

# ポスト福島における エネルギー・原子力・環境対策の再構築

2015.1.16

学生とシニアの対話イン東北大学

SNW 石井正則

[m\\_ishii@flamenco.plala.or.jp](mailto:m_ishii@flamenco.plala.or.jp)

# 目次

## 1 福島事故の原因と対策

原因、対策、復旧(汚染水問題、廃炉)に向けた取り組み

## 2 ポスト福島 of 課題

### 2.1 福島復興問題に向けて

### 2.2 化石燃料による原子力代替

### 2.3 後回しになった温室効果ガス削減

## 3 エネルギー計画の再構築に向けて

安定供給、エネルギー経済、温室効果ガス問題の解決など

## 4 おわりに 社会から受容されるために

リスクとベネフィットの選択など

# 1 福島震災事故 原因と対策

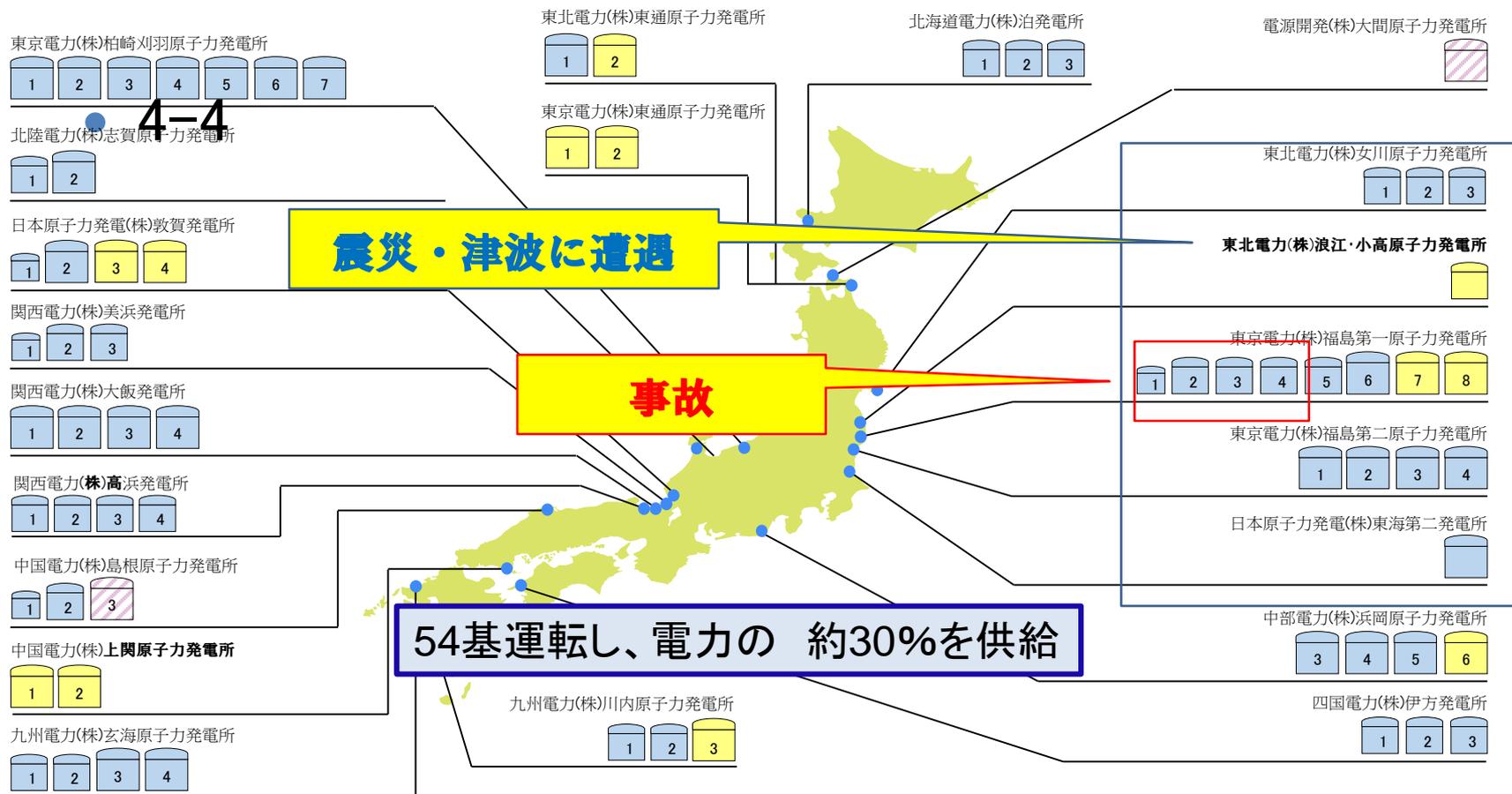
- **要因**
  - 地震後の津波による全電源喪失
  - 非常用冷却系の機能喪失
- **対策**
  - 安全対策 アクシデント・マネージメント
- **復旧に向けて**
  - 汚染水対策
  - 廃炉作業

下記の図書が参考になります

- \* 福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言—学会事故調最終報告書(丸善出版)
- \* 福島原発で何が起きたか 政府事故調技術解説(日刊工業社)
- \* その他、国会事故調、民間事故調、大前事故調の報告書など

# 震災・津波に遭遇した原子力発電所

(商業用・2010年3月末現在)

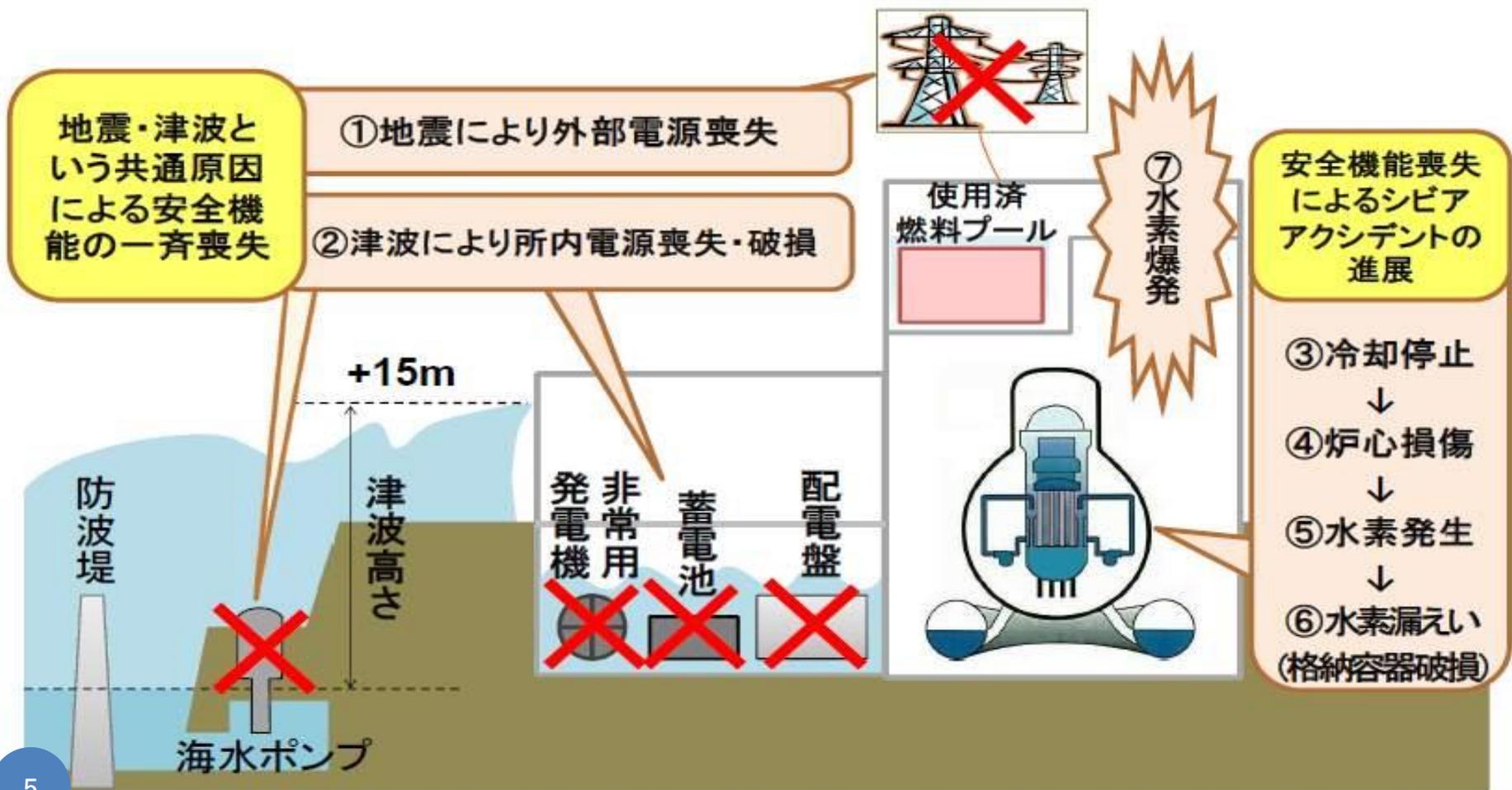


	基数	合計出力(万kW)
運転中	54	4884.7
建設中	2	275.6
着工準備中	12	1,655.2
合計	68	6,815.5

運転終了：日本原子力発電(株)東海発電所 1998.3.31 / 中部電力(株)浜岡原子力発電所1、2号機 2009.1.30

# 福島第一原子力発電所事故の原因

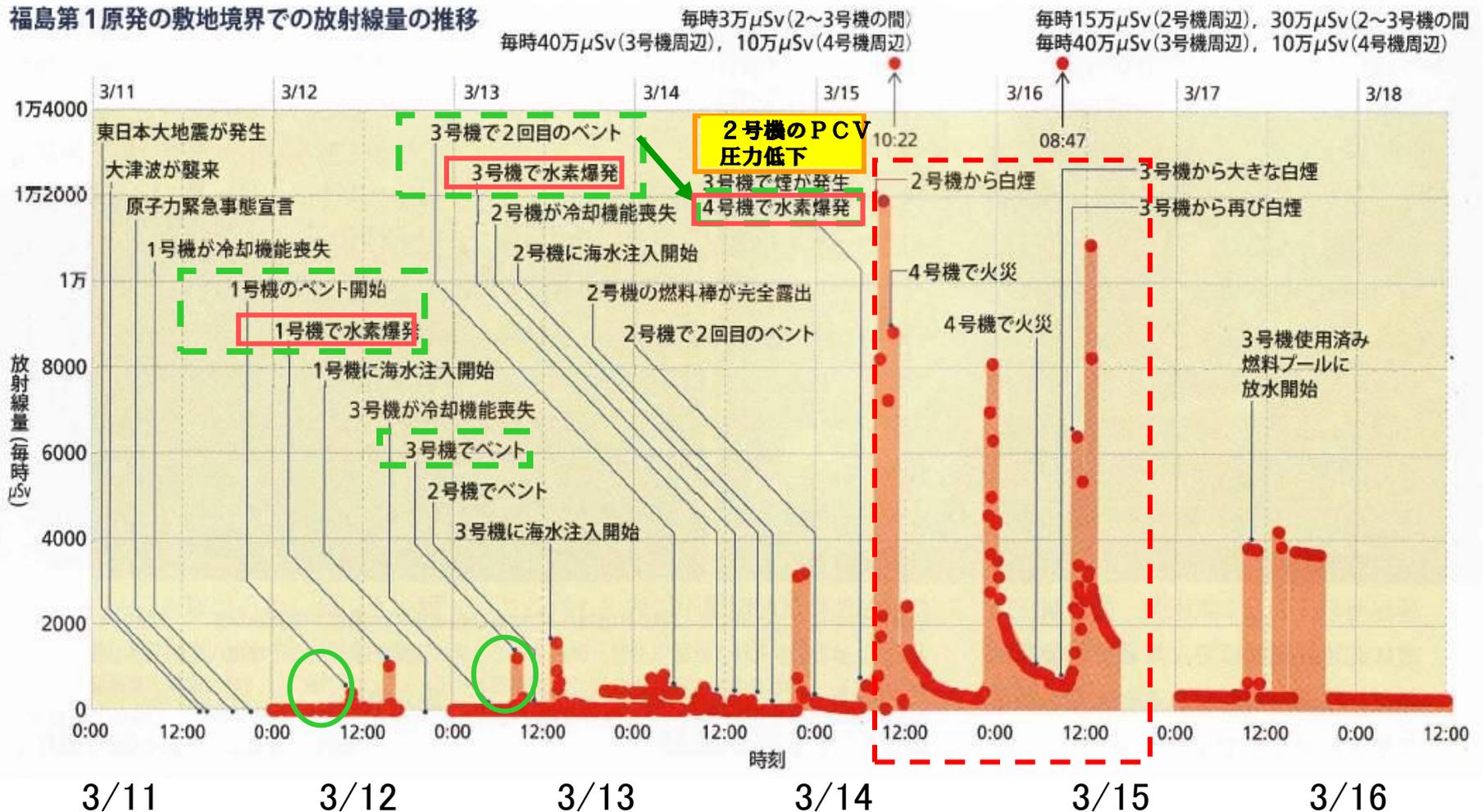
- \* 地震後外部電源、地震後の津波で非常用電源、直流電源喪失
- \* 非常用冷却系の機能喪失により炉心損傷、炉心溶融、水素爆発  
⇒過酷事故に進展



# 参考 格納納容器の損傷後に放射線量率急増

## 3/15の2号機のPCV漏洩以降の放射線量率が急増

福島第1原発の敷地境界での放射線量の推移



日経サイエンス2011年7月号より

奈良林直教授資料より

# 参考 炉心溶融に至るプロセス

石川迪夫先生の著書を参考にすると、概略次のようなプロセスで炉心が溶融、崩壊したと推察される。皆さんも推察してみてください。

- 1 冷却水注入停止
- 2 崩壊熱により蒸発・水位低下
- 3 炉内圧力・温度上昇
- 4 ベントで減圧、注水  
ジルコニウム・水の酸化反応熱&水素発生
- 5 被覆管溶融・崩壊
- 6 炉心溶融

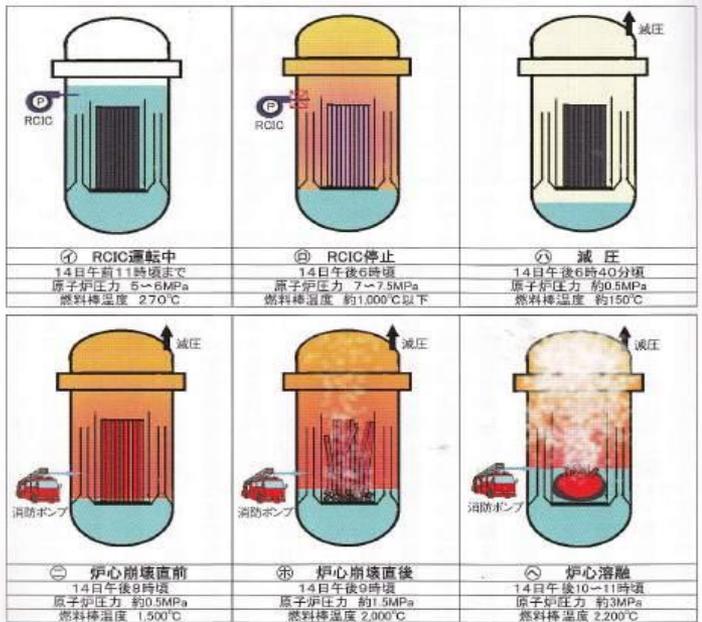


図1.2.10 2号機の炉心状況の進展（模式図）

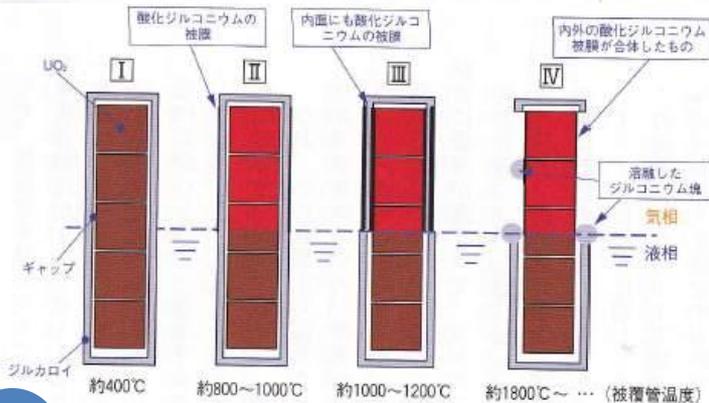
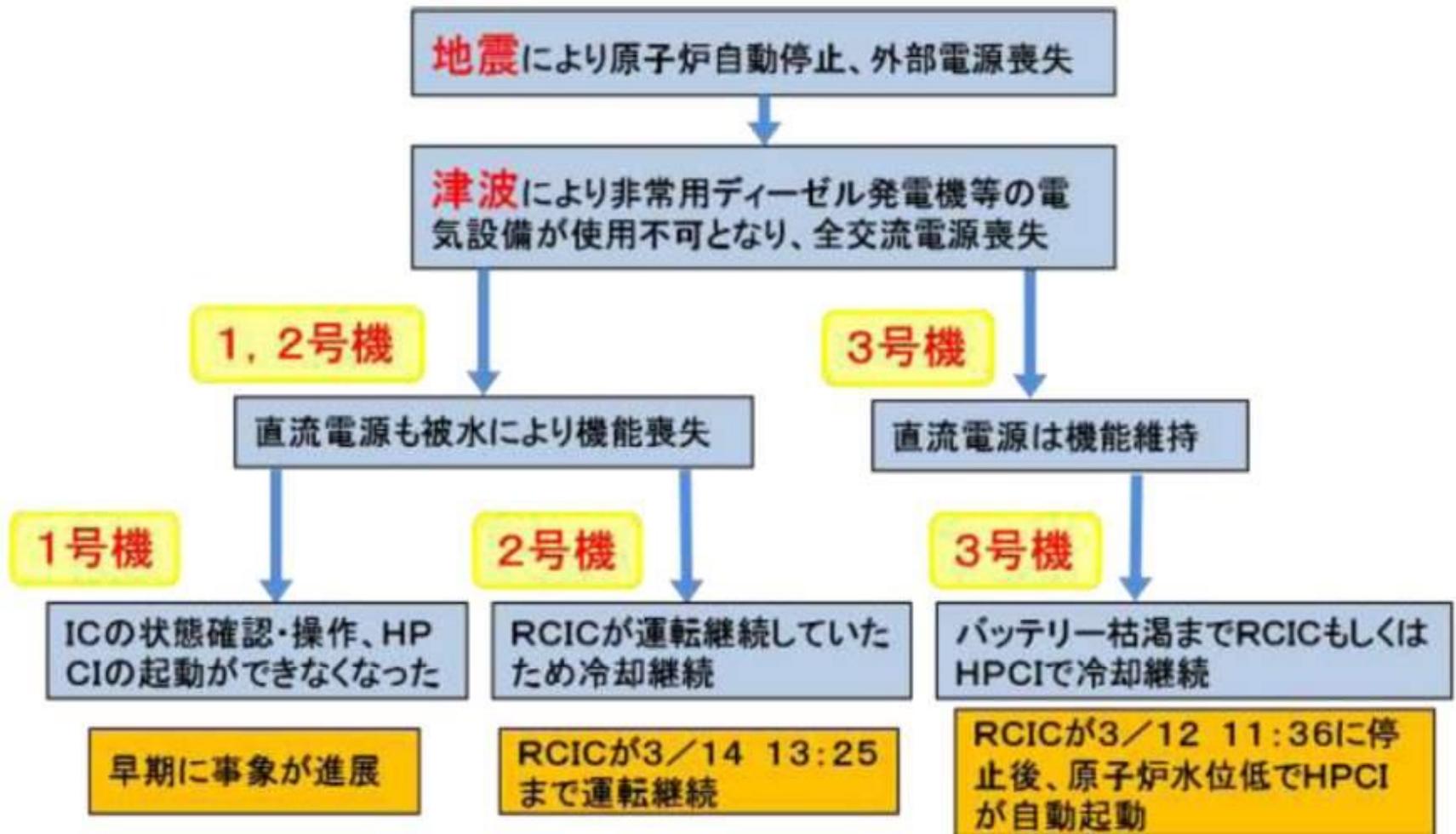


図1.1.5 事故時被覆管温度と燃料棒の状態

溶融炉心は卵の殻（皮膜）に覆われて炉底部に存在していると想定される。殻の内部は溶融状態。

詳細は石川迪夫著「考察福島原子力事故 炉心溶融・水素爆発はどう起こったか」を参照下さい

# 地震と津波の影響の整理



# 福島第一原子力発電所の事故の教訓

## 福島第一原子力発電所事故を教訓に

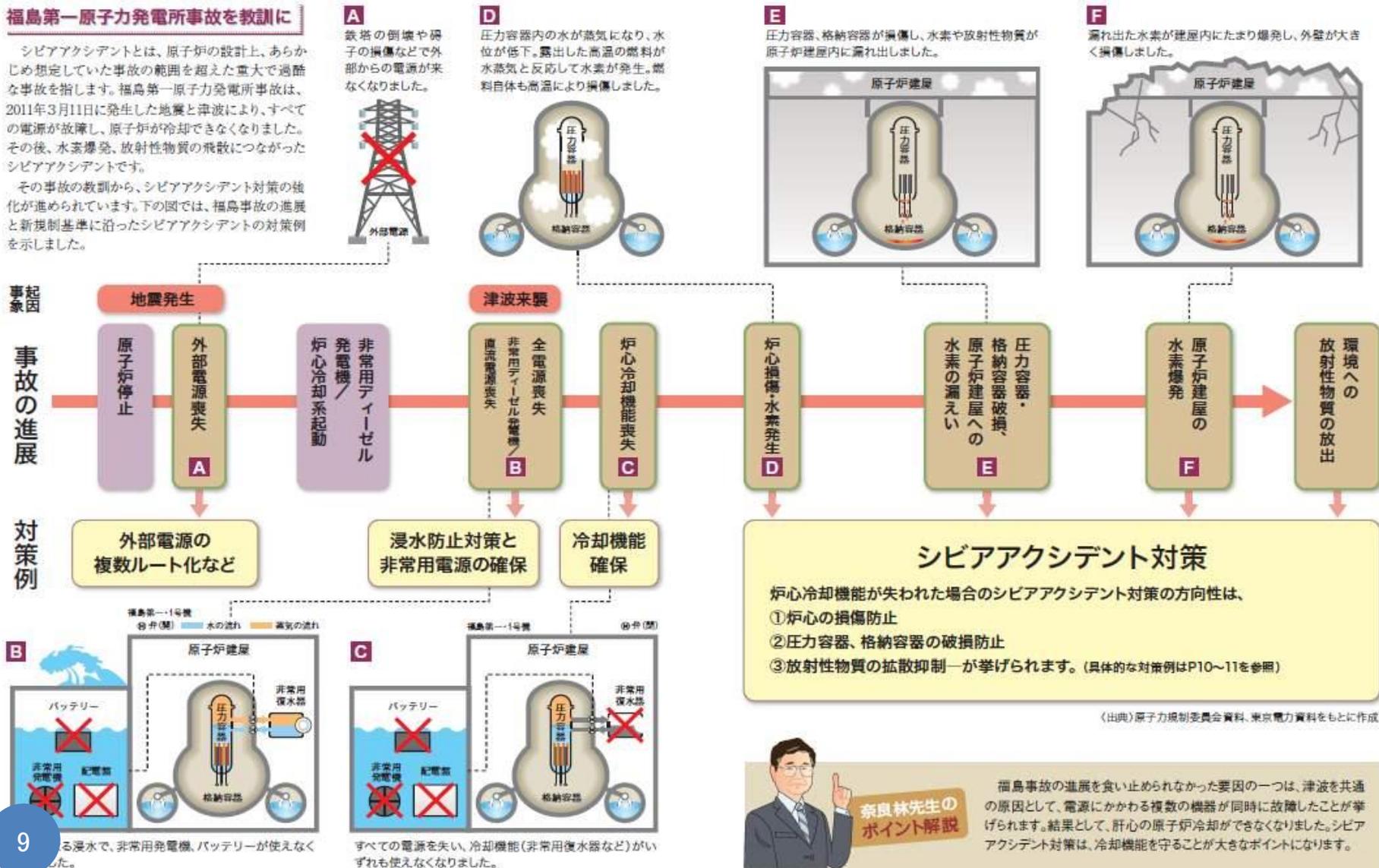
シビアアクシデントとは、原子炉の設計上、あらかじめ想定していた事故の範囲を超えた重大で過酷な事故を指します。福島第一原子力発電所事故は、2011年3月11日に発生した地震と津波により、すべての電源が故障し、原子炉が冷却できなくなりました。その後、水素爆発、放射性物質の飛散につながったシビアアクシデントです。

その事故の教訓から、シビアアクシデント対策の強化が進められています。下の図では、福島事故の進展と新規規制基準に沿ったシビアアクシデントの対策例を示しました。

事起る

事故の進展

対策例

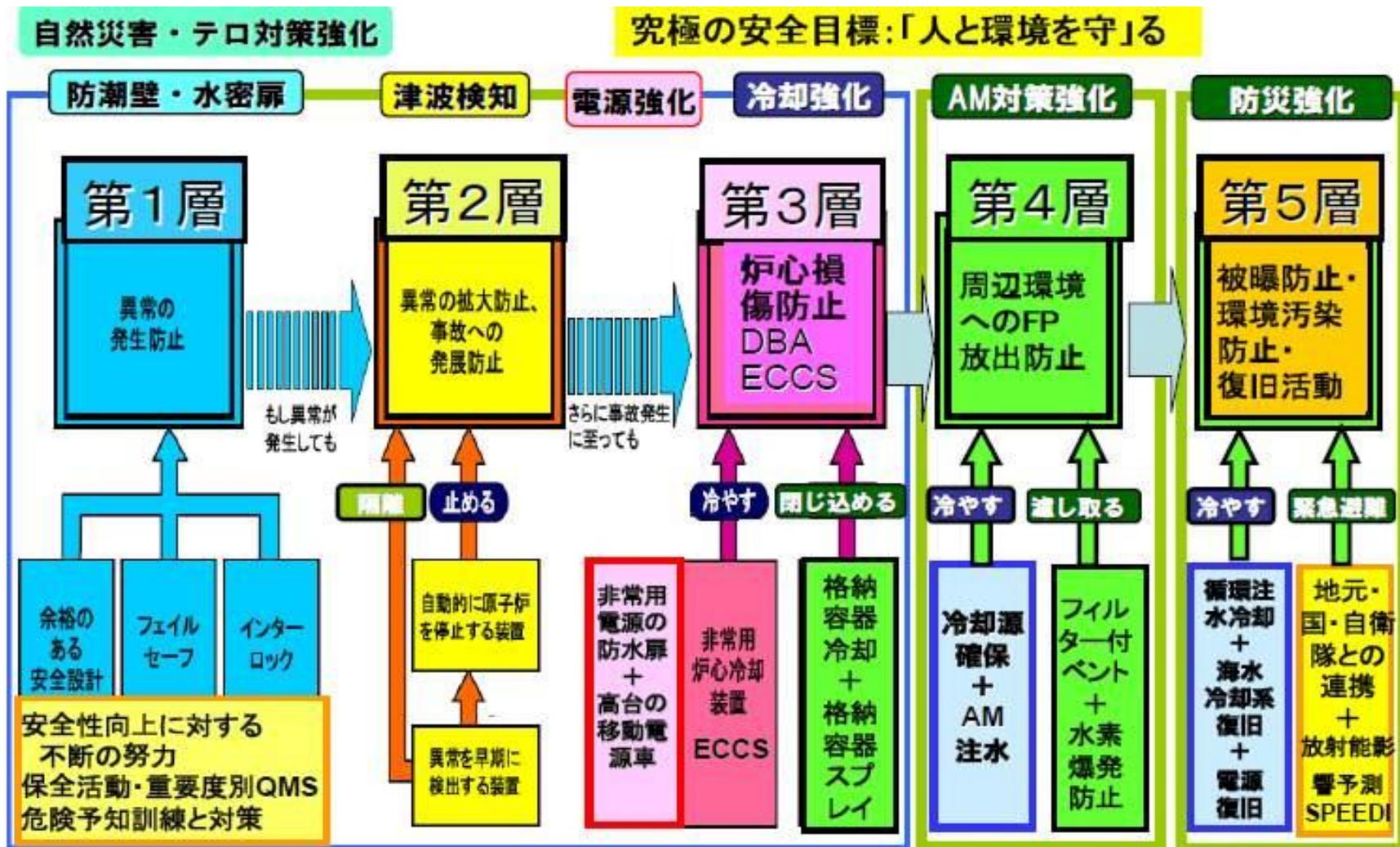


奈良林先生のポイント解説

福島事故の進展を食い止められなかった要因の一つは、津波を共通の原因として、電源にかかわる複数の機器が同時に故障したことが挙げられます。結果として、肝心の原子炉冷却ができなくなりました。シビアアクシデント対策は、冷却機能を守ることが大きなポイントになります。

# 津波に対する深層防護

第4層・5層 SA・AM



# 福島第一原発事故の原因と対策

①地震で受電設備が破損  
(外部電源喪失)



受電設備の耐震性向上  
(碍子対策、ガス遮断器採用)

②津波で非常用電源や  
電源盤、直流が使用不能



浸水防止対策(水密ドア、高所  
設置など)、非常電源多様化

③原子炉冷却・注水不能・炉  
心溶融・水素発生



冷却水源・注水手段多様化  
安全弁や除熱の強化など

④格納容器の過温破損  
水素爆発と放射能飛散



速やかなベントと格納容器  
冷却、フィルター付ベント

⑤計測監視と通信不能  
過酷事故時の防災遅延



非常時の訓練・対策強化  
原子力防災体制強化

# 規制基準の見直し

世界一厳しい新規制基準！

## <従来の規制基準>

シビアアクシデントを防止するための  
基準(いわゆる設計基準)  
(単一の機器の故障を想定しても炉心  
損傷に至らないことを確認)

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

## <新規制基準>

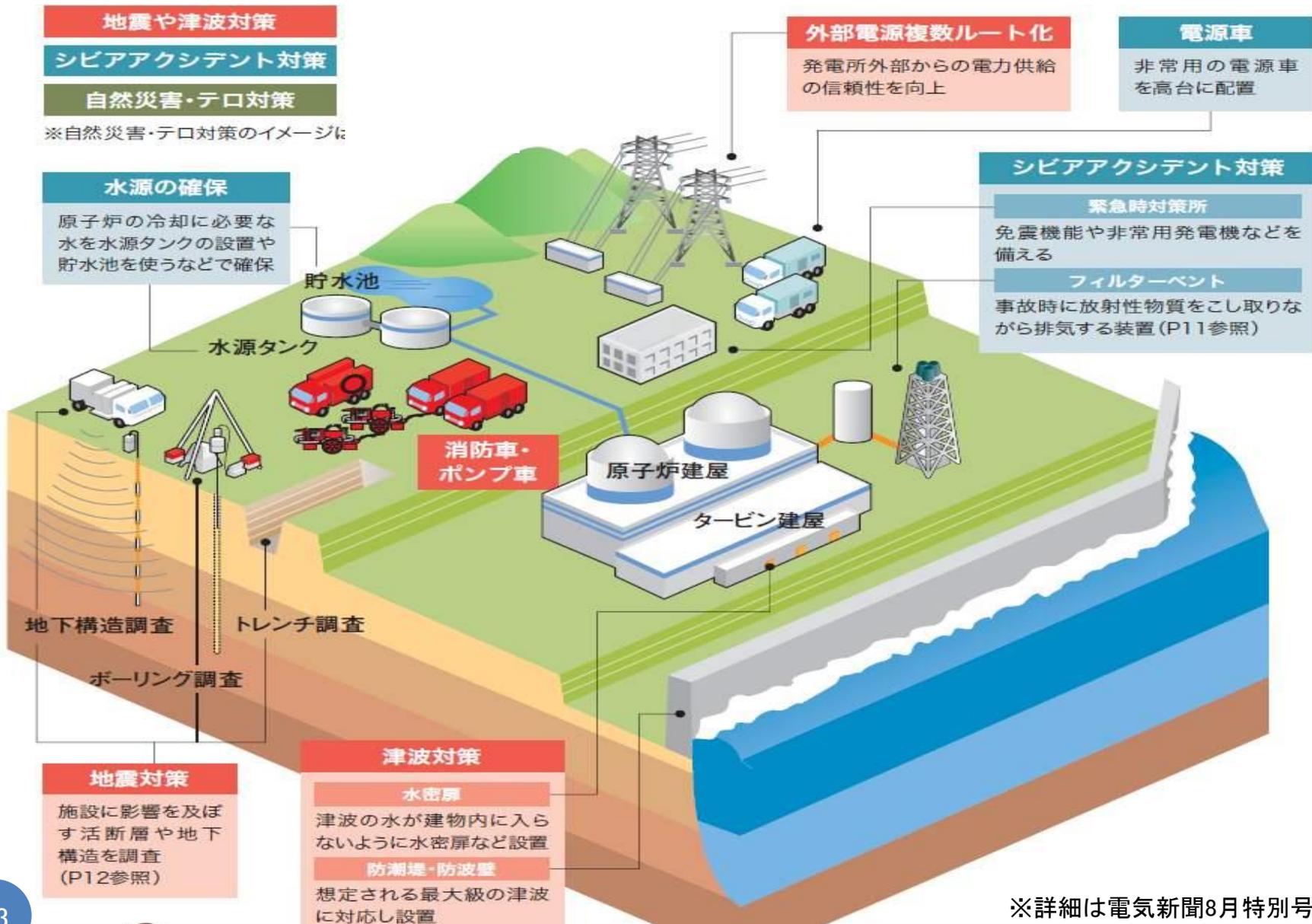
意図的な航空機衝突への対応
放射性物質の拡散抑制対策
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)
内部溢水に対する考慮(新設)
自然現象に対する考慮 (火山・竜巻・森林火災を新設)
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

新設 (テロ対策)  
新設 (シビアアクシデント対策)

強化又は新設

強化

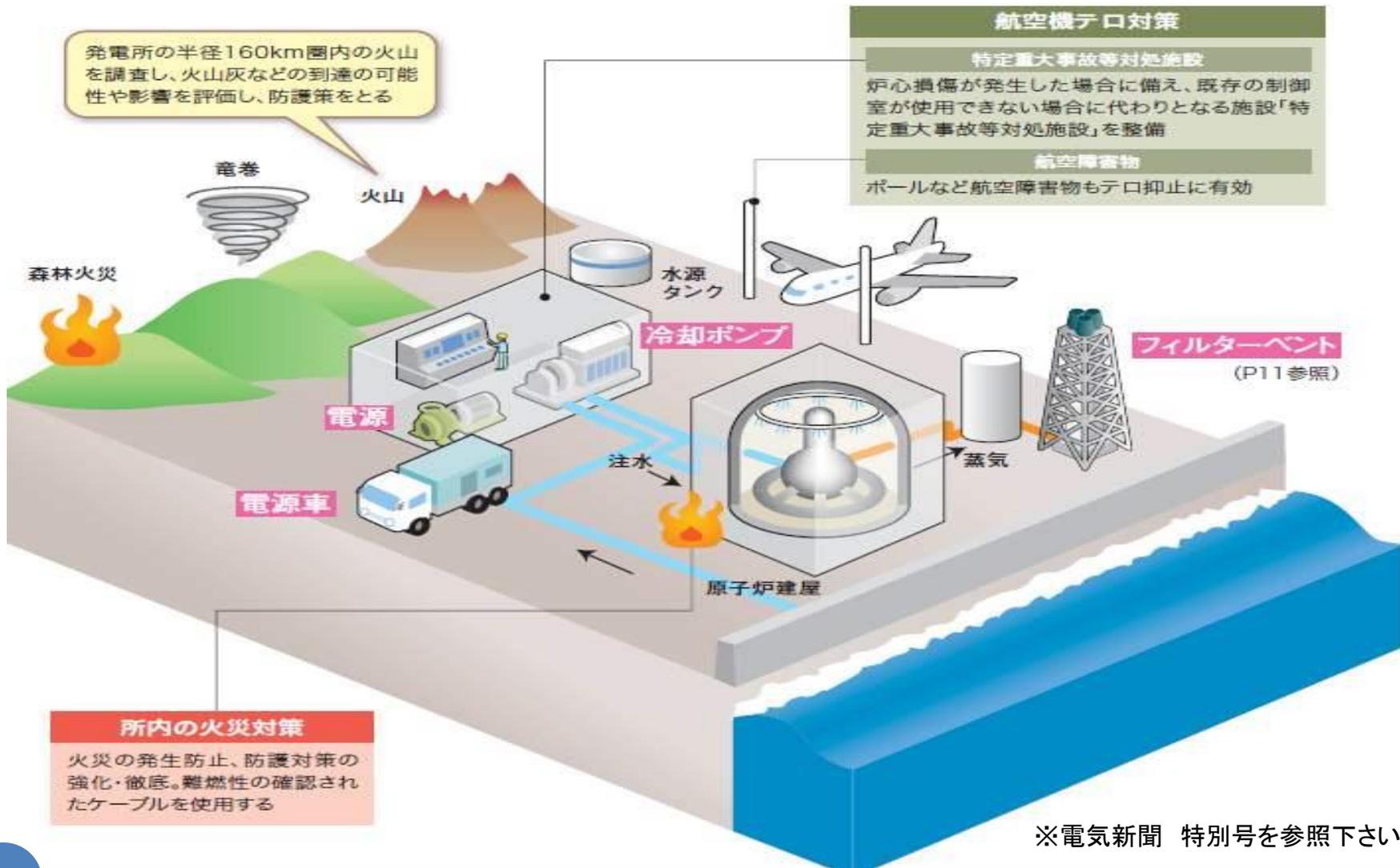
# 参考 新規制基準対応の概要



※詳細は電気新聞8月特別号

奈良林直教授資料より

# 参考 自然災害とテロ対策の概要

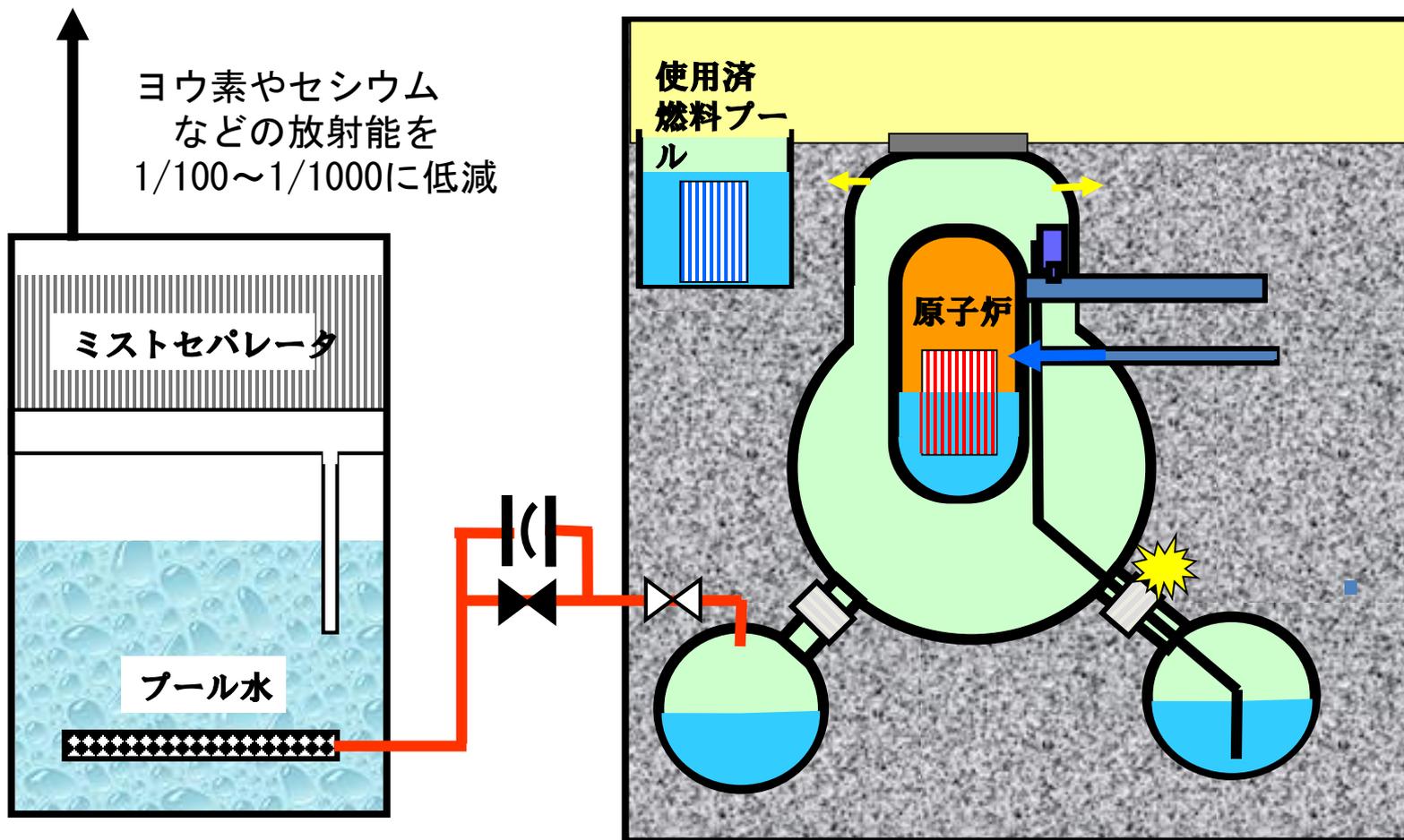


※電気新聞 特別号を参照下さい

奈良林直教授資料より

# 参考 フィルターベントの設置による 排出される放射性物質の削減

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、スウェーデンのほぼ全ての原発に設置)



# 廃止への道

## 廃止措置ロードマップ

- 冷温停止の達成・維持・・・冷却水の除染・循環
  - 使用済燃料取出し・・・まず4号機から(終了)
  - 燃料デブリ取出し・・・調査、技術開発が必要
  - 解体作業
- 廃止措置終了・・・半世紀かかる！



## 当面の課題

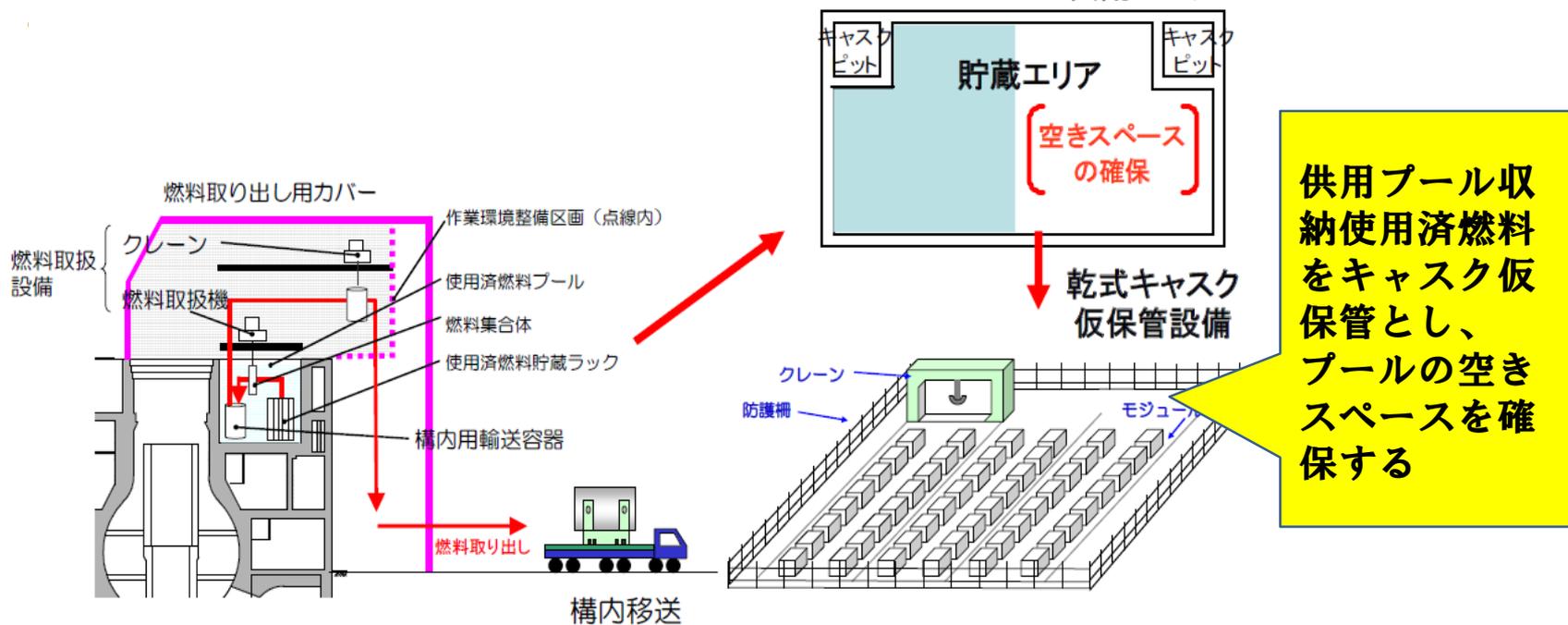
- 汚染水問題: 流入量が多い・・・貯蔵タンクが間に合うか？
- 作業環境の整備 除染、ガレキ処理、放射性廃棄物処理

# 資料 使用済燃料取出しのイメージ

## 手順

建屋上部ガレキ撤去⇒コンテナー設置⇒燃料取扱設備設置⇒燃料取出し⇒供用プールへ(供用プールの燃料は乾式キャスクに)

4号機は2013年11月開始～14年12月終了



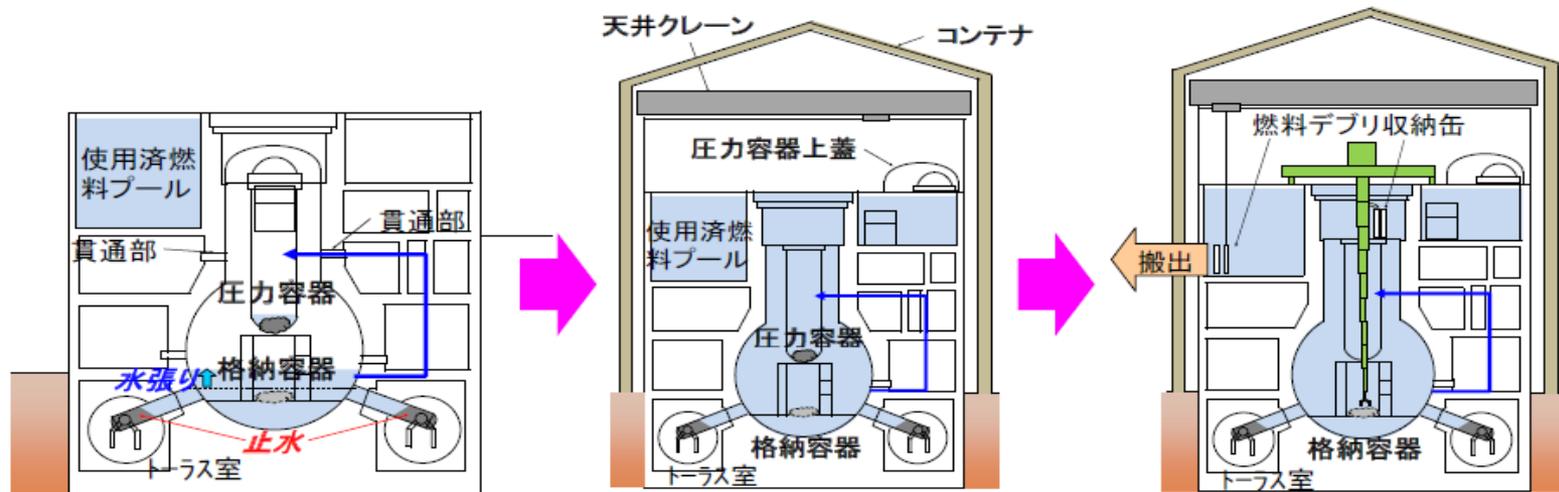
# 資料 燃料デブリの取出しのイメージ

## 高線量下の作業

被ばく防止のため、圧力容器、格納容器を冠水状態で取り出す

## 想定される手順

格納容器漏えい個所の調査・補修⇒圧力容器・格納容器水張り⇒圧力容器解放⇒燃料デブリの調査・取出し技術開発⇒取出し⇒（高レベル廃棄物）

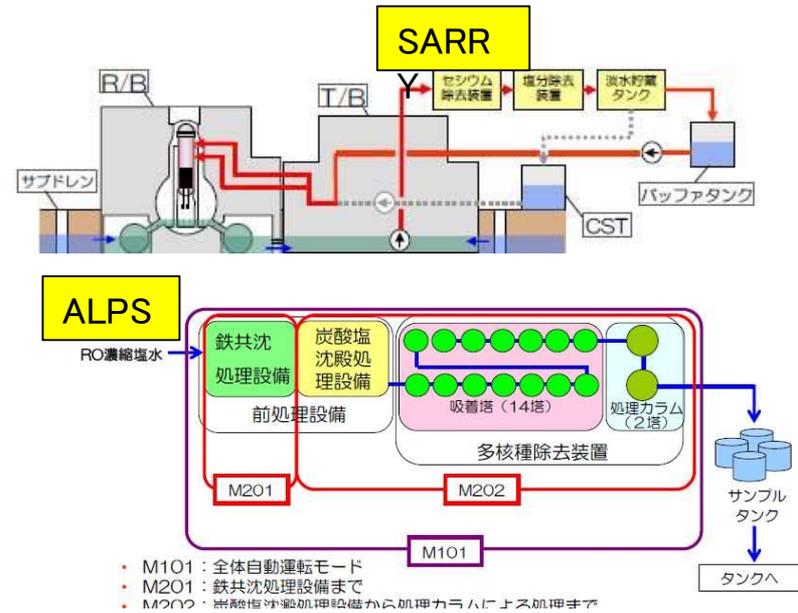


原子炉格納容器下部補修(止水)～下部水張り(イメージ)

燃料デブリ取り出し(イメージ)

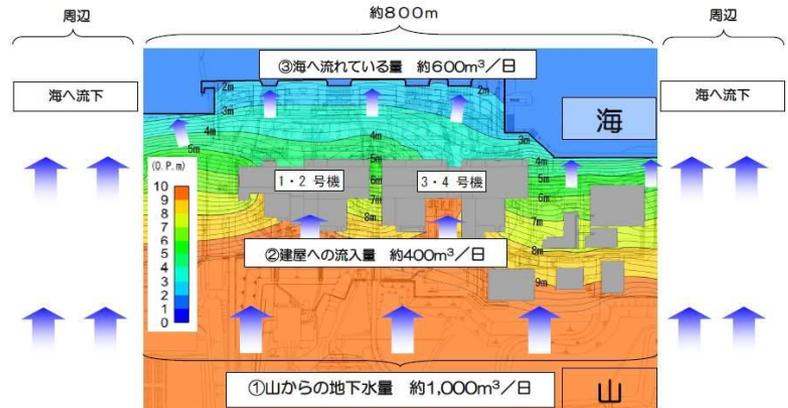
# 参考 滞留水・汚染水の問題

- 原子炉の冷温停止維持
  - 循環冷却システム
  - 滞留水 + 流入地下水
- 汚染滞留水対策
  - 漏洩防止
  - 浄化
    - SARRY : Cs
    - ALPS : トリチウム以外すべて
- 流入地下水
  - バイパスによる流入制限
    - 遮水壁
  - 貯蔵と排出
  - 1mSvの呪縛からの解放！



## 地下水の流れ

・山からの地下水①約1,000m<sup>3</sup>/日は、建屋へ②約400m<sup>3</sup>/日流入し、残りの③約600m<sup>3</sup>/日が海へ流れている



## 2 ポスト福島の問題

2. 1 福島復興 カギは1mSvの呪縛からの解放
  - 早期帰還・食料問題・汚染水問題など
2. 2 化石燃料による原子力代替 明らかになった課題
  - 経済負担増大
    - 年間負担増 約3.7兆円
  - 供給安定性の脆弱化
    - OECD諸国35カ国中34位
  - 温室効果ガス排出量の増大
    - CO2排出量 年間約1100万 t 増
2. 3 後回しになった地球温暖化対策
  - 地球温暖化対策の主役はエネルギー
  - 温室効果ガス削減へ再チャレンジが求められる
    - IPCC第5次報告
    - COP21（2015年12月）への対応



**化石燃料代替による弊害の早期解消  
エネルギー計画の再構築**

# 2. 1 福島復興

川合將義資料

## 福島の未来に向けて — 都市再興、産業再生、観光復活などなど



〈福島再生：西本由美子、吉田憲一よ

チェルノブイリ原発事故後開発された  
スラブチッチ市を超える都市作りを  
南海トラフ大震災のバックアップ都市も志向

ベテランの経験と若者の知恵と  
実行力で1次産業改革と成長  
農業の6次産業化  
世界1おいしい米作りに学ぶ  
植物工場  
農産物と加工品のブランド化  
商品の差別化と販路拡大戦略  
水産業、林業の改革



福島稲荷神社例大祭



桃農家



相馬の野馬追



広野・楢葉沖

再生可能エネルギー施設\*や廃炉を含むエネルギー基盤産業

柳津西山地熱発電所

柳津町

出力	65,000キロワット
完成	稼働中

提供：東北電力株式会社



医薬品原薬製造

医薬品製造\*やIT生産産業発展  
関連ソフト産業の育成、展開

\*福島県HP ふくしま復興のあゆみ 第5版より

増設

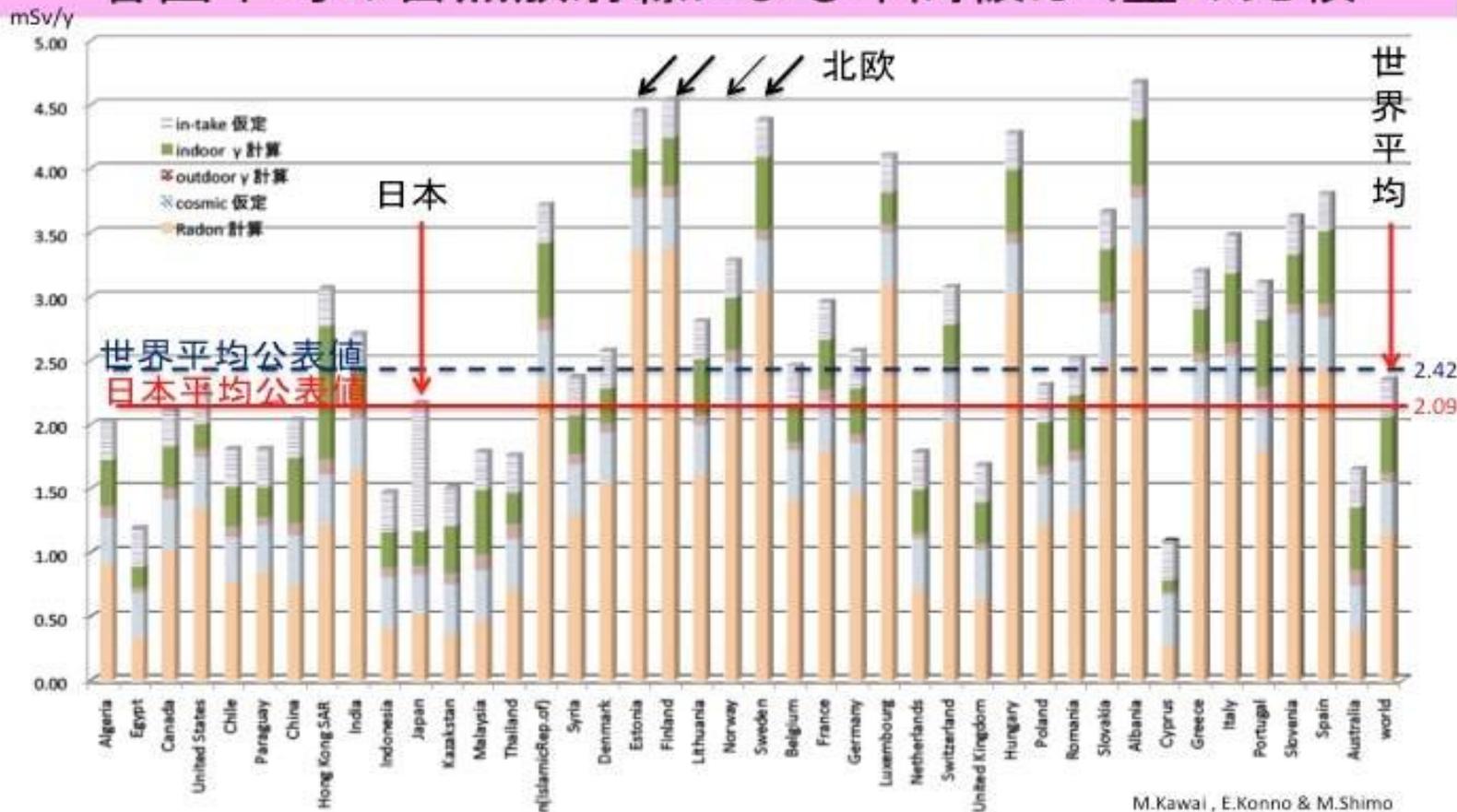
広野町

復興の課題：住民主体のビジョン作りと実現する熱意。特に若者の参加が重要

# 福島復興に向けて 1 mSv へのこだわりは必要？

川合將義資料

## 各国平均の自然放射線による年間被ばく量の比較



M.Kawai, E.Konno & M.Shimo

平成26年日本原子力学会秋の大会P18

国連科学委員会 UNSCEAR 2000レポートデータに基づく評価

日本で一般人の基準とされる1 mSvを加えた場合3.09mSvです。

## 2. 2 化石燃料による原子力代替

### 明らかになった課題1 経済負担と電気料金の上昇

\* 2011～14年度合計で約12.7兆円に達する見込み(年間負担増は約3.7兆円)

\* kWh当たりの原子力代替による負担増:LNG 12円、石油 17～18円、石炭 3円

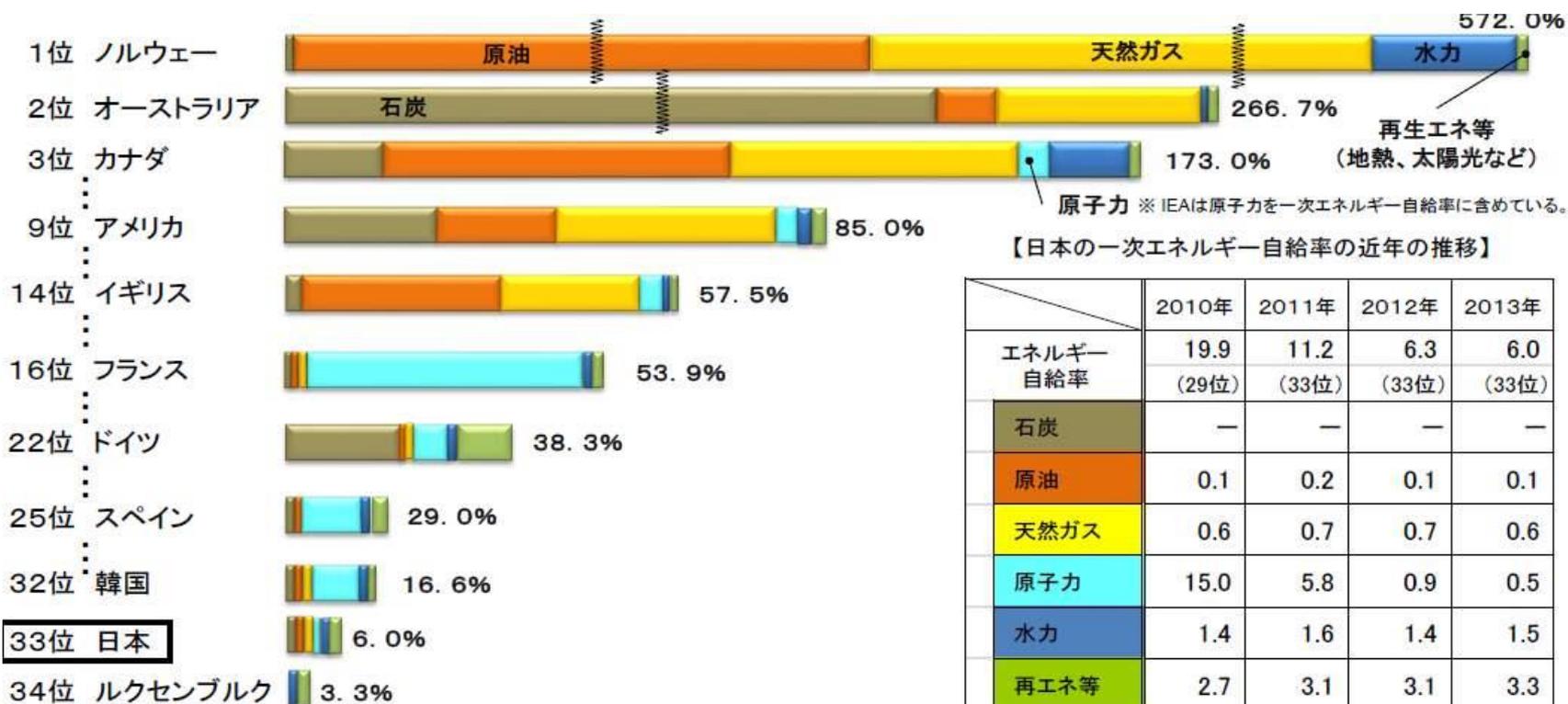
電力9社計	2010年度実績	2011年度実績	2012年度実績	2013年度実績	2014年度推計
総コスト	14.6兆円	16.9兆円	18.1兆円	19.0兆円	19.1兆円+α
燃料費	3.6兆円	5.9兆円	7.0兆円	7.7兆円	7.8兆円+α
うち原発停止による燃料費増(試算)	—	<b>+2.3兆円</b> 内訳 LNG +1.2兆円 石油 +1.2兆円 石炭 +0.1兆円 原子力▲0.2兆円	<b>+3.1兆円</b> 内訳 LNG +1.4兆円 石油 +1.9兆円 石炭 +0.1兆円 原子力▲0.3兆円	<b>+3.6兆円</b> 内訳 LNG +1.9兆円 石油 +1.8兆円 石炭 +0.1兆円 原子力▲0.3兆円	<b>+3.7兆円</b> 内訳 LNG +2.1兆円 石油 +1.8兆円 石炭 +0.1兆円 原子力▲0.3兆円
燃料費増が総コストに占める割合(%)	—	13.6%	17.1%	19.4%	19.4%
原子力利用率	66.8%	25%	3.9%	2.3%	0%

【参考】コストの諸元	LNG	石油	石炭	原子力
燃料費(2013年度)	13円/kWh	18円/kWh	4円/kWh	1円/kWh
燃料費(2014年度)	13円/kWh	19円/kWh	4円/kWh	1円/kWh
焚き増し分の発電電力量(2013年度)	1,450億kWh	1,022億kWh	153億kWh	—
焚き増し分の発電電力量(2014年度)	1,645億kWh	950億kWh	153億kWh	—

## 明らかになった課題2 エネルギー安定供給補償の脆弱化

OECD諸国の一次エネルギー自給率  
日本は約6% (3.11以前は約20%)

OECD加盟34カ国中33位・・・これではエネルギー安全保障はおぼつかない



原子力 ※ IEAは原子力を一次エネルギー自給率に含めている。

【日本の一次エネルギー自給率の近年の推移】

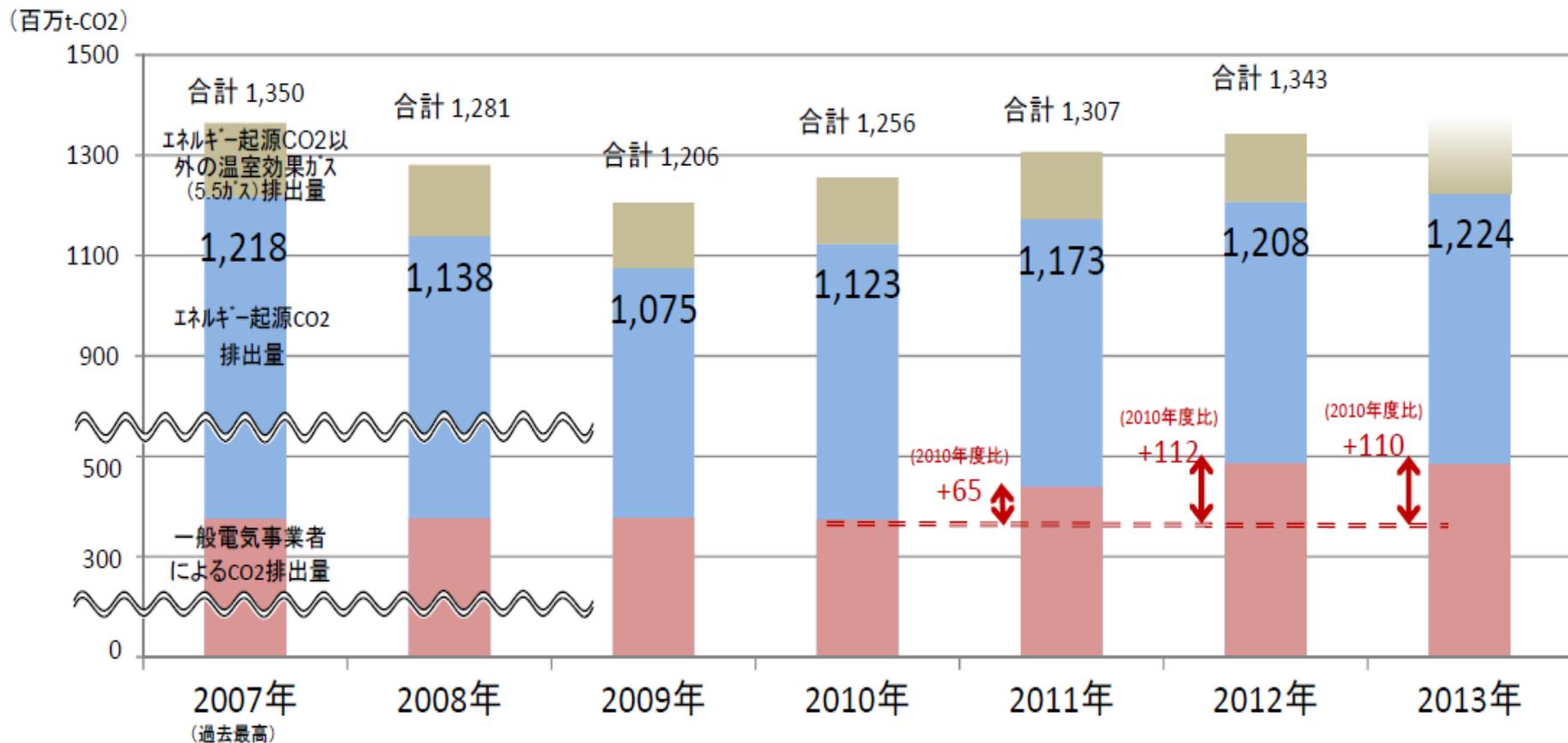
	2010年	2011年	2012年	2013年
エネルギー自給率	19.9 (29位)	11.2 (33位)	6.3 (33位)	6.0 (33位)
石炭	—	—	—	—
原油	0.1	0.2	0.1	0.1
天然ガス	0.6	0.7	0.7	0.6
原子力	15.0	5.8	0.9	0.5
水力	1.4	1.6	1.4	1.5
再生エネ等	2.7	3.1	3.1	3.3

表中の「—」: 僅少

【出典】 IEA「Energy Balance of OECD Countries 2014」を基に作成 (注) 2013年の数値は推計値

## 明らかになった課題3 日本の温室効果ガス排出量増大

\* 2012、13年のエネルギー起源CO2排出量は2010年比約110百万t-CO2増加  
 \* 省エネは進展しているも、原発停止による火力代替の影響で大幅増

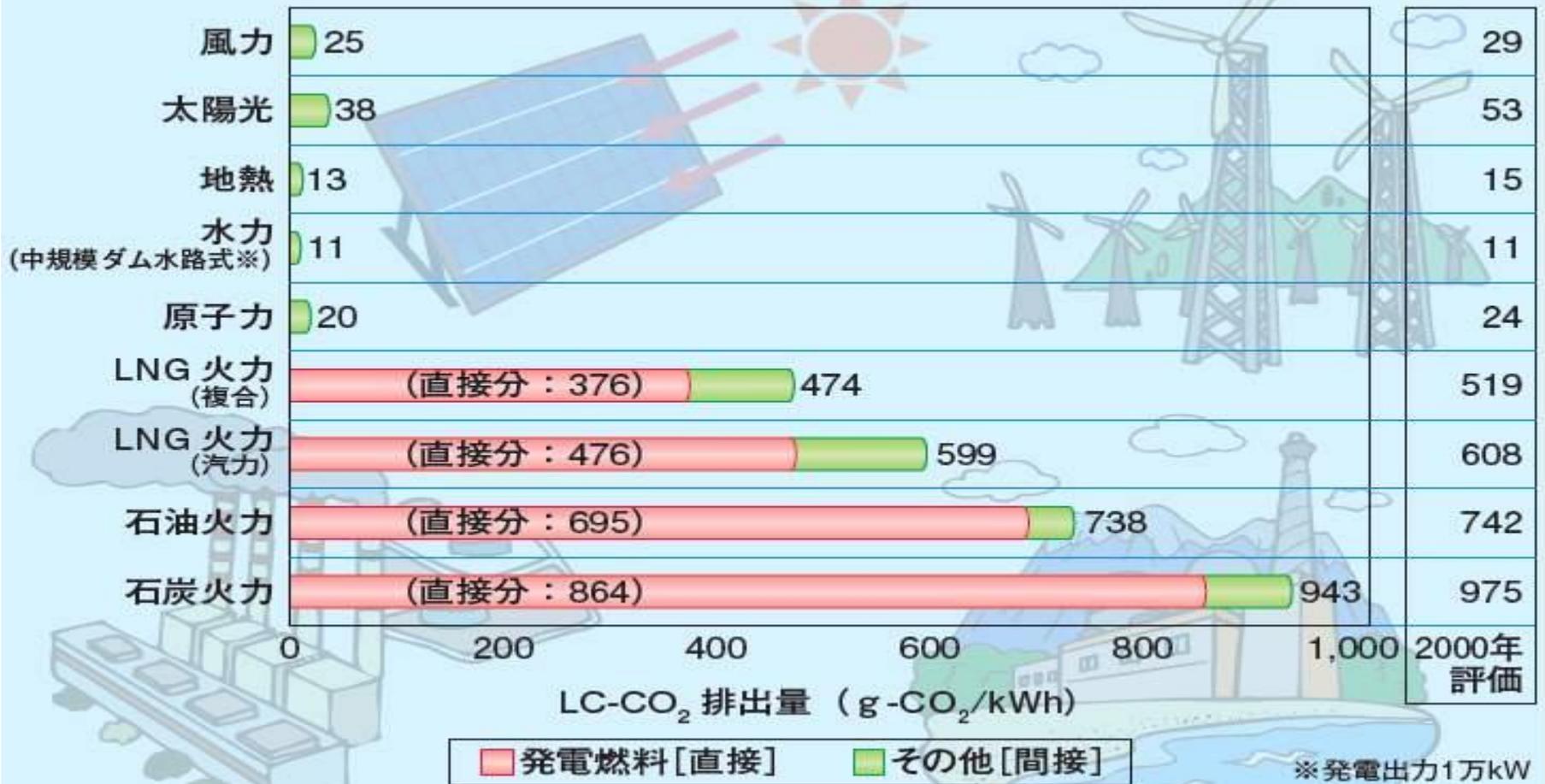


## 2. 3 後回しになった地球温暖化対策

- 化石燃料依存による温室効果ガス排出量増大
  - COP19（2013年）、20（2014年）、カンクン合意
    - 2020年削減目標（1990年比、米は2004年比）
      - 米国 -17、EU-40、英国-34、独-40、仏-33、露-15~-25
    - 日本は？
      - -25%に変わる目標？
        - 民主党マニフェスト（2009） 2020年までに25%削減
- 人間活動による温暖化の進展は止まらず
  - IPCC第5次報告（2013年）
  - COP21（2015年末、パリ）で何を提示できるのか？

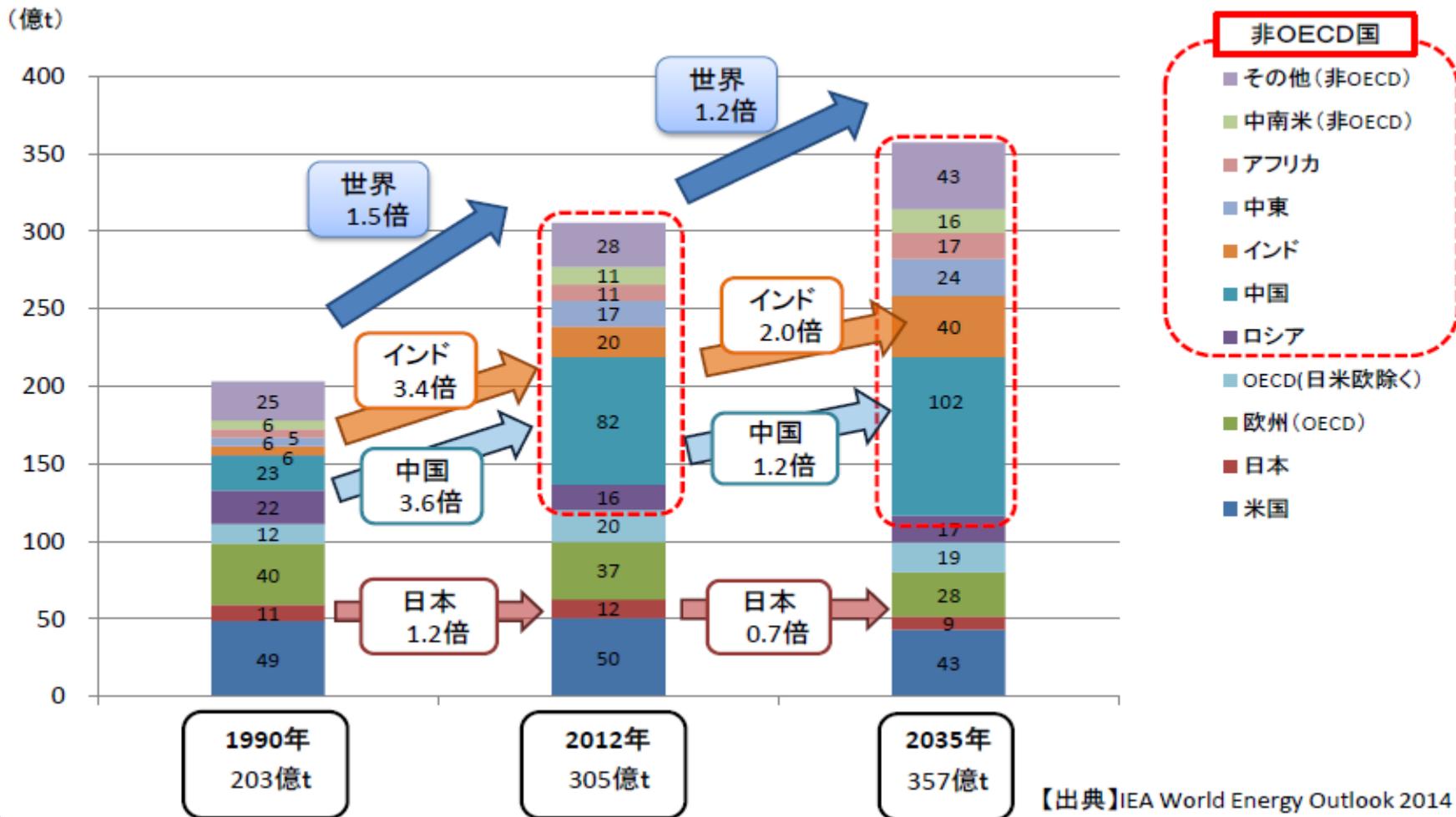
## 参考 電源別のCO2排出係数

火力による原子力代替⇒CO2排出大幅増・いずれ化石燃料はフェードアウト！  
太陽光、風力・・・バックアップが必要



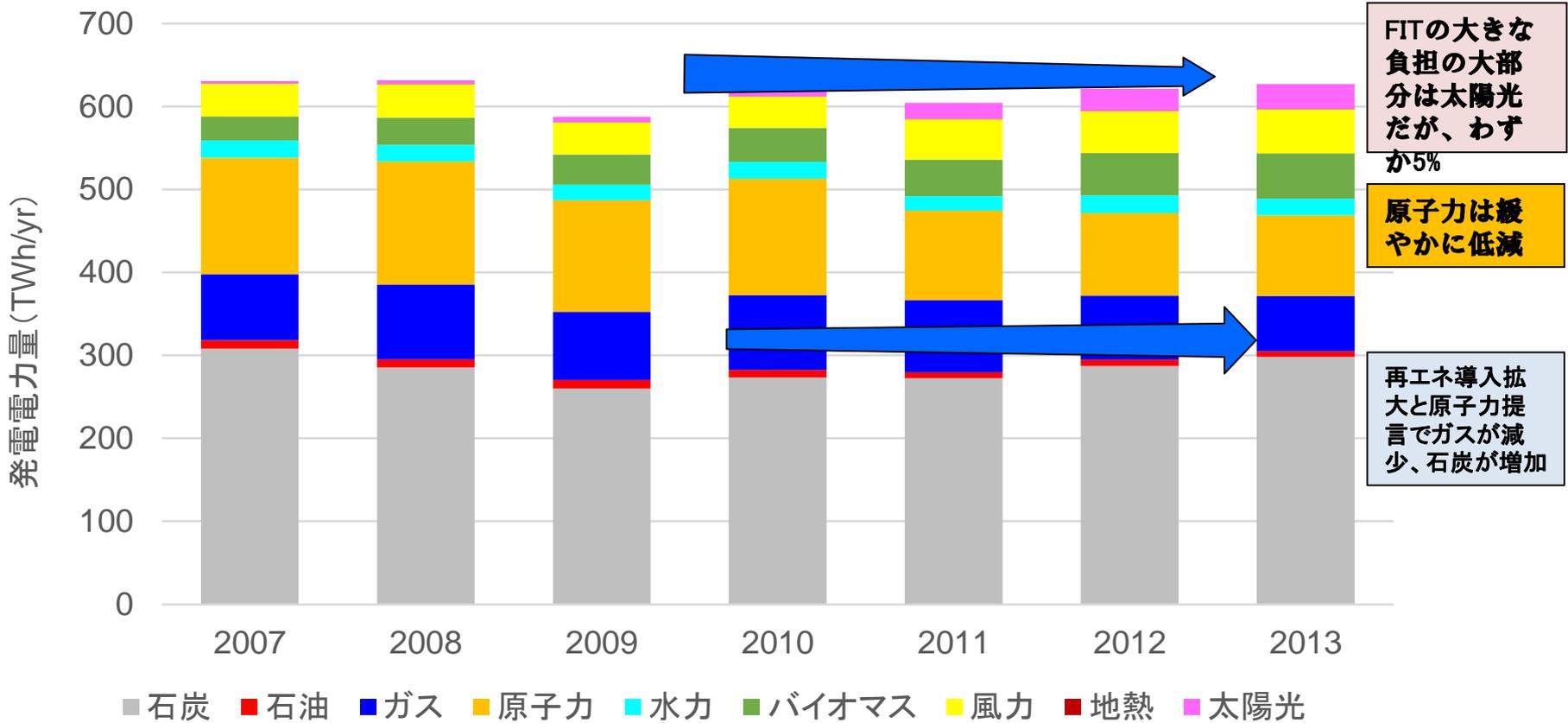
# 参考 世界のエネルギー一起源CO2排出量見通し

## 世界のCO2排出量の見通し(地域別)



# 参考 ドイツの発電・・・これでも優等生？

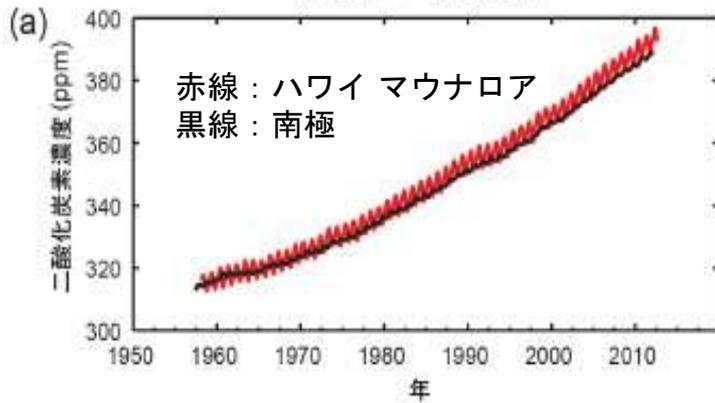
- \* 固定価格買取制度 (FIT) は見直し
- \* 太陽光の導入が進んだが、シェアは5%程度
- \* 原子力発電の段階的廃止を進めているが、その代替は石炭火力。CO2削減にならない



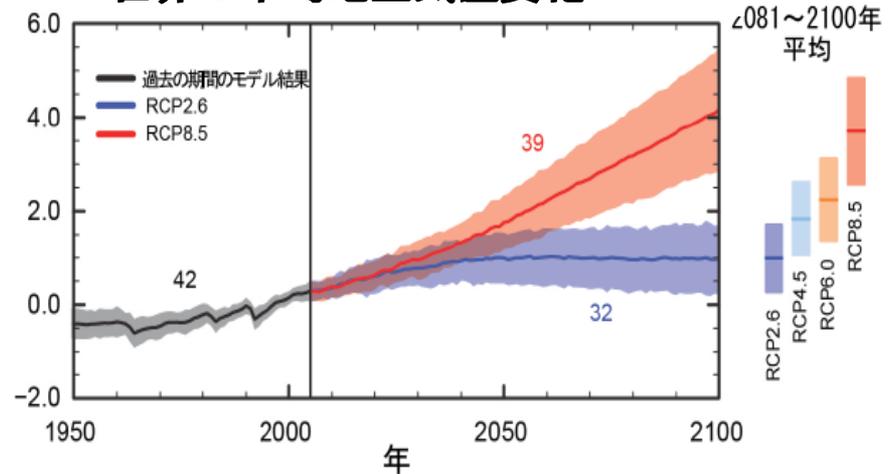
出典) IEA Energy Balances of OECD Countries, 2014

# 温室効果ガスの増大と気温変化 IPCC第5次報告より

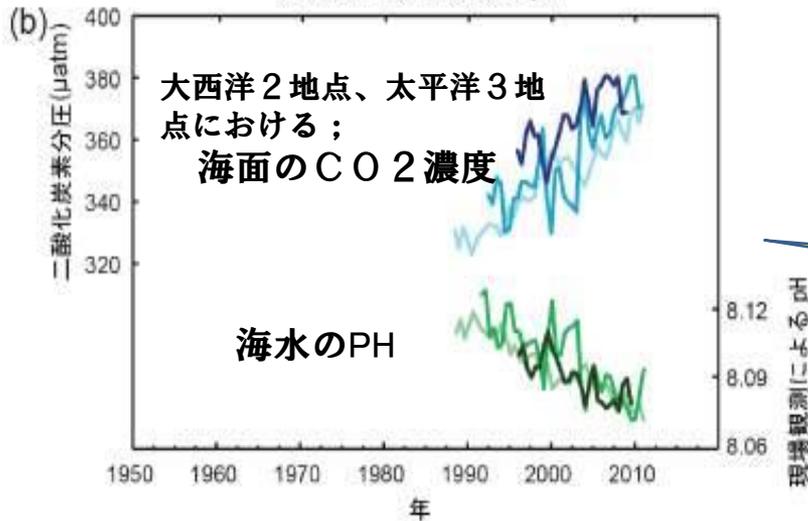
大気中の二酸化炭素



世界の平均地上気温変化



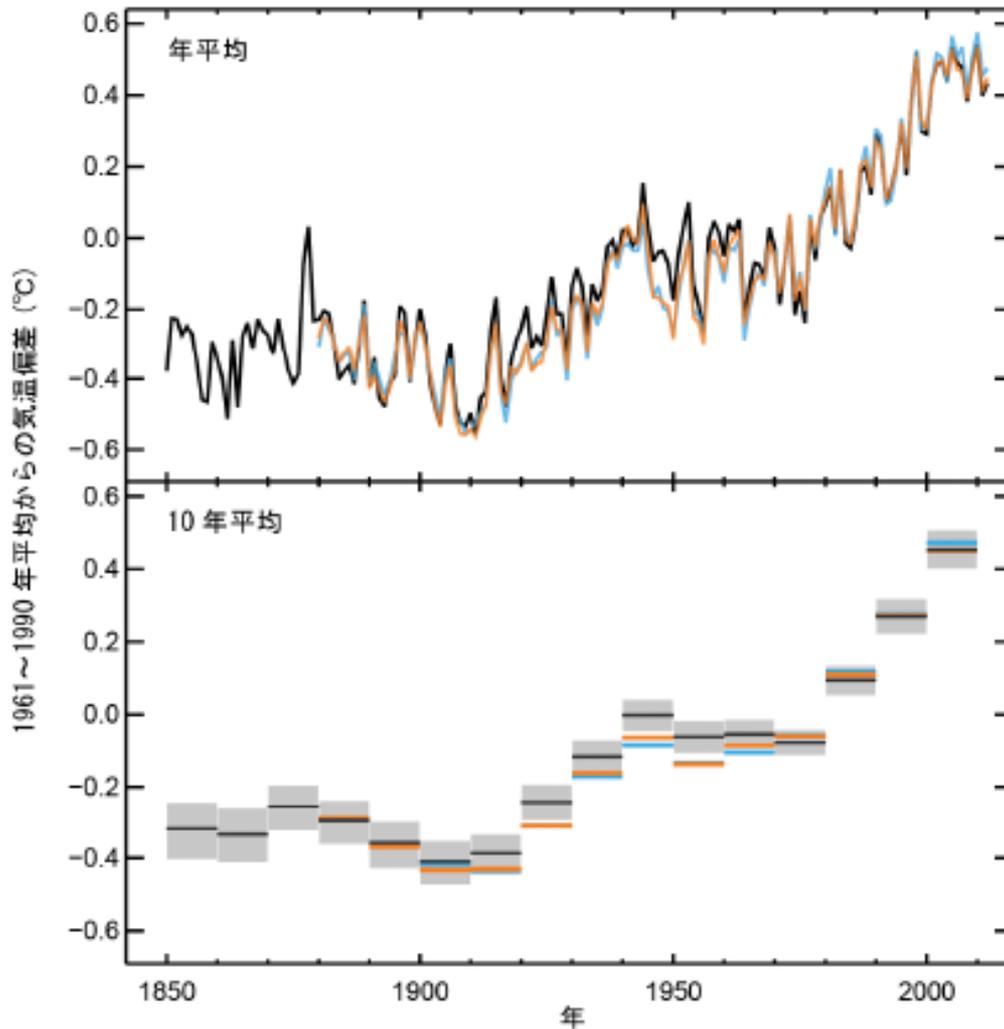
海面の二酸化炭素と pH



21世紀末の気温は、1986~2005年の平均に対し安定化シナリオ (RCP4.3、RCP6.0) では1.1~3.1、高排出量シナリオ (RCP8.5) では2.6~4.8°C上回る可能性が高い

温室効果ガス (CO<sub>2</sub>など) の大気中濃度は、少なくとも過去80万年間で前例にない水準にまで増加  
海洋は人為起源のCO<sub>2</sub>約30%を吸収、海洋酸性化を引き起こしている

# 地球温暖化・年平均気温の変化



## IPCC第5次報告より

1880~2012年の期間では約  
0.85°C上昇

1950年代以降、観測された  
変化の多くは数十年~数千年  
間で前例がない  
年により変動はあるが、10  
年平均ではこの傾向は明らか

1960年以降の急上昇の要因は  
人間活動による可能性が高い  
(確率95-100%)

# 温室効果ガスの増加 過去1万年

- 大気中の二酸化炭素、メタンの濃度は、人間活動によって1750年以降顕著に増加し、現在では、氷床コア※1から決定された産業革命前の値をはるかに超えている。

出典:AR4 SYR SPM

## 南極ドームふじ基地における氷床コア採取

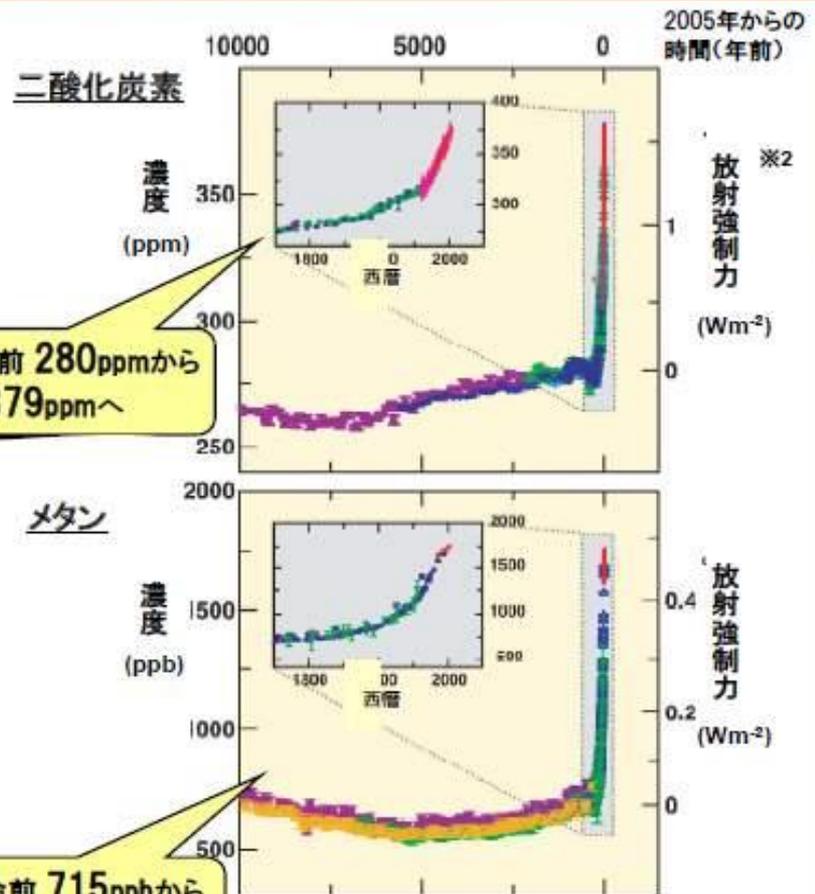


出典:文部科学省ホームページ  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/18/01/06022402/001/001.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/18/01/06022402/001/001.htm)

※1 南極やグリーンランドの氷床から取り出される氷。過去の大気組成や気温などを知る手がかりとなる。

※2 正の放射強制力は地表面を暖め、負の放射強制力は地表面を冷やす。地球に出入りするエネルギーのバランスを変化させる影響力のことで、1平方メートルあたりワット数で表される。

## 氷床コアと現代のデータによる温室効果ガスの変化



出典:AR4 SYR Longer Report 主題2 図2.3

# 3 エネルギー計画・政策の再構築に向けて

- 課題
  - 電気料金を3.11以前の水準に戻す
  - 安定したエネルギー供給・国際競争力、温室効果ガス削減を可能とする安定した電力供給の実現
- 当面の対応事項
  - 停止中の原子力発電所再稼働促進
  - 建設中の原子力発電所、核燃料サイクル施設（再処理工場）の建設促進、運転開始
  - 再生可能エネルギーのコスト低減（FITの終了）
- 中長期的に対応すべき事項
  - 現在の原子力発電運転期間終了も一定の原子力発電比率を維持するためのリプレイス計画の推進
  - 核燃料サイクルの推進・・・高レベル廃棄物処分場選定、MOX、高速炉推進
- 適宜、適時取り組むべき事項
  - 安全炉・次世代炉
  - 海外協力（輸出、技術協力）など
    - 輸出：米国、ベトナム、フィンランド、トルコ、カザフ・・・

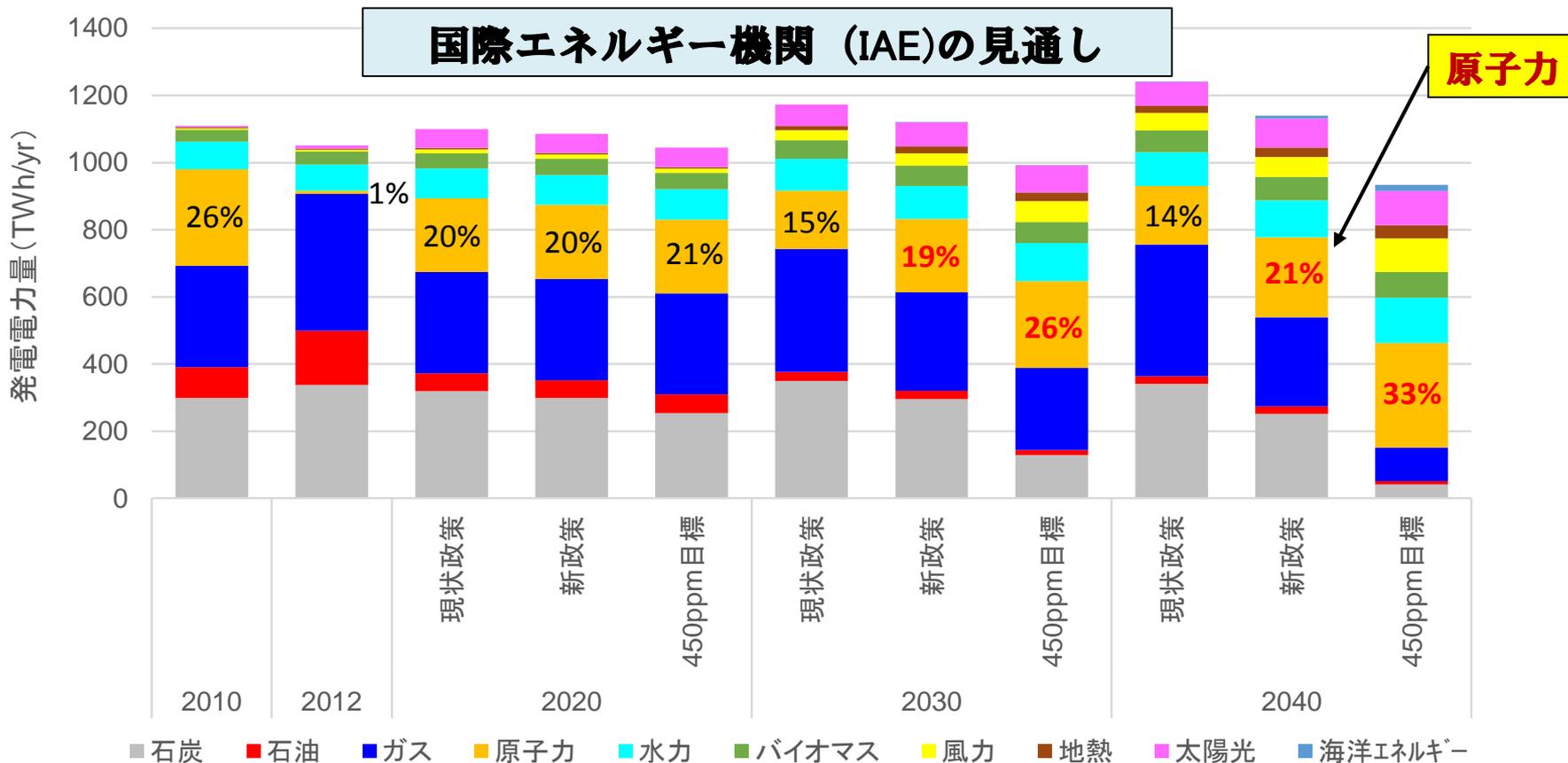


原子力が**安全性を高めてベストミックスの一翼を担うことにより**  
長期的・安定的なエネルギー供給と温室効果ガス削減を実現

# 日本の発電電力量の見通し

## ベストミックスのカギは原子力比率！

再生可能エネルギーはベースロード電源として原子力代替は成りにくい  
 ⇒原子力廃止の方向では結局天然ガスや石炭が代替することになる  
 ⇒気候変動政策を強化していくには原子力が必要



原子力

## 参考 原子力の安全性を高めるために

- リスクを見つけ出す2つのアプローチ

**FORECASTING** (進展事象想定)

FMEAなどによるハザードの想定

ハザードの事例・・・破断事故、地震、津波、外部攻撃など

**BACKCASTING** (究極事象設定)

目標(最大危害) 想定、さかのぼって対策検討

想定外をなくすには視点になり得るか？

深層防護ステージ5対応

- 技術者のリスク対応

- 安全目標とDBA (LOCA・・・) での対応、過酷事故対策
- 残余のリスクとPRA

- リスクを少なくする、発現させない！

- 技術、運転、管理、人材・・・あらゆる面で継続的なレベル向上



豊かな発想がなにより大切

## 4 おわりに 社会から受容されるために

次世代リスクコミュニケーションの方向

「分かってもらう」から「関係者が自ら判断・選択する」へ！

選択の幅：脱原子力 ⇔ 徐々に原子力縮小 ⇔ 一定規模の原子力維持  
科学技術リテラシーがカギか？

- 各選択肢にはそれぞれベネフィットとリスクがある
  - ベネフィット；経済性、温暖化抑制、安定性（国益・国防）など
  - リスク；不経済性、温暖化促進、供給不安定、健康影響
- これらを統合して判断する基準があるのか？
  - 視点1 経済価値に置き換える
    - 健康影響（寿命）、温暖化対策等を経済価値で算定
  - 視点2 受容意志の確認・・・受容意志、支払い意志
    - **Willingness to accept（受容意志）**・**Willingness to pay（支払い意志）**  
ステークホルダーへの聞き取り調査などによる
  - 視点3 不確実性がある場合は「後悔最小」！
    - 不確実性の小さい対策優先

賢い選択でベストミックスの実現を