第34回東職ランチョンセミナー

福島第一原子力発電所の廃炉の前途
～混迷からの救出～

2017年11月21日

原子力コンサルタント　　佐藤 暁

福島第一
6
191
252

代表的な本来の廃炉（緑地復旧）

1. 到達できないゴール

ゴール

- 緑地復旧（無条件解放）

ゴール到達までの主要マイルストーン

- 燃料デブリの回収、密封、保管（搬出、最終処理）。
- 敷地内の放射能汚染水の処理（遮水、ドライ・アップ・止水処理）。
- 汚染廃棄物の回収、汚染施設の解体、密封、保管（搬出、最終処理）。
- 敷地内の汚染土壌の回収、密封、保管（搬出、最終処理）。

要件

- 40年以内（～2051年）
- 敷地境界レベル　＜ 250μSv/年（米国環境保護庁の基準の場合）

制約

- 労働衛生基準、作業環境、許容被曝線量を遵守しての労働者確保
- コスト
- 放射性廃棄物の最終処分場

福島第一の現状

<u>事故によって喪失した（仮設による補完が必要な）主な設備・機能</u>

- 作業用・非常用照明
- 換気空調（給排気、フィルター、暖冷房）
- 建屋気密性
- 通信設備（ページング、無線）
- 監視（TVカメラ）設備
- 放射線モニター（mSv/h）、ダスト・モニター（Bq/cc）
- 防火・消火設備（火災報知器、自動スプリンクラー）

福島第一の環境

<u>作業環境</u>

・ 建屋内が多くの部屋に仕切られ、放射線環境が部屋毎に異なる。

<u>放射線環境</u>

・ 特性の異なる多数の放射性核種が混在
  - H3　フィルターによる除去効果なし、検出困難、皮膚から吸収。
  - Sr/Y90　検出困難、強β線（水晶体、皮膚被曝）、骨に沈着。
  - Cs134/137　全身に分布。
  - U/Pu　検出困難、骨に沈着、放射能毒性高（管理値極低）。

・ 水張りによる効果
  - 放射線（ガンマ線、ベータ線、アルファ線）の遮蔽。
  - 放射性エアボーンの拡散防止。

ドライアップによる環境変化

現状（水抜き前）

- 高線量
- 高汚染

水抜き後（通常作業時）

- 高線量
  - 雰囲気レベルの上昇
  - ホットスポットの増加
  - ベータ線
- 高汚染
  - 高汚染表面の露出
  - エアボーン濃度上昇

水抜き後（非常時）

- 火災
  - 乾燥によるエアボーン濃度上昇と建屋内圧の上昇に伴う外部環境へのエアボーン流出
- 台風
  - 通気、気圧変化に伴う外部環境へのエアボーン流出

環境・作業員のモニタリング
（運転プラントと福島第一との相違）

運転プラント

- 外部被曝
  - 全般的に低線量
  - 主にガンマ線に注目
  - 主に全身被曝に注目
- 内部被曝
  - ホール・ボディ・カウンター（WBC）により管理可能。
  - 検出、測定が容易。
  - 防護が容易。
  - 放射能毒性低。

福島第一

- 外部被曝
  - 全般的に高線量
  - ホット・スポットによる局部被曝
  - ベータ線にも注目
  - 皮膚、水晶体の被曝
- 内部被曝
  - WBCで検出困難な核種（H3、Sr90、U/Puなど）あり。
  - 検出、測定が困難。
  - 防護が困難。
  - 放射能毒性高。

放射性エアボーン濃度の管理値

核種	特徴	検出技術		気中濃度(Bq/cc)	
		環境	内部被曝	厚生労働大臣の限度	Appendix B DAC
H3	ベータ核種	難	バイオアッセイ	8E-1	7.4E-1
Mn54	通常プラントの主要な線源	易	WBC	2E-2	1.11E-2
Co60	通常プラントの主要な線源	易	WBC	1E-3	3.7E-4
Sr90	骨表面、ベータ核種	難	バイオアッセイ	3E-4	7.4E-5
Cs137	主要な核分裂生成物	易	WBC	3E-3	2.22E-3
U235/238	骨表面、アルファ核種	難	バイオアッセイ	3E-6	7.4E-7
Pu238/239 Pu240/242	骨表面、アルファ核種	難	バイオアッセイ	3E-6	1.11E-7
不明(半減期30日以上のアルファ核種)			バイオアッセイ	3E-8	

- 厚生労働大臣の定める限度(日本) ・・・ 1mSv/週 に相当する内部被曝をする濃度。
- DAC(米国) ・・・ 年間2,000時間曝露された場合、被ばく限度の内部被曝をする濃度。

トリチウム(H3)の問題

厚生労働大臣の定める限度 0.8Bq/cc

- 以下のうち、相対湿度、温度、水中濃度のいずれかが超過することで、厚生労働大臣の定める限度を超過。フィルター付マスクでは除去できない。
  - 相対湿度70％＠25℃（絶対湿度16.1g/m³）
  - 水中トリチウム濃度： 50,000Bq/cc

アルファ核種(U/Pu など)の問題

- 放射能毒性が高いためエアボーン濃度の管理値が低い。濃度が高くても低くても問題。
  - ➢エアボーン濃度が高いとき：　呼吸保護具によっても、十分な防護が得られない可能性がある。
  - ➢エアボーン濃度が低いとき：　検出できるためのサンプリング時間、計測時間が長時間となり、事前に把握することができない可能性がある。

「電離則」の要件

- 放射線業務従事者の被ばく限度
  - 実効線量：100mSv／5年
  - 実効線量：50mSv／年（実際には20mSv／年として運用）
  - 等価線量：眼の水晶体：150mSv／年　　皮膚：500mSv／年
- 施設管理
  - 1mSv／週（労働者が常時立ち入る場所における外部放射線による実効線量と空気中の放射性物質による実効線量との合計）
  - 粉じんの飛散を抑制する措置
  - 出入口に二重扉を設ける等、汚染の広がりを防止するための措置
- 呼吸保護具：　厚生労働大臣が定める限度を超えた汚染空気を吸入する労働者のため有効な呼吸用保護具を備え、使用させる。

防護係数＝100

- 不十分な防護係数。
- 眼の水晶体に対するSr/Y-90ベータ線の遮蔽が不十分。
- 水作業で閉塞。
- トリチウムは除去しない。

防護係数＝10,000

防護係数＝1,000

- 眼の水晶体に対するSr/Y-90ベータ線の遮蔽が不十分。
- トリチウムは除去しない。

①放射線防護の問題（労働者）

- ドライアップによって、各建屋地階の放射線レベルが全般的に上昇し、多数のホットスポットが発生することで、作業者が過剰被曝をする危険性が増す。通常の原子力発電所とは異なり、強力なベーター線も被曝。
- 建屋内が乾燥することによって、高濃度のベーター線核種、アルファ線核種が気中に浮遊。特に、アルファ核種の放射能毒性は高く、従来の呼吸保護具では不十分。
- ベーター線核種、アルファ線核種の内部被曝は、従来の測定方法（ホールボディカウンター）によっては測定不可能で、バイオアッセイ法でも測定可能か分からない。有効な治療法も不明。

②放射線防護の問題（周辺環境）

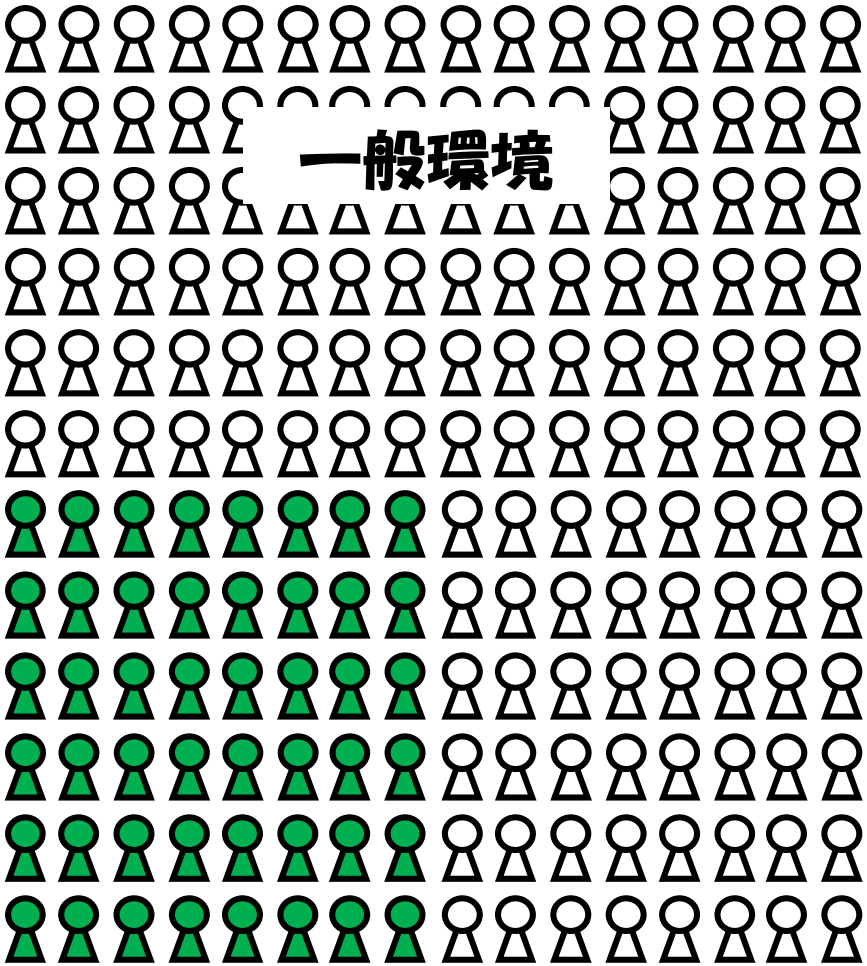
- 換気系の運転状態、昼夜の温度較差、強風などにより、建屋内の放射性物質が建屋外に流出し、ベーター核種、アルファ核種が外部環境に拡散。
- 建屋内の水がなくなることで乾燥し、防火・消火設備（火災検知器、自動消火設備、消火栓）が不完全であり、そのような状況下で火災が発生した場合、大量の放射性物質が外部環境に放出。
- 外部環境への放出監視基準は、労働者の呼吸する空気に対する管理基準よりも更に一段と厳しいため、サンプリングと測定が困難。

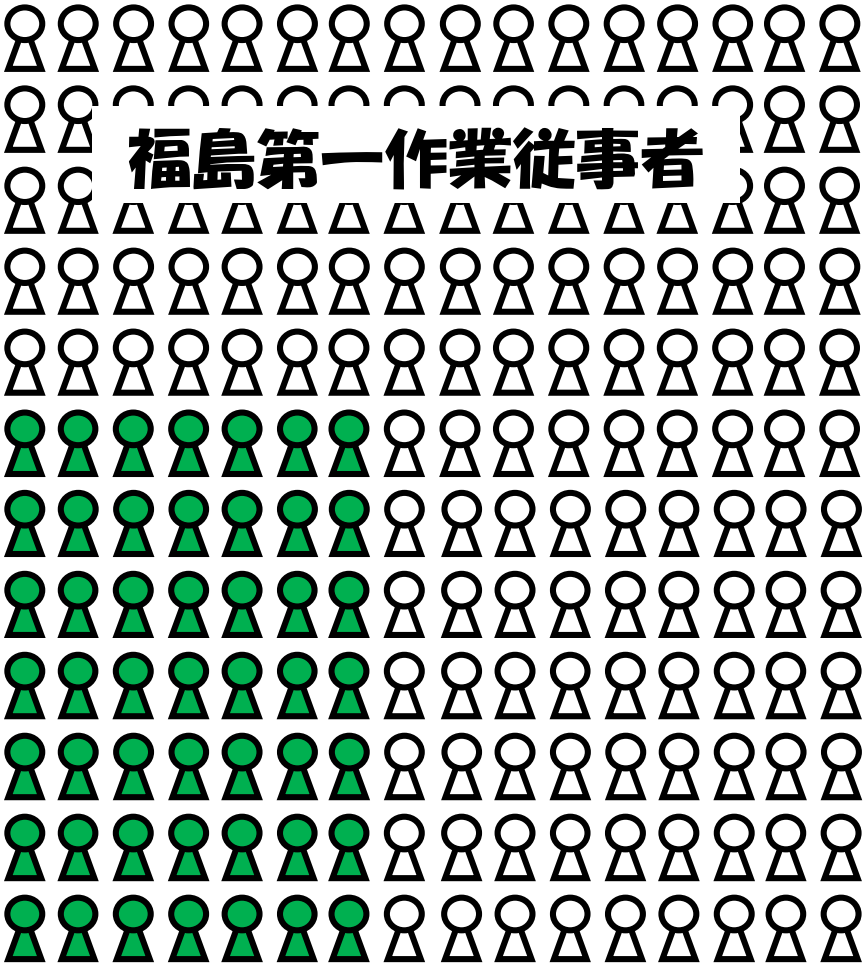
核種	気中濃度（Bq/cc）	
	Appendix B DAC	施設外への排気基準（Appendix B）
H3	7.4E-1	3.7E-3
Sr90	7.4E-5	2.22E-7
Cs137	2.22E-3	7.4E-6
U235/238	7.4E-7	2.22E-9
Pu238/239/240/242	1.11E-7	7.4E-10

③人員確保の問題

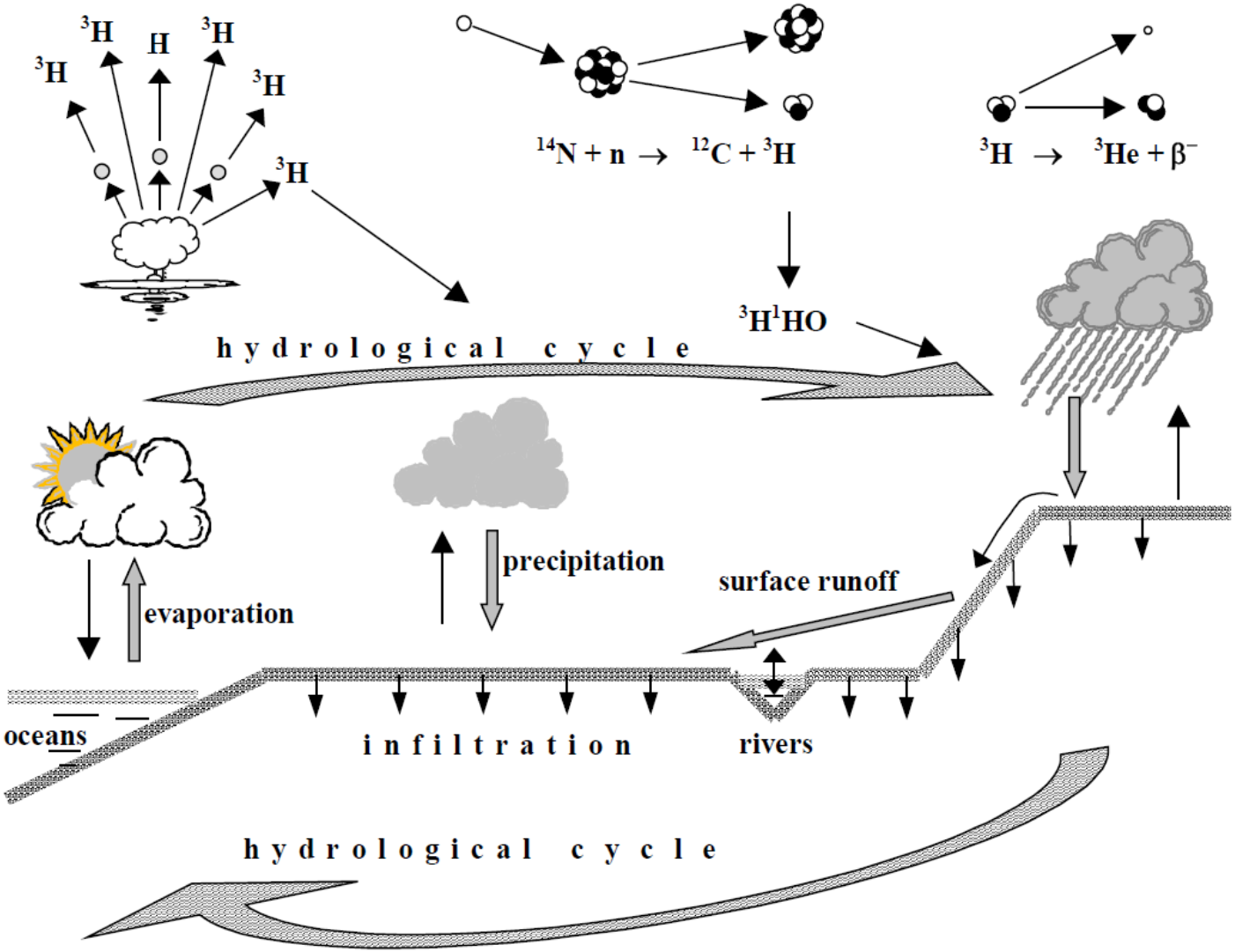
- 止水処理とは言っても、実際には、仮設照明の設置、換気空調系の設置、監視・通話装置の設置、緊急避難所の確保など、さまざまな付帯作業も発生。
- 各員が、許容被曝線量（年間20mSv）を受けるまでの期間がかなり短いため、頻繁な入れ替えが必要。外国人労働者への依存も考えられる。
- 労働者の雇用に当たっては、一連の安全教育、放射線管理教育に加え、保安上の理由から、アルコールや薬物検査も必要。職種によっては、バックグランド・チェックも必要。
- 再稼働が始まった場合、他の建設業が繁忙期に入った場合、元々魅力の低い作業内容であることもあり、労働者確保がより困難。
- 大量の労働者が投入されるため、将来、因果関係の不明な疾病を巡っての係争もあり得る。各作業員に対する日々の詳細な作業記録管理、健康管理、個人情報のデータベース化が重要。ただし、それでも内部被曝（特に骨（造血器官）に対する被曝）の評価誤差が大きいため、因果関係の否定が困難。

誰が ＋1人 か？





トリチウムの循環


^3H
^3H
H
^3H
^3H
^3H
$^{14}N + n \rightarrow {}^{12}C + {}^3H$
$^3H \rightarrow {}^3He + \beta^-$
$^3H^1HO$
hydrological cycle
precipitation
surface runoff
evaporation
oceans
infiltration
rivers
hydrological cycle

2. 現実的妥協を探る上での考慮のポイント

- 天然放射性物質

  カリウム、ラドン、トリチウム

- 核種による放射能毒性

  トリチウム、プルトニウム

- 核実験と核廃棄物による影響
- 原子力発電所の運転に伴って放出される放射性物質
- 海洋放出の正当性

天然放射性カリウム（K-40）

- 人体に含まれるカリウム
  - 0.2%（体重1kgあたり2g）
- 放射性カリウム（K-40）
  - 全カリウムの0.0117%
  - 半減期　12億8000万年
  - 比放射能：　2.65×10^5 Bq/g
- 天然カリウムの比放射能
  - 31Bq/g
- 人体に含まれる K-40
  - 体重1kgあたり62Bq
  - 体重70kgの人体には4340Bq

- 一日あたりの必要摂取量の目安
  - 男子　2000mg
  - 女子　1600mg

- K-40 による　“内部被曝”
  - 男子　62Bq/日
  - 女子　50Bq/日

カリウム含有率の高い食品1kgあたりの含有量

食品	含有量（g/kg）	放射能（Bq/kg）	食品	含有量（g/kg）	放射能（Bq/kg）
こんぶ（乾燥）	53	1,590	だいず（乾燥）	19	570
わかめ（素干し）	52	1,560	ピーナッツ	7.7	231
ひじき（乾燥）	44	1,320	納豆	6.6	198
まいたけ（乾燥）	25	750	ポテトチップス	12	360
しいたけ（乾燥）	21	630	アボガド	7.2	216
しろきくらげ（乾燥）	14	420	バナナ	3.6	108
エリンギ（生）	4.6	138			
えのきだけ（生）	3.4	102	抹茶	27	810

内部被曝？

バナナ1本（可食部分100グラム） 10ベクレル！

自然界の放射能～太平洋の海中に含まれる放射性物質

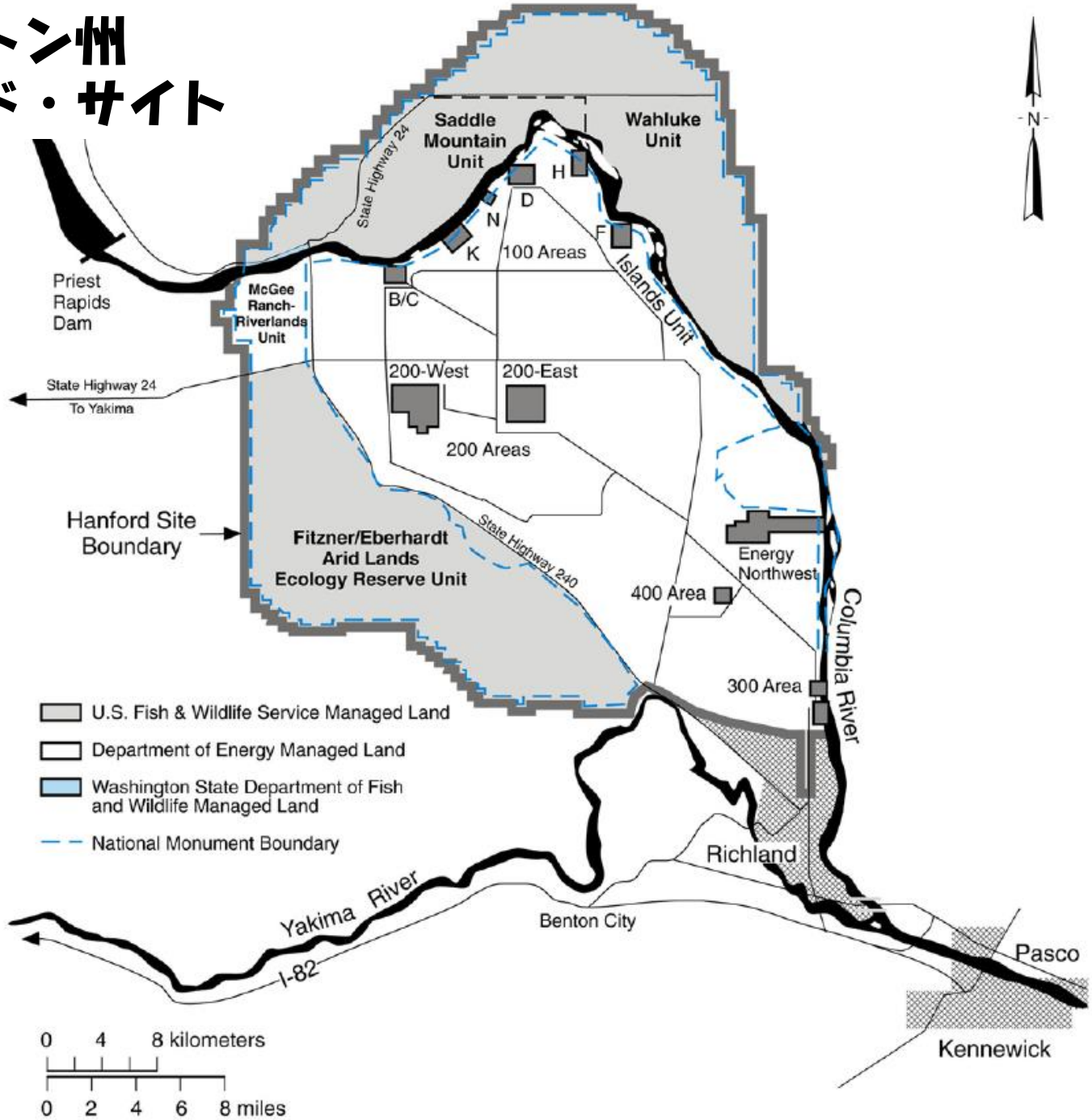
放射性核種	半減期(年)	太平洋の含有量(TBq)
H-3	12.32	370,000,000
K-40	1,248,000,000	7,400,000,000
C-14	5,730	3,000,000
Rb-87	49,200,000,000	700,000,000
U-235/238	4,470,000,000	22,000,000
福一事故流出		10,000

（出典） アイダホ州立大学(ISU)

世界の放射能汚染地帯

ノバヤゼムリャ
セラフィールド
マヤーク
セミパラチンスク
チェルノブイリ
ハンフォード
福島第一
ロッキー・フラッツ

米国ワシントン州
ハンフォード・サイト



米国ワシントン州
ハンフォード・サイト

高レベル放射性廃液を貯蔵していた埋設タンク
（後に腐食して漏洩）

危険性
（トリチウム vs. プルトニウム）

- トリチウムの放射能毒性
- ウォルマート問題（2009年10月）
- プルトニウムの放射能毒性
- WIPP火災（2014年2月）

0.47 TBq ！
EXIT
トリチウムを発光源とした20年間
メンテナンスフリーの非常口サイン

米国環境保護庁(EPA)の飲料水基準
40CFR141.66 "Maximum contamination levels for radionuclides"
常飲した場合 0.04mSv/年 に相当する濃度として 設定

放射性物質	濃度
H3(トリチウム)	740Bq/L
Sr-90	0.296Bq/L
α 核種(ウランは除く)	0.555Bq/L
ウラン	30μg/L

チェルノブイリ原子力発電所4号機

NSC: New Safe Confinement

3. 到達可能なゴール

ゴール

- 多重の隔離と監視

ゴール到達までの主要マイルストーン

- 燃料デブリの隔離。伝熱、対流、放熱による自然冷却。
- 敷地内建屋の除染。汚染廃棄物収納施設としての有効利用。
- 汚染水の処理。
- 敷地のドライ・アイランド化。
- 可燃廃棄物の焼却・減容。トレンチ埋設。

要件

- 40年以内（～2051年）
- 敷地境界の放射線レベル ＜ 250μSv/年（米国環境保護庁の基準の場合）

制約

- 労働衛生基準、作業環境、許容被曝線量を遵守しての労働者確保
- コスト
- 放射性廃棄物の最終処分場

燃料デブリの処理
回収か、現状のまま安定隔離か

<u>回収</u>

- 水中（冠水）工法　vs.　気中（非冠水）工法
- トップ・アクセス　vs.　サイド・アクセス、ボトム・アクセス
- 計量管理

<u>現状のまま安定隔離</u>

- 冷却方法
  - 水冷から空冷へ、アクティブからパッシブへ
- 隔離方法

遮水・止水のアプローチ

多重性

・ 遮水のみ、止水のみ、遮水＋止水

遮水技術

・ 凍土壁の維持

・ 恒久的な不透水性遮水壁の構築

・ 壕の構築による地下水流の遮断、雨水の浸透防止処理・排水設備

止水技術

・ 建屋内部からの止水処理

・ 建屋外壁のステンレス鋼板（二重）によるクラッディング

汚染水問題の解決アプローチ

汚染水対策

- 何もしない
- 貯水池からの蒸散
- コンクリート固化
- 再濃縮して長期貯蔵、減衰
- 伏流水として減衰
- 凍結して万年雪の中に埋めて減衰待ち
- 海洋放出