

기관-2021-49

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

여 준 석

• 연구진

- 연구책임자 여준석 (한국과학기술기획평가원 부연구위원)
- 참여연구원 정지훈 (한국과학기술기획평가원 연구위원)
 강경탁 (한국과학기술기획평가원 부연구위원)
 문연실 (한국과학기술기획평가원 연구원)

기관 2021-49 국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안
(연구기간: 2021.4~2021.12)

- 발행인 : 정병선
- 발행처 : 한국과학기술기획평가원
(27740) 충청북도 음성군 맹동면 원중로 1339
Tel) 043-750-2300 Fax) 043-750-2680
- <https://www.kistep.re.kr>
- 인쇄 : 주식회사 동진문화사

목 차

제1장 서론	1
제1절 연구배경 및 필요성	3
제2절 연구내용 및 연구방법	5
제2장 거대과학 개념 및 현황	7
제1절 거대과학 정의	9
제2절 거대과학 특징 및 파급효과	41
제3절 거대과학 분야 및 추진현황	47
제3장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈	65
제1절 거대과학 정책단계	67
제2절 우주 R&D 정책단계별 이슈	75
제3절 원자력 R&D 정책단계별 이슈	94
제4절 핵융합 R&D 정책단계별 이슈	107
제4장 거대과학 정책단계별 개선방안	129
제1절 거대과학 정책단계별 이슈	131
제2절 거대과학 정책단계별 개선방안	140
제5장 결론	157
참고문헌	162
별 첨	165

표 목 차

[표 1] 거대과학 개념·정의 사례	11
[표 2] FGI 대상자 정보	26
[표 3] FGI 질문 단계 및 내용	27
[표 4] FGI 조사 결과 - 대형연구시설	28
[표 5] FGI 조사 결과 - 기초과학	29
[표 6] FGI 조사 결과 - 첨단	30
[표 7] FGI 조사 결과 - 기간	32
[표 8] FGI 조사 결과 - 국제협력	33
[표 9] FGI 조사 결과 - 기타	33
[표 10] OECD GSF의 연구인프라 분류	35
[표 11] GSO의 GRI(글로벌 연구인프라) 분류	36
[표 12] 연구장비 및 시설 정의	37
[표 13] 정책별 대형연구시설 정의	37
[표 14] 구축 비용에 따른 연구시설·장비 구분	38
[표 15] 연구시설 유형 및 운영 특징	39
[표 16] 거대과학 및 대형연구시설·장비 정의	40
[표 17] 거대과학 분야 설정 사례	48
[표 18] 분야별 중장기계획	51
[표 19] 대형연구시설 구축 관련 정책	61
[표 20] 대형가속기 구축·운영 현황	63
[표 21] 국가별 연구인프라 생애주기 구분	69
[표 22] 정책단계 및 연구시설(RI) 생애주기 단계(EU)	73
[표 23] 거대과학 정책단계	74
[표 24] 2020년 주요국 정부 우주 예산	81
[표 25] 핵융합 R&D 연대별 주요 내용 요약	119

[표 26] 연구인프라 생애주기 관리정책 비교 135

[표 27] 대형연구시설 사업계획 변경 사례 137

[표 28] 연구시설·장비 관련 사업계획 변동 관리정책 139

[표 29] AHP 조사대상자 구성 144

[표 30] 거대과학 정책결정을 위한 주요판단기준 146

[표 31] 거대과학 전 분야 전문가 의견 가중치 및 순위 147

[표 32] 우주 분야 전문가 의견 가중치 및 순위 148

[표 33] 원자력 분야 전문가 의견 가중치 및 순위 148

[표 34] 핵융합 분야 전문가 의견 가중치 및 순위 149

[표 35] 가속기 분야 전문가 의견 가중치 및 순위 149

[표 36] 기술 분야 전문가 의견 가중치 및 순위 150

[표 37] 정책 분야 전문가 의견 가중치 및 순위 150

그림 목 차

[그림 1] 주요 연구내용 및 연구방법	5
[그림 2] 주요 연구범위	6
[그림 3] 선행연구 워드 클라우드(출현 빈도 기준)	16
[그림 4] 선행연구 토픽모델링(토픽-키워드 네트워크)	19
[그림 5] 토픽1 키워드 네트워크 : 거대과학&산업화	20
[그림 6] 토픽2 키워드 네트워크 : 거대과학 기능 및 거대과학 정책 ..	21
[그림 7] 토픽3 키워드 네트워크 : 거대과학 산업생태계	22
[그림 8] 토픽4 키워드 네트워크 : 거대과학&지역	23
[그림 9] 토픽5 키워드 네트워크 : 거대과학 거버넌스와 관리체계	24
[그림 10] 토픽6 키워드 네트워크 : 거대과학 국제협력	25
[그림 11] 국가우주개발계획 로드맵	54
[그림 12] 제3차 우주개발진흥기본계획	54
[그림 13] 제5차 원자력진흥종합계획 중점추진 과제	57
[그림 14] 제3차 핵융합에너지개발 진흥기본계획 전략 체계도	59
[그림 15] 사업추진 개선방안 목표 및 중점추진과제	62
[그림 16] 정책단계에 적용한 Kingdon의 다중흐름모형	68
[그림 17] 미국 DOE, NASA, NSF 연구인프라 생애주기	70
[그림 18] 연구인프라의 생애주기	71
[그림 19] 2020년 글로벌 우주활동	79
[그림 20] 미국 우주개발 미션 로드맵	82
[그림 21] 우주 분야 정책단계별 이슈	93
[그림 22] 연구용 원자로(원자력) 분야 정책단계별 이슈	101
[그림 23] 지하연구시설(원자력) 분야 정책단계별 이슈	106
[그림 24] 핵융합 및 핵분열 반응	107
[그림 25] 주요국 핵융합 실증로 중장기 로드맵	113

[그림 26] CFETR 공학설계 이슈 및 CRAFT 조감도 114

[그림 27] IFMIF-DONES 레이아웃 115

[그림 28] A-FNS 시설 및 부지 조감도 117

[그림 29] 민간 스타트업의 핵융합 연구 추진 현황 119

[그림 30] 핵융합 분야 대형연구시설·장비 구축 동향 123

[그림 31] 핵융합 분야 정책단계별 이슈 128

[그림 32] 대형연구시설 관련 국제기구와 ESFRI 134

[그림 33] 대형연구시설·장비 생애주기 단계평가 방안 142

[그림 34] AHP 설문 계층구조 145

[그림 35] 거대과학 프로그램 추가 방안 154

[그림 36] 거대과학 정책단계별 개선방안 161

요약문

거대과학은 기초과학 발전, 신산업 창출, 순지구적 사회·환경 문제 대응 등 경제발전부터 인류사회 기여까지 광범위한 파급 효과가 있다. 다만, 대규모 자원 및 인력 소요로 한 국가에서 다양한 거대과학 분야를 추진하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이에 따라, 국가 차원에서 선택과 집중의 전략적 투자가 불가피한 분야이다. 이를 위해, 국가 R&D체계에서 거대과학의 범위와 역할이 명확해야 하며, 거대과학 추진 수단계의 현황 및 문제점에 대한 진단과 종합적인 관리방안이 선제되어야 한다.

본 연구에서는 거대과학의 정의 및 범위를 설정하고, 정책단계별 이슈 및 문제점을 진단한 후 거대과학의 효율적 추진을 위한 정책 개선방안을 도출하였다.

우선, 문헌 조사, 서지 분석, 전문가 FGI 등을 통해 거대과학을 “대규모 예산과 인력이 투입되며 대형연구시설·장비를 장기간 구축하고 활용하는 과학기술 분야”로 정의했다. 또한, 거대과학 대형연구시설·장비는 “구축 단계부터 R&D 비중이 높으며, 단일장비 구축 비용이 500억 원 이상인 연구시설·장비”로 정의했다. 이에 따라 우주, 원자력, 핵융합, 가속기를 거대과학 분야로 한정하였다.

거대과학의 정책단계는 총 3단계(의제설정, 정책형성·결정, 정책집행)로 설정하였다. 또한, 정책단계별로 거대과학의 대형연구시설·장비 생애주기 개념과 매칭하여, 단계별 구분을 명확화하고 이슈 분석을 체계화하였다.

거대과학 분야 정책단계별 이슈는 다음과 같이 나타났다. 의제설정 단계에서는 의제설정의 비체계성, 거대과학 전체에 대한 객관적·통합적 의사결정체계 부재, 국가 차원의 대형연구시

설·장비 로드맵의 수립 및 관리 부족 등이 이슈로 나타났다. 정책형성·결정 단계에서는 개념R&D 없이 정책결정, 구축(공급) 중심 정책결정, 산업 기반 유지 확대 필요 등이 주요 이슈로 분석되었다. 정책집행단계에서는 사업계획 및 총사업비 변동, 운영 및 업그레이드, 예산변동 관리의 병행 등이 이슈로 나타났다. 위와 같이, 현재 구축(정책집행) 중심으로 제기되는 이슈들은 이전 정책단계의 다양한 이슈들의 상호작용에 의한 결과물이다. 이는 정책집행뿐 아니라, 의제설정 및 정책형성·결정 단계의 이슈도 개선 필요성이 높다는 것을 의미한다.

이에 본 연구에서는 거대과학 분야 정책단계별 개선방안을 다음과 같이 제안하였다. 우선, 정책 전 단계 및 거대과학 전 분야의 통합적 의사결정체계를 구축하고 시설·장비의 생애주기 평가 시스템을 도입해야 한다. 이와 연계하여, 국가 대형연구시설·장비 로드맵을 수립하고 투자와 연계하여 국가적 시설·장비 포트폴리오 및 투자계획을 관리할 필요가 있다. 의제설정 단계에서는 거대과학 선행R&D 사업 추진을 통해 개념의 구체화, 기술적 실현 가능성 등을 사전에 검토할 수 있는 체계를 구축할 필요가 있다. 정책형성·결정 및 정책집행 단계에서는 거대과학 프로그램을 신설하고 그 하위에 거대과학 관련 단위 사업을 연계·관리하는 방안을 제안하였다. 마지막으로, 로드맵 반영 및 우선순위 설정에 활용할 거대과학 정책결정을 위한 주요판단기준을 제시하였다. 전문가 AHP 설문을 통해 판단기준별 우선순위를 도출하였으며, 종합적으로는 과학기술적 타당성, 국가 정책적 타당성, 의제·정책 도출의 타당성, 사회경제적 타당성 순으로 중요도가 도출되었다.

제 1 장

서 론

제1장 서론

제1절 연구배경 및 필요성

거대과학은 특정 목표 달성을 위해 대규모 자원 및 연구인력이 장기간 집중되는 특징이 있으며, 기초과학 발전, 신산업 창출, 소지구적 사회·환경 문제 대응 등 경제발전부터 인류사회 기여까지 광범위한 파급효과가 있다. 인류는 거대과학을 통해 힉스입자 발견(CERN, 2012), 중력과 검출(LIGO, 2016) 등 기존 이론의 실험적 증명, 새로운 물질 및 공간을 발견하는 등 지적 영역을 확장해왔다. 또한, 차세대 전력원(핵융합) 등 자연에 대한 근본 이해를 바탕으로 사회가 직면한 문제에 새로운 해결책을 찾기도 한다.

거대과학은 장기간 대규모의 자원 소요 등의 특수성으로 인해 한 국가가 다양한 분야에 동시에 투자하기 어려우며, 다수의 이해관계자(정권, 지자체, 국민, 환경단체, 연구자 등)의 복잡한 의사결정이 불가피하다. 또한, 거대과학 대형연구시설 구축의 경우 기술적 불확실성, 연구시설의 인허가, 국제협력 장애 등에 따라 사업계획이 추진 과정에서 변경될 확률이 높다. 즉, 거대과학 추진 과정에서 수요-정책 괴리, 투자 지속성 및 안정성, 사업 기간 지연 등 다양한 이슈가 발생할 수 있다.

우리나라도 우주(발사체, 위성 등), 핵융합(KSTAR, ITER 프로젝트), 대형 가속기(4세대 방사광, 중이온 등) 등 거대과학이라 판단되는 분야에 투자 규모를 확대하고 있다. 우리나라 과학기술의 국제 위상 및 R&D투자 증가율을 고려했을 때, 국내 거대과학에 대한 투자 분야 및 규모는 지속해서 확대될 전망이다. 그러나 명시적인 거대과학 개념 및 범위가 부재하며 정책 추진기반 다소 미흡한 상황이다. 이에 따라, 국가 전체 R&D 관점에서 거

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

대과학의 역할이 명확하지 않으며, 분야별 또는 부처별 수요, 정책, 자원 등에 따라 산발적으로 거대과학 R&D가 추진되는 경향이 있다.

이를 해결하기 위해, 먼저 국가 R&D체계에서 거대과학의 개념과 범위를 명확화할 필요가 있다. 이에 따라, 프로젝트 관리뿐 아니라 거대과학 추진 수단계에 대한 현황 및 문제점을 진단하고 이에 따른 종합 관리방안 마련이 필요한 시점이다. 또한, 거대과학 분야는 국가 경쟁력 및 위상에 부합하는 역할 수행, 문제해결을 위한 전략적 선택과 집중이 요구된다는 점에서 선제적으로 투자 전략에 대한 고민 필요한 상황이다.

제2절 연구내용 및 연구방법

본 연구의 목적은 “국가 거대과학 분야 정책 전 단계의 이슈 및 문제점을 진단하고, 거대과학의 효율적 추진을 위한 정책 개선방안 도출”이다. 주요 연구내용과 방법은 그림 1과 같다.



[그림 1] 주요 연구내용 및 연구방법

- ① (대상 정의) 거대과학 개념 및 범위 설정
 - 국내 R&D체계에 맞는 거대과학 개념 및 범위(분야) 설정
 - 거대과학 문헌분석, 전문가 FGI 등을 통해 현 국내 R&D 체계에 적합한 거대과학 개념을 도출
- ② (현황 분석) 국내외 거대과학 추진현황 분석
 - 주요국 및 국제기구 거대과학 정책 분석
 - 국내 거대과학 정책 현황 분석
 - 국내 거대과학 대표사례 분야 세부현황 분석
 - 대표사례 분야(우주, 원자력, 핵융합)의 국내외 동향, 국내 R&D 연혁 등을 종합적으로 분석

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

- ③ (이슈 도출) 거대과학 정책단계별 이슈 도출
- 거대과학 정책 이슈를 체계적으로 진단하기 위해 거대과학 정책단계를 설정
 - 거대과학 분야-정책단계별 이슈 도출
 - 정책연구 및 예산심의 자료 분석, 전문가 인터뷰 등을 통해 정책단계별 이슈 도출
- ④ (개선방안 도출) 거대과학 정책단계별 개선방안 도출
- 거대과학 정책 이슈 해소를 위해 다양한 방법으로 개선방안을 도출
 - 유사이슈의 국내외 해결사례 및 정책연구 조사, 전문가 설문(AHP), 이해관계자 인터뷰, 전문가 자문 등을 통해 개선방안 도출

본 연구의 연구범위는 그림 2와 같이 한정한다. 정책단계의 경우, 국내 거대과학 분야의 추진현황을 고려하여 정책평가 단계는 제외하였다. 거대과학 분야 및 사례분석 대상은 그간 정책 연구가 많이 추진되지 않은 분야 중심으로 선정하였다.



[그림 2] 주요 연구범위

제2장

거대과학 개념 및 현황

제2장 거대과학 개념 및 현황

제1절 거대과학 정의

거대과학 정책 기반확보를 위해, 우선 우리나라 환경에 맞게 거대과학의 개념과 범위를 명확화할 필요가 있다. 본 연구에서는 기존 문헌분석, 전문가 FGI(Focused Group Interview) 등을 통해 거대과학 개념과 범위를 설정하였다.

1. 거대과학 정의 관련 사례

거대과학이라는 용어는 20세기 중반 미국 중심으로 행해졌던 원자폭탄 제조계획인 맨해튼 프로젝트(Manhattan Project)에서 유래된 것으로 알려져 있다. 용어의 유래에서 알 수 있듯이 초기에는 거대과학이 군사 목적을 위한 핵물리학 중심으로 추진됐다. 이후, 국제적 정세 변화 등에 따라 원자력, 핵융합, 우주 등 다양한 분야로 거대과학 개념이 확대되었다. 오크리지국립연구소(ORNL, Oak Ridge National Laboratory)¹⁾의 60년대 자료에서도 고에너지 가속기, 연구용 원자로, 우주탐사 등을 ‘Large-Scale Science’ 또는 ‘Big Science’ 명명한 사례를 찾아볼 수 있다.(Weinberg, 1961, 1967)

냉전 시대의 종식에 따른 국제 정세 변화는 거대과학의 역할에도 영향을 주었다. 미국의 경우, 거대과학에 대한 대규모 예산투입에 대한 새로운 정당성을 찾아야 했으며, 국제 사회에서는 오랜 기간 양분된 사회의 통합을 위한 도구가 필요했다. 이러한 배경 속에서, 미국 주도하에 거대과학 국제협력을 위한

1) 맨해튼 프로젝트가 종료되면서, 당시 핵무기 관련 주요시설들이 국립 연구소로 지정되었는데, 그중 하나가 오크리지국립연구소임

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

OECD MSF(Megascience Forum)가 설치되기도 했다.

이러한 과정에서 모호했던 거대과학에 대한 개념이 구체화되기 시작한다. OECD(1993a)는 MSF를 설립하며 Megascience Project를 “높은 중요도·다학제·복잡성의 과학적 문제를 해결하기 위해 대규모 협력이 필요한 분야에 대해, 연구시설, 도구, 인적자원, 물류 지원 등을 모두 망라하는 과학 이니셔티브”로 정의했다. 다만, MSF는 Megascience에 대한 명확한 구분 기준은 없으며 프로젝트 선정에는 다양한 변수가 작용될 수 있음을 밝혔다.²⁾ 또한, OECD MSF(OECD, 1993b)는 거대과학을 “막대한 자본과 인력의 투입이 필요하고, 거대한 연구시설을 필요로 하는 과학 분야”로 정의했다.³⁾ 미국 OTA(Office of Technology Assessment)에서는 거대과학을 “big money plus big machines”로 간단히 설명하기도 한다.(OTA, 1995)

거대과학을 정의하는 기관 및 연구마다 세부내용은 상이하나, 최근까지도 대부분 사례에서 OECD 정의를 수정·보완하여 활용했다는 것을 알 수 있다.(표 1) 또한, 초기에는 과학에 범위가 한정되다가, 거대과학의 산업적 과급력에 따라 과학·기술로 범위가 확대되었다.

우리나라도 거대과학에 대한 표준화된 정의는 없으나, 정책적으로는 일부 제시된 바가 있다. 2013년에 발표된 “제2차 국가 대형연구시설 구축지도(국가과학기술위원회, 2013)”에 따르면 거대과학기술은 “기초과학 및 산업기술 중 막대한 자본과 인력 투입이 필요하고 대형연구시설을 요구하는 과학기술 분야”로

2) 메가사이언스를 정의할 때 연구비 규모, 연구시설 설치상 특이점(예. 중앙 혹은 분산형), 사업의 특성 등의 다양한 변수도 함께 고려해야 한다고 밝힘

3) 경우에 따라, 메가사이언스(mega science)와 빅사이언스(big science)를 구분하는 경우가 있음. 메가사이언스라는 용어는 OECD에서 1992년 Megascience Forum(MSF)를 설립하면서 범용성을 확보하게 되었다. 메가사이언스는 빅사이언스를 포함하는 개념이며 연구인프라를 중심으로 한 대형프로젝트는 대부분 메가사이언스에 포함됨

제 2 장 거대과학 개념 및 현황

정의되어 있다. 정책자료 외에도 다수의 정책연구에서는 대규모 투자, 대형연구시설⁴⁾ 등이 공통으로 등장하는 키워드인 것을 알 수 있다.(표 1)

[표 1] 거대과학 개념·정의 사례

저자	구분	개념·정의
OECD (1993)	거대과학	막대한 자본과 인력의 투입이 필요하고, 거대한 연구시설을 필요로 하는 과학 분야
정성철 (1999)	거대과학 사업	많은 연구자원(R&D resource)을 요하는 연구개발 사업 혹은 고가의 과학 장비/설비 건설 사업
이명진 (2002)	거대과학	대규모 가속기를 이용한 고에너지 물리연구, 거대 망원경과 우주정거장을 이용한 우주연구, 지구환경 연구 등이 포함되며 대규모 연구비와 대규모 연구 설비를 요하는 과학연구 분야
이원희 (2009)	거대과학	막대한 자본과 인력 및 거대한 연구시설물을 필요로 하는 기초과학 분야
이민형 (2010)	거대과학 또는 거대기술	과학과 공학기술의 긴밀한 협력관계 하에서 대규모의 조직과 관리를 바탕으로 큰 자원의 투입을 필요로 하는 프로젝트 또는 많은 과학자, 기술자, 연구기관을 동원하는 대규모의 종합적 연구개발
조현대 (2011)	거대과학 기술	대규모 연구자금이 투자되어야 가능한 연구 분야를 말하며, 그 결과물로 순수과학 분야에서의 큰 성과 또는 산출된 지식을 기반으로 산업을 발전시킬 가능성이 큰 분야
최원재 (2013)	거대과학	거대과학은 연구성과의 파급효과가 매우 크지만, 대규모 투자가 필요하며, 실패 가능성도 커 정부 주도의 연구가 필요하며, 또한 국가 간 공동연구가 필요한 분야

4) Jacob(2012)은 거대과학이 다른 과학 분야와 구분되는 특징 중 하나로 대형연구시설에 대한 높은 의존도를 꼽음

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

저자	구분	개념·정의
국립과학기술위원회 (2013)	거대과학 기술	기초과학 및 산업기술 중 막대한 자본과 인력 투입이 필요하고 대형연구시설을 요구하는 과학기술 분야
김유빈 (2018)	거대과학	대형연구시설 혹은 대규모의 예산이 투입되는 과학기술의 한 분야로 물리, 화학, 바이오, 천문, 지구환경, 해양, 우주, 항공 등에 사용되는 첨단 고가시설 및 핵심장치를 기반으로 하는 연구
권기석 (2018)	거대과학	막대한 시설투자와 인력이 필요하며 과학과 기술의 상호작용이 종합적으로 구현되는 연구개발 프로그램

<참 고>

□ OECD Megascience Forum(MSF) 설립

1992년 3월 10일~11일 개최된 OECD CSTP(Committee for Scientific and Technological Policy) 과학기술 장관회의에서 거대과학(big science) 프로젝트의 기획, 개발, 재정 마련 초기 단계부터 OECD 회원국 간 정보 교환 및 공개적 논의가 필요하므로, 이를 위한 OECD 산하 조직 설립이 제안됐다.(OECD, 1992) 이후 1992년 4월 27일에 개최된 제58차 CSTP 회의에서, CSTP 산하 작업반으로 MSF 설립을 결정하였다.

※ MSF는 1999년 GSF(Global Science Forum)로 개편되었다.

3. In concluding its discussion of these proposals, the Committee agreed that the following text should be transmitted to the Council.

"Following the recommendation made by Ministers at the Meeting of the Committee for Scientific and Technological Policy at Ministerial level on 10-11 March 1992, the Committee, at its 58th Session, recommended to the Council that a Megascience Forum be established as a subsidiary body of the Committee for Scientific and Technological Policy to ensure the exchange of information and open substantive discussion on existing and future megascience projects and programmes, and to facilitate international co-operation in this area.

The Committee will later propose the appropriate funding based in 1992 on voluntary contributions from a number of Member countries and, in 1993, partly on Part I resources and partly on a Part II budget."

<OECD MSF 설립 결정문>

※ 출처 : OECD(1992), Establishment of a Megascience Forum

MSF 설립 제안서에는 1) MSF 역할—"현재와 미래의 거대과학사업 정보교환과 실무적 논의 및 관련 국제협력 증진", 2) MSF 조직 예산—회원국이 자발적 기여금 등의 세부사항이 포함되어 있다.

MSF 설립 결정문 마지막 부분에서 OECD 비회원국의 MSF 참여 방안에 대한 논의를 포함했는데, 상호이익 관계가 전제된다면 러시아와 같은 OECD 비회원국뿐만 아니라 타 국제기구도 observer 자격으로 MSF에 참여할 수 있도록 했다. 즉 MSF가 자체적으로 참여국을 모집하고 승인하도록 설계한 것이다. 이러한 조치는 MSF의 설립배경부터 MSF(현 GSF)가 국제 관계의 변화에 따라 회원국의 이익을 반영하는데 타 작업반보다 융통성을 갖고 있음을 보여 준다.

<참 고>

□ **OECD MSF 작업반 설립 기준**

※ 출처 : OECD(1996), "Megascience Forum: Criteria for Establishing Megascience Forum Working Groups"

○ **MSF 작업반 설립 기준**

- 토픽은 대규모 과학연구 중 국제협력과 관련이 있고, 도출되는 결의안은 정부 권한 영역 내에 존재해야 함
- 지정된 시한 내에 성공적인 결의안이 도출되어야 함
- 작업반에 MSF 회원국 중 최소 3개국 이상이 참여해야 하며, 특정 국가의 리더 역할 수행에 동의해야 함
- 프로젝트 수행과 분석, 결의안을 도출하는 과정에서 참여국의 과학 커뮤니티와의 소통 및 자문 과정을 거쳐야 함
- 기존의 국가 간 기구 또는 협의체와의 중복은 방지해야 하나, 타 기구와 협력은 유용할 것으로 보임
- 작업반 설립 시 MSF와 회원국의 제한된 재정적·인적자원이 고려되어야 함

○ **MSF 작업반 설립에 대한 우선순위 기준**

- 과학자와 정책결정자 관점에서, 특별히 더 시급한 사안인가?
- 열악한 국제협력으로 제한된 연구비가 비효율적으로 혹은 불필요하게 중복되어 사용되고 있는가?
- 특정 제도가 국제협력을 방해하고 있는가?
- 미래 연구와 국제협력이 정부로부터 충분한 지원을 받고 있지 못하는가?
- 정부 정책결정자와 과학 커뮤니티 간 대화를 강화할 필요성이 있는가?
- 국제협력을 증진하는 새로운 메커니즘이 필요한가?

2. 거대과학 정책 관련 선행연구 분석

본 절에서는 국내 연구 동향 분석을 통해 거대과학 정의 설정에 기초자료로 활용하려 한다.

우선 서지 분석을 위해 학술연구정보서비스(RISS)를 통해 국내 학술논문 및 학위논문 초록 DB를 확보하였다. 검색 키워드는 “거대과학”, 검색 기간은 1998~2020년(출판연도)으로 설정하였다.

최근 정부 R&D 예산이 확대되고 대부분의 R&D사업들이 대형화됨에 따라 기존처럼 프로젝트 규모만으로는 거대과학-비거대과학 구분이 어려워지고 있다. 또한, 거대과학에 활용되는 대형연구시설·장비 구축의 관리체계 개선에 연구 초점이 맞춰지면서 거대과학 자체 정책에 대한 관심도는 상대적으로 낮아지고 있다. 실제로, 2000~2013년 기간 동안 거대과학 정책 관련 연구들이 비교적 활발했으나, 최근에는 관련 연구가 줄어드는 추세이다. 따라서, 본 장의 서지 분석결과는 최신보다 과거 거대과학 정책연구 결과 중심으로 분석될 수 있다는 한계가 있다.

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안



[그림 3] 선행연구 워드 클라우드(출현 빈도 기준)

그림 3은 출현 빈도 기준으로 도출된 선행연구의 워드 클라우드이다. 대형연구시설, 대형가속기, 정책, 전략, 구축, 정부, 국제협력, 프로젝트 등의 키워드들이 자주 출현한다는 것을 알 수 있다.

보다 구체적으로 연구내용을 분석하기 위해 토픽모델링(분석 SW : NetMiner 4.0)을 시행했다. 그림 4는 토픽모델링 기법을 통한 토픽-키워드 네트워크 결과를 나타낸다. 총 6개의 토픽이 도출되었으며, 해당 토픽들의 주요 내용은 각 토픽의 키워드들을 분석하여 추정하였다. 토픽 1은 거대과학 산업화, 토픽 2는 거대과학 기능 및 정책, 토픽 3은 거대과학 산업생태계, 토픽 4는 거대과학과 지역, 토픽 5는 거대과학 거버넌스와 관리체계, 토픽 6은 거대과학의 국제협력으로 나타났다. 기존 문헌에서는 주로 거대과학의 기능 및 파급력과 이를 효과적으로 추진할 수 있는 거버넌스 및 관리체계 고도화에 관한 연구가 이뤄진 것을 알 수 있었다. 또한, 거대과학 국제협력과 산업 활성화를 위한 전략 수립에 관한 주제들도 다뤄진 것으로 나타

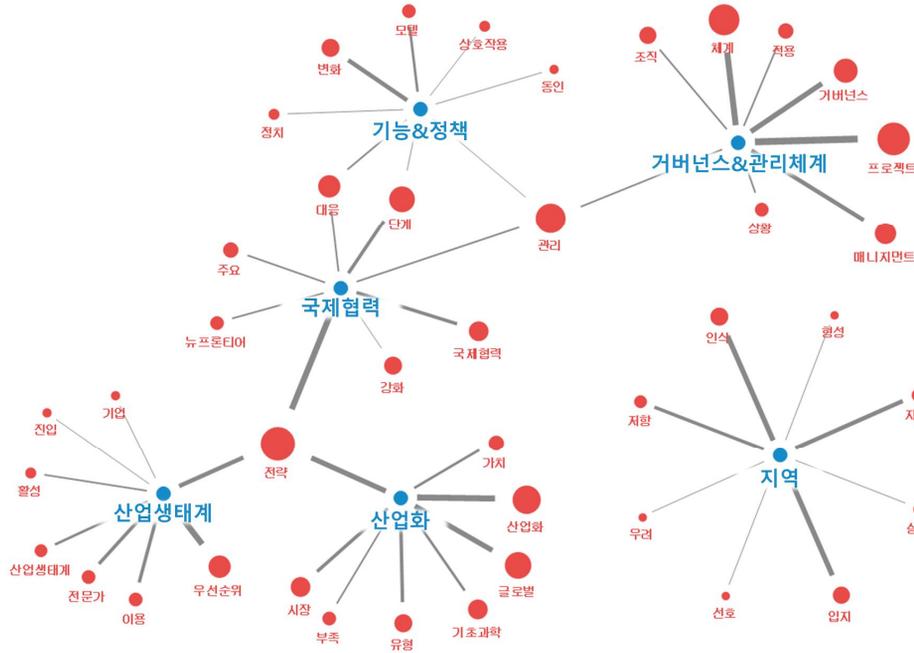
났다. 한가지 주목할만한 점은 지역과 관련된 연구들이 진행된 점인데, 이는 거대과학 대형연구시설 입지와 관련된 것으로 보인다.

토픽 간의 연결성은 살펴보면 다음과 같다. 우선 토픽 4(지역)를 제외한 나머지 5개 토픽들은 서로 연계성이 있는 것으로 나타났다. 토픽 1(산업화), 토픽 3(산업생태계), 토픽 6(국제협력)은 “전략”이라는 키워드를 중심으로 연계되어 있었다. 또한, 토픽 2(기능&정책)과 토픽 5(거버넌스&관리체계), 토픽 6(국제협력)은 “관리”라는 키워드로 연계되어 있었다. 토픽 4(지역)는 다른 토픽과의 연계성이 낮고 독립적인 주제인 것으로 나타났다.

토픽마다 나타난 키워드 네트워크는 그림 5~10과 같다. 토픽 1(산업화)에서는 “시장”, “전략”, “수출”, “실증” 등 거대과학 성과의 산업화와 관련된 키워드들이 주로 등장하는 것을 알 수 있었다. 대표적으로 정기철(2010)은 5대 거대과학 분야 중심으로 글로벌 산업화 전략 수립과 관련된 연구를 발표한 바가 있다. 토픽 2(기능&정책)에서는 “과학의 발전”, “변화”, “동인”, “미래”, “탐색”, “정책결정” 등의 키워드들이 나타났다. 이는 거대과학의 주요 기능들과 정책결정과 관련된 연구들이 진행되었다는 것을 나타낸다. 토픽 3(산업생태계)에서는 “전략”, “국산화”, “우선순위”, “기업”, “기술력”, “중소기업”, “지역발전” 등 국내 거대과학 산업생태계 활성화를 위한 연구의 키워드들이 주로 등장했다. 최원재(2013)는 거대과학 산업생태계 활성화 전략을 위한 우선순위 결정에 관한 연구를 발표한 바가 있다. 토픽 4(지역)에서는 “입지”, “저항”, “건설”, “주민”, “인식” 등 대형연구시설 건설 입지 및 지역 주민과 관련된 키워드들이 주로 나타났다. 토픽 3(산업생태계)에서 “지역발전” 등 거대과학의 지역에 대한 순기능에 대한 키워드와는 달리 “저항”, “피해”, “우려” 등의 키워드들이 주로 등장한 점은 대조적이다.

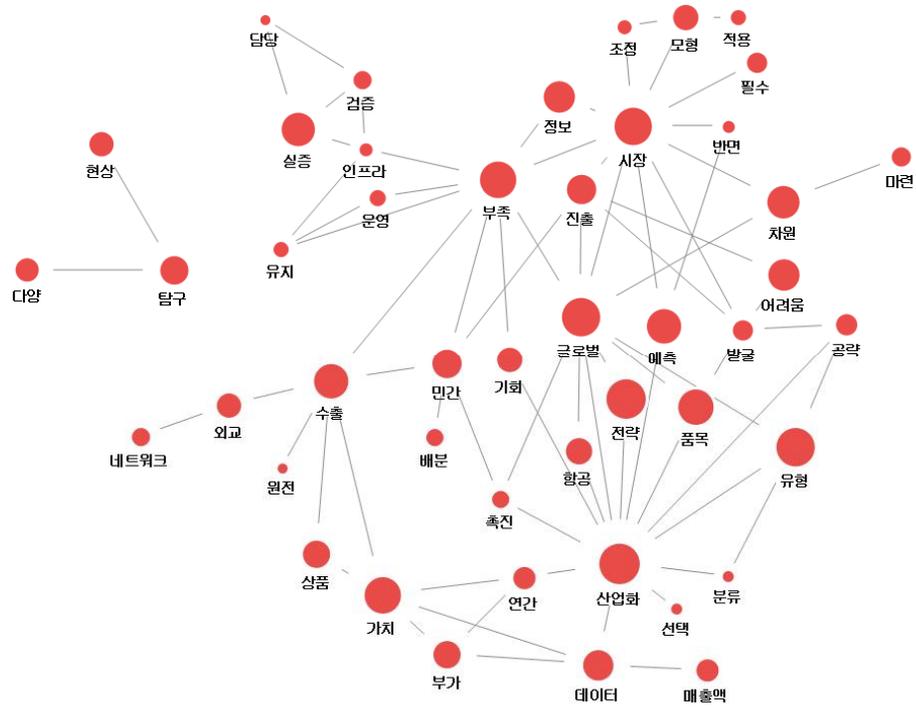
국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

토픽 5(거버넌스&관리체계)에서는 “프로젝트”를 중심으로 “매니지먼트”, “거버넌스”, “개선”, “관리”, “체계” 등의 키워드들이 나타났다. 이민형(2011)은 거대과학은 미래 불확실성은 크지만 파급효과가 큰 분야로 국가적 차원의 종합관리체계 구축 필요성을 제시한 바 있다. 토픽 6(국제협력)에서는 “전략”, “뉴프론티어”, “글로벌”, “국제협력”, “전지구” 등의 키워드들이 도출되었다. 조현대(2011)는 거대 과학기술 육성을 위해 국제 공동연구를 전략적으로 강화해야 한다고 분석한 바 있다.



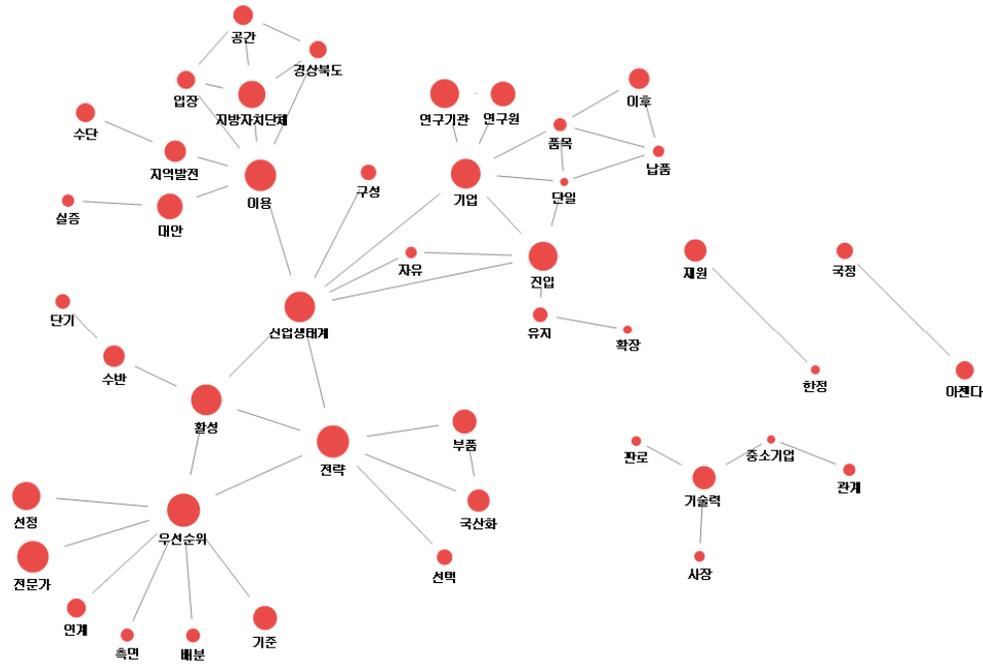
[그림 4] 선행연구 토픽모델링(토픽-키워드 네트워크)

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안



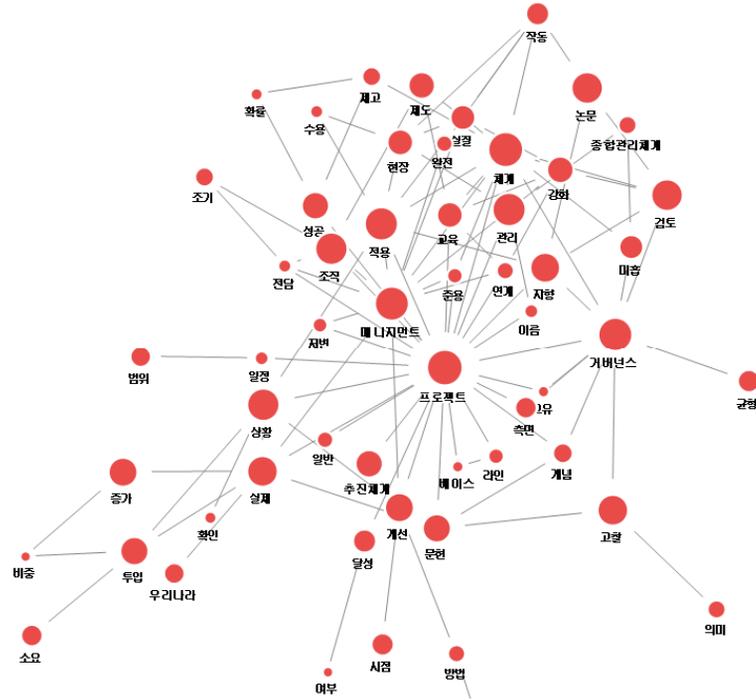
[그림 5] 토픽1 키워드 네트워크 : 거대과학&산업화

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안



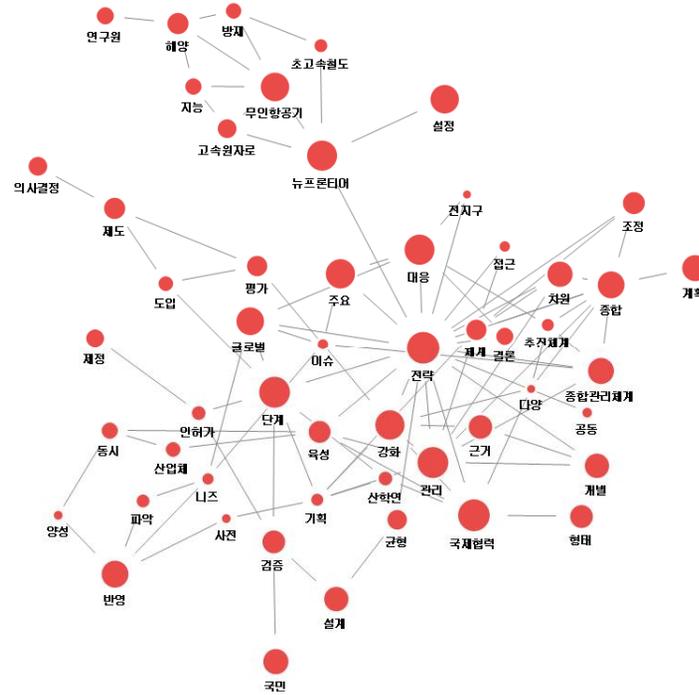
[그림 7] 토폭3 키워드 네트워크 : 거대과학 산업생태계

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안



[그림 9] 토픽5 키워드 네트워크 : 거대과학 거버넌스와 관리체계

제 2 장 거대과학 개념 및 현황



[그림 10] 토픽6 키워드 네트워크 : 거대과학 국제협력

3. 거대과학 정의 관련 전문가 의견 조사(FGI)

가. 거대과학 정의 관련 FGI 조사 개요

거대과학 개념 정의를 위해 표적 집단인터뷰(FGI, Focused Group Interview)를 시행하였다. FGI는 관심 대상인 특정 주제에 대하여 전문가 또는 이해당사자 집단을 대상으로 반구조화된 인터뷰를 시행하는 정성적 기법이다. FGI는 단순 정보 제공뿐 아니라 참여자 간 정보 및 의견 교환 등의 상호작용까지 분석함으로써, 연구자가 집단의 정보, 인식 등을 심층 분석할 수 있다는 장점이 있다.

조사대상은 총 9인으로 거대과학 관련 정책 및 기술 연구를 수행하고 있는 전문가들로 구성하였다.(표 2) 조사는 사회적 거리두기에 따른 모임 인원 제한으로 3인씩 나눠 총 3번에 걸쳐 시행하였다.

[표 2] FGI 대상자 정보

구분	나이	소속	분야	세부 분야
A	50대	학	기술	가속기
B	40대	연	정책	핵융합
C	50대	학	기술	가속기
D	50대	연	기술	원자력
E	40대	산	기술	대형연구시설
F	50대	연	정책	우주
G	40대	연	정책	국제협력
H	40대	연	정책	대형연구시설
I	50대	연	정책	거대과학 전반

조사내용은 Krueger&Casey(2009)의 제안 형태를 참고하여 도입(Opening), 전환(Introductory), 주요 핵심(Key), 마무리(Ending) 질문으로 표 3과 같이 구성하였다.

[표 3] FGI 질문 단계 및 내용

질문 단계	질문 내용
도입	거대과학 개념에 대한 인지 정도
전환	거대과학의 중요성 및 특징
주요 핵심 (거대과학 정의)	1. 대형연구시설 관련 키워드 2. 기초과학 관련 키워드 3. 첨단 관련 키워드 4. 기간 관련 키워드 5. 국제협력 관련 키워드
마무리	기타 의견 및 연구 방향 제언

FGI는 다음과 같이 진행하였다. 우선, 사회자(연구자) 주도로 참여자의 소속 및 전공 등 기본 정보를 공유했다. 이후, 사회자가 연구 개요 및 계획을 설명하고 사전에 제공된 거대과학 토픽모델링 결과 및 정의 사례를 상기시켰다. 표 3의 반구조화된 질문 단계를 통해 인터뷰를 진행하는 한편, 해당 주제 안에서 참여자 간 의견 교환 및 토론이 진행될 수 있도록 중재하였다.

주요 핵심 질문은 거대과학 정의에 활용될 키워드 중심으로 구성하였다. 해당 키워드는 절에서 나온 정의 사례 및 토픽모델링 결과 분석을 토대로 선별되었으며, 해당 내용은 참여자에게 서면으로 사전에 제공하여, 거대과학 정의에 대해 사전지식을 가지고 자유롭게 토론할 수 있도록 했다.

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

나. 거대과학 정의 관련 FGI 조사 결과

1) 대형연구시설 관련 키워드

대형연구시설 관련 키워드는 모든 참여자가 포함하는 것에 동의하였다. 최근, R&D 프로젝트의 예산 및 인력 대형화 추세에 따라 프로젝트의 규모만으로는 거대과학-비거대과학 구분이 어렵다는 의견이었다. 따라서, 대형연구시설이라는 특수성으로 거대과학의 범위를 한정할 필요가 있는 것으로 나타났다. 2절 문헌분석 결과에서도 대형연구시설, 대형가속기 등의 키워드 등장 빈도가 높았으며, 정의 사례에서도 대형연구시설 키워드가 대부분 포함된 것으로 확인됐다.

이후, “대형”의 기준에 대한 논의가 이어졌다. 비용만으로는 대형연구시설을 정의할 수 없으므로 추가적인 기준 설정이 필요한 것으로 나타났다. 또한, 50억 원 이상부터 대형연구시설로 분류⁵⁾하기에는 적절하지 않으므로 금액 기준을 상향해야 한다는 의견이 많았다.

마지막으로, 거대과학 정의 단계에서 직접 언급할 필요가 없는 부분은 대형연구시설 정의 단계에서 세부적으로 제시하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

[표 4] FGI 조사 결과 - 대형연구시설

구분	세부내용
“대형연구시설” 포함 여부	○(포함O) 최근 예산이나 참여 인력 규모로 비거대과학과의 차별화가 어려움 ○(포함O) 대규모 인력 및 예산투입은 R&D 전체적인 추세 ○(포함O) OECD GSF 등에서도 MegaScience 자체보다

5) 국가연구개발 시설장비의 관리 등에 관한 매뉴얼(2020.06.)에서는 구축 비용이 50억 원 이상인 시설·장비를 대형연구시설·장비로 분류함

구분	세부내용
	Large Research Infrastructure에 대한 관심도가 높아지고 있음
“대형” 기준	<ul style="list-style-type: none"> ○구축 비용만으로 대형연구시설을 특정할 수 없으며 다른 기준들이 추가되어야 함 ○정책적으로 제시된 비용(500억 원) 기준은 NFEC에서 관리를 위한 기준임 ○정책자료에서 제시된 기준(50억 원)은 대형이라고 하기에는 금액 규모가 작음 ○“대형” 범위를 규정하지 말고, 특정 조직을 두고 대형 연구시설을 선정 및 승인하는 방식도 추후 검토할 필요
기타	○거대과학 정의 단계에서 구체적으로 설명하기 어려운 부분은 대형연구시설 정의를 통해 에서

2) 기초과학 관련 키워드

기초과학 관련 키워드 삽입에 대해서는 참여자 대다수가 부정적인 의견을 제시했다. 거대과학을 기초과학으로 특정할 필요가 있다는 의견이 제시되었으나, 거대과학의 범위 확대 및 산업체 영향력 등을 고려한다면 기초과학으로 한정하기에는 부적절하다는 의견이 많았다. 또한, 대형연구시설 구축 및 활용의 목적 자체도 에너지원 상용화, 우주산업 진출 등 산업체와 직접 연계된 분야도 있는 것으로 나타났다. 2절 분석에서도 기초과학뿐 아니라 산업, 기술 등의 키워드도 출현 빈도가 높은 것으로 확인됐다.

최종적으로 기초과학 키워드를 포함한다면 산업 관련 키워드도 삽입해야 하므로 둘 다 제외하는 것이 바람직한 것으로 판단했다.

[표 5] FGI 조사 결과 - 기초과학

구분	세부내용
“기초과학” 포함 여부	<ul style="list-style-type: none"> ○(포함O) 거대과학을 기초과학으로 특정할 필요가 있음. 필요 시 “종합적” 등의 형용사를 통해 산업체 영역을 포괄할 수 있음 ○(포함O) 산업 관련 키워드를 포함한다면 기초과학 포함도 가능함 ○(포함X) 예전에는 대형연구시설 활용이 주로 기초과학에 집중되어 있었으나, 최근에는 기술까지 확대되어 다양한 분야에 응용되고 있음 ○(포함X) 가속기, KSTAR 등 활용 분야가 기초과학에 가까운 분야가 있더라도 구축 과정에서는 응용 및 개발 연구가 필요하고 산업체 참여가 필수적임 ○(포함X) 산업적 파급효과가 높은 거대과학 분야도 존재함 ○(포함X) ITER 등도 최종적으로 발전원 상용화가 목적이므로 기초과학이라 볼 수 없음

3) 첨단 관련 키워드

거대과학은 첨단과학 및 기술의 집약체이기 때문에, 첨단이라는 수식어 삽입 필요성이 제기되었다. 하지만, 거대과학 분야 중 장기간 검증된 기술을 필요로 하는 적용·활용 분야가 있으며, 50년대부터 R&D가 시작된 분야도 있는 등 첨단이 거대과학의 공통된 특징이라고 보기 어려운 것으로 나타났다. 2절 그림 3에 나타난 바와 같이, 첨단 고가시설 등 첨단 관련 키워드 포함 사례가 있으나, 대부분 사례에서 첨단 키워드는 사용되지 않은 것을 확인할 수 있다.

[표 6] FGI 조사 결과 - 첨단

구분	세부내용
“첨단” 포함 여부	<ul style="list-style-type: none"> ○(포함O) 기초과학과 연계하여 첨단과학 또는 첨단 기초과학 키워드를 포함할 필요 ○(포함O) 첨단과학 및 기술의 집약체로 거대과학은 첨단 특성이 있음 ○(포함X) 첨단이 아닌 경우도 존재함. 원자력 시설 등 인허가가 필요한 분야는 검증된 기술 및 소재를 활용해야 하는 경우가 많음 ○(포함X) 우주 발사체의 경우도 50년대부터 개발하고 있으므로 첨단이 공통적인 거대과학 특징이라고 보기 어려움

4) 기간 관련 키워드

거대과학을 위한 대형연구시설 구축 자체에도 긴 시간이 소요되고, 이후 활용 및 운영에도 장기간의 R&D가 필요한 만큼 “장기간” 관련 키워드가 포함돼야 한다는 의견이 많았다. 거대과학의 경우 국가 차원의 장기로드맵 하에 R&D가 체계적으로 추진되어야 한다는 의견도 있었다.

장기간에 대한 기준은 분야별로 다를 수 있으므로, 기간 범위를 특정하지 않고 정성적으로 표현하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

[표 7] FGI 조사 결과 - 기간

구분	세부내용
“기간” 포함 여부	<ul style="list-style-type: none"> ○(포함O) 거대과학은 타 분야보다 R&D 기간이 길어지는 특성이 있으므로, 장기간 등 기간 관련 키워드로 타 분야와 차별화할 필요 ○(포함O) 시설 구축이나 운영 기간이 보통 30~40년 소요 되는 경우가 많음 ○(포함O) 거대과학 분야는 국가적 장기로드맵 하에 R&D 사업이 추진되어야 함 ○(포함O) 장기간 범위를 특정하지 않고 정성적이라도 거대과학 정의에 포함할 필요 ○(포함X) 프로젝트별로 기간은 달라질 수 있음

5) 국제협력 관련 키워드

2절의 결과에 따라 하나의 토픽(토픽6)으로 제시된 국제협력 키워드에 대한 논의가 진행됐다.

대형연구시설의 거대화 추세에 따라 개별 국가가 단독으로 추진할 수 없는 경우, 연구비 분담 등 국제 공동연구가 필수적이라는 의견이 제시됐다. CERN, ITER, ISS 등이 해당 사례로 제시됐다. 또한, 연구결과의 검증, 객관화, 투명성 확보 등의 사유로 공동연구가 필요한 분야도 있는 것으로 파악됐다.

다만, 우주 발사체 등 국가 보안상의 사유로 국가 간 폐쇄적으로 R&D가 추진되는 경우도 있으므로, 국제협력이 거대과학 전체의 특징은 아닌 것으로 판단했다.

[표 8] FGI 조사 결과 - 국제협력

구분	세부내용
“국제협력” 포함 여부	<ul style="list-style-type: none"> ○(포함O) 대형연구시설의 거대화 추세에 따라 단일 국가에서 구축이 어려운 경우가 많아지고 있음. CERN, ITER, ISS 등 대형연구시설의 국제 공동연구는 글로벌 추세임 ○(포함O) 연구결과의 객관화, 기술 검증, 국제 사회 공조 등을 위한 국제협력 사례도 있음 ○(포함X) 대체로 국제협력이 필요하나 국가별로 보안 등의 사유로 폐쇄적인 분야도 있음 ○(포함X) 일부 분야의 경우 R&D 자체가 국제 사회의 통제 대상이 되는 경우도 있음

6) 기타 의견

“활용·운영”, “공공”, “전략적” 등의 키워드가 필요하다는 기타 의견도 존재했다.

[표 9] FGI 조사 결과 - 기타

구분	세부내용
“활용·운영” 포함 여부	<ul style="list-style-type: none"> ○(포함O) 구축 중심으로 인식되고 있는 거대과학에 활용과 운영 관련 키워드가 필요함 ○(포함X) 구축 자체가 목적인 분야도 있음 ○(포함X) 가속기를 이용하는 과학기술 분야는 매우 다양하므로, 이용 분야는 제외할 필요
“공공” 포함 여부	○(포함O) 장기간 및 고비용 소요로 인해 민간에서 투자가 불가한 경우가 많음
“전략적” 포함 여부	○(포함O) 국가적 전략(로드맵)하에 추진되어야 함

4. 대형연구시설·장비 범위

연구시설·장비는 과학기술 하부구조에 속하는 연구인프라⁶⁾의 핵심요소 중 하나로 과학기술 활동 대부분에 필요하다. 연구시설·장비를 구축하는 과정 또는 구축 후 활용하는 과정에서 R&D 성과를 도출, 입증, 또는 실현하게 된다. Georghiou(1996)은 과학기술과 연구시설·장비의 발전 간 높은 상관관계에 따라, 첨단 연구시설·장비 확보 노력이 점점 확대되고 있음을 언급한 바 있다. 또한, Nevada(1999)는 연구장비는 연구과제 수행에 필수적이며, 최신 연구장비 부재는 대학의 산학협력을 저해하는 요소라 밝히는 등 다수의 연구에서 연구시설·장비의 중요성이 강조되고 있다.

대형연구시설·장비는 예산, 규모, 파급효과 등으로 일반 연구시설·장비와 구별할 수 있다. 대형연구시설·장비에 관한 보편적 개념은 아직 명확하게 규정되지 않았으며, 국가, 연구자, R&D 단계, 목적 등에 따라 다양하게 정의되고 있다. OECD(1992)는 대형 연구인프라⁷⁾를 “물리, 화학, 바이오, 천문, 지구환경, 해양, 우주, 항공 등 거대과학에 사용되는 첨단의 고가시설”로 규정한다. 또한, 그중 연구시설 및 연구대상의 규모가 큰 것, 참여 인력과 분야의 복잡성이 큰 프로젝트 등으로 규정하며, 상업적 목적이 강한 분야는 제외하고 있다. 또한, 국가별 과학 정책에 따라 연구인프라의 정의가 상이할 수 있음을 언급하며, OECD GSF에서는 크게 3가지의 분류로 연구인프라를 구체화하고 있다.(표 10)

6) 과학기술 자산, 시설, 서비스 등 과학기술 활동을 지원하는 유·무형 요소를 총칭

7) 해외 주요국에서는 협의적 개념인 연구시설보다, 연구시설부터 연구그룹까지 포함하는 연구인프라(Research Infrastructure)라는 광의적 개념을 더 많이 사용함

[표 10] OECD GSF의 연구인프라 분류

분류	세부분류	예시
1. 시설	시설-규모 실험용 (시설 전체 활용)	○ LHC(대형강입자충돌기) ○ ITER(국제핵융합실험로)
	소규모 사용자 이용시설	○ 대형전파망원경 -ALMA(Atacama Large Millimeter /submillimeter Array) -SKA(Square Kilometre Array)
	대규모 사용자 이용시설	○ ESRF(유럽싱크로트론방사광시설)
2. 분산 인프라	다중 시설을 활용한 과학적 측정·발견	○ LIGO(레이저간섭계중력파관측소) ○ ICGC(국제암유전체컨소시엄)
	공동 과학적 주제에 기반한 연구 조정·통합	○ GEOSS(전지구관측시스템) ○ SIOS(북극스발바르종합관측망구축사업)
3. E-인프라	대규모 데이터의 가상통합, 저장, 수집·선별	○ GBIF(세계생물다양성정보기구) ○ INCF(국제신경정보학조정기구)
	고성능 컴퓨팅 및 네트워킹	○ GÉANT(범유럽데이터네트워크) ○ PRACE(유럽첨단컴퓨팅협력체)

※ 출처 : OECD(2014), The Impacts of Large Research Infrastructures on Economic Innovation and on Society

ESFRI(European Strategy Forum on Research Infrastructures)에서는 연구인프라를 “연구 커뮤니티가 해당 분야에서 연구를 수행하고 혁신을 촉진하기 위해 사용하는 시설, 자원 및 서비스”로 규정한다. 해당 개념에는 주요 과학 장비뿐만 아니라 과학 데이터와 같은 지식 기반 자원, 컴퓨팅 시스템 및 통신 네트워크와 같은 e-인프라 등 연구 및 혁신을 달성하는 데 필수적인 모든 도구가 포함되게 된다. 분류는 단일 연구인프라와 분산 연구인프라로 크게 2개로 구분하고 있다.

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

GSO(Group of Senior Officials)에서는 더 나아가 개발, 구축, 운영 비용 또는 전지구적 과학문제로, 단일 국가가 해결할 수 없는 수준의 거대과학에 필요한 장비로 GRI(Global Research Infrastructures) 개념을 도입하고 있다. GRI는 표 11과 같이 크게 3가지로 구분된다.

[표 11] GSO의 GRI(글로벌 연구인프라) 분류

분류	정의	예시
1. 단일 글로벌 시설	○ 거버넌스가 다수의 국가로 이루어져 있으며, 특정 단일 지역에 있는 시설	○ LHC(대형강입자충돌기) ○ ITER(국제핵융합실험로)
2. 글로벌 분산 연구인프라	○ 거버넌스가 다수의 국가로 이루어져 있으며, 글로벌 네트워크 일부에 해당하는 국가 또는 기관 단위의 연구인프라	○ 해양 또는 지구 관측소, 대형망원경 어레이, 극지 연구시설, 분산 컴퓨팅 시설 등
3. 단일 국가 시설	○ 특정 국가 소유이나, 국제적으로 많은 관심을 끄는 시설	○ 남극 또는 해양시추 시설

※ 출처 : GSO(2017), GSO on GRI Progress Report 2017

살펴본 바와 같이, 연구시설·장비에 관한 개념은 국가마다 조금씩 상이하다. 우리나라에서는 연구인프라라는 광의의 개념보다는 비교적 구체적인 연구시설·장비의 개념을 사용하고 있다. “국가연구개발 시설·장비의 관리 등에 대한 표준지침”⁸⁾에서는 연구시설·장비를 표 12와 같이 정의한다. 국가 정책적으로는 시설과 장비를 명확히 구분하며, 하나의 거대 연구장비 또는 하나의 거대 시스템도 연구시설에 포함된다는 것을 알 수 있다.

8) 과학기술정보통신부 고시-제2020-19호(2020. 05.)

[표 12] 연구장비 및 시설 정의

연구 장비	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1백만 원 이상의 구축 비용이 소요되며, 1년 이상의 내구성을 지닌 과학기술 활동을 위한 유형의 비소비적 자산
연구 시설	<ul style="list-style-type: none"> ○ 특정 목적의 연구개발 활동(시험, 분석, 측정, 교육, 훈련 등)을 지원하기 위해 다음 각호 중 하나의 형태로 이루어진 독립적인 연구공간 ① 하나의 거대 연구장비 ② 복수의 연구장비를 결합한 하나의 시스템 ③ 공동 활용을 촉진하기 위하여 연구장비들을 한 곳에 집적화한 단위

국내에서도 대형연구시설·장비에 대한 표준화된 정의 및 기준은 없으나, 정책적으로 일부 제시된 바가 있다. “국가대형연구시설 총람(2013)” 등에서는 표 13과 같이 대형연구시설을 정의한다.

[표 13] 정책별 대형연구시설 정의

출처	정의
국가대형연구시설 총람(2013)/ 구축지도(2013)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과학기술 분야에서 뛰어난 성능을 갖추고 첨단연구 분야에 활용됨으로써 해당 분야에서 중요한 영향력을 발휘할 수 있는 대규모 연구시설을 의미
국가대형연구시설 실태조사(2013)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과학기술 분야에서 대규모 예산투입과 장기간의 공정을 통해 구축되며, 뛰어난 성능을 갖추고 첨단 연구 분야에 활용됨으로써 해당 분야에서 중요한 영향력을 발휘하는 연구시설

해당 정책에서는 주요 키워드로 첨단연구, 영향력, 대규모, 장기간 등이 활용된 것을 알 수 있다. 표준지침을 세부적으로 설명하고 있는 매뉴얼⁹⁾에서는 구축비용별로 연구시설·장비의

9) 국가연구개발 시설장비의 관리 등에 관한 매뉴얼(2020.06.)

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

규모를 표 14와 같이 구분하고, 50억 원 이상부터 대형연구시설·장비로 분류한다.

[표 14] 구축 비용에 따른 연구시설·장비 구분

	소형	중소형	중형	중대형	대형	초대형
비 용	100만 원~ 3천만 원	3천만 원~ 1억 원	1억 원~ 10억 원	10억 원~ 50억 원	50억 원~ 500억 원	500억 원 이상

또한, “국가연구시설 중기 확충고도화 방향(20.12.)“에서는 연구시설의 운영 특징 및 구성형태에 따라 표 15와 같이 유형을 구분한다. 분산-단일 등 2개 또는 3개로 구분된 국제기구 사례보다 유형이 세분된 것을 알 수 있다. 구축 자체에 상당한 수준의 R&D가 필요한 유형은 대형장비 운영형, 관측/측정형이 해당한다고 볼 수 있다.

[표 15] 연구시설 유형 및 운영 특징

유형	정의	운영 특징
대형장비 운영형 (예 : KSTAR)	○ 물리적 단일한 위치에 있는 하나의 장비를 기준으로 여러 부대장비가 집적되어 구축된 시설	○ 하나의 대형장비(장치)를 가동하기 위해 여러 장비가 동시에 지원 ○ 시설 운영 자체가 연구 목적인 경우가 많음 ○ 지속적으로 운영되지 않음
연구장비 집적형 (예 : 나노랩)	○ 물리적 단일한 위치에 여러 연구장비를 특정 공정 단위로 집적하여 운영하는 시설	○ 여러 장비가 단일 장소에 집적 ○ 구성된 장비가 순차적 또는 개별적으로 활용 ○ 장비별 활용빈도 차가 있음
과학시료 관리형 (예 : 영장류 사육시설)	○ 물리적 단일 또는 분산된 위치에 연구대상을 관리하기 위한 목적으로 운영되는 시설	○ 대형장비가 일부 있으나 주목적은 아님 ○ 관리되는 연구대상이 운영의 목적으로 연구지원형태로 활용 ○ 24시간 365일 가동
데이터 센터형 (예 : 실험 데이터 센터)	○ 물리적 단일 또는 분산된 위치에 연구데이터를 관리하거나, 컴퓨팅 자원을 공유하는 시설	○ 다수의 컴퓨팅 장비를 결합하여 운영 ○ 컴퓨팅 자원(연산, 저장공간)의 배분을 통해 공동 활용 ○ 24시간 365일 가동
관측/ 측정형 (예 : 대형 풍동실험시설)	○ 특정 연구 목적을 지원하기 위해 물리적 단일 또는 분산된 위치에서 지속해서 대상을 관찰하는 시설	○ 하나 또는 여러 개의 대형장비로 구성 ○ 관측 또는 측정 대상물이 있으며, 이에 대한 관측·측정 시간 배분 ○ 연속적으로 가동되지 않으나 한번 활용 시 장시간 가동

※ 출처 : 국가연구시설 중기 확충고도화 방향(2020.12.)

라. 거대과학 정의

본 연구에서는 문헌분석, 전문가 의견 조사 등을 종합하여 “거대과학”과 “대형연구시설·장비”를 표 16과 같이 정의한다.

앞서 살펴본 바와 같이 연구시설·장비에 관해서는 비교적 명확한 정의가 있으나 대형연구시설·장비에 대한 기준은 비용을 제외하면 정성적으로 제시된 편이다. 또한, 매뉴얼¹⁰⁾ 상 대형에 속하는 50억 원 이상 시설·장비를 거대과학에 활용되는 시설·장비로 모두 분류하기에는 무리가 있다. 해당 기준으로는 최근 5년에만 49개의 장비가 구축된 것으로 조사된다.¹¹⁾ 따라서, 본 연구에서는 거대과학의 대형연구시설·장비를 500억 원 이상으로 설정한다.¹²⁾ 또한, 거대과학의 정의에 따라 단순 구매가 아닌 개발이 필요한 장비, 즉 구축에 상당 수준의 R&D가 필요한 연구시설·장비로 한정한다.

[표 16] 거대과학 및 대형연구시설·장비 정의

거대과학
대규모 예산과 인력이 투입되며 대형연구시설·장비를 장기간 구축하고 활용하는 과학기술 분야
대형연구시설·장비
구축 단계부터 R&D 비중이 높으며, 단일장비 구축 비용이 500억 원 이상인 연구시설·장비 단, 단기간 내 단순 상업적 목적이 강한 분야의 시설·장비는 제외

10) 국가연구개발 시설장비의 관리 등에 관한 매뉴얼(2020.06.)

11) 과기정통부, NFEC, 2019년도 국가연구시설장비 조사·분석 보고서(2020.12.)

12) 국가연구개발 시설장비의 관리 등에 관한 매뉴얼 상 “초대형”에 해당

제2절 거대과학 특징 및 파급효과

1. 거대과학 특징

첫째, 단일 목적의 R&D에 장기간 막대한 비용 및 인력 투입이 필요하다. 단순 대형연구개발사업도 대규모의 예산 및 인력이 필요할 수 있다. 다만, 거대과학은 대형연구개발사업 대비 R&D 목적과 성과 활용처가 비교적 명확하다. 또한, 단기간 내 민간 이익과 직결되기 어려워 국가 주도로 추진되는 경우가 많다. 다만, 한 국가가 동시에 많은 거대과학 분야 및 기술 후보군에 투자하기 어려우며, 환경에 따라 특정 분야 및 기술에 집중할 수밖에 없다. 그리고, 연구시설·장비 구축 이후에도 업그레이드 및 운영에 지속적인 재원 투입이 요구된다.

둘째, 막대한 자원 투입으로 인해 과학기술 외 요인(정치, 외교, 경제, 환경 등)이 R&D 추진 및 지속에 영향을 줄 수 있다. 또한, 다수의 이해관계자(국회, 정부, 지자체, 시민, 환경단체 등)로 인해 의사결정체계가 복잡하고 긴 시간이 소요된다. 그리고, 대형연구시설·장비의 부지선정 이슈가 지자체의 현안 또는 정치 이슈로 이어지기도 한다.(SSC 사례 참고)

셋째, R&D 추진 과정과 성과 달성에 대한 불확실성이 높으나, 막대한 성과를 도출할 수 있다. 거대과학은 단기간 내 성과 도출이 어려워 장기계획에 따라 추진되어야 한다. 다만, 계획된 성과가 달성되면 과학기술뿐만 아니라 산업, 사회, 환경 등 다양한 분야에 파급효과가 크다.

넷째, 대형연구시설·장비에 대한 R&D 의존도가 높다. 계획된 시설·장비의 구현에 불확실성이 거대과학 자체의 불확실성으로 이어진다. 또한, 거대과학 연구기관의 정책 방향 및 시설·장비의 조건 등에 따라 R&D 방향성이 확정된다. 때로는 이

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

러한 특징이 개별 연구자의 R&D 자율성과 기술 확장성을 제한할 수 있다.

다섯째, R&D 수행단계 및 목적이 기초연구에 가까운 경우라도 시설·장비 관련 산업체의 역할이 중요하다. 개념 수준의 거대 시설·장비를 실현할 수 있는 기술과 산업생태계가 필요하다. 또한, 획일적인 대량 생산품이 아니라 해당 분야에 특화되거나 독보적인 시설·장비가 필요하며, 이러한 요구(또는 거대 과학 정책)는 산업체의 기술기반 변화에도 영향을 미친다.

여섯째, 국제협력으로 이어지는 경우가 많다. 거대과학의 과학적 의제가 단일 국가에서 해결할 수 없거나, 전지구적 영향이 있는 경우, 또는 소요 자원 및 인력 등의 자원 투입에 국제적 분담이 필요할 경우, 국제 공동연구가 추진된다.

<참 고>

□ 미국 **Superconducting Super Collider** 사례

미국 의회는 1993년 10월 초전도 초대형 입자가속기(Superconducting Super Collider, SSC) 사업 종료를 결정했다. 1980년대 초반부터 추진된 사업은 이미 20억 달러의 예산집행과 텍사스에 24 km의 지하터널이 굴착된 후였다. 계획대로라면 SSC의 비용은 총 83억 달러, 건설부지는 20 km², 둘레는 84km이며, 완공되면 20 TeV로 가속할 수 있어 현재 CERN의 Large Hadron Collider(LHC)를 훨씬 초과하는 규모였다.

SSC는 1980년대 초부터 시작된 사업으로, 냉전 시대 속 국가 안보와 소련과의 기술경쟁 우위가 우선이었던 미국에서는 초대형 연구비 투입이 가능한 환경이었다. 이후, 냉전 종식과 함께 거대과학 사업에 대한 대규모 지원은 경제적 혹은 새로운 정치적 타당성을 확보해야만 했다. 변화된 거대과학 투자환경 속에서, 미 의회의 표면적인 중단 사유는 낮은 경제적 효과성, 예산 초과, 관리 부실 등이었다. 이 외에도, 텍사스로 SSC 부지가 선정된 후 SSC를 지지하는 의원 수가 줄어든 점, 국제우주정거장(ISS) 지상관제소가 휴스턴에 위치해 텍사스 지역사업으로 간주된 점, 타 분야의 과학자들과의 자금 경쟁 등 다양하고 복잡한 배경이 있었다.

결과적으로 SSC라는 과학 사업의 이슈가 지역 현안, 더 나아가 정치적인 현안으로 부상하면서 결국 중단되었고, 이는 미국 고에너지 물리학 커뮤니티에 커다란 충격으로 귀결되었다. 또한, 고에너지 물리학의 주도권이 CERN의 LHC를 건설하던 유럽으로 넘어가는 계기를 제공하게 된다.

이러한 과정에서 미국 물리학자들은 초거대 가속기에 대한 국제협력 필요성을 절감하였다. 유사한 시기(SSC 투자 정당성에 대한 논쟁과 미국 의회의 사업 중단)에 OECD 과기부 장관회의에서는, “세계에서 가장 큰 부국조차도 증가하는 거대과학 프로젝트 비용을 감당할 수 없다(신유정, 2019 재인용).”는 점을 강조했다. 이에 따라, 거대과학 사업의 비용과 이익을 함께 분담하는 국제협력이 필요하다는 논리에 더욱 힘을 실어주게 되었고, OECD MSF의 설립과 역할이 중요해졌다.

2. 거대과학 파급효과

가. 과학기술적 파급효과

거대과학을 통해 과학기술 패러다임을 바꿀 수 있을 정도로 독창적이거나 획기적인 연구성과 창출이 가능하다.¹³⁾ 또한, 미지 물질의 발견·관찰, 이론의 실험적 증명 등 인류의 과학지식 영역을 확장하기도 한다.¹⁴⁾

과학기술 수준의 발전, 인류사회의 복잡성 증가, 전지구적 문제 대두 등에 따라, R&D도 단일 분야가 아닌 다학제 접근이 불가피한데, 거대과학과 대형연구시설은 학제 간 연구를 활성화한다.

[다학제 연구] EHT

(Event Horizon Telescope. 2019)

전 세계 8개 전파망원경에서 동일시점에 대상을 관측하고, 다양한 연구진(천문학/물리학/컴퓨터공학/수학 등) 주도로 데이터를 분석하여 최초로 블랙홀 촬영



R&D에 투입되는 인적자원을 거대화시키고 인적 네트워크를 형성하게 하는 효과를 불러온다. 거대과학은 관련 과학 커뮤니티뿐 아니라 비연구자 커뮤니티(기업, 정부, 사회단체 등) 결성에도 영향을 미친다. 또한, 과학기술 인재양성 및 인력 유출 방지와 국제협력을 통해 해외 고급인력의 유치도 가능하게 한다.

[집단 연구] LIGO

(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, 2016)

전 세계 연구자가 LIGO 측정 데이터를 분석하여, 최초로 중력파 발견 (논문 주저자 수 1,003명)



13) 1970년대 이후 노벨 물리학상의 약 30%가 가속기를 활용(노벨상 홈페이지)

14) 힉스입자 발견(CERN, 2012), 중력파 검출(LIGO, 2016), 블랙홀 촬영(ETH, 2019) 등

나. 경제 · 산업적 파급효과

거대과학은 기존 기술에 대한 근본적이고 혁신적인 해결책을 제시할 뿐 아니라, 파생되는 기술 및 인프라로 신산업 탄생의 계기를 제공한다.

대형연구시설 구축 및 운영을 통해 건설(또는 구축), 기자재 조달, 장비 구매 등 직접 경제활동을 활성화한다. 또한, 고용 유발효과가 있는데, 단기적으로는 구축과 연관된 일자리를, 장기적으로는 연구, 운영, 과학 서비스 등의 일자리를 창출할 수 있다.

[경제 효과] CERN LHC

(Large Hadron Collider)

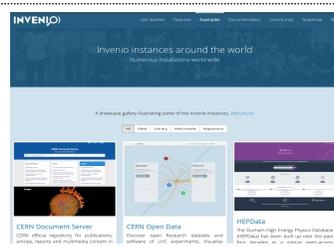
유럽입자물리연구소 강입자가속기의 경제적 효과는 초기 투자액(4조 6천억 원) 대비 100배 이상으로 추산되며, 관련 시장 성장률은 연평균 10% 이상으로 예측



거대과학은 민간기업의 기술기반 혁신에도 기여한다. 대형연구시설 구현을 위해, 기업은 대량 생산품 또는 기성품이 아닌 주문자(연구기관)의 요구에 따라 복잡성이 높은 제품을 개발해야 한다. 이러한 과정에서 대형연구시설 연구기관과 기업은 일방적 기술공급-수요 관계가 아니라, 서로 혁신 촉매제로 작용한다.

[신산업] 대용량 데이터 처리 및 저장 산업

대형연구시설에서 발생된 대규모 실험 데이터를 처리하기 위해, 빅데이터 처리, 전송, 분산 저장 등 관리를 위한 INVENIO 같은 오픈 소스 소프트웨어가 등장함. 이를 기반으로 데이터 관리 신산업이 태동



다. 사회·정치적 파급효과

거대과학은 국가 경쟁력 및 위상을 높일 기회를 제공한다. 거대과학은 세계적으로 독창적이거나 독보적인 연구성과를 목표로 하는 것이기, 해당 국가의 국제적 과학 리더십을 발휘할 기회를 제공한다. 또한, 거대과학 및 대형연구시설에 대한 투자 여력 자체가 국가 과학기술 수준 및 경제력을 증명하는 수단이 될 수 있다.

전지구적인 사회·환경 문제(기후변화, 팬데믹 등) 해결의 실마리를 제공한다. 최근의 COVID-19 팬데믹 상황에서 대형연구시설 중심 집단 연구는 바이러스의 특성을 이례 없는 속도로 분석하여, 백신 개발 및 대응방안 마련에 직접 기여했다. 또한, CERN 가속기를 통해 발견된 중입자로 암 치료 기술개발, 핵융합 에너지를 통한 지속가능한 에너지원 개발 등 다양한 사회·환경 문제 해결에 직간접적으로 기여한다.

거대과학 및 대형연구시설은 대중 과학 인식 제고 및 과학 교육에도 중요한 역할을 한다. CERN 등에서는 대형연구시설을 활용하여 교육기관의 교사연구프로그램을 운영하기도 한다. 또한, ESFRI, OECD GSF 등에서는 대형연구시설의 효과 중 하나로 '교육 및 다양한 형태의 아웃리치'를 제시한다.

CERN에는 매년 약 8만 명이 방문하며, 다양한 홍보 활동을 통해 고에너지 물리학에 대한 대중의 이해를 향상시키고 있다.¹⁵⁾ 이러한 활동은 대중에게 과학기술에 대한 친밀도를 높이고 R&D 투자 설득을 위한 도구 역할도 한다.

15) 방문자 센터인 “The Globe”를 운영하는 재단이 설립되기도 함

제3절 거대과학 분야 및 추진현황

1. 거대과학 분야

거대과학은 분야에 대한 일관된 기준이 없는 관계로, 연구자 및 정책별로 분류의 기준과 범위가 상이하다.(표 17) NFEC(2009) 및 이원희(2009) 연구를 살펴보면, OECD GSF, CERN 등의 해외 사례를 참고하여 주요 거대과학 분야가 선정된 것을 알 수 있다. 제1절의 관련 국제기구(OECD GSF와 GSO GRI)의 연구인프라 분류(표10, 11)와 MSF 시절 프로젝트(참고)를 살펴보면, 가속기, 우주·천문, 생물 다양성, 지구관측 등의 분야가 자주 등장하는 것을 알 수 있다. 한편, 2013년의 ‘제2차 국가대형연구시설구축지도’에서는 우주, 천문, 원자력, 핵융합, 가속기 등 12개로 거대과학기술 분야를 구분하였다.

본 연구에서는 1절의 거대과학 및 대형연구시설·장비 정의에 따라 우주, 원자력, 핵융합, 가속기로 연구대상을 한정하였다. 4개 분야 외에는 거대과학이라기보다 대형연구개발사업 개념에 가까운 경우가 많았다.¹⁶⁾ 또한, 시설·장비를 구축 없이 이용만 하는 분야까지 포함할 경우, 비거대과학 분야와의 경계가 모호해질 가능성이 있어서 연구대상에서 제외하였다.¹⁷⁾

16) 최근 사업의 대형화 추세에 따라, 탄소중립, 반도체 등의 분야도 단일 세부사업의 규모가 점점 커지고 있음. 이러한 상황을 고려했을 때, 차세대 컴퓨팅, 유전체 분석 등의 분야는 타 분야와의 구분이 모호할 수 있음

17) 제2장 전문가 FGI에서도 언급되었던 내용으로, 대형연구시설·장비를 단순 이용만 하는 분야에는 소재개발, 바이오 등 다양한 분야가 포함될 수 있음. 따라서, 구축 R&D부터 시작되는 분야를 중심으로 선정할 필요가 있음. 이러한 관점에서 기상(위성), 극지 등의 분야는 본 연구에서 제외함

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

[표 17] 거대과학 분야 설정 사례

저자	분야									
	우주	천문	기상	해양	극지	생명	원자력	핵융합	가속기	IT
정성철 (1999)	○	○	△			○		○	○*	
	물리		지구 물리			생명 과학				
NFEC (2009)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
										컴퓨팅
이원희 (2009)	○	○	○	○	○	○		○	○	○
	개발/ 관측	천체 감시	지구 관측	심해 탐사	극지 탐사	유전체/ 다양성				차세대 컴퓨팅
이민형 (2010)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
						생물 다양성				컴퓨팅
조현대 (2011)	○	○	○	○	○	○	○	○		○
	항공/ 우주		지구 관측		극지 탐사	생명 과학		물리		차세대 컴퓨팅
국기환 (2013)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
김유빈 (2018)	○	○	○	○		○			○	
			지구 환경			바이오			물리	

* 고에너지, 핵구조, 응집 물리 등

<참 고>

□ OECD MSF 프로젝트 (1995~1999)

주제	기간	내용
중성자원	1996~1998	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미래 중성자 공급에 관한 정량적 분석을 포함 ○ 각 정부의 기존 원자로 기반 중성자원 폐쇄로 인해 실험용 중성자가 부족할 전망이다. 이에 따라, 파쇄 중성자원 시설을 권역별로 건설하도록 권고 ○ 기존 시설의 개선과 중성자 산란을 위한 고급 장비의 개발도 권고
생물정보 작업반	1996~1999	<ul style="list-style-type: none"> ○ 생물 다양성 및 신경과학 분야의 대량 데이터베이스에 관한 국제협력 정책 논의 ○ 다양한 데이터베이스 정제 및 표준화 방안, 데이터베이스의 활용처 및 수요 연계 방안 논의 ○ GBIF(전지구 생물다양성 정보 시설)이라는 기구를 설립하는 것이 바람직하다는 권고안을 수립하여 OECD 회원국 과학 각료회의의 인준을 받음
핵물리 작업반	1996~1999	<ul style="list-style-type: none"> ○ 중이온 가속기 등 대형연구시설에 대한 대정부 권고안 완성 -분야의 다양성 및 물질 기본구조의 이해를 위해 장기 전략 수립 필요성을 강조 -의료 및 핵폐기물 처리 이슈 등도 언급
전파 천문학	1997~1998	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인프라 전반에 필요한 사항들과 저궤도 통신위성의 전파 간섭 문제에 관해 논의함 ○ OECD 회원국의 과학 각료회의의 인준을 받아 기획단의 조직을 권고함 ○ 기획단은 과학, 전파통제, 산업계 대표들로 구성되어, 전파 천문학과 전자통신의 공존을 위한 전략 수립을 목적으로 함

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

국제 거대과학 인프라	1996~1998	○협력의 장애는 무엇이며 어떻게 넘을 것인지, 시설 구축 및 운용에 참여하지 않은 국가의 과학자에게 사용허가를 할 것인지 등에 관해 논의함
심해 중성미자 관측소	1997.05. 워크숍	○워크숍 -우주에서 방출되는 고에너지 중성미자 대형 검출기의 미래 계획 및 전망 논의
전지구적 과학이슈	1998.03. 워크숍	○워크숍 -메가사이언스 정책 이슈 논의
미래 양성자 빔 시설	2000.09. 워크숍	○파쇄 중성자원 시설, 방사광 시설, 뮤온 및 중성미자 빔 시설, 핵폐기물 변환 시설 등 주요 분야에 대한 현황과 전망, 기술적 목표와 도전 등에 관해 논의함
구조 유전학	2000.06. 워크숍	○국제협력 및 연구개발 성과 연계 가능성을 탐색 ○단백질의 구조 분석을 위한 주요 기술과 시설에 초점(X-선 분석과 NMR을 강조) ○인프라구조 문제와 함께 데이터 정책 문제, 지식재산권 문제도 논의

2. 거대과학 정책 현황

4개의 거대과학 분야와 관련된 우리나라 법정 중장기계획 현황은 표 18과 같다. 주관부처는 동일하나, 분야마다 개별 근거법령이 있으며 위상 및 심의기구 등이 상이하다. 한편, 가속기 분야의 경우 중이온가속기 내용이 포함된 국제과학비즈니스벨트 기본계획 이외에는 직접적으로 관련된 중장기계획은 없는 것으로 파악된다.

[표 18] 분야별 중장기계획

분야	근거법령	주관부처	중장기계획명	위상 ¹⁸⁾	심의기구
우주	우주개발진흥법	과기정통부	제3차 우주개발 진흥 기본계획(2018~2040)	종합	장차관
원자력	원자력진흥법	과기정통부	제5차 원자력진흥 종합계획(2017~2021)	종합	국무총리
핵융합	핵융합에너지개발진흥법	과기정통부	제3차 핵융합 에너지 개발 진흥 기본계획(2017~2021)	세부	장차관
가속기	국제과학비즈니스벨트 특별법	과기정통부	국제과학비즈니스벨트 기본계획(2012~2021)	세부	장차관
기타	과학기술기본법	과기정통부	제2차 국가연구시설장비 운영·활용 고도화계획(2018~2022)	세부	자문회의

- 18) ① 종합계획 : (1) 중장기계획 연계맵에 따른 기술분류에서 개별 분야 총괄계획, (2) 연구개발사업의 추진근거뿐만 아니라 인력양성, 제도, 인프라 구축 등을 포함하고 있는 계획
 ② 세부계획 : (1) 중장기계획 연계맵에 따른 기술분류에서 계획이 다루는 기술 분야가 일부분이며 종합계획과 연계한 하위계획, (2) 연구개발만을 목적으로 하거나 연구개발이 계획의 목표 달성을 위한 주요 수단인 계획, (3) 계획의 내용이 세부기술별 목표와 추진 일정 등으로 구성된 기술 로드맵 등

가. 우주

우리나라는 1989년 국내 항공우주 분야의 R&D를 전문으로 수행하는 정부출연연구기관으로 한국항공우주연구소를 기계연구원 부설기관으로 설립하였다. 이와 동시에 연구중심 교육기관인 한국과학기술원에 인공위성연구센터를 설치하였다. 이후 1992년 실험용 소형과학위성인 「우리별 1호」를 국내 최초로 개발하였으며, 1999년 발사된 국내 최초 실용위성인 다목적 실용위성 「아리랑 1호」를 계기로 본격적 우주개발에 착수하게 되었다. 이후 아리랑 후속 시리즈, 과학기술위성, 통신해양기상위성 「천리안」, 우주발사체 「나로호」 등의 개발 계획이 수립된다.

우리나라 우주개발의 초석은 1996년 4월에 수립된 최초의 국가우주개발계획인 '우주개발중장기 기본계획'이다. 본 계획은 국가 우주개발의 비전과 목표를 담고 국가의 총체적 우주개발 기술 역량을 결집하는 종합계획이다. 최초 '우주개발중장기 기본계획(종합과학기술심의회 통과, 1996.04.)'은 2015년까지 총 19기의 위성체 개발, 과학로켓 및 우주발사체 개발 등을 지향하였다. 우주개발사업을 추진하는 과정에서 발생한 여러 국내·외 여건 변화와 국가 우주개발의 현실성 있는 목표로의 재조정을 위하여 기본계획은 3차례(1998년, 2000년, 2005년) 수정되었다.

우주는 항공과는 달리 국제법적(UN 우주조약)으로 주권이 미치지 못하고, 인류 공동의 유산으로 규정되어 특정 개인이나 국가의 소유가 허락되지 않는다. 반면, 우주 활동으로 인한 사고는 국가가 배상책임을 지게 되어 있는 특성으로 인해, 우주물체 등록, 발사 등 우주 활동을 관리하고 감독하기 위한 국내법 제정의 필요성이 제기되었다. 이러한 배경에서 2004년 초부터 우주개발 관련 법 제정 작업이 본격화되었으며, 기획연구, 공청회 등을 통해 제정된 '우주개발진흥법'은 2005년 12월 1일

시행되었다.

‘우주개발진흥법’에 근거한 ‘제1차 우주개발진흥기본계획(국가 우주위원회 의결, 2007.06.)’이 2007년 수립되었다. 이는 2007년 목표 저궤도 소형위성 자력 발사계획 지원, 다목적 실용위성 및 통신해양기상위성 개발 일정 조정 등 기존 ‘우주개발중장기 기본계획’을 우주개발진흥법에 규정된 ‘우주개발진흥기본계획’으로 수정·보완한 것이다. 이후 ‘제2차 우주개발진흥기본계획(국가 우주위원회, 2011.12.)’에서는 제1차 기본계획의 추진실적을 점검하고, 국내·외 동향을 반영하며, 우주 강국 실현을 위한 핵심기술 확보 등 종합 추진 의지를 강조하였다.

2013년 11월 국내·외 환경변화와 선택과 집중에 의한 새로운 우주개발 전략 마련 필요성에 따라 2013년~2020년까지의 구체적인 계획을 수립과 동시에 2040년까지의 장기적인 국가 우주개발 비전을 담은 ‘우주개발 중장기계획(국가우주위원회, 2013.11.)’을 수립하였다. 현재 효력이 있는 계획은 2018년 2월 수립 및 2021년 6월에 일부 수정된 ‘제3차 우주개발진흥기본계획’이다. 이 외에도, 우주 분야의 산업화를 가속하기 위한 ‘우주기술 산업화 전략(1차 2013.11., 2차 2019.01.)’, 위성 정보 활용을 다각화·활성화 전략을 담은 ‘위성정보 활용 종합계획(1차 2014.05., 2차 2019.01.)’, 우주물체 추락 등의 위협에 대비하기 위한 ‘우주위험 대비 기본계획(2014.05.)’ 등이 수립 및 추진되고 있다.

나. 원자력

우리나라는 1958년 원자력법이 제정되고 이후 1959년 대통령 소속의 원자력원 설립 및 원자력위원회가 발족하여 본격적으로 원자력연구가 시작되었다. 원자력법이 개칭된 원자력진흥법을 근거로 국가 원자력 이용정책을 체계적이고 일관성 있게 추진하기 위해 1997년부터 5년마다 ‘원자력진흥종합계획’이 수립되고 있으며 이에 따른 원자력 R&D를 추진하고 있다.

‘제3차 원자력진흥종합계획(‘07~‘11)’에서는 원자력 수출추진 정책의 일환으로 연구용 원자로 요르단 수출을 통해 원전 수출국으로 도약하였으며 방사선에 특화된 부산(기장) 의과학산업 단지 조성(수출용 신형연구로 포함)을 추진하였다. ‘제4차 원자력진흥종합계획(‘12~‘16)’에서는 사용후핵연료 저장·처분과 관련하여 ‘고준위 방사성폐기물 관리 기본계획’을 수립하였고 연구로용 판형 핵연료 개발 및 네덜란드 연구로 개선사업(OYSTER) 수주를 추진하였다.

‘제5차 원자력진흥종합계획(‘17~‘21)’에서는 안전하고 친환경적인 원자력 이용개발을 통한 우리 사회의 지속가능한 발전을 장기비전으로 삼고 2021년 목표를 국민의 신뢰 하에 미래를 준비하는 원자력 역량 확대¹⁹⁾로 정하였다. 이를 달성하기 위해 국민 안심, 미래경쟁력, 도약 성장, 소통 협력이라는 4대 목표와 8대 정책 방향¹⁹⁾을 제시하였다.

8대 정책 방향 중 하나인 사용후핵연료 안전관리 및 원전 사후처리 기반 적기 구축을 위해 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리시설 적기 확보를 추진하여 원전 외부 부지에 인허가

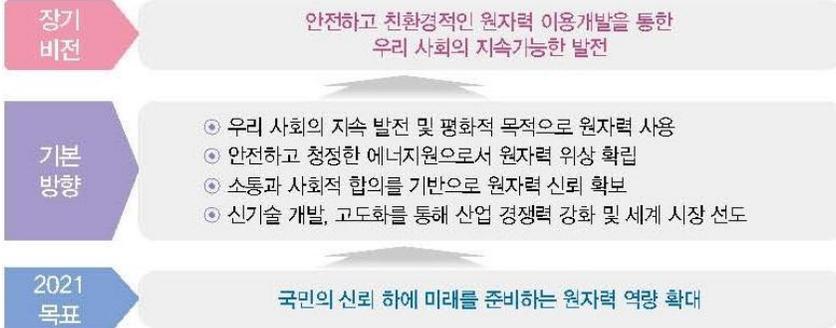
19) ① 최상의 원자력안전 확보, ② 사용후핵연료 안전관리 및 원전 사후처리 기반 적기 구축, ③ 미래 수요에 부응하는 도전적 연구개발 촉진, ④ 지속적 성장기반 확보, ⑤ 원자력산업 경쟁력 강화, ⑥ 방사선 이용·개발의 부가가치 증대, ⑦ 소통에 의한 원자력 정책 추진, ⑧ 국제 사회 기여 확대 및 리더십 확보

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

용 지하연구시설을 설치하고 과학적인 부지조사, 객관적이고 투명한 방식을 통한 부지확보의 정당성 확보 등을 규정하는 법·제도(고준위 방사성폐기물 관리절차법 등)를 마련하고자 하였다. 또한, 환경친화적 사용후핵연료 안전관리기술 확립을 추진하여 고준위 방사성폐기물 영구처분을 위한 처분시스템 개발(연구용 지하연구시설 추가 확보)과 적기 영구처분을 위한 관리기술 및 대안기술 개발을 병행하고자 하였다.

8대 정책 방향 중 다른 하나인 원자력산업 경쟁력 강화를 위해 원자력 수출 포트폴리오 완성 및 수출지원 개선을 추진하여 다양한 해외수요(교육·연구용, 원전도입 대비 인프라 구축, 동위원소 생산·중성자연구·재료개발 등)에 적합한 맞춤형 연구로 공급하고자 하였다. 또 다른 정책 방향으로 방사선 이용·개발의 부가가치 증대를 위해 방사선 인프라 고도화 및 기업지원 확대를 추진하여 수출용 신형연구로 와 연계한 동위원소 활용연구센터를 구축하려 하였다.

비전 및 정책방향



4대 목표	8대 정책방향	중점 추진 과제
국민 안심	1. 최상의 원자력 안전 확보	1 1. 복합재난 및 사고위험의 선제적 대응체계 구축 1 2. 원전 안전 및 운전 신뢰도의 지속적 향상 1 3. 국민이 신뢰하는 방사선 안전 및 방호체계 확립
	2. 사용후핵연료 안전 관리 및 원전 사후 처리 기반 적기 구축	2 1. 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리시설 적기 확보 2 2. 환경친화적 사용후핵연료 안전관리기술 확립 2 3. 원자력시설 해체산업 육성
미래 경쟁력	3. 미래 수요에 부응하는 도전적 연구개발 촉진	3 1. 신기술 융합·접목을 통한 새로운 원자력 영역 개척 3 2. 온실가스 감축수단으로서 원자력기술 확산
	4. 지속적 성장기반 확보	4 1. 원자력 인력양성 및 인력수급 컨트롤 타워 구축 4 2. 창의적이고 도전적인 원자력R&D 혁신체제 구축
도약 성장	5. 원자력산업 경쟁력 강화	5 1. 원전산업 생태계 조성·확장 5 2. 원자력수출 보트폴리오 완성 및 수출지원 개선
	6. 방사선 이용·개발의 부가가치 증대	6 1. 방사선 원천기술 확보 6 2. 방사선 의료·바이오 신시장 창출 6 3. 방사선 인프라 고도화 및 기업지원 확대
소통 협력	7. 소통에 의한 원자력 정책 추진	7 1. 원자력 정책에 대한 소통·상생협력 전개 7 2. 원자력 갈등관리를 위한 소통 프로그램 운영
	8. 국제사회 기여 확대 및 리더십 확보	8 1. 국제 원자력사회 기여와 역할 확대 8 2. 원자력의 평화적 이용증진을 위한 전략적 국제협력 체계 구축 8 3. 원자력 국제협력 강화를 위한 효율적 인프라 기반 조성

[그림 13] 제5차 원자력진흥종합계획 중점추진 과제

다. 핵융합

우리나라는 1995년 국가 핵융합연구개발위원회 신설 및 ‘국가 핵융합 연구개발 기본계획’을 시작으로 핵융합 연구가 본격화되었다. 이때 차세대초전도 핵융합연구장치(KSTAR) 개발과 국제핵융합실험로(ITER) 참여 기반이 마련된 것으로 볼 수 있다. 이후 2006년에 핵융합에너지 개발 진흥법이 제정되면서 5년 단위 ‘핵융합에너지개발 진흥 기본계획’²⁰⁾이 수립되고 이에 따라 핵융합 R&D를 추진하고 있다.

‘제1차 핵융합에너지개발 진흥 기본계획(‘07~‘11)’에서는 핵융합에너지개발 추진기반 확립을 정책목표로 설정하였다. 또한, 2030년대 핵융합 발전소 건설능력 확보를 위해 ‘07~‘36 기간 동안 3단계의 추진전략²¹⁾이 제시되었다. ‘제2차 핵융합에너지개발 진흥 기본계획(‘12~‘16)’에서는 KSTAR와 ITER를 활용한 핵융합 기반 기술 연구가 목표로 제시되었다. 이를 위해 KSTAR 50초 이상 운전, ITER 리더십 강화, 기초연구 활성화 등의 추진계획이 발표되었다.

‘제3차 핵융합에너지개발 진흥 기본계획(‘17~‘21)’에서는 ITER 건설 상황²²⁾ 등에 따라 2단계 기간을 기존 10년에서 15년으로 조정하였다. 연장된 5년 동안의 정책목표로 핵융합로공학 기술개발 추진기반 확립을 제시하고 3대 중점 추진전략²³⁾을 수립하였다.

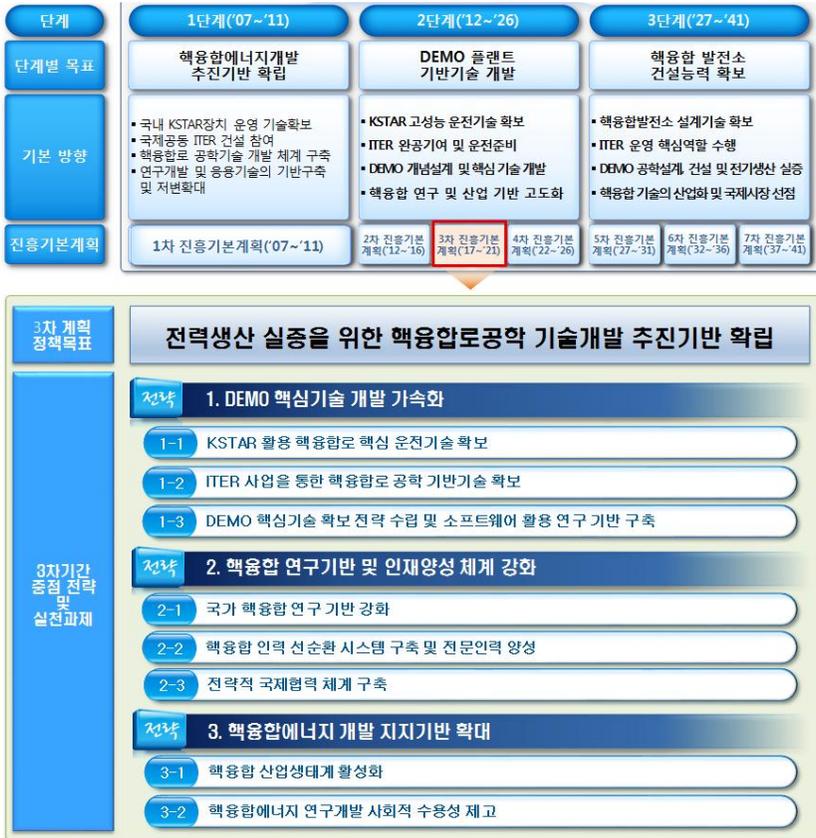
20) 핵융합에너지 연구개발 촉진 관련 최상위 계획으로 정책목표 및 기본방향, 추진체계와 전략, 기반 확충 등을 포함한 5년간의 정책 방향을 제시

21) 1단계(‘07~‘11) : 핵융합에너지개발 추진기반 확립, 2단계(‘12~‘16) : DEMO 플랜트 기반 기술개발, 3단계(‘17~‘21) : 핵융합 발전소 건설능력 확보

22) 2016년 11월에 ITER 이사회는 ITER 건설단계를 5년 연장하는 방안을 잠정 승인

23) ① DEMO 핵심기술 개발 기반확보, ② 핵융합 연구기반 및 인재양성 체계 강화, ③ 핵융합 에너지 개발 지지기반 확대 도출

제 2 장 거대과학 개념 및 현황



[그림 14] 제3차 핵융합에너지개발 진흥기본계획 전략 체계도

라. 기타(가속기 및 대형연구시설·장비)

대형연구시설 구축 관련 정책은 '제1차 국가대형연구시설 구축지도(2010)', '제2차 구축지도(2012)' 및 '국가연구시설 중기 확충·고도화 방향(2020)'이 대표적이다. 각 정책을 살펴보면, 2개의 구축지도(2010, 2012)는 구축 시설 및 개수 제시 등 로드맵 성격이 강하다. 반면, 확충·고도화 방향(2020)은 분야별 연구시설 총량 파악 및 투자 방향 제시가 중심인 것을 알 수 있다. 구축지도와 실제 투자가 연계되지 못하자, 구축 우선순위 설정 대신 구축 방향 제시 방식으로 변경된 것으로 파악된다.²⁴⁾

연구시설·장비 관리정책으로는 법정계획인 '제2차 국가연구시설·장비의 운영·활용 고도화계획(2018~2022)'이 수립 및 추진되고 있다. 고도화계획에서는 단순 관리가 아닌 효율적 활용을 위해 '연구시설·장비 통합관리제', '핵심연구지원시설(Core-Facility) 조성지원', '장비 활용 시스템 개선', '대형연구시설·장비 구축사업 종합사업관리(PM)' 등이 주요 과제로 제시되었다. 이 외에도 대형연구시설 관리정책인 '대형연구시설구축 내실화를 위한 사업 추진 개선 방안(2021)'이 수립 및 발표되었다. 그간 정책의 문제로는 구축보다는 운영 활용에 중점, 대형연구시설구축사업의 특성을 반영한 제도 및 관리체계 미흡 등으로 분석하였다. 이에 따라, 주요 과제로 '대형연구시설전문위원회 신설', '표준 추진절차 확립', '도입단계 검증 실효성 제고' '자체 사업관리 역량 강화' 등을 수립 및 추진 중이다.

24) '확충·고도화 방향(2020)'에서는 1, 2차 구축지도의 실효성 저하를 투자연계 미흡, 추진현황 모니터링 체계 부재, 구축목적 상설 시설 제외절차 미흡, 국제 공동구축체계 참여 미흡 등이 기인했을 것으로 분석함

[표 19] 대형연구시설 구축 관련 정책

구분	제1차 국가대형연구시설 구축지도(2010)	제2차 국가대형연구시설 구축지도(2012)	국가연구시설 중기 확충·고도화 방향(2020)
의의	대형연구시설 중장기 구축을 위한 범부처 계획 및 우선순위 제시	국가대형연구시설에 대한 중장기 구축계획을 제시	국가연구시설에 대한 구축·운영 방향 제시
활용	국가 차원의 대형연구시설 투자재원 배분 가이드라인	예산 배정 시에 우선 지원할 수 있는 국가대형시설 투자 우선 지침	연도별 투자 방향, R&D 단기 전략계획 수립 시 참고
비전	과학기술인프라 강국 실현을 통한 품격있는 나라 건설	과학기술 강국으로의 도약	혁신적 연구성과 창출을 위한 연구시설 운영
목표	① 2025년까지 국가 대형연구시설을 G-7 수준 달성 ② 국가 대형연구시 설을 Global Top 5개 구축	실효성 있고 체계적 국가대형연구시설 구축 전략 제시	연구시설에 대한 구 축·활용 관리체계 확립
시설수 /실적	69개(5대 분야) /7개 추진(10%)	13개(12대 분야) /5개 추진(38%)	구축 방향만 제시 (10대 분야)
시설 기준	구축비 50억 원 이상	구축비 500억 원 이상	-



[그림 15] 사업추진 개선방안 목표 및 중점추진과제

※ 출처 : 과기정통부(2021), 대형연구시설구축 내실화를 위한 사업추진 개선 방안

제 2 장 거대과학 개념 및 현황

한편, 가속기 분야에서는 ‘대형가속기 장기로드맵 및 운영전략(2020.03.)’을 통해 국내 대형가속기의 향후 계획이 제시되었다. 가속기의 종류별로 추진전략이 제시되었으며, 신규 구축이 아닌 기존 가속기의 활용 및 업그레이드에 대한 방향이 제시되었다.

[표 20] 대형가속기 구축·운영 현황

구분	주요성능	활용 분야	추진주체	비고
방사광	3세대 (원형) ○ 전자 회전 시 발생하는 방사광 이용 ○ 에너지 : 3.0GeV(전자)	물질의 정적 구조 분석	포스텍	운영 중 (1995~)
	4세대 (선형) ○ 전자가 휘 때 발생하는 X-선 이용 ○ 1천조분의 1초 광원 발생 ○ 3세대에 비해 100억 배 밝기 ○ 에너지 : 10GeV(전자)	물질의 동적 현상 실시간 관측, 3차원 분석		운영 중 (2017~)
양성자 (선형)	○ 양성자 가속 ○ 에너지 : 20MeV, 100MeV	물질을 변화/생성, 중성자 생산	원자력(연)	운영 중 (2013~)
중이온 (선형)	○ 헬륨, 탄소, 우라늄 이온 등을 가속 ○ 에너지 : 200MeV(우라늄)	핵물리, 응용과학 등 기초연구	IBS	구축 중 (~2021)
중입자 (원형)	○ 탄소 핵을 가속 및 암세 포에 조사 ○ 에너지 : 430MeV(탄소 핵)	의학용	서울대 병원	구축 중 (~2023)

※ 출처 : 과기정통부(2020), 대형가속기 장기로드맵 및 운영전략

제3장

거대과학 분야별-정책단계별 이슈

제3장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

제1절 거대과학 정책단계

1. 정책단계

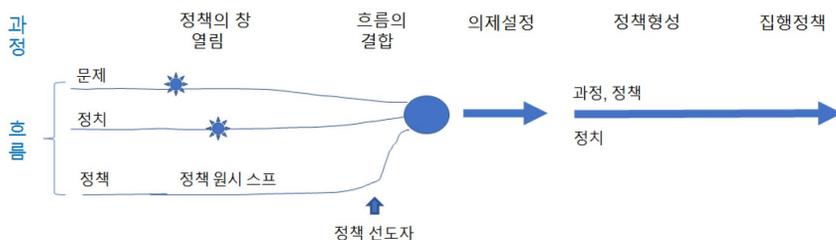
정책단계 또는 정책주기는 단계 간 구분이 명확하지 않고, 일정한 방향으로 추진되지 않을 수 있으므로 연구자마다 단계 구분 및 정의에 대한 견해가 다르다. 다만, 정책의 결정이 특정 문제를 해결하기 위한 최적의 대안을 선택하는 행위라는 점에서, 크게는 문제의식, 정책형성·결정, 집행, 평가의 단계로 진행된다고 볼 수 있다.(고용수, 2005) 실제로, 많은 연구에서 Howlett(2003)의 정책주기모델(의제설정, 정책형성, 정책채택, 정책집행, 정책평가)을 따른다. 각 단계에 대한 정의 및 주요 내용은 다음과 같다.

의제설정은 특정 커뮤니티의 의견이나 여론 등을 통해 이슈들이 제기되고, 이러한 이슈가 정책입안자들에 의해 정책의제로 채택되는 단계이다. 즉, 정책입안자에 의해 여러 사회 이슈 중 하나가 정책의제로 선별되는 과정이다. 정책형성은 선별된 정책의제를 해결하기 위해 적절한 정책목표를 설정하고, 목표달성을 위한 다양한 대안들이 도출되는 단계이다. 정책결정 또는 채택은 정책목표 달성을 위한 가장 합리적인 대안이 채택되는 과정이다. 여기서 최적의 정책대안은 정책의 실현 가능성, 소망성 등을 기준으로 채택되게 된다. 정책대안들은 의제설정 단계에서 제시되는 경우가 많으며, 의제설정에 누가 참여하나에 따라 정책결정 자체에 큰 영향을 미치게 된다. 정책집행은 형성된 정책을 구체화하여 추진하는 단계로, 경우에 따라 정책의 수정·관리까지 포함하게 된다. 정책평가는 집행된 정책의 효과, 영향, 문제점 등을 분석 및 평가하는 단계로, 이후 정책의 바람직한 집행 방향과 정책 수정·재수립 등에 판단 근거를 제공하게 된다.

2. 거대과학 정책단계

거대과학 정책단계도 큰 틀에서는 일반 정책단계와 상이하지 않다. 다만, 일반 정책과는 달리 정책단계에 참여하는 행위자의 범위가 협소하다. 이는 과학기술정책이 대중들에게 비정치적인 분야로 인식되는 경향이 있고, 각 분야에 대한 높은 전문성으로 인해 다양한 분야의 참여를 제한할 수 있기 때문이다.(김영삼, 2002) 이러한 현상은 거대과학 분야에서 더욱 심화 될 수 있다. 일반적으로 거대과학의 복잡성과 특수성이 비거대과학 분야보다 높고, 성과의 직접적인 혜택이 특정 과학기술 커뮤니티에 집중될 가능성이 크기 때문이다.

가. 거대과학 정책단계 관련 문헌분석



[그림 16] 정책단계에 적용한 Kingdon의 다중흐름모형

※ 출처 : 이승현(2018), 다중흐름모형을 적용한 기초과학정책 결정과정 분석 : 국제과학비즈니스벨트 사례

황병상(2004)은 거대과학 분야 중 하나인 핵융합 R&D 정책 분석에 정책단계 개념을 도입한 바 있다. 해당 연구에서는 정책단계를 정책의제 형성, 정책결정, 정책집행으로 구분하고 단계별 정책 네트워크가 어떻게 구성되고 작동하는지를 분석하였다. 이승현(2018)은 정책단계를 3단계(의제설정, 정책형성, 정책집

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

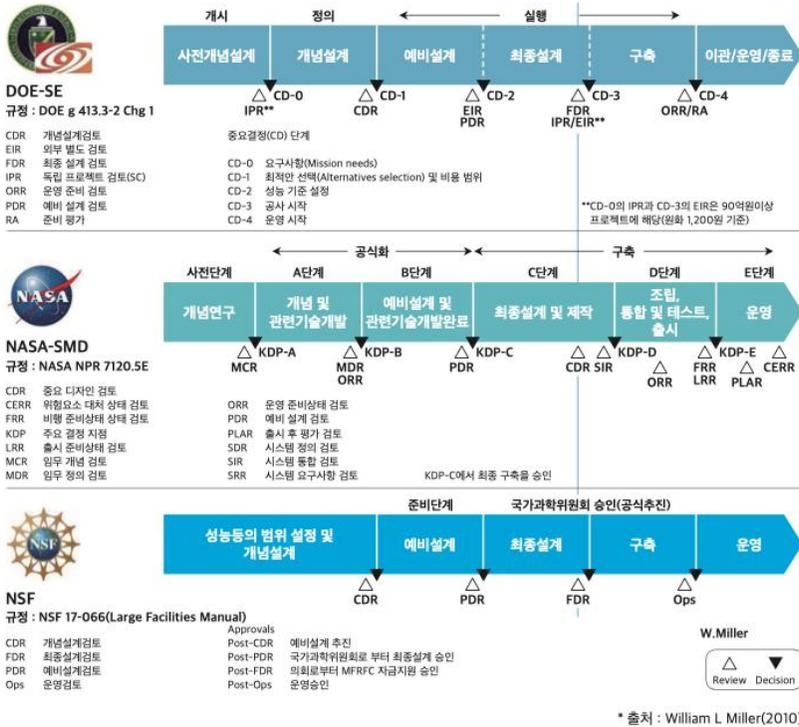
행)로 구분하여 국제과학비즈니스벨트(중이온가속기) 정책을 분석하였다. 해당 연구에서는 다중흐름모델(문제, 정책, 정치)을 통해 어떠한 사회정치적 요인들이 각 정책단계에 영향을 미쳤는지를 분석하였다.

거대과학 정책단계와 더불어 대형연구시설·장비의 생애주기에 관한 연구 관심도도 높아지고 있다. 보통의 R&D와는 달리 대형연구시설·장비라는 성과는 물리적으로 가시적이며 생애주기(Life cycle)를 가지고 있다. 김용주(2020)는 연구인프라에 대한 전주기 관리 필요성을 강조하면서 연구인프라의 생애주기 단계를 구분(개념도출, 디자인, 예비, 구축, 운영, 종료)하여 해외 선진사례를 분석하였다. 표 21과 같이 대부분 국가에서 개념도출 단계부터 연구인프라의 관리가 시작된다는 것을 강조하였다. 함선영(2021)은 국내 대형연구시설·장비 구축사업의 큰 문제 중 하나로 사전연구 부족을 지적하며, 개념도출 단계의 중요성을 강조하였다.

[표 21] 국가별 연구인프라 생애주기 구분

생애주기 단계	미국	EU	독일	영국	프랑스
개념도출	○	○	○	○	
설계	○	○	○	○	
준비	○	○		○	
구축	○	○	○	○	○
운영	○	○	○	○	○
종료	○	○		○	

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안



[그림 17] 미국 DOE, NASA, NSF 연구인프라 생애주기

※ 출처(재인용) : 김용주(2020), 국가별 연구인프라 투자결정 및 모니터링 체계 분석 및 정책이슈 도출

미국의 경우, 정부 기관별로 세부내용은 상이하나 크게는 대형연구시설 생애주기를 사전기획, 설계, 구축, 운영 등으로 정의 및 관리하고 있다. 또한, 단계별로 평가와 의사결정 과정²⁵⁾을 거치게 된다. 주목할만한 점은 사전개념설계, 개념연구 등 사전 R&D를 추진하고 이에 대한 평가가 이후 사업 추진이 공식화된다는 점이다.²⁶⁾ 그리고 구축뿐만 아니라 운영단계도 중요하게

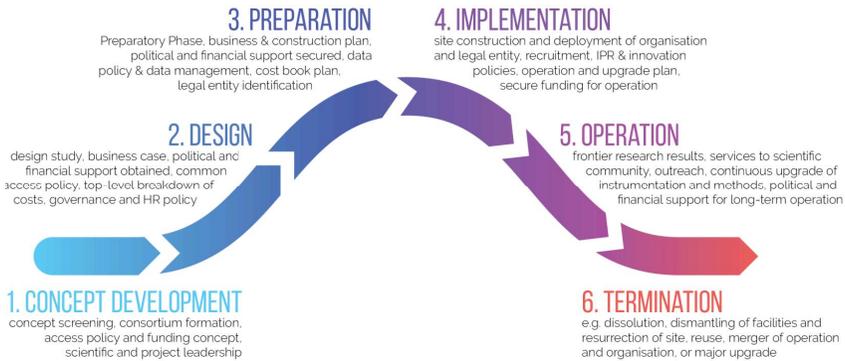
25) DOE : CD-n, NASA : KDP-n, NSF : CDR, PDR 등

26) DOE에서는 대형연구시설의 핵심기술 및 장치의 사전R&D를 지원하고, CD-0 미션 필요성이 인정되면 CD-1에서 개념설계에 대한 검토와 구축비의 범위를 산정함

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

인식하고 관리하고 있다. 대형 연구인프라의 경우 20~40년 정도의 수명을 예상하며, 총 구축비의 약 10%가 연간 운영비로 사용된다고 판단하고 있다. 이에 따라, 운영비가 구축비를 상회하는 경우가 많아, 운영단계 진입 전에 연간 투입 필요 예산을 결정하게 된다.

유럽연구인프라전략포럼(ESFRI)에서는 FP(Framework Programme) 및 GSO(Group of Senior Officials on Global Research Infrastructures) GRI(Global Research Infrastructures) 관련 범유럽 차원의 모든 대형 연구인프라 투자에 생애주기 개념을 적용하고 있다.(그림 18) EU 및 다수의 EU 회원국에서는 대형 연구인프라 투자의 3가지 27) 계획 프레임워크 중 하나로 생애주기 개념이 포함되어 있는 것이다.



[그림 18] 연구인프라의 생애주기

※ 출처 : ESFRI(2019), Roadmap 2021 Public Guide

27) 1. 국가 및 유럽 차원의 다년도 예산 또는 사업(보통 4~7년), 2. 국가 및 ESFRI는 대중(경우에 따라 재단 또는 사업)이 투자를 동의하는 연구시설 구축(업그레이드)에 우선 투자, 3. 연구시설 전체 또는 일부 생애주기(연구시설의 규모 및 투자의 복잡성에 따라 기간을 변동 가능)

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

EU RI-PATHS(Research Infrastructure imPact Assessment paTHways)는 연구인프라의 과학적, 사회적, 경제적 영향평가를 위한 툴킷을 제공한다. 툴킷 가이드에 따르면 연구 인프라의 영향평가는 정책단계 전체에 영향을 주며 정책단계-연구인프라 생애주기 및 영향평가를 연계하여 관리하고 있다. RI-PATHS 툴킷에서는 앞서 언급된 Howlett(2003)의 정책주기모델에 따라 정책단계를 설정하고 있다. 주목할만한 점은 연구인프라 생애주기를 단순히 관리 또는 정책집행에만 종속시키는 것이 아니라, 전체 과학기술 정책단계와 주기를 같이한다는 점이다. 이는 앞 절에서 살펴본 관리 중심으로 추진되는 우리나라 대형연구시설·장비 정책과의 확연한 차이이다.

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

[표 22] 정책단계 및 연구시설(RI) 생애주기 단계(EU)

정책단계	연구시설 생애주기 단계	연구시설 생애주기 정의
의제설정	개념도출	<ul style="list-style-type: none"> ○(정의) 과학 커뮤니티 기반 과학적 수요 및 목적에 따른 새로운 연구시설 개념을 도출하는 단계 ○(주요활동) 개념검토, 컨소시엄 구성, 활용 정책 및 재원조달 방안 구상 등
전략/정책형성	설계	<ul style="list-style-type: none"> ○(정의) 과학적 개념 및 연구시설의 기술적 실현 가능성을 증명하고, 잠재적 이용자 커뮤니티를 분석하는 단계 ○(주요활동) 설계 연구, 종합비용분석, 활용정책, 거버넌스 및 인력정책 마련 등
우선순위 설정	준비	<ul style="list-style-type: none"> ○(정의) 연구시설 구축·활용을 위한 체계를 완벽히 갖추는 단계 ○(주요활동) 사업·건설 계획, 정책·예산 지원책, 데이터 관리 정책 마련 등
집행	구축	<ul style="list-style-type: none"> ○(정의) 구축을 위한 수년간의 집중 투자 단계 또는 중심시설(분산형)에 대한 세부 협약 및 집중 협상 단계 ○(주요활동) 시설 구축, 조직 구성, 운영 및 업그레이드 계획 수립, 운영자금 확보 등
모니터링 및 평가	운영	<ul style="list-style-type: none"> ○(정의) 첨단연구와 이용자 수요를 충족시키는 과학 서비스를 제공하는 단계 ○(주요활동) 선도연구성과 도출, 하드웨어 및 소프트웨어 업그레이드, 장기운영방안 마련 등
피드백	종료	<ul style="list-style-type: none"> ○(정의) 분야별로 상이하나, 조직의 해산, 시설 해체, 부지 복원 등이 이뤄지는 단계 ○(주요활동) 시설 해체, 시설 용도 변경, 조직 합병, 부지 복원 등

※ ESFRI(2019) 및 RI-PATHS(2020) 자료를 통해 저자 재구성

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

나. 거대과학 정책단계 설정

본 연구에서는 정책단계를 총 3단계(의제설정, 정책형성·결정, 정책집행)로 설정하였다. 또한, 정책단계별로 거대과학의 대형연구 시설·장비 생애주기를 매칭하여, 단계별 구분을 명확화하고 이슈 분석을 체계화하였다. 참고로, 정책집행 단계 내 정책 구체화는 정부R&D 예산 편성 단위인 세부사업 기준으로 설정하였다.

각 단계의 정의 및 주요활동 등은 표 23과 같다.

[표 23] 거대과학 정책단계

의제설정	정책형성·결정	정책집행
○(정의) 특정 커뮤니티에서 이슈들이 제기되고 정책결정자의 관심 등에 따라 정책의제로 설정되는 단계	○(정의) 특정 문제를 해결하기 위해 정책목표가 설정되고 정책대안이 선별되는 단계	○(정의) 정책이 사업 또는 예산으로 구체화되고 집행되는 단계
○(주요활동) 이슈 제기, 문제 인식, 의제 채택	○(주요활동) 정책목표 설정, 대안검토 및 채택, 세부정책 수립	○(주요활동) 사업기획, 사업 사전평가, 사업 수행
○(연구시설·장비 주기) 개념도출 및 제시	○(연구시설·장비 주기) 설계 및 구축기반 조성	○(연구시설·장비 주기) 구축 및 운영

제2절 우주 R&D 정책단계별 이슈

1. 개요

가. 거대과학으로서의 우주의 개념 및 추진 단계

1) 우주 분야 R&D 특성 및 탄생 배경

우주 분야 R&D는 기초과학이면서 전략기술, 안보 영역, 국가 경제, 미래성장동력까지 광범위한 분야에 영향을 미친다. 우주기술은 기초과학으로 시작되어, 미지의 세계인 우주에 어떻게 도달할 수 있을까 그리고 사람이 살 수 있을까에 대한 질문과 과학적 추론을 통해 연구가 진행되었다. 19세기 말 러시아의 과학자 치올코프스키는 로켓을 통해 우주에 도달할 수 있을 것이라는 가설을 세웠고, 1903년 연구에서 액체추진제를 통해 속도와 거리를 낼 수 있을 것을 언급한 바 있다. 1926년 미국의 고다드 박사는 실제로 액체로켓을 만들어 발사했고 이후 이를 개선하여 우주 발사체의 기초를 닦았다.

우주개발은 미지의 세계 탐험이라는 상징성과 첨단기술력의 필요성 때문에 20세기 중반, 미국과 소련의 체제경쟁을 가속했다. 최초의 인공위성인 소련의 스푸트니크 1호, 최초의 우주인인 소련의 가가린, 최초의 달착륙선 아폴로 11호로 이어지는 지속적인 경쟁은 우주기술의 비약적인 발전을 가져왔다. 다만, 거대과학의 특성상 천문학적인 예산이 필요했기 때문에 체제경쟁 이후 하나의 국가가 전담하는 유인 우주탐사 프로젝트들은 하향추세에 접어들었다. 그러나 인공위성을 올려서 상대국을 정찰할 수 있다는 안보적 관점이 부각되면서, 주요국들은 우주기술 확보에 다시 주력하게 된다. 또한, 인공위성에서 확보한 영상정보가 정찰을 넘어서, 기상, 환경, 재난관리, 농업, 해양 등

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

다양한 분야에도 활용 가능하다는 것이 알려지면서, 우주 관련 설비는 경제와 직접적으로 관련된 인프라로 인식되게 되었다.

최근 들어 뉴스페이스 시대에 들어오면서, 그동안 정부가 주도했던 우주개발에 민간기업들이 진입하고 있으며, 우주 인터넷, 우주 관광, 우주자원과 같은 새로운 패러다임의 산업이 등장하여 우주에 대한 투자가치가 더욱 커지고 있다.

2) 우리나라 우주개발 연혁

우리나라는 1993년부터 위성 중심의 개발을 시작했고, 2001년부터는 발사체에 투자를 늘려왔으며, 2016년부터는 달 탐사 사업을 시작하여 우주탐사 분야의 기틀을 마련하고 있다.

위성 분야는 선진국대비 늦은 착수와 작은 예산에도 불구하고 경쟁력은 상당히 확보한 것으로 분석되고 있다. 다목적 실용위성 시리즈 개발로 세계 수준의 지구관측위성 기술을 확보하였으며, 천리안 위성 개발로 정지궤도 위성 기반 기술을 확보했다. 또한, 고해상도 저궤도위성(광학 0.55m~0.7m, 적외선 5.5m, 레이더 1m), 정지궤도 위성(해양, 기상, 환경) 운영으로 24시간 한반도 관측정보를 수집하고 있다. 고해상도 저궤도 광학 관측 위성은 자력으로 개발할 정도로 기술 수준이 높으나, 위성 탑재체 및 정지궤도 위성기술은 상대적으로 기술 수준이 낮은 편이다. 또한, 공공수요의 충족을 위해 특정 시한까지 위성개발을 완료해야 하는 체계사업의 특성으로 인해 핵심부품 개발에는 미흡한 점이 있다.

발사체는 1990년대 과학로켓을 시작으로 2001년부터는 투자를 확대하여 실용위성급 발사체인 한국형발사체 독자개발 단계까지 발전해 오고 있다. 과학로켓과 나로호 개발을 통해 우주 발사체 기반 기술을 확보하였으며, 나로우주센터 구축으로

우주발사장을 확보하였다. 발사체는 비확산체제의 핵심으로서 다른 국가에서 기술이전이 불가하므로 독자개발을 해야 한다. 이 과정에서 기술문제 발생, 초기 예산투입 지연 등의 문제가 생긴 바 있어, 발사체는 아직 선진국과의 기술격차가 존재한다고 볼 수 있다.

한편, 고해상도 위성영상 획득은 위성 정보 공공활용을 가속하고 있다. 위성영상을 지도 제작, 국토·자원 관리 등에 활용하고 있으며, 천리안 위성으로는 기상·해양자료 획득 및 위성통신 시험서비스를 수행하고 있다. 위성개발에 집중하다 보니 위성 정보 및 데이터를 사용하는 위성 활용 수요를 반영하지 못하는 지적도 제기된 바 있다. 이에 따라 위성 수요 및 공급 확대에 대비한 위성 정보 통합 활용·지원체계 구축을 추진 중이다.

우주탐사는 비교적 최근에 진입한 분야다. 시험용 달 궤도선 과학탐재체 선정·개발 착수와 시스템 기본설계가 2016년에 착수되었다. 다만, 기술 역량과 예산의 한계로 달 탐사 사업이 당초 계획대로 진행되지 않아, 발사계획은 2022년으로 연기됐다. 또한, 기획된 2단계 중 1단계를 먼저 추진한 후, 성과평가 단계를 거쳐 후속 단계를 추진하는 것으로 변경됐다.

3) 우주개발이 추진되는 주요계기

가) 개발의 관점

우주 공간은 경제적·안보적 관점에서 한 국가의 중요한 전략 자원이 될 수 있으므로, 우주에 진입하기 위한 발사체 기술을 확보할 필요가 있다. 위성영상정보는 관측, 지도 제작, 농업, 해양, 환경, 기상 등 다양하게 활용되기 때문에, 위성을 독자

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

개발할 수 있는 능력을 확보하는 것이 필요하다. 아울러, 위성의 보유는 상대국 정찰, 정밀유도무기 운용, 작전통신에 필수적이고, 발사체는 미사일 기술과 토대가 같으므로 국제적으로 우주기술의 비확산 규제체제가 마련되어 있다. 따라서 독자적으로 기술을 개발하지 않고 국가에 필수적인 우주 자산을 운용하는 데는 한계가 있고, 첨단기술이기 때문에 거대예산과 장기간의 투자, 전문적인 인력 유지가 요구된다.

나) 활용의 관점

우주기술은 그 자체로 전략기술이기도 하지만, 우주기술을 활용하는 서비스를 통하여 국민 삶의 질 향상에 이바지할 수 있다. 이미 위성영상정보는 재난관리, 농업, 해양, 환경, 기상 등에 필수적으로 활용되고 있으며, 위성 TV, 위성인터넷, 위성항법 등으로 국민의 생활에 밀접하게 연결되어 있다. 2020년 상업적 세계 우주산업 중 GPS, 위성 TV, 위성인터넷 등 위성정보 활용서비스 시장은 약 280조 원, 2040년에는 540조 원 이상이 될 것으로 예측된다. 우리나라가 보유한 다목적 실용위성 2호, 3호, 3A호, 5호 및 천리안 위성 1호, 2A호, 2B호 등으로 이미 2021년 6월까지 공공수요를 위해 26만 장 이상의 영상을 배포했다. 수입대체효과도 2021년 6월까지 2조 1,459억 원에 달한다.

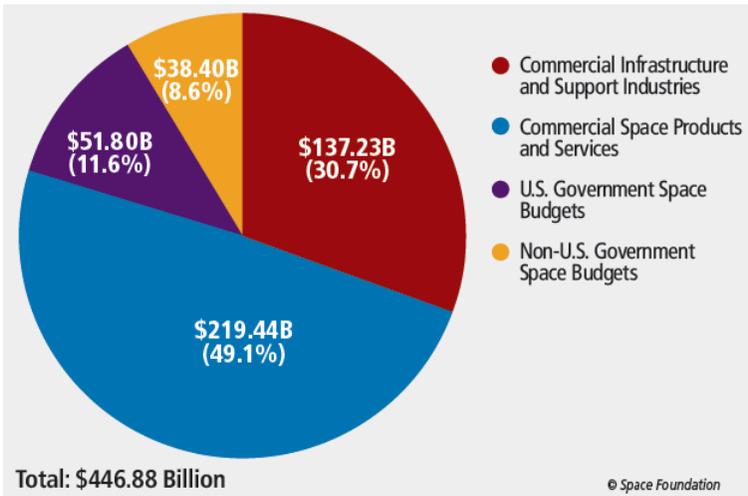
다) 경제의 관점

우주기술은 현재 및 미래성장동력으로서 세계적으로도 우주경제 규모가 급속도로 커지고 있다. 2020년 세계 우주산업 규모는 약 4,470억 달러(약 536조 원)로 전년 대비 4.4% 증가하면서 사상 최고치를 기록하였다. 모건스탠리는 전 세계 우주산업 규

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

모가 2040년에 1조1천억 달러(약 1,320조 원)로 성장할 것으로 전망한다.

최근에는 저비용·소형화 등 새로운 우주개발 패러다임인 뉴스페이스(New Space)의 등장으로 기존 우주산업의 생태계에서 벗어난 새로운 우주산업의 가치에 대한 기대감이 퍼지고 있다. 우주 혁신기업들의 과감한 도전으로 우주 인터넷, 우주자원 채굴, 우주 관광 등 새로운 비즈니스가 창출되고 있다.



[그림 19] 2020년 글로벌 우주활동

※ 출처 : Space Foundation Database

라) 안보의 관점

우주 자산은 이미 필수적인 사회 인프라로 인식되고 있으므로, 안보(security), 안전(safety)의 개념을 도입할 필요가 있다. 이미 국제 사회는 우주 안보 질서체제를 표방하고 있다. 우주 자산의 안전한 운용을 위한 우주물체의 추적, 우주위협 대비, 우

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

주기상, 자연 우주물체 관측 등과 같은 SSA(우주 상황인식)와 우주 활동국 및 우주물체 수의 증가, 우주 쓰레기의 기하급수적인 증가에 대응하기 위한 STM(우주교통관리) 개념이 이에 해당한다. 또한, 주요국들은 패권경쟁으로서 우주 안보 개념을 받아들이고 있다. 우주가 장기적으로 경제·정치·안보의 전장임을 확인하고, 우주를 국제외교의 중요한 의제로 설정하고 우주 활동에 대한 국제규범 수립과 지도력 확보에 노력하고 있다.

나. 각국의 우주 분야 국가 R&D 추진사례

1) 해외 우주개발 사례 개요

상업적 및 군사적 목적으로의 우주 분야 투자확대는 지속적인 증가추세이다. 과거 러시아와 미국이 절대적인 패권을 누리던 체제로부터 점차 10여 개국이 넘는 나라들이 위성과 발사체 개발을 위해 경쟁을 벌이는 양상이다. 미국의 Space Report(Space Foundation 발간)에 따르면, 전 세계적으로 2020년 우주 관련 정부 예산은 902억 달러로 지난 몇 년간의 성장 추세를 계속 유지하고 있다. 또한, 뉴스페이스 시대에 들어서면서, 민간기업들의 참여가 급속하게 늘어나고, 우주 분야에서도 수익 모델을 창출할 수 있다는 획기적인 인식 변화가 일어나고 있다. 일론 머스크의 SpaceX사가 주도하는 Starlink 프로그램은 1만 2천 기의 초소형 통신위성을 궤도에 본격 진입시키고 있고, Blue Origin사, Virgin Galactic사 등도 뉴스페이스 체제하에 위성통신, 민간 우주여행 서비스를 제공하는 사업을 진행하고 있다.

[표 24] 2020년 주요국 정부 우주 예산

국가/기관	예산 (U.S.Dollars)
미국	\$51.8B
중국	\$13.4B
일본	\$3.1B
프랑스	\$3.1B
러시아	\$2.5B
독일	\$2.6B
인도	\$1.3B
한국	\$0.6

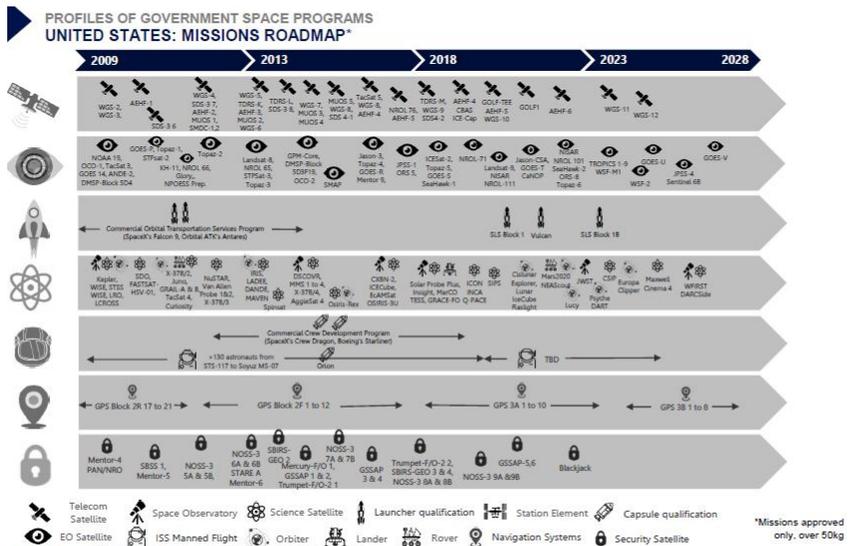
※ 출처 : Space Foundation 'Space Report 2021 Q1'

2) 미국

Space Report에 따르면, 2020년 미국의 우주 예산은 518억 달러로 역사상 가장 높은 수준에 이르렀으며, 이 중 약 49%가 NASA, NOAA 등 우주기관에, 51%는 국방·기밀 프로그램에 지출되었다. NASA는 모든 분야의 우주프로그램을 운영하고 있는데, 2020년에 NASA는 심우주 탐사 시스템개발에 45억 달러, 탐사 R&D에 15억 달러, 미래혁신기술개발 프로그램에 11억 달러, 우주과학에 70억 달러, 국제우주정거장·발사체 등 우주 운용에 41억 달러 등을 배정하였다. 달은 향후 10년 동안 국제우주정거장(ISS)을 넘어선 유인 우주 비행의 중요한 차기 목적지로서, NASA는 아르테미스 프로그램을 통해 2024년까지 달 남극에 우주인을 착륙시키겠다는 계획을 발표한 바 있다. 아르테미스 임무를 지원하기 위해 유인착륙 시스템을 개발한 3개 업체와 계약을 체결하기도 했다. 발사체와 관련해서는, NASA는 지난 2010년에 지구 저궤도(LEO)를 넘어 우주탐사를 위한 대형 로켓인 SLS(Space Launch System)의 개발을 시작하여

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

2022년에 달을 향한 유인 임무를 수행할 예정이다. 우주과학 분야의 경우, 달 착륙 운송서비스에 대한 상업적 계약을 통해 향후 10년간 26억 달러를 민간기업에 투자할 계획이며, 화성 탐사를 위해 MARS 2026 로버를 단기 대표 임무로 삼고, 2026년 샘플리턴 임무를 통해 화성 탐사를 성장시킬 계획이다. 지구관측과 관련해서는 NASA와 USGS(미 지질자원국)가 수행한다. ESM(Earth Systematic Mission) 프로그램으로 관측을 통한 다양한 과학 임무, ESSP(Earth System Science Pathfinder) 미션을 통한 허리케인예보능력 향상, 우주기술을 통한 해양 모니터링이나 해양 미세플라스틱 추적 등의 도전적인 임무를 수행하고 있다.



[그림 20] 미국 우주개발 미션 로드맵

※ 출처 : Euroconsult 2019

2) 중국

중국은 신흥패권 국가로 그동안 2010년대까지의 과업인 우주개발 '기반확보'에서 기반의 '활용'으로 방향을 전환하고 있다. 또한, 더 큰 로켓, 더 정교한 위성의 개발과 우주정거장 등 기타 우주 프로젝트를 포함하는 제13기 5개년 계획('16~'20)으로 우주개발 전략을 정립하였다. 또한, 제14기 5개년 계획('21~'25)에서 자립·자강을 강조하는 과학기술전략을 발표한 바 있다. 중국 우주프로그램은 CASC(항천과기집단공사) 등 국영기업에 의해 수행되며, 2020년 정부 우주 예산은 공개되지는 않았으나 134억 달러로 추산된다. CASC 산하에 10개 이상의 자회사가 있으며, 380억 달러의 매출과 18만 명의 직원을 보유하고 있다. 이러한 국영기업의 독점 형태 지속에도 불구하고 소형로켓 생산, 부품 시스템 등 틈새시장 발생 가능성은 상존하며, CASC도 사기업 스타트업에 투자를 시작하고 있다. 중국은 유인 우주탐사 프로그램으로 향후 10년간 250억 달러의 예산을 투입할 예정이며 창어 달 탐사, 텐윈 화성 탐사와 2020년대 중반 목성 탐사 등 우주과학 및 탐사 계획이 있다. 달 탐사 시리즈인 창어 미션은 최근 2020년 12월 창어5호가 달까지 갔다가 달에서 채집한 표본을 가지고 지구에 귀환하였고, 향후 창어6호가 달의 남북극지대에서 샘플채취, 궤도 랑데부 등을 시행할 예정이다. 발사체는 2020년 5월에 장정5B호가 지구 저궤도에 고중량 페이로드를 쏘아 올리는 데 성공함으로써 획기적인 전기를 마련했다. 향후 유인 및 화물 미션을 지속 수행하며, 장기적으로는 장정9호를 개발하여 유인 달 탐사 임무를 수행할 계획이다. 2020년대 들어 중국은 지구 저궤도(LEO) 상의 브로드밴드 위성군을 다수 발사할 계획을 갖고 있으며 가오편(EO)과 평원(기상) 위성군의 개발을 위해 지구관측 분야와 기상 분

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

야의 예산 지출이 증가하고 있다. 또한, 베이두 항법 위성체계를 구축하고 있으며, 이는 서구 항법 시스템에 대한 의존도를 줄이는 데 목적이 있다.

3) 일본

일본은 2020년 6월에 10년 단위의 우주 기본계획 개정을 한 바 있으며, 우주 안보의 중요성 강조와 재해대책 등에서의 활용 강화를 내용으로 담고 있다. 아울러 '자립적 우주 이용 대국'을 전면에 내세워 정보 수집 위성을 현재 4기에서 10기로 늘리 계획이며, 지역 항법 위성인 QZSS의 운용을 강화하고 있다. 2020년 일본의 우주 예산은 31억 달러에 달하며, 위성, 발사체, 우주탐사, 유인 우주 활동, 위성 활용, 우주 안보 등 모든 분야에서 우주개발 프로그램을 갖고 있다. 유인 우주 활동과 관련해서는 2020년에 3.4억 달러를 투자하였고, 국제우주정거장(ISS)의 장기 운영을 위한 파트너십을 2024년까지로 연장하여 수행하고 있다. 발사체는 지구 천이 궤도(GTO)에 최대 6톤을 올릴 수 있는 H-2A와, 저궤도에 19톤, 지구 천이 궤도에 8톤을 올릴 수 있는 H-2B를 운영하고, 재사용 가능한 H-3로켓을 개발 중이다. 자연재해가 많은 일본에서는 지구관측위성을 중요하게 생각하는데, 2014년에 ALOS-2호를 발사한 이후, 후속으로 Advanced SAR위성 2기를 2021년 발사 목표로 개발 중이다.

4) 유럽

유럽은 국가별로 우주개발을 하는 부분과 유럽이 하나의 공동체(유럽연합, 유럽우주청)가 되어서 우주개발을 하는 부분으로

구분된다. 프랑스와 독일은 유럽우주청(ESA)과 유럽연합에 분담금을 내면서도 국가적 차원의 우주개발에 많은 투자를 하고 있다. 유로컨설팅지에 따르면 유럽연합은 2020년 21억 유로(24.6억 달러)의 예산을 썼으며, 지구관측과 항법에 중점을 두고 있다. 지구관측위성 사업인 코페르니쿠스(Copernicus) 미션은 2020년 6.5억 유로(7.6억 달러)의 예산으로 수행되었으며, 2014년에 발표된 코페르니쿠스 데이터 정책에 따라 고해상도를 제외한 위성데이터를 무상으로 공개하고 있다. 위성항법 사업인 갈릴레오(Galileo) 미션은 항법이 경제에 직접적인 영향을 주는 인프라임을 인식하고, 미국의 GPS에 대한 의존도를 낮추기 위해 수행되고 있다. 현재 24기의 위성군과 2기의 궤도상 예비용 위성을 보유하고 있다. 유럽우주청(ESA)은 회원국들로부터 분담금을 받아서 의욕적인 초국가 프로젝트를 수행하는 지역 기반 전문국제기구로서 우주에 대한 유럽의 액세스를 보장하고, 유럽의 우주산업 발전에 기여하며 지구환경 감시를 하는 동시에 지구, 태양계, 우주 전체에 대한 과학적 발견의 폭을 넓힌다는 목표를 설정하고 운영되고 있다. 2020년 ESA의 예산은 49억 유로(57억 달러)에 달하며 매년 증가하고 있으며, 주요 프로그램으로는 발사체인 아리안 프로그램, 우주과학 및 탐사 프로그램, 국제우주정거장(ISS), 지구관측 프로그램 등이 있다.

5) 러시아

러시아는 냉전 시대에 미국과 패권을 다투던 우주 강국이었으나 소련 해체 이후에 경제적으로 회복되지 못하고 있는 실정이다. 최근 들어 화려한 과거를 부활시키기 위해 야심 찬 계획을 세우고 전 세계 우주산업에서 러시아의 점유율을 높이기 위한 전략을 수립한 바 있으나, 빈번하게 발생하는 예산삭감으

로 인해 다수의 우주프로그램들에 지연이 발생하고 있다. 또한, 2018년 러시아 우주 예산은 42억 달러였으나, 2020년에 25억 달러로 하락하였다. 발사체는 여러 차례의 예산삭감과 발사 실패로 우주청(Roscosmos)은 발사체 모델을 단순화하고 노후 발사체를 퇴역시키는 조치를 단행하되, 3대의 새로운 발사체를 개발하기로 하였다. 2018년에 러시아 정부는 달 궤도로 27톤, 지구 저궤도에 70~80톤을 쏘아 올릴 수 있는 예니세이 초중량 로켓개발을 승인, 2028년까지 개발을 완료할 계획이다. 러시아는 유인 우주활동으로 ISS 미션을 계속하고, 통신위성 사업으로 익스프레스(TV 방송), 고넷(군통신), 루치(데이터 릴레이) 미션을 운영하고 있고, 향후 스피어 프로젝트를 통해 IoT 시장에 진입하고자 함과 동시에 지구관측 및 과학탐사 프로그램도 계속 운영 중이다.

2. 의제설정 단계 이슈

가. 인공위성 분야(위성개발 및 위성 활용센터 운영 등)

정부 차원의 정책이 수립되기 전에, 1989년부터 1992년까지 KAIST에서 영국 Surrey대학의 기술을 이전받아 42kg급 소형 인공위성을 제작하여 발사하게 된다. 이것이 우리나라 첫 위성으로 등록된 우리별 1호이다. 이후 정부는 국제적인 추세에 따라 항공·우주 관련 기술의 자체개발능력 확보와 이를 통한 산업계 기술지원 업무를 효율적으로 수행하기 위한 목적으로 한국항공우주연구원을 설립(기계연구원 부설)하고, 1996년에 독립된 기관으로 출범시켰다.

이러한 일련의 활동은 당시 항공우주기술의 특성과 중요성에 대한 이해가 높아진 것에서 비롯된 것이다. 다만, 거대과학이라는 우주의 특성상 특정 커뮤니티에서 이슈를 제기해서 정책의제로 설정되었다기보다는 국가 차원에서 그 중요성에 관한 관심이 커지면서 우주 정책이 하나의 의제로 채택되었다고 볼 수 있다. 이러한 흐름은 현재까지도 지속되고 있어서 위성사업의 추진에 있어서 국가계획에 따른 정부 주도 방식을 유지하고 있다.

이처럼, 정부가 직접 의제설정을 선도하다 보니 충분한 사회적 환경, 커뮤니티의 저변확대가 이루어지지 않은 상태에서 정책의제가 선택되는 양상이다. 위성사업에서 보듯이 수요부처인 위성 활용 부처들의 의견 반영 보다, 주로 위성 개발·제작 자체에 치중하는 경향이 있다. 다만, 최근에는 차세대중형위성 등의 위성개발에서 수요부처 의견이 많이 반영되는 추세이다. 위성 활용센터의 운영의 경우, 위성 활용부처나 기관들이 요구하는 위성 정보 및 위성데이터의 활용기법과 방안과 관련된 R&D보다 관제, 수신 등에 집중되는 경향을 보인다.

나. 우주 발사체 분야(발사체 개발 및 우주센터 운영 등)

정부 차원 정책이 수립되기 전, 1950년대 국방과학기술연구소와 인하공대에서 교수와 학생 중심으로 로켓연구가 단기간 이루어진 적이 있다. 또한, 1960년대 공군사관학교에서 로켓연구가 10여 년 수행된 적이 있다. 이후, 본격적인 발사체 개발은 한국항공우주연구원에서 착수되었다. 첫 성과는 1990년부터 1993년까지 개발해서 발사에 성공한 과학로켓(KSR-1)으로 볼 수 있다.

발사체 분야에서도 각 연구기관의 R&D활동이 정책의제 설정에 영향을 주었겠으나, 커뮤니티의 자체 합의라기보다 국가 차원에서 하향식으로 정책의제가 채택되었다고 볼 수 있다. 이처럼, 정부가 직접 의제설정을 선도하다 보니, 충분한 사회적 환경 조성, 커뮤니티의 저변확대 등이 이루어지지 않은 상태에서 의제가 채택되는 때도 있다. 이는 결과적으로는 사업이 진행되는 과정(정책집행) 또는 후속 사업 논의 단계에서, 지속해서 발사체 사업에 대한 실효성 논란이 발생하는 원인이 될 수 있다.

3. 정책형성·결정 단계 이슈

가. 인공위성 분야(위성개발 및 위성 활용센터 운영 등)

1996년 우주개발 중장기기본계획 수립 시, 다수의 위성 개발 경험과 개발 진행 상황²⁸⁾을 검토하여 위성기술의 자립화가 필요하다는 정책결정을 내리게 된다. 이후, 국가계획에는 위성 개발 및 활용에 대한 세부정책이 수립 및 추진되고 있다.

현재 효력을 갖는 ‘제3차 우주개발진흥 기본계획’에는 ‘인공 위성 활용서비스 및 개발 고도화’를 전략²⁾로 두고 세부적인 내용을 추진 중이다. 재난·재해 등 국가위기 대응서비스 제공, 해양·환경·농수산 등 공공활용 서비스 제공, 통신·항법 등 4차 산업혁명 기반 서비스 제공, 한반도 정밀감시서비스 제공 등이 세부추진과제로 담겨 있다.

정책형성·결정 단계에서의 이슈는 국가계획에 활용서비스를 중시한 위성개발을 전략으로 정했으나, 실질적으로는 위성개발 계획이 주가 되어서 위성 활용 수요에 미치지 못하여, 사실상 국가계획이 제대로 작동되지 못하고 있다는 점이다.

나. 우주 발사체 분야(발사체 개발 및 우주센터 운영 등)

1996년 과기처는 우주기술을 21세기 첨단산업을 주도할 핵심기술로 전망하고, 발사체 개발 및 발사장 구축을 계획하게 된다. 따라서, 발사체 사업은 정부 차원에서 적극적인 의지를 가지고 정책을 만들게 된 것으로 볼 수 있다. 이러한 기조는 현재까지 이어지고 있다.

‘제3차 우주개발진흥 기본계획’에서는 전략¹⁾이 ‘우주 발사체

28) 우리별 1호(1992), 2호(1993), 과학 1호&2호(1993), 다목적 실용위성 1호(1999)

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

기술자립'이며, 다음과 같이 세부과제를 두고 있다. 한국형발사체 개발의 전 과정을 국내주도로 추진하여 2022년까지 완성하고, 이를 한국 우주산업 육성과 글로벌 우주 협력의 계기로 활용할 것을 계획하고 있다. 또한, 한국형발사체를 기반으로 발사 서비스 생태계를 육성하고, 소형과 대형으로 양극화된 발사 수요 등을 고려하여 다양한 크기의 발사체로 확장하는 것과 이를 연계한 시험시설과 발사대의 확장·운용을 계획하고 있다.

정책형성·결정 단계에서의 이슈는 1) 발사체 정책을 설정하는 데 있어서 다양한 대안이 검토되지 못하고 비교적 단시일 내에 정책결정이 이루어졌다는 점, 2) 향후의 다양한 형태의 발사체 개발 방안에 대해서도 계획은 있으나, 사업화까지의 구체적인 정책이 수립되지 않은 점, 3) 발사체 사업을 통해 산업 생태계를 육성하겠다는 계획은 있으나, 산업체를 위한 정부의 발사 수요 제시가 국가계획 상 명확히 제시되지 않은 점 등을 들 수 있다.

4. 정책집행 단계 이슈

가. 인공위성 분야(위성개발 및 위성 활용센터 운영 등)

위성사업은 수천억 원 단위의 거대예산이 투입되므로 예비 타당성조사를 거쳐야 하고, 위성운영을 염두에 두다 보니 기술 개발을 위한 순수 R&D 보다는 위성 자체를 개발하는 체계사업 위주로 사업이 진행되고 있다.

정책집행 단계에서 이슈가 되는 것은 1) 위성개발·활용에 거대예산이 소요되나 전체 R&D 예산 내에서 배분해야 하므로, 새로운 사업이 기획될 때마다 타 분야에 큰 영향을 미친다는 것, 2) 당장의 목표가 위성 체계개발이다 보니 위성의 부품이나 소재 등 핵심기술을 개발할 수 있는 시간적·재정적 여유가 없다는 것, 3) 위성마다 개별 사업으로 추진하다 보니(예컨대, 다목적 실용위성 5호 사업, 6호 사업 등), 전체 위성사업들로의 공통적인 문제점²⁹⁾이 반복된다는 것, 4) 위성 서비스보다는 위성개발 자체에 집중하다 보니 위성 활용서비스 고도화가 되지 않고 있다는 것, 5) 위성개발 이후 위성 활용센터 등의 운영사업에 대한 예산확보는 별도로 추진된다는 점 등이 있다.

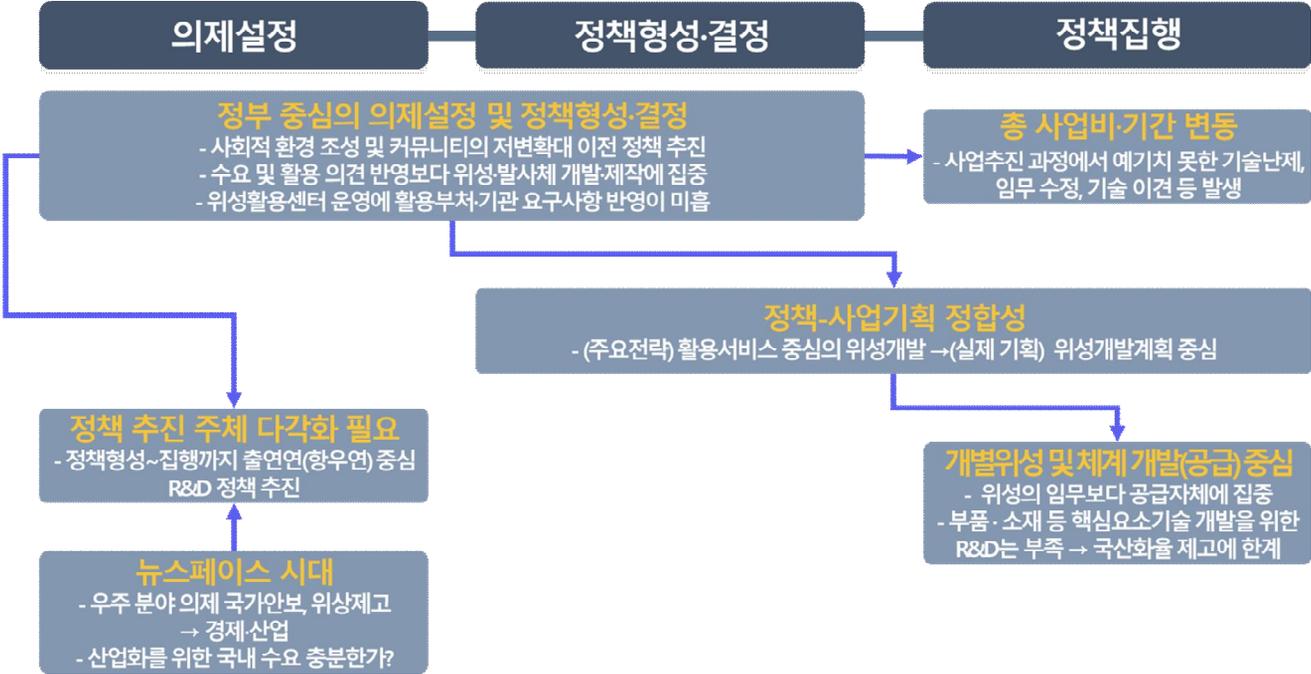
나. 우주 발사체 분야(발사체 개발 및 우주센터 운영 등)

국제 수출통제 체제하에서는 전략기술의 이전이 불가하기에 독자개발이 필수적인 분야이다. 따라서, 같은 체계개발 사업이나 위성의 경우와는 달리 선행기술개발부터 추진되어야 하는 특징이 있다.

29) 전주기상에 일정 단계에서 공통으로 나타나는 예산확보 문제, 시설·장비 확보문제, 사업 지체 문제, 타 위성사업과의 인력중복 문제에 대한 종합적인 해결을 할 수 없다는 것

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

정책집행 단계에서 쟁점이 되는 것은 1) 거대예산을 전체 R&D 예산 한도 안에서 배분해야 하므로, 새로운 사업을 기획할 때마다 타 분야에 영향을 미친다는 것, 2) 발사체 개발의 목적은 위성이나 탐사선을 탑재하고 우주로 운송하기 위한 것인데, 발사체의 사양을 결정할 당시에 탑재체에 대한 충분한 논의를 하지 않고 사업을 추진해서 발사체 사업 진행 중에 적절성 여부에 대한 논란이 있었다는 것, 3) 발사체를 발사하고 관리할 우주센터의 운영사업은 별도로 추진되고 있다는 점 등이 있다.



[그림 21] 우주 분야 정책단계별 이슈

제3절 원자력 R&D 정책단계별 이슈

1. 연구용 원자로

가. 개요

연구용 원자로(이하 연구로)는 발전용 원자로와 다르게 중성자를 이용한 연구 및 응용을 목적으로 하며 상대적으로 출력이 낮고 계통 구성도 간단하다. 연구로는 원자력 이론 교육·훈련, 중성자 빔 이용 연구, 핵연료 및 재료 조사 시험, 방사성 동위원소 생산, 방사화 분석, 중성자 도핑에 의한 반도체 생산, 중성자 포획 암 치료 등 그 이용 분야가 광범위하다.

방사성 동위원소 생산과 관련하여 연구로는 노심에서 핵반응에 의해 발생하는 중성자를 자연에 존재하는 핵종에 조사하는 방법을 사용한다. 많은 양의 중성자를 조사하여 대량으로 동위원소 생산이 가능하고 그 생산가격도 높지 않아 산업용 및 연구용으로 많이 사용된다.³⁰⁾

우리나라는 지난 1995년부터 한국원자력연구원 내에 다목적 연구로인 ‘하나로’를 가동 중이며 중성자 빔 이용 연구, 핵연료 및 재료 조사 시험, 동위원소 연구개발, 방사화 분석, 중성자 도핑 서비스 등이 이루어지고 있다. 그러나 후쿠시마 사고 후속 조치의 일환으로 수행된 내진보강 공사가 지연되어 정지기간이 장기화되었으며, 안전 규제 강화로 인한 불시정지로 활발한 이용이 저해되고 있다.

이후 부산시 기장군에 국내 연구로 수출역량 강화, 의료 및 산업용 방사성 동위원소 수급 안정화 및 수출 등을 목적으로 수출용 신형연구로 건설을 지난 2012년 4월부터 추진하고 있

30) 베타 및 감마선을 방출하는 핵종이 주종

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

다. 2014년 건설허가를 신청하였으나 경주(2016년 9월)와 포항(2017년 11월)에서 연이은 지진 발생에 따른 안전성 재평가 및 정밀 심사로 일정이 지연되어 2019년 5월 건설허가를 받았다.

나. 의제설정 단계 이슈

수출용 신형연구로의 대한 이슈는 원자력을 활용한 의학계(핵의학)에서 방사성 동위원소(테크니슘 동위원소의 원료인 몰리브덴) 공급이 지나치게 수입에 의존하고 있다는 문제를 제기하여 시작되었다. 이는 공급의 안전성이 떨어져 지난 2008년 전국의 상당수 병원의 핵의학 영상검사가 중단된 사태로 촉발되었고 그해 10월 22일 국정감사 교육과학기술위원회에서 한국원자력 의학원에 의해 정책의제 설정의 필요성이 제기되었다. 당시 언론에서는 국내 암 검사 연기 혹은 중단 관련 보도를 통해 의료용 핵 주권 등을 언급하면서 국내 생산시설을 확보하여 안정적인 공급의 당위성을 주장하였고 해외 주요 방사성 동위원소 생산 연구로 노후화, 가동중단에 따른 공급 대란 재발 우려를 제기했다.

이미 2000년대 초반 캐나다, 남아프리카공화국 등 연구로 폐쇄 이슈로 방사성 동위원소 공급 제한이 예상되어 OECD 원자력기구(NEA)에서 문제가 제기되었고 2009년 관련 고위그룹이 형성되어 있었다. 방사성 동위원소 안정공급을 위한 투자환경 조성, 전비용 회수, 비축 분량 지불 등 6개 원칙을 수립하여 이행을 촉구하였고 당시 중국, 일본 등 주변국의 연구로 건설 계획이 없었기 때문에 국내에 동위원소 생산용 연구로 구축의 필요성은 존재했다.

또한, 당시 국제 원자력 커뮤니티에서 우리나라의 위상에 비해 데이터 수집에 대한 기여가 작다는 평가가 있어 연구로 건

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

설을 통한 국제 사회 기여의 목적도 있었다. 다만, 의제설정 단계에서 방사성 동위원소 생산용 연구로에 대한 사전 개념도출 및 제시가 충분하지 못했고 이는 이후 정책형성·결정 단계와 정책집행 단계에도 영향을 주게 되었다.

다. 정책형성·결정 단계 이슈

수입에 의존하고 있던 몰리브덴 공급을 위해 단기(즉시)적으로는 용매추출 방법, 중기(2년)적으로는 ‘하나로’ 이용 발생기 제조, 장기(5~10년)적으로는 전용 연구로 건설의 방법이 검토되었다. 당시 정부의 UAE 원전 수출 등 정책과 부합하여 2008~2009년 네덜란드 ‘PALLAS’ 및 요르단 ‘JRTR’ 연구로 건설 참여 시 기술 및 가격 경쟁력 강화를 위해 기존 ‘하나로’와 차별화된 연구로 건설의 필요성이 대두되었다.

이에 교육과학기술부는 2008년 국정감사 이후 한국원자력연구원과 협의(2008.10.29.)하여 몰리브덴 공급을 위한 근본적인 해결방법인 방사성 동위원소 생산 전용 연구로 건설을 추진하게 된다. 방사성 동위원소 시장의 특성상 공공재적 성격이 강하여, 반감기가 짧은 동위원소 활용을 위해 정부 차원의 시설 구축이 필요한 상황이었다. 처음에는 연구로 부지를 제공할 지자체 물색에 어려움이 있었으나, 동남권 방사선 의과학산업단지 조성계획의 일환으로 부산시에서 수요를 제기하여 부지 후보를 구할 수 있었다.

당시 방사성 동위원소 생산을 위한 분리공정 및 시설 구축에 5년 이상의 연구개발이 필요할 것으로 예측되었으며 의료용 방사성 동위원소 생산 관련 공정개발 경험 부족으로 시설 구축 비용 단가를 과소 책정하는 등 어려움이 있었다. 이는 의제설정 단계에서도 드러난 것처럼 충분한 설계 및 구축기반

조성이 이뤄지지 않고 원전 수출 정책에 발맞춰 사업 추진이 다소 급하게 이루어졌기 때문으로 보인다.

라. 정책집행 단계 이슈

1) 사업기획

당시 국가 차원의 방사성 동위원소 안정 공급체계 구축 정책과 원전 수출 정책의 달성을 위해 ‘수출용 신형연구로 개발 및 실증사업’이 2010년 기획되었다. 처음에는 사업 기간 5년에 총사업비 2,500억 원의 R&D 유형 사업으로 기획되었다. 5년 내 연구로 건설 완료는 본질적으로 많은 리스크를 내재하고 있었으나, 국가 정책의 시급성이 우선 반영되어 추진된 것으로 보인다. 또한, 당시 연구로 수출 경쟁국인 아르헨티나가 기존 ‘RA-3’을 대체하기 위해 동위원소 생산 연구로 ‘RA-10’의 개념설계에 착수하는 등 수출상품 다원화 전략을 펴던 영향도 있었다.

기획 시점에는 연구로 건설·운영허가가 통합되어 있어 기획 보고서상 인허가 일정은 1년여 정도로 반영되었다. 그러나 2014년 5월부터 건설허가와 운영허가가 분리되어 인허가 소요 기간 증가가 불가피한 상황이 되었다. 이에 따라, 사업 착수 전 연구로 개념 및 기본설계를 충분히 수행하여 설계 기간을 단축하지 않으면, 5년 내 완공은 어려운 상황으로 이어졌다.

2) 사업 사전평가

2011년 2월 한국개발연구원 공공투자관리센터에서 ‘수출용 신형연구로 개발 및 실증사업’에 대한 예비타당성조사를 실시하여 보고서를 기획재정부에 제출하였다. 조사 당시 동위원소의 생산량 및 가격의 예측이 쉽지 않아 연구로의 운영을 통한

편의 추정에 큰 어려움이 있었다. 특히 동위원소 시장은 공격적 가격책정과 배타적 계약 때문에 시장진입 장벽이 높아 예측의 정확성이 떨어진다.

비용 추정 또한 아직 연구로의 개념설계가 이뤄지지 않아 추정이 가능한 수준까지만 수행하였으며 향후 개념설계, 기본설계 완료 후 좀 더 정확도 높은 비용 추정이 가능할 것으로 판단하였다. 또한, 기존 '하나로'와 차별화된 연구로 건설은 표준 원전과 같이 검증된 기술의 적용이 아니라 연구개발과 건설이 병행되어야 하므로 불확실성이 크고 따라서 사전평가 단계에서 이미 사업수행 단계 중 재검토가 이뤄질 것을 예측하였다. 다만, 사업 사전평가 시점에서 연구로의 경제성은 어느 정도 확보(B/C분석 : 0.96)되어 있었기 때문에 사업은 시행될 수 있었다.

안전 관련하여 연구로 부지 인근 주민들과 수차례 면담을 통해 유치동의서를 확보하여 민원 발생 가능성은 크지 않았지만, 건설·운영 단계에서는 추가 민원이 발생할 수 있다고 보았다. 후쿠시마 사고³¹⁾ 이후 지진이 연구로에 미친 영향에 대한 조사가 완료되면 관련 규제가 매우 강화될 것으로 예측되었다. 실제로 이후 강화된 규제요건으로 인해 사업비용 상승과 일정 지연이 나타나게 되었다.

마지막으로 연구로 건설 이후 운영계획이 구체적으로 제시되지 않아 연구로 활용방안이 다소 미흡하다는 평가를 받았다. 특히 연구로 운영에 대한 거버넌스 구조가 명확하지 않았으며 국가 예산이 투입된 연구로가 상업성을 가지고 기존 시장의 방사성 동위원소 공급망에 진입하기에는 민감한 부분이 있었다.

3) 사업수행

31) 사고 시점은 3월이기 때문에 해당 보고서 제출 이후 내용이 추가된 것으로 보임

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

2012년 2월 부처와 지자체 그리고 연구원 간 사업 추진 협약을 체결하고 그해 4월부터 사업에 착수하였다. 다만 사전평가 단계에서도 우려가 있었지만, 사업에 참여하는 연구자들이 다른 연구에도 참여할 수 있는 구조여서 사업에 집중할 수 있는 전담인력이 많지 않았다. 그럼에도 2013년 4월 연구로 개념설계를 완료하고 기본설계와 부대시설 종합설계에 착수하였다.

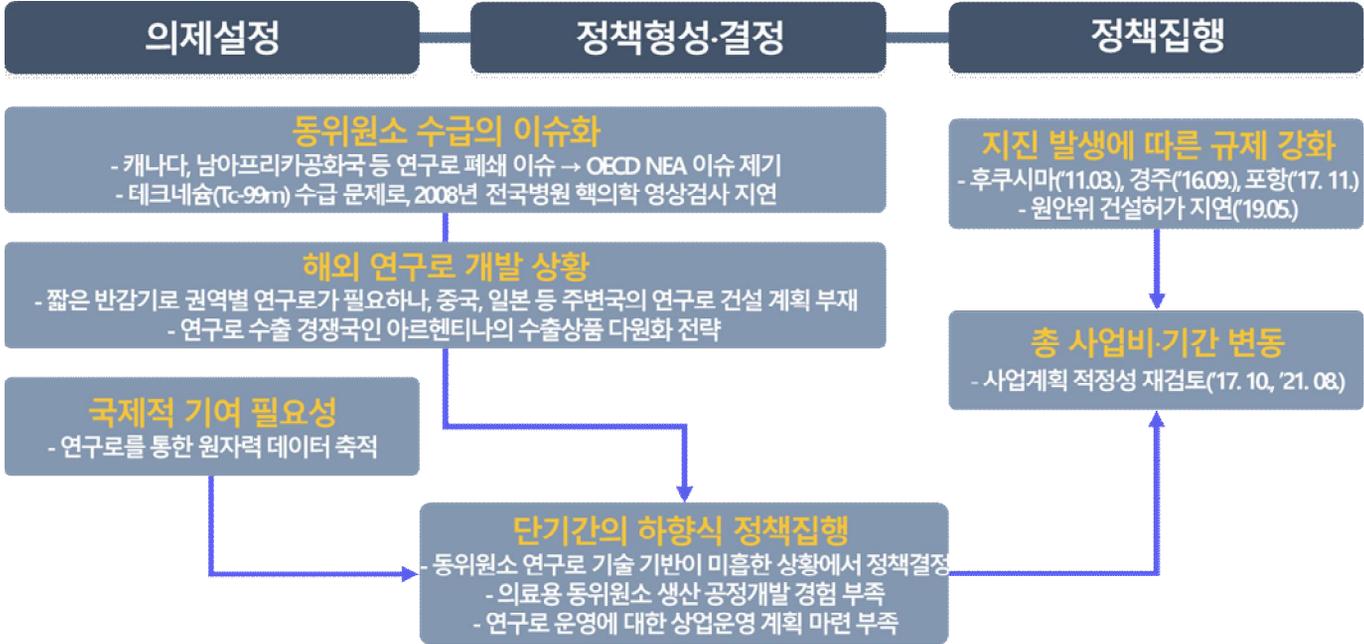
사업단 구성 및 운영과 관련하여 2013년 11월 미래창조과학부 훈령을 제정하고 사업운영 규정을 마련하였다. 이는 사업추진 협약 시기에 비해 다소 늦은 감이 있으며 사업단 상위조직이 자주 변경되는 등 효율적으로 사업을 추진하기에 어려움이 있었다.

2014년 10월 기본설계를 완료하고 그해 11월 원자력안전위원회에 건설허가를 신청하였으며 2015년 11월부터 건설허가본심사가 시작되었다. 하지만 2016년 9월 경주지진, 2017년 9월, 2017년 11월 포항지진으로 2018년 4월 안전성평가보고서를 각각 한국원자력안전기술원에 제출하였고 2019년 1월 심사를 거쳐 그해 5월 건설허가를 획득하였다. 이는 원래 예상했던 시기보다 2년 정도 지연된 것이며 전체 사업 기간의 증가에도 영향을 미치게 되었다.

후쿠시마 사고 이후 인허가 기준 강화와 주민들의 안전에 대한 요구 증가로 원자력 시설 및 부품단가 상승 요인이 발생하였으며 건설허가 지연에 따라 총사업비 및 사업 기간 변경에 대한 사업계획 적정성 재검토를 2017년 10월 수행하였다. 총사업비 증가에 따라 2020년 2월에는 총사업비 관리대상 사업으로 지정되었으며 2020년 5월 국토교통부 고시에 따

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

라 설계 경제성 검토를 하였고 그해 12월 설계 적정성 검토를 하였다. 최근(2021년 8월)에는 실시설계 완료에 따라 착공 전 사업 재검토 수행을 위해 사업계획 적정성 재검토를 다시 수행하였다.



[그림 22] 연구용 원자로(원자력) 분야 정책단계별 이슈

2. 지하처분연구시설

가. 개요

사용후핵연료 처분방식으로는 해양처분, 빙하처분, 우주처분, 심층처분 등이 고려되지만 OECD NEA와 각국 규제기관은 안전성과 경제성이 입증된 심층처분(Deep geological disposal) 방식을 권고하고 있다. 또한, 대부분 국가도 지하 안정적인 지층의 300~1,000 m 심도에 심층처분하는 방식을 선호하고 있다. 핀란드는 사용후핵연료 심층처분장을 곧 운영할 것으로 예상하며, 스웨덴은 심층처분장 건설 인허가를 위한 심사단계에 있다.

심층처분이란 방사성폐기물을 지하 깊은 곳의 안정적인 지층 구조에 처분하여 인간 생활권으로부터 영구히 격리하는 것을 의미하며 약 500 m 심도의 암반에 처분동굴을 설치하고 이 처분동굴에 처분 용기를 거치한 후 밀봉하는 개념이다. 이때 처분 용기는 압력 및 부식에 견디도록 특수하게 설계되어 있으며 사용후핵연료를 담고 있다. 처분 용기를 동굴에 거치할 때 암반과 처분 용기 사이에는 완충재라는 것을 채우며 이 완충재는 처분 용기를 외부 충격으로부터 보호하는 역할과 지하수가 처분 용기로 침투하는 것을 억제하는 역할을 하고 혹시 처분 용기에서 방사성물질이 방출되더라도 이를 흡착하고 생태계로의 이동을 지연하는 역할을 한다.

심층처분에 있어서 중요한 것은 매우 오랜 기간(수천~수십만 년) 시설이 일정 성능을 유지하고 안전을 보증할 수 있어야 한다는 것이다. 따라서 처분시설을 구성하고 있는 공학적방벽 및 천연방벽의 성능·안전성이 심지층 환경에서 지하처분연구시설(이하 URL, Underground Research Laboratory)을 통해 실증되어야 한다. 즉 URL은 고준위 폐기물 처분의 장기 안전성을 확보하기 위한 연구를 수행하고 안전성을 실증하는 시설이라고 할 수 있다.

URL은 크게 일반부지 URL(Generic URL)과 처분부지 URL(Site-specific URL)로 나눌 수 있다. 일반부지 URL은 말 그대로 향후 처분부지로 선호되는 모암과 유사한 지질학적 특성을 갖는 일반부지에 설치된 URL이다. 처분부지 URL은 처분장 부지에 설치된 URL을 의미한다. 일반부지 URL에서 얻어진 연구 결과는 처분장의 건설 인허가에 주로 활용되며 처분부지 URL에서 획득한 자료 및 기술은 처분장 운영 인허가에 직접 활용된다.

일반부지 URL은 일반적으로 처분부지가 선정되기 전에 건설·운영되므로 부지선정을 위한 조사 및 평가기술 개발, 처분 개념 개발, 처분시설 장기성능평가 모델 개발 및 검증, 처분시설 성능 및 안전성 실증, 처분시설 운영 및 취급장치 개발, 처분시설 폐쇄 및 모니터링 기술개발, 폐기물 회수시설 개발 등의 행위가 이루어진다. 처분부지 URL에서는 일반부지 URL에서 획득한 부지조사 기술을 활용하여 처분장으로 활용될 암반의 특성을 정량화하고 이 자료를 안전성 평가의 입력자료로 활용하여 처분장의 성능 및 안전성을 예측하고 현장 계측 값과 비교함으로써 처분시설의 안전성을 처분부지에서 직접 확인하는 행위가 이루어지게 된다. 또한, 일반부지 URL에서는 광범위한 R&D를 수행하기 위해 다양한 파괴시험이 수행되며 처분부지 URL에서는 시추공 설치와 같은 파괴시험을 수행할 경우 처분장에서 향후 방사성물질의 이동통로를 제공할 수 있으므로 파괴시험은 엄격하게 제한된다.

나. 의제설정 단계 이슈

2016년 7월 ‘고준위 방사성폐기물 관리 기본계획’이 의결되었지만 법제화되지 못하면서 확고한 사용후핵연료 관리정책은 사실상 현재도 부재한 상황이다. 이러한 환경하에서 심층처분 R&D를 추진하는 것은 자칫 매몰 비용을 발생시킬 우려가 있어 신중한 접근이 필요하다.

이미 학계에서는 심층처분의 개념이 1960년대 중반부터 대두되었으며 1970년대 최초 제시된 KBS-3 심층처분방식³²⁾을 기본 개념으로 채택하여 연구를 수행하고 있다. 아직 사용후핵연료 관리정책이 확고히 수립되지 않아 정책적 유동성이 있다고 하더라도 우리나라 지형에 맞는 고유처분시설 확보를 위한 기술개발은 미리 추진될 필요가 있다. 이미 다른 나라에서 채택하여 국민 수용성 측면에서 유리한 심층처분에 공통으로 적용되는 범용기술만 미리 연구개발을 한다면 향후 정책이 시급하게 결정되어도 바로 적용할 수 있다.

한국원자력연구원은 지난 2006년 말 부지 내에 관련 시설인 KURT(KAERI Underground Research Tunnel)를 구축하여 각종 현장 시험을 수행하였다. 총 터널 연장 길이는 551 m이고 총 6개의 연구모듈이 있으며 지표면으로부터 약 120 m의 최대 심도를 갖고 있으므로 처분환경과 동일한 압력을 걸어 실험을 수행할 수는 없지만, 처분장 건설 및 운영 시 조건 등에 관한 연구는 수행할 수 있다. 또한, 여기서 개발된 기술은 향후 일반부지 URL에서 실제 규모 처분시설에 대한 실증이 이루어질 때 기반 기술로 활용될 수 있다.

32) 핀란드와 스웨덴에서 채택한 방식으로 사용후핵연료를 500m 심부 암반에 처분

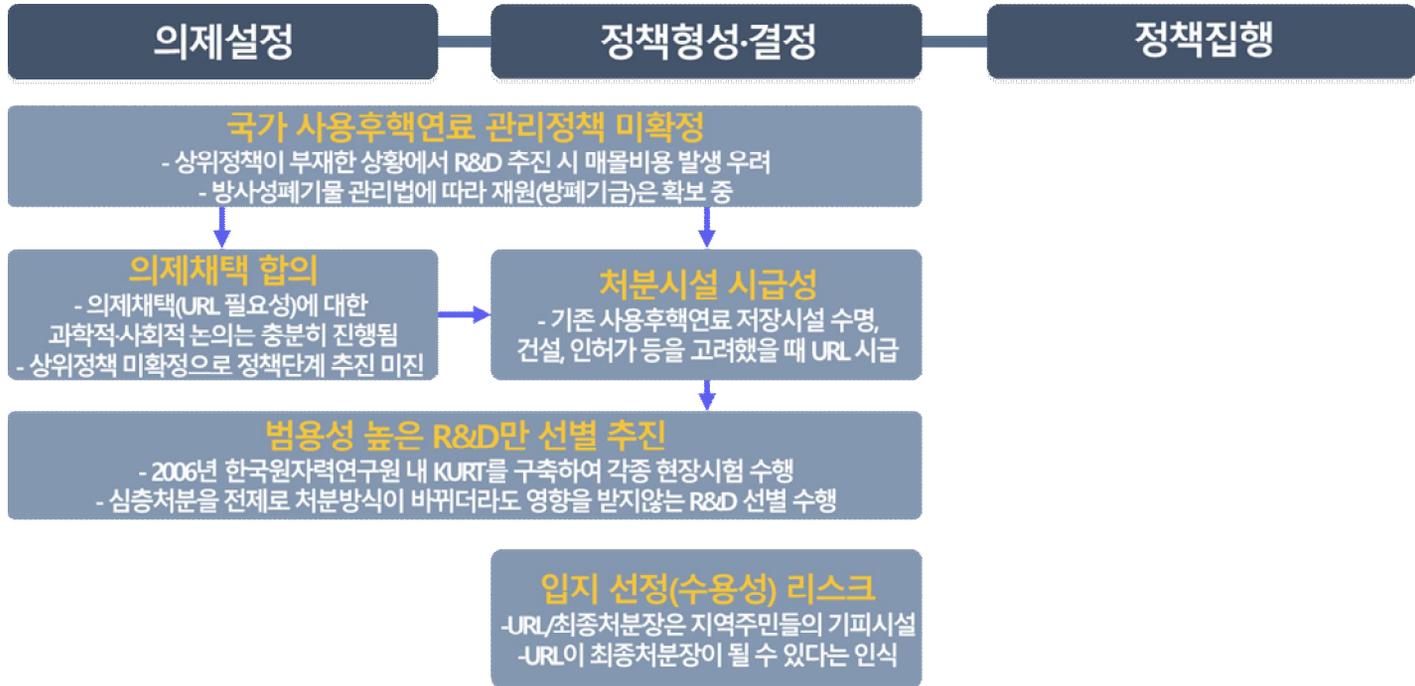
다. 정책형성·결정 단계 이슈

현재 사용후핵연료 저장시설의 수명 등을 고려하여 2029년 말까지 우리나라 고유처분시설에 대한 성능 및 안전성 실증을 위한 핵심기술 개발과 기반확보를 목표로 '사용후핵연료 저장·처분 안전성 확보를 위한 핵심기술개발사업'이 현재 진행 중이다. 해당 사업은 심층처분을 전제로 처분방식이 바뀌더라도 영향을 받지 않는 R&D 항목만을 선별하여 기술개발을 수행하지만 향후 사용후핵연료 처분의 시급성을 고려했을 때 정책결정이 조속히 이뤄져야 할 필요가 있다.

현재 '방사성폐기물 관리법'에 따라 사용후핵연료 저장·처분 사업 활용을 목적으로 산업통상자원부 고시(제2019-217호)에 근거하여 사용후핵연료 다발 당 일정 금액을 적립하고 있다. 향후 처분 안전성에 관한 일반 대중과의 소통 강화로 국민 수용성을 증진하여 사용후핵연료 관리정책이 확정된다면 해당 재원을 바탕으로 원자력환경공단과 한국원자력연구원 등 원자력 연구기관 참여하여 URL 건설 사업이 진행될 것으로 보인다.

URL 건설은 부지선정, 부지조사 및 설계, 건설 인허가, 건설 단계로 구분(총 약 10년 소요)할 수 있으며 시설 완공 및 운영 승인 후 처분성능·안전성 실증을 위해 15년 이상이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 실제로 처분을 시작해야 하는 목표 시점에서 이를 역산하면 정책결정이 언제까지 이뤄져야 할지 판단할 수 있다. 또한, 인허가와 관련해서 규제연구를 통해 방법론을 미리 확보하고 사업 기간 산정의 정확성을 높일 필요도 있다.

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안



[그림 23] 지하연구시설(원자력) 분야 정책단계별 이슈

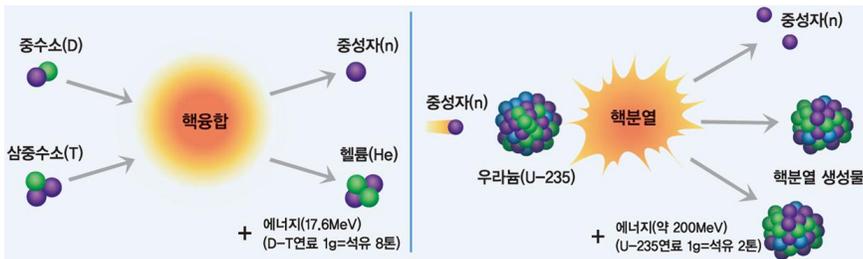
제4절 핵융합 R&D 정책단계별 이슈

1. 핵융합 개념 및 R&D 동향

가. 핵융합

핵융합은 수소 등의 가벼운 원자핵이 충돌하면서 더 무거운 원자로 합쳐지는 반응이다. 플라즈마 상태에서 원자핵들은 쿨롱 반발력(양성자)을 극복하고 핵력에 의해 결합하게 된다. 이 과정에서, 양성자와 중성자 개수는 보존되며 결합 전 여분의 질량만큼이 에너지($E=mc^2$)로 변하게 된다. 해당 질량결손에 따른 에너지를 핵융합에너지라고 부른다.³³⁾ 중수소 및 삼중수소 1g의 핵융합으로 얻어지는 에너지는 약 석유 8톤의 에너지와 유사하며, 우라늄 1g 핵분열 에너지의 4배에 해당한다.

태양처럼 거대한 항성의 중력은 가벼운 원자들의 핵융합 반응을 발생시키고 유지할 수 있게 한다. 하지만, 지구에서 인공적으로 핵융합 반응을 발생시키고 유지하려면, 1억℃ 이상의 초고온 플라즈마를 조성하고 제어할 수 있는 장치가 필요하다.



[그림 24] 핵융합 및 핵분열 반응

※ 출처 : 핵융합(연)(2016), 이지사이언스 시리즈 10 핵융합의 세계

33) 핵융합에너지 개발진흥법 제2조(정의)에서는 관련 용어를 다음과 같이 정의함

1. “핵융합”이란 2개의 가벼운 원자핵이 융합반응을 일으켜 반응 전보다 무거운 원자핵이 생성되는 현상을 말한다.
2. “핵융합에너지”라 함은 핵융합 과정에서 방출되는 모든 종류의 에너지를 말한다.

나. 핵융합 R&D 연혁³⁴⁾

1) 가능성의 발견(~1940년대)

핵융합 연구는 19세기 후반 플라즈마 연구로부터 시작된다. 19세기 플라즈마 연구는 주로 기체방전 실험의 형태로 이루어졌다. 당시 영국과 독일의 과학자들은 유리관에 높은 전압을 걸어 기체를 방전시키고 방전된 기체의 특성을 연구했다. 영국의 물리학자이자 화학자인 윌리엄 크룩스는 1879년 영국 왕립 학회에서 방전된 기체를 네 번째 상태의 물질로 발표했다. 이후 1928년 미국의 물리학자 어빙 랭뮤어에 의해 네 번째 상태의 이온화 기체는 '플라즈마(Plasma)'로 명명되었다.

핵융합 에너지의 가능성은 1905년 아인슈타인의 특수상대성 이론($E=mc^2$) 발표에 따라 가시화되기 시작했다. 1929년 앳킨슨과 회터만은 가벼운 원자핵들의 질량 차이를 계산하는 과정에서 물질변화 시 큰 에너지가 발생한다는 것을 발견했다. 이후 영국의 핵물리학자 제임스 채드윅이 1932년 중성자(Neutron)를 발견하고, 오토 한과 프리츠 슈트라스만이 1938년 중성자로 우라늄의 핵을 분열시킬 수 있다는 사실을 발견하였다. 이는 원자폭탄 개발로 이어지는 계기가 되었다. 이후, 원자폭탄의 기본원리는 독일의 물리학자 리제 마이트너와 오토 프리시에 의해 토대가 만들어졌다. 최종적으로 원자폭탄은 1945년 미국의 맨하튼 프로젝트에 참여한 과학기술자들에 의해 구현되었다.

중성자에 이어 핵융합에서 핵심적 역할을 할 수 있는 중수소도 1932년에 발견되었고, 영국 케임브리지에서 러더포드와 올리펀트는 1934년 인공 핵융합 반응을 최초로 성공했다. 20세기 초반 핵변환 실험이 성공함에 따라 핵융합 에너지 활용 가

34) 국가핵융합연구소(2012), 핵융합에너지 정책 백서 내용 정리

능성이 대두되고 공식적으로 제안된다. 미국과 영국의 천문물리학자나 핵무기 개발 프로젝트에 참여했던 과학자 집단을 중심으로 '수소폭탄' 개발도 시작되었다. 그러나 원자폭탄보다 수백 배 위력적인 수소폭탄 개발 계획은 국제 정세의 변화와 이해관계가 맞물리면서 국제적으로 확산되지 않았다.

2) 핵융합 연구의 시작(1950~1960년대)

1951년 아르헨티나가 핵융합 반응에 성공했다는 '우에물 프로젝트(Huemul Project)' 기사는 미국과 소련에 큰 충격을 주었다. 결과적으로 우에물 프로젝트는 거짓으로 드러났지만, 당시 미국과 소련에는 정부 주도의 핵융합 연구를 시작하는 계기로 작용했다.

미국은 수소폭탄 개발을 위해 1951년 맨하튼 프로젝트와 유사한 매터혼 프로젝트(Matterhorn Project)를 개시했다. 핵무기 경쟁에서 소련을 이기고 한국전쟁과 공산화에 대응한다는 군사적인 목적이 큰 프로젝트였다. 매터혼 프로젝트는 프린스턴 대학의 플라즈마물리연구소에서 수소폭탄 제조의 이론적 문제를 다루는 것으로 출발했으나, 이후 전력생산용 핵융합로 개발로 연구 비중도 확대됐다. 프린스턴 대학의 리만 스피트저는 1951년 현대 핵융합 연구에 중요 참고자료가 되는 플라즈마 자기가둠(Magnetic Confinement) 관련 논문을 발표하기도 했다.

거의 동시에 소련에서도 독자적으로 핵융합 연구가 추진되고 있었다. 소련 핵물리학자 안드레이 사하로프는 1953년 리튬을 사용한 핵융합 반응을 통해 건식 수소폭탄 제조에 성공하였다. 또한, 핵융합을 에너지원으로 이용할 수 있도록 1951년 자기격리(Magnetic Insulation) 및 토로이달 시스템(Toroidal System)에 관한 연구를 진행했다. 이 과정에서 현대 핵융합로의 원형

인 토카막(Tokamak)이 발명하였다. ‘플라즈마를 가두는 도넛 형태의 자기장 그릇’이라는 뜻의 토카막은 1955년 세라믹 진공 용기를 사용한 T-1(Tokamak-1)이라는 이름으로 최초 개발되었다.

수소폭탄이라는 군사적 목적의 무기개발에서 벗어나, 핵물리가 평화적으로 활용되고 국제 공조 분위기가 형성되기 시작한 것은 1958년 제네바에서 열린 ‘평화를 위한 원자력(Atoms for Peace)’ 회의의 역할이 크다. 이때 1950년대 중반까지 미국과 영국 등에서 비밀리에 진행되던 핵물리 연구(핵융합 연구 포함)의 내용이 공개되면서, 과학적·기술적인 한계를 극복하기 위해 국제 공동연구 체제에 필요성에 대한 분위기가 조성되었다.

1957년 영국의 핵물리학자 존 로슨은 플라즈마의 안전성 문제를 해결하기 위해 세 가지 조건을 발표했다. 플라즈마의 밀도, 온도, 가둠시간 등의 세 수치로 표현되는 이 조건은 현재 까지도 연구자들에게 핵융합을 위한 최소 기준으로 활용되고 있다. 1960년대 중반까지는 온도 및 가둠시간의 목표 달성에 난항을 겪었으나, 1968년 구소련의 쿠르차토프연구소(Kurchatov Institute)의 토카막 장치 T-3가 새로운 가능성을 열었다. 세계 최초로 1,000만°C의 플라즈마를 장시간 구현한 것이다. 당시 T-3의 성과는 미국, 유럽 등 다른 자기가둠 시스템에서 얻은 온도보다 10배 높으며 가둠시간도 수십 배 향상된 결과였다. 당시 영국 연구팀이 구소련을 직접 방문해 레이저 진단으로 결과를 검증하였고, 다음 해 네이처지에 게재된다. 이러한 T-3의 성과는 구소련을 중심으로 국제 공동연구를 활성화하였으며, 핵융합 연구를 토카막 방식에 집중하게 되는 계기가 되었다.

3) 핵융합 과학적 실증연구의 시대(1970년대)

1960년대까지는 플라즈마 가열 및 가둠에 관한 기초연구와 다양한 가둠장치에 대한 실험이 주로 수행되었다면, 1970년

대~1980년대에는 여러 나라가 중대형 토카막 개발에 집중하는 양상을 보였다.

1970년대에는 세계의 다양한 정치·경제적인 이슈로 핵융합에너지 개발에 대한 보다 적극적인 투자 필요성이 대두됐다. 1973년 1차 석유파동을 겪으면서 에너지 믹스 다변화에 대한 요구로 이어졌으며, 1979년 미국의 TMI(스리마일섬) 핵발전소 사고는 핵분열 발전에 대한 부정적 인식 확산을 가져왔다. 이에 따라, 세계 각국은 지속가능한 대체 에너지원의 필요성을 절감하면서, 핵융합 발전 연구를 적극적으로 지원하기 시작했다.

미국은 1974년 원자력에너지위원회에서 자기가둠 핵융합 연구에 연간 3억 달러의 지원을 결정하면서, 핵융합에너지를 과학적으로 실증하기 위하여 TCT(Two-Component Torus)를 프린스턴 대학에 설치하기로 하였다. 또한, 1977년에는 대형 핵융합 실험로인 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor)의 설계 연구를 승인했다.

일본은 핵융합로의 자기점화(ignition) 조건의 전 단계인 임계 플라즈마 조건 달성을 목표로 총 2,500억 엔을 투자하여 JT-60(Japanese Tokamak-60)을 완성하였다. JT-60은 1985년 일본원자력연구소에서 가동되어 최초 플라즈마(First Plasma)를 발생시키고, 1997년에 임계 플라즈마 조건을 초과 달성했다.

러시아는 1975년에 T-10(Tokamak-10)을 완공해 플라즈마 수송 및 열전달의 특성을 분석했으며, 고주파 가열을 통해 플라즈마의 온도 분포, 밀도, 전류 등을 조절할 수 있다는 연구결과를 발표했다. 이를 통해 정상상태(steady-state)뿐만 아니라 플라즈마의 불안전성을 제어하는 방법도 제시하였다. 1979년에는 초전도 전자석을 이용해 T-7(Tokamak-7)을 최초로 제작하였다.

유럽은 1977년 공동연구로인 JET(Joint European Torus)를 영국

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

옥스퍼드 내 컬럼연구소에 구축하기 시작했다. 1983년부터 운영을 시작한 JET는 영국, 독일, 프랑스, 이탈리아, 벨기에, 덴마크, 그리스 등 유럽 14개국의 650명의 인력이 참여하는 대규모 프로젝트였다.

4) 핵융합 공학적 실증연구의 시대(1980~1990년대)

1980년대 후반, 토카막 장치 연구를 진행한 주요국들(EU, 미국, 일본, 러시아)은 초대형 토카막 연구장치 공동 건설에 합의한다. 당시 국가별 개별장치(EU의 JET, 미국의 TFTR, 일본의 JT-60)로도 앞서 언급한 로슨 조건을 충족하는 성과를 보인 바 있다. 다만, 핵융합 에너지 상용화를 위해서는 공학적 실증이 필요했고, 기존 장치보다 큰 토카막 개발이 필요했다. 문제는 장치 개발에 투입될 엄청난 자금이었다. 당시 에너지 수급에 대한 불안과 대체 에너지원에 관한 관심이 줄어들면서, 천문학적인 비용 투입에 대한 공감대 형성이 불가능한 상황이었다. 이러한 상황에서, 1985년 제네바에서 구소련에서 핵융합 연구에 대한 국제협력을 제안하였다. 미국, EU, 일본을 이를 긍정적으로 검토하였고, 미국-구소련 정상 간에 '핵융합에너지 연구로 인류에게 커다란 공헌'에 합의하게 된다. 이에 따라, 주요 4개국은 핵융합의 공학적 실증 연구를 추진하게 된다.

1987년 국제원자력기구(IAEA) 중심으로 주요 4개국은 국제 토카막 반응로(International Tokamak Reactor, INTOR) 구축 프로젝트를 추진했다. 이후 INTOR 프로젝트는 국제핵융합실험로(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 프로젝트로 변경되어 현재까지 이어지고 있다. 현재는 한국 및 중국(2003년), 인도(2005년)가 가입하면서 총 7개국이 ITER 프로젝트에 참여하고 있다.

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

미국, EU, 러시아, 일본 등 주요 4개국은 1988년 IAEA 산하에 ITER 이사회를 구성하여, 3년간의 개념설계(Conceptual Design Activity, CDA)와 10년간의 공학 설계(Engineering Design Activity, EDA)를 완료하고 최종 설계보고서 작성을 2001년에 완료했다. 이러한 과정에서 구소련의 붕괴, 경제위기, 건설 비용 저감을 위한 설계 변경, ITER 건설장소 유치 경쟁(일-EU) 등 대내외 요인들로 프로젝트가 계획 대비 지체되기도 했다. 2005년에 프랑스 남부 카다라쉬 지방이 ITER 부지로 결정 난 후, 2006년 11월에 프랑스 엘리제궁에서 ITER 공동이행 협정 서명식이 완료되면서 ITER 프로젝트가 본격적으로 추진되었다.

5) 핵융합 에너지 실증을 위한 준비(2000년대~)

EU, 일본 등 해외 주요국은 ITER 운영 일정과 연계하여 핵융합에너지 실증을 위한 로드맵을 수립하고, 관련 R&D를 추진하고 있다. EU와 일본은 현재 실증로 개념설계를 진행 중이며, ITER의 D-T(중수소-삼중수소) 실험을 시작하는 2035년을 전후로 실증로 건설 여부를 결정할 예정이다. 또한, 핵심공학기술 확보를 위해 필요 시설·인프라(중성자원 등) 구축계획을 확정하고 투자에 착수했다.

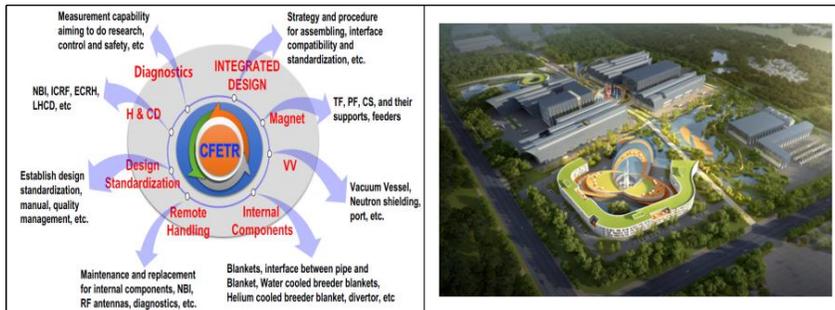


[그림 25] 주요국 핵융합 실증로 중장기 로드맵

※ 출처 : 핵융합(연)(2021), ENERGY INSIGHT VOL.5

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

중국의 경우, 핵융합 공학실험로(CFETR, China Fusion Engineering Testing Reactor) 건설·운영을 통해 2040년대에 전기생산 실증을 목표로 핵융합 R&D를 적극적으로 추진하고 있다. 이를 지원하기 위해 2025년 완공을 목표로 CRAFT(Comprehensive Research Facilities for Fusion Technology)를 건설 중이다. CRAFT에는 초전도 자석 연구시설 및 디버터 장치 공학 시설 등이 구축될 예정이다. 또한, 핵융합 실증로 환경에 적합한 재료개발을 위해 중성자원시설(HINEG, High Intensity D-T fusion NEutron Generator)을 개발하고 있다. 1단계로 HINEG-I을 개발하여 ITER TBM 구조재 후보인 CLAM(China Low Activation Martensitic)의 조사 테스트를 진행하고 있다. 현재 2단계(HINEG-II) 공학설계 및 3단계(HINEG-III) 개념설계를 진행하고 있다. 이외에도 최근, 중국과학원 핵에너지안전기술연구소는 러시아 부드키핵물리학연구소(BINP, Budker Institute of Nuclear Physics)와 협력하여 거대과학 프로젝트 ALIANCE(Axisymmetric LInear Advanced Neutron sourCE) 기획에 착수했다.



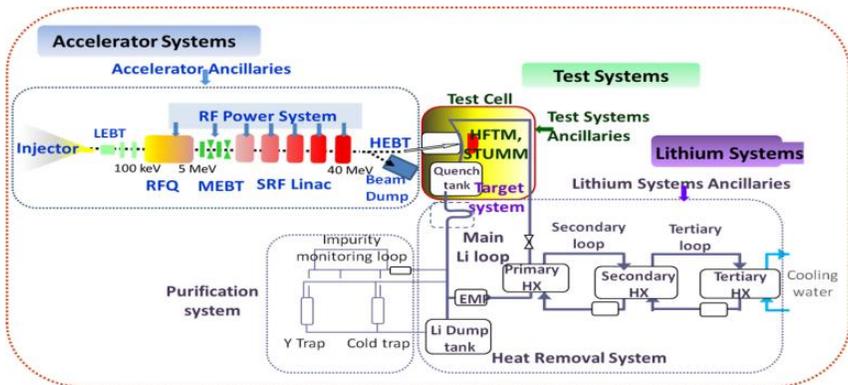
[그림 26] CFETR 공학설계 이슈 및 CRAFT 조감도

※ 출처 : G. Zhuang et al. (2018), "Progress of CFETR Design", 27th IAEA Fusion Energy Conference,

EU의 경우 실증로 환경에서의 핵융합 재료 테스트 및 증식 블랑켓의 삼중수소 증식 연구를 위해 가속기 기반 핵융합 중

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

성자원(IFMIF/DONES International Fusion Materials Irradiation Facility/Demo Oriented Neutron Source) 건설을 추진하고 있다. 29년에 완공을 목표로 스페인 그라나다에 건설될 예정이며, 현재 세부 공학 설계가 진행되고 있다. IFMIF-DONES 건설을 위한 R&D는 EUROfusion의 WP(Work Package) 중 하나인 WPENS(Work Package Early Neutron Source)를 통해 진행된다. IFMIF-DONES 구축에는 약 1조 원 내외의 비용이 소요될 전망이다. 이외에도 실증로 환경에서의 디버터 시스템 연구를 위해 디버터 기반 초전도 토카막 장치(DTT, Divertor Tokamak Test Facility)를 이탈리아에 건설하고 있다. 건설 기간은 2018년부터 2025년까지이며, 약 6,500억 원이 소요될 예정이다.



[그림 27] IFMIF-DONES 레이아웃

※ 출처 : Ibarra, A. et al(2018), The IFMIF-DONES project: preliminary engineering design, 「Nuclear Fusion」, Vol. 58.

영국은 2040년대 완공을 목표로 세계 최초의 핵융합 전력생산 실증을 위한 STEP(Spherical Tokamak for Energy Production) 건설을 진행하고 있다. 1단계로 2024년까지 STEP 개념설계 완료를 계획하고 있으며, 2단계인 2025년부터 2031년까지는 세부

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

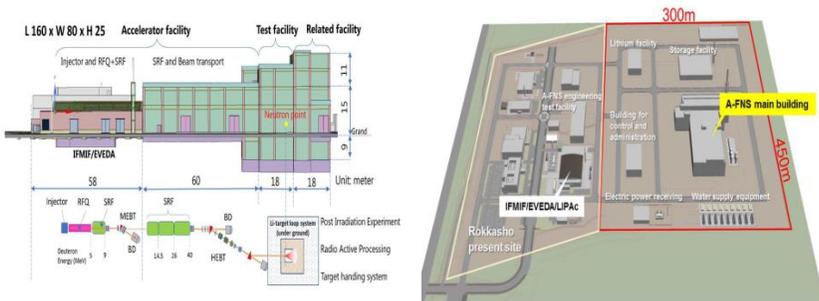
공학 설계를 완료하고 STEP 건설을 위한 제도적 기반(인허가 등) 마련을 완료할 계획이다. 3단계인 2031년부터 2040년까지는 STEP 건설 완료 및 운영을 시작하여, 2040년 이후 전력생산을 실증할 계획이다. 현재, 1단계 개념설계 단계에서만 300여 명의 산학연 전문가들이 참여하고 있다. STEP의 핵심 목표는 100 MW 이상의 전력생산, 삼중수소 자가증식 기술 확보 등이다.

미국의 경우 2021년 2월에 미국과학·공학·의학한림원(NASEM, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine)에서 핵융합 건설 패스트 트랙 전략을 DOE에 보고하였다. NASEM은 2050년 탄소배출 저감 기여를 목표로, 2030년대 초까지 핵융합 파일럿 플랜트(FPP)를 건설하고, 2035년부터 단계적 운영을 통해 전력생산 추진을 제시하였다.

일본은 경우 JT-60SA를 중심으로 노심 플라즈마 실험을 진행하고 있으며, 2020년 3월 ITER의 위성 토카막 역할 수행 및 DEMO 최적화 운전시나리오 개발을 목표로 초전도 자석 업그레이드를 완료하였다. 또한, 핵융합 재료 기술 및 관련 데이터의 조기확보·검증을 위해 가속기 기반 중성자원 개발 및 건설을 추진하고 있다. 초기에는 EU와의 공동협력 프로그램(BA, Broader Approach)을 통해 IFMIF(International Fusion Materials Irradiation Facility)를 건설할 예정이었으나, 현재는 IFMIF/EVEDA(Engineering Validation and Engineering Design Activities) 단계만 공동 구축 후, 중성자원은 EU(IFMIF/DONES)와 일본이 각각 구축하는 것으로 진행되고 있다. IFMIF/EVEDA는 실증로의 엔지니어링 설계를 위한 데이터 제공 및 재료 성능 검증을 위한 가속기 기반 중성자원 개발 프로젝트로 실험시설, 가속기 시설(LIPAc), 리튬 테스트 루프(ELTL)로 구성되어 있다. 현재 일본의 중성자원 시설 A-FNS(Advanced Fusion Neutron Source)는 개념설계까지 완료된 상태다. 2031년까지 완공하고 33년까지 'F82H' 구조재의 방사화

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

데이터를 확보·분석하여 DEMO 건설 여부 및 건설부지를 결정하는 데에 반영할 계획이다. 또한, A-FNS를 통해 핵융합 구조재 헬륨 발생 및 변위로 인한 영향, 삼중수소 발생 및 회수, 실증로 진단 및 제어장치 내구성 분석 등의 R&D를 추진할 계획이다.



[그림 28] A-FNS 시설 및 부지 조감도

※ 출처 : Ochiai, K. (2017), “Advanced-Fusion Neutron Source”, Workshop on Advanced Neutron Source and its Application

한편, 북미, 영국 등의 민간에서는 공공보다 이른 2030년대 핵융합에너지 실증 및 상용화를 목표로 R&D를 추진하고 있다. Ball(2021)에 따르면, 30개 이상의 핵융합 관련 스타트업이 존재하고 이 중 18개의 회사에서 24억 달러의 자금을 투자받은 것으로 나타났다. 공공의 핵융합 R&D 방향과 차이는, 더 작고 더 경제적으로 핵융합 장치를 구현한다는 점이다. 이를 통해 민간에서는 핵융합에너지의 활용성 및 시장 수용성을 증대할 계획이다. 실제로 23개 스타트업의 설문 결과, 다수가 전력생산과 더불어 우주 및 해양 분야 동력원, 수소생산, 열원 등의 시장을 목표로 설정하고 있었다(FIA, 2021).

미국 CFS(Commonwealth Fusion Systems)사는 MIT PSFC(Plasma Science and Fusion Center)와 협력하여, 고온 초전도체 기반 소형

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

토카막 장치 SPARC(Soonest/Smallest Private-Funded Affordable Robust Compact)를 개발 중이다. 2025년 첫 번째 플라즈마(First Plasma) 및 에너지 증폭률 1 이상 구현을 계획하고 있으며, 최종적으로 2030년대 초 200MW급 핵융합 발전소 건설을 목표로 추진 중이다. 미국 TAE Technologies사는 토카막이 아닌 선형핵융합 장치 상용화를 위해 R&D를 추진하고 있다. 연구장치인 '코페르니쿠스'는 2025년까지, 프로토타입 상용로인 '다빈치'는 2020년대 후반까지 개발할 계획이다. 최종적으로는 500MW급의 상용로 개발을 목표로 하고 있다. 또한, Google과 협력해 데이터 분석용 AI, 기계학습 등을 통해 핵융합 플라즈마 실험 가속화를 위한 최적화 알고리즘을 개발하고 있다. 캐나다의 General Fusion사는 가둠용기 없이 강한 자기장 내에 플라즈마를 만드는 자화표적 핵융합 방식의 연구장치 개발을 2025년까지 완료할 계획이다. 영국의 Tokamak Energy사는 고온 초전도체를 개발하여 구형 토카막 연구장치에 결합한 ST-F1 장치를 2025년까지 개발할 예정이다. 최종적으로는 150MW급 장치를 모듈화하여 생산할 계획이다.

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

(미국) MIT대 + CFS 社
"SPARC" 장치



- 고온초전도체를 활용하여 소형 토카막에서 ITER만큼의 에너지 증폭 실험을 위한 연구장치 SPARC 개발 (25년 최초 플라즈마 목표)

(미국) TAE Technologies 社
"코페르니쿠스" 장치



- 토카막과 다른 방식의 빔 형태 연구장치 '코페르니쿠스' 개발 (23년 이후 운영 목표)
- * 역사장방식 : 플라즈마 입자의 소용돌이 운동으로 자기장 생성

(캐나다) General Fusion 社



- 가두는 용기 없이 강한 자기장 내에 플라즈마를 만드는 자화표적핵융합 방식의 연구장치(주반경 1.5m) 개발 추진 (~24년)

(영국) Tokamak Energy 社
"ST-F1" 장치



- 고온초전도체(20T급)를 개발하여 구형(spherical) 토카막 연구 장치에 결합하여 업그레이드 (~25년)

[그림 29] 민간 스타트업의 핵융합 연구 추진 현황

[표 25] 핵융합 R&D 연대별 주요 내용 요약

구분	주요 내용
1950~1960년대	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미-소 경쟁체제 아래에 수소폭탄 중심 R&D 추진 ○ 핵융합 플라즈마 이론 및 기초연구 확산 <ul style="list-style-type: none"> - 구조론 토카막 기반 T-3 세계 최초 1,000만도 달성
1970년대	<ul style="list-style-type: none"> ○ 석유파동 등 에너지 안보 이슈에 따라 핵융합 에너지 개발 필요성 대두 ○ 중소규모 기초실험 및 대형 핵융합(토카막) 장치 건설 추진
1980~1990년대	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국가별 대형 핵융합 장치 운영을 통한 본격적인 실험 추진 ○ 범국가적 규모의 핵융합 장치 및 공학적 실증을 위한 국제협력 필요성 대두
2000~2010년대	<ul style="list-style-type: none"> ○ 핵융합의 공학적 실증을 위한 다자간 국제협력사업(ITER) 착수 <ul style="list-style-type: none"> - (참여국) 한국, EU, 일본, 미국, 러시아, 중국, 인도 등 7개국
2010~2020년대	<ul style="list-style-type: none"> ○ ITER 운영 연계 및 DEMO 관련 R&D 본격 추진 및 관련 대형 연구시설(DEMO, 중성자원 등) 구축 추진 ○ 민간 스타트업의 다양한 방식의 핵융합 연구 활성화

다. 우리나라 핵융합 R&D 연혁

1) KSTAR

앞서 살펴본 바와 같이 1980년대에는 국가별로 대형 핵융합 장치(미-TFTR, EU-JET, 일-JT-60 등)가 건설·운영되고, ITER 프로젝트에 대한 논의도 시작되던 시기다. 한편, 비슷한 시기에 우리나라는 서울대의 SNUT-79, 한국과학기술원의 ProTEXT, 한국원자력연구소의 KT-1 등 소형 토카막 장치 기반의 기초적인 실험이 진행됐다. 주요국의 기술 수준과는 현격한 격차가 존재했고, 이는 핵융합 과학 커뮤니티에 “국가적 차원의 핵융합 R&D 필요”라는 이슈 형성의 계기가 되었다. “이슈 제기”는 1989년 기초지원연(현KBSI)의 대형공동연구장비 수요조사 시 제출된 한국물리학회의 핵융합연구시설 수요로 공식화된다. 정책 추진 방향 구체화를 위해 Task Force가 구성되고 결과적으로 토카막 기반 장치의 설치·운영이 필요하다는 결론이 도출된다. 이후, 기초지원연은 과학기술처 장관으로부터 기능 재정립에 대한 승인을 받는데, 주요 내용으로 해당 토카막 핵융합 장치 설치가 포함되어 있었다.³⁵⁾ 그러나, 국가 재정의 한계상 핵융합 장치 구축이 우선순위에서 밀려났으며, 1991년에 미 MIT의 자기저울형 플라즈마 연구장치인 Tara를 공여받는 방향으로 선회하게 된다. 이후 1994년에 Tara는 한빛 장치로 개조·설치를 완료하게 된다. 즉, 의제설정 단계에서 과학 커뮤니티 중심으로 이슈가 제기되고 정책 의제로 채택은 되었으나, 정책형성 과정으로 넘어가는 과정에서 재원의 한계로 인해 다른 대안(공여)이 선택된 것이다.

1995년부터 KSTAR에 대한 구체적인 정책목표가 설정되고 구축을 위한 기반이 조성되기 시작했다. 1995년 7월 김영삼 정부

35) 한국기초과학지원연구원 20년사, 2008, 한국기초과학지원연구원

는 미국 샌프란시스코에서 재미 과학기술자 대상으로 우리나라의 과학기술 비전을 발표하였다. 해당 내용에는 기초과학 활성화와 함께 핵융합 에너지 개발 착수 계획이 포함되어 있었다. 정부가 제시한 대략적인 정책목표는 2001년까지 1,500억 원의 예산을 투자하여 세계적 수준의 초전도 토카막 장치(현 KSTAR)를 건설한다는 것이었다.

해당 계획에 대해 대부분 긍정적이었으나, 당시 과학기술처 장관의 전공 분야에 대한 편파적 예산 배정이라는 의견과 핵융합 에너지 실용성에 대한 회의적인 의견 등 부정적인 의견이 제시되기도 했다. 또한, 기초지원연(STarX)과 원자력연(K-2)이 각각 토카막 구축계획을 보고하는 등 출연연 및 부처 내에서 수행 주체 선정에 대한 갈등도 있었다. 이는 의제설정 단계에서 다양한 커뮤니티 및 주체들의 의견 반영이 부족했기 때문이라 판단된다.

KSTAR 구축기반 확립은 중간진입전략 기획자문위원회 산하 핵융합 소위원회로부터 시작된다. 소위원회에서는 ‘국가 핵융합 연구개발 추진계획’을 마련했고, 이는 1995년 12월 ‘국가핵융합연구개발위원회’의 ‘국가 핵융합 연구개발 기본계획’으로 이어진다. 정책목표는 ‘차세대 초전도 핵융합 연구장치(KSTAR)’를 구축하고 선진국 수준의 핵융합 기술 수준을 확보하는 것이었다. 이후 KSTAR 사업은 제2단계 선도기술개발(G7)사업으로 선정되어 본격적으로 추진된다. 1996년 1월에는 기초지원연 산하에 ‘핵융합연구개발사업단’을 신설하고, 출연연, 공기업, 대학, 민간 등이 참여하는 산학연 협력 체제가 마련된다.

정책의제가 정책결정으로 이어지기까지 당시 과학기술처 장관과 핵융합 과학기술계의 역할이 크게 작용했다. 또한, 기초지원연의 ‘한빛’ 장치의 성공적 운영도 KSTAR 정책결정의 기반이 되었다.

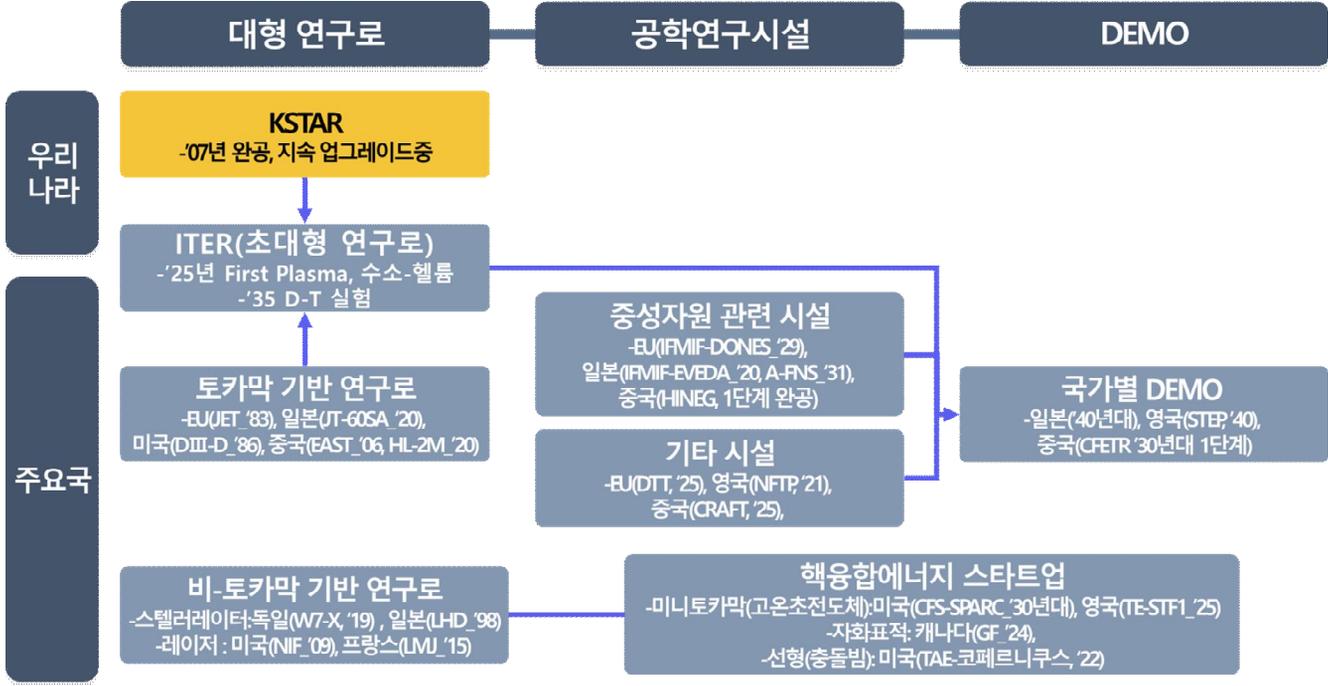
2) ITER

1991년부터 한국의 ITER 가입 필요성이 논의되기 시작했다. 기초과학연에서는 한빛 장치 건설 경험을 토대로 KSTAR를 거쳐 ITER에 가입한다는 내용이 담긴 '핵융합 연구개발 50년 계획안' 제안서를 과학기술처에 제출하였다. 그러나, 국내에서는 핵융합 주요국(미국, 소련, EU, 일본 등)에서 상대적으로 기술 수준이 낮은 한국을 회원국으로 인정하지 않을 것이라는 회의적인 의견이 대다수였다. 이에, 1995년 작성된 국가핵융합연구개발 계획안에서는 'ITER 가입'이 아닌 '세계적인 핵융합 공동연구에 참여'하는 것으로 명시되었다.

1999년, 기초지원연과 기초기술연구회(현 NST)는 유럽 핵융합 연구소들을 시찰하면서 ITER 가입을 다시 긍정적으로 검토하게 되는 계기를 제공했다. 특히, 2000년 9월 막스 플랑크 분원(Garching)에서 개최된 KSTAR 워크숍은 한국 핵융합 기술에 대한 주요국의 시각 변화를 체감하게 했다. 이러한 국내 핵융합 연구의 높아진 위상과 활동은 ITER 가입 이슈에 대해 정부가 전향적으로 정책형성을 할 수 있게 하는 계기가 되었다.

2002년 12월, 한국은 ITER 가입 의사를 표명하고 과학기술부 중심으로 ITER 협상단을 구성했다. 2003년 5월 ITER 가입 공식 의향서를 유럽에 제출했으며, 그해 6월 한국의 ITER 가입을 공식적으로 승인받게 된다. 2004년 8월, 핵융합연구개발사업단 내에 ITER 임시전담팀이 신설되었으며, ITER 협상단의 업무와 ITER 프로젝트 수행 준비 업무를 시작한다. 이후 2005년 10월에 임시전담팀은 ITER 사업단으로 확대된다.

2006년 11월, 한국을 비롯한 7개 참여국 대표들이 프랑스 엘리제궁에 모여 ITER 공동이행협정서에 서명하였고, 2007년 4월 우리나라 국회에서 ITER 공동이행협정 및 특권·면제협정 비준 동의가 이뤄졌다.



[그림 30] 핵융합 분야 대형연구시설·장비 구축 동향

2. 의제설정 및 정책형성·결정 단계 이슈

앞서 살펴본 바와 같이, 국내 핵융합 분야는 중간진입전략을 통해 단기간 내 국제적 수준에 도달하였다. 다만, 당시 의제설정 및 정책결정이 하향식 중심으로 추진되었고, 핵융합 R&D의 특성상 대형연구시설을 보유한 출연연 중심으로 추진되었다. 이에 따라, 토카막 기반의 KSTAR와 ITER에 대한 R&D 비중이 매우 높아졌고, 기술 확장성이 다소 제한된 상태이다. 이러한 고성능 플라즈마 R&D의 높은 비중은 핵융합 공학연구와 비-토카막 방식 R&D의 원활한 추진을 저해할 수 있다. ITER로 대표되는 토카막 방식의 핵융합이 세계적 추세인 것은 맞으나, R&D 분야의 경직성은 핵융합 커뮤니티의 확대 및 다원화와 글로벌 핵융합 동향 변화 대응에 부정적일 수 있다. 또한, 이러한 임무 중심 방식이 지속될 경우, R&D 추진 과정에서 도출될 수 있는 다양한 파급효과와 저변확대를 제한할 수 있다.

한편, 대형연구시설·장비에 대한 통합 거버넌스가 부재한 상황에서 출연연 중심으로 정책이 추진되다 보니, 의제설정 후 정책결정 단계로 넘어가지 못하는 상황이 발생하고 있다. KSTAR→ITER→DEMO로 이어지는 단계에서, 핵융합 공학적 검증을 위한 대형연구시설(공학연구시설, 중성자원 등) 구축 필요성에 대한 커뮤니티의 의제 논의는 상당 수준으로 진행됐다. 공학연구시설의 경우에는 '제2차 대형연구시설 구축지도(2012)'³⁶⁾ 등 일부 정책에는 반영된 적은 있다. 다만, 유사한 시기의 '제2차 핵융합에너지개발진흥 기본계획(2011)'에는 미반영되는 등 체계적 정책 추진에는 한계가 있는 것으로 파악된다.

36) 핵융합로공학 연구시설 : (예산)1,200억 원, (구축기간)7년

3. 정책형성·결정 및 정책집행 단계 이슈

KSTAR의 경우, 총구축비가 당초 1,500억 원에서 두 차례의 변경을 거쳐 3,090억 원으로 증가하였으며, 기간은 2002년 완공에서 2007년 완공으로 연장되었다. 또한, 제2장 3절에서 살펴본 바와 같이, KSTAR의 장비 운영 및 업그레이드에는 매년 약 370억 원(2016~2020 평균)이 투입되고 있다. 이는 구축비의 약 12%에 해당하는 규모이다. KSTAR는 장치 개발 자체가 큰 경쟁력이고 성과이기 때문에, 장치 업그레이드 및 운영에 지속적인 재원 투입 필요성은 있다. 다만, 업그레이드 계획은 핵융합진흥 기본계획 등 중장기계획을 통해 일부 제시되었으나, 재정 소요에 대한 명확한 정보는 제시되어 있지 않다. 또한, KSTAR 구축 및 운영에 대한 예산은 핵융합연의 주요사업비³⁷⁾로 지원되어 예산변동에 대한 관리 체계(총사업비 관리 등)는 적용되지 않는다. 이렇듯 총사업비 및 기간 변동의 이슈는 장치 운영 및 업그레이드 계획 구체화 이슈와 연계된다. 또한, 의제설정 및 정책형성·결정 단계에서 시설·장비의 활용·운용보다 구축·공급 중심으로 정책이 결정된 것³⁸⁾에서도 일부 기인된 것으로 판단된다.

ITER의 경우, 대형 국제협력사업으로, 사업 추진 과정에서 대내외 변수가 많아 불확실성이 더 높은 상황이다. 총사업비는 당초 8,767억 원(2007.08. 기준)에서 세 차례 변경을 거쳐 1조 7,888억 원(2020.09. 기준)으로 늘어났다.³⁹⁾ 사업 기간은 당초 대비 6년 늘어난 2025년(First Plasma)을 목표로 추진 중이다. 초기에

37) 대과제 : KSTAR 연구사업 → 중과제 : KSTAR 공동실험 및 플라즈마 연구사업, KSTAR 장치 운영 및 성능 향상사업

38) KSTAR의 향후 활용 계획에 해당하는 ‘한국형 초전도 핵융합연구장치(KSTAR) 활용 기본계획(2009.06.)’ 이 완공(2007.08.) 이후 수립 및 제시됨

39) 8,768억 원(2007.08.) → 1조 2,365억 원(2011.04.) → 1조 7,750억 원(2019.12.) → 1조 8,049억 원(2020.06.) → 1조 7,888억 원(2020.09., 사업계획 적정성 재검토 결과)

는 개념설계, 상세설계, 착공 추진 등의 과정에서 예산변동이 발생했다. 이후에는 주로 국가별 조달품목 설계 및 제작 과정에서 주로 변동이 발생했다. 결과적으로, 제19차 ITER 이사회(2016.11.)에서는 ITER 건설단계를 5년 연장(First Plasma 2020→2025)하는 방안⁴⁰⁾을 승인했다. 이러한 변경은 ITER 사업 예산 외에도 국내 정책결정까지 영향을 주었다. ‘제3차 진흥기본계획’에서는 기존 2단계에 5년을 추가(2021→2026)하여 2단계 정책목표인 ‘DEMO 플랜트 기반기술개발’에 집중할 것을 제시했다. 한편, 2025년 ITER사업(건설단계) 종료 후, ITER 운영단계에서 우리나라가 확보할 수 있는 지적 자원이나 참여 확대 방안 마련 등에 대해 의견이 제기되고 있다.⁴¹⁾

ITER의 경우, 2008년부터 재원 확보에 대한 이슈가 발생했다. ITER사업은 일반회계, 원자력기금, 전력기금 등에서 분담하여 지원 중이다. 재원 확보 이슈가 ITER사업 예산 편성 결과에 영향을 주진 않았으나, 예산 편성 단계마다 쟁점으로 나타나고 있다. 이러한 이슈는 정책결정 단계나 사업기획 단계에서 재원 마련에 대한 명확한 계획이 마련되지 않은 것에 기인한다. ITER 사업은 국제 조약에 따라 추진되며 국회 비준까지 완료된 경우로, 매년 국제 분담금 성격으로 예산이 편성되기에 예산 조정 여력이 크지 않다. 이러한 상황에서 사업비 변동 같은 이슈와 결부되면, 핵융합 분야나 동일 재원을 활용하는 타 분야 R&D추진에 영향을 미칠 수 있다.

앞 단계의 토카막 중심 R&D투자 이슈는 핵융합 분야 인력 양성 및 다각화에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 향후 공학 단계 진입이나 핵융합 방식의 다변화 시도를 위해서는 다양한 분야의 산학연 인재 유입이 필요하다. 이를 위해, 핵융합 원천

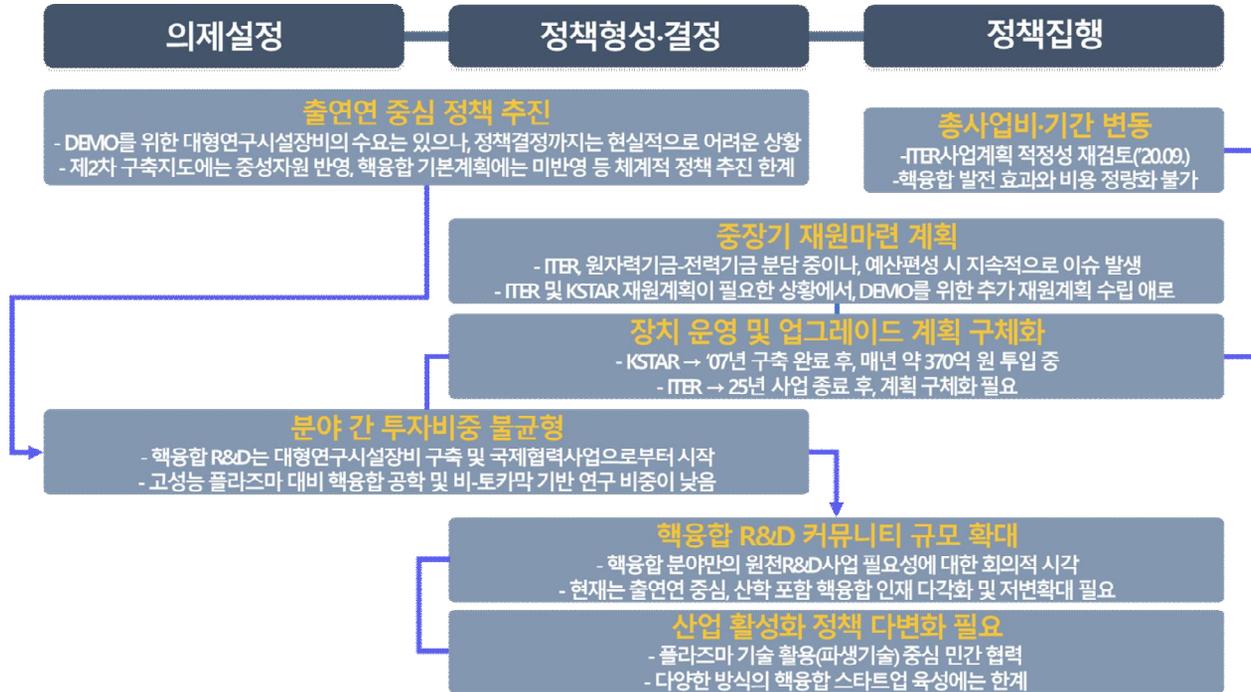
40) 2010.07. 확정 ITER 종합사업계획(Baseline-2010) → 2016.11. 변경 ITER 종합사업계획(Baseline-2016)

41) IO에서는 운영단계에 대비한 ITER Research Plan을 준비 중

제 3 장 거대과학 분야별-정책단계별 이슈

R&D도 추진 필요성이 있으나, 상대적으로 지원대상이 작은 핵융합 분야에 추가 지원에 대한 회의적인 시각도 존재한다. 또한, 현재 출연연의 산업 활성화 정책은 주로 파생기술인 플라즈마 활용에 집중되어 있다. 앞서 살펴본 바와 같이, 주요국에서는 다양한 방식의 핵융합을 활용한 스타트업들이 생겨나고 있다. 이러한 상황에 대응하기 위해서는 산업 활성화 정책의 다변화가 필요하다.

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안



[그림 31] 핵융합 분야 정책단계별 이슈

제 4 장

거대과학 정책단계별 개선방안

제4장 거대과학 정책단계별 개선방안

제1절 거대과학 정책단계별 이슈

1. 의제설정 단계

의제설정 단계에서 공통적으로 제기되었던 이슈 중 하나는 의제설정의 비체계성이었다. 그간 분야별 중장기계획이나 세부 사업 기획 시, 관련 커뮤니티 내 수요조사 체계는 상당히 고도화되었다. 하지만, 거대과학 및 대형연구시설·장비의 경우, 분야의 특성상 관련 커뮤니티의 합의보다는 특정 소수 또는 대내외 이슈에 따라 추진되는 경우가 많았다. 즉, 의제설정 과정이 상대적으로 폐쇄적이고 참여하는 행위자들의 범위와 규모가 크지 않았다. 이러한 방식은 신속한 정책결정을 가능하게 하나, 이후 사업 추진상 불확실성을 높일 수 있다. 과학 커뮤니티의 합의와 개념R&D가 성숙되지 않은 상태에서 정책결정이 이뤄질 경우, 사업 추진 중에 계획변경 등의 이슈로 이어질 수 있다. 또한, 대형연구시설·장비에 의존도가 높은 거대과학은 한정된 재원으로 인해 여러 방식의 대형연구시설·장비의 병행 추진이 어렵다. 따라서, 초기 정책결정에 따라 구축된 시설·장비 방식이 해당 분야의 전체 연구 방향을 장기간 고착시킬 수 있다. 이에 따라, 정책집행이 진행될수록 기술적 대안이 극단적으로 제한될 수 있다.

거대과학 전체에 대한 객관적·통합적 의사결정체계가 필요한 것으로 나타났다. 현재 거대과학에 대한 의사결정체계는 각 부처 또는 부서별로 분산되어 있는 상황이다. 장기간 대규모 투자가 불가피한 거대과학은 정치, 외교, 환경 등 외부요인에 따라 지속적인 투자에 대한 쟁점이 발생할 수 있다. 이러한 상황에서 최소한의 변동성 대응 장치가 없을 경우, 해당 거대과학

의 지속 추진 여부가 정치적으로 결정될 수 있다. 또한, 거대 과학 사업 자체는 안정적으로 추진된다고 하더라도, 특정 분야의 대규모 장기간 예산투입은 해당 분야 또는 타 분야 예산 편성에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 의사결정체계의 부재는 거대과학에 대한 투자 총량 파악, 장기 투자계획 수립, 분야 간 조정 등을 어렵게 만든다.

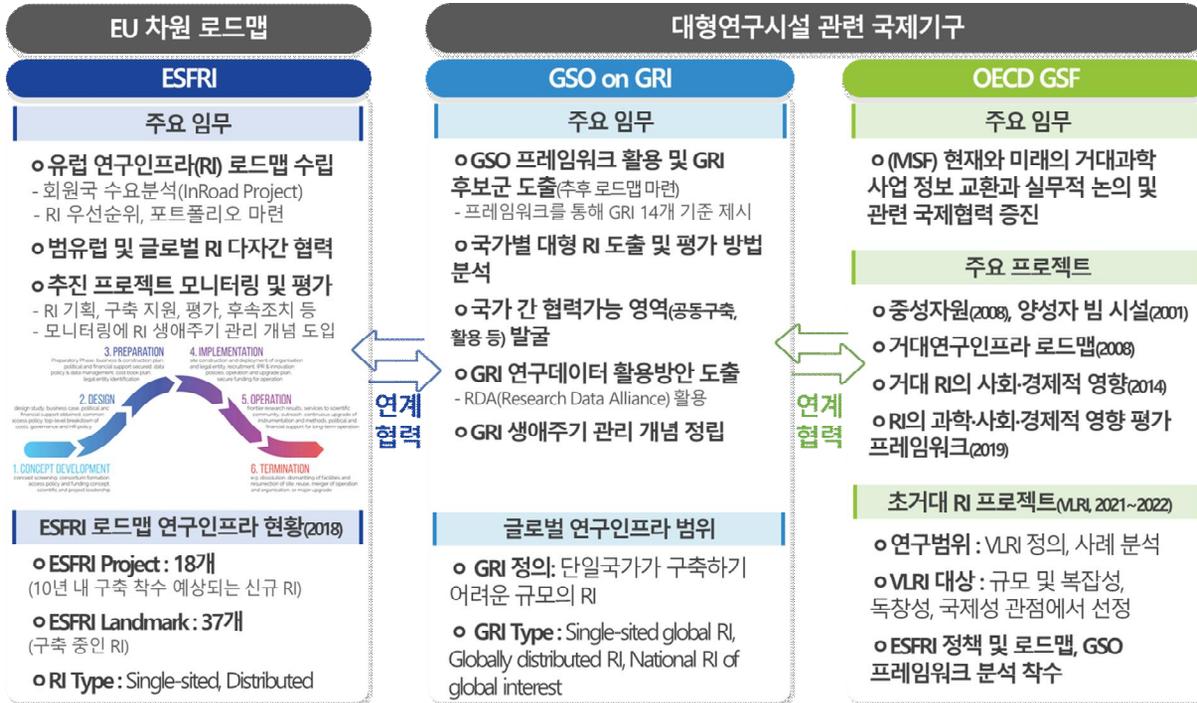
의사결정체계 이슈와 연계하여, 국가 차원의 대형연구시설·장비 로드맵의 수립 및 관리가 필요하다. 제2장 3절에서 살펴본 바와 같이, 2010년대 초반 우리나라에서도 대형연구시설에 대한 로드맵이 제시된 바가 있다. 다만, 실질적 투자연계가⁴²⁾ 미흡했으며 추진현황에 대한 모니터링 체계가 부재하는 등 실효성이 높지 않았다. 현재, 대형연구시설·장비는 총괄 로드맵 대신 분야별 중장기계획에서 관리되고 있다. 이에 따라, 해외 사례(ESFRI 등)와 같이 분야 간 일관된 기준 적용이 어렵고, 우선순위 조정 등이 불가한 상황이다. 국가적 수요분석 및 관련 커뮤니티의 합의에 따른 포트폴리오가 없을 시, 의제가 발생할 때마다 하향식 중심으로 정책결정이 추진될 가능성이 크다.

GSO 등 대형연구시설 관련 국제기구 참여를 확대할 필요가 있다. 최근, 초거대 연구인프라(VLRI)를 이용하여 혁신적 과학 성과가 창출되는 사례가 많아지면서, VLRI에 대한 중요성과 필요성이 높아지고 있다. 이러한 VLRI는 단일 국가의 역량을 넘어서는 경우가 많으므로, 주로 국제협력을 통해 구축되고 있다. 또한, 국제협력 프로젝트 분석, 추진 과정 효율화, 국제 거버넌스 마련 등을 위한 국제기구들도 설립되고 있다(그림 32). 이 중 OECD GSF에는 우리나라도 참여하고 있으나, GSO 등의 국제기구에는 참여하지 않고 있다. 통합적 의사결정체계

42) 구축지도 실적 : 제1차 → 10%(7개/69개), 제2차 → 38%(5개/13개)

(ESFRI)를 갖춘 EU에서는 OECD GSF뿐만 아니라 GSO GRI와도 직간접적으로 협력하고 있다. 최근 OECD GSF에서 추진하고 있는 VLRI 프로젝트에서도 ESFRI와 GSO와 사례를 분석하고 있으며, 세 기관 간 연계·협력이 유기적으로 추진되고 있다(그림 32). 반면, 우리나라는 통합적 의사결정체계가 부재한 상황으로 국제기구 참여 확대 및 관련 의제에 맞는 콘텐츠를 제공에 어려운 면이 있다. 더 나아가, 향후 ITER와 같은 VLRI 구축 프로젝트 수요가 발생했을 때, 이를 종합적으로 판단할 수 있는 기반이 부족한 상황이다.

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안



[그림 32] 대형연구시설 관련 국제기구와 ESFRI

2. 정책형성·결정 단계

거대과학은 예상치 못한 기술 난제 발생, 활용 방향 변경, 부품 조달 환경 변동 등에 따라 태생적으로 사업 추진상 불확실성이 존재한다. 또한, 의제설정 단계에서는 대형연구시설·장비의 개념도출 정도만 제시되어, 실현 가능성에 대한 검토 수준이 상당히 낮은 상태이다. 따라서, 의제로 채택된 시설·장비에 대한 개념 및 사전R&D 없이 정책결정이 바로 이뤄지면, 불확실성 및 위험요소는 해소되지 못한 채 정책집행 단계까지 확대되게 된다. 그리고 현 예산체계에서는 대형연구시설·장비에 대한 단계적 평가 체계가 없고, 사업 추진 여부와 총사업비·기간 등이 사전평가(예타 등)에서 모두 확정된다. 이는 앞 단계에서 해소되지 못한 불확실성이 이후 사업 추진(정책집행) 단계에서 기간·예산 변경 등의 문제로 발현된다. 위와 같은 사유로 인해, 주요국과 관련 국제기구에서는 대형연구시설·장비 생애주기 개념을 도입하고 이를 주요 정책단계로 인식 및 관리하고 있다. 이러한 추진체계는 사전R&D 체계화, 단계별 평가 및 정책결정을 가능하게 한다.(제3장 1절 참고)

[표 26] 연구인프라 생애주기 관리정책 비교

주요국		국내 대형연구시설·장비 생애주기 ⁴³⁾
정책단계	RI 생애주기	
의제설정	개념도출	기획
정책형성	설계	
정책결정	준비	
정책집행	구축	도입
모니터링 및 평가	운영	등록→활용→운영
피드백	종료	종료

43) ‘국가연구개발 시설·장비의 관리 등에 관한 표준지침’의 제2장 연구시설장비의 관리

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

거대과학 분야는 과학적·기술적 목표 달성을 위해 매우 복잡하고 정교한 대규모 시설·장비를 필요로 한다. 이러한 새로운 개념과 전례 없는 규모의 시설·장비를 구현해줄 산업체의 역할이 중요하다. 동시에, 공공 분야의 거대과학 정책은 산업체의 연관 R&D를 촉진하고, 잠재적으로 산업체의 기술 및 사업 기반을 변형시킬 수 있다. 다만, 산업체의 입장에서는 소비대상이 한정적이고 수요도 간헐적으로 발생하여 산업기반을 유지하는 것이 어려울 수 있다. 거대과학의 특성에 따라 관련 산업생태계 진입 장벽은 높으나, 기 진입한 산업체도 단일 품목 납품 이후 사업 판로를 찾지 못해 기술력이 사장되는 경우도 있다. 이러한 이슈는 추후 대형연구시설·장비를 구축할 때 관련 인력 및 기술이 소실되어, 유사한 품목이라도 다시 상당 수준의 R&D를 요하게 되는 결과로 이어진다. 또한, 안보 등의 이유로 기술 자립(국산화)이 필수적인 경우, 원활한 유지보수 등을 위해 국내 업체가 필요한 경우 등을 고려했을 때 국내 산업생태계의 유지 및 확대가 중요한 것으로 판단된다.

마지막으로, 공급(구축) 중심으로 정책이 추진된다는 이슈가 있었다. 시설·장비의 최종 목적, 활용 및 이용계획, 후속 R&D 및 성능개선 계획 등 장기적인 관점보다 단기 공급 중심으로 추진되는 경우가 존재했다.

3. 정책집행 단계

정책집행 단계에서 거대과학 사업의 공통 이슈는 총사업비 및 기간 변동으로 나타났다. 과기정통부(2021)에 따르면 2010년 이후 추진된 대형연구시설구축사업 19개 중 10개 사업(52%)에서 일정 지연 및 사업비 증가가 발생했다.⁴⁴⁾ 대표적인 사례를 정리하면 표 27과 같다. 사업계획이 변동되는 사유는 다양하겠으나, 앞서 살펴본 의제설정의 비체계성, 개념R&D 부재, 지속적인 업그레이드 등의 이슈와 연계될 수 있다.

[표 27] 대형연구시설 사업계획 변경 사례

대형연구 시설명	당초		변경	
	기간	총사업비(억 원)	기간	총사업비(억 원)
4세대 방사광가속기	2011~2014	4,000	2015(+1년)	4,038(+38)
한국형발사체	2010~2022	15,449	-	19,572(+4,123)
중입자가속기	2010~2015	1,950	2024(+9년)	2,598(+648)
중이온가속기	2011~2017	14,445	2021(+4년)	15,183(+738)
수출용 신형 연구로	2012~2016	2,900	2023(+7년)	4,389(+1,489)

44) 8개 사업에서 평균 3.9년(최대 9년) 연장되었으며, 10개 사업에서 당초(5.5조 원) 대비 7,796억 원 증액(14.2%)

대형연구시설·장비의 경우, 20~30년 정도의 수명이 예상되며 총구축비의 약 10%가 연간 운영비로 사용된다.⁴⁵⁾ 이러한 장기간 운영은 성능개선 계획, 부품 조달 환경, 관련 전문인력 양성 등에 대해 다각적인 검토를 요구한다. 무엇보다, 운영비가 구축비를 상회하는 경우가 많아 구축비만큼 운영비에 대한 투자계획 마련이 중요한 이슈이다. 이에 따라 주요국을 비롯하여 GSO, OECD GSF, ESFRI 등의 국제기구에서는 최적의 운영 방안에 관한 정책연구를 지속하고 있다. 한편, 우리나라는 구축 및 공급 중심의 정책결정으로 시설·장비의 최종 구축목적과 활용, 성능개선 등의 계획이 충분히 마련되지 않은 상태에서 정책이 집행되는 경우가 많다. 이는 구축 이후 운영단계에 얼마나 그리고 어떻게 투자해야 할지에 대한 이슈로 이어진다. 현재 운영비는 주로 관련 연구기관 자체사업으로 지원되고 있다. 이는 현재 대형연구시설·장비의 운영비 총계 파악 불가, 해당 연구기관의 자체R&D 비중 축소, 운영비 투자계획 수립 애로 등의 문제를 일으킬 수 있다. 또한, 특정 시설·장비의 성능개선을 어디까지 할 것인지에 대한 정책판단을 어렵게 한다.

현재 우리나라는 연구시설·장비 관련 사업계획 변동에 대해 병행적으로 관리하고 있다. 정책의 앞 단계보다 집행단계 및 사업관리에 제도가 집중된 상황이다. 예산 관점에서는 대표적으로 기재부의 총사업비 관리, 사업계획 적정성 재검토 등이 있다.(표 28) 거대과학의 정의에 따르면 모든 사업이 총사업비 관리대상이 된다.⁴⁶⁾ 총사업비 및 기간 변경으로 사업계획 적정성 재검토를 받게 되면, 이후 총사업비 변경에 대한 협의도 추가로 진행해야 한다.

45) OECD GSF는 국가 수준의 연구인프라는 구축 이후 통상적으로 총 구축 비용 대비 10%의 운영비용이 연간 투입되는 것으로 판단하고 있음. ESFRI 역시 운영비용을 초기 투자 대비 8-12%로 추산함

46) ‘총사업비 관리지침’에 따르면 총사업비가 200억 원 이상인 연구시설의 R&D사업은 총사업비 관리대상임

[표 28] 연구시설·장비 관련 사업계획 변동 관리정책

구분	총사업비 관리	사업계획 적정성 재검토	이행실태점검	종합사업관리 (PM)
담당 기관	기재부		과기정통부	
근거	총사업비 관리지침	예비타당성조사 운용지침	국가연구시설·장 비의 관리 등에 관한 표준지침	국가연구시설·장 비의 운영·활용 고도화계획 등
대상	총사업비 200억 원 이상	-	구축비 1억 원 이상	총사업비 500억 원 이상

예산 외에 시설·장비 구축과 관련해서는 과기정통부의 이행 실태점검과 종합사업관리(PM) 제도가 대표적이다. 이행실태점검은 1억 원 이상의 연구시설·장비에 대해 도입심의 결과의 이행 여부 및 예산집행 내역을 점검한다. 때에 따라 현장실태 조사 등이 추진되기도 한다. 종합사업관리(PM)의 경우, 대형 연구인프라 구축사업의 점검 관리체계 강화를 위해 2019년 1월부터 8개 사업에 시범 적용을 추진 중이다. 위험도가 높은 대형연구시설·장비 사업 성공률 제고를 위해 제도가 설계되었으나, 현재는 초기 단계로 대형연구시설·장비 및 PM제도의 이해, 사업관리제도체계 등이 다소 부족한 실정이다.

제2절 거대과학 정책단계별 개선방안

1. 통합적 의사결정체계 구축 및 생애주기 평가 도입

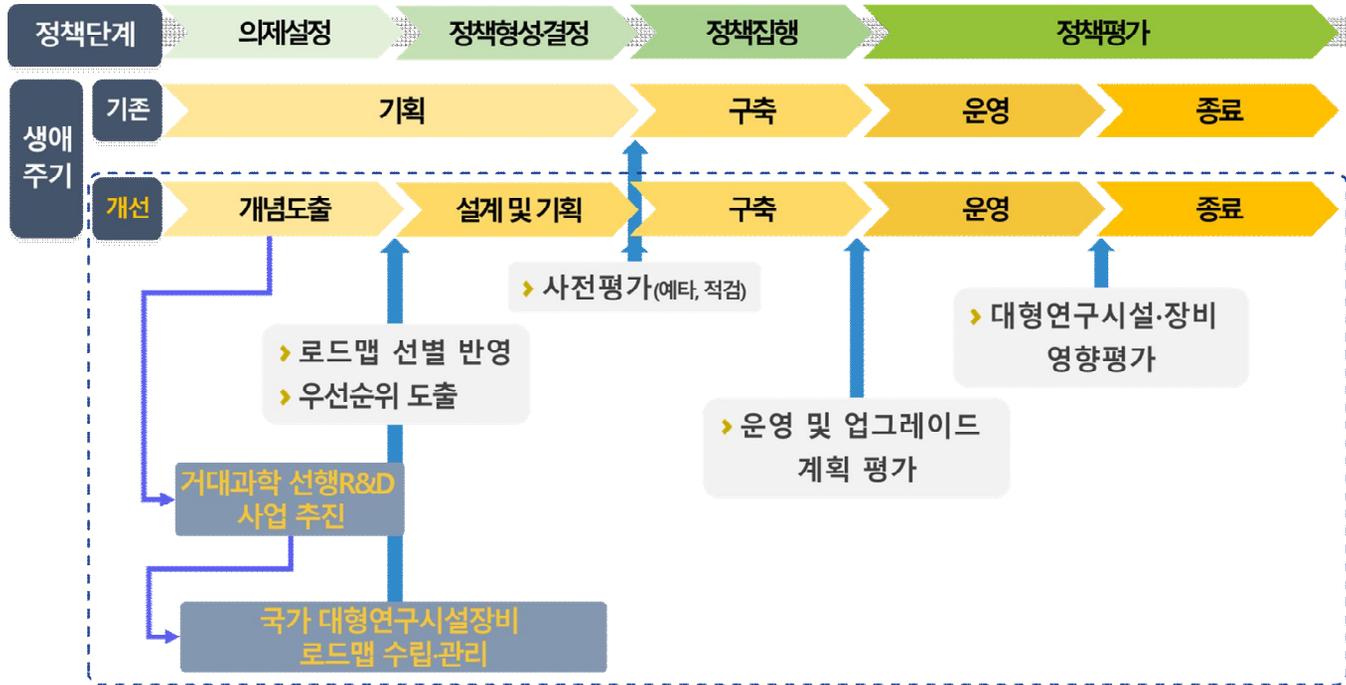
앞 절에서 살펴본 바와 같이, 거대과학에 대한 의사결정체계는 현재 각 분야 및 부처별로 분산되어 있다. 이로 인해 발생하는 이슈 해결을 위해서는, 의제설정부터 정책집행까지의 전체 정책단계와 전 거대과학 분야를 총괄하는 의사결정체계가 필요하다. 거대과학 분야의 통합적 의사결정체계 구축이 선제되어야, 거대과학 투자 총량 파악 및 투자계획 수립, 로드맵 수립, 분야 간 우선순위 조정, 단계평가 도입, 국제기구 프로젝트 참여 등 다양한 개선방안 도출이 순차적으로 가능하다. 더 나아가 국가 차원에서 추후 어떤 거대과학 분야에 투자해야 할지, 부품의 국산화 비중을 어느 정도가 적정한지 등에 대한 의사결정을 추진할 수 있다. 한편, ‘대형연구시설구축 내실화를 위한 사업 추진 개선 방안(2021)’에 따르면 과기정통부에서는 대형연구시설전문위원회를 신설할 예정이다. 해당 전문위원회의 역할과 권한을 단계적으로 확장 운영하는 방안도 고려할 수 있다.

또한, 의사결정체계와 연계하여 연구시설·장비의 생애주기 평가 도입 필요성이 있다. 표 26과 같이 연구시설·장비 생애주기는 개념도출, 설계·준비, 구축, 운영, 종료 등으로 구분될 수 있다. 그러나, 우리나라는 현재 구축 이전 단계는 세분되어 관리되지 못하고 있으며, 생애주기 중 구축 이전, 사업기획에 대해서만 한 번의 사전평가(예타, 적정성 검토 등)가 이뤄지고 있다. 이를 개선하기 위해 그림 33과 같이 연구시설·장비의 생애주기 개념을 도입하고, 단계별 평가를 도입할 필요가 있다. 개념도출에 대해서는 로드맵 선별 반영 및 우선순위 부여를 통해

제 4 장 거대과학 정책단계별 개선방안

평가하며, 구체화된 설계·기획에 대해서는 기존 사전평가 제도를 활용할 수 있다. 이슈로 제기되었던 장기 운영 및 업그레이드에 대해서는 운영단계 이전 해당 계획을 평가하여 운영 기간에 맞는 예산을 지원할 필요가 있다. 또한, 운영 중 또는 종료 단계에서는 대형연구시설·장비에 맞는 영향평가 제도를 마련하여 적용해야 한다. 각 평가 단계의 결과들은 전 단계로 환류되어 거대과학 체계 고도화에 활용될 수 있다.

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안



[그림 33] 대형연구시설·장비 생애주기 단계평가 방안

2. 거대과학 분야 국가 대형연구시설·장비 로드맵 수립·관리

가. 국가 대형연구시설·장비 로드맵 수립·관리

거대과학 분야의 국가 차원 대형연구시설·장비 로드맵을 수립하고 지속해서 관리할 필요가 있다. 단순히 수요조사를 기반으로 분야별 필요 시설·장비를 나열하는 것이 아니라, 일관된 판단기준하에 개념을 검토한 후 시설·장비의 선별 반영 및 우선순위 부여가 중요하다. 그리고, 로드맵의 객관성 확보를 위해 해외 전문가의 추가 검증 체계 등도 고려할 수 있다. 이러한 절차를 통해 추가 제도 없이도 생애주기 상 첫 단계평가를 추진할 수 있다.

로드맵의 위상 강화 및 실효성 제고를 위해 과학기술기본법 개정 등 최상위 법적 근거 및 로드맵-투자 연계 체계를 마련해야 한다. 또한, 대내외 환경변화에 대응하여 주기적으로 로드맵을 업데이트⁴⁷⁾하고, 로드맵 이행 현황을 점검할 수 있도록 설계해야 한다.

로드맵에는 주요 부품 및 기술, 구축 시기 및 기간, 구축 비용 및 규모, 활용 및 이용 방향, 과학적·기술적 입지조건 등을 구체적으로 포함할 필요가 있다. 이러한 국가적 시설·장비 포트폴리오 및 투자계획은 관련 산업체의 안정적 투자 및 R&D를 유도하여 산업생태계 활성화에 기여할 수 있다. 또한, 입지조건 제시 등은 이후 정책집행 단계에서 불필요한 사회적 갈등 및 사업 추진 지연을 최소화할 수 있다.

47) ESFRI의 경우, 2006년에 처음 로드맵을 수립한 후 주기적으로 로드맵을 업데이트하고 있음. (수립 연도 : 2006, 2008, 2010, 2016, 2018, 2021(예정))

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

나. 거대과학 정책결정 주요판단기준 선정을 위한 AHP 설문

본 절에서는 전문가 설문을 통해 로드맵 반영 및 우선순위 설정에 활용할 주요판단기준을 제시하고자 한다. 이에, 거대과학(대형연구시설·장비) 정책결정을 위한 주요판단기준의 우선순위를 도출하기 위해 거대과학 분야 전문가를 대상으로 AHP⁴⁸⁾를 실시하였다.

1) 설문대상 그룹 구성

설문대상 전문가는 총 19인으로 구성하였으며, 거대과학 분야, 산·학·연, 기술·정책 등을 다각적으로 고려하여 설문대상 전문가 그룹을 구성하였다.(표 29) 또한, 유의도적 표집 관점에서, 각 전문가들은 거대과학(대형연구시설·장비)에 대해 전문지식이 있는 사람들이며 본 연구의 목적을 이해하고 의미 있는 결과를 제시할 수 있다고 판단하였다.

[표 29] AHP 조사대상자 구성

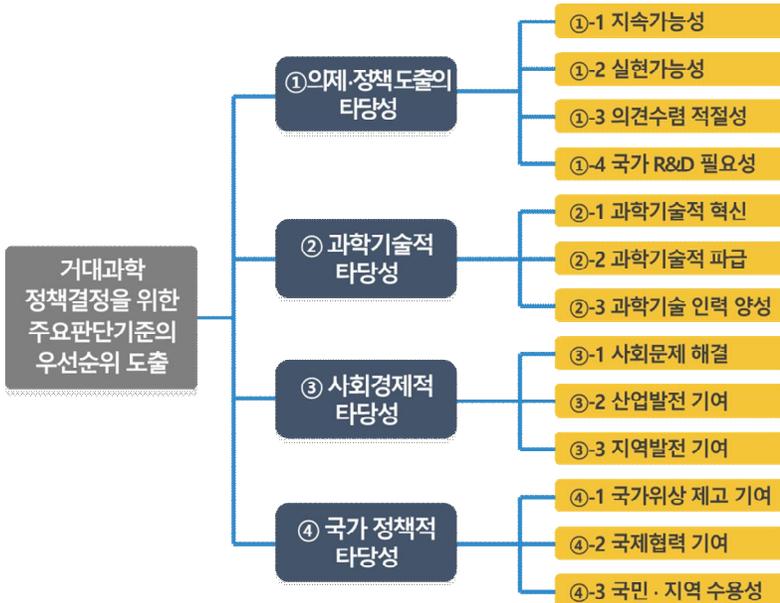
산/학/연	비중(%)	기술/정책	비중(%)	거대과학 분야	비중(%)
산	21.1	기술	57.9	우주	21.1
학	26.3	정책	42.1	원자력	21.1
연	52.6			핵융합	26.3
				가속기	21.1
				기타	10.4

48) AHP(Analytic Hierarchy Process)는 의사결정의 평가 기준이 복합적인 경우, 상호 배반적인 의사결정 구성 요소들의 쌍대비교를 통해 상대적 중요도를 측정하는 기법임(안승구 외, 2011)

2) AHP 평가항목 구성

거대과학 정의, 특징, 이슈 등을 바탕으로 거대과학 정책결정을 위한 판단기준을 구성하였다. 그림 34와 같이 4개의 1차 판단기준(제1계층)과 13개의 2차 판단기준(제2계층)으로 구분된다. 1차 판단기준은 ‘의제·정책 도출의 타당성’, ‘과학기술적 타당성’, ‘사회경제적 타당성’, ‘국가 정책적 타당성’이며, 2차 판단기준은 ‘지속가능성’, ‘실현가능성’, ‘의견수렴 적절성’, ‘국가 R&D 필요성’, ‘과학기술적 혁신’, ‘과학기술적 파급’, ‘과학기술 인력 양성’, ‘사회문제 해결’, ‘산업발전 기여’, ‘지역발전 기여’, ‘국가위상 제고 기여’, ‘국제협력 기여’, ‘국민·지역 수용성’ 등으로 각 기준에 대한 세부내용은 표 30과 같다.

AHP 설문지는 1차 및 2차 판단기준에 대한 중요도를 쌍대 비교하는 문항으로 구성하였다. 또한, 평가항목의 신뢰도를 판단하기 위해 각 비교 단계마다 일관성 비율이 0.1 보다 낮게 도출되도록 설계하였다.



[그림 34] AHP 설문 계층구조

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

[표 30] 거대과학 정책결정을 위한 주요판단기준

의제·정책 도출의 타당성	
지속가능성	장기 재정 소요 분석과 재원 마련 계획 마련이 가능한가? 또한, 국내외 정책적 리스크, 사회변화, 공공갈등 등에 무관하게 일관성 있는 추진이 가능한가?
실현 가능성	기본 기술, 국내 구축 기술 및 산업 수준, 관련 기관 전문성 등 기술적 준비성이 높은가?
의견수렴 적절성	의사결정 과정에서 다양한 분야 및 주체(공급자, 수요자 등)의 수요와 의견을 얼마나 반영하였는가? (특정 분야 또는 소수의 의견만 반영되지는 않았는지?)
국가 R&D 필요성	국가 R&D로 추진할 필요성이 높은가? (기술수입, 민간투자 등 다른 효율적인 정책대안이 존재하지 않는가?)
과학기술적 타당성	
과학기술적 혁신	인류의 과학기술적 지식 확장 또는 혁신 가능성이 큰가?
과학기술적 파급	타 과학기술 분야의 진보 및 혁신에 미치는 영향이 큰가?
과학기술 인력 양성	과학자, 공학자, 전문기술자 등 관련 분야 전문인력 확보 및 양성에 얼마나 기여 가능한가?
사회경제적 타당성	
사회문제 해결	국내외 사회·환경 문제(기후변화, 에너지 안보, 글로벌 보건 이슈 등) 해결에 얼마나 기여 가능한가?
산업발전 기여	산업생태계 활성화 및 산업발전에 직접(구축, 활용 등) 또는 간접적(스핀오프 등)으로 얼마나 기여 가능한가?
지역발전 기여	대형연구시설 구축이 지역 클러스터 또는 지역 전략과 연계하여 지역발전에 얼마나 기여 가능한가?
국가 정책적 타당성	
국가 위상 제고 기여	제안된 연구(대형연구시설)의 독창성 또는 선도성에 따라, 국가 위상 제고에 얼마나 기여 가능한가?
국제협력 기여	국제 공동연구 및 연구 네트워크 강화 또는 국제적 협약 및 원조 이행 등에 얼마나 기여 가능한가?
국민·지역 수용성	제안된 연구(대형연구시설)의 환경피해, 생활권 침해 등을 고려했을 때, 국민 및 지역사회의 수용 가능성이 큰가?

3) AHP 설문 분석결과

거대과학 분야 전문가의 AHP 설문 조사 결과를 바탕으로 1차 판단기준과 2차 판단기준에 대한 가중치를 분야별과 기술·정책별로 구분하여 분석하였다. 전문가의 전공, 소속, 담당업무 등을 바탕으로 우주, 핵융합, 가속기, 원자력 등 4개 거대과학 분야와, 기술·정책 분야로 구분하여 우선순위를 분석하였다.

가) 종합 분석결과

1차 판단기준을 살펴보면, ‘과학기술적 타당성’이 가장 중요한 것으로 분석되었으며, 그다음으로는 ‘국가 정책적 타당성’, ‘의제·정책 도출의 타당성’, ‘사회경제적 타당성’ 등의 순으로 나타났다. 2차 판단기준을 살펴보면, ‘과학기술적 혁신’이 가장 중요하게 나타났으며, ‘국가 위상 제고 기여’ 등이 뒤를 이었다.

[표 31] 거대과학 전 분야 전문가 의견 가중치 및 순위

순위	평가항목(1차 기준)	평가항목(2차 기준)
1	과학기술적 타당성(0.3989)	과학기술적 혁신(0.1880)
2	국가 정책적 타당성(0.2711)	국가 위상 제고 기여(0.1487)
3	의제·정책 도출의 타당성(0.1671)	국가 R&D 필요성(0.0692)
4	사회경제적 타당성(0.1629)	산업발전 기여(0.0773)

나) 거대과학 분야별 분석결과

우주 분야에서는 ‘국가 정책적 타당성’의 가중치가 0.4371로 가장 높게 나왔으며, 이에 해당하는 2차 기준으로는 ‘국가 위상 제고 기여(0.2381)’가 가장 중요한 것으로 나타났다. 그다음으로는 ‘사회경제적 타당성(0.2229)’, ‘의제·정책 도출의 타당성(0.1897)’, ‘과학기술적 타당성(0.1503)’ 순으로 나타났다. 주목할만한

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

점은, 타 분야와는 달리 ‘과학기술적 타당성’이 가장 낮은 순위를 보였다. 이는, 타 분야와는 달리 ‘과학기술적 타당성’이 가장 낮은 순위를 보였다.

[표 32] 우주 분야 전문가 의견 가중치 및 순위

순위	평가항목(1차 기준)	평가항목(2차 기준)
1	국가 정책적 타당성(0.4371)	국가 위상 제고 기여(0.2381)
2	사회경제적 타당성(0.2229)	사회문제 해결(0.0966)
3	의제·정책 도출의 타당성(0.1897)	국가 R&D 필요성(0.0710)
4	과학기술적 타당성(0.1503)	과학기술적 파급(0.0647)
5		과학기술적 혁신(0.0645)

원자력 분야의 경우, ‘국가 정책적 타당성(0.4371)’이 가장 중요하게 평가되었으며, 2차 판단기준에서는 대형연구시설의 환경피해, 생활권 침해 등과 관련하여 ‘국민·지역사회의 수용성(0.1753)’의 가중치가 가장 높게 나타났다. 그다음으로는 ‘과학기술적 타당성(0.2109)’이 뒤를 이었으며, ‘사회경제적 타당성(0.1995)’과 ‘의제·정책 도출의 타당성(0.1945)’ 비슷하게 중요한 것으로 나타났다.

[표 33] 원자력 분야 전문가 의견 가중치 및 순위

순위	평가항목(1차 기준)	평가항목(2차 기준)
1	국가 정책적 타당성(0.3951)	국민·지역 수용성(0.1753)
2	과학기술적 타당성(0.2109)	과학기술적 파급(0.1057)
3	사회경제적 타당성(0.1995)	사회문제 해결(0.0931)
4	의제·정책 도출의 타당성(0.1945)	국가 R&D 필요성(0.0727)

제 4 장 거대과학 정책단계별 개선방안

핵융합 분야의 경우, ‘과학기술적 타당성(0.5561)’과 ‘과학기술적 혁신(0.3058)’의 가중치가 타 판단기준보다 매우 높게 나타났다. 그다음으로는 ‘사회경제적 타당성(0.1704)’, ‘국가 정책적 타당성(0.1480)’, ‘의제·정책 도출의 타당성(0.1254)’ 순으로 중요도가 나타났다.

[표 34] 핵융합 분야 전문가 의견 가중치 및 순위

순위	평가항목(1차 기준)	평가항목(2차 기준)
1	과학기술적 타당성(0.5561)	과학기술적 혁신(0.3058)
2	사회경제적 타당성(0.1704)	산업발전 기여(0.0940)
3	국가 정책적 타당성(0.1480)	국가 위상 제고 기여(0.0973)
4	의제·정책 도출의 타당성(0.1254)	국가 R&D 필요성(0.0365)
5		지속가능성(0.0313)
6		실현 가능성(0.0313)

가속기 분야의 경우, ‘과학기술적 타당성’의 가중치가 0.5986으로 상당히 높게 나타났으며, 세부적으로는 ‘과학기술적 파급(0.2595)’이 중요한 판단기준으로 나타났다. 그다음으로는 ‘의제·정책 도출의 타당성(0.1841)’, ‘국가 정책적 타당성(0.1476)’ 등이 중요한 것으로 나타났다. ‘사회경제적 타당성(0.0697)’은 가속기 분야에서는 상대적으로 중요하지 않은 것으로 분석되었다.

[표 35] 가속기 분야 전문가 의견 가중치 및 순위

순위	평가항목(1차 기준)	평가항목(2차 기준)
1	과학기술적 타당성(0.5986)	과학기술적 파급(0.2595)
2	의제·정책 도출의 타당성(0.1841)	국가 R&D 필요성(0.0940)
3	국가 정책적 타당성(0.1476)	국가 위상 제고 기여(0.0956)
4	사회경제적 타당성(0.0697)	사회문제 해결(0.0314)

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

다) 기술/정책별 분석결과

기술 분야 전문가들은 ‘과학기술적 타당성(0.3535)’ 및 ‘과학기술적 파급(0.1797)’을 가장 중요하게 판단했다. 그다음으로는 ‘국가 정책적 타당성(0.3207)’, ‘사회경제적 타당성(0.2135)’ 등이 중요한 것으로 나타났다. 기술 분야에서는 ‘의제·정책 도출의 타당성(0.1303)’은 상대적으로 덜 중요한 것으로 분석되었다.

[표 36] 기술 분야 전문가 의견 가중치 및 순위

순위	평가항목(1차 기준)	평가항목(2차 기준)
1	과학기술적 타당성(0.3535)	과학기술적 파급(0.1797)
2	국가 정책적 타당성(0.3027)	국가 위상 제고 기여(0.1750)
3	사회경제적 타당성(0.2135)	산업발전 기여(0.1041)
4	의제·정책 도출의 타당성(0.1303)	국가 R&D 필요성(0.0506)

정책 분야도 ‘과학기술적 타당성(0.4477)’이 가장 중요한 것으로 판단되었으나, 세부적으로는 ‘과학기술적 혁신(0.2826)’의 가중치가 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, ‘의제·정책 도출의 타당성(0.2239)’이 두 번째로 중요한 것으로 분석되는 등 기술 분야와의 차이를 나타냈다.

[표 37] 정책 분야 전문가 의견 가중치 및 순위

순위	평가항목(1차 기준)	평가항목(2차 기준)
1	과학기술적 타당성(0.4477)	과학기술적 혁신(0.2826)
2	의제·정책 도출의 타당성(0.2239)	국가 R&D 필요성(0.0970)
3	국가 정책적 타당성(0.2215)	국가 위상 제고 기여(0.1121)
4	사회경제적 타당성(0.1068)	산업발전 기여(0.0487)
5		사회문제 해결(0.0429)

4) 소결 및 시사점

종합적으로는 1차 판단기준에 대해 과학기술적 타당성, 국가 정책적 타당성, 의제·정책 도출의 타당성, 사회경제적 타당성 순으로 중요도가 도출되었다. 하위 판단기준에서는 과학기술적 혁신, 국가 위상 제고 기여, 국가 R&D 필요성, 산업발전 기여 순으로 중요한 것으로 나타났다. 즉, 정책결정 시 과학기술적 혁신이 가장 중요하고, 지역발전 기여에 대해서는 가장 덜 중요한 것으로 판단되고 있었다.

정책 및 기술 분야로 구분했을 때는, 과학기술적 타당성이 두 분야 모두 가장 중요한 것으로 나타났으나, 정책 분야에서는 의제·정책 도출의 타당성이 두 번째로 중요도가 높은 반면, 기술 분야에서는 가장 덜 중요한 것으로 나타났다. 정책 전문가 관점에서는 의제설정의 비체계성 이슈 해소에 집중하는 반면, 기술 전문가 관점에서는 국가 정책과의 연계성이 우선되어야 한다는 의견으로 해석된다.

거대과학 분야별로 분석했을 경우, 우주 및 원자력 분야는 국가 정책적 타당성이 가장 중요했고, 핵융합 및 가속기 분야는 과학기술적 타당성의 중요도가 가장 높았다. 우주와 원자력 분야와 같이 산업화가 단기적으로 가능한 분야는 과학기술적 타당성보다 국가 정책적으로 타당한지에 대한 검토가 우선될 필요가 있는 것으로 보인다. 반면, 핵융합 및 가속기 분야와 같이 기초·원천 R&D 단계인 경우, 과학기술적 타당성을 중심으로 정책결정이 이뤄질 필요가 있는 것으로 판단된다. 하위 판단기준을 살펴보면, 우주는 국가 위상 제고 기여를, 원자력은 국민·지역 수용성을 가장 중요하게 평가했다. 이는 선호/비선호 시설에 대한 인식 차이에 기인한 것으로 보인다. 한편 핵융합은 과학기술적 혁신, 가속기는 과학기술적 파급을 가장 비

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

중 있게 평가했다. 핵융합 분야는 시설·장비 구축 자체로 R&D를 추진하고 비교적 타 분야의 접근이 어려운 반면, 가속기는 다양한 분야에서 이용 및 활용한다는 점에서 나타난 차이라고 판단된다.

3. 거대과학 분야 예산 프로그램 추가 및 연계 관리

우리나라는 프로그램예산제도⁴⁹⁾를 도입 및 운영하고 있다. 프로그램은 동일한 정책목표를 달성하기 위한 단위사업의 묶음이며, 정책적으로 독립성을 지닌 최소 단위이다. 또한, 총액 배분 자율편성 제도⁵⁰⁾의 한도액 설정 단위로 사용된다(예정처, 2010).

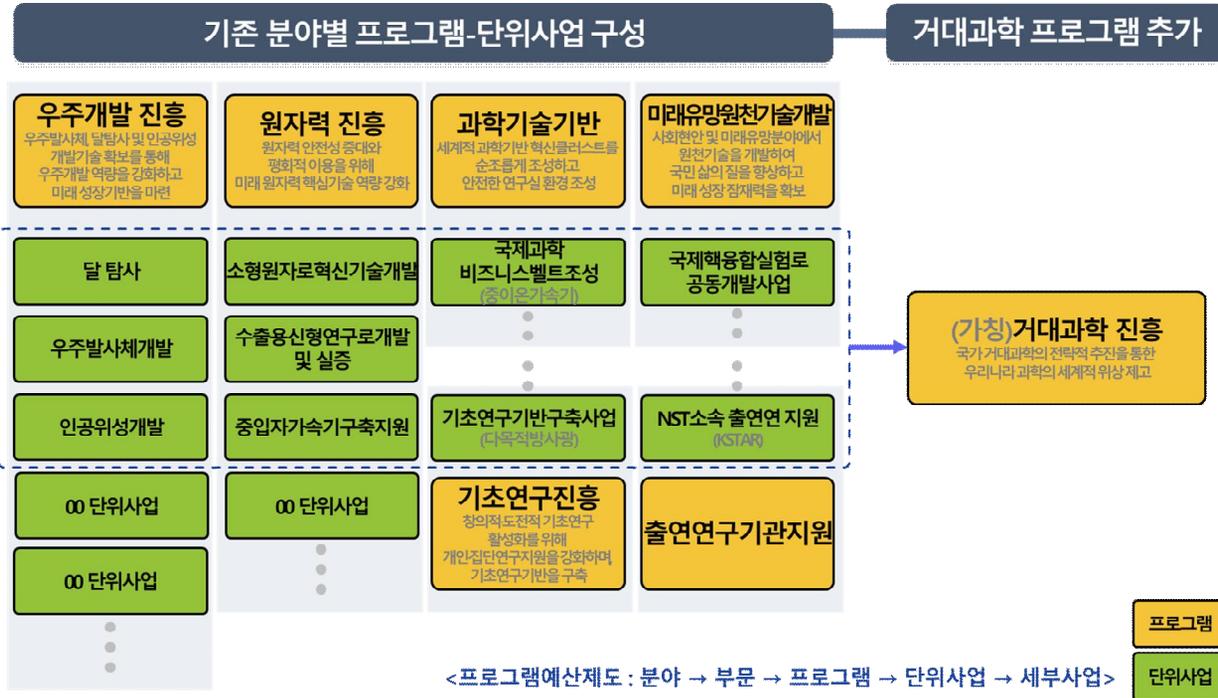
현재, 거대과학 분야는 개별 근거법령, 중장기계획 등에 따라 다수의 프로그램으로 분산되어 추진 중이다.(그림 35) 우주 및 원자력 분야는 비교적 거대과학 관련 단위사업에 대한 집중도가 높은 편이다. 반면, 핵융합 및 가속기 분야는 같은 분야임에도 과학기술기반, 기초연구진흥, 미래유망원천기술개발 등 다수의 프로그램에 분산되어 있다. 프로그램이 정책적 독립성을 지닌 최소 단위라는 점을 고려했을 때 향후 거대과학 상위정책, 로드맵 등이 수립되더라도 해당 정책이 예산 및 성과평가와 연계되기 힘든 구조이다. 따라서, 거대과학을 위한 프로그램을 추가 신설하여 현 예산체계에 반영할 필요가 있다.

다만, 각 분야 및 부서별 기존 정책 추진을 위해서는 현 프로그램-단위사업 구조도 현실적으로 유지해야 한다. 따라서, 기존 구조는 유지하되, 거대과학 프로그램을 신설하고 그 하위에 거대과학 관련 단위사업을 연계·관리하는 방안을 고려할 수 있다. 이를 통해, 거대과학 프로그램만의 프로그램 목표 및 성과지표를 도출하고, 지출한도(ceiling)도 프로그램 단위로 설정하는 방안 등도 고려할 수 있다.

49) 예산의 계획, 편성, 배정, 집행, 결산, 평가 등 전 과정을 프로그램을 중심으로 구조화하고, 성과평가 체계와 연계하여 성과를 관리하는 예산제도. 기본구조는 <분야-부문-프로그램-단위사업-세부사업> 5단계로 구성됨

50) 국가재정운용계획을 통해 사전에 제시된 분야별·부처별 지출한도 내에서 각 부처가 예산을 자율적으로 편성하는 방식

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안



[그림 35] 거대과학 프로그램 추가 방안

4. 기타

가. 거대과학 선행R&D 사업 추진

거대과학 분야 연구시설·장비 구축사업의 리스크를 근본적으로 줄이기 위해서는 시설·장비의 개념도출을 위한 선행R&D를 지원해야 한다. 선행R&D의 범위는 개발 리스크가 큰 주요 장치 및 기술의 실현 가능성 검토 등이 될 수 있다. 구체적인 선행R&D 지원 방안으로는, 거대과학 분야 프로그램형 선행R&D 사업 신설을 고려할 수 있다. 개념도출 단계에서는 다양성을 유지할 필요가 있으므로, 특정 의제에 대해 다양한 방식의 R&D(경쟁형R&D) 추진 및 유사·중복을 일부 허용할 필요가 있다. 이를 통해 관련 과학 커뮤니티의 합의를 도출할 수 있고, 특정 소수 및 기술에 대한 과도한 의존을 방지할 수 있다. 또한, 개념의 구체화, 기술적 실현 가능성 등을 통해 더 많은 의제를 도출할 수 있고, 사전정보의 확장으로 더 객관적인 합의를 이룰 수 있다. 이 외에도, 선행R&D사업을 통해 거대과학 분야 간 협업 발굴을 지원할 수 있다.

나. 총사업비 관리 완화

국가재정법 시행령 제22조(타당성제조사) 1항, 총사업비 관리지침 제49조(타당성제조사의 요건) 1항, 예비타당성조사 운용지침 제35조(사업계획 적정성 재검토) 1항 등에 따르면, 물가인상분 및지가상승분을 제외한 총사업비 증가가 10~20% 이상인 사업은 타당성제조사 또는 사업계획 적정성 재검토 대상이 된다.

거대과학 사업의 경우, 앞서 살펴본 바와 같이 사전평가(예타 등) 이후 설계 및 구축 과정에서도 사업계획 변경이 발생할 수 있다. 단계별 검토 및 PM 제도 활성화 등을 통해 사업계획 변

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

경을 최소화해야겠으나, 거대과학 사업은 본질적으로 불확실성을 완전히 배제할 수 없다. 즉, 거대과학 사업 추진 과정에 발생할 모든 문제를 사전에 예측하고 이를 고려한 세부 예산 계획을 수립하는 데 한계가 있다. 이러한 상황에서, 병행적인 총사업비 관리는 거대과학 사업 추진의 효율성을 오히려 낮출 우려가 있다. 따라서, 현 관련 규정의 최대치인 20%(또는 15%)⁵¹⁾의 총사업비 변경을 허용하고, 타당성재조사나 사업계획 적정성 재검토를 받은 거대과학 사업의 경우 이후 추가적인 총사업비 협의는 배제 또는 간소화할 필요가 있다.

51) 총사업비가 1,000억 원 미만이면 20% 이상, 1,000억 원 이상이면 15% 이상

제5장

결론

제5장 결론

본 연구에서는 국가 거대과학 분야 정책 전 단계의 이슈 및 문제점을 진단하고, 거대과학의 효율적 추진을 위한 정책 개선 방안을 도출하였다.

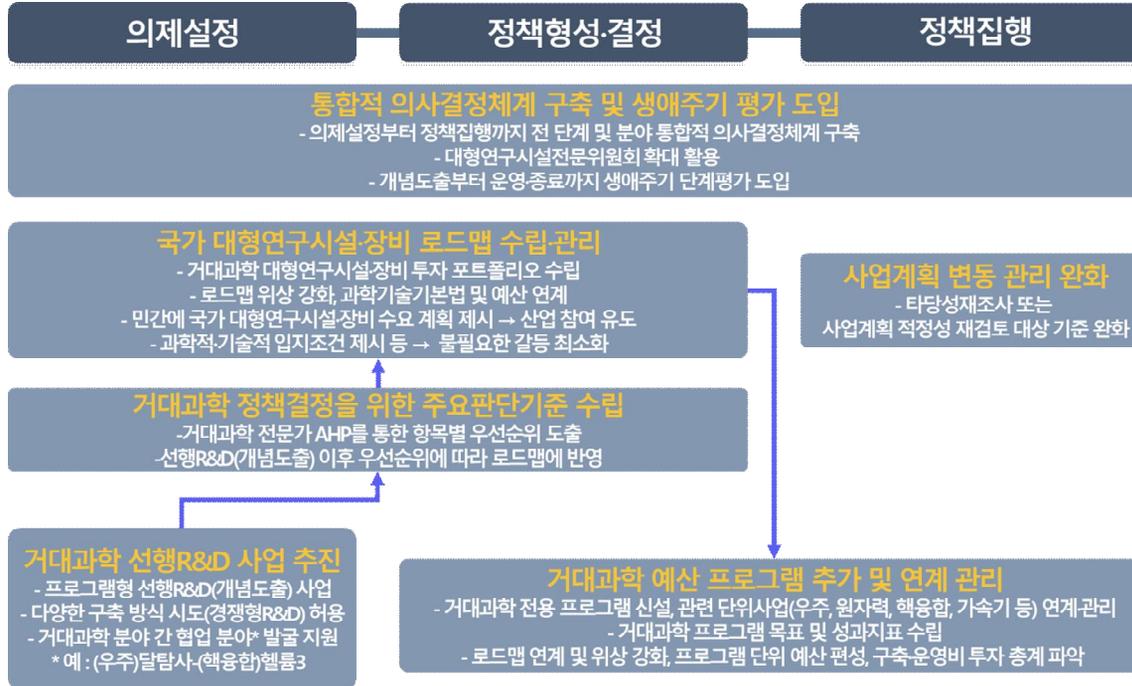
우선, 문헌 조사, 서지 분석, 전문가 FGI 등을 통해 거대과학을 “대규모 예산과 인력이 투입되며 대형연구시설·장비를 장기간 구축하고 활용하는 과학기술 분야”로 정의했다. 또한, 거대과학 대형연구시설·장비는 “구축 단계부터 R&D 비중이 높으며, 단일장비 구축 비용이 500억 원 이상인 연구시설·장비”로 정의했다. 이에 따라 우주, 원자력, 핵융합, 가속기를 거대과학 분야로 한정하였다.

거대과학의 정책단계는 총 3단계(의제설정, 정책형성·결정, 정책집행)로 설정하였다. 또한, 정책단계별로 거대과학의 대형연구시설·장비 생애주기를 매칭하여, 단계별 구분을 명확화하고 이슈 분석을 체계화하였다.

거대과학 분야 정책단계별 이슈는 다음과 같이 나타났다. 의제설정 단계에서는 의제설정의 비체계성, 거대과학 전체에 대한 객관적·통합적 의사결정체계 부재, 국가 차원의 대형연구시설·장비 로드맵의 수립 및 관리 부족 등이 이슈로 나타났다. 정책형성·결정 단계에서는 개념R&D 없이 정책결정, 구축(공급) 중심 정책결정, 산업 기반 유지 확대 필요 등이 주요 이슈로 분석되었다. 정책집행단계에서는 사업계획 및 총사업비 변동, 운영 및 업그레이드, 예산변동 관리의 병행 등이 이슈로 나타났다. 위와 같이, 현재 구축(정책집행) 중심으로 제기되는 이슈들은 이전 정책단계의 다양한 이슈들의 상호작용에 의한 결과물이다. 이는 정책집행뿐 아니라, 의제설정 및 정책형성·결정 단계의 이슈도 개선 필요성이 높다는 것을 의미한다.

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

이에 본 연구에서는 거대과학 분야 정책단계별 개선방안을 다음과 같이 제안하였다.(그림 36) 우선, 정책 전 단계 및 거대과학 전 분야의 통합적 의사결정체계를 구축하고 시설·장비의 생애주기 평가 시스템을 도입해야 한다. 이와 연계하여, 국가 대형연구시설·장비 로드맵을 수립하고 투자와 연계하여 국가적 시설·장비 포트폴리오 및 투자계획을 관리할 필요가 있다. 의제설정 단계에서는 거대과학 선행R&D 사업 추진을 통해 개념의 구체화, 기술적 실현 가능성 등을 사전에 검토할 수 있는 체계를 구축할 필요가 있다. 정책형성·결정 및 정책집행 단계에서는 거대과학 프로그램을 신설하고 그 하위에 거대과학 관련 단위사업을 연계·관리하는 방안을 제안하였다. 마지막으로, 로드맵 반영 및 우선순위 설정에 활용할 거대과학 정책결정을 위한 주요판단기준을 제시하였다. 전문가 AHP 설문을 통해 판단기준별 우선순위를 도출하였으며, 종합적으로는 과학기술적 타당성, 국가 정책적 타당성, 의제·정책 도출의 타당성, 사회경제적 타당성 순으로 중요도가 도출되었다.



[그림 36] 거대과학 정책단계별 개선방안

참고문헌

Alvin M. Weinberg(1961), Impact of Large-Scale Science on the United States

Alvin M. Weinberg(1967), Reflections on Big Science

ESFRI(2019), Roadmap 2021 Public Guide

FIA(2021), The global fusion industry in 2021

GSO(2017), GSO on GRI Progress Report

L. G. Georghiou(1996), Equipping researchers for the future

Maria Nedeva(1999), Benefactors or beneficiary - The role of industry in the support of university research equipment

Merle Jacob(2012), The persistence of big science and megascience in research and innovation policy

Michael Howlett(2003), Studying public policy: Policy cycles and policy subsystems

OECD(1992), Mega-Science Policy Issues

OECD(1993a), Megascience and Decision-making Processes

OECD(1993b), Megascience and its background

OECD(2014), The Impacts of Large Research Infrastructures on Economic Innovation and on Society

OTA(1995), International Partnerships in Large Science Projects

Philip Ball(2021), The chase for fusion energy

Richard A. Krueger(2009), Focus Groups; A Practical Guide for Applied Research

RI-PATHS(2020), Guidebook for Socio-Economic Impact Assessment of Research Infrastructures

Space Foundation(2021), Space Report 2021 Q1

고용수(2005), 한국의 과학기술정책 기획과정과 결정구조의 특성분석

과학기술정보통신부(2021), 대형연구시설구축 내실화를 위한 사업추진 개선 방안

국가과학기술위원회(2013), 제2차 국가 대형연구시설 구축 지도

국가연구시설장비진흥센터(NFEC, 2009), 거대과학과 연구시설

국가핵융합연구소(2012), 핵융합에너지 정책 백서

국회예산정책처(2010), 프로그램 예산사업 편람

권기석(2018), 과학과 기술의 공진화 경영을 통한 거대과학의 추격

김영삼(2002), 과학기술정책수립과정의 개선방안

김용주(2020), 국가별 연구인프라 투자결정 및 모니터링 체계 분석 및 정책이슈 도출

김유빈(2018), 거대과학 국가 R&D 성공을 위한 프로젝트 거버넌스 연구

신유정(2019), 학제성의 정책적 기반: 한·미 뇌과학분야 형성을 중심으로

안승구(2011), 국가 R&D 투자 우선순위 설정 방법론 연구

이명진(2002), 과학기술 국제화 환경분석 및 대응방안

이민형(2011), 거대과학 투자 효율화를 위한 종합관리체계 구축 방안

이승현(2018), 다중흐름모델을 적용한 기초과학정책 결정과정 분석 : 국제과학비즈니스벨트 사례

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

이원희(2009), 거대과학 국가 R&D 성공을 위한 프로젝트 거버넌스 연구

정기철(2010), 거대과학 글로벌 산업화 전략

정성철(1999), 거대과학 국제협력체제 분석 및 우리의 참여방안

조현대(2011), 국가 거대과학기술의 뉴 프론티어 창출 전략

최원재(2013), 거대과학 산업생태계 활성화 전략의 우선순위 결정에 관한 연구

한국핵융합에너지연구원(2021), ENERGY INSIGHT VOL.5

함선영(2021), 대형연구시설 구축 - 중이온가속기를 중심으로

황병상(2004), 과학기술 정책과정의 정책네트워크 분석: 핵융합 연구개발정책사례를 중심으로

별첨

[별첨] AHP 설문 조사 결과 - 평가항목 가중치

□ 평가항목 가중치(표)

거대과학 분야별 1차 판단기준 가중치

평가항목(1차 기준)	종합	우주	핵융합	가속기	원자력
의제·정책 도출의 타당성	0.1671	0.1897	0.1254	0.1841	0.1945
과학기술적 타당성	0.3989	0.1503	0.5561	0.5986	0.2109
사회경제적 타당성	0.1629	0.2229	0.1704	0.0697	0.1995
국가 정책적 타당성	0.2711	0.4371	0.1480	0.1476	0.3951
합계	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

기술/정책별 1차 판단기준 가중치

평가항목(1차 기준)	종합	정책	기술
의제·정책 도출의 타당성	0.1671	0.2239	0.1303
과학기술적 타당성	0.3989	0.4477	0.3535
사회경제적 타당성	0.1629	0.1068	0.2135
국가 정책적 타당성	0.2711	0.2215	0.3027
합계	1.0000	1.0000	1.0000

국가 거대과학 R&D 정책단계별 이슈 진단 및 개선방안

거대과학 분야별 2차 판단기준 가중치

평가항목 (1차 기준)	평가항목 (2차 기준)	종합	우주	핵융합	가속기	원자력
의제·정책 도출의 타당성	지속가능성	0.0251	0.0348	0.0313	0.0130	0.0238
	실현 가능성	0.0413	0.0536	0.0313	0.0442	0.0639
	의견수렴 적절성	0.0315	0.0303	0.0263	0.0329	0.0341
	국가 R&D 필요성	0.0692	0.0710	0.0365	0.0940	0.0727
과학기술적 타당성	과학기술적 혁신	0.1880	0.0645	0.3058	0.2370	0.0710
	과학기술적 파급	0.1467	0.0647	0.1479	0.2595	0.1057
	과학기술 인력 양성	0.0643	0.0211	0.1024	0.1021	0.0342
사회경제적 타당성	사회문제 해결	0.0619	0.0966	0.0560	0.0314	0.0931
	산업발전 기여	0.0773	0.0885	0.0940	0.0275	0.0794
	지역발전 기여	0.0238	0.0379	0.0205	0.0108	0.0269
국가 정책적 타당성	국가 위상 제고 기여	0.1487	0.2381	0.0973	0.0956	0.1468
	국제협력 기여	0.0543	0.1002	0.0210	0.0225	0.0731
	국민·지역 수용성	0.0681	0.0987	0.0297	0.0295	0.1753
합 계		1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

기술/정책별 2차 판단기준 가중치

평가항목 (1차 기준)	평가항목 (2차 기준)	종합	정책	기술
의제·정책 도출의 타당성	지속가능성	0.0251	0.0400	0.0166
	실현 가능성	0.0413	0.0365	0.0422
	의견수렴 적절성	0.0315	0.0505	0.0209
	국가 R&D 필요성	0.0692	0.0970	0.0506
과학기술적 타당성	과학기술적 혁신	0.1880	0.2826	0.1224
	과학기술적 파급	0.1467	0.0924	0.1797
	과학기술 인력 양성	0.0643	0.0727	0.0514
사회경제적 타당성	사회문제 해결	0.0619	0.0429	0.0778
	산업발전 기여	0.0773	0.0487	0.1041
	지역발전 기여	0.0238	0.0153	0.0316
국가 정책적 타당성	국가 위상 제고 기여	0.1487	0.1121	0.1750
	국제협력 기여	0.0543	0.0522	0.0535
	국민·지역 수용성	0.0681	0.0573	0.0741
합 계		1.0000	1.0000	1.0000

