

ALPS処理水問題を考える

2021/7/21

松久保 肇(原子力資料情報室)



原子力資料情報室の簡単なお紹介

- 設立:1975年、原子力発電所の問題を懸念する科学者達によって設立
- 主な活動:原子力に関する情報の収集、分析及び、市民への情報提供、ロビイングなど
- 年間予算:5000万円程度(会費と寄付)
- スタッフ:8名
- ウェブサイト : <https://www.cnic.jp>
- 発行物:原子力資料情報室通信(月刊)、Nuke Info Tokyo(英字誌、隔月刊)、他出版物多数



もくじ

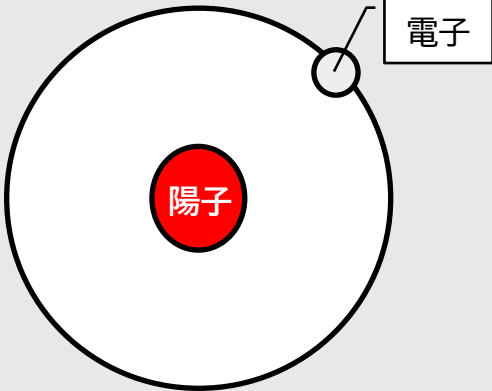
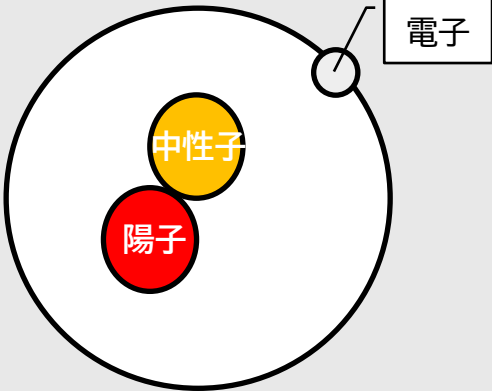
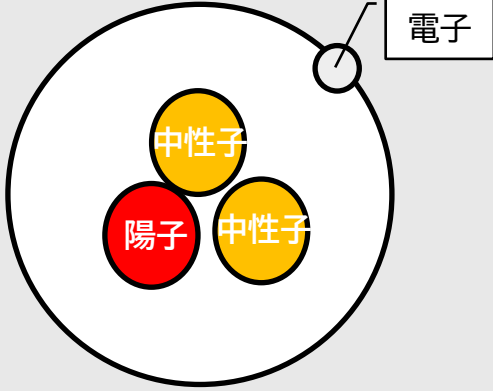
1. トリチウムとはなにか
2. 福島第一原発のALPS処理水、何が問題か



トリチウムとはなにか

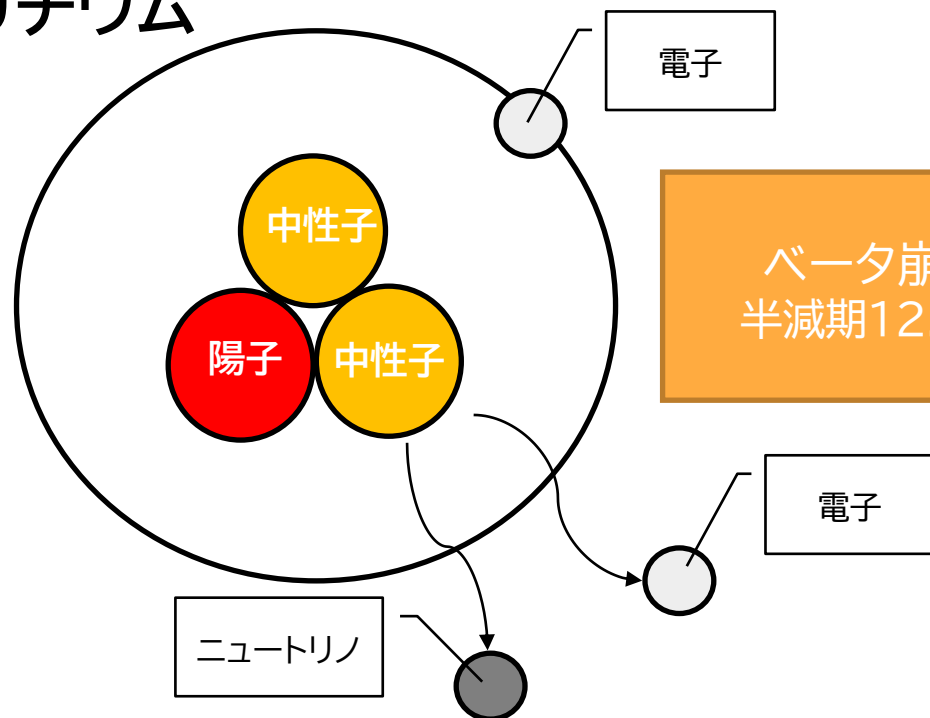


トリチウム

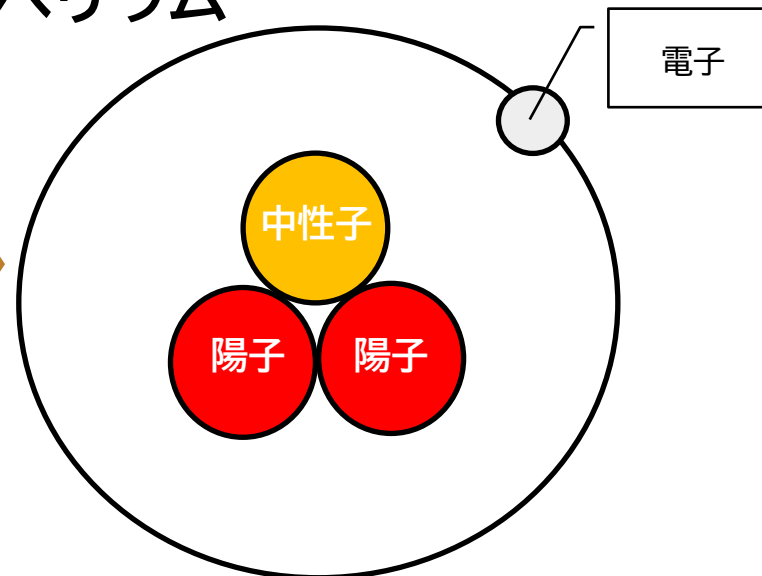
	水素	重水素(デュートリウム)	三重水素(トリチウム)
			
原子核	陽子1つ	陽子1つ、中性子1つ	陽子1つ、中性子2つ
表記	H	^2H 、またはD	^3H 、またはT

トリチウムから放射線が出る理由

トリチウム



ヘリウム

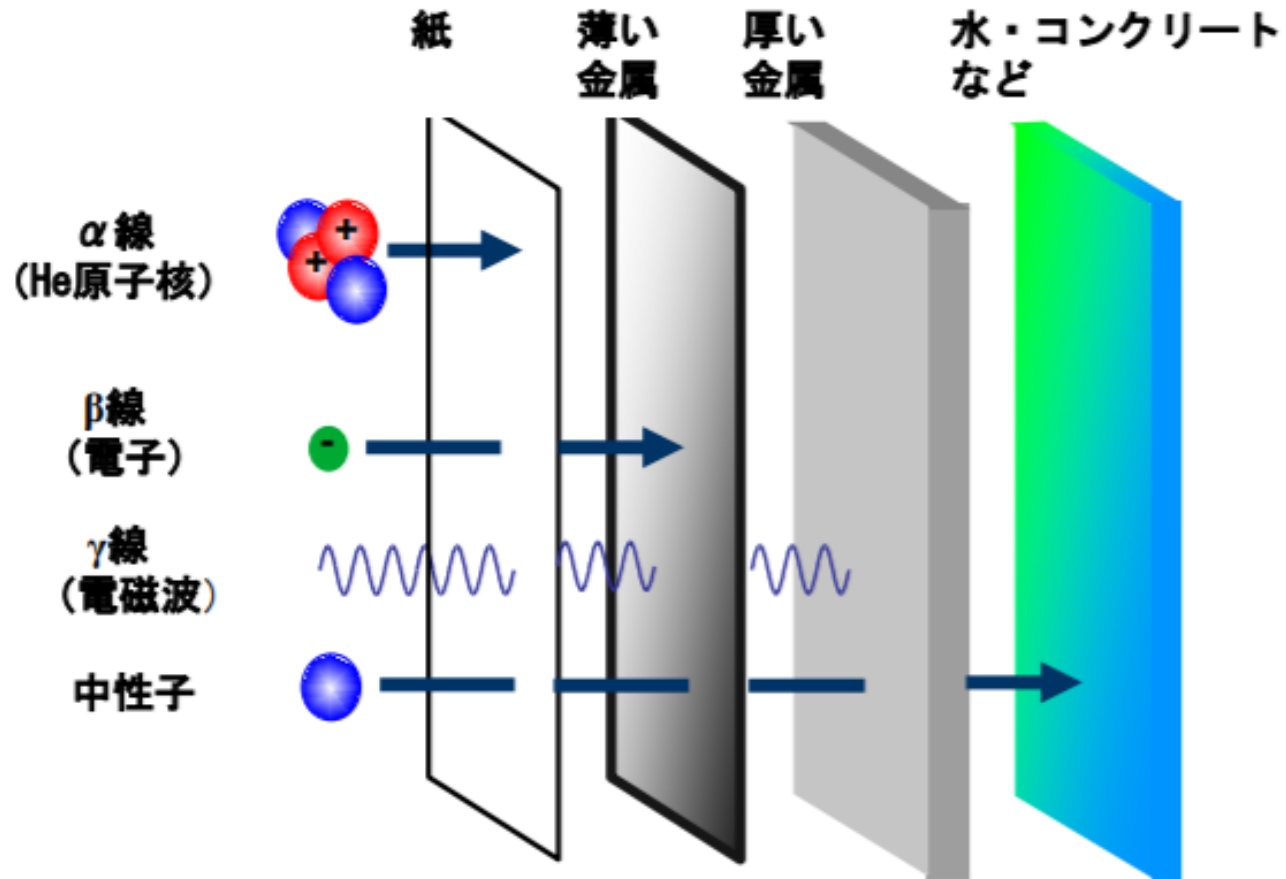


ベータ崩壊
半減期12.3年

- トリチウムの β 線最大エネルギー:18.6keV(平均5.7keV)
- β 線の飛程 空气中 5mm, 水中 $6\mu\text{m}$



放射線の種類と遮へい



放射線の特徴

α線：電気を帯びて重いので紙一枚ですぐに止まる。

β線：電気を帯びているので薄い金属ですぐに止まる。

γ線：電磁波の一種なので、金属は透過しにくい。

中性子：電気を帯びていない。重い物質では止まりにくく、軽い物質に衝突して止まる。

ちなみに、**トリチウムのβ線**はエネルギーが小さいため（最大18keV、テレビの電子銃の電子線エネルギーより小さい）、**紙1枚で遮へいが可能。**



トリチウムはどこから出てくるのか

平均すると海洋中のトリチウム濃度は
 1Bq/m^3

核爆発による放出と原発等からの放出が人為的なトリチウム放出だが、すでに出てしまった核実験分は減らせない。
一方、原子力などからの排出だけは減らすことができる。

核実験による放出分(1945~63)

$185,000 \sim 240,000 \times 10^{15}$

環境中の存在量

$20,000 \times 10^{15}$

平衡の場合の存在量

$1,000 \times 10^{15}$

宇宙線及び地殻等による生成

年間 70×10^{15}

原子力発電所などからの排出

年間 $10 \sim 20 \times 10^{15}$

Bq

10^{21} (1,000,000,000兆、十垓)

10^{18} (1,000,000兆、百京)

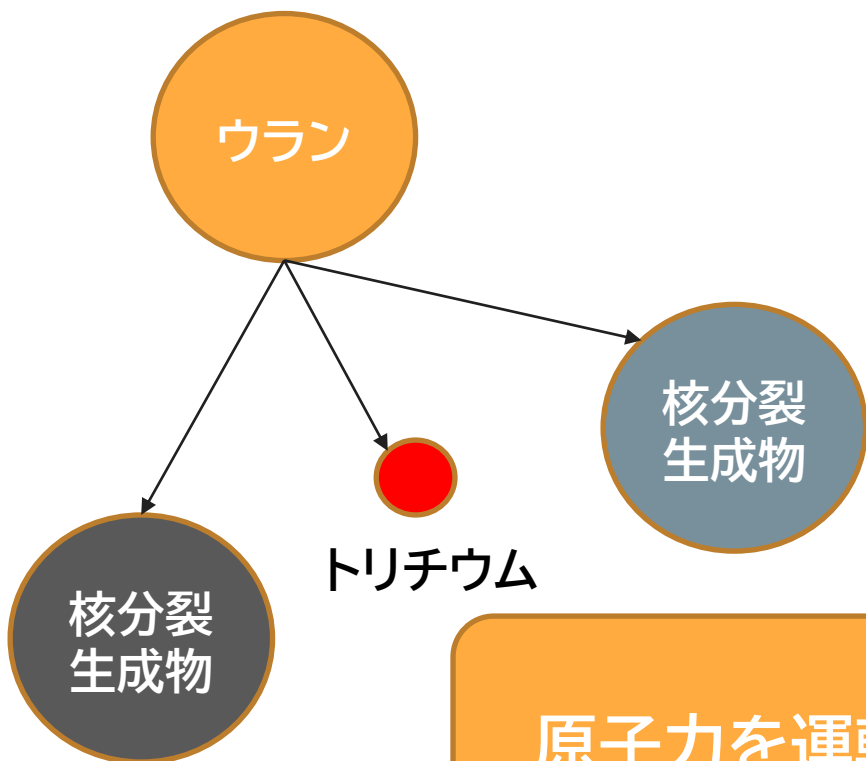
10^{15} (1,000兆)

10^{12} (兆)

原発ではどのようにトリチウムができるか？

- ウランの3体核分裂

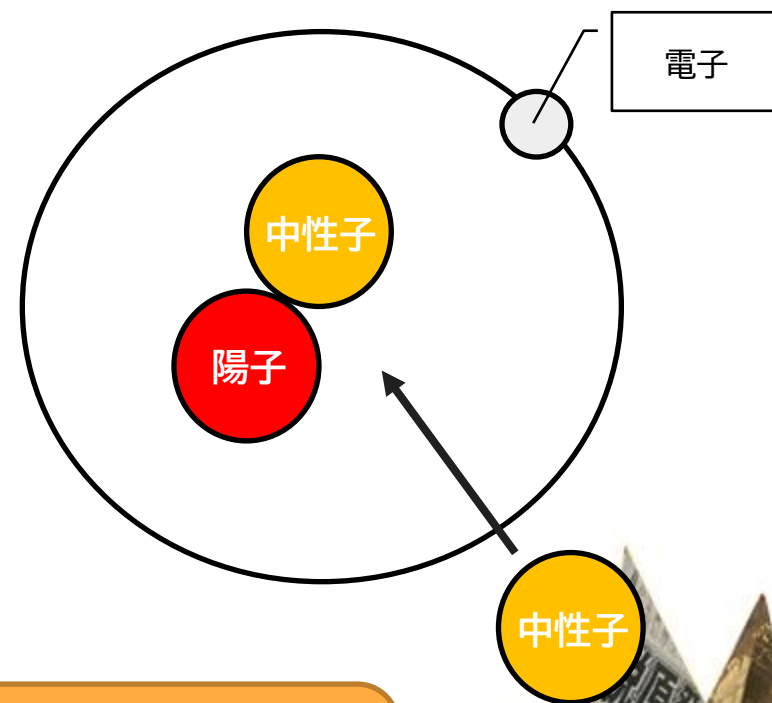
核分裂の1000回に2～4回程度の頻度で3体核分裂が起こる



- ボロン(ホウ素)やリチウムと中性子の反応

制御棒や冷却材に含まれるボロン(ホウ素)やリチウムが中性子と反応することで発生

- 冷却水に含まれる重水素の中性子捕獲反応



原子力を運転すると必ずトリチウムは生み出される



トリチウムの特徴

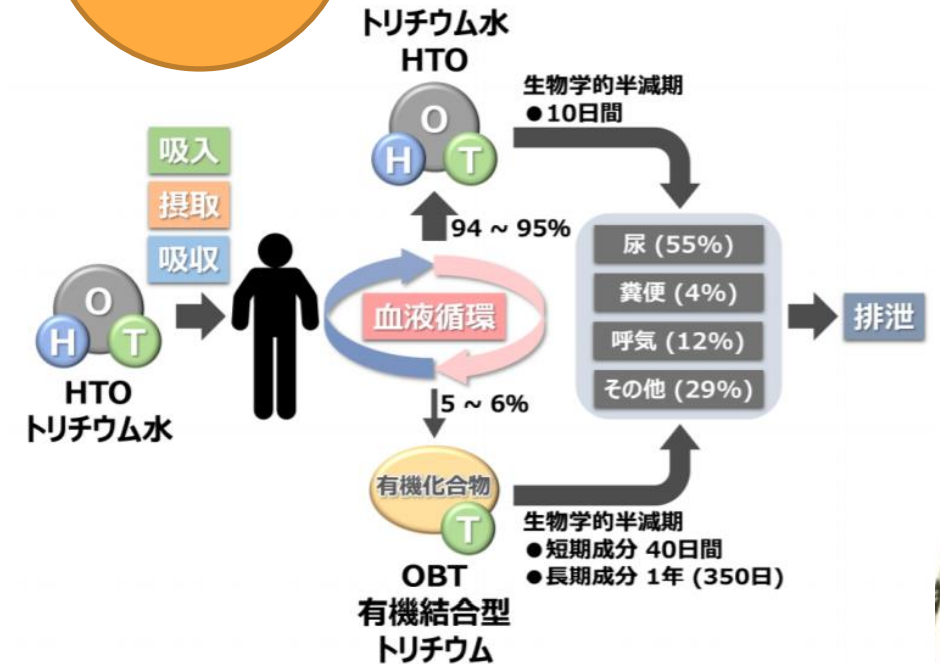
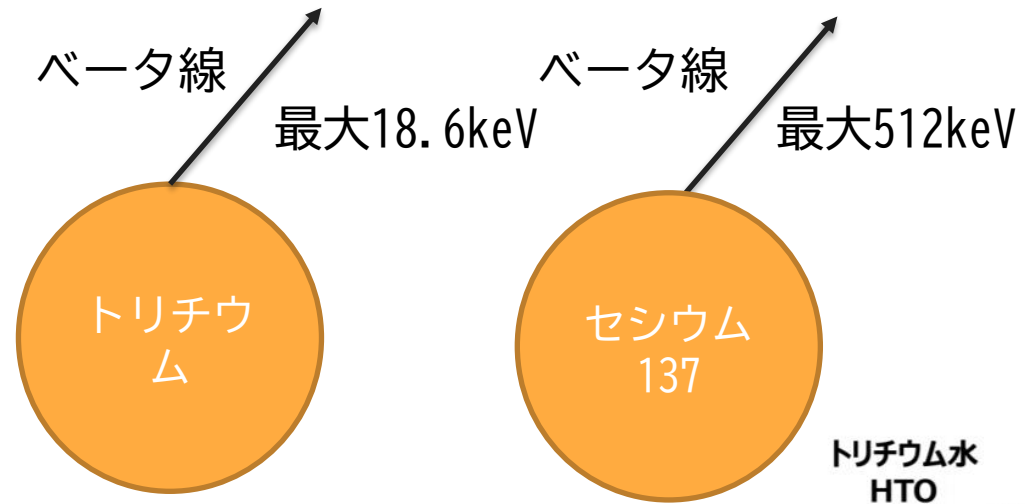
- トリチウムの持つ放射線は弱い

- 短い飛距離
 空気中 : 5mm
 体内 : 6 μ m程度
 ⇒ 内部被ばくが問題に

- 半減期 : 物理的半減期12.3年
 生物学的半減期7~18日、または約1年
 体内では、トリチウム水だけでなく有機結合型トリチウム(OBT)としても存在(生体内のたんぱく質や脂肪などに含まれる有機化合物の水素原子と置き換わる)
 ⇒ 被ばく量が増える(2~5倍)

- トリチウムの人体影響

放射線、また、DNA中の水素がトリチウムに置き換わった場合ヘリウムに変わること、DNAの結合を破壊する。
 ⇒ 大半の場合、修復されるが、修復ミスが発生することもある。
 がんリスク増



https://jrrs.org/assets/file/tritium_20191111.pdf



経産省のトリチウムに関する説明

- 被ばく線量は非常に低い
- 「生物濃縮することはない」
- DNAの中でトリチウムがヘリウムに変わって損傷しても、「普通は修復される」
- トリチウムが排出されている原子力施設周辺で、トリチウムが原因と考えられる共通の(健康)「影響の例は見つかっていない」



ロザリー・バーテル(生物学者)、カナダ原子力安全委員会での証言 (2006年12月1日)

- ICRPは、人がHTOを取り込んだ場合、約3%がDNA中の炭素原子と結合し(OBTとして)、その生物学的半減期は40日と仮定している。また、RBE(生物学的効果比)は1としている。
- 反論:

OBTに2タイプがある。OBT1は体内で容易に他の化学物質と化学反応を起こす。酸素、硫黄、リン、窒素などの原子と結合して アミノ酸、タンパク質、砂糖、でんぷん、脂質を作る。そして細胞の構造物質を作る。この場合の生物学的半減期は40日である。OBT2はDNA中の炭素原子と結合する場合であり、この場合には 生物学的半減期は550日である。

食べ物がOBTを含んでいた場合にはOBT1は一層増加する。拡大したOBTの定義からはエネルギー係数は3とすべき。

科学者たちの主張では、OBT1とOBT2からの被ばくは不均質、局所的である。この不均質な被ばくはHTOからの被ばく線量の4倍強い。

体内でHTO/47.5%-OBT1/47.5%-OBT2/2.3%の割合で存在した場合には組織は9mGy/yのエネルギーを吸収することとなる。専門家によれば組織について9mGyの被ばくは被ばく線量は18-27mSv、おおよそ20mSvになる。



生物濃縮しないか？

- いくつかの論文は生物濃縮を指摘している
 - Turner et al (2009), "Distribution of tritium in estuarine waters: the role of organic matter" (河口水域におけるトリチウムの分配—有機物質の役割)
 - 英国政府のRIFEレポート(2002):環境中の ^3H 濃度よりも生物の濃度が高い測定結果を示している(ただし、程度は低い)。
<https://www.cefas.co.uk/publications/rife/rife8.pdf>
 - Jaeschke and Bradshaw (2013), "Bioaccumulation of tritiated water in phytoplankton and trophic transfer of organically bound tritium to the blue mussel, *Mytilus edulis*" (トリチウム水の植物プランクトンやムール貝,イガイへの生物濃縮)



影響の例は見つかっていないか

ドイツ政府の実施したKiKK報告書は、原子力施設周辺の子ども達の白血病が有意に増加していることを疫学的に示した。その原因は特定されなかったが、Ian Fairlie(環境中の放射能影響に関する専門家)が「仮説」としながら、原因がトリチウム放出にあることを問題提起した。(通常の放出ではなく定期検査で原子炉を開放したときに、スパイク 状にトリチウムが放出されることに原因を求めた) “A hypothesis to explain childhood cancers near nuclear power plants” (Ian Fairlie, Journal of Environmental Radioactivity, 2013)

カナダ型原発では ^3H 放出量が多く、下流域 での白血病や小児白血病、ダウン症、新生児死亡などの増加が報告されている (「福島第一原発のトリチウム汚染水」(岩波「科学」2013年5月号))



DNAは必ず修復されるか？

- DNAに取り込まれたトリチウムは
 - ①崩壊でヘリウムに変化、DNAの部分切断
 - ②崩壊時に局所的に放出されるエネルギーにより、DNA切断がおきる可能性がある
- 二本鎖切断の可能性
- 「100%修復される」とはいえない

ALPS処理水、 何が問題か

福島第一原子力発電所 免震重要構

1. 廃止措置計画は現実的か？ — 見えない廃止措置後の姿
2. 汚染水発生メカニズム — 汚染水発生は止められないのか？
3. 敷地がないは本当か？
4. 本当に海に流すしかないのか？
5. 海に流してリスクはないのか？



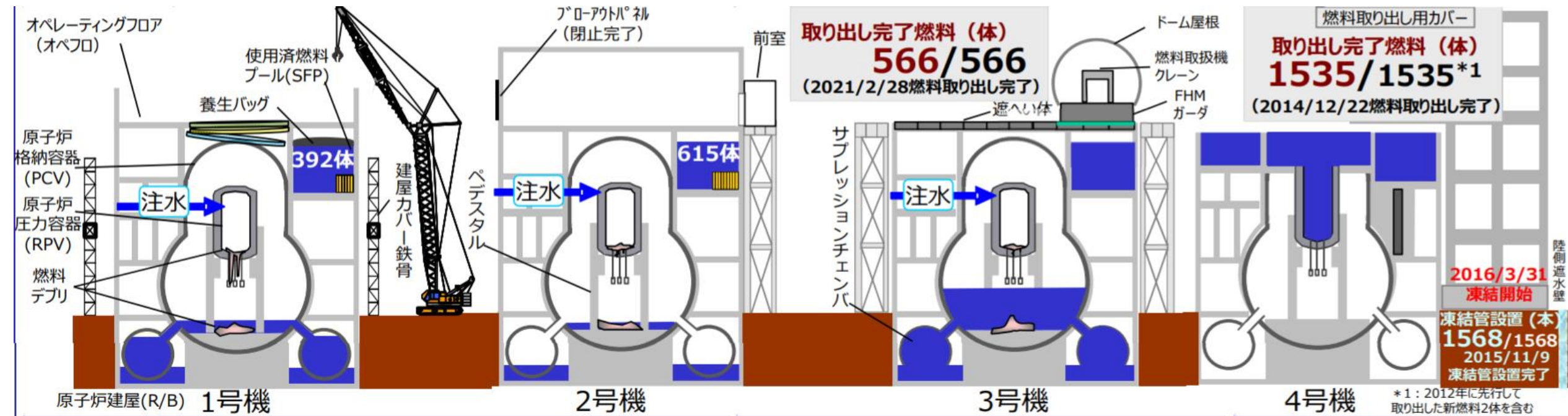
中長期ロードマップの目標行程（マイルストーン）

2041-51に完了する予定



汚染水対策	汚染水発生量を150m ³ /日程度に抑制		2020年内 達成
	汚染水発生量を100m ³ /日程度に抑制		2025年内
	滞留水処理	建屋内滞留水処理完了※1～3号機原子炉建屋、プロセス建屋、高温焼却炉建屋を除く	2020年内 達成
		原子炉建屋滞留水を2020年末の半分程度に低減	2022年度～2024年度
燃料取り出し	1～6号機燃料取り出しの完了		2031年内
	1号機大型カバーの設置完了		2023年度頃
	1号機燃料取り出しの開始		2027年度～2028年度
	2号機燃料取り出しの開始		2024年度～2026年度
燃料デブリ取り出し	初号機の燃料デブリ取り出しの開始（2号機から着手。段階的に取り出し規模を拡大）		2021年内
廃棄物対策	処理・処分の方策とその安全性に関する技術的な見通し		2021年度頃
	ガレキ等の屋外一時保管解消		2028年度内

福島第一1～4号機の状況



溶けた燃料はどこに？

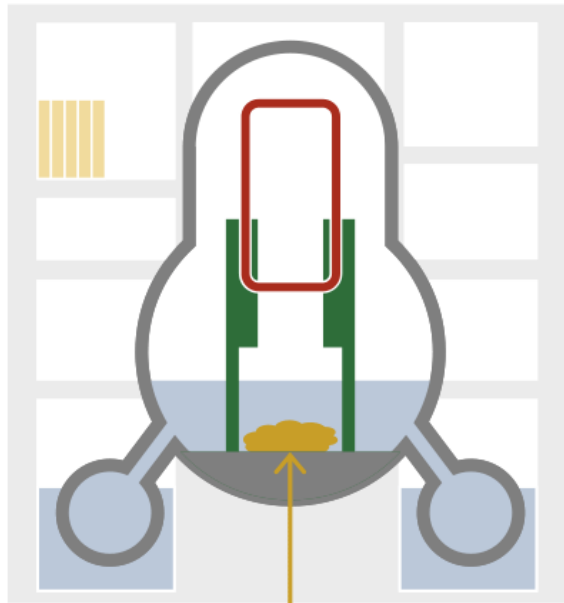
 原子炉圧力容器 (RPV : Reactor Pressure Vessel)

 ペDESTAL (原子炉圧力容器支持構造物)

 原子炉格納容器 (PCV : Primary Containment Vessel)

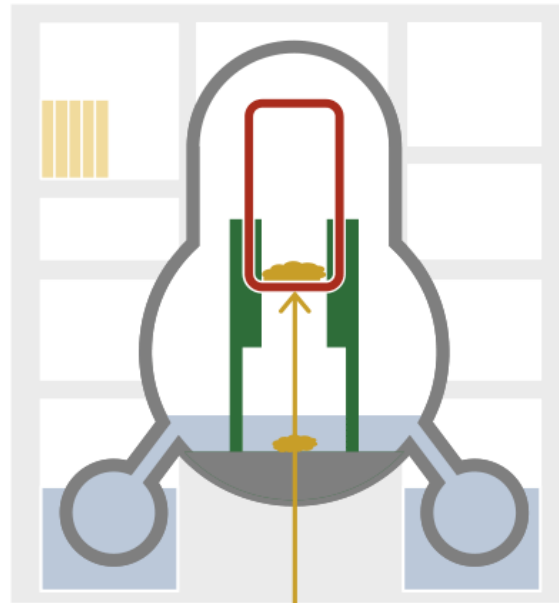
 燃料デブリ

1号機



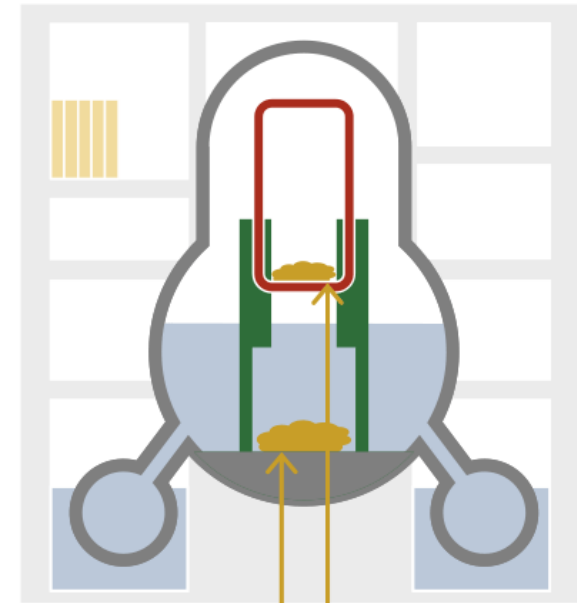
大部分は**PCV底部**に
落下している

2号機



RPV内部に
多く存在している

3号機



PCV底部とRPV内部の
両方に存在している

← 燃料デブリ分布 (推定) →

<https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20180424.html>



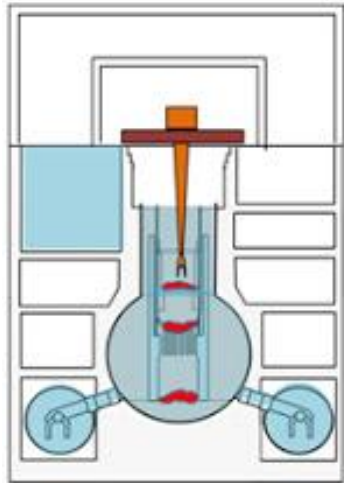
デブリ

- デブリとは:原子炉の内部にあった核燃料が溶け、さまざまな構造物と混じりながら、冷えて固まったもの。
- デブリ量:約880トン(1号機で279トン、2号機で237トン、3号機で364トン)
→スリーマイル島原発事故でのデブリは約150トン

いろいろなデブリの状態

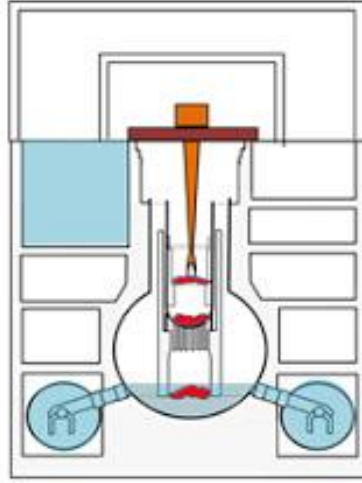


デブリの取り出し方法



冠水-上アクセス工法

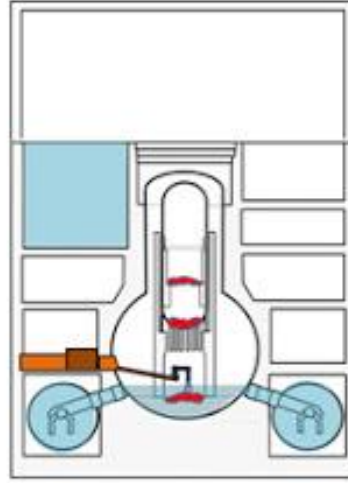
燃料デブリ上方の炉内構造物
取り出しが完了していることを
前提としたイメージ



気中-上アクセス工法

燃料デブリ上方の炉内構造物
取り出しが完了していることを
前提としたイメージ

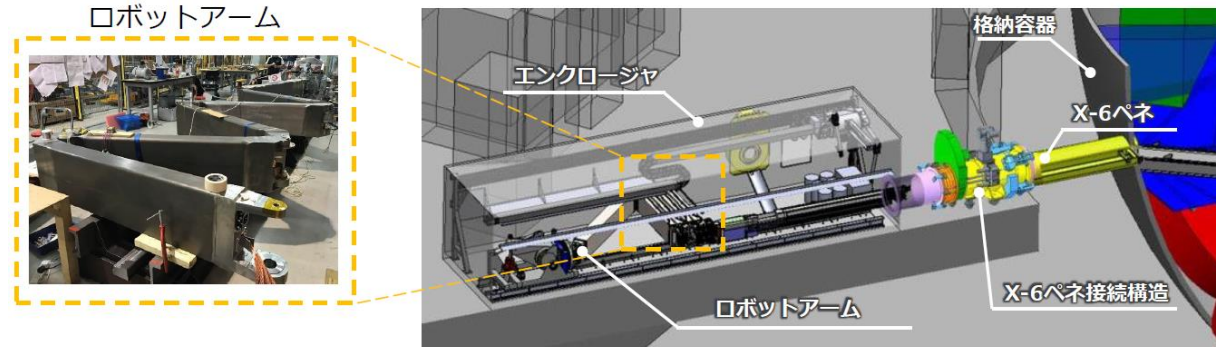
この工法が有力視



気中-横アクセス工法

PCV内RPVベDESTAL外側の
機器、干渉物撤去が完了して
いることを前提としたイメージ

本当はこれがいい



試験的取り出し		段階的に取り出し規模を拡大	
アクセス装置	デブリ回収装置	アクセス装置	デブリ回収装置

グラム単位で回収？



河北新報
ONLINE NEWS

東北ニュース

全国・海外ニュース

スポーツ

震災・防災

トップ > 東北ニュース > 記事

広域のニュース

広域 政治・行政 原発事故・放射線

ツイート シェア

資源エネルギー庁、デブリ取り出し装置を公開 グラム単位で回収へ 福島第1

資源エネルギー庁は2日、東京電力福島第1原発事故で溶け落ちた核燃料（デブリ）を取り出す装置を初公開した。伸縮するロボットアームを原子炉格納容器に入れ、遠隔操作で1グラム程度ずつデブリを回収する。2021年に2号機で始める試験回収に使用し、デブリの詳しい性質調査につなげる。

アームは長さ22メートル、重さ4.6トンで高強度のステンレス鋼製。先端に金属ブラシや真空容器を取り付け、粉状のデブリを付着・吸着させて回収する。23年度以降に開始を見込む本格回収に向けて物質特性を解明し、工法の具体化を図る。

英国で三菱重工などが開発を進めていた。今年8月にも原子炉の構造を模した試験場で訓練を始める。

デブリ取り出しは第1原発廃炉で最難関の作業。将来は一度に数キロの回収を目指す、格納容器内は毎時70シーベルトと放射線量が極めて高く、視界も限られる。2号機だけで237トンに上るデブリを全て取り出せるかどうかは見通せていない。

東電は2、3、1号機の順に取り出しを進める計画。各号機は内部の状況が異なり、装置や工法はその都度検討が必要になる。



開発したロボットアーム。先端にブラシなどを取り付け、燃料デブリを回収する（資源エネルギー庁提供）

拡大写真

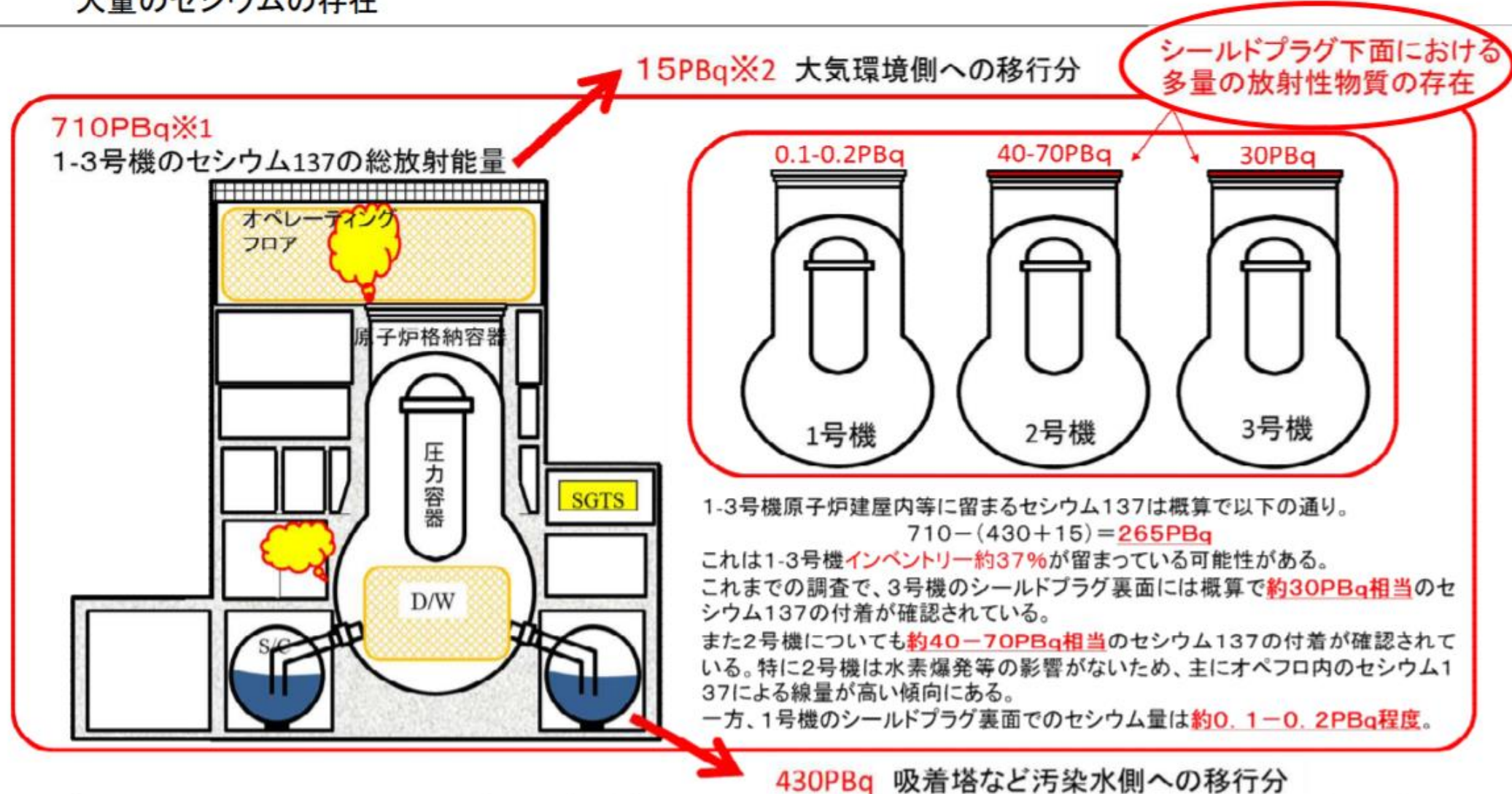
関連ページ: [広域](#) [政治・行政](#) [原発事故・放射線](#)

2020年07月03日金曜日

非営利活動法人
資料情報室
car Information Center



第1章 2. 1～3号機オペレーティングフロア及びシールドプラグ付近の放射線量と2、3号機シールドプラグ下面における大量のセシウム137の存在



※1: 福島第一原子力発電所1～3号機の原子炉停止時の放射性物質(ヨウ素131、セシウム137)の量について(平成23年4月14日原子力安全・保安院)

※2: 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書(平成23年6月)

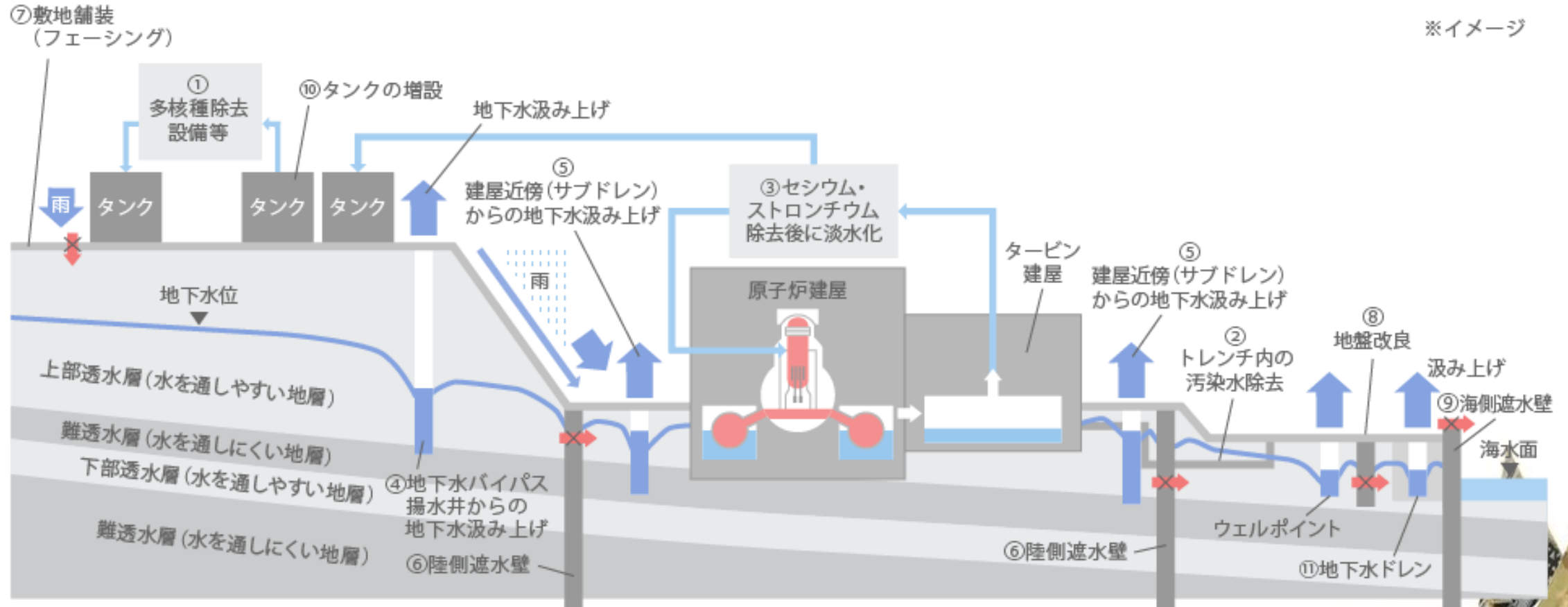
中長期ロードマップの目標行程（マイルストーン）



- 2041～2051年での廃止措置完了は現実的か？
- 見えない廃止措置終了の姿

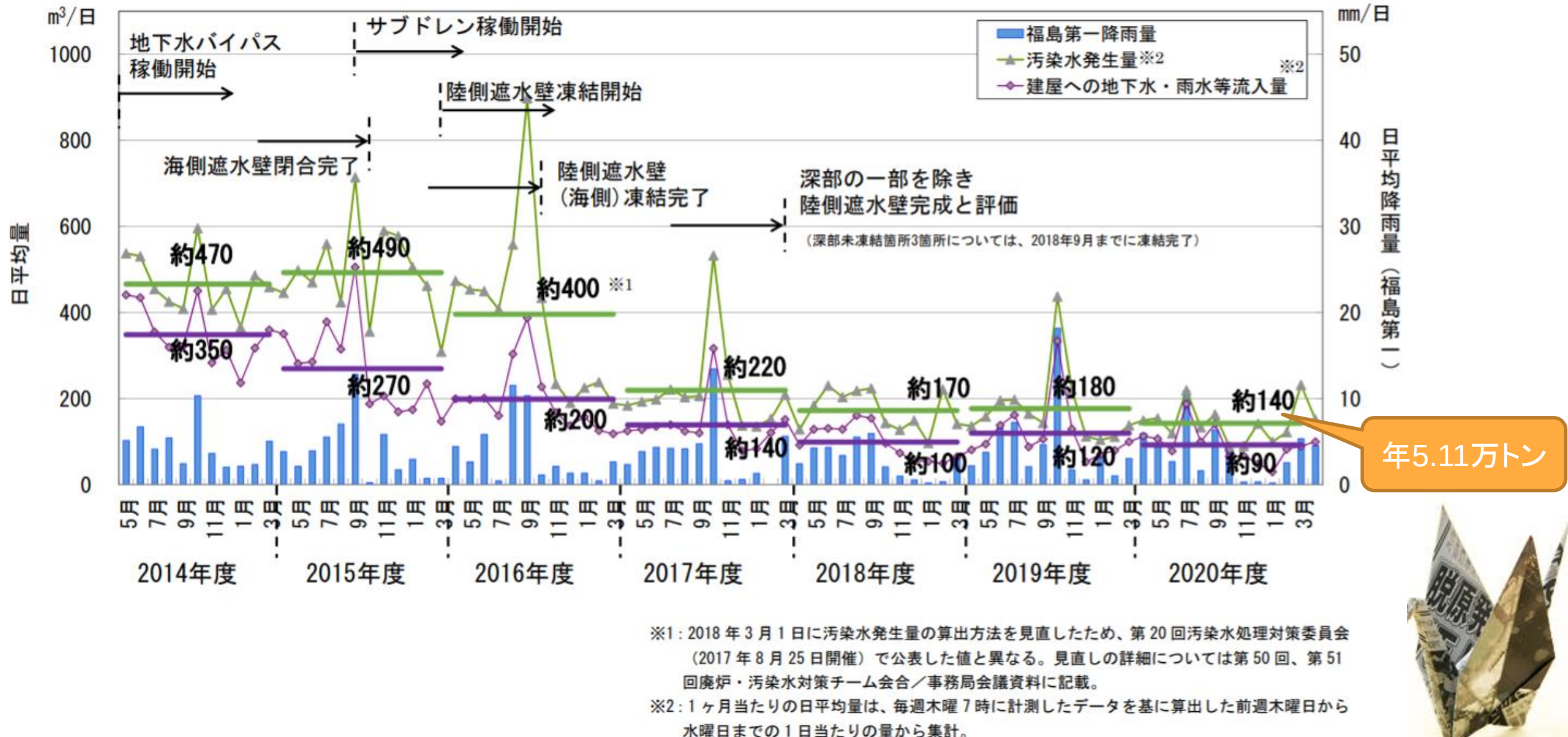


汚染水発生メカニズム



汚染水発生量

27



汚染水、ここから先どうやって減らすか

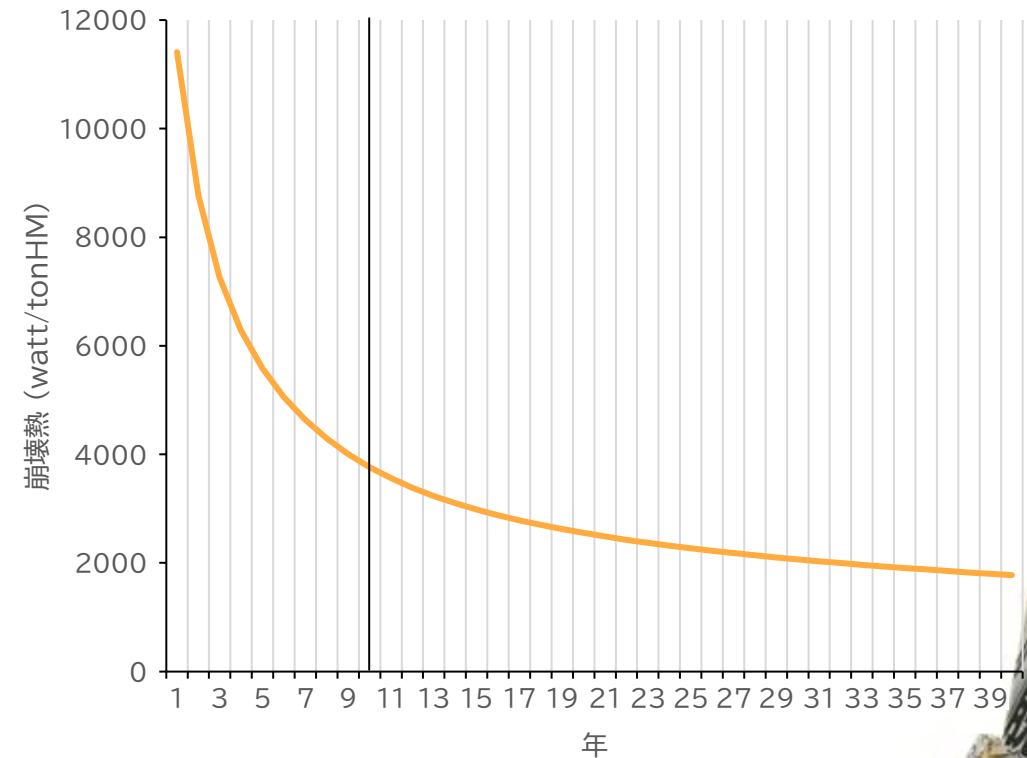
- デブリに水をかけることによって汚染水が発生
- 水をかけるのは除熱のため

一方で

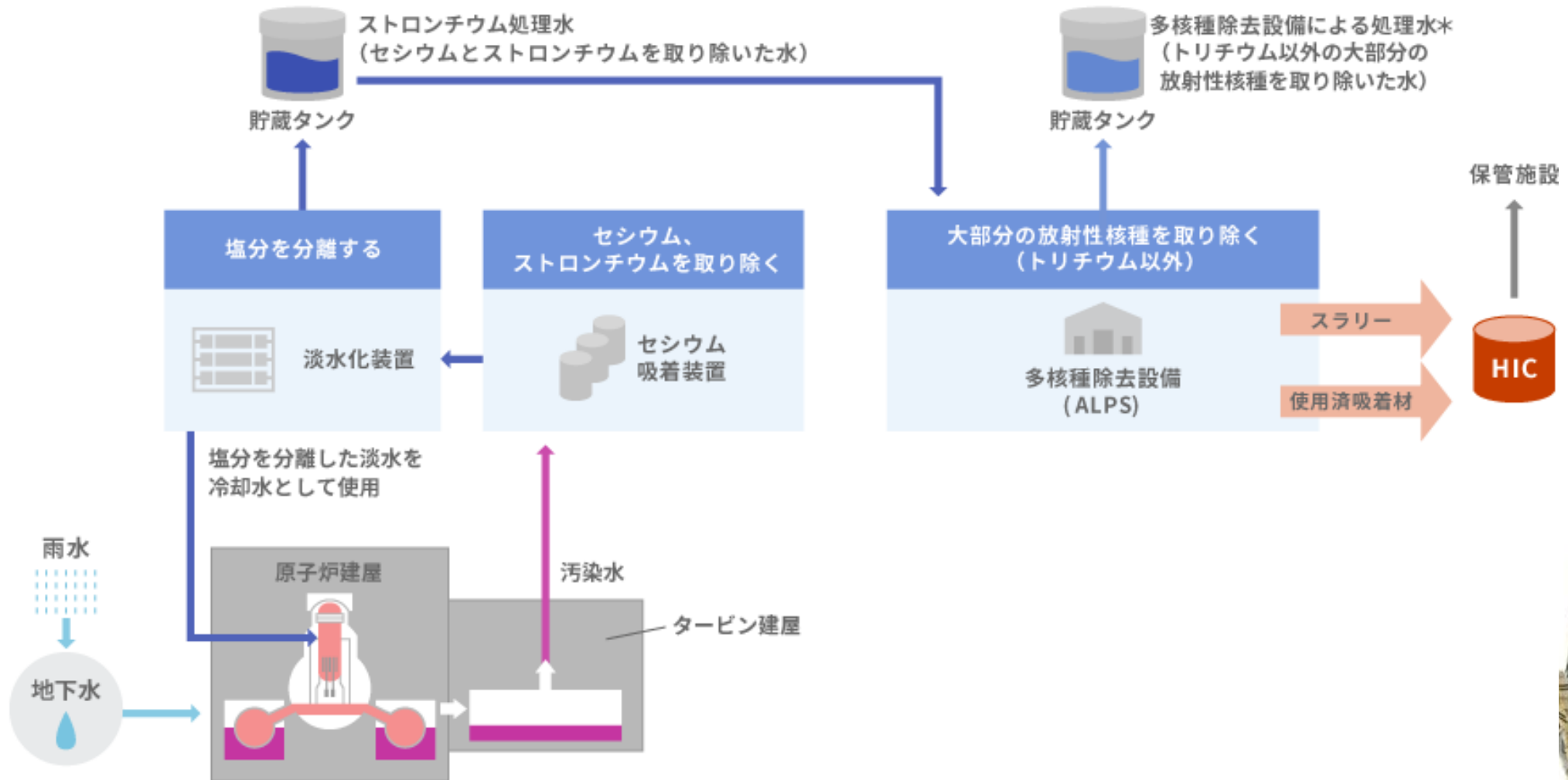
- デブリから出る熱は事故当初に比べて大幅に低下
※ここから先の発熱量低下は限定的
- 東電が何度か実施した注水停止試験では、デブリの熱上昇は限定的
- 先日の地震で原子炉格納容器の一部が破損して結果、炉内の水位が低下
→水が炉内にあることで、負荷がかかっている

➤ 空冷化によって、汚染水の発生を根本的に止める。

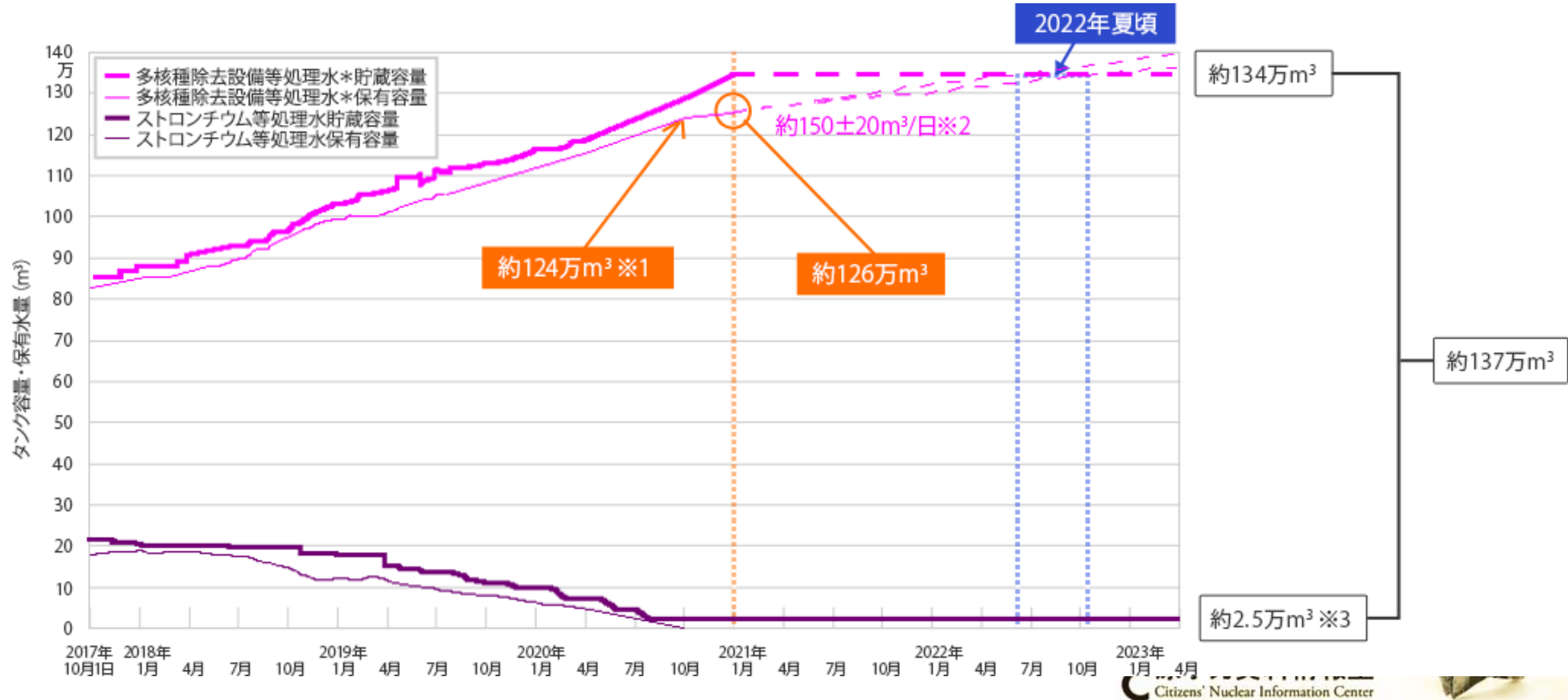
原子炉停止後の発熱量推移(ウラン燃料)



発生した汚染水の処理



ALPS処理水のタンク状況



30～40年で廃止措置を完了する前提の計画
本当に実現可能か？

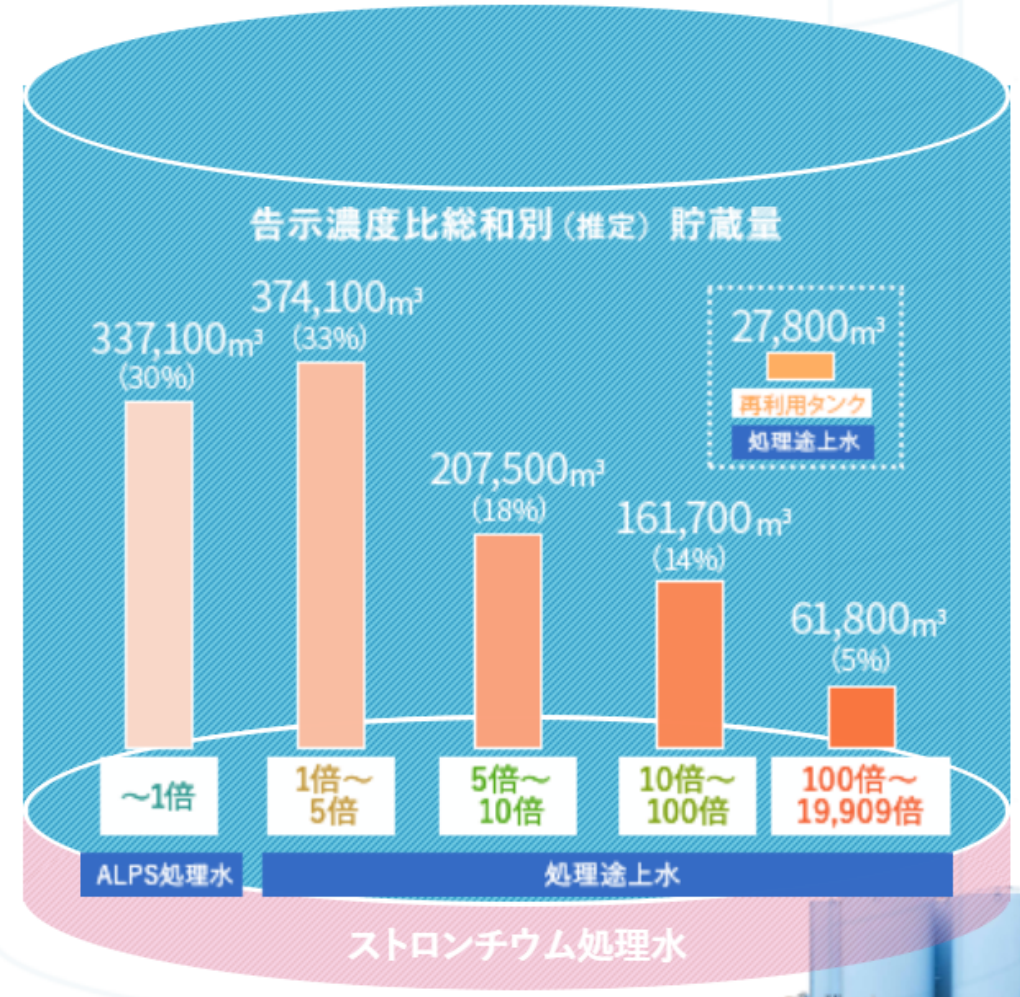
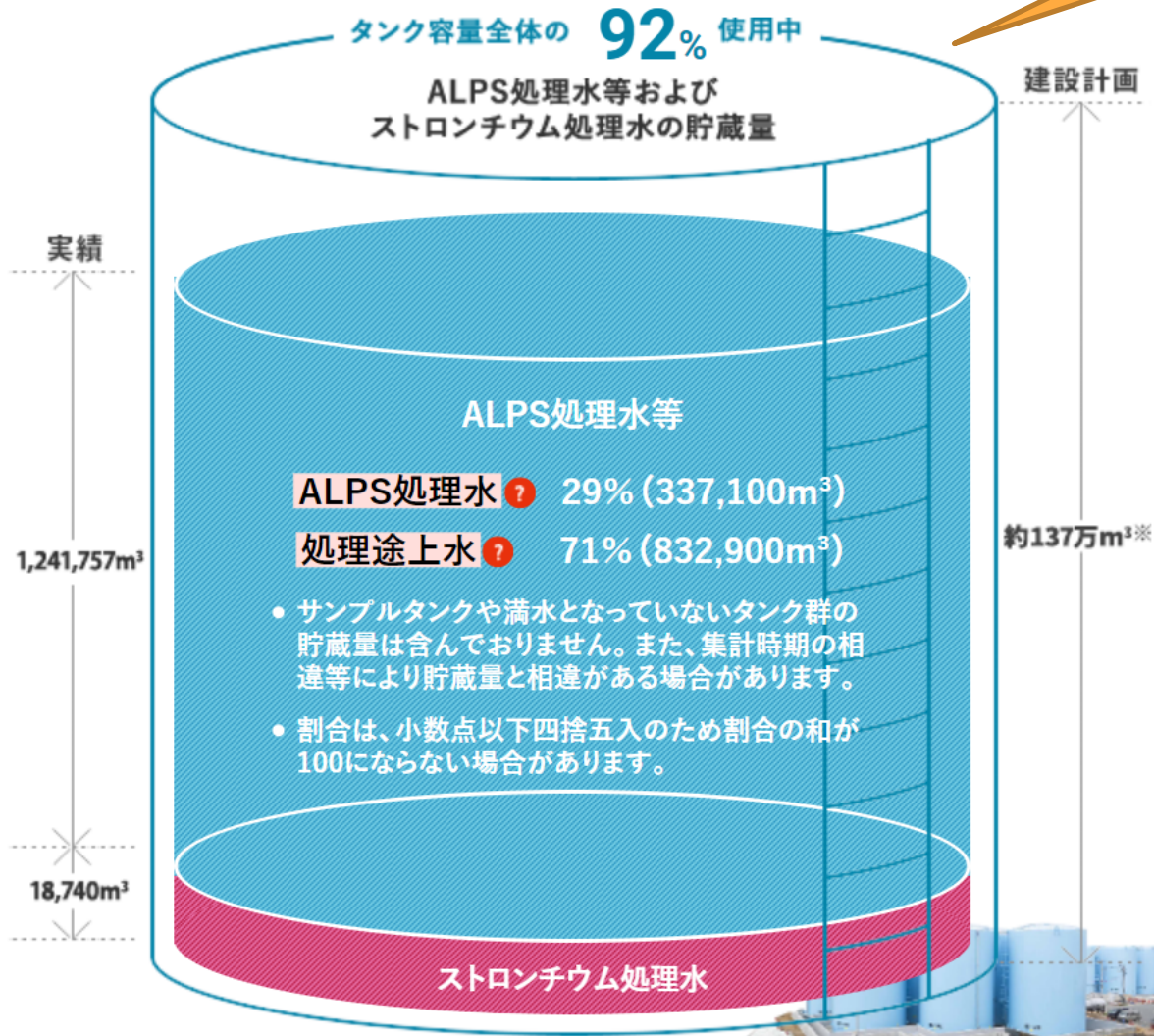
今後の敷地利用の検討

廃炉事業に必要と考えられる施設の設置に向けて、敷地全体の利用について、作業進捗に合わせ検討していく必要があります。



タンク貯蔵量と含まれる放射性物質

約125万トンに780兆bqの
トリチウムが含まれている
=62万bq/l



ALPS処理水に含まれる放射性物質

TEPCO

3-1. 二次処理性能確認試験結果(J1-C群)

■ J1-C群 (62核種+C-14+H-3)

● トリチウム:

2011/3/11/時点 総量:3,400兆Bq

—減衰→

2020/1/1時点 総量:2,069兆Bq
(タンク内:860兆Bq)

⇒2020年1月1日時点で約1,200兆Bqのトリチウムが建屋内に残存し、将来、新たに発生する汚染水に含まれる

	告示濃度限度 【Bq/L】	二次処理前 (設備入口) ^{※1}		二次処理後 (サンプルタンク) ^{※2}	
		分析結果 【Bq/L】	告示 濃度比 ^{※3}	分析結果 【Bq/L】	告示 濃度比 ^{※3}
Cs-134	60	2.93E+01	0.49	<7.60E-02	0.0013
Cs-137	90	5.99E+02	6.7	1.85E-01	0.0021
Co-60	200	3.63E+01	0.18	3.33E-01	0.0017
Ru-106	100	<5.00E+00	0.050	1.43E+00	0.014
Sb-125	800	8.30E+01	0.10	2.26E-01	0.00028
Sr-90	30	6.46E+04	2,155	3.57E-02	0.0012
I-129	9	2.99E+01	3.3	1.16E+00	0.13
C-14	2,000	1.53E+01	0.0076	1.76E+01	0.0088
H-3	60,000	8.51E+05	14.2	8.22E+05	13.7
主要7核種の 告示濃度比総和		2,165		0.15	
62核種 ^{※4} +C-14の 告示濃度比総和		2,406		0.35	

0.35のうち分析・評価の結果、検出下限未満であった核種(51核種)の告示濃度比の合計は0.19

※1 9/19,20,21に採取した試料についてコンポジットを行い分析を実施

※2 9/27に採取した試料について分析を実施

※3 分析結果が検出下限未満の核種は、検出下限値を用いて算出

※4 分析結果及び告示濃度限度の詳細は、参考資料を参照

数値の表記において、〇.〇〇E±△△とは〇.〇〇×10^{±△△}であることを示す

ALPS処理水放出基準の決まり方

- 周辺監視区域外の水中の濃度限度: 60,000Bq/L (トリチウムのみ排出の場合の通産省告示)
- 福島第一原発地下水バイパスならびにサブドレン水排出にあたっての運用目標値: 1,500Bq/L
 - まず、敷地境界における追加線量を 1 mSv/年未満と設定し、液体廃棄物に割り当てられた線量(経口摂取による被ばく)は現場環境より約 2 割と割り当てた(その他は直接線・スカイシャインと気体起因による線量)。続いて、以下のように告示濃度比との総和が約 0.2 となるよう各核種の運用目標値を設定した。

$$\frac{1}{60} (\text{Cs 134}) + \frac{1}{90} (\text{Cs137}) + \frac{5}{30} (\text{Sr90}) + \frac{1,500}{60,000} (\text{トリチウム}) = 0.219$$
 すなわち、この水を 1 年間、経口摂取し続けた場合の内部被ばく線量が 0.219mSv/年に相当。
 - ALPS処理水の二次処理後の告示濃度比(除去対象核種(62核種)+炭素14の告示濃度比総和)
 - J1-C群 【前】2,406 → 【後】0.35
 - J1-G群 【前】387 → 【後】0.22

⇒1,500Bq/Lという基準は十分なのか？

- 参考:アメリカ合衆国 37,000Bq/L



[海洋放出設備の概念図]



- 年間22兆Bqで
2053年完了
- 年間50兆Bqで
2041年完了
- 年間100兆Bqで
2033年完了



表 トリチウム水タスクフォースの基本要件の制約条件の評価について（ケース⑤の場合）

処分方法	① 地層注入の例	② 海洋放出の例	③ 水蒸気放出の例	④ 水素放出の例	⑤ 地下埋設の例
イメージ図	※希釈なし	※希釈あり	※希釈なし	※希釈なし	※地下水位より深い位置
期間	104 + 20nヶ月 912ヶ月（監視）	91ヶ月	120ヶ月	106ヶ月	98ヶ月 912ヶ月（監視）
コスト	180 + 6.5 n 億円 + 監視	34億円	349億円	1,000億円	2,431億円
規模	380m ²	400m ²	2000m ²	2,000m ²	285,000m ²
2次廃棄物	特になし	特になし	処理水の成分によっては、 焼却灰が発生する可能性あり。	2次廃棄物として残渣が発生 する可能性あり。	特になし
作業員被ばく	特段の留意事項なし	特段の留意事項なし	排気塔高さを十分にとるため、 特段の留意事項はない。	排気塔高さを十分にとるため、 特段の留意事項はない。	埋設時にカバー等の設置による 作業員の被ばく抑制が必要。
その他	適切な土地が見つからない場合、 調査機関・費用が増加。	取水ピットと放流口の間を岸壁等 で間仕切る場合には費用が増加。	降水条件によっては放出の停止の 可能性があり、多少期間が伸びる 可能性あり。	降水条件によっては放出の停止の 可能性があり、多少期間が伸びる 可能性あり。	多くのコンクリート、ベントナイトが 必要。残土が発生する。

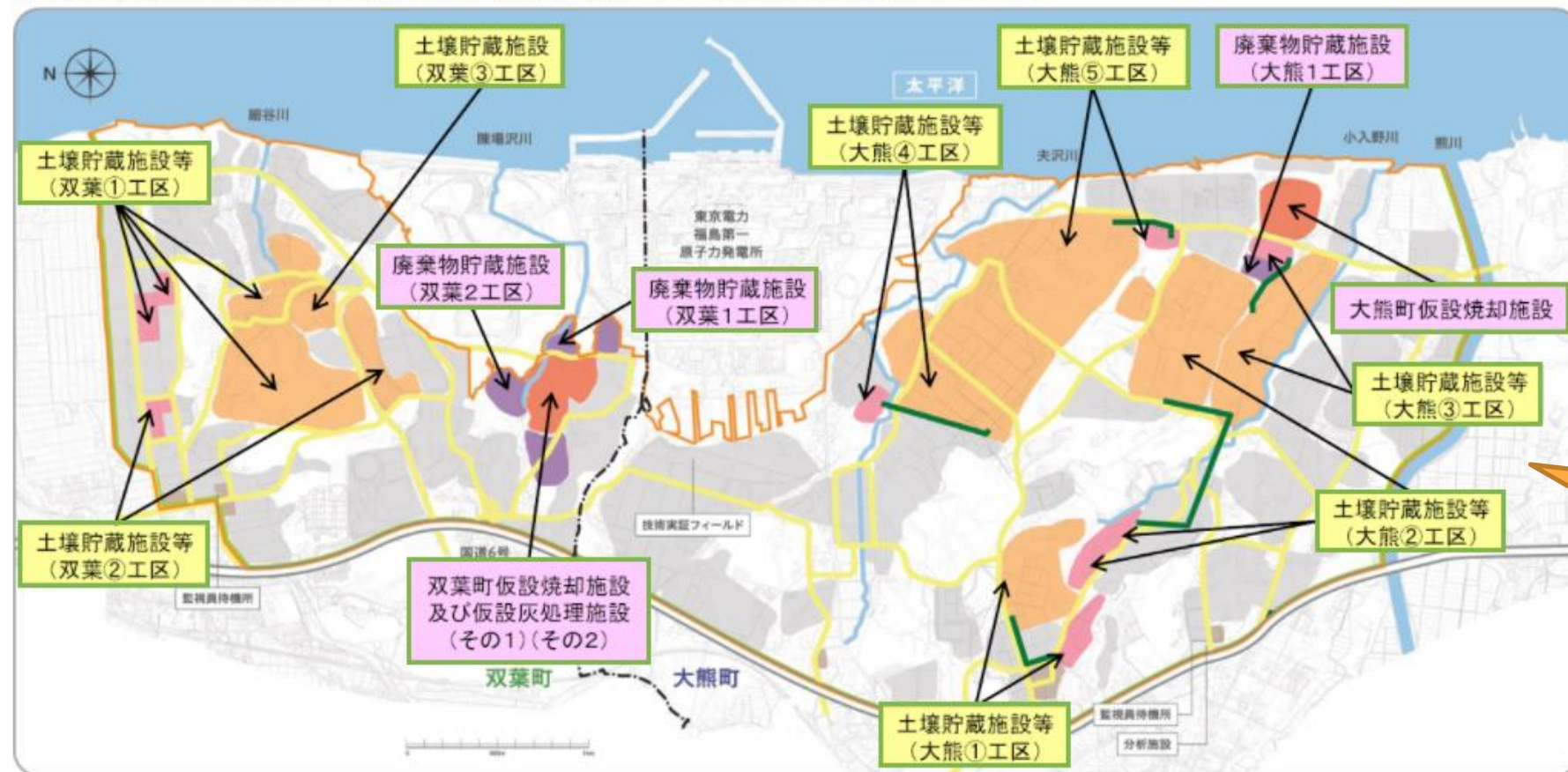
ほかの選択肢はなかったのか？

- トリチウム除去技術
 - 「トリチウム分離技術の検証のための実証事業」を実施。Kurion社、RosRAO社、株式会社ササクラなどから提案があり、検討実施。Kurionの提案は、実際に導入済みの技術を発展させたもの。分離技術はすべて研究開発段階とされ、選択から除外された
⇒ 凍土遮水壁は研究開発名目で国家予算が付けられている
- タンク貯蔵
 - 敷地内、また中間貯蔵施設などで保管場所を探すことはできるはず
⇒ 敷地内は廃止措置計画で使う予定がある、中間貯蔵施設は「地権者の皆様にも、中間貯蔵施設のために利用させていただくため、土地の提供(地上権の設定を含む)をお願い」したので、転用は難しいと説明
- セメント固化保管
 - 米サバンナリバーサイト核施設で導入済み技術



中間貯蔵施設の配置図（各工区名をクリックすると詳細を見ることができます）

用地の取得状況や除去土壌等の発生状況に応じて、段階的に整備を進めます。



• 使っていない土地はたくさんある。



※保管場等とは、除去土壌や灰等の保管場、解体物質の置場、輸送車両の待機場等に加え、現段階では整備する施設の種類の検討中の用地を含みます。



ALPS処理水の海洋放出 地元との約束

- 経済産業省と福島県漁業協同組合連合会の約束文書

「漁業関係者を含む関係者への丁寧な説明等必要な取組を行うこととしており、こうしたプロセスや**関係者の理解なしには、いかなる処分も行いません。**」(2015年8月24日)

- 経済産業省と全国漁業協同組合連合会の約束文書

「『東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ』に記載した、『地元関係者の御理解を得ながら対策を実施することとし、海洋への安易な放出は行わない。』との方針を今後も継続します。」(2015年8月26日)

- 東京電力から福島県漁業協同組合連合会への回答

「検証等の結果については、漁業者をはじめ、関係者への丁寧な説明等必要な取組を行うこととしており、こうしたプロセスや**関係者の理解なしにいかなる処分も行わず、処理水は敷地内のタンクに貯留いたします**」(東京電力(株)福島第一原子力発電所のサブドレン水等の排水に対する要望書、2015年8月25日)

ALPS処理水の海洋放出 地元との約束

- 糟谷廃炉・汚染水対策チーム事務局長補佐(官房総括審議官)

(ALPS処理水の海洋放出について)「**関係者の方の理解を得ることなくしていかなる処分もとることは考えておりません。**」(第6回廃炉・汚染水対策福島評議会、2015年1月7日)

- 宮沢洋一経済産業大臣

(馬淵澄夫議員の質問に答えて)「処理した汚染水を第一原発の中に今貯蔵しているわけでありましてけれども、これがどこかで満杯になったときのことといったことは、かなり規制委員会の中で心配をされているということは事実であります。(中略)地元関係者の御理解を得ながら対策を実施することとし、**海洋への安易な放出は行わない。まさに理解を得られないのであれば海洋への放出は行いませんが、一方で、安全だけではなくて安心といった意味でも、地元の関係者の理解が得られた場合には、そういう放出ということは可能性としてはある**ということだろうと思っております。」(衆議院 経済産業委員会 第30号 2015年8月28日)

海洋放出計画の問題点

- 放射性物質は集中管理が基本
 - ⇒拡散してしまうと回収できない。現在管理されている放射性物質を拡散させて良いのか
- 放射性物質を海洋放出することは許されるのか？
 - ⇒かつて日本は、旧ソ連・ロシアの”低レベル”放射性廃棄物の海洋投棄に抗議している。
- 漁業への打撃
 - ⇒2021年3月に試験操業を終了し、数年内に本格操業を予定。ALPS処理水放出と重なる。
- 不明確な放出量
 - 福島第一原発のトリチウム量(試算値)は、2011年3月11日時点で3,400兆Bqだったが、減衰して、2020年1月1日現在、2,069兆Bq(うちタンク:860兆Bq)と推計。
 - ⇒2020年1月1日時点で建屋内に残る約1,200兆Bqのトリチウムは将来、一定量が汚染水に移行
- 国と東電の違約
 - ⇒さらなる信頼低下。今後何をもって約束するのか？
- 測定・かたより
 - ⇒海洋中でトリチウムは速やかに拡散することを前提とするが、濃度のばらつきは発生しないのか？
- 国際的レピュテーション
 - ⇒沿岸諸国の抗議



改めて

- ALPS処理水海洋放出は国・東電の事情
 - 土地がないのは東電の事情。
 - 2015年に漁連らと約束して以来5年以上、手を打ってこなかった。
 - 海洋放出が選ばれたのは最も安価だったから
 - 東電は被害者にさらなる被害を要求している
- 2041－51年廃止措置完了は現実的か？
 - 廃止措置完了時点の姿を誰も知らない
 - 2041-51年廃止措置完了は極めて困難



ご清聴ありがとうございました。

