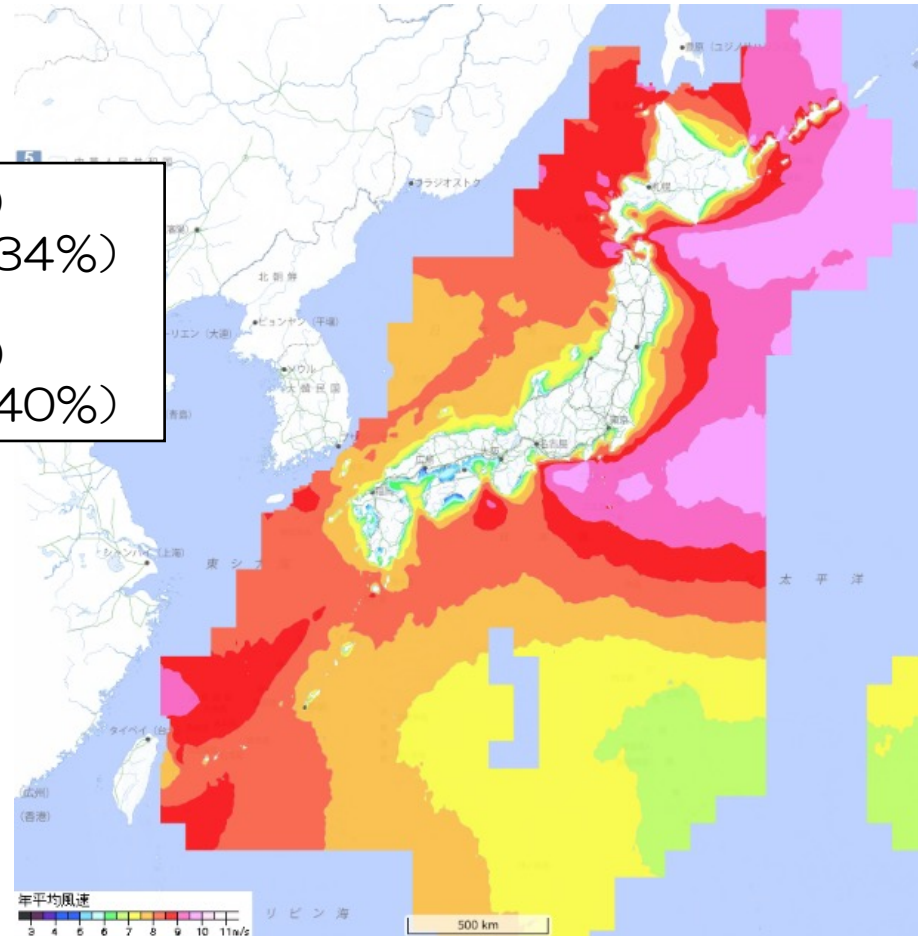


風力発電の導入ポテンシャル

- 陸上には風力発電を建設できる場所が少ないし、強い風が吹いている場所も少ない
- 洋上は風が強く十分なポテンシャルがあるが、コストの課題が大きい

陸上風力発電：1.18億kW (FIT 17円)
 → 3,509億kWh (設備利用率34%)

洋上風力発電：1.78億kW (FIT 32円)
 → 6,163億kWh (設備利用率40%)

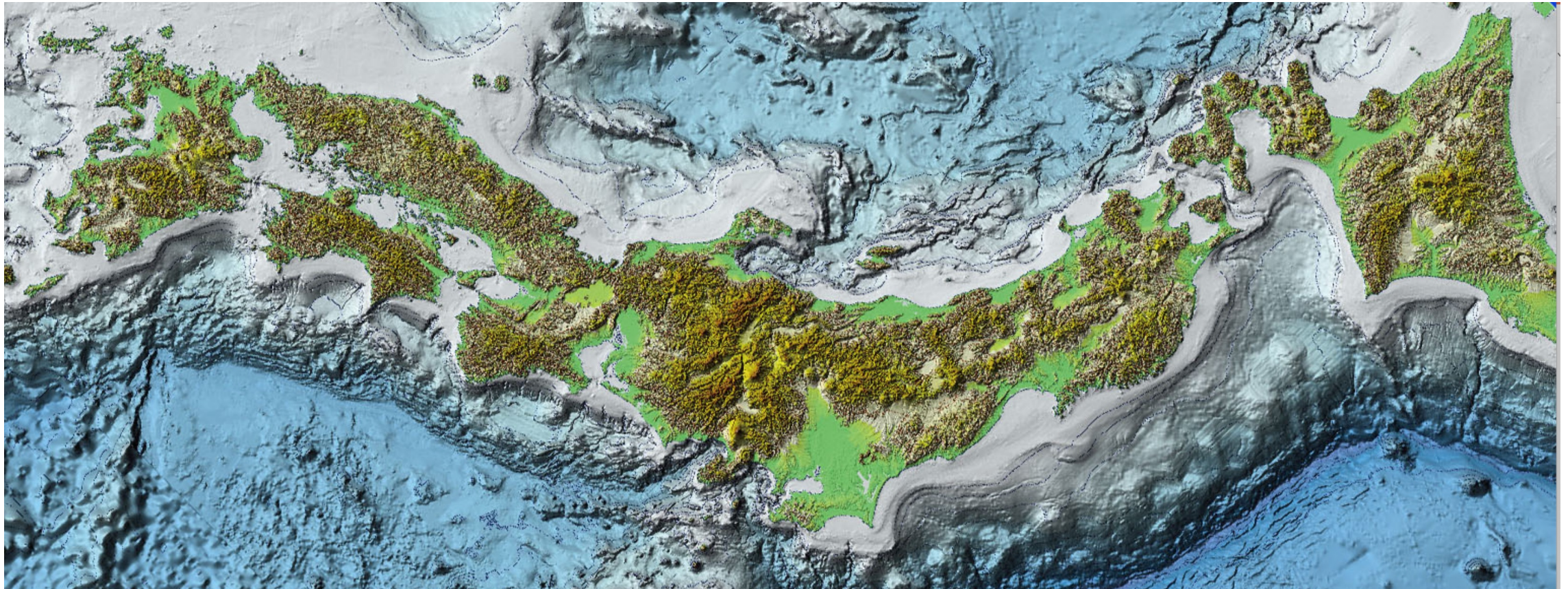


凡例：年平均風速

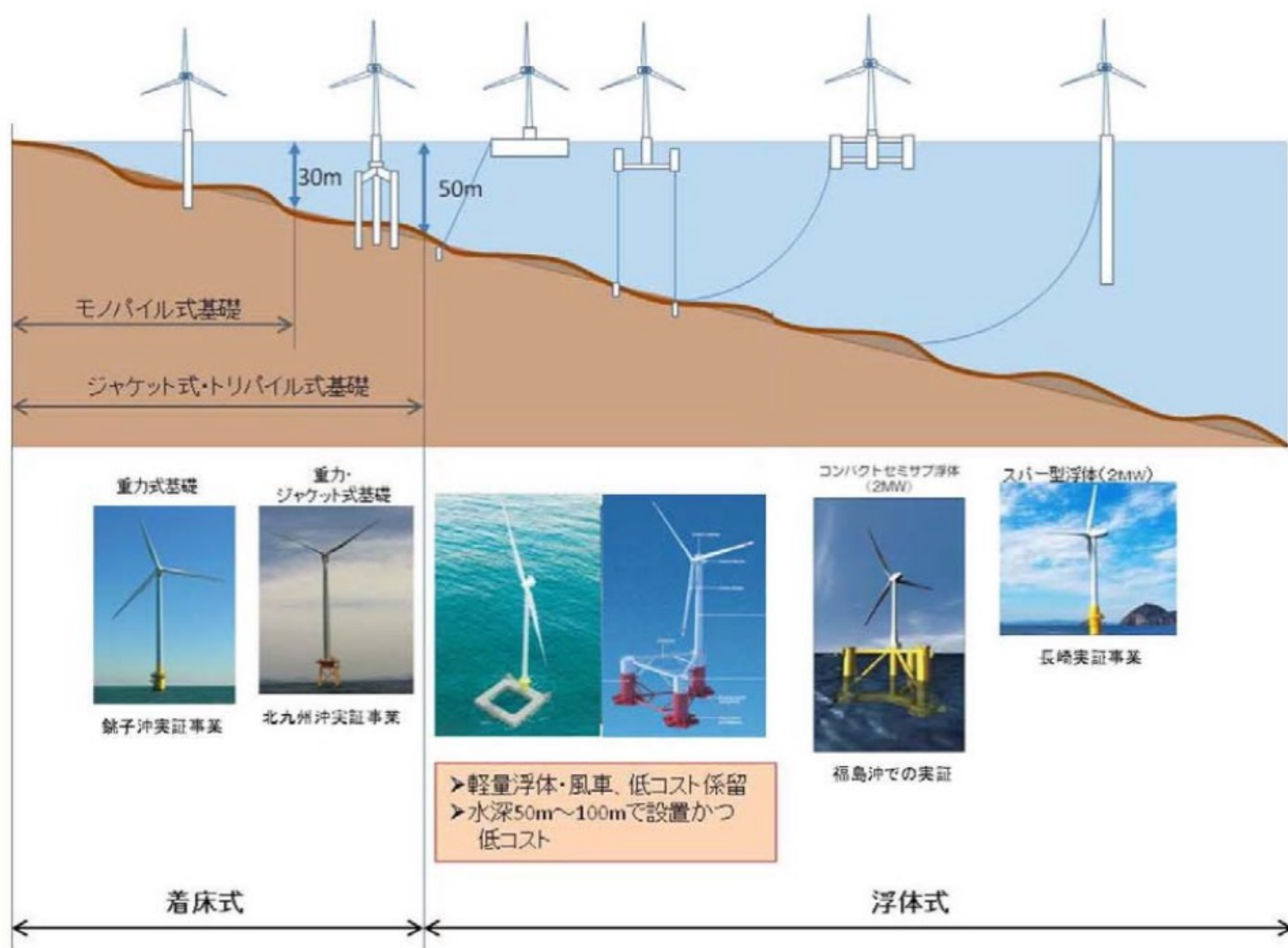


日本の沿岸では浮体式が必要

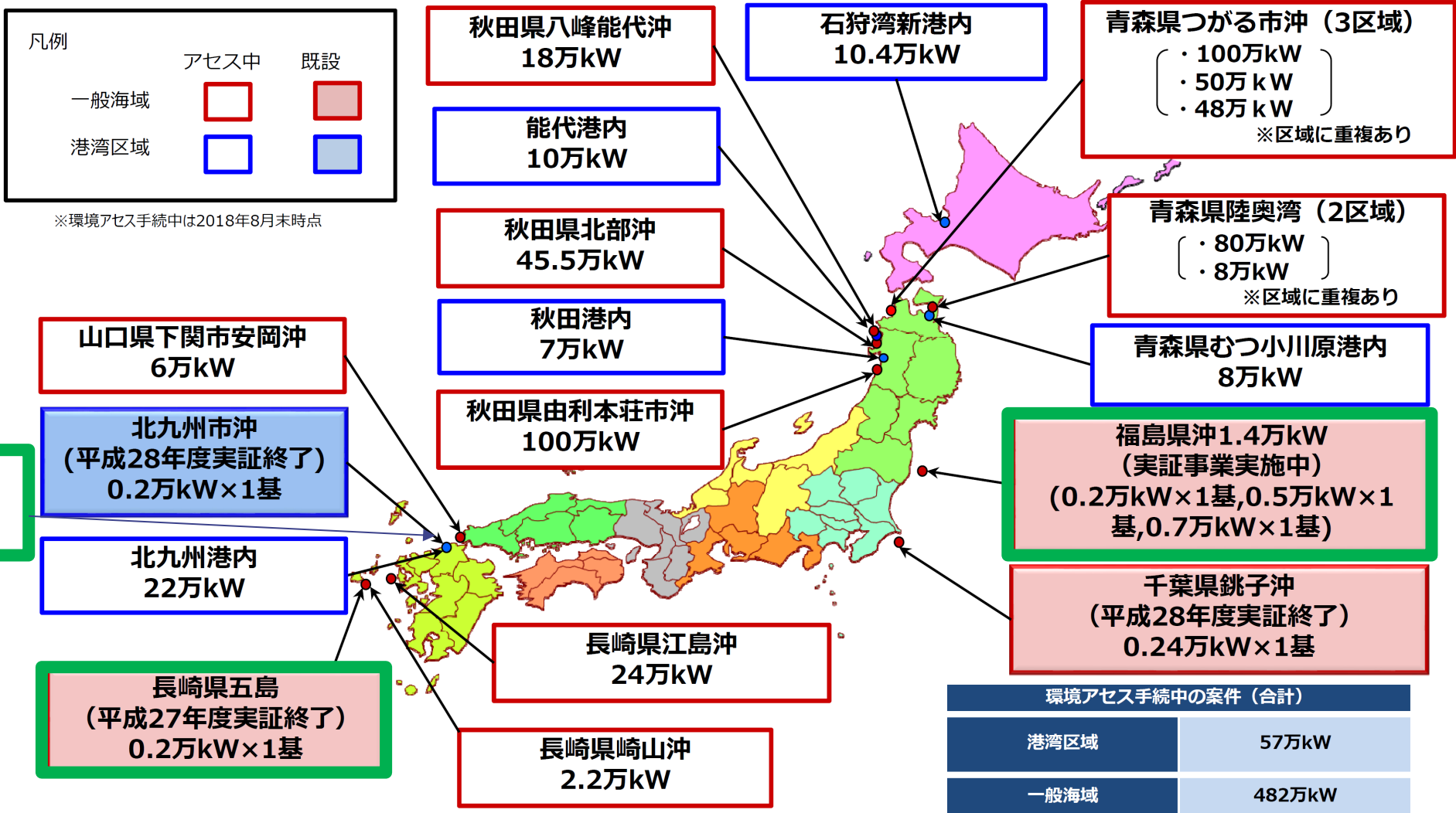
- 日本周辺の海底は深い
- 着床式の風力発電の開発規模は限られる



浮体構造と係留方法の課題



日本の洋上風力発電の導入状況



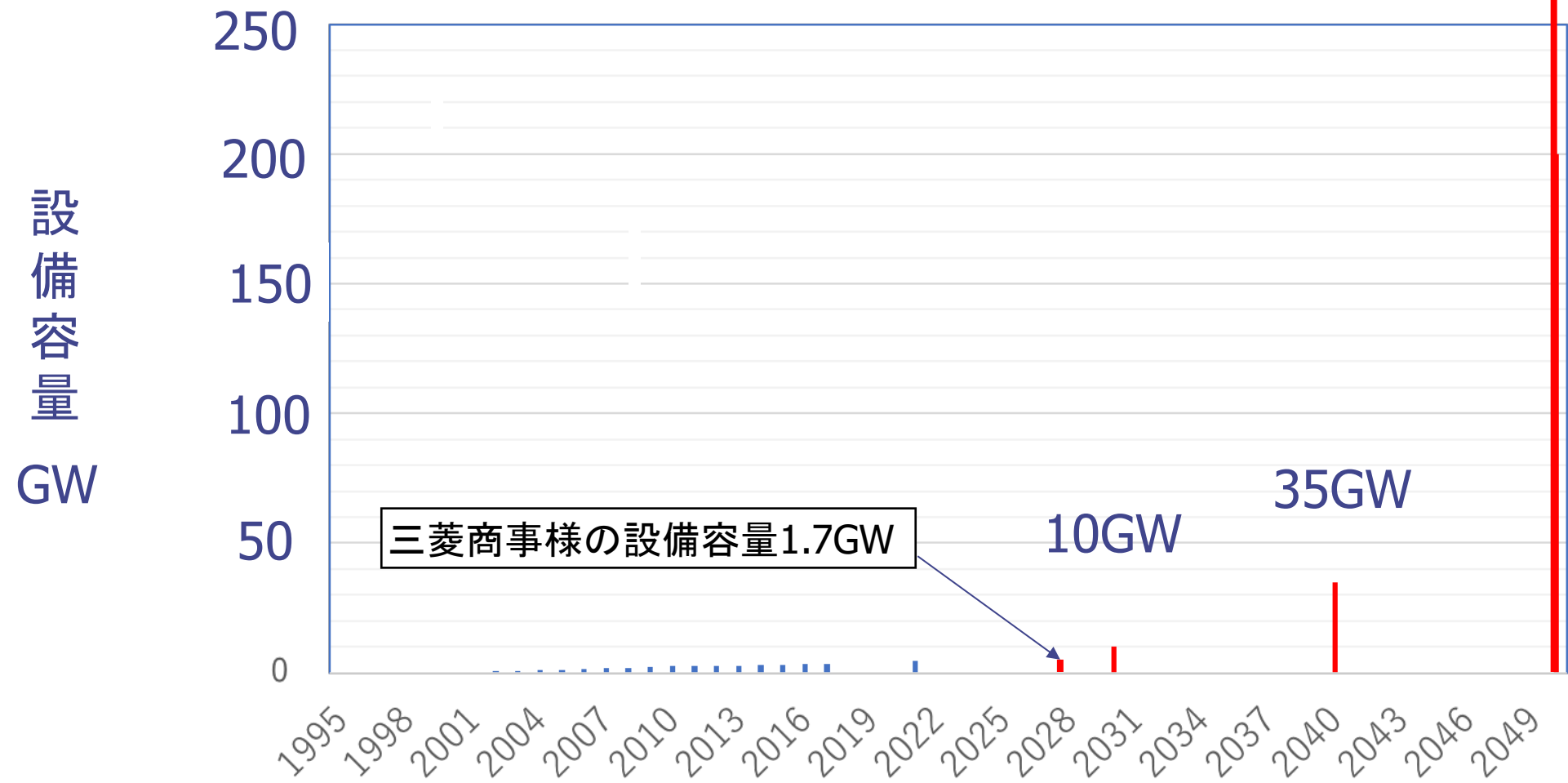
環境アセス手続中の案件 (合計)	
港湾区域	57万kW
一般海域	482万kW

※他に港湾区域において港湾管理者が事業者を決定したものあり (22万kW)
 ※一般海域は一部区域が重複しているものあり

風力発電のみで火力を置き換える場合

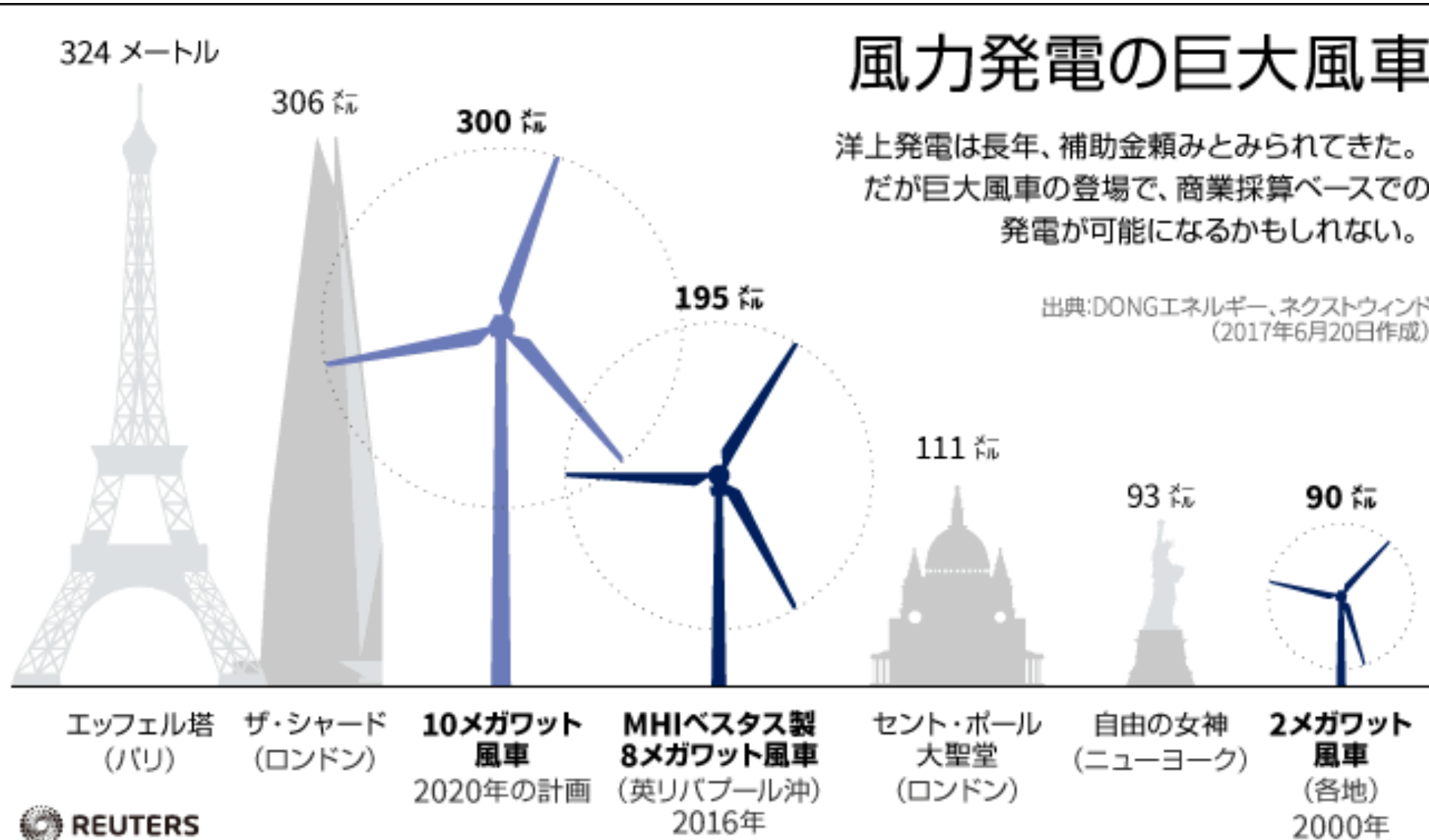
- 15MW風車で19,300基 (1日2基ペース)の建設が必要
- 290兆円の投資：現状の建設コスト (100万円/kW)
国産化しないと海外に流出

290GW



出典：NEDOホームページデータに加筆

陸上風車のコストダウンは大型化により達成

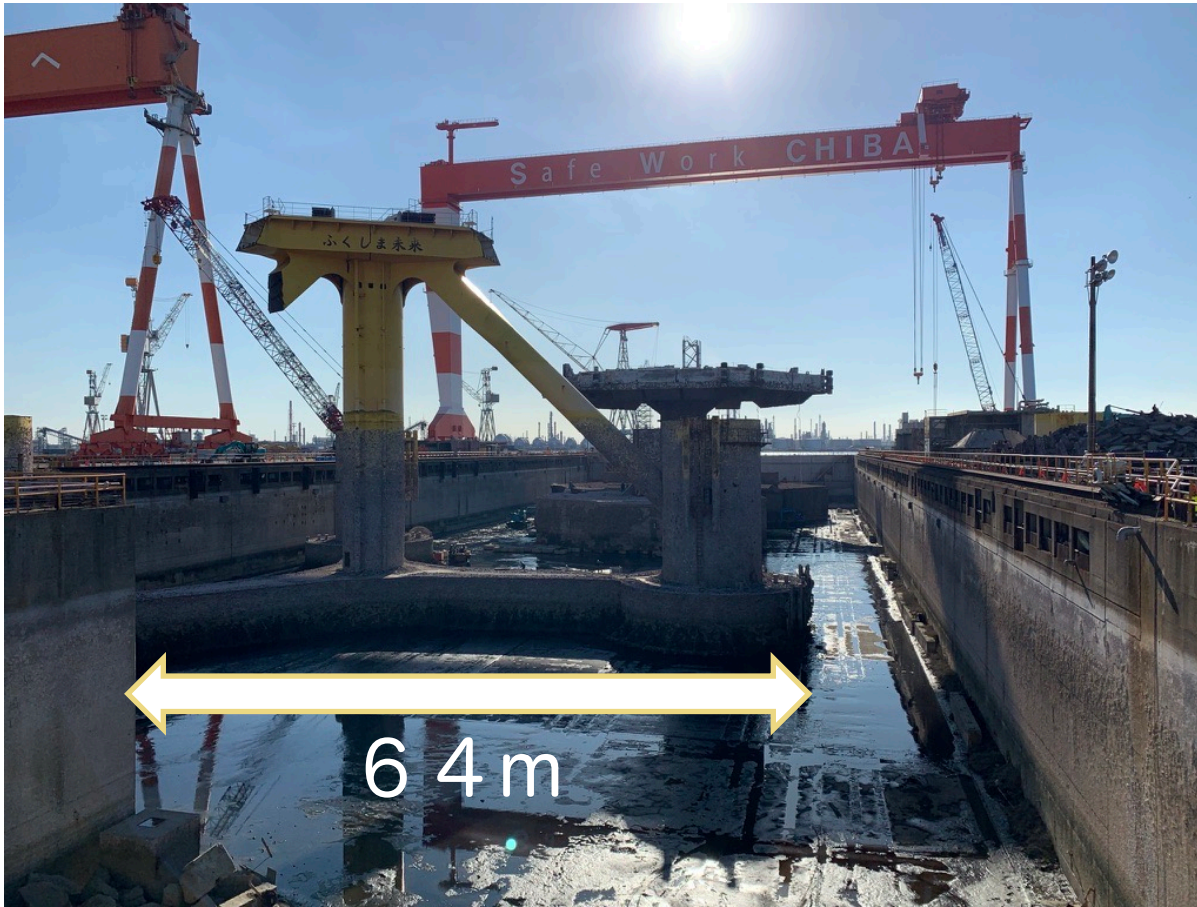


浮体式風力発電は浮体も巨大

福島県沖の洋上風力発電の解体現場（2021年撮影）

2 MW風車浮体

変圧器浮体



2千t(風車+浮体重量) / 2 MW = 1 t / kW 10万円 / kW

国内の風力発電メーカー相次ぐ撤退

2019年1月

日立製作所 風力発電の生産から撤退 生産はエネルギーコン（ドイツ）

2019年4月

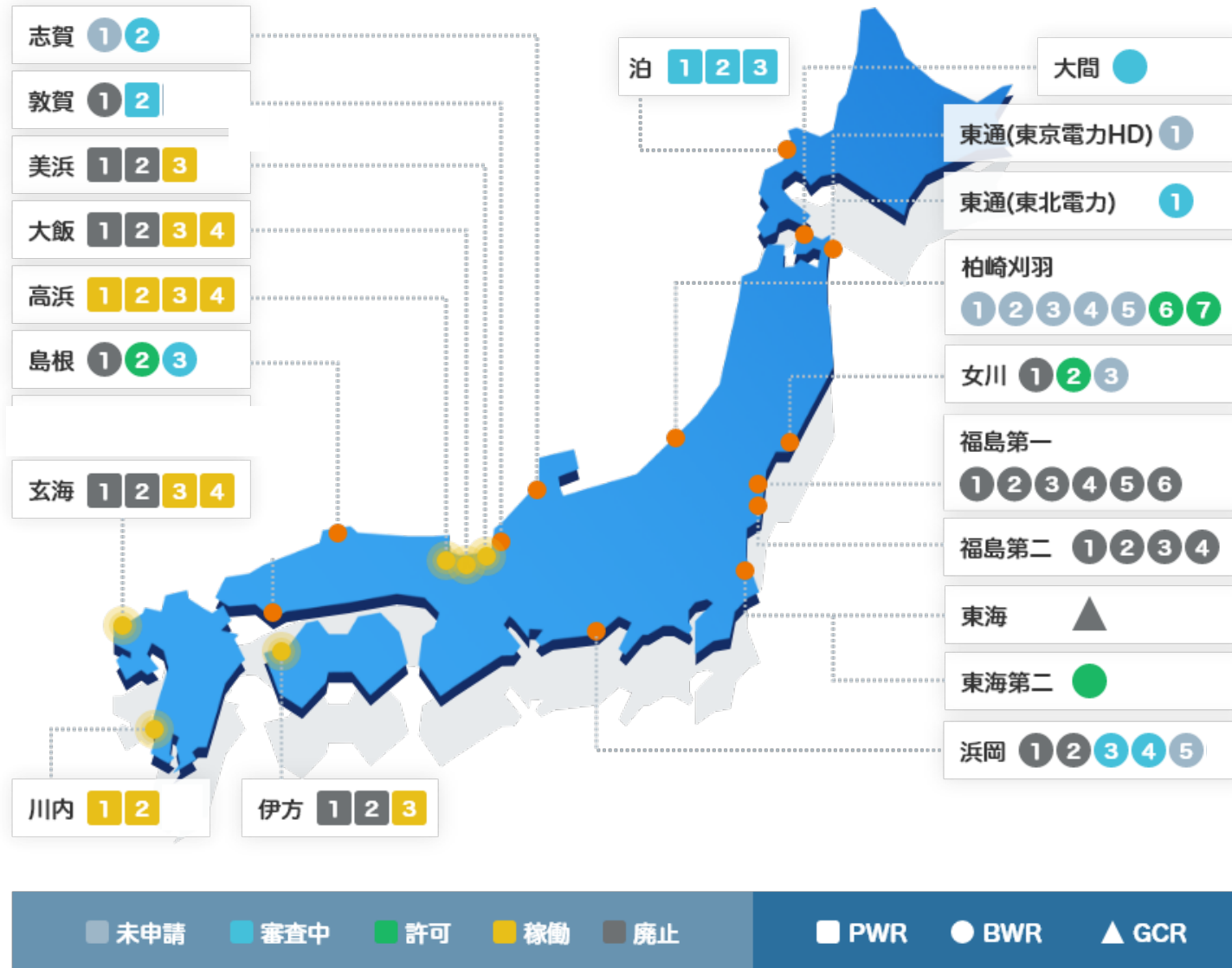
日本製鋼 風力発電器の製造・販売から撤退

2020年10月

三菱重工 風力発電のベスタス(デンマーク) に生産を委ねる

撤退の背景： 欧州の積極的な風力発電開発で差が広がる

日本の原発の再稼働状況



再稼働 1 2 基

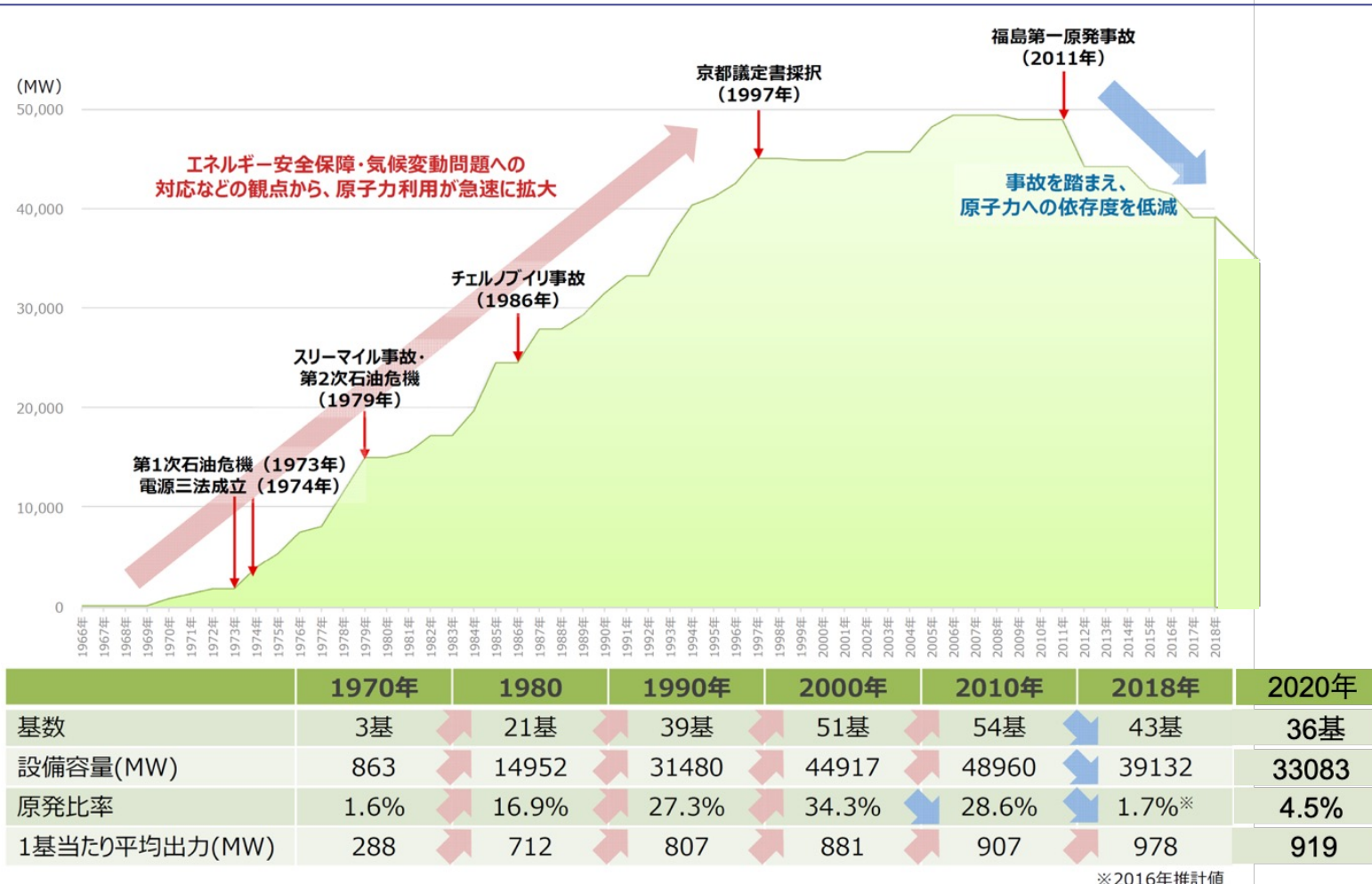
設置変更許可 5 基

審査中 10 基

未申請 9 基

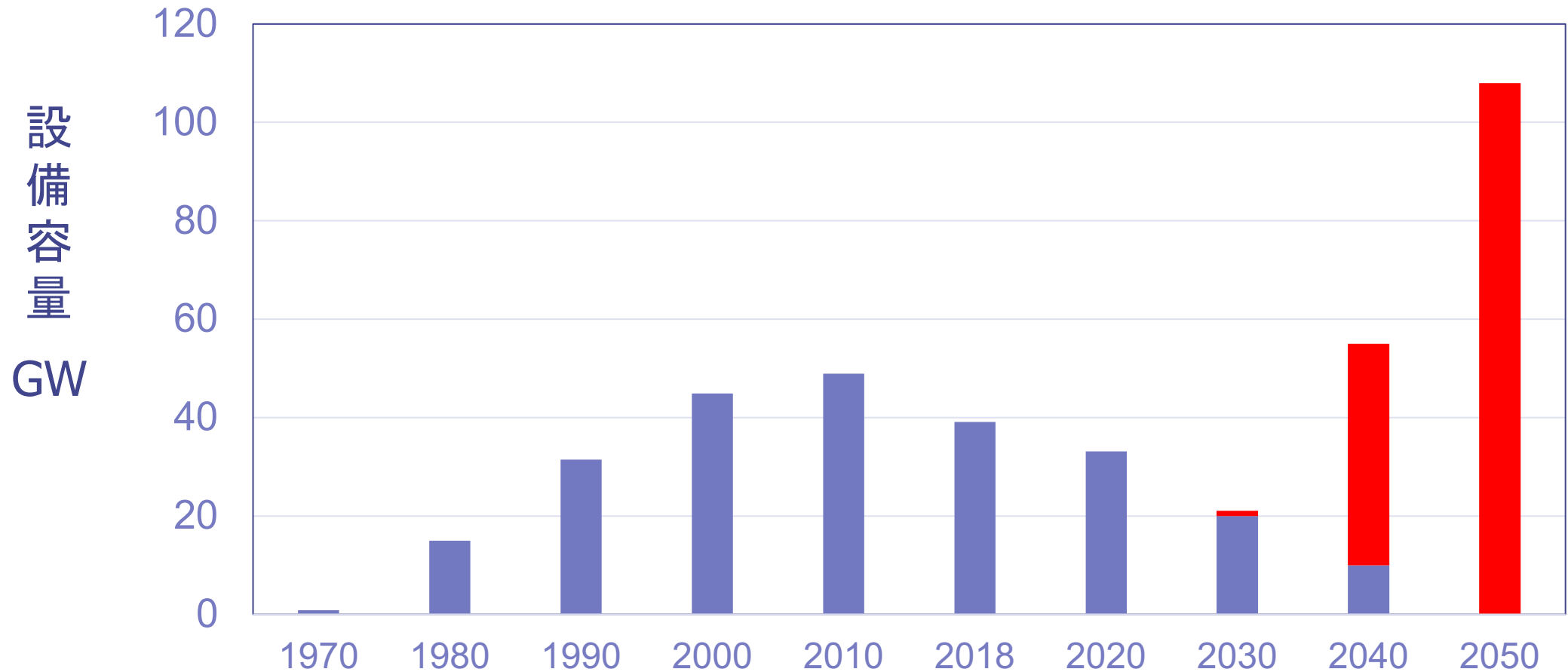
日本の原発の設備容量の推移

- 日本の原子力発電は2010年の54基から36基に減少
- 基本的な原発寿命は40年であり、2050年には既存炉は全て廃炉になる見込み
- 20年の寿命延長しても一時凌ぎで、原子力技術の継承にはつながらずその後に課題



原子力発電のみで火力を置き換える場合

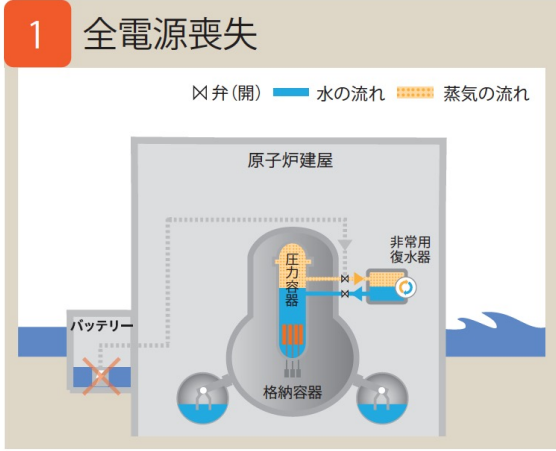
- 100万kW原発で108基（年5~6基ペース）の建設が必要
- 40兆円の投資：現状の建設コスト（37万円/kW）



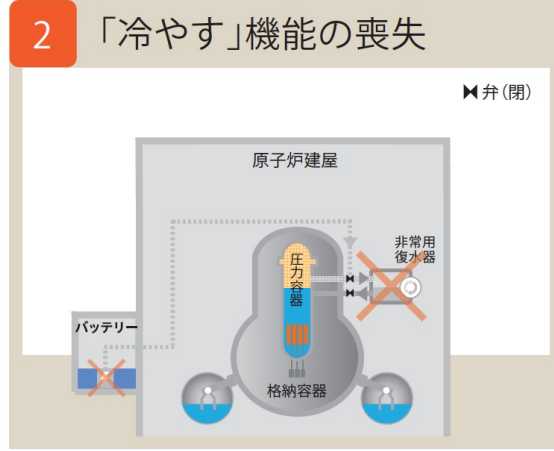
福島第一原子力発電所事故からの教訓



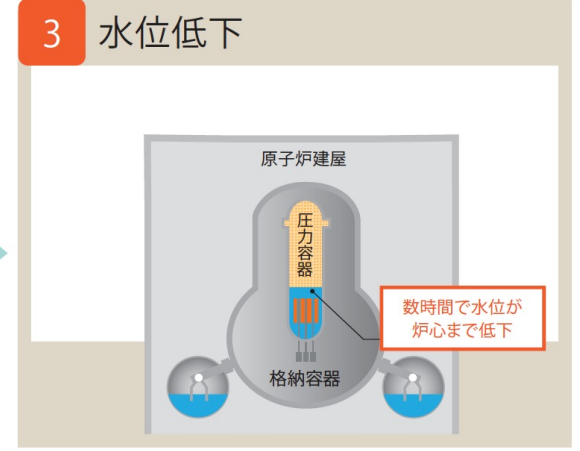
福島第一原子力発電所事故からの教訓



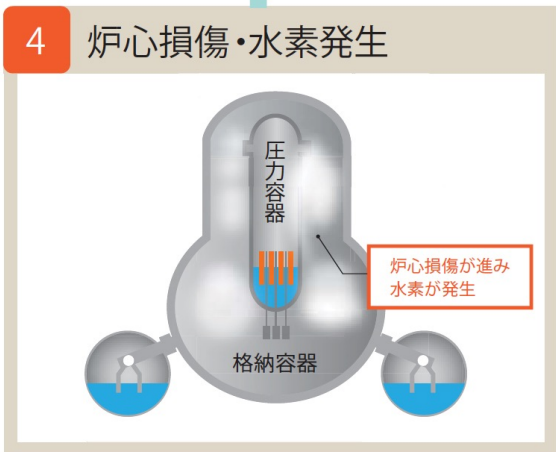
主に地震により外部からの送電(交流)を、津波による浸水により非常用ディーゼル発電機(交流)、バッテリー(直流)を喪失します。



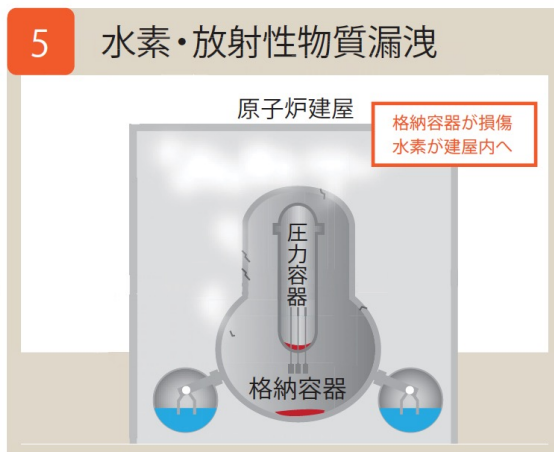
電源の喪失等により、冷却機能がいずれも使えなくなってしまう。



崩壊熱により、圧力容器内の水が蒸気になり、水位が低下します。



水位低下に伴い燃料が露出し、温度が上昇します。高温の燃料は水蒸気と反応して水素を発生、燃料自体も高温により損傷します。



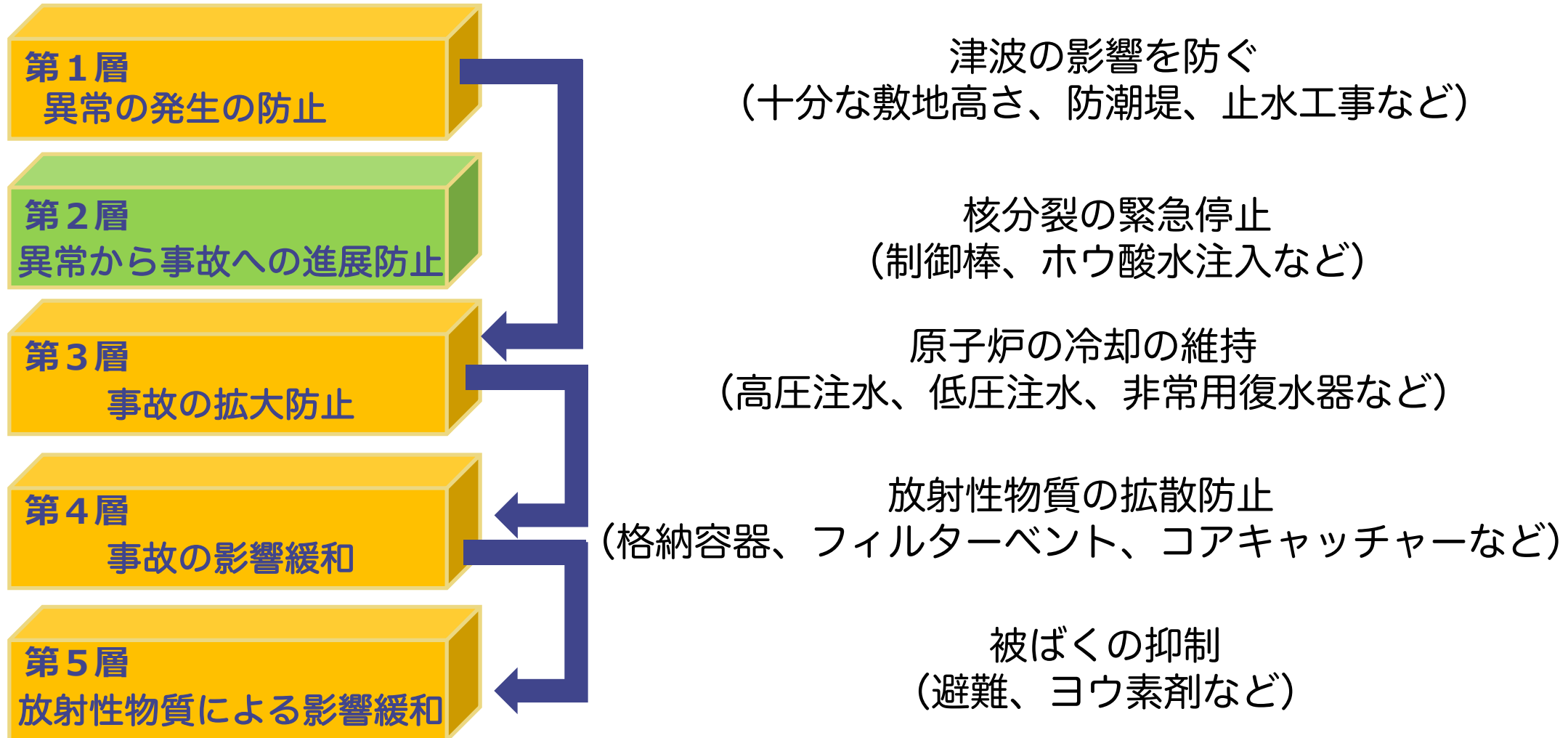
圧力容器、格納容器が損傷し、水素や放射性物質が炉建屋内に漏れだします。(原子炉建屋内に水素がした1、3号機は水素爆発に至りました。)



事故後の福島第一原子力発電所(左から1、2、3、4号機/2011年3月16日撮影)

深層防護は独立した防護ではなかった

- 津波侵入が全電源喪失を招き、冷却の喪失につながる
- 冷却喪失で炉心溶融が生じて格納機能を劣化させた
- 避難の過程において死亡者が発生

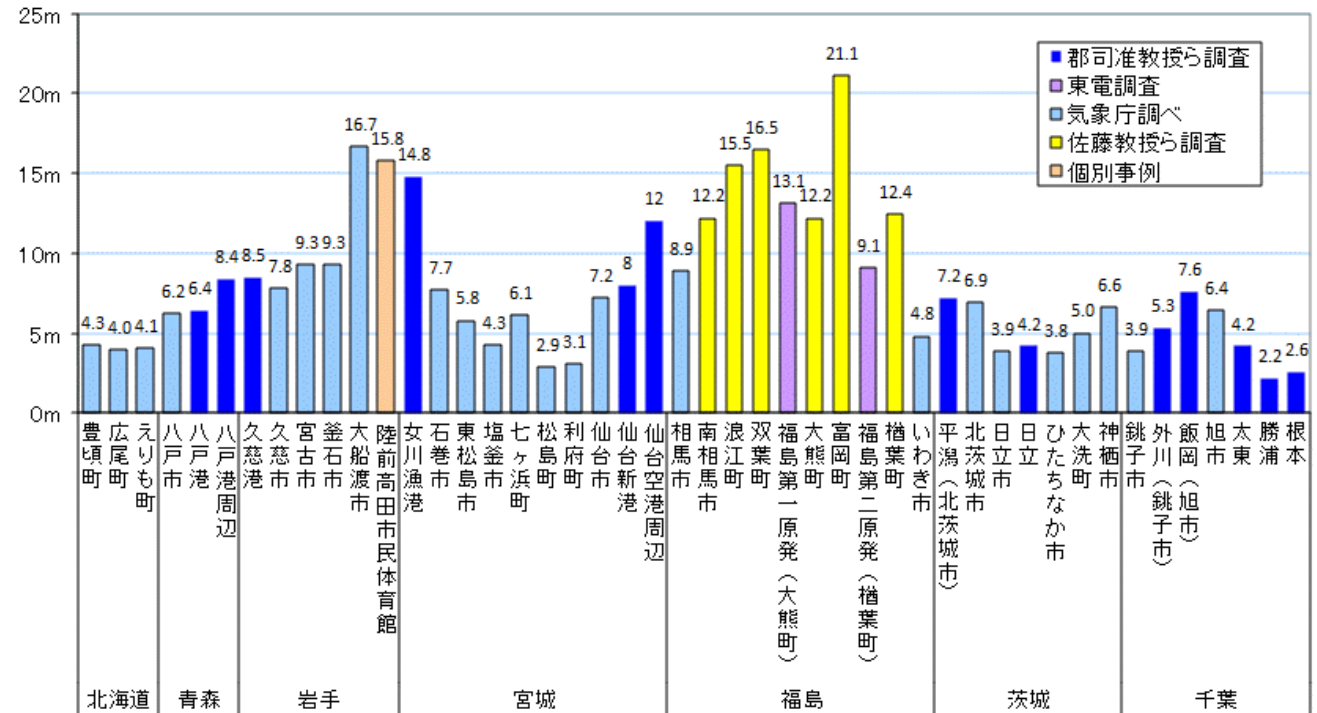


津波の高さ想定

- 津波高さは、波源の大きさ、向き、距離、海底地形を踏まえて推定
- 複数の波源が時間差を持ってずれると、到達点では干渉による強弱が生じる
- 隣接する場所でも津波高さに大きな差が生じている



(資料) 毎日新聞2011.3.14、北アメリカプレート 追加

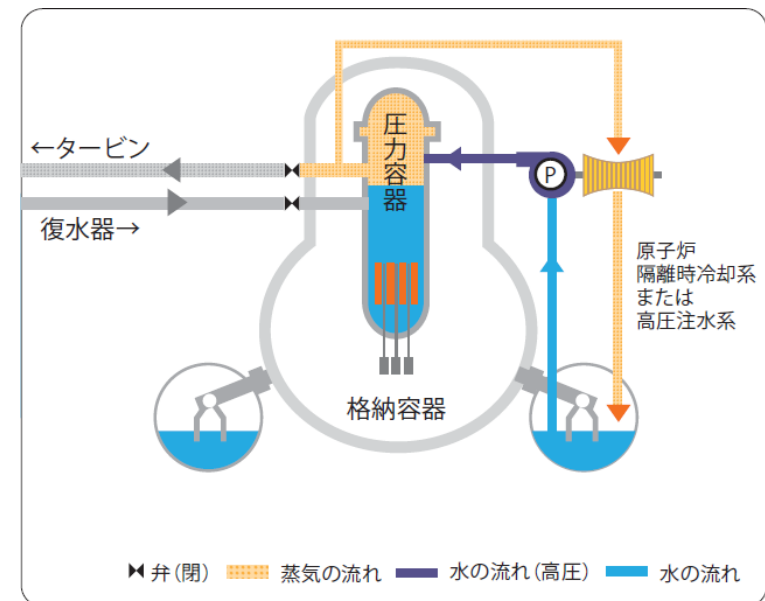
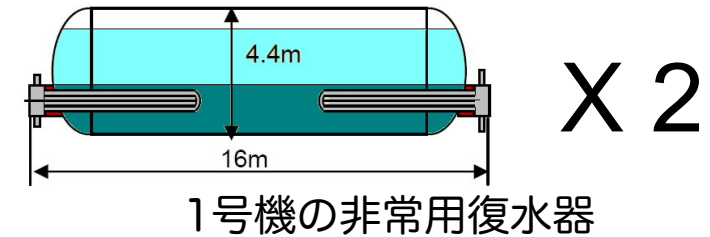
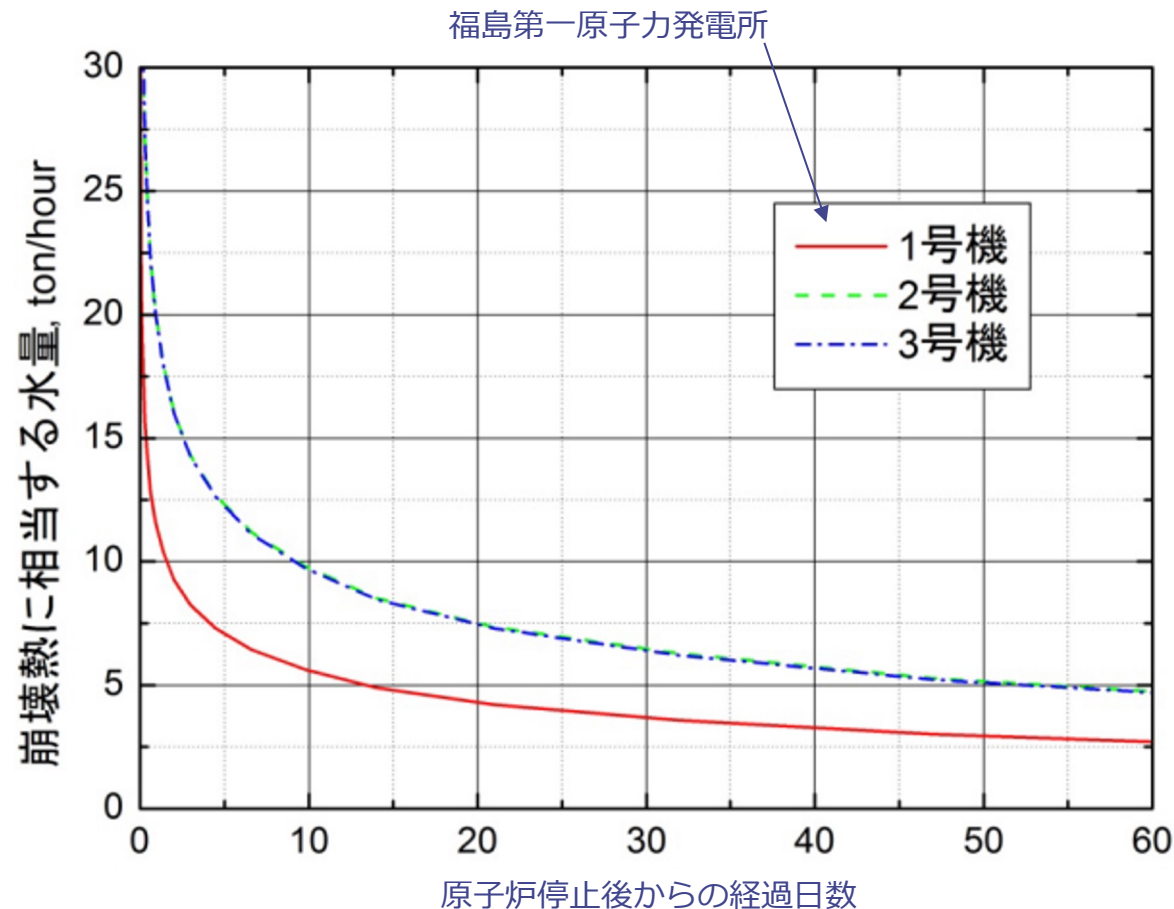


(注) 気象庁調べの北海道は上位3地点、その他は各市町村最高地点。それ以外は、気象庁調べにないか上回る結果を掲載。
 (資料) 毎日新聞2011.3.25(港湾空港技術研究所と都司嘉宣・東大准教授の調査)、気象庁調べ(「平成23年3月地震・火山月報(防災編)」)、痕跡等から推定した津波の高さ、下に定義図)、東京新聞2011.7.9(東京電力による詳細調査結果)、毎日新聞2011.4.17(東京海洋大岡安教授推定による陸前高田市市民体育館事例)、NHK2012.2.19(東京大学大学院佐藤真司教授の研究グループによる警戒区域内初の痕跡調査の結果)

参照：「地球環境問題としての津波災害について」吉野 正敏筑波大学名誉教授

崩壊熱除去は長期の継続が必要

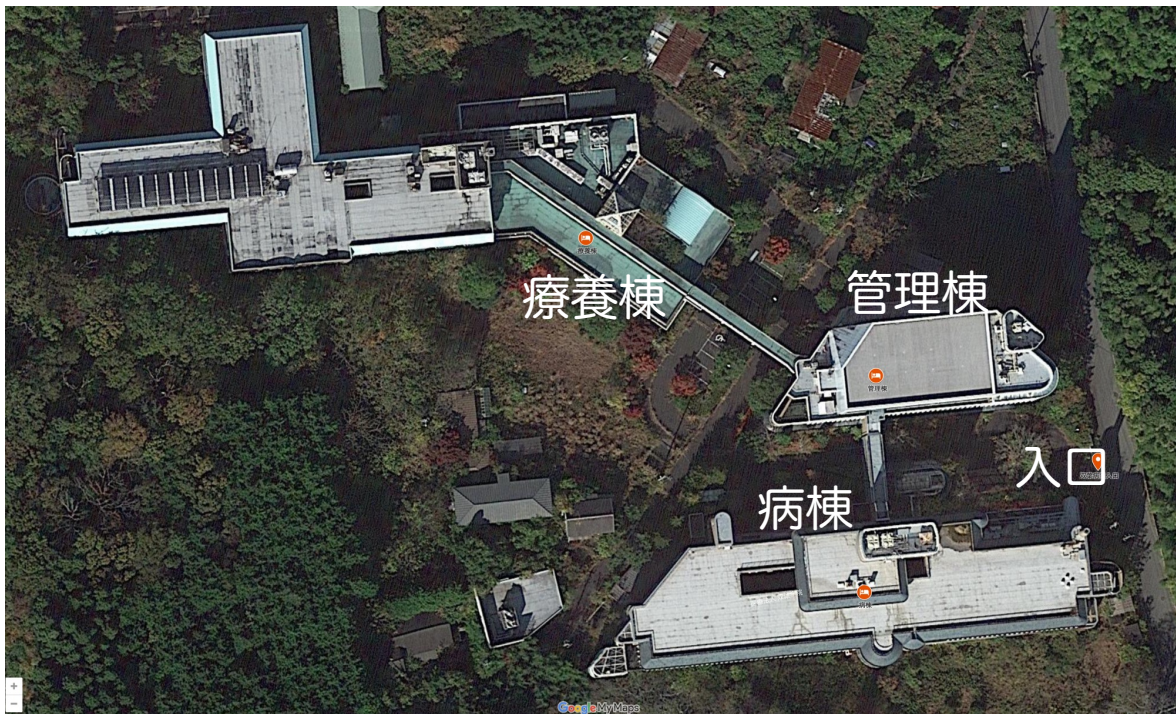
- 原子炉は核分裂の停止後も崩壊熱が発生し続ける**10日後でも毎時6トン程度の水が必要（1号機）**
- 従来は電源なしで冷却可能な時間を8時間として設計
 - 1号機の非常用復水器のタンクは100t × 2個
- 2号機の原子炉隔離時冷却系は約3日間運転を継続したが、その停止後にメルトダウンした
 - 本格的な冷却の回復に数週間掛かった



2、3号機の原子炉隔離時冷却系

双葉病院「45人死亡」

- 停電と医療従事者の不足により、医療依存度が高い患者に対する医療レベルを維持できなかった
- 放射性物質の拡散で、自衛隊が迅速に対応できなかった
- 混乱の中、病院、町、オフサイトセンター、自衛隊の間での的確な情報共有ができなかった



双葉病院における避難

3月11日	2:46 p.m.	地震発生 当時の入院患者数は338人（40%以上が高齢者） すべてのインフラ（水道、ガス、電気）が停止
3月12日	5:44 a.m.	原発周囲10km圏内に避難指示が拡大
3月12日	2:00 p.m.	第一陣避難：自力歩行可能な入院患者209人をバスで避難。 ほとんどの医療スタッフがこの避難に同行したため、残った患者への院内での十分なケアが継続できなくなった
3月14日	10:00 a.m.	第二陣避難：自衛隊のバスでの寝たきりの入院患者34人の避難
3月15日	a.m.	この時点までに避難前に入院患者4人が院内で死亡 第三陣避難①：自衛隊のバスで寝たきりの入院患者55人を救出し、避難
3月16日	0:35 a.m.	第三陣避難②：残り35人の患者が救出され、入院患者全員の病院脱出が完了 避難がすべて完了した時点で、39人の入院患者が死亡 1人が行方不明

浮体式原子力発電所の特徴

- 円筒形状の浮体構造物と原子力発電設備を組合せ（MIT考案）
- 既存技術の組合せにより、安全性を高めつつ早期に実現させる
- 発電を目的とし、原子力船とは異なり自走能力は持たない→ ある海域に係留し発電する
- 海外の船舶型と異なり円筒形状の浮体は揺れにくい

円筒形状の浮体構造物

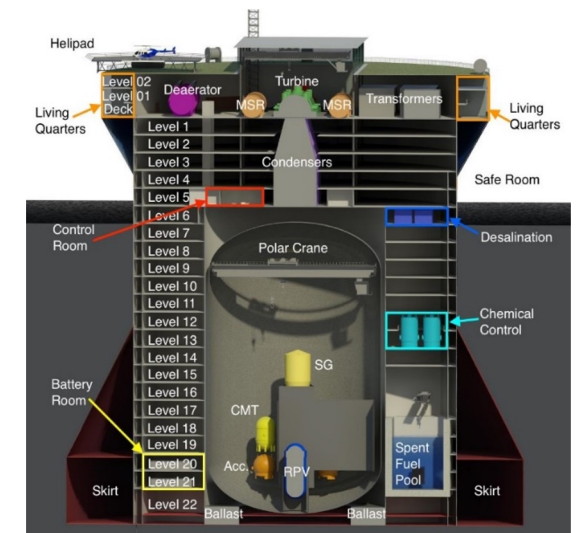


Ref. Sevan SSP社ホームページ

原子力発電設備



浮体式原子力発電



Ref. Nuc. Tec., 194, 1(2016).

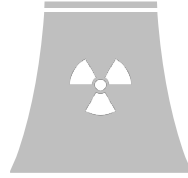
世界の浮体式原子力の開発状況

	名称	原子炉型	電気出力(MWe)	研究/開発	イメージ
ロシア	<u>アカデミック・ロモノソフ(KLT-40S)</u>	<u>PWR</u>	<u>70</u> (35*2基)	<u>ROSATOM</u>	
	OFPU (RITM-200M)	PWR	100 (50*2基)	ROSATOM	
中国	ACP100S	PWR	125	CNNC	
	ACPR50S	PWR	60	CGN	
韓国	BANDI-60	PWR	60	KEPCO E&C	
フランス	Flexblue	PWR	160	AREVA,CEA, EDF	
デンマーク	CMSR	熔融塩炉	200~800 (100*2~8基)	Seaborg Technologies	
アメリカ	OFNP	PWR	300~1100	MIT	
日本	<u>OFNP</u>	<u>BWR/PWR</u>	<u>300~1350</u>	<u>COCN</u>	
	(旧) 浮体式 原子力発電所	BWR/PWR	1100	JAEA	
	(旧) むつ	PWR	(36Mwt)	JAEA	

産業競争力懇談会での検討体制

原子力関係企業

- ・ 東芝エネルギーシステムズ
- ・ 日立GEニュークリア・エナジー
- ・ 三菱重工業
- ・ 三菱電機
- ・ IHI
- ・ 鹿島建設、清水建設
- ・ 日揮
- ・ 原燃輸送
- ・ 関西電力、中部電力、日本原子力発電
- ・ スタズビック・ジャパン、元EDFジャパンの方
- ・ 発電設備技術検査協会



大学・研究機関他

- ・ JAEA、電力中央研究所、エネルギー総合工学研究所
- ・ 東京海洋大学
- ・ 早稲田大学
- ・ 東京大学
- ・ 東京工業大学
- ・ 京都大学
- ・ 名古屋大学
- ・ 長岡技科大
- ・ イリノイ大学
- ・ 日本原子力産業協会
- ・ 三菱総合研究所
- ・ 日本電気
- ・ 日本保全学会



造船関係企業

- ・ 三菱造船
- ・ 日揮（海洋事業関係者も参加頂ている）
- ・ 清水建設（同上）
- ・ ジャパンマリンユナイテッド
（IHIのサポートとして参加頂いている）



東電グループ

- ・ 東京電力ホールディングス
- ・ テプコシステムズ
- ・ 東京エネシス
- ・ 東京パワーテクノロジー
- ・ KK6安全対策共同事業株式会社

TEPCO

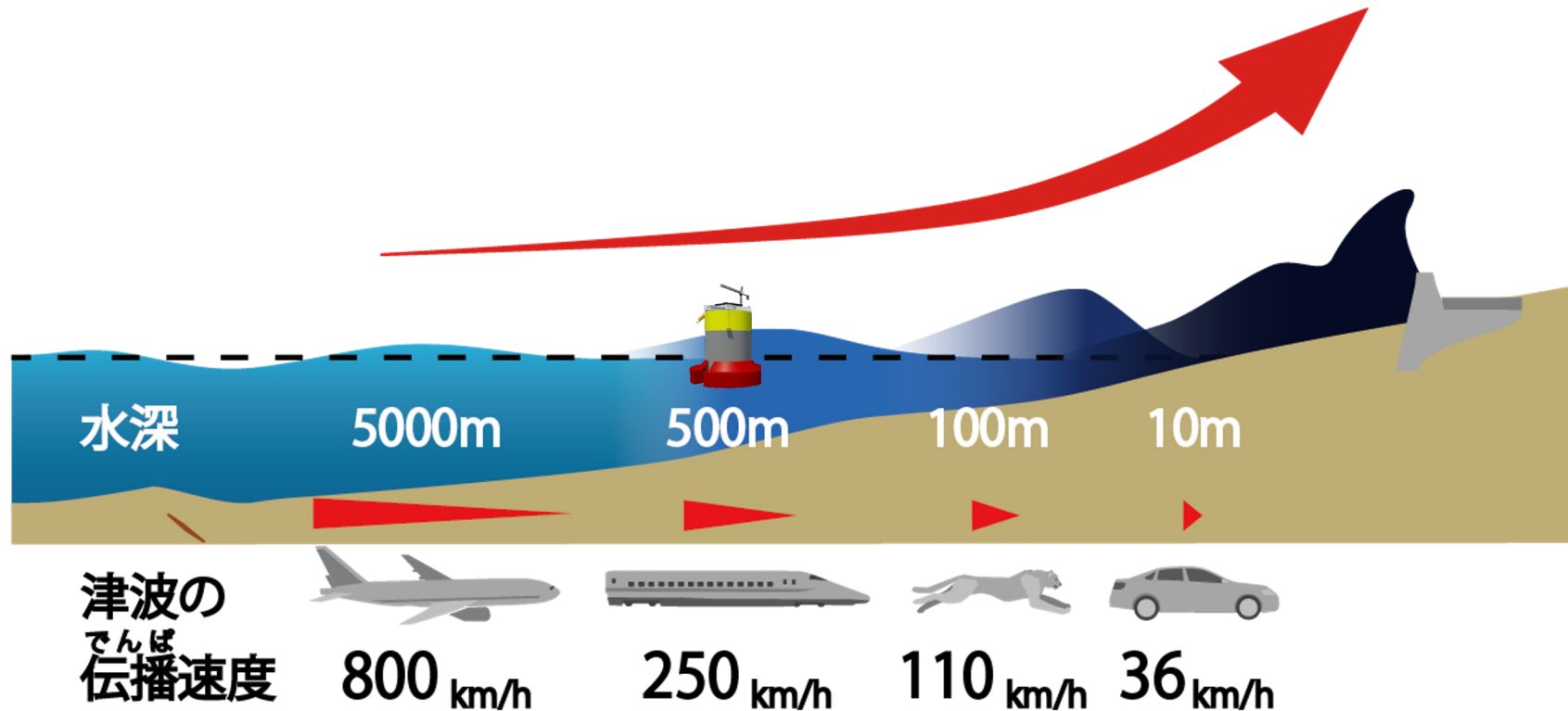
福島第一原発事故の反省を踏まえて

- 津波高さは想定が難しく、建屋が浸水し全電源喪失に至った
→ 浮体にすることで津波をやり過ごす
- 全電源喪失時に冷却を継続できる時間が短すぎた（3日でも不十分）
→ 海水との熱交換で動力なしで冷却を継続する
- 高齢者や病気の方が避難時に亡くなられた（40名以上）
→ 事故時の住民の方の緊急避難を不要にする



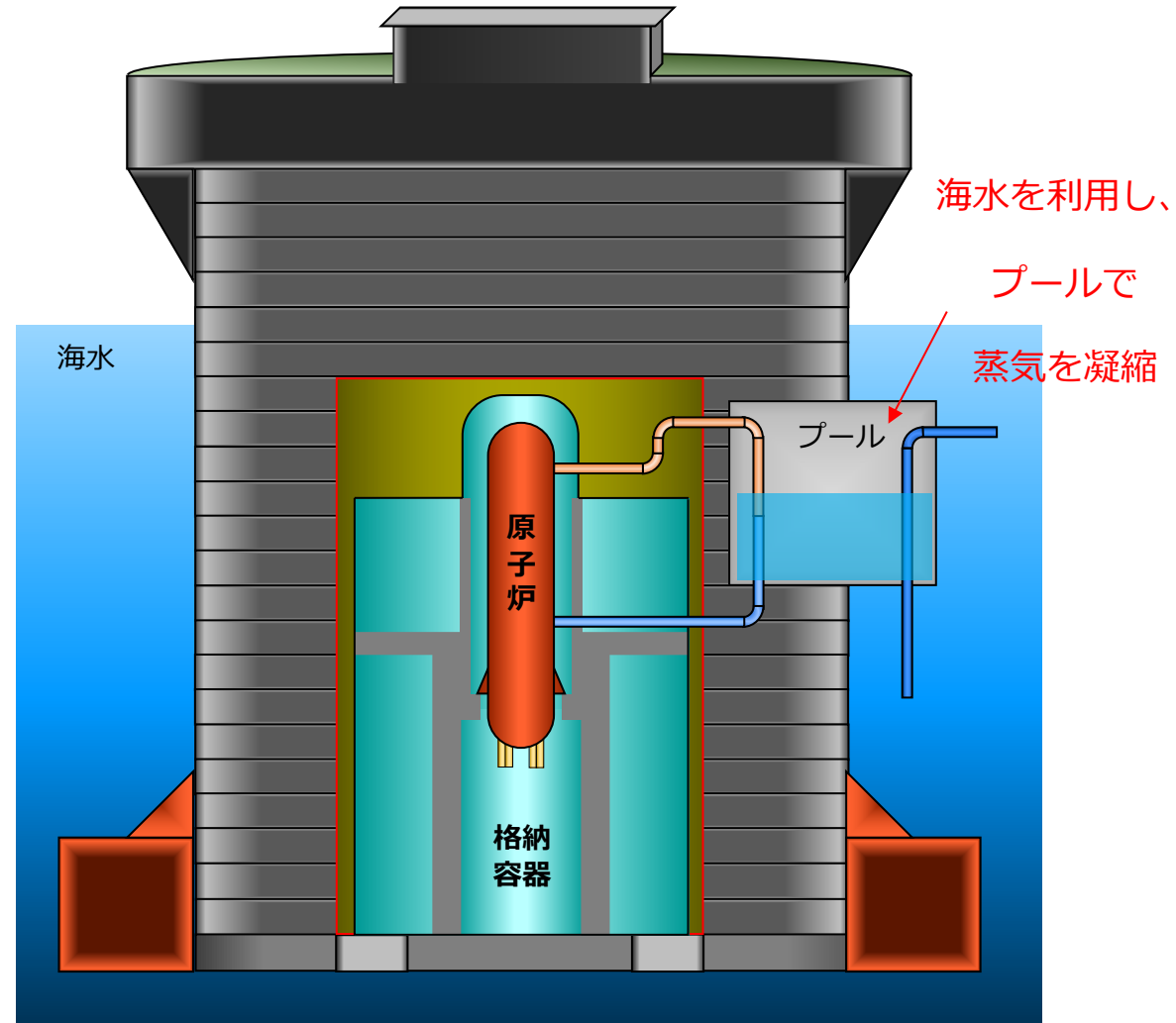
浮体にすることで津波をやり過ごす

- 沖合に設置する程、水深が深くなる → 津波高さは低くなる
- 船と同じ様に津波を乗り越えることができる



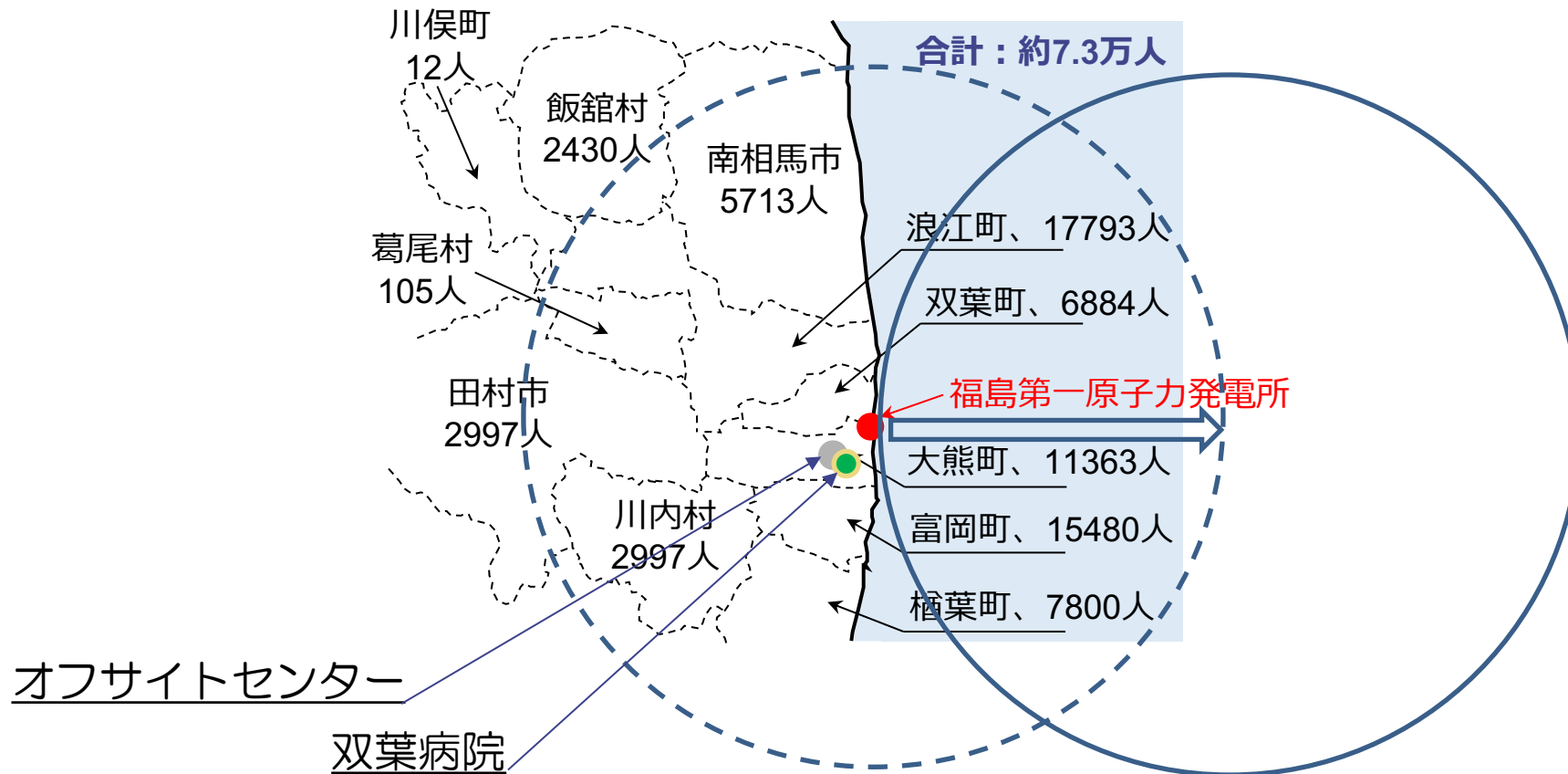
海水との熱交換で動力なしで冷却を継続可能

- 電源がなくても手動のバルブ操作で起動可能
- 周囲に存在する海水を利用して半永久的に冷却を継続



事故時の住民の方の緊急避難を不要にする

- 30km沖合に係留することで、緊急に避難が必要な区域内に住民がいない
- 航行中の船舶は事故の警報を受けて自力で速やかな避難が可能

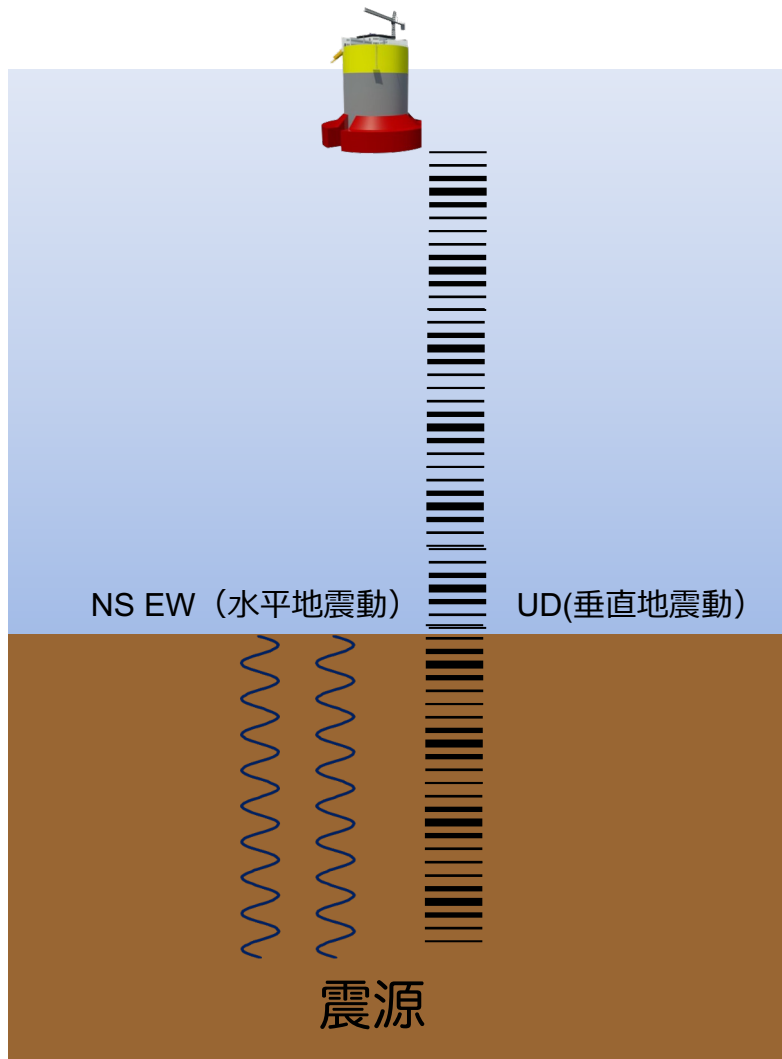


東日本大震災・東京電力福島第一原子力発電所事故による避難人数（2011/3/25 8時時点）^[1]

[1] 福島県災害対策本部「平成23年度東北地方太平洋沖地震による被害状況即報（第64報）」より作成

地震の影響も軽減可能

- 水平地震動は水中では伝播しない（垂直地震動は伝播）



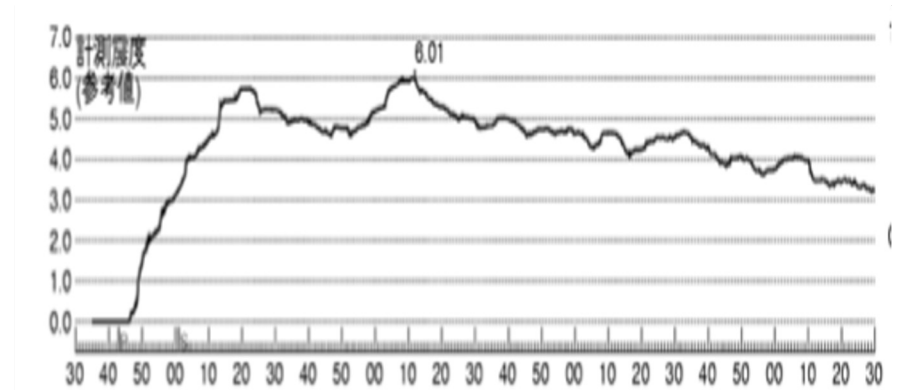
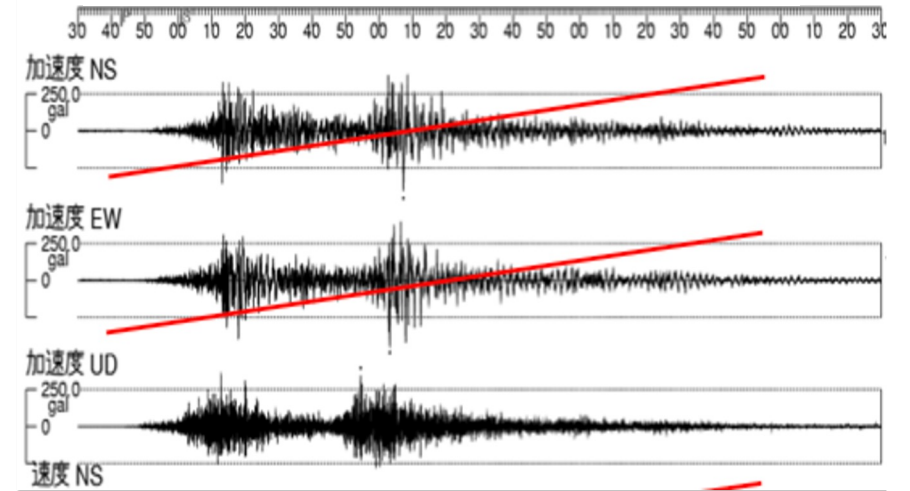
X 南北方向加速度

X 東西方向加速度

垂直方向加速度

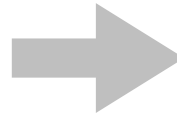
宮城県遠田郡湧谷町新町

2011/03/11 14時46分30秒～



集中した製造拠点（造船所）で製造

- ドックで集中製造し、製造品質が向上
 - ・ 遠隔地で建設するのはコスト面でも負担大
- 既存の陸上原発と同等の費用で建設可能
 - ・ 海底送電線は陸上送電線と同程度のコスト
 - ・ 陸上原発の耐震強化やテロ対策設備の費用を加味すると洋上が有利



浮体式原子力

- ・ 浮体建造物の建造費： 390～560億円
- ・ 海底送電線30kmの建設費： 304～475億円

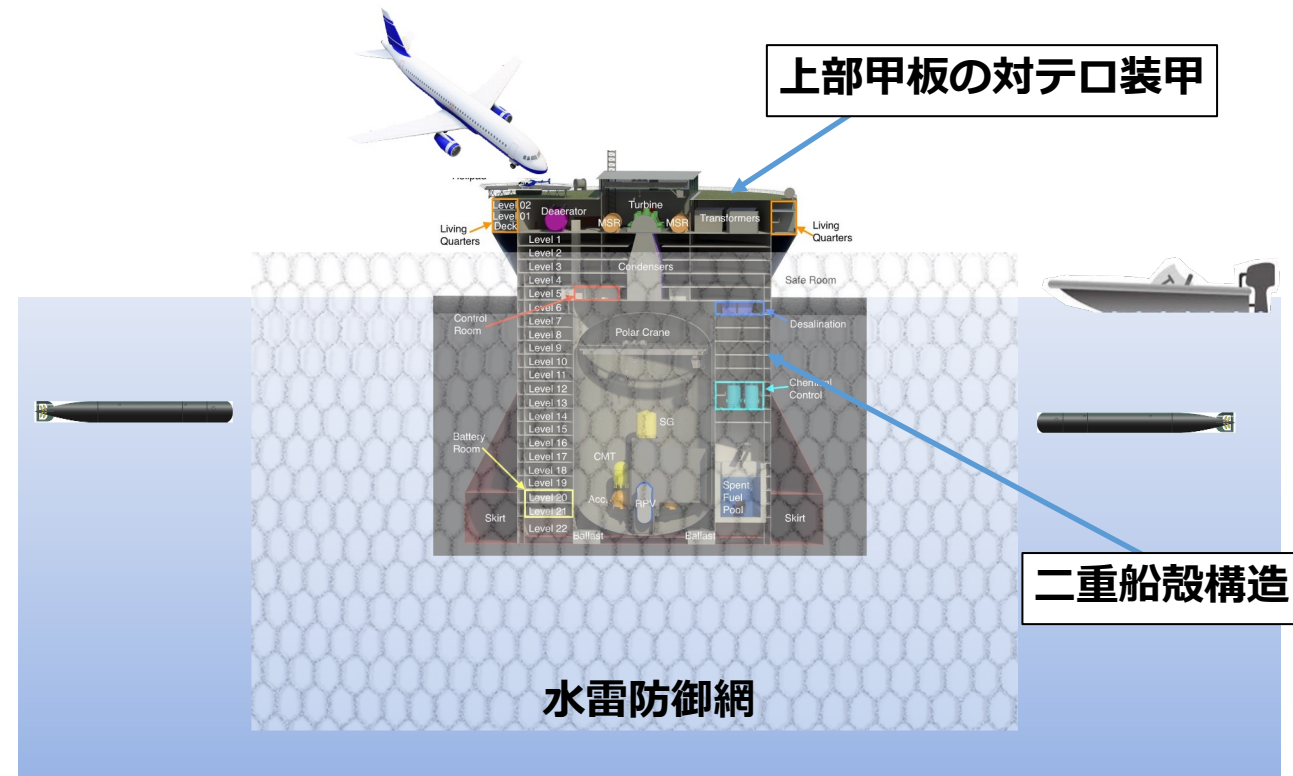
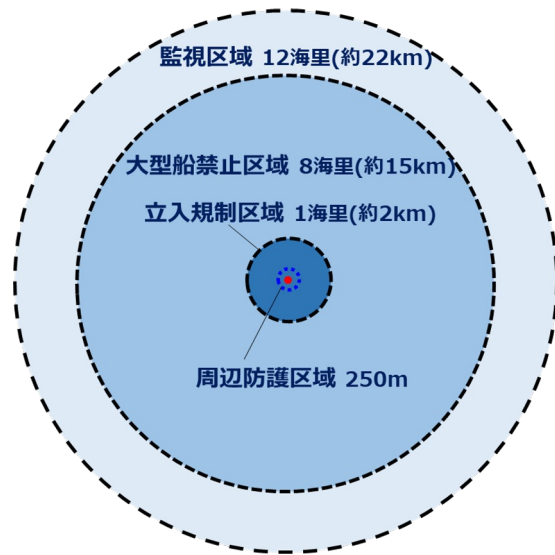
0.3t / kW

陸上の原子力

- ・ 土木建屋関係の建設費： 825～1375億円

テロ攻撃にも防御が堅い

- 本体が二重船殻構造で強固に作られている
- 魚雷や爆発物を積載した船舶は、魚雷防御網で接近を阻止できる
- 潮流や風により多少位置が動くので、飛行物体等による攻撃がしにくい



MITで検討された防護層^[1]

核セキュリティ対策の一例

[1] J.Conway et al (MIT), " Security and the Offshore Nuclear Plant (ONP) Security Simulation Testing and Analysis of the Multi-Layer Security System".

新たなリスクが懸念された場合には移動できる

- 新たな自然災害のリスクが見つかった場合
→ **タグボートなどで曳航してリスクのない場所に移動**する
- **投資リスクの抑制**に繋がる

陸上の原子力発電所では、原子炉直下に新たな活断層が確認された場合、廃炉となる。

例えば、海底火山



タグボートで曳航して移動



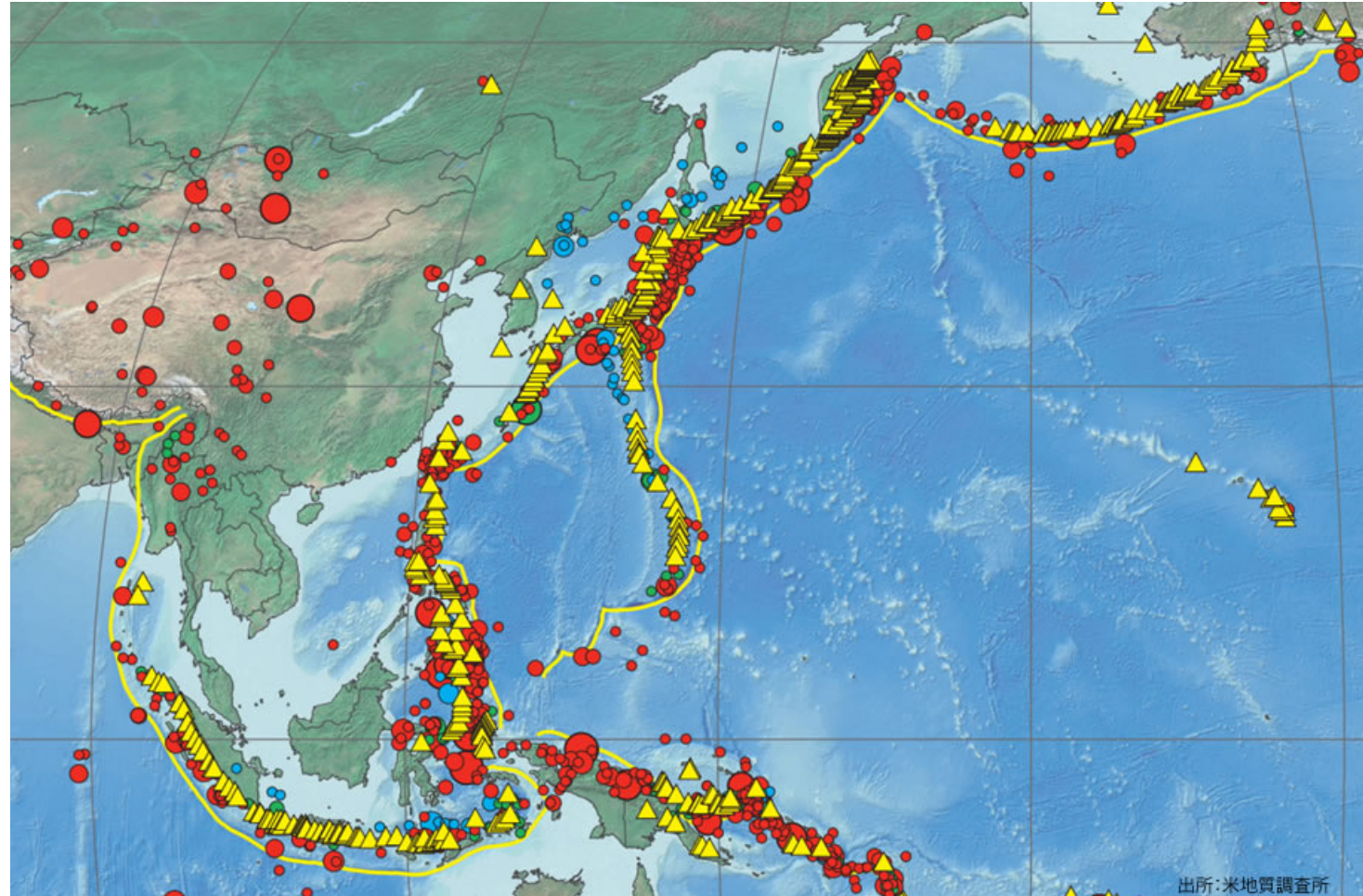
浮体式原子力の運用海域の候補（領海の観点から）



- 【選定条件】
- プラントの30km圏内に陸地を含まずかつ領海内に設置できる
 - 大型船禁止区域（プラント15km圏内）が領海内に収まる
 - 設置場所の水深が100m以上

海外への輸出が容易になる

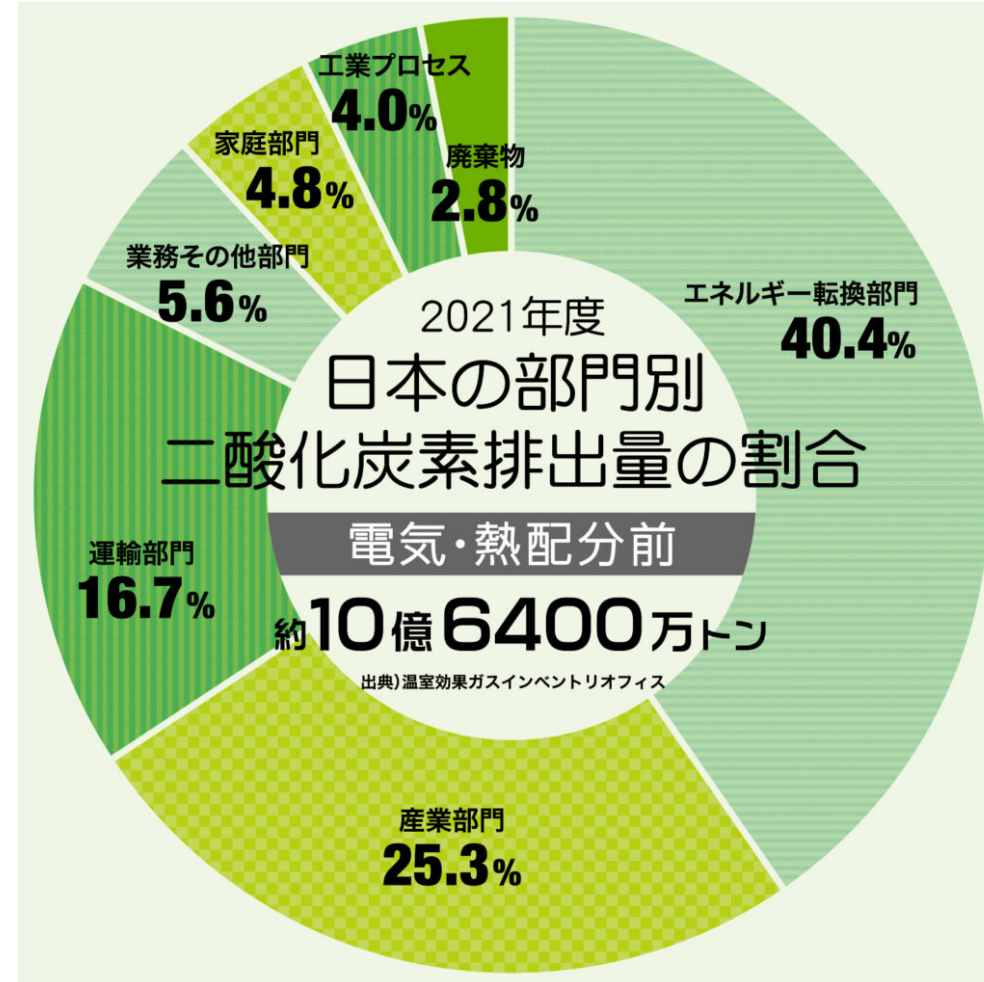
- 東南アジアは津波や地震が多く、陸上の原発輸出は難しい
- 日本で製造して曳航して行くことができる



(青丸、赤丸は地震、黄色の線はプレート境界、黄色の三角は火山)

部門別CO2排出量の割合

- 発電のゼロエミッション化は4割の解決策
- 自動車、家庭、商業・サービスは電化によりゼロエミッション化の流れ
- 工場の熱源電化などを加えると必要な電力量は倍増

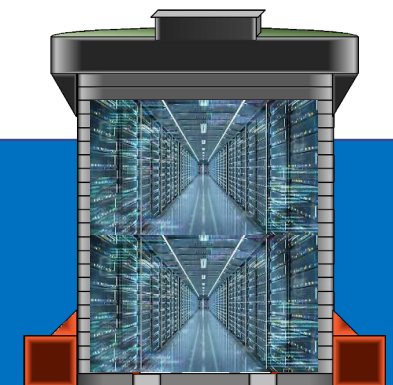
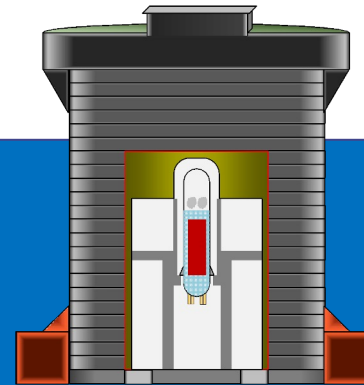


出典：温暖化ガスインベントリオフィス

- 発電のゼロエミッション化は4割の解決策
- 自動車、家庭、商業・サービス、工場の熱源電化により必要な電力量は倍増以上
- 電化が難しい領域も多い（航空、船舶など）
- 洋上に化学プラント船・データセンターを配置して浮体原発から電力を供給



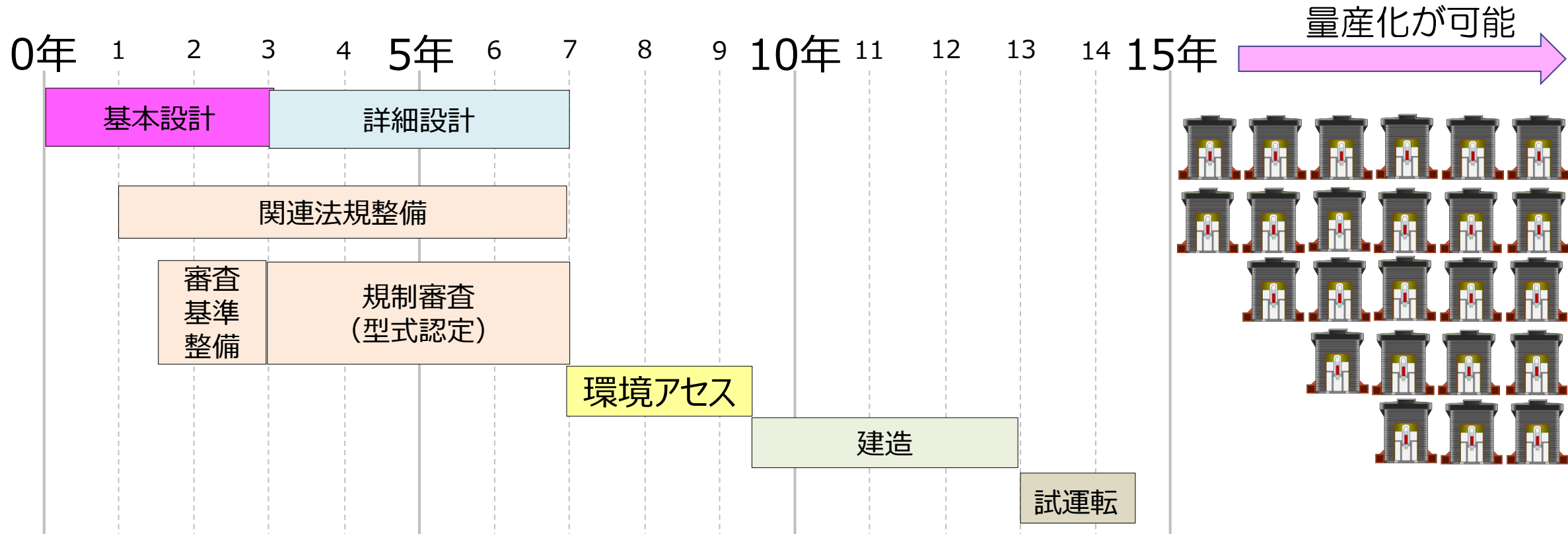
安定なゼロエミ電源の確保
化学プラントの立地点確保



安定なゼロエミ電源の確保
地震等の災害抑止

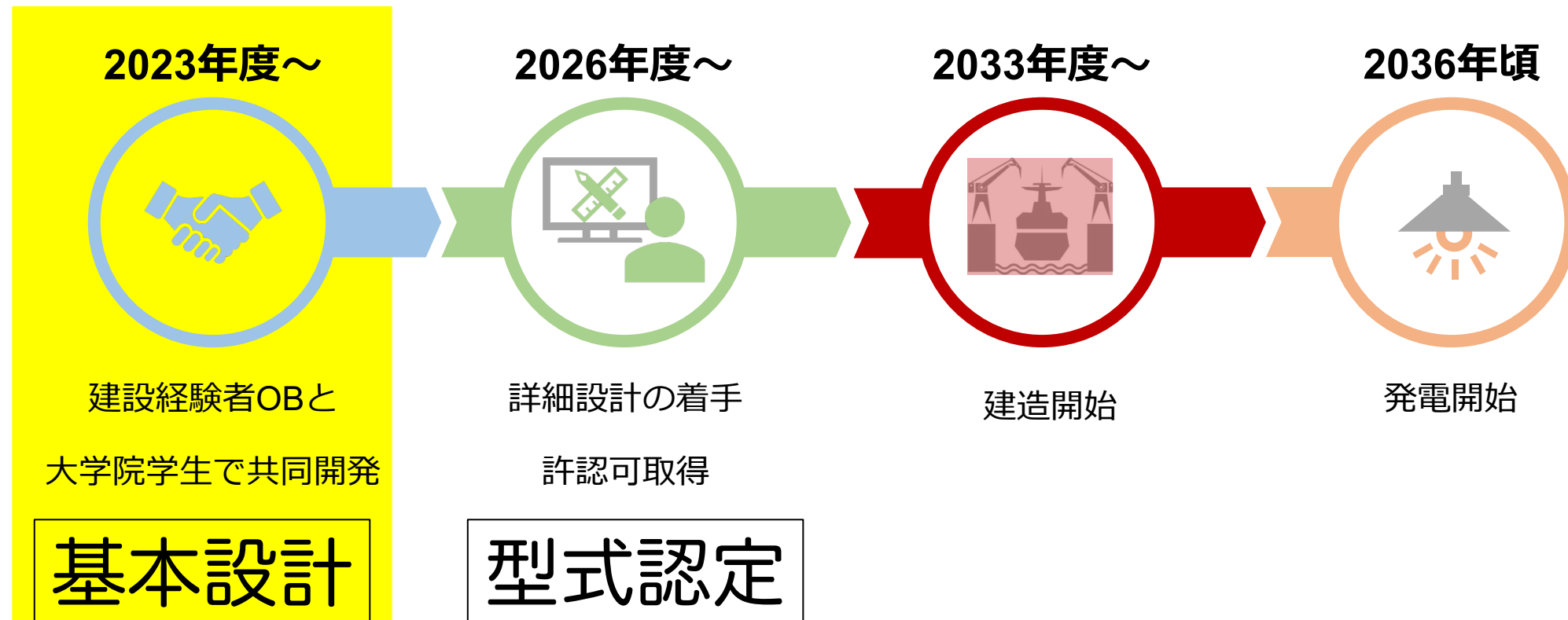
初号基の開発スケジュール

- 基本設計＝3年、詳細設計＋許認可＝4年、14.5年を要すると評価
- 方式認定方式により、後続号機の許認可が短縮でき、量産化が可能



今年度から基本設計に着手

- 設計主体の新組織（スタートアップ）を組織し基本設計に着手
 - 要求仕様確立、浮体構造の具体化、原子炉系配置レイアウト
- 開発を通じて高齢化する技術者から若手技術者への技術継承を図る
 - 建設経験のある**原発技術者OBと学生の共同作業**
学生にはJOB型インターンシップを活用した参画を期待



ご清聴ありがとうございました