

국가전략기술의 기술관리전략 운영사례분석 : 미국 DoE의 사용후핵연료 처분 캠페인

강선주*, 이현수
(주)라온넥스텝

An Analysis of National Strategic Technology Management Strategy Operation Case: US DoE's Spent Nuclear Fuel Disposal Campaign

Sun-Joo Kang*, Hyeon-Soo Lee
RaonNextep Co. Ltd

요약 국가연구개발사업의 중요성이 커짐에 따라 한정된 예산의 전략적 배분 및 활용을 통한 국가 기술력 확보가 더욱 중요해지고 있다. 특히 기술의 개발 및 적용, 관리에 장기간 소요되는 경우 지속가능하고 정량적 방식을 통해 도출된 우선순위를 바탕으로 한 체계적인 기술관리 전략이 필요하다. 고준위 방사성폐기물의 관리를 위해 미국 DoE(Department of Energy)는 2012년과 2019년 2차례에 걸쳐 사용후핵연료 처분 캠페인을 실시하면서 ISC(Importance to the Safety Case), SAL(State of the Art Level), Time Value 등의 지표를 토대로 우선순위 평가와 관련 R&D 로드맵을 수립하였다. 도출된 우선순위는 연속성을 갖기 위해 FEPs(Features, Events, Processes)을 기반으로 한 R&D 이슈와 R&D 활동을 연계하였으며, 우선순위별 비교분석도 실시하였다. 이 결과를 토대로 매년 진행된 R&D와 그 성과, 우선순위 변경사항, 향후 추진계획 등을 지속적으로 관리하고 있다. 현재 우리나라는 예산 투자우선순위 설정을 위한 국가연구개발 투자방향 및 기준(안)을 설정하고 있으며, 고준위방사성폐기물의 경우 기본계획을 통해 선도국 대비 국내 기술수준을 분석하는데 그치고 있다. 지금과 같은 정량적 평가가 결여된 관리방식은 정책 일관성과 위험도 높은 분야에 대한 대국민 신뢰도 확보를 저해할 것으로 우려된다. 향후 사용후핵연료 포화에 따른 심층처분 추진을 위해서는 우리나라 역시 미국 사례와 같이 정량적 평가방식을 기반에 둔 높은 신뢰도와 투명성을 갖춘 기술관리 전략이 필요할 것으로 판단된다.

Abstract As the importance of national research and development (R&D) projects increases, securing national technological competence through strategic allocation and the efficient utilization of limited budgets is becoming more significant. Specifically, when technology development, application, and management take a long time, a systematic technology management strategy based on priorities derived through a sustainable and quantitative method is required. For the management of high-level radioactive waste, the United States (US) Department of Energy (DoE) conducted two spent nuclear fuel disposal campaigns in 2012 and 2019, prioritizing evaluation and establishing related R&D roadmaps based on indicators such as Importance to the Safety Case (ISC), State-of-the-Art Level (SAL), and Time Value. The derived priorities were linked to R&D issues and activities based on Features, Events, Processes (FEPs) to have continuity, and a comparative analysis by priority was also conducted. Based on the results, annual R&D and its performance, prioritized changes, and future action plans are continuously managed. Currently, Korea sets the national R&D investment direction and standards (draft) for establishing budget investment priorities. In the case of high-level radioactive waste, this is limited to analyzing the level of domestic technology compared to those of leading countries through the 'Basic Plan'. There are concerns that the current management method which is lacking in quantitative evaluation will hinder policy consistency and public trust in high-risk areas. To promote deep geological disposal due to the expected saturation of spent nuclear fuel disposal facilities in the future, it is believed that Korea, like the US, would require a highly reliable and transparent technology management strategy based on a quantitative evaluation method.

Keywords : Technology Management Strategy, Case Study, Spent Nuclear Fuel, Dispositon, R&D

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구사업임(No.20210401003C).

*Corresponding Author : Sun-Joo Kang(RaonNextep Co. Ltd)

email: sunju9702@gmail.com

Received August 28, 2023

Revised September 26, 2023

Accepted October 6, 2023

Published October 31, 2023

1. 서론

과학기술이 국가경쟁력 확보에 중요한 역할을 하는 등 점차 중요성이 커짐에 따라 국가연구개발사업에 대한 투자가 지속적으로 증가하고 있다.

국가연구개발사업은 한정된 예산의 전략적 배분 및 활용을 통한 국가 차원의 기술력 확보를 최우선의 목표로 설정하고 있음에 따라 연구자원의 배분 목적의 중점투자 분야 설정을 위한 우선순위결정이 매우 중요하다.

우리나라는 과학기술기본법 제12조의2 제3항에 따라 매년 국가연구개발 예산의 투자우선순위 설정을 위한 국가연구개발 투자방향 및 기준(안)을 확정하여 발표하고 있으며, 이를 기반으로 각 부처별 국가연구개발사업의 방향성이 설정되고 있다. 하지만 방향성 제시 이후 실행을 위한 구체적 프레임워크가 제시되지 못하고 있으며, 정량적 평가방식도 부재한 실정이다. 또한 과학기술의 복잡성과 대형화, R&D 구조와 예산 배분 구조간의 차이 등으로 인해 전략적 투자가 어려우며, 국가연구개발사업 추진을 둘러싼 주변환경의 잦은 변화로 인해 투자방향 및 배분방향의 일관성 확보도 어려운 상황이다[1,2].

이러한 투자우선순위 설정과정 상의 문제는 중장기적인 관리가 필요한 기술분야에서 더욱 두드러질 수밖에 없다. 중장기적 관점의 기술관리 전략이 필요한 분야의 내외부적 요인으로 인해 정책의 방향성이 변화하거나 의사결정 과정에서의 판단기준이 변경될 경우 해당 기술의 신뢰도, 안전성 확보 등의 문제와 직결될 수 밖에 없다.

최근 국가적인 이슈로 부상하고 있는 고준위 방사성폐기물의 처분은 최소 50년에서 최대 10,000년까지의 안전성을 확보하기 위해 중장기적인 관점에서의 기술개발 및 관리가 필요한 대표적인 국가전략기술분야이다.

고준위 방사성폐기물은 열과 방사능을 계속 방출하기 때문에 저장 및 영구처분을 위한 높은 기술력과 안전성, 신뢰도 확보가 매우 중요하다.

IAEA(International Atomic Energy Agency)는 심층처분 착수부터 폐쇄 단계까지 R&D 계획의 수립 및 지속적인 이행을 권고하고 있으며, 이에 따라 미국, 일본 등의 선도국은 2-30년 전부터 체계적인 R&D 프로그램을 수립 및 운영하고 있다[3].

우리나라의 경우 고준위 방사성폐기물 관리와 관련하여 2차례에 걸쳐 고준위방폐물 관리 기본계획을 확정하고 이를 기반으로 로드맵을 수립 및 검증을 진행하고 있으며 로드맵에 포함된 핵심 요소기술을 대상으로 선도국 대비 국내 기술수준분석만을 실시하고 있다.

기술수준분석은 우리나라 및 주요국의 기술수준을 비교평가함으로써 해당 기술의 수준향상을 위한 시책을 마련할 수 있는 기초 자료로 활용되며, 이를 토대로 국가 장기과학기술 전략을 수립하고 있으나, 평가의 전문성 및 신뢰도, 객관성 등의 문제가 지속적으로 제기되고 있다.

이에 반해 우리나라보다 앞서 원전을 이용한 국가들은 처분 기술의 체계적인 관리를 위해 기술 로드맵을 수립하고 이를 기반으로 기술관리전략을 수립하여 운영하고 있다.

이에 본 연구는 고준위 방사성폐기물 관리 및 처분 분야의 선도국인 미국 에너지부(DoE: Department of Energy, 이하 DoE)의 기술관리 전략 운영 사례 연구를 실시하여 우리나라 환경에 적합한 고준위 방사성폐기물 관리기술 우선순위 도출 방향성을 확인해보고자 한다.

2. 국내현황

국가연구개발사업의 투자배분 등의 우선순위 도출과 관련된 연구는 Table 1에 제시된 바와 같이 자료포락분석(Data Envelopment Analysis: 이하 DEA), 연산가능 일반균형모형(Computable General Equilibrium; 이하 CGE 모형), 델파이 분석, 시스템 다이내믹스, 계층분석법(Analytic Hierarchy Process: 이하 AHP) 등의 방법론 중심으로 추진되고 있다[1,4].

DEA는 효율성을 측정하는 수학적 프로그래밍 기법으로 비영리 조직 및 공공부문의 성과측정에 많이 활용되는 방식이다. 범주형·연속성 자료를 사용할 수 있으며 비효율성의 크기를 측정할 수 있다는 장점이 있으나, 상대적 평가로 인한 효율성 차이가 모호하다는 단점이 있다. 유동현 외(2018)는 국방 R&D 분야에서 획득하고자 하는 국방과학 기술에 대해 국내 개발 여부 및 우선순위를 판단하기 위해 TRA 방법론에 기반한 DEA 방법을 활용하였다[5].

CGE 모형은 다수의 구조방정식으로 구성된 경제모형으로 현실경제를 재현하여 주요 정책의 변화가 다양한 경제 부문에 미치는 파급효과를 분석하는 방식으로 경제적 효과를 일반 균형적 관점에서 분석할 수 있다는 장점이 있으나, 경제정책의 변화에 따른 효과를 고려하기 어려워 결국 경제적 효과를 과소평가하게 되는 단점이 있다[6]. 임병인 외(2011)는 CGE 모형 추정 결과를 이용하여 28개 산업별 R&D 투자액의 GDP 파급효과를 추정하여 그 결과로써 투자 우선순위를 제시하였다[7].

Table 1. Key R&D decision-making methodologies

	Description
Data Envelopment Analysis	a statistical programming method that measures efficiency and is widely used for performance measurement in non-profit organizations and the public sector.
Computable General Equilibrium	a method of using an equation that describes the general equilibrium of the economy by introducing specific assumptions about production technology, preference relationships, production factor endowments, and government economic policies into an abstract general equilibrium model
Delphi Analysis	a method of deriving reasonable opinions by conducting repeated surveys of experts in the field in the absence of prior research
System Dynamics	a method of studying the behavior of an industrial system and revealing the effects of policy, decision-making structure, and interconnections such as time delay on the growth and safety of the system
Analytic Hierarchy Process	a method of evaluating mutually exclusive alternatives in a complex situation with multiple decision-making goals or evaluation criteria

델파이 분석은 선행연구가 부족한 상황에서 해당 분야 전문가를 대상으로 반복적인 설문 조사를 실시하여 합리적인 의견을 도출하는 방법으로 이슈에 대해서 객관적으로 검토할 수 있는 장점이 있으나, 참여자 선정이 어렵고 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 김용희 외(2014)는 건설 R&D 분야 중 항만 계류시설에 대한 유지보수 기준 설정을 위해 델파이 분석을 활용하여 310개 항만 시설물을 대상으로 투자 우선순위 결정 기준을 개발하였다[8].

시스템다이내믹스는 국가연구개발사업과 관련해 문제의 근원이 되는 원인구조를 규명하는데 주로 활용되고 있다. 순환적인 인과관계에 기초하고 있어서 맥락적인 시각을 가질수 있다는 장점이 있으나 예외적인 변수가 많아 성공적인 예측이 어려운 단점이 있어 R&D 투자 우선순위 관련 연구에는 많이 활용되지는 않았다[9,10].

마지막으로 AHP는 복잡한 문제를 계층화 및 세분화하여 쌍대비교를 통해 중요도를 도출하는 방법으로 의사결정의 목표나 평가기준이 다수이며 복합적인 상황에서 활용가능하지만 비교 대상이 너무 많은 경우 오류 발생 가능성이 높다는 단점이 있다. AHP는 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 소방방재청(2013)은 국가 주도 R&D 분야에서의 투자 우선순위 도출을 위해 AHP 분석을 실시하여 우선순위를 도출하였다[11].

3. 연구방법론

본 연구는 사례연구를 토대로 진행되었으며, 미국 DoE에서 실시한 사용후핵연료 처분 캠페인(UFDC: Used Fuel Disposition Campaign, 이하 UFDC)을 사례연구 대상으로 선정하였다.

사례연구는 많은 학문 분야에서 여러 목적으로 수행되어 왔다. 아직 잘 알려지지 않은 새로운 현상이나 주제에 대해 탐구하거나, 어떤 현상에 대해 묘사하고자 할 경우, 또는 인과관계를 설명하고자 할 경우 등에 한해 주로 사례연구가 추진되며, 일반적인 질적 연구 방법의 특성을 보인다[12].

원자력 발전 분야는 국제 공동 연구 및 교류가 활발히 추진되고 있으며, 우리나라는 원전 분야에서 비교적 후발주자이므로 선도국가를 대상으로 한 사례연구가 활발하게 추진되고 있다.

황용수·장선영·한재준(2015)은 미국의 사례를 중심으로 다양한 국가들의 방사성폐기물 처분장 확보 및 실패 사례와 관리정책 기초를 정리하여 우리나라 실정에 맞는 핵연료 전주기 관점에서의 정책수립 필요성을 제시하였다[13]. 정지범(2010)의 연구 역시 방사성폐기물 처리장 입지 선정과 관련하여 경주와 스웨덴 사례를 분석하여 입지선정에 필요한 기본적인 원칙을 제시하면서 장기적인 일관된 원칙과 유연한 적용을 통한 ‘한국적’ 입지 절차의 필요성을 제시하였다[14]. 고경민·이성우(2014)는 원자력 발전 관련 정책결정구조를 대상으로 미국과 프랑스의 사례분석을 실시하여 정부 주요 정책결정기관의 상호관계와 이익단체의 활동이 미치는 영향력 등을 살펴보고 우리나라 원자력 발전 정책의 방향성을 제시하였다[15].

상기와 같이 사례조사는 후발국 상황에서 선발국을 전략적으로 추격하기 위한 요소를 규명하거나, 과거 사례를 기반으로 한 시행착오를 최소화하기 위한 선행사례 분석의 목적으로 추진된다.

우리나라보다 앞서 원자력 발전을 활용한 국가들은 사용후핵연료를 포함한 방사성폐기물 관리와 관련된 다양한 사례를 가지고 있다. 타국가의 관리정책 운영 사례와 연구동향 파악은 우리나라의 향후 관리방안을 효율적으로 수립하는 기반으로 활용할 수 있다[13].

고준위 방사성폐기물, 즉 사용후핵연료 연구처분은 국민적 관심이 매우 높으며, 사용후핵연료에서 방출되는 높은 열과 방사능으로 인해 이의 관리 및 처분을 위한 기술의 안전성 및 신뢰도 등이 매우 중요한 분야이다. 우리나라보다 앞서 원자력 발전을 추진해온 미국은 사용후핵

연료 영구처분을 위해 유카산을 처분장 부지로 선정한 이후, 부지조사 결과 및 인근 주민 반대 등으로 인해 처분장 건설이 무산된 전례가 있다. 이후 미국은 체계적인 사용후핵연료 처분 기술 관리를 위해 사용후핵연료 처분 R&D 로드맵을 설정하고, 이를 기반으로 한 우선순위 평가와 기술관리 전략을 수립하여 관리하고 있다.

우리나라는 사용후핵연료 임시저장 포화시점이 곧 도래할 것으로 예상됨에 따라 영구처분을 위한 국가차원에서 로드맵을 구축 및 관리를 시작하였다. 앞으로 미국의 DoE 사례와 같이 구축된 로드맵의 체계적인 관리가 필요할 것으로 판단됨에 따라 미국 DoE를 대상으로 한 사례분석 연구를 실시하고자 한다.

본 사례 연구를 통해 미국에서 현재 추진 중인 처분 R&D 로드맵을 기반으로 한 기술우선순위 도출 프로세스, 지표, 평가결과 활용 방식등을 중점적으로 검토하고 우리나라 실정에 맞는 방법론 개발 및 적용에 활용할 수 있도록 방향성을 검토하고자 한다.

3.1 연구절차

미국 DoE는 사용후핵연료 및 고준위 방사성폐기물의 저장, 운반 및 처분과 관련된 R&D를 위한 사용후핵연료 UFDC를 설립하여 R&D 프로그램을 추진하고 있다[16].

UFDC의 R&D 프로그램은 사용후핵연료 처분 과정에서 발생가능한 위험요소를 규명하고 불확실성을 줄이기 위한 것으로 기존 이슈의 해결 정도를 확인하고 새로운 R&D 이슈를 도출하며, 이슈의 우선순위를 재평가하여 처분 로드맵의 수정 및 보완 작업을 수행한다.

사용후핵연료 처분 R&D의 우선순위 평가는 현재의 R&D 이슈 우선순위와 최신 기술과의 격차에 대한 전문가간 합의를 도출하고 현재 수행 중이거나 계획중인 R&D에 대한 현황 파악과 함께 전체 처분 프로세스상에서의 역할과 타 R&D 간의 연계성 등을 확인하기 위해 실시한다.

2009년 유카산 지하에 건설할 예정이던 처분장 추진 중단 이후 미국 DoE는 2010년 개념단계의 사용후핵연료 처분 R&D 로드맵을 도출하여 UFDC에서 고려해야 할 잠재적 R&D를 도출하였다. 이를 기반으로 2012년 현시점에 필요한 UFDC 로드맵을 개발하여 R&D 이슈를 식별하고 우선순위 평가를 실시하였다.

이후 UFDC 캠페인은 SFWST(The Spent Fuel and Waste Science and Technology; 이하 SFWST) 캠페인으로 변경되었으며, 2012년 로드맵 이후의 R&D 추진, 국제협력 연구, 지하 연구시설 운영 등을 통해 추가

적으로 확보된 기술을 반영하기 위하여 2019년 로드맵 업데이트를 진행하여 신규 R&D의 식별과 우선순위 재평가를 진행하였다.

3.2 연구 결과

3.2.1 2012 UFDC 로드맵

2012년 UFDC는 2010년 시작된 사용후핵연료 처분 R&D 로드맵을 기반으로 5단계에 걸쳐 우선순위 평가를 실시하였으며 이는 Fig. 1에 나타내었다. 현시점에 중요하다고 판단되는 FEP과 연계된 354개의 R&D 이슈를 식별하고 2개의 주요 평가 기준, ISC와 SAL을 사용하였다[16].

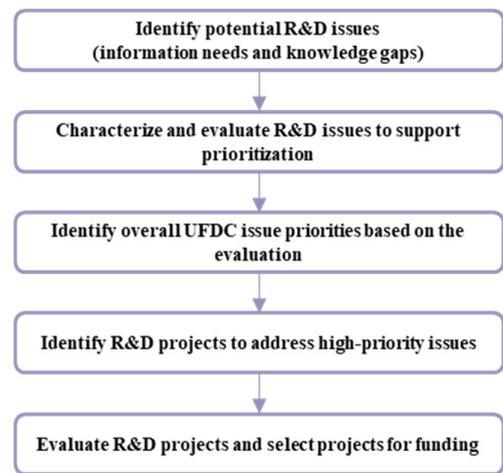


Fig. 1. 2012 UFDC Roadmap process

ISC는 Safety Case에서의 중요성을 평가하는 지표로 해당 이슈가 처분장 안전성에 영향을 미치는 정도를 정량화하여 중요도가 높은 이슈일수록 높은 점수로 평가한다.

SAL은 Table 2에서 보는 바와 같이 현시점의 과학적 이해도를 평가하는 지표로 불확실성이 높은 이슈일수록 높은 점수로 평가한다.

R&D 이슈 식별을 위해 사용후핵연료 처분과 관련하여 수집된 FEP을 검토했으며, 검토 결과 저장시설 건설 시 고려해야 할 지질학적 매개과 방사성 핵종 유출을 막기 위한 공학적·물리적 시스템, 지진, 화산 또는 기상과 같이 발생 가능한 현상 등이 포함되었다. 폐쇄 후 운영단계까지의 FEP 208개를 수집하였으며 R&D 이슈는 FEP과의 매칭을 통해 도출하였다. 일부 FEP의 경우 처분 지질 환경에 따라 달라짐에 따라 지질 특성(암염, 점토암, 결정질암 등)을 고려하여 최종적으로 354개의 R&D 이

Table 2. SAL metric values and definitions(2012)

SAL Descriptive	SAL Definition
Well Understood	The representation of an issue(process) is well developed, has a strong technical basis, and is defensible. Additional R&D would add little to the current understanding
Fundamental gaps in methods	The representation of an issue (conceptual and/or mathematical, experimental) is lacking
Fundamental Data Needs	The data or parameters in the representation of an issue(process)is lacking
Fundamental Gaps in Method, Fundamental Data Needs	Both
Improved Representation	The representation of an issue may be technically defensible, but improved representation would be beneficial
Improved confidence	Methods and data exist, and the representation is technically defensible but there is not widely-agreed upon confidence in the representation
Improved Defensibility	Related to confidence, but focuses on improving the technical basis, and defensibility, of how an issue(process) is represented

source : DOE, Used Fuel Disposition Campaign Disposal Research and Development Roadmap. 2012.

슈를 도출하였다. 추가적으로 이슈가 R&D를 통해 해결이 가능한지 여부를 검토하여 일부 또는 전체가 R&D로 해결 가능한 이슈를 평가대상으로 설정하였다.

도출된 354개의 R&D 이슈를 대상으로 ISC 평가를 실시했으며 ISC 평가 시 1) 안전성 평가에서의 중요성, 2) 설계, 시공, 운영에서의 중요성, 3) Safety Case 신뢰성에서의 중요성 등을 고려하여 낮음(1), 보통(2), 높음(3)으로 평가하며 점수를 최종 취합 후 가중치를 반영하여 계산하였다.

SAL은 각각의 이슈가 현재 시점에서 과학적으로 이해되는 정도를 나타내는 지표로 현재의 기술로도 해당 이슈가 해결된다면 그에 대한 R&D 추진 필요성이 떨어짐에 따라 이해도가 높을수록 낮은 점수를 배점하여 평가하였다.

이와 함께 각각의 R&D 이슈는 Safety Case에서 모두 유의미하지만 의사결정 시점에 따라서 상대적으로 상이할 수 있음에 따라 추가적으로 Time Value를 반영하여 주요 의사결정 지점에 따라 다른 가중치를 부여하여 평가하였다. 주요 의사결정지점은 부지검토, 부지선정, 부지 특성화 및 처분 시스템 설계, 부지 최적화 지점으로 제시하였다.

우선순위 점수를 기준으로 이슈를 정렬하되 상, 중, 하로 구분할 수 있는 기준값을 도출하여 그룹화를 진행하였다. 최종적으로 68개가 상위, 83개가 중위, 86개의 하위그룹으로 구분되었으며 이는 Fig. 2에 나타내었다. 117개의 이슈는 0점으로 평가되었는데, 범용 R&D로 해결 가능하거나, 다른 연계 R&D를 통해 해결이 가능한 경우, 또는 현재 기술수준으로도 해결이 가능해 추가적인 R&D가 필요 없는 경우 등이 해당된다.

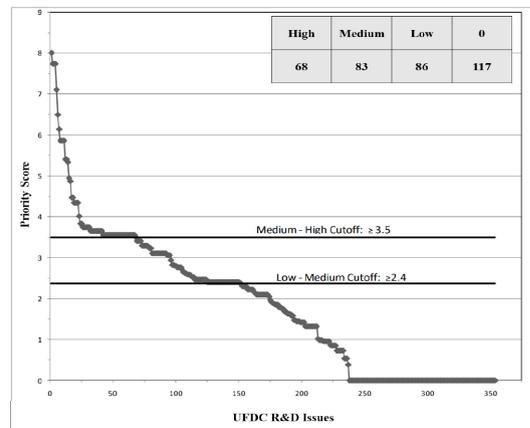


Fig. 2. Priority Scores for UFDC R&D Issues
source : DOE, Used Fuel Disposition Campaign Disposal Research and Development Roadmap. 2012.

Table 3. High Priority Issue Scores.(2012)

FEP No.	Title	Overall Priority Score
2.2.01.01	Evolution of EDZ - Clay/Shale	8.00
2.2.08.01	Flow Through the Host Rock - Salt	7.73
2.2.08.02	Flow Through the Other Geologic Units(Confining units, Aquifers, Salt)	7.73
2.2.08.06	Flow Through EDZ - Salt	7.73
2.2.08.04	Effects of Repository Excavation on Flow Through the Host Rock - Salt	7.10
2.2.08.07	Mineralogic Dehydration - Salt	6.49
2.2.01.01	Evolution of EDZ - Deep Boreholes	6.13
2.2.09.01	Chemical Characteristics of Groundwater in Host Rock - Deep Boreholes	5.86
2.2.09.02	Chemical Characteristics of Groundwater in Other Geologic Units(Non-Host-Rock)	5.86
2.2.09.05	Radionuclide Speciation and Solubility in Host Rock - Deep Boreholes	5.86

source : DOE, Used Fuel Disposition Campaign Disposal Research and Development Roadmap. 2012.

우선순위가 높은 10개의 R&D 이슈는 Table 3과 같다. 그 중 가장 우선순위가 높은 R&D 이슈는 ‘굴착손상영역(EDZ) 평가-점토암/결정질암’으로 나타났다. 모암의 속성과 관련된 항목들이 주로 상위 우선순위에 나타났으며 모암에 따라 우선순위가 다르게 나타났다. Table 4에서 보는 바와 같이 예를 들어 굴착손상영역과 관련된 FEP의 경우 세일은 우선순위가 높은 것으로 나타났으나 화강암, 암염 등은 중간그룹에 포함되었다.

Table 4. Relative Priority of Groups of R&D Issues Sorted by Processes and Geologic Media.

GEOSPHERE	Crystalline	Salt	Shale
1.2.01. LONG-TERM PROCESSES(tectonic activity)	Low	Low	Low
1.3.01. CLIMATIC PROCESSES AND EFFECTS	Low	Low	Low
2.2.01. EXCAVATION DISTURBED ZONE(EDZ)	Medium	Medium	High
2.2.02 HOST ROCK (properties)	High	High	High
2.2.03 OTHER GEOLOGIC UNITS(properties)	Medium	Medium	Medium
2.2.05. FLOW AND TRANSPORT PATHWAYS	Medium	Medium	Medium
2.2.07. MECHANICAL PROCESSES	Low	Medium	Medium
2.2.08. HYDROLOGIC PROCESSES	Low	High	Medium

source : DOE, Used Fuel Disposition Campaign Disposal Research and Development Roadmap. 2012.

3.2.2 2019 로드맵 업데이트

2017년 시작된 SFWST 캠페인은 2012년 UFDC 로드맵 업데이트를 목표로 설정하고, 1) 현재 진행중인 R&D 활동 정리, 2) 진행 중인 R&D의 우선순위 재평가, 3) 기존 R&D 수정 및 새로운 R&D 이슈 선정 등을 추진하였다. 즉 2012년 이후 진행된 R&D에 대한 점검과 이후 새로운 R&D 이슈의 발견 및 로드맵에 반영 등을 위해 2019년 로드맵 업데이트를 실시하였다[17].

2019년 로드맵 업데이트는 향후 심층처분장 건설과 관련하여 부지선별, 부지선정, 설계 및 인허가 등의 결정을 지원하기 위해 추진되며, 2022년까지 필요한 범용 R&D를 대상으로 진행하였다.

절차와 방식의 경우 2012년과 유사하나 평가 대상과 지표 배점 방식에 차이를 두었다.

평가절차는 2012년과 동일하게 평가대상 식별, 평가 기준 설정, 평가대상 평가, 평가대상간 순위 비교 및 전략 수립 등의 순으로 5단계로 추진하였으며, 이는 Fig. 3에 나타내었다. 지표 역시 2012년과 동일하게 ISC와

SAL을 활용하였으며, 2019년에는 Time Value 대신 R&D에 투입되는 비용을 검토항목에 추가하였다.

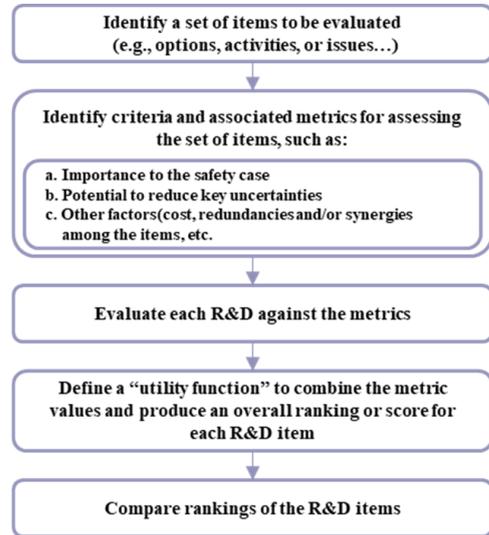


Fig. 3. 2019 SFWST Roadmap process

Table 5. ISC metric values and definitions

ISC Numerical Value	ISC Descriptive Value	ISC Definition (see Safety Case Elements figure)
5	High Importance to SC	Knowledge gained by proposed R&D strongly affects one of the three elements of "Disposal System Safety Evaluation" in the Safety Case (pre-closure safety analysis, post-closure safety assessment, confidence enhancement)
3	Medium Importance to SC	Knowledge gained strongly affects one of the Technical Bases elements of the Safety Case but the Technical Basis element itself only weakly or moderately influences a safety assessment metric
1	Low Importance to SC	Knowledge gained is only of a supporting nature and does not strongly affect the associated process model or model inputs

source : DOE, DOE SFWST Campaign R&D Roadmap Update: Fuel Cycle Research & Development. 2019

평가대상인 R&D 항목은 우선순위 도출 목적인 고준위 방사성 폐기물 관련 R&D 관리의 편익성 및 적절성 확보를 위해 과제 단위의 R&D 활동을 평가 대상으로 설정하였다. R&D 활동은 고준위 방사성 폐기물 관련 R&D 연구진과 전문가를 대상으로 협의하여 총 109개의 R&D 활동을 도출하였다. 이와 함께 평가의 연속성 확보

를 위해 2012년 R&D 이슈와 2019년 R&D 활동간의 연계를 실시하여, 최종적으로 사용후핵연료 처분 관련 FEP와 354개의 R&D 이슈, 109개의 R&D 활동 간 연계를 실시하였다.

109개의 R&D 활동을 대상으로 ISC 평가를 실시하였는데, 범용 R&D를 판단함에 있어 ISC의 정량화된 수치가 불필요하다고 판단하여 보다 정성적인 개념의 상위(5점), 중위(3점), 하위(1점)의 범주로 점수화하였다. ISC 지표에 대한 상세 설명은 Table 5를 통해 정리하였다.

Table 6. SAL metric values and definitions(2019)

SAL Value	SAL Descriptive Value	Questions to answer for: (1)Rationale for current SAL (2)R&D to move to next SAL
5	Fundamental Gaps in Method or Fundamental Data Needs, or Both	<u>Rationale for being at Level 5:</u> <ul style="list-style-type: none"> What is under development and what data is being gathered? What are the fundamental gaps? R&D necessary to get to Level 4?
4	Improved Representation	<u>Rationale for being at Level 4:</u> <ul style="list-style-type: none"> What methods and data currently exist? Why is the representation reasonable? Why is there not widely agreed upon confidence? <u>R&D necessary to get to Level 3?</u> <ul style="list-style-type: none"> e.g., what is needed to build agreement and confidence in the representation? and what additional data need to be gathered?
3	Improved Defensibility	<u>Rationale for being at Level 3:</u> <ul style="list-style-type: none"> Why and what needs to be (and can be) improved for defensibility for a generic repository? <u>R&D necessary to get to Level 2?</u> <ul style="list-style-type: none"> e.g., What level of effort on data and models would lead to the issue being technically defensible
2	Improved Confidence	<u>Rationale for being at Level 2:</u> <ul style="list-style-type: none"> Why is it technically defensible? <u>R&D necessary to get to Level 1?</u> <ul style="list-style-type: none"> e.g., What R&D would lead to improved confidence?
1	Well Understood	-

source : DOE, DOE SFWST Campaign R&D Roadmap Update: Fuel Cycle Research & Development. 2019

2019년 SAL 평가는 각 점수별로 현재 SAL 점수 판단 근거와 상위 SAL 점수로 평가하기 위한 판단 근거 등의 질문을 Table 6과 같이 평가자에게 제공하여 SAL 평가에 활용할 수 있도록 하였다.

SAL과 ISC 매트릭스 점수를 바탕으로 Table 7과 같이 조합한 매트릭스를 통해 R&D 활동의 전반적인 우선

순위 점수를 산출하였다.

Table 7. Priority Score(PS) Matrix(combination of SAL and ISC) for R&D Activities

	1	2	3	4	5
High(5)	L	M	M	M-H	H
Medium(3)	L	M	M	M	M
Low(1)	L	L	L	L	L

source : DOE, DOE SFWST Campaign R&D Roadmap Update: Fuel Cycle Research & Development. 2019

109개의 R&D 활동은 8개의 그룹으로 재분류하였으며, 이후 3종의 모암(점토암, 결정질암, 암염)을 중심으로 공학적 방벽(Engineered Barrier System; 이하 EBS), 운반-저장 겸용 캐니스터(Dual Purpose Canister; 이하 DPC), 국제활동, 성능평가(Performance Assessment; 이하 PA) 등 재구분하여 Table 8과 같이 평가대상을 147개로 확정하였다.

Table 8. Number of R&D Activities considered in each breakout session

Breakout session	Major groupings of R&D Activities	Total Number of R&D Activities Evaluated
Argillite	8	31
Crysralline	17	40
Salt	13	29
Dual Purpose Canisters (DPC)	6	6
Engineered Barrier System (EBS)	20	20
International	21	21
Performance Assessment (PA)	17	-
Other	7	-
Total	109	147

source : DOE, DOE SFWST Campaign R&D Roadmap Update: Fuel Cycle Research & Development. 2019

50여명의 전문가가 참가하여 R&D 활동에 대해 평가했으며, 평가 시 1) R&D 활동의 명칭과 정의, 2) SAL 등급 평가, 3) SAL 등급을 낮추기 위한 필요 R&D 도출, 4) DPC, EBS, 국제협력 등의 고려, 5) ISC 등급 평가 등을 함께 고려하였다

평가 결과를 살펴보면, 결정질암 관련 R&D 활동이 가장 많고 중간단위에 많이 분포되어있는 것으로 나타났으며 이는 Fig. 4에 나타내었다.

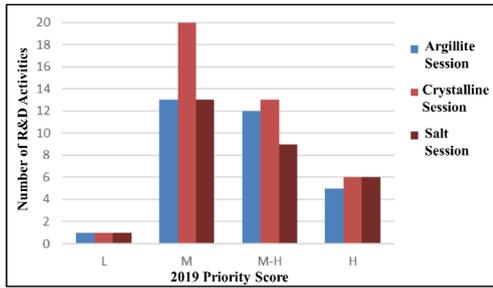


Fig. 4. Histogram of priority scores for each host-rock breakout session

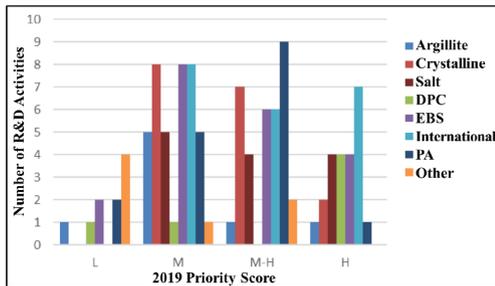


Fig. 5. Histogram of priority scores for each R&D activity grouping

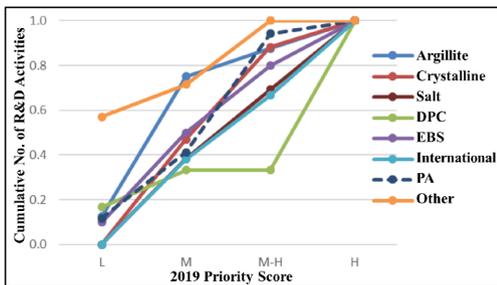


Fig. 6. Fraction CDF of Priority Scores for each R&D Activity Grouping

source : DOE, DOE SFWST Campaign R&D Roadmap
Update: Fuel Cycle Research & Development, 2019

8개 그룹을 기준의 결과를 나타낸 Fig. 5를 살펴보면 국제협력 관련 R&D 활동이 H 그룹에 가장 많이 포함된 것으로 나타났으며, 압연, EBS, DPC 등의 R&D 활동도 높은 우선순위를 보이고 있는 것으로 나타났다.

8개 그룹별 분포 비율을 나타내는 Fig. 6은 각 그룹별 그래프의 경사가 가파를수록 해당 그룹에 R&D 활동이 많이 포함된 것으로 판단 할 수 있는데 DPC의 R&D 활동이 상위 우선순위에 많이 포함되었음을 확인할 수 있으며, 이는 SFWST 캠페인에서의 DPC에 대한 중요성을 유추해볼 수 있다.

개별 R&D 활동을 살펴보면 상위 우선순위에는 총 23개의 R&D 활동이 포함되어 있으며 그 중 국제협력이 가장 많이 포함되었다. 국제협력 관련 R&D 활동 중에서도 연구용 지하연구시설에서의 연구를 통한 데이터 수집 및 공유 등의 내용이 주를 이루고 있어 해당 연구의 중요성을 보여준다.

또한 EBS 관련 R&D 활동이 전체 20개 중 4개가 높은 우선순위에 포함되어 있는데 이는 SFWST의 중점분야가 일반 모암 성능평가 모델의 개발에서 장벽 기능 모델 개선으로 발전된 것으로 추정해볼 수 있다.

Table 9와 같이 상위 우선순위에는 총 23개의 R&D 활동이 포함되었으며, 그 중 국제협력 관련 활동이 가장 많이 포함되어 있었다. 국제협력 중에서도 연구용 지하연구시설에서의 연구를 통한 데이터 수집 및 공유 등의 우선순위가 높은 것으로 나타났다.

또한 EBS 관련 R&D 활동이 전체 20개 중 4개가 높은 우선순위에 포함되어 있어 이는 SFWST의 목표인 범용적 압반 성능평가 모델 표준화 달성을 위한 활동으로 판단된다.

Table 9. High Priority R&D Activities

High Priority R&D Activities	
A-08	Evaluation of ordinary Portland cement(OPC)
C-15	Design improved backfill and seal materials
C-16	Development of new waste package concepts and models for evaluation of waste package performance for long-term disposal
D-01	Probabilistic post-closure DPC criticality consequence analyses Task 1 - Scoping Phase Task 2 - Preliminary Analysis Phase Task 3 - Development Phase
D-03	DPC filler and neutron absorber degradation testing and analysis
D-04	Coupled multi-physics simulation of DPC postclosure(chemical, mechanical, thermal/hydraulic) including processes external to the waste package
D-05	Source term development with and without criticality
E-09	Cement plug/liner degradation
E-11	EBS High Temp experimental data collection- To evaluate high temperature mineralogy /geochemistry changes.
E-14	In-Package Chemistry
E-17	Buffer Material by Design
I-04	Experiment of bentonite EBS under high temperature, HotBENT
I-06	Mont Terri FS Fault Slip Experiment
I-08	DECOVALEX-2019 Task A: Advective gas flow in bentonite

High Priority R&D Activities	
I-12	TH and THM Processes in Salt: German-US Collaborations(WEIMOS)
I-13	TH and THM Processes in Salt: German-US Collaborations(BENVASIM)
I-16	New Activity: DECOVALEX Task on Salt Heater Test and Coupled Modeling
I-18	New Activity: Other potential DECOVALEX Tasks of Interest: Large-Scale Gas Transport
P-12	WP Degradation Model Framework
S-01	Salt Coupled THM processes, hydraulic properties from mechanical behavior(geomechanical)
S-03	Coupled THC advection and diffusion processes in Salt, multi-phase flow processes and material properties in Salt
S-04	Coupled THC processes in Salt, Dissolution and precipitation of salt near heat sources(heat pipes)
S-05	Borehole-based Field Testing in Salt

source : DOE, DOE SFWS Campaign R&D Roadmap Update: Fuel Cycle Research & Development. 2019

상위 우선순위와 중-상 우선순위에 해당되는 R&D 활동을 R&D 주제를 기준으로 그룹화한 결과는 Table 10에 나타내었다. 처분장의 고온 영향 관련 R&D 활동이 가장 많이 나타났으며, 이는 DPC의 중요도가 반영된 것으로 판단된다. 또한 공학적 방벽 성능 평가에 중요한 HotBENT (High Temperature Bentonite Project)와 장기 FEBEX(Full scale Engineered Barriers Experiment) 열화 실험 등 국제협력 R&D 활동도 포함되어 있다.

Table 10. High Impact R&D Topic

High Impact R&D Topics	High-Priority R&D Activities	Medium-High-Priority R&D Activities
High Temperature Impacts	D-1, D-4, I-4, I-6, I-16, E-11, S-5	I-2, I-3, I-7, E-10
Buffer and Seal Studies	I-4, E-9, E-17, A-8, C-15	I-2, I-3, I-7, A-4, C-6, C-8, C-11
Coupled Processes (Salt)	S-1, S-3, S-4, I-12, I-13	I-14, S-2, S-7, S-8, S-11
Gas Flow in the EBS	I-6, I-8, I-18	I-9, P-17
Criticality	D-1, D-3, D-4, D-5	-
Waste Package Degradation	C-16, P-12	E-4, E-6
In-Package Chemistry	E-14	E-2, E-20, P-15, P-16
Generic PA Models	-	P-1, P-2, P-4, P-11, P-13, P-14
Radionuclide Transport	-	C-11, C-13, C-14, P-15, P-16
DFN Issues	-	I-21, C-1, C-17
GDSA Geologic Modeling	-	O-2, O-3
THC Processes in EBS	-	E-3

source : DOE, DOE SFWS Campaign R&D Roadmap Update: Fuel Cycle Research & Development. 2019

완충재와 밀봉 관련 연구도 우선순위가 비교적 높은 것으로 나타났다. HotBENT, FEBEX-DP 및 DECOVALEX-2019 Task E를 포함한 국제 협력 시험은 완충재 및 밀봉 관한 문제를 다루고 있으며, 특히 재료적인 측면에서 미래에 사용가능한 새로운 재료에 대해서 조사하고 있다.

3.2.3 2012년과 2019년 로드맵간 비교

2012년은 FEP과 연계된 R&D 이슈를 기준으로 평가하였으며, 2019년은 R&D 활동을 기준으로 평가했다는 차이가 있어 평가간 연계를 위해 FEP과 R&D 활동간 연계를 실시하였다. FEP과 R&D 활동은 R&D 활동범위가 넓고 여러 물리화학적 프로세스를 포함하는 실험 또는 분석적인 경우 여러개의 FEP과 매칭됨에 따라 R&D 활동과 FEP은 1대1 매칭되지 않았다.

Table 11. FEPS and their argillite-related activities

Act	ISC	SAL	Activity	2019 Score
FEP 2.2.01.01 Evolution of EDZ 8.00(2012 Score)				
E-11	H	5	EBS High Temp experimental data collection- To evaluate high temperature mineralogy /geochemistry	H
A-04	H	4	Argillite Coupled THM processes modeling including host rock, EBS, and EDZ(TOUGH-FLAC)	M-H
E-10	H	4	High-Temperature Behavior	M-H
I-07	H	4	DECOVALEX-2019 Task E: Upscaling of modeling results from small scale to one-to-one scale based in heater test data in Callovo-Oxfordian claystone(COx) at MHM underground research laboratory in France.	M-H
I-09	H	4	DECOVALEX-2019 Task C: GREET (Groundwater Recovery Experiment in Tunnel) at Mizunami URL, Japan	M-H
A-05	M	4	THM discrete Fracture Modeling using Rigid-Body-Spring-Network (RBSN)	M
A-07	M	5	Analysis of clay hydration/dehydration and alteration under various environmental conditions	M
E-08	H	3	Radionuclide Interaction w/ Buffer Materials	M
E-12	M	5	Buffer/backfill dry-out and resaturation process	M
I-05	H	3	Mont Terri FE(Full-scale Emplacement) Experiment	M

Table 11과 같이 FEP을 기준으로 살펴보면 2012년 가장 높은 우선순위로 도출된 ‘굴착손상영역(EDZ) 평가-점토암/결정질암’은 10개의 R&D 활동과 연계된다. ‘굴

착순상영역(EDZ) 평가-점토암/결정질암과 연계된 R&D 활동 중 상위 우선순위에 포함된 R&D 활동인 E-11 (EBS 고온 시험 데이터 수집) R&D 활동을 기준으로 살펴보면 아래 Table 12와 같이 8개의 FEP과 연계된다.

Table 12. R&D activities and their related FEPS

FEP	Host Rock	FEP Name	2012 Score
E-11(EBS Temp experimental data collection- To evaluate high temperature mineralogy /geochemistry changes)			
2.2.01.01	A	Evolution of EDZ	8.00
2.2.08.01	S	Flow through the Host Rock	7.73
2.2.08.01	A	Flow through the Host Rock	3.65
2.2.08.01	C	Flow through the Host Rock	3.65
2.1.04.01	*	Evolution and Degradation of Backfill	3.50
2.1.11.01	*	Heat Generation in EBS	2.59
2.2.01.01	C	Evolution of EDZ	2.58
2.2.01.01	S	Evolution of EDZ	2.58

Table 13. Compare 2012 and 2019 assessment results

FEP	FEP Name	2012 Score
D-01(Probabilistic post-closure DPC criticality consequence analyses) 2019 Score H		
2.1.02.06	SNF Cladding Degradation and Failure	3.62
2.1.04.01	Evolution and Degradation of Backfill	3.50
2.1.07.04	Mechanical Impact on Backfill	2.94
2.1.07.05	Mechanical Impact on Waste Packages	2.76
2.1.09.02	Chemical Characteristics of Water in Waste Packages	2.76
2.1.11.01	Heat Generation in EBS	2.59
2.1.03.08	Evolution of Flow Pathways in Waste Packages	1.96
2.1.13.02	Radiation Damage to EBS Components(in Waste Form, in Waste Package, in Backfill, in Other EBS Components)	1.73
2.1.14.01	Criticality In-Package	0.96
2.1.08.02	Flow in and through Waste Packages	0.86
2.1.01.02	Radioactive Decay and Ingrowth	0.00
2.1.13.01	Radiolysis(in Waste Package, in Backfill, and in Tunnel)	0.00

이를 통해 2012년 평가와 2019년 평가가 연속성을 가지게 되며 연구의 동향을 파악할 수 있는 데이터로 활용도 가능하다. 예를 들어 Table 13에 정리된 바와 같이 2012년 당시 유카산 처분장은 TAD 캐니스터 내에 처분을 기준으로 인허가를 받았기 때문에 임계와 관련된 항목이 3점 이하로 우선순위가 낮게 평가되었다. 하지만 이후 DPC에 저장된 사용후핵연료가 크게 증가하면서 임

계와 관련된 FEP이 재조정되면서 2019년 평가를 통해 상위 우선순위 그룹에 포함되었다.

실제로 이수홍 외(2016) 연구에 따르면 미국의 사용후핵연료 캐니스터는 DPC가 많이 사용되고 있으며, DPC의 단점인 열적 및 선도 한량 이하에서만 이송이 가능하다는 점, 작업자의 피폭 사례 증가 등의 문제를 해소하기 위한 연구가 적극적으로 수행되고 있다[18].

이러한 연구 방향성의 변화 뿐만 아니라 새로운 기술 추가, 기존 기술의 통합, R&D간 연계 방안 등을 제시하여 고준위 방사성폐기물의 처분 및 저장과 관련된 기술의 변화와 그에 따른 중요도 및 우선순위 조정 등을 살펴볼 수 있었다.

4. 결론 및 제언

미국 DoE는 2012년 2019년 2차례에 걸쳐서 로드맵을 설정하였으며 사용후핵연료 처분에 있어서 필요한 R&D의 도출과 그의 우선순위, 그리고 그를 바탕으로 한 로드맵을 구축하여 기술관리 방향성을 제시하였다.

특히 우선순위 도출에 대해서 정성적 방식이나 정량적 방식, 평가의 대상이 되는 기술의 단위 등을 달리하여 평가를 하되 연속성 확보를 위한 다양한 각도에서의 연계 및 고도화 등을 함께 추진함으로써 장기간 관리가 필요한 기술에 대한 관리 방식을 확립하고 있는 것으로 판단된다.

이후 DoE는 2012년과 2019년 진행된 로드맵을 기반으로 매해 해당 연차에 진행된 R&D와 그 성과, 우선순위 변경사항, 향후 추진계획 등을 포함한 보고서를 발간하고 있다[19-21].

이러한 활동은 장기적인 관점에서의 R&D 추진에 대한 일관성을 견지할 수 있게 해주고 체계적인 관리방안의 기반으로 작용한다. 하지만 미국 DoE 사례 역시 점수화, 가중치 적용 등의 방법을 통해 정량적으로 우선순위를 도출하고자 하였으나, 전문가 개인의 의견을 기반으로 했다는 점에서 완전한 의미의 정량평가로 보기에는 한계점이 있다.

고준위방사성폐기물과 같이 안전에 대한 국민적 관심도가 높고 기술의 신뢰도 등이 중요한 분야의 경우 미국과 같이 지속적이고 체계적인 기술의 개발과 관리를 통해 기술에 대한 신뢰도 확보가 중요하다.

우리나라 역시 방사성폐기물 관리법을 통해 고준위 방사성폐기물 관리정책의 원칙과 현황, 전망 등을 포함한

관리 기본계획을 5년마다 수립하여 발표하고 있다. 기본 계획과 함께 부지, 저장, 처분으로 구성된 분야별 기술 로드맵과 각 기술별 선도국 대비 수준 등이 포함된 상세 기술확보 로드맵도 제시하고 있다. 그러나 기존 로드맵으로는 미국의 사례와 같이 FEP과의 연계나 해당 기술의 수준, 우선순위 등은 파악하기 어려운 실정이다. 또한 현재 진행되고 있는 국가 단위의 R&D 추진 현황과의 연계, 해당 기술의 중요도, 최신의 국외 기술개발 현황 등과 함께 기술간 비교분석이 어렵다.

경주에 설립된 중저준위 방사성폐기물 처분장 설립 과정을 살펴볼 때, 투명한 의사결정 절차와 함께 관련 기술의 완성도와 신뢰도를 국민의 요구 수준에 맞도록 갖춘 정보제공이 매우 중요하다는 점을 알 수 있었다[14].

고준위 방사성폐기물은 중저준위 방사성폐기물에 비해 높은 방사능의 준위로 인해 처분장 설립 추진부터 많은 국민적 관심을 모을 것으로 전망됨에 따라 추진단계에서 발생하는 기술적 이슈에 대한 적절한 대응과 체계적인 관리가 필요하다.

현재 추진 중인 우리나라의 국가연구개발 예산 투자 우선순위 설정 방식이나 고준위 방사성폐기물 관리 기본 계획에 포함된 선도국 대비 기술수준분석은 거시적인 관점에서의 정책 방향성을 설정하는데는 적합하지만 세부적인 관점에서의 기술 개발 및 확보 시점이나 기술간 중요도, 우선순위 등을 비교 판단하기에는 어려운 실정이다.

이에 국가전략기술에 대한 정량적 우선순위 평가를 기반으로 한 장기적인 관리방안을 구축하고 이를 토대로 R&D 추진계획 수립 및 시행, 지속적인 피드백을 통한 업데이트 등이 가능하도록 우리나라 실정에 적합하며, 현행 기술수준 분석과 연계가 가능한 지속가능한 평가체계 개발이 필요할 것이다. 현재 제시되어 있는 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획과 분야별 R&D 로드맵의 기술을 나열하여 검토한 뒤, 미국 DoE에서 활용한 ISA와 SAL과 유사한 개념의 지표를 선정하여 기술별 우선순위를 1차적으로 도출하고 기술의 성숙도와 R&D 추진현황 간 연계분석을 통해 우리나라 처분 기술의 현황 파악을 위한 기반은 마련될 것으로 판단된다. 하지만 미국 DoE의 사례 역시 정성적 평가를 기반에 두고 있다는 점에서 전문가 의견에 따라 결과가 달라질 수 있어, 결과의 객관성 확보를 위한 방안 마련과 함께 지표 중 Time Value의 경우 미국은 처분의 주요 단계를 4단계로 구분하고 있으나, 우리나라의 경우 계획, 부지선정, 건설, 운영, 폐쇄, 폐쇄후관리, 총 6단계로 관리하고 있는 등 국가별 차이를 반영하기 위한 방안 마련도 필요할 것이다.

본 연구 결과를 바탕으로 추가적인 후속연구가 필요할 것으로 판단된다. 첫째, 본 연구는 미국 DoE 사례를 중심으로 검토함에 따라 해당 방식이 우리나라 실정에 적합한지에 대한 검토가 진행되지 않은 상황으로 이에 대한 검토가 필요하다. 둘째, 해당 방법론을 바탕으로 우리나라 실정에 맞는 방법론 개발 및 적용을 통해 한국형 기술관리전략에 적합한 평가지표와 방식의 개발이 필요하다. 마지막으로 미국 DoE 사례의 한계적인 정성적 평가의 점수화를 보다 객관적으로 판단하기 위한 추가적인 방안을 마련하기 위한 후속연구를 제안한다.

References

- [1] S. K. Ahn, A Study on the methodology of setting for investment in the national R&D program, Research Reports, KISTEP, KOREA, pp.1-22.
- [2] H. Y. Song, Process Development of Optimal Budget Allocation for Government R&D Program - Case Study of Big Science and Public R&D, Research Reports, KISTEP, KOREA, pp.3-32.
- [3] R&D roadmap expert, High-Level Radioactive Waste R&D Roadmap, Technical Report, Ministry of Trade, Industry and Energy, KOREA, pp.1-34.
- [4] S. K. Ahn, E. S. Kim, H. J. Cho, "Analysis of Assessment Indicator on Priorities for Budget Allocation of the National R&D Program", *Journal of Korea Technology Innovation Society*, Vol.14, No.4, pp.889-914, 2011.
- [5] D. H. Yu, D. I. Lim, H. J. Seol, "A Framework for Deriving Investment Priority in National Defense R&D: Using DEA based on TRA", *Journal of the KIMST*, Vol.21, No.2, pp.217-224, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.2.217>
- [6] H. Choi, "Reflections on Computational General Equilibrium(CGE) Models", *Yonsei Economic Studies*, Vol IX, No.2, pp.177-213, Sep. 2002.
- [7] B. I. Lim, S. K. Ahn, "Prioritization of National R&D Investment Using Estimation Results by CGE Model", *Journal of Technology Innovation*, Vol.19, No.3, pp.57-84, 2011.
- [8] Y. H. Kim, Y. H. Lee, J. J. Song, S. Y. Lee, "The Development of Investment Prioritization Criteria for the Mooring Facilities's Maintenance by the Delphi Study", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.15, No.1, pp.515-524, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.1.515>
- [9] S. S. Kim, D. H. Kim, "The Analysis of System Thinking on the Commercialization of Public R&D Research Institute", *Korean System Dynamics Review*, Vol.8, No.2, pp.191-207, 2007.

[10] S. J. Park, M. S. Kang, Innovation challenges to make government R&D budgeting more strategic, KISTEP Issue Weekly, KISTEP, KOREA, pp.3-11.

[11] KHUMHA SAFETY SYSTEM, Planning study for mid-and long-term research and development projects for tsunami disaster response, Research Reports, National Emergency Management Agency, KOREA, pp.135-157.

[12] W. S. Lee, "The Characteristics of Case Study as a Qualitative Research Methods", *Journal of Qualitative Research*, Vol.21 No.2, pp.85-91, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.22284/qr.2020.21.2.85>

[13] Y. S. Hwang, S. Y. Chang, J. J. Han, "Spent Nuclear Fuel Management in South Korea: Current Status and the Way Forward", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol.17, No.5, pp.312-323, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.4491/KSEE.2015.37.5.312>

[14] J. B. Chung, "Conflict and Settlement in Siting Policy: Comparative Study of Radioactive Waste Management Facilities in Korea and Sweden", *Korean Journal of Public Administration*, Vol.48 No.4, pp.145-169, 2010.

[15] K. M. Ko, S. W. Yi, "The Future of Nuclear Energy and Government Policy Decision Mechanism: Policy Suggestion for South Korea from American and French Cases", *Dispute Resolution Studies Review*, Vol.12, No.3, pp.227-258, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.16958/drrs.2014.12.3.227>

[16] DOE(U.S. Department of Energy), Used Fuel Disposition Campaign Disposal Research and Development Roadmap, Technical Report, U.S.DOE, U.S.A. pp.7-10.

[17] DOE(U.S. Department of Energy), DOE SFWST Campaign R&D Roadmap Update: Fuel Cycle Research & Development, Technical Report, U.S.DOE, U.S.A. pp.14-40.

[18] S. H. Lee, J. Y. Jung, J. M. Lee, T. M. Kim, K. P. Kim, "Review of the U.S. Spent Nuclear Fuel Standardization Canister Study", *2016 Fall Conference on Korean Society of Radioactive Wastes*, Korean Radioactive Waste Society, Je-ju, Korea, pp.107-108, Oct. 12 2016.

[19] DOE(U.S. Department of Energy), GDSA Repository Systems Analysis Investigations in FY2020: Spent Fuel and Waste Disposition, Technical Report, U.S.DOE, U.S.A. pp.1-15.

[20] DOE(U.S. Department of Energy), SFWST Disposal Research R&D 5-Year Plan - FY2021 Update: Spent Fuel and Waste Disposition, Technical Report, U.S.DOE, U.S.A. pp.1-40.

[21] DOE(U.S. Department of Energy), GDSA Repository Systems Analysis Investigations in FY 2022: Spent Fuel and Waste Disposition, Technical Report, U.S.DOE, U.S.A. pp.21-24.

강 선 주(Sun-Joo Kang)

[정회원]



- 2007년 02월 : 명지대학교 행정학과 (행정학학사)
- 2013년 8월 : 연세대학교 정보대학원 디지털비즈니스 학과 (정보시스템석사)
- 2014년 06월 ~ 2018년 04월 : ㈜더비엔아이 책임연구원
- 2018년 4월 ~ 2019년 9월 : 전략컨설팅집현 주식회사 책임연구원
- 2019년 9월 ~ 2020년 9월 : ㈜웍스 차장
- 2020년 9월 ~ 현재 : ㈜라운빅스랩 책임연구원

<관심분야>

국가연구개발사업, 사용후핵연료, 기술관리전략

이 현 수(Hyeon-Soo Lee)

[정회원]



- 2017년 8월 : 성신여자대학교 심리학과 (심리학학사)
- 2019년 8월 : 한양대학교 일반대학원 경영학과 (경영학석사)
- 2021년 2월 ~ 현재 : ㈜라운빅스랩 선임연구원

<관심분야>

국가연구개발사업, 사용후핵연료, 기술관리전략