

# '99% 안전' 원자력 발전 목표

## 핵물질 전용 배제 · 폐기물 최소화도 실현

글\_ 장문희 한국원자력연구소 신형원자로개발단장 · 김학노 연구지원부장 · 김현준 기술정책연구실장

지난 2000년 1월, 20세기의 마지막 해를 맞이하여 '원자력의 새로운 부활'을 모색하는 중요한 모임이 미국 워싱턴에서 열렸다. 원자력기술 선진국으로서 세계 원자력계를 선도하고 있는 우리 나라와 미국, 일본, 프랑스, 영국, 캐나다 등의 고위정책결정자급 인사들이 모여 21세기의 새로운 환경에서 원자력이 나아가야 할 방향에 대해 진지하게 논의한 결과, 제4세대 원자력시스템(Generation IV Nuclear Energy System, 이하 Gen IV) 개발을 위해 공동 노력한다는 취지의 정책선언문을 발표하였다.

### 2000년 서울서 GIF 첫공식회의

2000년 8월에는 그 첫 번째 공식적인 모임이 서울에서 개최되었다. 이 모임은 제4세대 원자력시스템 국제포럼(Generation IV International Forum, 이하 GIF IV)으로

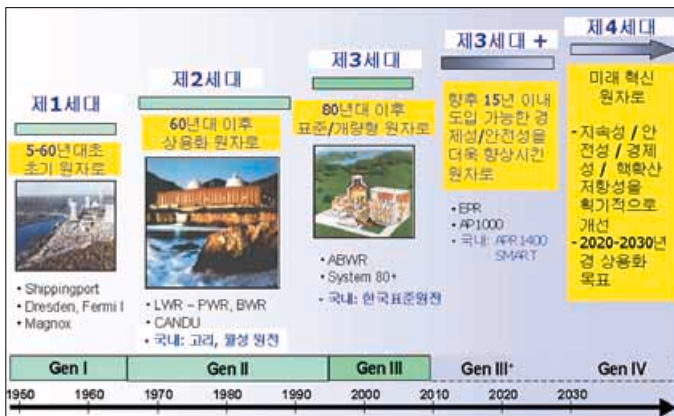
당초 9개국으로 출발했지만 현재는 우리 나라와 미국, 일본, 프랑스, 영국, 캐나다, 스위스, 유라툼, 남아공화국, 아르헨티나 및 브라질 등 11개 회원국이 참여하고 있다.

GIF는 제4세대 원자력시스템 공동개발을 목적으로 미래의 급격한 에너지수요 증가에 대비하고 인류의 지속가능한 발전에 기여하기 위해, 대중적 지지와 경제성 및 안전성이 획기적으로 향상된 원자력시스템을 개발하고, 이 시스템을 늦어도 2030년경까지 상용화해 우리의 생활 속에서 함께 숨쉴 수 있도록 하겠다는 목표를 설정하였다. 2001년 들어 본격적인 활동을 개시한 GIF는 전세계에서 제안한 100여 개의 Gen IV 노형 후보개념들을 평가하여 6개를 Gen IV 노형 개념으로 정하고, 이들에 대한 기술지도를 작성하였다.

### 값싸고 안전, 테러 예방 가능한 원자로

Gen IV는 여러 가지 의미를 가지고 있다. 먼저 시간적 의미로 보면, 지금까지의 원자로 개발을 제3세대까지로 구분하고 미래 세대로서 개발하여 도입할 것을 제4세대라고 한다(그림1). 즉, 원자력의 평화이용이 주창된 1950년대에 개발된 원형로 형태의 원자로들을 제1세대로 본다면, 제2세대는 원자력이 본격적으로 상업용 발전로로서 역할하기 시작한 1960년대부터 건설되어 운영된 원자로들로서 현재 세계에서 운영되고 있는 대다수의 원자로가 이에 해당되고 우리나라에서는 고리 원전과 월성 원전이 이에 해당된다.

또한 1979년의 TMI 사고 이후 원전의 안전성에 관심이 고조됨에 따라 안전성과 경제성을 함께 향상시키기 위해 표준화하고 개량화하는 일련의 기술개선과 개발 움직임이 활



원자력시스템의 발전 방향

발하였고, 이 결과로 등장한 원자로들이 제3세대로 분류된다. 따라서 제3세대 원자로들은 개량표준형 원자로로 불릴 수 있으며, 1990년대부터 본격 건설·운영되고 있다. 대표적인 제3세대 원자로로는 우리 나라의 한국표준형원전인 KSNP, 미국의 AP600, ABWR 등을 들 수 있다.

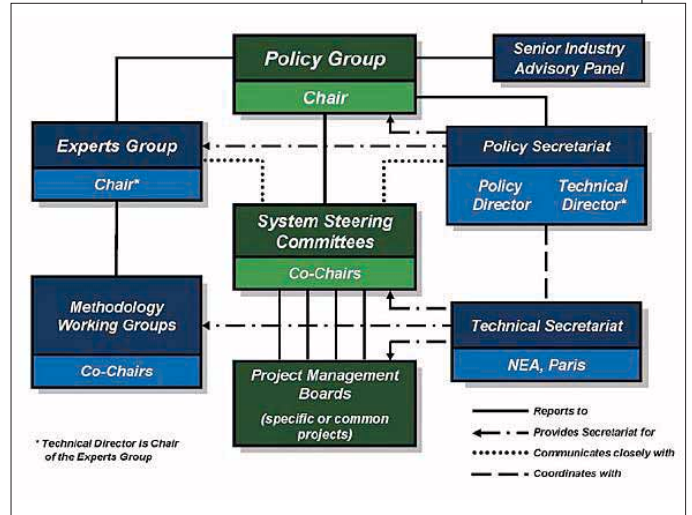
한편, 2015년경까지 건설되어 운영될 수 있다고 판단되는 원자로들은 제3세대를 경제성 측면에서 더욱 향상시킨 것들로서 이를 제3세대 플러스형이라는 개념으로 분류하고 있는데, 우리 나라의 APR-1400이 해당된다.

그러면 Gen IV는 무엇인가? 제3세대 플러스형 원자로가 단기적으로 원자력이용을 대표할 주자라면, Gen IV는 그 이후, 빠르면 2020년 늦어도 2030년 이후를 책임지는 우리 다음 세대를 위한 원자력시스템인 것이다.

Gen IV는 4가지의 혁신적인 기술목표를 추구하고 있다. 그리고 이 기술목표를 달성한다면 현재 원자력계가 안고 있는 당면 문제점들을 완화시키거나 해결해 줄 것으로 기대되고 있다.

Gen IV의 첫번째 기술목표는 Gen IV가 지속가능한 발전을 선도하기 위해서는 지속성(Sustainability)을 가져야 한다는 것이다. 지속성이란 두 가지 면에서 고려될 수 있다. 자원이용 효율을 혁신적으로 높이거나 자원의 재활용 기술개발을 통해 자원을 오랫동안 사용할 수 있도록 하는 것이 하나이고, 원자력시스템의 사용으로 발생하는 폐기물량을 최소화하는 혁신기술을 접목함으로써 다음 세대에 대한 부담을 경감시켜서 지속성을 확보하는 것이 두 번째이다. 이것은 지구환경문제가 21세기의 주요 이슈로서 등장하고 있는 시점에서 청정에너지로서 원자력이 이들 문제 해결에 중요한 역할을 할 수 있도록 할 것이다. 특히, Gen IV가 미래 청정에너지로서 기대를 한 몸에 받고 있는 수소 생산의 가장 중요한 에너지원이 될 것이다.

Gen IV의 두 번째 기술 목표는 일반 대중이 수용할 수 있는 정도의 안전성과 신뢰성을 가지도록 한다는 것이다. 이를 위해서 Gen IV는 원자로 외부에서 특별한 조치가 필요하지 않을 정도의 안전시스템을 장착하도록 하며, 중대사고의 발생이 거의 일어나지 않도록 하는 것이다. 이러한 혁신적 안전개념의 적용은 국민이해 및 수용성 확보에 크게 기여할



GIF 추진체계

수 있을 것이다.

세 번째 기술목표는 매우 경제적인 에너지공급 시스템이 되도록 한다는 것이다. 기존의 제3세대형 원자로로는 물론 다른 에너지생산시스템과 비교해도 건설부터 수명기간 동안의 운영비용을 모두 합산하는 전수명주기 비용에서 충분히 높은 경쟁력을 가지도록 하고, 또한 초기 투자비를 획기적으로 줄임으로써 투자 위험도를 감소시켜 민간산업체의 참여 장벽을 낮추도록 하고 있다.

마지막 기술목표는 원자력이 평화적 에너지로서 지속적으로 활용되기 위한 요건을 확보하기 위해 혁신적인 핵확산 저항성과 물리적 방호 개념을 개발하여 적용하는 것이다. 핵물질의 전용을 불가능하게 하고, 테러에 대한 대비도 완전하게 하여 명실상부한 에너지원으로 역할을 할 수 있게 하는 것이다. 이같은 Gen IV의 기술 혁신성은 현재 우리가 안고 있는 원전수거물관리센터 부지 확보 문제, 국민이해 문제 등을 완화시키거나 해결할 수 있는 계기를 제공할 것이다.

### GFR, SFR 등 6개 고속로 개념 선정

GIF는 미래 혁신형의 Gen IV 개념을 선정하기 위해 지난 2001년 4월 전세계에 Gen IV 개념을 공모하여 100여 개의 개념을 제안받았다. 제안된 개념들은 GIF 회원국에서 파견된 100여 명의 전문가들이 평가, 2002년 7월 최종적으로 6

# 01

개의 Gen IV 개념이 <표 1>과 같이 선정되었다. 평가는 이 개념이 Gen IV의 기술목표에 얼마나 충실할 수 있는가에 맞추어졌으며, 4대 목표 24개 세부지표를 가지고 평가되었다.

선정된 고속로 개념은 가스냉각로(GFR), 소듐냉각로(SFR), 납합금냉각로(LFR)이고, 열중성자로는 초고온가스로(VHTR), 고속로와 열중성자로는 초임계압수냉각로(SCWR)이다.

### 전문가 100여명, 20년간 개발할 기술지도 완성

지난 2001년 Gen IV 개발을 위한 GIF 활동이 본격화되면서, Gen IV의 개발전략을 수립하기 위한 준비가 이루어졌다. 즉, GIF는 Gen IV 개발전략을 수립하기 위해 회원국에서 전문가들을 파견하여 Gen IV 기술지도를 작성하도록 하였다. 기술지도 작성에 참여한 전문가는 100여 명이며, 우리나라도 7명의 전문가가 참여하였다.

기술지도는 2년여의 작성기간을 거쳐 2003년 1월에 최종안인 '제4세대 원자력시스템 기술개발계획'이 GIF 정책그룹의 승인을 받아 공식화 되었다.

기술지도는 Gen IV 개발을 3단계로 구분하여 추진하는 것으로 하고 있다. 제1단계는 '검토단계'로서 개념정립 및 개념설계를 수행하는 단계로서 각 시스템의 개발타당성을 점검해보는 단계이다.

<표 1> 6개의 Gen IV 개념

시스템	중성자스펙트럼	냉각방식	출구온도(°C)	상용화(연)
가스냉각고속로 (GFR)	고속중성자	가스	850	2025
납냉각고속로 (LFR)	고속중성자	납	550~800	2025
용융염로 (MSR)	열중성자	용융염	700	2025
소듐냉각고속로 (SFR)	고속중성자	소듐	520~550	2015
초임계압수냉각로 (SCWR)	열/고속중성자	초임계압수	550	2025
초고온가스로 (VHTR)	열중성자	가스	1000	2020

제2단계는 '개발단계'로서 회원국들이 개발 타당성을 확인하고 본격적으로 개발할 의사를 가지고 있는 시스템에 대해 연구개발을 추진할 것으로 예상되고, 이 단계에서 시스템의 기본설계가 완료될 것이다.

제3단계는 개발된 시스템을 실증해보는 '실증단계'다. GIF에서는 제2단계까지가 GIF가 주관하여 국제공동연구로서 추진할 필요가 있다고 평가하고, 마지막 제3단계는 산업체가 주도하는 단계가 될 것으로 보고 있다. 현재는 각 시스템별로 본 기술지도에 기초한 세부 연구개발계획이 수립되어 마무리단계에 있다.

### 공동연구개발 및 협력협정 체결 눈앞에

GIF는 Gen IV 기술지도 완성 이후 본격적인 연구개발 수행을 위해 두 가지 면에서 준비를 하고 있다. 첫째는 각 시스템별로 세부 연구개발계획을 수립하는 것이다. GIF는 각 시스템별로 시스템운영위원회를 회원국 전문가들로 구성하여 세부연구개발계획을 수립하도록 하였다.

세부 연구개발계획 수립에 앞서 GIF는 선정된 6개의 Gen IV 시스템에 대한 회원국들의 연구개발 참여의사를 조사한 바가 있다. 이 때, 용융염로(MSR)와 납냉각고속로(LFR)에 대해 회원국들의 참여의사가 낮아서 이들 두 시스템에 대한 시스템운영위원회는 구성되지 못하였다. 이에 따라, 현재는 초고온가스로(VHTR), 소듐냉각고속로(SFR), 가스냉각고속로(GFR)와 초임계압수냉각로(SCWR)의 시스템 운영위원회가 해당 시스템의 세부 연구개발계획을 수립하고 있고, 현재 거의 마무리 단계에 이르렀다.

한편, 납냉각고속로에 대해서 미국 등이 아직 관심을 표명하고 있음에 따라 시스템운영위원회를 구성하여 세부연구개발계획을 수립하기 위한 준비가 진행되고 있는 상황이다.

두 번째는 Gen IV 국제공동연구개발을 위한 협력협정을 체결하는 것이다. 이를 위해서 GIF에서는 초기에 MATF(Multi-lateral Agreement Task Force)를 구성하여 협정 초안을 준비하게 하고, 공동연구 수행에 따르는 자금 외의 시설이용, 기보유 기술정보 등의 활용을 비용으로 산정하는 등의 문제도 함께 고려하도록 하였다. MATF에서



미국 아르곤 국립연구소(ANL)의 고속중수로 EBR

작성한 초안을 바탕으로 2003년부터 GIF 정책그룹에서 이를 본격 논의하기 시작하였고, 몇몇 현안사항, 예를 들면 협정의 법적 지위, 서명주체의 형평성 등이 해결되면 2004년 말경에 협정에 서명할 것을 목표로 하고 있다.

현재 고려되는 협정의 틀은 3단계이다. 최상위 협정은 총괄협정으로서 공동연구개발을 추진하는 데 있어서 고려되는 모든 법적 사항을 포함하고, 하위 협정들을 통괄하는 것으로서 모든 회원국 정부가 서명주체가 될 것이다. 2004년 11월에 서명하려고 하는 협정이 바로 이 총괄협정이다.

그 다음은 시스템협정으로서 Gen IV 시스템별로 참여하는 회원국들이 서명할 것이다. 시스템협정에서 고려되었던 모든 법적 사항들이 총괄협정으로 이관됨에 따라 시스템협정의 내용과 법적 지위 등에 관한 사항은 총괄협정 서명 이후에 재논의하도록 하고 있다.

마지막 세번째 단계의 협정이 프로젝트협정이다. 프로젝트 협정은 회원국들이 실질적으로 참여하여 수행하여야 하는 프로젝트를 위한 협정이다. 이 협정에 서명함으로써 연구개발 수행에 참여하게 되는 것이다.

**우리 나라는 3개 고속로 운영위원회 참여**

우리 나라는 GIF 창립회원국이다. 우리 나라는 제3세대 플러스형 원자로인 APR 1400과 SMART의 개발 경험이 있고, APR 1400은 2기가 건설 계획되어 현재 계약 마무리 단계에 있다. 이러한 개발 경험과 기술력을 바탕으로 우리 나라는 제4세대 원자력시스템 개발에 적극 참여하고 있다.

우리 나라는 Gen IV 개념 선정 때, 10개의 개념을 제안하였는데, 그 중에서 SMART와 APR 1400은 INTD (International Near Term Deployment, 2015년까지 건설운영될 수 있다고 보는 제3세대 플러스형으로서 국제적으로 공인한 원자로들) 노형으로 선정되었고, 국가 원자력연구개발사업으로 연구되고 있는 액체금속로인 KALIMER에 기초하여 제안한 개념이 Gen IV 개념의 하나인 SFR에 포함되었다.

한편, 우리 나라의 핵확산저항성 핵연료주기 기술인 DUPIC에 기초한 개념도 제안된 바 있는데, DUPIC이 원자


로보다는 핵연료 측면에 더 강한 특성을 가진 반면에 Gen IV는 원자로와 핵연료주기를 포괄한다는 것에 따라 DUPIC을 Gen IV 개념에 포함시키지는 않았으나, DUPIC을 통해 확보된 기술들이 Gen IV 개발에 활용될 수 있다는 점을 높이 평가하여 연구개발계획수립에서 이 부분을 크게 반영하고 있다.

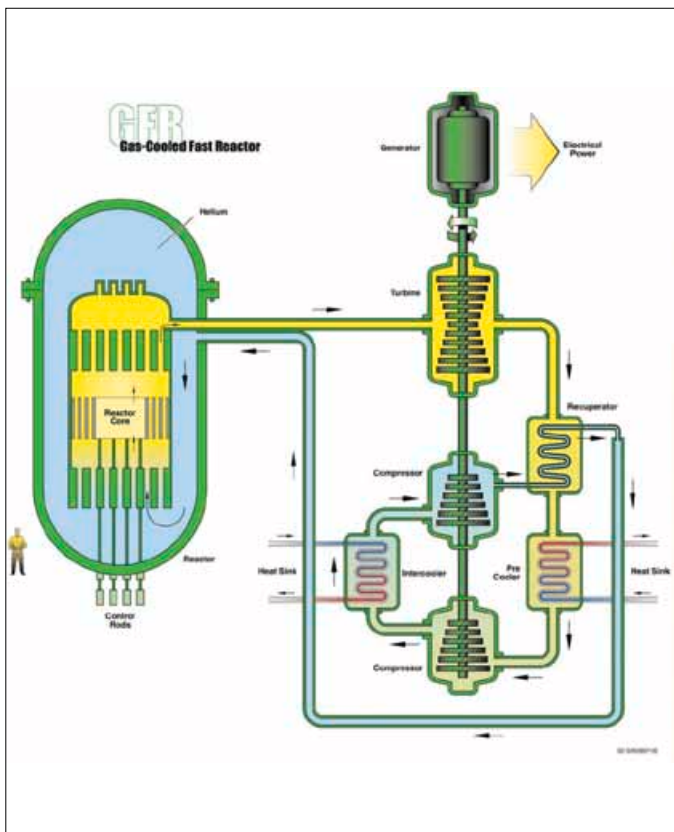
현재 우리 나라는 GIF 추진체계의 모든 조직에 대표와 전문가를 파견하고 있으며, 국내의 산·학·연·관이 모두 함께 참여하고 있다. 그리고 GIF에의 효과적인 참여와 Gen IV개발의 효율적 추진 및 본 체계의 원활한 운영을 위하여 국제협력기반조성사업의 일환으로 관련 기획 및 기반조성 사업을 수행하고 있다.

또한 Gen IV 국제공동개발의 효과적 수행을 위하여, 2003년 5월에 '제4세대 원자로 국제공동개발 기획보고서'를 산·학·연의 전문가 30여 명이 참여하여 작성함으로써 체계적이고 구체적인 방안을 수립한바 있는데, 이를 바탕으로 Gen IV 국제공동개발을 위한 예산이 배정되어 추진기반이 마련되었다.

우리 나라는 GIF에서 본격 연구개발계획 수립이 추진되고 있는 4개 시스템인 VHTR, SFR, SCWR 및 GFR 중에서 VHTR, SFR 및 SCWR에는 시스템운영위원회(SSC)에 참여하고 있으며, GFR는 요소기술 개발을 위해 프로젝트관리위원회(PMB)에만 참여하는 것으로 하고 있다.

VHTR는 수소생산을 주목적으로 하며, SFR는 우리 나라의 액체금속로인 KALIMER가 바탕이 되고 있고, SCWR는 초임계압수를 냉각재로 사용함으로써 얻어질 수 있는 고효율의 전력생산에 대한 기대가 있다. 반면 GFR는 VHTR와 같이 가스냉각로라는 점에서 공통기술 분야가 상당수 있다는 점 등을 고려하여 요소기술 개발에 참여하는 것으로 하고 있다.

우리 나라는 총괄협정이 서명되는 2004년 연말을 기점으로 Gen IV 개발 세부기획을 추진할 예정이다. 국내의 한정된 자원을 어떻게 효과적으로 활용하여 Gen IV 개발을 성공적으로 이끌고 나갈 수 있을 것인가가 세부기획의 가장 중요한 고려사항이 될 것이다. Gen IV는 우리의 미래이고, 그 미래에 우리가 주인이 될 것임을 기대한다. 



## GIF란 어떤 기구인가?



GIF 정책그룹 회의 모습

GIF는 2001년 7월 GIF 헌장(Charter)에 각국 정부가 서명함으로써 공식 출범하였다. 출범당시 9개 회원국에서 2002년 1월 스위스, 2003년 9월 유라툼이 회원국으로 참여함으로써 11개 회원국으로 운영되고 있다.

GIF는 2004년도 9월 제주에서 열린 정책그룹회의에서 추진체계와 정책선언문을 채택하였다. GIF의 최상위 조직은 정책그룹인데 회원국의 책임있는 고위급 인사 2명씩으로 구성돼 있으며, GIF의 모든 활동에 대해 의사를 결정하는 최고의 조직이다. 현재는 미국이 의장국이고, 일본과 프랑스가 부의장국을 맡고 있다.

전문가그룹은 Gen IV 공동개발의 기술적인 사항에 대해 정책그룹에 자문하고, Gen IV 연구개발을 위해 필요하다고 인정되어 설립된 여러 작업그룹과 태스크포스 조직의 활동을 감독하는 역할을 한다. 전문가그룹의 의장은 정책사무국의 기술국장이 맡도록 하고 있다.

GIF를 운영하기 위해 정책사무국과 기술사무국을 두고 있다. 정책사무국은 정책그룹회의와 전문가그룹회의를 주관하는 것이 가장 큰 역할이고, 연구개발을 수행하는 운영

위원회 등과 긴밀히 협력하여 Gen IV 국제공동개발이 원활하게 진행되도록 한다. 기술사무국은 현재 OECD/NEA에 위임하는 것으로 회원국간에 합의되어 있으며, Gen IV 국제공동개발을 위한 R&D 수행을 조직하고 지원하는 역할을 담당하게 된다.

정책그룹하에 있는 운영위원회는 Gen IV 시스템별로 구성되어 시스템개발을 총괄하며, 각 운영위원회 산하에는 프로젝트관리위원회를 두어 국제공동연구개발을 수행하게

된다.

또한 Gen IV 개발 원활화를 위한 방법론 개발 필요에 따라 작업그룹과 태스크포스를 전문가그룹 산하에 구성·운영하게 되는데, 현재는 핵확산저항성 및 물리적 방호 작업그룹(PR/PP WG; Proliferation-resistance and Physical Protection Working Group), 안전성 작업그룹(RSWG; Risk and Safety Working Group), 경제성 평가 작업그룹(EMWG; Economic Modelling Working Group), 법적 현안검토 태스크포스(LITF; Legal Issue Task Force) 및 비용산정 태스크포스(VCTF; Valuation of Contributions Task Force)가 구성되어 있다.

Gen IV 개발에서 민간산업체의 참여가 매우 중요하다는 인식에 회원국들이 공감함에 따라 산업체의 고위급 인사로 SIAP(Senior Industry Advisory Panel)을 구성하였고, GIF 정책그룹회의와 연계하여 공동회의를 개최하도록 하고 있다. 또한, 안전규제기관의 경우는 연구개발 초기부터 참여하는 것이 바람직하다는 의견에 따라 회원국의 규제전문가들로 패널을 구성하기 위한 준비가 이루어지고 있다.