미래 원자력 에너지 개발 추진 현황과 안전 대응 방안

감 성 천 한국원자력안전기술원 미래기준개발실 선임연구원



머리말

최근 원유 및 천연 가스의 가격이 지속적으로 상승하고 있어 세계 각국은 국가 에너지 안보의 중요성을 절감하고 있을 뿐 아니라 기후변화협약에 따른 온실 가스 감축을 목표로 하고 있는 교토의정서를 이행하기 위해서도 새로운 청정 에너지기술 개발을 추진하고 있다.

탄소 배출의 감소, 즉 화석 에너지 의존도 감소와 대규모의 안정적인 에너지 공급을 위해 원자력에너지의 이용이 확대되고 있으며, 미래의 에너지 수요 충족과 국민수용성 확보를 위해 새로운 원자력에너지 개발을 추진하고 있다.

미래 원자력 에너지 개발은 핵 분열 에너지와 핵융합 에너지의 이용에 따라 구분할 수 있다.

핵분열 에너지를 이용하는 원자

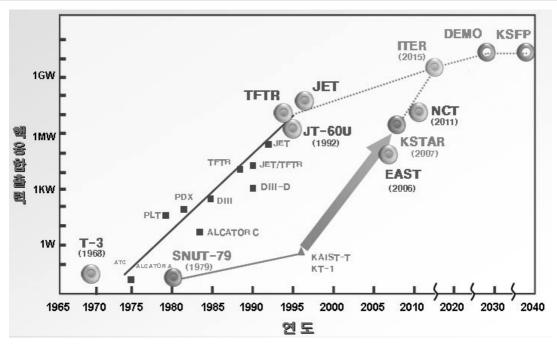
로의 제1세대 원자력 시스템은 1950년대 도입된 초창기 원전으로 미국의 Shippingport 원전과 영국의 Magnox 원전이 이에 해당되며, 그리고 1960년대 이후의 상용화된 제2세대 원자로 및 1980년 이후 개량한 제3세대 원자로와향후 15년 이내 도입 가능한 경제성과 안전성을 더욱 향상시킨 제3세대 플러스 원자로로 세대 구분을 할 수 있다.

그리고 지속성, 안전성, 신뢰성, 경제성, 핵확산 저항성을 획기적으로 개선하여 2020년에서 2030년 경 상용화를 목표로 하고 있는 제4 세대 원자로가 국제공동으로 개발 되고 있다.

이와 달리 핵융합 에너지를 이용 하는 상용화된 핵융합로는 아직 개 발되어 있지는 않지만 과학적 실증 단계로부터 국제 협력을 통한 공학

경희대학교 원자력공학과 졸업

한국원자력안전기술원 입사(1997) 대북경수로안전지원단, 대외정책단 대외사업담당 현 정책기준부 미래기준개발실



<그림 1> 우리나라의 핵융합 에너지 개발 중간 진입 전략 및 계획

적 실증 단계로 진입하였다.

본 발표에서는 우리나라의 미래 원자력 에너지 이용의 기술 개발 현황과 규제 기술 개발 현황을 소 개하고자 한다.

미래 원자력에너지 기술개발 현황

1. 핵융합 에너지

우리나라에서 핵융합 연구는 1979년 서울대학교에서 SNUT-79 소형 토카막 제작으로부터 시작되었다. 그후 한국원자력연구소(현 원자력연구원)의 KT-1 소형 토카막, 과학기술원의 KAIST-T토카막과 한국기초과학지원연구원의 한빛 대형 플라즈마 공동 연

구 장치 등에서 핵융합 연구를 수 행하였다.

1995년 정부는 핵융합 연구를 본격적으로 추진하기 위해 과학기 술처(현 교육과학기술부)에 국가 핵융합연구개발위원회를 신설하 고 국가핵융합연구개발기본계획 을 수립하였으며,「차세대초전도 핵융합연구장치(KSTAR, Korea Superconducting Tokamak Advance Research)」를 G-7 사 업으로 선정하고 개발을 추진하였다.

이후 KSTAR 사업을 통해 국제 적으로 기술력을 인정받아 2003 년 국제핵융합실험로 (ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor) 사업에 참여하게 되었다.

우리나라의 핵융합 에너지 개발 중간 진입 전략 및 계획은 〈그림 1〉과 같으며, 2040년대 한국형 핵 융합 발전소 건설 착수 및 독자적 인 핵융합 에너지 상용화 기술 확 보를 목표로 하고 있다.

2006년 12월 26일에 핵융합에 너지개발진흥법이 제정·공포되 었으며, 2007년 3월 27일 핵융합 에너지개발진흥법 시행령이 공포 되어 핵융합 에너지 연구의 법적 근거가 마련되었다.

한국형 핵융합 발전소 건설의 초 석이 될 KSTAR는 토카막형¹⁾ 핵융 합 연구 장치로 핵융합연구센터(현 핵융합연구소)에서 주관하여 1995 년 12월에 시작하여 2007년 8월

¹⁾ 토카막 : 태양처럼 핵융합 반응이 일어나는 환경을 만들기 위해 초고온의 플라즈마를 자기장을 이용해 가두는 핵융합 장치

주장치 건설이 완료되으며, 건설 사업비는 3090억원이다.

KSTAR는 초전도 토카막 운전 기술, 장시간 운전 연구 및 기술, 고성능 플라즈마 운전 연구 및 기술 확보와 ITER 부속 실험 장치 및 ITER 기술의 시험장비(Test Bed) 역할 등을 수행한다.

ITER 사업은 핵융합 에너지 상용화의 최종 과학적·기술적 실증을 위하여 우리나라를 비롯한 7개참여국이 공동으로 국제핵융합실험로를 건설하고 운영하는 국제협력 프로젝트이다.

사업 기간은 2004년에서 2015 년으로 열출력 500MW를 목표로 프랑스 카다라쉬에 장치가 건설되 고 있으며, 건설 단계 총비용은 약 50.8억 유로로 우리나라는 이중 9.09%를 부담하고 있다.

ITER의 참여 조건은 현물 부담 원칙에 의한 건설비 분담, 품질 보 증을 포함하는 핵융합 장치 제작 능력 보유, ITER 협상 내용 수용 및 설계 결과의 수용이다.

또한 참여를 통하여 권리는 ITER 건설·운영 직접 참여, ITER 관련 기술 및 지적 재산권 공유, 선 진국이 기확보한 R&D 기술 무상 공유이다.

우리는 ITER 건설 단계에서 토 카막형 핵융합 장치 기술 습득과 운영 참여를 통한 핵융합로 노심 운영 및 제어 기술, 핵융합로 요소 기술에 대한 지식과 경험을 축적 하게 된다.

<표 1> GIF 선정 Gen IV 후보 노형

제4세대 원자력 시스템	한글명
GFR(Gas-cooled Fast Reactor)	가스냉각고속로
LFR(Lead-cooled Fast Reactor)	납냉각고속로
MSR(Molten Salt Reactor)	용융염원자로
SFR(Sodium-cooled Fast Reactor)	소듐냉각고속로
SCWR(Supercritical Water-cooled Reactor)	초임계압수냉각원자로
VHTR(Very High Temperature Reactor)	초고온가스로

2. 제4세대 원자력 시스템

제4세대 원자력시스템국제포럼 (GIF, Generation IV Inter-national Forum)은 미래의 급격한 에너지 소비 증가에 대비하고, 인류의 지속 가능한 발전에 기여하기 위해, 대중적 지지와 경제성 및 안전성이 획기적으로 향상된 새로운 원자력 시스템의 개발 필요성에서 출발하였다.

영IF는 에너지 자원을 최적으로 활용할 수 있고, 가장 경쟁력 있는 가격으로 에너지를 공급할 수 있으며, 안전성과 폐기물 관리 및 핵확산 저항성이 충분히 확보되어이를 도입하고자 하는 국가에서의국민 수용성이 확보될 수 있는 차세대 원자력 시스템을 제4세대 원자력 시스템(Gen IV, Generation IV Nuclear Energy System)으로 정의하고 이의 국제 공동 연구개발을 추진하는 것을 목적으로 한다.

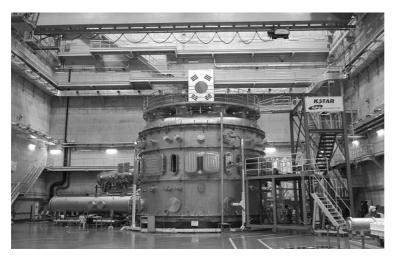
2000년 1월, 미국을 중심으로 원자력 활동이 활발한 주요 9개국 이 미래형 원자력 시스템에 개발 에 대한 공동 성명을 발표하고 GIF를 결성하여, 2030년경에 상 업적으로 건설, 운영될 수 있는 원 자력 시스템의 국제 공동 연구 개 발 추진에 착수하였다.

2001년 7월 한국에서, 9개 회원국은 다음 세대 원자력 시스템의 연구 개발을 위한 국제 협력체로서의 역할과 운영 규정을 담은 헌장(Charter)에 서명하여 GIF가공식 발족하였다.

이때의 회원국에는 한국을 비롯하여 미국, 프랑스, 일본, 영국, 캐나다, 아르헨티나, 브라질, 남아프리카공화국 등이며, 이후 스위스가 2002년 2월에 가입하고, EURATOM이 2003년 9월에 가입하였으며, 중국 및 러시아가 2006년 11월에 가입하여 현재는총 13개 회원국/국제 기구로 구성되어 있다.

한편 GIF를 통해 전 세계적으로 공모한 100여개의 미래형 원자로 후보들 중에서 GIF 전문가 그룹을 통해 2002년 7월, 최종적으로 미 래의 Gen IV 후보 노형으로 〈표 1〉의 6개를 가장 유망한 노형이라 고 선정하였다.

또한, 2002년 12월에는 Gen



KSTAR 전경

IV 시스템의 연구 개발을 위한 기술 지도(Technology Roadmap)를 발간하였다.

2005년 2월 28일에는 5개국 (미국, 일본, 프랑스, 캐나다, 영국)이 기본 협정을 서명하였으며, 이후 스위스가 추가로 서명하였고, 우리나라는 2005년 8월 30일 외교부 장관이 서명하고 2005년 11월 29일에 발효되었다.

2006년에 소듐냉각고속로와 초고온가스로의 시스템 약정에 과학기술부 장관이 서명하였으며, 2007년에 소듐냉각고속로 프로젝트 약정 및 2008년에 초고온가스로 프로젝트 약정에 서명하였다.

미래 원자력 에너지의 규제 기술 개발 현황

1. 핵융합 에너지

1995년 12월 KSTAR 장치의 개발이 시작되었으나, 당시 원자력 법에서는 KSTAR의 안전 규제를 위한 조항이 기술되어 있지 않아 건설과 운영 과정에서의 안전 규 제 이행은 불가능한 실정이었다.

따라서 핵융합 연구·실험 시설의 건설과 운영에 대하여 작업자와 일반 국민의 건강과 안전을 보장하고 환경을 보호하기 위한 국내 법규 및 안전 규제 체제 정립에관한 연구가 필요하였으므로 2000년에 「차세대 원자력 연구시설, 장치의 인·허가 체계 검토」연구 과제를 수행하였다.

연구를 통해 KSTAR 장치 안전 규제시 고려해야 할 위험 인자 도출, 차세대 에너지 연구 시설에 대한 안전 규제 요소 도출, 차세대 에너지 연구 시설의 안전 규제 체계정립을 위한 법규 개정안 및 인·허가 체계를 단기적 방안 및 장기적 방안으로 구분하여 제시하였다.

단기적 방안은 두 건의 과학기 술부 고시를 개정함으로써 수소 및 중수소를 이용한 핵융합 실험 장치를 방사선 발생 장치에 포함하는 것이며, 장기적 방안은 1단계와 2단계로 구분하였다.

제1단계에서는 방사광 가속기 및 대단위 조사 시설을 KSTAR 장 치와 함께 묶어 '대단위 방사선 시 설의 건설·운영 허가'의 인·허가 절차 및 기술기준을 정립하는 것 '이며, 제2단계는 '본격적인 핵융 합 시설의 건설에 대비한 방안으로 기존의 연구용 원자로의 건설·운 영 허가와 함께 묶는 것'이다.

이를 토대로 방사선발생장치 적용 대상에 관한 고시(제2001-9호)와 방사선안전보고서 작성 지침(제2001-10호)을 개정하였으며, 2002년 7월 18일 '방사선발생장치'로 사용 허가가 신청되었다.

원자력법에 따르면 방사선발생 장치를 사용하고자 하는 자는 설 치·사용 전에 사용 허가를 받아 야 하나, KSTAR의 경우 심사 착 수 당시 시설 설치가 이미 진행된 후이므로 불가피하게 구조 부지 분야의 경우 사후 심사 형태로 수 행되었다. 심사 업무는 9개 분야로 나누어서 수행하였으며 2007년 말 사용 허가가 승인되었다.

「ITER 인허가 체계 조사 및 품질 보증 이행 방안」연구(2004년 9월 ~ 2006년 1월)와「핵융합 에너지에 대한 국가 안전 체제 구축기반 개발」연구를 수행하였으며,현재「ITER 사업을 활용한 안전관리기반 구축」연구를 수행중이다.

연구를 통하여「핵융합 에너지

안전 관리 기반 구축을 위한 전략 기술 지도」를 개발하여 「핵융합 에 너지 개발 진흥 기본 계획」의 수립 에 반영하였으며, 핵융합 에너지의 안전 관리 체제(안)을 도출하였다.

전문 분야별로 기술 현황 분석 및 규제 기술 개발 계획을 수립하 여 작성한 전략 기술 지도는 법령 및 안전 문서 체계, 10개 전문 분 야의 38개 핵심 규제기술로 구성 되어 핵심 규제 기술별 개발 동향 및 전략, 일정 등을 제시하고 있다.

핵융합에너지개발진흥법에서 원자력법에 위임한 핵융합 에너지 연구 개발에 따른 안전 관리에 관 한 원자력법 개정 방향을 개발하 였으며, 안전 문서 체제 초안도 개 발하였다.

또한 핵융합에 대한 국제 공동의 안전성 확인의 추진에 대하여국 제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)의 Technical Meeting에서 제안하였으며, 주요 관련자와협의를 추진하였고 한・불원자력공동위원회에 협력의제를 제안한바 있다.

2. 제4세대 원자력 시스템

제4세대 원자력 시스템에 관한 규제 기술 개발과 관련하여 수행 한 업무는 다음과 같다.

KALIMER-150²⁾ 개념 설계 개 발 기간(1997~ 2001)중인 1998 년에 1년간「액체금속로 안전 규제 요건 개발 연구」를 수행하여 당시의 국외 액체금속로 개발 현황, 규제 요건 체계 및 적용 현황, 개발 필요 규제 요건 항목 등을 도출하였다.

그리고 2004~2005년에 「원자력 수소 고온가스로 규제 기술 현황 분석 연구」를 수행하여 고온가스로의 설계/규제 특성 분석, 일반안전 현안 도출, 원자력법령 적용성 평가 등 고온가스로 규제에 대한 기초적인 연구를 수행하였다.

2007년부터 원자력 기술 개발 사업의 일환으로 수소 생산 고온 가스로 및 소듐고속냉각로 등 제4 세대 원자로 안전성 확보를 위하 여 적용되어야 할 「신개념 원자로 개발을 위한 기술 중립형 규제 체 계 개발」연구를 현재 수행중이다.

또한 2003년 9월 캐나다 토론 토에서 개최된 GIF 정책그룹 회의시 규제 기관 참여가 논의되었으며, 2004년 6월 OECD/NEA 주관의 안전규제자회의에서 '규제자패널'신설을 합의하였고, 합의사항에 따라 2005년 3월 10일 GIF고위규제자 첫 회의를 미국 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)가 주관하여 개최하였다.

GIF의 고위규제자회의(GIF Senior Regulators Meeting)는 Gen-IV의 설계 인허가성 제고를 위해 개발과 규제간의 협력 증진 을 목적으로 하고 있다.

시사점 및 맺음말

핵융합 DEMO, 소듐고속냉각로 및 초고온가스로 실증로 등 미래형 원자로의 인허가 신청은 확정할 수 는 없지만 개발 로드맵을 참조로 할 경우 2020년경으로 예상된다.

안전 체제 구축 및 규제 역량 확보는 장기간에 걸친 투자를 요구하는데 UCLA 주관의 연구 보고서³¹에따르면 규제 정책에서 인허가 요건 개발까지 대략 15년의 기간을 예상하고 있으며, 따라서 미래 원자로에대한 안전 규제체제 구축 및 규제 역량의 조속한 확보가 필요하다.

미래 원자력 에너지 개발은 ITER, Gen-IV 등 대규모 국제 공동 개발의 형태로 이루어지며, 원자력 안전 규제도 다국간 설계 인증 프로그램(MDEP, Multinational Design Evaluation Program) 등 국제 사회에서 공동의 규제 체제 개발을 추진하고 있다.

이러한 국제적인 움직임에 발맞추어 우리나라도 국제 공동의 미래형 원자력 에너지 개발 사업 추진시에는 전략적으로 규제 기술의 개발도 병행하여 추진하여 나가야할 것이다.

* 본 원고는 소속 기관의 입장을 공식적으로 대변하지 않음을 밝힙니다.

²⁾ 핵분열의 연쇄 반응이 주로 고속 중성자에 의해 일어나는 한국형 액체금속로

³⁾ The STARLITE Study: Assessment of Options for TOKAMAK Power Plants, Final Report, 1997