

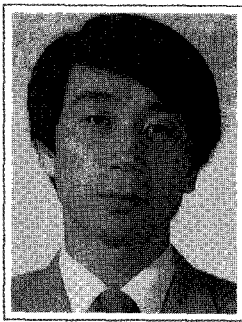


제4세대 원자력 시스템(Gen IV) 개발

- 추진 현황과 전망 -

김 현 준

한국원자력연구소 정책연구팀 책임연구원



21세기, 세계 원자력계는 혁신을 원하고 있다. 이 혁신은 인류의 지속 가능한 발전(發展)이라는 대명제를 어떻게 충족시키는가에 초점이 맞추어져 있다. 지속 가능한 발전이라는 대명제는 에너지 수요와 공급에서 환경 보존을 중요한 결정 인자로 등장시켰고, 이에 따라 에너지 기술 시장에서는 경제적이고 환경 친화적인 방향으로의 혁신적인 변화를 요구하고 있다. 이에 제4세대 원자력 시스템의 개발이 국제적인 관심 속에서 추진되고 있고, 이것이 21세기 원자력

계의 방향을 결정하는 중요한 인자가 될 것이라는 인식이 강하게 자리 잡고 있다.

본고에서는 GIF(Generation IV International Forum)를 중심으로 진행되고 있는 제4세대 원자력 시스템(Gen IV) 개발의 추진 현황과 전망에 대해 기술한다.

제4세대 원자력시스템(Gen IV) 개요

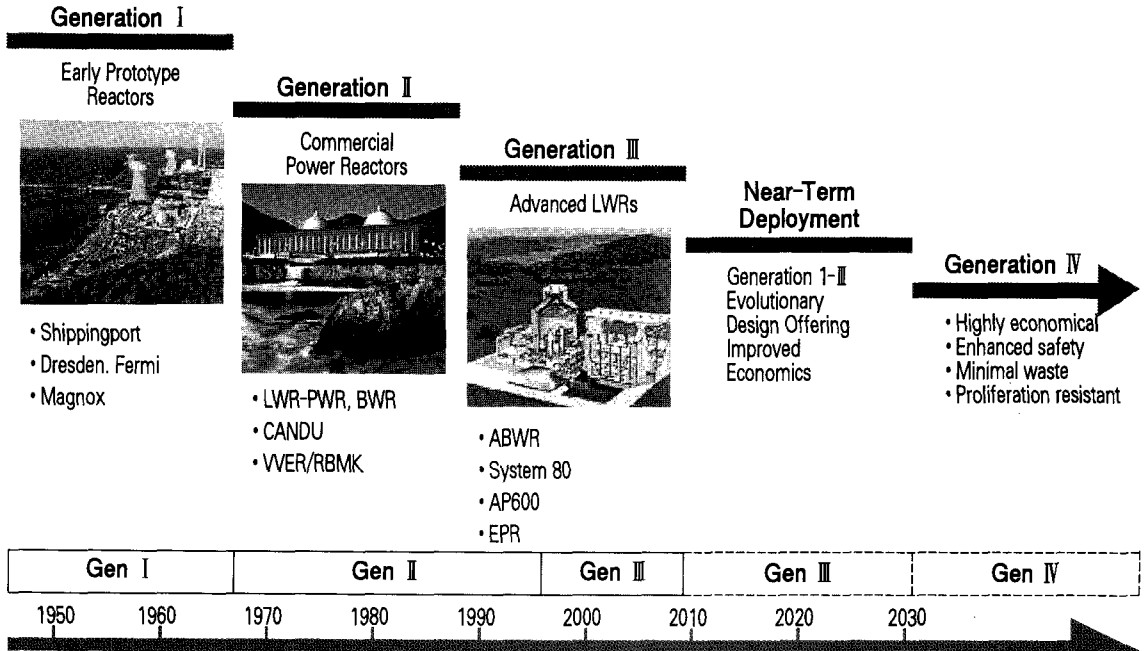
제4세대 원자력 시스템(Gen IV)은 원자로와 핵연료 주기를 포함한 전체 시스템으로서 영문명은 Generation IV Nuclear Energy System 이고, 약칭 Gen IV로 불린다.

원자력이 평화적으로 이용되기 시작한 이후 도입된 원자력 시스템을 제1세대(Gen I)부터 제3세대(Gen III)로 구분하고, 향후 2030년 이후를 책임질 원자력 시스템을 제4세대(Gen IV)로 정의하고 있다 <그림 1>.

Gen I은 1950년대에 도입된 초기 원자력 시스템들로서 영국의 Magnox형 원전과 미국의 Shippingport 원전이 대표적인 예이다.

Gen II는 원자력발전소가 본격적으로 도입되기 시작한 1960년대 이후에 건설·운전된 발전소들로서 현재 세계적으로 운전되고 있는 대부분의 원전들이 이에 해당된다. 우리나라에서는 고리·영광·울진 및 월성에 건설된 초기 원전들이 제2세대 원자력 시스템으로 분류될 수 있다.

Gen III는 1980년대 이후 표준화되고 개량화되어 1990년대 중반에 도입이 시작된 원전들이 이에 해당된다. 대표적인 예로는 우리나라의 한국 표준형 원전인 KSNP, 미국의 AP600·ABWR 등을 들 수 있고, 최근 미국이 2010년까지 도입할 것을 검토하고 있는 원자력 시스템들이 Gen III보다는 경제성 측면에서 좀더 개선된 제3세대+(Gen



〈그림 1〉 원자력 시스템의 변천

III+)라는 개념으로 분류되고 있으며, 이에 는 우리 나라의 APR-1400이 해당된다.

Gen IV는 2030년 이후의 장기적인 측면에서 원자력의 미래를 책임질 것을 기대하는 것으로서, 이를 위해 인류의 지속 가능한 발전(發展)에 기여하기 위한 지속성의 확보, 안전성의 획기적 개선, 경제성의 확보라는 특성을 충족시키도록 하고 있다. 이러한 특성은 Gen IV 개발의 기술적 목표로서 설정되었고, 〈표 1〉과 같이 세부 8가지 목표가 제시되었다.

첫 번째 목표인 지속성 확보는 인류의 지속 가능한 개발에 기여할 수

〈표 1〉 Gen IV 개발 목표

목표 1	인류의 지속 발전(發展)에 기여하는 지속성의 확보(Sustainability)
	목표 1-1: 연료 자원 활용성을 증대시켜 에너지 공급의 지속성 확보 목표 1-2: 폐기물 발생량의 감소로 환경 부담 경감 목표 1-3: 핵확산 저항성의 증대
목표 2	공극적 안전성 (Safety and Reliability) 확보
	목표 2-1: 일반 대중이 공감하는 수준의 안전성 및 신뢰성 확보 목표 2-2: 노심 용융 등 중대 사고 발생 가능성의 획기적 감소 목표 2-3: 비상 대응 등 특별한 조치가 필요없는 안전 시스템의 구축
목표 3	높은 경제성 (Economics)
	목표 3-1: 타발전원에 비해 전수명 운전 비용의 경쟁 우위 확보 목표 3-2: 초기 자본 투자 감소로 재정적 위험 부담의 경감

있는 원자력의 공급을 위한 것으로서, 이를 위하여 ① 연료 자원의 활용성을 증대시켜 에너지 공급의 지속성을 확보하도록 하고 ② 폐기물

발생량을 크게 감소시켜 환경 부담을 경감시키고 ③ 핵확산 저항성을 증대시켜 원자력의 평화적 이용이 인류에 이바지하도록 하고 있다.

두 번째 목표인 궁극적인 안전성 확보를 위하여 ① 일반 대중이 공감하는 수준의 안전성과 신뢰성을 확보하고 ② 원자로 노심 용융 등 중대 사고의 발생 가능성을 획기적으로 감소하며 ③ 비상 대응 등 특별한 조치가 필요 없는 안전 시스템을 구축하도록 하고 있다.

세 번째 목표는 높은 경제성을 확보하는 것이고, 이를 위하여 ① 타 발전원에 비해 전운전 수명 기간 동안의 운전 비용이 경쟁 우위를 가지도록 하고 ② 초기 자본 투자비를 획기적으로 감소시켜 원전 건설에 따른 재정적 위험 부담을 크게 경감하도록 하고 있다.

이러한 기술적 목표와 이를 계량적으로 평가하기 위한 지표를 활용하여 제4세대 원자력 시스템 개념 선정 및 연구 개발 항목 설정을 위한 로드맵(Gen IV TRM(Technology Road Map)) 작업이 진행되고 있다.

Gen IV 개발 추진 경과

21세기를 맞이하면서 국제 원자력계는 원자력의 새로운 방향을 활발하게 모색하였고, 새로운 방향의 하나로서 혁신 개념의 원자로 개발이 필요하다는 데에 공통된 인식을 형성하고 있었다.

즉 미래의 급격한 에너지 소비 증가에 대비하고 인류의 지속 가능한

발전(發展)에 원자력이 기여할 수 있어야 하고, 이를 위해서는 기존의 원자력 시스템과는 다른 혁신적인 개념이 필요하다는 것이었다.

이러한 분위기와 함께 미국에서도 원자력계의 새로운 활로 모색이 요청되고 있어서, 미국 에너지부(DOE)는 2000년 1월 세계적으로 원자력 활동이 활발한 8개국(한국·일본·프랑스·영국·남아공·캐나다·아르헨티나·브라질)에 대해 Gen IV 공동 개발을 위한 의견 교환을 요청하게 되었다.

이 회의는 원자력 개발 정책 책임자급 회의로서 개최되었고, 향후 GIF 정책 그룹 회의(Policy Group Meeting)의 발단이 되었다.

이 회의에서 향후 50년간 전력 소비는 개도국을 중심으로 급격히 증가할 것으로 전망하고, 또한 지구 환경 문제에 대한 관심이 지속적으로 증가할 것이라는 점을 염두에 두어 원자력의 역할이 매우 중요해질 것이라는 점에 인식을 같이 하며, 다자간 협력 형태로서 Gen IV 개발 필요성에 공감대를 형성한다는 등을 주요 내용으로 하고 있는 Gen IV 협력 개발을 위한 공동 선언문을 채택하였다.

이 회의의 결과에 따라 국제 협력을 통한 Gen IV 개발 추진을 위하여 GIF가 상기한 9개국이 참여하여 결성되었고, 정책 그룹과 전문가 그룹을 두어 회의를 개최하여 오고 있

다. 다음은 2002년 2월 개최된 런던 GIF 회의까지의 경과이다.

1. Gen IV 전문가 그룹 회의 (2000. 4, 미국 워싱턴)

이 회의는 이전 회의에 참석한 9개국의 전문가들이 참여한 회의로서, Gen IV 개발 관련 관심 분야에 대해 국별로 발표하고, 다자간 협력에 의한 Gen IV 개발 추진의 구체적인 방안을 논의하였다.

이 회의에서는 특히 Gen IV 개발에 필요하다고 고려되는 70개 연구 분야에 대해 각국의 관심 정도가 조사되었고, 이것은 후에 양국간 협력 연구 형태인 I-NERI (International NERI) 협력의 기초 자료로서 활용되었다.

즉 우리 나라와 미국의 원자력 공동 연구 프로그램인 한·미 I-NERI는 상기 조사 분야를 중심으로 수행 분야를 선정하였는데, 2001년도에는 이중에서 경수로 분야와 I&C 분야가 대상이 되었다.

이후의 GIF 회의들은 정책 그룹 회의와 전문가 그룹 회의로 나누어져 진행되었고, 많은 경우 정책 그룹과 전문가 그룹 연석 회의의 형식으로 개최되었다.

2. Gen IV Workshop (2000년 5월, 미국 워싱턴)

2000년 5월에는 미국의 주관으로 세계 여러 나라의 원자력 과학

기술자들이 모여 Gen IV 개발을 위한 워크숍을 개최하였고, Gen IV 설계 특성을 안전성·경제성·폐기물 및 핵비확산성의 4개 측면에서 논의하였다.

안전성 측면에서는 노심 용융 확률이 10^{-6} 보다 적을 것을 요구하고 원전 경계 밖에서 조치를 필요로 하는 방사선의 누출이 발생하지 않을 것 등이 필요하고, 경제성 측면에서는 발전소 건설 리드 타임이 36개월보다 적을 것 등 자본 투자비와 운전 유지비가 기존의 원자력발전소보다 획기적으로 개선되어야 한다는 점이 강조되었다.

폐기물 측면에서는 폐기물 발생량이 최소화되어야 하고, 모든 폐기물의 처리 방안이 수립되어야 하여야 하며, 이는 정책적으로나 국민 수용성 측면에서 수용 가능한 방법이라야 한다는 등의 요건이 제시되었다.

핵비확산 측면에서는 현재보다 핵확산 가능성이 훨씬 적어야 한다는 점이 강조되었다. 이 워크숍에서의 논의 결과는 그 이후 Gen IV 개발 목표 논의에 있어서 기초적인 틀을 제공하였다.

3. 서울 GIF 정책/전문가 그룹 회의 (2000년 8월, 한국 서울)

서울 GIF 회의에서는 GIF라는 명칭이 정식 사용됨과 더불어 GIF 현장 채택을 위한 초안 검토가 있었

고, 정책 그룹과 전문가 그룹 연석 회의로 개최되어 Gen IV TRM 추진 방안이 본격 논의되었다.

4. 파리 GIF 정책/전문가 그룹 회의 (2001년 3월, 프랑스 파리)

파리 GIF 회의에서는 GIF 현장, Gen IV TRM 목표 및 국제 기구의 GIF 참여 방안에 대한 논의가 이루어졌다.

GIF 현장은 GIF의 정신을 담고 GIF 운영 방향 등을 명문화한 것으로서, GIF를 공식적인 국제 회의체로 성립시키기 위해 본 현장에 참여국들이 서명하기로 하였다.

Gen IV TRM 목표는 앞서 기술한 바와 같이 Gen IV의 기술 목표(Technology Goal)로서 채택된 3개 목표 분야와 8개의 목표로 설정하였고, TRM 작성은 수냉각형 원자로, 가스냉각형 원자로, 액체 금속 냉각형 원자로 및 분류되지 않은 기타 노형의 4개 그룹으로 구분하여 수행하고, GIF 회원국으로부터 전문가들을 추천받아 공동 추진하는 방식을 취하게 되었다.

한편 IAEA와 OECD/NEA 등 국제 기구의 참여 요구에 대하여는 공식적인 회원국으로 하기보다는 참관 기구로서 하기로 합의하고, GIF 현장에 영구 참관 기구로서 자격을 부여하도록 하였다.

5. GIF 공식 출범

2001년 7월, 파리 회의에서 결정된 바와 같이 GIF 현장에 대한 9개 회원국들이 서명을 완료함에 따라 GIF가 공식적인 국제 회의체로서 출범하게 되었다.

6. 마이애미 GIF 정책그룹 회의 (2001년 10월, 미국 마이애미)

GIF가 공식적인 국제 회의체로 출범한 이후 개최된 첫 번째 회의인 마이애미 GIF 회의에서는 Gen IV TRM 추진 상황 점검, GIF의 세부 운영 방안 및 신규 회원국 가입이 주요 의제로 논의되었다.

Gen IV TRM 논의에서는 Gen IV 개념 선정에서 기준 등에 대한 가중치 부여 방법에 대해 GIF에서의 논의와 승인이 필요하다는 의견에 인식을 같이 하였고, Gen IV 개념 최종 선정 전에 관련 논의를 위한 GIF 회의를 개최하기로 하였다.

GIF의 원활한 운영을 위하여 GIF 현장에 명시된 바와 같이 사무국(Secretariat)을 두기로 하고, 2002년 말까지는 미국이 Gen IV TRM을 주도적으로 수행한다는 점을 감안하여 미국에서 사무국을 맡기로 하는 등 GIF 운영 지침을 검토하였다. 이에 따라 GIF 운영은 GIF 회의 개최국과 사무국이 협력하여 수행하는 방식으로 운영되고 있다.

한편 스위스의 신규 회원국 가입



에 대한 논의가 있었고, 다음 GIF 회의시까지 가입 승인 여부를 결정하기로 하였다.

7. 런던 GIF 정책/전문가 그룹 회의 (2002년 2월, 영국 런던)

마이애미 GIF 회의에서 결정된 바에 따라 2002년 2월 개최된 런던 GIF 회의에서는 Gen IV 개념 선정 방법과 선정 기준에 대한 가중치 부여 방안에 대한 논의가 있었다.

TWG 전문가들이 Gen IV 후보 개념에 대해 기술적으로 예비 평가한 결과, 가스냉각형 원자로 그룹과 액체금속 냉각형 원자로 그룹에 속한 후보 개념들이 상위 랭크를 차지하게 되었는데, 가스냉각형 원자로 그룹의 경우 안전성과 경제성 기준에서 높은 점수를 받고, 액체금속 냉각형 원자로 그룹의 경우는 지속성(sustainability) 기준에서 높은 점수를 받은 결과였다.

이러한 기술적 평가 방법에 의한 점수가 이번 회의에서 논의하고자 한 가중치의 변화에 따라 크게 변화되지 않을 것으로 예견되고, 또한 기준들간의 연계성이 제대로 반영되지 못하고 있다는 점 등에 따라 정책적 고려를 반영하기 위하여 임무(mission)라는 평가 가이드를 고려한 선정 방안을 논의하게 되었다.

임무로서 고려되고 있는 것은 ① 전력 생산 ② 폐기물 소멸 ③ 핵물질 재생산 ④ 수소 생산이다. 이 4

가지를 좀더 세분화하는 것이 논의되었는데, 전력 생산에서는 대형 시장 및 소형 시장이 같이 고려되도록 하여야 하고, 개도국의 시장 요건을 반영하며, 개별 국가적인 조건보다는 지역적인 조건(regional boundary condition)을 고려하도록 하였다.

또한 핵물질의 재생산은 궁극적으로 폐기물의 소멸과 맥을 같이 하고 있다고 보아 합치는 방안을 고려하도록 하고, 수소 생산에서는 수소 생산에 더하여 해수 담수화와 공정 열 생산도 고려하도록 하였다.

이번 회의에서 또 하나의 중요한 논의 사항은 I-NTD(International NTD)이다. NTD(Near Term Deployment)는 미국이 미국 내 시장에 2010년까지 단기적으로 원자력발전소를 건설·운영하기 위한 방안을 마련하는 것으로써 이미 그 보고서가 제출되어 있다(상세한 내용은 「NTD TRM 결과」에서 소개하도록 한다).

미국은 자국 내 시장이 목적인 NTD를 국제화하는 노력의 하나로써 I-NTD를 제안하였다. 이의 제안 배경은 현재 NTD 보고서와 Gen IV 후보 개념으로서 동시에 고려되고 있는 SBWR과 같은 원자로 개념들이 높은 시장성과 경제성에도 불구하고 Gen IV 개념 선정에서 탈락될 가능성이 매우 높고, 또한 유럽의 EPR(European

PWR)과 한국의 APR-1400과 같이 실질적으로 고려되어야 할 개념들이 Gen IV 후보 개념 및 NTD 후보 개념으로 반영되지 않았다는 점 등이었다.

따라서 상기 사항들을 반영하여 국제 협력에 의해(또는 국제적으로) 단기적으로 도입 가능한 노형을 검토하기 위해 RIT(Road Map Intergation Team)에서 I-NTD 추진 방안을 마련하고 다음 회의에서 구체적으로 논의하기로 하였다.

이에 대응하여 우리 나라는 APR-1400에 대한 정보를 제공하고, I-NTD 후보 노형으로서 APR-1400이 실질적으로 논의될 수 있도록 추진하고 있다.

Gen IV TRM 추진 현황

Gen IV TRM(Technology Road Map)은 GIF 활동의 일환으로 미국의 주도하에 추진되고 있는데, 2030년경에 시장에서 사용 가능한 원자력 시스템 개념의 선정과 이를 개발하기 위한 연구 개발 항목 및 추진 방안을 도출하는 것이 주요 목적이다.

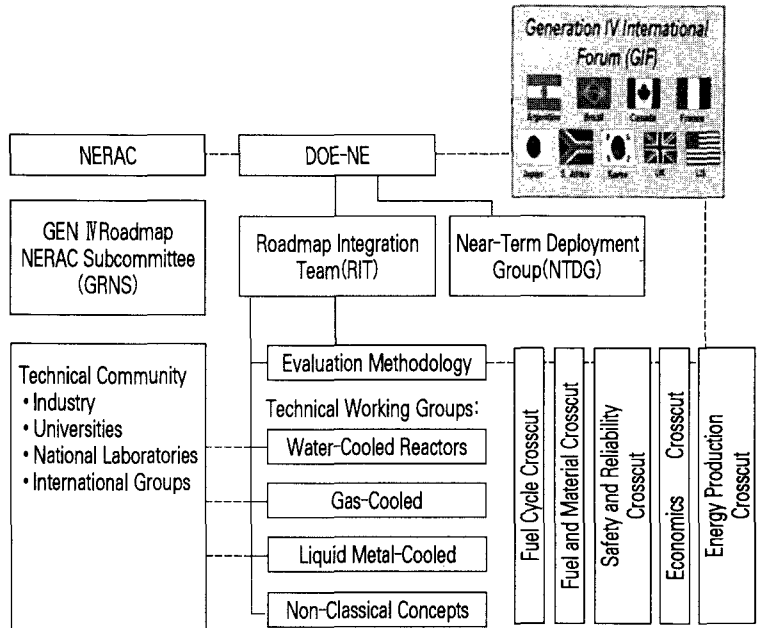
이를 위하여 서울 GIF 회의(2000년 8월)에서 본격적으로 논의한 결과, 미국과 GIF가 협력하여 Gen IV TRM을 추진하기로 하고, GIF 회원국으로부터 전문가를 추천받기로 하였다.

〈표 2〉 Gen IV 원자력 시스템 개념 제안 현황

구분	제안 현황		
원자로형별	수냉각형	28개	
	가스 냉각형	17개	
	액체금속 냉각형	32개	
	기타 시스템	17개	
	계	94개	
국가별	아르헨티나	1개	
	브라질	2개	
	캐나다	1개	
	영국	4개	
	프랑스	3개	
	독일	1개	
	이탈리아	2개	
	일본	19개	
	한국	10개	
	러시아	3개	
	미국	45개	
	계	94개	
	기관종류별	대학	27개
		연구 기관	45개
		산업체	22개
계		94개	

이에 2001년 3월 개최된 파리 GIF 회의에서 GIF 참여 9개 회원국(현재는 스위스가 신규로 가입하여 회원국이 10개국임)에서 각 분야 전문가들을 추천하였고, 미국을 포함하여 약 100여명의 전문가들이 TRM 작성에 참여하게 되었다.

Gen IV TRM에서는 앞서 기술한 바와 같이 ① 수냉각형 원자력 시스템 ② 가스냉각형 원자력 시스템 ③ 액체금속 냉각형 원자력 시스템 및 ④ 기타 분류되지 않은 원자



〈그림 2〉 Gen IV TRM 추진 체제

(주) NERAC : Nuclear Energy Research Advisory Committee

력 시스템(Non-classical system)의 4개 후보 개념 그룹으로 구분하여 Gen IV 개념 평가, 선정 및 연구 개발 계획 수립을 추진하고 있다.

이는 2001년 4월 전세계에 Gen IV 원자력시스템 개념을 공모한 결과 〈표 2〉에서 보는 바와 같이 100여 개념이 제안되었고, 이를 〈표 3〉에서와 같이 Gen IV 후보 개념 그룹으로 분류하여 평가하기로 함에 따라 이루어진 것이다.

제안된 개념을 검토하고 평가하여 최상의 Gen IV 원자력 시스템

개념을 선정하기 위하여 〈그림 2〉에서와 같이 개념 그룹별로 작업 그룹(TWG; Technical Working Group)을 구성하여 평가를 수행하였고, 또한 개념 그룹별 공통 분야를 검토·평가하기 위하여 Crosscut 그룹을 구성·운영하고 있다.

현재 구성된 Crosscut 그룹은 핵연료 주기 그룹(FCCG; Fuel Cycle Crosscut Group), 연료 및 재료 그룹(FMCG; Fuel and Material Crosscut Group), 안전 그룹(SRCG; Safety and Reliability Crosscut Group), 경제성 그룹



(ECG; Economics Crosscut Group) 및 에너지 생산 그룹(Energy Production Crosscut Group)의 5개 그룹이다.

이 중 핵연료 주기 그룹은 원자력 시스템에서 핵연료 주기가 차지하는 중요성이 매우 크다는 인식에 따라 TRM 작성 초기부터 구성되어 활동하고 있으며, 현재 2002년 4월에 보고서를 제출할 예정으로 되어 있다.

TWG에서는 평가 방법 개발 그룹(EMG; Evaluation Methodology Group)에서 개발한 평가 방법을 활용하여 각 그룹내의 Gen IV 후보 개념 그룹에 대해 기술적으로 평가하고, RIT(Road Map Integration Group)에서는 이를 통합하여 하나의 결과로 만들어 내게 된다.

이와 함께 미국에서는 Gen IV 개념 개발과는 별도로, 2010년 정도에 미국 내에 원전을 건설 운영하는 것으로 목표로 하는 단기적 원전 도입 방안 설정을 위해 NTDG(Near Term Deployment Group)를 미국 전문가를 중심으로 구성하여 운영하였으며, 그 결과 보고서가 이미 제출된 상태이다. 이에 대해서는 다음 항에서 설명하도록 한다.

Gen IV 후보 개념에 대한 기술적 평가는 현재 예비 평가 결과가 나온 상태인데, 이에 대해 GIF에서 평가 기준에 대한 가중치 변화를 고

〈표 3〉 TWG별 Gen IV 후보 개념 그룹 분류

A. 수냉각로 그룹

개념 그룹	개념 그룹명	그룹에 속한 원자로 개념	주평가 대상 개념
W1	Integral primary system rx	SMART, IRIS, CAREM, PSRD, MRX, Daisy, MASLWR	SMART, IRIS, CAREM
W2	Simplified BWR	SBWR	SBWR
W3	Next generation CANDU	CANDU-NG	CANDU-NG
W4	Supercritical LWR (thermal)	SCLWR(일본), Thermal supercritical water rx(당초 TWG2), CANDU-X	SCLWR, TWG2
W5	Supercritical LWR (fast)	SCW-fast (미국 제안)	SCW-fast
W6	High conversion core BWR (BARS&ABWR-II)	HCBWR, SSBWR, BARS, RMWR, ISPWR	HCBWR

B. 가스 냉각로 그룹

개념 그룹	개념 그룹명	그룹에 속한 원자로 개념	주평가 대상 개념
G1	Modular Pebble Bed Reactor - open cycle	ACACIA, Simplified Gas-Cooled PBR, Re-configurable PBMR, MPBR, APBR	MPBR
G2	Prismatic Fuel Modular Reactor - LEU/thorium open cycle	GT-MHR, SC-MHTGR, PH-MHR, RTW-MHR, SLR-MHR	GT-MHR
G3	Very High Temperature Reactor - LEU/thorium open cycle	VHTR, A-HTR, PH-MHR, APBR	A-HTR
G4	Generic gas-closed cycle	G1~G3 개념의 closed cycle 원자로 개념	-
G5	Gas-Cooled Fast Reactor - closed cycle	Modular, Fast Gas-Cooled Reactor - Gas Turbine Cycle, Gas-Cooled Oxide Fuel Fast Reactor System with dry recycling fuel cycle, HEN-MHR, Enhanced GCR	HEN-MHR

려해야 한다는 입장을 표명함에 따라 현재 가중치 변화에 따른 평가 결과의 변화를 점검해보고 이 결과를 오는 4월 12일 GIF 전문가 그룹 회의에서 발표할 예정이다.

한편 지난 2월 런던 GIF 회의에

서 논의된 바에 따라 Gen IV 개념의 최종 선정시 정책적 고려를 위한 임무(mission)가 새로운 평가 가이드로서 제출된 바 있고, 이를 이용한 평가 결과가 마찬가지로 4월 12일 GIF 전문가 그룹 회의에서 발표

C. 액체금속 냉각로 그룹

개념 그룹	개념 그룹명	그룹에 속한 원자로 개념	주평가 대상 개념
L1	Mox fuel, Na cooled fast rx	JSFR, M-JSFR, BN-800, RNR-1500, CDFR	JSFR
L2	Metal fueled, Na cooled, pyroprocess fast rx	S-PRISM, M-JSFR, KALIMER, ULLC with re-cladding, AFR-300,	S-PRISM, KALIMER
L3	Metal fueled, Na cooled, UPu/Zr once-through system (Japan)	4S	4S
L4	Medium sized Pb or Pb-Bi cooled rx, domestic set	Oxide-fueled version of BREST, INEEL/MIT Concepts	INEEL/MIT Concepts
L5	Medium sized Pb or Pb-Bi cooled rx, Russian set C	BREST, SVK-75	BREST
L6	Small Pb or Pb-Bi cooled rx with cartridge cores	ENHS, STAR-LM, STAR-H2	STAR

D. 비분류 원자로(Non-Classical) 그룹

개념 그룹	개념 그룹명	그룹에 속한 원자로 개념	주평가 대상 개념
N1	Molten Slat Core Reactor	HERACLITUS, MSRE, MSBR, LM-FR, MSR	MSBR
N2	Gas Core Reactor	GCR/VCR-MHD, GCR-U-C-F, GCR-UF6, Plasma Core	GCR/VCR-MHD
N3	Molten Salt Cooled Advanced High Temperature Reactor	AHTR	AHTR

될 예정으로 있다.

이후 2002년 5월 파리에서 GIF 회의를 개최하여 GIF 전문가 그룹 회의에서 검토된 Gen IV 개념 선정 결과에 대한 정책적 고려 사항에 대해 최종적으로 논의하고, 그 최종 결과를 7월에 개최 예정인 리우 GIF 회의에서 승인할 예정이다.

계속해서 선정된 개념에 대한 연구 개발 계획이 작성되고 Gen IV TRM 최종 보고서가 2002년 9월에 발간될 예정이다. 이 보고서가

발간되면 GIF 회원국을 비롯한 Gen IV 개발을 위한 국제 협력 방안이 GIF 회의에서 본격 논의될 전망이다.

Gen IV TRM 추진과 관련하여 우리 나라에서는 Gen IV 원자력 시스템 개념으로서 10개의 개념을 제안하였고, 현재 수냉각형 원자로 그룹의 W1그룹에 속한 SMART와 액체금속 냉각형 원자로 그룹의 L2 그룹에 속한 KALIMER가 좋은 평가를 받고 있으며, 또한 FCCG에서

는 DUPIC 개념에 대한 평가가 좋은 것으로 나타나고 있다.

한편 TWG와 Crosscut 그룹에 국내 전문가 7명(대학 1명, 산업체 2명, 연구 기관 4명)이 파견되어 활동하고 있는데, TWG에 6명, Corsscut 그룹에 3명이(2명은 TWG와 Crosscut에 중복 참여) 참여하고 있다.

NTD(Near Term Deployment) TRM 결과

미국은 현재 103기의 원전을 운전중이고, 원자력 발전 점유율은 약 20%에 이르고 있다. 반면에 1979년 TMI 사고 이후에 새로운 원전 발주가 없었으며, 원자력 분야의 산업 인프라는 매우 취약하게 된 상황이다.

또한 지구 환경 문제 등에 따라 원자력이 중요성이 인정되고 있어서, 2001년 5월 부시 행정부는 국가 에너지 정책(National Energy Policy)에서 전력 수요 증가를 충족하기 위해 원자력의 역할이 매우 중요하다고 강조하였다.

이에 따라 NEI(Nuclear Energy Institute)는 2020년까지 원전 50,000MW의 운전 개시를 목표로한 Vision2020을 작성한 바 있다.

또한 미국 등 원자력 선진 9개국이 참여하여 개발하고 있는 Gen IV는 상용화 목표 시기가 2030년

〈표 4〉 NTDG 후보 원전

후보 원자로	공급 회사	특 성
ABWR	GE	1,350 MWe BWR, NRC로부터 설계 인증 획득, 일본에서 건설·운영중
SWR1000	Framatome ANP	1,013MWe BWR, 유럽의 요건을 충족시키도록 설계되고 있음.
ESBWR	GE	1,380MWe 수동 안전성 BWR, 현재 개발중
AP600	Westinghouse	610MWe의 수동안전성 PWR, NRC로부터 설계 인증 획득
AP1000	Westinghouse	1,090 MWe 수동 안전성 PWR, AP 600을 용량 증대한 것, 아직 설계 인증 미획득
IRIS	Westinghouse	100~300 MWe 1차 계통 통합 PWR, 현재 개발중
PBMR	ESKOM	110 MWe modular direct cycle helium-cooled pebble bed reactor, 현재 남아공에서 건설 계획중
GT-MHR	General Atomics	288 MWe modular direct cycle helium-cooled reactor, 현재 러시아에서 건설 인허가를 받는 중

임에 따라 현재 직면한 미국의 전력 수요 증가 문제에 시의 적절하게 대응할 수 없다는 점을 고려하여 2010년에 미국 내에 Gen III+형 원전 도입을 목표로 검토를 하기 위해 NTDG(Near-term Deployment Group)을 구성하여 운영하였다.

NTDG의 임무는 미국 내에 단기(2010년)에 신규 원전을 건설·운영하는 데 있어서 기술적·제도적 및 규제상의 과제(gap)를 도출하고, 이를 해결하기 위해 미국 에너지부(DOE)가 취해야 할 행동 계획(Action items)을 권고하는 것이다.

1. NTD 후보 원전 및 평가 기준

먼저 신규 원전 후보 도출을 위하여 미국 DOE는 후보 원전 개념들을 제안받았다. 이에 〈표 4〉와 같이 8개 후보 원전 개념들이 제안되어 도출되었고, 추가의 3개 개념에 대해서는 다른 이유로 평가하지 않았다. 2010년까지 도입 가능할 것으로 추정되나, 여러 가지 이유로 평가 대상에서 제외된 3가지 원전은 다음과 같다.

① EPR (European PWR) : 1,545 또는 1,750MWe급 PWR로서 NTDG에 제안되지 않음에 따라 평가하지 않음.

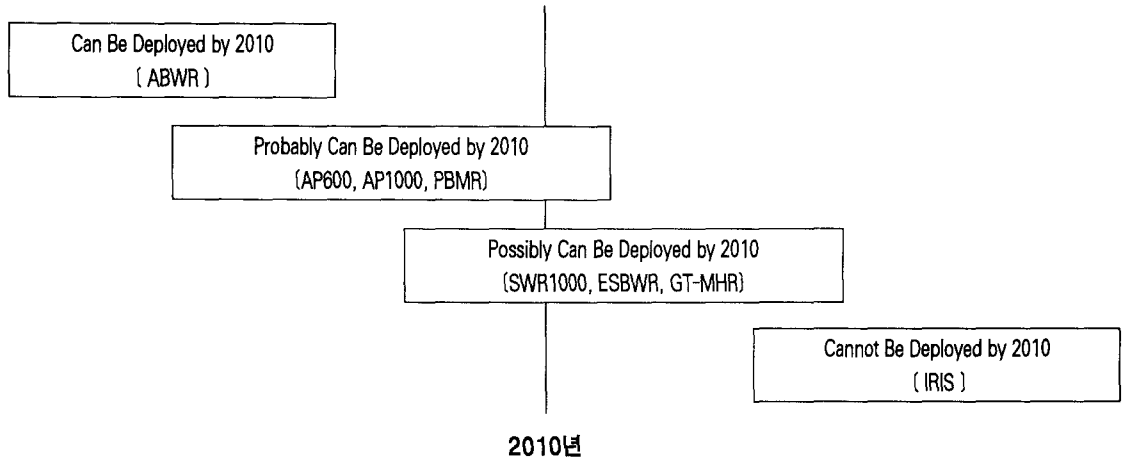
② System 80+ : 1,350MWe급 PWR로서 한국에서 건설되고 있으나, WEC(구 웨스팅하우스사)사에

〈표 5〉 NTDG 후보 원전 평가 기준

기 준	주요 내용
1. Regulatory Acceptance	미국 NRC로부터 설계 인증 획득, 또는 실증로에 대한 건설 허가를 받은 경험
2. Industrial Infrastructure	기기 및 부품 공급 업체, 관련 엔지니어링 업체의 유무, 또는 관련 기기 및 부품 등을 조립·완성시킬 의향을 가진 업체의 유무
3. Commercialization Plan	2010년까지 상업화를 위한 구체적 계획 - 시장 전망, 공급 업체 확보 계획, 연료 공급 확보 방안, 산업체 제작 능력 확보 방안 등
4. Cost Sharing Plan	정부와 민간의 비용 분담 계획 - 정부와 민간의 비용 분담 부문에 대한 구분과 투자 계획
5. Economic Competitiveness	확실한 경제성 평가 결과와 실증 - 자본 비용 규모, 최초 발전소 건설 비용 등
6. Fuel Cycle Industrial Structure	핵연료 공급 보장 - 저농축 우라늄 사용, 비순환 주기 산업체의 확보 또는 확보 계획

〈표 6〉 NTDG의 후보 원전 평가 결과

기준 노형	Regulatory Acceptance	Industrial Infra	Commer- cial ization Plan	Cost Sharing Plan	Economic Competi- tiveness	Fuel Cycle Industrial Structure
ABWR	충족	충족	충족 가능	충족	충족 가능	충족
SWR 1000	충족 가능	충족	자료 미제출	충족 가능	충족 가능	충족 가능
ESBWR	충족 가능	충족	미충족	충족	충족 가능	충족
AP 600	충족	충족	충족 가능	충족	충족 가능	충족
AP 1000	충족 가능	충족	충족 가능	충족	충족 가능	충족
RIS	미충족	충족 가능	미충족	충족	신뢰성 부족	충족
PBMR	충족 가능	충족 가능	충족 가능	충족	충족 가능	충족 가능
GT-MHR	충족 가능	충족 가능	충족 가능	충족	충족 가능	충족 가능



〈그림 3〉 NTDG 후보 원전의 2010년까지 도입 가능성 평가 결과

서 본 원전 개념을 미국 내에 도입할 의향을 보이지 않음에 따라 평가하지 않았음.

③ CANDU : 캐나다 고유 노형으로서 최근 경수 냉각, 중수 감속 방식의 개발로 경제성 향상이 기대되고 있으며, 미국 내에 특별히 도입하지 말아야 하는 특별한 이유는 없으나 아직까지 미국 내에 도입된 경험이 전혀 없음에 따라 평가하지

않음.

한편 후보 원전의 2010년까지 미국 내에 도입 가능성을 평가하기 위하여 6개의 기준을 〈표 5〉와 같이 설정하였다.

〈표 5〉에 나타난 6개의 평가 기준은 모두 중요성을 가지고 있다. 규제 수용성은 후보 원전이 미국 NRC의 규제를 통과할 수 있는가로서, 특히 새로운 규제 기준인 10

CFR52의 적용 가능성이 매우 중요한 현안이 되었다. 1980년 이후 지금까지 신규 원전 건설 경험이 없는 미국으로서는 원자력산업 인프라가 무척 취약함에 따라 신규 원전의 건설을 위해 기자재의 공급이 과연 제대로 이루어질 수 있는가가 중요한 것이다. 그리고 중요한 것은 경제성으로서, 타발전원에 비해 경제성 우위를 실증적으로 보여줄 수 있어야



한다는 것을 강조하고 있다.

이러한 평가 기준에 따라 평가한 결과 <표 6>에서와 같이 ABWR과 AP600이 기준에 대한 충족도가 가장 높고, IRIS가 가장 낮은 것으로 나타났다. 이에 기초하여 <그림 3>과 같이 후보 원전별 2010년까지의 도입 가능성을 평가한 결과, 도입 가능성이 가장 높은 원전 후보는 ABWR이며, 가장 가능성이 낮은 원전 후보는 IRIS로 나타났다.

2. NTD 추진 방안

NTDG에서는 2010년까지 시의 적절하게 미국 내에 원전을 도입하기 위해서 반드시 해결되거나 추진되어야 할 과제를 도출하여 평가하였다. 또한 현재 원전 도입에서 중요한 현안이기는 하나, 2010년까지 도입에 있어서 그 해결에 추가적 노력이 필요하지 않다고 평가되는 과제도 도출하여 제시하였다.

먼저 반드시 해결되거나 추진되어야 할 과제로서는 경제성 확보, 경쟁적 전력 시장하에서의 사업성 확보, 새로운 규제 기준인 10CFR 52의 효율적 시행, 원자력산업 인프라 구축 및 국가 원자력 전략(National Nuclear Energy Strategy) 개발을 제시하였다.

즉 신규 원전은 경쟁적 전력 시장(Deregulated Marketplace)에서 경제적 우위를 확보하여야 하며, 이는 특히 자본비가 반드시 타발전원

에 비해 적도록 노력해야 하고, 운전 유지비는 현재 운전중인 최고 수준의 발전소와 같거나 적은 수준이 되도록 노력하여야 한다는 것이다.

한편 원전은 대규모 자본 비용이 필요하며, 건설 및 인허가 등에 장기간의 리드 타임이 소요되는 등에 따라 시장 변화에 대한 대응성이 매우 부족하다. 따라서 이에 대한 대응성 증대를 위하여 경쟁적 전력 시장하에서 사업성 확보가 필요하다.

또한 지금까지 인허가 제도의 개선을 위하여 준비된 10CFR52는 신규 원전에 새롭게 적용된 경험이 없음에 따라, 이 10CFR52가 신규 원전 도입에 있어서 충분히 비용 효과적일 수 있는지에 대한 충분한 실증이 필요하다는 것이다.

그리고 지금까지의 실적으로는 설계 인증을 받는 데에 약 6~8년이 걸리는 것을 상당히 줄여야만 경제적 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 평가되고 있기도 하다.

또한 오랫동안 미국 내에 신규 원전 건설 경험이 전무한 관계로 원자력산업 인프라(전문 인력 부족, 관련 장비 및 기기 부족, 전문 업체 부족 등)가 매우 취약한데 이의 복구 또한 반드시 실현되어야 할 것이다.

마지막으로 신국가 에너지 정책에 부합되는 새로운 국가 원자력 전략 개발이 필요하며, 이에 민간이 신규 원전 도입 유도를 위한 투자

유인 및 지원 등이 포함되어야 한다는 것이다.

한편 원자력의 안전성, 사용후 핵연료 관리, 국민 수용성 및 핵물질 비확산 등은 현재 원자력 개발에 있어서 매우 중요한 현안이기는 하지만 이번 단기적인 원전 도입에 있어서 추가적인 노력을 요하지 않는 과제로서 평가되고 있다.

즉 현재 검토되고 있는 후보 원전들은 모두 NRC의 기준과 요건을 충족하고 있으며, 사용후 핵연료 관리 문제는 현재의 기술 수준으로 볼 때 문제가 없고 또한 원전 사업자들이 충분한 경험을 가지고 있어서 추가적인 노력이 요하지 않는 것으로 보고 있다.

국민 수용성은 최근의 여론 조사 결과를 볼 때 신규 원전 도입에 찬성하는 국민이 60%가 넘는 등에서 그리고 과거 여론 조사에 비해 그 비율이 크게 증대되는 추세를 보이고 있음에서 큰 문제가 아니라고 평가하고 있다.

마지막으로 핵물질 비확산은 현재 제안된 후보 원전 모두는 핵물질 확산 가능성이 거의 없는 노형이라는 점에서 또한 문제가 되지 않는 것으로 평가하고 있다.

NTD의 목표를 효율적으로 달성하기 위한 추진 전략으로서 NTDG에서는 두가지 노형을 병행하여 도입하는 dual track 전략을 권고하고 있다.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
1단계 : 10CFR52 재정비										
2단계 : 설계 완료(ABWR, PBMR)										
3단계 : 건설 및 시운전										
정부의 재정 지원(세제 등)에 대한 확고한 방안 설정										
원자력 산업계의 Infra에 대한 평가 완료										
국가 에너지 정책을 실천하기 위한 시행 계획 개발										

〈그림 4〉 NTD 추진 전략

즉 대형일 경우 경제성 확보가 용이하고, 경험이 풍부한 경수로와 중소형로로서 자본 투자 위험이 적고, 전력 수요 변화에 대응성이 좋은 가스를 병행하여 도입 추진하는 것이다.

또한 2010년까지 시의 적절하게 신규 원전이 도입될 수 있도록 하기 위하여 〈그림 4〉와 같이 3단계의 단계별 추진 전략을 수립 추진하는 것으로 하고 있다.

즉 제 1단계는 10CFR52의 재정비 및 실증, 제2단계는 설계 완료, 제3단계는 건설 및 시운전이다.

한편 소요 자금은 제1단계와 제2단계가 완료될 것으로 추정되는 2007년까지 약 1억불로 추정되고 있고, 이중 제2단계의 설계 완료에서는 정부와 민간이 공동으로 비용을 분담하는 방안으로 추진되어야 하는 것으로 권고하고 있다.

한편 2010년까지 신규 원전이 상

업 운전에 들어갈 수 있도록 하는 사업 추진 성공을 위한 최소 시간 요건으로서 ① 사업 추진 결정은 2003년 이전에 ② 인허가 완료는 2006년 말까지 ③ 건설은 최소 2007년에 개시되어야 하는 것으로 권고되고 있다. 이에 NTDG는 다음 사항을 결론으로 제시하고 있다.

① 시의 적절한 민간 투자가 충분하게 이루어져야 한다.

② 발전 회사는 신규 원전 도입 추진을 2003년 말까지 결정해야 한다.

③ 경쟁적 전력 시장(Deregulated Marketplace)하에서 경제성 확보가 매우 중요하다.

④ 경수로에 비해 가스로는 2010년 도입을 위해서 추가적인 노력을 요하는 과제가 많음에 따라 이의 해결 노력 강화가 필요하다.

⑤ 민간과 정부의 협력 강화가 필요하다.

한편 NTDG는 미 에너지부 등 정부에서 취해서 추진해야 할 사항으로서 다음 4가지를 권고하고 있다.

첫째, 민간과 정부가 협력하여 단계별 추진을 이행해야 한다는 것이다. 이에 시장의 필요(Market-driven)에 의한 추진이 전제되고, 협력의 형태는 민간과 정부의 비용 분담(Cost Sharing)이 될 것이라는 것이다.

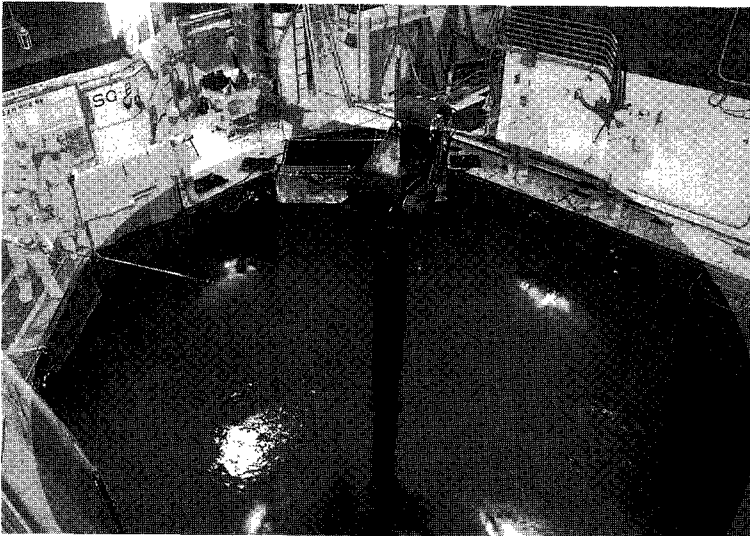
둘째, 정부는 민간 투자에 대해 인센티브를 보장하여야 한다는 것이다. 이에 세제 혜택, 투자 위험 감소 지원, 장기 전력 판매 계약 지원 등이 있다.

셋째, 원자력산업 인프라를 평가해야 한다는 것이다. 이를 위해서는 NEI가 주도하고 DOE 등 관계기관이 참여하여 원자력산업 인프라의 취약점을 파악하고 이의 해결을 위한 방안(Action) 도출하도록 해야 한다는 것이다.

마지막으로, 국가 에너지 정책을 지원할 국가 원자력 개발 전략을 수립해야 한다는 것이다.

한·미 I-NERI 추진 현황

한국과 미국은 제4세대 원자력 시스템 개발에 중점을 둔 한·미 양국간 국제 공동 연구 프로그램으로서 I-NERI(International NERI)를 추진하기로 합의하고, 이를 위한



Gen IV는 향후 세계 원자력발전소의 표준이 될 가능성이 큼에 따라 세계 원자력산업 주도권의 향방이 이에 의해 좌우될 가능성이 클 것으로 전망되는데, 우리나라는 Gen IV 개발 참여와 선도적 역할 수행을 통하여 원자력 G5 진입의 계기를 마련할 수 있을 것으로 전망된다.

협정을 2001년 5월에 체결하였다.

이후 양국은 2001년도 협력 분야로서 제4세대 원자력 시스템의 공동 기술 분야인 계측 제어 분야와 현실적으로 제4세대 원자력 시스템으로서 선정 가능성이 높다고 평가되는 경수로 분야를 선정하고 이를 추진하기로 하였다.

이에 따라 2001년 I-NERI 추진을 위하여 2001년 7월에 과제를 양국에서 동시에 공모하고, 이의 평가를 각기 실시하여 2001년 10월 6개 과제(경수로 분야 4개, 계측 제어 분야 2개)를 선정한 후 12월에 본격 수행하도록 하였다.

한편 2002년도 I-NERI 수행 분야는 Gen IV TRM 결과를 반영하여 정하도록 하고 있으며, 2002년도 추정 소요 예산으로 한국은 400만불 정도를 예정하고 있고, 미국은 1,000만불을 한국·일본 및 프랑스와 I-NERI 수행을 위하여 분배할 것으로 예상되고 있다. 그리고

2001년도 수행 과제 평가와 2002년도 수행 과제 선정은 2002년 10월 말에 실시될 전망이다.

결어- Gen IV 개발의 의의와 전망

2000년 1월 워싱턴 정책 그룹 회의에서 제시된 바와 같이 2020년 정도까지는 현재 개량화되고 표준화된 제3세대 원자력 시스템이 본격적인 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

프랑스는 유럽형 경수로(EPR), 일본은 신형 경수로(ALWR), 우리나라는 APR-1400 등 현재 원자력 기술 개발의 선도 그룹에 속한 나라들은 제3세대 원자력 시스템 개발을 건의 완료한 상태에 있고, 몇몇은 이미 건설되고 있거나 운영되고 있는 것도 있다.

미국의 부시 행정부는 신국가 에너지 정책에서 미국 내 전력 수요 급증에 대비하여 원자력 역할의 중

요성을 인식하고, 단기적(2010년까지)으로 3세대 원자력 시스템을 도입하도록 하고 있다.

그러나 제3세대 원자력시스템만으로는 향후 30~40년 이후의 전력 공급에 있어서 탈발전원과 경쟁하는 데 반드시 유리할 것이라고 전망되지 않고, 또한 지구 환경 문제 등에 좀더 효율적으로 대응하고, 핵확산 우려가 전혀 없는 원자력 시스템의 개발이 필요하다는 인식의 공감대에 의하여 Gen IV 개발이 본격 추진되게 되었다.

이에 따라 Gen IV는 2002년 가을에 최종 선정될 것으로 예상되는 몇몇 최상의 Gen IV 개념들을 중심으로 본격적인 연구 개발이 국제 협력에 의해 추진되어 2030년경부터 본격적으로 상업화 운전될 것으로 전망된다.

한편 우리나라는 제3세대 원자력 시스템인 APR-1400의 개발 경험이 풍부하여 Gen IV 개발에도 선도적 역할을 할 수 있을 것으로 전망된다.

Gen IV는 향후 세계 원자력발전소의 표준이 될 가능성이 큼에 따라 세계 원자력산업 주도권의 향방이 이에 의해 좌우될 가능성이 클 것으로 전망되는데, 우리나라는 Gen IV 개발 참여와 선도적 역할 수행을 통하여 원자력 G5 진입의 계기를 마련할 수 있을 것으로 전망된다. ☞