

KAERI/RR-2940/2008

원자력정책연구

A Study on the Nuclear Policy

원자력기술정책연구

A Study on the Nuclear Technology Policy

KAERI

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 기관고유사업 “원자력정책연구”과제(단위과제 “원자력기술정책연구”)의 2008년도 연차보고서로 제출합니다.

2009년 4월

과 제 명 : 정책연구부 원자력기술정책연구과제

과제책임자 : 임 채 영

연 구 원 : 이 광 석

정 익

이 종 희

요 약 문

I. 제 목

원자력기술정책연구

II. 연구의 목적 및 필요성

국내·외 원자력 이용개발 환경 변화 및 기술발전 현황을 조사·분석하고 이를 바탕으로 원자력 이용 개발에 있어서 원자력 연구개발 사업을 통한 원자력 기술개발의 효율적 추진을 위하여 정책 대안을 제시하는 것을 연구의 목표로 하고 있다.

III. 연구의 내용 및 범위

본 연구에서는 원자력 기술개발을 둘러싼 국내외의 환경 분석과 국가 원자력 연구개발 전략 개발의 관점에서 (1) 원자력 기술정책 동향을 분석하고 (2) 원자력 연구개발 중장기 성장전략을 논의하였다. 그 내용은 다음과 같다.

(1) 원자력 기술정책 동향 분석

- ① 국내·외 원자력 정책 동향 및 전망
- ② 중소형 원자로 개발 현황
- ③ 미래원자력시스템 개발 및 국제공동연구 추진 현황

(2) 원자력 연구개발 중장기 성장 전략 논의

- ① 미래원자력시스템 개발 장기 추진계획
- ② 원자력연구원의 기술사업화 활성화 방안

IV. 주요 연구결과 및 건의

(1) 원자력 기술정책 동향 분석

① 국내·외 원자력 정책 동향 및 전망

1970~2002년까지 세계 에너지 소비는 87% 증가, 2030년까지 연평균 1.6% 상승하여 현재(112억 TOE/년)보다 53% 증가한 171억 TOE/년에 이를 전망이다. 특히 지속적인 전 세계의 석유수요 증가와 OPEC 국가의 투자부진 등으로 인하여 장기적으로 국제유가가 상승할 것으로 전망되며, 이에 중국과 인도를 비롯하여 미국, 일본, EU 등은 에너지 안보 차원에서 에너지 자원 확보를 위한 외교를 강화하고 있다. 에너지 소비는 2030년까지 화석에너지에 대한 의존이 지속될 것으로 전망되지만 에너지 안보, 기후변화 등으로 인해 원자력 및 신재생에너지의 이용이 확대될 전망이다.

최근 원자력은 청정에너지로서 에너지 안보와 기후 변화에 대응하는 에너지 지원으로 공감대를 형성하고 있다. 2008년 기준 국내에는 20기의 원전이 운영 중에 있고 세계 30개국에서 439기가 운전 중이며, 전 세계 전력생산에서 원자력의 비중이 현재의 16%에서 2030년에는 27%까지 증가할 것으로 전망되고 있다. 원자력 수요의 증가는 주로 아시아지역에서 이루어지고 있으며 미국과 유럽의 주요국에서도 신규원전 건설이 예상되고 있다. 현재까지 발표된 원전건설 계획을 고려할 때, 최소한 2020년까지는 경수로가 주축을 이루고 장기적으로는 제4세대 원전에 의해 대체될 것으로 전망된다.

원자력발전에 사용되는 우라늄은 세계 56개국에 1480만 톤이 매장되어 있어 200년 이상 활용이 가능하지만 최근 원자력의 부활과 더불어 안정적인 핵연료 공급에 관한 사항이 쟁점화되고 있다. 원자력의 또다른 쟁점 사항인 사용후 핵연료에 대한 국가별 관리 방식은 재처리와 직접처분으로 구분될 수 있으며 세계 각국은 자국의 실정에 맞게 기술개발을 통해 친환경적인 사용후핵연료 처리방식을 선택하고 있다.

원자력은 지구 환경과 사회/경제적으로 여러 가지 문제들을 해결할 수 있는 잠재력을 가지고 있음에도 불구하고, 많은 일반 대중은 그 위험이 장점보다 크다고 인식하고 있다. 이러한 인식을 변화시키기 위해서는 많은 노력이 필요할 것이다. 즉, 원자력이용에 따른 현안들, 특히 안전성, 폐기물 처분 및 시설해체, 핵비확산 및 방호 문제 등에 대한 해법을 제시하여야 한다.

② 중소형원자로 개발 현황

세계적으로 대부분의 전력 수요 증가는 개도국에서 일어날 것으로 예측되고 있는데 이들 국가에게는 현재 선진국에서 개발되고 건설 중인 대형 원전만이 필요한 것은 아니다. 중국과 인도 같은 국가에는 기저부하용으로 대형원전이 필요하지만 지역적으로 떨어져 있는 지역에 전기를 공급하는 국가, 특히 전기뿐만 아니라 열 및 담수가 필요한 국가에서는 중소형 원자로가 보다 적합할 수 있다.

우리나라는 한국원자력연구원 주도로 중소형원자로인 SMART 개발을 추진하여 왔다. 2005년에 발표된 IAEA 자료에 의하면 현재까지 전 세계적으로 개발됐거나 개발 중인 중소형원자로 중 러시아에서 1980년대에 개발한 KLT-40S를 제외하면 SMART의 개발이 가장 앞서는 것으로 평가되었다. 그러나 KLT-40은 현재의 국제적인 기준을 만족시키지 못하는 것으로 간주되고 있다.

성공적인 SMART 연구개발을 위해서 기술개발 주체는 연구개발능력을 더욱 향상시키고 기술개발 지원 부문에서는 재정지원 및 인프라 구축에 노력을 기울여야 할 것이다.

③ 미래원자력시스템 개발 및 국제공동연구 추진 현황

본 연구에서는 국제공동연구개발 프로그램으로 진행 중인 Gen-IV와 GNEP의 추진 동향 및 전망을 분석하였다. 원자력기술선진국을 중심으로 추진 중인 제4세대원자력시스템 국제포럼(GIF)에서는 6개의 유망한 Gen-IV 개념 - 가스냉각 고속로 시스템, 납냉각 고속로 시스템, 소듐냉각 고속로 시스템, 용융염원자로 시스템, 초고온가스로 시스템, 초임계압수 냉각로 시스템 - 을 선정하여 공동연구를 수행 중으로 Gen-IV 시스템은 향후 미래 원자력시장의 기술 표준으로 자리 잡을 전망이다. 세계 주요 선진국은 첨단기술의 연구결과의 공유와 기술 개발의 위험 감소를 목적으로 공동연구에 참여하고 있으며 우리나라도 소듐냉각 고속로, 초고온 가스로를 중심으로 연구개발을 진행하고 있다. 2008년 기준 각각 SFR 시스템 3개와 VHTR 시스템 2개 프로젝트 약정이 체결되어 활발한 연구개발이 진행 중이다. Gen-IV는 미래의 에너지 수요충족과 기후변화 대응 등 원자력의 역할 확대에 기여할 것으로 기대된다.

미국은 세계적인 원자력 확대와 핵비확산 위협의 감소를 위하여 GNEP을 발표하였다. GNEP은 세계적인 원자력진흥, 핵확산저항성, 핵연료 재순환기술 개발, 방사성폐기물 최소화, 개량형연소로 개발, 핵연료공급체계 구축, 소형원자

로의 개발, 선진 안전조치 개발에 목표를 두고 있다. 2007년 출범한 GNEP의 국제협력체제는 인프라 개발과 안정적 핵연료서비스 분야의 워킹그룹을 중심으로 25개의 회원국이 참여하여 활동을 본격적으로 진행 중이다. 미국내의 핵연료 재순환을 위한 실증 프로그램의 진행은 신정부의 출범으로 불확실성을 내포하고 있지만, GNEP의 활동은 국제협력을 중심으로 지속될 전망이다.

(2) 원자력 연구개발 중장기 성장전략 논의

① 미래 원자력시스템 개발 장기추진계획

2008년 12월, 수립된 「미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획」의 수립 배경과 주요 내용을 살펴보고 계획 수립의 의의와 향후 과제에 대해 논의하였다.

이 추진계획은 2030년까지 미래 원자력시스템의 개발에 대한 청사진을 제시한 것이라 할 수 있다. 이 계획을 수립함으로써 장기간이 소요되는 미래 원자력시스템 연구개발을 일관되고 체계적으로 추진할 수 있는 기반이 마련되었다고 할 수 있다.

아울러 국제적으로는 제4세대 원자력시스템 공동 연구개발 수행시 국가계획에 기초한 협력이 가능하게 될 것이다. 국내적으로는 조만간 사회적 관심사가 될 사용후핵연료의 환경 친화적인 관리를 위한 하나의 기술적인 대안을 국민에게 제시함으로써 원자력에 대한 국민 수용성의 증진에 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

이 계획을 실현하기 위해서는 빠른 시일 내에 실행을 위한 구체적인 세부 계획이 마련되어야 할 것이다. 또한 추진계획의 실효성을 높이기 위해서는 이를 원자력진흥종합계획과 원자력연구개발 5개년계획 등과 같이 기존에 이미 수립, 시행되고 있는 계획과의 연계방안도 마련해야 할 것이다.

② 기술사업화 활성화 방안

21세기 연구소는 원천기술 혁신역량 강화와 함께 기술 사업화라는 두 가지 미션을 보유하고 있다. 한국원자력연구원은 국가 원자력 전문연구기관으로서 원자력 기술 개발을 통한 기술자립과 다양한 연구영역의 확대에 국가 경쟁력 강화에 많은 기여를 해왔다.

본 연구의 주요 목적은 원자력연구원 기술이 사업화로 성공적으로 연결될 수 있는 요인을 발굴하고 활성화하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 기술사업화 및 연구소기업 활성화 방안, 연구소 창의성 제고를 위한 실천공동체

구축방안, 기술사업화 역량제고를 위한 대내외 협업체계 구축전략 등 기술사업화를 위한 필요 요인을 중심으로 고찰하였다.

우선 기술사업화 역량 강화 프로그램으로 TEC¹⁾ 프로그램을 고찰하였다. TEC 프로그램은 미국 노스캐롤라이나 리서치트라이앵글파크의 노스캐롤라이나 주립대 경영대학내 HITEC 연구소에서 개발하였다. 이 프로그램은 기술을 찾고, 평가하며 사업화하는 방법론을 구체적으로 제시하는 교육으로써 벤처기업 창업에 필요한 준비 교육과정이다.

두 번째로 기술사업화를 위해 창의문화 구축의 필요성을 고찰하였다. 일반적으로 창의성의 궁극적인 행위 주체는 개인이지만, 조직 차원의 창의성이 높아지기 위해서는 개인특성을 넘어선 집단특성과 조직특성에 대한 관심과 체계적인 관리가 필요하다. 창의성 경영을 실천해 나가기 위해서는 그 구성차원이 다양성, 자율성, 참여성, 연결성, 유연성 등을 체계적으로 관리해 나가야 한다. CoP는 학습조직의 실천적 도구로 활용되는 물론 다양하게 전개되는 집단 상호작용을 바탕으로 창의성을 촉진하는 실천적 도구로 주목받고 있다. CoP를 통해 조직의 구성원들은 상호간의 새로운 정보 및 지식의 상호학습 및 문제해결방안을 모색하게 된다. 원자력연구원의 향후 창의성을 촉진하는 방향으로 CoP 활성화를 기할 필요가 있다.

마지막으로 연구원이 기술사업화 역량 및 성과제고를 위해 대내외 협력체계를 분석하였다. 원자력연구원의 성공적인 '외부 관리'와 협업전략을 위해 주요 공급자, 고객 및 보완자의 적절한 선정이 필요하며 사업화에 관한 사항뿐만 아니라 안전성, 신뢰성 문제 및 국제적 제한 요인(핵비확산 등 정치적 문제) 등을 고려하여 협업전략을 구사해야 할 것이다.

1) Technology Commercialization

SUMMARY

I. TITLE

A Study on the Nuclear Technology Policy

II. OBJECTIVE AND NECESSITY OF THE STUDY

The objective of the study was to make policy-proposals for enhancing the effectiveness and efficiency of national nuclear technology R&D programs. To do this, recent changes of international nuclear energy policy and trends of nuclear technology development were surveyed and analyzed.

III. CONTENTS AND THE SCOPE OF THE STUDY

This study (1) analyzed the trend of nuclear technology policies and (2) discussed the mid- and long-term strategy of nuclear energy R&D considering the changes in the global policy environment associated with nuclear technology development.

To put it in more detail, each subject was further explored as follows;

- (1) Analysis of the trend of nuclear technology policies
 - ① Trend and prospects of the international/domestic nuclear policies
 - ② Investigation of development of small and medium sized reactors
 - ③ International collaboration for advanced nuclear technologies
- (2) Discussion of the mid- and long-term strategy for nuclear energy R&D
 - ① The long-term development plan for future nuclear energy system
 - ② The facilitation of technology commercialization.

IV. MAJOR RESULTS AND RECOMMENDATIONS

(1) Analysis of the trend of nuclear technology policies

① Trend and prospects of the international/domestic nuclear policies

World energy consumption from 1970 to 2002 increased in 87%, it will reach 17.1 billion TOE in 2030 by increasing in 1.6% per annum on the average. On top of that, due to the increase of petroleum consumption and sluggish investment of OPEC countries, oil price will rise steadily. In this reason, majority of big energy consumers such as USA, Japan, EU, China and India strengthen their diplomacy for securing the energy resource supply. Fossil fuels will dominate the world energy supply until 2030, at the same time the share of nuclear energy and renewable energy is also expected to rise because of growing concerns about the secure supply of energy and global warming.

Recently, more and more countries share a view that nuclear energy is a clean energy and can be a practical countermeasure against insecure energy supply and global warming. twenty nuclear power plants (NPPs) operates in Korea and globally 31 countries operates 439 units NPPs in 2008. Recently, IAEA forecast that the share of nuclear power in global electricity generation would increase rapidly from 16% in 2007 to 27% in 2030. Biggest increase will occur in many Asian countries such as China, India and other developing countries, meanwhile significant number of nuclear power plants will be built in USA and many European countries as well. Considering the announced plan for nuclear installation, the light water reactor(LWR) will dominate the nuclear reactor market until 2020. In the longer term, GEN-IV reactors expected to replace LWR gradually.

Despite Uranium reserves is about 14.8 million ton in 56 countries and it will cover the global uranium demand for coming 200 years, the recent resurgence of the nuclear power option has raised the issue of whether there is adequate uranium in the world to provide the fuel to meet the substantial projected requirements that will be needed in this century. Current practice in dealing with spent nuclear fuel divides between those

nations which reprocess and those that intend to directly dispose spent fuel at a geological repository after appropriate packaging. They are developing environment-friendly fuel cycle system based on their own spent fuel disposal policy.

Despite nuclear energy potential to reduce global environmental and socio-economic threats, a significant fraction of public perceives that the risks of nuclear energy outweigh its advantages. To change this critical perception, significant efforts to give a solution for the safety, waste disposal and decommissioning, physical protection and non-proliferation and so on.

② Investigation of development of small and medium sized reactors

Much of the projected growth in world electricity demand will take place in developing economies, where the large nuclear power plants being developed and built in the advanced nuclear energy countries are not necessarily appropriate. In many developing countries which don't have big base-load demand, large nuclear power plants will not always be well suited. The geographical isolation of some population centres makes them candidates for small or medium reactors (SMRs), particularly if the plants also produce heat and/or portable water.

The System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART) development programme has been carried out by the Korean Atomic Energy Research Institute (KAERI). According to the IAEA report published in 2005, SMART was evaluated as the most advanced technology in the SMRs which are developed or under developing in the world, excepting KLT-40s developed by Russia. But the KLT-40s which was developed in 1980s, is not able to satisfy current international safety criteria.

For the successful R&D of SMART, it was important that R&D capability of R&D institutions should be improved and that appropriate funding and R&D infra structure should be well established and supportive.

③ International collaboration for advanced nuclear technologies

This study investigated and analyzed the trends of the Generation IV Nuclear Energy System (Gen-IV) and the Global Nuclear Energy

Partnership(GNEP) as the major international cooperative activities for development of advanced future nuclear energy systems. 13 countries including Korea established the Generation IV International Forum(GIF) and selected six most promising systems - GFR(Gas-cooled Fast Reactor), LFR(Lead-cooled Fast Reactor), MSR(Molten Salt Reactor), SFR(Sodium-cooled Fast Reactor), SCWR(Supercritical Water-cooled Reactor) and VHTR(Very High Temperature Reactor) - as the Gen-IV concepts for collaborative development. Gen-IV systems are expected to be the technology standards in the future nuclear energy market. Major countries in GIF are participating in collaborative development for the purpose of sharing advanced technology and reducing the risk in technology development. Korea carries out the R&Ds focused on the SFR and VHTR. As of 2008, the Project Arrangements for 3 projects of SFR system and 2 projects of VHTR system entered into force, Gen-IV can contribute to expanding the roles of nuclear energy in the future by meeting the increasing future energy demand and mitigating the climate change.

On Feb. 2006, the President of U.S.A suggested Global Nuclear Energy Partnership(GNEP) in the vision of expanding nuclear energy worldwide and at the same time, reducing the risk of nuclear proliferation. Its strategic plan aims at achieving several objectives, that is; expanding promotion of nuclear power worldwide, technical development of nuclear fuel recycle for nuclear proliferation resistance, minimization of radioactive waste, development of advanced burner reactor, construction of nuclear fuel supply system, development of small reactor, and development of advanced safety measure. International framework for GNEP was set up in 2007, 25 Partner countries have been doing earnest activities in the field of infrastructure development and reliable nuclear fuel service. Future progress of the GNEP programs in U.S.A for demonstration of advanced spent fuel recycling technology have some uncertainties owing to change of governmental administration, however, the international cooperation activities of GNEP is expected to be continued.

(2) Discussion of the mid- and long-term strategy for nuclear energy R&D

① The long-term development plan for future nuclear energy system

The background and the implications of 「The Long-Term Development Plan for Future Nuclear Energy System」 (hereinafter the Long-Term Plan), which was established in Dec. 2008, were discussed.

The Long-Term Plan is a blueprint for the future nuclear energy system development which requires much resources and long time period. It will be a solid foundation for promoting the related R&D.

It will also be helpful to stimulate the international cooperation with advanced countries like Japan, France and USA. It will contribute to improving the public acceptance of nuclear power by proposing a technological solution for spent nuclear fuel management, which will be a contentious social issue.

To materialize the Long-Term Plan, a detailed plan for implementation should be devised as soon as possible. the detailed plan should be incorporated with the existing plans such as the Comprehensive Nuclear Energy Promotion Plan and the Five-Year Plan for Nuclear Research and Development.

② The facilitation of technology commercialization

The research institutions of the 21st century have the missions of not only building core competencies but also commercializing technologies. As a government funded research institution, KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) has to follow the line along with searching for the factors to promote technology commercialization. The main purposes of the research are to investigate how technology commercialization in research institutions is accelerated, and to suggest the strategies for technology commercialization. In order to that, we deploy to analyze documents and conduct survey and case study.

We have underlined three strategies for promoting technology

commercialization in KAERI in terms of innovation strategy and processes; i.e., strategy of the TEC (Technology Commercialization) training, strategy of building creative organization culture, and strategy of enhancing technology capabilities through collaboration.

Firstly, the TEC training programs should be implemented for researchers who want to commercialize their own technologies. The TEC program is developed by the HITEC of the North Carolina State University (NCSU) at the Research Triangle Park (RTP), North Carolina, USA. The TEC program provides a training methodology by which researchers can search for, evaluate, and commercialize technologies.

Secondly, to build creative organization culture is essential for technology commercialization. Generally, creativity is believed individual characteristics, not organizational features. However, it is significant to identify and manage promoting and inhibiting factors in building creative organization culture. In order to manage creative organization culture, there are five dimensions to be considered, i.e., diversity, autonomy, redundancy, connectivity, and flexibility. In this regard, the notion of CoP (Communities of Practices) is worth being employed in perceiving creative organization culture. CoP encourages organization members to work together and to share information and knowledge enthusiastically so as to form creative organization culture. Thus we suggest KAERI makes use of CoP in building creative organization.

Thirdly, collaboration strategy is related to analyze how KAERI is catching up their technological capabilities in nuclear technology, and what the success factors of KAERI in technology commercialization are. We propose 'external management' and collaboration strategy with key suppliers, customers and complementers of KAERI. External management with collaboration strategy is played as a critical facet of R&D in atomic energy research due to its safety and credibility issues as well as international politics especially in the Korean peninsular where geopolitics have mattered even in pure commercial R&D for nuclear power plants.

목 차

요 약 문	iii
SUMMARY	viii
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 배경 및 목표	1
제 2 절 주요 연구 내용	3
제 3 절 연구 추진 방법	4
제 2 장 원자력 기술정책 환경	5
제 1 절 국내외 원자력 정책 동향 및 전망	5
1. 에너지 수급	5
2. 환경 문제	8
3. 국내외 원자력 동향	11
4. 원자력 이용개발 확대를 위한 주요 과제	19
제 2 절 중소형 원자로 개발 현황	27
1. 국가별 개별 현황	27
2. 주요 중소형 원자로	30
제 3 절 미래원자력시스템 개발 및 국제공동연구 추진 현황	37
1. 제4세대 원자력시스템 국제공동연구 추진 현황	37
2. 국제 원자력에너지 파트너십(GNEP)	55
3. Gen-IV와 GNEP의 공통분야	62
제 3 장 원자력 연구개발 중장기 성장전략 개발	67
제 1 절 미래 원자력시스템 개발 장기추진계획과 시사점	67
1. 개요	67
2. 추진계획 수립 배경	67
3. 계획 수립 과정	72

4. 추진계획의 비전 및 추진전략	72
5. 추진계획의 주요 내용	74
제 2 절 원자력연구원의 기술사업화 활성화 방안	79
1. 기술사업화 역량 강화	79
2. 창의문화 : CoP를 통한 연구개발 창의성 제고방안	85
3. 협력 : 기술사업화 활성화 전략	91
제 4 장 결론 및 건의사항	97
참고문헌	103
부 록	109

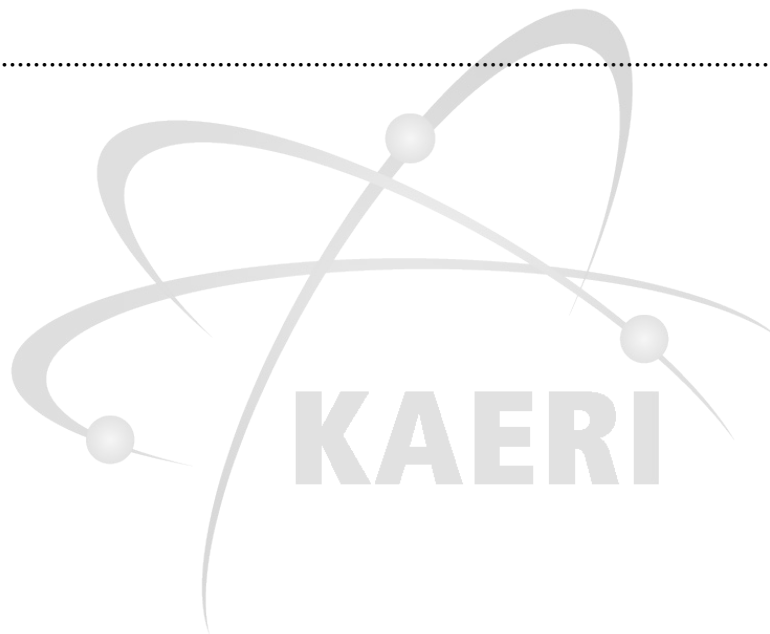


표 차 례

표 2-1. 세계 에너지 수요 전망	6
표 2-2. 우리나라 온실가스 배출 지위	10
표 2-3. 국가별 신규 원전 도입 전망	14
표 2-4. 국내 원전별 사용후핵연료 소내 저장용량 및 저장량	17
표 2-5. 주요국의 사용후핵연료 처리방안	18
표 2-6. IRIS 개발 일정	31
표 2-7. GIF 선정 제4세대 원자력시스템	41
표 2-8. 회원국별 Gen-IV 시스템 참여	42
표 2-9. GNEP와 Gen-IV의 추진 목표	62
표 3-1. 대덕 특구내 연구원 기업 현황	80
표 3-2. 대전 TEC 과정	85
표 3-3. CoP와 유사 개념 비교	87
표 3-4. 원자력(연)의 CoP 운영현황 및 변화	89
표 3-5. 성공적 CoP 실행방안	90
표 3-6. 상이한 개발 협력방법 간의 장단점 비교	91
표 3-7. 대상과 제품별 협력전략	92
표 3-8. 원자력(연) 기관별 산학협력 협정체계 통계	93
표 3-9. 원자력(연)의 원자력 기술협력 : 연도별 협력국가 및 기업	94

그림 차례

그림 2-1. 국제 원자력발전 장기 발전 시나리오	13
그림 2-2. 국제 우라늄 정광 및 농축가격 추이	16
그림 2-3. IRIS 원자로 상세 개념도	31
그림 2-4. PBMR 원자로와 주변구조물	34
그림 2-5. 원자력시스템의 세대 구분	38
그림 2-6. GIF 체제 및 국내 참여기관	40
그림 2-7. SFR 시스템의 개요	45
그림 2-8. VHTR 시스템의 개요	47
그림 2-9. SCWR 시스템의 개요	50
그림 2-10. GFR 시스템의 개요	51
그림 2-11. LFR 시스템의 개요	53
그림 2-12. MSR 시스템의 개요	54
그림 2-13. GNEP의 개념	55
그림 2-14. GNEP의 핵연료 재순환 및 ABR 활용개념	57
그림 2-15. GNEP의 추진 개념도	58
그림 2-16. GNEP와 Gen-IV의 공통분야	64
그림 3-1. GIF Technical Working Group 평가 결과	68
그림 3-2. 주요국의 고속로 개발 일정	69
그림 3-3. 국내 사용후핵연료 누적 예상량	70
그림 3-4. 국제 우라늄 가격 변동 추이	70
그림 3-5. 미래 원자력시스템 개발 장기추진계획의 비전 및 목표	73
그림 3-6. 친환경 고속로 순환핵연료주기 시스템 개념도	74

그림 3-7. 친환경 고속로 순환핵연료주기 시스템 기대 효과	75
그림 3-8. 친환경 고속로 순환핵연료주기 시스템 주요 개발일정	76
그림 3-9. 원자력이용 수소생산 시스템 개념도	76
그림 3-10. 원자력이용 수소생산 시스템 주요 개발일정	77
그림 3-11. 미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획	78
그림 3-12. 연구원 기업 및 기술지주회사의 구조	81
그림 3-13. 죽음의 계곡: 사업화의 요구 공간	82
그림 3-14. TEC 알고리즘의 체계	83
그림 3-15. CoHitec의 목표와 구조	84



제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목표

최근 1년 사이 우리나라 전체 에너지 수입액의 62%를 차지하는 원유의 단가상승률이 65%를 넘어선 가운데 석탄, 가스 등 모든 에너지 가격이 50% 내외로 급등하였다. 이러한 에너지 자원의 가격 인상으로 인해, 2008년도 상반기 우리나라의 에너지 수입액은 전년 같은 기간의 에너지 수입액에 비해 62%나 증가하였다. 이런 가운데 작년 말 「발리로드맵」이 채택됨으로써, 2013년부터 우리나라를 포함한 모든 선진국과 개발도상국은 온실가스 감축을 위한 국가목표의 설정 및 감축노력에 참여하여야 한다. 이에 따라 세계 각국은 온실가스 배출의 주요 원인인 화석연료의 사용을 줄이면서, 화석연료를 대체하기 위한 청정 에너지를 확보하기 위한 노력을 기울이고 있다.

이러한 상황을 반영하여, 정부는 지난 8월 27일 청와대에서 대통령 주재로 제3차 국가에너지위원회를 개최하여 20년 장기 에너지계획인 「국가에너지기본계획」을 심의·확정하였다. 이 기본계획에서 정부는 고유가와 온실가스 감축 등에 대응하기 위해 원자력의 역할 강화는 불가피한 선택임을 강조하며, 2030년까지 전체 발전설비 중 원전의 비중을 41%까지 제고할 계획임을 밝혔다.

한편 2008년 12월 22일 정부는 한승수 국무총리 주재로 「제255차 원자력위원회」를 개최하여, 「미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획」을 심의·확정하였다. 이 추진계획은 2030년까지 미래 원자력시스템의 개발에 대한 청사진을 제시한 것으로 개발에 장기간이 소요되는 미래 원자력시스템 연구개발을 일관되고 체계적으로 추진하기 위한 시스템별 추진일정 등 기본방향이 제시되어 있다.

이러한 원자력 개발을 둘러싼 상황에 효율적으로 대응하기 위해서는 21세기의 원자력의 역할과 비전에 대한 연구는 물론 원자력기술개발 정책에 대한 체계적인 연구가 요구되고 있다. 또한 원자력이용개발 환경의 변화와 선진 원자력기술 동향의 지속적인 파악과 원자력을 둘러싼 국내·외 정책 환경의 지속적인 모니터링을 통해 국내 원자력연구개발 정책의 근간이 되고 있는 「원자력진흥종합계획」, 「원자력연구개발5개년계획」의 수립 시에도 국내·외의 원자력 기술정책 환경변화를 평가하여 반영할 필요가 있다.

이에 본 연구는 원자력환경의 변화와 이용개발현황의 분석을 통해 국가 원

자력정책목표를 달성하기 위한 효과적인 국가 원자력 이용개발정책 수립지원을 목적으로 수행되었다.



제 2 절 주요 연구 내용

본 연구는 상기의 연구목표에 부합하기 위하여 국내·외 원자력 이용개발 환경 변화 및 기술발전 현황을 조사·분석하고 이를 토대로 원자력연구개발의 효율적 추진과 원자력산업 및 관련 분야에 효과적으로 연계하기 위한 방안과 구체적인 분야에서의 활용을 모색하였다.

이를 위해 본 연구에서는 (1) 원자력 기술정책 환경을 분석하고 (2) 원자력 연구개발 중장기 성장전략을 논의하였다.

원자력 기술정책 환경 분석을 위해 국내·외 원자력 정책 동향 및 전망, 중소형 원자로 개발 현황, 미래원자력시스템 개발 및 국제공동연구 추진 현황에 대해 조사·분석을 수행하였다. 세계 에너지 소비 증가에 따른 에너지 수급의 불균형, 지구환경문제 등 원자력 이용 촉진의 요인들을 조사하고 국내·외 원자력 현황 및 전망을 분석하였다. 또한 전기뿐만 아니라 열 및 담수 생산이 가능하여 세계적으로 그 수요가 증대되고 있는 중소형원자로의 개발현황을 조사하여 우리나라 SMART 연구개발에 있어 의미하는 바에 대해 숙고하였다. 끝으로 원자력 선진 기술 개발을 위하여 진행 중인 기술선진국들의 국제협력 추진 현황을 조사하였다. 이를 위해 제4세대 원자력시스템 국제포럼(GIF)과, 국제 원자력에너지 파트너십(GNEP)을 중심으로 이들 기술협력의 최근 동향과 향후 전개 방향에 대하여 검토하였다.

원자력 연구개발 중장기 성장전략과 관련해서는 본 연구팀이, 2030년까지 미래 원자력시스템의 개발에 대한 청사진을 제시한 「미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획」의 수립을 지원하였는바, 이와 관련하여 추진계획의 수립배경, 추진전략, 주요내용 및 추진계획의 의의와 그 시사점을 제시하였다. 그리고 원자력 기술이 사업화로 성공적으로 연결될 수 있는 요인을 발굴하고 활성화하기 위해 기술사업화 및 연구소기업 활성화 방안, 연구소 창의성 제고를 위한 실천 공동체 (CoP: Communities of Practice) 구축방안, 기술사업화 역량제고를 위한 대내외 협업체계 구축전략 등 기술사업화를 위한 필요 요인을 중심으로 고찰하였다.

제 3 절 연구 추진 방법

본 연구는 기관목적사업으로서 원자력을 둘러싼 국내·외 환경변화를 분석하고, 국가 원자력기술정책 방향 및 관련 기술정책 개발을 수행한다.

이에 다음의 ① 기술정책 현안 파악 → ② 기술정책 정보 수집 및 분석 → ③ 원자력기술정책개발 방법론 연구 → ④ 현안별 대응정책 방안 도출 → ⑤ 개발된 정책의 활용 방안 강구와 같이 단계별 연구추진 방법을 채택하고 있다.

먼저 최근의 국내 및 해외의 원자력기술개발 동향에 대한 모니터링을 통하여 주요 현안에 대하여 파악한다. 모니터링은 주요국의 원자력기술정책 동향 조사, 국내·외 학술회의나 세미나 등에서 발표된 자료 조사, 원자력관련 뉴스에 대한 조사 및 분석 등을 통하여 수행한다. 이렇게 파악된 현안은 시급성 및 중요도에 따라 분류되어, 시기적절한 대응책이 마련될 수 있도록 조사·분석된다.

현안사항이 연구를 필요로 하는 경우에는 관련 정보의 수집과 분석이 이루어지고, 적정 연구방법론에 대한 조사와 적용을 위한 연구가 이루어진다. 이를 통하여 현안문제 해결을 위한 정책방안이 결과로서 산출된다. 그리고 산출된 정책방안을 현실에 적용하기 위한 방안이 동시에 강구된다.

본 연구는 매년 발생하는 원자력기술정책 현안에 대해 지속적으로 상기와 같은 연구방법론을 적용하여 추진된다.

제 2 장 원자력 기술정책 환경

제 1 절 국내외 원자력 정책 동향 및 전망

1. 에너지 수급

가. 에너지 수요의 증가

경제협력개발기구/국제에너지기구(OECD/IEA) 등 에너지 관련 국제기구의 보고서에 의하면 에너지 수요는 세계 인구의 지속적 증가로 인해 꾸준히 증가할 것으로 예측되고 있다. OECD/IEA 통계에 의하면²⁾ 1970년부터 2002년까지 30년간 세계 에너지 소비는 87% 증가하였으며, 2030년까지 연평균 1.6% 상승하여 현재(112억 TOE/년)보다 53% 증가한 171억 TOE/년에 이를 전망이고 2050년까지는 현재의 2배 수준으로 증가할 것으로 전망되고 있다. 미국 에너지정보국(EIA : Energy Information Administration)도 같은 기간 동안 연평균 1.8%의 증가를 전망해 IEA보다 높은 에너지 수요를 전망하고 있다.³⁾

이러한 에너지 소비 증가의 대부분은 신흥공업국(중국, 인도 등 BRICs 국가)에서 나타나고 있다. OECD/IEA는 신흥공업국이 전체 에너지 수요 증가분의 76%를 차지하고, 중국의 비중이 현 15%에서 2030년 20%로 확대됨으로써 중요한 변수가 될 것으로 전망하였다. 중국은 2001~2005년 동안 평균 GDP 성장률 9.5%의 고도성장을 이루는 과정에서 에너지 소비량이 55% 급증하여 세계 에너지 소비의 블랙홀로 대두되고 있다.

에너지원별 추이를 살펴보면, 2030년까지도 화석에너지에 대한 의존이 지속될 것으로 전망되지만 에너지 안보, 기후변화 등에 대한 우려로 인해 원자력 및 신재생에너지의 이용이 확대될 것으로 예상된다. 현재의 고유가 상황이 지속될 것으로 전망되며 이에 따라 석유 의존도는 감소하고 석유를 대체할 수 있는 천연가스 및 석탄의 상대적 비중이 증가할 것으로 예상된다. 원자력에 대한 연평균 수요 증가율은 0.7%로 낮은 수준이나 화석연료를 대체할 수 있는 획기적인 대안 에너지가 나오지 않는 한 현실적인 대안으로 중요한 역할을 담당할

2) World Energy Outlook 2006, OECD/IEA

3) International Energy Outlook 2007, EIA/DOE

것이다. 에너지 수요의 지속적인 증가가 예상됨에 따라 주요국의 에너지 확보 경쟁도 더욱 심해질 것으로 전망된다. 특히 중동, 중앙아시아 등 전략적 중요성이 큰 지역을 중심으로 각국의 에너지 통제권 확보를 위한 경쟁이 더욱 치열해질 전망이다.

<표 2-1> 세계 에너지 수요 전망⁴⁾

	2004	2010	2015	2030	증가율 (‘04-’30)	비 중 (‘30년)
석탄	2,773	3,354	3,666	4,441	1.8	26.0
석유	3,940	4,366	4,750	5,575	1.3	32.6
가스	2,302	2,686	3,017	3,869	2.0	22.6
원자력	714	775	810	861	0.7	5.1
수력	242	280	317	408	2.0	2.4
바이오매스	1,176	1,283	1,375	1,645	1.3	9.6
신재생에너지	57	99	136	296	6.6	1.7
계	11,204	12,843	14,071	17,095	1.6	100.0

나. 석유 수급 전망

최근의 연구결과에 의하면 석유의 발견량은 이미 1960년대에 최대값에 도달했다는 것이 중론이다. 그 후에도 간혹 거대 유전이 발견되었고 지금도 석유탐사는 계속되고 있지만, 발견되는 유전의 크기는 1960년대에 발견된 거대 유전에 비해서 아주 작고 탐사 횟수에 비해 발견 성공률도 크게 떨어졌다. 60년대에는 해마다 발견되는 석유의 양이 연간 40기가 배럴이었지만, 현재는 연간 6기가 배럴에 지나지 않는다. 이와 같이 해가 갈수록 발견되는 석유의 양은 크게 줄어들어 갔지만, 이에 반해서 전 세계의 석유 소비량은 급속하게 증가해왔다.

세계 석유 수요는 중국 및 인도의 경제성장 등 개도국에서의 꾸준한 수요 증가로 2005년 8,400만 배럴/일에서 2030년 1억1,600만 배럴/일로 증가가 전망된다. 이러한 석유 수요는 주로 수송부분의 석유 사용이 증가할 것으로 예상되며, 산업부문에서도 석유화학 및 정제산업의 수요가 증가할 것으로 전망되고 있다.⁵⁾

4) World Energy Outlook 2006, OECD/IEA

5) International Energy Outlook 2006, EIA/DOE

최근 국제적인 경기 침체로 국제 유가가 하향 안정 추세를 보이고 있으나 2008년 상반기에 배럴당 100달러를 넘는 고공행진을 기록하였다. 향후 경기 회복에 따른 지속적인 전 세계의 석유수요 증가, 지정학적 불안 요인, 구소련 지역에서의 석유공급 정체 및 감소, OPEC 국가의 투자부진으로 인한 석유생산 능력 부족 등의 가능성을 전제로 할 경우 국제유가는 다시 크게 상승할 것으로 전망된다.

다. 에너지 안보

에너지 자원의 한계와 에너지 공급 지역의 불안 등으로 에너지 가격의 상승과 공급 불확실성이 심화되면서 전 세계적으로 자원 쟁탈전이 가속화되고 있고 에너지원의 안정적인 확보가 국민 삶의 질 향상과 국가발전의 중요한 요인으로 인식되고 있다. 산유국의 정정 불안과 세계 주요 에너지 수송로, 즉 해상 수송로와 파이프라인 등의 안보 상황, 석유와 천연가스 등에 대한 분쟁 지역의 테러와 사보타지 그리고 자연 재해 등으로 공급에 지장을 초래하는 경우 세계의 에너지 가격은 급등하여 왔다.

OECD/IEA는 향후 재생 가능한 에너지 생산의 증가에도 불구하고, 주요 정책과 가치, 기술적 변화가 수반되지 않는다면, 전 세계적으로 재생가능 에너지의 공급은 세계 에너지 소비량의 10%에도 미치지 못할 것이며, 석유가 여전히 40% 가량을 차지하게 될 것이라 전망하였다. 그러나 중추적인 1차 에너지원 역할을 담당하고 있는 화석연료의 가용 매장량은 한정되어 있고 생산량의 대폭적인 증대가 어려운 상황이다. 영국석유회사인 BP(British Petroleum)가 주요 화석연료의 가채연수를 분석한 자료에 의하면 석유는 40년, 천연가스는 65년, 석탄이 155년 정도로 예측되고 있다. 또한 우리나라의 경우도 연료를 증식시키지 않는 원자료를 계속해서 이용한다면 100년 이내에 고갈될 것으로 전망하고 있다.⁶⁾

이러한 자원량의 한계 전망에 따라 에너지 안보 차원에서 에너지 수요가 급증하고 있는 중국과 인도를 비롯하여 미국, 일본, EU 등 에너지 소비 대국들은 에너지 자원 확보를 위한 외교를 강화하고 있으며, 에너지 정책에서도 화석자원의 자주적 개발은 물론이고 해외 에너지 여건에 영향 받지 않고, 경제·사회·환경의 균형적 발전을 유지하는데 필요한 지속가능 에너지원 추구를 강조하고 있다.

6) BP Statistical Review of World Energy 2006

에너지 안보 문제가 국가 발전과 국가정책의 주요 과제로 대두되면서 주요국 정치 지도자들의 원자력에 대한 인식 변화가 나타나고 있다. 2005년 7월 글렌이글스에서 개최된 G-8 정상회의에서는 ‘기후변화 행동지침’ 중에서 “우리는 원자력을 지속적으로 이용하려는 G-8국가들이 원자력의 안전성, 신뢰성, 핵확산 저항성을 향상할 수 있는 기술을 개발하고 있음에 주목한다”고 명시한 바 있으며, 2006년 7월 페테스부르크에서 개최된 G-8 정상회의에서는 에너지 안보가 주요의제로 다루어 졌으며 원자력의 역할 또한 강조되었다.

주요국 정치 지도자들의 원자력에 대한 인식변화는 원자력의 환경 친화성, 핵연료 공급의 안정성 및 에너지자원 확보 외교 경쟁 등에 기인한다. 원자력은 연료인 우라늄의 출처가 다양하며 또한 주요 공급자들이 정치적으로 안정된 국가에 있어 석유나 가스보다 공급보장 능력이 뛰어나다. 또한 우라늄은 에너지 밀도가 매우 높기 때문에 화석연료에 비해서 수송과 저장이 매우 용이하다. 최근 주요 원자력 선진국은 지속적인 기술혁신을 통해 원자력의 안전성과 경제성을 향상시켜 오고 있다.

2. 환경 문제

가. 지구온난화

세계 경제가 확대되고 고도화되면서 환경에 대한 부하가 지역 차원을 벗어나 지구 전체로 확산된 결과 지구온난화, 대기오염 증가 등의 문제가 국제적인 문제로 대두되고 있다. 특히 대기 중의 이산화탄소 농도 증가에 따른 지구 온난화에 대한 우려가 국제적으로 높아지고 있다. 남극대륙의 거대한 빙산이 떨어져 나가고, 북극의 빙산 두께가 줄어들고, 그린란드의 빙산이 녹아내리고 있을 뿐만 아니라, 남태평양의 투발루 같은 섬나라는 해마다 해수면이 높아져서 면적이 줄어들고 있다. 지구온난화에 따라 지난 100년간(1906~2005) 지구 표면의 온도가 0.75°C 상승하였으며, 해수면은 1961년~2003년 동안 매년 1.8mm씩 상승하였다.⁸⁾ 우리나라의 경우, 지난 100년간 6대 도시의 평균기온이 약 1.5°C

7) 1톤의 우라늄은 1만~1만6천톤의 석유에 해당하는 에너지를 생산함.

8) Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report

상승하였으며, 제주지역의 해수면은 40년간 22cm 상승하는 등 기후변화 진행속도가 지구평균의 2~3배를 상회하고 있다.

2007년 2월 발간된 '기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC : Inter-Governmental Panel on Climate Change)'의 보고서에서는⁹⁾, 현재와 같이 화석연료를 계속 사용할 경우 금세기말 지구의 평균 온도는 최대 6.4°C, 해수면은 59cm 상승할 것으로 전망하며, 온실가스, 특히 CO₂의 대기방출을 억제하기 위해서는 환경친화적인 에너지원이 필수적이라 밝혔다. 또한 동 보고서에 따르면 세계적으로 전기 생산으로 인한 CO₂ 배출은 전체의 약 27%를 차지하면서, 그 규모는 온실가스 배출원 중에서 가장 크며 증가속도 또한 가장 빠르다고 서술하였다.

IPCC는 기후변화의 결과를 인류가 감당할 수 있는 수준으로 제한하기 위해서는 2050년의 연간 CO₂ 배출량을 현재의 절반수준으로 감축해야 한다고 결론을 내렸다.¹⁰⁾ 이는 2050년까지 연간 CO₂ 배출이 130억톤 정도로 줄어들어야 한다는 의미이다. 세계적으로 특단의 조치가 없으면 2050년에 CO₂ 배출은 연간 600억톤에 이를 것으로 예측되고 있다.

IEA는 이처럼 어려운 목표를 달성하기 위해서는 에너지의 생산과 사용의 효율성 극대화, 재생 에너지와 원자력의 대폭적인 확대 및 탄소포획/저장 기술의 대량 도입 등 사용가능한 모든 기술들을 조합해야 한다고 주장하고 있다. IPCC가 제안한 연간 130억톤의 감축목표와 관련하여 NEA의 시나리오는 석탄 대신에 원자력을 사용하면 연간 40억~120억톤의 CO₂ 배출을 줄일 수 있다고 전망하였다.¹¹⁾

나. 기후변화협약

지구온난화의 영향이 가시화되면서 1987년 제네바에서 열린 제1차 세계기상회의에서 IPCC가 결성된 이후, 세계 각국은 범지구적 차원의 대책마련에 본격적으로 나서게 되었다. 1997년에는 선진국들에게 1990년 대비 평균 5.2%의 감축 의무를 부과하는 교토의정서가 채택돼 2005년 2월 발효되었다. 이에 따라 가입국들은 2008~2012년까지 온실가스 배출량을 자국에 할당된 규모 이상으로 감축해야 한다. 2005년 11월 기후변화협약당사국 총회에서는 포스트 교토 협상

9) 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC) 제4차 보고서, 2007.2

10) IPCC, Special Report on Emission Scenarios (2000)

11) NEA, Nuclear Energy and the Kyoto Protocol (2002)

이 본격적으로 시작되었으며, 마침내 2007년 12월 인도네시아 발리에서 개최된 제13차 유엔 기후변화협약당사국 총회에서 2012년 이후 기후변화 대응체제를 결정하는 '발리 로드맵'이 채택되었다. 이에 따라 온실가스 감축 의무를 졌던 37개 선진국 이외에 개발도상국이 모두 참가해 2009년까지 교토의정서를 대체할 새 협약을 마련하게 되었다. 기존의 교토의정서 효력은 2012년에 만료되고, 새 협약은 2013년부터 발효될 것으로 전망된다.¹²⁾

이러한 국제적 동향에 발맞춰 세계 각국은 다양한 수단을 활용하여 자국의 온실가스 배출량을 감축하거나, 개발도상국에 에너지 절약기술이나 대체에너지 시설을 이전하여 온실가스 배출량을 줄인 만큼 자국의 감축량으로 인정받는 청정개발체제(CDM: Clean Development Mechanism) 등을 이행하고 있다. 현재 교토의정서는 원자력을 CDM의 공인된 기술로 인식하지 않고 있다. 그러나 발전분야가 CO₂ 배출부문에서 가장 크고 다른 것과 비교해서 증가속도도 빠르기 때문에 새로운 협정은 보다 먼 장기적인 관점에서 모든 가능한 옵션을 고려해야 할 것이다.

우리나라의 온실가스 배출량은 1995~2004년 기간 중 연평균 3% 증가하였으며, <표 2-2>에 보듯이, 2005년 온실가스 총 배출량이 591.1백만 CO₂톤으로 1990년 대비 98.7%가 증가하였다. 이 중 에너지부문에서 발생하는 온실가스가 84.3%를 차지하고 있다. OECD 국가와 비교하였을 때, 우리나라는 온실가스 배출량에서 6위 수준이며 증가율은 90.1%로 1위를 차지하고 있다. 이러한 온실가스 배출 지위 때문에, 우리나라는 다른 국가로부터 경제규모에 상응하는 온실가스 감축노력을 기울여야 한다는 압력을 받아 왔다. 이에 정부는 2007년 12월 국무조정실 주관으로 기후변화 제4차 종합대책을 마련하여 시행하는 등 기후변화에 효과적으로 대응하기 위한 노력을 기울이고 있다.

<표 2-2> 우리나라 온실가스 배출 지위 - OECD와 비교

배출량 관련 지표	우리나라	순위	비고
배출량	5.9억 톤	6위	1위 미국(70.7), 2위 일본(13.6)
증가율(1990~'04)	90.1 %	1위	2위 터키(72.6), 3위 스페인(49.0)
GDP당 배출량	0.59 톤/천\$	8위	1위 호주(0.80) 7위 미국(0.61)
1인당 배출량	12.28 톤/인	14위	1위 룩셈부르크(28.02)

12) 환경부 보도자료 참조, 2007.12

3. 국내의 원자력 동향

가. 국내 원자력발전 현황 및 전망

2008년 10월 현재 국내에는 20기의 원전이 운영 중에 있으며, 이들 원전으로부터 국내 총 전력의 약 40%가 공급되고 있다. 「제3차 전력수급기본계획」에 따르면, 2020년까지 10기(1,240만kW)의 신규 원전¹³⁾이 추가 건설될 예정이다.

최근 정부는('08.8.27) 청와대에서 대통령 주재로 제3차 국가에너지위원회를 개최하여 20년 장기 에너지계획인 「국가에너지기본계획」을 심의·확정하였다. 이 기본계획에서는 “저탄소 녹색성장”을 에너지 부문에서 뒷받침하고 “석유 이후 시대”에 대한 전략적 대응을 위한 장기 에너지정책 비전이 제시되어 있다. 또한 비전을 실현하기 위한 실행전략으로서, ① 에너지원단위¹⁴⁾를 현재의 0.341에서 2030년 0.185 수준으로 46% 개선하여 “에너지 저소비사회” 구현, ② 화석에너지 비중을 현재의 83% 수준에서 2030년에 61% 수준까지 축소하고, 신재생(2.4%→11%), 원자력(14.9%→27.8%) 등 저탄소 에너지의 비중을 확대 ③ “녹색기술” 등 에너지기술 수준을 현재 60%에서 2030년 세계 최고수준으로 끌어올려 에너지산업을 신성장동력으로 육성 등을 제시하고 있다.

정부는 고유가와 온실가스 감축 등에 대응하기 위해 원자력의 역할 강화는 불가피한 선택임을 강조하며, 2030년까지 전체 발전설비 중 원전의 비중을 41%¹⁵⁾까지 제고할 계획임을 밝혔다. 본 계획에 의하면 2030년까지 원전 비중은 전력수급계획의 목표치보다 10기의 신규 원전이 추가될 것으로 예상된다. 원전 확대를 위한 정책과제로서 국제기구의 안전 점검 및 안전성 평가 등을 통해 세계 최고의 원전 안전성을 확보해 나가고, 원전의 사회적 수용성을 제고하기 위해 원전건설의 혜택이 주변 지역에 직접적으로 확산되는 ‘지역공존형 원전 건설’을 추진해 나가기로 하였다. 또한 원전 비중 확대를 위한 기본 전제인 신규 원전 부지 확보와 사용후핵연료 관리문제는 민주적이고 투명한 공론화 절차를

13) 계획원전(완공시기) : 신고리 1(2010.12), 신고리 2(2011.12), 신월성 1(2011.10), 신월성 2(2012.10), 신고리 3(2013.09) 신고리 4(2014.09), 신울진 1(2015.12) 신울진 2(2016.12), 신규 1(2018.06) 신규 2(2019.6)

14) GDP 1천불을 생산하기 위해 소비된 에너지량(TOE)

15) 1차 에너지 비중: 15%(2007) → 28%(2030), 설비비중: 26%(2007) → 41%(2030), 발전량 비중: 36%(2007) → 59%(2030)

거쳐 최종 방향을 마련해 나가기로 하였다.

1978년 4월 고리 1호기가 상업운전을 시작한 이래, 원자력은 우리나라의 경제발전에 지대한 기여를 해왔다. 관련 통계추이를 살펴보면, 국내 1차 에너지소비 중 원자력비중이 11.1%(1995) → 14.1%(2000) → 14.3%(2003) → 15.7%(2005)로 높아지면서, 석유비중은 62.5%(1995) → 52.0%(2000) → 47.6%(2003) → 45.2%(2005)로 낮아지고 있다. 이러한 석유비중 감소는 원자력이 없었다면 수입했어야 할 석유를 원자력이 대체함으로써, 석유 수입 시 사용했었을 막대한 외화를 절감할 수 있었으며, 온실가스를 덜 배출함으로써 우리나라의 환경보존에 기여해 왔다. 1,000 MWe급 원자력발전소 1기는 화력발전소에 비해 연 750만톤의 이산화탄소 감축효과가 있으며 원자력의 이용함으로써 국내 총 이산화탄소 배출량의 약 20%를 감축할 수 있었다. 또한 원자력은 값싸고 안정적인 전력을 공급함으로써, 국가 경제발전과 물가안정에 크게 기여하였다. 물가통계를 살펴보면, 1982~2005년까지 소비자 물가는 172.7% 상승하였으나, 전기요금은 6.6% 인상(13회 인상, 10회 인하)에 불과하였으며, 원자력이 본격 도입된 시기와 전기요금이 안정화된 시기가 일치함을 확인함으로써 물가 안정에 원자력이 크게 기여하였음을 알 수 있다.

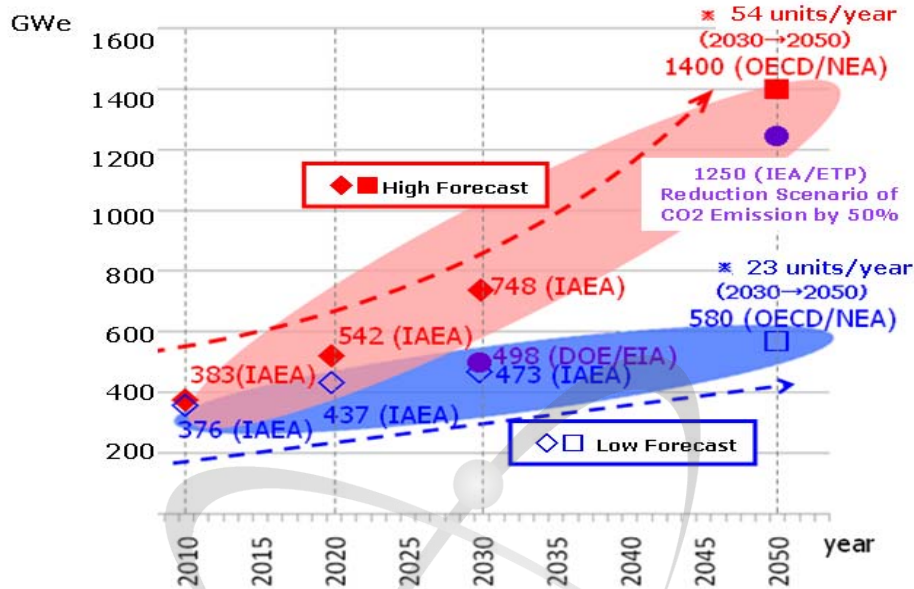
나. 국외 원자력발전 현황 및 전망

세계 원자력 협회(WNA: World Nuclear Association)에 의하면 2008년 6월 기준 전 세계 30개국에서 운전 중인 원자력발전소는 총 439기로 설비용량은 약 372 GW에 달한다. 미국, 프랑스, 일본이 세계 원전 설비용량의 57%를 차지하고 있으며, 2007년에 원자력은 16개국에서 전기 생산의 25% 이상을 차지하고 있다. 또한 러시아, 중국, 인도, 한국 등 11개 국가에서 총 36기를 건설 중에 있으며 2030년까지 계획(현재 계획 중이거나 제안된 원전) 중인 원전은 349기에 이른다. 현재 전력 수요 중 원자력발전소가 차지하는 비중은 전 세계적으로 16%에 달하며 이중 의존도가 큰 국가는 프랑스(78.1%), 리투아니아(72.3%), 스페인(48%), 우리나라(40%) 등이다.¹⁶⁾

전 세계적으로 온실가스 감축 및 급증하는 전력수요에 대처하기 위해 원자력의 이용 확대 또는 도입을 추진하려는 움직임이 뚜렷해지고 있다. 국제 에너

16) World Nuclear Power Reactors 2007-08 and Uranium Requirements (2008.6.9), WNA, <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>

지 관련기구들의 예측에 의하면 각 기구별 다소 차이가 존재하지만 2050년이 되면 원자력발전의 규모는 최대한 1400 GWe, 최소한으로도 580 GWe에 이를 것으로 전망된다.



<그림 2-1> 국제 원자력발전 장기 발전 시나리오¹⁷⁾

이러한 원자력 확대 전망은 각국의 에너지 정책에도 반영되고 있다. 미국은 신규원전에 대한 투자 장려 조항이 포함되어 있는 “2005년 에너지 정책법”을 2005년 8월 발효하였고, 제3세대 플러스형(Gen-III+)을 2010년경에 건설 착수하여 2014년경에 운전 개시에 들어가겠다는 “NP2010 프로그램”에 따라 현재 16개 전력사들이 26기의 신규 원전 건설의향을 발표하였다. 미국 전력연구소(EPRI)는 2030년까지 미국의 신규 원전 건설 규모는 64GWe에 이를 것이며 이중 2020년까지 24GWe가 건설될 것으로 전망하였다. 또한 EPRI는 이러한 원전 건설에 따라 2030년에는 총 전력수요의 25.5%를 원자력발전으로 공급할 것으로 보고 있다. 미국은 제4세대 원자력시스템 개발에서도 리더십을 발휘하고 있으며, 최근에는 세계원자력파트너십(GNEP; Global Nuclear Energy Partnership)을 주창하고 2020년경 자국의 사용후핵연료 관리정책의 한 방안으로 2020년경 상용 연소로(Advanced Burner Reactor)를 도입하려고 계획하고 있으며, 그 노형으로서

17) Nuclear Energy Outlook 2008, OECD/NEA

소듐냉각고속로가 유력하게 거론되고 있다.

러시아도 에너지 소비 증가에 대비해 현재 16%인 원자력 전력 생산 비중을 장래에는 25%까지 확대하겠다고 밝힌 바 있다. 이에 따라 러시아는 2025년까지 40GWe의 신규 원전을 건설할 계획이다. 또한 프랑스는 2020년부터 2035년까지 최소 40기의 노후 원전에 대한 대체 수요가 있을 것으로 전망되고 영국은 2007년 5월 발표한 에너지 백서에서 노후화된 기존 원자로를 대체할 신규 원전 도입을 고려하고 있으며, 정식으로 원전 신설이 확정될 경우 8기 정도가 건설될 전망이다. 그리고 침체로만 가고 있던 유럽의 원자력산업은 기후변화협약에 따른 이산화탄소 배출 감축의무의 준수, 고유가에 따른 탈화석연료의 필요성 등이 복합적으로 작용하여 원전 도입에 긍정적인 국가들이 다수 나타나게 되었다. 대표적인 국가들이 독일, 스페인, 스웨덴, 이탈리아 등이다. 이러한 분위기에 따라 핀란드는 프랑스에서 개발한 EPR을 건설하고 있고, 불가리아, 체코, 루마니아 등 동유럽 국가들과 터키는 원전 도입을 계획하고 있기도 하다.

중국은 2020년까지 6개 용지에 30기 이상 대규모 원자력발전소 증설을 추진하여 원전 규모를 40GWe 규모로 증설할 계획이고 인도도 2020년까지 20~30기의 신규원전을 건설할 계획을 가지고 있다. 2030년까지 두 국가의 원전 증가율은 중국의 경우 연평균 약 7.7%, 인도의 경우 9.1%가 될 것으로 전망되고 있다.¹⁸⁾ 이외에 파키스탄은 2030년까지 8GWe의 원전을 신규로 건설할 계획을 가지고 있고, 인도네시아는 2011년까지 신규 원전 도입을 가속화시키겠다는 의향을, 베트남은 2011년까지 원자로를 건설할 의향을 보이고 있으며, 카자흐스탄은 러시아와 협력하여 중소형로를 개발할 계획을 추진하고 있다.

<표 2-3> 국가별 신규 원전 도입 전망

국 가	목표 년도	용량/수량	국 가	목표 년도	용량/수량
미국	2020	30~32기	중국	2020	40 GWe
일본	2017	17 GWe/13기	인도	2020	20~30기
러시아	2025	40 GWe	파키스탄	2030	8 GWe
인도네시아	2025	4기	베트남	2017	2~3기
남아공화국	2030	27 GWe	아르헨티나 등	-	원전 추가 신규 도입

18) International Energy Outlook 2007, EIA/DOE.

장기전망에 따른 신규원전 노형들에 대해 세계원자력협회(WNA)에서 조사한 바에 따르면 2013년까지 신규로 운전에 들어 갈 예정인 48기 원전 중 대부분이 경수로형인 것으로 나타나고 있다. 총 48기 중 경수호가 39기(이중 PWR 33기, BWR 1기, ABWR 3기)이고, 중수호가 9기, 그리고 나머지 2기는 고속로이다. 경수로는 중국, 인도, 이란, 러시아, 일본, 핀란드, 한국, 파키스탄 등 많은 나라에서 건설되고 있고, 중수로는 인도, 루마니아, 캐나다, 아르헨티나에서, 고속로는 인도와 러시아에서 건설되고 있다. 그리고 2012년부터 2017년 사이에 운전에 들어갈 예정인 원전 12기는 모두 경수로형이다. 이러한 조사결과는 최소 2020년까지는 개량형 경수호가 주력 원전으로서 역할을 하고, 2030년까지도 경수호가 주력원전으로서 역할을 지속할 것으로 보인다. 물론 경수로의 역할은 2030년 이후에도 지속될 것으로 전망되지만, 사용후핵연료의 관리 정책의 영향으로 원전의 노형 구성 변화가 예상되고 있다.

다. 우라늄 수급 현황 및 전망

“NEA/IAEA Red Book 2005”로 알려진 “Uranium 2005: Resources, Production and Demand”에 의하면 우라늄 자원은 세계 56개국에 분포하고 있는 것으로 알려져 있으며 추정량은 1480만 톤으로 예측되고 있다. 여기서 130 US\$/kg-U 이하로 생산이 가능한 추정량은 1,182만 톤으로, 2004년 세계 우라늄 수요량 6만 7천 톤 기준으로 170년 정도의 분량으로 추정되고 있다. 추정량 중 생산이 가능한 확인된 양은 추정량의 32%에 해당되는 474만 3천 톤으로 호주(23.1%), 카자흐스탄(18.5%), 캐나다(9.6%), 남아공(8.6%), 미국(7.5%)이 전체의 67%를 차지하고 있다.¹⁹⁾ NEA/IAEA Red Book 2005에 의하면 2004년의 경우 전 세계 19개국에서 40,263톤을 생산하였으며 캐나다(29%)와 호주(22%)가 전체 생산량의 51%를 차지하였다. 이외에 카자흐스탄(9%), 러시아, 니제르, 나미비아가 각각 8%, 우즈베키스탄이 5%를 차지하였다.

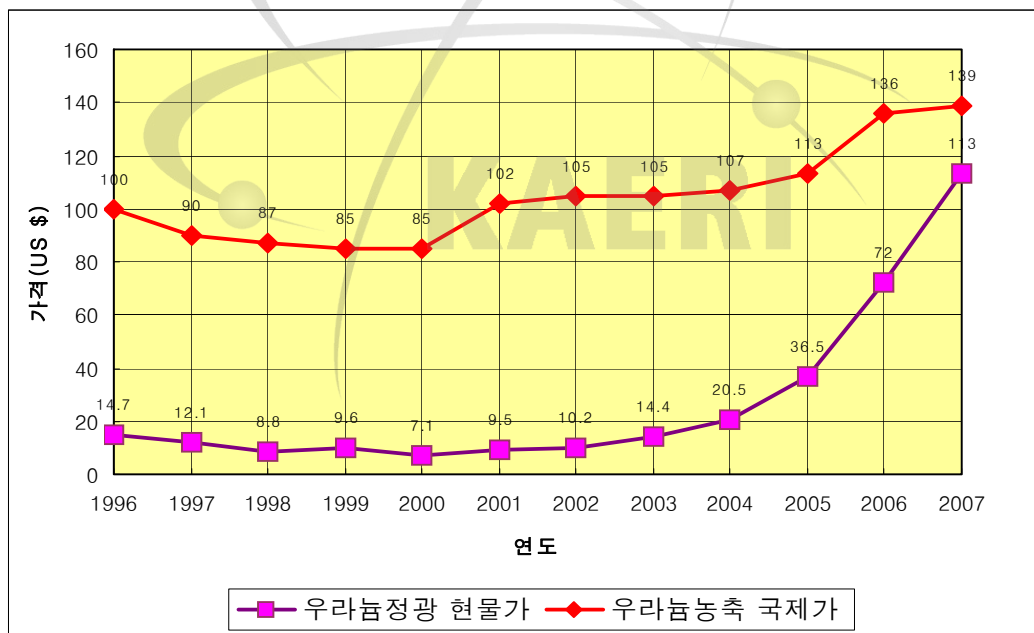
NEA/IAEA는 Red Book에서 세계 원자력 발전 용량의 경우 2025년에 449 GWe ~ 533 GWe로, 이에 따른 우라늄 수요는 8만 2천 톤 ~ 10만 톤으로 예측하였으며 우라늄 생산량은 2010년까지는 8만 3천 톤으로 급격하게 증가할 것으로, 2010년부터 2025년까지는 8만 7천 톤으로 점진적으로 증가할 것으로 예측하였다.

19) OECD/NEA and IAEA, 「Uranium 2005 : Resources, Production and Demand」, 2006.

최근, 원자력 발전의 수요 증가와 우라늄 광산 사고 등으로 인한 우라늄 공급 차질 등이 겹치면서 국제 우라늄 정광(U₃O₈) 가격이 급등과 급락을 반복하고 있다. 2001년 1월 국제 우라늄 정광 가격은 파운드 당 9 달러 수준이었으나 2007년 5월 125 달러로 급등하였고 이후 우라늄 가격이 다시 하락하여 2008년 9월 64 달러 수준으로 하향 안정 되었다.²⁰⁾ 그러나 장기적인 우라늄 수요 증가와 공급의 한정성 등을 고려할 때 우라늄 가격의 불안정은 지속될 것으로 예견된다.

우라늄 농축역무의 경우도 2007년 4월 \$139/SWU 수준으로 2000년 이후 상승 추세가 이어지고 있다. 이러한 상승 추세는 2010~2012년경 미국 및 프랑스의 노후 농축시설(기체확산법)을 대체할 신규시설(원심분리법)의 막대한 건설비 등을 감안할 때 2010년대 중반까지 유지될 전망이다.

이러한 우라늄 공급가격의 상승과 수급 불안정에 대비하여 세계 각국은 우라늄광산 추가 개발, 고효율 신형핵연료 개발, 제4세대 원자력 시스템 개발 등의 다양한 대책을 수립하여 추진하고 있다.



<그림 2-2> 국제 우라늄 정광 및 농축가격 추이

20) www.uxc.com

라. 사용후핵연료 관리

(1) 국내 동향

2008년 현재 우리나라는 20기의 원전이 가동 중에 있으며, 매년 700톤의 사용후핵연료가 발생하여 2007년 말 기준으로 4개 원전 부지에 총 9,420톤의 사용후핵연료가 저장 중에 있다. <표 2-4>에 의하면 고리원전의 경우 저장시설이 2016년이면 포화되며 그 외의 원전도 2016년을 기점으로 2~3년 내에 포화되는 것을 알 수 있다.

3차 전력수급기본계획 및 2020년 이후 전력소비 증가율 둔화 추세에 따른 2020년 원자력 점유율(43.4%) 유지를 가정하는 경우 2100년 원자력 발전량은 358 TWh로 추정되었으며, 발전설비 이용률 80%를 가정하면 이는 원자력 발전설비량 51 GWe에 해당한다. 현재의 원자력 이용추세를 감안할 때, 사용후핵연료 총 누적량이 2050년에는 45,000톤에 이를 것으로 추정되며 이중 고속로를 이용한 순환주기로 처분이 필요한 경수로의 사용후핵연료는 약 26,500 톤 정도의 규모이다.

<표 2-4> 국내 원전별 사용후핵연료 소내 저장용량 및 저장량

구분	저장용량	저장량	예상포화연도	
			현 용량기준시	저장능력 확장시1)
고리	2,253	1,623	2016	2016
영광	2,686	1,491	2016	20212)
울진	1,642 (2,327)3)	1,214	2008	2018
월성	5,980 (9,155)3)	5,092	2009	2017

1) 제253차 원자력위원회(2004.12.17) 의결사항에 명시된 예상 포화년도임

2) 영광 2,5,6 호기 저장용량 확장시 2021년까지 저장 가능

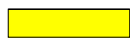
3) ()내는 확장 완료시 저장용량임(울진 3,4: 2008년, 월성 1: 2009년)

(2) 해외 동향

원자력을 주력 에너지로 이용하고 있는 대부분의 국가는 사용후핵연료를 직접 처분하기 보다는 기술개발을 통해 친환경적인 사용후핵연료 처리방식을 추진하고 있다. <표 2-5>에서 보듯이, 원전용량이 20GWe를 초과하는 국가들은 사용후핵연료를 새로운 에너지원으로 재활용하는 정책을 채택하고 있는 반면, 소규모 원전국가(핀란드, 스웨덴)는 직접 처분정책을 채택하고 있다. 2020년경 원전용량이 20 GWe에 이를 신흥 원자력 국가들(중국, 인도 등)도 미래 전망에 따라 이미 사용후핵연료를 재활용하는 정책을 표방하고 있다. 특히 이들 국가들은 원자력의 지속가능성 확보를 위하여 고독성의 방사성 핵종을 연소·제거하여 친환경성을 높이는 한편 사용후핵연료를 자원으로 재활용할 수 있는 고속로 도입을 동시에 추진하고 있다.

<표 2-5> 주요국의 사용후핵연료 처리방안

국가명	발전기수	발전용량(MWe)	사용후핵연료 처리정책
미 국	104	99,049	초우란 핵종 재순환 및 연소 (최종 방안 미결정)
프랑스	59	63,473	악티나이드 재순환주기 채택
일 본	55	47,577	재처리-고속로 연료주기 채택
독 일	17	20,339	직접 처분(현재까지 탈 원전 표방)
러시아	31	21,743	재처리 정책 추진
한 국	20	17,533	현재 소내 저장 (최종 방안 미결정)
중 국	11	8,587	재처리-고속로 연료주기 채택
인 도	17	3,779	재처리-고속로 연료주기 채택



20GWe 이상 국가



2020년까지 20GWe 이상에 도달할 국가

주요 국가의 사용후핵연료 정책동향을 상세히 살펴보면 다음과 같다. 미국은 GNEP을 통해 사용후핵연료 재순환정책으로 전환하고 있다. 사용후핵연료를 핵비확산 공정 등을 이용하여 우라늄을 저준위폐기물로 회수하고, 초우라늄 원소를 신형연소로(Advanced Recycle Reactor: ARR)에 재순환하는 전략을 추구하고

있다. 2007년 9월 비엔나에서 개최된 GNEP 각료급 협력회의(39국 참여, 16개국 서명)에서 원자력에너지 이용 확대, 사용후핵연료 재활용 및 고속로 개발·실증을 골자로 하는 선언문을 채택하였다. 우리나라는 2007년 12월 GNEP에 참여하기로 서명하였다. 2008년 2월 현재 서명국은 21개국이다.

프랑스는 사용후핵연료의 습식재처리에 의한 재순환정책과 장수명핵종 처리를 위한 기술개발을 병행하고 있다. 전통적으로 재처리를 통한 재순환을 추진해 왔으나, 고준위폐기물 관리법(2006.6)을 통해 장수명핵종의 분리·연소 제거를 위한 고속로 시스템 개발을 천명하였다. 사용후핵연료 장기중간저장시설 건설 등을 법적으로 규정하였다.

일본은 2006년 10월, '원자력정책대강'을 수립하여 사용후핵연료 재처리 및 플루토늄과 우라늄을 자원으로 재활용하는 고속로시스템 도입을 추진하고 있으며 이를 뒷받침하기 위한 원자력입국계획을 발표하였다. 또한 일본 정부는 2050년까지 온실가스 배출량을 50% 이상 줄이는 것을 목표로 '환경에너지기술혁신계획'을 수립하여 금년 5월에 확정할 예정인데 동 계획의 일환으로 일본원자력위원회는 금년 3월 원자력혁신기술개발로드맵을 제시하였다. 이 로드맵에는 원자력의 연구, 기술개발 활동의 목표에 대한 비전과 비전 달성에 기여하는 후보 기술, 실용화 과정, 극복해야 할 과제 등을 제시하였다. 일본은 2008년 2월 혁신적 원자력기술개발 로드맵을 일본 원자력위원회에서 의결하였다. 원자력의 혁신적 기술개발 로드맵은 실현되어야 할 시스템 특성이나 실현이 기대되는 재료나 프로세스의 혁신을 비전으로 제시함과 동시에, 이 비전을 실현하기 위해 추구해야 할 기술과제와 그 실현을 위한 연구개발 목표 등, 실용화를 위한 대처 로드맵도 제시하고 있다.

4. 원자력 이용개발 확대를 위한 주요 과제

원자력이 지구환경과 사회/경제적 위협을 감소시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있음에도 불구하고, 많은 일반 대중은 그 위험이 장점을 능가한다고 인식하고 있다. 원자력이 향후에 그 장점을 충분히 발휘하기 위해서는 일반 대중과 정치인들에게 원자력 기술의 특징, 특히 안전성, 폐기물 처분 및 시설해체, 핵비확산 및 방호 그리고 비용 등에 대한 확신을 가지도록 해야 할 것이다.

가. 안전성

원자력 기술에서 안전성과 환경보호는 최우선적으로 다루어져야 한다. 1970년대와 1980년대 원전 건설이 급속히 확대되었으나 TMI(1979)와 체르노빌(1986) 사고로 인하여 중단되었었다. 동시에 화석연료 가격이 폭락하면서 많은 나라에서 신규 원전의 경제성이 떨어졌다. 현재와 같이 화석연료 가격이 비싸더라도 또다른 중대 사고는 방사성 물질의 누출량에 상관없이 원자력 이용개발의 미래에 심각한 영향을 줄 수 있다.

한 국가에서의 중대 사고는 이웃나라에 심대한 영향을 줄 수 있기 때문에 원자력 안전성은 세계적인 관심사이다. 비록 원전의 안전한 운영은 개별 국가의 책임이지만 국제원자력 사회는 다자간설계평가 프로그램(MDEP)과 기타 국제사업을 통해서 국가별 안전체계를 공유하려고 노력하고 있다.

NEA가 지원하고 10개국이 참여하고 있는 MDEP은 신규 원전의 설계를 검토하게 될 국가별 규제기관이 자원과 지식을 최적으로 활용할 수 있는 국제적인 혁신방안을 개발하는 사업이다. 주요 목표는 기본적인 규제 관행과 규정을 수렴해서 규제기관간의 협력을 강화하고 인허가 과정에서 규제기관이 수행하는 설계검토의 효과성과 효율성을 향상시키는데 있다.

현재 새롭게 설계되는 원자로는 피동안전성 기능을 보유하여, 예상치 못한 사건의 경우에 인위적인 조작을 하지 않아도 원자로를 안전한 상태로 유지할 수 있다. 선진 기술이 도입된 중소형원자로는 아직 건설되지 않았지만 일체형 냉각계통, 즉 증기발생기, 가압기 및 펌프가 원자로 압력용기 내에 위치하여 냉각수 상실사고(LOCA)의 확률과 결과를 줄일 수 있도록 설계되고 있다.

나. 폐기물 처분과 시설해체

원자력 시설 운영에서 발생하는 저준위와 단수명 중준위 방사성폐기물은 양적으로는 가장 많지만 방사능 발생비율은 매우 적다. 이들 중/저준위 폐기물 처분기술은 잘 개발되어 있으며 원자력 발전 주요국들은 자체 처분시설을 운영하거나 좀 더 나은 기술을 개발 중이다.

그러나 현재까지 고준위 방사성폐기물의 처분을 위한 계획들이 지연되거나 실행되지 못하여 원자력의 이미지에 부정적인 영향을 주어 왔다. 특히 사용후핵연료와 재처리에서 발생하는 고준위폐기물이 아직까지는 처분된 경험이 없기 때문에 기술적으로 어렵거나 불가능하며 또한 폐기물관리와 시설해체 비용이 매우 비쌀 것이라는 인식을 주어 왔다.

1000 MWe급 경수로에서 연간 생산되는 사용후핵연료는 25톤 정도이지만, 재처리 될 경우 유리화된 고준위폐기물은 3톤으로 줄어든다. 세계적으로 사용후핵연료와 고준위폐기물의 궁극적인 관리 방안으로서 심층처분이 적합하다는 합의가 있다. 지금까지 사용후핵연료와 고준위폐기물 처분시설이 인/허가된 적은 없지만 국가 차원의 의사결정과정에서 처분시설 확보를 위한 상당한 진전이 이루어지고 있다. 미국에서는 부지가 선정되고 상당한 조사작업이 수행되었고, 핀란드에서는 선정된 부지가 정치적으로 그리고 해당지역의 지원을 받고 있으며, 스웨덴도 조만간 핀란드 수준에 도달하게 될 것이다. 프랑스, 일본, 영국 등 많은 다른 국가들도 사용후핵연료 처분부지를 모색하고 있다.

현재까지 다양한 원자력 시설들이 성공적으로 해체되어 왔다. 여기에는 100 MWe 이상이 되는 미국 원전의 해체와 수반되는 폐기물 처분도 포함되어 있다. 영국의 무역산업부(Department of Trade and Industry)의 분석에 따르면, 원전의 폐기물 관리와 해체비용은 원자력 발전 총비용의 3%에 불과하며 자금조달 방안은 마련되어 있다고 한다. 현재 세계적으로 원자력 시설 해체 업무의 70%는 민간 원전보다는 냉전시의 군사활동과 관련되어 있는 것으로 평가되고 있다.

다. 핵비확산과 방호

많은 일반 대중들은 전기생산 등 민수용으로 개발된 원자력 기술을 군사용으로 전환하는 것을 우려하고 있다. 핵비확산조약(NPT)하에서 국제원자력기구(IAEA)의 안전조치체계는 세계적으로 민수용 핵물질과 기술의 군사적 전용을 방지하는 데 큰 기여를 하여 왔다.

NPT는 1970년 발효되었고, 1995년 그 효력이 무기한 연장되었다. 현재 NPT 당사국은 191개국이며, 안전조치는 외교적, 정치적 그리고 경제적 수단으로 강화되며 민감기술의 수출통제로 보완되고 있다. NPT는 지난 40년간 핵무기확산을 저지하는 국제체제로서 법적인 기반을 갖추어 왔다. 그러나 미래에도 NPT가 지속적으로 성공하기 위해서는 다양한 정치적, 법적 변화 및 기술 발전으로 인한 위협에 대처할 수 있도록 강화되어야 한다.

재처리와 농축기술의 확산을 우려하여 IAEA는 핵연료주기의 핵확산저항성을 제고하기 위한 다자간 원자력 협력을 제안하였다. 그 목표는 가능한 여러 수단을 동원해서 농축과 재처리에 관한 기존의 상업적 체계를 보장하는 것이다. 국제적인 핵연료공급보장 이행, 현재 국가별로 관리되는 시설을 다국적 시설로

전환, 농축과 사용후핵연료 처분을 위한 새로운 다국적 시설 건설 등이 포함되어 있다. IAEA 제안 이외에 미국이 주도하는 '국제원자력파트너십(GNEP)'은 2008년 8월 현재 참가국이 21개국이며, 러시아는 '국제우라늄농축센터(IUEC)' 설립을 추진하고 있다. 또한 일본, 독일, 그리고 상용 농축시설을 가진 6개국의 제안들이 논의되고 있다.

국제적인 안전조치 체제가 핵확산을 저지하는 중요한 요소이지만, 기술적인 수단들이 안전조치 이행의 효율성을 더욱 높일 수 있다. 최근 개발중인 선진원자력기술은 핵확산위협에 대한 저항성이 강화되고 파괴적인 행위나 테러 위협에도 강력하게 대처할 수 있도록 설계되고 있다.

라. 비용과 자금조달

NEA와 IEA가 2005년 원자력, 석탄 그리고 가스발전의 균등화 발전원가를 국제적으로 비교한 결과에 따르면, 지역적인 상황에 따라 다소 차이는 있지만, 원자력은 석탄과 가스에 대해서 경쟁력이 있는 것으로 조사되었다.

최근 석유가격이 폭등하면서 다른 화석연료 가격도 크게 상승하였다. 신규원전의 건설과 운전은 최근의 상황을 고려할 시 분명히 자생력이 있는 것으로 평가된다. 민감도 분석을 해보면, 원자력 발전비용은 특히 순수건설비 (overnight cost)와 자본비용에 의해 좌우된다. 즉 초기단계의 대규모 비용이 투자를 저해하는 요인이 된다. 따라서 경제적인 측면에서 원자력의 당면과제는 발전비용 보다는 투자자금을 조달하는 데 있다.

원자력 발전비용은 발전소를 건설하는 데 필요한 자본비가 전체의 60%, 운전/유지비가 25% 그리고 핵연료주기비용이 15%를 차지한다. 우라늄 비용은 원자력 발전의 총비용에서 단지 5%를 차지한다. 이점은 연료비의 비중이 매우 높은 화석연료, 특히 가스 발전의 경우와 크게 다른 점이다.

전력도매시장의 경쟁도입은 현재 운전 중인 원자력발전의 상황을 고려할 때 불리하지는 않다. 경쟁압력은 운전성능 향상을 촉진하여 원전의 가치를 제고하여 왔으며 운전 중인 원전뿐만 아니라 신규 원전의 출력 증강, 수명 연장 및 이용률 증가 등을 통해서 경제성을 향상시킬 수 있다. 원자력 발전의 세계 평균 이용률은 지난 15년간 10%가 증가하여 83%를 기록하고 있다. 특히 2006년과 2007년에는 이용률 90% 이상을 기록한 국가가 각각 5개와 6개국에 이른다. 현재 많은 발전소의 출력이 증강되어 그중에는 20%까지 증가된 경우도 있으며 상

당수의 원자로 수명이 40년에서 60년으로 연장되었다.

신규 원전의 대규모 초기 자본비용과 장기간의 인허가 과정은 투자자들을 매우 신중하게 만들고 있다. 정부가 원전에 대한 투자를 장려하려면 인허가와 원전계획 그리고 폐기물 관리 및 시설해체와 관련된 투자위험을 줄이거나 경감시켜 주어야 한다. 또한 원자력 사업에 대한 광범위한 국가적 합의를 얻는 것은 투자자들에게 정치적인 위험을 줄여줄 수 있다.

아울러 정부는 탄소세와 거래에 관한 명확하고 장기적인 조치를 취할 필요가 있다. 대부분의 잠재적인 외부비용이 원자력 발전비용에는 이미 포함된 반면에 화석연료의 경우에는 외부비용이 포함되지 않았으며 그 규모는 거의 직접비와 비슷한 수준이다. 또한 전력회사의 발전수입에 대한 과세 방법이 발전기술의 상대적인 경쟁력에 영향을 미치면서 원자력이나 재생에너지와 같은 자본집약적인 시설들의 건설에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 따라서 정부는 에너지 정책 목표와 과세 제도가 조화를 이룰 수 있도록 해야 할 것이다.

마. 법 체제, 하부구조 및 자원

현행 국제법 체제는 일련의 법적인 구속을 가지는 조약 (treaties), 협약 (conventions), 협정 (agreements) 및 결의안 (resolutions)과 이를 뒷받침하는 수많은 비법률적인 규약 (codes), 지침 (guidelines), 기준 (standards)으로 구성되어 있다.

국가적이든지 국제적이든지 법 체제는 미래발전, 예를 들면 원자력 에너지 생산의 증가 등에 적용할 수 있도록 유연성을 갖추어야 한다. 가장 중요한 과제 중의 하나는 신규 원전사업을 추진하는 국가들이 국제적인 법 체제를 따르도록 하는 것이다. 이미 원전 체계를 구축하였으나 아직까지 국제 법체제를 따르지 않는 국가들도 마찬가지로 있다.

규제기관들은 국가법체제에서 매우 중요하며 법적인 권위와 기술적 역량 및 경영 능력 책임을 완수할 수 있는 인적, 재정적 자원 안전성과, 상충되는 부당한 영향이나 압력으로부터 독립되어 있어야 한다.

원자력 수요 증가에 대한 기대 속에서 이해당사자들은 대중의 참여에 대해 국내적으로도 보다 포괄적이고 분명한 제도를, 국제적으로는 보다 효과적인 체제를 요구할 수 있다. 정책수립 과정에 적합하도록 사회를 교육시키고, 권한을 부여하여 참여시키는 것과 함께 원자력의 미래에 대응하는 방향으로 더 좋은

지배구조를 개발하고 이행하는 것이 필요하다. 이를 위하여 정보투명성과 이해 당사자의 참여를 지원하는 법체제가 요구된다. 원자력 의사결정 과정에서 이해 당사자들의 권한이 법적인 절차에 의해서 증대되는 것이 필요할 수 있다. 원자력 의사결정 과정에서 이해당사자들의 참여를 증가시키는 것은 원자력과 환경 정책을 보다 효과적으로 강화시키고 대중의 신뢰를 증가시킬 수 있을 것이다.

많은 원자력 인력들은 1960년대와 1970년대 원자력의 급속한 성장기부터 일해 왔으며 이제 퇴직할 때가 되었거나 이미 원자력계를 은퇴하였다. 원전은 수명이 길고 또한 기술적 역량을 요구하기 때문에 이로 인하여 많은 국가의 원자력 산업계에는 기존의 원자력 기술과 역량을 유지하고 또한 향후 원전의 확장에 대비하는 기술개발에 어려움이 닥치고 있다.

인적자원의 가용성은 전력시장의 자유화에 따른 비용절감 압력과 원자력 연구개발에 대한 정부의 지원 감소에 영향을 받고 있다. 대부분의 국가들은 역량 있는 인적자원의 확보 필요성을 인식하고 있다. 최근 국제적으로, 지역적으로 그리고 국가적으로 보다 많은 학생들이 원자력계로 유입되도록 노력하고 있으나 아직 미흡한 실정이다.

원자력연구개발은 원자력기술의 안전성, 방사성폐기물 관리, 원자력 과학기술 개발에 필수적이다. 1990년대를 거치면서 대부분의 OECD 국가의 원자력 사업은 축소되었고 원자력 연구개발 자금도 줄어들었다. 각국의 국내 자원의 축소는 IAEA나 NEA같은 국제기구가 각국의 전문성과 자원을 모으는 역할을 수행하는 필요성을 증대시켰다. 이들 국제기구는 또한 원자력 지식보족을 위한 역할도 수행하고 있다.

바. 원자력과 사회

원자력 발전이 경쟁력이 있다고 하더라도, 대중들은 원전의 운전 자체보다는 방사성폐기물, 테러 및 핵확산 등 원자력을 둘러싼 현안들에 더욱 관심을 가지고 있다. 만일 폐기물 처분 문제가 해결된다면 원자력에 대한 반대는 크게 줄어들 것이다.

최근 조사에 의하면 유럽연합(EU) 시민들의 절반이상이 원자력의 위험이 장점을 능가한다고 생각하는 것으로 조사되었다. 특히 비원전국가, 원전에 대한 경험이 없는 경우, 또는 관련정보를 제대로 제공받지 못한다고 느낄수록 이러한 경향을 보인 것으로 나타났다. 이와 반대로 원자력에 대한 지식이 많을수록 원

자력에 대한 지지가 높았으나 대부분의 시민들은 원자력 정보가 불충분하다고 느낀다고 응답하였다.

원자력 정보에 있어 과학자들과 비정부기구들이(NGOs) 제공하는 정보가 가장 신뢰를 받고 있다. 국가의 정부, 에너지 회사뿐만 아니라 규제당국도 일반 대중으로부터 낮은 신뢰를 받고 있다. 원자력이 확대되려면, 관련 지식의 축적과 대중의 참여가 증대될 수 있도록 정책 입안자, 산업계 그리고 일반 사회간의 지속적인 관계 개선이 중요하다. 시민들에게 원자력 현안을 이해시킬 때, 직접참여를 통한 심층적 이해방식이 매우 효과적인 것으로 나타났으며 원자력의 위험에 대한 정보제공도 필요하지만 균형된 정보를 제공하여 대중의 신뢰를 구축하는 것 또한 중요하다고 드러났다. 따라서 이해당사자 및 대중과의 의사소통 과정은 투명하고 솔직해야 하며 에너지 안보와 금융 부담과 같은 상충되는 요구에 대해 우선적으로 접근해야 할 것이다.



제 2 절 중소형 원자로 개발 현황

중소형원자로는 현재 운전 중인 대형 상용원자로에 비해 용량이 적은 원자로를 의미한다. 국제원자력기구(IAEA)는 전기출력 15만kW 이하를 초소형로, 15~30만kW를 소형로, 30~70만kW를 중형로, 70만kW 이상을 대형로라고 각각 정의하고 있다²¹⁾.

중소형원자로는 초기투자 비용이 적고 경제의 발전단계에 따라 증설할 수 있어 전력 인프라가 정비되지 않은 개발도상국에서도 도입이 가능하며 전력 이외의 다양한 용도로 이용할 수 있다. 이 외에 중소형원자로는 대형로와 비교하여 구조가 단순하고 부품 개수가 적어 시스템 전체에 대한 품질관리가 용이하며 특별한 안전장치의 도움이 없어도 냉각이 가능한²²⁾ 구조상의 안전성 향상이라는 이점을 갖고 있다. 또한 중소형원자로는 대도시 근교에 건설이 가능하여 송전에 드는 막대한 비용을 감소시킬 수 있고 비상 정지 시에도 전체 전력 시스템에 미치는 영향이 적어 전력시스템 자체에 유연성을 가지도록 할 수 있다.

현재 세계적으로 안전성 및 경제성 제고에 중점을 둔 60여기의 중소형 원자로 개발이 원자력 선진국을 중심으로 활발하게 이루어지고 있다²³⁾. 개발 목적은 중소규모 전력생산, 지역난방, 해수담수화와 전력생산을 동시에 병행하는 열병합발전, 선박 추진동력원 등 매우 다양하며, 이들 대부분은 안전성이 획기적으로 제고될 수 있는 피동안전 개념의 일체형 원자로 형태이다. 특히 2000년대에 들어와 이와 같은 높은 안전성과 넓은 활용범위를 가진 다목적 중소형 원자로의 활용과 시장형성 전망이 밝아짐에 따라 원자력 선진국들은 경쟁적으로 개발에 착수하고 있다.

1. 국가별 개발 현황

가. 미국

21) Design and development status of small and medium reactor system 1995, IAEA

22) 현재의 대형 상용로에는 비상냉각을 위해 ECCS라는 시스템이 있음.

23) Status of Small Reactor Designs without On-site Refueling, TECDOG 1536, 2007, IAEA

미국은 최근 에너지공급 중시의 새로운 에너지 정책을 발표하고 원자력의 역할, 이용개발의 활성화를 통한 에너지안보의 대응력 강화를 시도하고 있으며 핵확산 저항성 원자로 개발의 의지를 천명하였다. 이에 따른 원자력 이용개발의 활성화 방안으로 전기출력 10~300 MWe 범위에 대한 중소형혁신원자로(3세대+) 및 제4세대원자로 노형의 본격적인 개발에 착수하였다. 미국의 중소형원자로 개발 현황을 보면 웨스팅하우스사를 중심으로 IRIS(International Reactor Innovative and Secure, 가압경수로)가 개발 중이고, 국립연구소인 LLNL(Lawrence Livermore National Lab), ANL(Argonne National Lab), LANL(Los Alamos National Lab)가 공동으로 SSTAR(Small, Sealed, Transportable, Autonomous Reactor, 액체금속속로)를 개발 중이다. 또한 제4세대 원자로개념으로 설계된 STAR(Secure Transportable Autonomous Reactor, 액체금속속로)가 ANL, 텍사스 A&M, GE를 중심으로 연구되고 있다. STAR는 수소생산용인 STAR-H₂, 전기생산용인 STAR-LM을 포함하고 있다. 다른 나라에 비해 개발착수가 다소 늦지만 원자로 기술에 있어 최고의 기술 보유국인 미국이 방대하게 축적된 기술 능력 및 경험을 적극적으로 활용할 경우, 세계적인 경쟁이 더욱 치열할 것으로 예상되는 중소형 원자로 개발에 선두 역할을 차지할 것으로 예상된다.

나. 일본

일본은 순수 발전 목적의 중형급 원자로 이외에 선박추진동력원으로 출력 범위 100/200/300 MWt급의 일체형 원자로인 MRX와 심해탐사정 동력원으로 150 kWe급 DRX의 개발을 일본원자력연구소(현 JAEA)가 집중적으로 추진하여 현재 기술검증을 수행함으로써 개발을 완료한 상태이다. 또한 산업계를 중심으로 다양한 용량의 신개념 중소형원자로 기술개발이 적극적으로 추진되고 있으며, 대표적인 일례로 '4S로(도시바, 전력중앙연구소)'를 들 수 있다. 이 원자로는 일본의 도시바와 전력중앙연구소가 1988년부터 개발해왔으며, 2016~2017년경에 첫 호기를 운전할 계획이다. '4S로'는 현재 미국 알래스카주 갈리나市가 디젤발전설비를 대체할 전원으로서 유치를 검토하고 있다. 또한, 일본 원자력연구소(현 JAEA)는 도심 지하에 건설하여 냉난방, 온수공급 등을 목적으로 하는 열출력 100 MWt인 피동형 일체형 원자로인 PSRD를 개발하고 있으며, 해안 지역에 건설하여 전력을 공급하는 방안도 연구 중에 있다. 미국과 거의 대등한 기술 보유국으로 알려지고 있는 일본은 방대한 연구자원의 집중적인 활용과 산학연의 협력으로 중소형원자로 개발에 가장 적극적인 노력을 기울이고 있어 향후

중소형 원자로 시장의 주도적 역할을 담당할 것으로 전망된다.

다. 러시아

러시아는 중소형원자로 개발과 이의 활용에 가장 적극적인 국가이며, 지형적 특성으로 인해 중소규모 지역난방 및 전력생산용 원자로 개발이 특징적인 것으로 주목받고 있다. 최근에는 신기술이 접목된 지역난방용 500 MWt의 일체형원자로인 AST-500이 건설 재개 예정이며, 유사 출력 규모의 원자로 개발이 매우 적극적으로 추진되고 있다. 한편, 쇠빙선의 추진동력 제공, 냉난방, 해수담수화를 통한 식수 및 용수 공급용의 KLT-40S 원자로는 현재까지 수십 년간의 운전 실적을 보유하고 있으며, 최근에는 동 원자로를 바지선에 선적하여 전력생산 및 해수담수화를 하기 위한 플랜트 개발을 캐나다와 공동으로 추진하고 있다. 대부분 서방세계에 그 정보가 널리 알려져 있지 않지만 러시아는 중소형일체형원자로 기술에 있어 세계적으로 독보적인 수준에 있는 것으로 알려지고 있다.

라. 중국

중국은 원자력기술의 자립화에 매우 큰 노력을 기울이고 있는 국가이다. 발전용 원자로의 독자설계, 건설, 수출뿐만 아니라 연구용 원자로, 지역난방용 원자로를 독자기술로 개발하고 있으며 기술수준도 건설, 운영 등 일부분야를 제외하고 상당히 높은 수준에 있는 것으로 평가된다. 일찍 독일과 협력하여 지역난방용 일체형원자로인 NHR(Nuclear Heat Reactor)-5를 개발, 건설하여 3년간에 걸친 실증시험을 성공적으로 마무리한 바 있다. 이러한 기술 수준을 바탕으로 용량이 격상된 200 MWt급 지역난방용 NHR-200을 개발 완료하여 건설 준비 중에 있다. NHR 원자로는 지역난방뿐만 아니라 해수담수화 에너지원으로도 활용될 예정이다. NHR 기술의 우수성은 외국에서도 인정되어 90년대 후반 모로코와 NHR-10을 개발하고 이를 8,000 톤/일 담수생산에 활용하는 플랜트 건설 타당성 연구를 공동으로 수행한 바 있다. 이외에도 칭화대학교를 중심으로 고온가스냉각로를 개발하고 있다. 현재 칭화대학교 원자력 및 신에너지기술연구소(INEET)를 중심으로 HTR-PM(High temperature reactor pebble bed module)을 개발하고 있으며 2010년까지 건설할 예정이다. HTR-PM 원자로는 수소생산용 고온 가스로 높은 안전성과 높은 발전효율의 특성과 더불어 고온에서 열공급이 가능한 선진적인 원자로로 인정받고 있다.

마. 아르헨티나

아르헨티나의 CNEA(원자력에너지개발기구)와 INVAP. Co.은 공동으로 자국의 독자 기술을 이용하여 27 MWe급 일체형원자로 CAREM에 대한 기본설계와 주요한 열수력 검증시험, 기기의 기계적 성능시험 등을 완료하고 건설을 계획하고 있다. 또한 최근 용량증강에 대한 타당성 조사를 마치고 150~300 MWe로 용량증강을 계획 중이다. 이 원자로 개발에 아르헨티나는 15년간 약 3천만 USD를 투자하였으며 CAREM을 기본 모형으로 하여 향후 15~20년 동안 4기의 원자로를 수출하겠다는 목표를 가지고 있다. 동 원자로는 소규모 전력생산, 해수담수화 에너지원, 산업용 열생산 등에 사용될 수 있는 원자로이다.

2. 주요 중소형 원자로

가. IRIS

소형 일체형 원자로인 IRIS(International Reactor Innovative and Secure)는 웨스팅하우스사가 주도하여 개발 중인 100~300MWe급 가압경수로이다. IRIS는 기존의 가압경수로보다 구조를 단순화시키고 초장주기 설계, 핵확산 저항성 제고, 경제성을 획기적으로 향상시켜 발전단가를 3 cents/kWh 이하, 피동안전개념 도입, 모듈개념 확장 및 폐기물 생성량 최소화 등을 목표로 하고 있다. 핵연료는 기존의 상용로보다 좀 더 농축된 5~9% 농축 산화 우라늄 연료를 사용한다.²⁴⁾

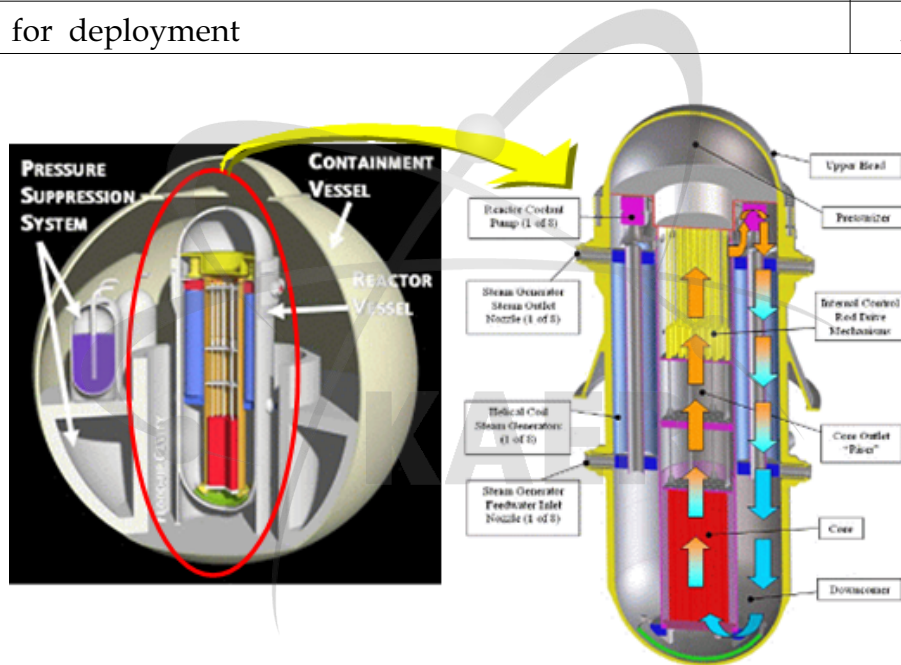
나. 4S

‘4S(Super Safe, Small and Simple reactor)로’는 1988년부터 일본의 도시바와 전력중앙연구소가 공동으로 개발해 온 1만kWe급 소듐냉각고속로이다. 규제당국의 인허가 신청업무와 원자로 설계 및 영업은 도시바가 맡고 있으며 전력중앙연구소는 안전에 대한 기술개발을 담당하고 있다. ‘4S로’는 연료 교환 없이 30년간 장기 운전이 가능하며 제조공장에서 미리 조립하여 해상으로 수송하기 때문에 건설 공기도 크게 단축시키는 이점이 있다.

24) "Here's looking at IRIS" Nuclear Engineering International, 2006.3, p.12~17.

<표 2-6> IRIS 개발 일정

IRIS project milestones	
Project started	1999.10
Assessed key technical and economic feasibilities	2000년 말
Performed conceptual design, preliminary cost estimate	2001년 말
Initiated NRC pre-application licensing for design certification	2002년 말
Completed NSSS preliminary design	2005년 중순
Initiate necessary testing for NRC design certification	2006년 봄
Complete above testing	2008년 중순
Obtain final design approval from NRC	2012
Ready for deployment	2015-2017



<그림 2-3> IRIS 원자로 상세 개념도

또한 연료 교환 및 유지보수를 하지 않고 30년 운전이 가능하기 때문에 종래의 대규모 송전계통과 분리된 독립형 전원으로서 송전선망이 불충분한 도시에서 멀리 떨어진 벽지나 낙도 등에서 수요가 있을 것으로 전망된다. 발전용도와 더불어 증기발생기에서 만들어지는 증기를 난방용으로 사용하거나 해수를 끓여서 담수를 만드는 '해수담수화 플랜트' 또는 수소 제조장치에 전원으로서의 수요가 전망된다.

'4S로'는 현재 미국 알래스카주 갈리나市가 디젤발전설비를 대체할 전원으로
로서 유치를 검토하고 있다. 또한 중동지역에서는 "해수를 담수화하는 플랜트
와 조합시킨 사례가 있다"고 호평했다. 그리고 러시아, 중국, 필리핀에서도 수
요가 있을 것으로 전망된다. 도시바는 미국 판매를 위해 NRC로부터 원자로 설
계승인(DA)을 취득하기 위한 신청을 했다. 2007년 10월에 예비심사가 시작되었
는데 본 심사는 2009년 2~4월경에 시작될 전망이다. 도시바와 전력중앙연구소
는 NRC로부터 '4S로'의 사전심사와 최종설계승인 그리고 표준설계인증을 취득
하게 되면 2016~2017년경에 첫 호기를 운전할 방침이다. 건설비용은 수요가
증가하여 양산화되면 "1kW당 단가는 대형 원자로와 비슷하게 1300~1500달러
까지 내릴 수 있다"(도시바 원자력기술부)고 전망했다.

'4S로'의 기술적 특이성은 아래와 같다. 우선 '4S로'는 냉각재로 소듐을 사
용한다. '4S로'는 고속로이기 때문에 연료 냉각에 중성자를 감속시키지 않는 성
질을 가진 나트륨 사용 순환구조를 채택했다. 원자로 내(1차계)의 냉각재만이
아니고 1차계 배관과 열교환 증기발생기에 열을 전하는 2차계 배관 내에도 나
트륨이 흐른다. 2차계 나트륨이 증기발생기의 전열관에 열을 전하면 그 속을
흐르는 냉각수가 증기로 되어 증기터빈을 돌리는 구조이다. 출력이 작기 때문
에 동력을 적극 억제시키는 기술을 적용했다. 그 대표적인 기술이 '전자펌프'이
다. 펌프배관 주위에 전자석을 부착하여 전기를 흐르게 하여 자계를 발생시키
면 전자력에 의해 액체나트륨을 흐르게 하는 구조이다. 전자펌프는 일반적인
기계식 펌프 구동방식에 비해 펌프를 회전시키는 전동기와 누수를 막는 실
(seal) 그리고 윤활유 등이 필요 없다. 기계가 구동하는 부분이 없기 때문에 고
장확률을 또한 훨씬 적다.

핵연료에 있어 '4S로'는 금속연료 (Steel-clad metal-alloy fuel)을 사용한다.
일반 경수로에는 산화물연료를 사용하지만 '4S로'에는 우라늄과 지르코늄
(zirconium)을 혼합시킨 금속연료를 사용한다. 이 금속연료를 높이 2.5m, 직경
0.9m의 노심에 가득 채워 넣는다. 이 상태에서 고속으로 움직이는 중성자가 핵
연료에 부딪히지 못하게 페라이트(ferrite)동제(銅製)를 반사체로서 노심을 둘러
싼다. 고속중성자가 반사체에 부딪혀 튀어 올라 반대쪽의 반사체에 부딪히는
반응을 반복하게 하면 노내의 중성자 밀도가 높아진다.

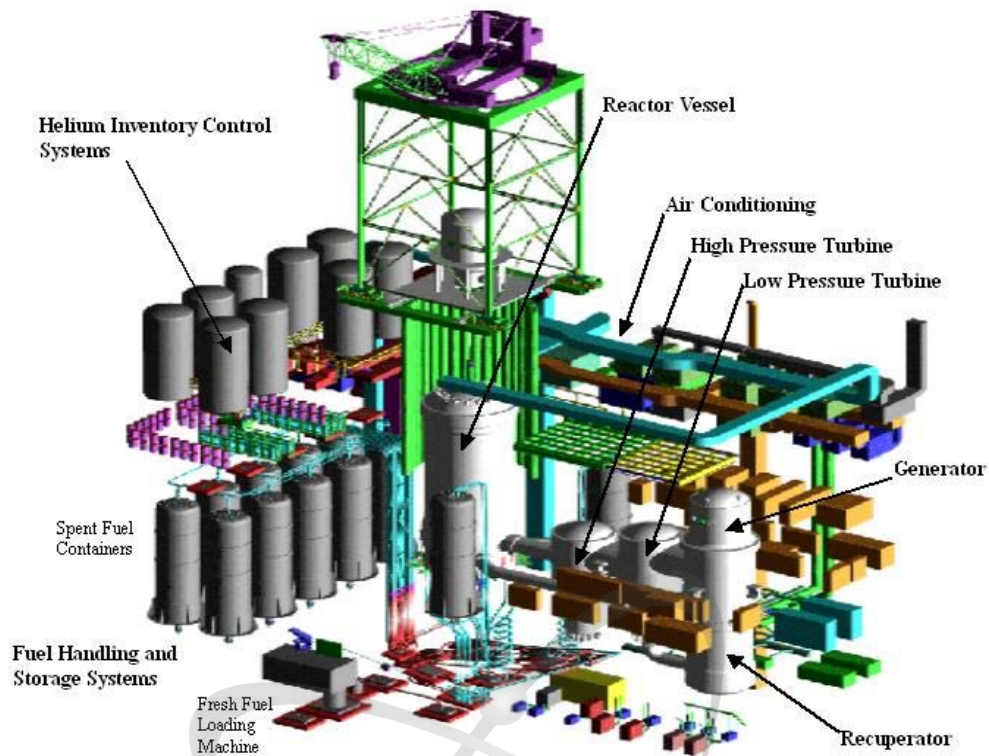
'4S로'의 구조상의 가장 큰 특징은 반사체를 사용하여 핵분열을 조정하는
점이다. '4S로'는 핵분열이 쉽게 일어나기 쉽게 하기 위해 제어봉 대신 반사체

를 이용하여 핵분열을 조정하는 특징이 있다. 반사체는 상하로 이동하기 때문에 반사체를 빼내면 임계가 멈추고 반사체를 삽입하여 노심(爐心)을 둘러싸면 해당 부분만 핵분열이 연속적으로 일어난다. 즉 원자로의 길이 방향을 따라 반사판을 서서히 움직임으로써 양초가 타는 것처럼 핵연료를 순차적으로 태울 수 있다. 다만 운전 중에 반사체를 상하로 움직여 노심을 제어하지 못하는 단점이 있다. 노심의 하부에서 서서히 반사체를 삽입하여 모든 반사체가 삽입이 끝나면 운전 개시 후 30년이 경과한다는 것이 설계상의 생각이다.

이외에 '4S로'는 소형이기 때문에 원자로건물을 땅속에 묻을 수 있어 항공기 테러에도 안전할 수 있다. 또한 제조공장에서 대충 조립해 모듈화하여 선박으로 해상 수송하여 현장에서 조립 및 시운전까지 할 수 있기 때문에 건설 공기를 12개월 정도로 일반 원전에 비해 대폭 단축시킬 수 있다. 안전 면에서는 원자로용기를 포함해 안전용기 전체를 자연 통풍으로 생각하는 구조를 채택하고 있어 냉각재가 새어 나올 염려도 없으며 노심용융도 방지할 수 있다.

다. PBMR

PBMR(Pebble Bed Modular Reactor)은 1993년부터 남아공이 적극적으로 개발을 주도하고 있는 차세대 중소형 원자로로 구상(球狀)연료를 채택하고 냉각재로 헬륨가스를 사용하는 고온가스냉각로이다. 현재 남아공화국 국영전력공사인 'ESKOM'이 중심이 되어 개발을 진행 중이며, ESKOM은 국내외로부터 출자를 받아 실질적인 개발 자회사로서 PBMR사를 1999년 설립하였으며 여기에는 도시바 산하의 웨스팅하우스도 자본투자에 참여하고 있다. PBMR은 분산전원으로서의 유연성과 높은 안전성 그리고 사용후연료에 관한 재처리도 할 수 없기 때문에 핵확산저항성이 우수하여 세계 주요 국가들로부터 차세대 원자로로 주목받고 있다. 최근 PBMR 원자로의 설계/기자재 구매/건설관리 서비스의 준비를 위한 계약이 체결되었다. 이 계약에는 프레토리아 인근 펠린다바에 폐불연료공장 및 케이프타운 인근 퀴버그(남아공의 유일한 기존 원자력발전소 부지)에 상업 규모의 실증로를 2010년부터 2014년에 완공하는 것이 포함되어 있다. 아직까지 실증 유니트의 인허가 및 환경영향평가 절차 등이 완료되어 있지는 않지만 성공적으로 실증이 입증되면 남아공에 30기의 유니트가 건설되고 그 후 이 기술은 해외 및 아프리카 대륙의 다른 곳에 배치될 계획이다.



<그림 2-4> PBMR 원자로와 주변구조물

PBMR의 기술 원조는 독일에 있다. 구 아세아 브라운 보베리(ABB)사와 구 지멘스사 등이 구상(球狀)을 의미하는 '페블'형 연료를 사용한 원형로 'THTR-300'을 건설한 실적이 있다. 독일에서는 발전(發展)하지 못했지만 이 기술에 관심을 가진 원자로메이커와 남아공이 다시 실용화시키기 위해 PBMR을 개발하기로 한 것이다. 사용하는 구상 피복입자연료는 카본(carbon)과 세라믹스(ceramics)의 다층(多層)구조를 채택했다. 핵연료를 코어(core)부분에 싸서 넣는 형식으로 다공질과 고밀도인 카본을 세라믹스에 겹쳐쌓아 가공한다. 이 입자는 직경이 1 mm 정도이지만 여기에서 대량의 입자를 직경 6 cm 정도 볼(ball) 모양으로 형성시킨다. 이것이 경수로에서의 연료집합체와 상응한 것인데 노심에서는 이 구상연료를 흑연블록에 끼워 넣는 형식을 취한다. 피복입자에 의한 연료의 이점은 핵분열생성물(Fission Product)을 밀폐시키는 능력이 높다고 알려져 있다. 이론적으로 노심 용융의 우려가 없기 때문에 경수로의 격납용기처럼 노심을 외부와 격리시키는 설비가 필요 없다. 이 때문에 안전성과 함께 설비의 간소화를 도모할 수 있어 건설비 절감이 가능하다.

PBMR은 고온가스로와 동일하게 핵·화학적으로 안정한 헬륨가스를 냉각재로 사용한다. 가스의 취급기술을 고도화할 필요성이 남아 있지만 헬륨가스는 방사(放射)화하지 않기 때문에 안전 면에서도 우수하다. 더욱이 원자로 내의 고온상태로 된 헬륨가스는 경수로와는 달리 그대로 가스터빈으로 보내어 발전(發電)이 가능하다. 원자로 출구온도는 약 900°C를 상정하고 있으며 고온에너지를 도출할 수 있다. 전기출력은 16만5천kW로서 소규모이지만 전력량의 필요에 따라 8기 정도까지 동일 사이트에 설치하는 것도 검토되고 있다.

라. HTR-PM

중국의 HTR(High temperature reactor) 원자로는 높은 안전성과 높은 발전효율의 특성과 더불어 고온에서 열공급이 가능한 선진적인 원자력 반응로로서 제4세대 원자력시스템의 참조 시스템 중의 하나일 뿐만 아니라 2020년 전에 상용화가 가능한 원자력시스템으로 평가 받고 있다. 최근 칭화대학교 INEET는 세계 최초로 HTR 모듈화에 성공했다.

현재 중국은 HTR-PM(pebble bed Module)의 실증로로 HTR-10을 운영하고 있다. HTR-10 프로젝트는 “HTR가스터빈 발전시스템(1기 공정)”, “HTR헬륨 터빈 발전시스템(2기 공정)” 등 두 단계로 나뉘어 추진되고 있다. HTR-10 프로젝트 1기 공정은 1992년에 중국의 “국가 863계획” 과제로 입안되었으며 1995년에 착공되었으며 2000년 12월 최초 임계치에 도달(반응로 열출력 10 MWth)하였다. 1기 공정은 2003년 1월에 풀가동 운영에 성공하였다.

“고유 안전성”과 고 효율성을 구비한 HTR 시스템은 고온열을 이용한 수소 제조 분야에서 중요한 역할을 한다. 중국은 “HTR 헬륨 가스터빈 발전시스템” 과제를 실행하는 한편 열출력 450 MW, 전기출력 195 MW의 모듈화 HTR-PM 방안설계를 완료했다. 중국은 HTR-PM으로 대용량 HTR 기술의 성숙도와 경제효과성을 검증할 예정이다. 향후 헬륨 가스터빈기술이 성숙된 후 HTR-PM 반응로는 헬륨 가스터빈과 직접 연결되어 발전효율을 크게 높일 수 있으며, 원자력 고온가스분해를 통해 수소 제조가 가능할 것으로 예측된다. 2004년 3월 중국화능그룹, 중국핵공업건설그룹과 칭화대는 HTR 산업화를 공동추진하기 위한 양해각서(MOU)를 작성, 2010년에 20만 kW급 HTR-PM 시범발전소를 건설하기로 합의했다. 또한 중국 원자력연구원은 HTR-PM 표준설계작업을 병행 추진, 향후 2년 내에 HTR-PM 설계초안과 안전성 분석보고서 초안을 작성하여 주관

부처에 제출할 계획이다.

HTR-10 헬륨기체 직접순환 발전장치는 세계 최초로 모듈화 HTR과 가스터빈 직접순환시스템 간의 연동을 실현한 실험 장치이다. 이 시스템의 열에너지 순환회로는 1개뿐이지만 발전효율이 비교적 높다. 상업용 원자로의 발전효율은 47%까지 가능한데다가 모듈식 고온 원자로의 고유안전성 특징까지 갖고 있다. HTR-10은 에너지 전환 단위(Cell) 열에너지순환 방안 최적화, 헬륨가스터빈 가압기체 유닛 기술난제 해결, 전자기 베어링 기술난제 해결, 수직 작업 상태에서의 윤활유 패키징 작업압력 변환상태에서의 주요소 급유를 포함한 2가지 헬륨기체 수직형 고속 기어감속기 기술난제 등의 핵심기술 분야에서 중요한 기술적 진전을 이루었다. 현재 상당수 국가들이 많은 인력과 재원을 들여 해당 시스템의 연구개발을 추진하고 있지만 다수가 연구/설계 단계에 머물러 있으며, 중국의 HTR-10 프로젝트만이 순조롭게 실험단계에 진입하였다.



제 3 절 미래원자력시스템 개발 및 국제공동연구 추진 현황

21세기에 들어 세계는 신흥공업국들의 급격한 성장으로 다원화의 경향을 보이고 있으며, 이전의 선진국 중심에서 신흥공업국과 개발도상국 쪽으로 경제 활동의 비중이 이동하고 있다. 아울러 생산 활동에 요구되는 원자재와 에너지의 부족에 대한 예측과 이에 따른 가격 상승의 우려가 심화되고 있다. 또한 기후변화 협약의 발효 등을 계기로 산업전반의 환경에 대한 영향의 중요성이 증가되고 있으며 지구온난화의 방지를 위하여 배출되는 온실가스의 가장 많은 부분을 차지하고 있는 에너지 분야에도 에너지원의 구성에 있어 정책적 고려의 대한 필요성이 증대되고 있다.

국제적으로 증가하고 있는 에너지 수요를 충족하기 위한 에너지의 공급과 온실가스 배출 저감의 관점에서 안정적이고 환경·친화적 에너지원인 원자력의 역할이 부각되고 있으며, 이와 동시에 국제적으로 해묵은 원자력의 이슈로 다루어지고 있는 안전성, 폐기물관리 및 핵확산의 위험 등을 기술적으로 해결할 새로운 미래형 원자력시스템 개발을 위한 세계 원자력계의 공동 노력이 이루어지고 있다.

본 절에서는 이러한 노력인 제4세대 원자력시스템 국제포럼 (Generation IV International Forum; GIF)과 국제 원자력에너지 파트너십 (Global Nuclear Energy Partnership; GNEP)의 추진 동향에 대하여 조사하고 우리나라의 국제 원자력 공동연구 참여방안에 대한 정책적 제언을 수록하였다.

1. 제4세대 원자력시스템 국제공동연구 추진 현황

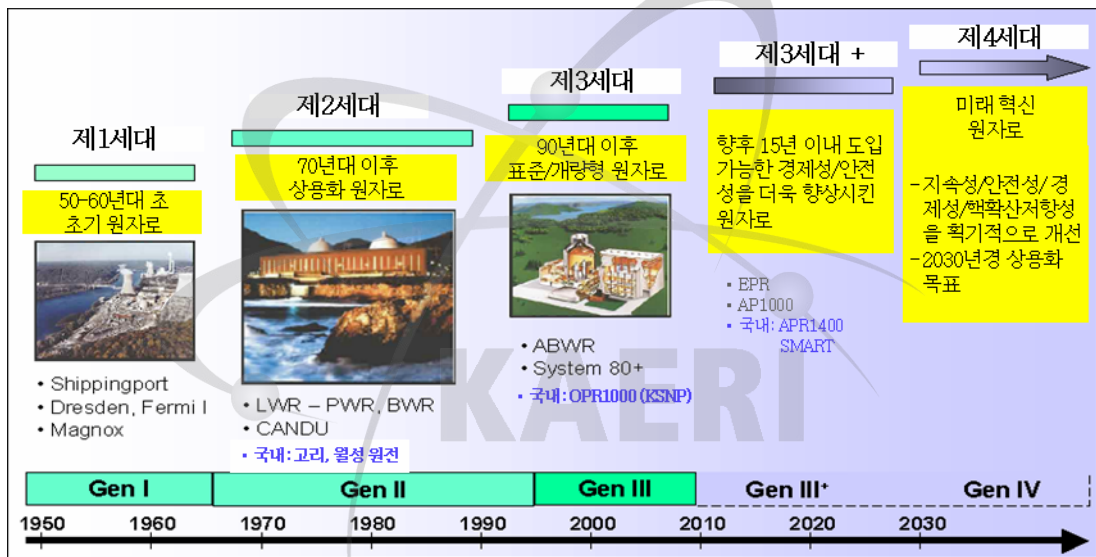
가. 제4세대 원자력시스템

Gen-IV로 불리는 제4세대원자력시스템(Generation IV Nuclear Energy System)은 미래에너지 수요의 충족과 국민 수용성 확보를 위하여 미국을 중심으로 한 원자력선진국이 개발을 추진 중인 차세대 원자력시스템이다.

원자력시스템의 세대 구분은 1950년대 초창기에 원자력으로부터 전력을 생산하기 시작했던 제1세대, 이후 1960년대 후반 이후 1970년대까지 건설되어 현재 전 세계적으로 운전 중인 대부분의 원전으로 우리나라의 초기 원전에 해당

하는 제2세대, 그리고 1980년대 이후 시작되어 1990년대 건설된 성능 향상과 표준화를 이룬 한국형 표준 원전 등의 3세대로 구분된다. 3세대 원전에서 신안전 개념의 도입과 용량의 격상으로 경제성이 향상된 개량형 원전을 제3세대 플러스(Gen III+)라 하며 최근 주요 원전 국가에서 건설중이거나 도입이 계획되어 있다.

제4세대 원자력시스템은 경수로로 대표되는 현재의 3세대 원자로와 비교하여 혁신적인 개념을 도입하여 에너지자원을 최적으로 활용할 수 있고, 가장 경쟁력 있는 가격으로 에너지를 공급할 수 있으며, 안전성과 폐기물관리 및 핵확산저항성이 충분히 확보될 수 있는 시스템을 목표로 하고 있다. <그림 2-5>은 원자력시스템의 세대구분을 나타내고 있다.



<그림 2-5> 원자력시스템의 세대 구분25)

제4세대 원자력시스템 국제포럼(Generation IV International Forum; GIF)은 새로운 개념의 차세대원자력시스템 개발을 위하여 조직된 국제협력체로, 2000년 1월, 미국을 중심으로 원자력활동이 활발한 주요 9개국이 제4세대원자력시스템 개발에 대한 공동성명을 발표하고 결성하였다. 2001년 7월, 9개 회원국은 Gen-IV 연구개발을 위한 국제협력체로서의 역할과 운영 규정을 담은 헌장(Charter)에 서명하여 GIF가 공식 발족되었다. 당초 한국, 미국, 프랑스, 일본,

25) 제4세대 원자력시스템 개발 국제동향조사/분석 연구, KISTEP, 2004

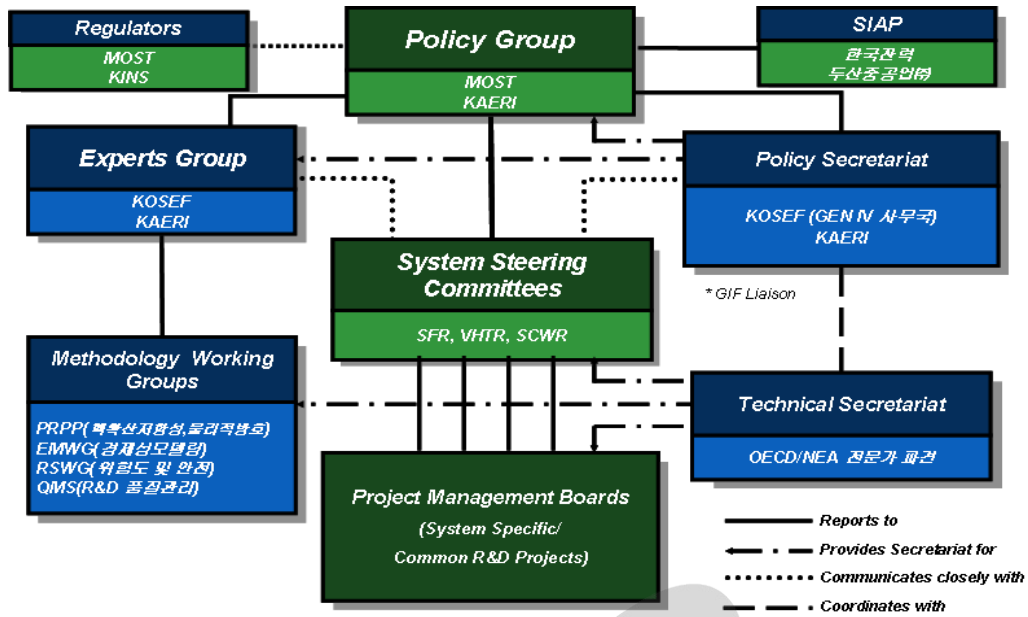
영국, 캐나다, 아르헨티나, 브라질, 남아프리카공화국의 9개국으로 출발한 GIF는 2002년 스위스가, 2003년 유럽연합(EU)이 가입하였으며, 2006년 중국과 러시아가 참여하여 현재 13개 회원국으로 운영되고 있다.

GIF의 운영, R&D 추진체제 및 우리나라의 참여기관은 <그림 2-6>와 같다. Gen-IV 개발에 대한 정책의 결정은 GIF 정책그룹(Policy Group)이 하며, 기술적인 분야는 전문가그룹(Expert Group)이 책임을 지도록 하고 있다. 두 그룹을 보좌하는 GIF 정책사무국(Policy Secretariat)은 현재 GIF를 주도한 미국에서 담당하고 있으며, 기술국장(Technical Director)과 정책국장(Policy Director)을 두고 있다. 정책사무국의 기술국장은 GIF의 기술적 사항을 종합하며, 전문가그룹 의장을 겸직하고 있다.

Gen-IV 시스템 개발의 실질적인 연구개발 수행과 관리는 시스템운영위원회(System Steering Committee; SSC)와 프로젝트관리위원회(Project Management Board; PMB)가 기술사무국(Technical Secretariat)의 도움을 받아 담당하며, OECD/NEA는 국제공동연구 추진 및 관리 경험을 활용하여 기술사무국으로서 운영위원회와 프로젝트관리위원회를 지원하는 역할을 담당하고 있다. 또한 2003년도에는 산업계의 관점에서 향후 Gen-IV의 도입까지의 과정에서 고려 사항 등의 필요성에서 국제원자력산업계와의 합동회의를 추진하기로 하고, 산업계 자문 패널(Senior Industry Advisory Panel; SIAP)을 구성하여 Gen-IV의 실증과 상용화 단계에 대비한 조언을 받고 있다.

우리나라는 정책그룹에 과학기술부 원자력국장, 전문가그룹에 한국과학재단의 원자력단장이 대표로 참여하고 있으며 각 그룹에 한국원자력연구원의 전문가 각 1인이 함께 참여하고 있다. 실제적 기술개발을 수행할 시스템운영위원회와 프로젝트관리위원회는 해당 연구 분야의 전문가가 참여하여 공동연구 협의에 참여하고 있다.

2006년에는 GIF의 추진체제에 변화가 있었다. GIF의 출범시부터 의장직을 수행해 온 미국에 이어서 프랑스가 제2기 의장국이 되었으며, 이후 회원국의 순환을 고려하기로 한 것이다. 2006년 7월 정책그룹회의에서 2기 의장으로 현 의장국인 미국의 추천을 받아 프랑스의 J. Bouchard(CEA)가 선출되었으며, 2006년 11월 프랑스 정책그룹회의부터 의장직을 수행하였다. 부의장국은 일본과 미국이 수행하고 있으며 차기 의장은 일본이 담당하기로 하였다. 또한 GIF는 부의장국 수와 역할의 확대를 추진하고 있다.



<그림 2-6> GIF 체제 및 국내 참여기관

나. GIF 추진 현황

2000년 1월 출범한 GIF는 2002년 7월, 전 세계적으로 공모한 100여개의 미래형 원자로 후보 중에서 지속가능한 자원의 활용성, 경제성, 안전성과 핵확산 저항성을 선정기준으로 하여 6개의 가장 유망한 Gen-IV 개념을 선정하였다. 선정된 Gen-IV 시스템은 아래의 <표 2-7>과 같으며, 선정 당시의 시스템 특성 부분에 공동연구를 추진하며 회원국의 기술 및 수요 등을 반영되었다.

또한 2002년 12월, 회원국의 전문가들이 참여하여 Gen-IV 시스템의 국제공동연구개발을 위한 「Gen-IV 기술로드맵(Gen-IV Technology Roadmap)」을 완성하였다. 기술지도는 6개 Gen-IV 시스템별로 중점적으로 추진하여야 하는 연구개발 추진 내용·일정과 추정된 소요 비용을 담고 있다. 현재는 Gen-IV 기술지도를 바탕으로 회원국이 공동으로 시스템별 세부 연구개발계획을 담은 프로젝트 계획을 작성하여 이를 바탕으로 공동연구를 추진하고 있으며, 현재까지의 진행 상황을 반영하여 기술로드맵을 보완할 예정이다. 새로 발간될 수정보고서는 GIF에서의 공동연구와 향후 연구개발 계획에 대한 내용으로 구성되며 기술보고서와는 별도의 보고서로 하여 “Gen-IV R&D Outlook”으로 발간할 예정이다.

<표 2-7> GIF 선정 제4세대 원자력시스템

System	Neutrons spectrum	Coolant	Temp. °C	Fuel cycle	Size (MWe)
VHTR (Very high temperature gas reactor)	thermal	helium	900 to 1000	open	250-300
SFR (Sodium-cooled fast reactor)	fast	sodium	550	closed	30-150, 300-1500, 1000-2000
SCWR (Supercritical water-cooled reactor)	thermal/ fast	water	510-625	Open/ closed	300-700 1000-1500
GFR (Gas-cooled fast reactor)	fast	helium	850	closed	1200
LFR (Lead-cooled fast reactor)	fast	lead	480-800	closed	20-180, 300-1200, 600
MSR (Molten salt reactor)	epithermal	fluoride salts	700-800	closed	1000

GIF는 Gen-IV 국제공동연구의 책임 있고 효과적인 추진을 위하여 3단계의 연구개발 협정을 체결하기로 결정하여 현재 협정 체결이 진행되고 있다. 3단계 협정은 정부가 서명 주체가 되는 기본협정(Framework Agreement), 기본협정의 이행기관이 맺는 시스템약정(System Arrangement), 시스템 하부의 실제적 연구 주관기관이 맺는 프로젝트약정(Project Arrangement)으로 구분된다.

GIF 공동연구체제의 프레임을 구성하는 최상위 협정인 기본협정은 2004년 9월 제주 정책그룹회의에서 논의가 시작된 이후 2005년 2월28일, Gen-IV 국제공동연구개발 참여국의 정부간 협정으로 발효되었다. 미국, 영국²⁶⁾, 프랑스, 일본, 캐나다가 기본협정 서명식에 참여하였고, 이어 스위스('05. 8), 우리나라('05. 11)와 EU('06.5)는 가입서의 기탁으로 추후 발효되었다. 현재 남아공은 2008년 3월 기본협정에 서명하여 승인서를 OECD에 기탁하였으며 러시아는 서명을 위한 국내 절차를 진행 중이다.

26) 영국은 국내의 사정으로 기본협정의 가입을 철회하였음.

시스템 약정은 Gen-IV 시스템의 실현가능성을 확인하고 성능을 최적화하며 시스템의 실증을 촉진하는 데 필요한 R&D를 계획하고 수행하는 데 있어 약정 서명자들 간에 협력 체제를 구축하는 것을 목적으로 하고 있다. Gen-IV 6개 시스템 별로 참여 회원국의 이행기관이 서명하게 되는 시스템약정은 2005년 협정 문안에 대한 협의에 착수하여, 2006년 2월에 SFR 시스템약정이 발효되었으며, 2006년 11월 VHTR, SCWR 및 GFR 3개의 시스템약정이 발효되었다.

시스템약정 하부의 프로젝트 약정은 시스템별로 개별 프로젝트로 체결하게 되며, 시스템을 구성하는 단위 프로젝트 수행을 위한 참여기관 간 계약적인 성격이 포함되는 협력 약정이다. 본 약정은 2005년 말 협의에 착수하여 프로젝트 약정 내용과 문안에 대한 협의를 진행하였으며, 2007년에 SFR 시스템의 3개 프로젝트 약정이 발효되었다. 2008년에는 VHTR 시스템의 2개 프로젝트 약정이 발효되었으며 SCWR 시스템 프로젝트 약정에 대한 협의를 진행 중이다.

각 회원국의 참여 시스템은 2008년 기준 <표 2-8>과 같다.

<표 2-8> 회원국별 Gen-IV 시스템 참여(시스템약정 서명 기준)

회원국	GFR	LFR	MSR	SCWR	SFR	VHTR	참여 시스템 수
캐나다				○		○	2
EU	○	○	○	○	○	○	6
프랑스	○		○		○	○	4
일본	○	○		○	○	○	5
한국					○	○	2
스위스	○					○	2
미국					○	○	2
참여국 수	4	2	2	3	5	7	

SFR은 한국, 미국, 일본, 프랑스, EU가 참여하고 있으며 2007년 11월 3개 프로젝트약정이 발효되어 실질적 공동연구 개발이 진행 중에 있다. 최초로 2007년 3월에 핵연료(Advanced Fuel) 프로젝트가, 9월에 GACID(Global Actinide Cycle International Demonstration) 프로젝트가, 11월에 기기설계 및 보조설비계통(Component Design and BOP) 프로젝트가 발효되었다. 현재 안전

및 운전(Safety and Operation)의 서명절차가 추진 중이며, 시스템종합·평가프로젝트(System Integration and Assessment)가 2008년 프로젝트계획 초안 완성을 목표로 진행 중이며 시스템연구계획(SRP)을 Update할 예정으로 특히 참조노형을 대형(Loop), 중형(Pool), 소형(Modular)으로 구분하여 추진할 예정이다. 중국은 차기 SCC부터 공식적으로 SFR에 참석할 것으로 예상되며, 시스템종합 및 CD/BOP 프로젝트에 참여 관심을 표명하고 있다.

VHTR은 한국, 미국, 일본, 프랑스, 캐나다, 스위스, EU가 시스템에 참여하고 있으며, 기본협정에 2008년 서명한 남아공도 참여를 희망하고 있다. 핵연료 및 핵연료주기(Fuel & Fuel Cycle) 프로젝트와 수소생산(Hydrogen Production) 프로젝트는 2008년 발효되었고, Material 프로젝트는 현재 약정 추진 절차를 추진 중이다. VHTR SSC는 남아공의 PBMR 프로그램이 Material 특성의 평가 및 선정에 중요한 부분을 담당하고 있어 남아공의 프로젝트약정 참여를 강력하게 희망하고 있다. VHTR은 현재 회원국 프로젝트로 진행 중인 Mid-term 프로젝트인 남아공의 PBMR과 미국의 NGNP 등 프로젝트의 진행지연으로 Gen-IV 기본개념 구성지연이 현안으로 제기되었으며, 프로젝트의 추진에서 지적재산(Intellectual Property), DB(Database) 등의 관리가 주요 이슈이다.

SCWR은 캐나다, EU, 일본이 시스템약정에 서명하고 발효시켰으며, 프랑스가 서명절차를 진행 중에 있으나 시스템 수준의 참여는 어려울 전망이다. 중국은 현재 SSC의 승인에 따라 observer로 참석하고 있으며, 초기부터 참여하였던 우리나라는 시스템 연구 수준이 아닌 프로젝트 수준에서 참여를 결정하여 시스템 약정에는 참여하지 않고 있다. 현재 2개의 프로젝트 약정 서명이 추진 중이고 참여국 중 일본이 산업계와 연구기관의 콘소시움을 구성하여 참여할 예정이나 내부 콘소시움 약정의 협의 관계로 서명이 지연되고 있다. 현재 시스템 수준의 종합적인 연구보다는 기술의 실증을 위한 연구시설의 건설을 추진하고 있으며, 대학 등이 참여하는 경우 품질관리체제(QMS) 적용 등과 대형규모 설비 등의 공동제작 등이 주요 현안이다.

GFR은 EU, 일본, 스위스, 프랑스가 참여하고 있으나, 시스템 약정 발효 후 회원국의 참여활동이 다소 미진한 상황이다. 현재 VHTR의 시스템공통기술 분야에 상당히 의존하고 있고, 시스템 개발에 대학 등의 연구결과를 종합하는 것이 필요하다. 공동연구의 추진 시에 SSC에 특별 참관의 자격으로 외부 전문가를 참여시킬 예정이다.

LFR 시스템에서 2006년 시스템약정에 서명 의향을 표명한 일본과 EU 2개국 중, EU는 시스템에 참여할 예정이나 일본의 시스템약정 참여는 불확실한 것으로 파악되었다. 일본은 프로젝트 수준의 참여는 확정되었으나 시스템약정의 서명은 내부 협의 중이며, 2007년 11월 스위스가 LFR 시스템에 참여할 수 있다고 입장을 표명하였다. LFR은 연구계획(System Research Plan; SRP) 초안에 대한 EG의 검토가 진행 중이며, EG의 검토의견, ELSY(European Lead-cooled System)의 예비 설계 결과 등을 반영하여 2008년 SRP 1차 초안을 발간할 예정이다. LFR 시스템은 소형(20MWe)과 중형(600MWe)의 두가지 트랙에 대해 연구개발을 추진 중에 있으며, 냉각재인 납(Lead) 관련 기술의 ADS(Accelerator Driven System)와 중복성, SFR과의 공동연구 등이 주요 관심사이다. LFR은 운전경험과 핵심기술을 보유하고 있는 러시아가 참여를 표명하기 않고 있으며, 회원국들이 대체 노형으로만 고려하는 경향이 있어 회원국의 협력이 본격화되기에 어려움이 존재하는 상황이다.

MSR 시스템은 프랑스와 EU가 향후 공식적으로 참여할 예정이며, 러시아의 참여를 기대하고 있다. 미국이 observer로 참여하고 있고 현재 SRP 초안 작성이 진행 중에 있으며 액체염의 화학적 특성, 구조재료, 평가코드 등이 주요 사항으로 VHTR, SFR과 연관성이 있다. MSR은 현재 시스템 연구개발 계획이 구체화되지 않았다.

다. Gen-IV 시스템의 프로젝트별 주요내용

GIF 회원국의 공동연구는 시스템별로 수개의 프로젝트로 구성되어 진행되고 있다. 각 프로젝트는 하부에 유사작업을 구분한 작업군(Work Package)과 단위작업(Task)으로 구성되며 연구가 진행되고 있다.

(1) 소듐냉각 고속로 시스템(SFR)

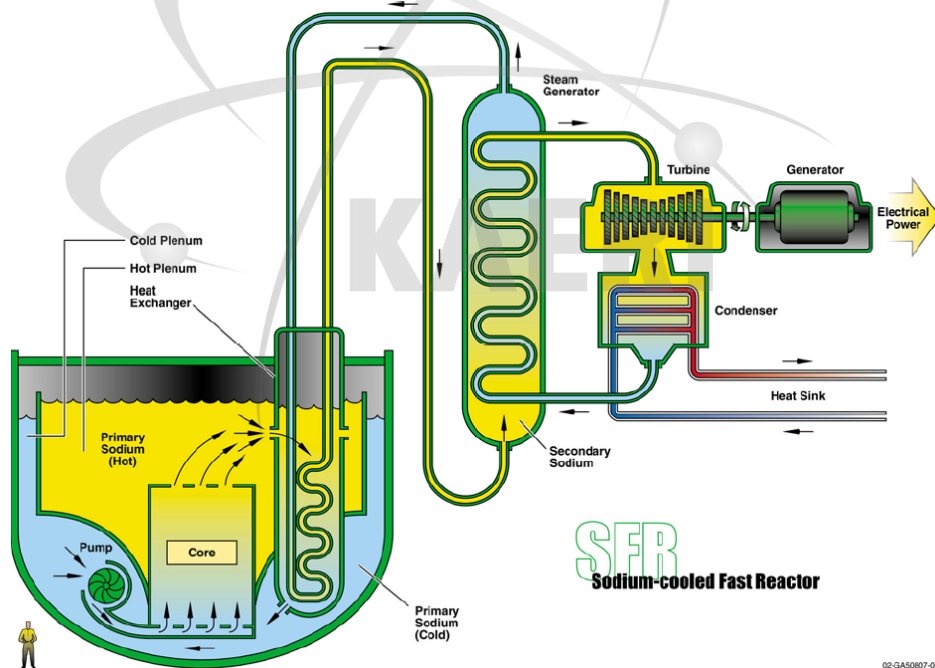
소듐냉각고속로 시스템은 체적은 작으나 높은 열적 밀도를 갖는 액체 나트륨을 냉각재로 사용한다. 산소가 없는 환경이 부식을 방지하며 나트륨이 공기, 물과 반응하지 않도록 냉각재 계통을 밀폐되어 있다. 원자로는 풀(Pool) 형이나 루프(Loop) 형태로 배치된다.

SFR 시스템은 상당히 많은 이전의 기술 경험을 있으며, 높은 핵변환 고속스펙트럼으로 운전이 가능하여 핵연료 자원의 이용을 증대시킬 수 있는 이익이

있으며 초우라늄 원소를 연료로 사용할 수 있어 고준위 폐기물의 생성량을 줄일 수 있어 핵확산저항성을 높일 수 있다. SFR의 주요 도전과제는 자본비용의 절감과 안전성의 향상이다.

SFR은 고속중성자 스펙트럼의 소듐냉각로 악티나이드 처리와 우라늄의 변환을 위하여 재순환 핵연료주기를 택하고 있다. 습식공정을 통한 우라늄/플루토늄 산화혼합물 연료를 사용하는 루프타입의 중형시스템(600-1500 MWe)과 건식열처리 공정에 의한 우라늄/플루토늄/마이너악티나이드/ 지르코늄 금속연료를 사용하는 풀타입의 중형시스템(600-1,500 MWe) 및 모듈형식의 소형시스템(50-150 MWe)의 3가지가 참조 시스템이다.

고준위폐기물 처리가 중요한 설계 특성으로 출구온도는 550°C이다. 시스템의 중요 안전 특성으로 냉각재 비등 여유도 확보, 1차계통의 낮은 압력 유지(거의 대기압조건), 중간 나트륨 순환루프 사용에 따른 방사성물질의 1차 계통 내 잠금 능력이 탁월한 것을 들 수 있다.



<그림 2-7> SFR 시스템의 개요²⁷⁾

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

SFR 시스템을 개발하기 위한 연구개발 프로젝트는 총 5개로 구성되어 있다.

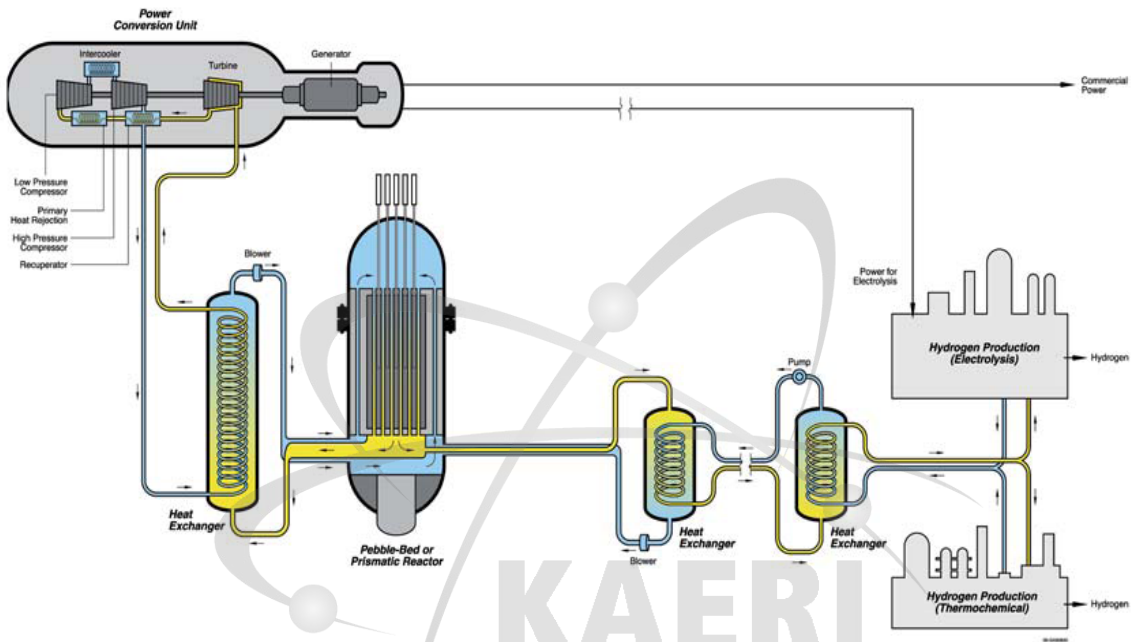
- ① 시스템종합·평가(System Integration and Assessment : SIA) 프로젝트
: 다른 R&D 프로젝트의 결과물을 검토하고 종합하며, 결과를 평가하고 개발 중인 개념의 GIF 기술목표에의 부합성을 평가한다.
- ② 안전 및 운전(Safety and Operation : SO) 프로젝트
: 개념설계의 안전성 평가에 기여하는 것을 목적으로 하여 피동형 안전계통과 중대사고의 실험과 해석모델 개발을 수행하며 안전계통 구성도 연구한다. 또한 현존하는 원자로에서 운전과 기술시험에 대한 연구를 수행한다.
- ③ 선진핵연료(Advanced Fuels : AF) 프로젝트
: 고연소도 핵연료시스템(핵연료 형태와 피복재) 개발과 핵연료 DB에 대한 연구와 마이너악티나이드를 함유한 핵연료의 재활용을 위한 원격 핵연료 제작 기술 연구와 대안 핵연료 연구를 수행한다.
- ④ 기기설계 및 보조설비계통(Component Design and Balance-Of-Plant : CD/BOP)
: 시스템의 보조설비계통을 개발하며 LBB(leak before-break)를 포함한 가동중 검사/보수 기술의 시험 및 해석 평가를 수행하며 Brayton 사이클을 포함한 대안 에너지변환시스템의 개발을 포함한다.
- ⑤ GACID(Global Actinide Cycle International Demonstration) 프로젝트
: 우라늄, 플루토늄, 마이너악티나이드를 포함한 모든 악티나이드 원소의 효과적 관리를 위한 실규모의 실증을 위한 R&D를 수행한다. 마이너악티나이드 함유 핵연료의 제작, 인허가와 몬주 원자로에서의 핵연료 핀 규모의 방사선조사로 구성되어 있다.

(2) 초고온가스로 시스템(VHTR)

VHTR은 고온가스로(high-temperature reactors : HTR)의 개량형 단계로 전력과 열에 의한 수소를 함께 생산하는 열병합발전을 목적으로 한다. 열-화학이나 전기-화학 또는 복합공정을 사용하여 열과 물만으로 수소의 생산이 가능하며 고온의 출구온도로 화학, 제철 산업에 사용이 가능하다.

냉각제로 헬륨 기체를 사용하며 흑연을 감속제로 사용하며, 열화학공정을 사용한 수소의 생산을 효율적으로 할 수 있도록 출구온도는 900°C (1,000°C가

목표임)로 하고 있다. VHTR은 고연소도 핵연료(150-200 GWd/tHM)와 완전한 피동안전, 낮은 운전 유지비용과 모듈양식의 건설이 가능하다. 참조 노형은 600MWth급으로 각주형(prismatic)의 블록이나 조약돌형 페블 베드형 노심을 가지며, 수소생산용 요오드-황(iodine-sulfur) 열화학공정에 효율적인 열공급이 가능하다. 복합발전(수소생산+전력생산) 등 광범위한 활용을 위한 설계로 고온, 에너지 집약적, 비전력 공정에 공정열을 공급하도록 설계하며 복합발전(co-generation) 수요 충당을 위해 전력생산 설비도 구비토록 설계한다.



<그림 2-8> VHTR 시스템의 개요²⁸⁾

VHTR 개발도 SFR과 마찬가지로 이전의 고온가스로에 사용된 기술에 근거하며 제작 및 인허가에 필요한 기술을 개발하며 현재 6개 프로젝트로 구성되어 있다.

- ① 설계, 안전 및 시스템통합(Design, safety and system integration) 프로젝트
: 종합작업은 VHTR 기준(Baseline) 개념을 평가하며, 기술 R&D를 종합한다. 시스템통합, 안전성·경제성평가와 인허가의 지원을 위하여 코드의 개발과 기계설계 체계화, 시장 조사를 수행한다.
- ② 재료(Materials) 프로젝트
: 1,000 °C의 고온 및 비정상상태에서의 운전을 위하여 신 재료의 개발과

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

기능검증이 요구되며, 원자로노심과 구조물에 사용되는 흑연, 내부구조물, 파이프, 고온 열교환기 및 가스터빈부속에 사용되는 금속재료, 제어봉과 피복재 및 원자로 내부 구조물과 중간 열교환기에 사용되는 등의 세라믹과 복합체(composite), 가스터빈 기기가 중점 연구 분야이다. 해당 조건에서의 특성화 시험으로 방사선조사하에서의 열-기계 물성과 부식 저항에 대한 DB를 구축하며 이것을 통하여 설계기준체계(codes and standards)와 손상 및 수명주기 평가를 예측하는 모델의 개발을 돕는다.

③ 기기(Components) 프로젝트

: 재료 프로젝트와 연결되어 있으며 주요 원자로 계통과 에너지변환시스템 기기에서 다루어져야할 설계, 건설 방법을 연구한다. 모듈방식의 건설, 부지 건설 기술, 새로운 용접 기술 및 용접 후 열처리 기술이 필요하며 대규모의 헬륨시험 루프에서 시험을 수행한다.

④ 핵연료 및 핵연료주기(Fuel and fuel cycle)

: TRISO 피복입자는 VHTR 핵연료의 기본개념으로 해당조건에서 기능이 검증되어야 하므로 R&D는 UO₂ 커널의 표준설계에 대한 이해와 연소도 증대와 핵분열생성물의 투과 감소 및 노심가열사고에 저항성을 증대시키기 위한 UCO 커널과 ZrC 피복의 사용을 검토한다. 핵연료특성, 방사선 조사후 검사, 안전시험, 핵분열생성물의 방출 평가, 화학 및 열-역학적 재료 물성을 종합하며, DB 구축과 핵연료의 노심내 거동을 분석하는 물리적 모델 개발을 계획하고 있다. 사용후 핵연료의 처리와 처분과 사용후 흑연의 관리를 검토하며 순환형 핵연료주기의 지원을 위한 플루토늄과 마이너악티나이드의 deep-burn도 검토한다.

⑤ 수소생산(Hydrogen Production)

: 두가지 주요 수소생산공정인 황/요오드(S/I) 열화학사이클과 고온 전기분해(high-temperature electrolysis : HTE)의 타당성, 최적화, 효율, 경제성 평가를 수행한다. 성능 평가와 최적화는 종합시험시설에서의 평가를 수행하며 개량형 공정열교환기 등 기기의 개발도 포함한다. 수소공정의 원자로와의 결합 기술은 수소폭발 등의 사고를 막고 트리튬의 침투와 열적 방해 등을 막기 위하여 질량 및 열 균형을 검토하며 설계와 연관된 위험도 분석을 수행한다. 수소생산 및 전력생산과의 병행을 위한 기술적 경제적 타당성 평가를 통하여 다른 열-화학 또는 혼성 사이클에 대한 조사를 수

행한다.

⑥ 전산 방법론 검증 및 벤치마킹(Computational Methods Validation and Benchmarking) 프로젝트

: 원자로 성능의 평가를 위한 열-수리학, 열역학, 노물리, 화학적 수송이 전산 방법론 개발과 검증을 수행한다. 코드 검증은 기본 현상과 종합적 시험에 대하여 HTTR 시험이나 과거의 고온가스로 데이터를 이용하여 벤치마크 시험과 코드간 비교를 통하여 평가된다. 불필요한 설계의 보수성의 제거하거나 개선된 건설비용 예측에 도움을 줄 수 있다.

(3) 초임계수냉각로 시스템(SCWR)

SCWR은 고온, 고압의 원자로로 물의 상변화가 없어 현재의 경수로에 비해 열효율과 계통의 구성에 이점이 있다. 원자로용기와 압력관 형태의 설계를 고려하고 있으며 열수리학, 재료, 화학적 특성, 운전 조건 등의 기술적 타당성 평가를 연구하고 있다.

SCWR은 물의 임계점(374°C, 22.1MPa) 이상에서 운전되는 고온·고압의 수냉각로로 초임계수의 사용으로 인하여 원자로 보조계통(BOP)을 간소화시킬 수 있고, 이에 따라 현재의 경수로에 비해 열효율을 1/3이상 향상시킬 수 있다. 참조노형은 1,700MWe급으로서 25MPa의 압력에서 운전되며 출구온도는 510°C이 나 550°C까지 격상이 가능하며 전원을 사용하지 않는 수동 안전특성을 가지고 있다.

전력생산을 효율적으로 하기 위한 것이 기본적인 설계 방향이며, 열중성자형과 고속중성자형의 두가지 선택대안이 있으며 열중성자 스펙트럼을 이용한 비순환 핵연료주기와 습식처리 방식을 이용하는 고속중성자 스펙트럼의 재순환 핵연료주기의 채택이 가능하다.

연구개발은 미래의 자본 및 시장 비용 목표를 충족하기 위하여 기존 SCWR의 실현가능성을 입증하는 것으로 목적으로 3개 프로젝트로 구성된다.

① 설계 및 종합(Design and integration)프로젝트

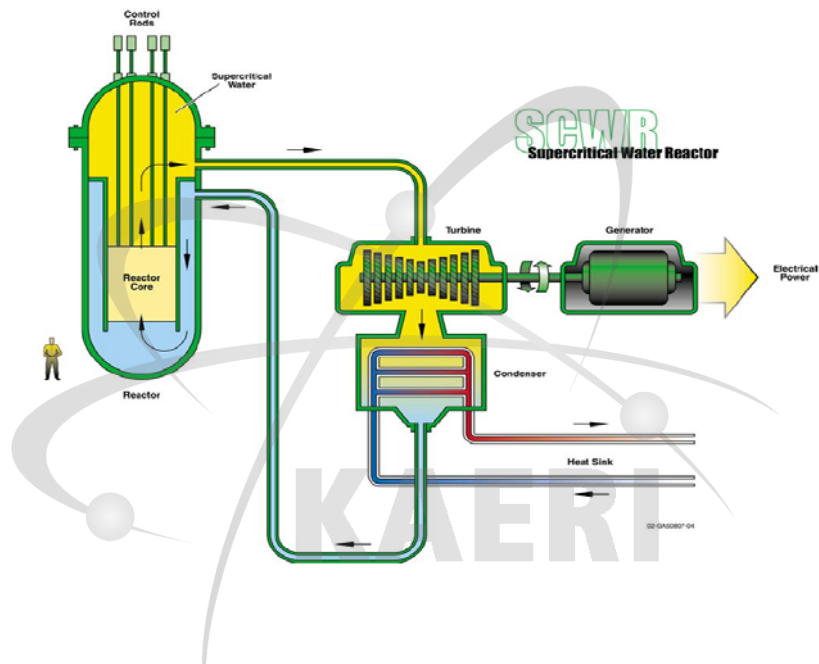
: Gen-IV의 기술목표를 만족하는 참조모형을 정의하는 것을 목적으로 하며, 현재의 협력은 핵연료 설계의 검증을 위한 원자로내 핵연료 시험루프의 설계와 건설을 수행하고 있다. 핵연료 부분의 활동을 별도의 프로젝트로 추진하는 방안을 검토 중이다.

② 열수력 및 안전(Thermal-hydraulics and safety)

: 현재 초임계압 조건에서의 열전달 및 안전성 DB에는 상당한 gap이 존재하여 프로젝트에서는 열수력학, 안전해석을 위한 데이터가 생산된다.

③ 재료 및 화학특성(Materials and chemistry)

: 원자로심 내외부의 중요 재료를 선택하며 초임계압 조건의 재료의 양립성과 방사학적 거동에 근거하여 참조 수화학 조건의 정의를 필요로 한다. 수소생산, 핵연료 및 핵연료주기 고속 스펙트럼의 SCWR 설계 등 시스템 개발에 중요한 결오는 아닌 R&D 활동은 후반부에 수행 될 예정이다.



<그림 2-9> SCWR 시스템의 개요²⁹⁾

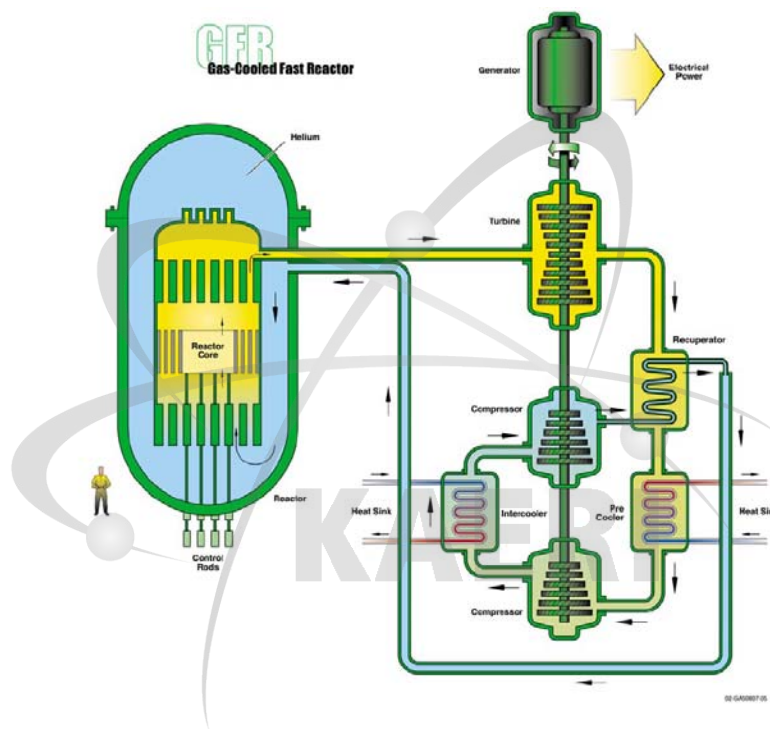
(4) 가스냉각 고속로 시스템(GFR)

GFR은 순환형 핵연료주기의 고온헬륨 냉각재의 고속스펙트럼의 순환형 핵연료주기를 채택한 시스템이다. 장수명 핵종의 그룹 재처리를 통하여 우라늄의 활용과 폐기물 저감의 측면에서 장기적인 지속가능성의 고속스펙트럼의 장점과 고효율 열사이클로 고온을 이용한 수소생산이 가능하다. 고온 가스 기술은 이전의 고온가스로에 많은 부분을 의존하고 있다.

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

핵연료와 안전특성에서는 첨단 재료와 헬륨을 이용한 냉각 등 혁신적인 기술을 채택하고 있다.

GFR은 고속중성자 스펙트럼의 헬륨(helium) 냉각재 원자로로서 재순환 핵연료주기를 적용하여 헬륨을 사용하여 원자로의 출구온도가 높기 때문에 전력 생산, 수소생산 및 공정열 생산을 고효율로 제공 가능하다. 참조노형은 출력 300-600MWe로 출구온도는 850°C이며, 원자로에 직접 연결된 브라이튼 가스터빈을 사용하여 열효율 향상을 꾀함하며 연료의 형태는 혼합세라믹, 입자형 및 세라믹피복재 등으로 악티나이드의 관리로 폐기물 저감이 가능하다.



<그림 2-10> GFR 시스템의 개요³⁰⁾

GFR의 주요 도전과제는 혁신적인 핵연료의 개발과 이와 연계된 핵연료주기 기술이며 시스템의 설계 및 안전해석이다. 현재 2개 프로젝트가 추진 예정이다.

- ① 핵연료, 노심재료 및 핵연료주기(Fast neutron Fuel, other Core Materials, and specific Fuel Cycle process : FCMFC) 프로젝트

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

: 고온의 운전 온도, 고속중성자 플럭스(flux), 고연소도 및 핵분열 생성물의 잠금을 유지하면서 무거운 핵분열 원소를 함유한 혁신적인 핵연료를 개발하는 것이다. 종합적인 악티나이드 재활용이 가능한 연관된 핵연료주기 기술을 개발하는 것이다.

② 설계 및 안전관리(Design and Safety Management : D&SM)프로젝트

: 자가증식(Self Breeding) 노심, 플루토늄과 마이너악티나이드의 재순환, 안전관리가 가능하며 경제성있는 출력밀도 등 GFR 참조노형과 운전 파라미터의 정의를 연구한다. 또한 원자로와 공정열 활용간의 커플링 접근법, 안전해석, 기술실증 실험로의 개념설계, 경제성분석 등을 수행한다.

(5) 납냉각 고속로 시스템(LFR)

LFR은 우라늄의 효율적 변환을 위하여 고속스펙트럼과 순환핵연료주기를 채택하고 있으며, 타 고속로와 마찬가지로 사용후핵연료 악티나이드의 연소로와 토륨사이클과 연계한 연소/증식로로 역할이 가능하다. 불활성 냉각재 사용으로 안전성의 확장이 가능하다. LFR은 전력생산, 수소생산 및 악티나이드 관리가 가능하다. R&D 수요는 핵연료, 재료, 부식제어 등이다.

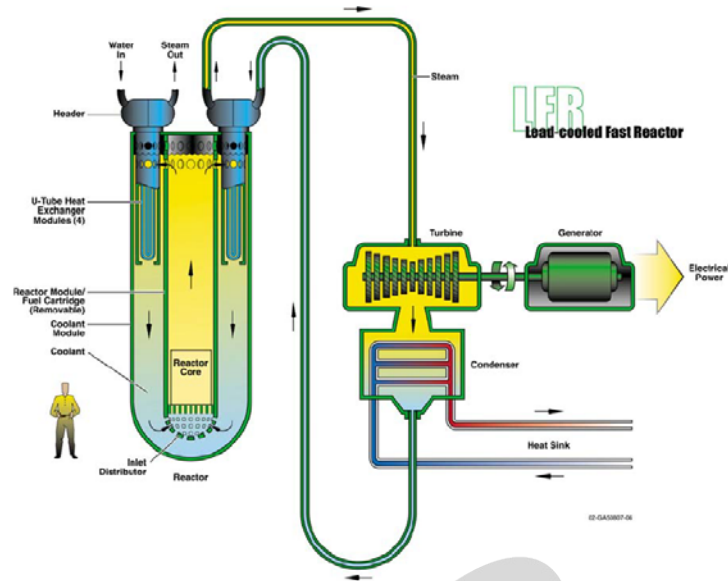
LFR은 고속중성자 스펙트럼을 가지고 있고, 납 또는 납/비스무스 혼합물 액체금속을 냉각재로 사용하는 원자로로 우라늄 변환의 효율 및 악티나이드의 완전재처리를 위하여 재순환 핵연료주기를 택하고 있다.

원자로형은 50-150MWe급 배터리 타입의 장주기 재장전형과 300-400MWe급 모듈형, 그리고 1,200MWe급 대형의 3가지 선택대안이 있다.

연료는 핵분열물질의 원료가 되는 우라늄과 초우라늄계열을 함유한 금속 혹은 질화물의 형태로 자연순환 냉각시스템으로서 출구온도는 550°C이나 재료의 개선을 통해 800°C까지 격상이 가능하고 고온열을 이용하여 열화학공정에 의한 수소 생산 가능하다.

배터리형 시스템은 15-20년의 재장전주기를 가지며, 소용량 전력계통용으로 전력을 생산하고, 수소생산 및 이동형의 에너지원으로 설계되고 있다.

현재 LFR은 참여국이 시스템연구계획을 작성하여 공동연구 추진을 협의 중이다.



<그림 2-11> LFR 시스템의 개요³¹⁾

(6) 용융염로 시스템(LFR)

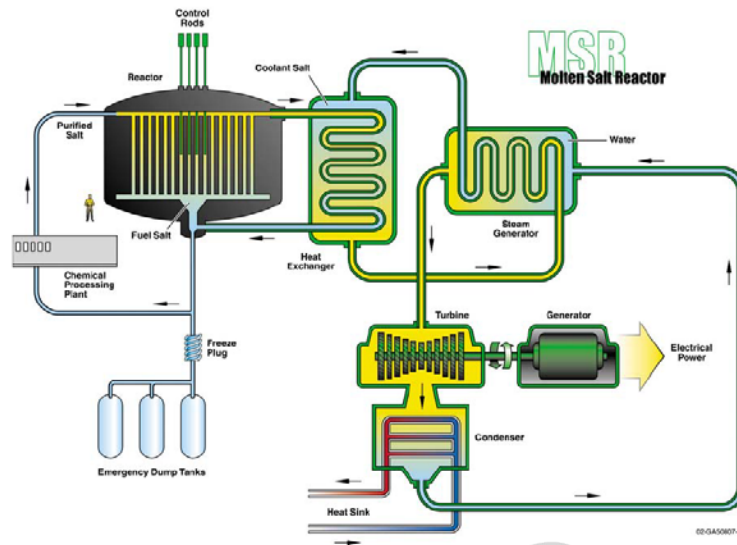
MSR은 순환하는 용융염 연료혼합물 내에서 핵분열 에너지를 생산하는 시스템으로 열영역이상(epithermal) 중성자 스펙트럼과 악티나이드 완전재순환핵연료주기를 가지고 있다. 연료는 나트륨/지르코늄/불화우라늄 액체혼합물이며, 흑연으로 되어 있는 노심채널 내를 용융염의 형태로 흐르고 있다. 용융염에서 생성된 에너지는 중간 열교환기를 거쳐서 2차 계통으로 전달되며 제3의 열교환기에서 에너지를 변환된다.

참조 용량은 1,000MWe이며 출구온도는 700°C로 열효율을 증가시켜 800°C로 격상이 가능하며 플루토늄과 소량 악티나이드를 효율적으로 연소시킬 수 있도록 하는 재순환 핵연료주기를 채택하고 있다.

액체형의 핵연료이기 때문에 연료의 성형 가공이 필요 없고, 플루토늄과 같은 악티나이드의 첨가가 용이하다.

현재 MSR은 시스템운영위원회의 구성을 협의 중으로 시스템연구계획을 작성예정이다.

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



<그림 2-12> MSR 시스템의 개요³²⁾

라. Gen-IV 시스템 추진 주요 현안 및 전망

현재 대부분의 시스템은 SRP 명시되어 있지만 예산의 부족으로 프로젝트에서 다루지 못하는 연구내용 문제, IPR 효율성에 대한 우려, 재정적 문제로 인한 프로젝트 내 협력의 미흡, 프로젝트 약정체결 지연, 산업계와 대학의 협력 부족, 시스템간 협력 부족 등이 현안문제로 제기되고 있다. 연구개발이 구체화되면 이에 대한 논의와 해결방안 모색이 필요하다.

GIF에서의 공동연구는 Gen-IV 개발을 위하여 연구개발 목적으로 참여국간 공동연구결과물을 공유하고, 향후에 상업적으로는 시스템 개발에의 기여를 고려하여 회원국간 협상을 통하여 제3자보다는 유리한 조건으로 이용하도록 하고 있다. 또한 연구개발결과 중 가까운 미래에 활용성이 높은 데이터베이스 등은 OECD/NEA가 관리할 예정이며, NEA가 소유 및 이용에 대한 법률적 사항을 검토할 예정이다.

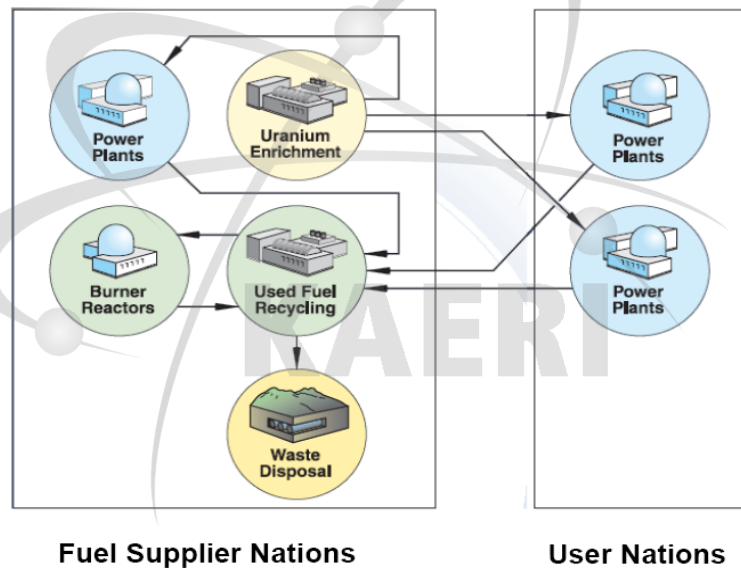
GIF 공동연구의 특징은 회원국들은 각국의 기술우위 분야를 기준으로 참여하여 부족 분야에 대한 선진기술의 확보를 추구하는 것으로 요약된다.

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

2. 국제 원자력에너지 파트너십(GNEP)

가. GNEP 개요

미국은 세계적인 원자력의 평화적 이용 확대와 함께 농축 및 재처리 기술이 더 이상 확산되지 않아야 한다는 전제하에 원자력 이용기반이 미흡한 국가들에게 농축/재처리가 필요 없도록 핵연료를 대여하고 회수하여 재처리하는 방안을 제안하고 아울러 사용후 핵연료 문제를 해결할 수 있는 핵중소멸 기술 등을 개발하여 미국과 전세계의 원자력 진흥에 기여한다는 취지로 2006년 2월 GNEP (Global Nuclear Energy Partnership) 발표하였다. GNEP은 원자력 이용 확대와 핵비확산 강화라는 일견 상충되는 2가지 목표를 동시에 추구하기 위한 구상으로 볼 수 있다.



<그림 2-13> GNEP의 개념³³⁾

(1) GNEP의 주요 과제

GNEP의 실천전략은 당초 아래의 7가지 주요과제로 구성되어 있다. 첫째 미국내 원자력 이용을 진작시킨다. 이를 위하여 미국 정부는 기존의 Nuclear

33) The Global Nuclear Energy Partnership, Greater Energy Security in a Safer, Cleaner World, February 6, 2006

Power 2010을 적극 활용하는 이외에 Standby Support Program을 새로 입안중이다. Nuclear Power 2010 은 산업체가 다음 10년간 새로운 원자력발전소를 건설하는 것을 지원하기 위한 것으로, 정부와 산업체가 공동으로 비용을 분담하여, 신규 부지 조사, 신형 원자력발전소의 설계/건설, 일관된 인허가 절차를 구현하도록 노력하고 있으며, 미국 원자력규제위원회 (NRC : Nuclear Energy Commission)의 새로운 설계인허가 절차를 적용하기 위하여 산업체와 협력하고 있다. Standby Support Program은 사업자의 면책사유에 의한 공기 지연시, 정부에서 손실보상금을 지급한다는 구상이다.

둘째 핵확산저항성이 강화된 핵연료주기를 실증한다. 이를 위해 PUREX 기술보다 핵확산 저항성이 큰 UREX+ 기술을 개발하여, 우라늄과 플루토늄만을 분리하는 것이 아니라 초우라늄원소(Np, Pu, Am, Cm 등)를 혼합된 상태로 추출한다. 이에 필요한 시설은 핵확산 위험을 줄이기 위하여 소위 “핵연료공급국”에만 설치하며, 다목적 핵주기 연구시설인 AFCF(Advanced Fuel Cycle Facility)를 2016년에 1단계 준공한다.

셋째 방사성폐기물 발생을 최소화한다. 이를 위해 초우라늄 원소를 핵종변환시킴으로써 사용후핵연료의 관리 능력을 향상시킨다. 즉 재처리를 통하여, 방사성폐기물 발생량 감축, 폐기물에서 발생하는 열의 관리능력 강화, 최종 처분하여야 할 장수명 핵종의 양을 감축코자 한다. 이에 따라 금세기 내에는 Yucca 처분장 1개만으로 현재 미국내 발생한 사용후핵연료 누적량은 물론 향후 발생할 사용후핵연료까지도 수용할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

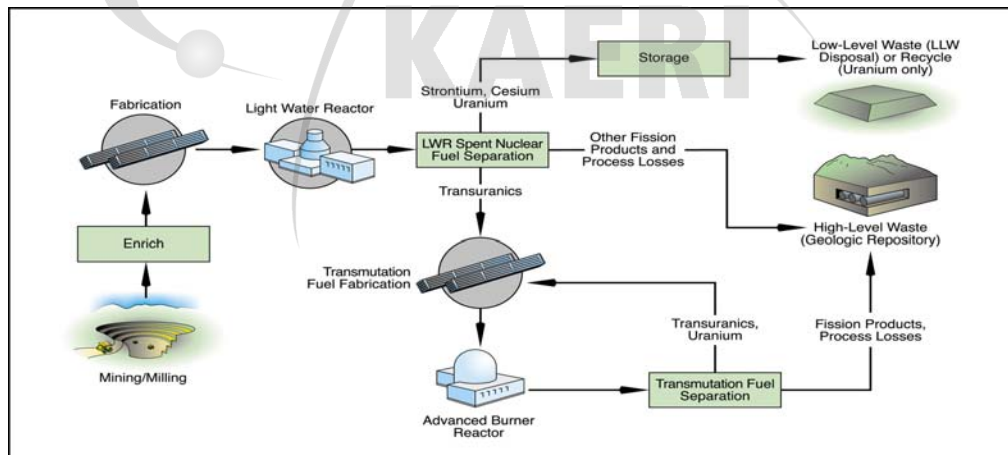
넷째 개량형연소로인 ABR(Advanced Burner Reactor)을 개발한다. ABR은 사용후핵연료 속에 함유된 초우라늄 원소를 반감기가 짧은 핵종으로 변화시키고, 이를 연소하여 소멸시키며 이 과정에서 발생하는 열을 이용하게 된다. 즉 경수로는 초우라늄 원소를 생성하는 반면, ARR은 초우라늄원소를 소멸시키는 역할을 한다. 미국 정부는 GNEP에 참여하는 국가와 공동으로 ARR 개발하고자 하며, 2006년 8월에는 당초 구상한 1/10 규모의 시험로 건설없이 바로 상업 규모 시설을 건설하는 것으로 건설 계획을 가속화하였다.

다섯째 신뢰성있는 핵연료 공급체계를 구축한다. 이를 위하여 GNEP은 참여국을 소위 “핵연료공급국(fuel supplier nation)과 이용국(user nation)”으로 구분하고 있다. 이용국은 농축, 재처리와 같은 민감 핵주기 시설을 보유하지 않겠다고 선언한 국가이며, 이들 국가들은 원자력발전소만을 소유하고 운영하기

만 할 뿐 핵연료주기 시설은 보유하지 않는다. 핵연료공급국은 농축, 재처리 시설을 보유하고 이용국에게 핵연료를 공급하며, 사용후핵연료를 회수하고 재처리하여 ARR에서 연소한다는 요람에서 무덤까지(cradle to grave fuel leasing) 개념을 구상하고 있다.

여섯째 소형원자로를 실증한다. 이는 개발도상국의 소규모 전력시장에 부합하는 안전하고 운전하기 쉬우며 핵확산 저항성이 증대된 원자로이다. 이러한 원자로는 발전용량이 50-350 MWe 규모로서, 수명기간 중 핵연료 교체가 필요 없는 초장주기 핵연료를 사용하며, 지역난방이나 식수 생산의 가능성도 고려하고 있다.

일곱째 첨단 안전조치를 개발한다. 이를 위하여 IAEA와 협력하여 민간 원자력 시설이 비평화적 목적으로 전용되는 것을 방지할 수 있도록, 핵물질 전용 및 계통 변경 시 즉각 탐지할 수 있는 안전조치 기술을 개발한다. 이는 강화된 안전조치 프로그램 및 기술을 개발하여 민간 원자력 시설이 비평화적 목적으로 전용되는 것을 방지하기 위한 것으로, 핵물질 전용 및 계통 변경 시 즉각 탐지할 수 있도록 하며, 재순환 시설, ABR의 설계에 반영될 수 있도록 국제협력을 통하여 추진하고자 한다.



<그림 2-14> GNEP의 핵연료 재순환 및 ABR 활용 개념³⁴⁾

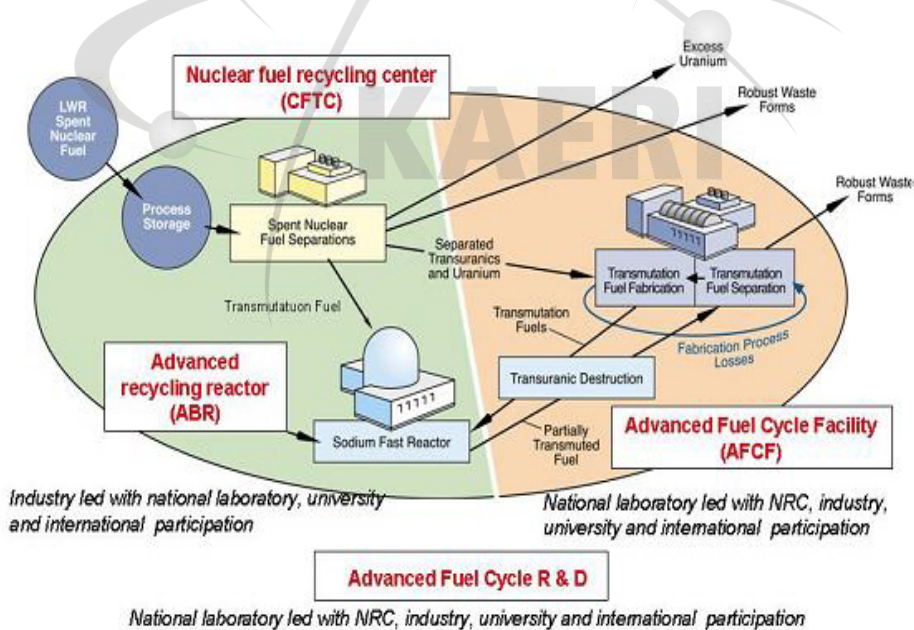
34) The Global Nuclear Energy Partnership, Greater Energy Security in a Safer, Cleaner World, February 6, 2006

(2) GNEP의 추진 전략

DOE는 2006년 8월에, 당초 전략을 대폭 수정하여 2단계(Track) 접근법의 개념으로 추진 전략을 재정립하였다. 이에 따라 UREX+기술의 공학규모 실증시설 (ESD : Engineering Scale Demonstration)과 ABR의 시험로 (ABTR : Advanced Burner Test Reactor) 건설은 취소되었다. 2단계 접근법은 단기간에 달성 가능한 Track 1과 장기적으로 추진하는 Track 2로 이루어진다.

Track 1은 미국 산업체의 축적된 경험과 연방정부의 R&D를 우선적으로 활용코자 한다. 이를 위하여 CFTC(Consolidated Fuel Treatment Center)를 건설하여 경수로 사용후핵연료의 유효성분인 우라늄, 플루토늄, 마이너악티나이드를 추출하며, 이 중에서 우라늄과 플루토늄은 이용하고, 마이너액티나이드는 Track 2 이행시까지 보관한다. 이 기간중에는 ABR 원형로 건설도 추진한다.

Track 2에서는 외국의 파트너와 협력하여 미해결 기술을 개발하는 것에 중점을 두고 있다. 이 기간에는 AFCRF(Advanced Fuel Cycle Research Facility)를 건설하여 고속로에서 인출한 사용후연료의 마이너악티나이드(Np, Am, Cm 등) 분리하고, 이를 사용하여 고속로용 핵연료를 제조하게 된다.



Track 1

Track 2

<그림 2-15> GNEP의 추진 개념도³⁵⁾

GNEP 이행을 위한 국제협력에 있어 미국 정부는 농축 및 핵연료 재순환 기술개발에는 이미 상용시설을 보유한 영국, 프랑스, 러시아 및 일본과 협력한다는 방침이다. 그러나 네덜란드, 독일, 아르헨티나, 브라질 (농축시설 보유국) 등은 핵연료 공급국에 포함되지 않고 있어, 이들 4개국과 한국, 캐나다 등 원자력이용이 활발한 국가와의 협의에 상당한 시일이 걸릴 것으로 예상된다.

나. GNEP 추진 동향

(1) GNEP 전략계획 수립

미국은 재정립된 GNEP 추진전략을 기반으로 2007년 1월 선진 핵연료재순환센터 및 고속로 기술을 개발하기 위한 전략계획을 수립하였다. DOE는 동 전략계획을 달성하고자 행동계획(Action Plan)을 발표하였으며, 주요 내용은 다음과 같다.

- 미국과 해외 산업체 및 타국 정부로부터 GNEP 시설을 구성하기 위하여 필요한 기술 및 정책현안을 해결하고 장애요소를 극복하기 위한 최선의 방법을 입수한다. 이 계획은 이미 착수된 것으로서, DOE는 2006년 8월 상업 규모의 핵연료재순환센터(FRC)와 선진 고속로(ARR) 건설에 대한 참여의향서(EOI)를 접수하였다.
- 상업용 GNEP 시설들을 지원할 수 있도록 잔존하는 기술적 현안에 대한 해결책을 입증하기 위한 세부 기술로드맵을 작성한다. 원칙적으로 기존 미국의 국립연구소 시설, 대학 및 국제 파트너와 함께 선진핵연료주기시설(AFCE)에 대한 기술개발 계획을 작성하는 것으로 GIF, I-NERI 등의 다자간 및 양자간 협력을 적절히 활용한다.
- 핵연료재순환센터 및 선진 고속로의 개념설계 및 엔지니어링 개발에서 산업계의 참여를 유도한다. 핵확산 저항성, 안전성, 폐기물 관리 등을 고려하여 설계한다.
- 환경영향보고서(PEIS: Programmatic Environment Impact Statement) 작성한다. 이를 위해 FRC 및 ARR 시설의 부지 선정을 위한 연구 예산과 환경자료 확보한다.

35) The Global Nuclear Energy Partnership, Greater Energy Security in a Safer, Cleaner World, February 6, 2006

- DOE 장관이 FRC와 ARR 원형로 건설을 위하여 2008년 6월 이전에 패 키지화된 정부·산업계간 파트너십 구성안을 마련한다. 선진핵연료주기 시설은 장기간의 재순환 핵연료 및 핵연료주기 기술개발을 보장하고자 정부 부지에 건설할 예정이다.

위 행동계획은 현 상황에서 GNEP 관련 미개발된 기술 및 장애요인을 국내외 연구기관 및 산업체와 파트너십을 구성하고 기존 다자간 공동연구 체제와의 협력을 통하여 해결하겠다는 것이 핵심으로 분석된다.

(2) GNEP 원칙성명서(SOP)의 주요 내용

부시 미 행정부는 2007년 9월 IAEA 총회 직전 장관급 회의를 소집하여 GNEP SOP에 동조하는 국가들을 파트너로 끌어들이고자 기존 프랑스, 러시아, 중국, 일본, 영국 등 5개국을 포함하는 원자력 발전국, 향후 원전 도입이 예상되는 국가 등 총 35개국 이상에게 GNEP SOP 서명식을 위한 초청장을 보냈다.

GNEP SOP에서는 GNEP이 원자력 이용확대 비전을 같이 하는 참여국간 협력으로, ① 참여국은 어떠한 권리도 포기하지 않으며, 자발적으로 참여하며, ② 참여국들은 IAEA 안전조치와 유엔 결의 제1540호와 같은 국제적 의무를 준수하며, ③ 실질적인 협력은 양자간 협정과 GIF/INPRO와 같은 기존의 다자간 체제를 활용하여 추진될 것임을 밝히고 있다. 또한, GNEP SOP에서는 GNEP 참여국간 협력을 다음과 같은 목적으로 추진한다고 밝히고 있다.

- 지속가능한 에너지 공급을 위한 원자력 확대
- IAEA와 협력하여 선진 안전조치 개발
- 핵연료의 안정공급을 위한 국제적 공급체제 확립
- 사용후핵연료의 초우라늄(TRU: Transuranic) 원소를 연소하는 선진 고속로 개발
- 개도국에 적합한 핵확산 저항성이 있는 원자로 개발
- 순수 플루토늄(Pu)을 분리하지 않는 선진 핵연료재순환 기술 개발
- 에너지와 자원의 효율적 사용을 위하여 최선의 핵연료주기 활용

(3) GNEP 운영체제 구축

GNEP SOP 서명식과 함께 서명국들은 향후 GNEP의 운영체제를 논의하였다. 우선 SOP에 서명한 국가들은 파트너국가가 되고, 이후 GNEP 파트너국가

가 되기 위해서는 기존 파트너국가들의 합의 절차를 거치기로 결정하였다. 또한, GNEP 추진을 위하여 의사결정기구인 집행위원회(Executive Committee), GNEP 운영그룹(Steering Group) 그리고 집행위원회가 지정하여 GNEP의 구체적인 활동을 지원하기 위하여 실무그룹(Working Group)을 두기로 하였다.

우선 집행위원회는 파트너 국가들의 장관급으로 구성하며, 옵서버 국가들도 참여가 가능토록 하고 있다. 집행위원회 회의는 매년 1회 회의 개최를 기본으로 하고, 회의를 개최하는 국가가 집행위원회 위원장 역할을 담당하기로 결정하였다. 또한, 운영그룹은 집행위원회 위원들이 지정한 고위급으로 구성하기로 하였다. 동 회의에서 서명국들은 우선 핵연료 공급보장과 인프라구축지원 실무그룹을 두기로 결정하였다. 현재 각 실무그룹 위원장은 미국이 맡고 있다. 실무그룹의 전문가들은 운영그룹 위원들이 지명하기로 하였다.

2007년 5월, 미국, 프랑스, 러시아, 중국 및 일본(영국 불참) 주요국 장관급 회의를 개최한 이래, 2007년 9월, 1차 집행위원회 개최 및 SOP 서명식을 개최(우리나라는 '07년 12월 서명)하여 출범한 GNEP 국제협력체제는 2007년 12월, 제1차 운영그룹회의 개최하여 실질적 활동에 착수하였다. 이후 2008년 5월, 제2차 운영그룹회의 개최하고 2008년 10월, 제2차 집행위원회 및 제3차 운영그룹회의 개최하였다.

GNEP 회원국(Partner)은 2008년 10월 기준 25개국³⁶⁾ 참여 중이며 IAEA, GIF, Euratom이 참관(Observers)자격으로 참여하고 있다. 현재 2개 워킹그룹(인프라개발, 핵연료공급보장)을 구성/운영 중이며, 2개 워킹그룹(중소형원자로, 폐기물관리) 설립 논의 중이다.

분야별 주요 활동 및 계획을 살펴보면 핵연료공급보장 분야에서는 선행핵연료주기(우라늄 공급, 변환, 농축, 성형가공)시장 조사와 핵연료공급보장과 관련된 회원국 정책 및 법령 설문을 핵연료 공급조건, 사용후연료 관리 등에 관하여 실시하는 등 핵연료주기 정책/법령 조사를 수행하였고, 향후 활동주제별 4개 Subgroup 구성하여 활동을 진행할 계획이다.

- ① 현황 분석(Facts Finding),
- ② 후행 핵연료주기,

36) 한국, 미국, 일본, 프랑스, 중국, 러시아, 캐나다, 영국, 호주, 우크라이나, 헝가리, 카자흐스탄, 루마니아, 슬로베니아, 리투아니아, 폴란드, 불가리아, 가나, 요르단, 이탈리아, 세네갈, 아르메니아, 에스토니아, 모로코, 오만 ('08.10, 신규참여회원국)

③ 핵연료 제조서비스,

④ 개도국에 필요한 공급보장 요건 분야에서

인프라개발 분야는 회원국의 원자력 도입 사례 발표를 인프라 개발, 교육 등을 중심으로 진행하였고, 아래 5개 부분별 활동을 추진할 예정이다.

① GNEP 인프라개발 정보체계(Resource Library)

② 인프라개발 자원 워크숍

③ 인적자원 개발

④ 회원국별 인프라개발 이행 및 확대 지원

⑤ GNEP 관련 전문기구와의 연계 구축

현재 중소형원자로(Grid Appropriate Reactor), 폐기물관리 워킹그룹 구성 등의 구성을 통한 미래 활동을 계획 중이다.

다. 우리나라의 GNEP 연구개발 참여

현재 GNEP의 ABR 대상 노형에는 우리나라가 개발 중인 Pyroprocessing 건식처리와 연계한 원자로인 GE-H의 개념이 포함되어 있으며, Gen-IV VHTR과의 연관성을 가지고 있는 General Atomics 콘소시움의 일원으로 고온가스로 (AGR: Advanced Gas-cooled Reactor) 개념을 GNEP에 적용하는 분야에 참여하고 있다.

2007년 4월, DOE는 GNEP 시설 건설에 산업체 참여를 위한 지원계획 (Funding Opportunity Announcement : FOA) 발표하고 2007년 10월, DOE가 4개 산업체 선정 지원(34.6M\$, '07.10~'08.09)하였으며, DOE는 4개 업체간 경쟁을 통하여 최선의 대안 발굴 추진 중이다. 4개 업체는 Energy Solutions, International Nuclear Recycling Alliance, GE-H, GA로 각 업체에는 원자력 주요산업체인 W/H, AREVA, Mitsubishi등이 참여하고 있다. 그 중 우리나라에 협력을 제안한 업체는 GE-H로 한국원자력연구원(KAERI)에 ①GNEP 기술개발을 위한 DOE 추진사업에 공동참여 ②한국내에 소듐냉각고속로 공동건설의 2개 기술협력 방안 제시한 바 있다. GE-H에 대한 지원금액은 10.3M\$로 GE-H는 DOE로부터 지원받은 사업비중 일부를 KAERI에 제공하여 KAERI가 일부 업무를 수행할 수 있도록 기술협력계약 체결을 제안하여 협의중이다. GE-H는 KAERI의 KALIMER 소듐냉각고속로 개념이 GE-H가 개발하고자 하는 개념과 유사하여 최적의 파트너로 인식하고 있고 수행 업무는 선진연소로 개념설계 연구 및 기

술개발 로드맵 작성지원 등이 될 것으로 예상하고 있다.

KAERI는 GA(General Atomics)사와 초고온가스로(VHTR) 및 원자력수소개발을 위해 2005년부터 협력 MOU를 체결하고 2005년 12월부터 원자력수소공동개발센터를 설립/운영 중이다. KAERI는 DOE의 차세대원전(NGNP) 계획에 GA사 주도 USIT 콘소시엄 멤버로 참여하여 예비개념연구 중이며 GA는 VHTR과 고속로의 공생 핵주기기술로 GNEP에 참여 중이다. KAERI의 참여 내용은 사용후핵연료를 Deep Burn 개념의 초고온가스로(DB-MHR) 연료로 사용하여 재처리 및 독성물질의 양을 줄이자는 개념으로 동 관련 분야의 참여를 예상하고 있다.

3. Gen-IV와 GNEP의 공통분야

Gen-IV와 GNEP의 출발은 원자력의 이용 확대를 통한 지속가능성의 확보, 폐기물의 감소 및 핵확산의 방지 등 상당히 많은 부분의 공통점을 가지고 있다.

<표 2-9> GNEP와 Gen-IV의 추진 목표

GNEP 4대 추진목표	Gen-IV 4대 목표
1. 에너지해외의존도(화석연료) 감축하고 국가경제 성장에 기여	1. 연료자원 활용성을 증대(재순환)시켜 에너지 공급의 지속성 확보하고 폐기물 발생량의 감소로 환경부담 경감
2. 새로운 핵비확산성 재순환 핵연료 개발로 폐기물 발생 및 핵확산성의 최소화	2. 일반 대중이 공감하는 수준의 안전성 및 신뢰성 확보
3. 세계의 지속가능발전 (성장과정정환경)에 기여	3. 타 발전원에 비해 전수명 운전비용의 경쟁우위 확보와 초기 자본투자 감소로 재정적 위험부담의 경감
4. 세계적인 핵확산 방지를 위한 가장 최근의 기술을 활용	4. 핵물질 전용의 방지, 테러 예방을 통한 핵확산저항성확보

GNEP의 출범시 GIF 정책그룹회의에 앞서 개최된 GNEP/Gen-IV 협의회의('06. 7. 11, 워싱턴 DC)에서는 GIF 정책그룹대표, 러시아, 중국 대표 등이 참석하여 미국이 GIF/GNEP 협력 추진을 위한 GIF 회원국의 의견을 청취하기 위한 비공식 회의로 진행된 바 있다.

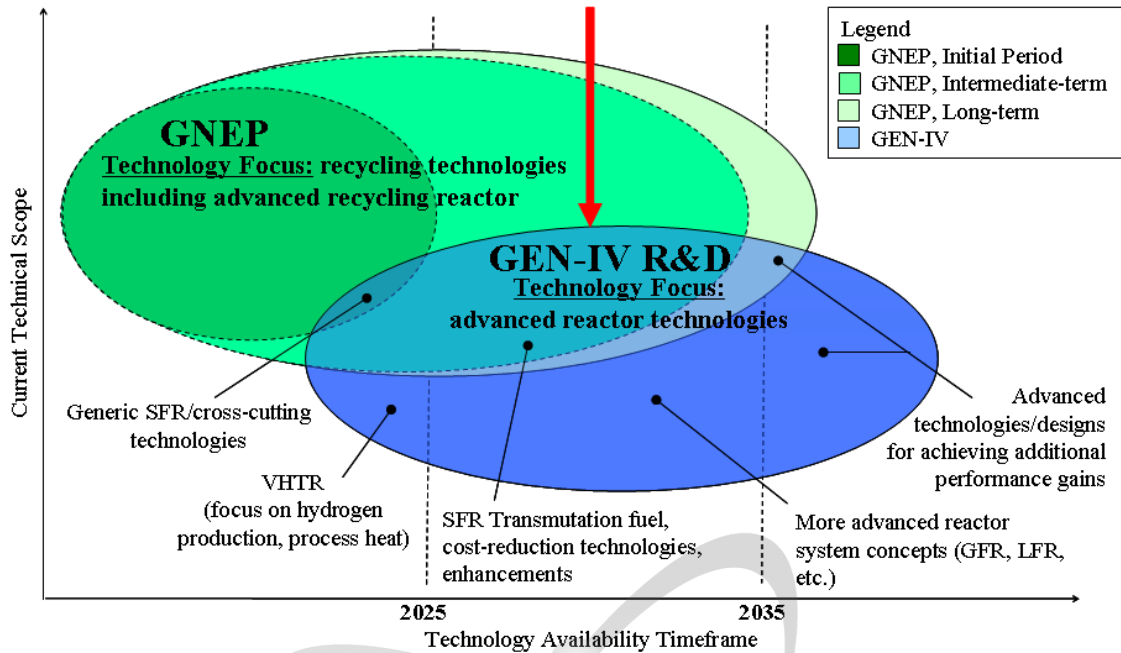
GNEP 과 Gen-IV 는 시간 일정 (단기/ 장기)과 내용(실증/R&D) 의 차이가 있을 수 있으나, 상호 밀접한 관계이며 도움을 줄 수 있다는 데 의견을 같이하

고 핵연료주기기술 보유국은 GIF의 Gen-IV 연구개발이 GNEP 에 많은 기여를 할 수 있을 것임을 강조하였으며, Gen-IV 고속로는 GNEP 의 핵확산저항성 핵연료주기와 연계하여 추진할 수 있음이 주로 언급이 되었다. GNEP과 Gen-IV 협력방안으로 GIF 회원국은 Gen-IV R&D Scope 내에서 GNEP 관련 연구를 수행이 가능하며 GNEP 와 관련하여 DOE 는 GNEP 이 원자력 협력국가 범주를 2 개의 파트너십(핵연료공급국, 이용국) 으로 구분하기 보다는 다양한 형태의 파트너십을 추구할 수 있음을 밝히고 GNEP 의 선진연소로(Advanced Burner Reactor; ABR) 는 SFR 과 시스템 설계 특성, 선진핵연료(Advanced Fuels) 등 많은 공통 부분이 있음을 확인하며 중소형원자로 등 GNEP 프로그램에 관련기술을 보유한 GIF 회원국의 참여에 대하여 문호가 개방되어 있다는 사실을 확인하였다.

Gen-IV SFR과 GNEP의 기술분야를 살펴보면 상당히 많은 부분의 공통부분이 있다. GNEP은 핵연료주기의 측면에서 폐기물의 저감을 위한 초우라늄원소의 변환을 위한 기술의 실증과 고속로의 설계를 추구하고 있으며, Gen-IV는 안전성과 핵확산저항성을 가진 마이너악티나이드 함유 핵연료를 사용하는 고속로를 개발하고 있다.

Gen-IV와 GNEP의 기술중첩분야는 주로 중기적인 원자로 연구개발에서 찾을 수 있다. 선진연소로(Advanced Recycle Reactor : ARR)를 포함한 재활용기술에 기술 초점을 두고 있는 GNEP와 선진원자로기술의 개발에 기술초점을 두고 있는 Gen-IV는 연구범위와 추진 일정에 있어 차이가 있다. GNEP의 ARR은 단기 및 중기적인 초우라늄의 원소의 연소를 통한 폐기물의 저감과 핵비확산을 추구하고 있으며 Gen-IV 원자로는 장기적으로 지속가능성을 우선으로 한 연료의 활용 증대성을 목표로 두고 있다.

시스템기술을 기준으로 할 때 단기적으로 SFR의 일반적 특성과 원자로에 공통을 적용되는 기술이 두 프로그램에 활용이 가능한 부분이다. 원자로의 설계 특성, 안전성 및 보조설비 등은 GNEP의 연구결과가 Gen-IV에 활용이 가능한 부분이다. 중기적으로는 SFR에서 연구하고 있는 변환이 가능한 핵연료, 시스템과 핵연료주기에서 비용의 절감을 추구하는 기술은 GNEP의 ARR 및 이와 연계된 핵연료주기 기술 상용화와 밀접하게 연결되어 있다. 장기적으로 보면 Gen-IV에서의 선진 기술과 성능의 향상을 위한 추가적 설계의 개발이 GNEP의 후반부에 사용이 가능한 기술이다.



<그림 2-16> GNEP와 Gen-IV의 공통분야

GNEP과 Gen-IV의 시너지 효과를 찾을 수 있는 부분은 SFR로 GNEP은 장기적인 핵변환 기술개발과 자본 및 운전/유지 비용 저감 등 경제성 목표의 성취를 다루기 위하여 Gen-IV SFR의 체제의 활용을 기대하고 있다. 주요 중첩분야는 아래와 같다.

- 핵변환 핵연료
- 개선된 검사/보수기술
- 지진 효과의 배제
- 핵연료 취급
- 장수명 재료
- 선진 보조설비계통(BOP)
- 선진 디지털 계측제어 적용

장기적으로 협력이 가능한 분야로 선진핵연료 연구개발, 국제적으로 건설이 가능한 GNEP 원자로의 건설을 위한 개념의 선정, 그리고 원자로 간 재료, 계측제어 및 출력전환 등의 광범위한 공통 연구개발(Cross-cutting R&D)을 들 수 있다.

미국은 GNEP를 ALWR 원자로의 건설을 위한 NP2010 프로그램의 다음 수

준으로 중요하게 고려하고 있으며, GNEP은 단기적이며 제한된 영역에 초점을 두고 있고 Gen-IV는 장기적이며 광범위한 영역을 대상으로 하고 있으나 목표와 연구개발에서 상당한 부분을 공유하고 있다. 또한 Gen-IV의 SFR 연구개발 약정 하의 연구개발이 GNEP의 확장이 가능하도록 하는 역할을 할 수 있을 것이다. 또한 미국이 에너지가 GNEP과 Gen-IV의 조정을 담당하고 있다.

GIF 회원국의 SFR 참여 방안으로 미국은 GNEP 의 ABR 과 관련한 연구항목을 중심으로 Gen-IV SFR 에 참여하고 있으며, 타 회원국은 국가적 수요(National Needs)에 따라 SFR의 특성을 설정하고, 연구를 추진하며, 연구결과를 공동 활용하고 있다.

현재 각 국별 연구개발 중인 SFR 노심 특성을 살펴보면 일본은 증식(breeding), 프랑스는 미정, 미국은 연소(burning), 한국은 현재 균형(breakeven) 노심을 채택하고 있으며 연구내용의 차이는 주로 연료 특성에 있으며, 그 차이는 시스템 전체에서 볼 때 크지 않다고 할 수 있다.

우리나라는 SFR 시스템 기술 및 선진핵연료 분야에서의 공동연구 수행과 기술협력을 통하여 GNEP 체제에서 준 공급국에 해당하는 위치 확보가 필요하며, GNEP 의 ABR 의 대상 노형은 SFR 로 GIF 에서 공동개발을 추진 중인 SFR 과 시스템기술에 공통 부분을 가지고 있어 GIF 를 통하여 시스템설계 기술개발과 함께 선진핵연료에 대한 공동연구를 추진할 예정이다. 또한 미국과 핵연료주기 분야에서의 지속적인 국제협력을 추진하여 기술 저변을 확보할 필요가 있다.

제 3 장 원자력 연구개발 중장기 성장전략 개발

제 1 절 미래 원자력시스템 개발 장기추진계획과 시사점

1. 개요

작년 12월 22일 정부는 한승수 국무총리 주재로 「제255차 원자력위원회」를 개최하여, 「미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획(이하 추진계획)」을 심의·확정하였다. 이 추진계획은 2030년까지 미래 원자력시스템의 개발에 대한 청사진을 제시한 것으로 개발에 장기간이 소요되는 미래 원자력시스템 연구개발을 일관되고 체계적으로 추진하기 위한 시스템별 추진일정 등 기본방향을 제시하였다는 점에서 큰 의의가 있다.

2. 추진계획 수립 배경

세계 각국은 고유가, 기후변화 및 에너지안보에 대비하기 위하여 원자력의 이용 확대를 적극 추진하고 있다. 특히, 미국은 지난 30년간 원전건설이 없었으나 최근 건설을 재개하고 있으며 러시아·중국·인도 등에서도 대규모의 원전 추가 건설을 추진하고 있다. 미국의 DOE(Department of Energy)가 발표한 원전 보유국의 2030년까지 원자력시설용량(GW) 확충 계획³⁷⁾을 살펴보면 미국 (98.5→109), 일본 (47.6→56), 러시아 (21.7→43), 중국 (7.6→39), 인도 (3.5→15) 등 주요국의 원자력발전 규모는 현재보다 최대한 31 GW(중국)가 증대되고 최소한 8 GW(일본)가 증가될 것으로 전망되고 있다.

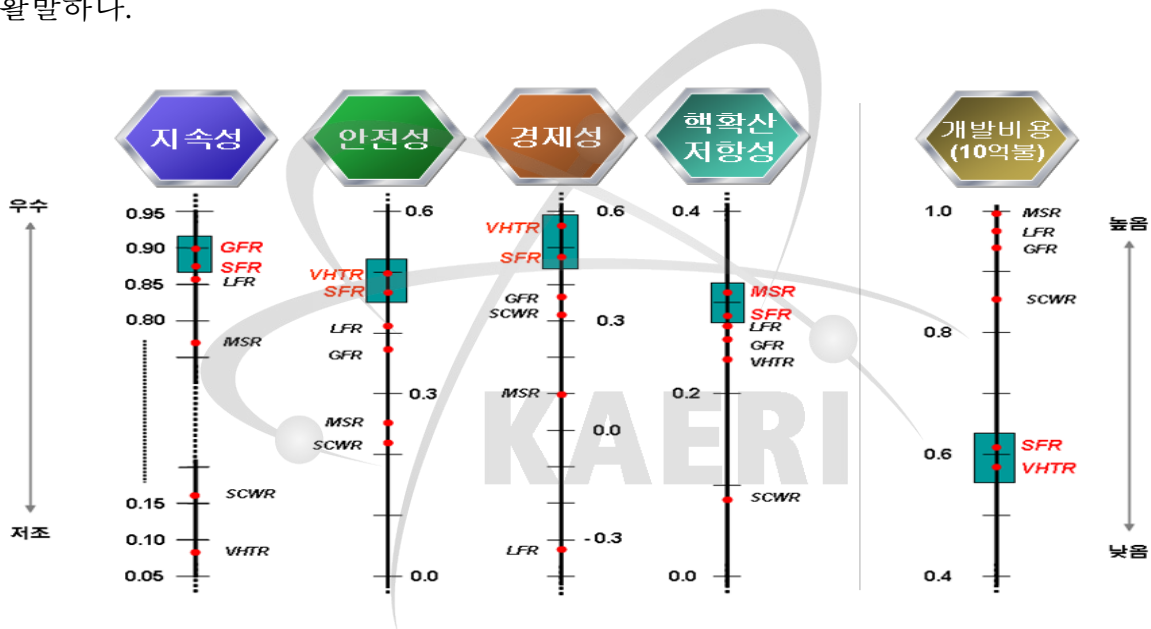
국내 전력의 36%(2007년 기준)를 원전에 의존하고 있는 우리나라도 지속적인 경제성장을 달성하고 고유가와 기후변화협약에 대비하기 위해서 미래 원자력개발에 있어 국가적 차원의 과감한 투자와 지원이 필요한 실정이다. 이러한 상황을 반영하여 정부는 지난 8월, 제3차 국가에너지위원회를 개최하여 20년 장기 에너지계획인 “국가에너지기본계획”을 심의·확정하였다. 이 계획에서 정부는 고유가와 온실가스 감축 등에 대응하기 위해 원자력의 역할 강화는 불가피한 선택임을 강조하며, 2030년까지 신형경수로 11기 내외를 추가 건설하여

37) International Energy Outlook 2006, DOE, 2006.6

원자력발전량 비중을 36%에서 59%까지 제고할 것임을 밝혔다.

원자력 이용확대와 더불어 주요 원자력 선도국들은 현재 원전기술의 한계를 극복하고 원전 이용 확대에 따른 문제점을 해결하는 동시에 미래의 원자력 주도권 확보를 위해 제4세대(Gen-IV) 원자력시스템³⁸⁾ 개발에 박차를 가하고 있다.

제4세대 원자력시스템 개발에 있어 미국을 중심으로 원자력활동이 활발한 주요 9개국³⁹⁾이 제4세대 원자력시스템 국제 포럼(GIF)을 결성하였으며 2002년 전문가 검토를 거쳐 제4세대 원자력시스템으로 6개의 시스템³⁹⁾을 선정하고, 기술 로드맵을 작성하여 공동연구를 추진하고 있다. 2008년 12월 현재 6개 시스템 중 4개 시스템에 대한 약정이 체결되어 회원국간 국제공동 연구가 진행중이며, 소듐냉각고속로(SFR)⁴⁰⁾와 원자력이용 수소생산시스템(VHTR)에 대한 참여가 가장 활발하다.



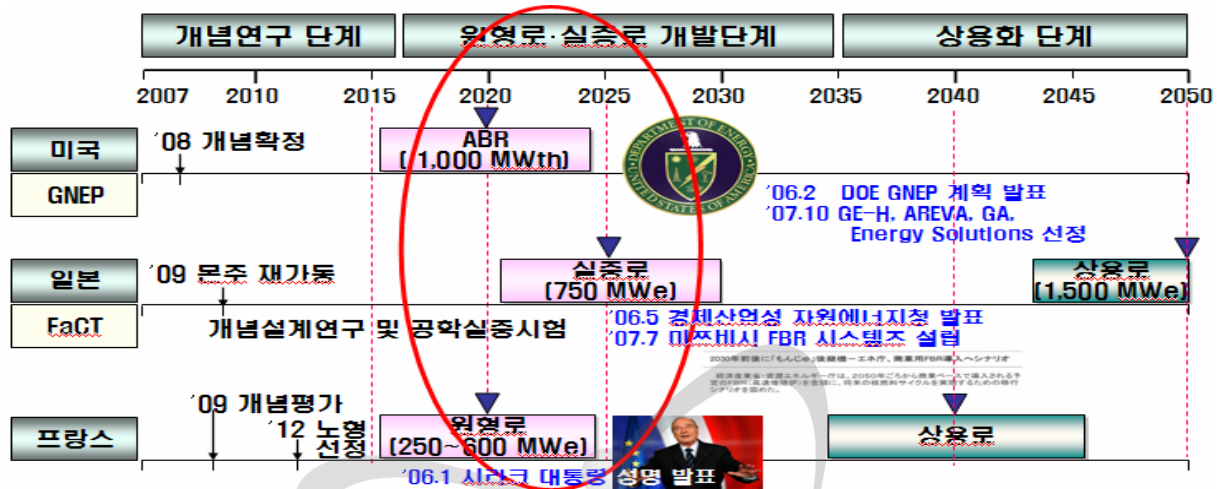
<그림 3-1> GIF Technical Working Group 평가 결과⁴¹⁾

38) 제4세대 원자력시스템(Generation-IV nuclear energy system) : 현재의 원전(제3세대)보다 지속가능성, 안전성, 경제성, 핵비확산성이 획기적으로 향상된 미래(차세대)의 원자력시스템으로 주요 원자력선진국들이 2030년대 상용화를 목표로 개발중임.

39) 소듐냉각고속로(SFR), 초고온가스로(VHTR), 초임계압수냉각원자로(SCWR), 가스냉각고속로(GFR), 납냉각고속로(SFR), 용융염원자로(MSR)

40) 소듐냉각고속로(SFR, Sodium-cooled Fast Reactor) : 고속의 중성자로 핵분열반응을 일으켜, 여기에서 생산된 열과 에너지를 이용하는 제4세대 원자로. 고속의 중성자를 이용하기 때문에 사용후핵연료에 남아 있는 고준위방사성폐기물인 초우라늄원소를 소각할 수 있어 고준위방사성폐기물을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 물을 냉각재로 사용하는 기존의 원자로와 달리 나트륨(소듐)을 냉각재로 사용하기 때문에 이런 이름이 붙었다.

국제공동연구를 바탕으로 미국, 일본, 프랑스, 중국 등은 제4세대 원자력시스템 개발을 위해 독자적인 국가별 장기 추진일정을 수립하여 추진하고 있다. 이 계획에는 사용후핵연료 재순환 및 원자력수소개발이 중심이 되고 있다.



<그림 3-2> 주요국의 고속로 개발 일정

미국은 차세대 원전개발을 위해 고속로 개발사업(GNEP; Global Nuclear Energy Partnership) 및 원자력이용 수소생산시스템 개발사업 (NGNP; Next Generation Nuclear Plant)을 추진중이다. 이 계획에 의하면 2020년까지 사용후 핵연료에 포함된 고독성 장수명 핵종 문제를 해결하기 위한 제4세대 고속로 (ABR; Advanced Burner Reactor)의 실증로 건설을 추진하고 2018년까지 원자력 이용 수소생산시스템과 이를 이용한 수소생산공정 (NHI; Nuclear Hydrogen Initiative)을 병행하여 개발할 예정이다.

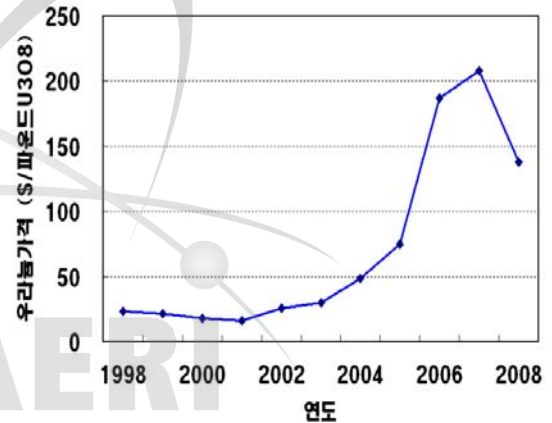
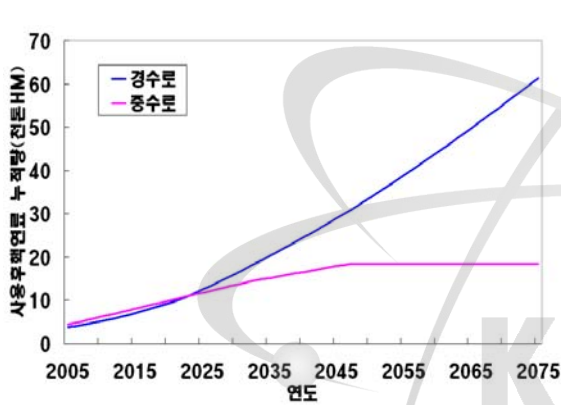
일본은 고속로 개발 프로젝트 (FaCT; Fast Reactor Cycle Technology Development) 및 원자력 수소 상용화 추진을 위해 2015년까지 고속로(SFR) 개념설계를 완료하고 2025년까지 고속로 운전을 개시할 계획이며, 2015년까지 원자력을 이용한 수소생산 공정의 하나인 열화학 수소생산기술의 실증을 완료할 계획이다.

프랑스는 2020년에 고속로 원형로를 운전개시하고, 2025년 상용화를 목표로

41) GIF 전문가 그룹을 통해 6개 시스템을 분석한 결과, 소듐냉각고속로(SFR) 및 원자력 이용 수소생산시스템(VHTR)이 우수한 것으로 평가됨(2002년 10월)

원자력 수소생산시스템의 핵심기술인 초고온가스로의 개발을 추진하고 있다. 프랑스는 고속로 시스템 개발을 위해 장수명 핵종의 분리 및 제거를 주 내용으로 하는 고준위폐기물관리법을 2006년 6월 제정하였으며 원자력 수소 핵심기술 개발 추진을 위해 아레바 (AREVA)는 600 MWt급 초고온가스로 ANTARES⁴²⁾ 개발을, 프랑스 원자력청 (CEA; Commissariat a l'Energie Atomique)은 수소생산 열화학공정을 개발하고 있다.

중국은 2020년까지 수소생산 고온가스로 실증을 목표로 기술개발을 추진중이며 2020년까지 실증용 고속로의 운전 개시할 계획이다. 고속로 개발에 있어 중국은 2050년까지 실험로-실증로-상용로 개발의 3단계 전략을 수립하여 추진하고 있으며 2013년 완공을 목표로 2기의 250 MWt급 고온가스로의 설계를 완료하여 인허가를 심사중이다.



<그림 3-3> 국내 사용후핵연료 누적 예상량

<그림 3-4> 국제 우라늄 가격 변동 추이 (현물시장 가격)

현재 국내적으로 원자력발전 이용확대에 따라 사용후핵연료의 누적량이 증가하고⁴³⁾ 전 세계적인 원전확대에 따른 우라늄 수요 증가와 자원민족주의 등으

42) AREVA New Technology based on Advanced gas-cooled Reactor for Energy Supply

43) 2008년 6월말 현재 국내 원전에는 약 9,710톤의 사용후핵연료가 저장되어 있으며, 연간 약 690톤이 발생함.

로 인한 우라늄 가격 및 공급 불안이 예상된다. 또한 전 세계는 청정 수소경제 시대가 2030년대 구현될 것으로 예측하고 이를 위한 연구개발에 적극적인 투자를 하고 있어 우리나라도 수소경제로의 진입을 위해 이산화탄소를 배출하지 않으면서 수소를 경제성 있게 대량 생산할 수 있는 기술 개발이 필요하게 되었다⁴⁴⁾.

이에 정부는 2005년에 제4세대 원자력시스템 개발을 위한 국제공동연구포럼인 제4세대 원자력시스템 국제포럼(GIF, Generation-IV International Forum)⁴⁵⁾에 가입⁴⁶⁾하고 제4세대 원자력시스템을 개발중이다. 현재 우리나라는 제4세대 원자력시스템 중, 사용후핵연료 문제의 기술적 해결능력 확보와 전력공급을 위한 소듐냉각고속로(SFR)와 미래 청정에너지원인 수소의 대량 생산·공급을 위한 원자력이용 수소생산시스템(VHTR) 등 2개의 시스템 개발에 2006년부터 참여하고 있다. 또한 사용후핵연료를 소듐냉각고속로의 연료로 재활용하기 위한 핵비확산성이 확보된 파이로(Pyro) 건식처리⁴⁷⁾ 기술을 2002년부터 미국과 국제 원자력 연구프로그램⁴⁸⁾을 통해 공동 개발중이다. 그러나 이와 관련한 장기 연구개발 계획의 부재로 전략적인 국제공동연구 추진에 한계를 가지고 있었다.

특히 우리나라가 역점을 두고 참여중인 소듐냉각고속로 연구개발의 경우 사용후핵연료를 재활용하기 때문에 관련 기술과 물질을 평화적인 목적으로만 이용한다는 것에 대한 국제사회의 신뢰 획득이 연구개발의 추진에 필수적이다. 그러나 그동안 장기계획의 부재로 인해 국제사회에 우리의 객관적이며 투명한 연구개발 추진일정을 제시하기 어려운 문제가 있었다.

이에 정부는 장기적인 미래 원자력시스템 연구개발의 기본방향을 제시하여

44) 2040년대 총 에너지 수요의 20%를 수소로 대체 (2005년 수소경제 국가비전 및 실행 계획)

45) 제4세대 원자력시스템 국제포럼(GIF, Generation-IV International Forum) : 2001년 미국을 중심으로 원자력활동이 활발한 주요 9개국(한국, 미국, 프랑스, 일본, 영국, 캐나다, 아르헨티나, 브라질, 남아공)이 제4세대 원자력시스템 공동 개발을 위하여 결성한 연구포럼으로 현재는 13개국(스위스('02년), EU('03년), 중국/러시아('06년) 가입)이 참여중. 우리나라는 2001년 설립시부터 참여한 창설국으로 활발한 활동을 하고 있음.

46) 제4세대 원자력시스템의 연구 및 개발에 관한 국제협력을 위한 기본협정 가입안 (2005년 8월 국무회의 의결)

47) 파이로(Pyro) 건식처리 : 사용후핵연료로부터 핵물질을 분리·정제하는 기술로서 순수한 플루토늄 회수가 불가능하여 핵무기 전용가능성이 없어 국제적으로 핵비확산성이 인정되는 공정임.

48) I-NERI (International Nuclear Energy Research Initiative) 프로그램

국제사회로부터의 불필요한 의혹과 오해를 불식시키고 국내 관련 연구를 일관되고 체계적으로 추진하여 향후 원자력 선도국으로서의 국제적 지위를 확보하기 위해 미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획을 수립한 것이다.

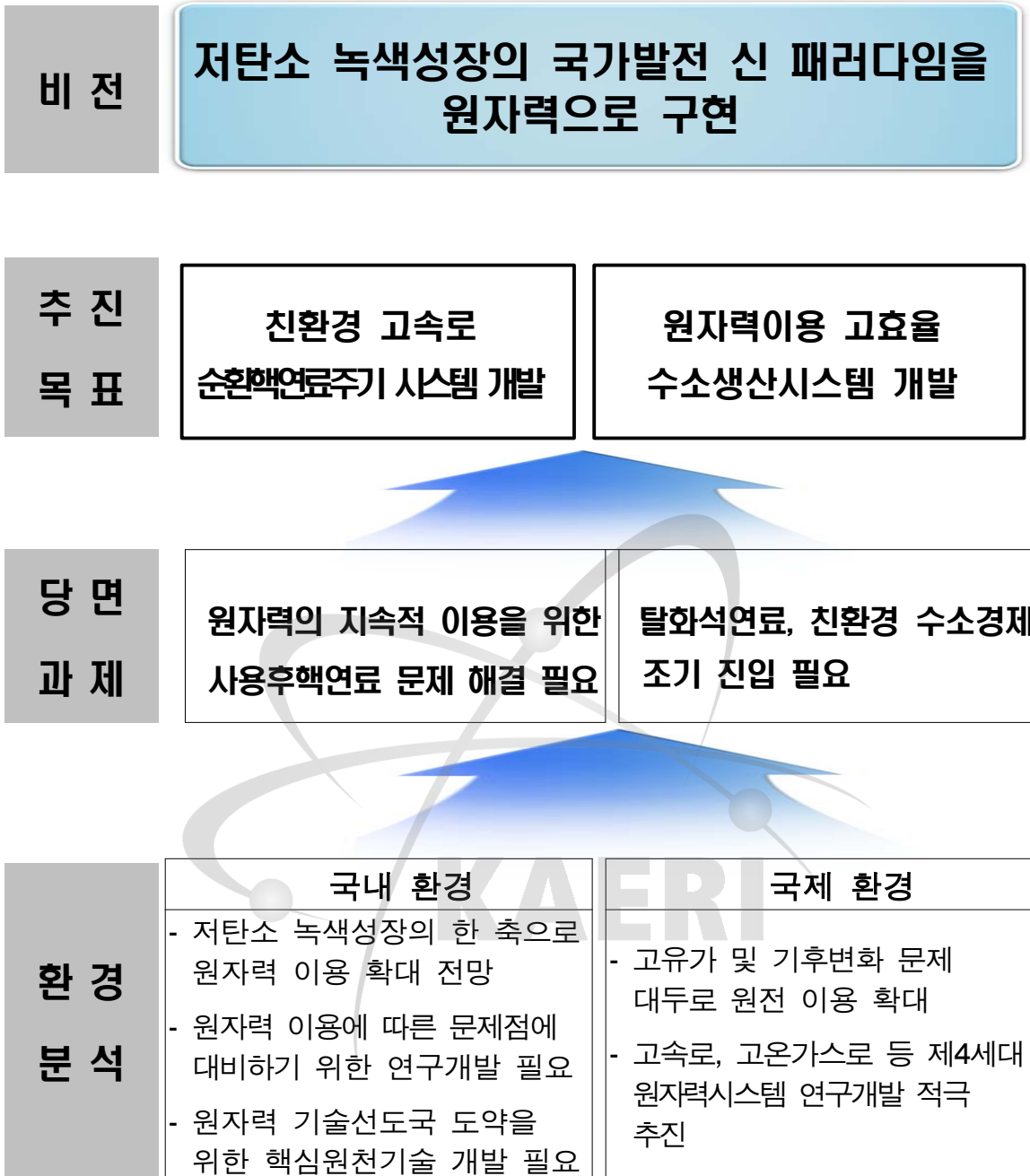
3. 계획 수립 과정

추진계획은 국내의 미래 원자력시스템 연구개발 및 사용후핵연료 관련 기술개발과 국내 사용후핵연료 발생 전망 등을 감안하고 2007년 Gen-IV 기획위원회의 결정에 따라 작성된 “미래 원전 로드맵”을 근간으로 하여, 각계각층의 다양한 의견을 한국원자력학회와 방사성폐기물학회가 공동으로 수렴하여 마련하였다. 주요 추진 경과는 아래와 같다.

- 「제4세대 원자력시스템의 연구 및 개발에 관한 국제협력을 위한 기본협정」 가입 결정 (2005년 8월, 국무회의 의결)
- 산/학/연 전문가로 구성된 “미래 원전 로드맵 수립위원회”를 통해 「미래 원자력시스템 연구개발 장기 추진계획(시안)」 마련 (2008년 5월 ~ 11월)
 - 원자력학회와 방사성폐기물학회가 공동으로 전문가 토론회 (2008년 5월) 및 공청회 (2008년 9월) 등을 통해 상기 시안을 검토
- 대국민 공청회와 원자력이용개발전문위원회 (2008년 12월)를 거쳐 「미래 원자력시스템 연구개발 장기 추진계획(안)」 마련

4. 추진계획의 비전 및 추진전략

추진계획의 비전은 포괄적으로 표현하면 저탄소 녹색성장의 국가발전 신패러다임을 원자력으로 구현하는 것이라 할 수 있다. 보다 구체적으로는 미래 원자력시스템 개발을 통한 기술 혁신 및 국가 발전 도모하고, 독창적인 원천기술 및 실용화기술의 개발로 관련 연구개발을 선도하며, 누증되는 사용후핵연료 관리문제의 기술적 해결을 통하여 원자력의 지속가능성 및 대국민수용성을 확보하는 한편, 수소경제의 상용화 시점에 준국산의 수소생산기술 확보하는 것이 연구개발을 통해 추구하는 것이라 할 수 있다. <그림 3-5>에 추진계획의 비전 및 목표를 도식화하였다.



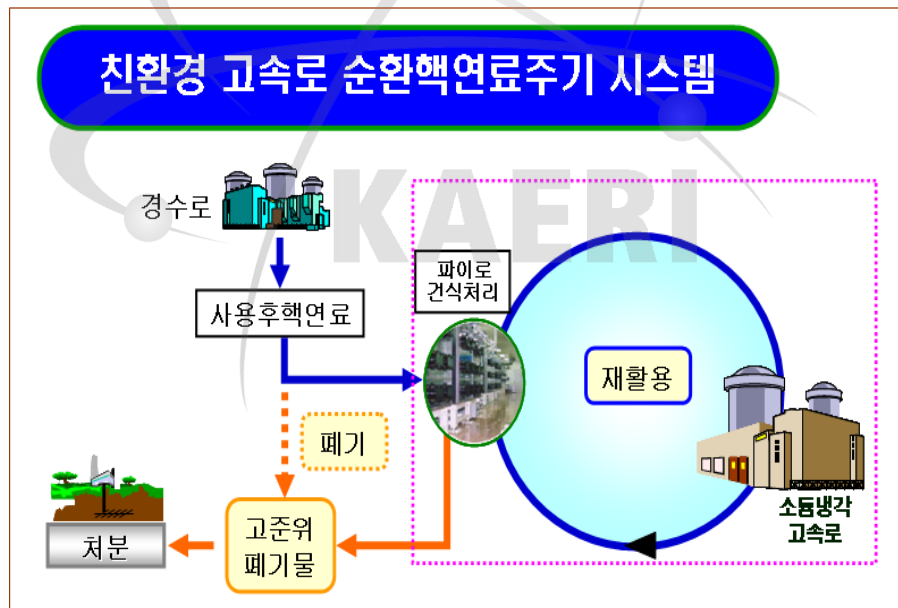
<그림 3-5> 미래 원자력시스템 개발 장기추진계획의 비전 및 목표

추진계획의 효과적인 달성을 위해 우선 국제공동연구 참여를 통해 투자 리스크를 분산하고, 국내·외 여건 변화에 따라 수정·반영하여 추진할 예정이다. 실증로와 실증로 운전경험은 미·일·프 등과의 국제 협력을 통해 획득하고 핵심 원천기술은 집중적인 투자를 통해서 자체 개발할 계획이다. 또한 동 추진계획의 일관되고 체계적인 추진을 위해 5년마다 수립되는 “원자력진흥종합계획”에

구체화하여 반영하고, 연구개발은 핵비확산성을 충분히 확보해 나가는 방향으로 추진하는 등 주기적으로 기술개발 추이와 국내·외 여건 변화를 반영하여 수정, 보완할 예정이다. 미래 원자력시스템의 개발에는 충분한 예산이 적기에 확보되어야 하는데 이를 위해서 예산투입이 비교적 적은 기초·원천 핵심기술 확보단계에서는 원자력연구개발기금 및 일반회계를 통해 예산을 확보하고 향후 과감한 재원 투입이 필요한 차세대 원자력시스템 건설 및 운영 등 실증단계 진입시에는 다각적인 예산확보 방안을 강구할 예정이다.

5. 추진계획의 주요 내용

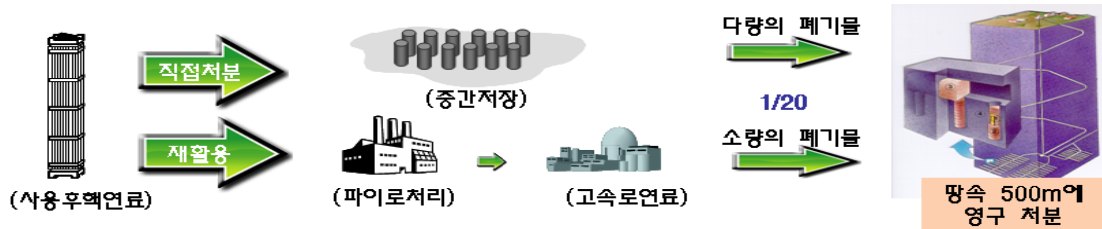
이번에 정부가 마련한 추진계획에는 제4세대 원자로 가운데 세계에서 가장 각광을 받고 있는 원자로 종류 중의 하나인 소듐냉각고속로(SFR)와 이를 연계한 핵비확산성이 보장된 파이로건식처리에 대한 기술개발을 담고 있다.



<그림 3-6> 친환경 고속로 순환핵연료주기 시스템 개념도

사용후핵연료를 파이로(Pyro) 건식처리를 통해 재가공한 후 소듐냉각고속로에 연료로 재활용하면 높은 연료 효율성과 고준위폐기물을 감축시킬 수 있는 일거양득의 효과가 있다. 이 기술을 적용하면 연료 활용성이 60배 이상 높아지

고, 방사성 독성은 1000분의 1수준으로 줄이고, 고준위 처분장의 크기를 100분의 1로 대폭 줄일 수 있어 경제적 효과가 매우 클 것으로 기대된다. 현재 원전 소내에 보관되어 있는 사용후핵연료만으로도 원전 20기를 120여년 동안 운전할 수 있는 연료로 사용이 가능하다.



❖ 직접처분과 재활용의 차이점

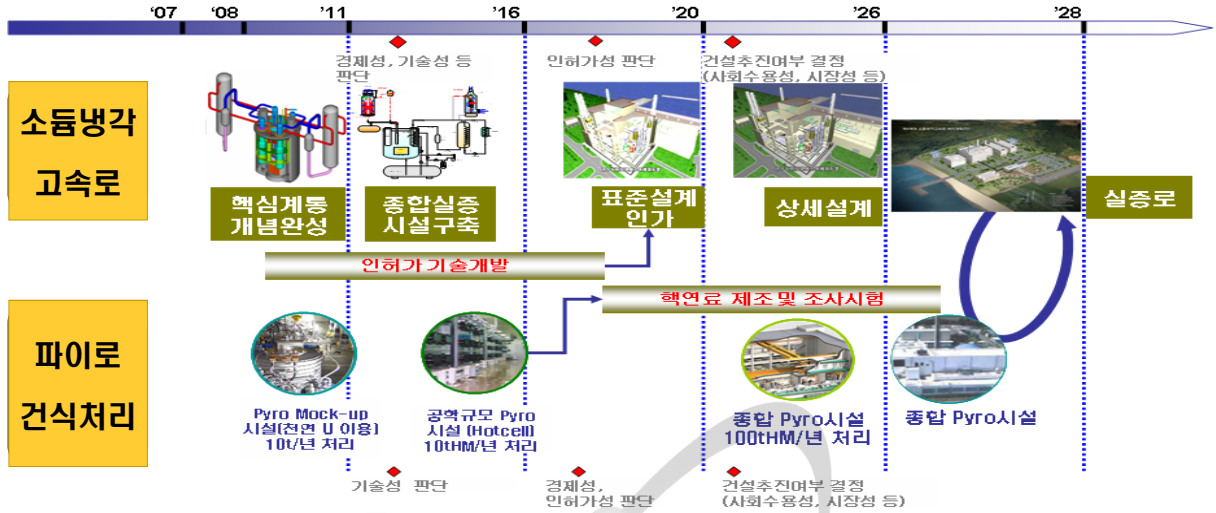


<그림 3-7> 친환경 고속로 순환핵연료주기 시스템 기대 효과

소듐냉각고속로(SFR)의 개발 일정은 크게 고유개념 개발(~2011년)과 기술실증 및 건설(~2028년)의 2단계로 추진될 예정이다. 고유개념 개발을 위해 제4세대 소듐냉각고속로 고유개념을 2009년까지 선정하고 고속로 고유개념 구체화 및 실용가능성을 2011년까지 입증할 계획이다. 이후 개념설계 (2012~2013년), 표준설계 (2014~2017), 표준설계 인가 및 예비설계 (2018~2021년)를 완료하여 최종적으로 2028년에 실증로를 건설, 운영할 계획이다.

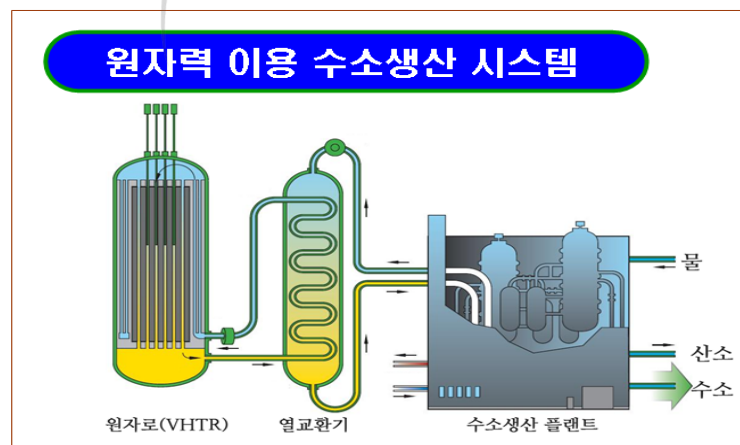
고속로에 사용할 사용후핵연료를 처리하는 기술인 파이로건식처리기술의 경우 파이로 건식처리 핵심기술 개발 및 검증 (~2011년)과 파이로 건식처리 실용화 시스템 개발 (~2030년)의 2단계 추진계획을 확정하였다. 우선 천연 우라늄 및 모의 사용후핵연료를 사용하는 건식처리 원천기술을 개발하기 위해 핵심기술을 2009년까지 개발 완료하고 2011년까지 공학규모의 모의실험 시설을 구축할 예정이다. 다음 단계로 사용후핵연료를 대상으로 한 파이로 건식처리 시설 완성을 위해 2016년까지 공학규모의 실증시설을 완료하여 관련 실험을 수행하며, 2020년에 종합 파이로 건식처리시설 상세설계를 완료하고 2025년까지 준상업시설 규모의 실용화시설을 건설, 운영하는 목표를 설정하였다. 기술개발이 완료되

면 핵비확산성이 확보된 사용후핵연료의 재활용 기술능력을 확보할 수 있어 사용후핵연료 문제해결을 위한 하나의 기술적 대안을 제시할 것으로 기대된다.



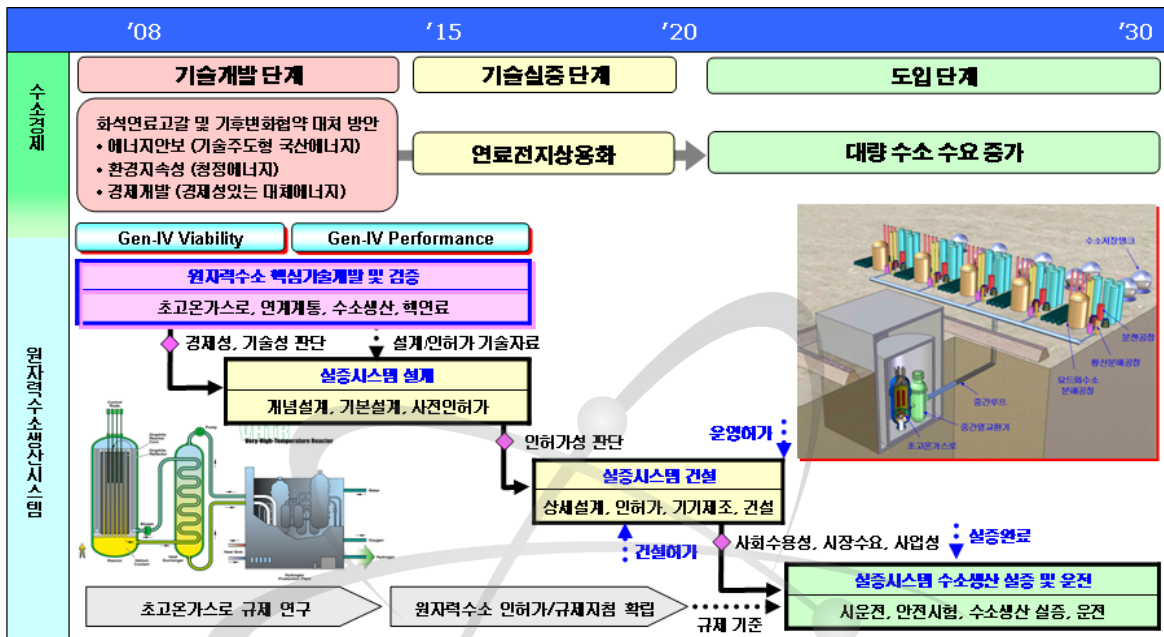
<그림 3-8> 친환경 고속로 순환핵연료주기 시스템 주요 개발일정

아울러 이번 추진계획에는 수소 경제시대를 대비하기 위한 원자력이용 수소생산시스템 개발 계획도 포함되어 있다. 원자력이용 수소생산시스템은 우라늄을 연소시켜 얻은 900°C 이상 고온의 열을 이용하여 물을 분해함으로써 수소를 경제적으로 대량생산할 수 있는 기술로서, 이산화탄소를 배출하지 않고 경제적으로 수소를 대량생산할 수 있는 장점이 있다.



<그림 3-9> 원자력이용 수소생산 시스템 개념도

구체적인 일정을 살펴보면, 관련 기술 개발을 추진하여 2011년까지 원자력 이용 수소생산시스템의 핵심·원천기술을 확보하고, 2017년까지 시스템 핵심기술의 성능 검증 및 기술현안을 해소하여 2022년에 실증로를 건설하는 것을 목표로 하고 있다.

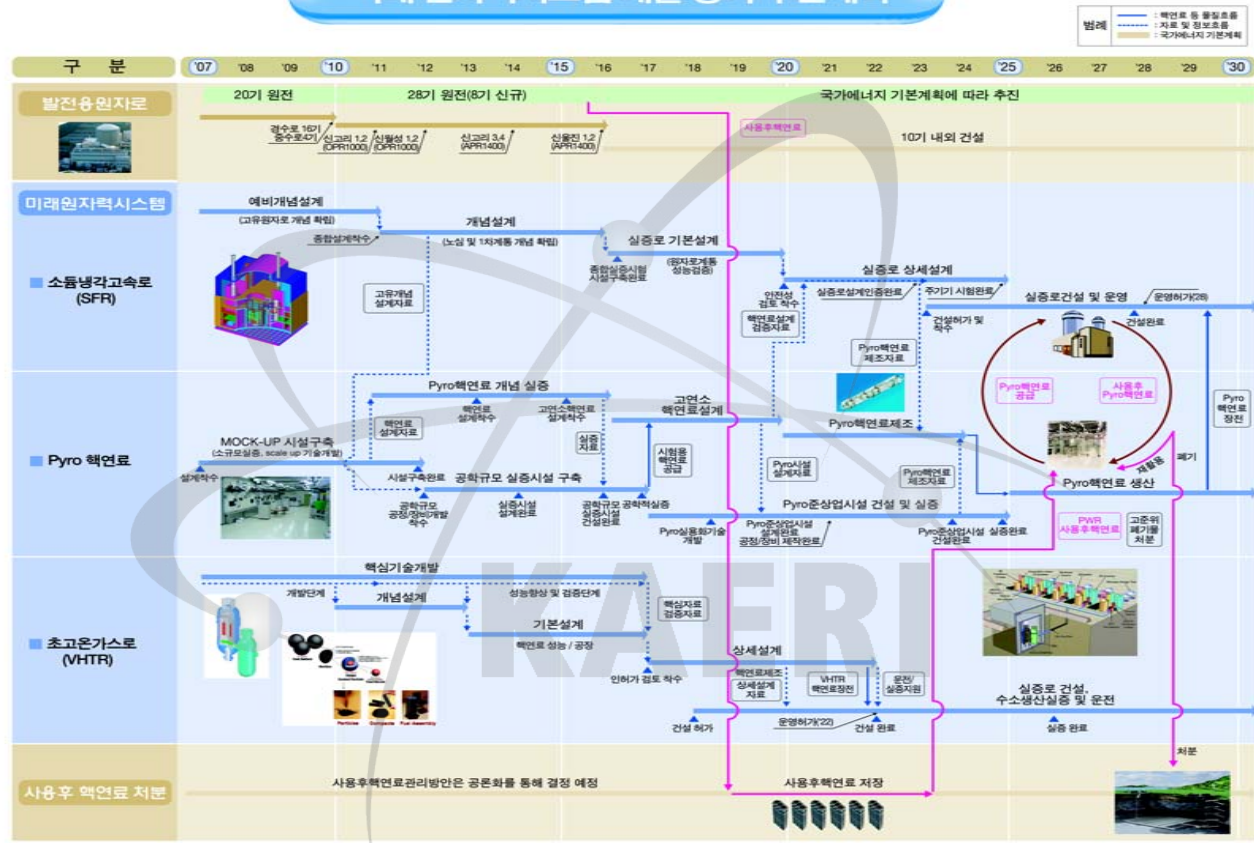


<그림 3-10> 원자력이용 수소생산 시스템 주요 개발일정

이 기술이 완성되면 수소의 경제적 대량생산으로 수소경제시대의 진입이 가능하게 되어 국가 에너지 문제 해결에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 원자력을 이용한 수소생산 방식은 이산화탄소를 배출하지 않는 수소생산방식 가운데 경제성이 가장 우수한 것으로 분석되고 있다.⁴⁹⁾ 또한 석유대체와 이산화탄소 배출 감축으로 고유가와 기후변화협약에 대응할 수 있게 될 것으로 기대된다. 2040년 총에너지 수요의 5%를 수소로 담당할 시 연간 약 8조 5천억원의 석유수입 대체효과와 연간 약 2천억원의 이산화탄소 배출 감축효과가 기대된다.

49) 생산방법별 수소생산단가 : 물전기분해 (\$4.14/kg), 태양력수소 (\$6.18/kg), 천연가스 분해 (\$1.12/kg, CO2 발생), 원자력이용 수소생산 (\$1.63/kg) - National Academy of Science

미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획



<그림 3-11> 미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획

제 2 절 원자력연구원의 기술사업화 활성화 방안

우리나라는 21세기 새로운 성장 동력을 마련하기 위한 노력을 기울이고 있으며 이를 위해 정부출연 연구원은 원천기술 혁신역량을 강화하고, 이렇게 구축된 기술역량을 기반으로 사업화하는 두 가지 미션을 갖고 있다. 특히, 원자력 기술은 발전분야와 함께 비발전의 기술을 보유하고 있어 사업화의 기회가 다양하다.

1959년 2월 설립된 원자력연구원은 국내 최초의 국가 원자력 전문연구기관으로서 원자력 기술 개발을 통한 기술자립과 다양한 연구영역의 확대로 국가 경쟁력 강화에 많은 기여를 해왔다. 중수로·경수로 핵연료의 국산화, 연구용원자로 ‘하나로’의 설계 및 건설, 한국표준형원전(KSNP)의 개발 등은 국가 원자력산업 발전의 이정표가 되었으며, 해수의 담수화가 가능한 일체형원자로 SMART, 연구용원자로 PALLAS, 자원활용과 환경문제를 획기적으로 개선할 순환형원자력시스템, 소재·식품·환경·농생물 분야와 방사선기술의 융합 등에 대한 지속적인 연구개발로 21세기를 대비하고 있다.

본 연구의 주요 목적은 원자력연구원 기술이 사업화로 성공적으로 연결될 수 있는 요인을 발굴하고 활성화하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 기술사업화 및 연구소기업 활성화 방안, 연구소 창의성 제고를 위한 실천공동체 (CoP: Communities of Practice) 구축방안, 기술사업화 역량제고를 위한 대내외 협업체계 구축전략 등 기술사업화를 위한 필요 요인을 중심으로 고찰하였다.

1. 기술사업화 역량 강화

가. 기술사업화 및 연구소기업 현황

출연연구원(출연(연))의 기술사업화 현황은 인력 및 조직 특성 등 여러 부문에서 문제점을 보이고 있다. 이러한 문제점은 조직 및 연구원의 기술사업화에 대한 공감대 부족과 관심 저조, 전반적인 연구인력의 사업화에 대한 전문성 부족, 기술사업화 관련 출연(연) 자체 예산 확보의 난이성, 공공 연구개발 (R&D)의 기술상용화 시스템에 따른 문제에서 기인한다. 출연(연)의 기술이전전담조직은 전문 인력을 확보하여 운영하기보다는 연구관리부서에서 기술이전업무를 단순한 순환보직형태로 수행하고 있으며 연구성과물을 단순히 후처리하는 방식의

일차적인 업무만을 대부분 수행하고 있다. <표 3-1>에서 알 수 있듯이 2008년 12월 현재 대덕특구내 정부출연(연)에서 만들어진 연구소 기업은 12개로 매우 저조한 실정이다.

<표 3-1> 대덕특구내 연구원 기업 현황⁵⁰⁾

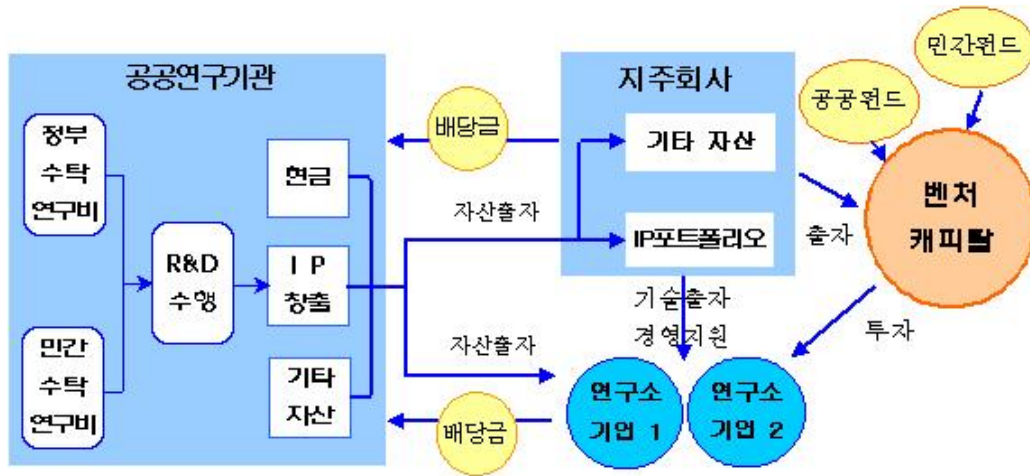
(단위 : 백만원)

No	출자기관	연구소기업	승인시기	사업 분야	출자액	설립지분율
1	원자력(연)	(주)선바이오텍	2006.03.30	식·의약품 및 화장품	378	37.8%
2	기계(연)	(주)템스	2006.12.19	매연저감장치, 천연가스 차량부품 등	252	20.0%
3	표준(연)	(주)재원티앤에스	2007.05.29	세라믹 부품소재	1,895	38.7%
4	전자통신(연)	(주)오투스	2007.07.23	텔레매틱스 분야	25	20.0%
5	전자통신(연)	(주)매크로그래프	2007.07.23	CG 등 영상 특수효과	150	20.0%
6	생명공학(연)	(주)메디셀	2007.12.28	바이오신약개발	400	44.4%
7	KAIST	(주)엠피위즈	2008.07.17	음성인식 및 음색변환 기술	33	32.7%
8	기계(연)	(주)제이피이	2008.10.16	광학필름 및 성형용 룰	128	21.2%
9	전자통신(연)	(주)비티웍스	2008.10.16	인터넷 ID 관리	128	20.0%
10	전자통신(연)	(주)테스트마이다스	2008.10.16	SW 테스트	25	20.0%
11	전자통신(연)	(주)지토피아	2008.12.17	GIS 시스템, 솔루션 개발	227	22.7%
12	전자통신(연)	(주)넥스프라임	2008.12.17	홈 네트워크	200	20.0%

최근 대덕연구개발지원본부는 특구육성에 관한 특별법 중 연구소 기업을 활성화하기 위한 법률개정을 추진하였다. 이는 정부출연(연)이 기술지주회사⁵¹⁾를 통하여 연구원 기업을 설치할 수 있도록 근거 마련 및 행정절차 간소화를 위함이다.

50) 대덕특구지원본부 (2008)

51) 기술지주회사는 국립연구기관 또는 정부출연연구기관이 보유하고 있는 기술의 사업화를 목적으로 다른 회사의 주식 (지분포함)의 소유를 통하여 해당 회사의 사업내용을 지배하는 것을 주된 사업으로 하는 회사를 이룸.



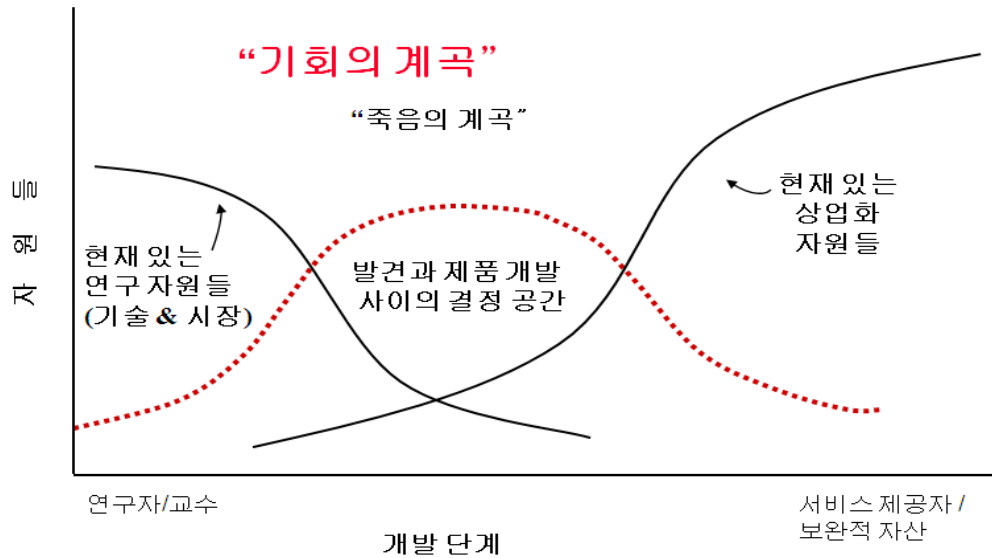
<그림 3-12> 연구원 기업 및 기술지주회사의 구조⁵²⁾

나. 기술과 사업과의 Gap

연구원 기술을 사업화로 연결하는 과정에서는 소위 ‘죽음의 계곡’(valley of death)이 존재하기 때문에 이를 극복하는 것은 매우 어려운 과제이다. 죽음의 계곡이란 발명이나 아이디어에 관한 시장성 인지와 사업화간에 존재하는 차이를 말한다(Markham, 2002). 모든 기업들은 기술개발에 필요한 자원, 인력, 조직 구조를 갖고 있다. 이들 요소는 그림에서 계곡의 좌측에 있다. 마찬가지로 기업들은 사업화 활동에 필요한 내용인 마케팅, 판매, 촉진, 생산, 유통 등을 보유하고 있으며, 이들은 그림의 계곡 우측에 존재한다.

<그림 3-2>에서 보듯 연구자는 관심이 연구와 논문발표 등에 있기 때문에 대부분의 자원들을 기술개발의 앞부분에 투자를 한다. 반면 기업들은 사업화에 대부분의 자원들을 투입하게 된다. 따라서 그림과 같이 가운데는 상대적으로 자원투입이 부족하며 여기에 죽음의 계곡이라고 불리는 취약 부분이 나타나게 된다. 죽음의 계곡을 넘는 방법에는 여러 가지가 있으나, 기술사업화 교육을 통한 연구자의 사업화 역량을 향상시키는 것도 효과적인 방법 중의 하나이다.

52) KISTEP, 대덕특구지원본부 (2008)



<그림 3-13> 죽음의 계곡: 사업화의 요구 공간⁵³⁾

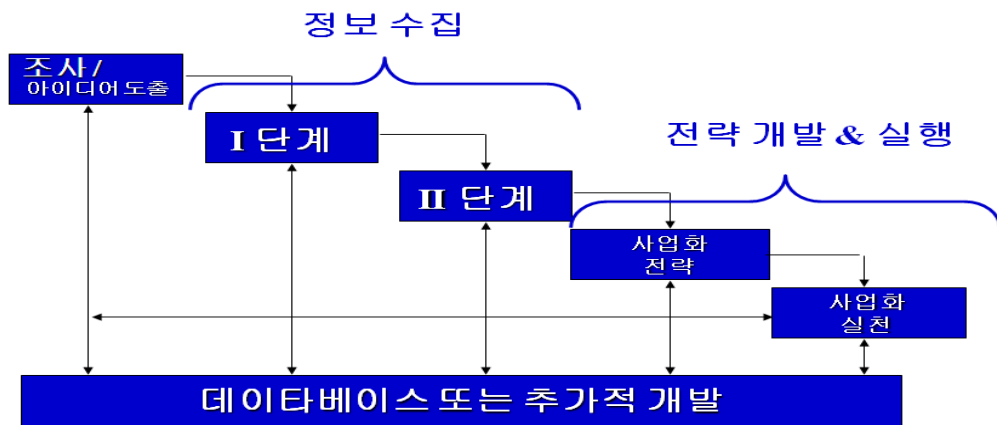
다. 기술사업화 역량 강화 프로그램

(1) 미국: RTP의 기술사업화 교육(TEC)

TEC (Technology Commercialization) 프로그램은 미국 노스캐롤라이나 리서치트라이앵글파크 (RTP)의 노스캐롤라이나 주립대 경영대학내 HITEC 연구소에서 개발한, 기술을 찾고 평가하며 사업화하는 방법론을 구체적으로 제시하는 벤처기업 창업에 필요한 준비 교육과정이다. TEC 프로그램은 각 주제별로 설문지, 점수 표, 합계 차트, 워크시트 등이 있는데 이를 팀원들이 함께 모여 팀활동을 통해 기술사업화 과정을 실제로 학습한다. 교수진은 벤처기업 경험이 있는 이공계 교수와 경영학 교수로 구성되어 있으며 'Executives in Residence'라는 현장경험의 경영진이 코치로서 함께 수업에 참여한다.

TEC는 <그림 3-3>과 같이 탐색조사/아이디어 도출, 정보수집 I, II, 사업화 전략, 사업화 실행 등 총 5단계로 구성되어 있다. 각 단계를 거치면서 데이터베이스를 만들며, 피드백 과정과 반복과정을 통해 내용의 깊이를 더해 좋은 사업화 의사결정이 이루어지도록 하고 있다.

53) Markham (2002)



<그림 3-14> TEC 알고리즘의 체계⁵⁴⁾

탐색조사/아이디어 도출 단계는 높은 잠재력을 보유한 기술을 찾는 활동으로서 여러 순차적 요인으로 구성되며 기술영역의 확인, 팀 조직과 준비, 기술가들과의 구조화된 인터뷰, 팀 발표, 제품명세서, 기술비교 및 선택, 기술가들에게 피드백, TPM, 가치제안서 작성 등을 수행한다.

정보수집 I 은 평가단계의 정보수집이며 사업화의 매력도를 사업이나 기술 조사가 이루어지기 전에 초기단계에서 평가하는 것으로서 초기 치명적인 결점을 발견할 수 있다. 본 단계에서는 지속적인 기능분석을 통해 전략적 분석 도출 및 의사를 결정한다. 정보수집 II 는 분석단계의 정보수집이며 I 단계에서 선택된 것을 중심으로 보다 구체적인 제품 아이디어와 기능분석, 전략분석, 제품 재정의, 의사결정 활동을 수행하며 아이디어 재정의, 아이디어 탈락, 프로세스에 따라 진행 등 3 가지 중 가장 적절한 것을 선택하게 된다.

사업화 전략 단계는 기술우위와 보호능력, 사업화 경로의 세분화, 신제품을 향한 진입전략과 확대전략의 구축, 보완재의 평가, 전략 플랫폼의 결과, 사업화를 위한 적합한 서류작성 등으로 구분된다. 사업화전략의 실천단계는 교육적 측면보다는 실제로 사업화에 적용해 보는 단계로서 우수 사업계획서를 만들고 이를 통해 신사업창출의 기반을 구축하고, 벤처캐피털(VC)로부터 자금을 지원 받고, 해당분야의 경영진을 모집, 필요 조직을 구축하는 과정이다.

54) Markham et al. (2000)

(2) 포트폴: 기술사업화 교육 (CoHitec)

CoHitec은 COTEC (2004년 설립)에 의해 고성장의 하이테크 벤처를 창출하기 위해 미국 TEC 프로그램과 연계하여 운영하고 있으며, 실제 기술을 모집하여 신제품을 개발, 새로운 벤처 창출을 지속화하도록 하는데 그 목적을 두고 있다. 현재 리스본과 포르투에서 매년 약 80명의 기술사업화 인력을 양성하고 있으며 매년 30여개의 기술분석, 1년에 약 12개의 사업계획서를 작성하여 2개 정도의 사업 프로젝트가 벤처기업으로 연결되고 있다.

CoHitec은 총 3단계로 구성되며 1단계에서는 미국의 기술사업화 방법론인 TEC 알고리즘을 따라 진행되고 2단계에서는 첫 단계에서 선택된 사업 프로젝트로부터 사업계획서를 보고 투자를 실시한다. 마지막 3단계에서 가상기업은 6개월 이내에 사업계획서를 정교화해서 투자자들에게 보이며, 벤처기업을 만들기 위해 투자금을 유치한다.



<그림 3-15> CoHitec의 목표와 구조

(3) 대덕 기술사업화 (TEC) 교육

대덕특구 지원본부에서는 연구소, 대학 등의 기술 사업화 역량을 강화하고, 장기적으로 이를 소화, 흡수하여 대전의 사업화 학습프로그램에 접목하고자

TEC 교육 프로그램을 도입하였다. 대덕특구 지원본부는 TEC 교육을 통해 개인에 대한 기여도로 '기업가 정신의 자신감 (Entrepreneurial Confidence)'을 제공하고 bottom-up 시장접근으로 기존의 ton-down 기술 중심 방식의 시장접근에서 오는 오류를 사전에 방지하고 벤처캐피탈에 대한 접근 가능성을 제고하고 사업실패 가능성을 낮추고, 지원기관들이 올바르게 벤처지원 역할을 담당하도록 역량을 강화하고자 하고 있다.

<표 3-2> 대전 TEC 과정

단계	주차	세션 내용	비고
사전 기술 탐색/확보	0 (beauty parade)	각 기관방문 설명 및 참여기술 확보	태스크포스 팀 중심으로 사전 기획
탐색/아이디어 도출	1-2	기술의 묘사, 문제기술서 초기 TPM, 가치제안서 도출, PAMM	팀 구성 및 팀별 활동 1일 강의와 3일 코칭
정보수집 1단계	2-3	시장평가 워크시트, 제품특성 워크시트. 1단계 기능별 분석	치명적 결함 발견 1일 강의와 3일 코칭
정보수집 2단계	4	1단계 기능별 분석, VOC 분석	현장 조사 강화 1일 강의와 3일 코칭
사업화 전략	5	전략분석 및 평가, 사업모델(BM) 개발 핵심자산, 보완자산 워크시트	사업모델의 현실화 1일 강의와 3일 코칭
사업화 실행	6	사업계획서 초안 준비 및 발표 준비	일관된 발표 지도 1일 강의와 3일 코칭
사업계획서 발표	7	최종 발표	1일 강의와 2일 코칭후 최종발표

2. 창의문화 : CoP를 통한 연구개발 창의성 제고방안

가. 창의성의 개념

창의성은 새롭고 가치 있는 무엇인가를 만들어낼 수 있는 능력을 기초로 창의적 결과를 도출하는 일련의 과정은 말한다. 이러한 창의성의 개념은 매우 다양한 연구와 관점에서 사용되는데 창의성을 지적 인지능력으로 보는 입장에서는 인지능력의 한 측면, 즉 사고유형이나 사고전략의 하나로 파악되며 당면한

상황을 해결해 나가는 인지적 과정 및 산출해 낸 결과 (반응, 산물, 아이디어)의 직접관찰을 통한 독창성으로 이해되기도 한다.

나. 창의성 경영의 의의

창의성 경영은 조직이 새롭고 유용한 아이디어를 창출하고 그 성공적인 달성을 위해 촉진요소와 저해요소를 관리하는 것으로 개인은 물론 집단과 조직이 창의적 행위를 하도록 유인하며 집단과 조직 차원에서 창의적인 문제해결이 이루어지도록 경영시스템 내 제반 특성과 조건을 관리하는 것이다.

다. 창의성 경영의 원칙

창의성 경영에는 다양성, 자율성, 잉여성, 연결성, 유연성 등 5가지의 원칙이 있다. 다양성은 다양한 자극, 성과 연령, 인종 등 측면에서의 구성다양성, 다양성에 따른 창조적 마찰 (creative abrasion) 등을 포괄하며 자율성은 자기주도성과 자발성, 상향식 (bottom-up) 의사전달의 가능성, 비공식성 등을 포함한다. 잉여성은 시간 및 자원, 인력의 여유 (slackness), 중복성 허용 등의 요소를 말하며 연결성은 커뮤니케이션의 활성화, 대내외적 네트워킹 및 제휴 활성화 정도 등을 포함한다. 마지막으로 유연성은 관료제적 경직성과 반대되는 개념으로서 변경가능성, 개방성 등을 포함한다.

라. 창의적 CoP의 의의

CoP (Community of Practices)는 구성원 간 새로운 정보 및 지식의 상호학습 및 문제해결방안을 모색하기 위한 활동하는 공동체를 지칭하며 공통된 관심을 갖는 사람들이 오랜 기간 동안 깊게 파고들어 아이디어를 공유하고 해결책을 찾아, 혁신을 구축하려고 할 때 일어나는 사회 학습과정이다. CoP와 유사한 개념에는 동호회, 프로젝트팀 등이 있으며 이들의 특징 및 차별성은 <표 3-3>에 제시하였다. 지식경영시스템의 지식생산의 한계와 참여의 한계가 드러나자 지식경영의 성공을 위해 주변인들이 보다 적극적으로 참여하여 지식과 스킬을 익히는 연구회, 학습조직 등의 CoP가 등장하게 되었다.

<표 3-3> CoP와 유사 개념 비교⁵⁵⁾

개념	목적	구성원	결합 원천	지속기간
CoP	지식 창출, 확산, 교환 및 개인 역량 개발	주제에 대한 전문성과 열정을 바탕으로 자기선택	그룹과 그 전문성에 대한 열정, 헌신, 자기동일성	주제가 연관되고, 함께 배우는데 가치와 흥미를 갖고 있는 한 지속
공식부서	제품 및 서비스 전달	관리자에게 보고해야하는 모든 구성원	직무요구와 공통 목적	영속 유지 의도(다음번 조직개편까지 지속)
운영팀	운영 혹은 프로세스 관리	경영자가 구성원 선택	운영에 대한 책무 공유	지속의도(운영 요구 시점까지 지속)
프로젝트팀	구체적 과업 완수	과업 수행할 직접역할을 하는 사람	프로젝트의 목적과 목표	종결시점 예정(프로젝트 완료시점)
관심공동체/동호회	정보 습득	관심이 같은 모든 사람	정보 접근과 공통점 인식	유기적으로 진화하고 종결
비공식네트워크	정보수집 및 전달 구성원 알기	친구, 사업상 지인, 친구의 친구	상호간 요구와 관계	시작과 종결 없음(사람들이 서로 연락하고 기억하는 한 지속)

마. 원자력연구원의 창의적 CoP 운영 현황

원자력(연)의 지식경영은 2004년 8월 새롭게 구축된 지식경영시스템은 통해 활성화되는 계기를 마련하였다. 도입 초기 CoP 프로그램을 지식경영 마일리지와 연계해 운영함에 따라 원내 CoP가 활성화 되었으나 2006년 3월 지식경영전담팀이 해체되고, 지식경영 업무가 업무혁신팀으로 이관됨에 따라 CoP 활동이 크게 위축되었다. 이에 원자력(연)은 CoP 활동을 활성화하기 위해 우수 CoP 운영 및 활동을 지원하고 부서 당 한 개 이상의 CoP 개설을 유도하고 있다. 또한 분기별 활동이 저조한 CoP는 폐지하고, CoP 당 최소 회원 5명 이상 유지를 권장하고 있다.

원자력(연) CoP 운영상의 문제점은 다음과 같다. 우선 지식경영의 일환으로 추진됨에 따라 CoP를 통한 지식의 등록과 조회 활동에만 초점을 두는 CoP 활동이 부각됨으로써 문제해결 방안을 탐색하는 단계까지 발전되지 못하고 있다.

55) Wenger, McDermott and Snyder (2002) p.42

또한 업무에 기반을 둔 CoP 활동이 주축이 되었기 때문에 업무개선을 떠나 창의성을 추구하는 본연의 CoP 활동이 위축되었다. 마지막으로 지식경영시스템이라는 온라인 기반활동을 통해 형식지가 강조됨에 따라 상대적으로 암묵지 형태의 지식창출 및 문제해결기능을 약화시켰다.

<창의적 CoP 설문조사>

1. CoP 관련 설문조사의 목적

- 원자력(연)의 CoP 활동현황을 타 기관 운영현황과 비교분석

2. 설문조사 진행 및 응답현황

- 기간 및 응답자 : '08.9~10월, 307명
- 대상기관 : 대전의 정부출연연 (4개), 청단위조직 (2개), 공기업 (3개)

3. 분석결과

- 개인별 대내외 CoP 참여현황은 원자력(연)이 평균 3.6개로 가장 높음.
- CoP를 통해 얻는 긍정적 이득은 타기관에 비해 상대적으로 낮게 나타남.
- CoP를 통해 본 창의적 학습풍토

구분	창의다양성	창의 자기주도성	창의 개방성	창의 연결성	창의 도전성
타기관 비교	낮음	낮음	낮음	낮음	낮음

○ 원자력(연) CoP 창출 성과 평가

- 창의적 성과 창출 측면 : 가장 높게 나타남.
- 독창적 지식 및 노하우 산출 측면 : 가장 낮게 나타남.
- 참여 구성원의 전문성 향상 측면 : 상대적으로 낮게 나타났지만, 타 기관과의 격차는 크지 않음.
- 참여 구성원의 문제해결능력 향상 측면 : 가장 낮게 나타남.
- 대외적으로 인정할만한 성과 창출 측면 : 가장 낮게 나타남.
- 당초 세웠던 자체 운영목표 달성 측면 : 상대적으로 낮은 것으로 나타났지만, 절대 수준 자체는 낮지 않음.

<표 3-4> 원자력(연)의 CoP 운영현황 및 변화⁵⁶⁾

년도	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년 6월
등록 CoP	34개	89개	155개	184개	123개
변동		55개 신설	66개 신설	41개 신설	61개 폐지

바. CoP를 통한 연구개발 창의성 제고방안

CoP가 활성화되기 위해서는 다음과 같은 세 가지 구성요소가 필요하다. 첫째 커뮤니티가 함께 필요로 하는 지식의 범위로서 CoP 필요성에 대한 아이덴티티를 제공하는 영역이다. 두 번째는 영역이 정해진 사람들의 모임이며, 이들 간에 관계의 질 (quality)을 나타내고, 내부와 외부간에 경계를 나타내는 커뮤니티이다. 마지막으로 구성원들이 공유하고 함께 개발한 지식체계, 방법들, 도구, 이야기, 사례, 문서 등의 실천이다.

우리나라의 연건에서 성공적인 CoP를 활성화하기 위해서는 사전에 수립한 전략을 일련의 지식의 영역으로 변환시킬 수 있어야 하고 각각의 영역에서 지식을 제공하기 위해 커뮤니티를 형성할 수 있는 인재들을 모색해야 한다. 또한 실천가들이 실천을 통해 개발에 참여하고 유용한 경험이 일어나게 만들어야 하고 세가지 구성 요소(영역, 커뮤니티, 실천)의 크기와 공통된 접점을 만들기 위해 후원조직이 필요하다.

사. 원자력(연) CoP 운영 개선방안 제언

원자력(연) CoP가 본래 의도한 창의적 성과 창출에 기여하기 위해서는 다음과 같은 개선노력을 기울일 필요가 있다. 첫째, 내부지향적으로 운영되는 원자력(연)의 CoP 참여의 한계를 극복할 필요가 있다. 이를 위해 원자력(연)의 경우 향후 CoP의 긍정적 참여효과가 클 것으로 예상되는 외부 개방적 CoP 참여활동을 촉진할 필요가 있다. 이를 위해 외부 개방적 CoP 참여활동을 촉진하기 위해 조직차원에서 CoP 지원방안을 강구해 나가야 한다.

56) 원자력(연) 내부자료, '지식경영 운영개선 ('08.2)'

둘째, 현행 자발적 참여를 기초로 한 부서중심형, 부서횡단형 CoP 활동을 좀 더 내실을 기하는 방향으로 운영방식을 개선할 필요가 있다. 현재 원자력(연)은 전형적인 CoP도 아니면서 그렇다고 기존의 TF나 프로젝트팀도 아닌 중간조직 형태의 CoP를 운영하고 있는 것으로 추정된다. 향후 구성원들의 자발적 참여를 전제로 기존의 TF나 프로젝트팀과 구분되는 학습공동체 원리에 입각한 CoP 운영을 권장해 나가야 한다.

셋째, 원자력(연)의 경우 향후 내부지향 CoP 운영 시 Off-line형을 권장하는 방향으로 정책방향을 전환할 필요성이 있으며, 외부인의 참여유인이나 시간적/공간적 한계를 극복하기 위한 목적에서 개방형 CoP를 운영하려고 할 경우 순수 Off-line형을 권장하는 것이 바람직할 것이다.

넷째, 원자력(연)의 경우 CoP의 창의적 조직운영 측면에서 타 기관에 비해 상당히 낮은 것으로 나타나고 있어 시급한 개선이 요청된다. 이를 위해 CoP의 운영방식에 대한 교육 등을 시행할 필요성이 있으며, 보다 근본적으로 조직의 전반적인 운영풍토를 좀 더 창의성을 촉진하는 방향으로 전환해 나가야 할 것이다.

<표 3-5> 성공적 CoP 실행방안⁵⁷⁾

구분	실행방안
영역(공통초점)	<ul style="list-style-type: none"> - 활동영역의 재구축 노력 - 학습주제의 지속적 변화를 통해 영역의 재설정 - 영역의 유형(업무개선형, 전략형, 학습형) - 융합을 통해 신규 니즈 발굴 노력.
공동체(관계)	<ul style="list-style-type: none"> - 신입직원 유입과 기존인력과의 의사소통 활성화 - 외부 전문가의 유치 - 조직의 학습문화와 결합 - 구성원간 친밀감과 흥미부여
실천(유용한 경험)	<ul style="list-style-type: none"> - 일과 학습을 일치(學業不二) - 작은 성과 발굴과 관심유발 - 학습활동 결과 확산 및 공유
후원 조직	<ul style="list-style-type: none"> - CEO의 의지와 참여 - 조직의 변화관리 - 성과보상 등 인사제도와 연계.

57) 최종인/권상순 (2007)

3. 협력: 기술사업화 활성화 전략

가. 기술사업화를 위한 협력

기술사업화를 하는데 있어 연구원이 독자적으로 하는 경우와 다른 기업 등과 협력하는 경우가 있을 것이다. 연구원이 다른 기업들과 협력하여 기술사업화를 추진할 경우 다음과 같은 요인을 이해하고 충족시켜줘야 한다.

- 기술개발 비용 및 시장 진입 비용 절감을 위한 협력
- 개발 및 시장 진입 위험을 줄이기 위한 협력
- 개발 시간과 신상품 상업화 시간을 줄이기 위한 협력
- 파트너로부터 필요 역량과 자원 확보를 통한 사업비 절감
- 프로젝트 비용과 위험 분산을 통한 리스크 최소화
- 기술표준 공유기회 확보 및 활용

<표 3-6> 상이한 개발 협력방법 간의 장단점 비교⁵⁸⁾

방법	속도	비용	통제	기존 역량 활용 잠재력	신 역량 개발 잠재력	타 기업 잠재력 평가 잠재력
단독 내부개발	저	고	고	가능	가능	불가능
전략적 제휴	변동	변동	저	가능	가능	때로 가능
합작투자	저	공유	공유	가능	가능	가능
라이선스 도입	고	중	저	때로 가능	때로 가능	때로 가능
라이선스 제공	고	저	중	가능	불가능	때로 가능
아웃소싱	중/고	중	중	때로 가능	불가능	가능
공동 연구조직	저	변동	변동	가능	가능	가능

58) Schilling (2008), p.165

기술사업화를 위한 협력을 위해서는 위에서 제시한 조건들을 고려해야 하며 동시에 개별 기업들이 원하는 바에 부합하는 협력전략을 찾아서 각 기업의 요구에 맞추어 주는 것이 필요하다. 이를 위해 협력 대상인 기업을 규모에 따라서 대기업과 중소기업으로 나누고, 협력 대상 제품의 종류를 소비재와 산업재로 4개 분면<표 3-7>으로 나누어 영역별로 협력 전략을 생각해 볼 수 있다.

이렇게 나누어 보면, 현재까지 원자력연구원의 사업화 성공사례로 평가되어 온 헤모힘과 핵연료피복관 개발사례를 II와 IV 전략으로 분류할 수 있을 것이다. 그리고 현재 연구원이 추진하고 있거나, 성공사례로 진행된 연구원 기업의 경우는 II와 IV 전략에 해당될 것이다. 연구소기업은 그 협력대상으로 중소기업이 적당하다고 볼 수 있다. 대기업과의 협력은 소비재이든 산업재이든 연구원기업의 형태로 하기 보다는 라이선스, 하청, 공동연구, 컨소시엄 등의 전략을 통하여 하고, 이는 연구원 기업과는 잘 맞지 않을 것이다.

<표 3-7> 대상과 제품별 협력전략

대상 제품	대기업	중소기업
소비재	I 라이선스, 하청, 공동연구	II 공동연구, 합작투자 <u>연구소기업</u> 약품, 식품 관련 기업 <u>헤모힘</u>
산업재	III 공동연구, 컨소시엄, 라이선스 KEPCO, KPS, KOPEC, KNFC 두산중공업 <u>핵연료피복관</u>	IV 공동연구, 전략적 제휴 <u>연구소기업</u> 원전 관련 기업

나. 기술사업화 역량 및 성과제고를 위한 대내외 협력체계 구축

기술사업화 역량과 성과를 높이기 위해서는 협력 전략이 중요하다. 그리고 협력 전략을 실행하기 위해서는 이를 뒷받침해 줄 수 있는 협력체계가 구축되어 있어야 한다.

원자력(연)이 현재 국내에서 협력협정을 맺고 있는 곳은 대부분 대학과 연구소이다. 소수의 산업체, 즉 기업을 보면, 원자력 기술관련 중견기업인 삼창기업이 포함되어 있지만, 나머지는 모두 대기업이다.

<표 3-8> 원자력(연) 기관별 산학협력 협정체계 통계 (1990~2008.3월)⁵⁹⁾

기관분류	수	기관명
대학교	41	한남대학교 외
연구소	13	세종연구소 외
산업체	8	대우엔지니어링, 한국전력기술, 한국원자력연료, 두산중공업, 삼창기업, 삼성SDI, 한국전력, 대우건설
군	3	육군종합군수학교 외
정부	1	특허청
지자체	3	평택시 외
언론사	2	대덕넷 외
병원	1	대전둔산한방병원
구조대	1	중앙119구조대
박물관	1	계룡산자연사박물관
협회	1	한국가속기 및 플라즈마연구협회

원자력(연)은 국제협력 역시 주로 해외 대학 및 연구소와 협력하고 있다. 미국, 중국, 러시아, 영국, 호주 등의 다양한 대학과 연구소 등과 협력한다. <표 3-9>처럼 원자력(연)은 1950년 원자력 기술을 도입하여 연구하고 활용한 이래 초창기에는 미국 및 국제기관과, 1970년 이후부터는 캐나다 및 프랑스 등 서유럽국가와 협력했으며, 1990년 이후엔 중국 및 그 외 국가들과 협력하기 시작했다.

59) 한국원자력연구원 내부자료 (2008)

<표 3-9> 원자력(연)의 원자력 기술협력: 연도별 협력국가 및 기업

국가협력 ○ 기업협력 ●

연도	국제원자력기구	미국	캐나다	프랑스	영국	스페인	벨기에	독일	러시아	루마니아	일본	중국	북한	베트남	호주	아르헨티나	인도네시아
1955		○															
1956		○															
1957	○																
1958																	
1959																	
1960																	
1961																	
1962																	
1963																	
1964																	
1965																	
1966																	
1967																	
1968																	
1969			●														
1970			●														
1971																	
1972																	
1973	○																
1974				●													
1975			●														
1976		●			●		○										
1977																	
1978		●		●													
1979															○		
1980					●												
1981			●		○			○									
1982					●												
1983																	
1984		○		●													
1985			●		●												
1986			●					○									
1987					○										○		
1988																	
1989					○												
1990					○				○								
1991					○				○			○	○				
1992			●									●	●				
1993		○			●							●	●				
1994			●		●		●					○	○				
1995			●									●		○			○
1996																	
1997			●											○			
1998			●					●									
1999																	
2000																	
2001																	
2002																	
2003													●				
2004													●				
2005																	○
2006																	
2007																	

이러한 협력 관계는 원자력 기술발전과 맥이 통한다. 원자력(연)의 원자력연구 분야의 기술은 1960년대부터 1980년대 중반까지는 국제기구와 선진국가로부터 기술을 전수 받는 수원기관 (Recipient)에 머물렀으나, 1980년 중반이후 개도국에 대한 기술 공여기관 (Donor)으로 바뀌었다.

원자력(연)은 원자력기술개발을 위해 히치하이킹 전략과 Know-why 전략을 구사하였다. 히치하이킹 전략은 기술개발 초기 선두에 진입할 수 없어서 외국의 기술에 편승해서 따라가면서 기술을 습득하는 전략이다. 선진국의 전문가들은 주로 엔지니어로서 이론보다는 경험에 의존하여 Know-how는 높지만, Know-why는 취약하기 때문에 Know-why 부분에 협력하는 차원으로 접근하였다.

다. 기술협력 성공 사례: 핵연료피복관 개발

원자력(연)에서 기술협력을 통한 성공사례의 대표적인 것으로는 핵연료피복관 개발이 있다. 본 기술의 성공요인 중 중요한 것은 외부관리를 통한 기술 습득과 보완자(혹은 외부협력자)의 관리이다. 본 기술 개발에는 1980년대 독일 지멘스에 파견되어 기술연수에 참여한 연구원이 포함되어 해외 선진기업의 기술연수를 통하여 연구원 개인에 체화된 지식과 기술이 이후 기술개발과정에서 중요한 학습 요인으로 작용하였다. 또한 기술개발 수요자인 KNFC (현 KNF) 등의 업체들이 기획 단계부터 참여하여 연구소, 산업체의 장점 부분을 각각 업무 분장하여 수행하였다.

또 다른 성공요인으로는 내부 연구 인력의 역량을 통한 문제해결 및 지속적인 기술개선과 장기 기술 생명주기에 따른 안정적 기술개발지원, 기술신뢰성 획득과 수출 향상을 통한 상용화를 들 수 있다.

제 4 장 결론 및 건의사항

본 연구는 국내외 원자력 이용개발 환경 변화 및 기술발전 현황을 조사 분석하고 이를 바탕으로 원자력 연구개발 사업을 통한 원자력기술개발의 효율적 추진을 위한 정책 대안을 제시하는 것을 연구의 목표로 하고 있다.

이의 달성을 위해 원자력 기술개발을 둘러싼 국내·외의 환경과 국가 원자력 연구개발 전략 수립의 관점에서 1) 원자력 기술정책 환경을 분석하고 2) 원자력 연구개발 중장기 성장전략을 논의하였다.

(1) 국내·외 원자력 정책 동향 및 전망

세계적인 에너지 수요 증가에 따른 에너지 자원의 가격 인상으로 인해 우리나라를 비롯한 세계 각국은 에너지 자원의 안정적 확보라는 중대한 문제에 부딪히고 있으며 지구 온난화 관련 협약이 강화되고 있어 성장과 보전이라는 난제에 봉착해 있다. 이에 따라 세계 각국은 온실가스 배출의 주요 원인인 화석연료의 사용을 줄이면서, 화석연료를 대체하기 위한 청정 에너지를 확보하기 위한 노력을 기울이고 있다.

이러한 상황에서 원자력은 에너지 안보와 기후 변화에 대응하는 에너지원으로 공감대를 형성하고 있다. 국내·외적으로 신규 원전 건설이 진행되고 있으며 개발도상국을 중심으로 대규모의 신규 원전 건설이 계획되고 있다. 이와 함께 원자력 발전에 있어 핵연료의 안정적 공급, 사용후핵연료의 처리·처분, 수소 생산을 위한 원자력의 이용 등이 새로운 쟁점으로 부각되고 있다. 최근의 이러한 국내·외적인 정세와 원자력에 대한 관심은 분명히 원자력의 부흥과 연구개발 활성화에 있어 청신호임은 분명하지만 동시에 원자력계에 숙제를 주는 것이기도 하다.

원자력은 지구 환경과 사회·경제적으로 여러 가지 문제들을 해결할 수 있는 잠재력을 가지고 있음에도 불구하고, 아직까지도 많은 일반 대중은 그 위험이 장점보다 크다고 인식하고 있다. 이러한 인식을 변화시키기 위해서는 많은 노력이 필요할 것이다. 즉, 원자력이용에 따른 현안들, 특히 안전성, 폐기물 처분 및 시설해체, 핵비확산 및 방호 문제 등에 대한 해법을 제시하여야 한다. 이를 위해서는 주어진 자원을 최대한 효율적으로 활용하여 목표를 달성할 수 있는 전략적인 기술개발이 필요하다.

(2) 중소형 원자로 개발 현황

전 세계적으로 자원고갈과 지구온난화 문제에 따른 원자력 에너지의 사용이 활발히 검토되고 있다. 이러한 움직임에 따라 원자력 선진국들은 자국의 원자력 이용능력을 더욱 폭넓게 하여 급속히 늘어나고 다양해지는 최종에너지 수요를 충족시키고자 하고 있다. 그러나 다수의 남미, 아프리카, 동남아시아 국가들은 전력 수요의 규모가 크지 않고 송배전 인프라가 부족하기 때문에 대형 원전의 도입을 주저하고 있다. 이에 전 세계적으로 활용될 수 있는 원자력 기술이란 관점에서 현재 원자력 선진국들을 중심으로 개발되고 있는 중소형원자로의 잠재력은 점차 높아져 가고 있다.

우리나라는 한국원자력연구원 주도로 중소형원자로 SMART 개발을 추진하여 왔다. 2005년에 발표된 IAEA 자료에 의하면 현재까지 전 세계적으로 개발됐거나 개발 중인 중소형원자로 중 러시아의 KLT-40S를 제외하면 SMART의 개발이 가장 앞서는 것으로 평가하였다. 러시아의 KLT-40S는 1980년대 구 소련에서 개발한 원자로로 현재의 국제기준 등을 만족하지 못하고 있는 것으로 알려졌다. SMART 연구개발은 실용화단계 진입을 앞두고 경제성과 시장성이 부족하다는 이유로 중단되었다가 최근 '저탄소 녹색성장' 정책 기조로 인한 원자력 확대 정책에 힘입어 추진이 재개되었다.

최근 주요국은 중소형원자로 개발에 박차를 가하고 있어 SMART 기술개발이 지체된다면 SMART의 기술적 우수성과 선도 기술이라는 위상에 커다란 위협을 줄 것이다. 이에 다시 시작된 SMART 연구개발이 꾸준히 추진되어야 향후 전개될 중소형 원자로 시장을 선점할 수 있을 것이다.

(3) 미래원자력시스템 개발 및 국제공동연구 추진 현황

우리나라는 원자력선진국을 중심으로 추진 중인 원자력선진기술에 대한 국제공동연구인 GIF의 Gen-IV 국제 공동 연구개발과 미국의 주도하에 발족된 GNEP에 참여중이다. 우리나라가 원자력선진기술확보사업을 원활하게 추진할 수 있는 기반을 제공하기 위하여, 지금까지 미래형 원자력시스템 연구개발 추진에 대한 국제 동향 파악과 원자력선진기술 확보 관련 국제협력 활동에서의 우리나라 입장 분석과 정립 및 공동연구 추진을 위한 협력기반 확충이 요구되고 있다. 또한 본격 추진되고 있는 Gen-IV 국제공동연구개발 참여와 현재 출범하여 구체화되고 있는 GNEP 프로그램의 원활한 추진 참여를 위한 제반 사항에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

(4) 미래원자력시스템 개발 장기 추진계획

2009년은 우리나라가 원자력 연구를 시작한 지 50년이 되는 해로 2008년 말에 새로이 다가올 우리나라 원자력의 나아갈 길을 밝히는 중·장기적인 연구개발 추진계획을 수립하였다는 것은 큰 의미가 있다.

이러한 상징적인 의미와 더불어 국제적으로는 미국, 일본, 프랑스 등 원자력 선진국과의 제4세대 원자력시스템 공동 연구개발 수행시 국가계획을 제시함으로써 대등한 차원의 협력이 가능하게 하는 실질적인 효과도 기대된다. 또한 미국과의 원자력 협력에 있어서도 기술개발의 타당성과 연구의 투명성 확보에 대한 우리의 의지를 보임으로써 관련 현안을 해결하고 협력방안을 도출하는 데에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

국내적으로는 장기간의 연구개발이 필요한 미래원자력시스템 분야의 개발 청사진과 이정표가 제시되어 일관성 있는 연구개발을 위한 기반이 마련되었다고 할 수 있다. 또한 멀지않은 시기에 사회적 관심사가 될 사용후핵연료의 환경친화적인 관리를 위한 하나의 기술적인 대안을 국민에게 제시함으로써 원자력에 대한 국민 수용성의 증진에 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

이번에 수립된 '미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획'은 향후 20년 이상의 장기간의 미래연구개발 방향을 제시하는 기본계획이라 할 수 있다. 따라서 이 계획을 실현하기 위해서는 빠른 시일 내에 실행을 위한 구체적인 세부계획이 마련되어야 할 것이다. 세부계획에서는 추진계획에서 제시된 목표와 일정에 맞추어 기술개발을 달성하는데 필요한 인력, 자원, 시설 등의 투입요소에 대해 상세하게 파악하여 이를 적기에 확보할 수 있는 구체적인 방안이 제시되어야 할 것이다.

아울러 향후 예상되는 기술적, 정치·외교적, 사회적 장애요인에 대해서도 종합적이며 심층적인 검토가 이루어지고 이에 대한 해결방안이 제시되어야 한다. 또한 추진계획의 실효성을 높이기 위해서는 이를 원자력진흥종합계획과 원자력 연구개발 5개년계획 등과 같이 기존에 이미 수립, 시행되고 있는 계획과 어떻게 연계해 나갈 것인가에 대한 고민이 필요할 것이다.

마지막으로 장기계획의 특성을 고려할 때 현재의 추진계획에 제시된 일정과 목표는 일정 부분 불확실성을 가질 수밖에 없다. 따라서 이를 보완하기 위해서는 주기적으로 혹은 적절한 시기에 기술개발 추이와 국내·외 여건 변화를 반영하여 계획을 수정, 보완하는 것이 필요할 것이다.

(5) 원자력연구원의 기술사업화 활성화 방안

본 연구는 원자력(연)이 기술사업화를 활성화하기 위해서 필요한 요인인 연구원들의 사업화역량, 창의성문화, 외부와의 협력에 대하여 고찰하였다.

우선 사업화역량 향상을 위해서 이를 위한 교육 프로그램 개설이 필요하다. 원자력 교육센터에 제안하는 교육과정은 다음과 같다. 강사진이 사전에 해당 기술을 파악하고 이해하는 시간을 먼저 갖고 9주에 걸쳐 강의와 실습을 진행하여 개념적인 이해와 함께 실천적 방법론을 수행하는 것으로 구성된다. 이는 개별적 강의에 의존하던 과거 방식과는 달리 전체의 논리적 전개와 함께 사업화의 자신감을 제공하며, 실행학습을 통해 현업에 적용도를 높일 수 있다. 강사는 TEC⁶⁰⁾ 프로그램 과정을 이수하고, 국내에서 양성된 강사진이 참여하여 진행하며, 강의와 함께 코칭도 병행하는 것이 바람직하다.

다음으로 원자력(연) CoP가 본래 의도한 창의적 성과 창출에 기여하기 위해서는 다음과 같은 개선노력을 기울일 필요가 있다. 첫째, 내부지향적으로 운영되는 원자력(연)의 CoP 참여 한계 극복할 필요가 있다. 이를 위해 원자력(연)의 경우 향후 CoP의 긍정적 참여효과가 클 것으로 예상되는 외부 개방적 CoP 참여활동을 촉진할 필요가 있다. 이를 위해 외부 개방적 CoP 참여활동을 촉진하기 위해 조직차원에서 CoP 지원방안을 강구해 나가야 한다.

둘째, 현행 자발적 참여를 기초로 한 부서중심형, 부서횡단형 CoP 활동은 좀더 내실을 기하는 방향으로 운영방식 개선이 필요하다. 현재 전형적인 CoP도 아니면서 그렇다고 기존의 TF나 프로젝트팀도 아닌 중간조직 형태의 CoP를 운영하고 있는 것으로 추정된다. 향후 구성원들의 자발적 참여를 전제로 기존의 TF나 프로젝트팀과 구분되는 학습공동체 원리에 입각한 CoP 운영을 권장해 나가야 한다.

셋째, 원자력(연)의 경우 향후 내부지향 CoP 운영시 Off-line형을 권장하는 방향으로 정책방향을 전환할 필요성이 있으며, 외부인의 참여유인이나 시간적·공간적 한계를 극복하기 위한 목적에서 개방형 CoP를 운영하려고 할 경우 순수

60) TEC 프로그램은 미국 노스캐롤라이나 리서치트라이앵글파크의 노스캐롤라이나 주립대 경영대학내 HITEC 연구소에서 개발하였다. 이 프로그램은 기술을 찾고, 평가하며 사업화하는 방법론을 구체적으로 제시하는 교육으로써 벤처기업 창업에 필요한 준비 교육과정이다.

Off-line형을 권장하는 것이 바람직할 것이다.

넷째, 원자력(연)의 경우 CoP의 창의적 조직운영 측면에서 타 기관에 비해 상당히 낮은 것으로 나타나고 있어 시급한 개선이 요청된다. 이를 위해 CoP의 운영방식에 대한 교육 등을 시행할 필요성이 있으며, 보다 근본적으로 조직의 전반적인 운영풍토를 좀 더 창의성을 촉진하는 방향으로 전환해 나가야 할 것이다.

마지막으로 외부협력을 통한 기술사업화 활성화를 위해서는 다음과 같은 사항을 고려해야 할 것이다.

첫째, 중소기업과 협력관계를 더 많이 맺고 더 많은 협력을 하는 것이 필요하다. 원자력연구원은 한전 등 원자력 관련 대기업과는 깊은 협력관계를 맺고 있다. 이제부터는 중소기업 등과의 협력을 더욱 깊이 할 필요가 있다. 특히 소비재를 중심으로 한 중소기업과의 협력이 실효를 거둘 수 있을 것이다. 헤모힘 개발을 통해서 성공적으로 연구소기업 사례가 탄생했다는 점이 이를 잘 보여 주고 있다. 이는 연구소기업 등을 통한 기술사업화 전략으로 좋을 것이다.

두 번째는 대기업과 산업재를 개발하고 사업화하는 것이다. 이는 기술을 공동연구개발을 하여 기업이 제품을 생산하는 협력전략이다. 핵연료피복관 개발과 사업화가 대표적인 성공사례이다. 이러한 공동연구개발 이외에도 이미 개발된 기술을 대기업이 사업화 할 수 있도록 라이선스를 제공 하는 등의 협력 전략이 가능할 것이다.

참고문헌

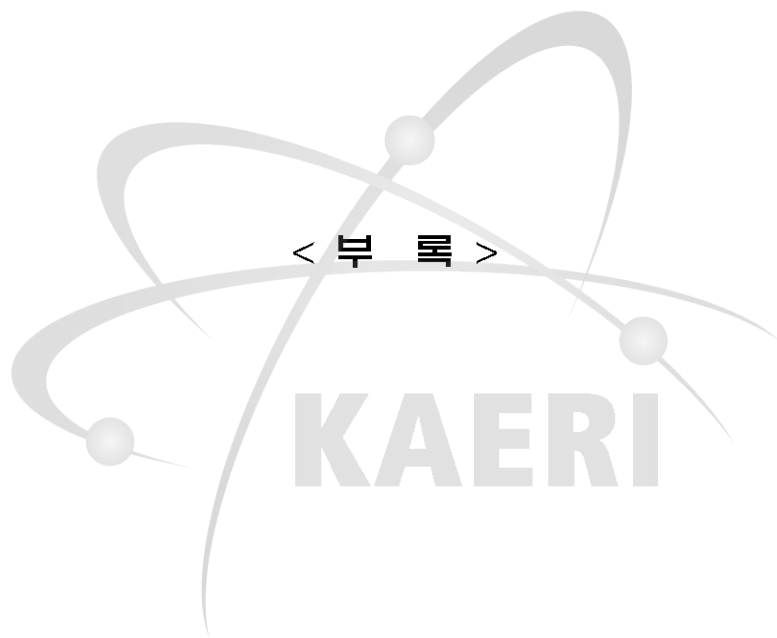
1. World Energy Outlook 2006, OECD/IEA
2. International Energy Outlook 2007, EIA/DOE
3. International Energy Outlook 2006, EIA/DOE
4. BP Statistical Review of World Energy 2006, British Petroleum
5. 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC) 제4차 보고서, 2007.2
6. IPCC, Special Report on Emission Scenarios (2000)
7. NEA, Nuclear Energy and the Kyoto Protocol (2002)
8. World Nuclear Power Reactors 2007-08 and Uranium Requirements (2008.6.9), WNA, <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>
9. The AREVA group presentation, WNU SI 2006
10. OECD/NEA and IAEA, 「Uranium 2005 : Resources, Production and Demand」, 2006
11. www.uxc.com
12. Design and development status of small and medium reactor system 1995, IAEA
13. Status of Small Reactor Designs without On-site Refuelling, TECDOG 1536, 2007, IAEA
14. "Here's looking at IRIS" Nuclear Engineering International, 2006.3, p.12~17
15. 권석균 (1996), 조직학습의 이론과 논쟁, 삼성경제연구소 편, 학습조직의 이론과 실제. 삼성경제연구소. 25-47.
16. 김수원, 주용국(2004), "기업의 학습공동체 구축을 위한 국내 사례 분석", 기업교육연구, 6(1), 5-39.
17. 김용환(2005), "기술혁신과 기술사업화에 관한 고찰", 기술경영경제학회 2005년 통합학술대회 논문집, 29-72.
18. 박선형(2004), "학습공동체 구축을 위한 이론적 모델 탐색",

- 교육행정학연구, 22(1), 157-177.
19. 박종복(2008), “한국기술사업화의 실태와 발전과제: 공공기술을 중심으로”, Issue Paper 2009-233, 산업연구원.
 20. 손태원, 정명호, 홍길표, 김영수(2002), “창의성 경영의 구성차원과 경영성과와의 관련성에 관한 탐색적 연구”, 한국인사관리학회, 인사관리연구(등재), 제26권 3권, pp. 273-301, (2002. 10)
 21. 윤창국(2002). 학습공동체 논의의 유형과 특성에 관한 연구. 서울대학교 교육학과 석사학위논문.
 22. 장수덕(2008), “조직학습, 환경의 불확실성, 그리고 기업성과 간의 관계”, 한국인적자원관리학회. 인적자원관리연구, 15(1), 153-172.
 23. 장영철(2001), “지식경영을 위한 인적자원개발 및 관리체계”, 집문당.
 24. 전성용 (1999), 디지털 경제시대의 핵심전략 : 창의성경영, 현대경제연구원, Prime Business Report, 82호, 1-6.
 25. 천명중, 허명숙(2001), “지식경영능력이 조직성과에 미치는 영향에 관한 실증적 연구”, 정보시스템연구, 10(2), 165-192.
 26. 최인수 (1998). 창의성을 이해하기 위한 여섯 가지 질문. 한국심리학회지 : 일반, 17권 1호
 27. 최종민(2001), “관리회계 정보의 조직학습 효과를 통한 기업성과에 대한 영향, 경영연구, 16(3), 25-52.
 28. 최종인(2008), “실천중심의 기술경영 교육: 대전 테크노파크의 기술사업화 교육사례를 중심으로”, 산업경제연구, 21권 4호, 한국산업경제학회.
 29. 최종인, 권상순(2007), “미래 인적자원개발을 위한 실천공동체: 특허청을 중심으로”, 대한경영학회지, 20(4), 1747-1773.
 30. 최종인·김인수 (1996), 개인창의성 연구의 개념적 고찰, 고려대학교, 경영연구, 30권 1호, 51-77.
 31. 최종인, 장승권, 홍길표(2007), 원자력 연구원 기술혁신 사례, 한국원자력연구원
 32. 한국원자력산업회의(편)(2007), 2007원자력연감, 한국원자력산업회의
 33. 한국원자력연구소(2001), 한국원자력연구원 40년사, 한국원자력연구소

34. Amabile, T. M. (1988), A Model of Creativity and Innovation in Organizations. *Research in Organizational Behavior*, 10: 123-167.
35. Amabile, T. M. (1997). Motivating Creativity in Organizations, *California Management Review*, 40 : 39-58.
36. Arthur, B. W. (1996) 'Increasing returns and the two worlds of business'.*Harvard Business Review*. 74: 100-109.
37. Barron, F. & Harrington, D. M. (1981). Creativity, Intelligence, and Personality. *Annual Review of Psychology*, 32, 439-476.
38. Bierly, P. & Chakrabarti, A. (1996), Generic Knowledge Strategies in the U.S. Pharmaceutical Industry, *Strategic Management Journal*, 17(10), 123-135.
39. Brown, J. S. (2002). An epistemological perspective on organizations and innovation: How can organizations afford knowing? The 3rd European Conference on Organizational Knowledge, Learning and Capabilities. 5-6 April. 2002. Athens, Greece.
40. Brown, J. S., and Duguid, P. (1991). Organizational learning and communities-of-practice: Towards a unified view of working, learning, and innovation. *Organization Science*, 2(1): 40-57.
41. Brown, J. S., and Duguid, P. (1998). Organizing Knowledge. *California Management Review*, 40(3): 91-111.
42. Brown, J. S., and Duguid, P. (2001). Knowledge and Organization: A social-practice perspective. *Organization Science*, 12(2): 198-213.
43. Csikeszentmihalyi, M. & Sawyer, K. (1995), Shifting the Focus Individual to Organizational Creativity. in Ford, C.M. & Gioia, D.A. eds., *Creative Action in Organization*, Thousand Oaks : SAGE Publications, Inc.
44. Ford, C.M. & Gioia, D.A. (1995), Multiple Vision and Multiple Voice : Academic and Practitioner Conceptions of Creativity in Organization. in Ford, C.M. & Gioia, D.A. eds., *Creative Action in Organization*, Thousand Oaks : SAGE Publications, Inc.
45. Gold, A. H., Malhotra, A. & Segars, A. H. (2001), Knowledge

- Management: An Organizational Capabilities Perspective, *Journal of Management Information Systems*, 18(1), 185-214.
46. Guilford, J.P. (1987). 'Creativity Research : Past, Present and Future,' in S.G. Isaksen ed., *Frontiers of Creativity Research*. New York : Bearly Press).
 47. Kelly, K. (1998). *New Rules for the New Economy*. 오재섭 (역). 디지털 경제를 지배하는 10가지 법칙. 황금가지. 2000.
 48. King, N. (1995), *Individual Creativity and Organizational Innovation*, in Ford, C.M. & Gioia, D.A. eds., *Creative Action in Organization*, Thousand Oaks : SAGE Publications, Inc.
 49. Lave, J. and Wenger, E. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. Cambridge: Cambridge University Press.
 50. Lee, H. & Choi, B. (2003), *Knowledge Management Enabler, Process, and Organizational Performance: An Integrative View and Empirical Examination*, *Journal of Management Information Systems*, 20(1), 179-228.
 51. Leonard, D. & Swap, W. (1999), *When Sparks Fly : Igniting Creativity in Group.*, Boston : Harvard Business School Press.
 52. Mackinnon, D.W. (1978). *In search of human effectiveness: Identifying and developing creativity*. Buffalo, NY: Creative Education Foundation.
 53. McDermott, R. (2000), *Critical success factors in building community of practice*, *Knowledge Management Review*, May/June.
 54. Nonaka, I. & Takeuchi, H. (1995), *The Knowledge-Creating Company*. New York : Oxford University Press.
 55. Oldham, G. R., & Cummings, A. (1996). *Employee creativity: Personal and contextual factors at work*. *Academy of Management Journal*, 39: 607-634.
 56. Robinson, A.G. & Stern, S. (1997), *Corporate Creativity : How Improvement and Innovation Actually Happen*. Berrett-Koehler Publishers, Inc.
 57. Schilling, M. A. (2008), *Strategic Management of Technological*

- Innovation, McGraw-Hill.
58. Scott, S. and Bruce, R. A. (1994). Determinants of innovative behavior. *Academy of Management Journal*, 37.
 59. Shrivastava, P. (1983), A Typology of Organizational Learning Systems, *The Journal of Management Studies*, 20(2), 7-28.
 60. Tidd, J., Bessant, J. and Pavitt, K. (2001), *Managing Innovation: Integrating Technological, Market and Organizational Change*, 2nd Ed., Wiley.
 61. Vandenbosch, B. and Higgins, C. (1995), Executive Information Systems and Learning: A Model and Empirical Test, *Journal of Management Information Systems*, 12(2), 99-130.
 62. Vandenbosch, B. and Higgins, C. (1996), Information Acquisition and Mental Models: An Investigation into the Relationship between Behavior and Learning, *Information Systems Research*, 7(2), 198-214.
 63. Wallas, G. (1926), *The Art of Thought*. Orlando : Harcourt Brace.
 64. Yeung, A. K., David, O. U., Stephen, W. N. and M. A. V. Gilnow (1999), *Organizational Learning Capability*, New York : Oxford University Press.
 65. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems - Executive Summary, GIF-001-00 (GIF/USDOE, 2003).
 66. Generation IV Technology Roadmap Report - Final Draft (GIF, 2002).
 67. Generation IV Technology Roadmap R&D Scope Report (GIF, 2002).
 68. Report of the Fuel Cycle Crosscut Group (GIF, 2001).
 69. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF-002-00 (GIF/USDOE, 2002).
 70. 제4세대 원자력시스템 개발 국제동향조사/분석 연구, KISTEP, 2004.



<부록 1> 세계 원전 현황(2008년 6월 기준)

국가	운전 중		건설 중		계획 중		합계	
	출력(MW)	기수	출력(MW)	기수	출력(MW)	기수	출력(MW)	기수
미국	99,049	104	0	0	41,000	32	140,049	136
프랑스	63,473	59	1,630	1	1,600	1	66,703	61
일본	47,577	55	2,285	2	16,045	12	65,907	69
러시아	21,743	31	4,920	7	34,240	35	60,903	73
독일	20,339	17	0	0	0	0	20,339	17
한국	17,533	20	3,000	3	6,600	5	27,133	28
우크라이나	13,168	15	0	0	28,900	22	42,068	37
캐나다	12,652	18	1,500	2	7,700	7	21,852	27
영국	11,035	19	0	0	0	0	11,035	19
스웨덴	9,016	10	0	0	0	0	9,016	10
스페인	7,442	8	0	0	0	0	7,442	8
중국	8,587	11	6,700	7	88,920	100	104,207	118
벨기에	5,728	7	0	0	0	0	5,728	7
대만	514.4	6	270	2	0	0	784	8
체코	3,472	6	0	0	1,900	2	5,372	8
스위스	3,220	5	0	0	4,000	3	7,220	8
인도	3,779	17	2,976	6	13,360	19	20,115	42
핀란드	2,696	4	1,600	1	1,000	1	5,296	6
슬로바키아	2,064	5	840	2	0	0	2,904	7
브라질	1,901	2	0	0	5,245	5	7,146	7
불가리아	1,906	2	0	0	1,900	2	3,806	4
헝가리	1,826	4	0	0	2,000	2	3,826	6
남아공	1,842	2	0	0	4,165	25	6,007	27
리투아니아	1,185	1	0	0	3,200	2	4,385	3
멕시코	1,310	2	0	0	2,000	2	3,310	4
아르헨티나	935	2	692	1	1,480	2	3,107	5
슬로베니아	696	1	0	0	1,000	1	1,696	2
루마니아	1,310	2	0	0	1,965	3	3,275	5
네덜란드	485	1	0	0	0	0	485	1
파키스탄	400	2	300	1	2,600	4	3,300	7
아르메니아	376	1	0	0	1,000	1	1,376	2
이란	0	0	915	1	2,200	3	3,115	4
터키	0	0	0	0	4,500	3	4,500	3
방글라데시	0	0	0	0	2,000	2	2,000	2
벨로루시	0	0	0	0	2,000	2	2,000	2
이집트	0	0	0	0	1,000	1	1,000	1
인도네시아	0	0	0	0	4,000	4	4,000	4
이스라엘	0	0	0	0	1,200	1	1,200	1
카자흐스탄	0	0	0	0	300	1	300	1
북한	0	0	0	0	950	1	950	1
태국	0	0	0	0	4,000	4	4,000	4
베트남	0	0	0	0	2,000	2	2,000	2
합계	367,259.4	439	27,628	36	295,970	312	690,857	787

<부록 2> 선진국 정상들의 원자력 지지 발언록

국 가	연설	주요 내용
미국 (부시)	2001. 5. 17 “Capital City Partnership”	○ 청정하고 무한한 에너지원인 원자력의 이용을 확대해야 한다고 주장함.
“	2005. 6. 22 Calvert Cliffs 원전(메릴랜드주) 방문 중 연설	○ 신규원전 건설을 촉진하기 위하여 11억 달러를 투자할 계획이 있음을 밝힘. ○ 미국이 신규원전 발주를 중단하는 동안 프랑스, 중국 등은 원전건설을 대폭 증가시켰다고 강조하면서 미국도 원전건설을 시작해야 한다고 주장
“	2005. 8. 8 Sandia National Laboratory 에서 연설	○ “Nuclear Power 2010 계획”을 통하여 원자력의 이용을 확대하고 신규 원자력발전소 건설 ○ 신규 6기의 원전건설에 대하여 연방보험 등의 혜택을 2005년도 에너지법에서 보장하고 있음
“	2006. 1. 31 State of the Union에서 연두교서 발표	○ 석유 의존을 극복하기 위한 방안으로 원자력과 청정석탄화력, 태양열, 풍력 등의 청정에너지 개발 투자를 22% 증가시키는 “신에너지구상(Advanced Energy Initiative; AEI)”을 발표함.
프랑스 (시라크)	2006. 1. 5 Business Leaders and Unions	○ 2020년까지 “프로토타입의 제4세대 원자로” 개발계획 발표.
영국 (블레이어)	2006. 5. 16 CBI Annual Dinner에서 연설	○ 기후변화와 에너지안보측면에서 에너지정책 중요 ○ 원자력, 재생에너지 및 에너지 효율증대의 중요성을 언급하면서 장기 에너지계획 수립 강조
일본 (고이즈미)	2006. 1. 20 제 164차 의회 정책 연설	○ 새로운 에너지원 개발 강조 ○ 원자력 발전 주력할 것을 역설
중국 (후진타오)	2005. 11. 17 제13차 APEC 정상회담(부산)	○ 원자력을 포함한 에너지 다변화 및 새로운 에너지원 개발 강조
러시아 (푸틴)	2006. 1. 25 유라시아 경제 공동체 정상회담	○ 유라시아경제공동체 틀 안에서 세계 에너지 안전에 대한 협력 확대를 천명 ○ “국제 핵연료주기 서비스센터” 설립을 제안
“	2006. 6. 9 러시아 핵무기 및 원자력단지 대표자 회의	○ 국가 경제성장 동력으로 원자력의 중요성을 강조 ○ 현재 러시아 총에너지 생산에서 16%를 차지하는 원자력의 비중을 25%까지 확대할 계획을 천명

<부록 3> 세계 주요국의 사용후핵연료 관리현황⁶¹⁾

국 가	운영중 원전('08.3) (원자력비중, '06)	관리정책	사용후핵연료 저장·처분 현황
미국	104기(19.4%)	직접처분→재처리	소내 건식저장시설/2008년 6월 YMP 건설허가 신청, 2017년 운영 목표
프랑스	59기(78.1%)	재처리	라아그 재처리시설에 저장/URL운영, 2015년 인허가, 2025년 운영 목표
일본	55기(30.0)	재처리	2010년 무쓰 중간저장 운영/2000년 NUMO 설립, 2035년부터 처분장 운영예정
러시아	31기(15.9%)	재처리	여러 형태의 저장시설운영/Kola 반도의 처분부지 조사 중
영국	19기(18.4%)	재처리/장기저장 처분	Wylfa 건식저장/HLW 관리대안 평가를 위하여 CoRWM 설립(2003)
캐나다	18기(15.8%)	직접처분	원전부지 내 건식저장/전담기관 MWMO 설립(2002), 단계적 접근방안
독일	17기(31.8%)	재처리/처분 (탈원전)	Ahaus, Gorleben 등에 중간저장시설 운영/2030년 처분시설 운영 목표
중국	11기(1.9%)	재처리	중간저장시설(란초우) 운영/2020년 처분부지 선정, 2050년 운영 목표
스웨덴	10기(48.0%)	직접처분	CLAB 중간저장시설/Aspo에 URL운영, 2020년 처분장 운영 목표
스페인	8기(19.8%)	직접처분	소내외 건식저장 및 처분연구, 2010년 이후 정책결정
벨기에	7기(54.4%)	위탁재처리 (탈원전)	Mol-Dessel에 중간저장시설 운영/Mol URL운영, 2035부터 처분장 건설 시작
스위스	5기(37.4%)	재처리	Zwilag에 재처리 폐기물 건식저장/URL운영
핀란드	4기(28.0%)	직접처분	소내 별도의 습식·건식저장/Olkiluoto 처분부지 선정, 2020년 운영 목표

61) IAEA Pris Database (<http://www.iaea.org./programmes/a2/>)

< 부록 4 > 세계적으로 개발 중인 중소형 원자로

국가	기관	원자로	용량 (만kW)	노형
미국	W/H	IRIS (International Reactor Innovative and Secure)	30	경수로
	GA	GT-MHR (Gas Turbine Modular Helium Reactor)	29.3	고온가스로
	ANL, Texas A&M, GE	STAR-LM (Secure Transportable Autonomous Reactor- Liquid Metal)	17.8	고속로
	LLNL, ANL, LANL	SSTAR (Small Sealed Transportable Autonomous Reactor)	1~10	고속로
	INEL	MASLWR (Multi Application Small Light Water Reactor)	3.5	경수로
일본	Toshiba, CRIEPI	4S (Super-Safe, Small and Simple Reactor)	1	고속로
	JAEA	PSRD (Passive Safe Small Reactor for Distributed Energy Supply System)	3	경수로
	Toshiba	LSBWR (Long operating cycle Simplified Boiling Water Reactor)	30	비등수로
러시아	NIKIET, VNIIAM	VKR-MT (Life time-core Particle-bedded 300MWe Boiling Water Reactor)	30	경수로
	OKBM	VBER-150 (Water Cooled Modular Power Reactor)	11	경수로
	OKBM	KLT-40S	7	경수로
중국	INEET	HTR-PM (High Temperature gas-cooled Reactor-Pebble bed Module)	19.5	고온가스로
아르헨 티나	CNEA, INVAP	CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares)	30	경수로
남아공	ESKOM	PBMR (Pebble Bed Modular Reactor)	11	고온가스로

< 부록 5 > IRIS 원자로 주요 재원

발전소 재원		원자로 냉각재 펌프	
Core thermal power	1000 MWt	Type	spool type, fully immersed
Net output	335 MWe	Number	8
원자로 압력 용기		Pump head	19.8 m
Inner diameter	6.21 m	원자로 노심	
Wall thickness	285 mm	Fuel assembly total length	5.207 m
Total height	21.3 m	Active core height	4.267 m
핵증기 공급 계통		Fuel Inventory	48.5 tU
Coolant loops	Internal reactor coolant system	Average liner heat rate	10.0 kW/m
Steam temperature, pressure	317 oC, 5.8 Mpa	Average core power density (volumetric)	51.26 kW/l
Feedwater temperature, pressure	224 oC, 6.4 Mpa	Fuel material	Sintered UO2
증기 발생기		Rod array	Square, 17X17
Type	Vertical, helical coil tube bundle, once-through, superheated	Number of fuel rods per assembly	264
Number	8	Number of fuel assemblies	89
Thermal capacity	125 MWt each	Outer diameter of fuel rods	9.5 mm
Number of heat exchanger tubes	656 each	Enrichment	4.95 wt%U-235
원자로 냉각재 계통		Equilibrium cycle length	30-48 months
Primary coolant flow rate	4700 kg/s	Average discharge burn-up	60,000 MWd/tU
Reactor operating pressure	15.5 MPa	원자로 격납용기	
		Geometry	Spherical, 25 m diameter
Core inlet temperature	292 oC	Pressure, Temp.	1400 kPa, 200 oC
Core outlet temperature	330 oC	Thickness	44.5 mm

< 부록 6 > SFR 시스템 특성

SFR Design Parameters	Loop Configuration	Pool Configuration	Small Modular
Power Rating, MWe	1500	600	50
Thermal Power, MWth	3570	1525	125
Plant Efficiency, %	42	42	~38
Core outlet coolant temperature, °C	550	545	~510
Core inlet coolant temperature, °C	395	370	~355
Main steam temperature, °C	503	495	480
Main steam Pressure, MPa	16.7	16.5	20
Cycle length, years	1.5-2.2	1.5	30
Fuel reload batch, batches	4	4	1
Core Diameter, m	5.1	3.5	1.75
Core Height, m	1	0.8	1
Fuel Type	MOX (TRU bearing)	Metal (U-TRU-10%Zr Alloy)	Metal (U-TRU-10%Zr Alloy)
Cladding Material	ODS	HT9M	HT9
Pu enrichment (Pu/HM), %	13.8	24.9	15
Burn-up, GWd/t	150	79	~87
Breeding ratio	1.0?1.2	1	1

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/RR-2940/2008			
제목 / 부제	원자력기술정책연구		
연구책임자 및 부서명	임 채 영(정책연구부)		
연구자 및 부서명	이 광 석, 정 익, 이 종 희 (정책연구부)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	p.140	도표	있음(o), 없음()
참고사항			
비밀여부	공개(o), 대외비(), _ 급비밀	보고서종류	연구보고서
연구위탁기관		계약번호	
초록 (15-20줄내외)	<p>본 연구는 국내·외 원자력 이용개발 환경 변화 및 기술발전 현황을 조사·분석하고 이를 바탕으로 원자력 이용 개발에 있어서 원자력 연구개발 사업을 통한 원자력기술개발의 효율적 추진을 위하여 정책 대안을 제시하는 것을 연구의 목표로 하고 있다.</p> <p>원자력 기술개발을 둘러싼 국내·외의 동향 분석과 국가 원자력 연구개발 전략 개발의 관점에서 (1) 원자력 기술정책 동향을 분석하고 (2) 원자력 연구개발 중장기 성장 전략을 논의하였다. 그 내용은 다음과 같다.</p> <p>(1) 원자력 기술정책 동향 분석</p> <p>① 국내·외 원자력 정책 동향 및 전망</p> <p>② 중소형 원자로 개발 현황</p> <p>③ 미래원자력시스템 개발 및 국제공동연구 추진 현황</p> <p>(2) 원자력 연구개발 중장기 성장 전략 논의</p> <p>① 미래원자력시스템 개발 장기 추진계획</p> <p>② 원자력연구원 기술사업화 활성화 방안</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	원자력, 기술정책, 최근 동향 분석, 연구개발, 중장기 전략, 기술사업화		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/RR-2940/2008							
Title / Subtitle		A Study on Nuclear Technology Policy					
Project Manager and Department		C.Y. LIM (Policy Research Division)					
Researcher and Department		K.S. LEE, Ik JEONG, J.H. LEE (Policy Research Division)					
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI		Publication Date	2009	
Page	p. 140	Fig. & Tab.	Yes(o), No ()		Size	A4	
Note							
Classified	Open(o), Restricted(), Class Document		Report Type	Research Report			
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>The objective of the study was to make policy-proposes for enhancing the effectiveness and efficiency of national nuclear technology R&D programs. To do this, recent changes of international nuclear energy policy and trends of nuclear technology R&D was surveyed and analyzed.</p> <p>In the viewpoint of analysis of the changes in the global policy surrounding nuclear technology development and development of national nuclear R&D strategy, this study (1) analyzed the trend of nuclear technology policies and (2) discussed the mid- and long-term strategy of nuclear energy R&D.</p> <p>To put it in more detail, each subject was further explored as follows;</p> <p>(1) Analysis of the trend of nuclear technology policies</p> <p>① Trend and prospects of the international and domestic nuclear policies</p> <p>② Investigation of development of small and medium sized reactors</p> <p>③ International collaboration for advanced nuclear technologies</p> <p>(2) Discussion of the mid- and long-term strategy for nuclear energy R&D</p> <p>① The long-term development plan for future nuclear energy system</p> <p>② The facilitation of technology commercialization</p>					
Subject Key words (About 10 words)		nuclear, technology policy, recent trend analysis, research and development, mid- and long-term strategy, technology commercialization					