

Vol. 2017 - 한국GIF사무국 05

# 주요국의 제4세대원자력시스템 R&D 현황

## CONTENTS

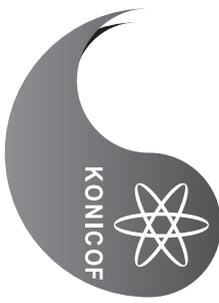
I . 호주 / 4
II . 캐나다 / 6
III . 중국 / 10
IV . EU / 14
V . 프랑스 / 18
VI . 일본 / 22
VII . 러시아 / 25
VIII . 남아프리카공화국 / 28
IX . 스위스 / 31
X . 영국 / 34
XI . 미국 / 38

작성: 한국GIF사무국 이정아  
감수: 장문희 원자력국제협력관



한국원자력협력재단





# 개요 및 주요내용

KOREA NUCLEAR INTERNATIONAL  
COOPERATION FOUNDATION

- ◆ 제4세대원자력시스템국제포럼(GIF:Gen-IV International Forum) 연차보고서 (Annual Report)는 GIF의 주요 정기간행물로, GIF 회원국의 원자력 연구개발 현황 및 GIF 협력성과 정보를 제공함
- ◆ 동 보고서는 원자력 주요 국가의 제4세대원자력시스템 R&D 현황은 관련 정책 수립 및 동향파악을 지원하기 위하여 2016년 GIF 연차보고서의 국가 현황 보고자료(Country Report)를 요약·정리한 자료임

국가	주요 내용
◆ 호주	- 원자력 국제협력 및 연구개발 동향
◆ 캐나다	- 원자력 국제협력 및 연구개발 동향 - 제4세대원자력시스템 연구개발 현황
◆ EU	- 에너지 및 원자력 연구개발 동향 - 유럽집행위원회-공동연구센터 활동 현황
◆ 프랑스	- 에너지전환법에 따른 "2023 국가 에너지 계획" 발표 - 원자력 산업계·국제협력·연구개발 동향
◆ 일본	- 고속로 개발에 따른 원자력 정책 및 발전소 현황 - 원자력규제위원회의 안전성 검토 현황 - 일본원자력기구 시설 현황
◆ 러시아	- 원자력 발전 현황 - 제4세대원자력시스템 연구개발 현황
◆ 남아공	- 종합자원계획 발표 및 원자력 신규 건설 프로그램 현황 - 원전 인허가 현황 및 원자력 연구개발 현황
◆ 스위스	- 원전 점진적 폐쇄 결정에 따른 원자력 정책 현황 - 원자력발전소 및 연구개발 현황
◆ 영국	- 원자력 연구개발 및 혁신 프로그램 투자 착수 - 소듐모듈원자로 연구개발 현황
◆ 미국	- 청정전력계획에 따른 원자력 정책 현황 - 원전 인허가 현황 및 미래 원자력 시스템 동향

## KONICOF

※ 동 자료는 과학기술정보통신부의 원자력국제협력 정책수립을 지원하기 위한 참고용 자료이므로, 무단전재 및 재배포를 금합니다..

# I. 호주

- ◆ 2016년 호주는 제4세대원자력시스템국제포럼(GIF) 14번째 회원국이 됨
- ◆ 호주는 남 호주 지역에 다국적 사용후핵연료 및 중준위방사성폐기물 처분장을 건설하는 것에 관심 증대

## □ 원자력국제협력 동향

- 2016년 6월 22일, GIF 헌장에 서명하고 14번째 회원국이 됨
  - 호주원자력과학기술연구소(ANSTO<sup>1)</sup>)는 GIF 기본협정 서명에 필요한 행정 절차를 진행 중이며, 장관은 조만간 서명할 기본협정에 대해 필요한 의회조치사항을 요청함
  - 호주의 회원가입 신청서에 명시된 바와 같이, 기본협정 서명 후 초고온가스로 시스템약정(VHTR SA<sup>2)</sup>) 및 재료 프로젝트약정(MAT PA<sup>3)</sup>), 용융염원자로 양해각서(MSR MoU<sup>4)</sup>) 및 안전성평가그룹(RSWG<sup>5)</sup>)에 참여할 것이며, 교육 및 훈련 TF와 경제성모델링 WG에도 기여할 예정임
- 2016년 9월, ANSTO는 국제열핵융합실험로(ITER<sup>6)</sup>)와 기술협력약정을 체결
  - 호주는 ITER과 기술협력약정을 체결한 최초의 ITER 비회원국이며, 융합 에너지 연구에 대한 지원을 확대 중임

1) Australian Nuclear Science and Technology Organization

2) Very-High Temperature Reactor System Arrangement

3) Material Project Arrangement

4) Molten Salt Reactor Memorandum of Understanding

5) Risk and Safety Working Group

6) International Thermonuclear Experimental Reactor

## □ 원자력연구개발 동향

- 남 호주 총리는 2015년 3월 왕립위원회를 통하여 핵연료주기의 참여확대를 위한 경제적 기회 가능성 조사를 지시하였으며, 위원장은 2016년 5월 최종 보고서를 제출하고 12가지 권고사항을 제시함
  - 권고사항 중 가장 주목할 만한 사항은 남 호주 정부는 다국적 사용후핵연료 및 중준위방사성폐기물(ILW<sup>7)</sup>)의 저장·처리 시설을 건립하는 것을 검토 중이며, 이를 위해서는 지역사회의 지원이 있어야 함
  - 동 시설의 건립계획을 위하여 남 호주 정부는 광범위한 공공자문절차를 진행 중이며, 권고사항에 대한 자문보고서는 11월 말 호주 정부에 제출될 예정임

7) Intermediate Level Waste

## Ⅱ. 캐나다

- ◆ 현재 캐나다 정부는 비확산 및 원자력폐기물 관리에 있어서 국제체제 내에서의 활동은 환경적으로 안전하다는 입장
- ◆ 신규원자력발전소의 건설 및 기존 원자로의 보수공사를 포함하여 에너지 공급 믹스 및 발전용량에 대한 투자 결정은 캐나다 연방에서 관리

### □ 원자력국제협력 동향

- 캐나다는 GIF<sup>8)</sup> 기본협정 유효기간 10년 연장에 서명(2016.10.21.)
  - 지속적이고 적극적인 GIF 참여 활동의 일환으로 초임계압수냉각로 (SCWR)<sup>9)</sup> 시스템약정(SA)<sup>10)</sup> 2단계에 서명하고 참여 중(2016.12.2. SA 연장 서명)
- 2015년 11월, 제21차 기후변화협약 당사국총회(COP21)<sup>11)</sup> “Mission Innovation”에서 청정에너지 혁신 가속화를 위한 협력활동에 대해 발표
  - 캐나다는 청정에너지 연구·개발 및 검증을 위한 투자를 2014-2015년 수준의 두 배로 늘릴 계획
- 캐나다와 루마니아 정부는 평화적인 목적의 원자력 에너지 개발 및 적용을 위한 협정을 체결(1977.10.24.)하고 협력을 지속해옴
  - 양국 간 삼중수소 제거 기술 및 장비의 수출을 허가함(2016.12.19.)

8) Generation-IV International Forum

9) SCWR, Supercritical Water-Cooled Reactor

10) SA, System Arrangement

11) COP 21, Conference of the Parties

## □ 원자력연구개발 동향

- 온타리오 주는 향후 15년 동안 250억 달러를 투자하여 10기의 원자로<sup>12)</sup> 수명을 25년에서 30년으로 연장하고, 원자력 발전용량을 9.9 GWe로 유지하는 계획을 발표
  - 2016년 10월, 달링턴 원자력발전소의 2호기는 40개월 동안의 보수공사를 위하여 가동이 중단됨
  - 온타리오 및 브루스 주는 브루스 원자력발전소의 6기 원자로에 대하여 보수공사를 하는데 합의하였으며, 2020년에 6호기가 보수공사를 위하여 가동이 중단될 예정
  
- 2017년 1월 1일, 원자력책임 및 보상법(NLCA)이 수정·보완되어 발효됨<sup>13)</sup>
  - 원자력발전소 운영 법적책임 한도를 10억 달러로 설정하고, 현재의 6억5천만 달러에서 2020년까지 10억 달러로 4년 동안 점진적으로 증액할 계획
  - 새로운 법적책임 한도<sup>14)</sup>는 현재 국제 표준, 특히 원자력 피해에 대한 보상 협약을 따르며, 캐나다는 IAEA의 원자력 피해에 대한 추가보상협약(CSC)<sup>15)</sup>에 서명(2013.12.3.)하였으며, 추가보상협약 비준서를 IAEA에 기탁(2017.6.6.)함으로써 추가보상협약을 비준한 10번째 국가가 됨<sup>16)</sup>

12) 달링턴 원자력발전소의 4기, 브루스 원자력발전소의 6기

13) NLCA, Nuclear Liability and Compensation Act

14) 1976년 원자력 법적책임 법에 의거하여 7천5백만 달러에서 증가

15) CSC, Convention on Supplementary Compensation for Nuclear Damage

16) 아르헨티나, 모로코, 루마니아, 아랍에미리트, 미국, 프랑스, 인도, 일본, 호주, 캐나다

## □ 소형모듈원자로(SMR)<sup>17)</sup> 연구개발 동향

### ○ 캐나다원자력안전위원회(CNSC)<sup>18)</sup> 활동

- 18개사 캐나다 및 국제기업이 소형모듈원자로 관련 캐나다의 규제 절차에 관한 정보를 구하기 위해 CNSC에 접촉해옴
- 허가절차에 앞서 선택적 예비 단계 공급자설계검토(VDR)<sup>19)</sup>가 이루어져야함. 이에 따라, 2016년 초부터 5개 SMR 공급사가 공급자설계검토를 진행 중
- 2016년 5월, SMR 허가와 관련된 잠재적인 문제해결을 위하여 공론화를 시작하였으며, 현재 의견 수렴 중

### ○ 캐나다천연자원부(NRCan)<sup>20)</sup> 활동

- 다른 기관과 협업하여, 2016년 5월 온타리오 내 SMR의 잠재적 건설 가능성 연구를 완료하고, 2016년 7월 북부지역주민들과의 원자력 에너지 전망에 대한 조사를 완료함

## □ 초임계압수냉각로(SCWR) 연구개발 동향

### ○ 로드맵 개발

- 2015~2016년 캐나다의 원자력 산업 및 국제관계자들은 초임계압수냉각로를 검토한 후 개념개발을 진행 중
- 개념개발 단계에서는 주로 기계 장치, 제작 기술 및 기술 분야와 같은 주요 구성 요소에 대한 확인 및 검증에 중점을 둠

17) SMR, Small Modular Reactor

18) CNSC, Canada Nuclear Safety Commission

19) VDR, Vendor Design Review, 공급업체의 원자로 기술을 기반으로 한 원자력 발전소 설계 평가

20) NRCan, Natural Resources Canada

- 주요 구성 요소는 전문가의 검토 및 점검을 통하여 선정되며, 로드맵에는 다양한 기술 분야에 적용될 확인 및 검증 방법을 명시함
- 기술 분야 검증은 기계 부품, 열 수축, 재료, 화학, 연료채널, 원자로 물리 및 경제 모델링과 같은 핵심 기술영역으로 세분화하여 이행될 것임

#### ○ 향후 전망

- 1,200 MWe의 대용량 기저부하 발전용 원자로는 Off-grid 소규모 원격커뮤니티, 광산 운영 및 샌드오일 생산에 광범위하게 활용될 예정
- 기저부하 개념 외에도 5-200 MWe의 전력을 생산하는 소형 초임계압수냉각로 개념개발을 지원 중

## Ⅲ. 중국

- ◆ '16년 9월, G20 정상 회담이 중국 항저우에서 개최되었으며, 에너지 안보 보호, 환경오염 및 기후변화대응, 반 테러리즘 및 안보 분야의 강화와 지속가능 발전을 위한 원자력 에너지와 기술의 활용성과 역할을 강조함
- ◆ '16년 9월 3일, 중국인민대표 상무위원회는 “파리기후변화협정”의 가입을 승인하였음. 아울러, 에너지 보전 및 오염 방지를 촉진하고 경제성장을 안정화하며 에너지 구조를 최적화하는 친환경적이고 지속가능한 발전을 달성하기 위한 중요한 수단으로서 원자력을 개발할 예정
- ◆ “원자력법” 및 “원자력안전법”이 국가인민대표 입법 계획에 포함됐으며, “원자력안보규정(초안)” 및 “원자력관리규정(초안)”에 대한 대중의 의견을 구하기 위해, 이들 규정을 '16년 6월 3일, 9월 18일 각각 공식적으로 공개함

### □ 원자력발전소의 운영 및 건설

- 2020년까지 운영 및 건설 중인 원자로가 90기가 될 것이며 중국 전력의 약 4%를 공급할 계획임
  - 현재 운영 중인 원자력발전소는 안전 및 성능에 있어 우수한 기록을 유지하고 있으며, 건설 중인 프로젝트 또한 예정대로 진행 중임
  - 산먼 원자력발전소의 AP1000 원자로 1호기는 고온 테스트 중임
  - 2016년 10월 11일 현재 운영 중인 원전 35기와 건설 중인 20기의 총 설비용량은 56.9 GWe임

## □ 제4세대원자력시스템 연구개발 현황

○ 2016년 6월 23일, 중국은 GIF 기본협정 10년 연장에 서명함

- 2016년 8월 3일 소듐냉각고속로(SFR), 2016년 12월 5일 초고온가스로(VHTR), 2016년 12월 28일 초임계압수냉각로(SCWR)의 Phase-II 시스템 약정 연장에 각각 서명함

○ 초고온가스로 개발 현황

- 2015년 HTR-PM<sup>21)</sup> 실증로 건설에 착수하여, 2016년 3월에 원자로압력용기를 설치하였으며, 2017년 말 Grid에 연결할 예정임
- 2016년 초, HTR-PM 최종 안전성분석보고서 검토를 시작하였으며, 2017년 초 완료할 예정
- 한 기에 6개 원자로 모듈을 건설하는 600 MWe HTR 발전소 연구개발이 착수되었으며 향후 (초)고온가스로 기술의 상업적 활용이 더욱 가속화될 것임

○ 소듐냉각고속로 개발 현황

- 2015년 4월부터 중국실험용고속로(CEFR)<sup>22)</sup>가 유지보수 중이며 2016년 말 재가동 예정임
- 고속실증로인 CFR600의 예비설계가 단계적으로 진행 중이며 2017년 1월부터 2018년 말까지 상세설계를 수행하고 2025년 이전에 가동을 목표로 함
- 소듐냉각고속로 시스템통합 및 평가(SIA)<sup>23)</sup> 프로젝트의 설계 트랙 중 하나인 상용로 CFR1200에 대해 예비개념설계를 수행(2017~2019)한 후, 2020년 건설에 착수하여 2034년 말 가동을 목표로 함

21) High Temperature Gas-cooled Reactor-Pebble bed Module

22) CEFR, China Experimental Fast Reactor

23) SIA, System Integration and Assessment

- 소듐냉각고속로 안전 및 운영(SO)<sup>24)</sup> 프로젝트와 관련하여 중국실험용고속로의 코어캐치 자연 순환 시뮬레이션과 과도현상 분석 코드 개발이 진행 중
- 소듐냉각고속로 부품설계 및 보조설비(CD&BOP)<sup>25)</sup> 프로젝트와 관련하여 중국원자력연구소(CIAE)<sup>26)</sup>는 초임계이산화탄소 Brayton Cycle 연구를 수행 중
- 소듐냉각고속로 선진핵연료(AF)<sup>27)</sup> PMB 회의가 2016년 3월 21일부터 23일까지 중국원자력연구소에서 성공적으로 개최됨

#### ○ 초임계압수냉각로 개발 현황

- 초임계압수냉각로 연구개발과 관련하여 실험로 CSR1000의 예비개념설계가 진행 중
- 초임계압수냉각로 기술(Phase-II)에 대한 새로운 연구개발 프로젝트가 승인됨
- 중국원자력발전연구소(NPIC)<sup>28)</sup>와 캐나다원자력연구소는(CNL)<sup>29)</sup> 공동협력으로 전산유체역학(CFD)<sup>30)</sup> 모델 평가를 위한 SCW 2X2 연료봉 다발 테스트를 기반으로 한 신규국제벤치마크시험을 준비 중
- 중국원자력발전연구소(NPIC)와 중국GIF사무국의 공동주관으로 제11차 GIF 초임계압수냉각로 정보교환회의가 2016년 3월 14일부터 16일까지 중국 청두에서 개최되었고 동 회의에서 GIF 회원국 및 IAEA는 27건의 SCWR 연구개발 내용을 발표함

24) SO, Safety and Operation

25) CD&BOP, Component Design and Balance of Plant

26) CIAE, China Institute of Atomic Energy

27) AF, Advanced Fuel

28) NPIC, Nuclear Power Institute of China

29) CNL, Canadian Nuclear Laboratories

30) CFD, Computational Fluid Dynamics

- 중국원자력에너지협회(CNEA)<sup>31)</sup>와 NPIC의 공동주관으로 제8차 초임계압 수냉각로 국제심포지엄(ISSCWR)<sup>32)</sup>이 2017년 5월 13일부터 15일까지 중국 청두에서 개최됨
- 중국과학아카데미(CAS)<sup>33)</sup>는 납냉각고속로(LFR)<sup>34)</sup> 및 용융염원자로(MSR)개발을 위해 다수의 연구개발 프로젝트를 할당함
- 원자로 기술혁신
  - 2016년 7월 27일, 중국원자력연구소는 Ghana 마이크로 원자로의 저농축 우라늄 프로젝트에 대한 영출력임계 실험을 성공적으로 수행함. 이는 저농축 마이크로 원자로의 전(full) 출력을 가능하게 함으로써 고농축 우라늄 사용 감축에 큰 기여를 하게 될 것임.
  - 2016년 7월 13일, 중국의 독립원자력등급디지털 I&C 플랫폼-‘FirmSys’가 IAEA의 검토를 통과하였고, I&C시스템보고서독립적기술자검토(IERICS)<sup>35)</sup>가 중국핵전집단공사(CGN)<sup>36)</sup>에 접수됨
- 원자력 비상대응
  - 2016년 5월 24일, 조정 및 기술지원, 응급구조, 프로젝트 구조, 방사선 모니터링 및 보호, 오염제거 및 의료구조의 6개 그룹 320명으로 구성된 중국 최초의 국가 차원 원자력비상구조팀이 설립됨
  - 중국의 원자력비상구조팀은 사고 시나리오 시뮬레이션, 운영기술 및 이론에 대한 교육을 이수한 후 국내 주요 원자력 사고 응급구조를 수행할 예정

31) CNEA, China Nuclear Energy Association

32) ISSCWR-8, The 8th International Symposium on SCWR

33) CAS, Chinese Academy of Sciences

34) LFR, Lead-Cooled Fast Reactor

35) IERICS, Independent Engineering Review of I&C System

36) CGN, China General Nuclear Power Group

## IV. EU

- ◆ 2016년 11월 10일, 유럽위원회 공동연구센터(JRC)<sup>37)</sup> 사무총장은 EU를 대신하여 GIF 기본협정 10년 연장에 서명
- ◆ EU는 2016년 11월 29일 SFR, 2017년 3월 15일 VHTR, SCWR 및 GFR Phase-II 시스템약정 연장에 서명

### □ 에너지 동향

- 유럽집행위원회(EC)<sup>38)</sup>는 원자력 분야 투자에 대한 조정과 개발 활동을 촉진하는 새로운 원자력계획프로그램(PINC)<sup>39)</sup>을 발간
  - 폐쇄핵연료주기<sup>40)</sup>와 함께 고속중성자 기술을 이용하는 제4세대원자력 시스템의 미래 활용을 목표로 한 유럽의 지속 가능한 원자력산업 구상으로 현재 다양한 원자로가 연구 중<sup>41)</sup>에 있으며 2050년까지 기술이 획기적으로 발전할 것으로 전망함
  - 2016년 9월, 유럽경제사회위원회(EESC)<sup>42)</sup>는 발간된 원자력계획프로그램에 대하여 여러 의견을 제시하였으며, 원자력계획프로그램의 개정에 대한 결정은 추후 이루어질 전망이다

37) JRC, European Commission's Joint Research Centre

38) EC, European Commission

39) PINC, Nuclear Illustrative Programme

40) Closed fuel cycle, Reprocessing

41) ALLEGRO, ALFRED, MYRRHA and ASTRID

42) EESC, European Economic and Social Committee

- 의견이 제시된 주요 주제들은 다음과 같음

- 원자력의 중·장기적 경쟁력
- 경제적 측면
- 공급 안전성
- 기후 변화 및 탄소 표적
- 대중 수용성, 원자력 피해에 대한 책임, 투명성 및 국가 간 효율적 협의

○ 유럽의 전략적 에너지 기술 계획(SET-Plan)

- 유럽의 전략적 에너지 기술 계획은 저탄소 기술의 개발과 채택을 가속화하는 것을 목표로 함
- 연구를 조정하고 프로젝트 재정 지원을 통해 새로운 기술을 개발하고 비용을 절감하고자 함
- 유럽의 전략적 에너지 기술 계획에서 원자력 분야의 지원 우선순위는 첨단 기술 개발, 원자로의 최고 수준의 안전 유지, 운영 효율성 개선, 후행 핵주기 및 폐로 분야임
- 유럽집행위원회(EC)<sup>43)</sup>와 회원국은 원자력 협약 대상에 관한 Issue paper를 준비했으며, 제4세대원자력시스템은 협약대상기술 중 하나임

## □ 원자력연구개발 현황

○ 유럽집행위원회 연구총국(EC-DG RTD)<sup>44)</sup>

- 2016년 10월 5일, Euratom Horizon 2020 2016년-2017년 핵분열 분야 지원 공고를 마감함

43) EC, European Commission

44) EC-DG RTD, European Commission Directorate General for Research and Innovation

- Euratom Horizon 2020 2016년-2017년 핵분열 분야 프로그램 중 Gen-IV 시스템의 아래 주제에 대해 2년 간 약 4천만 유로의 예산을 책정함
  - Topic 2 : ESNII<sup>45)</sup> system(고속로)
  - Topic 3 : 폐쇄핵연료주기(달린핵연료주기) 개발
  - Topic 4 : 제4세대원자력시스템 재료
  - Topic 5 : 소형모듈원자로(SMR)
  - Topic 12 : 교육 및 훈련
- 상기 주제에 대해 72개의 제안서가 접수되었으며, 2016년 12월 전문가 데스크톱 평가위원회는 프로젝트 선정 회의를 개최하고, 2017년 1월 선정된 제안서를 발표함

## □ 유럽집행위원회-공동연구센터(EC-JRC)<sup>46)</sup> 활동 현황

- 제4세대원자력시스템 연구 활동은 SANSIF<sup>47)</sup> 프로젝트와 NPTC<sup>48)</sup>의 작업 프로그램 2017-2018에 포함됨
- 선진핵분열 및 핵연료주기기술의 안전을 다루는 안전성 평가의 연구 범위는 다음과 같으며, 프로그램은 국제기구(IAEA, OECD/NEA) 및 EU 플랫폼(ESNII, EERA-JPNM<sup>49)</sup>, NC2I<sup>50)</sup>)에 대한 지원도 포함하고 있음
  - 선진원자로 핵연료 회수 및 전환(recovery and conversion)
  - 신(첨단)재료의 특성 및 거동
  - 혁신적인 핵연료의 특성 및 조사 성능

45) ESNII, European Sustainable Nuclear Industrial Initiative

46) EC-JRC, European Commission's-Joint Research Centre

47) SANSIF, Safety of Advanced Nuclear System and Innovation Fuel Cycles

48) NPTC, Non-Proliferation & Strategic Trade Control

49) EERA-JPNM, European Energy Research Alliance-Joint Program Nuclear Materials

50) CN2I, Nuclear Cogeneration Industrial Initiative

- 선진원자료를 위한 안전성능코드 개발(예. TU code)
  - 원자력 안전조치 및 비확산에 대한 혁신적인 개념 및 방법론
- 유럽집행위원회 공동연구센터는 현재 모든 제4세대원자력시스템을 다루는 여러 RTD 공고 제안서에 참여하고 있음
- 유럽원자력공동체(EURATOM)<sup>51)</sup> 협력 회의
- 2016년 12월 12일, 유럽집행위원회 공동연구센터는 Euratom-GIF 조정 회의를 개최하여 GIF 관련 Euratom 활동 10년에 대한 보고서(안)를 배포함
  - 동 회의는 유럽집행위원회 공동연구센터 활동을 포함한 제4세대원자력 시스템 연구개발에 참여한 Euratom 연구 커뮤니티, 유럽집행위원회 예산 지원 프로젝트 참여자 및 개별국가 예산지원 프로젝트 참여자 간에 이루어졌음

51) EURATOM, European Atomic Energy Community

## V. 프랑스

- ◆ 프랑스는 에너지전환법(2015년)에 따라, 2016년 11월 에너지부에서 2023년까지의 “2023 국가 에너지 계획”을 발표함
- ◆ 2015년 12월, CEA는 ASTRID 국제 프로젝트를 위한 안전옵션 보고서 작성 및 ASTRID 원자로의 개념 설계 단계를 완료함. 이어서 2019년 말 까지 기본 설계 단계를 진행할 예정

### □ 원자력 정책

- 2015년 발효된 에너지전환법에 따라, 2016년 11월 에너지부에서 2023년까지의 “2023 국가 에너지 계획”을 발표함
  - 전력 수요의 변화에 따라, 지난 5년간 평균 원자력 생산량인 410 Twh에서, 2023년에는 연간 원자력 생산량이 10 Twh에서 65 Twh까지 감소할 것이며, 감소량은 원자력 용량 또는 부하율의 감소로 이루어질 것임
  - 프랑스전력청(EDF, Electricite de France)은 Fessenheim 원자력 발전소 폐쇄를 위한 2년의 공식 절차를 시작할 것임
  - 프랑스는 폐쇄핵연료주기 전략을 유지하고, 현재 MOX를 사용하는 원자로 일부가 운전 정지될 경우, 운전중인 가압수형원자로(PWR, Pressurized Water Reactor) 일부가 MOX를 사용할 수 있도록 설계 변경할 것임

## □ 원자력 산업계 현황

### ○ 원자력공공기관 및 기업의 경영 구조 현황

- 2016년 프랑스의 원자력 공공단체의 경영 구조가 개편됨.
  - CEA의 역할 및 임무를 군사 및 민간원자력 분야로 지정하고, IRSN의 역할을 원자력 안전규제를 위한 기술지원 및 원자력 안전 분야 연구기관으로 규정함
- AREVA, EDF 및 CEA는 삼자간 협의체(프랑스 원자력 플랫폼)를 구성하여 원자력 중·장기 목표에 대한 삼자간 협력 효율성을 제고하면서 프랑스 대통령 원자력 정책 위원회가 결정을 준비하고 이행하는데 기여할 것임

### ○ 원자력 산업의 최근 발전 현황

- 프랑스 정부가 결정한 전략적 방향에 따라 프랑스 원자력산업의 구조 조정이 진행 중
  - 2016년 6월, Areva는 프랑스전력청(EDF)이 원자로사업 부서인 Areva NP의 지분을 갖는 조건의 양해각서(MoU) 서명과 함께 구조 조정을 진행함
  - 2016년 9월 Areva의 연료주기자산과 관련하여, 채광 및 선·후행 핵연료주기를 담당할 “Areva New Co”라는 새로운 회사가 설립되었으며, Areva 모회사(Areava SA)의 부채를 Areva New Co로 이관할 것임
  - 2017년 초, 자본 증식을 위해 총 50억 유로가 Areva 모회사와 Areva New Co로 분할될 것이며, 프랑스 정부는 직·간접적으로 Areva New Co의 자본금의 3분의 2 이상을 보유할 예정임(1/3은 전략적 투자자들이 보유)
  - 해군 추진용 원자로 및 연구용원자로를 담당하는 자회사인 Areva TA는 프랑스 정부, CEA, EDF 및 해군함정조선사인 DCNS에 인수됨. 이 구조조정 목적은 CEA, DCNS 및 Areva TA가 주요 역할을 담당하여 프랑스의 핵 억제력 수단 중 하나인 프랑스 해군의 원자력 추진 분야를 강화하는 것임.

### ○ Flamanville EPR 원자로 건설

- 프랑스전력청(EDF) 최고 경영자는 2015년 말, 2018년까지 원자로 가동을 위한 3단계 새로운 일정 계획을 발표함.

- AREVA와 EDF는 프랑스원자력안전규제청과의 합의에 따라 Flamanville 3호기 원자로 압력 용기의 기계적 특성 시험 프로그램을 2016년 말까지 연장함. 프랑스원자력안전규제청은 본 시험후에, EPR 압력 용기의 안전성에 대한 공식 의견을 제시할 예정.
- 규제당국이 승인할 때 까지는 Flamanville 3호기의 완공 일정은 2018년 말로 현재 일정과 같음.

## □ 원자력 연구개발 현황

### ○ ASTRID 국제 프로젝트 진행 현황

- 2015년 12월, CEA는 안전옵션 보고서 작성 및 ASTRID 원자로의 개념 설계 단계를 완료함. 이어서 2019년 말까지 기본 설계 단계를 진행할 예정
- 2016년 기본설계 활동에서는 다양한 실험시설 및 모델링도구를 개선함. 예를 들어, 2016년 6월 CEA Cadarache에 로봇 VENUS를 설치하여 Na 환경에서 음향 시각화에 대한 연구를 수행함
- 최근 컴퓨터 코드 SIMMER의 성능이 크게 향상됨. 이 코드의 신규 버전은 JAEA와 CEA에 의해 공동 개발되었으며, 소듐냉각고속로 중대사고 모의(묘사)에 사용됨. 고성능 컴퓨터의 사용 덕분에 코드의 열 수력 모듈의 속도가 약 30배 증가하여 ASTRID 프로젝트의 시뮬레이션 연구가 용이해짐.

## □ 원자력 국제협력 동향

### ○ CEA와 3개 연구 기관 간 ICERR 제휴 협약 체결

- 2016년 9월, CEA는 CNESTEN(모로코), JSI(슬로베니아) 및 CNSTN(튀니지)과 IAEA 연구용원자로를 기반으로 한 국제센터(ICERR) 계획 협정에 서명함
- 협약 체결은 교육용 및 훈련 프로젝트, 실무 훈련 및 연구개발 프로젝트를 위한 CEA의 연구용 원자로의 사용을 용이하게 할 것이며, 현재 건설 중인 Jules Horowitz 원자로의 사용을 위한 기반을 구축할 것임.

## VI. 일본

- ◆ 2016년 12월 개최된 원자력에너지정책 장관회의에서 고속로 개발을 위한 새로운 정책이 결정됨
- ◆ 2016년 11월, 후쿠시마 다이치 원자력발전소의 사용후핵연료 저장조에서 연료를 제거하기 위해 1호기 건물덮개외벽패널 해체를 완료함
- ◆ 새로운 안전규정에 따라 4개 원자력발전소의 8기 원자로가 2016년 12월 말부터 재가동 승인을 취득함

### □ 원자력 정책

- 2016년 12월 개최된 원자력에너지정책 장관회의에서 일본의 고속로 개발을 위한 새로운 정책이 결정됨
  - 세계 최고수준의 기술 인프라를 유지·개발하고, 상용화를 달성하며, 고속로의 국제표준화에서 리더십을 극대화하는 동시에 높은 수준의 안전성과 경제성을 갖춘 새로운 고속로를 개발하는 것을 목표로 함
  - 향후 10년간의 개발 과제를 명시하는 “전략적 로드맵(가칭)”을 2018년 개발 예정
- 원형고속증식로(Prototype Fast Breeder Reactor) 몬주는 페로로 전환하고, 향후 고속로 개발의 새로운 역할을 할 예정
- 고온가스냉각로(HTGR, High-Temperature Gas-Cooled Reactors)의 연구개발을 위해 산·학·연·정부가 참여하는 포럼이 2015년 4월 설립되었으며, 포럼은 향후 상용 고온가스냉각로의 구현 전망과 과제에 대해 정기적으로 논의할 예정

- 핵연료주기 산업과 관련하여 전력시장 규제완화로 사업 환경이 변화됨에 따라, 사용후핵연료 재처리 사업을 지속적으로 추진하기 위해 2016년 10월 원자력재처리기구(NuRO, Nuclear Reprocessing Organization of Japan)를 설립함
- 원자력재처리기구의 활동 즉, 전반적인 핵연료재처리프로젝트 계획 개발, 분담금 결정 및 모금, 재처리 등의 활동 수행을 법으로 규정함. 외부 전문가는 조직의 의사 결정에 참여할 것이며, 정부는 또한 기구의 운영체계를 보장하기 위해 일정 수준으로 참여할 예정임. 그러나 실제 재처리활동은 필요한 기술과 인적 자원을 가진 일본원자력연료회사(JNFL, Japan Nuclear Fuel Ltd)에 계속 위탁할 예정임

## □ 후쿠시마 제1(다이치) 원자력발전소(F1)

- 2016년 11월, 사용후핵연료 저장조에서 연료를 제거하기 위하여 1호기 건물 덮개외벽패널 해체를 완료함
- 2016년 3월, 원자로 건물과 지하수를 격리시키기 위해, 동결공법을 사용하여 차수벽을 만드는 작업을 시작함. 해양과 격리시키기 위한 작업은 2016년 10월 완료함. 산악지역에서 동결되지 않은 5곳 중 4곳은 일본 원자력규제위원회(NRA, Nuclear Regulation Authority)에서 확인했고, 나머지 한 곳의 동결상태는 원자로 건물 주변에서 퍼 올린 지하수양의 변화로 판단할 예정

## □ 원자력규제위원회(NRA)의 원자력발전소(NPSs, Nuclear Power Stations) 및 핵연료주기 시설에 대한 안전성 검토

- 새로운 안전규정에 따라 16개 원자력발전소의 26기 원자로를 재가동하기 위한 안전 검토 신청서가 NRA에 제출 되었으며, NRA의 검토 결과, 4개 원자력발전소의 8기 원자로가 2016년 12월 말부터 재가동 승인을 취득함

- 큐슈 전력회사의 센다이 원자력발전소 1-2호기, 시코쿠 전력회사의 이카타 원자력발전소 3호기, 간사이 전력회사의 다카하마 1-4호기, 미하마 원자력발전소 3호기 등이 재가동 승인을 받았으며, 이카타 3호기는 2016년 9월 상업 발전을 재개함

## □ 일본원자력기구(JAEA, Japan Atomic Energy Agency)의 시설 현황

- 2016년 12월 몬주의 폐로 결정에 따라, JAEA는 몬주를 안전하게 폐로하고, 고속로 연구 개발에 대한 몬주의 새로운 역할에 대해 검토 할 예정임
- 실험고속로인 JOYO의 경우, JAEA는 2017년 3월 말까지 새로운 규제기준에 따라 재가동을 위한 설비허가에 대한 변경 신청을 준비하고 있음
- 고온가스냉각시험로(HTTR, High Temperature Gas-cooled Test Reactor)의 안전성 검토를 위해, JAEA는 NRA와의 회의 및 청문회를 준비하고 자연현상과 안전에 대한 평가에 관한 논의를 완료함
- JAEA는 향후 고온가스냉각시험로(HTTR)에 적용할 계획인 열화학 요오드-유황(IS) 공정 시험 장치에서 31시간 동안 성공적으로 수소를 생산함

## Ⅶ. 러시아

- ◆ 러시아연방은 현재 35기의 원전운전으로 총 27.2GWe 전력을 생산하고 있으며, 9기의 신규 원전과 부양식 해상원전 1기를 건설 중임
- ◆ 2016년 8월 5일 제3세대+ VVER-1200 원자로가 설치된 Novovoronezhskaya 원전 6호기에서 핵연료 장전 및 미임계테스트(B1 단계)를 성공적으로 완료함
- ◆ 소듐냉각고속로 및 액체금속고속로는 “2010-2015년 계획 및 2020년 전망을 위한 차세대 원자력기술”을 위한 연방목표프로그램(FTR) 으로 개발 중이며, 현재 2030년까지의 FTP-2 준비 및 채택이 검토 중임

### □ 원자력 발전 현황

- 러시아연방은 현재 35기의 원전운전으로 총 27.2GWe 전력을 생산하고 있으며, 9기의 원전과 부양식 해상원전 1기를 건설 중임
- 2016년 8월 5일 제3세대+ VVER-1200 원자로가 설치된 Novovoronezhskaya 원전 6호기에서 핵연료 장전 및 미임계테스트(B1 단계)를 성공적으로 완료함
  - 설계 출력 100%에서 검수 프로그램 및 시험 운전을 완료한 후, 2016년 말, 상업 발전을 시작할 계획
  - 혁신안전 개념으로 기존의 능동안전시스템과 함께 새로이 피동안전계통을 사용함
  - 새로운 설계를 통해 지진, 쓰나미, 허리케인 및 항공기 충돌 사고의 영향을 방지할 수 있을 것으로 예상함. 새로운 안전 기준에 따라 원자로는 격납용기로 보호되고 있으며 원자로용기 아래에 노심용융물 "거치설비(trap)" 설치 및 피동잔열계통이 설치됨

- <sup>52)</sup>Rosenergoatom은 일본의 "후쿠시마-1" 원전 사고와 유사한 사건을 고려하여 설계/건설/운영 중인 모든 원전의 안전성을 분석하고 개선하고 있음

## □ 제4세대원자력시스템 연구개발 현황

- 러시아원자력공사(Rosatom)의 제4세대 원자력시스템 연구개발 분야
  - 소듐냉각고속로(SFRs, Sodium cooled fast reactors)
  - 액체금속고속로(HLMC, Fast reactor with heavy liquid metal coolant)
  - 초임계압수로(Supercritical water reactor)
  - 용융염로(Molten salt reactor)
  - 가스냉각고속로(Fast gas reactor)
- 소듐냉각고속로 및 액체금속고속로는 “2010-2015년 계획 및 2020년 전망을 위한 차세대 원자력기술”을 위한 연방목표프로그램(FTR)으로 개발 중임
  - 연방목표프로그램(FTP)은 원자로 시설의 특정 프로젝트, 유망한 고밀도 질화물핵연료의 생산기술 연구개발 및 마스터링, 핵연료주기 폐쇄문제의 활동 지원 등을 수행하며, 미래원자력을 위한 새로운 기술플랫폼을 창출하는 것을 목표로 함
  - 현재 2030년까지의 FTP-2 준비 및 채택이 검토 중임

52) 러시아 최대 전력 생산 회사로서, Atomenergoprom의 자회사(Atomenergoprom은 Rosatom의 자회사)

## □ 소듐냉각고속로(SFR, Sodium cooled fast reactors) 연구현황

○ 러시아는 현재 고속로 3기를 운영 중임

원자로	구분	현 단계	주요 진행사항
BN-600	상업 발전	36년 이상 운영	- 기존 수명 30년에서 40년으로 연장('20년 3월 까지) - 수명을 최대 60년까지 연장하는 작업을 진행 중 - 2016년 이용률 87.45% 이상 기록(총 운영 기간 중 최대치)
BOR-60	연구로	약 47년 운영	- '19년 말까지 운영 연장 허가됨
BN-800	상업 발전	2016년 10월 31일 이후 상업 운전 시작	- 15일 간('16년 8월 17-31일) 100% 설계출력에서 시운전을 성공적으로 완료함 - '16년 9월 21일-23일, "전력 공급 완전 상실"을 초래한 가상 지진의 설계기준외사고를 모사하여 벨로야르스크 3호기 및 4호기에 대한 비상대응훈련을 실시함 - 2016년 10월 31일, BN-800 4호기 상업운전 시작
BN-1200	대형 상업 발전	기술 설계 개발 완료	- 연방 목표 프로그램(FTP) 체제 내 4세대 원자력 시스템 요건을 충족하는 대형 고속로임 - BN-1200을 중심으로 운영될 벨로야르스크 원전 1호기 건설 논의 중임(2030년까지 건설 예정)
MBIR	연구로	기본 설계 개발 완료	- BOR-60 대체용으로, 연방 목표 프로그램(FTP)에 따라 건설 인허가 승인됨 - '15년부터 러시아원자력연구소 RIAR에 건설 중 - 러시아원자력공사(Rosatom)는 MBIR을 이용하는 국제연구센터를 설립할 계획임

○ BFS(Fast Critical Facility)

- 2017년 Obninsk 소재 IPPE(Institute of Physics and Power Engineering)의 BFS(Fast Critical Facility) 업그레이드가 완료될 예정. BFS는 원자로 설계 검증에 위한 거의 모든 출력수준의 노심을 모델링 할 수 있음.

## □ 액체금속고속로(HLMC, Fast reactor with heavy liquid metal coolant) 연구현황

○ HLMC(Fast reactors with heavy liquid metal coolant)

- 납냉각 BREST-OD-300 설계입증을 목표로 연구개발 프로그램 추진 중

## VIII. 남아프리카공화국

- ◆ 남아프리카공화국은 “2008 원자력 에너지 정책”에서 에너지 믹스와 에너지 전망 관련 원자력 배경을 설명하고, 2010-2013 종합자원계획에서는 2030년까지 9.6GWe의 추가적인 원자력 발전이 필요하다고 명시함
- ◆ 남아프리카공화국은 2016년 9월 말 원자력 신규 건설 프로그램의 제안 요청서(RFP, Request for Proposal)를 공개할 계획임
- ◆ 국가원자력규제기관을 통하여 남아프리카공화국은 2016년 9월 첫 번째 원자력안전 및 보안센터(CNSS, Centre of Excellence for Nuclear Safety and Security)를 출범시킴

### □ 원자력 정책 및 에너지 계획

- 남아프리카공화국은 “2008 원자력 에너지 정책”에서 에너지 믹스와 에너지 전망과 관련된 원자력 배경을 설명함
- 2010-2013 종합자원계획에서는 2030년까지 9.6GWe의 추가적인 원자력 발전이 필요하다고 명시함(현재 Koeberg 원자력 발전소의 전력량은 1.8GWe임)
- 2016년 11월 현재 종합자원계획을 검토 중이며, 에너지부(Department of Energy)는 공공 자문을 얻기 위해 개정된 종합자원계획의 초안 및 종합에너지계획을 발표함
- 남아프리카공화국 정부는 “국가가 감당할 수 있는 규모와 속도”로 원자력 에너지를 확보할 것이라고 강조함

## □ 원자력 신규 건설 프로그램

- 2015년 12월 9일 정부 내각의 결정에 따라, 2016년 9월 말 원자력 신규 건설 프로그램의 제안요청서(RFP, Request for Proposal)를 공개할 계획임
  - 원자력 조달, 내부 실사 및 이해 관계자 협의를 포함한 복잡한 상황으로 인해 프로그램의 착수가 지연되고 있음
  - 그러나 남아프리카 공화국은 에너지 믹스의 필수적인 부분으로서, 원자력 신규 건설 프로그램을 통해 국가의 에너지 안보를 확보하기 위해 노력 중임
  - 원자력 신규 건설 프로그램은 일자리 창출, 기술 개발 및 산업 창출로 국가 지식 경제에 기여할 수 있을 것임
  - 2016년 11월 내각은 Necsa를 선행핵연료주기시설 운영자로, Eskom을 원전 구매·소유·운영자로 지정함

## □ 원자력 안전 및 인허가

- 2016년 3월 10일 Eskom은 원자력규제기관(NNR, National Nuclear Regulator)에 Thyspunt(Eastern Cap)지역과 Duynefontein(Western Cape)지역을 대상으로 하여 원전부지허가(NISL, Nuclear Installation Site License) 신청서를 제출함
  - 2016년 7월 원자력규제기관(NNR)은 원전부지허가(NISL) 신청서에 대한 초기 검토 결과 국가정책 부합성 및 적법성을 확인하고 추가절차를 진행하기 위해 신청서를 접수함

## □ IAEA 전문가 임무

- 2016년 6월, 원자력규제기관이 주관할 IRRS 사전 준비 회의를 위해, 남아프리카공화국은 IAEA 안전기준 및 국제모범사례에 대한 규정 인프라 개발 현황을 포함한 남아공의 규제체제를 기술 및 정책적으로 검토하는 IAEA 통합 규제검토임무를 요청할 예정임(IAEA 통합규제검토회의는 2016년 12월 5일 ~15일 예정임)

## □ 원자력 연구개발 현황

- 국가원자력규제기관을 통하여 남아프리카공화국은 2016년 9월 첫 번째 원자력안전 및 보안센터(CNSS, Centre of Excellence for Nuclear Safety and Security)를 출범시켰으며 CNSS의 역할은 다음과 같음
  - 원자력 규제기관 및 원자력 산업 전반에서 요구되는 원자력안전교육을 받은 인력의 지속적인 공급
  - 원자력 안전 분야의 지속적인 전문가 양성 프로그램, 규제 활동 및 의사결정을 지원하기 위한 원자력 안전 연구 수행
  - 규제기관 및 원자력 산업계에 원자력 안전 기술 지원 서비스를 제공
- 남아프리카공화국은 인력 양성을 위해 한국의 “한전원자력대학원학교(KINGS)”의 2년 석사과정에 학생을 파견함

## Ⅸ. 스위스

- ◆ 스위스 정부는 후쿠시마-1 원전 사고 이후, 원전을 점진적으로 폐쇄하기로 결정함. 현재 운영 중인 5기의 원전은 운전허가기간 종료 후 대체하지 않을 예정임
- ◆ 원전을 단계적으로 폐쇄하기로 했지만, 폴쉐르연구소(PSI, Paul Scherrer Institute)의 원자력 및 안전 부서를 중심으로 원자력 연구 및 교육은 지속하기로 함

### □ 원자력 정책

- 스위스 정부는 후쿠시마-1 원전 사고 이후 원전을 점진적으로 폐쇄하기로 결정함. 현재 운영 중인 5기의 원전은 운전허가기간 종료 후 대체하지 않을 예정임
- 2016년 11월 27일, 원자력의 단계적인 폐쇄를 가속화하여 2027년까지 모든 원자력발전소를 폐쇄하기 위한 국민 투표를 진행했으나, 부결됨

### □ 원자력발전소 현황

- 스위스는 원자력발전소 네 곳에서 비등수형원자로(BWR, Boiling Water Reactor) 2기와 가압수형원자로(PWR, Pressurized Water Reactor) 3기를 운영하고 있음
- 전력회사인 BKW Energie AG는 47년 동안의 성공적인 원전 운영을 끝으로 2019년까지 Muhleberg BWR-4를 폐쇄할 것이라고 발표함. 해당 폐로 프로젝트는 2016년 초 정부당국에 제출됨

- Beznau 원전 1호기는 압력용기재료 검사 문제로 여전히 정지된 상태이며, 2017년 봄 이전에 재가동할 가능성은 거의 없음. Beznau 원전 2호기는 2015년 12월 23일 용기 상부헤드를 성공적으로 교체한 후 재가동에 들어감
- Leibstadt 원전에서는 다수의 연료다발 상부에서 심화된 연료봉 산화로 인한 장시간의 dry-out 운전 징후가 관찰되어, 원인 규명 시까지 원전 운전이 중단되고 있으며 2017년 초에 재가동될 것으로 예상됨.
- 전력 시장 침체 상황에서 기저부하 전력 생산은 상당한 경제적 어려움에 직면해 있음
- 3곳의 방폐물심지층처분 예비 후보지에 대한 조사는 원만하게 진행 중임

## □ 원자력 연구개발 현황

- 원전을 단계적으로 폐지하기로 했지만, 원자력 연구 및 교육은 지속하기로 결정함
  - 폴쉐르연구소(PSI, Paul Scherrer Institute)의 원자력 및 안전 부서를 중심으로 연구개발을 지속할 예정이며 미래에도 원자력 에너지 활용 능력을 계속 유지하는 것이 목표임.
- 2015년 11월 20일 GIF의 용융염원자로(MSR, Molten Salt Reactor) 프로젝트 양해각서(MoU, Memorandum of Understanding)에 서명함
  - 용융염로 MoU 참여 현황: JRC(Euratom), CEA(France), PSI(Switzerland), DOE(USA), ROSATOM(Russian Federation)

○ 제4세대원자력시스템 연구개발 주요 사항

- 초고온가스로(VHTR) 및 가스냉각고속로(GFR)의 고온 재료
- 스위스국립과학재단 및 Horizon2020 SAMOFAR 프로젝트를 통해 용융염로(MSR)의 설계 및 안전성 연구
- ASTRID 안전성과 관련하여 CEA와 PSI의 양자 협력

## X. 영국

- ◆ 2016년 영국은 원자력 R&D 및 혁신 프로그램 투자에 착수함
- ◆ Gen IV 기술로서 연료·재료 연구 및 SMR 평가 프로세스를 지속 할 수 있는 새로운 연구 시설을 완공함
- ◆ 영국은 2016년 SMR 기술경제성평가를 마치고, SMR 개발, 상용화 및 자금 조달에 있어 시장 관심을 측정하기 위한 조사를 진행 중임

### □ 혁신적인 프로그램

- 영국의 원자력 혁신 및 연구 자문위원회의 권고로 개발한 혁신 프로그램은 다섯 가지 주요 민간 원자력 분야의 혁신을 지원함
  - 영국 원자력 혁신 및 연구 자문위원회(UK Nuclear Innovation and Research Advisory Board)는 영국의 미래 에너지 믹스, 원자력에 관한 연구 개발 및 혁신에 대해 독립적이고 전문적인 자문을 제공하기 위해, 영국 정부가 설립한 단체임. 영국 경제에 크게 기여한바 있음.
- 프로그램의 중점 분야
  - 높은 효율성의 선진 핵연료에 대한 최첨단 연구
    - 초기 핵연료 연구는 경수로(LWR, light Water Reactor)에 대한 비산화물 사고내성 연료 및 피복재 개발, 제조 및 조사시험을 중심으로 진행함
    - 핵연료 개발은 고온원자로 연료인 코팅입자연료의 제조 공정 개선 향상 연구의 비경수로 분야로 확장하여 핵연료 kernel의 다양한 코팅, 증착 및 제조 기술에 대한 연구를 포함
    - 원자로 테스트 전(前) 검증 과정의 일부로, 실험적 연구를 통해 개발된 새로운 핵연료의 물리와 성능을 모델링 할 수 있는 혁신 기술 개발 및 프로그램으로 실험적 연구를 보완함.

- 미래 환경 및 재정 부담을 줄이기 위한 핵연료 재순환 공정에 대한 연구
  - 이 연구는 핵연료 재순환기술의 경제성, 핵확산저항성, 폐기물발생 및 환경 영향을 획기적으로 개선하는 5년 계획의 프로그램임
- 미래 원자로용 재료, 선진 제조 및 모듈러 기술 개발
  - 이 프로그램은 원자력 선진재료개발, 다양한 규모의 원자력 기기제조의 기계화 및 자동화, 제작 전(前) 모듈 개발 및 검증, 적절한 codes & standards를 개발하는 연구개발 통합프로그램임.
  - 재료 성능 데이터 개발, Gen-IV 원자로에 적합한 재료 및 제조 공정에 대한 기본이해, 일반 원자로의 모듈화 및 효과적 제조를 위한 실험실 규모의 연구를 포함
- 차세대 원자로 설계 개발, 안전 및 효율성을 뒷받침하는 연구
  - 차세대 원자로 설계에서 피동안전성에 대한 이해 및 예측 모델링 능력을 개선할 수 있도록 현대 디지털 공학기술 실례 및 시뮬레이션 도구의 보급 확대에 중점을 둠
  - 원자력 설계, 개발 및 건설 프로그램이 이행되는 방법에서 강화된 설계, 생산성 향상 및 단계적 변화를 이끌어가는 것에 목표를 둠
  - 이 연구 플랫폼은 제4세대원자력시스템 설계, 모듈화 및 현재/미래 원자로의 부지 외 제작 등의 분야에서 파트너와 설계 협력 프로젝트를 수립하는 것임

## □ 새로운 원자력 연구시설

### ○ 고온 설비

- <sup>53)</sup> 고온설비연합은 미래 시스템에서의 접목을 위한 구조 재료 기술을 조사, 개발, 발전시키는 연구 기관을 위해 개방형 재료 시험 연구소를 설립함.
- 고온설비는 1000℃이상 환경, 온도 변화 환경 등의 새롭고 까다로운 환경에서 재료를 검사할 수 있는 설비를 구비함

53) 고온설비연합(HTF, High Temperature Facility) Alliance: 영국의 기업 및 대학으로 구성된 팀으로, 선진 핵분열 시스템 설계, 제조, 운영 및 규제에 대한 심층적인 지식을 보유함. 이 지식은 첨단 실험 장비 보유를 위해 R&D 프로그램을 조정하는 데에 필요함.

- 미래원자력기술을 위한 새로운 예측 모델 개발과 첨단 소재의 선택, 제조 및 성능을 위한 데이터를 생산함

○ UTGARD(U/Th/beta-Gamma Active process chemistry R&D) 연구소

- 랭캐스터대학(University of Lancaster)의 UTGARD 연구소는 베타 및 감마 발생 핵분열생성물, 우라늄, 토륨 및 저준위 알파 추적자 등에 관한 연구를 위해 운영 중임
- UTGARD 연구소는 안전하고 경제적·효율적이며 핵확산저항성이 있는 습식 핵연료재순환 기술 개발을 지향함

○ Pyroprocessing

- Pyroprocessing 연구소는 에든버러대학(University of Edinburgh)에서 2016년 설립한 연구소로, 고속로 핵연료 Pyro-processing 재순환 기술의 필수 요소 기기 실증을 위한 장비와 인프라를 제공함

□ <sup>54)</sup> 소형모듈원자로 평가 및 경쟁

- 영국정부는 SMR 기술의 장기적 가치 특히, 건설 기간 단축, 원자력 발전 비용 절감 등의 잠재적 이익에 관심이 있음
- SMR 기술경제성평가 분야 및 주요내용(2016년 평가 완료)
  - SMR 기술에 대해 광범위한 심층 데이터 수집 및 증거 기반 분석을 포함하는 포괄적인 분석 및 평가
  - SMR 및 기타 에너지원의 전략 분석 및 균형 잡힌 영국 에너지시스템에 미치는 영향을 다루는 시스템 최적화 모델링
  - 새로운 원자력 기술의 전략적 분석 및 적용 가능성
  - 영국의 안전과 안보 체계의 맥락에서 SMR의 운용방안에 대한 고려

54) SMR, Small Modular Reactor

- SMR 기술에 적용하기 위한 다양한 선진 제조 기술 분석
  - 격납 · 차폐 및 구조 요소 · 안전 시스템 · 조립공정에 대한 모듈화가 SMR 건설에 어떤 기여를 하는지 분석하며 유지 보수, 공차 및 건설 위해도에 미치는 영향을 평가함
  - 다중시스템, 안전 및 fail-safe 시스템, 개선된 부하추종 능력에 대한 제어 시스템의 확장 영향 분석
- 영국 정부는 SMR 개발, 상용화 및 자금 조달에 있어 기술 개발자, 전력 회사 및 잠재적 투자자들의 SMR시장에 대한 관심을 측정하기 위한 조사를 시작함(2016년 3월 시작, 결과는 2017년에 예상됨)
- 이 조사는 SMR의 상업적 건설 방법과 제4세대 기술에 기반을 둔 원자로 기술을 포함한 원자로 건설 가능 기간에 대하여 정부와 참여자 간의 조직적인 대화 등을 포함함

## Ⅺ . 미국

- ◆ 미국에너지부(DOE)는 증가하는 국가 에너지 수요를 충족할 수 있는 신기술인 <sup>55)</sup>소형모듈원자로(SMR) 개발 노력 중임
- ◆ 미국에너지부(DOE)는 선진원자로 개발·건설에 대한 초기비전 및 전략을 발표하고(2016.6.6.) 선진원자로의 개발 및 건설을 위한 다음과 같은 6개의 장기 추진 전략적 분야를 도출함
- ◆ 미국에너지부(DOE)는 극한적인 설계기준외 사고를 견딜 수 있는 사고내성과 높은 성능을 가진 차세대 핵연료 개발을 추진하고 있음

### □ 자력연구개발 동향

- 원자력은 미래에도 안전하고 지속가능한 청정에너지를 공급하기 위한 미국 에너지 전략의 중요한 부분을 차지함
- 원자력에너지의 중요성이 커지면서, <sup>56)</sup>원자력에너지국(NE)은 직원들의 책임감 고양을 위해 조직을 개편함
  - 사용후핵연료 운송·보관·저장 부지 선정 업무를 담당할 <sup>57)</sup>사용 후 핵연료 및 폐기물 처분국을 설립
  - 원자력에너지 상업화 업무를 담당하는 <sup>58)</sup>원자력기술실증사무국의 설립
  - 선진원자로기술국은 새로이 편성된 원자력기술연구개발국으로 이관 되었으며 고속로, 고온가스로 및 일반신형원자로 기술에 대한 연구개발을 계속 담당함

55) SMR, Small Modular Reactor

56) The Office of Nuclear Energy (NE) is an agency of the United States Department of Energy

57) Office for Spent Fuel and Waste Disposition

58) Office of Nuclear Technology Demonstration and Deployment

- <sup>59)</sup>미국에너지부(DOE)의 LWR Sustainability(LWRS) 프로그램은 신뢰성 향상, 안전 유지 및 경수로 원전의 수명을 연장하기 위한 선진 기술에 대한 연구개발을 수행 중임
- 미국에너지부(DOE)는 증가하는 국가 에너지 수요를 충족할 수 있는 신기술인 <sup>60)</sup>소형모듈원자로(SMR) 개발을 추진하고 있음
  - 미국에너지부(DOE)는 SMR <sup>61)</sup>인허가기술지원(LTS) 프로그램을 통해, SMR의 안전·운영·경제성을 개선하는 혁신 설계의 허가 및 인증을 위한 비용을 지원함(개발자와 공동 비용부담 재정지원 프로그램)
  - LTS 프로그램 수혜 SMR인 NuScale은 2020년 중반 상업운전을 목표로 설계 및 인허가 신청 준비 등이 계획대로 진행 중임

## □ 제4세대원자력시스템 연구개발 현황

- 의회는 신형 시험 및 실증용 원자로 옵션에 대한 평가 연구를 완료했으며, 이 연구는 선진 조사(irradiation) 및 기술실증용 원자로 건설에 대한 다양한 옵션 평가를 포함함
  - 존 코텍(John Kotek) 원자력담당 차관보는 원자력에너지자문위원회(NEAC)에 2030년 이후 장기적인 측면에서 조사시험용 원자로의 필요성, 기능 및 사양을 조사할 추가 임무를 부여함.
- 미국에너지부(DOE)는 선진원자로 개발·건설에 대한 비전 및 전략(초안)을 발표함(2016.6.6.)
  - 탄소 기반 발전시설의 퇴진·성장·교체로 인해 대략 200GWe의 신규 전력량 수요를 예상하여 선진원자로 개발 및 건설 필요성을 강조함

59) DOE, Department of Energy

60) SMR, Small Modular Reactor

61) LTS, Licensing Technology Support

- 2050년 경 선진원자로의 역할을 설명하고, <sup>62)</sup>원자력규제위원회(NRC)의 필수 인허가 검토 완료를 포함하여 건설기간을 허용하여 최소한 2기의 비경수 개념 선진원자로 건설을 목표로 함
  - 미국에너지부(DOE)는 비전과 목표를 달성하기 위하여 선진원자로의 개발 및 건설을 위한 다음과 같은 6개의 장기 추진 전략 분야를 도출함
    - 원자로 공급자의 국립연구소 인프라 및 전문 기술에 대한 접근성 향상, 성능 및 기술 폐기 위해도 검증, 핵연료 주기 경로 개발, 효율적이고 예측 가능한 규제 체계 구축 지원, 민간 부문과의 협력을 통해 건설을 가속화하기 위한 자원 활용, 인적 자원 및 인력 개발 제공
- <sup>63)</sup>에너지자문위원회(SEAB)의 태스크포스는 미래원자력에너지에 대한 보고서 초안 발표(2016.9.22.)
- 보고서는 현재까지 원자력 개발 현황에 대해 논의하면서 First-of-a-kind 상용 원자로 설계, 개발, 실증, 허가 및 건설을 지원하기 위한 선진원자로 프로그램을 4단계 접근방식을 통해 착수할 것을 권고함. 보고서는 또한 민간 부문의 비용 분담을 포함하여 25년간 115억 달러가 소요될 것으로 예상함
- 2012년부터 DOE는 연구개발프로그램을 발전시키기 위해 산업계와 지속적으로 노력 중임
- 미국에너지부(DOE)는 X-energy와 Southern Company를 비용분담 프로그램의 지원 대상으로 확정하여 선진원자로 연구개발을 지원할 예정
  - 현재 미국에너지부(DOE)는 국립연구소 R&D 지원을 위한 1,000만 달러를 포함하여, 두 회사의 연구개발 지원을 위해 2400만 달러를 확보함
    - X-energy는 고온가스로(high temperature gas reactor)를 연구개발 중이고, Southern Company LLC는 용융염고속로(molten chloride salt fast reactor) 연구개발 하고 있음

62) NRC, Nuclear Regulatory Commission

63) SEAB, Secretary of Energy Advisory Board's

- 인허가와 관련하여, 미국에너지부(DOE)는 선진원자로설계기준(대부분의 선진원자로에 적용가능)과 함께 특히 소듐고속로 및 고온가스로 맞춤형 설계기준 초안을 작성함
  - 해당 설계기준은 2014년 12월 원자력규제위원회(NRC)에 제공되었고, NRC는 일반설계기준을 참조한 선진원자로설계기준(안)을 준비하여 산업계 의견을 구하기 위해 에너지부에 제공함. 이는 NRC의 안내지침서 개발 과정의 일환임
  - 원자력규제위원회(NRC)는 2016년 10월 공개회의를 개최하였으며 2017년 초 자문위원회와 회의를 가진 후, 2017년 말 최종 안내지침을 발표할 예정임
  - 또한, 인허가와 관련하여, 원자력규제위원회(NRC)와 미국에너지부(DOE)는 기술 및 규제 측면에서 비경수로 기술의 안전한 개발·건설의 효율성을 높이기 위한 옵션 모색에 선진원자로 Community를 참여시키기 위해 2015년 9월 및 2016년 2월 두 차례 각각 2일간의 워크숍을 주최함
    - 첫 번째 워크숍은 규제관련 요구사항에 중점을 두었고 두 번째 워크숍은 최근 계획 보고 및 선진원자로 핵연료 품질요건에 대해 검토함. 워크숍에는 정부, 산업계, 국립연구소 및 원자력 관련 기관이 참여함. 차기 워크숍은 2017년 4월 25~26일 예정임.
  
- 미국에너지부(DOE)는 극한적인 설계기준외 사고를 견딜 수 있는 사고내성과 높은 성능을 가진 차세대 핵연료 개발을 추진하고 있음
  - 차세대 핵연료는 후쿠시마 원전 사고에서 경험한 것과 같은 예기치 않은 상황에 대응할 여유가 있는 추가 시간을 운전자에게 제공할 것으로 예상함
  - 의회가 요청한 프로젝트는 타당성에서 품질 요건 확인, 상용화 준비에 이르기까지 3단계 접근 방식으로 진행되며 국립연구소, 대학 및 원자력 산업계와의 강력한 협력을 통해 이행됨

- AREVA, Westinghouse 및 General Electric이 이끄는 산업계 연구팀은 2022년까지 상용화를 추진한다는 궁극적인 목표를 지원하기 위해 IINL(Idaho National Laboratory) 선진시험원자로(ATR)를 이용하여 연구팀이 제안한 핵연료에 대한 중성자조사시험을 진행하고 있음