

日本物理学会主催シンポジウム  
平成23年6月10日

# 福島第一原子力発電所事故について —原子炉の立場から—

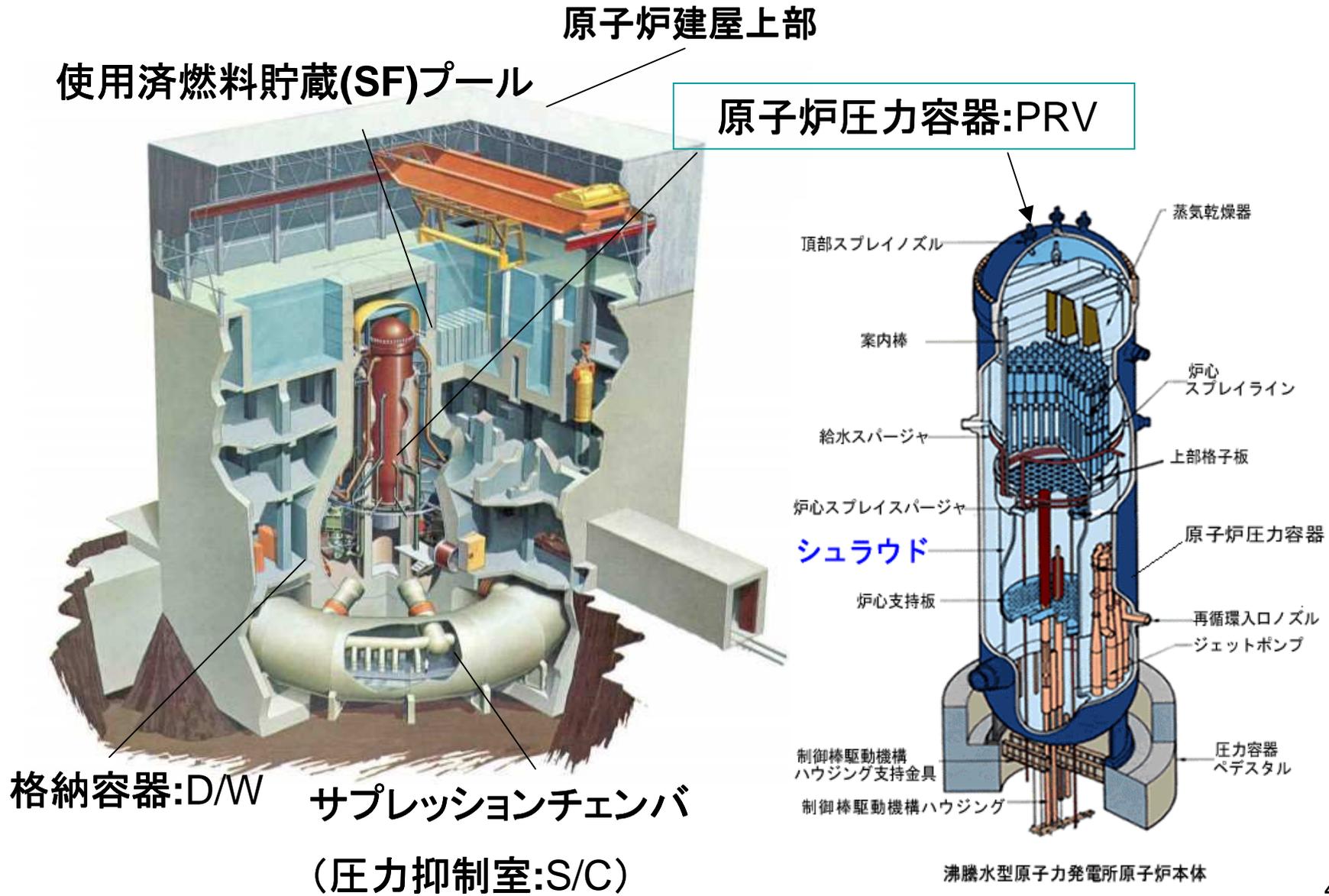
田中 俊一

# 内 容

1. 事故の原因と拡大、見通し
2. 環境に放出された放射能対策
3. 今後の課題

# 1. 事故の原因と拡大、見通し

# 沸騰水型原子炉(BWR)の構造



# 福島第一原発の諸元

	1号機	2号機	3号機	4号機
格納容器型式	Mark-1	Mark-1	Mark-1	Mark-1
電気出力(MWe)	460	784	784	784
原子炉压力容器(RPV)				
<b>最大圧力</b>	<b>8.24MPa</b>	<b>8.24MPa</b>	<b>8.24MPa</b>	<b>8.24MPa</b>
原子炉压力容器				
最高温度	300℃	300℃	300℃	300℃
格納容器(D/W)				
<b>最大圧力</b>	<b>0.38MPa</b>	<b>0.38MPa</b>	<b>0.38MPa</b>	<b>0.38MPa</b>
最高温度	140℃	140℃	140℃	140℃
商用運転開始	1971,3	1974,7	1976,3	1978,10
非常用発電機	2	2	2	2

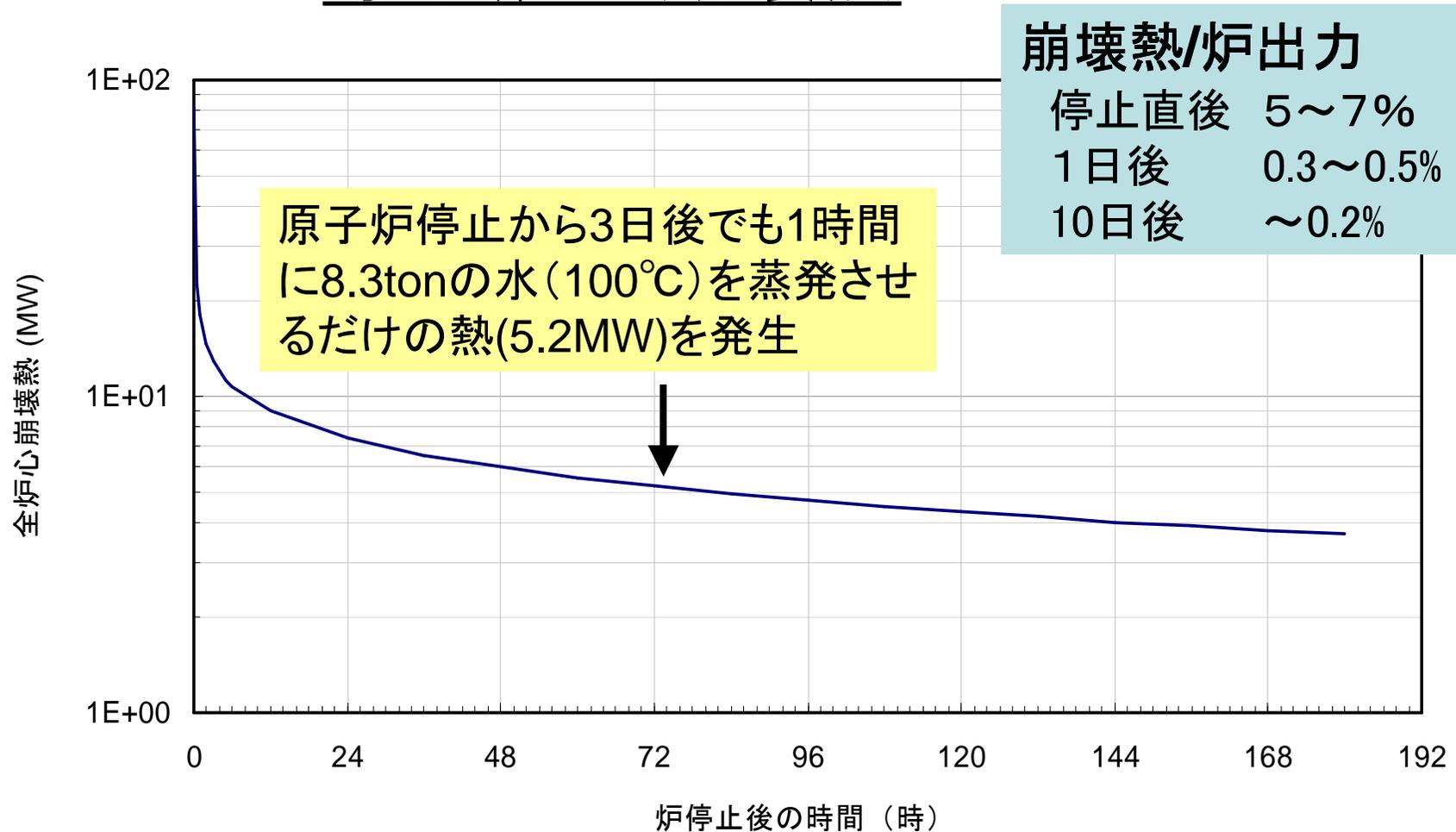
# 炉心内、燃料プールの燃料集合体

---

	1号機	2号機	3号機	4号機
炉心内燃料集合体数	400	548548-		
使用済燃料プール内使用済燃料集合体数	2925875	141,331		
使用済燃料プール内新燃料集合体数	100285	220		
水の容積(m <sup>3</sup> )	1,020	1,425	1,425	1,425

---

# 原子炉の崩壊熱



原子炉停止からの全炉心崩壊熱の時間変化

(福島第一原子力発電所1号機:平均22000Mwd/tを仮定)

# 時系列から探る初期対応

黒：日経・朝日、青：官邸データ、緑：コメント(田中)

## 3月11日(金)

- 14:46 地震発生、運転中の1, 2, 3号機自動停止
- 16:36 ECCSによる注水不能、原災法に基づく緊急事態発生を国に通報(東電)
- 19:03 原子力災害対策本部設置、原子力緊急事態宣言発令(首相)
- 20:30 2号機の冷却装置停止
- 22:50 2号機の炉心露出、燃料溶融予測(NISA) ⇒ 水素発生認識? 1号機でも?

## 3月12日(土)

- 1:20 1号機格納容器圧力の異常上昇通報(東電) ⇒ 水素発生認識?
- 1:30 政府が東電に水蒸気放出を指示 ⇒ 水素の認識?
- 6:38 1号機中央制御室の線量、通常の1000倍(NISA)  
D/W圧力(AM2:45-5:20に0.941MPaを記録) 破壊寸前!  
格納容器は過大な圧力で機密性を失ったため内部の放射能と水素が  
原子炉建屋へ漏洩! しかし格納容器からの放射能漏洩認識?
- 6:50 炉規法に基づき、経産相から1,2号機の格納容器圧力を下げるよう東電に命令
- 9:11 NISAが1,2号機の格納容器内の蒸気を外部に放出することを東電に命令  
水素爆発の認識なし!
- 10:17 1号機格納容器のベント実施
- 15:36 1号機で水素爆発
- 20:32 1号機に海水注入開始

## 3月13日(日)

8:41 3号機格納容器ベント開始

RPV圧力約9気圧から72気圧へ急上昇(8:00)、水位急低下(-3000mm)  
D/Wの圧力上昇、その後RPV圧力大気圧まで低下。

⇒ 13:12に海水注入するまで炉心冷却なし。

11:20 2号機格納容器ベント開始

13:12 3号機に海水注入開始

## 3月14日(月)

5:20 3号機ベント開始

11:00 3号機で水素爆発

16:34 2号機に海水注入、水位回復せず、燃料露出

17:12に水位ダウンスケール、PRV圧力74気圧、15日18:43に大気圧。

⇒ 圧力バウンダリーが破壊(破壊の原因)

## 3月15日(火)

6:00 4号機で爆発(SFプール)、水位低下により水素発生、燃料破損

6:10 2号機で水素爆発、圧力抑制室損傷

⇒ 燃料溶融と大量の水素発生についての認識欠如

## 3月16日(水)

8:30 3号機から白煙、SFプールの水位低下、燃料破損

⇒ 使用済燃料の発熱についての認識欠如、地震によるSFプールの損傷も確認せず。「SFプールの水位に注意」の助言が届かず。

# 冷却材喪失による炉心溶融のプロセス

- ① 炉心冷却が喪失すると崩壊熱により、RPV内の水が急速に蒸発、燃料が露出し、燃料被覆管(Zr合金)と水(水蒸気)との反応が始まる。



**安全審査指針では、被覆管表面温度を1200°C以下 (ECCS指針)**

- ② 1200°Cを越えると急速に反応が進み、被覆管は脆化し、同時に水素発生が急速に進み、2250°Cで溶融。

**4-5時間でZr被覆管がほぼ100%溶融。**

**その間の水素生成量は、約800kg**

- ③ 更に、温度が上昇し、2800°CになるとUO<sub>2</sub>燃料(セラミック)が溶融し、燃料に閉じ込められている核分裂生成物(FP's)が燃料の外に拡散放出される。
- ④ 溶融炉心は、炉内の構造物を更に溶融し、RPV下部に蓄積(炉心溶融)
- ⑤ 溶融炉心はRPVの制御棒駆動案内管等の貫通部分を溶かし、下部ヘッドに落下(BWR特有)
- ⑥ さらに、溶融炉心は下部ヘッドの壁を貫通して、格納容器に到達。  
(メルトスルー)
- ⑦ 格納容器の壁を溶融し、貫通。

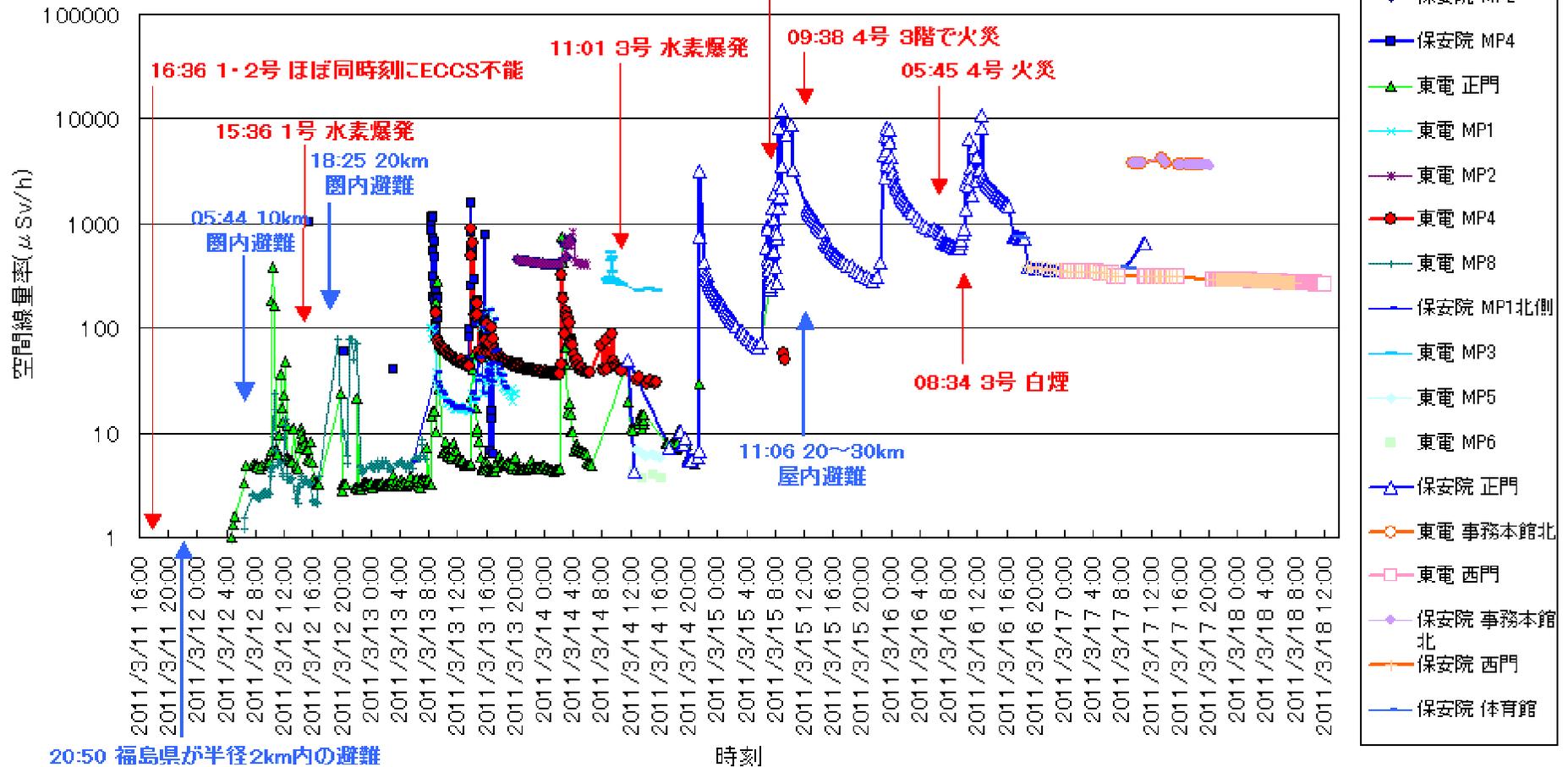
# 1～3号機の炉心温度と水素発生量の変化



※東電の資料に基づき作成。2、3号機は水位が低いケース

# 空間線量率の変化(サイト)

福島第一周辺の空間線量率(保安院・東電公表値)



国際原子力事象評価尺度:InternationalNuclearEventScale

## INES評価の変遷(原子力安全・保安院)

3月12日0時30分(地震発生後約10時間後)にレベル3

全て号機の熱除去機能が不作動

3月12日夕刻に1号機の評価をレベル4

所内の放射線レベルが上昇したため

3月18日に1,2,3号機の評価をレベル5(4号機はレベル3)

燃料損傷の確率が高くなったため、

4月12日に今回の事故の評価をレベル7

	想定放出量(Bq)		
	NISA	NSC	チェルノブイリ
$^{131}\text{I}$	$1.3 \times 10^{17}$	$1.5 \times 10^{17}$	$1.8 \times 10^{18}$
$^{137}\text{Cs}$	$6.1 \times 10^{15}$	$1.2 \times 10^{16}$	$8.5 \times 10^{16}$
ヨウ素換算	$2.4 \times 10^{17}$	$4.8 \times 10^{17}$	$3.4 \times 10^{18}$
全ヨウ素	$3.7 \times 10^{17}$	$6.3 \times 10^{17}$	$5.2 \times 10^{18}$

6月6日 想定放出量を $7.7 \times 10^{17}$ Bqに修正(NISA)

INESでは、原則として発生した事象がレベル2以上の場合には、24時間以内にIAEAを介して、公式情報が加盟各国に配布されることになっている。

# 事故の収束に向けた道筋

4月17日東電

現状① (1～3号機)燃料ペレットの一部は損傷しているが、注水により冷却できている

**リスク① 冷温化により格納容器内の水蒸気が凝縮、水素の濃度が高くなり、水素爆発する恐れ**

現状② (1～3号機)高温により格納容器に生じた隙間から放射性物質を含む微量の蒸気が漏洩している可能性大

現状③ (2号機)漏水が多く、格納容器が損傷している可能性大

目標① (1・3号機)安定的に冷却できている

**リスク④ 水を満たす過程でタービン建屋への流入水が増加**

**リスク⑤ 放射線レベルの高い場所で、作業が長期化する恐れ**

目標② (2号機)格納容器が密閉できるまでは、滞留水の増加を抑制しつつ冷却する

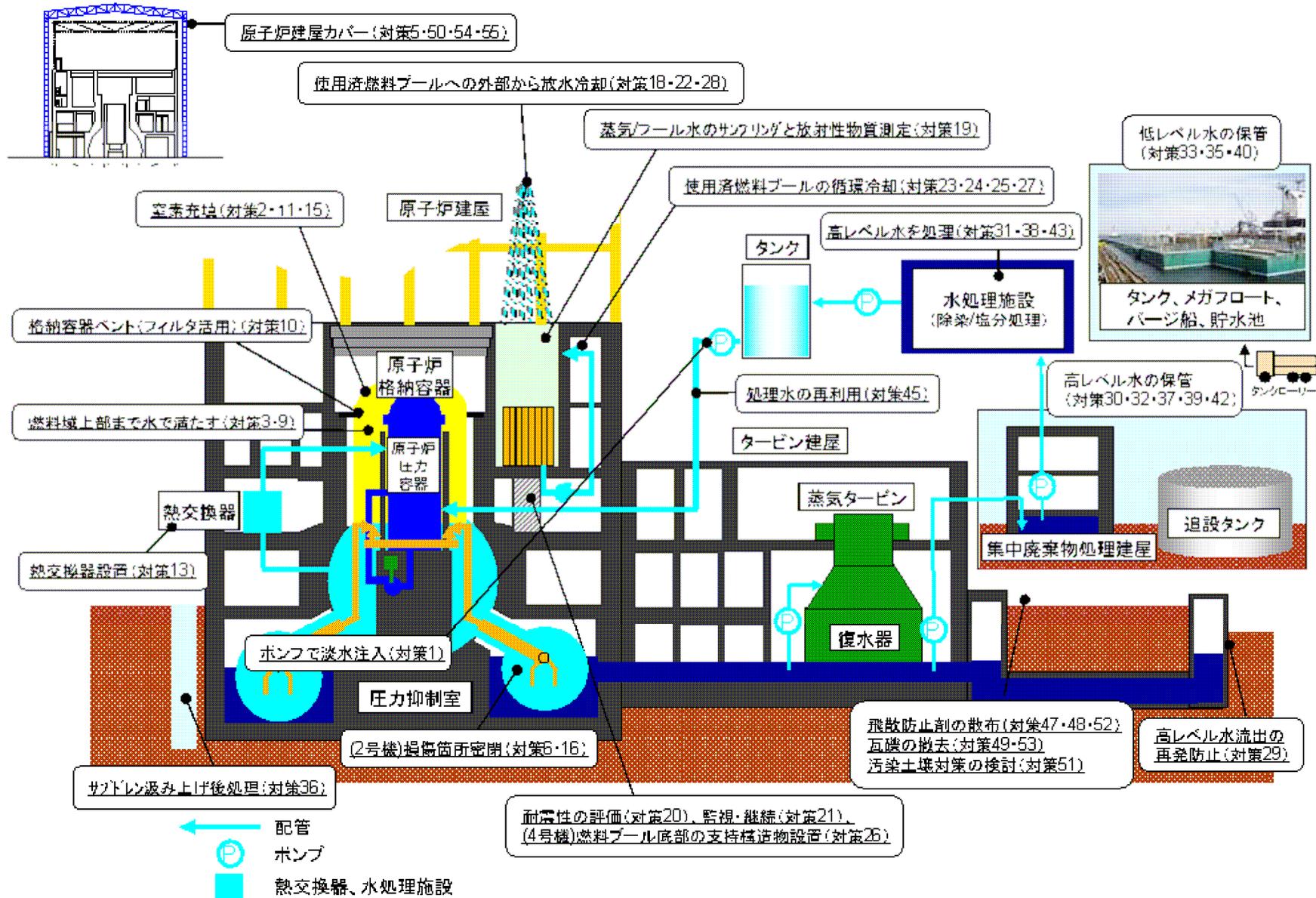
**リスク② 損傷箇所の密閉作業が長期化する恐れ**

現状⑨ 2号機タービン建屋や立坑・トレンチに放射線レベルの高い水が流出かつ滞留

目標⑥ 放射線レベルが高い水を敷地外に流出しないよう、十分な保管場所を確保する

**リスク⑦ 水処理施設の設置遅延や稼動不良の可能性**

# 発電所内における主な対策の概要図



# 収束の見通し

4月17日

ステップ1;放射線量が着実に減少傾向となっている(3ヶ月程度)

ステップ2:放射性物質の放出が管理され、放射線量が大幅に抑制されていること(3~6ヶ月)

5月17日

収束への道筋の見直し、「水棺方式」を延期、建屋等に滞留する汚染水を処理して原子炉注水に再利用する「循環注水冷却」へ現状

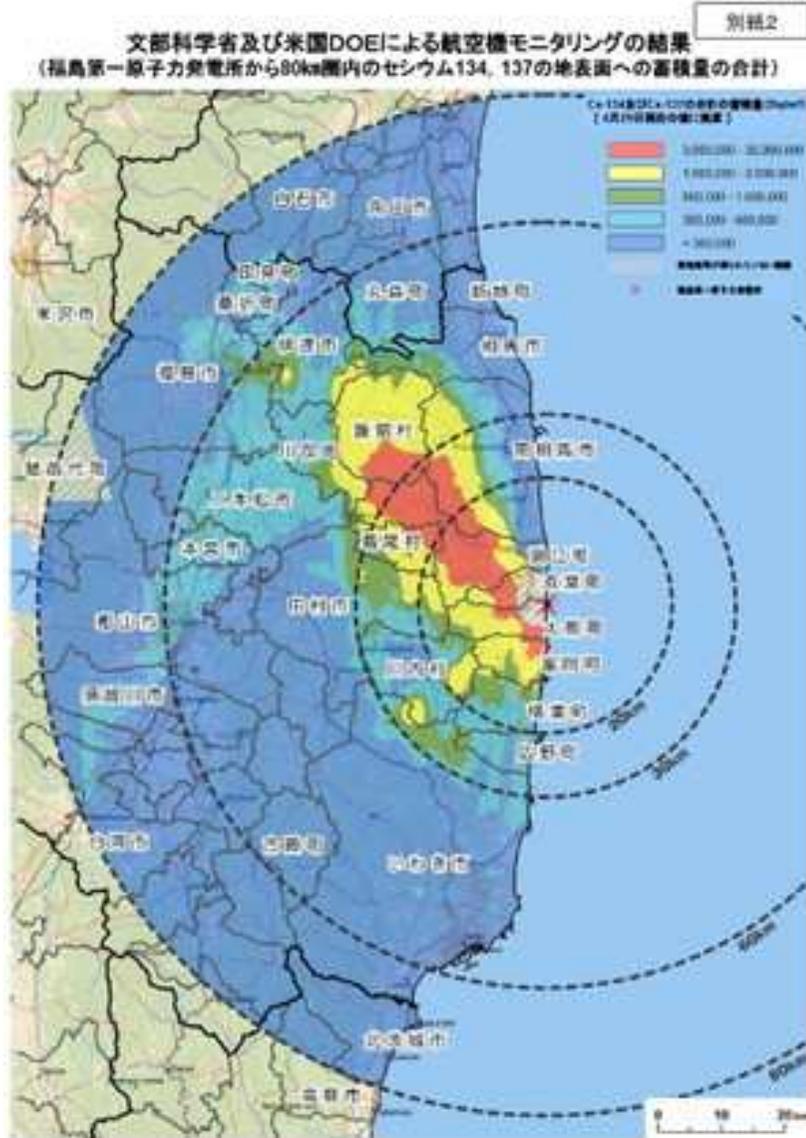
6月8日

1号機、2号機、3号機はメルトスルー状態  
(溶融燃料が圧力容器下部から格納容器へ)

**現時点での最大の課題は、毎時25トン(600トン/日)程度排出される大量の高濃度汚染水の処理**

## 2. 環境に放出された放射能対策

# 1. 福島第1原発事故により環境へ放出された放射能と放射能除去の必要について



# 公衆の放射線被ばく量の基準

## 緊急時被ばく状況

我が国の原子力防災指針では、50mSv以上の被ばくの可能性がある場合は避難、10～50mSvの被ばくの可能性がある場合は、屋内待機とされており、20km圏内の避難、30km圏内の待機はこの指針に基づいている。

## 現存被ばく状況

原子力安全委員会は、20mSv/年を採用。その結果、飯舘村などの計画的避難区域は、来年3月11日まで現在の地に留まって生活を続けた場合、積算線量が20mSvを越えることになるという予測に基づいて避難の判断がなされている。避難はしてないが、福島市や郡山市も通常よりかなり高い放射線量が観測されているので、現存被ばく状況にある。

## 計画的被ばく状況

平常時に放射性物質の管理ができている場合で、公衆の被ばく量は1mSv以下にすること。

## 放射能除染の必要性

### 避難区域の放射能汚染状況

- ・ Cs-137(半減期30年)、Cs-134(半減期2年)による土壤等の汚染は、国の定めた耕作制限の限度5000ベクレル/kgを越えている。

### 住民が村に復帰し、生活できる条件

- ・ 年間の被ばく線量が1～20mSv範囲であること。
- ・ 耕作、牧畜等を行うためには、セシウムによる土壤汚染を5000ベクレル/kg以下にすること。

### 現存被ばく状況地域の除染

- ・ ICRPは、緊急避難区域から外側にありながらも、放射能に汚染された環境で生活する場合には、被ばく量が年間1～20mSv/年の範囲に収まるようにする目安(参考レベル)を提案し、長期的には1mSvを目指すべきとしている。

# 飯舘村長泥地区での 除染試験

# 民家周囲の線源



屋敷表・横側

屋敷裏側

空間線量率: 13~15  $\mu$  Sv/h  
表面線量率: 20~170  $\mu$  Sv/h

## スギのオートラジグラフィー解析結果



# 屋敷裏の除染

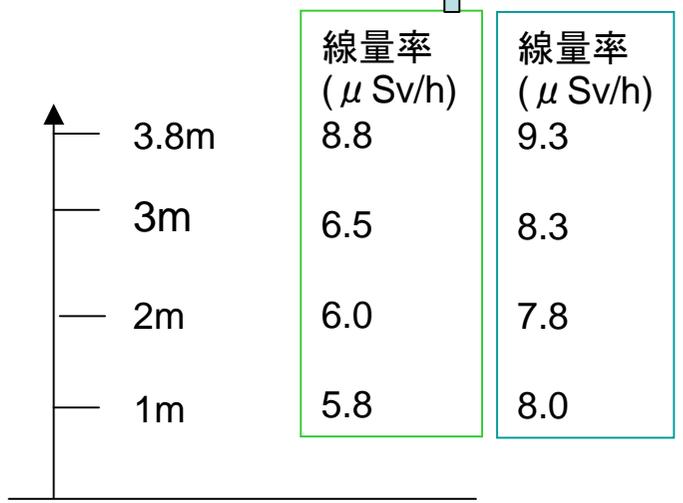


上方向が高い

もみの木: 伐採

屋敷の裏側は、土壌、草地を剥離除去

草地(スコップで漉取り)  
 除去前: 全面15kcpm~30kcpm  
 除去後: 全面 <6kcpm



高さ方向の線量率変化

雨樋下の土壌 (cpm)  
 除染前 10k ~ 41k  
 剥離後 < 8.0k



# 除染による屋内線量率の変化



100cm(床面)高さでの線量率( $\mu$  Sv/h)

	除染前 5月19日	除染後(床面) 5月20日	除染後(床面) 5月26日
①	3.9	3.7(3.2)	3.1(2.8)
②	9.6	4.7(3.3)	3.9(3.2)
③	4.2	4.1(3.6)	3.2(3.0)
④	8.6	4.8(4.4)	4.3(3.9)
⑤	4.2	4.2(3.0)	3.0(2.7)
⑥	6.5	4.6(3.3)	3.6(3.0)
⑦	4.8	4.7(3.7)	3.3(2.8)
⑧	5.2	4.7(4.5)	3.1(2.8)
⑨	7.1	6.6(5.3)	3.7(3.5)

# ビニールハウスの除染

- ・10mx4mにポリイオン溶液を散布(5月20日)
- ・乾燥後剥離(5月26日)



ポリイオン溶液の散布  
(10mx4m)  
天然ポリイオンと合成ポリイオン  
を散布



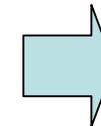
草刈鎌で剥取り



ポリイオンで固化した土壌

## GM測定値

	剥取り前	剥取り後(3~4cm厚)
鉛コリメータ無し	15k ~ 23kcpm	1.6k ~ 1.7kcpm
固化土壌のみ剥取り(0.5~1cm厚)		
鉛コリメータ付き	13.5k ~ 17.5kcpm	3k ~ 4.7kcpm



**除去率: 89% ~ 93%**

# 試験結果のまとめ

## ○ 汚染除去の結果

- 屋内線量率は、 $3.9\sim 8.6\ \mu\text{Sv/h}$ が $3.1\sim 4.3\ \mu\text{Sv/h}$ に低下。さらに下げるためには家屋の周囲50m～100mの範囲の除染が必要。
- ビニールハウス(畑)、牧草地、水田の放射能(セシウム)の濃度は耕作制限値の5分の1～2分の1に低下。

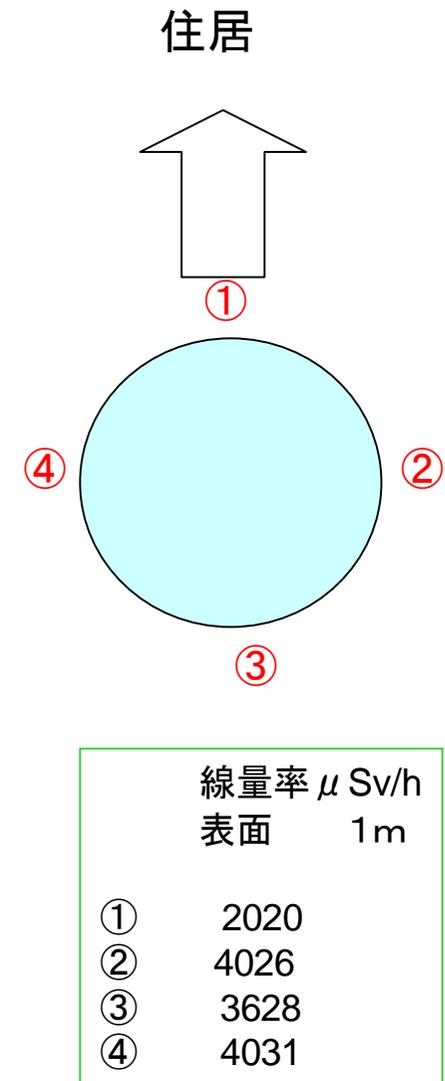
ビニールハウス(畑): **89%～93%(暫定値)**

牧草地: **93%～95%(暫定値)**

水田: **69%～85%(暫定値)**

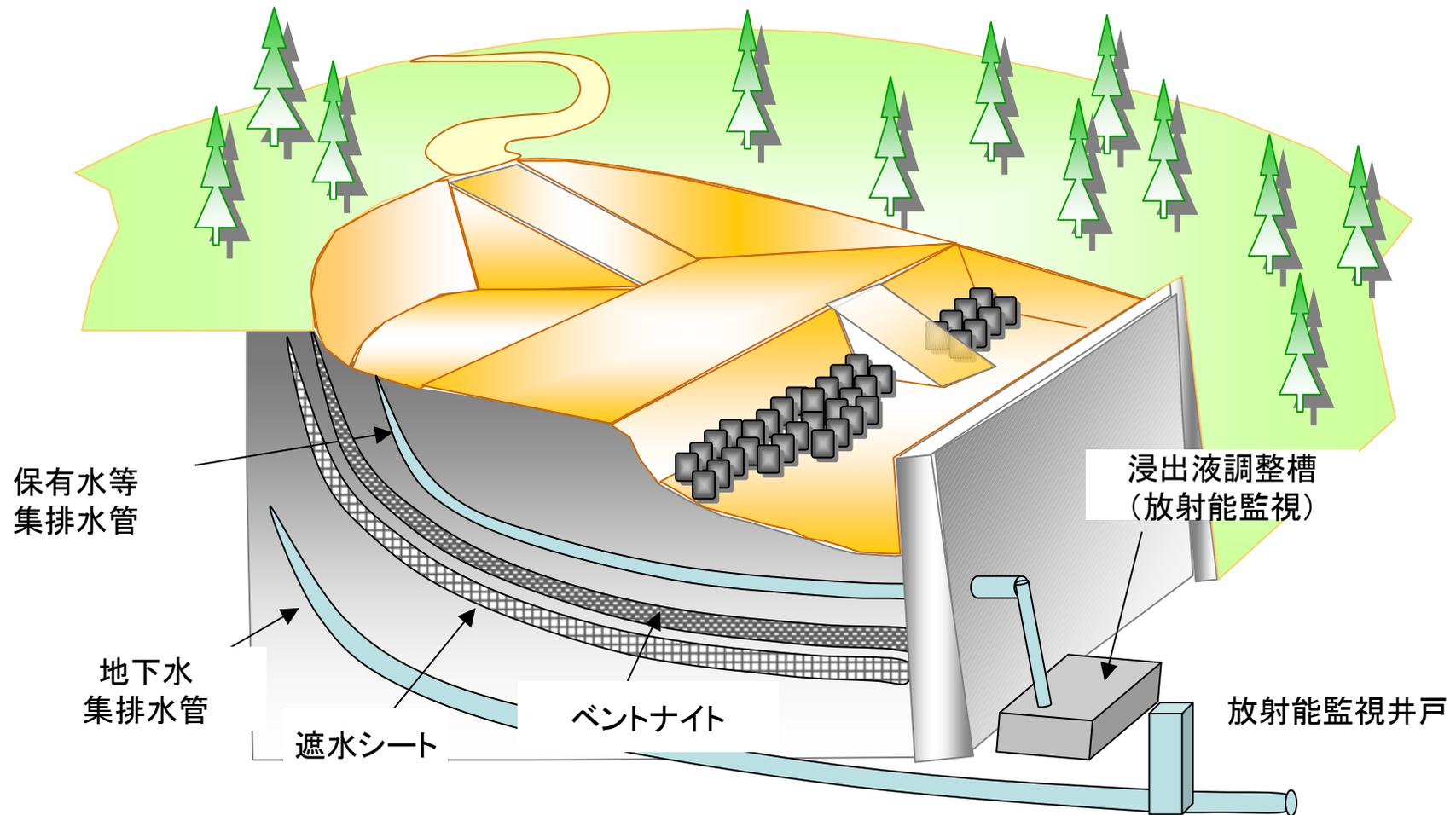
この値は、測定器のBG補正をすれば、さらに除去率は5%から10%良くなると推測。

# 除染に伴う土壌、草等



廃棄土壌等の表面線量率は、周辺の杉林の枯葉等の表面線量率15~30  $\mu$  Sv/hと比べて50%程度大きい。

# 廃棄土壌管理処分場(全体イメージ)



- ・ベントナイト中でのセシウムの300年間の移動距離は0.1mm  
⇒ 数mmのベントナイト層を設ける事でセシウムの閉じ込めが可能。
- ・排水中のCs-137濃度を連続モニターで監視
- ・排水中のCs-137濃度が基準を上回った時には、ゼオライト吸着塔などを用いて排水を処理
- ・覆土を100cmすれば、放射線量は0.0001  $\mu$  Sv/h以下

# 食物摂取基準値の不思議

飲食物摂取制限に係る基準 摂取限度(5mSv)		制限値 (Bq/kg)	
		日本	欧州
ヨウ素	飲料水、牛乳、乳製品	300	500
	野菜類	2000	2000
セシウム	飲料水、牛乳、乳製品	200	1000
	野菜類、穀類、肉、卵、魚、その他	500	1250

## 保守的な仮定

- ・ 年平均濃度とピーク濃度の比をEUでは1/10に対して、1/2を仮定 ⇒ 5倍
- ・ Sr-90/Csの比を0.1と仮定(実際は、0.01以下) ⇒ 5%
- ・ 食品摂取量について調査結果1365g/日を1600g/日と仮定 ⇒ 17%
- ・ 全ての食品が汚染されていると仮定 ⇒ 非現実

## セシウム-137の内部被ばく換算 1mSv/72000Bq

- ★ 伊達市のキロ当たり580Bq梅を一年間に10kg食べた場合の被ばく量は、75  $\mu$  Sv。
- ★ 神奈川県の新茶から、570Bq/kgのセシウムが検出されたことで、出荷自粛措置がとられたが、これは一年間に135kgのお茶を食べた場合、1mSvになる値である。

# 何のためのモニタリング

空气中放射能測定データ(ダストサンプリング) Bq/m<sup>3</sup>

[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/saigaijohou/syousai/1304006.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/saigaijohou/syousai/1304006.htm)

	福島市杉妻町	川俣町	飯舘村八木沢	二本松金色
4月24日	ND	ND	ND	ND
25日	ND	ND	ND	ND
26日	ND	ND	ND	ND
27日	ND	ND	ND	ND
28日	ND	ND	ND	ND
29日	ND	ND	ND	ND
30日	ND	0.77	ND	ND
5月 1日	ND	ND	ND	ND
2日	ND	ND	ND	ND
3日	ND	ND	2.2	ND
4日	ND	ND	ND	ND
5日	ND	ND	ND	ND
6日	ND	ND	1.43	ND
7日以降	ND	ND	ND	ND

空気中には放射能がないので、窓をしめたり、マスクをしたり、長袖を着る効果ゼロ。洗濯物、布団も外で乾燥させても問題はない。<sup>31</sup>

# 3. 今後の課題

## 福島原発(写真)は、巨大な放射性廃棄物



# 今後の課題（サイト内）

- 事故の沈静化・安定化（数ヶ月～3年）
- 作業環境の改善（数ヶ月～5年）  
放射能気体、汚染水、瓦礫等の処理
- 原子炉建屋修復・密封性修復（～1年）
- SF燃料、原子炉燃料取出し（5～10年）
- 通常の解体（10年）
- 廃棄物、破損燃料の保管（数10年）

## 今後の課題（サイト外）

- 放射線・放射能マップ（1～2ヶ月）
- 評価と対応策（1ヶ月～6ヶ月）
- 環境放射能の除染（数ヶ月～数年）
- 住民の移住、土地問題等（10年以上）
- 風評被害対策（10年）
- 放射線モニタリング（10年以上）
  - 大気、土壌、海、米・野菜等、魚類等
- 損害賠償（10年以上）
- 健康調査・管理（最低10年）

# 科学者への期待とモラル

- 原発の収束、その後対策のための課題は山積しており、具体的にかつ即効性のある成果が求められている。
- 現実への責任を持たないプレス発表は、結果として住民を傷つけることになることに留意すべき。
- 研究者の興味だけのフィールド試験は、住民を不安に陥れ、科学者への不信を募らせる。
- 様々な除染技術や廃棄物処理技術が提案されているが、除染すべき対象は広大で多様、また廃棄物は多種多様で物量は膨大であることを認識すべき。  
(応用可能性に配慮していただきたい)