filtered stem images using a fast digital data acquisition system	Ultramicroscopy	8(3)	327-334
4	Zaluzec, N.J.	1985	EF	Digital filters for application to data analysis in electron energy-loss spectrometry	Ultramicroscopy	18(1/4)	185-190
5	Oikawa, T., Ajika, N., Hashimoto, H., Kokubo, Y., Yamaguchi, K.	1985	EF	Construction of an energy filter for 200 kV CTEM	Ultramicroscopy	18(1/4)	159-164
6	Shuman, H., Chang, C.-F., Somlyo, A.P.	1986	EF	Elemental imaging and resolution in energy-filtered conventional electron microscopy	Ultramicroscopy	19(2)	121-133
7	Beckers, A. L. D., De Bruijn, W. C., Jongkind, J. F., Cleton-Soeteman, M. I., Apkarian, R. P.	1988	EF	Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy as a Tool for Structural and Compositional Analysis of Isolated Ferritin Particles	Nuclear instruments & methods in physics research. Section A	265(3)	261-276
8	Lehmpfuhl, G., Krahl, D., Swoboda, M.	1989	EF	Electron microscopic channelling imaging of thick specimens with medium-energy electrons in an energy-filter microscope	Ultramicroscopy	31(2)	161-168
9	Martin, J.M., Mansot, J.L., Hallouis, M.	1989	EF	Energy filtered electron microscopy (EFEM) of overbased reverse micelles	Ultramicroscopy	30(3)	321-328
10	Mory, C., Colliex, C.	1989	EF	Elemental analysis near the single-atom detection level by processing sequences of energy-filtered images	Ultramicroscopy	28(1/4)	339-346
11	Rose, H.	1989	EF	Optimization of imaging energy filters for high-resolution analytical electron microscopy	Ultramicroscopy	28(1/4)	184-189
12	Sorber, C.W.J., Van Dort, J.B., Ringeling, P.C., Cleton-Soeteman, M.I., de Bruijn, W.C.	1990	EF	Quantitative energy-filtered image analysis in cytochemistry - II. Morphometric analysis of element-distribution images	Ultramicroscopy	32(1)	69-79
13	Sorber, C.W.J., De Jong, A.A.W., Den Breejen, N.J., De Bruijn, W.C.	1990	EF	Quantitative energy-filtered image analysis in cytochemistry - I. Morphometric analysis of contrast-related images	Ultramicroscopy	32(1)	55-68
14	Xu, P., Loane, J.	1991	EF	Energy-filtered convergent-beam electron microscopy	Ultramicroscopy	38(2)	127-133

	R.F., Silcox, J.			diffraction in STEM			
15	Jordan, I.K., Rossouw, C.J., Vincent, R.	1991	EF	Effects of energy filtering in LACBED patterns	Ultramicroscopy	35(3/4)	237-243
16	Spence, J.C.H., Mayer, J., Zuo, J.M.	1991	EF	Quantitative electron crystallography with omega energy filtering	Micron and microscopica acta	22(1/2)	173-174
17	Reimer, L., Fromm, L., Hirsch, P., Plate, U., Rennekamp, R.	1992	EF	Combination of BELS modes and electron spectroscopic imaging and diffraction in an energy-filtering electron microscope	Ultramicroscopy	46(1/4)	335-347
18	Bonnet, N., Michel, J., Wagner, D., Balossier, G.	1992	EF	Optimization of digital filters for the detection of trace elements in electron energy loss spectroscopy I. Theory and simulations	Ultramicroscopy	41(1/3)	105-114
19	Cockayne, D., McKenzie, D.	1992	EF	The structure of amorphous and polycrystalline materials using energy-filtered RDF analysis	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	1190
20	Ahn, C. C., Hong, L., Eckert, J., Fultz, B.	1992	EF	Energy-filtered imaging of nanophase materials	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	1196
21	Bazett-Jones, D. P.	1992	EF	Energy-filtered imaging of biological specimens	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	1564
22	Gubbens, A. J., Krivanek, O. L.	1992	EF	Energy-filtered imaging in biological intermediate voltage TEM	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	1570
23	Reimer, L.	1992	EF	Energy filtered electron diffraction	Micron and microscopica acta	23(1/2)	209-210
24	Holmestad, R., Krivanek, O.L., Hoier, R., Marthinsen, K., Spence, J.C.H.	1993	EF	Commercial spectrometer modifications for energy filtering of electron diffraction patterns and images	Ultramicroscopy	52(3/4)	454-458
25	De Bruijn, W. C., Sorber, C. W. J., Gelsema, E. S., Beckers, A. L. D.	1993	EF	Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy of Biological Specimens	Scanning microscopy	7(2)	693
26	Jiang, X. G., Ottensmeyer, F.	1993	EF	Optimization of a prism-mirror-prism imaging energy filter for high resolution	Optik	94(2)	88

	P.			electron microanalysis			
27	Mayer, J.	1993	EF	Applications of Energy Filtering TEM in Material Science	Microscopy and analysis	37	23
28	Szabo, V., Ruehle, M., Nowakowski, M., Su, K.	1993	EF	Characterizing the Microstructures of TiN/TiB ₂ Nanocomposites with Energy Filtered TEM	Materials Research Society symposia proceedings	286	443
29	Probst, W., Benner, G., Mayer, J.	1993	EF	New energy filtering TEM—principles and applications	Institute of Physics conference series	130	295
30	Probst, W., Benner, G., Bihr, J., Weimer, E.	1993	EF	An "Ω" Energy Filtering TEM—Principles and Applications	Advanced materials	5(4)	297
31	Rose, H.	1994	EF	Correction of aberrations, a promising means for improving the spatial and energy resolution of energy-filtering electron microscopes	Ultramicroscopy	56(1/3)	11–25
32	Burgess, W.G., Preston, A.R., Botton, G.A., Zaluzec, N.J., Humphreys, C.J.	1994	EF	Benefits of energy filtering for advanced convergent beam electron diffraction patterns	Ultramicroscopy	55(3)	276–283
33	Berger, A., Mayer, J., Kohl, H.	1994	EF	Detection limits in elemental distribution images produced by energy filtering TEM: case study of grain boundaries in Si ₃ N ₄ ?	Ultramicroscopy	55(1)	101–112
34	Deininger, C., Necker, G., Mayer, J.	1994	EF	Determination of structure factors, lattice strains and accelerating voltage by energy-filtered convergent beam electron diffraction	Ultramicroscopy	54(1)	15–30
35	Eaglesham, D.J., Berger, S.D.	1994	EF	Energy filtering the "thermal diffuse" background in electron diffraction	Ultramicroscopy	53(4)	319–324
36	Su, D.S., Swoboda, M., Zeitler, E.	1994	EF	Single-electron excitation of amorphous carbon observed with energy filter	Ultramicroscopy	53(2)	97–100
37	Reimer, L.	1994	EF	Energy-filtering TEM in materials and life science	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	52	936
38	Probst, W., Zellmann, E., Benner, G., Weimer, E.	1994	EF	Cryo imaging using an energy-filtering TEM (EFTEM): Optimum use of phase-contrast transfer function (PCTF)	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	(52)	506
39	Mavrocordatos, D., Lienemann, C.-P., Perret, D.	1994	EF	Energy Filtered Transmission Electron Microscopy for the Physico-Chemical Characterization of Aquatic Submicron Colloids	Mikrochimica acta	117(1/2)	39
40	Krivanek, O. L., Kundmann, M. K., Bourrat, X.	1994	EF	Elemental Mapping by Energy-Filtered Electron Microscopy	Materials Research Society symposia proceedings	332	341

41	Feja, B., Durrenberger, M., Muller, S., Reichelt, R., Aebi, U.	1994	EF	Mass Determination by Inelastic Electron Scattering in an Energy-Filtering Transmission Electron Microscope with Slow-Scan CCD Camera	Journal of structural biology	55(1)	101-112
42	Lavergne, J.-L., Foa, C., Bongrand, P., Seux, D.	1994	EF	Application of recording and processing of energy-filtered image sequences for the elemental mapping of biological specimens: Imaging-Spectrum	Journal of microscopy	174(3)	195
43	Horoyan, M., Soler, M., Martin, J. M., Benoliel, A.-M.	1994	EF	Contribution of energy-filtering TEM to the detection of calcium: application to mast cells	Journal of microscopy	173(3)	211
44	Wang, Z.L., Shapiro, A.J.	1995	EF	Energy-filtering and composition-sensitive imaging in surface and interface studies using HREM	Ultramicroscopy	60(1)	115-135
45	Kohl, H., Berger, A.	1995	EF	The resolution limit for elemental mapping in energy-filtering transmission electron microscopy	Ultramicroscopy	59(1/4)	191-194
46	Jaeger, W., Mayer, J.	1995	EF	Energy-filtered transmission electron microscopy of SimGen superlattices and Si-Ge heterostructures. I. Experimental results	Ultramicroscopy	59(1/4)	33
47	Midgley, P.A., Saunders, M., Vincent, R., Steeds, J.W.	1995	EF	Energy-filtered convergent-beam diffraction: examples and future prospects	Ultramicroscopy	59(1/4)	1-13
48	Jager, W., Mayer, J.	1995	EF	Energy-filtered transmission electron microscopy of SimGen superlattices and Si-Ge heterostructures I. Experimental results	Ultramicroscopy	59(1/4)	33-45
49	Crozier, P.A.	1995	EF	Quantitative elemental mapping of materials by energy-filtered imaging?	Ultramicroscopy	58(2)	157-174
50	Rose, H., Krahl, D.	1995	EF	Electron Optics of Imaging Energy Filters	Springer series in optical sciences	71	43
51	Hofer, F., Warbichler, P.	1995	EF	Energy Filtered TEM Imaging of Nonmetallic Precipitates in Metallic Materials	Practical metallography,	32(7)	345
52	Deininger, C., Mayer, J., Ruehle, M.	1995	EF	Determination of the charge density distribution of crystals by energy filtered CBED	Optik	99(4)	135
53	Fehrenbach, H., Ochs, M., Richter, J.	1995	EF	Energy-Filtering TEM in the Fine-Structural Study of the Mammalian Lung	Microscopy and analysis	(49)	11
54	Hofer, F., Warbichler, P., Grogger, W., Lang, O.	1995	EF	On the Application of Energy Filtering TEM in Materials Science: I. Precipitates in a Ni/Cr-alloy	Micron	26(5)	377-390
55	Hobbs, L.W., Qin, L.C.	1995	EF	Energy-filtered electron diffraction study of vitreous and amorphized silicas	Journal of non-crystalline solids	192/193	456-462
56	Fehrenbach, H.	1995	EF	Microanalysis of the egg shell of <i>Adela metallica</i> (Poda) (Lepidoptera:Adelidae) by energy-filtering transmission electron microscopy (EFTEM)	International journal of insect morphology & embryology	24(2)	195-202

57	Kurata, H., Isoda, S., Kobayashi, T.	1995	EF	Quantitative Energy-Filtering Image of Carbon Nanotube	ICR ANNUAL REPORT	2	6-7
58	Uhlemann, S., Rose, H.	1996	EF	Acceptance of imaging energy filters	Ultramicroscopy	63(3/4)	161-167
59	Hofer, F., Warbichler, P.	1996	EF	Improved imaging of secondary phases in solids by energy-filtering TEM	Ultramicroscopy	63(1)	21-25
60	Koeck, P.J.B., Schroder, R.R., Haider, M., Leonard, K.R.	1996	EF	Unconventional immuno double labelling by energy filtered transmission electron microscopy	Ultramicroscopy	62(1/2)	65-78
61	De Jong, A., Rees, J., Busing, W., Lucken, U.	1996	EF	Integrated energy-filtering TEM: the CM120-BioFilter	Progress in biophysics and molecular biology	65(1.S1)	194
62	Horiuchi, S., Yase, K., Kitano, T.	1996	EF	Morphology Observation of Polymer Blends by Energy-filtering Electron Microscopy	Polymer preprints, Japan	45(2)	E949
63	Hashimoto, H., Makita, Y., Endoh, H.	1996	EF	Characterization of thin film materials by 400 kV electron microscope images and with an energy filter	Materials chemistry and physics	46(1)	7-14
64	Koertje, K.-H.	1996	EF	ESI contrast analysis: a new approach for element analysis with energy-filtering transmission electron microscopy (EFTEM)	Journal of microscopy	184(3)	175-184
65	Han, K. F., Gubbens, A. J., Sedat, J. W., Agard, D. A., Taya, S.	1996	EF	Optimal strategies for imaging thick biological specimens: exit wavefront reconstruction and energy-filtered imaging	Journal of microscopy	183(2)	124-132
66	Taniguchi, Y., Nakazawa, E., Usukura, J.	1996	EF	Development of γ -Type Energy Filtering TEM	Journal of electron microscopy	45(4)	307-313
67	Kurata, H., Isoda, S., Kobayashi, T.	1996	EF	Chemical Mapping by Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy	Journal of electron microscopy	45(4)	317-320
68	Crozier, P.A., McCartney, M.R.	1996	EF	Elemental Mapping of Heterogeneous Catalysts by Energy-Filtered Transmission Electron Microscopy	Journal of catalysis	163(2)	245-254
69	Scott, J.H., Majetich, S.A.	1996	EF	Lattice imaging of Ag-Co thin films using energy-filtered TEM	IEEE transactions on magnetics	32(5)	4701-4703
70	Chang, L., Chen, F.R., Chen, C.J., Lin, T.S.	1996	EF	HRTEM and energy filtering TEM study of interfacial reaction between diamond film and silicon	Diamond and related materials	5(11)	1282-1287
71	Harscher, A., Lichte, H., Mayer, J.	1997	EF	Interference experiments with energy filtered electrons	Ultramicroscopy	69(3)	201-209
72	Spence, J.C.H., Zuo, J.M.	1997	EF	Does electron holography energy-filter?	Ultramicroscopy	69(3)	185-190
73	Wang, Z.L.	1997	EF	Lattice imaging using plasmon energy-loss electrons in an energy-filtered transmission electron microscope	Ultramicroscopy	67(1/4)	105-111
74	Horiuchi, S., Yase, K., Kitano, T., Higashida, N., Ougizawa, T.	1997	EF	Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy for the Characterization of Polymer Blend Morphologies	Polymer journal	29(4)	380-383
75	Chesne,	1997	EF	The Segregation of Surfactant upon Film	Polymer	43(2)	187-196

	Alexander Du, Gerharz, Bettina, Lieser, G.			Formation of Latex Dispersions: an Investigation by Energy Filtering Transmission Electron Microscopy	international		
76	Kurata, H.	1997	EF	Principle of energy-filtering transmission electron microscopy and its applications	Nihon Kesshō Gakkai shi	39(6)	416-425
77	Grogger, W., Hofer, F., Kothleitner, G.	1997	EF	Quantitative Chemical Phase Imaging by Means of Energy Filtering Transmission Electron Microscopy	Mikrochimica acta	125(1/4)	13-20
78	Golla, U., Kohl, H.	1997	EF	Theoretical and Experimental Investigations of Resolution and Detection Limits in Energy-Filtering Electron Microscopy	Micron : the international research and review journal for microsc	28(5)	397-406
79	Quintana, C., Marco, S., Carrascosa, J. L.	1997	EF	Evaluation of the Analytical and Imaging Performances of a Non-dedicated TEM Equipped with a Parallel Electron Energy Loss Spectrometer (PEELS) and Image Filter (IF)	Journal of trace and microprobe techniques	15(2)	175-188
80	Wang, Z. L., Van Heerden, D., Josell, D., Shapiro, A. J.	1997	EF	Energy-Filtered High-Resolution Electron Microscopy for Quantitative Solid State Structure Determination	Journal of research of the National Institute of Standards and Technology	102(1)	1-14
81	Tsuno, K., Kaneyama, T., Honda, T., Tsuda, K., Terauchi, M., Tanaka, M.	1997	EF	Design and testing of Ω mode imaging energy filters at 200 kV	Journal of electron microscopy	46(5)	357-368
82	Kimoto, K., Sekiguchi, T., Aoyama, T.	1997	EF	Chemical shift mapping of Si L and K edges using spatially resolved EELS and energy-filtering TEM	Journal of electron microscopy	46(5)	369-374
83	Lloyd, S. J., Dunin-Borkowski, R. E., Boothroyd, C. B.	1997	EF	The determination of the ionicity of sapphire using energy-filtered high resolution electron microscopy	Institute of Physics conference series	153	113-116
84	Winkler, J., Luensdorf, H., Jockusch, B. M.	1997	EF	Energy-filtered electron microscopy reveals that talin is a highly flexible protein composed of a series of globular domains	European journal of biochemistry	243(1/2)	430-436
85	Starosud, Alexander, Bazett-Jones, David P., Langford, Cooper H.	1997	EF	Energy filtered transmission electron microscopy (EFTEM) in the characterization of supported TiO ₂ photocatalysts	Chemical communications	5	443-444
86	Grimm, R., Baermann, M., Haeckl, W., Typke, D., Sackmann, E., Baumeister, W.	1997	EF	Energy filtered electron tomography of ice-embedded actin and vesicles	Biophysical journal	72(1)	482-489
87	Yu, Y., Ping, D.,	1997	EF	The Application of Energy-Filtered Imaging	Acta metallurgica	33(3)	240-246

	Peng, H., Li, D., Ye, H.			to Materials Research	Sinica		
88	Heinemann, D., Mader, W.	1998	EF	Electron scattering experiments using a post-column imaging electron energy filter	Ultramicroscopy	74(3)	113-122
89	Ponsonnet, L., Vacher, B., Martin, J. M.	1998	EF	High resolution chemical mapping in the energy-filtering TEM: application to interface layers in ceramics	Thin solid films	324(1/2)	170-175
90	Correa, C. A., Hage, E.	1998	EF	On the use of energy-filtering transmission electron microscopy for analysis of unstained multiphase polymer systems	Polymer	40(8)	2171-2174
91	Grogger, W., Hofer, F., Warbichler, P., Feltz, A., Ottlinger, M.	1998	EF	Imaging of the Core-Shell Structure of Doped BaTiO ₃ Ceramics by Energy Filtering TEM	Physica status solidi. A, Applied research	166(1)	315-326
92	Gubbens, A. J., Brink, H. A., Kundmann, M. K., Friedman, S. L., Krivanek, O. L.	1998	EF	A post-column imaging energy filter with a 20482-pixel slow-scan CCD camera	Micron : the international research and review journal for microscopy	29(1)	81-87
93	Warbichler, P., Hofer, F., Hofer, P., Letofsky, E.	1998	EF	On the application of energy-filtering TEM in materials science: III. Precipitates in steel	Micron : the international research and review journal for microscopy	29(1)	63-67
94	Grogger, W.	1998	EF	Use of energy filtering electron microscopy for chemical characterization of hardmetals	Metal powder report	53(7/8)	45
95	Flaitz, P. L., Bruley, J.	1998	EF	Analysis of Layered Structures at High Spatial Resolution Using Energy Filtered Imaging	Materials Research Society symposia proceedings	523	165-170
96	Single, C., Zhou, F., Heidemeyer, H., Prins, F. E., Kern, D. P., Plies, E.	1998	EF	Oxidation properties of silicon dots on silicon oxide investigated using energy filtering transmission electron microscopy	Journal of vacuum science & technology. processing, measurement, and phenomena	16(6)	3938-3942
97	Grimm, R., Typke, D., Baumeister, W.	1998	EF	Improving image quality by zero-loss energy filtering: quantitative assessment by means of image cross-correlation	Journal of microscopy	190(3)	339-349
98	Shin, D. H.	1998	EF	Electron Energy-Loss Spectroscopy and Energy-Filtered Imaging of C ₆₀ Thin Films	Japanese journal of applied physics Part 2, Letters	37(5A)	L559-L561
99	Shindo, D., Konno, Y., Lin, S.-H., Gomyo, A.	1998	EF	Structure Modulation of Al _{0.5} In _{0.5} P Studied by Energy-Filtered Electron Diffraction and High-Resolution Electron Microscopy	Japanese journal of applied physics Part 1, Regular papers, short notes and review papers	37(479)	2593-2597
100	Soler, M., Desplat-Jego, S.,	1998	EF	Adhesion-related glycocalyx study: quantitative approach with imaging-spectrum	FEBS letters	429(1)	89-94

	Vacher, B., Ponsonnet, L., Fraterao, M., Bongrand, P.			in the energy filtering transmission electron microscope (EFTEM)			
101	Penisson, J.-M., Lereah, Y.	1998	EF	Structure of an Al-Ge alloy by energy filtered TEM and EELS spectroscopy	European physical journal, EPJ. Applied physics	4(3)	275-280
102	Holin, C., Chang, L., Fu-Rong, C., Kai, J.J., Eugene, T., Jianming, F., Zheng, X.	1998	EF	High resolution and energy filtering TEM study of interfacial structure and reaction in advanced materials processing	Acta materialia	46(7)	2431-2439
103	Plitzko, J.M., Mayer, J.	1999	EF	Quantitative thin film analysis by energy filtering transmission electron microscopy	Ultramicroscopy	78(1/4)	207-219
104	Wang, Z. L., Bentley, J., Evans, N. D.	1999	EF	Mapping the Valence States of Transition-Metal Elements Using Energy-Filtered Transmission Electron Microscopy	The journal of physical chemistry. B,	103(4)	751-753
105	Correa, A., Hage, E.	1999	EF	On the use of energy-filtering transmission electron microscopy for analysis of unstained multiphase polymer systems	Polymer	40(8)	2171-2173
106	Triebkorn, Rita A, Henderson, Ian F, Martin, Andrew P	1999	EF	Detection of iron in tissues from slugs (<i>deroceras reticulatum m?ller</i>) after ingestion of iron chelates, by means of energy-filtering transmission electron microscopy (EFTEM)	Pesticide science	55(1)	55-61
107	Hoffstatter, G.H.	1999	EF	Comments on aberration correction in symmetric imaging energy filters	Nuclear instruments & methods in physics research. Section A	427(1/2)	275-281
108	Tsuno, K., Kaneyama, T., Honda, T., Ishida, Y.	1999	EF	Design of omega mode imaging energy filters	Nuclear instruments & methods in physics research. Section A	427(1/2)	187-196
109	Lins, Ulysses, Kachar, Bechara, Farina, Marcos	1999	EF	Imaging faces of shadowed magnetite (Fe ₃ O ₄) crystals from magnetotactic bacteria with energy-filtering transmission electron microscopy	Microscopy research and technique	46(4)	319-324
110	Chao, K.J., Wu, C.N., Chang, A.-S., Hu, S.F.	1999	EF	The study of MCM-41 molecular sieves by energy-filtering TEM	Microporous and mesoporous materials	27(2/3)	287-295
111	Song, M., Mitsubishi, K., Furuya, K.	1999	EF	Electron energy loss spectroscopy and energy filtered imaging of Xe cavities embedded in Al at 423 and 473K	Micron	30(2)	129-133
112	Kimoto, K., Kobayashi, K., Aoyama, T., Mitsui, Y.	1999	EF	Analyses of composition and chemical shift of silicon oxynitride film using energy-filtering transmission electron microscope based spatially resolved electron energy loss spectroscopy	Micron	30(2)	121-127
113	Botton, G.A., Phaneuf, M.W.	1999	EF	Imaging, spectroscopy and spectroscopic imaging with an energy filtered field emission TEM	Micron	30(2)	109-119

114	Murakami, Y., Shindo, D.	1999	EF	Lattice Modulation Preceding to the R-phase Transformation in a Ti50Ni48Fe2 Alloy Studied by TEM with Energy-Filtering	Materials transactions	40(10)	1092-1097
115	Tomokiyo, Y., Matsumura, S., Manabe, T.	1999	EF	Energy filtering transmission electron microscopy using the new JEM-2010FEE	Journal of microscopy	194(1)	210-218
116	Liu, C. P., Boothroyd, C. B., Humphreys, C. J.	1999	EF	Energy-filtered transmission electron microscopy of multilayers in semiconductors	Journal of microscopy	194(1)	58-70
117	Shibayama, T., He, G. W., Takahashi, H., Kawasaki, M., Kohyama, A.	1999	EF	Interface structure analysis of SiC fibres reinforced SiC matrix composites by energy filtering TEM	Journal of electron microscopy	48(6)	893-898
118	Tsuno, K.	1999	EF	Optical design of electron microscope lenses and energy filters	Journal of electron microscopy	48(6)	801-820
119	Egerton, R. F.	1999	EF	Spatial resolution of nanostructural analysis by electron energy-loss spectroscopy and energy-filtered imaging	Journal of electron microscopy	48(6)	711-716
120	Yamada, K., Saw, K., Kurata, H., Kobayashi, T.	1999	EF	Visualization of carbon in steels using energy filtering TEM	Journal of electron microscopy	48(1)	9-16
121	Grogger, W., Hofer, F., Warbichler, P., Leitner, O.	1999	EF	Elemental mapping of semiconductor devices using energy-filtering transmission electron microscopy	Institute of Physics conference series	164	35-38
122	Debec, A., Marcaillou, C., Bobiniec, Y., Borot, C.	1999	EF	The centrosome cycle in syncytial Drosophila embryos analyzed by energy filtering electron microscopy	Biology of the cell	91(4/5)	379-391
123	Delille, D., Pantel, R., Van Cappellen, E.	2000	EF	Crystal thickness and extinction distance determination using energy filtered CBED pattern intensity measurement and dynamical diffraction theory fitting	Ultramicroscopy	87(1/2)	5-18
124	Zackrisson, J.	2000	EF	Energy filtered TEM of Ti(C,N) based cermets	Powder metallurgy	43(4)	299-305
125	Akase, Z., Tomokiyo, Y., Tanaka, Y., Watanabe, M.	2000	EF	Measurement of charge of Cu and O in YBa2Cu3Oy by energy-filtering convergent-beam electron diffraction.	Physica. C, Superconductivity	338(1/2)	137-143
126	Furukawa, Y.	2000	EF	Energy-filtering transmission electron microscopy (EFTEM) and electron energy-loss spectroscopy (EELS) investigation of clay-organic matter aggregates in aquatic sediments	Organic geochemistry	31(7/8)	735-744
127	Hofer, Ferdinand, Grogger, Werner, Warbichler, Peter, Papst, Ilse	2000	EF	Quantitative Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy (EFTEM)	Mikrochimica acta	132(2/4)	273-288
128	Grogger, Werner, Hofer, Ferdinand, Warbichler, Peter,	2000	EF	Quantitative Energy-filtering Transmission Electron Microscopy in Materials Science	Microscopy and microanalysis	6(2)	161-172

	Kothleitner, Gerald						
129	Zuo, J. M., Pacaud, J., Hoier, R., Spence, J. C.	2000	EF	Experimental measurement of electron diffuse scattering in magnetite using energy-filter and imaging plates	Micron	31(5)	527-532
130	Pantel, R., Torres, J., Paniez, P., Auvert, G.	2000	EF	Physical and chemical analysis of advanced interconnections using energy filtering transmission electron microscopy	Microelectronic engineering	50(1/4)	277-284
131	Ikematsu, Y., Shindo, D., Oikawa, T.	2000	EF	Quantitative Analysis of Short-Range Order Diffuse Scattering in Cu-27.5 at%Pd Alloy with Energy-Filtered Electron Diffraction	Materials transactions	41(1)	238-241
132	Murakami, Y., Shindo, D., Otsuka, K.	2000	EF	Observations on Diffuse Scattering in a Ti50Ni48Fe2 Alloy by Energy-Filtering TEM	Materials science forum	327/328	441-444
133	Wakao, H., Kobayashi, S., Nakamura, K., Kiyohara, S., Kashima, I.	2000	EF	Effect of K-edge filter for one-shot dual energy subtraction using Gd contrast medium	International congress series	1199	144-146
134	Grogger, W., del Arco, M. V., Ballesteros, C., Krishnan, K.	2000	EF	Energy-filtered imaging and growth mechanism of YBa2Cu3O7- δ ultrathin films	Institute of Physics conference series	165	231-232
135	Bovin, J.-O., Huber, T., Balmes, O., Malm, J.-O., Karlsson, G.	2000	EF	A New View on Chemistry of Solids in Solution-Cryo Energy-Filtered Transmission Electron Microscopy (Cryo-EF-TEM) Imaging of Aggregating Palladium Colloids in Vitreous Ice	Chemistry : a European journal	6(1)	129-132
136	Thomas, P. J., Midgley, P. A.	2001	EF	Image-spectroscopy - II. The removal of plural scattering from extended energy-filtered series by Fourier deconvolution	Ultramicroscopy	88(3)	187-194
137	Bayle-Guillemaud , P., Barbier, A., Mocuta, C.	2001	EF	Development of a quantitative energy filtering TEM method to study a reactive NiO/80Ni20Fe interface	Ultramicroscopy	88(2)	99-110
138	Ochs, Matthias, Fehrenbach, Heinz, Richter, Joachim	2001	EF	Ultrastructure of canine type II pneumocytes during hypothermic ischemia of the lung: A study by means of conventional and energy filtering transmission electron microscopy and stereology	The Anatomical record	263(2)	118-126
139	Moore, K. T., Elbert, D. C., Veblen, D. R.	2001	EF	Energy-filtered transmission electron microscopy (EFTEM) of intergrown pyroxenes	The American mineralogist	86(7/8)	814-825
140	Hofer, F., Warbichler, P., Kronberger, H., Zweck, J.	2001	EF	Mapping the chemistry in nanostructured materials by energy-filtering transmission electron microscopy (EFTEM)	Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy	57(10)	2061-2069
141	Lo, S.-C., Chen, F.-R., Kai, J.-J.,	2001	EF	Nanoscale-level dielectric property image of low-k dielectric materials for copper	Proceedings of SPIE--the	(4468)	140-149

	Chen, L.-C., Chang, L., Chiang, C.-C., Ding, P.			metallization using energy-filtered TEM	international society for optical engineering		
142	Golla, U., Putnis, A.	2001	EF	Valence state mapping and quantitative electron spectroscopic imaging of exsolution in titanohematite by energy-filtered TEM	Physics and chemistry of minerals	28(2)	119-129
143	Weyland, M., Midgley, P. A.	2001	EF	Three Dimensional Energy Filtered Transmission Electron Microscopy (3D-EFTEM)	Microscopy and microanalysis	7(S2)	1162- 1163
144	Botton, G. A.	2001	EF	Insight Into The Properties Of Functional Materials With Energy Filtered and Analytical TEM	Microscopy and microanalysis	7(S2)	1156- 1157
145	Hofer, F., Kothleitner, G., Warbichler, P.	2001	EF	Compositional Mapping with Energy Filtering TEM: The Present Status	Microscopy and microanalysis	7(S2)	1136- 1137
146	Disko, M., Poplewell, J., O Grady, K., Hutchings, J.	2001	EF	Energy-Filtered Imaging of Colloidal Cobalt Metal Particles	Microscopy and microanalysis	7(S2)	1090- 1091
147	Pantei, R., Sondergard, E., Delille, D., Kwakman, L. F.	2001	EF	Quantitative Thickness Measurements of Thin Oxides using Low Energy Loss Filtered TEM Imaging	Microscopy and microanalysis	7(S2)	560-561
148	Hattestrand, M., Andren, H. O.	2001	EF	Evaluation of particle size distributions of precipitates in a 9% chromium steel using energy filtered transmission electron microscopy	Micron	32(8)	789-797
149	Hens, S., Van Landuyt, J., Bender, H., Boullart, W., Vanhaelemeersch, S.	2001	EF	Chemical and structural analysis of etching residue layers in semiconductor devices with energy filtering transmission electron microscopy	Materials science in semiconductor processing	4(1/3)	109-111
150	Shindo, D., Murakami, Y., Ikematsu, Y.	2001	EF	Energy-filtered electron microscopy study on phase transformation of alloys	Materials science & engineering. properties, microstructure and processing. A	312(1/2)	9-19
151	Bentley, J., Walter, K. C., Evans, N. D.	2001	EF	Bonding in Ion-Implanted Carbon Films Characterized by TEM Spectrum Lines and Energy-Filtered Imaging	Materials Research Society symposia proceedings	589	395-400
152	Mayer, J., Plitzko, J. M.	2001	EF	Quantitative Mapping of Concentrations and Bonding States by Energy Filtering TEM	Materials Research Society symposia proceedings	589	279-288
153	Norris, D. J., Cullis, A. G., Grasby, T. J., Parker, E. H. C.	2001	EF	Energy-Loss Filtered Imaging of Segregation-Induced Interface Broadening in SiGe/Si p-Channel MOSFET Device Structures	Materials Research Society symposia proceedings	589	167-172
154	Murakami, Y., Shibuya, H.	2001	EF	Precursor effects of martensitic transformations in Ti-based alloys studied by	Journal of microscopy	203(1)	22-33

	Shindo, D.			electron microscopy with energy filtering			
155	Hoshi, K., Ejiri, S., Probst, W., Seybold, V., Kamino, T., Yaguchi, T., Yamahira, N.	2001	EF	Observation of human dentine by focused ion beam and energy-filtering transmission electron microscopy	Journal of microscopy	201(1)	44-49
156	Sigle, W., Zern, A., Hahn, K., Eigenthaler, U., Ruhle, M.	2001	EF	Advances in energy-filtering transmission electron microscopy	Journal of electron microscopy	50(6)	509-516
157	Terada, S., Aoyama, T., Yano, F., Mitsui, Y.	2001	EF	Time-resolved acquisition technique for elemental mapping by energy-filtering TEM	Journal of electron microscopy	50(2)	83-88
158	Shibata, T., Ikematsu, Y., Shindo, D.	2001	EF	Elemental mapping using ω -type energy filter and imaging plate	Journal of electron microscopy	50(1)	29-32
159	Varela, M., Ballesteros, C., Grogger, W., Krishnan, K.M., Arias, D., Sefrioui, Z.	2001	EF	High-resolution and energy-filtered transmission electron microscopy of YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} /PrBa ₂ Cu ₃ O ₇ superlattices	Journal of alloys and compounds	323/324	558-561
160	Bando, Y., Mitome, M., Golberg, D., Kitami, Y., Kurashima, K., Kaneyama, T.	2001	EF	New 300 kV Energy-Filtering Field Emission Electron Microscope	Japanese journal of applied physics Part 2, Letters	40(11A)	L1193-L1196
161	Zackrisson, J., Larsson, A.	2001	EF	Energy-filtered transmission electron microscopy in hard materials research	International journal of refractory metals & hard materials	19(4/6)	275-284
162	Schroder, A., Sitte, W., Rom, I., Grogger, W., Hofer, F.	2001	EF	Interfacial Pattern Formation in the Pt-Ni-O System, Studied by Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy	Diffusion and defect data. [Pt. A], Defect and diffusion forum	194/199(2)	1563-1568
163	Schlotzer-Schreier, U., Kortje, K.-H., Erb, C.	2001	EF	Energy-filtering transmission electron microscopy (EFTEM) in the elemental analysis of pseudoexfoliative material	Current eye research	22(2)	154-162
164	Norris, D. J., Cullis, A. G., Braithwaite, G., Grasby, T. J., Whall, T. E., Parker, E. H. C.	2001	EF	Energy filtered TEM analyses of Ge snowploughing during oxidation of SiGe/Si MOSFET device structures	CONFERENCE SERIES-INSTITUTE OF PHYSICS	169	185-188
165	Bavle-Guillemaud, P., Mocuta, C., Barbier, A.	2001	EF	Quantitative energy filtering TEM to study spin valves	CONFERENCE SERIES-INSTITUTE OF PHYSICS	168	337-340
166	Leapman, R. D.	2001	EF	Analysis of biological structures by EELS and energy filtering	CONFERENCE SERIES-INSTITUTE OF	168	9-14

					PHYSICS		
167	Bando, Y., Golberg, D., Mitome, M., Kurashima, K., Sato, T.	2001	EF	C to BN conversion in multi-walled nanotubes as revealed by energy-filtering transmission electron microscopy	Chemical physics letters	346(1/2)	29-34
168	Thomas, P.J., Midgley, P.A.	2002	EF	An Introduction to Energy-Filtered Transmission Electron Microscopy	Topics in Catalysis	21(4)	109-138
169	Meidia, H., Cullis, A.G., Schonjahn, C., Munz, W.D., Rodenburg, J.M.	2002	EF	Investigation of intermixing in TiAlN/VN nanoscale multilayer coatings by energy-filtered TEM	Surface & coatings technology	151/152	209-213
170	Moore, K. T., Howe, J. M., Veblen, D. R.	2002	EF	High-resolution and energy-filtered TEM imaging of Ag segregation to planar precipitate-matrix interfaces in an Al-Cu-Mg-Ag alloy	Philosophical magazine B	82(1)	13-34
171	Okuyama, T., Nakayama, M., Tomokiyo, Y., Van der Biest, O.	2002	EF	Strain Analysis of Si by FEM and Energy Filtering CBED	Microscopy and microanalysis	8(1)	11-15
172	Moore, K.T., Stach, E.A., Howe, J.M., Elbert, D.C., Veblen, D.R.	2002	EF	A tilting procedure to enhance compositional contrast and reduce residual diffraction contrast in energy-filtered TEM imaging of planar interfaces	Micron	33(1)	39-51
173	Nagai, N., Lee, You-Jin, Nagata, N., Gunduz, M., Nakano, K., Nojima, T.	2002	EF	Elemental sulphur and alkali elutable melanin detected in oral melanosis and malignant melanoma by energy-filtering transmission electron microscopy	Journal of oral pathology & medicine	31(8)	481-487
174	Terada, S., Aoyama, T., Yano, F., Mitsui, Y.	2002	EF	Time-resolved acquisition technique for spatially-resolved electron energy-loss spectroscopy by energy-filtering TEM	Journal of electron microscopy	51(5)	291-296
175	Shindo, D., Ikematsu, Y., Lee, C.-W., Suzuki, T., Ichihashi, T., Hsu, C.-C.	2002	EF	Energy-filtered electron diffraction and high-resolution electron microscopy on short-range ordered structure in GaAs _{0.5} Sb _{0.5}	Journal of electron microscopy	51(1)	29-34
176	Wang, Y.Q., Duan, X.F., Cao, L.M., Li, G., Wang, W.K.?	2002	EF	Application of energy-filtering transmission electron microscopy to characterize amorphous boron nanowires	Journal of crystal growth	244(1)	123-128
177	Schonjahn, C., Humphreys, C. J., Glick, M.	2002	EF	Energy-filtered imaging in a field-emission scanning electron microscope for dopant mapping in semiconductors	Journal of applied physics	92(12)	7667-7671
178	Radcke, C., Stroh, T., Dworkowski, F., Veh, R?diger W.	2002	EF	Specific visualization of precipitated cerium by energy-filtered transmission electron microscopy for detection of alkaline phosphatase	Histochemistry and cell biology	118(6)	459-472
179	Rom, I. Hofer,	2002	EF	Visualization of Compositional Fluctuations in	Chemistry of	14(1)	135-143

	F., Bucher, E., Sitte, W. Gatterer, K., Fritzer, H. P., Popitsch, A.			Complex Oxides Using Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy	materials		
180	Hofer, F., Warbichler, P., Letofsky-Papst, I.	2002	EF	Nanoanalysis of Precipitates in Steels with Energy Filtering Transmission Electron Microscopy	BHM. Berg- und h?ttenm?nnische Monatshefte	147(9)	263-267
181	Nicotra, G., Lombardo, S., Spinella, C., Ammendola, G., Gerardi, C., Demuro, C.	2002	EF	Observation of the nucleation kinetics of Si quantum dots on SiO2 by energy filtered transmission electron microscopy	Applied surface science	205(1/4)	304-308
182	Mayer, J.	2002	EF	Nanoscale Analysis by Energy-Filtering TEM	Advances in imaging and electron physics	123	399-412
183	Sigle, W., Kramer, S., Varshney, V., Zern, A., Eigenthaler, U., Ruhle, M.	2003	EF	Plasmon energy mapping in energy-filtering transmission electron microscopy	Ultramicroscopy	96(3/4)	565-571
184	Grogger, W., Schaffer, B., Krishnan, K.M., Hofer, F.	2003	EF	Energy-filtering TEM at high magnification: spatial resolution and detection limits	Ultramicroscopy	96(3/4)	481-489
185	Ren, Y., Kruhlak, M. J., Bazett-Jones, D. P.	2003	EF	Same Serial Section Correlative Light and Energy-filtered Transmission Electron Microscopy	The journal of histochemistry and cytochemistry	51(5)	605-612
186	Kasama, T., Golla-Schindler, U., Putnis, A.	2003	EF	High-resolution and energy-filtered TEM of the interface between hematite and ilmenite exsolution lamellae	The American mineralogist	88(8/9)	1190- 1196
187	Park, C., Crooks, Roy E., Siochi, E. J., Harrison, J. S., Evans, N., Kenik, E.	2003	EF	Adhesion study of polyimide to single-wall carbon nanotube bundles by energy-filtered transmission electron microscopy	Nanotechnology	14(9)	L11-L14
188	Egerton, R.F.	2003	EF	New techniques in electron energy-loss spectroscopy and energy-filtered imaging	Micron	34(3/5)	127-139
189	Pantel, R., Jullian, S., Delille, D., Dutartre, D., Chantre, A., Kermarrec, O., Campidelli, Y.	2003	EF	Inelastic electron scattering observation using energy filtered transmission electron microscopy for silicon-germanium nanostructures imaging	Micron	34(5)	239-247
190	Kothleitner, G., Hofer, F.	2003	EF	EELS performance measurements on a new high energy resolution imaging filter	Micron	34(3/5)	211-218
191	Lindner, J.K.N.,	2003	EF	Local composition analysis of SiC	Materials science	102(1/3)	70-74

	Kubsky, S., Schertel, A.			microstructures formed by ion projection in silicon using energy filtered TEM in combination with FIB specimen preparation	& engineering B		
192	Yamauchi, K., Takahashi, K., Hasegawa, H., Iatrou, H., Hadjichristidis, N., Kaneko, T.	2003	EF	Microdomain Morphology in an ABC 3-Arm Star Terpolymer: A Study by Energy-Filtering TEM and 3D Electron Tomography	Macromolecules	36(19)	6962-6966
193	Lee, S., Kim, Y., J. Moon, H.-S.	2003	EF	Energy-Filtering Transmission Electron Microscopy (EF-TEM) Study of a Modulated Structure in Metakaolinite, Represented by a 14 Angstrom Modulation	Journal of the American Ceramic Society	86(1)	174-176
194	Chang, K.-C., Bentley, J., Porter, L. M.	2003	EF	Nanoscale Characterization of the Silicon Dioxide-Silicon Carbide Interface Using Elemental Mapping by Energy-Filtered Transmission Electron Microscopy	Journal of electronic materials	32(5)	464-469
195	Aoyama, K., Matsumoto, R., Oka, S.	2003	EF	Elemental mapping of DNA chains by energy-filtering TEM	Journal of electron microscopy	52(3)	283-290
196	Utsunomiya, S., Ewing, R. C.	2003	EF	Application of High-Angle Annular Dark Field Scanning Transmission Electron Microscopy and Energy-Filtered Transmission Electron Microscopy	Environmental science & technology	37(4)	786-791
197	Nicotra, G., Lombardo, S., Spinella, C., Ammendola, G., Gerardi, C., Demuro, C.	2003	EF	Observation of the nucleation kinetics of Si quantum dots on SiO ₂ by energy filtered transmission electron microscopy	Applied surface science	205(1/4)	304-308

3. 역동적 연구(in situ study) 활용분야

No.	Author	Year	Index	Subject	Journal	Vol	Page
1	Evans, J.H., van Veen, A., Caspers, L.M.	1983	IN-SITU	In-situ TEM observations of loop punching from helium platelet cavities in molybdenum	Scripta metallurgica	17(4)	549-553
2	Barna, A., Barna, P.B., Radnoczi, G., Safran, G.	1984	IN-SITU	In-situ UHV TEM study of the two-dimensional growth of Al ₂ Au phase on Al(111) surface	Ultramicroscopy	15(1/2)	101-107
3	Suzuki, K., Ichihara, M., Takeuchi, S., Nakagawa, K., Maeda, K., Iwanaga, H.	1984	IN-SITU	IN SITU TEM OBSERVATION OF DISLOCATION MOTION IN II-VI COMPOUNDS	Philosophical magazine. A	49(3)	451-461
4	Lu, K., Wang, J.T.	1985	IN-SITU	A micromechanism for crystallization of amorphous alloys I. An in situ TEM observation	Journal of crystal growth	112(2/3)	525-530
5	Heinemann, K., Poppa, H.	1985	IN-SITU	In-situ TEM evidence of lattice expansion of very small supported palladium particles	Surface science	156(1)	265-274
6	Benassayag, G., Sudraud, P., Jouffrey, B.	1985	IN-SITU	IN SITU HIGH VOLTAGE TEM OBSERVATION OF AN ELECTROHYDRODYNAMIC (EHD) ION SOURCE	Ultramicroscopy	16(1)	1-8
7	Metois, J.J., Takayanagi, K., Tanishiro, Y.	1985	IN-SITU	Growth of monoatomic layer terraces on a (111) lead crystal face: In situ observations in dark field by UHV-TEM	Surface science	155(1)	53-64
8	Beuers, J., Jonsson, S., Petzow, G.	1987	IN-SITU	TEM-in situ deformation of beryllium single crystals—a new explanation for the anomalous temperature dependence of the critical resolved shear stress for prismatic slip	Acta metallurgica	35(9)	2277-2287
9	Fnaiech, M., Reynaud, F., Couret, A., Caillard, D.	1987	IN-SITU	TEM IN SITU STUDY OF DISLOCATION GLIDE IN A III-V COMPOUND (InSb)	Philosophical magazine. A	55(4)	405-423
10	Xiao, H.Z., Gao, S.J., Wan, X.J.	1987	IN-SITU	In situ TEM observation of the interaction of strain-induced hydride and crack propagation in Ti-6Al-4V	Scripta metallurgica	21(3)	265-268
11	Hitzenberger, C., Karathaler, H.P., Korner, A.	1988	IN-SITU	In situ tem study of the h.c.p. to f.c.c. martensitic phase transformation in CoNi single crystals	Acta metallurgica	36(10)	2719-2728
12	Holloway, K., Sinclair, R.	1988	IN-SITU	High-resolution and in situ tem studies of annealing of Ti-Si multilayers	Journal of the less-common metals	140	139-148
13	Shih, D.S., Robertson, I.M., Birnbaum, H.K.	1988	IN-SITU	Hydrogen embrittlement of a titanium: In situ tem studies	Acta metallurgica	363(1/2)	111-124
14	Datta, A., Regalbutto, J.R., Allen, C.W.	1989	IN-SITU	TEM and in-situ EM study of the dispersion of MoO ₃ on SiO ₂ ?	Ultramicroscopy	29(1/4)	233-246
15	Gibson, J.M., Lanzerotti, M.Y.	1989	IN-SITU	Silicon oxidation studied by in-situ tem	Ultramicroscopy	31(1)	29-35

16	Jieping, Z., Haicheng, G., Huiju, Z., Laird, C.	1989	IN-SITU	In situ TEM observation of tensile deformation in high-purity titanium after a single compression stroke	Scripta metallurgica	23(4)	553-556
17	Clement, N., Caillard, D., Lours, P., Coujou, A.	1989	IN-SITU	TEM in situ straining of a Ni-base γ' single crystal-unlocking of dissociated screw dislocations at low temperature	Scripta metallurgica	23(4)	563-568
18	Szymanski, R., Lynch, J.	1989	IN-SITU	Specimen limitations in nanocharacterization by TEM/STEM of industrial heterogenous catalysts: In situ, irradiation damage and micro/macro correlations	Ultramicroscopy	28(1/4)	295-301
19	Reiche, M., Hoppe, S.	1990	IN-SITU	TEM in-situ investigations of the crystallization behaviour of amorphous silicon thin films	Ultramicroscopy	33(1)	41-50
20	Coujou, A., Lours, P., Roy, N.A., Caillard, D., Clement, N.	1990	IN-SITU	Determination of the local tensile axis direction in a tem in situ strained γ' single crystal-a finite element approach	Acta metallurgica et materialia	38(5)	825-837
21	Zhang, T.	1990	IN-SITU	A study on implanted impurity activation in silicon and in situ observation of residual defects in high voltage TEM	Nuclear instruments & methods in physics research. Section B	44(3)	325-330
22	Heinemann, K., Osaka, T., Poppa, H.	1991	IN-SITU	Phenomenological in-situ TEM gas exposure studies of palladium particles on MgO at room temperature	Ultramicroscopy	12(1/2)	9-18
23	Garg, A., Howe, J.M.	1991	IN-SITU	Nucleation and growth of Ω phase in Al-4.0 Cu-0.5 Mg-0.5 Ag alloy-An in situ hot-stage TEM study	Acta metallurgica et materialia	39(8)	1925-1937
24	Levade, C., Couderc, J.J., Vanderschaeve, G., Caillard, D., Courret, A.	1991	IN-SITU	TEM in-situ observation of recombination-enhanced mobility of dislocations in II-VI compounds	Applied surface science	50(1/4)	119-124
25	Pestman, B.J. de Hosson, J.T.M.	1992	IN-SITU	Interactions between lattice dislocations and grain boundaries in Ni ₃ Al investigated by means of in situ TEM and computer modelling experiments	Acta metallurgica et materialia	40(10)	2511-2521
26	Robertson, I.M., Lee, T.C., Birnbaum, H.K.	1992	IN-SITU	Application of the in situ TEM deformation technique to observe how "clean" and doped grain boundaries respond to local stress concentrations	Ultramicroscopy	40(3)	330-338
27	Ross, F. M., Hull, R., Bahneck, D., Bean, J. C.	1992	IN-SITU	In situ TEM measurements of the electrical properties of interface dislocations	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	1338
28	LeGoues, F. K.	1992	IN-SITU	Ex situ and in situ TEM study of the relaxation of thin films by the modified Frank-Read mechanism	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of	50(2)	1342

29	Barmak, K., Levine, L. E., Smith, D. A., Koniem, Y.	1992	IN-SITU	In situ TEM observation of C49 to C54 TiSi ₂ transformation	America Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	1356
30	Smith, P. L., Hsia, S. L., Tan, T. Y., McGuire, G. E.	1992	IN-SITU	In situ TEM observation of epitaxial CoSi ₂ formation on (100) silicon	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	1366
31	Nguyen, T. D., Gronsky, R., Kortright, J. B.	1992	IN-SITU	In situ TEM studies of agglomeration of sub-nanometer Ru layers in Ru/C multilayers	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	256
32	Gibson, J. M., Ross, F. M., Twisten, R. D.	1992	IN-SITU	In situ TEM of silicon oxidation	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	324
33	Tsai, F., Khiznichenko, V., Cowley, J. M.	1992	IN-SITU	In situ observations of the behaviors of ferroelectric domains in BaTiO ₃ under applied electric fields with TEM	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	348
34	Yang, Y., Liu, D., Kang, M., Sun, Y.	1992	IN-SITU	High-Temperature TEM in situ Study of Growth Kinetics of Bainite in ?Brass	Acta metallurgica Sinica	28(3)	A99
35	Paine, D. C., Howard, D. J., Evans, N. D.	1992	IN-SITU	In situ TEM studies of the effect of misfit strain on the kinetics of Si _{1-x} Ge _x solid phase epitaxy: Temperature calibration and surface effects	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	13444
36	Ratnaparkhi, P. L.	1992	IN-SITU	In situ hot-stage TEM study of a diffusion-bonded Al/SiC interface	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	218
37	Hull, R., Bean, J. C., Ross, F.	1992	IN-SITU	Deformation mechanisms at epitaxial semiconductor interfaces studied by in situ TEM	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	50(2)	248

38	Batstone, J. L., Hayzelden, C.	1993	IN-SITU	In situ TEM studies of the crystallization of amorphous silicon: the role of silicides	Institute of Physics conference series	134	165
39	Tong, H.Y., Ding, B.Z., Jiang, H.G., Hu, Z.Q., Dong, L., Zhou, Q.	1993	IN-SITU	An in situ TEM observation on the thermal stability of a nanocrystalline FeBSi alloy	Materials letters	16(5)	260-264
40	Guillemet, J.P., de Mauduit, B., Pieraggi, B., Bielle-Daspert, D., Scheid, E.	1993	IN-SITU	Crystallization of amorphous thin LPCVD Si films: "in situ" TEM measurement of nucleation and grain growth rates	Materials science & engineering. properties, microstructure and processing. A	173(1/2)	377-380
41	Wright, R.N., Van Sieten, C.D.	1993	IN-SITU	In-situ TEM observations of helium bubble interactions with dislocations?	Journal of nuclear materials	206(1)	87-93
42	Lu, M., Wangendristel, A.	1993	IN-SITU	In Situ Tem Observation of Amorphous $NdxFe_{1-x}$ Thin Films and Their Crystallization	Acta metallurgica Sinica	29(4)	B186
43	Michaud, H. M., Baillin, X., Pelissier, J., Putaux, J. L.	1993	IN-SITU	Interaction between dislocations and $\Sigma=51$ and $\Sigma=19$ tilt grain boundaries in germanium: study by in-situ, TEM and HREM	MICROSCOPY MICROANALYSIS MICROSTRUCTURES	4(2/3)	221
44	Coujou, A., De Mauduit, B., Benyoucef, M.	1993	IN-SITU	On the Origin of Mechanical Twins. Some TEM "In Situ" Observations	STRENGTH OF METALS AND ALLOYS	9(2)	991
45	Reiche, M., Edelman, F., Heydenreich, J.	1993	IN-SITU	TEM In-Situ Investigations of Interfacial Processes in the Pd/a-GeSi System	Diffusion and defect data. SSP. [Pt. B], Solid state phenomena	32/33	571
46	Coujou, A., Benyoucef, M., Clement, N.	1993	IN-SITU	TEM "in situ" Deformation at Room Temperature of a γ/γ' Superalloy: Propagation of Dislocations in γ Channels	Diffusion and defect data. SSP. [Pt. B], Solid state phenomena	35/36	455
47	Park, M., Krause, S. J., Wilson, S. R.	1993	IN-SITU	Growth kinetics of Al ₂ Cu in an Al-1.5Cu thin film by in situ TEM	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	51	1172
48	Guillemet, J. P., De Mauduit, B., Pieraggi, B., Campo, E.	1993	IN-SITU	Crystallization of amorphous thin low pressure chemical vapour deposition silicon films: in situ TEM measurement of grain growth rates	Journal of materials science letters	12(12)	910
49	Ross, F. M., Hull, R., Bahnck, D., Bean, J. C.	1993	IN-SITU	Changes in electrical device characteristics during the formation of dislocations in situ in the TEM	Institute of Physics conference series	134	245
50	Faress, A., Levade, C., Vanderschaeve, G.	1993	IN-SITU	Dynamics of Dislocations in II-VI Compounds under Electronic Excitation. A TEM "in-situ" Study	Physica status solidi. A, Applied research	138(2)	583
51	Wang, J., Ponton, C.B., Marquis, P.M.	1993	IN-SITU	The microstructure of pressureless sintered silver-toughened alumina: an in situ TEM study	Materials science & engineering. properties, microstructure and	161(1)	119-126

					processing. A		
52	El-Din, H. N., Coujou, A., Coulomb, P.	1993	IN-SITU	In situ TEM observations of dislocation motion in dynamic aging conditions?	MODELLING MEASUREMENT AND CONTROL C	38(1)	55
53	Louchet, F., Pelissier, J., Caillard, D., Peyrade, J. P.	1993	IN-SITU	In-situ TEM study of dislocation mobility in semiconducting materials	MICROSCOPY MICROANALYSIS MICROSTRUCTUR ES	4(2/3)	199
54	Snoeck, E., Roucau, C., Baules, P., Casanove, M. J.	1993	IN-SITU	Use of in-situ TEM experiments for phase transition studies	MICROSCOPY MICROANALYSIS MICROSTRUCTUR ES	4(2/3)	249
55	Tong, J., Wheatley, J.C., Eyring, L.	1993	IN-SITU	The effect of an electric field on the crystallization of gel-derived alumina precursors observed in situ in the TEM	Ultramicroscopy	52(3/4)	388-392
56	Levade, C., Faess, A., Vanderschaeve, G.	1993	IN-SITU	A TEM in situ investigation of dislocation mobility in the II-VI semiconductor compound ZnS. A quantitative study of the cathodoplastic effect	Philosophical magazine. A,	69(5)	855
57	Jaouen, C., Denanot, M.F., Riviere, J.P., Ruault, M.O., Salome, M.	1993	IN-SITU	In situ TEM study of ion induced amorphization at low temperature in Al ₃ Ti	Nuclear instruments & methods in physics research. Section B	80/81(1)	386-359
58	Howe, J. M.	1994	IN-SITU	Quantitative in situ hot-stage high-resolution TEM	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	(52)	758
59	Clement, N., Souquet, S., Gerard, C., Traverse, J. P.	1994	IN-SITU	High-Temperature In-Situ TEM Study of Carbides Precipitation in Sintered or Melted Molybdenum	Physica status solidi. A	141(1)	109
60	Sinclair, R., Konno, T. J., Hong Ko, D.	1994	IN-SITU	TEM and in situ HREM for Studying Metal-Semiconductor Interfacial Reactions	Materials science forum	155/156 (COM)	111
61	Thibault, J., Baillin, X., Pelissier, J., Putaux, I. L.	1994	IN-SITU	In-Situ IMEV TEM and HREM Study of the Deformation and the Transformation of Symmetrical Tilt Grain Boundaries in Ge and Si	Materials Research Society symposia proceedings	319	215
62	Mallamaci, M. P., Bentley, J., Carter, C. B.	1994	IN-SITU	In-Situ TEM Crystallization of Anorthite-Glass Films on Al ₂ O ₃ ?	Materials Research Society symposia proceedings	321	567
63	Wu, Y., Jacobs, E. G., Pouraghabagher, C., Pinizzotto, R. F.	1994	IN-SITU	In-Situ TEM Study of Copper-Tin Intermetallic Formation	Materials Research Society symposia proceedings	323	165
64	Atzmon, Z., Sharma, R., Russell, S. W., Mayer, J. W.	1994	IN-SITU	Kinetics of Copper Grain Growth During Nitridation of Cu-Cr and Cu-Ti Thin Films by In Situ Tem	Materials Research Society symposia proceedings	337	625

65	Zhang, Y., Wang, Y.-B., Chu, W.-Y.	1994	IN-SITU	In-situ TEM Observation of Brittle Microcrack Nucleation	Chinese science bulletin	39(12)	980
66	Hata, K., Saito, Y., Ohshita, A., Takeda, M., Morita, C., Noda, T.	1994	IN-SITU	In situ HV-TEM observation of the liquid cone formation process in a liquid metal field emission gun	Applied surface science	76/77	36-40
67	Mecartney, M. L., Gust, M. C., Evans, N. D.	1994	IN-SITU	In situ TEM crystallization of sol-gel derived BaTiO ₃ thin films	Proceedings, ... annual meeting, Electron Microscopy Society of America	52	588
68	Roesner, H., Molenat, G., Nembach, E.	1994	IN-SITU	High Temperature In-Situ TEM Observation of Dislocation Processes in Fe ₃ Al	STRENGTH OF MATERIALS -INTERNATIONAL CONFERENCE	10	717
69	Werner, M., Bartsch, M., Messerschmidt, U., Baither, D.	1994	IN-SITU	TEM Observations of Dislocation Motion in Polycrystalline Silicon during In Situ Straining in the High Voltage Electron Microscope	Physica status solidi. A	146(1)	133
70	Anton, R., Reetz, O., Schmidt, A.A.	1994	IN-SITU	In Situ TEM Investigation of Processes Catalyzed by Pd-Ni Alloy Particles on Carbon Substrates in the Presence and Absence of Oxygen	Journal of catalysis	149(2)	474-485
71	Nagpal, P., Baker, I., Horton, J.A.	1994	IN-SITU	TEM in-situ straining of NiAl	Intermetallics	2(1)	23-29
72	Yang, Y. Q., Liu, D. H., Meng, X. K., Kang, M. K.	1994	IN-SITU	Growth Kinetics and High-Temperature TEM in situ Observation of Bainite in a Cu-Zn Alloy	Metallurgical and materials transactions. A	25(12)	2609
73	Zhu, W., Gu, H., Guo, Y.	1994	IN-SITU	In Situ Tension Observation on Ti-10V-2Fe-3Al Alloy Under SEM and TEM	Acta metallurgica Sinica	30(10)	A468
74	Huang, Y., Chen, Q., Yuan, C., Chu, W.	1994	IN-SITU	In Situ TEM Observations of Dislocation Emission, Multiplication and Motion Induced by Anodic Dissolution in Type 310 Stainless Steel	Acta metallurgica Sinica	30(10)	B458
75	Chen, Q., Chu, W., Qiao, L., Wang, Y.	1994	IN-SITU	TEM in Situ Observation of Brittle Cracking of Hydrogen-Charged 310 Stainless Steel Under Tension	Acta metallurgica Sinica	30(6)	A256
76	Zhang, Y., Wang, Y.-B., Chu, W.-Y., Hsiao, C.-M.	1994	IN-SITU	The in-situ TEM observation of microcrack nucleation in titanium aluminide	Scripta metallurgica et materialia	31(3)	279-283
77	Praprotnik, B., Driesel, W., Dietzsch, C., Niedrig, H.	1994	IN-SITU	HV-TEM in-situ investigations of the tip shape of indium liquid metal ion emitter	Surface science	314(3)	353-364
78	Hayzelden, C., Batstone, J. L.	1994	IN-SITU	High Resolution In Situ TEM Studies of Silicide-Mediated Crystallization of Amorphous Silicon	Materials Research Society symposia proceedings	321	579
79	Tanaka, H.,	1994	IN-SITU	In-Situ Tem Observation of Interfacial	Materials Research	337	481

	Konno, T. J., Sinclair, R.			Reactions in the Zr/Si System	Society symposia proceedings		
80	Chen, Q.-Z., Chu, W.-Y., Qiao, L.-J.	1994	IN-SITU	The TEM in-situ Observation of Hydrogen-induced Nanocrack of Austenitic Stainless Steel	Chinese science bulletin	39(16)	1329
81	Sulkowski, S., Nowak, H. F., Szynaka, B.	1994	IN-SITU	Alveolar epithelial cells in experimental lung emphysema. Ultrastructural analysis of cells in situ in TEM	Experimental and toxicologic pathology	45(8)	513
82	Liu, J., Wang, D. Z., Yao, C. K.	1995	IN-SITU	TEM in situ study of isothermally induced cracking in the near-interface region of a SiCw/6061Al composite	Journal of materials science letters	14(3)	201
83	Snoeck, E., Sinclair, R.,, Parker, M., Coffey, K.R., Howard, J.K., Hylton, T.L.	1995	IN-SITU	Microstructural evolution of NiFe/Ag multilayers studied by X-ray diffraction and in situ high-resolution TEM	Journal of magnetism and magnetic materials	151(1/2)	24-32
84	Rankin, J., Sheldon, B.W.	1995	IN-SITU	In situ TEM sintering of nano-sized ZrO ₂ particles	Materials science & engineering. properties, microstructure and processing. A	204(1/2)	48-53
85	Y., X., Schulson, E.M.	1995	IN-SITU	Dislocation-grain boundary interactions in Ni ₃ Ga with and without boron: in situ tem deformation	Scripta metallurgica et materialia	33(6)	931-938
86	Korner, A.	1995	IN-SITU	Phase Transformations in the Fe-Al System Studied by "In-Situ" TEM Heating	Materials Research Society symposia proceedings	364(1)	219
87	Itoh, T., Sinclair, R.	1995	IN-SITU	In Situ TEM Study of Reactions in Iron/Amorphous Carbon Layered Thin Films	Materials Research Society symposia proceedings	382	45-50
88	Hojou, K., Furuno, S., Tsukamoto, T., Kushita, K. N.	1995	IN-SITU	In-Situ EELS and TEM Observation of Al Implanted with Nitrogen Ions	MICROSCOPY MICROANALYSIS MICROSTRUCTUR ES	6(1)	141
89	Schryvers, D., Ma, Y.	1995	IN-SITU	In situ TEM study of the Ni ₅ Al ₃ to B ₂ +L ₁₂ decomposition in Ni ₆₅ Al ₃₅ ?	Materials letters	23(1/3)	105
90	Gu, B., Zhang, J.-w., Wang, F.-r., Chu, W.-y.	1995	IN-SITU	The in-situ tem observation of corrosion facilitating dislocation emission, multiplication and motion for brass	Scripta metallurgica et materialia	32(4)	637-640
91	Sobue, S., Mukainakano, S., Ueno, Y., Hattori, T.	1995	IN-SITU	Solid-Phase Reactions in Al Alloy/TiN/Ti/Si Systems Observed by In Situ Cross-Sectional TEM	Japanese journal of applied physics Part 1	34(2)	987
92	Chen, M., Chen, D., Lin, D.	1995	IN-SITU	In Situ Straining TEM Observation of Fracture Behavior in PST Crystals of TiAl	Materials Research Society symposia proceedings	364(2)	1047
93	Kusinski, J., Thomas, G.	1995	IN-SITU	In-situ TEM Observations of the Microstructural Changes During Early Aging Stages in Al-Li-Cu-Mg-Zr(x) alloys	Journal of materials processing technology	53(1/2)	247-254
94	Driesel, W.,	1995	IN-SITU	HV TEM in situ investigations of the tip	Ultramicroscopy	57(1)	45-58

	Dietzsch, C., Niedrig, H., Praprotnik, B.			shape of a gallium liquid-metal ion/electron emitter			
95	Kushita, K. N., Hojou, K., Furuno, S.	1995	IN-SITU	In-Situ EELS and TEM Observation of Boron Carbide (B ₄ C) During Hydrogen- and Helium-Ion Bombardments	MICROSCOPY MICROANALYSIS MICROSTRUCTURES	6(1)	149
96	Benyoucef, M., Clement, N., Coujou, A.	1995	IN-SITU	TEM in situ straining of the MC2 superalloy at room temperature	Philosophical magazine. A	72(4)	1043
97	Driesel, W., Dietzsch, Ch., M?ser, M	1996	IN-SITU	In situ HV TEM observation of the tip shape of lead liquid metal ion sources	Journal of physics D, applied physics	29(9)	2492-2500
98	LeGoues, F.K., Hammar, M., Reuter, M.C., Tromp, R.M.	1996	IN-SITU	In situ TEM study of the growth of Ge on Si(111)	Surface science	349	249-266
99	Zhu, R., Li, S., Wei, T.	1996	IN-SITU	Dynamic observations on TEM in-situ tensile deformation of Mn8 steel	Chinese science bulletin	41(23)	2011-2015
100	Matsumoto, A., Matsuno, K., Chiwata, N., Kuwano, N., Oki, K.	1996	IN-SITU	In-situ TEM Observation of Phase Transformation Processes in Cu ₃ Pt with a Long-Period Superstructure	Journal of electron microscopy	45(5)	442-447
101	Chen, Q., Wu, X., Humphreys, C. J.	1996	IN-SITU	In Situ TEM Study on the R-Phase Transformation in TiNi Alloy	ACTA METALLURGICA SINICA -ENGLISH LETTERS	9(3)	157-163
102	Hojou, K., Furuno, S., Kushita, K.N., Otsu, H., Izni, K., Furuya, Y.	1996	IN-SITU	In situ EELS and TEM observation of silicon carbide irradiated with helium ions at low temperature and successively annealed	Nuclear instruments & methods in physics research. Section B	116(1/4)	382-388
103	Huang, Y., Chen, Q., Chu, W.	1996	IN-SITU	In-situ TEM Observation of Dislocation Emission, Multiplication and Motion Induced by Anodic Dissolution in Type 310 Stainless Steel	Journal of materials science & technology	12(3)	215-218
104	Rosner, H., Nembach, E., Molenat, G.	1996	IN-SITU	In situ TEM observations of dislocation processes in iron-aluminides with 25 and 30 at.% aluminium	Materials science & engineering. properties, microstructure and processing. A	216(1/2)	169-177
105	Nihara, K., Sekino, T., Nakahira, A., Kamino, T., Yaguchi, T.	1996	IN-SITU	In-situ fabrication of tungsten nanocrystal encapsulated carbon ball in TEM	Materials letters	27(3)	121-125
106	Li, H. ; Chen, Q., Chu, W.	1996	IN-SITU	In Situ TEM Observation of Nucleating and Propagating of Microcracks in Stainless Steel Under Tension	Acta metallurgica Sinica	32(11)	1159-1164
107	Minoda, H., Tanishiro, Y.,	1996	IN-SITU	In situ TEM observations of surfactant-mediated epitaxy: Growth of Ge on	Surface science	357/358	418-421

	Yamamoto, N., Yagi, K.			an Si(111) surface mediated by In			
108	Vetrano, J. S., Bruemmer, S. M., Robertson, I. M.	1996	IN-SITU	In-Situ TEM Studies of Recrystallization and Grain Growth in Al-Mg-Mn-Zr Alloys	Materials Research Society symposia proceedings	404	177-182
109	Nayak, R., Petford-Long, A. K., Doole, R. C., Afonso, C. N.	1996	IN-SITU	In-Situ TEM Study of Crystallisation of Amorphous SbOx Films	Materials Research Society symposia proceedings	404	217-222
110	Ren, S. B., Lu, C. J., Shen, H. M., Wang, Y. N.	1996	IN-SITU	An In-Situ TEM Study of the Dynamic Behavior of Domain Walls in a Free-Standing Lead Titanate Thin Film under External Stress	Materials Research Society symposia proceedings	404	95-100
111	Lei, T. Q.	1997	IN-SITU	In-Situ SEM and TEM Continuous Observations for Studying Dynamic Processes in Materials	Materials and manufacturing processes	12(1)	61-70
112	Yeadon, M., Yang, J. C., Averback, R. S., Bullard, J. W., Gibson, J. M.	1997	IN-SITU	In-situ TEM study of the sintering of copper nanoparticles on (001) copper	Institute of Physics conference series	153	257-260
113	Teodorescu, V. S., Nistor, L. C., Van Landuyt, J.	1997	IN-SITU	High Resolution TEM Observation of in Situ Colloid Formation in CaF2 Crystals	Materials science forum	239/241 (COM)	671-674
114	Wu, P., Jiang, E.Y., Liu, Y.G., Wang, C.D.	1997	IN-SITU	In situ TEM observation of metastable phase formed by solid state interdiffusion in a Co-Cu system	Thin solid films	301(1/2)	90-94
115	LEI, T. C, LIN, G. Y, GE, Q. L, ZHOU, Y, HE, X. J	1997	IN-SITU	Morphologies of monoclinic phase in ZrO2 (2 mol% Y2O3) revealed by TEM in situ continuous observations	Journal of materials science	32(4)	1105-1111
116	Gu, B., Nie, Y., Gao, K., Chu, W.	1997	IN-SITU	In Situ TEM Observation of Hydrogen-Induced Cracking and Stress Corrosion Cracking for Fe3Al	Acta metallurgica Sinica	33(7)	709-717
117	Gao, K.-W., Chu, W.-Y., Wang, Y.-B., Hsiao, C.-M.	1997	IN-SITU	In-situ tem observation of dissolution-enhanced dislocation emission, motion and the nucleation of SCC for Ti-24Al-11Nb alloy in methanol	Scripta materialia	36(2)	259-264
118	Wall, M. A., Barbee, T. W., Weihs, T. P.	1997	IN-SITU	Preparation of Multilayered Materials in Cross-Section for In Situ TEM Tensile Deformation Studies	Microscopy research and technique	36(3)	143-150
119	Field, R.D., Thoma, D.J.	1997	IN-SITU	In-situ hydrogen charging of Pd and Pd-Rh in the tem	Scripta materialia	37(3)	347-353
120	Jiang, A. B., Tadaki, T., Mori, H., Hsu, T. Y.	1997	IN-SITU	In-situ TEM Observation of $\gamma \rightarrow$ curly Martensitic Transformation during Tensile Straining in an Fe-Mn-Si Shape Memory	Materials transactions, JIM	38(12)	1072-1077
121	Jiang, B., Tadaki, T., Mori, H., Hsu, T. Y.	1997	IN-SITU	In-situ TEM Observation of curly γ Transformation during Heating in an Fe-Mn-Si Shape Memory Alloy	Materials transactions, JIM	38(12)	1078-1082
122	Tsujimoto, K., Tsuiji, S., Saka, H., Kuroda, K., Takatsuji, H.,	1997	IN-SITU	In-situ TEM Characterization of Whiskers on Al Electrodes for Thin-Film Transistors	Materials Research Society symposia proceedings	441	421-426

	Suzuki, Y.						
123	Zhang, P., Sui, Z.	1997	IN-SITU	Crystallization of MgO-B ₂ O ₃ -SiO ₂ Slag Observed by In Situ TEM	Zeitschrift fur Metallkunde	88(5)	438-440
124	Ransom, B., Bennett, R.H., Baerwald, R., Shea, K.	1997	IN-SITU	TEM study of in situ organic matter on continental margins: occurrence and the "monolayer" hypothesis	Marine geology	138(1/2)	1-9
125	Palard, M., Ruault, M.-O., Bernas, H., Strobel, M., Heinig, K.-H.	1997	IN-SITU	In situ TEM study of the evolution of CoSi ₂ precipitates during annealing and ion irradiation	Institute of Physics conference series	157	501-506
126	Keller, R.-M., Sigle, W., Baker, S. P., Kraft, O., Arzt, E.	1997	IN-SITU	In Situ TEM Investigation During Thermal Cycling of Thin-Copper Films?	Materials Research Society symposia proceedings	436	221-226
127	Gignac, L. M., Svilan, V., Clevenger, L. A., Cabral, C., Lavoie, C.	1997	IN-SITU	In Situ Tem Analysis of TiSi ₂ C49-C54 Transformations During Annealing	Materials Research Society symposia proceedings	441	255-266
128	Vailhe, C., Douin, J., Caillard, D.	1997	IN-SITU	In Situ TEM Observations of Cross-Slip Mechanisms in NiAl With a Soft Orientation	Materials Research Society symposia proceedings	460	455-460
129	Ghosh, B., Crimp, M. A.	1997	IN-SITU	TEM In-situ Study of Dislocation Motion in B2 NiAl Single Crystals	Materials Research Society symposia proceedings	460	467-472
130	Yang, J. C., Yeadon, M., Kolasa, B., Olynick, D., Gibson, J. M.	1997	IN-SITU	Kinetic Investigations of the Initial Oxidation Stage of Copper by In-Situ UHV-TEM	Materials Research Society symposia proceedings	466	239-244
131	Heinen, D., Schroeder, H., Schilling, W.	1997	IN-SITU	In-Situ TEM-Investigations of Electromigration Induced Mass Transport in "Near-Bamboo" Al-Interconnects	Materials Research Society symposia proceedings	473	375-380
132	Heinen, D., Schroeder, H.	1997	IN-SITU	In-Situ TEM-Investigation of Stress- and Electromigration Induced Void Formation and Growth in Passivated Al-Interconnects	Materials Research Society symposia proceedings	473	381-380
133	Schroeder, H., Heinen, D.	1998	IN-SITU	In-situ Tem-investigation of Stress- and Electromigration-induced Void Formation and Growth in Passivated Al-interconnects	AIP conference proceedings	(418)	183-194
134	Jagannadham, K., Wilsdorf, H. G. F., Weertman, J.	1998	IN-SITU	Dislocations at ductile/plastic crack tips: in-situ TEM observations	Materials research innovations	1(4)	254-264
135	Suzuki, S., Bower, C., Zhou, O	1998	IN-SITU	In-situ TEM and EELS studies of alkali-metal intercalation with single-walled carbon nanotubes	Chemical physics letters	285(3/4)	230-234
136	Sharma, Renu, Weiss, Karl	1998	IN-SITU	Development of a TEM to study in situ structural and chemical changes at an atomic level during gas-solid interactions at elevated temperatures	Microscopy research and technique	42(4)	270-280

137	Mallamaci, M.P., Bentley, J., Carter, C.B.	1998	IN-SITU	In-Situ TEM Crystallization of Silicate-Glass Films on Al ₂ O ₃ ?	Acta materialia	46(1)	283-303
138	Yeadon, M., Yang, J. C., Averback, R. S., Bullard, J. W., Gibson, J. M.	1998	IN-SITU	Direct Observations of the Sintering of Silver Nanoparticles on Single Crystal Copper by In-Situ UHV TEM	Materials Research Society symposia proceedings	501	283-288
139	Su, Y. J., Wang, Y. B., Chu, W. Y.	1998	IN-SITU	In Situ TEM Observations of Liquid Metal Embrittlement of Al Single Crystals in HG + 3 atm% Ga	Key engineering materials	145/149(2)	1053-1058
140	Regula, M., Ballif, C., Levy, F.	1998	IN-SITU	In situ TEM observation of nickel promoted WS ₂ thin-film crystallization	Journal of crystal growth	193(1/2)	109-113
141	Lin, G.Y., Lei, T.C., Zhou, Y.	1998	IN-SITU	In-situ TEM Observations of Tetragonal to Monoclinic Phase Transformation in ZrO ₂ -2 mol% Y ₂ O ₃ Ceramics	Ceramics international	24(4)	307-312
142	Hugo, R.C., Hoagland, R.G.	1998	IN-SITU	In-Situ TEM Observation of Aluminum Embrittlement by Liquid Gallium	Scripta materialia	38(3)	523-529
143	Anton, R., Schneiderei, I.	1998	IN-SITU	In situ TEM investigations of dendritic growth of Au particles on HOPG	Physical review B	58(20)	13874-13881
144	Chen, Q. Z., Ngan, A. H. W., Duggan, B. J.	1998	IN-SITU	An in-situ TEM study of the L1 ₂ to DO ₁₉ phase transformation in the intermetallic compound Fe ₃ Ge	Intermetallics	6(2)	105-114
145	Kimata, H., Kondo, Y., Takayanagi, K.	1998	IN-SITU	Visualisation of Field Desorption of Ga Liquid Metal Ion Source in-situ by TEM	BOOK- INSTITUTE OF MATERIALS	687	419-425
146	Xu, H., Heaney, P. J., B [?] hm, H.	1999	IN-SITU	Structural modulations and phase transitions in eucryptite: an in-situ TEM study	Physics and chemistry of minerals	26(8)	633-643
147	WANG, Y.	1999	IN-SITU	In-situ TEM Observation of Ag/Ni Super-Lattice Films During Heating	JOURNAL OF FUNCTIONAL MATERIALS	30(1)	40-42
148	Ikuhara, Y., Nagai, Y., Yamamoto, T., Sakuma, T.	1999	IN-SITU	TEM In-Situ Observation of SiO ₂ Doped TZP at High Temperatures	Materials science forum	304/306	525-530
149	Chen, Q.Z., Li, H.Q., Chu, W.Y.	1999	IN-SITU	Thinning processes and strains in the thinned areas ahead of loaded crack tips during in situ tension in the TEM	Materials letters	38(5)	267-371
150	Zhang, F. C., Hu, B. T., Zhang, L. X., Lin, C. F.	1999	IN-SITU	In-Situ TEM Observation of Nanosilicon Fiber Growth	ACTA METALLURGICA SINICA	12(5)	1069-1072
151	Wang, X. Y., Zhou, S. X., Chen, W. Z.	1999	IN-SITU	In-Situ TEM Observation of Fe ₈₀ P ₁₂ C ₆ Mo _{0.5} Si ₁₃ Amorphous Alloy?	Journal of Magnetics Society of Japan	23(1/2)	203-205
152	Vystavel, T., Jacques, A., Gemperle, A., Gemperlova, J., George, A.	1999	IN-SITU	Dislocation Interaction with a $\Sigma=3$ Grain Boundary Observed by in-situ TEM?	Materials science forum	294/296	397-400

153	Hugo, R.C., Hoagland, R.G.	1999	IN-SITU	Gallium penetration of aluminum: in-situ TEM observations at the penetration front	Scripta materialia	41(12)	1341-1346
154	Lu, H., Su, Y., Wang, Y., Chu, W.	1999	IN-SITU	In situ TEM research of dislocation emission and microcrack nucleation for Ti after adsorption by Hg	Corrosion science	41(4)	699-708
155	Takeguchi, M., Wu, Y., Tanaka, M., Furuya, K.	2000	IN-SITU	In situ UHV-TEM observation of the direct formation of Pd ₂ Si islands on Si(111) surfaces at high temperature	Applied surface science	159/160	225-230
156	Liu, M., Zhang, X. M., Liu, L., Li, Y. Y., Shelyakov, A. V.	2000	IN-SITU	In situ TEM observations of martensite-austenite transformations in a Ni ₄₉ Ti ₃₆ Hf ₁₅ high temperature shape memory alloy	Journal of materials science letters	19(15)	1383-1386
157	Chiwata, N., Sakai, T., Matsumoto, A., Kuwano, N., Oki, K.	2000	IN-SITU	Ordering process of Cu ₃ Pt from short-range order state studied by in-situ TEM observation	Micron	31(5)	539-542
158	Dannenbergh, R., Stach, E. A., Groza, J. R., Dresser, B. J.	2000	IN-SITU	In-situ TEM observations of abnormal grain growth, coarsening, and substrate de-wetting in nanocrystalline Ag thin films	Thin solid films	370(1/2)	54-62
159	Hugo, R. C., Hoagland, R. G.	2000	IN-SITU	The kinetics of gallium penetration into aluminum grain boundaries-in situ TEM observations and atomistic models	Acta materialia	48(8)	1949-1957
160	Anton, R., Kreutzer, P.	2000	IN-SITU	In situ TEM evaluation of the growth kinetics of Au particles on highly oriented pyrolytic graphite at elevated temperatures	Physical review B	61(3)	16077-16083
161	Shimizu, T., Tosaka, M., Tsuji, M., Kohjiya, S.	2000	IN-SITU	In situ TEM Observation of Natural Rubber Thin Films Crystallized under Molecular Orientation	Journal of the Society of Rubber Industry of Japan	73(5)	274-276
162	John Cumings, Philip G. Collins, A. Zettl	2000	IN-SITU	Materials: Peeling and sharpening multiwall nanotubes	Nature	406	586
163	Jiang, C. Z., Fan, X. J.	2000	IN-SITU	In-situ TEM observation of silver nanocrystals in an Ag-implanted SiO ₂ film	Surface & coatings technology	131(1/3)	330-333
164	Wang, Z. L., Poncharal, P., de Heer, W. A.	2000	IN-SITU	Measuring physical and mechanical properties of individual carbon nanotubes by in situ TEM	The Journal of physics and chemistry of solids	61(7)	1025-1030
165	Wang, Z. L., Poncharal, P., de Heer, W. A.	2000	IN-SITU	Nanomeasurements of individual carbon nanotubes by in situ TEM	Pure and applied chemistry	72(1/2)	209-220
166	Crevoiserat, S., Lehnert, T., Hessler-Wyser, A., Gotthardt, R.	2001	IN-SITU	TEM studies of in situ martensitic transformation in NiTi thin films	Journal de physique. IV, Proceedings	11(8)	415-420

167	Grillo, S. E., Hellgren, N., Serin, V., Broitman, E., Colliex, C., Hultman, L., Kihn, Y.	2001	IN-SITU	Monitoring the structural and chemical properties of CNx thin films during in situ annealing in a TEM	European physical journal, EPJ. Applied physics	13(2)	97-106
168	Lavagne, S., Levade, C., Vanderschaeve, G.	2001	IN-SITU	Defect dynamics in ZnSe/GaAs(001) epilayers: TEM in-situ heating experiments	CONFERENCE SERIES- INSTITUTE OF PHYSICS	169	219-224
169	Jiang, C. Z.	2001	IN-SITU	In situ TEM observation of the formation of nickel nanocrystals in Ni-implanted amorphous SiO2 thin films	Journal of materials science letters	20(14)	1335-1337
170	Gao, K., Qiao, L., Chu, W.	2001	IN-SITU	In situ TEM Observation of Crack Healing in α -Fe Single Crystal	Acta metallurgica Sinica	37(2)	118-120
171	Kooi, B. J., De Hosson, J. T.	2001	IN-SITU	In-situ TEM analysis of the reduction of nanometre-sized Mn3O4 precipitates in a metal matrix	Acta materialia	49(5)	765-774
172	Federspiel, X., Ignat, M., Guettaz, L., Bergman, C., Phillibert, J., Mack, A.	2001	IN-SITU	Interfacial TiAl3 Growth: In Situ TEM Observations and Numerical Simulations	Materials Research Society symposia proceedings	612	D10.10-G7.10
173	Verheijen, M. A., Donkers, J. J. T. M., Thomassen, J. F. P., van den Broek, J. J., van der Rijt	2001	IN-SITU	In Situ Electrical Resistance Measurements of Al-Ge Films in the TEM Using a Modified Heating Holder	Materials Research Society symposia proceedings	615	G6.1
174	Dolle, M., Grugeon, S., Beaudoin, B., Dupont, L., Tarascon, J.-M.	2001	IN-SITU	In situ TEM study of the interface carbon/electrolyte	Journal of power sources	97/98	104-106
175	Thomas W. Hansen, Jakob B. Wagner, Poul L. Hansen, Søren Dahl, Haldor Topsøe	2001	IN-SITU	Atomic-Resolution in Situ Transmission Electron Microscopy of a Promoter of a Heterogeneous Catalyst	Science	16	1508-1510
176	Zhou, W., Edmondson, M. J., Anderson, P. A., Edwards, P. P.	2001	IN-SITU	TEM studies of the in-situ growth of silver metal nanowires from zeolites	CONFERENCE SERIES- INSTITUTE OF PHYSICS	168	397-400
177	Jin, H.W., Park, C.G., Kim, M.C.	2001	IN-SITU	In situ TEM heating studies on the phase transformation of metastable phases in	Materials science & engineering.	304/306	321-326

				Fe-Cr-B alloy spray coatings	properties, microstructure and processing. A		
178	Bharadwaj, M.D., Yang, J.C.	2001	IN-SITU	The reduction of copper oxide by water vapor visualized by in situ UHV-TEM	Scripta materialia	44(11)	2557-2561
179	Gao, K. W., Qiao, L. J., Chu, W. Y.	2001	IN-SITU	In situ TEM observation of crack healing in α -Fe	Scripta materialia	44(7)	1055-1059
180	Shimizu, T., Tsuji, M., Kohjiya, S.	2001	IN-SITU	In situ TEM Observation of Crystallization of Isotactic Polystyrene	Journal of the Society of Fiber and Technology, Japan	57(5)	137-143
181	Wang, Z. L., Poncharal, P., de Heer, W. A., Gao, R. P.	2001	IN-SITU	A New Approach Towards Property Nanomeasurements Using In Situ TEM	Materials Research Society symposia proceedings	589	217-222
182	Bharadwaj, M. D., Gupta, A., Gibson, J. M., Yang, J. C.	2001	IN-SITU	The Effect of Different Oxidizing Atmospheres on the Initial Kinetics of Copper Oxidation as Studied In Situ UHV-TEM	Materials Research Society symposia proceedings	589	389-394
183	Gemperlova, J., Jacques, A., Gemperle, A., Zarubova, N.	2001	IN-SITU	Interaction of Slip Bands With Grain Boundary-In Situ TEM Observation	Materials Research Society symposia proceedings	652	Y8.23-Y8.25
184	Kiguchi, T., Wakiya, N., Shinozaki, K., Mizutani, N.	2002	IN-SITU	SiOX formation process between YSZ and Si substrate in YSZ/Si thin films by in-situ TEM analysis	Key engineering materials	(216)	153-156
185	Janecek, M., Louchet, F., Calonne, O., Doisneau-Cottignies, B.	2002	IN-SITU	What can be learnt from TEM in-situ straining experiments?	Kovove materialy	40(6)	353-364
186	Kiguchi, T., Wakiya, N., Shinozaki, K., Mizutani, N.	2002	IN-SITU	ROLE OF ULTRA THIN SiO _x LAYER ON EPITAXIAL YSZ/SiO _x /Si THIN FILM AS MULTI FUNCTIONAL BUFFER LAYER BY NANO-PROBE AND IN-SITU TEM INVESTIGATION	Integrated ferroelectrics	45	89-96
187	Abe, H., Yamamoto, S., Miyashita, A.	2002	IN-SITU	In situ TEM observation of nucleation and growth of spherical graphitic clusters under ion implantation	Journal of electron microscopy	51(Suppl)	S183-S188
188	Kiguchi, T., Wakiya, N., Shinozaki, K., Mizutani, N.	2002	IN-SITU	Analysis of Formation Process of Ferroelectric Domain Structure in PZT Thin Films by In-Situ TEM	Key engineering materials	228/229	203-206
189	Yasuda, A., Kawase, N., Mizutani, W.	2002	IN-SITU	Carbon-Nanotube Formation Mechanism Based on in Situ TEM Observations	The journal of physical chemistry. B	106(51)	13294-13298
190	Jiang, C.-z., Chen, H.-b., Shi, Y., Fu, Q.	2002	IN-SITU	In situ TEM investigation of the nucleation and growth of nickel nanocrystals	JOURNAL-CHINESE ELECTRON MICROSCOPY	21(5)	623-624

					SOCIETY		
191	Tanaka, M., Takeguchi, M., Furuya, K.	2002	IN-SITU	In-situ observation of Pd ₂ Si islands on Si by UHV-TEM/STM	Journal of crystal growth	237/239	254-258
192	?Nogiwa, K., Yamamoto, T., Fukumoto, K., Matsui, H., Nagai, Y., Yubuta, K., Hasegawa, M.	2002	IN-SITU	In situ TEM observation of dislocation movement through the ultrafine obstacles in an Fe alloy	Journal of nuclear materials	307/311	946-950
193	Delmas, F., Casanove, M. J., Courret, A., Coujou, A.	2002	IN-SITU	Study of the Nanoscale Precipitation in 6056 Alloy (AlMgSi) by Conventional Transmission Electron Microscopy and TEM In-Situ Straining Experiments	Materials science forum	396/402(2)	1109-1114
194	Oleshko, V. P., Crozier, P. A., Cantrell, R. D., Westwood, A. D.	2002	IN-SITU	In situ real-time environmental TEM of gas phase Ziegler-Natta catalytic polymerization of propylene	Journal of electron microscopy	51 (Suppl)	S27-S40
195	Wang, Z. L., Dai, Z. R., Gao, R., Gole, J. L.	2002	IN-SITU	Measuring the Young's modulus of solid nanowires by in situ TEM	Journal of electron microscopy	51 (Suppl)	S79-S86
196	Minor, A. M., Lilleodden, E. T., Stach, E. A., Morris, J. W.	2002	IN-SITU	A Method for Extracting Quantitative Data During In Situ TEM Nanoindentation	Materials Research Society symposia proceedings	695	165-170
197	Gai, P. L.	2002	IN-SITU	Development of Wet Environmental TEM (Wet-ETEM) for In Situ Studies of Liquid-Catalyst Reactions on the Nanoscale	Microscopy and microanalysis	8(1)	21-28
198	Sinclair, R., Itoh, T., Chin, R.	2002	IN-SITU	In Situ TEM Studies of Metal-Carbon Reactions	Microscopy and microanalysis	8(4)	288-304
199	Xie, Z., Liu, Y., Stach, E.	2003	IN-SITU	In situ TEM study of the shape recovery process in predeformed NiTi shape memory alloy	Journal de physique. IV, Proceedings	112(2)	769-772
200	Li, S., Yip, T. H., Ramanujan, R. V., Liang, M. H.	2003	IN-SITU	In situ TEM studies of the mechanisms of crack nucleation and propagation in fully lamellar microstructures	Materials science and technology	19(7)	902-906
201	Zhou, G., Yang, J.C.	2003	IN-SITU	Temperature effect on the Cu ₂ O oxide morphology created by oxidation of Cu(0 0 1) as investigated by in situ UHV TEM	Applied surface science	210(3/4)	165-170
202	Ouyang, L.-z., Luo, C.-p., Liu, J.-w., Zeng, M.-q.	2003	IN-SITU	A TEM study of in-situ formed (Al ₂ O ₃) _p /(Al-4wt.% Mg) composites	JOURNAL-CHINESE ELECTRON MICROSCOPY SOCIETY	22(1)	50-55
203	Liu, Y., Xie, Z.	2003	IN-SITU	TEM in situ study of the pre-strained NiTi shape memory alloy-driving force for shape recovery?	Materials science & engineering. properties, microstructure and	361(1/2)	185-190

					processing. A		
204	Zhou, G., Yang, J.C.	2003	IN-SITU	Initial oxidation kinetics of copper (110) film investigated by in situ UHV-TEM	Surface science	531(3)	359-367
205	Boyall, N. M., Durose, K., Watson, I. M.	2003	IN-SITU	An In Situ TEM-Cathodoluminescence Study of Electron Beam Degradation of Luminescence From GaN and In _{0.1} Ga _{0.9} N Quantum Wells	Materials Research Society symposia proceedings	743	683-688
206	Zielinski, W., Pakiel, Z., Kurzydowski, K.J.	2003	IN-SITU	TEM in situ annealing of severely deformed Ni ₃ Al intermetallic compound	Materials chemistry and physics	81(2/3)	452-456
207	Xu, Z.	2003	IN-SITU	In situ TEM study of electric field-induced microcracking in piezoelectric single crystals	Materials science & engineering B	99(1/3)	106-111
208	Foecke, T., Kramer, D.E.	2003	IN-SITU	In situ TEM observations of fracture in nanolaminated metallic thin films	International journal of fracture	119(4)	351-357
209	Dai, P.-q., He, Z.-r., Mao, Z.-y.	2003	IN-SITU	In situ TEM observation on fracture of H68 brass	CHINESE JOURNAL OF NONFERROUS METALS	13(4)	919-923
210	Zu, X.T., Zhu, S., Xiang, X., You, L.P., Huo, Y., Wang, L.M.	2003	IN-SITU	In situ TEM observation of heavy-ion-irradiation-induced amorphization in a TiNiCu shape memory alloy	Materials science & engineering. properties, microstructure and processing. A	363(1/2)	352-355
211	Zheng, M. Y., Zhang, W. C., Wu, K., Yao, C. K.	2003	IN-SITU	The deformation and fracture behavior of SiCw/AZ91 magnesium matrix composite during in-situ TEM straining	Journal of materials science	38(12)	2647-2654
212	Li, J.X., Chu, W.Y., Wang, Y.B., Qiao, L.J.	2003	IN-SITU	In situ TEM study of stress corrosion cracking of austenitic stainless steel	Corrosion science	45(7)	1355-1365
213	Hugo, R.C., Kung, H., Weertman, J.R., Mitra, R., Knapp, J.A., Follstaedt, D.M.	2003	IN-SITU	In-situ TEM tensile testing of DC magnetron sputtered and pulsed laser deposited Ni thin films	Acta materialia	51(7)	1937-1943
214	Zhou, G., Yang, J. C.	2003	IN-SITU	Dramatic Effect of Temperature on Metal-Oxide Nanostructures: Oxidation of Cu Films by In Situ UHV-TEM	Materials Research Society symposia proceedings	739	95-100
215	Li, P., Howe, J. M.	2003	IN-SITU	In Situ TEM Studies of Sessile Dislocation Arrangements and N Vacancy Ordering in ZrN	Materials Research Society symposia proceedings	779	141-146
216	Zielinski, W., Swiatnicki, W., Barstch, M., Messerschmidt, U.	2003	IN-SITU	Non-uniform distribution of plastic strain in duplex steel during TEM in situ deformation	Materials chemistry and physics	81(2/3)	476-479

4. 고에너지 활용분야

No.	Author	Year	Index	Subject	Journal	Vol	Page
1	Konno, T. J., Sinclair, R.	1996	HVEM	In Situ Atomic Resolution Electron Microscopy of Metal-Mediated Crystallization of Semiconductors	Materials science forum	204/ 206(2)	749-754
2	Takeuchi, G.	1998	HVEM	Analysis of Vibration in a High Voltage Electron Microscope	REPORT OF RESEARCHES-NIPPON INSTITUTE OF TECHNOLOGY	28(2)	255-258
3	Segawa, M., Taniyama, A., Shindo, D.	1998	HVEM	HREM observation of the interface between Laves-phases and matrix phases in Inconel 718 by using a high-voltage electron microscope	ISIJ international	38(12)	1375-1386
4	Wall, M. A., Dahmen, U.	1998	HVEM	An in situ nanoindentation specimen holder for a high voltage transmission electron microscope	Microscopy research and technique	42(4)	248-254
5	Hiroi, Zenji, Horiuchi, Shigeo	1998	HVEM	High-voltage high-resolution electron microscopy study of alkaline-earth copper oxides	Microscopy research and technique	40(4)	251-264
6	Allen, C. W., Dorignac, D.	1998	HVEM	Survey of high voltage electron microscopy worldwide in 1998	Electron microscopy		275-276
7	Hayashi, S., Katsuta, T., Matsui, I., Takaoka, A.	1998	HVEM	Fully remote-controlled system for a 3 MV ultra-high voltage electron microscope	Electron microscopy		279-280
8	Morita, C., Arai, S., Kuroyanagi, T., Miyauchi, K.	1998	HVEM	Improvement of a field emission gun system installed on a high voltage electron microscope	Electron microscopy		285-286
9	Kotrschal, K., Royer, S., Kinnamon, J.C.	1998	HVEM	High-Voltage Electron Microscopy and 3-D Reconstruction of Solitary Chemosensory Cells in the Anterior Dorsal Fin of the Gadid Fish Ciliata mustela(Teleostei)	Journal of structural biology	124(1)	59-69
10	Furuya, K., Mitsubishi, K., Song, M., Saito, T.	1998	HVEM	In-situ ion implantation of Xe into Al with high-resolution high-voltage electron microscopy	Ion Implantation Technology Proceedings, 1998	2	811-814
11	Martone, M. E., Deerinck, T. J., Young, S. J., Ellisman, M. H.	1999	HVEM	Three Dimensional Protein Localization Using High Voltage Electron Microscopy	Japan Society of Histochemistry and Cytochemistry		35-46
12	Muto, S., Horiuchi, S., Tanabe, T.	1999	HVEM	Local structural order in electron-irradiated graphite studied by high-resolution high-voltage electron microscopy	Journal of electron microscopy	48(6)	767-776
13	Yoshida, K., Takaoka, A., Hayashi, S., Matsui, I.	1999	HVEM	Development of a remote operation system for an ultra-high-voltage electron microscope	Journal of electron microscopy	48(6)	865-872
14	Mori, H.	1999	HVEM	Materials Modification with High Voltage	Structural defects		89-94

				Electron Microscopy	in advanced materials		
15	Utsuro, H., Takai, Y., Ikuta, T., Shimizu, R.	1999	HVEM	Optimization of voltage axis alignment in high-resolution electron microscopy	Journal of electron microscopy	48(6)	905-908
16	Hama, K., Arii, T., Ito, Y.	2000	HVEM	High-voltage electron microscopy in neurocytology	Journal of electron microscopy	49(1)	1-4
17	Kato, T., Nunome, K., Morimoto, Y., Nishimura, K., Saka, H.	2000	HVEM	In-situ high-voltage electron microscopy observations of reactions between molten Zn and Fe	Philosophical magazine letters,	80(4)	187-192
18	Mastrorarde, D., Kremer, J., O Toole, E., Morphew, M., Ladinsky, M., McIntosh, R.	2000	HVEM	Resources for the study of cellular structure by high voltage electron tomography, serial thin sectioning, specific labeling, and image analysis	Microscopy and microanalysis	v3, suppl. 2	231-232
19	Martone, M. E., Deerinck, T. J., Yamada, N., Bushong, E., Ellisman, M. H.	2000	HVEM	Correlated 3D Light and Electron Microscopy: Use of High Voltage Electron Microscopy and Electron Tomography for Imaging Large Biological Specimens	Journal of histotechnology	23(3)	261-272
20	Nagata, T.	2000	HVEM	Three-dimensional high voltage electron microscopy of thick biological specimens	Micron	32(4)	387-404
21	Flinn, P. A., Lee, S., Doan, J. C., Bravman, J. C., Marieb, T., Madden, M. C.	2000	HVEM	A high voltage scanning electron microscope for the in situ observation and recording of electromigration voids in metal lines on integrated circuits	Microscopy and microanalysis	v3, suppl. 2	615-616
22	Watanabe, T.	2000	HVEM	Best use of high-voltage, high-powered electron beams: a new approach to contract irradiation services	Radiation physics and chemistry,	57(3/6)	635-639
23	Osterman, J., Hallen, A., Jargelius, M., Zimmermann, U., Galeckas, A., Breitholtz, B.	2000	HVEM	Electron Beam Induced Current Investigation of High-Voltage 4H Silicon Carbide Diodes	Materials science forum	338/342(1)	777-780
24	Koike, T., Watanabe, S., Suda, T., Ohnuki, S., Takahashi, H.	2001	HVEM	Dynamical Study of Radiation-Induced Amorphization in NiTi by High Resolution - High Voltage Electron Microscopy	Advanced materials and processing		1347-1350
25	Nagata, T.	2001	HVEM	Three-Dimensional and Four-Dimensional Observation of Histochemical and Cytochemical Specimens by High Voltage Electron Microscopy	Acta histochemica et cytochemica	34(3)	153-170
26	Iwamoto, C., Shen, X. Q., Okumura, H., Matuhata, H., Ikuhara, Y.	2001	HVEM	Nanometric inversion domains in conventional molecular-beam-epitaxy GaN thin films observed by atomic-resolution high-voltage electron microscopy	Applied physics letters	79(24)	3941-3943

27	Higashida, K., Kawamura, T., Morikawa, T., Miura, Y., Narita, N., Onodera, R.	2001	HVEM	HVEM observation of crack tip dislocations in <i>silicon crystals</i>	Materials science & engineering. properties, microstructure and processing. A	319/321	683-686
28	Messerschmidt, U.	2001	HIVEM	High-voltage electron microscope high-temperature in situ straining experiments to study dislocation dynamics in intermetallics and quasicrystals	Journal of microscopy	203(1)	68-71
29	Ivan kova, E. M., Adhikari, R., Michler, G. H.	2002	HIVEM	Deformation mechanisms in modified polystyrene studied by high-voltage electron microscopy	Proceedings of SPIE--the international society for optical engineering	4627	271-274
30	Pascher, R., Berthold, C.-H., Rydmark, M.	2002	HIVEM	Computer-assisted simulation of high-voltage electron microscopy using serial images recorded by conventional transmission electron microscopy	Journal of electron microscopy	51(2)	113-126
31	Nagata, T.	2002	HVEM	X-ray microanalysis of biological specimens by high voltage electron microscopy	Electron microscopy; ICEM 15	2	165-168
32	Howlander, M. M. R., Kinoshita, C., Shiyama, K., Kutsuwada, M.	2002	HIVEM	Electrical conductivity of Wesgo AL995 alumina under fast electron irradiation in a high voltage electron microscope	Journal of applied physics	92(4)	1995- 1999
33	Howe, J. M., Reynolds, W. T., Vasudevan, V. K.	2002	HVEM	Static and In-Situ High-Resolution Transmission Electron Microscopy Investigations of the Atomic Structure and Dynamics of Massive Transformation Interfaces in a Ti-Al Alloy	Metallurgical and materials transactions. A	33(8)	2391- 2412
34	Higashida, K., Narita, N., Tanaka, M., Morikawa, T., Miura, Y., Onodera, R.	2002	HIVEM	Crack tip dislocations in silicon characterized by high-voltage electron microscopy	Philosophical magazine. A	82 (17/18)	3263- 3274
35	Ohno, T., Sengoku, M., Arii, T.	2002	HVEM	Measurements of electron beam damage for organic crystals in a high voltage electron microscope with image plates	Micron	33(4)	403-406
36	Sakata, T., Okado, H., Mori, H.	2002	HVEM	Crystallized palladium silicide formation on Si(111) at room temperature observed by ultra high voltage electron microscopy	Electron microscopy; ICEM 15	1	549-552
37	Yamamoto, Kazuo, Tanji, Takayoshi, Hibino, Michio, Schauer, Peter, Autrata, Rudolf	2002	HIVEM	Improvement of light collection efficiency of lens-coupled YAG screen TV system for a high-voltage electron microscope	Microscopy research and technique	49(6)	596-604
38	Ishikawa, N.	2002	HIVEM	The investigation of high voltage electron irradiation effect in wustite	Current advances in materials and processes : report of the ISIJ Meeting	15(4)	728
39	Hayashi, T.,	2002	HVEM	In situ observation of glide motions of	Journal of nuclear	307/	993-997

	Fukmuto, K., Matsui, H.			SIA-type loops in vanadium and V-5Ti under HVEM irradiation	materials	311(2)	
40	Ivankova, E. M., Adhikari, R., Michler, G. H., Weidisch, R., Knoll, K.	2003	HVEM	Investigation of the micromechanical deformation behavior of styrene-butadiene star block copolymer/polystyrene blends with high-voltage electron microscopy	Journal of polymer science Part B	41(11)	1157-1167
41	Akiyama, T., Shimojo, S., Nishio, S., Kitatsuji, Y., Peltier, S., Hutton, T., Lin, Fang-Pang	2003	HVEM	Telecontrol of ultra-high voltage electron microscope over global IPv6 network	Applications and the Internet Workshops, 2003. Proceedings.		184
42	Katagiri, N., Simatani, Y., Arie, T., Katagiri, Y.	2003	HVEM	Extraocular Photoreception of a Marine Gastropoda, Onchidium: Three-Dimensional Analysis of the Axons of Dermal Photoreceptor Cells in the Dorsal Mantle Examined with a High-Voltage Electron Microscope	Symposium for life sciences and medicine	11	86-90

5. 3차원 이미징 활용분야

No.	Author	Year	Index	Subject	Journal	Vol	Page
1	Hama K, Nagata F	1970	3-D	A stereoscope observation of tracheal epithelium of mouse by means of the high voltage electron microscope	Journal of Cell Biology	45(3)	654-659
2	Shelton PM, Horridge GA, Meinertzhagen IA	1971	3-D	Reconstruction of synaptic geometry and neural connections from serial thick sections examined by the medium high voltage electron microscope	Brain Res	29(2)	373-377
3	Marraud RA, Chretien M	1973	3-D	Three-dimensional structure of the forming face of the Golgi apparatus as seen in the high voltage electron microscope after osmium impregnation of the small nerve cells in the semilunar ganglion of the trigeminal nerve	Journal of Microscopy	97(1)	49-57
4	Cox G	1973	3-D	The application of stereo-micrography in the high voltage electron microscope to studies of cell-wall structure and deposition	Journal of Microscopy	97(1)	29-40
5	Rambourg A, Clermont Y, Marraud A	1974	3-D	Three-dimensional structure of the osmium-impregnated Golgi apparatus as seen in the high voltage electron microscope	Am J Anat	140(1)	27-45
6	Sattler CA, Staehelin LA	1976	3-D	Reconstruction of oral cavity of Tetrahymena pyriformis utilizing high voltage electron microscopy	Tissue Cell	8(1)	1~18
7	Byers HR, Porter KR	1977	3-D	Transformations in the structure of the cytoplasmic ground substance in erythrophores during pigment aggregation and dispersion. I. A study using whole-cell preparations in stereo high voltage electron microscopy	Journal of Cell Biology	75(Pt1)	541-558
8	Uhrik B, Zacharova D	1979	3-D	Three-dimensional arrangement of sarcoplasmic reticulum in crayfish as seen by high voltage electron microscope	Cell Tissue Res	202(2)	343-346
9	浜清	1984	3-D	培養細胞全載標本の超高電顯微鏡 Whole cell observation of cultured cells by means of high voltage electron microscopy	組織培養	10	414-417
10	Parsons DF, Marko M, Radermacher M, Frank J	1985	3-D	Shape changes and polarization of cells migrating through tissue. A high-voltage electron microscope and computer graphics study of serial thick sections	Tissue Cell	17(4)	491-510
11	Kawakami H, Hirano H	1985	3-D	Three-dimensional reconstruction of the open canalicular system of human platelets by means of high-voltage electron microscopy	Journal of Electron Microscopy	34(1)	38-41
12	Hayato Kawakami	1985	3-D	Three-dimensional reconstruction of the open canalicular system of human platelets by means of high-voltage electron microscopy	Journal of Electron Microscopy	34	38-41
13	K. Hama	1985	3-D	Three dimensional image analysis using HVEM stereo pair picture of thick biological specimens	In Situ Experiments with High Voltage Electron Microscopy	455-460	

14	K. Hama	1986	3-D	Three dimensional image analysis of HVEM tilt images of thick biological specimens	Proc.11th ICEM	2	1161-1166
15	Mariko Yoshida, Fumio Uno, Shiro Nii	1986	3-D	High voltage electron microscopy of whole cells infected with herpes simplex virus type 1.	Journal of Electron Microscopy	Vol. 35, No. 1	47-59
16	Mariko Yoshida	1986	3-D	High voltage electron microscopy of whole cells infected with herpes simplex virus type 1.	J.Elctron Microsc.	35	47-59
17	Toshio Kosaka	1986	3-D	Three-dimensional structure of astrocytes in the rat dentategyrus	J.Comp.Neurol.	249	242-260
18	SOH HIDAKA	1986	3-D	The Synaptic Ultrastructure in the Outer Plexiform Layer of the Catfish Retina: A Three-Dimensional Study with HVEM and Conventional EM of Golgi-impregnated Bipolar and Horizontal Cells	J.Comp.Neurol.	247	181-199
19	H.Kawakami	1986	3-D	Rearrangement of the open-canalicular system of the human blood platelet after incorporation of surface-bound ligands. A high-voltage electron-microscopic study	Cell Tissue Res	245	465-469
20	Kiyoshi Hama	1986	3-D	Three dimensional organization of neurons and glia cells as revealed high voltage electron microscope stereoscopy	Biomed. Res. 7, Suppl.	2	241-251
21	Tatsuo.Arii, Kiyoshi.Hama	1987	3-D	Method of Extracting Three-Dimensional Information from HVTEM Stereo Images of Biological Materials	Journal of Electron Microscopy	36 No4	177-195
22	Kiyoshi Hama	1987	3-D	Three-Dimensional Analysis of High Voltage Electron Microscope Tilt Image: Methods and Problems	J.Electron Microsc. Tech	6	185-192
23	Tatsuo Arii	1987	3-D	Method of Extraction Three-Dimensional Information from HVTEM Stereo Image of Biological materials	J.Electron Microsc.	36	177-195
24	Takasaka T, Shinkawa H	1987	3-D	Serial section reconstruction of the guinea pig outer hair cells as studied with a high-voltage electron microscope and a computer-graphic display	Acta Otolaryngol	435	7-20
25	Boothroyd, C.B., Baxter, C.S., Bithell, E.G., Hytch, M.J., Ross, F.M., Sato, K.	1989	3-D	The determination of the structure and composition at interfaces to atomic resolution	Ultramicroscopy	29(1/4)	18-30
26	Glaser, R.M., Tong, L., Kim, S.-H.	1989	3-D	Three-dimensional reconstructions from incomplete data: Interpretability of density maps at "atomic" resolution	Ultramicroscopy	27(93)	307-318
27	Kiyoshi Hama	1989	3-D	Three-Dimensional Morphometrical Study of Dendritic Spines of the Granule Cell in the Rat Dentate Gyrus With HVEM Stereo Image	J.Elctron Microsc. Tech	12	80-87
28	Hama K, Arii T, Kosaka T	1989	3-D	Three-dimensional morphometrical study of dendritic spines of the granule cell in the rat dentate gyrus with HVEM stereo image	J Electron Microsc Tech	12(2)	80-87
29	Kurt.Kotrschal, John.C.Kinnamon, Suzanne.M.Royer	1990	3-D	High-Voltage Electron Microscopy and 3-D Reconstruction of Solitary Chemosensory Cells and Di-I Labeling of Primary Afferent Nerves	Electron Microscopy	3	412-413

30	Henderson, R.	1990	3-D	Atomic Resolution 3D Structures of Biological Molecules by Electron Microscopy	Electron		183-197
31	Akio.Takaoka, Katsumi.Ura	1991	3-D	Stereoscopic observation and determination of surface orientation of voids in stress-thermal-migrated aluminum lines of LSI with UHVEM	Ultramicroscopy	39	299-305
32	Kiyoshi Hama	1991	3-D	Three-Dimensional Organization of Neuronal and Glial Cell Processes as Revealed by HVEM Stereoscopy	Proc.49th EMSA		432-433
33	Kiyoshi Hama	1991	3-D	Three-Dimensional Morphometry of Biological Fine Structure Using Stereo Image	Proc.49th EMSA		144-145
34	Beorchia A, Ploton D, Menager M, Lebonballet S, Thiry M, Bonnet N	1991	3-D	Digital three-dimensional visualization of cellular organelles studied by medium- and high-voltage electron microscopy	J Microsc	163(Pt2)	221-231
35	Kiyoshi Hama	1991	3-D	The three Dimensional Morphology of the Astrocytic Process Covering the Surface of the Neuronal Soma with Many Terminal Boutons	Biomedical Research	12S2	159-160
36	Downing, K. H.	1992	3-D	Three-Dimensional Crystallographic Reconstruction for Atomic Resolution	Signal and image processing in microscopy and microanalysis	43-52	
37	Downing, K. H.	1992	3-D	Three-Dimensional Crystallographic Reconstruction for Atomic Resolution	Scanning microscopy. Supplement	6	43-
38	David Hessler, Stephen J. Young, Bridget O. Carragher, Maryann E. Martone	1992	3-D	Programs for Visualization in Three-Dimensional Microscopy	Neuroimage	1	55-67
39	Kiyoshi Hama	1992	3-D	Three dimensional morphological and morphometrical studies of cellular fine structure by means of the high voltage electron microscope	J.Clin.Electron Microscopy	25	319-322
40	Barnard DP, Turner JN, Frank J, McEwen BF	1992	3-D	A 360 degrees single-axis tilt stage for the high-voltage electron microscope	J Microsc	167(Pt1)	39-48
41	Philip J. Mercurio, T. Todd Elvins, Stephen J. Young, Philip S. Cohen, Keven R. Fall	1992	3-D	An Interactive Visualization Environment for Electron Microscopy and 3D Imaging	Communications of the ACM	Vol. 35, No. 6	55-63
42	H.R. Wenk, K. H. Dowing,Hu Meisheng, M. A. O'Keefe	1992	3-D	3D Structure Determination from Electron-Microscope Images: Electron Crystallography of Staurolite	Acta Cryst.	A48	700-716

43	Hama K, Ariei T, Kosaka T	1994	3-D	Three-dimensional organization of neuronal and glial processes: high voltage electron microscopy	Microsc Res Tech	1:29(5)	357-367
44	O'Keefe, M. A., Downing, K. H., Wenk, H.-R., Hu, M.	1994	3-D	3-D Imaging of Crystals at Atomic Resolution	Materials Research Society symposia proceedings	332	563-572
45	Henderson, R.	1998	3-D	Atomic Resolution 3D Structures of Biological Molecules by Electron Microscopy	BOOK- INSTITUTE OF MATERIALS	687	183-197
46	Martone, M. E., Deerinck, T. J., Young, S. J., Ellisman, M. H.	1999	3-D	Three Dimensional Protein Localization Using High Voltage Electron Microscopy	Japan Society of Histochemistry and Cytochemistry,		199935 -46
47	Nagata, T.	2000	3-D	Three-dimensional high voltage electron microscopy of thick biological specimens	Micron	32(4)	387-404
48	Nagata, T.	2001	3-D	Three-Dimensional and Four-Dimensional Observation of Histochemical and Cytochemical Specimens by High Voltage Electron Microscopy	Acta histochemica et cytochemica	34(3)	153-170

(첨부 8)

사업 관련
학회 및 학술지 발표 자료

1. 국제학회 발표:

- 1) YJ Kim, S Lee, Electron Beam Induced Phase Transformations from Metakaolinite to Mullite, Microscopy & Microanalysis' 99, Portland, Oregon, U.S.A., August 1-5, 1999.
- 2) S Lee, YJ Kim, HJ Lee, HS Moon, Phase Transformation Sequence in Kaolinite-Mullite Reaction Series and Orientation Relationship of the Intermediate Phase Studied by EF-TEM and HRTEM, Mullite 2000, Oban, England, August 28-30, 2000.
- 3) YJ Kim, S Lee, JM Jeong, YB Lee, In Situ EFTEM Study of Dehydration Processes in Gibbsite, Kaolinite and Pyrophyllite, Frontiers in Electron Microscopy in Materials Science, Matsue, Japan, Nov. 13-17, 2001.
- 4) S Lee, YJ Kim, HS Moon, CM Chon, EF-TEM Study of a Modulated Structure Represented by 14Å Modulation in Metakaolinite and Metadickite, Clay Mineral Society, Madison, Wisconsin, U.S.A., June 16-20, 2001.
- 5) YJ Kim, J Song, JK Kim, S Lee, Structure Analysis of Amorphous Silica in Diatom Frustules Using Energy-filtered Electron Diffraction Patterns, ACA 2002, San Antonio, Texas, U. S. A., May 25-30, 2002.
- 6) JH Song, SM Boo, YJ Kim, Electron Microscopy of a Cell Wall Structure of a Achnantheacean Diatomaceous Alga *Achnanthes brevipes*, Algae 2002, Tsukuba, Japan, July 19-24, 2002.
- 7) S Lee, YJ Kim, H-S Moon, IM Kang, KD Min, Thermal Transformations from Pyrophyllite to Mullite and Preferred Orientation of Mullite in a Needle Texture Pattern Investigated by EFTEM, IMA 2002, Edinburgh, England, September 1-6, 2002.
- 8) YJ Kim, Current Status of a New UHVEM installed in the Korea Basic Science Institute, JSM 2003, Sapporo, Japan, June 6-9, 2003.
- 9) S Lee, YJ Kim, H-S Moon, W-S Seo, EFTEM and HRTEM Studies of Metakaolinite and Metadickite, Broome 2003 International Crystallographic Meeting, Broom, Australia, Aug. 10-13, 2003.
- 10) YJ Kim, Performance and Application Plans of a New UHVEM Installed in

Korea, ISMA 1, Jeju, Korea, Oct. 20-25, 2003.

- 11) YM Kim, JM Jeung, JI Park, JG Kim, JH Song, YJ Kim, Accurate interpretation of electron diffraction data acquired with imaging plates, ISMA 1, Jeju, Korea, Oct. 20-25, 2003.
- 12) YM Kim, S Lee, SH Lee, YJ Kim, Electron irradiation characteristics for the transition phases from gibbsite, ISMA 1, Jeju, Korea, Oct. 20-25, 2003.

2. 국내학회 발표:

- 1) 이영부, 김윤중, 이석훈, 장식 광물에 대한 EPMA 분석에서 나타나는 양이온의 거동, 제 30 회 한국전자현미경학회(춘계), 고대 의대 의학관, 1999. 5. 28-29.
- 2) 정종만, 이영부, 김윤중, 분말시료의 TEM 관찰을 위한 Holey Grid 제작방법, 제 30 회 한국전자현미경학회(춘계), 고대 의대 의학관, 1999. 5. 28-29.
- 3) 이수정, 김윤중, 문희수, 변조 구조를 포함하는 메타카올리나이트 구조의 모델링에 관한 연구, 한국광물학회, 서울대, 1999. 6. 12.
- 4) 김윤중, Investigation of Feldspar Microstructures Using ESI (Electron Spectroscopic Imaging) Techniques, 한국금속학회(추계), 인하대, 1999. 10. 22-23.
- 5) 김윤중, 정종만, 이영부, 최재웅, 정연식, 박춘근, 에너지여과 투과전자현미경을 이용한 Hillebrandite의 3-D 구조연구, 한국세라믹학회(춘계), 명지대, 2000. 4. 21-22.
- 6) 김윤중, 국내에 설치·운영될 초고전압 투과전자현미경(UHV-TEM)의 특성 및 주요 활용 분야, 한국전자현미경학회, 한양대 안산 Campus, 2000. 5. 26-27.
- 7) 정종만, 이정민, 윤수병, 김윤중, 3-D 구조분석을 위한 TEM Double-tilting Holder의 β 값 측정장치 개발, 한국전자현미경학회, 한양대 안산 Campus, 2000. 5. 26-27.
- 8) 이수정, 김윤중, Kaolinite, Pyrophyllite 및 Gibbsite의 탈수과정 비교 연구, 대한지질학회, 충남대 기초과학관, 2000. 10. 27-28.
- 9) 김윤중, 에너지여과 투과전자현미경을 이용한 세라믹 재료의 상전이 연구, 한국세라믹학회(추계), 강원대 공과대학, 2000. 10. 20-21.
- 10) 김윤중, 정종만, 이영부, 이수정, TEM을 이용한 분말 시료의 역동적 가열실험법 연구, 한국전자현미경학회(추계), 가톨릭대 의대 의과학연구소, 2000. 11. 10-11.

- 11) 김윤중, 정종만, 이수정, 이영부, 에너지여과 투과전자현미경을 이용한 Gibbsite의 직접 가열실험, 한국세라믹학회(춘계), 인하대, 2001. 4. 27-28.
- 12) 이수정, 김윤중, 문희수, 가열에 의한 Gibbsite의 탈수반응 경로에 관한 재고찰, 한국세라믹학회(춘계), 인하대, 2001. 4. 27-28.
- 13) 정종만, 김윤중, TEM 직접 가열실험을 위한 분말시편 준비법, 한국세라믹학회(춘계), 인하대, 2001. 4. 27-28.
- 14) 이영부, 김윤중, 투과전자현미경의 냉각 시료지지대를 이용한 Amelia albite의 CBED 연구, 한국전자현미경학회(춘계, 기초(연)), 2001. 5. 25-26.
- 15) 정종만, 이정민, 윤수병, 김윤중, TEM Double-tilting Holder의 β 값 측정장치 제작 및 시험, 한국전자현미경학회(춘계), 기초(연), 2001. 5. 25-26.
- 16) 김윤중, 송지호, 이수정, 에너지여과된 전자회절도형을 이용한 비정질 실리카의 구조 분석, 한국세라믹학회(추계), KAIST, 2001. 10. 19-20.
- 17) 이수정, 김윤중, Pyrophyllite의 가열로 생성된 Mullite의 삼차원적 방향성 연구, 대한지질학회, 경북대, 2001. 10. 26-27.
- 18) 송지호, 김윤중, 부성민, 전자현미경을 이용한 Diatom의 3-D 구조 분석, 한국생물과학학회, 중앙대, 2001. 10. 26-27.
- 19) 정종만, 이정민, 윤수병, 김윤중, TEM Double-tilting Holder의 경사값 보정기 제작, 한국전자현미경학회(추계), 조선대, 2001. 11. 9-10.
- 20) 김윤중, 투과전자현미경(TEM)을 이용한 물질의 정량구조분석법 고찰, 한국결정학회(추계), 포항공대, 2001. 11. 16-17.
- 21) 김진규, 송지호, 김윤중, 투과전자현미경의 전자회절자료의 정량화에 대한 고찰, 한국결정학회(춘계), 서울시립대, 2002. 5. 18.
- 22) 이영부, 김윤중, 이정후, Albite의 ordering에 대한 TEM의 SADP 및 CBED 연구, 한국광물학회(춘계), 전북대, 2002. 5. 24-25.
- 23) 김영민, 정종만, 이수정, 김윤중, 정량구조분석을 위한 Gibbsite 분말의 TEM 시편 준비법, 한국전자현미경학회(춘계), 한양대, 2002. 5. 24-25.
- 24) 정종만, 이정민, 윤수병, 김윤중, TEM double-tilting holder와 rotating holder를 위한 보정기 제작, 한국전자현미경학회(춘계), 한양대, 2002. 5. 24-25.
- 25) 김윤중, 초고전압 투과전자현미경의 제작, 설치 및 운영 현황, 한국전자현미경학회(추계), 경북대, 2002. 11. 8-9.
- 26) 김영민, 이영부, 이수정, 김윤중, TEM 직접가열 실험과 빔 조사 효과에 의한

- Gibbsite의 상전이 과정에 관한 연구, 한국전자현미경학회(추계), 경북대, 2002. 11. 7-8.
- 27) 김진규, 이영부, 김윤중, EF-TEM을 이용한 직접가열 실험을 통한 Titanium의 고온에서의 상변화 연구, 한국결정학회(추계), 표준연, 2002. 11. 21-22.
- 28) 김윤중, 초고전압 투과전자현미경의 제작 현황 및 운영 계획, 한국전자현미경학회(추계), 경북대, 2002. 11. 7-8.
- 29) 김영민, 이영부, 이수정, 김윤중, TEM 직접가열 실험과 빔 조사 효과에 의한 Gibbsite의 상전이 과정에 관한 연구, 한국전자현미경학회(추계), 경북대, 2002. 11. 7-8.
- 30) 김진규, 이영부, 김윤중, EF-TEM을 이용한 직접가열 실험을 통한 Titanium의 고온에서의 상변화 연구, 한국결정학회(추계), 표준연, 2002. 11. 21-22.
- 31) 김영민, 정종만, 이수정, 김윤중, Gibbsite 상전이에 관한 전자빔 조사효과의 EF-TEM을 이용한 정량화, 한국결정학회(춘계), 서울산업대, 2003. 5. 23-24.
- 32) 이수정, 김윤중, 문희수, 서원선, 투과전자현미경에 의한 메타카올리나이트 및 메타딕카이트의 구조 고찰, 한국광물학회, 한국지질자원연구원, 2003. 5. 30.
- 33) 박종일, 김진규, 송지호, 김윤중, EF-TEM을 이용한 비정질 실리카 나노입자의 구조 및 상전이 연구, 한국전자현미경학회(춘계), 유성호텔, 2003. 5. 30-31.
- 34) 김윤중, 최근 국내에 설치된 초고전압 투과전자현미경의 특성 및 활용 계획, 한국전자현미경학회(추계), 연대 원주분교, 2003. 11. 7-8.
- 35) 정종만, 이정민, 김윤중, HVEM에 사용되는 Specimen Holder의 보관 장치인 Dry Pumping System의 자체 제작, 한국전자현미경학회(추계), 연대 원주분교, 2003. 11. 7-8.
- 36) 김영민, 김진규, 김윤중, 허만희, 권경훈, 초고전압 투과전자현미경의 원격 시범 운영, 한국결정학회(추계), 원자력연구소, 2003. 11. 21.

3. 국제 학술지 발표:

- 1) Sujeong Lee, Y.J. Kim, H-S Moon, Phase Transformation Sequence from Kaolinite to Mullite Investigated by an Energy-Filtering TEM, J. of American Ceramic Society, 82(10), 2841-2848, 1999.

- 2) Y.J. Kim, Sujeong Lee, Electron Beam Induced Phase Transformations from Metakaolinite to Mullite, *Microscopy and Microanalysis*, 5, 530-531, 1999.
- 3) K.T. Moon, J.K. Jeon, Y.J. Kim, D.P. Kim, Preparation of Al-B-N Nanocomposite Phase from Mixture of Pre ceramic Polymer and Metal Components, *Scripta Mater.*, 44, 2111-2115, 2001.
- 4) Sujeong Lee, Y.J. Kim, H.J. Lee, H-S Moon, Electron Beam Induced Phase Transformations from Metakaolinite to Mullite Investigated by EF-TEM and HRTEM, *J. Am. Ceram. Soc.*, 84(9), 2096-2098, 2001.
- 5) CK Rhee, HR Ryu, YJ Kim, Photodissolution of Cleaved CdTe(110): Atomic Force Microscopic and Auger Electron Spectroscopic Study, *Applied Surface Science*, 187, 179-186, 2002.
- 6) Sujeong Lee, Y.J. Kim, H-S Moon, EF-TEM Study of a Modulated Structure in Metakaolinite Represented by a 14Å Modulation, *J. Am. Ceram. Soc.*, 86(1), 174-176, 2003.
- 7) J-M Yang, J-C Park, D-G Park, K-Y Lim, S-Y Lee, S-W Park, Y-J Kim, Epitaxial C49-TiSi₂ phase formation on the silicon (100), *J. Applied Physics*, 94(6), 4198-4202, 2003.

4. 국내 학술지 발표:

- 1) 정종만, 이영부, 김윤중, 원심분리기를 이용한 분말시료의 TEM용 시편 준비법 연구, *한국전자현미경학회지*, 29(1), 67-73, 1999.
- 2) 이영부, 김윤중, 전자회절도형을 이용한 무기시료의 격자상수 측정법 연구, *한국전자현미경학회지*, 29(1), 75-81, 1999.
- 3) 이수정, 김윤중, 문희수, 에너지여과 투과전자현미경을 이용한 카올리나이트의 탈수 반응 연구, *한국광물학회지*, 12(1), 23-31, 1999.
- 4) 이수정, 문희수, 김윤중, 다구조형과 불순물이 카올린광물의 상전이에 미치는 영향: I. 카올리나이트와 덕카이트, *자원환경지질*, 32, 399-409, 1999.
- 5) 이수정, 문희수, 김윤중, 다구조형과 불순물이 카올린광물의 상전이에 미치는 영향: II. 할로이사이트, *자원환경지질*, 32, 411-418, 1999.

- 6) 이수정, 김윤중, 문희수, EF-TEM을 이용한 납석-물라이트의 상변이 특성, 한국세라믹학회지, 38(2), 199-206, 2001.
- 7) 김윤중, 정종만, 이영부, 이수정, 송지호, 분말 시료의 TEM 직접 가열 실험법 연구, 한국전자현미경학회지, 31(4), 315-323, 2001.
- 8) 김윤중, 투과전자현미경을 이용한 Tridymite의 구조 및 상전이 연구, 한국광물학회지, 15, 44-58, 2002.
- 9) 이수정, 주형태, 김윤중, 문희수, Texture Electron Diffraction Pattern에 의한 결정구조 해석, 한국전자현미경학회지, 32(3), 185-193, 2002.
- 10) 김영민, 정종만, 이수정, 김윤중 (2002) 정량구조분석을 위한 Gibbsite 분말의 TEM 시편준비법, 한국전자현미경학회지 32(4), 311-317, 2002.
- 11) 김진규, 이영부, 김윤중, EF-TEM 직접가열 실험을 통한 titanium의 고온 상전이 연구, 한국전자현미경학회지, 33(1), 59-58, 2003.
- 12) 김윤중, 이영부, XRD와 TEM을 이용한 Albite의 구조 및 상전이 연구, 한국광물학회지, 16(1), 91-106, 2003.
- 13) 김영민, 김윤중, Imaging Plate에 기록된 전자회절자료의 해석, 한국전자현미경학회지, 33(3), 59-58, 2003.
- 14) 이영부, 김윤중, 이석훈, 이정후 (2003) 전자현미경을 이용한 Anorthoclase의 미세구조 및 화학 연구, 한국광물학회지, 16(3), 233-243, 2003.
- 15) 박종일, 김진규, 송지호, 김윤중, EF-TEM을 이용한 비정질 실리카 나노입자의 구조 및 상전이 연구, 한국전자현미경학회지, 33(4), , 2003.
- 16) 김영민, 김진규, 김윤중, 허만희, 권경훈, 초고전압 투과전자현미경의 원격 시범 운영, 한국전자현미경학회지, 33(4), , 2003.



<제주 국제학회(ISMA)에서 사업결과 발표 장면 (2003. 10. 21)>



<제주 국제학회(ISMA)에서 발표 후 질의응답 장면 (2003. 10. 21)>

(첨부 9)

연구개발 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

원자단위의 구조까지 직접 관찰할 수 있는 가속전압 1 MV 이상의 최첨단 초고전압 투과전자현미경을 한국기초과학지원연구원(기초연, KBSI) 대덕본원에 설치하여 기초과학 및 응용과학 분야에서 국가적인 공동 연구장비로 활용하고 국제 수준의 전자현미경 공동연구센터의 주장비로 육성하고자 하였다. 국제적인 무한 기술경쟁이 본격화하는 21세기에 국내의 연구생산성 및 연구경쟁력을 획기적으로 제고시키기 위해서는 차세대 나노반도체를 포함한 신물질의 원자단위 구조분석, 뇌세포를 포함한 생체의 삼차원적 구조분석, 소재의 역동적 구조 및 물성 변화 연구, 전자빔 및 이온빔을 이용한 극한 소재의 개발 등 핵심 NT/BT 분야에서 과학기술 발전에 기여할 수 있는 초정밀 분석 장비 및 기술을 본 사업을 통해 국내의 과학기술자에게 조기에 제공하는 것이 필요하다.

2. 연구수행결과 현황

2003년 9월 현재 본 사업에서 목적하였던 기초과학 및 응용과학 분야에서 국가적인 공동 연구장비로 활용할 수 있는 최첨단 초고전압 투과전자현미경(가속전압 1.3MV)을 한국기초과학지원연구원 대덕본원에 성공적으로 설치하였다. 금년 10월 중에 장비제조사인 일본 JEOL사로부터 장비 운용 및 보수유지에 관한 종합적인 교육을 습득하고 금년 11월부터 내년 3월까지 시험 가동을 수행한 후 장비의 외부 사용은 2004년 4월부터 시작할 예정이다.

3. 연구성과

국내에 처음으로 도입, 설치한 초고전압 투과전자현미경 장비는 최근 일본, 독일 및 미국에 설치된 동급 장비에 비교하여 아래와 같은 다섯 가지 특징을 가지고 있다.

(1) 원자분해능(0.12nm)과 고경사각($\pm 60^\circ$)의 동시 실행:

세계적으로도 처음 갖는 기능으로 무기 및 유기 신물질의 삼차원적 구조를 원자 수준으로 분석이 가능하다. 장비의 성능시험 중 세계 최초로 Si wafer의 원자분해능 사진을 [110]-[100]-[111] 방향에서 얻을 수 있었다. 분해능 면만을 보면 현재 일본의 동북대와 동경대, 그리고 독일의 MPI(Max-Plank-Institute, Stuttgart)에 설치된 동급 장비의

0.10nm에 미치지 못하나 이들 장비는 $\pm 40^\circ$ 이상의 경사가 불가능하기 때문에 삼차원적 구조분석이 크게 제한된다. 이러한 새로운 기능은 21세기 국가 전략사업이 될 나노미터 단위의 다층 복합구조 반도체의 평가 및 개발은 물론, 최근 프론티어 사업 등을 통해 국내에서도 본격화하고 있는 뇌세포 및 뇌질환과 관련된 연구개발에도 획기적인 기여를 하리라고 기대한다.

(2) 최첨단 에너지 여과장치 부착:

에너지 여과장치는 명암대비가 약한 시료, 특히 생물시료의 관찰에 효과적이다. 또한, 시료의 화학성분, 화학분포 및 전자구조를 정밀 분석할 수 있어 차세대 소재로 주목되고 있는 경원소 신소재의 분석에 유용하다. 본체에 부착된 에너지여과장치(HV-GIF)는 새롭게 개발된 기종으로 독일의 MPI와 일본의 국립재료연구소에 부착된 동일 기종에 비해서 모든 기능이 향상되었으며 특히 plasmon-loss 영역에서도($\Delta V \sim 20\text{eV}$) 원자분해능 관찰이 가능함을 확인하였다. 이런 경우 정량적인 작업을 수행한다면 신물질의 분석에서 서로 다른 원자의 종류까지도 직접 구별할 수 있는 새로운 길을 열 수 있기 때문에 장비의 시험가동 기간에 이 분야를 집중적으로 점검할 예정이다.

(3) 역동적 연구에 필요한 다양한 시료지지대의 구비:

넓은 범위(액체헬륨 온도 $\sim 1500^\circ\text{C}$)의 변온 실험과 변형 실험을 역동적으로 할 수 있는 시료지지대를 준비하였다. 저온 시료지지대는 단백질 구조분석, 초전도물질 연구 등에 필수적이며 고온 및 변형 시료지지대는 고온 소재 연구 및 역동적인 상변이 연구 등 신물질 및 신공정 개발에 활발히 이용할 수 있다. 특기할 사항은 고온 시료지지대의 성능시험 중 1100°C 에서도 원자분해능 이미지를 얻었는데 이는 동급 장비에서 얻은 원자분해능 이미지 중 가장 고온에서 얻은 것이다. 고온 가열실험 시에 시편의 유동을 막기 위해 새롭게 제작된 water recirculator를 사용하였다.

(4) 원격제어로 기기 운용:

세계에서 세 번째이며 JEOL 장비로서는 처음 시도되는 원격운용 방식이다. 일본 Hitachi 사에서 오오사카 대학과 Hitachi 중앙연구소에 각각 설치한 동급 장비는 Workstation-base로 운용되며 원격운용만이 가능함에 비해 본 장비는 PC-base로 운용되며 직접운용도 가능하다. 특히, 세계적으로도 선진화된 국내의 IT 기술과 접목하면 사용자에게 접근이 용이하고 친근한 운용환경을 제공하여 초고전압 투과전자현미경의 활용도를 극대화할 수 있고 급속히 발달하는 컴퓨터 산업에 발맞추어 필요시 기기의 성능을 손쉽게 개선시킬 수 있는 장점이 있다.

(5) 이온빔 가속기 장착 가능:

장래에 꼭 필요하다고 생각되는 이온빔 가속기의 부착을 위하여 장비의 본체에 접속 부위를 제작하였으며 전자현미경동에 이온빔 가속기를 설치할 수 있는 공간 및 부대시설을 확보하였다. 이온빔 가속기의 부착은 일본의 국립재료연구소와 홋카이도 대학, 그리고 미국의 국립아르곤연구소의 장비를 대표적으로 들 수 있는데 전통적인 원자로와 핵융합로의 재료연구에 활용하는 외에도 최근 신소재 개발에도 활용이 증가하고 있다. 국내의 원자력연구소는 이온빔 가속기를 자체 제작할 수 있는 기술력을 가지고 있기 때문에 우리나라의 현실에 필요한 사양의 이온빔 가속기를 적기에 국내 제작하고 부착하여 장비의 활용성을 더욱 넓힐 예정이다.

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

(1) 국가적인 전략산업인 차세대 반도체 개발, 나노구조 신소재 개발에 필수적인 삼차원적 원자분해능 및 에너지여과 분석기능을 제공하여 NT분야의 독자적인 기술 개발을 촉진한다. 또한, 국가적 공동연구장비인 초고전압투과전자현미경(전자 회절분석), 포항방사광가속기(X-선 회절분석) 및 하나로 시설(중성자 회절분석)을 연계하여 국가 전략물질 개발에 필요한 정밀구조분석 프로그램을 공동 수행한다.

(2) 생명과학의 핵심 연구 분야인 뇌 구조 연구, 단백질 구조 연구, 신약 개발 등에 필요한 삼차원적 이미징 기능과 구조분석 기능을 제공함으로써 BT분야의 선진적인 연구 및 개발을 유도한다. 또한, 국가적 공동연구장비인 초고전압투과전자현미경(원자~분자 수준 이미징 가능, 급속냉각한 세포)과 포항방사광가속기(sub- μm 수준 이미징 가능, 살아있는 세포), 차세대자기공명장치(μm 수준 이미징 가능, 살아있는 세포)를 연계하여 국가적인 BT 발전에 필요한 생체 이미징 및 정밀구조분석 프로그램을 공동 수행한다.

(3) 장비의 초고전압 에너지를 이용한 전자빔과 다양한 시료지지대, 그리고 추후 부착 예정인 이온빔을 종합 활용하여 관련 연구기관과 함께 항공우주 소재(항공우주연구원), 원자로 물질(원자력연구소), 핵융합로 물질(기초과학지원연구원) 등 방사능 조사를 효과적으로 차단해야 하는 극한 소재의 연구개발 프로그램 공동 수행한다.

(4) 본·분소 간에 초고속통신망과 원격제어 기능을 이용하여 전국 어디에서나 장비의 접근 및 사용을 용이하게 하고, 국가간의 초고속통신망을 이용하여 해외에서도 장비를 직접 운용을 할 수 있도록 함으로써 국제적인 공동연구의 활성화와 함께 21세기 국가적인 공동 연구장비 운영의 새로운 모델을 제시한다.

5. 기대효과

(1) 국가적인 전략산업인 차세대반도체 개발, 나노구조 신소재 개발에 필수적인 원자 분해능 분석기능을 제공함으로써 선진국의 기술보호 장벽을 극복하고 해당분야의 독자적인 기술 개발을 촉진시킨다. 특히, 앞으로 일본과 치열한 경쟁을 벌릴 차세대 반도체 개발에 필요한 분석 및 평가를 국내에서 수행할 수 있기 때문에 기술정보의 유출을 방지한다. 반면, 국외에서 개발된 극미세 신소재의 구조를 국내에서 분석함으로써 선진국의 기술보호 장벽을 극복하고 새로운 소재의 개발을 유도한다.

(2) 초고전압 투과전자현미경의 고투과력 및 고에너지 기능을 이용하면 역동적인 실험이 가능하기 때문에 신물질의 분석 및 평가뿐만 아니라 새로운 물성 개발 및 공정 개발에도 직접 기여한다. 특히 이온빔 가속기가 장착되면 항공우주 소재, 원자로 물질, 핵융합로 물질 등 방사능 조사를 효과적으로 차단해야 하는 극한 소재의 개발에 본격적으로 기여하리라 예측한다.

(3) 21세기 생명과학의 핵심 연구분야인 뇌세포 연구, 단백질 구조 연구 및 신약 개발 등에 필요한 삼차원적 구조분석 기능을 제공함으로써 해당분야의 선진적인 연구 및 개발을 활성화 한다.

(4) 전자현미경의 센터화를 이루어 재료·생명과학·의학 등의 다양한 분야에서 신물질이나 분석이 어려운 물질의 분석을 한 곳에서 완료할 수 있기 때문에 관련 분야의 기술협력 및 융합 신기술 개발을 촉진시킨다.

(5) 국가적인 대형 연구장비의 설치·운영으로 국내의 기초과학 연구를 한 단계 up-grade한다. 특히, 초고전압 투과전자현미경을 포항가속기 및 하나로 시설과 연계하여 회절을 이용한 국가적인 물질 분석 및 개발 program을 마련하여 학·연·산 공동연구를 활성화시키고, 상이한 학문 및 기술분야의 교류를 촉진시켜 창의적인 연구활동을 유발하는데 기여한다.

6. 문제점 및 건의사항

없음