



2022.5.30.

국회예산정책처 | 사업평가

과학기술 인프라 대형가속기 구축·운영 사업 분석

Analysis of Large Accelerator construction Projects and Operation System

이병철



국회예산정책처
NATIONAL ASSEMBLY BUDGET OFFICE

과학기술 인프라
대형가속기 구축·운영사업 분석

과학기술 인프라 대형가속기 구축·운영사업 분석

총괄 | 송병철 예산분석실장

기획·조정 | 서세욱 사업평가심의관
전용수 경제산업사업평가과장

작성 | 이병철 경제산업사업평가과 예산분석관

지원 | 김창민 경제산업사업평가과 자료분석지원요원
이채원 경제산업사업평가과 행정실무원

본 보고서는 「국회법」 제22조의2 및 「국회예산정책처법」 제3조에 따라 국회의원의 의정활동을 지원하기 위하여 발간되었습니다.

문의 : 예산분석실 경제산업사업평가과 | 02) 6788-3777 | eie@nabo.go.kr

이 책은 국회예산정책처 홈페이지(www.nabo.go.kr)를 통하여 보실 수 있습니다.

“본 보고서는 담당 분석관의 연구 결과를 바탕으로 작성된 것으로
국회예산정책처의 공식의견과는 다를 수 있음을 알려드립니다.”

과학기술 인프라 대형가속기 구축·운영사업 분석

2022. 5.



본 보고서는 과학기술 인프라 대형가속기 구축·운영사업의 전반적인 현황을 살펴보고, 주요 쟁점별 문제점과 개선방안을 제시하고자 하였습니다. 분석 결과, 우선 미래 과학기술 환경에 대응하여 대형가속기를 포함한 대형연구시설의 증장기 구축 로드맵을 수립하고, 사전 R&D검증 단계를 통해 재정투자 효율성을 강화할 필요가 있습니다. 또한, 대형가속기의 운영 성과를 높이기 위해 전문인력 양성을 확대하고 운영기관 간 협력체계 강화, 차세대가속기의 전략적인 R&D투자와 산업체 역량강화 지원에 노력할 필요가 있습니다.

본 보고서가 우리나라 기초과학의 발전과 R&D재정투자 효율화에 관심을 가지고 계시는 의원님들의 의정활동에 유용하게 활용되기를 바라며, 앞으로도 국회 예산정책처는 전문적이고 객관적인 분석을 통해 의원님들의 의정활동을 적극 지원하겠습니다.

본 보고서는 「국회법」 제22조의3 및 「국회예산정책처법」 제3조에 따라 국회의원의 의정활동을 지원하기 위하여, 국회예산정책처 보고서발간심의위원회의 심의(2022.5.12)를 거쳐 발간되었습니다.

끝으로 본 보고서는 담당 분석관의 연구 결과를 바탕으로 작성된 것으로 국회 예산정책처의 공식견해와 다를 수 있음을 알려드립니다.

요 약 / 1

I. 분석개요 / 1

1. 분석의 배경 및 목적	1
2. 분석의 구성 및 방법	3

II. 대형가속기 구축·운영 현황 / 4

1. 대형가속기 개요	4
2. 국내 대형가속기 구축 현황	8
가. 방사광가속기 구축사업	9
나. 양성자가속기 구축 사업	21
다. 중이온가속기 구축 사업	27
라. 중입자가속기 구축 사업	37
3. 대형가속기 구축·운영 투자 현황	44
가. 대형가속기 총 투자비 현황	44
나. 대형가속기별 구축·운영비 현황	49

III. 주요 쟁점 분석 / 54

1. 대형가속기 구축 사업 체계	54
가. 대형가속기 구축 사업의 지연 현황	54
나. 대형가속기 구축 사업 관리 체계 개선 방안	65
2. 대형가속기 운영체계 및 성과	87
가. 대형가속기 운영체계 현황	87
나. 대형가속기의 운영체계 개선 방안	91
다. 대형가속기 구축·운영 성과	113

IV. 결론 및 시사점 / 130

I. 분석 개요

1. 분석의 배경 및 목적

- 대형가속기는 기초과학의 대표적인 대형연구시설로 최근에는 반도체, 신약, 신소재, 암치료 등으로 산업적 활용 범위와 영향력이 증가
- 국내 대형가속기는 포항의 3세대 방사광가속기, 4세대 방사광가속기, 경주의 양성자가속기 등 3기가 운영 중이며, 대전의 중이온가속기, 부산의 중입자가속기, 청주의 다목적방사광가속기 등 3기가 구축 중
- 대형가속기 구축과 운영에는 대규모의 정부 예산이 투자되기 때문에 면밀한 중장기 투자전략과 체계적인 구축사업관리, 효율적인 운영체계가 요구됨
 - 국내 대형가속기 구축 사업은 빈번한 계획 변경, 사업 지연 문제가 나타나고 있으며, 증가하는 활용 수요에 대응한 효과적인 운영체계 마련도 미흡
- 이에 대형가속기 구축·운영 사업의 현황을 분석하고 주요 쟁점사항에 대한 문제점과 개선방향을 제시하고자 함

2. 분석의 구성 및 방법

- 주요 현황에서 대형가속기의 개념과 국내에 구축된 대형가속기별 사업 개요, 추진 경과, 기술개요, 해외현황을 정리하고, 전체 재정투자 규모를 조사
- 주요 쟁점분석에서 대형가속기 구축 사업과 운영체계 및 성과를 중심으로 문제점과 개선방안을 제시
 - 중이온가속기와 중입자가속기 구축사업을 중심으로 사업지연 원인과 문제점을 살펴보고 향후 개선방안을 제안

- 다음으로 대형가속기의 운영 현황과 운영성과 적절성, 전문인력 양성 확대필요성, 대형가속기 기술수준 등을 살펴보고 향후 개선방안을 제시함

[보고서의 구성과 주요 내용]

구분		주요 분석 내용
I. 분석 개요		• 분석의 배경 및 목적 • 분석의 구성 및 방법
II. 대형가속기 구축·운영 현황		• 대형가속기 개요 및 국내 구축 현황 - 대형가속기 구축 사업, 기술개요, 해외현황 - 대형가속기 구축·운영 재정투자 규모
III. 주요 쟁점 분석	대형가속기 구축 체계	• 대형가속기 구축 사업 체계 - 대형가속기 구축 사업 지연의 원인과 문제점? - 대형가속기 구축 사업관리 체계 개선 방안?
	대형가속기 운영체계 및 성과	• 대형가속기 운영체계 - 대형가속기 운영체계 현황과 연구성과의 효율성? - 대형가속기 전문인력 양성 확대 필요성? • 대형가속기 기술경쟁력 - 차세대가속기 기술수준과 핵심장치 국산화율?

자료: 국회예산정책처

II. 대형가속기 구축·운영 현황

1. 대형가속기 개요

- 대형가속기는 입자가속기와 이를 활용하기 위한 첨단연구장비, 연구설비, 지원시설 등이 결합된 대형연구시설(Large Research Facilities)임
 - 입자가속기(Particle Accelerator)는 전기장과 자기장을 이용하여 입자를 높은 속도로 가속시키는 장치로 대형가속기의 핵심장치
 - 대형가속기는 핵물리학, 입자물리학 등의 기초연구에 주로 이용되어왔으나, 최근에는 생명과학, 의학, 재료, 나노, 방위산업 등 산업적 활용이 증가
- 국내 대형가속기는 방사광가속기 3기, 양성자가속기 1기, 중이온가속기 1기, 중입자가속기 1기 등 총 6기가 구축·운영 중

[국내 대형 가속기 구축운영 현황]

구분		구축기간 (성능향상)	총투자비 (성능향상)	운영주체	지역	비고
방사광 가속기	3세대	1991~1994 (2009~2011)	1,500억원 (1,000억원)	포항공과대학교 (포항가속기연구소)	포항	운영중
	4세대	2011~2015	4,298억원		포항	운영중
	다목적	2021~2027	10,454억원	한국기초과학지원연구원	청주	구축중
양성자가속기		2002~2012	3,143억원	한국원자력연구원	경주	운영중
중이온가속기		(1단계) 2011~2022	15,183억원	기초과학연구원	대전	구축중
중입자가속기		2010~2024	2,596.1억원	서울대학교병원	부산	구축중

자료: 과학기술정보통신부

2. 국내 대형가속기 구축 현황

가. 방사광가속기 구축사업

- 방사광가속기는 전자를 가속하여 방사광을 발생시키고, 이를 이용해 원자 및 분자 단위의 움직임을 관찰하는 연구시설
 - 방사광(synchrotron radiation)은 기존의 광원보다 수 백만배에서 수 억배에 이르는 강력한 고해상도·고에너지의 빛
- 국내는 포항에 1994년 3세대 방사광가속기, 2015년 4세대 선형 방사광가속기가 완공되어 운영중이며, 현재 충북 청주에 다목적 방사광가속기를 2027년까지 구축

[국내 방사광가속기 구축 사업 개요]

구분	3세대	4세대 선형	다목적
사업기간 /총사업비	1988~1994년 / 1,500억원(출연)	2011~2015년 / 4,298억원(출연)	2021~2027년 / 1조 454억원(출연)
대지건물	건물: 126,800㎡(약 3.8만평) / 18개동 45,358㎡(1.3만평)	120,620㎡(3.6만평) / 9개동 36,868㎡(1.1만평)	건축연면적 약 69,400㎡
주요장치	선형가속기(170m), 저장링(둘레 281.8m), 빔라인(36기)	가속장치(1,030m), 빔라인(80m, 3기), 실험장치(7기)	방사광가속기 1기 빔라인 10기
운영기관	포항공과대학교 포항가속기연구소		한국기초과학지원연구원

자료: 과학기술정보통신부

나. 양성자가속기 구축사업

- 양성자가속기는 전기장을 이용하여 양성자를 빛의 속도에 가까이 가속하여 물질에 충돌시키면서 물질의 성질 변화와 새로운 물질 생성에 이용하는 연구시설
 - 반도체 및 자동차 부품소재, 신약, 의료 등 다양한 첨단분야에 활용 중
- 경주의 양성자가속기는 ‘21세기 프론티어 연구개발사업’의 내역사업인 ‘양성자기반 공학기술개발사업’을 통해 구축
 - 가속기 구축에 2002년에서 2012년까지 총 3,143억원이 투자되었으며, 현재 한국원자력연구원 양성자과학연구단에서 운영 중

[양성자가속기 구축사업 개요]

구분	내용
사업기간/ 총사업비	• 구축: 2002~2012년 / 3,143억원(국고 58.4%, 지자체 37.6%, 민간 4.0%)
시설규모	• 대지: 약 440,000㎡, 건축물: 9개동 • 장치: 100 MeV 양성자가속기, 총 6개의 빔라인(20 MeV 1개, 100 MeV 5개)
운영기관	한국원자력연구원 양성자과학연구단

자료: 과학기술정보통신부

다. 중이온가속기 구축사업

- 중이온가속기는 수소와 헬륨보다 무거운 원소를 이온화하여 매우 빠르게 가속시킨 뒤, 표적 원자핵에 충돌시켜 다양한 희귀동위원소를 생성하는 장치
- 우리나라 중이온가속기 구축 사업(RAON)¹⁾은 국제과학비즈니스벨트²⁾ 내 대형기초과학연구시설로 기초연구의 경쟁력을 강화를 목적으로 구축 중
 - 주관기관은 기초과학연구원이며, 2022년까지 진행된 1단계 구축사업에 1조 5,473억원을 투자

1) ‘라온’(RAON; Rare Isotope Accelerator complex for ON-line experiments) 중이온가속기의 별칭으로 ‘즐거움’과 ‘기쁨’의 순 우리말이다.

2) 국제과학비즈니스벨트는 창조적 연구환경 조성을 통해 세계적 두뇌가 모이고, 기초과학과 비즈니스가 융합된 국가성장네트워크를 지칭

[중이온가속기 구축 사업 개요]

구분	내용
사업기간/ 총사업비	• 1단계: '11~'22년 / 1조 5,473억원 (국고100%) (장치구축: 5,228억원, 시설건설 6,384억원, 부지매입 3,571억원)
위치(사업규모)	• 대전시 유성구 신동지구(부지면적 952,066㎡, 연면적 116,252㎡)
주요장치	• 중이온 빔을 제공하는 가속장치, 기반장치, RI생성장치, 실험장치 등
사업시행주체	기초과학연구원(중이온가속기건설구축사업단)

자료: 과학기술정보통신부

라. 중입자가속기 구축사업

- 의료용 중입자가속기는 중입자(수소이온보다 무거운 이온)를 빛의 속도 가까이 가속하여 암을 치료하는 장치
 - 이온발생장치, 저에너지 전송시스템, 선형가속장치, 중에너지전송시스템, 원형가속장치, 고에너지 전송시스템, 회전 갠트리 등으로 구성
- 정부의 중입자가속기 구축 지원사업은 중입자가속기 및 치료시스템을 도입하여 중입자치료센터를 구축하는 사업
 - 주관기관은 서울대학교병원으로 2024년까지 총 사업비 2,596억원을 투자

[중입자가속기 구축 사업 개요]

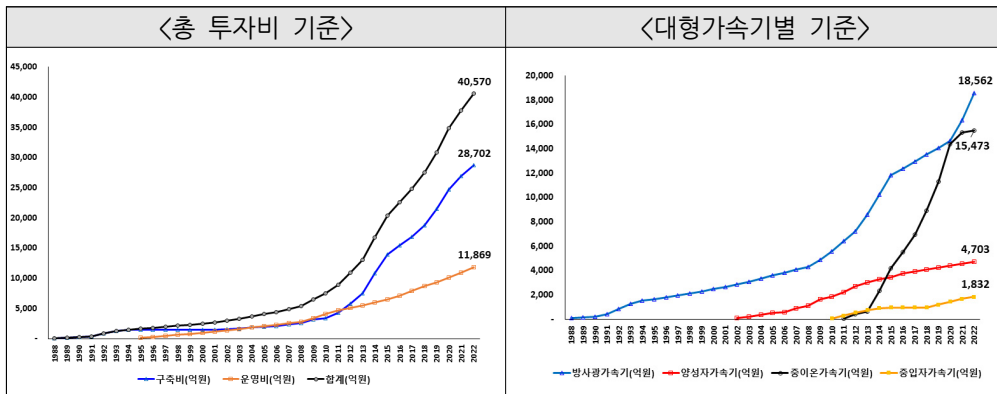
구분	내용
사업기간/ 총사업비	• 2010~2024년 / 2,596.1억원(출연)(국비 45.7%, 지자체 25.4%, 민간 28.9%)
사업내용	• 430MeV/u 의료용 중입자가속기 구축 및 중입자치료센터 건립
사업시행주체	• 서울대학교병원

자료: 과학기술정보통신부

3. 대형가속기 구축·운영 투자 현황

- 대형가속기의 총 투자비는 2022년까지 4조 570억원으로, 구축비에 2조 8,702억원, 운영비에 1조 1,869억원이 투자
 - 재원별로는 정부재정 3조 4,379억원, 지자체 4,066억원, 민간 등 2,018억원
 - 대형가속기별로는 방사광가속기 1조 8,562억원, 중이온가속기 1조 5,473억원, 양성자가속기 4,703억원, 중입자가속기 1,832억원 등

[대형가속기 구축·운영 총 투자규모(누적)]



자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

- 대형가속기의 총 운영비로 총 1조 1,429억원, 연평균 217억원이 투자됨
 - 대형가속기 운영비 이외에 ‘가속기핵심기술개발’과 ‘방사광가속기 핵심장치 국산화 기술개발’ 등에 2022년까지 총 149억원을 투자

[대형가속기 평균 운영비 현황]

구분	총 구축비 (A)	운영 기간	총 운영비 (B)	연평균 운영비(C)	B/A	C/A
3세대 방사광가속기	1,500	'95~	8,543	305	5.70	0.203
4세대 선형 방사광가속기	4,298	'16~	1,326	190	0.31	0.044
양성자가속기	3,143	'02~	1,560	156	0.50	0.050

자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

Ⅲ. 주요 쟁점 분석

1. 대형가속기 구축사업 체계

가. 대형가속기 구축 사업의 지연 현황

- 중이온가속기는 당초 계획에 비해 5년 지연, 총 사업비는 738억원 증가, 중입자가속기는 당초 계획에 비해 9년 지연, 총 사업비는 646.1억원 증가

[중이온가속기 및 중입자가속기 구축사업 변경 현황]

구분		당초	현재안	증감
중이온가속기 (1단계)	사업기간	2011~2017년	2011~2022년	+5년
	총사업비	14,445억원	15,183억원	738억원
중입자가속기	사업기간	2010~2015년	2010~2024년	+9년
	총사업비	1,950억원	2,596.1억원	+646.1억원

자료: 국회예산정책처

- 중이온가속기 구축 사업은 핵심 장치인 초전도 가속장치(SCL3, SCL2) 개발과 구축이 지연되면서, 본격적인 빔 인출과 가속기 운영이 지연 중
- 당초 2019년 SCL3 구축, 2020년 빔 인출을 계획하였으나, 2021년 12월에 이르러 SCL3 설치가 완료되었고, SCL2의 제작과 구축 시점은 미정

[중이온가속기 구축사업 장치구축 핵심지표 달성 현황]

구분	사업연도								
	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23
계획	ECR 빔인출	RFQ 빔인출	SCL데모 빔인출	방사선사용 허가 취득 유틸리티공급		SCL3 설치시작	SCL3 SI빔인출	KoBRA시운전 ISOL RI빔시운전 IF시운전	SCL3 RI빔인출
실적	ECR 빔인출	RFQ 빔인출	SCL데모 빔인출	방사선사용 허가취득 유틸리티공급		SCL3 설치시작	SCL3 설치완료	SCL3 최초빔인출 ISOL RI빔시운전	SCL3 SI빔인출 SCL3 RI빔인출 KoBRA빔시운전 IF장치시운전

주: 계획은 사업기본계획 4차 변경('21.5) 기준, 실적은 '21년말 기준으로 '22년, '23년은 계획임(제 37차 사업추진위원회 사업일정변경(안)('21.12) 기준)

자료: 과학기술정보통신부

- 중이온가속기 구축사업은 사전에 면밀한 사업계획 수립과 타당성 검토 부재
 - 기획단계에서 설계를 구체화하지 않고 기술검증이 부족한 상황에 본격적인 사업에 착수하면서, 설계 변경, 사업기간 및 예산 증가가 반복
- 중입자가속기 구축 사업 지연은 당초 주관기관의 민간 투자유치와 기술개발 계획이 실패하면서, 주관기관 변경과 장비도입으로 사업이 변경된데 기인
 - 주관기관 변경 후 사업내용을 ‘중입자가속기 및 관련 기술 개발’에서 ‘난치성 암 치료 및 기초연구 인프라 구축(기기도입)’으로 변경
 - 이미 완공된 치료센터가 도입 예정인 중입자가속기 장치 사양과 맞지 않으면서 치료센터의 개보수 공사로 인해 사업이 지연 중

[중입자가속기 구축지원사업 장치구축 핵심지표 달성 현황]

구분	사업연도				
	‘19	‘20	‘21	‘22	‘23
계획	장치구축 입찰 진행	건물설계 및 장치설계 완료	건물공사 및 장치제작 진행	건물공사 완료 및 장치 국내 운송 완료	장치 설치·성능검사·인수시험 완료
실적	장치구축 입찰 진행	장치구매계약 체결/ 건물설계사 선정 및 설계 착수	건물설계 추진 및 장치제작 진행	-	-

주: 계획은 제10차 사업운영위원회 심의·의결(‘19.04) 기준이며 실적은 ’21년말 달성 기준

자료: 과학기술정보통신부

나. 대형가속기 구축 사업 관리 절차 개선 방안

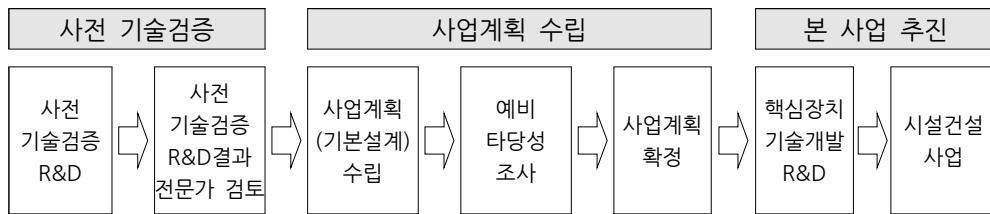
- 대형가속기를 비롯한 대형연구시설 구축 사업의 사업지연과 사업비 증가가 빈번해지면서, 대형연구시설 구축 사업에 대한 전반적인 제도개선 필요성 증가
 - 대형연구시설은 기술적 고난도, 복잡성, 대규모 재원 투입으로 사업계획의 불확실성이 높고, R&D사업과 장치·시설구축 사업이 결합된 특징
 - 대형연구시설 구축 사업은 일관된 사업관리체계 부재, 단계별 관리·평가체계 미흡, 사업단의 전문성·경험 부족 등의 문제점이 지속

- 과학기술정보통신부는 대형연구시설 구축관리 표준지침 제정, 대형연구시설전문위원회 신설, 총사업비관리지침 개정 등의 개선 방안 추진 중

□ 이에 대형연구시설 구축 사업의 기술개발 불확실성을 대응할 수 있도록, 사업추진 전에 ‘기술개발 검증 R&D’ 단계를 신설하고, 본 사업은 R&D단계와 시설구축단계로 구분하여 추진함으로써 사업 지연의 위험성을 최소화

- 대형연구시설의 핵심장치에 대한 ‘사전 기술검증R&D’를 통해 장치개발과 구축 가능성을 검증하고, 기본설계를 수립한 이후 예비타당성 조사를 시행
- 본 사업 추진 시 장치개발 R&D와 시설구축사업을 단계별로 추진하여, R&D지연으로 인한 시설유휴화, 사업기간 연장, 사업비 증가 등을 최소화

[대형연구시설 구축 사업 추진 절차 개선방안(예시)]



자료: 국회예산정책처

□ 대형연구시설이 체계적으로 구축될 수 있도록 대형가속기를 포함한 ‘대형연구시설의 중장기 로드맵’을 마련하고 지속적인 수정·보완 추진

- 2012년 「제2차 국가대형연구시설 구축지도」 수립 이후 대형연구시설에 대한 정부의 중장기 로드맵 수립은 부재
- 대형연구시설의 재정투자 규모를 고려할 때 국가차원의 체계적이고 종합적인 중장기 로드맵 수립은 필수적이며, 미래 기술환경 변화와 연구현장의 수요 등을 반영한 지속적인 수정·보완이 중요
- 대형가속기에 대한 정부 재정지원의 근거 법률은 다양하지만, 근거 법률에서 수립되는 과학기술분야 중장기계획과의 미흡한 연계를 개선할 필요

2. 대형가속기 운영체계 및 성과

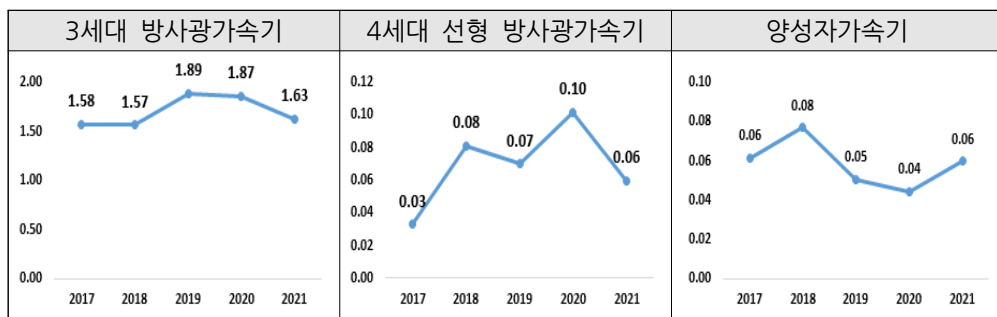
가. 대형가속기 운영체계 현황

- 3세대·4세대 방사광가속기의 운영은 포항공과대학교 산하 포항가속기연구소에서 맡고 있으며, 연구소장 아래 3개 단(3세대, 4세대, EUV)으로 구성
 - 포항가속기연구소의 2021년 예산은 580억원이며, 지출은 인건비 202억원, 사업비 323억원, 경상경비 26억원 등
- 양성자가속기의 운영은 한국원자력연구원 산하 양성자과학연구단에서 맡고 있으며, 연구단장 아래 2개 연구부 1실, 1팀으로 구성
 - 양성자과학연구단의 2021년 예산은 175억원이며, 지출은 인건비 31억원, 사업비 142억원, 경상경비 2억원 등이 편성

나. 대형가속기 운영성과

- 현재 운영 중인 대형가속기(3·4세대 방사광, 양성자)의 최근 5년간 이용신청 건수는 2017년 2,172건에서 2021년 3,183건으로 증가
 - 최근 5년간 대형가속기 운영비당 SCI논문 성과는 다소 감소 또는 정체

[대형가속기 운영비 1억원당 SCI논문 성과현황]



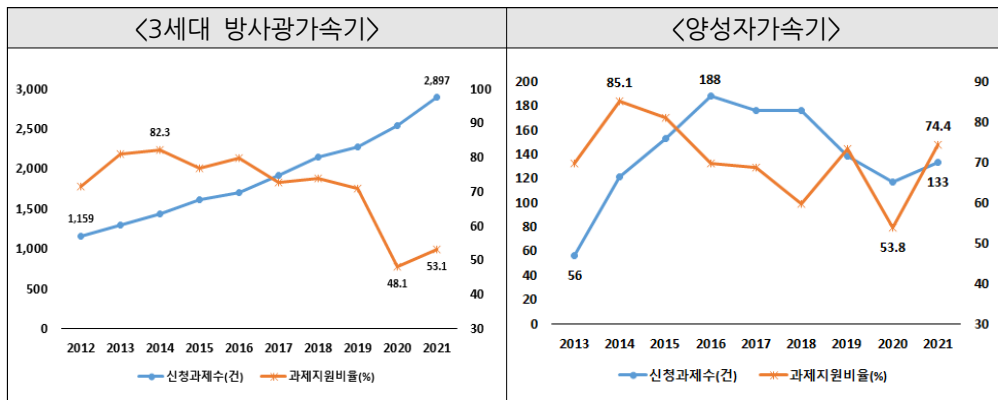
주: 운영비 1억원당 SCI논문편수(천)=SCI논문편수(천)/운영비(억원)

자료: 과학기술정보통신부 제출자료를 바탕으로 재작성

□ 대형가속기의 산업체 활용 수요는 증가하고 있지만, 대형가속기에서 제공 가능한 빔라인 수의 한계로 인해 산업체 지원 비중은 감소 또는 정체

- 대형가속기의 2021년 산업체 이용 비중은 3세대 방사광가속기 7.3%, 4세대 선형 방사광가속기는 3.3%, 양성자가속기 29.3%
- 대형가속기 활용에 대한 전반적인 활용 수요 증가에 비해 빔라인 수 증설은 부족하면서, 전반적인 과제지원비율이 낮아진데 주요 원인이 있음

[연도별 신청과제건수 및 과제지원비율 추이]



자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

□ 대형가속기 이용 수요 증가에 대응하기 위해서는 장기적으로는 신규 가속기나 빔라인 증설의 필요성이 있다고 볼 수 있지만, 우선적으로 대형가속기 운영의 효율화에 노력할 필요

- 과학기술정보통신부는 대형가속기 간 기술·인력·정보의 공동 활용을 촉진하고자 2017년 ‘대형가속기협의회’를 출범시켰으나 실질적인 운영이 부재했고, 방사광가속기 공동활용 촉진 법률 근거 신설, 방사광가속기 국유화 이후 경영평가 등의 공적관리 강화, 이용자 지원 체계 개선도 미흡
- 재정투자 효율성을 고려하여 우선적으로는 이용이 저조한 빔라인을 개조하거나, 대형가속기 간 기술·인력·정보의 공동 활용 촉진, 이용자 지원체계 개선 등으로 운영체계 효율화에 노력할 필요

- 대형가속기 운영인력 규모가 빔라인의 효과적인 운영과 연구자 지원에는 부족한 수준으로, 신규 인력 양성 지원과 운영기관 인력 충원 필요
 - 대형가속기 운영기관은 연구인력 충원(27.1%), 기술인력 충원(19.8%), 행정·운영 인력충원(8.7%) 등으로 인력충원의 애로사항 비중이 가장 높음
 - 대형가속기별 인력 소요를 조사한 결과, 2022년 412명에서 2025년에 695명으로 증가하여 총 283명의 추가 인력 충원이 필요할 것으로 전망

[대형가속기 인력 소요계획]

(단위: 명)

구분	'22년(A)	'23년	'24년	'25년(B)	증감(B-A)
인력전망 (연도별 충원인력)	412	529 (+117)	615 (+86)	695 (+80)	283

주: 2022년은 현재 정규직 근무 기준이며 23년 이후는 계획 기준

자료: 과학기술정보통신부

- 과학기술정보통신부는 다목적 방사광가속기 구축사업의 본격 추진에 따른 인력 부족에 대비하여 대학·출연연·기업체의 전문인력 활용 방안 등을 검토

다. 대형가속기 기술경쟁력 향상

- 대형가속기 활용 성과를 높이기 위해서는 차세대가속기 분야의 기술수준 향상과 관련 산업체의 기술역량 강화가 필요
 - 우리나라 차세대가속기 기술수준은 세계 최고 수준 국가에 비해 67.5%수준이며, 7.0년 정도 기술격차가 있다는 평가
 - 평가 근거로 구체적인 제조 및 운영 기술 부족, 연구진 기초역량 미흡, 정부의 연구인력 양성 및 연구비 지원 부족 등이 제시
 - 지속적인 교체 수요와 기술개발 필요성이 높은 대형가속기 장치와 품목을 선정하여 정부의 전략적인 R&D투자 및 산업체 사업화 지원 필요

- 대형가속기 핵심장치의 국산화율은 양성자가속기 고주파장치 5.1%, 다목적 방사광가속기 고주파장치 0%, 중이온가속기 극저온시스템 19.8%, 사이클로트론 5.2% 수준
- 이를 위해 대형가속기 구축 사업에 역량있고 검증된 국내장비업체의 참여를 확대하여 요소 기술확보를 도모하고, 이를 활용한 새로운 기술개발과 사업화를 추진할 수 있도록 체계적인 기업지원 필요
- 의료용 입자가속기를 포함한 방사선 진료장비 세계 시장의 급속한 성장에 대응할 수 있도록 원천기술 확보를 위한 R&D투자전략을 검토할 필요
 - 전 세계 입자가속기 암 치료 시장의 성장추세가 가장 높을 것으로 전망되며, 우리나라의 암 환자의 입자가속기 치료 비중도 크게 증가
 - 전 세계 방사선 치료 시장은 연평균 4.55% 성장하여 2024년 85억 6,105만 달러로 전망되며, 입자가속기 치료 비중이 가장 높을 것으로 예상
 - 의료용 입자가속기 시장에 도전할 수 있도록 원천기술 확보를 위한 정부의 효과적인 R&D투자전략과 민간의 사업화 지원이 필요
 - 우리나라 의료기기 무역수지가 최초로 흑자로 전환되었지만, 방사선 치료 장치는 국내 생산 기업체는 없으며 전량 해외 수입에 의존

IV. 결론 및 시사점

- 첫째, 대형가속기 구축을 위한 체계적인 중장기 로드맵을 마련하고, 미래 과학기술 환경변화에 대응한 지속적인 수정·보완으로 재정투자 효율성을 강화
 - 대형가속기와 같은 대형연구시설은 대규모의 구축비용과 운영비가 소요되고, 시설구축에 장기간이 소요되므로 재정투자 효율성, 시설활용의 적시성을 고려한 중장기 로드맵 수립 필요
 - 대형가속기별 구체적인 구축목표와 운영 방향을 수립하고 근거 법률의 중장기계획과의 연계를 강화

- 둘째, 대형가속기를 비롯한 대형연구시설 구축 사업 추진 전에 ‘사전 기술검증 R&D’ 단계를 신설하고, 본 사업 시 R&D와 시설건설 사업을 단계별로 추진함으로써 사업지연의 위험성을 최소화할 필요
 - 대형연구시설 구축사업은 기술개발 위험이 높은 특징이 있지만 이에 대응할 제도적 장치가 부재하므로 사전 ‘기술검증R&D’를 신설 검토
 - 본 사업 추진 시 R&D사업과 장치시설구축사업을 단계별로 추진하여, 기술개발의 지연으로 인한 사업지연과 총사업비 증가를 최소화
- 셋째, 대형가속기의 활용 수요 증가로 장기적으로는 신규 빔라인 증설의 필요성이 있지만, 대형가속기 운영체계 효율화에 우선적으로 노력할 필요
 - 대형가속기 통합운영체계를 구축하여 기술·인력·정보의 공동 활용을 촉진하고, 효율적인 빔라인 지원체계를 구축할 필요
 - 대형가속기 운영을 위한 전문인력이 부족하고 인력 수요가 지속적으로 발생한다는 점에서 정부의 효과적인 전문인력양성과 운영인력 확충 방안 마련 필요
- 넷째, 대형가속기 활용 연구성과를 높이기 위해서는 차세대가속기 개발과 장치 국산화를 위한 전략적인 R&D투자와 관련 산업체의 기술역량강화 지원이 필요
 - 대형가속기 활용 성과의 양과 질을 높이기 위해서는 차세대가속기 개발과 장치개발을 위한 R&D투자 필요
 - 대형가속기에 지속적인 교체 수요가 높고 타 산업으로의 파급효과가 있는 장치나 품목의 국산화를 위한 정부의 전략적인 R&D투자가 필요
 - 또한, 대형가속기 구축 사업에 역량있고 검증된 국내장비업체의 참여를 확대하고 산업체의 기술역량 강화를 위한 사업화 지원도 필요

대형가속기는 원자 내부 구조를 밝히기 위해 원자핵이나 기본입자를 가속시키거나 충돌시키는 기초과학의 대표적인 대형연구시설로서 핵물리학, 입자물리학, 물질분석 등의 기초연구에 주로 이용되어왔다.

최근에는 생명과학, 의학, 핵공학, 재료공학, 나노산업, 방위산업 등으로 산업적 활용 범위와 영향력이 높아지고 있어, 주요국들은 첨단과학기술 선점을 위한 필수적이고 중요한 연구시설로서 국가차원에서 체계적 정책에 따라 대형가속기 인프라를 구축·운영 중에 있다¹⁾.

[대형가속기 활용 분야]

구분		주요 내용
고에너지 및 핵물리 분야	에너지 프론티어형	• 최고의 에너지 상태에서의 연구를 위한 충돌가속기로 주로 전자(또는 양전자) 또는 양성자를 가속시켜 이용
	인텐시티 프론티어형	• 연구대상 입자들을 대량으로 생성시키고자 가속기로 전자, 양성자 입자들을 충돌시키는 가속기
재료과학, 생명과학, 에너지/환경 분야	방사광원	• 전자를 가속하여 방사광(자외선, X-선 등)을 발생시켜 물질의 정밀 구조 및 동력학 분석 연구에 활용 (신소재, 신물질, 촉매, 나노소재, 초전도체, 단백질 구조분석, 신약개발 등에 활용)
	중성자원	• 양성자를 고에너지로 가속하여 납, 수은, 우라늄 등 무거운원자핵과 충돌시켜 파쇄현상(Spallation)을 이용하여 대량의 중성자를 생산하여 물질의 구조 분석 및 신물질 개발에 활용
의료용, 산업용		• 암치료, 동위원소 생산, 신소재개발, 농산물 가공, 특수표면처리 용도로 개발되어 사용

자료: 한국연구재단, 「다목적 방사광가속기 구축사업 예비타당성조사 추진을 위한 전략수립 연구」, 2021.6.

1) 미래창조과학부·한국과학기술한림원, 「방사광가속기·중이온가속기 사업 비교 분석」, 2013.9.

국내 대형가속기는 포항에 3세대 방사광가속기(Pohang Light Source, PLS)가 구축되어 1995년부터 운영되면서 가속기 활용이 본격화되었다. 이후 4세대 선형 방사광가속기와 경주의 양성자가속기가 구축운영되고 있으며, 대전의 중이온가속기, 부산의 중입자가속기, 청주의 다목적방사광가속기 등 3기를 추가로 구축하고 있다²⁾.

[국내 대형 가속기 구축운영 현황]

구분	구축기간 (성능향상)	총투자비 (성능향상)	지역	비고
3세대 방사광가속기	1991~1994 (2009~2011)	1,500억원 (1,000억원)	포항	운영중
4세대 선형 방사광가속기	2011~2015	4,298억원	포항	운영중
다목적 방사광가속기	2021~2027	10,454억원	청주	구축중
양성자가속기	2002~2012	3,143억원	경주	운영중
중이온가속기	1단계: 2011~2022	15,183억원	대전	구축중
중입자가속기	2010~2024	2,565.1억원	부산	구축중

주: 3세대 방사광가속기 전체 건설비 1500억 원 중 40%는 정부가, 60%는 포스코가 지원

자료: 과학기술정보통신부

대형가속기 구축과 운영은 대부분은 정부 주도로 대규모 예산이 투자되기 때문에 장기적인 안목에서 체계적인 사업관리와 효율적인 운영이 요구된다. 그러나 우리나라는 대형가속기 구축에 대한 체계적인 중장기로드맵이 미흡했으며, 2010년부터 추진해온 중이온가속기와 중입자가속기 구축 사업도 지속적으로 지연되고 총사업비도 당초계획보다 증가하면서, 대형가속기 구축 사업에 대한 종합적인 검토의 필요성이 제기되고 있다.

이에 국회예산정책처는 대형가속기 구축·운영 사업의 현황을 분석하고, 주요 쟁점 사항에 대한 문제점과 개선방향을 제시하고자 한다. 특히, 대형가속기별로 기술개념과 구동원리를 소개하여 일반인들의 이해를 돕고자 하였다. 최종적으로는 대형가속기 구축·운영 사업의 국회 예산심의와 입법활동을 지원하고, 정부의 실질적인 성과창출, 국민들의 인식제고에 도움이 될 수 있는 참고자료를 제공하고자 하였다.

2) 3세대 방사광가속기는 3세대 원형 방사광가속기(PLS-II), 4세대 방사광가속기는 4세대 선형 X선 방사광가속기(PAL-XFEL), 다목적 방사광가속기는 4세대 원형 방사광가속기가 정식 명칭이라고 볼 수 있지만, 본 보고서에서는 특별한 경우를 제외하고 정부 자료에서 일반적으로 쓰고 있는 3세대 방사광가속기, 4세대 선형 방사광가속기, 다목적 방사광가속기로 기술하였다.

본 보고서의 구성과 분석내용은 1장에서 분석의 배경 및 목적, 보고서의 구성 및 분석 방법을 설명하였다.

이어 2장에서는 대형가속기 구축·운영 현황으로 대형가속기의 개념과 국내에 구축된 대형가속기별 사업 개요, 추진경과, 기술개요, 해외현황을 정리하고, 전체 재정투자 규모를 조사하였다.

3장의 쟁점분석에서는 중이온가속기와 중입자가속기 구축사업의 사업지연 원인을 살펴보고 향후 개선방안을 제안하였다. 그리고 대형가속기의 운영 현황과 연구성과를 살펴보고 연구성과 효율성과 전문인력 양성 확대의 필요성을 검토하였다. 마지막으로 대형가속기 기술경쟁력 차원에서 차세대기술수준과 핵심장치 국산화율을 분석하였다.

마지막으로 4장 결론 및 시사점에서 주요 분석 내용을 정리하고 종합적인 개선방안을 제안하였다.

[보고서의 구성과 주요 내용]

구분		주요 분석 내용
I. 분석 개요		• 분석의 배경 및 목적 • 보고서의 구성 및 분석 방법
II. 대형가속기 구축·운영 현황		• 대형가속기 개요 및 국내 구축 현황 - 대형가속기 구축 사업, 기술개요, 해외현황 - 대형가속기 구축·운영 재정투자 규모
III. 주요 쟁점 분석	대형가속기 구축 체계	• 대형가속기 구축 사업 체계 - 대형가속기 구축 사업 지연의 원인과 문제점? - 대형가속기 구축 사업관리 체계 개선 방안?
	대형가속기 운영체계 및 성과	• 대형가속기 운영체계 - 대형가속기 운영체계 현황과 연구성과의 효율성? - 대형가속기 전문인력 양성 확대 필요성? • 대형가속기 기술경쟁력 - 차세대가속기 기술수준과 핵심장치 국산화율?

자료: 국회예산정책처

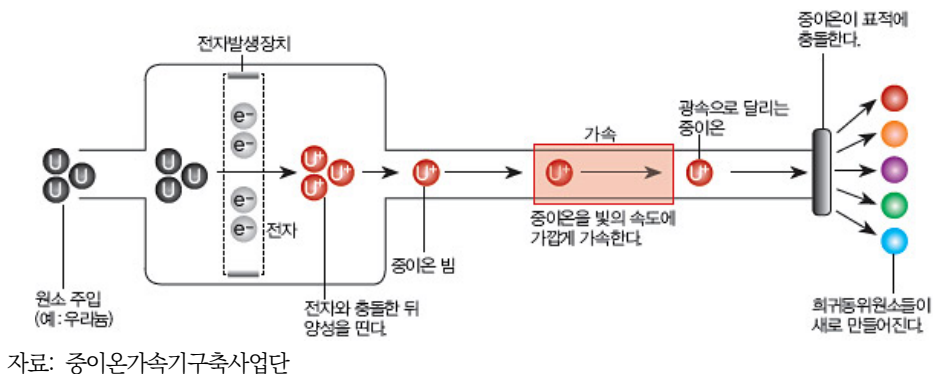
1

대형가속기 개요

대형가속기는 ‘입자가속기(Particle Accelerator)’와 이를 활용하기 위한 연구장비, 연구설비, 지원시설 등이 결합된 대형연구시설(Large Research Facilities)을 말한다. 입자가속기는 전기장과 자기장을 이용하여 전자, 중이온, 양성자와 같은 하전입자를 빛의 속도와 비슷한 높은 속도로 가속시키는 장치이다. 여기서 말하는 가속이란 전하를 띠고 있는 하전입자에 전자기력을 가해 속력 또는 운동방향에 변화를 주는 것이다¹⁾.

입자가속기의 활용 목적은 입자의 가속과 충돌 과정에서 다양한 반응을 관찰하고 분석하여 미시세계의 물리법칙을 규명하는데 있으며, 입자가속기는 입자물리학과 핵물리학, 물성분석 등 기초과학 연구발달에 핵심 시설로 활용되어 왔다. 최근에는 반도체, 신약개발, 신소재개발, 암치료 등의 다양한 산업적 활용 범위가 더욱 넓어지면서 과학기술 선점을 위한 필수적인 국가연구시설로 여겨지고 있다.

[중이온가속기의 원리 예시]



1) 하전입자에 속력 또는 운동방향을 변화시키는 것은 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의한 것으로, 하전입자의 속력을 증가시키기 위해서는 전기장이, 운동 방향을 바꾸기 위해서는 자기장이 필요하다.

입자가속기의 역사는 1897년 J.J. 톰슨²⁾이 음극선으로 전자를 발견하고, 1911년 어니스트 러더퍼드³⁾가 알파입자(헬륨원자 핵)를 금박에 쏘는 실험을 통해 원자핵을 발견하면서 시작되었다고 알려져 있다. 이후 러더퍼드는 원자에서 전자를 떼어 이온을 만들고, 이를 가속시켜 다른 원소에 충돌시키는 입자가속기 아이디어를 제시하였다. 입자가속기는 1930년대에 들어 콕크로프트-윌튼 가속기⁴⁾, 반데그라프 가속기⁵⁾ 개발에 이어 어니스트 로렌스⁶⁾가 ‘사이클로트론(Cyclotron)’⁷⁾을 발명하면서 현재의 입자가속기로 발전할 수 있는 시초가 되었다⁸⁾.

입자가속기는 하전 입자의 가속에너지를 얻는 원리, 가속기의 형태, 가속입자의 종류, 입자가속의 목적 등에 따라 분류할 수 있다.

[입자가속기 유형 분류]

구분	가속기 유형
가속에너지	정전(직류)형 가속기, 공명(교류)형 가속기
가속기 형태	선형(linear) 가속기와 원형(circular) 가속기
가속입자 종류	전자가속기, 양성자가속기, 중이온가속기 등
입자가속의 목적	방사광 발생을 위한 가속기와 충돌·동위원소 발생 등을 위한 가속기

자료: 윤수진·함선영·이상경. “입자가속기술”, 『KISTEP 기술동향브리프』, 2019.

전하 입자가 어떠한 형태의 가속에너지를 얻느냐에 따라 정전(직류)형 가속기와 공명(교류)형 가속기로 구분한다⁹⁾. 가속기 형태는 크게 선형가속기(Linear Accelerator)와 원형가속기(Circular Accelerator)로 나뉜다. 선형가속기는 입자가 직선형으로 된

2) 톰슨(Joseph John Thomson)은 영국의 물리학자로 전자를 발견한 공로로 1906년 노벨 물리학상을 받았다.

3) 러더퍼드(Ernest Rutherford)는 영국의 핵물리학자로 원자 내부 구조 연구로 1908년 노벨 화학상을 받았다.

4) 1932년 영국의 물리학자 콕크로프트와 윌튼이 발명한 양성자 가속기이다.

5) 반데그라프가속기(Van de Graaff Accelerator)는 미국의 물리학자 로버트 J. 반데그라프가 발명했다. 밴더그라프 발전기(Van de Graaff generator)를 이용한 정전기형 가속기로 높은 전위차를 이용하여 입자를 가속한다.

6) 로렌스(Ernest Orlando Lawrence)는 미국의 물리학자로 1939년 사이클로트론 개발로 노벨 물리학상을 받았다.

7) 고주파의 전극과 자기장을 사용하여 입자를 나선모양으로 가속시키는 입자가속기이다.

8) 정모세, “해의 대형 가속기 개발 및 연구 현황”, 『서울공대웹진』, Vol. 121., 2021.

9) 정전형(직류)형 가속기는 고정된 높이의 에너지에 해당하는 퍼텐셜 에너지를 만들어 하전 입자를 가속시키는 것으로 콕크로프트-윌튼, 반데그라프 등의 가속기가 있다. 교류기적인 전기장을 만들어 입자 에너지를 증가시키는 것이 공명(교류)형 가속기로 선형가속기, 원형가속기가 있다.

(자료: 문창범, 『가속기에 얽힌 과학』, 창문각, 2020.)

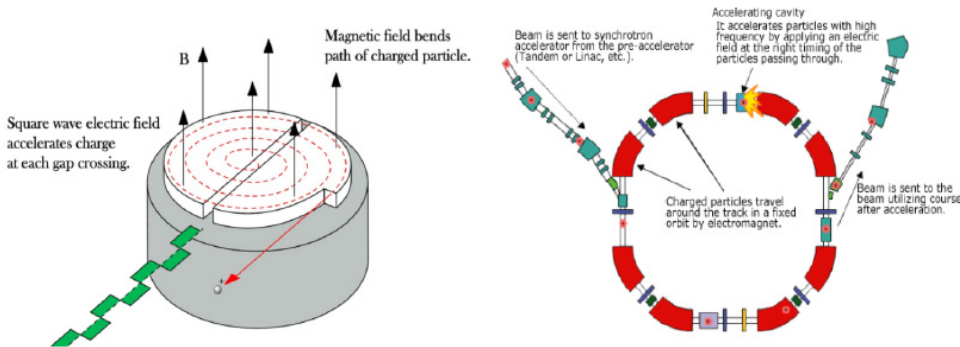
가속관을 지나면서 점차 에너지를 얻는 방식이며, 원형가속기는 입자가 원형의 궤적을 돌면서 에너지를 얻는 방식이다. 원형가속기는 구동원리에 따라 사이클로트론(Cyclotron)과 싱크로트론(Synchrotron)으로 구분한다. 사이클로트론은 두 반원판(전자석) 사이의 간극을 지나가며 하전입자를 가속 및 원운동을 하게하여 가속시키는 장치이다. 싱크로트론은 사이클로트론처럼 입자가 원형 궤도를 돌지만 자기장을 걸어주는 자석과 가속 전기장을 인가하는 고주파가속관이 공간적으로 분리되어, 입자의 에너지 증가에 따라 자기장의 세기를 증가시켜 일정한 궤도 반경을 유지하면서 반복 가속시키는 방식이다.

[가속기 형태에 따른 유형]

구분	주요 내용
선형가속기 (Linear Accelerator)	입자가 직선형으로 된 가속관을 지나면서 점차 에너지를 얻는 형태로 에너지가 커질수록 가속관의 길이가 길어지며, 입자 통제에 유리
원형가속기 (Circular Accelerator)	입자가 원형의 궤적으로 돌면서 에너지를 얻는 형태로 에너지가 커질수록 지름 또는 자기장이 커져 선형에 비해 공간 운영 측면에서 효율적이지만 입자 통제가 어려움
사이클로트론 (Cyclotron)	두 반원판 전자석 사이의 간극을 지나가는 하전입자를 가속 및 원운동하게 하며 하나의 가속기로 반복해서 가속시킬 수 있는 장치. 양성자, 중이온 가속기에 적합하며 최대가속 에너지에 한계가 있음
싱크로트론 (Synchrotron)	입자가 원형궤도를 돌며 가속 전기장을 반복적으로 통과하면서 얻는 에너지에 따라 궤도에 설치된 자석의 자기장 세기를 증가시키면서 반복 가속함. 전자, 양성자, 중이온가속기에 가능하며 최대가속에너지가 높음.

자료: 윤수진·함선영·이상경. “입자가속기술”, 「KISTEP 기술동향브리프」, 2019

[사이클로트론(좌)과 싱크로트론(우) 구조와 구동원리]



자료: 한국과학기술기획평가원, 「다목적 방사광가속기 구축사업 예비타당성 조사 보고서」, 2021.6.

대형가속기는 일반적으로 입자가속기의 가속입자의 종류와 활용목적에 따라 분류한다. 전자를 가속시켜 발생하는 방사광¹⁰⁾을 얻어내는 방사광가속기, 양성자를 가속시켜 충돌할 때 나오는 입자를 관찰하는 양성자가속기, 헬륨보다 큰 원자를 이온화하여 가속시키는 중이온가속기, 입자 빔¹¹⁾을 이용한 암치료 목적의 중입자가속기 등이 있다.

[대형가속기의 가속입자 및 활용 목적 비교]

구분	방사광가속기	양성자가속기	중이온가속기	중입자가속기
가속입자	전자	양성자	중이온(안정원소, 희귀동위원소)	중이온(안정원소)
활용목적	물질의 구조 분석 및 현상관측	물질변화, 중성자 생산	희귀동위원소 생성 및 활용연구	암치료 및 치료기술 연구

자료: 중이온가속기건설구축사업단

입자가속기로 전자, 양성자, 중이온 등을 빛의 속도에 가깝게 가속시키면서, 더욱 정교하고 미세한 조정을 하려면 대규모의 에너지가 필요하기때문에, 입자가속기는 점점 대규모 연구시설로 확장되어 왔다. 과거 로렌스가 개발한 첫 번째 사이클로트론 가속기 모델의 크기가 10cm에 불과했지만, 대표적인 입자가속기인 유럽연합의 ‘거대강입자가속기(LHC)’¹²⁾는 빔 터널의 길이만 27km에 달한다.

국내외 구축·운영되고 있는 입자가속기는 수 천억원에서 수 조원 이상의 예산이 투자되는 대표적인 대형연구시설이다. 과학기술정보통신부는 국내 입자가속기 중 대규모 재정이 투입된 시설을 ‘대형가속기’로 구분하여 관리하고 있다. 대형가속기는 공식적인 용어는 아니지만 일상에서도 볼 수 있는 입자가속기 기술과 구별하고 첨단연구장치, 연구설비, 지원시설 등이 결합된 대표적인 ‘대형연구시설(Large Research Facilities)’로서의 개념을 담기 위한 것이다.

10) 방사광(synchrotron radiation)은 빛에 속도에 가깝게 가속된 전자가 강력한 자기장을 지나며 휘어질 때 방출되는 빛이다.

11) 빔(beam)이란 입자들이 흐트러지지 않고 나아가는 입자 이온들의 흐름이다. 원자를 이온화한다는 것은 원자에서 전자가 빠지거나 또는 들어온 상태를 말한다.

12) 대형 강입자 충돌기(大型強粒子衝突器, 영어: Large Hadron Collider, 줄여서 LHC)는 유럽 입자 물리 연구소(Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire)에서 세운 입자 가속 및 충돌기로, 스위스 제네바 근방에 위치하고 있다.

국내 대형가속기는 방사광가속기 3기, 양성자가속기 1기, 중이온가속기 1기, 중입자가속기 1기 등 총 6기가 구축·운영 중이다.

방사광가속기는 전자를 가속하여 발생하는 방사광을 이용하여 물질의 구조분석 및 미세 가공 등에 활용된다. 포항공대에 1994년 3세대 방사광가속기, 2015년에 4세대 선형 방사광가속기가 완공되어 운영중에 있다. 다목적방사광가속기는 충북 청주에 2027년까지 구축하여 2028년부터 운영할 계획이다.

양성자가속기는 2012년 경주에 구축되어 2013년부터 원자력연구원이 운영하고 있다. 양성자가속기는 가속한 양성자를 물질에 조사함으로써 물질을 변화시키거나 의료 산업용 동위원소 생산 등의 연구에 활용하고 있다.

중이온가속기는 기초과학연구원이 대전에 구축하고 있으며, 2022년까지 1단계 사업을 완료할 계획이고, 2022년부터 선행R&D를 수행할 계획이다. 중이온가속기는 중이온을 표적에 충돌시켜 희귀동위원소 발견 등의 기초연구에 활용될 예정이다.

중입자가속기는 서울대학교병원이 부산에 구축하고 있으며 2024년까지 완공하여, 향후 중입자 빔을 이용한 암 치료와 연구에 활용될 예정이다.

[국내 대형가속기 구축·운영 현황]

구분		형태	구축기간 (성능향상)	총투자비 (성능향상)	운영주체	지역	비고
방사광 가속기	3세대	원형	1991~1994 (2009~2011)	1,500억원 (1,000억원)	포항가속기연구소 (포스텍 위탁)	포항	운영중
	4세대	선형	2011~2015	4,298억원		포항	운영중
	다목적	원형	2021~2027	1조 454억원	한국기초과학 지원연구원	청주	구축중
양성자가속기		선형	2002~2012	3,143억원	한국원자력연구원	경주	운영중
중이온가속기		선형	1단계: 2011~2022	1조 5,183억원	기초과학연구원	대전	구축중
중입자가속기		원형	2010~2024	2,565.1억원	서울대학교병원	부산	구축중

자료: 과학기술정보통신부

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/1>

가. 방사광가속기 구축사업

(1) 사업개요

방사광가속기는 전자를 가속하여 고해상도·고에너지의 빛(X-선 레이저 등)을 발생시켜 원자·분자 단위의 구조와 움직임을 관찰하는 장치로 생명, 재료, 화학, 물리, 환경 등의 다양한 분야의 연구에 활용되고 있다.

1994년 국내에 최초로 3세대 방사광가속기가 포항공과대학교에 건설되었으며, 2015년에 4세대 선형 방사광가속기가 구축되었다. 현재 다목적방사광가속기 1기가 충청북도 청주(오창)에 2027년까지 구축될 계획이다.

3세대 방사광가속기 구축 사업은 1989년에 개발계획을 수립하여 1991년에 착공하였다. 1994년에 방사광가속기가 준공되고 1995년부터 방사광가속기 이용실험이 개시되었다. 이후 2009년부터 2011년까지 3세대 방사광가속기 성능향상 사업이 추진되었고 2012년에 시설 이용이 재개되었다. 2017년 방사광가속기 시설이 국유화된 이후 포항공대가 주관기관으로 선정되어 위탁운영을 맡고 있다.

[3세대 방사광가속기 추진경위]

- '89.12 : 산업정책심의회에 방사광가속기 개발계획(안) 보고
- '90. 4 : 과기처 훈령에 의거 가속기개발위원회 구성 (훈령 제291호)
- '91. 4 : 방사광가속기 건설공사 착공
- '93.12 : 방사광가속기 운영형태 및 정부지원 의결 (제6차 가속기개발위원회)
- '94.12 : 방사광가속기 준공
- '94.12 : 방사광가속기공동이용연구사업지원규정 제정 (과기처 훈령 제 399호)
- '95. 9 : 방사광가속기 이용실험 개시
- '96.12 : 방사광가속기 운영기금 200억원 확보 (POSCO 출연)
- '09. 1 : 3세대 방사광가속기 성능향상 사업 추진 ('09~'11, 3개년)
- '12. 3 : 3세대 방사광가속기 성능향상 완료, 이용자지원 재개
- '17. 9 : 포항 방사광가속기 국유화 (3·4세대 방사광가속기)
- '17.12 : 국유재산 관리위탁 및 주관연구기관 선정 (포항공대)
- '21. 1 : 빔라인 36기 운영 중

자료: 과학기술정보통신부

3세대 방사광가속기 구축과 성능향상에 정부 출연금 1,596억원, POSCO에서 904억원을 투자하였다. 시설 대지면적은 126,800㎡, 건물면적은 18개동에 45,358㎡이며 선형가속기 1기와 빔라인 36기가 운영되고 있다.

[3세대 방사광가속기 구축 사업 개요]

구분	내용		
사업기간/ 총사업비	- 구축: 1988~1994년 / 1,500억원(출연) - 성능향상: 2009~2011년 / 1,000억원(출연)		
사업비 구성			
	구분	사업비(억원)	비율
	정부	1,596	63.8%
	POSCO	904	36.2%
시설규모	- 대지/건물: 126,800m2(약 3.8만평) / 18개동 45,358m2(1.3만평) - 주요장치: 선형가속기(170m), 저장링(둘레 281.8m), 빔라인(36기)		
운영기관	포항공과대학교 포항가속기연구소		

자료: 과학기술정보통신부

4세대 선형 방사광가속기는 2009년에 사업계획을 수립하고, 2010년 예비타당성 조사를 거쳐 2011년 기본계획을 마련하였다. 이후 2011년 착공하여 2015년 4세대 선형 방사광가속기 건설을 완료하고, 2017년부터 본격적인 장비 이용 지원이 이루어졌다.

[4세대 선형 방사광가속기 추진경위]

· '07. 5 : 대통령, 4세대 선형 방사광가속기구축사업 예산지원 이행 지시 · '07. 8~'11 : 4세대 선형 방사광가속기 구축을 위한 사전타당성조사 실시 · '08. 2~'09.7 : 4세대 선형 방사광가속기 구축 사업기획 수행 · '09. 6 : 4세대 선형 방사광가속기 구축 사업추진계획(안) 수립 · '09.12~'10.8 : 예비타당성조사 실시(기재부, KDI) : 타당성 인정 · '11. 3 : 4세대 선형 방사광가속기 구축사업 기본계획안 확정 · '15.12 : 4세대 선형 방사광가속기 준공 · '16. 6 : 4세대 선형 방사광가속기 X-선 자유전자레이저 발생 성공 · '17. 6 : 이용자 실험 지원 시작 · '21. 1 : 빔라인 3기(실험장치 7기) 이용자지원 중

자료: 과학기술정보통신부

4세대 선형 방사광가속기 구축에는 정부 출연금 4,038억원, 지자체 260억원 등 총 4,298억원이 투자되었다. 시설 규모는 대지면적이 120,620㎡, 건물면적이 9개동에 36,868㎡이며, 1,030m에 이르는 가속장치와 실험장치 7기 등이 운영되고 있다.

[4세대 선형 방사광가속기 구축 사업 개요]

구분	내용		
사업기간 / 총사업비	• 2011~2015년 / 4,298억원(출연)		
총사업비 및 사업비 구성			
	구분	사업비	비율
	정부	4,038	94.0%
	지자체	260	6.0%
사업규모 및 내용	• 대지 / 건물: 120,620m2(3.6만평) / 9개동 36,868m2(1.1만평) • 주요장치: 가속장치(1,030m), 빔라인(3기-경엑스선, 연엑스선), 실험장치(7기)		
운영기관	포항공과대학교 포항가속기연구소		

자료: 과학기술정보통신부

[3세대 및 4세대 선형 방사광가속기 전경]



자료: 포스코 ICT 홈페이지(<https://smartfuture-poscoict.co.kr/333>)

다목적 방사광가속기 구축사업은 기존 방사광가속기의 성능 한계를 극복하고, 산업체 우선 지원 빔라인을 30% 이상 구축하려는 사업이다. 다목적 방사광가속기 구축 사업의 목적은 세계 최고 수준의 다목적 방사광가속기를 구축하여 산업지원 역량 강화 및 선도적 기초·원천연구 지원, 사회적 현안·국가안보 이슈에 대한 신속한 대응기술 지원을 위한 것이다¹³⁾.

다목적 방사광가속기는 2011년 국가 대형연구시설 구축지도에 우선 투자대상으로 계획되어 있었다. 이후 2019년 소재·부품·장비 연구개발 투자전략 및 혁신대책에 산업계지원을 위한 다목적 방사광가속기 구축이 포함되면서 신규 사업 추진이 결정되었다. 2021년 예비타당성 조사를 완료하고, 과학기술정보통신부 ‘다목적 방사광가속기 구축 사업’¹⁴⁾으로 추진되고 있다. 2021년 과학기술정보통신부는 주관기관으로 한국기초과학지원연구원을 선정하고, 사업단 구성 등 본격적인 사업 착수를 진행하고 있으며, 2027년 상반기 구축 사업 완료를 목표로 하고 있다.

[다목적 방사광가속기 추진경위]

- '11 : 국가 대형연구시설 구축지도(차세대 다목적 3.5GeV방사광가속기 포함)
- '19.8 : 소재·부품·장비 연구개발 투자전략 및 혁신대책(관계부처 합동),
- 산업계 지원을 위한 다목적 방사광가속기 등 연구시설 추가 구축 검토
- '21. 6 : 예비타당성 조사 완료
- '21. 7 : 주관기관(한국기초과학지원연구원) 선정
- '21. 9 : 사업단장 선정 및 사업단 구성

자료: 과학기술정보통신부

다목적 방사광가속기 구축 총 사업비는 1조 454억원으로 가속장치 3,460억원, 빔라인 구축 1,305억원, 기반시설 구축 3,689억원, 부지/전력인입선로 2,000억원 등이다. 정부 재정은 가속장치, 빔라인, 기반시설 구축에 8,454억원이 투자되며, 지방비는 부지/전력인입선로 구축 등에 2,000억원이 투자된다. 시설 규모는 건축연면적 약 69,400㎡에 방사광가속기 1기와 빔라인 10기를 구축할 계획이다.

13) 한국과학기술기획평가원, 「다목적 방사광가속기 구축사업 예비타당성 조사 보고서」, 2021.6.

14) 코드: 국가균형발전특별회계 1235-301

[다목적 방사광가속기 구축 개요]

구분	내용		
사업기간/ 총사업비	구축: 2021~2027년 / 10,454억원(출연)		
사업비 구성	구분	사업비	비율
	정부	8,454억원	80.9%
	지자체	2,000억원	19.1%
시설규모	- 대지: 건축연면적 약 69,400㎡ - 장치: 선형가속기, 부스터링, 저장링(800m), 빔라인(40기, '27년 10기)		
주관기관	한국기초과학지원연구원		

자료: 과학기술정보통신부

[다목적 방사광가속기 예산 투입 계획]

(단위: 억원)

구분		'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	합계
국비	가속장치	80	454	450	586	1,300	400	190	3,460
	빔라인	4	38	240	383	400	160	80	1,305
	기반시설	31	123	380	1,431	800	800	124	3,689
	소계	115	615	1,070	2,400	2,500	1,360	394	8,454
지방비	부지·전력인입선로	1,000	1,000	-	-	-	-	-	2,000
합계		1,115	1,615	1,070	2,400	2,500	1,360	394	10,454

자료: 과학기술정보통신부

[다목적 방사광가속기 조감도]



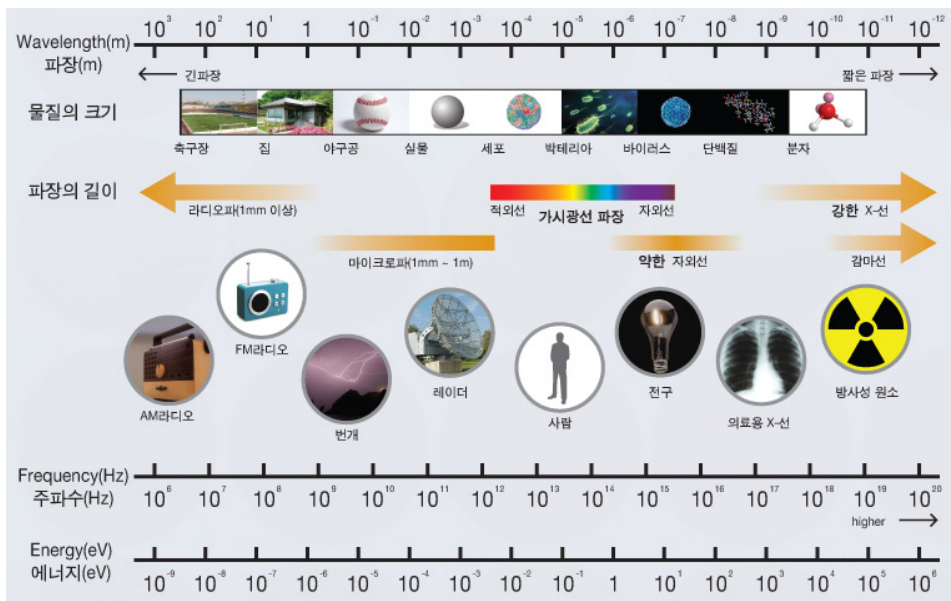
자료: 한국기초과학지원연구원

(2) 기술개요¹⁵⁾

기존의 광원보다 수 백만배에서 수 억배에 이르는 강력한 빛을 인공적으로 만들어낸 것이 방사광(synchrotron radiation)이다. 방사광은 적외선부터 우리가 눈으로 볼 수 있는 가시광선은 물론 자외선, 경 X-선에 이르기까지 광범위한 파장의 백색광이다¹⁶⁾.

방사광가속기는 광범위한 파장 영역의 빛을 인공적으로 만들어 내는 장치이자, 방사광을 활용하는 실험장치들이 집적되어 있는 대형연구시설이다. 3세대 방사광가속기에서 나오는 방사광 파장의 영역은 $10^{-7} \sim 10^{-10}$ m으로, 고체의 원자구조, 분자 및 중요한 생물학적 구조를 탐구할 수 있다.

[전자기파 스펙트럼]



자료: 포항가속기연구소

- 15) 포항가속기연구소 홈페이지의 시설 소개 내용을 정리하였다.
(<https://pal.postech.ac.kr/Menu.pal?method=menuView&pageMode=pal&top=1&sub=3&sub2=2&sub3=24>)
- 16) 예를 들면 병원에서 사용하는 X-선은 가시광선으로는 투과할 수 없는 피부나 근육을 투과하여 뼈의 형상을 얻을 수 있다. 특히, 차세대 방사광 X-선은 뛰는 심장을 찍을 수 있다. 심장의 운동과 근육의 미세한 진동을 동영상으로 촬영할 수 있을 뿐더러 해상도는 1,000분의1 μm (마이크로미터) 단위로 초음파보다 1,000배나 뛰어나다.

방사광을 발생시키는 싱크로트론 가속장치는 1947년 미국의 General Electric에서 처음 제작했다. 싱크로트론 가속장치는 고에너지로 입자빔을 가속시키는 것이 본래 목적이었다. 초기에 입자빔을 가속할 때마다 발생하는 방사광은 입자의 에너지를 자꾸 낮추는 장애요인이었지만, 1960년대부터 방사광은 기존 X선의 단점을 극복한 유용한 성질의 빛으로 인식되었다. 이후 연구자들은 방사광가속기의 전자빔 에너지(Energy)와 에미턴스(Emittance)¹⁷⁾, 방사광의 밝기(휘도)(Brilliance)¹⁸⁾ 및 결맞음(Coherence)¹⁹⁾ 등의 성능을 개선시켜 왔다.

방사광가속기는 방사광의 특징과 방사광 발생장치의 진화에 따라 1세대에서 4세대까지 분류한다.

1세대 방사광가속기는 입자의 충돌 실험을 위해 구축한 가속기로 부가적으로 발생한 방사광을 여러 연구에 활용했다. 방사광의 활용 가능성이 알려지면서 1980년대에 방사광 발생과 사용을 주목적으로 만들어진 방사광가속기가 2세대이다. 2세대는 방사광 발생을 위해 전자빔 경로를 한번 바꾸는 휨자석(Bending-magnet)을 사용하였다.

3세대는 1990년 후반 들어서며 휨자석 대신 삽입장치²⁰⁾를 이용하여 방사광을 만드는 가속기를 말하는데, 전자빔을 더욱 정교하게 컨트롤할 수 있게 되었다. 4세대 선형 방사광가속기는 이전 보다 10배 이상 초과하는 방사광을 발생한다²¹⁾. 3세대 방사광가속기는 전자빔의 경로를 휘어지게 하기 위해 2~3개의 휨자석을 사용하지만, 4세대 원형방사광가속기는 더 많은 휨자석을 배치하여 휘도 및 결맞음을 약 100배까지 개선한 것이다. 이를 통해 나노크기 시료까지 관측이 가능하여 고효율 신물질 개발 연구 등에 활용이 가능해졌다.

17) 전자빔의 에미턴스(Emittance)는 전자빔의 위상공간(공간적·운동적) 퍼짐 정도를 나타내는 수치로 주로 길이단위(m, Meter)와 각도단위(rad, Radian)의 곱으로(mrad) 나타내며, 수치가 작을수록 고품질의 방사광을 만들 수 있다.

18) 방사광의 휘도(Brilliance)는 방사광의 밝기를 나타내는 값으로 number of photons/second/meter²/rad²/0.1%BW로 나타낼 수 있다.

19) 결맞음(Coherence) 정도는 주어진 파장에서 광자빔의 간섭성 정도를 나타내며 방사광의 파장(λ)과 에미턴스(ϵ)의 비율로 표현되고 전자빔의 에미턴스가 작을수록 광자빔의 결맞음이 좋아진다.

20) 위글러(Wiggler) 혹은 언듈레이터(Undulator)라고 하며 주기적으로 배열된 자석 구조물로 전자빔이 자석배열을 통과하면서 전자빔의 경로가 여러 번 바뀌에 따라 방사광이 많이 발생하여 휨자석보다 강한 빛을 생성할 수 있다.

21) 함선영, “방사광가속기”, 「기술동향브리프」 2020-07호, 한국과학기술기획평가원, 2020.

[1~4세대 방사광가속기 특징 및 사양]

구분	특징	전자빔 에미턴스 (nm·rad)	휘도	결맞음 정도 (@2keV)
1세대 (1960년~)	방사광 발생 및 활용이 아닌 입자물리 연구를 위해 구축한 가속기에서 부가적으로 발생하는 방사광을 각종 연구에 활용	-	-	-
2세대 (1980년대)	방사광 발생 및 사용을 주목적으로 구축되고 방사광 발생을 위해 휨자석(Bending-magnet) 을 활용하는 방사광가속기	~100	~10 ¹⁵	~0.00001
3세대 (1990년대 후반)	방사광 발생을 위해 휨자석 대신 삽입장치를 이용하여 방사광을 만드는 방사광가속기	~10	~10 ²²	~0.001
4세대 (2000년~)	이전 세대 광원의 주요 파라미터 수치 보다 10 배 이상 초과하는 방사광을 발생하며 원형 혹 은 선형 형태의 방사광가속기	~0.1	~10 ²⁴	~0.1

주1: 휘도 단위: number of photons / s / mm² / mrad² / 0.1%b.w.

주2: 4세대는 4세대 원형 방사광가속기(4GSR) 사양 기준

자료: KISTEP

3세대 방사광가속기(PLS-II)의 주요 장치는 선형가속기(linear accelerator), 저장링(SR: storage ring), 빔라인 등으로 구성된다.

[포항방사광가속기(3세대 방사광가속기) 시설 구성도]



자료: 포항가속기연구소

방사광을 만들기 위해서는 우선 전자를 가속시켜야하는데 선형가속기가 이 역할을 한다. 선형가속기의 전자총에서 전자를 발생시키고 고주파 발생장치를 이용하여 직선 가속관을 통해 전자를 빛의 속도로 가속한다. 가속된 전자는 100m 가량의 전송관(BTL: beam transfer line)과 입사장치(injection system)를 통해 저장링에 입사된다. 저장링은 둘레가 281m인 원형에 가까운 전자 통로이다. 저장링에는 휨전자석이 있는데, 저장링에 입사된 전자가 저장링의 진공파이프 내에서 휨전자석의 자장을 지나면서 15도씩 방향을 바꾸어 원형에 가까운 궤도를 돌게 한다²²⁾. 빔라인은 저장링을 돌고 있는 전자들로부터 발생된 방사광을 실험 목적에 맞도록 방사광의 성질을 조절하여 실험 장치까지 전달해주는 관이다. 빔라인은 사용하는 에너지영역에 따라 크게는 진공자외선, X-선 빔라인으로 나눌 수 있다.

[방사광가속기 주요 구성요소]

구분	주요 내용
전자총 및 선형가속기 (Linear Accelerator)	전자총에서 입사된 전자덩치(bunch)를 가속 후 부스터링에 입사하는 장치의 집합
부스터링 (Booster Ring)	선형가속기에서 전달된 전자덩치를 가속하여 저장링에 입사하는 장치의 집합
저장링 (Storage Ring)	전자 광학계와 삽입장치를 포함하는 가속된 전자덩치를 저장, 이용하기 위한 장치의 집합
MBA (Multi Bend Achromat)	피코미터급 원형 싱크로트론 광원 구성에 핵심적인 전자 광학계의 집합
삽입장치 (Insertion Device)	산업지원 및 기초과학 실험에서 필요로 하는 다양한 X-선을 필요에 따라 발생시켜 빔라인에 공급하는 장치
빔라인 (Beam Line)	삽입장치로부터 발생된 빛을 실험조건에 맞게 실험 장치로 전달하는 광학계의 집합
실험장치 (End-stations)	빔라인으로부터 공급된 빛을 활용하여 실험을 수행하는 장치의 집합, 시료 전달장치, 시료 환경장치 및 측정, 분석장비 등의 집합
이용자 공간 (User Space)	빔라인 광학계 및 실험장치를 작동하여 실험을 수행하고 데이터를 취합, 분석하는 이용자 공간

자료: 한국과학기술기획평가원, 「다목적 방사광가속기 구축사업 예비타당성 조사 보고서」, 2021.6.

22) 저장링에는 휨전자석 이외에도 4극, 6극 전자석과 궤도수정 전자석이 들어 있으며, 저장링을 돌 때 마다 잃어 버리는 에너지를 보충하기 위한 고주파 공동장치가 설치되어 있다.

포항가속기연구소에 설치된 4세대 선형 방사광가속기는 자유전자레이저(XFEL, X-ray Free Electron Laser) 방식으로 가속된 10GeV²³⁾ 에너지의 전자빔이 100m 길이의 삽입장치(언듈레이터)를 통과하면서 전자가 발생시키는 자발적 전자빔이 다시 전자빔과 상호작용을 하는 방사광 증폭과정(SASE; Self-Amplified Spontaneous Emission)으로 방사광을 발생시킨다. 언듈레이터의 개수가 많아질수록 더 파장이 짧고 밝은 빛이 나오게 된다. 그래서 4세대 선형 방사광가속기는 수 km (포항 4세대 선형 방사광가속기는 1.1km)에 이르는 거대한 직선의 레이저 발생장치로 구성된다.

다목적 방사광가속기는 3세대 방사광가속기와 유사하지만 에미턴스를 피코미터 단위로 줄여 기존 가속기의 한계를 극복한다는 차이가 있다²⁴⁾.

[3세대와 4세대 방사광가속기 비교]

구분	저장링(SR) 방식		선형가속기(LINAC) 방식
	3세대 원형 방사광가속기 (Synchrotron Light Source)	4세대 원형 방사광가속기 (4GSR/4th Gen. Storage Ring)	4세대 선형 방사광가속기 / X-선 자유전자레이저 (XFEL/X-ray Free Electron Laser)
형태	원형		선형
빛의 밝기	태양빛의 100억배	3세대의 100배~1,000배	3세대의 1억배
시간 분해능	이론상 최대 10피코(10^{-12})초 보통은 마이크로(10^{-6})~나노(10^{-9})초		펨토(10^{-15})초
공간 분해능	빔라인 실험자에게 제공되는 빔의 공간분해능은 집속거울 등 광학계에 의해 결정, 보통 20~200nm 수준		수nm 이하의 공간분해능

주: 1. SR(Storage Ring): 원형 저장링에서 넓은 영역의 방사광을 인출하여 실험에 활용

2. LINAC(LINear ACcelerator): 선형가속기와 긴 삽입장치를 통해 방사광 인출

자료: 포항가속기연구소 제출자료

23) 전자볼트(electronvolt, 기호 eV)는 에너지의 단위로 주로 입자 물리학 또는 핵물리학에서 사용한다. 밀리-, 킬로-, 메가-, 기가 -, 테라-, 페타-(meV, keV, MeV, GeV, TeV, PeV) 의 형태로 쓰인다. GeV는 기가 전자볼트 ($=10^9$ eV)를 나타낸다.

24) 한국과학기술기획평가원, 「다목적 방사광가속기 구축사업 예비타당성 조사 보고서」, 2021.6.

(3) 해외현황

방사광가속기는 전 세계적으로 총 53기가 운영 또는 구축 중에 있으며, 국가 첨단 연구인프라로서 방사광가속기의 활용을 확대하고 산학연 클러스터²⁵⁾로의 조성도 지원하고 있다. 또한, 스웨덴, 브라질 등은 차세대 방사광가속기 구축을 완료하였고, 일본, 중국 등은 차세대 방사광가속기를 신규 구축하고 있으며, 미국, 일본, 영국 등은 3세대 시설의 성능향상으로 기술 경쟁력을 확보하고 있다.

[국가별 대형 방사광가속기 운영·구축 현황]

구분		국가별 방사광가속기 대수(1GeV 이상)
3세대 원형	운영(35)	미국(6), 일본(6), 독일(4), 중국(2), 대만(2), 캐나다(1), 브라질(1), EU(1), 프랑스(1), 이탈리아(1), 스페인(1), 스위스(1), 영국(1), 러시아(1), 태국(1), 한국(1), 호주(1), 인도(1), 요르단(1), 폴란드(1)
	구축 중(2)	아르메니아(1), 이란(1)
4세대 원형	운영(3)	스웨덴(1), 브라질(1), 유럽연합(1)
	구축 중(7)	일본(1), 중국(1), 스위스(1), 미국(2), 러시아(1), 한국(1)
4세대 선형	운영(5)	한국(1), 미국(1), 일본(1), 독일(1), 스위스(1)
	구축 중(1)	중국(1)

자료: 한국과학기술기획평가원, 「다목적 방사광가속기 구축사업 예비타당성 조사 보고서」, 2021.6., 박성희 교수(고려대학교) 제공 자료 등을 바탕으로 재작성

미국은 2022년부터 APS-U(The Advanced Photon Source-Upgrade) 프로젝트를 시작한다. 동 프로젝트는 기존의 저장링을 최첨단 기술로 업그레이드하여, 기존 광원에 비해 50배 더 밝은 X-ray빔을 제작하는 것이다. 미국 에너지국(DOE, Department of Energy)은 BES(Basic energy science), NP(Nuclear physics), HEP(High energy physics) 프로그램을 통해 가속기 관련 R&D사업을 지원하고 있다. 그 중 BES 프로그램은 방사광가속기의 운영과 주요시설 개선을 지원하고 있다.

스웨덴은 MAX-IV가 2016년도에 시운전되면서 MBA격자(Muti-bend achromat lattice) 운전을 실현하였고, 유럽연합(ESRF-EBS)²⁶⁾, 독일(PETRA-IV)²⁷⁾ 등

25) (대만) 신추 과학공원, (일본) 효고현 야부시 광과학기술특구, (스웨덴) 스칸디나비아과학마을, (프랑스) 그르노블 Giant 프로젝트 등

26) ESRF-EBS는 대형 물체, 금속 재료, 비정질 재료, 약물 설계 분야에 중점적으로 적용가능한 빔라인을 구축하는 것이다.

에서 3세대 원형 방사광가속기의 성능 개선을 통한 4세대 원형 방사광가속기 구축을 추진하고 있다. 유럽연합경쟁력이사회는 ESFRI(The European strategy forum on research infrastructures)를 통해 유럽 연구기반 시설의 로드맵을 수립하였는데, 방사광가속기 ESRF-EBS, European XFEL이 랜드마크로 포함되어 있다.

일본은 과학기술·학술 정책의 종합적 추진(2016)에 따라 SPring-8, SACLA, J-PARC 등 거대장비에 대한 산·학·관의 공동 이용촉진을 권고하고 있다. 그리고 일본의 문부과학성은 ‘민관 지역파트너십에 의한 차세대 방사광’, ‘최첨단 대형연구시설 정비 및 공유 촉진’ 등의 프로그램을 통해 방사광가속기 구축·운영을 지원하고 있다. 일본은 기존 3세대 원형 방사광가속기인 SPring-8를 4세대 원형 방사광가속기인 SPring-8II로 향상시키는 프로젝트를 추진 중이다.

중국은 「중국제조 2025 전략」에 따라 6 GeV 4세대 원형 방사광가속기 HEPS(The High Energy Photon Source)를 신규로 구축할 예정이다. HEPS는 2017년 12월 국가개혁위원회의 공식 승인을 받았고, 2025년에 베이징에 완공될 예정이다. 총 14개 빔라인과 엔드스테이션이 구축되며 총 90개 빔라인을 수용할 수 있도록 건설할 계획이다.

[차세대 방사광가속기 주요 추진현황]

구분	가속기명(연구소)	에너지	길이	가동시기
스웨덴	MAX-IV	3GeV	528m	2016
EU	ESRF-EBS	6GeV	884m	2020
브라질	SIRIUS(LNLS)	3GeV	518.4m	2020
일본	SPring-8 II	6GeV	1,435m	2025
스위스	SLS-2(PSI)	2.4GeV	290.4m	2024
미국	APS-U(ANL)	6GeV	1,104m	2026
미국	ALS-U(LBNL)	2GeV	287m	2028
중국	HEPS	6GeV	1,360.4m	2026
한국	다목적 방사광가속기	4GeV	800m	2027
러시아	SKIF(BINP)	3GeV	476m	2024
아르메니아	CANDLE	3GeV	269m	계획중
이란	ILSF(IPM)	3GeV	528m	계획중

자료: 한국과학기술기획평가원, 「다목적 방사광가속기 구축사업 예비타당성 조사 보고서」, 2021.6., 박성희 교수(고려대학교) 제공 자료 등을 바탕으로 재작성

- 27) PETRA-IV는 방사광의 밝기 100배 이상 향상, 해상도 5~100배 향상으로 원자 스케일 분석 및 전 기화학 촉매의 다양한 실시간 분석 가능

나. 양성자가속기 구축 사업

(1) 사업개요

한국원자력연구원의 양성자가속기는 ‘21세기 프론티어 연구개발사업’²⁸⁾의 내역사업인 ‘양성자기반공학기술개발사업’²⁹⁾을 통해 구축되었다. 2003년 사업유치기관 공모를 거쳐 2006년 경주시 건천읍 일대로 사업부지가 확정되었다. 2009년 공사가 착공되어 2012년 완공까지 총사업비 3,143억 원을 투입하였고, 2013년 양성자가속기 빔서비스 지원이 시작되었다.

[양성자가속기 구축 추진경위]

- '02. 1. 양성자기반공학기술개발사업 공모(과학기술부)
- '02. 6. 양성자기반공학기술개발사업단장 임명
- '02. 7. 양성자기반공학기술개발사업 본협약 체결
- '03. 1. 양성자가속기 사업유치기관 공모
- '03. 4. 국무회의 의결에 따라 사업유치기관 선정 유보(원전수거물 관리시설과 연계)
- '06. 1. 양성자가속기 유치기관 경주시로 확정
- '09. 5. 양성자가속기 부지확보 및 공사 착수
- '10. 4. 양성자가속기 100MeV가속장치 제작 및 기초시험 완료
- '12. 10. 부대시설 건설공사 완료
- '12. 12. 양성자기반공학기술개발사업 종료
- '13. 1. 양성자가속기연구센터 운영 착수
- '13. 7. 양성자가속기 빔서비스 착수
- '19. 5. 운영기관 명칭 변경: 양성자가속기연구센터→양성자과학연구단

자료: 한국원자력연구원 양성자과학연구단

28) 21세기 프론티어 사업은 2010년까지 전략기술분야에서 선진권 진입을 목표로 국가경쟁력을 획기적으로 향상시켜 선진경제를 실현하고 선진국 수준의 삶의 질을 구현하는 한편, 기술혁신의 성과를 사회기반 전 분야로 확산하는 것을 목표로 기초·원천연구에서 응용사업화까지 전 주기 연구개발을 지원하는 프로그램이다. 총 사업기간은 2000년부터 2013년까지, 총 사업비는 1조 8,038억원이 투자되었다.(자료: 한국과학기술기획평가원, 「대형연구개발사업 성과활용실태 결과분석 및 시사점」, 2015.8.)

29) 양성자기반공학기술개발사업은 선형 양성자가속장치를 개발하고 양성자 빔이용기술과 장치응용기술 확보(100MeV, 20mA 선형 양성자가속장치 개발, 양성자 빔이용기술과 장치응용기술의 확보, 개발 기술의 산업적 활용과 관련 벤처기업 창출기반 조성)을 위한 사업이다. (자료: 과학기술부, 「2002년도 21세기 프론티어연구개발사업 안내서」, 2002.1.)

양성자가속기 시설 규모는 대지 440,400㎡에 양성자가속기 1기와 빔라인 6기를 구축하여 운영하고 있다. 양성자가속기는 한국원자력연구원 양성자과학연구단에서 운영하고 있다.

[양성자가속기 구축사업 개요]

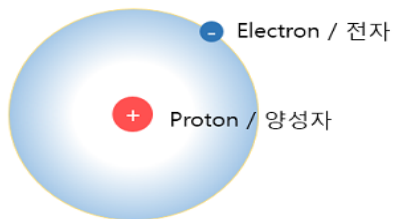
구분	내용		
사업기간 / 총사업비	구축: 2002~2012년 / 3,143억원		
사업비 구성	구분	사업비(백만원)	비율(%)
	국고	183,612	58.4
	지자체	118,200	37.6
	민간	12,526	4.0
	합계	314,338	100.0
시설규모	- 대지: 약 440,000㎡, 건축물: 9개동 - 장치: 100 MeV 양성자가속기, 총 6개의 빔라인(20 MeV 1개, 100 MeV 5개)		
운영기관	한국원자력연구원 (양성자과학연구단(경주))		

자료: 과학기술정보통신부

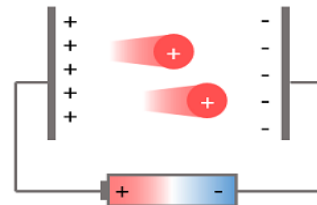
(2) 기술개요

수소원자에 고전압을 걸어서 전자를 제거하면 원자핵만 남게 되며, 이 수소원자핵 혹은 수소원자의 양이온을 양성자(Proton, H⁺)라고 한다. 양성자가속기는 전기장을 이용하여 양성자를 빛의 속도 가까이 가속시켜 주는 장치이다. 양성자는 양의 전하를 띠고 있어 가속관 내에서 전기장을 걸어주면 음극 방향으로 이동하면서 속도가 높아진다.

[양성자 개념 및 가속 원리]



Hydrogen Atom / 수소원자



Proton Acceleration / 양성자가속

자료: 김유종·문명국·이재상, “경주 양성자가속기 운영 현황과 업그레이드 계획”, 『물리학과 첨단기술』30권 5호, 한국물리학회, 20216.2.

양성자가속기는 가속한 양성자가 물질에 부딪힐 때 물질의 성질을 변화시키거나 새로운 물질을 생성하며, 반도체, 자동차, 부품소재, 신약, 의료, 유전자 조작 등 다양한 첨단분야에 활용하고 있다³⁰⁾.

경주의 양성자가속기는 20 MeV 기초연구용(범용) 빔라인(TR23)과 100 MeV 기초연구용(범용) 빔라인(TR103), 100 MeV 저선량(반도체 특성 연구용) 빔라인(TR102)을 운영하고 연구자에게 입자빔(양성자, 이온, 의료용 동위원소 등)이용 연구를 지원하고 있다³¹⁾.

[양성자가속기 빔라인 운영 개요]

에너지	빔라인	활용분야
20MeV	TR23	재료, 핵물리, 반도체 등
100MeV	TR102	우주/자연방사선효과(전자부품/생체 등), 방사선 검출기 등
	TR103	생명공학, 재료, 핵물리, 반도체 등

자료: 양성자과학연구단

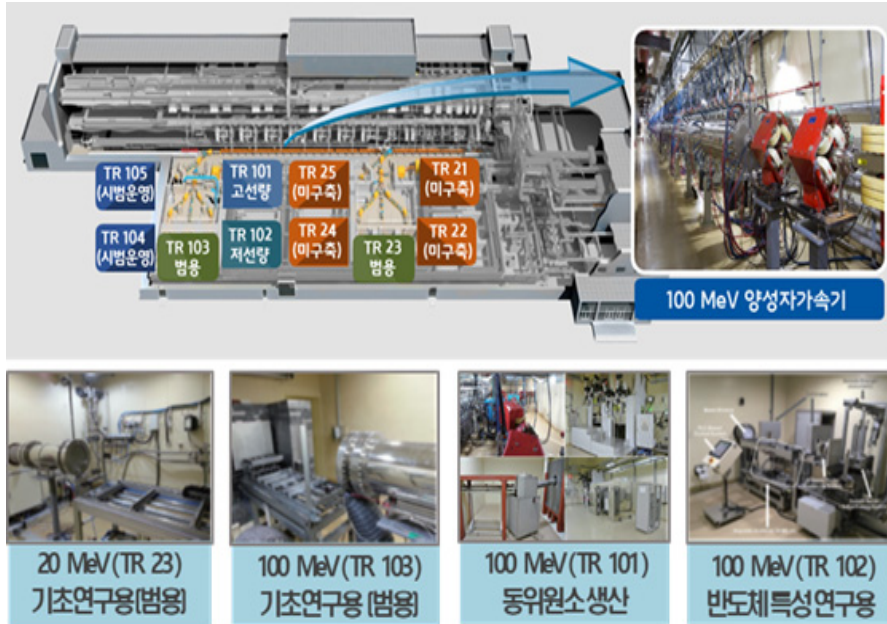
경주 100 MeV 양성자가속기는 양성자빔을 만들어 내는 이온원인 IS (Ion Source), LEBT (Low Energy Beam Transport), RFQ(Radio Frequency Quadrupole), 20 MeV DTL (Drift Tube Linac), MEBT (Medium Energy Beam Transport), 100 MeV DTL 등의 여러 장치가 있다.

이와 함께 양성자빔 궤도를 따라 빔진단을 위한 빔전류 측정용 CT(Current Transformer), 빔위치 측정용 BPM(Beam Position Monitor), 빔손실 측정용 BLM(Beam Loss Monitor), 빔전하량 측정용 Faraday Cup, 빔궤도를 조정하기 위한 Steerer Magnet, 빔의 집속용 QM(Quadrupole Magnet), 빔의 진행 방향을 휘게 하는 BM(Bending Magnet) 등이 설치되어 있다.

30) 김유중·문명국·이재상, “경주 양성자가속기 운영 현황과 업그레이드 계획”, 「물리학과 첨단기술」 30 권 5호, 한국물리학회, 2021.6.2.

31) 경주 양성자가속기는 총 10기의 빔라인(20 MeV 5기, 100 MeV 5기)을 구축하도록 설계하였고, 2021년 12월 말 기준 6기의 빔라인(20 MeV 1기, 100 MeV 5)을 구축 완료하였으며, 이중 3기의 빔라인(20 MeV 1기, 100 MeV 2기)만 운영 중이다.

[양성자가속기 구성도]



자료: 양성자과학연구원

[양성자가속기 주요 장치]

구분	주요 내용
이온원(IS)	양성자가속기에 입자를 생성하여 공급하는 양성자원으로 중성 수소기체에 전기에너지를 가하여 방전을 일으키고 이를 통해 생성된 수소 플라스마에서 양성자만을 인출하여 LEBT에 공급
LEBT	이온발생장치에서 가속장치로 빔을 전송하는 장치
RFQ	LEBT에서 입사한 50 keV 양성자빔을 고주파(RF)를 사용하여 빔을 3 MeV까지 가속시키는 장치
DTL	양성자빔을 20 MeV에서 100 MeV로 가속시키기 위한 장치
빔라인	총 10기의 빔라인(20 MeV 5기, 100 MeV 5기)으로 설계하였으며, 2021년 12월 말 기준 6기의 빔라인(20 MeV 1기, 100 MeV 5기)을 구축하였으며, 현재는 20 MeV 1기(TR23)와 100 MeV 2기(TR102, TR103)를 운영하고 외부 이용자 서비스를 제공 중
표적실	양성자가속장치에서 인출된 20 MeV, 100 MeV의 양성자빔을 이용자의 시료에 알맞게 공급하기 위한 시설

자료: 양성자과학연구원

(3) 해외 양성자가속기 현황

현재 해외에서 운영하고 있거나 구축 중인 500 MeV 이상 고에너지 양성자가속기는 중성자원으로 활용을 위해 구축·운영 중이다. 주요국의 양성자가속기 시설은 스위스 Swiss Spallation Neutron Source(SINQ), 영국 ISIS Neutron and Muon Source, 미국 LANSCE(Los Alamos Neutron Science Center)와 SNS(Spallation Neutron Source), 일본 J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex), 중국의 CSNS(China Spallation Neutron Source)가 있다.

미국 오크리지국립연구소(ORNL)³²⁾에서 운영하는 SNS의 경우 양성자가속기 성능 향상과 두 번째 중성자 발생용 표적 및 이용시설 구축을 위한 SNS-STIS를 기획 중이고, 로스앨러모스국립연구소(LANL)³³⁾에서 운영하는 LANSCE에서도 기존에 운영하고 있는 중성자과학시설인 WNR(The Weapons Neutron Research Facility) 등에 더해 추가로 양성자가속기 성능향상과 MW급 중성자원 구축 계획을 발표했다. 중국 고에너지물리연구소(IHEP)³⁴⁾에서 운영하는 CSNS는 1단계 구축을 마치고 운영 중이며 동시에 2단계 구축을 추진 중이다. 영국 러더포드애플턴연구소(RAL)³⁵⁾에서 운영하는 ISIS의 경우 기존 양성자가속기와 중성자 발생용 표적집합체의 성능향상 계획을 갖고 있다. 한편 유럽 다국적 컨소시엄으로 구축 진행 중인 ESS(European Spallation Source) 연구센터가 건립되고 있다³⁶⁾.

32) 오크리지 국립연구소(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)는 미국 에너지부 (Department of Energy) 산하의 국립연구소 중 최대 규모의 과학/에너지 연구소이다.

33) 로스앨러모스 국립 연구소(Los Alamos National Laboratory)는 미국 에너지부 (Department of Energy) 산하의 국립연구소로 우주, 재생에너지, 의학, 나노, 슈퍼컴퓨터 등의 연구를 수행한다.

34) 중국 과학원 고에너지 물리학 연구소(Institute of High Energy Physics)

35) 러더포드애플턴연구소(Rutherford Appleton Laboratory)는 1957년 설립된 응용 기초 과학 연구소로 영국 과학기술 시설이사회(Science and Technology Facilities Council) 소속

36) ESS는 파쇄 중성자 생성을 위한 대형 가속기로 총 17개국(스웨덴, 덴마크, 노르웨이, 라트비아, 에스토니아, 아이슬란드, 폴란드, 독일, 프랑스, 네덜란드, 영국, 헝가리, 체코 공화국, 스위스, 스페인, 이태리)이 스위스 제네바의 CERN과 같은 협력 사업으로 추진하는 연구시설임

[세계 양성자가속기 사양 비교]

구분	SINQ	ISIS	LANSCe	SNS	J-PARC (JSNS)	CSNS	ESS	KOMAC
국가	스위스	영국	미국	미국	일본	중국	유럽	한국
연구소	PSI	RAL	LANL	ORNL	JAEA KEK	IHEP	ERIC	KAERI
최종에너지 (GeV)	0.59	0.8	0.8	1.0(1.3)	3	1.6	2.0	0.1
평균빔전류 (mA)	1.8	0.23	1	1.4(2.2)	0.333	0.0625 (0.3125)	2.5	0.1~1.6
평균빔파워 (MW)	1	0.184	0.8	1.4(2.8)	1	0.1(0.5)	5	0.160
입사형선형 가속기에너지 (MeV)	·	70	·	·	181~400	80 (250)	·	·
최종가속기타입	원형 Cyclotron	원형 Synchrotron	선형	선형	원형 RCS	원형 RCS	선형	선형
원형가속기둘레 (m)		163			348.333	227.92		
원형가속기 전자석상태세기		0.7			1.23	1		
파쇄중성자원 구축여부	○	○	○	○	○	○	○	×
열중성자 Flux (n/cm ² /sec)	1014	> 1016	> 1015	> 1017	> 1017	> 1016	> 1018	
완공 연도	1978	1985	1972 (1997)	2006 (2025)	2008	2016 (미정)	2025	2012

자료: 과학기술정보통신부 제출자료

다. 중이온가속기 구축 사업

(1) 사업개요

중이온가속기 구축사업은 희귀동위원소 생성 및 특성 연구를 위한 중이온가속기(RAON)³⁷⁾를 구축하는 것이다. 중이온가속기 구축 사업은 2009년 국제과학비즈니스벨트 종합계획에서 벨트 내 대형기초과학연구시설로서 기초연구의 경쟁력을 강화하고 가속기 활용 우수연구자 양성을 목적으로 추진되었다.

국제과학비즈니스벨트는 창조적 연구환경 조성을 통해 세계적 두뇌가 모이고, 기초과학과 비즈니스가 융합된 국가성장네트워크를 말한다. 국제과학비즈니스벨트 종합계획은 세계적 수준의 기초과학 연구거점 구축 등의 목표 아래 5대 추진과제를 제시하였는데, 기초과학연구원 설립, 중이온가속기 설치, 비즈니스기반 구축, 기초과학 거점 조성 등이다.

[국제과학비즈니스벨트 종합계획 개요]

구분	주요 내용
비전	기초과학의 획기적인 진흥을 통한 신성장 동력 창출 및 세계 일류국가 창조
목표	• 세계적 수준의 기초과학 연구거점 구축 • 과학과 비즈니스의 융합을 통한 미래신산업 창출 • 저탄소 녹색성장 성공모델 구현
추진 과제	• 세계적 수준의 기초과학연구원 설립 운영 • 대형연구시설로서 중이온가속기 설치 • 지속성장 도시조성을 위한 비즈니스기반 구축 • 과학과 문화예술이 융합된 국제적 도시환경 조성 • 기초과학 거점 조성 및 지역연구거점과의 네트워크화

자료: 국가과학기술위원회, 「국제과학비즈니스벨트 종합계획(안)」, 2009.1.13.

국제과학비즈니스벨트 종합계획 수립 이후 2012년에 중이온가속기구축사업 기본계획이 확정되었지만, 기획재정부 사업계획 적정성 검토 등에 따라 총 4차례 기본계획이 변경되었고, 2022년까지 1단계 사업이 진행된다.

37) '라온'(RAON; Rare Isotope Accelerator complex for ON-line experiments) 중이온가속기의 별칭으로 '즐거움'과 '기쁨'의 순 우리말이다.

[중이온가속기 구축 추진경위]

- 국제과학비즈니스벨트 종합계획 확정(국과위)(‘09.1)
※ 과학벨트 내 대형연구시설로서 중이온가속기 설치 결정
- 중이온가속기 구축계획 수립 연구(‘09.3~’10.6), 개념설계 보고서 발행(‘11.2)
- 중이온가속기구축사업 기본계획 심의, 확정(‘12.1)
※ 기간 : ’11~’17년, 총사업비 : 4,604억원(건설, 부지매입비 미포함)
- 중이온가속기구축사업 기본계획 1차 변경(‘13.9)
※ 기간 : ’11~’19년, 총사업비: 4,604억원(건설, 부지매입비 미포함)
- 국제과학비즈니스벨트사업 사업계획 적정성 검토(기재부, KDI)(‘14.1)
- 중이온가속기구축사업 기본계획 2차 변경(‘15.4)
※ 기간 : ’11~’21년, 총사업비: 장치 4,602억원, 건설 6,243억원, 부지매입비 3,600억원
- 중이온가속기구축사업 「사업점검 TF」 결과 도출(‘17.12)
※ 총사업비: 14,314억원(장치구축 5,028억원, 시설건설 5,650억원, 부지매입비 3,600억원)
- 중이온가속기구축사업 사업추진 방향(안) : 국제과학비즈니스벨트위원회 의결(‘18.2), 시설-장치 사업비 조정(안), 사업계획 적정성 검토 추진 등
- 사업점검 TF결과반영 시설건설 재설계 완료(‘18.6)에 따른 기재부 총사업비 협의조정(‘18.8)
- 중이온가속기구축사업 사업계획 적정성 재검토 완료(기재부, ’19.4)
- 중이온가속기구축사업 기본계획 3차 변경(‘19.5)
※ 기간 : ’11~’21년, 총사업비 : 장치 5,028억원, 건설 6,276억원, 부지매입비 3,571억원
- 중이온가속기구축사업 사업추진 방향(안) : 국제과학비즈니스벨트위원회 의결(‘21.4),
- 사업계획 변경(1단계/선행 R&D/2단계 구분), 핵심장치 구축 전략 변경, 사업관리 개선 등
- 중이온가속기구축사업 기본계획 4차 변경(‘21.5)
※ 사업비 조정(장치구축비 200억 증 등), 단계별 구축, 사업기간 변경(‘11~’21→~’24이후)
- 중이온가속기 시설건립공사 완공(‘21.5)
- 중이온가속기구축사업 추진일정 변경(‘21.12)
- 저에너지가속장치 설치완료(‘21.12)

자료: 과학기술정보통신부

중이온가속기 구축 사업은 2022년 1단계까지 1조 5,183억원이 투자되었다. 장치구축 5,228억원, 시설건설 6,384억원, 부지매입 3,571억원이다. 대전시 유성구 신동지구 일대에 부지면적은 952,066㎡(연면적 116,252㎡)이며, 중이온 빔을 제공하는 가속장치, 기반장치, RI 생성장치, 실험장치 등을 구축한다.

[중이온가속기 구축 사업 개요]

구분	내용												
세부사업명	국제과학비즈니스벨트조성(중이온가속기 시설 건설, 중이온가속기 장치구축)												
사업기간/ 총사업비	1단계: '11~'22년 / 1조 5,183억원 (장치구축: 5,228억원, 시설건설 6,384억원, 부지매입 3,571억원) - 선행R&D : '22~'25년 / 전체 예산규모 기재부 협의 예정('22년 42억) 2단계: 착수 시점부터 4년 / 전체 예산규모 기재부 협의 예정 (사업추진 적정성 재검토 후 최종 확정)												
총사업비 및 사업비 구성 (1단계)	<table><tr><th>구분</th><th>사업비</th><th>비율</th></tr><tr><td>장치구축</td><td>5,228</td><td>34.4%</td></tr><tr><td>시설건설</td><td>6,384</td><td>42.1%</td></tr><tr><td>부지매입</td><td>3,571</td><td>23.5%</td></tr></table>	구분	사업비	비율	장치구축	5,228	34.4%	시설건설	6,384	42.1%	부지매입	3,571	23.5%
구분	사업비	비율											
장치구축	5,228	34.4%											
시설건설	6,384	42.1%											
부지매입	3,571	23.5%											
위치 (사업규모)	대전시 유성구 신동지구(부지면적 952,066㎡, 연면적 116,252㎡)												
사업내용	- 장치구축사업: 고에너지(200MeV/u), 대전류(400kW급) 중이온 빔을 제공하는 가속장치, 기반장치, RI생성장치, 실험장치 등의 개발 및 설치 - 시설건설사업: 중이온가속기의 안정적인 가동과 쾌적한 연구환경 조성을 위한 연구·지원시설 건설												
사업시행주체	(주관기관) 기초과학연구원(중이온가속기건설구축사업단)												

자료: 과학기술정보통신부

중이온가속기 구축 사업은 국제과학비즈니스벨트조성³⁸⁾ 세부사업 내 내역사업으로 편성하여 추진하였다. 중이온가속기 운영사업은 기초과학연구원 연구운영비 지원(R&D)³⁹⁾의 기관고유사업에 내역사업으로 편성하였다. 중이온가속기 운영사업은 2021년 5월 중이온가속기 시설이 준공되고, 가속장치·실험장치도 순차적으로 설치·구축됨에 따라 가속기 시설 및 장치의 운전, 운영을 위한 관리·유지비를 편성한 것이다.

2021년 중이온가속기 시설건설 예산은 52억원, 중이온가속기 장치구축 사업은 797억원이었으며 1단계 사업이 마무리되는 2022년도 투입 예산은 없다. 2022년도 신규 사업으로 선행R&D사업에 42억원을 편성하였다. 중이온가속기 운영사업은 2021년 100억원, 2022년에는 165억원을 편성하였다.

38) 코드: 일반회계 1640-300

39) 코드: 일반회계 2231-414

[중이온가속기 구축 관련 사업 예산 현황]

(단위: 백만원, %)

사업명	2020 결산	2021		2022 예산(B)	증감	
		본예산	추경(A)		B-A	(B-A)/A
국제과학비즈니스벨트조성	313,727	182,477	182,477	40,769	△141,708	△77.7
- 중이온가속기 시설건설	203,151	5,206	5,206	-	사업종료	-
- 중이온가속기 장치건설	98,720	79,662	79,662	-	사업종료	-
- 중이온가속기 선행R&D	-	-	-	4,206	4,206	신규
기초과학연구원 연구운영비 지원	214,521	249,281	249,281	271,323	22,042	8.8
- 기관고유사업비 (중이온가속기 운영사업)	2,516	10,000	10,000	16,470	6,470	64.7

자료: 과학기술정보통신부

중이온가속기 선행R&D 사업은 2022년부터 2025년까지 총 4년간 추진예정이며 고에너지가속장치 구축을 위한 시제품 및 초도양산품 소요기술 확보와 기술검증을 목적으로 한다.

[중이온가속기 선행R&D개요]

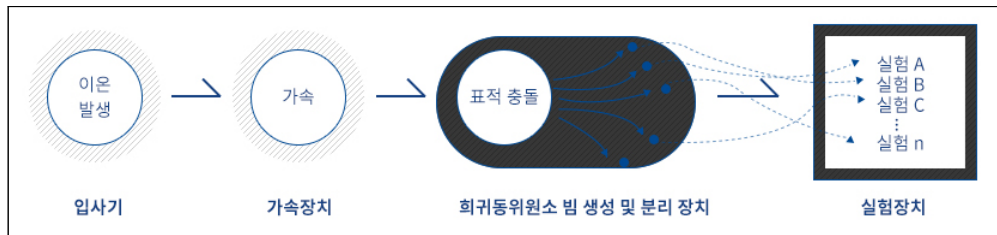
구분	내용
사업 목적	SCL2 가속관/가속모듈 양산 소요기술 확보 및 기술검증
사업 기간	2022~2025년 (총 4년)
사업 예산	전체 예산규모 기재부 협의 예정('22년 42억원)
사업 내용	- 초전도가속모듈 SCL21, SCL22의 초도양산품을 제작하고, 제작-후처리-성능시험 등에 관계되는 장비 및 시설 구축 (공정절차 확립) SCL21 & 22용으로 선정된 모델의 초도양산 가속모듈 제작을 통해 필요한 기술(공정, 절차 등) 확립 (R&D설비 확충) 선행 R&D 추진 중 SCL2 본제품 구축에 필요한 가속장치의 제작, 후처리 및 시험에 필요한 장비 증설

자료: 과학기술정보통신부

(2) 기술개요

일반적으로 중이온가속기는 수소와 헬륨보다 무거운 원소를 이온화하여 매우 빠르게 가속시킨 뒤, 표적 원자핵에 충돌시켜 현재까지 발견되지 않았거나 자연상태에서 존재하지 않는 다양한 희귀동위원소를 생성하는 장치이다⁴⁰⁾.

[중이온가속기 희귀동위원소 생성원리]



자료: 중이온가속기건설구축사업단

중이온가속기는 크게 가속장치, 희귀동위원소(RI, Rare Isotope) 생성장치, 실험장치, 기반장치 등으로 구성되어 있다. 가속장치는 중이온 빔을 생성하여 가속하는 장치이다. 기반장치는 가속장치 구동의 필수적인 기반시설을 말한다. 희귀동위원소(RI) 생성장치는 가속된 중이온 빔을 표적에 충돌시켜 희귀동위원소를 생성하거나 분리하는 장치이다. 실험장치는 희귀동위원소 추출 등 다양한 연구를 수행하는 장치를 말한다.

[중이온가속기 주요 장치 개요]

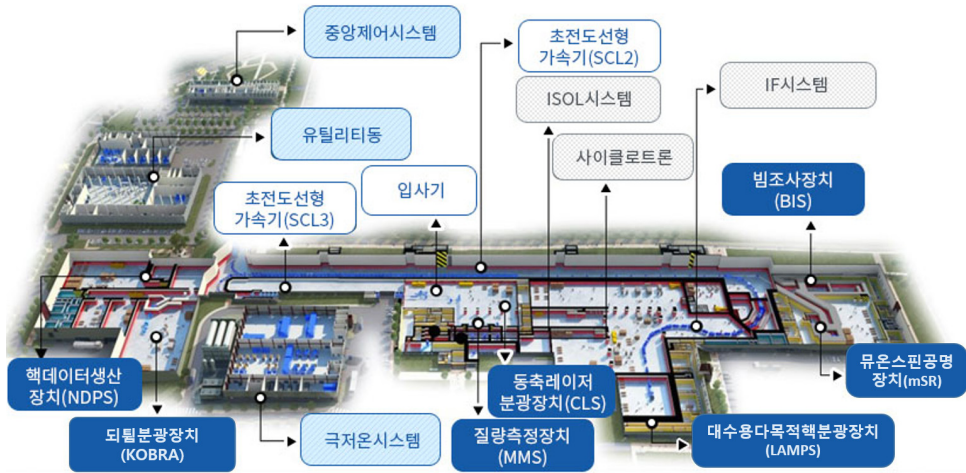
구분		주요 내용
중이온 가속기 (RAON)	가속장치	입사기, 초전도선형가속기(SCL3, SCL2), 굴절구역 등
	기반장치	제어시스템, 극저온시스템 등
	RI생성장치	ISOL시스템, IF시스템 등
	실험장치	핵과학 및 응용과학 실험장치(7개) 등

자료: 중이온가속기건설구축사업단

40)

중이온가속기건설구축사업단
(https://risp.ibs.re.kr/html/risp_kr/information/information_0302.html)

[중이온가속기 장치 구축 개요]



자료: 과학기술정보통신부

동 사업의 가속장치는 가벼운 이온인 양성자부터 무거운 이온(우라늄)까지 가속한다. 가속장치는 입사기로 불리는 이온원과 저에너지가속기, 초전도선형가속기로 구성된다. 입사기는 ECR이온원⁴¹⁾에서 생성된 중이온 빔을 저에너지가속기(RFQ; Radio-Frequency Quadrupole)⁴²⁾를 거쳐 초전도선형가속기(SCL; Super Conducting Linear accelerator)에 전달하고, 초전도선형가속기는 입사기로부터 전송된 중이온 빔을 최대 200MeV/u까지 가속시킨다.

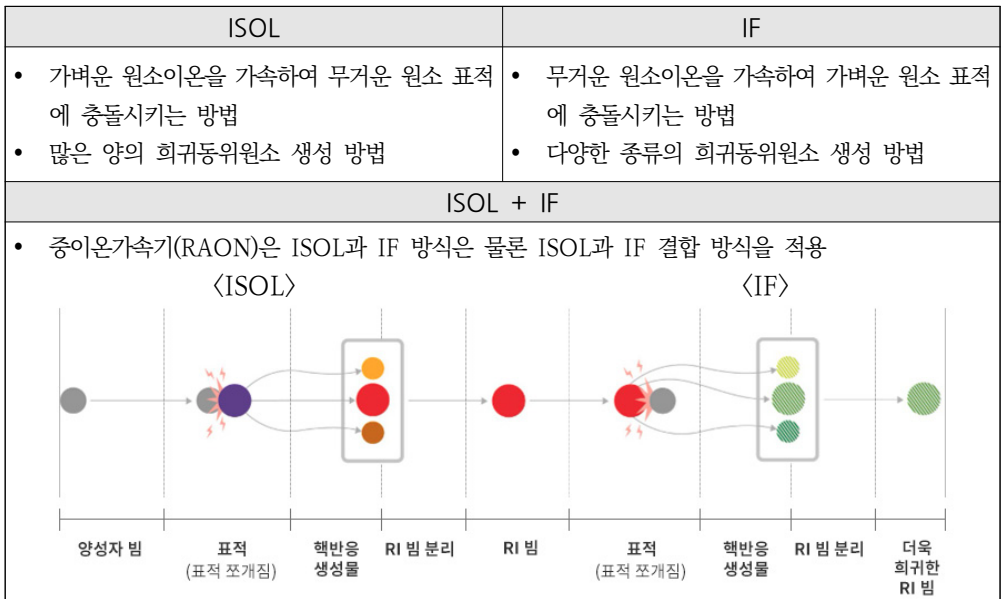
기반장치는 가속장치 구동에 필수적인 장치로 중앙제어시스템, 극저온시스템 등으로 구성되어 있다. 중앙제어시스템은 중이온가속기 주요 구성장치들의 동기화(Timing System) 및 시각 정보 제공, 장치들의 오류 감지와 보호(Machine Protection System)하며, 분산 시스템의 상호연결 역할 등을 수행한다. 극저온시스템은 극저온플랜트에서 생산된 액체 헬륨을 초전도선형가속기(SCL)의 저온유지모듈에 안정적으로 공급하여 초전도가속관이 초전도 상태를 유지할 수 있게 하는 역할을 수행한다.

41) 전자 사이클로트론 공명 이온원(Electron Cyclotron Resonance Ion Source)은 마이크로파의 특정 주파수와 자기장에서 전자의 공명현상에 따른 회전운동을 이용하여 고밀도 플라스마를 발생시킬 수 있는 이온원을 말한다.

42) 중이온가속기의 핵심장치 중 하나인 고주파사중극자(RFQ)는 선형가속장치로 고주파를 인가함으로써 이온빔을 흩어지지 않도록 모아주는 빔집속(focusing) 기능, 고주파 가속장치로 가속하기 위해 빔을 변형(bunching)하는 기능과 함께 이온빔의 에너지를 높이는 가속(acceleration) 기능이 동시에 가능한 장치이다. 일반적으로 선형가속기의 저에너지부에 설치하여 초기 가속장치로 널리 활용되고 있다.

희귀동위원소 생성방법은 ISOL(대전류 저에너지 동위원소 빔 생성방법- 표적 쪼개짐에 의한 희귀동위원소 생성)⁴³⁾과 IF(소전류 고에너지 동위원소 빔 생성방법-빔 쪼개짐에 의한 희귀동위원소 생성)⁴⁴⁾가 있다. 동 사업의 중이온가속기(RAON)는 2가지 희귀동위원소 생성방식(ISOL, IF)을 독립적으로 운영하거나 또는 동시에 결합하여 운영하는 방식이다.

[중이온가속기(RAON) 희귀동위원소 생성원리]



자료: 중이온가속기건설구축사업단

RI생성장치에서 생성된 희귀동위원소를 추출하여 다양한 활용연구를 수행하는 실험장치가 있다. 동 사업에는 질량측정장치(MMS; Mass Measurement System), 동축

43) ISOL(Isotope Separation On-Line): 가벼운 원소이온을 빠르게 가속하여, 무거운 원소로 된 표적에 충돌시켜 무거운 원소를 쪼갬 후 그 파편 중에서 새로운 희귀동위원소를 추출하는 방법이다. 이 방법으로는 많은 양의 희귀동위원소를 생성할 수 있으며, 희귀동위원소를 추출하는 과정이 여러 번 반복되어 최종 추출되는 희귀동위원소의 순도가 매우 높다.

44) IF(In-flight Fragmentation) 무거운 원소이온을 가속하여 가벼운 원소로 된 표적에 충돌시킨 후, 쪼개진 무거운 원소 이온빔의 파편 중 목표하는 희귀동위원소만을 추출하는 방법이다. 빔의 파편이 매우 다양하고 고속으로 날아가는 희귀동위원소들을 자석으로 빠르게 분리함으로써 짧은 수명의 다양한 희귀동위원소를 얻을 수 있다.

레이저분광장치(CLS; Collinear Laser Spectroscopy), 되튠분광장치(KOBRA; Korea Broad Acceptance Recoil Spectrometer and Apparatus), 핵데이터 생산장치(NDPS, Nuclear Data Production System), 대수용다목적스펙트로미터(LAMPS; Large-Acceptance Multipurpose Spectrometer), 뮤온스핀공명장치(mSR; Muon Spin Rotation/Relaxation/Resonance), 빔조사장치(BIS; Beam Irradiation System)가 있다.

[중이온가속기 주요 장치 개요]

구분		주요 내용
가속 장치	입사기	중이온을 생성시켜 초전도선형가속기에 전달하는 장치
	초전도선형가속기(SCL3)	입사기에서 전달된 중이온 및 RI빔을 18.5MeV/u(우라늄 기준) 까지 가속시키는 장치
	초전도선형가속기(SCL2)	18.5MeV/u 중이온 및 RI 빔을 200MeV/u(우라늄 기준)까지 가속시키는 장치
기반 장치	중앙제어시스템	중이온가속기 주요 구성장치들의 동기화 및 시각 정보를 제공하고, 수많은 장치들의 오류를 감지하고 보호하며, 분산 환경에서 운영되는 시스템들을 상호 연결해 주는 장치
	극저온시스템	극저온플랜트를 통해 생산된 헬륨을 초전도선형가속기(SCL3, 2)에 공급하여 극저온 환경을 유지시켜 주는 장치
RI 생성 장치	ISOL시스템	가벼운 이온(양성자 등)을 가속하여 무거운 표적원소(우라늄 등)에 충돌시켜 희귀동위원소를 생성시키는 방식의 시스템
	IF시스템	무거운 이온(우라늄 등)을 가속하여 가벼운 표적(탄소 등)에 충돌시켜 희귀동위원소를 생성시키는 방식의 시스템
실험 장치	질량측정장치(MMS)	초저에너지 영역(0.1MeV 이하) 구간에서 희귀동위소 에너지 및 비행시간 측정을 통해 원자핵의 질량 측정
	동축레이저분광장치(CLS)	초저에너지 영역(0.1MeV 이하) 구간에서 레이저분광학 기술을 이용하여 희귀동위원소 원자핵의 모양, 전하분포 등을 측정
	되튠분광장치(KOBRA)	저에너지 영역(~18.5MeV/u, 우라늄 기준) 구간에서 양성자 또는 중성자 과잉 희귀동위원소 생성 및 활용 연구
	핵데이터생산장치(NDPS)	저에너지 영역(~18.5MeV/u, 우라늄 기준) 구간에서 고속중성자를 이용한 중성자 기초핵반응 측정
	대수용다목적 핵분광장치(LAMPS)	고에너지 영역(18.5MeV/u ~ 200MeV/u, 우라늄 기준) 구간에서 희귀동위원소의 원자핵 대칭 에너지 및 중성자 과잉 핵반응 연구
	뮤온스핀 공명장치(mSR)	고에너지 영역(18.5MeV/u ~ 200MeV/u, 우라늄 기준) 구간에서 전자 기적 구조 및 특성연구, 극미량 원소 분석, 내부구조 영상화
	빔조사장치(BIS)	고에너지 영역(18.5MeV/u ~ 200MeV/u, 우라늄 기준) 구간에서 중이온 빔 및 희귀동위원소 빔 조사를 통한 이온빔 연구 등

자료: 중이온가속기건설구축사업단, KISTEP 자료 등을 바탕으로 재작성

(3) 해외현황

세계적으로 희귀동위원소를 생성하고 있는 대형 가속기는 2022년 기준 대략 5개가 존재하며, 2개가 신축 중인 것으로 조사되었다. 주로 캐나다, 프랑스, 유럽, 일본, 독일, 미국, 중국 등에 중이온 가속기가 구축운영 중에 있다. 희귀동위원소 발생을 위해 ISOL 또는 IF 방식을 활용하고 있으며, 다양한 분야를 대상으로 연구를 수행하고 있다⁴⁵⁾.

[해외 중이온 가속기 현황]

연구시설	가속에너지	가속출력	RI빔에너지	발생방식	연구분야	비고
RIKEN RIBF (일본)	350MeV/u (우라늄)	100kW	345MeV/u	IF	핵과학	운영중
TRIUMF ISAC II (캐나다)	500MeV/u (양성자)	50kW	6MeV/u	ISOL	핵, 물성	운영중
GSI FAIR (독일)	3.7GeV/u (중이온)	80kW	1.5GeV/u	IF	핵, 천체, 입자, 원자, 물성	~'25
GANL/ SPIRAL II (프랑스)	15MeV/u (중이온)	160kW	6GeV/u	ISOL	핵과학	운영중
CERN/ HE-ISOL DE (유럽)	1.4GeV/u (중이온)	2.8kW	10MeV/u	ISOL	핵, 천체, 입자, 원자, 물성	운영중
MSU/FRIB (미국)	200MeV/u	400kW	<150MeV/u (Sn-132)	IF	핵과학	~'22
IMP/HRFL (중국)	500MeV/u	1010pps	-	IF	핵과학	운영중

자료: 과학기술정보통신부KISTEP

45) 한국과학기술기획평가원, 「2018년도 사업계획 적정성 재검토 보고서 - 중이온가속기 장치구축사업」, 2019.6.

일본 RIKEN RIBF(Radioactive Isotope Beam Factory)는 중이온 사이클로트론을 이용하여 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소를 새로 발견하고 특성측정을 위한 목적으로 설립되어 운영 중이다.

캐나다 TRIUMF ISAC I(Isotope Separator and Accelerator-1)은 양성자 사이클로트론을 이용하여 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소의 질량을 측정하거나 중성자 달무리를 이루는 특별한 원자핵의 내부 구조 연구를 수행하고 있다.

독일 GSI FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research)는 중이온 선형가속기와 원형가속기인 싱크로트론을 이용하여 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소의 특성을 측정하고 있으며 원자핵을 이루고 있는 입자(양성자, 중성자)의 특성을 연구하고 있다.

[해외 주요 중이온가속기의 사양 및 활용분야]

연구시설	사양	활용 연구 분야
RIKEN RIBF (일본)	350MeV/u 100kW(우라늄), 〈345MeV/u(희귀동위원소)	• 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소를 새로 발견하고 특성을 측정(약 50종)
TRIUMF ISAC I (캐나다)	500MeV/u 50kW(양성자), 11MeV/u(희귀동위원소)	• 별의 내부에서 무거운 원소를 합성하는 과정을 규명하는 연구 • 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소의 질량을 측정 • 중성자 달무리를 이루는 특별한 원자핵의 내부 구조를 연구
GSI FAIR (독일)	1GeV/u 80kW(우라늄), 〈0.9GeV/u(희귀동위원소)	• 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소의 특성을 측정 • 원자핵을 이루고 있는 입자(양성자, 중성자)의 특성을 연구 • 별의 내부에서 무거운 원소를 합성하는 과정을 규명하는 연구

자료: 과학기술정보통신부KISTEP

라. 중입자가속기 구축 사업

(1) 사업개요

중입자가속기 구축 지원사업⁴⁶⁾은 중입자가속기 및 치료시스템을 도입하여 설치하고, 중입자치료센터를 구축하는 사업이다.

사업의 목적은 난치성 암 치료를 위한 중입자치료 기술연구와 기술 습득, 전문인력 양성 등이다. 사업 주관기관은 서울대학교병원이며, 총 사업기간은 2010년에 시작되어 2024년까지로 총 사업비는 2,596.1억원이 투입된다.

[중입자가속기 구축 사업 개요]

구분	내용		
세부사업명	중입자가속기 구축 지원 사업		
사업기간 / 총사업비	2010~2024년 / 2,596.1억원(출연)		
총사업비 및 사업비 구성	구분	사업비	비율
	(국비) 과학기술정보통신부	118,604	45.7%
	(지방비) 부산시·기장군	66,005	25.4%
	(주관기관) 서울대학교병원	75,000	28.9%
사업규모	430MeV/u 의료용 중입자가속기 구축 및 중입자치료센터 건립		
사업시행주체	(주관기관) 서울대학교병원		

자료: 과학기술정보통신부

중입자가속기 구축 사업은 2003년에 처음 사업 기획이 이루어졌지만, 2004년 한국원자력의학원 동남권 분원 사업계획에 중입자가속기 센터 구축을 포함하여 수립하고 예비타당성조사를 거치면서 사업이 구체화되었다. 2005년 의료용 중입자가속기 개발 타당성에 대한 정책연구 등을 거쳐, 2009년 예비타당성조사를 완료하면서, 2010년 중입자가속기 구축 사업이 본격적으로 착수되었다.

당초 중입자가속기 구축사업은 부산광역시 기장군 일대에 2010~2015년 간 총사업비 1,950억원을 투입하여 중입자치료센터와 중입자가속기 연구 시설 건설 등으로 계획되었다⁴⁷⁾. 한국원자력의학원은 중입자가속기(400MeV/u)를 국내 기관 컨소시엄을 통해 직접 개발하고 치료시스템은 해외기관과 공동연구를 통해 개발하겠다는 계획을 수

46) 코드: 국가균형발전회계 1442-403

47) 국비 700억원, 지자체(부산시·기장군) 500억원, 한국원자력의학원 750억원

립하였다. 그러나 한국원자력의학원이 중입자가속기 개발을 위한 공동연구기업 및 투자기업 유치에 실패하고 사업 분담금도 마련하지 못하면서 사업은 일시 중단되었다. 이에 당시 주관부처인 미래창조과학부(현 과학기술정보통신부)는 2017년 2월 주관기관 재공모를 통해 서울대학교병원으로의 사업 이관을 결정하였고, 2019년 3월 서울대학교병원 이사회 의결에 따라 주관기관 변경이 완료되었다.

[중입자가속기 구축 추진경위]

- '03. 02~09. 중입자가속기 사업제안 및 사전기획조사
- '04. 01~07. 한국원자력의학원 동남권 분원(중입자가속기 구축 포함) 예비타당성조사 실시
- '06. 09. 의료용 중입자가속기 개발 타당성에 대한 정책연구 수행
- '08. 11. 중입자가속기 개발 예비타당성조사 대상사업 신청
- '09. 11. 예비타당성조사 완료
- '10. 04. 중입자가속기사업단 구성 및 사업 착수
- '13. 11. 중입자치료센터 건설공사 착공
- '14. 05. 사업계획 변경(중입자가속기 기종변경: 사이클로트론→싱크로트론)
- '15. 06. 가속기 공동개발기술사업화 투자기업 공모
- '16. 05. 중입자치료센터 건설 / 투자기업 협정(MOU) 해지
- '16. 08. 적정성 재검토 착수(기재부, KISTEP)
- '17. 01. 중입자치료기 구축 참여병원 모집
- '17. 09. 의료용 중입자가속기 사업 서울대병원 참여 관계기관 MOU 체결
- '17. 10. 중입자가속기기술개발사업 사업계획 변경(제9차 운영위)
- '18. 09. 적정성 재검토 완료(기재부, KISTEP)
- '19. 03. 서울대병원 참여 확정(서울대 이사회)
- '19. 04. 사업계획 변경 최종 확정(제10차 운영위)
- '19. 05. 서울대병원 사업 착수
- '19. 09. 사업이관(의학원→서울대병원) 협의완료(~'19.8월), 자산등록 등 추진
- '19. 12. 장치사양, 마스터플랜 점검 및 조달방법 확정(제11차 운영위)
- '20. 01. 장치 국제입찰 공모 진행(1.22~3.2)
- '20. 08. 중입자가속기 구축계약 체결
- '20. 12. 중입자치료센터 설계용역 계약 체결
- '21. 05. EBI(Equipment-Building Interface)* 등 기본설계 완료
- *기 완공한 중입자치료센터와 향후 도입할 중입자가속기의 Interface 조정 논의
- '21. 08. 중간설계 완료('21. 07.)에 따른 조달청 적정성 검토 착수
- '21. 11. 조달청 중간설계 부문 적정성 검토 완료

자료: 과학기술정보통신부

중입자가속기 구축은 ‘중입자가속기 구축지원사업(R&D)’⁴⁸⁾으로 예산을 지원하고 있다. 2021년 중입자가속기 장치구축 국비 예산은 86.7억원이었으며, 방사선안전 및 사업관리 관련 예산은 16억원이었다. 중입자가속기 분할 장치대금 집행일정 등에 따라 2022년 중입자가속기 장치구축 국비 예산은 없다. 2022년도의 경우 방사선안전 및 사업관리 관련 예산만 20.3억원 편성되었다.

[중입자가속기 구축지원사업(R&D) 예결산 현황]

(단위: 백만원, %)

사업명	2020 결산	2021		2022 예산(B)	증감	
		본예산	추경(A)		B-A	(B-A)/A
중입자가속기 구축지원사업	19,230	10,266	10,266	2,030	△8,236	△80.2
- 중입자가속기 통합장치구축	17,530	8,666	8,666	0	△8,666	-
- 방사선안전 및 사업관리	1,700	1,600	1,600	2,030	430	26.9

자료: 과학기술정보통신부

(2) 기술개요

의료용 중입자가속기는 중입자(헬륨, 탄소, 질소, 우라늄 등 수소이온보다 무거운 이온)⁴⁹⁾를 빛의 속도 가까이 가속시키고, ‘브래그피크(Bragg peak)’⁵⁰⁾라는 물리적 특성을 이용하여 암을 치료하는 장치이다.

X-선이나 감마선은 정상세포에도 손상을 줄 수 있지만, 중입자선은 0.1mm까지 정밀하게 제어하여 암세포만을 조사하는 치료가 가능하기 때문에 기존 방사선 치료나 양성자가속기보다 부작용이 적고 암치료에 탁월하다고 알려져 있다⁵¹⁾.

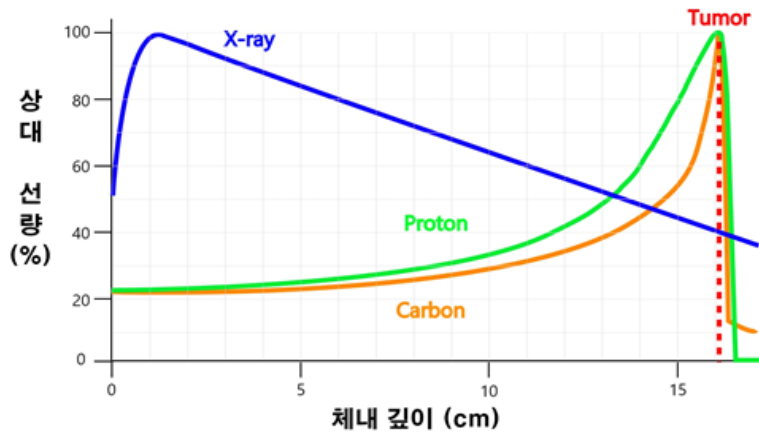
48) 코드: 국가균형발전특별회계 1442-403

49) 입자별 상대질량: 양성자(1), 헬륨(4), 탄소(12), 네온(20), 규소(28), 아르곤(38)

50) 브래그피크란 입자빔의 고유한 특성으로, 입자빔이 인체 내의 정상 조직을 투과하여 암 조직에 도달하는 순간 막대한 양의 방사선을 쏟아 부어 암 세포를 죽이고, 그 이후로는 방사선량이 급격히 사라지는 것을 말한다.

51) 한국과학기술기획평가원, 「중입자가속기 구축지원사업 사업계획 적정성 재검토 보고서」, 2018.11.

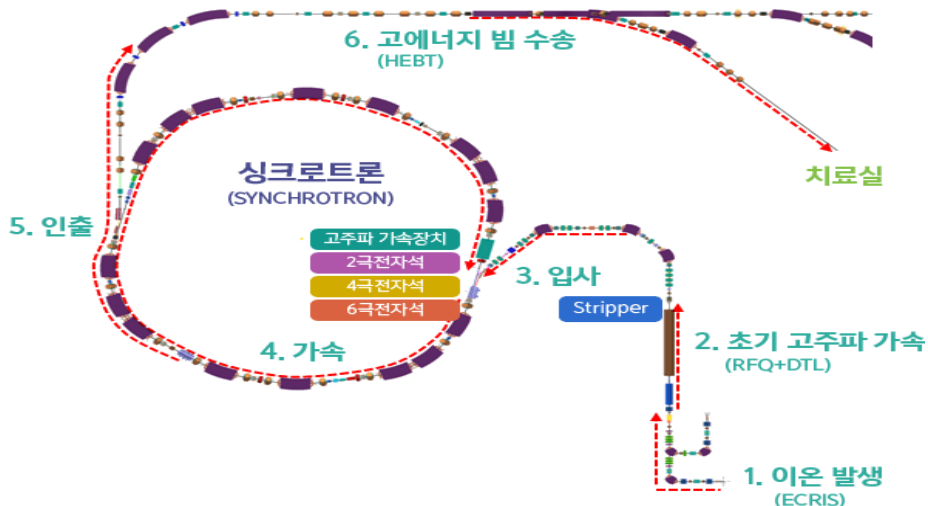
[입자별 상대적인 방사선량(브레그피크)]



자료: 서울대병원(<https://dept.snuh.org/dept/HICP/content.do?menuId=002004>)

의료용 중입자가속기의 구성은 크게 이온발생장치, 저에너지 전송시스템, 선형가속기, 중에너지전송시스템, 싱크로트론, 고에너지 전송시스템, 환자 조사장치(회전 갠트리) 등으로 구성된다⁵²⁾.

[의료용 중입자가속기 구성도]



자료: 한국원자력학회(<https://www.kirams.re.kr/khima/baryon/baryonIntroduce.do>)

52) 한국과학기술기획평가원, 「중입자가속기 구축지원사업 사업계획 적정성 재검토 보고서」, 2018.11.

이온발생장치(ECRIS)⁵³⁾는 플라즈마 가스 상태에서 고주파를 이용해 이온 빔을 발생시켜 인출하는 장치이다. 저에너지 전송시스템(LEBT)은 이온발생장치에서 선형가속기(LINAC)로 빔을 전송하는 장치이다. 선형가속기(LINAC)는 이온발생장치에서 싱크로트론(Synchrotron)으로 빔을 전송하고, 중에너지 전송시스템(MEBT)은 선형가속기에서 싱크로트론으로 빔을 전송하는 장치이다. 싱크로트론(Synchrotron)은 선형가속기에서 인출된 빔을 가속하는 주 장치이다. 고에너지 전송시스템(HEBT)은 싱크로트론에서 인출된 고에너지 이온 빔을 치료실로 전송한다. 회전갠트리는 다양한 각도에서 암조각을 정밀 조준하여 빔을 조사하는 장치이다.

[중입자가속기 주요 장치]

구분	주요 내용
이온발생장치 (ECRIS, Electron Cyclotron Resonance Ion Source)	플라즈마 가스상태에서 고주파를 이용해 이온 빔을 발생시켜 인출하는 장치
저에너지 전송시스템 (LEBT, Low Energy Beam Transport)	이온발생장치에서 선형가속기로 빔을 전송하는 장치
선형가속장치 (LINAC, Linear Accelerator)	이온발생장치에서 싱크로트론으로 빔을 전송하는 장치
중에너지 전송시스템 (MEBT, Medium Energy Beam Transport)	선형가속장치에서 원형가속장치로 빔을 전송하는 장치
싱크로트론(Synchrotron)	선형가속장치에서 인출된 빔을 가속하는 주 가속기로 빔을 입사시키는 입사장치, 중입자 빔을 저장하는 전자석 시스템, 저장된 빔을 가속하는 고주파 공진장치, 가속된 빔을 고에너지 빔라인으로 인출하는 인출장치 등으로 구성
고에너지 전송시스템 (HEBT, High Energy Beam Transport)	싱크로트론에서 인출된 고에너지 이온 빔을 치료실로 전송하는 장치
회전 갠트리 (Rotating Gantry)	치료시 치료대와 그 둘레를 360도 회전하면서 암조각을 조준하여 빔을 조사하는 장치

자료: 과학기술정보통신부

53) 이온발생장치(ECRIS)는 플라즈마 장치, 전자석 장치, 고주파 시스템, 빔 인출시스템, 질량분석 전자석장치 등으로 구성되어 있다.

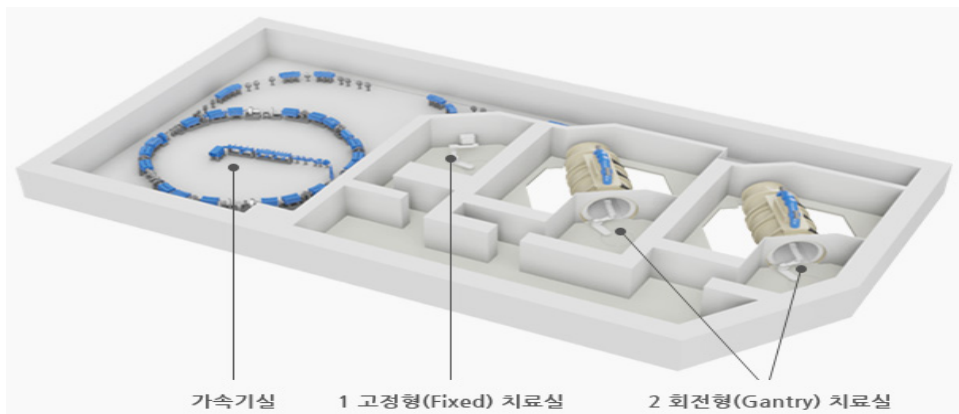
의료용 중입자가속기를 이용한 치료를 위해서는 환자 영상 획득시스템, 병원정보시스템, 치료계획시스템, OIS(Oncology Information System), 환자자세결정시스템, 호흡동조시스템, 정도관리(Quality Assurance, QA), 방사선량 계측 시스템 등이 필요하다.

의료용 중입자가속기 치료 과정은 먼저 환자진료, 치료자세 결정 및 고정기구 제작, 의심되는 암 부위의 초음파, CT, MRI 등의 영상촬영을 거쳐 치료 계획을 수립한다. 치료계획은 처방되는 방사선량의 최적화, 암 치료 에너지, 방향과 조사장치 설정 등이다. 치료계획과 같은 모의 치료를 실시하고, 치료 직전 치료계획의 실제 방사선량을 측정하여 치료계획을 검증한다. 최종적으로 암 부위에 따라 일정 기간 중입자가속기를 이용한 치료를 받고, 암 치료 경과를 진료 받는다.⁵⁴⁾

(3) 국내 및 해외현황

국내에는 서울대병원에서 구축하고 있는 중입자가속기보다 먼저 연세의료원에서 중입자가속기 진료장비를 도입하고 있다. 연세의료원의 중입자암치료센터는 2018년부터 공사에 착수해 지하 5층, 지상 7층, 연면적 32,928㎡에 3개의 치료실(고정형치료실 1실, 갠트리치료실 2실)로 구축되며, 시험가동을 거쳐 2023년부터 치료를 시작할 예정이다.

[연세의료원 중입자가속기 치료센터 조감도]



자료: 연세암병원 홈페이지(<https://sev.severance.healthcare/cancer/story/therapy.do#tab-content2>)

54) 한국과학기술기획평가원, 「중입자가속기 구축지원사업 사업계획 적정성 재검토 보고서」, 2018.11.

해외에서 운영 중인 의료용 중입자가속기는 13개, 현재 건설 중인 중입자가속기는 5개가 있다고 한다.

[운영 중인 중입자가속기 치료센터]

국가	기관	입자 종류	유형 및 최대에너지 (MeV)	치료 시작
일본	HIMAC	탄소	800/u 싱크로트론	1994, 2017
	HIBMC	탄소	320/u 싱크로트론	2002
	GHMC	탄소	400/u 싱크로트론	2010
	SAGA-HIMAT	탄소	400/u 싱크로트론	2013
	I-Rock Kanagawa Cancer Center	탄소	430/u 싱크로트론	2015
	Osaka Heavy Ion Therapy Center	탄소	430/u 싱크로트론	2018
	Yamagata University Hospital	탄소	430/u 싱크로트론	2021
독일	HIT	탄소	430/u 싱크로트론	2009, 2012
	MIT	탄소	430/u 싱크로트론	2015
이탈리아	CNAO	탄소	480/u 싱크로트론	2012
중국	SPHIC	탄소	430/u 싱크로트론	2014
	Heavy Ion Cancer Treatment Center	탄소	400/u 싱크로트론	2019
오스트리아	MedAustron	탄소	403/u 싱크로트론	2019

자료: PTCOG (Particle Therapy Co-Operative Group)

[운영 예정인 중입자가속기 치료센터]

국가	기관	입자 종류	유형 및 최대 에너지 (MeV)	치료 시작
대만	Taipei Vetarans General Hospital	탄소	400/u 싱크로트론	2021, 2022
중국	HITFil at IMP	탄소	430/u 싱크로트론	2022
한국	Yonsei Severance Hospital	탄소	430/u 싱크로트론	2022
	Seoul National University Hospital	탄소, 헬륨	탄소 430/u, 헬륨 230/u 싱크로트론	2025
프랑스	ARCHADE	탄소	430/u 싱크로트론	2023

자료: PTCOG (Particle Therapy Co-Operative Group)

가. 대형가속기 총 투자비 현황

1990년부터 2022년까지 대형가속기의 구축·운영에 투자된 재정사업은 과학기술 정보통신부 소관 11개 세부사업으로 조사되었다.

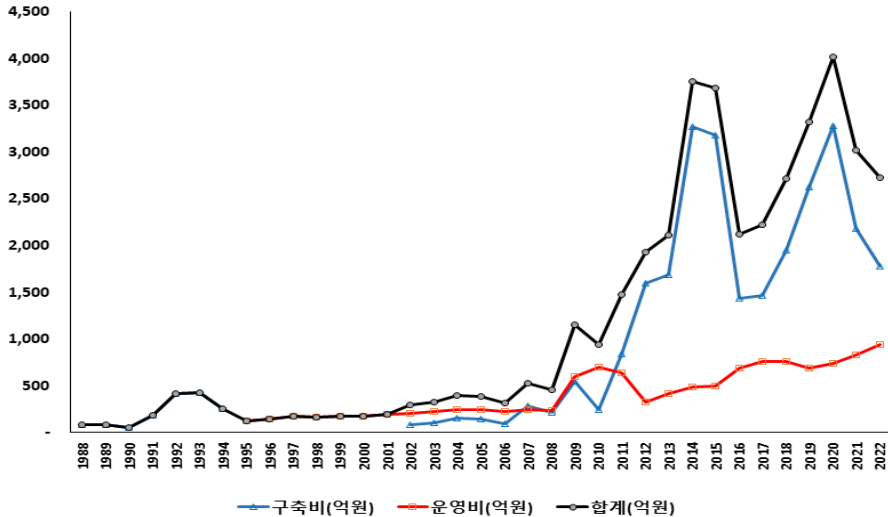
[대형가속기 구축·운영 재정사업 현황]

구분	회계	세부사업명(내역사업명)(사업기간)	비고
방사광 가속기	일반회계	방사광가속기 개발사업('90~'94)	3세대 방사광 구축비
	일반회계	4세대 방사광가속기 구축사업('11~'15)	4세대 선형 방사광 구축비
	일반회계	산업지원 다목적 방사광가속기 개념 연구('20)	다목적 방사광 구축비
	국가균형발전 특별회계	다목적 방사광가속기 구축사업('21~'27)	
	일반회계	방사광가속기공동이용연구지원(3세대방사광가속기)('95~)	3세대 방사광 운영비
	일반회계	3세대 방사광가속기 성능향상사업('09~'11)	
	일반회계	방사광가속기공동이용연구지원(4세대방사광가속기)('16~)	4세대 선형 방사광 운영비
	일반회계	방사광가속기공동이용연구지원 (방사광가속기 핵심장치 국산화 기술개발)('21~)	방사광 운영비
	일반회계	방사광가속기공동이용연구지원(가속기핵심기술개발)('16~)	
양성자 가속기	일반회계	양성자기반공학기술개발('02~'12)	양성자 가속기 구축비
	에너지 및 자원사업 특별회계	한국원자력연구원 연구운영비 지원 (양성자가속기연구센터 운영('13~'18), 양성자과학연구단 운영('19~))	양성자 가속기 운영비
중이온 가속기	일반회계	국제과학비즈니스벨트조성(중이온가속기장치구축)('11~'21)	중이온 가속기 구축비
	일반회계	국제과학비즈니스벨트조성(중이온가속기시설건설)('14~'21)	
	일반회계	기초과학연구원 연구운영비 지원(중이온가속기 운영사업)('20~)	중이온 가속기 운영비
중입자 가속기	국가균형발전 특별회계	중입자가속기 구축지원('10~'24)	중입자 가속기 구축비

자료: 과학기술정보통신부 제출자료를 바탕으로 작성

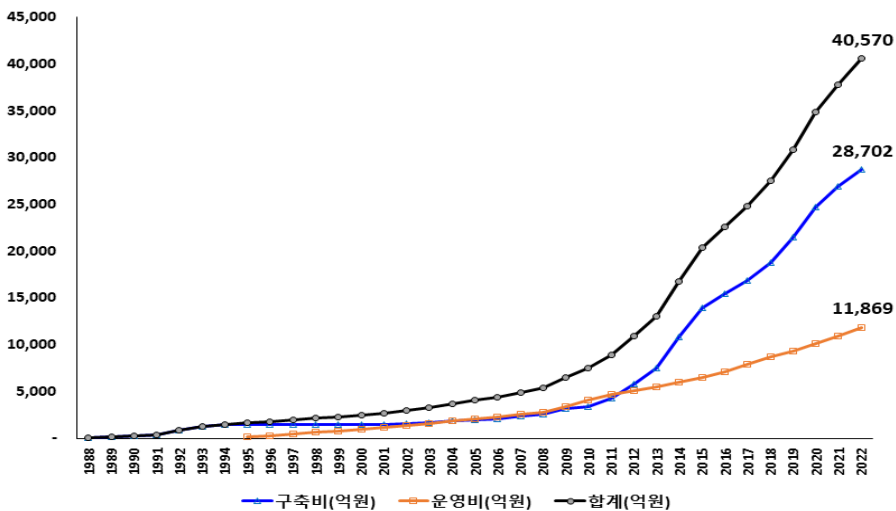
1988년부터 2022년까지 총 누적 투자비는 4조 570억원으로, 장치구축 및 시설
건설 등 구축비 2조 8,702억원, 운영비 1조 1,869억원이다.

[대형가속기 구축·운영 연도별 투자규모]



주: 구축비 및 운영비에 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함
자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

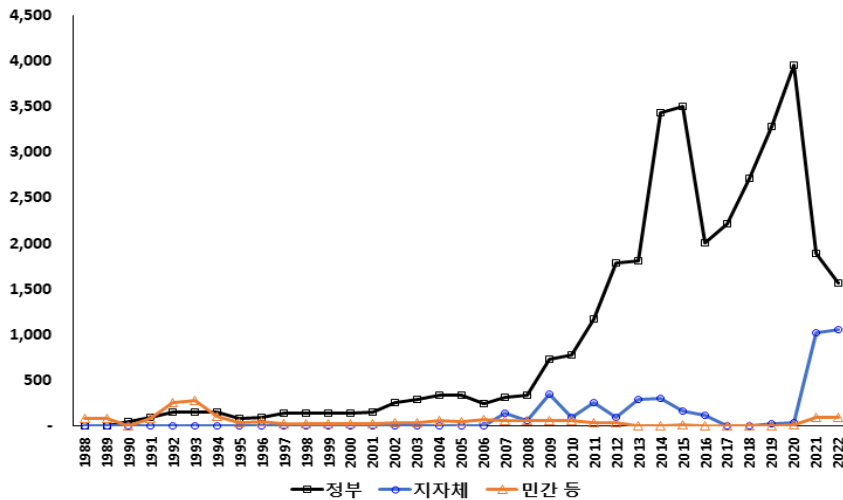
[대형가속기 구축·운영 연도별 투자규모(누적)]



주: 구축비 및 운영비에 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함
자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

총 누적 투자비를 재원별로 살펴보면 정부재정 3조 4,486억원, 지자체 4,066억원, 민간 등 2,018억원이다.

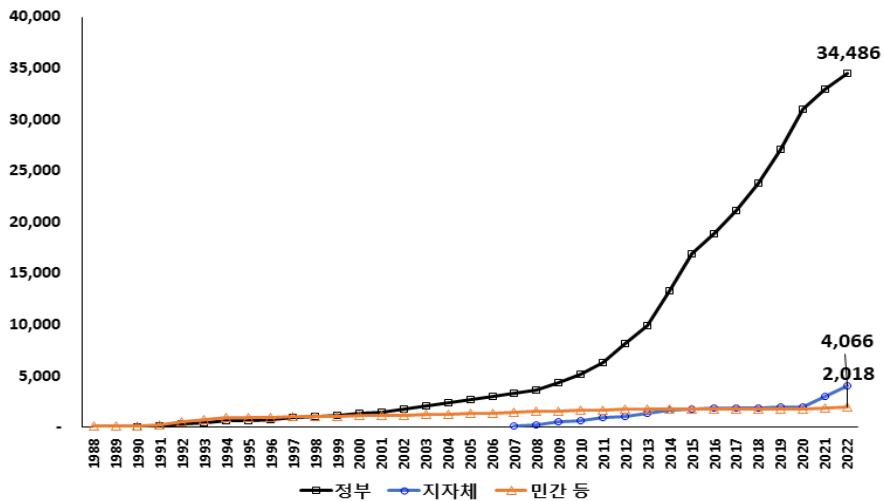
[대형가속기 구축·운영 재원별 연도별 투자규모]



주: 구축비 및 운영비 포함

자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

[대형가속기 구축·운영 재원별 연도별 투자규모(누적)]

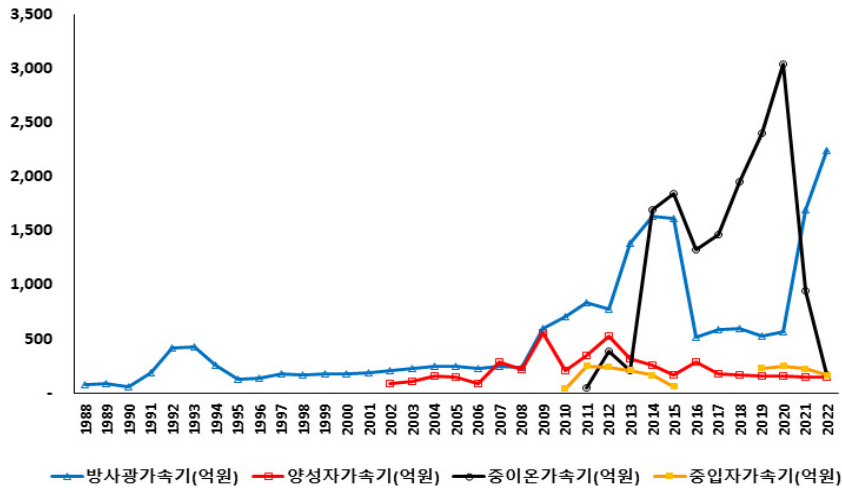


주: 구축비 및 운영비 포함

자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

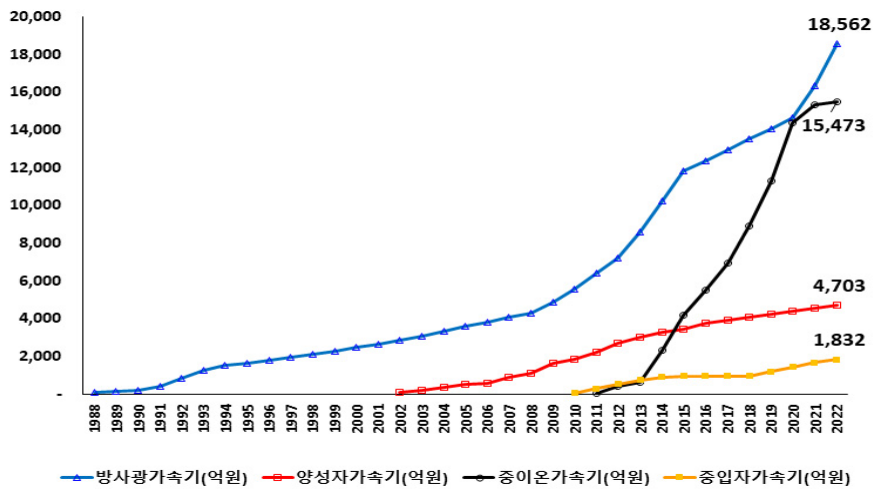
대형가속기별 누적 총 투자비는 방사광가속기 1조 8,562억원, 중이온가속기 1조 5,473억원, 양성자가속기 4,703억원, 중입자가속기 1,832억원 등의 순이다.

[대형가속기별 구축·운영 연도별 투자규모]



주: 대형가속기별 구축비 및 운영비 합계로 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함
자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

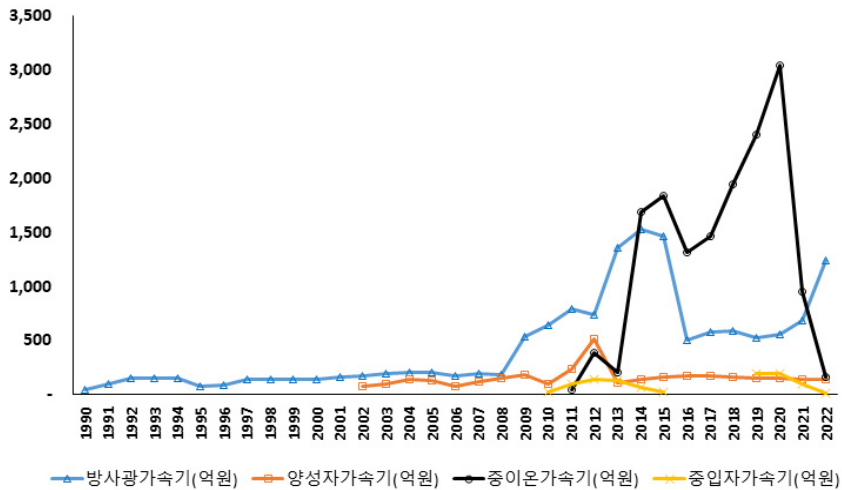
[대형가속기별 구축·운영 연도별 투자규모(누적)]



주: 대형가속기별 구축비 및 운영비 합계로 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함
자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

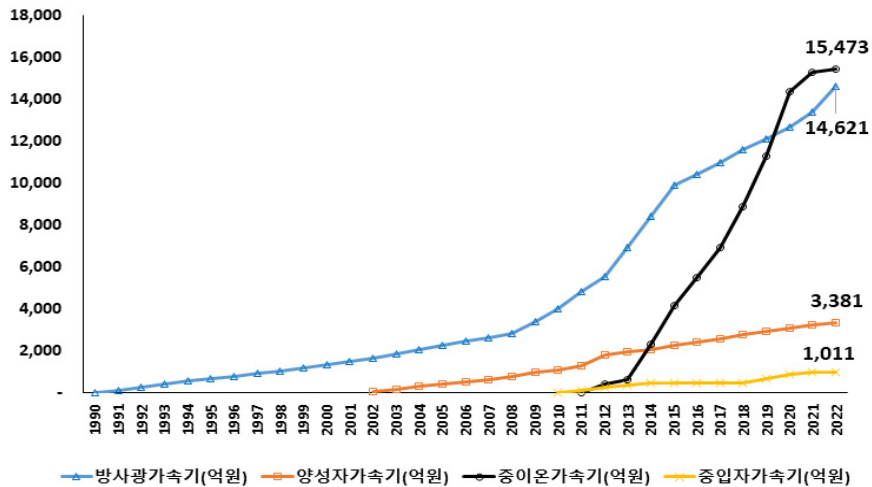
대형가속기별 정부재정 기준 누적 투자액은 중이온가속기 1조 5,473억원, 방사광 가속기 1조 4,621억원, 양성자가속기 3,381억원, 중입자가속기 1,011억원 순이다.

[대형가속기별 구축·운영 정부재정 연도별 투자규모]



주: 구축비 및 운영비 정부재정사업 집행액 기준
자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

[대형가속기별 구축·운영 정부재정 연도별 투자규모(누적)]

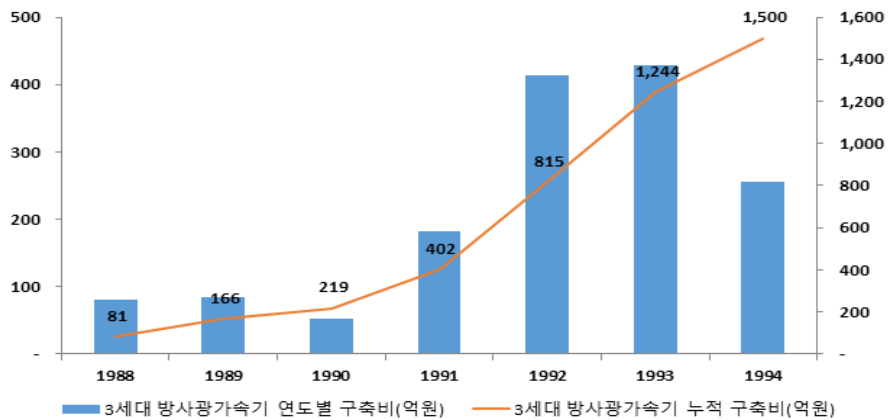


주: 구축비 및 운영비 정부재정사업 집행액 기준
자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

나. 대형가속기별 구축운영비 현황

3세대 방사광가속기의 총 구축비는 1,500억원이며, 연 평균 운영비로 305억원이 집행되어 구축비 대비 운영비 비중은 평균 20.3% 수준이다.

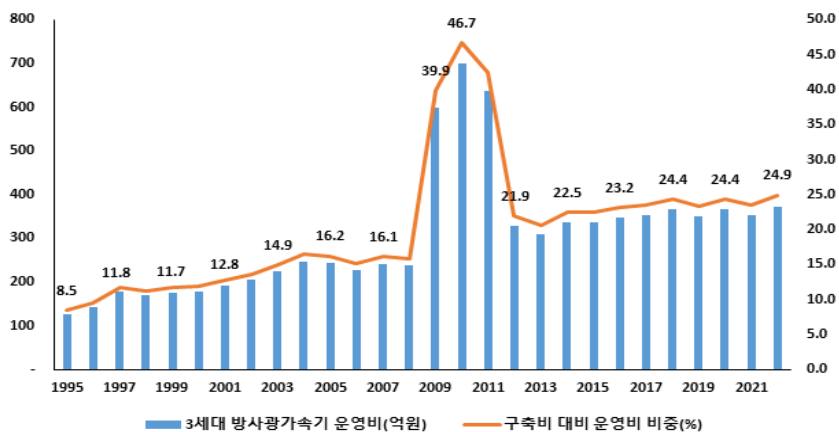
[3세대 방사광가속기 연도별 구축비]



주: 구축비 및 운영비에 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함

자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

[3세대 방사광가속기 연도별 운영비 비중]

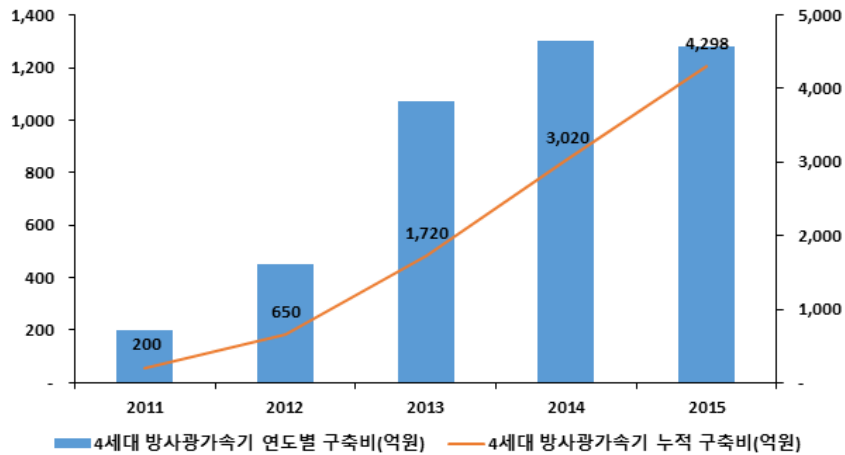


주: 구축비 및 운영비에 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함

자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

4세대 선형 방사광가속기의 총 구축비는 4,298억원이며, 연 평균 운영비로 190억원이 집행되어 구축비 대비 운영비 비중은 평균 4.4% 수준이다.

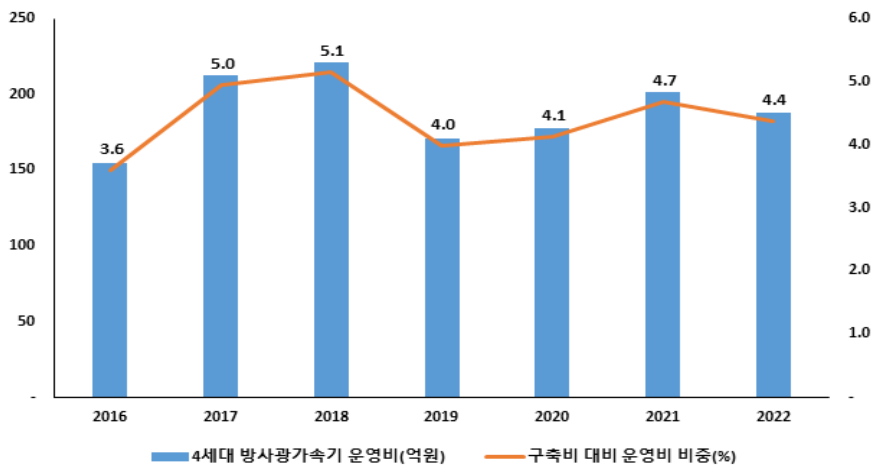
[4세대 선형 방사광가속기 연도별 구축비]



주: 구축비 및 운영비에 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함

자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

[4세대 선형 방사광가속기 연도별 운영비 비중]

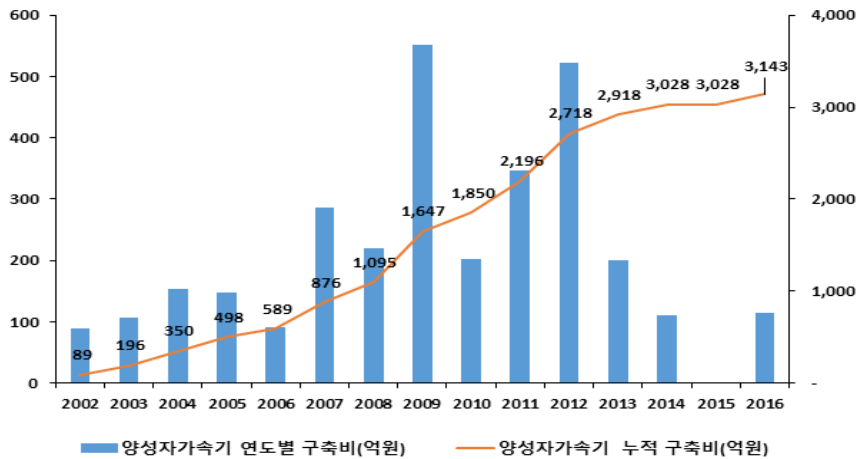


주: 구축비 및 운영비에 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함

자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

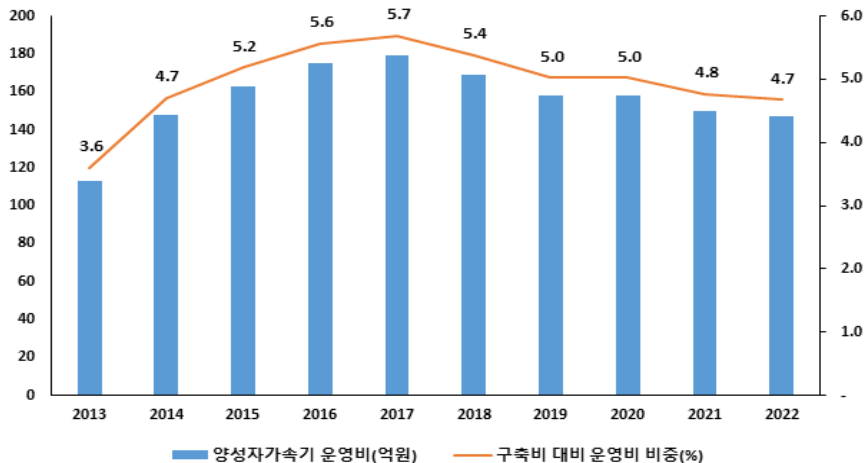
양성자가속기의 총 구축비는 3,143억원이며, 연 평균 운영비로 156억원이 집행되어 구축비 대비 운영비 비중은 평균 5.0% 수준이다.

[양성자가속기 연도별 구축비]



주: 구축비 및 운영비에는 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함
 자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

[양성자가속기 연도별 운영비 비중]



주: 구축비 및 운영비에는 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함
 자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

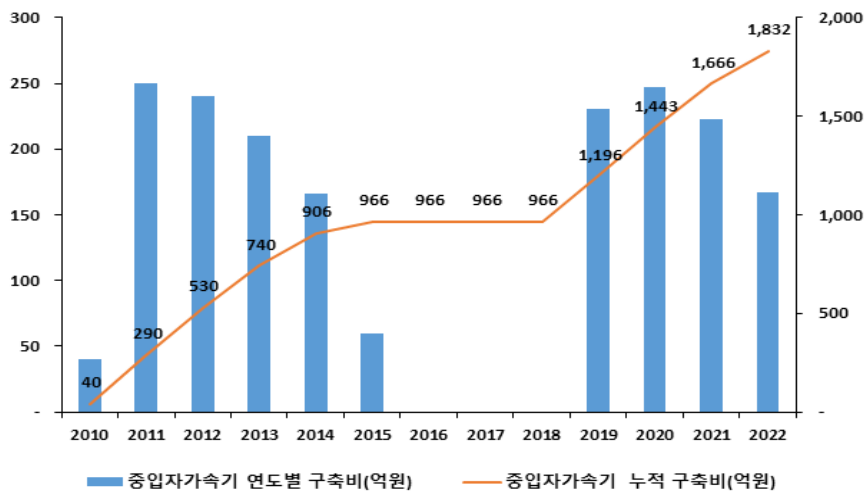
중이온가속기의 총 구축비(1단계)는 1조 5,183억원이며, 2022년까지 중입자가속기의 총 구축비는 1,832억원이다.

[중이온가속기 연도별 구축비]



주: 구축비 및 운영비에는 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함
 자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

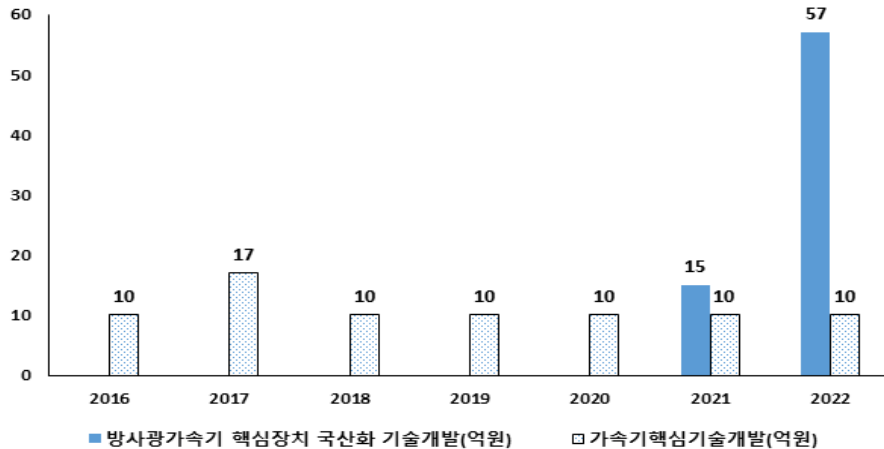
[중입자가속기 연도별 구축비]



주: 구축비 및 운영비에는 정부재정과 지자체, 민간 투자금을 포함
 자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

대형가속기 구축비와 운영비 이외에 방사광가속기공동이용연구지원사업의 내역사업으로 '가속기핵심기술개발('16~)'과 '방사광가속기 핵심장치 국산화 기술개발 ('21~)'이 추진되어왔으며, 2022년까지 총 149억원이 투자되었다.

[방사광가속기공동이용연구지원사업 가속기기술개발 내역사업 연도별 집행액]



자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

3세대 방사광가속기는 총 구축비의 20.3% 수준인 평균 305억원의 운영비가 매년 소요되며, 누적 총 운영비는 8,543억원으로 총 구축비의 5.7배이다. 4세대 선형 방사광가속기는 총 구축비의 4.4% 수준인 평균 190억원의 운영비가 매년 소요되며, 누적 총 운영비는 1,326억원으로 총 구축비 31%에 해당한다. 양성자가속기는 총 구축비의 5.0% 수준인 평균 156억원의 운영비가 매년 소요되며, 누적 총 운영비는 1,560억원으로 총 구축비의 50%에 달한다.

[대형가속기 평균 운영비 현황]

구분	총 구축비 (A)	운영 기간	총 운영비 (B)	연평균 운영비(C)	B/A	C/A
3세대 방사광가속기	1,500	'95~	8,543	305	5.70	0.203
4세대 선형 방사광가속기	4,298	'16~	1,326	190	0.31	0.044
양성자가속기	3,143	'02~	1,560	156	0.50	0.050

자료: 과학기술정보통신부 자료를 바탕으로 재작성

1

대형가속기 구축 사업 체계

가. 대형가속기 구축 사업의 지연 현황

현재 중이온가속기, 중입자가속기, 다목적방사광가속기 구축 사업이 진행 중이다. 2021년에 사업이 착수된 다목적 방사광가속기를 제외한, 중이온가속기와 중입자가속기 구축 사업은 당초 계획에 비해 상당 기간 사업이 지연되고 있다.

중이온가속기는 당초 일괄 구축에서 단계별 구축으로 변경되었다. 1단계 사업기간으로만 보더라도 당초 계획에 비해 5년이 지연되었으며, 총 사업비는 738억원이 증가하였다. 중입자가속기는 사업기간이 9년이 지연되었으며, 총 사업비는 당초 계획보다 646.1억원이 증가했다.

[중이온가속기 및 중입자가속기 구축사업 변경 현황]

구분		당초	현재안	증감
중이온가속기	사업기간	2011~2017년	2011~2022년	+5년
	총사업비	14,445억원	15,183억원	738억원
중입자가속기	사업기간	2010~2015년	2010~2024년	+9년
	총사업비	1,950억원	2,596.1억원	+646.1억원

주: 중이온가속기 현재안은 1단계 사업 기준임

자료: 과학기술정보통신부 제출자료를 바탕으로 작성

이로 인해 국정감사와 예결산심사에서는 대형가속기 구축 사업의 사업지연 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 대형가속기는 대표적인 대형연구시설로서 고난도의 기술개발이 요구되고, 수 만개의 장치가 연결되어 있어 사업계획 자체에 높은 불확실성을 내포하고 있다는 점이 있지만, 일반적으로 사업지연의 원인은 미흡한 사업계획과 체계적이지 못한 사업관리에 있다는 분석이 있다.

(1) 중이온가속기 구축 사업

중이온가속기 구축사업의 기본계획은 2012년 1월 수립되었다. 그러나 부지매입비 부담 주체 결정이 지연되면서 부지조성 일정이 순연되었고 이에 따라 1차 기본계획이 변경(2013.9)되었다. 이후 사업계획 적정성 검토(기재부, KDI) 결과(사업기간 및 총사업비(시설건설 포함) 조정)의 반영을 위해 2차 기본계획 변경('15.4)이 이루어졌다. 사업계획 적정성 재검토(사업범위 및 일정, 예산조정) 결과 반영을 위해 3차로 변경('19.5) 되었으며, 사업점검('20.7~'21.1, NRF) 결과에 따른 사업추진 방향 재설정 을 위해 4차 기본계획 변경('21.5)이 있었다.

당초에는 초전도가속장치를 SCL3, SCL2, SCL1로 이어지는 일괄 구축으로 계획 했으나, 2019년 SCL1 구축이 취소되었으며, 나머지는 1단계(SCL3 구축)와 선행 R&D(SCL2 구축방안 연구) 후 2단계(SCL2 구축) 사업을 추진하는 단계별 구축으로 변경하였다.

[중이온가속기 구축 기본계획 변경 내역]

구분	기본계획	1차('13.9)	2차('15.4)	3차('19.5)	4차('21.5)
변경 사유	-	과학벨트 기본계획 변경('13.8)	적정성 검토 ('14.1, 기재부)	적정성 재검토 ('19.4, 기재부)	사업점검 ('21.1, 과기부)
사업 범위	장치구축	장치구축	장치구축 및 시설건설	장치구축 및 시설건설 (SCL1 등 제외)	· 1단계: SCL2 제외 모든 장치 구축 · 선행R&D: SCL2 양산 기술확보 및 기술검증 · 2단계: SCL2 본제품 제작 및 설치
사업 일정	'11~'17	'11~'19	'11~'21	'11~'21	· 1단계: '11~'21 · 선행R&D: '22~'23 · 2단계: 착수시점부터 4년
사업 예산	4,604억원 (건설비, 부지매입비 미포함)		14,445억원 - 장치구축 4,602억원 - 시설건설 6,243억원 - 부지매입 3,600억원	14,443억원 (건설 E/S등 반영시 14,875억) - 장치구축 5,028억원 - 시설건설 5,815억원 - 부지매입 3,600억원	· 1단계: 15,183억원 - 장치구축 5,228억원 - 시설건설 6,384억원 - 부지매입 3,571억원 · 선행R&D: 86억원 · 2단계: 1,327억원(추정)

자료: 과학기술정보통신부

[중이온가속기 장치 구축사업 기본계획 수정에 따른 예산 변경 내역]

(단위: 억원)

구분		기본계획 (‘12.1.)	1차 변경 (‘13.9.)	2차 변경 (‘15.4.)	3차 변경 (‘19.5.)	4차 변경 (‘21.5.)
장치 구축	가속장치	2,160	2,160	2,602	2,705	2,800
	기반장치	659	659	511	617	634
	RI생성장치	701	701	796	956	1,002
	실험장치	867	867	409	514	526
	사업단운영	217	217	284	236	266
	소계	4,604	4,604	4,602	5,028	5,228
시설건설		0	0	6,243	5,815	6,384
부지매입		0	0	3,600	3,600	3,571
합계		4,604	4,604	14,445	14,443	15,183

주: 1. 1차 변경: 기간연장(기존: '11~'17년 → 변경: '11~'19년)

2. 2차 변경: 기간연장('11~'19년 → '11~'21년)

3. 3차 변경: 사업범위 및 사업비 조정결과 반영(장치시설 일부 제외)

4. 4차 변경: 사업비 조정(장치구축비 200억 증 등), 단계별 구축(일괄구축 → 단계별 구축), 사업 기간 변경('11~'21 → ~'24 이후)

자료: 과학기술정보통신부

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/2>

동 사업의 추진이 지연되면서 과학기술정보통신부와 사업관리기관인 한국연구재단의 사업 점검이 아래와 같이 여러 차례 이루어졌다.

2016년 한국연구재단은 종합점검위원회를 구성하여 동 사업에 대한 종합점검을 실시하였다. 그 결과 사업단의 리더십과 사업관리 역량 보완, 수행업무의 현황과 계획을 정확히 분석하여 실질적이고 체계적으로 재정립, 국내외 전문가를 통해 초전도가속기 부분의 기술 확보가 필요하다고 지적하였다.

2017년 주무부처인 과학기술정보통신부는 사업점검 TF를 직접 구성하여 점검하였다. 그 결과 SCL 설치 일정지연 등 사업지연 요소들을 포함한 리스크 관리 방안을 포함한 대응 사업전략 수립, 사업단 내부조직의 운영 효율화 등이 필요하다고 지적하였다. 사업점검 TF결과에 따라 2018년 국제과학비즈니스벨트위원회에서 동 사업에 대한 사업계획 적정성 재검토 추진을 의결하였다.

2020년 한국연구재단은 국내외 전문가로 사업 점검·자문 TF를 구성하여 사업 추진 현황을 점검하였다. 그 결과 사업 최종 성능목표 달성을 위해 일괄구축에서 단계별 구축으로의 사업 추진방향 변경 등이 필요하다고 지적하였다.

[중이온가속기 종합점검 주요 내용]

구분	주요 검토 내용
한국연구재단 종합점검 (2016.12.)	• 공정, 예산 등 사업의 통합관리가 부족하고 사업의 비효율 심화 - 마일스톤, 업무분류체계 등 공정계획 부실 - 사업수행, 조직운영 등과 관련된 권한이 사업단장에게 집중 • 초전도가속기(SCL3) 성능검증 기준절차 및 품질관리 등이 미흡 • 가속기 구축 경험을 보유한 전문가 부족, 국내외 협력 미비 • 핵심장치 구매방법시기 미흡, 개발 실패에 대비한 대책 미흡
사업점검 TF (2017.12.)	• 핵심장치성공 가능성 점검 - SSR가속관, QWR가속관, HWR가속관 개발 불확실, 성능 부적합 - ISOL 및 IF 제원변경에 따른 향후 성능향상 계획 마련 • 구축이후 활용성 부분 - 세계수준의 활용인력 양성 프로그램 개발 요구됨 - 세계수준의 대형 국제공동연구 프로젝트 발굴 필요 • 사업추진 방향 부분 - 시설건설 사업비 절감 등을 통해 총 사업비 준수 필요 - 사업추진일정 가능성 검토 결과 일정조정 필요 - 산학연 협력 강화를 통한 국내 가속기 개발 역량 집결 필요
사업계획 적정성 재검토 (2019. 4.)	• 주요장치의 설계가 구체화되면서 장치사양 변경추가와 장치구축 범위 축소 등 추가소요 발생으로 사업비 증가 - 중이온 장치구축 및 조립설치에 대한 추가 소요 비용 발생 - 활용연구 주제 발굴 및 인력양성 지원 확대 필요 • 가속기 개발·구축 자체나 사업관리 측면에 전문 관리 체제로의 전환이 필요
중이온 가속기 구축사업 종합·총괄점검 (‘20.9.~’21.1.)	• 사업 최종 성능목표 달성을 위한 추진방향 재설정 필요 (일괄 구축→단계별 구축) • 대형연구시설구축사업의 특성을 고려한 효율적인 사업관리방안 마련 필요(IBS 내부 조직화 등)

자료: 과학기술정보통신부KISTEP

중이온가속기 구축사업이 당초 계획보다 지연된 원인 중 하나는 핵심 장치인 초전도 가속장치 제작이 지연되었기 때문이다. 변경된 기본계획 상으로 2021년에 초전도가속장치 SCL3를 구축하고 빔 인출을 계획하였다. 그러나 실제로는 2021년 12월에 이르러 SCL3 장치 설치가 완료되었고, 현재 추진 중인 SCL3 운영 테스트를 거쳐 본격적인 빔 인출은 2023년 이후라고 전망하고 있다¹⁾.

[중이온가속기 구축사업 장치구축 핵심지표 달성 현황]

구분	사업연도								
	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23
계획	ECR 빔인출	RFQ 빔인출	SCL데모 빔인출	방사선사용 허가 취득 유틸리티공급		SCL3 설치시작	SCL3 SI빔인출	KoBRA시운전 ISOL RI빔시운전 IF시운전	SCL3 RI빔인출
실적	ECR 빔인출	RFQ 빔인출	SCL데모 빔인출	방사선사용 허가취득 유틸리티공급		SCL3 설치시작	SCL3 설치완료	SCL3 최초빔인출 ISOL RI빔시운전	SCL3 SI빔인출 SCL3 RI빔인출 KoBRA빔시운전 IF장치시운전

주: 계획은 사업기본계획 4차 변경('21.5) 기준, 실적은 '21년말 기준으로 '22년, '23년은 계획임(제 37차 사업추진위원회 사업일정변경(안)('21.12) 기준)

자료: 과학기술정보통신부

현재 기반장치인 제어시스템, 극저온플랜트도 계획대비 1~2년 늦은 시점에서 시운전 중이다. RI 생성장치인 사이클로트론과 ISOL시스템은 2021년 설치를 마치고 현재 시운전에 있으며, IF시스템은 계획보다 늦게 설치 중이다. KoBRA를 비롯한 활용장치 7개는 2022년부터 시운전에 들어간다는 계획이었지만, 주요 장치의 시운전 완료와 빔인출 시점에 따라 본격적인 활용 시점은 지연될 수 밖에 없다.

대형연구개발사업은 예산 및 기간 오차를 최대한 줄일 수 있도록 기획단계에서 설계를 최대한 구체화하는 것이 필요하다. 그러나 동 사업은 2009년 예타 면제 이후 가속기 장치구축에 필요한 대략적인 예산 추정치만으로 2011년에 사업을 착수하였고, 이후 4년이 지난 2015년에 이르러서야 적정성 검토결과로 총사업비와 사업기간이 확정되는 등 부실한 사업계획에 기반하여 사업이 추진되었다²⁾.

결론적으로 기획단계에서 설계를 구체화하지 않고 개념설계 수준에서³⁾ 본격적인 사업에 착수하면서, 이후 설계 변경, 사업기간 및 예산의 증가가 되풀이되었다. 또한 기 확보되지 않았던 초전도 기술에 대한 국내 기술수준 평가·검토가 미흡한 상황에 무리한 국산화를 추진하면서 핵심장치 제작이 지연되었기 때문이다.

- 1) 과학기술정보통신부 보도자료, “한국형 중이온가속기 저에너지가속장치 설치 완료, 내년 최초 빔인출 기대!”, 2021.12.29.
- 2) 한국과학기술기획평가원, 「2018년도 사업계획 적정성 재검토 보고서 - 중이온가속기 장치구축사업」, 2019.6.
- 3) 국제과학비즈니스벨트 전체 사업 계획 시 대학에 위탁하여 개념 설계 수준의 기획을 2차례 정도 추진한 상태에서 사업이 착수되었다.

[중이온가속기 구축사업 주요 장치별 계획대비 추진실적]

장치구분			사업연도										
			'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27
가속 장치	입사기	계획	본제품성능개선		설치 시운전								
		실적	제작			설치		범시운전			운영		
	SCL3 가속장치	계획	시제품 개발	제작	설치 시운전								
		실적	제작			설치		시운전	범시운전	운영			
	SCL2 가속장치	계획	시제품 개발		제작	설치 시운전							
		실적				시제품 제작	초도양산품제작			본제품 제작			
	SCL1 초천도 선형가속기	계획			제작		설치 시운전						
		실적			설치 제외								
RF시스템	계획	시제품 개발	제작	설치 시운전									
	실적			제작									
진공시스템	계획	시제품 개발	구매	설치 시운전									
	실적			제작									
기반 장치	제어시스템	계획	시제품 개발	제작	설치 시운전								
		실적	시제품 개발	제작		설치	시운전	범시운전	운영				
	극저온 플랜트	계획		구매	설치 시운전								
		실적	구매	설계	설계	제작 설치	시운전	냉각					
RI 생성 장치	사이클로트론	계획		구매	설치 시운전								
		실적	설계 구매	제작			설치	시운전	운영				
	ISOL 시스템	계획	시제품 개발	제작	설치 시운전								
		실적	시제품 개발	제작			설치	시운전	범시운전	운영			
	IF 시스템	계획	시제품 개발	제작			설치 시운전						
		실적			제작			설치	시운전				
활용 장치	KOBRA	계획	시제품 개발	제작	설치 시운전	실험수행							
		실적		제작			설치		시운전	범시 운전	운영		
	LAMPS	계획	시제품 개발	제작			설치 시운전						
		실적	시제품 개발		제작		설치		시운전				
	MMS	계획	시제품 개발	제작		설치 시운전							
		실적	시제품 개발	제작			설치		시운전	범시 운전	운영		
	CLS	계획							설치				
		실적	시제품 개발	제작				시운전	범시 운전	운영			
	NDPS	계획											
		실적			설계		설치		시운전	범시 운전	운영		
mSR	계획												
	실적			제작		설치		시운전					
BIS	계획												
	실적			제작		설치		시운전					

주: 계획은 4차 기본계획('21.5) 기준이며 실적은 '22.3월말 달성 기준

자료: 과학기술정보통신부

(2) 중입자가속기 구축 사업

중입자가속기 구축사업은 2010년부터 현재까지 총 4회에 걸쳐 기본계획이 변경되면서 사업기간은 2024년까지 연장되었고, 총 사업비는 1,950억원에서 2,596.1억원으로 증가했다.

사업 지연의 주 원인은 가속기 타입의 변경과 당초 주관기관인 한국원자력의학원이 사업부담금을 확보하지 못했기 때문이다. 이로 인해 사업의 주관기관이 서울대학교병원으로 이관되었고, 사업목표도 ‘중입자가속기 및 관련 기술의 개발’에서 ‘난치성 암 치료 및 기초연구 인프라 구축’으로 변경되었다. 이후 중입자가속기 장비구매 계약체결과 치료시설 개보수⁴⁾ 등이 지연되면서 전체 사업일정이 지연되고 있다.

[중입자가속기 구축 사업 주요 변경 내역]

구분		예타결과 (‘09.11.)		운영위 사업계획 변경 (‘14. 5.)		운영위 사업계획 변경 (‘17.10.)		사업계획 적정성 재검토(‘18.11.) 및 최종확정	
사업명		중입자가속기 기술개발사업		중입자가속기 기술개발사업		중입자가속기 구축지원사업		좌동	
사업목표		중입자가속기 개발, 암환자 치료		중입자가속기 개발, 암환자 치료 (가속기 기종 변경)		중입자치료시스템 통합구축 암치료 및 기초연구 인프라 구축(기기도입)		좌동	
사업기간		2010~2015		2010~2016		2010~2020		2010~2024	
주관기관		한국원자력의학원		한국원자력의학원		서울대학교병원		좌동	
사업비		1,950억원		1,950억원		2,042.5억원		2,596.1억원	
분 담 금	국비	700	35.9%	700	35.9%	775.5	38.0%	1,186	45.7%
	지방비	500	25.6%	500	25.6%	517	25.3%	660.1	25.4%
	주관기관	750	38.5%	750	38.5%	750	36.7%	750	28.9%

자료: 과학기술정보통신부

4) 과학기술정보통신부는 사업이관전에 완공된 중입자치료센터 건물을 도입 예정인 중입자가속기의 사양에 맞춰 개보수 과정들이 사업지연의 큰 원인 중 하나라고 설명하였다.

[중입자가속기 구축사업 기본계획 변경에 따른 예산 변경 내역]

(단위: 억원)

구분	예타결과 (‘09.11.)	운영위 사업계획 변경 (‘14.5.)	운영위 사업계획 변경 (‘17.10.)	사업계획 적정성 재검토 (‘18.11.) 및 최종확정
장치구축	1,380.0	1,380.0	1,395.5	1,511.5
시설건설	400.0	400.0	437.0	767.1
운영비 등	170.0	170.0	210.0	317.5
합계	1,950.0	1,950.0	2,042.5	2,596.1

자료: 과학기술정보통신부

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/3>

앞서 살펴본 바와 같이 2010년부터 추진된 중입자가속기 구축 사업은 당초 2015년 완공 계획에 비해 10년 이상 지연되고 있다. 당초 사업 계획에서는 중입자가속기의 새로운 원천기술 확보⁵⁾와 주관기관이 민간 투자유치를 통한 사업비 매칭을 제시하였다. 그러나 예비타당성조사에서 기술개발 가능성과 재원마련의 불확실성이 존재한다는 평가가 있었다.

실제로 당시 주관기관인 한국원자력의학원은 2016년 5월에 중입자가속기 치료센터를 완공하였지만, 민간 투자유치와 기술개발에는 최종 실패하면서 2017년 동 사업은 서울대병원으로 사업이 이관되었다.

이와 같이 예비타당성 조사에서 기술개발 가능성과 재원조달 가능성이 우려된다는 지적이 있었음을 감안하면, 과학기술정보통신부가 사업계획에 대해 면밀한 재검토를 추진하고 주관기관과 민간투자 유치를 지원할 필요가 있었다고 보여진다.

[중입자가속기 구축사업 점검별 주요 내용]

구분	주요 검토 내용
예비타당성조사 (2009.10.)	• 사전연구에도 불구하고 치료시스템 구축방안 등이 일부 미흡 • 사업기간 내 기술개발 성공가능성 검토 필요, 가속기와 치료시스템의 연계에 대한 기술적 불확실성 존재 • 한국원자력의학원의 재원조달 가능성 검토 필요

5) 원천기술 확보라는 것은 일본, 독일 등에서 적용 중인 싱크로트론 방식이 아닌 사이클로트론 방식의 중입자가속장치를 개발하는 것이었다. 사업 운영위원회는 한국원자력의학원이 사이클로트론 개발 경험과 능력을 확보하고 있어 국내 자체적으로 중입자가속기 개발이 가능할 것으로 판단하고, 2011년 6월 운영위원회를 통해 사이클로트론 방식을 최종 선정하였다.

구분	주요 검토 내용
사업계획 적정성 재검토 (2018.11.)	• 법제도적 위험요인 다수 존재 - 국내 처음 도입되는 의료기기로 방사선 시설물 인허가, 의료기기 인허가, 환자 치료로 계획 등에 대한 철저한 준비 • 기기 도입·설치를 통한 환자 치료로 사업 내용이 변경됨에 따라 참여기관 간 긴밀한 협조 체제 구축 필요 • 사업비 증가요인 다수 존재 - 정확한 세부 내용 산출이 어려운 이유로 사업 규모에 포함되지 못한 시설개 보수 비용 등의 추가 사업비 부담이 감안될 필요 • 본격적인 사업 추진을 위한 사업단 체제로의 전환 • 가속기 관련 전문인력 확보, 전문가 교육양성 프로그램 필요
운영위원회 부대의견 (2022.1.26.)	• 건축, 예산 확보 등 철저한 리스크 관리를 통해 더 이상의 사업지연이 없이 원활한 추진 필요

자료: 한국과학기술기획평가원, 과학기술정보통신부

또한, 당시 주관기관인 한국원자력의학원은 2016년 5월에 중입자가속기 치료센터를 완공하였지만, 민간 투자유치를 통한 사업비 마련이 불가능해지면서 2017년 동 사업은 서울대병원으로 사업이 이관되었다. 서울대병원은 중입자가속기 기술개발에서 장치 도입으로 사업계획을 변경하였다. 이로 인해 이미 완공된 치료센터는 도입될 중입자가속기 장치 사양과 달라 개보수 공사가 추가로 필요하게 되었고, 기본설계 이후 남은 행정 절차(6)로 인해 아직까지 본격적인 공사를 착수하지 못하고 있다.

[중입자가속기 구축지원사업 장치구축 핵심지표 달성 현황]

구분	사업연도				
	'19	'20	'21	'22	'23
계획	장치구축 입찰 진행	건물설계 및 장치설계 완료	건물공사 및 장치제작 진행	건물공사 완료 및 장치 국내 운송 완료	장치 설치·성능검사 ·인수시험 완료
실적	장치구축 입찰 진행	장치구매계약 체결/ 건물설계사 선정 및 설계 착수	건물설계 추진 및 장치제작 진행	-	-

주: 계획은 제10차 사업운영위원회 심의·의결('19.04) 기준이며 실적은 '21년말 달성 기준

자료: 과학기술정보통신부

6) 총사업비 조정요구 심의 → 실시설계·검토 → 총사업비 조정 → 공사발주 등의 단계를 거친다

변경된 사업계획에 따르면 과학기술정보통신부는 2020년 8월 장치구축 계약을 체결하였고, 제조사의 장치 제작이 끝나는대로 국내로 운송하여 2022년부터 치료센터 설치를 거쳐 성능검사, 원자력안전위원회 및 식품의약품안전처 인허가 취득, 인수시험 실시 등을 진행할 예정이었다.

과학기술정보통신부는 이미 사업계획 변경을 통해 장치 구축 계약 체결 당시 장치 구축 완료 목표 시점을 2023년에서 2024년으로 조정한 바 있다⁷⁾. 그러나 앞서 설명한 치료센터의 개보수 공사 일정이 지연되면서, 전체 사업의 구축 완료 시점이 2026년 이후로 최소 18개월 이상 지연될 가능성이 높다.

[중입자가속기 구축지원사업 주요 장치구축 계획 대비 변경(안)]

항목			사업연도								
			'20	'21	'22	'23	'24	'25	'26		
시설개보수 공사		계획	설계 및 공사								
		변경	설계 추진		개보수 공사						
장치 구축	장치 설계	계획									
		변경									
	장치 제작	계획									
		변경									
	국내 운송	계획									
		변경									
	장치 설치	계획									
		변경									
	성능 검사	계획									
		변경									
	수평 고정빔 인수시험	계획									
		변경									
	회전 겐트리 인수시험	계획									
		변경									

주: 중입자가속기 구축지원사업 운영위원회(2022.1.26.) 보고 시점 기준임

자료: 과학기술정보통신부

이와 같은 시설공사 구축 일정 조정과 함께 과학기술정보통신부는 공사설계에 따른 미검토된 공사비가 총사업비에 아직 반영되지 않아 기획재정부와 총사업비 조정도 추진하고 있어 총사업비도 다시 증가할 가능성이 높다⁸⁾.

7) 중입자가속기 구축계약 체결 시, 장치제조사가 제시한 구축일정(안)을 반영하여 사업기간을 한 차례 조정한 바 있다.('20.9월) (종료: '23.12월 → '24.10월)

8) 과학기술정보통신부에 따르면 향후, 중간설계결과를 수령하였지만 시공사 선정 및 공사 발주 전까지

[중입자가속기 구축사업 중간설계에 따른 총사업비 및 사업기간 조정 결과]

구분	기존	변경안	증감
총사업비	259,609백만원	275,885백만원	+16,276백만원
사업기간	2010.4.~2024.10.	2010.4.~2026.04.	+18개월

주: 기획재정부, 중입자가속기 구축지원사업 총사업비 조정결과 통보 2022.4.

자료: 과학기술정보통신부

결론적으로 동 사업은 주관기관이 한국원자력의학원에서 서울대병원으로 이관되고, 사업목표도 기술개발에서 장치도입으로 변경되면서, 도입 예정인 중입자가속기 사양에 맞춰 치료센터 시설의 개보수가 필요하지만 이를 위한 소관 부처의 행정절차가 지연되면서 추가적인 사업 지연이 발생하고 있다.

총사업비 조정 및 기관별(정부, 지자체, 주관기관) 사업비 분담 협의, 실시설계, 실시설계 적정성 검토, 설계 경제성 검토 등의 절차가 예정되어 있으며, 협의 진행상황에 따라 일정의 추가 변동 가능성이 있고, 아직 운영위원회를 통한 사업계획 변경은 미 실시된 상황이라는 설명이다.

나. 대형가속기 구축 사업 관리 체계 개선 방안

(1) 대형연구시설 구축사업 표준 절차 확립 필요

일반적으로 ‘연구시설’은 특정목적의 연구개발활동(시험, 분석, 계측, 교육, 훈련 등)을 지원하기 위한 독립적인 연구공간’을 말하며, ‘연구장비’란 1백만원 이상의 구축 비용이 소요되며, 1년 이상의 내구성을 지닌 과학기술활동을 위한 유형의 비소비적 자산을 말한다.

연구시설은 ‘하나의 거대 연구장비’, ‘복수의 연구장비를 결합한 하나의 시스템’ ‘공동활용을 촉진하기 위하여 연구장비들을 한 곳에 집적화한 단위’ 등으로 구분할 수 있다. 연구시설의 구성 요소는 연구장비 뿐만 아니라 특수설비, 부대시설, 연구건물 및 토지로 구성될 수 있다.

[연구장비 및 연구시설의 정의]

구분	정의
연구시설·장비	연구개발활동에 직접적으로 사용되며, 연구개발에 필요한 기능과 환경을 구현하는 ‘연구시설’과 ‘연구장비’를 총칭함
연구시설	‘연구시설’이란 ‘특정목적의 연구개발활동(시험, 분석, 계측, 교육, 훈련 등)을 지원하기 위해 다음 각 호 중 하나의 형태로 이루어진 독립적인 연구공간’을 말함 - 하나의 거대 연구장비 - 복수의 연구장비를 결합한 하나의 시스템 - 공동 활용을 촉진하기 위하여 연구장비들을 한 곳에 집적화한 단위
연구장비	‘연구장비’란 ‘1백만원 이상의 구축비용이 소요되며, 1년 이상의 내구성을 지닌 과학기술활동을 위한 유형의 비소비적 자산’을 말함

자료: 「국가연구개발 시설·장비의 관리 등에 관한 표준지침」 별표 1의1(연구시설장비 정의 및 구성)

[연구시설 해당 유형]

포함대상	제외대상
- 대형장비운영시설(핵융합장치, 가속기 등) - 연구장비집적시설(나노팩센터, 핵심연구지원시설 등) - 과학시료관리시설(생물사육시설, 화합물은행 등) - 데이터센터(슈퍼컴퓨터, 빅데이터센터 등) - 관측/측정시설(기상관측시설, 천문측정센터 등)	- 연구개발활동 직접 지원 이외의 다양한 목적으로 공간을 갖춘 형태의 일반시설 - 연구동(실험동), 교육시설(도서관, 강의실, 교수실, 학생회관 등), 지원시설(행정동, 강당, 기숙사, 식당) 등

자료: 국가과학기술위원회, 「제1차 국가대형연구시설구축지도」, 2010.12.

과학기술정보통신부는 연구시설 중 50억원 이상의 국가연구개발예산이 투입되어 장기간 구축되는 첨단 연구시설을 ‘대형연구시설(Large Research Facilities)’로 구분한다. 대형연구시설은 첨단연구장치, 연구설비, 지원시설 등이 결합되어 있으며, 순수 연구동(실험동), 교육시설, 지원시설 등과는 다르다⁹⁾. 특히, 대형가속기는 첨단연구장치와 연구시설이 결합된 대표적인 대형연구시설이다.

[대형연구시설의 구성요소에 따른 유형]

구분	대형연구시설의 정의 및 예시
장비기반형	대규모의 연구장비 또는 중소 규모의 연구장비들을 포함하고 있는 연구 수행을 위한 일반적인 시설 (예시: 방사광가속기, 연구용 원자로, 슈퍼컴퓨팅센터 등)
환경조성형	주된 연구장비가 없더라도 특수한 연구환경을 조성하거나 연구자원을 제공하는 설비가 되어 있는 시설 (예시: 해양공학수조, 대형캐비테이션터널, 국가영장류센터 등)

자료: 국가과학기술위원회, 「제1차 국가대형연구시설구축지도」, 2010.12.

그러나 대형연구시설은 다양한 첨단기술과 장비들이 집적화되면서 사업규모와 기술의 복잡성이 크다. 또한 장시간에 걸쳐 대규모 예산이 투입되고 연구시설을 구성하는 세부요소들이 복잡하여 사업관리의 어려움도 높은 편이다.

[대형연구시설 구축 사업의 특징]

구분	주요 특징
복잡성	고난이도 기술이 요구되어 기술적 난제들이 복합적으로 발생하며, 요소기술의 세분화로 관리의 복잡성이 증대 * (예) 중이온가속기 16대 장치, 3만여개 부품, 3천여개의 세부공정으로 구성
고비용	막대한 비용*이 소요되며 실패 시 대규모 투자에 대한 매몰비용 및 투입인력의 대체 활용 등의 문제 야기 * 2010년 이후 500억원 이상 국내 대형연구시설(17개) 평균 구축비용 약 2,900억원

자료: 과학기술정보통신부, 「대형연구시설구축 내실화를 위한 사업추진 개선 방안(안)」, 2021.4.16.

9) 국가과학기술위원회, 「제1차 국가대형연구시설구축지도」, 2010.12.

2021년 과학기술정보통신부 자료에 따르면, 국가연구개발사업으로 구축운영 중인 대형연구시설(500억원 이상)은 34개, 총 투자규모는 8조 2천억원이다¹⁰⁾. 이 중 2010년 이후 추진된 사업은 19개이며, 이 중 10개 사업이 당초 계획보다 사업이 지연되었다. 일정지연은 평균 3.9년, 총사업비는 당초 대비 총 7,796억원(14.2%) 증가하였다. 특히 중입자가속기와 중이온가속기 구축사업은 타 대형연구시설 구축 사업들보다 상대적으로 사업지연 총 사업비 증가가 더욱 높은 것으로 나타났다.

[대형연구시설 구축사업 중 당초계획 변경 사업 현황]

시설명	부처	당초		변경		비고
		기간	총사업비	기간	총사업비	
이사부호	산업통상 자원부	2010~2013	962억원	2010~2015 (+2년)	1,067억원 (+105억원)	완료
대전력시험설비	산업통상 자원부	2011~2015	1,672억원	2011~2016 (+1년)	1,682억원 (+10억원)	완료
심해공학수조	산업통상 자원부	2013~2016	690억원	2013~2020 (+4년)	779억원 (+89억원)	완료
광주전력변화 시험센터	과학기술 정보통신부	2015~2017	230억원	2015~2020 (+3년)	638억원 (+408억원)	완료
한국형발사체	과학기술 정보통신부	2010~2022	15,449억원	-	19,572억원 (+4,123억원)	진행중
수출용신형 연구로	과학기술 정보통신부	2012~2016	2,900억원	2012~2023 (7년)	4,389억원 (+1,489억원)	진행중
3 / 4D물리 탐사연구선건조	산업통상 자원부	2018~2023	1,725억원	-	1,873억원 (+148억원)	진행중
4세대 선형 방사광가속기	과학기술 정보통신부	2011~2014	4,000억원	2011~2015 (+1년)	4,038억원 (+38억원)	완료
중입자가속기	과학기술 정보통신부	2010~2015	1,950억원	2010~2024 (+9년)	2,596.1억원 (+646.1억원)	진행중
중이온가속기	과학기술 정보통신부	2011~2017	14,445억원	2011~2022 (+5년)	15,183억원 (+738)	진행중

자료: 과학기술정보통신부

10) 과학기술정보통신부, 「대형연구시설구축 내실화를 위한 사업추진 개선 방안(안)」, 2021.4.16.

첫째, 대형가속기와 같은 대형연구시설 구축 사업은 다양한 위험요인으로 인해 사업지연과 사업비 증가의 위험율이 높으므로, 정부는 대형연구시설 구축 사업의 특성을 고려한 효과적인 사업관리체계 구축에 노력할 필요가 있다.

과학기술정보통신부는 대형연구시설 구축 사업이 빈번하게 지연되는 원인을 범부처 차원의 일관된 관리체계 부재, 사업기획단계에 충분한 검토와 사업단계별 관리·평가체계 미흡, 사업단 전문인력 및 전문성·경험 부족 등으로 분석하였다.

[대형연구시설 구축사업의 문제점]

구분	주요 내용
의사결정체계	- 범부처 차원의 일관된 관리 체계의 부재 - 사업별 주요사항 결정을 위한 객관적·전문적 의사결정체계 부재, 사업별 추진위원회의 실질적 승인 권한 한계
사전기획	- 국가차원의 계획 없이 외부요인에 의한 Top-down 기획, 충분한 기술적 검토와 공감대 형성 없이 추진 - 기획단계에 충분한 사업리스크 고려 부재, 개념설계 단계에서 예산·기간을 확정하여 계획 변경 초래
단계검토	- 사업 중요시점마다 Phase(stage) 구분, 철저한 평가 부재 - 예비타당성 면제, 적정성검토 미실시로 불확실성 증가
자체역량 및 문화	- 사업책임자 및 관계자의 전문성 부족, 전문적 사업관리 인식 저조 - 사업관리 전문지식이나 대형연구시설 구축 경험이 없는 사업단장 선임 - 사업관리 인력의 전문지식·경험 부족
사업관리	- 사업단의 체계적인 사업관리가 미흡하고, 프로젝트의 리스크 관리 미흡 - 정부차원의 전문관리 조직 부재, 정부-사업단 간 의사소통 미흡

자료: 과학기술정보통신부, 「대형연구시설구축 내실화를 위한 사업추진 개선 방안(안)」, 2021.4.16.

이러한 점을 고려하여 과학기술정보통신부는 우선 대형연구시설 구축 추진체계 정비 차원에서 「대형연구시설구축 내실화를 위한 사업추진 개선 방안(안)」을 마련하였다. 동 방안의 주요 과제는 표준지침¹¹⁾ 제정, 대형연구시설전문위원회 신설, 총사업비관리 지침 개정, 예타조사에 전문위원회 참여, 설계적정성검토 운영 개선, 진도관리 표준화·전산화, 대형연구시설 구축 사업관리지원센터 운영 등이다.

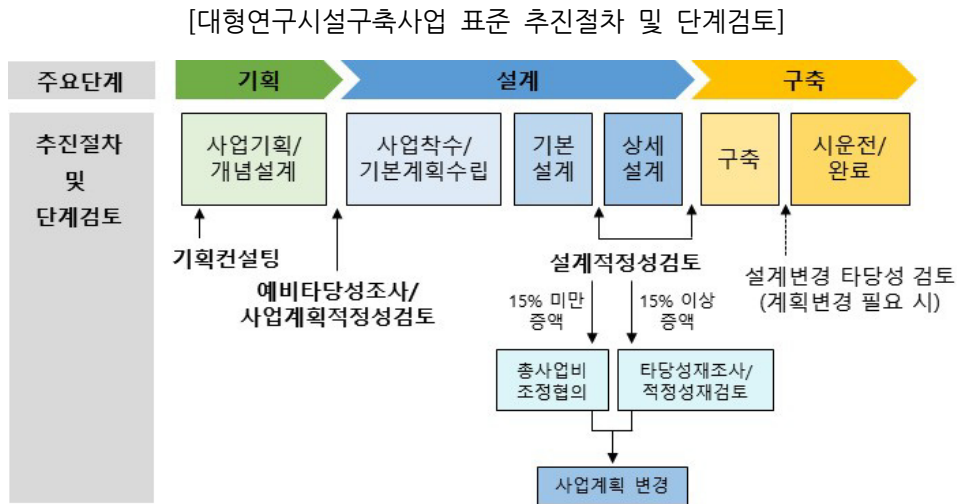
11) 2021년 12월 표준지침 마련 근거조항 신설을 위한 과학기술기본법 개정안이 국회 본회의를 통과하였고, 현재는 표준지침(안)을 마련 중에 있다.

[대형연구시설 구축사업 개선 방안 추진과제 추진실적]

구분	추진과제	추진 시기(안)	추진 여부	비고
대형연구시설구축 추진체계 정비	대형연구시설 구축관리 표준지침 제정	~'22.3분기	진행	- 과학기술기본법 개정(21.12.9. 본회의 통과, 7월 시행) - 표준지침(안) 마련 중
	과기자문회의 운영위원회 운영세칙 개정	~'21.3분기	완료	대형연구시설전문위원회 신설 (제10조제11호)
	대형연구시설 전문위원회 구성	~'21.4분기	완료	공모 추천 절차를 거쳐 사업관리전문가, 엔지니어, 기술분야별 전문가 등 20명
	총사업비관리지침 개정	~'22.4분기	예정	과기기본법시행령 개정으로 별도 표준지침 제정 근거 확보 후 기재부 협의 추진 예정
시설구축 단계별 사업계획 검토 내실화	예비타당성조사 전문위원회 참여	'22.~	예정	대형연구시설전문위원 임기 시작 이후('22.1월~)
	설계적정성검토 운영 개선	~'22.1분기	진행	설계검토와 장비도입심의 간 중복성 해소(검토기준 개선, 서면 검토 도입), 대형연구시설 구축사업 위험관리 업무 고도화
자체 사업관리 전문성 강화	사업관리전문가 및 전담부서 기준 마련	'22.~	진행	대형연구시설 구축관리 표준지침(안)에 반영 추진
사업관리 효율화 및 현장부담 완화	진도관리 표준화·전산화	'22.~	예정	지원센터 공모 지정 이후 본격추진
	의사결정체계 확립	'22~	예정	사업단별 자체 매뉴얼에 주관부처-전문기관-사업단 의사결정 절차 명시
	단계 중심 평가	'22.~	예정	주요 단계만 평가하여 현장 부담 경감
사업관리지원센터 운영	지원센터 운영방안수립 및 '22년 예산 반영	'21.4분기	완료	'22년도 국가연구시설장비 선진화지원사업에 반영
	맞춤형 컨설팅 시범적용	'21.3~4분기	완료	대형연구시설구축 8개 사업단 대상 1단계 서면검토, 2단계 현장인터뷰(8~9월), 3단계 현장컨설팅(10~11월) 추진
	기관선정 및 센터 지정·운영	'22.~	진행	과기기본법 시행령 개정 후 공모, 선정 및 본격 운영 예정
관련 제도 정비	과학기술기본법 시행령 개정	~'22.3분기	진행	과학기술기본법 개정('22.7.12.시행)에 따른 관계부처 협의 및 규제심사 진행

자료: 과학기술정보통신부

동 방안의 대상은 총 사업비 500억원 이상의 대형연구시설건축사업 중 ‘R&D가 포함되어 불확실성이 높은 사업’이다. 동 방안의 표준지침안으로 제시된 내용은 건축사업 전주기를 단계별로 구분하고 단계별 주요절차를 규정하며, 사업기획 단계의 컨설팅 지원과 설계 단계의 적정성 검토, 구축 단계에서 변경이 필요할 경우 과학기술자문회의(전문위원회)의 타당성 검토를 거치게 한다는 것이다.



자료: 과학기술정보통신부, 「대형연구시설건축 내실화를 위한 사업추진 개선 방안(안)」, 2021.4.16.

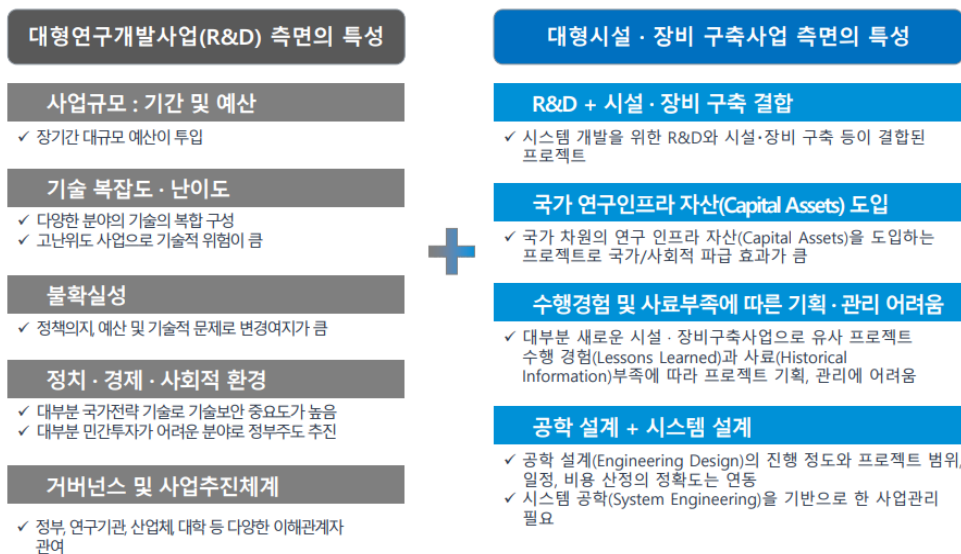
과학기술정보통신부는 동 방안에서 대형연구시설 구축 사업을 사업 기획단계, 설계 단계, 구축단계별로 설계의 적정성에 대한 컨설팅 및 자문을 실시할 계획이지만, R&D 측면에서 볼 때 ‘사업기획/개념설계’에 대한 기술개발 가능성, 기술개발 기간과 예산의 적정성을 검증하는 수준은 아니라고 보여진다. 또한, 동 방안에서는 예비타당성 조사를 거쳐 본 사업 추진이 결정된 이후에 기본설계와 상세설계가 진행되므로 현재의 사업 절차와 큰 차이가 없다고 보여진다. 이에 대형연구시설 구축 사업의 사업 지연과 사업비 증가의 위험을 최소화할 수 있도록 효과적인 사업관리체계 구축 방안을 마련할 필요가 있다¹²⁾.

12) 과학기술정보통신부는 동 개선방안의 사업절차는 ‘총사업비 관리지침 제4조 제1항 제1호에 규정되어 있는 사항이며, 개선방안의 단계별 적절성 검토는 현재의 사업절차 하에서 사업단에 추가적인 컨설팅, 자문 등을 지원함으로써 동 개선안이 연구현장에 또 다른 부담이 되지 않기 위함이라는 의견이다.

둘째, 대형연구시설 구축 사업의 기술개발 불확실성을 대응할 수 있도록, 사업추진 전에 ‘기술개발 검증 R&D’ 단계를 신설하고, 본 사업은 R&D단계와 시설구축단계로 구분하여 추진함으로써 사업 지연의 위험성을 최소화할 필요가 있다.

대형연구시설 구축사업은 일반적으로 ‘대형연구개발사업(R&D)’과 ‘대형시설·장비 구축 사업’이 결합된 특징을 갖고 있다. 중이온가속기 구축사업과 중입자가속기 구축사업의 경우도 장치개발 R&D와 장치·시설구축 사업으로 구분할 수 있다.

[대형연구시설구축사업의 특징]



자료: 한국연구재단, 「대형연구개발사업의 사업관리체계 개선방안 수립 연구」, 2021.8.

중이온가속기 구축 사업의 R&D는 가속기 핵심장치를 개발하는 것으로 당초 기획 당시에도 기술개발의 위험성이 높다는 우려가 있었음에도, 시설건설 사업이 동시에 추진되었다. 이후 시설건설 사업은 일정대로 추진되었지만 장치개발 R&D 사업이 지연되면서 전체 구축 사업의 사업기간과 사업비가 증가하게되었다.

중입자가속기 구축 사업도 R&D와 시설건설 사업이 동시에 추진되었고, 이후 장치개발이 실패하면서 장치도입으로 사업내용이 변경되었다. 그러나 개발장비에 맞춰 완공된 시설은 도입장비에 맞춰 개보수가 필요해지면서 사업지연 및 사업비 증가를 초래하였다.

[중이온가속기 및 중입자가속기 구축 사업의 구분]

구분	R&D	장치구축 및 시설건설
중이온가속기	가속장치, 기반장치, RI 생성장치, 실험장치 개발 중	중이온가속기 장치 구축 연구지원시설 등 (2021.5. 완공)
중입자가속기	의료용 중입자가속기 개발에서 장비도입으로 변경	중입자가속기 치료센터 건설 (2016.5. 완공)

자료: 국회예산정책처

이와 같은 대형연구시설 구축 사업의 R&D의 불확실성을 해소하기 위해서는 본 사업 추진 이전에 ‘사전 기술검증R&D’ 단계 신설을 고려해 볼 필요가 있다. ‘사전 기술검증R&D’는 대형연구시설의 본격적인 구축 추진에 앞서 핵심기술·장치의 개발과 제조기술 등에 대해 실험실 또는 파일럿(pilot) 수준까지 지원하여 기술개발 가능성을 검증하는 개념이다.

더 나아가 ‘사전 기술검증R&D’ 결과를 바탕으로 대형연구시설 구축 사업의 기본 설계까지 완료한 이후 예비타당성 조사를 통해 사업의 추진여부를 확정하고, 본 사업 추진 시에도 R&D와 시설건설 사업을 단계별로 추진하는 방식을 검토해볼 필요가 있다.

사전 기술검증R&D와 기본설계를 이후 예비타당성 조사를 시행한다면 대형연구시설 구축 사업의 합리적인 총 사업기간과 총 사업비를 도출할 수 있으며, 본 사업 추진 시에도 R&D와 시설건설을 단계별로 구분하여 시행한다면, R&D 위험으로 인한 사업 지연을 최소화할 수 있을 것으로 보여진다.

[대형연구시설 구축 사업 추진 절차 개선방안(예시)]

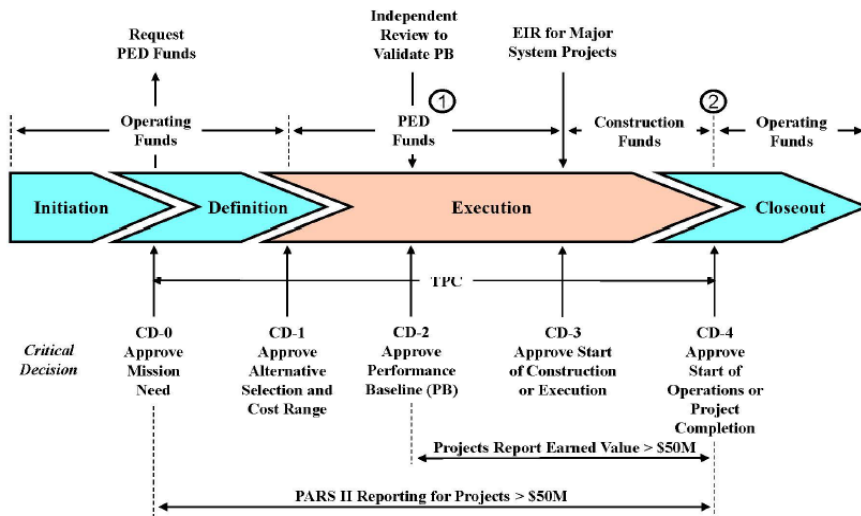


자료: 국회예산정책처

이러한 대형연구시설 구축 사업 체계 개선에 ‘사전 기술검증R&D’ 개념과 본 사업의 각 단계별 진행 방식은 미국 에너지부(DOE, Department of Energy)¹³⁾의 ‘CD(Critical Decision)체계’, 우리나라 국방R&D의 ‘기술성숙도¹⁴⁾평가’(Technology Readiness Assessment; TRA) 제도를 참고할 필요가 있다.

미국 에너지부는 대형연구시설 구축 사업의 추진 전에 핵심기술장치의 선행R&D를 우선 지원하고¹⁵⁾, 설계의 성숙 정도에 따른 불확실성을 인정하는 CD(Critical Decision) 체계를 대형 프로젝트에 의무적용하고 있다.

[미국 에너지부 자본 자산 취득 시스템(Line Item Capital Asset Projects) 개요]



출처: DOE, 「DOE Order 413.3B Chg 5:Program and project management for the acquisition of capital assets」, 2021.1.12.

- 13) 미국 에너지부는 최근 가속기 및 관련 기술의 중요성 인식하고 내부 산하에 2020년 4월 12일 ‘가속기 연구/개발 및 구축 담당실(ARDAP, Office of Accelerator R&D and Production)’을 설치하여, 입자물리/핵물리/기초과학/핵융합 분야 등과 긴밀히 협력하고 있다.
- 14) "기술성숙도(TRL : Technology Readiness Level)"란 해당 기술이 실제로 응용되어 쓰일 수 있기까지 어느 정도 준비가 되었는지를 확인하는 정량적인 수준으로 1단계부터 9단계까지로 구분
- 15) 미국 에너지부는 Major Items of Equipment(MIE) 프로그램을 통해 주요 연구시설장비의 지속적인 개발업그레йд, 대형연구시설의 본격적인 구축시작 이전에 핵심장치기술의 선행R&D 수행 등을 지원하고 있다. (자료: 함선영안지현, “대형연구시설 구축-중이온가속기를 중심으로”, 「KISTEP 기술동향브리프」, 2021.7.)

CD 체계는 총 프로젝트 비용 \$50M 이상의 모든 에너지부 프로젝트에 의무적으로 적용되는 주요 의사결정 절차이다. CD 체계는 다섯 단계로 구분되며 프로젝트 각 단계는 이전 단계의 CD를 완료해야 진행이 가능한 체계로 운영된다¹⁶⁾.

[미국 에너지부(DOE) 대형연구시설 구축 CD단계별 절차]

구분	주요 내용
CD-0	• 미션 필요성을 승인하는 단계로 이 단계의 승인은 본 프로젝트의 추진을 통해서만 목적을 달성할 수 있음을 의미
CD-1	• CD-1의 승인은 프로젝트 정의 및 개념설계(Conceptual Design)의 완료를 의미하며, 설계가 충분히 성숙되지 않았으므로 확정된 비용이 아닌 예비추정치의 '범위'를 검토
CD-2	• CD-2 승인 이전에는 예비설계(Preliminary Design)가 완료되어야 하고, CD-2 승인을 통해 프로젝트의 성공을 측정하는 총 프로젝트 비용 및 기간, 구축범위 등의 성능 기준선(PB, Performance Baseline)을 확정
CD-3	• 본격적인 구축의 승인
CD-4	• 프로젝트의 종료를 승인

자료: 함선영·안지현, “대형연구시설 구축-중이온가속기를 중심으로”, 「KISTEP 기술동향브리프」, 2021.7.

다음으로 우리나라 국방R&D의 기술성숙도 평가는 무기체계에 적용되는 ‘핵심기술 요소들(Critical Technology Elements; CTE)’¹⁷⁾이 어느 정도까지 성숙되어 있는지를 정량적으로 평가하는 제도이다.

동 제도가 도입된 배경에는 대부분의 실패한 국방R&D 사업에 준비되지 않은 기술의 문제가 있었으며, 이로 인해 사업의 일정 지연, 비용의 증가, 목표 달성 실패를 초래하였기 때문이다¹⁸⁾.

16) 미국 에너지부는 총 프로젝트 비용 규모에 따라 경중을 두어 Major System Project와 Non-Major system Project로 구분하고, CD 승인 권한을 다르게 설정하고 있다. 총 프로젝트 비용이 \$750M 이상인 프로젝트를 Major System Project로 구분하고, 부장관(Deputy Secretary)이 CD 승인 권한을 가지며, 총 프로젝트 비용이 \$50M 초과, \$750M 미만인 프로젝트는 Non-Major System Project로 구분하고, 차관(Under Secretaries) 혹은 프로그램 비서실(Program Secretarial Office)이 CD 승인 권한을 가진다. (자료: 함선영·안지현, “대형연구시설 구축-중이온가속기를 중심으로”, 「KISTEP 기술동향브리프」, 2021.7.)

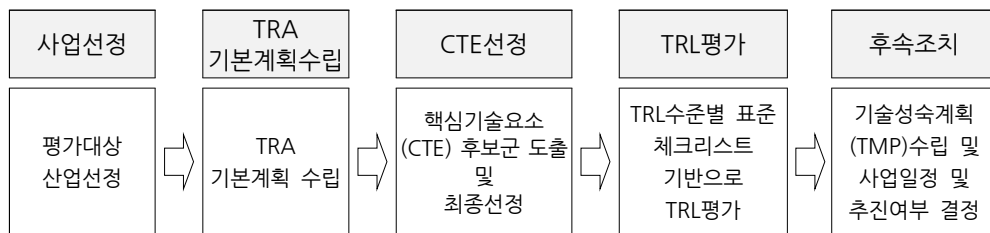
17) 「기술성숙도평가(TRA) 업무지침」

제3조(용어정의) 이 지침에서 사용되는 용어의 정의는 다음 각 호와 같다.

1. “핵심기술요소(CTE : Critical Technology Elements)”란 개별 무기체계연구개발 사업의 범주에서 해당사업 완수를 위해 기술적으로 중요한 요소로 사업의 목표(성능, 비용, 일정)를 충족하는데 결정적인 영향을 주거나, 기존 기술에 비해 개발 내용, 개발방식, 시연 환경, 설계 조건 등이 새롭게 적용되는 기술을 말한다.

현재 방위사업청은 「기술성숙도평가(TRA) 업무지침」(예규 725호, 2021.7.23.)¹⁹⁾를 제정하고 선행연구, 탐색개발, 탐색/체계개발 통합 추진, 핵심기술연구개발 등에 적용하고 있다. 기술성숙도평가(TRA) 평가결과는 연구개발 다음 단계 진입을 위한 근거자료로 활용되며, 평가결과 기술성숙도를 만족하지 못할 경우 개발기관이 제시한 기술성숙계획(개발계획, 기술이전, 공동연구 등)을 검토하여 사업일정 변경, 사업추진 여부 결정에 대해 판단하게 된다.

[국방R&D 기술성숙도평가 추진절차]



자료: 「기술성숙도평가(TRA) 업무지침」(예규 725호, 2021.7.23.)를 바탕으로 작성

대형연구시설 구축 사업은 R&D사업과 장비·시설구축 사업의 특성을 모두 갖고 있으며, 다양한 위험요인으로 인해 사업지연과 사업비 증가의 위험율이 높다. 과학기술정보통신부는 대형연구시설장비 구축 사업의 추진체계를 정비하고자 표준지침(안) 마련 등을 준비하고 있지만, 현재 체계와 큰 차이가 있다고 보기 어렵다.

이에 기획재정부와 과학기술정보통신부는 대형연구시설 구축 사업의 R&D에서 발생하는 기술개발 불확실성을 대응할 수 있도록, 사업기획 단계에 ‘기술개발 검증 R&D’ 단계를 신설하여 기술개발 가능성을 검토할 필요가 있다. 또한 R&D로 인한 사업지연 위험을 최소화할 수 있도록 본 사업 추진시에 R&D와 시설건설 사업을 단계별로 추진하는 절차를 고려해볼 필요가 있다²⁰⁾.

18) 양희승·조현기, 「국방R&D정책」, 피앤씨미디어, 2020.8.

19) 「기술성숙도평가(TRA) 업무지침」

제1조(목적) 이 지침은 선행연구, 탐색개발, 탐색/체계개발 통합 추진 사업, 신개념기술시범(ACTD)사업 및 핵심기술연구개발(시험개발)사업에 대한 기술성숙도평가(TRA) 업무를 위해 필요한 절차 등을 규정함을 목적으로 한다.

20) 대형연구시설 구축 사업의 대부분이 기획재정부 ‘총사업비 관리지침’의 대상사업으로, 상기 절차들은 ‘총사업비 관리지침’의 개정과 연계되어 검토될 필요가 있다.

(2) 대형가속기 구축 사업의 체계적인 중장기계획 수립 필요

2010년 정부는 국가과학기술위원회를 중심으로 대형연구시설에 대한 최초의 중장기 투자 계획인 「제1차 국가대형연구시설 구축지도」(2010.12.)를 수립하였다. 「제1차 국가대형연구시설 구축지도」의 수립 목적은 실효성 있고 체계적인 국가대형연구시설의 구축 전략을 마련하고, 궁극적으로는 대형연구시설의 투자 우선순위를 제시하는데 있었다.

[국가대형연구시설 구축지도 수립 개요]

구분	내용
목적	2025년까지 세계적 수준의 대형연구시설을 체계적으로 구축하고, 공동활용을 촉진하여 국가 과학기술 위상 및 경쟁력 제고
필요성	- 총체적인 수요조사 결과를 토대로 구축로드맵을 수립하여 대형연구시설의 전략적 투자 기반을 마련하고, 과학기술 선진화 및 신산업 발전에 기여 - 국내 연구기관(연구자)의 공동이용 증진 및 R&D 예산의 효율적 사용 등 시너지 효과 제고
성격 및 의의	- 정부 주도로 추진하는 대형연구시설에 대한 중장기 구축계획으로 국가적 대형 연구시설 구축의 기획·평가·예산배분의 근간 - 국가 차원에서 전략적 확충이 요구되는 중점 대형연구시설의 체계적 구축을 통해 국가전략적 중점기술 및 미래 첨단과학기술을 효과적으로 지원

자료: 국가과학기술위원회, 「제1차 국가대형연구시설 구축지도」, 2010.12.

1차 구축지도에서는 구축목적, 예산, 활용 등의 구축기준에 해당하는 ‘중점 대형연구시설’ 69개를 선정하고 과학기술적 중요성, 국가전략적 중요성, 경제사회적 파급성 등을 고려하여 투자 우선순위를 S, A, B 군으로 분류하였다.

국가과학기술위원회는 2012년에 「제1차 국가대형연구시설 구축지도」를 수정·보완한 「제2차 국가대형연구시설 구축지도」를 수립하였다. 1차와 달리 2차 구축지도에서는 작성대상 대형연구시설을 500억원 이상의 초대형시설로 한정하여 13개 시설에 대해서만 검토하였다. 그리고 S, A, B 유형의 투자 우선순위가 아닌 단기, 중기, 장기로 구분하여 투자시기를 제시하였다.

[제1차 및 2차 국가대형연구시설 구축지도 주요 내용 비교]

구분	「제1차 국가대형연구시설 구축지도」 (국가과학기술위원회, 2010.12.)	「제2차 국가대형연구시설 구축지도」 (국가과학기술위원회, 2012.12.)
목적	2025년까지 세계적 수준의 대형연구시설을 체계적으로 구축하고, 공동활용을 촉진	국가 정책적으로 단기·중기·장기로 추진할 13개 중점 대형연구시설 제시
제안시설 수 (검토시설수)	5대 중점투자분야별 69개 (282개)	500억원 이상 시설 13개 (53개)
평가기준	과학기술적 중요성, 국가차원의 활용성, 경제사회적 파급성	과학기술적 중요성, 국가차원의 활용성, 경제사회적 파급성
타당성검토	연구자 수요조사	수요조사, 실태조사, 성과분석 등
보완주기	2년(비정기적)	3년(주기적 보완)
투자시기	투자 우선순위(S, A, B군) - S군(신속히 구축) 21개, - A군(중요성은 높지만 신중한 접근 필요) 21개 - B군(유사시설이 존재하거나 수요가 불 명확한 시설) 27개	그룹별(단기, 중기, 장기) 투자시기 - 단기(5년 이내): 국가분자이미징센터 등 4개 시설 - 중기(6~10년): 다목적 저에너지 방사광시설 등 6개 시설 - 장기(10년 이후): 강력 펄스 중성자원 등 3개 시설

자료: 각 자료를 바탕으로 작성

1차 구축지도에서 4세대 선형 방사광가속기와 차세대 방사광가속기는 S군으로 분류되었다. 제2차 구축지도에서는 4세대 선형 방사광가속기는 2014년, 중이온가속기는 2017년, 중입자가속기는 2015년까지 구축을 계획하였다.

[제1차 국가대형연구시설 구축지도 내 대형가속기 투자 우선순위 평가 결과]

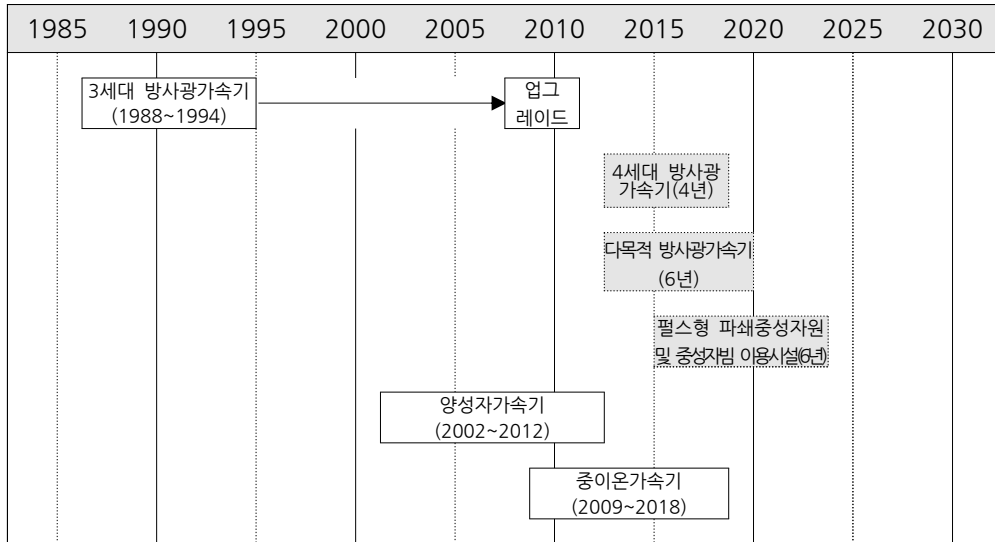
(단위: 억원, 년)

군별	대형연구시설명	구축비용	구축기간	운영비용	구축수준	구축방식
S군	1. 4세대 방사광가속기	4,260	4	400	세계최고	부분개발
	16. 차세대 다목적 3.5GeV 방사광가속기	5,000	6	500	세계최고	부분개발

주: 구축비용과 운영비용, 구축수준 등은 2011년 구축지도 수립 당시 기준

자료: 국가과학기술위원회, 「제1차 국가대형연구시설 구축지도」, 2010.12.

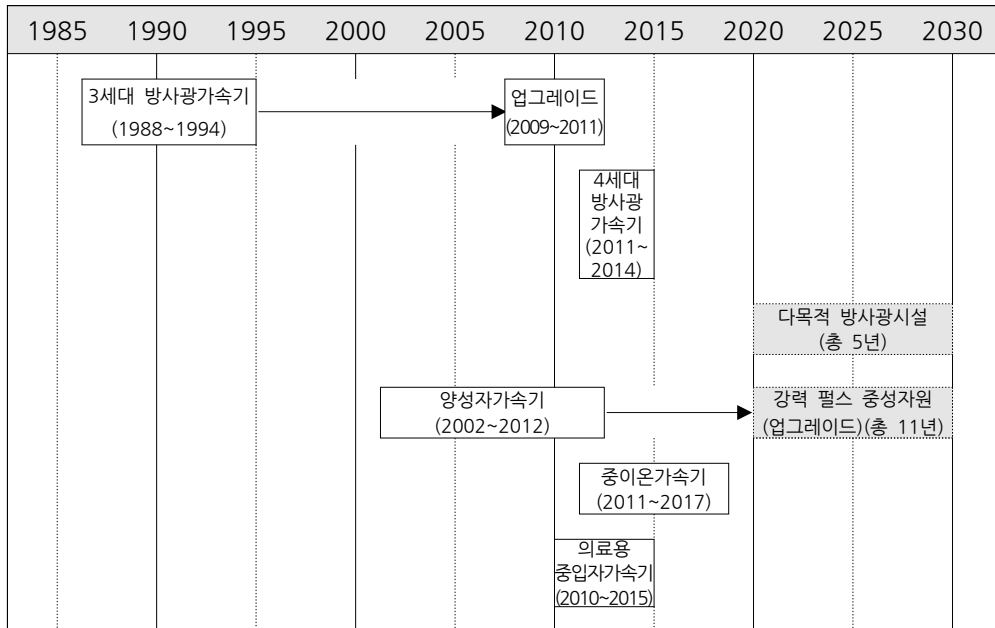
[1차 국가대형연구시설 구축지도 내 대형가속기별 구축 계획]



주: 점선 음영 시설은 당시 기준 신규 구축 계획 시설을 의미

자료: 국가과학기술위원회, 「국가대형연구시설 구축지도」, 2010.12.

[2차 국가대형연구시설 구축지도 내 대형가속기별 구축 계획]



주: 점선 음영 시설은 당시 기준 신규 구축 계획 시설을 의미

자료: 국가과학기술위원회, 「제2차 국가대형연구시설구축지도」, 2012.12.

첫째, 미래 과학기술 환경변화에 대응한 ‘대형연구시설의 중장기 로드맵’ 수립과 지속적인 수정·보완이 필요하며, 이를 바탕으로 대형가속기 구축 사업의 선택과 집중을 통해 재정투자 효율성을 높일 필요가 있다.

미국의 에너지부(DOE)는 분야별로 자문위원회에서 중장기계획을 수립하는데, 예를 들어 핵과학 분야는 핵과학자문위원회가 향후 10년간의 핵과학 연구와 대규모 기기·시설 구축에 대한 ‘핵과학의 중장기계획’을 수립하고 업데이트하고 있다.

유럽의 유럽전략포럼(ESFRI)은 유럽에 구축되는 연구인프라에 대한 중장기계획인 ‘ESFRI 로드맵’, 핵물리학유럽협력위원회(NuPECC)의 ‘핵물리학의 중장기계획’(LRP) 등에서 향후 10년 이상의 연구시설 구축 계획을 제시하고 있다.

일본의 일본학술회는 ‘마스터플랜’에서 대형 연구시설과 연구계획을 심사평가하고, 문부과학성은 마스터플랜을 바탕으로 예산배분관점의 우선순위를 설정하는 로드맵을 수립하고 있다.

[주요국의 대형연구시설 구축 중장기계획 수립 현황]

구분	주요 내용
미국	- 에너지부(DOE) 분야별 자문위원회를 통한 중장기계획 수립 - 예시) 핵과학자문위원회(NSAC, Nuclear Science Advisory Committee) ‘핵과학의 중장기계획’(LRP, Long Range Plan for Nuclear Science)에서 연구 우선순위, 필요한 대규모 기기 및 시설, 연구자금 등을 검토하여 제안
유럽	- 유럽전략포럼(ESFRI)의 ‘ESFRI 로드맵’, ‘핵물리학의 중장기계획’(LRP) 등 수립 ‘ESFRI(European StrategyForum on Research Infrastructure) 로드맵’은 향후 10년 이후 유럽에 구축되는 연구인프라에 대한 중장기계획 - 핵물리학유럽협력위원회(NuPECC, Nuclear Physics European Collaboration Committee)의 ‘핵물리학의 중장기계획’(LRP, Long Range Plan in Nuclear Physics) - 프랑스 고등교육연구부의 ‘연구인프라 국가전략(Stratégie Nationale des Infrastructures de Recherche)’ - 독일 교육연구부(BMBF, Bundesministerium für Bildung und Forschung)의 연구인프라 국가 로드맵
일본	- 일본학술회(SCJ, Science Council of Japan)는 ‘마스터 플랜(Master Plan)’ 수립 - 과학적인 관점에서 대형 시설·연구 계획을 심사·평가(Master Plan 수립 연도: 2010, 2014, 2017, 2020) - 문부과학성은 일본학술회(SCJ)에서 발표한 Master Plan을 바탕으로 예산 배분 관점에서의 우선순위를 설정하는 ‘로드맵(Roadmap)’ 수립

자료: 함선영·안지현, “대형연구시설 구축 중이온가속기를 중심으로”, 「KISTEP 기술동향브리프」, 2021.7.

이와 같이 미국, 유럽, 일본 등의 주요국은 중장기적인 관점의 대형연구시설 구축 계획을 자문위원회 검토, 연구현장 수요 조사 등을 바탕으로 수립하고 주기적인 업데이트를 하고 있다.

우리나라는 「과학기술기본법」 제28조²¹⁾, 「과학기술기본법 시행령」 제42조²²⁾에서 정부가 연구시설·장비현황을 주기적으로 조사하고, 연구시설·장비의 확충·고도화, 관리·운영·공동활용 및 처분에 대한 중장기 계획을 수립하도록 규정하고 있다. 그러나 연구시설·장비의 확충·고도화 측면에서 2010년 「제1차 국가대형연구시설 구축지도」와 2012년에 1차 구축지도를 보완한 「제2차 국가대형연구시설 구축지도」를 수립한 이후 현재까지 추가적인 업데이트는 없다²³⁾²⁴⁾.

2020년 3월 과학기술정보통신부는 「대형가속기 장기로드맵 및 운영전략」을 통해 국내 대형가속기들의 향후 구축·운영계획을 제시했으나, 연구현장의 의견 수렴 여부, 계획이행 여부 점검 및 효과 분석, 내·외부환경 변화를 반영한 업데이트 계획 등은 제시되어 있지 않다. 또한 「국가연구시설 증기(‘22~’24) 확충·고도화 방향」을 2020년도에 수립했지만, 증기적(3년) 대형연구시설의 과학기술분야별 구축 방향만을 제시하는데 그쳐 실효성이 부족하다.

21) 「과학기술기본법 시행령」

제28조(연구개발 시설·장비의 확충·고도화 및 관리·활용) ① 정부는 효율적이고 균형 있는 연구개발을 추진하기 위하여 필요한 연구개발 시설과 장비 등을 확충·고도화하고 관리·운영·공동활용 및 처분하기 위한 시책을 세우고 추진하여야 한다. <개정 2015. 6. 22.>

22) 「과학기술기본법 시행령」

제42조(연구개발 시설·장비의 확충·고도화등의 추진) ① 관계 중앙행정기관의 장은 법 제28조제1항에 따라 연구개발 시설·장비의 확충·고도화, 관리·운영·공동활용 및 처분(이하 “확충·고도화등”이라 한다)을 효율적으로 추진하기 위하여 연구개발 시설·장비 현황을 주기적으로 조사하여야 한다. <개정 2015. 12. 22.>

② 관계 중앙행정기관의 장은 제1항에 따른 조사결과를 반영하여 다음 각 호의 계획을 수립하고, 이를 국가연구개발사업에 대한 중·장기계획에 반영하여야 한다. <개정 2015. 12. 22.>

1. 관련 연구개발사업에 필요한 연구개발 시설·장비의 확충계획
2. 연구개발 시설·장비의 관리·운영 및 공동활용 계획
3. 연구개발 시설·장비의 고도화계획
4. 연구개발시설·장비의 처분에 관한 계획

23) 「제1차 국가대형연구시설 구축지도」의 총 계획기간은 15년이었으며, 그 기간 동안 다양한 대·내외 환경변화가 예상되므로 주기적인 수정·보완의 필요성을 제시하였다.

24) 과학기술정보통신부는 연구시설·장비 관리·운영·공동활용 측면의 중장기계획으로 「국가연구시설 장비의 운영 활용 고도화계획(안)」을 5년 단위로 수립하고 있다.

그리고 과학기술정보통신부는 대형연구시설 실태조사를 2017년, 2018년 2차례 실시하기는 했지만, 그 이후 일반 국가연구시설장비 실태조사와 통합하면서 대형연구시설에 대한 별도의 실태조사를 실시하고 있지 않다.

[우리나라 대형 연구시설장비 관련 중장기 로드맵 수립 및 실태조사 추진현황]

연도	국가대형연구시설 중장기 로드맵	국가대형연구시설 실태조사
2010	「제1차 국가대형연구시설 구축지도」	
2012	「제2차 국가대형연구시설 구축지도」	
2018		「2017 대형연구시설 실태조사」
2019		「2018 대형연구시설 실태조사」
2020	「대형가속기 장기로드맵 및 운영전략」 「국가연구시설 중기(‘22~’24) 확충·고도화 방향」	

자료: 과학기술정보통신부

과학기술정보통신부는 「대형가속기 장기로드맵 및 운영전략」을 통해 대형가속기 분야의 중장기 운영방향을 제시하였지만, 단발성 계획에 그칠 우려가 있으며 지속적인 수정·보완이 요구된다. 이와 같이 대형가속기 분야에 대한 장기 로드맵 수립도 필요할 수 있으나, 대형연구시설장비의 중요성과 재정투자의 규모를 고려할 때 국가차원의 체계적이고 종합적인 대형연구시설장비 중장기 로드맵 수립하에 과학기술분야별 로드맵이 연계되는 것이 타당할 것으로 보여진다. 또한, 미래 환경변화에 대응할 수 있도록 연구현장의 수요조사, 구축 효과분석 등을 반영한 지속적인 수정·보완이 추진될 필요가 있다²⁵⁾.

둘째, 대형가속기 구축 사업의 사업목표와 추진 방향을 대형가속기별 근거 법률의 분야별 중장기계획과 효과적으로 연계하여 체계적인 사업 추진을 도모할 필요가 있다.

대형가속기별 구축 사업은 대규모 재정이 투자되는 사업으로 명확한 법률에 근거하여 추진하여야 한다.

3세대 및 4세대 선형 방사광가속기는 「과학기술기초법」 제28조²⁶⁾ 및 동 법률 시행

25) 과학기술정보통신부는 이러한 의견에 대해 "대형연구시설 중장기 구축 로드맵"을 과학기술혁신본부 차원에서 수립하여도 각 부처별 예산심의, 예비타당성 조사 등의 창구가 별도로 있고, 외부요인으로 구축되는 사례가 많아 로드맵의 실효성이 부족하여 2012년 이후 수립하지 않고 있다고 설명하였다. 또한, 대형연구시설의 구축 로드맵은 각 부처별이나 과학기술 분야별, 대형연구시설별로 수립하고 혁신본부가 총괄 취합하는 방안이 적절한 것으로 판단하고 있다는 의견을 제출하였다.

26) 「과학기술기초법」

제28조(연구개발 시설·장비의 확충·고도화 및 관리·활용) ② 정부는 제1항에 따른 연구개발 시설·장

령 제42조27)의 연구개발 시설과 장비 확충·고도화에 대한 정부 재정지원의 근거 조항, 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」제6조28)와 동 법률 시행령 제4조29)의 기초연구에 대한 정부의 재정지원 조항에 근거하고 있다. 그 외 방사광가속기 관리위탁 운영을 위한 법률은 「국유재산법」 제29조30)에 근거하고 있다.

양성자가속기는 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」제6조와 동 법률 시행령 제4조를 비롯해, 「원자력진흥법」 제12조31)의 원자력연구개발사업 추진 조항에 근거를 두고 있다. 또한, 양성자가속기는 「중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 유치지역 지원에 관한 특별법」32)에 따라 방사성폐기물 처분시설을 유치한 경주 지역에 대한 지원 시설이란 성격도 있다.

-
- 비의 확충·고도화, 관리·운영·공동활용 및 처분을 추진하기 위하여 필요한 때에는 대통령령으로 정하는 바에 따라 이를 지원할 기관을 지정하고 그 운영에 필요한 경비를 지원할 수 있다. (이하 생략)
- 27) 「과학기술기본법 시행령」
제42조(연구개발 시설·장비의 확충·고도화등의 추진) ⑤ 관계행정기관장은 대학, 연구기관 및 기업에 연구개발 시설·장비의 확충 및 운영에 필요한 경비의 전부 또는 일부를 지원할 수 있다.
- 28) 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」
제6조(기초연구사업의 추진) ② 제1항에 따른 기초연구사업 추진에 필요한 비용은 정부 또는 정부 외의 자의 출연금(出捐金), 「과학기술기본법」 제22조에 따른 과학기술진흥기금(이하 “진흥기금”이라 한다)의 운용수익금과 제13조에 따른 공공기관의 연구개발비로 충당한다.
- 29) 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률 시행령」
제4조(시행계획의 수립 및 시행) ① 법 제5조제3항에 따른 시행계획(이하 “시행계획”이라 한다)에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.
1.~3. (생략)
4. 다음 각 목의 구분에 따른 부처별 시책
나. 과학기술정보통신부
1) ~ 5) (생략)
6) **방사광가속기(放射光加速器), 핵융합 연구장치 등 대형 연구시설의 운영 및 공동이용 지원 등**
7) 국립·공립연구기관의 기초연구활동 장려 및 지원 등
8) 과학기술분야 연구인력의 양성, 활용 및 처우개선 방안
- 30) 「국유재산법」
제29조(관리위탁) ① 중앙관서의 장은 행정재산을 효율적으로 관리하기 위하여 필요하면 국가기관 외의 자에게 그 재산의 관리를 위탁(이하 “관리위탁”이라 한다)할 수 있다. (이하 생략)
- 31) 「원자력진흥법」
제12조(원자력연구개발사업의 추진) ① 과학기술정보통신부장관은 제10조제1항에 따라 수립된 부문별 시행계획에 따라 원자력연구개발사업계획을 수립하고, 이를 효율적으로 추진하기 위하여 매년 연구과제를 선정하여 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」 제14조제1항 각 호의 기관 또는 단체와 협약을 맺어 연구개발하게 할 수 있다.
- 32) 「중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 유치지역지원에 관한 특별법」
제1조(목적) 이 법은 중·저준위(中·底準位) 방사성폐기물 처분시설을 유치한 지역에 대한 지원체계를 마련하여 유치지역의 발전 및 주민의 생활 향상에 이바지함을 목적으로 한다.

중입자가속기는 「방사선 및 방사성동위원소 이용진흥법」 제6조33)의 방사선 등의 연구기반 확충 및 지원과 「원자력진흥법」 제12조의 방사선 및 원자력의 연구개발사업 지원 조항, 그리고 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」 제14조34)의 특정연구개발사업 추진 조항을 사업추진 근거로 두고 있다.

중이온가속기는 「국제과학비즈니스벨트 조성 및 지원에 관한 특별법」 제27조35)의 대형기초연구시설 설치 조항에 사업추진 근거를 두고 있다.

[대형가속기 구축 및 운영의 재정지원 근거 법률]

구분	주요 내용
3세대·4세대 방사광가속기	- 「과학기술기본법」 제28조(연구개발 시설·장비의 확충·고도화 및 관리·활용), 동법 시행령 제42조(연구개발 시설·장비의 확충·고도화등의 추진) ※ 연구개발 시설과 장비 등을 확충·고도화 - 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」 제6조(기초연구사업의 추진), 동법 시행령 제4조(시행계획의 수립 및 시행) ※ 방사광가속기, 핵융합 연구장치 등 대형 연구시설의 운영 및 공동이용 지원 등 - 「국유재산법」 제29조(관리위탁) - 「방사광가속기등공동이용연구사업지원규정」
다목적 방사광가속기	- 「과학기술기본법」 제28조(연구개발 시설·장비의 확충·고도화 및 관리·활용), 동법 시행령 제42조(연구개발 시설·장비의 확충·고도화등의 추진) ※ 연구개발 시설과 장비 등을 확충·고도화 - 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」 제6조(기초연구사업의 추진), 동법 시행령 제4조(시행계획의 수립 및 시행)

33) 「방사선 및 방사성동위원소 이용진흥법」

제6조(방사선등의 연구기반 확충 및 지원) ② 정부는 방사선등의 연구를 위하여 설립된 법인 및 단체의 활동에 드는 경비의 전부 또는 일부를 지원할 수 있다.

34) 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」

제14조(특정연구개발사업의 추진) ① 과학기술정보통신부장관은 기초연구의 성과 등을 바탕으로 하여 국가 미래 유망기술과 융합기술을 중점적으로 개발하기 위한 연구개발사업(이하 “특정연구개발사업”이라 한다)에 대하여 계획을 수립하고, 연도별로 연구과제를 선정하여 이를 다음 각 호의 기관 또는 단체와 협약을 맺어 연구하게 할 수 있다. (이하 생략)

35) 「국제과학비즈니스벨트 조성 및 지원에 관한 특별법」

제27조(대형기초연구시설의 설치 등) ① 국가는 거점지구에 대형기초연구시설을 설치할 수 있다.

②~③항 생략

④ 제1항의 대형기초연구시설의 설치와 운영 및 공동이용을 위하여 필요한 비용은 정부 또는 정부 외의 자의 출연금으로 충당한다.

구분	주요 내용
양성자가속기	- 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」 제6조(기초연구사업의 추진), 동법 시행령 제4조(시행계획의 수립 및 시행) - 「원자력진흥법」 제12조(원자력연구개발사업의 추진) - 「중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 유치지역지원에 관한 특별법」 ※ 유치지역 선정, 지자체 사업 분담금 및 공유재산 대부 등
중입자가속기	- 「방사선 및 방사성동위원소 이용진흥법」 제6조(방사선 등의 연구기반 확충 및 지원) - 「원자력진흥법」 제12조(원자력연구개발사업의 추진) - 「기초연구진흥 및 기술개발 지원에 관한 법률」 제14조(특정연구개발 사업의 추진)
중이온가속기	- 「국제과학비즈니스벨트 조성 및 지원에 관한 특별법」 제27조(대형기초연구시설의 설치 등)

자료: 과학기술정보통신부

그리고 대형가속기 구축·운영 사업은 해당 근거 법률에서 수립하고 있는 중장기계획과 대형가속기별 사업목표, 추진 방향 등이 연계되어 추진되는 것이 타당하지만, 대형가속기를 비롯한 일부 대형연구시설 사업들이 중장기계획과의 연계가 미흡하다고 조사된 바 있다³⁶⁾.

예를 들어, 중이온가속기 구축사업의 근거 법률인 「국제과학비즈니스벨트 조성 및 지원에 관한 특별법」에서는 「국제과학비즈니스벨트 기본계획」을 수립하고 있다. 동 계획에서는 중이온가속기 구축 사업의 체계적 추진, 활용도 제고를 위한 공동 R&D, 기술인력 교류 추진 등에 대한 구체적인 중장기 계획을 제시하고 있었다.

그리고 중입자가속기 구축사업과 양성자가속기 구축사업의 근거법률인 「원자력진흥법」에서는 5년마다 「원자력진흥종합계획」, 「방사선진흥계획」을 수립한다. 동 계획에서는 가속기 기반 방사선 치료기술 개발, 중입자 치료센터 전문화 등 중입자가속기를 활용한 의료기술 개발 계획과 양성자가속기 성능향상 등에 대한 일부 계획을 제시하고 있었다.

이에 반해 방사광가속기 구축사업의 근거 법률로 제시한 「과학기술기본법」에 따라 5년 마다 수립되는 「제4차 과학기술기본계획(18~22)」에는 국가연구시설장비 활용성 제고를 위한 연구장비 활용 포털 접근성 강화, 공동활용체계 구축 등의 주요 내용을 담고 있지만, 방사광가속기 등 대형가속기 구축에 대한 구체적인 중장기 계획은 담고 있지

36) 신규 구축 중인 13개 대형연구시설 중 과학기술분야 중장기계획과 연계된 시설은 6개(46.2%)에 불과하고, 대형연구시설의 구축과 운영에 관한 별도의 관리 법령과 규정을 보유한 시설의 비율도 3개(23.1%)에 불과했다.

않다. 또 다른 근거 법률인 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」에서는 「제4차 기초연구진흥종합계획(‘18~’22)」을 수립하고 있다. 동 중장기계획에서는 대형연구시설 장비에 대한 활용성 제고와 사업관리 강화 계획을 제시하였지만, 대형가속기 구축과 운영에 관한 범정부 차원의 구체적인 중장기계획은 부재했다.

대형가속기별 구축 사업은 대규모 재정이 투자되는 사업으로 명확한 법률에 근거하여 추진하고, 근거 법률에서 수립하고 있는 중장기계획에 대형가속기별 사업목표, 추진 방향 등을 포함하여 작성하는 것이 필요하다. 그러나 앞서 살펴본 결과 방사광가속기의 경우 근거 법률의 중장기계획과 연계성이 다소 부족하므로 개선 필요성을 검토할 필요가 있다.

[대형가속기 근거 법령의 중장기계획 내 주요과제]

법률	중장기계획명	대형가속기 관련 주요 계획
「과학기술 기본법」	「제4차 과학기술 기본계획(‘18~’22)」 (2018.2.23.)	• 국가연구시설장비 활용성 제고 - 연구장비 활용포털(ZEUS) 중심의 정보 일원화로 연구장비 활용 취약계층 접근성 강화 - 지역 수요 등에 기반하여 R&D 기반구축시설의 특성화 유도 및 분야 간, 기관 간 네트워크 기반의 공동 활용체계 구축
「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」	「제4차 기초연구 진흥종합계획(‘18~’22)」 (2018.6.29.)	• 대형 연구장비 구축·운영을 통하여 국내외 연구자들이 모여 연구하는 관련 분야의 허브로 육성 - 대형연구시설장비(가속기 포함)의 사업별 특성에 맞는 종합사업관리(Project Management) 계획 수립을 통해 구축 관리를 강화

법률	중장기계획명	대형가속기 관련 주요 계획
「원자력 진흥법」	「제5차 원자력 진흥종합계획 (‘17~’21)」 (2017.3.22.)	• 융·복합 첨단 방사선 치료기술 개발(가속기 기반 고정밀 치료기술 개발) • 방사선 신산업 창출을 위한 시설장비 구축 및 활용도 제고 - 대형 방사선시설의 성공적 구축 및 지역거점별 기능 전문화 (중입자치료센터)
	「제6차 원자력 진흥종합계획 (‘22~’26)」 (2021.12.27.)	• 과학기술 경쟁력 제고에 연구인프라 활용 극대화 - 중입자가속기 기반 치료센터 구축 및 양성자 가속기 성능향상 등 추진
	「제2차 방사선진흥계획 (‘17~’21)」 (2017.3.22.)	• 한국원자력의학원 성과 제고 및 의료산업 기초역량 강화 - 중입자치료센터의 정상 추진을 위해 필요 시 병원과 센터의 운영권을 참여기관에 위탁하는 등 분담금 이행 노력 • 방사선 시설·장비 활용도 제고 - 양성자가속기 활용성 향상을 위해 빔라인을 확충하고, 에너지 업그레이드 등 장비보완 검토
「국제과학 비즈니스벨트 조성 및 지원에 관한 특별법」	「국제과학비즈니스 벨트 기본계획 변경」 [2012~2021] (2015.8.26.)	• 세계 최고 수준의 중이온가속기 구축·활용 - 선진국 가속기 연구소와의 공동 R&D 및 기술 인력 교류 추진 - 사업의 체계적 수행을 위해 전담 사업단 운영 - 활용도 제고를 위한 활용시설 구축 및 이용자그룹 육성 - 국내 산업체의 적극 참여 및 활용을 통한 기술력 확보
	「국제과학비즈니스 벨트 2차 기본계획 (‘22.~’30)」 (2022.3.22.)	• 최고 수준의 중이온가속기 구축 완성 및 안정적인 운영을 통한 글로벌 기초연구 거점으로 안착 - 중이온가속기 구축의 단계적 추진을 통해 장치운영의 신뢰성 및 효율성 확보 - 핵물리분야부터 물성과학의생명 등 다양한 기초연구 분야까지 단계별 활용 확대를 통한 세계적 기초연구 거점시설로 활용

자료: 과학기술정보통신부

가. 대형가속기 운영체계 현황

(1) 3세대·4세대 방사광가속기 운영체계

3세대·4세대 방사광가속기의 운영은 포항가속기시설이 국유화되면서, 2018년부터 포항공과대학교 포항가속기연구소에서 위탁운영을 맡고 있다. 현재 연구소는 연구소장 아래 3개 단(3세대, 4세대, EUV)으로 구성되어 있으며, 2021년 말 기준 총 인원은 255명(정규직 및 계약직 포함), 방사광가속기 운영을 위한 연간 예산은 2022년 기준 558억원³⁷⁾이다.

[포항가속기연구소 조직도]



주: EUV가속기 구축사업단은 사업기간('20~'22) 동안 한시적으로 운영자료: 포항가속기연구소

37) 3세대 가속기 운영 370억원, 4세대 가속기 운영 188억원

포항가속기연구소 운영예산은 과학기술정보통신부의 ‘방사광가속기공동이용연구지원38)’ 사업으로 지원되고 있다. 방사광가속기공동이용연구지원사업의 2022년 예산은 625억원으로 3세대 방사광가속기 운영에 370억원, 4세대 선형 방사광가속기 운영에 188억원, 가속기핵심기술개발 10억원, 방사광가속기 핵심장치 국산화기술개발에 57억원이 편성되었다.

[방사광가속기공동이용연구지원 사업 예산 현황]

(단위: 백만원, %)

사업명	2020 결산	2021		2022 예산(B)	증감	
		본예산	추경(A)		B-A	(B-A)/A
방사광가속기공동이용연구지원	54,924	57,625	57,625	62,516	4,891	8.5
방사광가속기공동이용연구지원사업	53,924	55,125	55,125	55,816	691	1.3
- 3세대가속기 운영	36,222	34,980	34,980	37,010	2,030	5.8
- 4세대가속기 운영	17,702	20,145	20,145	18,806	△1,339	△6.6
가속기핵심기술개발	1,000	1,000	1,000	1,000	0	0.0
방사광가속기 핵심장치 국산화기술개발	-	1,500	1,500	5,700	4,200	280.0

자료: 과학기술정보통신부

포항가속기연구소의 2021년 수입액은 581억원이며 정부출연금인 576억원, 기타 5억원³⁹⁾이다. 지출은 인건비 205억원, 사업비 324억원, 경상경비 26억원 등이다.

[포항가속기연구소 수입·지출 현황]

(단위: 백만원)

구분		'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22
수입	정부출연사업비	50,648	57,754	59,189	52,636	54,924	57,625	62,516
	지자체출연	-	-	-	-	-	-	-
	기타 수입	400	381	486	451	246	502	-
	합계	51,048	58,135	59,675	53,087	55,170	58,127	62,516
지출	인건비	15,161	16,236	17,581	19,656	19,805	20,506	22,287
	사업비	32,296	38,010	38,460	29,797	31,731	32,487	30,895
	경상경비	2,591	2,189	2,634	2,634	2,634	2,634	2,634
	기타 지출	1,000	1,700	1,000	1,000	1,000	2,500	6,700
	합계	51,048	58,135	59,675	53,087	55,170	58,127	62,516

주: 방사광가속기공동이용연구지원 사업 결산 기준, 2022년은 예산 기준

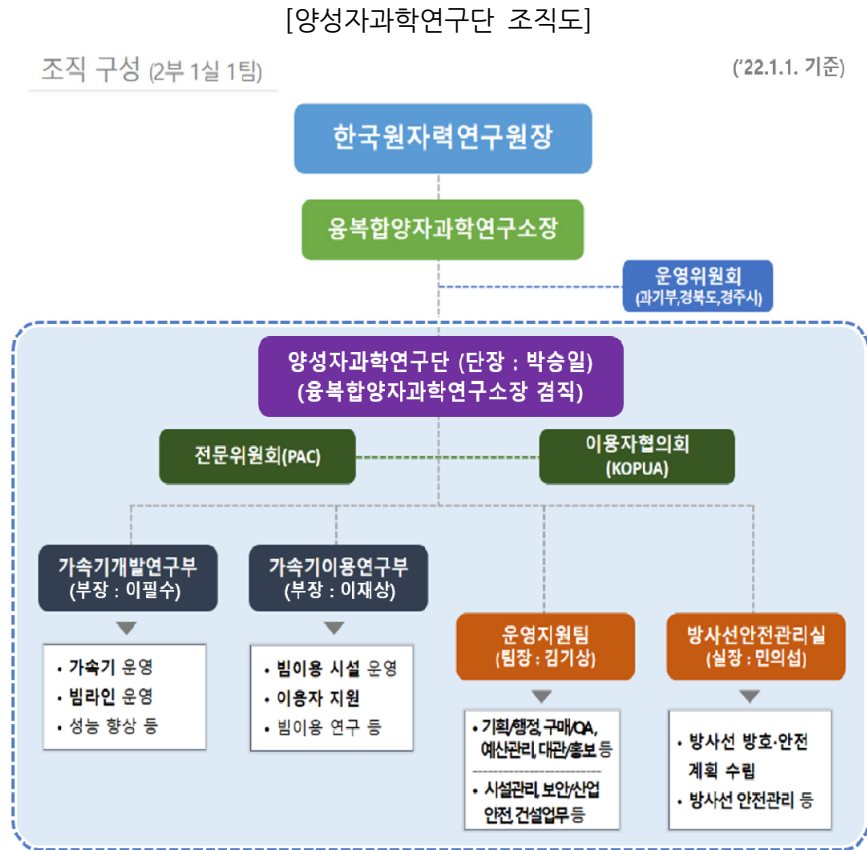
자료: 과학기술정보통신부

38) 코드: 일반회계 1235-411

39) 기타 수입 중 가속기 이용료 수입액은 2.6억원이다.

(2) 양성자가속기 운영체계

현재 양성자가속기의 운영은 한국원자력연구원 산하 양성자과학연구단에서 맡고 있다. 연구단장 아래 2개 연구부 1실, 1팀으로 구성되어 있으며, 2021년 말 기준 총 인원은 57명(정규직 및 계약직 포함)이다.



자료: 양성자과학연구단

양성자과학연구단의 2021년 수입액은 175억원이며 정부출연금인 172억원으로 대부분을 차지하고 있다. 정부출연금은 과학기술정보통신부의 ‘한국원자력연구원 연구운영비 지원(R&D)⁴⁰⁾’ 사업에 포함되어 지원되고 있다.

40) 코드: 에너지 및 자원사업특별회계 2241-401

그 외 2021년 기타수입은 2억 9,500만원으로 가속기 이용료 수입액 1억원을 포함하고 있다. 지출은 인건비 31억원, 사업비 142억원, 경상경비 2억원이었다. 양성자과학연구단 2022년 예산은 159억원으로 인건비 26억원, 사업비 130억원 등이 편성되었다.

[한국원자력연구원 연구운영비 지원(R&D) 사업 예산 현황]

(단위: 백만원, %)

사업명	2020 결산	2021		2022 예산(B)	증감	
		본예산	추경(A)		B-A	(B-A)/A
한국원자력연구원 연구운영비 지원(R&D)	139,431	149,049	149,049	153,769	4,720	3.2
양성자과학연구단 운영	15,652	14,873	14,873	14,492	△381	△0.03

자료: 과학기술정보통신부

[양성자과학연구단 수입지출 현황]

(단위: 백만원)

구분		'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22
수입	정부출연사업비	18,030	18,190	17,851	17,522	17,189	17,240	15,654
	지자체출연	-	-	-	-	200	-	-
	기타 수입	410	218	367	214	363	295	229
	합계	18,440	18,408	18,218	17,736	17,752	17,535	15,883
지출	인건비	2,128	2,694	2,946	3,374	3,261	3,090	2,630
	사업비	16,172	15,586	15,055	14,188	14,282	14,213	13,024
	경상경비	140	128	217	174	209	232	229
	합계	18,440	18,408	18,218	17,736	17,752	17,535	15,883

주: ~2021년도는 결산 기준, 2022년은 예산 기준

자료: 과학기술정보통신부

나. 대형가속기의 운영체계 개선 방안

대형가속기 이용 분야는 가속된 입자를 특정한 목적으로 위해 직간접적으로 이용하는 기술 또는 산업 분야로 정의한다. 대형가속기는 개발 초기에 기초과학 분야에 한정적으로 이용되었으나, 가속기 제작 기술과 분석기술의 발전으로 반도체, 에너지환경, 소재, 제약 등의 첨단산업분야의 활용이 증가하고 있다.

[대형가속기 이용 분야]

구분	주요 내용
기초과학	입자충돌 시설, 방사광가속기 시설, 파쇄증성자원 같은 초대형시설부터 전자현미경장치에 이르기까지 가속된 하전입자의 기초과학적 이용
에너지/환경	- 에너지 생산 및 가공 등에 활용하거나 환경 정화에 이용하는 분야 - 입자 빔이 물질 안으로 침투하여 화학적 결합구조를 바꾸거나 물리적 핵 구조를 변형(핵 연료 및 핵 폐기물 처리에 이용 등)
첨단소재/정밀부품	- 산업용 가속기는 대부분이 전자 가속기로 각종 물질의 표면 성질을 변화시키거나, 반도체 패터닝, 용접장치, 오피수 처리 등에 활용 - 에너지·환경소재(이차전지, 태양전지, 수소저장매체, 광화학촉매 등), 전자소재(반도체, 하드디스크, MRAM 등의 자성소재, 디스플레이 등), 고분자재료, 고부가가치철강산업, 항공 및 자동차 소재 등 - 초소형 모터, 초소형 기계 부품, 의료용 미세 바늘, 마이크로 렌즈, 군용 무기부품 등의 금형을 방사광을 이용한 금속 식각을 통해 제조
의료/신약	- 입자가속기를 활용한 환자 진단 및 치료에 활용 - 의료용 방사성동위원소는 전체 방사성동위원소 시장의 80%를 차지하고 있으며, 2022년 시장규모는 약 82억 달러로 전망 - 세계적으로 방사광가속기를 활용한 의약품 개발이 활발함 - 미국 국립암연구소, 방사선치료암연구단체, 유럽암치료연구단체는 방사선 민감제 개발 및 임상연구를 지속적으로 진행 - 스위스의 로슈, 노비티스 등의 신약기업을 배경으로 유럽의 ESRF는 범라인의 자동화 등을 통해 단백질 구조를 분석

자료: 과학기술정보통신부·KISTEP

3세대 방사광가속기 연구성과로는 반도체 소자 소형화 기술인 ‘비정질 질화붕소’ 절연체 개발, 무-유기 하이브리드 태양전지 구현, 3차원 그래핀 합성법 개발, COVID-단백질의 결합구조 규명 등의 성과에 기여하였다.

4세대 방사선가속기는 과냉각된 물의 결정구조 실증, 세계 최초로 분자가 탄생하는 순간을 포착하는 성과 등을 창출했다.

[방사광가속기 활용 주요 연구 성과]

구분	산업분야	주요 연구성과
3세대	반도체	- 반도체 소자 소형화 기술인 '비정질 질화붕소' 절연체 개발 - 친환경 전력 반도체 기판 결합 분석 - 초저전력 메모리 개발 가능성 규명
	에너지 / 환경	- 고효율·저비용의 장점을 모두 가진 무-유기 하이브리드 태양전지 구현 - 미세 기공성 구리규산염을 이용한 CO2 포획 연구 - 페로브스카이트 BSO 태양전지 전극 연구
	소재	고성능 제올라이트 개발, 흑린 관련 연구, MoTe2 관련 연구, 제올라이트 연구, 3차원 그래핀 합성법 개발
	생명 (제약)	- COVID-19 치료제(CT-P59)와 COVID-단백질의 결합구조를 해상도 0.27nm 수준에서 규명 - 비아그라 기작원리 규명, B-Z DNA 구조 규명 - 에이즈 바이러스의 증폭을 차단하는 단백질 연구 '드로셔 단백질' 3차원 구조 해석 연구
4세대	기초 과학	- 과냉각된 물의 결정구조 실증 - 영하 70℃에서 얼지 않는 물 및 상변이 순간 관측 - 세계 최초로 분자가 탄생하는 모든 순간(35펨토초) 포착 4세대 선형 방사광가속기(PAL-XFEL) 세계 최고 수준 성능 확보(빔 강도, peak brightness 등)

자료: 과학기술정보통신부

양성자가속기는 반도체/전자부품에 대한 우주방사선 영향 신뢰성 평가, 슈퍼커패시터, 열전소자, 초전도소재 등의 소재개발, 전지용 촉매의 물성 제어, 암치료 기술, 양성자빔 활용 육종 돌연변이 연구 등을 수행하였다.

[양성자가속기 활용 주요 연구 성과]

산업분야	주요 연구성과
반도체	반도체/전자부품에 대한 우주방사선 영향 신뢰성 평가 연구
신소재	신소재인 Graphene, Bi2Te3, MgB2 등의 물성 제어 연구 (슈퍼커패시터, 열전소자, 초전도소재 등)
화학(촉매)	전지용 촉매의 물성 제어 연구(산소반응 감소, 수소저장용량 향상 등)
의료	양성자빔 이용 의료치료기술 연구(암세포 사멸, 치매치료 등)
육종	양성자빔 활용 육종 돌연변이 발생 연구 (화훼, 벼, 채소 관련 품종 개량 및 신규 품종 개발 연구 등)
원자력 / 방사선	방사선 차폐 소재 개발 연구, 핵반응 연구 등 수행
센서	가스센서, 방사선센서 등의 검출 성능 향상 연구 수행

자료: 과학기술정보통신부

(1) 대형가속기 활용 연구 효율성 강화

현재 운영 중인 대형가속기(3·4세대 방사광, 양성자)의 최근 5년간 이용신청 건수는 2017년 2,172건에서 2021년 3,182건으로, 배정과제 건수는 2017년 1,717건에서 2021년 2,042건으로 증가했다.

대형가속기 과제건수 증가는 방사광가속기의 활용 수요의 증가에 기인하며, 양성자가속기의 활용 수요와 과제지원 건수는 다소 감소했다. 대형가속기의 실험인원은 2017년 6,160명에서 2021년 5,633명으로 다소 감소했고, SCI논문 건수도 2017년 574편에서 2021년 518편으로 감소했다.

[대형가속기 활용 과제 및 연구성과 현황]

(단위: 건, 명, 편)

유형	구분	2017	2018	2019	2020	2021
3세대 방사광 가속기	이용신청	1,914	2,152	2,271	2,545	2,897
	배정과제	1,557	1,686	1,768	1,802	1,871
	실험수행	1,391	1,592	1,607	1,224	1,538
	실험인원	5,576	5,877	6,096	3,109	5,132
	SCI논문	556	574	661	682	576
4세대 방사광 가속기	이용신청	82	84	146	119	152
	배정과제	26	45	54	61	68
	실험수행	26	45	53	54	60
	실험인원	250	361	332	172	130
	SCI논문	7	18	12	18	12
양성자 가속기	이용신청	176	176	138	117	133
	배정과제	134	112	108	80	103
	실험수행	121	105	101	63	99
	실험인원	334	290	316	188	371
	SCI논문	11	13	8	7	9
합계	이용신청	2,172	2,412	2,555	2,781	3,182
	배정과제	1,717	1,843	1,930	1,943	2,042
	실험수행	1,538	1,742	1,761	1,341	1,697
	실험인원	6,160	6,528	6,744	3,469	5,633
	SCI논문	574	605	681	707	597

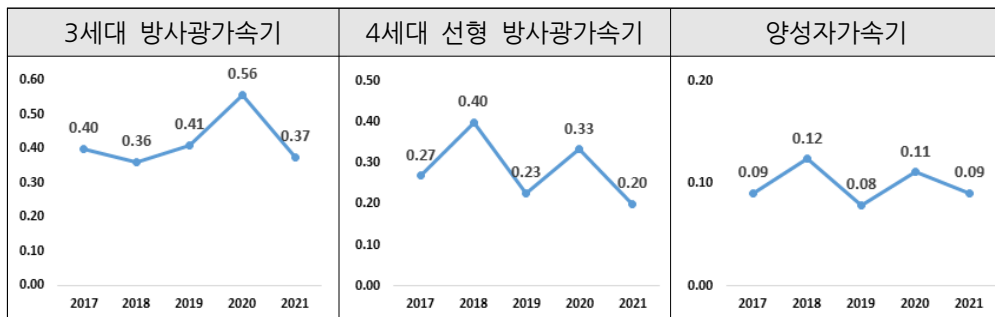
자료: 과학기술정보통신부

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/4>

최근 5년간 대형가속기 활용 실험수행과제당 SCI논문 성과와 운영비당 SCI논문 성과는 다소 감소 또는 정체되었다.

실험수행과제당 SCI논문 성과는 3세대 방사광가속기가 2017년 0.4편에서 2020년 0.56편까지 증가했지만 2021년에 0.37편으로, 4세대 선형 방사광가속기는 2018년 0.4편에서 2021년 0.2편으로 점차 감소했다. 양성자가속기는 실험수행과제당 SCI논문이 0.09편으로 정체된 현황을 보였다.

[대형가속기 활용 실험수행과제당 SCI논문 성과현황]

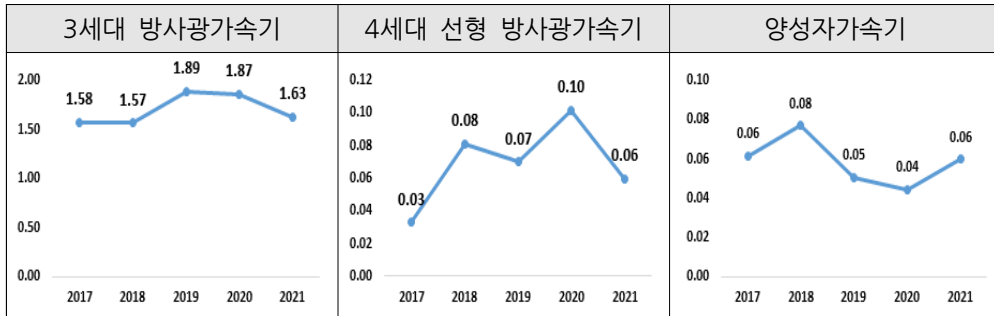


주: 실험수행과제 1건당 SCI논문편수=SCI논문편수/실험수행과제건수

자료: 과학기술정보통신부 제출자료를 바탕으로 재작성

대형가속기 운영비당(1억원) SCI논문 성과는 3세대 방사광가속기가 2019년 1.89편까지 증가했지만 2021년에 1.63편으로, 4세대 선형 방사광가속기는 2020년 0.1편에서 2021년 0.06편으로 감소했다. 양성자가속기는 0.06편으로 정체된 현황을 보였다.

[대형가속기 운영비 1억원당 SCI논문 성과현황]



주: 운영비 1억원당 SCI논문편수=SCI논문편수/운영비(억원)

자료: 과학기술정보통신부 제출자료를 바탕으로 재작성

그러나 방사광가속기 활용 SCI 논문만 보면 질적성과 지표인 IF(Impact Factor)⁴¹⁾는 지속적으로 증가하고 있는데, 국가전체 논문과 한국연구재단 사업⁴²⁾ 전체 논문과 비교해도 상대적으로 우수한 것으로 나타났다.

[대형가속기 활용 논문 연도별 IF지수 평균 현황]

(단위: 점)

유형	2014	2015	2016	2017	2018	2019
국가 전체	2.77	2.89	3.13	3.36	3.70	3.91
한국연구재단 전체	3.40	3.59	3.80	4.02	4.46	4.71
방사광가속기	4.20	6.00	5.80	6.60	7.10	7.70

자료: 과학기술정보통신부, 한국연구재단 자료를 바탕으로 재작성

그 외 현재 구축 중인 중이온가속기구축건설사업단의 연구성과로는 논문 SCI 266건, 특허출원 40건, 특허등록 20건이 있다. 중입자가속기사업단의 연구성과는 논문 24건, 특허출원 15건, 특허등록 9건이 있다.

41) IF(Impact Factor) 지표는 저널 영향력 지수이다. 이 지수는 최근 2년간 저널수록 논문의 평균 피 인용 수를 의미하며, 주로 저널 평가를 위한 지표로 활용되고 있다.

42) 한국연구재단 사업은 주요 R&D사업과 대학재정지원사업(BK21+, 글로벌박사펠로우십사업)을 대상으로 하고 있다. (자료: 전세림·최용석, “한국연구재단 지원사업 논문성과 통합분석”, 「NRF ISSUE REPORT」 2021 21호, 한국연구재단, 2021.11.15.)

[중이온가속기구축건설사업단 논문·특허 성과(2021년 12월말 누적기준)]

(단위: 건)

논문게재				학술발표		특허출원		특허등록	
SCI		비SCI							
국내	국외	국내	국외	국내	국외	국내	국외	국내	국외
48	218	23	14	346	342	29	11	20	0

자료: 과학기술정보통신부

[중입자가속기사업단 논문·특허 성과(2021년 12월말 누적기준)]

(단위: 건)

논문게재				학술발표		특허출원		특허등록	
SCI		비SCI							
국내	국외	국내	국외	국내	국외	국내	국외	국내	국외
15	9	-	-	10	48	15	-	9	-

주: 서울대병원 사업이관 이전 성과

자료: 과학기술정보통신부

첫째, 대형가속기의 산업체 활용 수요는 증가하고 있지만, 대형가속기에서 현재 제공 가능한 물리적인 빔라인 수의 한계와 전문인력의 부족으로 인해 산업체 지원 비중은 감소 또는 정체하고 있다.

3세대 방사광가속기의 산업체 지원과제수는 2012년 49건에서 2017년 131건으로 증가해왔으나, 이후 다소 감소하였다. 양성자가속기의 산업체 지원과제수는 2013년 2017년까지 5건 내외로 적었으나, 2018년 27건으로 크게 증가하였고⁴³⁾, 이후에는 다소 정체되어 있다. 전반적으로 대형가속기의 산업체 지원 과제수는 지속적으로 증가하였지만, 2017년 이후부터 다소 감소 또는 정체에 있다.

대형가속기의 전체 지원과제의 산업체 이용 비중을 보면, 3세대 방사광가속기가 2017년 9.4%에서 2021년 7.3%로 다소 감소하였고, 4세대 선형 방사광가속기는 아직 산업체 이용 비중이 3.3% 수준에 그치고 있다. 양성자가속기는 2017년 3.3%에서 2020년 41.3%까지 증가했지만 2021년에는 29.3%로 다소 감소하였다.

43) 양성자가속기의 산업체 과제지원비율이 증가한 이유는 2018년 일본의 수출규제로 인해 첨단소재의 산업 수요가 증가하면서 삼성전자, SK하이닉스, LS전선 등의 대기업 이용이 증가했기 때문이다.

[대형가속기별 연도별 산업체 지원과제 현황]

(단위: 건, %)

유형	구분	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
3세대 방사광	산업체	49	58	84	88	96	131	121	115	91	112
	전체	829	1,046	1,179	1,241	1,363	1,391	1,592	1,607	1,224	1,538
	비중	5.9	5.5	7.1	7.1	7.0	9.4	7.6	7.2	7.4	7.3
4세대 방사광	산업체						0	1	1	0	2
	전체						26	45	53	54	60
	비중						0.0	2.2	1.9	0.0	3.3
양성자	산업체		3	5	2	4	4	27	28	26	29
	전체		39	103	124	131	121	105	101	63	99
	비중		7.7	4.9	1.6	3.1	3.3	25.7	27.7	41.3	29.3

주: 비중=산업체/전체

자료: 과학기술정보통신부

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/5>

산업체의 빔타임 요구 시간 대비 제공시간으로 정의되는 ‘빔타임 수용률’에서도 3세대 방사광가속기의 경우 2013년 65.6%에서 2021년 39.8%로 감소했으며, 양성자가속기도 2014년 91.7%에서 2021년 48.2%로 감소하였다.

[대형가속기별 산업체 빔타임 요구 수용률 추이]

(단위: %)

구분	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
3세대방사광	50.4	65.6	65.3	51.2	60.2	55.0	53.0	47.1	30.1	39.8
4세대방사광						0.0	36.4	100.0	0.0	100.0
양성자						63.6	73.2	56.3	41.6	48.2

주: 빔타임수용률 = 빔 제공시간 / 빔 요구시간

자료: 과학기술정보통신부

방사광가속기의 산업체 지원과제 비중이 감소한 이유는 여러 가지가 있을 수 있지만, 우선적으로는 대형가속기 활용에 대한 전반적인 활용 수요 증가에 비해, 연구자에게 제공할 수 있는 빔라인 수는 거의 증가하지 않았기 때문이다⁴⁴⁾.

44) 3세대 방사광가속기는 최대 40개 빔라인 운영이 가능한데 현재 36개가 운영 중이며, 4세대 선형 방사광가속기는 최대 5개 빔라인이 가능한데 현재 3기가 운영 중이다.

[대형가속기별 빔라인 수 추이]

(단위: 개)

구분	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
3세대방사광	34	34	34	34	34	34	34	35	35	36
4세대방사광						3	3	3	3	3
양성자		3	3	3	3	3	3	3	3	3

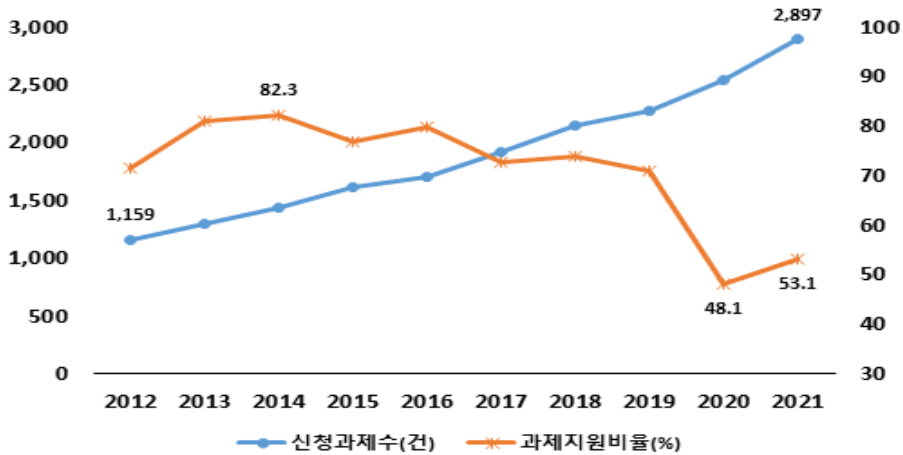
주: 빔타임수용률 = 빔 제공시간 / 빔 요구시간

자료: 과학기술정보통신부

3세대 방사광가속기는 가동 이후 전체 신청과제 수가 지속적으로 증가하고 있지만, 빔라인 수의 한계로 인해 전체 과제지원 비율은 2014년 82.3%를 정점으로 2020년 48.1%, 2021년 53.1%로 감소하였다.

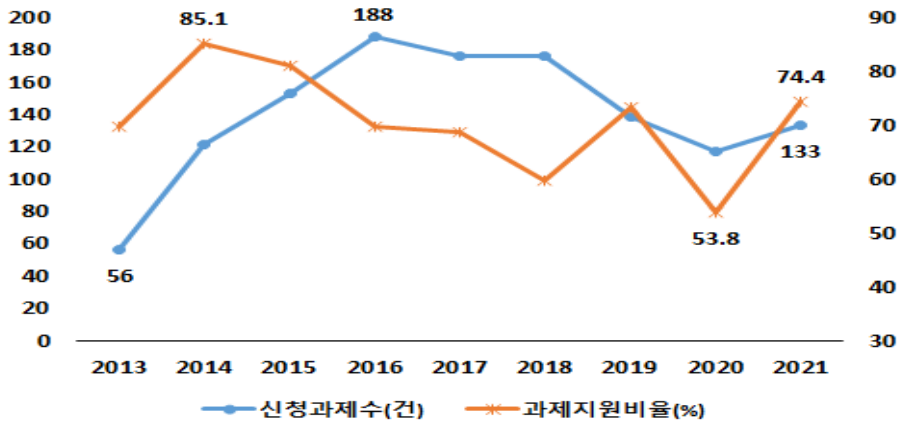
양성자가속기도 가동 이후 전체 신청과제 수는 2016년 188건에서 점차 감소하여 2021년 133건이 지원되었다. 과제지원비율도 2014년 85.1%에서 감소추세로 2020년 53.8%까지 감소하였지만 2021년 74.4%로 증가했다.

[3세대 방사광가속기 연도별 신청과제건수 및 지원비율 추이]



자료: 과학기술정보통신부

[양성자가속기 연도별 신청과제건수 및 지원비율 추이]



자료: 과학기술정보통신부

과학기술정보통신부와 대형가속기 운영 기관은 산업체 수요 증가에 대응하여 산업체의 과제지원비율을 높이려고 한다. 그러나 대학·공공연 연구자의 과제지원 비율도 낮아지거나 정체되어 있어 연구주체간 형평성 문제를 고려하면 산업체 지원을 무조건 확대하는 데에도 한계가 있다고 보여진다.

[대형가속기별 연도별·연구주체별 과제지원비율 현황]

(단위: %)

유형	구분	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
3세대	대기업	71.6	77.3	77.1	68.2	75.2	73.0	71.2	66.0	45.1	55.2
	중견·중소기업	20.0	77.8	83.3	68.4	82.4	80.0	62.5	87.5	50.0	72.4
	대학·공공연	71.8	81.1	82.6	77.6	80.1	72.6	74.3	71.0	48.3	52.8
	합계	71.5	80.9	82.3	76.8	79.8	72.7	74.0	70.8	48.1	53.1
4세대	대기업						0.0	50.0	100.0	0.0	100.0
	중견·중소기업						0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	대학·공공연						32.5	53.7	35.9	46.2	38.7
	합계						31.7	53.6	36.3	45.4	39.5
양성자	대기업		-	100.0	100.0	50.0	50.0	71.1	76.7	60.7	60.9
	중견·중소기업		100.0	100.0	100.0	100.0	75.0	-	55.6	81.8	88.2
	대학·공공연		67.9	84.5	80.8	69.4	68.8	57.4	73.7	47.4	75.3
	합계		69.6	85.1	81.0	69.7	68.8	59.7	73.2	53.8	74.4

주: 과제지원비율(과제수용률) = 과제지원건수 / 과제신청건수

자료: 과학기술정보통신부

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/6>

[대형가속기별 연도별·연구주체별 빔타임 요구 수용률 현황]

(단위: %)

유형	구분	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
3 세 대	대기업	52.4	63.7	65.9	52.1	55.7	55.0	53.5	46.4	30.1	38.2
	중견·중소기업	9.1	77.4	61.4	46.2	88.5	56.0	45.9	61.8	32.5	53.8
	대학·공공연	52.2	69.6	64.4	62.0	60.8	51.9	55.5	50.9	32.4	35.6
	합계	52.1	69.4	64.5	61.1	60.7	52.3	55.2	50.6	32.2	35.8
4 세 대	대기업						0.0	36.4	100.0	0.0	100.0
	중견·중소기업						0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	대학·공공연						23.1	37.1	31.1	38.3	33.1
	합계						22.7	37.1	31.7	38.0	33.8
양 성 자	대기업			300.0	100.0	50.0	80.0	73.2	63.6	36.8	44.2
	중견·중소기업		200.0	72.7	100.0	100.0	50.0	-	33.3	68.4	57.6
	대학·공공연		31.5	70.0	56.2	45.9	45.7	46.7	51.4	21.5	38.9
	합계		35.2	70.9	56.6	46.4	46.4	50.8	53.1	29.4	41.9

주: 과제지원비율(과제수용률) = 과제지원건수 / 과제신청건수

자료: 과학기술정보통신부

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/7>

둘째, 대형가속기 이용 수요 증가에 대응하기 위해서는, 우선적으로 대형가속기의 운영체제 효율화와 R&D협력 체계 구축 등에 노력할 필요가 있다.

정부는 대형가속기 구축·운영의 공공성과 투명성을 강화하고, 운영관리의 효율화 및 공동활용 촉진을 위한 「대형가속기 운영체제 개선방안」(2017.2.28.)을 수립하였다. 2017년 당시 대형가속기에 대한 통합 운영체제가 부재한 상황에 기관별·지역별로 산발적인 사업이 추진되면서 장기적인 발전이 저해되고 있다는 문제점이 지적되었기 때문이다.

동 개선방안에서 대형가속기 통합 운영체제를 위한 대형가속기협의회 구성, 국가통합가속기연구소 설립, 공동활용에 관한 법적근거 마련, 방사광가속기 국유화, 우수연구자에 대한 체계적 지원 등을 계획하였다.

[대형가속기 운영체제 개선방안 주요 내용]

구분	주요 추진과제
대형가속기 연계·협력 시스템	- 대형가속기 통합 운영체제 기반 구축 - 대형가속기 구축·운영 협의회 구성, 기술·인력·정보 공동 활용 - 국내 대형가속기를 포괄하는 ‘국가통합가속기연구소’ 설립 등 검토 - 양성자가속기 운영 활성화, 중이온·중입자가속기 효율적 활용 준비
방사광가속기 공적관리 강화	- 기부채납 및 위탁운영 등을 통한 공적관리 강화 - 방사광가속기 국유재산으로 편입 및 전문기관 위탁 - 대형가속기 운영과 공동활용에 관한 법적근거 마련 - 가속기운영위원회 및 연구소장 기능 강화 - 가속기운영위원회 대표성 강화, 감독기능 확대 등 - 가속기 운영조직에 대한 경영평가 추진 - 이용자 의견 수렴 체계 강화
방사광가속기 이용자 서비스 질 향상	- 가속기 운영조직 및 이용자 지원 체계 개선 - 빔라인 확충 및 안정적 실험환경 조성 - 우수성과 창출 및 산업적 활용 확대
4세대 가속기 전략적 활용	- 이용자 육성 및 저변 확대 / 중점 활용분야 발굴 / 국가 전략적 활용 4세대 가속기에 특화된 운영체제 및 실험환경 조성

자료: 국가과학기술심의회 운영위원회, 「대형가속기 운영체제 개선방안」, 2017.2.28.

과학기술정보통신부는 먼저 2017년 「방사광가속기등공동이용연구사업지원규정」에 대형가속기협의회 구성과 운영 근거⁴⁵⁾를 마련하고, ‘대형가속기협의회’를 출범시켰다. 대형가속기협의회 설립 목적은 대형가속기의 증가에 따라, 기술·인력·정보의 공동활용을 촉진하고 대형가속기 운영의 효율화를 추진하는 데 있었다. 그러나 대형가속기협의회 운영 실적은 2018년 3월 26일, 2018년 7월 10일 2번의 회의 개최에 불과했다. 그 이후 협의회를 통한 대형가속기 간 기술·인력·정보의 공동 활용 촉진과 운영 효율화를 위한 정보공유 체계는 구축되지 못했다.

45) 「방사광가속기등공동이용연구사업지원규정」(과학기술정보통신부훈령 제11호, 시행 2018.1.1.)

제20조(협의회의 운영) ① 국가 대형가속기를 효율적으로 연계 운영하기 위하여, 가속기 운영 책임자 등을 위원으로 하는 국가대형가속기협의회를 둘 수 있다.

② 협의회는 대형 가속기 자원의 공동 활용 등을 통한 기관간 협력을 활성화하는 한편, 국내 대형 가속기 연계 발전을 위한 관련 정책 자문 및 제안 등을 수행한다.

[대형가속기협의회 구성·운영(안)]

구분	주요 내용
구성	방사광, 양성자, 중이온가속기 기관 책임자
주요임무	① 가속기 구축·운영에 필요한 기술·인력·정보 공동 활용 ② 국내 대형가속기 발전전략 등 관련 정책 자문 ③ 신규 가속기 구축에 대한 사전 타당성 검토 ④ 국내외 대학 및 연구기관과의 교류협력 활성화
운영방식	협의회장(2년, 선출) 소속기관이 사무국 역할을 하고, 공동프로젝트, 인력교류(파견), 연구위탁, 기술교류회 등을 통한 실질적인 협력 창출

자료: 국가과학기술심의회 운영위원회, 「대형가속기 운영체제 개선방안」, 2017.2.28.

[대형가속기협의회 개최실적]

구분	일시	장소	안건
1회	2018.3. 26	대전역	정책협의회 구성 및 추진 방안, 대국민 이해도 제고를 위한 가속기 연계 홍보 방안 등
2회	2018.7. 10	정부과천청사	가속기를 활용한 도전적 연구분야 발굴, 가속기혁신 연구기획위원회 구성·운영 추진 방안 등

자료: 과학기술정보통신부

이와 함께 과학기술정보통신부는 방사광가속기 소유권을 국유재산으로 편입하고, 공모를 통해 전문기관을 선정하여 위탁관리 시행을 추진하였다. 그리고 방사광가속기의 공동활용 촉진을 위한 법률 근거를 신설⁴⁶⁾하고, 방사광가속기의 국유화 이후 위탁기관의 재정지원에 맞는 공공성·투명성 강화를 위한 경영평가 및 감사 등의 공적관리 강화, 가속기 이용자 지원 체계 개선 등을 계획하였다⁴⁷⁾. 그러나 이후 법률 개정, 운영기관의 경영평가 및 감사 체계는 마련되지 못하였다.

46) 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률 개정(안)」

제10조의 2(방사광가속기 등 공동 활용 촉진) ①미래창조과학부 장관은 방사광가속기 등 대형가속기 공동 활용을 촉진하기 위해 시설·장비 운영과 연구 등에 소요되는 경비를 지원할 수 있다.

② ①항에 따라 정부의 지원을 받은 기관 또는 단체는 해당 시설·장비를 국내 산학연 연구자들에게 개방하고, 공동 활용 촉진을 위해 적극 노력하여야 한다.

47) 3세대 및 4세대 선형 방사광가속기 운영을 맡고 있는 포항가속기연구소는 그간 국가연구개발사업에 대한 연차평가로 운영성과를 매년 평가하고 있었다. 그러나 과학기술정보통신부는 가속기연구소장의 임기에 맞춰 경영평가를 추진하여 조직 운영에 대한 책임성을 강화한다는 차원이었다.

[포항가속기연구소 및 방사광가속기 운영 효율화 과제 추진 실적]

구분	추진 내용
방사광가속기 국유화	- 방사광가속기 소유권 국유재산으로 편입 완료(2017.9.) - 공모를 통한 전문기관 관리위탁 실시(포항공과대학교)
방사광가속기 공동활용 촉진 법률 근거 마련	대형연구시설·장비의 일종인 방사광가속기 등의 대형가속기 공동활용 촉진만을 규정하는 것이 적절하지 않아 입법 보류
포항가속기연구소 경영평가 및 감사	포항가속기연구소 경영평가 및 과기부 감사 실적 없음 (경영평가 대상 기관이 아니며 이를 추진할 근거도 부재)
이용자 지원체계 개선	프리미엄 멤버제 미실시, 3단계 빔타임 운영 및 파트너유저 제도 등 일부 실시

자료: 과학기술정보통신부 제출자료를 바탕으로 작성

과거 대형가속기의 운영 효율화를 높이기 위한 거버넌스 개선 방안으로 국가통합가속기연구소 설립안이 제시되기도 하였다. 2013년 당시 미래창조과학부(현 과학기술정보통신부)는 「기초과학연구원 5개년 계획(‘13~’17)」(2013.12.19.)에서 세계 최고 성능의 중이온가속기 구축 및 활용을 위해 포항가속기연구소를 포함한 국가통합가속기연구소 설립을 계획하였다⁴⁸⁾. 이어 과학기술정보통신부는 2017년에 「대형가속기 운영체제 개선방안」에서 전국에 산재되어 운영 중인 대형가속기를 포괄하는 국가통합가속기연구소 설립으로 대형가속기의 운영 효율화를 높이하고자 하였다.

[「기초과학연구원 5개년 계획(‘13~’17)」 내 국가통합가속기연구소 설립 계획]

과제명	주요 내용
[중점과제 1-2] 중이온가속기 구축	- 부설 가속기 연구소 설립 추진 - 포항가속기를 포함한 대형 가속기 통합 운영을 위해 2015년까지 기초과학연구원 부설 가속기 연구소 설립 추진

자료: 미래창조과학부, 「기초과학연구원 5개년 계획(‘13~’17)」(2013.12.19.)

국가통합가속기연구소를 통해 전국에 산재한 대형가속기를 통합운영하면 각 기관에서 획득한 노하우와 전문인력 공유가 가능하고, 가속기 관련 장기적인 관점의 정책개발

48) 미래창조과학부, 「제4회 국가과학기술심의회 개최결과」, 2013.12.26.

이나 R&D지원, 시설개선에 체계적인 대응이 가능하다는 논리였다. 그러나 대형가속기 별 이용 목적과 활용분야가 상이하여 운영방식이 다르기 때문에 운영조직을 통합하면 도리어 효율성을 저해한다는 의견도 있다⁴⁹⁾.

우선 정부는 지연되고 있는 중이온가속기와 중입자가속기 구축 사업을 원활하게 추진하여 안정적인 운영을 도모하는데 집중하고, ‘국가통합가속기연구소’ 설립은 국내외 사례 등을 면밀하게 검토하고 전체 대형가속기 운영이 가시화되는 시점을 고려하여 장기적인 과제로서 접근할 필요가 있다⁵⁰⁾.

결론적으로 방사광가속기 이용 수요 증가에 대응하여 신규 빔라인 증설이 필요할 수 있지만, 재정투자 효율성을 고려하여 우선적으로는 이용이 저조한 빔라인을 개조하거나, 연구자 이용 지원체계 개선 등 운영체계 효율화에 노력할 필요가 있다. 또한, 대형가속기운영협의회에 적절한 역할과 권한을 부여하여 단순한 교류모임에서 벗어나 실질적인 기술·인력·정보의 공동활용 협력 기구로 운영하는 방안을 검토할 필요가 있다.

49) 미래창조과학부, 「방사광가속기의 효율적 운영을 위한 중장기 발전방안 수립」, 2017.5.16.

50) 과학기술정보통신부는 국가통합가속기연구소 설립은 중이온가속기 구축이 완료되는 시점을 고려하여 장기적으로 검토할 사항으로 지금까지 국가통합가속기연구소 설립에 대한 구체적인 사항을 검토한 바 없다고 한다.

(2) 대형가속기 전문인력 양성 확대

대형가속기 운영기관에는 2022년 2월 기준으로 총 469명(정규직 412명, 계약직 57명)의 인력이 근무하고 있다.

대형가속기별로는 포항가속기연구소의 3세대 방사광가속기가 176명(37.5%)로 가장 많으며, 중이온가속기 131명, 4세대 방사광가속기가 83명, 양성자가속기 55명, 중입자가속기 16명, 다목적 방사광가속기 8명 등의 순이다⁵¹⁾. 운영분야별로는 가속기 개발·운영 326명(69.5%)으로 가장 많고, 시설건설·운영 52명, 행정지원 50명, 사업기획·조정 34명, 가속기 이용연구 7명 등의 순이다.

[대형가속기 운영인력 현황]

(단위: 명)

구분			사업 기획·조정	가속기 개발·운영	가속기 이용연구	시설 건설· 유지관리	행정 지원	합계
방사광 가속기	3세대	정규	8	109	-	7	17	141
		계약	4	21	-	6	4	35
		합계	12	130	-	13	21	176
	4세대	정규	3	58	-	8	-	69
		계약	2	7	-	3	2	14
		합계	5	65	-	11	2	83
양성자가속기	정규	1	30	5	6	5	47	
	계약	-	5	2	-	1	8	
	합계	1	35	7	6	6	55	
중이온가속기	정규	12	90	-	16	13	131	
	계약	-	-	-	-	-	-	
	합계	12	90	-	16	13	131	
중입자가속기	정규	2	5	-	5	4	16	
	계약	-	-	-	-	-	-	
	합계	2	5	-	5	4	16	
다목적 방사광 가속기	정규	2	1	-	1	4	8	
	계약	-	-	-	-	-	-	
	합계	2	1	-	1	4	8	
합계	정규	28	293	5	43	43	412	
	계약	6	33	2	9	7	57	
	합계	34	326	7	52	50	469	

주: 2022년 3월 현재 기준(기관장·임원은 사업기획·조정에 포함)

자료: 과학기술정보통신부

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/8>

51) 2022년 3월 기준 현재 8명이 근무 중이며 연말까지 25명으로 확대할 계획이다.

첫째, 대형가속기 운영인력 규모가 빔라인의 효과적인 운영과 연구자 지원에는 부족한 수준으로, 정부의 효과적인 신규 인력 양성 지원과 운영기관 인력 충원을 위한 예산 검토가 필요해 보인다.

2022년 기준 현재 운영 중인 대형가속기는 3세대 방사광가속기, 4세대 방사광가속기, 양성자가속기이다. 대형가속기의 빔라인당 운영인력을 조사한 결과 2022년 기준 3세대 방사광가속기가 1.5명, 4세대 방사광가속기가 10.3명, 양성자가속기가 10.0명이다.

[대형가속기 빔라인당 운영인력 현황]

(단위: 개, 명)

구분			'17	'18	'19	'20	'21	'22
방사광 가속기	3세대	빔라인 수	34	34	35	35	36	36
		운영인력	54	51	56	55	55	55
		빔라인당 운영인력	1.6	1.5	1.6	1.6	1.5	1.5
	4세대	빔라인 수	3	3	3	3	3	3
		운영인력	27	31	28	31	31	31
		빔라인당 운영인력	9	10.3	9.3	10.3	10.3	10.3
양성자가속기		빔라인 수	3	3	3	3	3	
		운영인력	14	16	22	22	22	30
		빔라인당 운영인력	4.7	5.3	7.3	7.3	7.3	10.0

주: 1. 각 연도말 기준이며, 2022년은 2월말 현재 기준

2. 빔라인당 운영인력 = 운영인력 / 빔라인 수

3. 빔라인 운영인력은 빔라인 운영, 가속기 운전·유지보수, 성능향상 업무를 맡은 인력

자료: 과학기술정보통신부

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/9>

특히, 국내 방사광가속기의 빔라인당 운영인력 수준이 주요 선진국에 비교해 매우 낮은 수준이라고 한다.⁵²⁾ 실제로 3세대 방사광가속기의 빔라인 수는 1996년 6기에서 2021년 36개, 이용과제는 69개에서 1,538개 과제로 증가했지만, 운영인력은 1995년 145명에서 2022년 138명으로 감소한 것으로 나타났다.

52) ALS(미국) 6.4명, Sping-8(일본) 6.7명, Elettra(이태리) 13.7명, ESRF(프랑스) 12.0명 (자료: 국가과학기술심의회 운영위원회, 「대형가속기 운영체제 개선방안」, 2017.2.28.)

[3세대 방사광가속기 빔라인 운영현황 비교]

구분	빔라인 수	이용과제	운영예산	운영인력	SCI논문
1996년	6기	69과제	142억원	145명	3편
2021년	36기	1,538과제	354억원	138명	576편

자료: 과학기술정보통신부

이러한 대형가속기 운영인력의 부족에 따라 과학기술정보통신부와 각 운영기관은 2022년 412명에서 2025년에 695명으로 총 283명의 인력 충원을 계획하고 있다. 3세대 방사광가속기 12명, 4세대 선형 방사광가속기 6명, 양성자가속기 2명, 중이온가속기는 39명, 중입자가속기는 42명, 다목적 방사광가속기 182명 등이다.

[대형가속기 인력 소요계획]

(단위: 명)

구분		'22년(A)	'23년	'24년	'25년(B)	증감 (B-A)	비고 (충원내역)
방사광 가속기	3세대	141	150	150	153	12	빔라인 9명, 신약개발장비 3명
	4세대	69	73	73	75	6	동시운전 등 인력수요 증가 반영 6명
양성자가속기		47	49	49	49	2	'22.7월 2명 충원 예정 (가속기 운영 1, 빔 이용연구 1)
중이온가속기		131	160	165	170	39	미채용 신규인력 7명, 정규직 전환 인력 16명, 빔사운전 및 활용성 검증 6명, 고에너지가속장치 선행R&D 5명, 빔 이용 지원 및 이용자 육성 5명
중입자가속기		16	22	48	58	42	단장(센터장) 1명, 의사직 5명, 전공의 2명, 교수직(의학물리) 7명, 보건직 5명, 방사선생물학자 1명, 선량측정사 2명, 치료기사 11명, 약무직 1명, 간호직 7명, 운영기능직(간호) 2명, 의공학기사 2명, 사무직 6명, 기술직 3명, 외래 행정 3명 ※ 겸직인원 포함
다목적 방사광가속기		8	75	130	190	182	행정원 11명, 기술원 65명, 연구직 106명
합계 (연도별인력)		412	529 (+117)	615 (+86)	695 (+80)	283	

주: 2022년은 현재 정규직 근무 기준이며 23년 이후는 계획 기준

자료: 과학기술정보통신부

국내 대형가속기 운영자들의 설문조사 결과 시설·조직·인력 운영의 적절성에 중 '운영인력의 충분성'을 2.05점으로 가장 낮게 평가하였다. 대형가속기 운영자를 대상으로 정부의 중점 지원영역에 대한 우선순위 조사 결과에서도, 연구인력 충원(27.1%), 기술인력 충원(19.8%), 행정·운영 인력충원(8.7%) 등 정부의 인력충원의 필요성에 대한 응답이 가장 많았다⁵³⁾.

[대형가속기 시설·조직·인력 운영의 적절성 설문조사(대형가속기 운영자 대상)]

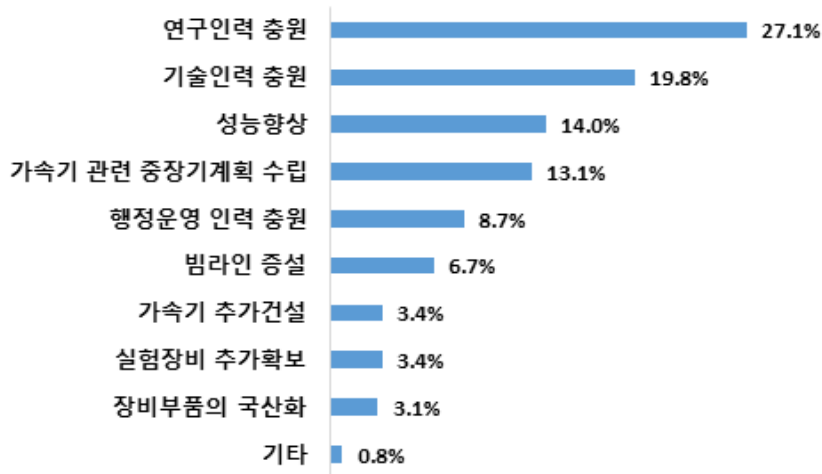
(단위: 점)

구분	이용자 지원 및 관리의 적절성	운영인력의 전문성	정기적인 교육 제공 여부	운영인력의 충분성	시설 및 정비상태의 양호성	운영 모니터링의 체계성
점수	4.59	4.4	3.84	2.05	3.94	4.61

주: 설문항목 점수는 7점 리커트 척도로 구성

자료: KISTEP

[대형가속기 중점 지원영역 설문조사(대형가속기 운영자 대상)]



자료: KISTEP

53) 윤수진·신애리·문관식, 「대형가속기 현황분석 및 실증연구를 통한 핵심이슈 발굴」, 한국과학기술기획평가원, 2017.

대형가속기 전문인력 부족을 해결하고자 과학기술정보통신부는 2022년도 신규 사업으로 ‘가속기 인력양성 및 활용지원 사업⁵⁴⁾’을 추진한다. 가속기분야 석박사 양성이 가능한 대학을 선정하여 인력양성 프로그램 운영비와 관련 장비비를 지원하고, 박사후 연구원의 실무연수 실습비를 지원한다. 지원규모는 인력양성 유형은 2개 대학 컨소시엄에 총 6년간 212억원, 활용지원 유형은 2개 지정센터(포항가속기, 중이온)에 6년간 총 55억원을 지원한다.

과학기술정보통신부는 동 사업으로 2025년까지 53명, 2027년까지 129명의 전문인력을 양성할 계획이지만, 2025년까지만해도 280여명 이상의 전문인력이 필요하다는 것을 감안할 때 전문인력 충원이 충분하지 못한 수준이다.

[가속기인력양성 및 활용지원 사업 지원 규모]

구분	지원대상	지원내용	'22년 지원규모
인력양성	가속기 분야 석·박사 양성이 가능한 대학 컨소시엄	인력양성 프로그램 운영비 및 장비비	2개 컨소시엄 (27억원)
활용지원	가속기 분야 박사 후 연구원	박사 후 연구원 실습비	2개 지정센터 (6억원)

자료: 과학기술정보통신부

[가속기인력양성 및 활용지원 사업 인력양성 목표]

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	합계
인원(명)	9	11	14	19	27	49	129

자료: 과학기술정보통신부

향후 대형가속기의 운영 및 연구인력 수요는 지속적으로 증가할 것이란 점에서, 가속기 인력 확보를 위한 정부의 체계적인 인력양성이 시급히 필요해 보인다. 그러나 대학에서 배출된 전문인력이 대형가속기 운영인력 충원으로 이어지기 위해서는 운영기관의 인력 정원확대와 예산이 마련되어야 하므로, 이에 대한 부처 간 협의와 검토가 필요할 것이다.

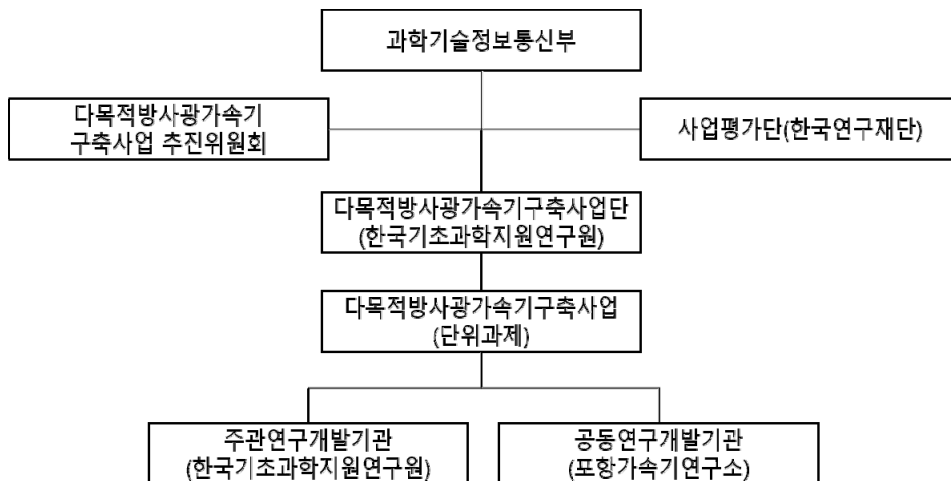
54) 과학기술혁신인재양성사업(1744-411) 내역사업

둘째, 다목적 방사광가속기 구축 사업의 원활한 추진을 위해서는 주관기관인 한국 기초과학기술지원연구원과 공동연구기관인 포항가속기연구소의 전문인력만으로는 한계가 있으므로, 대학·출연연·산업체 등의 전문인력 활용 방안도 검토할 필요가 있다.

다목적 방사광가속기 구축사업의 추진체계는 주관부처인 과학기술정보통신부 아래 주관기관인 한국기초과학지원연구원(다목적방사광가속기구축사업단)이 있으며, 공동연구 개발기관으로 포항가속기연구소가 참여하고 있다.

과학기술정보통신부는 국내 대형 연구인프라 구축·운영 상황 및 사업지원 역량 등을 고려하여 국내 유일의 연구시설·장비 및 분석과학기술 분야 연구기관인 한국기초과학지원연구원을 다목적 방사광가속기 구축사업의 주관기관으로 지정하였다⁵⁵⁾.

[다목적 방사광가속기 사업추진체계]



자료: 과학기술정보통신부

과학기술정보통신부 다목적방사광가속기 사업계획에 따르면, 2025년까지 190명, 2027년에는 300명의 전문인력 확보가 필요하다고 전망하였다.

55) 과학기술정보통신부 보도자료, “다목적 방사광가속기 구축 사업 본격 추진”, 2021.7.19.

[다목적 방사광가속기 구축사업 운영인원 투입계획]

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027
인원(명)	25	75	130	190	250	300

자료: 과학기술정보통신부

현재 다목적 방사광가속기의 가속장치 및 빔라인 설계와 구축은 포항가속기연구소가 담당하고 있으며, 주관기관인 한국기초과학지원연구원은 전체 사업 관리와 기반시설 구축 등을 주로 맡고 있다. 2022년 전체 참여인력 154명 중 한국기초과학지원연구원 사업단은 25명, 포항가속기연구소는 129명이다.

[다목적 방사광가속기 구축사업 예산 집행 계획]

(단위: 억원)

구분	사업내용	예산	담당
가속장치	• 4GeV 에너지, 피코미터급 에미턴스(Emittance)의 전자 빔 싱크로트론 광원 공급을 목표로 하는 설비 구축(선형가속기, 부스터링, 저장링)	3,460	포항가속기 연구소
빔라인	• 10기의 빔라인 및 실험장치 구축	1,305	
기반시설	• 주요건물건설(선형가속기동, 저장링동, 초전도고주파동, 연구동, 본부동, 연구실험지원동 등) • 주요시설구축(장치냉각시설, 전력지원시설, 빔라인 지원시설 등)	3,689	한국기초과학 지원연구원
기타	• 부지, 전력인입선로 구축	2,000	지자체
합계		10,454	

자료: 과학기술정보통신부

[다목적방사광가속기 구축사업 참여인력 현황(2022년도 기준)]

(단위: 명)

구분	다목적방사광사업단	포항가속기연구소	합계
가속장치	-	41	41
빔라인	1	32	33
행정	7	19	26
퇴직인력(고경력)	-	13	13
신규채용(예정)	17	24	41
계	25	129	154

자료: 과학기술정보통신부

통상적으로 가속기 구축인력에는 소수의 가속기 빔물리 분야 인력과 가속기 시스템 분야 인력, 그 외 전자, 기계, 토목 등의 다양한 전문가의 참여가 필요하다. 한국기초과학지원연구원은 대형연구시설 분야의 연구인력과 연구경험을 보유하고 있지만, 다목적 방사광가속기 구축 사업에는 대형가속기 분야의 전문성을 고려하여 포항가속기연구소의 연구인력이 다수 참여하고 있다.

그러나 향후 다목적 방사광가속기 구축 사업이 본격화되어 전문인력 충원이 필요하더라도 포항가속기연구소의 대형가속기 운영을 위해서는 연구소 인력을 추가로 투입하는 데는 한계가 있을 것으로 보인다.

따라서 과학기술정보통신부는 다목적 방사광가속기 구축사업의 본격 추진에 따른 인력 부족에 대비하여 가속기 전문인력의 특성을 고려한 다각적 인력활용 방안을 검토하여 시행할 필요가 있다.

과학기술정보통신부는 가속기 빔물리와 시스템 등의 가속기 핵심전문인력은 「대형가속기 장기로드맵 및 운영전략」에 따라 포항가속기연구소 인력의 신규 충원과 기존 인력 참여 확대, 고경력과학자 활용으로 최대한 확보할 계획이라고 한다⁵⁶⁾.

과학기술정보통신부는 이와 함께 주관기관인 기초과학지원연구원의 대형연구시설 전문인력의 참여를 확대하거나, 대학·출연연·기업체의 관련 분야 전문인력을 활용할 수 있는 협력방안을 조속히 검토할 필요가 있다⁵⁷⁾.

56) 다목적방사광가속기 참여인력 300명의 상당부분은 극소수 가속기빔물리 전문인력(국내 5-10명 수준), 가속기 시스템 전문인력이며 그 외 기타전문인력으로 구성된다. '22년부터 추진되는 가속기인력양성 및 활용지원사업도 대부분은 가속기 빔물리 전문인력보다는 가속기시스템과 빔라인분야 인력이 차지하고 있다.

57) 과학기술정보통신부는 포항가속기연구소는 이미 다목적방사광가속기 구축사업 일부 연구과제를 대학과 협력(서울대, 고려대 등)하여 추진 중이라고 한다.

다. 대형가속기 구축·운영 성과

(1) 차세대가속기 기술수준 현황

대형가속기는 새로운 과학적 사실을 밝혀내는 연구시설이면서 가속기 자체가 첨단 과학기술의 성과이다. 대형가속기에서 입자를 생성하고 가속시키며 이를 정밀하게 제어·측정·분석하기 위해서는 플라즈마 기술, 고주파 기술, 고주파 가속기술, 상전도/초전도 기술, 빔 진단 기술, 정밀 가공 기술, 기반 기술 등의 다양한 첨단기술이 필요하다.

[가속기 작동에 필요한 주요 기술과 장치]

구분	주요 내용
플라즈마 기술	이온원에서 가속에 필요한 이온을 효과적으로 발생시키고 이를 빔의 형태로 인출하는 기술
고주파 기술	대출력 고주파 전력을 증폭하고 제어하는 기술
고주파 가속 기술	고주파를 이용해 입자 빔을 효과적으로 가속하는데 사용되는 가속관의 설계 및 운영 기술
상전도 / 초전도 기술	가속관, 전자석 등 도체를 필요로 하는 가속기 장치에 상전도체 혹은 초전도체를 적용·활용하는 기술
빔 진단 기술	가속된 빔의 위치 및 세기 등의 특성을 측정하기 위한 장치의 설계·제작·신호 처리 등과 관련된 기술
정밀 가공 기술	가속기 주요 장치의 정밀한 제작·가공과 관련된 기술
기반 기술 (진공 / 냉각 / 제어)	주요 가속장치의 운영을 위해 반드시 필요한 진공 기술, 냉각 기술, 제어 기술 등

자료: KISTEP

대형가속기를 활용한 연구과제의 양과 질을 높이기 위해서는 연구목적과 범위, 분석요구에 맞춘 차세대 가속기 제작 기술개발이 지속되어야한다. 차세대 가속기 기술은 기존 가속기보다 훨씬 더 작은 크기에서 고에너지 전자나 양성자를 얻을 수 있는 새로운 유형의 가속기를 말하며, 주요국에서 차세대 가속기 기술개발에 노력하고 있다.

[대형가속기 장치분야별 도전목표]

구분	높은 에너지	높은 출력	저 에미턴스	높은 가속장	새로운 방법	고휘도·결맞음성	소형화
초전도 RF가속관	○	○		○			○
가속기 빔 시뮬레이션	○	○	○		○	○	
입자빔 Source		○	○			○	
RF 출력원	○	○		○			
빔 진단제어		○	○			○	
상전도 고 가속전계 구조							○
새로운 가속기	○			○	○		○
초전도 자석	○		○				○

자료: 박성희, “국내 가속기 개발 및 연구현황”, 「서울공대웹진」, Vol. 121. 2021.

우리나라의 차세대가속기 분야 연구개발 활동은 활발한 수준이지만, 기술수준은 세계 최고 수준 국가에 비해 아직은 낮은 것으로 평가되었다.

2020년도에 국내 ‘차세대가속기 기술’에 대한 기술수준을 평가한 바 있다⁵⁸⁾. 차세대가속기 기술은 고휘도 방사광 장치 기술, 고강도·고성능 희귀동위원소 빔 생성 장치, 난치성 암치료 및 산업적 활용 가속장치 기술 등으로 정의한다.

[중점과학기술 내 가속기 기술 분류 현황]

대분류	중분류	중점과학기술
에너지·자원	핵융합·가속기	핵융합에너지 기술, 차세대가속기 기술
차세대가속기 기술 개요		
- 살아있는 세포나 물질의 펨토초 이하의 실시간 관찰을 통하여 새로운 과학영역을 개척하기 위한 4세대 X-선 자유 전자 레이저 가속기 기술, 기존 3세대형 저장링의 전자빔 회절한계 극복을 통한 극한 방사광 저장링 기술 등의 개발과 연X-선, 경X-선 영역의 고휘도 방사광 실험환경을 동시에 제공하는 장치기술 - 대전류 이온원, 초전도 가속관, 초전도 전자석, 고주파 발생장치 등 수소부터 우라늄까지 고출력·고에너지 중이온빔의 가속을 통하여 고강도·고성능 희귀동위원소 빔을 생성하기 위한 장치기술 - 하전입자와 표적물질과의 핵반응을 이용한 난치성 암치료 및 다양한 빔에너지를 가지는 전자빔·이온빔의 산업적 활용 등 소형 가속장치 활용 기술		

자료: 과학기술정보통신부, 「제4차 과학기술기본계획」, 2018.2.

58) 과학기술정보통신부는 「과학기술기본법」 제14조 및 동법 시행령 제24조에 근거하여 2년 마다 국가적으로 중요한 핵심기술에 대한 기술수준을 평가한다. 가장 최근에는 2020년도에 「제4차 과학기술기본계획」 내 120개 중점과학기술에 대해 기술수준평가를 실시했다.

차세대가속기 분야의 기술수준평가 결과를 살펴보면, 우리나라는 세계 최고 수준 국가의 기술수준에 비해 67.5%의 수준이며, 7.0년 정도 기술격차가 있다고 평가되었다⁵⁹⁾. 연구단계 역량에서는 보통수준이지만 연구개발활동 경향은 상승으로 평가되었다

[차세대가속기 주요국 기술수준(2020년 조사 기준)]

구분	기술수준			연구단계 역량		연구개발활동 경향(점수)
	수준(%)	격차(년)	그룹(점수)	기초(점수)	응용개발(점수)	
한국	67.5	7.0	후발(2.00)	보통(2.89)	보통(3.00)	상승(3.22)
중국	74.0	5.0	추격(2.90)	우수(3.67)	우수(3.67)	급상승(3.56)
일본	90.0	2.0	선도(3.70)	우수(4.33)	우수(4.33)	유지(2.44)
EU	95.5	0.5	선도(4.00)	탁월(4.89)	탁월(4.67)	상승(2.67)
미국	100.0	0.0	최고(4.00)	탁월(4.89)	탁월(4.89)	상승(2.56)

주: 1. 기술수준 그룹은 선도/최고(4점), 추격(3점), 후발(2점), 낙후(1점)로 평가한 평균값
 2. 연구단계 역량은 탁월(5점), 우수(4점), 보통(3점), 미흡(2점), 부족(1점)으로 평가한 평균값
 3. 연구개발활동경향은 급상승(4점), 상승(3점), 유지(2점), 하강(1점)으로 평가한 평균값
 자료: 안지현 외, 「2020년 기술수준평가」, 한국과학기술기획평가원, 2020.12.

이러한 차세대가속기 기술수준은 전체 120개 중점과학기술의 평균 수준(80.1%)과 비교하여 상대적으로 낮은 편으로 하위 기술수준 그룹에 포함되어 있다.

[차세대가속기 기술수준 평가 현황(2020년 조사 기준)]

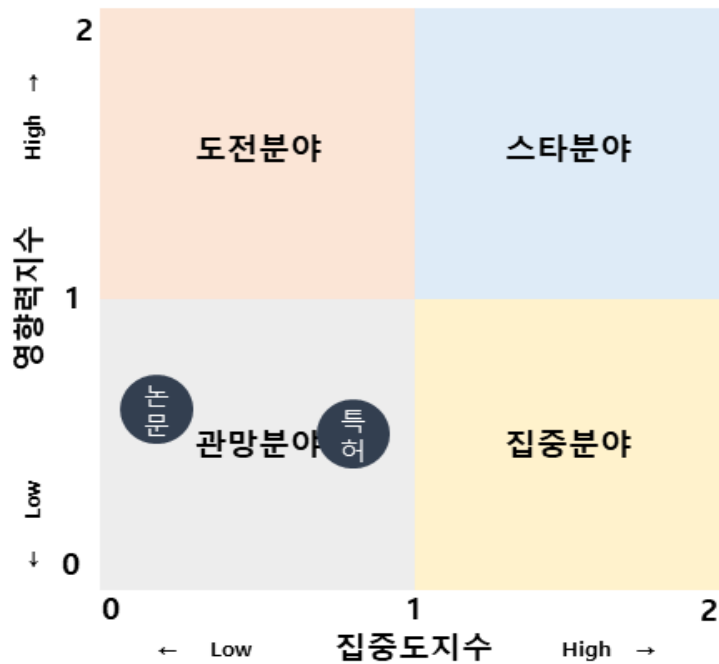
중점과학기술	기술수준(%)		기술격차(년)		연구개발 활동경향	연구단계 역량	
	'18	'20	'18	'20		기초	응용개발
전체기술 평균	76.9	80.1	3.8	3.3	상승	보통	우수
차세대가속기 기술	64.0	67.5	6.0	7.0	상승	보통	보통

자료: 안지현 외, 「2020년 기술수준평가」, 한국과학기술기획평가원, 2020.12.

우리나라 차세대가속기 기술의 논문·특허 포트폴리오 분석 결과에서는 집중도와 영향력이 모두 낮은 관망기술로 평가되었다.

[국내 차세대가속기 기술의 논문 및 특허 포트폴리오 평가 결과]

59) 안지현 외, 「2020년 기술수준평가」, 한국과학기술기획평가원, 2020.12.



자료: 과학기술정보통신부·KISTEP

동 기술수준조사에 참여한 전문가들은 방사광 가속기 개발, 중이온 가속기 구축과 의료용 중입자치료기 도입 등 관련 연구개발 활동이 증가하고 있지만, 아직 구체적인 제조 및 운영 기술이 부족하고, 연구진의 기초역량이 미흡하며, 연구인력 양성 및 연구비 등의 정부 지원도 부족하다고 평가했다.

[국내 차세대가속기 기술수준평가 판단 근거]

- PAL-XFEL 기술도입에 학습·설계기술만 있을 뿐 구체적인 제조 및 운영 기술은 부족
- 가속기 핵심 설계 제작 기술은 학습 단계
- 중이온가속기/양성자가속기 등 이온가속기 관련 업체가 부족함
- 산업/의료용 가속기 발전이 부족
- 연구인력이 전략적 배분 및 정부 지원이 부족, R&D경험 및 기초역량 미흡
- 순수 기초연구 발전을 위한 가속기 연구 투자가 미흡

자료: 안지현 외, 「2020년 기술수준평가」, 한국과학기술기획평가원, 2020.12.

(2) 대형가속기 핵심장치 국산화 필요

연구장비산업은 연구장비와 그 주변시스템 및 부품을 개발하거나 개조, 유지·보수·서비스하는 산업이다. 연구장비의 성능은 연구성과에 직접적으로 영향을 주며 기존의 기술적 난제에 대한 해결과 연구생산성을 제고하기 때문에 주요국들은 연구장비를 국가 과학기술 경쟁력 제고의 핵심요인으로 인식하고 전략적 투자를 통해 기술과 시장 확보에 노력하고 있다.

세계 연구장비 시장은 2013년 70.7조원 수준에서 연평균 6.9%로 성장하여 2022년에 127.4조원 규모에 이를 것으로 추정한다. 국내 장비시장 규모는 2014년 1조 6,965억원에서 연평균 10.4%로 크게 증가하여 2018년 2조 5,182억원 규모로 추정하였다⁶⁰⁾.

최근 5년간(2016~2020) 국가연구개발사업으로 투자된 연구시설·장비 구축액은 총 4조 262억원 수준이며, 국가연구개발사업 투자규모 대비 비중은 4.6% 수준으로 다소 감소 추세이다.

[국가연구개발사업 연구시설·장비 투자현황]

(단위: 억원, %)

구분	2016	2017	2018	2019	2020	합계	평균
국가연구개발 투자액(A)	164,624	166,171	167,861	174,095	200,560	873,311	174,662
연구시설· 장비구축액(B)	9,501	9,302	7,033	6,758	7,668	40,262	8,052
비중(B/A)	5.8	5.6	4.2	3.9	3.8	4.6	4.6

주: 국가연구개발투자액과 연구시설·장비 구축액은 국방R&D사업을 제외한 투자액임

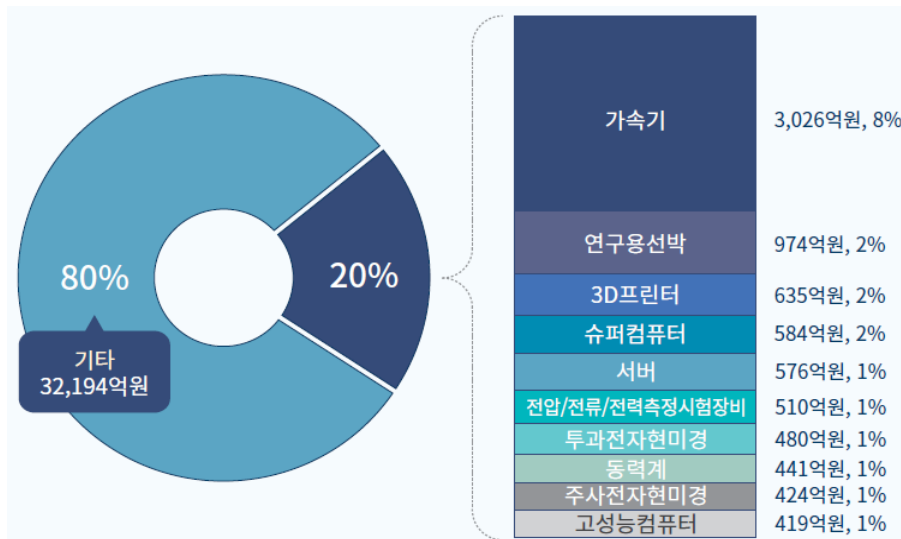
자료: 과학기술정보통신부, 「2020년도 국가연구개발시설장비 조사분석 보고서」, 2021.12.

첫째, 최근 5년간 국가연구개발사업으로 구축된 연구시설·장비 중 대형가속기 투자액이 가장 높은 비중을 차지하고 있지만, 주요 장치의 국산화는 다소 정체되어 있다. 이에 지속적인 교체 수요와 기술개발 필요성이 높은 장치와 품목을 선정하여 전략적인 R&D투자 및 산업체 사업화 지원 방안을 마련할 필요가 있다.

60) 과학기술정보통신부, 「연구장비산업 혁신성장전략(안)」, 2020.8.20.

최근 5년간 구축액 기준 상위 10대 연구시설·장비의 총 금액은 8,069억원으로 전체 구축액의 20.0%를 차지하며, 가속기가 3,026억원으로 가장 높았다.

[국가연구개발사업 연구시설·장비 10대 투자 상위 현황]



자료: 과학기술정보통신부, 「2020년도 국가연구개발시설장비 조사분석 보고서」, 2021.12.

최근 5년간 국가연구개발사업으로 구축된 연구시설·장비는 구축수 기준으로 국산 비율이 31.1%, 외산 비율은 68.9% 수준이다. 구축액 기준으로는 국산 비율이 42.1%, 외산 비율은 57.9% 수준이다.

[국가연구개발사업 연구시설·장비 투자현황]

(단위: 억원, %)

구분		구축수		구축액	
		점수	비중	구축액	비중
국산		5,855	31.1	16,959	42.1
외산	미국	5,893	31.3	9,322	23.2
	독일	2,122	11.3	4,260	10.6
	일본	1,605	8.5	3,623	9.0
	영국	767	4.1	1,071	2.7
	스위스	413	2.2	775	1.9
	기타	2,198	11.7	4,253	10.6
	소계	12,998	68.9	23,304	57.9
합계		18,853	100.0	40,262	100.0

자료: 과학기술정보통신부, 「2020년도 국가연구개발시설장비 조사분석 보고서」, 2021.12.

대형가속기 주요장치의 국산화율은 3세대 방사광가속기 62%, 4세대 방사광가속기 69.9%, 양성자가속기 53.3%, 중이온가속기 65.1%, 중입자가속기 27.9%⁶¹⁾이며, 현재 설계 중인 다목적 방사광가속기는 62.6%로 계획되어 있다.

[대형가속기 주요 장치구축 국산화율]

(단위: 억원, %)

구분	합계		국산		외산	
	사업비(a)	비율	사업비(b)	비율(b/a)	사업비(c)	비율(c/a)
3세대 방사광가속기	1,000	100.0	620	62.0	380	38.0
4세대 방사광가속기	2,788	100.0	1,948	69.9	840	30.1
다목적 방사광가속기	5,547	100.0	3,475	62.6	2,072	37.4
양성자 가속기	542	100.0	289	53.3	253	46.7
중이온 가속기	3,651	100.0	2,376	65.1	1,275	34.9
중입자 가속기	1,511.5	100.0	410.0	27.1	1,101.5	72.9

자료: 과학기술정보통신부

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/10>

세부적으로 살펴보면, 양성자가속기는 고주파장치 국산화율이 5.1%였으며, 다목적 방사광가속기는 고주파장치를 전량 외산으로 도입할 계획이다. 중이온가속기의 극저온시스템은 국산화율이 19.8%, 사이클로트론은 5.2% 수준이다⁶²⁾.

[양성자가속기 주요 장치별 국산화율]

(단위: 억원, %)

구분	합계		국산		외산	
	사업비(a)	비율	사업비(b)	비율(b/a)	사업비(c)	비율(c/a)
가속장치	254.3	100.0	219.6	86.4	34.7	13.6
전원장치	80.0	100.0	10	12.5	70.0	87.5
고주파장치	136.5	100.0	7	5.1	129.5	94.9
냉각장치	25.2	100.0	23	91.3	2.2	8.7
제어장치	24.2	100.0	21.98	90.8	2.2	9.2
진공장치	21.7	100.0	7	32.3	14.7	67.7
합계	541.9	100.0	288.58	53.3	253.3	46.7

자료: 과학기술정보통신부

- 61) 과학기술정보통신부는 중입자가속기는 도입 절차상 국내 업체 예산 지급액, 국내 인력 활용도 등을 고려하여 국산화율이 27.9%라고 제출하였지만, 완성된 중입자가속기를 일본에서 도입하는 것이기 때문에 실질적으로는 외산 비율이 100%라고 봐야한다.
- 62) 중이온가속기구축사업단에 따르면 2016년까지는 장치 설계 및 시제품 제작·성능시험과 관련 R&D 기간으로 해외선진기술 도입이 필요했지만, 2017년부터는 국내 업체 참여로 국내 발주비율이 높은 수준이며 일부 해외 업체만 제작 가능한 대형헬륨냉동기, 고순도 초전도특성 재료, 사이클로트론 등만 해외발주로 추진되었다고 한다. 특히, 세계최초로 고방사선 환경에서 사용가능한 고온초전도자석을 자체기술로 설계하고 제작 하였다고 설명하였다.

[다목적 방사광가속기 주요 장치별 국산화율(계획기준)]

(단위: 억원, %)

구분		합계		국산		외산	
		사업비(a)	비율	사업비(b)	비율(b/a)	사업비(c)	비율(c/a)
가속 장치	가속장치	2,487	100.0	1,607	64.6	880	35.4
	초전도 고주파	543	100.0	0	0.0	543	100.0
	기타 시설	430	100.0	424	98.6	6	1.4
빔라인	삽입장치	122	100.0	104	85.2	18	14.8
	기타 장치	1,183	100.0	558	47.2	625	52.8
기타		782	100.0	782	100.0	0	0.0
합계		5,547	100.0	3,475	62.6	2,072	37.4

자료: 과학기술정보통신부

[중이온가속기 주요 장치별 국산화율]

(단위: 억원, %)

구분		합계		국산		외산	
		사업비(a)	비율	사업비(b)	비율(b/a)	사업비(c)	비율(c/a)
가속장치		1,694	100.0	1,210	71.4	484	28.6
기반 장치	중앙제어 시스템	65	100.0	52	80.0	13	20.0
	극저온 시스템	334	100.0	66	19.8	268	80.2
	방사선 안전	6	100.0	6	100.0	0	0.0
	SRF 시험시설	262	100.0	189	72.1	73	27.9
RI생성 장치	사이클로트론	193	100.0	10	5.2	183	94.8
	ISOL 시스템	240	100.0	162	67.5	78	32.5
	IF 시스템	401	100.0	386	96.3	15	3.7
실험장치		316	100.0	171	54.1	145	45.9
기타		141	100.0	124	87.9	17	12.1
합계		3,651	100.0	2,376	65.1	1,276	34.9

자료: 과학기술정보통신부

이와 같이 대형가속기 핵심 장치 중 고주파 발생장치, RI생성장치인 사이클로트론, 극저온 시스템 등은 다른 장치에 비해 상대적으로 국산화율이 낮은 편이다. 대형가속기 장치의 국산화는 유지비용의 절감과 수입대체효과 뿐만 아니라 기업 육성, 일자리 창출, 파생기술의 타 산업 확산 등의 경제적 효과를 창출할 수 있는 장점이 있다. 그러나 해외 장치 수입과 활용이 더욱 경제적인 수도 있으므로, 지속적인 교체 수요가 있는 소모품 등 국산화 필요성이 높은 품목을 선정하고 이에 대한 국산화 R&D 및 산업체 지원 방안을 마련할 필요가 있다.

둘째, 과학기술정보통신부는 대형가속기 구축 사업에 역량있고 검증된 국내장비업체의 참여를 확대하고, 장비 구축과정에서 관련 요소기술 확보와 보유기술을 활용한 새로운 기술개발과 사업화 등을 추진할 수 있도록 체계적인 기업지원을 강화할 필요가 있다.

가속기 제작 산업은 진공장치산업, 고주파분야, 초전도장치 산업, 플라즈마 관련 산업, 정밀제어 분야, 고전압 및 고압 재료, 초정밀 계측기 산업 등이 있다. 대부분 대기업으로는 감당할 수 없는 기초 기반 지식 축적형의 소량 다품종의 산업으로 품목당 부가가치가 매우 높은 업종이다. 가속기는 정밀도와 안정도가 일반기기와는 비교할 수 없을 정도의 높은 사양이 필요하기 때문에 기술적 진입장벽이 높다⁶³⁾. 더 중요한 점은 대형가속기 제작 시장이 한정적이기 때문에 기업의 수익창출로 직접 연계되기 어려운 점이 있어 대부분 정부 주도로 추진하고 있다.

그러한 민간 기업의 수익 창출의 한계에도 불구하고, KSTAR(핵융합 연구 장치), ITER(국제 핵융합 실험로), 3세대 및 4세대 방사광, 양성자, 중이온 가속기의 구축 과정에서 국내 120개 기업이 연구개발 및 제조에 참여하여 성장했다⁶⁴⁾. 특히, 대형가속기 구축에 참여한 기업들이 구축과정에서 축적된 기술력과 노하우를 바탕으로 관련 요소기술 및 장치 국산화에 성공하여 기술력을 확보해가고 있다.

[국내 가속기 주요 장치의 제조국 및 제조업체]

기술	구성장치		포함 방사광가속기		양성자가속기	중이온가속기
			3세대	4세대		
고주파 가속 기술	가속관	상전도	IHEP(중국) 미쯔비시(일본) 도시바(일본)	비츠로테크(한국) 미쯔비시(일본)	비츠로테크(한국)	비츠로테크(한국)
		초전도	RI(독일)	-	비츠로테크(한국)	비츠로테크(한국) RI(독일)
자석 제작 기술	전자석	상전도	금룡테크(한국) IHEP(중국)	금룡테크(한국) 한미테크원(한국) IHEP(중국)	금룡테크(한국) IHEP(중국)	금룡테크(한국) 한미테크원(한국) DANFYSIK(덴마크)
		초전도	-	-	금룡테크(한국)	JH엔지니어링(한국) 수퍼제닉스(한국) Tesla(영국)

자료: 윤수진·함선영·이상경, “입자가속기술”, 「KISTEP 기술동향브리프」, 2019

63) 미래창조과학부, 「차세대 양성자 치료 시스템 및 통합 솔루션 구축방안」, 2015.1.13.

64) 해당 대형연구시설 구축과정에서 연구개발 및 제조에 참여한 국내 산업체의 총 매출 규모는 2009년 313.9억 원에서 2013년 1405.3억 원까지 증가했다고 한다. (자료: 함선영·안지현, “대형연구시설 구축-중이온가속기를 중심으로”, 「KISTEP 기술동향브리프」, 2021.7.)

그리고 대형연구시설 구축과정에 참여한 기업체가 관련 요소기술을 확보·활용하여 새로운 기술 및 제품을 제작하거나, 보유 기술을 기반으로 창업하는 등 관련 산업을 활성화하고 있다⁶⁵⁾.

과학기술정보통신부는 대형가속기 구축 장비의 국산화율을 높이기 위해서는 먼저 국산화가 필요한 장비의 우선순위를 선정하고 전략적인 R&D지원과 장치제조 기술의 민간 이전을 촉진할 필요가 있다.

[포항가속기연구소 기술이전 현황]

(단위: 건, 개사, 천원)

구분	기술이전 건수	기술이전 기업수	기술이전료 총액	건당 기술료
실적	19	14	455,000	23,947

주: 포항가속기연구소 설립(1988년) 이후 기술이전 총 실적임

자료: 포항가속기연구소

대형가속기 운영기관인 포항가속기연구소는 산업기술융합센터, 양성자과학연구단은 한국양성자가속기이용자협의회 운영 등을 통해 기업활동을 지원하고 있지만, 관련 기업들이 가속기 기술을 활용해 타 산업으로 확장해갈 수 있도록 체계적인 기업지원을 강화할 필요가 있다.

[중이온가속기 활용 기초과학분야 및 산업분야(예시)]

기초 과학	물성과학	생명과학	핵물리학	천체물리학
	물질 특이현상	유전자·생체고분자, 체내 조직·장기기능	신 핵종 탐색, 희귀 핵구조 및 반응	우주원소·초신성, 중성자별 및 매질



산업 분야	에너지	의료	농림	기타
	이차·베타·태양전지, 원자력발전	질병진단 및 치료, 생체시료 분석	신품종 개발	항공우주 소재, 반도체, 신소재 개발

자료: 함선영·안지현, “대형연구시설 구축-중이온가속기를 중심으로”, 「KISTEP 기술동향브리프», 2021.

65) 다윈시스는 KSTAR 구축과정에서 고전압·고정밀 전원장치 관련 자체기술을 확보하고, 이를 바탕으로 전기화학 및 철강 플랜트, 동·알루미늄 제련 공정, 플라즈마 관련 산업으로 영역을 확장하여 연 매출 약 2,479억 원(20년 기준)을 달성했다. 유럽 CERN 구축과정에 참여하여 새로운 제품서비스 개발, 신규고객 확보, 매출 증가 등이 발생한 기업은 28개에 달하며(19년 기준), 생명공학, 재료과학 등 다양한 분야에서 CERN의 기술을 활용한 스타트업은 16개사가 있었다(16년 기준). (자료: 함선영·안지현, “대형연구시설 구축-중이온가속기를 중심으로”, 「KISTEP 기술동향브리프», 2021.7.)

(3) 의료용 입자가속기 R&D투자전략 필요

암 환자의 일반적인 치료 방법은 수술, 항암화학요법, 방사선치료가 있다. 방사선치료는 X-선(엑스선), γ -선(감마선), 전자선 등의 고에너지 방사선(Radiation)⁶⁶⁾을 이용하여 암세포를 파괴하는 치료를 말한다⁶⁷⁾.

암 치료에 활용되는 방사선의 종류에는 광자로 이루어진 전자기방사선과 입자로 이루어진 입자방사선이 있다. 방사선 치료 방법은 크게 외부 방사선(원격) 치료 방법과 근접 치료 방법이 있다. 외부 방사선 치료는 선형가속기를 이용해 만든 X-선이나 전자선을 환자의 피부에 통과시켜 몸 내부의 암 조직까지 도달하게 하여 암세포를 파괴하는 방법이다. 근접치료는 방사선을 발생시키는 동위원소를 인체 조직 내에 직접 삽입하는 방식 등으로 치료하는 방법이다.

[치료용 방사선의 종류]

광자선(Photon Beam) or 전자기방사선	입자방사선(Particle Beam)
엑스선, 감마선 등	전자선, 양성자선, 중성자선, 중입자선 등

자료: 국립암센터

[방사선 치료 방법 종류]

외부 방사선(원격)치료	근접치료(Brachytherapy)
선형가속기를 이용하여 만든 고에너지의 X-선이나 전자선을 환자의 피부에 통과시켜 몸 내부에 있는 종양까지 도달하게 하여 암세포를 죽이는 방법	방사선을 발생시키는 동위원소를 인체 조직 내에 직접 삽입하거나 자궁, 비인강, 기관지, 식도, 담도 등으로 관을 통해 넣어 치료하는 방법

자료: 국립암센터

방사선 치료는 정상 조직에 불가피하게 방사선이 조사되는 부작용을 동반한다. 따라서 방사선치료 기술은 정상 조직의 손상을 최소화하면서 암 세포에 대해서만 선택적으로 치료의 효과를 높이는 특수한 치료 방법들이 개발되어왔다. 특수 방사선 치료 방법에는 3차원 입체조형 방사선치료, 정위적체부방사선치료, 세기조절 방사선치료(IMRT;

66) 방사선은 에너지를 가진 입자 혹은 파동의 흐름이 공간이나 매질을 통해 전파되는 것을 의미

67) 방사선을 세포에 조사하면 방사선이 세포의 DNA(Deoxyribo Nucleotic Acid)와 세포막에 직접 혹은 간접적으로 작용하여 장애를 일으켜 세포 사멸(Apoptosis)이라는 과정을 통해 죽게 된다.

Intensity Modulated Radiation Therapy), 영상유도 방사선치료, 토모치료, 입자선 치료 등이 있다.

[특수한 방사선치료 방법]

구분	치료 개요
3차원 입체조형 방사선치료 (3D CRT)	환자로부터 얻은 CT(전산화단층촬영)나 MRI(자기공명영상)의 진단 영상들을 소프트웨어로 분석하여 종양에 방사선을 쏘여주는 방식
정위적체부 방사선치료 (SBRT)	- 선형가속기에서 발생시키는 방사선을 이용하여 암 조직을 파괴하여 수술과 같은 효과를 얻을 수 있는 비침습적인 치료법 - 감마나이프 : 감마 나이프 방사선수술은 두피나 두개골의 절개 없이 방사선 물질에서 방사되는 감마선을 이용하는 장비 - 사이버나이프 : 선형가속기를 로봇팔에 장착하여 방사선을 조사하는 장비로 종양의 위치를 추적하여 방사선을 조사하는 장비
세기조절방사선치료 (IMRT)	고에너지 X-선 치료기법으로 방사선 조사 범위를 수백 개의 조각으로 나누어 개별적으로 선량을 조사하는 방식
영상유도 방사선치료(IGRT)	방사선 치료기기에 영상 장치를 결합하여 치료 전에 신체 내 종양의 이미지 변화를 3차원적으로 비교하여 치료 종양의 크기 및 위치를 정확히 관찰하여 오차를 최소화 하는 치료기법
토모치료	고에너지 엑스레이를 이용한 방사선 치료기와 전산화단층촬영이 가능한 CT를 접합한 방사선 치료기
입자선치료	양성자, 중입자 같은 입자선을 암 세포에 조사하여 치료 (양성자가속기는 2007년 국립암센터, 2017년 삼성서울병원에서 도입)

자료: 허영·정해근·조일성, “방사선 치료기기 기술동향 및 산업 현황”, 「KEIT PD Issue Report」 VOL17-5, 2017.5.

입자선 치료는 암 표적에만 적정량의 입자선을 집중적으로 조사할 수 있어, 정상 조직의 피폭 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다. 입자선 치료 방법에는 양성자치료(PBRT; Proton Beam Radiation Therapy)⁶⁸⁾, 중입자치료, 중성자치료가 있다. 양성자 치료는 수소 원자핵을 가속하여 얻은 양성자를 암에 조사하여 치료하는 방법이며, 중입자 치료는 원자핵과 전자를 가진 원자 자체를 이온화하여 가속시켜 치료하는 것이다.

68) 대표적인 입자선 치료는 양성자 치료로 1946년 미국의 로버트 월슨박사에 의해 처음 제안되었으며, 1955년 버클리 방사선 연구소에서 최초로 연구를 시작해 1990년 세계 최초로 미국 로마린다 대학 메디컬센터에 환자치료 전용 양성자 치료 시설이 건립되었다. (자료: 미래창조과학부, 「차세대 양성자 치료 시스템 및 통합 솔루션 구축방안」, 2015.1.13.)

첫째, 암 환자의 입자가속기 치료 시장의 성장추세가 가장 높을 것으로 전망되며, 우리나라의 암 환자의 입자가속기 치료 비중도 크게 증가하고 있다.

전 세계 방사선 치료 시장은 2019년 68억 5,194만 달러에서 연평균 4.55% 증가하여, 2024년에는 85억 6,105만 달러에 이를 것으로 전망하고 있다⁶⁹⁾. 특히, 생물학 기반 방사선치료 기술에서 입자가속기를 활용한 입자선 치료로 패러다임이 변화하고 있어, 입자선 치료 시장의 성장추세가 가장 클 것으로 전망한다.

[글로벌 방사선 치료시장 치료유형별 시장 규모 및 전망]

(단위: 백만달러, %)

구분	2018	2023	증가율
영상유도 방사선 요법	1,563.2	1,711.6	1.8
강도 조절 방사선 요법	1,279.1	1,488.9	3.1
3D 등각 방사선 요법	1,132.9	1,358.3	3.7
입자빔 치료	865.3	1,349.2	9.3
정위요법	470.0	611.8	5.4

자료: 「Marketsandmarkets, Radiotherapy Market」, 2019. 및 국립암센터 제출자료

우리나라 암 환자의 방사선 치료 인원은 2017년 72,147명에서 2021년 기준 84,876명으로 4.1%의 연평균 증가율을 보이고 있다. 국내 의료기관의 방사선 치료 장치 누적 대수는 선형가속기가 191대로 가장 많으며, 방사선동위원소 치료장치인 후장전 치료기가 34대, 토모테라피 26대, 감마나이프 21대, 사이버나이프가 9대, 입자가속기 치료 장치인 양성자치료기는 2대⁷⁰⁾가 있다.

[국내 의료기관 연도별 암환자 방사선 치료 현황]

(단위: 명, 건, %)

구분	2017	2018	2019	2020	2021	연평균증가율
실인원수	72,147	77,994	80,316	81,370	84,876	4.1
명세서건수	1,104,289	1,151,199	1,180,183	1,200,912	1,245,149	3.0

주: 건강보험 심사일 기준 2017년 1월 ~ 2021년 12월 까지 심사결정분

자료: 건강보험심사평가원 제출자료

69) TechNavio, 「Global Radiation Oncology Market」, 2020. 및 국립암센터 제출자료

70) 국립암센터의 양성자 치료시설은 2001년 도입이 결정되었고 건설공사와 시험운영을 거쳐 2007년 첫 환자 진료를 시작했으며, 서울삼성병원은 2011년에 착수하여 2015년부터 운영하고 있다.

[국내 의료기관 방사선진료장비 연도별 도입 현황(누적)]

(단위: 대수)

구분	장비명	2017	2018	2019	2020	2021
의료용 가속장치	선형가속기	169	171	181	184	191
	사이버나이프	11	11	11	10	9
	토모테라피	20	24	23	25	26
	양성자 치료기	2	2	2	2	2
	중성자 치료기	0	0	0	0	0
의료용 방사성동위원소 치료장치	후장전치료기	38	38	36	37	34
	감마나이프	20	22	21	21	21

주: 「의료장비현황 신고대상 및 식별부호화에 관한 기준 고시」(제2022-28호)에 따라 요양기관이 건강보험심사평가원에 신고한 장비 기준임

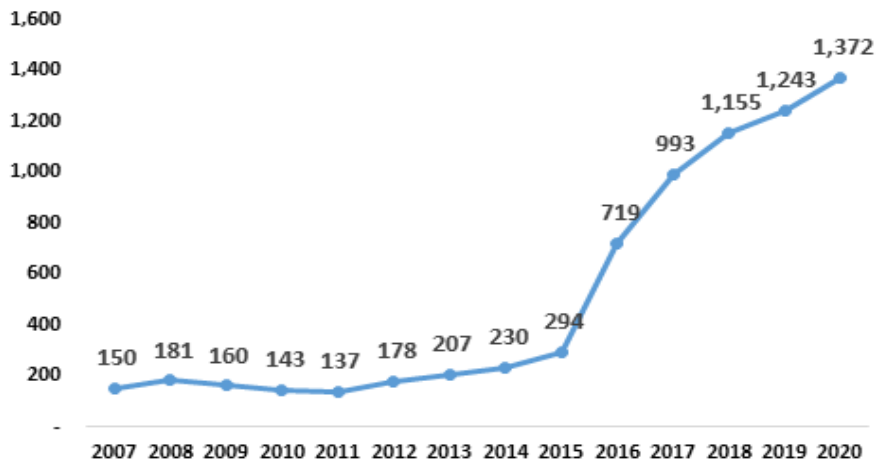
자료: 건강보험심사평가원

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/11>

양성자치료기는 국립암센터와 서울삼성병원 2대에 불과하다. 그러나 국립암센터와 삼성서울병원의 양성자 치료 인원은 2015년까지 연간 300명 이내에서 2020년에만 연간 1,372명에 달하는 등 치료 인원이 크게 증가하는 추세이다⁷¹⁾.

[국립암센터 및 삼성서울병원 양성자치료 환자수]

(단위: 명)



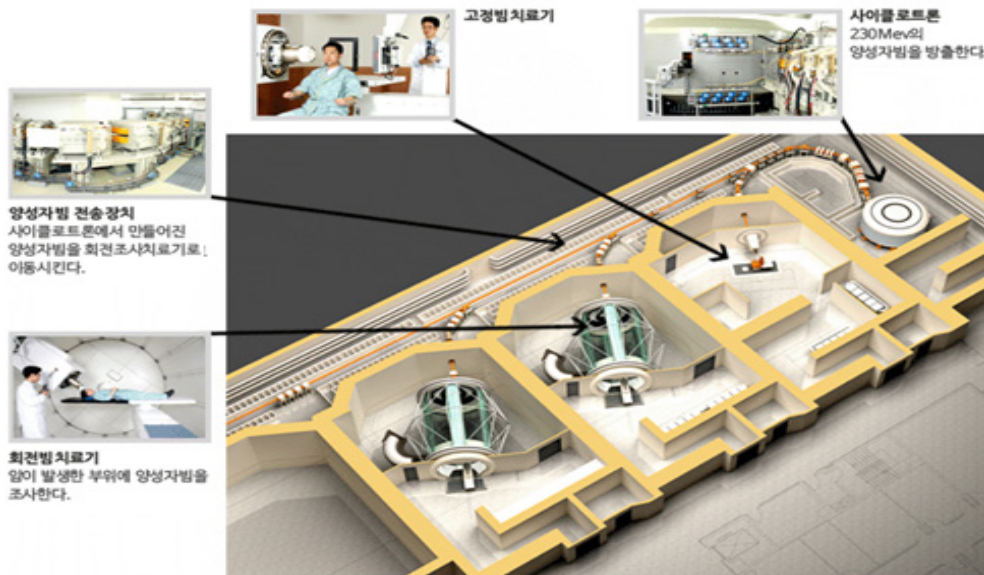
주: 국립암센터 및 서울삼성병원 인원 합계

자료: 국립암센터

71) 2015년부터 양성자치료에 의료보험이 적용된 원인도 있다.

전 세계적으로 양성자치료환자의 수는 증가하고 있는데 약 148개의 기관이 양성자를 포함한 입자빔 치료를 수행해 왔으며, 2021년 2월 기준 전 세계적으로 양성자치료를 받은 누적환자의 수는 약 222,425명에 달한다고 한다. 향후 2025년에는 전 세계 치료기관의 누적수가 177개가 될 것으로 예상된다⁷²⁾⁷³⁾.

[국립암센터 양성자치료기 구성도]



자료: 국립암센터(https://ncc.re.kr/main.ncc?uri=proton_therapy02)

둘째, 방사선 치료 장치의 글로벌 시장 규모는 크게 성장하고 있지만, 국내 방사선 진료 장치는 전량 수입에 의존하고 있어, 방사선 치료 장치 기술개발을 위한 전략적인 정부R&D지원의 필요성을 검토할 필요가 있다.

우리나라 의료기기 생산 및 수출입실적 통계자료를 살펴보면, 2020년도 생산 실적은 10조 1,358억원으로 전년대비 39.2% 증가했다. 특히 수출 실적은 66억 3,658만 달러로 전년대비 78.9% 증가했지만 수입실적은 44조 2,981만 달러로 6.5% 증가하

72) Particle Therapy Co-Operative Group(PTCOG), www.ptcog.ch. Feb-2021. 및 국립암센터 제출자료

73) 유럽에 비해 미국과 아시아에서 환자의 수가 급속히 증가하고 있으며, 이는 그동안 일본을 중심으로 이루어지던 양성자치료가 최근 중국, 대만, 싱가포르, 인도, 태국 등 다양한 나라에서 양성자치료기관을 늘리고 있기 때문이라고 한다.

여 의료기기 무역수지가 최초로 흑자로 전환되었다.

이와 같은 2020년의 의료기기 생산수출 실적 증가는 코로나19 유행으로 체외진단의료기기⁷⁴⁾ 수출이 급성장했기 때문이다⁷⁵⁾.

[우리나라 의료기기 연도별 생산 및 수출입실적 현황]

(단위: 백만원, 천USD, %)

구분	2016	2017	2018	2019(A)	2020(B)	증감	
						(B-A)	(B-A)/A
생산금액	5,603,064	5,823,155	6,511,135	7,279,384	10,135,785	2,856,401	39.2
수출실적(a)	2,918,523	3,164,210	3,610,213	3,709,929	6,636,575	2,926,646	78.9
수입실적(b)	3,151,367	3,495,526	3,888,991	4,159,915	4,429,811	269,896	6.5
무역수지(a-b)	△232,844	△331,316	△278,778	△449,986	2,206,764	-	-

자료: 식품의약품안전처

그러나 우리나라 의료기기 생산 및 수출입실적 통계자료를 살펴보면 2019년, 2020년 방사선 진료 장치의 수입점유율은 거의 100%이다. 2020년 기준 가장 높은 수입액을 보인 품목은 치료용하전입자가속장치로 525억 8,288만원이다. 이와 같이 의료기기와 방사선 진료 시장 성장 추세에도 불구하고, 방사선 진료장치⁷⁶⁾ 분야의 국내 생산 기업체는 없으며 전량 해외 수입에 의존하고 있다⁷⁷⁾. 앞으로 연세대의료원과 서울대병원에서 중입자가속기 치료 장치가 구축되면 국내에는 4대의 입자가속기 암환자 치료 장치를 보유하게 되지만, 모두 일본에서 수입한 것이다.

74) 2020년도 수출 상위 체외의료기기 품목은 ‘고위험성감염체유전자검사시약’이 18.6억 달러로 전년대비 1,935.6% 증가, ‘고위험성감염체면역검사시약’이 10.6억 달러로 전년대비 2,567.9% 증가 등

75) 식품의약품안전처, “의료기기 첫 무역수지 흑자, 혁신 규제서비스 지속 강화 추진”, 2021.6.24.

76) 「의료기기 품목 및 품목별 등급에 관한 규정」의 [별표] 의료기기 품목 및 품목별 등급에서 방사선 진료장치(Radiologic device) A13000 ~ A13200에 해당된다.

77) 의료용 입자가속기의 경우 연구용 가속기와는 달리 국내에서 개발된 제품자체가 없으며, 제품이 개발되더라도 임상시험을 통해 승인을 받아야 하기 때문에 이미 임상시험으로 검증된 해외 제품을 활용할 수 밖에 없는 한계점이 있다. 따라서 의료용 입자가속기 국산화를 위해서는 기술개발뿐만 아니라 임상시험까지 고려한 제도적 지원방안 필요하다.

[우리나라 방사선 진료장치 수입액 및 수입점유율 현황]

(단위: 천원, %)

분류번호	품목명	2019년		2020년	
		수입금액	수입 점유율	수입금액	수입 점유율
A13000.00	방사선진료장치	59,789	100.0	88,433	100.0
A13010.02	양전자방출-전산화단층엑스선조합촬영장치	8,797,471	100.0	10,143,519	100.0
A13020.01	치료용하전입자가속장치	45,156,650	100.0	52,582,876	100.0
A13060.01	방사성핵종재호흡장치	48,129	100.0	54,990	100.0
A13070.01	방사선치료용빔조정블록	401,678	100.0	-	-
A13080.01	수동식근접치료용방사선조사장치	5,684,545	100.0	7,348,313	100.0
A13090.01	원격조정식근접치료용방사선조사장치	15,166	100.0	47,566	100.0
A13100.01	원격치료용방사선조사장치	36,324	100.0	36,763	100.0
A13120.01	기능검사용방사선측정장치	16,938	100.0	70,048	80.8
A13130.01	베타계수기	248,050	100.0	-	-
A13140.01	감마계수기	418,490	64.9	-	-
A13170.01	단일광자방출전산화단층촬영장치	2,816,005	100.0	5,603,711	100.0
A13170.02	단일광자방출전산화단층엑스선조합촬영장치	5,614,036	100.0	3,128,199	100.0
A13180.01	치료용엑스선조사장치	3,405	100.0	-	-
A13190.00	치료용방사선모사장치	-	-	266,949	100.0
A13190.01	치료용방사선모사장치	-	-	1,020,254	100.0
A13200.01	방사선혈액조사장치	2,536,128	100.0	1,636,715	100.0
합계		71,852,804	99.7	82,028,336	100.0

주: 수입점유율은 금액 기준임

자료: 식품의약품안전처, 각 연도 「의료기기 생산 및 수출입실적 통계자료」

<https://datalink.nabo.go.kr/9791167990501/12>

2020년 7월 22일 국내에서 최초로 ‘치료용중성자 조사장치’⁷⁸⁾가 혁신의료기기⁷⁹⁾로 지정을 받았고, 한국원자력의학원 등에서 입자가속기를 이용한 암치료 기술개발에 노력하고 있지만, 원천기술 확보를 위한 정부의 효과적인 R&D지원과 사업화를 위한 임상시험 지원 방안 등 전반적인 지원방안 검토가 필요하다.

78) 입자가속기를 통해 발생하는 중성자를 조사하여 붕소가 주입된 암세포를 선택적으로 사멸시킬 수 있는 장치이다.

79) “혁신의료기기”란 「의료기기법」 제2조제1항에 따른 의료기기 중 정보통신기술, 생명공학기술, 로봇기술 등 기술집약도가 높고 혁신 속도가 빠른 분야의 첨단 기술의 적용이나 사용방법의 개선 등을 통하여 기존의 의료기기나 치료법에 비하여 안전성·유효성을 현저히 개선하였거나 개선할 것으로 예상되는 의료기기로서 제21조에 따라 식품의약품안전처장으로부터 지정을 받은 의료기기를 말한다.

대형가속기는 기초과학 분야의 핵심적인 연구시설이면서 연구성과의 산업적 효용성도 높아져 다양한 미래 첨단산업의 중추적 연구시설로 활용되고 있다. 우리 정부는 3세대 방사광가속기 및 4세대 선형 방사광가속기, 중이온가속기, 중입자가속기, 다목적 방사광가속기 구축과 운영에 그간 3.4조원이 넘는 정부 예산을 투자해왔다. 그러나 대형가속기 구축 사업이 빈번하게 지연되고 재정투자 규모도 당초 계획보다 증가해왔다. 또한, 증가하는 이용 수요에 비해 과제 지원율은 낮아지고 있어 효과적인 운영체제 구축의 필요성이 높아지고 있다.

이에 본 연구에서는 국내 대형가속기의 구축사업 현황과 운영체제를 전반적으로 살펴보고, 주요 쟁점별 문제점들에 대해 아래와 같이 주요 개선방안을 제시하고자 한다.

첫째, 대형가속기 구축 사업의 체계적인 중장기 로드맵을 마련하고, 미래 과학기술 환경변화에 대응한 지속적인 수정·보완으로 재정투자 효율성을 강화할 필요가 있다.

대형가속기와 같은 대형연구시설은 대규모의 구축비용이 들어가지만, 향후 시설운영에도 큰 규모의 정부예산이 소요되고, 시설구축에 장기간이 소요되므로 시설 구축운영의 재정투자 효율성, 시설활용의 적시성을 고려한 국가차원의 중장기로드맵 수립이 필요하다. 또한, 대형가속기 구축의 근거 법률로 수립하고 있는 각 분야 중장기계획과 대형가속기별 기본계획과의 연계가 다소 미흡하다는 점을 개선할 필요가 있다. 그러나 이러한 문제는 대형연구시설 구축 사업의 전반적인 문제점임을 감안하여 대형연구시설의 구축 사업 관리의 표준절차 수립과 운영으로 재정투자 효율성을 높일 필요가 있다.

둘째, 대형가속기를 비롯한 대형연구시설 구축 사업 추진 전에 ‘사전 기술검증 R&D’ 단계를 신설하여 R&D의 가능성과 위험성을 확인하고, 본 사업 추진시에도 R&D와 시설건설 사업을 단계별로 추진함으로써 사업지연의 위험성을 최소화할 필요가 있다.

대형가속기를 포함한 대형연구시설 구축사업은 ‘대형연구개발사업(R&D)’ 측면에서 기술적 난이도가 높아 사업지연의 위험율이 높은 특징이 있다. 중이온가속기 구축사업과 중입자가속기 구축사업의 사례에서도 핵심장치의 기술개발이 지연되면서 전체 사업일정

의 지연으로 이어졌다. 이에 대형가속기 구축 사업계획 수립 이전에 ‘사전 기술검증 R&D’를 신설하고 기본설계까지는 완료 후에 예비타당성 조사를 추진하는 방안을 검토해볼 필요가 있다. 본 사업 추진 시에도 장치개발 R&D사업과 시설구축사업을 단계별로 추진한다면, 기술개발의 지연으로 발생하는 사업지연과 총사업비 증가를 최소화하는데 효과적일 것으로 보여진다.

셋째, 대형가속기의 활용 수요 증가를 고려할 때 장기적으로는 신규 빔라인 증설의 필요성이 있지만, 가속기 전문인력 양성, 대형가속기 간 기술·인력·정보의 공동 활용을 촉진 등 대형가속기 운영체계 효율화에 노력할 필요가 있다.

3세대 방사광가속기의 신청과제 수는 운영 초기에 비해 거의 3배가량 증가했지만, 과제지원율은 82.3%에서 53.1% 수준으로 감소하였다. 과제지원율을 높이기 위해서는 장기적으로 빔라인 증설이나 신규 가속기 구축이 필요한 상황이다.

그러나 우선적으로는 대형가속기협의회를 활성화하여 기술·인력·정보의 공동 활용을 촉진하고, 이용자 유형별 빔라인 지원체계를 개선하는 등 가속기 운영의 효율성을 높이는 노력이 필요하다. 또한 현재 대형가속기 운영자들은 연구·기술·행정 등의 가속기 운영 전 분야의 인력 충원이 시급하다고 평가하고 있다. 현재 구축 중인 대형가속기의 운영이 본격화 할 경우 전문인력 부족이 심화될 우려가 있으므로 전문인력 양성과 운영기관 인력 충원에 노력할 필요가 있다.

넷째, 대형가속기 활용 연구성과를 높이기 위해서는 차세대 가속기 개발과 주요 장치의 국산화를 위한 전략적인 R&D투자가 필요하며, 관련 산업체의 기술역량 강화를 위한 사업화 지원에 적극 노력할 필요가 있다.

대형가속기를 활용한 연구과제의 양과 질을 높이기 위해서는 기존 가속기보다 높은 성능을 지닌 차세대 가속기 개발이 필요하다. 우리나라의 차세대가속기 분야 연구개발 활동은 활발한 수준이지만, 제조 및 운영 기술과 연구진의 기초역량을 높일 필요가 있다.

대형가속기 구축 사업의 경험을 통해 핵심장치의 국산화율은 점차 개선되고 있지만, 일부 핵심장치의 경우 여전히 외산제품에 의존하고 있다. 제한된 사업 기간 내에 사업 위험율을 낮추고 검증된 외산 제품을 활용하는 것이 경제적인 경우도 있지만, 장기적으로는 대형가속기에 지속적인 교체 수요가 높고 타 산업으로의 파급효과가 있는 장치

나 품목의 국산화를 위한 정부의 전략적인 R&D투자가 필요하다. 또한, 대형가속기 구축 사업에 역량있고 검증된 국내장비업체의 참여를 확대하고 산업체의 기술역량 강화를 위한 사업화 지원에도 적극 노력할 필요가 있다.

대형가속기를 비롯한 대형연구시설은 기초과학연구와 미래유망분야 원천 기술 확보의 핵심요소로서 고용유발, 관련 산업 육성, 신산업 창출 등을 통해 경제활성화에 기여한다. 이에 첨단 대형연구시설의 활용여부가 성과창출에 중요한 역할을 하고 있으며, 그 중 대형가속기의 활용성이 더욱 주목받고 있다. 그러나 대형가속기는 구축 사업에 대규모 예산이 투입되고, 향후 운영비도 지속적으로 증가하기 때문에, 신규 대형가속기 구축은 장기적인 관점에서 미래환경변화와 산업수요를 종합적으로 검토하여 신중하게 결정해야한다.

그리고 전 세계적으로도 대형가속기 구축 수요가 증가하면서 가속기 분야는 새로운 전략시장으로 충분히 매력적이며, 핵심장치의 경우 타 산업으로의 활용성도 높은 편이다. 이에 우리나라도 다양한 대형연구시설장비의 구축 노하우를 갖고 있고, 주요 장치 개발과 생산에 관한 기초원천 기술을 확보한다면 장기적으로는 기초과학 연구시설장비 분야의 세계 최고의 기술경쟁력을 갖출 수 있다고 본다.

다만, 이를 위해서는 정부차원에서 대형가속기 기술경쟁력을 높일 수 있도록 체계적인 중장기 기술로드맵 수립과 이에 따른 전략적인 R&D투자, 전문인력 양성확대, 산학연 협력체계 강화, 효과적인 기술이전사업화 지원체계 등이 효과적으로 추진되어야할 것이다.

과학기술 인프라 대형가속기 구축·운영사업 분석

발 간 일 2022년 5월

발 행 인 임익상 국회예산정책처장

편 집 예산분석실 경제산업사업평가과

발 행 처 국회예산정책처

서울특별시 영등포구 의사당대로 1
(tel 02·2070·3114)

인 쇄 처 ㈜명문기획

이 책은 국회예산정책처 홈페이지(www.nabo.go.kr)에
서 보실 수 있습니다.

ISBN 979-11-6799-050-1 93350

© 국회예산정책처, 2022

내일을 여는 국민의 국회



(07233)서울특별시 영등포구 의사당대로 1
Tel. 02-2070-3114 www.nabo.go.kr

발 간 등 록 번 호

31-9700486-001951-01



국회에산정책처
NATIONAL ASSEMBLY BUDGET OFFICE