

---

# 혁신형 SMR 가혹환경용 압력계측기 개발 계획

한국원자력연구원 배상훈

2023. 10. 25.

# 혁신형 SMR 공정계측분야 기술개발 목표

# 다목적 고정밀 계측시스템 개발 과제



연구과제명	자율운전성능과 안전성 향상을 위한 다목적 고정밀 계측시스템 개발
연구책임자	이준구(한국원자력연구원 SMART원자로기술개발부)
총연구기간	2023. 4. ~ 2027. 12. 31. (4년 9개월)
당해년도	2023. 4. ~ 2023. 12. 31. (9개월)
출연처	과학기술정보통신부 (혁신형 소형모듈원자로 기술개발사업)
연구개발비 (백만원)	정부지원(16,870) 총연구비(18,613) : 현금(17,057) + 현물(1,556)
참여인원	주관기관(30명, 신규 2명 포함) 및 8개 공동기관(62명)
공동연구개발기관	한국광기술원, (주)인포비정보기술, (주)미래엔, (주)우진, (주)두온시스템, 조선대학교, (주)리얼게인, (주)유저스, 쉘텍, Manometr

### 3세부 - 공정계측 센서기술 개발과제



과제 구성	과제명	주관기관	과제책임자
주관	혁신형 SMR 기술개발사업	KAERI	
제1세부기술	다목적 고정밀 내환경 분포센싱 기술		
공동연구	분포센서 광신호처리 기술개발	한국광기술원	정제안
제2세부기술	무선저전력 복합센싱기술		
공동연구	무선저전력 복합센서 구현	(주)인포비정보기술	김창배
공동연구	무선 스마트 계측기기 CGID 입력대응	(주)미래엔	손광영
제3세부기술	공정계측 센서기술		
공동연구	고온환경 유량계측기 개발	(주)우진	김건명
공동연구	GWR형 원자로 수위계측기 개발	(주)두온시스템	김철진
공동연구	공정계측기 온라인감시 및 고장예측 알고리즘 개발	조선대학교	김종현
위탁	계측기 점검주기 해석 및 설치기술 지원	(주)솔텍	허태영
국제공동연구(위탁)	가혹환경 조건 압력계측기 개발	Mamometr	Sergiy
제4세부기술	기기건정성 상태감시 계측시스템 개발		
공동연구	상태감시 계측시스템 설계 및 제작	(주)리엘게인	유경탁
공동연구	온라인 감시기법 및 구조결함 판별기법 개발	조선대학교	김종현
제5세부기술	노외중성자속 감시기술		
공동연구	노외중성자속 감시장치 기술개발	(주)유저스	조진복
국제공동연구(위탁)	노외중성자속 검출기 기술개발	(주)TFS	미정

혁신형 SMR 기술개발사업

2-7-과 다목적 고정밀 계측시스템

# 공정계측기술 개발 최종 목표



## □ 공정계측(압력) 기술개발과제 최종목표

1단계('23-'25)

혁신형 SMR 공정계측 설계

1차: 제작사 방문 협의-압력 측정 기본개념 및 사양 분석

2차: 압력센서 설계 요건 분석 및 시험방법 계획 수립

3차: 시작품 제작 및 시험장치 구성

2단계('26-'27)

혁신형 SMR 공정계측 기술 검증

4차: 제작 완료 시작품에 대한 성능 시험 평가

5차: 계측기 설치시 현장 연계방안 수립과 기기검증 계획 수립

혁신형 SMR 공정계측기 시작품 설계, 제작을 통한  
공정계측 인허가 입력자료 생산

# 공정계측기술 정량적 목표치

## □ 주요 예상 정량적 목표

평가 항목 (주요성능 Spec1)	단위	전체 항목에서 차지하는 비중2) (%)	세계최고 수준 보유국/보유기업 ( / )	연구개발 전 국내 수준	개발 목표치					표준 인증 기준3)	기준 설정 근거4)	평가 방법5)
			성능수준		성능 수준	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도			
연구개발과제 TRL (1~9단계) (1세부-6단계)			3	3	3	3	4	5	6			
연구개발과제 CRL (1~9단계) (1세부-2단계)			1	1	1	1	1	1	2			
3-1.유량계/압력계 RA1) of aged sensor ass'y	%	15	-	-			5% 이내	5% 이내	5% 이내	KASTO 03-209 19-19	설계사양	공인시험성적서
3-2.수위계 RA1) of aged sensor ass'y	mm	15	±10	-			±50 mm	±50 mm	±50 mm	±50mm m	설계사양	공인 시험성적서

- ❖ 온도/압력/방사선 의 개별적인 기기환경시험은 **공인시험기관에서 수행 예정**
- ❖ 운전 환경에 맞는 **특수제작 수위계용 챔버(고온/고압)** 및 **유량계용 시험루프에서 자체 시험은 별도 수행 예정**
- ❖ 압력계 -Transducer 및 remote transmitter로 고온/고방사선 저항 운전조건 만족
- ❖ 유량계 - Clamp-on타입 + harsh 환경조건 및 진동 고려
- ❖ 수위계의 경우 GWR probe 로 내진요건 및 정확도 목표

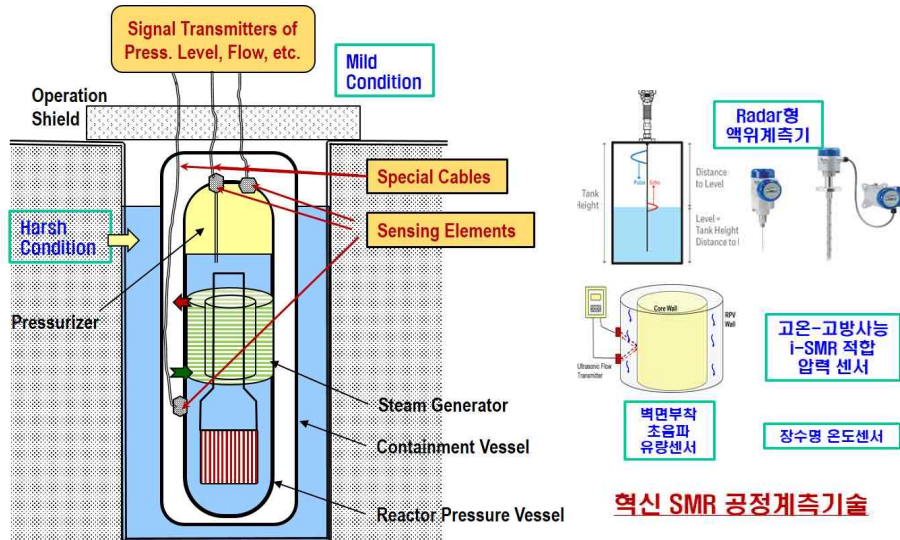
# 공정계측기술 연구개발 내용

## < 3세부 공정계측 센서기술 >



## 3세부 전체 연구내용

### 공정계측 센서기술 개발



### 기존 원전용 공정계측기 기술의 i-SMR 적용 한계

- 혁신형 SMR 원자로 특성상 소형화 일체화된 구조 적용
- 노심 센서간 근접성에 의한 극한 환경조건과 기기 생존성 문제
- 경제성을 위한 장주기 운전과 계측기 유지보수 전략 변경
- 공정계측기 설계, 연계조건, 시험 및 검증조건 등의 변화

### 연구내용

#### 공정계측기 요건 분석 및 설계

- 계측기 환경요건 및 설계요건 분석
- 설치조건 및 연계사항들 사전 점검
- 적용기술기준 및 규제요건 분석
- 제작 사양 및 추가 개발요소 식별

#### 공정계측기 시작품 제작 시험

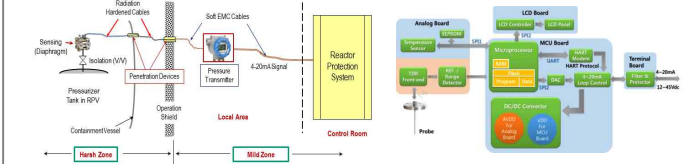
- 초음파유량계/GWR/압력계 시작품 설계 및 제작
- 시작품 제작-챔버 및 시험루프 성능시험 및 내환경 특성 평가
- 시작품 보완 및 기기검증 계획수립

#### 점검주기 논리 및 온라인 신호 검증/고장예측 알고리즘 개발

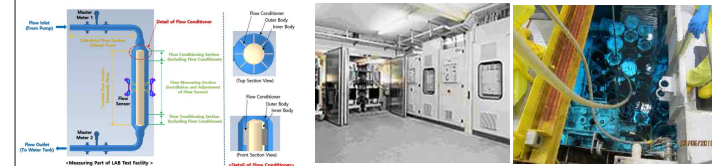
- 계측기 드리프트 데이터 분석과 교정 및 점검주기 설정 논리개발
- 온라인감시 신호검증 및 고장예측 알고리즘 구현과 검증

### 시작품/검증/설계입력

#### 혁신형 SMR 유량/수위/압력계 설계 요건 개발

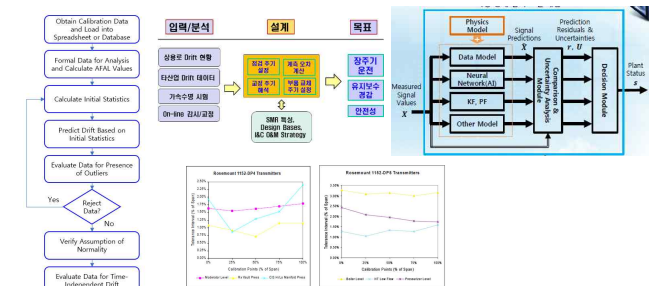


#### 공정계측기(유량/수위/압력) 시작품 제작 및 시험



#### 드리프트 분석 및 점검주기 논리개발

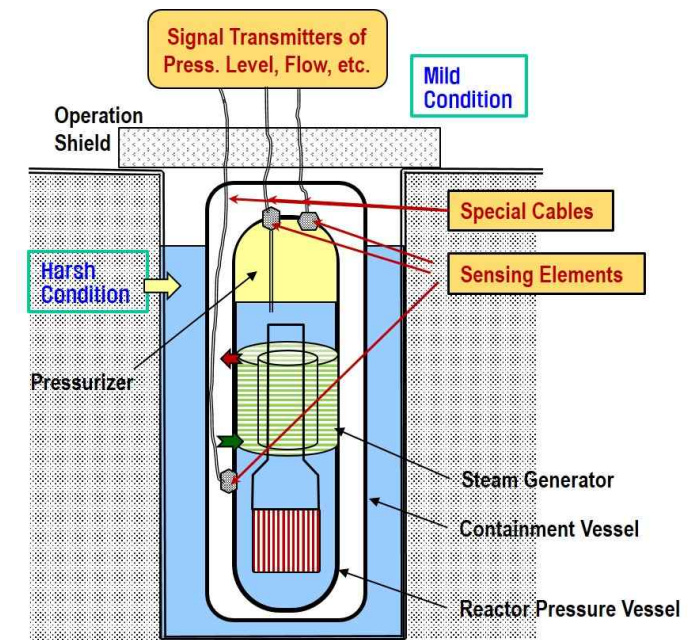
#### + 온라인감시 신호검증 및 고장예측 알고리즘 개발





### 3 세부 기술 기본개념

- ❖ 혁신 SMR 공정계측기 기술개발을 위한 기본 개념
  - i-SMR 원자로의 1차측 계통(증기발생기 포함)은 소형화 일체화된 구조임
  - 이에 따른 계측기 설치 공간에 많은 제약이 따르고, 노심과 센서간 거리가 가까워져 온도, 압력 등 환경조건이 더욱 가혹해짐
  - 일체형 원자로구조물의 특성상 관통부 및 센서 측정 위치간 다른 구조물들 간 연계 요소들이 많아져 설계의 기술적난이도가 올라감
  - 높아진 환경 조건 하에서의 센서 생존성 및 성능요건을 심도있게 고려해야 됨
  - 경제성을 위한 장주기 운전이 필수인만큼 이를 대비한 계측기 유지보수 전략 변경
  - 가장 시급한 개발이 필요한 원자로 내부 유량, 압력, 수위를 계측하기 위한 공정계측 센서 및 신호 케이블 등 필수요소들을 개발하며,
  - 공정계측기 개발은 설계, 제작, 시험, 평가 등을 거쳐 그 성능과 결함들을 미리 발견하고 보완하여 i-SMR 환경에 적합한 공정계측기 요건들을 결정하는 것을 목표로 함

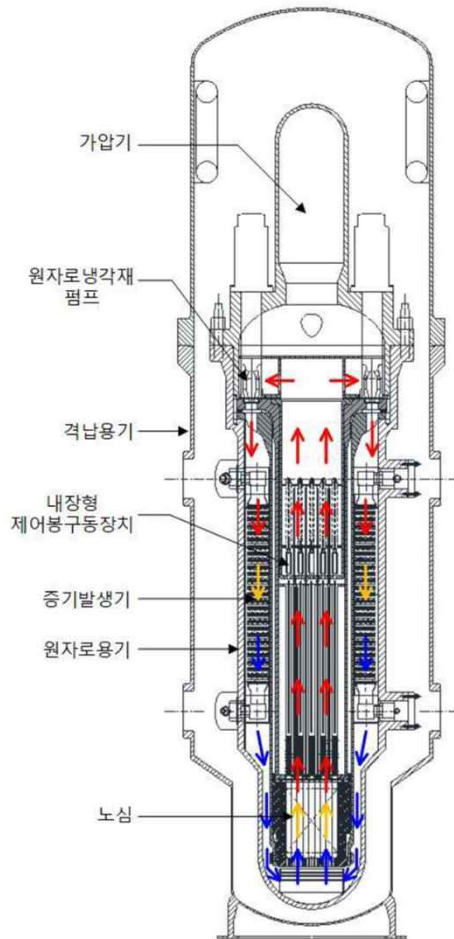


i-SMR 공정계측기 개념도

# 가혹환경 조건 압력계측기 개발 방안

# 혁신형 SMR 및 NuScale 형상

## □ 혁신형 SMR

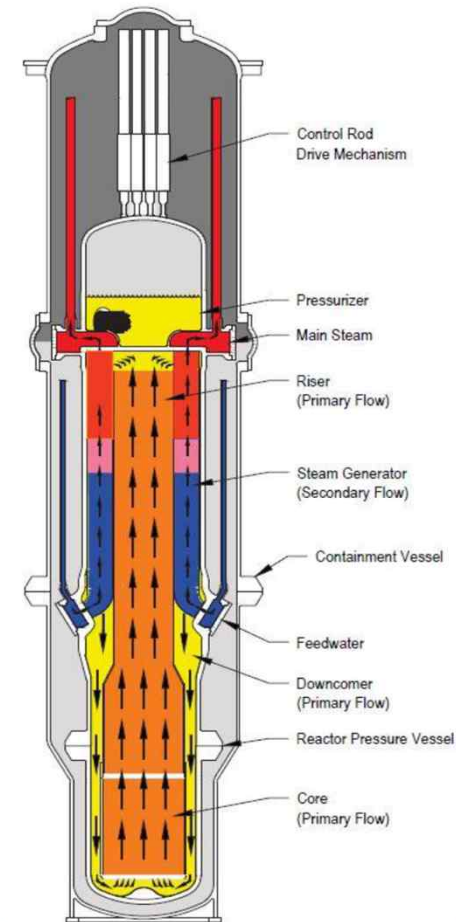


### 가장 큰 특징

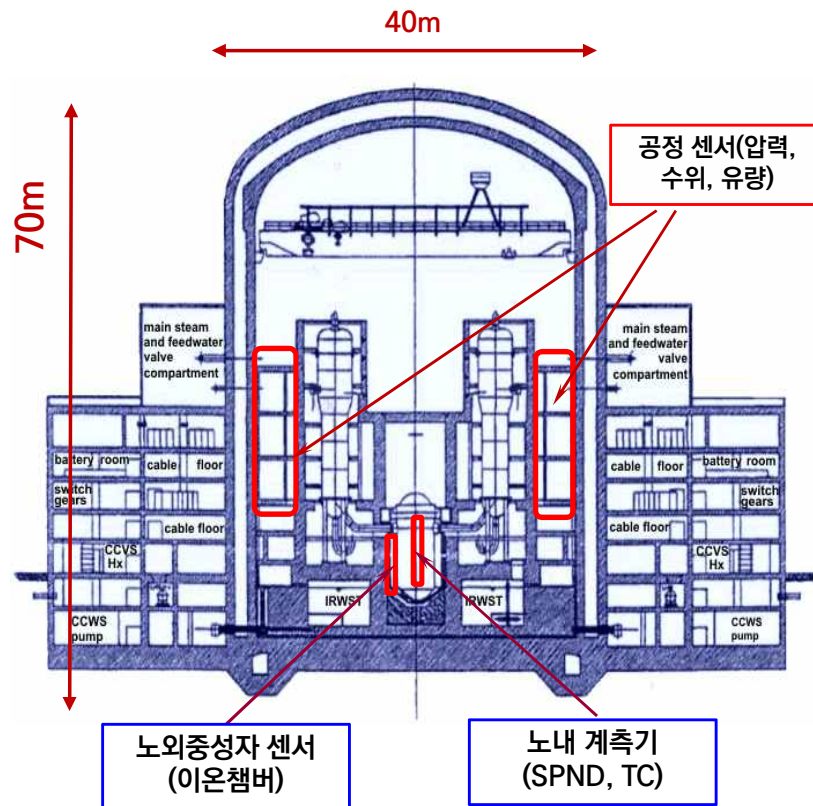
\* 일체화 격납용기  
(Integrated Containment Vessel)



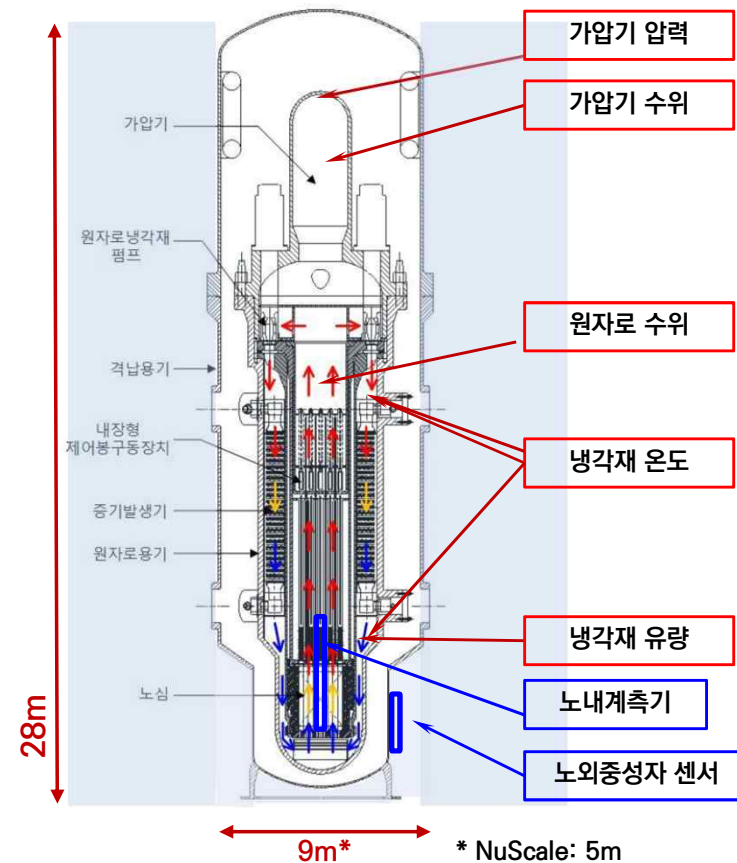
## □ NuScale Power Module (NPM)



# NSSS 센서 위치: i-SMR vs. PWR



PWR NPP



i-SMR 계측기 예상 위치



# 센서의 설치 환경 조건 예-NuScale

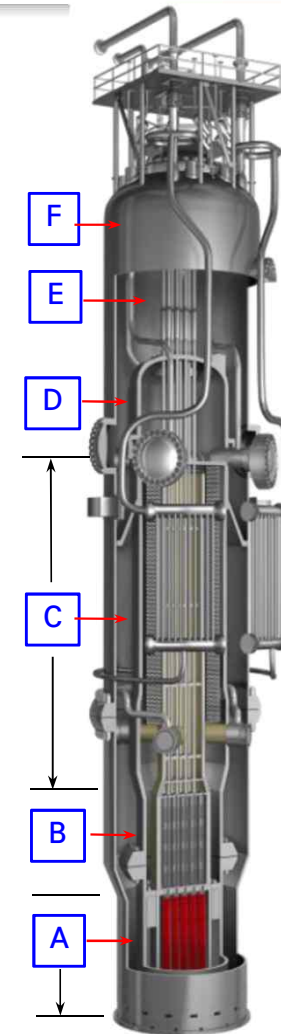
Table 3C-6: Normal Operating Environmental Conditions

Zone	Temperature (°F)	Pressure (psig) (Nominal)	Maximum Relative Humidity (%) <sup>(1)</sup>	60 Years Integrated N Dose (Rads)	60 Years Integrated $\gamma$ Dose (Rads) (Includes fission $\gamma$ , N- $\gamma$ , coolant)	Water Level (ft. above RXB pool floor)
A	487 (lower RPV wall)	<(-14.6) <sup>(2)</sup>	0	2.42E8	9.01E10	47' (inside CNV for refueling)
B	491 (RPV wall) 295 (CNV wall)	<(-14.6) <sup>(2)</sup>	0	6.71E8	4.51E10	(inside CNV for refueling)
C	551 (RPV wall)	<(-14.6) <sup>(2)</sup>	0	1.10E9	4.11E7	47' (inside CNV for refueling)
D	618 (outside top of PZR) 295 (CNV wall)	<(-14.6) <sup>(2)</sup>	0	6.00E7	3.01E6	47' (inside CNV for refueling)
E	581 (surface of MS piping)	<(-14.6) <sup>(2)</sup>	0	4.77E7	2.26E6	47' (inside CNV for refueling)
F	295 (upper CNV volume)	<(-14.6) <sup>(2)</sup>	0	3.55E7	1.51E6	-
G	140	0	<100	1.85E6	4.35E4	-
H	105	0	<100	above bioshield EL 145	2.65E1 5.50E0	above bioshield EL 145
I	140	0 plus submergence head	N/A	pool center next to operating module	0 8.70E7	pool center (coolant only) next to operating module
J	105	0	<100	0	6.53E04	69' (normal operating level outside CNV)
K	85	0	<100	0	1.58E01	-
L	85	0	<100	0	1.58E01	-
M	105	0	<100	0	5.26E00	-
N	105	0	<100	0	-	-

Notes:

1. Normal service relative humidity outside of the containment vessel is shown as <100%; the relative humidity inside the containment vessel is 0% because the environment is normally maintained in a vacuum.
2. The pressure inside the CNV is maintained less than the saturation pressure corresponding to the reactor pool pressure; this results in a vacuum.
3. The boron concentration in the pool areas will be nominally 1800 ppm. EPRI primary water chemistry guidelines show the pH of a pool with 1800 ppm boron concentration to be 4.75.

\* [7] NuScale Power, "Final Safety Report, Ch. 3," Rev.02



TID 최대  
7 decade  
까지 추정  
(NuScale)

## 센서의 설치위치 환경 조건

운전 모드	환경변수	NuScale*	상용로**
Normal	Temperature	146.1 °C (CNV surface temp.)	50 °C
	Pressure	-14.6 psig (-0.1 Mpa) (Inside CNV, Vacuum)	Atm. (대기압)
	Radiation	3x10 <sup>4</sup> Gy (gamma) 6x10 <sup>5</sup> Gy (neutron) (outside top of the PZR)	2x10 <sup>4</sup> Gy (gamma) ? (neutron)
Design Basis Events	Temperature	288 °C (CNV surface temp.)	182 °C
	Pressure	958 psig (6.6 MPa) (HELB)	60 psig (0.42 Mpa)
	Radiation	3.9x10 <sup>5</sup> Gy (gamma) 3.84x10 <sup>5</sup> Gy (beta) (for 100days)	3.3x10 <sup>5</sup> Gy (gamma) 2.0x10 <sup>6</sup> Gy (beta) (for 182 days)

\* [8] Brian Arnholt, "Advancement in Technology Applications for the NuScale Power I&C design," Nov. 2019 and [7] NuScale Power, "Final Safety Report, Ch. 3," Rev.02 → D-Zone 기준

\*\* [9] FSAR Ch.3 for KSNP

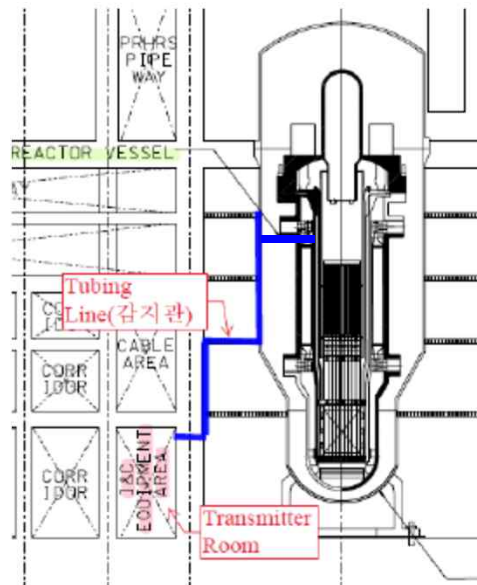
➡ 격납용기 내부 환경에서 전자회로(특히 CMOS/IC칩) 소자의 생존가능성은 없음



# 계측센서 구현 방법

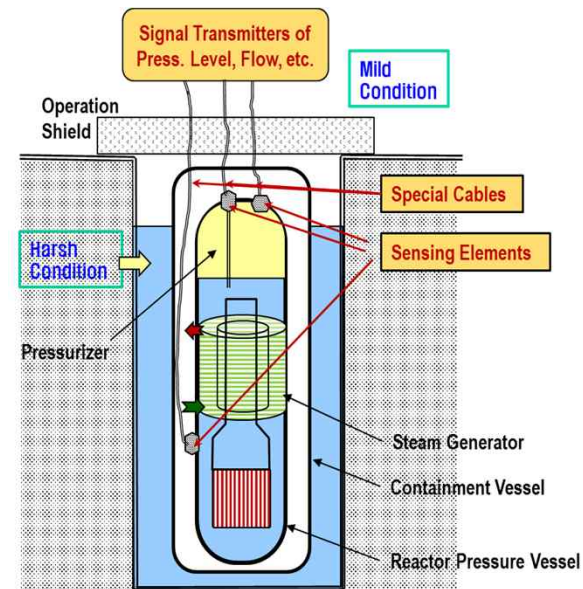
## 1안

- 상용로 방식 계측계통 설계
  - RTD, TC, Pressure Transmitter
- 외부 계측기 Room 설치
  - 감지배관(도압배관) 인출
    - 격납용기 관통, 격리밸브 장착



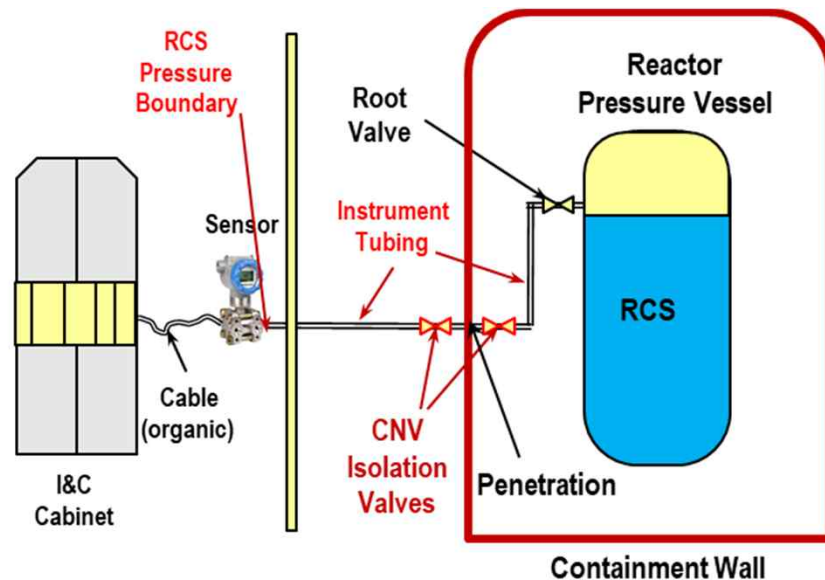
## 2안

- SMR 용 신규 센서 개발
  - NuScale 접근 방식
- (유체)감지관
  - 감지관(도압관) CV 관통 배제
    - 전기선(Cable)으로만 관통



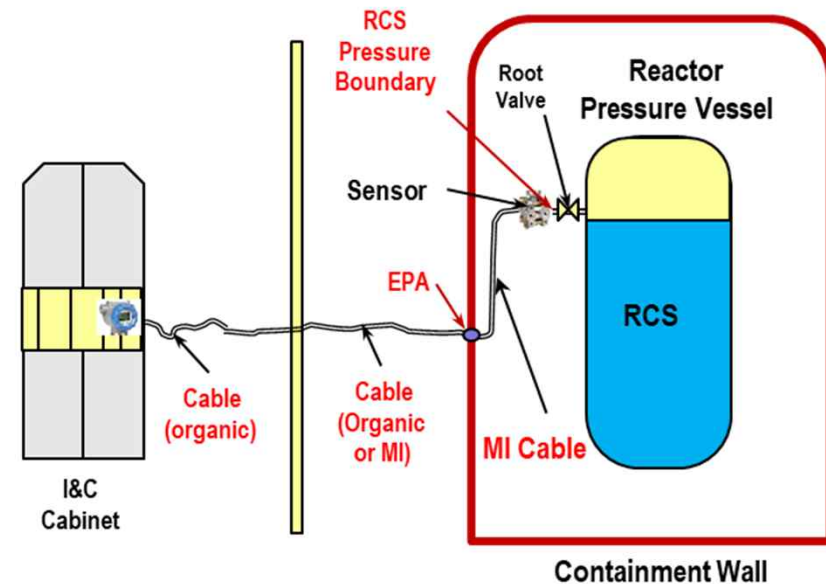
# 공정계측센서 설치방안 - 1안 vs 2안

1안



Method 1) RCS Instrumentation with Tubing

2안



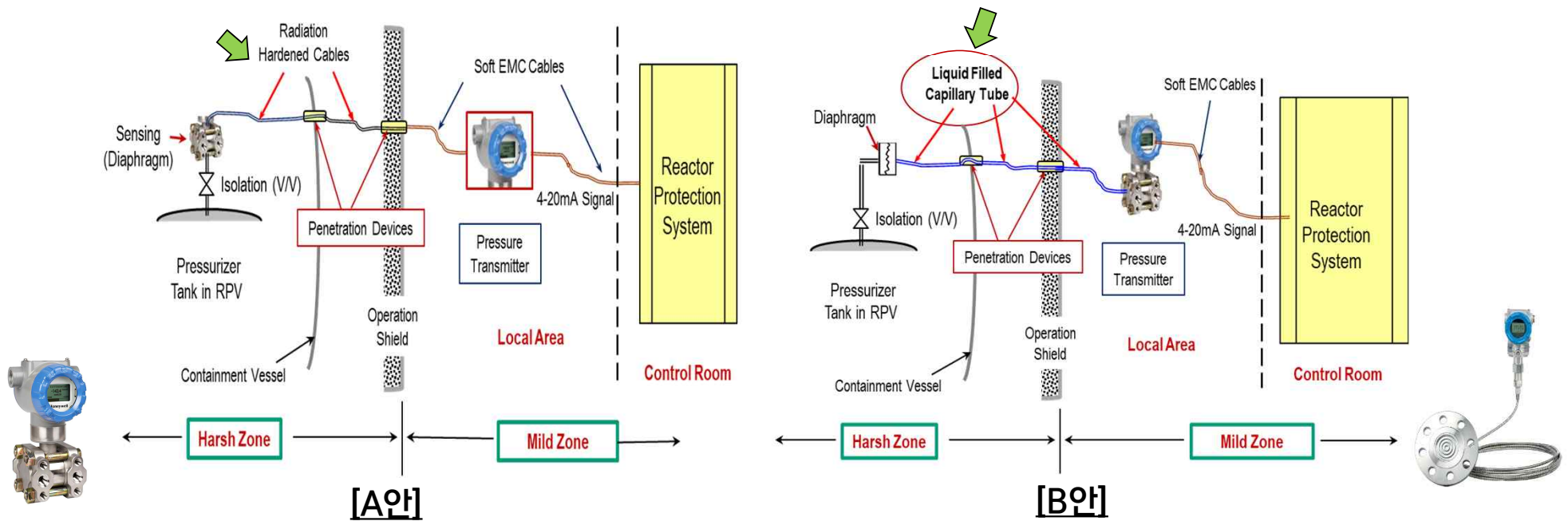
Method 2) RCS Instrumentation with Cabling

## Tubing과 (MI) Cabling 적용 비교

# 압력계측센서 설치 방향

## □ NSSS 압력 계측 방안

- 압력 감지부 (Sensor-Transducer)만 CV안에 장착 + Remote Transmitter
- 압력 (신호 전달): MI cable (A안) 혹은 Capillary Tube (B안)



→ 기술적 타당성, Qualification, 압력경계 문제 등의 기술적 현안 존재

# 압력계측센서 및 시스템 공급망 확보 방안



## □ 공급망 확보를 위한 기본방향

- 혁신 센서 개발 사업 과제에서 생산한 압력 계측기의 Technical Data 에 대한 인허가 자료 생성
- 성능시험 및 결과 기반 NSSS 안전등급 압력계측기에 대한 EQ 기기검증 계획 수립  
(환경조건/성능조건 등 PSAR로 확정된 수치 및 자료를 기반으로 수행)
- 참여 제작사가 공급사가 될 수 있도록 후속 인허가 획득 및 후속 설계변경 과정에 참여 유도
- 원자력 QA 마련 등의 후속 절차 지원



# Thank you

## Q & A