

これまでの委員からのご質問への回答について

2019年3月27日
九州電力株式会社

ご質問への回答（目次）

1. 川内2号機 蒸気発生器取替後の検査について
2. 1次冷却材が沸騰する状態における燃料被覆管の健全性について
3. レベル2 P R Aにおける事故時に放出される放射性物質の種類や量（ソースターム）の評価結果について
4. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

1. 川内2号機 蒸気発生器取替後の検査について

【ご質問】

川内2号機の取替後の蒸気発生器について、取替後の最初の定期検査で検査を実施すべきではないか。

1. 川内2号機 蒸気発生器取替後の検査について

川内2号機の蒸気発生器については、取替後の最初の定期検査（第23回定期検査）で蒸気発生器2基、その次の定期検査（第24回定期検査）で蒸気発生器1基の伝熱管の検査※を実施する計画である。

なお、定期検査において、伝熱管の異常の兆候が確認された場合には、当該定期検査で全ての蒸気発生器伝熱管の検査を実施する。

蒸気発生器伝熱管については、運転実績や、経年的な変化を把握する観点から、定期検査毎にいずれかの蒸気発生器の伝熱管のECT※を行い、2回の定期検査にわたって全3基の蒸気発生器伝熱管のECTを行うこととしている。

※ECT：渦流探傷試験（伝熱管の健全性を確認する試験）

2. 当社の蒸気発生器伝熱管の検査実績

蒸気発生器伝熱管に690合金を採用するプラントについては、2定検で全蒸気発生器の伝熱管全数を検査することとし、下表に示す周期で検査を行っている。

玄海2号 (SG数:2基)	定検時期	19回(2005)	20回(2007)	21回(2008)	22回(2009)
	検査対象	A	B	A	B
	検査数	1基	1基	1基	1基
玄海3号 (SG数:4基)	定検時期	10回(2007)	11回(2008)	12回(2009)	13回(2018)
	検査対象	B,C	A,D	B,C	A,D
	検査数	2基	2基	2基	2基
玄海4号 (SG数:4基)	定検時期	8回(2008)	9回(2009)	10回(2010)	11回(2018)
	検査対象	A,D	B,C	A,D	B,C
	検査数	2基	2基	2基	2基
川内1号 (SG数:3基)	定検時期	20回(2010)	21回(2015)	22回(2016)	23回(2018)
	検査対象	A,B	C	A,B	C
	検査数	2基	1基	2基	1基

【計画】 川内2号 (SG数:3基)	定検時期	23回	24回	25回	26回
	検査対象	A,B	C	A,B	C
	検査数	2基	1基	2基	1基

3. 当社の蒸気発生器の検査

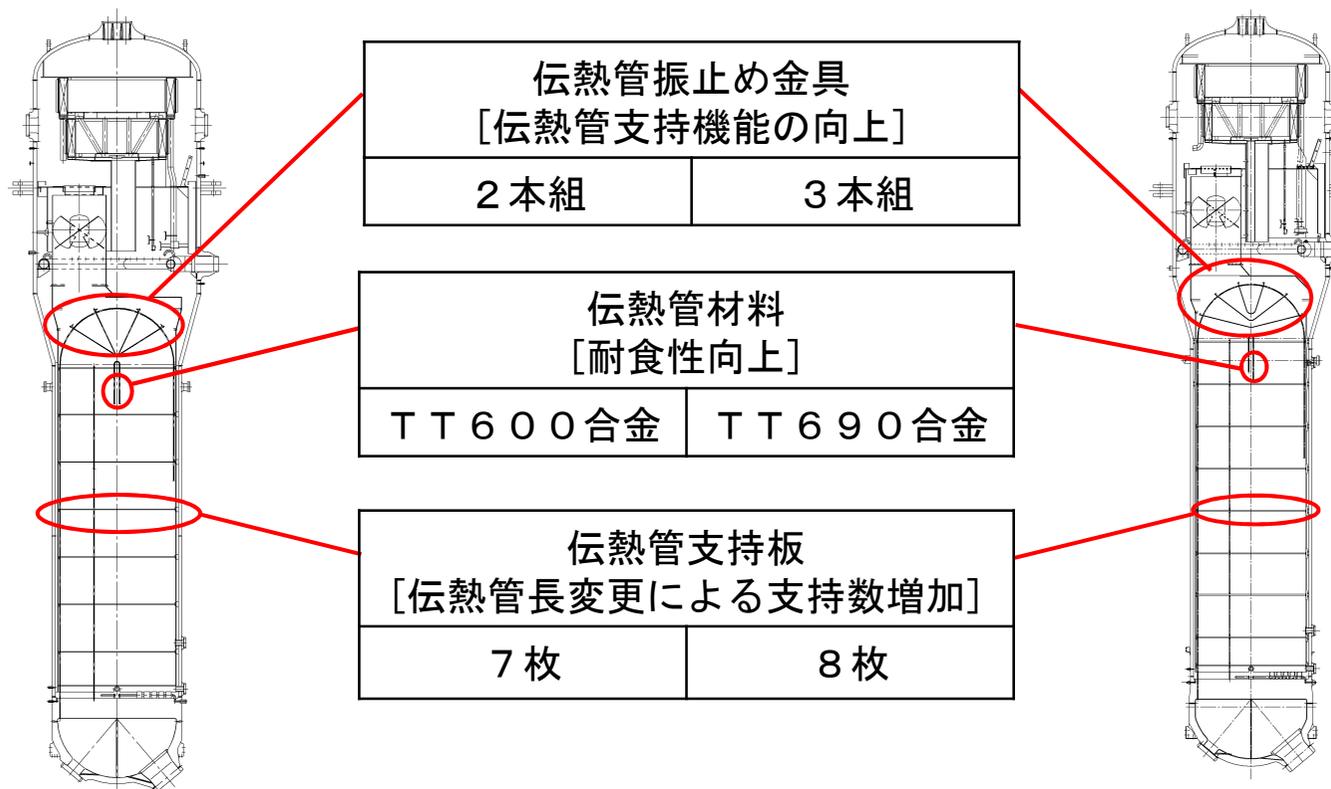
取替蒸気発生器は工場製作、発電所据付け及び運転の各段階において、品質管理を確実に実施するとともに、各種検査により健全性を確保している。また、国の検査についても合格している。

		項目	内容
工場製作時	伝熱管	単体	<ul style="list-style-type: none"> ・材料・寸法検査 ・水圧試験 ・E C T 伝熱管材料が設計通りであり加工が適切に行なわれ、伝熱管として問題がないことを各種検査により確認。
		取付状況	<ul style="list-style-type: none"> ・管板と伝熱管溶接部の確認 ・振止め金具の材料検査、寸法検査、外観検査 ・振止め金具の組立て及び据付け状態を確認する検査 伝熱管のS G本体への組込み状態に問題がないことを各種検査により確認。
	本体	<ul style="list-style-type: none"> ・材料・寸法検査 ・溶接検査 ・外観検査 ・耐圧漏えい検査 S G本体について、材料が設計通りであり、加工・組み立てが適切に行なわれS G本体として問題がないことを各種検査により確認。	
発電所据付け時		<ul style="list-style-type: none"> ・S G据付け状態を確認する検査 ・伝熱管のE C T ・耐圧漏えい検査 ・総合負荷性能検査 発電所においては、所定の場所に据付け後、状態に問題がないことを各種検査により確認。また、運転状態に異常がないことを確認。	
運転開始後		<ul style="list-style-type: none"> ・伝熱管のE C T（2定検で全数） ・耐圧漏えい検査（毎定検） ・総合負荷性能検査（毎定検） 定期検査で、E C Tにより伝熱管に異常のないことを確認するとともに、規定の圧力で漏えい検査を実施。また、運転状態に異常がないことを確認。	

参考 1 : 蒸気発生器の信頼性向上

川内 2 号機の蒸気発生器は、検査、補修作業時の作業員の被ばく低減や、予防保全の観点から蒸気発生器 3 基全てを取替えた。

取替にあたっては、先行プラントで経験した各種トラブルを踏まえ、材料・構造を改善した最新設計を採用し、伝熱管の応力腐食割れや、流体振動に対して信頼性向上を図っている。また、製作・据付け時においても厳しい品質管理を行い ECT を含む各種検査を実施している。



参考2：蒸気発生器伝熱管の検査に係る規格について

蒸気発生器伝熱管の検査を規定する維持規格（JSME S NA1-2008）においては、690合金伝熱管を採用した蒸気発生器の良好な運転実績等を踏まえ、川内1, 2号機の蒸気発生器は、7年以内に全SGの伝熱管全数を検査することが要求される。

川内2号機と同じ設計の蒸気発生器（国内全18プラント）では、「応力腐食割れ」や「流体振動」に伴う損傷事例は無く運転されている。

九電：川内1号(取替)、玄海3/4号、玄海1号(取替/運転終了)

玄海2号(取替/廃止決定)

関電：大飯1/2号(取替/運転終了)、大飯3/4号、高浜1/2号(取替)

美浜1/2号(取替/運転終了)、美浜3号(取替)

四電：伊方1/2号(取替/運転終了)、伊方3号

北電：泊3号

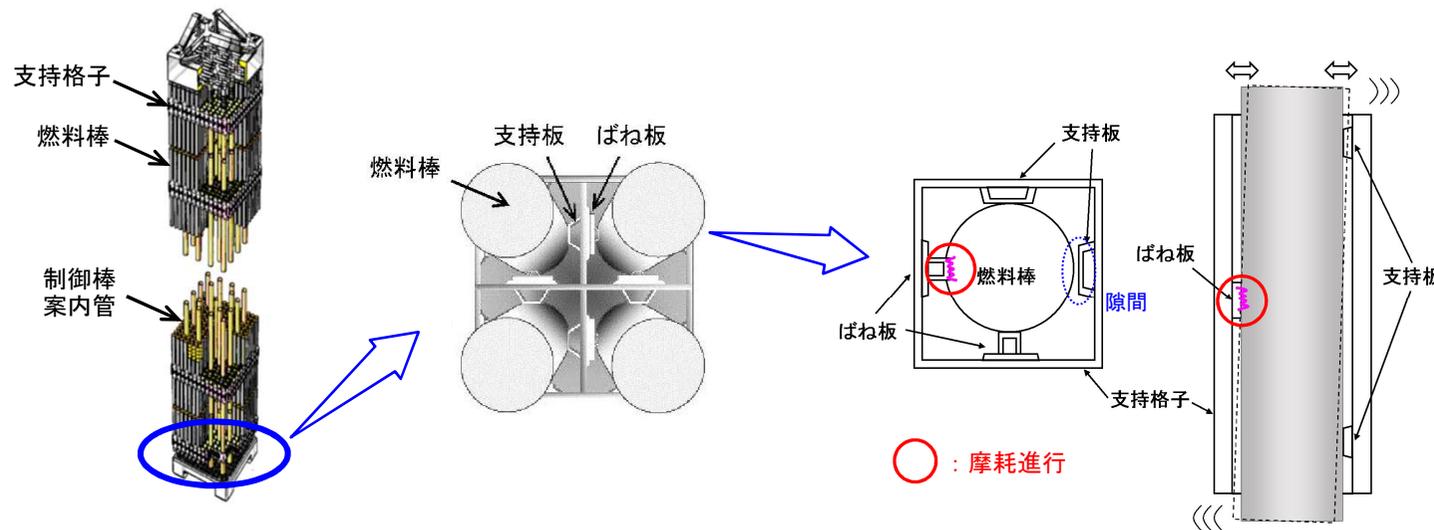
2. 1次冷却材が沸騰する状態における燃料被覆管の健全性について

【ご質問】

川内1号機の燃料集合体漏えい発生に関して、1次冷却材が沸騰する過酷な状態における燃料被覆管の健全性について、説明すること。

1. 燃料棒の振動による燃料被覆管の摩耗発生について

- 川内1号機において、通常運転中に発生した燃料集合体漏えいは、燃料棒と支持板及びばね板の間に隙間が生じ、燃料棒の微小な振動が起きたことにより燃料被覆管が摩耗し、微小孔が生じたものと考えられる。
- 燃料棒の振動は、燃料棒が流体から受ける力により発生し、その振動が継続することにより、燃料被覆管の摩耗が発生する。
- 今回は、1次冷却材が沸騰する通常でない状態における燃料棒の振動による燃料被覆管の摩耗について説明する。

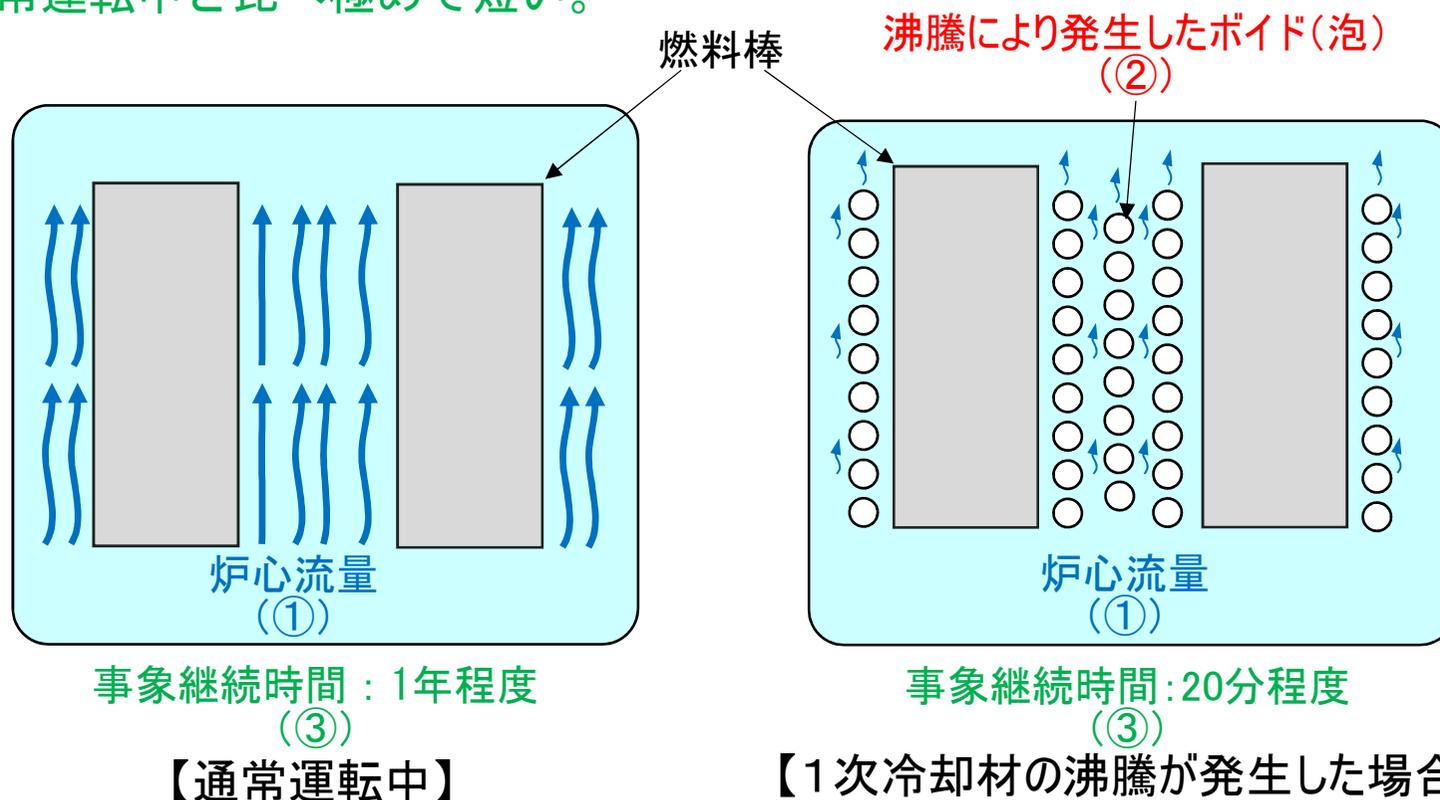


【摩耗発生模式図】

2. 1次冷却材の沸騰が発生した状態の原子炉の状況

○原子炉内で1次冷却材の沸騰が発生する事象では、燃料棒の振動による燃料被覆管の摩耗の原因となる「燃料棒が流体から受ける力」と「振動の継続時間」に関して、通常運転中と比べ、以下の違いがある。

- ①本事象の発生に伴い、原子炉停止後1次冷却材ポンプが停止し、非常用炉心冷却設備による炉心注入が行われることにより、「炉心流量」は少なくなる。
- ②さらに原子炉停止後も、継続的に発熱（崩壊熱）することにより1次冷却材中に「ボイド」が発生し、「流体動圧」は増加する。
- ③緩和策の実施により速やかに事象が終息するため、「事象が継続する時間」は、通常運転中と比べ極めて短い。



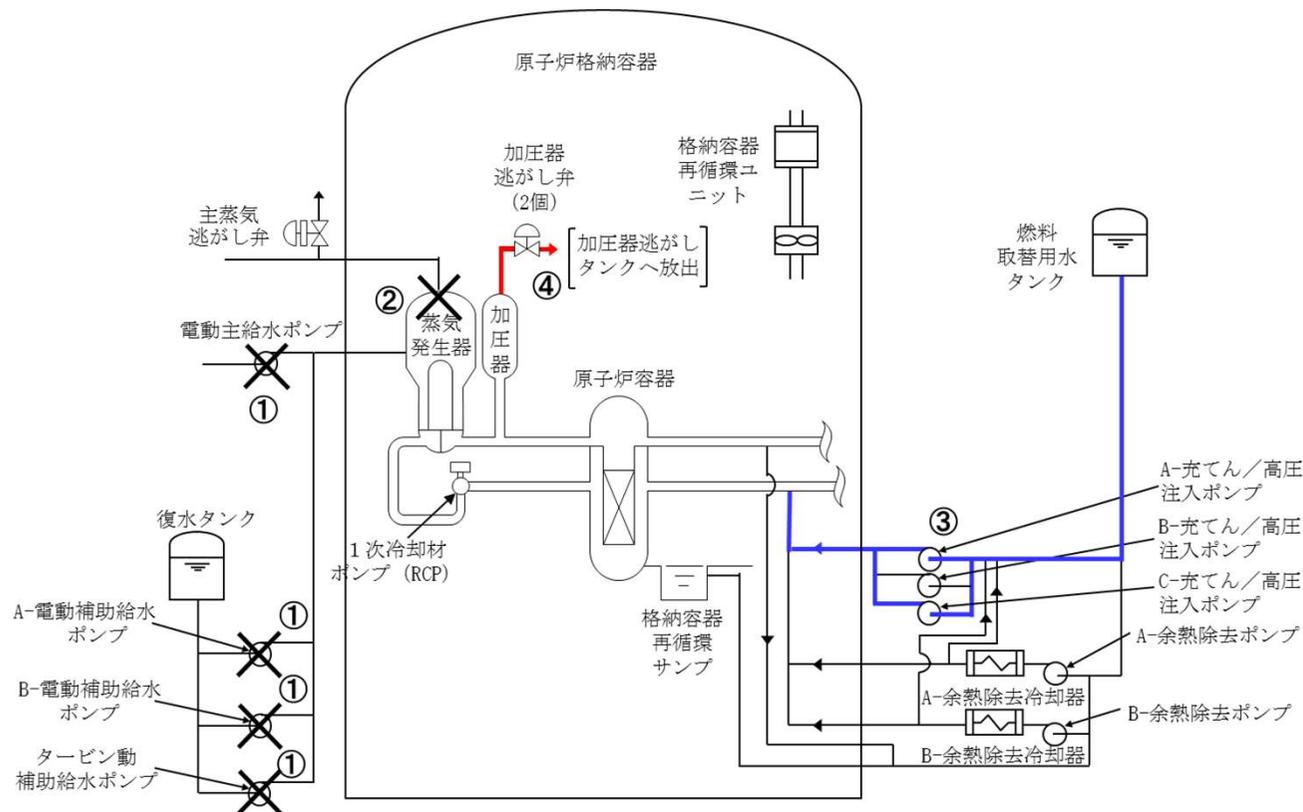
3. 1次冷却材が沸騰する事象における燃料被覆管の健全性について

○原子炉内で1次冷却材の沸騰が発生する事象においては、通常運転中と比べて、燃料被覆管の摩耗への影響は極めて小さく、燃料被覆管の摩耗により燃料集合体の漏えいが発生することはない。

	燃料棒が流体から受ける力		③事象継続時間	摩耗への影響度 (\propto ① \times ② \times ③)
	①炉心流量 (質量流量)	②ボイドによる流体動圧 (\propto 密度 \times 流速の二乗)		
通常運転中	12.6 t/s	1とした場合 (ボイド発生なし)	1年程度 (燃料漏えい時)	1とした場合
原子炉内で 沸騰が 発生する事象	0~0.1 t/s 程度	約2倍 2程度 (質量流量一定で、 ボイド率50%の場合 密度：1/2程度 流速：2倍程度 流体動圧：2倍程度)	約1/10,000 20分程度	約1/100,000 ~ 約1/1,000,000

(参考) 原子炉内で1次冷却材が沸騰する事象の例

- 通常運転中に蒸気発生器への注水機能が喪失 (①) すると、2次冷却系による除熱機能が喪失 (②) する。
- 事故を収束させるため、充てん／高圧注入ポンプ (③) と加圧器逃がし弁 (④) を用いたフィードアンドブリードを実施すると、炉心での減圧沸騰に伴い生じた蒸気 (ボイド率：50%程度) が、加圧器逃がし弁を介して放出され、炉心が冷却される。



3. レベル2 PRA評価結果について

【ご質問】

レベル2 PRAにおける事故時に放出される放射性物質の種類や量（ソースターム）の評価結果について説明すること。

※レベル2 PRA

環境への放射性物質の放出を伴う事故の発生頻度（格納容器機能喪失頻度）及び放出量等の評価を行う確率論的リスク評価（PRA）

1. ソースターム評価結果について

○当社は、安全性向上の観点から、設計基準事故対処設備（建設時）に加え、TMI※事故を契機に整備したアクシデントマネジメント（AM）策や新規制基準に基づくシビアアクシデント（SA）対策を実施してきた。

※米国スリーマイル・アイランド原子力発電所

○レベル2 PRAでは、上記対策の設備故障が重畳することを想定した格納容器機能喪失頻度、環境に放出される放射性物質の種類・量（ソースターム）を評価することとしている。

○格納容器が健全である場合については、ソースターム及び敷地境界の実効線量の定量評価を実施している。評価内容について、次頁以降にて説明する。

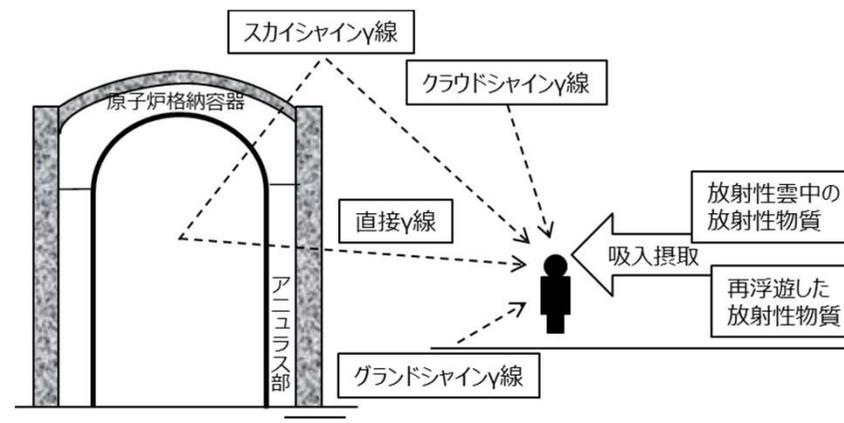
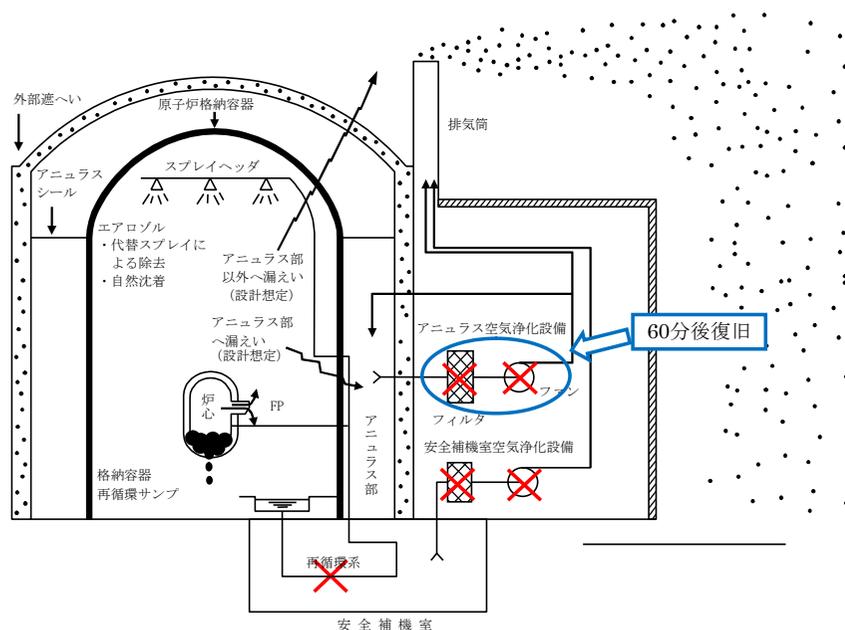
○なお、格納容器が機能喪失する場合については、評価技術が研究段階にあり、現時点においてソースタームの定量評価に至っていない。

2. ソースターム評価結果について

○評価対象事象は、「大破断LOCA+ECCS注入失敗+CVスプレイ失敗」を選定した。

〔全交流動力電源喪失及び原子炉補機冷却機能喪失の重畳を考慮し、常設電動注入ポンプを用いた代替格納容器スプレイ及び格納容器再循環ユニットを用いた格納容器内自然対流冷却を考慮。〕

○本評価事象は、炉心損傷が早く、事象進展中の原子炉格納容器圧力が高く推移することから環境に放出される放射性物質の量が多くなり、被ばく評価上厳しい事象である。



放射性物質の放出量評価イメージ図

2. ソースターム評価結果について

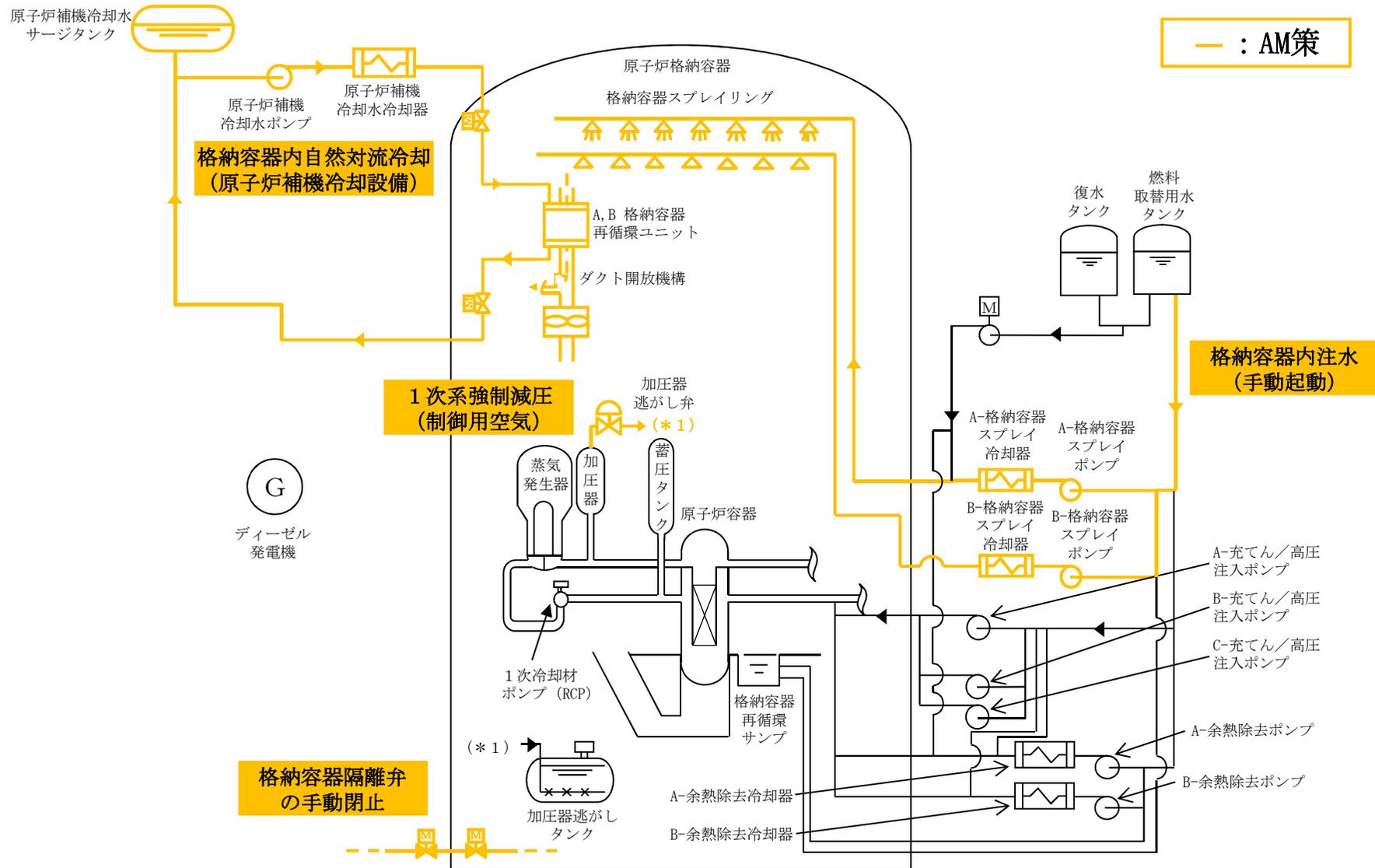
○評価結果は以下のとおり。

➤大気中への放射性物質の放出量（事故後7日間積算）

核種グループ	放出放射能（Bq）
希ガス類	約4.4E+16
よう素類	約2.4E+14
Cs類	約9.9E+12
Te類	約4.1E+13
Sr類	約2.2E+12
Ru類	約1.2E+13
La類	約1.7E+11
Ce類	約1.8E+12
Ba類	約3.8E+12

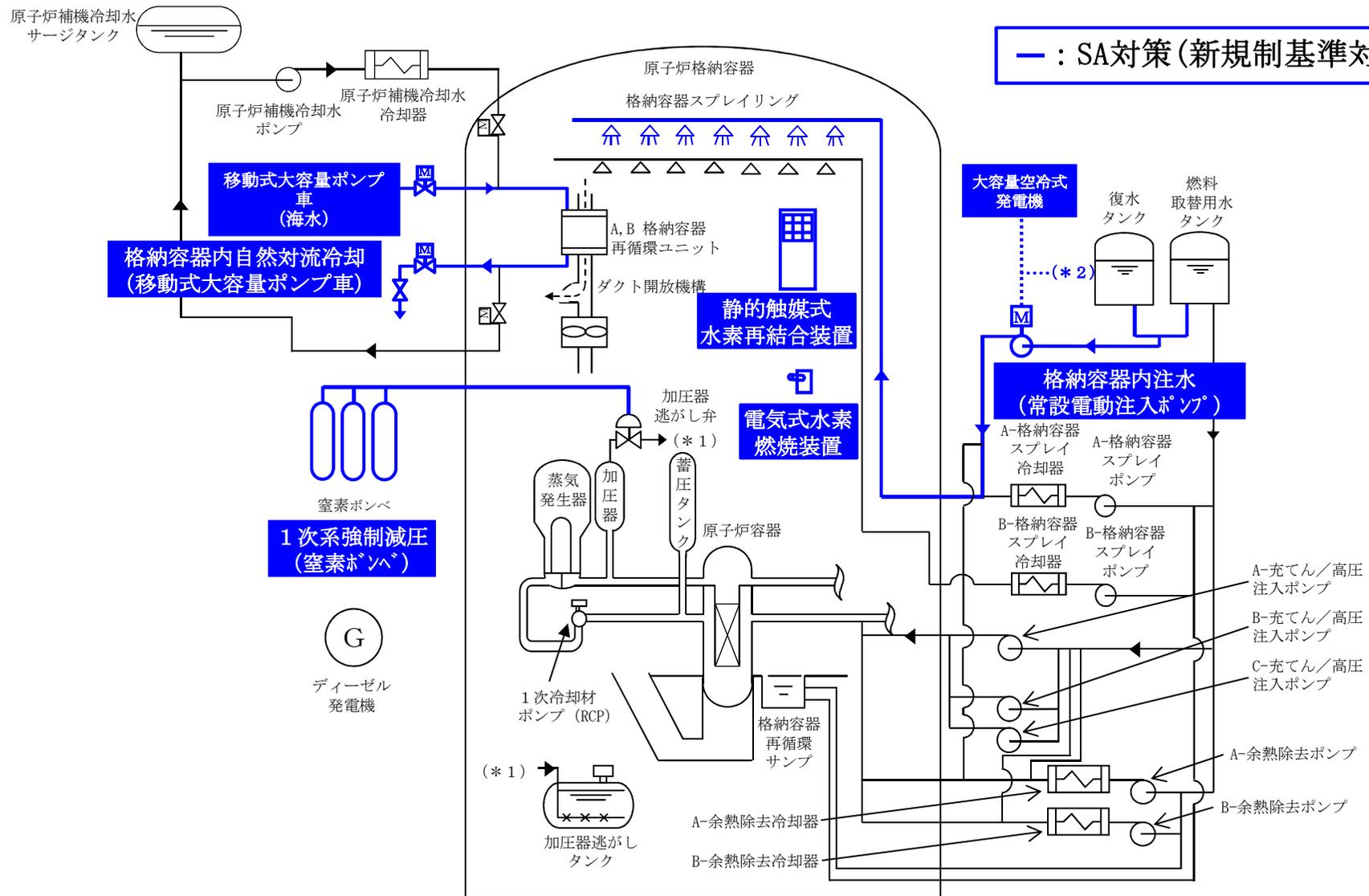
➤敷地境界の実効線量（平均値）：43mSv

(参考)



主なAM策の概略系統図 (格納容器機能喪失防止対策)

(参考)



— : SA対策 (新規制基準対応策)

主なSA対策の概略系統図 (格納容器機能喪失防止対策)

4. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

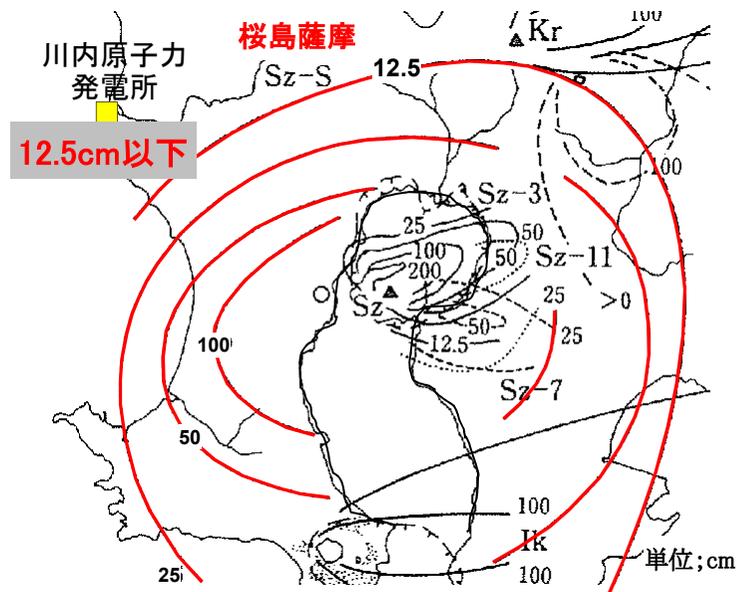
【ご質問】

桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて、
計算モデルや設定パラメータなどの詳細を説明すること。

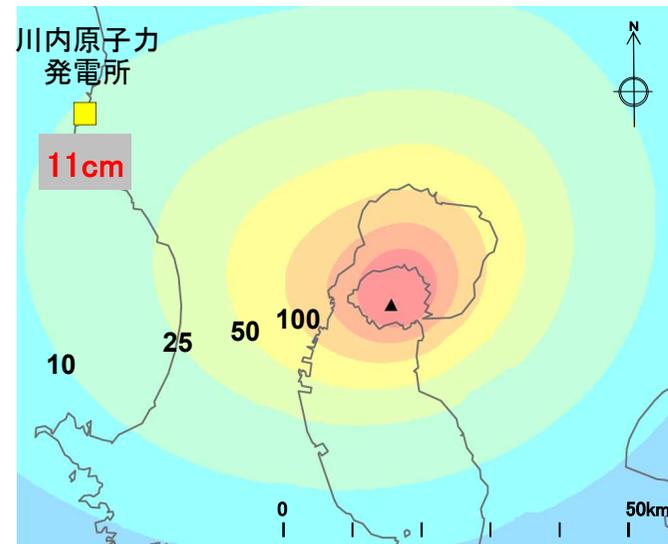
1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

(1) ご質問の背景の整理

- 当社は、約1.3万年前の「桜島薩摩噴火」を対象に、文献等の調査結果や降灰シミュレーション結果を踏まえ、敷地における層厚を15cmと評価。
- 第7回専門委員会において、より発生頻度の高い（現実的に起こり得る可能性の高い）「桜島大正噴火（1914年）」を対象に、最大の風向・風速での敷地への影響を確認し、15cmの設定の保守性をご説明。
- 第8回専門委員会において、シミュレーションの計算モデルや設定パラメータ等の詳細を説明するようにとのご指摘。



文献による降灰分布(町田・新井(2011))



降灰シミュレーションに基づく降灰分布
(8月の平均風を考慮した場合)

1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

(2) 計算モデルの概要

- 解析コードは、多くの研究者により利用され、実績がある「Tephra2」を用いた。

[Tephra2の概要]

- ・「Tephra2」は、Bonadonna et al.(2005)の移流拡散モデルを用いたシミュレーションプログラムである。
- ・移流拡散モデルとは、火山灰の重力による落下において、風による移動(移流)及び空中で火山灰が自発的に散らばる現象(拡散)を考慮して、計算するものである。
- ・風は高度毎に水平な一方向に吹くものとされ、時間変化・空間変化は考慮しない。また、拡散は水平方向のみが考慮されている。

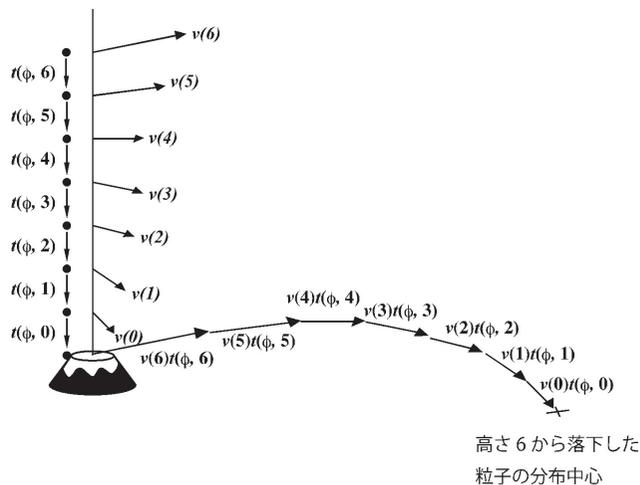


図3 移流の概念図

火口直上の風が、高さ0から6までそれぞれベクトル $v(0) \sim v(6)$ で表されるとする。各高さ区間 n を落下する間に粒子が流されるベクトルは $v(n)t(\phi, n)$ で表されるので、高さ6から放出される粒子はこれら全ての積算が分布の中心のベクトルとなる。

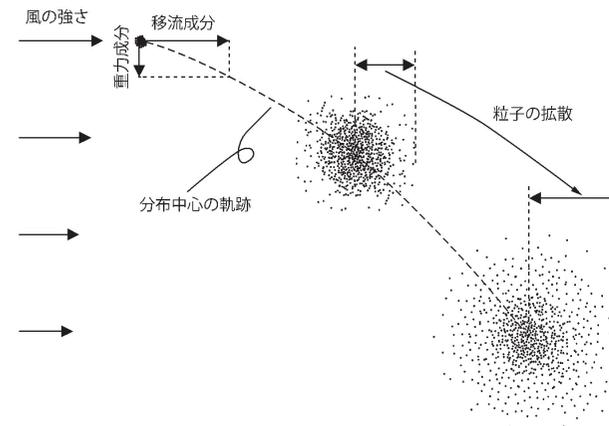


図1 移流拡散モデルの概念図

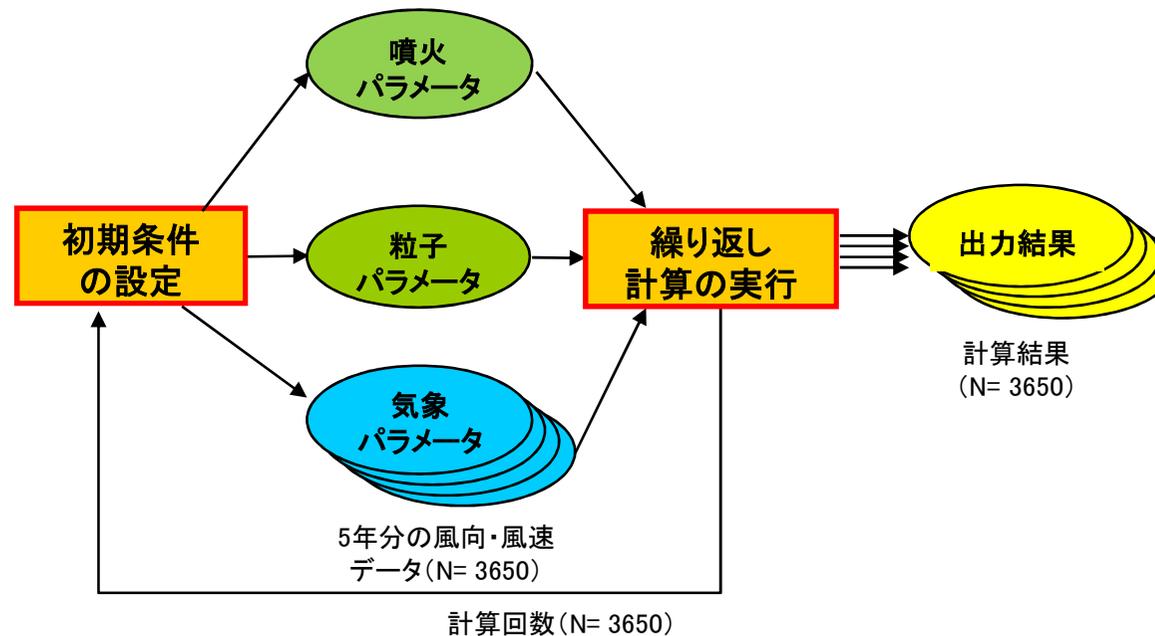
粒子の分布中心の軌跡は、重力による落下と風による移流によって決まる。粒子の一団は時間0の時に点で表されるが、時間の経過とともに拡がっていく。

1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

(3) 計算方法

[気象パラメータを変化させた繰り返し計算]

- ・ Tephra2では、噴火パラメータ、粒子パラメータ、気象パラメータの3つのパラメータを設定する。
- ・ 今回の計算では、5年分の風データを用いて、3650回の繰り返し計算を行っている。
- ・ 出力結果として、3650個の川内原子力発電所地点での層厚データを得ている。



1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

(4) 噴火パラメータ (噴出源)

項目		単位	設定値	備考	
噴火 パラメータ	噴出源	噴出位置	—	北緯 31° 34′ 38″ 東経 130° 39′ 32″	気象庁編(2013) : 日本活火山総覧(第4版)より設定 (桜島南岳)
		噴出標高	m	1,060	
		噴出物量	km ³	0.33	Biass et al.(2017)より設定
		噴煙柱高度	km	15	Biass et al.(2017)より設定
		PLUME_RATIO(噴煙柱のうち 粒子放出のない区間比)	—	0.1	噴煙のほぼ全領域からの放出を仮定

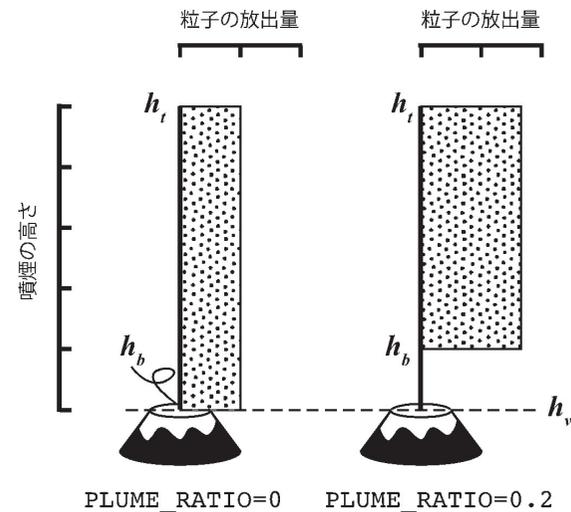


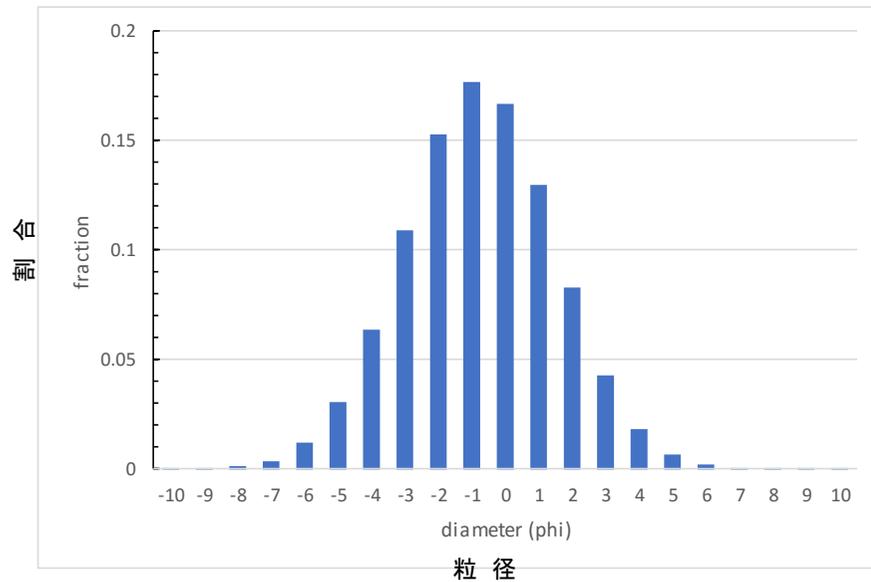
図 7 PLUME_RATIO パラメータの概念図
 粒子の放出範囲と放出量を網掛けで示す。面積として示される放出量は PLUME_RATIO の違いによって変化しないが、各高さにおける放出量は PLUME_RATIO に従って大きくなる。

出典: 萬年(2013)

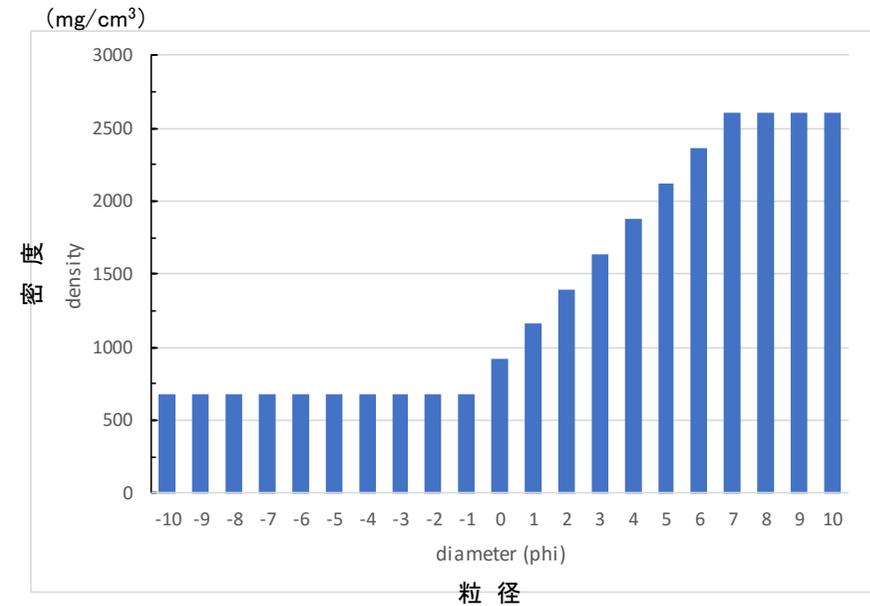
1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

(5) 粒子パラメータ (粒径・密度)

項目		単位	設定値	備考	
粒子 パラメータ	粒径	平均粒径	mm	$1/2^{-1.28} (\doteq 2.4)$	Biass et al. (2017) より設定
		粒径分散	mm	$1/2^{2.25} (\doteq 0.2)$	
		最大粒径	mm	$1/2^{-10} (= 1,024)$	テフラ2における推奨値
		最小粒径	mm	$1/2^{10} (\doteq 0.001)$	
密度	岩石密度	g/cm ³	2.6	テフラ2における推奨値	
	軽石密度	g/cm ³	0.676	Biass et al. (2017) より設定	



粒径分布



粒径毎の密度

1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

(6) 粒子パラメータ (拡散)

項目		単位	設定値	備考	
粒子パラメータ	拡散	みかけ渦拡散係数(細粒)	m ² /s	0.04	Suzuki(1983)、萬年(2013)より設定
		拡散係数(粗粒)	m ² /s	2500	
		Fall Time Threshold (粗粒または細粒の拡散式を適用する境界となる落下時間)	s	4000	Biass et al.(2017)より設定

[拡散]

○粒子の拡散については、細粒な粒子と粗粒な粒子で挙動が異なるため、TEPHRA2では、それぞれの拡散式が用意されている。

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{8C}{5} (t_{ij} + t'_i)^{2.5}$$

C; みかけ渦拡散係数

$$\sigma_{ij}^2 = 4K (t_{ij} + t'_i)$$

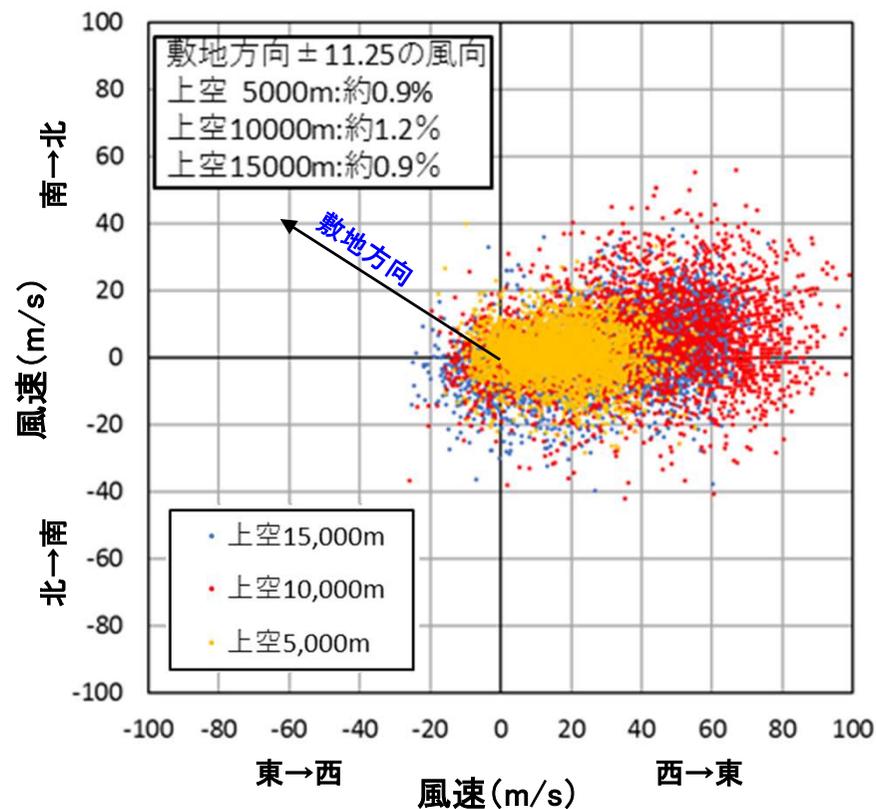
K; 拡散係数

○どちらの式を用いるかは、落下時間で決められており、落下時間が短い場合は粗粒な式、長い場合は細粒な式を用いる。この境界の時間をFall Time Threshold(落下時間閾値)としている。

1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

(7) 気象パラメータ

- 鹿児島地方気象台の5年間（2006年～2010年）の風向・風速データ【3,650データ＝2回/日（9時、21時）の5年分】を用いて計算を実施。



桜島上空の風の頻度分布(2006年～2010年)

1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

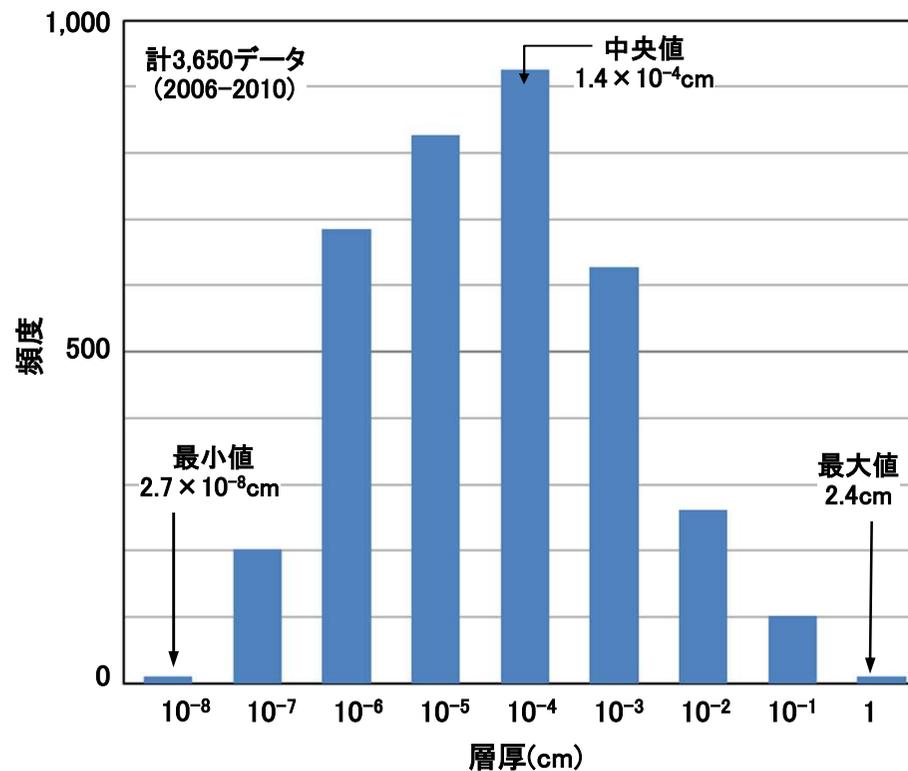
(8) 設定パラメータ (一覧)

項目		単位	設定値	備考	
噴火 パラメータ	噴出源	噴出位置	—	北緯 31° 34' 38" 東経 130° 39' 32"	気象庁編(2013) : 日本活火山総覧(第4版)より設定 (桜島南岳)
		噴出標高	m	1,060	
		噴出物量	km ³	0.33	Biass et al.(2017)より設定
		噴煙柱高度	km	15	Biass et al.(2017)より設定
		PLUME_RATIO(噴煙柱のうち 粒子放出のない区間比)	—	0.1	噴煙のほぼ全領域からの放出を仮定
粒子 パラメータ	粒径	平均粒径	mm	$1/2^{-1.28} (\approx 2.4)$	Biass et al.(2017)より設定
		粒径分散	mm	$1/2^{2.25} (\approx 0.2)$	
		最大粒径	mm	$1/2^{-10} (= 1,024)$	テフラ2における推奨値
		最小粒径	mm	$1/2^{10} (\approx 0.001)$	
	密度	岩石密度	g/cm ³	2.6	テフラ2における推奨値
		軽石密度	g/cm ³	0.676	Biass et al.(2017)より設定
	拡散	みかけ渦拡散係数(細粒)	m ² /s	0.04	Suzuki(1983)、萬年(2013)より設定
		拡散係数(粗粒)	m ² /s	2500	Biass et al.(2017)より設定
		Fall Time Threshold (粗粒または細粒の拡散式を適用する境界となる落下時間)	s	4000	
気象 パラメータ	風向、風速	—	鹿児島地方気象台の5年間(2006年~2010年)の全気象観測データ 【 3,650データ=2回/日(9時、21時)の5年分 】		

1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

(9) 検討結果

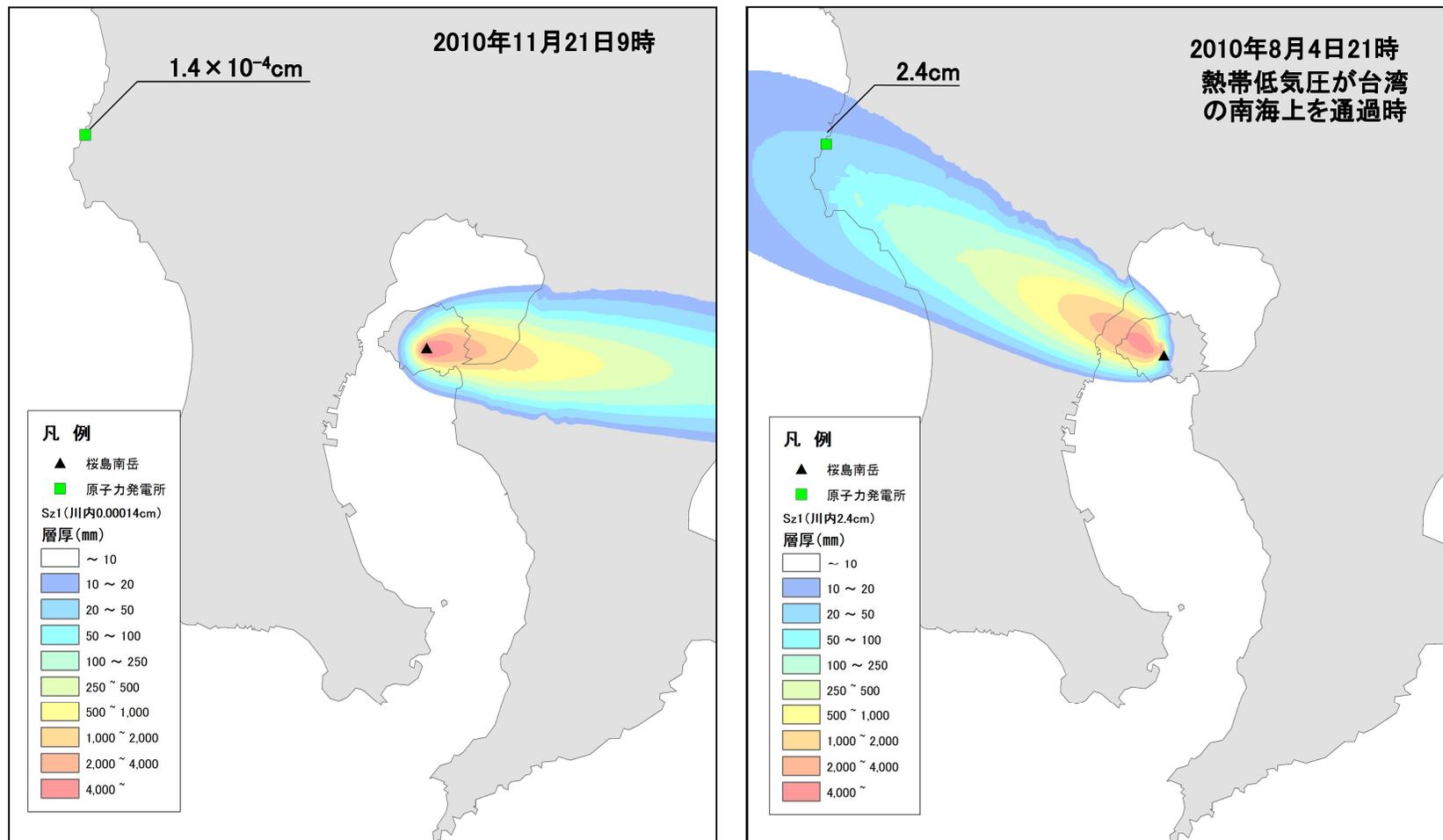
- 桜島上空は年間を通じて西→東の風が大半であるため、敷地での降灰量は極めて少なく（中央値： $1.4 \times 10^{-4} \text{cm}$ 、最大値：2.4cm）、15cmの当社評価が十分保守性を有することを確認。



全解析結果(敷地の層厚)のヒストグラム

1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

〔 火山灰シミュレーション結果（桜島大正噴火） 〕



【中央値】降灰分布図

【最大値】降灰分布図

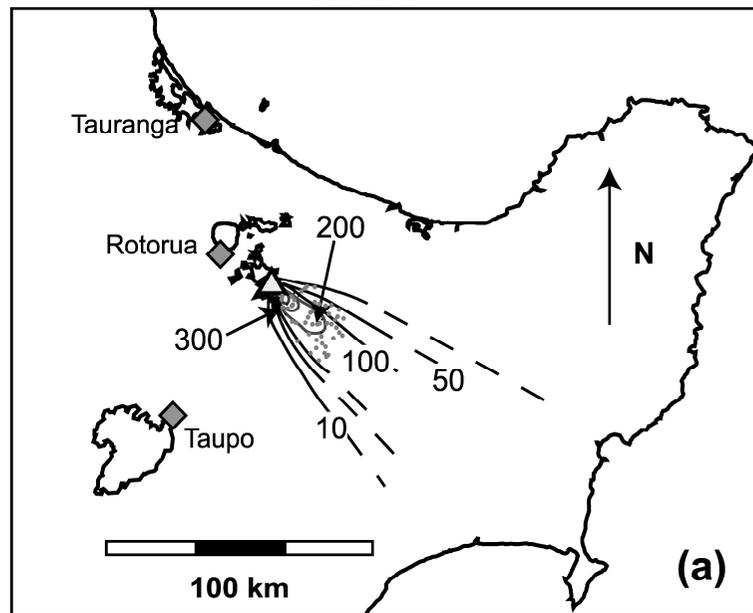
降灰シミュレーションに基づく降灰分布図(桜島大正噴火)

1. 桜島大正噴火の火山灰シミュレーションについて

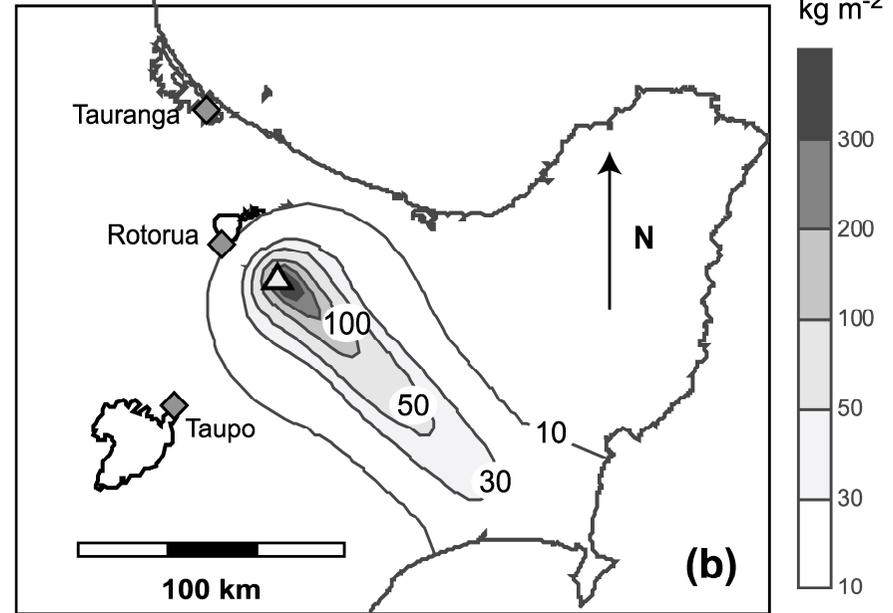
(参考) Tephra2の再現性

- Bonadona et al. (2005)は、ニュージーランドで発生した噴火 (Kaharoa 1315年:VEI5) を対象にTephra2の再現性を検討し、概ね再現はできるとしている。

フィールドデータによる降灰分布



Tephra2の計算による降灰分布



当社は、今後とも、安全確保を最優先に、
発電所の安全、安定運転に努めてまいります。