

# Development Plans to Realize Autonomous Operation of PGSFR

2017. 05. 17

성승환



**한국원자력연구원**  
Korea Atomic Energy Research Institute



I

자율운전 / Machine Learning

II

경수로 운전

III

PGSFR 운전 / 실험 장치 운전

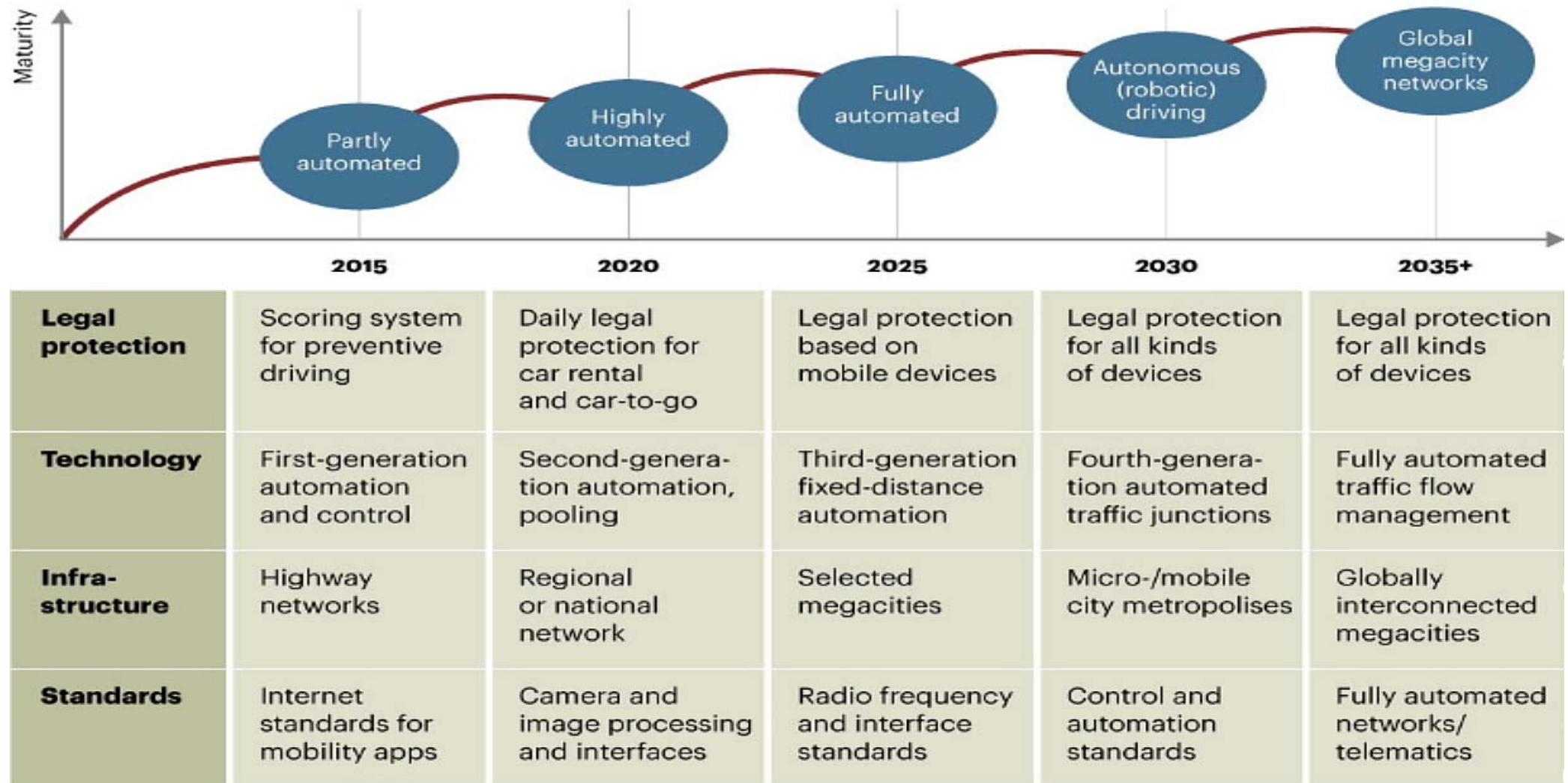
IV

Roadmap (제안)

V

결론

## Autonomous driving technology will advance in waves



Sources: Rinspeed; A.T. Kearney analysis

# 원자력 상황 및 자율운전 상황 대비

SAE level	Name	Narrative Definition	Execution of Steering and Acceleration/Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
<b>Human driver monitors the driving environment</b>						
<b>0</b>	<b>No Automation</b>	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
<b>1</b>	<b>Driver Assistance</b>	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
<b>2</b>	<b>Partial Automation</b>	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	<b>System</b>	Human driver	Human driver	Some driving modes
<b>Automated driving system ("system") monitors the driving environment</b>			<b>원자력플랜트 수준 (level 2.5)</b>			
<b>3</b>	<b>Conditional Automation</b>	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	<b>System</b>	Human driver	Some driving modes
<b>4</b>	<b>High Automation</b>	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	<b>System</b>	Some driving modes
<b>5</b>	<b>Full Automation</b>	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	<b>All driving modes</b>

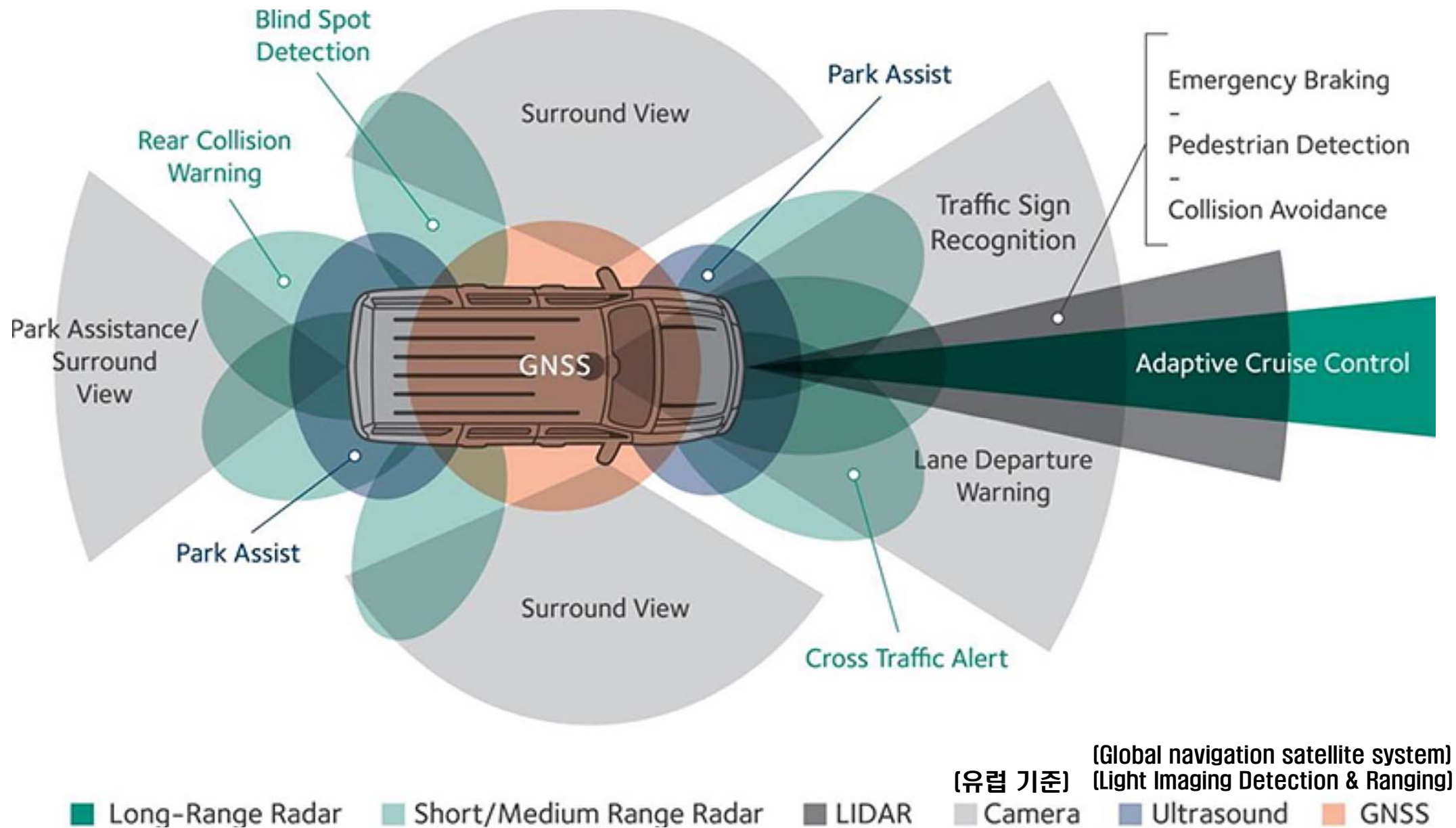
Car)  
Adaptive cruise control  
Lane keeping  
Emergency stop  
Driver assist  
후측방 경고

Plant)  
비안전 : 반자동화  
안전 : 자동  
상황 인식 및 대처: 수동

[유럽 기준]



# 자율운전 센서



# Machine Learning

## - Machine Learning

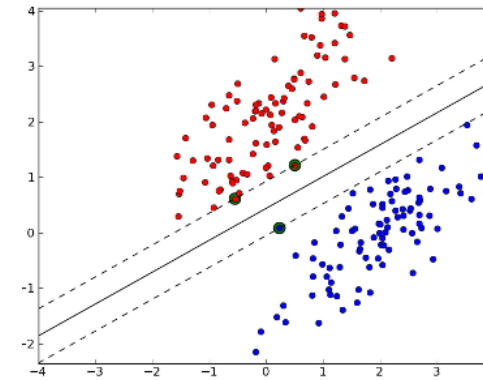
- Supervised Learning
- Unsupervised Learning
- Reinforcement Learning

## - Expert System

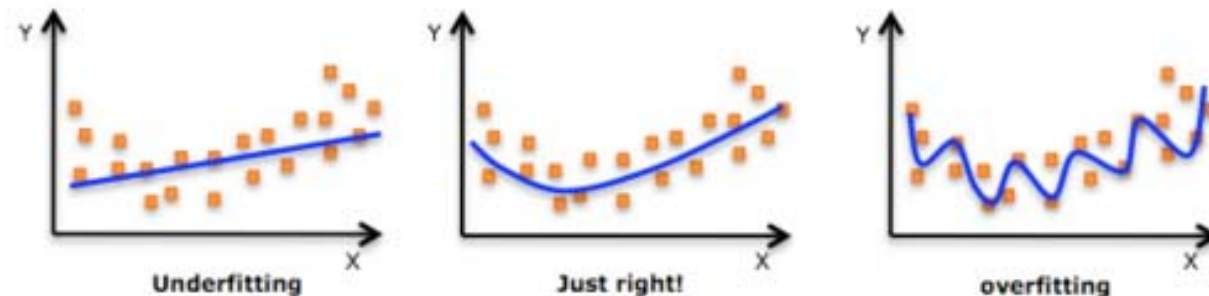
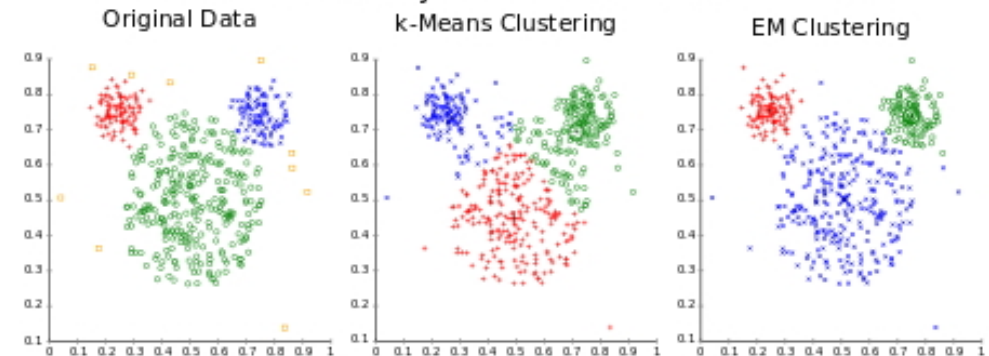
- procedure

## - Disadvantages

- don't know
- right/wrong probability (blackbox)
- extrapolation
- underfitting / overfitting (cost function or objective function)
- Deep learning (neural network 대처)



Different cluster analysis results on "mouse" data set:



# 경수로 기동 운전 절차 (극히 일부 발췌) (1/2)

영광원자력본부  
제2발전소

제 목 : 상온정지상태로부터 고온대기상태 운전

절차서 번호	종합-01
개정 번호	06
페이지	1 / 26

## 1. 0 목 적

이 절차서는 발전소를 상온정지 상태[저온관 온도 $\leq 99^{\circ}\text{C}$ ( $210^{\circ}\text{F}$ ),  $K_{eff} < 0.99$ ]로부터 고온대기 상태[저온관 온도 $\geq 177^{\circ}\text{C}$ ( $350^{\circ}\text{F}$ ),  $K_{eff} < 0.99$ ]로 만들기 위한 절차를 기술한다.

## 3. 0 주의 및 제한사항

- 가압기 수위 지시계 LI-110X 및 LI-110Y는 정상운전중의 압력과 온도를 기준하여 교정되어 있으므로 가열중 가압기의 실제 수위를 확인하기 위해서는 첨부 6.2의 수위 보정곡선을 이용하여 지시값을 보정해야 한다.
- 가압기 수위 지시계 LI-103은 저온 상태를 기준하여 교정되어 있다.
- 증기발생기 수위 지시계 LI-1113A/B/C/D, LI-1123A/B/C/D, LI-1115X/Y 및 LI-1125X/Y는 정상운전중의 압력과 온도를 기준하여 교정되어 있으므로 원자로냉각재 가열중에 실제 수위를 확인하기 위해서는 첨부 6.3의 수위 보정곡선을 이용하여 지시값을 보정해야 한다.
- 증기발생기 수위 지시계 LI-1114A/B/C/D, LI-1124A/B/C/D, LI-1111, LI-1112, LI-1121, LI-1122는 정상운전중의 압력과 온도를 기준하여 교정되어 있으므로 원자로냉각재 가열중에 실제 수위를 확인하기 위해서는 첨부 6.3의 수위 보정곡선을 이용하여 지시값을 보정해야 한다.
- 원자로냉각재계의 최대 가열율은 기술지침서 3.4.8.1(원자로냉각재계통 압력/온도 제한)에 따라 다음과 같이 제한된다.
  - 저온관 온도  $27^{\circ}\text{C}$  이하일 때:  $5.5^{\circ}\text{C/hr}$  이하
  - 저온관 온도  $27^{\circ}\text{C}$  초과  $82^{\circ}\text{C}$  이하일 때:  $33.3^{\circ}\text{C/hr}$  이하
  - 저온관 온도  $82^{\circ}\text{C}$  초과시 :  $55.5^{\circ}\text{C/hr}$  이하
- 가압기의 최대 가열율은 운영기술지침서 3.4.8.2(가압기 가열/냉각 제한)에 따라  $111.1^{\circ}\text{C/hr}$ 로 제한된다.

- 가열운전중 원자로냉각재계통의 온도 와 압력, 가압기 온도가 압력/온도곡선의 제한치를 초과하지 않도록 매 30분마다 점검(경기-64)해야 한다.
- 가압기에 기포가 형성되기 전에는 원자로냉각재의 온도변화가 원자로냉각재 압력에 크게 영향을 미치므로 급격한 원자로냉각재 온도변화를 초래해서는 안된다.
- 원자로냉각재계통의 온도를 변화시킬수 있는 조작후 정확한 온도변화를 감지하기 위해서는 충분한 시간을 기다린다.
- 가압기 전열기 운전중에는 가압기 수위를 25% 이상 유지하여 전열기 손상을 방지해야 한다.
- 가압기에 기포 형성후 가압기 수위를 낮출 때 가압기 수위지시계 LI-110X, 110Y의 수위가 일치하지 않을 때는 수위 감소운전을 중지하고 수위지시계를 교정하여야 한다.
- 가압기에 기포가 형성되어 있을 때의 가압기 수온은 고온관 온도보다  $28^{\circ}\text{C}$ ( $50^{\circ}\text{F}$ ) ~  $177^{\circ}\text{C}$ ( $320^{\circ}\text{F}$ )만큼 높아야 한다.
- 가압기 수위가 33% 이상이고(만수위 상태 포함) 증기 발생기 2차측 온도가 원자로냉각재계통 저온관 온도보다 높으면 원자로냉각재펌프를 기동해선 안된다.
- 가압기 수위가 33% 미만이고 증기발생기 2차측 온도가 원자로냉각재계통 저온관 온도보다  $11^{\circ}\text{C}$  이상 높으면 원자로냉각재펌프를 기동해선 안된다.
- 원자로냉각재 펌프의 운전횟수는 원자로냉각재의 온도에 따라 다음과 같이 제한되어야 한다.
  - 원자로냉각재계통의 저온관 온도가  $93^{\circ}\text{C}$  미만일 때에는 원자로냉각재펌프의 운전은 2대 까지 허용된다.
  - 원자로냉각재계통의 저온관 온도가  $93^{\circ}\text{C}$  이상  $260^{\circ}\text{C}$  미만일 때에는 원자로냉각재펌프의 운전은 3대까지 허용된다.
  - 네번째 원자로냉각재펌프를 기동하기 위해서는 원자로냉각재계통 저온관 온도가  $260^{\circ}\text{C}$  이상 되어야 한다.
- 원자로냉각재펌프의 재기동 횟수는 계통-02(원자로냉각재펌프 운전) 절차서에 명시된 제한치를 초과해서는 안된다.

- 정지냉각계통 흡입 측 압력방출밸브(SI-V179/189)는 원자로냉각재 온도가  $146^{\circ}\text{C}$ ( $295^{\circ}\text{F}$ ) 이하에서는 개방 설정치가  $32.7\text{kg/cm}^2\text{A}$ ( $465\text{psiG}$ )로 저온과압방지를 위해 배열되어 있어야 한다.
- 정지냉각계통 흡입격리밸브(SI-V655/656)는 원자로냉각재 압력이  $35\text{kg/cm}^2\text{A}$ 를 초과하면 자동으로 닫힌다.
- 정지냉각계통 흡입격리밸브(SI-V651/652 및 653/654)는 원자로냉각재 압력이  $49.2\text{kg/cm}^2\text{A}$ 를 초과하면 자동으로 닫힌다.
- 정지냉각계통은 저압안전주입펌프의 기계적 밀봉장치 손상가능성을 피하기 위해 원자로냉각재 온도  $148.8^{\circ}\text{C}$  이상에서는 가능한 운전하지 않아야 한다.
- 원자로냉각재 저온관 온도가  $176^{\circ}\text{C}$ ( $350^{\circ}\text{F}$ )를 초과하거나 원자로냉각재계통 압력이  $28.8\text{kg/cm}^2\text{A}$ ( $410\text{psiA}$ )를 초과하면 정지냉각계통이 운전되어선 안된다.
- 정지냉각펌프 운전 중에는 사고 후 시료채취계통으로 원자로 냉각재 누설 여부를 확인하기 위해 시료채취펌프 입구압력을 주기적으로 점검해야 한다.
- MODE 3(고온대기) 또는 4(고온정지)에서 원자로냉각재 계통 압력이  $123.8\text{kg/cm}^2\text{A}$ ( $1825\text{psiA}$ )를 초과하기 전에 다음과 같이 안전주입탱크가 운전가능해야 한다.
  - 봉산수 수위는 협역수위계를 기준으로  $28 \sim 72\%$  범위 이내.
  - 봉산농도는  $2300 \sim 4400\text{PPM}$  범위이내.
  - 탱크 압력은  $40.6\text{kg/cm}^2\text{G}$ ( $578\text{psig}$ ) ~  $43.9\text{kg/cm}^2\text{G}$ ( $624\text{psig}$ )로 유지.
  - 질소배기밸브는 닫힘 상태에서 전원이 제거된 상태.]
- 원자로냉각재 온도가  $65.6^{\circ}\text{C}$ 를 초과하여 가열중일 때는 주기적으로 시료분석을 수행하여 산소농도를 감시해야 한다.
- 원자로냉각재 온도가  $82^{\circ}\text{C}$  이하에서는 원자로냉각재계통의 산소농도제어를 위해  $\text{N}_2\text{H}_4$ 를 사용하고  $82^{\circ}\text{C}$  이상에서는 수소를 사용한다.
- 충전펌프는 원자로냉각재계통 압력  $52.7\text{kg/cm}^2\text{A}$ ( $750\text{psiA}$ ) 이하에서 한대만 운전하고 나머지 2대의 펌프는 정지상태를 유지해야 한다. 그러나 반응도 제어에 필요한 경우에는 정지중인 충전펌프를 수동으로 기동할 수 있다.
- 격납용기 살수계통은 원자로냉각재계통 온도가  $99^{\circ}\text{C}$ ( $210^{\circ}\text{F}$ )를 초과하기 전에 운전가능 해야 한다.

# 경수로 기동 운전 절차 (극히 일부 발췌) (2/2)

## 4.0 초기조건

- 4 1 발전소는 상온정지 상태(저온관 온도  $\leq 99^{\circ}\text{C}$  ( $210^{\circ}\text{F}$ ),  $K_{eff} < 0.99$ )를 유지하고 있다. \_\_\_\_\_/
- 4 2 원자로냉각재계통은 충수 및 배기가 완료된 상태이다. \_\_\_\_\_/
- 4 3 가압기 수위는 만수위상태(SOLID STATE)이다. \_\_\_\_\_/
- 4 4 원자로냉각재 압력은 화학 및 체적제어계통 유출수 배압조절밸브(451-V201P/201Q)에 의해  $26 \sim 28\text{kg/cm}^2\text{A}$  ( $370 \sim 400\text{psiA}$ ) 범위 이내로 유지되고 있다. \_\_\_\_\_/
- 4 5 하나의 정지냉각계통이  $15,200\text{ l/min}$  ( $4000\text{ gpm}$ )의 유량으로 운전중이고 다른 정지냉각유로는 운전가능한 상태이다. \_\_\_\_\_/
- 4 6 유출유량은 정지냉각 유출유로를 통해 형성되고 있다. \_\_\_\_\_/
- 4 7 한대의 충전펌프 운전상태에서 충전 및 유출, 원자로냉각재펌프의 밀봉주입유로가 운전되고있고 나머지 충전펌프는 정지상태에 있다. \_\_\_\_\_/
- 4 8 가압기 안전밸브는  $175.7\text{Kg/cm}^2\text{A}$  ( $2500\text{psiA}$ )  $\pm 1\%$ 에서 개방될 수 있도록 설정되었고 운전 가능한 상태이다. \_\_\_\_\_/
- 4 9 저온과압보호계통의 압력방출밸브(SI-V179/189)가  $32.7\text{kg/cm}^2\text{A}$  ( $465\text{psiG}$ )의 개방 설정치로 운전가능해야 하며 과압방지기능을 수행할 수 있도록 유로가 배열된 상태이다. \_\_\_\_\_/

## 5.0 절차

- 5 1 첨부 6.1에 따라 가열전 계통 점검을 수행한다. \_\_\_\_\_/
- 5 2 안전주입탱크의 수위가 협역수위  $28\% \sim 72\%$  범위내에 있는지 확인하고 필요한 경우 절차서 계통-05(안전주입계통)를 수행하여 수위를 조절한다. \_\_\_\_\_/
- 안전주입탱크 1A 협역수위 지시계 LI-332.333
  - 안전주입탱크 2A 협역수위 지시계 LI-342.343
  - 안전주입탱크 1B 협역수위 지시계 LI-312.313
  - 안전주입탱크 2B 협역수위 지시계 LI-322.323
- 5 3 안전주입탱크의 시료를 분석하여 붕소 농도가  $2300 \sim 4400\text{PPM}$  범위내에 있는지 확인한다. 필요한 경우 절차서 계통-05(안전주입계통)를 수행하여 붕소농도를 조절한다. \_\_\_\_\_/
- 5 4 방사선 감시 유량제어기 FIK-204를 설정치  $7.6\text{L/min}$  ( $2\text{GPM}$ )로 설정하여 자동으로 전환 한다. \_\_\_\_\_/
- 5 5 원자로 냉각재 펌프 밀봉주입수 유량이  $25 \sim 28.4\text{ L/min}$  임을 확인하고 필요하면 차압 제어기 PDK-240을 조절하여 밀봉 주입수 유량을 제어한다. \_\_\_\_\_/
- 참고) 원자로냉각재계통의 압력이 정상 운전압력보다 낮을경우 요구되는 유량을 형성할 수 있도록 충전관 배압밸브 CV-240을 사용할 수 있다. 이때 정상 운전압력과 온도에 도달 할때까지 적절한 운전상태를 확인하기 위해 PDK-240을 감시해야 한다.
- 5 6 습식 보관상태의 증기발생기를 절차서 화학-10 (2차계통 수질관리)의 기동시 수질로 만들기 위해 절차서 계통-03(증기발생기 보관)에 따라 적절한 수위까지 배수후 복수기 또는 복수저장탱크에서 급수하여 정상수위(협역수위  $44\%$ 까지) 충수한다. \_\_\_\_\_/

- 5 7 절차서 계통-02 (원자로냉각재펌프 운전)절차에 따라 원자로냉각재펌프의 기동전 점검을 수행한다. \_\_\_\_\_/

- 원자로 냉각재 압력 :  $26 \sim 28\text{kg/cm}^2\text{A}$
- 원자로 냉각재 펌프 밀봉주입수 유량 :  $25 \sim 28.4\text{ L/min}$
- 기가냉각수 공급 :  $27.2 \sim 32.7\text{ L/min}$

참고) 원자로냉각재펌프 밀봉유출수 유량은 원자로냉각재 압력이 낮을 때는 정상유량보다 낮게 유지되며 원자로냉각재 압력이 증가함에 따라 정상유량까지 서서히 증가한다.

### 주의사항

1. 원자로 냉각재 펌프를 기동하기전 반드시 원자로 냉각재 압력 및 온도는 첨부6.4의 제한곡선에 만족한 상태이어야 한다.
2. 원자로 냉각재 펌프 2대를 처음 기동할 때에는 원자로 냉각재 펌프 2A 및 2B를 기동하여 가압기 살수 운전이 가능하도록 한다.
3. 정지냉각계통이 운전되고 있지 않은 유로의 원자로냉각재펌프를 기동할 때는 원자로냉각재 온도와 압력이 급격하게 변화할 수 있으므로 주의한다.
4. 원자로냉각재펌프를 기동하기위해서는 최소 2분이상 해당 원자로냉각재펌프의 출력유량표가 운전중이어야 한다.

- 5 8 원자로냉각재계통의 가열을 위해 운전절차서 계통-02(원자로냉각재펌프 운전)에 따라 1대 또는 2대의 원자로냉각재펌프를 순차적으로 기동한다. \_\_\_\_\_/

- 원자로 냉각재 펌프 1A 제어스위치 : RC-HS 001A
- 원자로 냉각재 펌프 1B 제어스위치 : RC-HS 002A
- 원자로 냉각재 펌프 2A 제어스위치 : RC-HS 003A
- 원자로 냉각재 펌프 2B 제어스위치 : RC-HS 004A

- 5 9 원자로냉각재계통의 압력 및 온도를 매 30분마다 점검(정기-64)하여 운전제한치 이내에 있음을 확인하고 기록한다. \_\_\_\_\_/



# 경수로 비정상 운전 절차 (극히 일부 발체)

## 1.0 목 적

본 절차서는 단순한 원인에 의해 원자로가 트립되는 경우에, 모든 안전 기능을 점검하여 발전소의 안전상태를 확인하고, 환경으로의 방사능 누출가능성을 최소화하면서 발전소를 고온대기 상태로 안전하게 유지하며, 가능한 한 신속하게 정상 운영 절차서로 전환하기 위한 운전원 조치 사항을 기술한다.

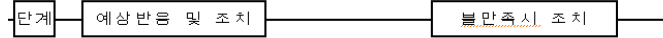
## 2.0 적용 시점

다음은 모두 만족:

- ◎ 원자로트립후 우신조치(우신-01) 완료,
- ◎ 단순원인에 의한 원자로 트립을 지시.

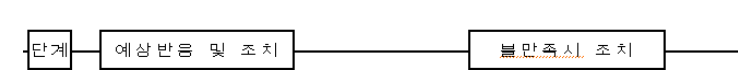
## 3.0 종료 시점

1. 단순 원자로 트립의 진단이 확인되지 않음.  
- 또는 -
2. 원자로트립의 안전기능 상태점검(5.0) 환경기준이 1개 이상 불만족.  
- 또는 -
3. 본 절차서 수행 결과, 다음을 모두 만족:
  - ◎ 모든 안전기능 상태점검(5.0)의 환경기준 만족,
  - ◎ RCS가 제어중이고, 고온대기 상태 유지중,
  - ◎ 계속 수행할 정상 운영 절차서가 준비되고, PNSC가 수행을 승인함.



## 4.0 절차

- \*1. 안전기능 상태점검(5.0)을 수행하여, 단순 원자로트립 진단을 **확인**한다.
  1. 사고를 제진단(우신-02)하여, **다음중 1개**의 절차서로 간다:
    - ◎ 해당 비상절차서,
    - ◎ 회복절차서(회복-01).
2. 절차진행 확인 흐름도(6.0)에, 원자로 트립시각을 기록한다.
- \*3. 가압기 수위가 다음을 모두 만족하는지 **확인**한다:
  - ◎ 가압기 수위 : 15~70%,
  - ◎ 가압기 수위추이 : 33~52.6%로 **복구**중.
- \*4. 가압기 압력이 사고후 P-T 곡선의 제한치 이내에서 다음을 모두 만족하는지 **확인**한다(참부 1):
  - ◎ 가압기 압력 : 135~165 kg/cm<sup>2</sup>A,
  - ◎ 가압기 압력추이 : 156.4~160 kg/cm<sup>2</sup>A로 **복구**중.
3. 증전펌프 및 유출유량을 제어하여, 가압기 수위를 33~52.6%로 복구한다.
4. 가압기 전열기 및 살수를 제어하여, 가압기 압력을 156.4~160 kg/cm<sup>2</sup>A로 복구한다.



- \*5. SBCS에 의해 RCS Tag가 292~299℃로 제어되는지 **확인**한다.
  5. 다음을 이용하여 RCS Tag를 292~299℃로 **복구**한다:
    - ◎ SBCS 수동제어,
    - ◎ 만약 SBCS가 운전불능이면, ADV 사용,
    - ◎ 터빈구동 주급수펌프 운전에 의해 RCS가 과냉될 우려가 있을 경우에는, 다른 급수 펌프(기동용 또는 보조 급수펌프)로 교체 운전.
- \*6. 1대 이상의 S/G가 다음을 모두 만족하는지 **확인**한다:
  - ◎ S/G 수위 : 23.7~90%(WR),
  - ◎ S/G 수위유지를 위해 주/보조 급수 제동이 운전가능.
6. 주/보조 급수제동을 운전하여 1대 이상의 S/G 수위를 23.7~90%(WR)로 복구한다.
7. 발전소가 안정상태로 유지되면, 본 절차서를 종료하고 PNSC의 지시에 따라 절차를 수행한다.
7. 만약 발전소 냉각이 필요하면, 발전소를 냉각한다.

끝

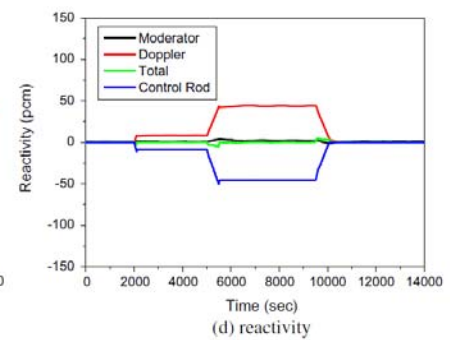
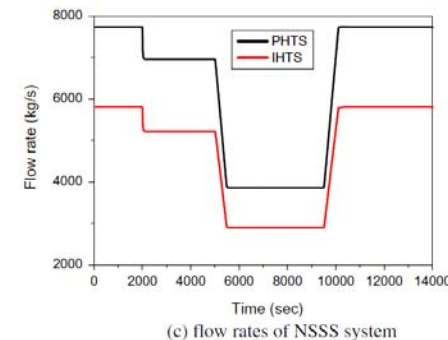
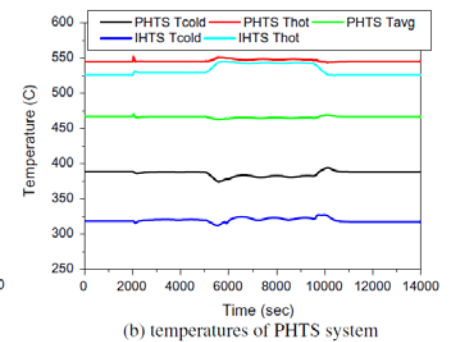
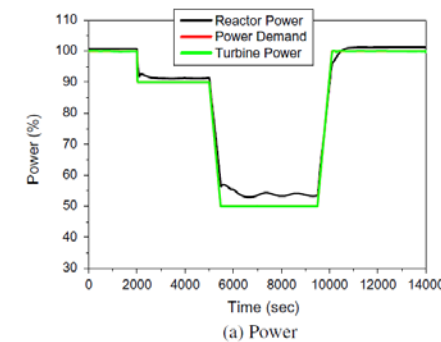
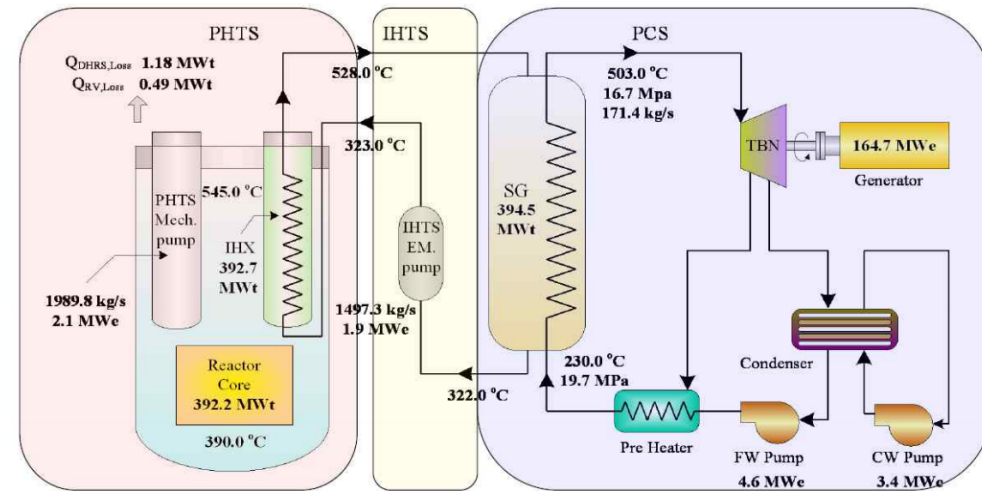
# PGSFR 운전 (1/2)

## - PGSFR 출력운전 논리

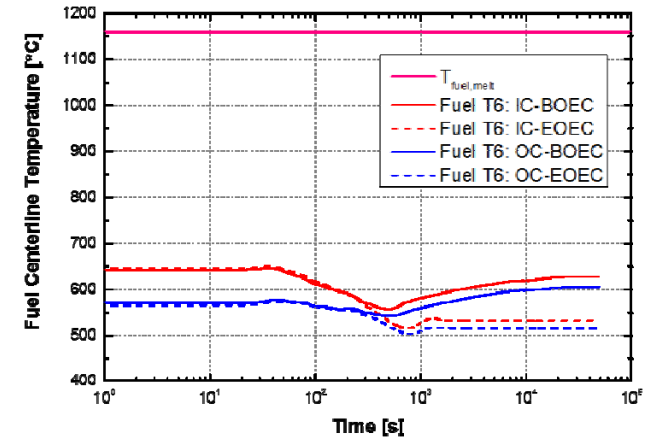
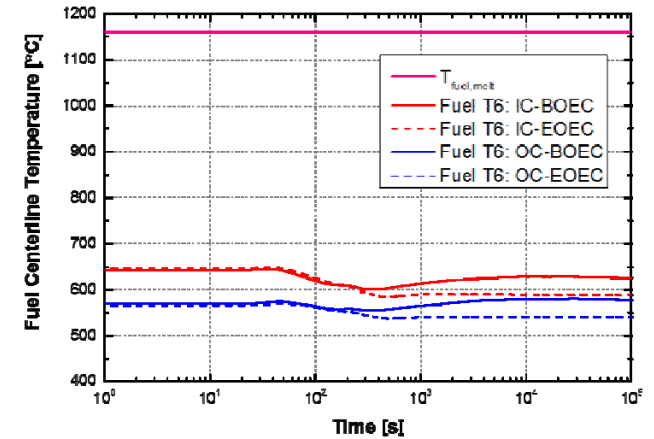
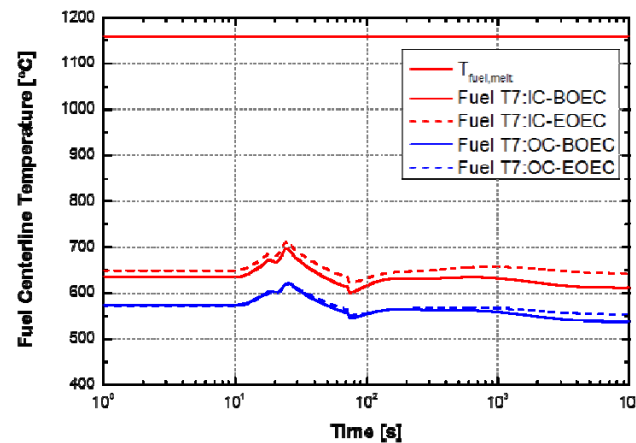
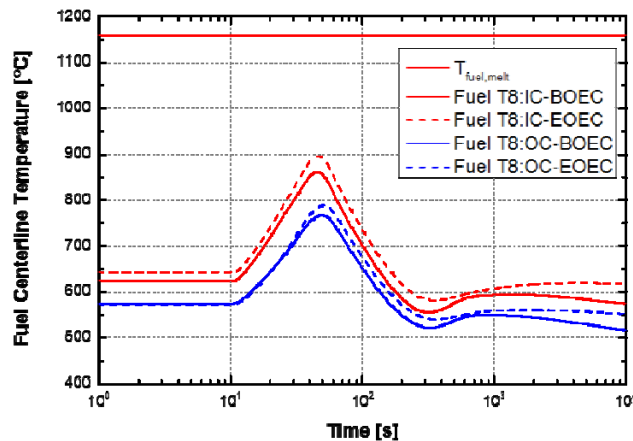
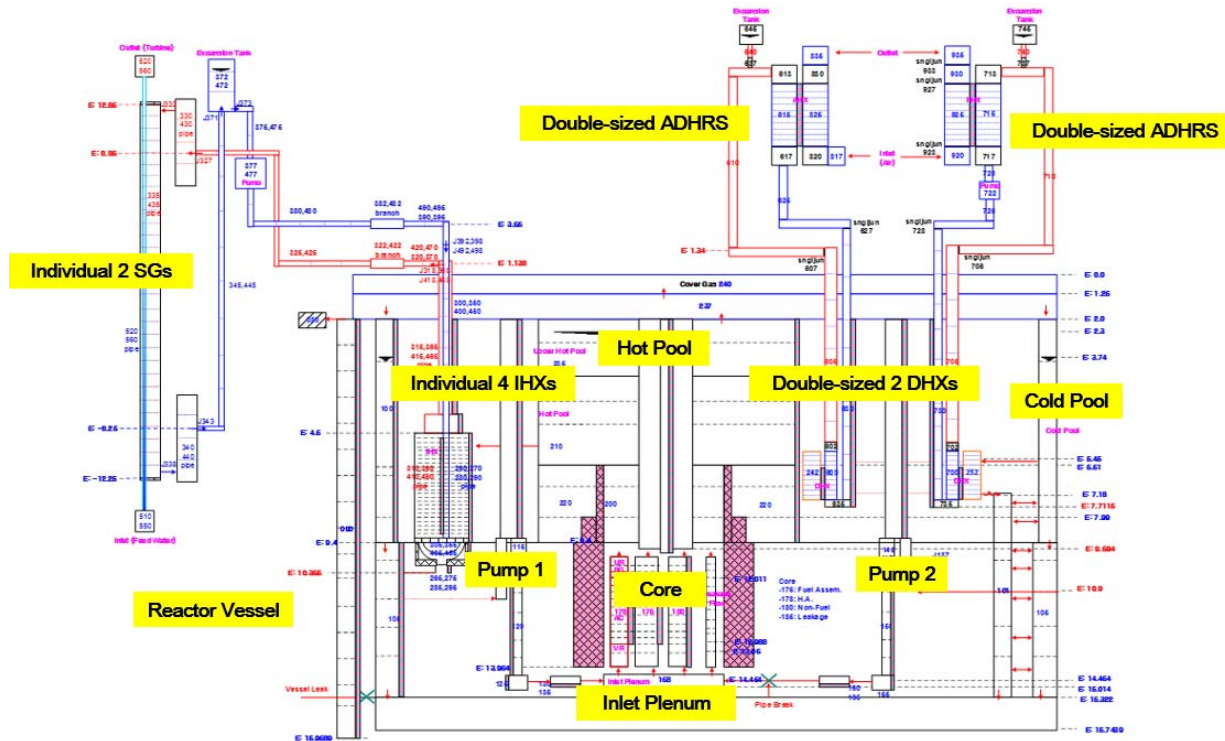
- 정상 출력 운전 : 반자동 -> 자율운전
  - ✓ 제어봉 그룹 선택 (현재 primary CR 전체)
  - ✓ 제어봉 속도 선택
  - ✓ DCS structure : PI controllers (reactor power, turbine power, FW flow rate, PHTS flow rate, IHTS flow rate, TCV...)
  - ✓ 비상 운전 절차 (수동)
- 기동/정지 운전 : 수동 (자율 운전 도입)
  - ✓ later
- 비상 운전 : 자동 및 수동 대처 (자율운전 도입)
  - ✓ 원자로정지 및 공학적안전설비개시(자동)
  - ✓ 비상 운전 절차 (상황 판단 및 수동 조치)
  - ✓ later

## - 정상출력 운전 관련 변수

- 제어변수 : 중요변수 ~10개 (총 50개 미만, 대부분 연동되어 있으나 이상 상태 확인 및 조치 필요)
- 감시변수 : 50개 미만 (플랜트 상태 확인)



# PGSFR 운전 (2/2)



# 실험장치 운전 절차 (일부 발체)



그림 2. AHX 성능시험 순서도

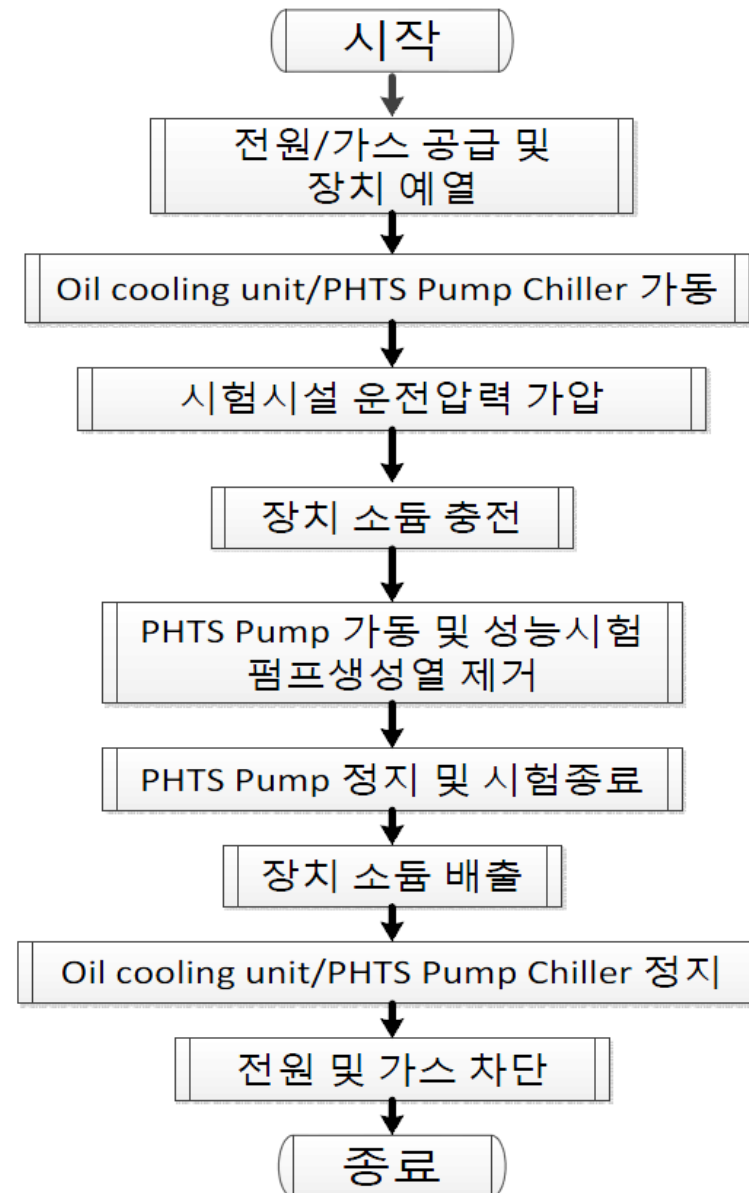


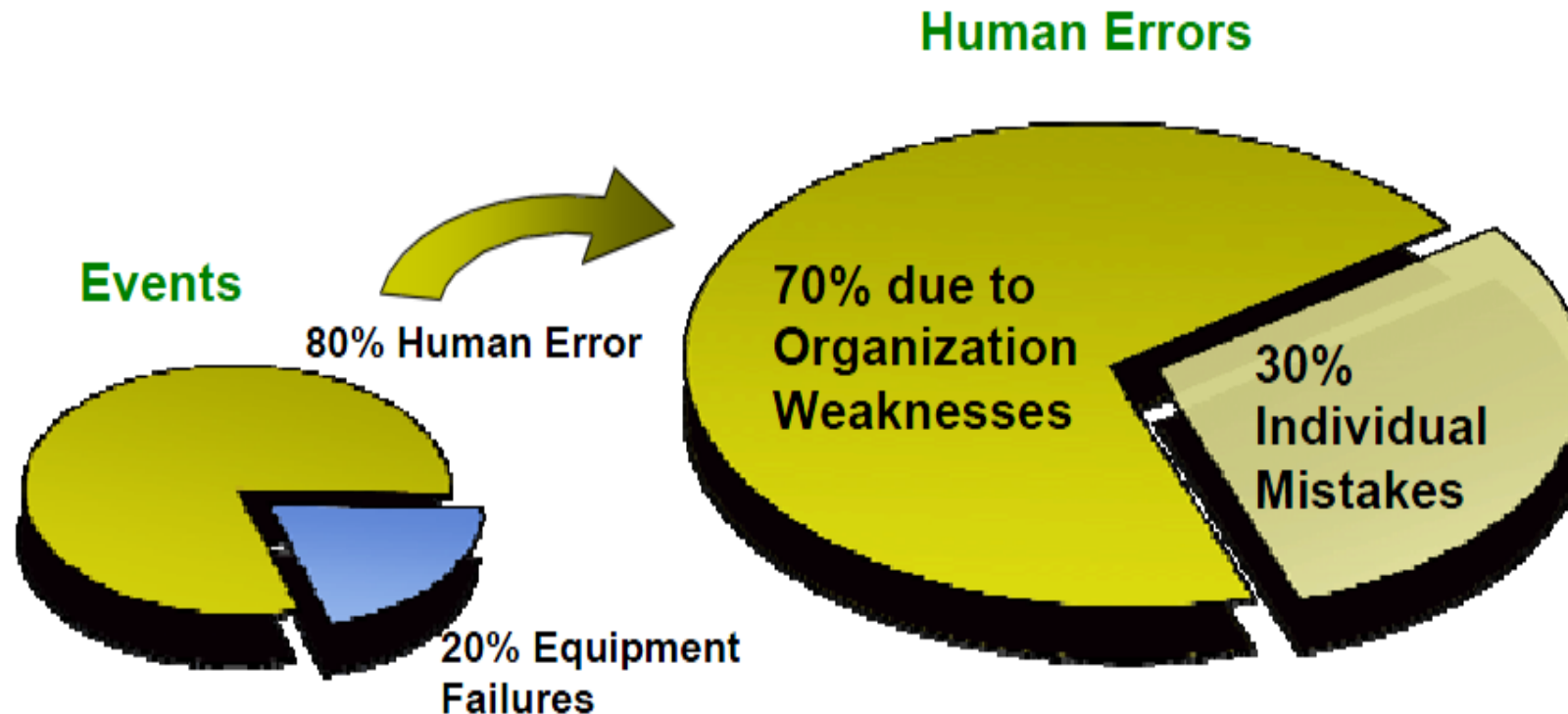
그림 3 기계식 펌프 운전절차



# 운전 (인적 오류로 인한 사고 비율)

- 대부분 (3/4) 오류는 잠재적인 조직의 약점 표출, 30%는 개인 잘못 (작업 실수 등) by INPO (Institute of Nuclear Power Operation (원자력발전운영협회). [1995~1999]
- 21 of 26 (81%)가 human error by NRC.
- The report disclosed that “the risk is in the people—the way they are trained, their level of professionalism and performance, and the way they are managed.”
- KINS homepage [opis.kins.re.kr] human error 20% 이내 (대부분 직접 인적 사고, 넘어짐 등..., 일부 운전/유지보수 요원 잘못 지적, 그러나 실제 사건처리 방향은 절차 개정, 즉 조직 문제 가능성 높음)

Reference) Human Performance Improvement Handbook, Vol. 1: Concepts and Principles, DOE Standard DOE-HDBK-1028-2009.



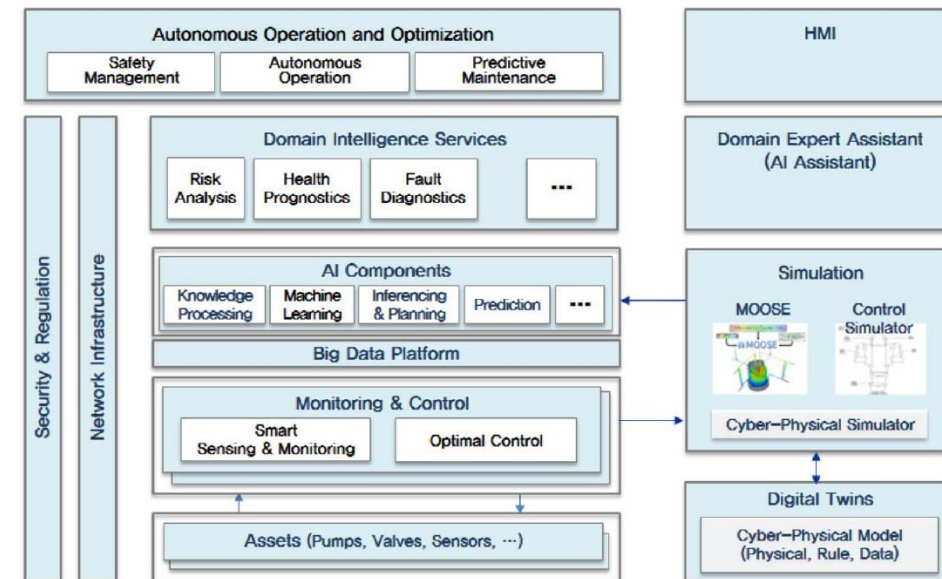
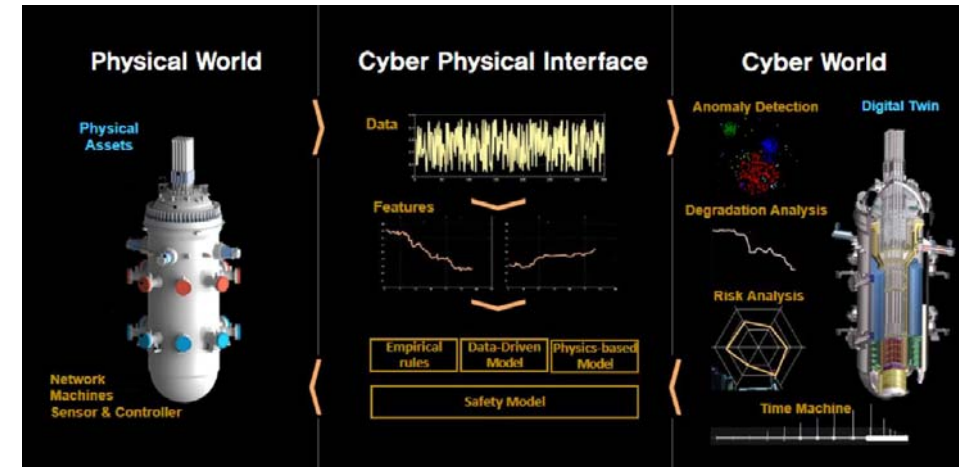
# Roadmap 제안 (What)

## - 요건 정의 및 분석

- SW 개발 절차 준용 (SW 용어 도입)
- 눈에 보이는 시스템 현재 없다. (문제점)
- 학습 자료
  - 해석 자료 이용, 초기 학습 (걸음마, 기존 연구)
  - 시스템 자료 (설계, 해석, 실험...)
- 자율운전을 위한 AI system 구축
  - 관련 연구 분석 및 적합한 모델 선정

## - 최종 목표 : AURA

- level 4 autonomous unmanned reactor operation with artificial intelligence for PGSFR
- Internal accident + external event 고려한 자율 운전
- License 획득 (자동차 자율주행 기술 : 인허가성 담보)



# Roadmap 제안 (How)

## - 역할

### • ETRI

- 관련 연구 분석 및 적합한 모델 선정
- ExoBrain, 플랜트 자율운전, google car, AlphaGo, Watson, Mxnet, TensorFlow...
- 자율운전을 위한 AI 시스템 구축

### • KAERI

- 걸음마 자료 제공 (초기 단순 해석, 경향 파악)
- 학습 자료 추가 및 정밀화/고도화
- PGSFR 설계 및 동특성 자료 해석/분석/데이터화
- 간단 시험 시설 활용/구축 및 테스트 진행

### • 학계

- 과제 결과 검토 및 지원
- 유사 플랜트 적용성 분석 (ex KAIST SMR)

### • 산업계

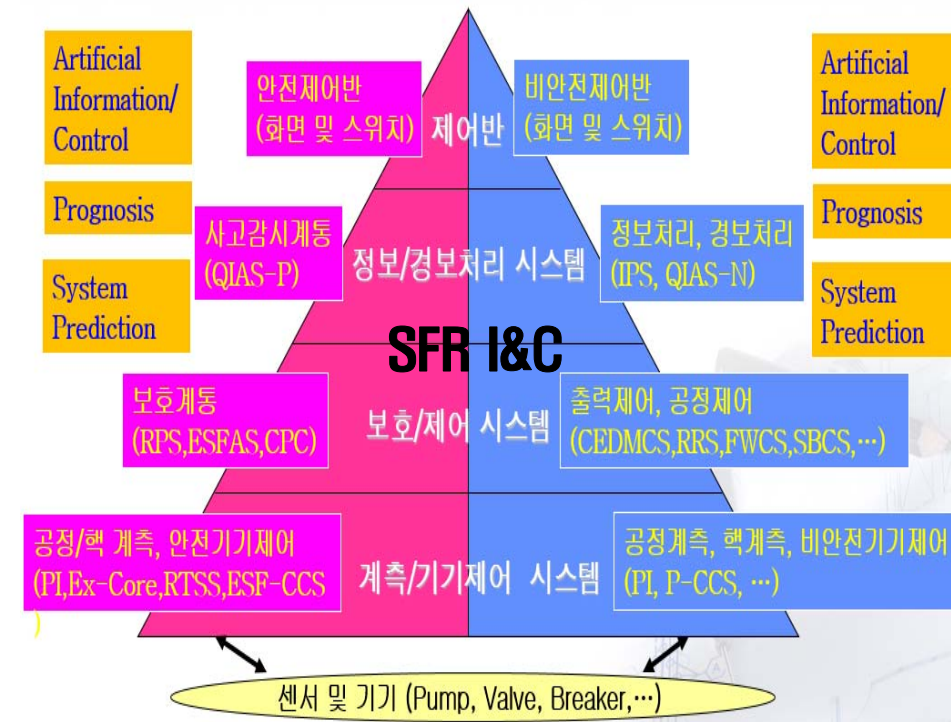
- 원자력 인허가에 적합한 최종 제품 생산 공급

ETRI



안전시스템

비안전시스템



**SFR SYSTEM DESIGN/ANALYSIS**

# Roadmap 제안 (1/2)

## AURA (Artificial intelligence for Unmanned Reactor Autonomy operation)

### - 1단계 : feasibility 확인 및 new paradigm 설정

- 현황 분석 -> 방법론 개발 (연구방향 구체화) -> 알고리즘 선정 -> new paradigm 설정
- $\alpha$ -SCPA,  $\alpha$ -INCIA, AI 기술 분석 및 타당성

DeepMind(Alphabet), WayMo, Watson, Mxnet(Amazon AI cloud), TensorFlow(python) etc...

### - 2단계 : $\alpha$ -AURA system 구축

- Level 2 autonomous driving 기법 도입 (정상 상태 자율운전)
- 초기 학습자료 생산 ( $\beta$ -SCPA,  $\beta$ -INCIA, MARS-LMR)
- policy network 초안 구성 : Learning (AI [Deep learning 등], data mining...) 기술
- 정상운전 절차적 운전제어(power control, startup/cool-down operation)를 자율운전으로 대체

PGSFR 운전 특성 고려 (작은 출력 증/감발 운전 및 기동/정지 운전 예상)

### - 3단계 : $\beta$ -AURA system 구축

- Level 3 autonomous operation (이상 경보 발생, 안전계통 자동화 운전, 필요시 운전원 개입 제어)
- learning data 생산 (SCPA, INCIA, MARS-LMR 및 simulator 활용 가능성 타진)
- policy network + limited value network + Monte Carlo search (비안전제어계통 운전 자율화)
- protective function 기존 플랜트 개념 (automatic[인허가요건] & manual override)



# Roadmap 제안 (2/2)

## AURA (Artificial intelligence for Unmanned Reactor Autonomy operation)

### - 4단계 : AURA ver. 0.5 system 구축

- Level 3.5 autonomous operation (safety 자율운전 포함, 운전원 감시)
- transient + internal accident 자율운전
- learning data 추가/정밀화/고도화 (SCPA, INCIA upgrade, MARS-LMR & simulator )
- Defense-in-Depth and Diversity 확보 방안 (AURA 오류 대처 및 제한적 license)
- policy network + value network (전체 안전/비안전계통을 활용한 내부 사고 승리 확률 계산)
- PGSFR back-fit 필요 (AI-based sensor, actuator, procedure 추가)

### - Final : AURA ver. 1.0 system 구축

- level 4 autonomous operation
- Internal accident + external event 고려한 완전 자율 운전 (무인운전)
- policy network + value network + Monte Carlo search 완성
- License 획득 (자동차 자율 주행 기술 개발에 따라 인허가성 담보 가능)
- PGSFR back-fit 추가 필요



- 실험장치 운전 : 좋은 예제 및 중간 점검 포인트
  - ✓ 단위 기기 시험 운전
  - ✓ 종합실증 실험 장치 운전
- 원자로 운전
  - 정상 출력 운전 : 반자동
    - ✓ 제어봉 그룹 선택 (PGSFR : primary 6개, secondary 3개) (경수로 : control bank A,B,C,D, shutdown bank A,B,C,D)
    - ✓ 제어봉 속도 선택 (high speed, normal speed or variable speed)
    - ✓ PI controllers
      - reactor power, turbine power, FW flow rate, PHTS flow, IHTS flow, steam pressure <- load index
  - 기동/정지 운전 : 수동 및 기동 시험 절차 (기동중 검사 포함)
  - 비상 운전 : 자동 및 수동 대처
    - ✓ 원자로정지 및 공학적안전설비개시 (자동)
    - ✓ 비상 운전 절차 (상황 인식 및 수동 절차 진행)
  - 최종 목표 : (인적 오류에 의한 운전 잘못 가능성 최소화 및 안전성 향상)
    - ✓ 상황 인식 및 가용한 모든 수단 동원
    - ✓ 방사능 누출 최소화 (대중 보호)
    - ✓ 지능형 자율운전 자동차의 장기적 최종 목표 (self driving stage 4) 와 동일



**Thank you  
for your attention**