

한국 서울

2023年4月21日

# 후쿠시마제1 원전 사고와 후속 상황

전 도시바 원전 설계기술자  
원자력시민위원회 위원·규제부 회장

박사(공학)    고토 마사시  
後藤 政志

# 내 용

1. 후쿠시마제1원전 사고 개요
2. 오염수 발생 · 삼중수소 해양 투기
3. 후쿠시마제1원전 현황
4. 후쿠시마 사고 원인과 대책
5. 원전 안전성

# 후쿠시마제1원전 파괴상황

2013年9月 강연에서

운전 중

1호기

운전 중

2호기

운전 중

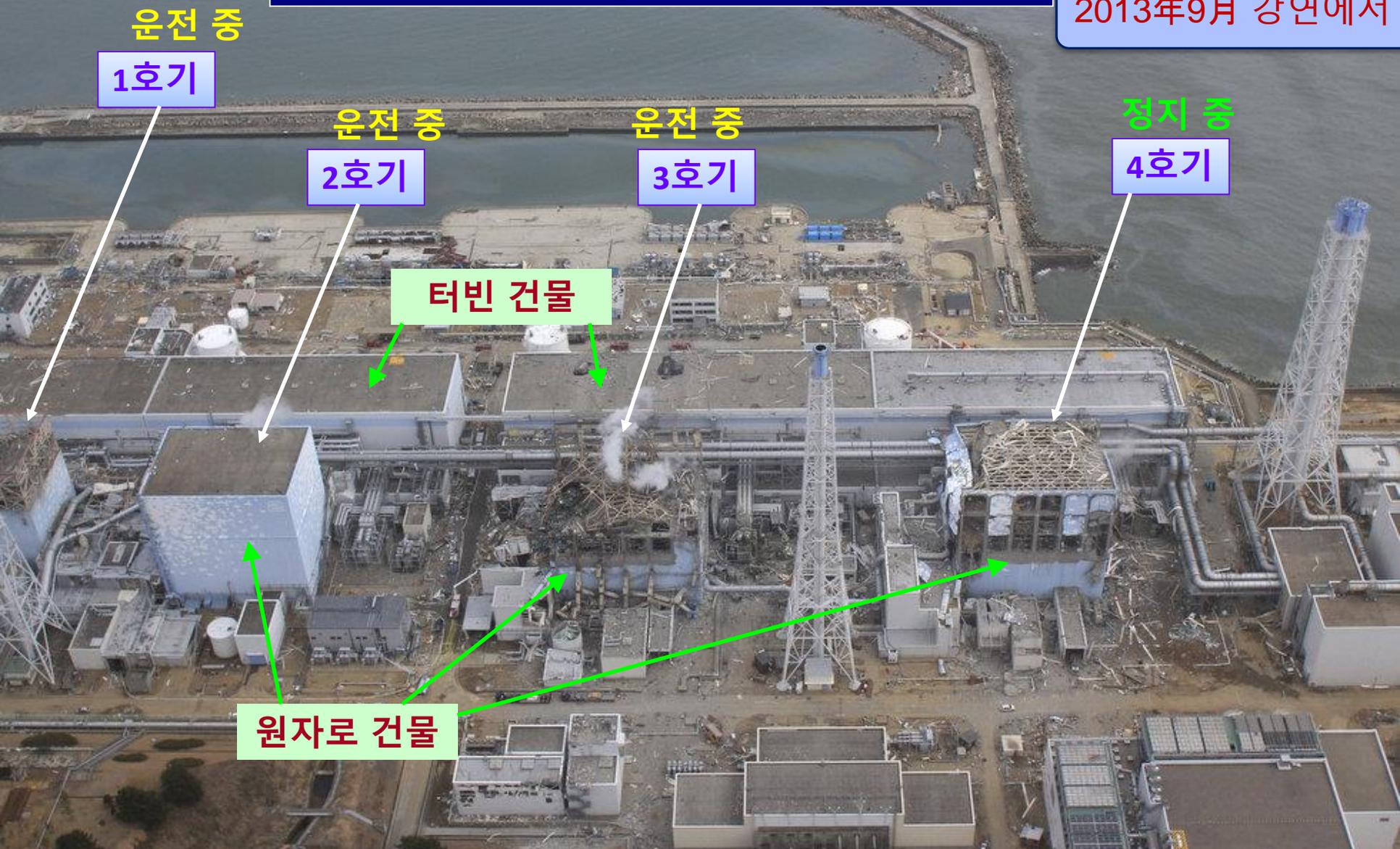
3호기

정지 중

4호기

터빈 건물

원자로 건물



# 후쿠시마제1원전 사고 끝나지 않았다

2021年3月5日 원자력규제위  
『후쿠시마사고조사 중간정리』 발표



파괴된 건물 상부와 건물 밖 배관에서 고농도의 방사성물질 발견. 수소폭발 발생장소와 수소 유출 경로에 새로운 의문.

2022年6月 현재도 사용후핵연료 추출작업은 절반 정도까지 밖에 하지 못했다.



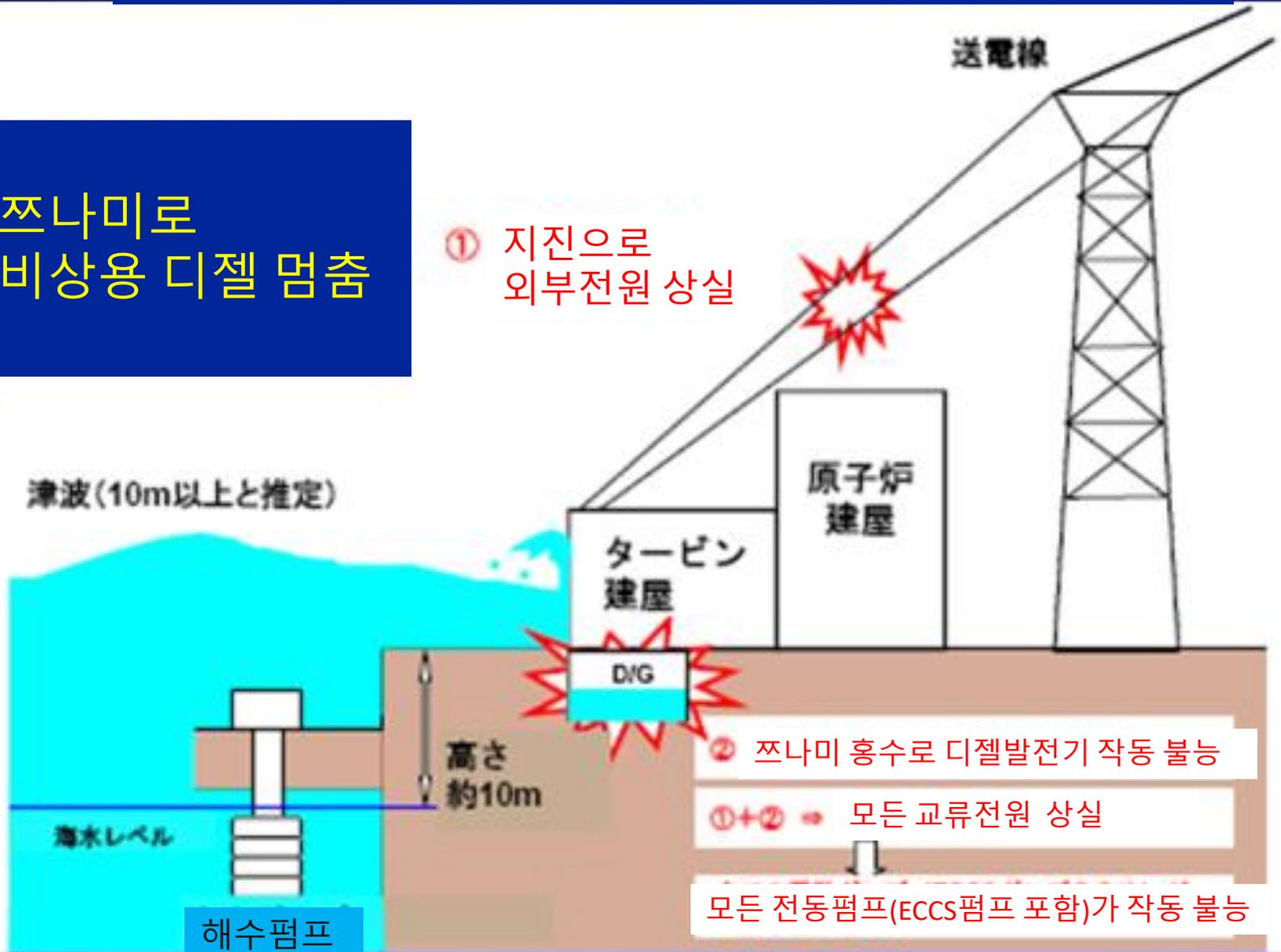
<https://kobajun.biz/>



<http://umaebina.com/>

# 손상 원인 (전 전원 상실)

쓰나미로  
비상용 디젤 멈춤



해수펌프

② 쓰나미 홍수로 디젤발전기 작동 불능

①+② ⇒ 모든 교류전원 상실

모든 전동펌프(ECCS펌프 포함)가 작동 불능

# 후쿠시마제1원전사고 끝나지 않았다

2021年3月5日 원자력규제위가  
『후쿠시마사고조사 중간정리』 발표



파괴된 건물 상부와 건물 밖 배관에서 고농도의 방사성물질이 발견. 수소폭발 발생장소와 수소 유출 경로에 새로운 의문.

2022年6月 현재도 사용후핵연료 추출작업은 절반 정도까지 밖에 하지 못했다.



<https://kobajun.biz/>

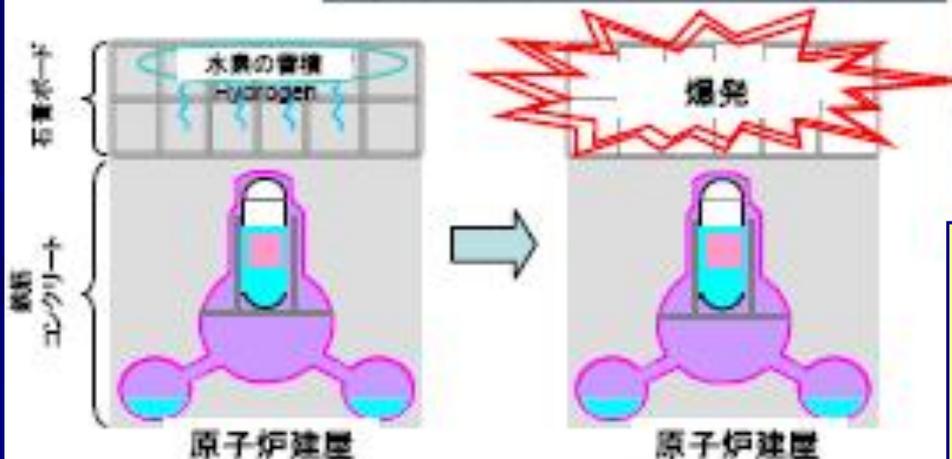
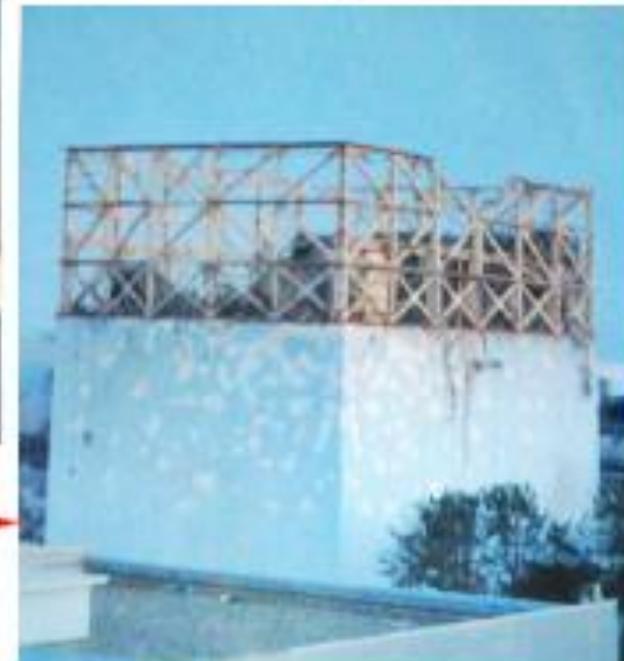


<http://umaebina.com/>

# 1호기 사고의 진전

オペレーションフロアで水素爆発

4층에서 수소폭발 가능성

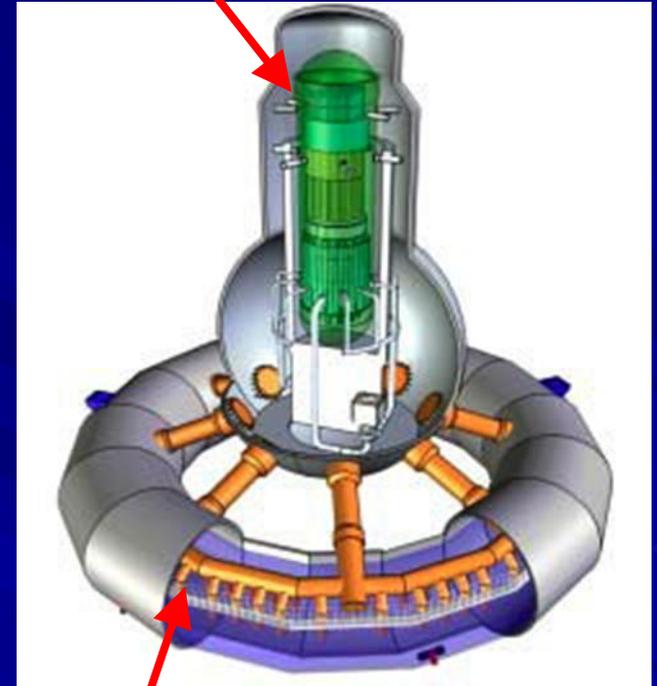


수소 이행경로 ?

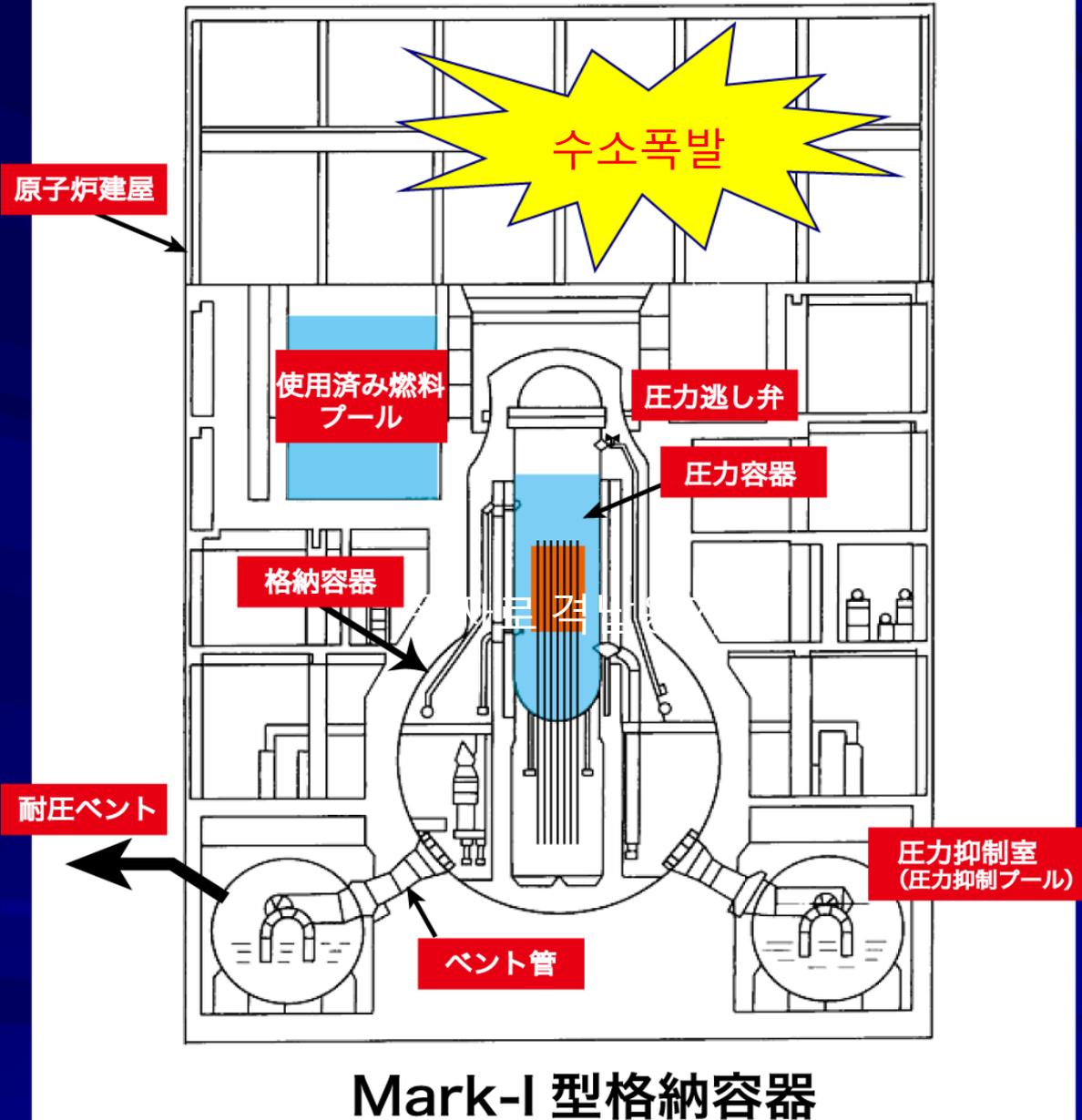
노심⇒압력용기⇒격납용기  
⇒격납용기 플랜지부 누설

## 수소 경로

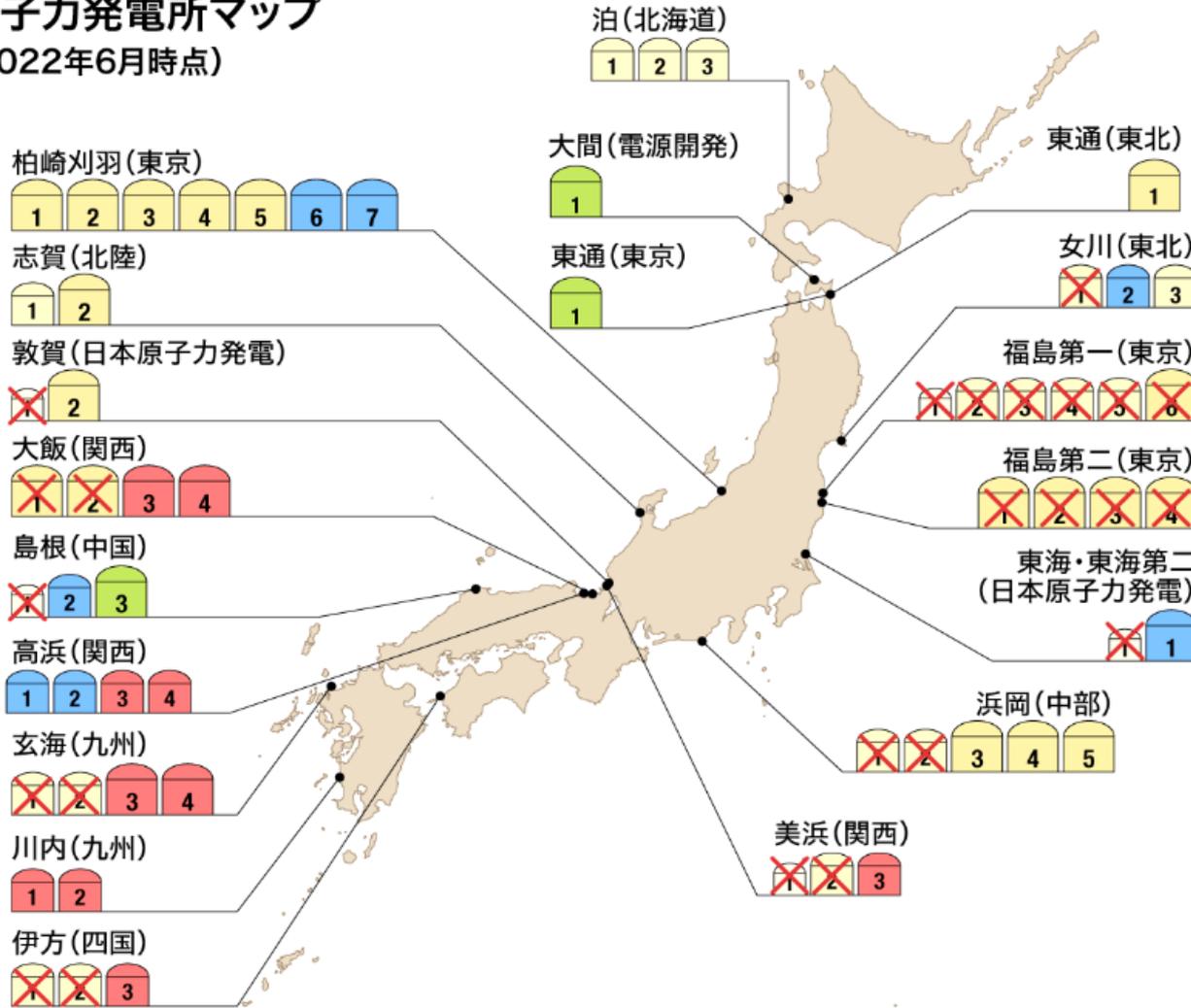
원자로 격납용기  
(드라이웰)



원자로 격납용기  
(웰웰)



# 原子力発電所マップ (2022年6月時点)



## 凡例

### 出力規模

- 50万kW未満
- 100万kW未満
- 100万kW以上

- 再稼働済 (定期検査中も含む)
- 新規制基準合格
- 建設中
- 廃炉決定済

各電力会社公表資料等を参考に編集部作成  
 ※東日本大震災前の時点で廃炉決定済だった東海発電所と浜岡発電所1・2号機も地図に含めている。

## 일본의 원전

비등수형(BWR)  
 가압수형(PWR)  
 이 거의 반반씩.  
 약 50몇기  
 있었지만  
 후쿠시마 사고로  
 21기는 폐로.

현재 가동 중인  
 것은 가압수형  
 9기뿐

# ‘원자력 안전’의 붕괴

후쿠시마사고  
때는 멈췄지만,  
항상 멈춘다고는  
할 수 없다

◆ **정지** ⇒ **제어봉이 삽입되어 멈췄다!**

【 그러나 이미 몇 번의 제어봉사고를 일으키고 있고, 지진으로 제어봉이 반드시 들어간다고 단언할 수 없다! 】 **제1후쿠시마3호기/시가1호기에서 임계사고**

◆ **냉각** ⇒ **지진/쓰나미로 고장 발생, 실패.**

이미 노심 손상. 지금도 냉각이 안정되어 있지 않다.  
압력용기도 손상!

◆ **차폐** ⇒ **압력용기, 격납용기도 파손**  
이미 차폐기능을 잃었다!(특히 2호기)

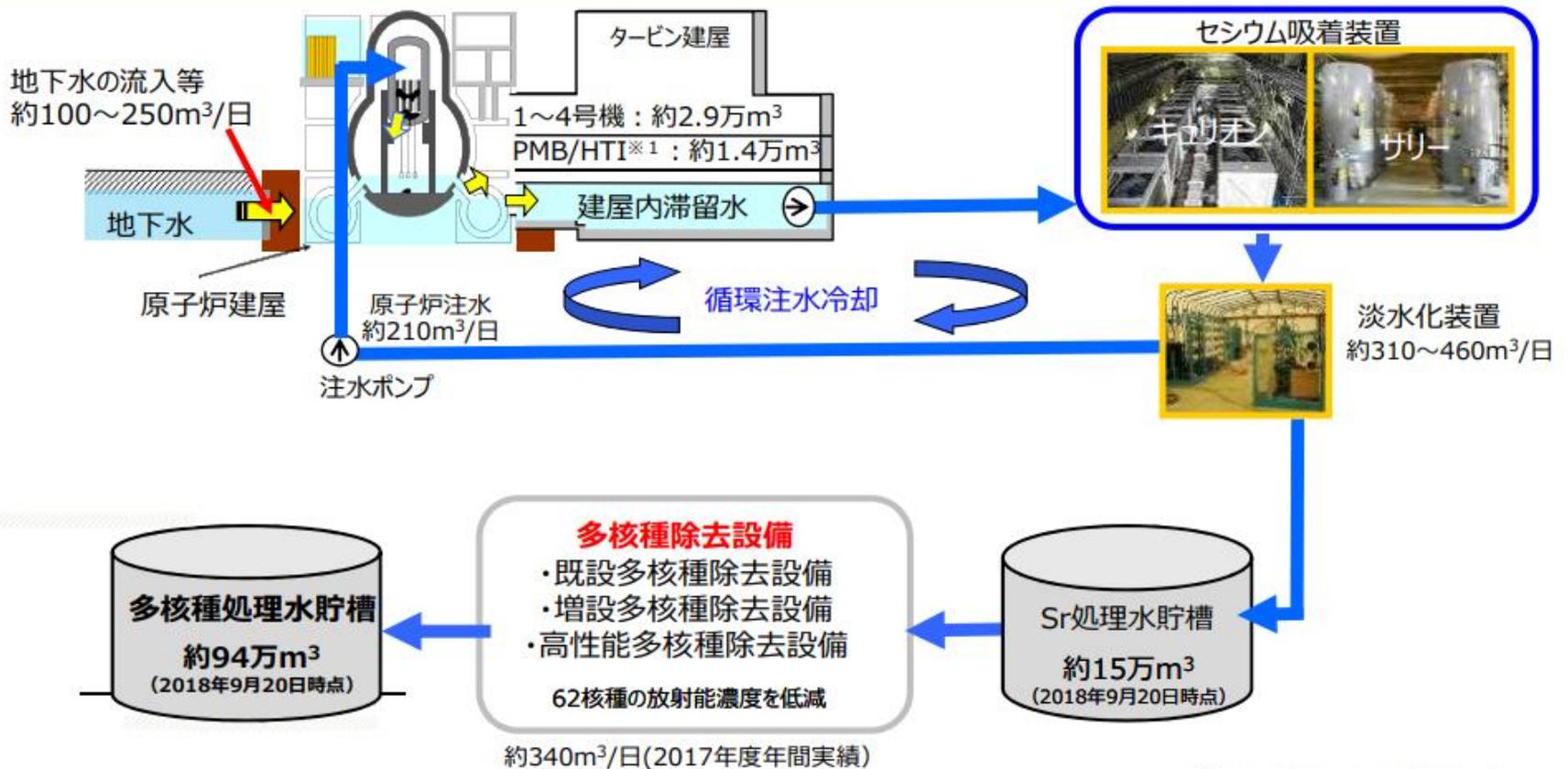
# 제어봉 탈락/오삽입 사고 일람 (～2007年)

年月日	原発名	事故内容
1978/11/02	福島第一3	制御棒5本が脱落. <b>臨界.</b>
1979/02/12	福島第一5	制御棒1本が脱落.
1980/09/10	福島第一2	制御棒1本が脱落.
1988/07/09	女川1	制御棒2本が脱落.
1991/05/31	浜岡3	制御棒3本が脱落.
1991/11/18	福島第一2	制御棒5本が誤挿入.
1993/04/13	女川1	制御棒1本が誤挿入.
1993/06/15	福島第二3	制御棒2本が脱落.
1996/06/10	柏崎刈羽6	制御棒4本が脱落.
1998/02/22	福島第一4	制御棒34本が脱落.
1999/06/18	志賀1	制御棒3本が脱落. <b>臨界.</b>
2000/04/07	柏崎刈羽1	制御棒2本が脱落.
2002/03/19	女川3	制御棒5本が誤挿入.
2005/04/16	柏崎刈羽3	制御棒17本が誤挿入.
2005/05/24	福島第一2	制御棒8本が誤挿入.



# 오염수처리 개요

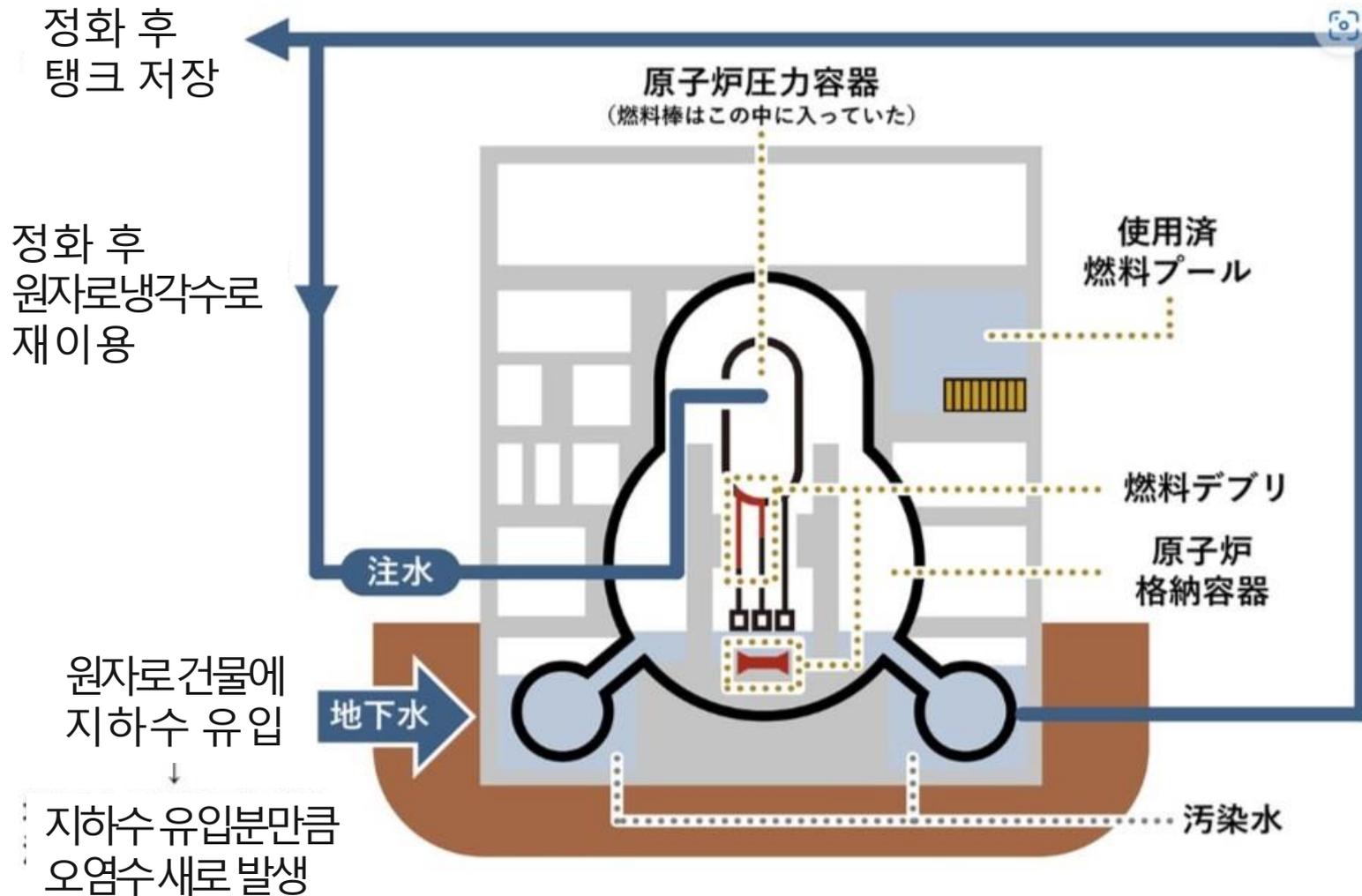
매일 유입되는 지하수 따위로 발생하는 오염수(건물 내 체류수)는 세슘 흡착장치와 염수화 장치에서 처리함. 염수화 장치 투과수는 원자로 냉각에 재이용하고, 농축수(스트론튬 처리수)는 다핵종 제거설비로 정화시켜 탱크에 저장



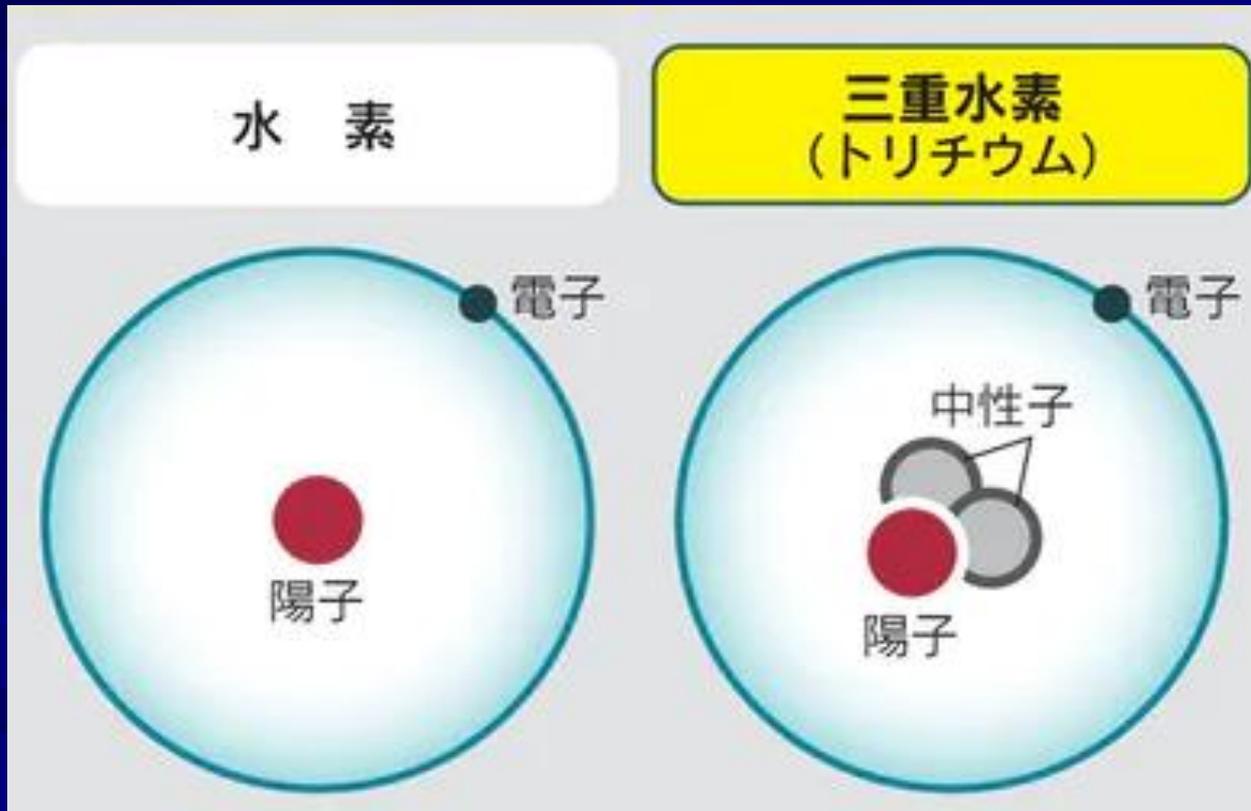
※ 1 プロセス主建屋/高温焼却炉建屋

# 오염수 발생

후쿠시마제1원전 원자로 건물 내 오염수 상황



삼중수소는 물과 같은 성질  
화학적으로 분리 불가.  
원전을 통상 운전할 때도 삼중수소 대량 방출.



필터로  
여과하지  
않는  
희가스도  
통상 운전 시  
환경에 방출

# 「삼중수소 처리수」

「삼중수소 이외 핵종을 환경에 방출 시  
규제기준을 채운 물」을 「ALPS처리수」라  
호칭하기로 변경。

삼중수소는 다른 방사성핵종과 달리 처리(제거)할  
수 없지만, 삼중수소 이외 핵종이 대량으로 포함된  
물이 보관되어 있던 사실을 감추고 있음이  
문제였다。

# 지금까지 모아온 삼중수소 오염수를 방출?

◆삼중수소(등) 오염수가 약130만톤, 1천개 넘는 탱크에 보관 중.

정부는 탱크 놓을 토지가 없다며,  
희석하여 해양방출하기로 결정.

「다른 방법이 있음」에도 방사성물질을 바다로  
흘리는 것은 오염을 바다로 확대하는 행위.



주민, 어업자, 시민 반대를 누르고 왜  
억지로 바다에 흘리는가.

os://beguredenega.com/

# 대형 탱크에 장기 보관안

- ◆ 장기보존에 따른 방사능 감소
- ◆ 석유비축에 많은 실적 있음
- ◆ 10만m<sup>3</sup> 대형 탱크 10몇기

10만m<sup>3</sup> 원유탱크



# 몰탈 고화로 영구처분

- ◆ 삼중수소 오염수를 시멘트로 굳혀 콘크리트 탱크에 흘려넣음
- ◆ 방사성물질 새지 않음
- ◆ 실질적인 영구보관

미국 사반나리버 핵시설에서 실시 중



# 각종 방사성물질을 제거하는 시설「ALPS」



ALPS (アルプス)

삼중수소는 방사성물질이지만, 보통의 물과 같은 성질이라 제거 불가능.

오염수 뿐 아님。  
방사성 오니도 보관 용량 가득 차。

(슬러리)를 격납하는 용기「HIC처리수 뿐 아니라 ALPS  
처리로 생기는 방사성 오니(슬러리)」보관용량 98%  
(2023年3月2日 시점)

후쿠시마 사고로 대량의 방사성물질이 환경에 방출되어  
비교적 오염이 적은 곳부터 제염(방사능 제거)해왔다。  
오염된 잔해물과 토양을 긁어모았지만, 그 후 대량으로  
모은 오염토를 기준 이하 농도라면 문제 없다하여,  
도로와 제방 등에 사용하기까지 시작했다. 지극히 위험。

# 제3자기관으로 IAEA(국제원자력기관)에 견해를 내도록 의뢰...「원자력 추진기관」에 협력요청

## 처리수방출에 따른 IAEA와의 협력 항목

전용장치로 오염수에서 방사성  
물질을 확실하게 제거하는지 검증

방출 시 희석방법 등의 안전성 감시

방출 전후 해수 모니터링

처리수 방출이 사람과 환경에 영향을  
주지 않는지 확인

평가결과를 국내외에 발신

예를 들면 환경오염 등을  
조사 연구하는 조직에 평가를  
의뢰 한다면 알겠지만,  
IAEA는 국제적으로 원자력을  
추진해 온 기관이다. 그들  
견해는 삼중수소 해양방출을  
감시나 모니터링 등으로  
확인할 거니까 문제 없다는  
태도이다.

원자력 추진기관에 견해를  
요구하는 것은, **반대하는  
어업관계자와 시민 목소리  
압살 역할을 맡기려는 것.**

# 삼중수소 오염수로 알게 된 사항

- (1) 데브리 추출 계획은 당면 동결하고, 장기 격리 보관으로 이행해야 함.
- (2) 대형 저장 탱크 혹은 몰탈 고화시설을 택하면, 오염수 해양 방출 불필요.
- (3) 데브리 공냉화를 꾀하는 것으로 오염수 발생 막음.
- (4) 지하수 유입을 막아 데브리에 접촉시키지 않음.
- (5) 삼중수소는 방사성물질로, 일단 환경에 내보내면 원래로 돌리지 못함. 안이한 해양방출은 실제 피해와 소문 피해 낡음.

◆삼중수소 오염수 문제는 사고 시 뿐 아니라, 통상운전 시에도 「원전과 재처리시설」에서 방사성물질을 환경에 계속 내보내고 있음을, 새삼 명확하게 했다. 한국, 중국도 마찬가지.

# 원자로 건물의 방사성물질을 외부로 빼는 스택(굴뚝)



福島第一原発の1号機(右)と2号機間にある太い配管に沿うように設置された細い配管の切断撤去は、2号機側の一部しかできず中断。東電は周辺のがれき撤去を先行させる

福島第一原発(福島県大熊町、双葉町)1、2号機間にある高濃度の放射性物質で汚染された配管の切断撤去を巡り、東京電力は、現行計画の作業を断念した。切断開始から5カ月、配管を26分割する計画はトラブル続きで、撤去できたのは

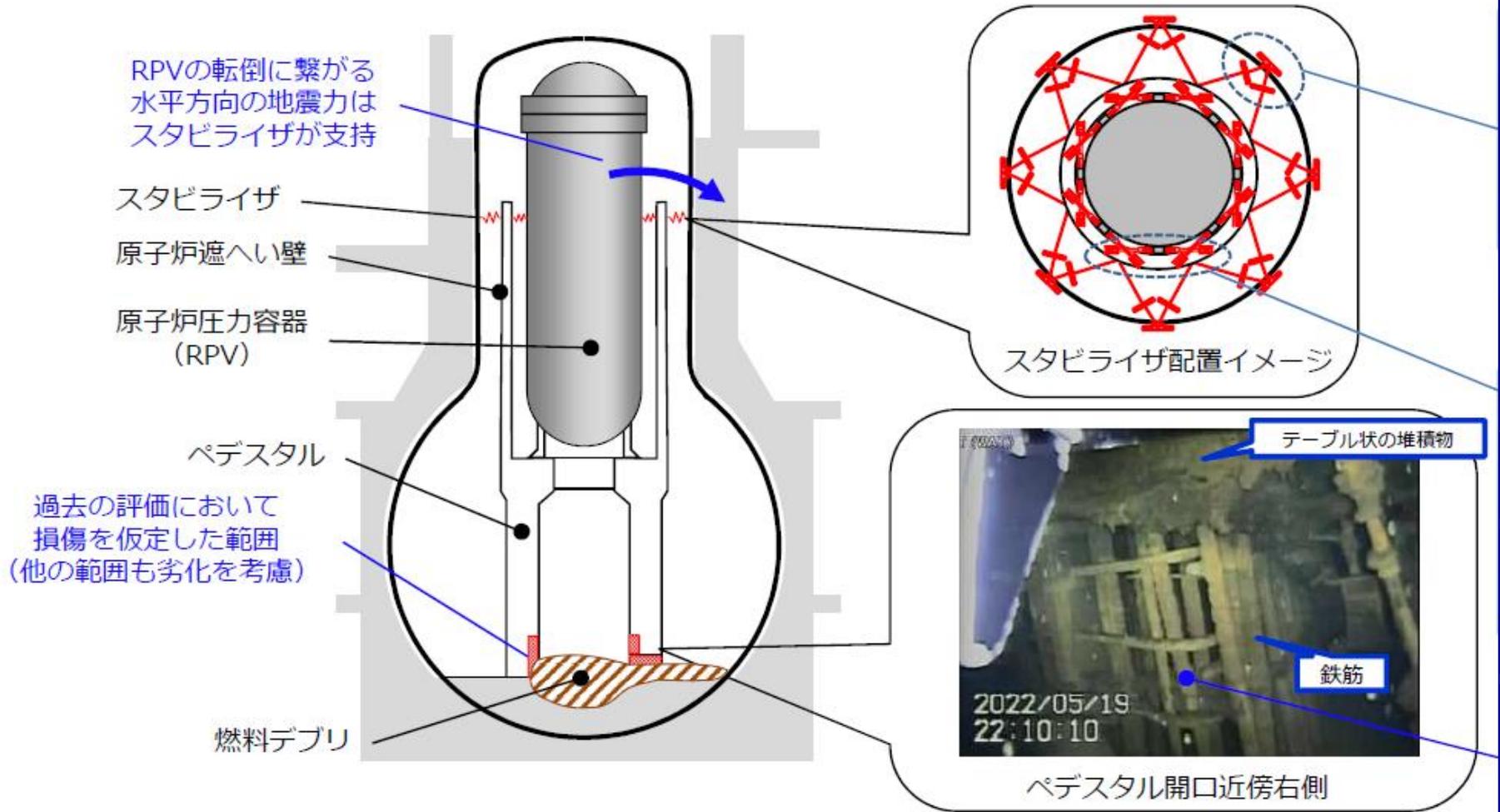
# 차례차례 발견되는 사고 실태

1. 후쿠시마 사고 때 수소 유출경로와 폭발한 장소, 폭발에 이른 경위 등이 불분명한 채, 심사가 통과되어 버림.
2. 원자로 건물 상부에서 발견된 실드 플러그 고농도 오염
3. 2호기 배기용 스택 아래쪽 격납용기 벤트라인에서 누설과 수소폭발...수소 역류와 폭발 발생
4. 3호기에서 4호기로 수소 역류, 1호기에서 2호기로도.
5. 1호기 원자로 베데스탈에서 데브리에 의한 콘크리트 결손

사고가 어떻게 진전되었는지, 특히 수소폭발과 격납용기 벤트 관계 등, 재구성 필요 있음.

애초에 '국회사고조'가 남긴 규제 관련 과제를 무시하고, 니가타현 기술위원회 논의도 미해결.

# 원자로 압력용기 기초(베데스탈)



# 원자로 압력용기, 바닥에 구멍? 제어봉 구동기구 일부 탈락

共同通信社 によるストーリー • 2 時間前



# 후쿠시마 1호기 원자로 기초 (베데스탈)의 콘크리트 상실



# 우크라이나 원전에 공격

초르노빌 사고로

원전이 전쟁도구가 되었다.  
직접 공격할 작정은 없어도 오폭  
리스크와 운전원 심리상태 우려됨.  
전력 부족하니 “원전을 늘리자”는  
일본은 원전리스크를 전혀  
이해하고 있지 않음.

원전 공격은 제네바조약에서 금지하고  
있지만, 러시아는 완전 무시했다.



자포리자 원전

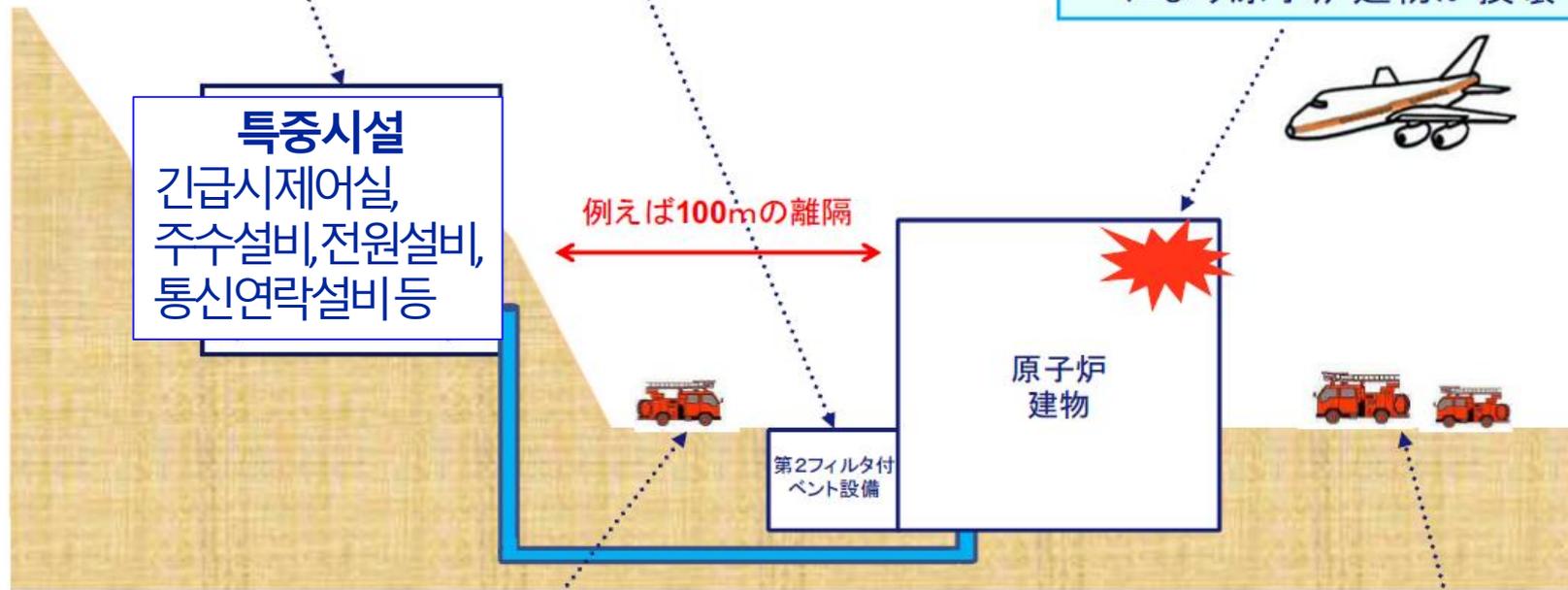


## 특정 중대사고 등 대처시설의 개요(이미지)

중대사고 등 대처설비 보강  
백업으로, 특중시설로  
원자로격납용기 파손을 방지

고의에 의한 공격으로 격납용기가  
파괴되어 있으면, 격납용기  
냉각도 격납용기 필터벤트도  
무의미해진다。

① 故意による航空機衝突  
により原子炉建物が損壊



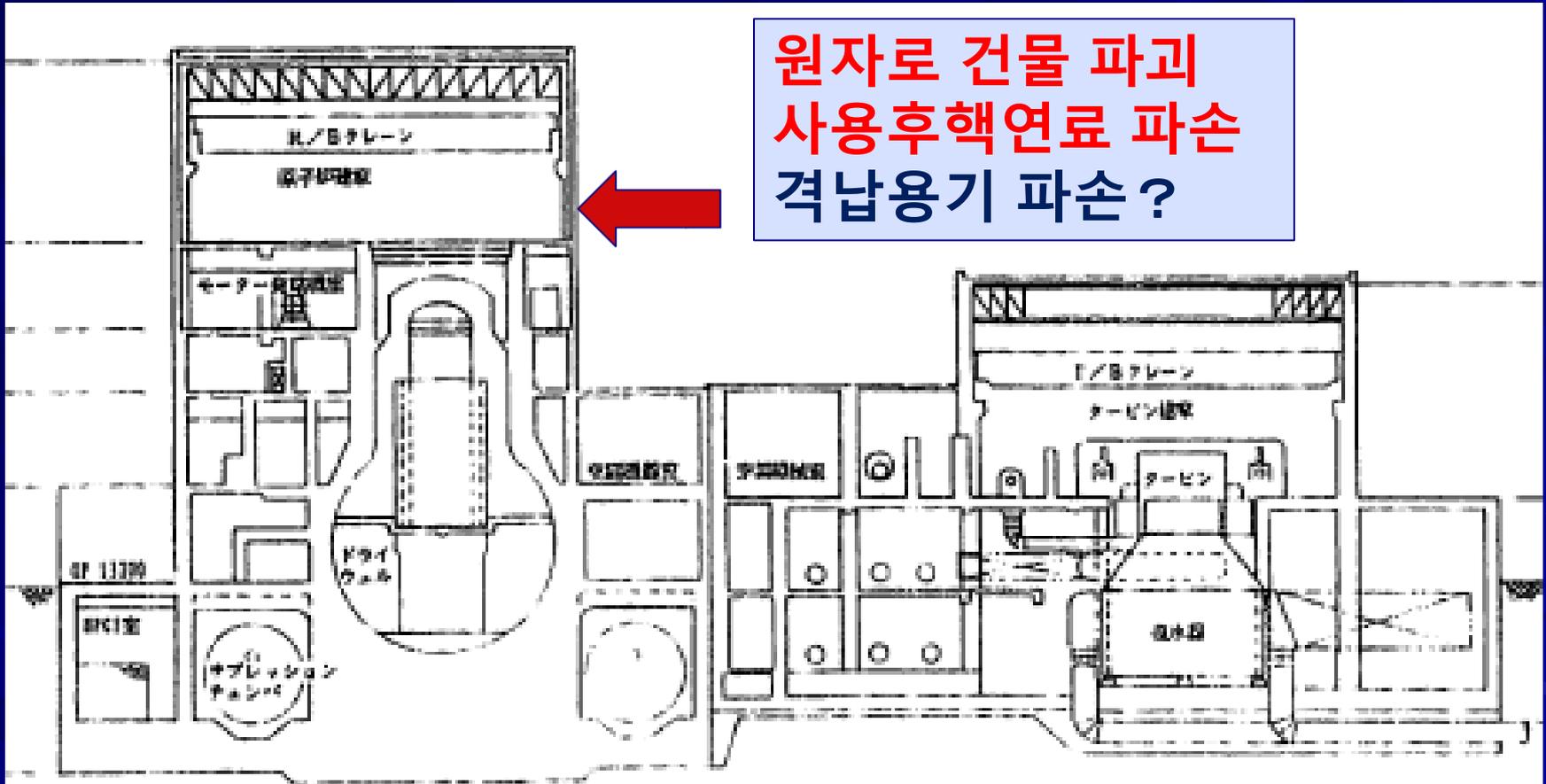
② 送水車等の可搬型設備(重大事故等対処設備)にて原子炉格納容器を冷却

# 항공기 낙하는 강도평가해야

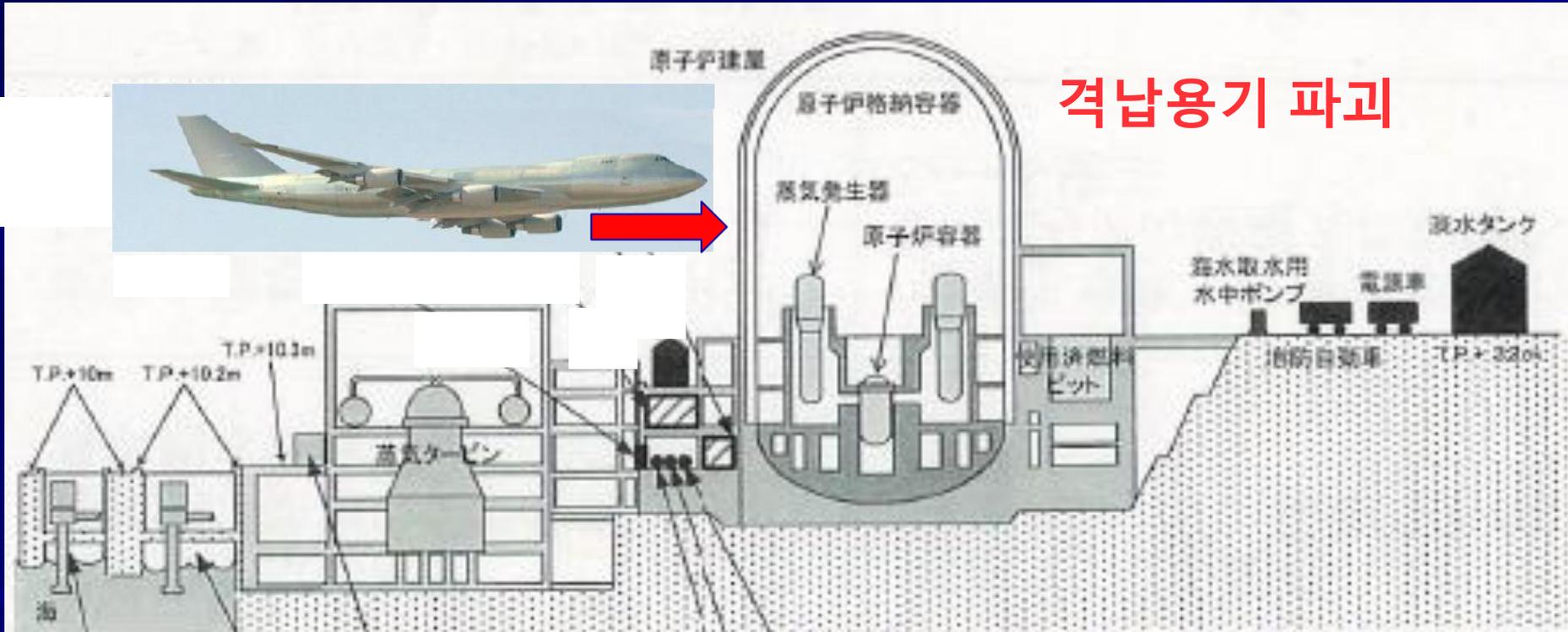
- ◆ 핵전에서 항공기 낙하확률이 작다고 평가하지 않는 것은, 발생 시 사고의 엄혹함을 무시하고 있음.
- ◆ 유럽에서는 많은 나라에서 항공기 낙하대책을 세움.
- ◆ 이래서야 후쿠시마 사고 “악몽”이 재발할 우려 높음.
- ◆ 록카쇼 재처리공장은, 자위대 제트기 충돌 시 계산을 해, 두께 약 1.2m 정도의 벽은 파괴되지 않는다고 했다.  
그러나 충돌 속도 등 굉장히 느슨한 비현실적인 가정으로 평가.
- ◆ 나는 어느 정도 무게의 소형제트기나 대형 항공기가 어느 정도 속도로 충돌하면, 벽이 부서지는지 해석으로 평가했다. (록카쇼 재처리공장 저지소송)
- ◆ 전쟁과 테러에 핵발전소는 방호 불가능이다.

# BWR에 항공기가 충돌하면...

원자로 건물 파괴  
사용후핵연료 파손  
격납용기 파손?



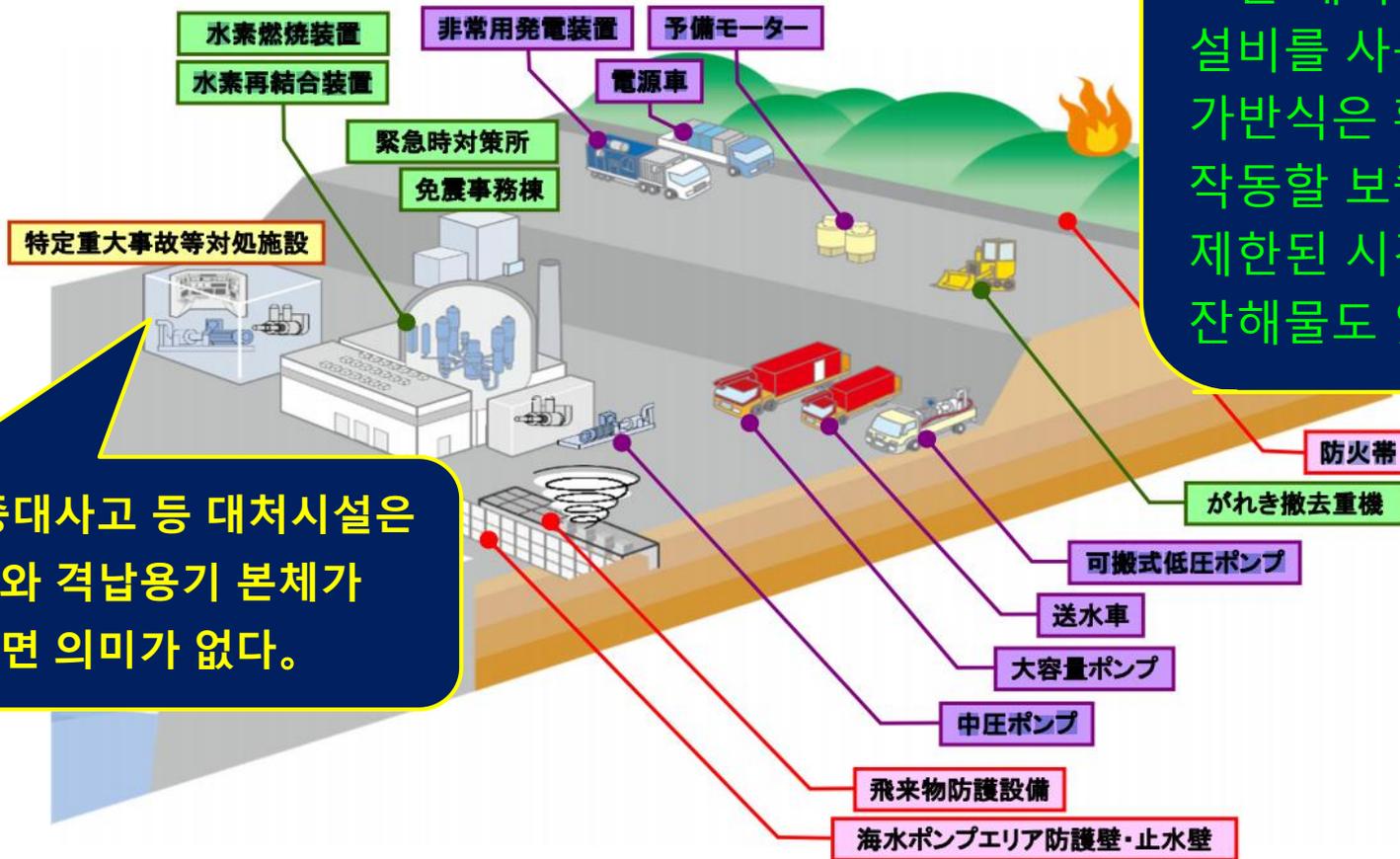
# 원전에 항공기가 충돌하면?



**PWR 플랜트에서는 항공기가 추락하면 격납용기가 파괴되고, 특히 내부에서 화재 발생 가능성 높다.**

# 특정중대사고 등 대처시설

## 주요 안전성 향상 대책 이미지



전원, 냉각, 차폐의 모든 대책에 가반식 설비를 사용. 가반식은 확실히 작동할 보증이 없다. 제한된 시간에 오염과 잔해물도 있다.

특정 중대사고 등 대처시설은 원자로와 격납용기 본체가 망가지면 의미가 없다.

# 인류는 아직 「가둠 기능」기술 미확립

— 사고 역사로 본 가둠 기능의 실패 —

1986年 스페이스 셔틀  
챌린저호 사고



고체 로켓 O링 누설



2010年 멕시코만 원유 유출사고(부유식 리그)  
약 70만킬로리터 원유 유출. 걸프만 전쟁에 이어 사상 2번째 사고

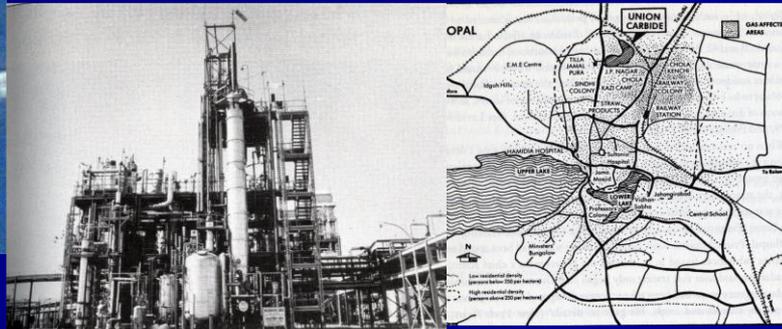


1980년대 북해 캐나다  
앞바다에서 석유 굴삭  
리그 플랫폼 폭발,  
침몰사고 속출

2003年 스페이스 셔틀  
콜롬비아호 사고



1984年 인도 보팔  
독가스 유출 사고



1985年 JAL 점보기  
격벽 파괴 추락사고

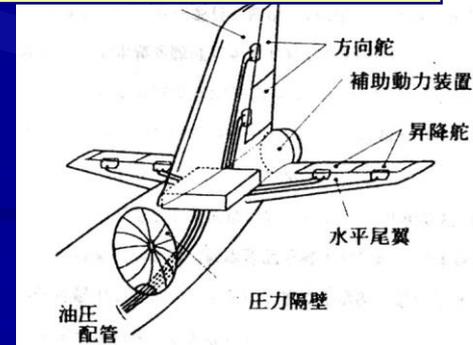


図 5.18.3 压力隔壁と油压配管 [ 1 ]

# 우크라이나 체르노빌 원전의 위성사진



【4월26일 AFP】  
국제원자력기구(IAEA)의  
라파엘 그로시(Rafael Grossi)  
사무국장은 26일, 1986년  
초르노빌(체르노빌,  
Chernobyl) 원전 사고  
유적지를 러시아군이 몇 주  
동안 점거한 것을 비난했다.

우크라이나 초르노빌원전을 찍은 위성화상.막사테크놀로지 제공(2022年3月10日촬영·공개, 자료사진)。 (c)AFP PHOTO /SATELLITE IMAGE ©2022 MAXAR TECHNOLOGIES

# 원전과 테러 및 무력공격

## 【평상시의 원전도 안전하다 말하지 않는 원자력규제위원회】

- ◆ 대규모 지진, 쓰나미, 화산분화 등, 일본은 가혹한 상정 외 자연현상이 일어날 수 있다. 대규모 자연재해는 복합적인 핵발전소 사고를 일으킬 위험성이 높다.
- ◆ 기계 고장, 특히 노후 핵전의 열화에 따른 기능상실과, 인위적인 에러가 서로 겹치면 대규모 사고가 된다.
- ◆ 원전 사고에 대해, 규제위는 「규제기준을 지킬 것」을 요구하지만, 기준을 채웠다 하여 「안전하다고 결코 말하지는 않는다」.
- ◆ 정부는 규제위가 인정한 원전은 「안전하다고 간주하고 재가동하겠다」고 하지만, 누구도 안전을 보장하고 있지 않다.

## 【무력공격에 대해 원전은 완전 무방비】

(更田원자력규제위원회 위원장)

「규제기준에서, 무력공격에 대비하는 것은 현재 요구하고 있지 않고, 또 앞으로도 요구하는 것은 생각하고 있지 않습니다」

(山形教授)전 원자력규제청 전 간부

「공격에 최대한 피해를 막을 유효한 방법은, 국가 명령으로 핵전을 긴급정지시키는 것. 긴급정지 절차나 누가 대응할 것인지 등, 평소부터 국가와 전력회사, 자위대 등이 연계하여 훈련하며 대비해 뒤야 함」

무력공격에 대한 핵전의 정지는 훨씬 이전부터 행할 필요가 있고, 사용후핵연료 등을 추출할 필요가 있다. 하지만, 모든 원전이 한꺼번에 멈추기때문에 에너지 안전보증도 되지 않는다. 원전이 가진 특성을 더 정확하게 살펴야 한다.

항공기 충돌 등은 원자력규제위원회가 전력회사에 대책을 세우도록 요구하고 있다. 그러나 실제로는 평가도 내지 않고, 구조상의 대책은 없다.

한편 우크라이나에서 일어난 것과 같은 무력공격은 테러범위를 넘어 「방위」 문제가 되기 때문에 원자력 안전규제로는 대응할 수 없다는 것이 국가의 입장이다.

# 원자력발전소는 무력 공격에 대응 전혀 불가

- ◆ 원전은 전력회사가 테러대책을 세우게 되어 있지만, 지극히 어렵다.
- ◆ 특정 중대사고 등 대처시설은, 격납용기와 원자로가 손상되지 않는 것이 전제.
- ◆ 무력공격에는 국가가 방위할 것을 요구하지만, 자위대를 강화해서 일본 전국의 해안선에 설치된 원전과 재처리공장 지키기는 불가능.
- ◆ 무력공격은 늘 공격측 힘이 방어측 힘보다 상위.



NHK サイカル 2022.06.22 より





# PWR형 격납용기의 대형 제트기 충돌해석 사례

丹羽一邦：鋼板コンクリート板の飛翔体による破壊強度解析, LS-DYNA Users Conference 2006 講演論文集, 日本総研ソリューションズ (2006)

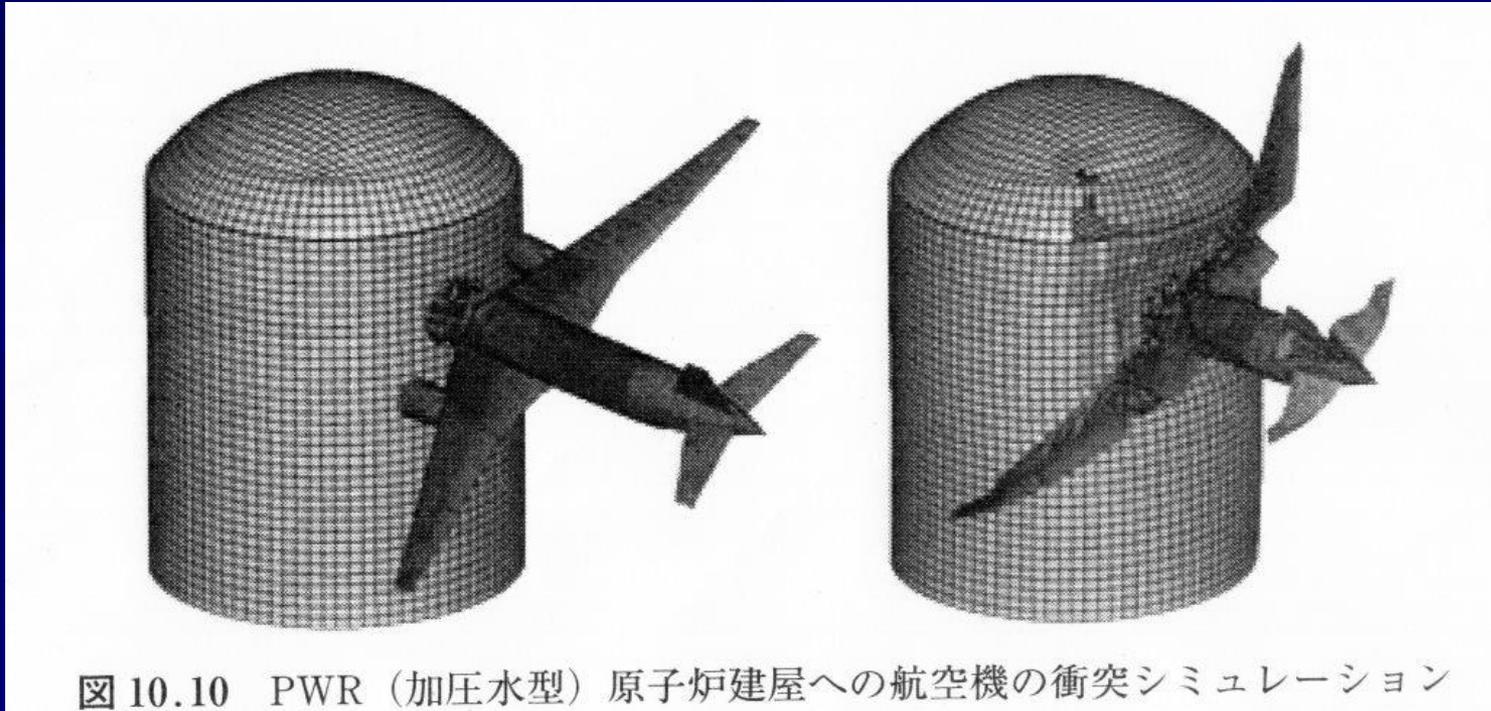


図 10.10 PWR (加圧水型) 原子炉建屋への航空機の衝突シミュレーション

원자로건물 두께800mm RC고강도 콘크리트제

내부에 강철 격납용기(기재가 없지만 두께 30~40mm 정도?)

자료:「충격공학의 기초와 응용」横山隆편저 共立출판 2014年5月에서

# 「원자력에서 얼마나 빨리 빠져나와야 하는가?」

- ◆ 2021年3月 규제위의 후쿠시마 사고 중간 정리는 아직 끝나지 않음. 미해명 문제가 많음.
- ◆ 특히 수소폭발 대책은 후쿠시마 사고 상황마저 확정하고 있지 않다. 그럼에도 PWR은 가동하고, BWR도 5기(가시와자키가리와6, 7호기, 도카이제2, 오나가와2호기, 시마네2호기) 심사를 거쳤다.
- ◆ 모든 원전의 수소폭발 대책과 관련 안전대책을 모두 다시 세워야 함.
- ◆ 신형로는 안전성 면에서도 비용면에서도 전혀 도움이 안 된다.
- ◆ 환경에 가장 악영향을 초래하는 것이 원자력발전소다. 후쿠시마 부흥 실태를 보면 명확하다. 원전은 SDGs에 많은 항목에서 저촉되어 있다.
- ◆ 에너지 선택에 원전을 넣을 여지는 없다. 평상시의 자연재해나 사고 리스크와 테러 등 무력공격 대상이 되는 것, 그 리스크 크기는 다른 발전방식 리스크와 비교가 안 된다. 위험한 원전은 더 이상 가동하지 않고, 재생가능 에너지를 최대한 증강하고, 지금 잠시의 부족분은 화력을 사용하는 것으로 충분히 가능. 지금까지 무시해온 화력의 축소를 제어하면 된다. 화력은 단계적으로 줄인다.

# 「原発を 세워놓고 自衛戦争は 불가」

山田太郎(本名:小倉志郎)2007年 初판

## 原発を並べて 自衛戦争はできない

山田太郎

YAMADA Taro



「リブレーザ」No.3 抜刷

A. 原発に対する武力攻撃には、軍事力などでは護れないこと。したがって、日本の海岸に並んだ原発は、仮想敵(国)が引き金を握った核兵器であること。

B. 一たび原発が武力攻撃を受けたら、日本の土地は永久に人が住めない土地になり、再び人が住めるように戻る可能性が無いこと。

(やまだ・たろう／原発技術者)

# 중대사고(시비어 엑시던트)

**설계상정 범위**

**노심 용융**

통상 상태

과도 상태

사고 상태

시비어 엑시던트

원전은 『노심용융』 안 되도록 설계해 왔을 터. 노심용융 후 중대사고 대책은, 언 발에 오줌누기.

지진 쓰나미 등

냉각재 상실사고

전전원 상실사고

항공기 낙하 등

핵심반응 제어 실패

노심 손상

원자로(압력용기)손상

격납용기 손상

수소 폭발

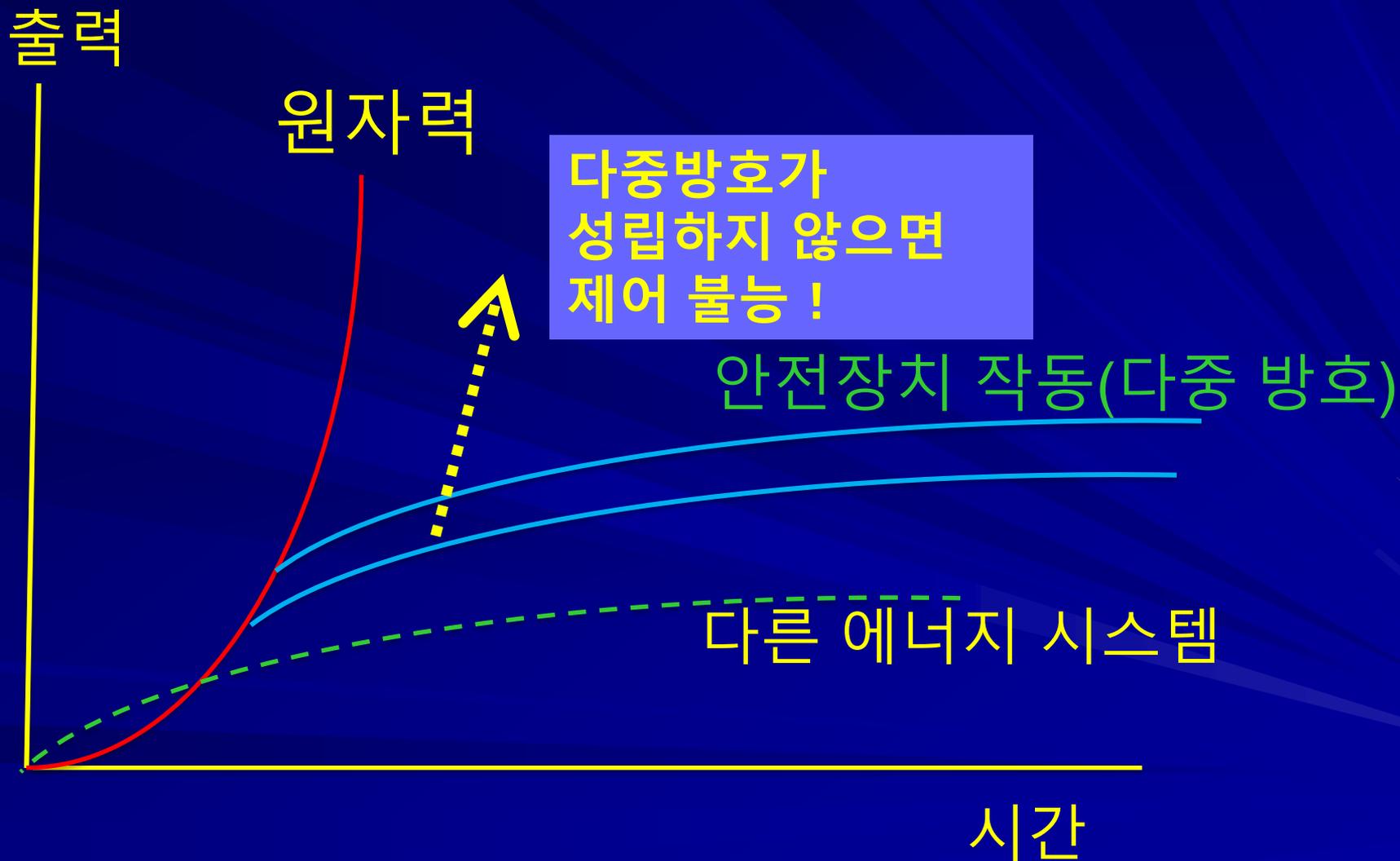
수증기 폭발

재임계

코어 콘크리트 반응

정지 / 냉각 / 차폐

# 원자력은 왜 위험한가



# 안전성 사고방식(그레이존 문제)

『위험을 발견하면 정지』  
이것으로 안전 확보 불가!  
【위험 검출형】



『안전 확인이 가능하면 운전』  
【안전 확인형】

# 신칸선과 원전의 차이

- ◆신칸선은 「멈춤 안전」이 성립한다.
- ◆원전은 제어봉을 넣어도 멈추지 않는 일이 있다.
- ◆핵반응은 멈춰도 냉각을 계속하지 않으면 멜트다운
- ◆냉각에 실패하면 대량의 방사성물질이 나오므로 격납용기에 가둔다.
- ◆격납용기가 건전하면 사고는 수습될 가능성이 높다.
- ◆격납용기는(냉각이 잘 안되면) 압력·온도가 오르며, 이윽고 망가져 버리기 때문에 격납용기 벤트로, 내부에 찬 가스를 밖으로 뺀다. 방사성물질이 대량으로 포함되어 있기 때문에, 「필터 부착 벤트」를 달도록 했다.
- ◆후쿠시마 사고 때는 격납용기 벤트(필터 없음)가 기능하지 않았다. ⇒원자력발전소는, 안전한 상태란 무엇인가를, 「결정할 수 없다」.

# 압력이 오르면 격납용기는 파괴됨

미국에서 파괴시험 한 동영상 공개

『NUREG CR-6810』에서

격납용기 벤트  
실패하면...

필자는 도시바  
현역시절 미일  
공동 격납용기  
파괴시험에 종사.



오오이3,4호기 PCCV ¼모델시험 샌디아국립연구소



# 무엇이 중요한가?

로카쇼재처리공장, 핵연료사이클은 극히 위험。  
플루토늄과 우라늄은 건드리지 말고 원스루 해야 함。

2021年3月3日 규제위의「후쿠시마 사고원인에 관한  
중간정리」에 따르면 후쿠시마 사고 원인이 해결되지  
않음。따라서 이미 인가한 비등수형(BWR)5기는 심사를  
다시할 필요。특히 수소폭발 대책이 불충분하고, 재심사  
없는 재가동은 있을 수 없음。

전쟁과 안전 보장 관점에서 원전도 재처리시설도 가지면  
안 되는 것이 명확해짐。원전 따위는 전쟁이 일어나면  
공격 대상이 되어、상대에게 준핵무기(더티봄:더러운  
폭탄)를 주는 격。

인류 안전보장은 핵무기를 포함해 유엔을 포함하여  
군사력에 의하지 않는 수단을 모색할 필요가 있다。  
군사력에 의한 해결은 군확경쟁에 빠지고,  
“푸틴대통령과 동료”가 됨。

# 원전, 평화 시든 전쟁 시든 가동 불가

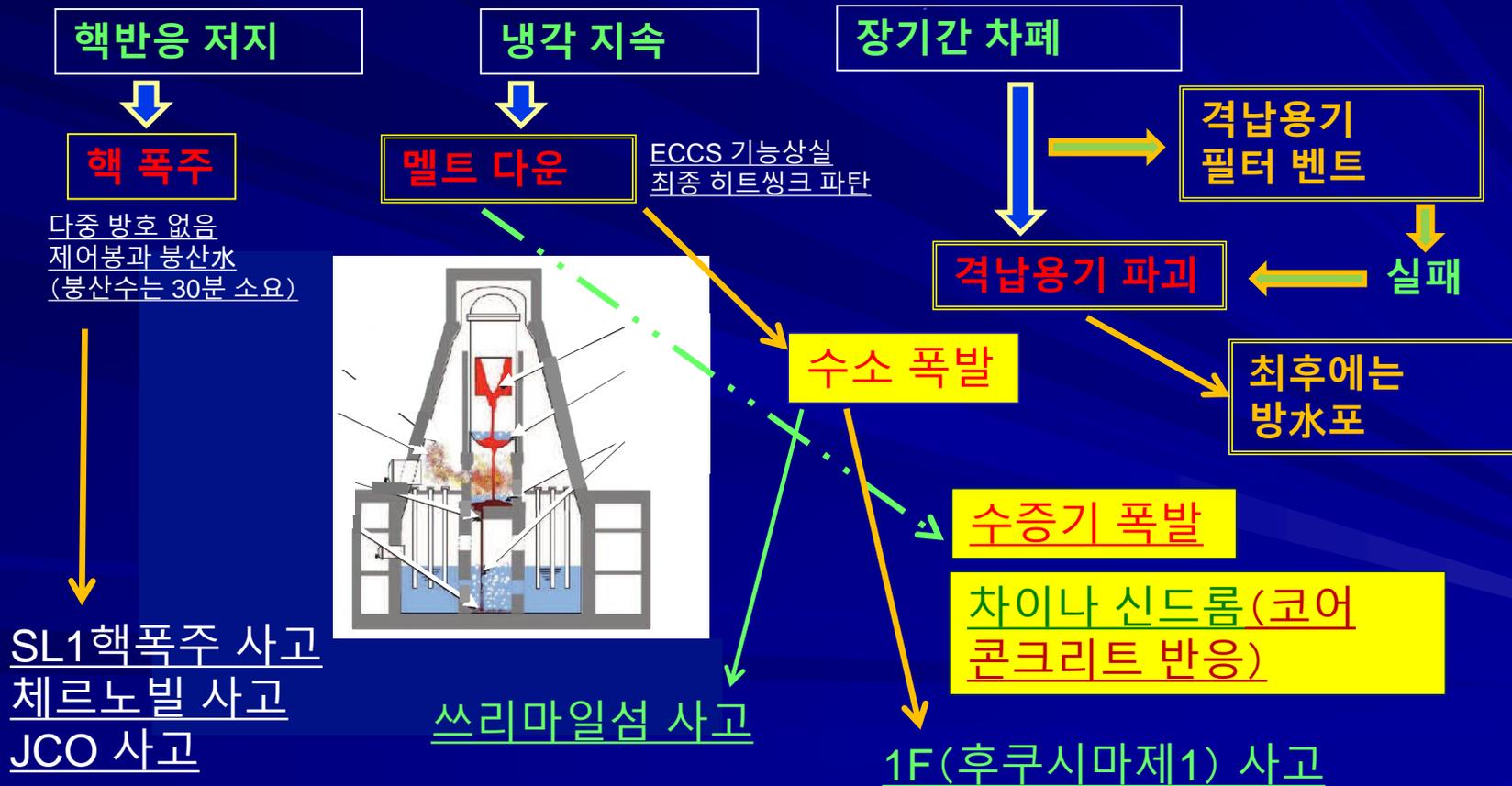
—우크라이나 교훈은 원전 존재를 부인하고 있다—

- ◆일본 원전은 항공기 충돌(사고에도 테러에도)에 못 견뎌。
- ◆원전은 전쟁상태에서 적국의 좋은 공격대상。
- ◆의도적이지 않아도 유탄에 대규모 방사능 오염이 될 수 있음。
- ◆원전은 무력공격 당하면 방어 따위 불가。특히 일본은 모두 바다에 면하고 있으므로 좋은 공격대상。
- ◆원전에서 원자로 격납용기, 원자로, 사용후핵연료 수조 등의 건전성을 잃으면, 되돌릴 수 없는 방사능 오염。
- ◆하드 뿐 아니라 사이버 공격, 조작실 점거도 위험

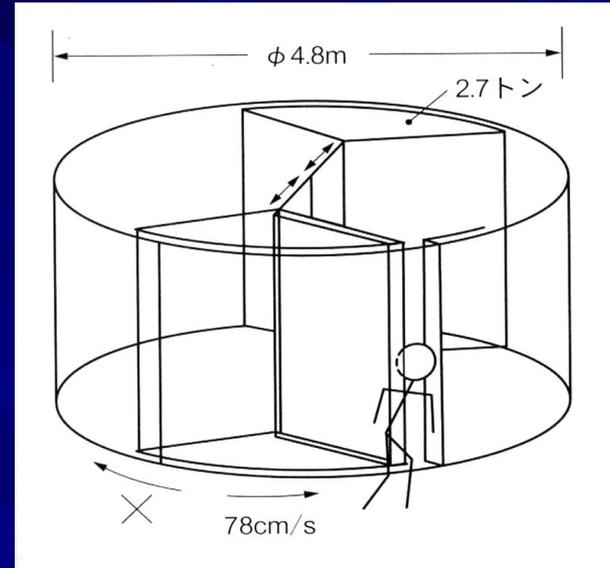
# 그림1 일단 발생하면 원전 사고 막을 방법 없어

- ◆ 자연현상·테러(외부요인) \*지진, 쓰나미, 화산, 태풍, 토네이도, 벼락 등
- ◆ 고장(내부요인) \*복합재해: 항공기 낙하, LNG탱커 좌초, 등
- ◆ 휴먼 팩터(인적 미스) \*방사선 취화, 부식, 응력부식균열, (금속)피로 등

현상: 제어봉 고장, 전원상실, 압력용기 파괴, 배관 파단, ECCS 고장, 격납용기 기능 상실 등



# 사고가 발생한 록본기힐즈의 대형 자동회전문

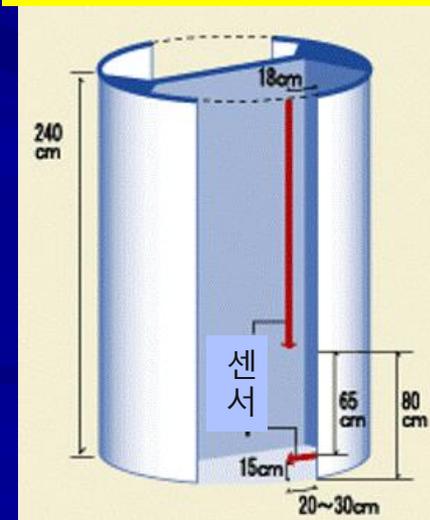


페일세이프(fail-safe) 설계를 몰라.

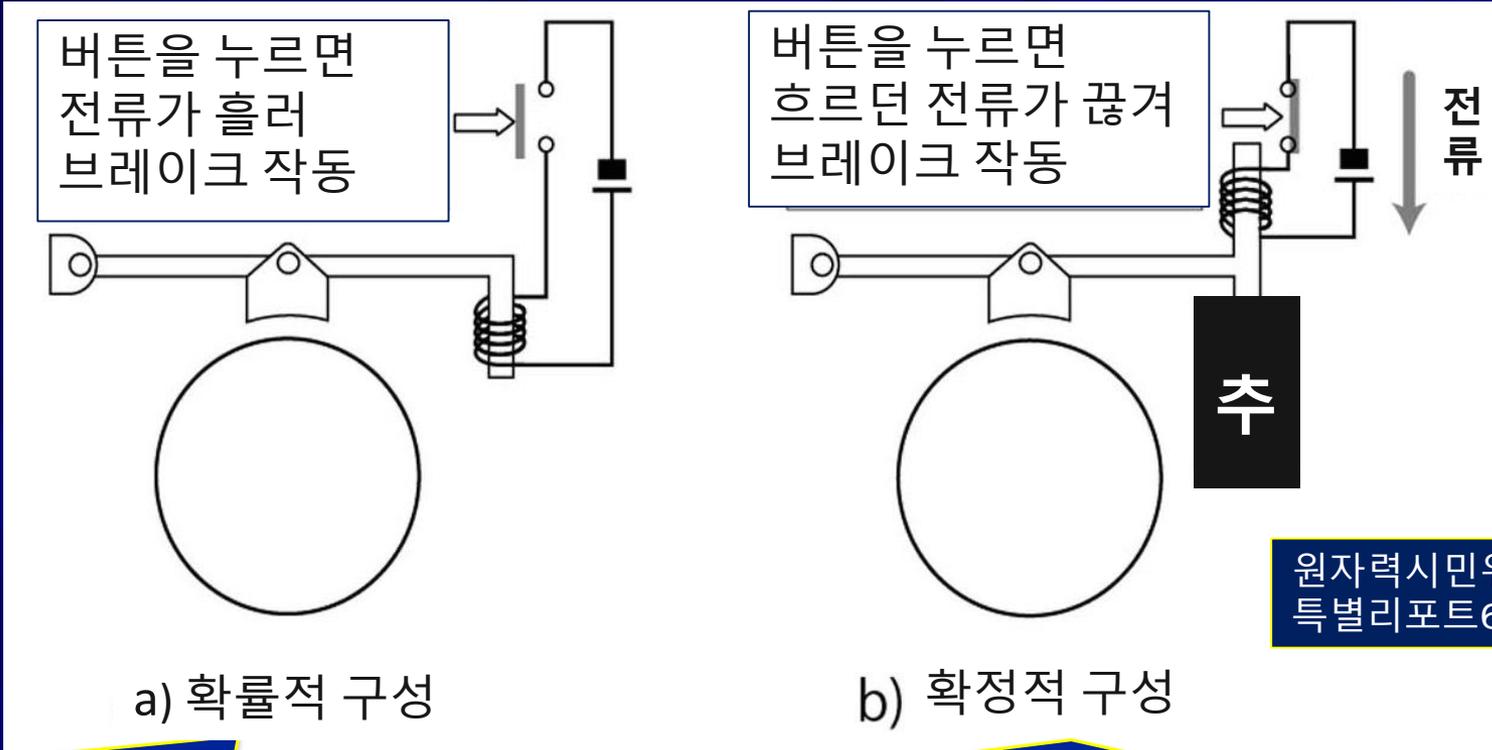
「적외선 센서가 있으니까 안전」하다  
했지만, 센서가 작동하지 않아 아이가  
끼어 사망。(2004年3月26日)

안전설계 기본이 안 되어 있어.  
고장 시 안전 측면에서 작동하지 않는  
기계는 위험。

적외선 센서가 감지가능한 부분



# 「확률적 안전」과 「확정적 안전」의 차이



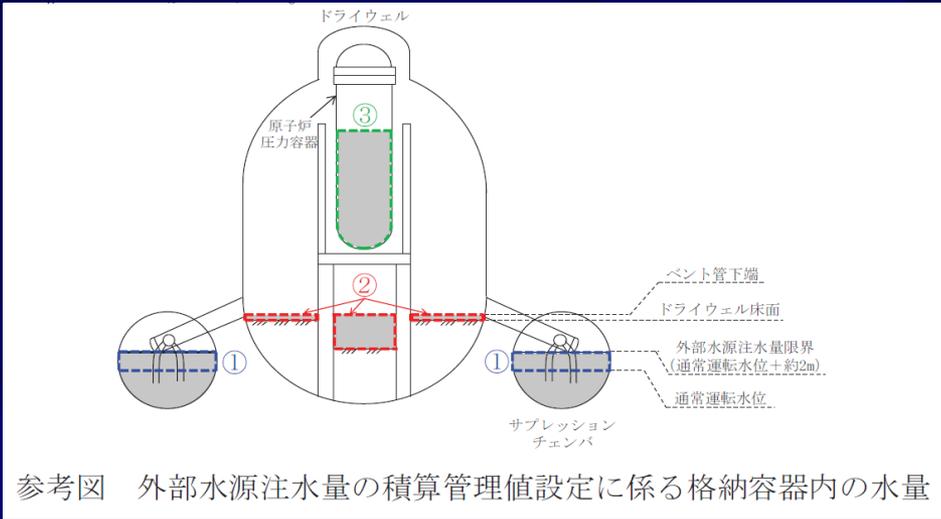
원자력시민위원회  
특별리포트6 제6장

스위치를 누르면 전류가 흘러 브레이크가 걸린다. 그러나 한 곳에서라도 고장나면, 브레이크가 걸리지 않는다. 부품 개수가 늘어나면 빈번하게 고장이 나고 그 때 브레이크 부작동으로 고장이 난다。

전류를 흘려두고 브레이크를 뗀다. 스위치를 누르면 전류가 끊겨 브레이크가 걸린다. 어느 곳이 고장 나도 전류가 끊겨 브레이크가 걸린다. 빈번하게 고장이 나도 브레이크가 걸리기 때문에 사고는 나지 않는다。

佐藤国仁 「국제안전규격 동향과 안전확인형 시스템의 개요」(2001年10月)에서 작성

# 중대사고 후기에는 수위가 올라, 주요 기기가 수몰



격납용기를 외부에서 계속 냉각하면、

①진공 파괴밸브 수몰

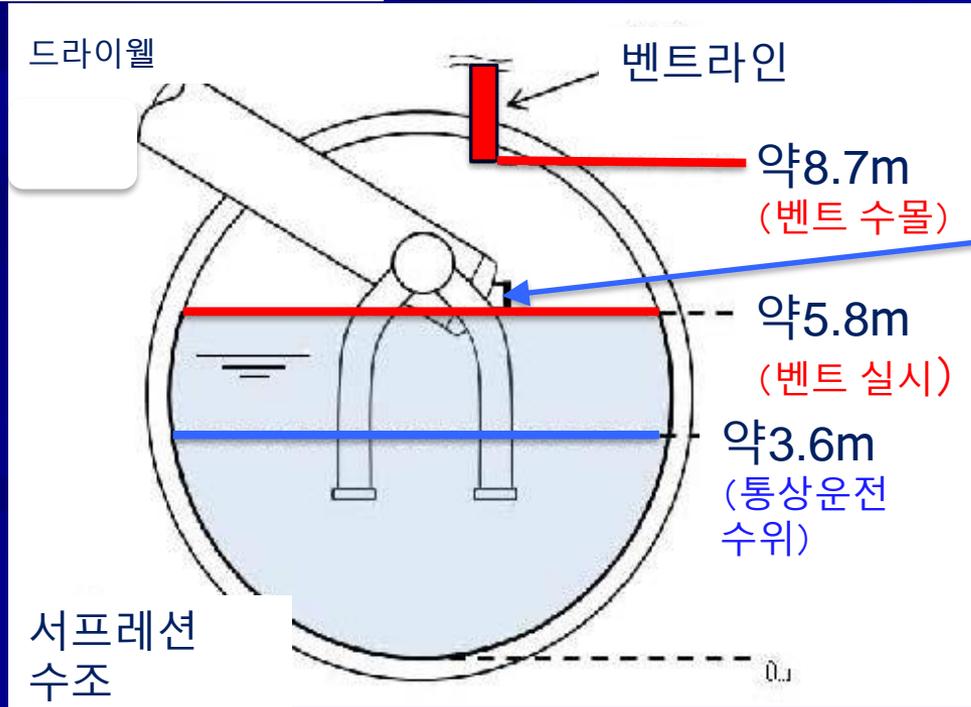
ドライ웰과 서프레션 체임버를 균일하게 누를 수 없게 된다。

②벤트라인 수몰

격납용기 벤트를 할 수 없게 된다。

⇒ドライ웰 벤트가 되어, 방사능을 대량으로 흘뿌린다。

(오나가와 원전 사례)

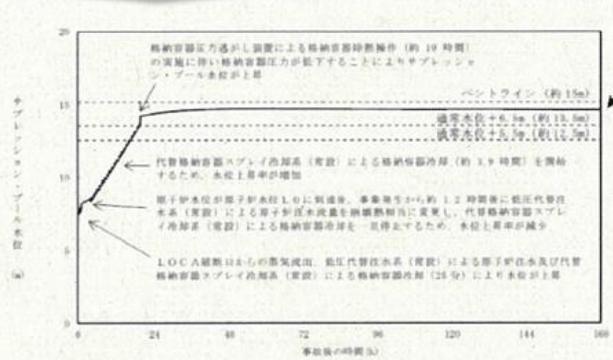


진공 파괴밸브

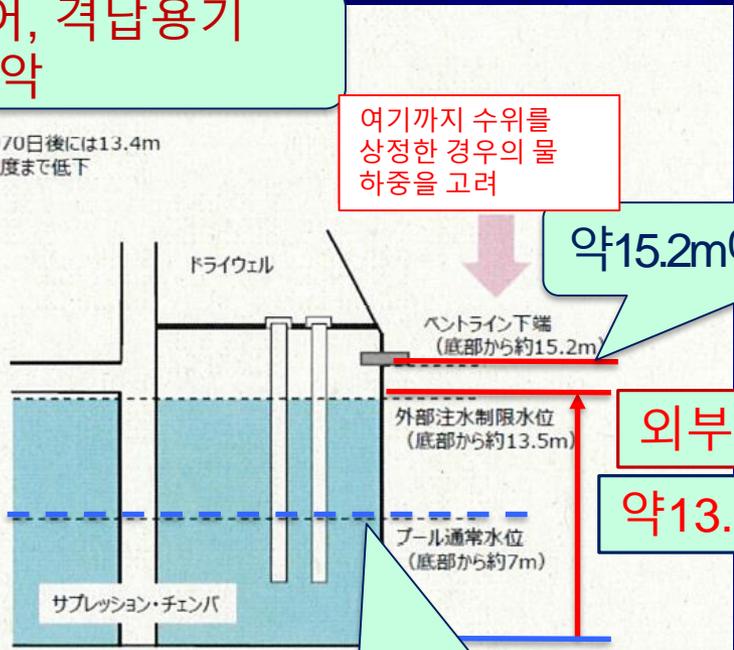
# 서프레션 수조는 중대사고 시 외부 주수로 수위가 상승 ~이런 줄타기가 가능하다고 생각하는 건 비정상~

원자로를 계속 냉각하면 수조 수위가 한계에 달해 격납용기 스프레이 멈춤

수위가 오르면 지진에 의한 하중이 늘어, 격납용기 좌굴 가능성 증가. 격납용기 좌굴은 최악



第7.2.1.3-14図 サプレッション・プール水位の推移  
重大事故等対策の有効性評価において水位が最大となるサプレッション・プール水位挙動 (令和元年12月19日付け陳述書 (丙C第40号証46頁以下) で説明した「雰囲気気圧力・温度による静的負荷 (格納容器過圧・過温破損)」のうちの代替循環冷却系が使用できない場合)



여기까지 수위를 상정한 경우의 물 하중을 고려

약15.2m에서 벤트 불가

외부 주수 제한

약13.5m

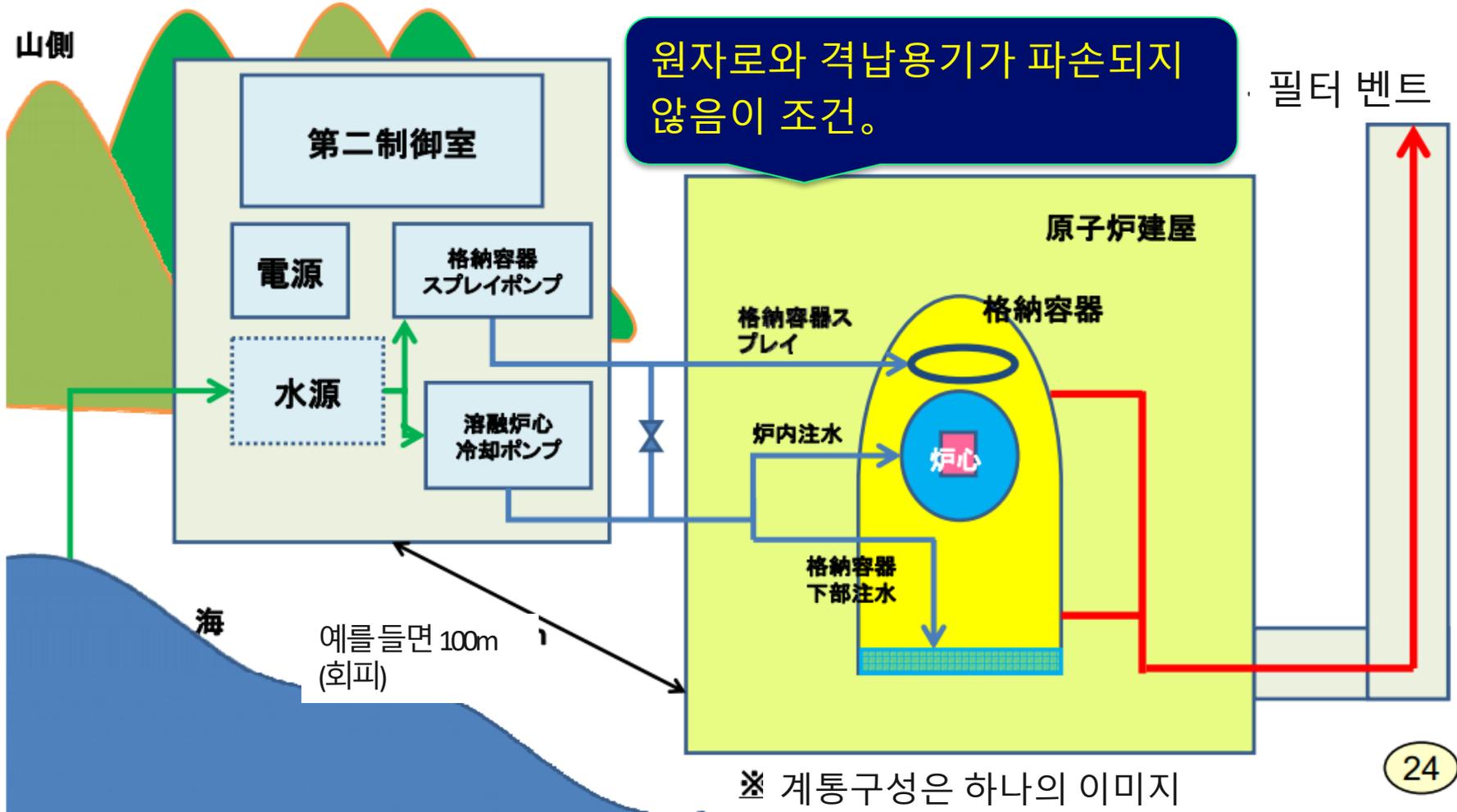
통상수위 약7m

중대사고 발생 등에 상정되는 서프레션 체임버의 수조 수위 (도카이제2원전 사례)

(出典:丙C第49号証付-19頁より)

## 의도적인 항공기 충돌 대책

의도적인 항공기 충돌 등 테러리즘에 의한 노심손상이 발생한 경우 사용 가능한 시설(특정 안전시설)의 정비를 요구



# 설계기준과 중대사고의 차이

## 설계기준

◆ 설계조건이 명확. 예를 들면 격납용기 설계조건은 최악의 배관파단이 발생했다 치고, ECCS (노심냉각과 격납용기 스프레이)가 작동했을 때 달하는 압력온도로 설계 (Pd 약 3~4기압 171°C).

### ◆ 설계의 전제

#### \* 단일고장 기준 적용

\* 극력 다중성, 다양성, 독립성 적용

#### \* 기본적으로 허용 응력 설계

◆ 신뢰성 꽤 높음. 전부는 아니지만 시험 데이터와 해석의 뒷받침이 있음.

## 가혹사고 (중대사고)

◆ 설계조건 특정 불가. 예를 들면 격납용기의 중대사고 조건은 ECCS 등의 다중 고장을 상정하여, 대체 냉각계가 작동하는 것으로 평가. 최악시나리오는 특정 못하고 있음. 평가기준은 격납용기의 한계압력·온도 (2Pd, 200°C).

### ◆ 가혹사고의 전제

#### \* 단일 고장기준은 적용하지 않음.

\* 「유효성 평가」는 확실하게 작동할 보증은 없지만, 「상정 조건하에서 기능 부과」함을 확인.

#### \* 한계강도 등으로 평가

◆ 신뢰성은 극히 낮음.

◆ 평가방법은 베스트 에스티메이트.

◆ 확률이 작은 현상은 무시.

# 원전 안전확보는 왜 어려운가

## 1. 【피해 규모 한정 불가】공간·시간

- ◆TMI, 체르노빌, 후쿠시마제1 모두 사고 진전 프로세스에 따라 제각각
- ◆방대한 위험물질·방사능 확산 방지 곤란...차폐 기술의 한계  
⇒작은 나라는 소멸되는 위험

## 2. 【공간적·시간적 에너지 밀도가 높음 제어에 실패하면 “폭주·발산”】

- ◆핵반응·붕괴열에 의한 노심용융 모두 제어시스템 기능하지 않으면 “폭주”
- ◆핵반응은 초 단위·냉각은 분·시간 단위

## 【사고 피해가 한정적】

- ◆화학공장 화재⇒다 불탄다 !
- ◆인도 보팔은 광범한 피해 (유독가스 누출 방지 곤란 때문에 현장에서 철수)
- ◆화학플랜트는 폭발해도 직접적 피해가 일정 이상 확산되지 않음

## 【비교 대상】

- ◆화력발전·화학플랜트
- ◆항공기
- ◆신칸선
- ◆LNG 탱커 등

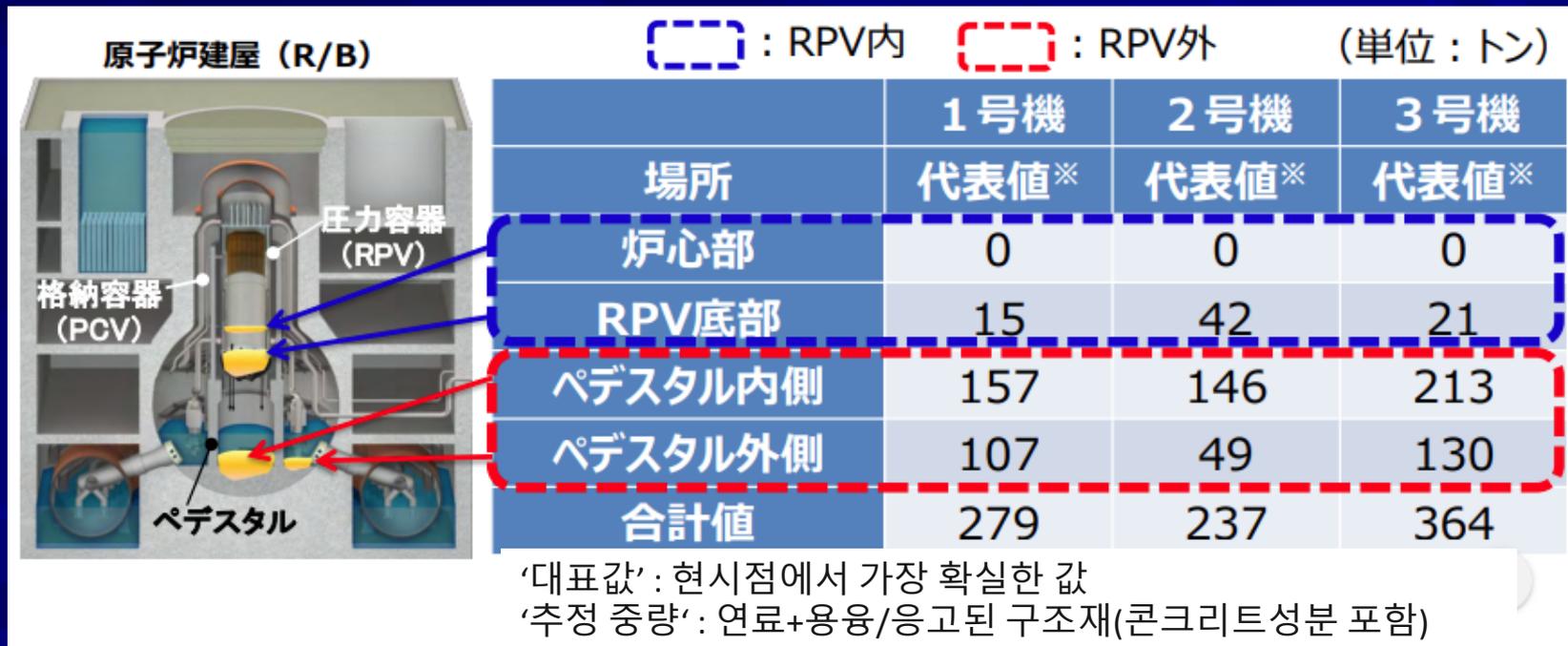
# 사고로 발생한 데브리 양

【핵연료】 76~100톤

【구조 금속재료】 56~111톤

【콘크리트】 74~146톤

} 1기당 합계  
237~364톤



출전: 「국제페로연구개발기구에서 연구개발 상황에 대해」 鋸田裕史、2016  
年10月20日

# 조사<sub>調査</sub> 로봇은 왜 어려운가

## PCV 내부 조사 기술 개발(조사 로봇)

### ペDESTAL外側の調査 (1号機)

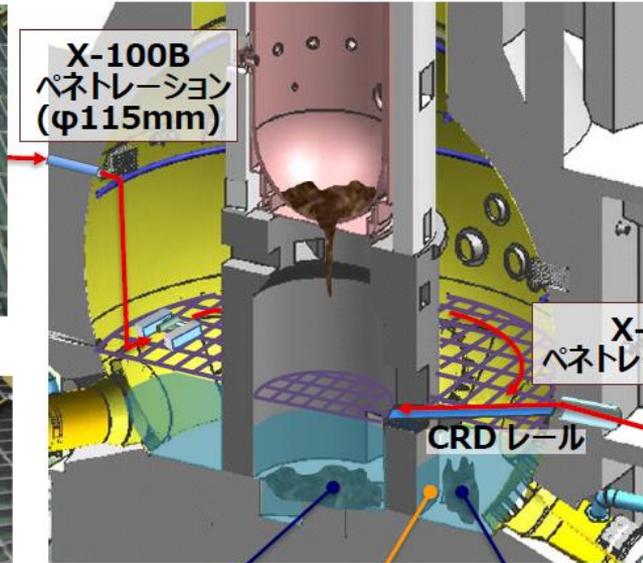
○形状変化型ロボット (B2調査)



変形



(注) 上の写真はB1調査時のロボットです。



ベDESTAL 内  
燃料デブリ  
(イメージ)

作業者  
出入口

ベDESTAL 바깥  
燃料데브리  
(이미지)

### ペDESTAL内側の調査 (2号機)

○クローラ型遠隔調査ロボット (A2調査)



変形



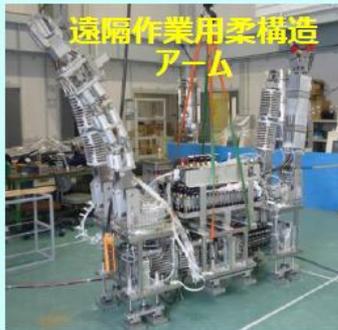
# 물을 채울지 말지에 따라, 공법과 로봇이 달라

## 핵연료 데브리 추출기술 개발

### 기술적 과제

- 방사성더스트 차폐 기능 확보
- 원격조작 기술 확립
- 피폭저감/오염확대 방지 기술 확립

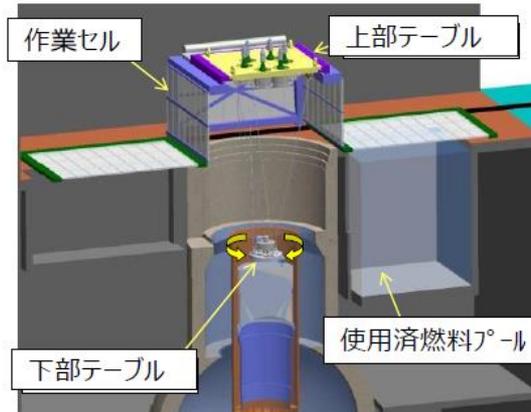
### 基盤技術の開発



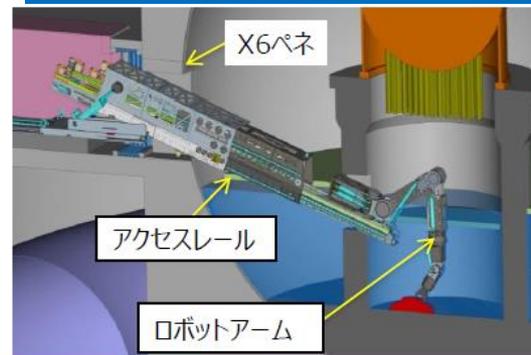
ロボットアーム



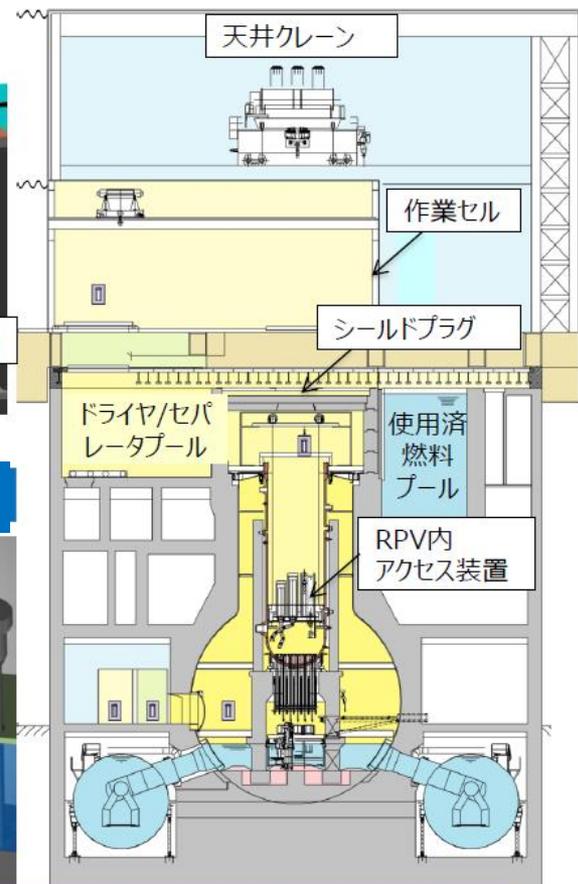
### 관수-상접근 공법(개념)



### 옆구리 접근 공법(개념)



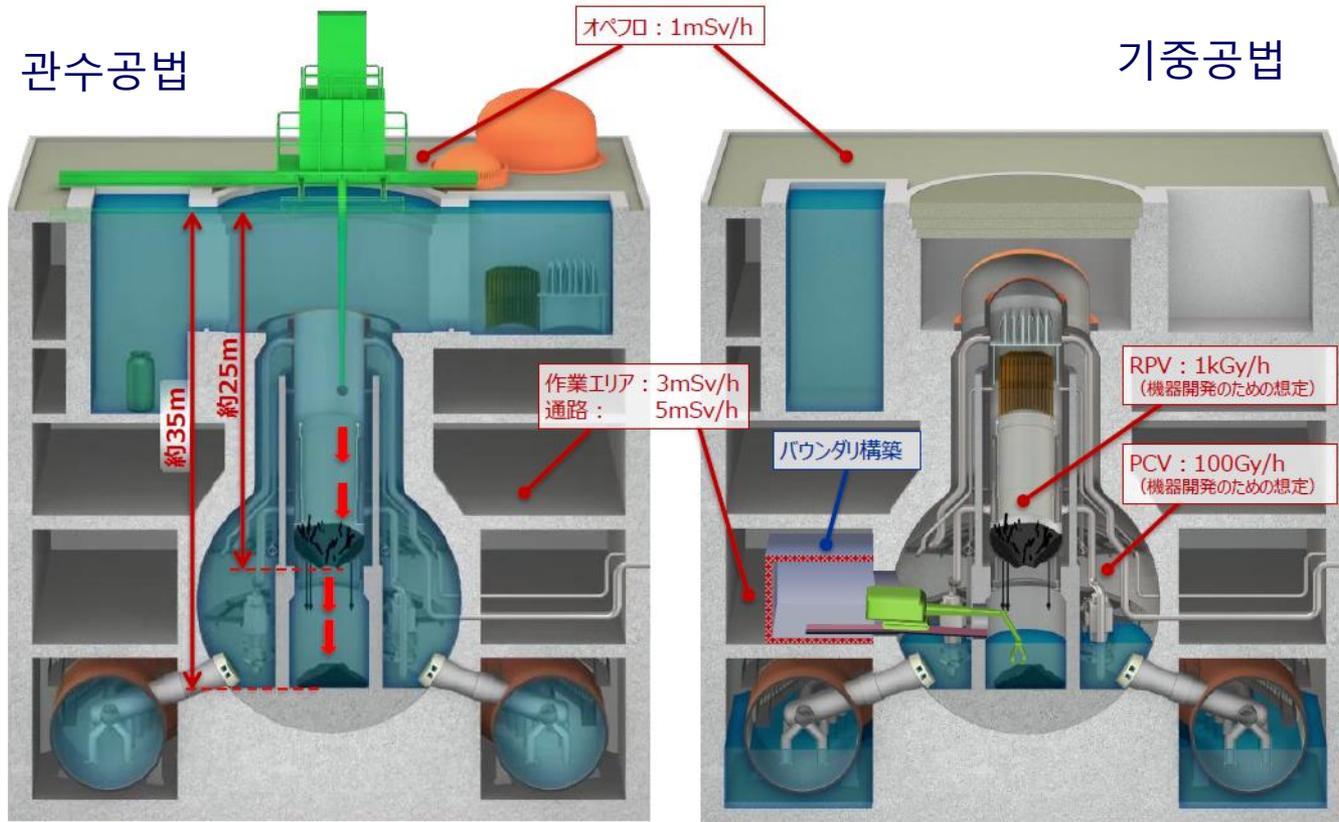
### 기중-상접근 공법(개념)



# 관수<sup>冠水</sup> 공법과 기중<sup>氣中</sup> 공법은 크게 다름

관수공법은 무리 ①격납용기에 구멍 ②만수가 되면 지진력을 못 가짐

## 관수공법과 기중(대체)공법(이미지)



원자력학회 강연을 듣고、「격납용기가 설계 상, 지진 발생 시 못 견딘다」고 주장해왔다.

기본적인 원전설계를 이해하지 않은채 계획을 짜는 것은 비정상.

# 노후 원전이 위험한 이유

◆ 낡은 플랜트는 여러 곳이 고장나기 시작해 수리해도 이미 따라잡을 수 없다.

◆ 기계(자동차 등) 고장 빈도는 육조곡선으로 나타난다.

## ◆ 대책의 문제점

\* 비파괴검사(x선이나 초음파 등)는 기술적인 한계가 있어, 결함을 짚어내지 못하는 일이 있다.

\* 원자력발전소 구조는 굉장히 복잡하여 언제, 어디서, 고장이 발생할지 예측할 수 없다.

\* 결함이 발생했을 때 「안전하게 멈추는 보증이 없다」 이 점이 「신칸선」과 다름. ⇒ 피해 규모는 결정적 차이.

# 원전 노후화와 고장 발생율

## 욕조 곡선

일반적인 기계의 고장 발생율(빈도)을 표시한 곡선



인터넷 '욕조곡선', "FUKUDA" 에서

# 경청해주셔서 감사드립니다

핵발전은 인간과 환경에  
되돌릴 수 없는 데미지를 준다.

핵발전 없는 사회를 지향하는 활동은,  
전쟁을 회피하는 활동과 함께 중요한  
환경문제이며, 인류의 희망이다.