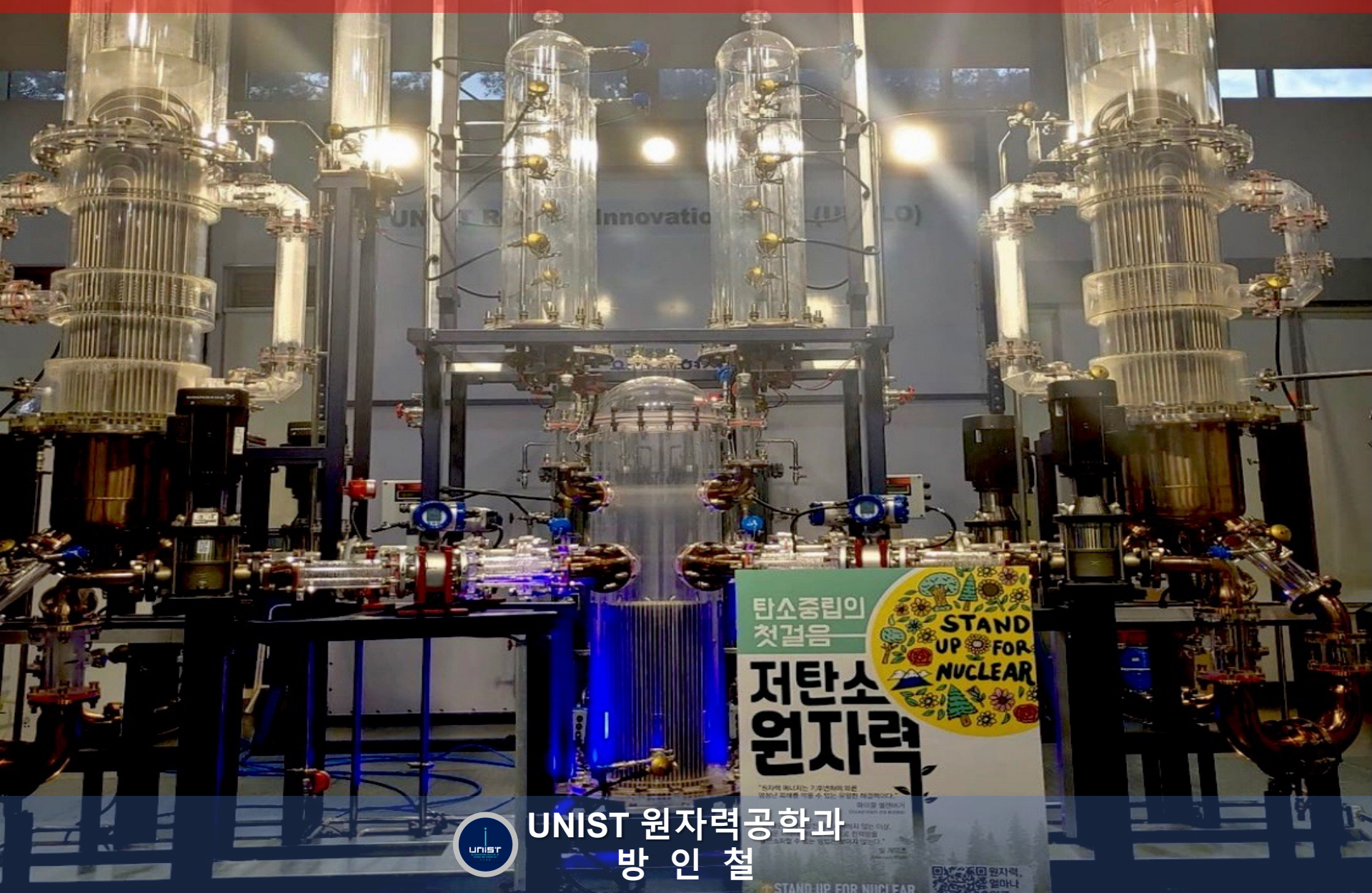


피동고유안전 원자로- 무제어봉 원자로의 RETHINK



UNIST 원자력공학과
방 인 철



원자력발전소 중대사고 발생을 통한 교훈

TMI 원전 사고



1979

기능 고장 및 **인적 오류**에
의한 중대사고 발생

체르노빌 원전 사고



1986

설계 결함 및 **안전문화 결여**로
인한 중대사고 발생

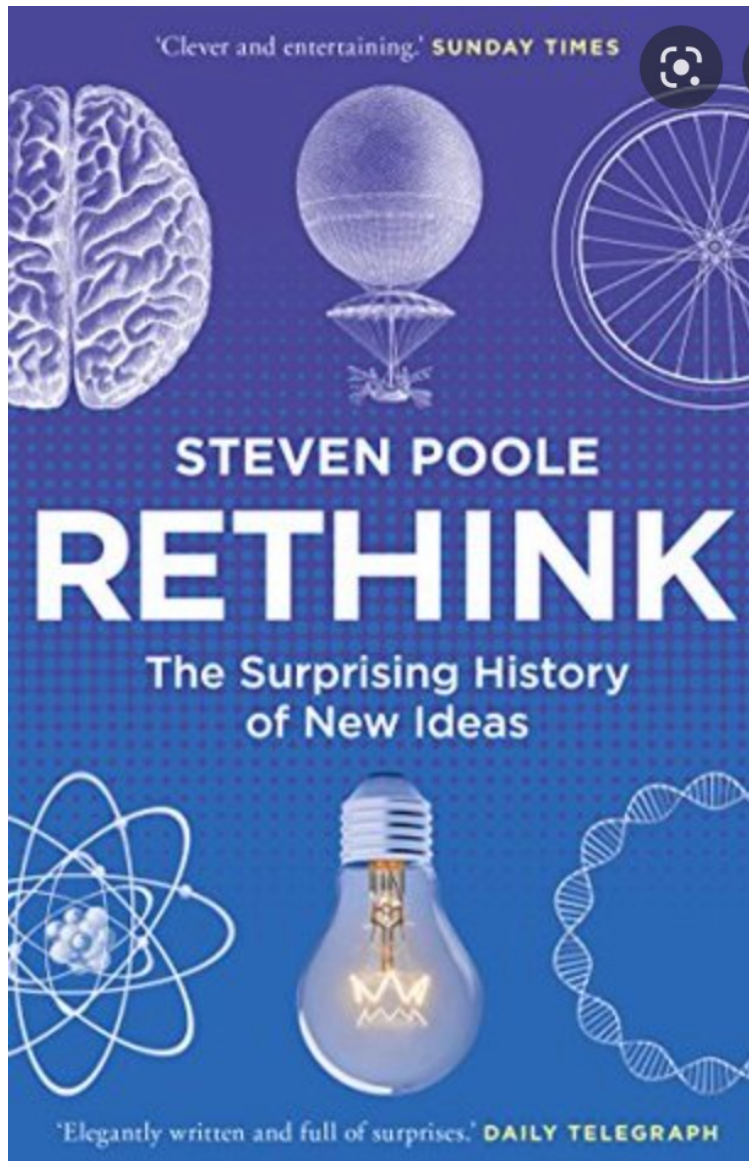
후쿠시마 원전 사고



2011

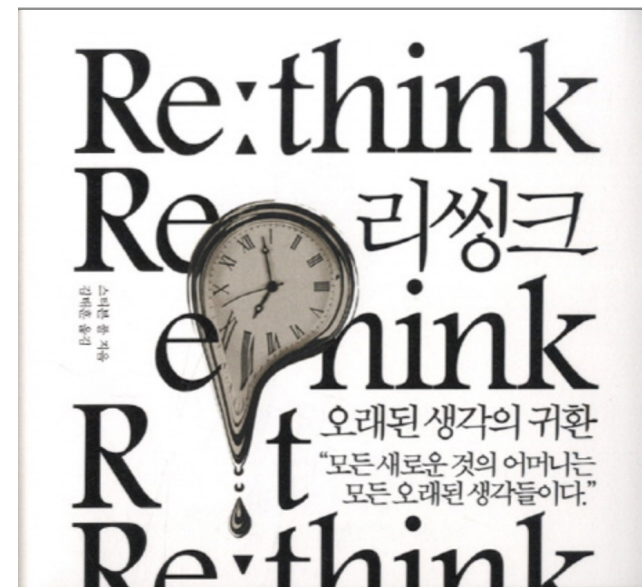
극한 자연재해 및 **인적 오류**에
의한 중대사고 발생

“극한의 자연재해 환경에서도, 운전원의 개입 없이 **출력 폭주가 없고,**
피동 안전 개념에 입각한 **무한 냉각성능이 보장되는 NICE** (Naturally
and Inherently CoolEd)한 원자로 설계가 요구됨”



“Rethink [동사]

1. 어떤 생각을 다시 하다. 재고하다.
2. 생각하는 방식을 바꾸다.





반면, **최초의 전기자동차**는
내연기관 자동차보다 30여년을 앞선
1834년에 만들어졌습니다.
(스코틀랜드의 로버트 앤더슨 발명)

당시 전기자동차는
발명왕 에디슨도 개발에 나서는 등
당대 최고 인기있는 자동차였습니다.



“Rethink [동사]

1. 어떤 생각을 다시 하다. 재고하다.
2. 생각하는 방식을 바꾸다.

“연구에서 실로 가치 있는 성과를 이루기 위해서는 동료들의 의견을 거슬려야 한다.”

-프레드 호일

“군대의 침략은 막을 수 있으나 제때를 만난 사상(아이디어)은 막을 수 없다.”

- 빅토르 위고

History : 균질 원자로 (고유안전 원자로) vs 비균질원자로

균질성 (Homogenous fluid)의 장점 그리고 어려움

- 콜라, 커피, 우유, 혈액(피) : 콜로이드 용액
- 나노유체 냉각재 (고체나노입자+액체) → 분산 실패
- 균질 수용액 원자로 → 분산 실패 → 비균질 원자로 (고체연료): 연탄

안전한 원자로 설계 문제 (Only Safe Reactor)

- Meltdown : (1) 출력폭주, (2) 냉각능력 상실

→ 역사속 해결책 후보

(1) 균질성 추구: 균질 용융염 원자로 (액체연료, 화학 원자로) : 석유

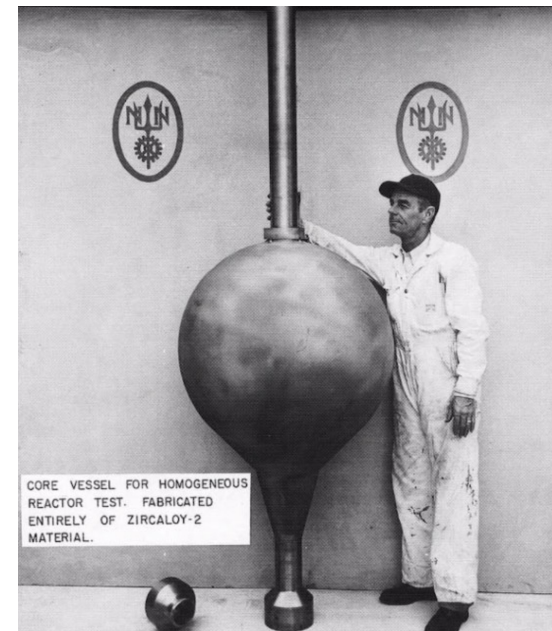
for 출력폭주(액체 팽창), 냉각능력 상실 (drain system), Alvin M. Weinberg, "MSRE"

(2) 비균질성 기반: 소형모듈원자로

for 소형화(출력폭주?), 냉각능력 상실(자연순환) → Hose Reyes, "Nuscale Power Module"

(3) 비균질성 기반: 피동고유안전 경수로

for 출력폭주(피동보론주입), 냉각능력 상실(자연순환) → Pederson, "PIUS", Sako et al. "SPWR"



Aqueous homogeneous reactor at Oak Ridge National Laboratory

JOURNAL ARTICLE

Inherently Safe Reactors and a Second Nuclear Era

Alvin M. Weinberg and Irving Spiewak



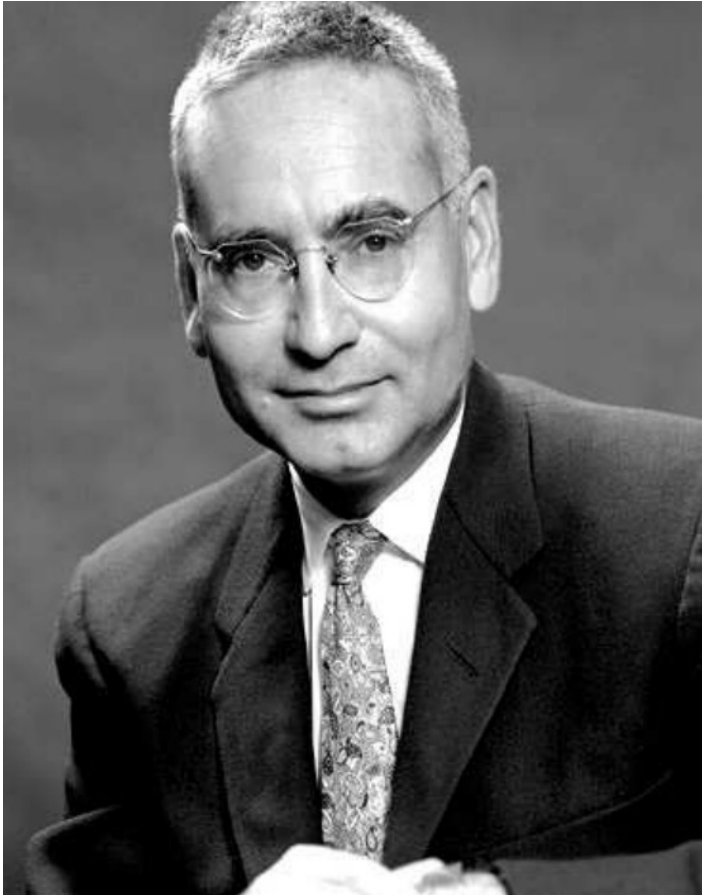
Science

New Series, Vol. 224, No. 4656 (Jun. 29, 1984),
pp. 1398-1402 (5 pages)

Published by: American Association for the
Advancement of Science

Second Nuclear Era

“Can reactors be designed for which the probability of melt-down is zero?”



Alvin M. Weinberg

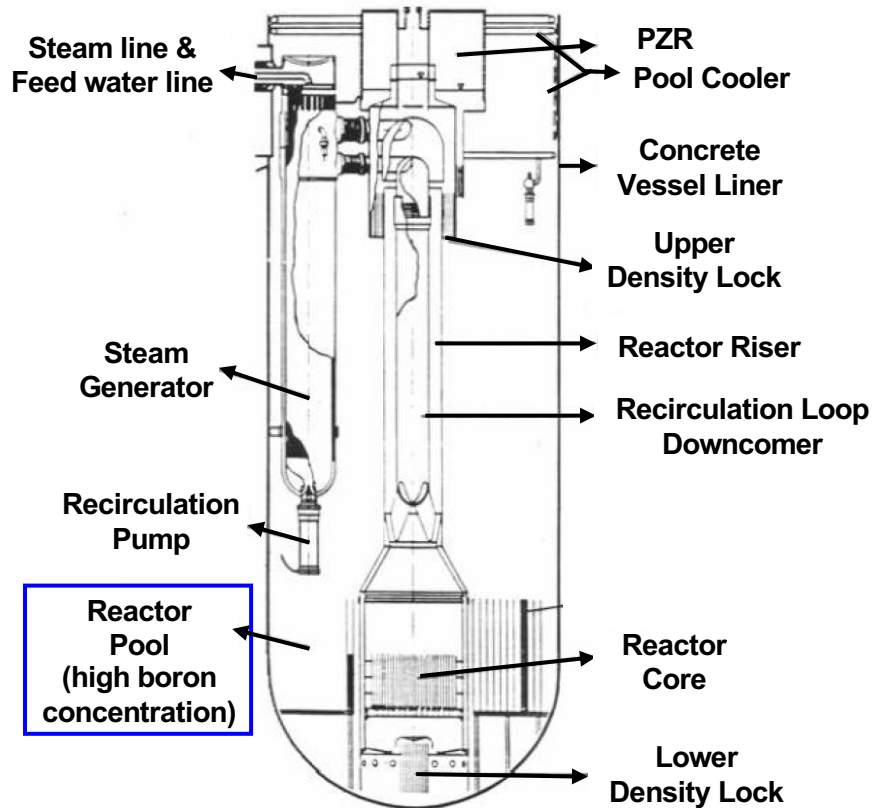
- As the two reactor accident, Three Mile Island (TMI) and Chernobyl demonstrate, a malfunctioning reactor can pose serious threat - even though TMI caused no discernible biological harm.
- The public's reaction to TMI and Chernobyl was immediate and drastic.
- This reaction led designers to ask “Can reactors be designed for which the probability of melt-down is zero?”
- And if such reactors were the technical basis for a Second Nuclear Era, would this not eliminate one of the public's concerns about reactors?

Second Nuclear Era

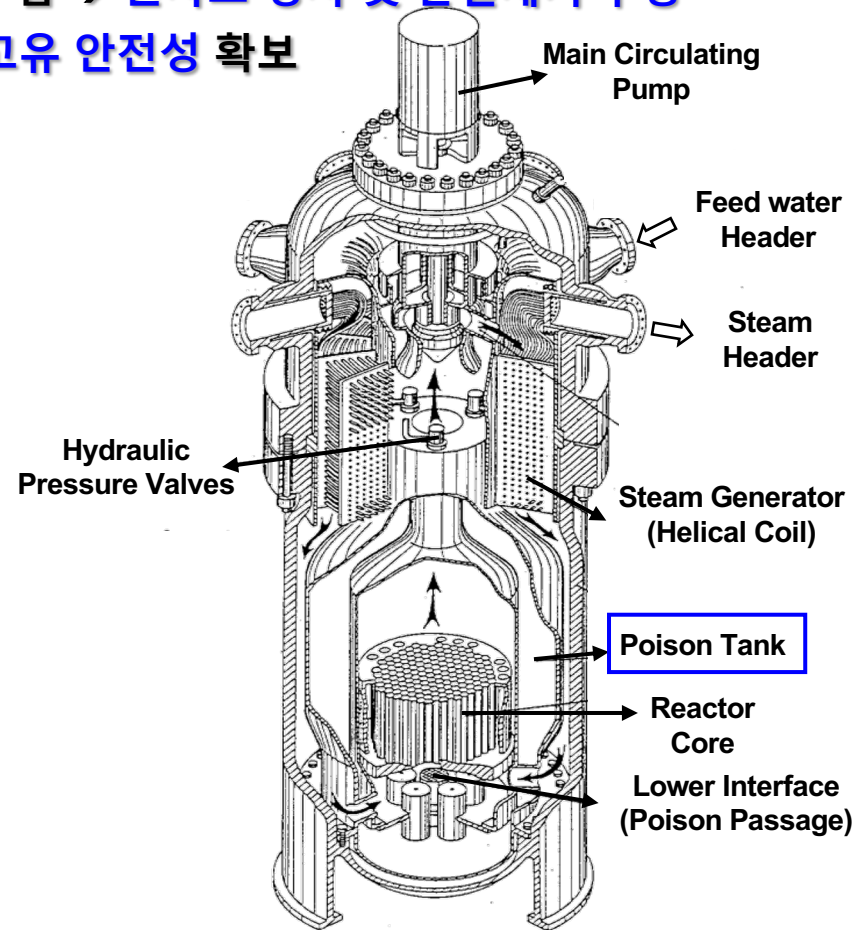
- When these ideas were first discussed by David Lilienthal in 1980, the reactor community could not answer this question. But once the question was raised, **ideas for “super-safe” reactors** emerged. Central to the discussion was the notion of inherent safety - i.e., **a reactor whose safety was ensured not by engineered, active systems, but by inherent passive systems that depend on well-recognized natural laws.**
- One result of these preliminary investigations was to sharpen the definition of “zero” probability. Ordinary pre-TMI Light Water Reactors had core-melt probabilities, as determined by Probabilistic Safety Analysis, of 10–4/RY. In Sizewell-B, A PWR built in England, the core-melt probability was reduced to ~ 10–6/RY.
- Yet **the issue cannot be decided by PSA - the public does not distinguish between a core-melt every 10,000 years/reactor, and one ten times less frequent.**
- It has seemed to me that publicly acceptable reactors must have features that, **in the public’s mind**, represent a **transparent, easily understood improvement** over existing reactors.
- Several reactors that embody inherently safe features have been proposed. These include the Westinghouse APWR, and the General Electric ABWR - these are in the class of incrementally improved LWR’s. In the case of inherently safe reactors there is the **small gas-cooled HTGR of General Atomic** and **the PIUS reactor of ABB**. **Of these I would consider only PIUS to be truly inherently safe.**

- PIUS (Process Inherent Ultimate Safety), PWR, 640 MWe, ABB-ATOM (Sweden)
 - ✓ The reactor core does not use control rods, neither for reactor shutdown nor for power shaping.
 - ✓ The reactor control is accomplished by means of reactor coolant boron concentration and temperature.

원자로 용기 내부 **내장형 고농축 봉산 수조 / 탱크 구비 (무제어봉)**
유압 구동 방식을 통한 고농축 봉산수 주입 → 원자로 정지 및 잔열제거 수행
설계 특성에 의한 고유 안전성 확보

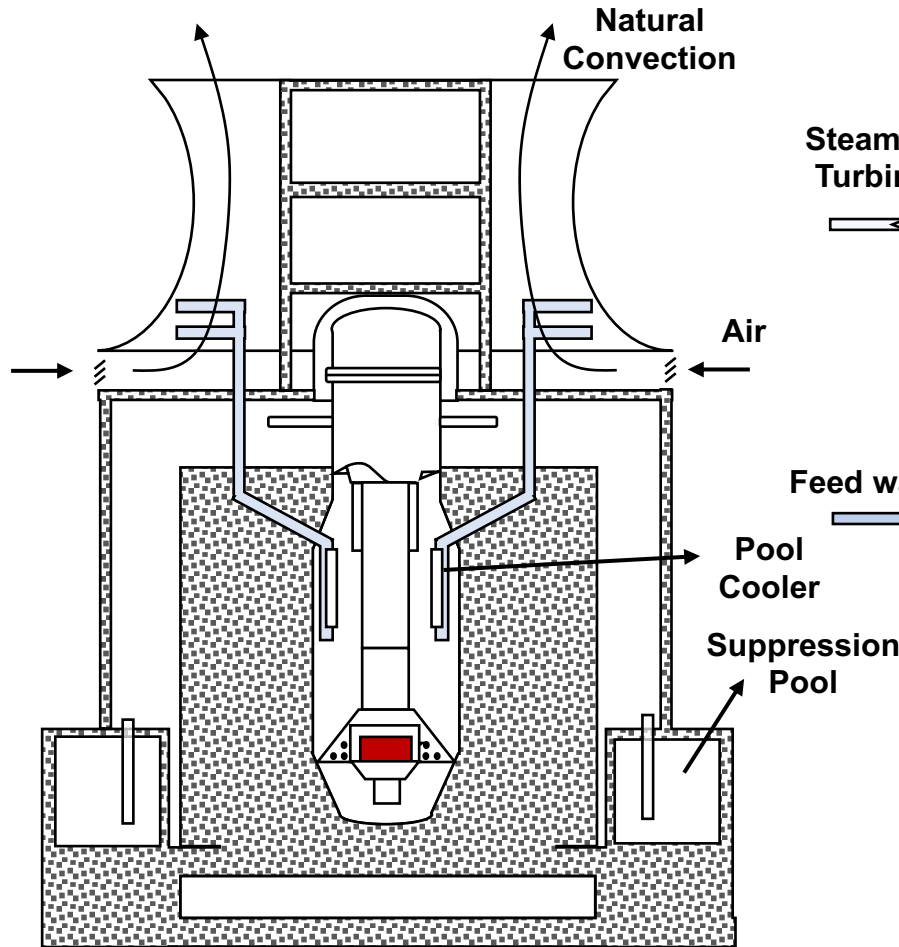


PIUS (Process Inherent Ultimate Safety)
PWR, 640 MWe, ABB-ATOM (Sweden)

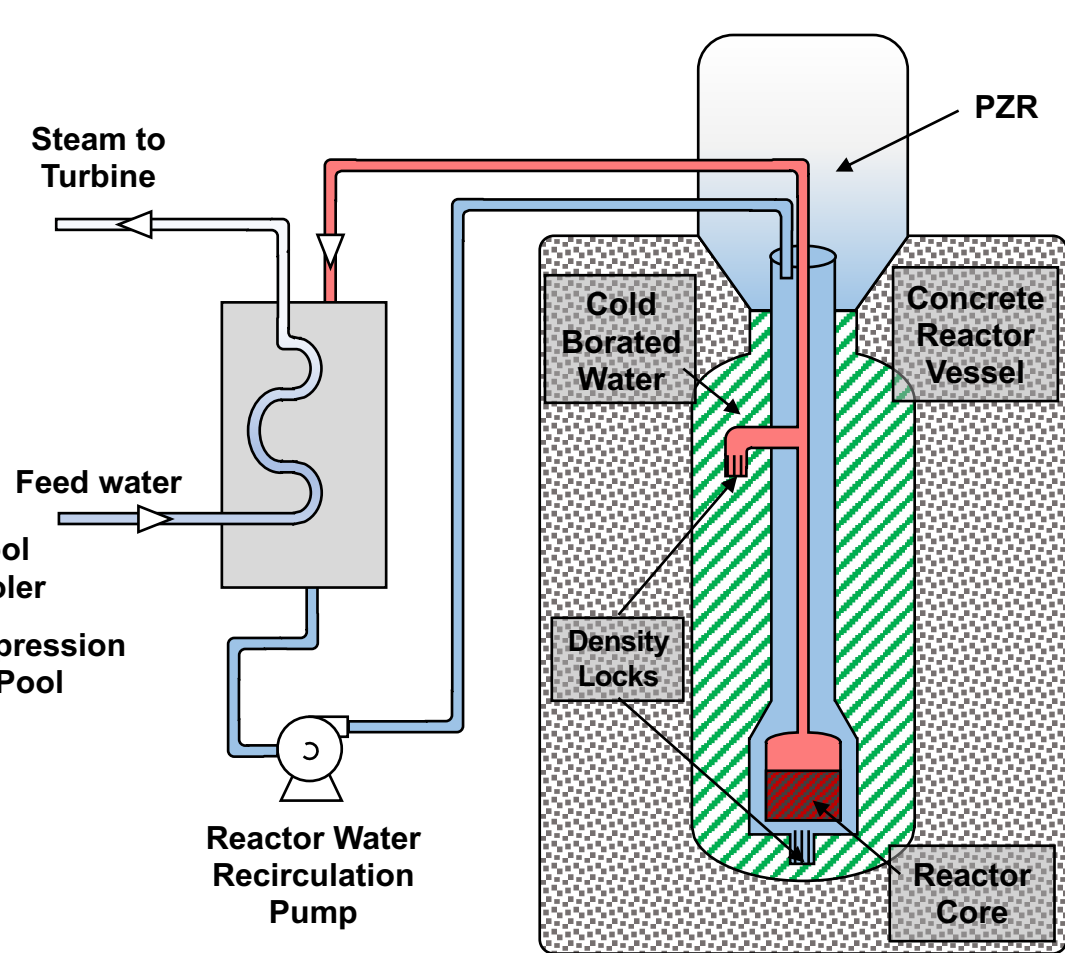


SPWR (System Integrated Pressurized Water Reactor)
PWR, 350 MWe, JAERI (Japan)

- 사고 발생 시, 1차 계통 냉각수의 유속 및 온도 변화에 의한 Density Lock 수력학적 균형 붕괴
→ **고농축 붕산수 유입에 의한 원자로 정지 + 수조** 를 통한 **잔열 제거** (설계 특성에 의한 고유 안전성)



PIUS 원자로 건물 설계 계략도



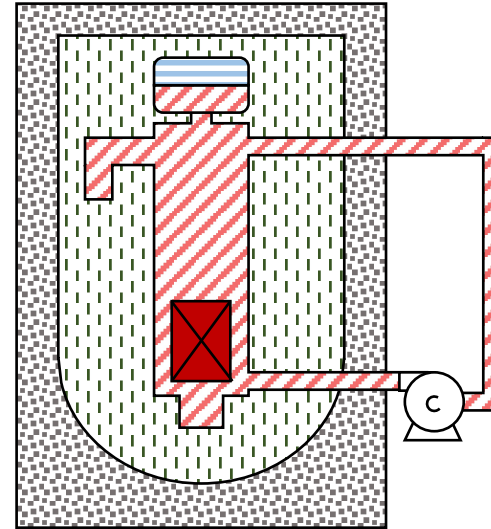
PIUS 원자로 설계 계략도

PIUS 원자로 설계 특징

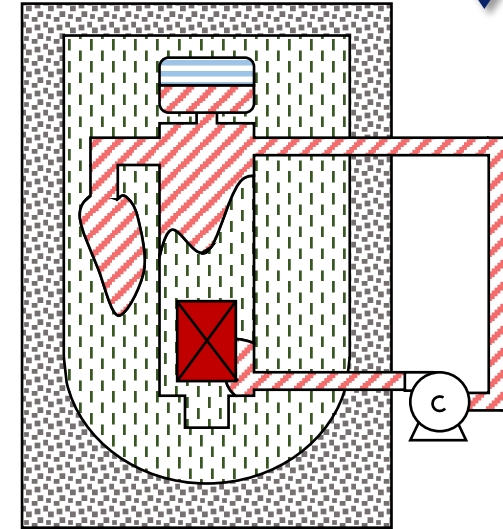
13

- 원자로 과도 조건 (냉각재 유량 및 온도 변화)
→ Density Lock의 유압 균형 붕괴로 인한 원자로 자동 정지 (피동 / 고유 안전성 확보)
- 어떠한 사고 환경에서도 활성 노심 노출 및 DNB 발생이 나타나지 않음
- 고농축 봉산 수조를 통해 원자로 출력 제어 및 잔열 제거 수행 (ADS, SIS, DHRS, CRDM) 대체

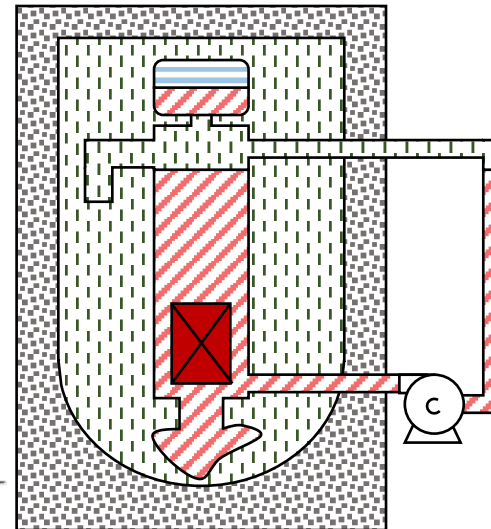
 콘크리트 격납 용기
  저온 고농축 봉산수
 고온 저농축 봉산 냉각재
  증기



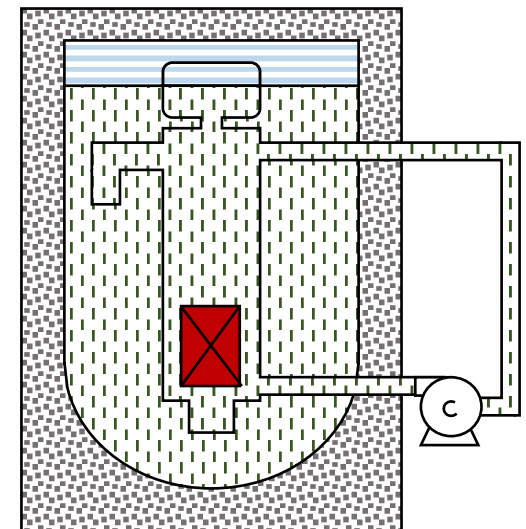
정상 운전 상태



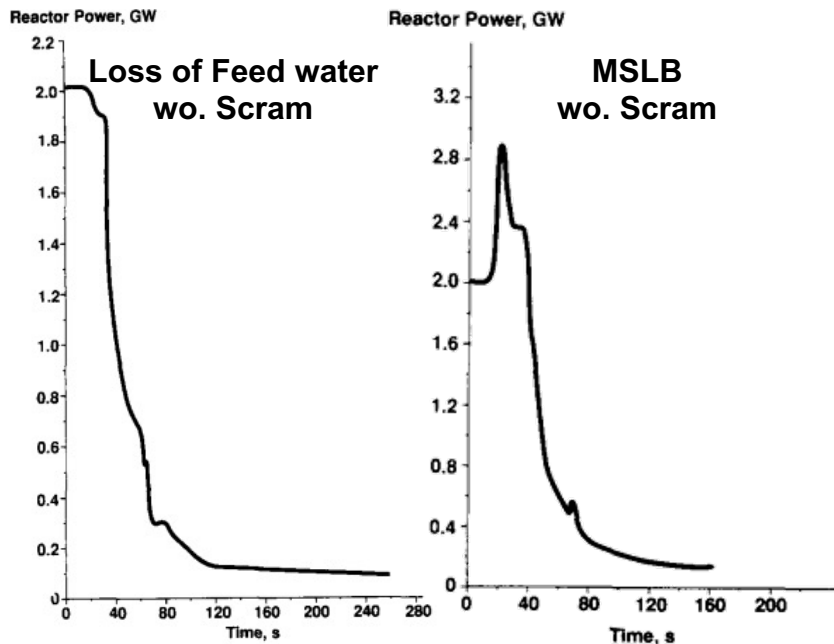
유량 상실 / 급수 상실



냉각재 유량 증가

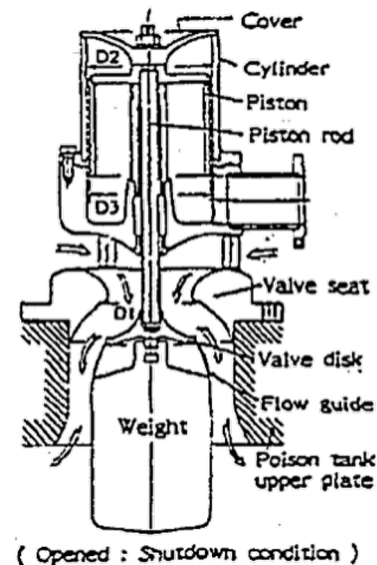
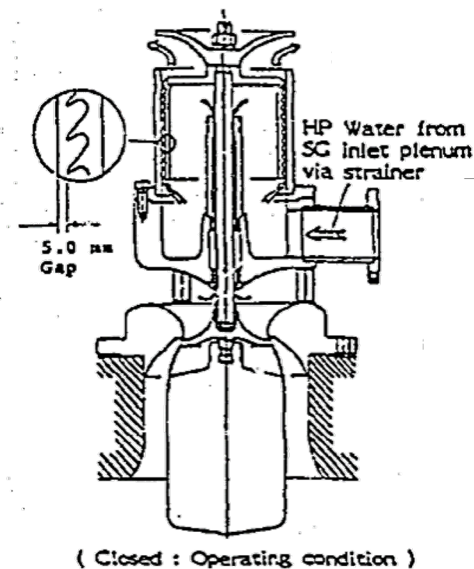
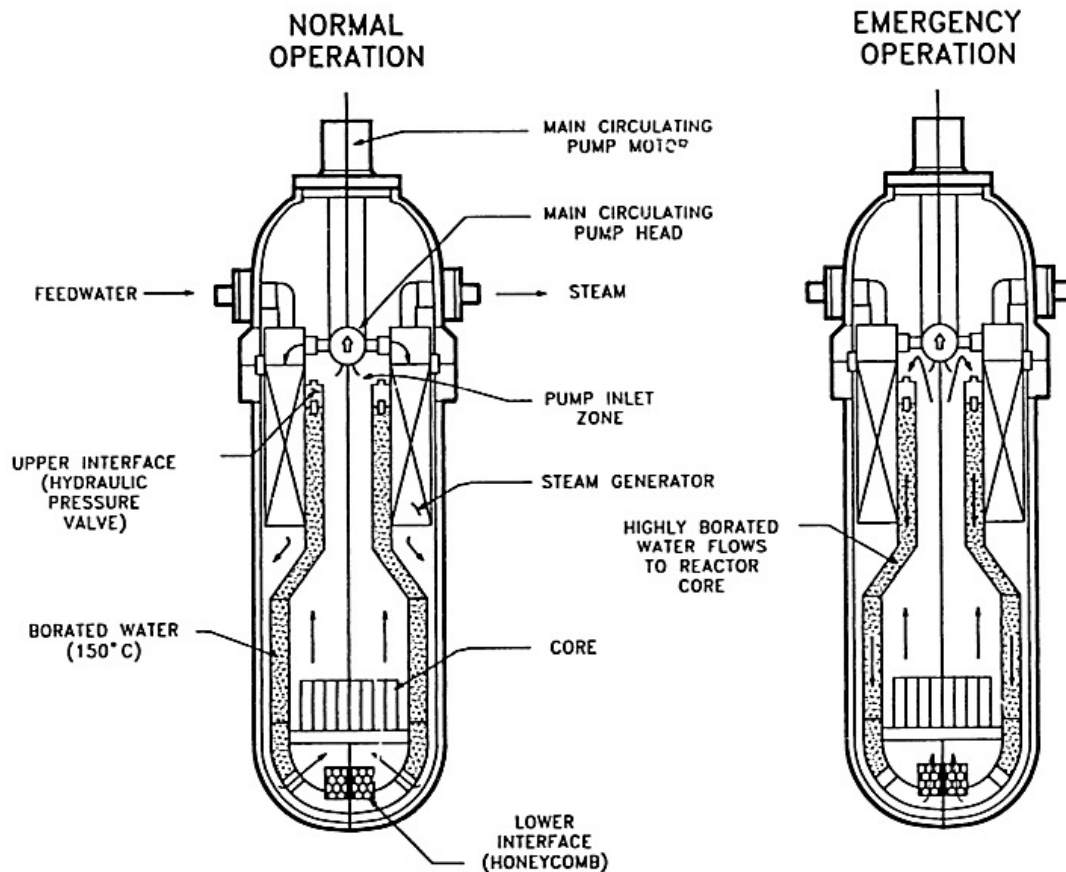


장기 냉각 상태



사고 조건에서의 PIUS 원자로 출력 과도 거동

- **SPWR** (System Integrated PWR)는 **일체형 PWR**로, **내장형 봉산 탱크** (유압 밸브 구동식)를 통해 **제어봉 구동장치를 대체**
- SBO (AC 전원 상실), 유량 상실 (MCP 정지), 냉각재 상실 (LOCA) 상황에서 유압 밸브가 개방되며 원자로 자동 정지







FIRST IN
CHANGE

감사합니다.

