제4세대 원자력시스템 연구개발의 추진배경과 필요성

원자력연구소 연구원
권혁(kwonhk@kaeri.re.kr)
기술경영연구센터 부연구위원
황석원(hsw100@stepi.re.kr)

1. 제4세대 원자력 시스템의 개발 배경

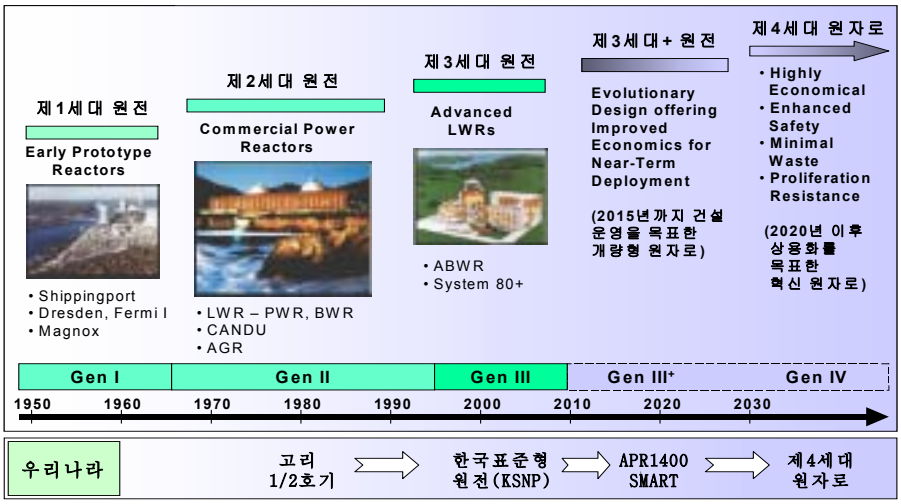
원자력 시스템은 맨하탄 프로젝트의 산물인 중성자 연쇄반응 제어기술을 평화적으로 이용하면서 시작되었다. 1950년대에 영국의 풍부한 석탄자원을 기반으로 개발된 고온 개스로방식의 Magnox형 원전과 잠수함의 추진기관에 사용된 가압 경수방식을 응용한 Shipping port 원전을 필두로 상업 발전에 원자력이 이용되기 시작하였다. 제 1세대 또는 GEN 1이라 불리우는 이 시대에 원자력 발전이 전력 기간산업으로 자리 매김을 하기 시작하였다.

GEN II는 원자력 발전소가 본격적으로 도입되기 시작한 1960년대 이후에 건설·운전된 발전소들을 가리킨다. 이때에 도입된 원전들이 현재 세계에서 운전되는 대부분의 원전들이다. 우리나라에서는 고리, 영광, 울진, 월성에 건설된 초기 원전들이 이 세대에 해당한다.

1980년대 이후, 원자력 발전의 경제성을 향상시키기 위해 표준화, 개량화 사업이 수행되었고 원자력 시스템들이 표준화, 규격화되기 시작하였다. 이에 따라, 1990년대 중반 이후에 도입된 원전들을 GEN III라 부르기 시작하였다. 우리나라의 표준형원전인 KSNP(Korea Standard Nuclear Plant), 미국의 AP600, ABWR, System 80+ 등이 이에 해당한다.

최근 미국의 캘리포니아 대정전 사태이후 원자력 발전에 대한 심각한 고려가 DOE와 NRC에서 행해졌고 신규 원전 건설을 향후 10년 내에 할 것을 천명하였다. 이러한 정부와 규제기관의 원전활성화 방안에 힘입어 GEN III보다 경제적이고 안전성이 우수한 원자로의 개발이 시작되었고 2015년에 건설될 것을 목표로 한 GEN III+원전이 개발되었다. 우리나라의 APR 1400과 미국의 AP1000이 이에 해당한다(IAEA, 2002).

그러나 이러한 우수한 안전성과 경제성을 가진 GEN III+로도 2030년 이후까지 경쟁력과 국민 수용성을 충분히 확보기 어려울 것이라는 점을 고려하여, 2030년 이후를 겨냥한 혁신 개념의 원자력 시스템을 개발하고자 하고 있는데, 이를 GEN IV라 한다.



<그림 1> 제4세대 원자로와 원자력 시스템의 변천사(KISTEP, 2004)

Gen IV는 2030년 이후의 장기적인 측면에서 원자력의 미래를 책임질 것을 기대하는 것이다. 이를 위해 인류의 지속 가능한 발전에 기여하기 위한 지속성의 확보, 안전성의 획기적 개선, 경제성의 확보를 지향하고 있다. Gen IV 기술 개발은 4개의 원칙 하에 8개의 목표로 구성되었다.

<표 1> Gen IV 기술 목표(KISTEP, 2004)

○ **목표 1: 인류의 지속 발전에 기여하는 지속성의 확보(Sustainability)**
- 목표 1-1: 연료자원 활용성을 증대시켜 에너지공급의 지속성 확보
- 목표 1-2: 폐기물 발생량의 감소로 환경부담 경감

○ **목표 2: 궁극적 안전성 (Safety and Reliability) 확보**
- 목표 2-1: 일반대중이 공감하는 수준의 안전성 및 신뢰성 확보
- 목표 2-2: 노심 용융 등 중대사고 발생가능성의 획기적 감소
- 목표 2-3: 비상대응 등 특별한 조치가 필요 없는 안전시스템의 구축

○ **목표 3: 높은 경제성 (Economics)**
- 목표 3-1: 타 발전원에 비해 전수명 운전비용의 경쟁우위 확보
- 목표 3-2: 초기 자본투자 감소로 재정적 위험부담의 경감

○ **목표 4: 핵확산 저항성 및 물리적 방호의 증대**

Gen IV의 8가지 기술 목표는 다음과 같은 4가지 원칙 하에서 도출되었다. 첫째, 혁신적인 시스템 개발을 유인하고 도전적이라야 한다. 둘째, 세계적인 에너지 수요에 대응할 수 있어야 한다. 셋째, 원자로만이 아닌 핵연료주기를 포함한 전체 시스템을 대표하여야 한다. 넷째, 모든 Gen IV 후보 개념들이 하나도 배제됨이 없이 이득, 비용, 위험도 및 불확실성에 기초하여 위의 목표에의 부합성을 평가받도록 한다는 것이다.

이러한 원칙과 함께, Gen IV의 기술목표는 단일 시스템에 대한 특정 목표를 충족시키도록 하는 것이 아니라, 광범위한 분야에서 새로운 원자력시스템 개발을 유인하도록 하여야

하며, 2030년 이후의 사회 경제적 상황에 대한 예측 불확실성을 반영하여 지나치게 구체적이지 않도록 하고 있다. 이러한 원칙과 주의 사항을 고려하여 다음과 같이 Gen IV 기술 목표가 설정되었다(GIF, 2002).

첫 번째 목표는 지속성 확보이다. 이는 인류의 지속 가능한 개발에 기여할 수 있는 원자력의 공급을 위한 것으로써, 자원의 절약과 환경보호에 기여하여야 하며, 미래 세대의 자원 활용 능력을 보존토록 하고 마찬가지로 미래세대에 대해 특정의 부담을 지우지 않도록 하는 것이 요구된다. 이러한 지속성 확보라는 목표의 달성을 위하여 (1) 연료자원의 활용성을 증대시켜 에너지공급의 지속성을 확보하도록 하고, (2) 폐기물 발생량을 크게 감소시켜 환경부담을 경감시키며, (3) 핵확산 저항성을 증대시켜 원자력의 평화적 이용이 인류에 이바지하도록 하고 있다.

두 번째 목표인 궁극적인 안전성 확보는 원자력이용의 전제조건이라는 측면에서 매우 중요하게 고려된다. 이의 달성 목표는 (1) 일반 대중이 공감하는 수준의 안전성과 신뢰성을 확보하고, (2) 원자로 노심 용융 등 중대사고의 발생 가능성을 획기적으로 감소시키며, (3) 비상대응 등 특별한 조치가 필요 없는 안전시스템을 구축하는 것이다.

세 번째 목표인 높은 경제성 확보는 시장 요건으로서 Gen IV가 경쟁적 전력시장에서 생존하기 위해서는 필수적이다. 이 목표의 달성을 위해서 (1) 타 발전원에 비해 전운전수명 기간 동안의 운전비용이 경쟁 우위를 가지도록 하고, (2) 초기 자본투자비를 획기적으로 감소시켜 원전 건설에 따른 재정적 위험 부담을 크게 경감하도록 하고 있다.

이러한 기술 목표와 이를 계량적으로 평가하기 위한 지표를 활용하여 제4세대 원자력시스템 개념 선정 및 연구개발 항목설정을 위한 로드맵(Gen IV TRM(Technology Road Map)) 작업이 진행되고 있고, 정책적 고려를 위하여 Gen IV가 미래 에너지 시장에서 어떠한 역할을 담당할 것인가를 고려하는 방안도 병행하여 논의되고 있다.

현재 고려되고 있는 Gen IV의 역할은 (1) 대규모 전력망에 적합하도록 대형 전력공급 능력을 가지는 것, (2) 소규모 전력망 또는 분산전원에 적합한 소형 전력공급 능력을 가질 것, (3) 전력 및 출구의 고온을 이용한 수소생산을 하는 것 및 (4) 악티나이드 관리를 할 수 있는 것 등이다. 이러한 임무들은 미래 원자력시스템이 지속가능한 발전을 위한 에너지 생산원의 역할을 할 수 있기 위해 필수적인 것들이다.

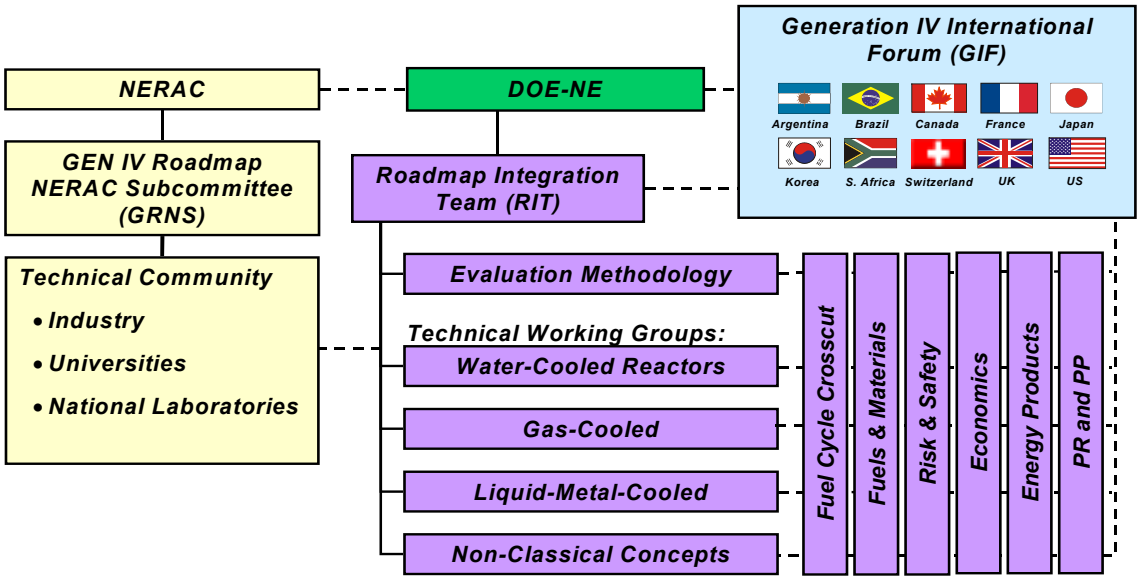
2. 제4제대 원자력시스템의 신개념 원자로와 한국의 선택

제4세대 원자력 시스템은 원자로 기술과 핵연료 주기 기술 전체를 포함하고 있다. GIF에서는 다음과 같은 6개의 신개념 원자로를 선정하였다.

① 가스냉각 고속로 (GFR :Gas-cooled Fast Reactor)
② 납냉각 고속로(LFR :Lead-cooled Fast Reactor)
③ 소듐냉각 고속로(SFR :Sodium-cooled Fast Reactor)
④ 용융염로(MSR :Molten Salt Reactor)
⑤ 초고온가스로(VHTR :Very High Temperature gas-cooled Reactor)
⑥ 초임계수냉각로(SCWR :Super Critical Water-cooled Reactor)

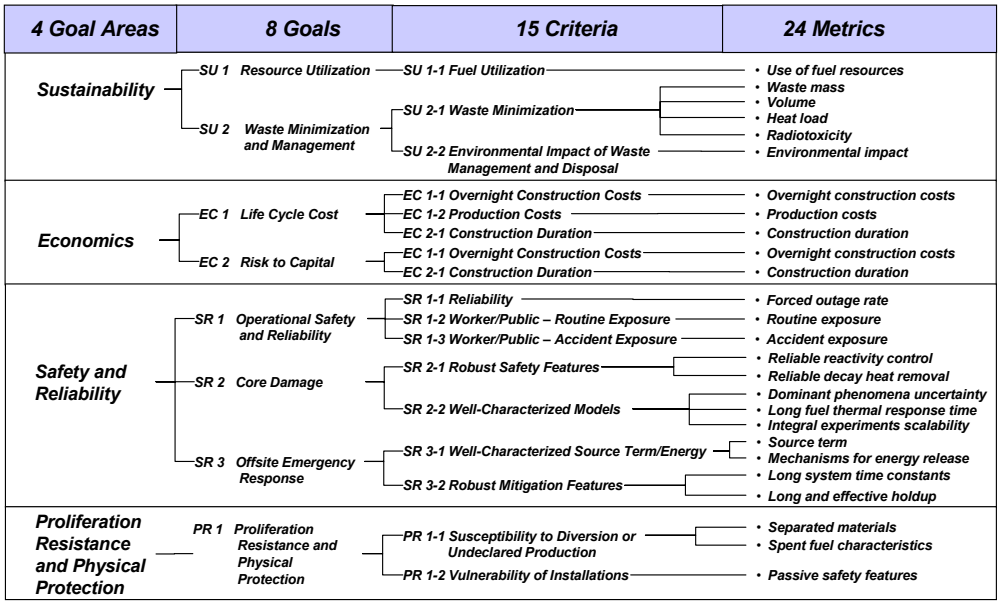
제4세대 원자력시스템을 선정하고, 연구개발계획을 수립하는 작업은 GEN IV

Techonology Roadmap 작업을 통하여 수행되어 왔다. 이 체계는 GEN IV 6개 후보그룹별 전문가팀(TWG :Technical Working Group)의 기술적 평가와 평가방법 팀의 평가방법론 개발 및 평가결과를 통합하는 통합팀(RIT :Roadmap Integration Team)으로 구성되어 있다. 이들 팀의 GEN IV 후보 시스템에 대한 평가는 우선 평가방법 팀에서 평가방법과 척도를 만들어 기술평가 전문가 팀에 <표 2>와 같은 기준을 제시하면, 전문가 팀은 제시된 방법을 적용하여 후보 시스템의 기술적인 부분을 평가하고, 각 팀별 평가결과를 RIT에서 통합하는 절차를 반복 수행하는 것이다. 이를 통해 6개의 GEN IV 개념이 선정되었다.



<그림 2> Gen IV Technology Roadmap 추진체제(GIF, 2002)

<표 2> GEN IV 원자로의 평가 기준(GIF, 2002)



Gen IV 개념으로 선정된 개념에 대한 평가결과를 <표 3>과 같이 요약할 수 있다. 평가결과는 Gen VI 목표분야에 대한 개념들의 점수를 나타낸 것으로서 1점이 최고점수 이다. GIF의 평가에 의하면, 0.5점 이상이면 Top rank로 구분하고, 0.2~0.5 사이는 Good, ALWR 기준치의 ±0.20 사이에 들어가는 것은 Neutral, 이 보다 낮은 점수를 받게 되면 Weak로 평가하고 있다. 그림에서 보면, Sustainability 부분에서 Thermal Neutron Spectrum을 사용하는 VHTR과 SCWR-Thermal을 빼고는 모두 Top Rank의 점수를 받고 있고, 안전성과 경제성 분야에서는 VHTR만 Top Rank를 받고 있다. 핵확산저항성 분야에서는 모든 개념들이 Top Rank를 받지 못하고 있다.

<표 3> Gen IV 개념별 평가결과 비교(GIF, 2002)

Gen IV Systems	Sustainability	Safety & Reliability	Economics	PR & PP
GFR	Top	Good	Good	Good
LFR	Top	Good	Weak	Good
MSR	Top	Good	Neutral	Good
SFR	Top	Good	Good	Good
SCWR	Neutral to Top	Neutral to Good	Good	Neutral to Good
VHTR	Neutral	Top	Top	Good

평가순위 : Top → Good → Neutral → Weak

SFR, GFR 및 VHTR이 좋은 평가를 받은 그룹으로 분류할 수 있고, SCWR, LFR 및 MSR이 상대적으로 나쁜 평가를 받은 그룹으로 분류할 수 있다. 이러한 평가 결과가 추후 어떤 국가가 자국의 Gen IV 개념을 선정하는가에 결정적인 영향을 주는 것은 아닐 것이나, 객관적인 평가 결과라는 점에서 좋은 참고자료가 될 수 있다. 예를 들면, 한국과 일본같이 에너지 안보가 매우 중요한 국가에서는 Sustainability가 중요한 기준이 될 수 있고, Thermal Neutron Spectrum을 사용하는 VHTR과 SCWR은 에너지공급형 원자력시스템으로는 적합하다고 판단하지 않을 수가 있다. 그러나 어떤 경우이던, 안전성은 국민이해와 직결되고 경제성은 사용자의 요구조건이기 때문에 이 두 가지를 만족해야 한다. 핵확산저항성은 국제적인 요건으로 기본적으로 이 요건을 잘 만족하는 개념이 선정되어야 할 것이고, 기술적으로 핵확산을 방지하기 어려운 경우는 제도적으로 강화하는 방법을 사용하여야 할 것이다. 이를 정리하면 아래와 같다.

- Sustainability : SCWR-Thermal, VHTR
- Safety & reliability : MSR, SCWR-Thermal, SCWR-Fast
- Economics : SCWR-Fast, MSR, SFR-MOX, LFR
- PR/PP : SCWR-Thermal

이에 따라 평가가 좋지 않다고 판단되는 개념은 SCWR-Thermal (3개 부분에 포함), SCWR-Fast, MSR (2개 부분 포함), VHTR, LFR, SFR-MOX (1개 부분 포함)의 순이다. 이중에서 하나도 포함되지 않은 개념이 SFR-Metal이다.

Gen IV 개념들이 지녀야 할 임무로서 제시된 것이 전력 공급, 수소생산 등 에너지 공급, 방사성폐기물 관리를 들 수 있다. Gen IV 개념별 특성별 비교는 <표 4>에 나타나있다.

<표 4> Gen IV 개념의 임무별 특성(GIF, 2002)

Gen IV Systems	Electricity Generation	Hydrogen Production & Cogeneration	Actinide Management	Rating (MWe)
GFR	▲▲	▲▲	AM	288
LFR	▲▲	▲▲	AM	50~150 300~400 1200
MSR	▲▲	▲▲	AM	1000
SFR	▲▲▲	▲	AM	150~500 500~1500
SCWR	▲▲▲	▲	Once Thru or AM	1700
VHTR	▲	▲▲▲	Once Thru	600 MWth

주: AM은 Actinide Management를 말하며, Once-Thru는 비순환핵연료주기를 말함

대용량을 추구하는 SFR과 SCWR은 전력공급용으로 적합하고, 고온의 소용량을 추구하는 VHTR은 수소생산 등 에너지공급용으로 적합하다. GFR, LFR, MSR은 전력공급과 에너지생산 등에 함께 사용할 수 있을 것으로 평가되고 있다. 방사성폐기물 관리에는 Thermal Neutron을 사용하는 개념을 제외하고는 모두 적합한 것으로 평가되고 있다.

2002년 11월 현재 회원국들의 Gen IV R&D 선호도 표명 결과는 다음 <표 5>와 같다.

<표 5> GIF 회원국별 Gen IV R&D 선호도 표명('02. 11)(GIF, 2002. 11)

국가	GFR	LFR	MSR	SCWR	SFR	VHTR	Crosscut
아르헨	N	N	N	N	N	N	N
브라질	N	N	N	N	N	N	N
캐나다	X	X	X	H*	X	X	H(multiple areas)
프랑스	H	L	L	M	H	H*	H(fuel cycle)
일 본	M	L	X	M	H*	H	H(multiple areas)
한 국	M	L	L	M	H	H	M(multiple areas)
남아공	M	X	X	X	X	M	M(materials)
스위스	H	H*	X	H	X	M	H(automation, info tech., materials, fuels, waste min., fuel cycle)
영 국	H	X	L	L	M	H	H(fuel, waste min., non-prolf., infor tech.)
미 국	H*	M	L	H	M	M	H(fuel cycle, fuels, materials)

주: H: *High*, M: *Medium*, L: *Low*, X: *No Interest*, N: *Not Reported*, *: *Lead Coordinating Country*

이러한 회원국별의 선호도는 각국의 원자로 개발사와 주요 개발 원자로와 깊이 관계되어 있다. 캐나다의 경우, INPRO 혁신 원자로인 CANDU-X BOP 계통은 초임계수를 이용한 발전소 효율 및 계통의 단순화를 통해 경제성을 향상시키려 하고 있다. GEN 4에서도 이러한 자국의 연구 현황 및 자본의 효율적인 투자를 위해 SCWR에 높은 선호도와 투자 의지를 보여주고 있다.

한국 역시 SMART와 KALIMER를 개발하는 기술과 자본을 활용하여 SFR과 SCWR에 관심을 표명하고 있다. 이 두 원자로형의 선택은 1990년 이후부터 추진된 KALIMER사업과 근년간의 APR 1400과 SMART 사업으로부터 얻어진 기술을 고도화하고 선진 기술을 획득하기 위한 전략적 선택으로 보여진다. 또한 2020년 이후의 신에너지 체제를 담당할 수소 에너지를 고려하여 수소 생성을 목적으로 한 원자로인 VHTR을 선택하였다.

3. 우리나라의 제4세대 원자력시스템 개발 참여 현황

우리나라는 1978년 고리 원자력발전소를 상업적으로 가동한 이후, 1980년대에 들어 원전 표준화와 함께 원전기술자립을 추진하였고 1990년대 중반에는 기술자립의 완결체인 한국표준형 원자력발전소를 건설하기에 이르렀다. 또한 한국형 원전의 표준화 경험을 바탕으로 차세대형 원전인 APR1400 개발에 성공하였고, 향후 APR1400(Advanced Pressurized Reactor

1400)이 국내 원전 도입의 주류가 될 수 있는 여건을 마련되었다.

이러한 경험은 21세기 새로운 원자력의 역할을 기대하고, 이에 걸 맞는 원자력기술 혁신을 도모하고자 하는 세계적인 움직임에서 우리나라가 그 중심에 서 있을 수 있는 밑거름이 되고 있다. 이에 따라 우리나라는 제4세대 원자력시스템 개발과 관련된 국제 활동, 즉 GIF (Gen IV International Forum)과 IAEA(International Atomic Energy Agency)의 INPRO(International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) 등에 적극적인 참여를 요청받게 되었다.

1) GIF 참여 배경

미국은 21세기를 맞이하여 원자력의 새로운 역할과 가능성에 관심을 가지고 원자력연구개발의 주도권을 회복하기 위하여 NERI (Nuclear Energy Research Initiative) 프로그램을 추진하였다. NERI 프로그램은 1980년대 이후 TMI(Three Mile Island) 원전 사고의 여파로 원전 안전규제가 강화되고 이를 충족하기 위한 운전 유지비가 급등하면서 신규 원전 건설을 위한 활동이 거의 없어지고 미국 내의 원자력연구개발 인프라를 붕괴시켜, 원자력기술의 세계 주도권 확보가 어렵다는 판단에 따라 주도권 회복을 위해 시작되었다. 이 NERI 프로그램이 현재 미국이 주도적 역할을 하여 출범한 제4세대 원자력시스템 국제포럼(GIF)의 밑거름이 되었다.

미국은 물론 세계적으로도 새로운 원자력시스템의 출현 필요성에 대한 공감대가 형성되고 있어서, IAEA와 OECD NEA 및 OECD IEA(International Energy Agency)의 3개 유엔 산하 기구에서 공동으로 21세기 혁신 원자력시스템 개발 방향에 대한 조사 연구를 수행하고 있었다. IAEA 스스로도 혁신 원자로 및 핵연료주기 기술 개발을 회원국 간에 추진하기 위한 움직임이 활발하다.

우리나라는 1995년 한국표준형 원전기술을 자립하여 건설・운영하고 있었고, 차세대경수로 프로젝트가 착수되어 APR1400으로 명명된 신형원전 기술개발이 추진되고 있었다. APR1400 개발은 성공을 보장하고 있었고, 향후 이것이 단기적으로 한국의 주력 노형으로 건설・운영될 전망이었다. 이에 우리나라는 경수로 기술과 이와 관련된 기술들에 대한 경험이 세계적으로 인정받았고, 더 나아가 현재 기술개발이 구체적으로 수행되어 그 성과가 가시적으로 나타난 국가가 한국 등 몇 나라 밖에 없다는 사실이 미래 혁신 원자력시스템 개발에서 중요한 위치를 차지하게 되는 배경이 되었다.

우리나라는 원자력진흥종합계획의 개정이 21세기 환경변화와 전망에 기초한 새로운 장기계획의 수립이 진행되어야 하는 시점이 도래하고 있었고, 이에 원자력진흥종합계획의 개정작업이 추진되게 되었다.

2000년 1월 미국은 주요 원자력선진국들과 함께 제4세대 원자력시스템 개발을 추진하기로 하고, 해당 국가의 고위정책결정 위치에 있는 인사들을 초청하여 제4세대 원자력시스템 공동개발에 대한 의견수렴에 들어갔다. 이 회의에서 참가국들은 공동선언문을 통하여 제4세대 원자력시스템의 개발 필요성에 대한 공동인식을 표명하였고 제4세대 원자력시스템 국제포럼이 본격적으로 추진되게 되었다. 이 회의에 아시아 지역에서 우리나라와 일본이 참가하였고, 유럽지역에서는 영국과 프랑스, 남미 지역에서는 브라질과 아르헨티나, 북미지역에서는 미국과 캐나다 그리고 아프리카지역에서 남아공화국이 참여하게 되었다.

우리나라와 일본은 아시아의 대표적인 원자력기술 선진국으로, 또한 원자력의 평화적 이용 부문의 실적이 우수한 국가로서 인정을 받았고, 유럽에서는 원자력 활동이 가장 활발한

프랑스와 미국의 동맹국으로서 원자력기술 선진국이고 핵무기보유국인 영국이 참여대상국가로서 초청을 받았다. 유럽에서 독일은 원자력기술 선진국이나 최근 원자력활동이 침체되어 쇠퇴되어 가고 있는 점이 감안되어 초청받지 못한 것으로 평가된다. 또한 원자력기술 선진국으로 평가되는 다른 유럽국가와 러시아 등은 유럽지역 편중을 방지하는 차원에서 추후 참여가 고려된 듯하다. 남미 지역에서는 대표적인 원자력기술선진국으로 고려되는 국가인 브라질과 아르헨티나가 초청되었다. 최근 이들 국가들은 경제적인 문제로 인하여 원자력 활동이 그리 활발하지는 못하고 있으나, 지금까지의 기술개발 활동을 고려해 볼 때 남미지역의 원자력기술 선진국으로서 충분한 자격이 있다고 보여진다. 북미에서는 미국과 캐나다가 각각 경수로와 중수로 기술을 대표하고 있다는 측면에서 기술선진국으로서 대표성을 가진다고 할 것이다. 마지막으로 아프리카에서는 원자력기술개발 경험이 전반적으로 일천한 면이 있지만 남아공화국은 상대적으로 원자력기술이 크게 발달한 국가라고 볼 수 있다. 이렇게 각 대륙에서 원자력기술선진국으로서 대표성이 있다고 판단되는 9개국이 모여 제4세대 원자력 시스템 개발을 본격적으로 논의하게 된 것이다.

2) GIF 참여

우리나라는 2000년 1월 회의에 참석한 직후 제4세대 원자력시스템 공동개발 필요성을 크게 인식하고, 적극 참여한다는 기본 방향이 설정되었다. 당시에는 정부와 KISTEP이 중심이 되어 동향 파악과 향후 대응 방안을 모색하는 수준으로 진행되어 왔고, 정부, KISTEP 및 원자력연구소의 전문가가 각종 회의에 참석하고 있었다. 2000년도에 수차례의 GIF 회의가 있었고, 2000년 8월에는 우리나라에서 GIF 회의를 개최하기도 하였으나, GIF 관련 활동을 총괄하고 책임 있게 수행할 추진주체가 명확하게 설정되었다고는 볼 수 없었다.

2001년 들어 GIF도 체제를 점차 정비하여 가고 INERI도 구체적 협력이 추진됨에 따라, 이와 관련한 활동 방향에 대한 논의가 원자력선진기술확보사업 기획위원회를 통하여 이루어졌으며, GIF 활동 참여를 위한 정책그룹과 전문가그룹 및 실무진이 구성됨에 따라 체계적인 수행이 가능하게 되었다.

2001년 GIF는 Gen IV Technology Roadmap 작성을 추진하기로 하고, GIF회원국에서 관련 분야 Technical Working Group(TWG)과 Crosscut에 전문가를 파견하여 수행하기로 함에 따라 우리나라는 경수로 TWG에 2명, 가스로 TWG에 1명, 액체금속로 TWG에 2명, 기타 노형 TWG에 1명, 핵연료주기 Crosscut에 1명 등 7명의 전문가를 추천하여 활동하도록 하였다. Gen IV개념 선정을 위한 평가 및 R&D 개발 등이 본 TWG와 Crosscut을 중심으로 이루어져 2002년 7월 6개 Gen IV 개념이 선정되었다.

한편, GIF가 공식적으로 발효하게 된 것은 GIF 헌장(Charter)을 회원국들이 모두 서명한 2001년 7월이다. 우리나라도 2001년 7월 GIF 헌장에 서명함으로써 GIF 창설회원국이 되었고, 지금까지 적극적으로 참여하고 활동하고 있다.

2002년 7월 Gen IV 개념이 선정된 이후 GIF의 주요 활동은 Gen IV R&D 공동연구를 어떻게 추진할 것인가로 전환되었다. 즉, Gen IV R&D 협정 체결 방안을 논의할 Task Force가 구성되었고, Gen IV 공동연구 R&D 항목을 개발할 기술위원회를 구성하는 등 전문가 그룹이 구성되었다. 우리나라도 전문가를 추천하여 적극 참여하고 있다. 지금까지 GIF 활동을 위해 우리나라에서 참여하였거나 참여하고 있는 사항을 정리하면 다음과 같다.

- GIF Policy Group (2명)

- GIF Expert Group (2명)
- Technical Working Group Experts (7명) - 임무 마감
- Proliferation Resistance and Physical Protection Expert Group (2명)
- Gen IV 노형별 Steering Committee 및 프로젝트관리위원회 위원 (11명)
- Task Force on Multilateral Agreement (2명) - 임무 마감
- Senior Regulator (2명)
- Senior Industry Panel (2명)

GIF에서는 2003년말을 목표로 Gen IV 공동연구개발 계획을 노형별로 마무리하기로 하였고, 연구협력협정은 2004년 초반에 체결하기로 하였다.

3) INPRO 참여

2000년 9월 IAEA 총회 결의에 따라 추진되게 된 INPRO 프로그램은 2000년 11월 혁신원자로작업단 공여국 회의가 개최되면서 본격화되었음은 앞에서 기술한 바와 같다. 우리나라는 이미 본 공여국 회의에 참가함으로써 INPRO 추진을 시작부터 참여하는 국가가 되었다.

이후 우리나라는 INPRO에 전문가를 파견(Cost-Free Expert를 파견)하는 형태로 참여하기로 하고, 2002년 초에 1명의 전문가를 파견하였다. 이로써 우리나라는 INPRO 정회원국으로서 자격을 가지게 되었고, INPRO 추진의 여러 면에서 적극적인 활동을 하고 있다.

한편, IAEA는 회원국으로부터 전문가 pool을 구성하여 기술자문을 받고 있다. 우리나라는 여러 분야에 걸쳐 기술자문을 위한 전문가를 파견하지만, 개별 접촉에 의하여 활동하고 있는 관계로 전체적인 참여 현황을 파악하기는 어렵다. 현재까지 파악된 바에 따르면 평가 분야와 핵확산저항성 분야에 참여하고 있는 것으로 나타나고 있다. 현재 활동 중인 INPRO 관계자는 다음과 같다.

- 운영위원회 위원(Steering Committee Member) : 과학기술부, 비엔나 과학관, 한국원자력연구소 전문가
- 핵확산저항성 부문 국제조정그룹(International Coordinating Group) : 파견 전문가
- 주요 부문별 자문 전문가 : 평가 부문, 핵확산저항성 부문 등

우리나라는 INPRO 활동에 능동적으로 대처하기 위하여 국내 추진체제를 정비하기로 하고, 한국원자력연구소에서 한국과학기술기획평가원(KISTEP)의 위탁연구인 “원자력선진기술확보사업 추진을 위한 기획연구”를 수행하고 있다. 그러나 INPRO에서 명확한 업무 범위가 제시되지 못하고 있어 국내에서도 구체적인 추진주체를 정할 필요성이 없는 상황이다.

향후, INPRO의 활동이 뚜렷한 목표와 방향을 가지고 추진될 경우를 대비하여 GIF 활동 및 INERI 활동을 포함한 원자력선진기술확보사업 전체를 총괄할 추진주체의 설립이 필요하다.

한편, 제1A단계(Phase 1A)에서 도출한 미래 혁신원자로에 대한 사용자요건들을 적용하여 평가하는 제1B단계(Phase 1B) 단계의 대상 기술로서 우리나라의 DUPIC 기술이 선정되어 추진되고 있다.

4. 제4세대 원자력시스템 연구개발의 필요성

국내 원자력기술개발의 목표 및 지향점은 2002년 6월에 수립된 원자력진흥종합계획에 잘 명시되어 있다. 2015년까지의 원자로와 핵연료 그리고 원전건설과 관련된 장기 주요 추진 계획을 보면 다음과 같다.

- 신형경수로의 건설로 국내 전력수요의 45% 담당과 제4세대 원자로 핵심기술 확보 및 중소형 원자로 실용화를 내용으로 한 원자력발전 및 원자로 개발
- 개량형 핵연료 개발·상용화 및 연소도가 높은 신형 핵연료 개발과 핵비확산성 핵연료주기 기술개발을 추진하는 핵연료 및 핵연료주기 기술의 자립
- 원전의 건설·운영기술을 고도화와 기술 표준화를 통한 산업체의 체계적으로 육성하여 원자력산업의 매출 확대와 플랜트 단위의 수출을 주도하여 원자력발전산업의 육성 및 진흥

이를 위하여 제2차 원자력진흥종합계획(2002～2006)에 원자력안전, 방사선 방호 및 영향평가, 방사선의학, RI 생산 및 방사선 이용, 원전성능개선/현장기술혁신분야를 강화하여 원자로 및 핵연료, 방사성폐기물관리, 기초 기반분야와 함께 8개 분야 42개 대과제, 단위과제 17개를 운영하고 있다.

원자력연구개발은 상용원자력기술의 개량, 미래형 원자로와 핵연료 및 핵연료주기기술 개발, 원자력 기초과학 및 기반공학 기술개발, 방사선 및 방사성동위원소 기술개발, 방사성폐기물 관리, 원자력 시설 안전 및 환경안전 평가 및 관리 기술개발, 원전성능개선 지원 등을 목적으로 추진하고 있다.

표준원전 지속적 설계개량과 APR1400 상세 설계 및 건설착수, 중소형원자로 기본설계 완료 및 설계검증, 액체 금속로, 제4세대 원자로개발이 중점적으로 추진되고 있으며, 국제적으로 제4세대 원전을 공동으로 개발하고 있는 GIF와 INPRO와 연계하여 국내 원전개발을 추진할 것으로 전망되고 있다.

<표 6> 원자력 진흥종합계획 1차 및 2차 추진 내용 비교

분야	제1차 진흥종합계획 '97	제2차 진흥종합계획 2001
1. 원자력 발전 및 원자로 개발	표준원전 기술 고도화 차세대원자로(현 APR1400) 개발 액체금속로 개발 중소형 원자로 개발	표준원전 지속적 설계개량 APR1400 상세설계 및 건설착수 중소형원자로 기본설계 완료 및 설계검증 액체금속로 제4세대 원자로개발
2. 핵연료 및 핵연료주기 기술확립	핵연료성능개량연구 경 중수로연계핵연료주기(DUPIC) 미래형 혼합산화핵연료(MOX) 중소형로 및 연구로용 핵연료 토륨핵연료주기	표준원전용 개량형 핵연료 개발 상용화 신형핵연료 개발 국내핵연료 산업 육성 경 중수로 연계핵연료기술 핵비확산성 핵연료주기기술개발 미래 핵연료 관련 핵심 기술 연구로 중소형원자로 핵연료
4. 원자력 발전 산업의 육성 및 진흥	원자력산업체제개선 원자력산업경쟁력강화 원자력산업해외진출 원전건설 및 운영기술고도화	원자력산업의 경쟁력강화 해외 원전산업 진출 원전건설 및 운영기술 고도화
5. 국민이해 기반의 구축	원자력시설 수용기반조성 원자력시설지역 지원 부지활용극대화	원자력시설의 국민수용 기반조성 원자력시설 지역지원
6. 원자력안전 증진	선진안전규제제도 안전규제행정 안전규제국제화 안전문화확산	원자력 안전의 국민 신뢰도 증진 원자력 안전문화의 확산 원자력 시설 안전성 향상 안전규제 제도의 개선 및 효과성 효율성 제고 안전성 향상 연구 원자력 안전성 증진을 위한 국제협력강화
8. 방사성폐기물 및 사용후 핵연료안전 관리	사용 후 핵연료관리기술 중저준위폐기물관리기술 방사성폐기물폐안전규제 핵연료주기폐기물처리 처분 제염 해체기술	방사성폐기물 및 사용 후 핵연료 안전관리 중저준위 폐기물처리의 선진화 「폐기물안전협약」관련 종합대책수립 사용후 핵연료 중간저장 시설 고준위폐기물 처리처분 기술 폐로핵심기술
9. 원자력기반 첨단기술개발	연구로 이용기술, 신소재, 계측제어, 로봇, 레이저, 양자공학, 핵변환 등 기초 기반기술, 연구기획관리	세계 5위권의 원자력과학기술 능력확보 기반기술개발 및 타연구분야와의 연계추진 사전조사 기획 평가 관리체제강화
10.원자력인력 양성. 확보	국내인력활용 해외우수인력확보 전문인력양성	원자력인력수급계획수립 우수전문인력양성 최상전문인력확보

장기적인 원자력진흥종합계획을 요약하면 APR-1400의 기술 고도화와 함께 더 나은 대용량 전원공급형 원자로의 개발, 액체금속로 개발, 그리고 향후 새로운 에너지원으로서 수소경제를 주도할 원자로가 요구됨을 알 수 있다. 진흥종합계획에서 제시된 이들 새로운 요구사

항들을 제4세대 원자로를 통해 도달할 수 있게 되었으며 그중 가장 연관된 3가지 원자로형을 선택하였다.

1) SCWR의 연구 필요성

세계 에너지자원 가용량의 한계와 고갈 가능성의 제기는 에너지자원 개발의 다양화를 촉진시키고 있다. 특히 지속 가능한 개발 측면에서 석유대체에너지와 재생에너지의 개발에 투자가 확대될 것으로 전망되고 있다.

에너지수급에 대한 정책은 국가의 상황에 따라 달라질 수밖에 없으며 산업구조와 경제발전에 큰 영향을 주어 왔다. 국제적인 에너지정세의 변화에 따라 대체에너지와 신재생에너지의 개발에 대한 투자도 점진적으로 확대되고 있는 추이이며 이는 원자력연구개발에서 연구개발투자 측면에서 효율성과 경쟁력 요구가 심화될 것으로 예상 된다.

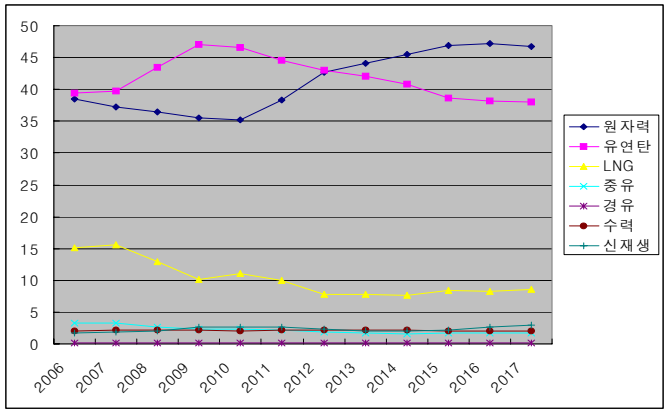
원자력 발전소는 초기 설비 투자자본이 많이 소요되는 발전소로서 대용량으로 갈수록 발전단가가 낮아져 다른 발전소보다 효율적이고 경제성이 있게 된다. 이런 경향성을 반영하듯 원자력발전소는 950MWe에서 KSNP(Korean Standard Nuclear Plant)-1000MWe로 그리고 2010년 이후의 신고리3호기 이후부터는 APR-1400(Advanced Pressurized Reactor)-1400MWe로 점점 발전용량을 증가시키고 있다. 이처럼 전력수급계획에서 추구하는 원자로는 대용량의 원자로인데 GEN-IV의 SCWR가 이 목적에 부합하는 원자로이다. SCWR은 1800MWe의 발전용량을 가지는 대용량의 원자력 발전이면서 기존 원자력 발전소 부지 정도의 크기를 요구하며 효율이 44%에 이르는 고효율 원자로이다. 초기 한국의 고리1,2호기 원자로와 비교하면 거의 2배의 발전용량을 가지고 있으며 고리 1호기급 한 개정도의 건설비로 두 개의 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히 초임계를 사용하여 2차계통과 1차계통을 단일화하여 발전소의 복잡한 배관 및 기타 설비들을 간소화시켜 안전성 및 경제성을 향상시키고 건설공기의 획기적인 단축을 추구하는 원자로이다. 이처럼 SCWR의 많은 장점을 가지지만 현재 한국의 수급기본계획이 다른 GEN-IV 원자로의 필요성에 비해 그 절대적 필요성이 떨어진다.

한국의 제2차 전력수급기본계획에는 2017년까지의 수요량 예측 및 공급량 예측이 잘 나타나 있다. 제 2차 수급계획에 의하면 연도별 에너지원별 발전량 전망에서 유연탄과 LNG의 발전량을 점차 줄이고 원자력과 신재생에너지의 발전량을 증가시키고 있다. 특히 제2차 전력수급기본계획에서 원자력 발전소 기수는 점점 줄어들고 있으나 설비비율은 2010년을 기점으로 오히려 증가하고 있다. 이러한 추이는 2011년의 신고리 1, 2호기와 2013년 경의 신고리 3, 4호기의 건설에 의해 발전소 설비는 2013년에 정점을 이루고 그 후 2023년까지 현재의 발전설비와 발전량을 유지하도록 계획되어 있기 때문이다. 전력 예비율과 관련해, 꾸준히 증가하고 있는 전력량을 이들 1400 MWe의 대용량 원자로가 충분히 담당함으로써, 이 기간에 폐기될 것으로 예상되는 원자로 2기(고리 1호기, 월성 1호기)와 향후 20-30년 사이에 최대 7기가 폐기 될 것으로 보이는 기존 원자로의 용량을 이들 4기가 2017년까지는 무리 없이 현재의 예비율을 유지해줄 수 있을 것으로 보인다.

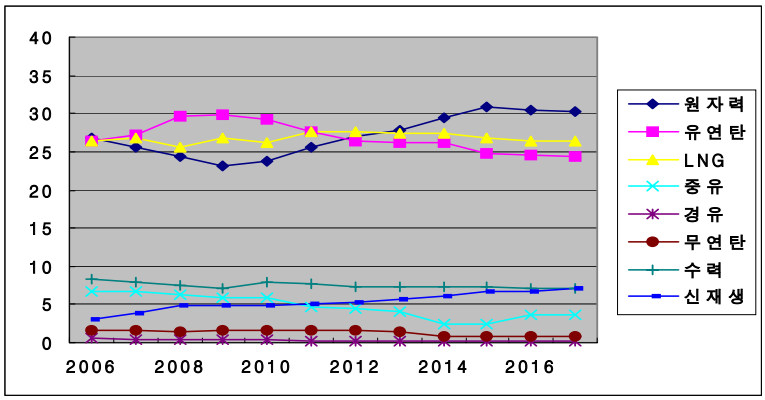
그러나 사회적, 경제적, 정치적 환경에 의해 기존 계획된 발전소들이 건설되지 못할 경우 전력예비율은 큰 차질을 보일 것으로 생각된다. 전력예비율과 관련한 한국전력의 시나리오에 의하면 원자력 설비가 예상대로 건설되지 않을 경우 2017년경 이후에 크게 예비율이 떨어지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 한가지 시나리오는 기존의 원자력 수명을 연장시키고 up-rating을 통해 발전소의 설비용량을 증가시키는 것이다. 기존 설비에서 고리 1호기(2008년까지 운전 예상)와 월성 1호기(2013년까지 운전예상)가 수명이 10년으로 연장되고 기존의 경수로 950 MW급이 5% up-rating을 통해 1000 MW 급으로 올려질 경우, 예비율이 기존의 S2 시나리오에서 2015년 12.8%

가 15%로 2017년 9.3%가 11.44%로 올라가게 되어 쉽게 필요 예비율을 얻을 수 있다. 이러한 기존 원전설비의 활용은 신규원전의 1개와 비견되는 설비 예비율을 기존 원자력을 통해 얻을 수 있게 한다.

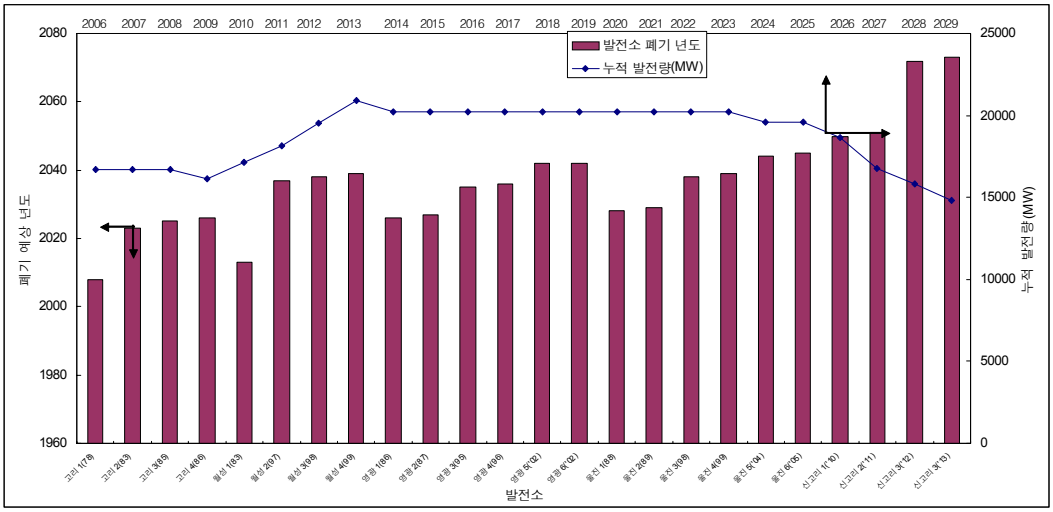
Up-rating 및 발전소의 수명연장은 재료적 부식 및 열화 현상을 해결하고 법적으로 안전성이 인정되어야만 가능하다. 특히 GEN-IV 원자로 중 SCWR은 기존 경수로 기술기반 위에 혁신적인 설계들이 첨가된 원자로이므로 실제 경수로에 적용가능한 기술을 많이 내포하고 있다. 이와 같은 기술적 특징은 GEN-IV의 SCWR 연구과제를 통해서도 알 수 있는데 특히 관심 있는 연구항목이 재료 부식 및 열화현상 해결임을 주지해야 한다(GEN-IV roadmap). 따라서 이러한 연구에 대한 국제적인 협력을 통해 핵심기술을 습득하여 기존 경수로 기술의 고도화 및 수명연장과 up-rating을 통한 국내 전력설비의 효율성을 높이는데 기여할 수 있을 것이다.



<그림 3> 연도별 에너지원별 발전량 전망(참고 페이지http://www.kpx.or.kr)



<그림 4> 연도별 에너지원별 발전설비구성 전망(참고 웹페이지http://www.kpx.or.kr)



<그림 5> 발전소 폐기년도와 원자력 발전소의 누적 발전량

2) SFR의 연구 필요성

SFR은 핵연료의 지속성과 연료를 원자로에서 연소시킨 후 발생하는 플루토늄 및 기타 핵연료성 물질들의 안전한 처리를 위해 개발된 원자로이다. GEN-IV에서 제시한 4가지의 목적 중에서도 특히 핵연료의 지속성에서 가장 높은 점수를 받았다. 이 원자로의 개발 목적과 존재목적은 핵연료의 지속 및 핵폐기물 특히 Actinide계열의 처리이다.

한국, 일본과 같은 에너지 연료 소비국들은 자국의 에너지 안보를 위해 원자력 발전소를 건설하고 지지하여 왔다. 이들 나라에서는 원자력을 중국산 에너지로 분류하여 자국 기간산업의 에너지원으로서 공급하고 에너지 안보 및 포토폴리오 차원에서 원자력산업을 유지하고 지속적으로 지원하였다. 그러나 핵연료 물질인 우라늄 역시 석탄이나 기타 화석연료처럼 고갈되는 자원이기 때문에 각 국가마다 우라늄의 안정적 공급과 유지를 위해 많은 노력을 하고 있다. 한국의 경우는 국내에 우라늄 원광이 있으며, 북한의 경우 양질의 우라늄을 채광할 수 있는 곳이 있다고 알려져 있다. 그러나 전 세계적으로 분포된 우라늄 부존자원은 그림 3.4에서 보이는 것처럼 선행 핵주기만을 채택한 경수로만을 사용할 경우 향후 60년 정도만 유지될 것으로 예상된다. 반면, 핵연료 변환 공정을 통한 후행 핵연료주기를 고려하여 2030년에 이 주기를 택할 경우, 안정적인 우라늄 부존자원과 재생산된 핵분열성 및 핵연료성 자원에 의해 2100년 이후까지 안정적인 원자력에너지를 이용할 수 있다. 따라서 이들 우라늄 부존자원의 확충과 핵연료의 안정적인 보급을 위해 핵연료의 증식이 요구된다.

초기 원자력 발전 개념을 주창했던 핵물리학자들은 이러한 자원문제를 인식하여 에너지 부존자원의 근본적인 해결방안으로서 증식로 개념을 생각하였다. 현재의 핵연료는 한번 쓰고 폐기 또는 보관하는 방법을 채택하고 있는데 SFR과 같은 원자로를 사용할 경우 이 보관된 폐기물을 연료 자원으로 사용할 수 있다. 이런 이유로 기존 경수로에서 생산된 고준위 폐기물들은 핵연료 자원으로서 가치가 있기 때문에 발전소 주변의 임시 보관소에서 안전하게 보관하고 있다. 그러나 경수로에서 연소된 핵연료는 높은 방사성을 띄는 반감기가 긴 핵물질들이 다량 포함되어 있다. <그림 6>의 첫 번째 그림에서는 원자로에서 연소되고 생산된 고준위 핵폐기물 추이를 보여주고 있는데, 원자력발전소의 증가에 따라 급속하게 증가하고 있다. 그러나 후행핵연료주기를 사용하는 SFR을 같이 가동할 경우 이 양이 도입 후 30년 후

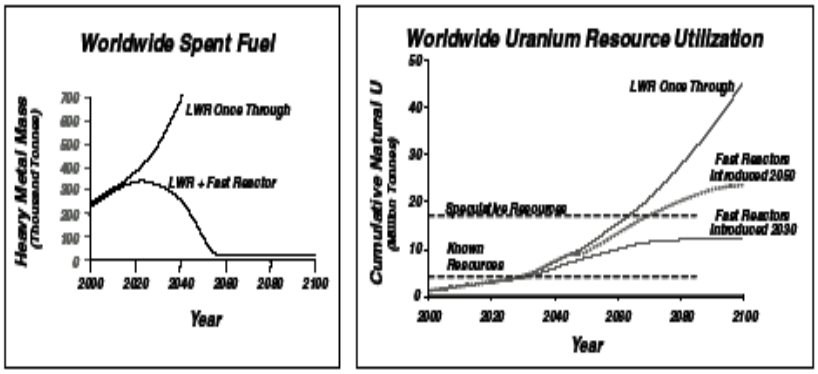
급격하게 감소되는 것을 볼 수 있다. 이는 경수로에서 연소되어 생성된 장수명 핵물질들을 가공하여 SFR의 연료 주기에 쓰여지는 경우, 좀 더 안정적이고 짧은 반감기를 가진 단수명 핵종으로 변환하게 되어 폐기물의 감소 및 연료의 증식이 동시에 이루어지기 때문이다.

SFR의 경우 선진국들 프랑스, 미국, 일본에서는 이미 원형로, 실증로 모두가 건설되어 운영된 경험이 있는 원자로이다. 이들 기존의 SFR이 갖고 있던 경제성 및 핵확산 저항성에서의 실용화 제약요인을 최근 개발된 기술과 국제 협력을 통해 해결할 것으로 예상된다. 특히 GEN-IV에서 제시된 SFR의 경우 고유 안전성을 지니고 핵확산 저항성을 가지면서 경제성이 있는 SFR을 개발하는 것을 목표로 하고 있으므로, 우라늄 자원의 한계성을 극복하면서 일반대중이 수용할 수 있는 원자로를 개발할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 우리나라는 1990년 후반부터 지금까지 KALIMER 원자로 개발과 함께 이미 상당한 수준의 기술력과 선진국과의 전략적 기술 제휴를 할 수 있는 수준에 있기 때문에 국내 도입에도 기술적으로 하자가 없는 원자로이다.

SFR은 이처럼 많은 장점을 가지는 원자로이지만 정치, 경제적 이유로 침체 조정기에 놓여 있는 원자로이다. 미국 및 일부 선진국들은 SFR 기술의 개발 중지 혹은 연구개발 투자 감소에 따라 전문인력의 계속적 유지에 어려움을 겪고 있기 때문에 우리나라가 선진국으로부터 입증된 핵심기술 도입의 호기로 볼 수 있다. 또한 미국을 주도로 해서 일본, 프랑스와 같은 SFR 선진국들이 주도적으로 이 원자로의 기술개발을 추진하고 있기 때문에 더욱더 핵심기술 도입과 습득이 용이하리라 판단된다.

SFR의 특성상 핵연료 주기기술 개발이 동반되어야 한다. 핵연료 주기기술의 확보여부는 국가적인 정치적 문제와 안전성이 동반되어야 하므로 모든 나라에서 국가 주도로 관련기술을 개발하고 있다. 이러한 배경 하에 미국, 프랑스, 일본 등의 원자력 선진국에서도 국가 재원으로, 국가 책임 하에 핵연료주기 기술이 개발되고 있다. 핵연료주기 기술은 군사적 목적으로의 기술적 전용 가능성 때문에 국제적으로도 매우 민감한 기술로 전략적인 접근이 필요하다. 따라서 국가 주도하에 장기 전략에 따라 체계적인 기술 개발과 함께 미국 및 선진국과의 전략적인 협력관계를 통한 핵 투명성 및 신뢰도 확보가 요구된다.

이러한 상황과 연료의 부존자원, 그리고 고준위 핵물질 및 장수명 핵종의 전환과 소멸을 위해 SFR의 핵연료 주기기술 및 SFR 원자로 기술개발을 위한 연구투자가 요구된다.



<그림 6> 우라늄 부존자원량과 원자로주기에 따른 원자력 에너지 지속성

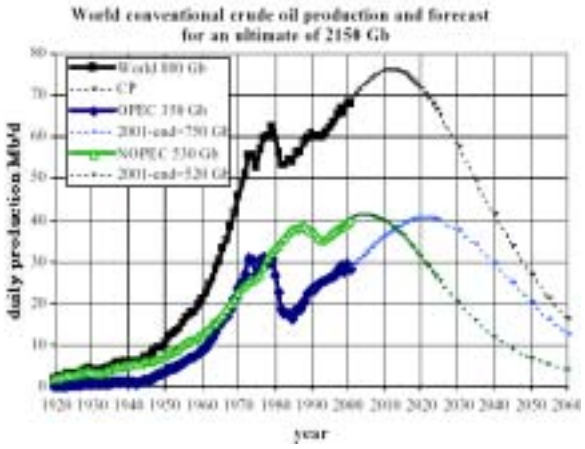
3) VHTR의 연구 필요성

최근 미국 부시대통령의 연두교서와 국내 산자부 장관의 수소 프로젝트에 관한 연설을

통해 수소 경제시대를 대비해야한다는 인식들이 확산되고 있다. 화석연료가 앞으로 30년 이후에는 급감할 것을 OECD와 OPEC 에서 <그림 7>처럼 예상하고 있기 때문이다.

화석연료의 고갈을 대비한 수소 경제로의 이행을 위해 수소제조, 운송, 저장에 관한 기술들이 개발되고 있으며 특히 제조에 관한 경제적인 방법으로 여러 기술들이 제시되고 있다. 수소제조 기술들 중, 교토의정서에 의한 탄소세를 포함한 생산단가는 원자력을 이용한 수소제조방법이 가장 경쟁력이 있다. 유가에 따른 수소 생산원가의 가격경쟁력은 <그림 8>에서처럼 분석된 바 있다. 현재의 배럴당 60달러 이상의 고유가에서는 고온 열분해를 통한 수소제조 원가가 가장 경쟁력이 있는 생산 방법으로 조사되었다. 고온 열분해를 위해 요구되는 온도는 900 도 이상의 초고온이다. VHTR의 출구온도는 1000도로서 고온 열분해를 통한 수소 제조시 요구되는 고온을 충분히 제공할 수 있다. VHTR의 고온은 수소제조 뿐 아니라 광범위한 적용성을 가지고 있다. VHTR에서 생산되는 여러 열용량은 수소 생산뿐만 아니라 공정열과 직접 전기 생산 방식 등 다양하게 사용될 수 있다. 특히 VHTR은 과거 HTGR 개발 프로그램으로부터 발전하여 온 원자로로서 개발에 필요한 국제적인 데이터베이스가 충분히 구축되어 있다.

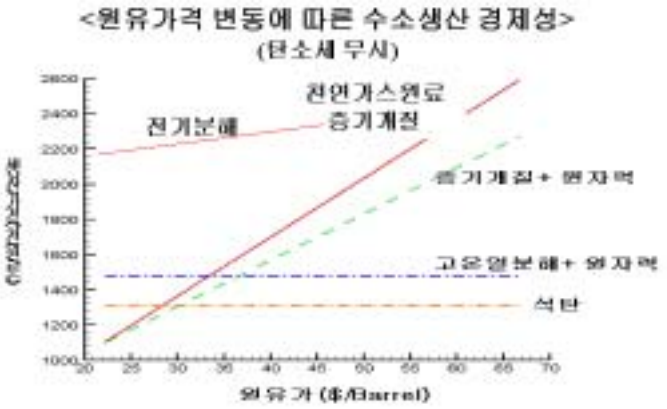
이러한 연구 환경과 각국의 경쟁적인 개발 분위기속에서 국내의 VHTR 관련 기술은 경수로 위주의 원자력 기술개발에 밀려 매우 미흡한 수준이다. 가장 값싸고 안정적으로 수소를 생산할 수 있는 VHRT에 연관된 수소 생산방식은 미래의 수소경제를 위해 대비해야 될 필수적인 기술이다.



<그림 7> 세계의 원유 공급량 예측

<표 7> 수소제조방법에 따른 수소생산 단가의 비교

제조방법	CO2 여부	천연 가스	고온가스 냉각로	바이오 매스	풍력	전기분해	태양전지
비용 ($/m^3)	잔류	**0.07**	-	0.13	-	-	-
	제거	0.15	**0.11**	0.25	0.2	0.22	0.4



<그림 8> 원유가 변동에 따른 수소생산 단가의 비교

【참고문헌】

KISTEP(2004), 제4세대 원자력시스템 개발 국제동향 조사·분석 연구.

GIF(2002), Generation IV Technology Roadmap Report - Final Draft.

GIF Evaluation Methodology Group(2002), Final Screening Methodology.

GIF(2002), Generation IV Technology Roadmap R&D Scope Report.

GIF/USDOE(2003), A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems - Executive Summary, GIF-001-00.

GIF(2001), Report of the Fuel Cycle Crosscut Group.

KAERI(2003), GIF 회의 참가보고서 - 남아공, KAERI/OT-1091/2003.

KAERI(2003), 원자력수소 제조기술개발 및 실증사업 추진을 위한 기획연구.

KAERI(2002), 정책연구부, 혁신원자로 개발 - Innovative Nuclear Reactor Development (번역서), KAERI/TS-189/2003, OECD/NEA, IAEA, OECD/IEA (Three Agency Study).

IAEA(2003), Guidance for The Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles - Report of Phase 1A of the INPRO, IAEA-TECDOC-1362.

IAEA(2002), Nuclear Technology Review.

과학기술부(2001), 제2차 원자력진흥종합계획.