

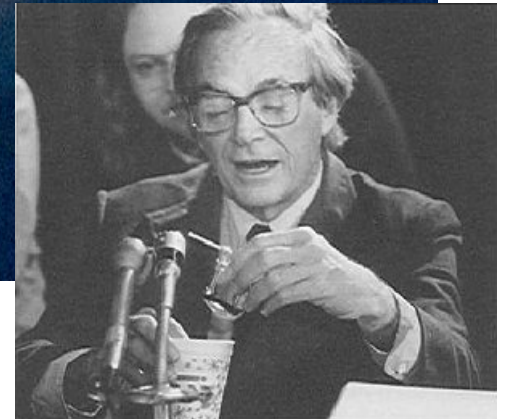
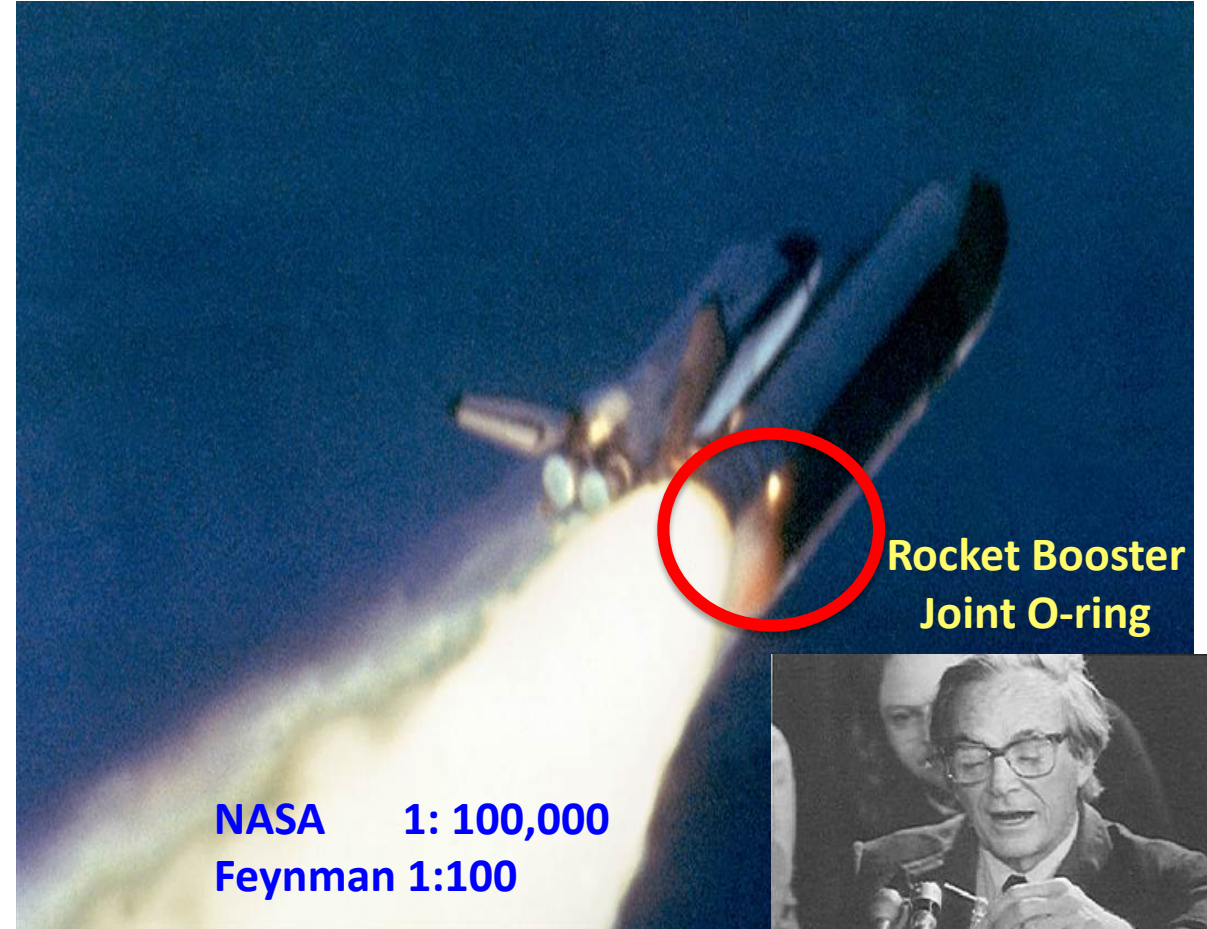
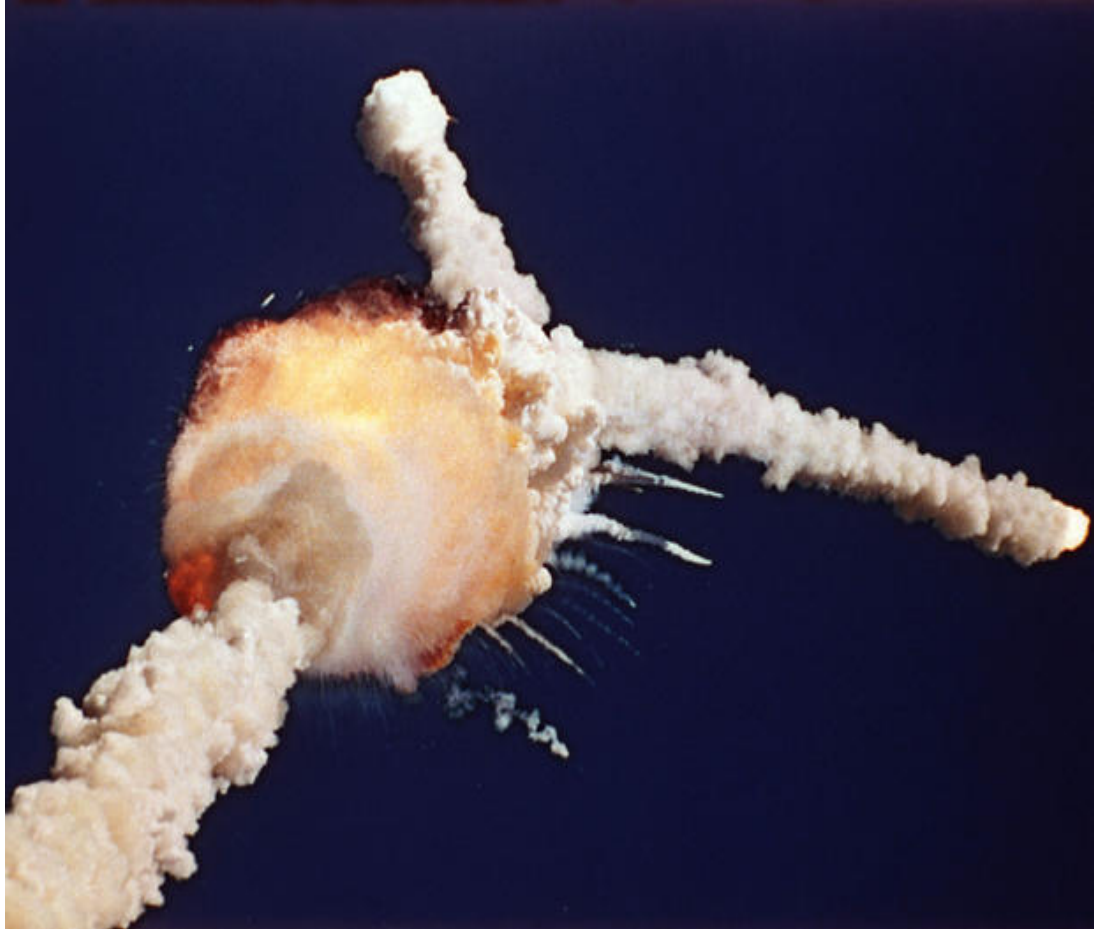
**사고관리전략 수립 및 검증을 위한  
중대사고 해석**

**- 특별강연 I -**

**박현선**  
**첨단원자력공학부**  
**POSTECH**

**Oct. 23 2019**  
**2019년 추계 원자력학회, 일산, KINTEX**

# The Challenger Disaster (Jan. 28, 1986)



# The Challenger Disaster (Jan. 28, 1986)

1957 Oct. 4 Russian Sputnik 1 Satellite

1958 July 29 NASA from NACA (National Advisory committee for Aeronautics)

1959 Sept. 13 Apollo-11 Moon Landing

- NASA becomes a huge organization
- NASA lost a mission after the Moon Landing
- NASA looked for another missions
- NASA focused on political lobbying
- NASA over-emphasized the technical capabilities

1972 - 2011 Space Shuttle Program

- NASA promised “space shuttle” without the proven records of the technologies
- NASA scientists continuously raised critical technical issues but not considered by NASA managers due to the fear of budget cuts

Engine failure probability:  $10^{-2}$  (Engineers) vs.  $10^{-5}$  (Managers)  
LOCV (Loss of Crew and Vehicle:  $10^{-5}$  (PRA) vs. 1/57 (Records)

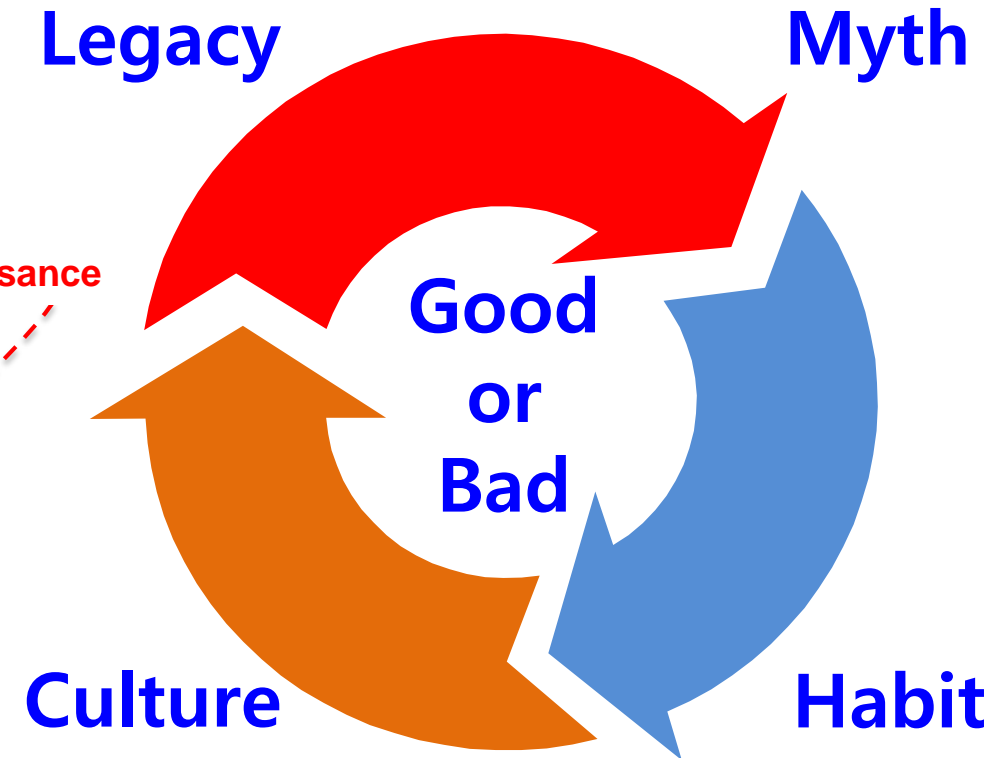
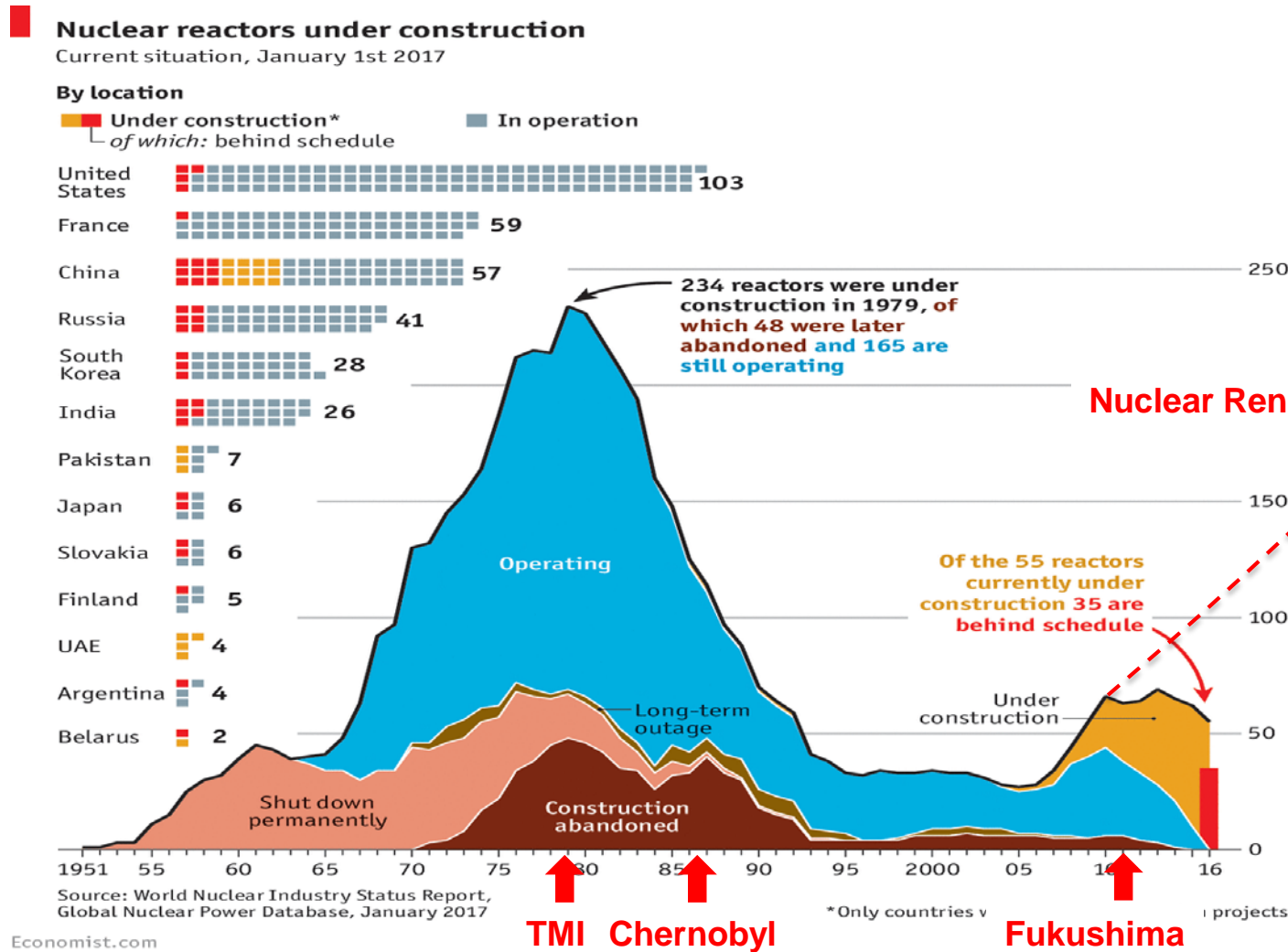
- NASA engineers repeatedly raised a technical warning for the on-going issue



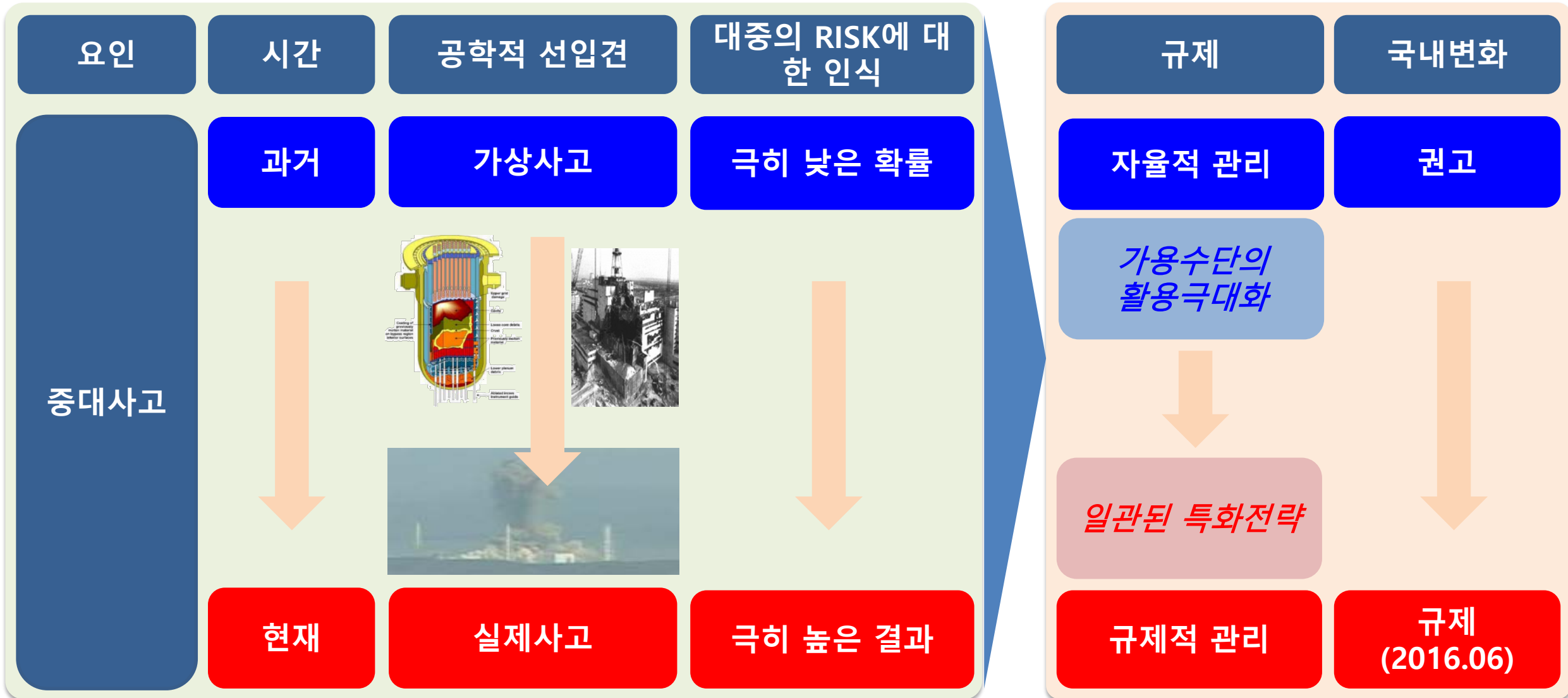
*"For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for Nature cannot be fooled ..."*

by Richard Feynman

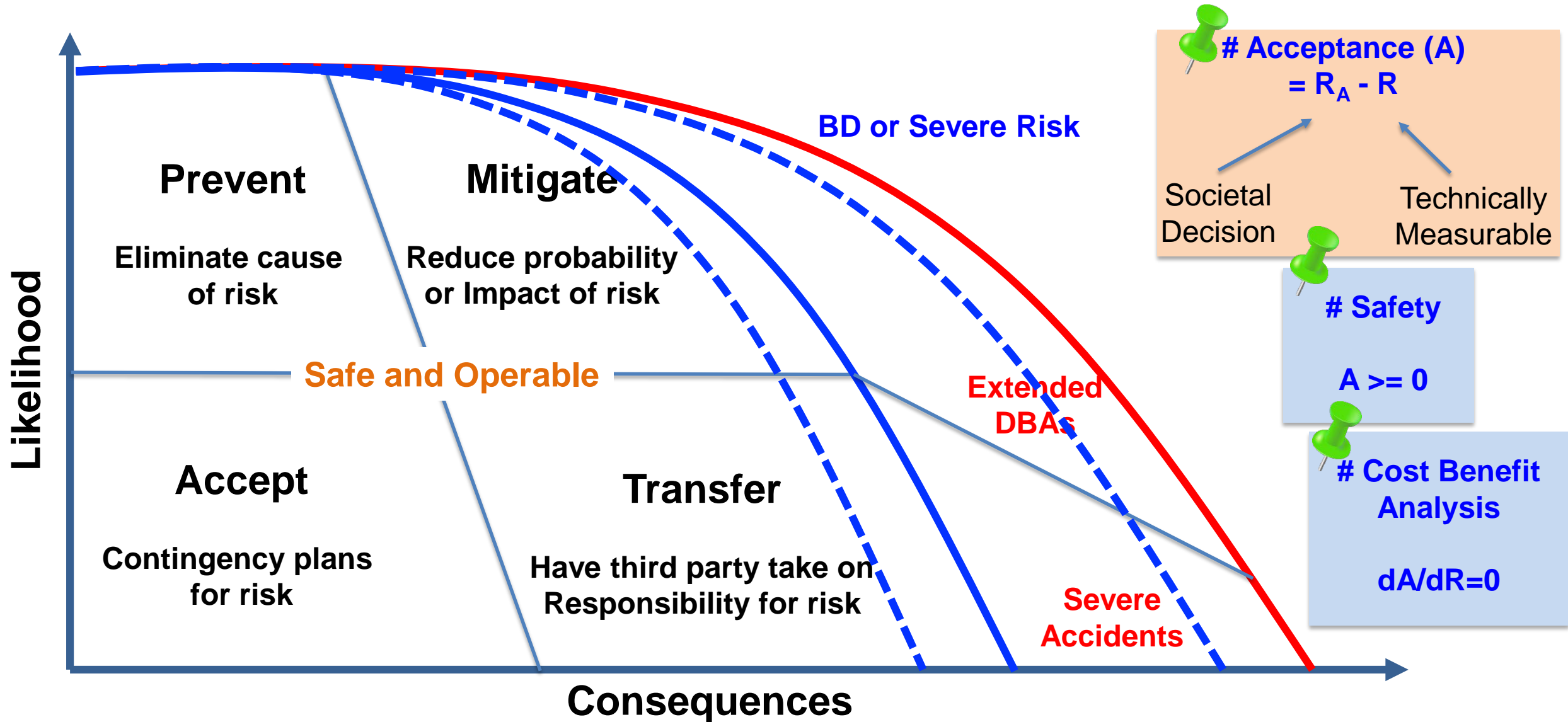
# Fukushima Accidents (March 11, 2011)



# 후쿠시마이후 중대사고 규제 강화: 중대사고 팩트 체크

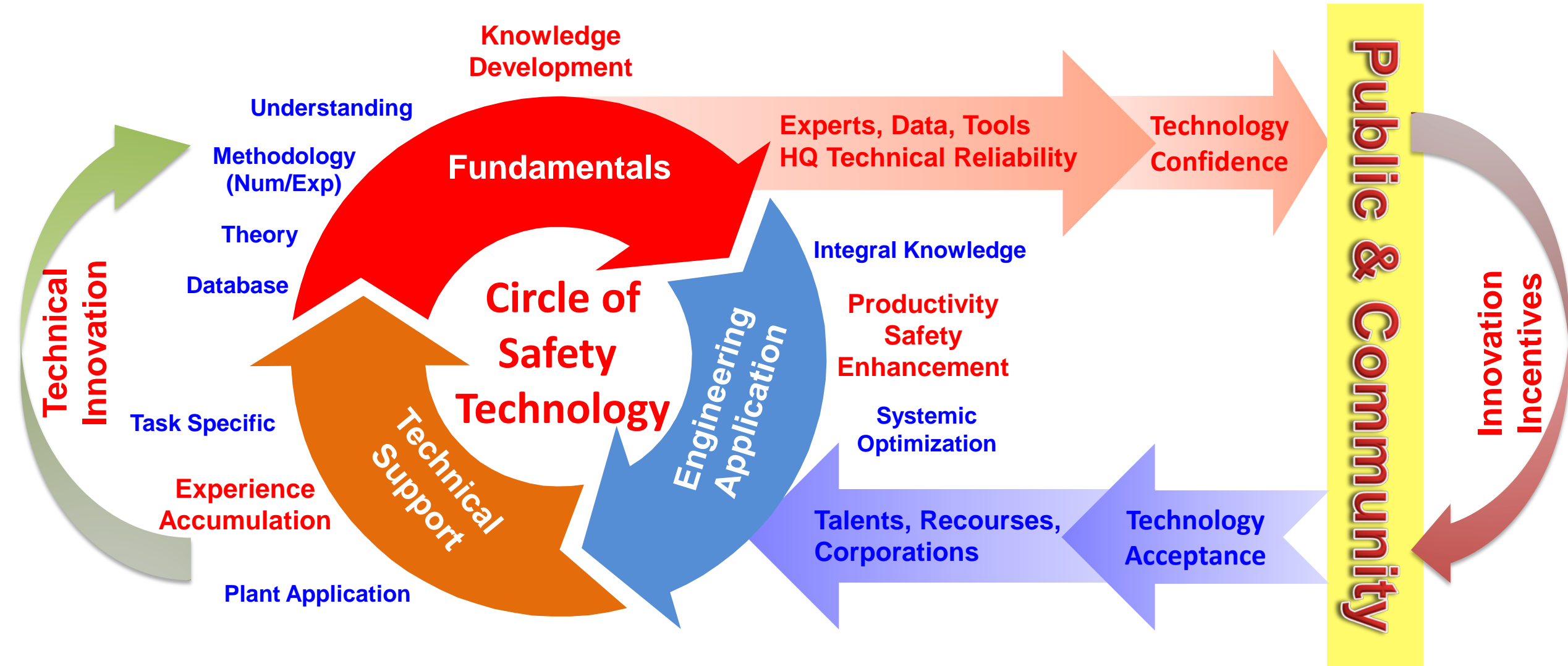


# 후쿠시마이후 중대사고규제강화: 원자력안전 팩트체크 (Risk, Safety and Acceptance)





# 후쿠시마이후 중대사고규제강화: 원자력안전 팩트체크 (Incentive, Regulation, and Innovations)



## 후쿠시마이후 중대사고 규제 강화: 중대사고 법제화

### 신안전 목표

0.1% Health Rule

Cs Release Rule

250 mSv

Cs-137 < 100 TBq

and <  $10^{-6}$ /Yr

정량적 성능목표

확률적 성능목표

규제프레임내의 중대사고

결정론적 중대사고  
안전해석



PSA 해석  
(L1, L2, L3)

최적해석

중대사고/PSA  
안전해석

모델 불확실성  
사고시나리오 불확실성  
대처설비 제한성

격납건물건전성

SAMG 유효성  
 $L1 > L2 > L3$

SAMG 제출

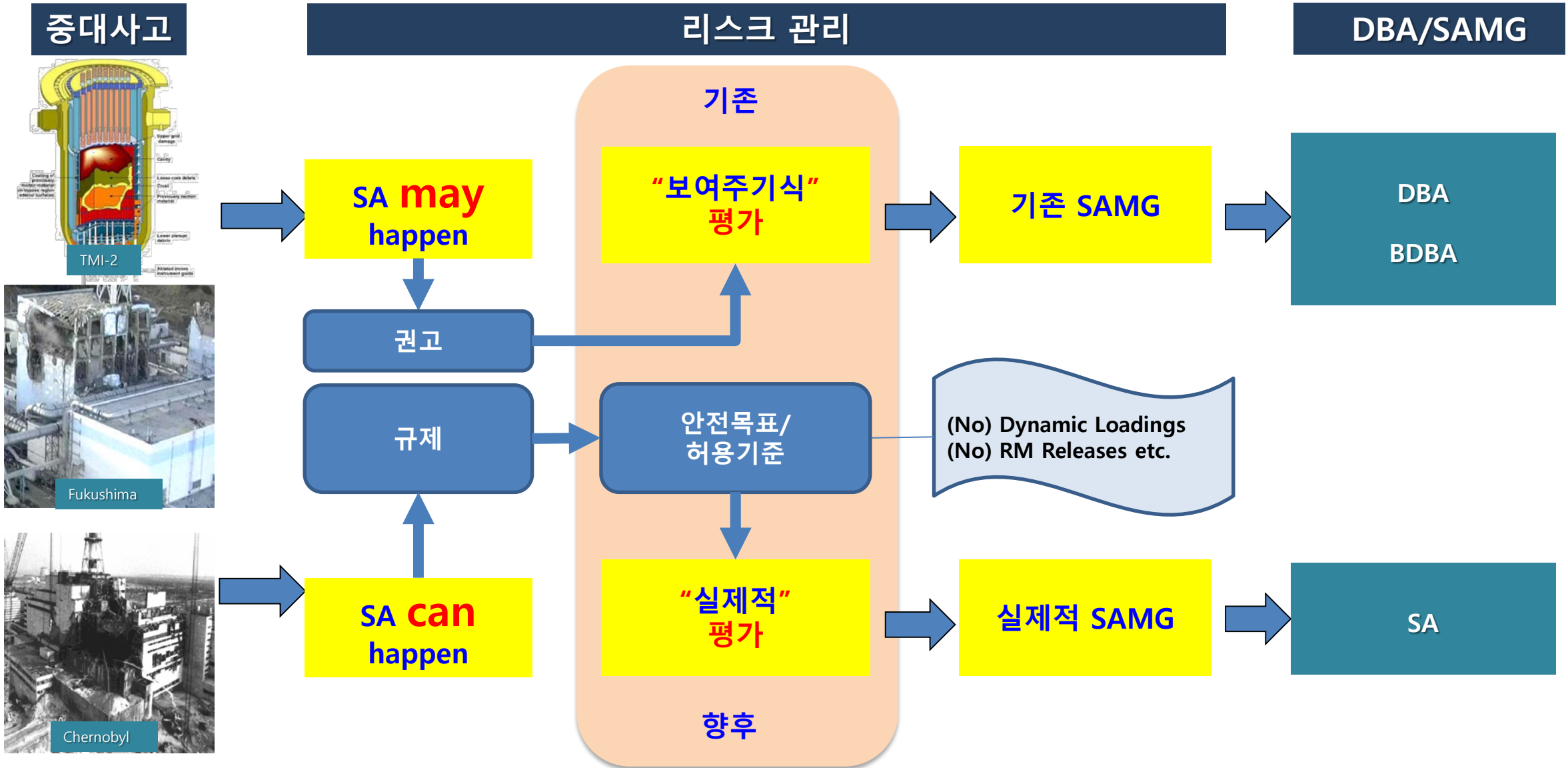
유효한 SAMG

SAMG

가용대처설비

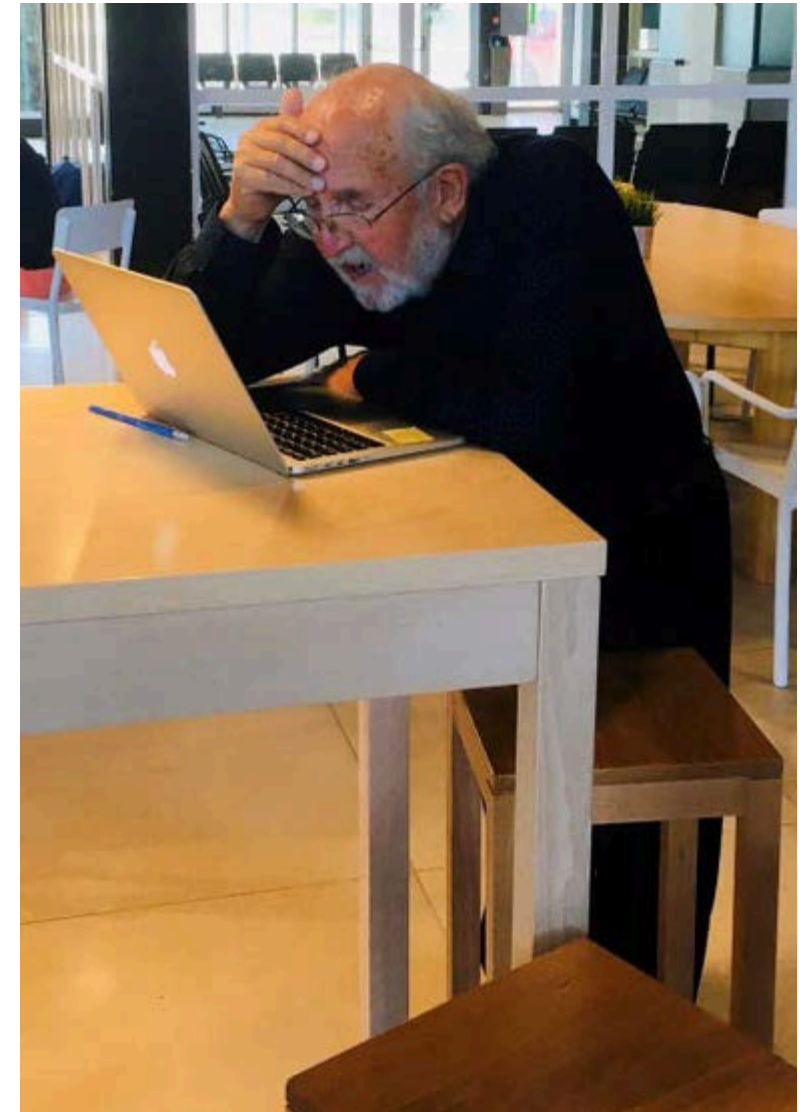


# 중대사고 해석 의미 재설정 : 사고관리전략 유효성 평가개념 재정립



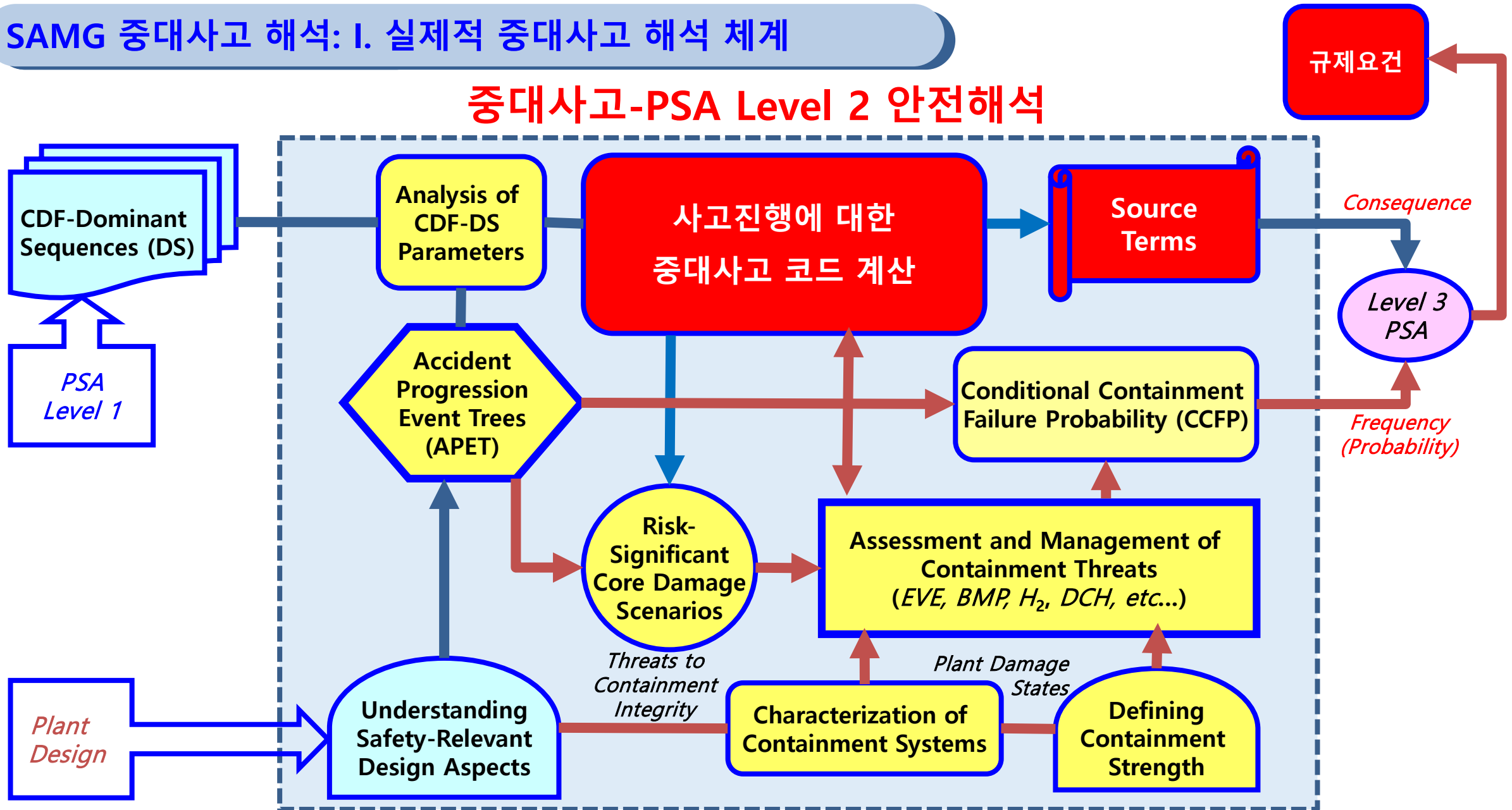
## 중대사고 해석의 본질: SA/DBA해석의 차이

항목	DBA	SA (기준)
해석 특징	목적지향적	증상지향적
해석 접근방식	하향식	상향식
사고대응	능동적 억제대응	수동적 완화대처
안전설비	공학적 안전시스템	가용수단
규제	규제 (인허가)	사고관리적 완화 권고 (규제)
사고관리	적극적 관리 (적절)	수동적 관리
사고 발생확률	중하의 확률	매우 낮은 확률
안전해석	DBA 안전해석	SA 안전해석 및 Risk 해석
해석 방법론	결정론적 해석 (Best-Estimate)	결정론적 + 확률론적해석 (불확실성정량화)

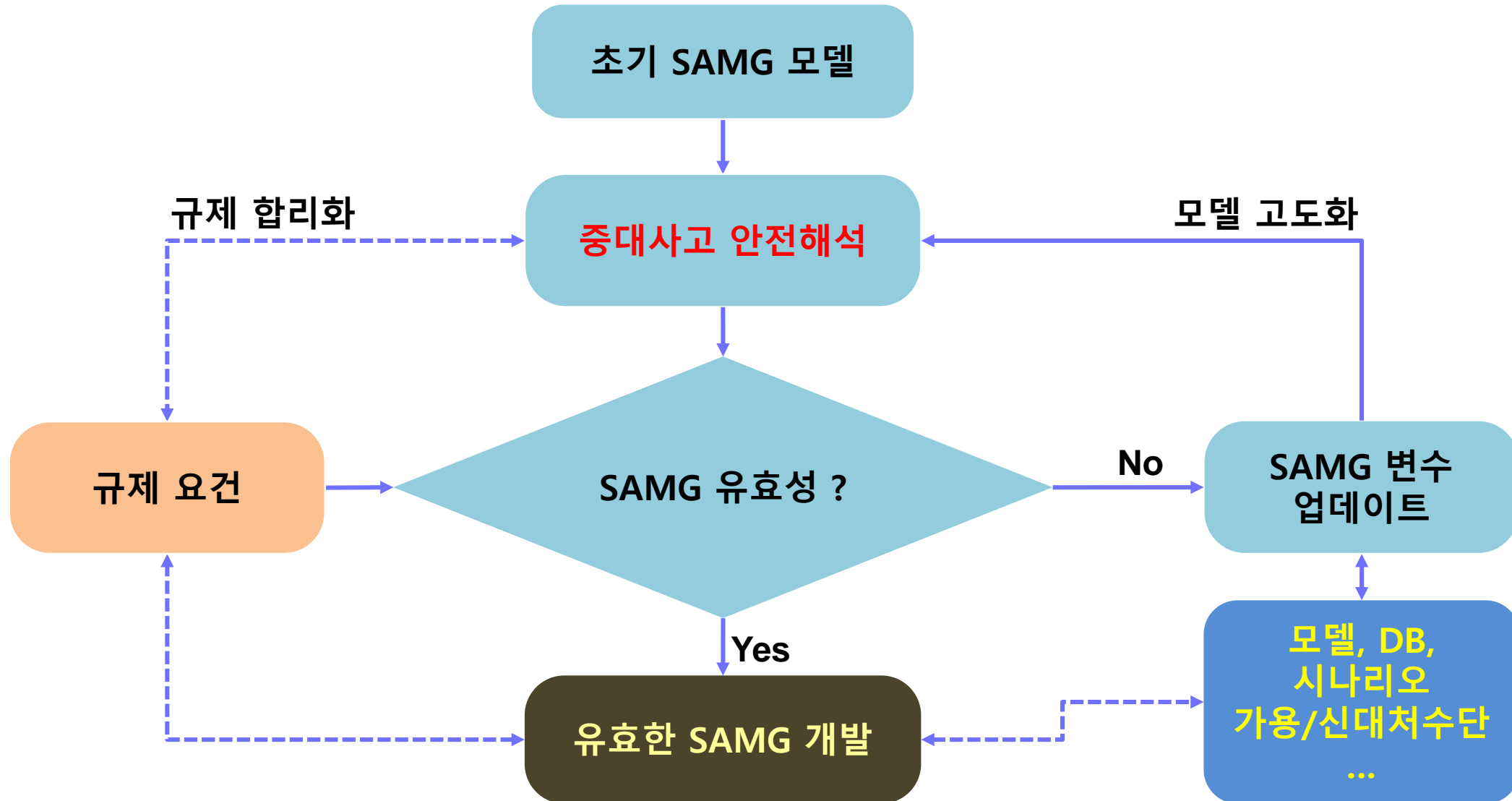


## SAMG 중대사고 해석: I. 실제적 중대사고 해석 체계

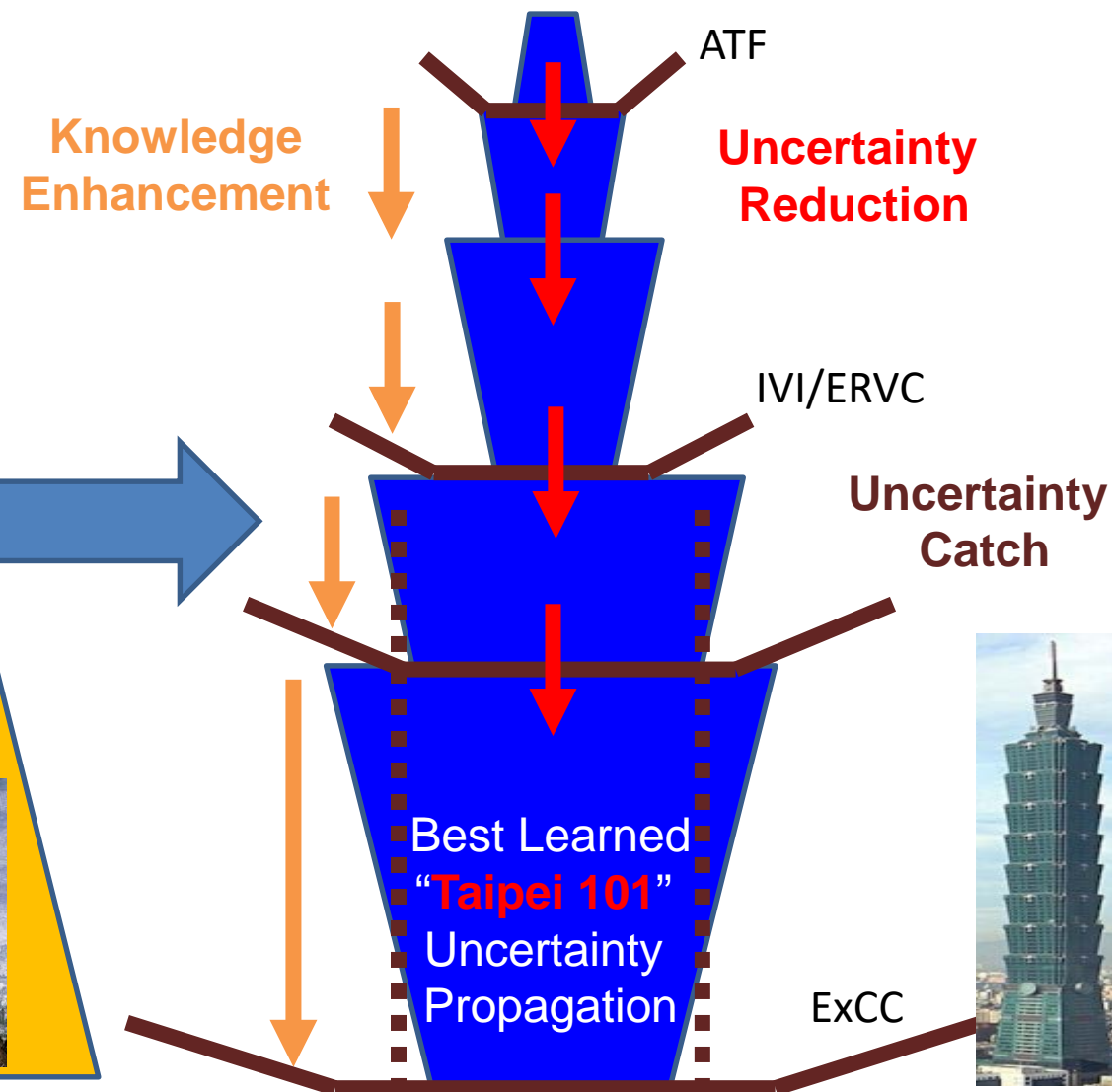
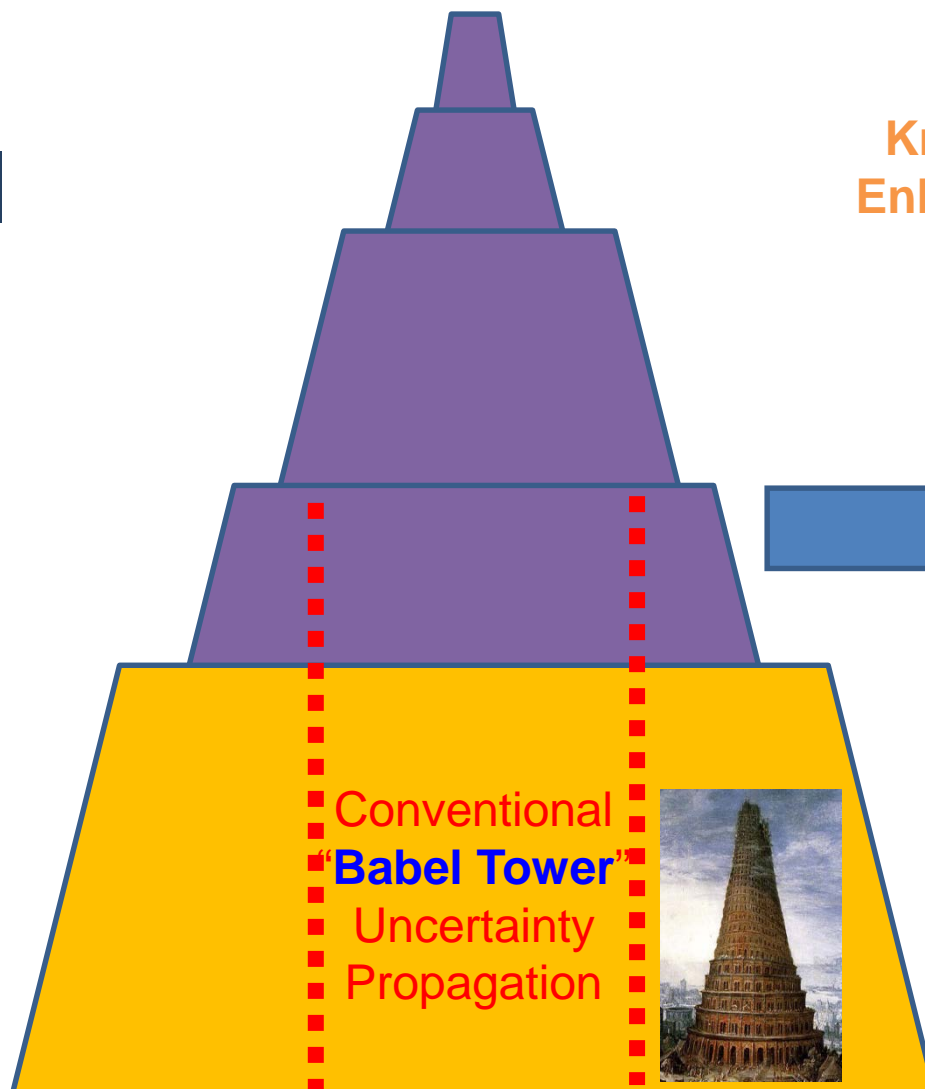
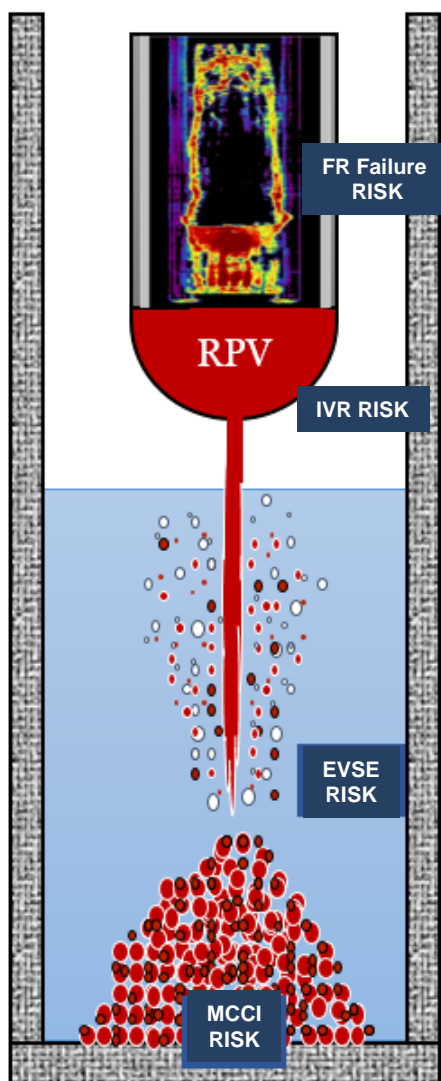
### 중대사고-PSA Level 2 안전해석



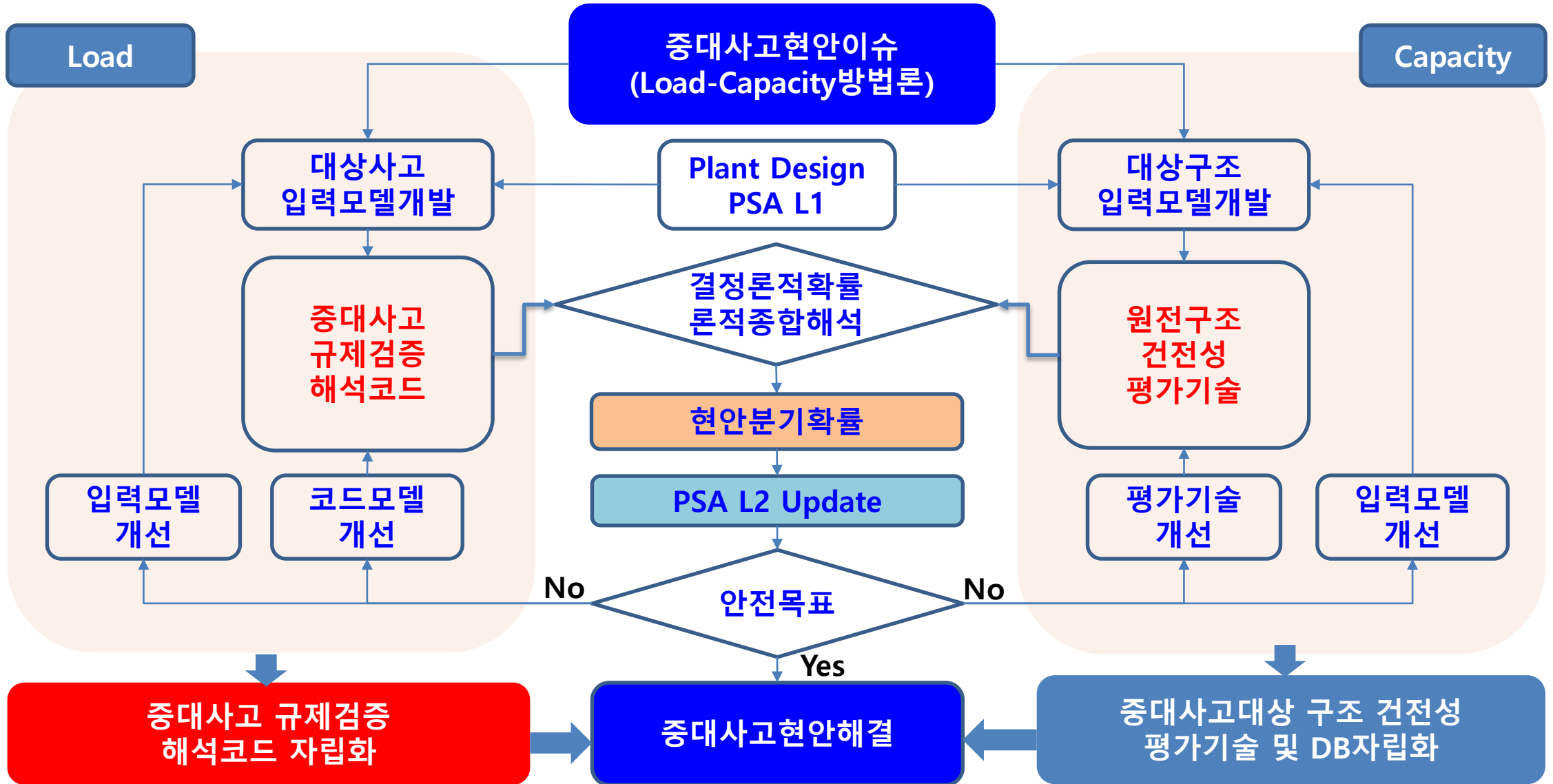
## SAMG 중대사고 해석 : II. 중대사고 평가 생태계



# SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (개념) - Babel Tower vs. Taipei 101



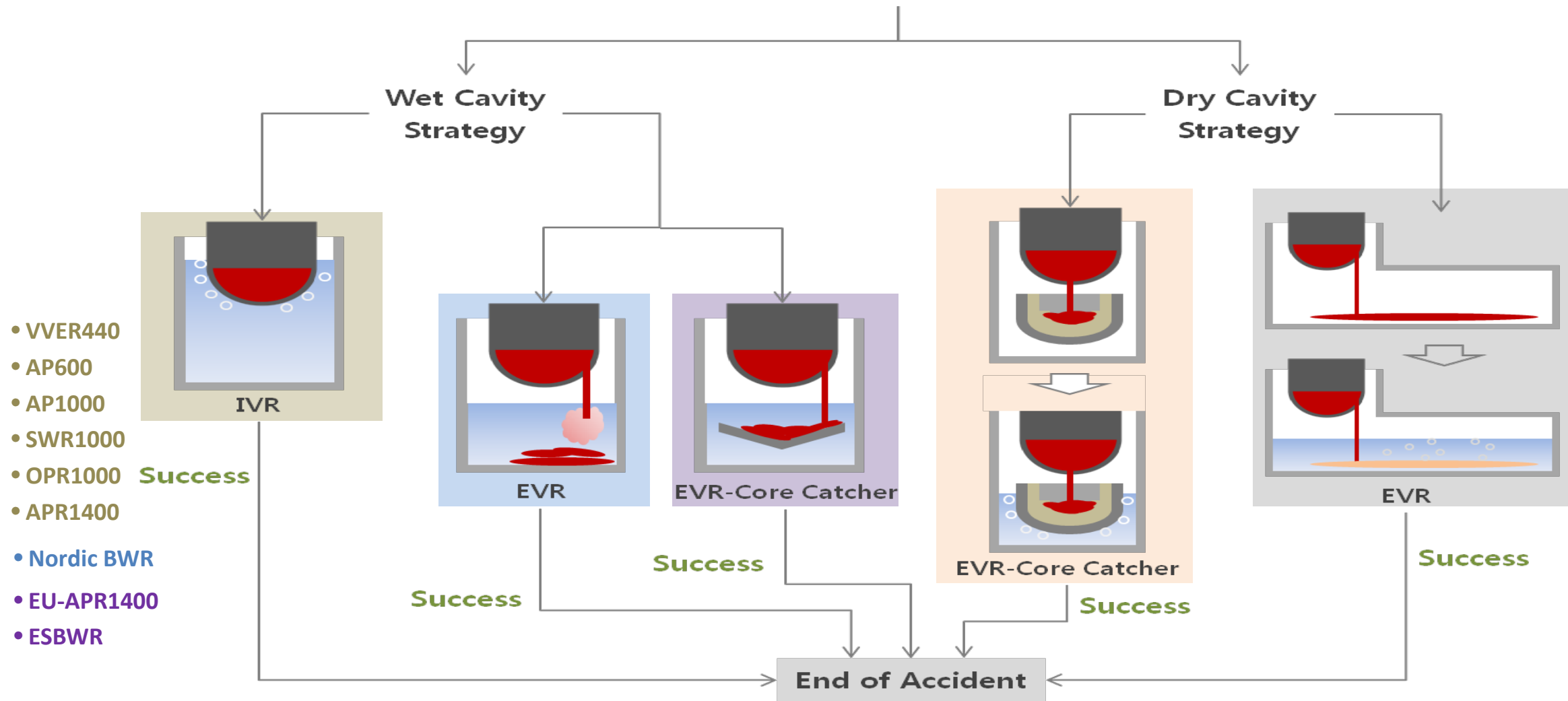
# SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (방법론) – 유효한 SAMG 구축



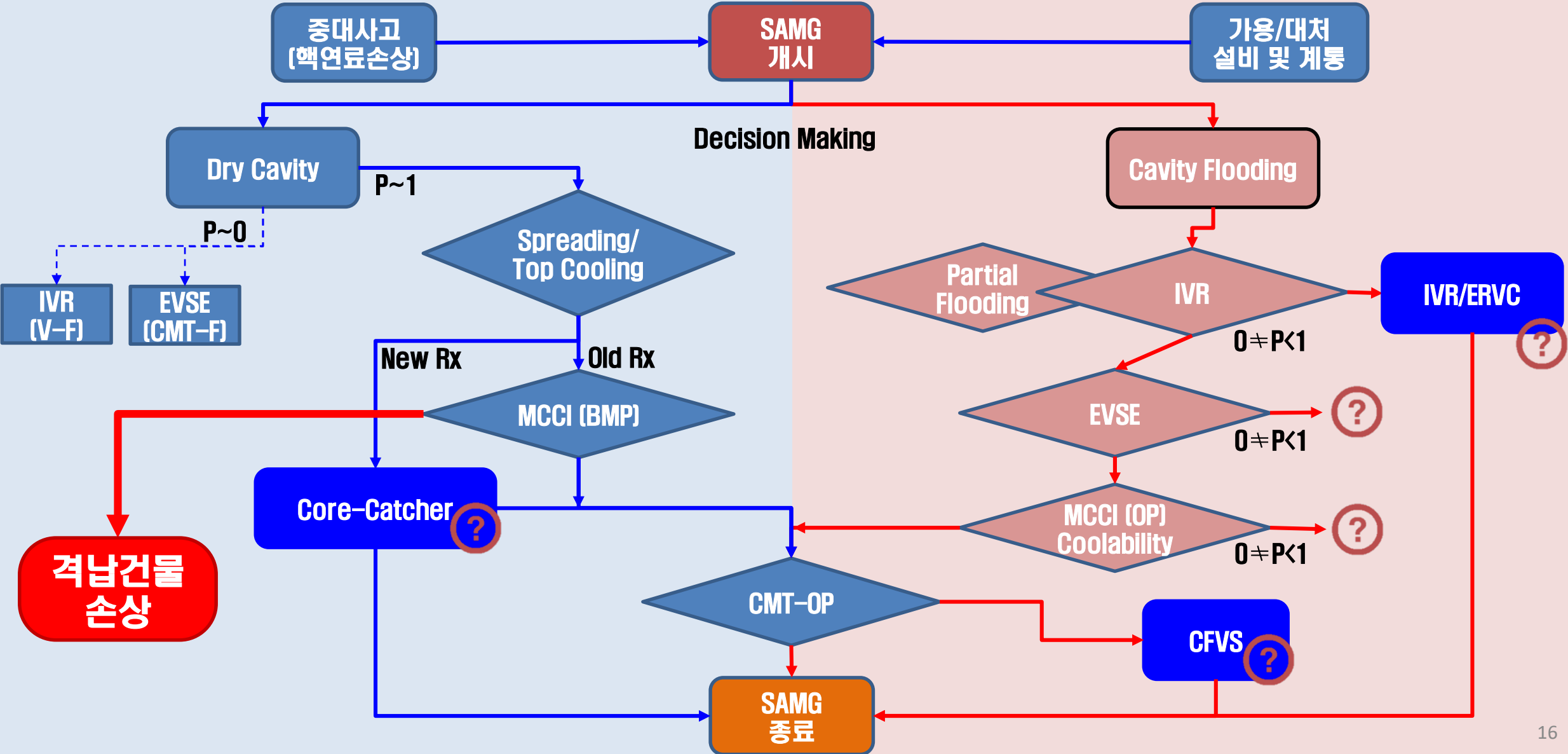


# SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) - 사고관리 전략 (노외 충수전략)

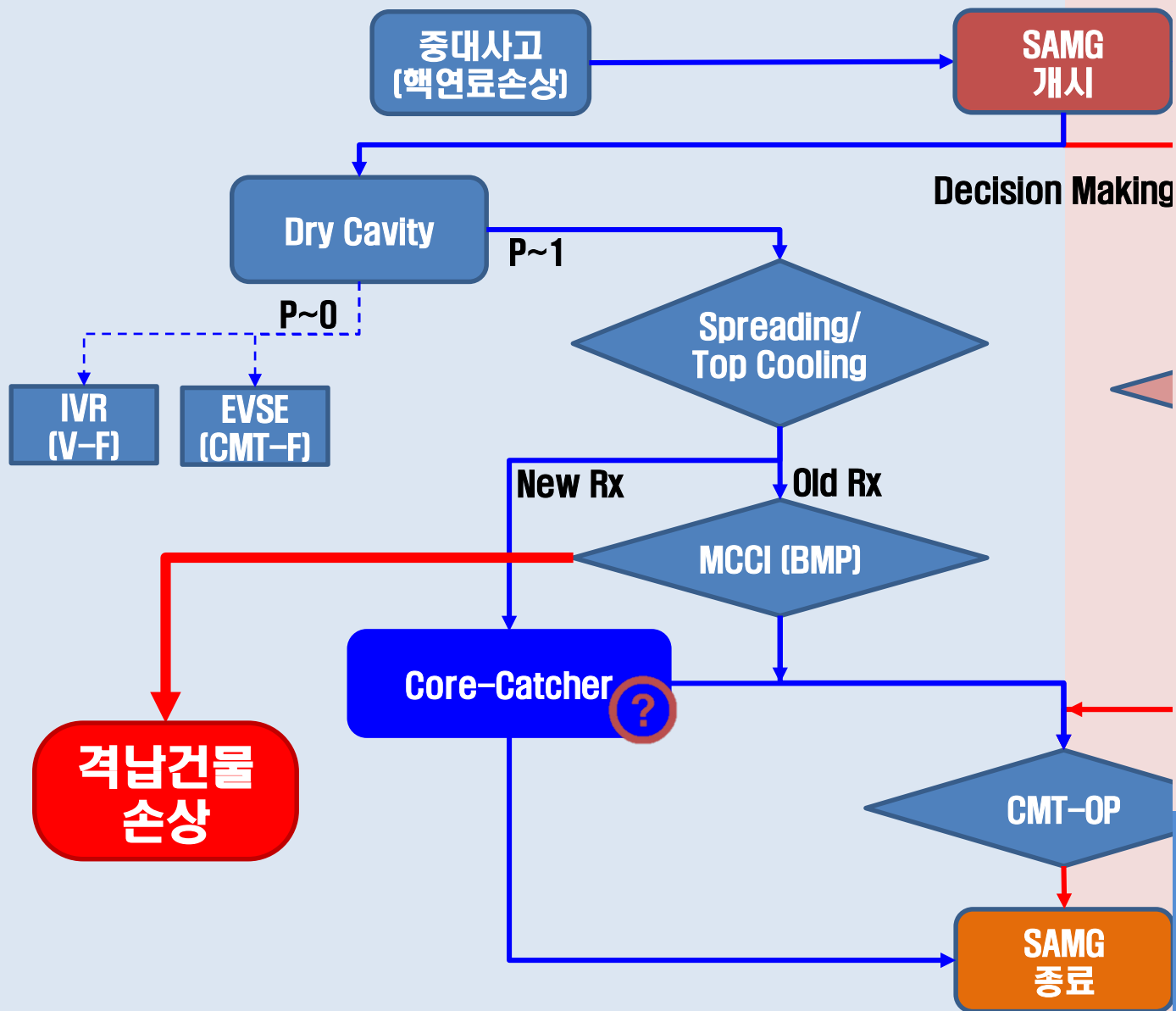
## Severe Accident Management Strategy (SAMS)



SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) - 사고관리 전략 (노외 충수전략)



SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) - 사고관리 전략 (노외 충수전략)



SAMS Perception

Do Nothing

Inconclusive (Problematic)  
SAMS

Risk Perception

No Steam Explosion  
But for sure on  
Basemat Melt Through

Public Acceptance (PA)  
Public Confidence/Trust  
Societal Responsibility in EP

SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) - 사고관리 전략 (노외 충수전략)

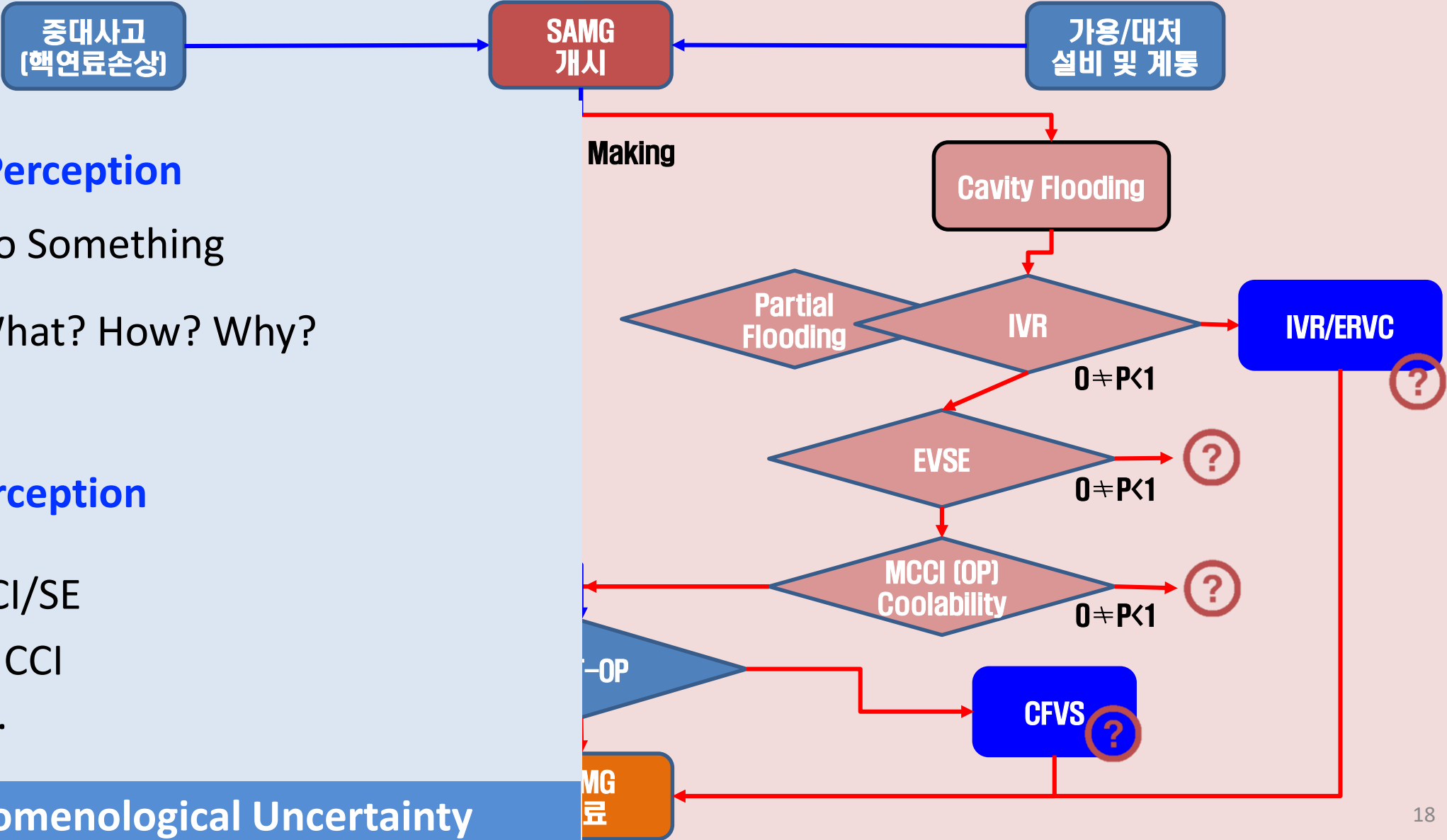
SAMS Perception

Do Something  
What? How? Why?

Risk Perception

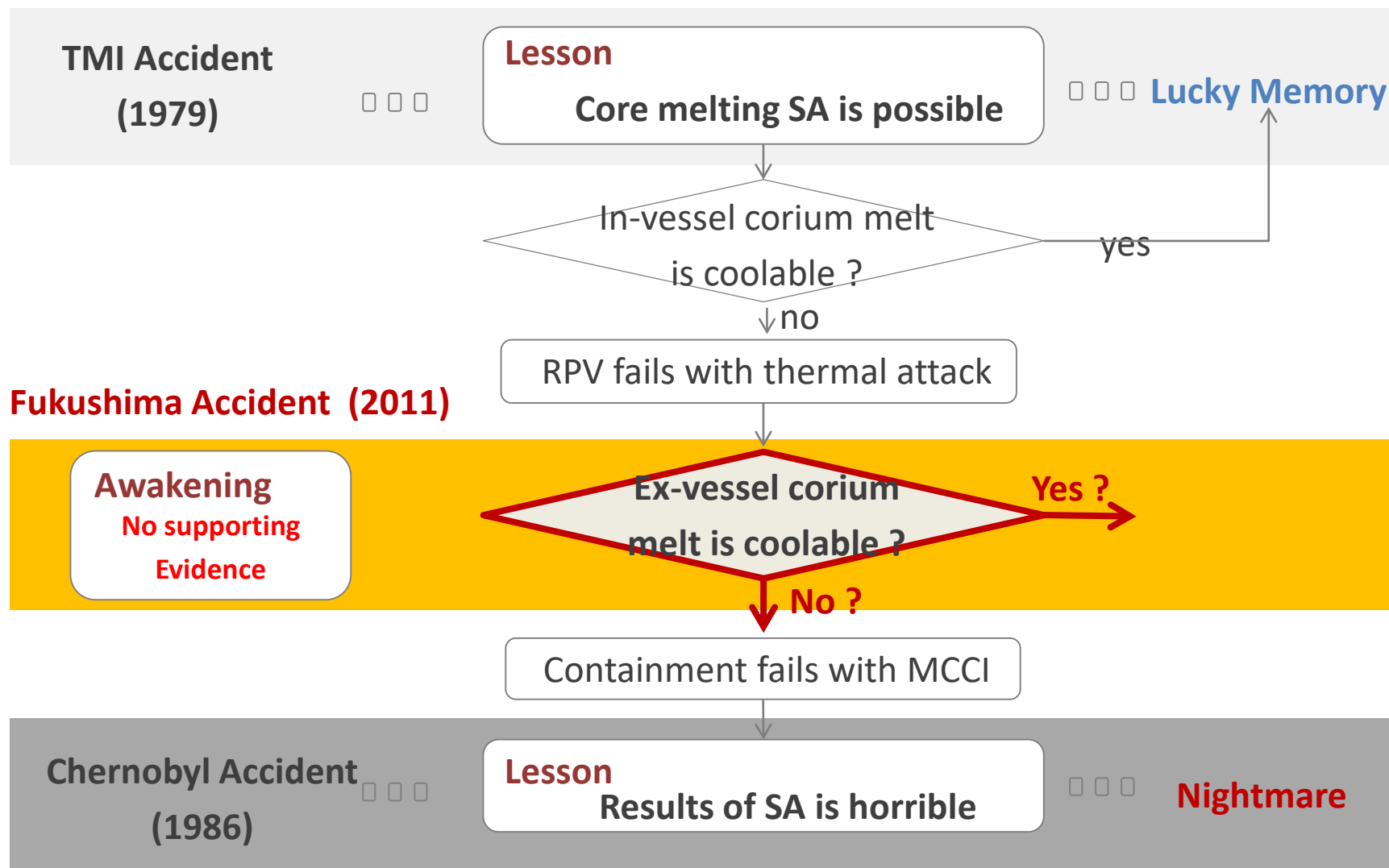
FCI/SE  
MCCI  
....

Making



Large Phenomenological Uncertainty

## SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) - 사고관리 전략 (노외 충수전략)



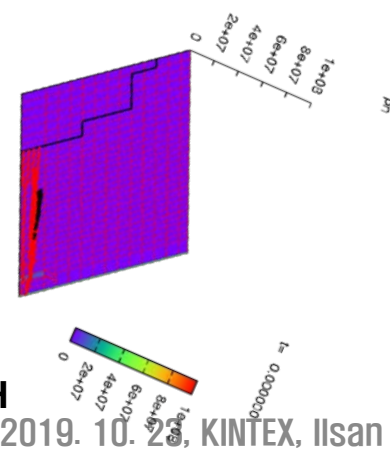
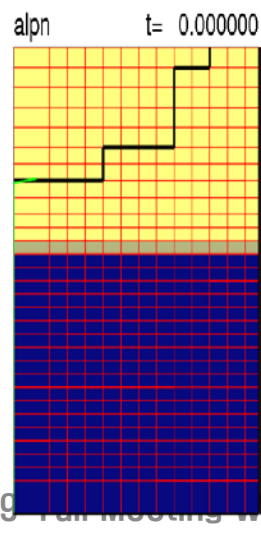
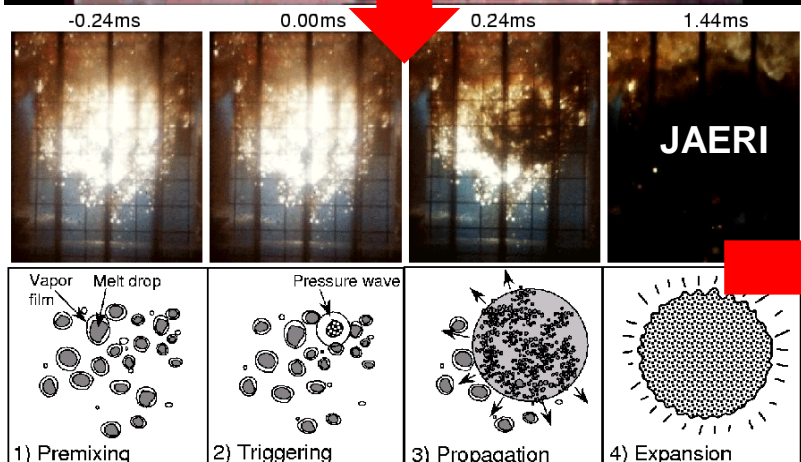
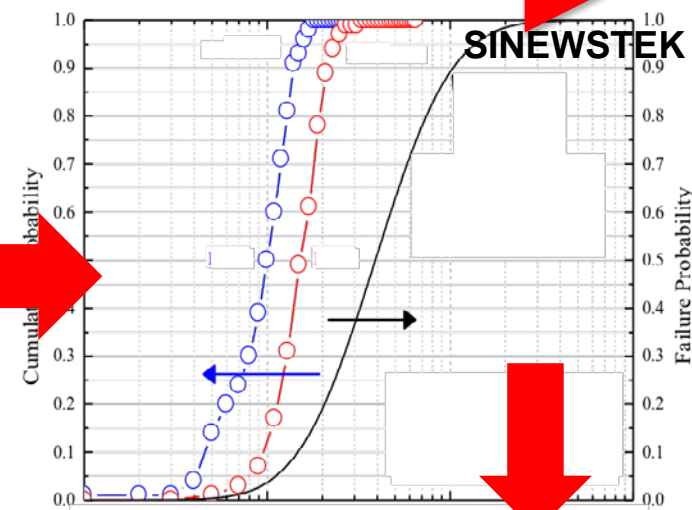
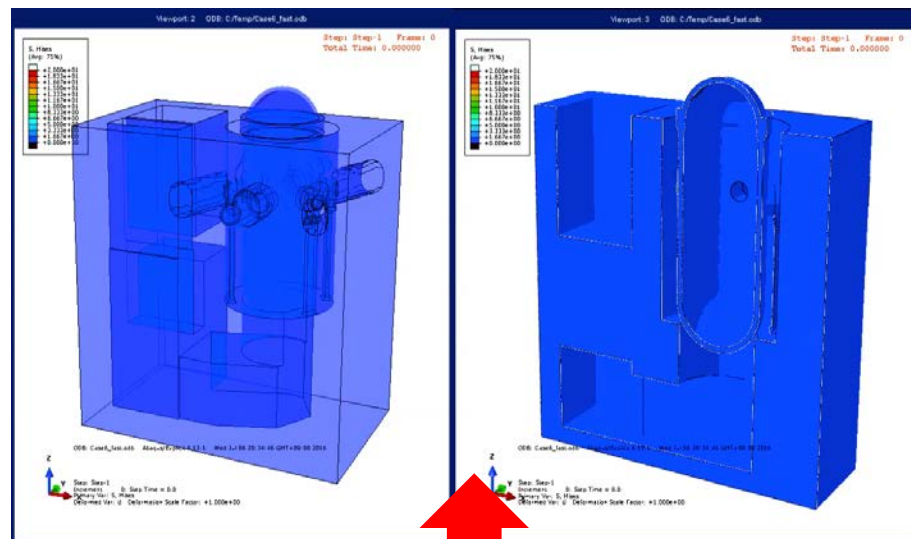
# SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) - 사고관리 전략 (증기폭발)

중대사고 이슈

실제적 해석

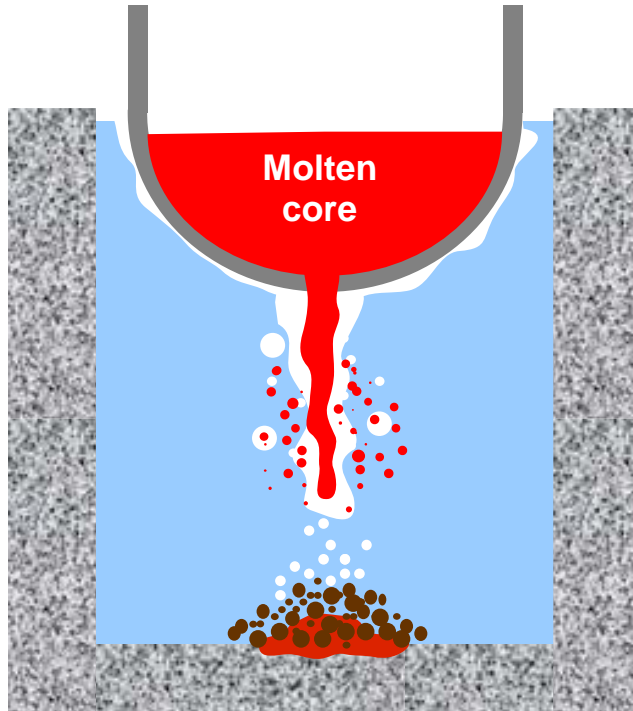
종합적 평가

현안 해결





## SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) - 사고관리 전략 (노외 냉각성 평가)



### Steam explosion

- kinetic energy or impulse load?
- CV fragility?

### RV failure

- size? ... important!
- location?
- melt composition?

### FCI (mild)

- melt break fraction?
- debris size?
- steam spike?

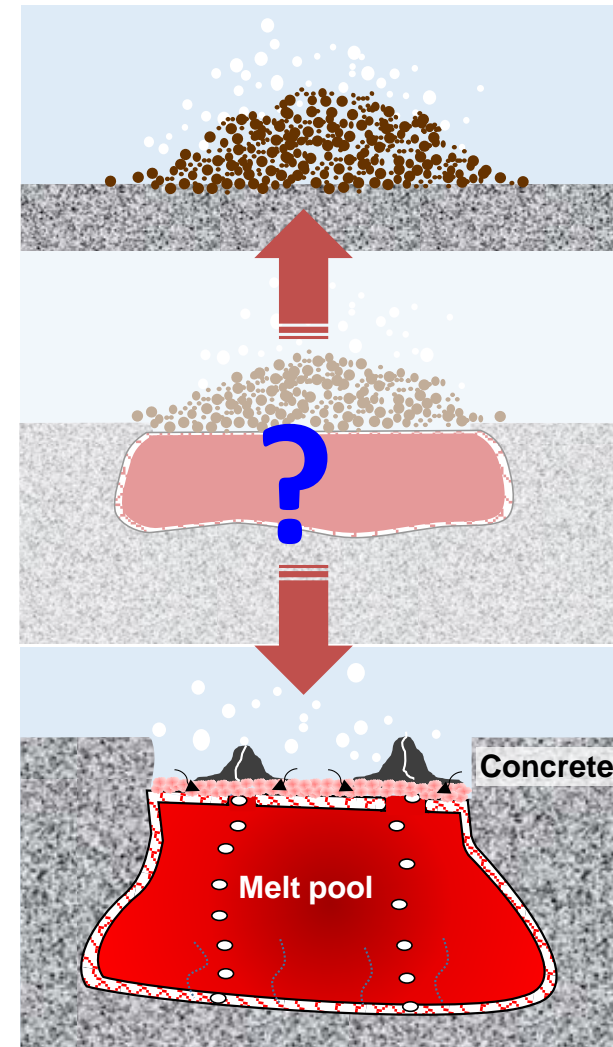
### Debris bed

- geometry, agglomerate?
- cooling?

### MCCI (with debris bed?)

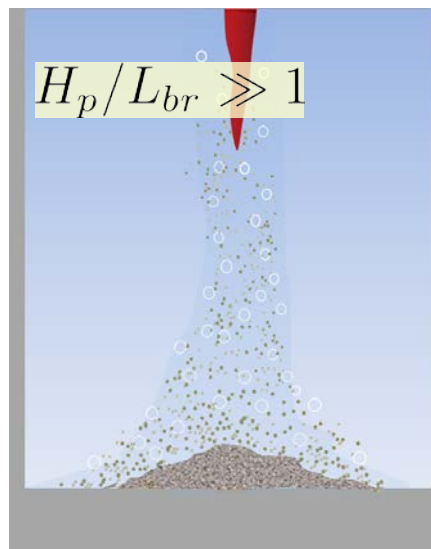
- cooling?
- concrete ablation?
- steam/non-condensable gas pressurization?
- aerosol (load on CFVS)?

### Cooling model so far...

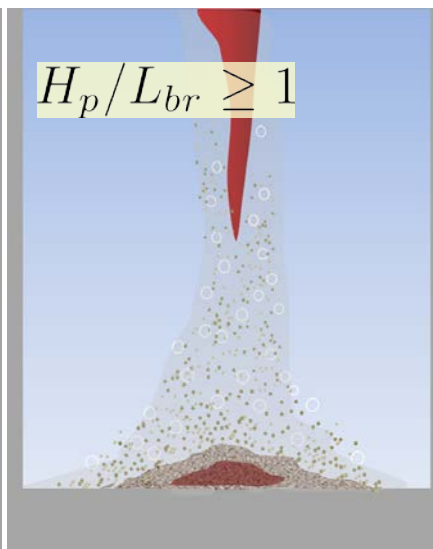


Sure for cooling?

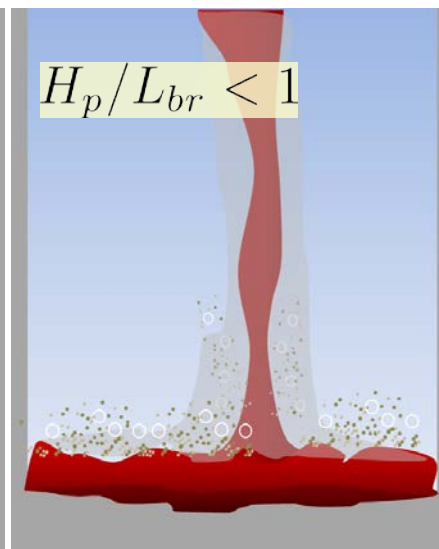
# SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) – 사고관리 전략 (노외 냉각성 평가)



**Deep pool**  
**Complete breakup**  
 → Debris bed



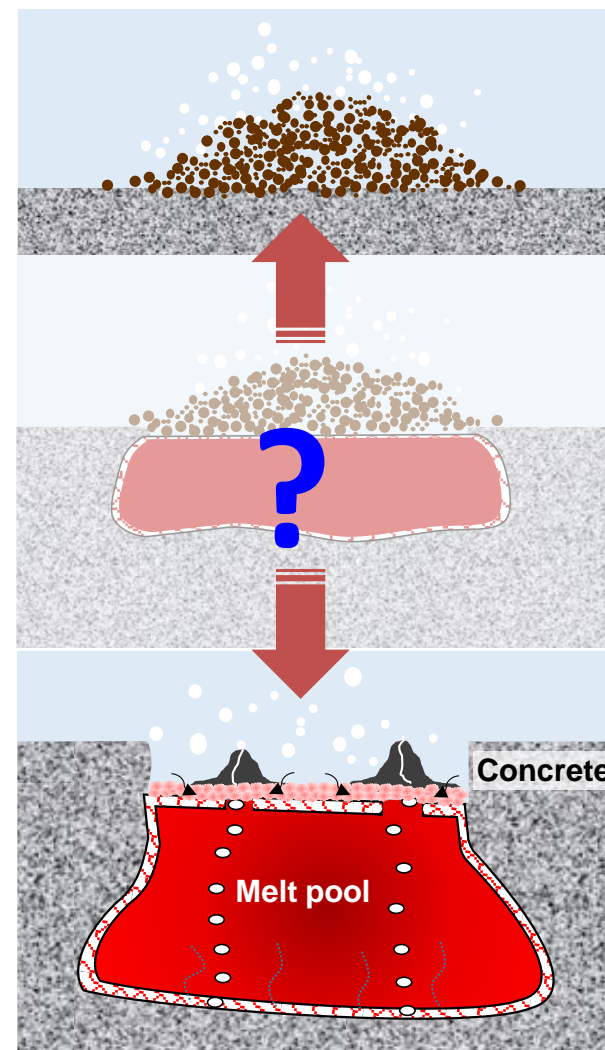
**Middle depth**  
**Partial breakup**  
**or re-melt**  
 → Debris bed+MCCI?



**Shallow pool**  
**No/little breakup**  
 → MCCI

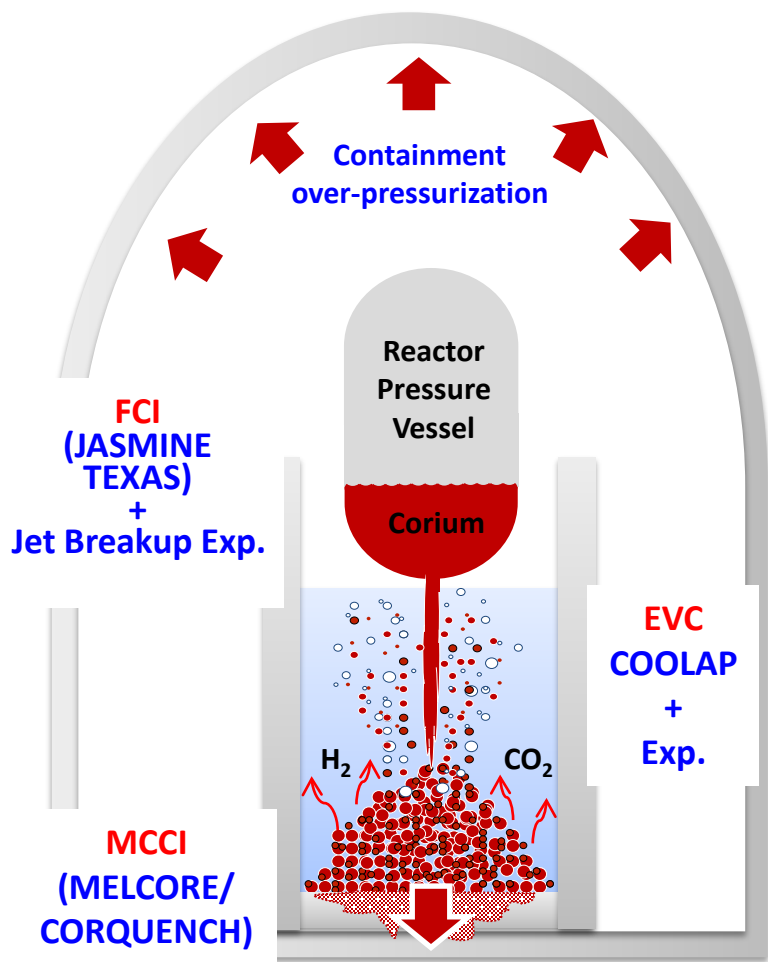
IVR/FCI	Coolability/MCCI	System
Available but exactly	No Models/Available	MELCOR/MAAP

Cooling model so far...

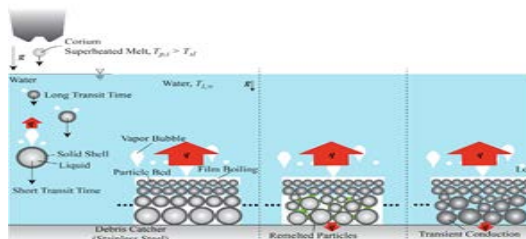


**Sure for cooling?**

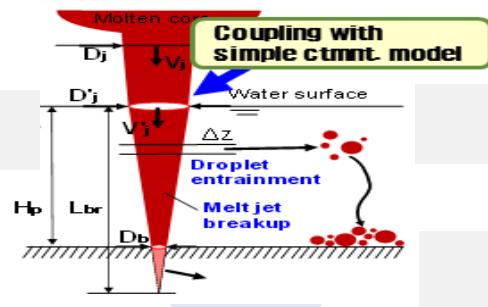
# SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) - 사고관리 전략 (노외 냉각성 평가)



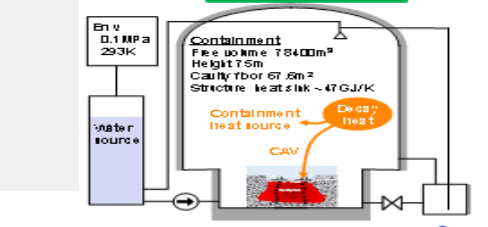
## COOLAP-0 & COOLAP-I



## COOLAP-II

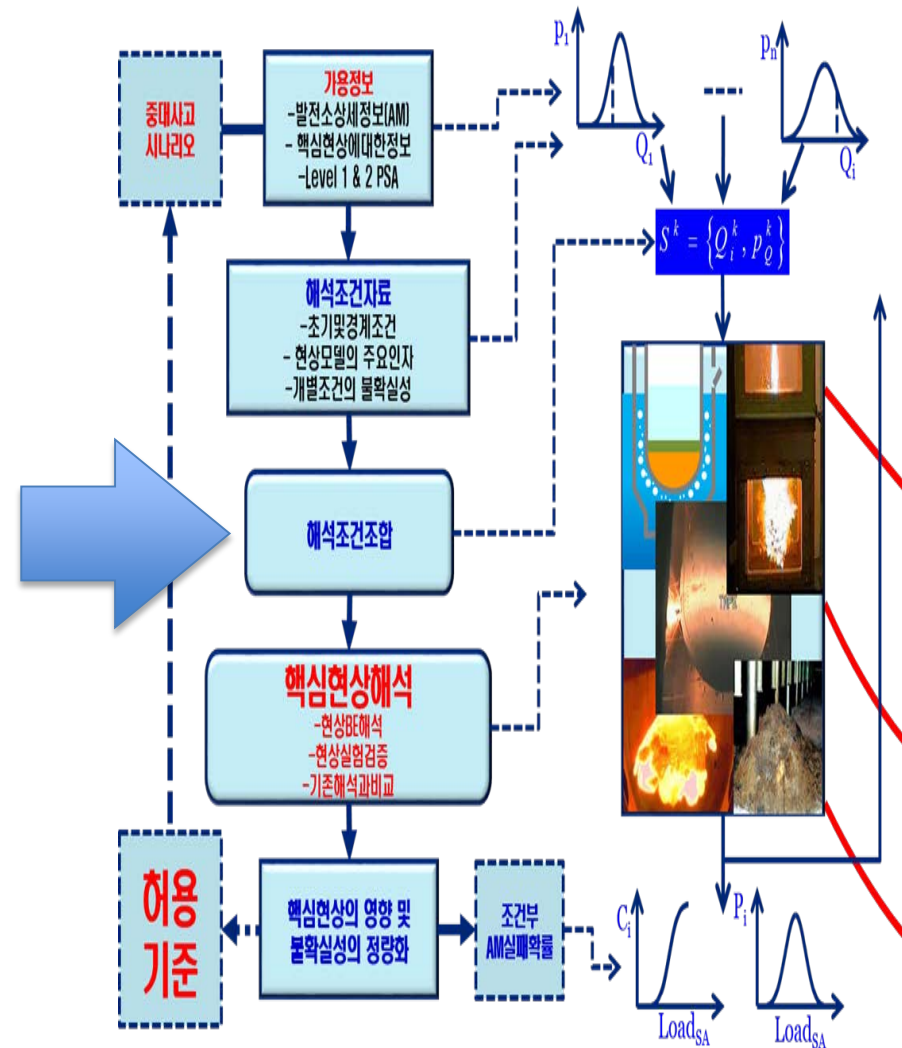


## MELCOR



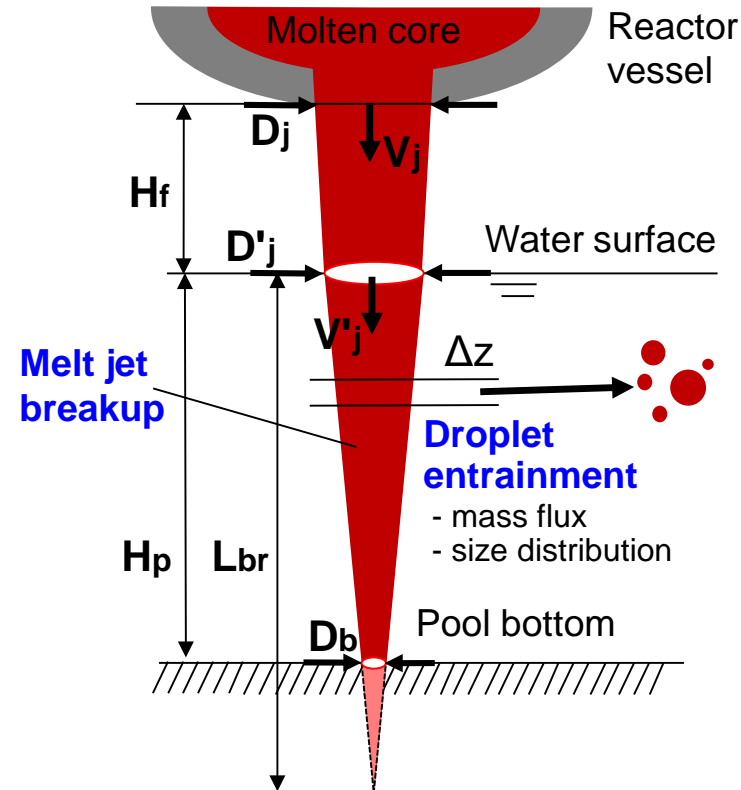
현상모델  
- 용융물 파쇄, 적층  
- 냉각성 및 MCCI

“아중” 지표 확률 분포  
관련 변수 중요도



## • Melt jet breakup

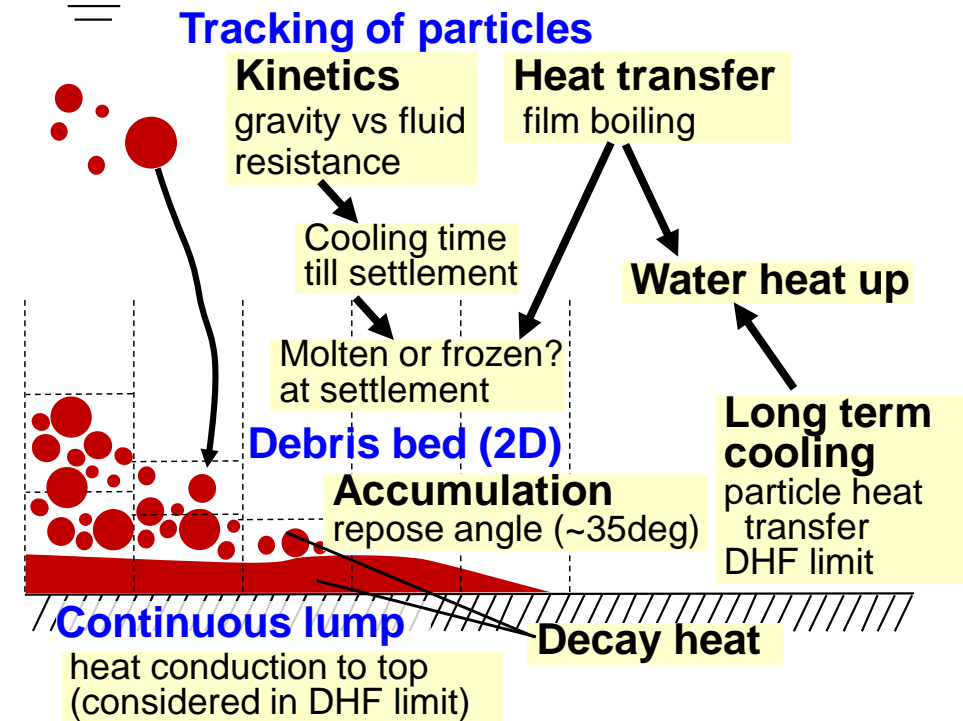
- quasi steady state jet mass eq.
- breakup length (corr.)
- particle size distribution (corr.)



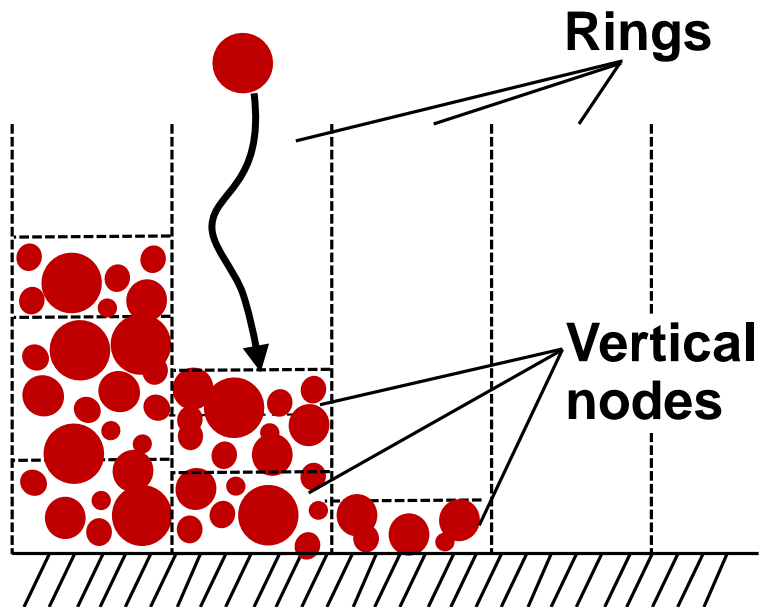
## ▪ Particle tracking

- kinetics & energy equation
- hydrodyn. drag (corr.) vs gravity
- heat transfer: film boiling (corr.)

Water surface



- **Debris bed formation**
  - 2D grid model
  - given porosity (~0.5)
  - repose angle limit for slope



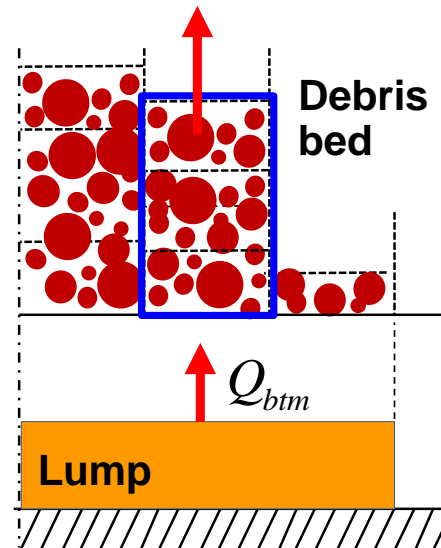
- **Debris bed heat transfer**

- Particle HT (attenuation factor ~0.1)
- Limitation by DHF (corr. Rahman, 2013 etc.)
- Heat from lump (conduction)

- **Mass transfer**

- Re-melting in debris bed node  
→ Mass transfer (merge) to lump (T criterion)

$$Q_{dbr} + Q_{btm} \leq F_{dhf} Q_{dhf}$$



**Debris bed heat transfer**

$$Q_{dbr} = \min(Q_{lim}, Q_{htr})$$

HT corr.

**Limit by DHF**

$$Q_{lim} = F_{dhf} Q_{dhf} - Q_{btm}$$

**Heat input at bottom from lump**

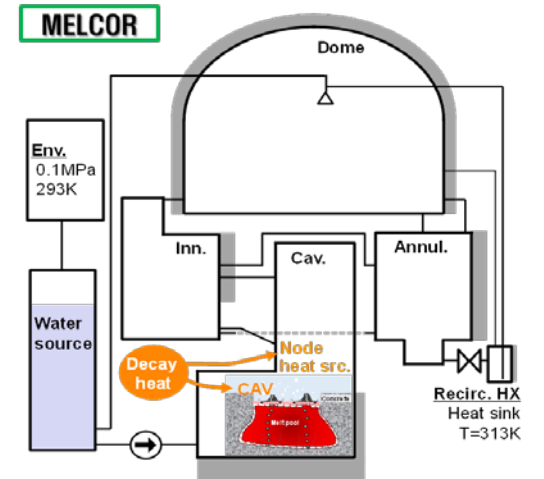
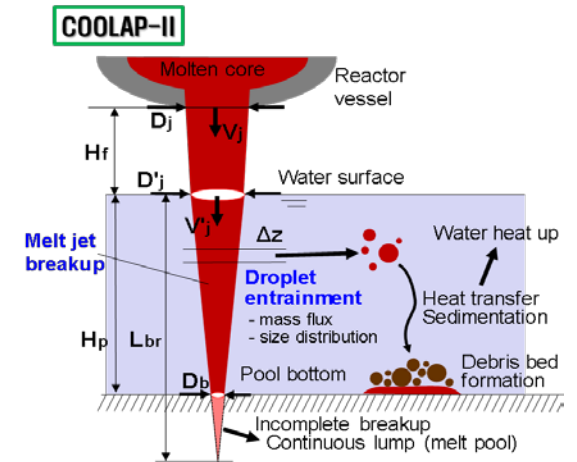
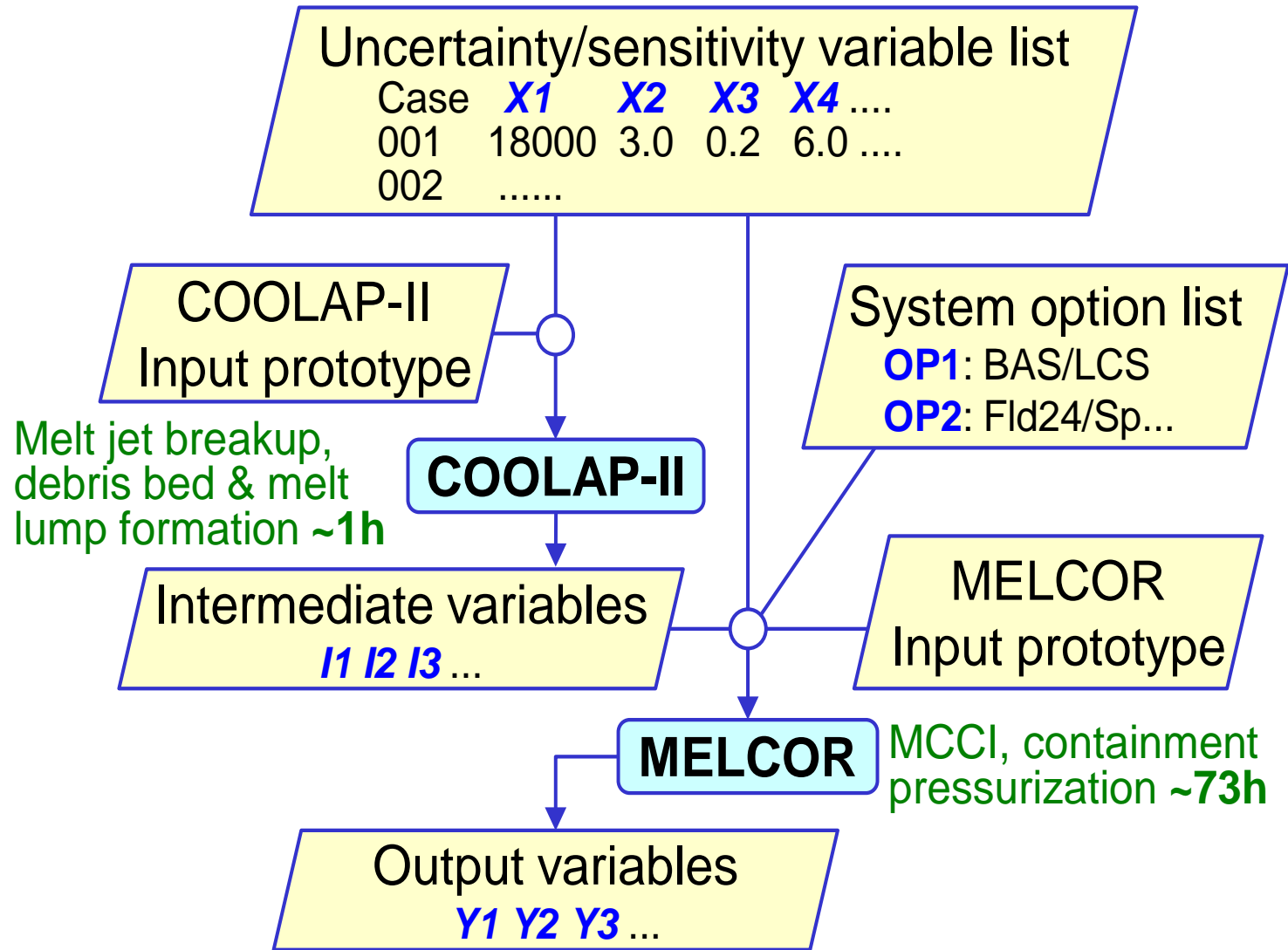
$$Q_{btm} = \min(A_b F_{htlmp} q''_{cnd}, F_{dbdhf} F_{dhf} Q_{dhf})$$

Conduction in lump    Fraction of DHF as limit

**Re-melting in a debris bed node → Mass transferred to lump**



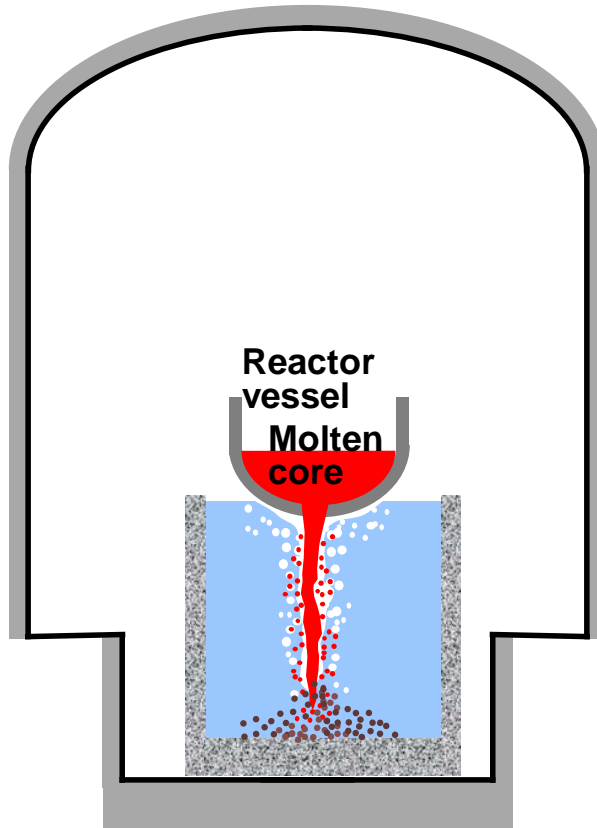
# SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) - 사고관리 전략 (노외 냉각성 평가)



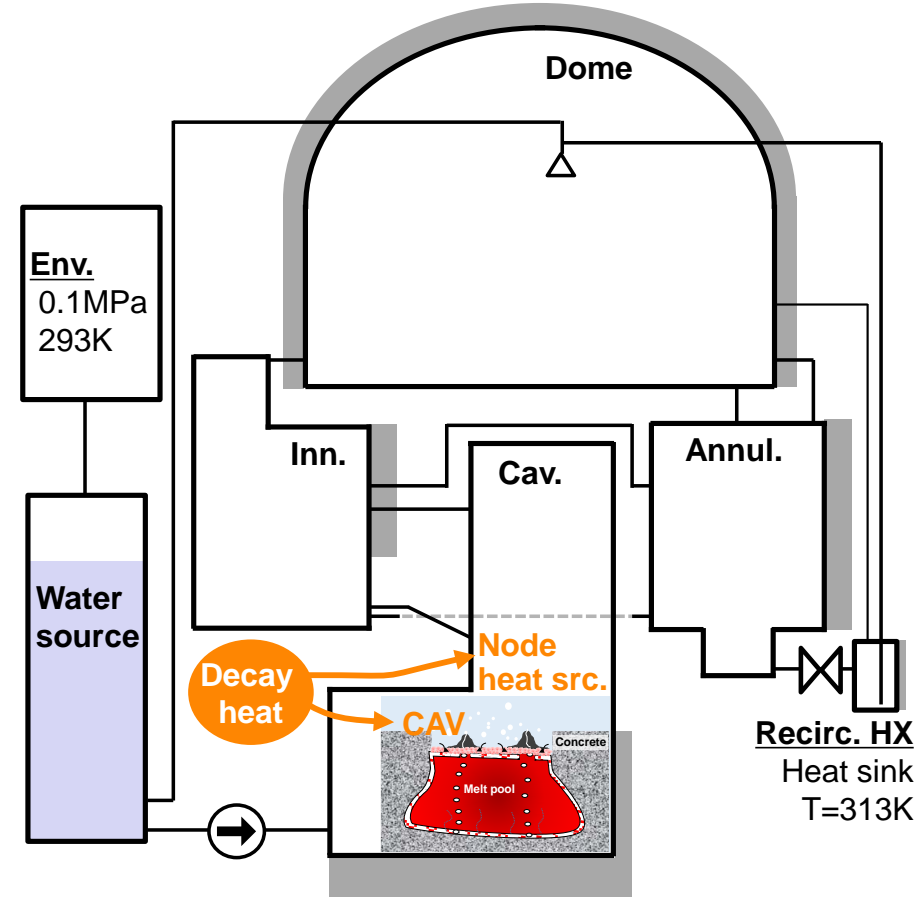


## SAMG 중대사고 해석 : III. 중대사고 현안 해결 (예) - 사고관리 전략 (노외 냉각성 평가)

COOLAP-II : single node model



MELCOR : 4-node model



Long-term behavior involves transport of water among compartments (evaporation, condensation, gravitational fall, water level at cavity)

## SAMG 중대사고 해석 : 정리

- 후쿠시마사고이후 중대 사고는 더이상 가상 사고가 아닌 **실제적 사고**로 간주되고 **규제 관리** 범위에 들어섰다.
- 국내 중대사고 법제화는 유효한 사고 관리 전략을 통한 **정량적 안전 목표**를 달성하도록 요구하고 있고 이는 곧 실제적 중대사고 안전 해석을 통하여 사고관리전략의 유효성을 **정량적으로 평가**하여야 함을 의미한다.
- 중대사고 안전 해석의 본질은 중대 사고의 증상 지향적이고 특화안전설비보다 가용 수단의 효율적인 활용에 중점을 둔 Top-down방식의 사고 관리 대처 특성에 따른 **결정론적 그리고 확률론적 접근**이 필연적이다.
- 그러므로 유효한 사고관리전략을 개발하고 검증 평가 하기 위해서는 **실제적 중대사고 해석 체계**가 구축되어야 한다. 즉 결정론적 현상 해석 및 확률론적 사고 전계를 종합하여 Level 2 PSA를 완성시키고 Level 1과 Level 3와 유기적으로 연계한다.

*If you can't measure it, you can't manage (improve) it ...  
by Peter Drucker*

## SAMG 중대사고 해석 : 정리

- 중대사고 현안 해결을 위한 중대사고 안전 해석은 **Load-Capacity 방법론**에 기초 하여야 한다. 중대사고 현상 및 사고 시나리오에 대한 불확실성이 매우 높지만 그 정밀도의 수준은 중대 사고시 발생하는 하중을 견디는 구조체의 건전성에 따라 상대적으로 평가 되어야 한다. 실제 많은 중대사고 현안 및 이슈들이 이와 같은 방법론에 따라 해결되어 왔다. 중대사고 법제화 환경하에서는 이에 대한 해석 능력 배양이 중요하다 (Reactor vessel integrity, Containment integrity 등등)
- 유효한 사고 관리 전략을 개발하고 검증하기 위한 중대사고 해석은 현상 모델 개발, 해석 입력 개선, 평가 기술 개발, Update된 원전 특성 Database 구축 및 Level 2 PSA모델 등의 **지속적인 개선**이 이루어져야 한다.
- 중대사고 안전 해석에 있어서 중대사고 법제화 이후 가장 큰 요구사항은 우리의 중대사고 안전 해석은 더이상 일반적이지 않고 **고유 특성** 적이라는 것이다. 이는 곧 중대사고 안전 해석에 필요한 모든 인적, 기술적, 도구적 환경이 **독자적**이어야 함을 의미한다.

*For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for Nature cannot be fooled ...” by Richard Feynman*

# *Nuclear Safety*

*Deep-Learning for knowns,  
Smart-Predicting for unknowns*

