

# フクシマ・ クロージャー・プラン

～福島事故の問題整理と解決策の再考～

2013年12月12日

佐藤 暁

# 概要

# 個別の問題解決ではなく、 「連立問題」の解決策を模索！

- 地下水流入の遮断
- 燃料デブリの冷却
- 燃料デブリの回収

## オーソドックスな解決策

課題	解決策
地下水流入の遮断	凍土壁
燃料デブリの冷却	小ループ循環冷却
燃料デブリの回収	水中遠隔工法

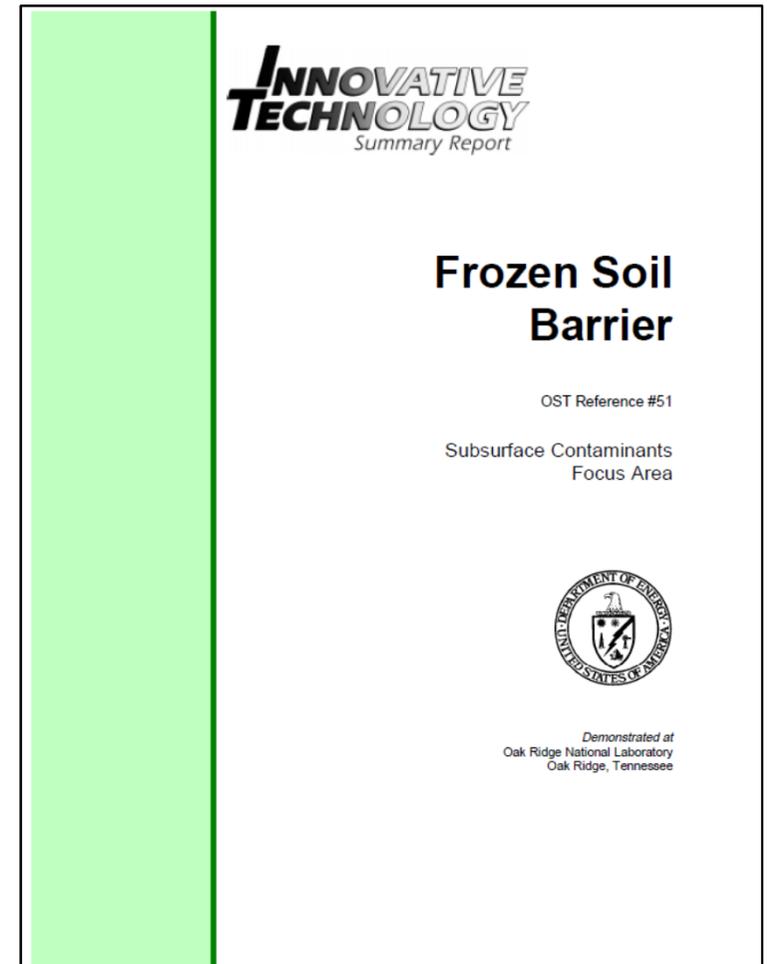
# 問題点

## ①凍土壁

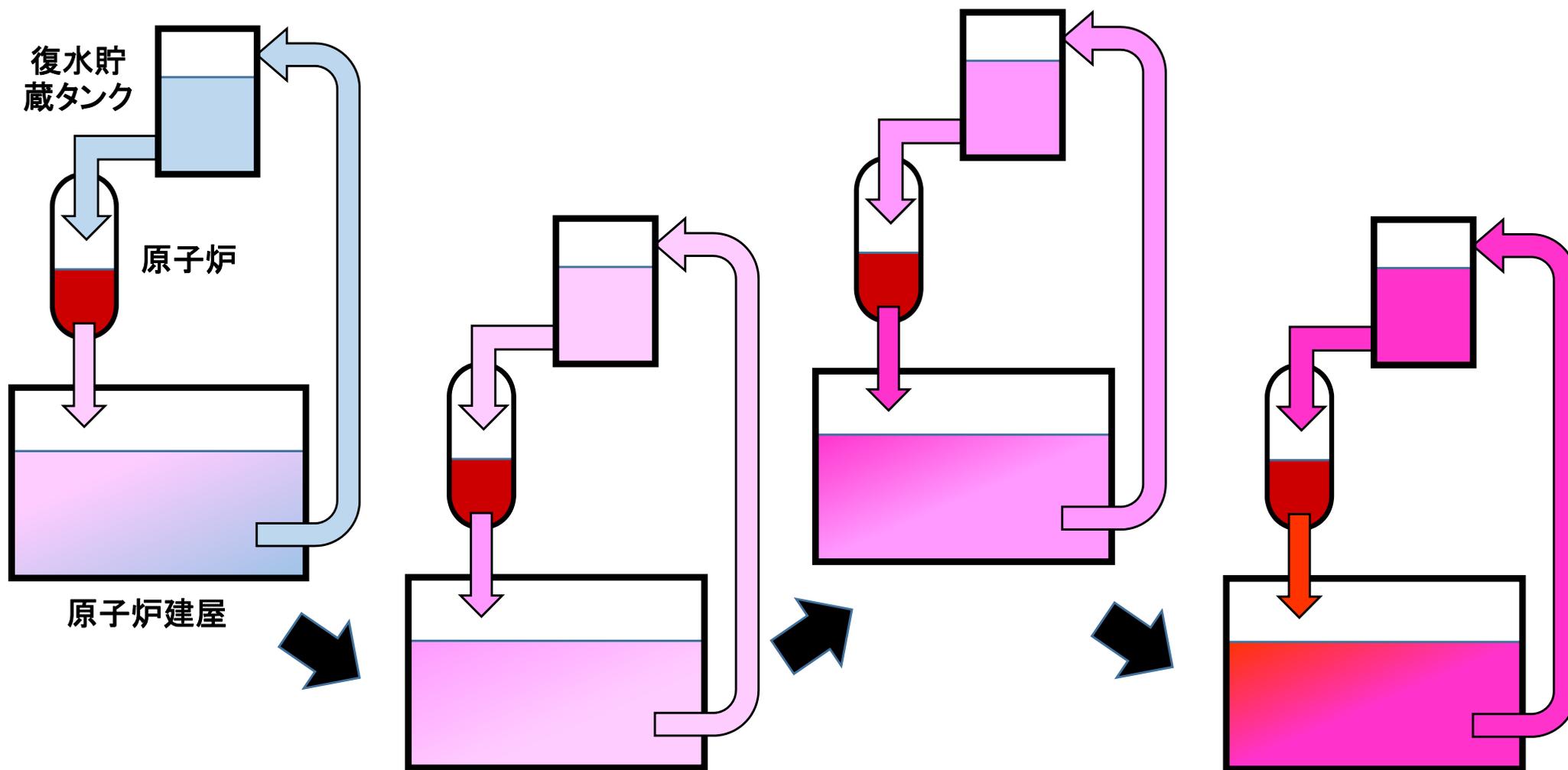
- ・ オークリッジ国立研究所での実証試験の成功(1997～1998年)
- ・ 有望な工法の一つ。

### 短所

- ・ タンク・ファームが守備範囲になっていない。
  - ⇒ タンクの漏洩が発生した場合の備えがない。
- ・ いつ凍土の維持を解除できるのか見通しが不明。
  - ⇒ 解除すると直ちに再び流入する。



## ②小ループ循環冷却



浄化装置のない小ループ運転をした場合の濃縮効果

### ③水中遠隔工法による燃料デブリの回収

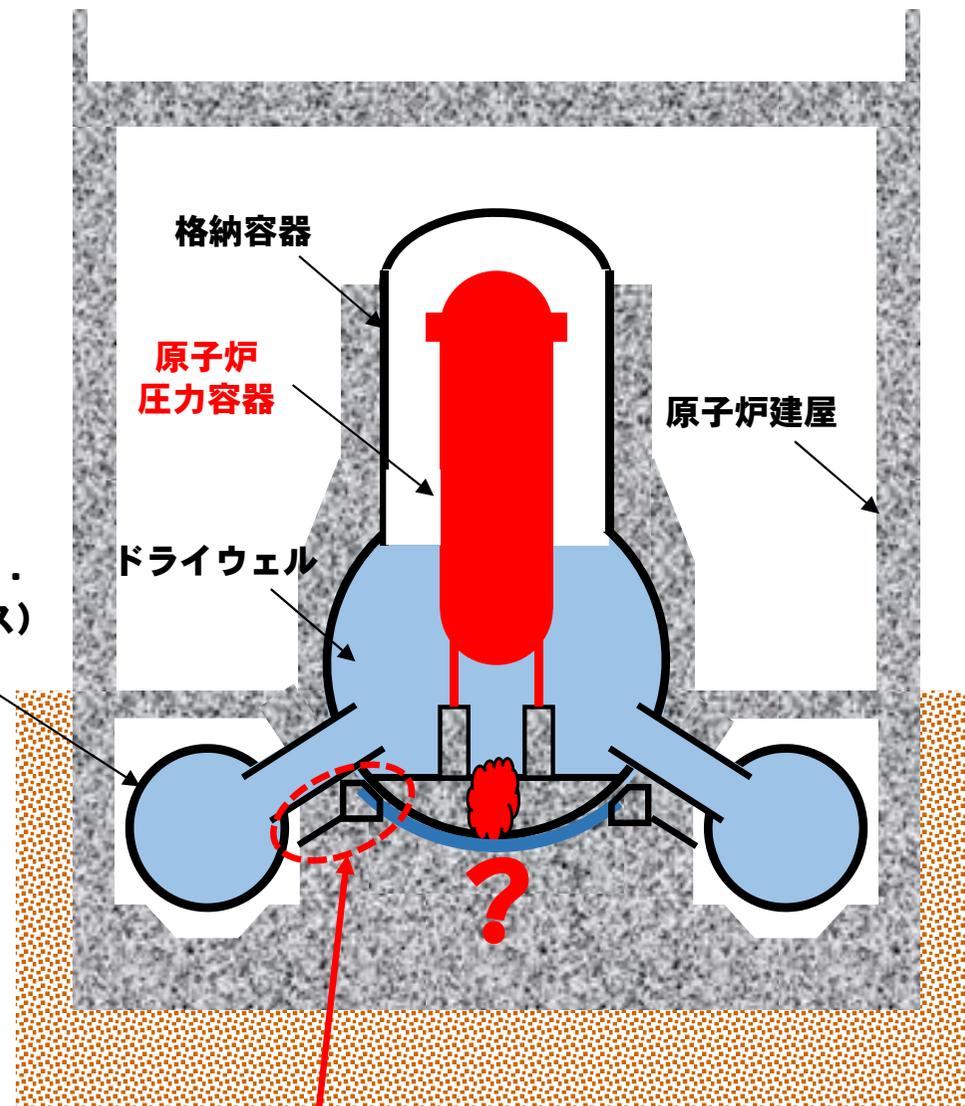
- **格納容器漏洩部の止水が困難。**
- **作業に着手できるまでの膨大な準備作業量。**
  - 高線量デブリの処理。
  - 天井クレーン、作業ブリッジの復旧。
  - 原子建屋の修復。照明、換気系、電源の復旧。
- **燃料デブリに到達するまでの干渉物多数。**
  - 格納容器上蓋、保温材、原子炉圧力容器上蓋、蒸気乾燥器、湿分分離器、上部格子板。
- **透明度、水質の確保が必要。**
- **放射線作業環境、作業装備が厳しい。**
- **高度な熟練技能が必要。**
- **長期間の水張り状態の維持に伴う高いリスク：格納容器の底部が大破した場合、燃料デブリが露出し、高線量。**

# サンド・クッション・ドレン配管からの漏水の意味すること

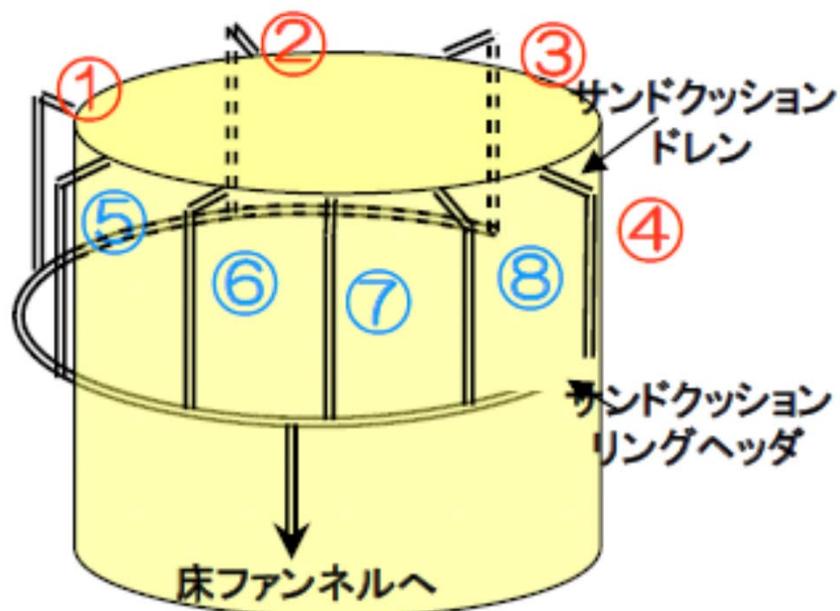
東京電力発表  
(平成25年11月13日)



サブプレッション・  
プール (トーラス)



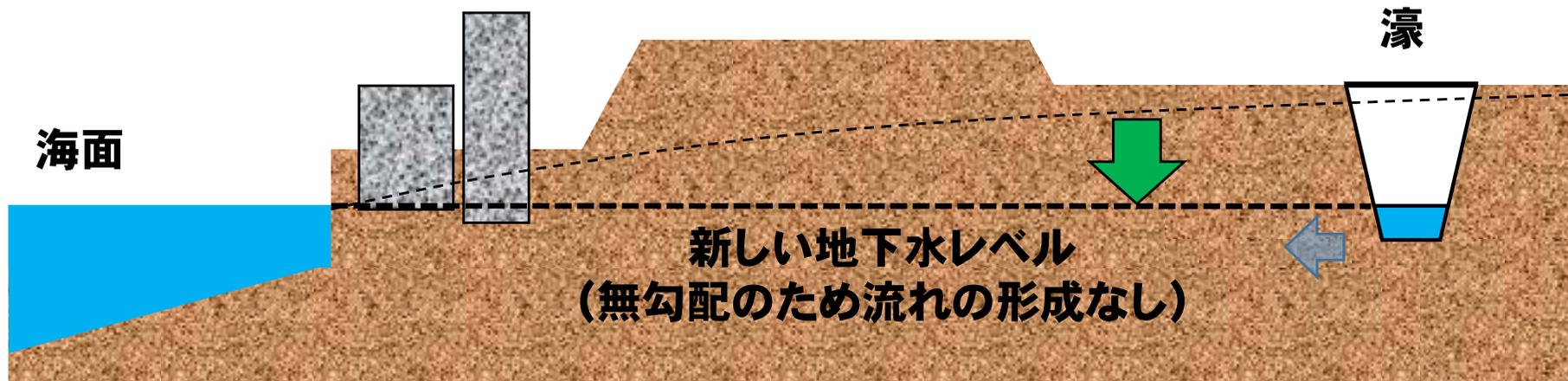
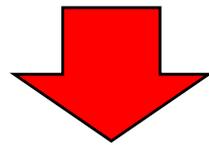
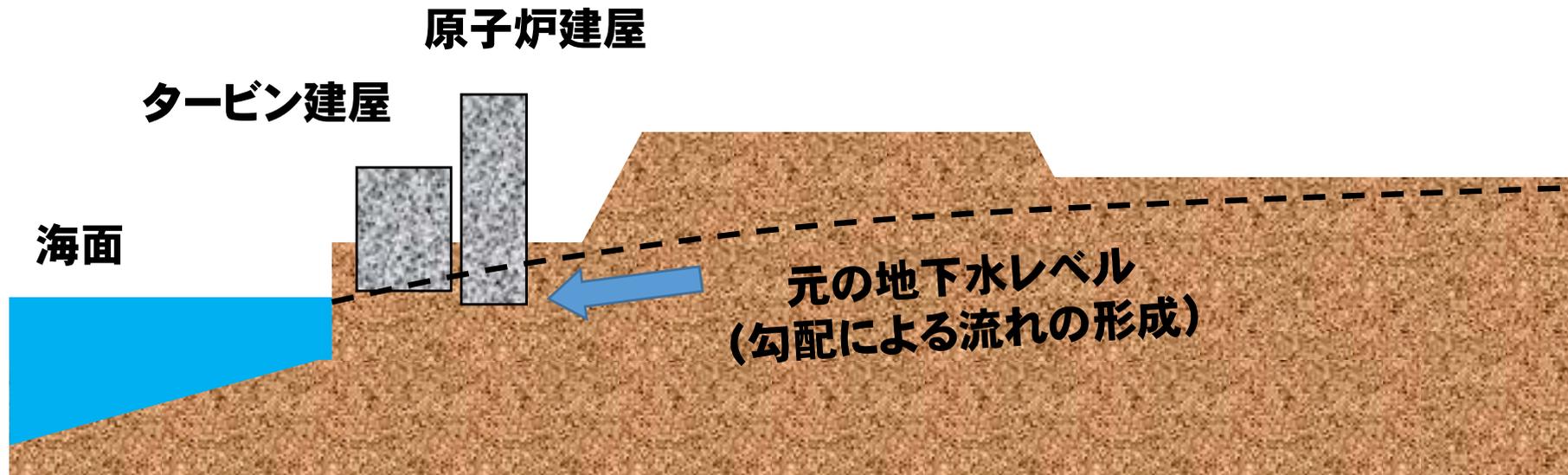
サンド・クッション、  
及びドレン配管



# 代案

課題	解決策
地下水流入の遮断	濠、「ドライ・アイランド」
燃料デブリの冷却	空冷化
燃料デブリの回収	地下ホットセル

# ① 濠、「ドライ・アイランド」



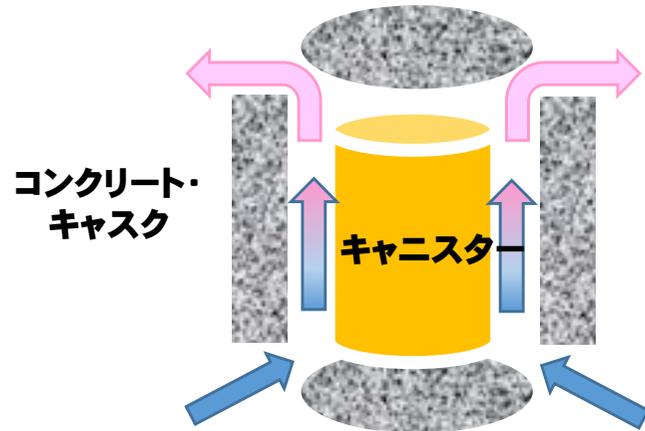
# 濠の輪郭案

総長約7km

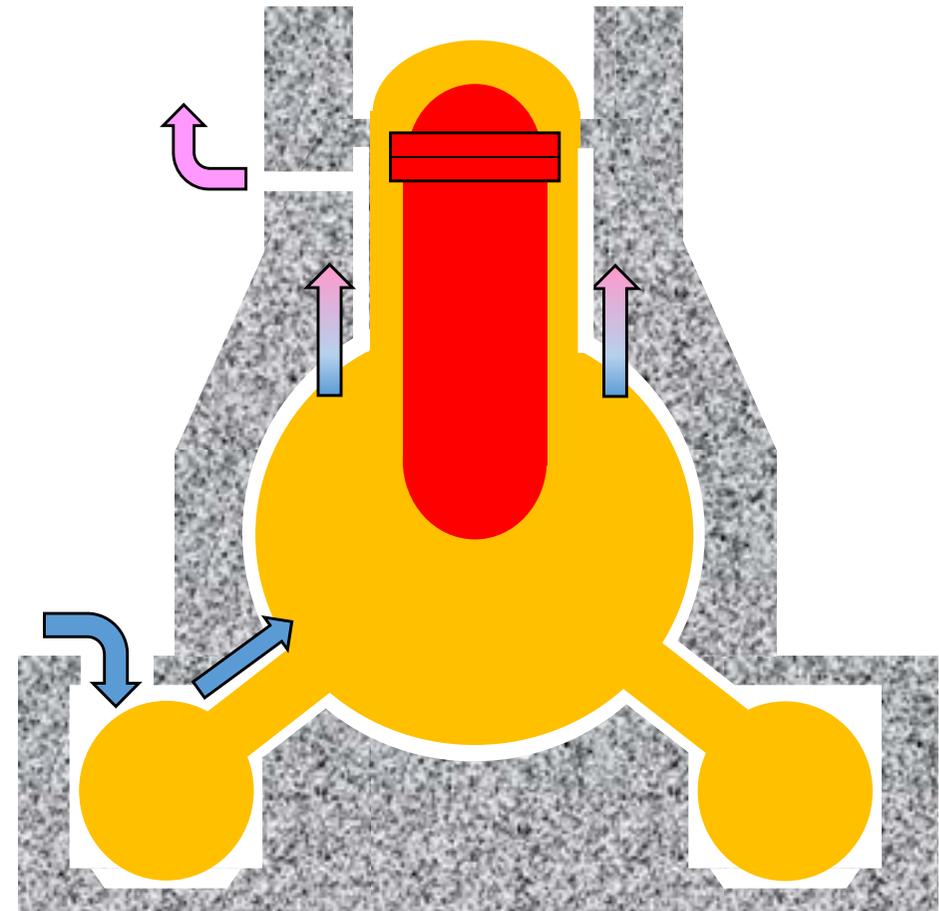


# ②空冷化

使用済燃料キャスク

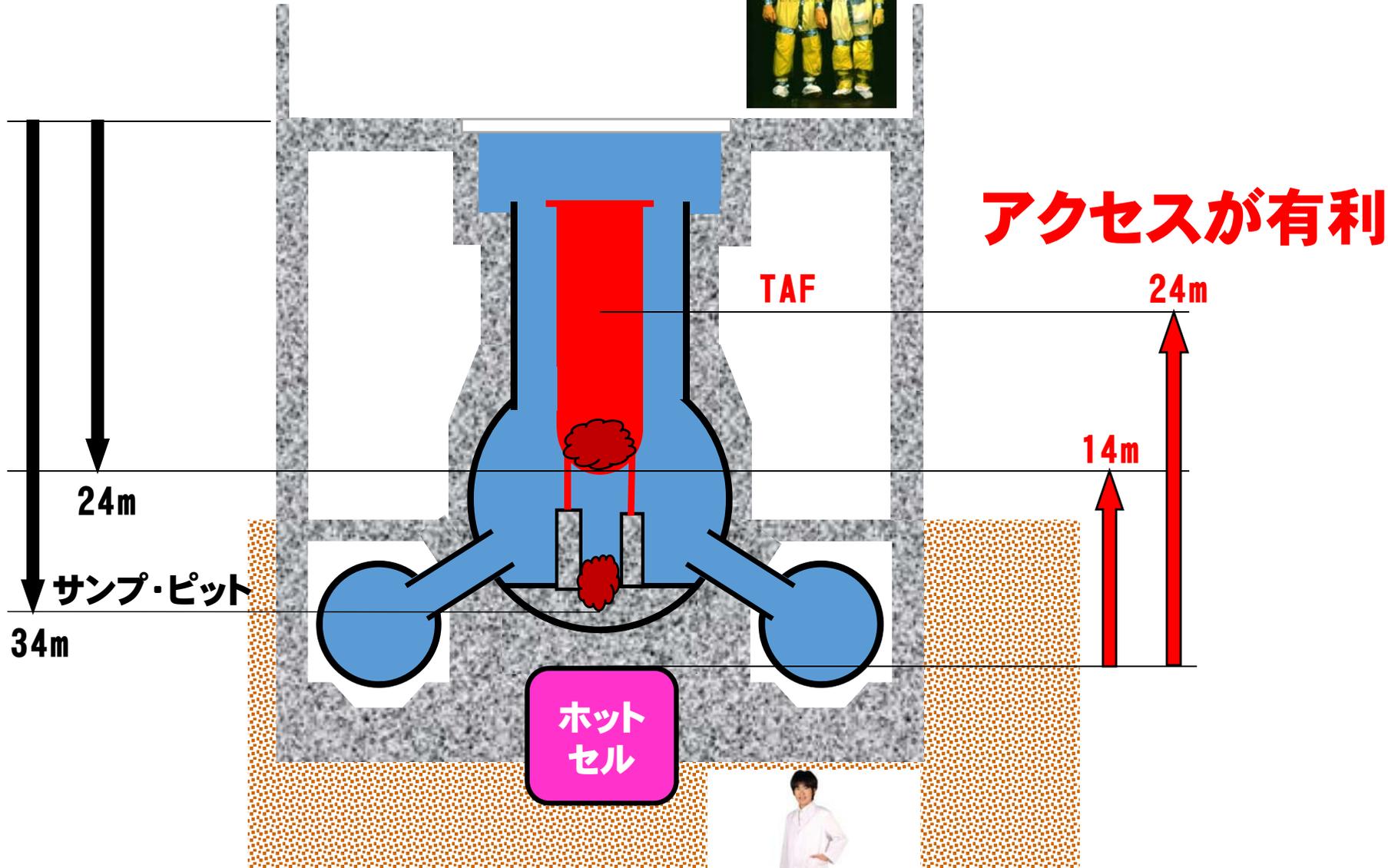


原子炉格納容器



	乾式 キャスク	2号機、3号機 格納容器
燃料装荷数	87体	548体
発熱量	33kW	約200kW
容器表面積	27.7m <sup>2</sup>	> 1,500m <sup>2</sup>
充填ガス	ヘリウム7気圧	空気
燃料被覆管温度	予想値 361℃	なし
容器表面温度	予想値 222℃	?
コンクリート温度	予想値 67℃	?

# ③地下ホットセル



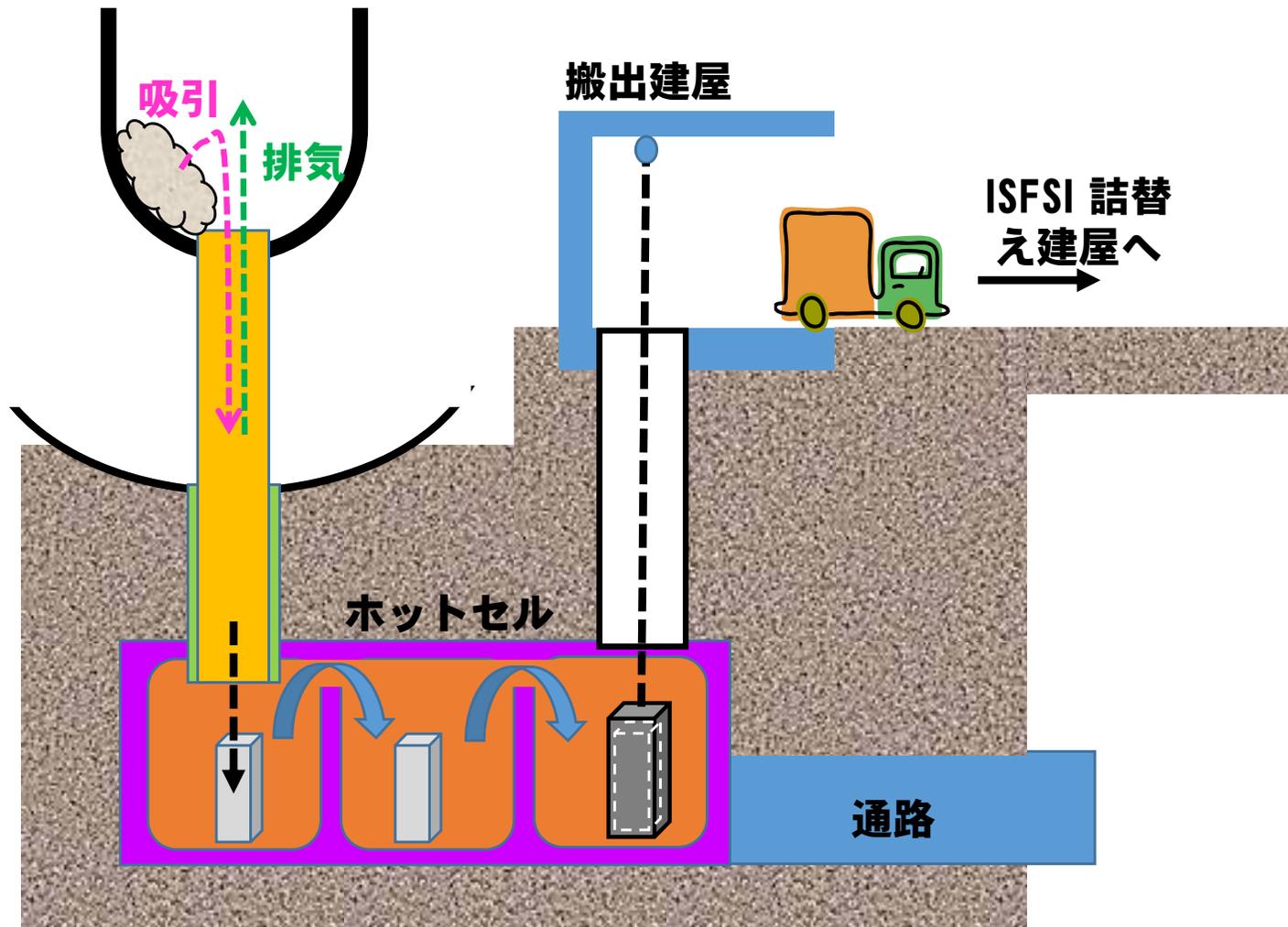
軽装備での作業が可能



# 超高レベルの放射性物質を 取り扱うためのホットセル



# 燃料デブリの回収からカプセル充填まで



カプセル  
充填

上蓋溶接

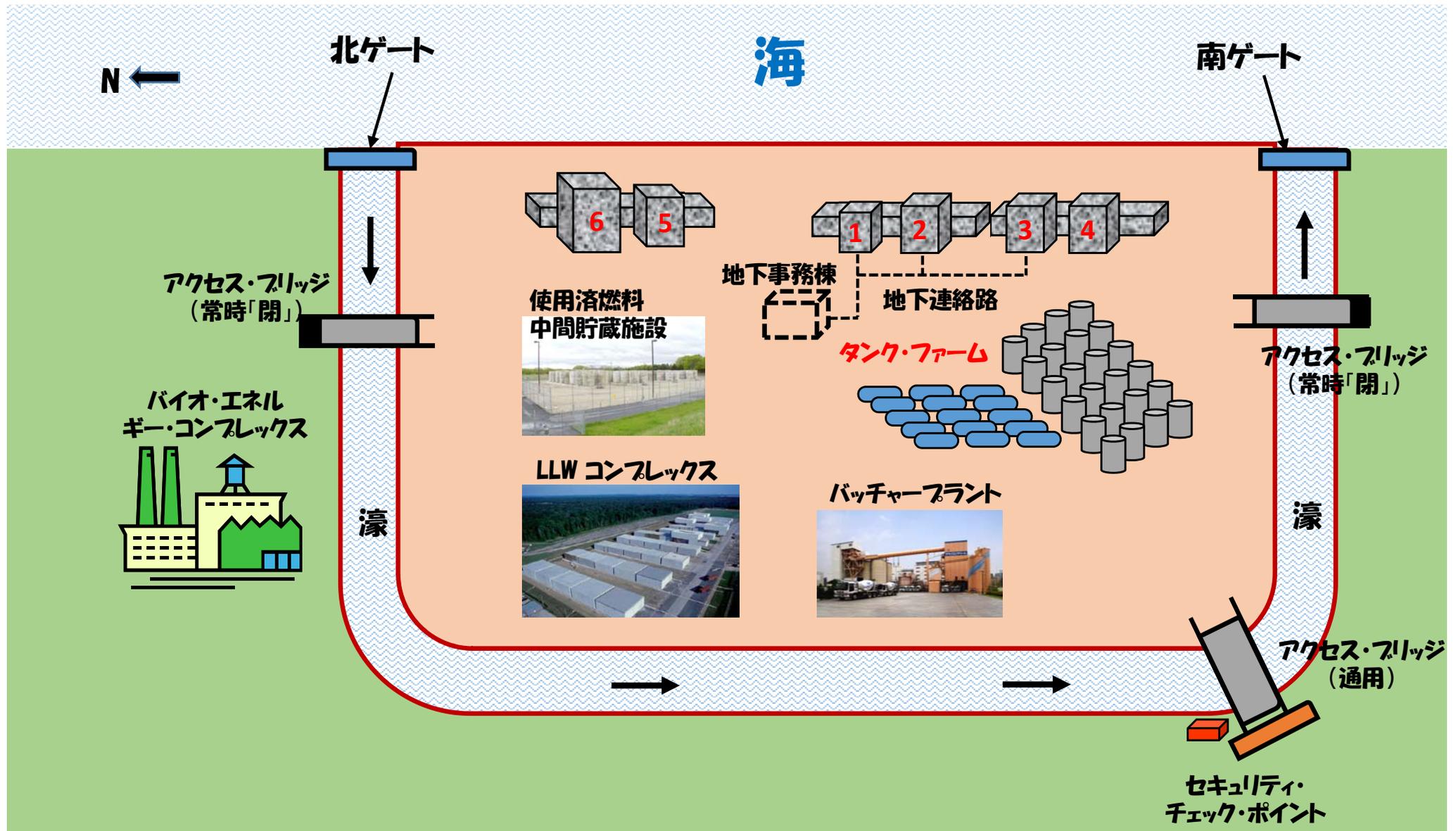
輸送 (遮蔽)  
カスク装荷

# 濠、ドライ・アイランドの付加価値

## 概念

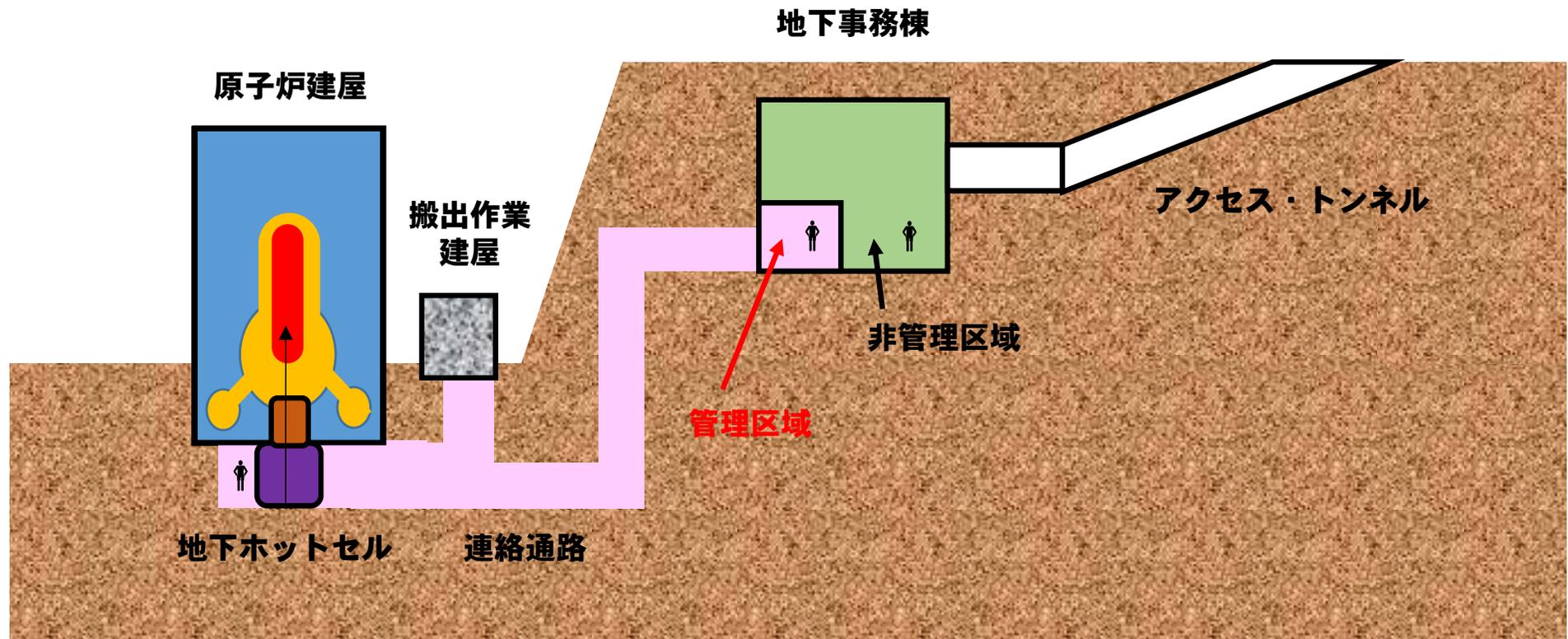
- **地下水レベルが低く、濠で隔離されていることを活かした多様な利用法**
  - **低レベル放射性廃棄物の埋設処理施設(トレンチ)**
  - **使用済燃料中間貯蔵施設(乾式キャスク)**
  - **地層処分に代わる使用済燃料最終処分用ディープ・ボアホールのパイロット・プラン**
- **濠の広大な湛水面積の活用**

# 「ドライ・アイランド」の全体概念図



# 地下事務棟

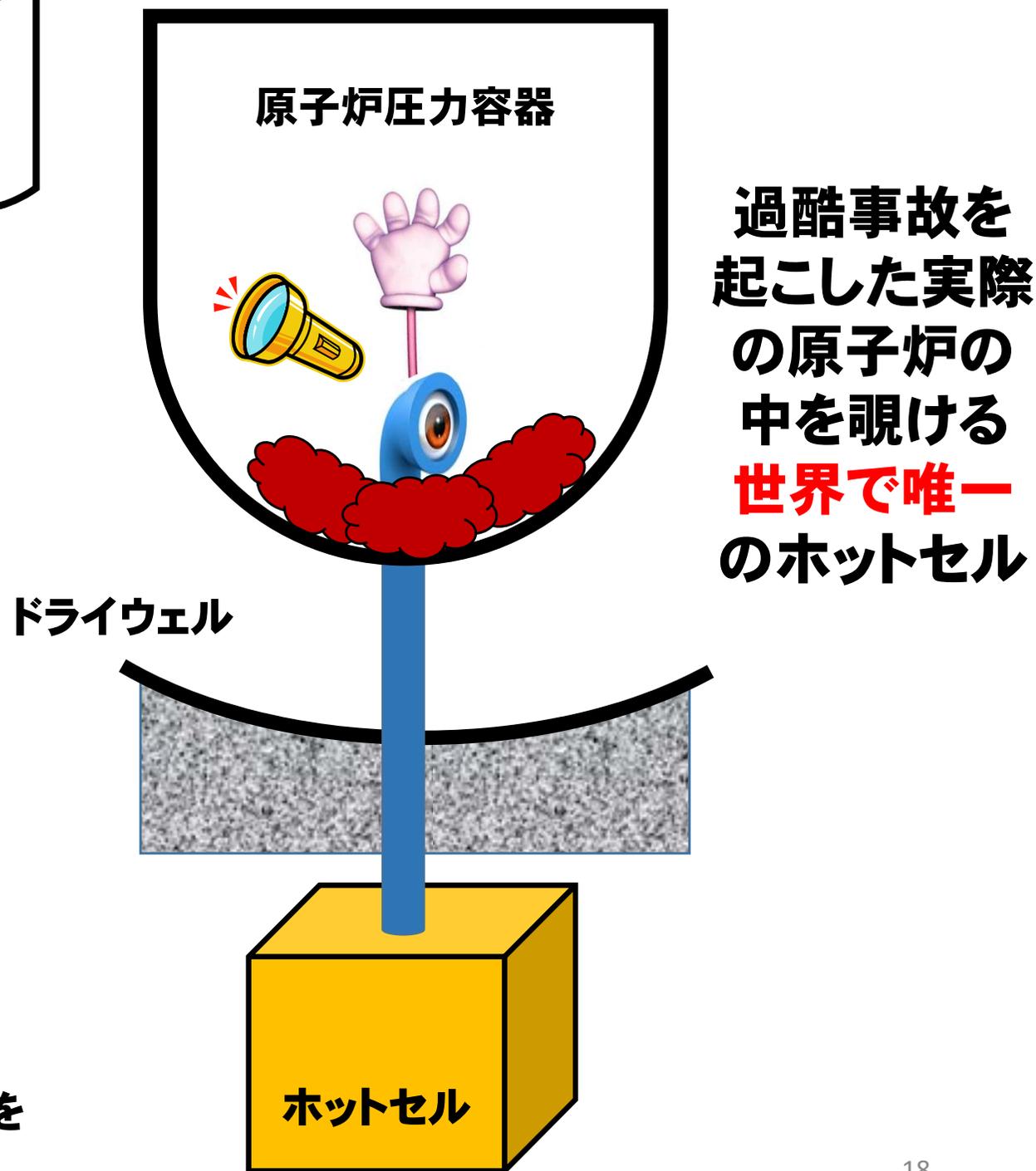
- 飛び地の非管理区域を確保
- ホールボディカウンターなどの設備も設置可能
- 地下ホットセルへの通路



# 国際貢献



チェルノブイリでは、高線量の原子炉を覗くための「潜水艇」が使われたが…



補足

# 状況整理

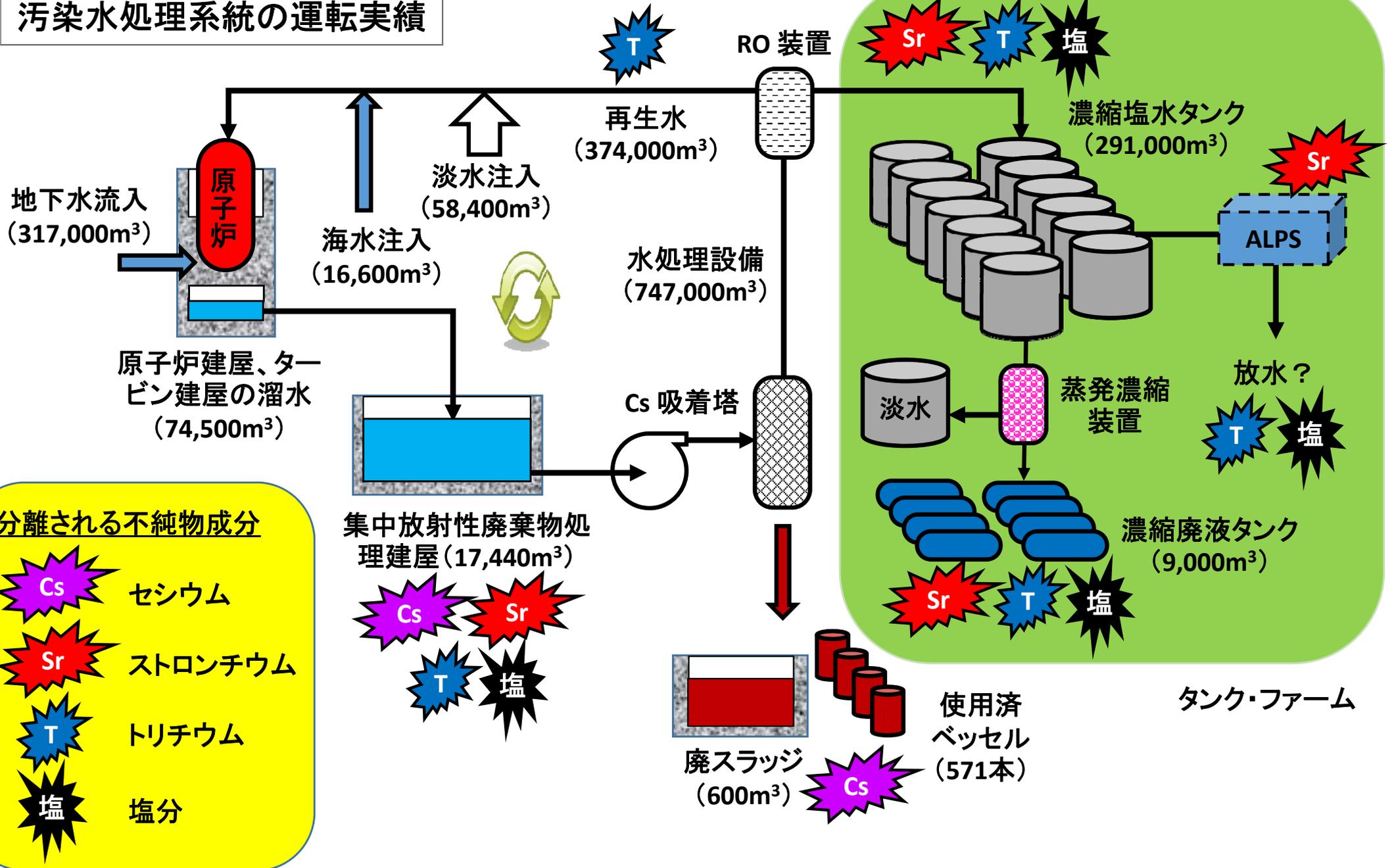
## ①汚染水処理系統

事故によって放出された放射エネルギーの比較(単位:TBq)

核種	福島			チェルノブイリ (参考)
	事故による大気放出		汚染水* (2013年10月)	
	事故時の量	2.6年後補正		
Cs-134	18,000	7,500	71,000	47,000
Cs-137	15,000	14,000	150,000	85,000
Sr-90	140	130	58,000	10,000
H-3			400	
(塩分)			(5,100トン)	

\*: 東京電力からのデータに基づく佐藤による推定値

2013年9月24日現在までの  
汚染水処理系統の運転実績



- **セシウム(Cs-134、Cs-137)は、すでにほとんどがキュリオン社の吸着塔、東芝のSARRY、アレバの除染装置で吸着。**
- **ストロンチウムは、R0装置で分離され、濃縮塩水タンク(86～90%)と濃縮廃液タンク(10～14%)に分離。**
- **5,100トンの塩分も R0装置で分離され、濃縮塩水タンク(86～90%)と濃縮廃液タンク(10～14%)に分離。**
- **トリチウムだけが除去されず循環。ただし、地下水の流入によって、徐々に希釈。**
- **ALPSは、ストロンチウムなどの放射性核種の除去に貢献するが、トリチウムと塩分は除去しない。**

## ②海洋汚染

### 海底土の汚染調査結果(単位:Bq/kg)

北		南	
5/6号機放水口北側	1,100	南放水口付近	790
請戸沖合1km	830	熊川沖合1km	150
請戸沖合2km	32	熊川沖合2km	180
請戸沖合3km	40	熊川沖合3km	500
請戸川沖合3km	970	熊川沖合5km	1,800
小高区村上沖合1km	1,400	熊川沖合10km	340
		熊川沖合15km	110
		熊川沖合20km	64

**検出限界未満 ≠ ゼロ**  
**サンプル水の放射能濃度が検出限界未満でも、海底土の汚染として検出。**

### ③再浮遊・フォールアウト

#### 放射性物質のフォールアウトの量(単位:Bq/m<sup>2</sup>)

採取期間	核種	福島第一	福島第二
2012年 4月2日～5月2日	Cs-134	7,700	150
	Cs-137	11,000	220
2012年 9月3日～10月1日	Cs-134	12,000	ND
	Cs-137	20,000	ND
2012年 11月1日～12月3日	Cs-134	1,600	15
	Cs-137	2,900	22

**検出限界未満 ≠ ゼロ**  
ダスト・サンプルの放射能濃度が検出限界未満でも、フォールアウトとして検出。

## ④注水による冷却効果

### 1～3号機における注水量と原子炉压力容器底部温度の推移

パラメータ			2011-9-30	2012-9-30	2013-1-31	2013-8-15
1号機	注水量	m <sup>3</sup> /h	3.7	4.9	4.4	4.3
	RPV底部温度	℃	77.5	35.4	18.4	32.5
2号機	注水量	m <sup>3</sup> /h	10.0	6.9	5.6	5.4
	RPV底部温度	℃	99.4	46	30.7	43.9
3号機	注水量	m <sup>3</sup> /h	10.5	7.1	5.3	5.5
	RPV底部温度	℃	78.1	48	31.6	42.0

2013年8月15日の注水温度を20℃と仮定した場合の除熱量の計算例:

1号機:  $(32.5 - 20) \times 4.3 \times 1000 \times 4.18 / 3600 = 62\text{kW}$

2号機:  $(43.9 - 20) \times 5.4 \times 1000 \times 4.18 / 3600 = 150\text{kW}$

3号機:  $(42.0 - 20) \times 5.5 \times 1000 \times 4.18 / 3600 = 140\text{kW}$

汚染水として熱源核種が溶出したことによる損失80kW(1～3号機)、ガンマ・ヒーティングによるバイパスなどが原因し、解析予想値よりも低め。

# 汚染水として熱源核種が溶出したことによる損失の計算

## 事故直後の溜水に含まれていた放射性物質の現在の換算値

核種	崩壊エネルギー	比率	現在の放射能量
Cs-134	2.059MeV	14.7%	64,400TBq
Cs-137	0.512MeV	30.7%	134,000TBq
Ba-137m	0.662MeV	30.7%	134,000TBq
Sr-90	0.546MeV	12.0%	52,300TBq
Y-90	2.280MeV	12.0%	52,300TBq
合計			437,000TBq

$437,000 \times 10^{12} \text{Bq} \times 1.00 \text{ MeV/sec/Bq} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} = 69,920 \text{ J/sec} \doteq 70 \text{ kW}$   
その後の溶出による追加を10%と仮定し、約80kW の熱源流出の可能性あり。

## ⑤循環運転による希釈効果

- 初期には、淡水で希釈しているかのように放射能濃度が低下していくが、2012年4月頃から、低下が鈍化。
- これは、実際には低濃度(とは言っても、 $10^4$  Bq/cm<sup>3</sup>オーダー)の溶出が続いているため。
- トリチウムは吸着・回収されず、地下水によって希釈されるだけのため、濃度の減少が著しく緩慢。

## 水処理系の運転に伴う放射能濃度の変化(単位: Bq/cm<sup>3</sup>)

年月日	実績		淡水による希釈を前提とした予想		
	処理量	濃度	n	e <sup>-n</sup>	濃度
2011 7/26	29,120	1,760,000	0.317	0.73	2,200,000
8/24	56,010	1,300,000	0.609	0.54	1,600,000
9/20	97,030	1,100,000	1.055	0.35	1,000,000
10/25	140,020	830,000	1.522	0.22	650,000
11/22	168,450	720,000	1.831	0.16	480,000
12/27	192,110	380,000	2.088	0.12	370,000
2012 2/21	246,810	280,000	2.683	0.068	210,000
3/27	277,210	160,000	3.013	0.049	150,000
4/24	308,620	130,000	3.355	0.035	100,000
6/19	363,840	110,000	3.955	0.019	57,000
12/18	527,430	59,000	5.733	0.0032	9,700
2013 7/9	686,020	54,000	7.457	0.00058	1,730
9/24	747,290	?	8.123	0.00030	890

$$n = \frac{\text{処理量}}{\text{系統保水量}} = \frac{\text{処理量}}{92,000}$$