

# 福島第一原子力発電所事故 から得られた教訓、課題と対策

---

名古屋大学  
山本章夫

2013.3.17

1



## 概要

---

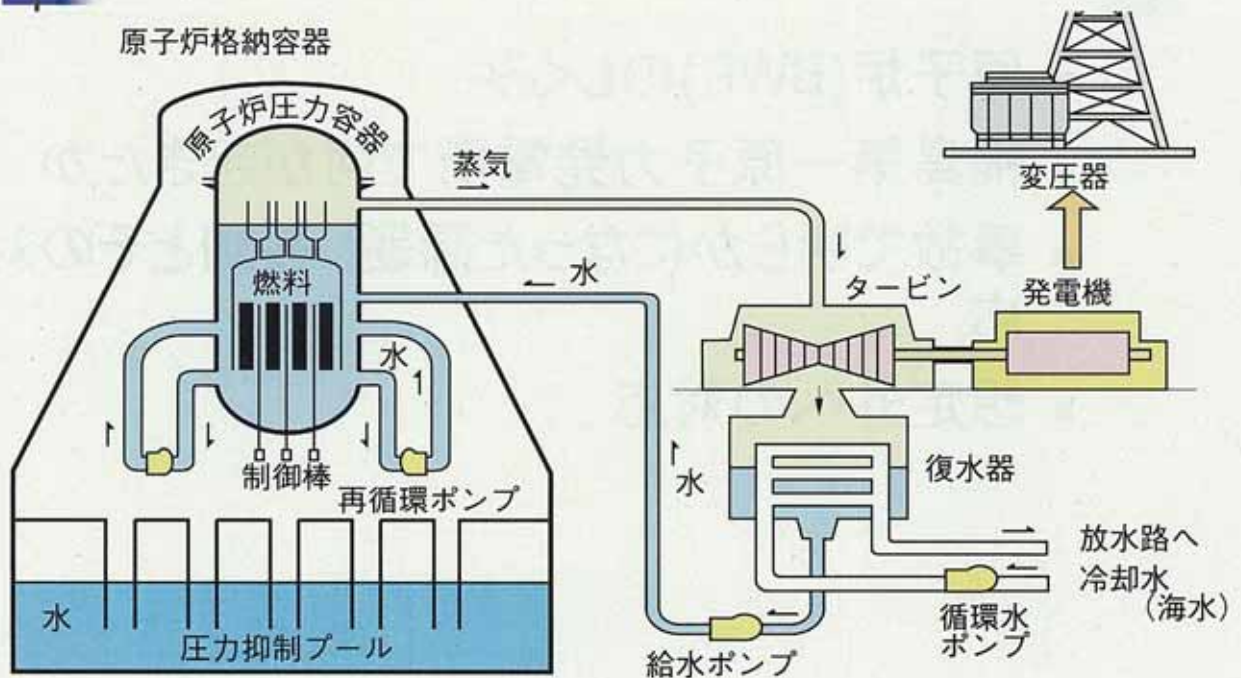
- 原子炉(BWR)のしくみ
- 福島第一原子力発電所で何が起きたか
- 事故で明らかになった課題、教訓とその対応
- 想定外への対応

2

# 原子炉(BWR)のしくみ

3

## BWRの概要

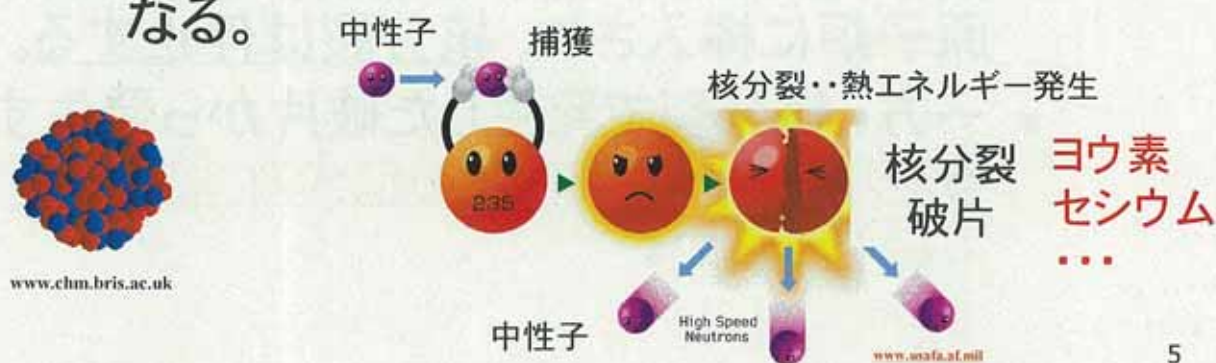


4



## 核分裂とは・・・

- ウラン235などに中性子が衝突すると、原子核が分裂する。この際、分裂破片(2個)と中性子(2~3個)がでてくる。
- 分裂破片および中性子は運動エネルギーを持っており、これが核分裂エネルギーとなる。



5

## 放射能、放射性物質と崩壊熱

- 核分裂でできた破片の多くは、不安定で、時間とともに変化(崩壊)する性質を持つ。
- この際に、強い放射線を出す性質を持っている。(放射線を出す能力、**放射能**)
- 放射線を出す物質を**放射性物質**と呼ぶ。
- また、変化(崩壊)する際に、わずかであるが、**熱**を発生する。(崩壊熱)
  - 例えば
    - ヨウ素131→キセノン131(8日間で約半分が変化)
    - セシウム137→バリウム137(約30年で約半分が変化)

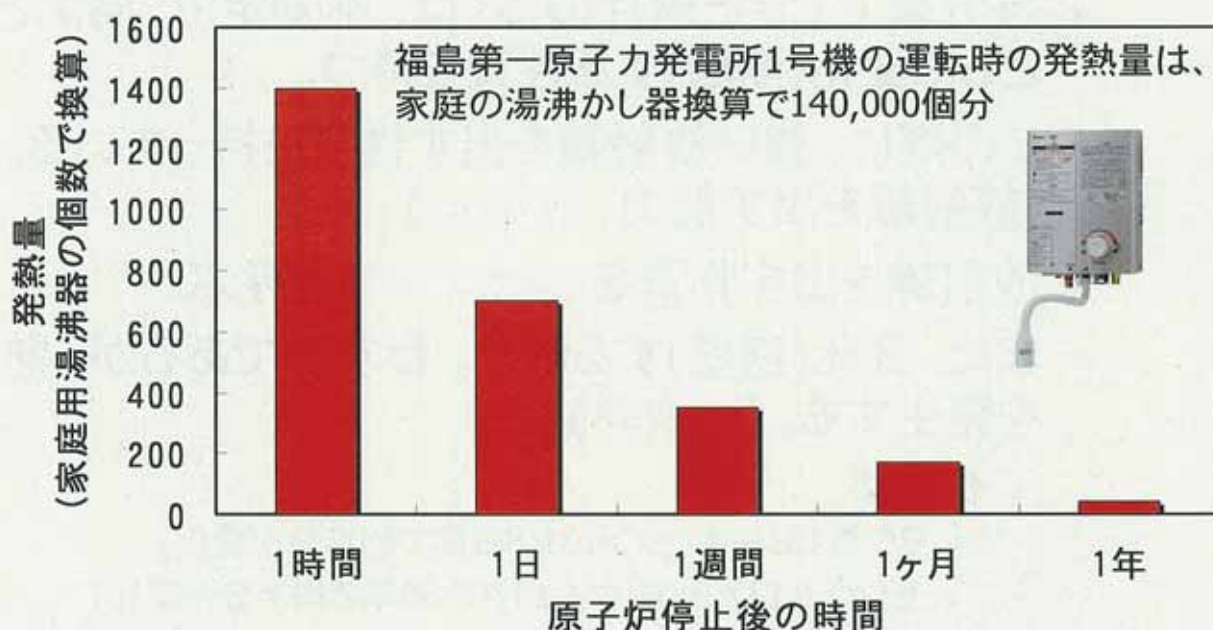
6

## 原子炉をなぜ冷やす必要があるか

- 原子炉は、以下の二つで熱を発生する。
  - ウランの核分裂
    - 大量の熱を発生する
  - 核分裂破片の変化(崩壊)
    - 核分裂に比べると少ないが、安全上重要
- 異常時には、中性子を吸収する制御棒が原子炉に挿入され、核分裂は停止する。
- 一方、核分裂で発生した破片から発生する崩壊熱は、時間とともに少なくなるが、零にはならない。

7

## 炉心で発生する崩壊熱(1号機)



8



# BWRの安全注入系

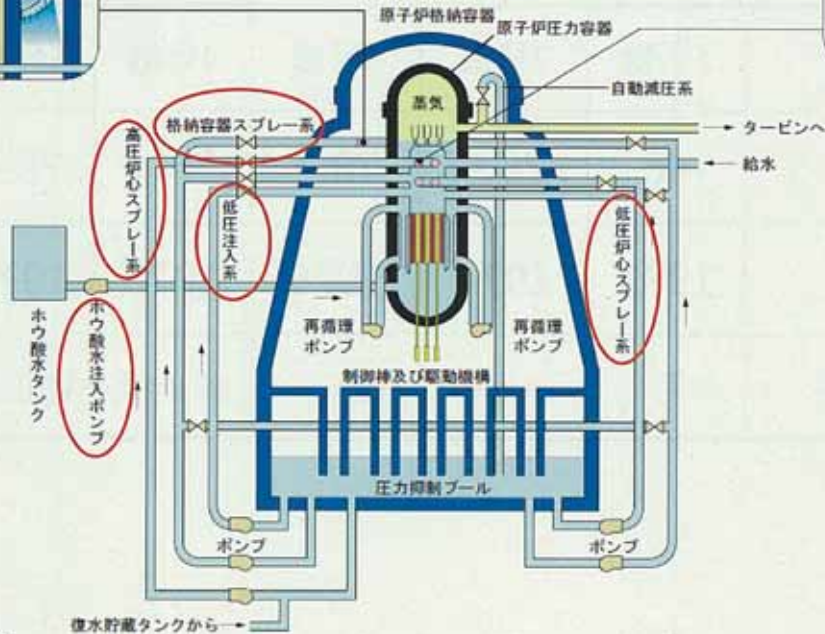
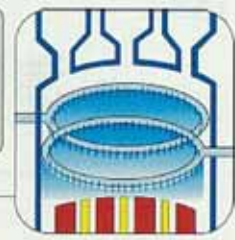


## 格納容器スプレー装置

格納容器の内壁に取り付けたドーナツ型の水管からも、水がシャワーのように流れて格納容器の内部を冷やします。これが格納容器スプレーです。

## 非常用炉心冷却装置

ドーナツ型の穴のあいた水管があって炉心の水が減ると、自動的にスプレーのように放水され燃料を冷やします。これが炉心スプレー系の冷却装置です。



「原子力・エネルギー」回面集

## 福島第一原子力発電所で何が起きたか

福島第一原子力発電所事故の概要を振り返り、何が問題だったかを認識する。

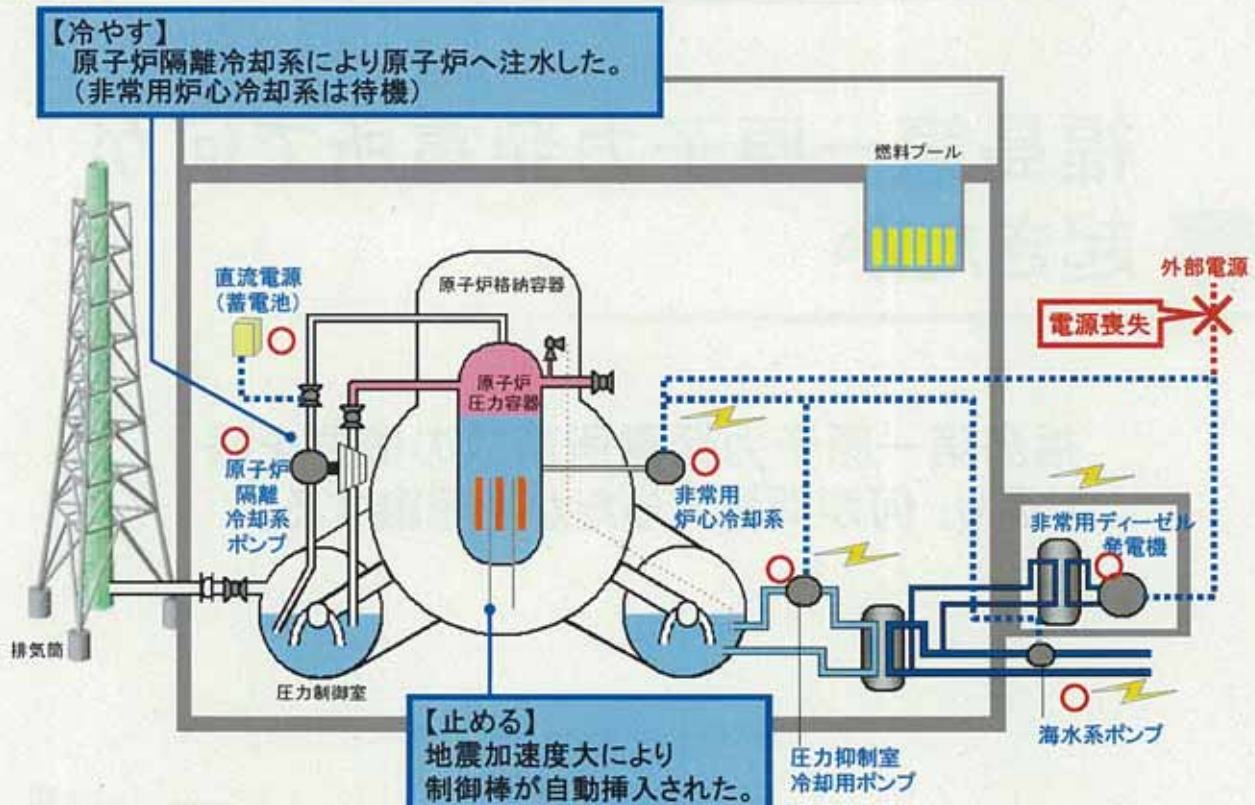
# 福島第一原子力発電所の概要

## ■ 沸騰水型軽水炉(BWR)

	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機
電気出力(万kW)	46	78.4	78.4	78.4	78.4	110.0
運転開始(年)	1971	1974	1976	1978	1978	1979
地震発生時の状態	運転中	運転中	運転中	停止中	停止中	停止中

11

## 地震発生直後の状況

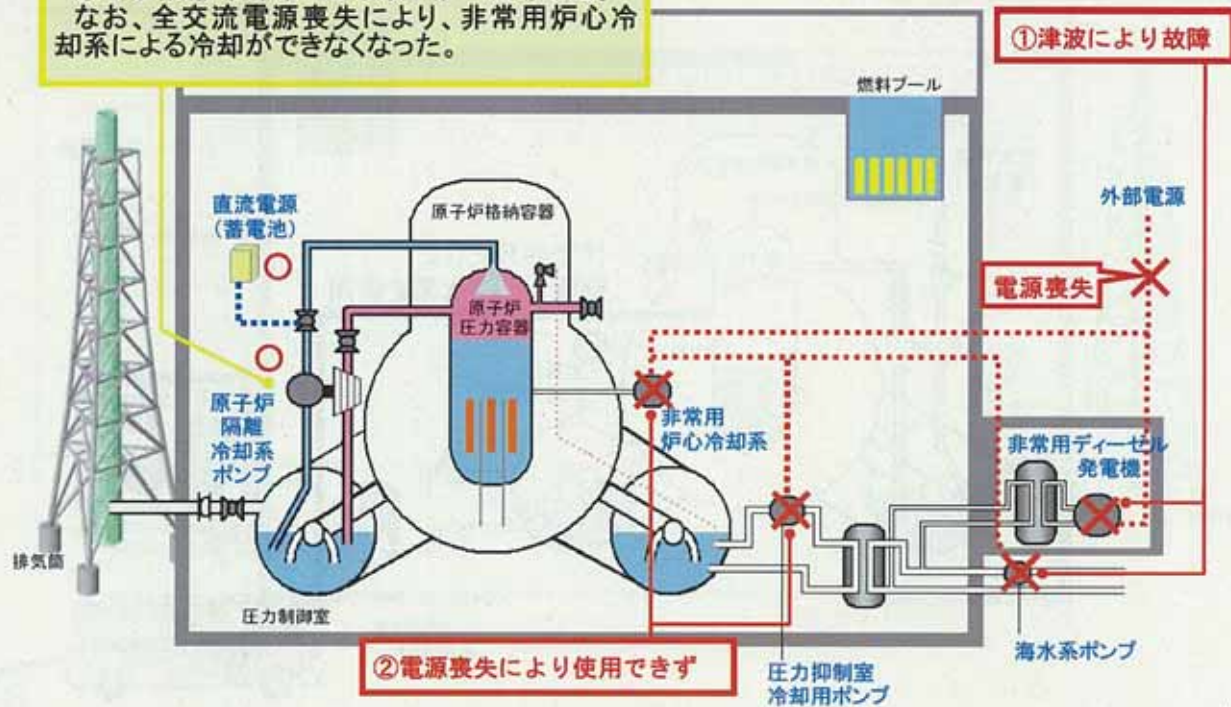




# 津波到達直後

## 【冷やす】

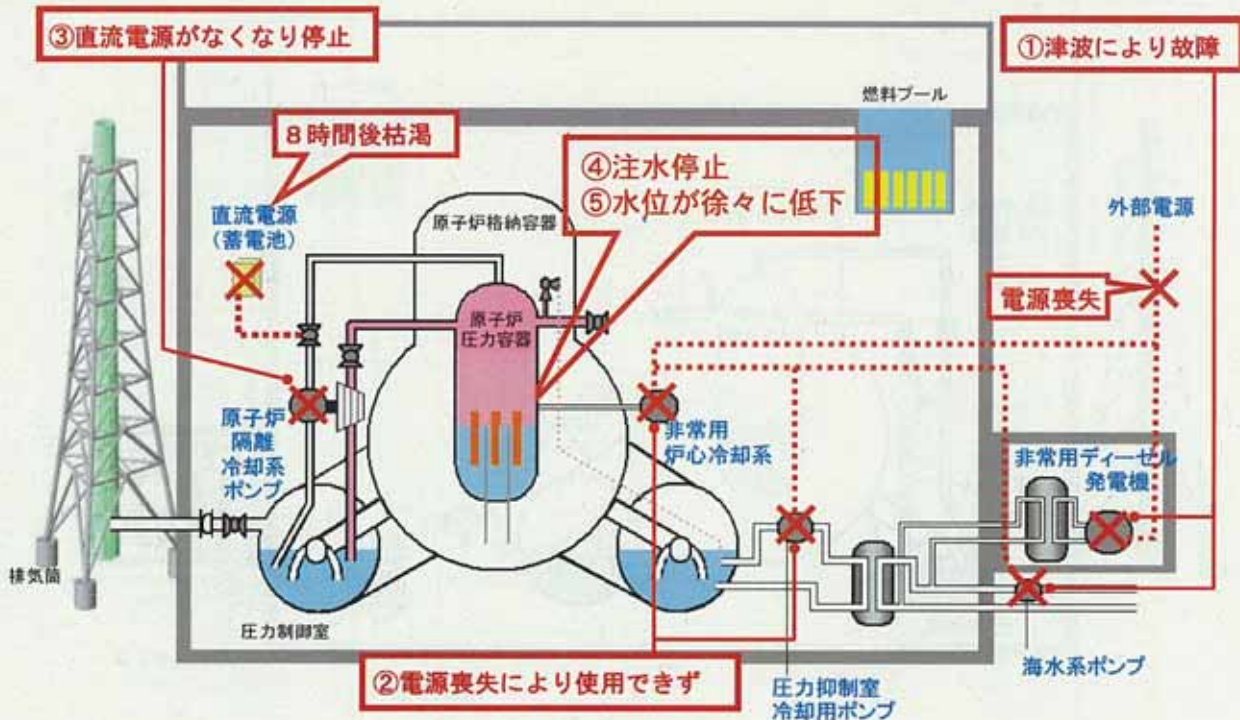
原子炉隔離冷却系により原子炉へ注水した。  
 なお、全交流電源喪失により、非常用炉心冷却系による冷却ができなくなった。



43

<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/event/documents/siryou3-4.pdf>

# 注水停止—原子炉内の水位低下

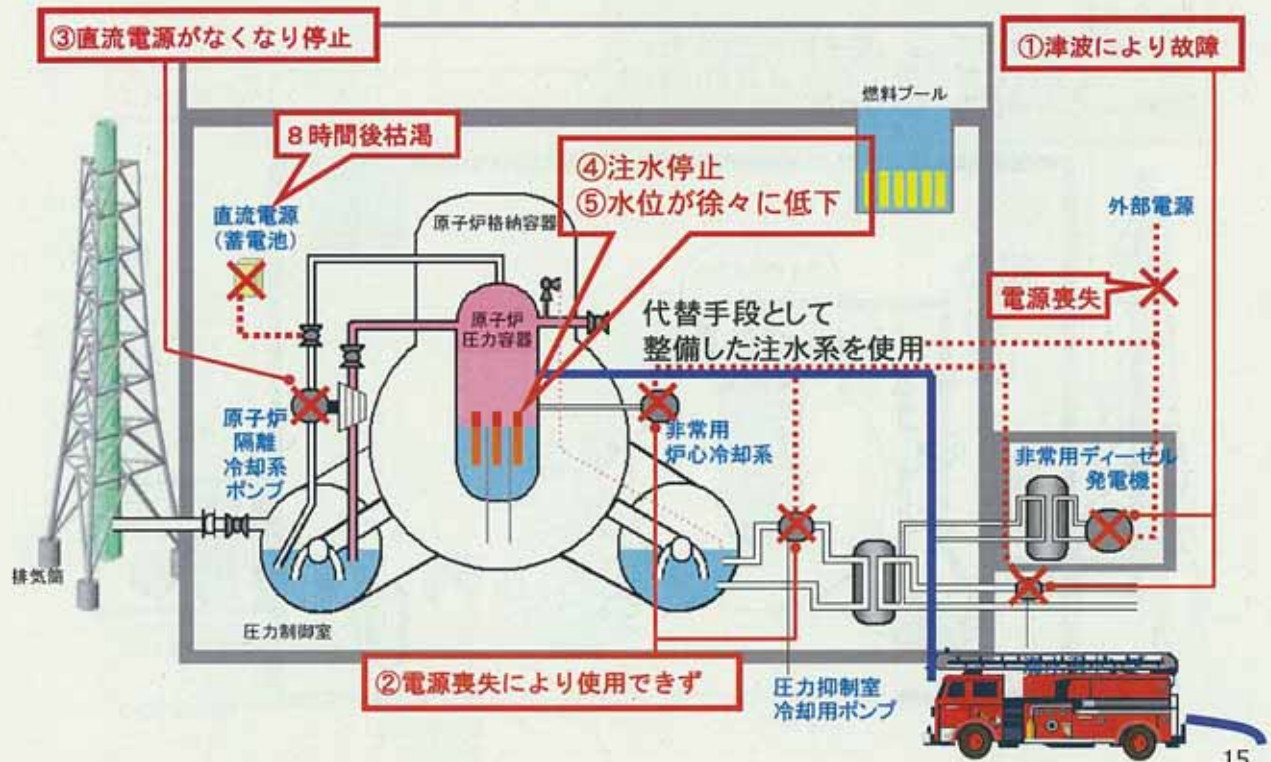


14

<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/event/documents/siryou3-4.pdf>に一部追加

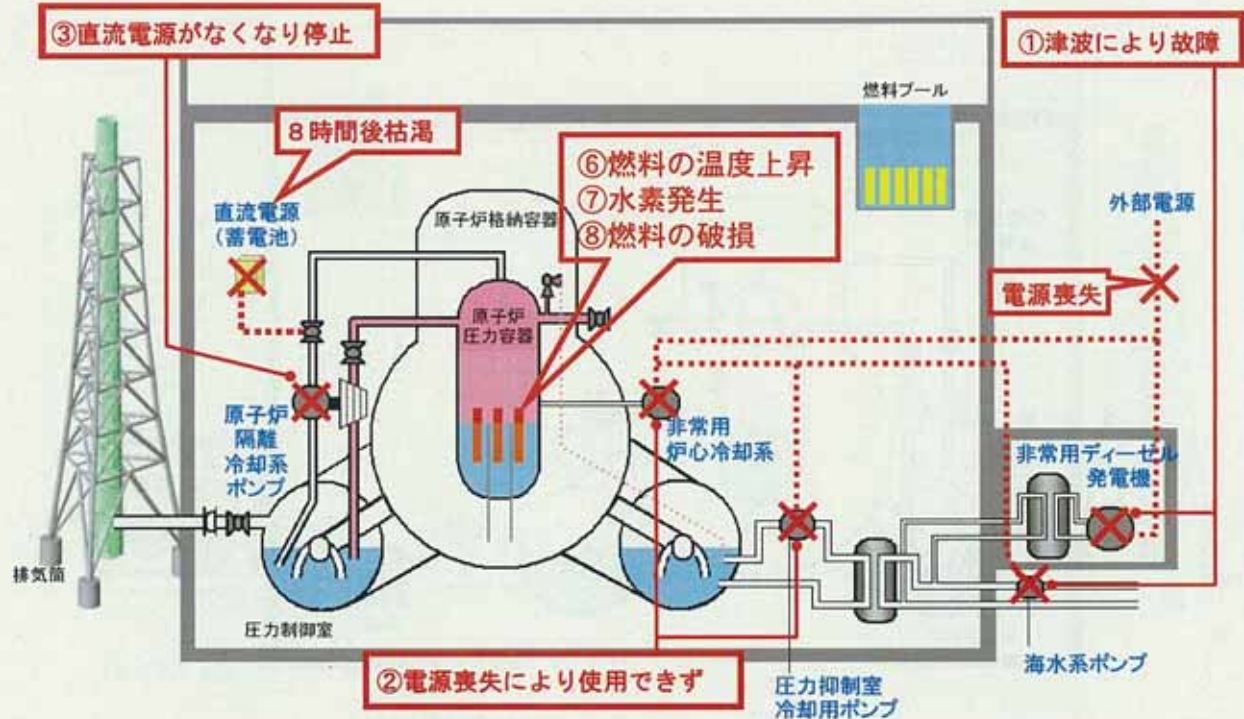


# 消防ポンプなどによる海水注入



<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/event/documents/siryou3-4.pdf>に一部追加

# 燃料の冷却不足—燃料の破損



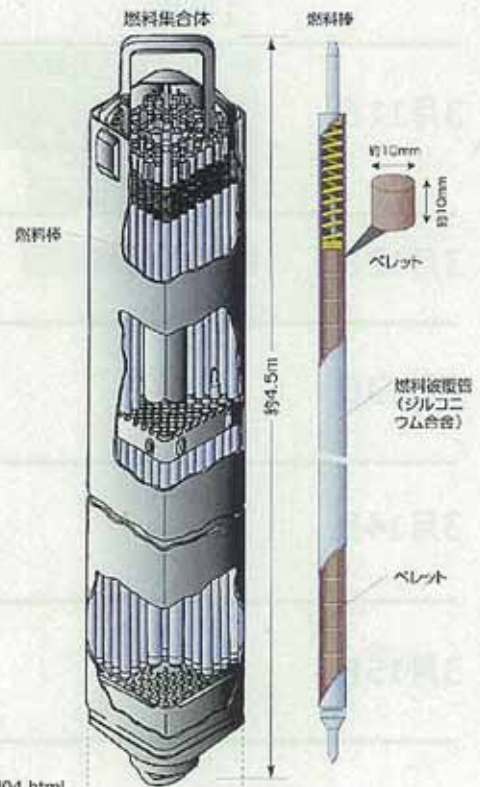
<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/event/documents/siryou3-4.pdf>に一部追加



# ジルコニウム-水反応

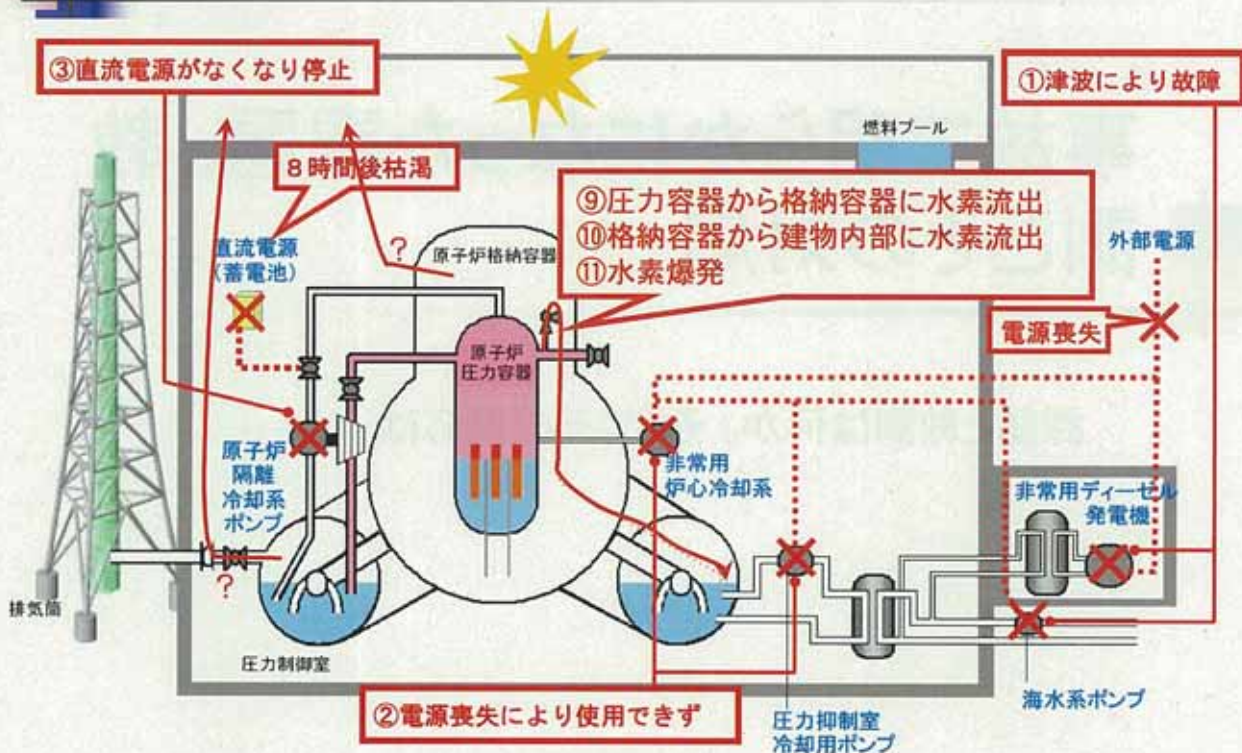
- ウラン燃料を覆っている薄い金属製の管(被覆管)の材料であるジルコニウム合金は、高温(900℃)になると、周りの水蒸気から酸素を奪い、酸化反応を起こす。

- $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$
- 発熱反応で、高温になるとさらに反応が加速



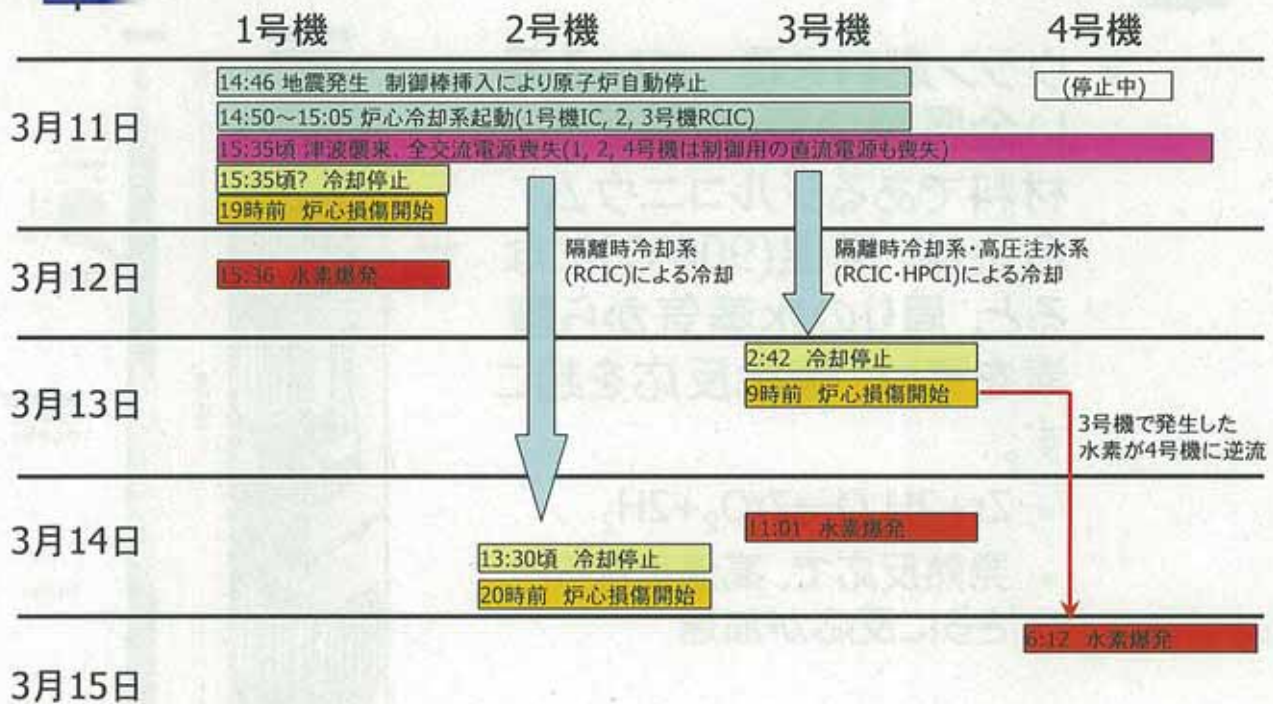
[http://www.tohoku-epco.co.jp/electr/genshi/gaiyo\\_higashi/build04.html](http://www.tohoku-epco.co.jp/electr/genshi/gaiyo_higashi/build04.html)

# 水素爆発による建物の破損





# 事故進展のまとめ(福島第一原発)



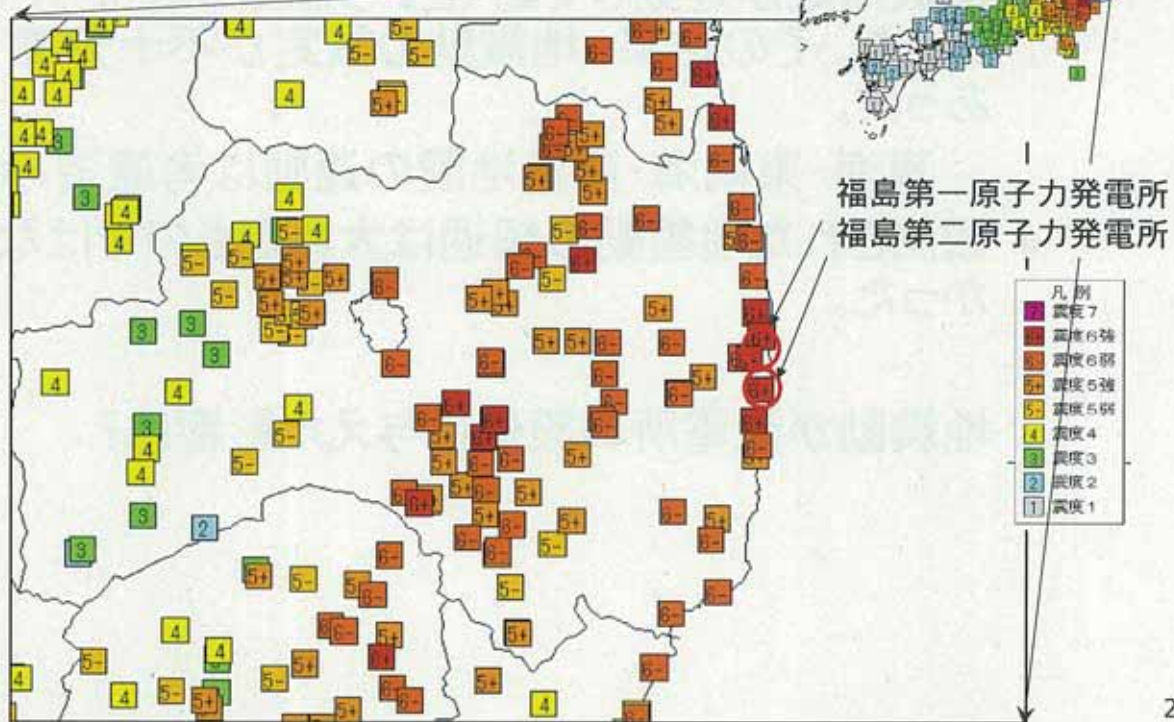
## 事故で明らかになった課題、教訓とその対応

課題と教訓は何か。そしてその対応は。



# 地震の概要

福島県周辺

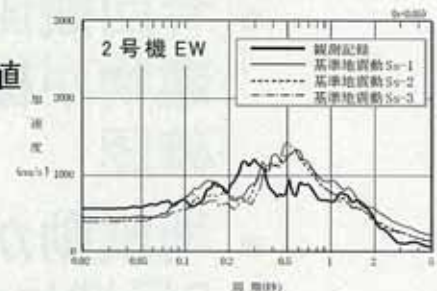
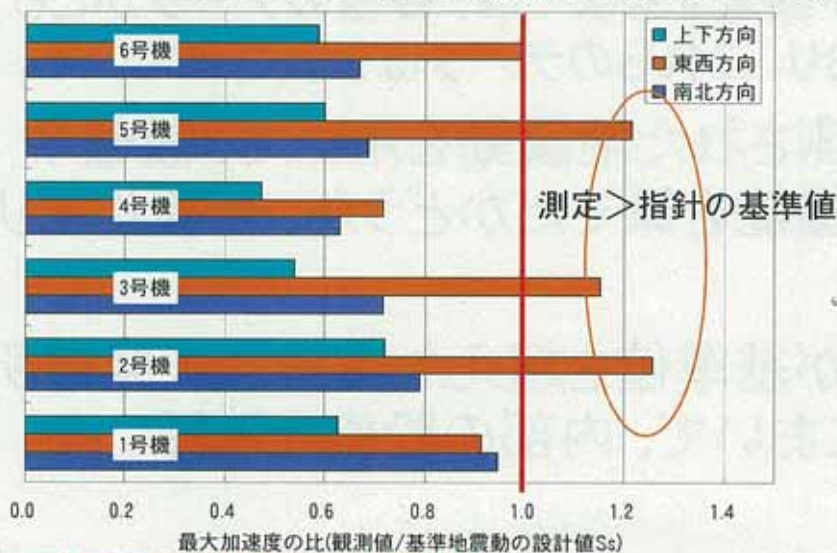


21

<http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/11b/kaisetsu201103111600.pdf>

# 地震動(課題)

- 福島第一、女川、東海第二原子力発電所において、観測された地震動(加速度)が耐震指針で基準となる地震動(加速度)を越えた。



22

<http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110401013/20110401013.pdf>  
を元に作成





## 地震動(教訓)

- 複数領域が連動して動くという想定が不十分であった。その結果、地震動の設定が不十分であった。
  - 東海・東南海・南海地震の連動は考慮済み。
- 観測された地震動の超過は大幅なものではなかった。
- 地震動が発電所の設備に与えた影響は？

23



## 発電所の設備への影響(確認方法)

- 津波が襲来するまでの圧力容器、格納容器内の温度や圧力変化、蒸気流量の確認
  - 津波が襲来するまでは、各種のデータがとられており、これらのデータは公開されている。
- 今回観測された地震動を用いて、設備や建物が機能を保てたかどうか、計算により確認
- 地震動が基準値を超えた福島第一発電所5号機において、内部の設備を確認

24



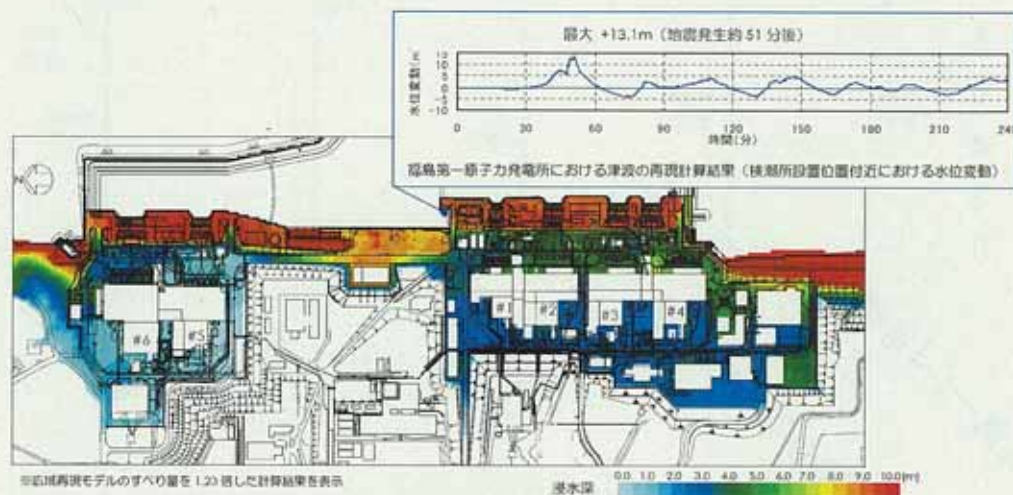
# 発電所の設備への影響(評価)

- 政府事故調報告書
  - 圧力容器、格納容器、冷却系(非常用復水器、隔離時冷却系、高圧注入系)、非常用ディーゼル発電機等の重要機器については、地震動で本来の機能を損なうような損傷を受けていないと推認される。
- 国会事故調報告書
  - 大規模な冷却材喪失事故が起きていないことは明白。
  - 安全上重要な機器の地震による損傷はないとは確定的には言えない。
- 原子力安全・保安院(技術的知見)
  - 安全上重要な機能を有する主要な設備のうち地震後に機能していたものは、今回の地震により機能に影響するような損傷は生じていないと考えられる。
  - 一方、今回の地震の影響により微少漏えいが生じるような損傷が安全上重要な機能を有する主要な設備に生じたかどうかについては、現時点で確かなことは言えない。

25

# 津波(課題)

- 考慮していた高さをはるかに越える津波に見舞われ、安全上重要な機器が同時に故障し、事故の悪化を防げなかった。



26

# 津波の影響(福島第一)

福島第一原子力発電所の屋外浸水状況

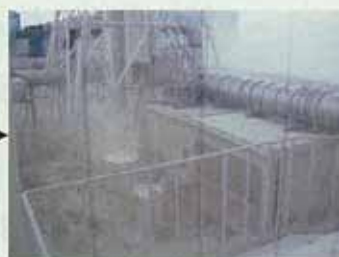
< 4号機南側集中環境施設プロセス主建屋付近：敷地高O. P. +1.0m、重油タンク高さ約5.5m >



撮影日：2011/3/11 15:42



撮影日：2011/3/11 15:42



撮影日：2011/3/11 15:43



撮影日：2011/3/11 15:43



撮影日：2011/3/11 15:43



撮影日：2011/3/11 15:44

[http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11\\_j/images/111202f.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/111202f.pdf)

# 津波高さの比較





## 津波(教訓と対策)

- 想定している津波高さが全く不十分。
- 設計基準津波の設定方法について、改定案を検討中(新安全基準)
- 津波に関する確率論的安全性評価の標準的な手順を日本原子力学会で策定。今後安全評価に活用。

29

## 電源喪失(課題)

- 通常電源・非常用電源に加え、電源盤などの多くが使用できなくなり、原子炉の状態が分からなくなり、また安全上重要な機器が動かなくなった。



平成22年8月25日 東京電力提供

30

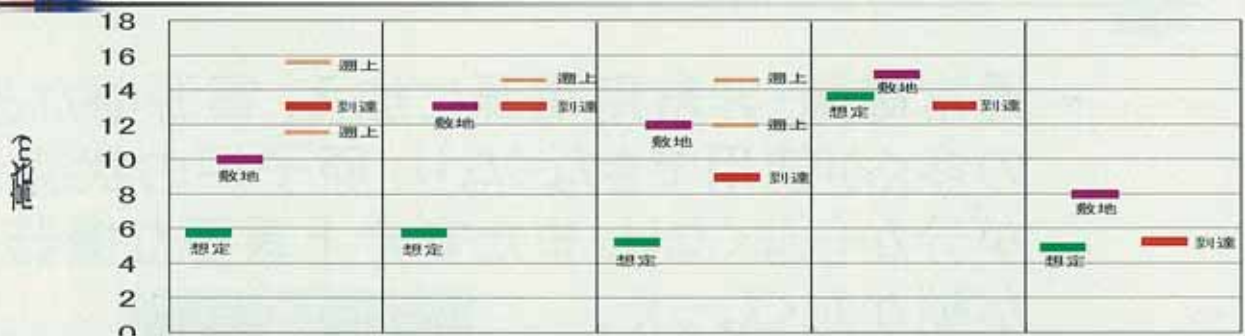


## 被災後の電源・冷却状態の比較

	福島第一 1-4号機	福島第一 5, 6号機	福島第二 1-4号機	女川 1-3号機	東海第二
通常電源	×	×	○	○	×
非常用 電源 (ディーゼル発 電機)	×	○ (5台中4台×)	1, 2号機 × (6台中6台×) 3, 4号機 ○ (6台中3台×)	○ (8台中2台×)	○ (3台中1台×)
電源車	×	○ (一部使用)	○ (一部使用)	不要	不要
通常電源 復旧	×	×	○ 当初から	○ 当初から	3/13 19:37 に復旧
冷却系統	高圧 × 低圧 ×	高圧 不要 低圧 ○	高圧 ○ 低圧 ○	高圧 ○ 低圧 ○	高圧 ○ 低圧 ○
最終状態	過酷事故	冷温停止	冷温停止	冷温停止	冷温停止

31

## 津波高さと電源状態の比較



	福島第一 1-4号機	福島第一 5, 6号機	福島第二 1-4号機	女川 1-3号機	東海第二
非常用 電源 (ディーゼル発 電機)	×	○ (5台中4台×)	1, 2号機 × (6台中6台×) 3, 4号機 ○ (6台中3台×)	○ (8台中2台×)	○ (3台中1台×)
非常用 発電機 位置	タービン 建屋 B1F	タービン建屋 B1F、 専用建屋1F	コントロール 建屋B2F	コントロール 建屋B3F、 原子炉建屋 1F	コントロール 建屋B1F
状態	過酷事故	冷温停止	冷温停止	冷温停止	冷温停止

32





## 電源喪失(教訓)

- 通常(外部)電源を信頼しすぎており、その結果として、長時間にわたり通常(外部)電源が停電することに対して準備が不足していた
- 長期間にわたり、通常電源・非常用電源がともに停電する「全交流電源喪失」に対する準備が不足していた
- 非常用電源や電源盤の「多様性」と「独立性」が不足していた
- 原子炉の状態を監視するセンサーを動かすために必要となる直流電源(バッテリー)が切れた(枯渇した)時の代替手段が不足していた

33

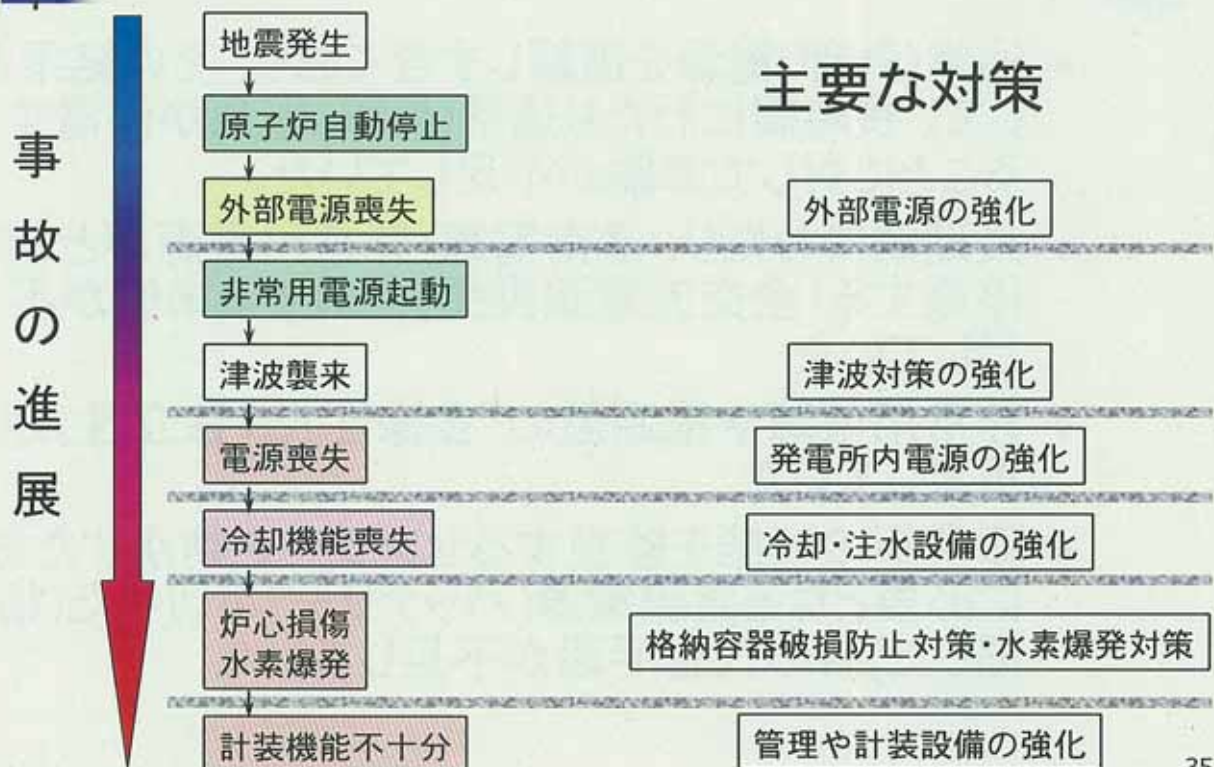


## 電源喪失(対策)

- 所内電源の信頼性向上
  - 電気設備を位置的に分散して配置
  - 電気設備の浸水対策(建物の水密化など)
  - 多様な手段による交流電源の供給(高台へのガスタービン発電機の設置、大容量電源車など)
  - 電源車などからの電源供給を容易にする
  - 重要な電気設備品の予備を備蓄
- 外部電源の信頼性向上
  - 複数のルートで電源供給
  - 変電所や開閉所の電気設備の耐震性向上

34

# 事故の進展と主要な対策の関係



<http://www.nisa.meti.go.jp/shingikai/800/28/008/8-2-2.pdf>

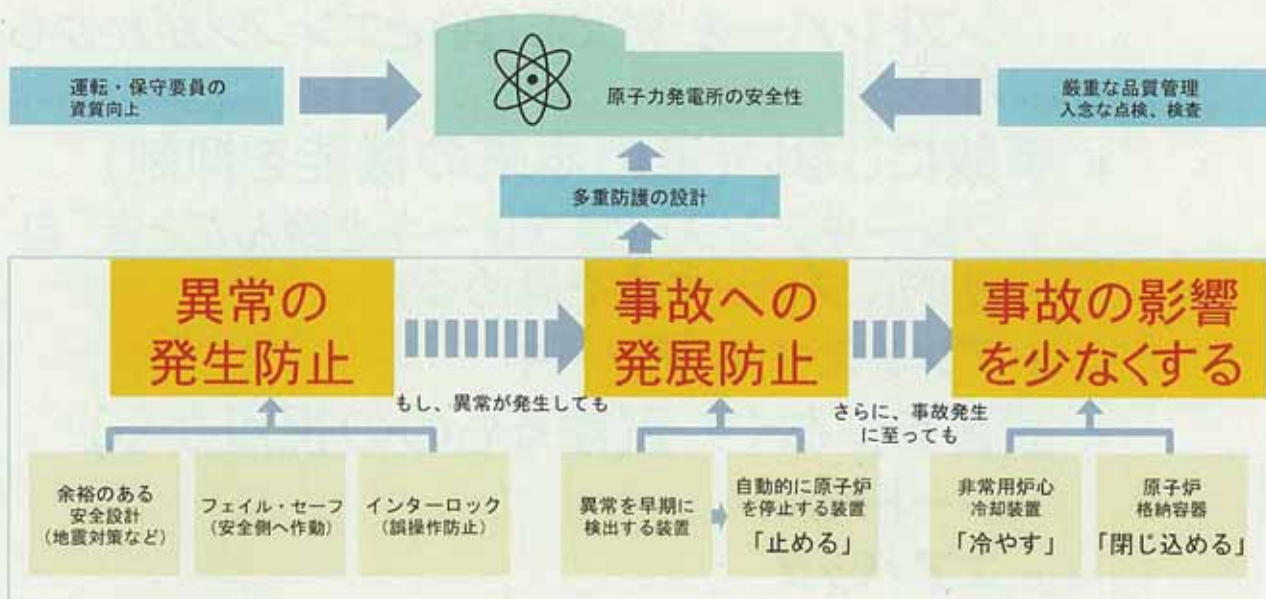
35

## 深層防護：原子力発電所の安全 対策の考え方

36



# 原子炉の安全設計の考え方



# 原子力の安全確保のためのキーワード


- 深層防護
- 多重性、多様性、独立性



## 安全確保のしくみ(自動車の場合)

- 異常をおこさない(車の機能で実現)
  - シフトレバーを“P”にしないとエンジンがかからない
- 事故にしない(車の本来の機能を抑制)
  - ブレーキアシスト(急ブレーキを踏んだとき、自動的にブレーキ力を高める)
  - アンチスキッドブレーキ
- 被害を少なくする(護るものの視点から)
  - シートベルト
  - エアバッグ

39



## 安全設計における深層防護

- 第一層:異常の発生を防止する。
- 第二層:(仮に異常が発生した場合でも)事故への発展を防止する。
- 第三層:(仮に事故が発生した場合でも)事故の影響を緩和する。
- 第四層:(仮に設計時に考慮していた事故を越えて)過酷事故になった場合でも影響を緩和する。
- 第五層:(仮に過酷事故が発生したとしても)防災などにより周辺への影響を緩和する。

40





## 多重性、多様性、独立性

- 多重性
  - 同じ働きをもつ同じ原理の機器を複数用意しておく
  - 例: 非常用ディーゼル発電機を3台用意する
- 多様性
  - 同じ働きを持つ別の原理の機器を複数用意しておく
  - 例: ガスタービン発電機を用意しておく
- 独立性
  - 機器を別々の場所に設置する
  - それぞれの機器が他の機器の助けなしで働くようにする
  - 例: 非常用ディーゼル発電機を別の水密区画に配置する
  - 例: ガスタービン発電機を原子炉の建物とは別の場所に設置する

41



## 津波対策の基本的な考え方

- 発電所敷地内への津波の浸入を防ぐ
- 仮に敷地内に海水が進入しても、建物への侵入を防ぐ
- 仮に建物の中に海水が侵入しても、冷却する機能を確保する

42



## 国によるこれまでの対応

---

旧原子力安全・保安院、原子力規制  
委員会を中心に

43



## 旧保安院の対応(緊急安全対策)

---

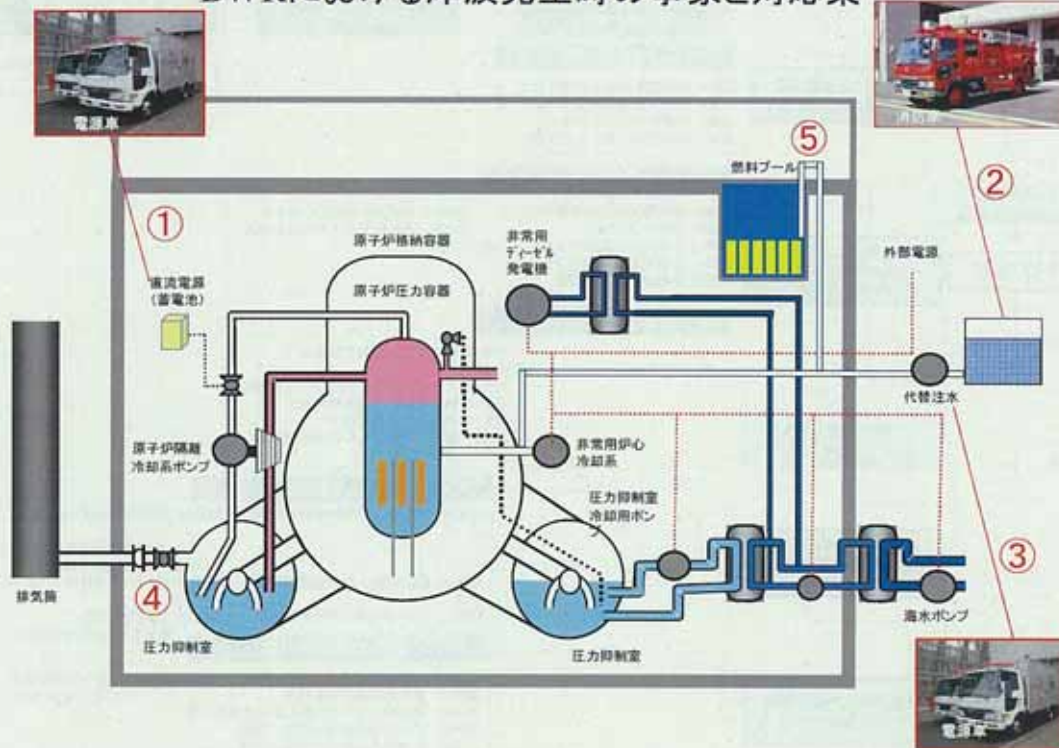
- 平成23年3月30日に旧原子力安全・保安院が事業者に通達。
- 1ヶ月程度での対策を求める。
- 「津波により3つの機能(全交流電源、海水冷却機能、使用済み燃料貯蔵プールの冷却機能)を全て喪失したとしても、炉心損傷や使用済み燃料の損傷を防止し、放射性物質の放出を抑制しつつ冷却機能の回復を図ること。」

44



# 旧保安院の対応(緊急安全対策)

## BWRにおける津波発生時の事象と対応策



<http://www.meti.go.jp/press/20110330004/20110330004.pdf>

45

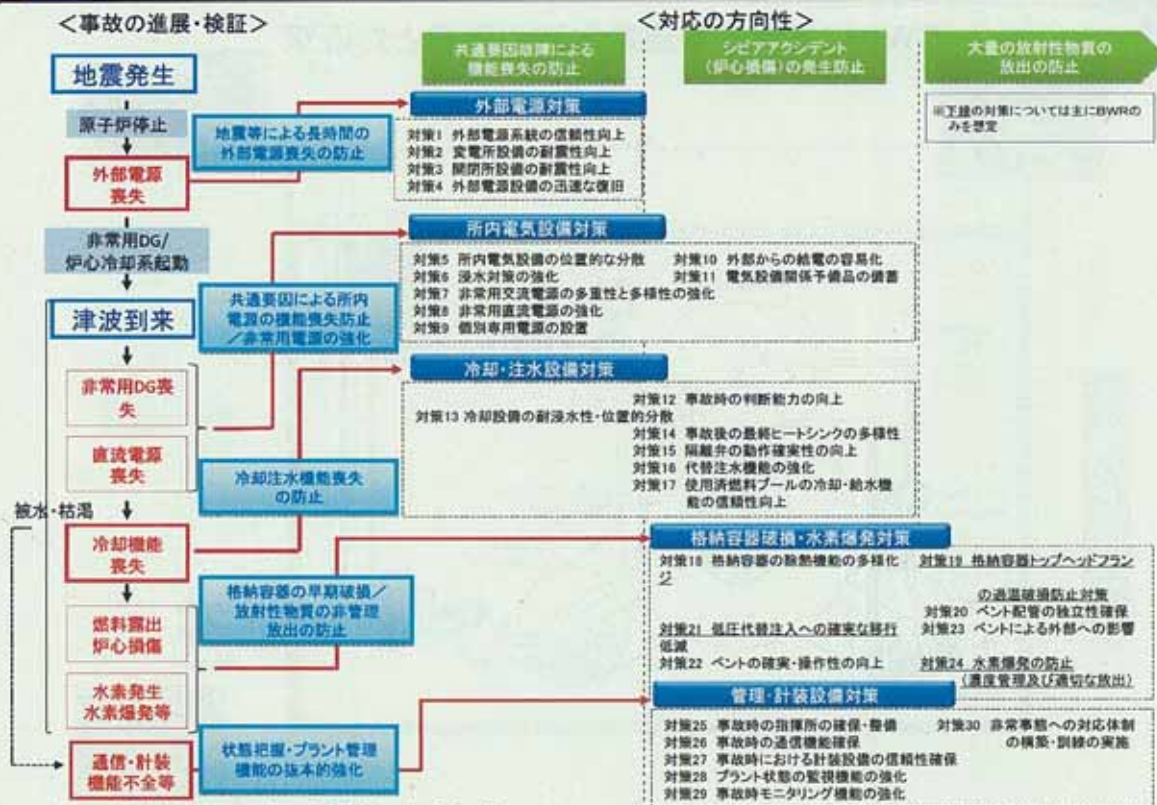
# 旧保安院の対応(技術的知見)

- 福島第一の事故を分析し、技術的な課題を検討・整理、とりまとめたもの。(平成23年10月～平成24年2月に検討を実施)
- 検討内容
  - 事故の各段階における重要機器の動作状況及び事故対応に必要な資機材の不足・不具合を整理
  - これらの不具合・不足の再発防止策を検討
- 内容は新安全基準に反映されている

<http://www.atom.pref.fukui.jp/senmon/report2012siryou/no2-1.pdf>

46

# 旧保安院の対応(技術的知見)



47

# 旧保安院の対応(シビアアクシデント規制の考え方)

- 従来、規制対象となっていなかったシビアアクシデントについて、規制の考え方を検討。(平成24年2月～8月に検討を実施)
- 原子力規制委員会において策定中の新安全基準(骨子案)にその考え方が活用されている。

48



# 旧保安院の対応(シビアアクシデント規制の考え方)

原子力防災 (深層防護 第5層)

放射性物質放出・拡散抑制 (深層防護 第4-2層)

格納容器損傷の防止 (深層防護 第4-1層)

著しい炉心損傷の防止 (深層防護 第3-2層)

事故の影響を緩和 (深層防護 第3-1層)

事故への拡大を防止 (深層防護 第2層)

異常・故障の発生を防止 (深層防護 第1層)

従来の設計上の想定

49

## 原子力関連法の改正

- 改正原子力基本法
  - 前項の安全の確保については、確立された国際的な基準を踏まえ、**国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全**並びに我が国の安全保障に資することを目的として、行うものとする。
- 改正原子炉等規制法
  - 大規模な自然災害及び**テロリズムその他の犯罪行為**の発生も想定した必要な規制を行う
  - 原子力施設において**重大な事故が生じた場合に放射性物質が異常な水準で当該原子力施設を設置する工場又は事業所の外へ放出されること**その他の核原料物質、核燃料物質及び原子炉による災害を**防止し**、
- 人と環境を護ることを明示
- 過酷事故の発生を前提とし、規制の対象とする
- 最新の知見を既存の発電所に適用(バックフィット)

50



# 原子力規制委員会 新安全基準(骨子案)

- 深層防護の考え方の徹底
  - 複数の安全対策を用意し、それらが共倒れにならないように配慮する
- 自然現象等による共通の原因による故障の想定とその防護対策を大幅に引き上げ
  - 地震・津波の評価の厳格化、津波浸水対策の導入
  - 多様性・独立性を十分に配慮
- 「炉心損傷防止」、「格納容器機能維持」、「ベントによる管理放出」、「放射性物質の拡散抑制」という多段階の対策を用意
- 使用済み燃料プールにおける安全対策を強化
- 意図的な航空機落下等に備えて原子炉建屋とは独立な「特定安全施設」を導入

51

# 原子力規制委員会 新安全基準(骨子案)

<従来の安全基準>

<新安全基準>

炉心損傷に至らない状態を想定した  
設計上の基準(設計基準)  
(単一の機器の故障のみを想定等)

自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
信頼性に対する考慮
電源の信頼性
冷却設備の性能
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

放射性物質の拡散抑制
意図的な航空機衝突への対応
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)
自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
信頼性に対する考慮
電源の信頼性
冷却設備の性能
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

(シビアアクシデント対策)  
新設

強化

強化





## まとめ

- 原子炉(BWR)のしくみ
- 福島第一原子力発電所で何が起きたか
- 事故で明らかになった課題、教訓とその対応
- 規制の対応状況

53



## 参考

- 新安全基準関係(原子力規制委員会)
  - [http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0027\\_05.pdf](http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0027_05.pdf)
  - [http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0027\\_06.pdf](http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0027_06.pdf)
  - [http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0027\\_07.pdf](http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0027_07.pdf)
  - [http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0027\\_08.pdf](http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0027_08.pdf)
- シビアアクシデント対策規制の基本的考え方(原子力安全・保安院)
  - <http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan2012/genan035/siryo2.pdf>
- 東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について(中間とりまとめ)(原子力安全・保安院)
  - <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/800/28/008/8-2-1.pdf>
- 緊急安全対策(経済産業省)
  - <http://www.meti.go.jp/press/20110330004/20110330004.pdf>
- IAEA関係会議に対する日本政府の報告
  - [http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea\\_houkokusho.html](http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html)
  - <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/backdrop/20110911.html>
- 国会事故調報告書
  - <http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naaic.go.jp/report/>
- 政府事故調報告書
  - <http://www.kantei.go.jp/jp/noda/actions/201207/23kenshou.html>
- 東電事故調報告書
  - <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/interim/index-j.html>
- Team H2Oプロジェクト(大前レポート)
  - [http://pr.bbt757.com/pdf/conclusion\\_111227.pdf](http://pr.bbt757.com/pdf/conclusion_111227.pdf)
- 日本原子力技術協会報告書
  - [http://www.gengikyo.jp/report/tohoku\\_F1jiko\\_Houkoku.html](http://www.gengikyo.jp/report/tohoku_F1jiko_Houkoku.html)
- 米国原子力発電協会「特別報告(追録):福島第一事故からの教訓」(和訳)
  - [http://www.gengikyo.jp/report/tohoku\\_F1jiko\\_INPO\\_report.html](http://www.gengikyo.jp/report/tohoku_F1jiko_INPO_report.html)
- 福島第一原発事故と4つの事故調査委員会
  - [http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo\\_3526040\\_po\\_0756.pdf?contentNo=1](http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_3526040_po_0756.pdf?contentNo=1)

54

