

福島原発行動隊（SVCF）講演
令和3年9月23日 WEBEX

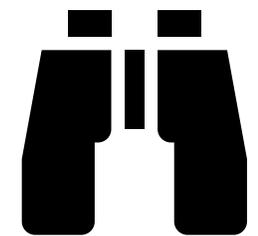
福島第一原子力発電所の廃炉と放射性廃棄物管理

福井大学 附属国際原子力工学研究所
特命教授 柳原敏

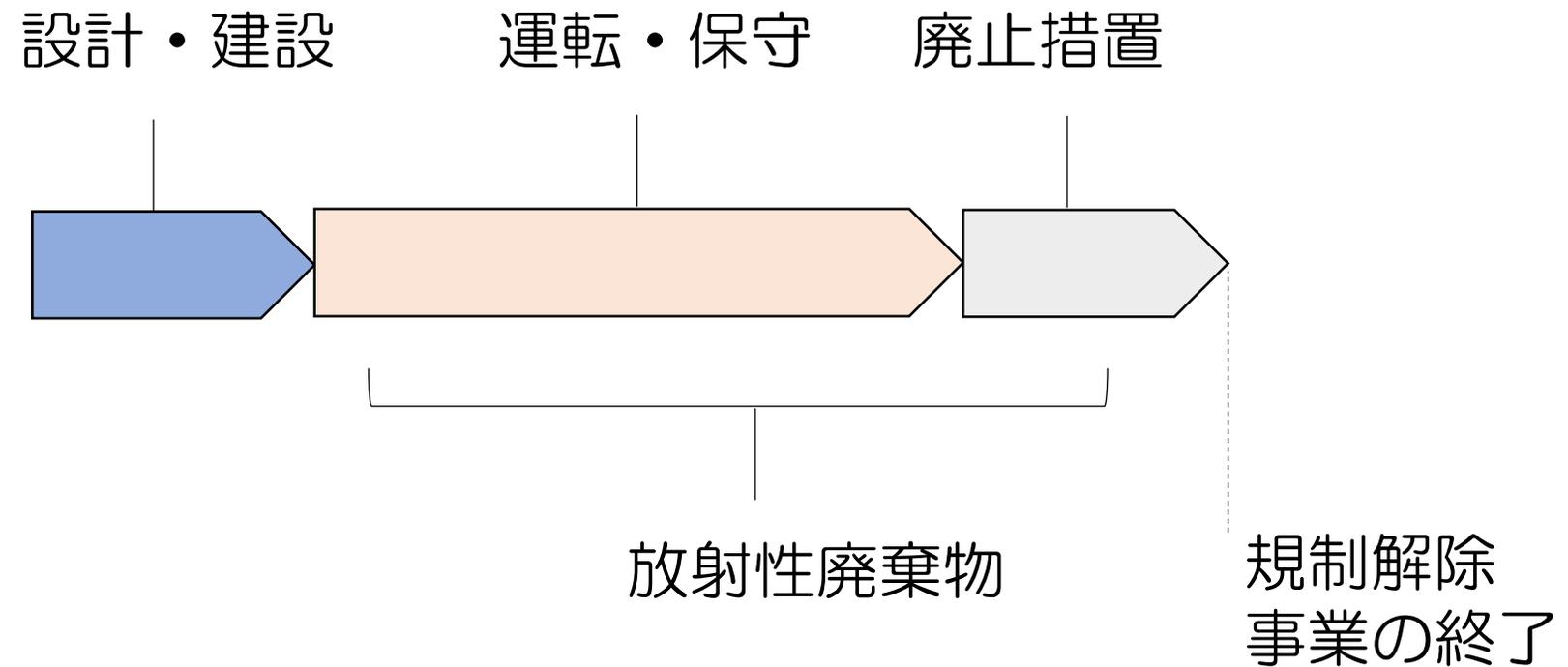
講演の主な項目

- 廃止措置とは
- 廃止措置の現状
- 事故炉の廃炉（廃止措置）
- 原子力学会における検討
- 廃炉（廃止措置）をどう進めるのか

廃止措置とは



プラントライフサイクル



廃止措置とはどういうこと？

原子力施設を建設して事業などを行うときは必ず許可が必要になる。

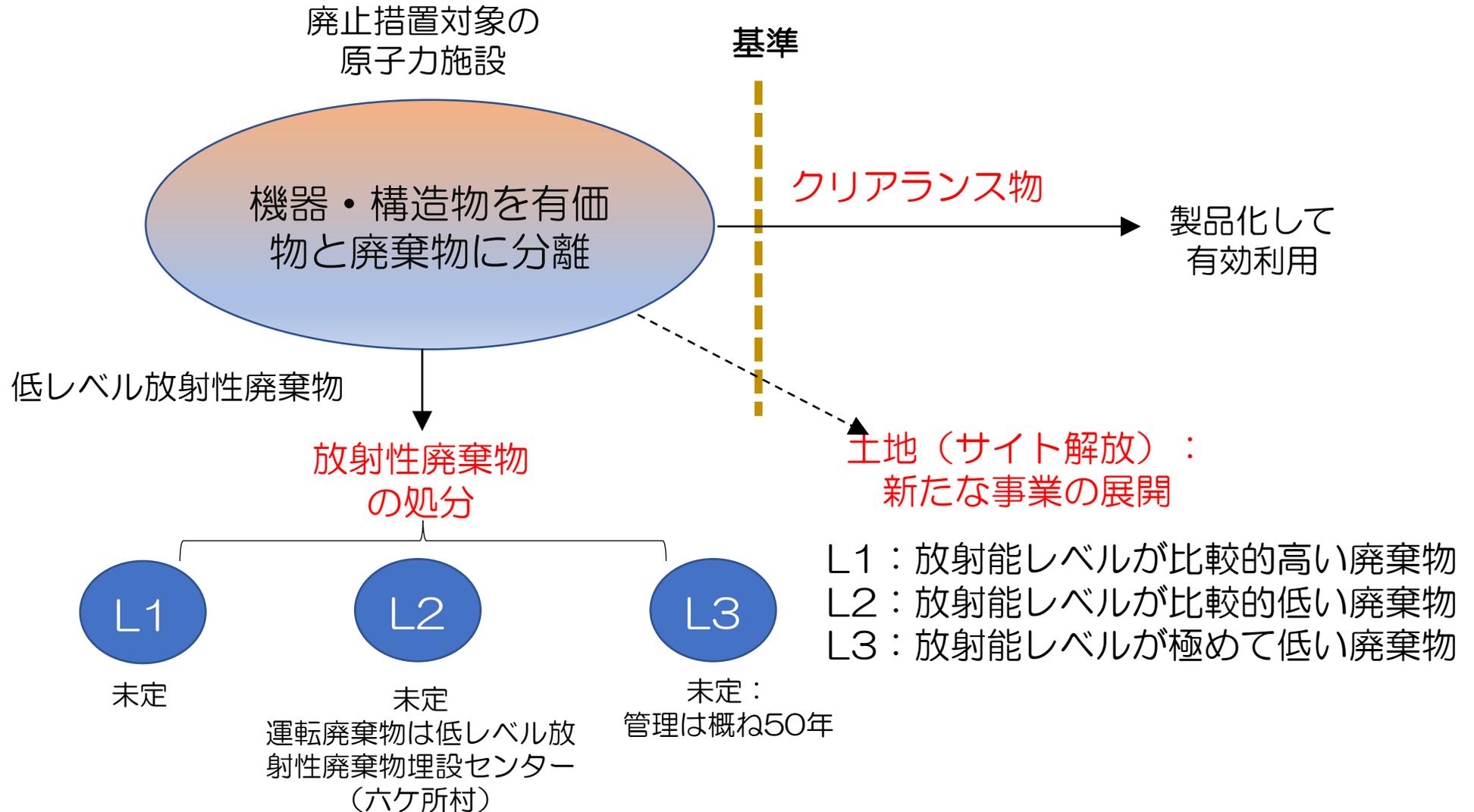
■ 廃止措置で必要なこと

- ✓ 核燃料物質の譲渡
- ✓ 施設や敷地の放射能の除去
- ✓ 放射性廃棄物の廃棄
- ✓ 放射線管理記録の引渡し

← 対象施設にかけられている
規制の解除

資料：実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則 第二百二十一条（廃止措置の終了確認の基準）

廃止措置工事で実施すること



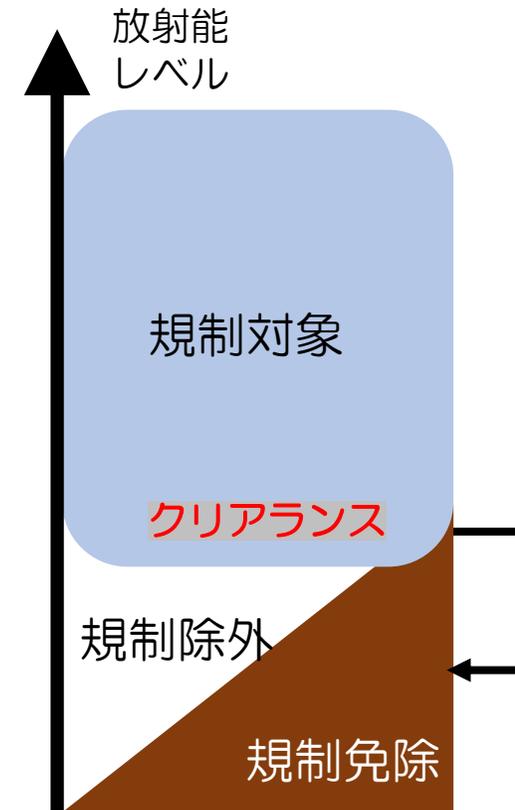
クリアランス

クリアランス

- 人の健康への影響が無視できることから「放射性物質として扱う必要がないもの」として、放射線防護の規制の対象から外すこと。
- 一般的には、原子炉施設から発生する、ごくわずかの放射性核種を含む廃棄物や再生利用可能物が該当。クリアランスされたものは、一般のものとして扱うことが可能。

クリアランスレベル

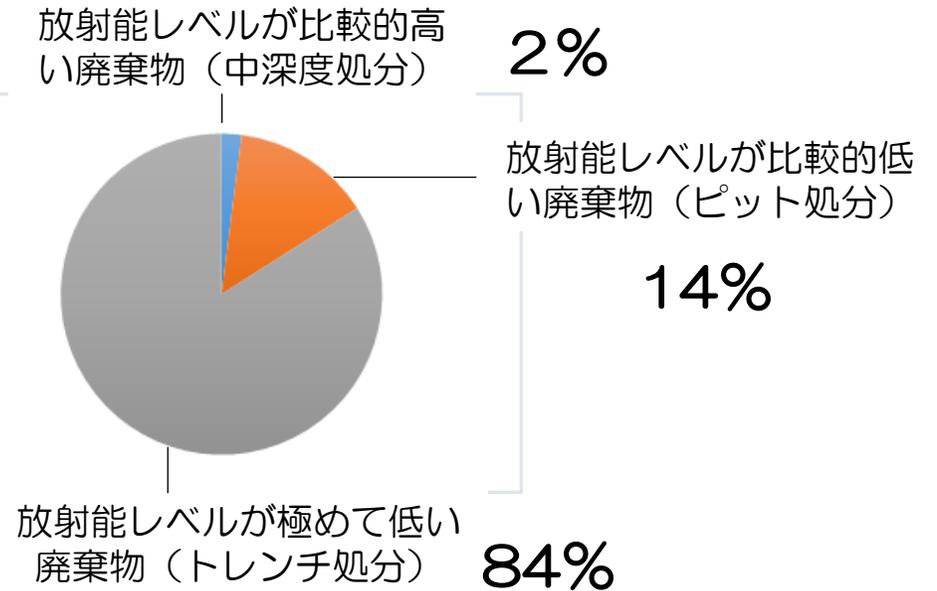
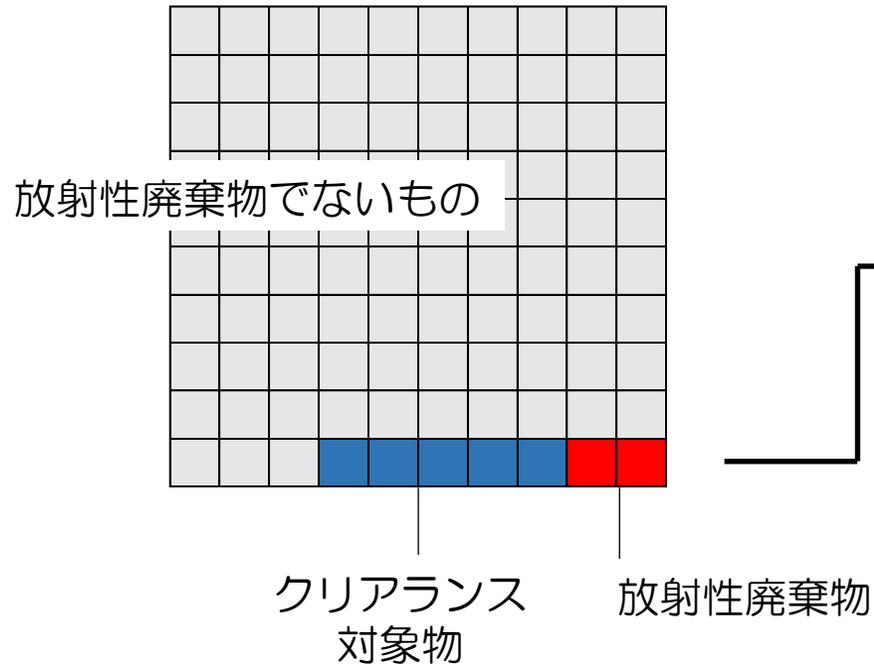
- 「放射性物質」から「放射性物質として扱う必要のない物」を区分する基準となる放射性核種濃度。



放射性廃棄物と有価物の発生量（通常の原子力発電所）

- 廃止措置工事からは低レベル放射性廃棄物が発生
- 発生する廃棄物の大部分はクリアランスレベル以下（有価物）

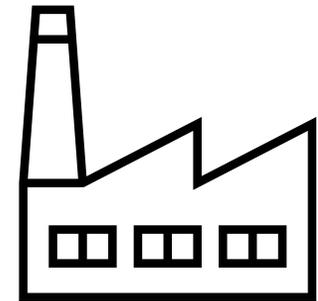
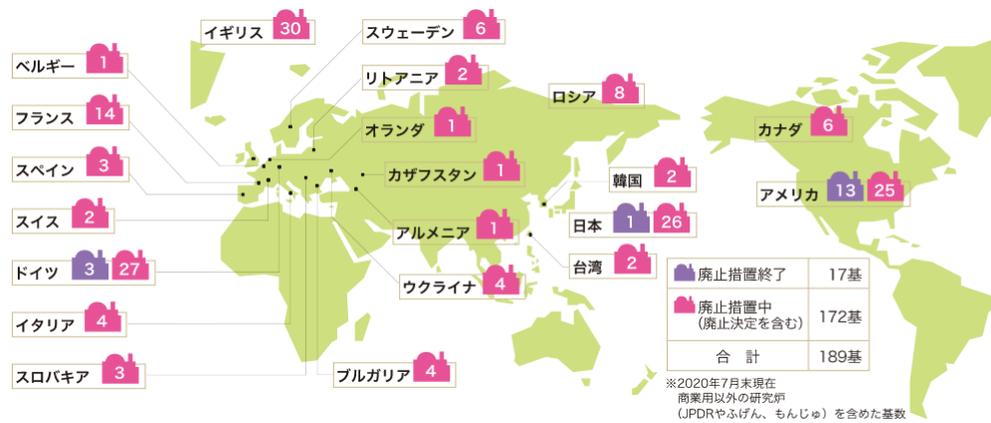
廃止措置で発生する廃棄物と有価物



小型原子力発電所の場合

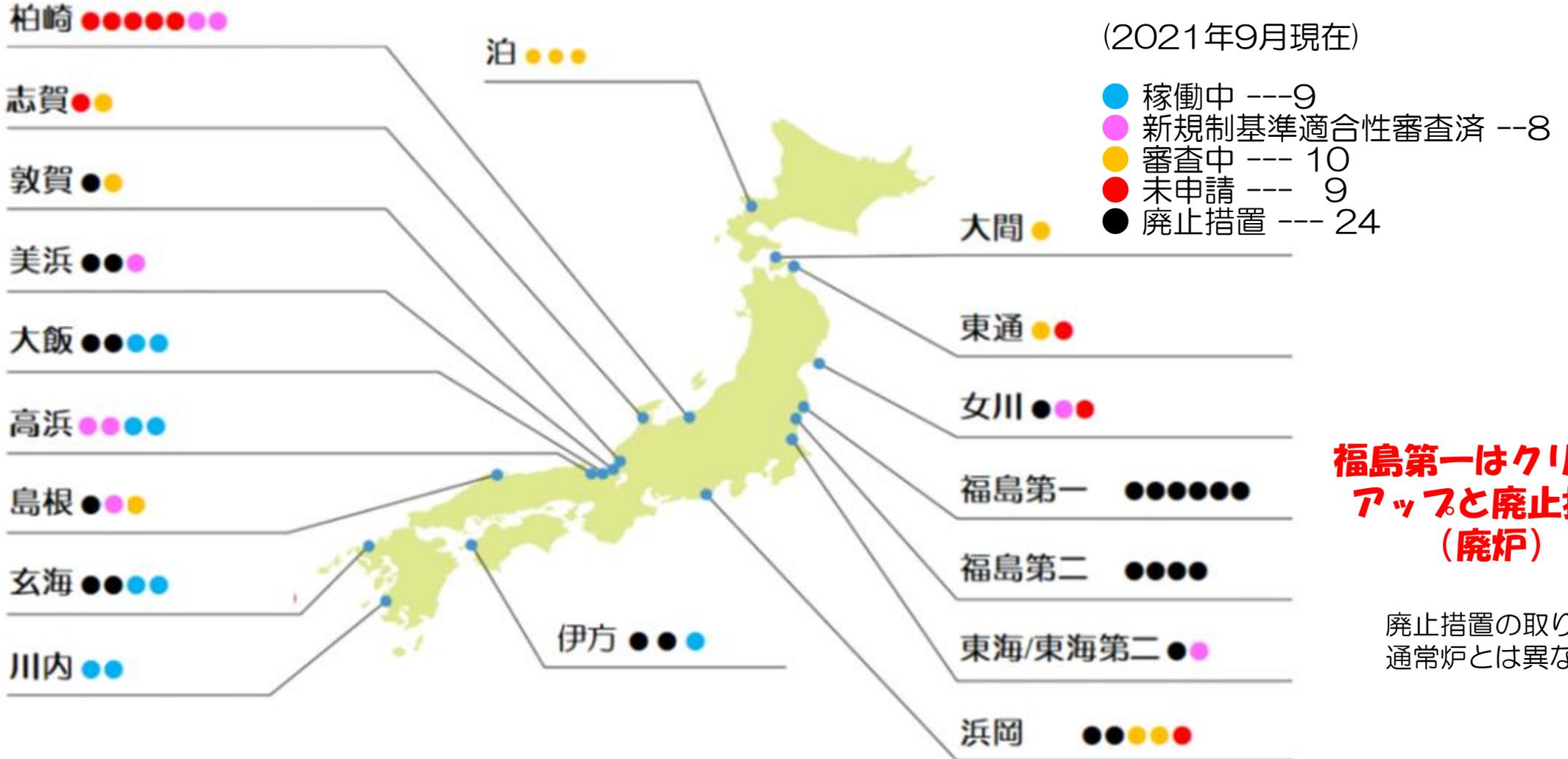
解体物の総量：BWR:約15万トン
PWR:約19万トン

廃止措置の現状



商業用原子力発電所の廃止措置の現状

日本の商業用原子力発電所60基のうち、24基が廃止措置段階



福島第一はクリーンアップと廃止措置(廃炉)

廃止措置の取り組みは通常炉とは異なる

我が国の廃止措置計画

原子力発電所	タイプ	出力 (万kWe)	廃止措置費用の 予測 (億円)	廃止措置期間 (年)
JPDR	BWR	1.5	230 ^{注1}	10
東海発電所	GCR	16.6	885	25
ふげん	新型転換炉 ^{注2}	16.6	750	25
浜岡1号機	BWR	54	379	27
浜岡2号機	BWR	84	462	27
美浜1号機	PWR	34	324	30
美浜2号機	PWR	50	359	30
敦賀1号機	BWR	35.7	363	24
島根1号機	BWR	46	382	30
玄海1号機	PWR	55.9	364	28
伊方1号機	PWR	56.6	407	40
福島第二 (1-4号機)	BWR	各110	697-714 ^{注3}	44
もんじゅ	FBR	28	3750	30
福島第一	BWR	^{注4}	80000	40

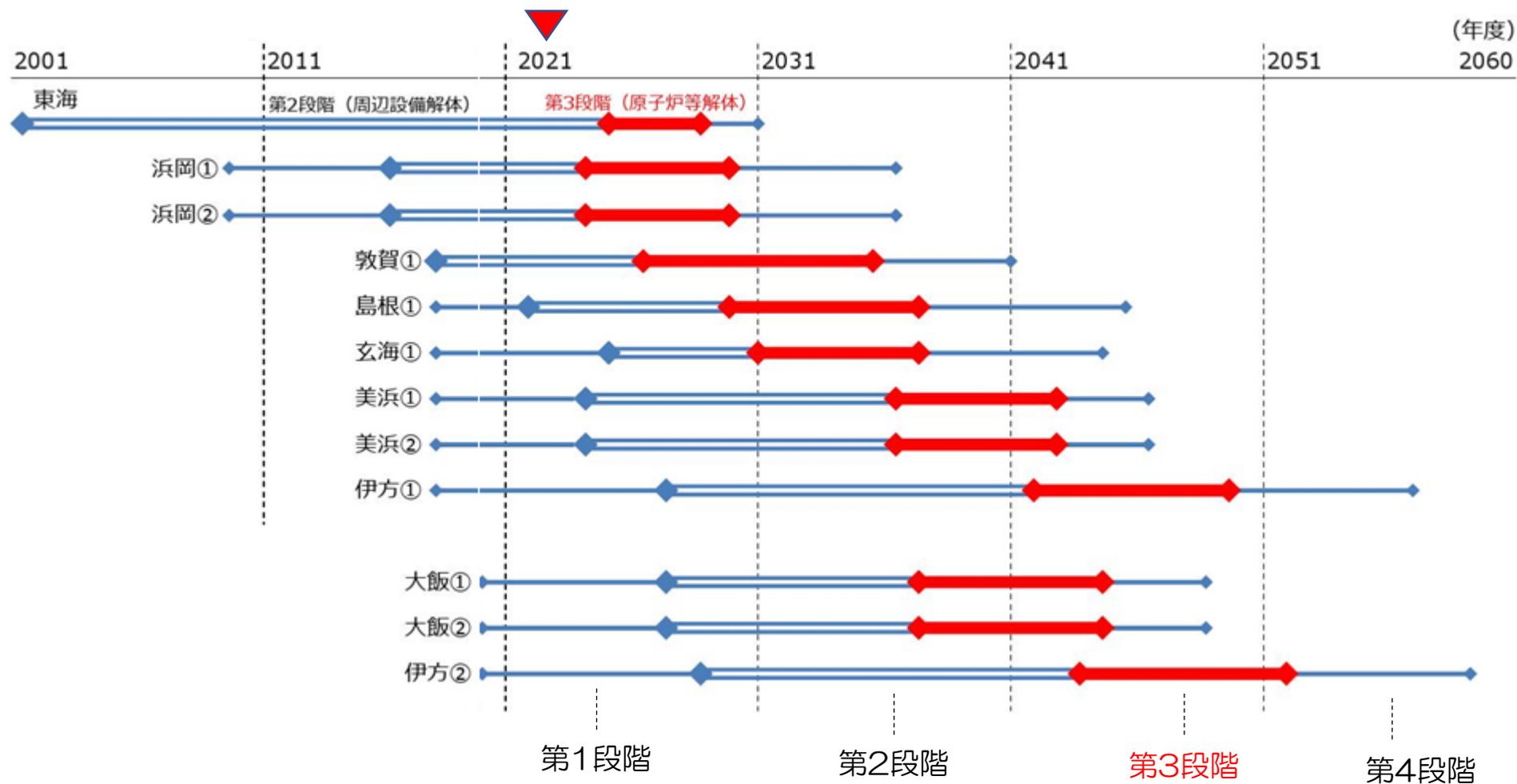
注1：技術開発を含む（実績）

注2：重水減速沸騰軽水冷却型

注3：1号機：697億円、2号機：714億円、3号機：708億円、4号機：704億円

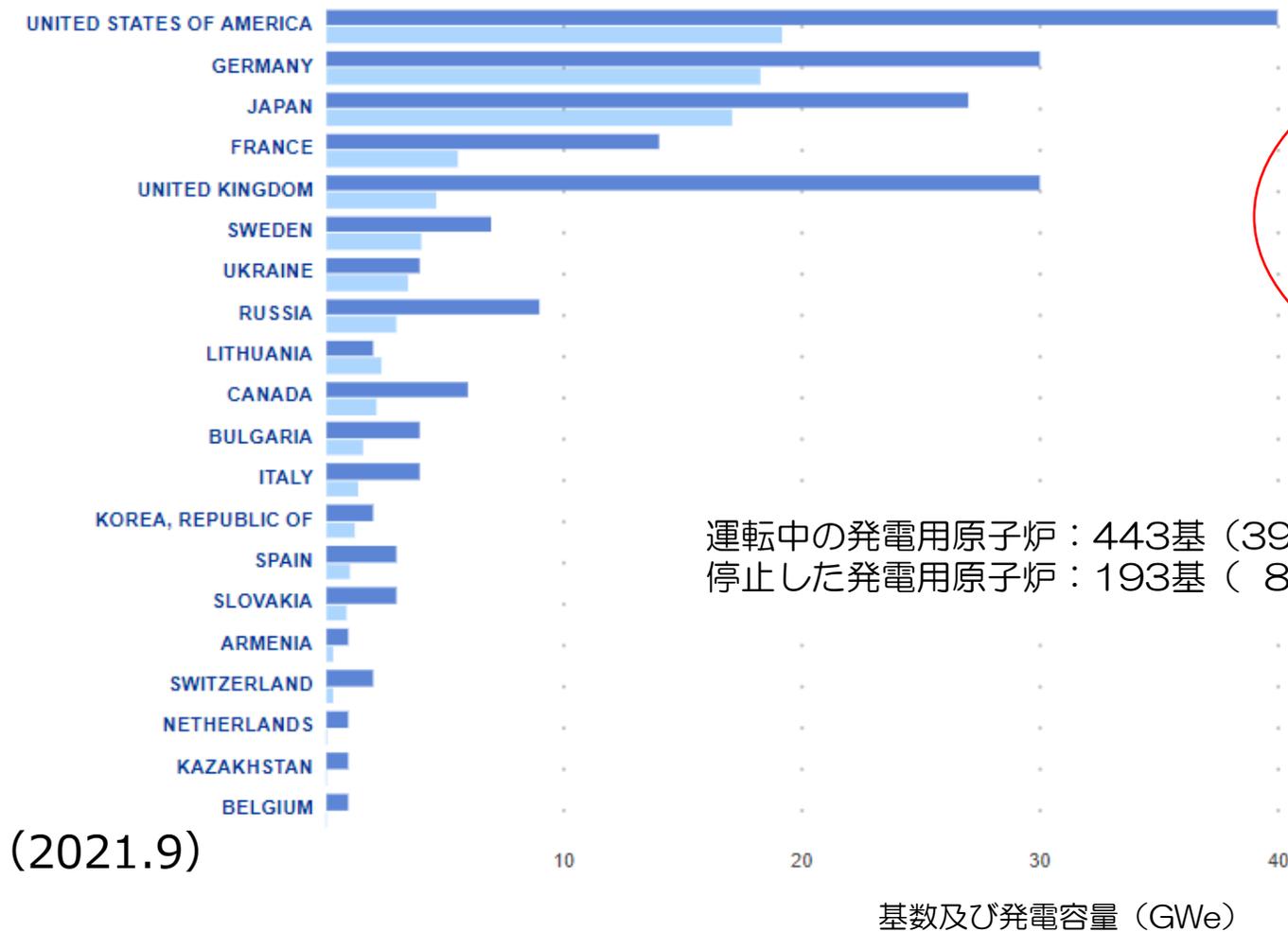
注4：1号機：46万kWe、2-5号機：78.4万kWe、6号機：110万kWe

各原子力発電所の廃止措置工程（計画）



- 現在、周辺設備を解体する第2段階にあるのは、4基。
- 原子炉等を解体する第3段階は、**2020年代半ば以降に本格化**する見通し。

世界の廃止措置



(2021.9)

IAEAデータベース

<https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>

IAEA, Selection of decommissioning Strategies: Issues and Factors, IAEA-TECDOC-1478, 2005

戦略の基本要素

● 工程

- ✓ DECOM : 即時解体
- ✓ SAFESTOR: 遅延解体（安全貯蔵）

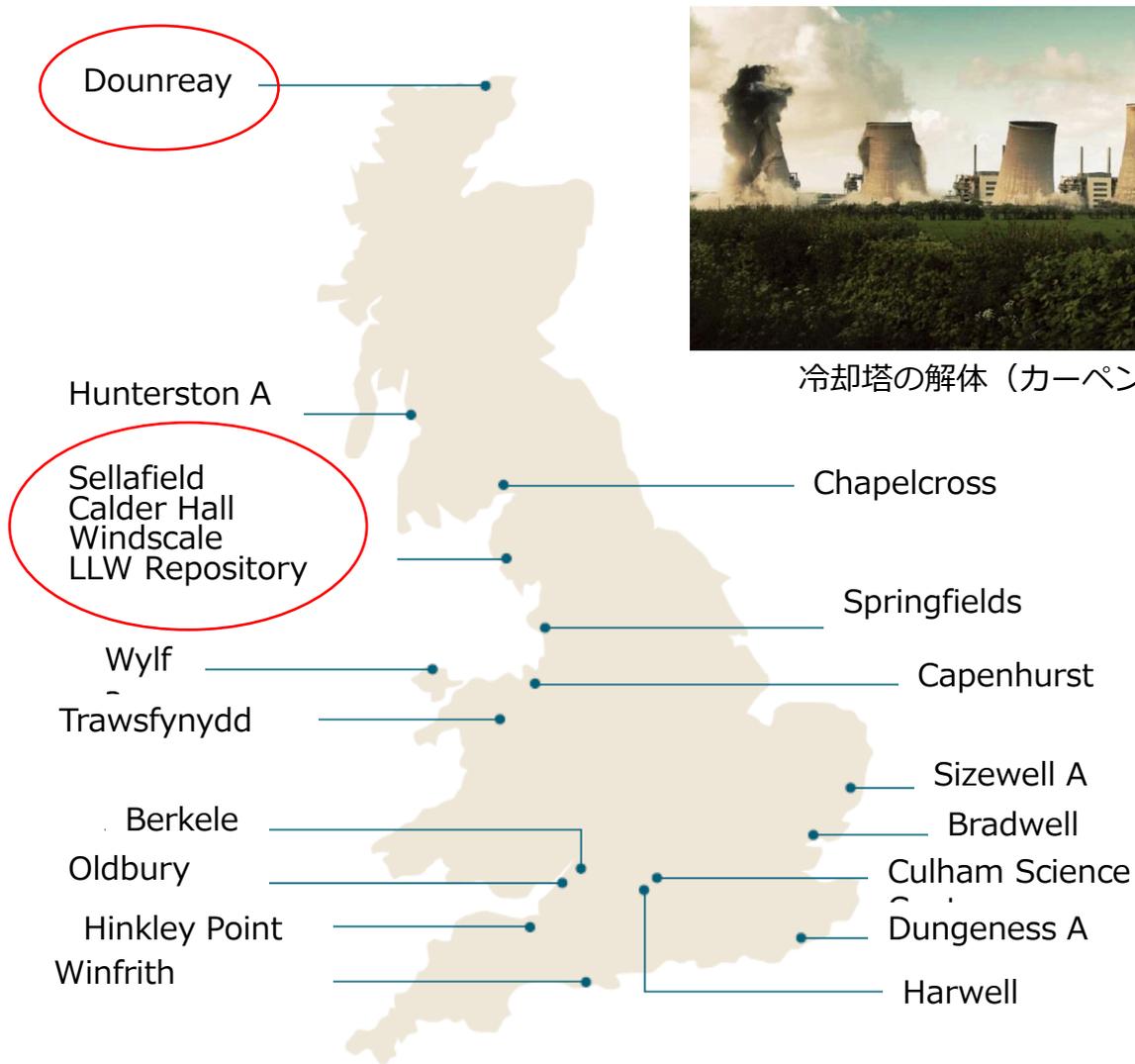
● エンドステート

- ✓ グリーンフィールド
- ✓ ブラウンフィールド

戦略決定に係る基本要因（IAEA）

1. 国の政策と規制の枠組み
2. 戦略の実施に必要な経済的資源/コスト
3. 使用済み燃料と廃棄物管理
4. 安全性と環境影響
5. 知識管理と人的資源
6. 社会的影響とステークホルダーの参加
7. 適用可能な技術

英国の主要な原子力サイト



冷却塔の解体 (カーペンクロス)



冷却水ポンプ施設の解体 (ブラッドウェル)



余剰な貯蔵施設の解体 (セラフィールド)

廃炉戦略に係る分析

IAEAデータベースに基づく162基のプロ
ジェクトを対象に戦略決定の要因を分析注

対象とした決定要因

- 運転期間
- 人材育成
- 廃炉の資金
- 社会的受容性*
- 社会的寛容性**
- 廃炉の経験
- 原子炉の型式
- 運転履歴
- 放射性廃棄物管理施設の可能性
- サイト内の原子炉基数
- 技術的可能性

*原子力・廃棄物などを対象

**社会的な開放性など

● 工程

即時解体

- 人材育成（高）
- 廃炉の資金（有）
- 社会的寛容性（高）
- 廃炉の経験（有）

● エンドステート

グリーンフィールド

- 社会的寛容性（高）
- 廃炉の経験（有）
- 運転履歴（長期）

遅延解体（安全貯蔵）

- 複数基のサイト
- 社会的受容性（高）
- 運転履歴（長期）
- GCR、RBMK、事故炉

ブラウンフィールド

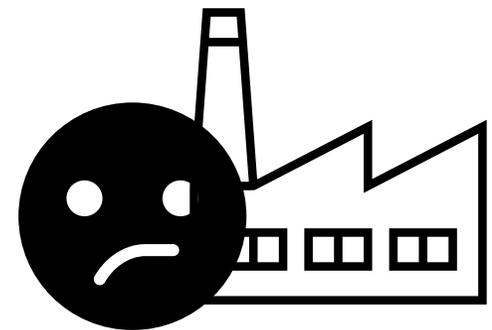
- 社会的受容性（高）
- 複数基のサイト
- 事故炉

注：Young A Suh, Carol Hornibrook, Man-Sung Yim, Decisions on nuclear decommissioning strategies: Historical review, Progress in Nuclear Energy 106 (2018) 34-43

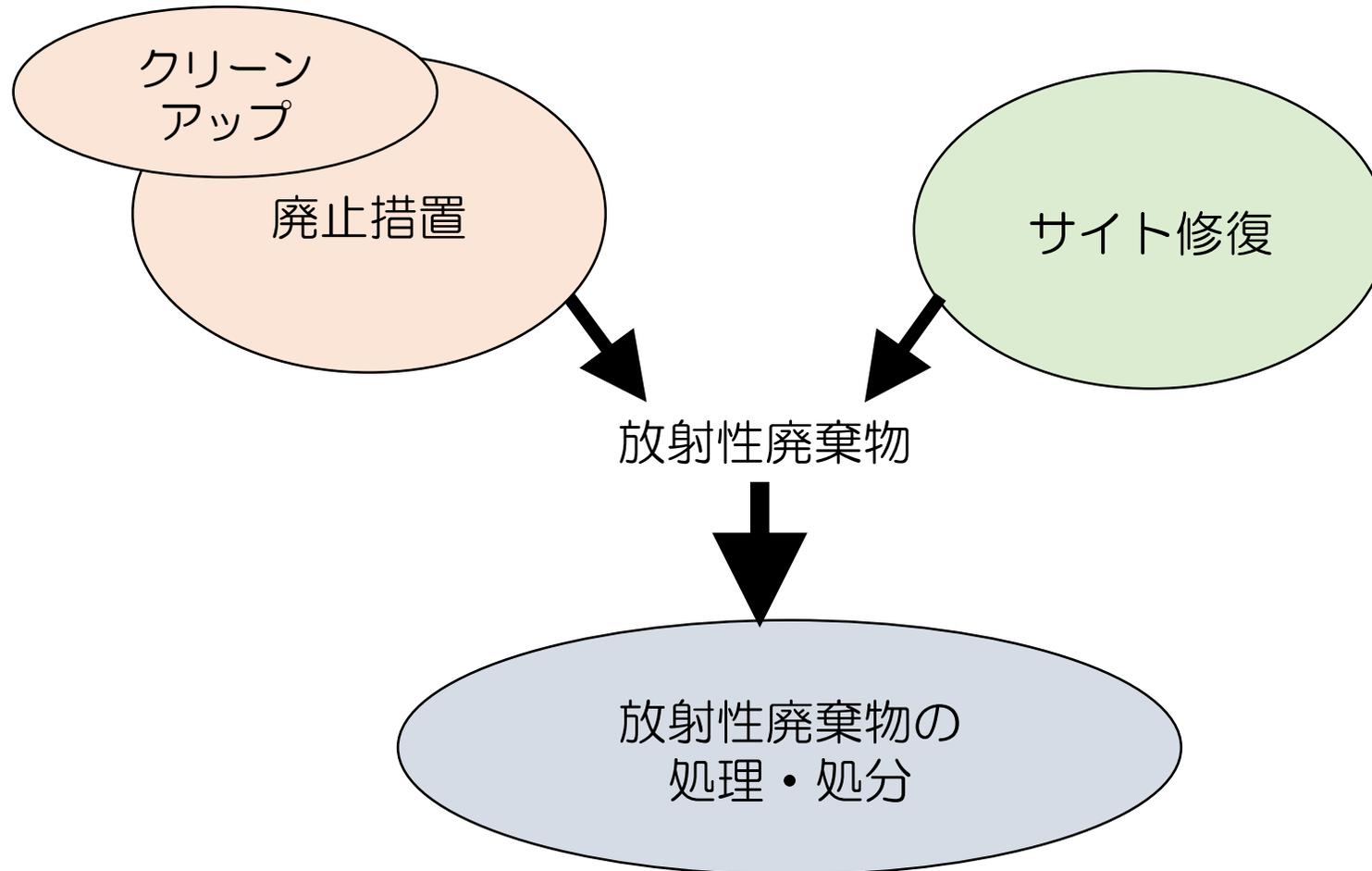
事故炉の廃炉（廃止措置）

事故の結果と影響

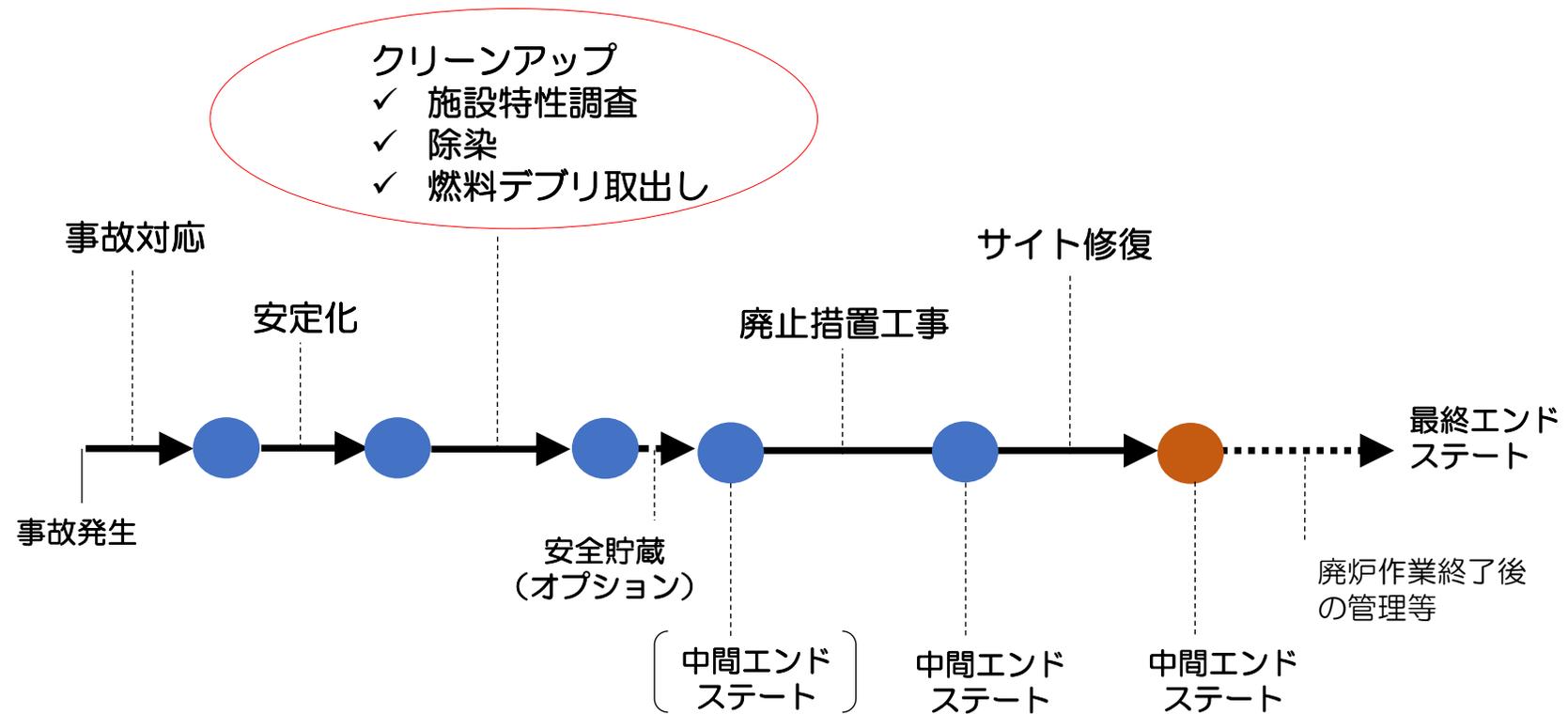
- サイト周辺及びサイト内で放射線リスクの増大
- 放射性廃棄物の大量発生（除染廃棄物、等）
- 廃止措置・施設回復のための大量な資源投入
- 長期に渡る廃止措置工事の必要性
- 原子力に対する社会的な信頼の失墜



原子力事故を経験したサイト（施設）に必要なこと



最終状態に至るタイムライン (IAEA)

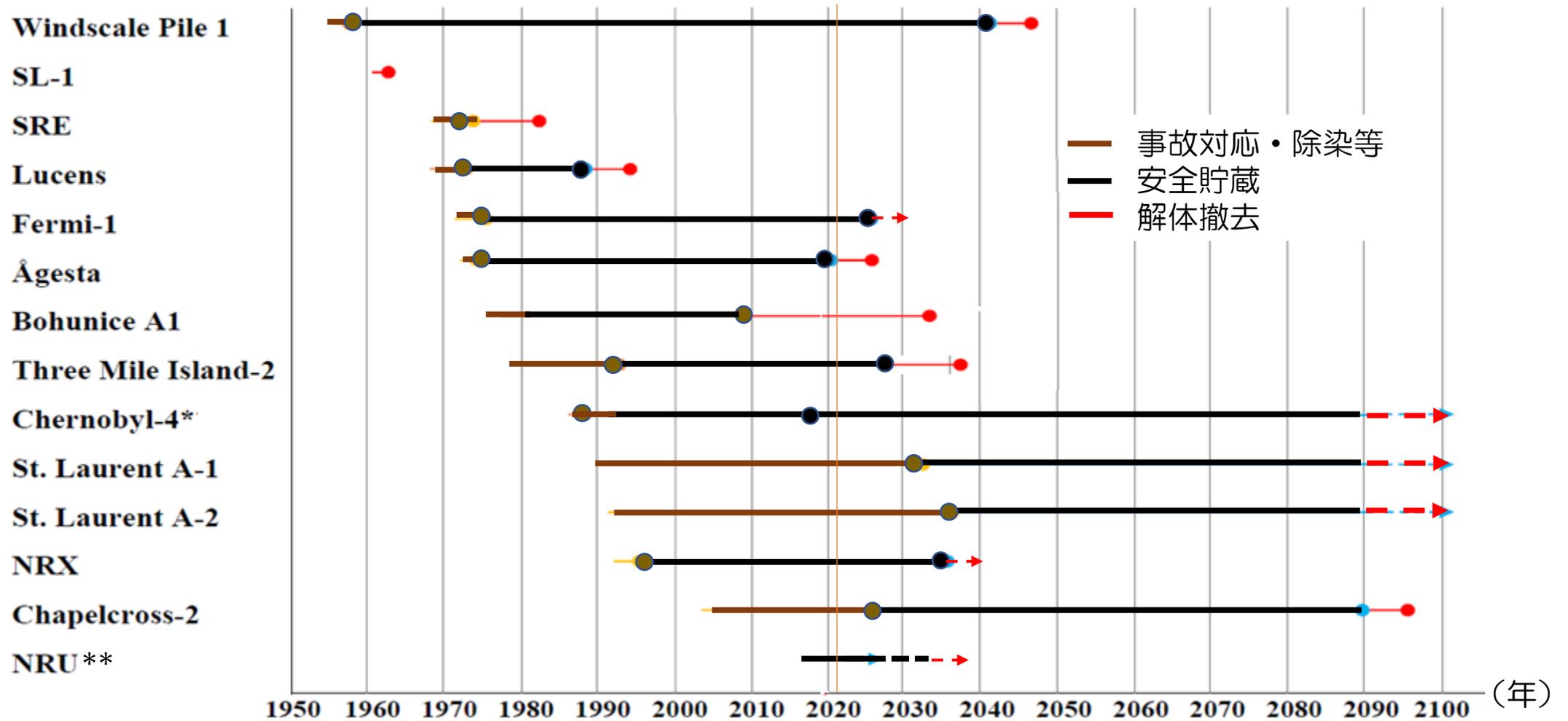


事故で停止した原子炉 (INESレベル4以上)

NO	原子炉	国	形式	利用	出力	事故発生年	備考
1	NRX	カナダ	軽水冷却重水炉	研究炉	10 (MWt)	1952	再稼働・廃炉
2	Windscale Pile 1	英国	黒鉛減速ガス冷却炉	軍用	180 (MWt)	1957	廃炉
3	NRU	カナダ	重水冷却炉	研究炉	200 (MWt)	1958	再稼働・廃炉
4	SRE(Sodium Reactor Experiment)	米国	黒鉛減速ナトリウム冷却炉	実験炉	20 (MWt)	1959	廃炉終了 ○
5	SL-1	米国	沸騰水型軽水炉	軍用	3 (MWt)	1961	廃炉終了 ○
6	Fermi 1	米国	高速増殖炉	原型炉	65 (MWe)	1966	再稼働・廃炉
7	Chapelcross-2	英国	黒鉛減速ガス冷却炉	商用炉	60 (MWe)	1967	再稼働・廃炉
8	Ågesta	スウェーデン	加圧水型重水炉	商用炉	12 (MWe)	1968	再稼働・廃炉
9	St. Laurent A-1	フランス	黒鉛減速ガス冷却炉	商用炉	405 (MWe)	1969	再稼働・廃炉
10	Lucens	スイス	重水減速ガス冷却炉	実験炉	28 (MWt)	1969	廃炉終了 ○
11	Bohunice A1	スロバキア	重水減速ガス冷却炉	商用炉	143 (MWe)	1977	廃炉
12	Three Mile Island-2	米国	加圧水型軽水炉	商用炉	808 (MWe)	1979	廃炉
13	St. Laurent A-2	フランス	黒鉛減速ガス冷却炉	商用炉	530 (MWe)	1980	再稼働・廃炉
14	Chernobyl-4	ウクライナ	黒鉛減速軽水炉	商用炉	1000 (MWe)	1986	廃炉

INES : International Nuclear and Radiological Event Scale
国際原子力事象尺度

事故で停止した原子炉の廃炉工程



*シェルターの中で解体作業：2117年までに燃料デブリの取り出し

**安全貯蔵期間は未定

「安全貯蔵」の選択

安全貯蔵の実施理由

- 損傷燃料・燃料デブリの取出しに係る技術開発
- 放射能の減衰による作業員の被ばく低減
- 処分施設の確保
- 他の原子力施設の廃止措置工事と並行実施
- 廃止措置費用の確保



- 戦略決定には廃炉経験の活用やサイト内での他の活動とのバランスを考慮

その結果として

- サイト修復が実施されるまで放射性廃棄物の処分が先送り
- 最終段階で放射性廃棄物や汚染物の行き先（中間貯蔵施設も含む）が決められる

廃止措置と環境修復：米国の取り組み

米国エネルギー省のEM（環境管理）計画

- マンハッタン計画及びその後の核開発などで使用されて不要になった施設の廃止措置
- 管理が不適切だったことにより汚染した土壌などの撤去に係る活動

EM計画の概要

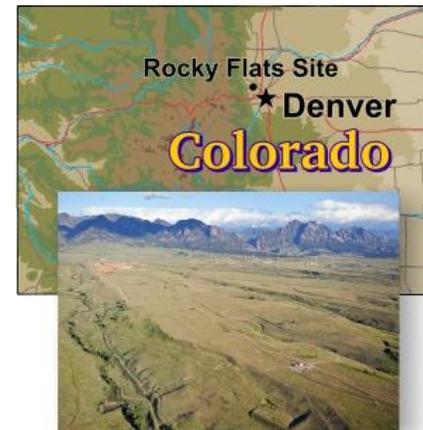
- 1989年に開始
- 米国35州に及び約8000km²の環境修復
- 参加人員：約30,000人（契約会社を含む技術者、科学者等）
- 年間の予算：約50億ドル

主な成果：環境修復の実現（2000年代後半）

- ロッキーフラッツ
- ファーナルド
- マウンド



EMプログラムのサイト



ロッキーフラッツサイト

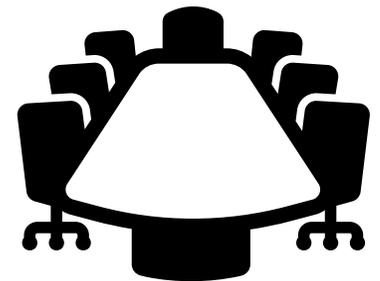


米国におけるサイト修復活動

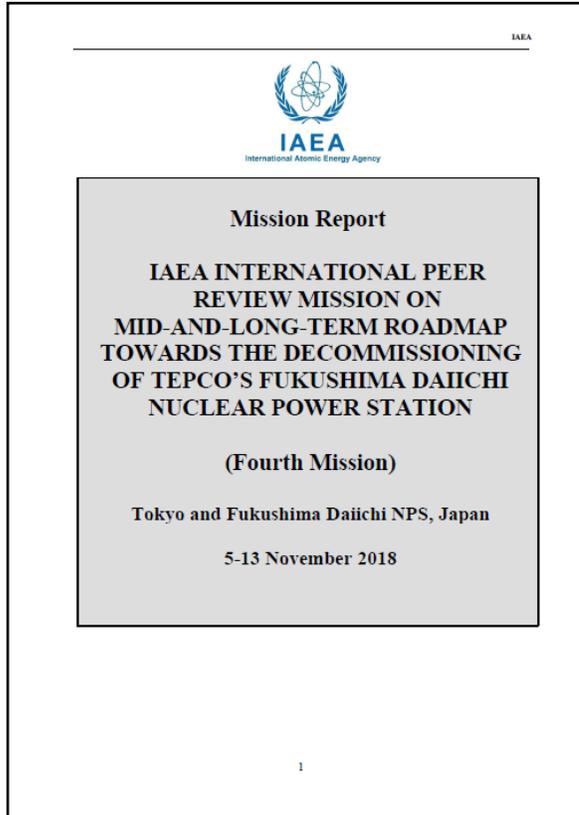
原子力サイト	跡地利用形態(計画を含む)	跡地利用形態の決定に影響した要因
Fernald (4.2 km ²)	処分施設 (増設) ビジターセンター, 自然公園	全ての廃棄物のサイト外搬出はコストの面から実施困難と判断 ステークホルダーグループがサイト内処分に同意
Rocky Flats (27.6 km ²)	制度的管理エリア 野生生物保護区	汚染土壌の除去コストが膨大 (除去しない場合と比較して7倍以上のコスト)
Mound Site (1.2 km ²)	ビジネス地区	居住地区がサイトに隣接 地域住民は雇用及び経済的便益のための跡地利用を要望
Oak Ridge Reservation (139.6 km ²)	レクリエーションエリア 産業エリア(原子力利用/非原子力) 低レベル廃棄物処分施設(増設) 廃棄物保管施設(TRU waste)	修復前に低レベル放射性廃棄物の処分実績あり 地域住民は雇用維持できる跡地利用を要望
Savannah River National Laboratory (802.6 km ²)	産業エリア(原子力利用), 自然保護・資源管理エリア 低レベル廃棄物処分施設 (既存施設) 低レベル廃棄物処分施設 (増設)	修復後も原子力プログラムを継続する計画 遠隔地のため, 産業目的での利用に不向き
Hanford (1,517.7 km ²)	廃棄物の保管及び処分エリア 産業エリア(食品製造・加工・流通業等) 農業エリア, 研究開発施設 レクリエーションエリア 生態系保護エリア, 制度的管理エリア	Fernald及びWeldon Springからウラン金属を受入れ 研究開発施設を継続して利用する計画 修復目標は地域住民やステークホルダーと20年以上の対話を経て設定

○ : 修復活動が終了 () : サイトの面積

原子力学会における検討



国際機関からの提言：総合的な廃炉計画の策定



Advisory Point 3

The IAEA Review Team advises the Government of Japan and NDF to prepare themselves now in order to develop during Phase 3 **an integrated plan for the completion of decommissioning of the entire Fukushima Daiichi site**; including all six units, the ancillary radioactive waste treatment and storage facilities, and **the management of all forms of radioactive waste** arising during the decommissioning activities.

Careful consideration should be given to the assumptions used and how to express the inherent uncertainties involved. In order to successfully produce such a plan, significant effort is expected to be required **to determine the options and scenarios that lead to a credible plan for the long term.**

- 1Fサイト全体の総合廃炉計画の策定
- 長期計画の選択肢とシナリオの決定

中間報告における5つの提言

第6章：提言

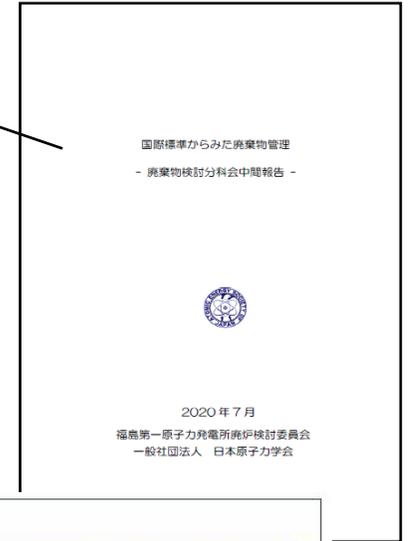
1. 廃炉の定義
2. エンドステートに係る議論の必要性
3. ステークホルダーによる討議機会の整備
4. 放射性廃棄物の低減に係る取り組みの早期実施
5. 放射性廃棄物処分に係る制度の見直し

発生量抑制：クリアランス、スチュワードシップなど放射性廃棄物を低減することを前提にした、廃炉・サイト修復の計画及び制度の検討

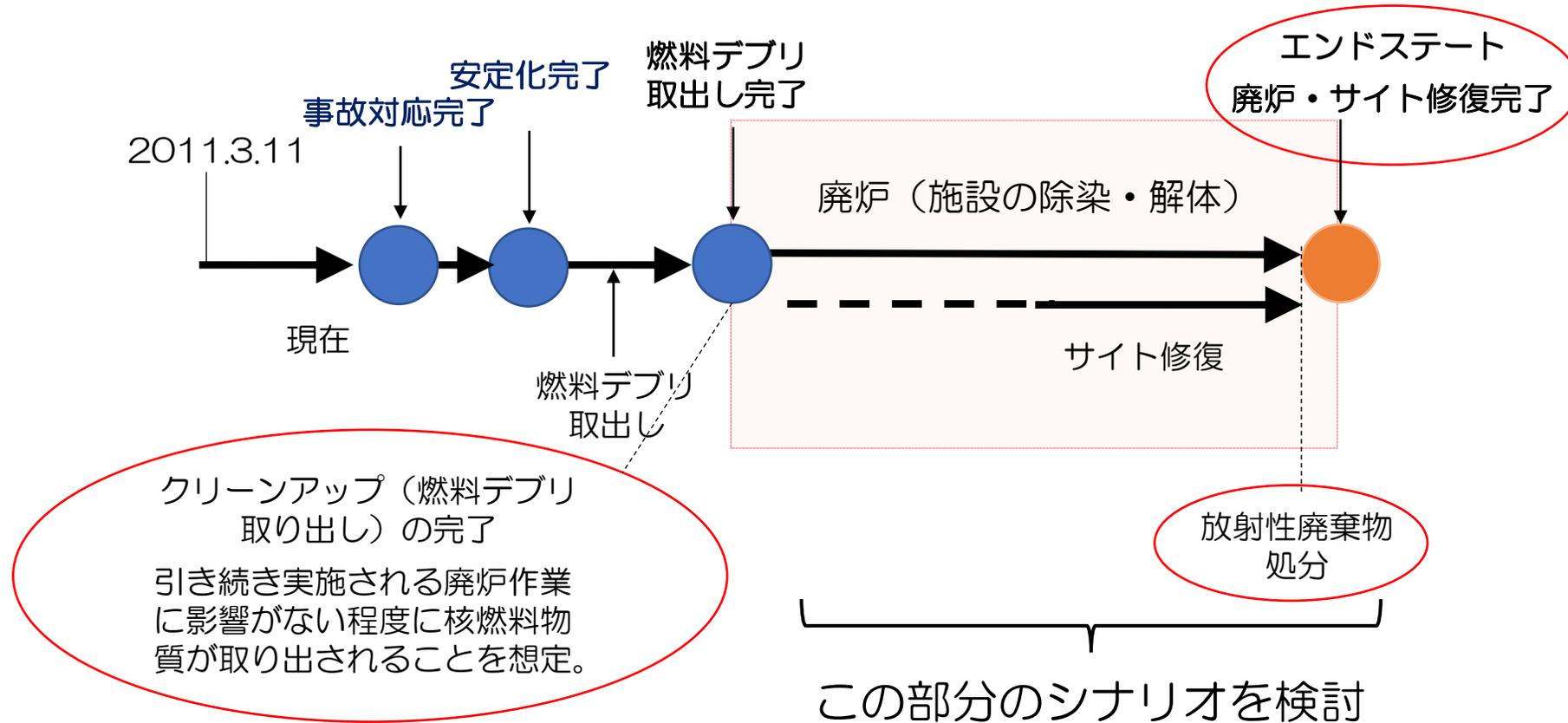
再利用・再使用：クリアランスレベルよりも多少放射能濃度の高いものであっても、作業員の安全性を評価した上で1Fサイト内での限定再利用の検討

表題

国際標準からみた廃棄物管理
-廃棄物検討分科会中間報告-

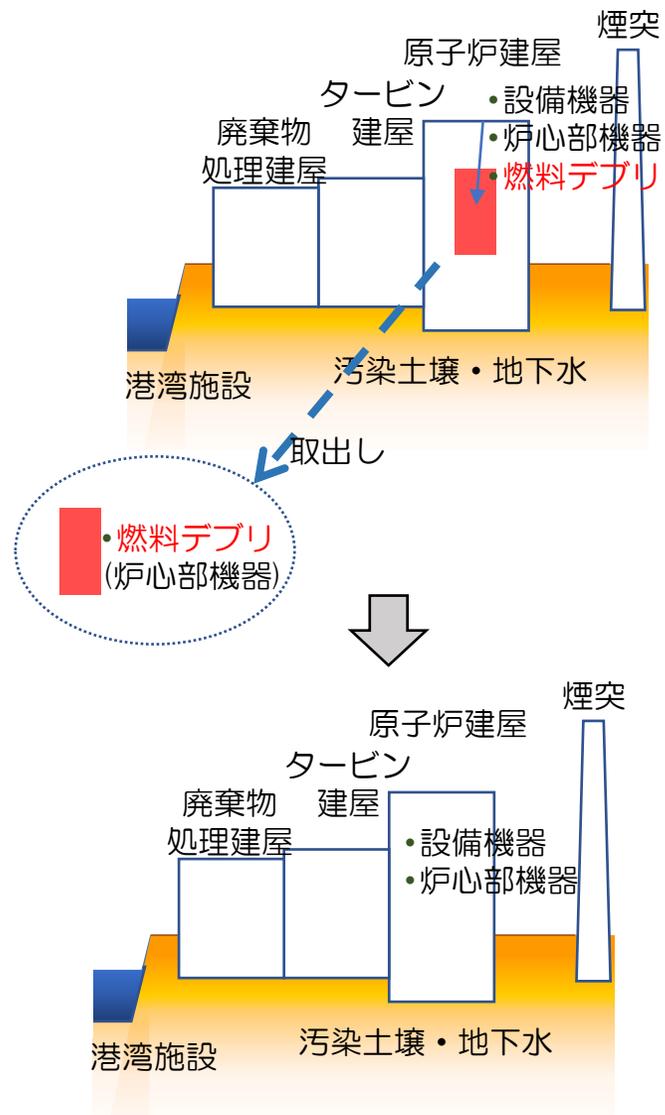


エンドステートに至るシナリオの検討



- フェーズ1 : 廃炉作業のうち主要な原子力施設(原子炉建屋・タービン建屋)の解体が終了するまで
- フェーズ2 : 残存する他の建造物の解体作業が終了するまで
- フェーズ3 : 汚染土壌・地下水の除去・処理等サイト修復が終了するまで
- フェーズ4 : サイト利用に必要な準備が終了するまで (廃棄物の管理などを含む)

施設の撤去に係る選択肢

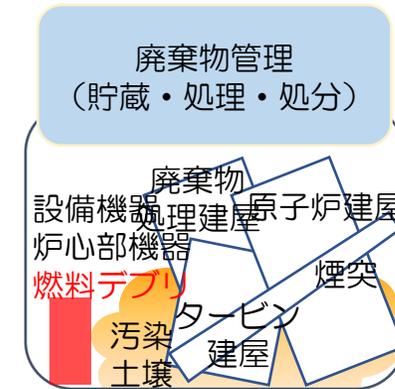


1. 全て撤去

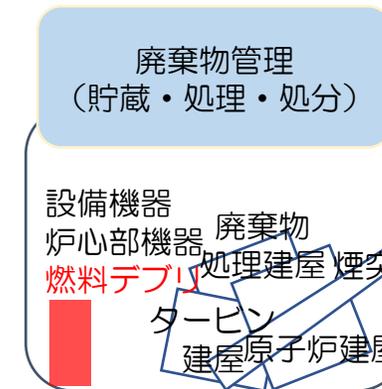
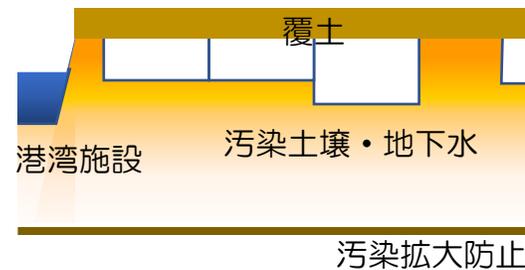


【廃炉】機器・構造物の全量を撤去。

【サイト修復】敷地内全域の汚染土壌を撤去。



2. 地上部のみ撤去



シナリオの比較（4ケース）

シナリオ1（即時、全量撤去）

- 廃炉作業により機器・構造物の全量を撤去
- サイト修復（汚染撤去）によりサイト全域を制限なし敷地解放

シナリオ2（即時、部分撤去）

- 廃炉作業により建屋・地下構造物の一部を解体・撤去、残存物は管理
- 発生する放射性廃棄物を管理区域で保管
- サイト修復（汚染撤去）によりサイトの一部を解放
- 廃棄物の搬出が完了した時点でサイトの多くの部分を解放

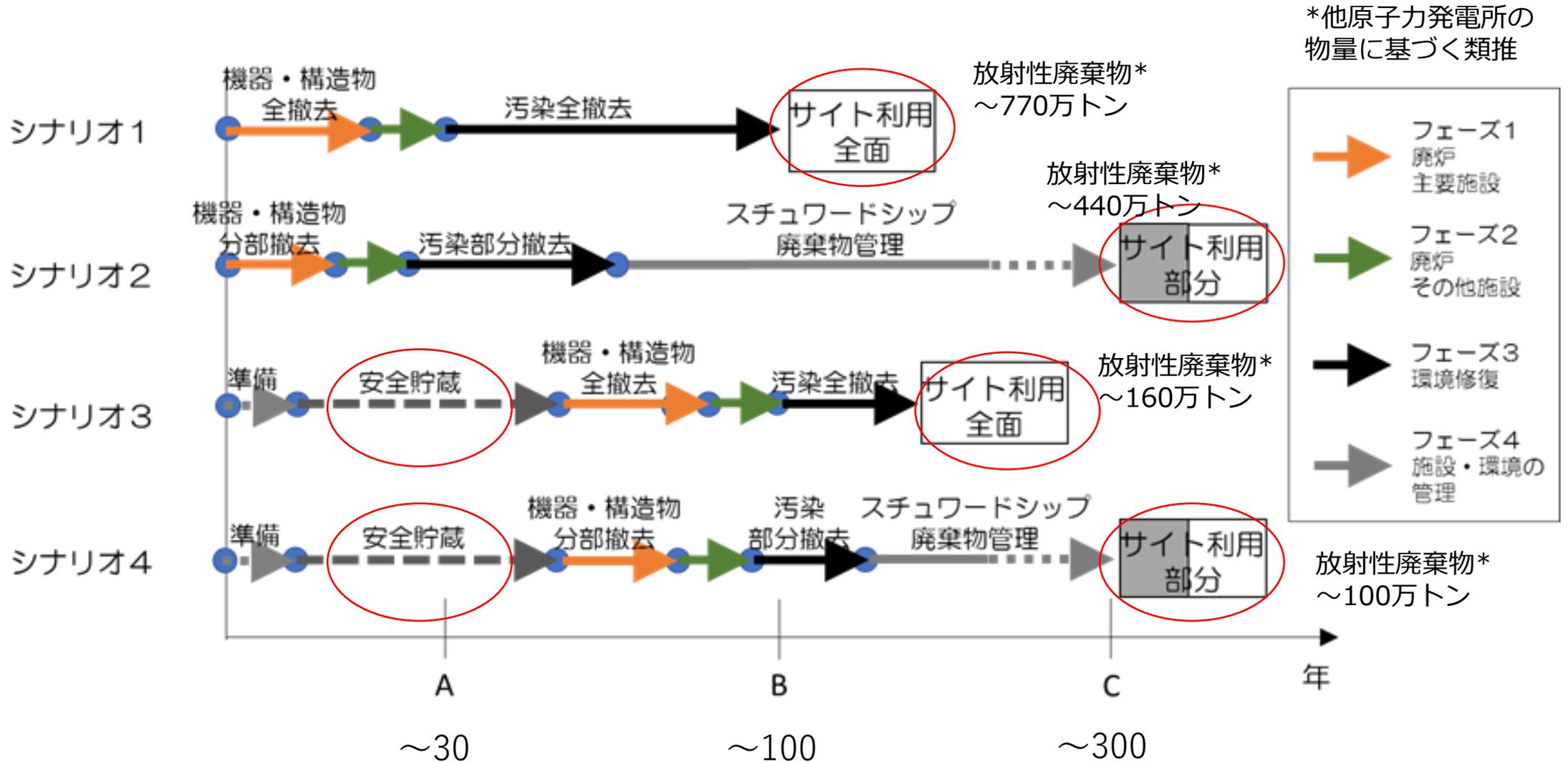
シナリオ3（遅延、全量撤去）

- 発生する放射性廃棄物を管理区域で保管
- 処分施設が確保された時点で放射性廃棄物を搬出
- サイト修復（汚染撤去）によりサイトの一部を解放

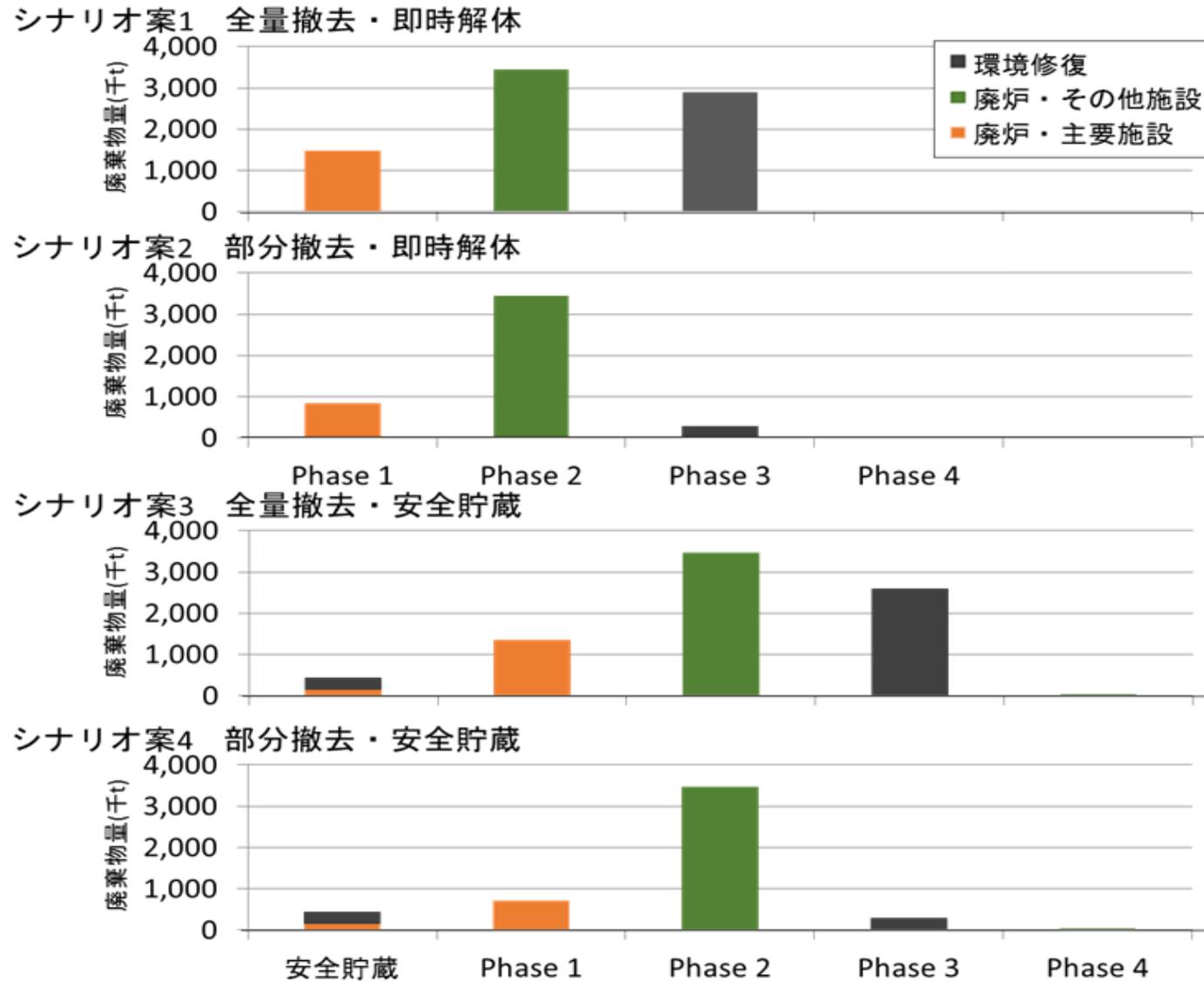
シナリオ4（遅延、部分撤去）

- 発生する放射性廃棄物を管理区域で保管
- 処分施設が確保された時点で放射性廃棄物を搬出
- サイトの汚染は安全性を評価して監視（スチュワードシップ）

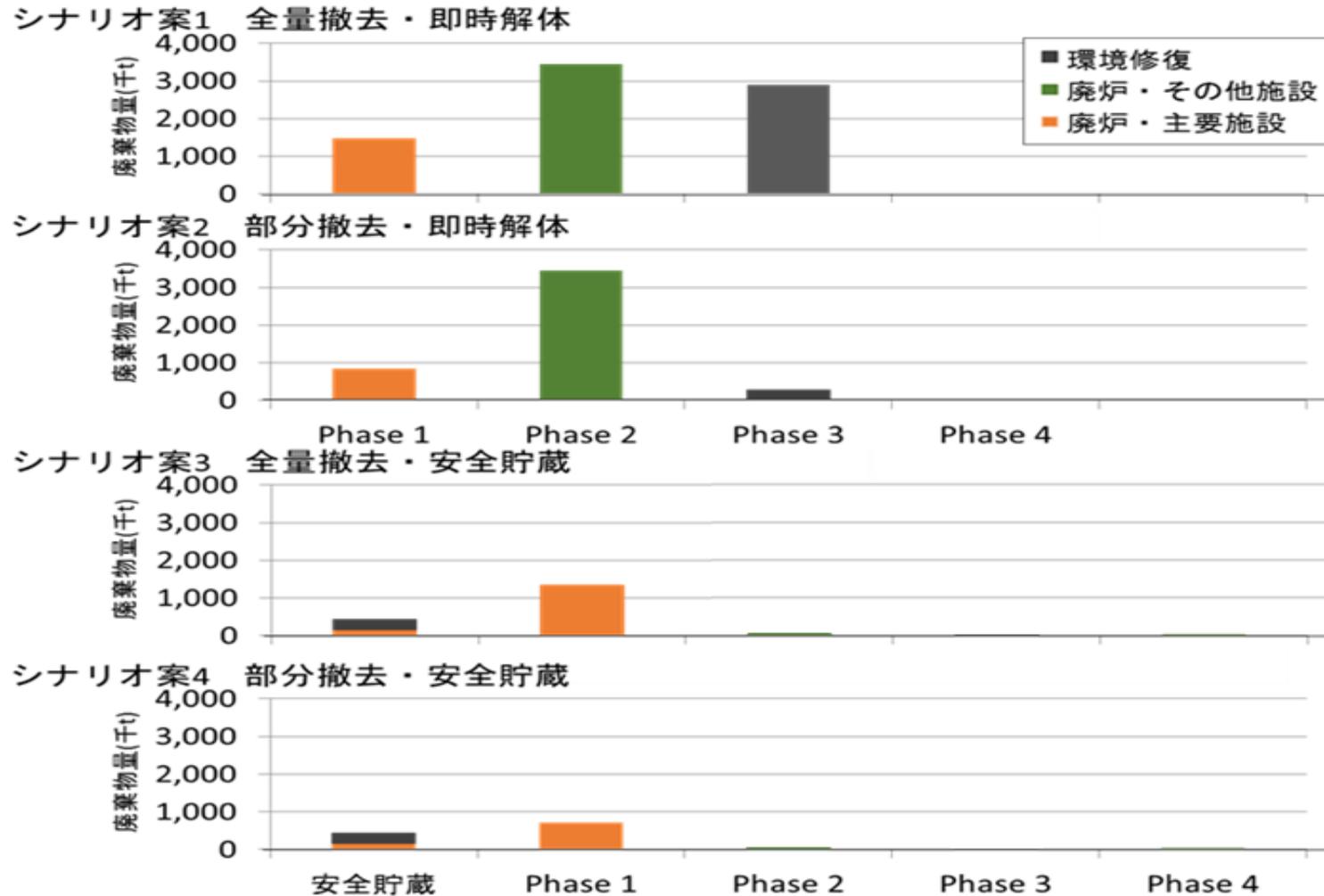
シナリオの比較例



シナリオの比較例（廃棄物量）



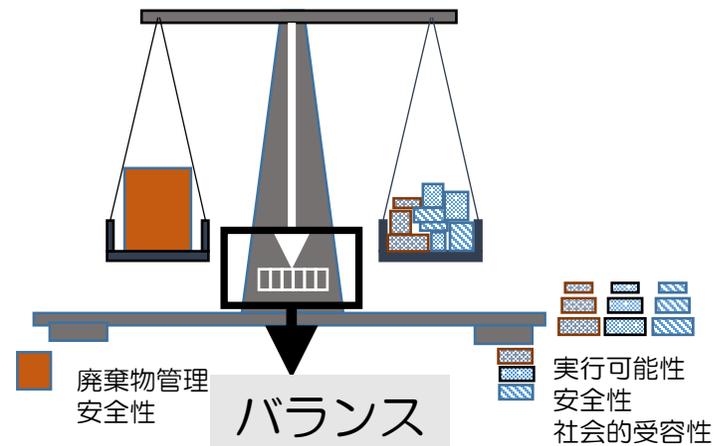
シナリオの比較例（放射能の減衰を仮定した廃棄物量）



前の図に放射能の減衰を考慮したものであり廃炉・サイト修復の終了時点での評価。主要核種は¹³⁷Csであるとし、また、時間軸は前述の「時間軸の考え方の目安の一例」を想定している。

シナリオ検討に必要な視点

- サイトの有効利用（一部/全部、制限/無制限）が可能か
- 安全性（作業員及び公衆）は確保されるのか
- 合理性（経済性）は確保されるのか ・ 放射性廃棄物の安全な管理は可能か
- 放射性廃棄物の行先を決められるのか ・ エントステートとサイトの利用計画が社会的に受容されるか
- エンドステートまでの概略工程が社会的受容性を有するか（地域間及び世代間等の公平性、意思決定プロセスの透明性）



ステークホルダー参加の重要

Closing the Circle on the Splitting of the Atom

The Environmental Legacy
of Nuclear Weapons Production
in the United States
and What the Department of Energy
is Doing About It



The U.S. Department of Energy
Office of Environmental Management

From Secrecy to Openness

In keeping with the Clinton Administration's focus on government accountability, Energy Secretary Hazel O'Leary has begun an "openness initiative" to encourage informed and constructive citizen involvement.

情報公開

様々な人々による
議論と協力

Citizen Involvement

Many of the program's environmental questions cannot be answered with engineering solutions alone. Decisions about the most important questions can only be made through a national debate and cooperation among government officials; workers; contractors; all interested Federal, State, and Tribal parties; and informed citizens.

The U.S. Department of Energy Office of Environmental Management, Closing the Circle on the Splitting of the Atom, DOE/EM-0266, ISBN: 0-16-048448-0, 1996

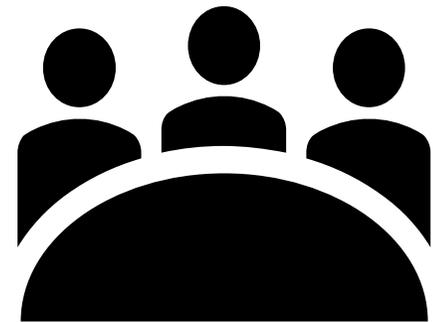
STAKEHOLDER INVOLVEMENT



Earlier involvement and increased participation by stakeholders in cleanup decisions must be accompanied by their acknowledgement of the same regulatory and budgetary constraints placed upon the DOE.

USDOE Rocky Flats Project Office, CLOSURE LEGACY, April 2006

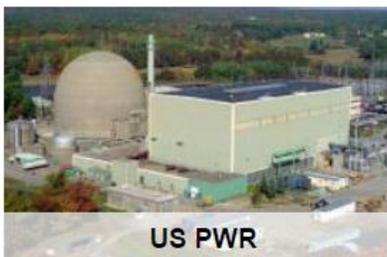
廃炉（廃止措置）をどう進めるのか



廃止措置が決まった原子力施設は？

D&D is a Waste Management Strategy

ENERGYSOLUTION

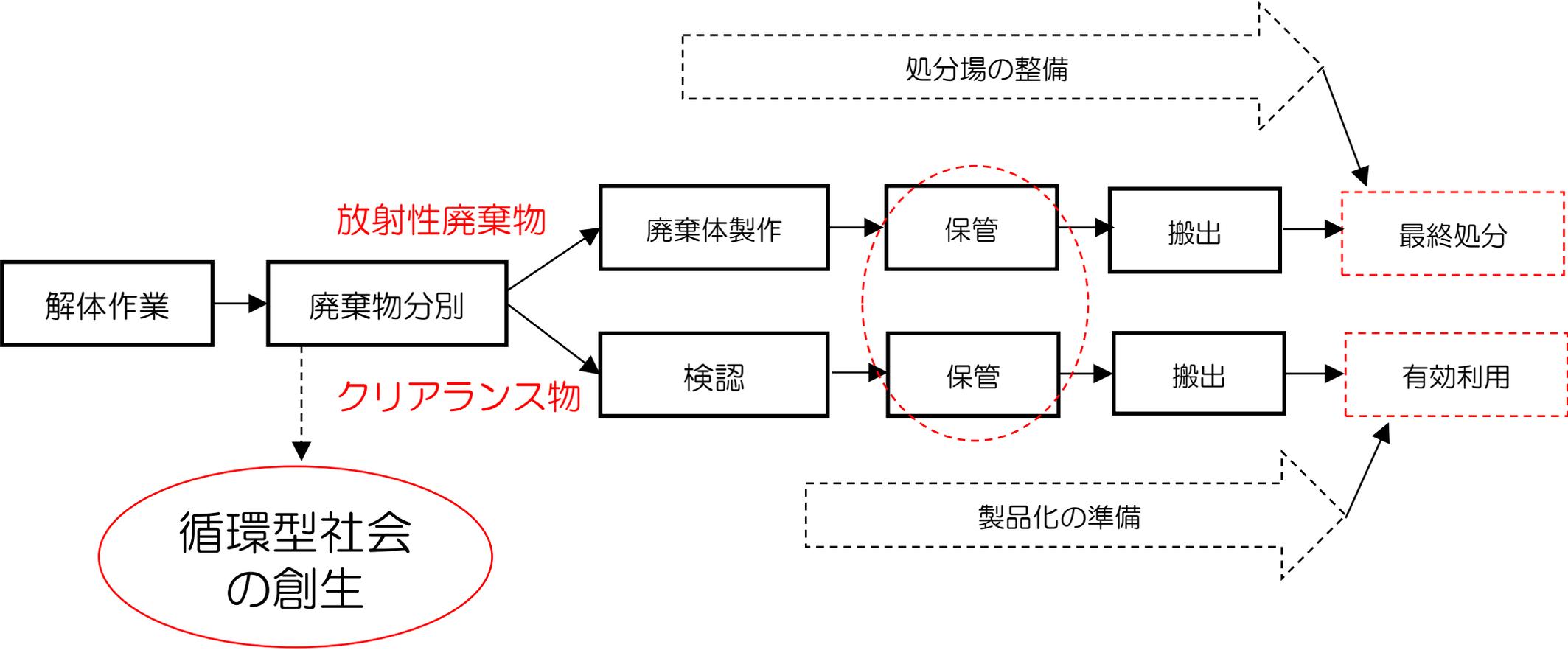


What do we see?

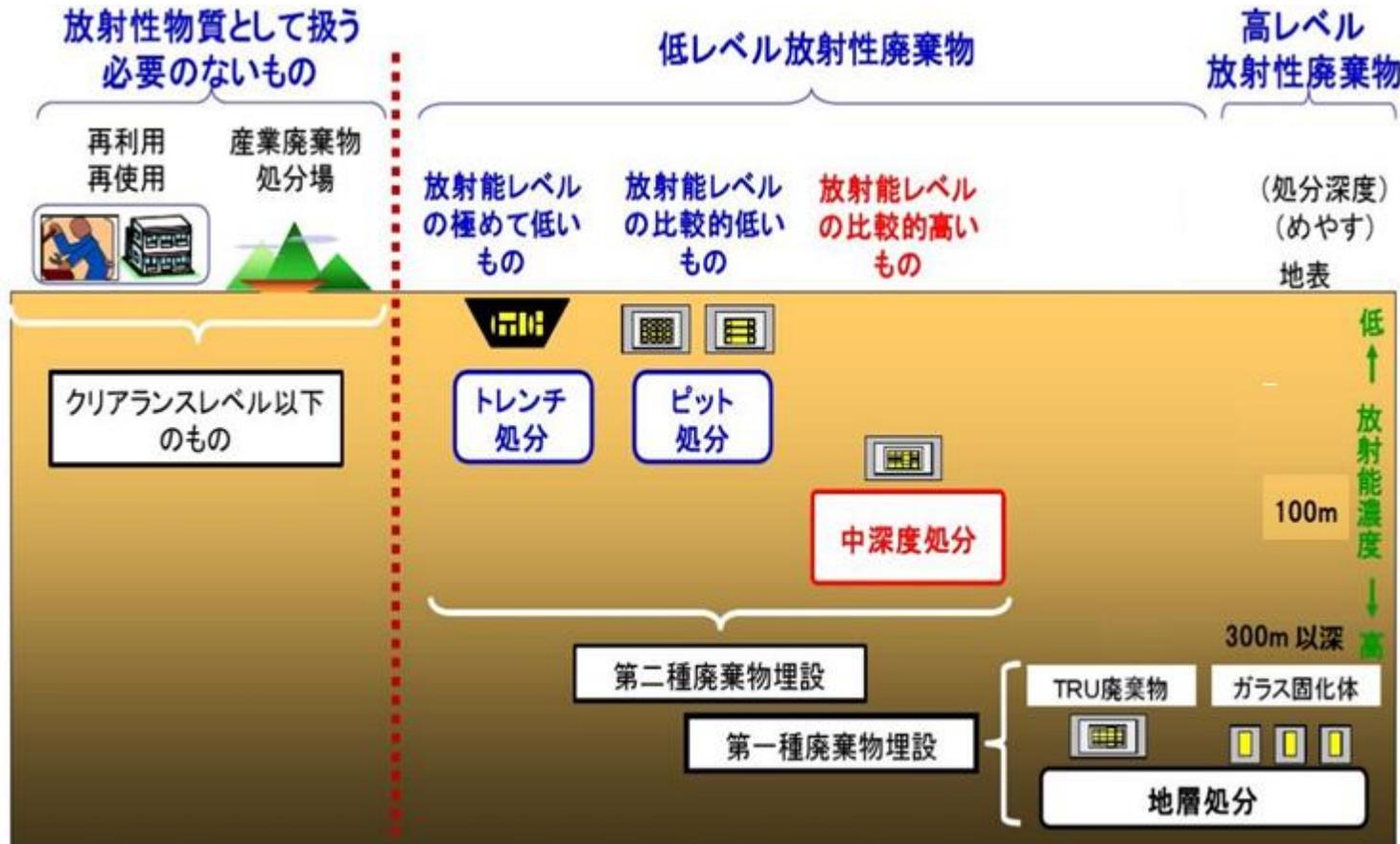


解体物のフロー（廃棄物・有価物）

処分場の建設・作業には時間が掛かる



放射性廃棄物の種類と処分方法



トレンチ処分

施設の解体などで発生したコンクリートガラ、金属など極めて放射能レベルが低いもの

ピット処分

濃縮廃液、使用済み樹脂、焼却灰、フィルター等で比較的放射能レベルが低いもの（セメント等で固化）

中深度処分^{注1}

炉内構造物、制御棒等、比較的放射能レベルが高いもの。濃縮廃液、手袋、工具などで放射能レベルが比較的高いTRU^{注2}によって汚染したもの

地層処分

高レベル廃棄物として分類されているガラス固化体、TRU廃棄物のうち放射能レベルが高いもの

注1：一般的な地下利用に対して十分に余裕を持った深度への処分

注2：ウランより原子番号の大きな核種

放射性廃棄物の処分場

稼働している処分場（日本原燃（六ヶ所村））

- 1号廃棄物埋設：約4万m³(200ℓドラム缶20万本相当)
- 2号廃棄物埋設：約4万m³(200ℓドラム缶20万本相当)
- 最終的には約60万m³

閉鎖された処分場（原子力機構（東海村）のサイト）

- JPDRのL3廃棄物（レベルが極めて低い廃棄物）
約2500m³（1670トン）

今後必要となる処分場

- L1レベルの廃棄物
- L2レベルの解体廃棄物
- L3レベルの廃棄物（サイト内またはサイト周辺？）
- 研究所等廃棄物
- 1F廃炉の廃棄物

放射性廃棄物をどう処分（管理）するのか



低レベル放射性廃棄物埋設センター



JPDRの極低レベル放射性廃棄物の埋設処分

原子力利用の課題は放射性廃棄物管理

通常炉の廃止措置

- 工事計画に沿った廃止措置の確実な実施
- 放射性廃棄物の処分先を決めないと作業が行き詰まる

福島第一原子力発電所の廃炉（クリーンアップと廃止措置）

- 
- 大量の廃棄物をどのように管理（貯蔵・処理・処分）するのか
 - エンドステートの選択肢はどうするのか
 - 廃棄物の行先を決めないと廃炉作業は終わらない



廃止措置のプロジェクトマネジメント

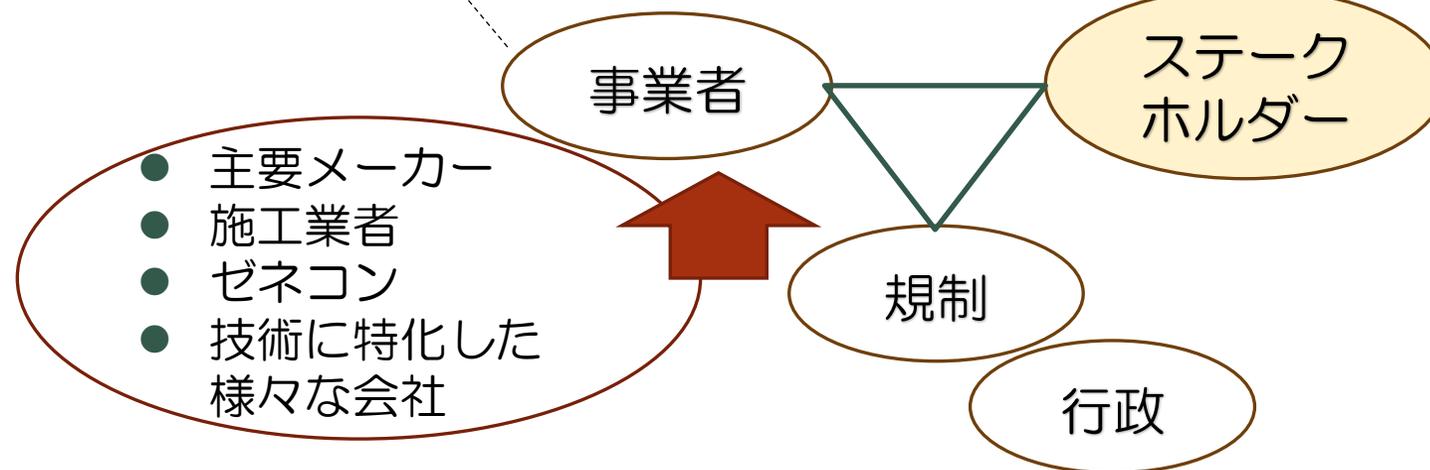
- 廃止措置及び放射性廃棄物の処理・処分に係る様々な局面での選択と説明責任
- 廃止措置プロジェクト計画の綿密な検討と作成及び工事進捗の分析と関係者（ステイクホルダー）への説明は必須課題

社会は廃炉・放射性廃棄物にどう取り組むのか

ステークホルダー
の視点

- 計画の詳細などの情報は正確に公開されているのか
- プロジェクトの進捗はどのようになっているのか
- ステークホルダーの意見は取り入れられているのか
- 廃炉ビジネスの展開は可能か
- 発電所の敷地・廃棄物は将来どうするのか

- 廃炉工事は事業者の責任
- 安全（放射線安全）が最優先
- 工程遅延は許容され易い



まとめ

- 廃炉戦略の決定要因に係る分析
即時解体/遅延解体, グリーンフィールド/ブラウンフィールド
- 世界の廃炉（事故炉）及びサイト修復に係る経験・知見の分析
廃炉工程、跡地の利用形態、ステークホルダーの参加
- 放射性廃棄物の行先を含めたエンドステートに係る議論の必要性

ご清聴ありがとうございました！