

2025년도
에너지기술개발사업
연구개발과제기획보고서

원자력
(원전 탄력운전 기술개발)

목 차

I . 동향분석	1
1. 개 요	
2. 산업·기술동향	
3. 특허동향	
4. 표준화동향	
5. 정부R&D 지원현황	
6. 시사점	
II . 기획대상연구개발과제 도출	29
1. 연구개발과제기획방향	
2. 개발위험 관리방안	
3. 기획연구개발과제 기술개요서	

1. 개요

□ 개념

❖ 원전 탄력운전 기술개발사업의 개념

- 무탄소에너지(CFE) 공급 확대에 따른 부하 변동성에 대응하기 위해 원전의 유연성 확보 및 수출 경쟁력 강화를 위한 대형원전의 탄력운전 설계, 제어 및 운영 기술개발

○ 탄력운전(Flexible Operation) 정의

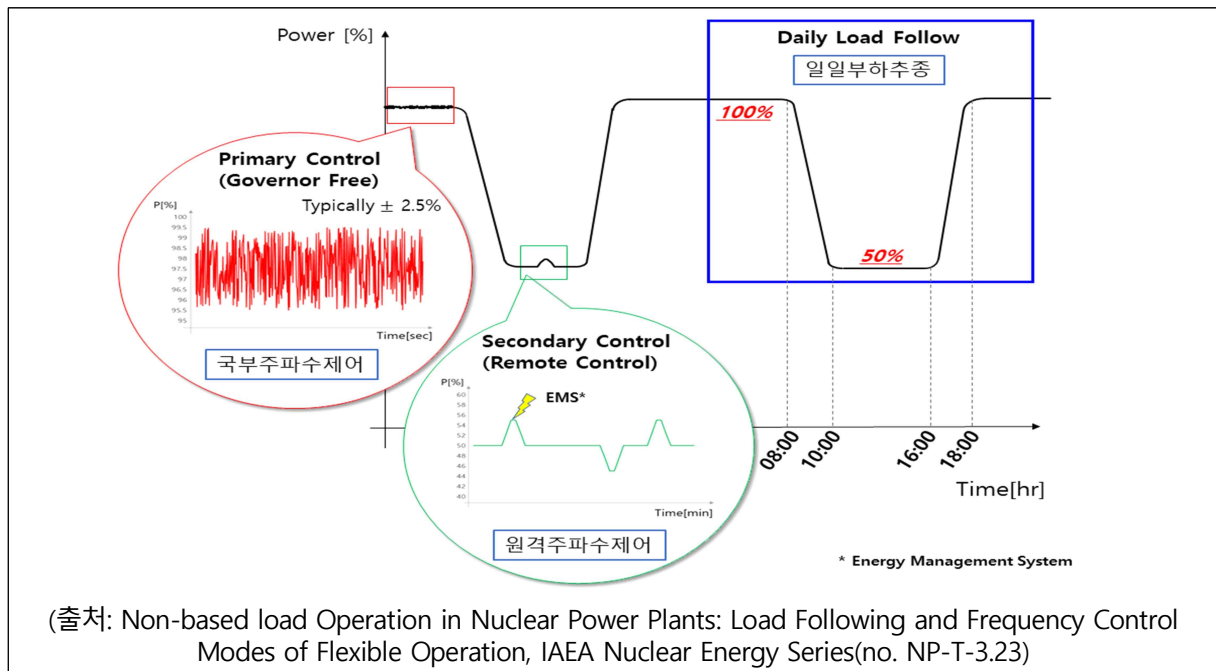
: 전력계통의 부하변동에 대응하여 발전기의 출력량을 조정하는 운전 방식

<탄력운전의 종류>

구분	명칭	출력변화 형태 예시	터빈제어방식
(일일) 부하추종 운전	<ul style="list-style-type: none"> • Daily Load Follow • Daily Load Cycling • Scheduled and Unscheduled Load Follow 	<ul style="list-style-type: none"> • 100-50-100(%) • 14-2-6-2(hr) 	Load ref. 변화
주파수 제어운전	<ul style="list-style-type: none"> • GFO (Governor Free Operation) • Local Frequency Control • Primary Frequency Control • Frequency Sensitive Mode(FSM) (EUR rev. E) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2~3% 출력변화 매우 잦은 변화 	Speed Control 기능에 의한 자동조절
	<ul style="list-style-type: none"> • AGC (Automatic Generation Control) • Remote Frequency Control • Secondary Frequency Control 	<ul style="list-style-type: none"> • 약 5~10% 출력변화 하루 30~40회 	Load ref. 변화

- 부하추종운전(Load Follow) : 일일 또는 특정기간 단위로 전력수요가 많은 시간대에는 100% 출력으로 운전하다가 수요가 적거나 타 전력원의 공급이 많을 것으로 예상되는 시간대에는 사전에 계획을 수립하여 출력을 낮추어 운전하는 방식
- 주파수제어운전(Frequency Control) : 전력계통망의 규정 주파수제어 및 전력수요 대응을 위해 실시간으로 출력을 조정하여 운전하는 방식으로 국부주파수제어와 원격주파수제어로 구분

- 국부주파수제어(Governor Free Control, GFC) : 전력계통의 주파수와 발전소 송출단의 주파수 차이를 터빈컨트롤밸브(조속기)로 수초 이내의 실시간으로 보정하는 운전방식으로 통상 2~3% 정도의 출력변화에 대응
- 자동발전제어(Automatic Generation Control, AGC) : 전력 그리드의 수요에 맞추어 안정적 주파수제어를 위해 전력계통운영시스템(EMS)에서 보내는 원격 제어신호로 발전기의 출력을 수분 이내로 자동으로 증감발하는 운전 방식으로 통상 5~10% 정도의 출력변화에 대응



[탄력운전 종류별 특성 예]

○ 프로젝트 방향

- : 현행 원전의 경우 기저부하 운전을 기반으로 특수 경부하 기간에 사전 계획하여 부분 출력증감발 운전 시행 ⇒ 상시적이고 반복적인 탄력운전 상용화를 위한 설계, 제어, 운영 및 인허가 대응 기술 개발
- (원전 유연성 확보) 원전 탄력운전 상용화 기술개발을 통한 출력변동 대응력 향상으로 전력계통 안정성 및 재생에너지 연계성 강화
- (수출 경쟁력 강화) 유럽사업자요건(EUR)을 충족하는 탄력운전 기술 개발로 원전 수출 경쟁력 강화

○ 프로젝트 범위

: APR1000 및 APR1400을 대상으로 탄력운전을 위해 부하추종운전 및 주파수제어운전 기술개발

- (대상 노형) APR1000 / APR1400

* 국내 가동/신규 원전의 대표성 및 수출 원전의 노형을 고려하여 2가지 원자로형을 대상으로 대응기술 개발

- (대상 기술) 부하추종운전 / 주파수제어운전(국부주파수제어 방식)*

* 현행 국내에서는 원전 외부에서의 원격출력제어를 할 수 있는 근거는 없으므로 자동발전제어 방식 탄력운전은 본 사업 기술개발 대상에서 제외

- (사업 기간) 동 사업 목표달성 후 국내 신규/가동원전 및 수출 원전에 탄력운전을 적용하기 위해 정부 또는 민간자체 후속사업 수행

· **탄력운전 상용화 기술개발(동 사업) : '25 ~ '28**

- 탄력운전 기술 인허가 신청 : '29
- 실증 대상호기 인허가 대응 및 교체노심설계 : '29 ~ '30
- 실증 인허가 획득 : '31
- 탄력운전 실증 대상호기 시범운영 : '31 ~ '33
- 탄력운전 상용화 확대 : '34 ~



[프로젝트 개념도]

□ 주요이슈

❖ 정부는 국정과제 이행을 위한 에너지 안보 및 탄소중립의 수단으로 원전을 적극 활용하고, 수출을 통한 원전 최강국 도약을 추진

* '38년 발전량 중 무탄소 비중 70% 달성 목표, 안정적 전력계통 운영을 위해서는 원전의 탄력운전이 시급하며 적기 기술개발을 통한 수출경쟁력 강화 필요

○ (원전 확대) 원전 비중 확대 방향에 따른 원전 안전 운영과 미래 원전 시장 중장기 경쟁력을 확보하기 위한 기술개발 혁신이 필요

- 원전은 급증하는 국가전력수요의 30% 이상을 담당하는 무탄소에너지이며, 11차 전기본(실무안)은 '38년 무탄소에너지(CFE) 비중 70% 달성 목표설정

* 원전 발전비중(안) : ('23년) 30.7% → ('30년) 31.8% → ('38년) 35.6%

- 정부는 탄소중립을 위해 원전과 재생에너지를 확대해나갈 예정이나, 이는 모두 경직성 전원으로 전력계통의 불안정성이 증가하는 추세

* 원전 + 신재생E 발전비중(안) : ('23년) 39.1% → ('30년) 53.4% → ('38년) 68.5%

- 특히, '20년부터 명절 및 봄·가을철 등 전력 경부하기* 원전 출력제어가 시행**되고 있으며, 향후 필요한 감발량도 늘어날 전망

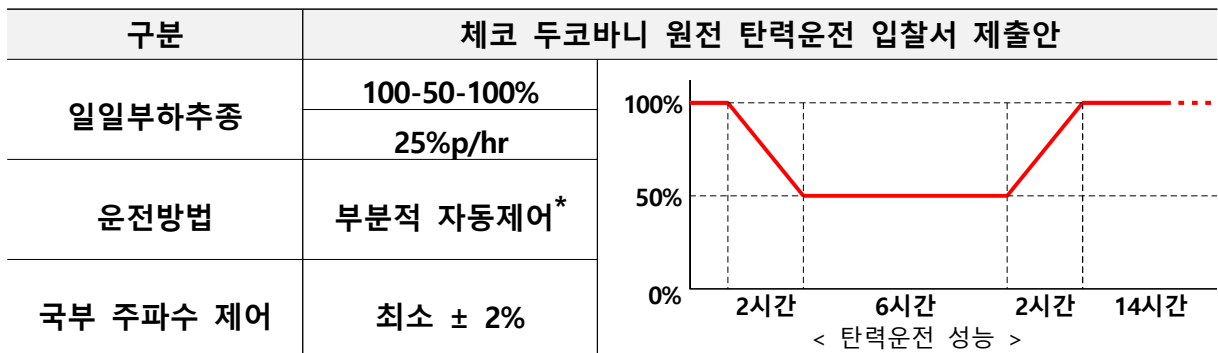
* '24년 봄철 최저 전력수요 경신 (최저 전력수요 '23년 39.5GW → '24년 37.3GW)

** '20.5월 전력거래소는 최초로 원전 출력제어를 요구하였으며, '22년까지는 명절에만, '23년부터 신재생 설비 급증으로 봄철 5회 및 명절 2회 시행, '24년에는 가을철에도 2회 시행

○ (수출경쟁력) 핵심 국정과제로 추진 중인 '원전의 수출산업화' 이행을 위해서도 원전의 탄력운전 기술개발 및 실증이 필요

- 이미 체코 등은 원전 입찰 요건에 '탄력운전'을 필수 요건으로 포함

- 체코 두코바니 원전의 탄력운전 성능을 만족시키기 위해서는 원전의 탄력운전 기술개발 및 상용화가 적기에 이루어져야 함





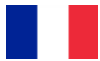





* 제어봉 : 자동운전, 봉산 농도 조절 : 수동운전

2. 산업·기술 동향

□ 해외 동향

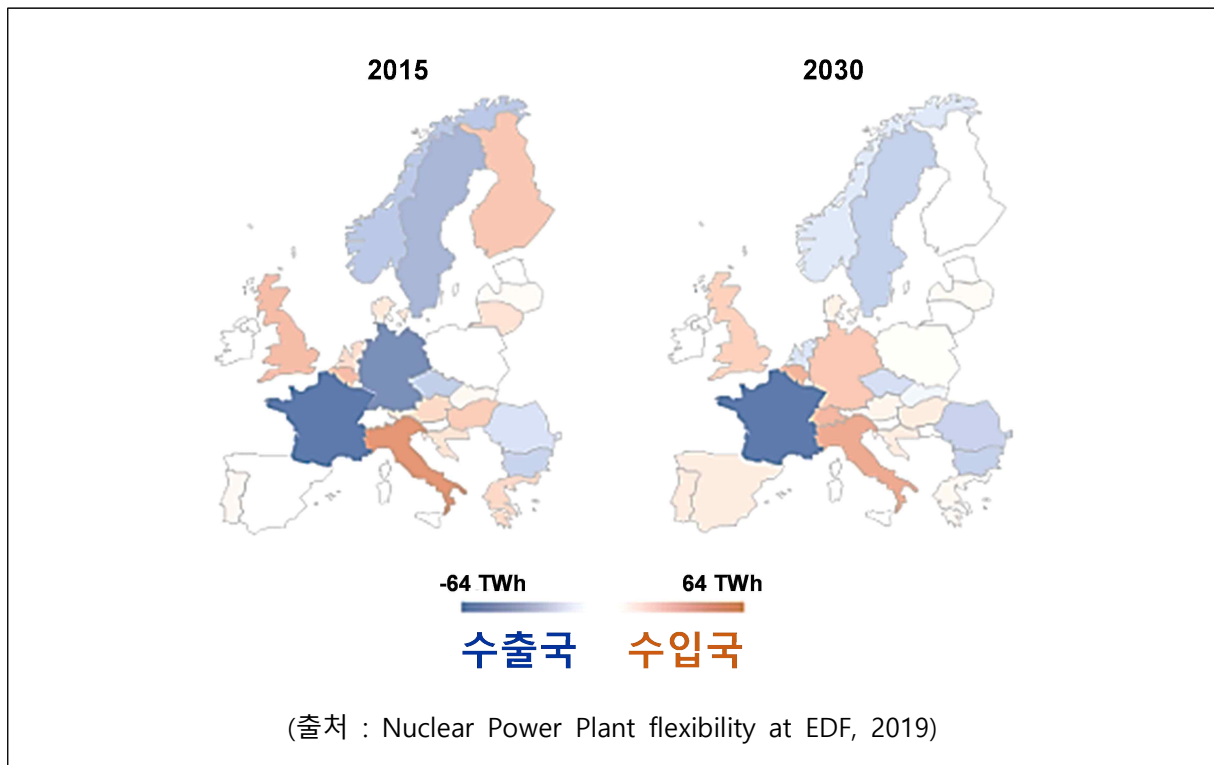
- (산업 동향) 전 세계 가동원전 415기 중 251기는 계속운전을 승인 받았고, 미국은 80년 계속운전도 승인. 체코, 폴란드 등 세계적으로 64기 신규 대형 원전 건설 추진 중 (IAEA, WNA/'24.9월 기준)

<주요 국가별 원전 확대 정책 동향>

국가	세부 내용
 미국	• 원전을 무탄소전원에 포함, 계속운전 지원금 60억불 배정
 영국	• '50년까지 최대 8기 추가건설, SMR 등 개발에 4억파운드 배정 • 총 전력생산 중 원전 비중을 현재 15% 수준에서 25% 확대
 프랑스	• '50년까지 신규 6기 건설 + 추가 8기 검토(현재 원전 비중 66%)
 폴란드	• '43년까지 6기 건설(원전 비중 약 10%)
 체코	• '40년까지 최대 4기 추가 건설 추진(원전 비중 36% → 46% → 58%)
 핀란드	• 신규 1기 가동 개시, 가동원전 2기 계속운전 추진
 일본	• 원전을 재생에너지와 함께 에너지 안보 공헌, 탈탄소 전원으로 적극 활용
 벨기에	• 원전 2기에 대한 계속운전 기한을 기존 '25년에서 '35년으로 연장

- 전 세계적으로 재생에너지 설비 및 비중이 확대되면서 원자력발전 등 기존 전력원의 탄력운전이 요구되고 있으며 신규원전 발주국가들도 탄력운전을 기본적으로 요구하고 있음
- 각국별로 에너지믹스 정책은 상이하더라도 탄소중립에서의 주요 전원인 재생에너지와 원전의 공존을 위한 탄력운전 기술개발은 필수적임
- 프랑스는 전체 전력망에서 원전의 비중이 높아 오래전부터 부하추종 운전을 하고 있었으며, 유럽의 경우 재생에너지의 보급률이 높아 신규 원전 건설 시 부하추종 성능요건 충족을 기본적으로 요구하고 있음

- 아래 그림은 유럽의 국가별 전력 수출입 전망으로 2015년 전력 수출국이던 독일이 2030년에는 전력 수입국으로 전락할 것이라는 예상을 보여주고 있음. 그 이유는 재생에너지의 비율 증가에 따른 간헐성을 감당하지 못해 전력을 수입하는 비중이 늘어날 것으로 예상되며, 반면에 원전 비중이 높고 재생에너지 비중이 낮은 프랑스는 주요 전력 수출국 지위를 지속해서 유지할 전망



[유럽의 전력 수출입 전망]

- 미국의 일부 주(State)에서는 최근 재생에너지 증가로 인해 전력 그리드의 불안정성이 심각한 문제가 되고 있으며 상용원전을 중심으로 부하추종운전을 계획하고 있음
- 체코 정부는 두코바니(Dukovany) 원전건설사업에 탄력운전을 요건화하고 있으므로 원전 수출경쟁력 확보를 위해서도 해외 사업자요건 (Utility Requirement)에 부응하는 부하추종운전 성능 및 운영 기술 확보가 시급함
- 특히, 재생에너지 보급률이 높은 해외시장에서 이런 문제가 더 빨리 발생할 것으로 예측되므로 원전수출을 통한 글로벌 탄소중립에 기여하기 위한 필수 핵심기술임

- (기술 동향) 세계적으로도 최저 50% 이하 출력의 탄력운전을 운영할 수 있는 국가는 프랑스·독일이 유일하며, 미국도 70% 수준 탄력운전만 시행 중
 - 프랑스, 벨기에 등 원자력 발전 비중이 60% 이상인 국가는 부하추종운전의 필요성을 매우 중요하게 인식하여, 1970년대부터 부하추종운전 기술을 개발하고 1980년대에 인허가 취득후 상용운전에 적용하고 있음. 프랑스의 경우 미국 웨스팅하우스가 개발한 Mode-A 기법을 이용하여 부하추종운전을 시작한 이후 Framatome사가 자체 개발한 Mode-G 기법을 도입하여 주파수제어를 포함한 부하추종운전 경험이 매우 풍부함. 또한, 이후에 Mode-X라는 진보된 제어기법을 개발하여 후속 원전에 적용하고 있음
 - 독일은 KWU 노형 개발시 자동부하추종운전 능력을 설계에 반영하였으며, 우수한 자동부하추종 운전성능을 보유한 독일의 고유원전인 KONVOI는 프랑스의 N4와 더불어 유럽형 신형원자로인 EPR의 참조 원전으로 사용됨
 - 독일 원전은 일정 출력 이상에서는 Constant Tavg Mode 운전방식을 채택하고 있는데, 이러한 운전방식은 노심출력이 변동해도 냉각재 평균 온도는 그대로 유지되어 노심내 냉각재 평균 밀도 변화가 적어 반응도 조절이 용이하고, 노심이 감당해야 하는 반응도 궤환을 온도궤환 효과로 보상하여 출력복귀 및 주파수제어 운전에 매우 유리하며, 일일 부하추종 운전 경우에도 붕소 변화량을 감소시키며, 제어봉의 움직임도 줄일 수 있어 탄력운전에 매우 효과적인 운전방식으로 판단됨
 - 프랑스와 독일의 경우, 80년대 노형 개발 시 높은 수준의 자동부하추종 운전이 가능하도록 설계하였고 충분한 경험을 보유하고 있음. 최근 WEC사도 AP1000 노심에 출력제어용 제어봉과 출력분포 제어용 제어봉을 별도로 설계하여 자동부하추종운전 능력을 확보하였음
 - 미국의 경우, 원전의 비중이 적어 주로 기저부하용으로 사용되어 부하추종운전 성능은 주요한 요소로 고려하지 않았음. (구)ABB-CE 원전은 PSCEA를 이용한 설계개념을 사용하고 있으나, 실질적인 부하추종운전을 수행하지 않고 있으며 웨스팅하우스사가 MSHIM이라는 부하추종운전 기법을 개발한 바 있으나 역시 실제 적용하지 않고, 단지 AP1000 설계에만 반영하였음

- 프랑스의 경우, 부하추종운전 관련하여 직접적인 규제요건에 의해 핵연료의 건전성 평가 기술을 보유하고 있으며, 국내와 미국의 경우와 같은 간접적인 평가 방법과는 다르게 운전조건 I과 II에서 PCI(Pellet-Cladding Interaction) 모델 및 제한치를 사용하는 직접적인 평가 방법을 사용하고 있음
- 유럽은 EUR(유럽 사용자 요건, European Utility Requirements)의 URD(Utility Requirement Document)에 따라 부하추종 및 관리능력 보유를 요구하고 있음. 그러나 국가별로 세부 요구기준은 다른 것으로 판단됨
- 미국의 일부 주에서는 최근 재생에너지 용량 증가로 인해 전력그리드의 불안정성이 심각한 문제가 되고 있어, 상용원전을 중심으로 부하추종운전을 계획하고 있으며, 미국 DOE 주도로 수소를 비롯한 에너지 저장시스템과 연계한 원자력 기술을 개발 중임
- 미국 NRC의 SRP(Standard Review Plan) 4.2에 따르면 부하추종운전과 관련하여 직접적인 규제요건은 없으나 연료봉 성능평가 항목 중 부하추종운전과 관련하여 연료봉의 1% 변형률과 소결체 용융기준을 만족하고 FPG(Fuel Preconditioning Guideline)의 운전요건을 충족하면 부하추종운전은 가능한 것으로 판단하고 있음

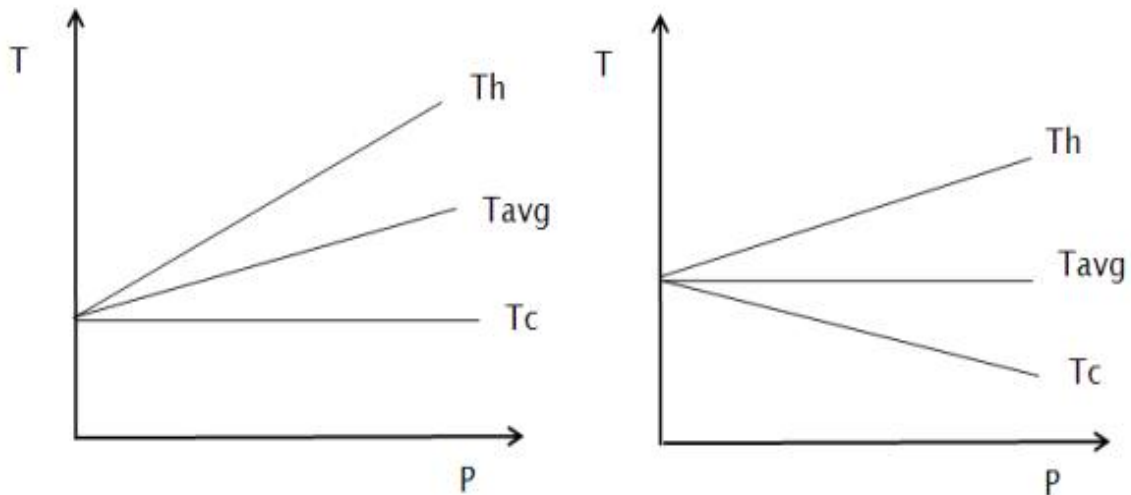
<세계 각국의 원전 부하추종운전 기법 현황>

제어 기법	설계단계	운전경험	적용 발전소	특성
Mode-K	상 세	없음	OPR1000, APR1400	<ul style="list-style-type: none"> · PSCEA(자동) · FSCEA(자동) · 보론(수동)
ABB-CE	상 세	없음	영광 3/4, 울진 3/4, System 80, System 80+	<ul style="list-style-type: none"> · PSCEA(수동) · FSCEA(수동) · 보론(수동)
Mode-G	상 세	매우 많음	프랑스 PWR (900 MWe, 1300 MWe)	<ul style="list-style-type: none"> · G-Bank(반자동) · R-Bank(자동) · 보론(수동)
Mode-X	상 세	많음	프랑스 N4 (1500 MWe)	<ul style="list-style-type: none"> · X-Bank(자동) · 보론(자동)
MSHIM	개 념	없음	기존 웨스팅하우스 발전소 및 AP1000	<ul style="list-style-type: none"> · MSHIM(자동) · 보론(수동)
KWU	상 세	많음	독일 Konvoi 발전소	<ul style="list-style-type: none"> · D-Bank(자동) · L-Bank(자동) · 보론(자동)

□ 국내 동향

- (산업 동향) 산업구조가 다양화되고 국민생활양식이 선진화됨에 따라 최대/최저 전력 수요차가 심화하고 있고, 양질의 전기공급이 요구되고 있음. 이에 대응하기 위해서는 전력망의 요구에 능동적으로 대응이 가능한 전력공급원의 증가가 필요함
 - 국내 원전은 기저부하용 전력원으로 사용하고 있어, 향후 최대/최저 전력 수요차가 더 증가할 경우에는 전력망 운용에 어려움이 예상되며, 원전의 비중이 커질수록 더욱 심화될 것으로 예측됨
 - 국내 원전 운영사의 경우에도 APR1400 등 가동원전의 탄력운전을 계획하고 있으며, 탄력운전 관련 기술을 확보하여 수출노형의 기술경쟁력 향상 및 신재생에너지와의 연계 활성화를 도모하고 있음
 - 원전의 부하추종운전이 효율적으로 이루어지면 원전 운전 유연성을 증가시켜 양질의 전력 공급에 기여할 수 있을 것으로 예상되며, 원전의 부하추종운전은 타 전력공급원과의 경쟁을 고려할 때, 전력공급 능력의 유연성 확보 차원에서도 기술 확보가 필요함
- (기술 동향) 국내 OPR1000 및 APR1400 노형의 경우, 제한적인 부하추종운전이 가능하도록 설계되었으나, 그동안 실질적인 적용 필요성이 적어 기저부하용으로만 운영해왔으며, 특수 경부하 기간중에 제한된 범위에서 계획 출력감발운전(100-80-100%)을 부분적으로 시행하였으나 반복적이고 상시적인 일일부하추종에 대한 운전 경험은 부재함
 - 2000년대 초반 한국원자력연구원은 Mode-G와 Mode-K를 개선한 전력연구원의 Mode-P의 부하추종운전기법을 APR1400을 대상으로 개발하여, 1차원 노심모델 기반의 부하추종운전에 대한 계통 수용 가능성 수준의 성능평가를 수행하였으나 이후 활용되지는 않았음
 - 정부지원으로 수행한 대형원전인 APR+개발 단계('08~'12)에서는 자동 부하추종운전을 위한 노심의 안전성 및 핵연료 건전성 평가기술과 계통의 성능평가, 출력 자동제어방법론 등 핵심요소기술이 개발되었음

- 국내 원전의 경우는 Sliding Tavg Mode에 의한 방식으로 운전하도록 설계됨. 이러한 운전방식은 2차측 증기건도(steam quality) 유지와 압력 유지 측면에서 효과적이며, 원자력발전이 기저부하만을 감당할 때 매우 효율적이고 경제적인 방식임. 그러나 탄력운전 적용시 제어봉의 움직임이 증가하고, CVCS를 통한 붕산 농도 조절 빈도가 증가한다는 단점을 가지므로, 강화된 탄력운전 성능요건을 요구하는 수출형 해외 원전에는 설계 개선이 필요함



[Sliding Tavg Control 및 Constant Tavg Control 운전 형태]

- 2010년대 후반부터는 APR1400의 수출경쟁력 제고를 위해 탄력운전을 위한 노심설계, 안전해석 및 계통설계와 평가기술 개발을 수행하여 본격적인 탄력운전에 대비한 설계 기반기술을 구축하고 있는 단계임
- 그러나 실질적이고 상시적인 탄력운전의 인허가 획득 및 운영을 위해서는 노심 및 핵연료의 안전성을 담보할 수 있는 평가·감시 기술과 운전 경험 부족을 극복할 수 있는 노심설계방법, 운전지원 및 운영기술의 고도화가 절실함

3. 특허 동향

□ 해외 동향

○ 탄력운전용 노심설계 방법론 및 안전성평가 기술 개발 기술 동향

- 탄력운전용 노심설계 방법론 및 안전성평가 기술과 관련하여 경수로의 우라늄 농축도를 높였을 때의 잉여 반응도를 저감할 수 있는 노심 설계 기술, 원자로의 노심의 연료 사이클에 이용될 노심 설계 기술, 노심 설계의 결정으로 적용 가능한 한계 세트를 정의하고 만족되어야 할 목표의 한계에 근거하여 기준 노심 설계하는 기술, 한계 세트가 정의 되어 정의된 한계에 근거하여 기준 노심 디자인이 생성되는 방법에 관한 기술 등을 출원하고 있음
- 관련기업으로는 도시바(일본), 도시바 에너지시스템즈(일본), 글로벌 뉴클리어 퓨얼-어메리카스, 엘엘씨(미국) 등이 있음
- 해당 특허들은 탄력운전을 고려한 노심설계에 참조 할 수 있으나 APR형 노심설계 기술과는 직접적인 연관성이 없음

< 해외 노심설계 방법론 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호 (일자)	특허명	특징
도시바 도시바 에너지시스템즈	JP2017-217136 (2017.11.10.)	경수로용 연료 집합체, 경수로 노심 설계 방법 및 경수로용 연료 집합체 설계 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 가연성 독물은 농도나 개수를 결정하기 위해 복잡한 계산을 다수 실행할 필요가 있어, 지금까지 유효한 설계가 이루어지고 있지 않음. • 경수로에 있어서, 우라늄 농축도를 높였을 때의 잉여 반응도를 저감
글로벌 뉴클리어 퓨얼-어메리카스, 엘엘씨	US10/325,831 (2002.12.23.)	원자로 노심 설계를 결정하는 방법 및 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로의 노심의 연료 사이클에 이용될 노심 설계를 결정
글로벌 뉴클리어 퓨얼-어메리카스, 엘엘씨	US11/024974 (2004.12.30.)	원자로 노심의 설계 방법 및 그 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로의 노심내에서 연료 사이클로 사용되게 되는 노심 설계를 결정하는 방법 및 장치 • 노심 설계의 결정으로 적용 가능한 한계 세트를 정의하고, 한계 세트는 노심 에너지 사이클에 걸쳐서 만족되어야 할 목표 고온 과잉 반응도 제약과, 사이클에 대해서 설정되는 원하는 제어 블레이드를 정의하며, 정의된 한계에 근거하여 기준 노심 설계를 생성
글로벌 뉴클리어 퓨얼-어메리카스, 엘엘씨	US10/325831 (2002.12.22.)	원자로의 노심 디자인을 판정하기 위한 방법 및 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 노심 디자인을 판정하는 것에 적용 가능한 한계 세트가 정의되어 정의된 한계에 근거하여 기준 노심 디자인이 생성되는 방법 • 기준 노심 디자인은 복수의 연료 위치에 배치된 현재미조사 연료 번들의 초기장하패턴을 포함

○ 핵연료 건전성 평가체계 고도화 및 제어봉 운전제한치 완화 기술동향

- 핵연료 건전성 평가체계 고도화 및 제어봉 운전제한치 완화 기술과 관련하여 연료봉 제한량 산출 방법을 제공하는 기술, 원자력 플랜트의 초기 설비를 동기화할 수 있는 제어봉 조작 감시 장치를 출원하고 있음
- 관련기업으로는 GLOBAL NUCLEAR FUEL AMERICAS LLC, HITACHI GE NUCLEAR ENERGY LTD 등이 있음
- 해당 특허들은 탄력운전을 고려한 핵연료봉 평가 및 제어봉 운전제한치 완화에 참조 할 수 있으나 APR형 핵연료 및 제어봉 관련 기술과는 직접적인 연관성이 없음

< 해외 핵연료 건전성 평가체계 고도화 및 제어봉 운전제한치 완화 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호 (일자)	특허명	특 징
GLOBAL NUCLEAR FUEL AMERICAS LLC	JP2005-369831 (2005.12.22)	핵연료봉의 평가방법	<ul style="list-style-type: none"> • 연료봉 제한량 산출 방법을 제공 • 개별 연료 집합체에서의 연료봉들의 평균 노출 및 평균 출력(kW/ft)을 계산함으로써 제한들을 획득하고 계산된 연료봉들의 평균 노출 및 평균 출력(kW/ft)을 이용하여 맵을 개발
HITACHI GE NUCLEAR ENERGY LTD	JP2022-036362 (2022.03.09)	제어봉 조작 감시 장치 및 제어봉 조작 감시 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력 플랜트의 초기 설비를 동기화할 수 있는 제어봉 조작 감시 장치 • 플랜트의 운전시에 전동 구동에 따라 제어봉을 삽입 혹은 뽑아 내는 제어봉 조작 감시 장치

○ 부분강제어봉 개발 및 성능 검증 제작 기술 동향

- 부분강제어봉 개발 및 성능 검증 기술과 관련하여, 가압수형 핵 원자로를 위한 제어봉, 1668℃까지 안정적으로 유지되어 설계 기준 사고 조건을 넘어 초과하고 사고 공차 핵연료 조건을 충족시킬 원자로 제어봉을 위한 재료로 구성된 제어봉, 제어봉 내에서 중성자 흡수재의 조사로 야기된 스웰링으로 인해 제어봉 클래딩 직경 확장의 극복할 수 있는 제어봉 등에 관한 기술을 출원하고 있음
- 관련기업으로는 아레바 엔피 게엠베하(독일), 웨스팅하우스 일렉트릭 컴퍼니 엘엘씨(미국)가 있음

- 해당 특허들은 전강제어봉에 관련된 것들로 AIC 부분강제어봉 개발과는 직접적인 연관성이 없음

< 해외 부분강제어봉 개발 및 성증 검증 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호 (일자)	특허명	특징
아레마 엔피 계엄베하	PCT/EP2006/007 225 (2006.07.22.)	가압수형 핵 원자로를 위한 제어봉	<ul style="list-style-type: none"> • 가압수형 핵 원자로를 위한 제어봉 • 흡수봉의 스웰링에 의해 유발되는 피복관 스트레칭의 정도가 줄어든 가압수형 핵 원자로를 위한 제어봉
웨스팅하우스 일렉트릭 컴퍼니 엘엘씨	PCT/US2018/045 695 (2018.08.08.)	경수로를 위한 고온 제어봉	<ul style="list-style-type: none"> • 적어도 1668°C 까지 안정적으로 유지되어 설계 기준 사고 조건을 넘어 초과하고 사고 공차 핵연료 조건을 충족시킬 원자로 제어봉을 위한 재료 • 제어봉은 1500°C 초과 용점을 갖는 클래딩 재료, 및 1500°C 초과 용점을 갖는 중성자 흡수 재료를 포함하는 핵연료 집합체를 위한 고온 제어봉
웨스팅하우스 일렉트릭 컴퍼니 엘엘씨	US11/840,424 (2007.08.17.)	원자로용 제어봉	<ul style="list-style-type: none"> • 제어봉이 완전히 삽입되는 경우, 대시 포트에 충돌하는 제어봉 클래딩의 영역의 제어봉 내에서 중성자 흡수재의 조사로 야기된 스웰링으로 인해, 제어봉 클래딩 직경 확장의 극복 • 제어봉이 완전히 삽입되는 경우, 대시 포트 영역의 제어봉 침단 열의 감소 • 레이 제어봉이 천천히 이동되는 경우, 노심에 일어나는 반응에서 고속 변화의 감소

○ 탄력운전을 위한 제어 감시시스템 및 검증 기술 동향

- 탄력운전을 위한 제어 감시시스템 및 검증 기술과 관련하여, 원자력 발전소의 부하 추종 운전시에서 플랜트 설비 기기의 부하 이력의 감시에 근거한 부하 추종 운전 제어 기술, 전력 레귤레이터는 목표 값 및 리액터 출력의 변화에 기초하여 리액터 출력을 조정하는 기술, 원자력발전소 안전계통 제어 감시 시스템 등을 출원하고 있음
- 관련기업으로는 NIPPON ATOM IND GROUP CO LTD, TOSHIBA, MITSUBISHI HEAVY IND LTD 등이 있음
- 해당 특허들 중 NIPPON ATOM IND GROUP CO LTD의 특허는 탄력운전 제어와 직접적인 연관성이 있으며 다른 특허들은 탄력운전을 위한 제어 감시시스템 개발에 활용될 수 있으나 직접적인 연관성은 없음

< 해외 탄력운전을 위한 제어 감시시스템 및 검증 기술 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호 (일자)	특허명	특 징
NIPPON ATOM IND GROUP CO LTD	JP1987-287379 (1987.11.16.)	원자력 발전소 부하 추종 운전 제어장치	<ul style="list-style-type: none"> 원자력 발전소의 부하 추종 운전시에서 플랜트 설비 기기의 부하 이력의 감시에 근거한 부하 추종 운전 제어장치 부하 추종 운전한 운용에 의해서 부가된 원자력 발전소 설비기기의 부하 상황과 그 누적 이력을, 컴퓨터를 이용해 자동적으로 산출·기록함과 동시에, 기기의 허용 부하 한계를 감시하고, 감시 결과로부터, 부하 추종 운전한 제어 동작을 자동적으로 중지 혹은 제한하는 등의 제어
TOSHIBA	PCT/JP2013/067 815 (2013.06.28)	원자로 전력 조절 장치	<ul style="list-style-type: none"> 전력 레귤레이터는 목표 값 및 리액터 출력의 변화에 기초하여 리액터 출력을 조정 열 평형에 기초하여 반응기 출력을 계산하는 장치, 반응기 출력에 매칭되는 신호를 보정하는 장치, 보정된 신호에 기초하여 반응기 출력을 제어하는 장치를 포함
MITSUBISHI HEAVY IND LTD	JP2019-144021 (2019.08.05.)	원자력 플랜트의 안전계 제어 감시 시스템	<ul style="list-style-type: none"> 작업자의 감시 부담을 줄일 수 있는 원자력 발전소 안전계통 제어 감시 시스템을 제공 이상 발생시 사용되며 동일한 기능을 갖는 복수의 안전장치를 포함

○ 탄력운전에 따른 계통설계, 안전해석 및 건전성 영향 평가 기술 동향

- 탄력운전에 따른 계통설계, 안전해석 및 건전성 영향 평가 기술과 관련하여, 임의의 플랜트 부하 운전 상태에서 얻어진 프로세스 데이터로부터 연산되는 플랜트로서의 성능 데이터의 양부를 용이하게 판정하는 기술, 원자력 발전소의 감시기술, 외부 부하의 작용이 국소적이어도 대응 가능한 원자력 플랜트의 건전성 평가기술, 운전플랜트 데이터를 사용하여 오프라인으로 원자로 운전을 시뮬레이션하는 기술 등을 출원하고 있음
- 관련기업으로는 TOSHIBA, FRAMATOME, TOSHIBA ENERGY SYSTEM&SOLUTION 등이 있음
- 해당 특허들은 탄력운전에 따른 계통설계, 안전해석 및 건전성 영향 평가에 참조 할 수 있으나 APR형 원전 계통과는 직접적인 연관성이 없음

< 해외 탄력운전에 따른 계통설계, 안전해석 및 건전성 영향 평가 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호 (일자)	특허명	특징
TOSHIBA CORP	JP1989-279266 (1989.10.26.)	플랜트 성능 감시 장치	<ul style="list-style-type: none"> 임의의 플랜트 부하 운전 상태에서 얻어진 프로세스 데이터로부터 연산되는 플랜트로서의 성능 데이터의 양부를 용이하게 판정할 수 있도록함 신뢰도가 높다고 판정된 플랜트 성능 데이터를 용이하게 선택 플랜트의 이력 감시 정도를 높인 플랜트 성능 감시 장치
FRAMATOME	PCT/EP2022/074 781 (2022.09.07.)	불균형의 검출과 특성 평가에 따라 원자력 발전소를 감시하는 방법 및 시스템	<ul style="list-style-type: none"> 원자력 발전소의 감시 방법 감시 방법은 복수의 증기 발생기의 각종기 발생기에 대해서 증기 발생기의 동작의 대표 파라미터 세트의 파라미터의 불균형을 검출 증기 발생기의 파라미터의 측정치와 증기 발생기의 파라미터의 평균치와의 편차를 결정
TOSHIBA/ TOSHIBA ENERGY SYSTEM&SOLUTION CORP	JP2019131089 (2019.07.16.)	원자력 플랜트의 건전성 평가 장치, 방법 및 프로그램	<ul style="list-style-type: none"> 외부 부하의 작용이 국소적이어도 대응 가능한 원자력 플랜트의 건전성 평가 기술

○ 노심출력분포 계산 및 운전지원 통합시스템 개발 기술 동향

- 노심출력분포 계산 및 운전지원 통합시스템 개발 기술과 관련하여, 플랜트 운용의 고도화에 대응한 노심 계산 기술, 계산기 부하가 적고 정확한 노심 해석이 가능한 3 차원 노심 해석 방법, 단시간에 효율적으로 노심 계산을 실행하는 기술 등을 출원하고 있음
- 관련기업으로는 NUCLEAR FUEL IND LTD, SHIKOKU ELECTRIC POWER CO INC, MITSUBISHI HEAVY IND LTD 등이 있음
- 해당 특허들은 탄력운전을 고려한 노심출력분포 계산에 참조 할 수 있으나 APR형 노심운전 기술과는 직접적인 연관성이 없음

< 해외 노심출력분포 계산 및 운전지원 통합시스템 개발 기술 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호 (일자)	특허명	특징
NUCLEAR FUEL IND LTD	JP2023-044629 (2023.03.20.)	노심 계산방법, 노심 계산 프로그램 및 노심 계산 장치	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 다양화나 플랜트 운용의 고도화에 대응한 노심 계산

SHIKOKU ELECTRIC POWER CO INC	JP2006-224921 (2006.08.22.)	3 차원 노심 해석 방법 및 3 차원 노심 해석 프로그램	<ul style="list-style-type: none"> 계산기의 부하가 적은 데다가 정확한 노심 해석을 행하는 것이 가능한 3 차원 노심 해석 방법 복수의 연료봉을 구비한 노심이 복수의 3 차원 형상의 연료봉 모델로 분할된 체계에서, 연료봉 모델 내의 중성자의 거동을 해석하기 위한 3 차원 노심 해석 방법
MITSUBISHI HEAVY IND LTD	JP2022-092154 (2022.06.07.)	노심 계산방법, 노심 계산 장치 및 프로그램	<ul style="list-style-type: none"> 단시간에 효율적으로 노심 계산을 실행 열수 힘모델 및 간단하고 쉬운 공명 계산 모델에 근거하여 간단하고 쉬운 핵열반복 계산을 실시하고, 출력 분포를 산출

○ 탄력운전 대응 실증시험 운영절차서 기술 동향

- 탄력운전 대응 실증시험 운영절차서 기술과 관련하여, 플랜트 데이터로부터 이상의 원인-결과를 묶는 도표를 작성하고 이 도표에 의해서 이상의 현상을 나타내는 경보의 중요도에 따른 처치를 실시하는 기술, 플랜트 종합 엔지니어링 지원 시스템 등을 출원하고 있음
- 관련기업으로는 NIPPON ATOM IND, TOSHIBA, TOSHIBA SYST TECHNOL CORP 등이 있음
- 해당 특허들은 탄력운전 대응 실증시험 운영절차서 개발에 참조 할 수 있으나 APR형 운영기술과는 직접적인 연관성이 없음

< 해외 탄력운전 대응 실증시험 운영절차서 기술 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호 (일자)	특허명	특 징
NIPPON ATOM IND GROUP CO LTD	JP1985-066687 (1985.04.01.)	플랜트의 이상시 처치 결정 방법	<ul style="list-style-type: none"> 플랜트 데이터로부터 이상의 원인-결과를 묶는 도표를 작성하고, 이 도표에 의해서 이상의 현상을 나타내는 경보의 중요도가 처치를 실시하는 것에 의해서 플랜트를 정상 상태로 회복 측정된 플랜트 데이터에 의해서 경보를 예측하고, 경보 기능이 정상적으로 작동하고 있는인가 반대인지를 검사하도록 해 이상의 원인과 이상의 현상과 이상의 장래 상태를 추정하고, 대응하는 처리를 결정
TOSHIBA/ TOSHIBA SYST TECHNOL CORP	JP2006-263923 (2006.09.28.)	플랜트 종합 엔지니어링 지원 시스템	<ul style="list-style-type: none"> 각 부분의 엔지니어링 데이터베이스 사이의 데이터 제휴를 실시할 수 있어 발전소의 건설한 효율 향상을 도면짓이 생기는 플랜트 종합 엔지니어링 지원 시스템을 제공

□ 국내 동향

○ 탄력운전용 노심설계 방법론 및 안전성평가 기술 개발 기술 동향

- 탄력운전용 노심설계 방법론 및 안전성평가 기술 개발과 관련하여, 원자력 발전소 노심설계를 위한 설계 결과물의 검증을 자동으로 수행하는 기술, 노심핵설계 전산코드로는 불가능했던 크러드 및 붕소 침적 현상을 해석 기술 등이 출원되고 있음
- 관련 주요 기관은 한국수력원자력 주식회사, 한전원자력연료 주식회사 등이 있음
- 해당 특허들은 탄력운전을 고려한 노심설계에 활용될 수 있으나 직접적인 연관성은 없음

< 국내 노심설계 방법론 및 안전성평가 기술 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원 번호(일자)	특허명	특 징
한전원자력 연료 주식회사	10-2016-0106843 (2016.08.23.)	원자력 발전소의 노심설계 자동 검증 시스템	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력 발전소 노심설계를 위한 설계 결과물의 검증을 자동으로 수행하는 시스템 및 방법
한국수력 원자력 주식회사	10-2022-0144951 (2022.11.03.)	크러드 및 붕소 침적 현상 예측평가 가능한 노심핵설계 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 노심핵설계 전산코드로는 불가능했던 크러드 및 붕소 침적 현상을 해석 가능 • 노심핵설계코드, 노심 부수로 열수력 해석 전산코드, 수화학 해석 전산코드를 연계하는 해석 방법 대비 계산시간을 효율적으로 감소

○ 핵연료 건전성 평가체계 고도화 및 제어봉 운전제한치 완화 기술동향

- 핵연료 건전성 평가체계 고도화 및 제어봉 운전제한치 완화 기술과 관련하여, 가압 경수형 원전의 열유동 환경과 작동 유체의 수화학 조건을 모사하는 기술, 얇은 핵연료 피복관에 가해지는 변형 량을 미세하게 제어하는 기술, 사고 조건 핵연료 붕다발 실험 데이터 취득 기술, 원자로 내의 피복관의 표면에 발생하는 미포화비등 현상을 감지하는 기술, 핵연료 피복관의 변형량을 측정하는 기술 등이 출원되고 있음
- 관련 주요 기관은 울산과학기술원, 한국원자력연구원, 한전원자력연료 주식회사 등이 있음

- 해당 특허들은 탄력운전을 고려한 핵연료봉 평가 및 제어봉 운전제한치 완화에 활용될 수 있으나 직접적인 연관성은 없음

< 국내 핵연료 건전성 평가체계 고도화 및 제어봉 운전제한치 완화 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원 번호(일자)	특허명	특징
울산과학기술원	10-2023-0050176 (2023.04.17.)	가압 경수형 원자력 발전소 핵연료 피복관 성능 평가 실험장치	<ul style="list-style-type: none"> • 가압 경수형 원전의 열유동 환경과 작동 유체의 수화학 조건을 모사 • 열전달 성능 평가와 동시에 피복관의 부식 저항성 또는 크러드 침적과 같은 화학적 반응을 모사 • 가압 경수형 원전의 고온 작동 환경에서 변형 및 파손이 최소화될 수 있는 시편을 제공
한국원자력연구원/ 한국수력원자력 주식회사	10-2011-0042125 (2011.05.03.)	핵연료 소결체-피복관 상호작용 측정 맨드렐 셀 및 이를 구비한 시스템	<ul style="list-style-type: none"> • 핀 타입 맨드렐을 적용함으로써 두께가 0.57mm의 매우 얇은 핵연료 피복관에 가해지는 변형량을 미세하게 제어 • 핵연료 소결체 펠릿이 모래시계모양으로 팽윤하는 모형을 정확히 모사 • 피복관의 다양한 변형속도제어와 실시간측정 및 요오드의 농도조절 등 원자로 노 내에서 수행되는 압력상승 시험 시 PCI 영향인자들을 노외에서 정확히 모사
한국원자력연구원	10-2021-0129836 (2021.09.30.)	핵연료 피복관 다차원 거동 실험 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 다수봉 환경의 핵연료 피복관의 실시간 다차원 변형 및 온도 데이터 측정이 가능하여, 사고 조건 핵연료 봉다발 실험 데이터 취득이 가능 • 다양한 치수 및 형상의 히터 적용이 가능하여, 16×16 피치(pitch) 뿐만 아니라, 17×17 피치 등 타 규격에도 활용
한국원자력연구원	10-2016-0125655 (2016.09.29.)	핵연료 피복관 표면의 미포화비등 현상 탐지 방법 및 핵연료 피복관 표면의 미포화비등 현상 탐지 장치	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 내의 피복관의 표면에 발생하는 미포화비등 현상을 감지 • 핵연료 피복관 표면의 크러드 부착을 억제하여 이 크러드 내의 과도한 보론 침적에 의한 축방향 출력불균일을 방지 • 핵연료 피복관의 건전성 저하를 방지
한국원자력연구원	10-2012-0064694 (2012.06.18.)	핵연료 피복관의 변형량 측정장치	<ul style="list-style-type: none"> • 안전하게 핵연료 피복관의 변형량을 측정 • 보호관을 구비하여 측정 도중 핵연료 피복관의 크립 파단시 피복관 내측면에 고착되어 있던 방사성 입자들이 비산하여 몸체 및 주변 장비가 방사성 물질로부터 오염되는 것을 미연에 방지

○ 부분강제어봉 개발 및 성능 검증 기술 동향

- 부분강제어봉 개발 및 성능 검증 기술과 관련하여 원자로 제어봉의 봉단 마개 용접부, 흡수체부, 그리고 공관부의 결합을 동시에 검출하는 기술, 가압 경수로의 제어봉용 중성자 흡수체로 란타나이드계 희토류

산화물 화합물 요소를 적용하는 기술, 필요에 따라 중성자 흡수능의 분포를 다양하게 구성할 수 있는 위치 가변형 중성자 흡수장치가 있는 제어봉, 제어봉을 교체하지 않고 회전하여 사용함으로써 제어봉과 핵연료 사이에 배치된 구조물의 손상을 최소화하는 기술 등이 출원되고 있음

- 관련 주요 기관은 한국수력원자력 주식회사, 한국원자력연구원 등이 있음
- 해당 특허들은 전강제어봉에 관련된 것들로 AIC 부분강제어봉 개발과는 직접적인 연관성이 없음

< 국내 부분강제어봉 개발 및 성증 검증 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원 번호(일자)	특허명	특 징
한국수력 원자력 주식회사	10-2021-0076555 (2021.06.14.)	원자로 제어봉의 검사 시스템	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 제어봉의 검사 시간 및 검사 비용을 감소 • 원자로 제어봉의 봉단 마개 용접부, 흡수체부, 그리고 공관부의 결함을 동시에 검출할 수 있으므로, 원자로 제어봉의 각 영역마다 별도의 탐촉자를 이용하지 않아도 됨
한국 원자력 연구원	10-2022-0051584 (2022.04.26.)	원자로용 중성자 흡수체 및 중성자 흡수 제어봉	<ul style="list-style-type: none"> • 가압 경수로의 제어봉용 중성자 흡수체로 란타나이드계 희토류 산화물 화합물 요소를 적용하여, 제어봉 집합체의 수명을 연장하고 사고시 안정성을 향상 • 제어봉 내 중 방향 축을 따라 적층 배열되는 중성자 흡수체 요소들의 성분, 밀도, 형상 등을 조절하여, 중성자 제어능을 유지하면서 하중을 조절하여, APR 원자로용 제어봉에 용이하게 적용
한국수력 원자력 주식회사	10-2023-0061419 (2023.05.12.)	위치 가변형 중성자 흡수장치가 있는 제어봉, 및 그 집합체	<ul style="list-style-type: none"> • 제어봉 내부 중성자 흡수체의 분포를 일부에만 두어 축 방향 출력분포를 용이하게 함 • 흡수체가 노심의 특성에 따라 제어봉 내부의 상/중/하단 등에 집중적으로 위치될 수 있음 • 필요에 따라 중성자 흡수능의 분포를 다양하게 구성할 수 있는 위치 가변형 중성자 흡수장치
한국 원자력 연구원	10-2012-0151214 (2012.12.21.)	회전교환이 가능한 원자로 제어봉구조	<ul style="list-style-type: none"> • 제어봉을 교체하지 않고 회전하여 사용함으로써 제어봉과 핵연료 사이에 배치된 구조물의 손상을 최소화 • 핵연료봉과 제어봉 사이가 견고하게 지지될 수 있는 구조물을 제공

○ 탄력운전을 위한 제어 감시시스템 및 검증 기술 동향

- 탄력운전을 위한 제어 감시시스템 및 검증 기술과 관련하여, 원자로 정지를 방지하도록 한 노심보호연산기 계통의 가변과출력 정지 제어하는 기술, 운전대상 원자로를 평가하여 부하추종운전을 수행할 추종운전 원자로와 부하추종운전을 수행하지 않을 비추종운전 원자로를 결정 하는 기술,

원자력 발전소의 배열 조건 및 리스크감시 모델에 종속되지 않음으로써, 발전소의 구분 없이 모든 발전소에 대한 리스크를 평가하는 기술, 원전 운전원에게 필요한 감시기 및 제어기의 정보를 제공하는 기술, 출력변화 수단의 출력변화전 예측결과를 제공하여 운전에 대한 신뢰성과 정확한 제어가 가능하도록 하는 원전 탄력운전 기술, 인공지능을 이용하여 원자력 발전소를 부하추종운전 기술 등이 출원되고 있음

- 관련 주요 기관은 두산중공업 주식회사, 한국수력원자력 주식회사, 한국 원자력연구원 등이 있음
- 해당 특허들은 대형원전의 탄력운전 제어와 직접적인 연관성이 있거나 탄력운전을 위한 제어 감시시스템 개발에 활용될 수 있음

< 국내 탄력운전을 위한 제어 감시시스템 및 검증 기술 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호(일자)	특허명	특징
두산중공업 주식회사	10-2008-0026577 (2022.03.04.)	노심보호연산기 계통의 가변 과출력 정지 제어 방법	<ul style="list-style-type: none"> 출력 급감발계통 작동 시에 제어봉 그림자계수를 계산하고, 제어봉 그림자계수(RSF)가 반영된 중성자속 출력을 계산하여 가변 과출력 정지 설정치를 결정 원자로 정지를 방지하도록 한 노심보호연산기 계통의 가변과 출력 정지 제어 방법
한국수력 원자력 주식회사	10-2022-0014836 (2022.02.04.)	복수의 소형모듈형 원자로를 포함하는 원자력발전소의 운전방법	<ul style="list-style-type: none"> 소형모듈형 원자로를 1차 평가하여 정지대상 원자로와 운전대상 원자로를결정 운전대상 원자로를 2차 평가하여 부하추종운전을 수행할 추종운전 원자로와 부하추종운전을 수행하지 않을 비추종운전 원자로를 결정
한국수력 원자력 주식회사	10-2011-0069350 (2011.07.13.)	원자력 발전소 출력운전 중 범용 리스크감시 시스템 및 그 방법	<ul style="list-style-type: none"> 원자력 발전소의 배열 조건 및 리스크감시 모델에 종속되지 않음으로써, 발전소의 구분 없이 모든 발전소에 대한 리스크를 평가
한국원자력 연구원	10-2019-0101917 (2019.08.20.)	원자력 발전소의 운전 제어 장치 및 이의 인터페이스 화면 표시 방법	<ul style="list-style-type: none"> 탐색 빈도 및 제어 빈도가 높은 감시기 및 제어기의 정보를 제공 감시기 및 제어기의 정보 표시가 정확하고 적절하게 이루어질 수 있고, 운전원에게 필요한 감시기 및 제어기의 정보를 제공
한국수력 원자력 주식회사	10-2021-0011114 (2021.01.27.)	원자력발전소 탄력운전방법 및 시스템	<ul style="list-style-type: none"> 원자력발전소 탄력운전방법 출력변화수단의 출력변화전 예측결과를 제공하여 운전에 대한 신뢰성과 정확한 제어(예: 봉노농도 및 제어봉의 택일적 또는 복합적 제어 등)를 할 수 있음
한국수력 원자력 주식회사	10-2022-0026644 (2022.03.02.)	인공지능을 이용하여 원자력발전소를 부하추종운전하는 방법	<ul style="list-style-type: none"> 인공지능을 이용하여 원자력발전소를 부하추종운전하는 방법 부하추종운전하는 단계에서는, 축방향출력편차에 대한 운전제한조건을 만족시키며, 운전제한조건을 만족하지 않을 경우에는 원자력발전소를 정지시키도록 운전할 수 있음

○ 탄력운전에 따른 계통설계, 안전해석 및 건전성 영향 평가 기술 동향

- 탄력운전에 따른 계통설계, 안전해석 및 건전성 영향 평가 기술과 관련하여, 풀형 납냉각 피동형 소형모듈화 원전 목업(mockup) 설계 제공 기술, 열수력 안전해석코드를 이용해서 단일한 코드체계로 원자로 노심을 평가하는 기술, 습증기의 습분 함량을 측정하지 않고도 정확한 증기 엔탈피를 계산하여 고압 터빈의 효율을 계산하는 기술, 원자력 발전소에 광역상실의 사고가 발생한 경우 노심의 손상 여부를 평가하는 기술, 원자력 발전소의 노심설계 시에 설계 결과물을 신속 정확하게 자동검증하는 기술, 원자력 발전소에서의 노심 손상을 초래하는 사건을 통해 분석하고자 하는 대상 구역의 수에 상관없이 한 번에 정량화를 수행하는 기술, 중수로 원전의 천이노심의 안전해석 방법 등이 출원되고 있음
- 관련 주요 기관은 한국전력공사, 한국수력원자력 주식회사가, 한전원자력연료 주식회사 등이 있음
- 해당 특허들은 탄력운전에 따른 계통설계, 안전해석 및 건전성 영향 평가에 참조 할 수 있으나 APR형 원전의 탄력운전을 위한 기술개발과는 직접적인 연관성이 없음

< 국내 탄력운전에 따른 계통설계, 안전해석 및 건전성 영향 평가 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호 (일자)	특허명	특징
한국전력공사	10-2009-0102323 (2009.10.27.)	열수력 안전해석코드를 이용한 원자로 노심 평가방법	<ul style="list-style-type: none"> • 열수력 안전해석코드 체계에 적합하도록 핵증기공급 계통, 노심의 고온수로, 노심의 고온점을 모델링 • 열수력 안전해석코드를 이용해서 단일한 코드체계로 원자로 노심을 평가
한국수력원자력 주식회사	10-2013-0077809 (2013.07.03.)	원자력 발전소 고압 터빈 효율 측정 시스템 및 그 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 습증기의 습분 함량을 측정하지 않고도 정확한 증기 엔탈피를 계산하여 고압 터빈의 효율을 계산 • 고압 터빈의 효율을 계산함에 있어, 측정 불가능한 잉여 증기유량에 대한 영향력을 고려하여 더욱 정확한 효율을 계산
한국수력원자력 주식회사	10-2014-0090492 (2014.07.17.)	원자력 발전소의 광역상실 사고 시 노심 손상 평가 장치 및 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력 발전소에 광역상실의 사고가 발생한 경우, 노심의 손상 여부를 평가 • 원자력 발전소에 광역상실의 사고가 발생한 경우, 노심 손상을 방지할 수 있는 대응 전략을 수립할 수 있도록 판단의 근거를 제공

한국원자력 연구원/ 한국수력 원자력 주식회사	10-2007- 0028638 (2007.03.23.)	원자력 발전소의 외부 사건에 의한 노심 손상 빈도를 평가 정량화하는 방법	<ul style="list-style-type: none"> 원자력 발전소에서의 노심 손상을 초래하는 사건을 통해 분석하고자 하는 대상 구역의 수에 상관없이 한번에 정량화를 수행 정량화를 위해 입력된 자료의 수정 및 검토가 용이하여 오류를 줄일 수 있음
--------------------------------------	--------------------------------------	---	--

○ 노심출력분포 계산 및 운전지원 통합시스템 개발 기술 동향

- 노심출력분포 계산 및 운전지원 통합시스템 개발 기술과 관련하여, 실시간 전노심 출력분포를 예측하는 기술, 디지털 노심운전제한치 감시 계통의 고온 열적 조건의 평가를 위한 Pseudo Hot Pin 출력분포를 계산하는 기술, 신경망 회로를 구성하는 각각의 노드 간의 최적의 연결 강도를 결정하여 원자로 가동 중 노내계측기를 통해 측정되는 노내 계측기 신호를 바탕으로 원자로 노심의 축방향 출력분포를 합성하는 기술 등이 출원되고 있음
- 관련 주요 기관은 울산과학기술원, 한전원자력연료 주식회사 등이 있음
- 해당 특허들은 탄력운전을 고려한 노심출력분포 계산에 활용될 수 있으나 직접적인 연관성은 없음

< 국내 노심출력분포 계산 및 운전지원 통합시스템 개발 기술 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호 (일자)	특허명	특 징
울산과학기술원	10-2022- 0105624 (2022.08.23.)	GMDH기반 노심출력 예측 방법 및 시스템	<ul style="list-style-type: none"> 제어봉의 과도상황에서도 실시간 전노심 출력분포를 예측할 수 있어 즉발 노내 계측신호를 발생시키는 코발트-바나듐 노내계측기의 신호처리 기반기술로 활용 가능 실시간 전노심 출력분포를 예측
한전원자력 연료 주식회사	10-2012- 0089916 (2012.08.17.)	노내계측기 신호 기반의 반경방향 첨두계수를 이용한 노심운전제한치감시계 통의 Pseudo Hot Pin 출력분포 구성 방법	<ul style="list-style-type: none"> 노내계측기 신호 기반의 반경방향 첨두계수를 이용한 노심운전제한치감시계통(Core Operating Limit Supervisory System, COLSS)의 Pseudo Hot Pin 출력분포 구성 방법 디지털 노심운전제한치 감시 계통의 고온 열적 조건의 평가를 위한 Pseudo Hot Pin 출력분포를 계산하는 기술

한국원자력 연료 주식회사	10-2015- 0051667 (2015.04.13.)	신경망 회로를 이용한 원자로 노심의 축방향 출력분포 합성방법 및 그 방법이 적용된 노심감시계통	<ul style="list-style-type: none"> • 각각의 노드는 다른 계층의 노드와 연결되며 각 노드 간 연결은 학습 결과에 따라 가변되는 각각의 연결강도를 갖고 연결되도록 구성되는 신경망 회로를 이용 • 원자력 발전소의 원자로 노심 설계에 적용된 다양한 노심 설계 데이터에 기초한 학습을 통해 신경망 회로를 구성하는 각각의 노드 간의 최적의 연결강도를 결정하여, 원자로 가동 중 노내계측기를 통해 측정되는 노내계측기 신호를 바탕으로 원자로 노심의 축방향 출력분포를 합성 • 연료주기 전체에 걸쳐 보다 정확한 노심의 축방향 출력분포를 모사
---------------------	--------------------------------------	--	---

○ 탄력운전 대응 실증시험 운영절차서 기술 동향

- 탄력운전 대응 실증시험 운영절차서 기술과 관련하여, 원자력 발전소 비상 운전 가이드, 원자력 발전소 시운전 시험 절차서에 관한 참조문서 통합 관리 및 절차서 표현장치 등이 출원되고 있음
- 관련 주요 기관은 울산과학기술원, 한국수력원자력 주식회사 등이 있음
- 해당 특허들은 탄력운전 대응 실증시험 운영절차서 개발에 참고 할 수 있으나 탄력운전 대응 운영기술 개발과는 직접적인 연관성이 없음

< 국내 탄력운전 대응 실증시험 운영절차서 기술 관련 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원 번호(일자)	특허명	특 징
울산과학 기술원	10-2019- 0122422 (2019.10.02.)	원자력 발전소 비상 운전 가이드 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력 발전소 비상 운전 가이드 방법 • 원자로 트립후 조치(SPTA)를 자동적으로 수행하여 운전원에 인가된 업무 부하에 의하여 발생할 수 있는 인적 오류를 감소
한국수력 원자력 주식회사	10-2017- 0110919 (2017.08.31.)	원자력 발전소 시운전 시험 절차서 작성에 필요한 참조문서 통합 관리 및 절차서 표현장치	<ul style="list-style-type: none"> • 원자력 발전소 시운전 시험 절차서에 관한 참조문서 통합 관리 및 절차서 표현장치 • 원자력 발전소 시운전이 효율적으로 진행 • 시운전 시험 절차서 작성 시 통합된 참조문서 및 용어정의 데이터베이스를 통해 해당되는 문서번호 및 관련 내용 추출 또는 검색을 통해 자동입력이 가능하기 때문에 동일 내용에 대한 중복을 배제할 수 있음

4. 표준화 동향

□ 해외 동향

○ 공적국제표준화 기구

- ISO(International Organization for Standardization, 국제표준화기구)의 원자력분야 국제표준 개발은 기술위원회(Technical Committee)인 TC85 Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection에서 담당하고 있으며 산하 위원회(Sub-Committee)로 SC2 Radiological protection, SC5 Nuclear installations, processes and technologies, SC6 Reactor technology를 운영하고 있음
- IEC(International Electrotechnical Commission, 국제전기기술위원회)의 원자력 분야 국제표준 개발은 기술위원회(Technical Committee)인 TC45 Nuclear Instrumentation에서 담당하고 있으면 산하 위원회(Sub-Committee)로 SC45A Instrumentation, control and electrical power systems of nuclear facilities 및 SC45B Radiation protection instrumentation을 운영하고 있음.
- ISO TC85 및 IEC TC45에서는 현재까지 탄력운전을 주제로 한 국제표준을 발행하였거나 개발하지 않고 있음

○ 미국

- ASME(American Society of Mechanical Engineers, 미국기계학회), ANS(American Nuclear Society, 미국원자력학회), IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 미국전기전자학회) 등에서 발행한 단체표준은 NRC(Nuclear Regulatory Commission, 원자력규제위원회)에 의해 규제기준으로 활용될 뿐만 아니라 전세계 190개 국가에서 활용되고 있어서 사실상국제표준의 지위를 가지고 있을 정도로 활성화되어 있으나 원전의 탄력운전 관련 별도 표준을 발행하지 않음

○ 프랑스

- AFCEN은 원자력발전 1차측 기자재 설계 및 제작 표준협회로서 RCC-M(기계), RCC-MRx(소듐고속로, 연구용원자로, 핵융합로), RCC-E(전기), RCC-C(핵연료) 등 단체표준을 개발하고 있음

- AFCEN에서 탄력운전에 대한 별도 표준을 발행하지 않았으나, RCC-C의 조항인 'D-C 2220 General Operating Conditions'에서 일일 부하추종 운전을 허용하고 있으며 열출력의 15%까지 일상적인 단계적 감발 수용 및 수시간 동안 유지 후 전출력 상태로의 복귀를 허용하고 있음.

○ 일본

- JEA(Japan Electric Association, 일본전기협회) 및 JSME(Japan Society of Mechanical Engineers, 일본기계학회)에서 발행한 코드(규정), 지침, 표준과 함께 JIS(Japan Industrial Standards, 일본산업규격)이 원자력분야에 적용되고 있음
- 일본에 건설된 33기의 원전 중 25기가 BWR(Boiling Water Reactor, 비등수형 원자로)임에도 불구하고 탄력운전 관련 단체표준 발행내용은 확인되지 않음

□ 국내 동향

○ KEPIC(전력산업기술기준, Korea Electric Power Industry Code)

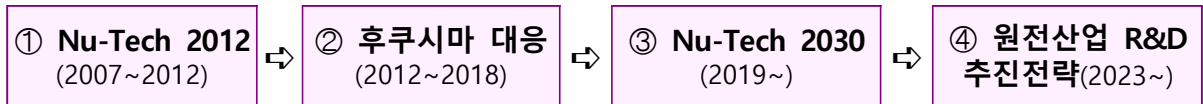
- 국내는 ASME, ANS, IEEE 등 미국의 사실상국제표준 개발기관이 발행하는 Codes & Standards를 참조하여 KEPIC으로 발행하고 있으며 원안위 고시에 따라 원자력발전소 안전등급 품목의 설계, 재료, 제조, 검사, 시험, 설치 기준으로 우선 적용되고 있고, 비안전등급 품목에도 광범위하게 적용되고 있으나 해외와 마찬가지로 탄력운전 관련 별도 표준을 개발하지 않음
- RCC-C를 주요 참조표준으로 개발한 KEPIC-NFA '가압경수로용 핵연료'는 RCC-C와 동일하게 'NFA 6222 일반적인 운전상태'에서 일일 부하추종 운전을 허용하고 있으며 열출력의 15%까지 일상적인 단계적 감발 수용 및 수시간동안 유지 후 전출력 상태로의 복귀를 허용하고 있음.
- 'NFA 6223 원자로 운전방식'에서 기저부하 및 부하추종 운전방식에 대해 간단히 설명하고 있는데, NFA 6223은 RCC-C를 참조하지 않고 KAERI/AR-386/93 기술동향분석보고서 "가압경수로의 부하추종운전"을 인용하여 작성함
- KEPIC 개발 전담기관인 대한전기협회는 2025년에 서울과학기술대학교와 협력하여 탄력운전 관련 국내외 법령, Codes & Standards, 기술적용 현황을 조사하고 KEPIC 도입타당성을 검토할 예정임

5. 정부R&D 지원현황

□ 투자 동향

- (원전산업 R&D 지원 현황) 원자력 안전, 해체, 방폐물 관리 등 전주기 기술 확보 및 미래 원전시장 선점을 위한 i-SMR 기술 개발 등 추진

- 원전산업 R&D 정책 변화



- ① (Nu-Tech 2012) 원전 3대 미자립기술(MMIS, RCP, 원전안전코드) 확보, APR+ 개발 및 유럽사업자요건(EUR) 획득 기반 마련
- ② (후쿠시마 대응) 지진 등 자연재해 대비 강화 및 원전해체 준비 착수
- ③ (Nu-Tech 2030) 원전 안전성 강화 및 원전해체 상용화, 방폐물 안전 관리기술 확보 등 중점 추진
- ④ (원전산업 R&D 추진전략, 23.5월) 미래(SMR)·시장(수출)·융합(연계) 중심 5대 추진 전략 16대 세부 전략 마련, 원전 최강국 도약 추진

비전	글로벌 기술 선도를 통해 원전산업 최강국 도약	
목표	미래(SMR) · 시장(수출) · 융합(연계분야) 중심 5대 분야 2조원 투자 <small>* 민관 합동 '24~'28년 R&D 투자</small>	
추진전략	① 차세대 원전시장 선도	① 혁신형 SMR, ② 미래제조기술 ③ 디지털 통합관리, ④ 4세대 원전
	② 원전 수출경쟁력 강화	⑤ 유럽형 표준설계, ⑥ 해외원전 기자재 ⑦ 넷제로 시티
	③ 원전 융합기술 확보	⑧ 원전수소, ⑨ 연계분야 활용
	④ 원전 안전기술 혁신	⑩ 원전 안전, ⑪ 원전 소부장 ⑫ 사고저항성핵연료(ATF), ⑬ 사고예방·대응
	⑤ 후행주기 관리기술 완성	⑭ 원전해체, ⑮ 고준위 방폐물 ⑯ 중저준위 방폐물

□ 기술개발 현황

- 산업부 원자력분야 주력 R&D 사업이었던 원자력핵심기술개발사업의 일몰 이후, 현재 가동원전 안전성향상, i-SMR 등 예타 사업 중심으로 연구개발 지원
- 원전 전주기 기술개발 추진으로, 융합, 공백 분야 수요를 중점 발굴하여 추진
 - 탄력운전 기술개발과 같은 현안 해결형 신규사업 추진 필요

〈관련 주요 사업 현황〉

사업명	사업목적	R&D 주요내용	예산
원자력핵심기술 개발사업 (산업부)	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 전주기 핵심기술을 확보하여 안정적 전력공급 기반을 마련 • 원전현장의 현안문제 해결을 위한 혁신기술 및 원자력 기초기반기술을 상용화하기 위한 중간 연계기술 개발 추진 	<ul style="list-style-type: none"> • 원전안전 및 선진화 • 원전설비 성능향상 • 원자력환경 및 해체 • 원전기술혁신 	13,221 억원
원전산업 글로벌 시장 맞춤형 기술개발사업 (산업부)	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 수출에 필요한 주요 기술개발을 통해 글로벌 원전시장 경쟁력 확보 및 국내 원전산업 생태계 유지에 기여 	<ul style="list-style-type: none"> • 유럽 요건 등 수요자 요구에 따른 수요자 맞춤형 기술개발을 통해 원전수출의 제약 및 부족 기술을 충족하고, 해당국가의 인허가 기준 만족 및 전력 안전성에 필요한 기술 확보 	165 억원
가동원전 안전성 향상 핵심기술개발사업 (다부처-과기부,산업부)	<ul style="list-style-type: none"> • 심층방호 혁신기술을 통한 가동원전 안전여유도 향상 지원을 목표로 안전한 원전운영의 잠재 위험요인에 대처하고, 강화되는 안전기준에 선제적인 대응역량을 확보하여 국민이 안심할 수준의 장기운영 안전성을 향상 	<ul style="list-style-type: none"> • (고장/사고 최소화를 위한 혁신 예측 기술) • (사고확대 예방을 위한 혁신 안전기술) • (사고완화 및 피해 최소화를 위한 대응기술) 	5,515 억원
혁신형 소형모듈 원자로 개발사업 (다부처-과기부,산업부)	<ul style="list-style-type: none"> • 2028년까지 핵심기술을 개발하고 표준설계 및 기술 검증을 완료하여 이를 통해 국가 원자력 기술수준을 한 단계 도약시키고, 원자력산업의 수출다각화 및 산업 활성화에 기여 	<ul style="list-style-type: none"> • SMART 개발을 통해 확보된 원천기술을 활용하여 2030년대 세계 SMR 시장에서 요구되는 안전성·경제성·유연성을 갖춘 혁신형 SMR을 개발 	2,747 억원

6. 시사점

- 무탄소에너지 확대 정책 기조에 따라 전력계통의 안정적 운영에 대한 부담 증가와 원전의 출력변동 유연성 기술확보를 위한 전력계통 안정화가 절실한 현안임
 - 2050 탄소중립 목표 실현을 위해 재생에너지원 및 원전의 발전 비중을 높임에 따라 전력계통의 안정성 확보 부담이 더욱 가중될 것으로 예상됨
 - 전력계통의 안정적 운영을 위해서 원전의 출력증감발 요구가 증대되고 있어 원전의 탄력운전 확대를 통한 전력계통의 안정성 확보가 시급한 과제임

- 글로벌 원전 확대 전환기에 해외 원전 수출시장 선점을 위해서는 탄력운전 상용화 적용 기술 확보가 매우 시급하고 중요함
 - 전 세계적으로 재생에너지 비중이 확대되면서 원전의 탄력운전이 요구되고 있으며, 정부의 2030년까지 원전 10기 수출목표 달성을 뒷받침하기 위해서는 미완성 핵심기술인 탄력운전 상용화 기술개발을 통한 수출경쟁력 강화가 요구되며 이에 대한 정부의 지원이 절실히 필요함
 - 사업자 입장에서 탄력운전을 실시하면 원전 이용률 저하로 이윤추구(경제성) 측면에서는 불리한 선택이나, 전력 가격 변동성 완화, 재생에너지 전력망/ESS 구축 비용 절감 및 원전 수출경쟁력 제고로 인한 경제적 효과가 기대됨

- 탄력운전의 상용화를 위한 설계기술의 고도화 및 탄력운전 경험 부족과 제약 사항을 극복하고 효율적 운영을 위한 기술의 고도화가 절대적으로 필요함
 - 기존의 국내 원전은 기저부하용으로 설계가 최적화되고 탄력운전에 대한 운전 경험의 부재로 인해 상시적인 탄력운전의 적용에는 한계가 있음
 - 따라서 원전 탄력운전 적용을 위한 설계변경, 운영변경 및 인허가를 위해서는 노심 안전성 담보할 수 있는 설계 및 감시·평가 기술 개발, 안전성평가, 계통 제어 최적화, 운전지원 및 운영기술의 고도화 등의 상용화 기술개발이 필요함

II.

기획대상연구개발과제 도출

1. 연구개발과제기획 방향

□ 연구개발과제기획 기본방향

- 무탄소에너지 확대에 따른 원전 탄력운전 필요성 증가에 대응하고 원전 수출경쟁력 강화를 위한 탄력운전 기술개발

□ 신규 예산 지원 계획안

(단위 : 억원)

구 분	원천기술	혁신제품형	계
지정공모		-	-
품목지정		1	1
자유공모		-	-
계		1	1

□ 기획대상연구개발과제 현황

연구개발과제(품목)명		연계 수요 (도출근거)
기획대상주제명	기획대상연구개발과제(품목)명	
원전 탄력운전 기술개발 (APR 원전 탄력운전 종합 기술개발)	① 탄력운전용 노심설계 방법론 및 안전성 평가 기술개발 ② 핵연료 건전성 평가체계 고도화 및 제어봉 운전제한치 완화 기술개발 ③ 부분강제어봉 개발 및 성능 검증 ④ 탄력운전을 위한 제어감시시스템 및 검증 기술개발 ⑤ 탄력운전에 따른 계통 설계, 안전 해석 및 건전성 영향 평가 ⑥ 실시간 3차원 노심출력분포 계산 및 운전지원 통합시스템 개발 ⑦ 탄력운전 대응 실증시험 운영 절차서 개발	○ 정부정책(국정과제 3번 연계) - ‘원전의 적극적 활용’, ‘원전의 수출산업화’ 등 국정과제 이행을 위한 기술개발 사업 지원 필요 ○ 원전산업 R&D 추진전략(총리 주재 원자력 진흥위원회 의결(‘24.2)) - (원전수출경쟁력 강화) 원전 기반 에너지 자립과 탄소중립 달성을 위한 안정적 에너지 공급기술 개발 - (원전 융합기술 확보) 재생에너지 연계 등 다양한 수요에 대응하기 위해 전력 생산 조절 등 원전운전을 다양화하는 기술개발 ○ (사전기획) 원전 탄력운전 기술개발사업

□ 사업화 연계성과 발생 가능성

연구개발과제(품목)명		지식재산권				표준 ²⁾	인증 ³⁾
		등록특허		소프트웨어	기타 ¹⁾		
기획대상 주제명	기획대상 연구개발과제 (품목)명	해외	국내				
원전 탄력운전 기술개발 (APR 원전 탄력운전 종합 기술개발)	① 탄력 운전 용 노심설계 방 법론 및 안전 성 평가 기술 개발	X	X	X	X	X	X
	② 핵연료 건전성 평가체계 고도 화 및 제어봉 운전제한치 완 화 기술개발	△	○	△	X	X	X
	③ 부분강제어봉 개발 및 성능 검증	△	○	x	△	X	X
	④ 탄력 운전 을 위한 제어감 시시스템 및 검증 기술개 발	△	○	△	△	X	X
	⑤ 탄력 운전 에 따른 계통 설 계, 안전해석 및 건전성 영 향 평가	△	○	X	X	X	X
	⑥ 실시간 3차원 노심출력분포 계산 및 운전 지원 통합시 스템 개발	△	△	○	X	X	X
	⑦ 탄력운전 대 응 실증시험 운영 절차서 개발	△	○	X	△	X	X

2. 개발위험 관리방안

□ 기술개발 위험요인

- 국내 원전은 기저부하용으로 설계가 최적화되고 일일부하추종운전과 주파수제어운전과 같은 실질적인 탄력운전에 대한 운전 경험이 부재
 - 건설단계에서는 시운전 기간 중에 일회성 부하추종 관련 성능시험을 수행하였으나, 상업운전 단계에서는 실질적인 국내 원전의 탄력운전 운영계획이 없었기 때문에 기저부하용으로 설계 및 운영되어 왔음
 - 동 사업을 통한 탄력운전 기술개발 이후, 탄력운전을 적용할 대상원전을 선정하여 해당 원전의 상용 교체노심설계 및 운영변경 인허가를 우선적으로 추진하고 탄력운전을 시범 운영 후, 운영 평가 및 경험 축적을 통해 탄력운전 적용 대상원전을 확대할 계획임
- 지금까지의 부하추종운전 관련 연구는 원전의 계획된 부하추종운전 적용 가능성 여부에 대한 평가 등 핵심 요소기술 중심으로만 수행
 - 상시 탄력운전의 상용화를 위한 설계기술, 인허가 대응 및 운전 제약사항을 극복할 운영기술 고도화 등의 상용화 기술개발을 통해 해결할 계획임
 - 탄력운전시 정기점검 방법론 및 절차가 국제적 표준을 충족할수 있도록 해외 사례에 대한 정보수집 및 실증 운영 데이터 확보 필요
 - 제논(Xe) 진동을 예측할 수 있는 감시프로그램을 개발해야 하며 이를 통해 실시간 노심 상태를 예측할 수 있으므로 감시프로그램의 요소 개발 연계를 통한 안정적인 운영기술 확보가 중요
- 탄력운전의 기술적 성숙도가 낮고, 실증경험이 부족하여 단기간 기술 격차 해소에 어려움이 있어 해외노형과 경쟁 시 단점으로 작용
 - 실제 적용을 위한 요소기술, 평가·감시 기술, 운전지원 및 운영기술 개발이 공통 목표 아래 체계적으로 이루어져야 하며, 인허가 조기 확보를 위해서 규제기관과의 효율적인 소통이 필요

- 단기간에 기술개발 및 인허가를 위해, 통합형과제로 추진하여 현안에 대한 신속한 결정과 협력체계 확보 등 효율적인 과제 수행을 통해 기술적 목표를 달성하고자 함
- 탄력운전을 활발히 운영중인 해외국가의 운영 및 인허가 사례를 참조하고 해외 공동연구 결과물 및 기술정보교류를 통해 인허가 대응에 적극 활용할 계획임
- 국내 i-SMR 표준설계 인증단계에서 규제기관의 탄력운전에 대한 인허가 사례를 참고하여 효율적인 인허가 대응을 추진할 계획임

□ 사업화 애로사항

- 원전의 유연성 확보가 중요해지며, 특히 원전 수출대상국인 유럽의 경우, 탄력운전 성능 및 운영요건을 필수적으로 요구. 수출경쟁력 제고 차원에서 탄력운전 상용화 기술 확보가 매우 중요하고 시급함
 - 원전 유연성 확보는 재생에너지 확대에 따른 전력계통 안정화 비용 상승의 억제 효과가 크며, 글로벌 원전 확대 전환기에서의 해외 원전 수출시장 선점을 위해서는 탄력운전 상용화 적용 기술이 필수적인 요소임
 - 유럽 사업자의 성능요건 수준을 성능목표로 설정하고 이를 충족하기 위한 설계, 제어, 운영 기술을 개발하고 국내 APR 원전을 대상으로 먼저 인허가 신청 및 탄력운전을 적용하여 설계 검증 및 운영 경험을 축적할 계획이며 이를 통해 해외 수출 경쟁력을 제고할 예정임
- 원전 사업자 입장에서 탄력운전 시행시 이용률 저하에 따른 경제적 손실이 불가피하여 탄력운전에 적극적이고 자발적인 참여 의지가 부족하여 해당 기술개발 및 상용화에는 다소 소극적인 입장임
 - 참여기업에 대한 민간부담금을 최소화하여 적극적인 기술개발 참여 환경을 조성하고 향후 탄력운전 운용에 따른 전력시장에서의 보상체계 방안 수립과 같은 탄력운전 적극 참여 유도를 위한 정부의 별도 정책적이고 제도적인 지원을 강구할 필요가 있음

□ 사회환경 위험요인

- 간헐적이고 변동성인 큰 전원인 재생에너지의 공급설비 확대와 경직성 전원인 원전의 발전 비중이 증대됨에 따라 전력계통 안정성 확보에 대한 리스크가 가중될 것으로 예상
 - 재생에너지의 공급설비 확대는 전력계통불안정성을 초래하여 전체 전력 시스템비용상승 유발. 화석연료 대안으로 ESS, 수소, CCS 등의 기술이 개발되고 있으나 확장성, 수용성, 경제성 측면의 경쟁력이 아직 부족하여 궁극의 대안으로는 한계
 - 원전과 재생에너지의 동반성장이 필연적이며 원전의 경직성 전원의 한계를 극복하기 위해 원전의 안전한 상시적인 탄력운전 설계·운영을 위한 실증 기술 개발로 에너지 공급의 안정성 확보
 - 원전을 포함한 전력 시스템 구성비용은 재생 및 신재생 에너지만으로 구성된 전력시스템에 비해 보다 경제적이므로 전력시스템의 부하변동에 원전이 유연한 대응이 가능하게 하여 전력계통 안정성 확보와 경제적 부담 문제를 해소
- 사회적으로 원전은 환경요인에 의한 사고확대 가능성 및 기저부하원으로 경직성 등 위험요인이 큰 것으로 인식되고 있어, 탄력운전에 대한 기술 성숙도 및 위험 통제 능력 강화와 기술 유용성, 사회적 기여도 등에 대한 인식 개선이 필요
 - 명확한 위험요인 분석에 기반한 기술개발 및 위험 통제능력 강화가 선제되어야 하며, 무탄소에너지 전환으로 인한 사회적 기여도, 기술 파급효과 등에 대한 대국민 인식을 개선할 수 있도록 기술적 성과와 사회적 기여도 홍보할 계획임
 - 최근 인공지능, 병렬계산등의 Super Computing 등과 함께 전력 수요가 급증하고 있고, 앞으로의 전력 수요는 더욱 폭발적으로 증가할 것이 예상되며, 원자력은 기저발전원으로 역할이 중요함

- 원자력발전은 에너지 단가를 고려해볼 때, 원자력은 기저발전원으로서 탄력운전 보다는 최대 출력운전을 하는 것이 경제적이며 탄력운전은 자주 출력을 변경해야하는 점에서 원전 효율성에 부담이 될 수는 있으나, 현재 전력망 구조와 향후 재생에너지 확대 등을 고려할 때 최대 출력 운전을 기본으로 원전의 고유한 특성은 살리면서, 탄력운전의 기능을 추가하여 유연성을 확보하는 방안이 국가 경제적 관점에서 바람직한 해법임

□ 기술영향 검토

- AI 및 전기 모빌리티 등 사회기반 전력수요 증가와 환경문제 해결을 위한 무탄소에너지 사회 전환을 위한 화력발전 대체 수요 증가에 대한 대체 에너지원의 필요성이 증가하고 있음
- 원전 탄력운전 기술 확보를 통한, 기저부하전력원의 경직성 해소 및 안전한 운영 및 관리기술 확보로 산업경쟁력 제고와 함께 사회·문화적 복지 증진을 이룰 수 있을 것으로 판단됨

3. 기획연구개발과제 RFP / 기술개요서

[품목지정공모 (기술개요서)]

품목명 : APR 원전 탄력운전 종합 기술개발 36

**'25년도 에너지기술개발사업 신규연구개발과제
품목개요서/제안요청서(RFP) (통합형 연구개발과제)**

관리번호	(재)2025 - 원자력 - 대형통합형 - 품목1		산업 기술 분류	중분류 I	중분류 II
과제 유형	<input type="checkbox"/> 원천기술	<input checked="" type="checkbox"/> 혁신제품 <input type="checkbox"/> 실증형		원자력	-
해당여부	<input type="checkbox"/> 표준연계 <input type="checkbox"/> 경쟁형 R&D <input type="checkbox"/> 복수형 R&D <input type="checkbox"/> 국가핵심기술 <input type="checkbox"/> 안전관리형 <input type="checkbox"/> 공기업협력 <input type="checkbox"/> 탄소중립 <input type="checkbox"/> 국제공동 <input checked="" type="checkbox"/> 통합형 <input type="checkbox"/> 초격차 프로젝트 <input type="checkbox"/> 혁신도전형 <input type="checkbox"/> 초고난도 <input type="checkbox"/> 핵심전략기술 <input type="checkbox"/> 유연컨소시엄 <input type="checkbox"/> 샌드박스 연계형				
R&D 자율성트랙	<input checked="" type="checkbox"/> R&D 자율성트랙(일반) <input type="checkbox"/> R&D 자율성트랙(지정)				
프로젝트명	원전 탄력운전 기술개발사업				
1. 필요성					
<ul style="list-style-type: none"> ○ (정책·기술) 정부는 국정과제 이행을 위한 에너지 안보 및 탄소중립의 수단으로 원전을 적극 활용하고, 수출을 통한 원전 최강국 도약을 추진 <ul style="list-style-type: none"> - 2050 탄소중립 목표 실현을 위해 재생에너지와 원전의 발전 비중이 증가함에 따라 전력계통의 안정성 확보 부담이 더욱 가중될 것으로 예상 - 전력계통의 안정적 운영을 위해서 원전의 출력증감발 요구가 증대되고 있어 원전의 탄력운전 확대를 통한 전력계통의 안정성 확보가 시급한 과제임 ○ (시장현황) 다수의 국가가 원전 신규 건설 계획을 발표함에 따라 글로벌 원전시장 확보를 위해 주요국이 치열한 경쟁 중임 <ul style="list-style-type: none"> - 전 세계 가동원전 415기 중 251기는 계속운전을 승인 받았고, 미국은 80년 계속운전도 승인. 체코, 폴란드 등 세계적으로 64기 신규 대형원전 건설 추진 중 (IAEA, WNA/24.9월 기준) - 국내 및 세계 각국에서 재생에너지 비중 확대로 원자력발전 등 기존 전력원의 탄력적 운영이 요구되고 있으며, 유럽의 경우 신규 원전에 대해 부하추종 성능요건 충족을 기본적으로 요구 * 체코 정부는 두코바니 원전건설사업에 탄력운전을 요건화하고 있음 ○ (사업화) 글로벌 원전 확대 전환기에서의 해외 원전 수출시장을 적기에 선점하기 위해서는 탄력운전 상용화 적용 기술이 매우 중요하고 시급함 <ul style="list-style-type: none"> - 정부의 2030년까지 원전 10기 수출목표 달성을 뒷받침하기 위해서는 미완성 핵심기술인 탄력운전 상용화 기술개발을 통한 수출경쟁력 강화가 필요하며 이에 대한 정부 차원의 적극적인 지원 필요 * 사업자 입장에서 탄력운전의 실시로 경제적 손실(원전 이용률 저하로 불리)이 발생할 수밖에 없으나, 전력 가격 변동성 완화, 재생에너지 전력망 및 ESS 구축 비용 절감과 원전 수출경쟁력 제고에 기여할 것으로 기대함 					
2. 프로젝트 개념					
<ul style="list-style-type: none"> ○ (기술개념) 무탄소에너지(CFE) 공급 확대에 따른 부하 변동에 대응하기 위해 원전의 유연성 확보 및 수출경쟁력 제고를 위한 대형원전의 탄력운전 설계, 제어 및 운영 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - (원전 유연성 확보) 원전 탄력운전 상용화 기술개발을 통한 출력변동 대응능력 향상으로 전력계통 안정성 확보 및 재생에너지 연계성 강화 - (수출 경쟁력 강화) 유럽사업자요건(EUR)을 충족하는 탄력운전 기술개발로 원전 수출경쟁력 강화 					

- **(기술개발방향)** 현재 국내 원전 탄력운전 제약성을 극복하고 상시적인 탄력운전을 위한 설계, 제어, 운영, 인허가 대응 기술개발
 - i) 탄력운전 상용화 시 잦은 출력 변화로 노심 안전성 확보가 관건 → 노심설계 및 안전성 평가기술 개발
 - ii) 원자로 출력변화 시 냉각수 및 증기 유량 변화 → 노심 외에도 1,2차 냉각계통 핵심기기의 안전성 평가방식 개선 필요 → 계통 영향평가 및 제어기술 개발
 - iii) 기존 한수원 내부 원자로 운영·조종 매뉴얼은 100-80-100% 출력 운전 및 비상시 대응 운전에 국한 → 운영 절차개발 및 운전 지원시스템 고도화

구분	세부 기술개발 내용
노심설계 및 안전성 평가 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> · 탄력운전용 노심설계 방법론 및 안전성평가 기술 개발 · 핵연료 건전성 평가체계 고도화 및 제어봉 운전제한치 완화 기술개발 · 부분강제어봉 개발 및 성능 검증
계통 영향 평가 및 제어 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> · 탄력운전을 위한 제어 감시시스템 및 검증 기술개발 · 탄력운전에 따른 계통설계 안전해석 및 건전성 영향 평가
운영 절차개발 및 운전지원 시스템 고도화	<ul style="list-style-type: none"> · 실시간 3차원 노심출력분포 계산 및 운전지원 통합시스템 개발 · 탄력운전 대응 실증시험 운영절차서 개발

<개념도>



3. 개발목표 및 내용

- **(최종목표)** 원전의 출력변동 능력을 향상시키고 상시적인 탄력운전의 상용화를 위한 설계, 제어, 운영 및 인허가 대응 기술개발
 - (원전 탄력운전 기술 확보) 대형원전의 탄력운전 일일부하추종 및 국부주파수제어 실증을 위한 기술개발
 - (유럽 사업자요건 충족 기술개발) 일일부하추종 성능 100%-50%-100%, 연간 200회, 출력변동률 30% Pr/hr 및 국부주파수제어 성능 ±3% 출력변동내 주파수제어
- **(세부연구개발과제 연구내용)** 총괄과제와 7개 세부과제로 구성하여 역할분담을 통한 기술개발 추진

세부연구개발과제명	기술개발 목표 및 내용	비고
<p>(총괄) APR 원전 탄력 운전 종합 기술 개발 (TRL : 3 ~ 8단계)</p>	<p>□ 세부연구개발과제 종합관리 및 사업추진 방향 조정</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 세부연구개발과제 진도점검 및 운영관리 ○ 연구개발을 통해 도출된 연구결과물 상호 연계 지원 ○ 사업성과 실적 관리 및 보고 총괄 등 ○ 원전 탄력운전 상용적용 추진 계획 및 전략 수립 ○ 탄력운전 인허가 추진 전략 수립 및 인허가 보고서 총괄 관리 ○ 각 세부연구개발과제 기술보고서 총괄 관리 <p>※ 사업 주체가 되는 세부 연구개발기관이 총괄 역할 수행</p>	<p>공고시기 2025년 공고</p> <p>연구개발과제유형 혁신제품</p> <p>주관연구개발기관 기업</p> <p>정부납부기술료 비징수</p> <p>지원기간 43개월 이내</p>
<p>① (세부1) 탄력운전용 노심 설계 방법론 및 안전성 평가 기술 개발 (TRL : 5 ~ 8단계)</p>	<p>□ 탄력운전 조건을 반영한 핵연료의 건전성 및 노심의 안전성 평가를 포함하는 교체노심 설계방법론, 설계절차 개발 및 인허가 문서작성</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ APR1400/APR1000 탄력운전 노심에 대한 노심설계, 안전성 평가 기술개발 및 연계자료 생산 ○ 탄력운전 적용 노심설계 및 안전해석 설계절차 구축 ○ 탄력운전을 반영한 RSEMR(교체노심 안전성평가방법론) 인허가신청 ○ APR1400/APR1000 노심부하추종운전 성능평가 	<p>공고시기 2025년 공고</p> <p>연구개발과제유형 혁신제품</p> <p>주관연구개발기관 기업</p> <p>정부납부기술료 징수</p> <p>지원기간 43개월 이내</p>
<p>② (세부2) 핵연료 건전성 평가체계 고도화 및 제어봉 운전 제한치 완화 기술 개발 (TRL : 4 ~ 8단계)</p>	<p>□ 핵연료 건전성 평가체계 고도화</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 핵연료 성능해석코드 및 범용 유한요소해석 S/W 기반의 핵연료 PCI 평가체계 고도화 및 검증 ○ 다양한 탄력운전 시나리오에 대한 핵연료 PCI 위험도 평가 ○ 실시간 핵연료 위험도 평가 방법론 개발 ○ 탄력운전시 PCI 위험도를 고려한 출력증감발 운전 지침 개발 <p>□ 제어봉 운전제한조건 완화</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 탄력운전 성능확보를 위한 제어봉 운전제한조건 완화 기술개발 ○ 제어봉 삽입허용 누적시간 확장안 유효성 평가 	<p>공고시기 2025년 공고</p> <p>연구개발과제유형 혁신제품</p> <p>주관연구개발기관 기업</p> <p>정부납부기술료 징수</p> <p>지원기간 43개월 이내</p>
<p>③ (세부3) 부분강제어봉 개발 및 성능 검증 (TRL : 5 ~ 8단계)</p>	<p>□ 탄력운전에 적합한 AIC(Ag-In-Cd) 흡수체 적용 부분강제어봉 개발과 상용공급을 위한 생산체계 및 제조품질 확보</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ AIC 흡수체 적용 부분강제어봉 설계(도면,시방서) ○ AIC 부분강제어봉 성능평가 및 노외 성능시험 ○ AIC 부분강제어봉 제조공정개발 및 생산체계 구축 ○ AIC 부분강제어봉 제조 품질 확보 	<p>공고시기 2025년 공고</p> <p>연구개발과제유형 혁신제품</p> <p>주관연구개발기관 기업</p> <p>정부납부기술료 징수</p> <p>지원기간 43개월 이내</p>

<p>④ (세부4) 탄력운전을 위한 제어감시시스템 및 검증 기술개발 (TRL : 3 ~ 7단계)</p>	<p>□ 원자력발전소 탄력운전에 최적화된 제어/감시시스템 및 검증 기술개발</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 탄력운전 1,2차측 제어시스템 및 감시 기술개발 ○ 탄력운전 적용 비정상 운전시나리오 작성 및 MMIS 디지털 트윈(시뮬레이터)을 활용한 시나리오 검증 ○ 탄력운전 비정상 상태 진행 방지용 TCS(터빈제어시스템) 비상제어 논리 개발 ○ NSSS / BOP / TBN 설비 통합 시뮬레이션을 통한 발전소 제어영향 검토 ○ 출력제어계통(PCS)을 포함한 제어논리 적합성 확인 ○ 터빈 속도제어 논리 정합성 확인 ○ 최적 터빈 속도제어 상수(Speed Filter등) 도출 ○ NSSS / BOP / TBN 설비 통합 Governor Free 운전 제어성능 해석 Tool 개발 	공고시기	2025년 공고
		연구개발과제유형	혁신제품
		주관연구개발기관	기업
		정부납부기술료	징수
		지원기간	43개월 이내
<p>⑤ (세부5) 탄력운전에 따른 계통 설계, 안전 해석 및 건전성 영향 평가 (TRL : 4 ~ 7단계)</p>	<p>□ 원전 탄력운전 조건 및 AIC 부분강제어봉 적용에 따른 NSSS 계통설계, 안전해석 및 건전성 영향평가</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 탄력운전에 따른 NSSS 계통설계 및 안전해석 기초 자료 생산과 방법론 검토 ○ 탄력운전 시나리오별 NSSS 계통설계, 안전해석 및 기기 건전성 평가 <p>□ 탄력운전 조건별 1차/2차 계통 핵심기기 환경유기손상 영향 평가 및 DB구축</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 탄력운전 조건별 핵심기기 성능 영향자료 검토 및 평가대상기기 도출 ○ 탄력운전 조건별 핵연료 피복관 크러드 영향 평가 ○ 탄력운전 조건별 1차계통 핵심기기 환경 피로 및 손상 평가 ○ 탄력운전 조건별 2차계통 핵심기기 부식 손상 평가 <p>□ 탄력운전 터빈 핵심기기 건전성 평가</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 탄력운전 조건별 터빈 건전성 및 수명 평가 ○ 터빈 손상완화 및 로터 최적 운전방안 개발 	공고시기	2025년 공고
		연구개발과제유형	혁신제품
		주관연구개발기관	제한없음
		정부납부기술료	징수
		지원기간	43개월 이내
<p>⑥ (세부6) 실시간 3차원 노심 출력 분포 계산 및 운전 지원 통합시스템 개발 (TRL : 5 ~ 8단계)</p>	<p>□ 실시간 운전자료(PI) 기반 3차원 고속 노심 감시 및 예측 시스템 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 실시간 발전소 운전자료 기반 3차원 고속 노심 출력 분포 계산 기술개발 및 검증 ○ 운전전략 시나리오 예측 정확도 향상 방법 개발 ○ 운전제한인자 실시간 감시(노심 침투계수, 연료봉 PCI) 기능 개발 ○ 탄력운전에 따른 동적 노심 거동 분석 기능 개발 	공고시기	2025년 공고
		연구개발과제유형	혁신제품
		주관연구개발기관	기업
		정부납부기술료	징수
		지원기간	43개월 이내

⑦ (세부7) 탄력운전 대응 실증시험 운영 절차서 개발 (TRL : 3 ~ 7단계)	<input type="checkbox"/> 일일부하추종 및 국부주파수제어 운전을 위한 운영 절차서 개발 <input type="checkbox"/> 탄력운전중 정기점검 시험을 위한 방법론 개발 및 발전소 안정상태 재정립을 반영하여 절차서 개선 <input type="checkbox"/> 운전원에 의해 일일부하추종운전 및 국부주파수제어 운전을 안전하게 수행할수 있도록 표준 운영절차서 신규 개발 <input type="checkbox"/> 탄력운전에 따른 기기 점검, 감시, 교정등 운영 절차 점검 및 개정 ※ 세부연구개발과제와 연계로 2차년도 착수	공고시기
		2025년 공고
		연구개발과제유형
		혁신제품
		주관연구개발기관
		기업
정부납부기술료		
징수		
지원기간		
34개월 이내		

4. 기타 지원 요건

○ 지원규모 : 43개월 이내

- 1차년도 정부지원연구개발비: 35억원 이내, 총 정부지원연구개발비: 294.5억원 이내)
 - 총괄과제 : 1차년도 : 0.3억원 내외, 총 정부지원 3억원 내외
 - 세부1 : 1차년도 : 5억원 내외, 총 정부지원 42억원 내외
 - 세부2 : 1차년도 : 3억원 내외, 총 정부지원 45억원 내외
 - 세부3 : 1차년도 : 5억원 내외, 총 정부지원 30억원 내외
 - 세부4 : 1차년도 : 8.7억원 내외, 총 정부지원 34.5억원 내외
 - 세부5 : 1차년도 : 5억원 내외, 총 정부지원 66억원 내외
 - 세부6 : 1차년도 : 8억원 내외, 총 정부지원 42억원 내외
 - 세부7 : 1차년도 : -, 총 정부지원 32억원 내외 (2차년도 착수)

○ 개발위험 극복방안

- 실제 적용을 위한 요소기술, 평가·감시 기술, 운전지원 및 운영기술 개발이 공통 목표 아래 체계적으로 이루어져야 함. 단기간에 기술개발 및 인허가를 위해, 대형 통합형과제로 추진하여 현안에 대한 신속한 결정과 협력체계 확보 등 효율적인 과제 수행을 통한 기술적 목표 달성이 요구됨
- 수요기업의 적극적인 과제 참여를 통해, 적용성을 평가하고 대두될 문제점에 대한 대응기술 확보 방안과 규제기관과의 소통을 강화하여 인허가를 조기 확보 할 수 있도록 협력체계 구축 필요

○ 기타사항

- 대형통합형과제로 총괄주관연구개발기관이 세부연구개발과제를 포함하여 총괄연구개발 형태로 컨소시엄을 구성하고, 1개 총괄연구개발과제 및 7개 세부연구개발과제 별로 연구개발계획서를 제출
- AIC 부분강제어봉은 국내 APR1400 노심에 우선 적용하여 실증할 예정이며, 해외 수출형인 APR1000 노심 적용은 체코 원전 입찰서를 기반으로 기존 인코넬 부분강제어봉 기반으로 평가하되 향후 계약확정 단계에서 AIC 부분강제어봉으로 설계 변경 시에는 APR1000 노심 적용을 고려할 수 있음