

제4세대 원자력시스템의 기술적 특성  
Technological Features of Generation IV  
Nuclear Energy System

정 익\*, 김현준, 양맹호, 오근배

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

21세기를 맞이하면서, 국제 원자력계는 원자력의 새로운 방향을 활발하게 모색하였고, 새로운 방향의 하나로서 혁신 개념의 원자로 개발이 필요하다는 데에 공통된 인식을 형성하고 있었다. 혁신 원자로 개발의 효과적 달성을 위하여 미국과 유럽, 일본 등과 우리나라를 포함한 원자력 선진국들은 에너지안정공급 능력이 우수하고 국민수용이 가능하며 절대 안전성의 확보 및 경제적으로 경쟁력이 우수한 원자력시스템 개발을 위한 노력을 활발하게 진행하고 있다. 본 연구에서는 미래형 혁신 원자력시스템의 기술 목표를 제4세대 원자력시스템을 기준으로 살펴보고, 현재 국제 공동연구로 개발을 추진 중인 제4세대 원자력시스템의 기술적 특성에 대하여 기술하였다.

Abstract

In the early stage of 21th century, international nuclear society was on the active look out for new direction, and had a common recognition on the necessity of innovative reactor system. To achieve this purpose effectively, several international projects have been initiated for development of new nuclear energy systems that secure stable energy supply and have improved public acceptance, safety, and cost-effectiveness. In this study, status of international projects on future innovative nuclear energy systems and technology goals of future nuclear energy systems were surveyed, and the technological features of Generation IV nuclear energy system were described.

키워드 : 제4세대 원자력시스템, GIF, 기술 목표, 기술적 특성

\* 전화) 042-868-8699; e-mail) ikjeong@kaeri.re.kr

## 1. 서론

21세기를 맞이하면서, 국제 원자력계는 원자력의 새로운 방향을 활발하게 모색하였고, 새로운 방향의 하나로서 혁신 개념의 원자로 개발이 필요하다는 데에 공통된 인식을 형성하고 있었다. 즉, 미래의 급격한 에너지 소비 증가에 대비하고 인류의 지속 가능한 발전에 원자력이 기여할 수 있어야 하고, 이를 위해서는 기존의 원자력시스템과는 다른 혁신적인 개념이 필요하다는 것이었다.

이러한 추세에 대응하고 이를 효과적으로 달성하기 위해 에너지안정공급 능력이 우수하고 국민수용이 가능하며 절대 안전성의 확보 및 경제적으로 경쟁력이 우수한 원자력시스템 개발을 위한 노력이 미국과 유럽, 일본 등과 우리나라를 포함한 원자력선진국들 사이에 활발하게 진행되고 있다.

그 주요한 예가 미국과 우리나라 등 원자력기술선진 10개국들이 추진하고 있는 제4세대원자력시스템 국제포럼(GIF, Generation IV International Forum)으로서 여기에서는 21세기 에너지문제를 책임질 제4세대 원자력시스템 개발을 다자간 협력으로 추진하고 있다.[1] 또 다른 예로는 국제원자력기구(IAEA)에서 추진하는 것으로서, 140여 회원국들의 요구에 부응하여 21세기에 회원국이 원자력시스템을 용이하게 도입하여 운영할 수 있도록 하기 위한 혁신적인 원자력시스템 개발 프로그램인 INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) 프로그램을 추진하고 있는 것이다.[2] 이 외에도 유럽연합(EU, European Union)에서도 미켈란젤로라고 명명된 미래형 원자력시스템 개발을 추진 중에 있고, OECD/NEA, OECD/IEA 및 IAEA의 3개 국제기구가 공동으로 미래형 원자력시스템 개발 방안을 수립하기 위해 "Three Agency Study"가 수행되고 있다.[3]

본 연구에서는 미래형 혁신 원자력시스템의 기술 목표를 제4세대 원자력시스템을 기준으로 살펴보고, 현재 국제공동연구로 개발을 추진 중인 제4세대 원자력시스템의 기술적 특성에 대하여 기술하였다.

## 2. 제4세대 원자력시스템

### 2.1 미래 원자력에너지의 역할과 제4세대 원자력시스템

2050년경의 세계인구는 60억에서 100억 정도로 증가할 것으로 예상되며, 현재의 에너지소비 구조는 환경에 대한 역영향과 지구온난화를 가속시키고 있어 미래의 증가하는 에너지 수요를 위한 청정하고 안전하고 값이 싼 에너지 필요하다.

원자력은 현재 세계에너지의 16%를 차지하며 온실가스를 배출하지 않는 에너지원으로 최대 점유율을 가지고 있으며, 증가하는 미래의 에너지 수요를 위하여 환경

역영향이 없는 원자력이용에 의존할 것이며 원자력은 21세기 후반부에는 수송에너지 지원으로의 수소 생산, 해수담수화를 통한 물의 공급 등의 전력이외의 에너지 생산에도 광범위하게 이용될 것으로 전망된다.[4]

제4세대 원자력시스템(Gen IV, Generation IV nuclear energy system)은 미래의 급격한 에너지소비 증가에 대비하고, 인류의 지속 가능한 발전에 기여하기 위해, 대중적 지지와 경제성 및 안전성이 획기적으로 향상된 원자력시스템의 개발 필요성에서 출발하였다.

과거의 원자력시스템을 살펴보면, 원자력이 평화적으로 이용되기 시작한 이후 도입된 원자력시스템을 제1세대(Gen I)부터 제3세대(Gen III)로 구분하고, 향후 2030년 이후를 책임질 원자력시스템을 제4세대(Gen IV)로 정의하고 있다.

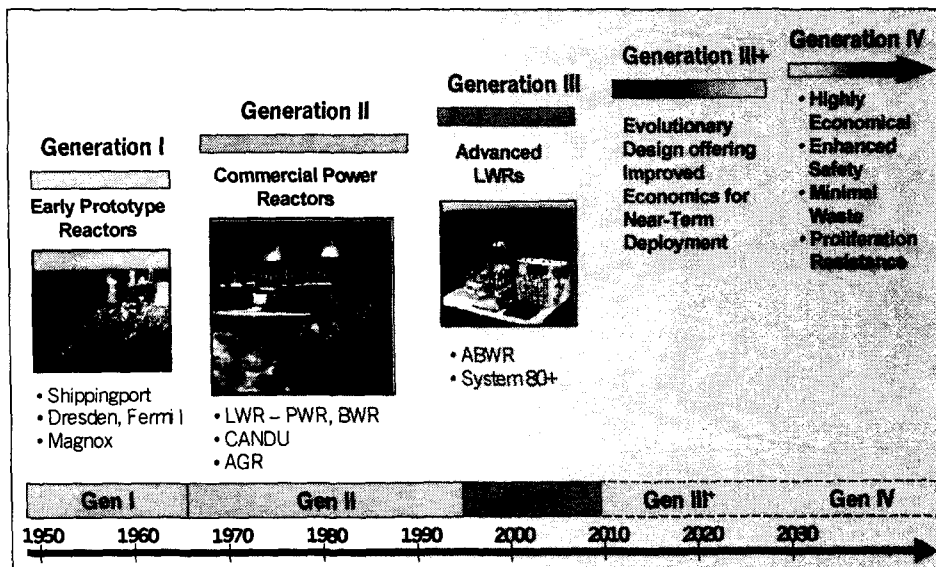


그림 1. 원자력시스템의 변천

결국, Gen IV는 이들 제3세대 원자력시스템과 비교하여 에너지 생산의 경제적 경쟁력과 국민 수용성 확보 측면에서 우수한 혁신개념의 원자력시스템으로, 2030년 이후를 겨냥하는 에너지 시스템이라고 볼 수 있다.

## 2.2 제4세대 원자력시스템 국제포럼

미국 에너지부(DOE)는 2000년 1월 세계적으로 원자력 활동이 활발한 8개국(한국, 일본, 프랑스, 영국, 남아공, 캐나다, 아르헨티나, 브라질)에 대해 미래형 원자력 시스템인 제4세대 원자력시스템의 공동개발을 위한 의견교환을 요청하게 되었다. 이 회의에서, 향후 50년간 전력소비는 개도국을 중심으로 급격히 증가할 것으로 전망하고, 또한 지구환경문제에 대한 관심이 지속적으로 증가할 것이라는 점을 염두

에 두어 원자력의 역할이 매우 중요해 질 것이라는 점에 인식을 같이 하며, 다자간 협력 형태로써 제4세대 원자력시스템 개발 필요성에 공감대를 형성한다는 등을 주요 내용으로 하고 있는 제4세대 원자력시스템 협력 개발을 위한 공동선언문을 채택하였다.

제4세대 원자력시스템 국제포럼은 헌장(GIF Charter)에서, 향후 세계적인 에너지 수요의 증대, 환경보전 인식의 증대, 지속 가능한 발전에 대한 인식의 증대 등에 대응하여 원자력의 잠재력이 충분히 발휘될 수 있도록 하기 위해서는 경제성, 안전성, 폐기물 관리 및 핵확산저항성에 대한 연구개발이 필요하다고 하고, 앞서의 원자력 시스템들이 가지고 있는 장점은 취하고 단점은 보완하는 새로운 세대의 원자력시스템 개발의 필요성을 지적하고 있다.

2002년 7월 GIF는 6개의 혁신 원자력시스템을 선정하고, 이후 각 개념에 대한 기술개발 분야와 일정을 기술한 기술지도(Technology Roadmap)를 발간하였으며, 현재 시스템의 개발을 공동연구로 수행하기 위한 방안을 수립 중에 있다.[5]

### 3. 미래 원자력시스템의 기술 목표

원자력시스템이 미래 에너지 공급에서 핵심적 역할을 할 수 있게 Gen IV 시스템은 다음 4가지 분야에 대한 개발목표를 가지고 있다.

- 지속가능성(Sustainability)
- 경제성(Economics)
- 안전성/신뢰성(Safety and Reliability)
- 핵확산저항성/물리적 방호(Proliferation Resistance and Physical Protection)

개발목표는 8개의 세부목표로 나누어지며 이의 달성을 위한 15개의 기준으로 표현된다. 최종적인 시스템의 평가를 위한 평가척도는 24개로 이루어진다.[4]

#### 3.1 지속가능성

원자력시스템이 지속가능성을 확보하는 것은 현 세대 뿐만 아니라 미래 세대의 수요를 계속 충족시킬 수 있는 능력을 가지는 것이다. 지속가능성의 확보로

(1) 원자력에 의한 전력 또는 열로 생산하는 수소에너지를 활용함으로써 환경에 해로운 에너지원과 수송 에너지를 대체하여 환경에 긍정적인 영향을 유발하고,

(2) 방사성폐기물 발생량을 획기적으로 감소시킴으로써 폐기물 처리·처분 여유를 크게 확보하며,

(3) 장수명 방사성폐기물 양을 획기적으로 감소시킴으로써 폐기물 관리 기간을 크게 감소시키고,

(4) 우라늄자원 이용효율을 크게 향상시키게 될 것이다.

지속가능성의 세부목표로 1)자원의 이용도, 2)폐기물의 최소화 및 관리를 두고 있으며, 시스템의 기준은 자원의 이용도에서의 ①핵연료이용, 폐기물에서의 ②폐기물 최소화, ③폐기물관리와 처분의 환경영향의 3가지를 설정하고 있다.

### 3.2 경제성

원자력시스템이 타 에너지원은 물론 기존의 원자력발전형태 보다 높은 경제성을 확보하고, 또한 자본투자 위험도 크게 감소시키는 것을 목표로 하며 경제성 목표의 달성을 통하여,

(1) 혁신적인 기술개발과 단순화 등을 통하여 운영비용과 에너지생산비용을 크게 저감하고,

(2) 혁신적인 건설 및 제작기술 적용 등을 통하여 초기 자본투자 위험을 크게 감소시키고,

(3) 전력생산의 해수담수화, 지역난방, 수소에너지 생산 등 비전력생산 분야의 활용으로 에너지경제를 개선하게 될 것이다.

원자력시스템의 경제성의 목표로 1)전수명주기비용 감소, 2)자본 위험도의 감소를 두고 있으며, 시스템의 기준은 전수명주기비용에서의 ①건설비용, ②에너지생산비용, 자본위험도에서의 ③건설기간의 3가지를 설정하고 있다.

### 3.3 안전성 및 신뢰성

시스템의 안전하고 신뢰성있는 운전이 미래원자력시스템 개발에 앞서서 매우 중요한 요건이며, 안전성 및 신뢰성 확보의 목표는 안전하고 신뢰성있는 운전, 사고관리 방안의 획기적 개선, 사고 영향의 최소화, 안전성 확보로 투자자의 투자를 보호, 발전소외에서의 사고영향 비상대응의 필요성의 감소 등을 확보하는 것이다. 이를 통하여 고유 안전특성의 적용, 우수한 안전설계 적용, 일반 대중이 수용할 수 있는 투명한 안전특성을 확보하게 되어 일반대중의 원자력안전에 대한 신뢰를 크게 증대시키게 될 것이다.

원자력시스템의 안전성과 신뢰성의 목표로 1)운전의 안전성과 신뢰성, 2)노심손상 빈도의 저감, 3)소외비상대응의 감소를 두고 있으며, 시스템의 기준으로 운전안전성과 신뢰성에서의 ①신뢰성, ②종사자 및 대중의 일상적 방사선노출, ③사고시의 방사선 피폭, 노심손상빈도의 ④안전특성의 강인함(robustness), ⑤적합한 특성 모델, 소외비상대응에서의 ⑥적합한 특성의 방사선원/에너지 산출, ⑦강인한 사고완화 특성의 7가지 설정하고 있다.

### 3.4 핵확산저항성 및 물리적 방호

원자력시스템의 핵확산 저항성과 물리적 방호 능력의 확보는 핵물질의 전용과 핵테러 가능성을 방지하여 원자력의 평화적 이용을 크게 증진시키는 것을 목표로 하고 있다. 이를 통하여,

- 1) 원자력시스템의 고유한 핵확산 저항성을 증대시키고, 핵물질전용 방지를 위한 안전조치 등을 강화함으로써 효과적이고 지속적인 핵확산 저항성을 제공하고,
- 2) 우수한 설계를 적용하여 테러를 방지하는 핵물질방호 능력을 확보하게 될 것이다.

핵확산저항성 및 물리적 방호의 목표 아래의 시스템의 기준으로 ①전용이나 ②미신고생산의 민감성, 2)설비의 취약성을 두고 있다.

표 1. Gen IV 개념 선정 평가기준

4 Goal Areas	8 Goals		
Sustainability	SU 1 Resource Utilization	SU 1-1 Fuel Utilization	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Use of fuel resources</li> <li>• Waste mass</li> <li>• Volume</li> <li>• Heat load</li> <li>• Radiotoxicity</li> <li>• Environmental impact</li> </ul>
	SU 2 Waste Minimization and Management	SU 2-1 Waste Minimization SU 2-2 Environmental Impact of Waste Management and Disposal	
Economics	EC 1 Life Cycle Cost	EC 1-1 Overnight Construction Costs EC 1-2 Production Costs EC 2-1 Construction Duration	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Overnight construction costs</li> <li>• Production costs</li> <li>• Construction duration</li> </ul>
	EC 2 Risk to Capital	EC 1-1 Overnight Construction Costs EC 2-1 Construction Duration	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Overnight construction costs</li> <li>• Construction duration</li> </ul>
Safety and Reliability	SR 1 Operational Safety and Reliability	SR 1-1 Reliability SR 1-2 Worker/Public - Routine Exposure SR 1-3 Worker/Public - Accident Exposure	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forced outage rate</li> <li>• Routine exposure</li> <li>• Accident exposure</li> </ul>
	SR 2 Core Damage	SR 2-1 Robust Safety Features SR 2-2 Well-Characterized Models	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reliable reactivity control</li> <li>• Reliable decay heat removal</li> <li>• Dominant phenomena uncertainty</li> <li>• Long fuel thermal response time</li> <li>• Integral experiments scalability</li> </ul>
	SR 3 Offsite Emergency Response	SR 3-1 Well-Characterized Source Term/Energy SR 3-2 Robust Mitigation Features	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Source term</li> <li>• Mechanisms for energy release</li> <li>• Long system time constants</li> <li>• Long and effective holdup</li> </ul>
Proliferation Resistance and Physical Protection	PR 1 Proliferation Resistance and Physical Protection	PR 1-1 Susceptibility to Diversion or Undeclared Production PR 1-2 Vulnerability of Installations	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Separated materials</li> <li>• Spent fuel characteristics</li> <li>• Passive safety features</li> </ul>

## 4. Gen IV 시스템의 기술적 특징

### 4.1 Gen IV 시스템 설계 특성

제4세대 원자력시스템은 원자로 기술뿐 아니라, 관련되는 핵연료주기 기술 전체를 포함하는 것으로 정의되며, 시스템의 평가를 위한 평가척도는 4개의 목표영역에

서의 24개 척도로 이루어져있으며 각 평가기준은 개량형경수로(ALWR, Advanced Light Water Reactor)를 기준으로 한 값에 상하 3단계를 두어 전체 7단계의 값을 가진 것으로 평가를 수행하였다.

최종적으로 전문가 그룹의 평가점수를 바탕으로 시스템의 주요 임무와 각국의 선호도를 기준으로 한 정책고려사항을 반영하여 아래의 6개의 개념을 선정하였다.

- 가스냉각 고속로 (GFR, Gas-cooled Fast Reactor System)
- 납냉각 고속로 (LFR, Lead-cooled Fast Reactor System)
- 나트륨냉각 고속로 (SFR, Sodium-cooled Fast Reactor System)
- 용융염로 (MSR, Molten Salt Reactor System)
- 초고온가스로 (VHTR, Very High Temperature Reactor System)
- 초임계수냉각로 (SCWR, Supercritical Water-cooled Reactor System)

상기의 6개 Gen IV 시스템 선정 배경은 다음과 같다.

- Gen IV 개발목표 달성이 가능한 시스템
- 미래 원자력시스템이 가져야 할 임무인 전력생산, 수소생산, 공정열 생산, 액티나이드 관리 등에 가장 적합한 시스템
- 선정된 시스템 전체가 상기의 개발목표와 임무에 잘 부합하도록 선정
- 선정된 시스템에 대한 회원국의 관심과 정책을 반영

표 2. Gen IV 개념별 설계 특성

Gen IV Systems	Neutron Spectrum	Coolant	Fuel	Recycle Process	Outlet Temp.	Deployment
GFR	Fast	Gas	Carbide	Aqueous (or Pyro)	850°C	2025
LFR	Fast	Pb or Pb / Bi	Metal/ Nitride	Pyro	550-800°C	2025
MSR	Thermal	Salt	Fluoride	Salt process	700°C	2025
SFR	Fast	Na	Metal / MOX	Pyro / Aqueous	520-550 °C	2020
SCWR	Thermal / Fast	Supercritical water	Oxide	Aqueous	550 °C	2025
VHTR	Thermal	Gas	Oxide	Once-through	1000°C	2020

선정된 6개 시스템 중 연료의 이용률 향상과 마이너액티나이드의 처리를 위하여 고속중성자 스펙트럼을 사용하는 것은 GFR, LFR, SFR의 3개이며, SCWR이 열중

성자에서 장기적으로는 고속중성자 스펙트럼을 사용하는 것으로 계획하고 있다. MSR과 VHTR은 열 중성자 스펙트럼을 사용한다.

각 시스템의 냉각재로는 액체금속(LFR, SFR), 기체(GFR, VHTR)가 각 2개이며, 용융염(SMR)과 초임계수(SCWR)가 각각 1개로 구성되어 있다. 연료는 SCWR과 VHTR이 산화(Oxide)연료, GFR은 탄화(Carbide)연료, MSR은 불화(Fluoride)연료를 사용하며, LFR은 금속(Metal)연료와 질화(Nitride)연료를 SFR은 금속(Metal)연료와 혼합산화(Mixed Oxide)연료를 사용한다.

선정된 Gen IV 시스템은 초고온가스로(VHTR)를 제외하고는 순환핵연료주기를 채택하고 있으며 액티나이드 처리의 능력이 뛰어나 지속가능성에서 상위에 위치한다. 초임계수냉각로(SCWR)의 경우는 열중성자 스펙트럼을 이용한 경우에만 비순환 연료주기이다.

VHTR을 제외한 각 시스템의 출구온도는 520~850℃로 현재의 상용원자로인 가압경수로(PWR)에 비해 높아서 전력생산이외의 활용이 가능하며, 특히 VHTR은 1000℃로 직접적인 공정열의 생산이 가능하다.

선정된 6개의 시스템은 전력생산과 수소생산 및 열병합발전에 모두 이용될 수 있으며, SFR과 SCWR은 전력생산에서 VHTR은 수소생산 및 열병합발전에 강점을 보이고 있다. 공정열의 생산을 주 목적으로 하는 VHTR을 제외한 모든 노형은 마이너 액티나이드의 처리가 가능하다.[4]

## 4.2 Gen IV 연구개발 계획

기술지도작성팀(Roadmap Integration Team)에 의해 작성된 보고서에는 연구개발이 최적상태로 진행될 경우 Gen IV 시스템 중 SFR과 VHTR은 2020년경에 연구개발의 완료가 가능할 것으로 예측되었으며 이외의 GFR, LFR, MSR, SCWR은 2025년경에 완료가 가능한 것으로 예측되었다.

제4세대 원자력시스템의 기술목표를 달성하기 위한 기술개발은 3단계로 추진되는 것이 고려되고 있다. 먼저, 1단계(Viability Phase)는 기술적 가능성을 평가하며, 시스템 개발에 반드시 필요한 핵심기술(Key technologies)을 개발하는 것이다. 이 단계의 성공은 시스템 개발의 성공 여부와 직결된다. 2단계(Performance Phase)는 시스템의 성능데이터를 개발하고, 시스템을 최적화하는 연구를 수행하는 것이다. 1, 2 단계의 연구가 끝나면 시스템의 개념설계가 완료된다. 제3단계(Demonstration Phase)는 1, 2단계의 연구결과를 바탕으로 시스템을 실증하는 것이다. 3단계는 산업체의 참여가 필수적이다.

제4세대 원자력 시스템의 기술지도는 2010년경까지 시스템을 위한 연료, 재료,



안전성, 공정 등의 개발을 통한 viability 평가 단계를 거쳐서 2020년에서 2025년 경까지 시스템의 세부특성 연구개발의 performance 단계를 거쳐 이후 demonstration 단계에 이르는 것으로 기술하고 있다.

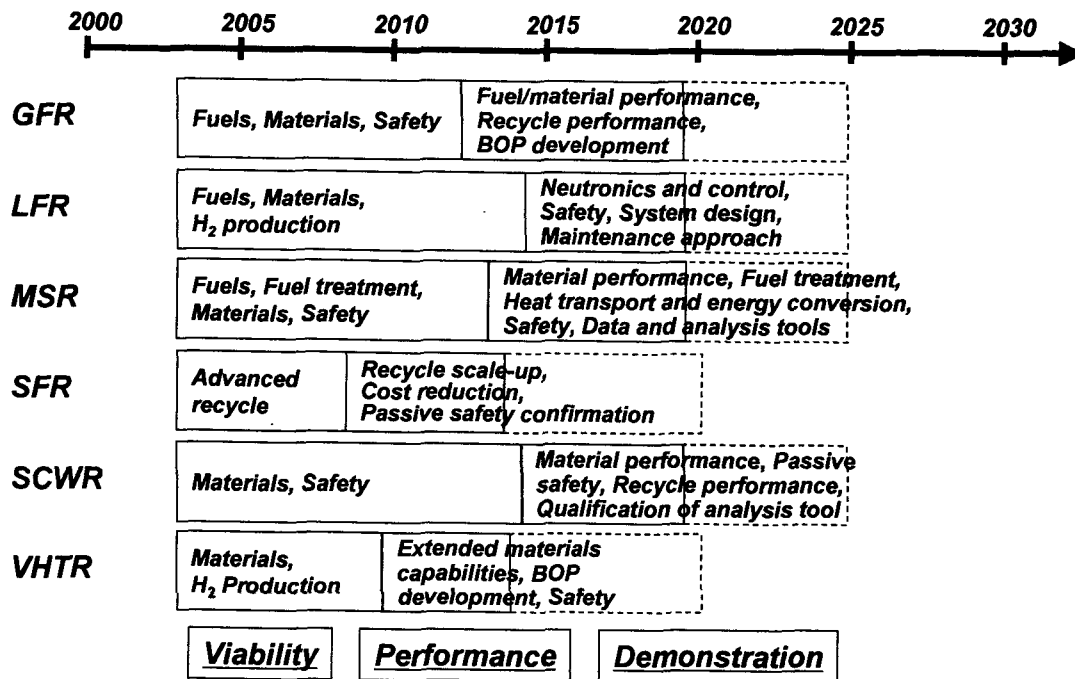


그림 2. Gen IV 개념별 R&D 항목

현재 GIF에서는 각 시스템을 대상으로 연구개발계획의 수립을 위한 연구분야와 협력방안이 모색 중이며, 기존의 인프라와 연구개발의 결과를 활용한 연구개발의 수행 계획을 수립하고 있으며, 국내에서는 국내의 기술기반과 국제적 협력의 용이성을 고려한 연구개발계획이 수립중이다.[5]

### 5. 결론 및 시사점

원자력에 있어서의 현재의 주요 이슈는 경제성, 안전성, 사용후연료 등의 방사성 폐기물의 처분, 사용물질 및 기술의 핵확산저항성 등이다. 대중의 수용도는 안전성, 폐기물관리, 핵확산저항성의 기술적 측면과 함께 정책적, 사회적인 요인에 의해 결정된다.[6] 새로운 원자력시스템의 도입에 있어서 대중의 수용도의 증진을 위한 전제조건으로 원자력시스템은 각 이슈에 대하여 받아들여질 만한 충족이 필요하며 이와 함께 다른 발전원 및 에너지 시스템과 비교하여 경제성 측면에서 경쟁력이 있어

야 한다.

현재 국제적으로 개발 중인 미래형 원자력시스템은 위의 범주의 이슈에 대한 기술적인 극복방안을 반영하고, 자원이용의 효율성과 공정열을 이용한 해수 담수화 및 수소생산 등에 이용이 가능하도록 되어있다. 제4세대 원자력시스템은 에너지자원을 최적으로 활용할 수 있고, 가장 경쟁력있는 가격으로 에너지를 공급할 수 있으며, 안전성과 폐기물관리 및 핵확산저항성이 충분히 확보되고 이를 도입하고자 하는 국가에서의 국민수용성이 확보될 수 있도록 하는 미래형 시스템이다. 현재 미래 원자력시스템의 개발에 이용이 가능한 과거의 지식과 연구들이 데이터베이스화하여 제공되고 있으며, 핵심기술 분야로 여러 혁신적 원자로 설계의 개발에 활용될 수 있는 기술을 대상으로 국제적인 협력이 증가하고 있다. 또한 각국은 원자력기술의 혁신과 기술기반을 바탕으로 한 공동연구의 수행으로 미래형 원자력시스템의 개발을 가속화하고 있다.

미래형 원자력시스템은 21세기 에너지수요 증가를 충족할 수 있는 안전하고 비용효과적인 에너지 시스템으로 인류의 삶의 질 향상과 풍요로운 생활을 받치는 기반이 될 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [0] 김현준, "제4세대 원자력시스템(Gen IV) 개발 - 추진현황과 전망", 2002. 3, 원자력산업 제229호
- [0] *Guidance for the evaluation of innovative nuclear reactors and fuel cycles -Report of Phase 1A of the INPRO-*, IAEA, June 2003, IAEA-TECDOC-1362
- [0] *Innovative Nuclear Reactor Development -Opportunities International Co-operation-*, OECD, 2002
- [0] *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, December 2002, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum
- [0] 한국원자력연구소, 원자력선진기술확보사업추진을 위한 기획연구, 한국과학기술기획평가원, 2002
- [0] NUCLEAR POWER IN THE OECD, OECD/IEA, 2001