北陸原子力懇談会

原子力発電所の安全確保のための設計の考え方と能登半島地震の教訓

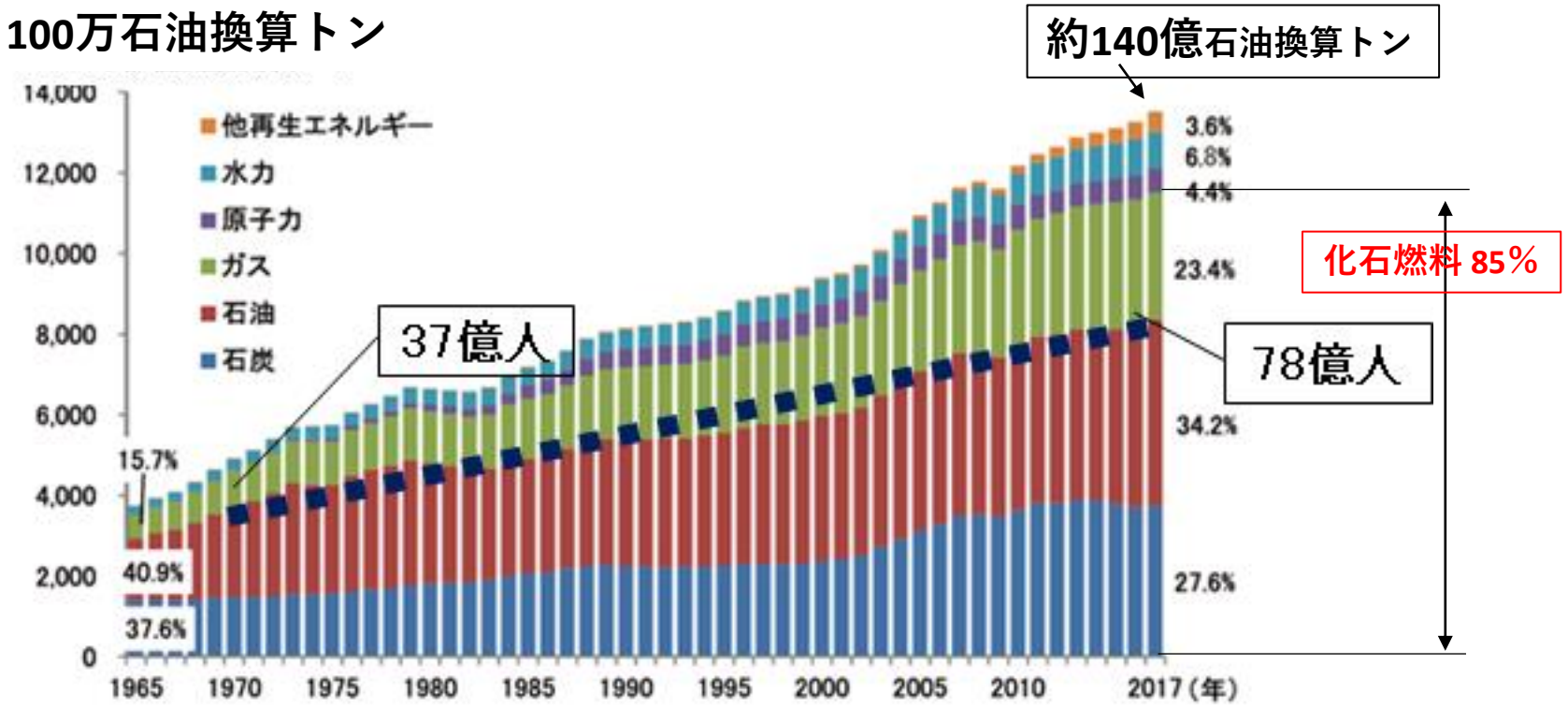
2024年5月

宮野　廣
日本原子力学会1F廃炉検討委員会委員長
日本保全学会理事・顧問、元法政大学
日本機械学会・日本原子力学会・日本保全学会フェロー

Rev20-1 2024-4-28

世界・日本のエネルギー事情

人口の増加に伴う世界のエネルギー消費の推移

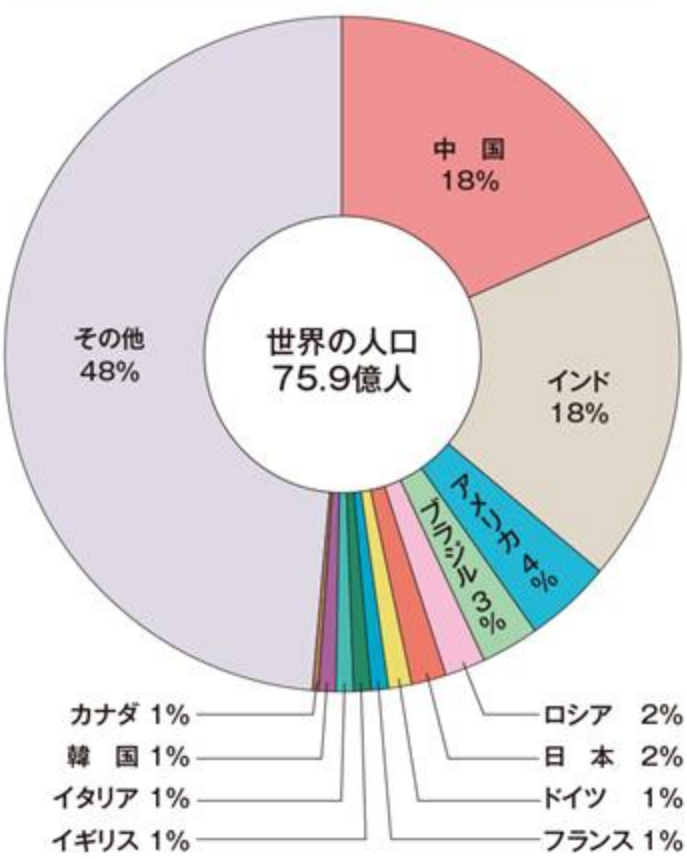


出典:経産省の資料を元に作成

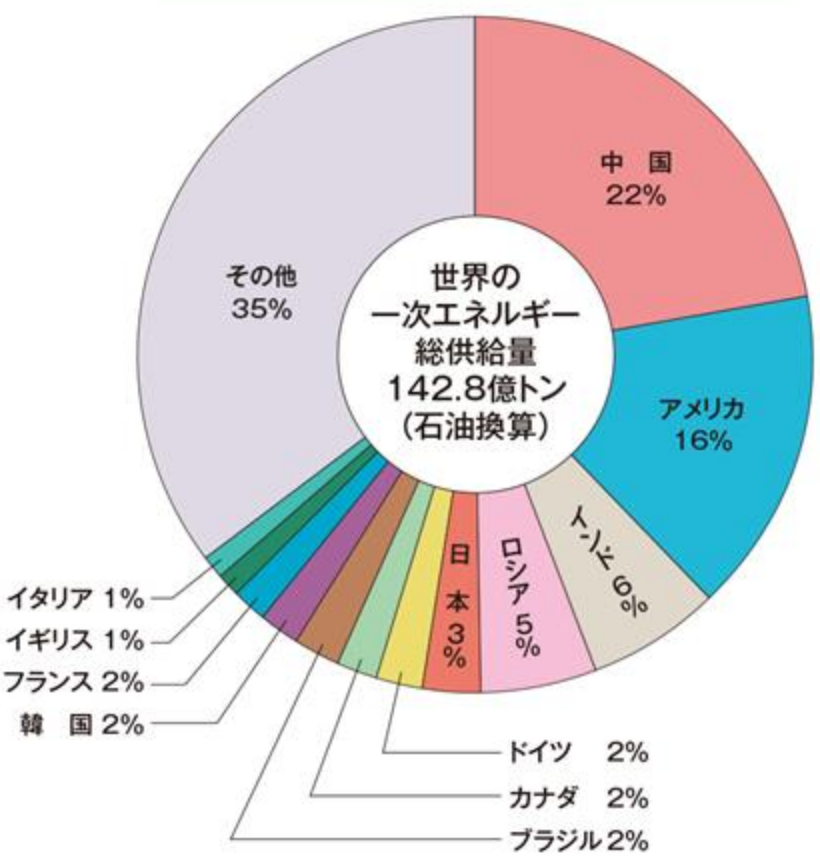
人口の増加と共に
化石燃料の使用量も増加

世界の人口と一次エネルギー供給（消費）量 （例2018年）

世界の人口（2018年）



世界の一次エネルギー総供給量（2018年）

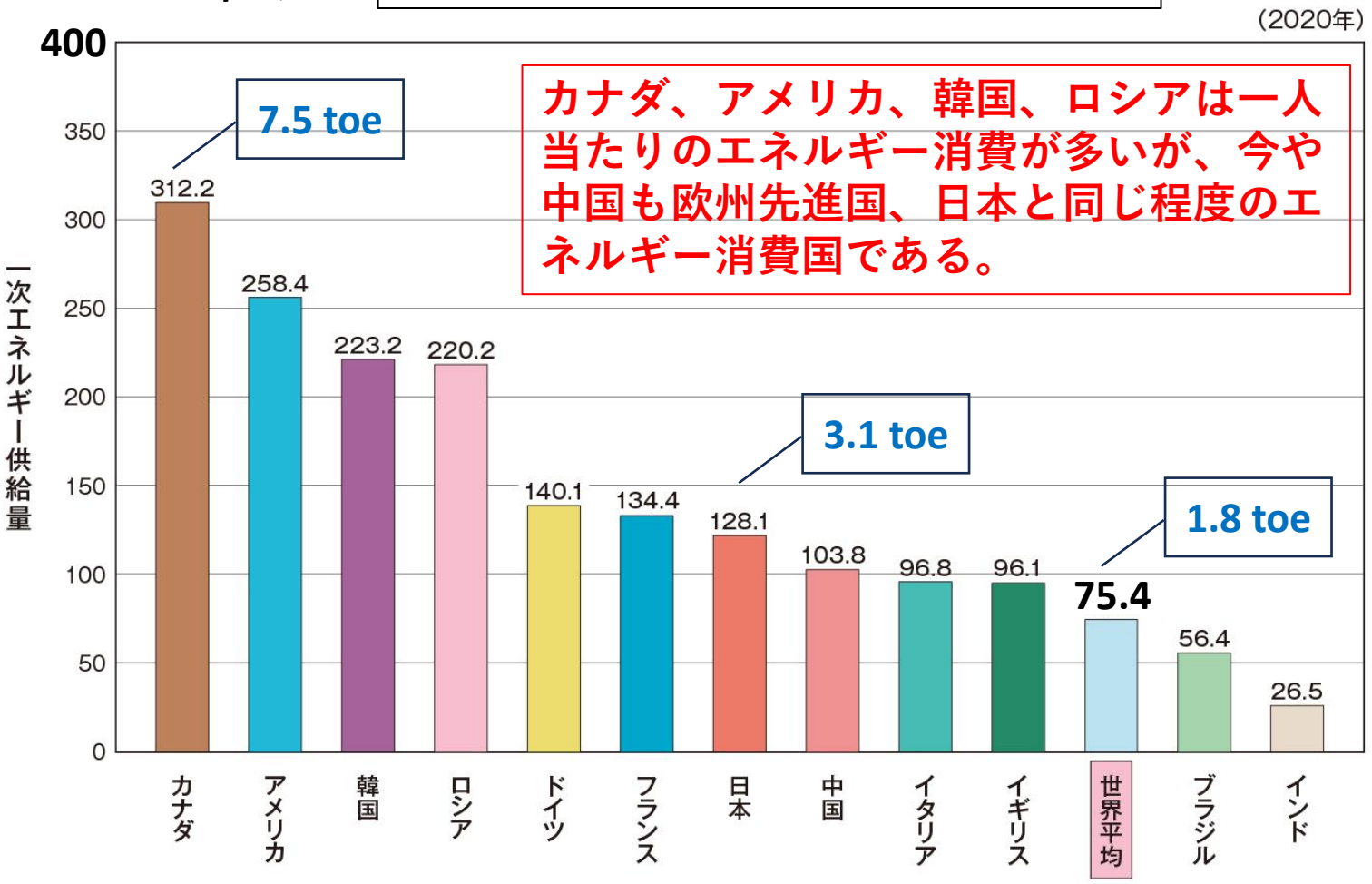


先進国、大国で全エネルギーの65％ものエネルギーを消費している

世界の一人あたりの一次エネルギー供給（消費）量比較 （例2020年）

（ギガジュール/人）

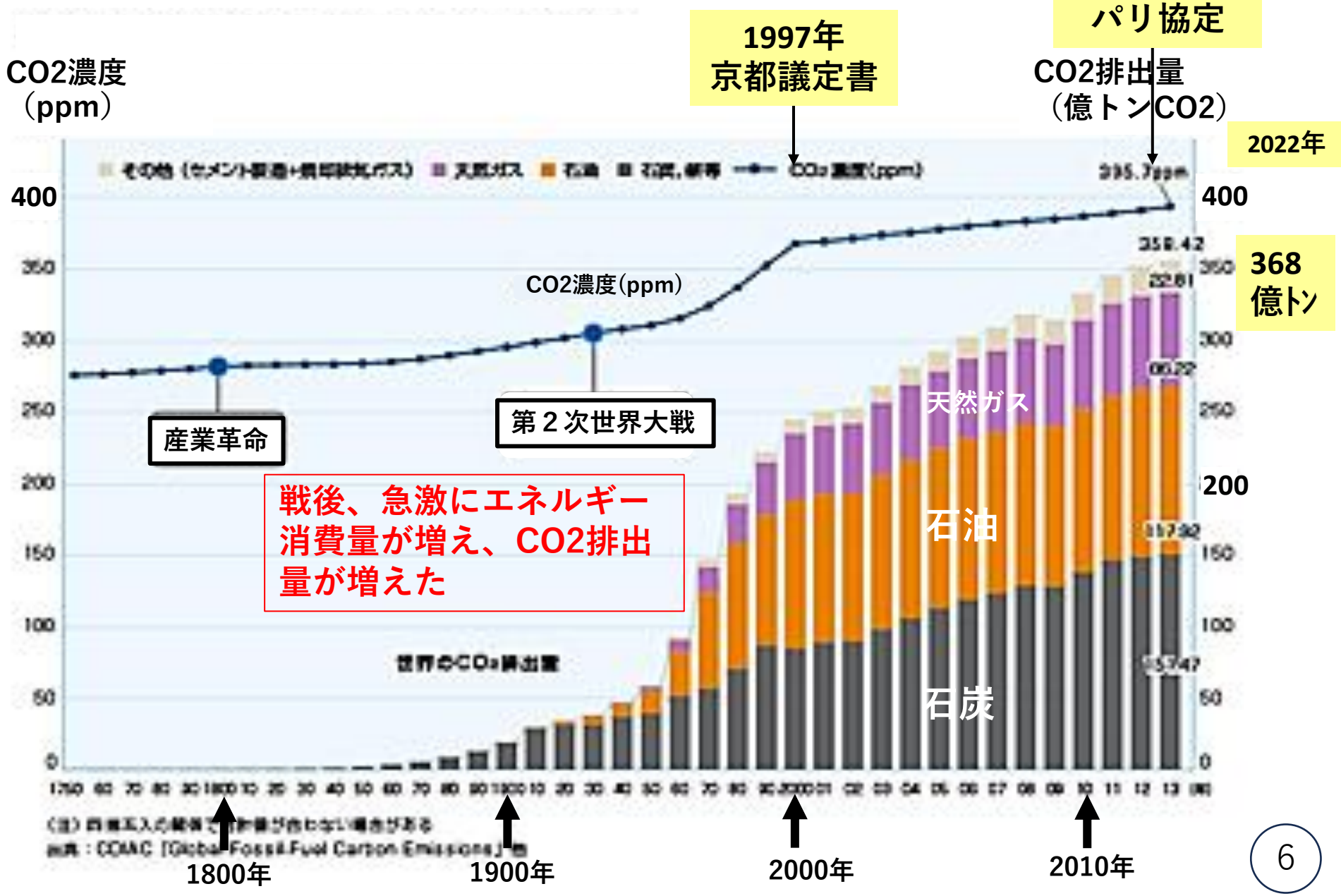
400Gジュール＝約10 石油換算トン(toe)



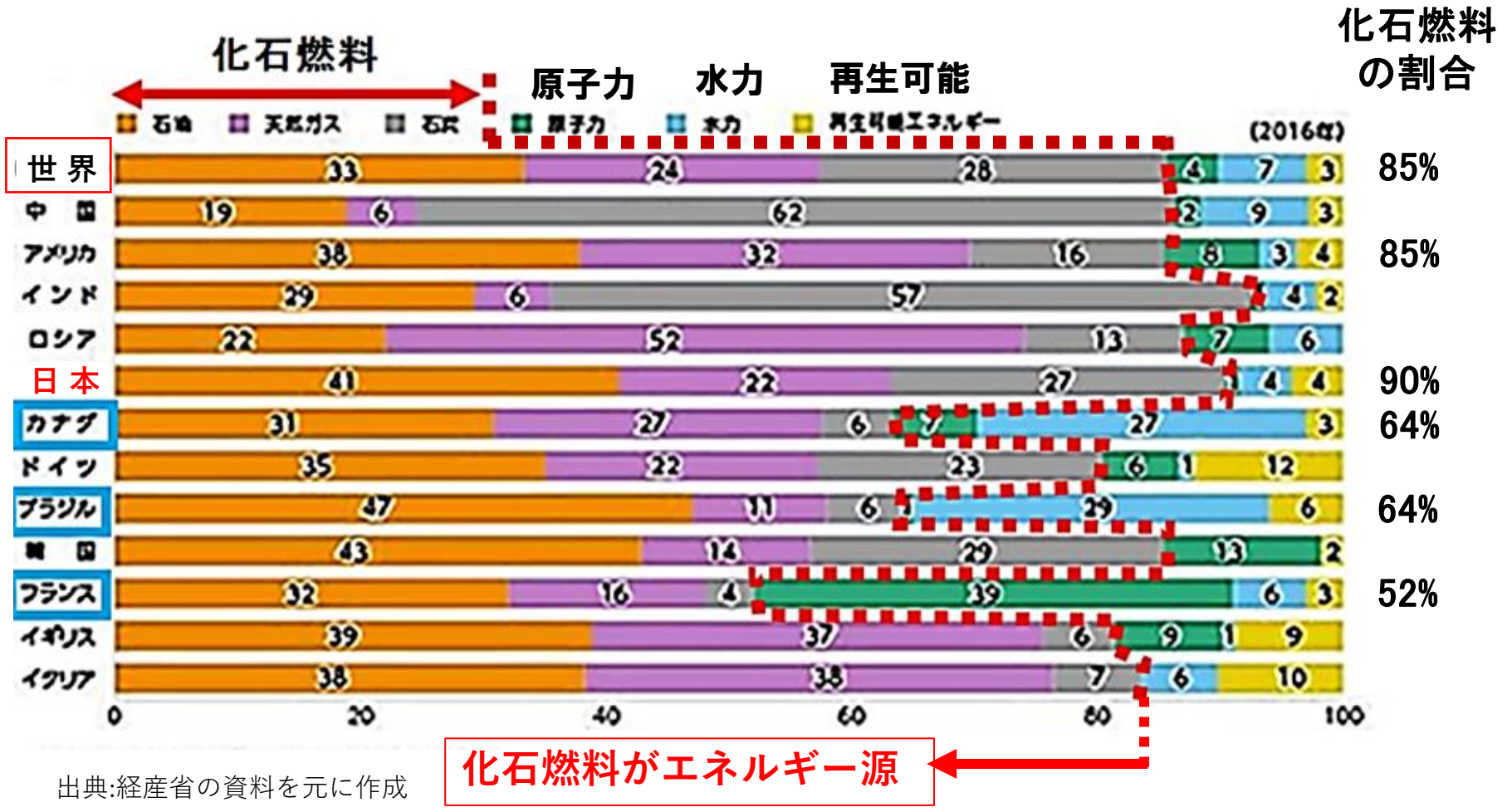
カナダ、アメリカ、韓国、ロシアは一人当たりのエネルギー消費が多いが、今や中国も欧州先進国、日本と同じ程度のエネルギー消費国である。

出典：IEA「World Energy Balances 2022」より作成

CO2の排出量と大気中のCO2濃度の推移

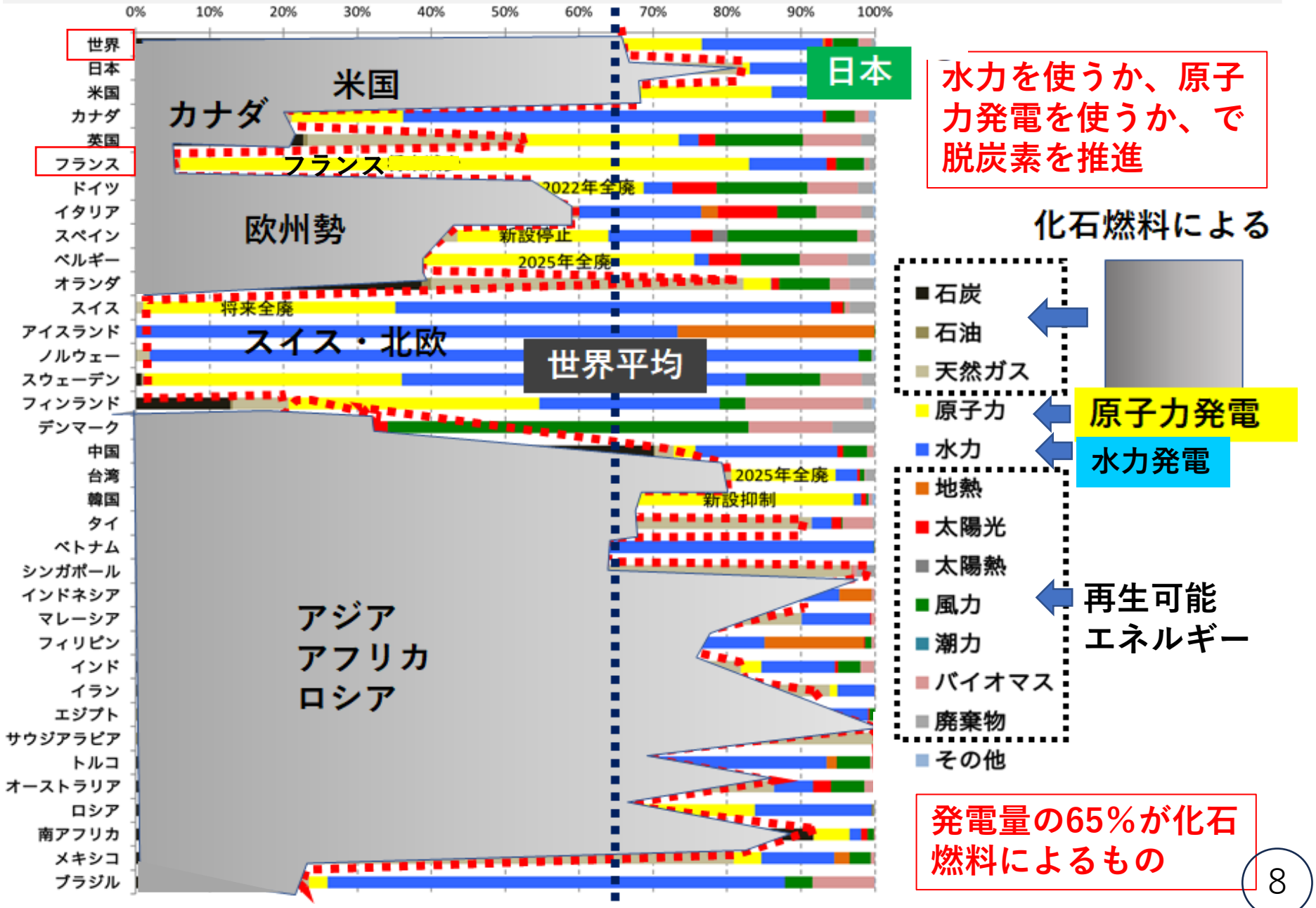


世界の主要国のエネルギー源の構成

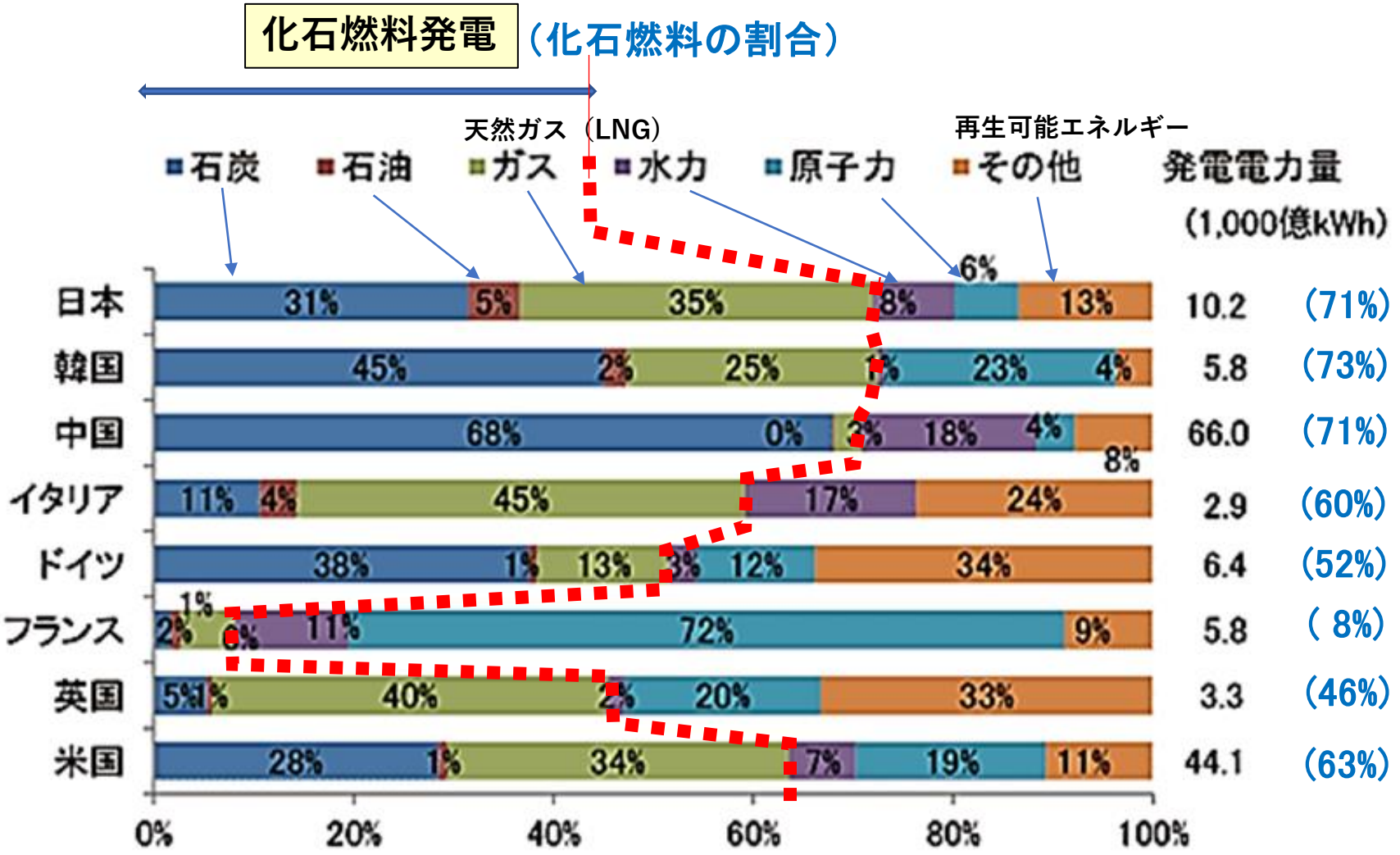


出典:経産省の資料を元に作成

世界の使用電力の中での発電方式によるエネルギー源の分布



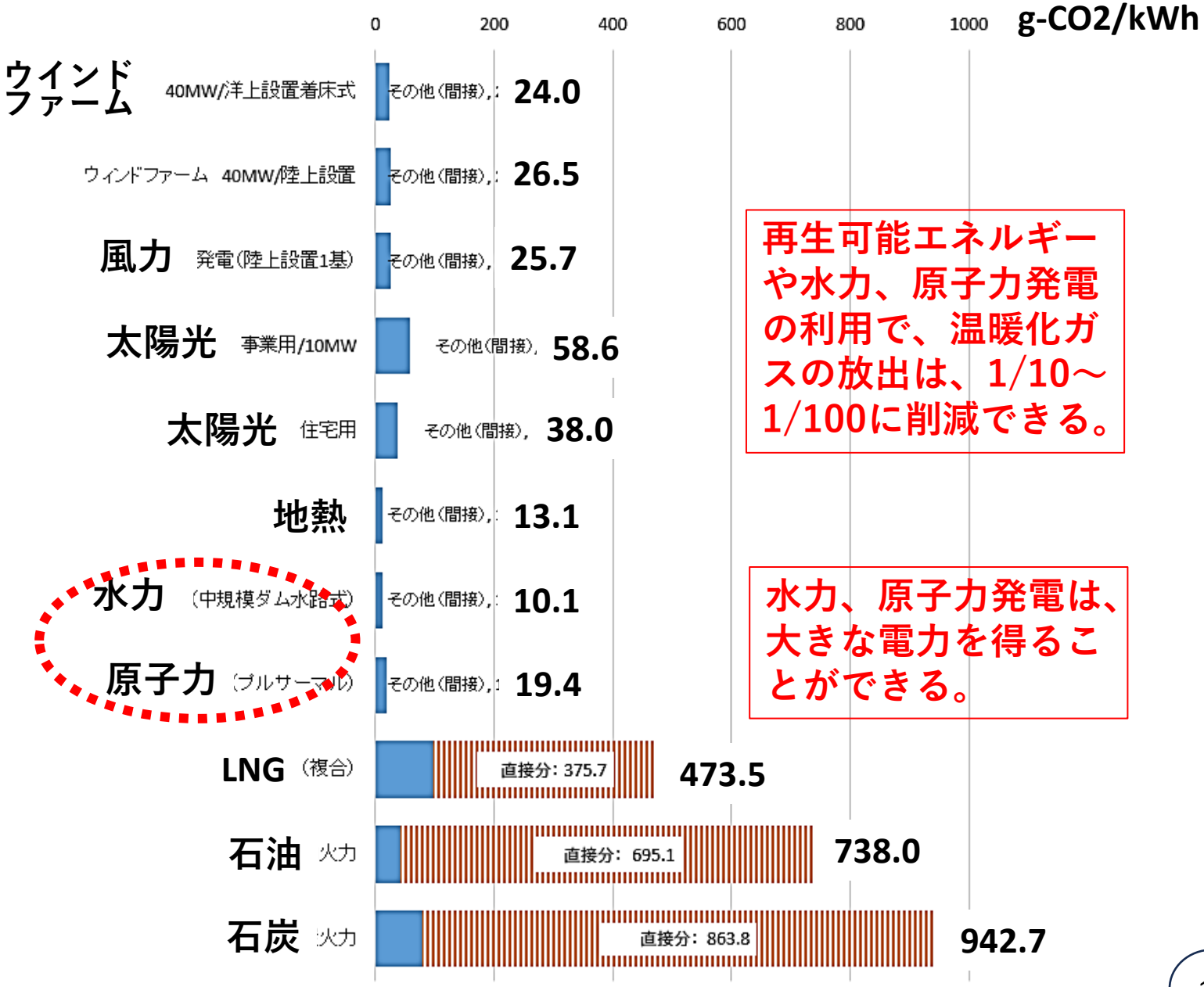
世界のエネルギー消費大国での発電量と電源構成　(2017年)



出典:経産省の資料を元に作成

多くの先進国でも、発電に化石燃料を使っている。
フランスは原子力発電の効果が大きくわずか８％。

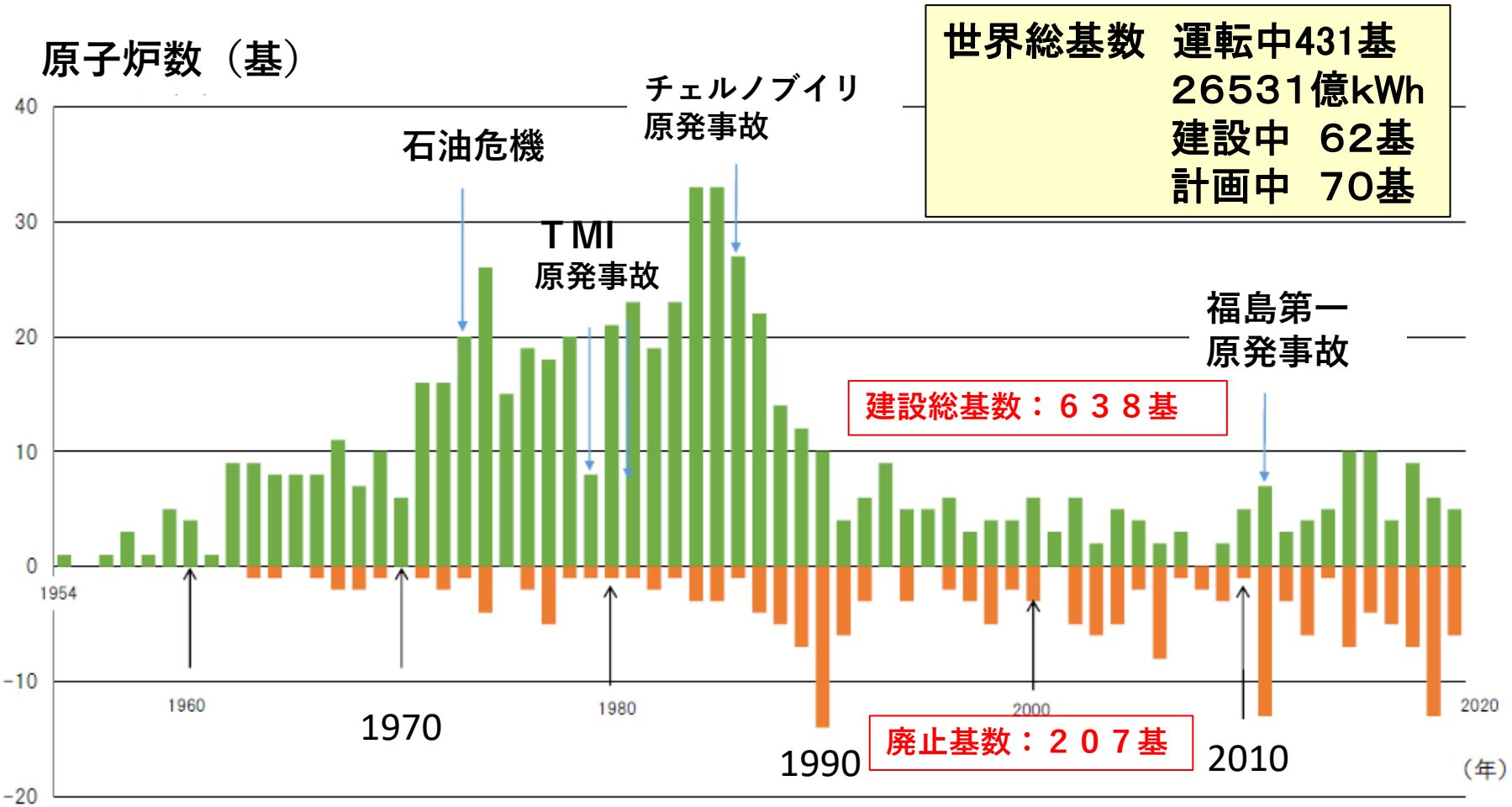
発電方式による地球温暖化ガス排出比較



再生可能エネルギーや水力、原子力発電の利用で、温暖化ガスの放出は、1/10～1/100に削減できる。

水力、原子力発電は、大きな電力を得ることができる。

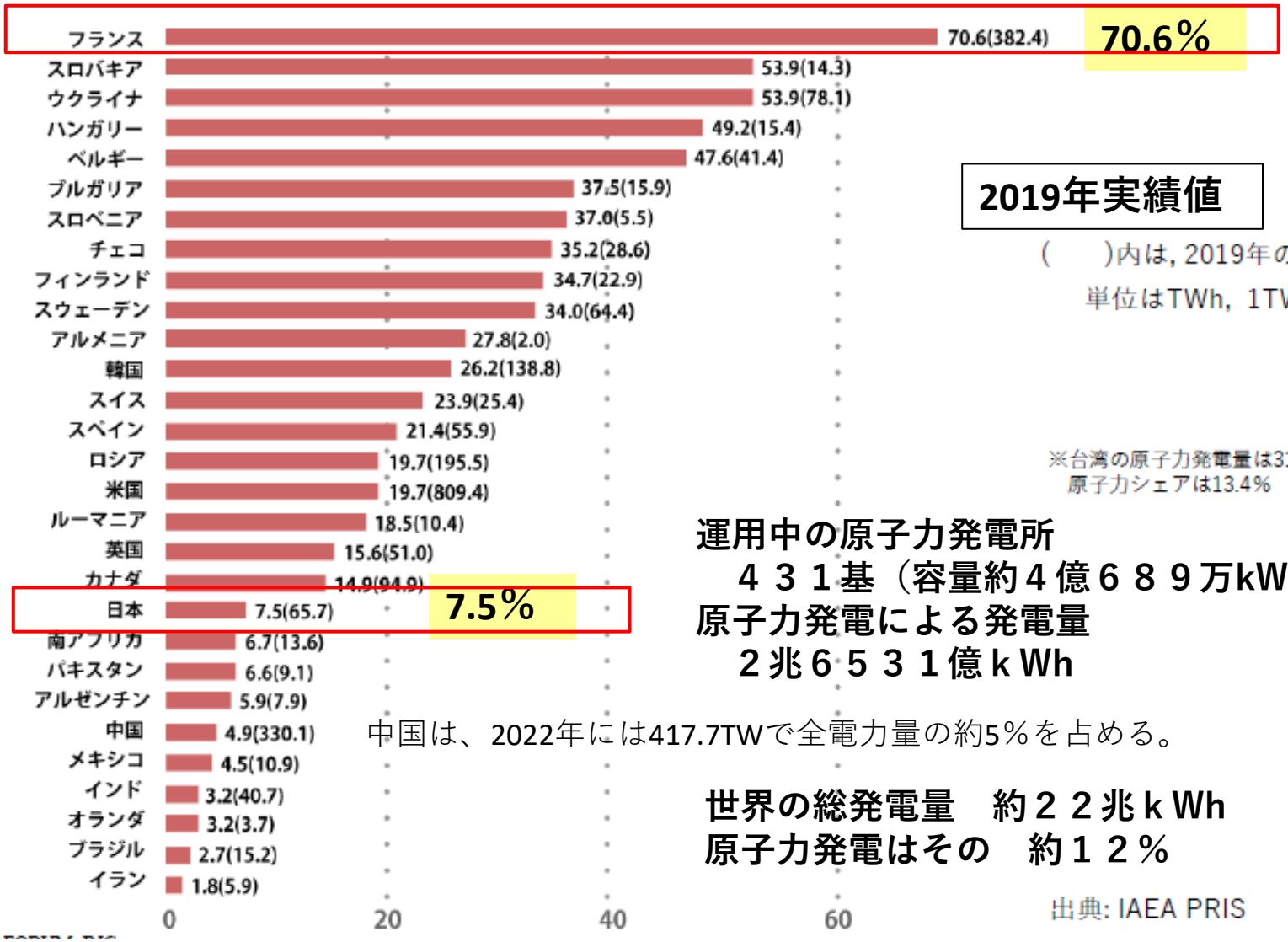
世界の原子力発電所　送電開始と閉鎖の推移



© JAPAN ATOMIC INDUSTRIAL FORUM, INC.

出典: IAEA PRIS, JAIF調べに基づき当協会作成
表数値出典：日本原産協会2023-3-13

世界各国の原子力発電のシェア



70.6％

7.5％

2019年実績値

（　　）内は，2019年の原子力発電量

単位はTWh，1TWh＝10億kWh

※台湾の原子力発電量は31.1TWhで，
原子力シェアは13.4％

運用中の原子力発電所
４３１基（容量約４億６８９万kW）
原子力発電による発電量
２兆６５３１億ｋWh

中国は、2022年には417.7TWで全電力量の約5％を占める。

世界の総発電量　約２２兆ｋWh
原子力発電はその　約１２％

出典: IAEA PRIS

日本の原子力発電所の稼働状況

原子力発電所の現状

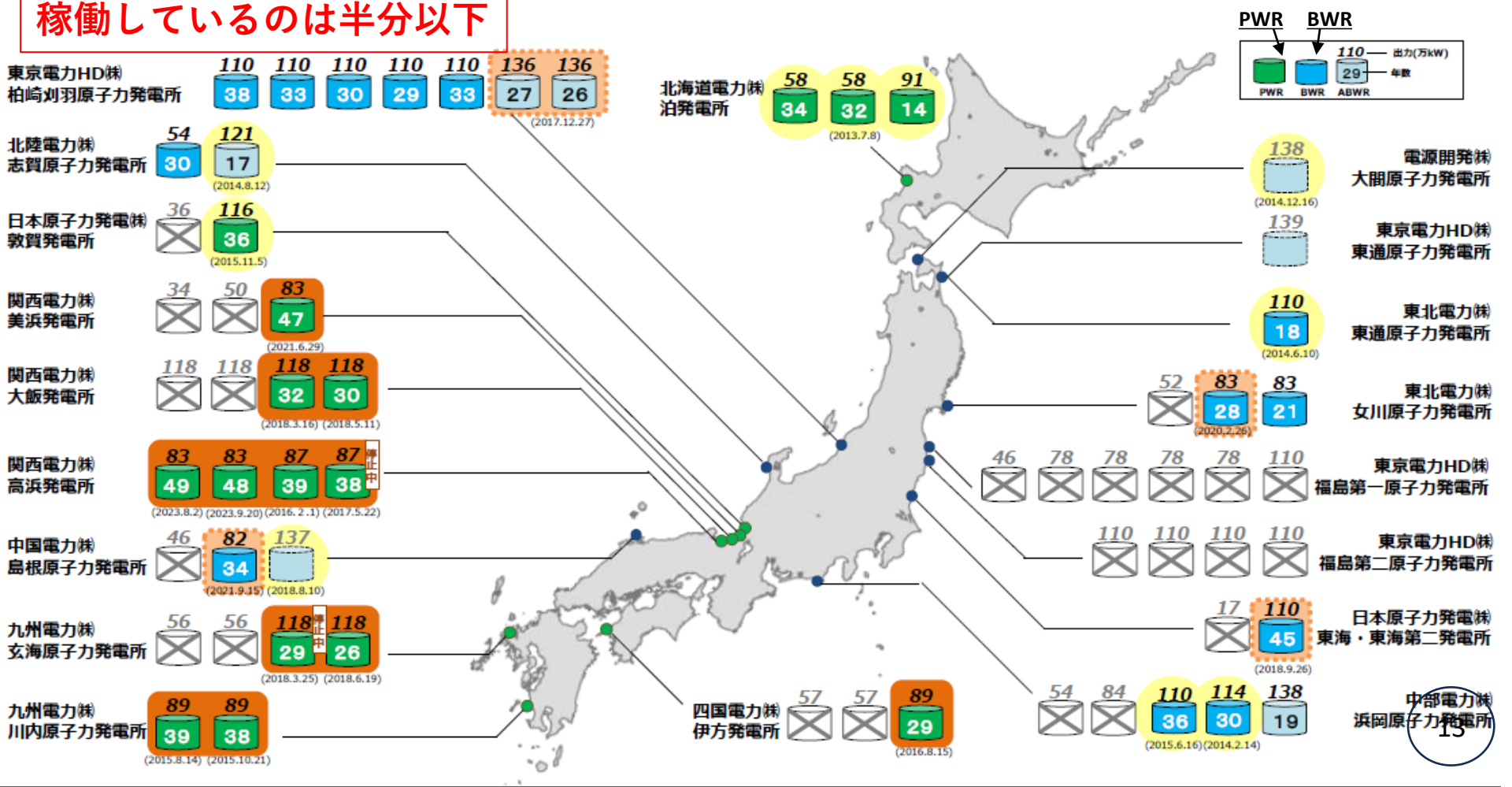
総数３６基　3722万ｋW

2024年1月24日時点

再稼働	設置変更許可	新規制基準 審査中	未申請	廃炉
12基	5基	10基	9基	24基

稼働中 10基、停止中 2基（送電再開日）　(許可日)　(申請日)

稼働しているのは半分以下

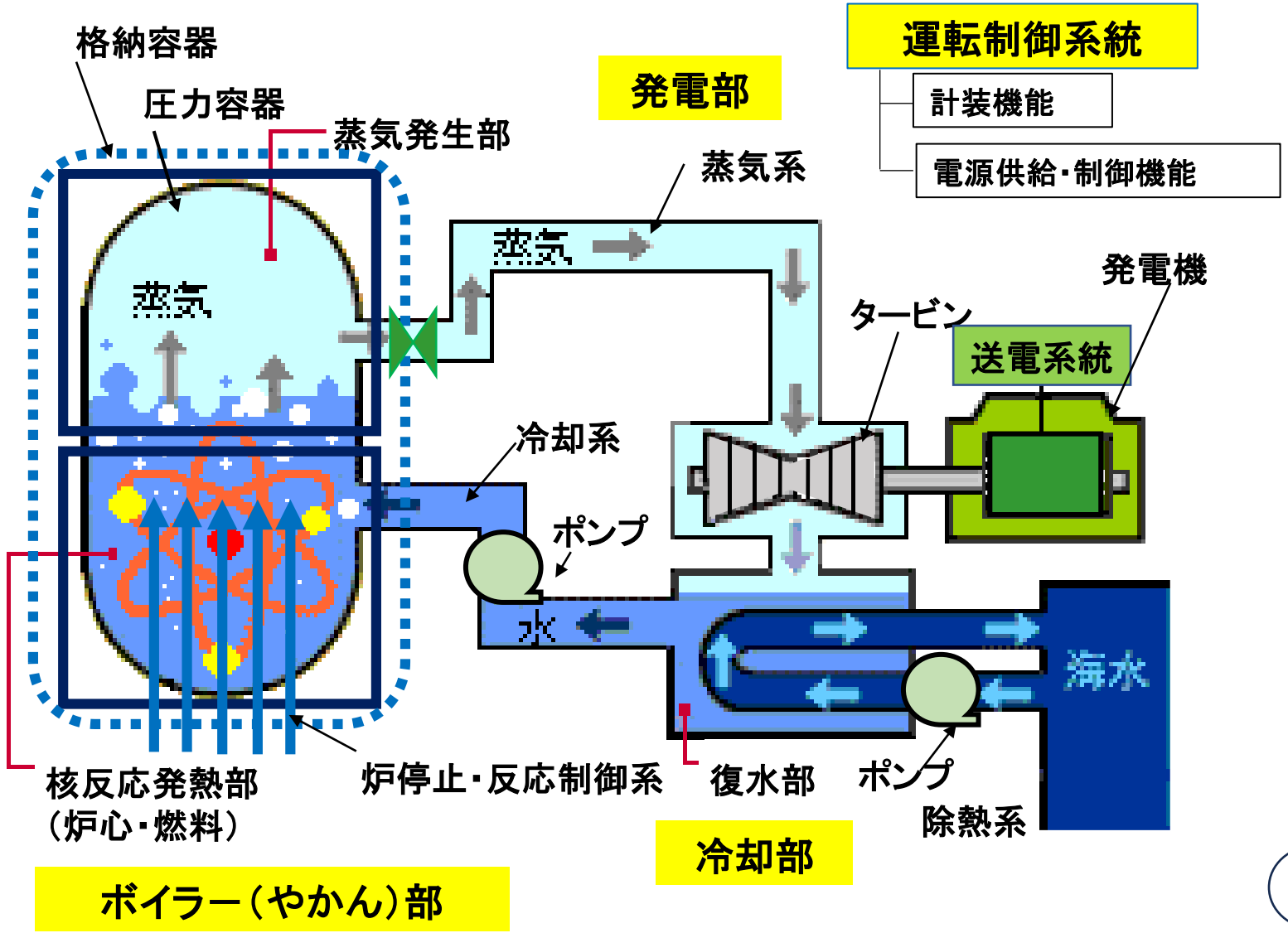


原子力発電とは

電気を起こす仕組みー原子力発電の仕組み

原子力発電の仕組みは、他の発電と同様ボイラーが原子力エネルギーと言う違いだけで単純だが。

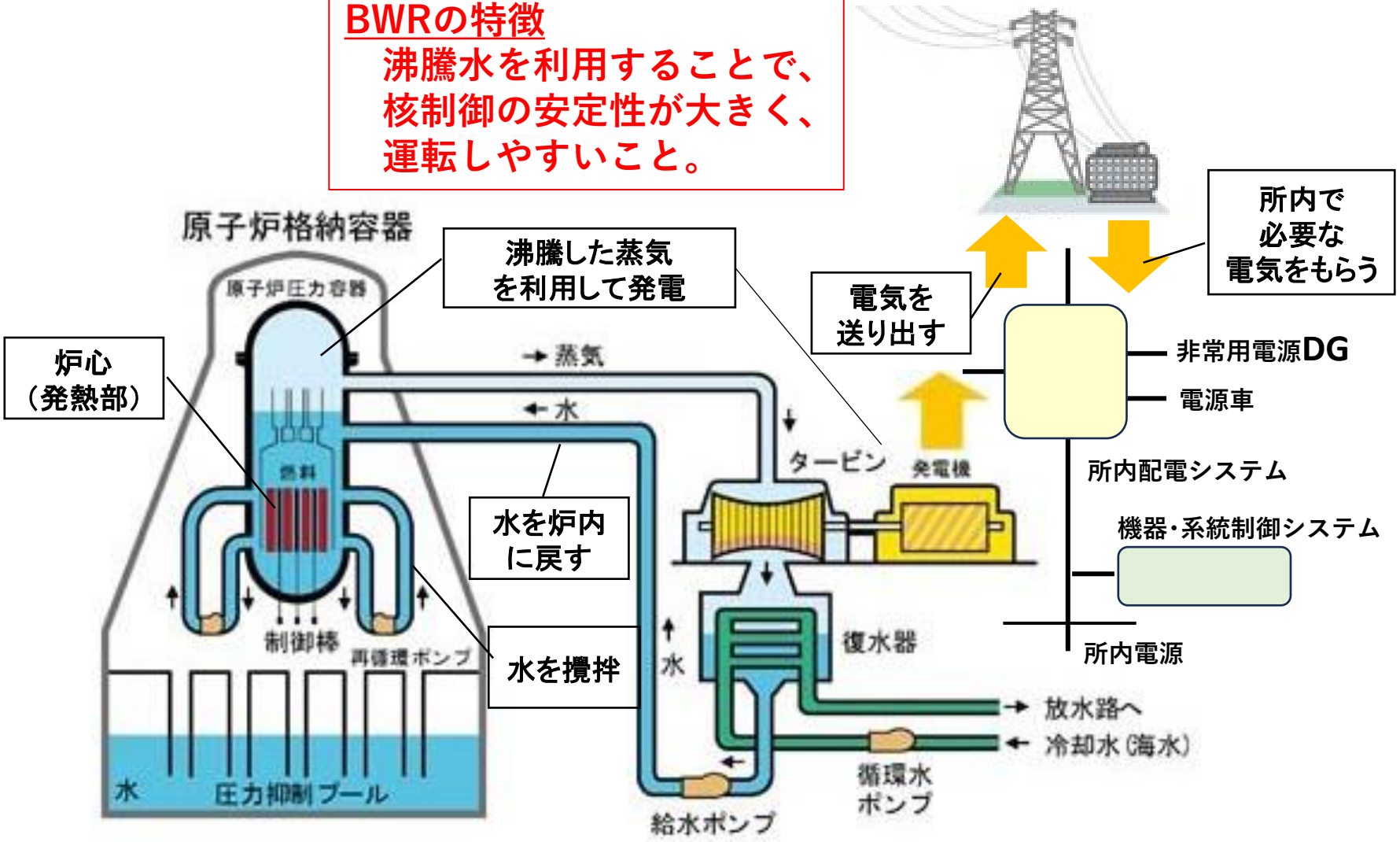
複雑にしているのは安全確保のための仕組み



原子力発電所の構成

志賀原子力発電所・沸騰水型原子力発電所（BWR）の全体概要

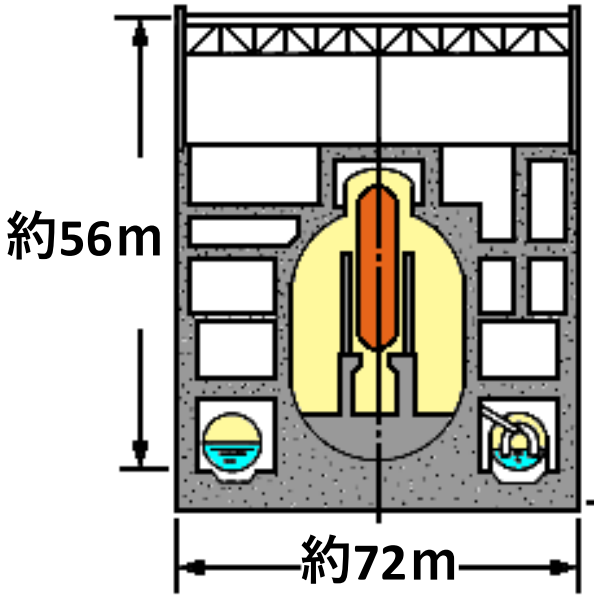
BWRの特徴
沸騰水を利用することで、
核制御の安定性が大きく、
運転しやすいこと。



BWR：Boiling Water Reactor

志賀原子力発電所の特徴

１号機（５４万ｋW）

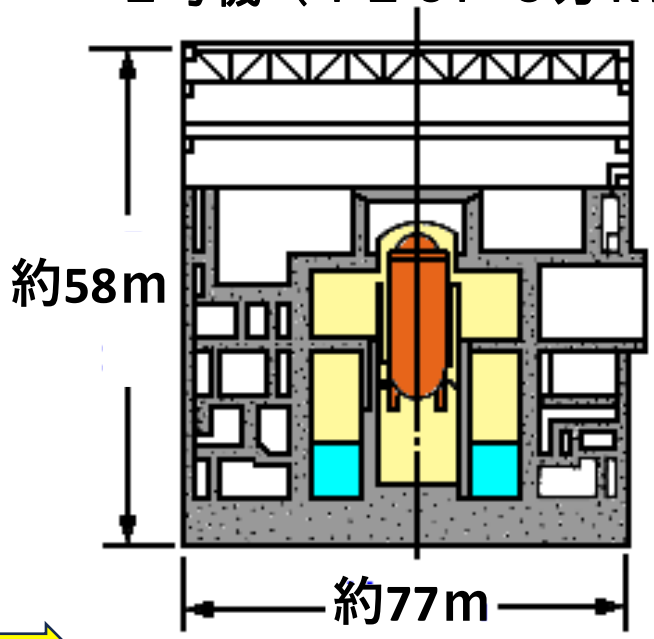


BWR

格納容器
（MARK　Ⅰ改良型）
鋼製円筒/円環形

再循環ポンプ２台
ジェットポンプ16台（炉内）

２号機（１２０．６万ｋW）



ABWR

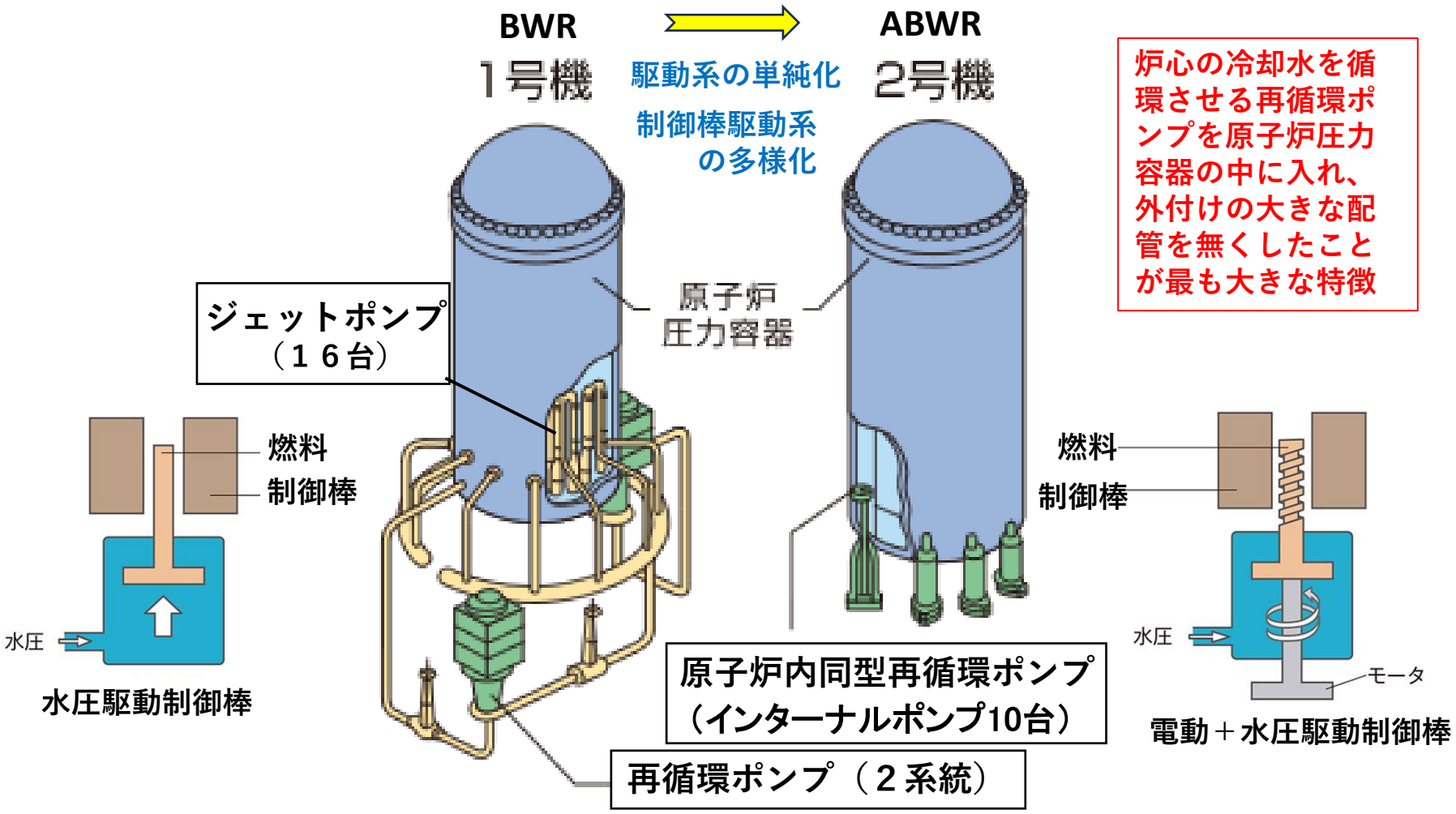
格納容器
RCCV
鉄筋ｺﾝｸﾘｰﾄ製
鋼製内張円筒型

インターナルポンプ10台（炉内）

格納容器の小型化

志賀原子力発電所の特徴

沸騰水型原子力炉（BWR: Boiling Water Reactor)



ABWR：Advanced Boiling Water Reactor 改良型沸騰水原子炉

原子力発電所の構成の特徴

常用系は、

発電所の通常の運転をつかさどる制御設備である。

- 制御棒の引抜・挿入を制御する制御棒制御系,
- 原子炉の出力に関係する再循環流量を制御する再循環流量制御系,
- 原子炉への冷却水である給水の流量を制御する給水流量制御系,
- 原子炉圧力ならびにタービンを制御する原子炉圧力・タービン制御系,
- タービンおよびタービン発電機保護系
- これらの系統を制御する運転制御設備および変圧器や遮断器などの電気供給設備

などから構成される。

今回、能登半島地震で損傷した変圧器は常用系の設備であり、多重化されているとともに、安全系は別に備えられている。

安全系は、

万一異常が発生した場合に原子炉安全を確保する安全上重要な計測制御設備である。

- 異常が発生した場合に原子炉を緊急停止させる原子炉安全保護系,
- 異常時に原子炉冷却の維持や放射能の拡散を抑制するために設けられている工学的安全施設の動作を制御する工学的安全施設制御系,
- 中性子束を計測し原子炉の出力を監視する核計装系
- 常用系とは別に、異常発生時に機能する、電気供給設備、系統制御設備

などから構成される。

常用系の異常が安全系に影響を及ぼさないように、物理的・電気的に分離すること
また**安全系は相互に独立した多区分構成とすること**、が要求されている

安全とは

社会での「安全」とは

●一般に「安全」とは以下のように定義されている。

①物事が損傷したり、危害を受けたりするおそれのないこと。

②安らかで危険のないこと。平穏無事。

（出典：広辞苑）

原子力発電の安全とは

原子力における「安全」すなわち「原子力安全」とは、

「放射線リスクによって生じる人と環境（人の生活環境）に悪い影響を与えることを防ぐ」

ことである。

この達成すべき安全目標は、国民とのリスクコミュニケーションにより定められる。

原子力発電の設備は、これを達成するように造られ、運用される。

要点：①それぞれが安全確保の責務を果たす意識

②“リスク”による定量化

③安全目標、性能目標のコンセンサス（目標の合意）

③「深層防護」を念頭に対応

「深層防護」の考え方

「深層防護」とは、多重化、多様化により、確実にする考え方

設計　設計者（発注者）の役割

設計者が取り組む範囲

第1層：異常・故障の発生防止　→ 通常運転の範囲

第2層：異常・故障の「事故」への拡大防止 → 異常を検知する

第3層：「事故」の影響緩和　→ 設計基準事故以内に収める

「設計者」とは設計基準・仕様に基づきプラントを設計製造するもの。第４層は、一部も設計者の役割があるが、基本は使用者の役割である。

運用　使用者の役割

第4層：「設計基準を超す事故」への施設内対策

→ シビアアクシデント（過酷事故）に展開させない。影響を小さくする

→重大事故に対処するための機能を有する施設を付加する。

→ 使用者のアクシデントマネジメント（AM）対応

使用者が取り組む範囲

防災　国・自治体の役割

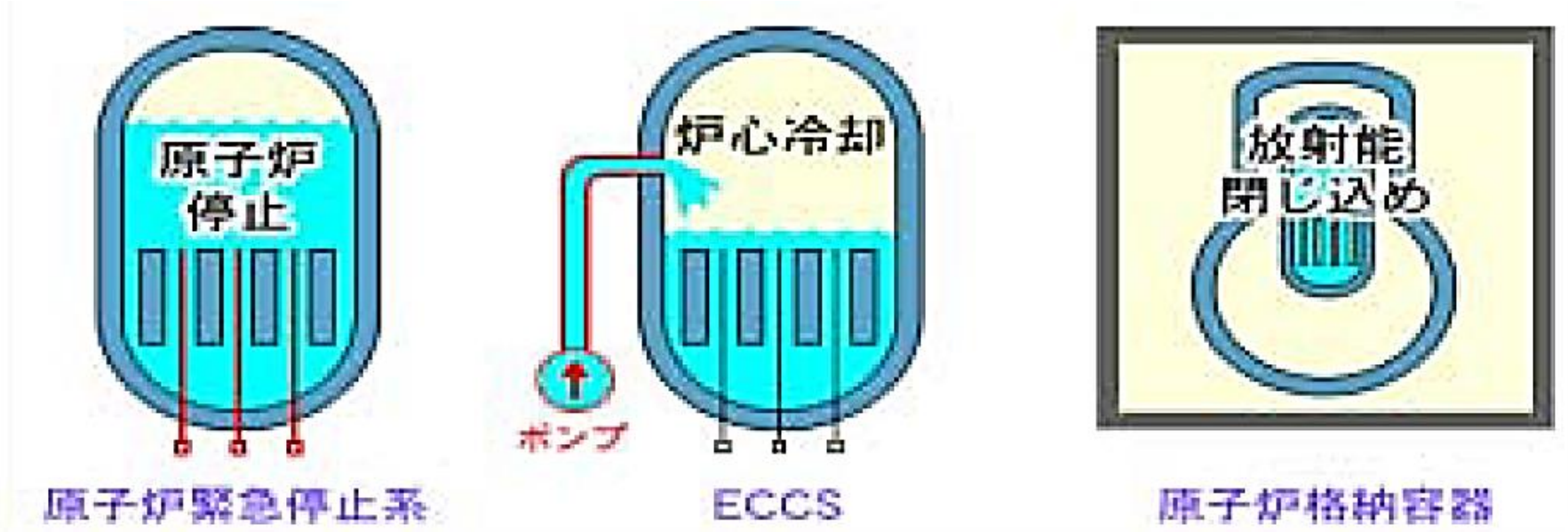
第5層：公衆と環境の防護のための防災対策

→ 住民・公衆による災害を防ぐ

原子力安全の原則

原子力発電所の安全確保の重要な手段

第2層 「止める」 → 第3層 第4層 「冷やす」 → 第3層 第4層 「閉じ込める」



［出典］経済産業省ホームページ／原子力のページ、http://www.atom.meti.go.jp/

ECCS：Emergency Core Cooling System　非常用炉心冷却系

原子力の安全を設計する

●安全設計　「第1-４層までみた安全の考え方を示す」

放射性物質、崩壊熱などの危険性を制御、管理し、安全を確保するためのシステム設計

－多重化、多様化、独立性の確保

多重化(性)：同一の機能を有する同一の性質の系統、または機器が2つ以上あること
多様化(性)：同一の機能を有する異なる性質の系統、または機器が2つ以上あること
独立性　　：それぞれが影響をうけずに、独立して機能すること

●構造設計　「第1-3層（発生の防止、拡大の防止、影響の緩和で設計する」

所定の発電所内部・外部からの力に対する構造健全性（強度確保）の確保の観点からの設計

－壊れない、機能が失われないようにする

●安全評価　「設計したものの安全のレベルをリスクで確認する」

安全設計の妥当性の確認

つまり、原子力発電所がシステムとしてそれぞれの機器・系統が連携をとりながら安全に運転できるか、また安全に停止できるかを評価

－十分に小さなリスクで原子力安全が確保されることを示す
　社会の要求に基づくリスクレベルを確保する。

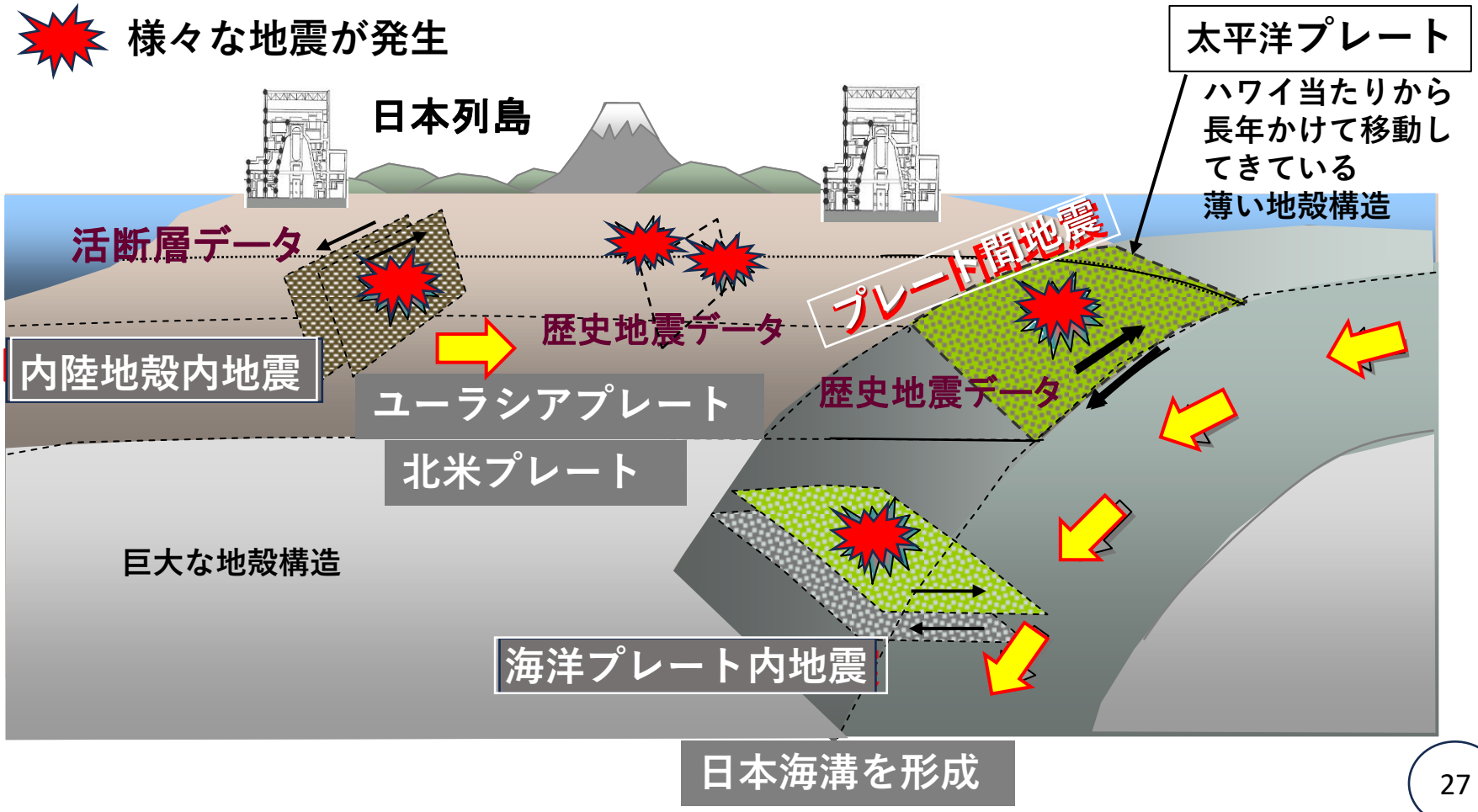
（注）「リスク」とは、発生の事象の大きさと可能性、確率をいう。

地震を考える

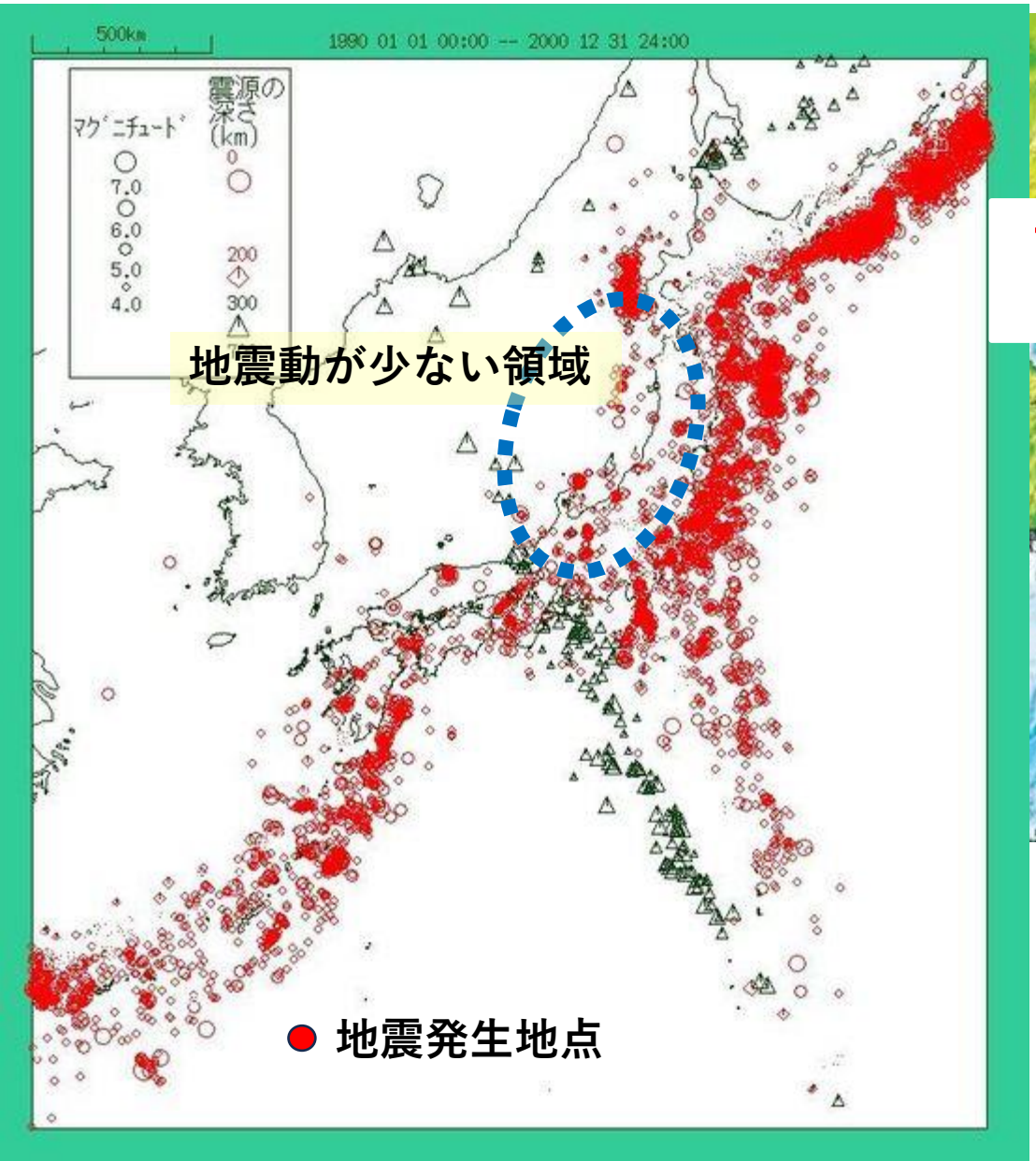
地震動の発生メカニズム

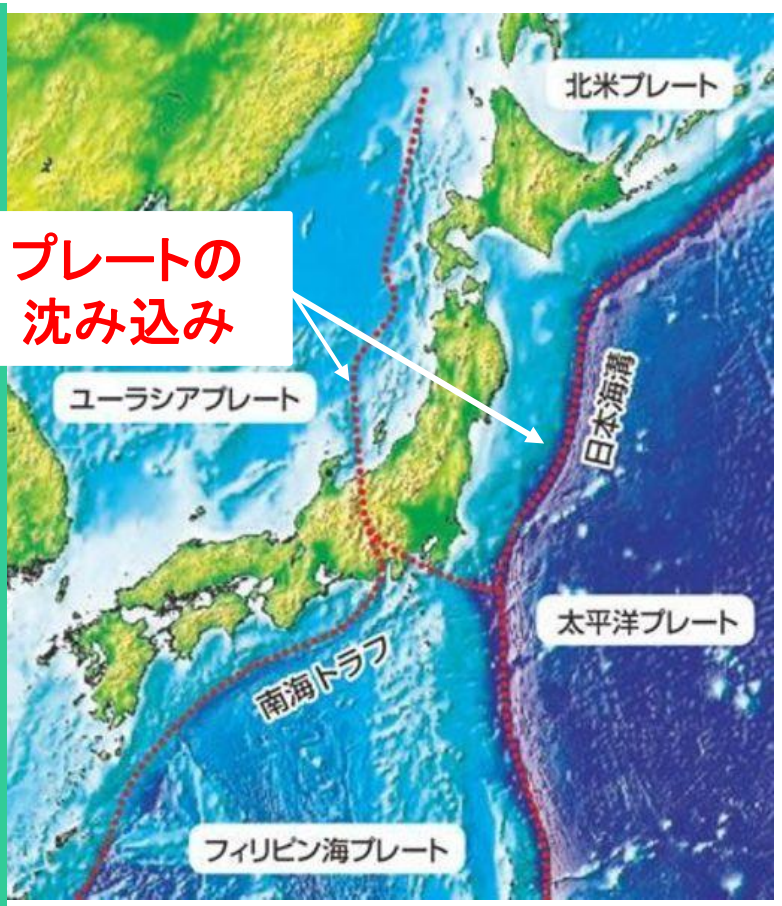
日本は、プレートのぶつかり合う地盤のうえにある。

「わが国の原子力発電所にとっては、地震が最大の脅威である。
いかに対応していくのか、わが国の重要な課題である。」



日本付近の地震の分布

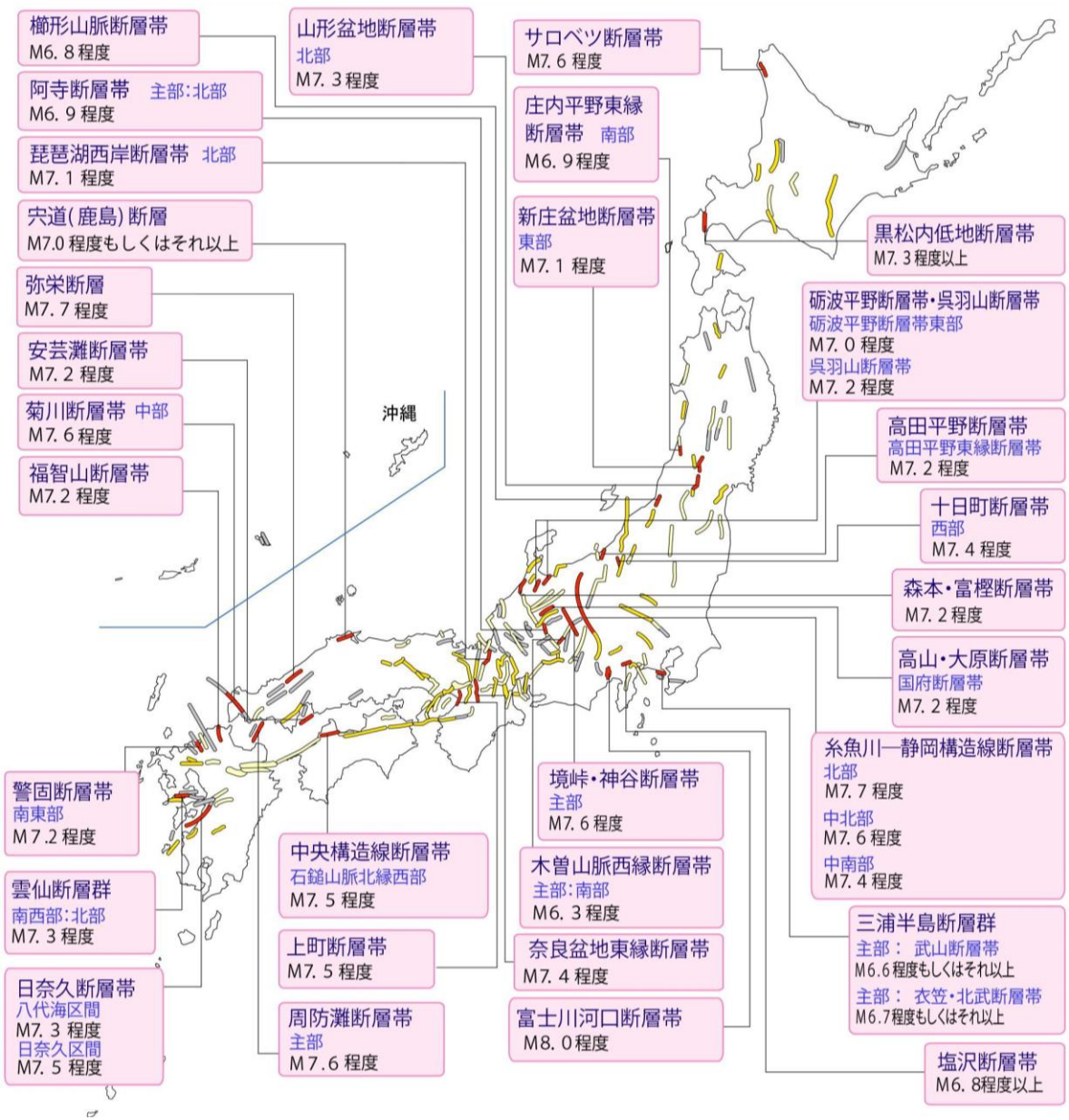




地形図

地震は、マントルの動き、地殻の動きで生じる地盤のずれにより発生する。

日本各地の地震・断層帯の位置

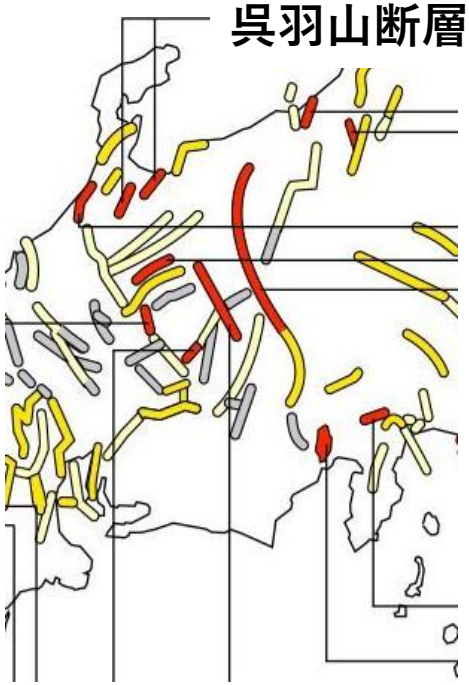


凡例：
- Sランク（高い）：30年以内の地震発生確率が３％以上
- Aランク（やや高い）：30年以内の地震発生確率が0.1～３％未満
- Zランク：30年以内の地震発生確率が0.1％未満
  （Zランクでも、活断層が存在すること自体、当該地域で大きな地震が発生する可能性を示す。）

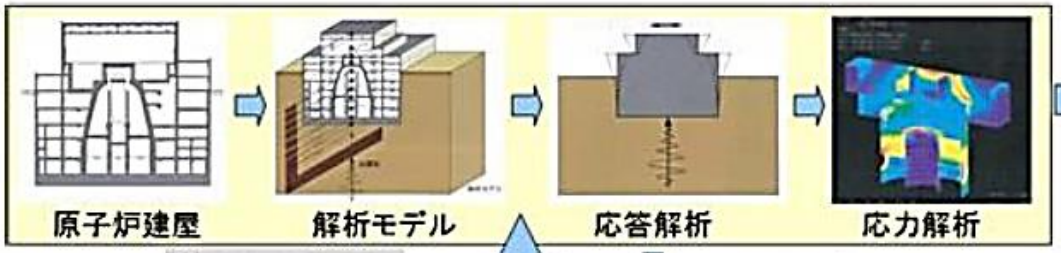
出典：政府 地震調査研究推進本部

（拡大図）

砺波平野断層帯
呉羽山断層帯

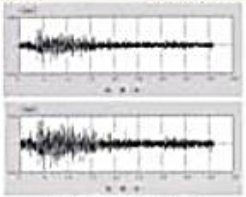


原子力発電所の地震　－解析と実験による安全性確保



解析による
安全性の確認

地震動の
解析例


地震動入力

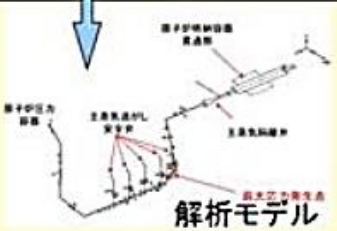

床応答スペクトル

岩盤の
安定解析

安全性の確認

総合的に
安全を確保、
確認する


機器・配管


解析モデル

応答解析
応力解析

実験による
安全性の確認

解析

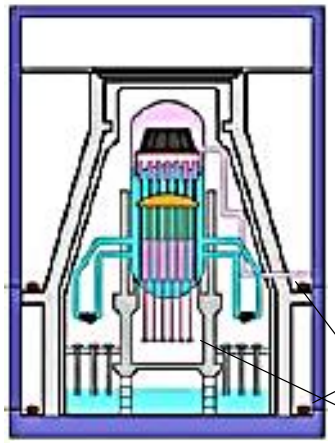
設計の高度化

実機に反映

実験



実験による
主要設備の
耐震性の
確認



地震時の停止システム

実機での地震時
のデータの採取

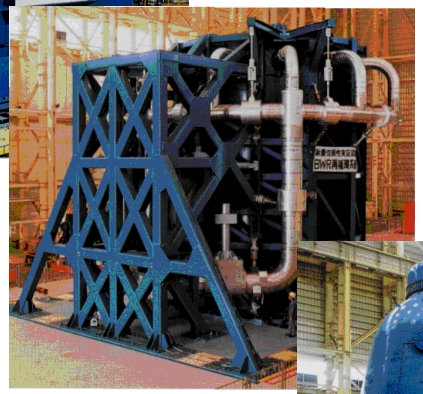
大型振動台設備（多度津）

耐震実証試験による各システムの地震時健全性の確認

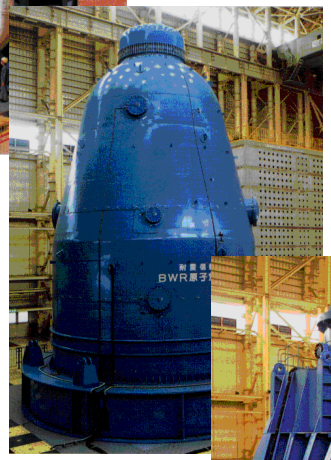
大型機器

↓制御棒駆動装置



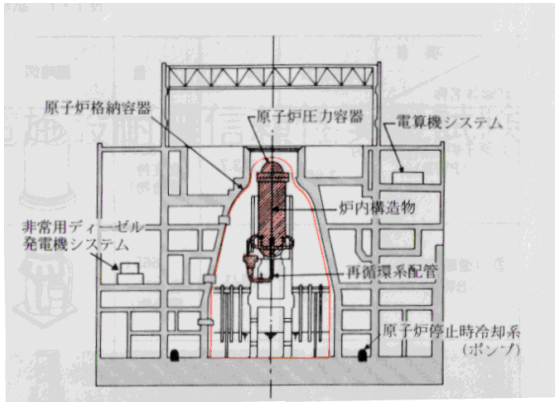


再循環配管→



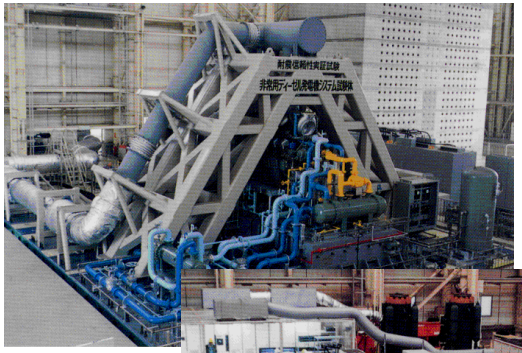
←格納容器

実機断面図



重要システム

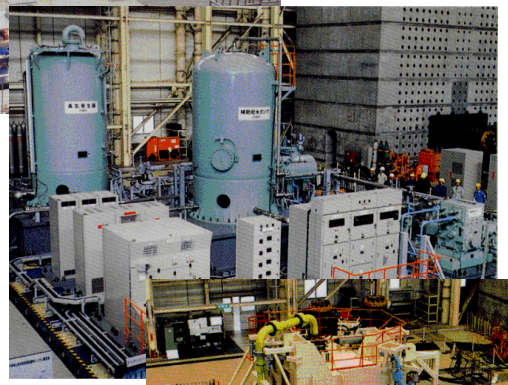
非常用DG



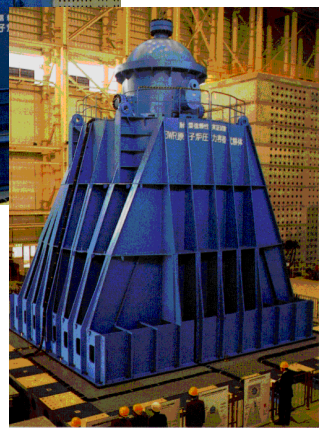


←計算機システム

↓安全系

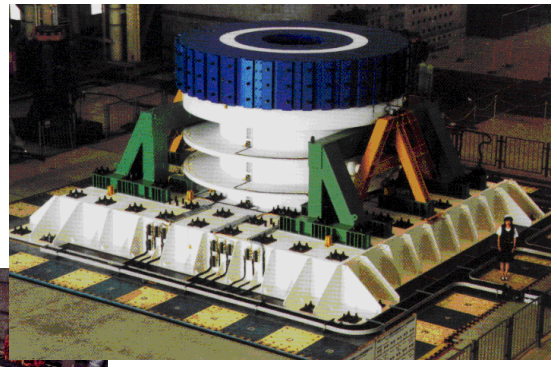


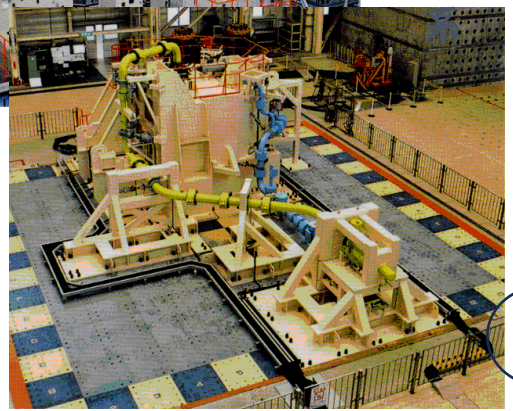
↓配管



←縦型ポンプ
システム

コンクリート製格納容器

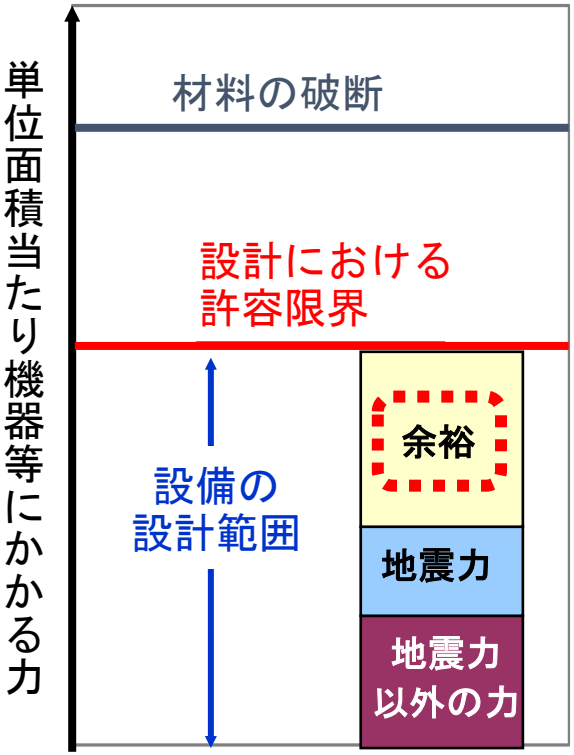




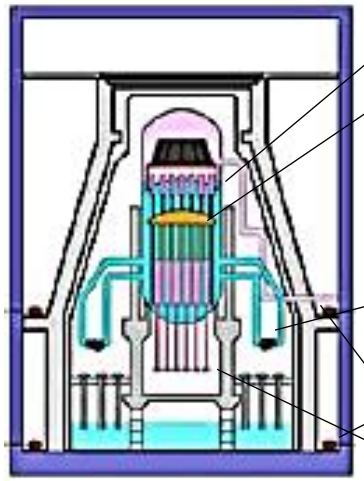
耐震裕度　柏崎・刈羽原子力発電所の新潟県中越沖地震での評価

機器・配管系の許容限界と裕度

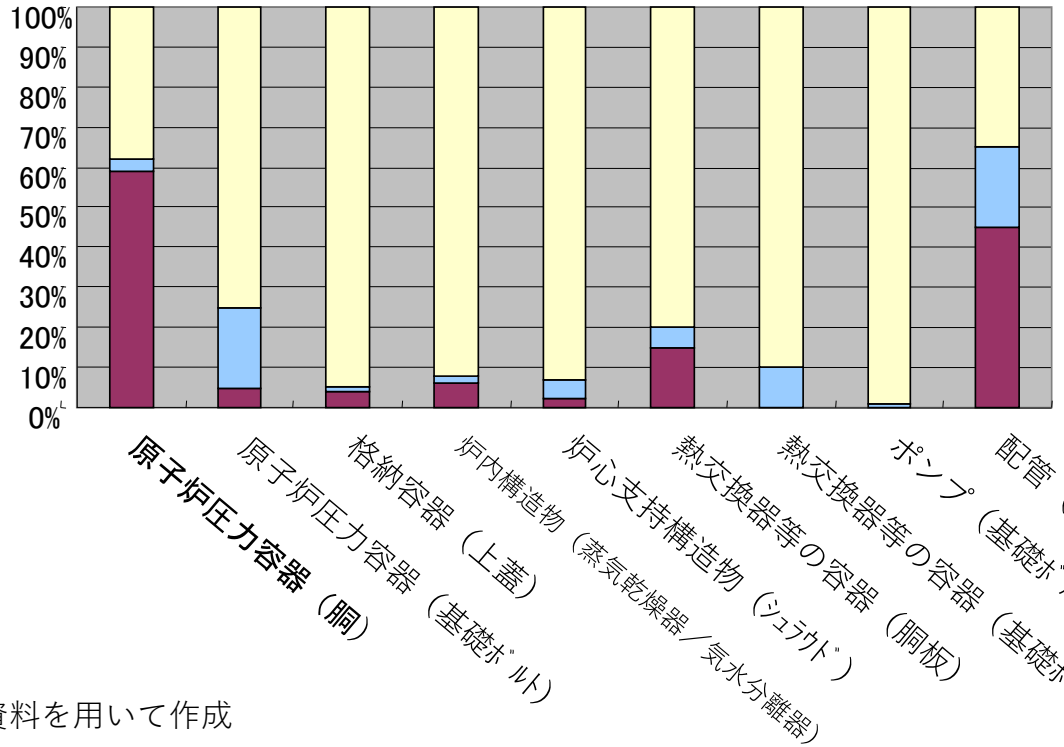
2007年の中越沖地震時のデータより



破壊に至る値より安全側に許容限界値を定め、さらに安全側の範囲で設計を行っている



地震時の停止システム



出展：経産省原子力安全・保安院報告資料を用いて作成

能登半島地震

2024年1月1日能登半島地震は何をもたらしたのか

石川県全図

UPZ

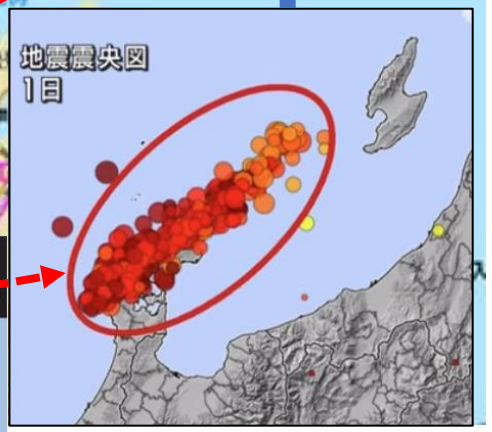
志賀原子力発電所

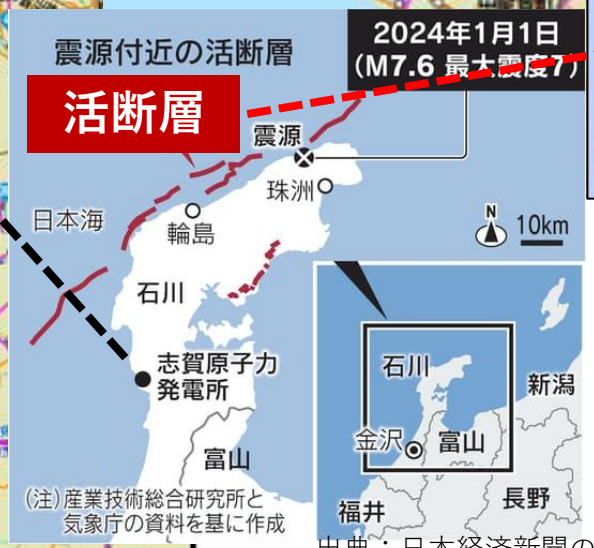
2024年1月1日M7.6の地震発生

震源

輪島市

珠洲市

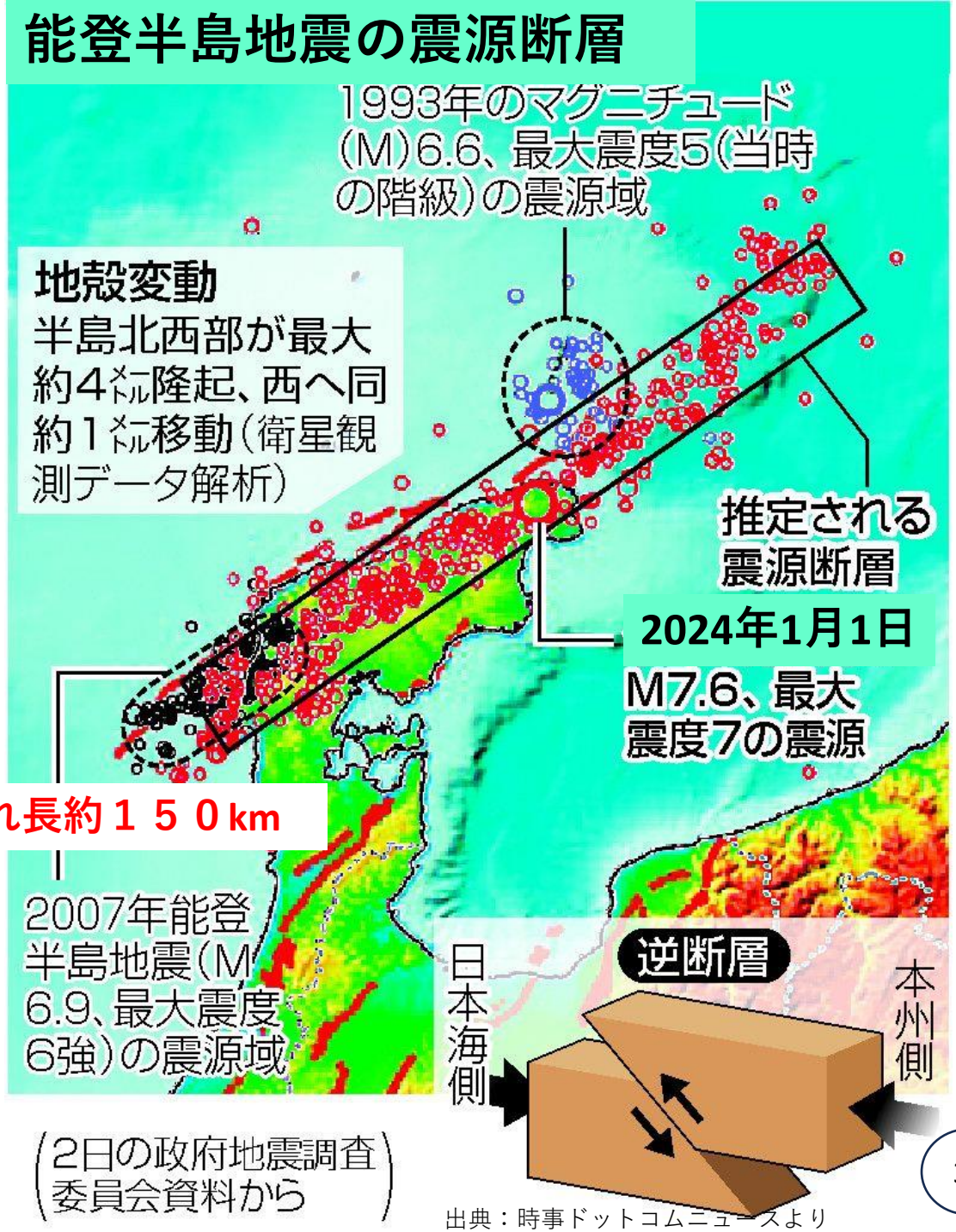




出典：日本経済新聞の情報を活用して作成

能登半島地震の震源断層





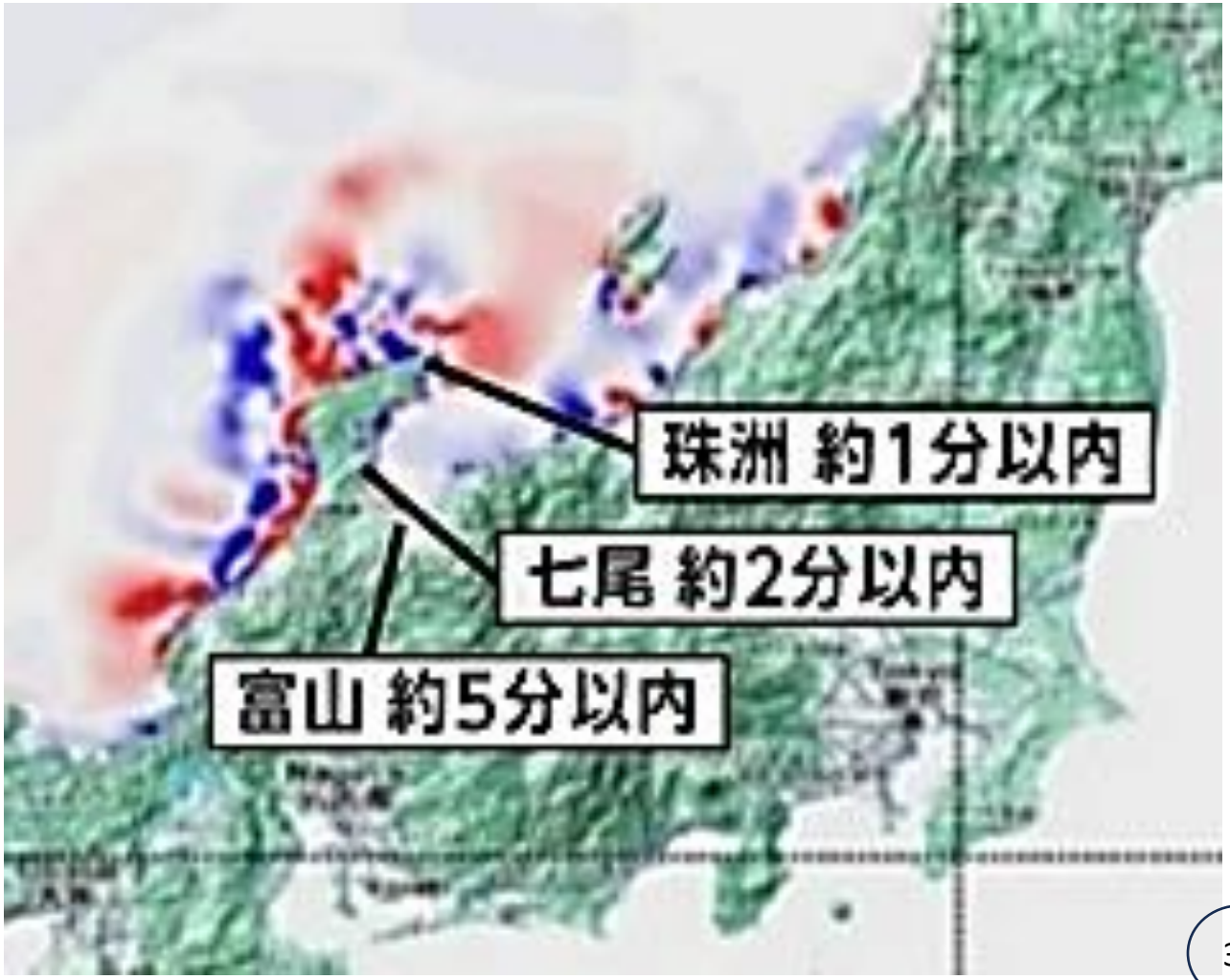
出典：時事ドットコムニュースより

活断層近傍では、大きな地震動と地盤の隆起（陥没）がある。今回は、３ｍ－５ｍの隆起があったようだ。

2024年1月1日能登半島地震での津波の大きさと到達時間



海域での断層の動きは、大きな津波を生む。陸地に近い断層の動きでは、津波は短時間に海岸に到達する。

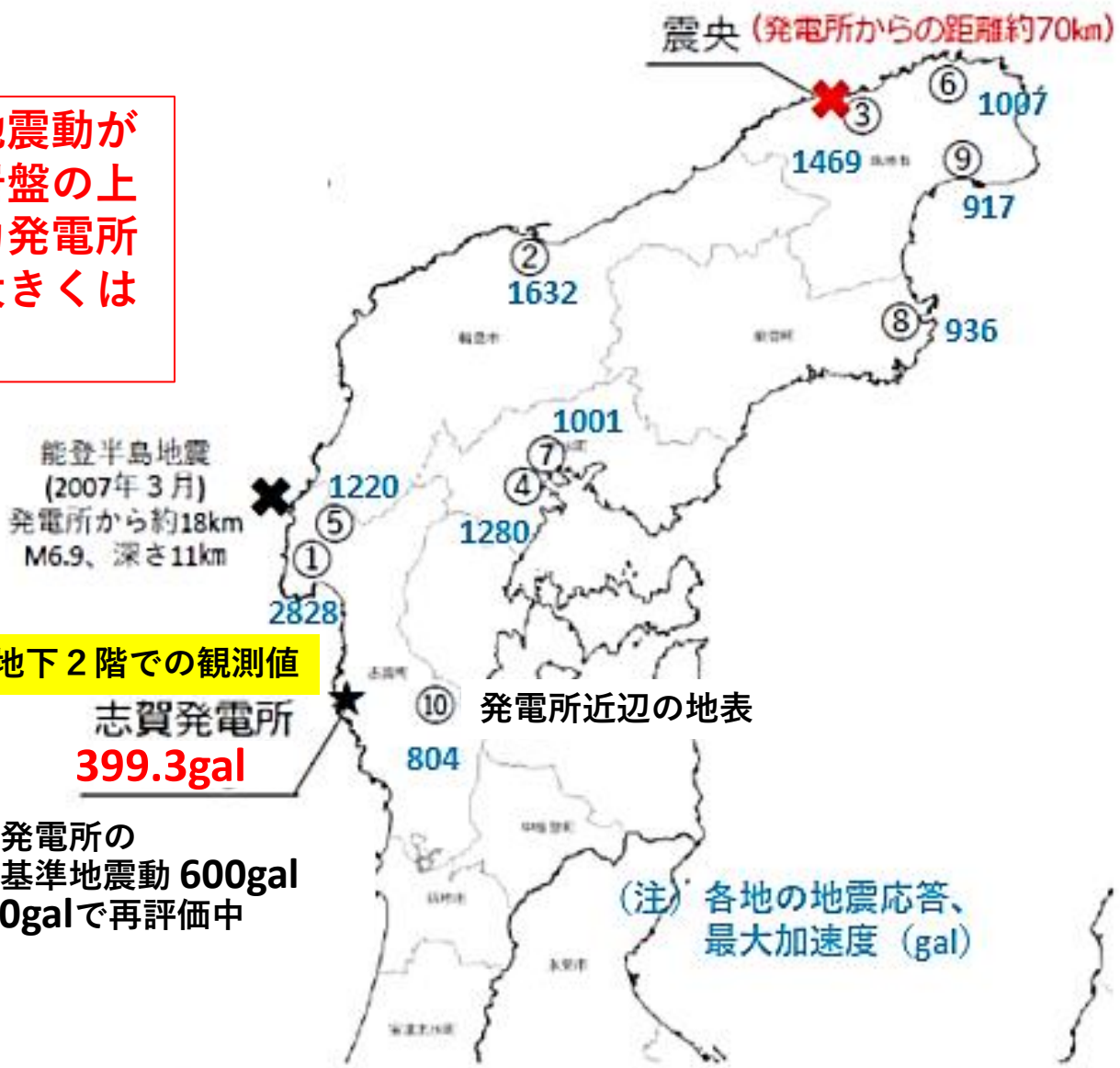


2024年1月1日能登半島地震での能登各地の地表面での地震動と志賀原子力発電所の地震動応答

（M7.6　震源深さ15km）

震央（発電所からの距離約70km）

各地で、大きな地震動が観測されたが、岩盤の上に建つ志賀原子力発電所での地震応答は大きくはなかった。

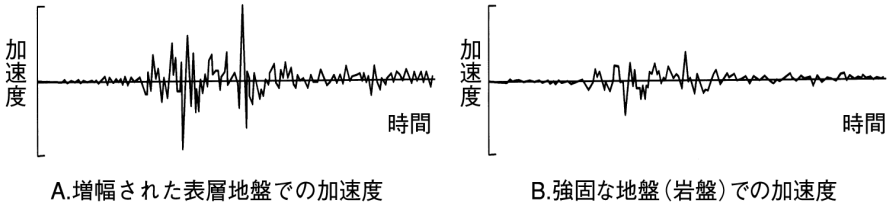


出典：関西電力webサイトより

原子力発電所の揺れ　一般の建造物との比較

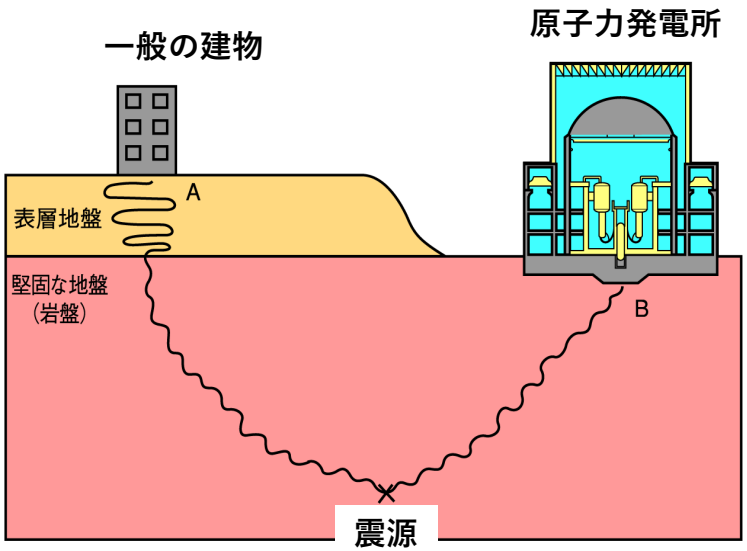
岩盤の上に建つ原子力発電所の地震動の大きさは、地表の３分の１ほど。

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



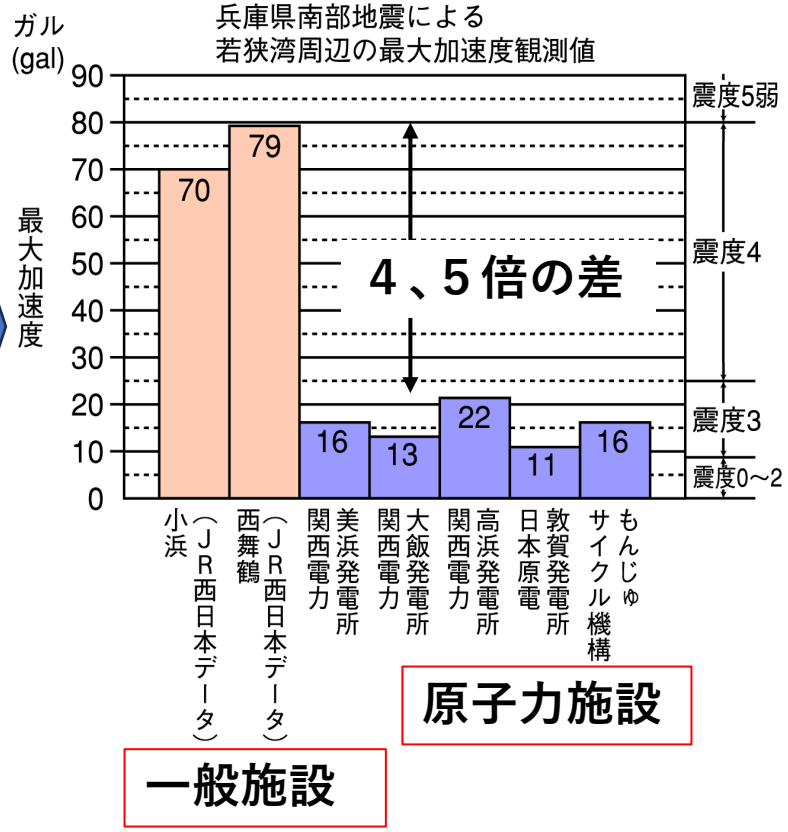
A.増幅された表層地盤での加速度　　B.強固な地盤（岩盤）での加速度

注）地震波形は模式図



堅固な地盤（岩盤）での揺れは、表層地盤に比べて1/2~1/3程度

1995年（平成7年）　兵庫県南部地震での地震動による若狭湾周辺の設備の振動



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

志賀原子力発電所の能登半島地震での地震応答

能登半島地震（2024年1月1日）の概要
発生：2024年1月1日　16時10分
震源：石川県半島地方（珠洲市）
規模：Ｍ７．６
（参考）　東北地方太平洋沖地震（2011年）M9.0
　　兵庫県南部地震（1995年）　M7.3
　　能登半島地震（2007年）　M6.9

志賀原子力発電所での応答
1号機での実測　（地震計1号機原子炉建屋地下2階）
水平　336gal　［合成最大加速度　399.3gal］
垂直　330gal

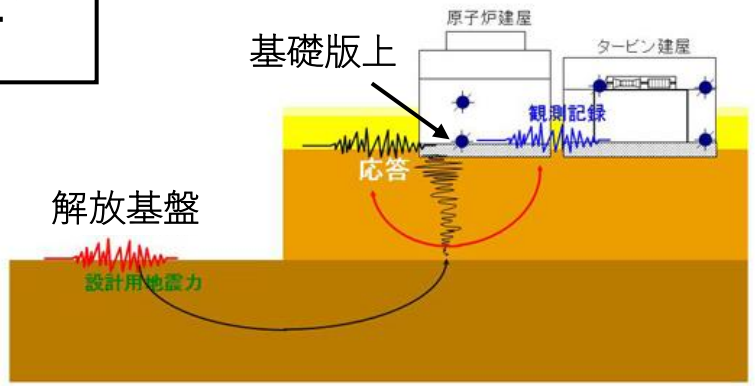
発電所前面海域の水位変動（2号機取水槽槽内ほか）
最大約３ｍ水位上昇、最大約１ｍ水位低下

志賀原子力発電所の各設備の地震時の健全性評価を実施した結果、評価基準を十分に下回るものであった。

原子力システムの安全機能は、健全に働くことが確認された。

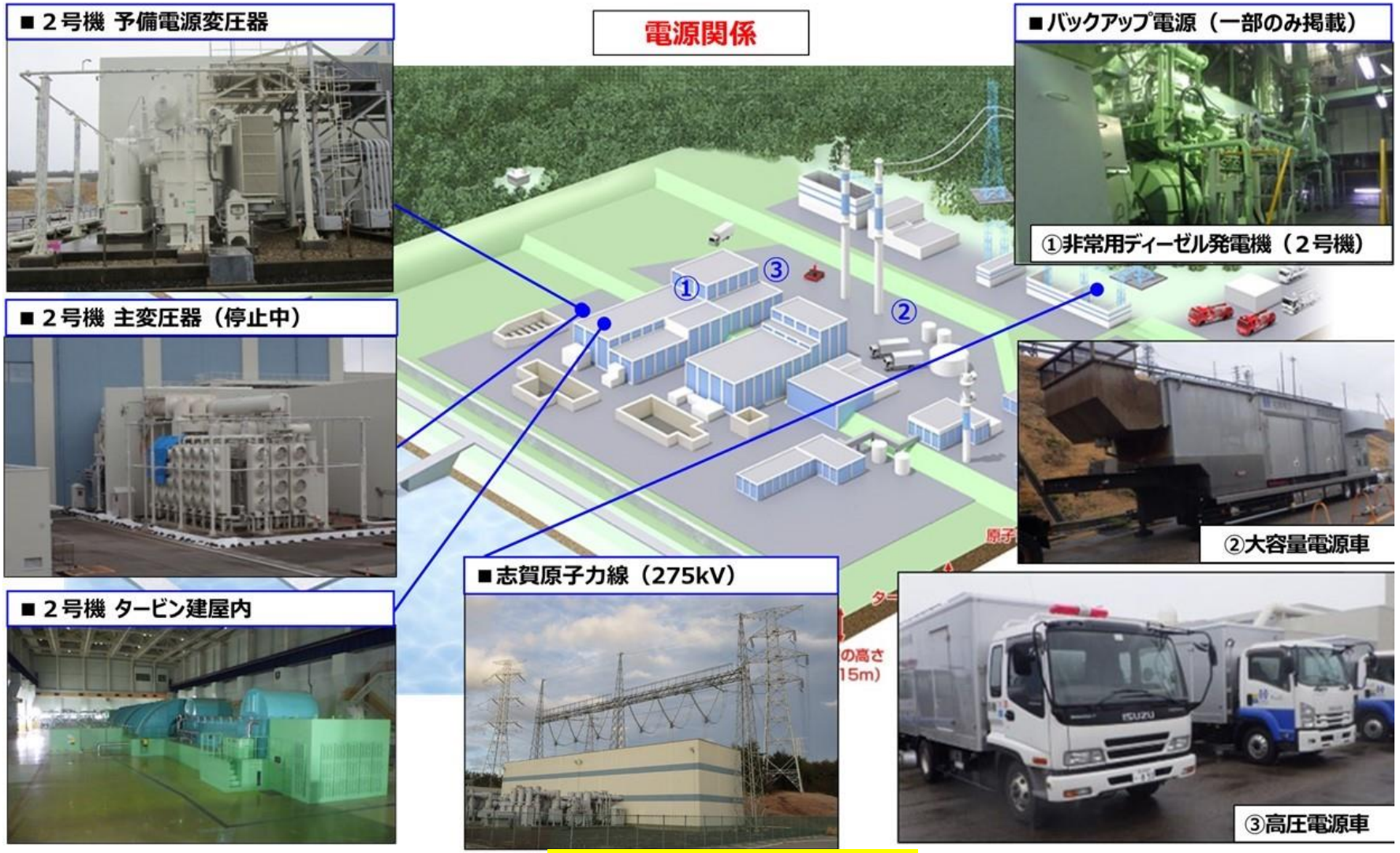
柏崎・刈羽原子力発電所での新潟県中越沖地震（2007年）時の地震応答
（例）1号機での実測　（　）は設計値
NS　311gal　（274）
EW　680gal　（273）
UD　408gal

応答加速度の実測値が設計値を上回わることもあるが、構造健全性は余裕が大きく問題はない。



設計用地震力と観測された加速度位置

2024年1月1日の能登地震後の志賀原子力発電所の設備状況 (1/2)



停止中の2号機低圧タービンにおいて「伸び差大」警報が発生したが、原子炉施設の安全確保に影響はない。

１号機起動変圧器からの油漏れがあることを確認され、系統は遮断したが、他の系統の利用、非常用電源の確保、監視設備、冷却設備の機能は維持、プラントの安全確保に影響はなかった。

出典：北陸電力webサイトより

2024年1月1日の能登地震後の志賀原子力発電所の設備状況 (2/2)

使用済燃料貯蔵プール、その他

■２号機 使用済燃料貯蔵プール

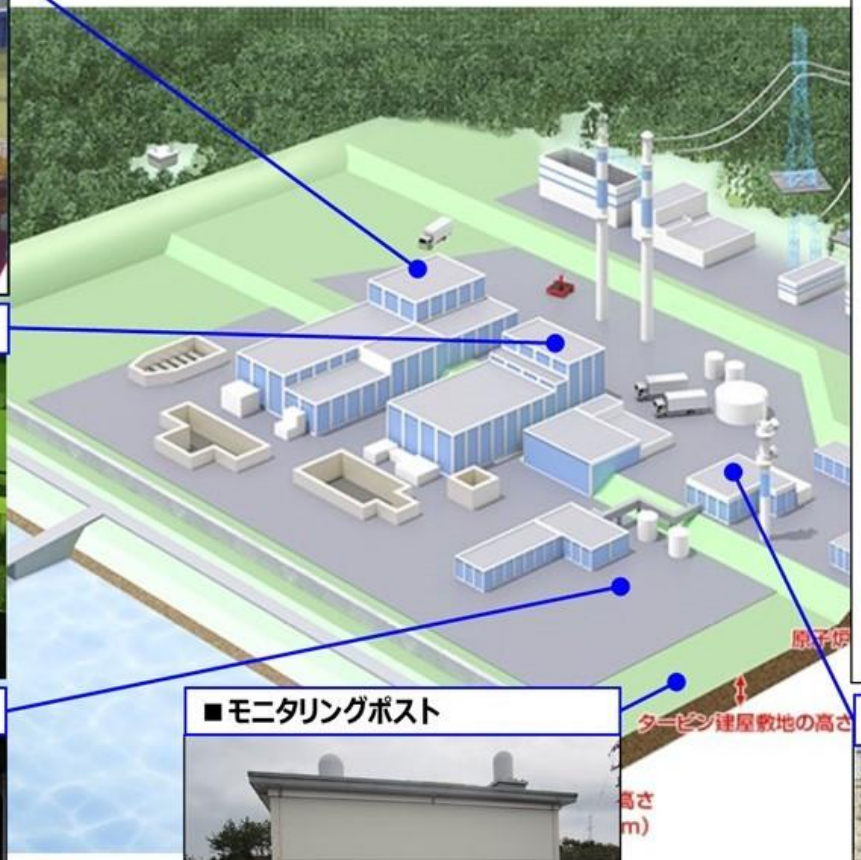


■1号機 使用済燃料貯蔵プール



■構内道路





■モニタリングポスト



<バックアップ水源設備>

大容量淡水貯水槽



大坪川ダム



■緊急時対策棟

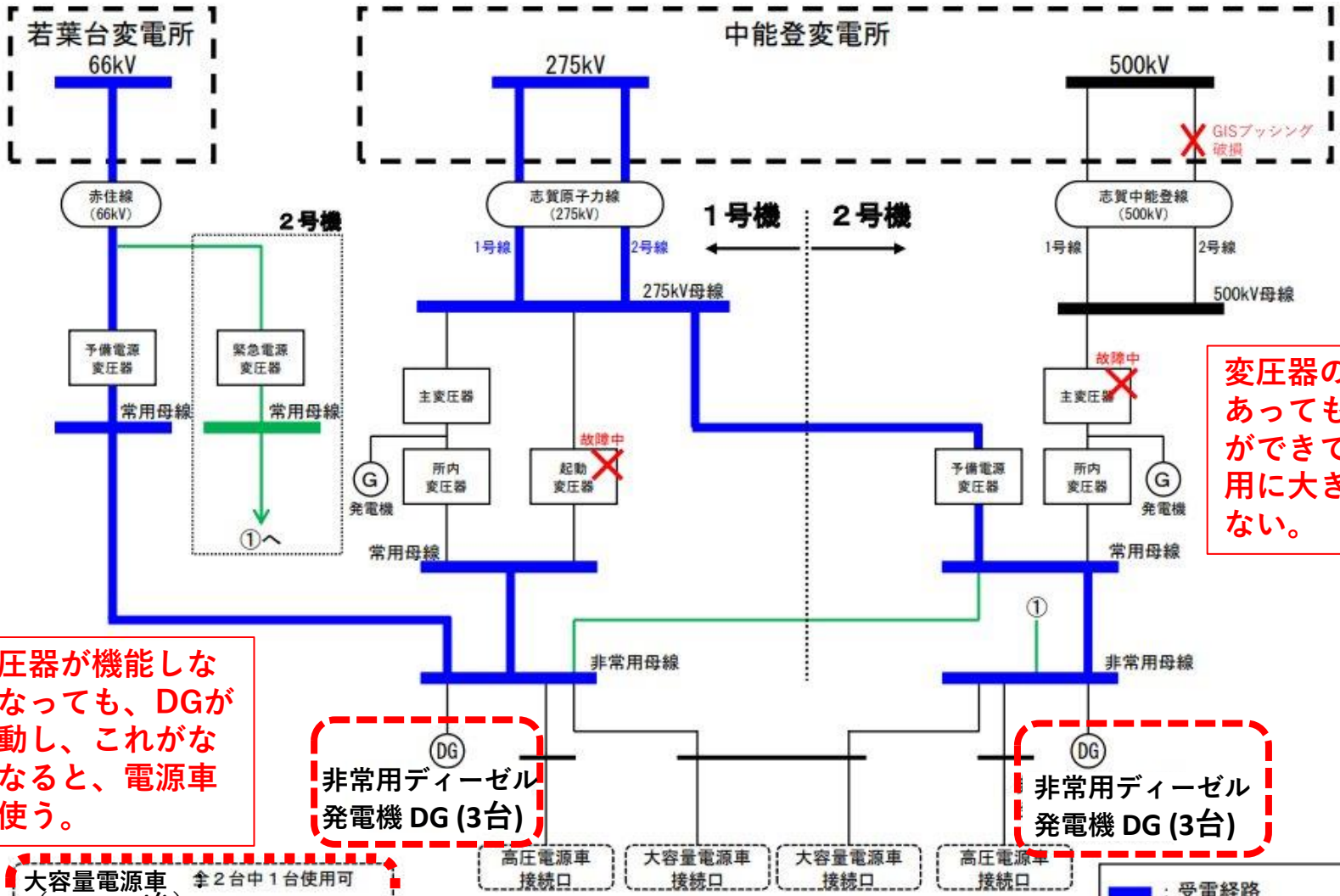


SFPプールの水がスロッシングで溢水したが、外部への放射能の影響はなかった。
周辺の自治体モニタリングポストの計器のいくつかに異常の誤発信があった。

出典：北陸電力webサイトより

志賀原子力発電所の主変圧器の損傷の状況と電源供給機能の確保

地震後の受電状態（１号機：66kVより受電、２号機：275kVより受電）



変圧器の損傷があっても、多重化ができており、運用に大きな影響はない。

変圧器が機能しなくなっても、DGが作動し、これがなくなると、電源車を使う。

大容量電源車（4000KVA/台）　：全２台中１台使用可
高圧電源車（300KVA/台）　：全８台中７台使用可（１月９日に１台追加）

アクシデントマネジメント設備

１、２号機　所内電源系統概略図

まとめ

志賀原子力発電所の能登半島地震を踏まえた新たな教訓（その１）

○地震時の発電所は大丈夫だったか

安全確保はできたか

・プラントは停止中ではあったが、安全確保に関わる機器、システムの保全は十分に確保され、運転中であったとしても**安全確保は確実に行えた**と言える。

運転中であれば、安全は確保できたのか

・停止中であったことは、プラント停止系のシステムなどの作動がなく、問題は起きない状況にある。それでも、原子力安全は確保できると言えるのか、との指摘がある。
志賀原子力発電所では安全機器などに異常は確認されなかったことや、地震動の応答データから評価した結果、原子炉建屋内の全ての安全設備で健全性が確認されたこと、また、2007年の中越沖地震での東京電力の柏崎・刈羽原子力発電所での安全系設備の運用に関わる機器・システムの健全性が確保されていた実績などを総合して志賀原子力発電所がたとえ運転中であったとしても、プラントとしての安全は十分に確保されると推察される。

・今回の地震では、半島先端部では４ｍほどの隆起が見られており、これが志賀原子力発電所の前面海域で起こった場合に、非常時の海水の供給に影響がでるのではないか、との指摘がある。
実際には、発電所の前面海域では隆起はなく、３ｍほどの水位上昇はみられたが、非常時の海水供給のシステムは健全であり問題はなかった。
しかし、アクシデントマネジメントの観点から、前面海域の隆起について、どこまで想定すべきかの検討を行った上で、海水供給の手立てを検討しておくことも必要であろう。

志賀原子力発電所の能登半島地震を踏まえた新たな教訓（その２）

○地震時の発電所は大丈夫だったか

安全確保はできたか

・プラントは停止中ではあったが、安全確保に関わる機器、システムの保全は十分に確保され、運転中であったとしても**安全確保は確実に行えた**と言える。

電源供給に問題はなかったか

・変圧器の損傷は、多重性を確保されており、電源供給には問題はなかったが、たとえ外電の供給を失ったとしても、非常用ディーゼル発電機やAM用電源車が確保されており、電源供給には問題はない。

運用確保はどこまで求めるのか

・変圧器の損傷は、原子力安全には影響しないものであったが、プラントとしての役割である運用により電力を供給する役割には影響があった。
・今回は、系統からの所内給電ができたが、共通要因で複数の変圧器が損傷を受ける可能性も考えなければならない。地震後の運用を継続するためには、この系統の変圧器の設計を見直すことも考えなければならない。

通常の運用に対して、今回に地震の影響は、変圧器以外、特に安全系の設備、電源、冷却水供給、などの系統は、健全性が確保されており、運用は問題ないものであったと言えよう。

志賀原子力発電所の能登半島地震を踏まえた新たな教訓（その３）

○安全確保は、誰に求めるのか

深層防護の第4層までは、安全確保は一義的に使用者に求められる。

・「設計」はメーカーが行っているが、使用者も責任を分担している。
・「運用」は使用者が責任を持って行っている。メーカは設計者としてそれを支えている。

規制は、適合基準を定めて、設計・運用を審査し、安全に運用できるかの判断を行う。結果、使用者に運用の認可を与える。
そこには、使用者の責任で、設計基準を超えてのシステムの状態の把握と事故に至ることを防ぐための方策を取ることが求められる。

深層防護の第5層は、住民に求められる

・「防災」は住民自らが取り組むが、自治体、国と一体で実行する。
その方策は、「避難」と「屋内退避」である。

能登半島地震では多くの家屋が倒壊、道路の破損が多々あり、「避難」「屋内退避」に困難な事態も想定される。
継続して、住民の意思を確認しながら、検討を進めなければならない。

（注）深層防護
第１層：異常・故障の発生防止
第２層：異常・故障の事故への拡大防止
第３層：事故の影響緩和
第４層：設計基準を越す事故への施設内対策
第５層：公衆と環境の防護のための防災対策

まとめ

〇世界のエネルギー需要は、確実に大きく増大しており、地球温暖化への対応も必須である。
（世界では、現在約140億トン石油換算のエネルギーが利用され、その内85%が化石燃料です。約360億トンもの地球温暖化ガスCO2の排出量となっている。）
〇どんな策も重要であるが、有用な手段は「原子力発電の利用」である。
わが国の原子力発電の割合は約２％でしかなく、原子力発電所36基のうち12基がようやく再稼働されている状況である。

（原子力発電所の安全策の強化）
〇日本は地震国、地震への対応が重要である。
〇さまざまに地震およびそれに伴う津波への対応策を強化し、これまでも実証されてきた。

（能登半島地震での原子力発電所の安全）
〇志賀原子力発電所においても安全策は、今回の能登半島地震で立証された。
〇一方、常用系の設備である変圧器の損傷が一部見られたが、必要な監視設備冷却設備、非常用電源などの機能は維持されており、原子炉施設の安全確保には影響はない。
〇しかし、発電所の運用には、常用系の強化も検討して行かなければならない。

志賀原子力発電所は、2024年（令和6年）1月1日の能登半島地震では一部常用設備に被害はあったものの、「止める」「冷やす」「閉じ込める」の安全の基本の機能に問題なかったことが確認された。

ご清聴ありがとうございました