

요 약 문

I. 제 목

- 방사광가속기 사업과 중이온가속기 사업의 비교분석 연구

II. 연구개요

□ 연구의 배경

- 국회 미래창조과학방송통신위원회 부대의견 제시
 - 국회 미방위는 2013년 추경예산 심의('13.4.30)결과 부대의견으로 4세대방사광 가속기와 중이온가속기에 대한 비교 평가를 제시

□ 연구의 목적 및 내용

- 연구목적
 - 4세대 방사광가속기와 중이온가속기 사업의 사업추진 현황을 점검하고, 두 대형가속기 구축사업을 기술성, 사업성, 시급성 측면에서 비교 평가
- 연구내용
 - 4세대 방사광가속기구축사업과 중이온가속기 구축사업의 추진현황 및 해외 대형가속기 구축 동향 조사
 - 4세대 방사광가속기 구축사업과 중이온가속기 구축사업을 기술성·사업성·시급성 측면에서 비교 평가

□ 연구 추진방법

- (전문가위원회 구성 운영) 가속기 관련 산·학·연 전문가 9명*으로 전문가위원회를 구성하여, 분야별 작성 및 전체 회의를 통해 점검
 - * 양종만(이화여대), 손동철(경북대), 김수봉(서울대), 김현정(서강대), 노승정(단국대), 한범수(이비테크), 박배호(건국대), 김은산(경북대), 임병우(한국전력기술)
- (문헌조사 및 사업단 인터뷰) 대형가속기 관련 기획연구, 해외 동향 연구 등의 문헌조사와, 사업현황 등의 파악을 위해 각 가속기사업단장의 사업추진 현황 발표 및 인터뷰 등 실시

Ⅲ. 가속기 개념 및 분류

□ 가속기의 개념

- 가속기(accelerator 또는 particle accelerator)는 원자핵이나 소립자와 같이 작은 입자의 내부구조 등을 밝히기 위하여 원자핵 또는 기본입자를 가속, 충돌시키는 장치
 - 양성자, 전자, 이온 등의 전기를 띤 입자를 강력한 전기장을 사용하여 빛의 속도(30만km/초)에 가깝게 속도를 높여줌으로써 충돌과정에서 일어나는 숨어있던 입자들 사이에 다양한 반응을 통해 미시세계의 물리법칙을 규명
 - 과거에는 핵물리, 입자물리학 등 기초연구 연구수행에 주로 이용
 - 현재에는 생명과학, 의학, 핵공학, 재료공학, 나노산업, 방위산업 등 다양한 분야에 활용

□ 가속기의 분류

- 가속기는 입자를 가속한다는 점에서는 동일하나, 가속입자의 종류에 따라 전자(방사광)가속기, 중이온가속기, 양성자가속기로 분류하고, 가속시키는 형태(방법)에 따라 원형가속기와 선형가속기로 구분
- ① 가속입자별 분류: 전자(방사광)가속기, 양성자가속기, 중이온가속기

<가속입자별 가속기 종류 및 특징>

구 분		원 리	연구 분야	활용분야
강입자가속기	전자 및 방사광 가속기	전자를 가속한 후, 전자석을 이용해 회전시킬 때 발생하는 ·자외선, X-선 등 넓은 영역의 고속도, 고휘도의 빛을 활용하는 연구	높은 에너지를 가진 강력한 빛을 물질에 비추어 원자, 분자 수준, 근원적 구조를 규명하는 연구에 필수	다양한 빛의 방식을 활용하여 기초과학은 물론, 응용과학, 과학, 의학 및 산업 등에 폭 넓게 활용 · 물질구조, 생명과학, 핵구조 및 강입자, 입자물리 연구 등
	양성자가속기	수소원자에서 양성자만을 꺼내어 가속한 후, · 양성자와 표적과의 충돌에 따른 표적의 변화, 충돌로 생성되는 2차입자(중성자, 뮤온 등) 연구	양성자를 활용하여 물질의 핵을 파쇄해 그 특성과 구조의 파악 뿐만 아니라 물질의 변형시킬 수 있는 연구에 필수	물질구조에 대한 이해와 기초과학적 연구뿐만 아니라 물질구조 변경을 통한 신소재 개발, 암 치료 등에 응용 · 생명과학, 핵구조, 강입자, 암치료, 입자물리 연구 등
	중이온가속기	양성자가속기와 원리 유사하나 수소보다 무거운 입자(탄소, 칼슘, uranium 등)들을 가속한 후 · 가속입자와 표적과의 충돌로 핵반응을 일으켜 다양한 희귀동위원소 생성	중이온의 핵반응으로 다양한 희귀동위원소를 연구하여, 차세대 핵물리 연구에 필요하며, 원소의 생성원리를 실험적으로 증명하여 우주창조의 비밀을 푸는 등 기초과학 연구에 필수	물질의 생성 및 변화를 통해 신핵종 탐색연구, 핵구조 연구, 우주핵반응, 암 치료, 극한 핵물질 연구 등 · 암치료, 신물질·신물질개발, 반도체공정, 핵물리연구 등

② 가속기 형태별 분류: 선형가속기, 원형가속기

- 원형가속기: 선형에 비해 공간 운영측면에서 효율적이거나, 입자들의 곡선운동으로 통제가 어려워 저전류 빔 가속에 적합
- 선형가속기: 에너지가 커질수록 가속관 길이가 길어지고, 같은 하전입자들 간의 반발력 통제에 유리하여 대전류 가속에 유리

IV. 국내 대형가속기 구축 현황 및 진단

□ 4세대 방사광가속기 구축 사업

○ 사업개요

- 목적: 세계 최첨단의 4세대 방사광가속기(빔에너지 10GeV)를 구축하여 미래 첨단 기초연구 인프라 확보
- 총사업비/사업기간: 4,260억원(정부 4,000, 지방 260)/ '11~'14
- 사업규모: 4세대 방사광가속기 구축(총 길이 1,100m)
 - 빔에너지 10GeV(X-선 자유전자레이저), 방사광파장 0.1nm 이하(경X-선)
 - 주요시설: 전자빔동, 광자빔동, 기술지원동 등
 - * 부지 102,700㎡(31,100평), 건물연면적 36,720㎡(11,108평)

○ 추진현황

- 사전타당성분석(KISTEP, '07.8~'11), 예비타당성조사 완료(KDI, '09.12~'10.8)
- 『4세대 방사광가속기』 사업 기본계획 수립 및 사업착수('11.4월)
- 기반시설 공사 업체 선정 및 공사 착수('12.9.1~'14.11.31)
- 전자빔시스템 장치설계 완료('11) 및 가속장치 구매·제작 착수('13)
- 광자빔시스템 장치설계 완료('12) 및 실험장치 구매·제작 착수('13)

○ 예산현황

(단위: 억원/정부)

구분	2011	2012	2013	2014	계
예산	200	450	1,050	1,100*	2,800 (총사업비 4,000)

* '14년 정부 예산안

□ 중이온가속기 구축 사업

○ 사업개요

- 목적: 과학벨트를 세계적 지식창출 거점으로 육성하기 위해 현재 운용 또는 구축 중인 가속기 대비 최고 성능의 중이온가속기 구축
- 총사업비/사업기간: 4,604억원(정부 4,604, 지방 0)/ '11~'17
 - * 장치구축비로 건물, 부대시설 건축비, 인건비 미포함
- 사업규모: 중이온가속기 구축
 - 빔에너지 200MeV/u, 빔출력 400kW급 희귀동위원소 가속기
 - * 부지 약 1,000,000㎡(약 300,000평), 시설연면적 135,582㎡(약 40,000평)

○ 추진현황

- 국제과학비즈니스 종합계획 확정('09.1), 중이온가속기 구축계획 수립연구('09.3~'10.6)
- 개념설계('10.3~'11.2) 및 개념설계 내용 및 사업방향 국제자문('11.7~'10)
- 기본계획 수립 및 사업단장 선정, 구축 사업 착수('11.12~'12.1)
- 시스템 요구사항 및 마일스톤 수립('12.9)
- 주요장치 상세설계 완료('13.6), 시작품/시제품 제작 착수('13.1~)

○ 예산현황

(단위: 억원/정부)

구분	2011	2012	2013	2014	계
예산	44	390	420	600*	1,454 (총사업비 4,604)

* '14년 정부 예산안

V. 해외 대형가속기 구축 동향

□ 해외 4세대 방사광가속기 구축 사업

- 세계적으로 4세대 방사광가속기가 가동되고 있는 곳은 미국(LCLS-I)과 일본(SACLA)이며, EU와 스위스는 신규 구축, 미국은 추가 구축(LCLS-II) 중

구분	PAL-XFEL (한국)	LCLS (미국)		SACLA (일본)	Euro X-FEL (EU)	PSI-XFEL (스위스)
		LCLS-I	LCLS-II			
사업기간	'11~'14	'05~'08	'10~'16	'07~'10	'09~'15	'11~'16
건설비	4,260억원	7,400억원	4,500억원	4,500억원	1조7,000억원	3,600억원
가속 에너지 (GeV)	10	13.64	2~15	8	10~20	5.8
방사광 파장 (nm)	6~0.1	1.5~0.15	7.7~0.05	6~0.08	6~0.085	10~0.1
총 길이(km)	1.1	1.6	-	0.7	3.4	0.7

□ 해외 중이온가속기 구축 동향

- 세계적으로 희귀동위원소를 생성하고 있는 대형 가속기는 5개이며, 그 중 3개가 업그레이드 중이고, 독일과 미국은 신규 구축 중

구분	한국 기초과학(연) 리온	캐나다 TRIUMF /ISAC II	프랑스 GANL /SPIRAL II	유럽 CEFN /MIE-ISOLDE	일본 RIKEN /RIBF	독일 GSI /FAIR	미국 MSU /FRIB	중국 IMP /HIRFL
사업기간	~'17	운영 중 성능향상~'15	운영 중 성능향상~'17	운영 중 성능향상~'16	운영 중	~'18	~'21	운영 중
가속 에너지	200MeV/u (우라늄)	500 MeV (양성자)	15 MeV/u (중이온)	1.4 GeV/u (양성자)	350 MeV/u (우라늄)	3.7 GeV/u (중이온)	200 MeV/u (우라늄)	500 MeV/u (우라늄)
가속출력	400kW	50kW	160kW	2.8kW	100kW	80kW	400kW	10 ¹⁰ pps
리빔 에너지	< 250 MeV/u (Sn ⁻¹³²)	6 MeV/u	6 MeV/u	10 MeV/u	345 MeV/u	1.5 GeV/u	< 150 MeV/u (Sn ⁻¹³²)	
발생 방식	ISOL/IF	ISOL	ISOL	ISOL	In Flight	In Flight	In Flight	In Flight
연구 분야	핵 천체, 원자력, 물성, 바이오, 의학	핵, 물성	핵과학	핵 천체 입자, 원자, 물성, 바이오	핵과학	핵 천체 입자, 원자, 물성, 바이오	핵과학	핵과학

※ 유럽 EURISOL(1GeV, 양성자, ISOL 방식) 개념설계 중, 중국 ISOL+IF 결합 가속기 제안 논의 중

VI. 대형가속기 구축 사업 비교분석

□ 기술성 측면

○ 기술적 우수성

- (방사광) 미국, 일본에 이어 세계 3번째 4세대 방사광가속기로, 고해상도(태양의 100경배)와 펨토초(10^{-15} 초) 시간단위 실험이 가능하여 살아있는 세포 연구
- 3세대 방사광가속기 구축·운영을 통해 축적된 국내 기술력을 바탕으로 주요 구성품의 국산화율을 70%까지 확보
 - ※ 국산화 장비(예): 전자총, 모듈레이터, 전자석, 분광기, 빔 진단장치 등
- (중이온) 세계 최초로 두 가지 동위원소 생성방법(ISOL, IF)을 결합하여 기존 시설보다 넓은 범위의 희귀 동위원소 생성 가능
- 가속에너지 200MeV/u, 가속출력 400kW급 대형가속기로 현재 운영 또는 건설 중인 중이온가속기 중 최고 수준
- 현재 진행 중인 가속기 구축 프로젝트(CERN의 HIE-ISOLDE 등)와 공동 개발·제작을 통해 개발비용과 리스크 절감
 - ※ ISOL(Isotope Separation On-Line): 두꺼운 표적에 양성자를 충돌시켜 대전류 저에너지 동위원소 생성
 - ※ IF(In-flight Fragmentation): 가벼운 표적에 무거운 중이온을 충돌시켜 소전류 고에너지 동위원소 생성

□ 사업성 측면

○ 투자비용

- (방사광) 구축비용은 4,260억원*, 연간 운영비는 192억원 추정
 - * 유틸리티 및 시설 1,380억원, 전자빔 2,457억원, 광자빔 423억원
 - ※ 기존 시설(3세대 방사광가속기)의 인프라와 인력을 공동 활용할 수 있어 중이온가속기에 비해 구축·운영비용이 상대적으로 낮음
- (중이온) 구축비용은 4,604억원*, 연간 운영비는 440억원 추정
 - * 가속장치·기반시설 2819억원, IF·ISOL 시스템 701억원, 활용시설 867억원, 사업단 운영비 217억원

<가속기 구축비용 및 운영비용>

구분	상세 구분	4세대 방사광가속기	중이온가속기
구축비용	구축비용 (기본계획 상)	4,260억원 (국비 4,000억원 지방비 260억원)	4,604억원 (국비 4,604억원 국제과학비즈니스벨트사업)
	인건비	52억원 (74명)	165억원 (180명)
운영비용	운영경비	140억원	275억원

* 운영비용에 빔라인 증설 및 성능향상 비용은 제외

○ 연구 수요

- (방사광) 범용성이 우수한 거대과학시설로서 생명, 재료, 화학, 물리, 환경 등 다양한 분야의 연구에 활용되며, 최근 생명·환경 분야 이용자가 크게 증가하는 추세
- (중이온) 핵과학, 원자·분자과학, 물성과학, 의생명과학을 중점 연구 분야로 하며, 희귀 동위원소를 생성하는 가속기는 세계적으로 이용 수요에 비해 시설이 현저하게 부족한 상황

□ 시급성 측면

○ 구축의 시급성

(계획상 4세대 방사광가속기는 2014년, 중이온가속기는 2017년 구축예정)

- (방사광) EU(2015), 스위스(2016), 미국(2016)이 연이어 구축 예정으로 구축이 지연될수록 시설의 기술적 진보성은 크게 저하
 - 미국, 일본 4세대 가속기의 경우 빔라인 수 제한 및 자국 이용자 우선 사용 등으로 이용 경쟁률이 매우 높으며, 보안이 요구되는 첨단 산업기술 연구는 해외 시설 사용이 곤란
 - ※ 3세대 방사광가속기 이용자의 82%가 4세대 가속기 이용 의향예비타당성조사, 2010)
- (중이온) 프랑스(2017), 독일(2018), 미국(2021)이 우리와 비슷한 시기에 구축 예정으로 지연될수록 시설의 기술적 진보성 저하
 - 세계최초의 새로운 동위원소 생성방식을 통한 희귀 동위원소를 활용한 독창적인 연구개발이 지연되고, 국제공동연구를 통한 대형실험에서 경쟁력 있는 이용자들의 확보가 어려움

○ 대형시설 구축사업의 특성상, 사업 지연에 따른 추가비용 발생이 불가피 (통상 총 사업비의 5% 정도가 연간 추가비용으로 발생)

※ 중이온가속기 사업의 추가비용이 높은 것은 상대적으로 참여인력 수가 많고 구축 장비의 부분 운영에 따른 운영비가 발생하기 때문

<사업 지연에 따른 증가 비용>

구 분	4세대 방사광가속기			중이온가속기		
	1년 지연	2년 지연	3년 지연	1년 지연	2년 지연	3년 지연
추가비용 (연차별 누적비용)	198억원	348억원	448억원	286억원	604억원	957억원

□ 종합분석

- 4세대 방사광가속기는 첨단과학에 필요한 물질분석 연구, 중이온가속기는 희귀 동위원소를 이용한 기초과학 연구에 주로 활용
- 가속기 등 거대과학 연구시설은 국가의 과학기술 수준을 높이고 경쟁국의 기술 발전을 견제하는 중요 수단
- 가속기 구축 과정에서 고용유발효과가 높은 정밀제조업 분야의 국내 중견·중소 기업 일자리 창출

VII. 국가 대형가속기 발전을 위한 제언

□ 대형가속기 발전을 위한 제언

- 국가 대형 가속기 구축을 추진하여 추격형 연구에서 탈피하고 이제는 우리가 분야를 선도하고 새로운 분야를 개척해 나가는 한 차원 높은 연구 필요
 - 가속기의 범용성과 더불어 우수성을 고려할 필요가 있으며, 사용자의 목적에 부합되게 효율적으로 이용되도록 적절한 빔 라인 건설도 필요
- 우리의 과학 기술력과 경제 규모에 걸맞게 '4세대 방사광가속기'와 '중이온가속기'와 같은 대형가속기의 구축으로 세계를 선도하는 과학기술의 발전이 요구됨
 - 4세대 방사광가속기는 원자 단위의 아주 짧은 순간(1,000조분의 1초)의 동적인 현상을 관측하는 최첨단 장비로서 2014년 완공하면 미국, 일본에 이어 세계 3번째로 보유
 - 현재 핵심 장비의 설계와 시제품 성능 검사를 완료하고 건물과 냉각 장치 등의 기반시설이 순조롭게 구축 중으로 적절한 지원으로 일정이 지연되어 불필요한 비용 증가가 발생하지 않도록 할 필요가 있음
 - 중이온가속기는 원자번호가 큰 원소를 가속하여 새로운 핵의 탐색과 다양한 희귀 동위원소의 생성과 활용을 목적으로 하는 기초과학 연구의 핵심 시설임
 - 계획된 국제적 경쟁력을 확보하기 위해서는 부지 확보, 부대시설의 조기 구축, 핵심 장비의 설계와 시제품 검증이 조속히 이루어져야 하고 이를 위해서는 정부의 적절한 지원이 절실히 필요