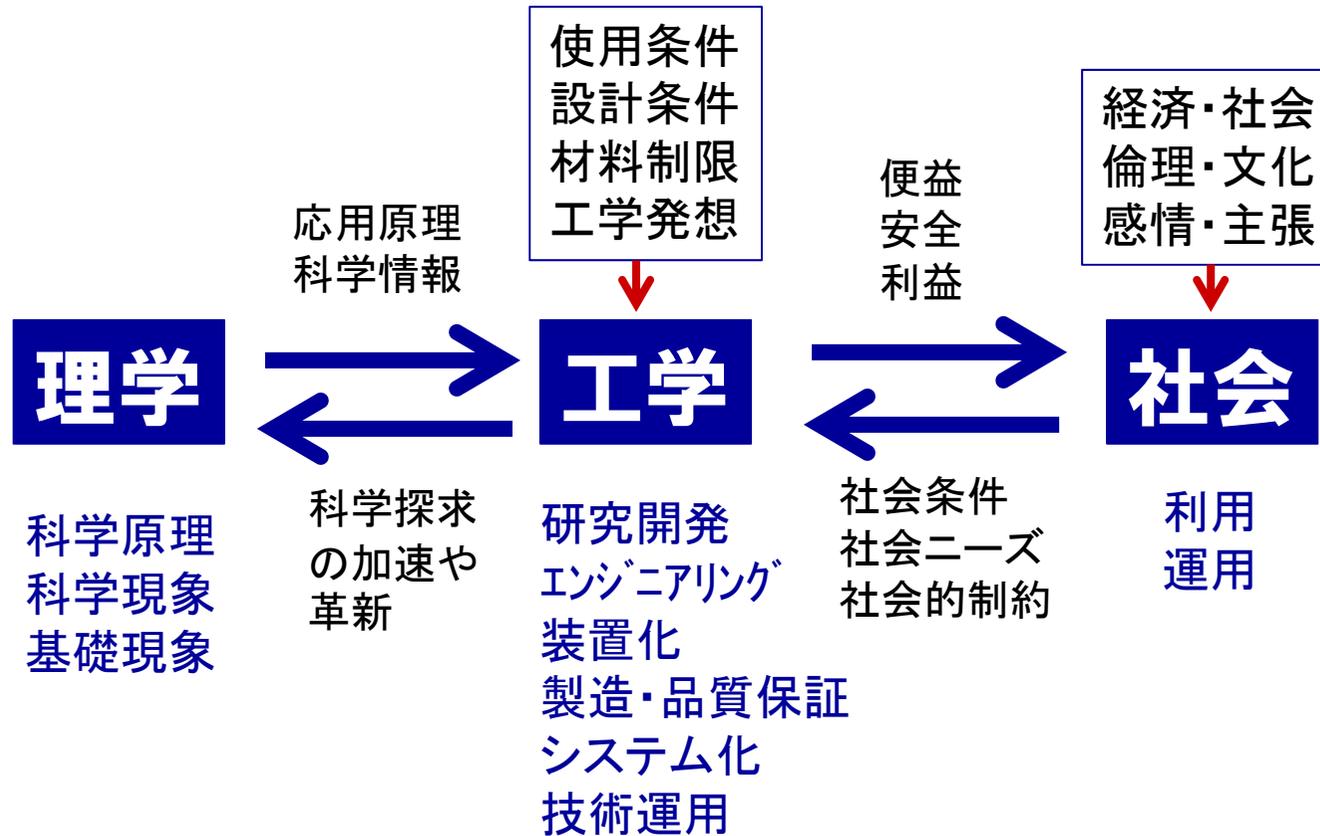


# 今後の原子力発電に求められる技術的方向性

2012年9月29日

京都大学原子炉実験所  
山名 元

# 原子力研究の課題の存在（理学・工学・社会）



軽水炉

黎明期

第一世代炉

第二世代炉

第三世代炉

第四世代

高速炉

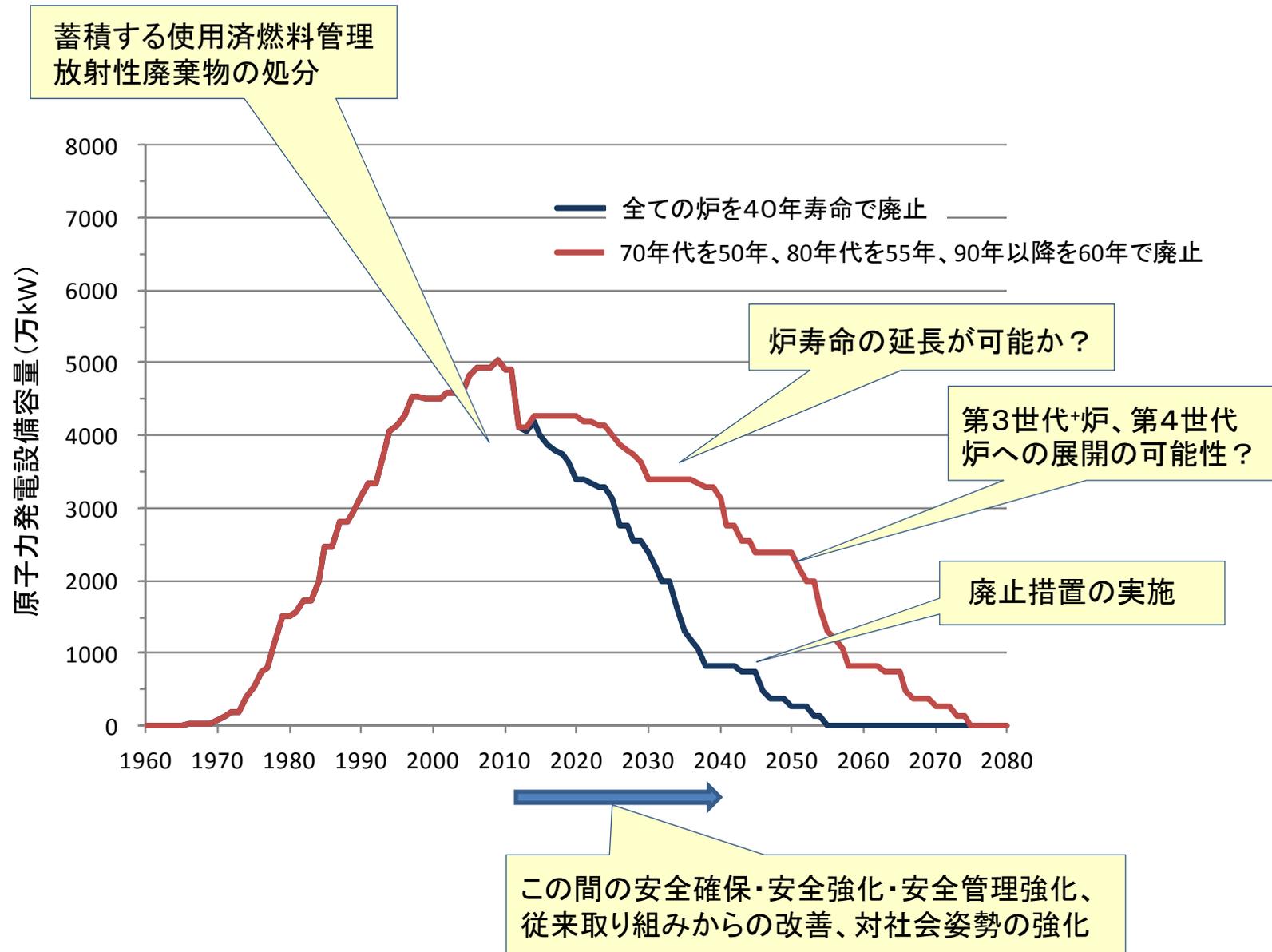
黎明期

初期実験

原型炉

実証炉

# 革新的環境・エネルギー戦略における原子力展望と課題



# 今後の原子力研究開発の大きな方向性

原子力政策の変更に沿う研究開発の見直しと、旧来原子力研究開発での問題を是正した上での研究構成の見直しが必要。

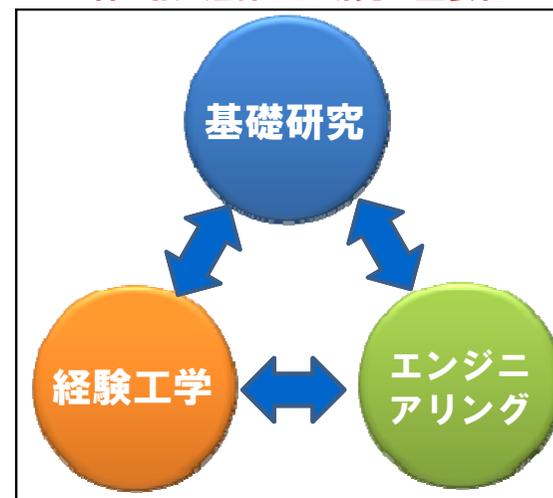
## 1. 福島第一発電所事故への修復対応への取組み(今後の原子力研究の原点)

- ① 損傷した福島第一発電所の原子炉の廃炉に向けての技術開発
- ② 福島県を初めとする広域汚染地域の環境修復の研究等

## 2. さらに、今後の原子力研究開発の大きな方向性として

- ③ 基礎基盤研究の強化
- ④ プラント信頼性や性能の強化
- ⑤ 原子力工学と社会の整合に関わるより本質的な探究
- ⑥ 自然災害等の外的因子と施設機能(内的因子)を包含するリスク評価
- ⑦ 新しい安全基準を満たすべき安全性能の強化(システムおよび装置)
- ⑧ 使用済燃料および放射性廃棄物に関わる本質解の探求(再処理・直接処分・地層処分)
- ⑨ 原子炉の寿命評価や安全強化等に関わる基礎データの拡充
- ⑩ 放射線安全や環境安全に関わる基礎研究および放射線防護上の研究強化

三者が強く関係した研究の重要性



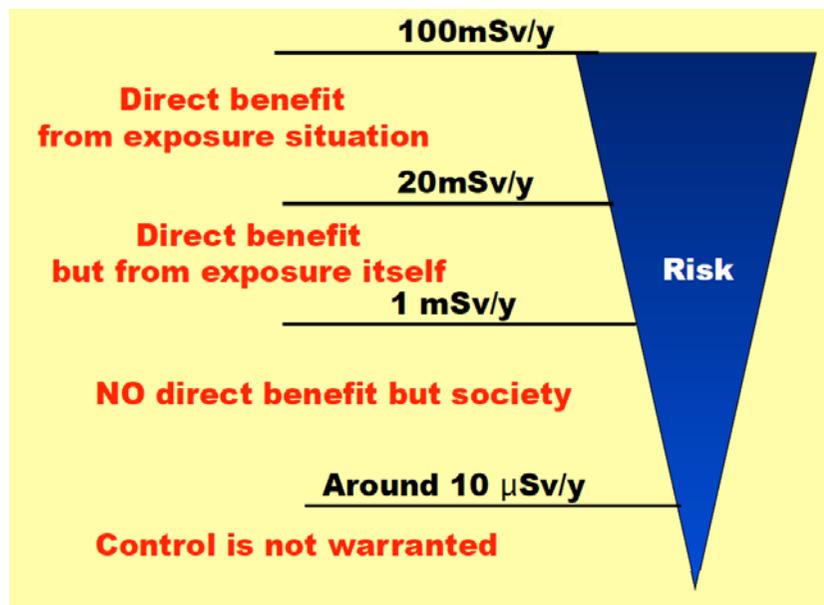
## 3. 今後決定される原子力利用計画に沿って..

- ⑪ 高速炉や加速器駆動未臨界システムなどの次世代炉の研究開発

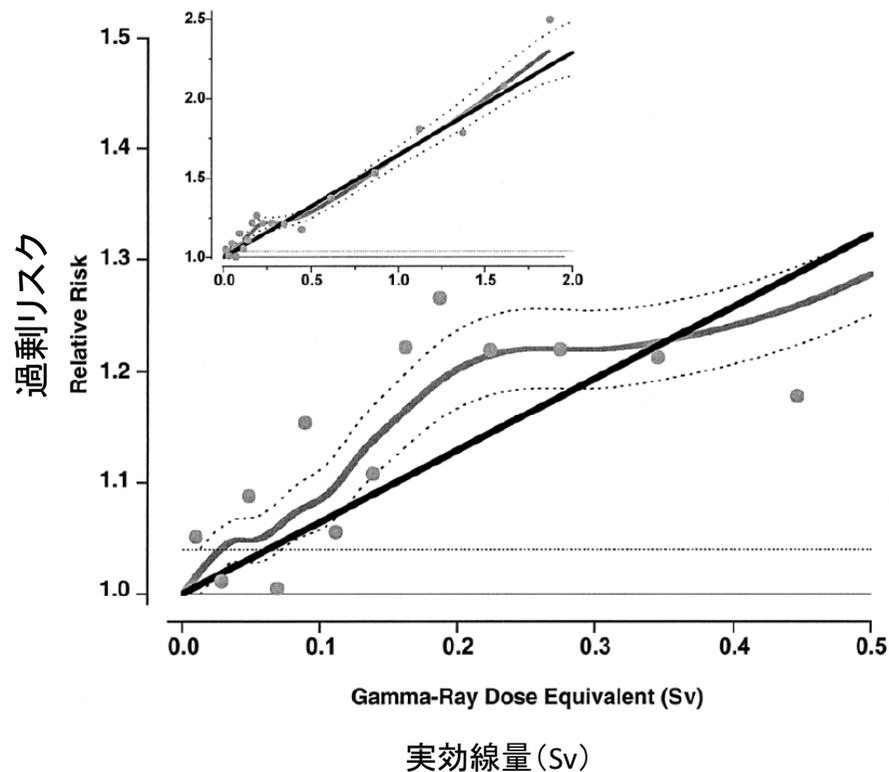
# 例：放射線安全—人体への放射線影響に関わる深化した研究が必要

100mSv以下の被ばくによる生体影響(低線量被ばく)の解明や、放射線による生命影響のメカニズムの基本的解明が、今後の地道な研究として期待される。

## ICRPの線量拘束値・参考値の考え方

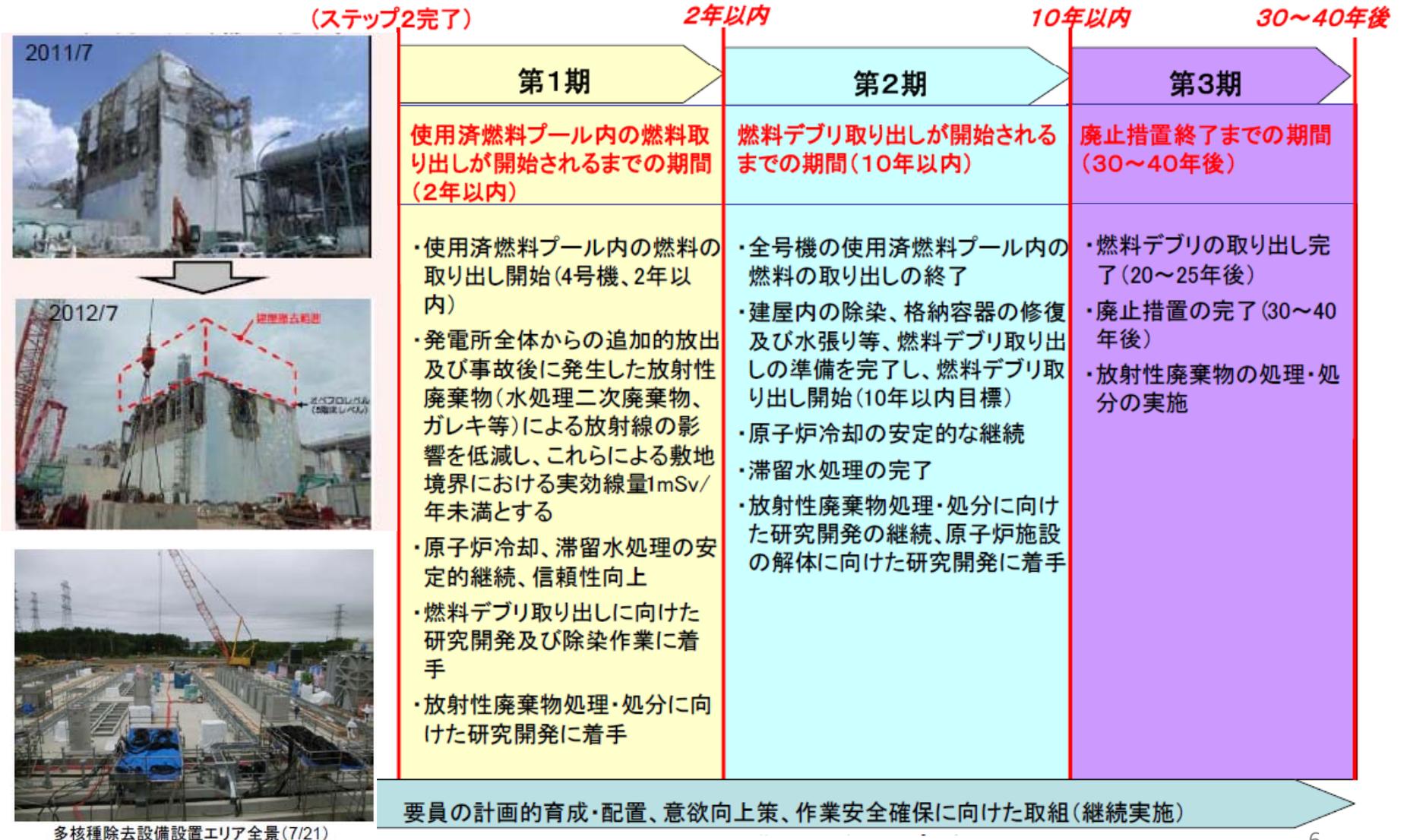


## 広島原爆疫学調査による低線量域での過剰相対リスク



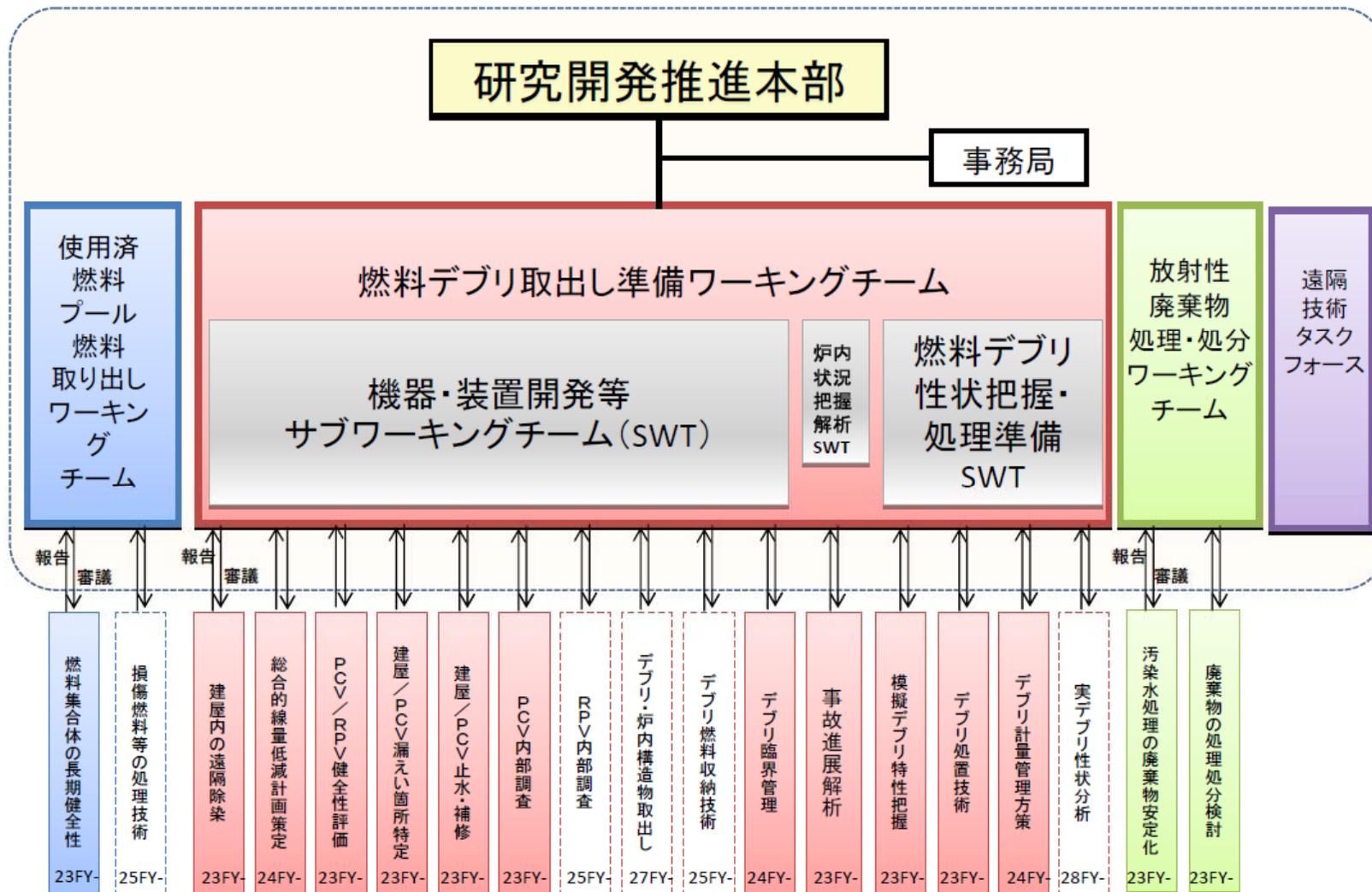
Pierce, Radiation Research (2000)

# 福島第一原子力発電所廃止の中長期ロードマップ(H24年7月)

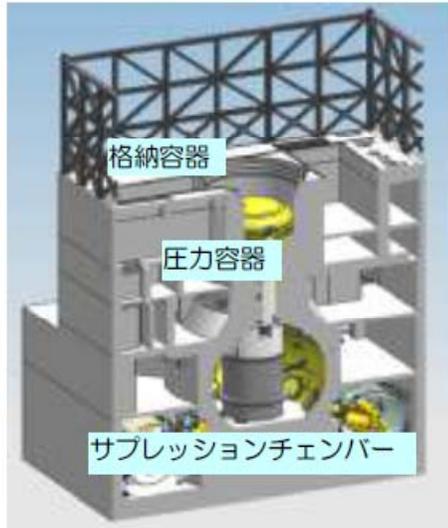


# 福島第一廃止措置に向けて取られている研究開発体制

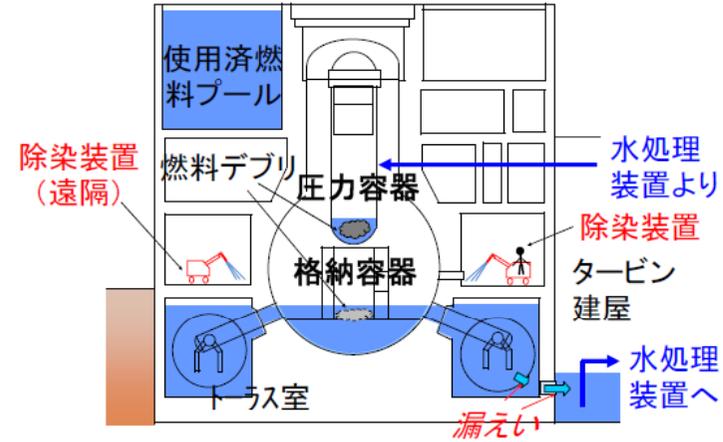
40年以上に亘る廃止措置における多くの困難な措置に向けた、技術の総力を挙げた取り組みが求められている。



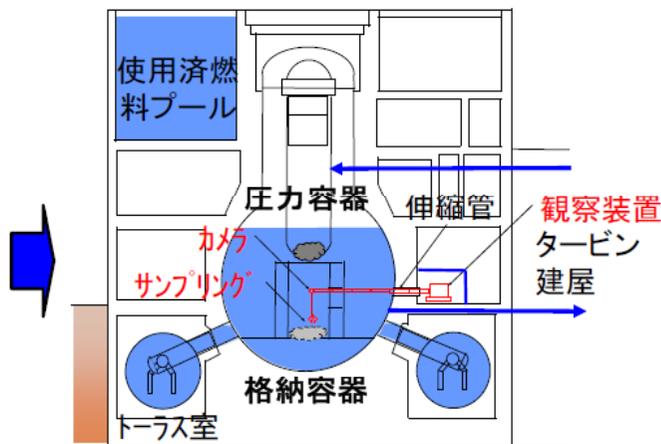
# 損傷した原子炉からの燃料デブリの取り出し(中長期RMより)



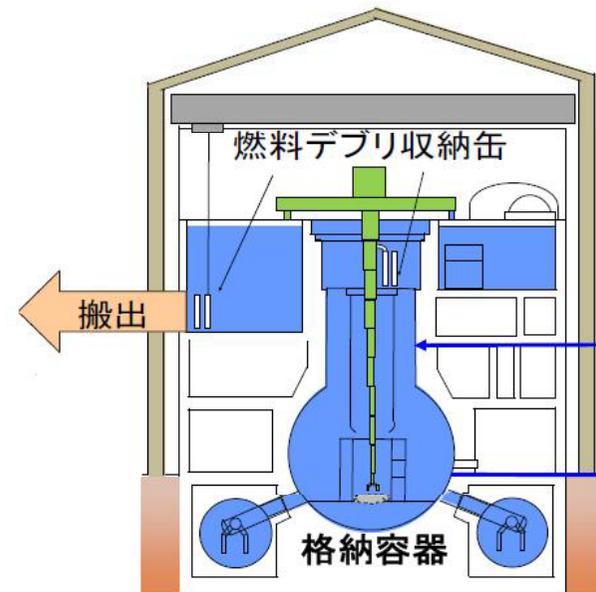
原子炉建屋



原子炉建屋内除染

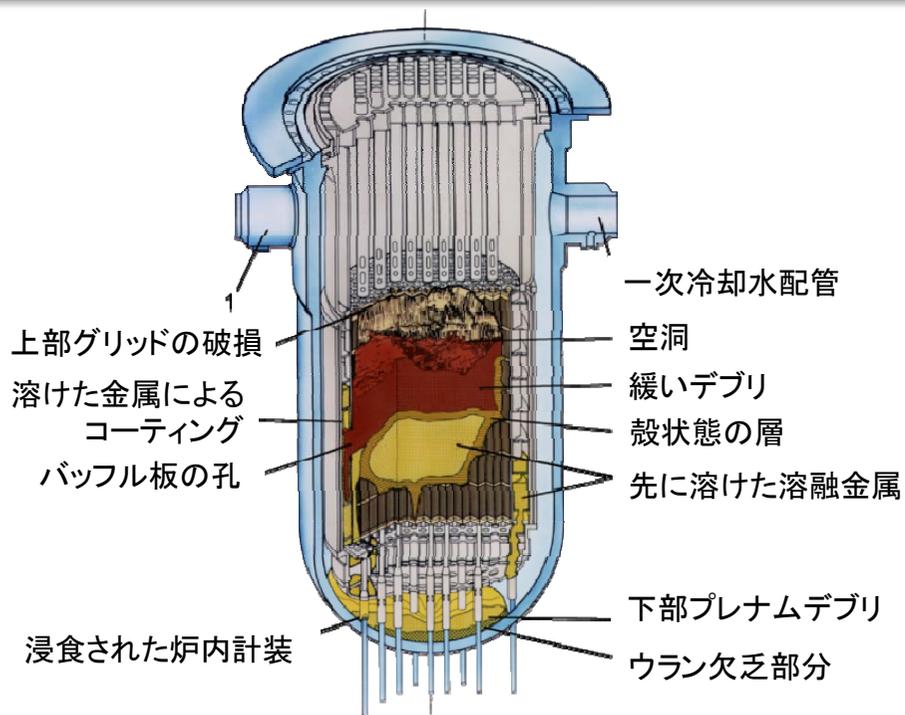


格納容器内部調査・サンプリング



燃料デブリ取り出し

# 燃料デブリ(TMI事故での炉心溶融の状況)



先に溶融して固化した金属の部分



燃料の痕跡

燃料ペレットのギャップ

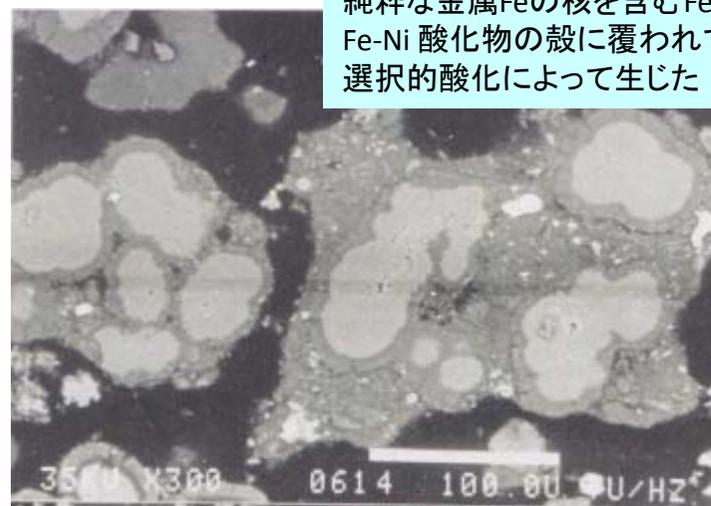


**ボーリングコア G12-P9-B**

完全溶融による岩石状塊  
高密度な高ウラン濃度相  
高密度な高ジルコニウム濃度相  
軽い(Fe, Ni, 高Cr含有相)

**凝固殻の O7-P4-EA1debris**

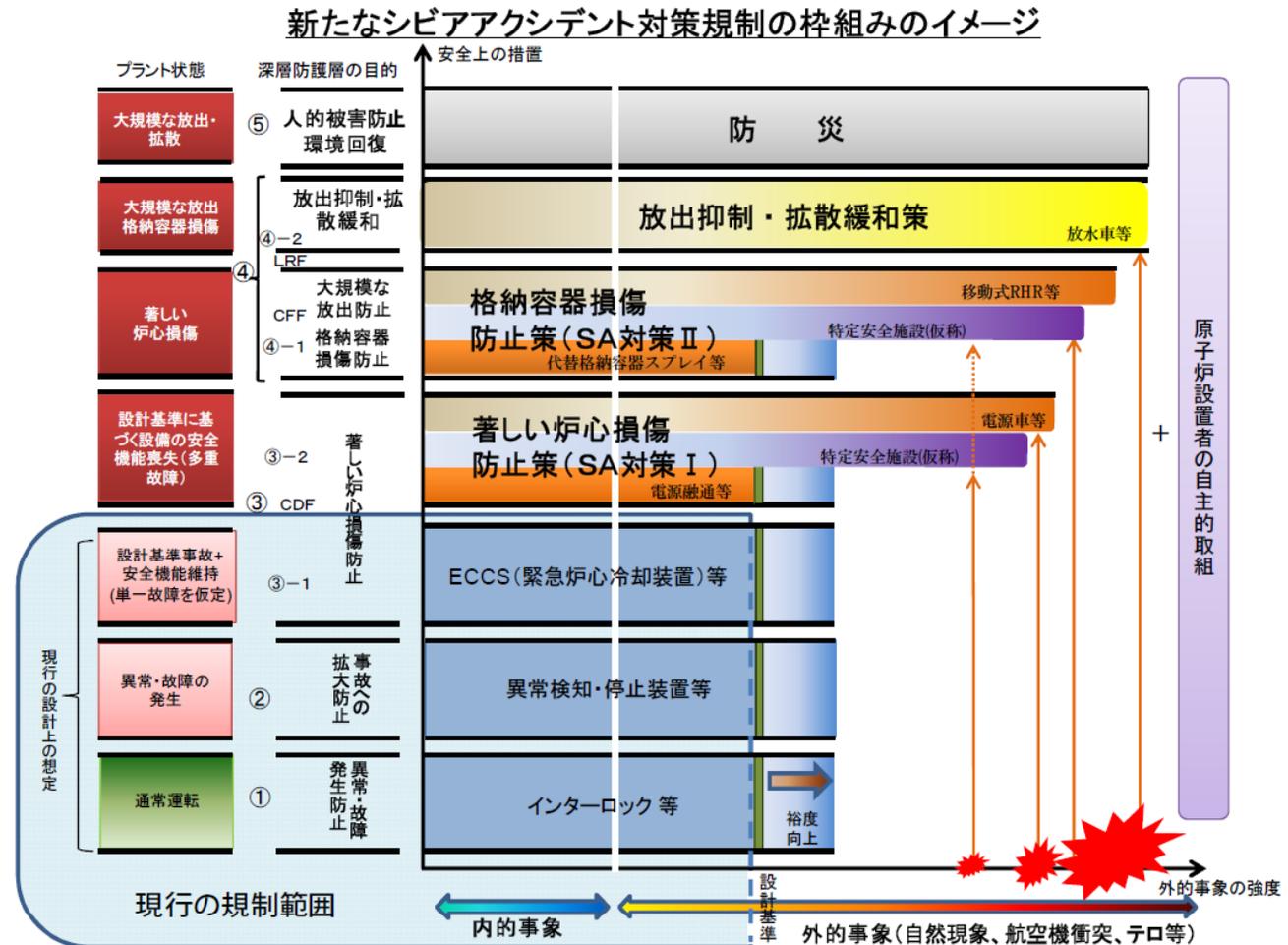
純粋な金属Feの核を含むFe-Ni 団塊  
Fe-Ni 酸化物の殻に覆われている  
選択的酸化によって生じた



# 安全の抜本見直し—緊急に求められる「深層防護の拡充」

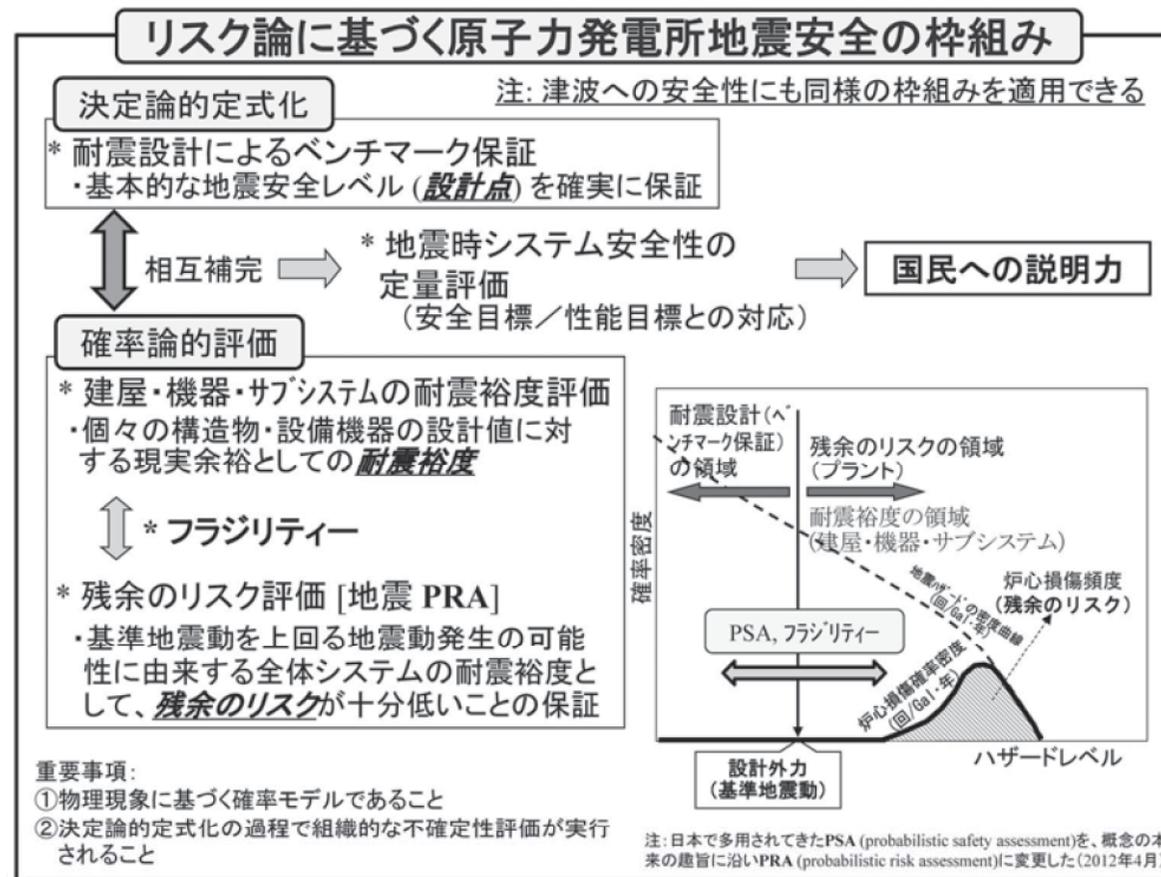
「深層防護の深化と強化」を目指した、ハード的、ソフト的、工学論理的、対社会説明、等あらゆる取り組みが必要とされる。

- ⑤ 人的被害を防止
- ④ 損傷が起こっても放出を防止・抑制
- ③ 著しい炉心損傷を防止
- ② 事故への拡大を防止
- ① 異常の発生を防止



# 自然災害を包含する確率論的リスク評価

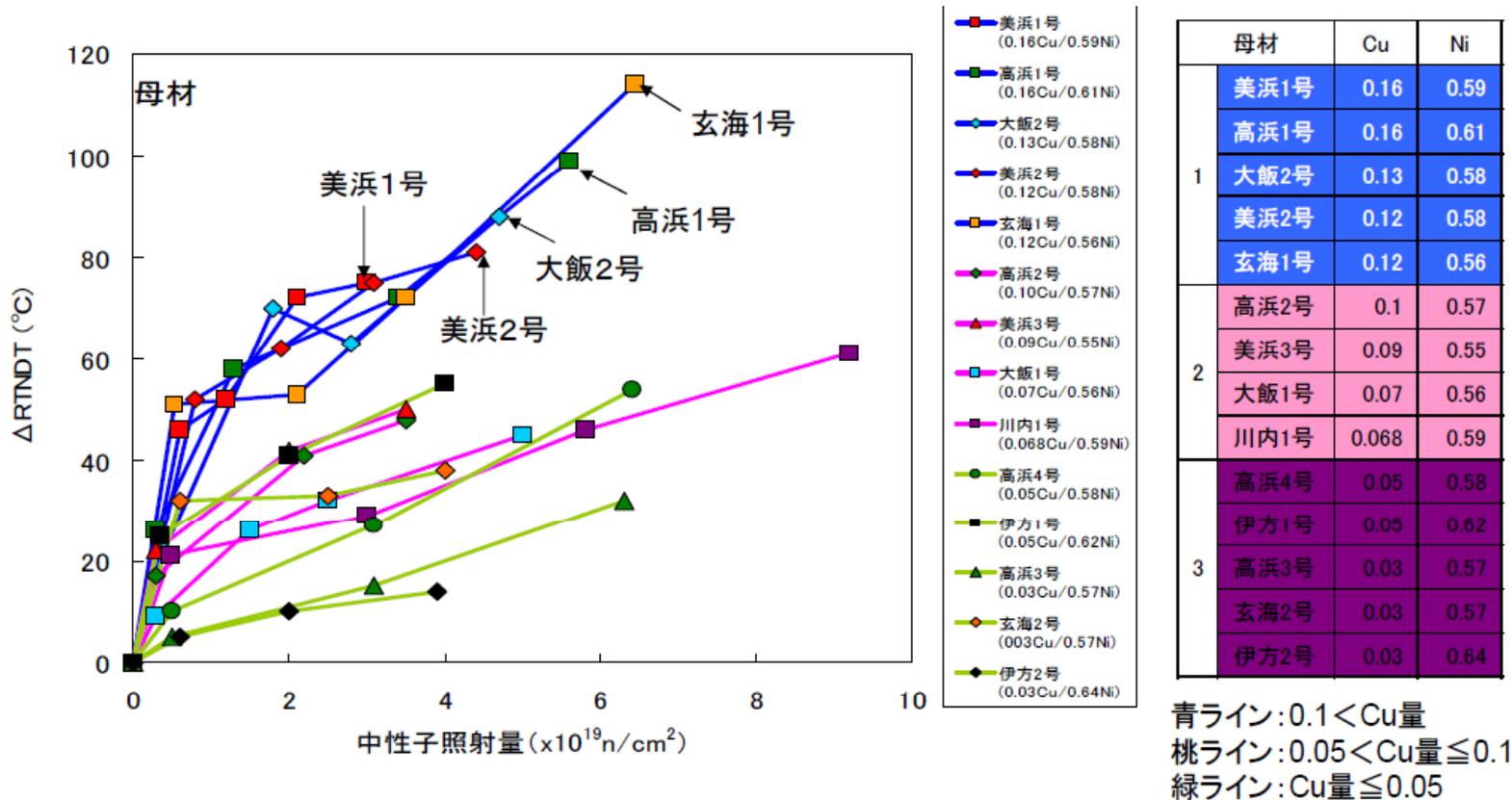
原子力発電所の総合的な安全のためには、地震工学・津波工学に関わる個別要素技術とともに、総合化の技術を錬磨しなければならない。原子力安全工学と地震工学の分野の連繋が必要である。自然外力の不確定性を考慮し、設計基準を超える「設計外外力」の領域における安全担保の問題として、リスク論に基づく意思決定の枠組みが根幹となる。



第1図 原子力発電所の地震安全のリスク概念

# 例：重要な基礎研究—軽水炉寿命延長のネック（圧力容器の特性劣化）

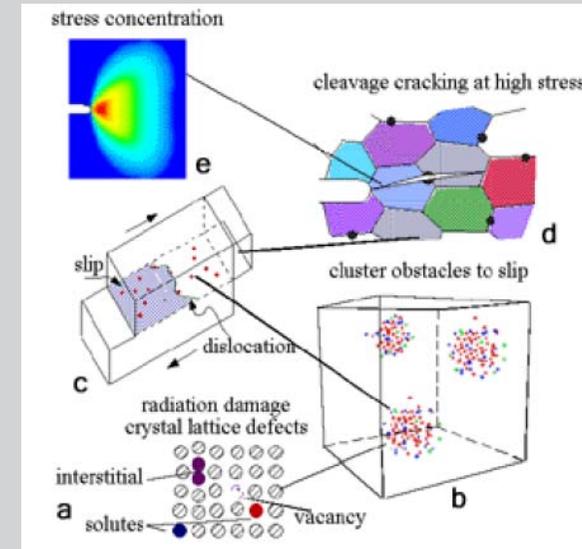
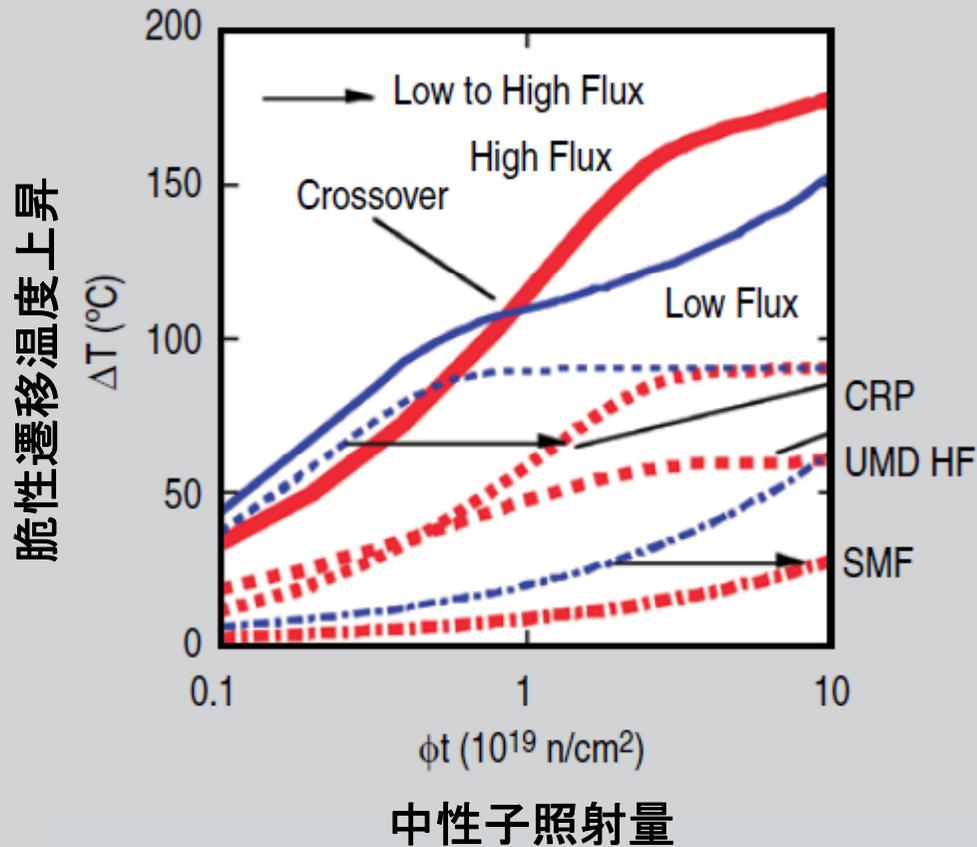
長期に亘る中性子照射による脆性遷移温度の上昇の全体像が、監視試験片の調査により分かっている。その基礎メカニズムの研究をはじめとする科学的技術基準の構築に努力が必要である。



✓玄海1号と同程度のCu量を持つ他プラントの脆性遷移温度の上昇(上グラフの青線)と比較しても、同程度の脆化進展傾向を示しているのではないかと推察される。

引用: 高経年化技術評価に関する意見聴取会・保安院資料

# 例：重要な基礎研究—軽水炉压力容器の特性劣化のメカニズム

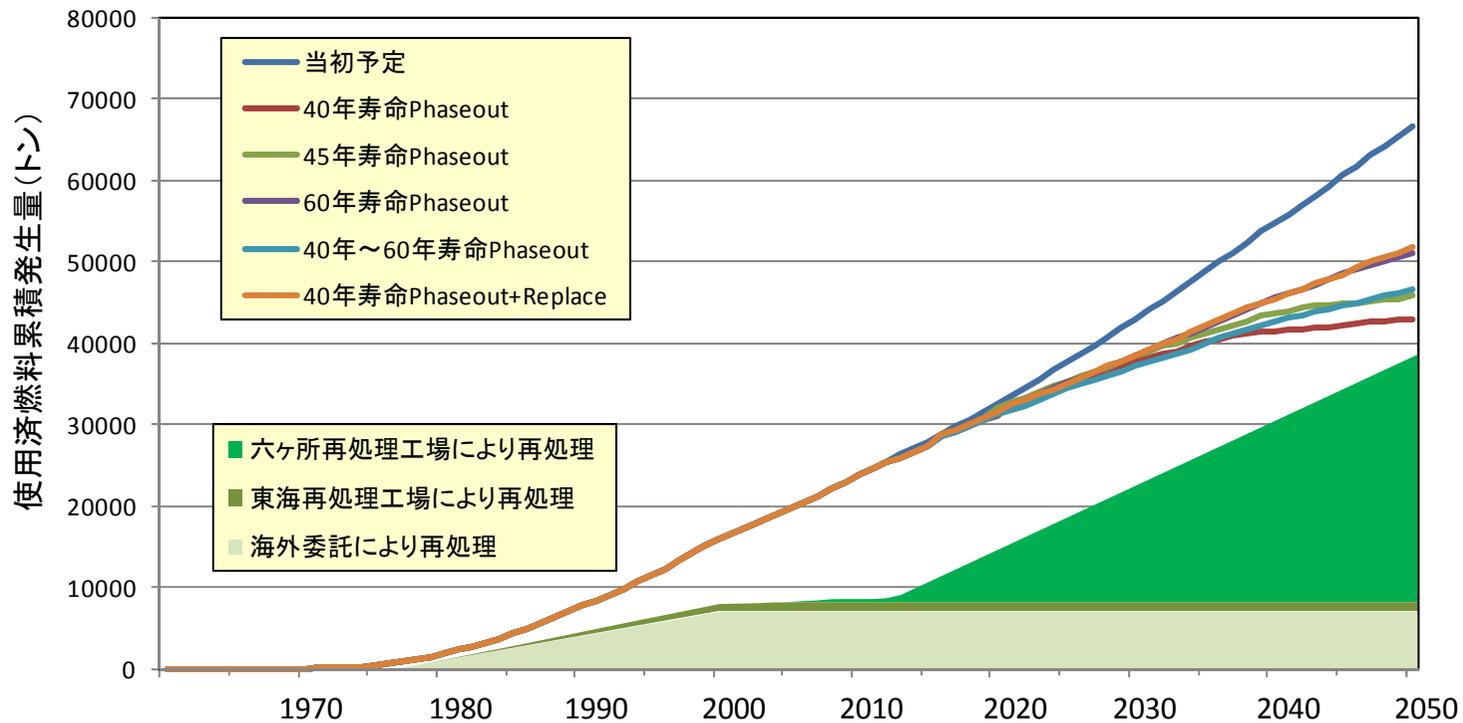


CRP: 銅リッチの析出物効果  
 UMD: 不安定マトリックス欠陥  
 SMF: 安定マトリックス欠陥

Figure 4. A schematic illustration of the three-feature (SMF + CRP + UMD)  $\Delta T$  model for a copper-bearing steel. The heavy and light lines are for high and low flux, respectively. The arrows show the delays in the SMF and CRP contributions at high flux. The longer dashed line shows the extra UMD contribution to  $\Delta T_{umd}$  at high flux. These competing effects result in a crossover in the total  $\Delta T$ .

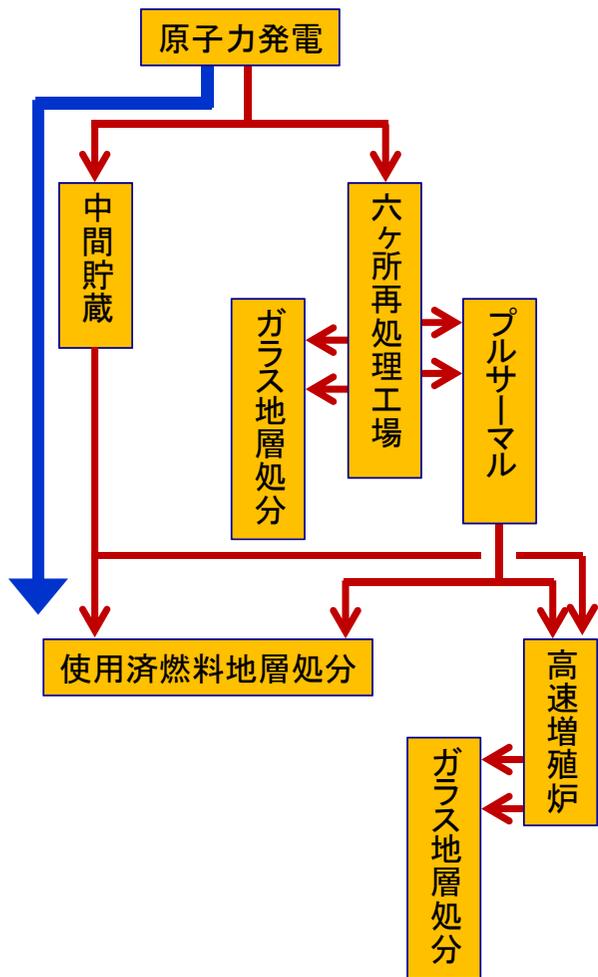
# 原子力の本質問題—軽水炉使用済燃料の発生

減原子力路線においても、使用済燃料の発生は継続する。  
恒久的な解を求めて、使用済燃料管理の最適化を図る必要がある。

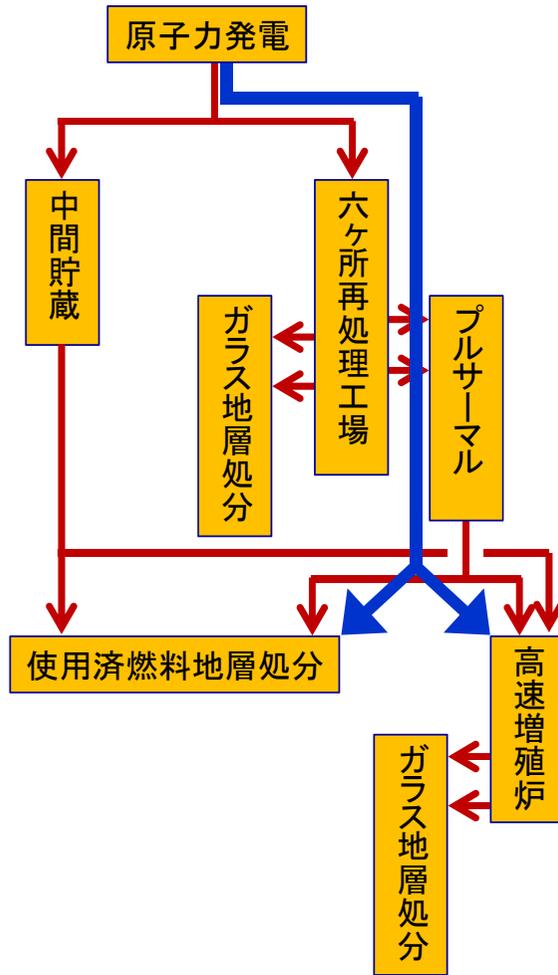


# 核燃料サイクル選択枝の概要(原子力委員会)

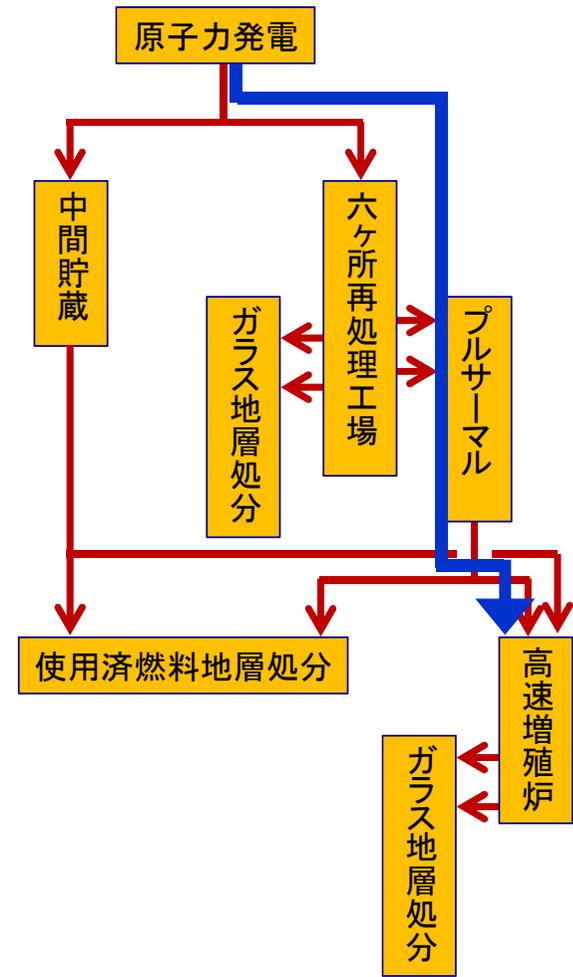
選択枝①  
全量直接処分



選択枝②  
再処理直接処分併存

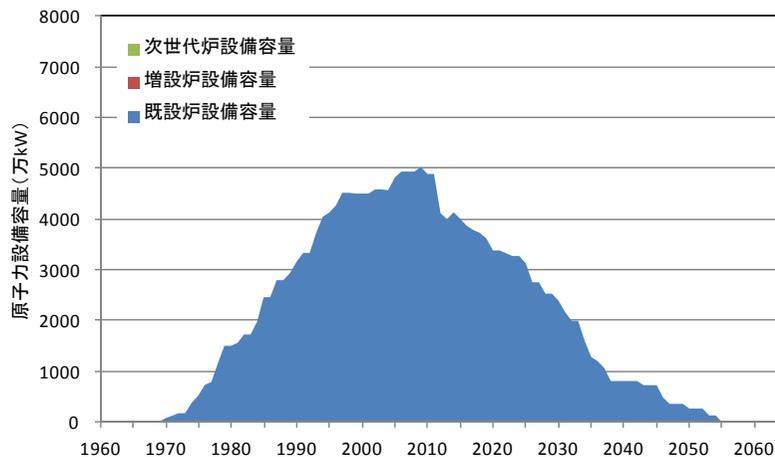


選択枝③  
全量再処理

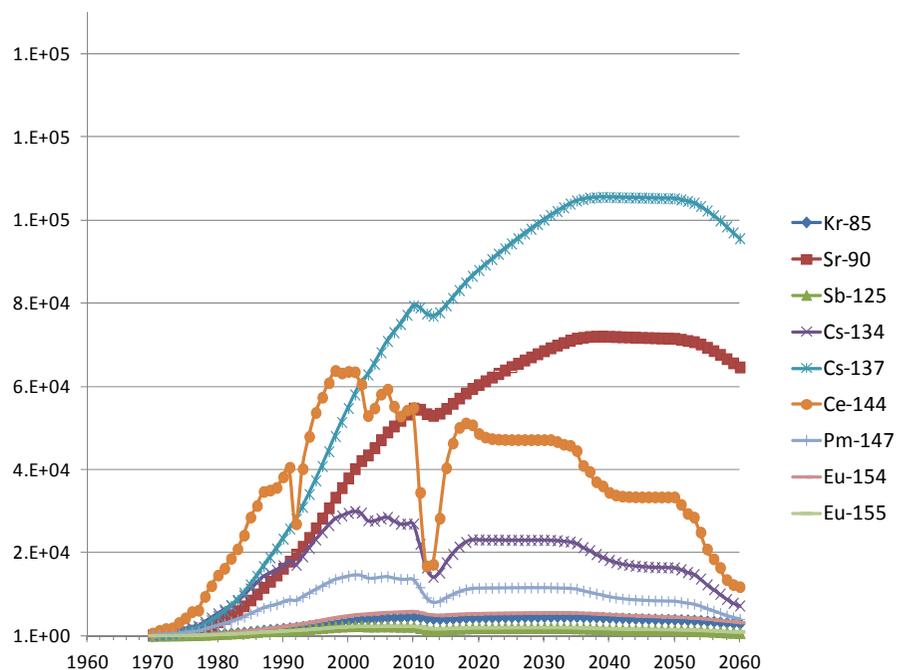
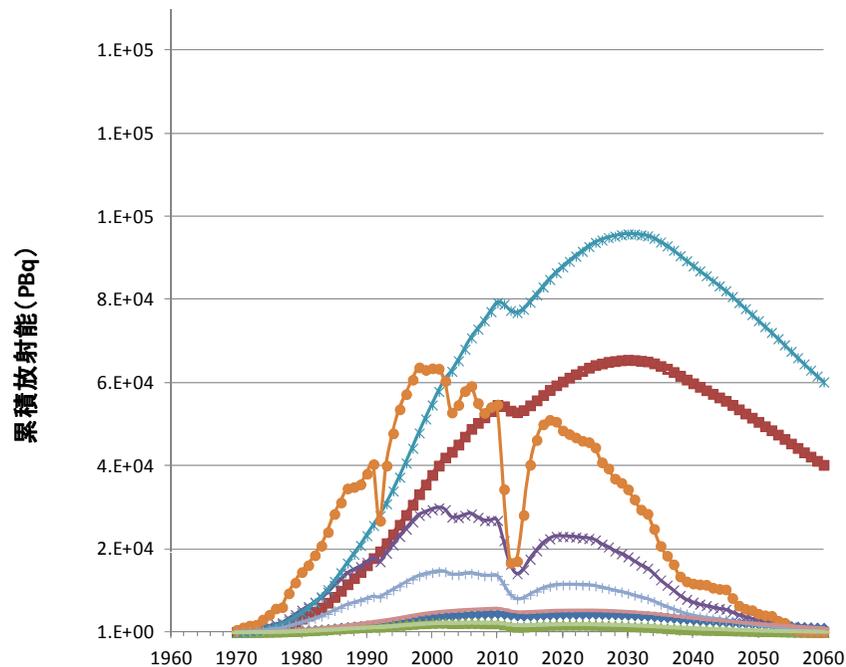
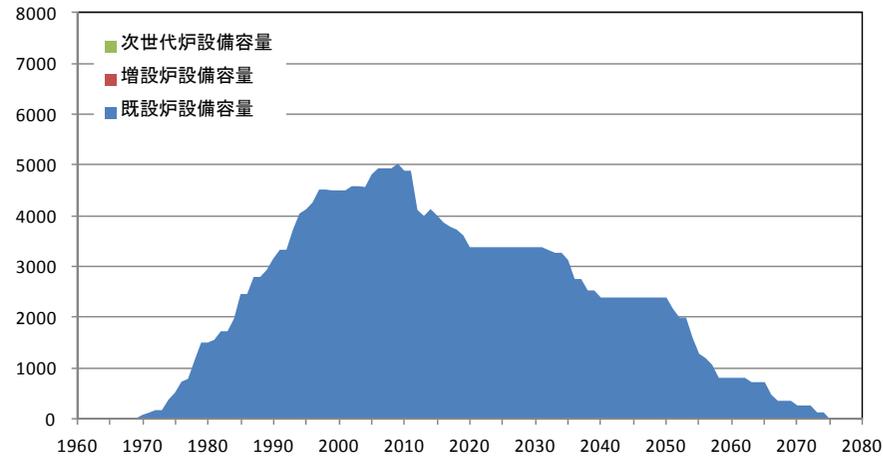


# 減原子力路線での核分裂生成物核種の蓄積

## A. 炉寿命40年での廃止

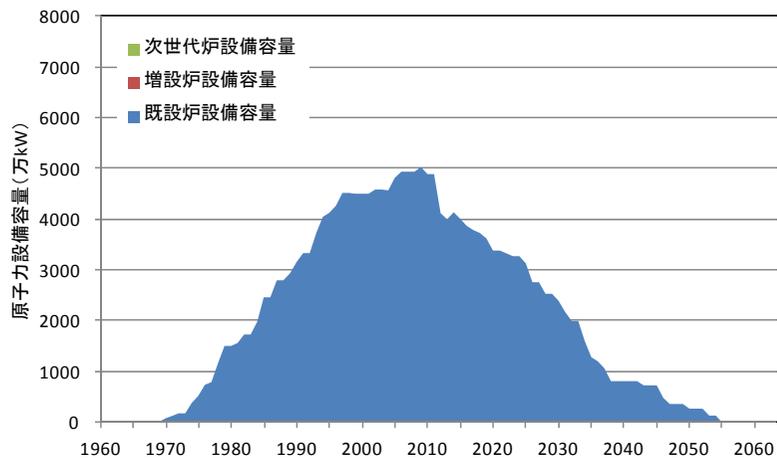


## B. 炉寿命40~60年での廃止

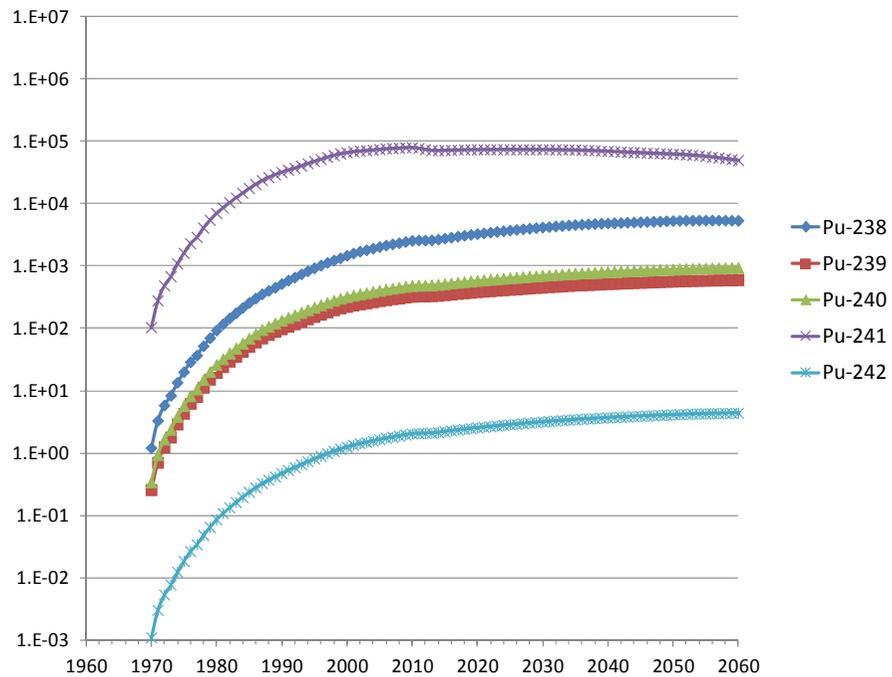
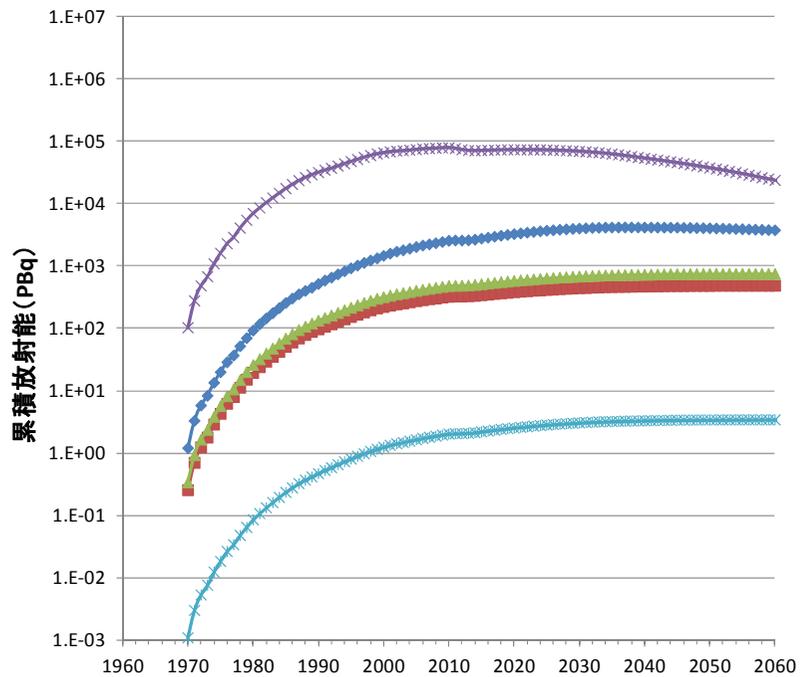
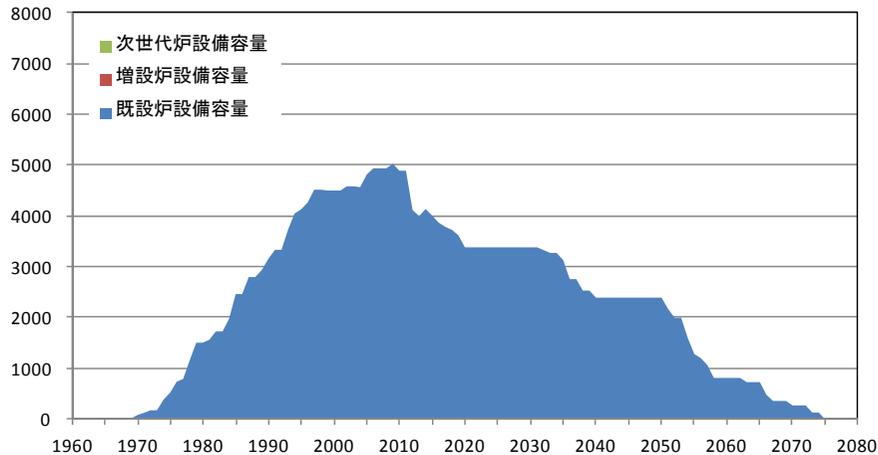


# 減原子力路線でのプルトニウムの蓄積（放射能として）

## A. 炉寿命40年での廃止



## B. 炉寿命40~60年での廃止



# 地層処分の概念

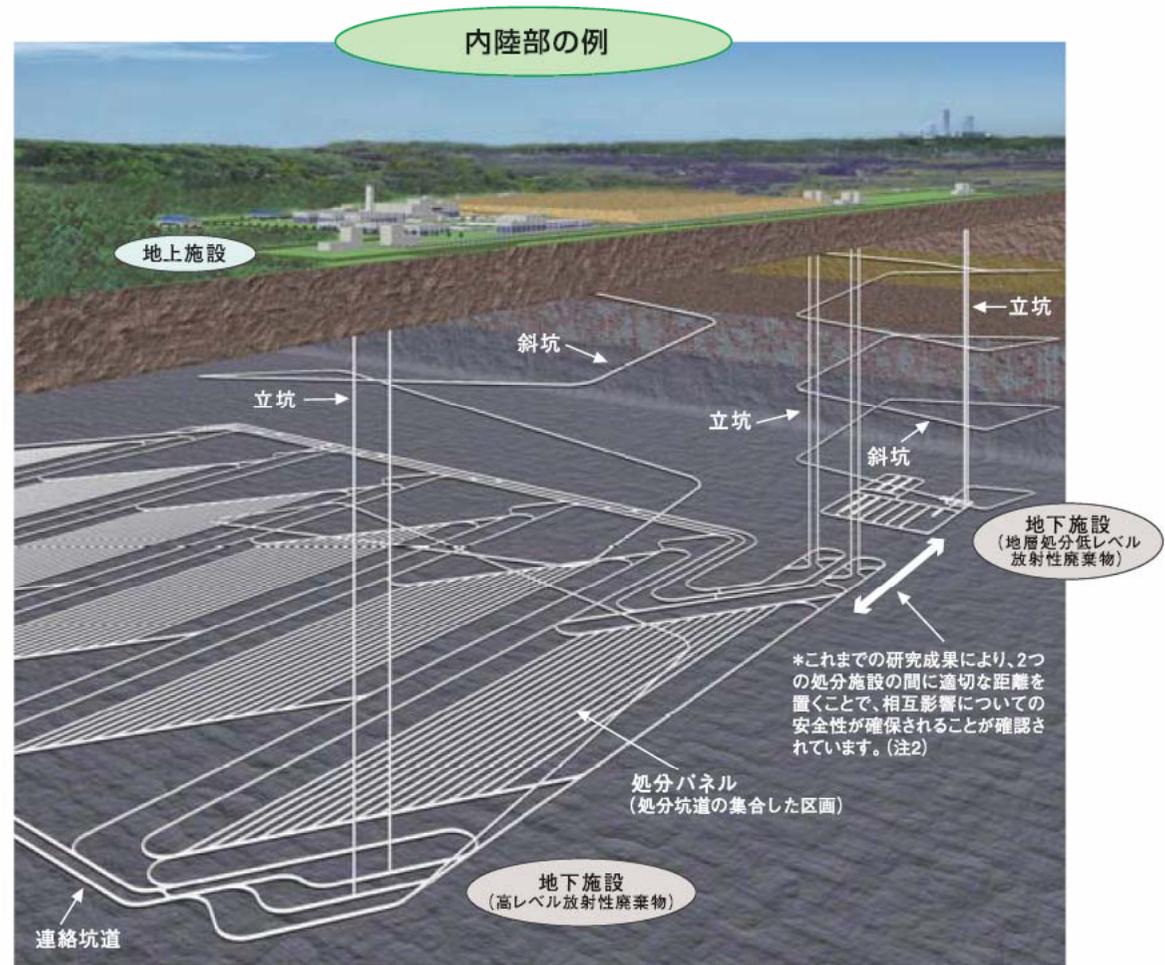
バックエンド路線の如何に関わらず、地層処分は必要な技術。世界的に共通の認識。

## 地層処分

人間の生活環境から十分離れた安定な地層中に、適切な人工バリアを構築することにより長期的な安全性を確保する処分方法。ここで言う「地層」には、地質学上の堆積岩を指す「地層」と、地質学上は「地層」とみなされない「岩体」が含まれている。

## 人工バリア

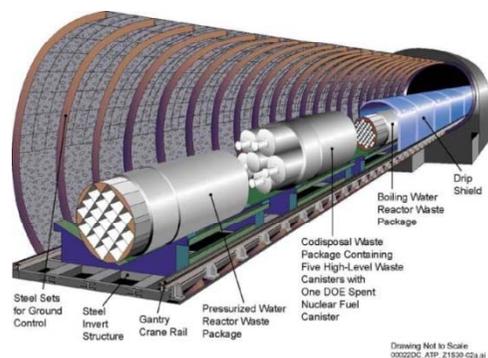
埋設された放射性廃棄物から、放射性物質が生活環境へ移行することを抑制するために、人工的に設けられる障壁(バリア)をいい、オーバーパック、緩衝材、コンクリートなどの人工構築物の総称。



# 直接処分技術(我が国においても研究の開始が必要となる)

- ◆ 米国・ドイツとも、直接処分事業は実施に至っていない。現在は、両国ともサイト内貯蔵で対処
- ◆ 両計画とも、廃止ないし中断状況にある。

## 米国の直接処分場計画 Yucca Mountain, NEVADA, USA



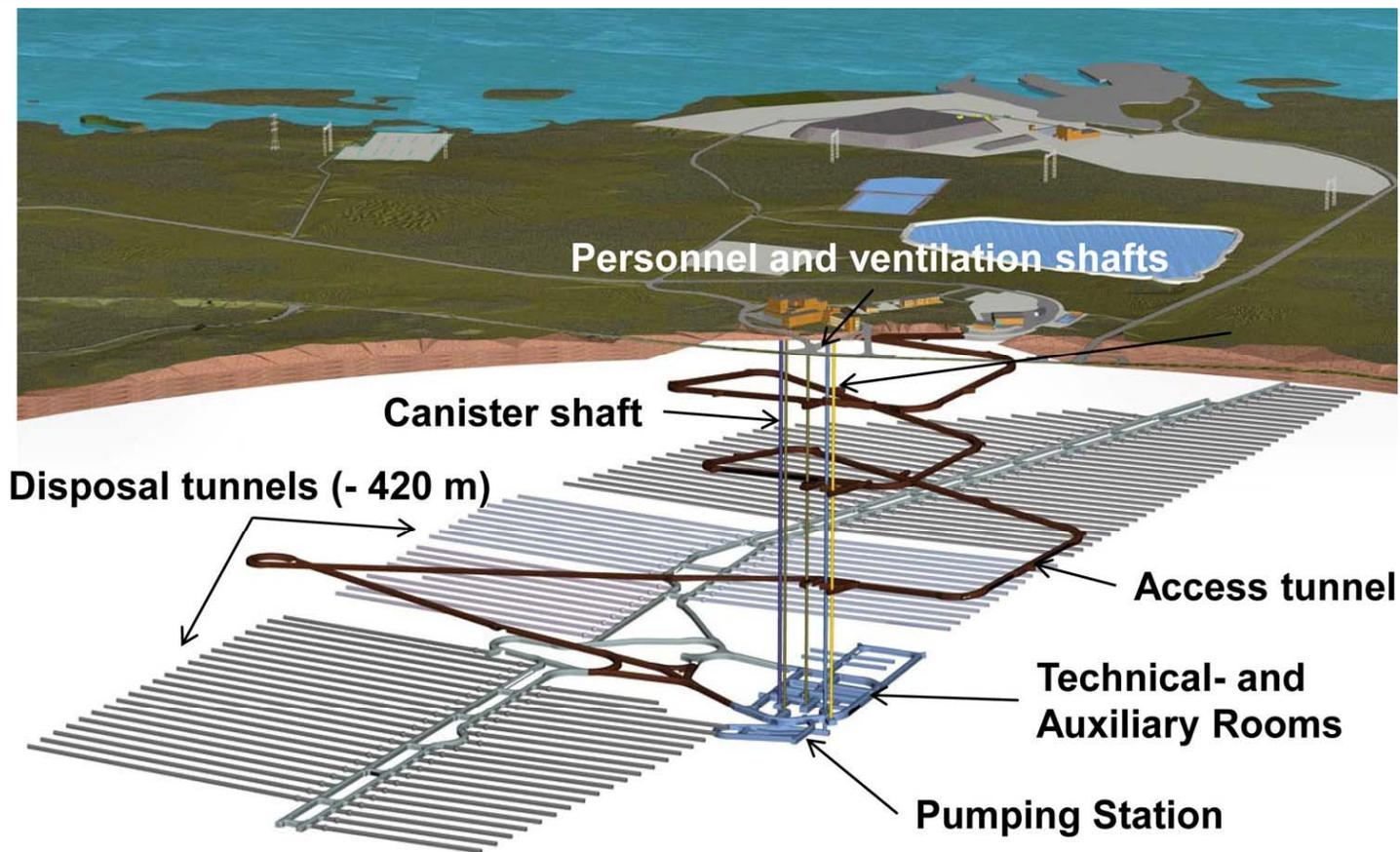
## ドイツの使用済燃料直接処分計画 Gorleben



# 日本における地下研究の例(東濃地科学センター)

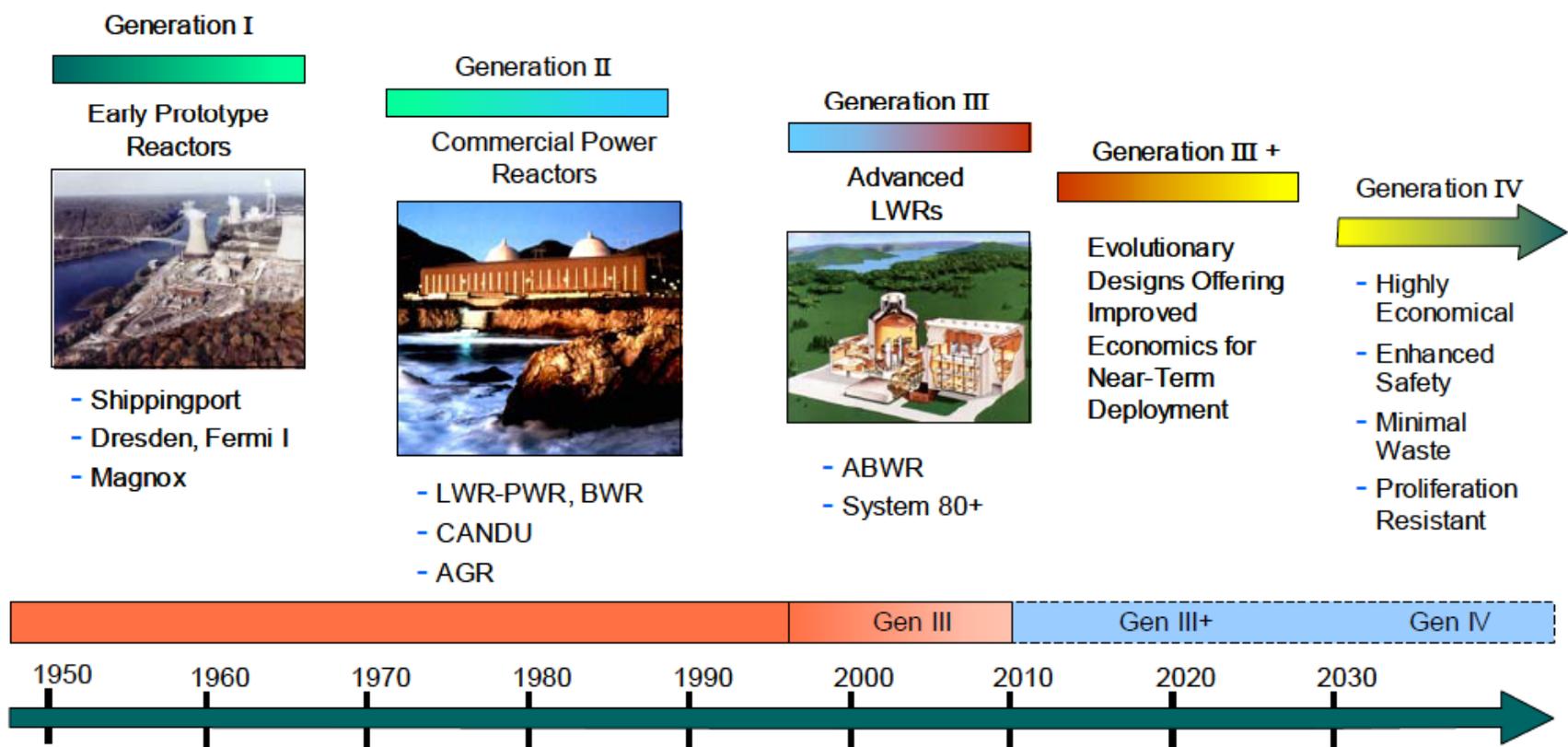


# フィンランド・オルキオト処分サイト概念図(2020年頃に事業開始)



# 第4世代炉 (Generation IV Nuclear Energy Systems)

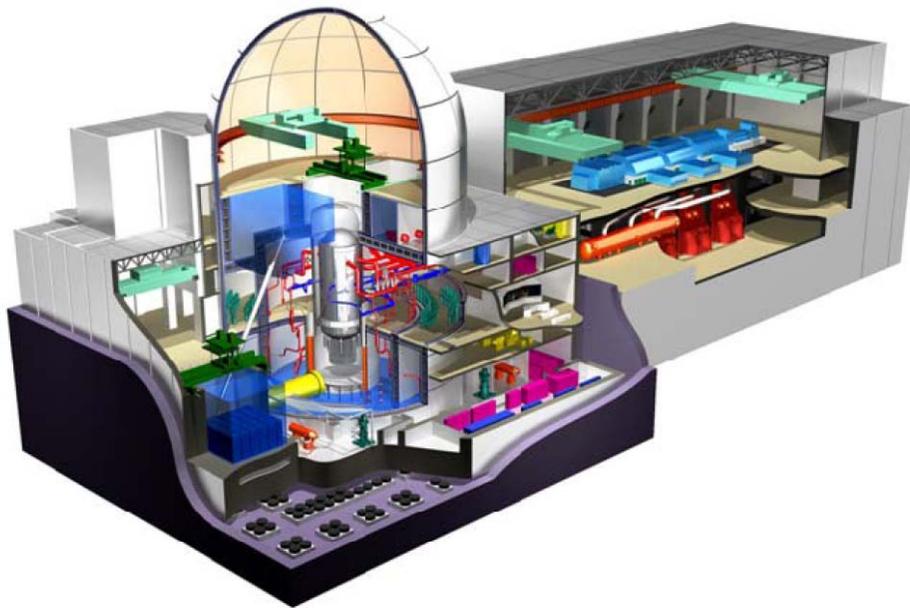
世界的には第III世代炉(III+)の導入が計画されており、同時に、第IV世代炉(高速増殖炉等)に対する開発意欲が存在する。我が国における、次世代炉の位置づけの再吟味が必要。



# Generation III<sup>+</sup> 次世代軽水炉開発研究

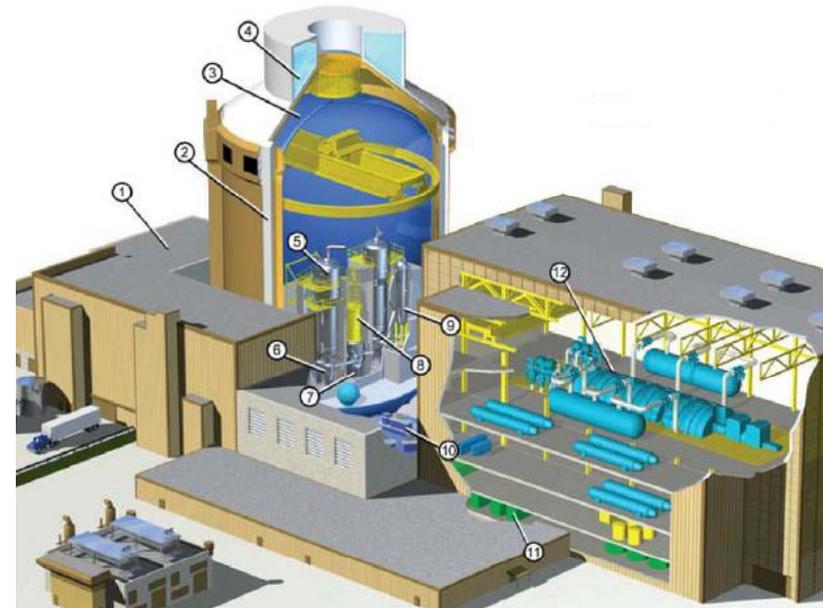
## 日本の次世代軽水炉

- 当初計画では2030よりの実用が期待されていた
- 将来の国際標準に沿う
- 1.76 GWe 出力
- 固有安全性の強化
- 炉寿命 80 年を想定



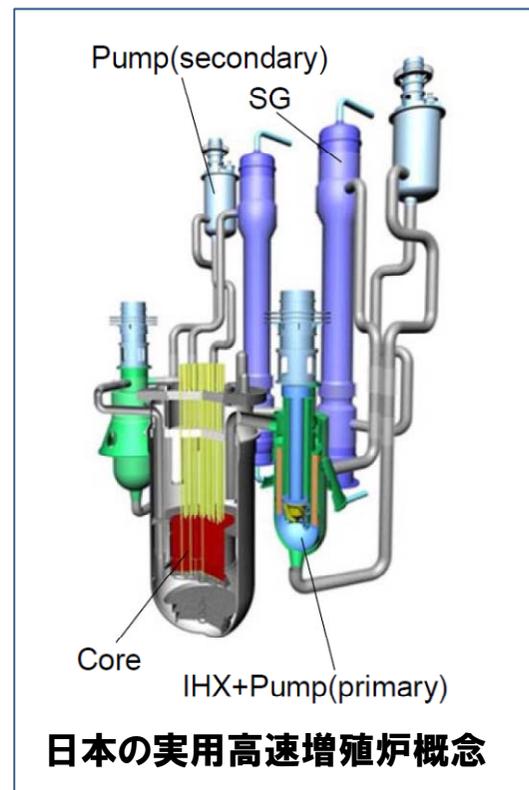
## Westing HouseのAP1000

- 2ループの加圧水型原子炉
- 1.154GWe出力
- 炉心損傷頻度が、最大で、 $2.41 \times 10^{-7}$  /プラント1基/1年
- 受動的な安全設計を採用
- 格納容器の受動冷却システム



# 高速炉開発・世界の状況

- ◆ 資源小国のフランス、韓国、日本は、高速炉サイクルの開発を積極的に推進。特にフランスと日本は、第4世代炉国際フォーラム (GIF) の場も活用して研究開発を進め、安全性等に優れた第4世代炉の実証炉を2020年代に実現する計画。
- ◆ ロシアやインドは、より早期の実用化を指向し、既存技術をベースに積極的な技術開発を推進。2010年代に原型炉/実証炉を建設し、2020年代には商用炉を導入する計画。
- ◆ 経済成長を続けるアジアの国々は、資源制約からの脱却を目標として増殖性を追求。フランス及び日本は、増殖性と環境負荷低減の両面から開発を推進。米国は、当面、環境負荷低減を目標とした開発を指向。
- ◆ 高速炉原型炉を中断した米国でも、ブルーリボン委員会の分科会報告書(案)では、「原子炉及び燃料サイクルの先進的技術(例:アクチノイドリサイクルが可能な高速炉等)への取組は、安全性、経済性、環境性、エネルギー保障の観点から大きな効果をもたらすことが期待されるため、引き続き研究開発を実施すべき。」と提言。
- ◆ なお、環境負荷低減については、高速炉以外に、加速器駆動未臨界炉を使用した研究開発も進められている(例:EUでのMYRRHA計画)



  
中国  
高速実験炉  
(CEFR)  
20MWe  
・初臨界 2010年7月  
・発電電(40%出力) 2011年7月



  
インド  
高速増殖原型炉  
(PFBR)  
500MWe  
・初臨界 2012年予定  
・商業運転開始 2013年予定



  
ロシア  
高速実証炉  
(BN-800)  
880MWe  
・初臨界 2013年予定  
・商業運転開始 2014年予定

