

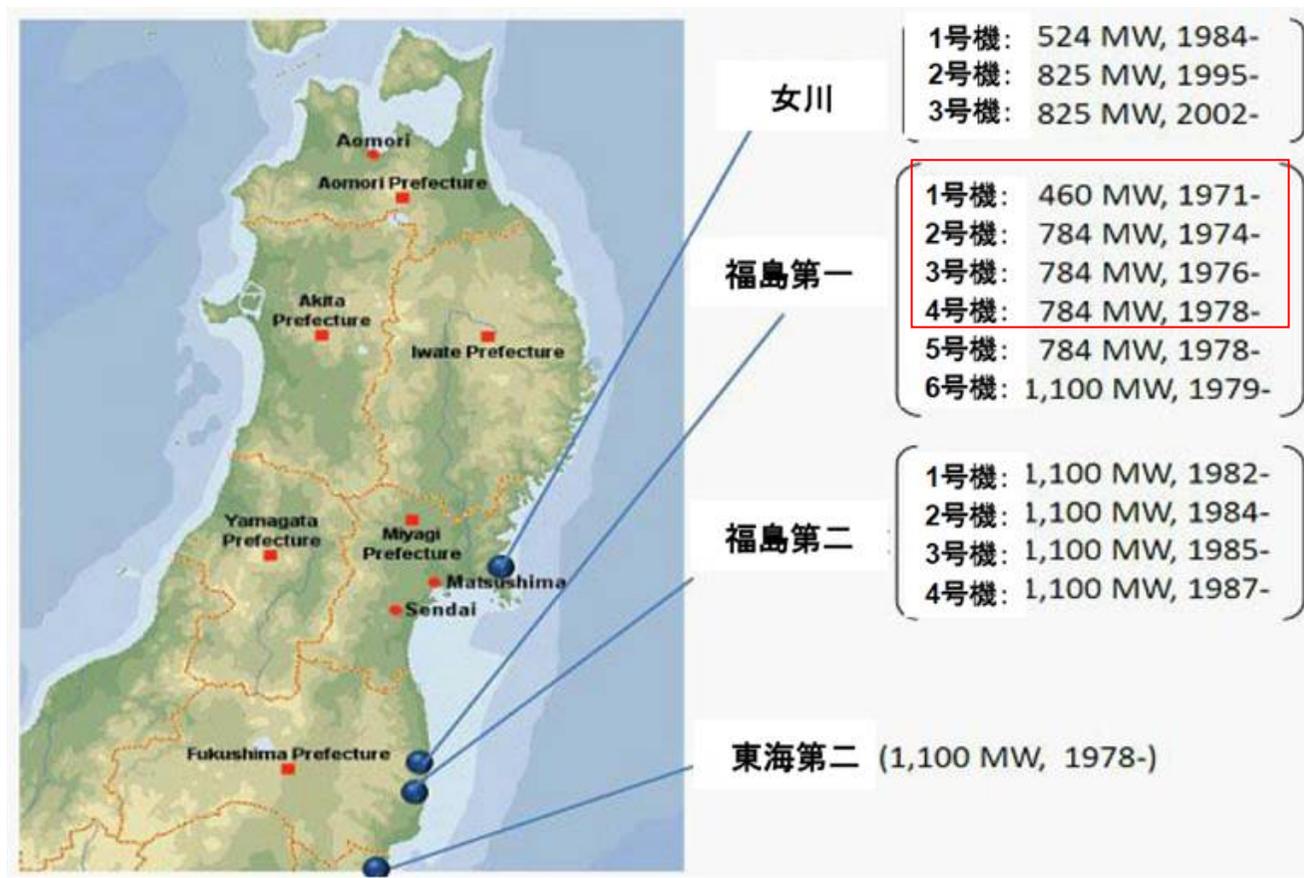
早稲田大学 理工学術院  
未来エネルギーシンポジウム  
事故の分析と対策

平成23年7月15日

北海道大学 大学院 工学研究科  
エネルギー環境システム専攻  
教授 奈良林 直

# 東北地方太平洋沖地震 M9.0

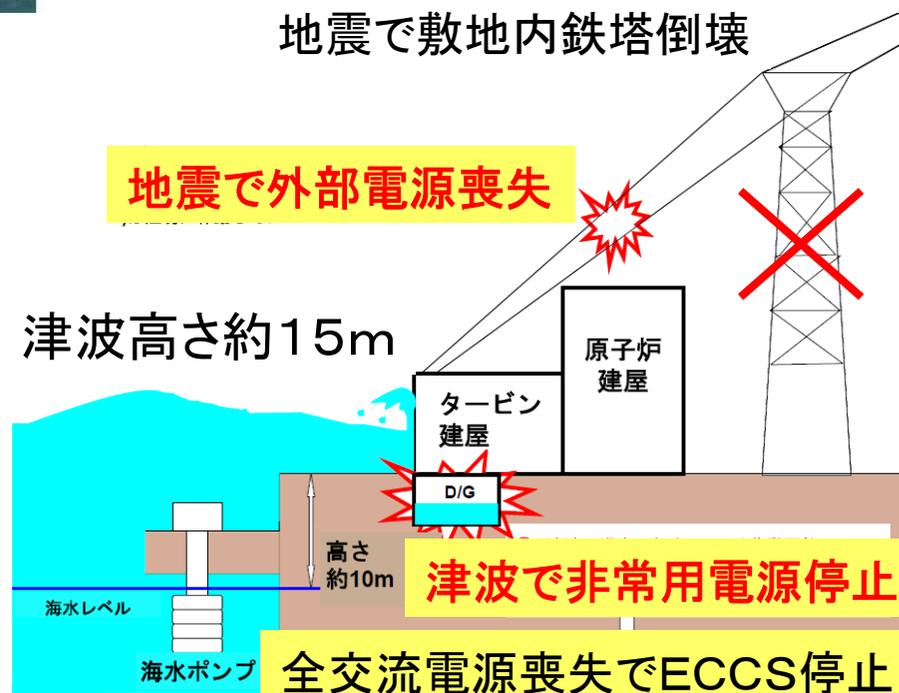
- 3月11日14時46分18秒、三陸沖を震源として発生したマグネチュード9.0の巨大地震。太平洋沿岸に**大きな津波**・東日本大震災
- 沿岸に立地する火力発電所、原子力発電所の多くが影響を受け、運転停止。これが広域の**外部電源喪失**につながった。



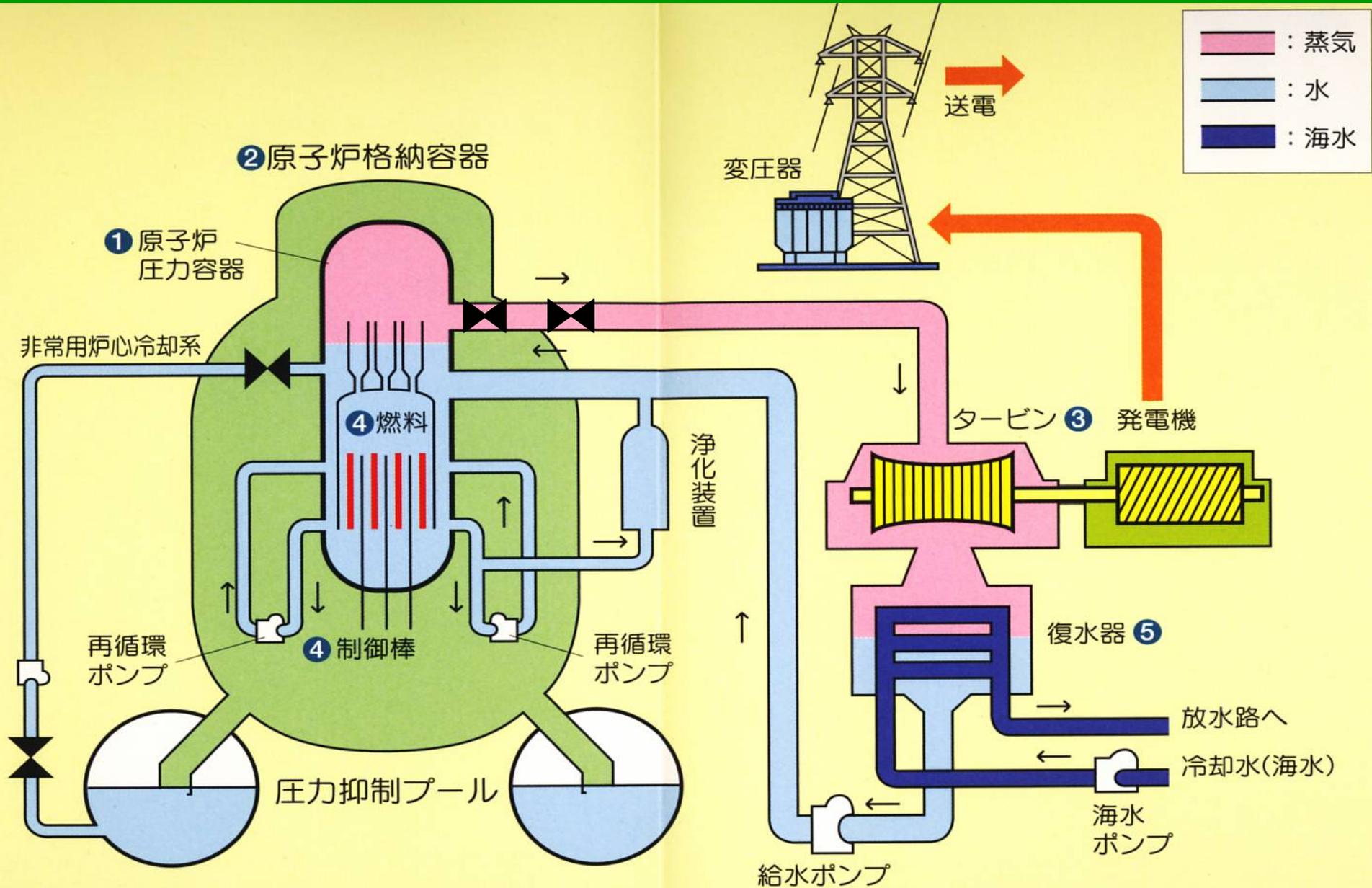
# 何が起きたのか

■ 地震で外部電源喪失、津波で非常用DG停止

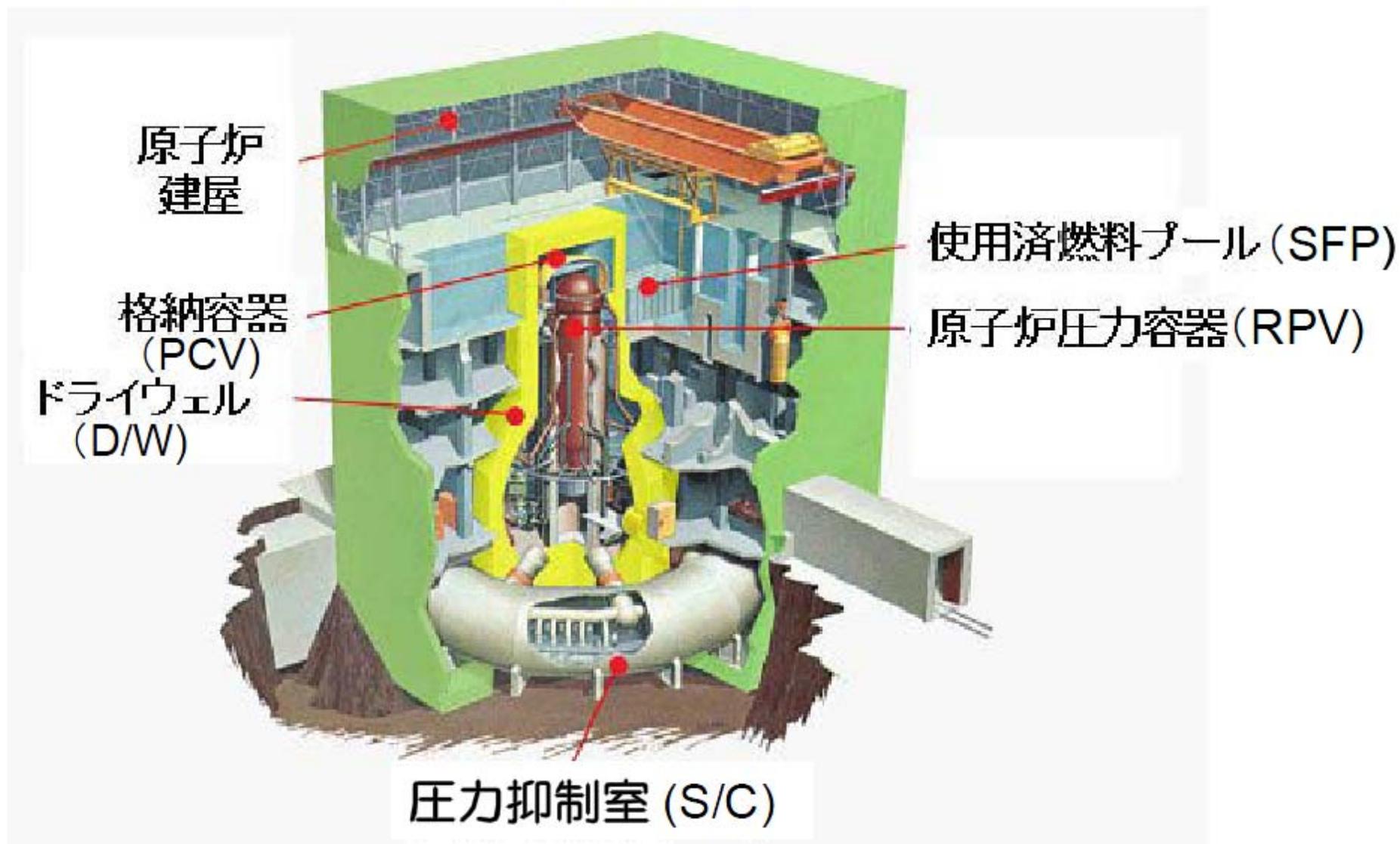
→ 冷却源喪失



# 沸騰水型原子力発電所(BWR)

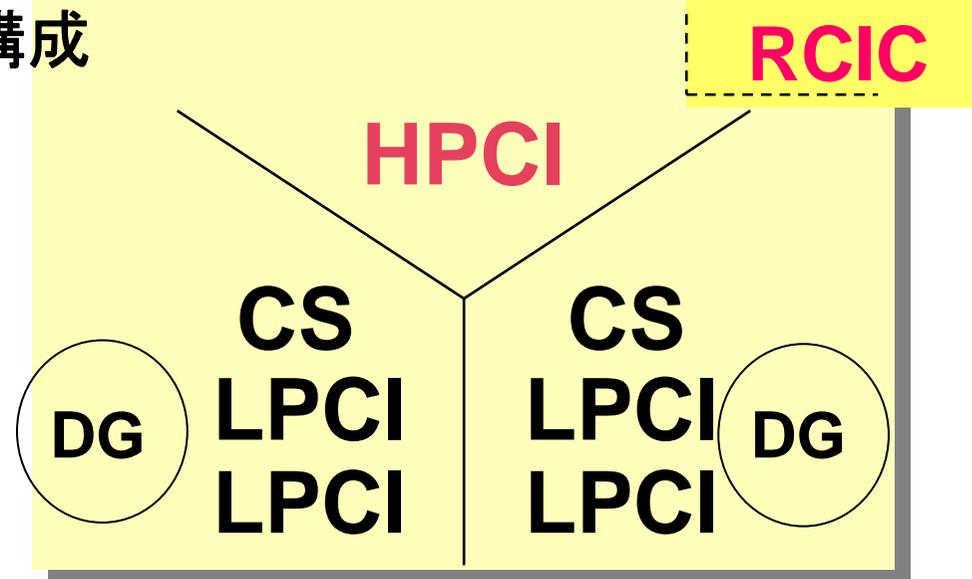
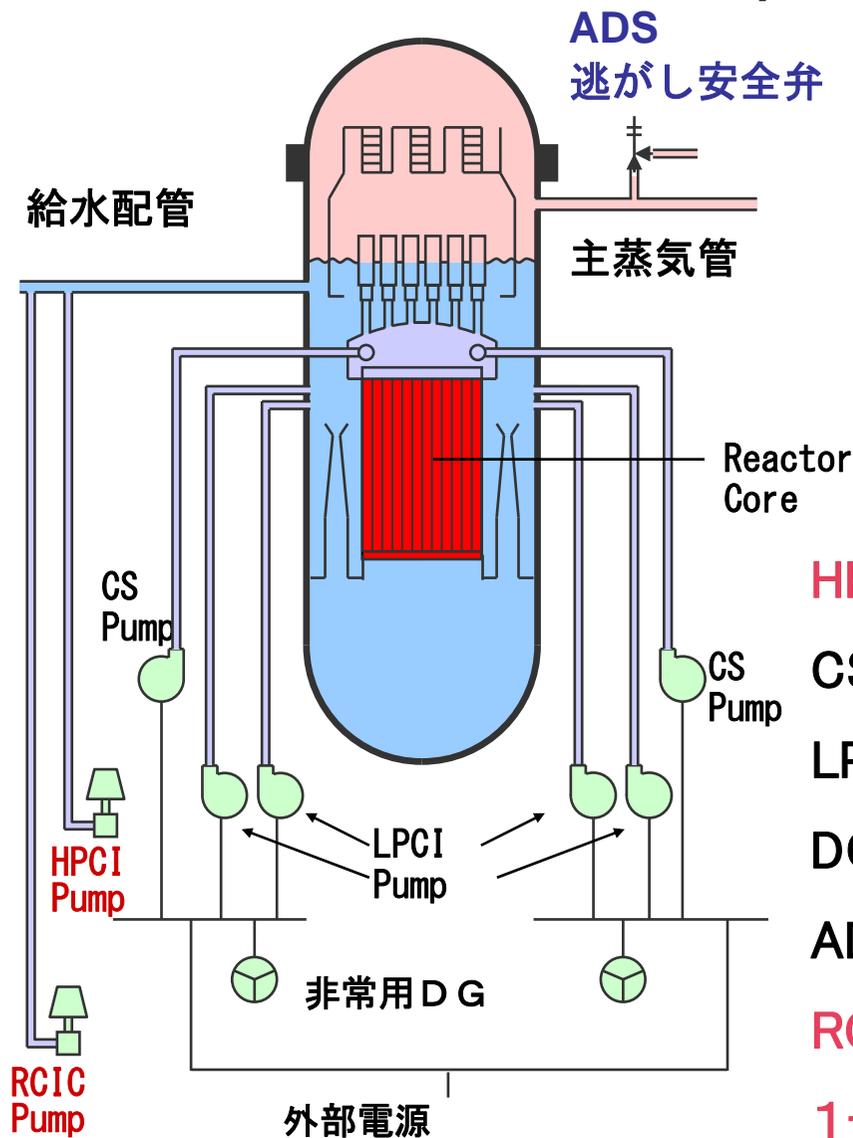


# 福島第1発電所(1~5号機)の構造



# 1号機 (BWR/3)、2~3号機 (BWR/4)

## ■ 非常用炉心冷却系 (ECCS) の構成



HPCI : 高圧注入系 (タービン駆動)

CS : 炉心スプレイ系 (スプレイノズル)

LPCI : 低圧注入系

DG : 非常用ディーゼル発電機

ADS : 自動減圧系 (逃がし安全弁)

RCIC : 隔離時冷却系 (タービン駆動, 常用系)

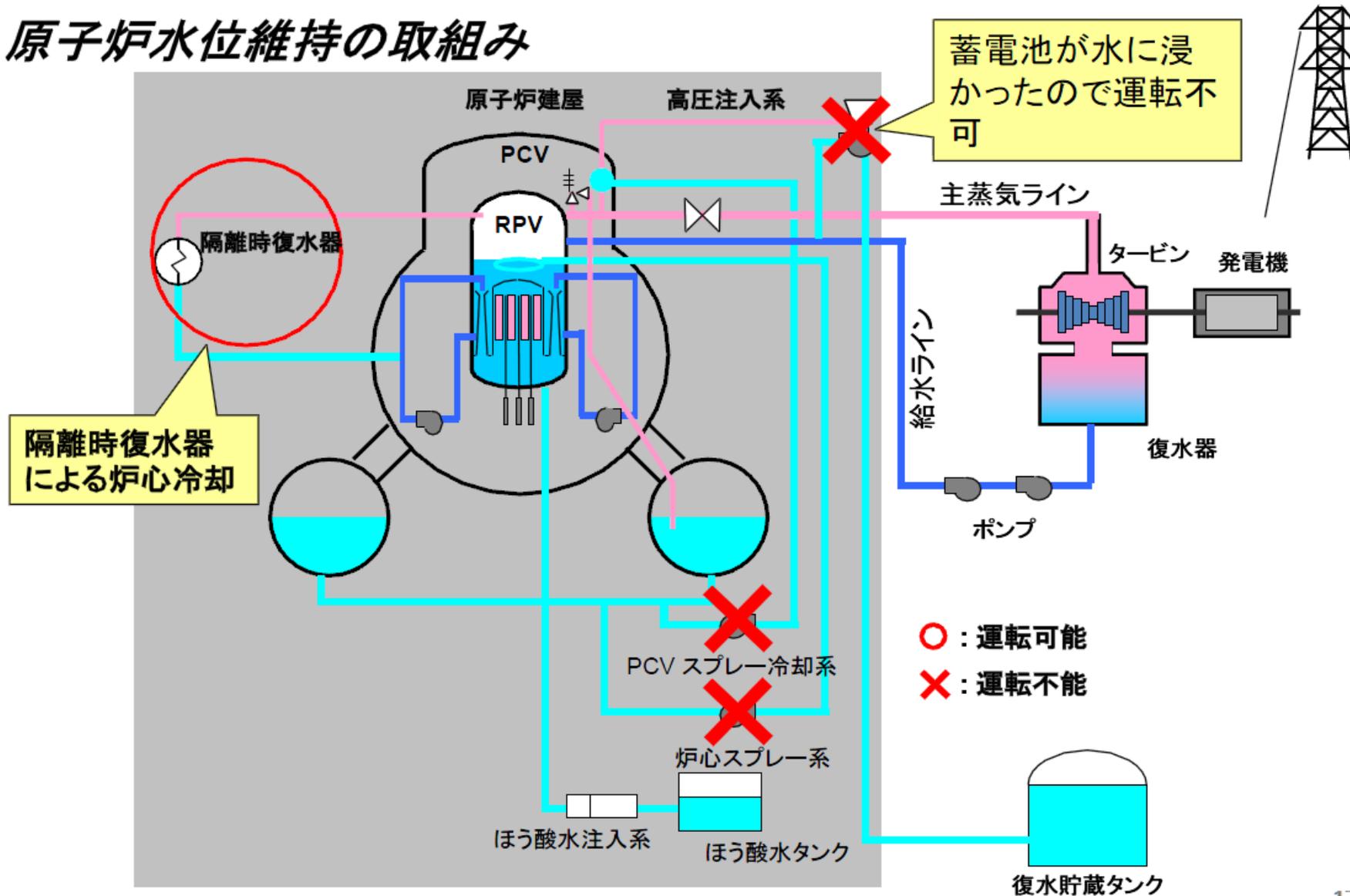
1号機は隔離時復水器 (水没熱交換器)

# 何が起きたのか



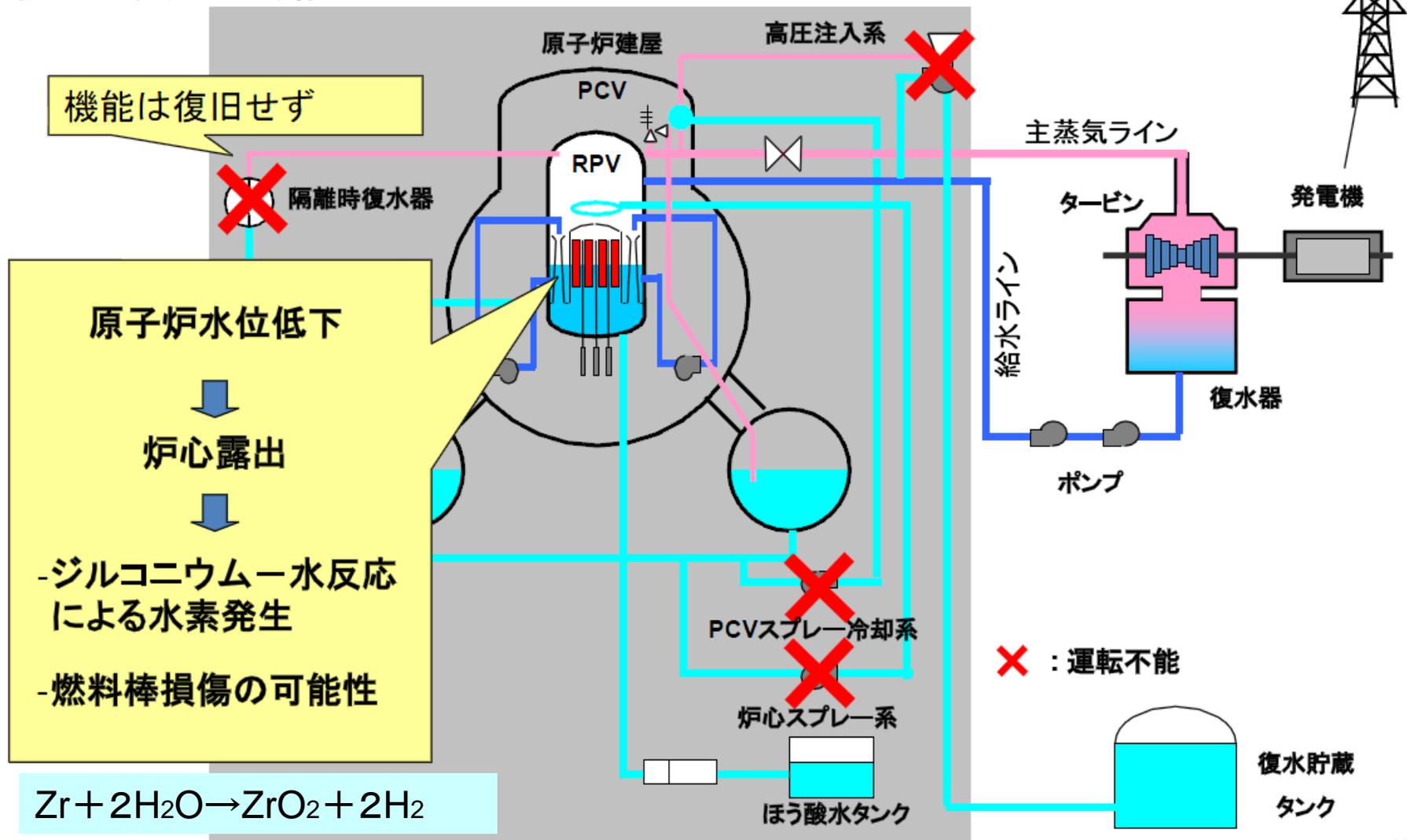
# 1号機で何が起きたのか

## 原子炉水位維持の取組み



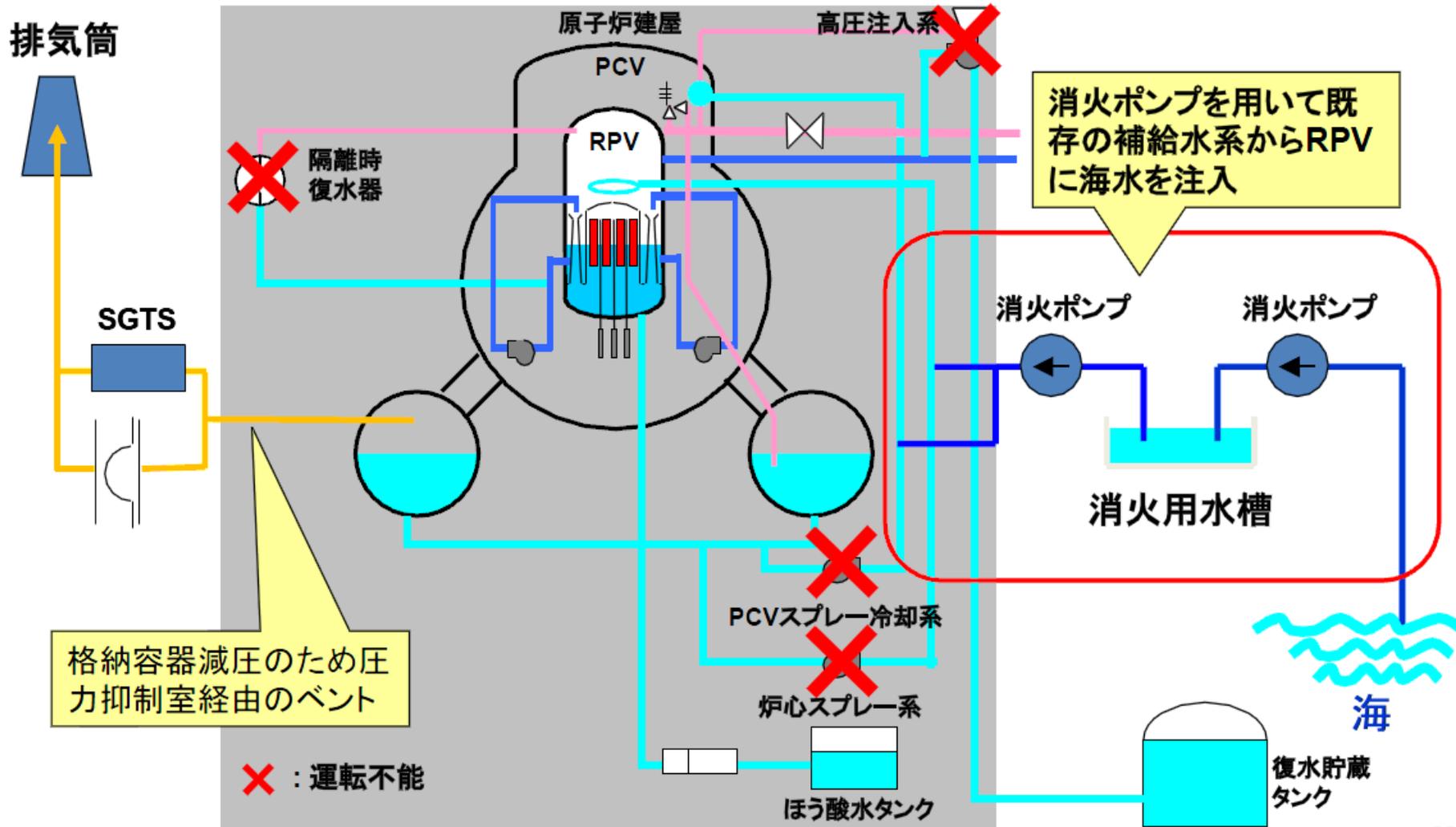
# 1号機で何が起こったのか

非常用復水器の冷却能力喪失のため原子炉水位が下がり、  
続いて、炉心が露出

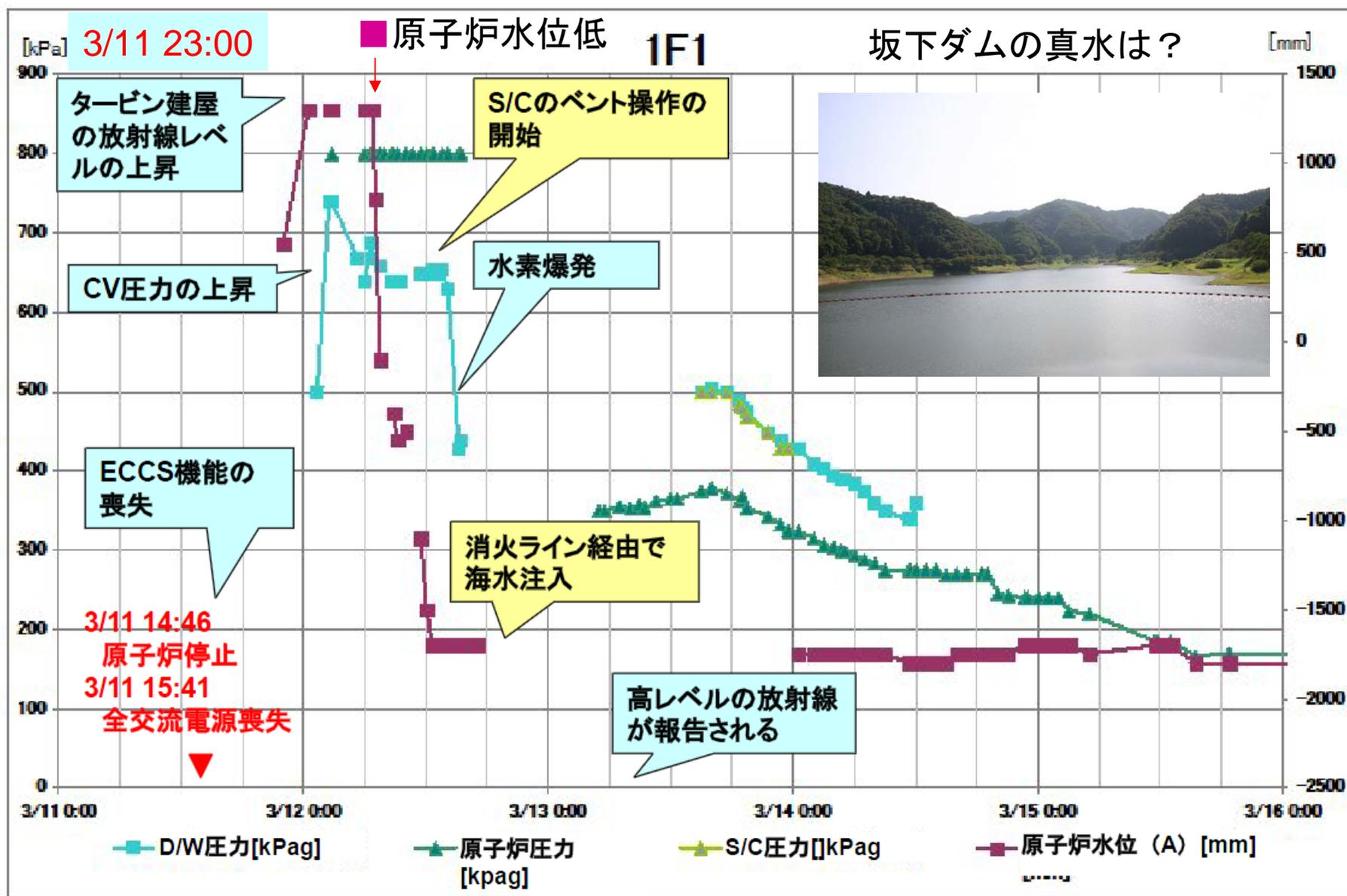


# 1号機で何が起きたのか

- 消火用水ポンプを用いて海水を注入
- 格納容器減圧のため圧力抑制室経由のベントを実施



# 1号機何が起きたのか

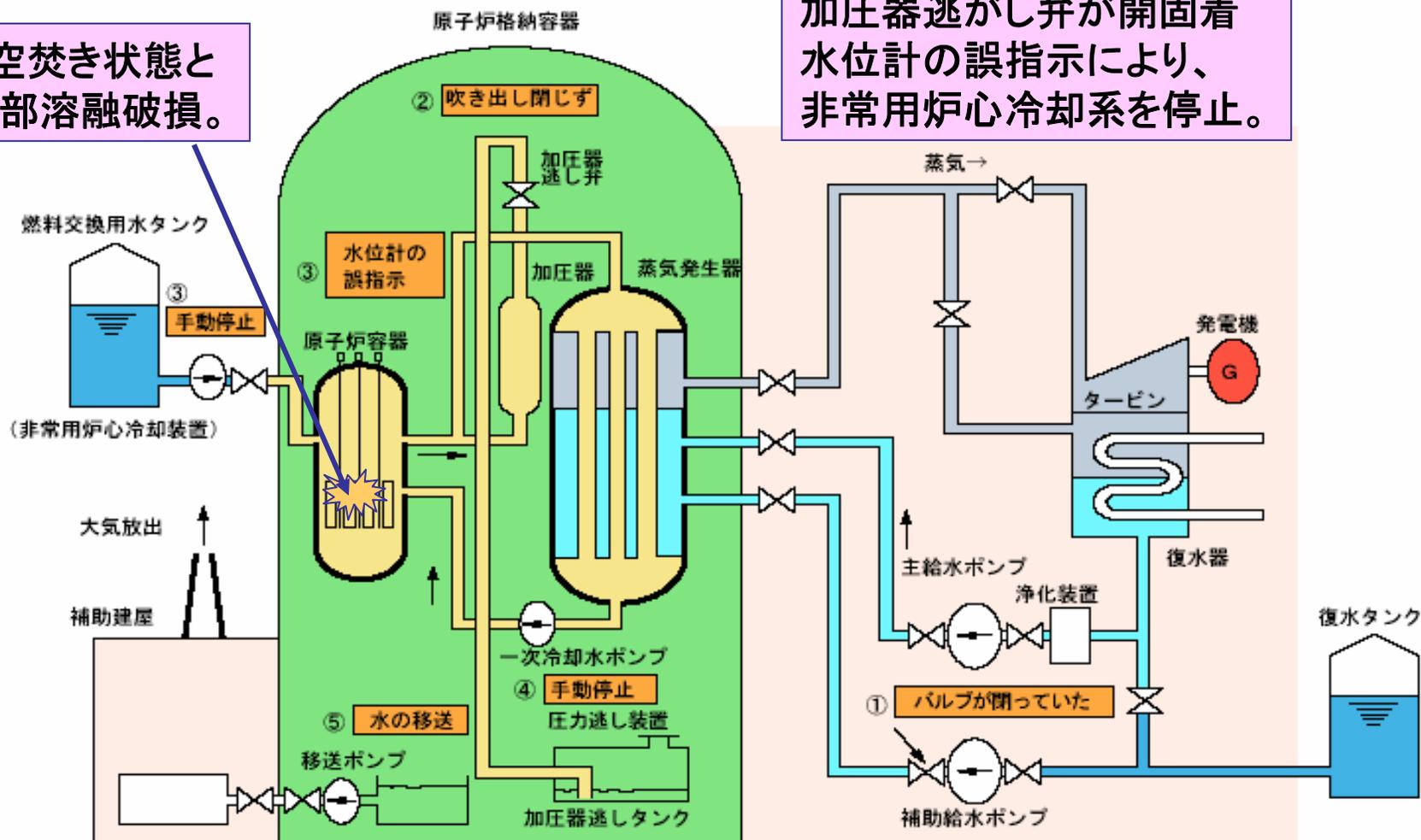


# 米スリーマイルアイランド原発事故の教訓

- ① 過酷事故の教訓として、その後過酷事故対策が進んだ
- ② ヒューマンエラー(人的ミス)防止・主蒸気逃がし安全弁の開発・水位計の改良
- ③ 受動的冷却系を備えた新型原発の開発開始

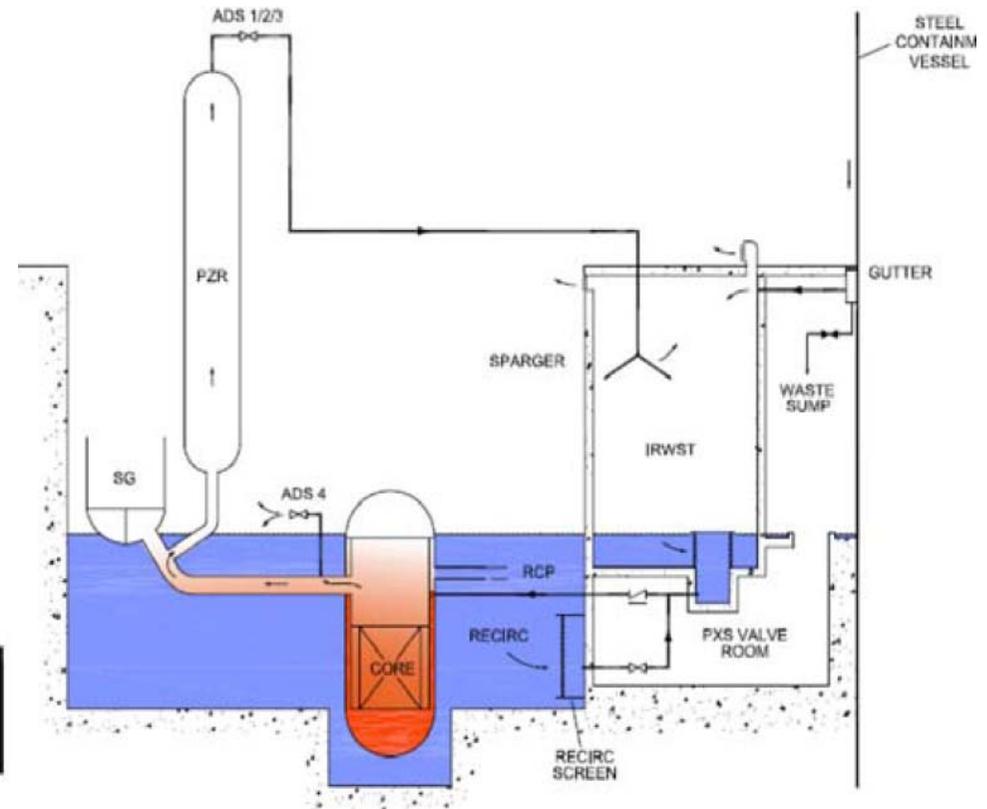
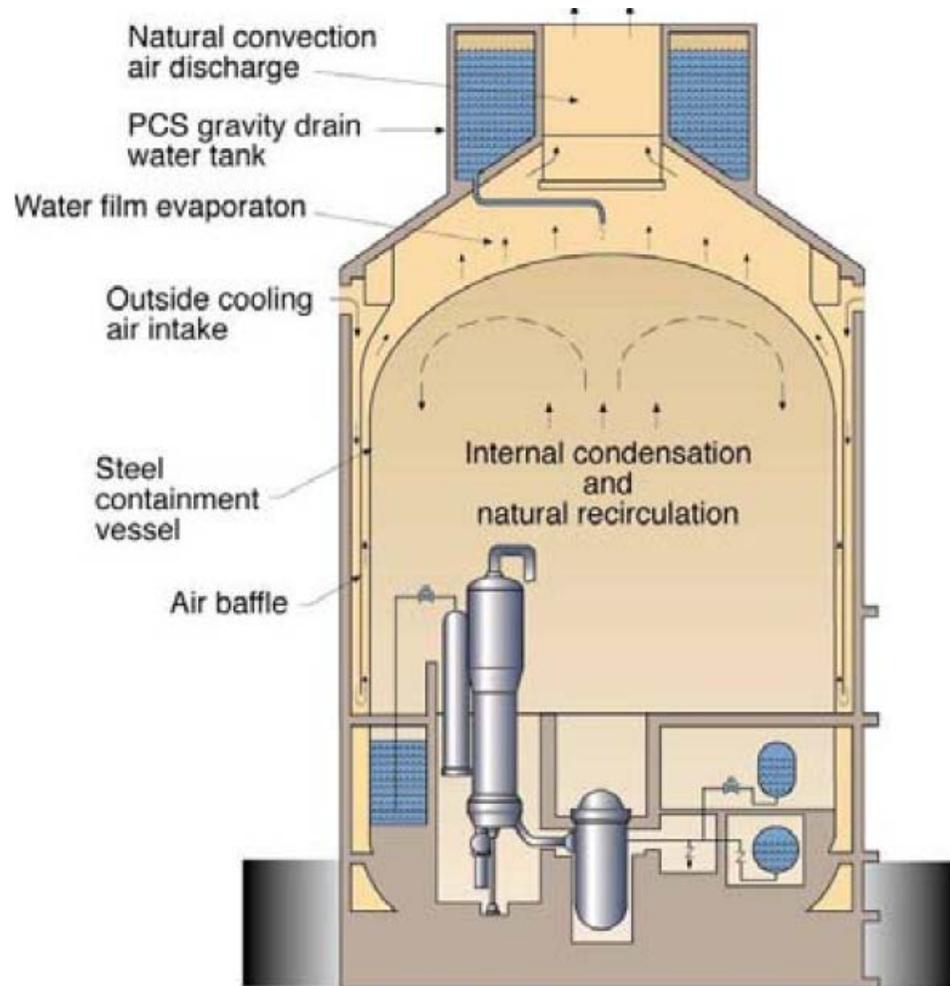
炉心が空焚き状態となり、一部溶融破損。

加圧器逃がし弁が開固着  
水位計の誤指示により、  
非常用炉心冷却系を停止。



# AP1000の自然冷却システム

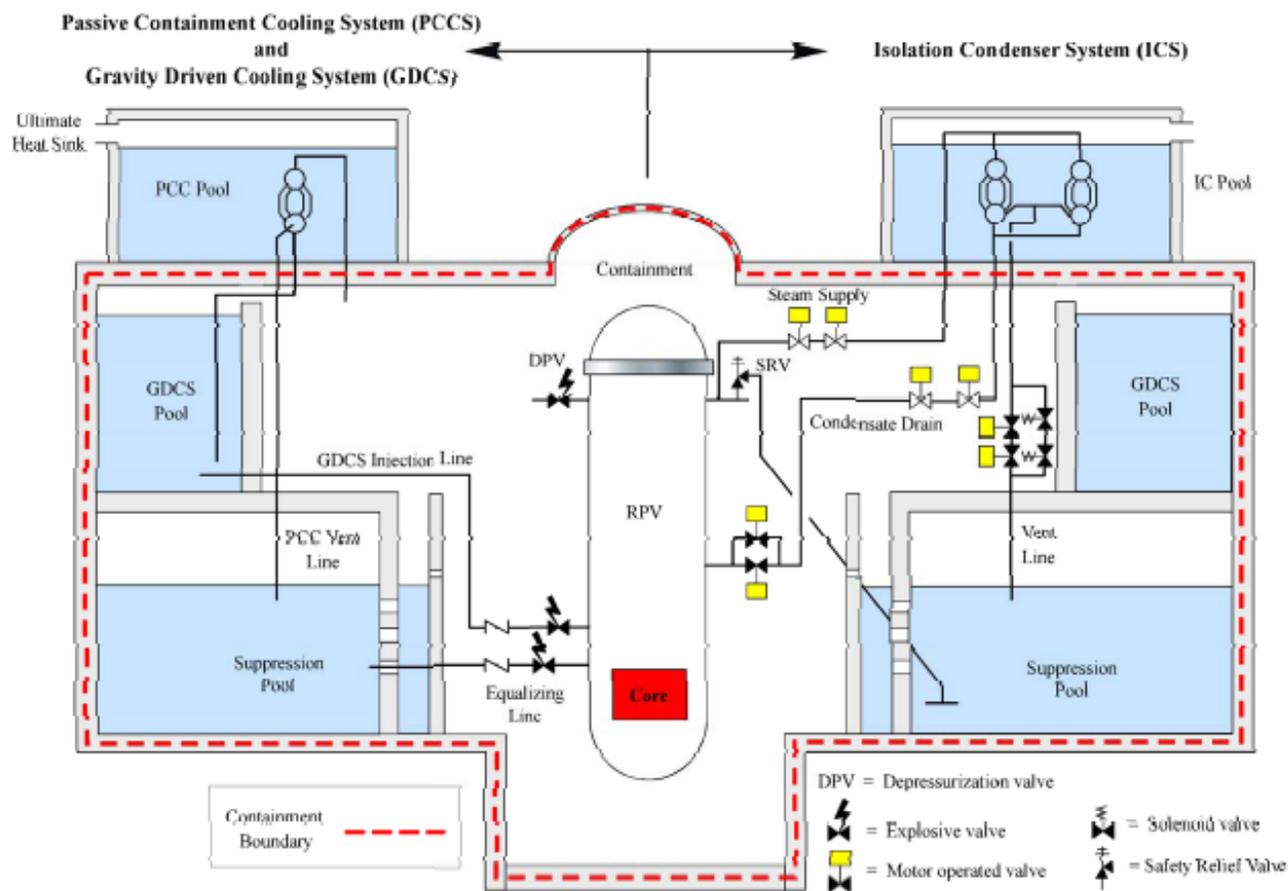
■ 外部注水に頼らずに、自然冷却で事故収束



# ESBWRの事故収束

## ■ 外部注水に頼らずに、自然冷却で事故収束

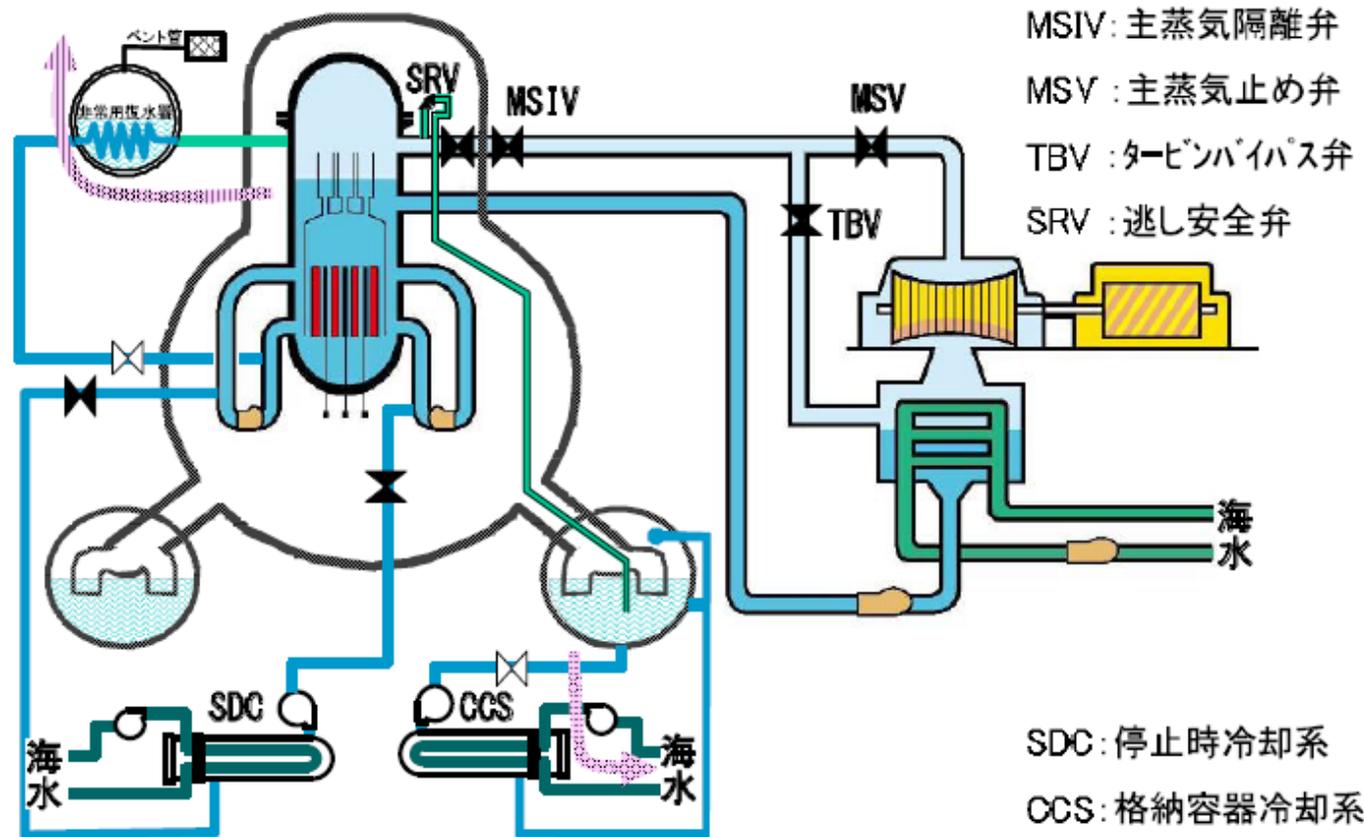
### Passive Safety



# 1号機のECCS系

## ■ ヒートシンクとして海水系に依存

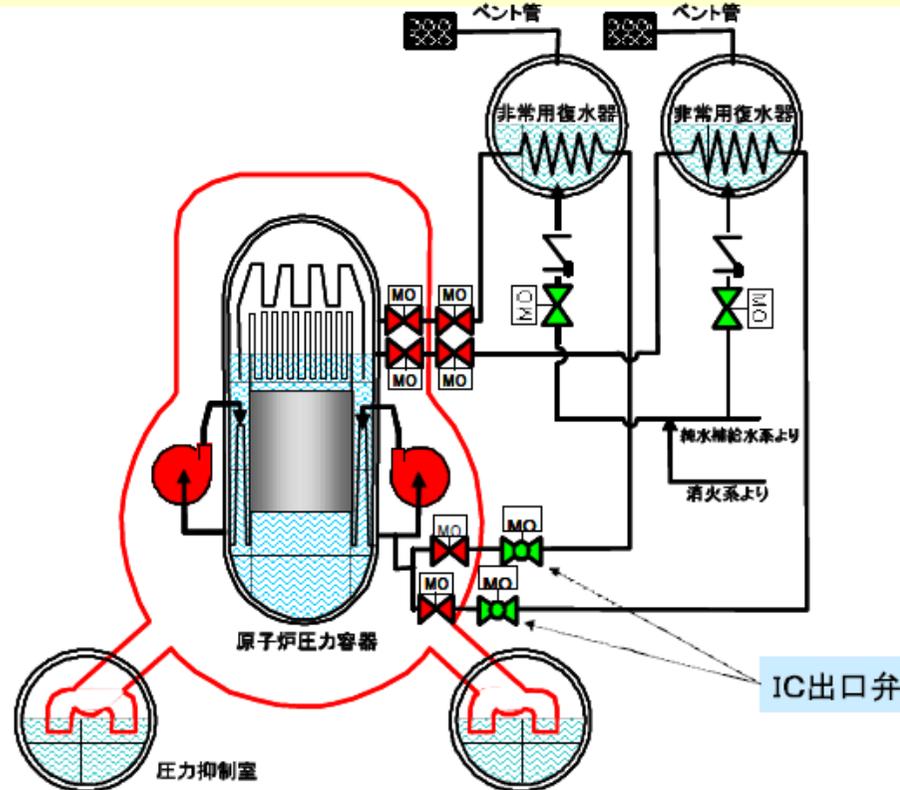
### 1号機：主蒸気隔離弁（MSIV）閉時の冷却



# 1号機にも自然冷却系があった

- 強力な冷却・減圧性能があったが、バッテリー喪失で機能喪失。動いていたら、事故収束できた。

1号機：非常用復水器 (IC: Isolation Condenser)



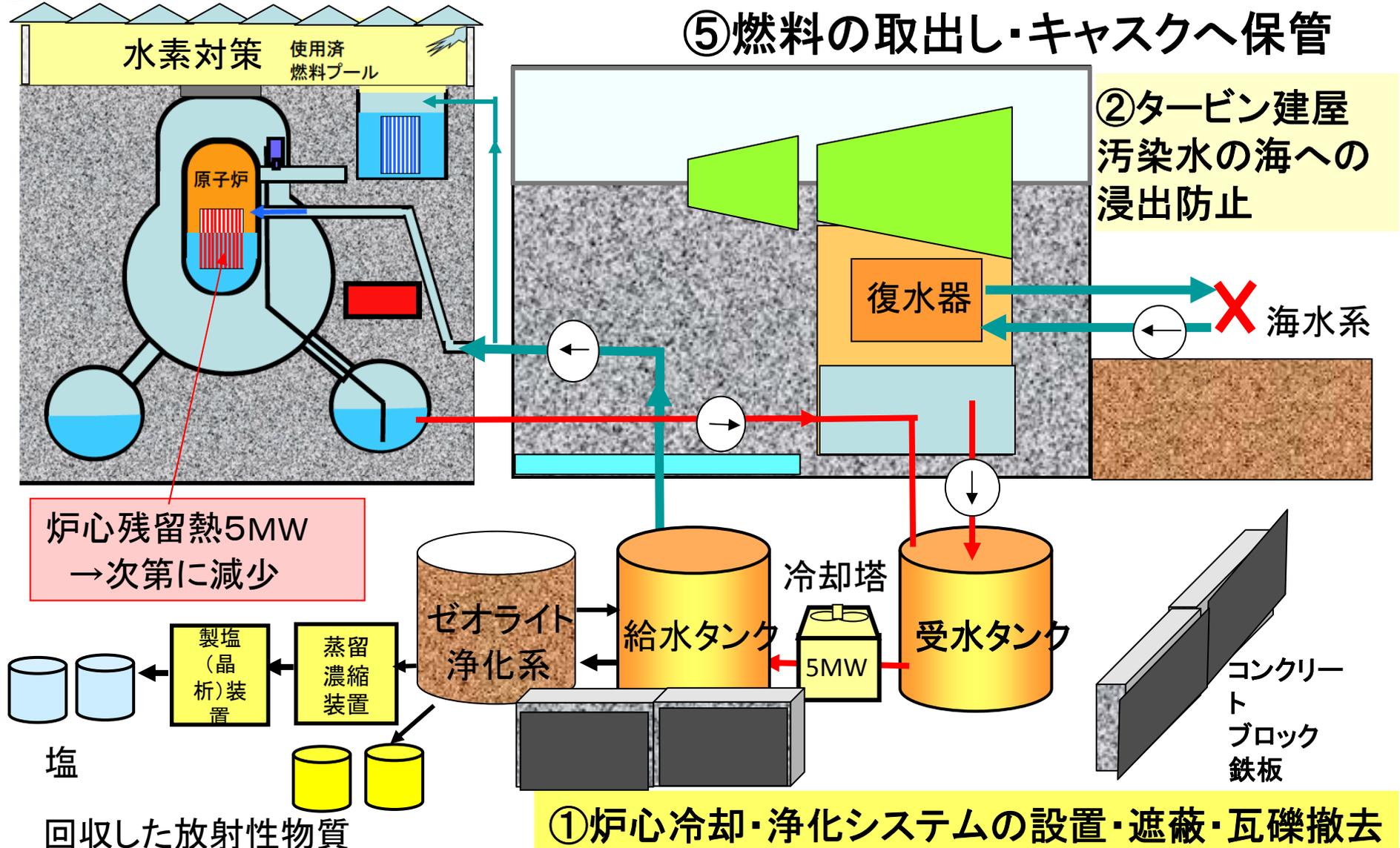
# 原子炉の冷温停止と汚染防止

③原子炉建屋の屋根と壁の修復

④土壌浄化

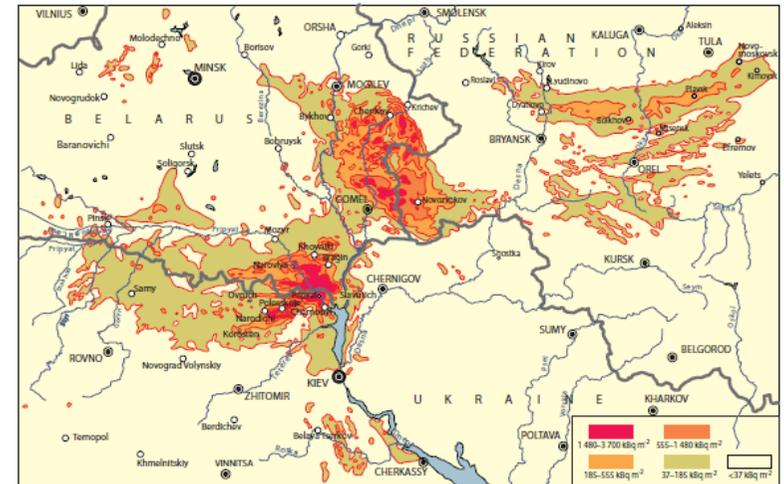
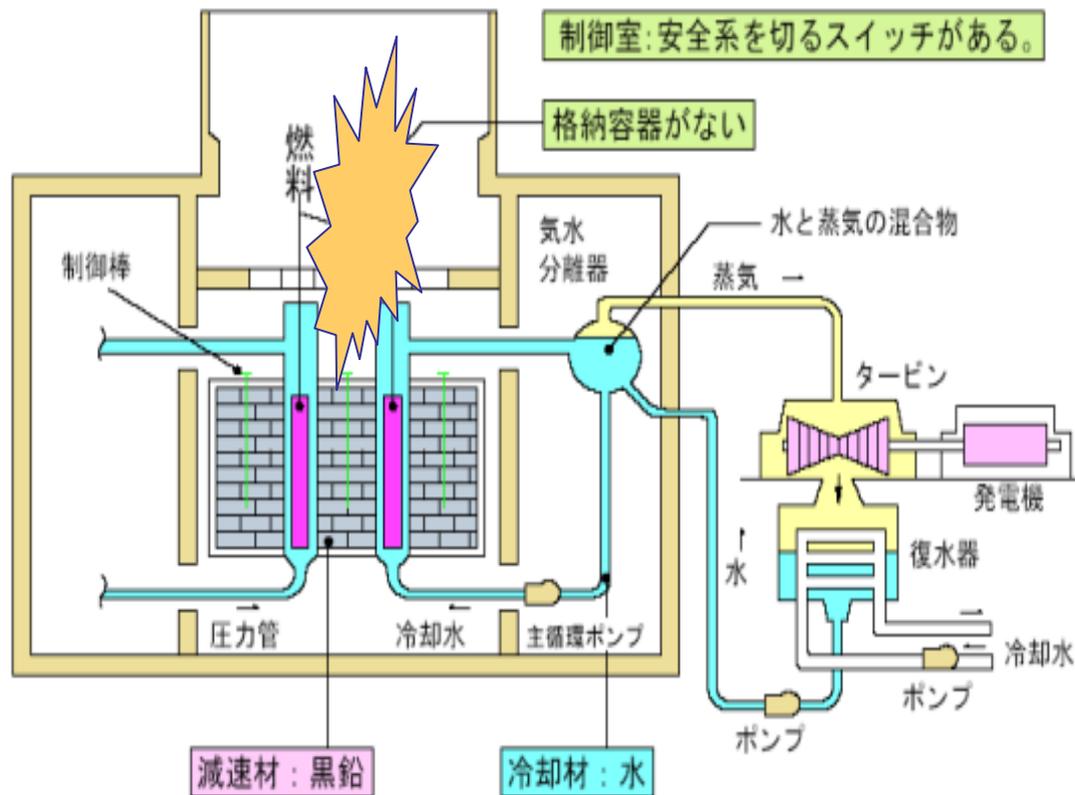
⑤燃料の取出し・キャスクへ保管

②タービン建屋  
汚染水の海への  
浸出防止



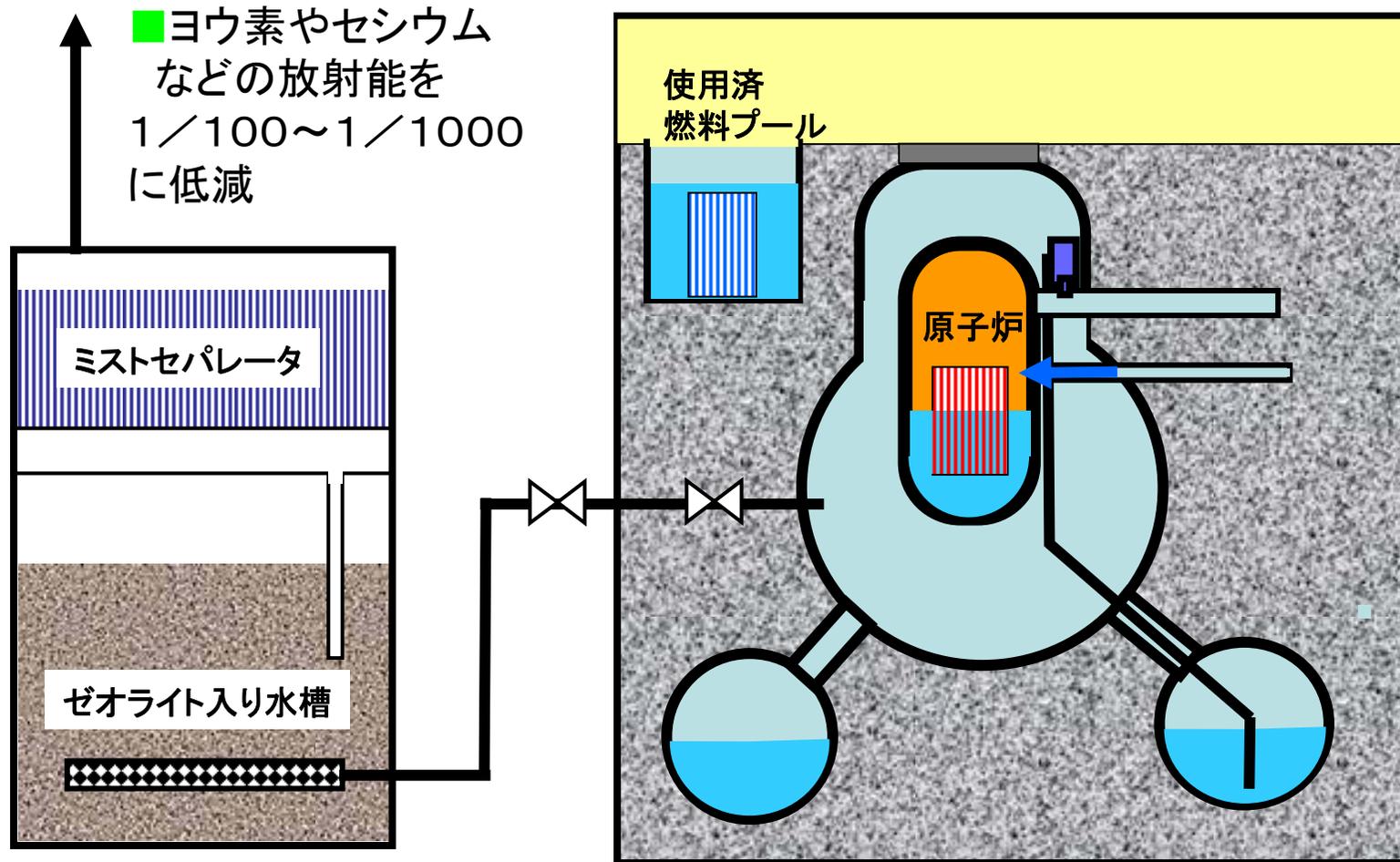
# チェルノブイリ原発事故の教訓

- ①減速材温度係数(ブレーキがかかる固有の安全性)の重要性を認識
- ②放射性セシウムやヨウ素による広域汚染の発生・屋内退避・緊急避難の重要性
- ③フィルター付きベント(フィルタードベント)が欧州で普及



# フィルター付きベントの設置

■チェルノブイリ事故の教訓:「例え事故が起こっても地元には迷惑をかけません」  
(フランス、ドイツ、スイス、フィンランド、ノルウェイの多くの原発に設置)



# 福島第1原発の事故の要因分析

## ■ 長時間の外部電源喪失

東日本沿岸に立地する広域の原子力発電所や火力発電所の運転停止  
福島第1発電所敷地内の送電線の鉄塔の地震による倒壊

## ■ 海水のみに依存した冷却系の共倒れ

敷地高さを4～5m超えて流入した津波により、タービン建屋内に海水が侵入  
非常用ディーゼル発電機・海水冷却ポンプのモータが機能停止

## ■ 炉心冷却喪失事象の発生

炉心冷却喪失、高温になった燃料被覆管と水の化学反応により大量の水素が発生  
燃料が一部溶融し、ヨウ素やセシウムなどが格納容器内に放出

## ■ 過酷事故対策の炉心注水の遅れ

過酷事故緩和対応措置に必要な淡水の確保の遅れ→消火ポンプによる海水注入  
炉心注水喪失時間が長時間に及んだ。

## ■ 格納容器過圧と水素対策不足

格納容器の一部破損により、ヨウ素やセシウムと多量の水素が放出  
非常用水素処理系が電源喪失により機能せず、水素爆発

## ■ 使用済み燃料プール冷却

プールの水位確保ができず、使用済み燃料プールの燃料被覆管も一部損傷

# 他電力のグッドプラクティス(訓練)

## ■ 長時間の外部電源喪失防止

水力発電所、内陸の火力発電所があり、津波でも外部電源を確保  
開閉所が山側に移設。強固なコンクリート壁による雪害防止



## ■ 海水のみに依存した冷却系の共倒れ防止

原子炉建屋の空調ダクトを5m上方に移設工事中  
非常用ディーゼル発電機室、タービン建屋のドアの水密化  
ガスタービン発電機車の配備



## ■ 炉心冷却喪失事象の発生

蒸気発生器の減圧と注水が容易。蒸気発生器を介した炉心冷却が可能  
格納容器が大きいので格納容器内の水素濃度が上がりにくい



## ■ 過酷事故時の炉心注水の遅れ防止

過酷事故緩和対応措置に必要な淡水の確保(5000トン×2個)  
一部ホースを金属の配管により常設化・注水訓練で作業時間確認

## ■ 格納容器過圧と水素対策不足

格納容器が大きいので格納容器内の水素濃度が上がりにくい  
長期的には、濾過フィルター付きベントの設置を推奨



## ■ 使用済み燃料プール冷却

使用済み燃料プールへのアクセス容易、敷地高さ31mで注水訓練

# チェルノブイリの教訓

- チェルノブイリ事故は、健康被害も環境被害も当初恐れられていたよりはるかに少なく、重大事故ではあったが、破局的(Catastrophe)ではなかった。最大の健康被害は、極めて誇張されたリスク観念に基づく精神的被害であり、不安にかられ、宿命論者になり、薬物・アルコール依存、失業、無気力をもたらした。
- 福島第1発電所周辺の計画避難区域の方々に対する心のケアが重要。せつかく生き残った家畜を殺処分にするなど、言語道断ではないか？  
研究対象として国が飼育を許可する等の配慮必要

# これからのエネルギーの本命は？

## ゼロエミッション時代の主役は？



太陽光



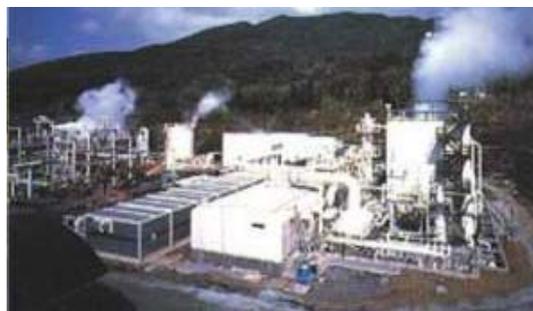
風力



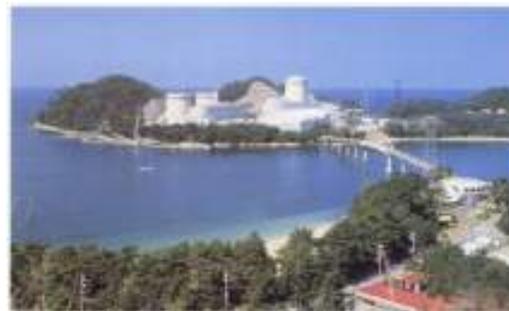
バイオ



水力



地熱



原子力

# 太陽光と風力発電はまだまだ

原子力発電所を20基建設すれば、我が国のCO2排出量を6%削減できる。同じコストで太陽光ではわずか0.5%の削減

原子力発電所一基

100万kW級  
(3000億円)

13倍のコスト

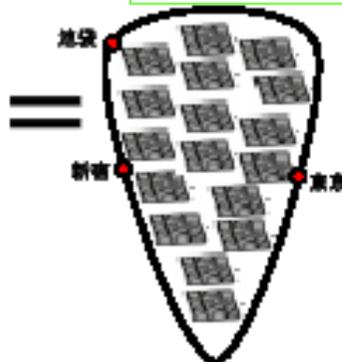
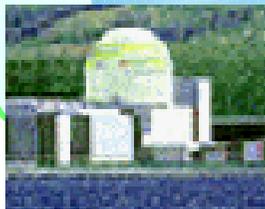
太陽光発電

山手線一杯の面積(約67km<sup>2</sup>)

約4兆円

国家予算92兆円

100万kW)



山手線の内側の面積の何倍？

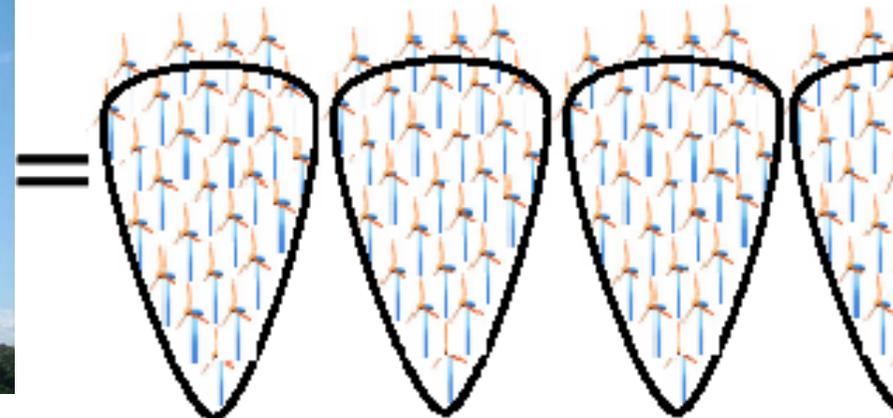
太陽光発電ならほぼ 1つ分

風力発電なら 3.5倍

広大な敷地が必要

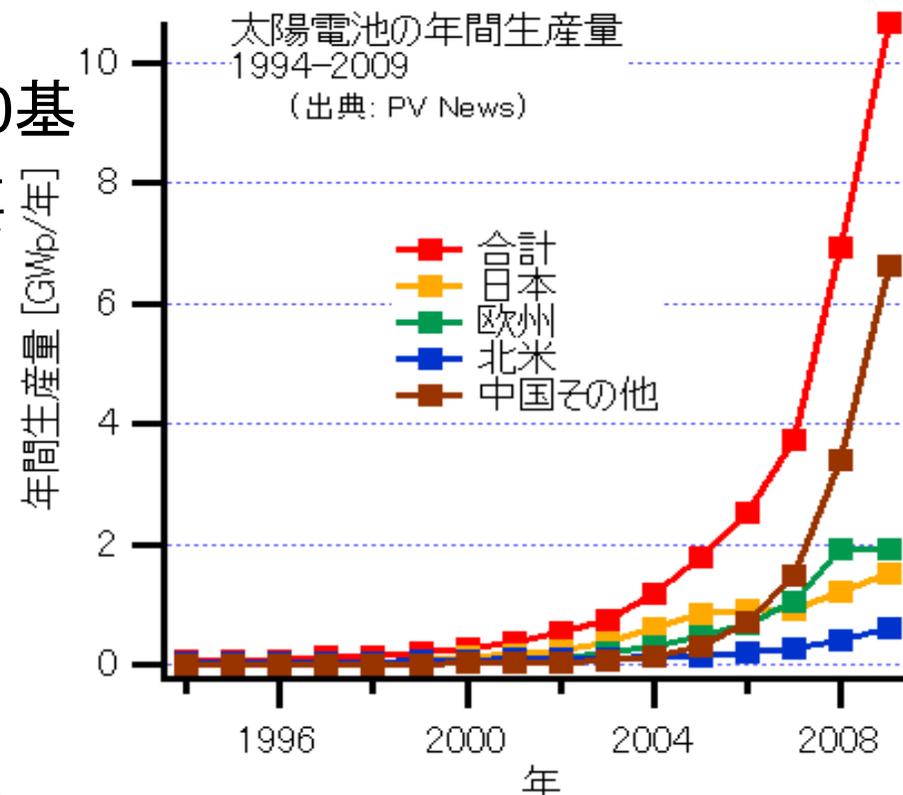


風力発電  
山手線の3.5倍の面積(約246km<sup>2</sup>)  
(1兆円)



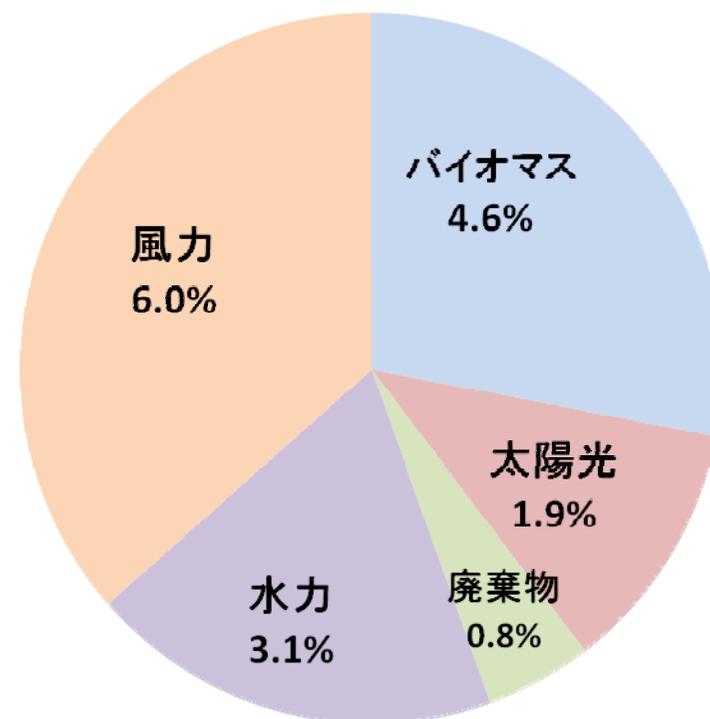
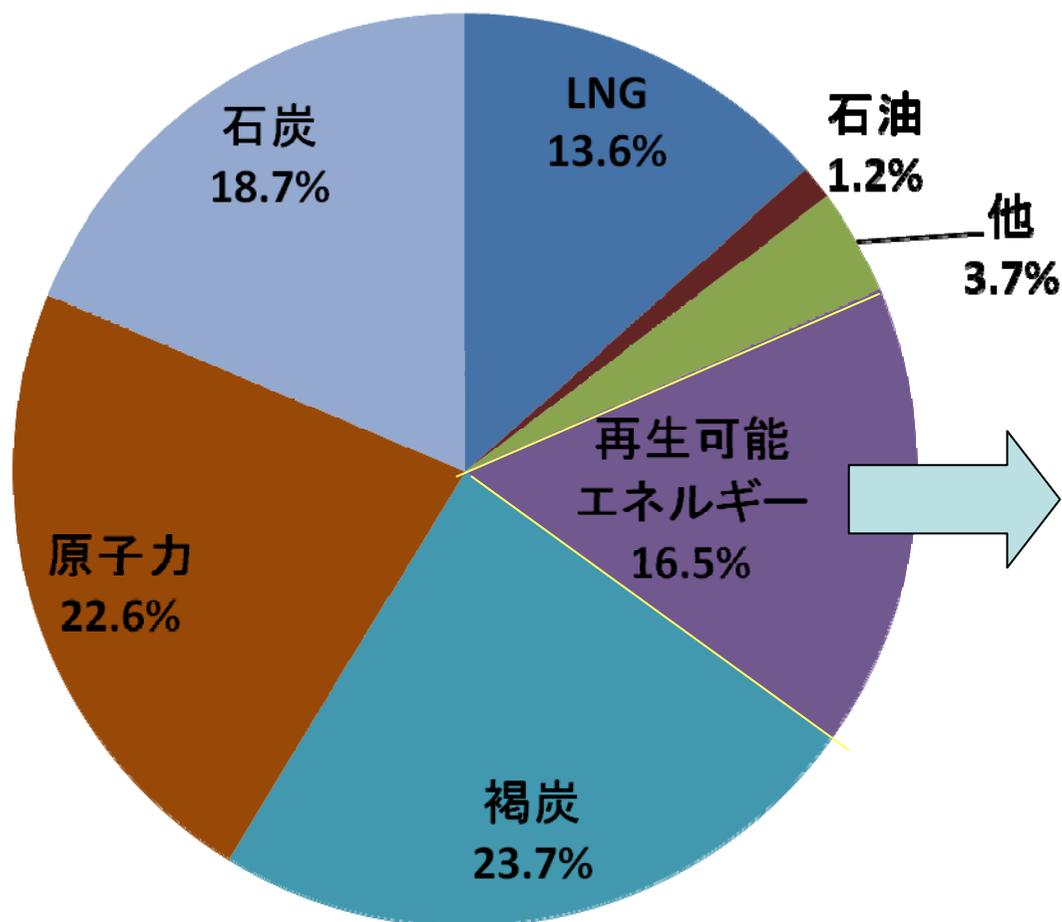
# 太陽光発電のコスト

- 太陽電池パネル 57万円/kW(現在の国内量販店価格)
- $100\text{万kW} * 57\text{万円/kW} = 5700\text{億円}$
- 設備利用率  $6\text{h}/24 * 0.5 = 12.5\%$
- $5700/0.125 * 0.7 = 3.2\text{兆円}$ でようやく  
原発1基分の電力が得られる
- 5000万kWの原発を止めて、50基  
建設すると160兆円の予算必要



# ドイツの再生可能エネルギー：太陽光はわずか1.9%

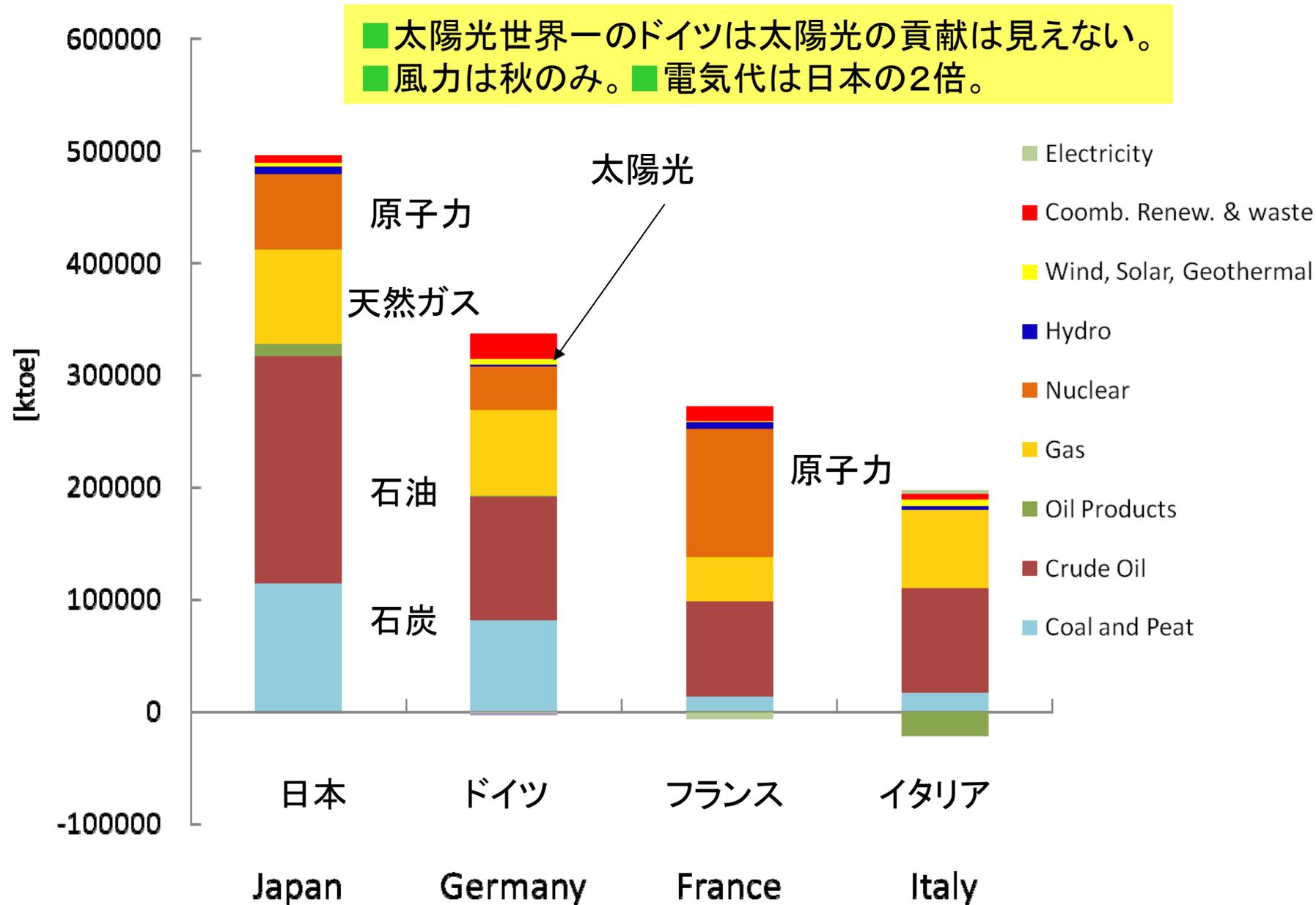
原子力発電設備容量：2034万kW  
太陽光発電設備容量：約1700万kW



再生可能エネルギーの内訳

2010年のドイツの電源構成比(総発電電力量6,210億kWh、暫定値)  
出典：エネルギー収支統計協会、再生可能エネルギー統計協会

# Share of total primary energy supply in 2008



# 今年・来年の夏の大停電？

- 浜岡発電所を超法規的措置で停止してしまったが。。。
- ニューヨーク大停電の二の舞？ 日本経済への大打撃
- 余裕が無い状態で1基、運転停止すると芋づる式に  
広域大停電→鉄道・地下鉄・エレベータ・病院・食品・通信

企業・行政・病院のリスク管理必要

# 欧州の干ばつと猛暑



'03年、'06年のヨーロッパの熱波(死者計約5万人)

ドレスデン地域(2006年7月)



干上がったエルベ川—熱波続く  
欧州【AFP=時事】

地球温暖化の死者はチェルノブイリ事故の  
比では無い！CO2は大量殺戮ガス

The death toll in France during a Europe-wide July heat wave has reached an estimated 40. But it was nothing like the summer of 2003, when killer heat combined with social dysfunction, leaving 15,000 dead.



# まとめ

- 福島第1原発1～4号機の事故は、しっかりした事前検討や対策がなされていれば早期に収束できた。
- 福島の事故の原因と各発電所の対策をきちんと説明すべき。世界一の安全性を確保して、しっかり運転を！
- 100万kWの原発を1日止めると2億円の燃料必要。  
1年で、700億円、50基で2.5兆円の石油が必要。
- 太陽光だけだと160兆円の設備投資と償却が必要。  
50～100年の国家の事業として取り組むべき。