

대형연구시설·장비를 활용한 국내 기초과학 현황 및 발전 모색

Basic science research in Korea based on large-scale research facilities and equipment



대형연구시설·장비를 활용한 국내 기초과학 현황 및 발전 모색

Basic science research in Korea based on large-scale research facilities and equipment

연구위원장

류동수 한국과학기술한림원 정회원,
울산과학기술원 교수

위원

곽규진 울산과학기술원 교수

문창범 기초과학연구원 희귀핵연구단 책임연구원

박병곤 한국천문연구원 대형망원경사업단장

박인규 서울시립대학교 교수

유인태 성균관대학교 교수

이주한 한국기초과학지원연구원 소재분석연구부 책임연구원

이형목 서울대학교 명예교수

전동오 기초과학연구원 중이온가속기사업단 책임연구원

정모세 울산과학기술원 교수

요약본

- 최근 물리학 및 천문학 등의 기초과학연구에서는 대형연구시설·장비에 기반한 빅사이언스를 수행해 왔음. 이러한 업적 중의 일부는 노벨상 수상으로 연결되고 있는데, 최근의 예로는, 힉스 보손 발견(유럽 CERN 입자가속기 활용, 2013년 노벨 물리학상), 중성미자 진동 발견(일본 Super-Kamiokande 활용, 2015년 노벨 물리학상), 중력파 관측(미국 LIGO 중력파 검출기 활용, 2017년 노벨 물리학상) 등이 있음.
- 대형연구시설·장비를 활용한 연구는 기초과학 분야 분야의 난제를 해결하여 breakthrough를 이루어 왔음. 이를 통해 기존의 틀을 넘어서는 과학의 발전을 선도하고 있음. 과학적 목적으로 구축하고 있지만, 또한 다양한 분야에 파생되어 응용 및 기술개발로 연결되고 있음.
- 국내 물리학 및 천문학 등의 기초과학이 노벨상에 근접한 세계 최고 수준으로 한 단계 더 도약하기 위해서는, 대형연구시설·장비에 기반한 빅사이언스 연구를 수행할 필요가 있음. 이러한 필요성은 거의 모든 국내 관련 기초과학 연구자들 사이에서 공감대가 형성되고 있으며, 이는 다양한 대형연구시설·장비의 구축 제안으로 표출되고 있음.
- 현재 국내에는 대형연구시설·장비를 체계적으로 선정하여 구축하고 관리할 수 있는 시스템이 부재한 상황임. 따라서 대부분의 기초과학연구를 위한 대형연구시설·장비 구축 제안들이 아이디어 수준에 머무르고 있으며, 심지어는 기획 단계에도 다다르지 못하고 있음.
- 한편으로는 시스템 부재 등으로 인해, 현재 국내에서 운영 또는 구축되고 있는 대형연구시설·장비 중 일부는 충분한 과학적·기술적 검증과 더불어, 사업을 추진할 제도적 기반, 그리고 사업을 수행할 인력 확보 등이 없이, “Top-Down” 방식으로 구축이 결정되었음. 이는 구축 기간 연장, 구축 예산 초과와 더불어, 당초 예상에 못 미치는 성능의 시설·장비 구축 또는 당초 제안에 못 미치는 연구 및 기술개발 성과로 귀착되기도 함.

- 미국, 일본, 유럽 등 기초과학연구가 활발한 국가에서는 대부분의 기초과학 대형연구시설·장비를 과학적 요구에 의해 과학적 목표 및 임무를 수행하고자 과학계에서 마련한 로드맵에 기반하여, 사업을 추진할 제도적 장치를 통해 “Bottom-Up” 방식으로 선정하고 구축, 그리고 운영하고 있음.
- 대형연구시설·장비 기반 빅사이언스를 통한 국내 기초과학연구를 활성화하기 위해서는, 먼저 기초과학 분야 대형연구시설·장비의 구축 및 운영을 주관할 정부 기관 내 “사업전담부서”의 설립이 필요함. 국가과학기술자문회의, 한국과학기술한림원, 한국연구재단 등의 산하 가칭 “기초과학 대형연구시설·장비 사업단”이 예가 될 수 있음.
- 기초과학 분야 대형연구시설·장비는 이런 시스템하에서, 과학적 동기가 가장 우선되어, 전문가 집단에 의해 “Bottom-Up”으로 제안, 선정, 구축, 그리고 운영이 결정되어야 함.
- Bottom-Up 방식을 통한 대형연구시설·장비의 구축을 위해 다음과 같은 “생애주기” 개념을 도입한 선정과 개발을 제안함: 제안(Proposal) → 기획(Planning) → 연구·개발(R&D) → 설계(Design) → 건설(Construction) → 운영(Operation) → 퇴역(Divestment)
- 대형연구시설·장비의 구축이 일관성 있게 추진되려면, 이를 위한 예산이 뒷받침되어야 함. 이를 위해, 가칭 “기초과학 분야 대형연구시설·장비 구축운영진흥법”을 법제화하여, “기초과학 분야 대형연구시설·장비 구축 및 운영을 위한 별도의 예산 꼭지”를 마련하는 것을 제안함.

I. 대형연구시설·장비의 정의 및 특징	11
<hr/>	
II. 대형연구시설·장비의 중요성	15
<hr/>	
III. 물리·천문 분야 국내외 대형연구시설·장비	19
1. 국내 대형연구시설·장비	20
2. 해외 대형연구시설·장비	31
<hr/>	
IV. 해외의 대형연구시설·장비 구축 및 운영 체계	45
1. 미국의 대형연구시설·장비 구축 및 운영 체계	46
2. 일본의 대형연구시설·장비 구축	56
3. 유럽의 대형연구시설·장비 구축	58
4. 중국의 대형연구시설·장비 구축	60

V. 국내 대형연구시설·장비 구축 및 운영 현황	63
1. 국내 대형연구시설·장비 구축 및 운영 체계의 문제점	64
2. 로드맵 구축 및 운영 정책 현황	65
3. 현 문제점을 타개하기 위한 과학계의 노력	68

VI. 대형연구시설·장비 기반 빅사이언스를 통한 국내 기초과학연구의 발전을 위한 제언	71
1. 물리·천문 분야 대형연구시설·장비 현황으로 본 시사점	72
2. 제언의 기본 방향	73
3. 구체적 제언 내용	75

VII. 결론	79
----------------	----

표 3.1	국내 대형 가속기 종류 및 원리	21
표 3.2	RAON 구축 과정	26
표 3.3	해외 4세대 선형 방사광가속기 현황	32
표 3.4	해외 4세대 원형 방사광가속기 구축 현황	33
표 3.5	전 세계 중이온가속기 현황	34
표 4.1	물리학 분야 중점대형연구 예시	57
표 4.2	중국의 5대 기초과학 집중 육성 분야	60

그림 1.1	대형입자충돌기	13
그림 1.2	제임스웹우주망원경	13
그림 2.1	기술자가 Super-Kamiokande의 광검출기를 검사하고 있는 모습	16
그림 2.2	미국 Livingston과 Hanford에 설치된 LIGO 전경	17
그림 3.1	3세대(PLS-II) 및 4세대 선형(PAL-XFEL) 방사광가속기	22
그림 3.2	차세대 방사광가속기 조감도	23
그림 3.3	경주 양성자가속기연구센터 가속기동 내부	24
그림 3.4	기장군 의료용 중입자가속기 치료센터	25
그림 3.5	단계별 가속기 운전 계획	26
그림 3.6	한국형 중이온가속기 “라온(RAON)” 장치 구축 개요	27
그림 3.7	초강력 레이저 장치의 전경	28
그림 3.8	KSTAR 전경	29
그림 3.9	서울, 울산, 제주에 위치한 KVN 전파망원경 전경	30
그림 3.10	동아시아 VLBI 연구망	31
그림 3.11	전 세계 초강력 레이저 현황	35
그림 4.1	Astro 2020 공식 로고	50
그림 4.2	NSF 대형연구시설·장비의 생애주기	52
그림 4.3	일본 천문학계 10개년 계획의 흐름도	58
그림 5.1	중점 대형연구시설 목록 및 구축 시기	66
그림 5.2	2017년에 발간된 한국천문학회 장기발전계획 표지	70
그림 6.1	종합사업관리 시스템의 흐름도 및 조직	74
그림 7.1	기본 방향의 요점	80
그림 7.2	기초과학 분야 대형연구시설·장비 생애주기	80

**대형연구시설·장비를 활용한
국내 기초과학 현황 및 발전 모색**

Basic science research in Korea based on
large-scale research facilities and equipment

I

**대형연구시설·장비의
정의 및 특징**

I. 대형연구시설·장비의 정의 및 특징

■ 대형연구시설·장비의 정의

- 물리학, 천문학 등의 기초과학, 그리고 화학, 바이오, 지구환경, 해양, 우주, 항공 등에서 빅사이언스(big science)를 수행하기 위한 고가의 첨단 시설 및 장치(OECD, 2002)
- 뛰어난 성능을 갖추고 최첨단 연구 분야에 활용됨으로써 해당 분야에서 중요한 영향력을 발휘할 수 있는 대규모 연구 시설 및 장비(미래창조과학부, 2014)

■ 대형연구시설·장비의 개념(국가연구시설장비진흥센터, 2010)

- 연구시설: 과학기술활동을 위한 환경, 설비, 장비를 갖춘 연구 공간
- 연구장비: 과학기술활동을 위한 유형의 비소비적 자산
- 대형: 구축 비용에 의해 주로 정의되며, 그 외 중요성, 복잡성, 구축 기간 등의 기타 요인들도 포함함.

■ 대형연구시설·장비의 법령 현황(한국법제연구원, 2020)

- 위에서 언급한 내용은 정책적 차원에서 사용하고 있는 정의와 개념임.
- 국내의 법제에서는 대형연구시설·장비의 정의·개념들을 규정하는 법령은 존재하지 않음.
- 연구개발에 관한 다른 법령과 혼선을 피하기 위해서는 대형연구시설·장비의 정의와 개념, 그리고 법적 근거를 정립할 필요가 있음.

■ 물리학·천문학 분야 대형연구시설·장비의 예

- 유럽입자물리학연구소(CERN) 대형강입자충돌기(Large Hadron Collider, LHC)
 - 세계 최대의 양성자 입자 가속 및 양성자-양성자 충돌기
 - 스위스 제네바 근처에 위치하고 있음.
 - 건설 비용: 100억 달러(12조 원), 건설 기간: 10년
 - 힉스 보손(Higgs boson)의 발견으로 2013년 노벨상 수상

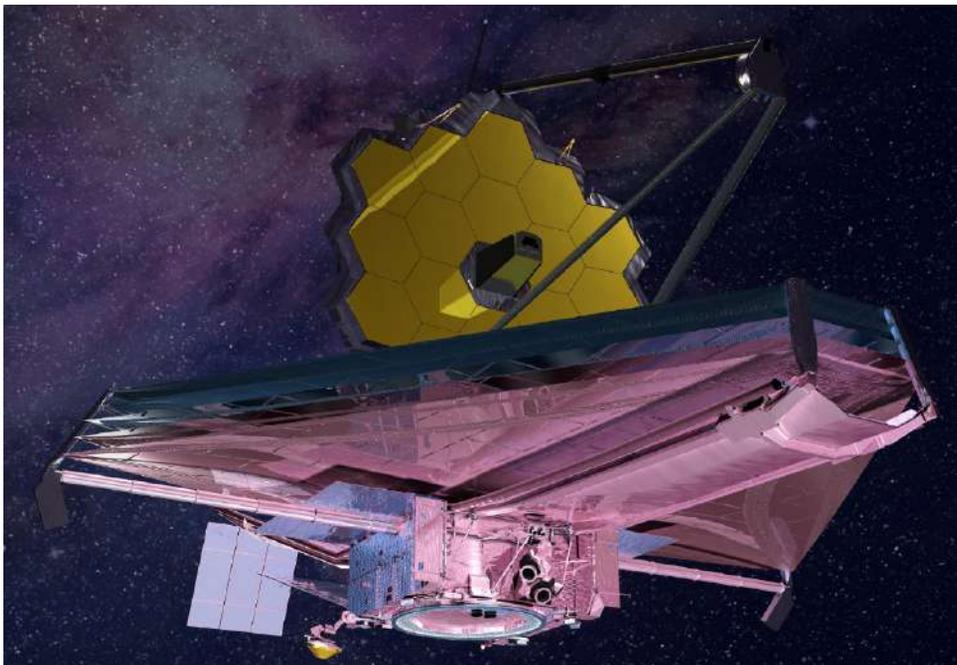
그림 1.1 대형입자충돌기



출처: 유럽입자물리연구소 제공

- 미국항공우주국(NASA) 제임스웹우주망원경(James Webb Space Telescope)
 - 적외선·가시광선 영역의 천문 관측을 위한 세계 최대의 우주망원경
 - 구축 비용: 100억 달러(12조 원), 구축 기간: 15년
 - 2021년 12월에 우주로 발사됨.

그림 1.2 제임스웹우주망원경



출처: 미국항공우주국 제공

■ 물리학, 천문학 등 기초과학 분야 대형연구시설·장비의 특징

- High risk: 기술적 난이도, 그리고 대규모 예산의 투입으로 인한 불확실성(risk)이 높음.
- High reward: 대형연구시설·장비의 성공적인 구축을 통한 빅사이언스의 성공적인 수행은 당장은 과학적 breakthrough를 이루고, 장기적으로는 산업에서 first mover를 위한 원천기술의 기반을 제공할 수 있음.
- 복잡성: 최첨단의 연구를 위한 시설·장비의 구축에는 대부분 고난이도의 새로운 기술이 요구되어 기술적 난제들을 해결해야 함.
- 파생 효과: 고난이도 기술이 필요하지만, 성공적인 구축은 파생된 기술로 산업 발전에 기여할 가능성이 큼.
- 대규모·장기간 연구 필요: 새로운 기술 개발 및 난제 해결을 위해서는 대규모 예산이 투입된 장기간 연구가 필요함.
- 예산 규모, 불확실성 등을 고려하면 정부의 주도로 추진되어야 함. 그러나 정부의 주도로 인해 정부 정책에 좌우될 수 있음.

**대형연구시설·장비를 활용한
국내 기초과학 현황 및 발전 모색**

Basic science research in Korea based on
large-scale research facilities and equipment

II

**대형연구시설·장비의
중요성**

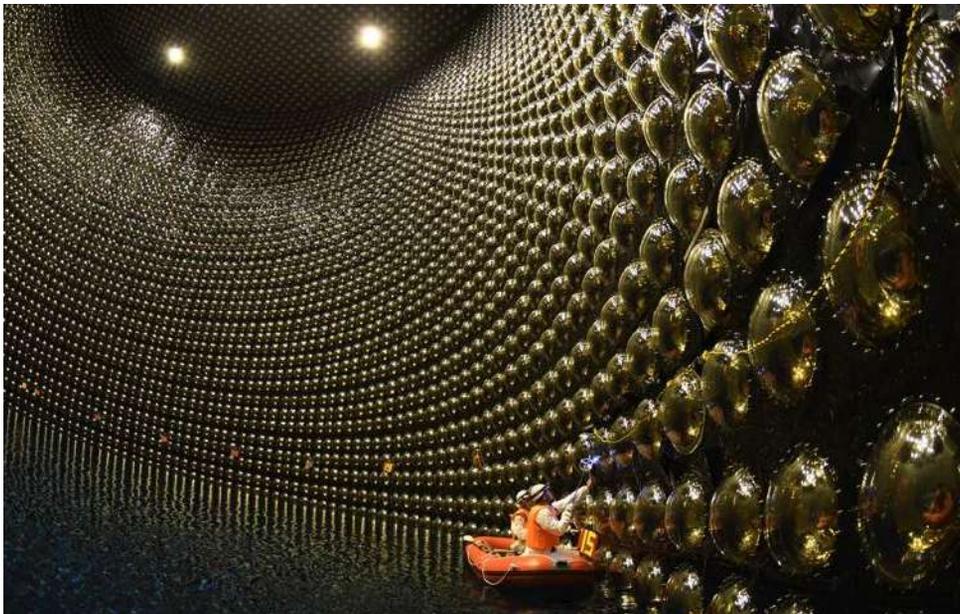
II. 대형연구시설·장비의 중요성

- 대형연구시설·장비는 과학기술 연구의 핵심적인 요소로 과학기술이 발전함에 따라 활용이 확대되고 있으며, 미래유망산업의 창출 및 발전에 중추적인 역할을 하고 있음.
- 대형연구시설·장비의 구축 및 이를 활용한 기초과학 분야에서의 빅사이언스 수행은 과학적·기술적 중요성뿐만 아니라 경제적·사회적으로도 중요성을 가짐.

■ 대형연구시설·장비의 과학적 중요성

- 대형연구시설·장비는 기존 과학 난제의 해결, 새로운 과학 분야의 창출 등을 통해 현대 과학을 견인하고 있음.
- 물리학, 천문학 등 기초과학연구에서는 대형연구시설·장비에 기반한 빅사이언스를 통해 과학적 breakthrough를 이루어 왔고, 이러한 업적 중의 일부는 노벨상 수상으로 연결되고 있음.
 - Super-Kamiokande에서 1988년에 중성미자 진동 발견으로 2015년 노벨상 수상

그림 2.1 기술자가 Super-Kamiokande의 광검출기를 검사하고 있는 모습



출처: 일본 동경대 Institute for Cosmic Ray Research 제공

- 레이저간섭중력파관측소(Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, LIGO)에서 2015년에 중력파를 관측하여 2017년 노벨상 수상

그림 2.2 미국 Livingston과 Hanford에 설치된 LIGO 전경



출처: 일본 동경대 LIGO Laboratory 제공

- 대형연구시설·장비는 국가의 과학 발전에 핵심적인 역할을 하고 있으며, 세계적인 연구 경쟁력 확보에 필수적임.

■ 대형연구시설·장비의 기술적 중요성

- 대형연구시설·장비는 첨단 기술의 집약체로 관련 기술을 획기적으로 발전시킬 수 있는 기반을 제공함.
 - Kamiokande 중성미자 검출장치 구축 시 개발된 광센서(photomultiplier tube)는 일본 기업 Hamamatsu에서 제품화하여 다양한 분야에 응용되었음.
- 대형연구시설·장비를 통한 연구는 기존 기술에 대한 근본적이고 혁신적인 해결책을 제시하여 신산업 창출의 촉매제로 작용함.
- 또한 기존 기술에 대한 근본적이고 혁신적인 해결책 마련뿐만 아니라 새로운 기술에 대한 탐구와 발견을 통해 신산업 창출의 마중물 역할을 수행함.
- 최첨단 연구를 위한 대형연구시설·장비 구축은 이에 파생되는 미래유망 분야의 원천기술을 확보할 기회를 제공함.
- 대형연구시설·장비는 국가과학기술을 획기적으로 발전시켜, 과학기술 분야의 국가 경쟁력 및 위상을 제고시킬 수 있음.

■ 대형연구시설·장비의 경제적 중요성

- 대형연구시설·장비 구축을 통해 확보한 원천기술 및 창출된 사업은 경제적 유발효과가 큼.

- 대형연구시설·장비 구축사업은 대형 프로젝트로서 고용 유발효과가 큼.
- 대형연구시설·장비가 구축된 도시는 과학·문화·산업의 중심지로 발돋움하여 경제적 유발효과가 큼.
- 유럽입자물리연구소(CERN) 경우
 - 약 2,500명이 상시적으로 고용되어 있으며, 세계 85개국의 600여 대학과 연구소에 고용된 약 10,000여 명의 과학자가 CERN 시설을 이용하고 있음.
 - CERN 유치과학자가 사용하는 경비는 연간 1조 원 정도로 예상됨.
 - 매년 10만 명 이상이 과학과 혁신의 글로브(The Globe of Science and Innovation) 등의 시설을 방문하고 있음.
 - 경제적 파급효과는 구축비를 훨씬 상회하는 것으로 추정됨.

■ 대형연구시설·장비의 사회적 중요성

- 대형연구시설·장비의 보유 및 이를 활용한 세계적 수준의 연구성과 창출은 국가 과학 경쟁력의 척도로 인식되고 있음.
- 대형연구시설·장비를 활용한 빅사이언스는 예산, 기술적 복잡성 등으로 국제공동 프로젝트를 통해 추진되고 있어, 이런 연구의 주도권은 국가의 위상을 제고함.
- 대형연구시설·장비는 구축되는 지역의 개발 및 발전에 크게 기여함.
- 대형연구시설·장비는 관련 과학기술 분야 인력 양성에 핵심적인 역할을 수행함.
 - 독일전자싱크로트론연구소(DESY): 500명 이상의 학생 및 젊은 연구자 교육, 130명 이상의 산업 견습생 훈련
- 대형연구시설·장비는 국내 고급인력의 유출 방지와 동시에 해외 고급인력의 유입·활용에 기여함.
- 국가의 과학문화 확산 등에 긍정적인 영향을 미침.

**대형연구시설·장비를 활용한
국내 기초과학 현황 및 발전 모색**

Basic science research in Korea based on
large-scale research facilities and equipment

III

**물리·천문 분야 국내외
대형연구시설·장비**

Ⅲ. 물리·천문 분야 국내외 대형연구시설·장비

1. 국내 대형연구시설·장비

- 본 정책연구는 물리·천문학의 기초과학 분야 대형연구시설·장비에 초점이 맞추어져 있음.
- 구축 비축 비용과 더불어 분야의 대표성을 고려하여, 아래에는 다음 범주의 국내 대형연구시설·장비의 현황을 기술함.
 - 대형 가속기
 - 3세대 방사광가속기
 - 4세대 방사광가속기
 - 양성자가속기
 - 중입자가속기
 - 중이온가속기
 - 초강력 레이저
 - KSTAR(핵융합 장치)
 - KVN(한국우주전파관측망)

■ 대형 가속기

- 가속기는 기본입자(전자, 양성자 등), 중입자 또는 원자핵(중이온)을 가속, 충돌시키는 장치
- 가속되는 입자의 종류에 따라 가속기는 전자가속기, 양성자가속기, 중입자가속기, 중이온가속기 등으로 분류
- 국내 대형 가속기는 이용 입자 및 응용 분야에 따라서 <표 3.1>처럼 방사광가속기(3세대 원형방사광가속기, 4세대 선형방사광가속기, 다목적방사광가속기), 양성자가속기, 중입자가속기, 중이온가속기로 분류

표 3.1 국내 대형 가속기 종류 및 원리

종류	원리	가속/이용입자	응용 분야
방사광가속기: 3·4세대 가속기(포항) 다목적가속기(오창)	거의 빛의 속력으로 가속된 전자의 진행 방향을 바꿀 때 발생하는 빛(방사광)을 이용	전자/ 방사광(X선)	물질의 구조 분석 및 미세 가공 등 (생명·재료·화학·물리·기계·반도체·응용과학 분야)
양성자가속기(경주)	거의 빛의 속도에 가깝게 가속된 양성자를 표적 물질에 조사하여 생성된 입자를 이용	양성자/ 양성자, 중성자 등	의료용·산업용 동위원소 생산, 파쇄 중성자원, 양성자 암치료 등
중입자가속기 (중입자치료기) (부산 기장군)	이온화된 탄소와 헬륨을 거의 빛의 속도로 가속하여 암치료에 이용하는 장치	탄소와 헬륨 이온	중입자를 이용한 암치료(간암, 전립선암, 재발된 암치료 등) 방사선 의학 연구 등
중이온가속기(대전)	무거운 핵을 가속하여 표적과의 충돌을 통해 핵반응을 일으켜 다양한 희귀동위원소를 생성시키는 장치	중이온 (양성자~우라늄)	기초연구 및 응용연구 활용 (핵물리 연구, 중이온 암치료, 신물질 및 신제품 개발 등)

■ 방사광가속기

• 방사광가속기의 원리

- 방사광: 거의 빛의 속력으로 운동하는 고에너지 전자빔이 휘어진 자석(bending magnet) 혹은 언듈레이터(undulator)를 지나갈 때, 전자빔의 궤도가 휘어지면서 전자빔의 진행 방향으로 방출하는 전자기파
- 1947년 제너럴 일렉트릭사의 전자싱크로트론에서 이와 같은 전자기파가 처음 관측되어 싱크로트론 방사광(싱크로트론 Radiation)이라고도 명칭

• 방사광가속기의 특성 및 응용 분야

- 가속기의 특성에 따라 mm에서 nm(10^{-9} 미터) 영역까지 폭넓은 파장에 걸쳐, 태양 빛보다 약 100억 배 이상 밝은 휘도(brightness)의 강한 빛(전자기파) 생성
- 국내 방사광가속기에서는 나노미터에서 서브나노미터 파장의 고휘도 X-선을 방출하여, 기초과학 연구뿐만 아니라, 바이러스 DNA 구조 분석 및 신약 개발, 고해상도의 종양 촬영으로 암치료법 개발, 플렉시블 디스플레이에 들어가는 두께 수백 나노미터의 유기반도체 물질 특성 연구, 연료전지, 수소 저장 재료 등 친환경 미래 배터리 개발 등에 응용되고 있음.

• 포항 방사광가속기(3세대 방사광가속기: Pohang Light Source, PLS)

- 물리·천문을 포함한 기초과학 분야 국내 최초 대형연구시설·장비
 - 1988. 04. - 방사광가속기 건설본부 발족(포철/포항공단)
 - 1991. 04. - 방사광가속기 건물 공사 착공
 - 1994. 12. - 포항방사광가속기 준공(PLS-I)
 - 2011. 06. - PLS-I를 업그레이드한 PLS-II 구축

- PSL-I
 - 국가 경제력 및 연구역량의 향상을 위해 물리, 화학, 재료, 생물 등 다양한 분야에 활용될 수 있는 대형연구시설·장비로 선정됨.
 - 포항공과대 설립과 맞물려 신설 학교의 Flagship 장치로 포항공과대와 포항제철이 구축함.
- PLS-II
 - PSL-I의 성공적인 운영 및 연구성과에 기반하여 PSL-I를 업그레이드한 PLS-II 구축
- PSL-I과 PLS-II은 과학적인 고려뿐만 아니라, 정치·사회·지역 상황 등이 고려되어 정부 주도로 구축됨.
- PAL-XFEL(포항가속기연구소 4세대 자유전자레이저 선형 방사광가속기)
 - 4세대 방사광가속기는 전 세계적으로 2000년대 개발되었으며, 3세대 방사광가속기에 비해 10~100배 정도 향상된 성능을 가짐.
 - nm 파장, 펨토초(10^{-15} 초) 길이(duration)의 X-선 레이저 광원에 기반한 기초과학 연구 및 첨단 기술 개발을 목적으로 구축됨: 1~0.06nm의 hard X-선, 10~1.0nm의 soft X-선에서 최대 30GW의 radiation power 제공
 - 구축 기간: 2011년~2015년
 - 구축 비용: 약 4,500억 원
 - Top-Down 방식의 정부 주도로 구축됨.

그림 3.1 3세대(PLS-II) 및 4세대 선형(PAL-XFEL) 방사광가속기



출처: 영남일보

- 다목적 원형 방사광가속기(오창 방사광가속기)
 - 2016년 스웨덴에서 세계 최초로 4세대 원형 방사광가속기가 성공적으로 구현된 이후, 여러 선진국에서는 이를 구축하려는 시도가 진행되고 있음.
 - 충청북도 오창에 구축되는 다목적 방사광가속기는 포항의 3세대 원형 방사광가속기보다 100배 밝은 빛을 내도록 설계된 4세대 원형 방사광가속기임.
 - 전체 둘레가 약 800m인 원형의 저장링(Storage Ring) 동 및 저장링에 전자빔을 공급하기 위한 선형가속기 및 부스터링(Booster Ring) 동 건설
 - 전자총, 부스터링, 저장링을 포함한 MBA(Multi Bend Achromat) 기반 4GeV 피코미터급 싱크로트론 광원 구축
 - Phase-I에서는 삽입장치(insertion device) 기반 10기의 빔라인 및 실험장치 구축 예정
 - 구축 기간: 2021년~2027년
 - 구축 비용: 약 1조 원
 - Phase-I 완료 후, 빔라인을 확장을 포함한 Phase-II도 계획 중임.
 - 2020년 소부장(소재, 부품, 장비) 위기를 계기로, 높은 해외 의존도를 지닌 핵심 소재·부품의 국산화율을 높이고 관련 산업경쟁력 향상에 기여하는 동시에 COVID-19 확산과 같은 국가·사회 문제에 신속 대응할 수 있는 기술 확보를 위한 연구 인프라로 기획됨.
 - 과학적 목적과 더불어 정책적인 상황이 고려되어 Top-Down 방식의 정부 주도로 구축되고 있음.

그림 3.2 차세대 방사광가속기 조감도



출처: 매일경제

■ 양성자가속기

- 양성자가속기는 2002년에 시작된 정부 주도의 장기(10년) 프로젝트인 「21세기 프론티어사업」 내 양성자기반공학기술개발사업의 지원으로 2012년에 완공되어 현재 운영 중임.
 - 구축 기간: 2002년~2012년
 - 구축 비용: 약 3,000억 원
- 100-MeV 양성자가속기와 140-200keV 저에너지 이온빔 시설은, 입자빔(양성자, 이온, 중성자, 의료용 동위원소, 전자 등) 이용 연구개발 플랫폼을 제공하여 미래 원천기술 개발과 입자빔 기반 산업체 육성에 기여하겠다는 목적으로 구축됨.
- 한국원자력연구원에서 관리·운영 중이며, 현재 「제5차 원자력종합진흥계획(2017~2021)」에 따라 방사선 신산업 창출을 위해 안정적인 운용 및 이용 확대를 실시하여 양성자가속기 활용도를 제고하는데 집중 중임.
- 향후 양성자가속기 사업은 가속기의 주요 장비인 클라이스트론·고주파 창(RF window) 등의 부품을 교체하고 가속기의 이용 범위 확대를 위한 시설 장치 확충을 계획 중임.
- 양성자가속기 사업은 방사성 폐기물 처리시설과 연계하여 추진되어, 최종적으로 경주에 건설되었음.

그림 3.3 경주 양성자가속기연구센터 가속기동 내부



출처: 조선일보

■ 중입자가속기

- 암치료, 방사선 의학 연구 등에 활용할 탄소(430MeV/u), 헬륨(헬륨 230/u)의 의료용 중입자를 가속하는 장치임.
- 의료용 중입자가속기는 2009년 예비타당성조사 통과 후 사업이 진행되어 2016년에 부산시 기장군에 중입자가속기센터가 건설됨.
 - 구축 기간: 2010년~2016년
 - 구축 비용: 약 2,600억 원
- 최초 한국원자력의학원 산하 기관으로 출범하였으나, 분담금 미지급 등으로 사업이 장기간 표류됨. 중입자가속기 자체는 아직 구축되지 못하고 있음.
- 적정성 재검토 실시 중 2018년 사업 성격이 중입자가속기의 장치 개발에서 장치 구매로 변경됨. 동시에 2019년 주관기관이 원자력의학원에서 서울대학교병원으로 변경되어 중입자가속기 구입 및 구축이 진행되고 있음.
- 현재 국내에는 세브란스병원이 서울 병원에서 동일한 목적의 의료용 중입자가속기를 운영 중임.

그림 3.4 기장군 의료용 중입자가속기 치료센터



출처: 국제신문

■ 중이온가속기

- 물리·천문을 포함하여 기초과학 분야 국내 최대 대형연구시설·장비
 - RAON(온라인 실험을 위한 희귀동위원소 가속기 지구: Rare isotope Accelerator complex for ON-line experiment): 기초과학연구원(IBS) 산하 중이온가속기건설구축사업단(RISP)에 속한 입자가속기
 - 온라인 동위원소 분리방식(ISOL)과 비행파쇄방식(IF)을 모두 사용할 최초의 중이온 입자가속기
- 관련 분야 연구자들의 요청을 수용해, 대신 공약으로 Top-Down 방식의 정부 주도로 구축되고 있음.
- 구축 진행 경과

표 3.2 RAON 구축 과정

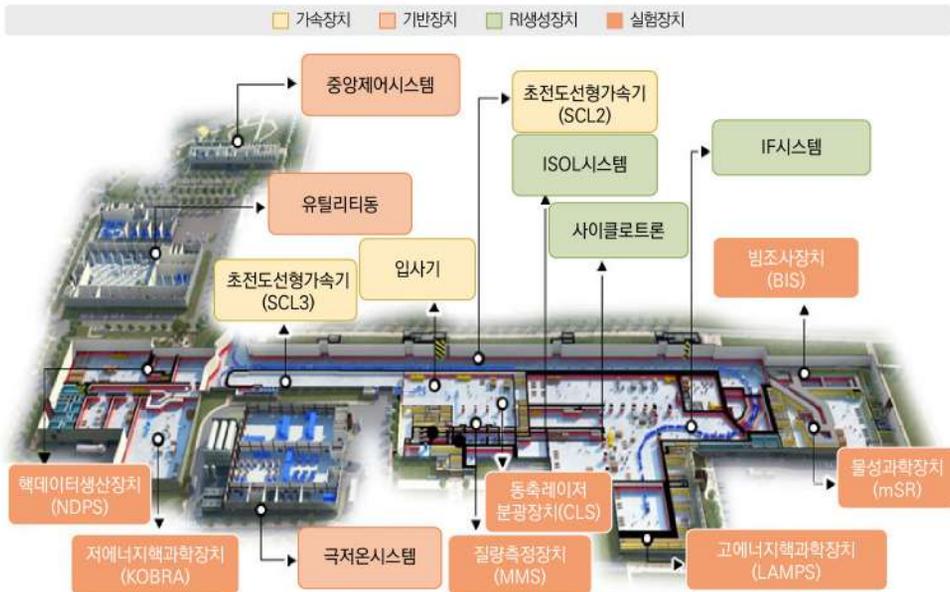
구분	기본계획 (2012.1.)	1차 변경 (2013.9.)	2차 변경 (2015.4.)	3차 변경 (2019.5.)	4차 변경 (2021.5.)
사업 범위	장치 구축 사업	장치 구축 사업	장치 구축 사업 및 시설건설 사업	장치 구축 사업 및 시설건설 사업(SCL1 제외 등 시설건설 및 장치 구축 일부 조정)	장치 구축 사업 및 시설건설 사업 (장치 구축 단계구분 1단계, 선행R&D, 2단계)
사업 일정	2011년 ~ 2017년	2011년 ~ 2019년	2011년 ~ 2021년	2011년 ~ 2021년	<ul style="list-style-type: none"> • 1단계: 2011 ~ 2021년(일부 장치 2022년) • 선행R&D: 2022 ~ 2023년 • 2단계: 착수 시점으로부터 4년
사업 예산	4,604억 원 (건설비, 부지매입비 미포함)	4,604억 원 (건설비, 부지매입비 미포함)	14,445억 원 (장치 구축 4,602억 원, 시설건설 6,243억 원, 부지매입 3,600억 원)	14,443억 원 (시설건설 E/S 등 반영시 14,875억 원)	<ul style="list-style-type: none"> • 1단계: 15,183억 원 (장치 구축 5,228억 원, 시설건설 6,384억 원, 부지매입 3,571억 원) • 선행R&D: 86억 원 • 2단계: 1,327억 원(적정성 재검토 추진 후 최종 확정 예정)

- 구축 현황 및 향후 계획
 - 2021. 05.: 중이온가속기 시설건설 준공
 - 2022. 10.: 최초 빔 인출

그림 3.5 단계별 가속기 운전 계획



그림 3.6 한국형 중이온가속기 “라온(RAON)” 장치 구축 개요



출처: 기초과학연구원

■ 초강력 레이저

- 극초단(펨토초 10^{-15} 초), 초강력(페타와트 10^{15} Watt) 레이저를 만드는 장치
- 연구주제
 - 초강력 레이저 분야의 최첨단 기술개발
 - 극한 영역에서 나타나는 빛과 물질의 상호작용 탐구
 - 초고출력 레이저를 이용한 전자, 양성자 등의 입자 가속
 - 레이저를 이용한 천체 플라즈마 연구
 - 원자, 분자, 고체 및 나노 물질에서 초고속 현상 탐구
- 구축연혁
 - 2004년 5월 광주과학기술원(GIST) 내 고등광기술연구소 준공
 - 2005년 국내 최초로 100테라와트(10^{12} Watt) 출력의 레이저 시설 구축
 - 2012년 1.5페타와트 출력의 레이저 시설 구축
 - 2012년 12월 기초과학연구원(IBS) GIST 캠퍼스 연구단인 초강력 레이저과학 연구단 유지
 - 2016년 4페타와트 출력의 레이저 시설 구축
- 물리·광학 등 기초과학에 기반한 광기술 개발의 필요성과 더불어, 광주 광특화 단지 활성화를 통한 광산업의 발전을 위해 구축됨.

- 최근 전라남도에서는 GIST 레이저 시설의 성능을 업그레이드한 최고출력 200페타와트, 에너지 40킬로줄 급의 초강력 레이저 시설 구축을 신설되는 한국에너지공과대학교 부근에 추진하고 있음.

그림 3.7 초강력 레이저 장치의 전경



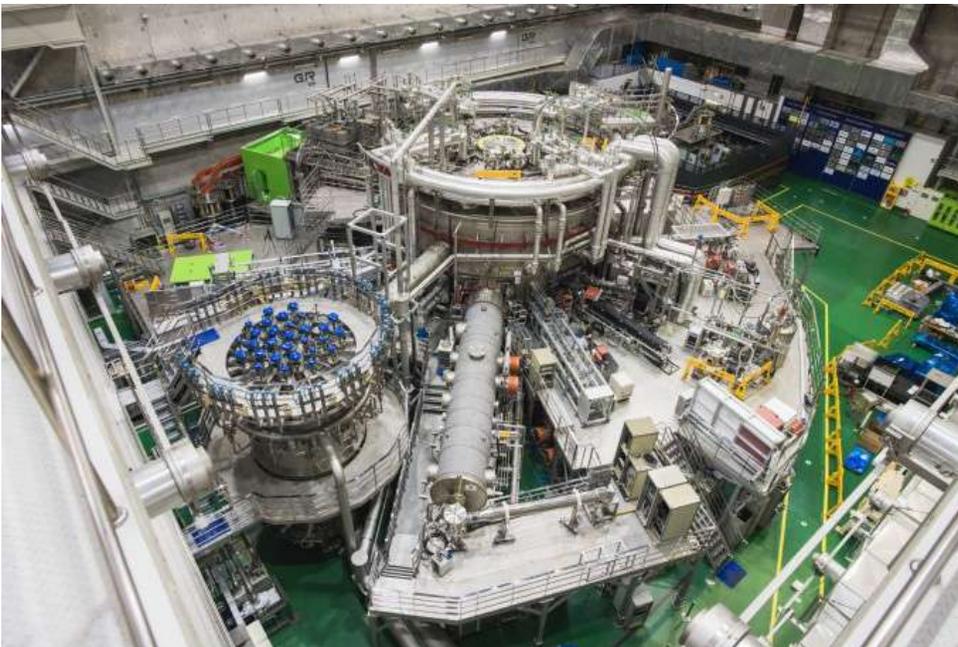
출처: GIST IBS CoReLS 연구단

■ 핵융합 장치(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, KSTAR)

- KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)는 한국이 독자적으로 개발한 토카막(Tokamak)형 핵융합 실험 장치임.
 - 1989년에 “플라즈마 핵융합 연구 분야”가 대형공동연구장비 중 하나로 선정되면서 기초과학연구 지원센터에서 건설을 추진함.
 - 구축 기간: 1995년~2007년
 - 구축 비용: 약 4,000억 원
- 초전도 전자석을 사용하는 핵융합 장치로, 일반 전자석을 사용하는 장치에 비해 플라즈마 지속 시간이 훨씬 길다는 장점을 갖고 있음.
- 세계 최초로 300초 이상 고주파를 낼 수 있는 메가헤르츠(MHz) 대역의 전자기파 가열장치(통칭 ICRF)를 사용하는 장치임.

- 다양한 연구성과를 창출함.
 - 2011년 11월: 핵융합 연구에서 난제 중 하나인 핵융합 플라즈마 경계면 불안전 현상(ELM)을 제어하는 데 성공
 - 2016년 12월: H-모드 유지시간 70초를 달성
 - 2017년 9월: ELM을 34초 동안 제어하는 데 성공
 - 2021년 11월: 1억°C 초고온 플라즈마를 30초간 유지하는 데 성공
 - 2022년 9월: FIRE 모드 발견
- 국내 대형연구시설·장비 중 가장 성공적인 사례로 평가받고 있음.

그림 3.8 KSTAR 전경



출처: 한국핵융합에너지연구원

■ 한국우주전파관측망(Korean VLBI Network, KVN)

- 한국천문연구원이 구축하여 운영하는 전파 간섭계(radio interferometer)
- 서울(연세대학교), 울산(울산대학교), 제주(탐라대학교)에 위치한 각각이 직경 21m인 전파망원경 3기로 구성됨.
- 국내기술로 개발한 세계 최초의 K-밴드(22 GHz), Q-밴드(43 GHz), E-밴드(83 GHz) F-밴드(129 GHz) 4개 채널 동시 관측 수신기 장착함.
- 주요 연구 분야: 활동성은하핵, 만기형 별, 별 탄생 영역 등에 대한 mm 파장 대역의 VLBI 연구

- 한국천문연구원의 기관 고유 사업으로 구축됨.
 - 구축 기간: 2001년~2008년
 - 구축 비용: 약 400억 원
- 2023년까지 강원도 평창에 4번째 21m 전파망원경을 설치하여 기선(baseline)의 수를 3개에서 6개로 증가시키고 230GHz 대역 수신기를 추가하여 5개 채널 동시 관측 시스템으로 업그레이드할 예정이다.
- 주요 연구성과: EHT(Event Horizon Telescope) 국제연구팀에 참여하여 2019년 세계 최초로 M87 은하 중심의 거대질량블랙홀의 영상을 촬영하는 데에 기여함.

그림 3.9 서울, 울산, 제주에 위치한 KVN 전파망원경 전경



출처: 한국천문연구원

- 국제협력 연구 현황
 - 4채널 동시 관측 수신 시스템을 근간으로 하여 일본의 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry)와 함께 한일 VLBI 연구망을 구축하였으며 연구센터는 한국천문연구원에서 운영
 - 한일 VLBI를 확장하여 중국까지 포함하는 한중일 VLBI 연구망을 구축하여 운영 중이며 동아시아 권역으로 확장하는 EAVN(East Asia VLBI Network)의 구축이 진행 중임.

그림 3.10 동아시아 VLBI 연구망



출처: 한국천문연구원

- 국제 기술 표준화
 - 2018년 4채널 수신기를 소형화한 3채널(22/43/86 GHz) 동시관측수신기(Compact Triple-band Receiver, CTR) 자체 개발에 세계 최초로 성공하여 대통령 표창 수상
 - 2020년 이탈리아와 3채널 수신기 수출 계약을 체결하여 2023년 납품 예정
 - 2022년 핀란드와 3채널 수신기 수출 계약 체결 완료
 - 유럽 VLBI 연구망 및 미국에서 추진하고 있는 차세대 VLA(ngVLA)는 한국천문연구원의 3채널 동시관측수신기 CTR을 표준 모델로 채택

2. 해외 대형연구시설·장비

- 본 정책연구는 물리·천문학의 기초과학 분야에 초점이 맞추어져 있고, 위에서 언급한 국내 시설·장비 현황, 그리고 현재 국내 연구자들의 관심 분야 등을 고려하여, 다음의 현황을 기술함.
 - 방사광가속기
 - 중이온가속기
 - 초강력 레이저

- 중성미자 검출 장비
 - 중력과 검출 장비
 - 지상 천문관측 장비
 - 우주 천문관측 장비
- 개별 시설·장비에 집중하기보다는 위 범주의 시설·장비 현황을 종합하여 기술함.

■ 방사광가속기

- 미국, 유럽, 일본, 중국 등 해외 주요국에서는 방사광가속기를 포함해서 대형가속기 관련 로드맵을 마련하고 주기적으로 업데이트하는 등 전략적으로 대형가속기를 구축·운영하고 있음.
- 방사광가속기와 관련해서는 전 세계적으로 다수의 4세대 가속기 신규 구축 및 기존 3세대 가속기의 4세대 가속기로의 업그레이드 프로젝트가 진행되고 있음.
- 국내 대형연구시설·장비 현황에서도 언급한 바와 같이, 4세대 방사광가속기는 3세대 가속기보다 주요 성능이 10~100배 개선됨.
- 4세대 가속기는 자유전자레이저 선형 방사광가속기와 원형 방사광가속기가 있음(아래 <표 3.3> 참조).
- 방사광가속기는 초기에는 주로 물리, 화학, 생명과학 등 기초과학 연구에 활용되었으나, 3세대 가속기의 등장으로 방사광의 고성능·안정성이 확보되면서 다양한 산업 분야로 저변이 확대되고 있음.
- 최근 에너지·환경, 전자 소재 등의 첨단 산업 분야에서도 방사광가속기가 활발하게 활용되고 있음.

표 3.3 해외 4세대 선형 방사광가속기 현황

가속기명 (국가명)	구축 기간	에너지 [GeV]	길이 [km]	에미턴스 [mm·mrad]	빔전류[kA] @ peak	결맞음 정도	휘도* @ Peak
PAL-XFEL (한국)	2011~2015	10	1.1	0.4	3	1	~10 ³³
LCLS (미국)		16.5	1.6	0.45	5	1	~10 ³³
SACLA (일본)	2007~2011	8.5	0.7	0.4	10	1	~10 ³³
European XFEL(독일)	2007~2015	17.5	3.4	1.4	5	1	~10 ³³
Swiss FEL (스위스)	2011~2016	5.8	0.74	0.43	3	1	~10 ³³
SHINE (중국)	2018~2025	8	3.1	0.4	1.5	1	~10 ³³

*휘도 단위: number of photons / s / mm² / mrad² / 0.1%b.w.
출처: 한국과학기술평가원, 2020

표 3.4 해외 4세대 원형 방사광가속기 구축 현황

구분	가속기명	국가	에너지 [GeV]	저장링 둘레 [m]	에미턴스 [mm·mrad]	전류 [mA]
신규	MAX-IV	스웨덴	3	528	0.3	500
	SLiT-J	일본	3	354	0.92	300
	SIRIUS	브라질	3	518.4	0.25	350
	HEPS	중국	6	1360	0.034	200
개선 (예정)	ESRF-EBS	EU	6	844.4	0.11	200
	Spring-8 II	일본	8	1,436	0.14	100
	APS-U	미국	7	1,104	0.067	200
	ALS-U	미국	2.0	196.5	0.07	500
	SLS-II	스위스	2.4	290.4	0.098	400
	PETRA-IV	독일	6	2,304	0.015	100
	Diamond-II	영국	3.5	560.6	0.16	300
	SOLEIL-U	프랑스	2.75	354.1	0.072	500
ELETTRA 2.0	이탈리아	2	259	0.23	310	

출처: 한국과학기술연구원, 2020

■ 중이온가속기

- 중이온가속기는 희귀동위원소 기반의 최첨단 기초과학 연구를 위해 구축하고 있음.
- 현재 전 세계적으로 5개의 중이온가속기가 운영 중이며, 한국의 RAON을 포함해서 3개 정도가 신축 중이며 거의 완성 단계에 있음.
- 주요 연구 분야로는 희귀원소 빔 발생 및 특성 연구, 핵천체 물리학 연구, 천체물리 및 우주 진화 연구 수행 등이 있음.
- 주요 성과로는 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소의 발견 및 특성 측정이 있음.
- 핵물리, 환경/화학, 재료 및 생물학 응용 등에서도 다양한 성과를 내고 있음.
- 그 외 중이온 암치료 치료용 중이온가속기 연구개발도 진행 중임.

표 3.5 전 세계 중이온가속기 현황

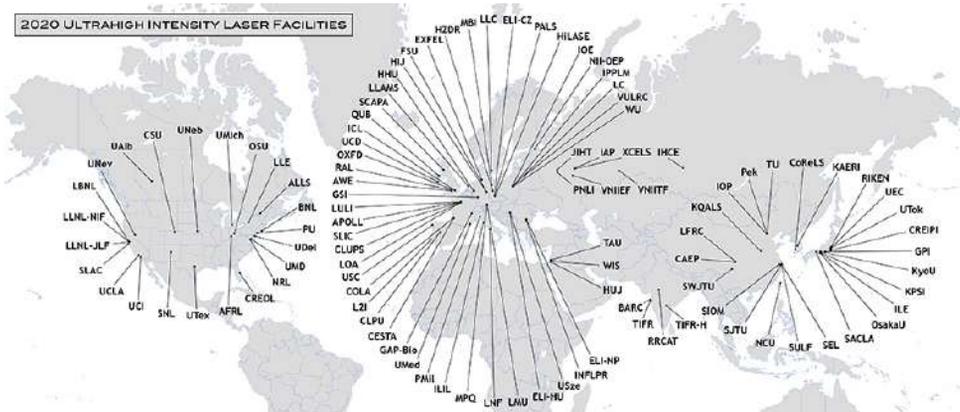
구분	한국 기초과학(연) 라운	캐나다 TRIUMF /ISAC II	프랑스 GANIL /SPIRAL II	유럽 CERN /HIE-ISOL DE	일본 RIKEN /RIBF	독일 GSI /FAIR	미국 MSU /FRIB	중국 IMP /HIRFL
사업 기간	~2022	운영중 성능향상 (~2015)	운영중 성능향상 (~2017)	운영중 성능향상 (~2016)	운영중	~2022	~2022	운영중
가속 에너지	200MeV/u (우라늄)	500 MeV (양성자)	15 MeV/u (중이온)	1.4 GeV/u (양성자)	350 MeV/u (우라늄)	3.7 GeV/u (중이온)	200 MeV/u (우라늄)	500 MeV/u (우라늄)
가속 출력	400kW	50kW	160kW	2.8kW	100kW	80kW	400kW	1010pps
RI빔 에너지	< 250 MeV/u (Sn-132)	6 MeV/u	6 MeV/u	10 MeV/u	345 MeV/u	1.5 GeV/u	< 150 MeV/u (Sn-132)	
발생 방식	ISOL/IF	ISOL	ISOL	ISOL	In Flight	In Flight	In Flight	In Flight
연구 분야	핵, 천체, 원자력, 물성, 바이오	핵, 물성	핵과학	핵, 천체, 입자, 원자, 물성, 바이오	핵과학	핵, 천체, 입자, 원자, 물성, 바이오	핵과학	핵과학

출처: 한국과학기술평가원, 2019

■ 초강력 레이저

- 1996년 미국 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)에서 페타와트 초강력 레이저를 처음으로 개발한 이후, 현재 전 세계에 걸쳐, 대형연구시설·장비 중에서는 가장 많은 숫자인, 약 70여 개의 페타와트 급 장치가 운영 중이거나 구축 중임.
- 물질과의 상호작용을 통해 높은 온도, 높은 에너지의 극한 환경을 만들어, 주로 천체물리 현상 등 기초과학 연구를 수행할 목적으로 제안되었음.
- 생명공학, 환경/기후, 화학, 재료 등의 분야에도 응용되어 다양한 성과를 내고 있음.

그림 3.11 전 세계 초강력 레이저 현황
(The International Committee on Ultra-High Intensity Lasers)



■ 중성미자 검출 장치

- 1987년에 대마젤란 성운 초신성에서 방출된 중성미자가 관측되고, 2000년에는 중성미자 진동 현상이 발견되는 등의 세계적인 연구성과들이 계속 나오고 있어, 중성미자는 최근 크게 부각되고 있는 연구 분야임. 그 결과 현재 차세대 중성미자 검출기 구축사업이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있는데, 대표적으로 일본의 Hyper-Kamiokande, 미국의 DUNE, 중국의 JUNO가 있으며 구체적인 상황은 다음과 같음.

Hyper-Kamiokande(HK)

- 주관 국가 및 기관: 일본 도쿄대학교 KEK 연구소
- 주요 사양: 지하 650m에 위치한 높이 72m, 직경 69m의 원기둥 모양의 초대형 용기 내에 26만 톤의 초순수 물로 채워지며 약 40,000개의 광센서(PMT)가 용기 내벽에 설치되어 중성미자 신호를 검출함.
- 주요 추진 현황
 - 2002년: Super-Kamiokande의 차세대 프로젝트로 제안됨.
 - 2019년: Hyper-Kamiokande 프로젝트 예산 승인
 - 2020년: Hyper-Kamiokande 건설 시작
 - 2027년: Hyper-Kamiokande 완공. 가동 시작
 - 구축 비용: 8억 달러(1조 원)
- 기대되는 주요 연구성과: 중성미자에서의 물질-반물질 비대칭성 발견, 중성미자 질량 순서 결정, 새로운 중성미자 상호작용 발견, 초신성 중성미자 검출 등이 있음.

Deep Underground Neutrino Experiment(DUNE)

- 주관 국가 및 기관: 미국 Fermi National Accelerator Laboratory와 Sanford Underground Research Facility
- 주요 사양: 지하 1,500m에 위치한 10,000톤의 액체아르곤 검출기 4개로 구성. 1단계에서는 2개를 먼저 가동하고 2단계에서 나머지 2개를 가동 예정임.
- 주요 추진 현황
 - 2012년: 차세대 Long Baseline Neutrino Experiment가 제안됨.
 - 2015년: DUNE collaboration 출범
 - 2017년: Fermi 연구소와 Sanford가 지하 시설 구축 시작
 - 2030년: DUNE 1단계 완공. 가동 시작
 - 2032년~: DUNE 2단계 구축
 - 구축 비용: 30억 달러(3.6조 원) 이상
- 기대되는 주요 연구성과: Hyper-Kamiokande 실험의 경쟁 실험으로 기대성과도 중성미자에서의 물질-반물질 비대칭성 발견, 중성미자 질량 순서 결정, 새로운 중성미자 상호작용 발견, 양성자 붕괴 탐색, 초신성 중성미자 검출 등으로 비슷함.

Jiangmen Underground Neutrino Observatory(JUNO)

- 주관 국가 및 기관: 중국 과학원
- 주요 사양: 지하 700m에 위치한 직경 43.5m의 구형 용기 내부에 중성미자 검출 매질로 사용되는 20,000톤의 액체 섬광체와 용기 벽면에 설치되는 20,000여 개의 광센서로 구성됨.
- 주요 추진 현황
 - 2013년: JUNO 프로젝트 승인
 - 2014년: JUNO Collaboration 출범
 - 2022년: JUNO 지하시설 완공
 - 2023년: JUNO 검출기 완성 및 가동
 - 구축 비용: 3억 달러(3,600억 원) 이상
- 기대되는 주요 연구성과: 중성미자 질량 순서 결정, 중성미자 진동상수 정밀 측정, 태양 중성미자, 초신성 중성미자, 지각 중성미자의 검출 및 연구 등임.

■ 중력파 검출 장치

- 현재 작동 중인 중력파 검출기는 미국의 LIGO, 유럽의 Virgo, 그리고 일본의 KAGRA가 있음. 그리고 본격적인 중력파 검출기의 성능을 가지고 있지는 않지만, 소형이면서 다른 검출기에서 필요한 기술개발을 위한 플랫폼 역할을 하는 독일의 GEO가 있음. 이들 중 대형장치를 간단히 설명하면 다음과 같음.

Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory(LIGO)

- 주관 국가 및 기관: 미국 NSF
- 운영 기관: LIGO Laboratories(MIT, Caltech)
- 주요 사양: L자 모양의 Laser 간섭계로서 각 팔의 길이는 4km이고 워싱턴 주의 한포드와 루이지애나 주의 리빙스턴에 각 1기씩 설치되어 있음.
- 주요 추진 현황
 - 1984년: NSF가 Caltech과 MIT를 LIGO 추진기관으로 선정하여 지원 시작
 - 1990년: 국가과학위원회(National Science Board)가 LIGO 건설을 승인함.
 - 1999년: LIGO 완공
 - 2014년: Advanced LIGO 설치 완료
 - 2015년 8월: 제1차 관측 가동 시작, 2015년 9월 14일 최초의 중력파 검출
 - 2023년 3월: 제4차 관측 가동 시작 예정
 - 구축 및 운영 비용: 2015년 제1차 관측 가동까지 약 6억 2천만 달러(7,500억 원)
- 주요 연구성과
 - 2015년 9월 인류 최초의 중력파 검출(2017년 노벨 물리학상)
 - 2017년 8월 중성자별의 충돌로부터 나오는 중력파와 전자기파 동시 관측을 통해 짧은 감마선 폭발체의 기원 규명
 - 지금까지 세 차례의 관측 가동을 통해 100개 가까운 중력파를 관측함으로써 중력파 우주 천문학 시대를 선도함.

Virgo Interferometer

- 추진 국가 및 기관: 유럽의 이탈리아, 프랑스, 네덜란드 등 여러 국가로 구성된 European Gravitational Observatory(EGO)
- 협력 국가: 스페인, 포르투갈, 아일랜드, 그리스, 벨기에, 독일, 덴마크, 폴란드, 체코, 모나코, 헝가리, 중국, 일본 등

- 주요 사양: L자 모양의 Laser 간섭계로서 각 팔의 길이는 3km이고, 이탈리아 피사 부근 Casina에 위치함.
- 주요 추진 현황
 - 1989년: Adalberto Giazotto and Alain Brillet가 Virgo라는 이름의 중력파 검출기를 프랑스의 CNRS와 이탈리아의 INFN에 제안함.
 - 1990년: Virgo 프로젝트 승인
 - 2003년: Virgo 완공
 - 2009년: Advanced Virgo 프로젝트 승인
 - 2015년: LIGO와 동시 관측 가동 시작
 - 2017년: 제2차 관측 가동 시 LIGO와 최초의 동시 관측 성공
 - 구축 및 운영 비용: 약 2억 유로(2,600억 원)

Kamioka Gravitational-Wave Detector(KAGRA)

- 추진 국가 및 기관: 일본, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research)
- 협력 국가: 한국(천문연구원), 이탈리아 등
- 주요 사양 및 특징: L자 모양의 Laser 간섭계로서 각 팔의 길이는 3km이고, 일본 서해안 기후현 히다시의 카미오카 광산에 설치됨.
- 최초로 지하에 설치된 중력파 검출기이고, 역시 최초로 검출기 거울들을 냉각하는 검출기임.
- 주요 추진 현황
 - 2010년: LCGT(Large Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope)라는 이름의 프로젝트로 일본 정부에 의해 승인
 - 2012년: KAGRA라는 이름으로 개칭
 - 2020년: 검출기 완공
 - 2021년: LIGO/Virgo의 제3차 관측 가동의 마지막 한 달 동안 참여
 - 2023년: LIGO/Virgo의 제4차 관측 가동에 참여 예정
 - 추진 비용: 약 2억 달러(2,600억 원)
- 2022년 현재 미국의 LIGO, 유럽의 Virgo, 일본의 KAGRA는 MOU를 통해 공동으로 관측을 추진하고 있음.

■ 지상 천문관측 장비

- 천체에서 나오는 전자기파는 감마선에서 전파에 이르기까지 매우 폭넓은 파장을 가지고 있으나, 지구 대기를 자유롭게 통과하는 것은 가시광선과 전파임. 따라서 지상 관측 장비는 모두 광학망원경과 전파망원경임. 지상 관측 장비 중 규모가 크고 중요한 것 몇 개만 기술함.

제미니 천문대(Gemini Observatory)

- 북반구 하와이의 해발 4,200m 마우나 케아와 남반구 칠레의 해발 2,600m 세로 파촌 고원에 각각 한 대씩 건설한 직경 8.1m의 광학망원경
- 주관 국가/기관: 미국(NSF), 캐나다(NRC), 칠레(CONICYT), 브라질(MCTI), 아르헨티나(MCTIP), 한국(KASI)
- 한국은 2019년부터 신규 참여함.
- 2022년 현재 제미니 천문대의 운영은 미국의 NSF가 NOIRLab을 통하여 주관하고 있으며 총 운영비의 약 70%를 부담하고 있음.
- 1991년 발표된 1990년대 미국 천문학 및 천체물리학 연구개발 10년 계획에서 지상 분야 최우선 순위로 선정됨.
- Gemini-N은 1999년, Gemini-S는 2000년에 각각 운영을 시작함.
- 건설 비용: 약 1.87억 달러(2,200억 원)
- 가시광 영역에서는 영상 관측과 고분산 분광 관측 및 다천체 분광 관측이 가능하며 근적외선 영역에서는 레이저 인공별을 이용한 적응 광학 영상 관측으로 회절 한계에 가까운 초고해상도 영상 관측과 고분산 분광 관측이 가능함.
- 제미니 천문대는 2020년대 최고 수준의 지상 광학망원경으로서 세계 최대의 광학 영상 탐사 프로젝트인 LSST 관측자료에 대해 분광 관측자료를 추가할 주력 망원경으로 분광 관측 장비로 각광을 받고 있으며 JWST 우주망원경을 보완하는 지상 광학 및 적외선 관측을 수행함.

US Extremely Large Telescope(US-ELT) - GMT & TMT

- 미국 주도 차세대 초거대 광학망원경
- GMT(Giant Magellan Telescope)는 직경이 8.4m인 원형 반사경 7장을 연꽃잎 모양으로 배열한 직경 25.4m의 광학망원경으로서 칠레의 해발 2,500m 라스캄파나스 정상에 설치할 계획임.
- GMT는 미국의 8개 기관(Carnegie, Harvard U., Smithsonian, Chicago U., U. Texas, TAMU, U. Arizona, ASU), 호주의 2개 기관(ANU, AAL), 한국(KASI), 브라질(FAPESP), 이스라엘(WIS) 등 13개 기관이 참여하는 국제공동건설 프로젝트이며 건설은 미국에 소재한 비영리기구인 GMTO Corporation이 수행하고 있음.

- TMT(Thirty Meter Telescope)는 직경이 1.4m인 정육각형 반사경 498장을 별집 모양으로 배열한 직경 30m의 광학망원경으로서 하와이 마우나케아 정상 또는 스페인 카나리아 군도의 라 팔마에 설치할 계획임.
- TMT는 미국의 칼텍과 캘리포니아 대학, 인도(DST), 중국(NAOC), 일본(NINS), 캐나다(NRC)가 참여하고 있고, 미국의 고던 베티 무어 재단(Gordon and Betty Moore Foundation)의 후원을 받는 국제공동건설 프로젝트이며 건설은 미국에 소재한 비영리기구인 TIO가 수행하고 있음.
- GMT와 TMT는 광학 및 적외선 영역에서 적응 광학계를 이용한 회절 한계 수준의 고분해능 영상 관측 및 다천체 분광 관측, 고분산 분광 관측 등을 통하여 탄생 직후의 초기 우주와 외계 행성계 형성과 진화 등 현대 천문학의 핵심 주제를 연구할 수 있는 지상관측 장비임.
- GMT와 TMT는 각각 독립된 프로젝트로 수행해왔으나 2018년 미국 NSF/AURA와 함께 미국 주도의 초거대망원경 프로그램인 US-ELT를 결성하였으며 US-ELT 프로그램은 2021년 발표된 2020년대 미국 천문학 및 천체물리학 분야 연구개발 10년 계획에서 최우선 순위로 선정되었음.
- 건설 비용: GMT 건설비 약 24억 달러(2조 8천억 원), TMT 건설비 약 31억 달러(3조 7천억 원)
- 완공 예상 시기: 2030년

European Extremely Large Telescope(E-ELT)

- 유럽남천문대(ESO)가 건설 중인 차세대 초거대 광학적외선 지상망원경
- 직경 1.4m의 정육각형 반사경 792장을 별집 모양으로 배열한 직경 39m의 광학망원경으로서 칠레의 해발 3,000m 세로 아마조네스 정상에 설치할 계획임.
- 주관 국가/기관: EU/ESO
- E-ELT는 다섯 번의 반사를 거치는 독특한 광학 설계를 채택하여 미국 주도 초거대 광학망원경과 차별화하고 있음.
- 건설 비용: 약 13억 유로(1조 8천억 원)
- 완공 예상 시기: 2028년

Very Large Array(VLA)

- 미국 뉴멕시코 소코로 부근의 평원에 위치한 전파망원경 array
- 1964년 발표된 1960년대 미국 천문학 및 천체물리학 10년 연구개발계획 조사에서 최우선 순위 프로젝트로 선정됨.
- 미국 국립전파 천문대(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)가 1973년에 건설을 시작하여 1980년에 본격적인 관측을 시작함.
- 건설 비용: 건설 당시 기준 7.85백만 달러(2021년 가치 기준 약 2.58억 달러, 3,000억 원)

- 지름 25m 전파망원경 28개로 구성되어 있고, Y자 모양을 이루는 세 개의 팔을 따라 9개씩 27개가 배열되어 있으며 하나의 전파망원경은 여분으로 제작됨.
- 각 망원경은 팔을 따라 설치된 철로를 이용해 이동할 수 있음.
- 망원경을 배열하는 영역의 최대 지름은 약 37km이고, 관측 가능한 전파의 진동수는 1GHz~50GHz임.
- 주요 연구성과: 수성에서 얼음 발견(1991), 우리은하 중심부에서 나오는 전파 관측(1982~1988), 감마선 폭발체로부터 나오는 전파 관측(1997) 등 다수

Atacama Large Millimeter Array(ALMA)

- 66개의 지름 12m 전파망원경으로 구성된 현재 최대 규모의 전파망원경 array
- 칠레 북부 아타카마 사막의 차한토르 고원(해발 고도: 5,000m)에 위치하고 있으며 관측 파장은 0.32~3.6mm임.
- 주관 국가/기관: 미국(NSF), 캐나다(NSERC), 유럽(European Southern Observatory, ESO), 일본(NINS)
 - 당초에는 아시아에서 일본만이 포함되어 있었으나 나중에 한국의 천문연구원과 대만의 과학원이 운영에 참여하기 시작했음.
 - 현재 참여 국가의 총수는 21개국임.
- 2003년에 착공하여 2011년 완공되었음.
- 건설 비용: 140억 달러(약 17조 원)
- 주요 연구성과: 지금까지 별 탄생 영역이나 멀리 있는 은하의 성간 물질에 대한 고해상도 관측을 통해 우주의 이해에 크게 기여했으며, 특히 지난 2018년에 처음으로 공개된 블랙홀 영상을 찍는 사건지평선 망원경(Event Horizon Telescope) 네트워크에서 가장 중심적인 역할을 함.

The Square Kilometre Array(SKA)

- 많은 수 전파망원경을 배열로 연결하여 총 집광 면적 1 제곱킬로미터를 구현하는 차세대 세계 최대 전파망원경 프로젝트
- 남아프리카에는 고주파(1GHz~100GHz) 영역 안테나를, 서호주에 저주파(10MHz~1GHz) 영역 안테나를 각각 설치하여 운영할 계획임.
- 1단계 건설은 2021년 개시, 과학 연구 관측은 2020년대 말에 실시할 수 있을 것으로 예상함.
- 1단계 건설 이후 계속 안테나를 확장 건설하여, 당초 목표였던 “Full SKA”를 구현할 계획임.
- 건설 비용: 1단계 건설비와 2021~2030년 운영비 합계 19억 유로(2조 6천억 원)로 추정됨.

- 현재 공식 참여 국가는 - 호주, 캐나다, 중국, 프랑스, 독일, 인도, 이탈리아, 뉴질랜드, 스페인, 남아프리카 공화국, 스웨덴, 스위스, 네덜란드, 영국 등 14개국
 - 현재 한국, 일본 등도 참여를 추진하고 있음.
- 프로젝트 주관: 비영리기구인 SKAO가 주관하고 있으며 본부는 영국 맨체스터의 조드렐뱅크에 설치됨.

■ 우주 천문관측 장비

- 가시광선과 전파 등 제한된 파장의 관측만 가능한 지상 장비에 비해, 우주에 설치된 망원경은 천체로부터 방출되는 모든 파장의 전자기파를 관측할 수 있음. 한국에서는 한국천문연구원 2003년 FIMS, 2013년 MIRIS, 2018년 NISS 등 소형 우주망원경을 발사하여 활용한 바 있으나, 미국이나 유럽에서 발사한 우주망원경에 비하면 규모가 매우 작음. 아래에는 지금까지 추진된 여러 우주망원경 가운데 대표적인 것 몇 가지만 소개함.

허블 우주망원경(Hubble Space Telescope, HST)

- 발사 연도 및 가동 기간: 1990년, 1990년~현재(2030년경까지 사용 예상)
- 주관 국가/기관 및 협력 국가/기관: 미국 NASA, 유럽 ESA
- 주요 사양: 주경 지름 2.4m, 관측 파장: 근자외선-근적외선
- 추진 비용: 160억 달러(2021년 달러 가치 기준, 19조 원)
- 주요 연구성과: 행성, 항성, 은하, 은하계, 우주 등 천체학 전 분야에 막대한 영향을 미침.

컴프턴 감마선 천문대(Compton Gamma-Ray Observatory, CGRO)

- 발사 연도 및 가동 기간: 1991년, 1991년~1999년
- 주관 국가 및 기관: 미국 NASA
- 주요 사양: 20keV~30GeV의 감마선을 측정하는 기기, 해상 정밀도 2도
- 추진 비용: 6억 1700만 달러(발사비용 포함, 7,500억 원)
- 주요 연구성과: 감마선 폭발체가 우주론적 거리에 떨어져 있는 먼 곳에서 오고 있다는 사실을 확립. 거대질량 블랙홀 주변에서 나오는 감마선 관측됨.

찬드라 X-선 관측소(Chandra X-ray Observatory, CXO)

- 발사 연도 및 가동 기간: 1999년, 1999년~현재
- 주관 국가 및 기관: 미국 NASA
- 주요 사양: 지름 1.2m, 관측 x-선 에너지 범위: 0.1~10keV

- 추진 비용: 30억 달러(3조 6천억 원)
- 주요 연구성과: 고에너지 X-선 천체물리현상 규명

스피처 우주망원경(Spitzer Space Telescope)

- 발사 연도 및 가동 기간: 2003년, 2003년~2020년
- 주관 국가 및 기관: 미국 NASA
- 주요 사양: 주경 지름 85cm, 관측 파장 영역: 3~180 μ m
- 추진 비용: 13억 6천만 달러(1조 6천억 원)
- 주요 연구성과: 적외선 영상 및 분광 관측을 통해 별의 탄생과 죽음, 은하의 진화 등에 대해 획기적인 연구성과를 얻음.

플랑크 우주망원경(Planck Space Observatory)

- 발사 연도 및 가동 기간: 2009년, 2009년~2013년
- 주관 국가/기관 및 협력 국가/기관: 유럽 ESA, 미국 NASA
- 주요 사양: 지름 1.9m x 1.5m, 관측 파장 300 μ m~11mm
- 추진 비용: 약 6억 유로(발사비용 포함, 8,500억 원)
- 주요 연구성과: 고분해능 관측을 통한 우주배경복사 비등방성의 관측. 이를 통해 우주론적 인자들을 정확히 추정함으로써 정밀 우주론 시대를 열게 함.

허셸 우주망원경(Herschel Space Observatory, HSO)

- 발사 연도 및 가동 기간: 2009년, 2009년~2013년
- 주관 국가/기관 및 협력 국가/기관: 유럽 ESA, 미국 NASA
- 주요 사양: 지름 3.5m, 관측 파장: 55~672 μ m
- 추진 비용: 약 9억 유로(발사비용 포함, 1조 2천억 원)
- 주요 연구성과: 원적외선 영상 및 분광 관측을 통해 태양계 소천체의 특성 연구, 별 탄생 과정 연구, 별 탄생 은하의 발견 중

제임스 웹 우주망원경(James Webb Space Telescope, JWST)

- 발사 연도 및 가동 기간: 2022년, 현재 운용 중이며 예상 수명은 5~10년
- 주관 국가/기관 및 협력 국가/기관: 미국 NASA, 유럽 ESA
- 주요 사양: 지름 6.5m, 관측 파장: 0.6~28 μ m(가시광선 - 중적외선)

- 추진 비용: 약 100억 달러(12조 원, 지금까지 최대 천문학 프로젝트)
- 주요 연구성과: 아직 관측을 시작한 지 얼마 되지 않았으나, 뛰어난 해상도와 분해능 덕분에 이미 우주 초기 은하들을 다수 발견함.

**대형연구시설·장비를 활용한
국내 기초과학 현황 및 발전 모색**

Basic science research in Korea based on
large-scale research facilities and equipment

IV

**해외의
대형연구시설·장비 구축
및 운영 체계**

IV. 해외의 대형연구시설·장비 구축 및 운영 체계

1. 미국의 대형연구시설·장비 구축 및 운영 체계

- 미국의 학계에서는 다양한 survey를 통해 대형연구시설·장비에 관한 학계의 의견을 수렴하고 있음. 본 보고서에서는 기초과학 물리·천문 분야 survey 중 다음을 기술함.
 - Snowmass 미팅: 고에너지물리 분야 대형연구시설·장비에 관한 학계의 의견을 수렴
 - Decadal Survey: 천문학 분야 대형연구시설·장비에 관한 학계의 의견을 수렴
- 미국은 다양한 기관에서 대형연구시설·장비를 심사·선정·운영하고 있음. 본 보고서에서는 기초과학 물리·천문을 지원하는 다음 기관에서의 시설·장비 구축 및 운영 체계를 기술함.
 - DOE(Department of Energy)
 - NSF(National Science Foundation)
 - NASA(National Aeronautics and Space Administration)

■ Snowmass 미팅 및 보고서

- Snowmass 탄생 배경
 - 1930년대 캘리포니아 버클리 대학에서 사이클로트론이 개발되면서 가속기 구축 시작
 - 1950년대 싱크로트론 기술이 도입되면서 동부 브룩헤이븐 연구소에는 코스모트론, 서부 버클리연구소에는 베바트론이 설치·운영됨.
 - 1960년대부터 1980년대까지 가속기 건설이 붐을 이루면서 스탠포드 선형가속기(1966년), 페르미연구소 부스터/링(1970년), 스탠포드 SPEAR e+e-충돌기(1972), 코넬대학 CESR(1979), SLAC PEP(1980), 페르미연구소 테바트론(1983년) 등이 경쟁적으로 건설되고 운영됨.
- Snowmass 탄생 동기: 이전 시스템의 문제점
 - 대형연구시설·장비의 수요가 증가함과 동시에 지역별로 대형연구시설·장비를 유치하기 위한 경쟁이 발생
 - 대규모 예산의 투입이 필요한 대형연구시설·장비 구축이 “수요자”와 “정부 당국(주로 DOE, Department of Energy)” 간의 로비 형식의 협상으로 결정되는 등의 갈등 발생
 - 대형연구시설·장비의 여러 수요자 및 중복 수요를 조정하여 선정 및 구축의 우선순위를 파악할 필요가 생김.

- Snowmass의 탄생
 - 미국 학계는 대형연구시설·장비의 건설이 “과학의 관점”에서 결정되어야 한다고 미국 정부를 설득함.
 - 1982년 콜로라도의 Snowmass에서 관련 과학자들의 회의가 개최됨. 당시 고에너지물리학 전 분야의 연구현황과 미래의 연구계획에 대한 발표가 이루어지고, 어떤 대형연구시설·장비가 우선적으로 건설되어야 하는지를 모두의 동의로 결정하자는 합의가 도출됨.
 - 이후 Snowmass 미팅이 미국 대형연구시설·장비 건설의 증장기 계획을 결정하는 공식 프로세스로 자리 잡게 됨.
 - 2005년 이후부터는 Snowmass가 아닌 지역에서도 개최되었지만, 회의 명칭은 그대로 Snowmass 미팅으로 칭함.
 - Snowmass 참여 인원: 평균 3,000여 명(미국뿐 아니라 전 세계에서 참여)
 - 2022년 Snowmass: 미국 시애틀에서 7월 17일~22일에 개최
- 미국 입자물리학 분야 대형연구시설·장비 구축 우선순위 결정 방식
 - Snowmass 미팅 개최: 고에너지물리학의 각 분야에서 해결해야 할 가장 중요한 문제들을 발굴
 - P5(P5: Particle Physics Prioritization Panel) 위원회로 송부
 - 20년 단위의 비전을 실천할 10년 단위 실행 계획 마련
 - 5단계의 승인 과정: 아래 DOE Lab Critical Decision 과정과 동일
 - 예비단계(CD-0): 타당성 승인 및 CDR R&D를 위한 펀딩
 - 1단계(CD-1): CDR(Critical Design Review) 제출 및 프로젝트 승인(예산 규모와 지원 범위 결정)
 - 2단계(CD-2): TDR(Technical Design Review) 검토 및 승인
 - 3단계(CD-3): 대형연구시설·장비 구축 승인
 - 4단계(CD-4): 대형연구시설·장비 준공 및 가동 승인
- Snowmass의 10대 프론티어: 고에너지물리학의 최첨단 10대 연구분야
 - 에너지 프론티어(Energy Frontier)
 - 중성미자 물리학 프론티어(Neutrino Physics Frontier)
 - 희귀 반응 및 정밀측정 프론티어(Rare Processes and Precision Measurements Frontier)
 - 우주 프론티어(Cosmic Frontier)
 - 이론 프론티어(Theory Frontier)
 - 가속기 프론티어(Accelerator Frontier)

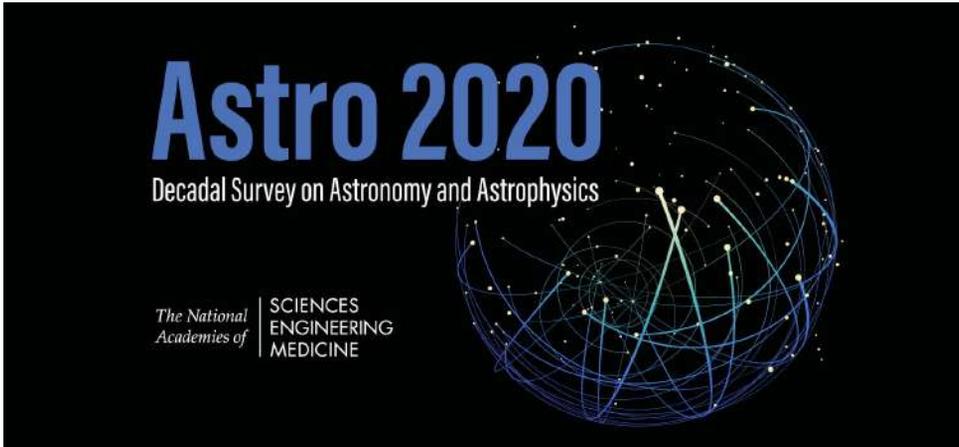
- 실험기기 프론티어(Instrumentation Frontier)
- 컴퓨팅 프론티어(Computational Frontier)
- 지하 시설(Underground Facilities)
- 커뮤니티 참여(Community Engagement)

■ Decadal Survey(미국 천문학 및 천체물리학 연구개발 10년 계획)

- 주관 기관: 미국 National Research Council of National Academy of Sciences
- 보고서의 주요 내용 및 의의
 - 미국의 천문학 및 천체물리학 분야 현재 연구 동향 및 연구시설·장비 상황을 분석하면서, 조사 시점 이후 10년간 수행할 연구 사업에 대한 우선순위 권고
 - 천문학과 천체물리학 분야 투자 우선순위에 대한 학계의 의견을 정부 당국에 전달하여 예산 편성을 위한 참고 자료로 활용하도록 함.
 - 1964년에 실시한 최초의 조사는 지상 천문학 연구시설·장비만을 대상으로 하였으나, 1970년대부터 지상과 우주 연구시설·장비를 함께 다루고 있음.
 - Decadal survey에서의 추천은 NSF 또는 NASA를 통한 예산 지원을 보장하는 것은 아님. 그렇지만 최근 구축된 지상 및 우주의 대형연구시설·장비 중 우선순위로 추천되지 않은 것이 없을 정도로 Decadal Survey는 미국 천문학 및 천체물리학 분야 정책 결정에 중요한 영향력을 미치고 있음.
- Decadal survey 보고서 발간 역사
 - 1964년 제1차 보고서 “지상 천문학: 10개년 프로그램”
 - 1972년 제2차 보고서 “1970년대의 천문학과 천체물리학”
 - 1982년 제3차 보고서 “1980년대의 천문학과 천체물리학”
 - 1991년 제4차 보고서 “천문학과 천체물리학 발견의 10년”
 - 2001년 제5차 보고서 “새로운 천년의 천문학과 천체물리학”
 - 2010년 제6차 보고서 “천문학과 천체물리학의 새로운 세계와 새로운 지평선”
 - 2021년 제7차 보고서 “2020년대 천문학과 천체물리학의 발견으로 가는 길”
- 가장 최근에 발간한 보고서 “2020년대 천문학과 천체물리학의 발견으로 가는 길”(Astro 2020): 2021년 11월 4일 미국 National Academy of Sciences에 제출
 - 조사 범위: NSF의 천문학분과(Division of Astronomical Sciences)와 NASA의 천체물리학 분과(Astrophysics Division)가 관할하는 분야

- 전체 위원회는 2명의 Co-chair [Fiona A. Harrison(California Institute of Technology), Robert C. Kennicutt, Jr.(전 Director of Institute of Astronomy, University of Cambridge)]를 포함하여 총 20명의 member 구성
- 전체 위원회 아래에 운영위원회와 과학 패널 6개, 프로그램 패널 7개, 취업 현황과 사회적 영향 패널(SoPSI), 천문학 보드, 우주과학 보드로 구성
- Astro 2020 위원회 활동 요약
 - 과학 패널
 - 각 패널이 맡은 연구 분야의 현 상태에 대한 진단 도출
 - 향후 10년 동안 연구해야 할 중요한 과학적 질문과 예상되는 발견 결정
 - 프로그램 패널
 - 현재 진행 중이거나 제안된 프로젝트가 과학 패널이 발굴한 과학적 질문에 답을 할 수 있는지 평가
 - 제안된 프로젝트의 기술, 위기, 비용 평가(Technical, Risk, and Cost Evaluation, TRACE) 도출
 - 취업 현황과 사회적 영향 패널(SoPSI)
 - 미국 천문학계의 현황, 다양성과 포용성, 직장 환경, 교육, 홍보, 직무 개발, 공공 정책 등에 대한 정보 수집
- Astro 2020 권고 최우선순위
 - 과학 주제
 - search for habitable exoplanets and extraterrestrial life
 - study black holes and neutron stars
 - study the growth and evolution of galaxies
 - 대형연구시설·장비
 - 지상 천문관측 장비: US-ELT(GMT, TMT)
 - 우주 천문관측 장비: 새로운 적외선, X-선 망원경

그림 4.1 Astro 2020 공식 로고



■ DOE(Department of Energy)의 대형연구시설·장비 선정 및 운영 체계

- DOE의 한 부서인 Office of Science에서는 아래 분야를 관장함.
 - Advanced Scientific Computing Research
 - Basic Energy Sciences
 - Biological and Environmental Research
 - Fusion Energy Sciences
 - High Energy Physics
 - Nuclear Physics
- Office of Science는 Argonne National Laboratory, Brookhaven National Laboratory, Fermi National Accelerator Laboratory 등 미국 내 10개 국립연구소를 운영 중임.
- Office of Science는 다음의 자문위원회(Federal Advisory Committees)를 두고 있음.
 - Advanced Scientific Computing Advisory Committee(ASCAC)
 - Basic Energy Sciences Advisory Committee(BESAC)
 - Biological and Environmental Research Advisory Committee(BERAC)
 - Fusion Energy Sciences Advisory Committee(FESAC)
 - High Energy Physics Advisory Panel(HEPAP)
 - Nuclear Science Advisory Committee(NSAC)
- 과학자와 기술자로 구성된 자문위원회의 조언을 기반으로 대형연구시설·장비 프로그램의 선정과 지원이 결정됨.

- Critical Decision: 해당 분야 전문가로 구성된 위원회의 조언을 기반으로 한 대형연구시설·장비 프로젝트 선정 과정
 - CD-0: Approve Mission Need
 - CD-0은 과학적 목표 또는 새로운 기능과 같은 프로젝트의 필요성(Mission Need)이 존재함을 승인
 - 프로젝트의 시설, 기술 또는 구성을 반드시 명시할 필요는 없음. 하지만 수준(level)은 어느 정도인지 명시
 - 일반적으로 CD-0 승인 이후의 비용(cost)은 프로젝트의 비용에 포함. 즉, 발생한 비용은 전용 프로젝트 예산에서 공제
 - CD-1: Approve Alternative Selection and Cost Range
 - CD-1은 선택된 대안 및 접근 방식이 CD-0에 정의된 미션 요구를 충족하도록 최적화되었다는 결정
 - 평가의 주요 요소는 프로젝트의 개념 설계, 비용 및 일정 범위 및 일반 획득 방식. 비용 범위는 다양한 기능과 같은 추정 및 범위 옵션에서 불확실성을 허용
 - CD-2: Approve Performance Baseline
 - CD-2는 프로젝트의 예비 설계(preliminary design) 및 기준 범위(baseline scope), 비용 및 일정의 승인
 - baseline은 프로젝트가 비용 및 일정에 대한 earned value metrics와 기술 성능에 대한 Key Performance Parameters(KPP)를 사용하는 것으로 측정될 수 있는 결정적인 계획
 - CD-3: Approve Start of Construction
 - CD-3은 프로젝트의 최종 설계를 승인했으며 건설을 위한 자금 투입을 승인
 - 완전하고 독립적으로 검토된 최종 디자인
 - 최종 설계 완료의 정의가 절대적이지 않으며 반드시 모든 도면이 100% 완료되었다는 것을 의미하지는 않지만, 조달 및 건축이 시작될 수 있도록 설계가 충분히 성숙해야 함. 여기에는 적절한 구성 요소의 설계 검증 테스트 완료가 포함될 수 있음.
 - CD-4: Approve Start of Operations or Project Completion
 - CD-4는 프로젝트의 목표가 충족되었다는 인식
 - 기술적 성공 기준으로 사용되는 모든 KPP(Key Performance Parameters)가 충족되었음을 나타냄.

■ NSF(National Science Foundation)의 대형연구시설·장비 선정 및 운영 체계

- NSF 대형연구시설·장비(Major Research Equipment and Facilities, MREFC)의 정의
 - 연구 및 교육을 위해 필요한 핵심 장비·시설
 - 2020년 10월 개정된 NSF 규정에 따르면 총비용(Total Project Cost, TPC) \$20M 이상인 장비·시설
 - 총비용(TPC)의 정의: 건설 또는 획득에 필요한 비용이며 운영비나 과학 연구에 필요한 비용은 제외
- 대형연구시설·장비의 선정
 - 뛰어난 연구개발 기회와 혁신성을 갖추고 연구, 개발, 교육 및 사회적 파급효과가 있음을 입증해야 함.
 - 과학적인 이해와 기반 기술에 관한 기존의 패러다임을 변혁할 수 있음을 입증해야 함.
 - 계획 수립 및 개발 기간 이후까지 다년간 지속될 수 있는 최신 연구와 교육 기회를 제공해야 함.
 - NSF의 목표와 전략 및 우선순위에 부합해야 함.
 - 즉, 분야의 외부 과학 및 기술 전문가 평가에서 기반한 확고한 지지를 받으면서 아래와 같은 장점을 갖추어야 함.
 - 과학 연구 및 기술개발을 할 충분한 가치
 - 광범위한 사회적 영향력
 - 해당 과학, 기술 분야의 지지
 - 기술적인 측면에서 실현 가능성
 - 프로젝트 관리, 비용, 건설 기간 등의 적정성
- 대형연구시설·장비의 생애주기(Life Cycle) 개념 설정 및 적용
 1. 개발(Development)
 2. 설계(Design)
 3. 건설(Construction)
 4. 운영(Operation)
 5. 퇴역(Divestment)

그림 4.2 NSF 대형연구시설·장비의 생애주기(Matt Hawkins, 2022)



- 개발 단계
 - 연구시설·장비에 대한 초기 아이디어의 발굴, 장기적인 필요성, 우선순위, 일반적인 필요조건 등에 대한 학계의 지지를 바탕으로 NSF에 신청함.
 - 개발 단계 지원 비용은 주로 초기 아이디어를 발전시키고, 학계의 지원을 구하고, 공동개발 파트너십을 구축하는 용도로 사용함.
 - 개발 단계에서 설계 단계로 넘어가기 위해서는 NSF의 연구시설사무국(Chief Officer of Research Facilities, CORF)에 공식 요청서를 제출하고 승인받아야 함.
 - CORF의 심사 결과는 NSF 기관장에게 제출되며, NSF 내 국가과학이사회(National Science Board, NSB)의 승인을 얻은 후 설계 단계로 진입함.
- 설계 단계
 - 설계 단계에서는 세부적인 건설비, 스케줄, 기술적인 규격과 도면, 프로젝트 관리 절차 등이 구축됨.
 - 설계 단계는 3단계로 나눌 수 있음 - 개념 설계(Conceptual Design), 예비 설계(Preliminary Design), 최종 설계(Final Design)
 - 각 설계 단계는 프로젝트 실행계획서(Project Execution Plan, PEP)에 따라 NSF의 공식적인 점검을 받은 후 다음 단계로 진입 가능
 - 점검 회의에서 합격점을 받지 못할 경우 프로젝트는 중단됨.
 - 개념 설계
 - 개발 단계에서 추정된 대략의 비용 및 개발 범위, 기술적인 요구사항을 보다 구체화함.
 - 프로젝트 실행계획서의 구성 요소 업데이트 - 구성 요소별 비용 추정, 종합 개발 일정, 위험 인자 분석 등
 - 예비 설계
 - 프로젝트 실행계획서를 보다 구체화함.
 - 상향식 비용 추정, 최종 개발 범위와 개발 일정, 구체화된 위험 인자 분석 등을 통해 총 건설 비용(TPC)을 도출하고 의회에 예산요구서를 제출할 수 있을 정도로 매 회계연도별 필요 예산을 추산
 - 예비설계검토회의를 통해 최종 설계 단계 진입 여부를 결정하고 NSB에 향후 필요한 추가 예산을 예산요구서에 포함하도록 요청
 - 최종 설계
 - 프로젝트 정의 및 실행계획서를 더욱 구체화하고 건설 예산 집행 준비를 완료
 - 예비설계검토회의에서 예상하지 못한 추가 요소들을 설계에 반영
 - 최종설계검토회의를 통해 건설 단계 진입 여부를 결정

- 건설 단계
 - 건설 단계 예산이 확보되면 건설이 시작됨.
 - 건설은 통상적으로 \$100M 이상의 비용, 5년 이상의 기간이 소요됨.
 - 건설 단계에서 NSF는 계획에 대비하여 개발의 범위와 기간, 비용 등이 제대로 진행되는지를 관리 감독함.
 - 건설 단계의 마지막은 보통 운영 단계로 전환되는 과정을 포함
- 운영 단계
 - 건설 단계에서 제출한 운영 단계 계획서를 최종적으로 확정
 - 운영 단계는 건설 단계에서 최종적으로 건설을 완료하고 운영 단계로 진입하는 데 필요한 기간과 비용을 포함할 수 있음.
 - 운영 단계의 마지막은 퇴역 단계로 진입하기 위한 기간과 비용을 포함할 수 있음.
- 퇴역 단계
 - Divesment를 퇴역으로 번역했지만, 이는 프로젝트의 범위나 성능 또는 과학적 결과물의 축소를 의미하는 것은 아님.
 - 퇴역은 학계의 판단에 따라 NSF에서 결정함.
 - 이 단계에서 대형연구시설·장비의 운영은 다른 기관이나 대학, 재단 등으로 이관할 수 있음.

■ NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 대형 미션 선정 및 지원 체계 (미국 NAS 2017 참조)

- 대형 미션(Large Strategic Science Missions)의 정의와 성격
 - NASA의 과학연구이사회(Science Mission Directorate, SMD) 네 개 분과(천체물리, 지구과학, 태양물리, 행성과학)가 우주개발과 과학연구에 대한 미국의 세계적인 리더십을 유지를 목표로 선정하는 플래그십 미션임.
 - NASA SMD에서 운영하며, 보통 수십억 달러의 비용과 가장 복잡하면서도 정교한 기술개발을 요구하는 미션임.
- 대형 미션의 특징
 - 극한 환경에서 도전적인 과학연구 수행
 - 다양한 목적의 과학연구 수행
 - 상대적으로 많은 수의 대형 관측 장비를 탑재
 - 상대적으로 수명이 길며, 미션을 수행하는 동안 습득한 지식을 바탕으로 새롭게 개발된 과학연구 프로그램을 수행

- 대형 미션의 선정 과정
 - 위의 네 개 과학 분야에서 실시하는 Decadal Survey 보고서 등을 통한 과학계의 의견을 바탕으로 우선순위를 결정
 - 일반 경쟁으로 장비 구축 및 운영 주체를 선정하는 것이 아니라, NASA에서 특정 기관을 지정하여 임무를 부여함.
- 대형 미션의 선정 절차
 - 과학계의 의견 및 중요성을 고려
 - 천체물리 분과의 경우 “Great Observatories” 프로그램에서는 허블 우주망원경과 찬드라 X-선 관측소, 그 외 페르미 감마선 관측소와 같은 미션을 다양한 연구자의 수요를 반영하여 선정했음.
 - 행성계 분과에서는 보이저, 갈릴레오, 카시니, 큐리오시티와 같은 미션에서 행성계 과학 커뮤니티의 지구화학, 지구물리, 대기권, 자기권 연구 등을 위해 선정했음.
 - 태양물리 분과는 SDO(Solar Dynamic Observatory), VAP(Van Allen Probes), MMS, STEREO(Solar Terrestrial Relations Observatory), Voyager 등을 태양물리 학계의 연구 수요에 대응해 선정했음.
 - 과학 분과에서 수행하는 대형 미션에 대해 조정이 필요한 경우, 해당 분야의 Decadal Survey 보고서 등을 먼저 참조한 다음, 해당 미션들의 중간 점검 결과에 따르기를 권고하며, 이러한 절차로도 부족한 경우에는 해당 분과의 자문단 의견에 따르고 있음.
 - 대형 미션 제안서는 최소한의 과학적 성과와 최대 필요 예산, 예산 규모에 따라 기대되는 과학적 성과 등을 포함하여야 함.
 - 과학연구 프로그램 개발 제안서는 소요 비용에 대한 제약 조건을 반드시 포함하여야 함. 즉, 추정 예산보다 비용이 초과하거나 극복할 수 없는 기술적 장벽이 발생하는 경우, 원래의 계획보다 개발 범위를 축소하거나 또는 새로운 기술의 등장에 따른 새로운 연구 방법의 추가 등에 따라 개발 범위를 확장하거나 하는 유연한 의사 결정 방법이 포함되어야 함.
 - 대형 미션 후보 과제에 대해, 철저한 사전 조사를 통해 과학연구 목적, 위험성, 비용, 성능, 일정 등에 대한 조정이 이루어질 것임을 조사 위원회에 통보하여야 함. 이를 통해 초기 추정 비용에 비해 실제 비용이 지나치게 높게 나타나는 등의 부작용을 방지함.
 - 대형 미션의 과학적 생산성과 중요성을 입증하기 위해 SMD의 각 과학 분과는 현재 진행 중인 모든 미션에 대해 기본적인 정보들을 대중에게 공개해야 하며 이를 매년 업데이트해야 함.
- 현재 운영 중인 대형 미션
 - 천체 관측용 우주망원경: 허블 우주망원경, 찬드라 X-선 관측소, 제임스 웹 우주망원경
 - 태양 관측용 우주망원경: SDO(Solar Dynamics Observatory), MMS(Magnetospheric Multiscale Mission), Parker Solar Probe

- 행성 탐사: 보이저 1호와 2호, Mars Science Laboratory/Curiosity rover, Mars 2020/Perseverance와 Ingenuity helicopter
- 지구 탐사: Terra(EOS AM-1), Aqua(EOS PM-1), Aura(EOS CH-1), JPSS(Joint Polar Satellite System)

2. 일본의 대형연구시설·장비 구축

■ 문부과학성 과학기술 기본계획

- 일본에서는 기초과학에 대한 지원은 주로 문부과학성에서 담당하고 있음. 일본에서는 과학기술 분야를 체계적으로 지원하고 관리하기 위해 1996년부터 5년 단위로 “과학기술 기본계획”을 수립하고, 이를 바탕으로 연구 활동을 지원해 오고 있음.
- 일본의 과학기술정책 이념 변천 추이
 - 제1기(1996~2000)
 - 새로운 연구개발 시스템 구축
 - 제2기(2001~2005)
 - 새로운 지식의 창조, 창출된 지식에 의한 활력과 풍요로운 생활 창출
 - 제3기(2006~2010)
 - 사회, 국민으로부터 지지받고 성과를 환원
 - 사람 중심의 과학기술
 - 제4기(2011~2015)
 - 일본이 지향해야 할 모습의 실현으로 이어지는 과학기술
 - 제5기(2016~2020)(미래창조과학부 2016 참조)
 - “과학기술 이노베이션 종합전략 2015” 이름으로 발표
 - 중점사항은 ① 미래 산업 창조와 사회 변혁을 향한 새로운 가치 창출을 위한 대책 마련, ② 경제·사회적 과제에 대한 대응, ③ 과학기술 이노베이션의 기반 강화, ④ 이노베이션 창출을 위해 인재·지식·재화의 선순환 시스템 구축
 - 제6기(2021~2022)(한국과학기술평가원 2021 참조)
 - “제6기 과학기술·혁신기본계획” 이름으로 발표
 - 중점사항은 ① 국민의 안전과 안심을 확보하는 지속 가능하고 강인한 사회로의 변혁, ② 지식의 영역을 개척하여 가치 창조의 원천이 되는 연구역량 강화, ③ 개인의 다양한 행복과 도전을 실현하는 교육·인재육성

■ 일본학술회의(Science Council of Japan, SCJ)(S&T GPS 2020 참조)

- 일본학술회의(SCJ)는 인문학, 사회과학, 자연과학, 그리고 공학 등 모든 학문 분야의 커뮤니티를 대변하는 기관임.
- SCJ 학술대형연구계획 분과는 2010년 이후 3년마다 학술적 의의가 높은 대형연구를 체계화하기 위한 학술대형연구 마스터플랜을 수립함.
 - 과학계와의 협의를 통해 장기적(5~10년, 그 이상)으로 추진되고 예산 총액이 수십 억 엔의 규모를 가진 ‘대형시설계획’과 ‘대규모 연구계획’으로 구성
 - 대형시설계획: 대형 연구시설이나 부수적 설비를 건설하여 운용함으로써 과학을 연구하는 계획
 - 대규모 연구계획: 과학자 커뮤니티가 요구하는 과제에 많은 연구진을 투입하거나, 대규모 데이터를 구축하여 이용하는 연구계획
 - 문부과학성은 관련 정책 로드맵 수립 시 이를 참고 자료로 활용
- 2019년에는 “학술대형연구계획에 관한 마스터플랜 2020”을 발표
 - 총 161건의 학술대형연구계획을 선정하였으며, 그중 중점대형연구계획은 31건임.
 - 연구계획은 연구·교육기관장, 일본 학술회의 회원·제휴회원, 연구협회장 등에 의해 제안
 - 평가는 ① 계획의 학술적 의의, ② 과학자 커뮤니티 합의, ③ 계획 실시주체의 명확성, ④ 계획 타당성, ⑤ 공동이용체제 충실도, ⑥ 사회적가치, ⑦ 대형연구계획으로서의 적합성 관점에서 실시

표 4.1 물리학 분야 중점대형연구 예시

분류	계획명(예산)	개요	계획	실시기관
물리학	대형저온중력파 망원경 KAGRA 계획(90.6억 엔)	KAGRA는 쌍성블랙홀 및 쌍성중성자성의 합체를 관측하는 중력파 망원경이며, LIGO/Virgo(중력파 관측장치)의 국제관측네트워크에 참여하여 중력파 천문학 및 멀티메신저 천문학 발전에 기여	<ul style="list-style-type: none"> • 2010~2018 :건설기간 • 2019~2022 :1기 운용 • 2023~2042 :본 계획 	<ul style="list-style-type: none"> • 국립천문대, • 고에너지가속기연구기구 공동 건설, • 도야마대학에 거점 구축, • 공동이용연구자는 국내외 300명 이상

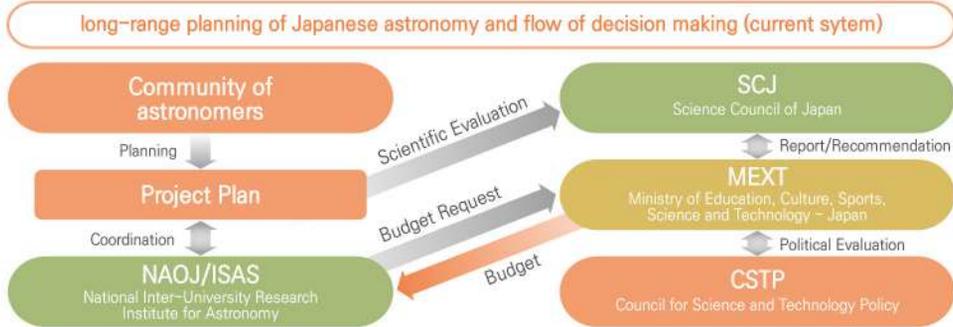
■ 일본 천문학계의 Decadal Survey

- 일본 천문학계에서도 대형연구시설·장비에 대한 연구자들의 의견을 수렴하기 위해 미국 Decadal Survey를 본받아 일본판 Decadal Survey를 실시하고, 이에 기반하여 SCJ로부터 대형연구시설·장비를 추천받아 발표해 오고 있음.
- 일본에서 대규모 천문학 프로젝트를 수행하는 대표적인 기관으로는 NAOJ(일본국립천문대, National Observatory of Japan)와 JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency) 산하 ISAS(Institute for Space and Astronautical Sciences)가 있음.
- 일본 천문학계 대형연구시설·장비 계획의 의사 결정 과정은 아래 그림에서 볼 수 있듯이, Decadal Survey 등을 통해 학계의 의견을 수렴하여 계획을 수립하고, 대형 프로젝트를 수행하는

NAOJ/ISAS와의 협의를 통해 구체화한 후, 이들을 SCJ 주관 아래 과학적 중요성을 평가하여, 문부과학성에 재정지원을 요청하는 형태로 진행함.

- 일본 최초의 Decadal Survey는 1994년 Norio Kaifu의 주도로 “Astronomy toward 21st Century”라는 제목으로 발간되었으며 이때 우선순위로 추천한 네 개의 프로젝트 ALMA, AKARI, VERA, Large Cryogenic Gravitational Telescope(LCGT, 추후 KAGRA로 개칭됨)는 추후 모두 승인되어 구축됨.

그림 4.3 일본 천문학계 10개년 계획의 흐름도



출처: Norio Kaifu 제공

3. 유럽의 대형연구시설·장비 구축

■ 유럽연구인프라전략포럼(European Strategy Forum on Research Infrastructure, ESFRI) (ESFRI Roadmap 2021 참조)

- ESFRI는 과학계의 의견을 수렴한 대형연구시설·장비 로드맵(European Roadmap for Research Infrastructures)을 통해 연구·개발 인프라 개선을 위한 대형연구시설·장비 프로젝트를 제시함.
- ESFRI는 2006년도에 유럽의 연구시설·장비 관련 로드맵을 처음 발표하였고, 2년 주기로 로드맵을 업데이트함.
 - 최초의 2006년 로드맵에는 35개의 프로젝트가 포함되었으나, 가장 최근의 2021년 로드맵 “Strategy Report on Research”에는 총 63개의 프로젝트가 포함됨(22개는 ESFRI Projects, 나머지 41개는 ESFRI Landmarks로 분류됨).
 - 2021년 로드맵 작성에는 유럽 내 약 1,000여 명이 이르는 전문가들이 참여하여 과학계의 의견을 반영함.
- 2021년 로드맵에 포함된 물리·천문의 기초과학 분야 대형연구시설·장비
 - ESFRI Projects
 - European Solar Telescope

- Einstein Telescope
- European Plasma Research Accelerator with Excellence in Applications
- KM3 Neutrino Telescope 2.0
- ESFRI Landmarks
 - 천체 관측 장비: Cherenkov Telescope Array, Extremely Large Telescope, Square Kilometre Array(SKA) Observatory
 - 가속기: High-Luminosity Large Hadron Collider, SPIRAL2, Facility for Antiproton and Ion Research, ILL(Institut Laue-Langevin), European Spallation Source, European Synchrotron Radiation Facility Extremely Brilliant Source, European X-Ray Free-Electron Laser Facility
 - 고성능 레이저: Extreme Light Infrastructure(ELI)
 - 고자기장: European Magnetic Field Laboratory

■ Horizon Europe(S&T GPS 2021 참조)

- EU(European Union)에서는 범유럽 차원 과학연구의 경쟁력을 제고하기 위해 1983년부터 FP(Framework Program)를 시작함.
 - FP1(1984~1987): 1983년 채택된 FP는 프로그래밍 도구일 뿐만 아니라 경제위기를 해결하고 회원국의 경쟁력을 지원하기 위한 재정적 도구로 역할
 - FP2(1987~1991): FP1과 유사한 구조이지만 연구 인프라에 대한 접근 및 지원, 연구자 이동성, 중소기업을 포함한 혁신 과정의 주체 지원과 프로그램에 유럽 공동체 외 국가 참여
 - FP3(1991~1994): 단일시장 완성이 여전히 FP 개발의 주요 측면인 반면, 유럽 차원의 연구훈련을 도입하고, 경제·사회적 통합을 강화하고, 환경보호와 삶의 질 관점을 포함
 - FP4(1994~1998): 주제는 ICT, 산업기술, 환경, 생명과학, 농업과 수산, 생명과학, 비핵 에너지와 운송과 같은 이전 FP에서 정의된 주제와 유사(목표된 사회경제적 연구 도입)
 - FP5(1998~2002): 삶의 질과 생활자원 관리; 사용자 친화적 정보사회; 경쟁력 있고 지속 가능한 성장; 그리고 에너지, 환경과 지속 가능한 개발에 중점
 - FP6(2002~2006): 세 가지 프로그램(지역사회 연구 집중/통합; 혁신, 인적자원, 연구인프라와 '과학과 사회'에 대한 지원을 포함하는 ERA 구조화; 그리고 'ERA 기반 강화') 중심 지원
 - FP7(2007~2013): 4가지 목표인 협력, 아이디어, 사람, 역량을 중심으로 추진
 - FP8 Horizon 2020(2014~2020): 7가지 사회적 도전(건강, 식량안보, 에너지, 운송, 기후환경, 포용 사회, 안보 사회). '우수성 확산과 참여 확대'와 '사회와 함께하는 과학'이라는 구체적인 목표가 추가됨.

- 2021년에는 FP9 Horizon Europe(2021~2027)을 시작함.
 - 미션 지향, 국제협력, OS(Open Science) 등의 정책 강화와 유럽 파트너십에 대한 새로운 정책 접근을 통한 개방성 제고 강조
 - 예산: 총 1.8조 유로
 - ESFRI 로드맵에 포함된 대형연구시설·장비의 다수를 지원함.

4. 중국의 대형연구시설·장비 구축

- 국무원은 2018년 1월 세계 과학기술 강국 건설을 위해 중국을 글로벌 과학센터와 혁신거점 부상 목표를 제시하고 5대 분야별 정책을 중점 육성 중임.

표 4.2 중국의 5대 기초과학 집중 육성 분야(S&T GPS, 2020)

5대 분야	중점 배치 주요내용
① 기초연구 배치 개선	<ul style="list-style-type: none"> • 수학, 물리 등 중점기초학문에 주력 • 우주진화, 물질구조, 생명기원, 뇌 및 인지 등을 모색 • 양자과학, 뇌과학, 합성생물학, 우주과학, 심해과학 등 중대 과학문제 선행배치 • 국가중대과기프로젝트 실시, 양자통신 및 양자컴퓨터, 뇌과학 및 뇌 연구 등 '과기혁신 2030-중대프로젝트' 실시 • 국가중점연구개발계획을 가속화하고, 기초연구 선행배치 강화 • 베이징시와 상하이시의 국제영향력 있는 과기혁신센터 육성 지원 • 광둥성/홍콩/마카오 지역의 국제과기혁신센터 구축을 추진 • 베이징시 화러우, 상하이시 장장, 안후이성 허페이 등 종합국가과학센터 육성 강화, 원천혁신거점 구축
② 수준 높은 연구기지 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 돌파형·유도형·플랫폼형 국가실험실 설립, 국가실험실 안정 지원 메커니즘 구축 • 국가중점실험실 배치를 최적화
③ 기초연구 인력그룹 육성	<ul style="list-style-type: none"> • 국가 '천인계획', '만인계획' 등 고급인력 유치 및 양성 계획을 본격화하여 천하의 영재 집결 • 과학자작업실을 설립하여 전망성 전략적 과학자군 육성 • 청장년과 예비 과기인력 양성 강화 • 국가중대과기기반시설, 국가중점실험실 등 연구기지의 집결 역할을 극대화하고, 우수한 혁신단체가 기초과학연구에 종사하도록 안정 지원
④ 기초연구 국제화 수준 향상	<ul style="list-style-type: none"> • 국제 거대과학계획과 거대과학공정 실시 • '일대일로' 과기혁신 행동계획 실시, '일대일로' 협동혁신 공동체 구축 • 정부 간 과기협력을 심화하고, 국가별 전략을 분류 제정하며, 국제혁신협력플랫폼을 구축하여 과학 프런티어 문제연구를 공동 추진
⑤ 기초연구 발전 환경 최적화	<ul style="list-style-type: none"> • 기초연구 전략자문위원회를 설립하여 기초연구 발전추세를 진단 • 기초연구 다원화 투입 메커니즘 구축 • 기초연구 및 응용연구 간 융합 추진 • 스마트제조, IT기술, 현대농업, 자원 및 환경 등 중점 분야의 응용기술 혁신을 본격화하며, 응용연구를 통해 원천혁신과 산업화를 연결

- 2020년 11월에 발표된 「중공중양의 국민경제와 사회발전 제14차 5개년 계획 및 2035년 장기 목표 제정에 관한 건의안」에서는 기초연구를 강조함.
 - 국가실험실 설립을 추진하고, 국가중점실험실 체계 재편
 - 종합국가과학센터와 지역혁신거점을 배치하고 베이징, 상하이, 웨강아오 대만구에 국제과기혁신센터 조성 지원
 - 수준 높은 연구형 대학의 발전을 지원하고, 기초과학 인재 양성 강화
- 중국의 물리·천문 분야 대형연구시설·장비의 예
 - Beijing Electron-Positron Collider II(BEPC II) in Beijing
 - High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility(HIAF) in Huizhou, Guangdong
 - Jiangmen Underground Neutrino Observatory(JUNO) in Kaiping, Jiangmen
 - China Spallation Neutron Source(CSNS) in Dongguan, Guangdong
 - Shanghai Synchrotron Radiation Facility(SSRF) in Shanghai
 - Experimental Advanced Superconducting Tokamak(EAST) in Hefei
 - National Laboratory for Quantum Information Science in Hefei, Anhui
 - Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope(LAMOST) in Xinglong Station, Hebei
 - Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope(FAST) in Pingtang, Guizhou
- 중국은 기초과학 분야 선도국이 되기 위해 물리·천문을 포함한 기초과학 분야의 대형연구시설·장비를 구축하고 있음.
- 중국은 대부분의 대형연구시설·장비가 전략적 필요에 기반하여 Top-Down으로 구축되고 있음.

**대형연구시설·장비를 활용한
국내 기초과학 현황 및 발전 모색**

Basic science research in Korea based on
large-scale research facilities and equipment



**국내 대형연구시설·장비
구축 및 운영 현황**

KAST Research Report 2022
한림연구보고서 146

V. 국내 대형연구시설·장비 구축 및 운영 현황

- 3장 1절에서 언급한 바와 같이, 국내에는 구축 및 운영이 성공적으로 진행되고 있다는 평가를 받고 있는 대형연구시설·장비가 있는 반면(예를 들어 KSTAR 핵융합 장치, KVN 한국우주전파관측망), 일부 대형연구시설·장비는 구축 과정에서 문제점을 드러내고 있음. 아래 1절에서는 문제점을 드러낸 국내 대형연구시설·장비를 간단하게 짚어봄.
- 최근 일부 국내 대형연구시설·장비 구축의 문제점을 인지하면서, 동시에 국내에는 대형연구시설·장비의 구축 및 운영을 관장할 체계가 부재하다는 인식하에, 이를 해소하기 위한 구축지도(로드맵), 다양한 보고서, 정책 제안 등이 국책연구기관, 과기정통부, 국가과학기술자문회의, 국회 등에서 발간되었음. 아래 2절에서는 이 보고서들을 간단하게 소개함.
- 한편 물리·천문을 포함한 과학계에서는 대형연구시설·장비 구축의 첫 단계는 학계 연구자들의 의견 수렴이라고 보고, 다양한 노력을 경주 중임. 또한 물리학회에는 대형연구시설·장비를 사용하는 회원을 중심으로 최근 “한국고에너지물리학회”를 창립했음. 아래 3절에서는 물리학과 천문학 분야에서의 노력을 간략하게 기술함.

1. 국내 대형연구시설·장비 구축 및 운영 체계의 문제점

- 과학기술정보통신부에서 2021년 국가과학기술자문회의에 제출한 “대형연구시설구축 내실화를 위한 사업추진 개선 방안(안)”에서 발췌함(과학기술정보통신부, 2021).
 - 1994년 포항 방사광가속기 구축 이래, 국가연구개발사업으로 구축·운영 중인 500억 원 이상 대형연구시설·장비는 34개, 투자 규모는 8.2조 원
 - 2010년 이후 추진된 대형연구시설·장비는 19개이며 이 중 10개 사업에서 일정 지연 및 사업비 증가 등 계획 변경 발생
- 아래에서는 물리·천문의 기초과학 분야 대형연구시설·장비 중 “중이온가속기”, “중입자가속기”, “다목적방사광가속기”의 구축 과정에서의 문제점을 간단하게 짚어봄.

■ 중이온가속기(3장 1절 참조)

- 대전 신동에서 구축되고 있는 중이온가속기는 당초 계획에 비해 기간은 5년 지연, 총사업비는 738억 원 증가함.

- 중이온가속기 구축사업은 사전에 면밀한 사업계획 수립과 타당성 검토 부재: 기획 단계에서 설계를 구체화하지 않고 핵심 기술(초전도 가속관 기술 등)의 검증이 부족한 상황에 본격적인 사업에 착수하면서, 설계 변경, 사업 기간 및 예산 증가가 반복됨.

■ 중입자가속기(3장 1절 참조)

- 부산 기장에서 구축되고 있는 중입자가속기는 당초 계획에 비해 기간은 9년 지연, 총사업비는 646억 원 증가함.
- 중입자가속기 구축사업의 지연은 당초 주관기관의 민간 투자유치와 기술개발 계획이 실패하면서, 주관기관 변경과 장비 도입(국제 조달로 구매)으로 사업이 변경된 데 기인함. 예산집행을 위해 장치 사양이 확정되기 이전에 이미 완공된 치료센터 건물도 도입 예정인 가속기 장치 사양과 맞지 않으면서 치료센터의 개보수 공사로 인해 사업이 지연되기도 함.

■ 다목적 방사광가속기

- 충북 오창에서 구축 중인 다목적 방사광가속기의 경우 소재/부품/장비의 국산화 및 독자 기술개발이 이슈가 되면서 구축됨.
- 국내에서도 고사양의 다목적 방사광가속기를 추가 건립해야 한다는 의견은 있어 왔지만, 소재/부품/장비의 원활한 공급 및 조 단위 예산 등으로 인해 추진동력을 얻지 못함. 하지만, 2019년 7월 일본의 기습적인 수출규제 조치 및 COVID-19 이후 글로벌 공급망이 흔들리고, 소재/부품/장비의 국산화 및 독자 기술개발의 필요성이 대두되면서 건립의 타당성 및 명분이 제공됨.
- 사업비 1조 원이 넘는 대형 국책 프로젝트인 방사광가속기 유치를 놓고 각 지자체가 경쟁하는 양상을 띠. 따라서 사업이 학계의 충분한 의견 수렴 및 과학·기술적 검증 과정을 거치기 전에, 정치권의 결단에 의해 Top-Down으로 사업이 결정됨.

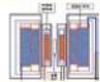
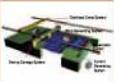
2. 로드맵 구축 및 운영 정책 현황

■ 국가 대형연구시설 구축지도(National Large Research Facilities Roadmap, NFRM)

- 4장에서 언급한 바와 같이 외국에서는 대형연구시설·장비 구축을 위해 과학계의 의견을 수렴하여 로드맵을 작성하는 절차 또는 제도가 있음: Snowmass 미팅·Decadal Survey(미국), 일본학술회의(SCJ)·일본 천문학계의 Decadal Survey, 유럽연구인프라전략포럼(ESFRI) 등
- 국내에서도 기초과학지원연구원 산하 국가연구시설장비진흥센터(NFEC)에서 2차례에 걸쳐 “국가 대형연구시설 구축지도”를 작성했음.

- 1차 2010년: 국가연구시설장비진흥센터 주도로 작성 후 국가과학기술위원회에 제출
- 2차 2013년: 국가 대형연구시설 구축지도(National Large Research Facilities Roadmap, NFRM 2013) 보고서로 발간
- 2013년 보고서에서는 물리·천문 분야 대형연구시설·장비를 다수 포함한 13개 중점 대형연구시설의 로드맵 작성함(그림 5.1) 참조).

그림 5.1 중점 대형연구시설 목록 및 구축 시기

	단기 Near-Term 5년 이내 구축 착수	중기 Mid-Term 6-10년 이내 구축 착수	장기 Long-Term 10년 이후 구축 착수
우주·천문		대형 적외선 우주망원경 구축기간 총 10년 운영기간 총 5년 구축비 500억 원 운영비 20억 원 	지하 고에너지물리 연구시설 구축기간 총 8년 운영기간 총 30년 구축비 4,950억 원 운영비 100억 원 
		평방킬로미터배열 거대전파망원경 구축기간 총 13년 운영기간 총 30년 구축비 1,000억 원 운영비 100억 원 	
해양·생명	국가고자기장센터 구축기간 총 9년 운영기간 총 20년 구축비 2,770억 원 운영비 195억 원 	고기능 3차원 융합 해저 석유물리탐사선 구축기간 총 4.5년 운영기간 총 20년 구축비 1,200억 원 운영비 60억 원 	대형 심해저 해양공학 수조 구축기간 총 6년 운영기간 총 30년 구축비 506억 원 운영비 16억 원 
	국가분자이미징센터 구축기간 총 8년 운영기간 총 20년 구축비 2,100억 원 운영비 82억 원 		
원자력·해양·가속기	하나로 연구용 원자로 및 활용시설 (업그레이드) 구축기간 총 8년 운영기간 총 30년 구축비 500억 원 운영비 62억 원 	핵융합로공학 연구시설 구축기간 총 7년 운영기간 총 20년 구축비 1,200억 원 운영비 40억 원 	강력 펄스 중성자원(업그레이드) 구축기간 총 11년 운영기간 총 40년 구축비 7,500억 원 운영비 600억 원 
		다목적 저에너지 방사광시설 구축기간 총 5년 운영기간 총 20년 구축비 800억 원 운영비 50억 원 	
IT·기계	10MW급 동력부품 종합시험센터 구축기간 총 6년 운영기간 총 30년 구축비 625억 원 운영비 37억 원 	장파 표준시 방송국 구축기간 총 5년 운영기간 총 20년 구축비 500억 원 운영비 20억 원 	

출처: 국가연구시설장비진흥센터 보고서, 2013

- 대형연구시설 로드맵은 작성되었지만, 이를 위한 예산확보 및 후속 정책은 이루어지지 않았음.
- 이후 정권 교체 등이 있으면서 2010년과 2013년에 작성된 “국가 대형연구시설 구축지도”는 실현되지 못했음.

■ 대형연구시설·장치 구축 및 운영을 위한 기존의 보고서와 정책 제안

- 위에서도 언급한 바와 같이, 대형연구시설·장비의 구축 및 운영을 대비한 다양한 보고서, 정책 제안 등이 발간되었음. 이 중 최근 것을 연대순으로 나열함.
 - 국가핵융합연구소(2017) 과학기술종합조정지원사업: 대형연구시설장비 구축사업 관리체계 개선방안 기획연구
 - 과학기술정보통신부(2018) 대형연구시설장비 구축사업 종합사업관리(Project Management, PM) 가이드라인(안)
 - 한국과학기술평가원(2019) 중이온가속기 장치구축사업
 - 한국연구재단(2020) 대형연구개발사업의 사업관리체계 개선방안 수립 연구, 대형연구시설장비 구축사업을 중심으로
 - 과학기술정보통신부(2020) 연구시설 투자포트폴리오 추진개요 및 방안
 - 한국법제연구원(2020) 대형연구시설·장비에 관한 법제 개선방안 연구
 - 과학기술정보통신부(2021) 대형연구시설구축 내실화를 위한 사업추진 개선 방안(안)
 - 국회예산정책처(2022) 대형가속기 구축·운영사업 분석
 - 과학기술정보통신부(2022) 대형연구시설 구축관리 표준지침
- “제4차 기초연구진흥종합계획(2018~2022)”(관계부처합동, 2018)에서는 국내 대형연구시설·장비의 차질 없는 구축 진행을 명시하고, 이를 위한 종합사업관리(Project Management)제도 수립을 통한 관리 강화 계획이 포함됨.
- 2022년 1월에는 과학기술정보통신부가 제시한 “대형연구시설 구축 내실화를 위한 사업추진 개선방안” 이행을 위해 국가과학기술자문회의 내에 “대형연구시설전문위원회”가 신설되었음.
- 위에서 나열한 다양한 시도와 노력에도 불구하고, 대형연구시설·장비 제안, 선정, 구축, 운영을 주관할 체계가 현재 국내에는 확립되어 있지 않은 상황임.
- 아래에는 보고서와 정책 제안 등에서 대형연구시설·장비 구축 및 운영과 관련하여 공통적으로 언급하고 있는 현재의 문제점을 몇 개 나열함.
 - 다수의 대형연구시설·장비가 Top-Down 방식으로 기획되어, 관련 분야 연구자와의 공감대 형성 부족
 - Top-Down 방식으로 기획되어 학계의 과학적·기술적 검토 부족
 - 대형연구시설·장비의 선정, 구축, 운영을 위한 사업관리 전문성 및 이해도 부족

- 대형연구시설·장비에 대한 국가 차원의 로드맵을 포함한 전략 부재
- 대형연구시설·장비를 위한 범부처 차원의 일관된 관리체계 부재
- 대형연구시설·장비 구축 및 운영을 위한 인력양성체계 부재
- 보고서와 정책 제안 등에서 현재 문제점을 극복하기 위한 방안으로 언급하고 있는 내용 중에 다음이 포함되어 있음.
 - 기존 국내 대형연구시설·장비의 구축 및 운영 현황 등의 상세 분석
 - Bottom-Up 방식으로 대형연구시설·장비에 대한 학계 연구자들의 의견 수렴
 - 대형연구시설·장비를 주관할 범국가적 체계 수립
 - 개별 시설·장비의 특성을 고려한 종합사업관리(Project Management) 제도 도입

3. 현 문제점을 타개하기 위한 과학계의 노력

- 물리학회와 천문학회 등 과학계에서는 대형연구시설·장비 구축과 관련된 문제점을 인식하고, 이를 타개하기 위한 노력의 시발점으로 미국의 Snowmass 미팅, Decadal Survey 등과 유사한, 학계의 의견을 수렴하기 위한 다양한 활동을 진행하고 있음.

■ 한국물리학회의 특별 세션

- 한국물리학회에서 “새로운 대형연구시설의 국내 건설 필요성과 계획”이라는 특별 세션을 개최하고 있음.
- 한국물리학회 특별 세션은 다음의 취지하에 개최되었음: “대형연구시설은 건설하고 운영하는 데 막대한 예산을 사용하므로, 학계에서 충분히 논의를 거친 후 건설하는 것이 바람직합니다. 또한 건설 후에는 제대로 운영되고 있는지도 잘 감시해야 할 것입니다. 이와 같은 취지에서 물리학회에서는 국내에 새로운 대형연구시설을 건설하고자 하는 연구자들의 열망을 회원 여러분과 공유하는 자리를 마련했습니다. 이와 같은 시도가 향후 대형연구시설·장비 전반에 관한 건설적인 논의로 이어지는 계기가 되었으면 합니다.”(한국물리학회, 2021)
- 2021년 가을에는 다음 4개의 대형연구시설에 대한 소개가 있었음.
 - Korea Neutrino Observatory(KNO) - 유인태(성균관대 교수)
 - 고자기장 연구시설 - 김용민(단국대 교수)
 - 초강력레이저연구시설 - 이성구(GIST 고등광기술연구소 연구원)
 - Korea Spallation Neutron Source - 김유종(한국원자력연구원 양성자과학연구단장)

- 2022년 봄에는 다음 2개의 대형연구시설에 대한 소개가 있었음.
 - PAL 4세대 방사광가속기 빔 라인 추가 - 강홍식(포항가속기연구소)
 - 초고속 전자회절장치 이용자 시설 - 정영욱(한국원자력연구원)

■ 한국고에너지물리학회 창립

- 2000년대에 들어서 한국의 고에너지물리학이 다양한 국제공동연구의 참여를 바탕으로 인적·물적으로 비약적으로 발전하고 국내의 연구자들이 만들어 낸 많은 성과에도 불구하고, 국가 차원에서 구축된 글로벌 기초연구 인프라의 부족으로 국제적으로 선도적인 역할을 하기에 필연적 한계가 따른다는 인식하에, 국내 핵·입자·천체물리학계가 연합하여 2005년 한국고에너지물리협의회를 창립하고, 이후 꾸준한 발전을 거쳐 2022년 “한국고에너지물리학회”를 설립함.
- 한국고에너지물리학회는 국내 고에너지물리학의 중장기 로드맵 마련과 대형연구시설의 구축 계획을 논의하는 중심적 역할을 하여 한국형 Snowmass와 같은 기능을 추구함.
- 2022년 11월 17일 한국고에너지물리학회 정기 총회 개최
 - 국내의 대형연구시설(중이온가속기 등) 연구소장 및 고에너지물리학 연구 단체(기초과학원 연구단, 선도연구센터, 중점연구소)의 연구책임자급 초청 세션으로 구성
- 다양한 국제협력연구에 있어 해외 연구기관과의 카운터 파트 역할을 수행하고, 글로벌 연구시설에 기반한 “국립고에너지물리연구소”의 설립을 추진하고 있음.

■ 물리학회의 추가 노력

- 한국물리학회 “입자 및 장물리학 분과”에서는 여러 차례 회의와 분과미팅을 통해 의견을 수렴하여 2020년 말에 “입자 및 장물리학 2020~2030 장기전략백서”를 출간함. 미국의 Snowmass 보고서를 벤치마킹(benchmarking)해서 향후 10년간의 연구방향 및 중요 프로그램을 6개의 Frontier (에너지, 맛깔구조, 중성미자, 암흑물질, 입자이론, 장 및 끈이론)별로 제시함. 향후 장기전략백서를 주기적으로 업데이트하여 고에너지물리 분야의 대형연구시설의 로드맵으로 활용할 수 있도록 할 계획임.
- 한국물리학회 특별 세션에서 소개되었던 대형연구시설·장비는 관련 연구자들 차원에서 R&D와 구축 가능성에 관한 연구가 계속 진행되고 있음.
- Korea Neutrino Observatory(KNO): 100여 명의 교수, 박사급 연구자, 학생이 참여하여, 과학 주제 및 장비 개발에 대한 워크숍을 정기적으로 개최하고 있으며, UNIST, 경북대학교, 한국천문연구원, 한국물리학회, 한국천문학회 등과 구축을 위한 MOU를 추진하고 있음.
- 고자기장 연구시설: 기초과학지원연구원(KBSI)에서 발주한 “국가 고자기장 연구인프라 구축사업 예비타당성 조사 기획”이 용역으로 이루어지고 있고, 최근에 2차 수요조사가 이루어진 바 있음.

- 초강력레이저연구시설: 전라남도 지방정부와 정치권에서 특별히 의지를 가지고, 한국에너지공과대학교(KENTECH) 근처에 구축을 추진 중이며, 최근 구축 타당성 토론회를 국회의원 회관 대회의실에서 개최하였음.
- Korea Spallation Neutron Source: 기존 경주의 100MeV 양성자 가속기를 확장하는 사업으로, 부지 및 주관기관이 이미 확정된 사업임. 최근까지 세 차례의 위원회를 개최하였고, 예비타당성조사를 준비 중임.

■ 천문학회의 Decadal Survey

- 한국천문학회에서는 미국 Decadal Survey를 벤치마킹하여, 학계의 방향에 대한 연구자들의 의견을 수렴하기 위한 “장기발전계획”을 수립하고 있음.
- “한국 천문학의 새로운 도약”이란 제목하에, 2013년에 초본이 발간되었으며, 2017년에는 이를 보완 수정한 개정판이 발간되었음.
- 한국천문학회 장기발전계획에는 현재 운영 또는 참여 중인 KVN(Korean VLBI Network, 한국우주전파관측망), GMT(Giant Magellan Telescope), LIGO(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)와 더불어 현재 한국이 참여를 추진 중인 SKA(The Square Kilometre Array), 그리고 기획 중인 우주망원경 프로젝트가 기술되어 있음.

그림 5.2 2017년에 발간된 한국천문학회 장기발전계획 표지



출처: 한국천문학회

**대형연구시설·장비를 활용한
국내 기초과학 현황 및 발전 모색**

Basic science research in Korea based on
large-scale research facilities and equipment

VI

**대형연구시설·장비 기반
빅사이언스를 통한 국내
기초과학연구의 발전을
위한 제언**

VI. 대형연구시설·장비 기반 빅사이언스를 통한 국내 기초과학연구의 발전을 위한 제언

1. 물리·천문 분야 대형연구시설·장비 현황으로 본 시사점

■ 국내 대형연구시설·장비 현황으로 본 시사점

- 3장의 1절에서 기술한 바와 같이, 현재 운용되고 있는 국내 대형연구시설·장비의 일부는, 기초과학 분야의 시설·장비임에도 불구하고, 과학적 고려보다는 정책적·정치적 고려가 우선되어 “Top-Down” 방식으로 결정되어 구축되었거나, 구축되고 있음.
 - 이런 과정에서 과학계에 의한 과학적·기술적 검증이 충분히 이루어지지 않은 경우가 발생함.
 - 이는 구축 기간 연장, 구축 예산 초과와 더불어, 당초 예상에 못 미치는 성능의 시설·장비 구축 또는 당초 제안에 못 미치는 연구 및 기술개발 성과로 귀착되기도 함.
- 국내 대형연구시설·장비 구축사업 중 일부는 기술적 위험이 높음에도 불구하고, 충분한 과학적·기술적 검증과 더불어, 사업을 추진할 제도적 장치, 그리고 사업을 수행할 인력확보 등이 없이 진행된 것으로 판단됨.
 - 대형연구시설·장비 구축사업을 위해서는 과학계의 의견 수렴, 과학적·기술적 검증 등을 위한 체계가 필요함.
 - 대형연구시설·장비 구축사업은 R&D, 건설, 운영 등을 단계별로 추진하여, 기술개발의 지연으로 인한 사업 지연과 총 사업비 증가를 최소화할 필요가 있음.
 - 대형연구시설·장비 구축 및 운영을 위해 전문인력양성 계획 및 이를 뒷받침할 지원책 마련이 “반드시” 필요함.
 - 대형연구시설·장비 구축사업에는 역량 있고 검증된 국내 업체가 참여하여 관련 요소기술 확보와 보유 기술을 활용한 새로운 기술개발·사업화 등을 추진할 수 있도록 지원할 체계가 필요함.

■ 해외 대형연구시설·장비 현황으로 본 시사점

- 3장의 2절에서 나열한 해외 대형연구시설·장비는 기초과학 시설·장비로, 대부분 과학적 요구에 의해 과학적 목표 및 임무를 수행하기 위해, 4장에서 기술한 바와 같이 과학계에서 마련한 로드맵에 기반하여, 사업을 추진할 제도적 장치를 통해 “Bottom-Up” 방식으로 선정하고 구축, 그리고 운영되고 있음.

- 이런 대형연구시설·장비는 기존의 틀을 넘어서는 새로운 발견을 통해 과학의 발전을 선도하고 있음.
- 과학적 목적으로 구축하고 있지만, 또한 다양한 분야에의 응용 및 기술개발로 연결되고 있음.

2. 제언의 기본 방향

- 물리학 및 천문학 등의 기초과학 분야에서 대형연구시설·장비는 빅사이언스(Big Science)를 가능하게 하고, 이를 통해 해당 분야의 난제를 해결하는 등 획기적인 결과를 창출하여 과학·기술의 진보를 선도하고 있음.
- 국내 물리학 및 천문학 등의 기초과학이 노벨상에 근접한 세계 최고 수준으로 한 단계 더 도약하기 위해서는, 대형연구시설·장비에 기반한 빅사이언스 연구를 수행할 필요가 있음. 이러한 필요성은 거의 모든 국내 관련 기초과학 연구자들 사이에서 공감대가 형성되고 있으며, 이는 다양한 대형연구시설·장비의 구축 제언으로 표출되고 있음.
- 빅사이언스 프로젝트가 과학적 성공을 거두기 위해서는 다음의 과정이 필요함.
 1. 먼저 “과학적 큰 질문”을 정의함.
 2. 질문의 해답을 찾기 위한 구체적인 연구 방법을 도출함.
 3. 연구 목적을 달성할 연구시설·장비를 제안하고 구축함.
 4. 연구시설·장비를 활용한 빅사이언스 연구를 수행함.
- 국내에서는 순서가 뒤바뀌어, 연구시설·장비부터 짓고, 거기에 맞추어 연구를 수행하는 상황이 종종 발생하기도 했음. 이는 연구의 목표, 연구시설·장비에 대한 검토 등이 충분히 이루어지지 않았기 때문이라 사료됨.
- 현재의 우리나라에서 대형연구시설·장비 수요자와 정부 당국 간의 협의를 통해, 정책과제를 수행하고, 예비타당성조사를 거쳐 건설되고 있음. 대부분 정책적, 그리고 일부는 정치적으로 구축이 결정되고 있음. 그러나 물리·천문 등의 기초과학 분야 대형연구시설·장비는 과학적 동기가 가장 우선되어야 하고, 과학적·기술적 검토를 통해 “Bottom-Up”으로 구축이 결정되어야 함.
- 대형연구시설·장비의 구축 및 운영을 위해서는 정부 기관 내 “사업전담부서”의 설립이 필요함.
 - 국가과학기술자문회의, 한국과학기술한림원, 한국연구재단 등의 산하 가칭 “기초과학 대형연구시설·장비 사업단”이 예가 될 수 있음.
- 대형연구시설·장비의 구축이 일관성 있게 추진되려면, 이를 위한 예산이 뒷받침되어야 함.
 - 현재는 일정 금액(500억 원) 이상의 시설·장비는 예비타당성조사를 거쳐 예산을 확보해야 함. 이런 제도보다는 “기초과학 분야 대형연구시설·장비 구축 및 운영을 위한 별도의 예산 쪼끼”를 마련하는 것을 제안함.

- 이를 위해서는 “핵융합에너지개발진흥법” 또는 “우주개발진흥법”의 경우와 유사하게, 예를 들어 가칭 “기초과학 분야 대형연구시설·장비 구축운영진흥법”을 법제화할 필요가 있음.
- 예를 들면, “대형연구시설·장비 사업단”이 매년 5천억 원의 예산으로, 사업 기간 10년, 그리고 사업비 5천억 원의 대형연구시설·장비 10개의 구축을 지원함.

- 대형연구시설·장비의 구축을 일관성 있게 관리하기 위해서는 종합사업관리(Project Management) 시스템과 시스템 엔지니어(System Engineer) 역할의 확립이 필요함.
- 구축 후, 운영 및 퇴역을 관리할 시스템 확보도 필요함.

■ 종합사업관리(Project Management) 시스템과 시스템 엔지니어(System Engineer) 역할 확립

- 국내 대형시설 구축사업의 규모가 확대되면서 체계화·선진화된 사업관리의 중요성이 커지고 있음.

그림 6.1 종합사업관리 시스템의 흐름도 및 조직



- 핵심은 “체계화되고 전산화된 사업관리 체계와 시스템 기법”의 도입임.
 - 사업관리 체계구축(조직, 절차서, 시스템)과 일정 및 사업비 계획을 수립하고 체계적인 운영으로 사업관리 회의 등 최적의 의사 결정을 지원
 - 사업관리 수행 조직을 구성하고, 리스크 측정, WBS(Work Breakdown Structure), 공정표 작성, 비용 산정, 진도 관리 등을 수반함.
- 사업관리 체계 전문가(혹은 외부 전문기관)에 의한 사업관리 기술지원 방식으로 과제책임자를 보좌하는 것이 필요함.
- 대형시설 구축사업의 난이도와 복잡성이 커짐에 따라 system integration을 위한 “시스템 엔지니어(System Engineer) 역할”의 확립도 필요함.

3. 구체적 제언 내용

■ Bottom-Up 방식

- 위에서도 여러 번 언급한 바와 같이, 국내 대형연구시설·장비 구축에서 드러난 문제점을 해결하기 위해 가장 먼저 해야 하는 것은 Bottom-Up 방식의 도입임.
- Bottom-Up 방식을 통한 대형연구시설·장비 구축 및 운영에는 미국의 NSF(National Science Foundation)에서와 같이 생애주기(Life Cycle) 개념을 도입할 필요가 있음.
 0. 제안(Proposal)
 1. 기획(Planning)
 2. 연구·개발(R&D)
 3. 설계(Design)
 4. 건설(Construction)
 5. 운영(Operation)
 6. 퇴역(Divestment)
- 제안 → 기획 → 연구·개발 → 설계 → 건설 단계 엄격한 평가를 통해 충분한 과학적·기술적 검증을 거친 후 다음 단계로 진행되어야 함.
- 운영과 퇴역 단계도 학계의 충분한 검토를 거친 후, 진행되어야 함.
- Bottom-Up 방식의 성공은 이 방식을 통해 대형 장치를 구축하려는 국내 연관 분야 및 과학자 그룹의 역량에 달려 있음. 대형연구시설·장비를 구축하고 운영할 과학적·기술적 역량을 충분히 갖추었음을 보여주는 프로젝트만 추진되어야 함.

■ 제안

- 제안 주체는 학술단체(예, 물리학회, 천문학회 등) 또는 연구자 그룹이 되어야 함. 공개적으로 대형연구시설·장비 후보들을 제안받아, 과학적·기술적 검증을 통해 우선순위가 정해져야 함.
- 기초과학 분야 대형연구시설·장비의 구축에는 정책적·정치적 고려는 가능한 배제되어야 함.
- 위에서도 언급한 바와 같이, 기초과학지원연구원 산하 국가연구시설장비진흥센터(NFEC)에서 2차례에 걸쳐 “국가 대형연구시설 구축지도”를 작성했음. 이후 업데이트되지 않았고 현재 기초과학 대형연구시설·장비에 대한 로드맵은 없는 상황임.
- 학술단체(예, 물리학회, 천문학회) 또는 연구자 그룹 대형연구시설·장비를 제안하고 우선순위에 기반한 로드맵을 작성하여 정부에 제안하는 시스템 구축이 필요함. 미국의 Snowmass 미팅과 Decadal Survey, 일본학술회의(SCJ)의 학술대형연구계획에 관한 마스터플랜, 유럽연합의 ESFRI(유럽연구인프라전략포럼) 등이 모델이 될 수 있음.
- 국가 대형연구시설의 구축에 대해 구축 의사를 단순히 모아 로드맵을 만드는 데 그치지 않고, 정부는 과학계 의견을 존중하여 대형연구시설·장비 구축을 결정하는 관례를 만들어 갈 필요가 있음.
- 이를 위해 제안 주체와 공식적/공개적으로 소통할 수 있는 정부의 창구가 필요. 현재는 정부 기관(대부분의 경우, 과학기술정보통신부) 내 담당 주체가 불명확. 담당 주체가 있어도 담당자가 교체되는 경우 사업 추진의 동력 유지가 어려움. 이런 현실적인 문제를 보완할 장치가 필요함.
- 미국, 유럽, 일본 등은 자문위원회 등에서 현장의 의견을 주기적·공식적으로 확인하고 있으나, 우리나라는 연구 현장의 대형연구시설·장비 수요 등을 상시·주기적으로 확인하고 반영할 수 있는 체계가 없음.
- 2022년 1월 국가과학기술자문회의 내에 “대형연구시설전문위원회”가 출범하였으나, 아직까지 역할이 다소 모호하며, 기초과학에 대한 비중은 낮은 것으로 판단됨.
- 대형연구시설·장비를 위한 인재 양성이나 기술개발 프로그램이 많지 않음. 이 때문에 전문인력이나 기술력이 충분치 않은 상태에서 구축에 착수, 사업 리스크로 작용함. 대형연구시설·장비를 활용한 빅사이언스를 활성화하기 위해서는 이를 보완할 제도적 장치가 필요함.

■ 평가/선정

- 정부기관 내 사업전담부서에서 진행하지만, 선정은 전문가 집단이 결정해야 함.
- 위에서도 언급한 바와 같이, 제안된 대형연구시설·장비 제안의 평가 및 선정은 엄격한 과학적·기술적 검증을 위해 여러 단계를 거쳐 진행되어야 함.
 - 제안 → 기획 → 연구·개발 → 설계 → 건설/구축
- 건설로 가기 전 설계 단계는 더욱 세분화될 필요가 있음. NSF(National Science Foundation)의 경우를 참조하면 다음을 고려할 수 있음.
 - 개념 설계 → 예비 설계 → 최종 설계

- 단계별 심사를 통과하지 못한 프로젝트는 중단되어야 함.
- 단계별 심사는 학회, 유관 기관, 해외 전문가 등으로 구성된 공신력 있는 위원회를 통해 일관성 있게 이루어져야 함.
- 심사는 과학적 중요성, 시급성, 경쟁력, 그리고 기술적 개연성 등이 평가의 기본이 되어야 함. 기초과학 분야 대형연구시설·장비에서 정책적·정치적 논리가 지나치게 개입되면 안 됨.
- 제안된 프로젝트가 단계를 통과할 때마다, 이를 위한 예산이 배정되어야 함. 즉, 기획, 연구·개발, 설계로 가면서 이를 위한 적절한 예산이 지원되어야 함.

■ 구축

- 정부기관 내 사업전담부서에서 정부출연연구기관, 과학기술특성화대학 또는 대학교 등에 “구축 사업단”을 선정하고, 이 사업단이 주체가 되어 진행함(과학기술정보통신부, 2022).
- 기초과학 분야 대형연구시설·장비는 이윤을 창출하는 사업이 아니므로, 원칙적으로 사회간접자본(SOC) 또는 각종 문화시설과 유사하게 국가 예산으로 구축이 추진되어야 함.
- 대형연구시설·장비 구축은 길게는 10년 또는 그 이상 진행되는 장기적인 사업이므로, 당초 계획 대비 예산 항목 및 연도별 예산집행 규모가 변경될 가능성이 있음. 전체 사업비 범위 내에서 이러한 변경이 신속하고 융통성 있게 관리될 수 있도록 종합사업관리(Project Management) 제도를 도입할 필요가 있음.
- 현재 구축 중인 가속기를 비롯한 일부 대형연구시설·장비의 경우, 초기 계획 부실로 인해 사업 지연과 사업비 증가가 등의 경우가 발생하고 있음. 구축 과정에서도 단계별 관리·평가 체계를 도입하여, 정상적인 사업 추진이 어렵다고 판단되면, 매몰 비용을 감수하고서라도 구축을 중단하는 제도를 마련할 필요가 있음.
 - 미국에서 1980~1990년대에 구축을 추진한 입자가속기(Superconducting Super Collider, SSC)는 이런 이유로 건설이 중단되었음.
- 이런 평가를 위해서는 사업과 이해관계가 없는 독립된 평가위원회를 구성해야 함. 이를 통해 사업에 대한 신뢰할 수 있는 평가 결과를 의사 결정자에게 전달함으로써 사업에 대한 정확한 판단을 내릴 수 있도록 유도해야 함.

■ 운영

- 구축된 대형연구시설·장비는 정부출연연구기관, 과학기술특성화대학 또는 대학교에서 운영하거나, 별도의 연구소 또는 부설 연구소를 설립하여 운영하게 함.
- 대형연구시설·장비의 운영 주체는 구축 사업단과 다를 수 있음.
- 구축한 대형연구시설·장비는 국제적 경쟁력을 유지할 수 있도록 충분한 운영 예산과 연구 인력을 제공해야 함.

- 구축 사업단 참여연구자들이 사업종료 이후 유사 사업에 합류하거나, 기존 소속기관 등으로 복귀할 수 있는 제도적 장치를 마련함으로써, 참여연구자들의 구축 후 장래에 대한 불안감을 해소하고, 사업에 전념할 수 있는 여건을 조성하는 것이 필요함.
- 구축 사업단 인력들, 특히 신진 인력들이 구축이 완료된 후 직장 확보 등으로 어려움을 겪을 가능성이 있음. 또한, 구축사업에 참여했던 업체들이 시설 및 인력을 유지하기가 어려운 경우도 있음. 이런 문제를 해소하는 방안으로 구축이 완료된 이후에도 지속적인 성능 향상을 위한 R&D, 노후화 부품 교체 비용, 주요 부품 국산화, 인력양성 등을 위한 프로그램이 마련되어야 함.
- 국가의 중요한 자원인 대형연구시설·장비가 애물단지가 되지 않고 적재적소에 잘 활용되도록 지속적인 관리가 필요함.

■ 퇴역

- 대형연구시설·장비의 수명이 다 되었거나 효율이 저하되었다고 판단되는 경우 퇴역시킴.
- 퇴역은 관련 학계의 의견 수렴 및 검토를 거친 후 진행함.

**대형연구시설·장비를 활용한
국내 기초과학 현황 및 발전 모색**

Basic science research in Korea based on
large-scale research facilities and equipment

VII

결론

Ⅶ. 결론

■ 대형연구시설·장비 기반 빅사이언스를 통한 국내 기초과학연구를 활성화를 위한 본 보고서 제언의 요점

그림 7.1 기본 방향의 요점

- 국내 기초과학이 노벨상에 근접한 세계 최고 수준으로 한 단계 더 도약하기 위해서는, **대형연구시설·장비에 기반한 빅사이언스 연구 수행이 필요함**
- 기초과학 분야 대형연구시설·장비는 과학적 동기가 가장 우선되어야 하고, 따라서 **과학적·기술적 검토를 통한 Bottom-Up으로 구축이 결정되어야 함**
- 기초과학 분야 대형연구시설·장비의 구축 및 운영을 위해서는 **정부 기관 내 사업전담부서의 설립이 필요함**
- 대형연구시설 구축 과정이 일관성 있게 추진되려면, 이를 위한 예산이 뒷받침되어야 함. **기초과학 분야 대형연구시설의 효율적인 구축 및 운영을 위해서는 별도의 예산 쪼끼를 마련하는 것이 필요함**

■ 기초과학 분야 대형연구시설·장비의 “생애주기” 제안

그림 7.2 기초과학 분야 대형연구시설·장비 생애주기



참고문헌

- 권면 외(2017). “과학기술종합조정지원사업: 대형연구시설장비 구축사업 관리체계 개선방안 기획연구”, 국가핵융합연구소.
- 김동연 외(2018). “제4차 기초연구진흥종합계획(2018~2022): 문재인 정부의 기초연구진흥 기본 방향”, 관계부처합동.
- 김성수 외(2021). “대형연구시설구축 내실화를 위한 사업추진 개선 방안(안)”, 과학기술정보통신부.
- 과학기술정보통신부 연구개발투자심의국(2018). 대형연구시설장비 구축사업 종합사업 관리(Project Management) 가이드라인(안).
- 과학기술정보통신부 (2020). 연구시설 투자포트폴리오 추진개요 및 방안.
- 과학기술정보통신부 연구개발투자심의국(2022). 대형연구시설 구축관리 표준지침.
- 국가연구시설장비진흥센터(2010). Manual, 연구시설·장비의 정의 및 범위.
- 도계훈(2021). “일본 제6기 과학기술·혁신기본계획 주요 내용과 시사점”, 한국과학기술평가원.
- 류형근 외(2020). “대형연구개발사업의 사업관리체계 개선방안 수립 연구, 대형연구시설 장비구축사업을 중심으로”, 한국연구재단.
- 미래창조과학부(2014). 국가대형연구시설 실태보고서.
- 미래창조과학부(2016). 일본 제5기 과학기술기본계획 관련 동향.
- 송병철 외(2022). “대형가속기 구축·운영사업 분석”, 국회예산정책처.
- 윤계형 외(2020). 대형연구시설·장비에 관한 법제 개선방안 연구, 한국법제연구원.
- 윤중현 외(2010). “국가대형연구시설구축지도(안)”, 국가연구시설장비진흥센터.
- 이상엽 외(2019). “중이온가속기 장치구축사업”, 한국과학기술평가원.
- 이준식 외(2013). “국가대형연구시설구축지도(National Large Research Facilities Roadmap, NFRM 2013)”, 국가연구시설장비진흥센터.
- 한국물리학회(2021). “대형연구시설 소위원회 회의록”.
- 한국천문학회(2013). 장기발전계획: 한국 천문학의 새로운 도약 초본.
- 한국천문학회(2017). 장기발전계획: 한국 천문학의 새로운 도약 개정판.
- 함선영(2020). “방사광가속기”, 한국과학기술평가원.
- NASEM(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine)(2017). Powering Science: NASA’s Large Strategic Science Missions, Washington, DC: The National Academies Press.
- ESFRI Roadmap(2021). “Strategy Report on Research”.
- Matt Hawkins(2022). “NSF Operations and Maintenance(O&M) Oversight for Major Research Facilities”.
- OECD(2002). “Frascati Manual”.
- S&T GPS(2020). “일본, 학술대형연구 마스터플랜 2020 발표”, <https://now.k2base.re.kr/portal/trend/mainTrend/view.do?poliTrndId=TRND0000000000038485&menuNo=200004>.

참고문헌

S&T GPS(2020). “중국, 기초연구 10년 행동 방안 강조”, <https://now.k2base.re.kr/portal/trend/mainTrend/view.do?poliTrndId=TRND00000000000041293&menuNo=200004>.

S&T GPS(2021). “Horizon Europe 내용 및 시사점”, https://now.k2base.re.kr/portal/issue/ovsealssued/view.do?poliIssueId=ISUE_0000000000000976&menuNo=200&pageIndex=.

대형연구시설·장비를
활용한 국내 기초과학
현황 및 발전 모색

한림연구보고서 146

KAST Research Report 2022
한림연구보고서 146

대형연구시설·장비를 활용한 국내 기초과학 현황 및 발전 모색

Basic science research in Korea based on large-scale research facilities and equipment

발행일 2022년 12월
발행처 한국과학기술한림원
발행인 유욱준
전화 031) 726-7900
팩스 031) 726-7909
홈페이지 <http://www.kast.or.kr>
E-mail kast@kast.or.kr
편집/인쇄 경성문화사 02) 786-2999
I S S N 2799-5135
977-2799513-00-9 46

- 이 책의 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.
- 한국과학기술한림원의 동의 없이 내용의 일부를 인용하거나 발췌하는 것을 금합니다.



이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금 지원을 통한 사업으로
우리나라 사회적 가치 증진에 기여하고 있습니다.