

原子力発電所の耐震安全性

2009年8月23日
於 双葉町公民館
原子力有識者
石井正則

最初に皆様への質問

- 原子力発電所は大きな地震が起きた時でも、周囲に放射性物質を漏洩する可能性が少なく、まあまあ安全と思う。
- 原子力発電所は大きな地震が起きた時、周囲に放射性物質を漏洩する可能性があるので、安全とは思わない。

はじめに

柏崎刈羽原子力発電所の経験

- 想定を超える地震動（M6.8）、設計を超える地震加速度（約2.5倍）
- 原子炉の安全確保
 - 重要機器の損傷はなかった
 - 周辺地域に放射線災害を及ぼさなかった
- 一般設備は損傷
 - 普及に時間を要しており、エネルギー供給や経済的損害は大きい



- これらを踏まえ、**安全性の向上と設備損傷の低減を目指した耐震安全を考える**

目次

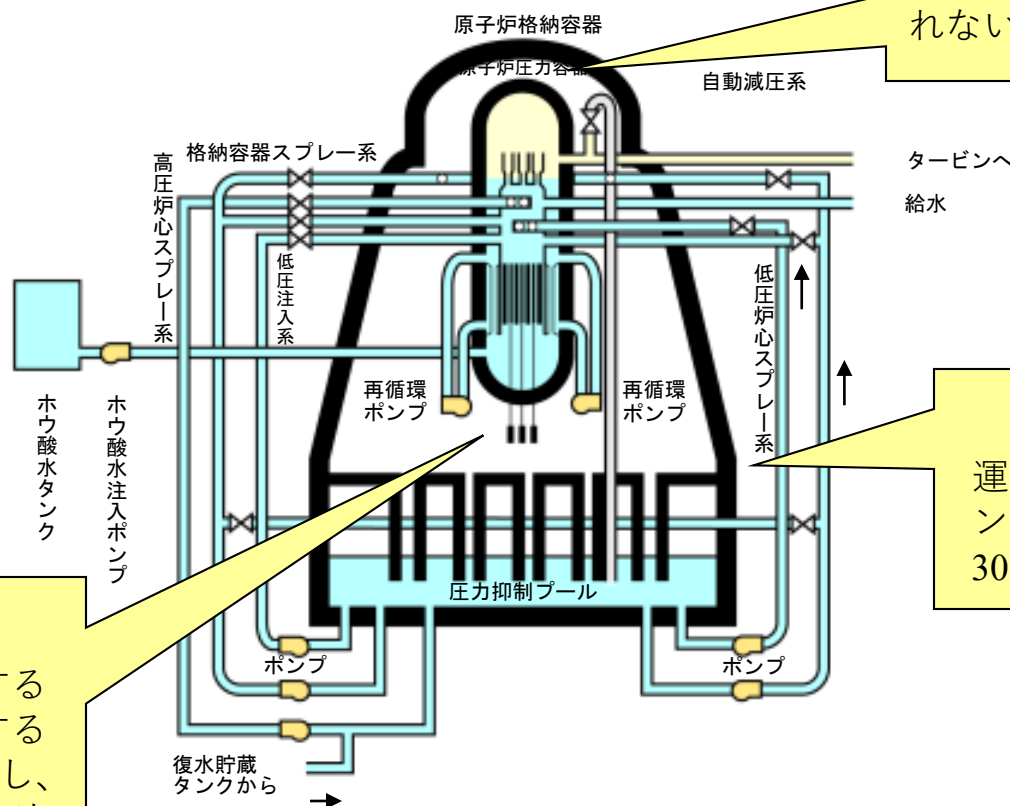
- 1 原子力発電所の安全確保の基本
- 2 地震の基礎知識
- 3 原子力発電所の地震対策
- 4 新潟県中越沖地震と柏崎刈羽原子力発電所
 4. 1 地震の特徴と規模
 4. 2 原子力発電所設備への影響
 4. 3 周辺地域への影響
 4. 4 エネルギー供給、環境、経済への影響
 4. 5 原子力発電所の地震対策
- 5 耐震安全性のまとめ
- 6 原子力の必要性

1 原子力発電所の安全確保の基本

止める・冷やす・閉じ込める

閉じ込める

放射性物質が外部に漏れないように閉じ込める



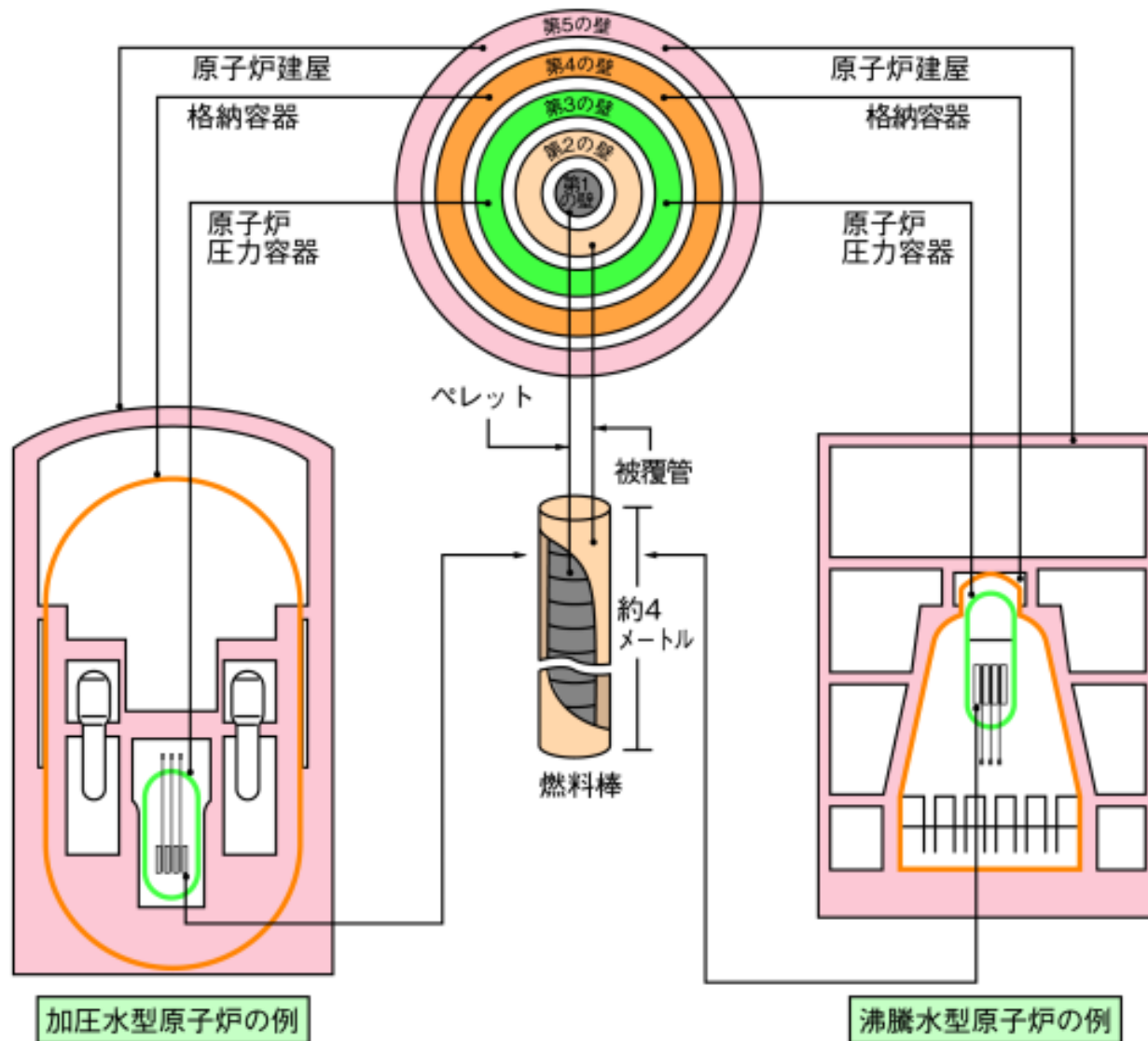
止める

トラブルを検知すると中性子を吸収する制御棒を自動挿入し、原子炉を安全に止める

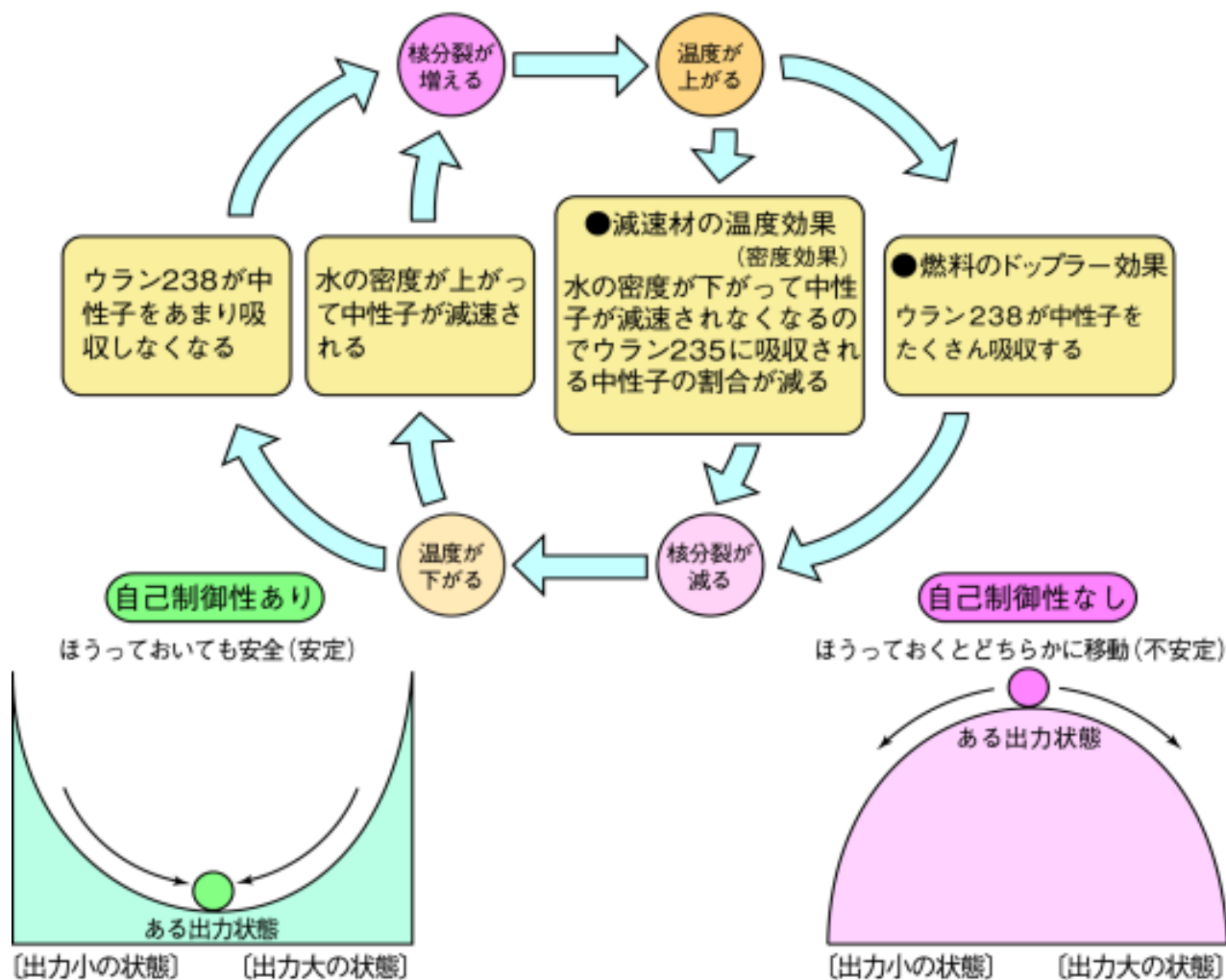
冷やす

運転停止後もポンプを循環、約30~40℃まで冷やす

放射能を閉じ込める5重の壁

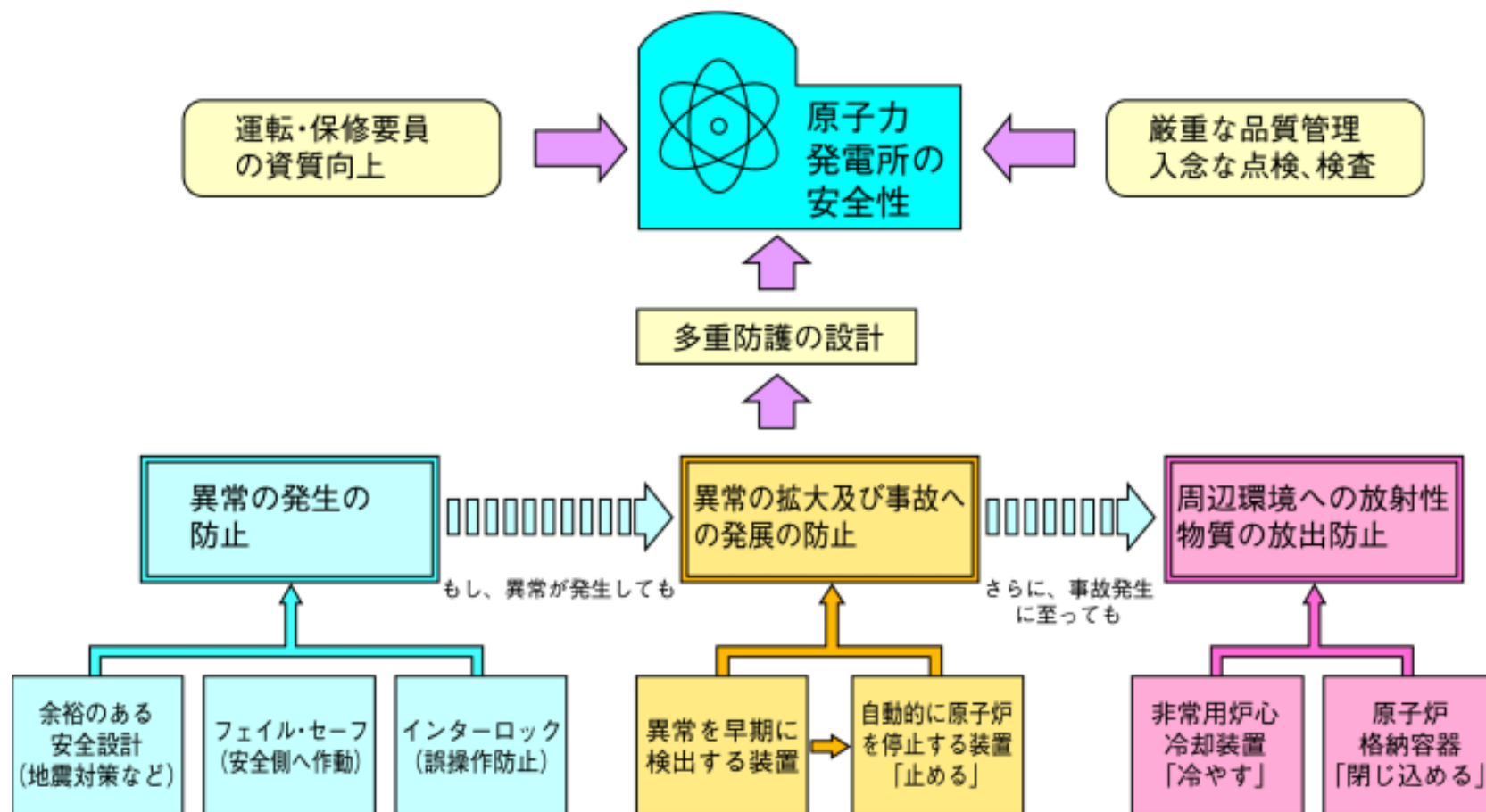


原子炉の固有の安全性(自己制御性)



出典：資源エネルギー庁「原子力2008」他

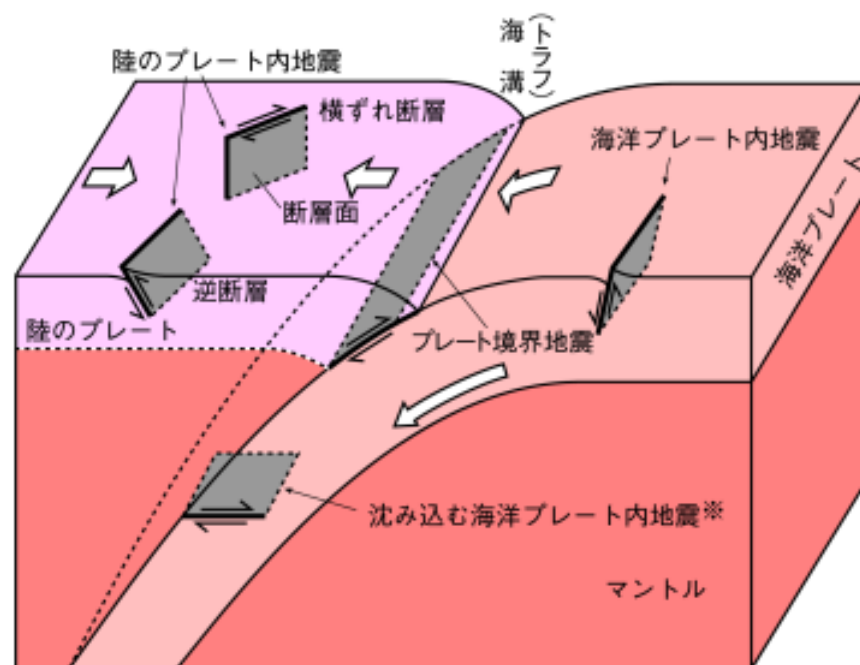
安全確保のしくみ



2 地震の基礎知識

●地震のメカニズム

地震は発生原因によって、「プレート境界型地震」と「プレート内型地震」に大別されます。プレートの運動によって蓄積されたひずみのエネルギーが、ある限界を超えたときに、エネルギーを解放して地震が発生します。



※沈み込む海洋プレート内地震とは、いわゆるスラブ内地震のことです。

●地震の大きさ

マグニチュード

マグニチュード(M)とは、地震が放出したエネルギーの大きさを示す尺度です。

ガル

ガルとは、加速度の単位(cm/sec^2)で地震の揺れの強さを数値として表現したものです。

震度

震度とは、観測点における地震の揺れの強さを示す尺度で、0～7までの10階級に分かれています。気象庁は全国の約600地点で観測しています。

●活断層とは…

活断層とは、一般に最近の地質時代に繰り返し活動し、将来も活動することが推定される断層をいいます。

(1995年の兵庫県南部地震は、神戸海洋気象台発表でマグニチュード7.3、最大水平加速度818ガル、震度7でした。)

出典：原子力安全・保安院パンフレット「原子力発電所の耐震安全性」他

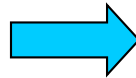
活断層調査

沿岸海域活断層調査

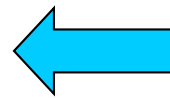
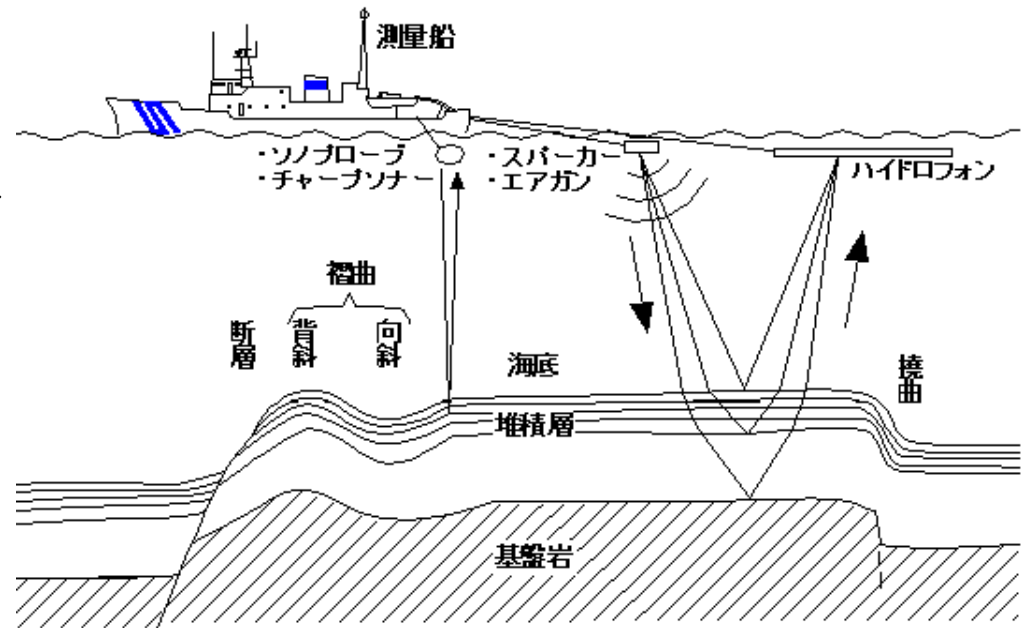
表層音波探査

深層音波探査

海底堆積物調査



音波探査図



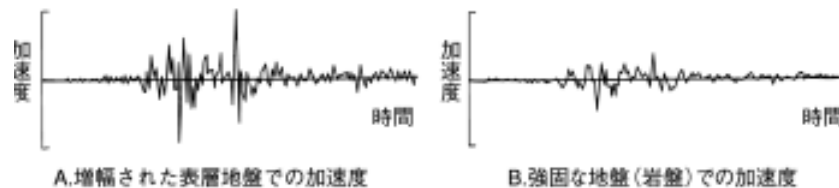
陸地トレンチ調査の例

断層の分布、過去の活動の歴史等を調査

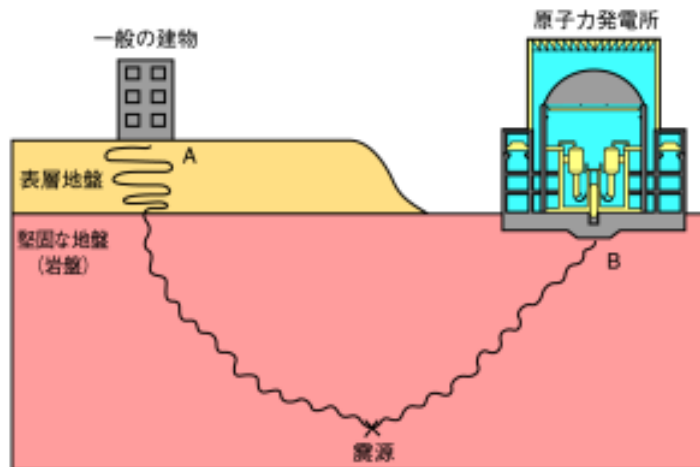
原子力発電所と一般建築物との揺れの差

岩着の原子炉建屋(Sクラス)は、一般構築物より揺れが少ない

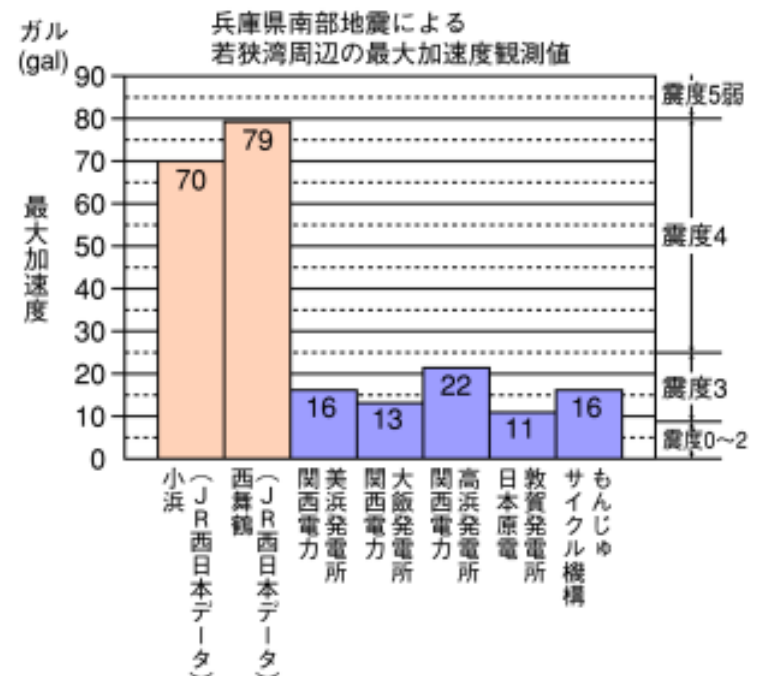
堅固な地盤(岩盤)上に設置した原子力発電所と
一般の建物の揺れの伝わり方



注) 地震波形は模式図



堅固な地盤(岩盤)での揺れは表層地盤に比べ $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 程度



出典：原子力安全・保安院パンフレット「原子力発電所の耐震安全性」他

3 原子力発電所の地震対策

【安全確保のための8つのポイント】

段 階	対 策	説 明
設計段階における 安全性の確認	①徹底した調査	敷地の地質・地質構造はもとより、周辺部を含め活断層や過去に発生した地震等を詳細に調査
	②極めてまれな地震動をも考慮した設計	極めてまれながら供用期間中に発生すると想定される水平方向と鉛直方向の2方向の地震動に対しても、安全上重要な機能は失われないような設計
	③詳細な解析評価	信頼性の高いコードを用いて、想定した地震動が発生した時の重要な建物・機器等の複雑な揺れについて解析し、耐震安全性を詳細にチェック
	④支持地盤及び周辺斜面の安全性を確認	耐震安全上重要な施設を設置する地盤が、地震に対して十分な支持力を有していることを試験や解析を実施して確認するとともに、地震随伴事象として想定される施設の周辺斜面の崩壊等によっても、原子炉施設の安全機能に重大な影響を与えないことを確認
	⑤津波に対する安全性の確認	地震随伴事象として想定される津波について詳細な数値シュミレーション等を実施して施設の安全機能に重大な影響を与えないことを確認
建設、運転段階における 安全性の確保	⑥十分な支持性能をもつ地盤に建設	地震による揺れの振幅が小さく、十分な支持性能があり、すべりや有害な沈下等を生ずる恐れがない地盤に建設
	⑦自動停止機能	一定以上の揺れを検出したときには、速やかに原子炉を自動停止させるシステムを装備
	⑧振動台や加振機による耐震性の実証及び耐震限界の把握	振動台や加振機を用いて、実機や実機相当の試験体に設計を上回る地震力を加え、施設の耐震性の実証、設計裕度の把握、設備機能の維持及び解析に用いたコードの妥当性を確認

出典：原子力安全・保安院パンフレット「原子力発電所の耐震安全性」

耐震設計審査指針（耐震指針）の改定概要

【改訂のポイント】

（2006年9月19日改訂）

項 目	旧耐震指針	新耐震指針
想定する地震動	最強地震と限界地震の2種類の地震動を策定	2種類の地震動の策定方針を一本化
一律に考慮する地震	マグニチュード6.5の直下地震	過去の地震観測記録に基づき原子力発電所ごとに設定
考慮する活断層	5万年前以降の活動が否定できないもの	後期更新世（最長13万年前）以降の活動が否定できないもの
施設の重要度分類	As（最重要）、A（重要）、B、Cの4クラスに分類	最重要クラス（AsからSに呼称変更）の範囲をAクラスまで拡大（S、B、Cの3クラスに分類）

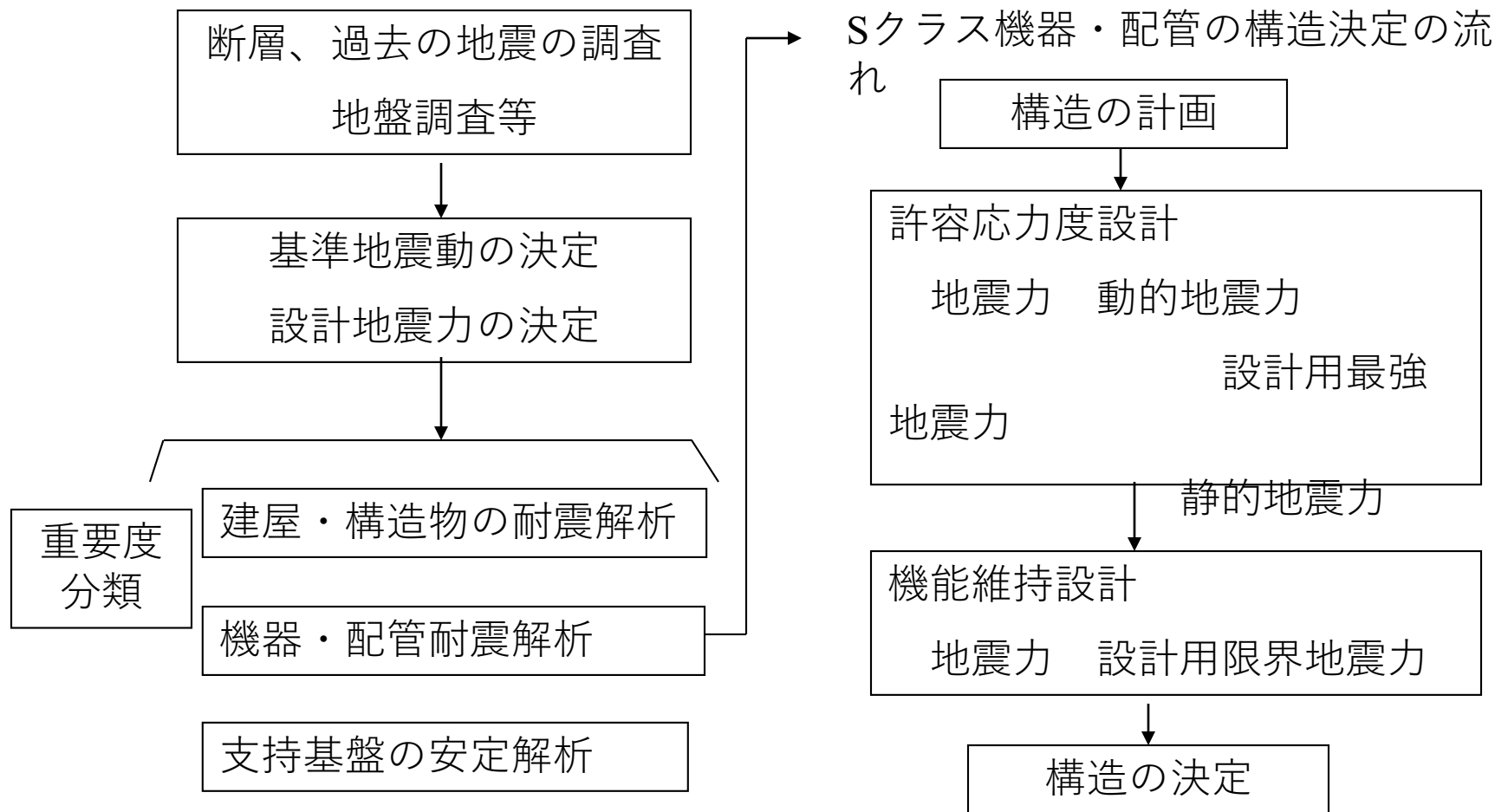
原子力施設の耐震構造設計の基本方針

粘のある材料 岩着 剛構造 経験に基づく地震荷重の想定

重要度分類	建物および構築物	機器、配管など
Sクラス	Cクラスの震度の3倍と 動的解析により定まる水平地震力の大きな値	動的解析による加速度と左記の加速度の1.2倍による地震力
Bクラス	Cクラスの震度の1.5倍	左記の震度の1.2倍、重要な共振のおそれのある設備は動的にも解析
Cクラス	建築基準法に定める震度	左記の震度の1.2倍

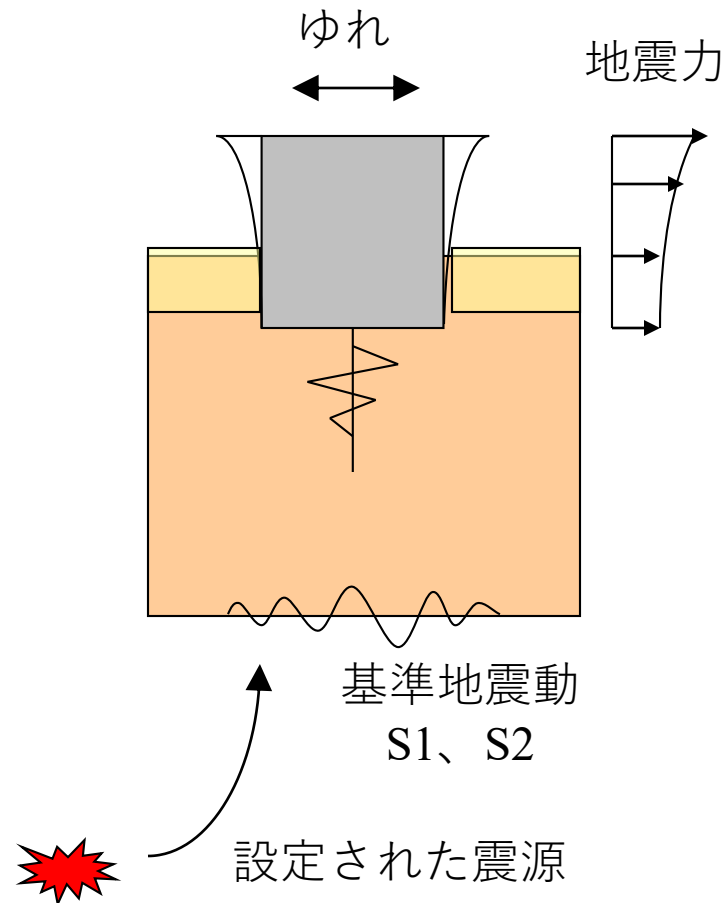
重要度分類は旧基準によった。AsクラスはS2地震に対し機能維持条件を追加。新基準ではA、AsはSクラスに統合。

耐震設計のプロセス



設計用地震力の決定

動的地震力



設計用地震動の設定

建屋・構築物

動的地震力

機器・配管

床応答地震動/地震力



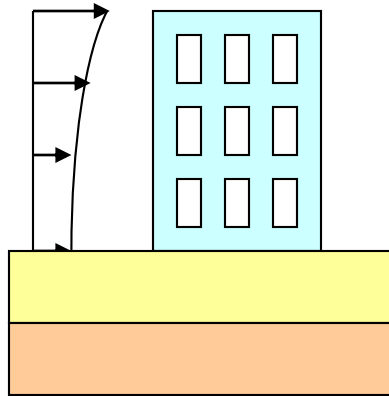
個々の機器、配管等の

構造設計

設計用地震力の決定

静的地震力

一般建築物



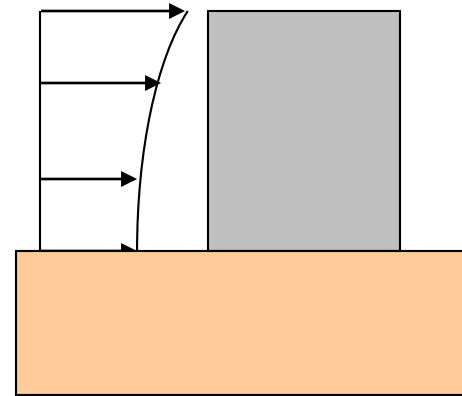
建築基準法の静的地震力

$$i\text{階の層せん断力} \quad Q_i = \Sigma W_i \times C_i$$

ΣW_i : 各階が支える上部の総重量

C_i : 層せん断力係数

原子炉建屋等



Sクラスは建築基準法の静的地震力の3倍

$$i\text{階の層せん断力} \quad Q_i = \Sigma w_i \times \mathbf{3} C_i$$

Bクラスは1.5倍、Cクラスは1倍



建屋・機器・配管構造設計

設計の検証

● モデルを用いた大型振動台による検証

- 安全上重要な機器は、想定した地震力より大きな力で実際に揺らせて、設備の機能や働きに異常がないか確認した

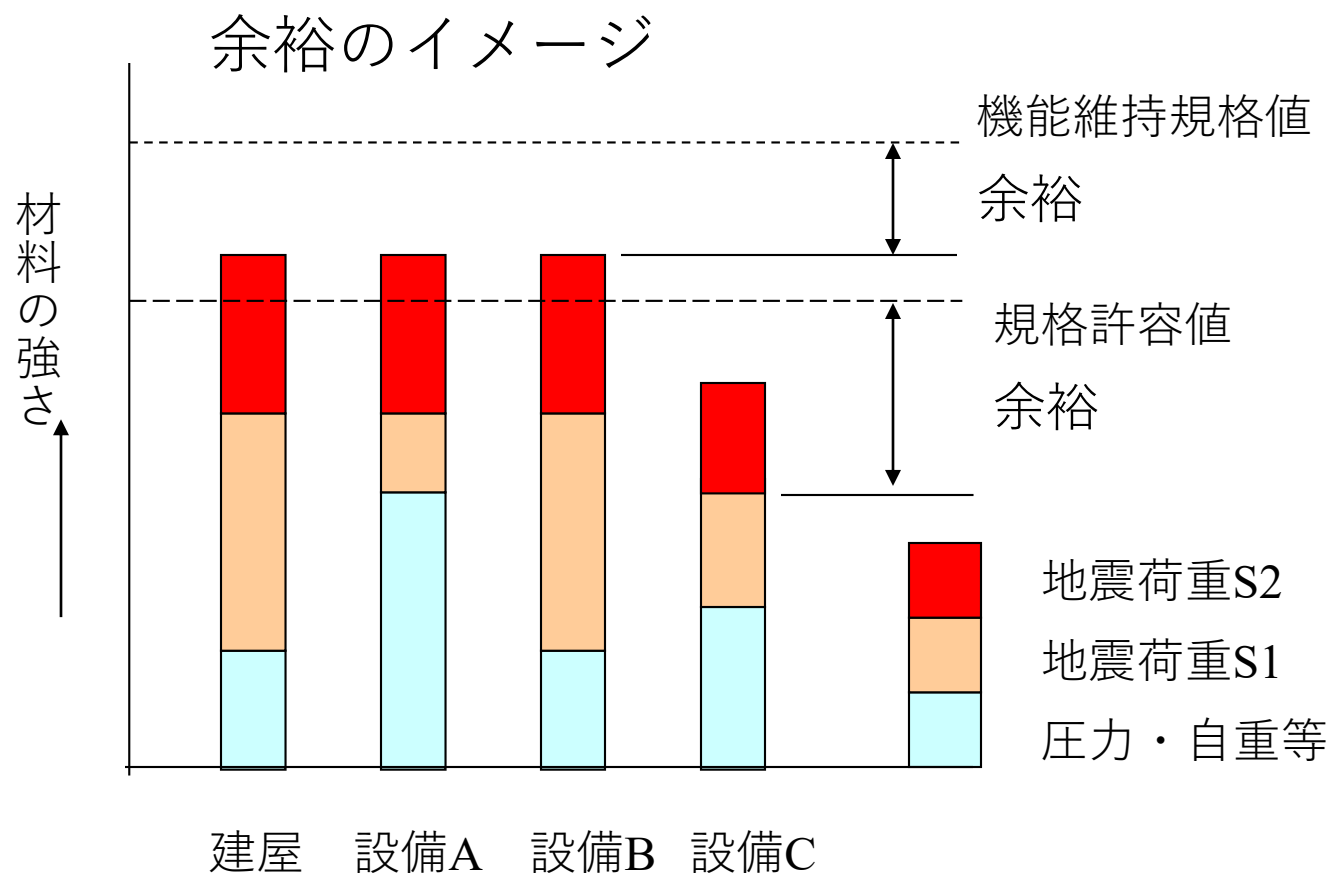


PWR格納容器の耐震信頼性
実証試験の試験体



配管系終局強度耐震実証試験の試験体

設計の裕度

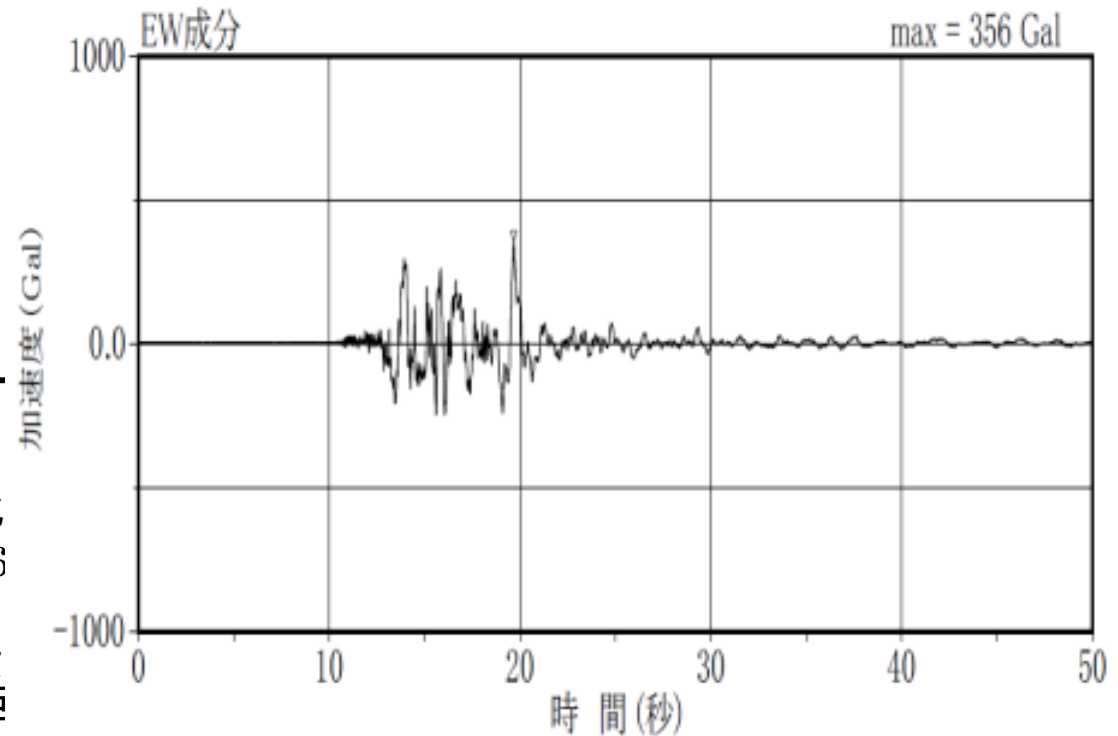


この他、実際の材料の強さと規格値、実際に発生している応力と計算値の間にも余裕がある

4 中越沖地震と柏崎刈羽原子力発電所

4. 1 中越沖地震の概要

- ・ 発震日時：2007年7月16
- ・ 震源位置：上中越沖 北
東経138度36
- ・ 気象庁マグニチュード：
- ・ 柏崎刈羽原子力発電所ま
震央距離 16km、震源距
- ・ 設計を超える地震加速度 (取入2.51倍)



東電資料より

中越沖地震の特徴と規模

- 従来の経験的な評価方法に基づく計算値を上回る揺れ
 - 原子炉建屋基盤上で観測された加速度が1～4号機側（680～384Gal）と5～7号機側（442～322Gal）と大きな差
- 通常より大きな地震に褶曲地盤等による増幅と建屋が埋め込まれていることによる減衰が作用
- 設計時に想定した地震動との差（水平方向）
 - 1号機 1.5（＊）～2.5倍（＊静的震度法ベース）
 - 7号機 1.35倍

4. 2 柏崎刈羽原子力発電所への影響

柏崎刈羽原子力発電所の重要機能は維持された結果、原子炉は安全に停止



- * 運転中の原子炉は計画通り停止
→「止める」「冷やす」「閉じ込める」が機能
- * 重要機器(A, A Sクラス)の損傷はないか、軽微
- * B、Cクラスは損傷アリ、復旧の時間を要する
- * プール水、排気筒から微量の放射能が漏れた(モニタリングでの検出されず)

発電所の最重要機能 原子炉の安全

止める・冷やす・閉じ込める

- **止める** 地震動を検知し自動停止（スクラム）
制御棒緊急挿入
- **冷やす** 冷却系を運転継続して停止
- **閉じ込める** 燃料からの放射性物質の漏洩なし
燃料損傷なし・格納容器の健全性維持
プール水と排気筒からの微量放射能漏出

グッドプラクティスとして評価
機械学会動力エネルギー部門賞受賞

損傷事例 1 3号機所内変圧器の火災

ショートによる火花に起因して、3号機所内変圧器で火災が発

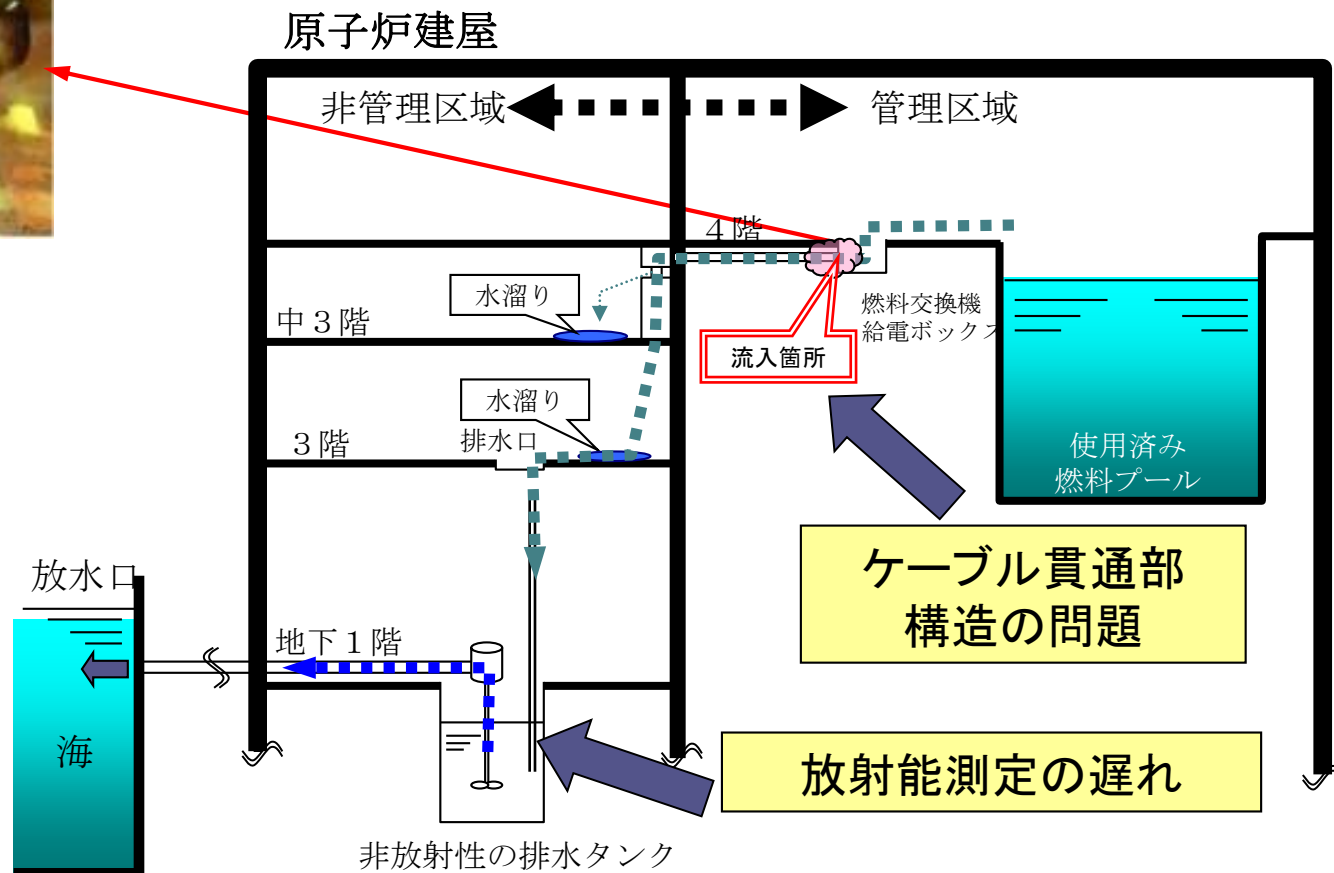
屋外消火設備の損傷により消火活動が難航

防火壁があり、燃え尽ると鎮火する構造



損傷事例 2 6号機燃料プール水の漏えい

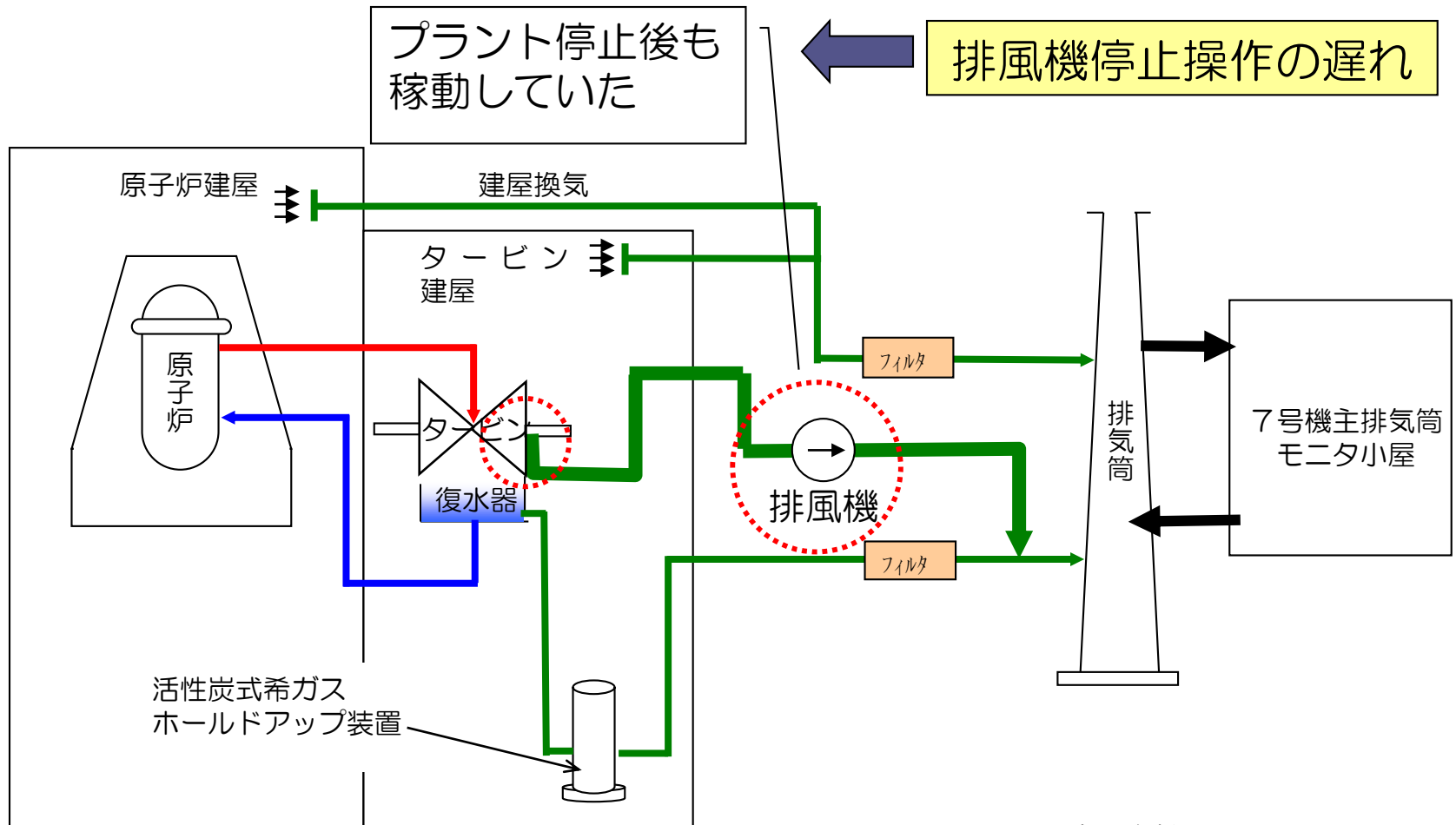
使用済燃料プール水が燃料交換機の電線管を通じて
非管理区域へ滴下し，排水タンク経由で海へ放出



東電資料より

損傷事例 3 7号機の放射性物質の漏えい

復水器内に滞留していたヨウ素および粒子状放射性物質が、タービングランド蒸気排風機により吸引され放出



東電資料より

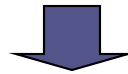
4. 3 周辺地域への影響

- **漏れた放射能は微量・・・影響はなかった**
 - 柏崎海岸で13人は海水浴したのと同じ線量
 - 1kg当りでは人間より少ない量
 - 周辺地域で異常の検出されず
- **それにもかかわらず、報道は不安を煽った！**
仏ルモンド紙は正確に報道（7月18日付記事）

最も地震の影響を受けた地域に立地する柏崎刈羽原子力発電所は損傷がなかった。初期的な火災が発生したものの迅速に消し止められ、漏洩は環境が汚染されるレベルをはるかに下回っていた。

漏れた放射能の規模（１）

発表・報道された微量の放射能
プールの水 1.2m³ 9万ベクレル(Bq)



モニタリングでは異常は検出されず
→人体より低い値(海水はゼロに等しい)

漏れた水は1リットル当り 75Bq/L

(1キログラム当りでは 75Bq/kg、人体より少ないレベル！)

飲料水規準 259Bq/L以下(WHO)

人と体の中 7000Bq(120Bq/kg、13人集まったのと同じ)

ラドン温泉 9000Bq/L(10L分)

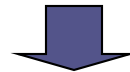
温泉法では111Bq/L以上が放射能泉

(ATOMICAによる)

漏れた放射能の規模（２）

発表・報道 大気中に漏れた 気体ヨウ素 $4 \times 10^8 \text{Bq}$ 、粒子状物質 $2 \times 10^6 \text{Bq}$ これによる被ばく線量はそれぞれ、約 $2 \times 10^{-7} \text{mSv}$ 、約 $7 \times 10^{-10} \text{mSv}$

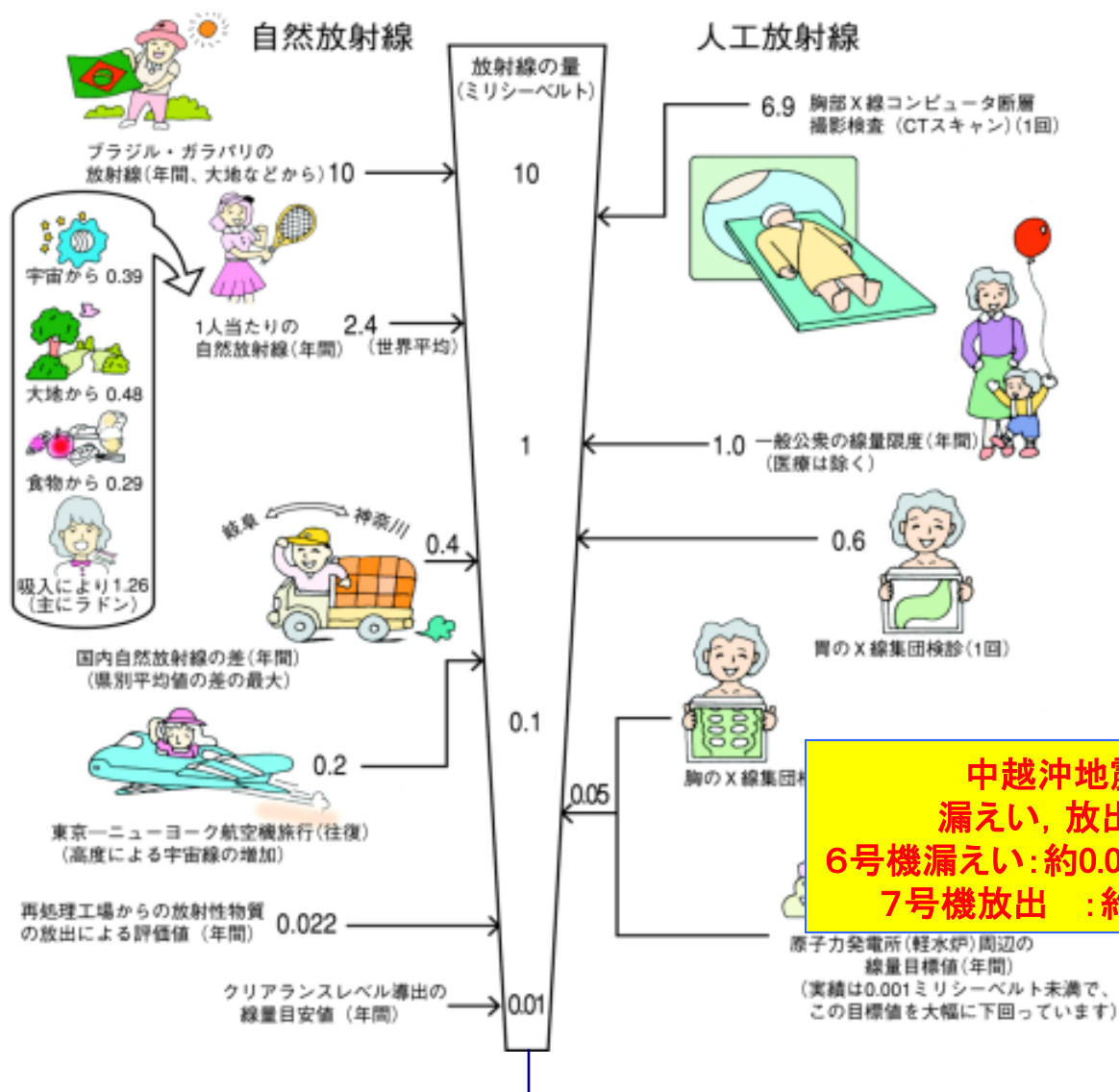
一般公衆の線量限度の1千万分の1、自然界から1年間に受ける被ばく線量 2.4mSv と比較しても十分低い



モニタリングでは検出されず→ゼロに等しい

胸部X線検査 0.05mSv 、東京 - NY往復 0.2mSv と比較しても、無視しうる値

日常生活と放射線



参考 2 体内、食物中の自然放射性物質

●体内の放射性物質の量 (体重60kgの 日本人の場合)

カリウム40 4,000ベクレル
炭素14 2,500ベクレル
ルビジウム87 500ベクレル
鉛210・ポロニウム210 20ベクレル

体内の放射性物質
約7000Bq

体重1kg当り
約120Bq

●食物中のカリウム40の放射能量(日本) (ベクレル/kg)



漏れた放射能は
75Bq/kg

4. 4 エネルギー供給、環境、経済への影響

・ 柏崎刈羽原子力は出力821.2万kW、東京電力の発電量の17%を発電。

・ 停止は供給面、環境面（CO₂排出増加）、国民経済に大きな影響。
安定供給対策

- 新規電源の運転開始や休止火力の運転再開、試運転前倒し、発電所の増出力運転や自家発の余剰購入などを実施
- 節電のお願い、燃料の追加調達

CO₂排出量増大

- 平成19年度約400億kWhを火力発電で代替
CO₂排出量約2300万t増加（日本全体の排出量の約2%相当）

経済影響

- 原油の輸入とCO₂排出権取引でお金が海外流出

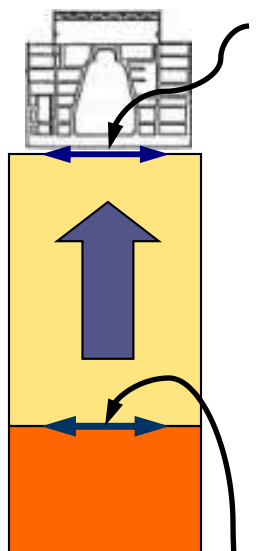


国民経済への影響大

4・5 柏崎刈羽原子力発電所の地震対策

- 地質調査にもとづき、耐震性を強化
 - 中越沖地震の約1.5倍の基準地震動を設定
 - 配管サポートの追加、強化等
- 消化設備の強化
 - 消化配管の地上化、トレンチ化等
- 自衛消防体制の整備
 - 化学消防車の配備等
- その他
 - 通報連絡網の強化等

基準地震動および建屋の揺れ



原子炉建屋地下階	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	7号機
中越沖地震観測値	680	606	384	492	442	322	356
基準地震動による揺れ	845	809	751	704	606	724	738
耐震強化地震による揺れ	1000						

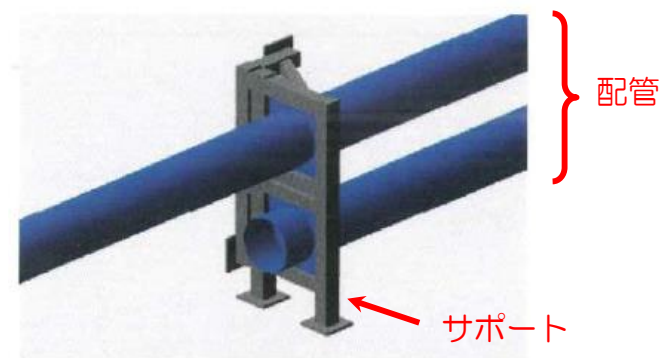
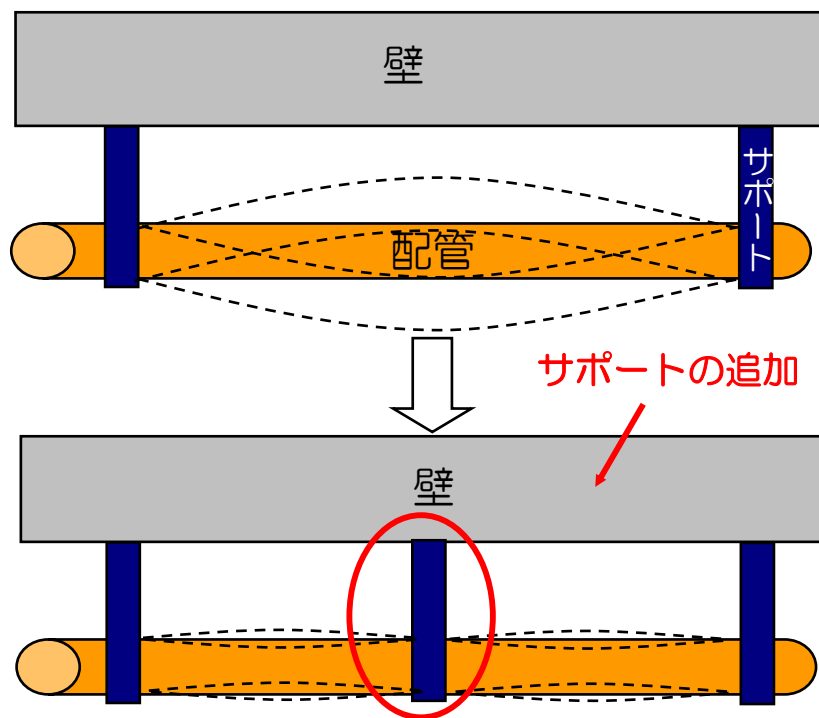
基準地震動	2300	1209
-------	------	------

耐震強化に向け、全号機1000ガルで設計確認、設備改良を実施

中越沖地震の1.5倍に耐震強化

耐震安全性向上のための工事の例(1)

配管サポート追加のイメージ



<既設配管サポートのイメージ>

サポート追加により、配管の揺れを低減

耐震安全性向上のための工事の例(2)

消火設備の強化

- 消火設備の損傷対策
 - 消火系配管の地上化、フレキシブルジョイントの採用等（地盤沈下の影響を受けにくい構造に変更）
 - 防火水槽設置など水源の多様化



消火配管のトレンチ化



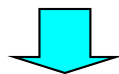
耐震防火水槽設置



消火配管の地上化

5 地球温暖化防止に向けた原子力の役割

- **京都議定書**1997年
 - 先進国2008～12年までに1990年の5.2%減
 - 日本は6%減→2007年は9.0%増
- **洞爺湖サミット**2008年
 - 2050年までに現状の半減（先進国は60～80%減）
- **COP15に向け2020年の中期目標** 国民的合意の形成
 - 日本：**2005年比15%減**（麻生首相の決断）
 - 太陽光 2800万kW導入（定額買取）等もあるが！
 - **削減の43%は原子力**（新設9機と稼働率向上による）



中期計画は原子力がなければ達成できない！

わが国の中期目標6つの選択肢

対策技術の普及

政策

①長期継続見直し**努力継続**(2005年比▲4%、1990年比+4%)

・既存技術の延長線上で効率改善

・現状の政策(自主努力を促す効率改善目標、トップランナー規制、補助金など)により達成

③長期継続見直し**最大導入**(2005年比▲14%、1990年比▲7%)

・最高効率の機器を現実的な範囲で最大限導入

・現状の政策に加え、新たな買取制度(太陽光)、エコカー購入支援補助、省エネ住宅の規制強化等により、政策をさらに最大限強化

⑤1990年比▲15%(2005年比▲21%)

・新規(フロー)に導入する機器はすべて最高効率の機器に

・更新時期前の既存(ストック)の機器も一定割合を買換え、改修

<タイプA(財政出動重視型)>

・高価な最高効率の機器でも、何年か使えば経済的に有利になるレベルの補助、税の重課・軽減(投資回収年数3年~10年)

・財源の裏打ちが必要(年間3.6兆円)

<タイプB(義務付け重視型)>

・新規導入の機器は、すべて最高効率の機器とすることを義務付け

・既存の機器にも、範囲を限って買換え、改修を義務付け

⑥1990年比▲25%(2005年比▲30%)

・新規・既存の機器のほぼすべてを最高効率の機器に

・経済の活動量(生産量)を低下

・新規、既存の機器を、ほぼすべて最高効率の機器とすることを義務付け

・炭素への価格付け(炭素税、排出量取引)も不可欠

問題点

- ・ 産業界の主張は①
- ・ 環境政策者の主張は⑥
- ・ 麻生総理は、中間を取って選択肢③+1%
2005年比-15%
- ・ 民主党マニフェストでは1990年比-25%を主張



環境・エネルギー政策を決定付ける重要な岐路

地球温暖化対策 中期目標に於ける原子力の役割

GHG15%削減の内訳

原子力の寄与

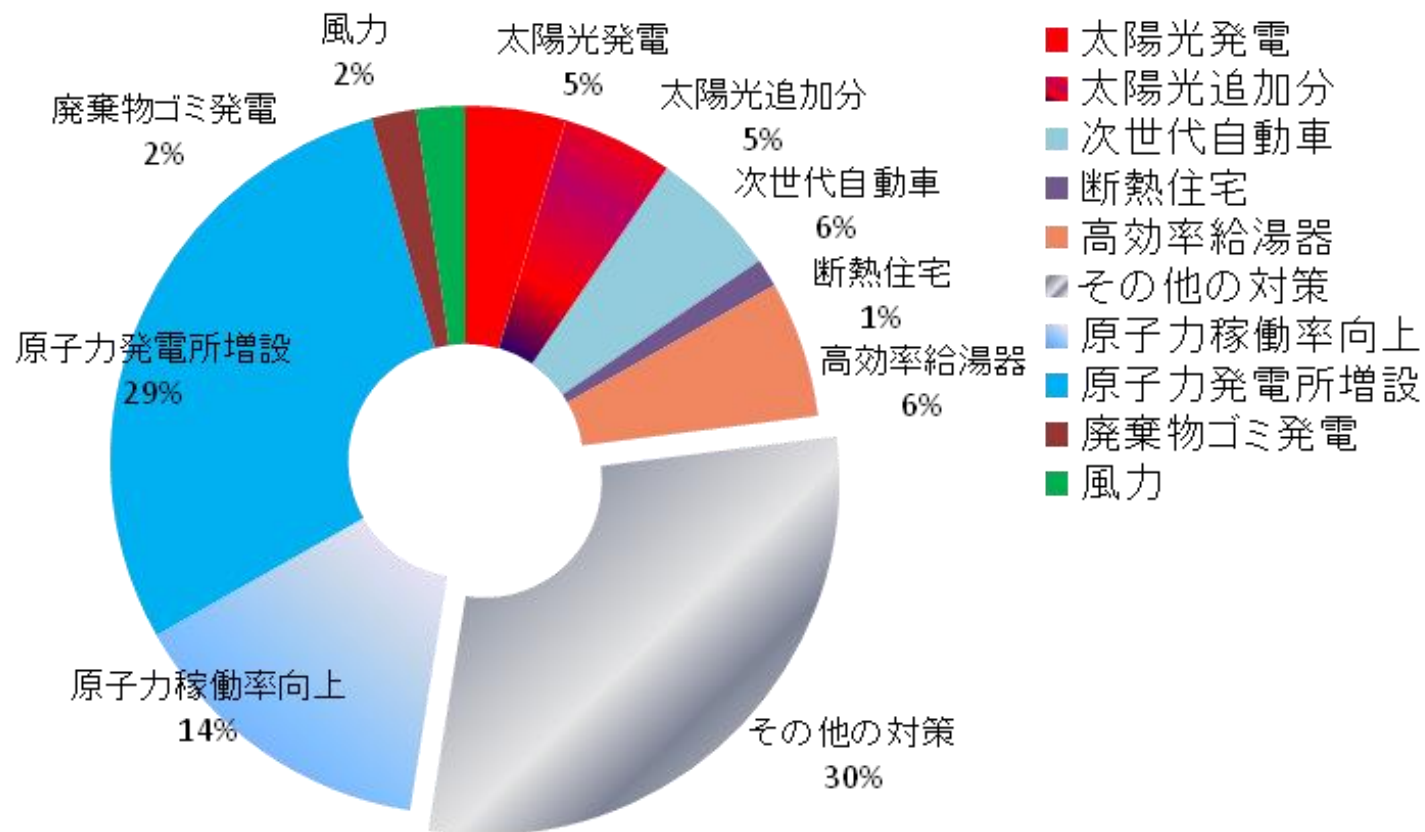
: 43%

内訳

新設 9 機

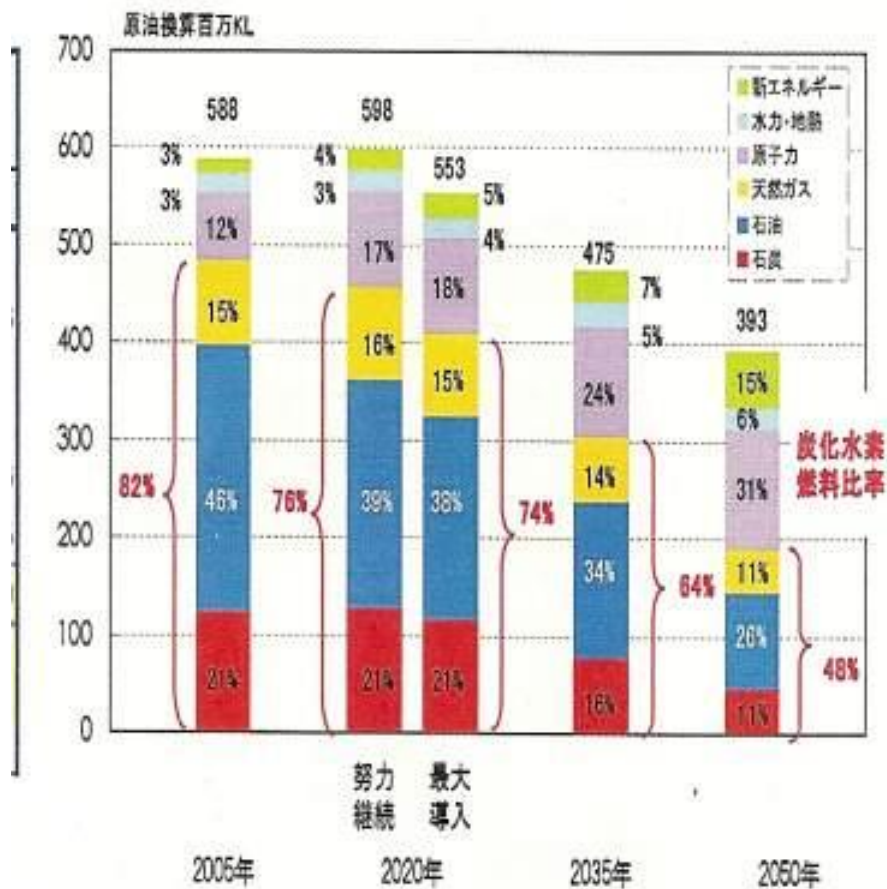
稼働率向上

→約80%



2050年のエネルギー需給の姿

一次エネルギー供給の推移



電源構成の推移



今後の原子力政策 (経済産業省 2009年6月18日)

低炭素電源の中核たる原子力の更なる推進に向けた決意と具体策

決意

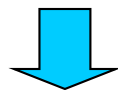
- ・原子力発電の活用なくしては、エネルギー安定供給はもちろん、地球温暖化問題への対応はおよそ不可能である。
- ・2020年をめどに原子力を始めとする『ゼロ・エミッション電源』を50%以上とする」
- ・原子力発電比率を、2020年時点で40%程度とする必要がある。

具体策

1. 既設炉の高度利用
設備利用率の向上や出力の向上など
2. 新增設・リプレースの円滑化
2018年度までに運転開始が予定されている9基の新增設を着実に進める。
3. 核燃料サイクルの推進
六ヶ所再処理工場の操業,使用済燃料の貯蔵施設の整備
プルサーマル計画の推進,高速増殖炉開発の推進
高レベル放射性廃棄物処分事業の推進
4. 国民との相互理解促進
5. 地域共生
6. 国際的課題への対応

6 まとめ

- 耐震安全性に確保にむけて
 - 一定以上の大きさの地震動を感知した場合；
「自動停止」→「冷やす」「閉じ込める」で安全確保
 - 最新の知見にもとづく設計と審査
 - 運転開始後も、最新の知見を踏まえた安全性の確認
要すれば耐震性強化
- 環境・エネルギー政策
 - CO2削減の約半分は原子力
「新規建設」「稼働率向上」がカギ



温室効果ガス削減中期目標達成には原子力が必須
このためには国民の理解が不可欠

おわりに 今日の話を聞いて；

- 原子力発電所は大きな地震が起きた時でも、周囲に放射性物質を漏洩する可能性が少なく、まあまあ安全と思う。
- 原子力発電所は大きな地震が起きた時、周囲に放射性物質を漏洩する可能性があるので、安全とは思わない。

ご静聴ありがとうございます