

## 福島第一原子力発電所の処理戦略：

### 新しい「その場石棺化プラン」提案

2011年5月27日

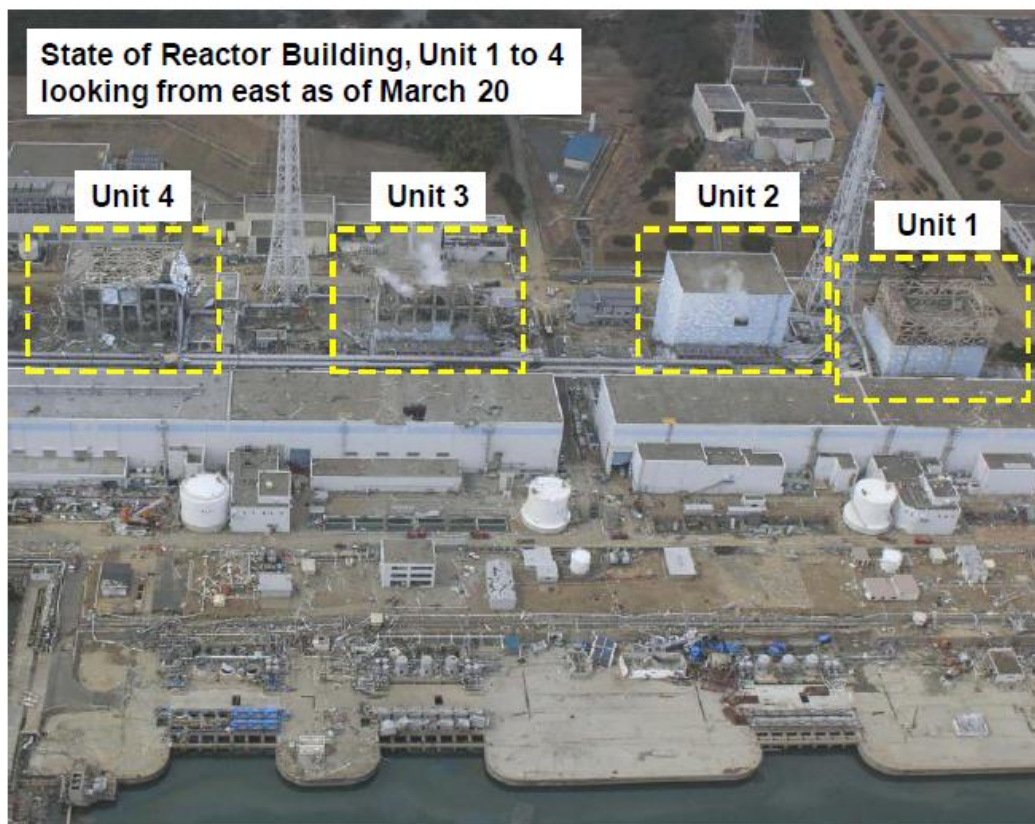
佐藤暁

[satoshi@sato@iacdc.com](mailto:satoshi@sato@iacdc.com)

International Access Corporation

#### Abstract

福島第一原子力発電所で発電所領域を「Green Field」に解体する目的で進行中の「Green Field プラン」の妥当性を検討した。その結果、「Green Filed 化」は、原子炉の状態と大気と海洋の放射能汚染を防ぐための緊急の問題を考慮すると、実際上不可能であることが分かった。その代案として、「その場石棺化プラン」を提案する。これは、1) 福島第一原子力発電所を処理する柔軟で実行可能である、2) 水の処理と石棺化、3) 千年を超えるその場地上保管。そして4) 大気と海洋の汚染を現実的な時間尺度で止めるための具体的な技術提案を含んでいる。



5/22/2011

## Executive Summary

### 1. 原子炉の現状

公開の情報をもとに、以下の結論に達した (Table 1 and Figures 1 and 2):

- 1) 1号、2号、3号炉はどれもひどく損壊している。炉心は、6時間以上にわたる (1号炉：14時間09分、2号炉 06時間29分、3号炉 06時間43分) 冷却能力の喪失により、完全に破壊された。ほとんど燃料棒は壊れて炉心版に落ち、そのうちかなりの部分が下部ヘッドを貫通して格納容器に落下した (図 1)。そのうち、いくつかは原子炉床に落下してコンクリート破壊が進んでいる。幸いなことに、注水作業のおかげで、床のコンクリートは貫通していないと思われる。水密性は、圧力容器に関しては完全に失われ、格納容器についても部分的に失われているので、圧力容器の水面レベルを維持するためにはM、かなりの量の注水を行わなければならない。4号炉だけは、幸いなことに3がt11日の時点で空だったので、破壊を免れている。
- 2) 使用済み燃料棒保管プールに関しては、これまではっきりした情報は発表されていない。3号炉と4号炉の保管プールは過熱による熱的な損害を受け、1号炉と4号炉の保管プールは地震と水素爆発による機械的な損害を受けていると思われる。2号炉の保管プールは目立った損害を受けてないようだ。
- 3) 1号炉、2号炉、4号炉の建屋はどれも水素爆発で強く損害を受けている。このため、オーバーヘッドクレーンなどの周辺機器が使えない。

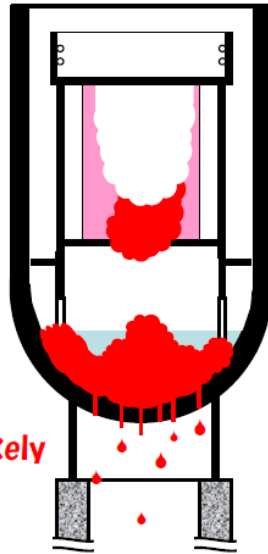
Table 1: 福島第一原子炉の現状

Unit	Reactor Core	Reactor Pressure Vessel	Primary Containment	Reactor Building
1	Totally destroyed	Barrier integrity no longer maintained. Bottom Head Penetrations severely damaged.	Barrier integrity no longer maintained. Details not confirmed.	Original Function as Secondary Containment totally lost due to H2 explosion on Refueling Floor. Remaining part of building still reasonably good. Overhead Crane (OHC) and Fuel Handling Machine (FHM) not available.
2	Ditto	Ditto	Barrier integrity severely degraded due to H2 explosion inside or outside Torus.	Function as Secondary Containment still reasonably maintained even after H2 explosion. OHC and FHM still fully functioning.
3	Ditto	Ditto	Same as Unit 1	Same as Unit 1, except that some portions lower than Refueling Floor also degraded due to H2 explosion
4	Empty	Not affected	Not affected	Ditto

Degradation of Reactor Pressure Vessel Bottom Head

Creep rupture begins to occur at ~240-deg C below melting point (1500-deg C) of vessel material (low alloy steel), allowing some leakage of highly contaminated water containing fractured pieces of fuel pellets.

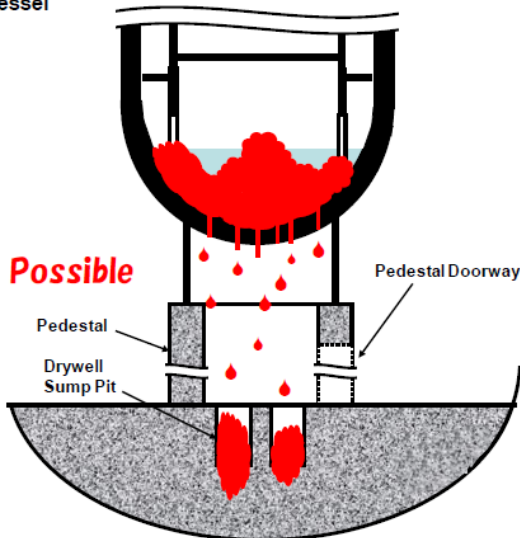
Highly Likely



14

Figure 1. 原子炉格納容器はほぼ間違いなく破壊されている

Further Degradation of Reactor Pressure Vessel Bottom Head



16

Figure 2: たぶん、破壊は格納容器にまでおよび、溶け落ちた燃料棒の一部は原子炉建屋床まで到達している。

## 2. 「グリーンフィールド化プラン」(4,5,6): グリーンフィールド化への解体にはあまりに多くの困難がある

東京電力による福島第一原子力発電所の解体長期計画は表 2 にまとめられている。その最終形態はあまりはっきりとは表現されていないが、グリーンフィールド化を最終目標としているように思われる。しかし、上の述べた現状を考えると、福島第一原子炉の周りを「グリーンフィールド」化するのは、以下の理由により不可能であると結論せざるを得ない。

Table 2: 東京電力による福島第一原子力発電所の解体計画

New timetable for trouble-shooting of nuclear accident of TEPCO (major amendment)

schedule		April 17	Step 1 (finished by the end of July)	Step 2 (from mid- Oct. 2011 to Jan. 2012)	mid-term purpose
cooling	nuclear reactor	input of fresh water	minimum watering (water cooling) preparation for reuse of polluted water repair of broken part of container working cond. enhance.	circulate water cooling complete drowing of container Stable cooling	Cold shutdown stop corrosion of reactor and pipes
	fuel rod pool		remote control of watering setting heat exchanger	more stable cooling	extraction fuel rod
control	polluted water	transport. polluted water	stop ocean pollution	storage lowering amount stop ocean	completion of polluted water treatment pollution
	underground water		stop underground	water pollution	build. barrier for underground water
prep. for after shock	tsunami/shake	protection	for aftershocks and tsunamis prep. multiple radiation barrier	reinforcement of each reactor	reinforcement of each reactor
environ. enhance.	life/work environ.		enhancement of working	conditions	

- 1号炉、2号炉、3号炉の燃料棒の回収は、燃料棒自身の破壊、水素爆発によるオーバーヘッドクレーンなどの周辺機器の損失により、絶対に不可能である。
- 圧力容器への注水は大幅に減らさなければならない、さもなければ強度汚染水が大量に作られ、原子炉の床およびその地下に漏れ出す。これらは、地下水の流れに従って、海洋に流れ出す。
- 原子炉周辺の、建屋、土壌、そして地下水は、プルトニウムを含む放射能物質によって広範に強く汚染されてしまった。
- 大量の強度に汚染された材料とコンクリートのがれきを保管する場所の候補さえ存在していない。

### 3. 「その場石棺化」計画：現実的な代替案

福島第一原子力発電所の「その場石棺化」を実現する代替案を提案する。その骨子は、以下のようなものである：

- 水に代わってガス／空気による冷却を行う。最初は強制対流、最終的には自然対流による。
- 水漏れを止める。細かなガラス繊維と炭化珪素、炭化ホウ素の粉を混ぜたものを注入

し、水漏れ箇所をふさぐ。その上でリン酸カルシウム  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  のような沈殿する化合物を注入して固化を図る。

- 現在容器かプールに保管されている強度汚染水は、処理後  $5,000\text{Bq}/\text{cm}^3$  まで、放射能レベルが下がれば、汚染されたコンクリートのがれきと混ぜて原子炉や原子炉建屋の石棺化に使う。一方、濃集された方の放射性液体は、ガラス固化後適切なコンテナに入れて、その場で保管する。
- 地下 20–30m (TBC) まで伸びたコンクリートの壁で建屋を囲んで、外部からの地下水の流入を防ぎ、原子炉の建屋の地下に漏れ出した強度汚染水を封じ込める。
- 原子炉建屋の内外部に TSP (Trisodium Phosphate:  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ) 溶液を噴霧して、 $^{131}\text{I}$  の飛散を抑える。

### 3.1. 原子炉の冷却

解放される熱量の減少にしたがって、以下のように冷却方法を変える：

- モード 1：強制循環ヘリウム冷却 (Figure 3)

ヘリウムガスは図 3 の A を送風システムで通じて炉心に送り込まれる。炉心の金属構造が、ヘリウムガスへ有効に熱を伝えるヒートシンクとして機能する。温められたガスは、さらにサプレッションチェンバーに送られ、その水を蒸発させる。さらに暖かいガスは原子炉圧力容器の上部に新しく取り付けられたパイプに集められる。ヘリウムガスは、スクラバー／ガス冷却器で、不純物を取り除かれて再び循環される。不純物ガスを調べて、原子炉内の状況を把握する。原子炉圧力容器と格納容器の間には、銅の球殻、ゼオライト、パーライトなどを、高い熱伝導率、放射線遮蔽能力、放射性物質・粒子の吸着能力を考慮して混合して詰める (図 4)。

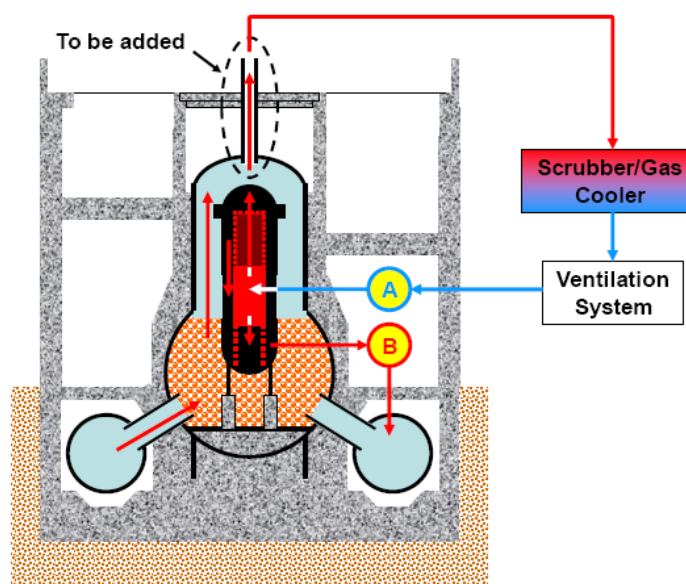


Figure 3: ヘリウム強制冷却 (モード 1)

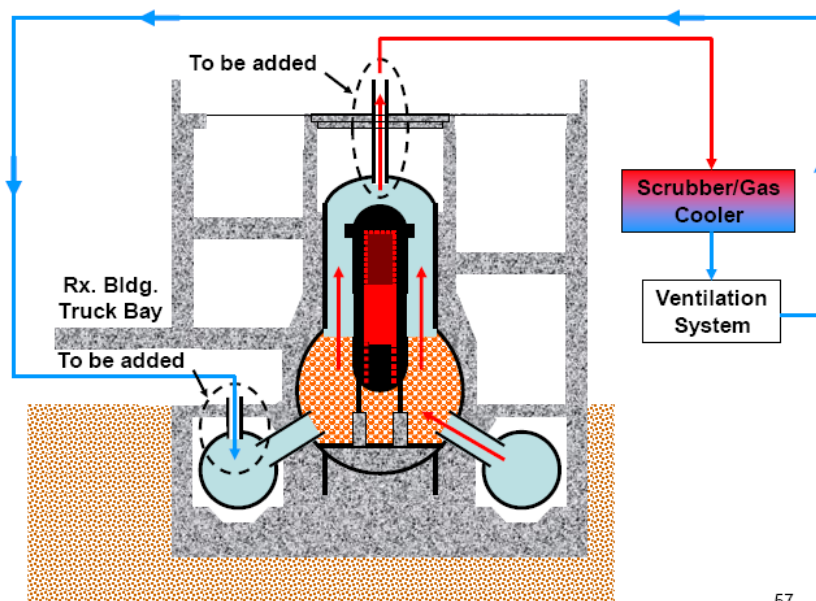


53

Figure 4: 格納容器は銅の球殻、ゼオライト、パーライトなどを、高い熱伝導率、放射線遮蔽能力、放射性物質・粒子の吸着能力を考慮して混合して詰める。

● モード 2：強制空気冷却 (Figure 5)

空気はサプレッションチェンバーに送風システムによって、新しく設置されたパイプによって注入される。空気は原子炉圧力容器と格納容器の間を通り抜けながら冷却する。温められた空気は原子炉の上部にあるパイプから引き抜かれる。



57

Figure 5: 強制空気冷却 (モード 2)

● モード 3: 自然空気冷却

空気は原子炉の上部から能動的に引き抜かれる。新しい空気は、サプレッションチェンバーのパイプもしくはその他の漏えい箇所から自然に入り込む (Figure 6)。さらに時間がたてば、上部のパイプを封鎖するか取り除く。この場合は空気は自然に格納容器の外側を流れて冷却する。石棺化が完成する (figure 7)。

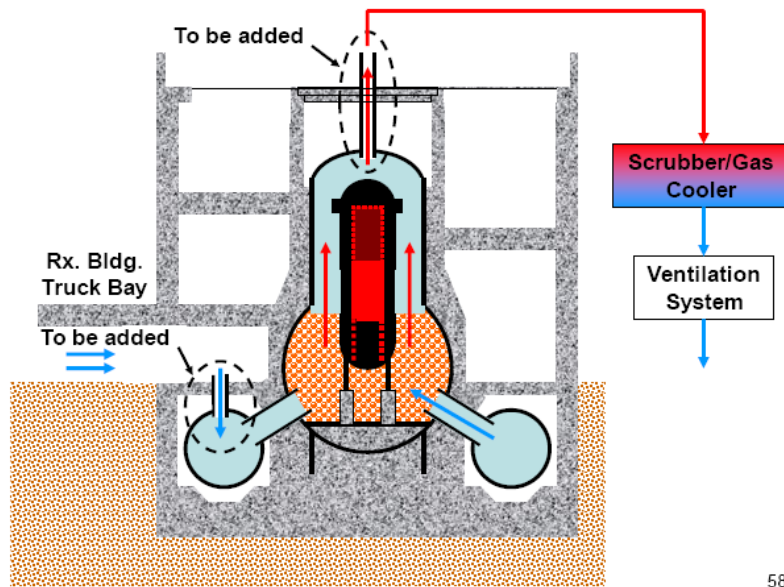
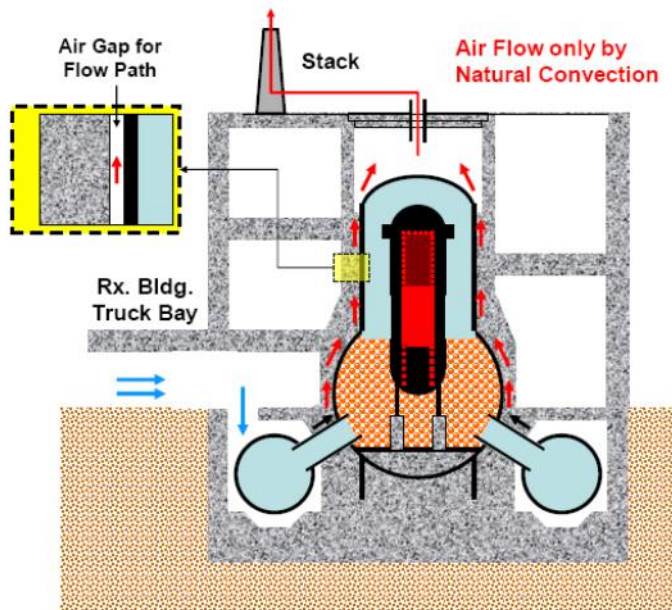


Figure 6; 自然空気冷却 (モード 3)



59

Figure 8: 自然冷却：石棺化の完成

## Tentative Mode Change Schedule for each Reactor

Operation Mode	1	2	3
Heat Generation Range (kW)	> 700	200 - 700	< 200
Cooling Strategy	He/Forced	Air/Forced	Air/Natural

	Estimated Heat Generation as of 5/11/2011	Time Period			
		1Y	2Y	3Y	10Y
Unit 1	70kW	Mode 1	Mode 2	Mode 3	
Unit 2	460kW	Mode 1	Mode 2		Mode 3
Unit 3	230kW	Mode 1	Mode 2		Mode 3
Unit 4	1800kW	N/A			

Figure 8: 原子炉の「その場石棺化」プランのタイムテーブル

### 3.2. 使用済み燃料棒保管プールの冷却

1号炉、3号炉、4号炉の使用済み燃料棒保管プールの中にある燃料棒は、ヒートシンクがついた金属の箱を新たに装着してその場で冷却する。プールは、原子炉と同様の混合物で満



たす。原子炉と同様に、最初はヘリウムで次第に強制空気冷却、自然空気対流に変えてゆく。2号炉の燃料棒はよく検査して異常がなければ、青森県の六ヶ所村の再処理施設に運んで保管する。T

## Tentative Mode Change Schedule for each SFP

Operation Mode	1	2	3
Heat Generation Range (kW)	> 350	100 - 350	< 100
Cooling Strategy	He/Forced	Air/Forced	Air/Natural

	Estimated Heat Generation as of 5/11/2011					
		0.5Y	2Y	5Y	5.5Y	10Y
<b>Unit 1</b>	<b>70kW</b>	Mode 3				
<b>Unit 2</b>	<b>460kW</b>	Mode 1	Mode 2		Mode 3	
<b>Unit 3</b>	<b>230kW</b>	Mode 2		Mode 3		
<b>Unit 4</b>	<b>1800kW</b>	Mode 1		Mode 2		Mode 3

Figure 9: 使用済み燃料棒保管プールのその場石棺化のタイムテーブル

#### 4. 最悪の場合：すべての建屋を石棺化する

酸化ウランがコンクリートの建屋の基礎を突き抜けて、第三紀の半個結砂岩の中に貫入してしまっている最悪の場合を考える。壁の砂岩が解けて酸化ウランと酸化ジルコンのマグマと混合するので、マグマの温度は低下する。最初の高さに依存して、マグマは最終的には固化して深くても 10-20m で止まると考えられる。そのまわりの砂岩は脱水化され、水に富んだ液体を放出し、放射性物質と一緒に上昇する。これらの流体による大気汚染を防止するために、粘土、軽石、ゼオライト、グラファイト、有機物の混合物で建屋を満たす。シールドされた建屋の上には放射性物質を吸収するフィルターを装着した煙突を立てる。

このような事態が、すでに起こっているか将来起こる場合には、広範な汚染が地下に漏れた強度汚染水により続くことが心配される。というのは、地下水の流れが放射性物質を海に運ぶからである。これを防ぐために、深さ 20-30m のコンクリートの厚い壁で、原子炉の地下を囲んでしまう必要がある。これらの壁は、周りからの地下水の流入を防いで、放射性物質を原子炉地下に閉じ込める。

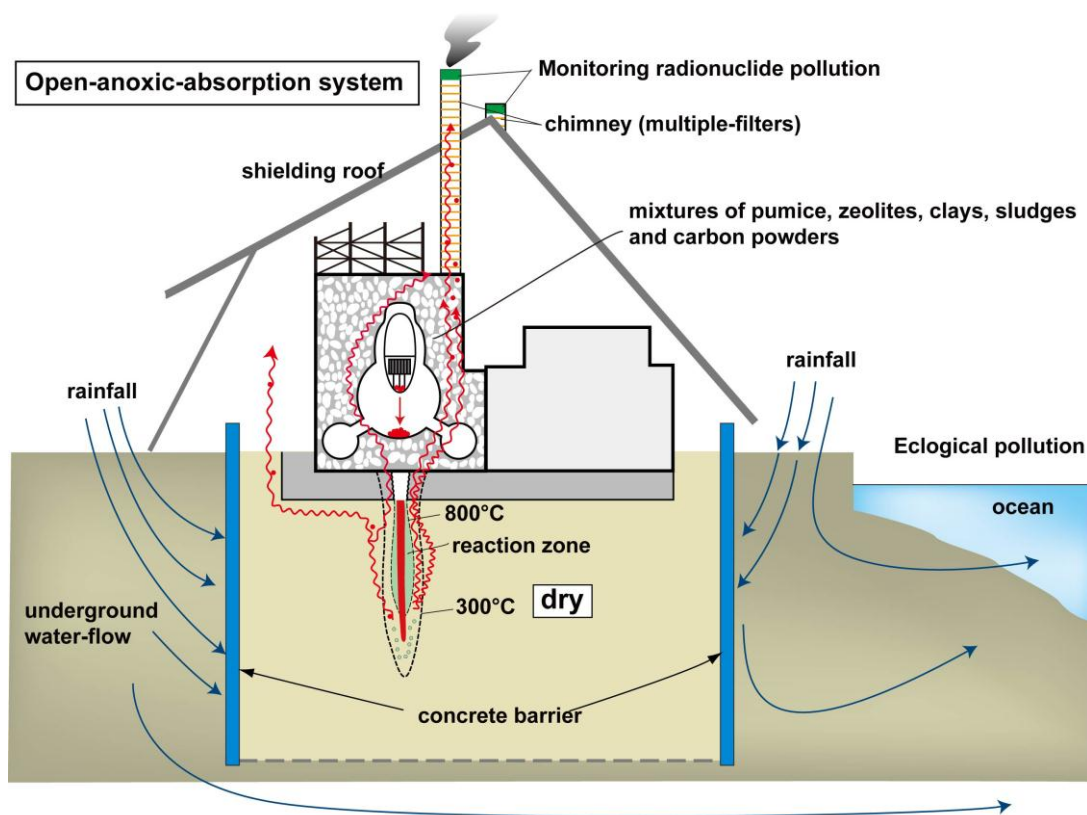


Fig. 10 建屋を完全に石棺化するプラン：1)建屋屋上の煙突により蒸気が逃散するオープンシステムの維持、2)炭素の粉、酸素を含まない有機物を多く含んだ堆積物（ヘドロ）と粘土による酸素欠乏状態の維持（水素爆発の防止）3）ゼオライト、粘土、グラファイトによる放射性物質の吸着性の維持。煙突に設置された多層のフィルターで汚染物質を除去する。煙突の上では、放射性物質量を監視する。

## 5. 「石棺化」を超えて

最先端の技術による新しい設備・装置が福島第一原子力発電所の被災地の経済的な復興には必要である。

- 太陽光で駆動される新しい技術を導入したエネルギー施設
- 自然に得られる資源による環境浄化や放射性生物学の研究施設

## References

- 1) USNRC Technical Training Center, G.E. Technology Systems Manual (R-304B)
- 2) USNRC Technical Training Center, G.E. Technology Advanced Manual GE BWR/4 Advanced Course (R-504B)

- 3) NUREG/CR-6042, Rev.2 “Perspectives on Reactor Safety” (March 2002)
- 4) Maine Yankee Decommissioning Experience Report (Detailed Experiences 1997-2004)
- 5) Yankee Nuclear Power Station License Termination Plan, Rev.1 (November 19, 2004)
- 6) Zion Nuclear Power Station Post-Shutdown Decommissioning Activities Project
- 7) NUREG-1350, 2010-2011 Information Digest, Volume 22 (August 2010)
- 8) OECD/NEA “Chernobyl Ten Year On Radiological and Health Impact – An Assessment by the NEA Committee on Radiation Protection and Public Health” (November 1995)
- 9) MIT Study on The Future of Nuclear Power (2003, Massachusetts Institute of Technology)

#### エピソード

2011年3月19日に、SSは福島第一原子力発電所の1号炉、2号炉、3号炉が、6時間を超える冷却能力の喪失のためにメルトダウンしているとの見解をまとめた技術資料をリリースした。より詳細な技術資料は、International Access Corporationから3月28日にリリースされている。さらにSSは4月22日に理研セミナーにおいて、“Nuclear Disaster at Fukushima Daiichi NPP: Current Status and Anticipated Issues about Recovery Project”と題する講演を行っている。一方、この間、東京電力は原子炉の炉心の損傷は軽微であるとの主張を繰り返してきた。しかし、5月12日になって、突然1号炉が強く損傷しているとの見解をリリースした。さらには、2号炉と4号炉も同様の状態にあると報告した。