

東海第二発電所

放射性物質の拡散抑制対策への対応について

2024年3月18日

日本原子力発電株式会社

本資料のうち、 は営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

1. 福島第一原子力発電所事故の教訓



【事故の推移】

【事故の教訓】

【対応方針】

地震の発生

外部電源の喪失

大津波の襲来

全電源の喪失

(浸水による多重故障及び共通要因故障)

原子炉の冷却機能の喪失

炉心の損傷

格納容器の破損, 原子炉建屋への放射性物質, 水素の漏えい

原子炉建屋の水素爆発

環境への大規模な放射性物質の放出

放射性物質の連続的放出を想定しておらず, 放射性物質の拡散を低減するための措置が取られていなかった。

原子炉建屋放水設備による大気への放射性物質の拡散抑制

①

海洋拡散抑制設備による海洋への放射性物質の拡散抑制

②

2. 福島第一原子力発電所事故の教訓に対する新たな対策



○福島第一原子力発電所事故で得られた教訓に対する新たな対策として、環境への放射性物質の拡散を抑制するための措置として、以下の対策を施す。

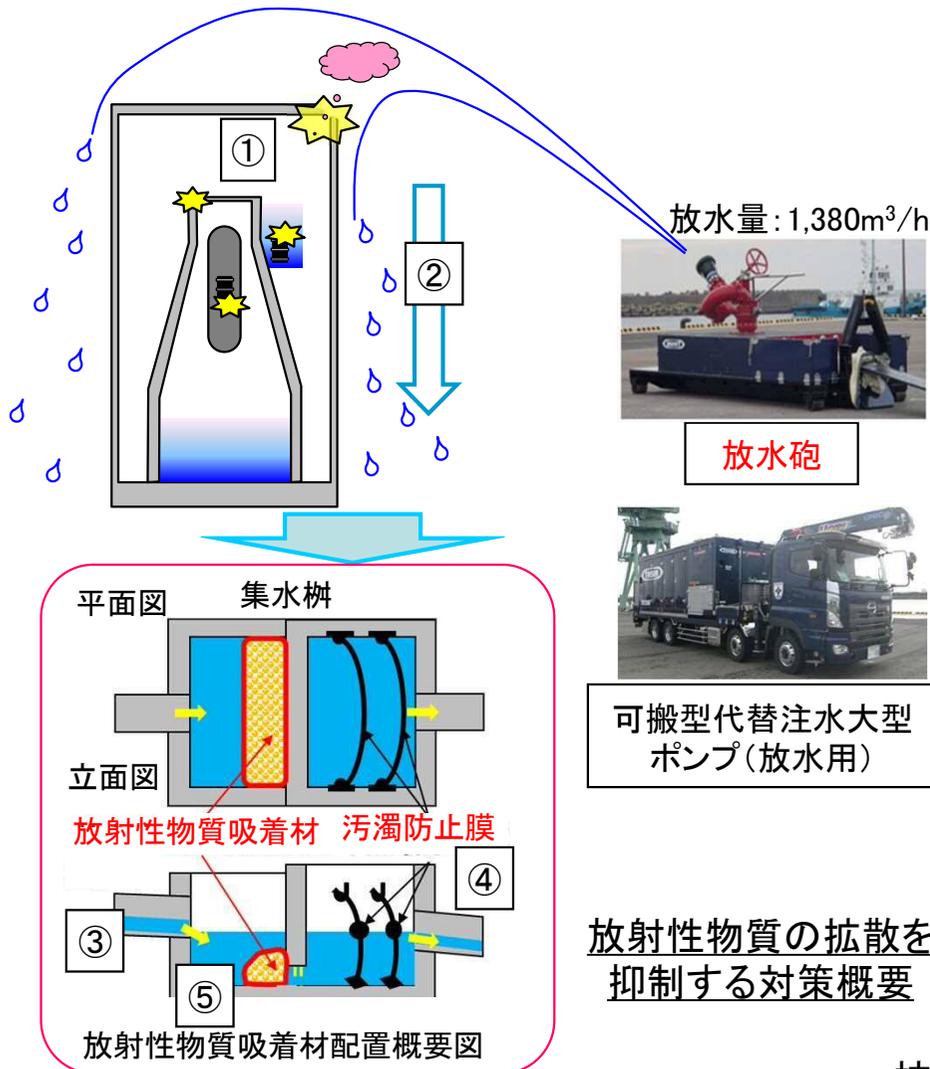
対応方針	従来の対策	新たな対策	備考
①原子炉建屋放水設備による大気への放射性物質の拡散抑制	—	<ul style="list-style-type: none"> ・地震、津波等の自然現象による影響を受けない頑健な保管場所に可搬型代替注水大型ポンプ(放水用)及び放水砲等を配備する。 ・予備機についても、上記と同様な保管場所に配備する。 ・原子炉建屋から放出される放射性物質の漏えい箇所を把握するため、ガンマカメラ※及びサーモカメラ※を配備する。 	新規
②海洋拡散抑制設備による海洋への放射性物質の拡散抑制	—	<ul style="list-style-type: none"> ・地震、津波等の自然現象による影響を受けない頑健な保管場所に汚濁防止膜及び放射性物質吸着材※を配備する。 ・予備品についても、上記と同様な保管場所に配備する。 ・汚染水が発電所から海洋に流出する放水路及び雨水排水路集水柵に汚濁防止膜設置場所を整備する。 ・放射性物質吸着材※については、雨水排水路集水柵に設置場所を整備する。 	新規

※印は自主対策設備を示す。

3. 大気及び海洋への放射性物質の拡散抑制措置の概要

○放射性物質の拡散抑制の目的

➤ 東海第二発電所の安全対策は、炉心の損傷を防止する対策に加えて、万一炉心の著しい損傷が発生した場合でも、放射性物質を格納容器から極力漏えいさせない対策を備えているが、万々が一原子炉格納容器の損傷等により閉じ込め機能が損なわれ、原子炉建屋から直接放射性物質が拡散する場合も想定して、**放射性物質の拡散を抑制する対策**を施す。



①燃料溶融により、沸点の低い放射性物質(Cs等)が気化され気体となり、格納容器及び原子炉建屋の損傷等により原子炉建屋外へ放出された放射性物質は微粒子となって大気中を漂う。放出される放射性物質の中でも放射性セシウム(Cs-137)は半減期が約30年と長く、被ばく線量への影響が大きい。

※Ⅰ. 説明箇所(論点No.126 P4~P7)

②原子炉建屋外へ放出された放射性物質は、**放水砲により放水される水との接触により地表へ打ち落とされる。**

③放水砲により打ち落とされた放射性物質は、埃等に吸着され粒子状または水に溶け込んだ状態で流れる。

※Ⅱ. 説明箇所(論点No.124 P8~P12)

④放水砲により打ち落とされた放射性物質は、雨水排水路集水枳及び放水路に設置する**汚濁防止膜により、凝固・沈降させ海洋への流出を抑制する。**

※Ⅲ. 説明箇所(論点No.125 P13~P15)

⑤汚濁防止膜より上流側に**放射性物質吸着材を設置することで、放水砲により打ち落とされた放射性物質を捕捉し、下流側への流出を抑制する。**

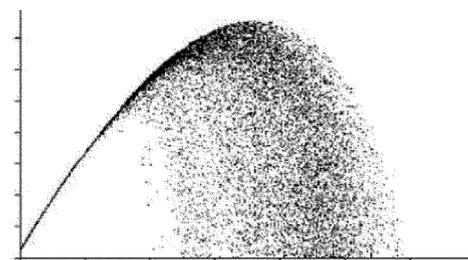
I. 放水砲による放射性物質の拡散抑制対策効果について(1/3)

○大気への放射性物質の拡散抑制

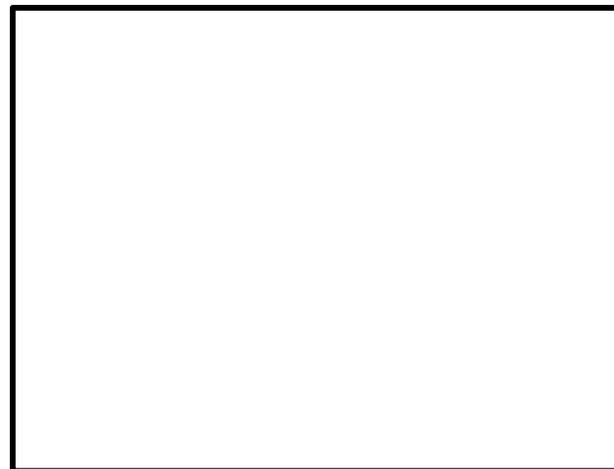
- 大気への放射性物質の拡散抑制は、可搬型代替注水大型ポンプのホースの先端に放水砲を取付け、海水を破損箇所(放射性物質放出箇所)近傍にスプレーする。(放水開始までの準備所要時間目安は、ホース長を200 mとした場合約145分)
- 破損箇所が目視出来ない場合は、ガンマカメラ及びサーモカメラによる放射線や熱感知による放射性物質の漏えい箇所の絞り込みも可能(絞り込みまでの所要時間目安は約30分)
- 放射性物質の漏えい箇所が特定できない場合に備えて、原子炉建屋屋上中央に向けてスプレーを行うことで、原子炉建屋全域にスプレーする能力も有している。
- 放水砲設置箇所は、放水砲を原子炉建屋中心から約80 mの範囲内に仰角65°で設置した場合に、原子炉建屋屋上中心部まで放水可能な箇所を複数設定



発電所で実施した放水試験
直状放射による放水(到達点での状態)



(参考)直状放射による放水※



放水砲設置箇所及び原子炉建屋中心からの距離



放水砲の射程と射高の関係
(例:設置位置A, 圧力1.0MPa時)

※参考文献:「第14回 消防防災研究講演会資料」より抜粋

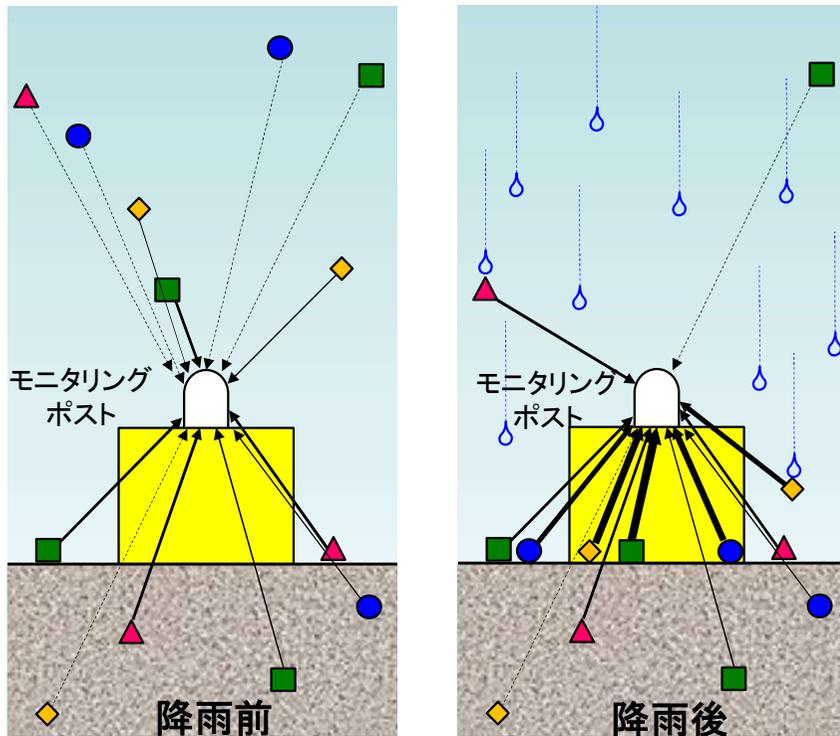
主催 消防庁消防大学校 消防研究センターより

I. 放水砲による放射性物質の拡散抑制対策効果について(2/3)

○大気への放射性物質の拡散抑制効果(1/2)

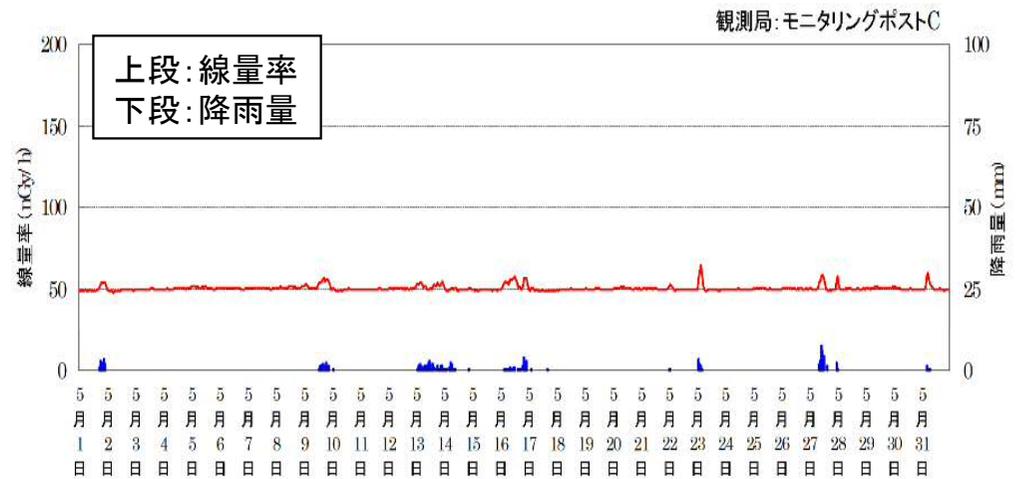
- 一般に、大気中の天然放射性核種は**降雨の影響により地面に落下し**、それに伴い**屋外モニタリングポストの指示値上昇の要因**となることが分かっている。
- 大気中の放射性物質は、一般的な降雨でも地表に落下することから、**茨城県の過去最大降雨量の約9倍***の水量が確保できる放水砲では**より多くの放射性物質の落下が見込まれ**、**大気中に拡散する放射性物質の低減効果に期待できると考える。**

※放水砲による放水量1,380 m³/hを原子炉建屋屋上面積約1,890 m²で除した値で算出した730 mm/hと茨城県の過去最大降雨量81.7 mm/h(1947年)の比較による。



【凡例】◆●▲■:天然放射性核種 ♀:雨粒

降雨による屋外モニタリングポスト指示値変動概念図



空間線量率と降雨量の測定結果抜粋(当社HP2022年5月分より)
拡散抑制-7

○大気への放射性物質の拡散抑制効果(2/2)

- 原子炉建屋外へ放出される微粒子状の放射性物質の粒子径は $0.1 \mu\text{m} \sim 0.5 \mu\text{m}$ と考えられ、この微粒子の放水時の水滴による除去機構は、水滴と微粒子の慣性衝突作用(水滴径 $0.3 \text{mm} \phi$ 前後で最も衝突作用が大きくなる)によるもの。
- 放水砲による噴霧放射を活用することでその衝突作用に期待できる。また、水滴と微粒子の相対速度を大きくし、水の流量を大きくすることで除去効果の増大が期待できる。
- 日本鉱業会誌による学術論文^{※1}によれば、対象の浮遊粉塵(粒径 $5 \mu\text{m}$ 以下)に対して $3.5 \text{kg}/\text{cm}^2$ の水圧で噴霧^{※2}した場合、除塵率70%までに約3分、除塵率90%までに約8分との実験結果がある。また、水圧を上昇させることにより除塵効果も高まる結果となっている。

原子炉建屋の破損箇所近傍に直接スプレーする場合は、放水砲による水圧 1.0MPa (約 $10.2 \text{kg}/\text{cm}^2$)は、上記の浮遊除塵実験時の約3倍であり、微粒子状の放射性物質を除去する効果に期待できる。

※1 参考文献:「日本鉱業会誌 73巻 824号 昭和32年2月 噴霧散水による浮遊粉塵の抑制について」より引用

※2 噴霧仕様: 平均水滴径 0.045mm , 水量 $0.120 \text{m}^3/\text{h}$

【参考】放射性物質の拡散抑制効果

- 放水による放射性物質の除去効果について、**格納容器スプレイ※での実験結果**を参考に添付する。
- 下図に示すとおり**スプレイを行うことでヨウ素濃度が低下している**。その他セシウム等についても同様の傾向があることが分かっている。(1回目のスプレイでヨウ素濃度が約9割低下)
- 格納容器スプレイの実験及び前頁の除塵効果の実験とは条件等異なるが、放水砲による放水もこれらと同様の効果を狙ったものであり、**大気中に拡散する放射性物質の低減効果が期待できる**。

※格納容器スプレイ

格納容器内に水を噴霧することで、格納容器内の温度及び圧力上昇を防止するとともに、放射性物質の濃度を低減する設備

【出典】

“Removal of Iodine and Particles from Containment Atmospheres by Sprays-Containment Systems Experiment Interim Report” BNWL-1244
(参考和訳)
格納容器スプレイ系による格納容器雰囲気中のヨウ素及び微粒子の除去試験中間報告書(BNWL-1244)

【参考試験条件和訳】

水滴径中央値: 1210 μm

流量: 約11 m^3/h

温度: 約124 $^{\circ}\text{C}$

圧力: 約0.3 Mpa

スプレイ水: ホウ素濃度3000ppm, 水酸化ナトリウム添加pH9.5

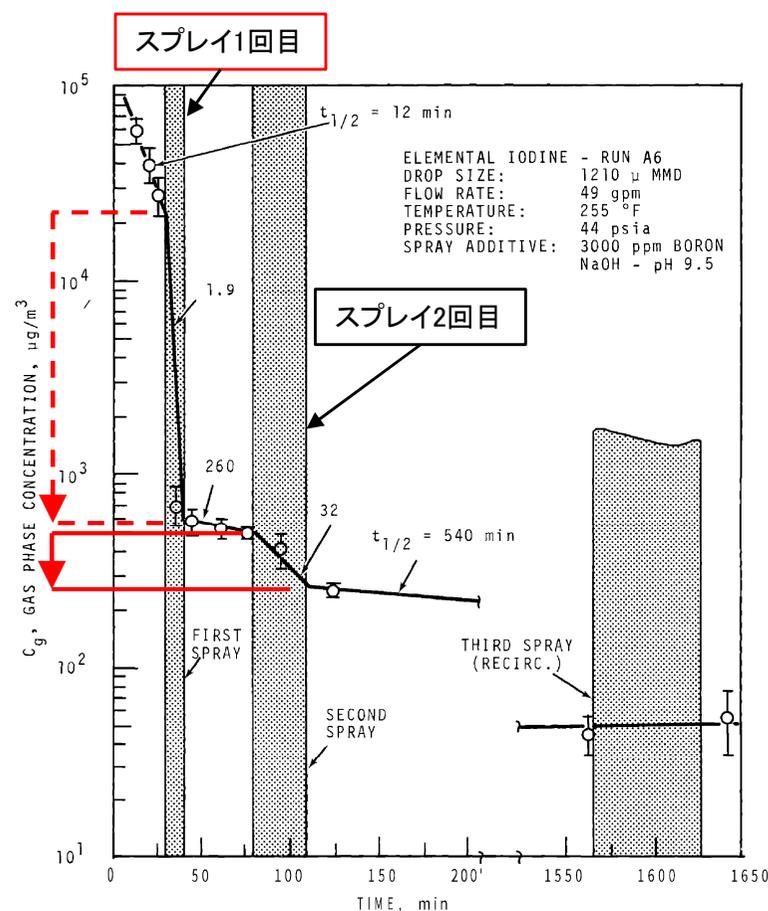


FIGURE 9. Concentration of Elemental Iodine in the Main Room, Run A6

Ⅱ. 汚濁防止膜による放射性物質の拡散抑制対策について(1/3)



【汚濁防止膜】

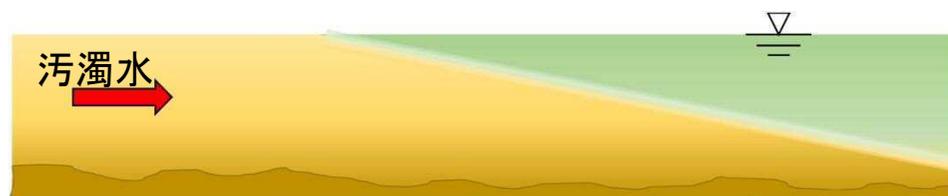
- ・発電所敷地と海洋までの経路となる場所には、**全て汚濁防止膜(放射性物質吸着材)を設置する。**

対処設備	汚濁防止膜
設置場所 (放水前)	(放水路-A~C) 雨水排水路 集水柵-1~9(8)
所要時間 目安	140分(1重目設置) (全箇所2重設置時360分)

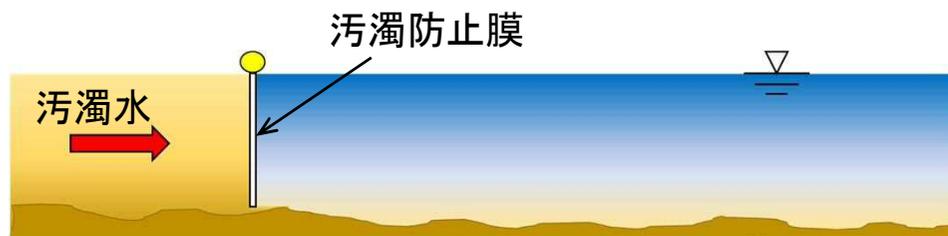
- ※**太線**で囲った**放水路-A~C**及び**雨水排水路集水柵-8**については、放水砲による原子炉建屋への**放水開始までに汚濁防止膜の1重設置を完了**させることで、放水開始初期に発生する汚染水の流出による海洋への放射性物質の拡散を抑制する。
(放水路-A~C及び雨水排水路集水柵-8は、原子炉建屋周りの水路から直接海へ繋がっているルート)

○汚濁防止膜(シルトフェンス)による海洋への放射性物質の拡散抑制措置(1/2)

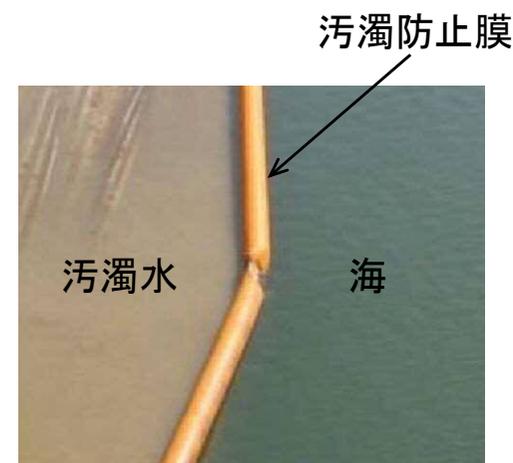
- 放水砲等にて打ち落とされた放射性物質は、埃などに付着した状態で汚染水として拡散することとなる。その汚染水は、原子炉建屋周辺を取り囲む地上部の一般排水路で集水され、地下埋設の一般排水路を通して雨水排水路集水柵又は放水路から海へ流れ込むことから、**汚濁防止膜を集水柵等の途中の排水路に設置することで海洋への放射性物質の拡散抑制を行う。**
- 汚濁防止膜は、港湾・海岸及び河川工事において汚濁拡散を防止するために利用されており、水中にカーテンを張ることで拡散する汚濁水を滞留させ、滞留した汚濁粒は自然に凝固して沈降させる。このように、汚濁防止膜によって、埃などに付着した**放射性物質が汚濁防止膜内に滞留し凝固・沈降し、海洋への流出を抑制することができる。**



汚濁防止膜を設置しない場合のイメージ図



汚濁防止膜を設置した場合のイメージ図



汚濁防止膜による拡散抑制参考例

Ⅱ. 汚濁防止膜による放射性物質の拡散抑制対策について(3/3)

○汚濁防止膜(シルトフェンス)による海洋への放射性物質の拡散抑制措置(2/2)

- 放射性物質が付着した大きな汚濁粒は、物理的に汚濁防止膜に捕捉されることより、1重目にて十分効果を発揮するが、何らかの理由で破損することが考えられることから、念のため2重配置とする。
- 東京電力による福島第一原子力発電所事故後に設置した港湾内の汚濁防止膜内外における海水中のCs-137濃度測定結果※によると、汚濁防止膜による放射性物質の低減効果は約1/2程度と推測される。(P12の参考文献参照)
- 東海第二の汚濁防止膜設置箇所は、底面形状が港湾に比べて平らな水路であることから、底面との隙間がより少なく汚濁防止膜を設置可能であり、港湾に設置するよりも低減効果は高いと考えられる。

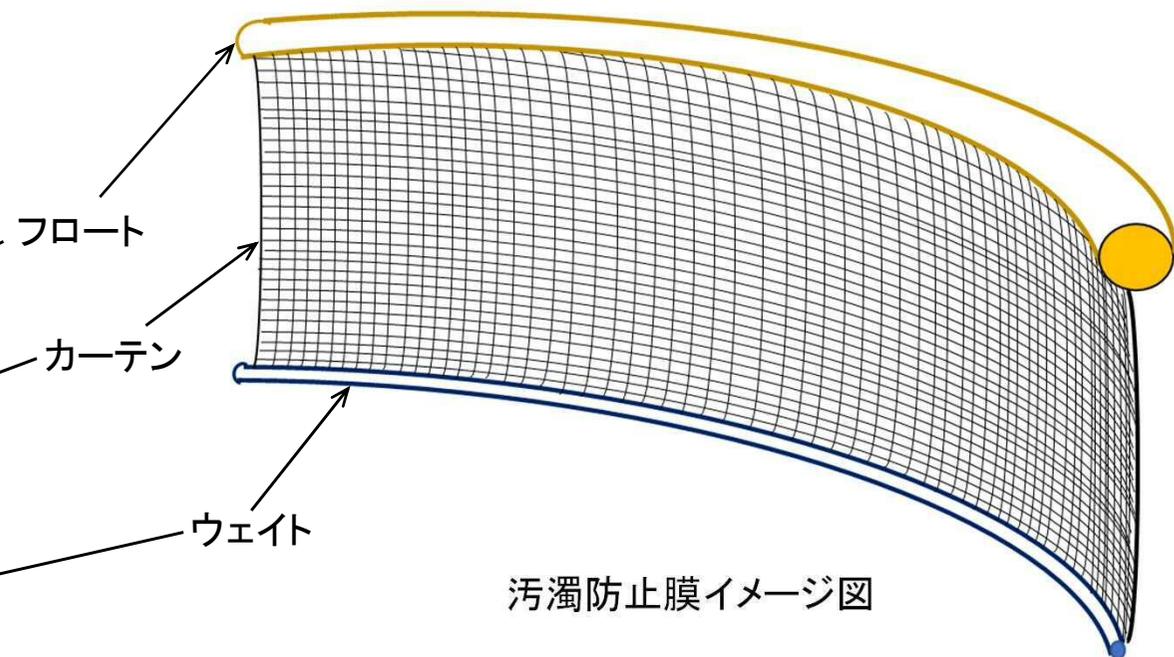


汚濁防止膜 梱包状態(例)



汚濁防止膜 展開状態(例)

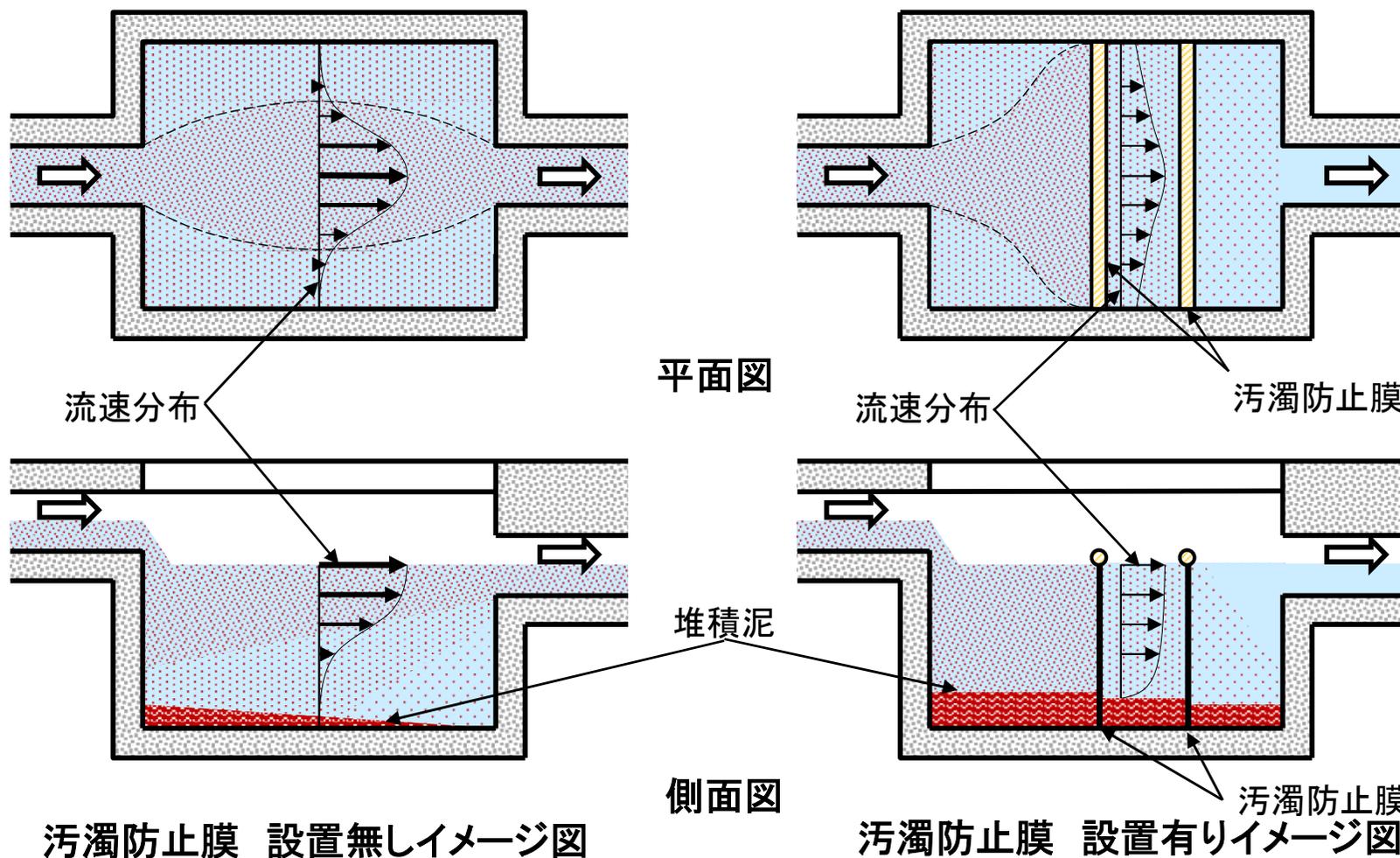
※参考文献:港湾内の海水中放射性物質濃度の状況について
(2013年1月31日東京電力株)



汚濁防止膜イメージ図

(参考)汚濁防止膜(シルトフェンス)による整流効果について

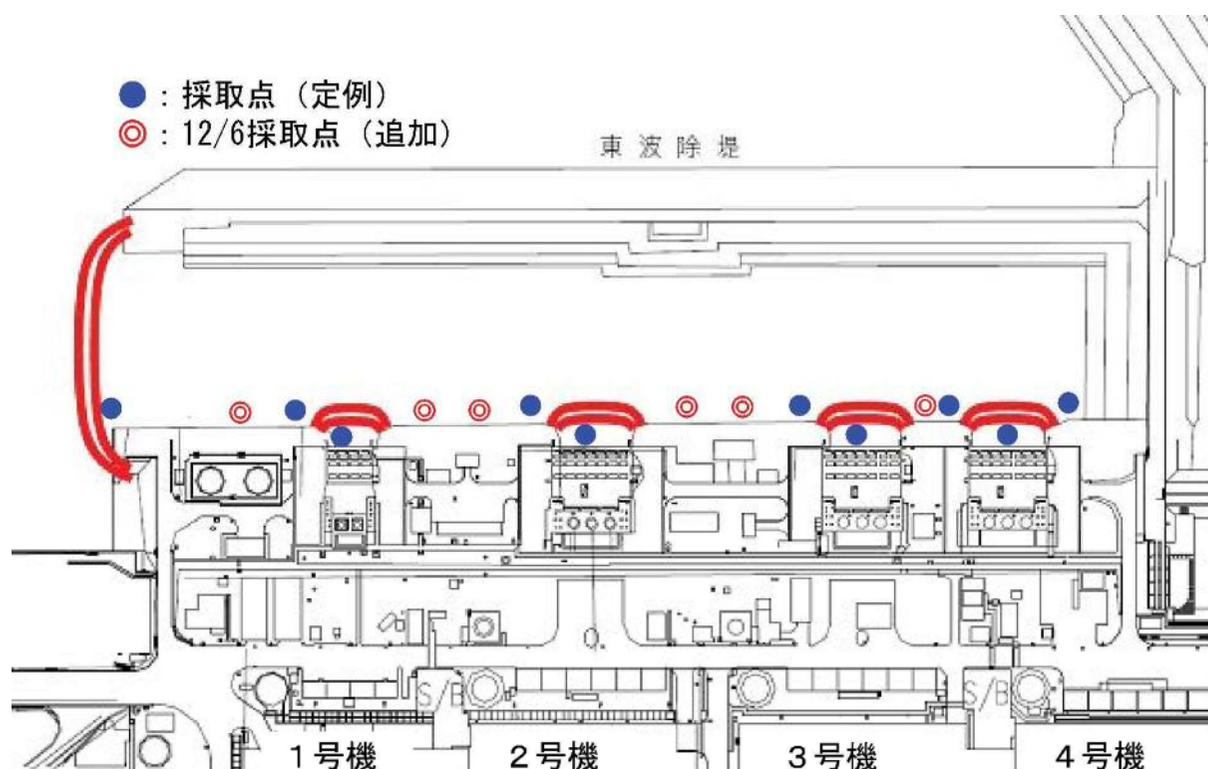
- 汚濁防止膜の効果には、物理的な捕捉効果以外にも**整流・流速低減効果**がある。
- 整流効果とは、汚濁防止膜を設置することにより、幅広く一様な流速になり、**流速が低減し、汚濁粒子が沈降しやすくなる。**



(参考) 港湾内の海水中放射性物質濃度の状況について(2013年1月31日東京電力(株))

➤東京電力による福島第一原子力発電所事故後の港湾内の海水中放射性物質濃度の測定結果は以下のとおりであり、シルトフェンス(汚濁防止膜)外側の変動範囲(6~150Bq/L)と、シルトフェンス内側の変動範囲(30~250Bq/L)を比較すると**外側の値は高くない結果**となっている。

1~4号機取水路開渠内海水中放射性物質濃度(Bq/L)



採取点	Cs-137濃度
取水路開渠北側*1	5.7~38
1号機護岸前北側*2	27
1号機シルトフェンス外側*1	16~47
1号機シルトフェンス内側*1	27~81
1,2号機間護岸前北側*2	51
1,2号機間護岸前南側*2	48
2号機シルトフェンス外側*1	28~100
2号機シルトフェンス内側*1	57~170
3,4号機間護岸前北側*2	55
3,4号機間護岸前南側*2	54
3号機シルトフェンス外側*1	42~130
3号機シルトフェンス内側*1	75~250
4号機護岸前*2	70
4号機シルトフェンス外側*1	45~97
4号機シルトフェンス内側*1	63~160
取水路開渠南側*1	43~150

* 1: 11/1~12/6採取の最小値~最大値を記載

* 2: 12/6採取

➤上記結果から、シルトフェンス内外の放射性物質濃度比から、**シルトフェンス(汚濁防止膜)による放射性物質の低減効果は約1/2程度と推測される。**

【放射性物質吸着材】

- ・発電所敷地と海洋の経路となる場所には、**全て放射性物質吸着材(汚濁防止膜)**を設置する。

対処設備	放射性物質吸着材
設置場所	雨水排水路集水柵 -1~10
所要時間 目安	21時間

放射性物質吸着材を設置することにより、各集水柵等に設置した**汚濁防止膜の捕捉効果、整流効果及び流速低減効果により沈降した放射性物質を吸着**させて拡散抑制対策を行う。

また、集水柵にて放射性物質の捕捉、吸着を行うことから、**サンプリング等による放射性物質放出状況の把握が湾内で捕捉・吸着を行うよりも容易**に実施可能となる。

○放射性物質吸着材(ゼオライト)による海洋への放射性物質の拡散抑制措置

- 放水砲等にて打ち落とされた放射性物質は、埃などに付着した状態で汚染水として拡散することとなる。その汚染水は、原子炉建屋周辺を取り囲む地上部の一般排水路で集水され、地下埋設の一般排水路を通して雨水排水路集水柵又は放水路から海へ流れ込むことから、**汚濁防止膜及び放射性物質吸着材を集水柵等の途中の排水路に設置することで海洋への放射性物質の拡散抑制を行う。**
- 放射性物質吸着材は、ゼオライトを使用する。放射性物質吸着材(ゼオライト)は、**細孔による分子ふるい効果に加え、イオン交換能、触媒能、吸着能などの特性**をもっており、その機能から工業触媒、吸着剤、イオン交換剤、排水処理など幅広く利用されている。
- 高分子系のイオン交換樹脂等は、放射線被ばくにより構造が破壊され、長期保管時には再放出することや火災の発生も起こり得る。そのため、長期にわたる放射性物質吸着材には、**ゼオライトのような無機吸着材が適している。**
- 東海第二で採用する放射性物質吸着材は、**国内他原子力発電所で採用されているゼオライトと同等以上の海水中でのセシウム吸着性能を備えたものを設置する。**



ゼオライト(例)



ゼオライト入り土のう袋姿
(国内他原子力発電所の例)

【参考】国内他原子力発電所の採用ゼオライトの仕様例

・吸着率：約40～60%

(測定条件：粒径約0.1～0.5 mm, 溶媒海水100%,
セシウム濃度1 ppm, pH7.9 測定時間1～24 時間)

(参考：セシウム137の濃度が1 ppmとした場合、1 Lでは約3.2 GBq)

(参考)海水中におけるゼオライトのセシウム吸着率の低下について

- 国内産天然ゼオライトの海水によるセシウム吸着率低下確認試験結果(表1)を参考に添付する。
- 試験条件は以下のとおり。
 - ・ゼオライトと溶液の固液比は1:100
 - ・水道水及び海水を用いて非放射性セシウム溶液(初期濃度約10 mg/L)を作成
 - ・浸漬時間は24時間と48時間
 - ・処理水のセシウム濃度はイオンクロマトグラフ法にて測定
- この試験結果から、海水では吸着率が40%～60%に低下することが示された。また、海水の場合は長時間の浸漬により除去率が大きく高まる傾向を示しており、吸着率と共に吸着速度も低下することが推定される。
- この試験結果における海水時の吸着率は、国内他原子力発電所が採用しているゼオライトの吸着率と同じような結果となっている。
- 海水によりゼオライトの吸着能力は低下するものの、安全性向上のための自主対策として設置することは有効であり、海洋への放射性物質の拡散は、汚濁防止膜の捕捉・沈降効果及びゼオライトによる吸着により低減可能と考える。

表.1 海水による Cs 吸着率(%)の低下

浸漬時間	水道水	海水
24時間	98.4	46.7
48時間	98.8	67.4

※参考文献:吸着材を用いた放射性セシウム含有溶液の浄化手法の検討
(土木学会第67回年次学術講演会 平成24年9月)