東京電力福島第一原子力発電所事故に関する技術分析

2012年6月16日

技術分析分科会

岡本孝司

技術分析分科会

① 公表されているデータをもとに、現在の原子炉の状況を推定する。また、事故発生当時のデータを分析して、事故の進捗状況をまとめること。

② 福島第一原子力発電所の事故を分析し、得られた教訓をまとめるとともに、世界の原子力発電所がより安全になるように、対策案を提言の形でまとめること

③ 今後必要となる、原子力安全研究に関するロードマップを提言すること

④ 原子力安全のあるべき方向性と改善案を提言すること

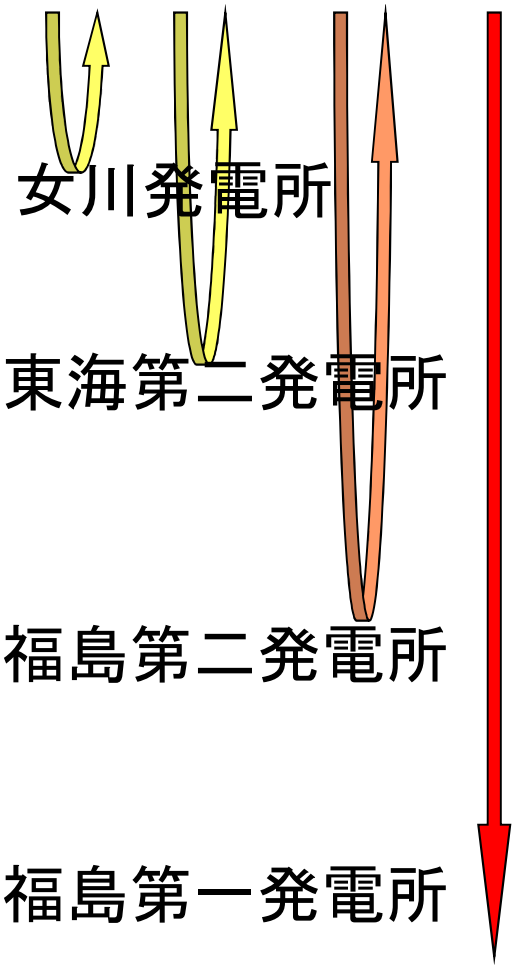
技術分析分科会の実績

- 教訓と対策を発表(2011年5月9日)
- ワークショップの開催（2011年8月3日）
- 原子力学会での報告
  - 秋の大会(2011年9月22日)
  - Int. Symp. Nucl. Safety (2011年10月30日)
  - GLOBAL(2011年12月9日)
  - その他
- 中間とりまとめの準備（進行中）

IAEA Safety of Nuclear Power Plants (SSR-2/1)

深層防護（Defense-in-Depth)

1. 異常の発生を防止する
2. 異常が発生しても、その拡大を防止する
3. 異常が拡大しても、その影響を緩和し過酷事故に至らせない
4. 異常が緩和できず、過酷事故に至っても、対応できるようにする
5. 異常に対応できなくても、人を守る



地震後の原子力プラント状況

		Operation	DiD1	DiD2
女川	#1	100%出力	炉停止	常用系 M/C 火災
	#2	起動中	炉停止	
	#3	100%出力	炉停止	
福島第一	#1	100%出力	炉停止	外部電源喪失
	#2	100%出力	炉停止	外部電源喪失
	#3	100%出力	炉停止	外部電源喪失
	#4	停止		外部電源喪失
	#5	停止		外部電源喪失
	#6	停止		外部電源喪失
福島第二	#1	100%出力	炉停止	
	#2	100%出力	炉停止	
	#3	100%出力	炉停止	
	#4	100%出力	炉停止	
東海第二		100%出力	炉停止	外部電源喪失

福島第一原子力発電所における耐震

- 耐震設計評価
  - 建屋は、概ね弾性範囲にあった
  - シミュレーションによって、重要な機器は健全である事を確認
  - ５号機をウォークダウンし、重要な機器が健全であることを確認
- 津波前後のプラントパラメータを評価
  - １次系バウンダリのリークを示すパラメータは無い
  - プラントの応答は、損傷が無い事をシミュレーションによって確認

地震では重要な機器は損傷していないと推定

http://www.meti.go.jp/press/2011/02/20120216004/20120216004.html

大地震に対しても、現行の耐震設計は機能した
安全を確保するため、継続的改善を進める必要がある

津波直後のプラント状態

		DiD3	DiD4(AM)	DiD5(Emergency)
女川	#1			
	#2	2D/G ×		
	#3			
福島第一	#1		SBO, LUHS	炉心損傷、水素爆発
	#2		SBO, LUHS	炉心損傷
	#3		SBO, LUHS	炉心損傷、水素爆発
	#4		SBO, LUHS	水素爆発
	#5		SBO, LUHS	
	#6		LUHS	
福島第二	#1		LUHS	
	#2		LUHS	
	#3			
	#4		LUHS	
東海第二		1D/G ×		

SBO: 全交流電源喪失、LUHS: 最終熱逃場喪失

津波後の福島第一発電所 と 福島第二発電所

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#1	#2	#3	#4
外部電源	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○
非常用発電機 A: 空冷 *: 冷却ポンプ損傷	× ×	× ×A	× ×	× ×A	×* ×*	×* ○A ×*	× × ×	×* ×* ×*	×* ○ ○	×* ×* ○
M/C (非常用電源盤)	×	×	×	×	×	3/3	1/3	○	○	○
M/C (常用電源盤)	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○
P/C (非常用電源盤)	×	2/3	×	2/3	×	3/3	1/3	2/3	2/3	2/3
P/C (常用電源盤)	×	2/4	×	2/2	2/4	×	6/7	4/5	7/7	4/5
直流電源	×	×	○	×	○	○	○	○	○	○
海水冷却ポンプ	×	×	×	×	×	×	×	×	1/2	×

台湾　第３（馬鞍山）発電所　全交流電源喪失事象
2001年3月18日

0:45　外部電源２系統喪失
　　Ａ系母線損傷
　　Ｂ系非常用D/G起動失敗

0:57　蒸気駆動ポンプ起動（炉心冷却）

2:54　第５D/GをＢ系母線に繋ぎこむ

全交流電源喪失

約２時間

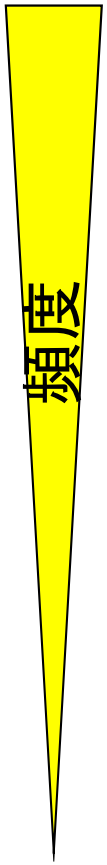
復旧

電源喪失は、D/G起動失敗だけではなく、
電源盤損傷、母線損傷などでも起こりうる。
盤や母線が損傷すると、電源があっても電気供給不可

本事象は、日本の安全性向上に反映されたか不明

SBO（全交流電源喪失）の分類

外部電源	非常用D/G	M/C & BUS	直流電源	対策例
×	×	○	○	代替交流電源 (Swing D/G)
×	×	×	○	代替 M/C 蓄電池充電器 仮設ケーブル
×	×	×	×	後備直流電源 後備充電器 後備計測系

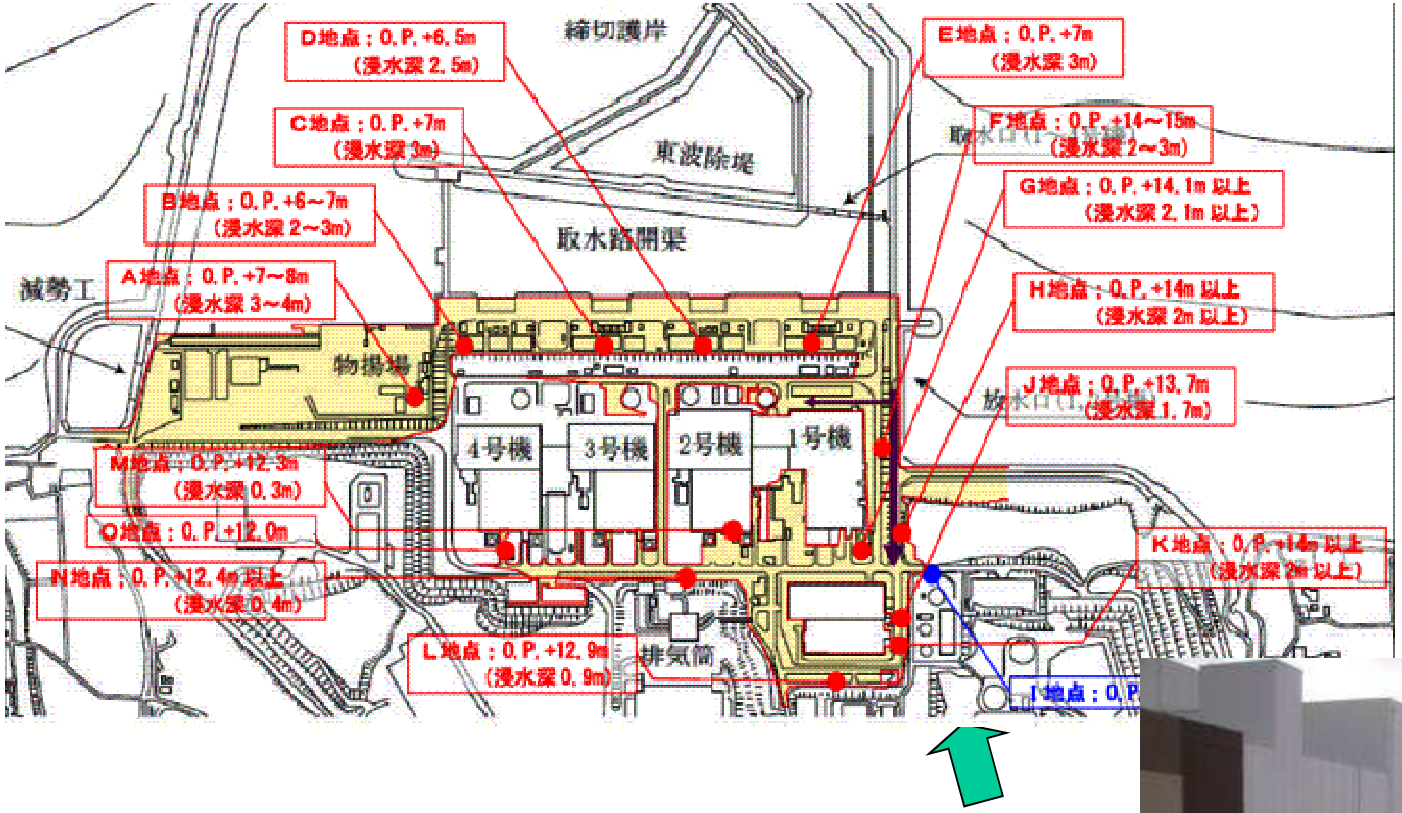


全電源喪失のまとめ

1. 非常用電源系は、多重性、多様性、独立性が重要
2. 単純な全交流電源喪失は、設計基準事象として考慮する。
   リスク低減のため代替交流電源を準備する
3. 母線喪失や直流喪失は、設計超過事象として考慮する
   事が必要である
4. 計装系は電源容量が動力に比べて小さい
   後備直流電源がAM対策としては有効
5. 電源系の共通要因故障を防ぐために、水密性、耐震性を
   確実に実施する事が必要
6. 電源があれば、過酷事故に至らない、もしくは至ったとし
   ても影響を緩和できる可能性が高い

可能な限り多様で多重な電源確保

福島第二原子力発電所



設計津波 +5.2m

敷地高さ +12m

津波 +6.5～7m
1号南側 +14m

電力 冷却

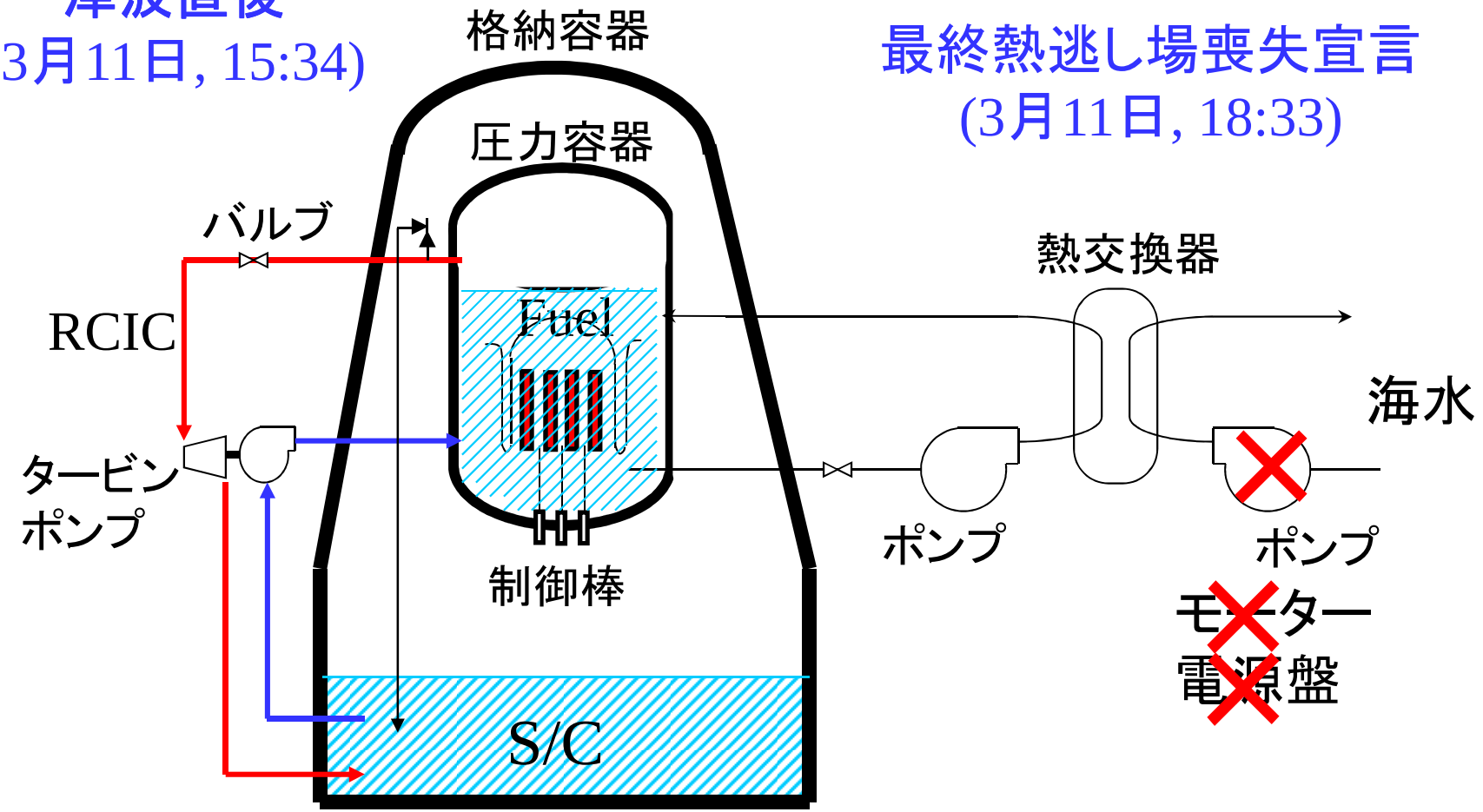
海水ポンプ → 3号機以外は損傷
ディーゼル発電機 → 1号機損傷

http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110413006/20110413006.pdf

全冷却系喪失

福島第二発電所1号機

津波直後
(3月11日, 15:34)



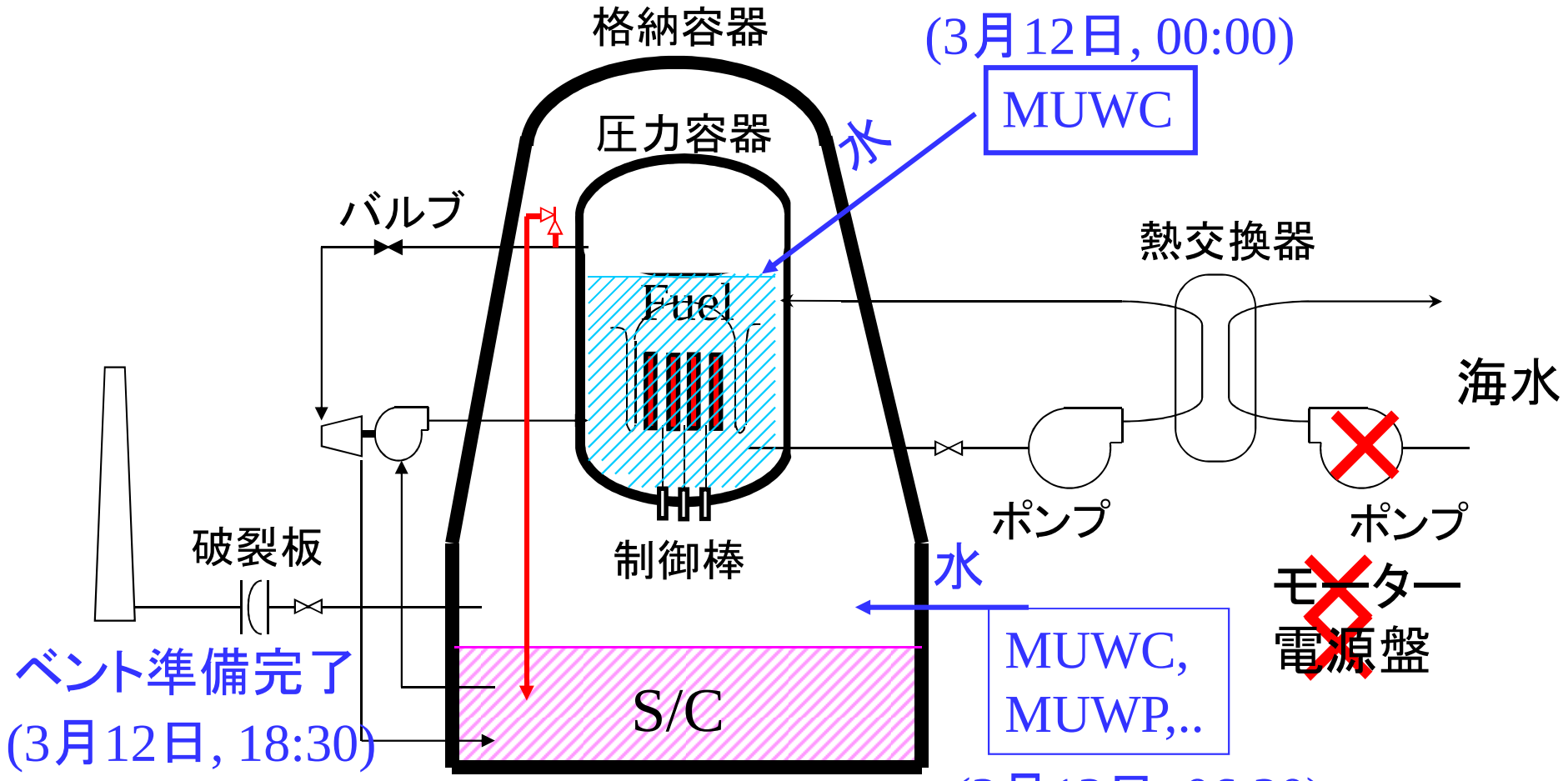
最終熱逃し場喪失宣言
(3月11日, 18:33)

隔離時冷却系(RCIC)で冷却　S/C温度 → 上昇
(3月11日, 15:36)

全冷却系喪失

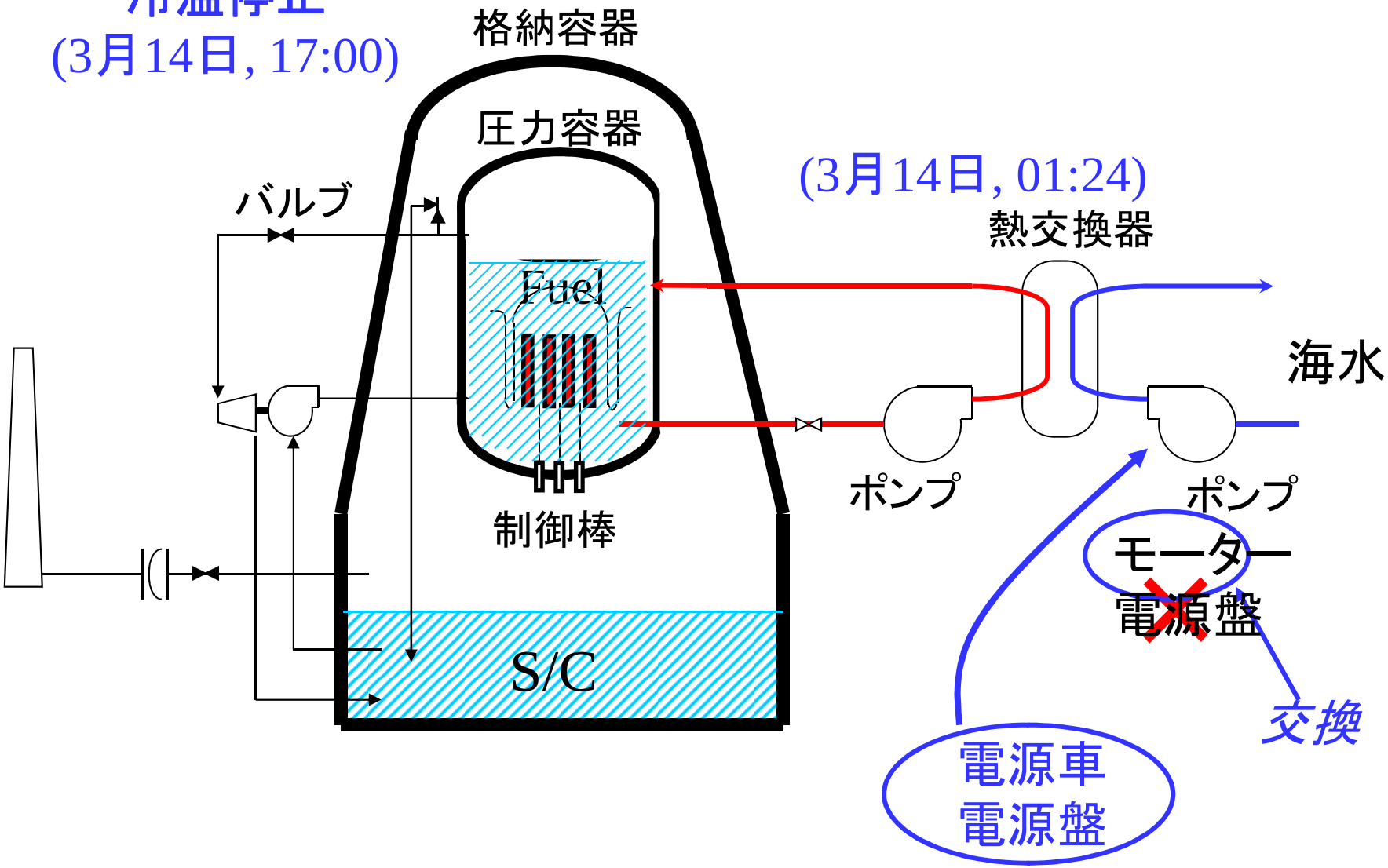
福島第二発電所1号機

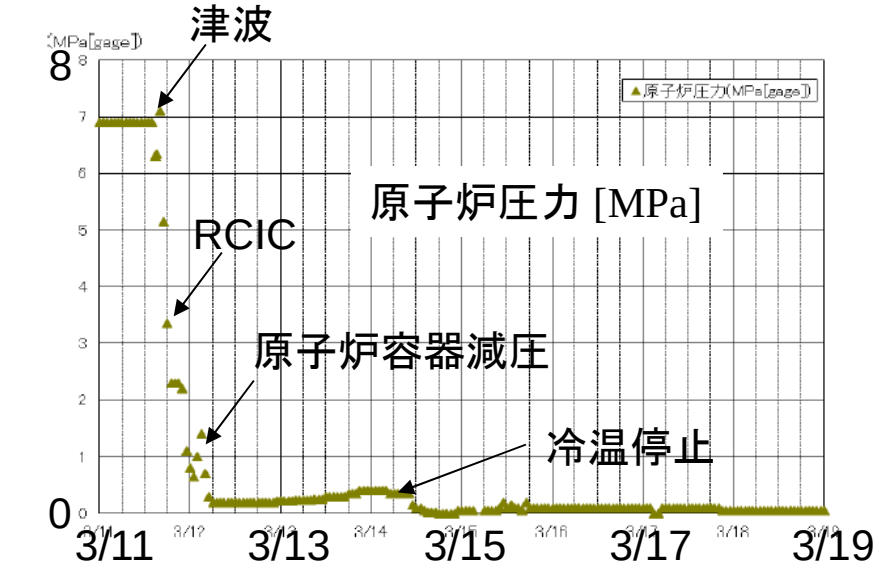
アクシデントマネジメント

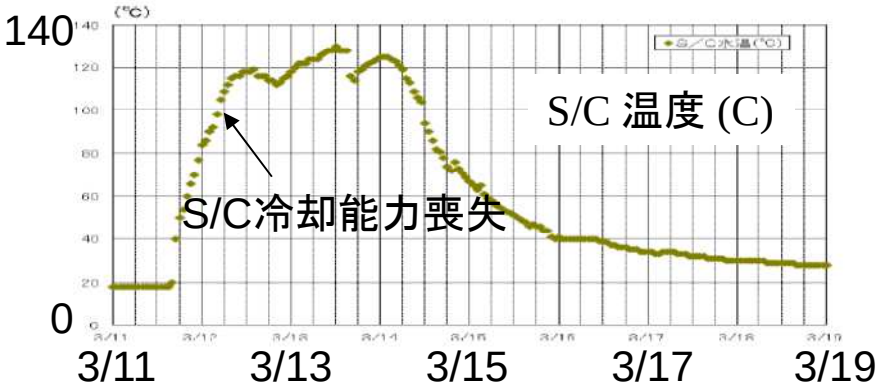


全冷却系喪失

福島第二発電所1号機







福島第二発電所1号機

全冷却系喪失
からの復旧

津波から冷却開始まで
約２日半(58時間)分の
崩壊熱は、格納容器内の
水などの温度上昇に寄与

IAEAへの日本政府報告書より (2011年9月)

全冷却系喪失のまとめ

福島第二原子力発電所のアクシデントマネジメント
を含む対応は、良好事例として共有すべき

1. 電源があれば、最終熱逃し場喪失事象は、比較的長時間の対応可能余裕時間がある。
2. どのような場合でも、完全な電源喪失は防ぐ必要がある
3. 復旧のための時間を短縮するため、予備のポンプやモータなどを準備しておくことが重要である
4. 海水冷却ポンプは、水密建屋に設置する事が望ましい。非常用発電機などの重要機器は水密性を高めることも必要である。
5. 空冷システム(大気に熱を逃す)を、冗長性を高めるために検討すべきである

深層防護思想は機能したのか

- 深層防護思想は、福島事故後であっても原子力安全の基本的概念である。
- インパクトが比較的小さかった福島第二は第４層が機能して、安全が保たれた
- 直流を含む全ての電源が使えなくなる事象を含め、リスクに応じた対応策を、あらかじめ考えておくことが必須である。
- 炉心損傷が起こることを前提とした、影響緩和策を充実する事が必須である。

深層防護思想を拡充する事が重要である

新知見の反映をしにくい日本の制度

- 民主党マニフェストにある原子力規制委員会が2年間全く動いていない。自民党・公明党のおかげで何とかなる？
- 立地指針は50年近く改訂されていない
- 阪神淡路地震のあと10年以上経って耐震指針が改定
- 規制側も事業者側も、新しいコード導入を審査する労力が大変なため、未だに40年前のコードを安全解析で利用
- リスク情報の規制への取り込みが10年以上遅れている
- 安全目標も中間報告のまま10年近く止まっている
- シビアアクシデント規制も必要性はわかっていたが導入に時間がかかりすぎて、未だに導入できていない

KAIZENが安全を維持するために最も重要

なぜ事故を防げなかったのか

- 国（規制当局）も事業者も、新知見の導入よりは、現状維持を望んだ
- 原子力安全に直接関係のない、品質保証文書を作り、それをチェックすることが安全を見ていると示しやすいので、安易な道に流れた。
- 現場は書類作りで疲弊しており、新知見の導入により、さらなる安全性の劣化を恐れた。
- TMI, チェルノブイリを対岸の火事と考えた。

結果として、原子力安全に対する対策が劣化し、事故を防ぐことが出来なかった

原子力安全の鍵

- 目的を明確化「人と環境を守る」
- 深層防護の徹底（Defense-in-Depth)
  - ４層の拡充、環境を守るための深層防護
- 安全重要度による意思決定(Graded Approach)
  - 対策の重要度分類を、リスクを考慮して決定する
  - 重要度分類に応じた、管理、保守を進める
- 継続的改善の仕組み(Continuous Improvement)
  - 国の規制システムの維持と改善
  - 事業者マネジメントシステムの維持と改善

Safety Culture and SAHARA

(Safety as high as reasonably achievable)

2011年5月9日

教訓と提言

福島第一原子力発電所の事故から教訓をくみ取り、世界で稼働中の原子力発電所で同じような事故を二度と起こさないようにすることが重要である。
公開されている情報を元に、今回の事故とその対応を、テーマに分類、分析し、その中から得られる教訓をまとめ、考えられる対策の例を提言としてとりまとめた。
なお、提言としては、「１年程度の短期に行うべき対策の例」と、「２、３年程度の中期にじっくり改革すべき対策の例」にまとめた。

1. 地震
2. 津波
3. 全電源喪失
4. 全冷却系喪失
5. アクシデントマネジメント
6. 水素爆発
7. 使用済み燃料貯蔵プール
8. 安全研究
9. 安全規制と安全設計
10. 組織・危機管理
11. 情報公開
12. 緊急時安全管理

次ページより、2012年6月16日現在のフォローアップを記す

2012年6月16日

１．地震の揺れに対する教訓

a. 地震の揺れに対する従来の対策は、おおむね有効であった可能性が高いと推定される

技術的知見(30項目)で確認

b. 外部電源系の地震対策が十分でなく、事故の拡大を防げなかった

提言（短期）

保安院において審議中

(1) 一部基準地震動Ssを越えた女川、東海第二原子力発電所については、地震の揺れによる影響について、定量的な評価を実施。再起動に向けて、必要があれば安全強化を行う

(2) 福島第一及び福島第二原子力発電所について、今回の地震に対する耐震評価を実施し、得られた知見を耐震設計の改善に資すること

提言（中期）

保安院において審議中

(3) 日本国内の発電所について、今回の地震のメカニズムから、必要があれば基準地震動Ssの見直しを行い、バックチェックを急ぐこと

(4) 外部電源の耐震性の考え方について、再度検討する必要がある

技術的知見(30項目)に記載

2012年6月16日

２．津波に対する教訓

a. 耐震設計で考慮していた津波の規模が不十分であった
b. 海水の浸水により、安全上重要な機器が停止し、事故の拡大を防げなかった
c. 地下構造物の浸水防止が不十分であり復旧作業を妨げている

提言（短期）

ストレステスト（一次）で確認

(1) 安全上重要な機器の損傷を防ぐため、これらが配置されている建物に海水が入らないようにするなどの、ハードウエア対応

提言（中期）

(2) 今回の知見に基づき、津波の想定を見直す
リスク評価手法を取り入れ、想定する津波に対する標準化を進める
(3) 津波が敷地内に浸入しないように、防潮堤を作る
(4) 建物の水[illegible]の浸水経路を塞ぐ
(5) 津波によ[illegible]障害を与える可能性考慮
(6) 排水ポンプをあらかじめ設置しておく
(7) 機器の予備品を、津波に影響を受けない場所に準備しておく
(8) 津波により散乱する瓦礫を除去する重機などをあらかじめ準備
(9) 安全重要度が低いピットであっても、海岸に近いものについては水密性を高め、津波が侵入しないようにする

原子力学会津波PRA標準策定
各種対策をストレステスト（一次）で確認

2012年6月16日

３．全電源喪失に対する教訓

a. 安全審査が不十分であった
b. 全電源が長期間喪失し、事象の進展が防げなかった
c. 原子炉内の状況把握が困難となった
d. 電源が一部でも残っていれば、事象の進展を食い止められる可能性がある

提言（短期）　緊急対策で装備　・　ストレステスト（一次）で確認

(1) 電源車、小型発電機など多様な方法で電源を供給する
(2) 交流電源がすべて喪失した場合を想定し、重要な機器および炉心の監視系への電力供給を行えるようにする
(3) 発電機を複数機設置する場合は、あらかじめケーブルを接続しておく

提言（中期）

(4) 安全審査指針などの見直しをすすめる　原子力安全委員会　中間とりまとめ
(5) ガスタービン発電機など、多様な発電機を導入する。配置にも多様性を求め、固定式のものは免震床などを考慮する
(6) 海水冷却に頼らない、空冷式発電機を準備する　ストレステスト（一次）で確認
(7) 予備の電源盤を準備する
(8) 他の発電所（例えば水力）との電源融通を行う　対策の高度化を推進中
(9) 蒸気タービン駆動炉心注水ポンプには小型の発電機を取り付け、制御用のバッテリーの充電を行う　対策の高度化を推進中

2012年6月16日

4． 全冷却系喪失に対する教訓

a. 海水冷却は津波に対して脆弱性がある
b. 電源があれば炉心損傷までの時間的余裕が比較的ある

提言（短期）

ストレステスト（一次）で確認

(1) 消防車などを用いた冷却系への注水訓練の実施とハードウエア整備

提言（中期）

(2) 海水ポンプモータなどの予備品をあらかじめ、津波の影響を受けない場所に準備しておく

ストレステスト（一次）で確認

(3) 海水ポンプに対する浸水防止対策、例えば防水壁や専用建屋の設置を行う

対策の高度化を推進中

(4) 海水に頼らない冷却システムを準備し冗長性を担保する。例えば崩壊熱除去が可能な容量の空気冷却機などを設置しておく

(5) 動力の要らない自然循環冷却システムを考案する

(6) 水源を多様化しておく。（河川、ダム、防火用水など）。必要に応じて送電線をさらに多重化する

2012年6月16日

５．アクシデントマネジメントに対する教訓（1/2）

a. アクシデントマネジメント(AM)対策が事故の大幅な悪化を防いだ
b. 全電源喪失を考慮したアクシデントマネジメント(AM)が不十分であった可能性がある
c. 炉心が損傷した後、放射性物質が放出された後のAM対策が十分に検討されていなかった

提言（短期）

ストレステスト（一次）で確認

(1) シビアアクシデントのAM対策として、下記目的のため、数日間使用可能な予備電源を準備する。また、空気作動弁操作のために窒素ボンベを常備しておくことも有効である
  i) 炉心の重要なパラメータおよび排気塔放射線モニター計測用電源ベントラインの制御が行えるように電源ラインを準備する
  ii) 水素再結合機及び非常用ガス処理系電源

対策の高度化を推進中

(2) ベント実施が現地責任者の判断でできるようにする
(3) AM対策の訓練を実際の状況(津波により瓦礫が散乱している状況など)を想定して実施する。なお、瓦礫の散乱を考慮し、あらかじめ炉心給水用ホースの設置をしておく対策なども有効である

ストレステスト（一次）で確認

2012年6月16日

５．アクシデントマネジメントに対する教訓（2/2）

a. アクシデントマネジメント(AM)対策が事故の大幅な悪化を防いだ
b. 全電源喪失を考慮したアクシデントマネジメント(AM)が不十分であった可能性がある
c. 炉心が損傷した後、放射性物質が放出された後のAM対策が十分に検討されていなかった

提言（中期）

対策の高度化を推進中

(4) 全電源喪失以外の起因事象によるAMを見直すとともに、必要な常設の設備対応を実施する。なお、今回の事故における具体的なAM対応やプラントの挙動を評価し、AMの改善に繋げることが重要である
(5) ベントラインにゼオライトの砂と水を入れたフィルタードベント等を設置
(6) 同一敷地内に複数立地している場合のAM同時対応策について評価
(7) 大量の汚染水が発生する可能性がある事を考慮し、移動式汚染水処理設備をあらかじめ準備しておく(事故後に発災事業所に輸送)
(8) 炉心損傷が起きた後の、炉心冷却手法や閉じ込め手法を系統的に検討する。また、必要なハードウエア対応を考慮する
(9) 放射性物質を放出した後の、炉心冷却手法や閉じ込め手法を検討する。また、必要なハードウエア対応も考慮する

一部はストレステスト（二次）で確認予定

2012年6月16日

６．水素爆発に対する教訓

a. 水素爆発により原子炉建屋が破損した
b. 格納容器外の水素爆発は考慮されていなかった
c. 格納容器外への水素漏洩経路が不明

提言（短期）

緊急対策で実施

(1) 格納容器パラメータ計測システムや水素結合器などへ、予備電源を供給できる仕組みと、パラメータの遠隔モニターができるようにする
(2) ベントラインの再チェックと漏洩検査を行う。また、ベントの訓練を実施する

提言（中期）

対策の高度化を推進中

(3) 格納容器外水素爆発のメカニズムを評価する
(4) 格納容器外に水素が漏れないようなAM対策を行う。例えば、静的触媒再結合器の設置などが考えられる

2012年6月16日

７．使用済み燃料貯蔵プールに対する教訓

a. 使用済み燃料貯蔵プールの冷却に失敗した
b. 建屋が破損した後の使用済み燃料の閉じ込めに課題がある

提言（短期）

ストレステスト（一次）で確認

(1) 使用済み燃料貯蔵プールに対するAMを見直す
具体的には、電源喪失直後に、消防車による注水ができるように準備する、プールのある運転床にある消火栓から注水ができるように準備する、あらかじめフレキシブルホースなどを設置して地上からの注水が容易になるようにしておくことなどが考えられる

(2) 電源喪失しても予備電源などで燃料プール温度及び漏洩監視モニターを監視できるように電源を準備する

提言（中期）

対策の高度化を推進中

(3) 使用済み燃料貯蔵プールの自然循環冷却システムを導入する

(4) 空冷の中間貯蔵設備を導入する

(5) シミュレーションによって事故挙動を評価し、４号機建屋破損の原因を調査・特定する。また使用済み燃料貯蔵プールの状況を調査する

2012年6月16日

８．安全研究の推進に対する教訓

a. シビアアクシデント研究と成果の活用が不十分であった
b. 国家予算の使い方に無駄が多い

提言（短期）

法律改正を推進中

(1) JAEAやJNESを通じた、既存のシビアアクシデント研究成果の規制への反映

提言（中期）

(2) 人材育成　シビアアクシデントを含む安全研究、安全設計に係わる人材育成を体系的に実施する

対策の高度化を推進中

(3) シビアアクシデント研究の推進
特に、水素挙動解析、水素燃焼、使用済み燃料プール評価など

(4) モデリング・シミュレーション技術の推進
特に、原子力安全の高度化、シミュレーションの検証と妥当性確認

(5) 災害時に必要な研究成果については、予算措置を行い、維持していくことが必要である。場合によっては法律改正も必要である

一部、対策の遅れも見られる

2012年6月16日

９．安全規制と安全設計に対する教訓

a. 外的事象に対する安全設計の考え方が不十分であった
b. 極まれに発生するが、影響が大きな事象に対する評価が不十分
c. 共通要因故障への備えが不十分であった
d. 日本の安全規制の仕組みが不十分であった

提言（短期）

ストレステスト（一次）で確認

(1) 津波に対するアクシデントマネジメント(AM)対策を評価する

提言（中期）

(2) 外的事象に対する定量的リスク評価手法の確立

対策の高度化を推進中

(3) 内的事象に対する深層防護の再確認と定量的リスク評価の高度化
(4) 不確定性が大きく、影響が巨大な事象に関するリスク評価手法確立
(5) 定量的リスク評価でカバーできない事象に対するAM対応策
(6) 安全重要度・多様性多重性の見直し。特に電気系の見直し
(7) 日本の安全規制システムの全面的な見直し。

法律改正準備中

i) 法律体系を見直し、原子炉等規制法に電気事業法を統一する
ii) 原子炉等規制法を改正しシビアアクシデントを規制範囲に取り込む
iii) 設置許可に包括的安全解析書を導入する。
iv) 民間第三者認証制度を導入し、あわせて監査的検査制度を導入する

2012年6月16日

１０．組織、危機管理に対する教訓

a. 責任体制が不十分であった
b. 停電や情報伝達の問題などにより緊急時の円滑な対応がうまくいかなかった

提言（短期）　安全規制委員会で下記を目指している。正しく運用できるか？

(1) 専門性を持った責任者がすべての責任の統括する

提言（中期）

(2) 専門性を持った規制組織を作る

i) 原子力安全委員会を三条機関化し、日本版NRC(米国原子力安全規制委員会)のような専門性の高い規制組織を作る
ii) 環境放射線モニタリングを原子炉等規制法に取込み、都道府県が実施することで、原子力施設の監視を強化し、透明性を高めるとともに、原災法への円滑な橋渡しを図る
iii) 役職に応じた資格制度を導入するとともに、人事の固定化を図る
iv) 規制監査機関を作り、委員会事務局の監査を行う
v) 同機関は、諸外国の規制機関との連携を緊密に保つとともに、IAEAの活動に能動的に参画する

2012年6月16日

１１．情報公開に対する教訓

a. 情報公開が十分ではないと見られている
b. 技術的な説明が不十分であった
c. 放射線安全に対する説明性が低い
d. 避難区域の設定が段階的に拡大した
e. 避難区域などの設定に関する自治体との連携不足
f. 自治体と災害本部の意思疎通が無い

提言（短期）

(1) SPEEDIの全面的な公開

まだ対策が不十分かもしれない

(2) プレス発表における技術的な説明の改善
(3) 統一された放射線安全の考え方に基づいた防護措置の発表

提言（中期）

(4) 原子力災害対策法の見直し。特に国と自治体の役割を実態に合わせて明確化
(5) 見直された原子力災害対策法にのっとり、事故が起こることを前提とした訓練の実施
(6) ERSSやSPEEDIの高度化と利用法に関する議論を明確化
(7) 原子力透明化法の制定

2012年6月16日

１２．緊急時安全管理に対する教訓

a. 構内の放射線量に関する情報一元化、共有化に課題がある
b. 免震重要棟の設計条件に放射性物質の流入は想定されていなかった
c. 緊急事態での従業員・作業員への健康等への影響の認識が不足

提言（短期）

(1) 情報共有化の徹底

緊急対策で実施

提言（中期）

(2) 緊急時における放射線管理要員の確保および資機材の調達の事前計画と実行可能性確認

(3) 緊急時の人間行動など行動科学および健康科学面からの分析とその知見の反映

対策の高度化を推進中