

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

2013.10.20

1



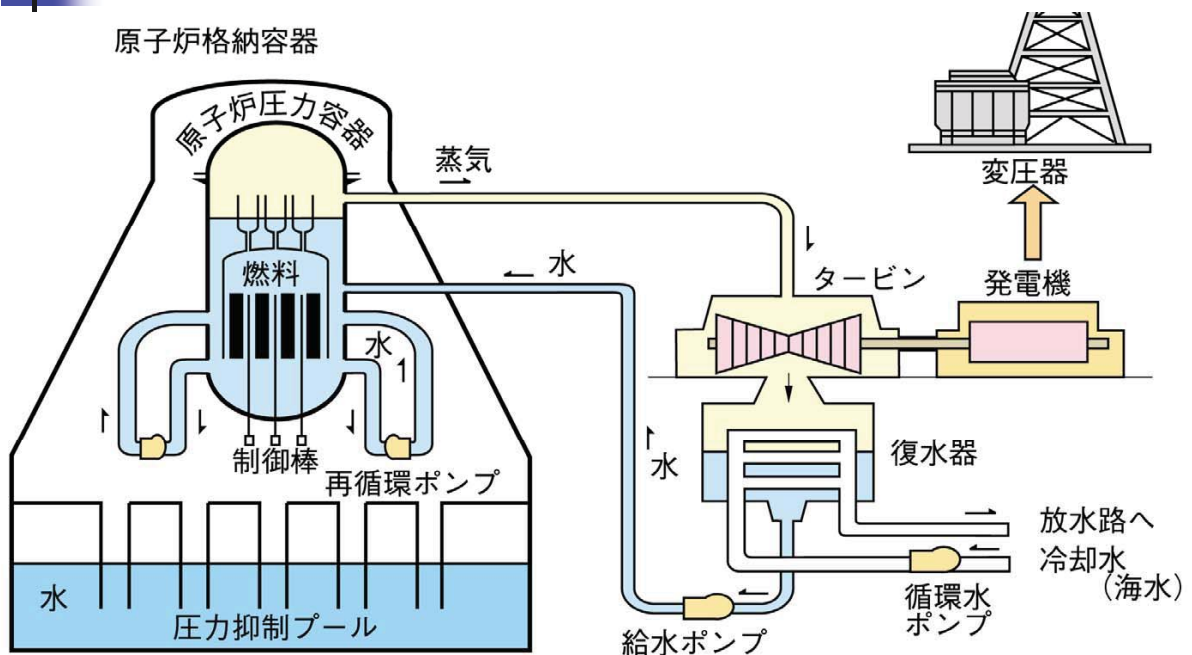
概要

- 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
- 新規制基準の概要

原子炉(BWR)のしくみ

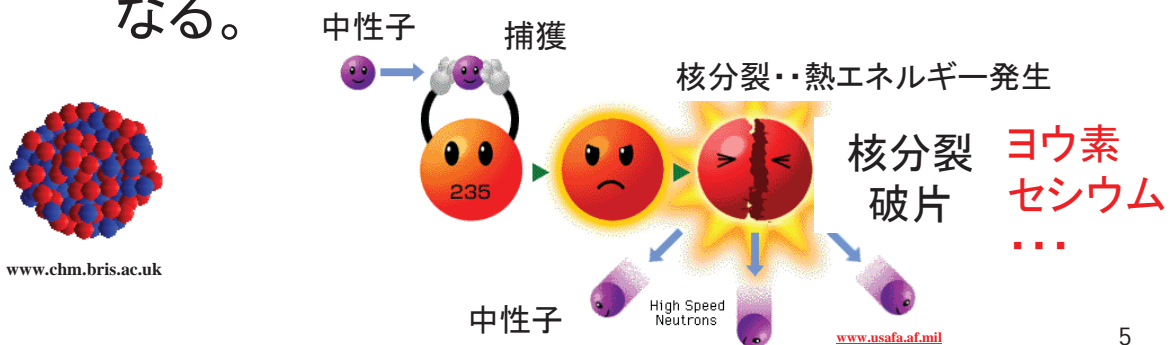
3

BWRの概要



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)

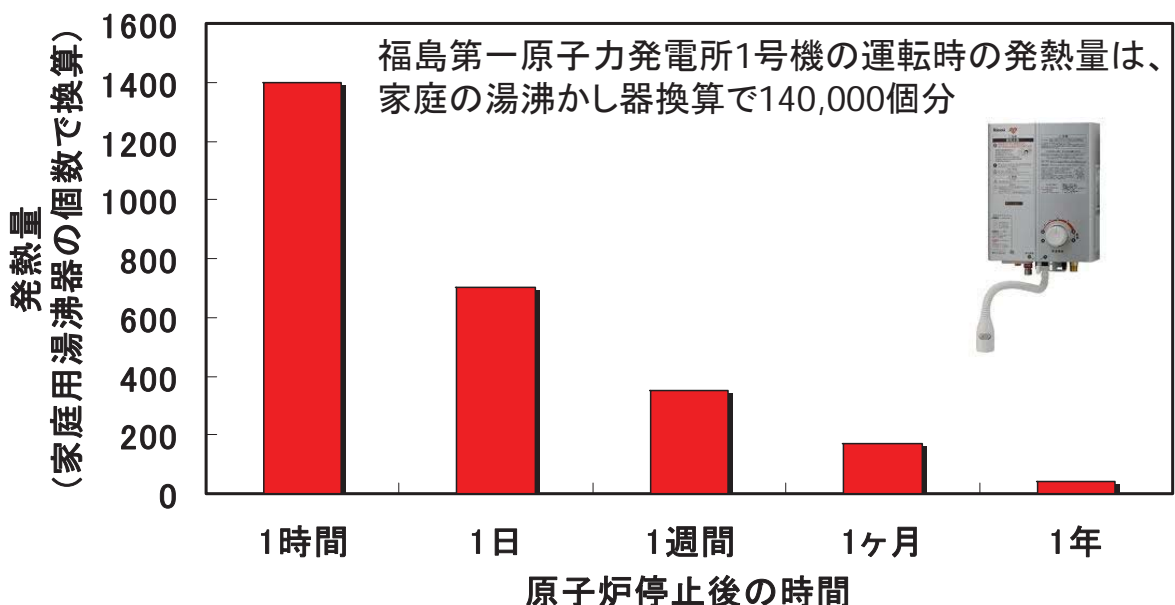
6

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。

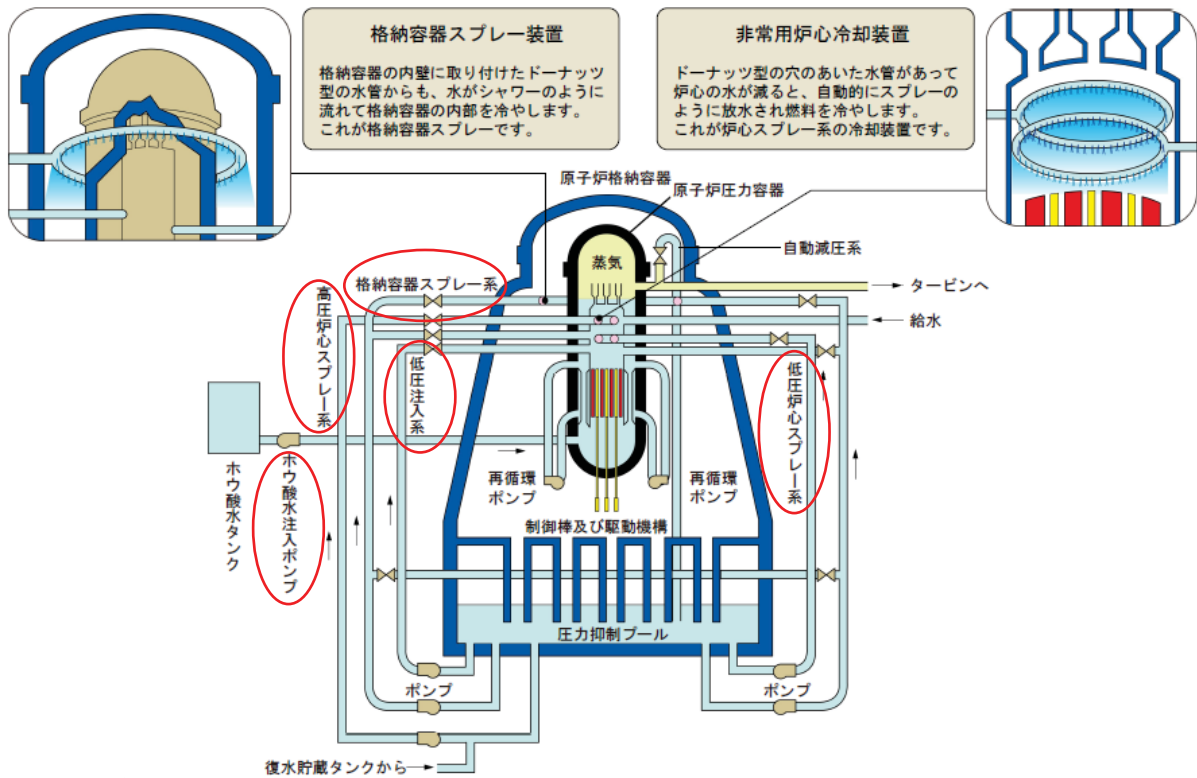
7

炉心で発生する崩壊熱(1号機)



8

BWRの安全注入系



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。

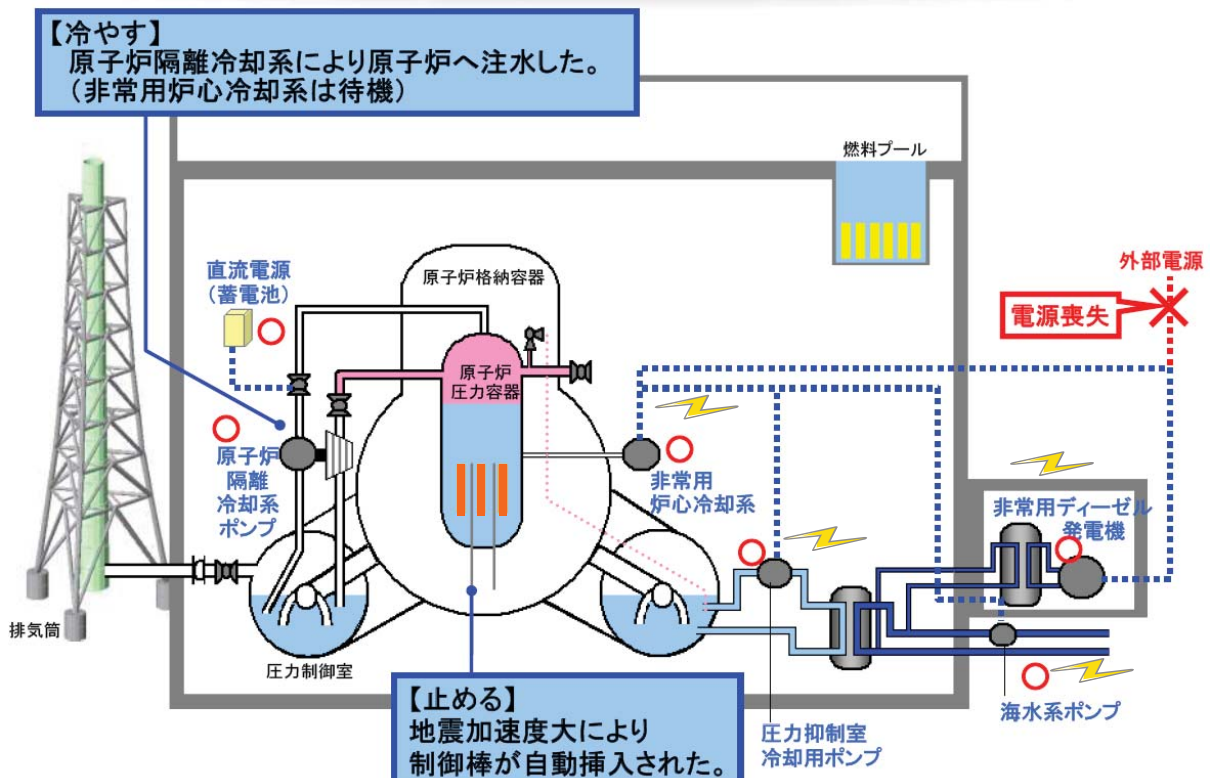
福島第一原子力発電所の概要

■ 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

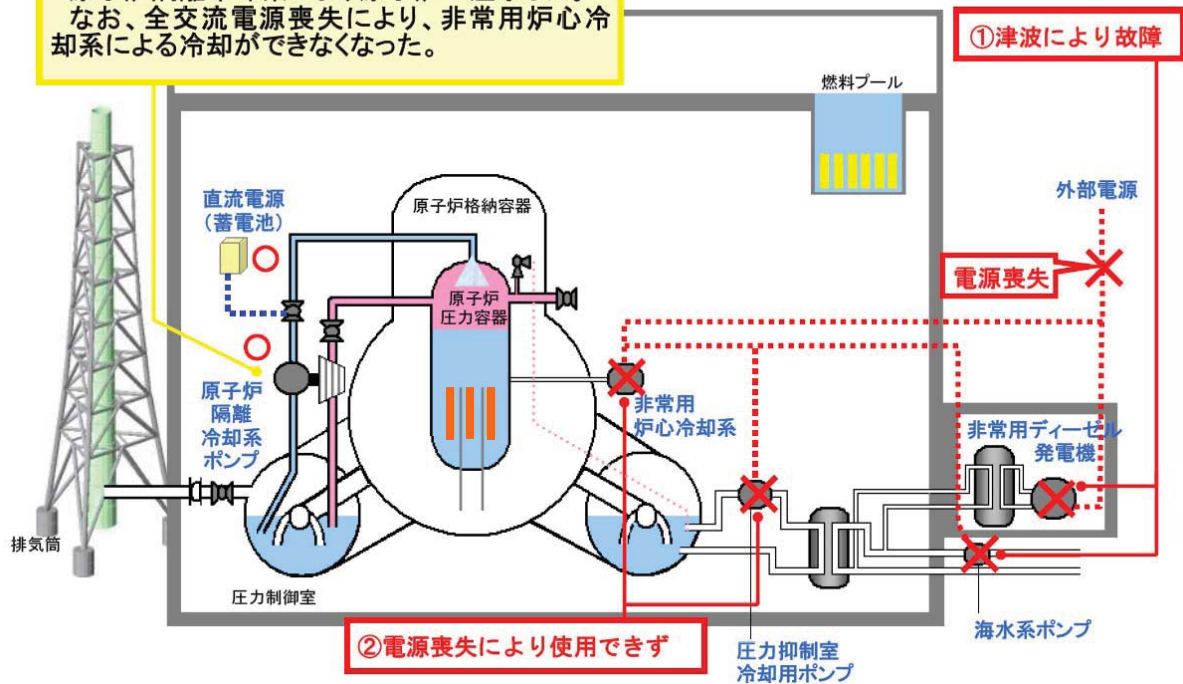
11

地震発生直後の状況



津波到達直後

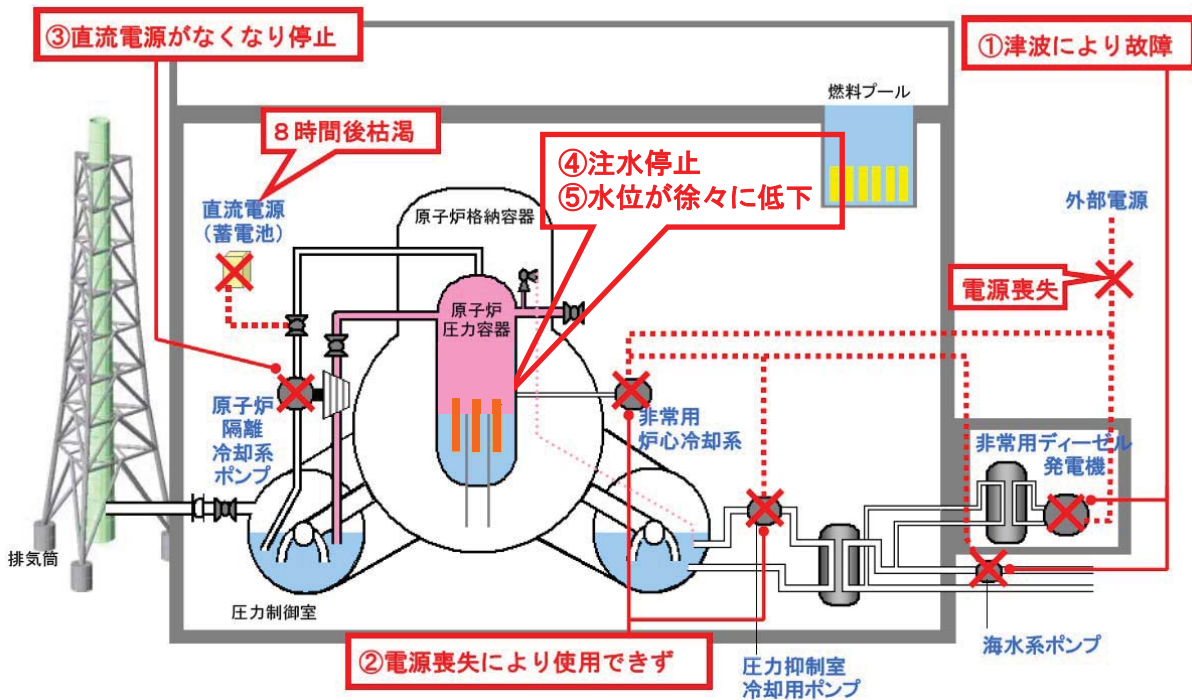
【冷やす】
原子炉隔離冷却系により原子炉へ注水した。
なお、全交流電源喪失により、非常用炉心冷却系による冷却ができなくなった。



<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/event/documents/siryu3-4.pdf>

13

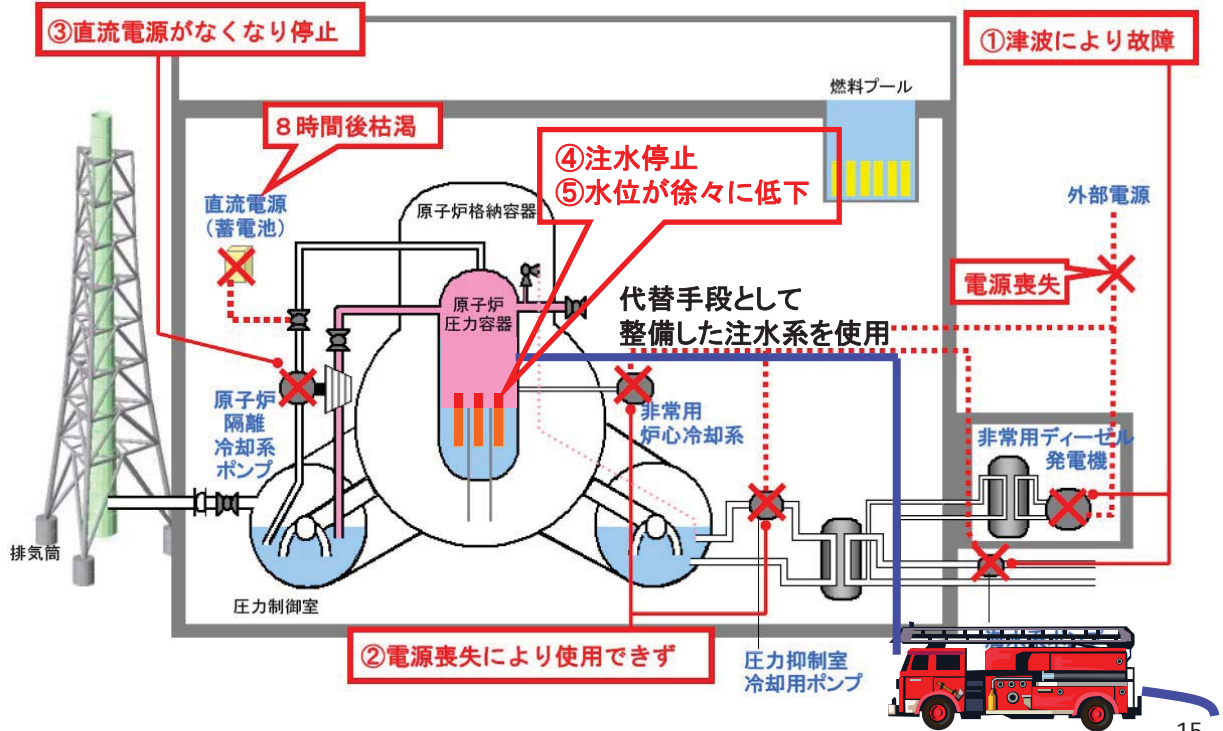
注水停止—原子炉内の水位低下



<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/event/documents/siryu3-4.pdf>に一部追加

14

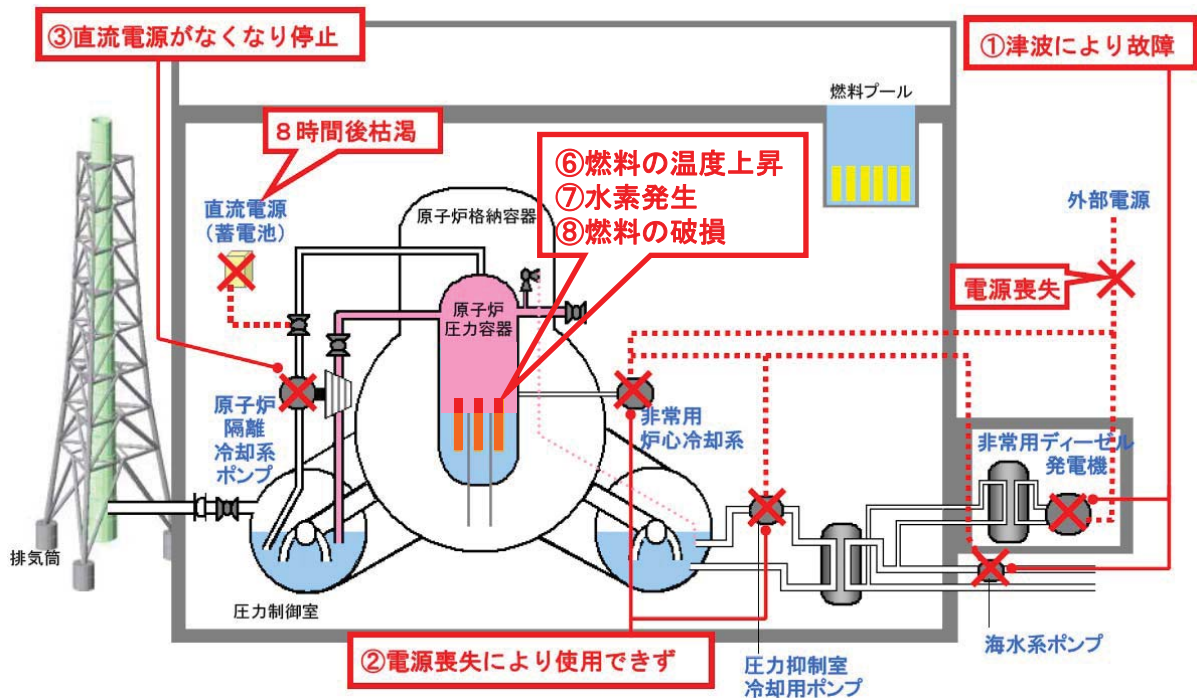
消防ポンプなどによる海水注入



15

<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/event/documents/siryu3-4.pdf>に一部追加

燃料の冷却不足—燃料の破損



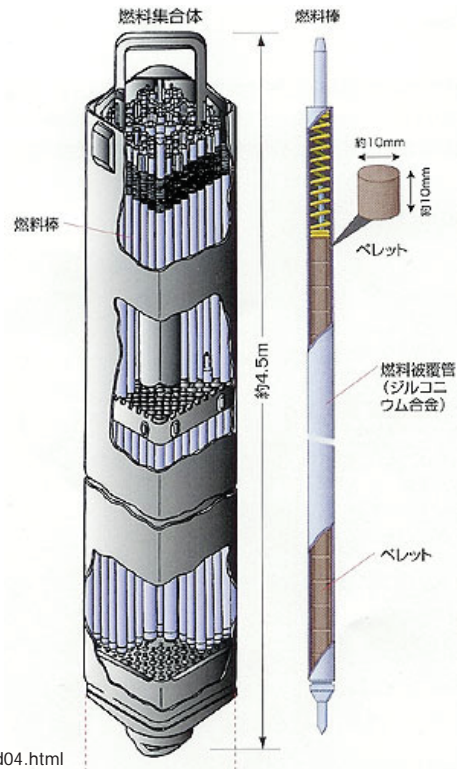
16

<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/event/documents/siryu3-4.pdf>に一部追加

ジルコニウム-水反応

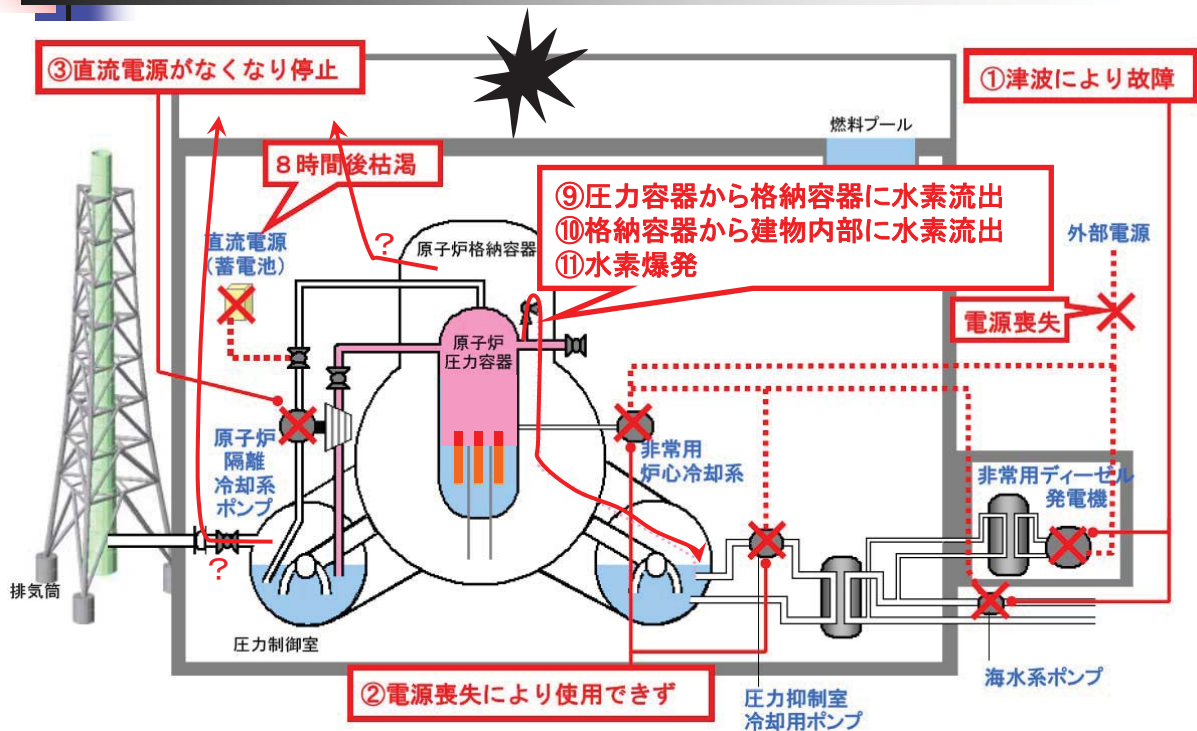
- ウラン燃料を覆っている薄い金属製の管(被覆管)の材料であるジルコニウム合金は、高温(900°C)になると、周りの水蒸気から酸素を奪い、酸化反応を起こす。

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

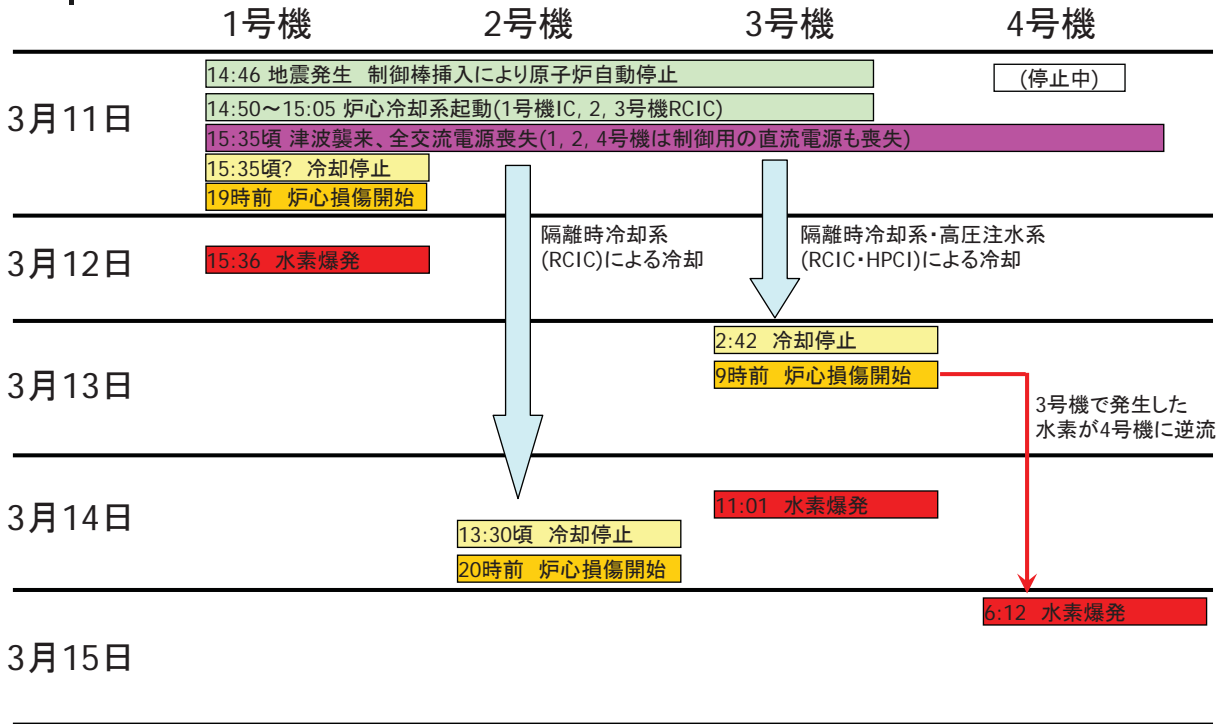


http://www.tohoku-epco.co.jp/electr/genshi/gaiyo_higashi/build04.html

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)



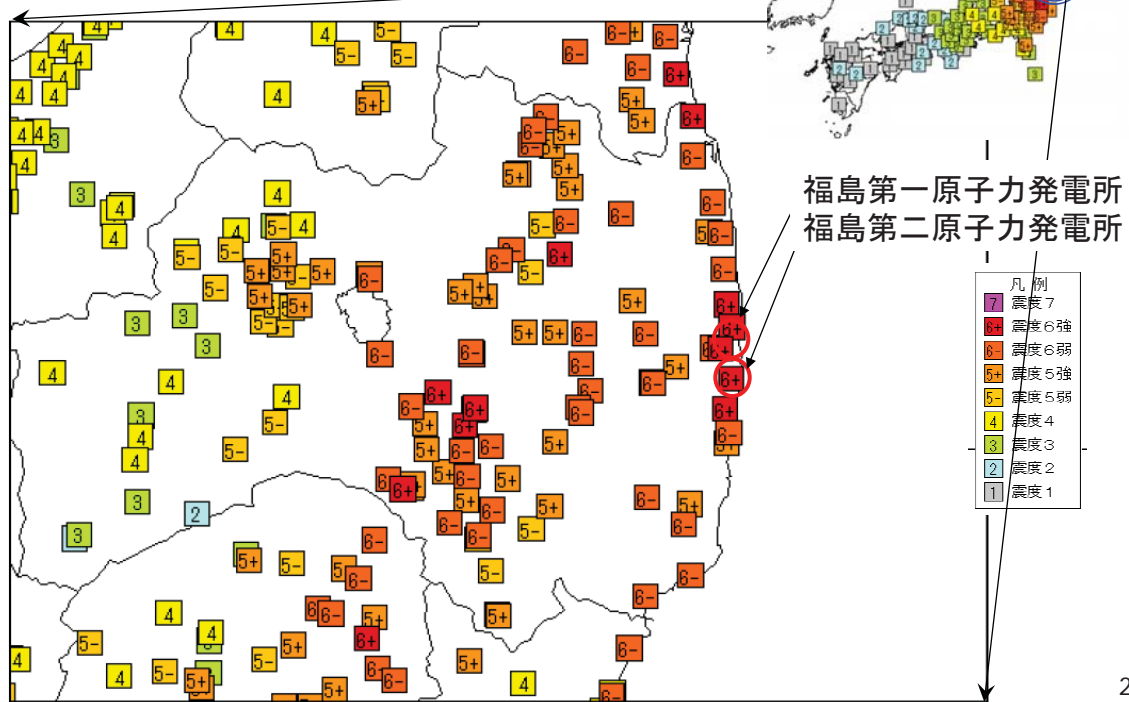
19

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

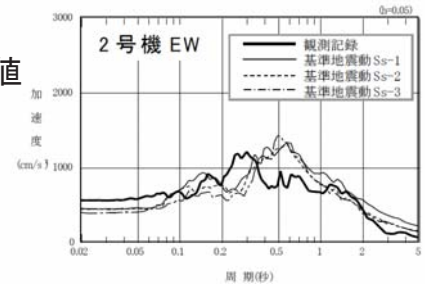
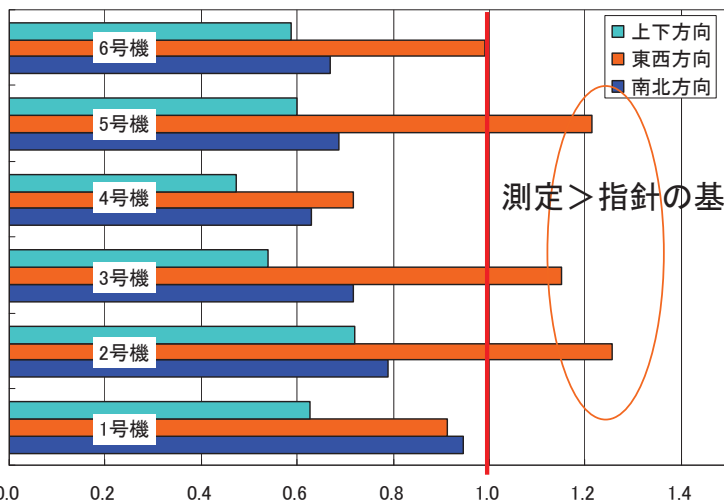


<http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/11b/kaisetsu201103111600.pdf>

21

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。



最大加速度の比(観測値/基準地震動の設計値Ss)

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

22



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

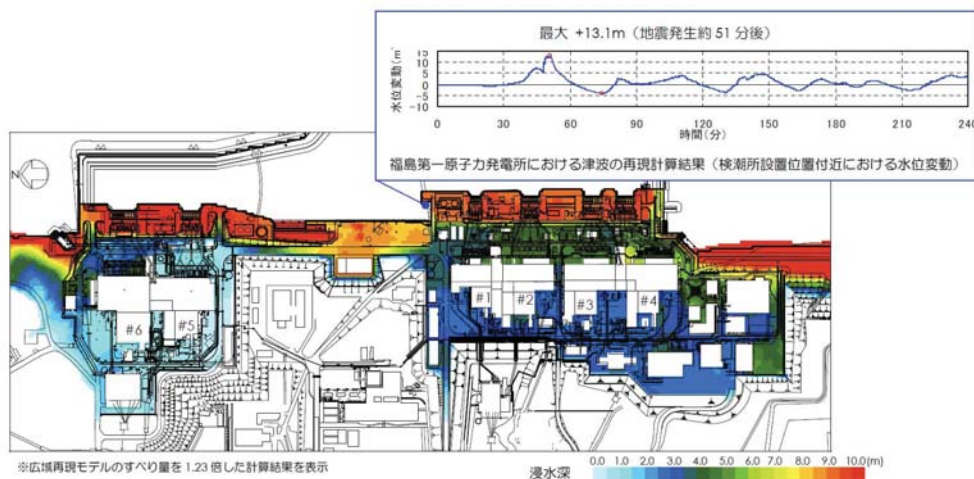
発電所の設備への影響(評価)

- 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)

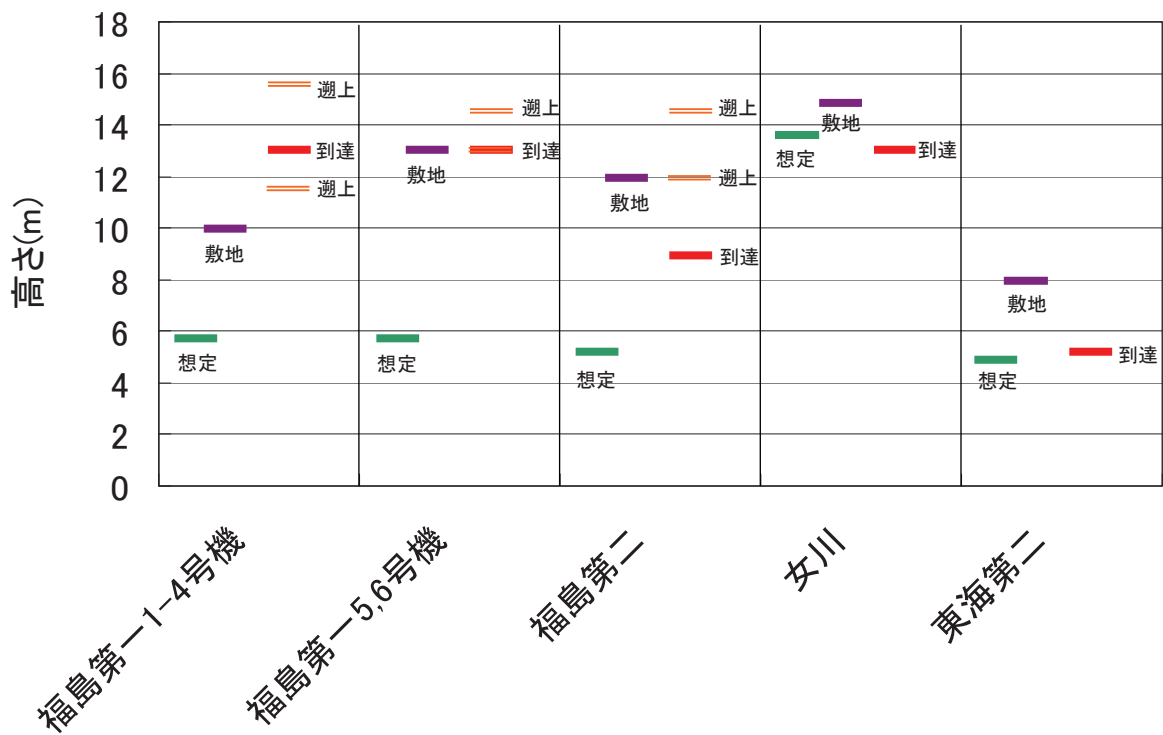
福島第一原子力発電所の屋外浸水状況
 < 4号機南側集中環境施設プロセス主建屋付近：敷地高O. P. +10m、重油タンク高さ約5.5m >



http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/111202f.pdf

27

津波高さの比較



28

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を改訂(新規制基準)
- 防波堤による発電所構内への浸水防止
- 水密扉による原子炉建屋内への浸水防止
- 重要機器室への浸水防止
- 重要機器への浸水を想定した代替りの機器の準備

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 23 年 8 月 25 日 東京電力撮影

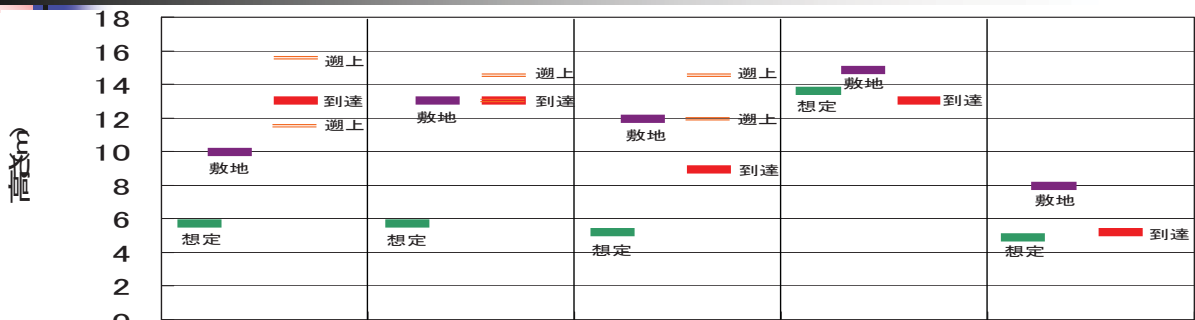
30

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)	×	○	1, 2号機 × (6台中6台×) 3, 4号機 ○ (6台中3台×)	○	○
電源車	×	○	○	不要	不要
通常電源 復旧	×	×	○	○	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)	×	○	1, 2号機 × (6台中6台×) 3, 4号機 ○ (6台中3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(枯渴した)時の代替手段が不足していた

33

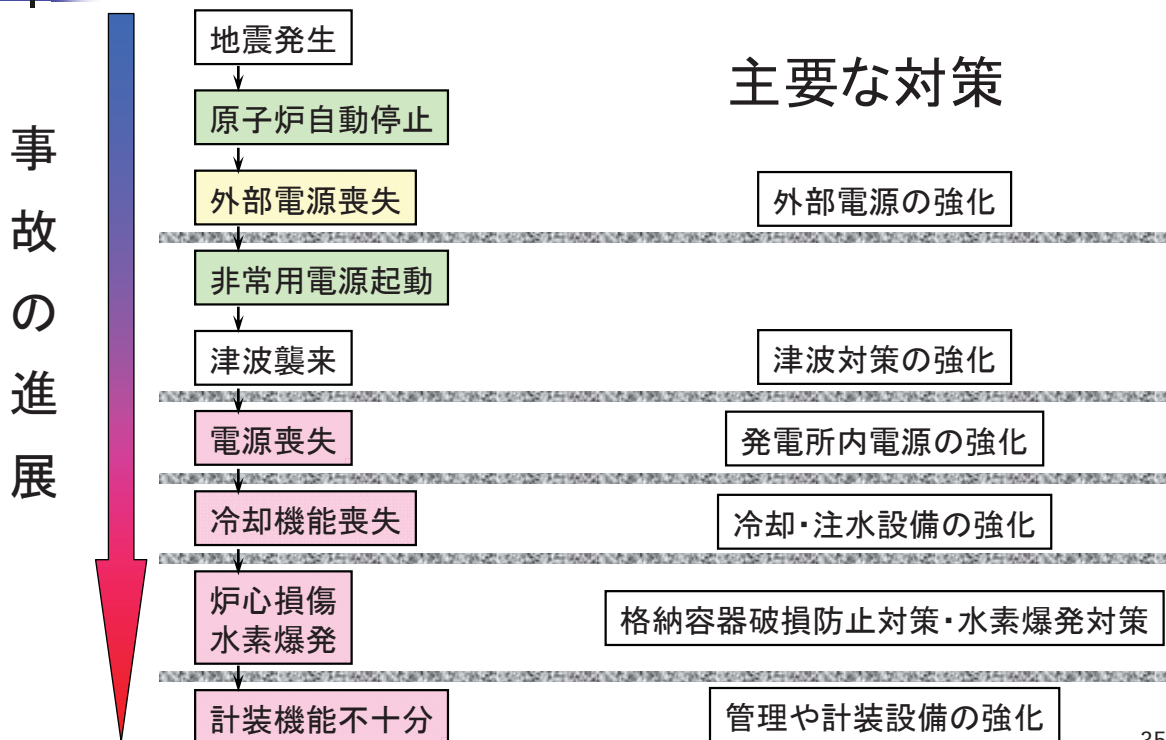


電源喪失(対策)

- 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

原子力規制委員会による 新規制基準とその概要

原子力規制委員会が策定している規制基準(2013年7月施行)の概要を示し、福島第一原子力発電所事故の教訓がどのように反映されているかを確認する。



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)

37

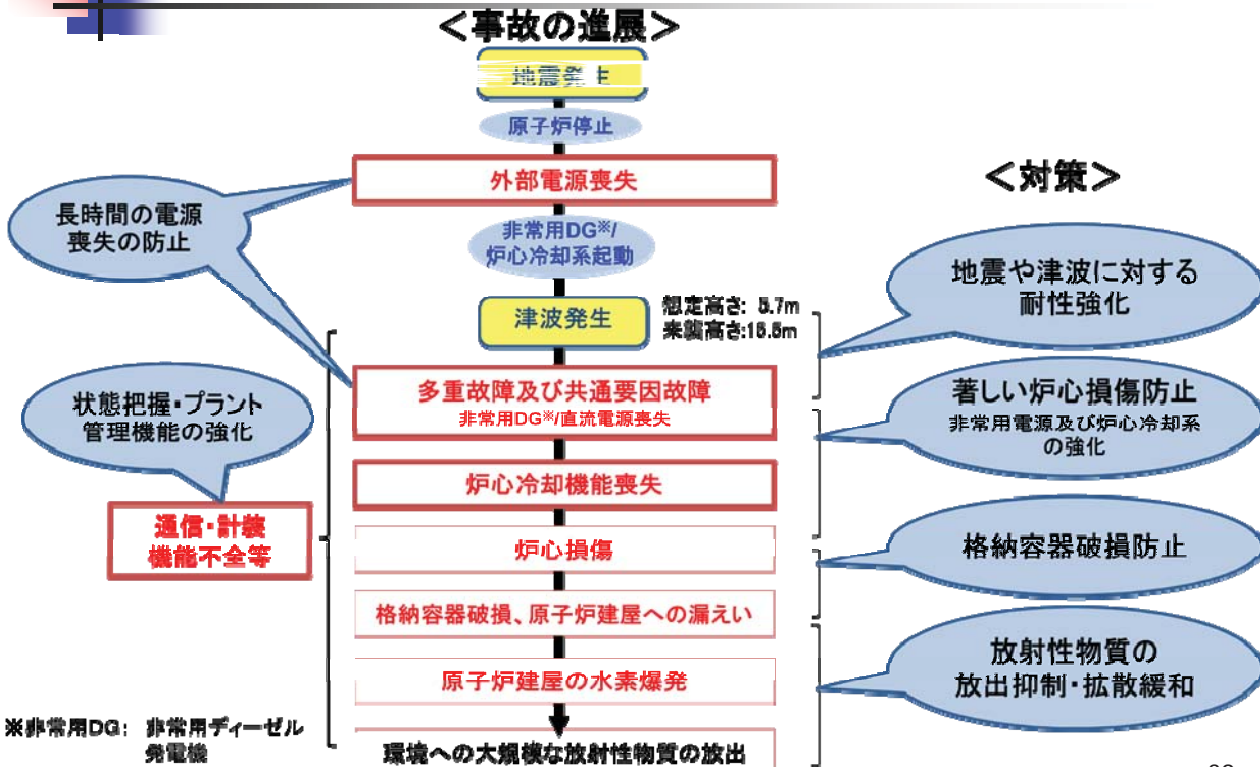


原子力規制委員会 新規制基準策定の基本的考え方

- 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

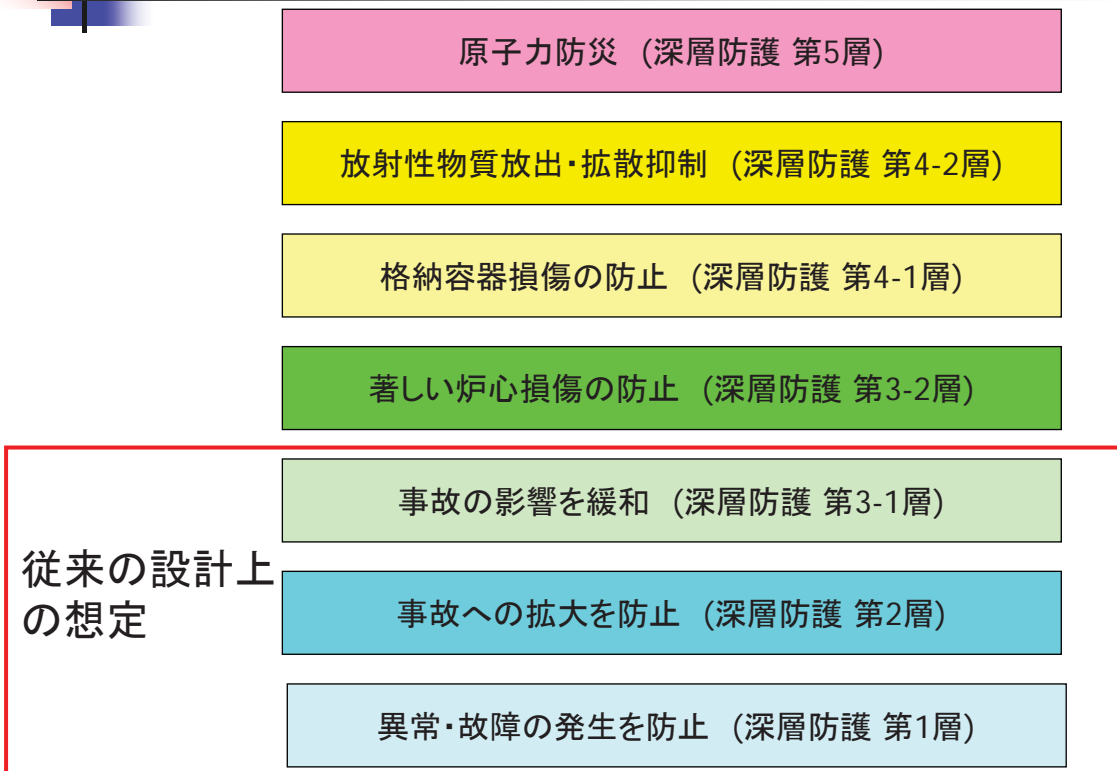
38

福島第一事故の進展と対策



http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h24fy/data/0027_05.pdf

深層防護の考え方の徹底



新規制基準の全体像

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

新設
ピアクシデント対策

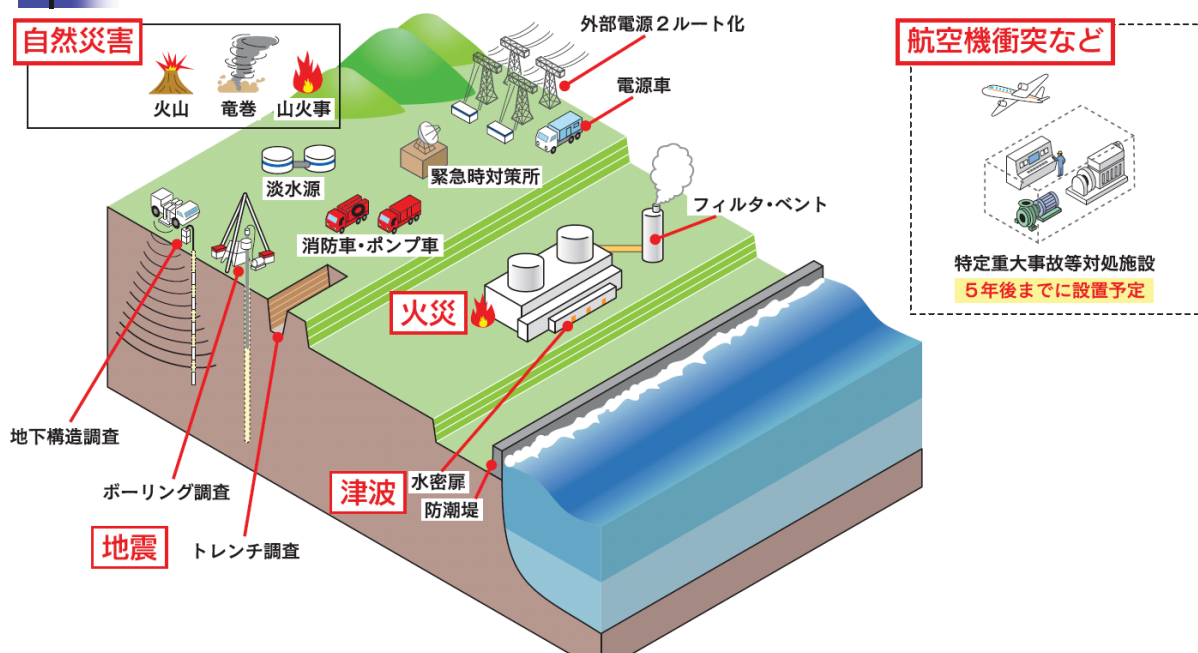
強化

強化

http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h24fy/data/0027_05.pdf

41

新規制基準の主な対策



http://www.fepec.or.jp/enelog/common/pdf/sp2013_vol3.pdf

42

設計時の基準の強化

- 竜巻、火山、森林火災など、種々の自然現象を新しく考慮
- 火災防護対策の強化(特にケーブルなどの火災)
- 内部溢水(原子炉建屋内部での大規模な水漏れ)の考慮
- 外部電源の強化(複数の別回線で異なる変電所に接続)



米国の火災防護規制強化のきっかけとなった Browns Ferry 1号機のケーブル火災(1975年3月22日発生)

http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/shin_anzenkijyun/data/0004_02.pdf



BF 1の火災の一因となったケーブル・トレイ貫通部のシール材の例



http://photo.tepco.co.jp/var/rev0/0000/3672/120217_08.jpg

43

シビアアクシデント対策(炉心損傷防止)

- **設計時の想定を超える事態を前提とし、炉心損傷に至らないための対策を要求**
 - 原子炉停止に失敗した場合の対策
 - 原子炉冷却に失敗した場合の対策
 - 原子炉減圧に失敗した場合の対策
 - 原子炉の除熱に失敗した場合の対策
 - 冷却水や電源(サポート機能)の確保

44

シビアアクシデント対策(炉心損傷防止)

○原子炉減圧機能喪失時の対策(PWR)

原子炉を減圧するための弁を手動で開けられるようハンドルを設置するとともに、手順書を整備。

主蒸気逃がし弁の手動操作ハンドル



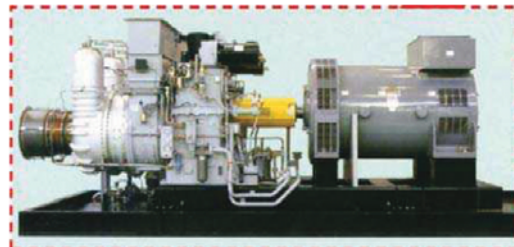
○サポート機能の確保(PWR・BWR共通)

全交流電源喪失に備えた、代替電源設備等(電源車、バッテリー等)の配備。

電源車の高台への設置等



ガスタービン発電設備



http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h24fy/data/0027_05.pdf

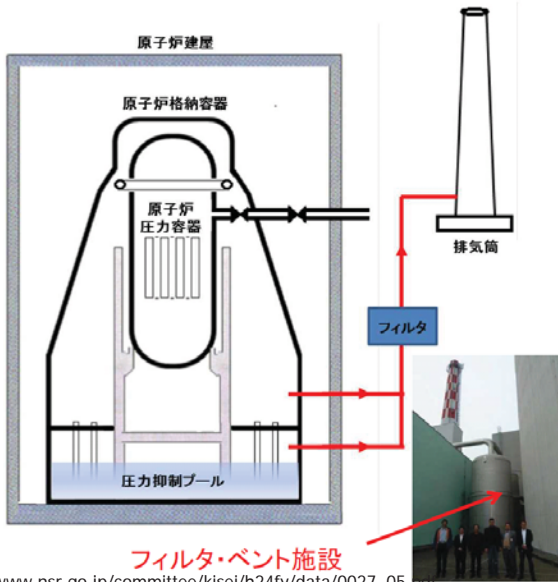
シビアアクシデント対策 (格納容器破損防止)

- 炉心損傷の発生を想定して格納容器の破損を防止するための対策を要求
 - 格納容器の冷却・減圧・放射性物質低減対策(格納容器冷却のためのスプレイ、フィルタつきベントシステム)
 - 格納容器下部に落下した溶融炉心の冷却対策
 - 格納容器内の水素爆発防止対策
 - 原子炉建屋等の水素爆発防止対策

シビアアクシデント対策 (格納容器破損防止)

○格納容器の除熱・減圧

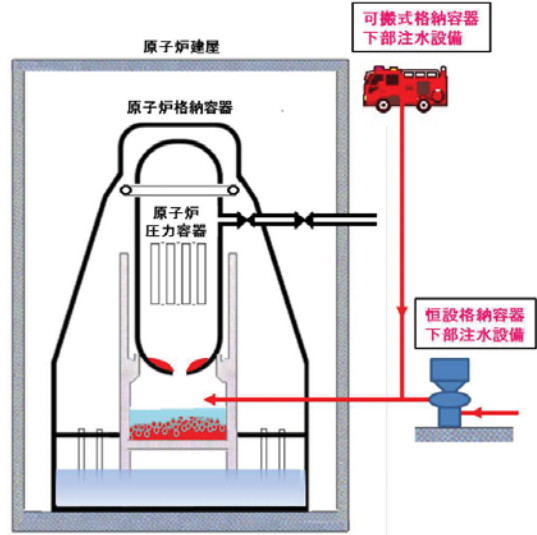
格納容器内圧力及び温度の低下を図り、放射性物質を低減しつつ排気するフィルタ・ベントを設置。



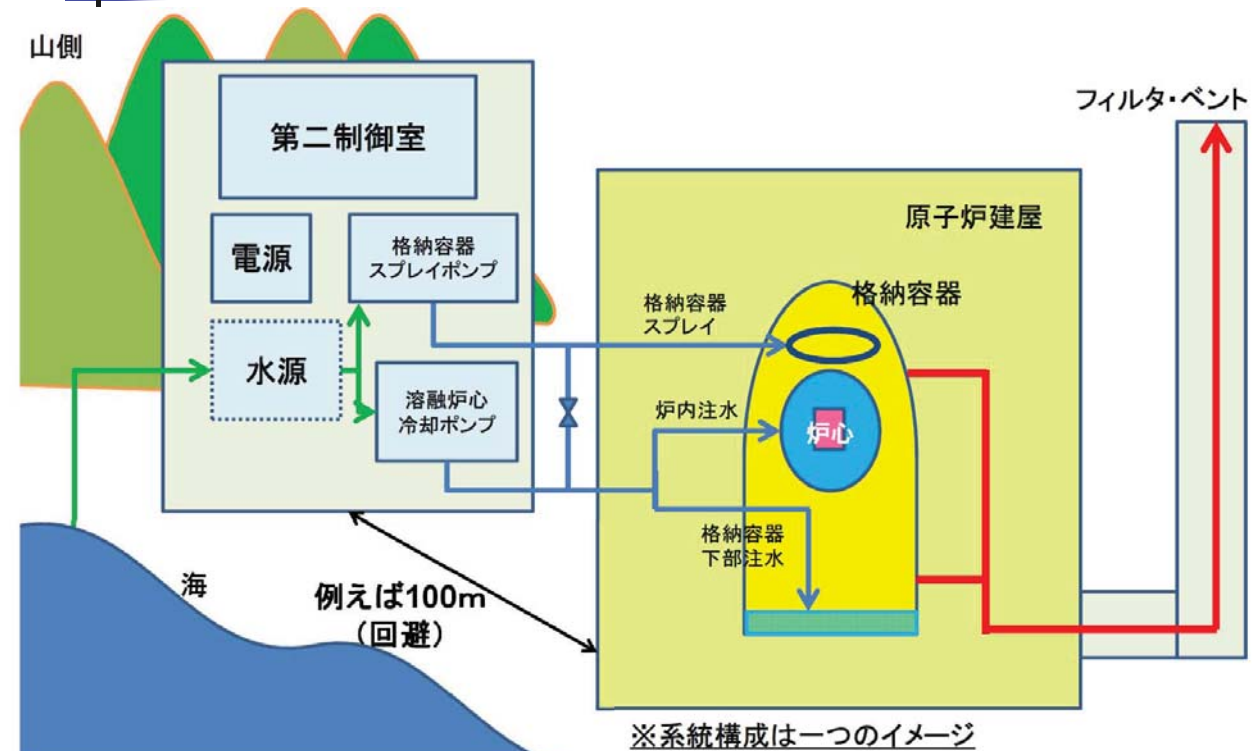
http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h24fy/data/0027_05.pdf

○溶融炉心の冷却

溶融炉心により格納容器が破損することを防止するため、格納容器下部注水設備 (ポンプ車、ホースなど) を配備。



意図的な航空機衝突などへの対策



http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h24fy/data/0027_05.pdf

敷地外への放射性物質の拡散抑制対策

- 格納容器が破損に至った場合を想定、放水などにより放射性物質の拡散を抑制



対策イメージ(大容量泡放水砲システムによる放水)

(画像の引用)

平成23年度版消防白書 http://www.fdma.go.jp/html/hakusho/h23/h23/html/2-1-3b-3_2.html

http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h24fy/data/0027_05.pdf

49

耐震・耐津波性能強化

地震・津波の評価方法の厳格化。特に津波対策を大幅に強化

津波に対する基準を厳格化



既往最大を上回るレベルの津波を「基準津波」として策定し、基準津波への対応として防潮堤等の津波防護施設等の設置を要求

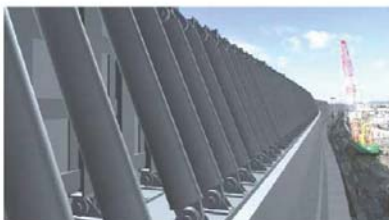
高い耐震性を要求する対象を拡大



津波防護施設等は、原子炉圧力容器等と同じ耐震設計上最も高い「Sクラス」に

<津波対策の例(津波防護の多重化)>

○津波防護壁の設置
(敷地内への浸水を防止)



○防潮扉の設置
(建屋内への浸水を防止)



http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h24fy/data/0027_05.pdf

50

耐震・耐津波性能強化

活断層の認定基準を厳格化



耐震設計上考慮する活断層は、後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できないものとし、必要な場合は中期更新世以降（約40万年前以降）まで遡って活動性を評価

より精密な基準地震動の策定



サイト敷地の地下構造を三次元的に把握

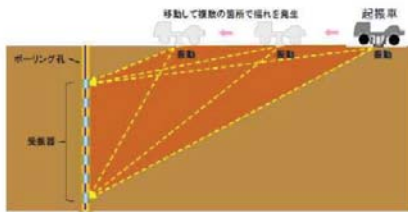
地震による揺れに加え地盤の「ずれや変形」に対する基準を明確化



Sクラスの建物・構築物等は、活動性のある断層等の露頭が無い地盤に設置

＜地下構造調査の例＞

起振車で地下に振動を与え、ボーリング孔内の受振器で受振し、解析することで、地下構造を把握



起振車

16

http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h24fy/data/0027_05.pdf

51

その他の対策

- 全電源喪失やシビアアクシデントの過酷な環境下において原子炉の状態(温度・圧力・水位など)を把握する手段の整備
- 制御室/免震重要棟の耐事故性能向上
- 通信回線の多重化・多様化・専用回線化
- 使用済み燃料プールの冷却方法の多様化・多重化
- シビアアクシデント時の手順書の整備、訓練の実施、体制の整備

52



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
- 新規制基準の概要

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_06.pdf
 - http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0027_07.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閣僚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.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/naiic.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
- 日本原子力技術協会報告書
 - 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
- 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

54