

# 川内原子力発電所に対する 安全審査の非保守性、および 深層防護の国際的水準未満の問題点

2016年1月20日

佐藤 暁

# はじめに

- 非保守性： 原子力安全の議論における「安全性の分水嶺」は、事故が起こるか否かの確率が 50/50 のところにあるのではなく、原子炉1基当たりの年間の事故発生確率として 0.01/99.99(炉心損傷事故)ないし 0.001/99.999(大量早期放射能放出事故)と心得られている。この通念に照らしても、なお安全であることを裏付けるためには、しばしば敢えて過大とも思われる余裕が盛り込まれなければならない、その場合の考慮に欠落や不十分さがある場合を「**非保守的である**」と指摘する。
- 原子力安全に対する脅威と防御の構成要素：

脅威 \ 防御	第一層 堅牢設計	第二層 検査・試験	第三層 設計事象	第四層 過酷事故	第五層 防災
内部事象					
外部事象					
破壊工作					
未熟な安全文化					

# 論点

1. 原子力安全と地震の脅威の関係
2. 設計基準地震動の策定プロセスにおける非保守性
3. 一様ハザード・スペクトルの非保守性
4. 火山の噴火に対する安全評価における非保守性
5. 過酷事故評価における非保守性
6. 過酷事故対策における非保守性

# 1. 原子力安全と地震の脅威の関係

## 事故発生への影響

- 多くの機器、複数ユニットに対し同時に影響。火災、内部溢水も誘発。
- 安全系の直接破壊だけではない。(所外電源喪失。破損することによって、安全系に影響するものもある。消火水配管、運搬道路など。)
- 配管、ポンプなどの大型機器だけではない。(電子基板の故障なども。)
- 解析できない機器もある。(経年劣化も考慮した実験が必要。)
- 地震加速度だけではない。(変圧器油面の波。燃料の出力急増現象。)
- 運転中だけではない。(停止期間中の格納容器開放後に燃料移動中。)

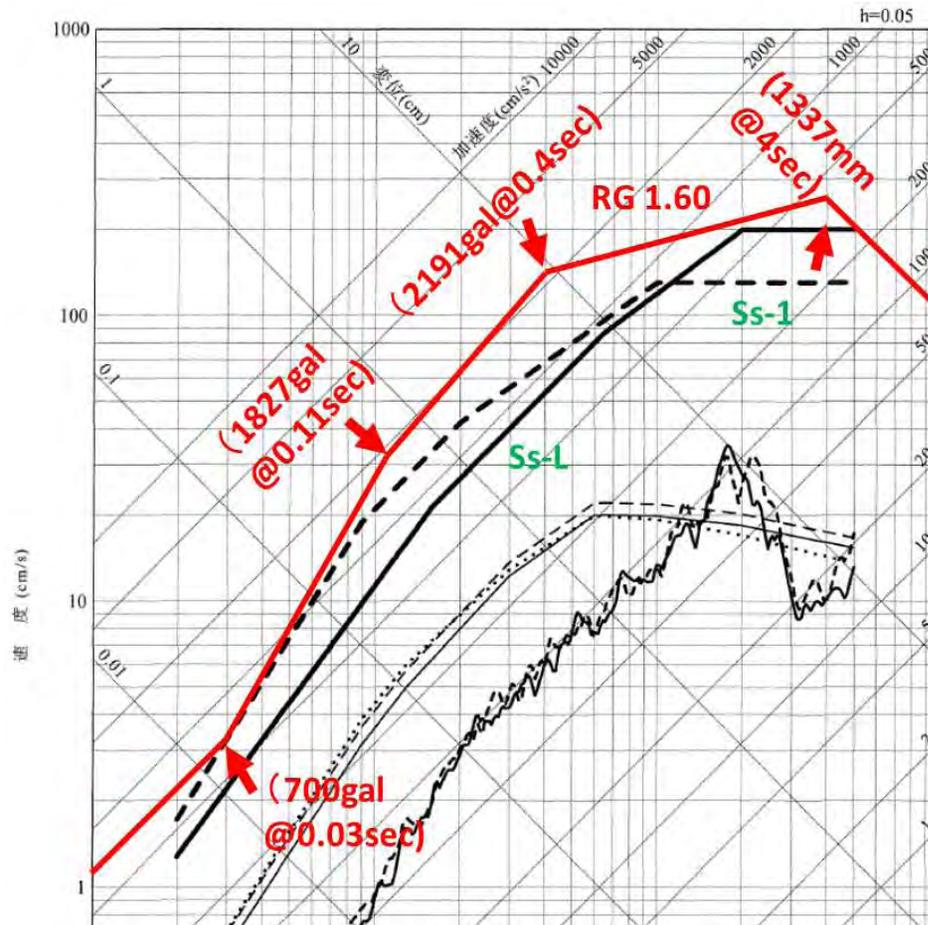
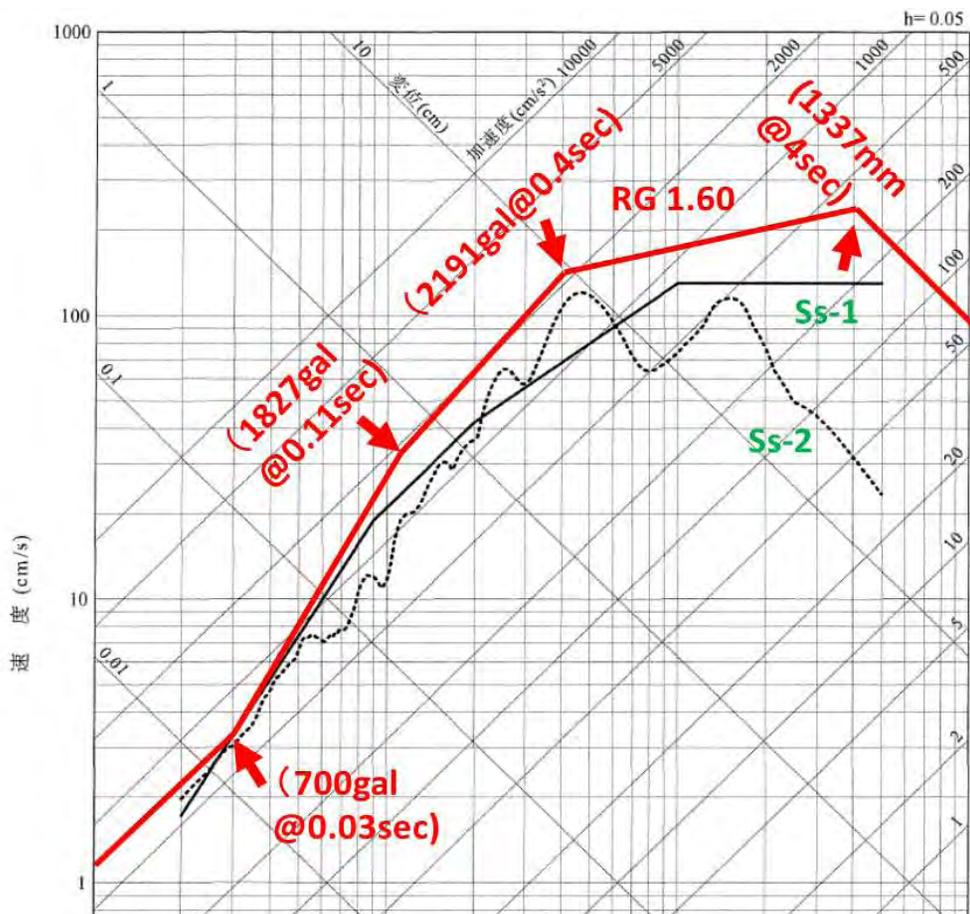
## 事故発生後の対応への影響

- 余震。(2011年3月11日にはM5.0以上が180回。事故対応活動の妨げ。)
- 複合災害。(0.001/99.999(10万年に1回の規模)を考慮すべき。)

## 2. 設計基準地震動の策定プロセス における非保守性

- 最も保守的な策定方法は、RG 1.60 によること。
- 遠隔地震源の大規模地震(Ss-L)も考慮し、一緒に包絡されるべき。
- 複数の設計スペクトルを設定することの正当性が当て嵌まらない。
- Ss-2 として、留萌の「生」のスペクトルを使っていること非保守性(実質、何の強化も求めることになっていない。)
- 本来示されるべき水平2成分の時刻歴波形が1種類しかない。(同一の時刻歴波形を両成分として使うのは禁止。)
- カリフォルニア州の2カ所の原子力発電所(サン・オノフレ、ディアブロ・キャニオン)の応答スペクトルを下回っている。
- 最新の米国の例でも、複数の設計スペクトルは設定されていない。
- 二分割スペクトルによる解析の保守性は、単一の全域包絡スペクトルによる解析との比較によって証明されるべき。

# RG 1.60 による応答スペクトルが1本 あれば、Ss-2もSs-L も含まれる。



複数のスペクトルを保守的に1つに包絡して設定するのが本来の基本。  
(RG 1.165)

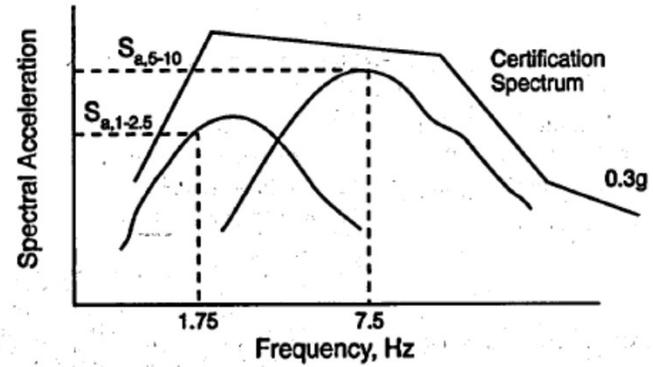


Figure F.1 Use of SSE Spectrum of a Certified Design

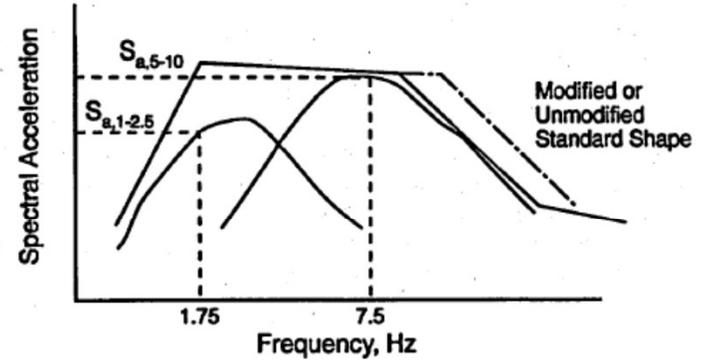


Figure F.2 Use of a Standard Shape for SSE

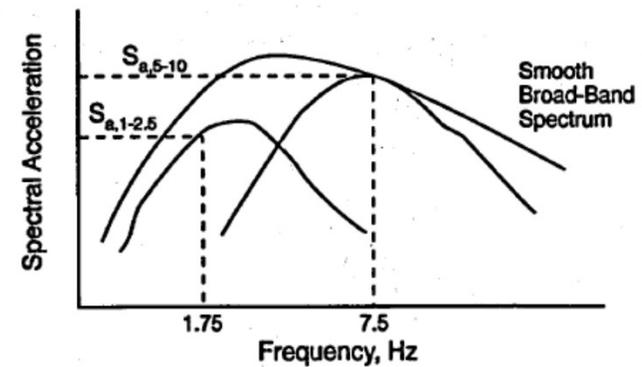
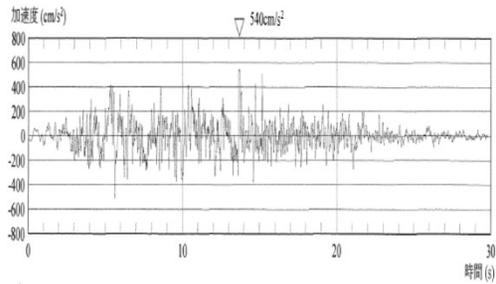


Figure F.3 Development of a Site-Specific SSE Spectrum

# 時刻歴波形(同じ加速度と時間スケールで示す。)

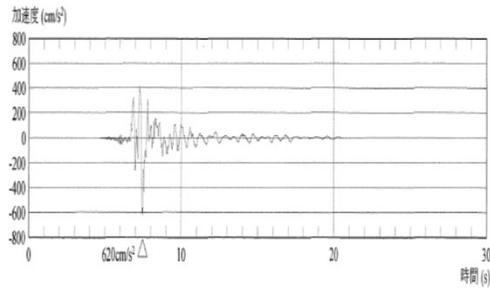
Ss-1



加速度 (水平方向: Ss-1<sub>H</sub>)

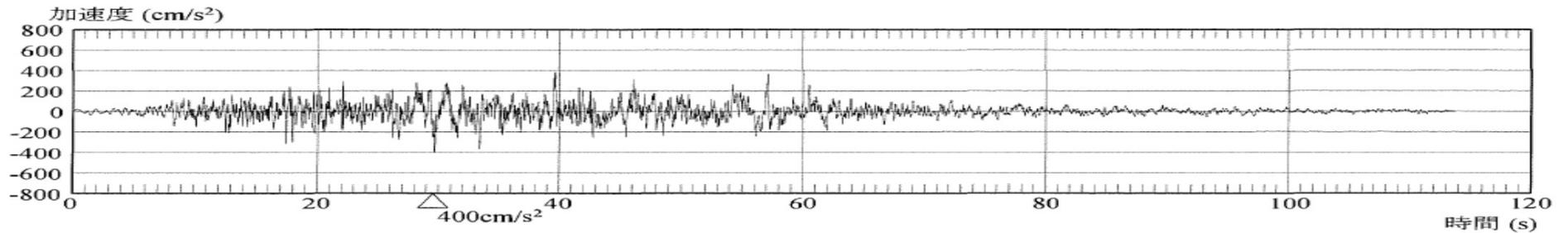
X成分? Y成分?

Ss-2



加速度 (水平方向: Ss-2<sub>H</sub>)

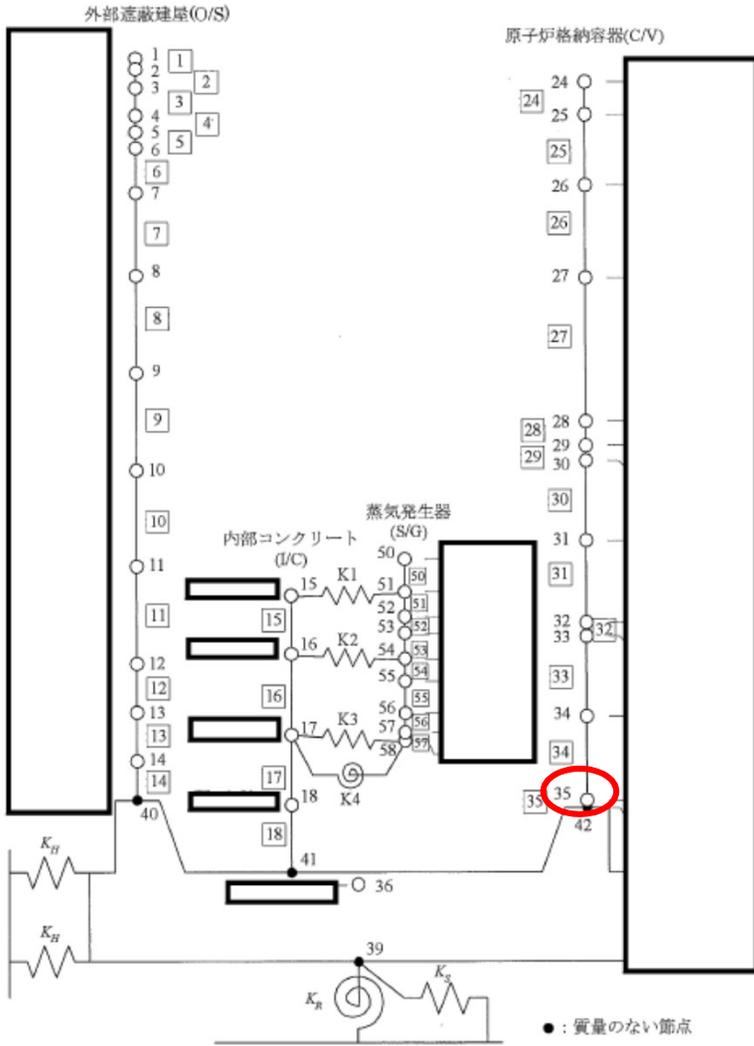
Ss-L



加速度 (水平方向: Ss-L<sub>H</sub>)

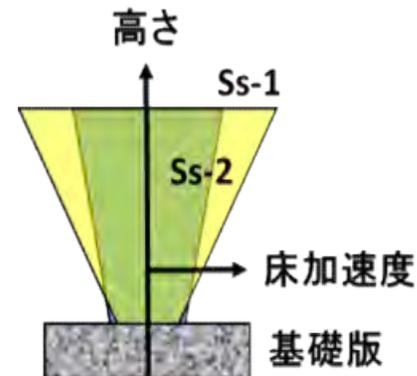
# Ss-1とSs-2の時刻歴波形を入力して計算された最大床加速度

もし、Ss-Lの時刻歴波形を入力したらどうなるのか？

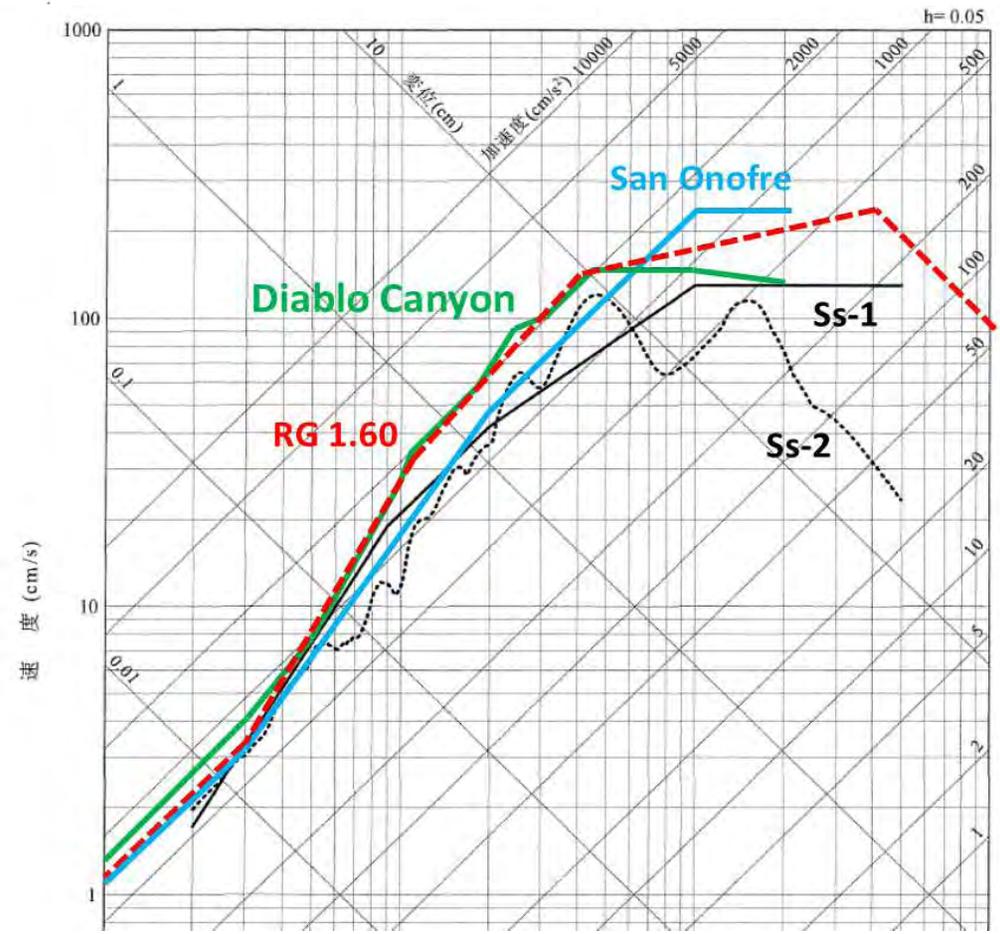
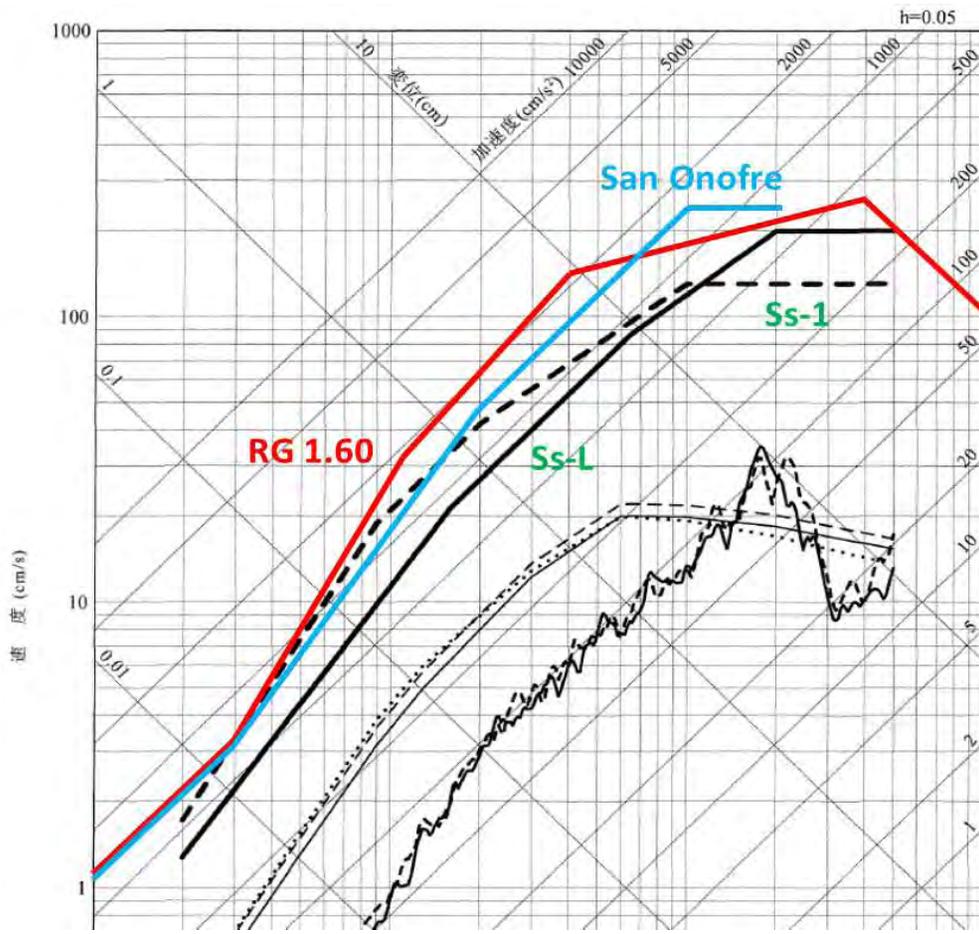
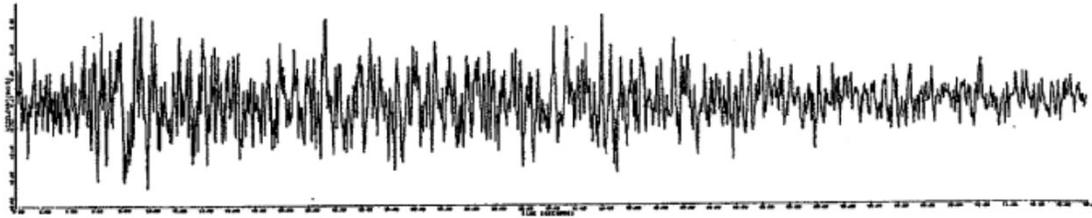


最大床加速度 (x9.8m/s<sup>2</sup>)

		基礎部						
蒸気発生器		27	2.93	1.81	35	0.61	0.66	
質点 番号	水平(Y)方向	28	2.17	1.46				
	Ss-1	29	2.02	1.39	内部コンクリート			
53	2.06	1.15	30	1.93	1.35	15	1.68	1.04
原子炉格納容器		31	1.52	1.11	16	1.46	0.97	
24	4.13	2.32	32	1.15	0.88	17	1.12	0.87
25	3.96	2.25	33	1.07	0.82	18	0.85	0.77
26	3.53	2.07	34	0.69	0.66			



# サン・オノフレ原子力発電所の時刻歴波形(長さ80秒)

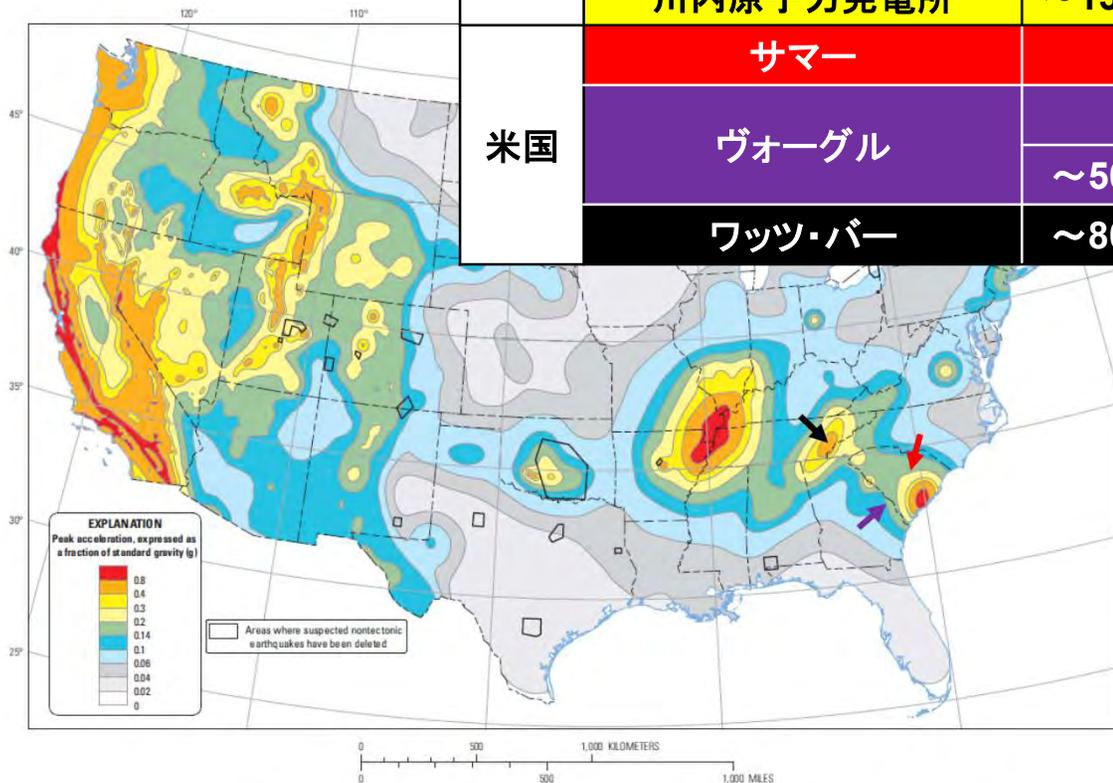


### 3. 一様ハザード・スペクトルの非保守性

- IAEA ガイドラインの年超過確率の基準(10,000年に1回)に適合していることを示すために引用。
- 過去の設計基準地震動の超過事例。(2005年以降、4回の地震によって5カ所で発生。)
- 米国東部の一様ハザード・スペクトルよりも低い。
- 日本のスペクトルの策定は古く、最新の地震(新潟県中越沖地震など)のデータと照合しても非保守的。柏崎・刈羽原子力発電所の開放基盤において、1号機で1699ガル、4号機1478ガル、3号機1113ガル、2号機1011ガルに達しているが、原子力安全基盤機構の地震基盤における一様ハザード・スペクトルでは、100万年に1回の地震でさえ666ガル。
- 一様ハザード・スペクトルの根拠となるデータが公開されていない。

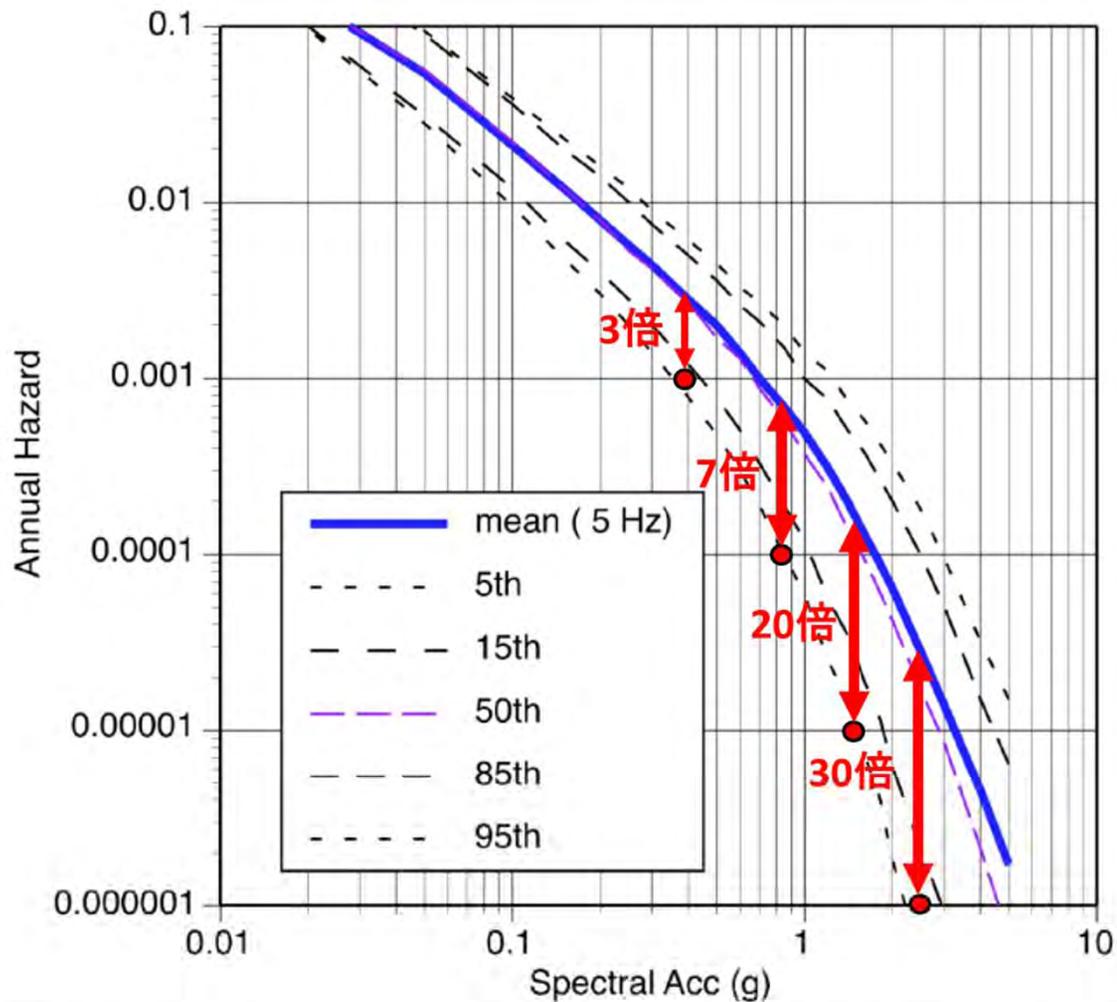
## 地震ハザードの日米比較

		年超過確率	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
日本	南東北・関東・中部 (柏崎・刈羽)		139ガル	286ガル	468ガル	666ガル
	中部・近畿 (高浜、伊方)		180ガル	366ガル	595ガル	826ガル
	川内原子力発電所		~130ガル	~300ガル	~500ガル	~700ガル
米国	サマー			0.15g	0.493g	1.38g
	ヴォーグル		~50ガル	~150ガル	~475ガル	>1000ガル
	ワッツ・バー		~80ガル	~350ガル	1000ガル	>>1000ガル



Two-percent probability of exceedance in 50 years map of peak ground acceleration

出典: 米国地質調査所(USGS)による向こう50年間における超過確率2%の地震加速度(PGA)(2014年版)。図中、黒、紫、赤の矢印先端に、それぞれワッツ・バー、ヴォーグル、サマーの各原子力発電所がある。



ディアブロ・キャニオン原子力発電所の5Hz(周期0.2秒)に対するハザード曲線(青の実線)に、川内原子力発電所に対する一様ハザード・スペクトルから読み取った値(赤丸)をプロット

## 4. 火山の噴火に対する 安全評価における非保守性

- ① 降下火砕物(火山灰)の降積量(15cm)の仮定は妥当か？
- ② 火山灰の気中濃度(3,241 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )の仮定は妥当か？
- ③ 建屋の屋根に対する強度評価は妥当か？
- ④ フィルターの閉塞に対する評価は妥当か？
- ⑤ 電源、冷却水の確保は確実に対応できるか？
- ⑥ 原子力防災計画への影響

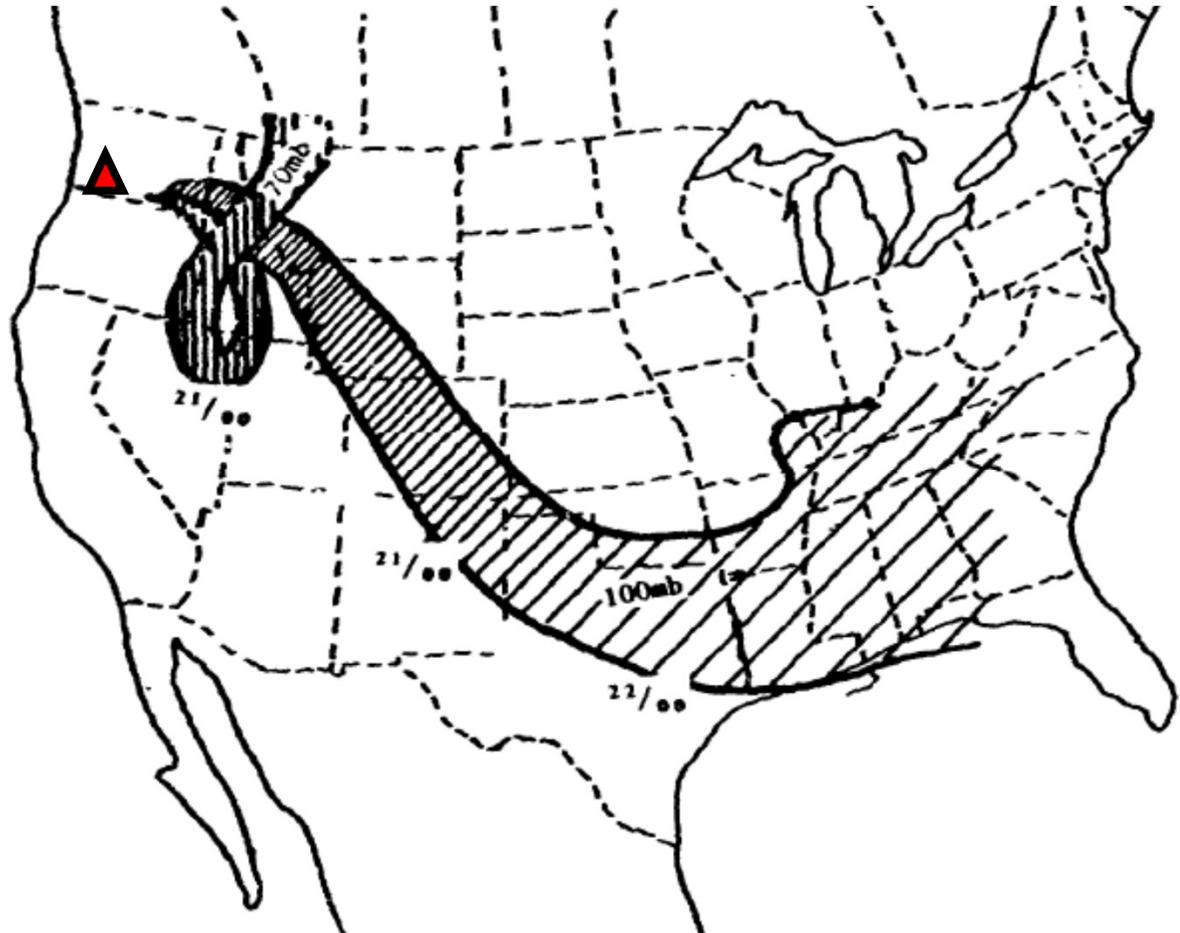
### 比較

- 米国(ワシントン州)
- 欧州(アイスランド)

# (参考-1)セント・ヘレンズ火山(米国ワシントン州) の噴火(VEI 5)と原子力施設への影響

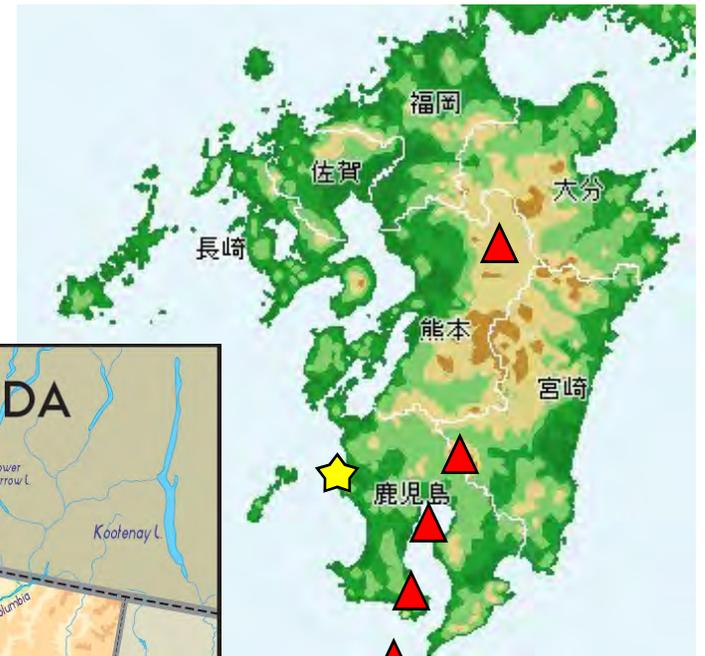


噴火の瞬間  
(1980年5月18日08時32分)

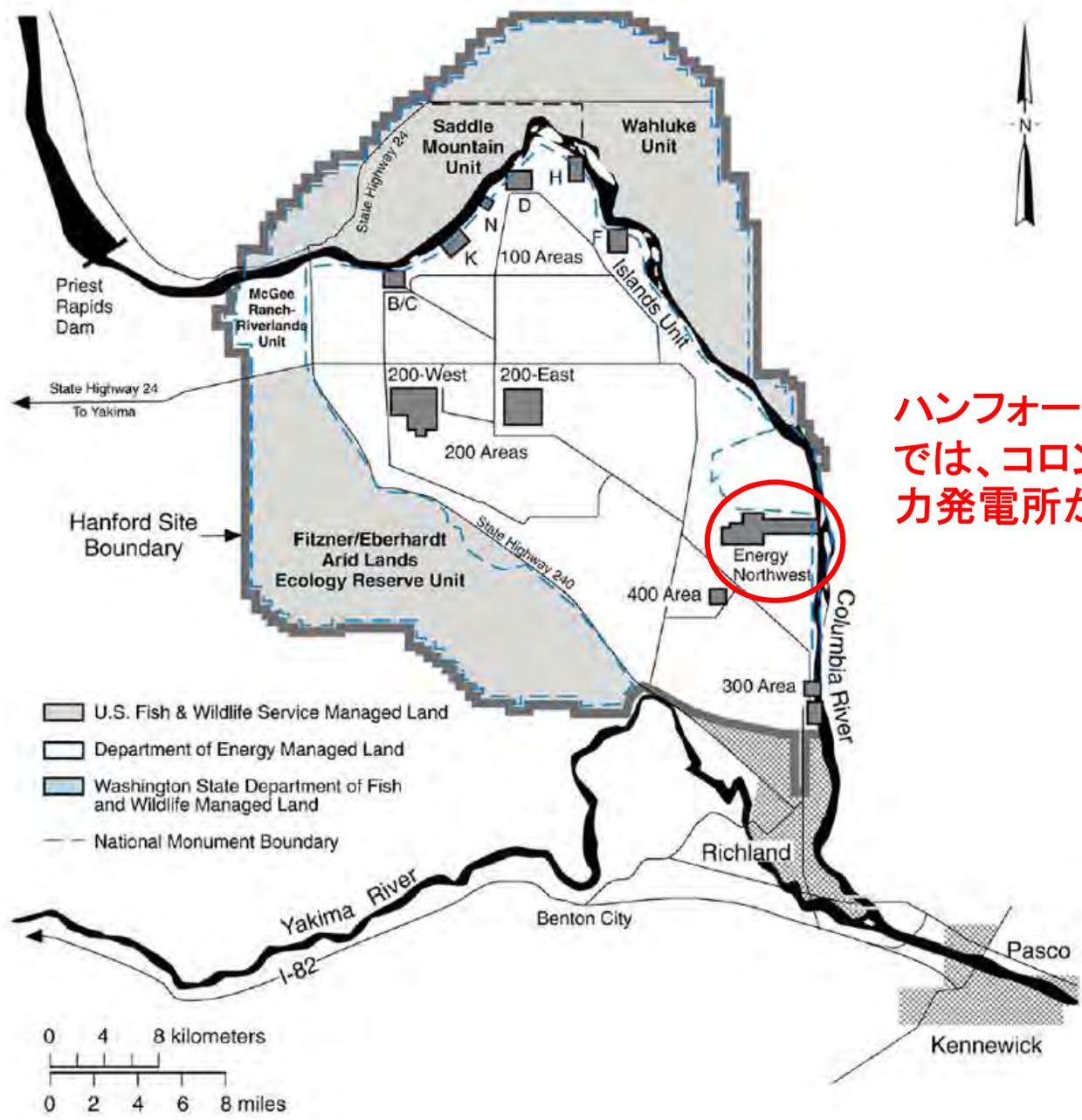


噴煙・火山灰の拡散に対するNASAの  
計算結果。(最前部の予想通過日時)

セント・ヘレンズの西側に位置する**トロジアン原子力発電所**では噴火の影響はなかったが、東側には、ヤキマ、リッツビル、スポーケンにまで影響が及んだ。その途中の約200km地点に、**ハンフォード核施設**がある。



ほぼ  
同じ縮尺



ハンフォード核施設内  
では、コロンビア原子  
力発電所が稼働中。

Volcano Hazards in the Three Sisters  
Region, Oregon

Open-File Report 99-437



U.S. Department of the Interior  
U.S. Geological Survey

ワシントン州の南に隣接するオレゴン州には、スリー・シスターズという火山群があり、噴火した際の危険についてUSGSが、1999年に報告書を発行している。その中に以下の記載がある。

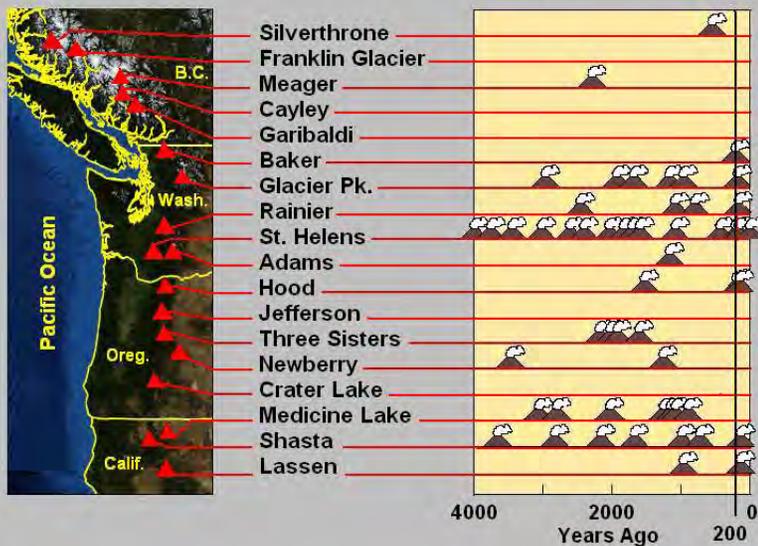


1980年のセント・ヘレンズ山の噴火では、風下のヤキマ、リッツビル、スポーケンの地区において、交通、商業活動、地域サービスに著しい支障が生じた。

これらの地区での火山灰の降積量は、0.5～8cmで、多いところほど復旧までに長い時間を要している。

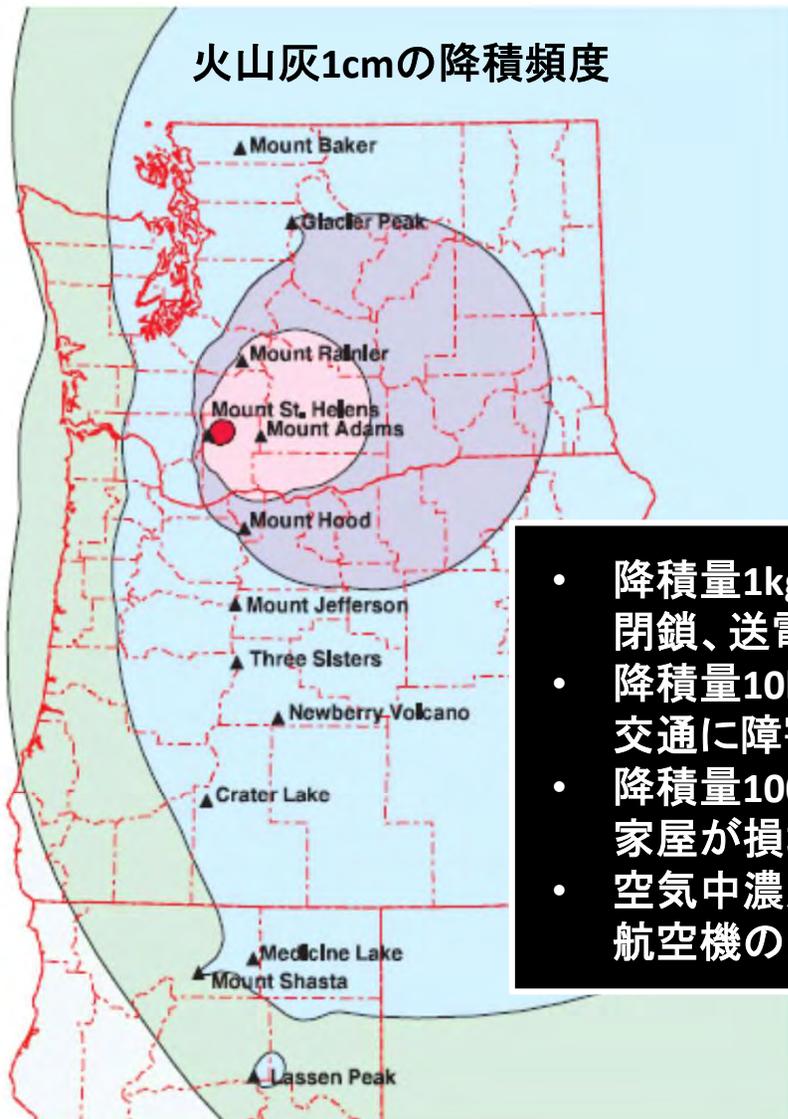
住民の生活には、**0.5cmでも十分な支障 (major inconvenience) となり、1.5cmともなると大惨事 (a disaster) をもたらした。**ともあれ3地区とも、2週間以内でほぼ元の状態に復旧した。

Cascade Eruptions During The Last 4,000 years



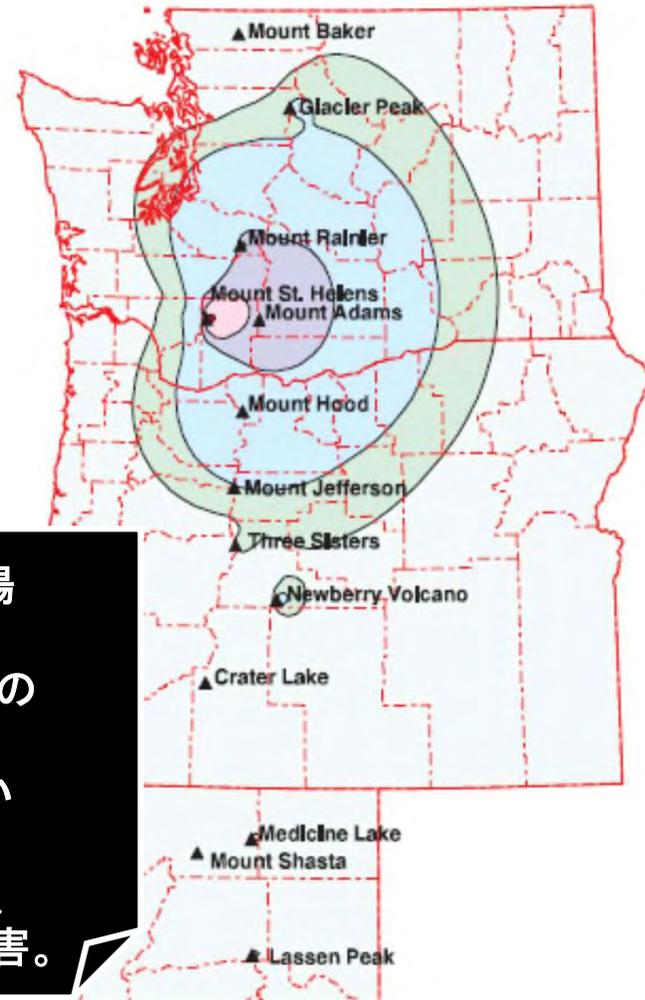
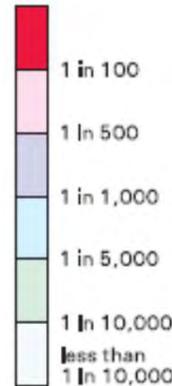
# 火山灰のハザード・マップ

# Regional Tephra- Hazard Maps



火山灰1cmの降積頻度

(1) Annual probability of the deposition of 1 centimeter (0.4 inches) or more of tephra from any of the major Cascade volcanoes.



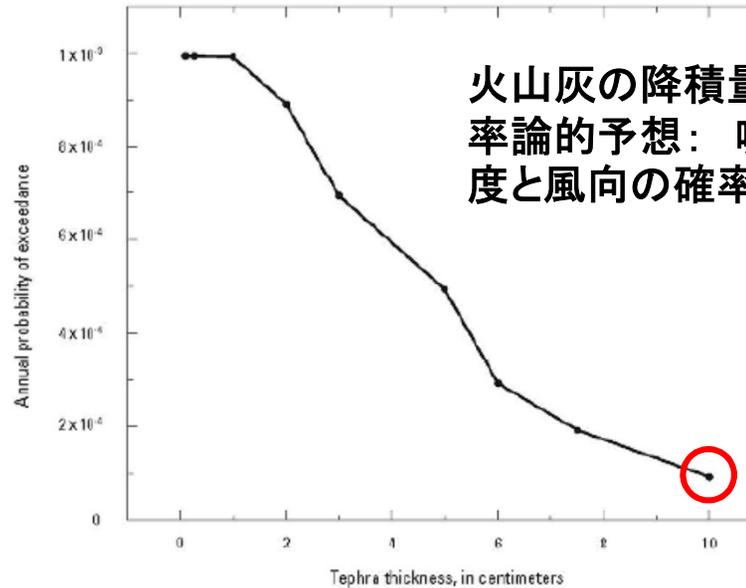
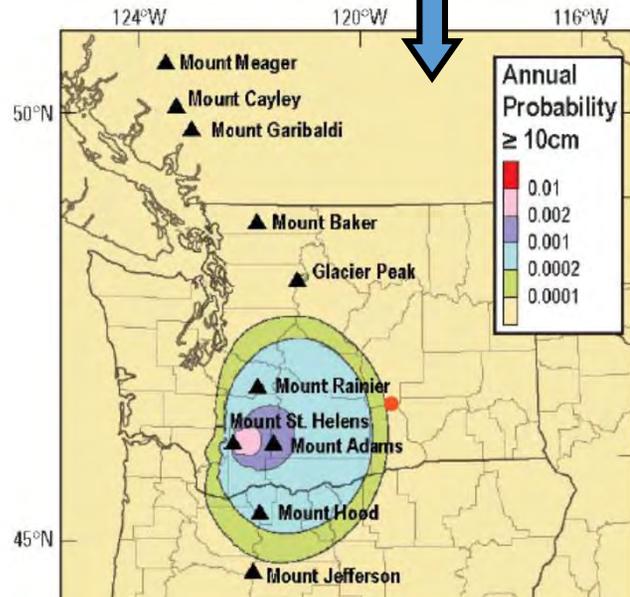
(2) Annual probability of the deposition of 10 centimeters (4 inches) or more of tephra from any of the major Cascade volcanoes.

火山灰10cmの降積頻度

- 降積量 $1\text{kg}/\text{m}^2$ で、飛行場閉鎖、送電網に障害。
- 降積量 $10\text{kg}/\text{m}^2$ で、道路の交通に障害。
- 降積量 $100\text{kg}/\text{m}^2$ で、弱い家屋が損壊。
- 空気中濃度  $2\text{mg}/\text{m}^3$  で、航空機の安全飛行に障害。

2011年、より詳細な評価に基づく報告書を発行。

ハザード・マップも修正



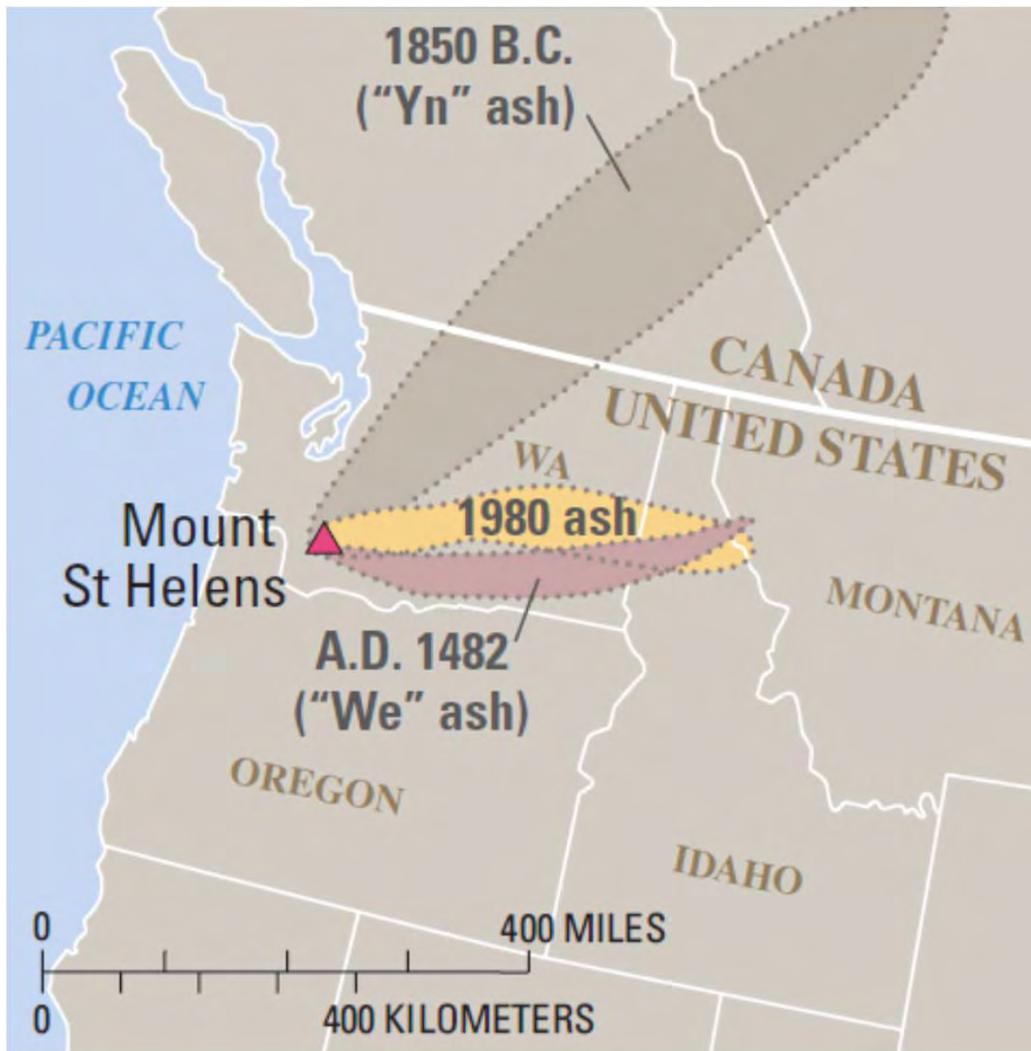
火山灰の降積量に対する確率論的予想：噴火の予想頻度と風向の確率により推定

ハンフォードにおいては、火山灰の降積量10cmが、10,000年に1回の超過確率に相当。

Volcano	Date	VEI <sup>1</sup>	Thickness (in cm) at distance from vent (in km)								
			5 km	10 km	15 km	20 km	30 km	40 km	50 km	100 km	200 km
Agung	May 1963	4	50	30	20	12	8	1	0.8	0.2	0.1
Lascar	1993	4		20	15	8	6	4	3	2	0.2
El Chichón	A	4	18	12	9	6	2	1	0.8	0.4	0.2
Soufrière St. Vincent	1812	4								5	3
Askja	1875	4		35	33	30	26	23	20	8	5
Cosegüina	1835	5	60	30	25	20	15	12	10	5	1
St. Helens Wn	1480	5		150	120	100	50	22	16	5	2
St. Helens	May 18, 1980	5	20	11	11	11	9	7	3	3	2
Usu	~580 yr ago	5								20	5
Hudson	August 1991	5		250	225	200	150	80	50	13	6
St. Helens Ye	~3,500 yr ago	5		35	32	30	26	23	20	14	7.5
Santa Mariá	1902	5		100	84	75	60	50	40	30	10
Pinatubo	June 15, 1991	5 <sup>2</sup>	40	30	27	25	18	16	14	5	3
St. Helens Yn	~3,900 yr ago	5 <sup>2</sup>	150	140	120	110	90	80	60	20	6

<sup>1</sup> Volcanic Explosivity Index of Newhall and Self (1982)

<sup>2</sup> Listed as VEI 5 in Newhall and Hoblitt (2002), but as VEI 6 in Siebert and others (2010)



**USGS "Pre-1980 Eruptive History of Mount St. Helens, Washington"**

# (参考-2) エイヤフィヤトラヨークトルの噴火による火山灰濃度の実測

ARTICLE IN PRESS

Atmospheric Environment xxx (2011) 1–13

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Atmospheric Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/atmosenv

Airborne in-situ investigations of the Eyjafjallajökull volcanic ash plume on Iceland and over north-western Germany with light aircrafts and optical particle counters

K. Weber<sup>a,\*</sup>, J. Eliasson<sup>b</sup>, A. Vogel<sup>a</sup>, C. Fischer<sup>a</sup>, T. Pohl<sup>a</sup>, G. van Haren<sup>a</sup>, M. Meier<sup>c</sup>, B. Grobéty<sup>c</sup>, D. Dahmann<sup>d</sup>

<sup>a</sup> University of Applied Sciences, Environmental Measurement Techniques, Josef-Gockel-Str. 3, 40474 Düsseldorf, Germany  
<sup>b</sup> University of Iceland, Faculty of Civil and Environmental Sciences V8II, Háskólagígi 2-6, 107 Reykjavík, Iceland  
<sup>c</sup> University of Fribourg, Dep. of Geosciences and FRIMAT, Ch. du Musée 6, 1700 Fribourg, Switzerland  
<sup>d</sup> Institute for the Research on Hazardous Substances IGF, Waldring 97, 44789 Reckum, Germany

ARTICLE INFO

Article history:  
 Received 2 March 2011  
 Received in revised form 5 October 2011  
 Accepted 12 October 2011

Keywords:  
 Eyjafjallajökull  
 Volcano  
 Ash plume  
 Optical particle counter  
 Research aircraft  
 UV-DOAS

ABSTRACT

During the time period of the eruption of the Icelandic volcano Eyjafjallajökull in April/May 2010 the Dusseldorf University of Applied Sciences has performed 14 research flights in situations with and without the volcanic ash plume over Germany. In parallel to the research flights in Germany three measurement flights have been performed by the University of Iceland in May 2010 over the western part of Iceland. During two of these flights the outskirts of the eruption plume were entered directly, delivering most direct measurements within the eruption plume during this eruptive event. For all the measurement flights reported here, light durable piston-motor driven aircrafts were used, which were equipped with optical particle counters for in-situ measurements. Real-time monitoring of the particle concentrations was possible during the flights. As different types of optical particle counters have been used in Iceland and Germany, the optical particle counters have been re-calibrated after the flights to the same standard using gravimetric reference methods and original Eyjafjallajökull volcanic ash samples. In-situ measurement results with high spatial resolution, directly from the eruption plume in Iceland as well as from the dispersed and several days old plume over Germany, are therefore presented here for the first time. They are normalized to the same ash concentration calibration standard. Moreover, airborne particles could be sampled directly out of the eruption plume in Iceland as well as during the flights over Germany.

During the research flights over Iceland from 9 May 2010 to 11 May 2010 the ash emitted from the vent of the volcano turned out to be concentrated in a narrow well-defined plume of about 10 km width at a distance of 45–60 km away from the vent. Outside this plume the airborne ash concentrations could be proved to be below  $50 \mu\text{g m}^{-3}$  over western Iceland. However, by entering the outskirts of the plume directly the research aircraft could detect ash concentrations of up to  $2000 \mu\text{g m}^{-3}$ .

On the other hand, the ash plume, which was analysed by research flights over Germany several thousand km away from the eruption vent, appeared to be significantly structured in horizontal and vertical directions. Different sub-plumes could be found. Peak concentrations of more than  $330 \mu\text{g m}^{-3}$  could be detected.

The results of the measurements within the ash plume over Germany were compared with the predictions of the London VAAC model. The range of ash concentrations found by the research aircraft in Germany were not in conflict with the calculations of concentration regimes by the London VAAC model.

\* Corresponding author. Tel.: +49 2134351437; fax: E-mail address: kuno@radon.weber@fh-duesseldorf.de

1352-2310/\$ – see front matter © 2011 Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.10.030

Please cite this article in press as: Weber, K. north-western Germany with light aircrafts

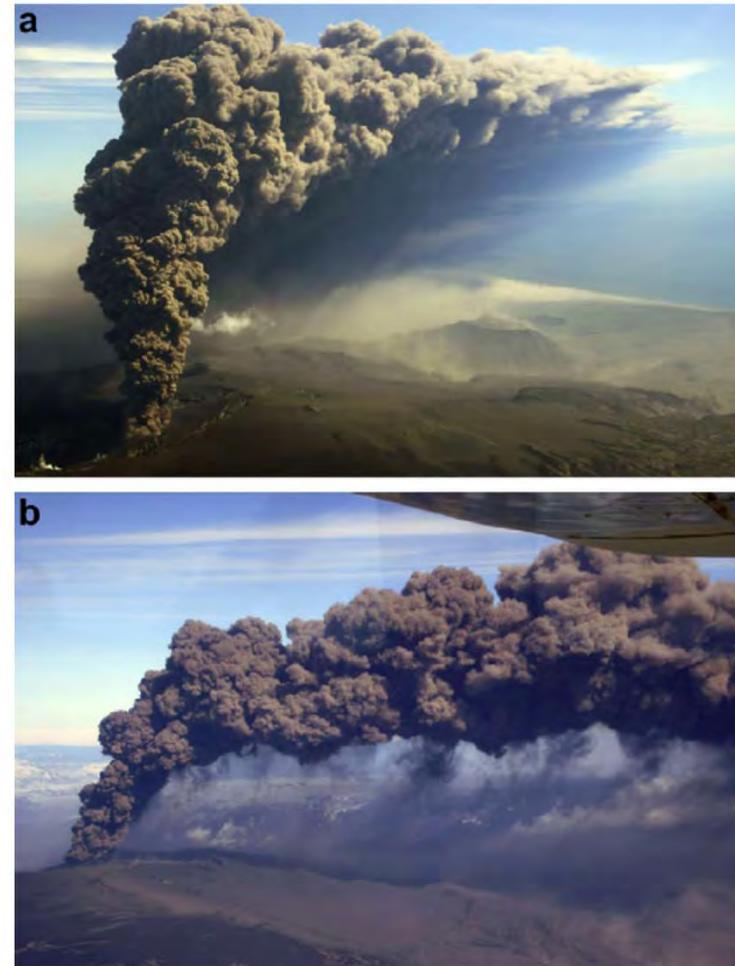
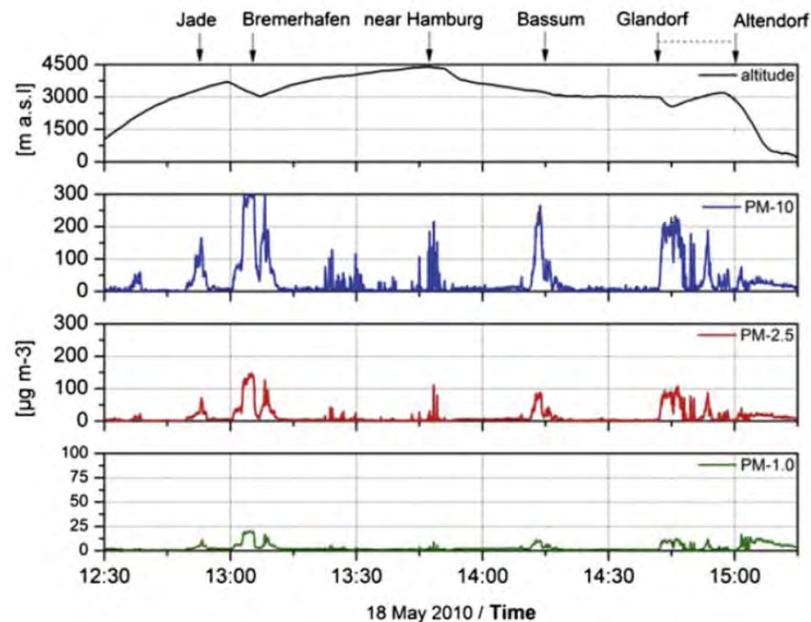
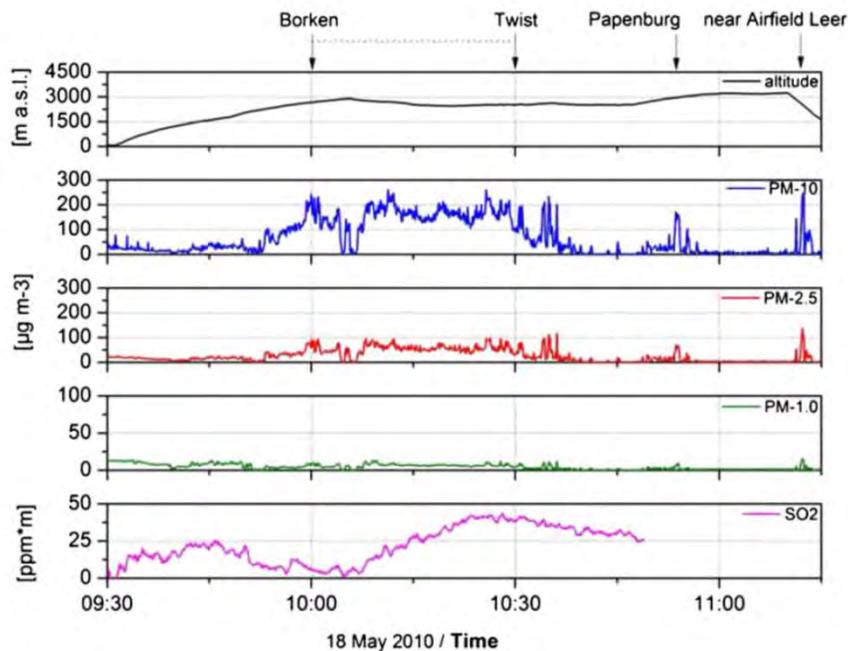



Fig. 2. Eruption plume of the Eyjafjallajökull on 11 May 2010 as seen from the Cessna measurement aircraft: (a) photo taken from north-western position, 10 km distance from the plume and (b) photo taken from western position, 15 km distance from the plume.

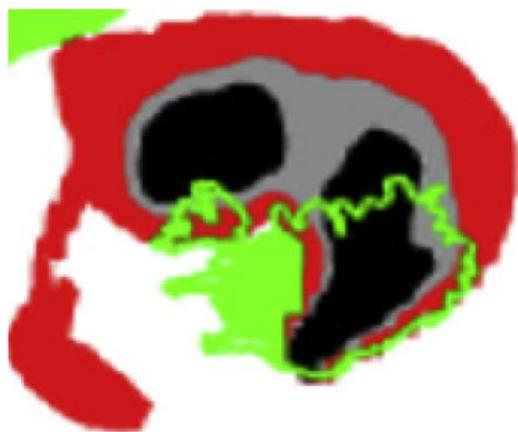
2機の観測機を使って  
ドイツ領空を飛行させ、  
火山灰濃度を実測



Fig. 9. Track of measurement flight on 18 May 2010 with measured concentration of PM10, colours indicate the concentration range.



ロンドン気象室火山灰助言センター(VAAC Volcanic Ash Advisory Center)  
による2010年5月19日の状況に対する予想解析



4,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える範囲を  
かなり遠方(数百km)までと  
予想している。

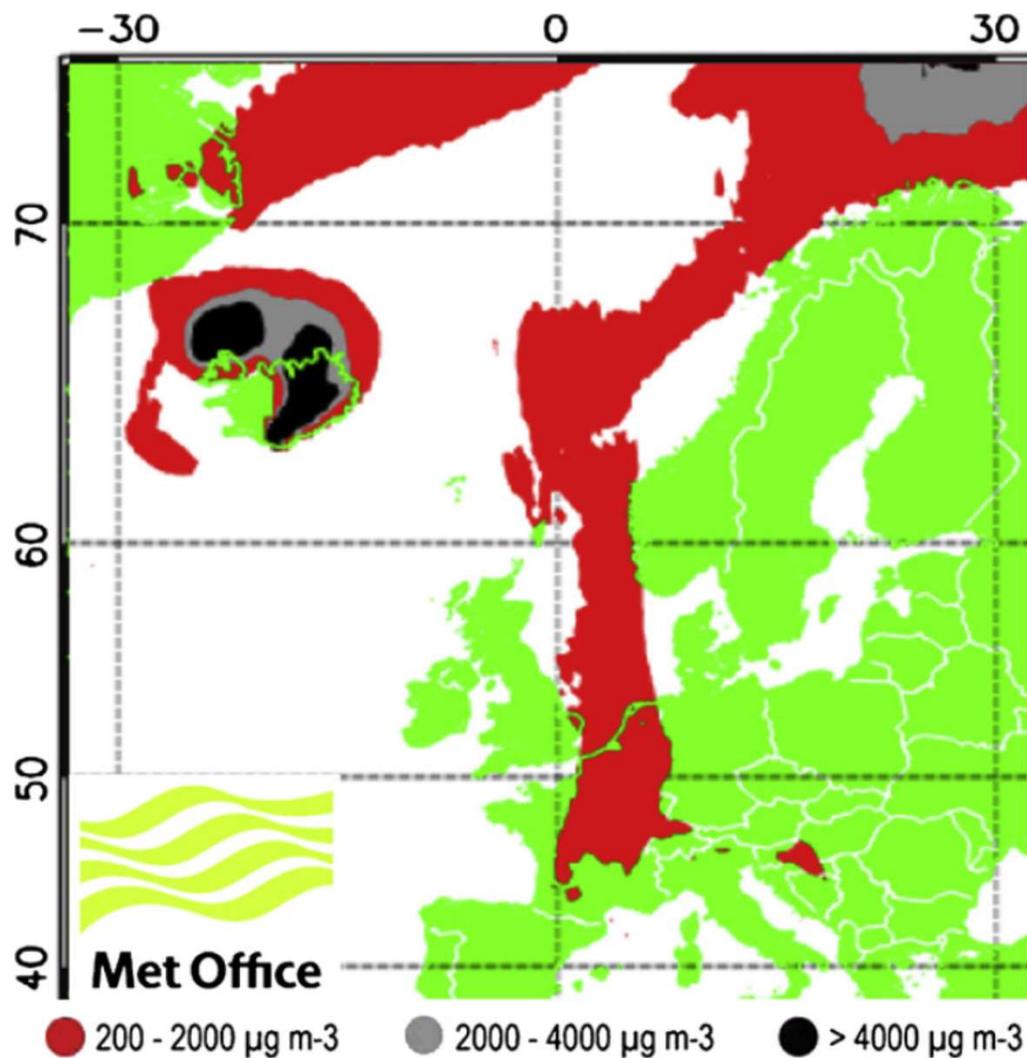


Fig. 15. VAAC prediction for volcanic ash plume over Europe on 19 May 2010.

# (参考-3) アイスランドの火山が噴火した場合の火山灰による影響評価

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 2265–2287, 2014  
 www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/14/2265/2014/  
 doi:10.5194/nhess-14-2265-2014  
 © Author(s) 2014. CC Attribution 3.0 License.

Natural Hazards  
 and Earth System  
 Sciences

## A multi-scale risk assessment for tephra fallout and airborne concentration from multiple Icelandic volcanoes – Part 1: Hazard assessment

S. Biass<sup>1</sup>, C. Scaini<sup>2</sup>, C. Bonadonna<sup>1</sup>, A. Folch<sup>2</sup>, K. Smith<sup>3</sup>, and A. Höskuldsson<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Section of Earth and Environmental Sciences, University of Geneva, Geneva, Switzerland

<sup>2</sup>CASE Department, Barcelona Supercomputing Center (BSC-CNS), Barcelona, Spain

<sup>3</sup>Geography, College of Life and Environmental Science, University of Exeter, Cornwall Campus, Penryn, UK

<sup>4</sup>Nordic Volcanological Center, University of Iceland, Reykjavik, Iceland

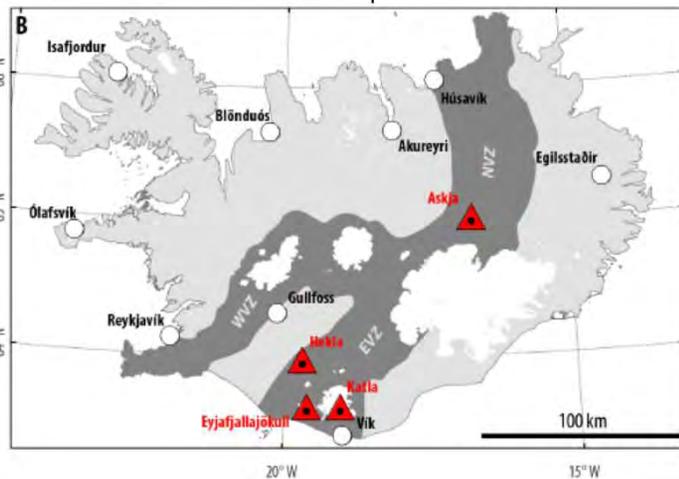
Correspondence to: S. Biass (sebastien.biass@unige.ch)

Received: 28 February 2014 – Published in Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.: 9 April 2014

Revised: 21 July 2014 – Accepted: 24 July 2014 – Published: 29 August 2014

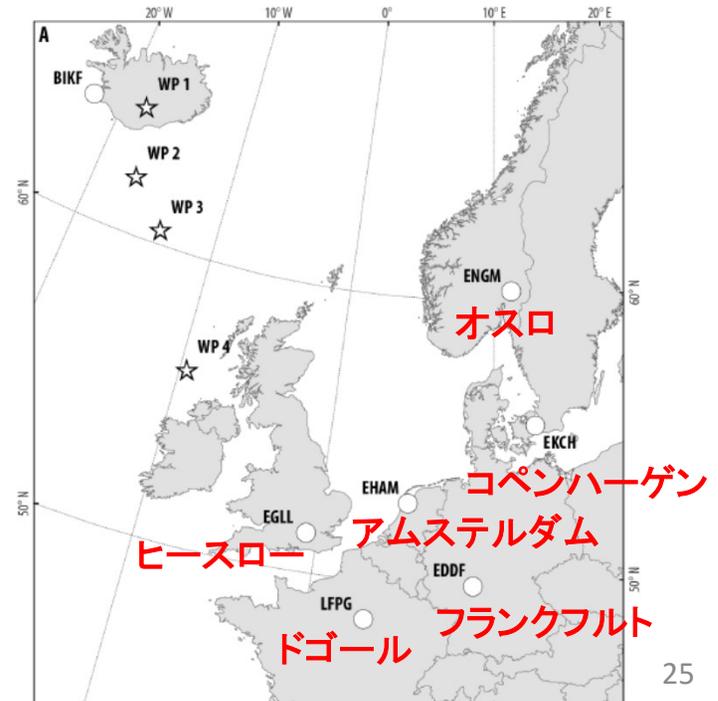
**Abstract.** In order to assist the elaboration of proactive measures for the management of future volcanic eruptions in Iceland, we developed a new scenario-based approach to assess the hazard associated with tephra dispersal and sedimentation at various scales and for multiple sources. The target volcanoes are Hekla, Katla, Eyjafjallajökull and Askja, selected either for their high probabilities of eruption and/or their high potential impact. By coupling tephrostratigraphic studies, probabilistic techniques and modelling, we developed comprehensive eruption scenarios for both short- and long-lasting eruptions and compiled hazard maps for tephra ground deposition at a national scale and air concentration at a European scale using the TEPHRA2 and FALL3D models, respectively. New algorithms for the identification of realistic sets of eruptive source parameters are investigated, which assist the generation of probability density functions of eruption source parameters for the selected scenarios. Aggregation processes were accounted for using various empirical models. Outcomes, i.e. probabilities conditioned to the occurrence of an eruption, help the assessment and comparison of hazard levels at different scales. For example, at a national scale Askja has a 5–10% probability of blanketing the easternmost half of the country with a tephra accumulation of at least  $1 \text{ kg m}^{-2}$ . At a continental scale, Katla has a 5–10% probability of producing ash clouds with concentrations of  $2 \text{ mg m}^{-3}$  over the UK, Scandinavia and northern Europe with a mean arrival time of 48–72 h and a mean persistence time of 6–18 h. In a companion paper, Scaini et al. (2014) present a vulnerability assessment for Iceland to

ground deposition of tephra and for the European air traffic to airborne ash which, combined with the outcomes of the present paper, constitute one of the first comprehensive multi-scale risk assessment associated with tephra dispersal and sedimentation.



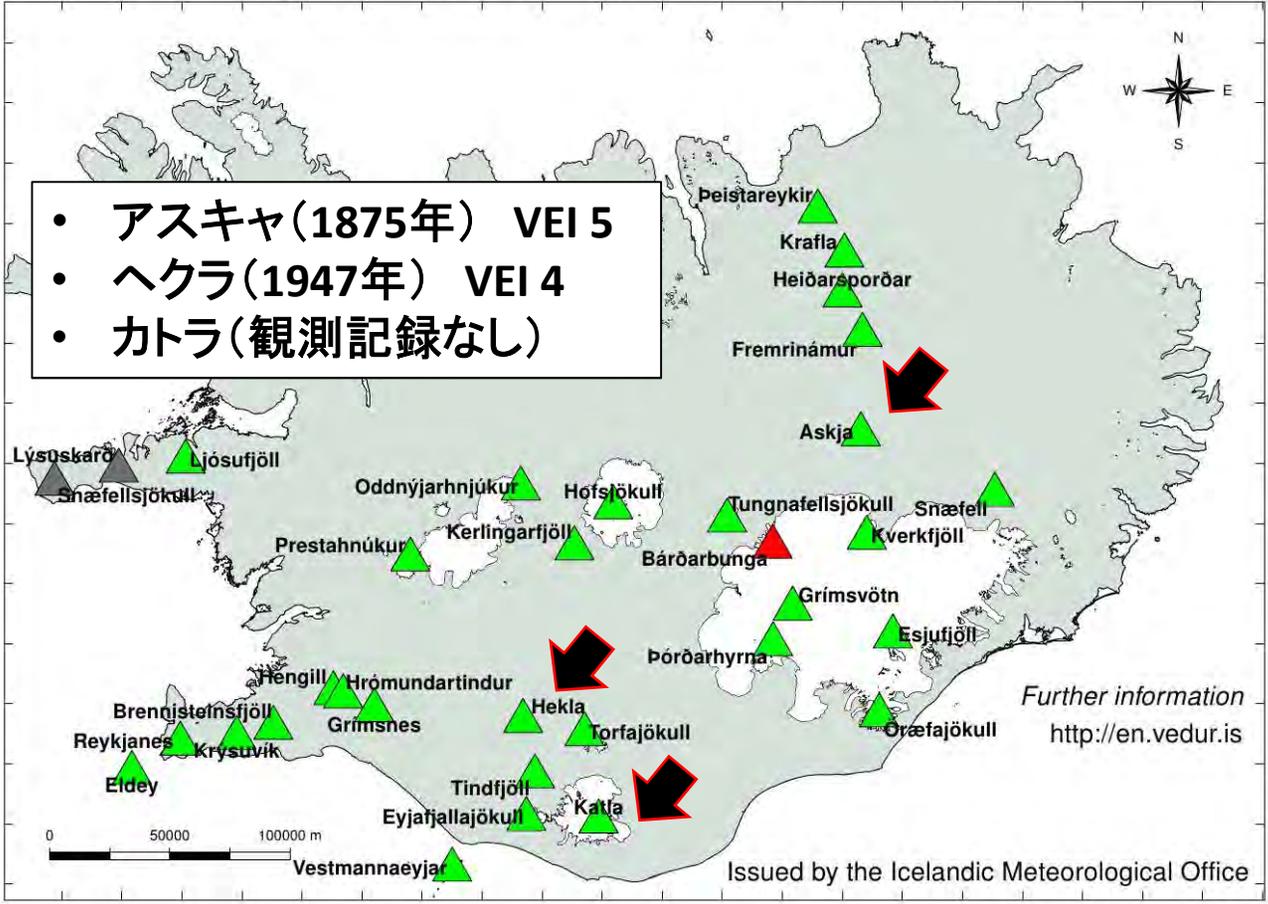
Published by Copernicus Publications on behalf of the Euro

- 2010年のエイヤフィヤトラヨークトルの噴火による影響を受けた欧州では、過去のアイスランドでの噴火を再現し、影響を評価。
- スイス、スペイン、英国、アイスランドの専門家による報告書。(2014年8月29日発行)



# Aviation Colour Codes for Icelandic Volcanic Systems

Map refreshed: 14:07 UTC, 23 August 2014. Previous code change: 14:06 UTC, 23 August 2014



- アスキャ(1875年) VEI 5
- ヘクラ(1947年) VEI 4
- カトラ(観測記録なし)

Further information  
<http://en.vedur.is>

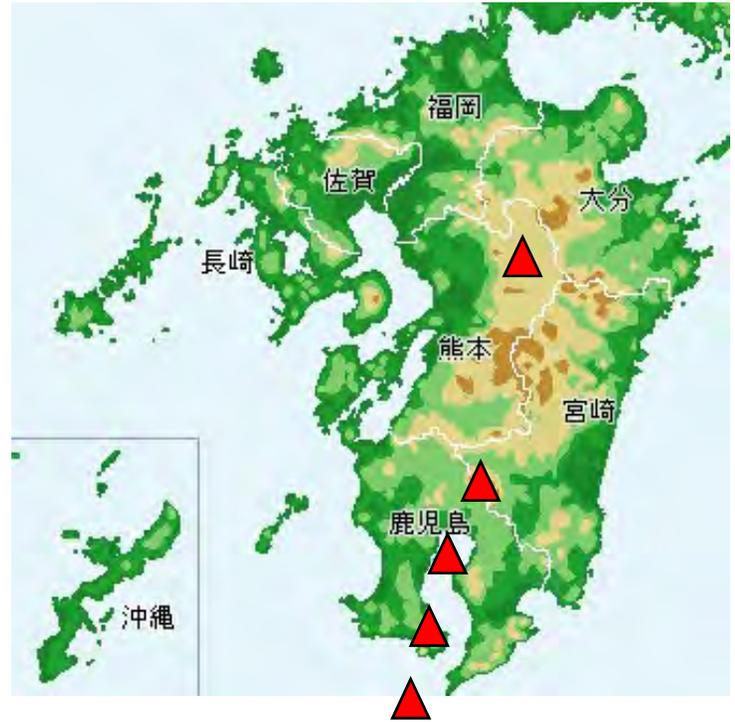
Issued by the Icelandic Meteorological Office

Map refreshed daily at 09:00 UTC

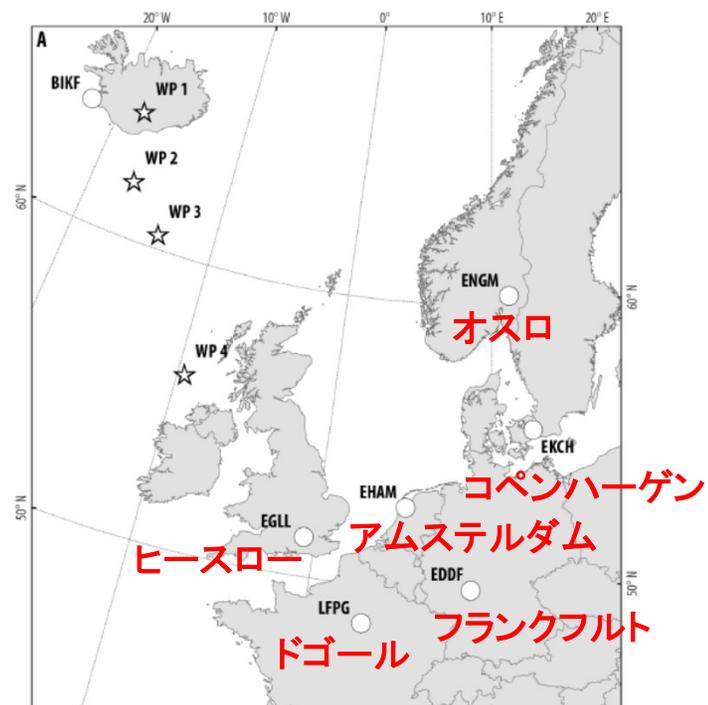
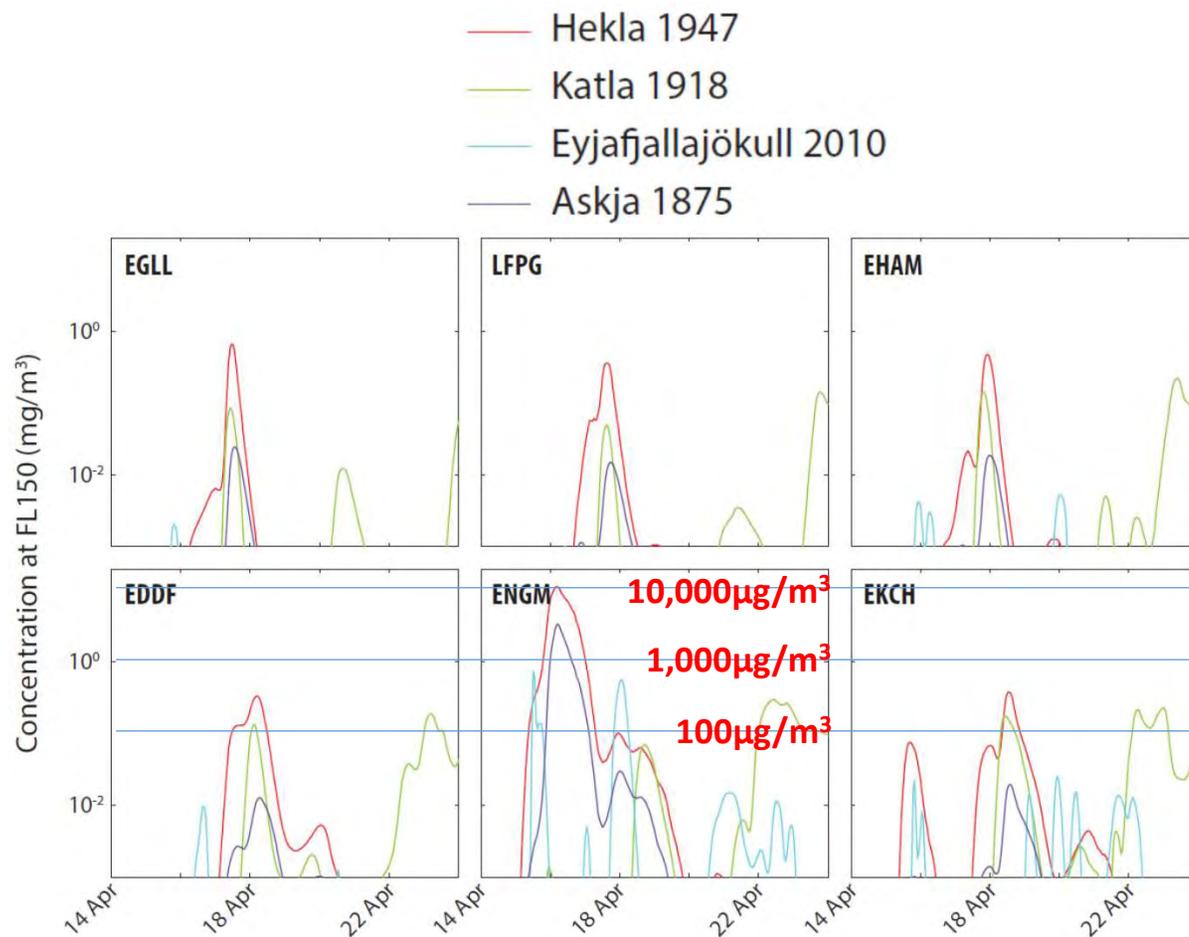
**Aviation colour codes used by the Icelandic Meteorological Office**

- ▲ GREY: Volcano appears quiet but is not monitored adequately. Absence of unrest unconfirmed.
- ▲ GREEN: Volcano is in typical background, non-eruptive state.
- ▲ YELLOW: Volcano is exhibiting signs of elevated unrest above known background level.
- ▲ ORANGE: Volcano is exhibiting heightened or escalating unrest with increased potential of eruption.
- ▲ RED: Eruption is imminent or in progress – significant emission of ash into the atmosphere likely.

Colour codes, which are in accordance with recommended International Civil Aviation Organisation (ICAO) procedures, are intended to inform the aviation sector about a volcano's status. Notifications are issued for both increasing and decreasing volcanic activity, and are accompanied by text with details (as known) about the nature of the unrest or eruption, especially in regard to ash-plume information and likely outcomes.



# 欧州の主要な空港の上空4,600mにおける火山灰濃度



オスロ空港(ヘクラ火山から約1,650km)では、エイヤフィヤトラヨークトルの噴火でも1,000µg/m<sup>3</sup> 近いが、ヘクラ火山の噴火では、10,000µg/m<sup>3</sup>に達すると予想。

# 火山灰濃度の評価

火山灰濃度が  
2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
を超える確率

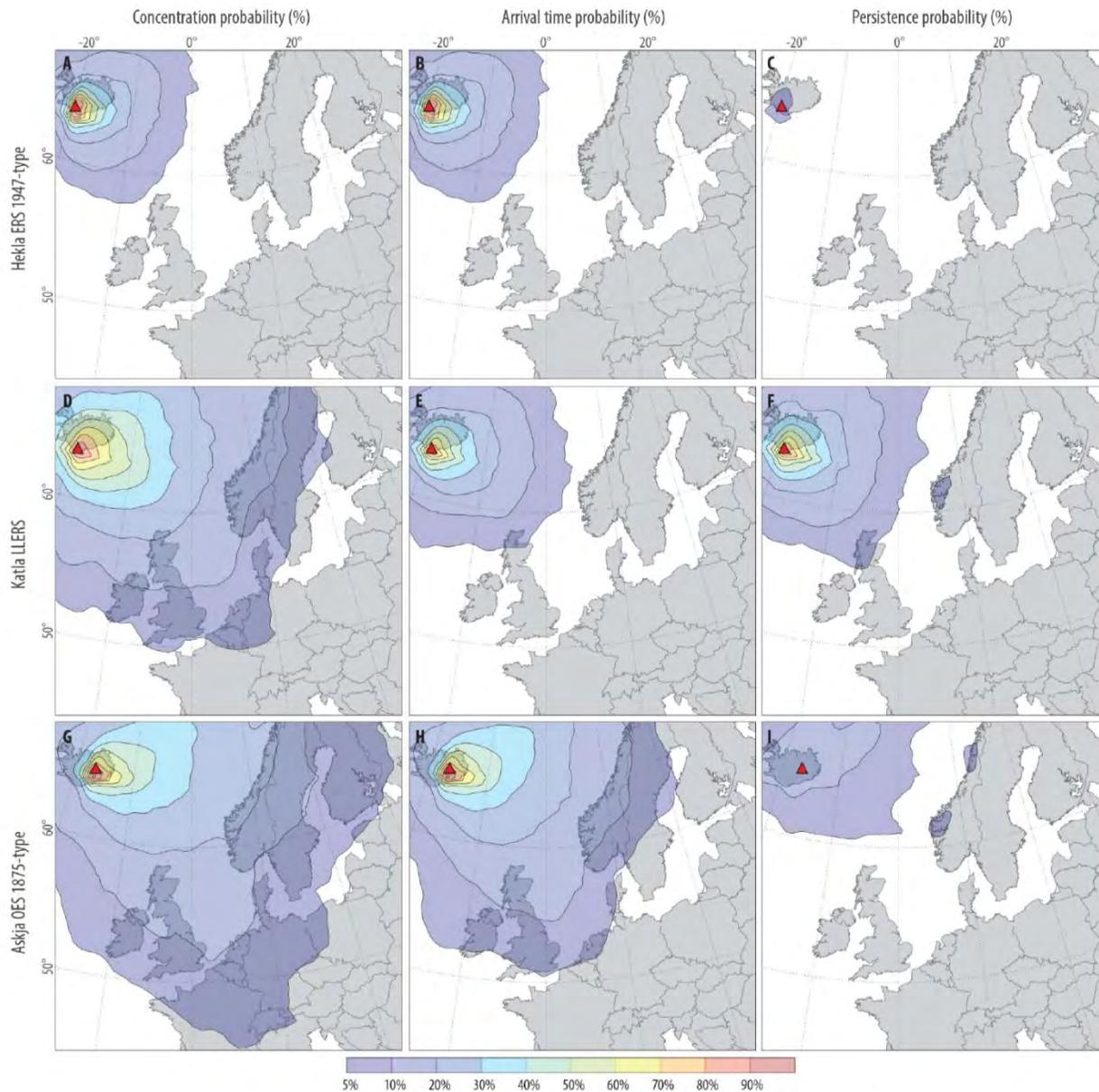
24時間以内に  
2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
を超える確率

2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
の濃度が12時間以  
上持続する確率

ヘクラ  
VEI 4

カトラ

アスキャ  
VEI 5



# 火山灰降積量の評価

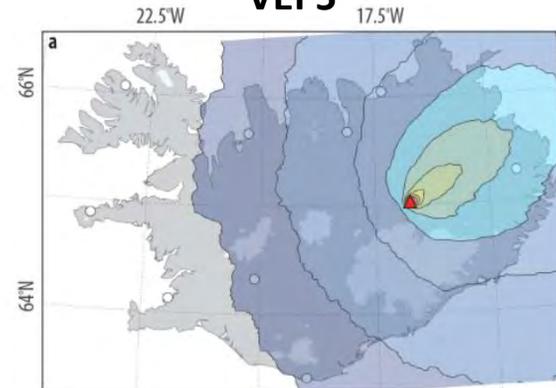
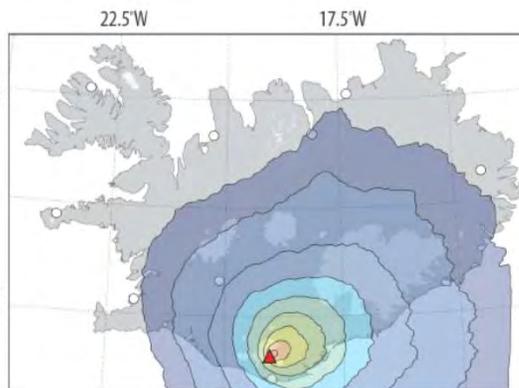
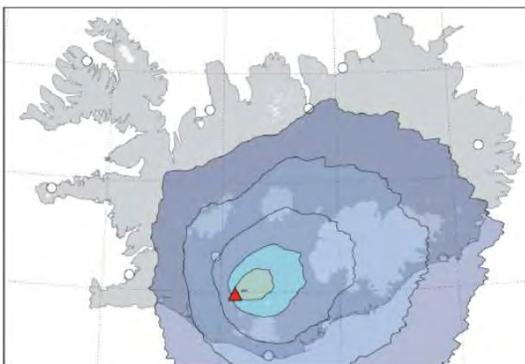
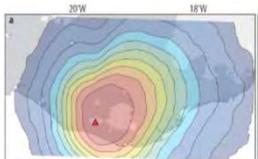
エイヤフィヤトラ  
ヨークトル

ヘクラ  
VEI 4

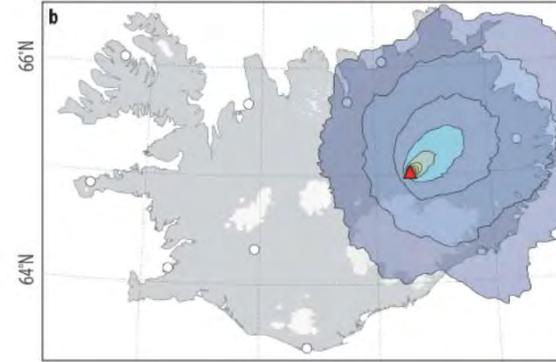
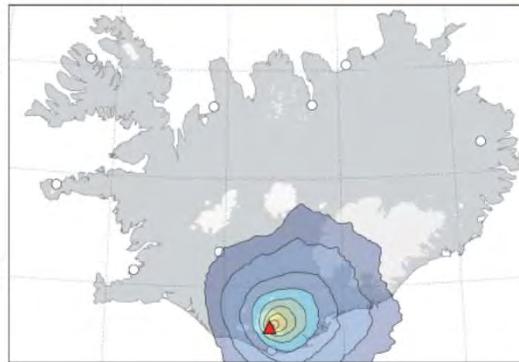
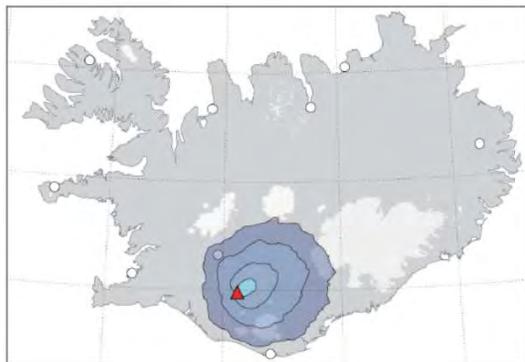
カトラ

アスキャ  
VEI 5

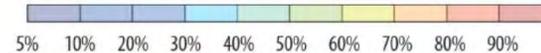
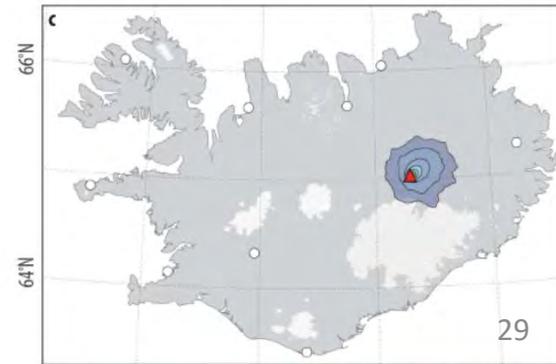
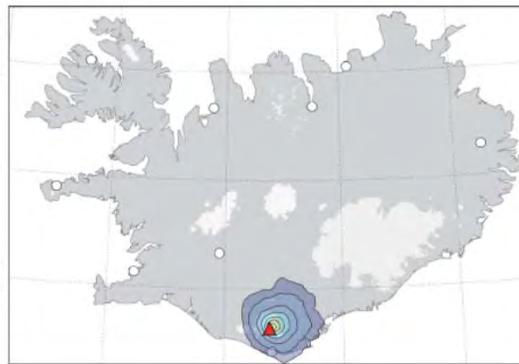
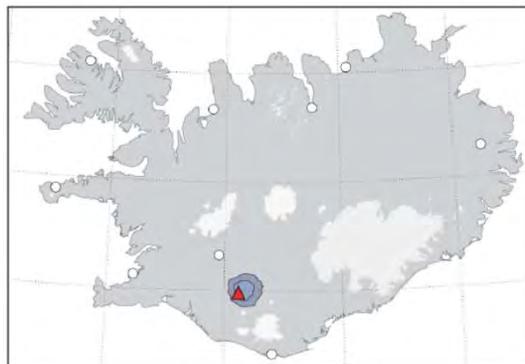
1kg/m<sup>2</sup>



10kg/m<sup>2</sup>



100kg/m<sup>2</sup>



# ①降下火砕物(火山灰)の降積量(15cm)の仮定は妥当か？

- アスキャ火山(アイスランド)の噴火(1875年 VEI 4)の場合には、50km地点での火山灰の降積量は20cm。
- VEI 5の噴火の場合、50km地点での火山灰の降積量が40～60cmに達している例がある。
- セント・ヘレンズから200km以上離れているハンフォード核施設においても設計値を10cmとしている。
- ハンフォード核施設内ほぼ東端にあるコロンビア原子力発電所では、1980年のセント・ヘレンズ火山噴火時の7.5cmを設計基準値として採用。
- 桜島がVEI 5の噴火をした場合には、川内原子力発電所での火山灰の降積量が、15cmを超える可能性は十分にある。

## ②火山灰の気中濃度(3,241 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )の仮定は妥当か？

① 非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ灰捕集容量	1000g/m <sup>3</sup>
② 非常用ディーゼルフィルタ表面積	2.98m <sup>2</sup>
③ 非常用ディーゼルフィルタでのダスト捕集量 =①×②	2,980g
④ 降下火砕物の大気中濃度	3,241 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ **
⑤ 非常用ディーゼル発電機吸気流量	34,615m <sup>3</sup> /h
⑥ 閉塞までの時間 =③/④/⑤	26.5 h

※ アイスランド南部エイヤヒャトラ氷河で発生(H22年4月)した火山噴火地点から約40km離れたヘイマランド地区における大気中の火山灰濃度値(24時間観測ピーク値)



[http://en.wikipedia.org/wiki/ir\\_:\\_?#\\_disruption\\_after\\_the\\_2010\\_Eyjafjallajökull\\_eruption](http://en.wikipedia.org/wiki/ir_:_?#_disruption_after_the_2010_Eyjafjallajökull_eruption)

Research Article

**Airborne Measurement in the Ash Plume from Mount Sakurajima: Analysis of Gravitational Effects on Dispersion and Fallout**

Jonas Eliasson,<sup>1,2</sup> Junichi Yoshitani,<sup>2</sup> Konradin Weber,<sup>3</sup> Nario Yasuda,<sup>2</sup> Masato Iguchi,<sup>2</sup> and Andreas Vogel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>EERC, School of Engineering and Natural Sciences, University of Iceland, Austurvegur 6A, 800 Selfoss, Iceland

<sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0001, Japan

<sup>3</sup>Laboratory for Environmental Measurement Techniques, University of Applied Sciences, Josef-Gockeln-Strasse 9, 40474 Düsseldorf, Germany

Correspondence should be addressed to Jonas Eliasson; jonase@hi.is

Received 28 April 2014; Accepted 13 August 2014; Published 19 October 2014

Academic Editor: Francesco Cairo

Copyright © 2014 Jonas Eliasson et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Volcanic ash concentrations in the plume from Sakurajima volcano in Japan are observed from airplanes equipped with optical particle counters and GPS tracking devices. The volcano emits several puffs a day. The puffs are also recorded by the Sakurajima Volcanological Observatory. High concentrations are observed in the puffs and fallout driven by vertical air current, called streak fallout. Puffs dispersion is analyzed by the classical diffusion-advection method and a new gravitational dispersion method. The fluid mechanic of the gravitational dispersion, streak fallout, and classical diffusion-advection theory is described in three separate appendices together with methods to find the time gravitational dispersion constant and the diffusion coefficient from satellite photos. The diffusion-advection equation may be used to scale volcanic eruptions so the same eruption plumes can be scaled to constant flux and wind conditions or two eruptions can be scaled to each other. The dispersion analyses show that dispersion of volcanic plumes does not follow either theories completely. It is most likely diffusion in the interface of the plume and the ambient air, together with gravitational flattening of the plumes core. This means larger boundary concentration gradients and smaller diffusion coefficients than state of the art methods can predict.

1. Introduction

Airborne observations of volcanic ash concentrations with optical particle counters and GPS tracking have recently been taken in use to study volcanic plumes [1–7].

Three  
and gas ce  
Japan we  
Universit  
of Applied  
volcano h  
emit a con  
puffs, som  
of the first  
IAVCEI c

The staggering economic disaster [13, 14], inflicted upon the aviation industry by the Eyjafjallajökull eruption in 2010 and the Grimsvötn eruption in 2011, made clear the importance of ash cloud predictions. These events sparked the research program that produced the Sakurajima campaign



FIGURE 3: Picture of the 9:53 explosion puff by <http://373news.com/>, Kagoshima, Japan (their clock).

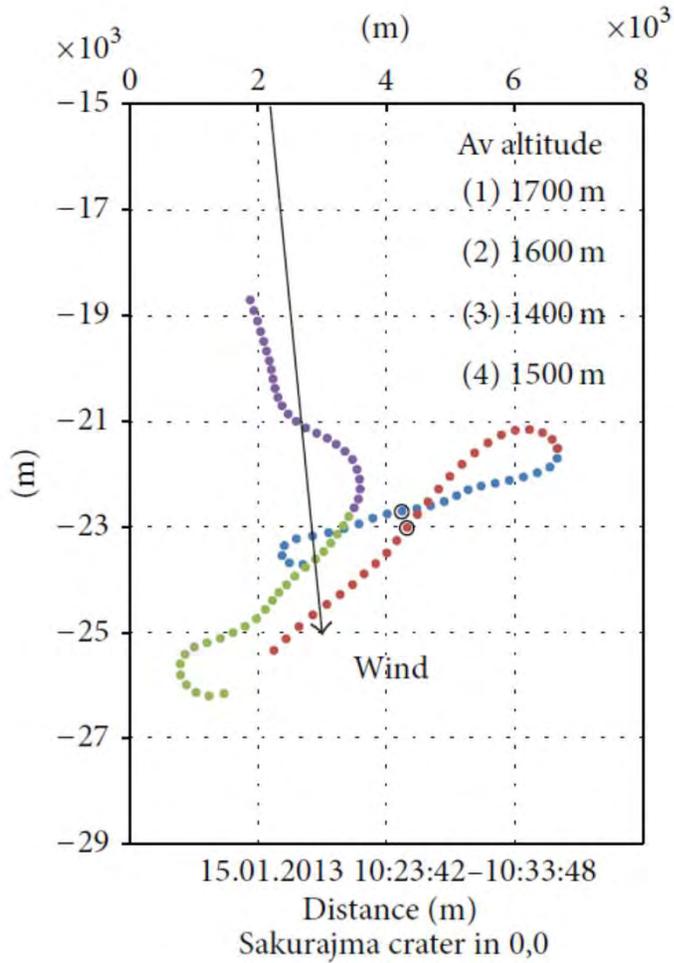
## 高濃度の火山灰が下降気流によって帯状に降下する現象(Streak Fallout)を述べた論文(2014年10月19日発表)

- 桜島の噴煙に対する調査報告書。
- 2013年1月15日に3回の噴煙(09:50~09:53)が観察され、その直後に、風下約20kmの上空で火山灰濃度を観測。(最高15,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- 2013年7月27日の観測では、Streak Falloutに遭遇。(最高20,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- 火山からの噴煙は、高い濃度で遠方まで伸びつつ、その真下に火山灰のフォールアウトを形成。

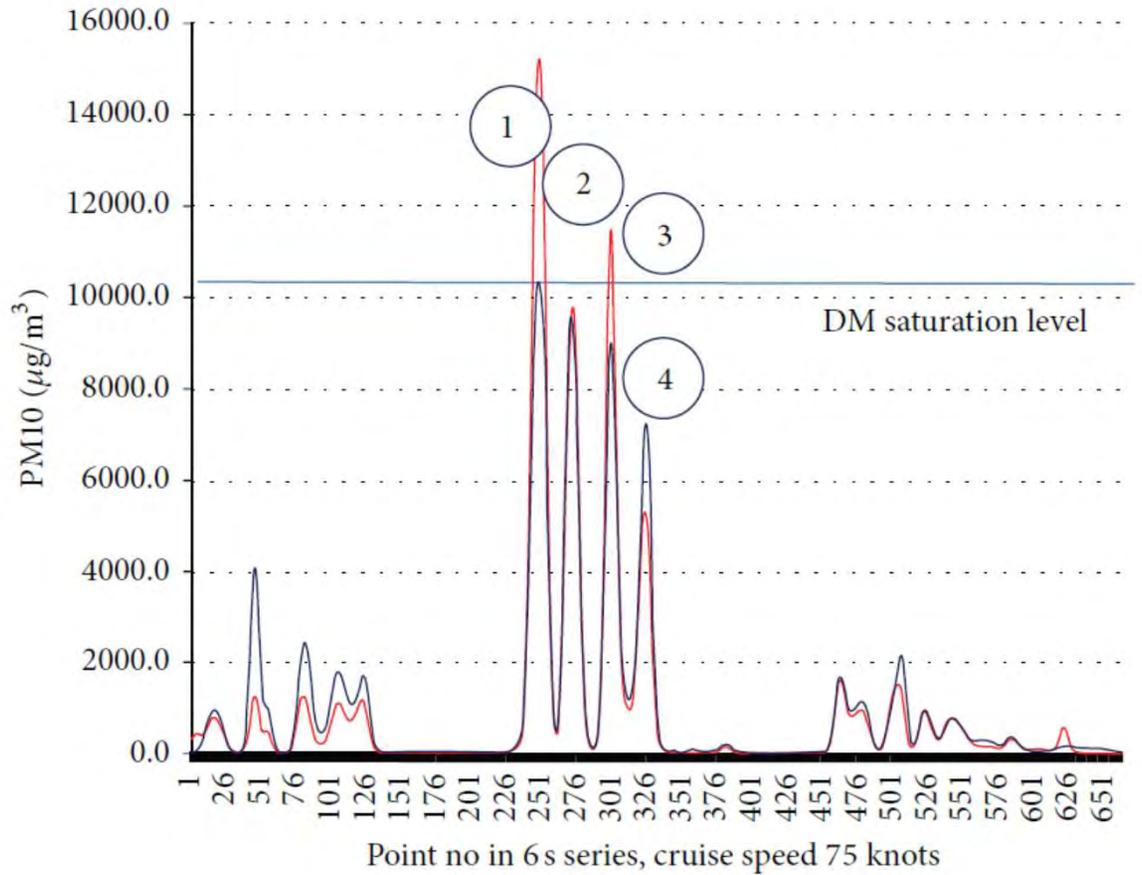


2004年グリムスヴォトン山(アイスランド)噴火の際に観察された Streak Fallout

## 2013年1月15日の噴煙の調査(10時23～33分の飛行)

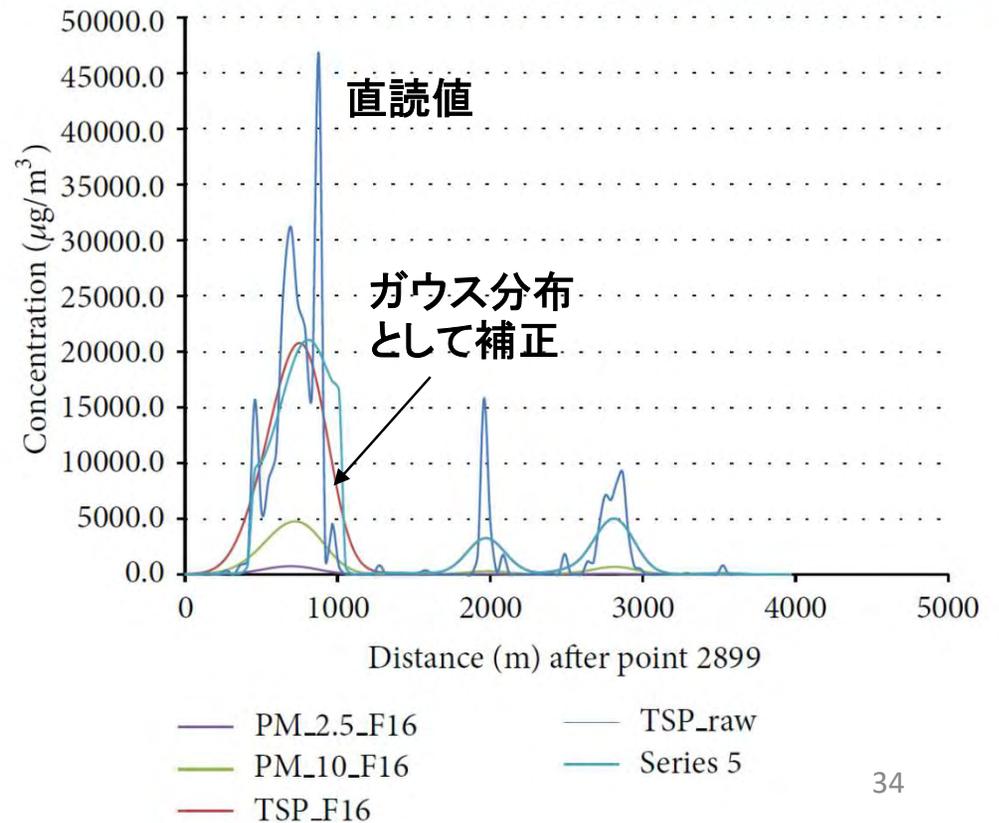
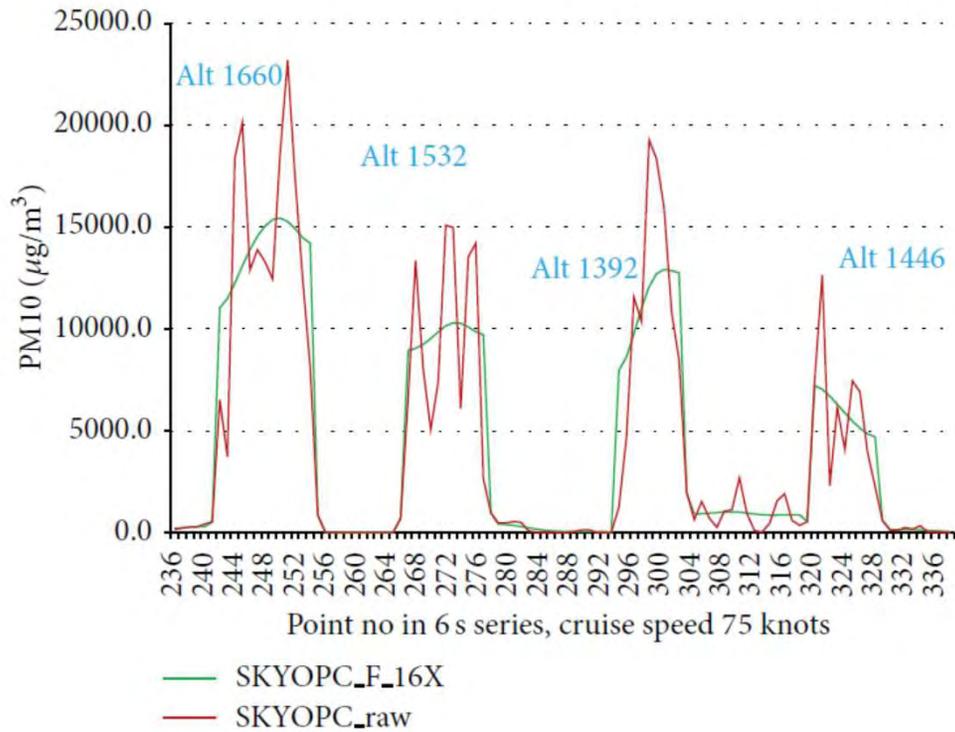


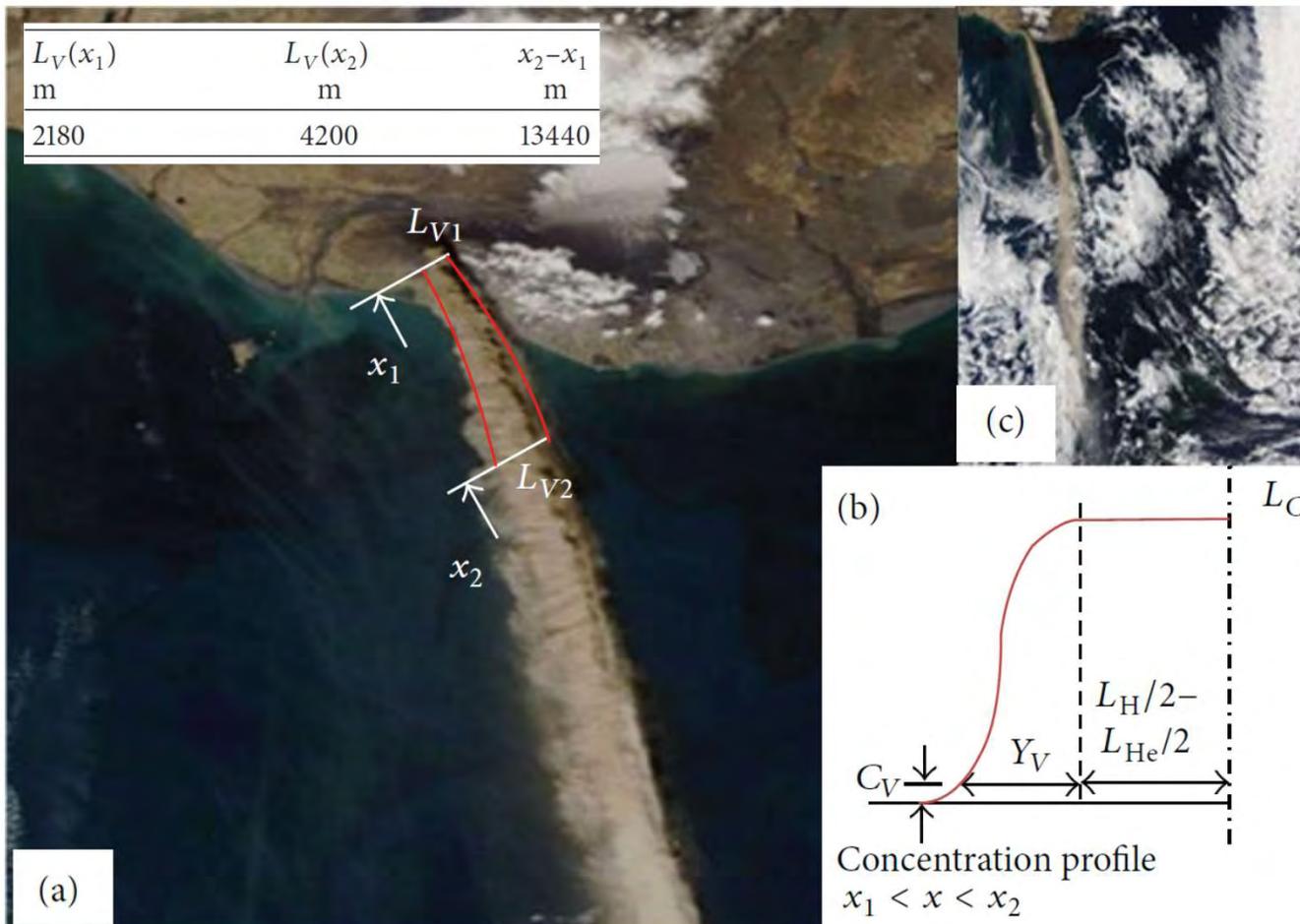
- Trac\_1
- Trac\_2
- Trac\_3
- Trac\_4



- SKYOPC\_F\_16
- DM\_F\_16

## 2013年1月15日の噴煙の調査 (10時23～33分の飛行)





エイヤフィヤトラヨークトルの噴煙(2010年5月11日の衛星写真)  
鮮明な輪郭で狭い幅のまま800km先まで伸びており、その下に  
フォールアウトを形成。

# 火山灰の気中濃度 ( $3,241\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) の 仮定は妥当か？

- 火山灰濃度は、観測点によって著しく異なり、距離だけに依存するわけではないため、1点での測定値に基づいて仮定するのは妥当ではない。
- 英国VAACの解析では、エイヤフィヤトラヨークトルの噴火で、 $4,000\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超えていた範囲が数百km先の遠方にまで及んでいたと評価。
- セント・ヘレンズ山から200km以上離れているハンフォードでも、 $2,650\mu\text{g}/\text{m}^3$  を仮定。(一旦地面に降積した後の再浮遊も考慮。)
- **桜島の噴煙の中では、 $15,000\mu\text{g}\sim 20,000/\text{m}^3$  の火山灰濃度も実測。**
- ストゥリーク・フォールアウトにより、高濃度の火山灰が降下してくる可能性もある。(実際この現象は、桜島でも観察されている。)
- **桜島が VEI 4以上で噴火し、噴煙が直接向かってきた場合には、川内原子力発電所で仮定している $3,241\mu\text{g}/\text{m}^3$  を顕著に上回る濃度で火山灰が降下してくる可能性があり、風によって一旦地面に降積した火山灰が再浮遊することも考慮した場合、十分保守的とは思われない。**

# ③建屋の屋根 に対する強度評価は妥当か？

## ポイント

- 火山灰の降積量15cmをベースに3,000N/m<sup>2</sup>と仮定。
- 地震荷重との組み合わせは考慮不要と仮定。(建築基準法施行令に基づき、地震荷重と積雪荷重の組み合わせが評価不要の地域だから。)
- 2号機燃料取替建屋の屋根スラブの許容荷重は4,400N/m<sup>2</sup>。
- 2号機ディーゼル建屋の屋根スラブの許容荷重は8,100N/m<sup>2</sup>。
- 1号機燃料取替用水タンクの天井板の許容応力(III<sub>A</sub>S)に対する裕度は1.08。

表 降下火砕物に対する建屋の評価結果※1

評価対象施設	評価部位※2	許容堆積荷重※3 N/m <sup>2</sup>	降下火砕物堆積荷重 N/m <sup>2</sup>	裕度	結果	
原子炉建屋	1号機	屋根スラブ (ドーム部※4)	6,200	3,000	2.07	○
	2号機	屋根スラブ (ドーム部※4)	6,200		2.07	○
原子炉補助建屋	1号機	屋根スラブ	8,100		2.70	○
	2号機	屋根スラブ	8,100		2.70	○
燃料取扱建屋	1号機	屋根スラブ	5,100		1.70	○
	2号機	屋根スラブ	4,400		1.47	○
ディーゼル建屋	1号機	屋根スラブ	9,800		3.27	○
	2号機	屋根スラブ	8,100		2.70	○
主蒸気管室建屋	1号機	屋根スラブ	9,800		3.27	○
	2号機	屋根スラブ	8,100		2.70	○

- ※1 川内原子力発電所の立地地域は、建築基準法施行令に基づく地震荷重と積雪荷重の組合せを要しない地域であり、降下火砕物の堆積は積雪頻度と同等以下であることから、地震荷重との組合せは考慮しない。ただし、降下火砕物の除灰作業による堆積荷重の低減は速やかに実施する。
- ※2 条件の厳しい(設計時考慮荷重(積載荷重、自重)が最も小さい)スラブを代表部位として評価した。
- ※3 降下火砕物堆積荷重は短期荷重として評価した。(短期許容応力度設計における長期荷重を差し引いた荷重を許容堆積荷重とした。)
- ※4 ドーム中段には凹凸が無いいため、屋根勾配により灰が端部に流れても、ドーム中段に灰が集中して堆積することはない、また、ドーム中央部から端部に灰が流れた方が応力は小さくなるが、評価においては等分布荷重とした。

荷重の低減を図ることも可能である。

荷重条件…降雨条件及び積雪条件を踏まえ3,000N/m<sup>2</sup> + 自重

表 代表部位に対する評価結果

評価対象施設	部位	応力の種類	算出応力 MPa	許容応力※2 MPa	裕度	結果
復水タンク (1号機)※1	屋根板	一次一般膜応力	61	226	3.70	○
		一次膜+一次曲げ応力	194	339	1.74	○
	胴板	一次一般膜応力	68	226	3.32	○
		一次膜+一次曲げ応力	182	339	1.86	○
燃料取替 用水タンク (1号機)※1	屋根板	一次一般膜応力	62	173	2.79	○
		一次膜+一次曲げ応力	239	259	1.08	○
	胴板	一次一般膜応力	73	173	2.36	○
		一次膜+一次曲げ応力	153	259	1.69	○

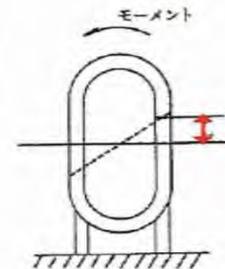


図 一次一般膜応力の例

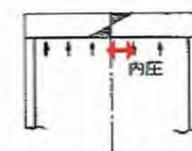


図 一次曲げ応力の例

- ※1: 一次一般膜応力及び一次膜+一次曲げ応力を評価しており、これらの応力は板厚に依存する(板厚が小さい方が応力大きい)ため、板厚の薄い川内1号機のタンクを評価することで、川内2号機のタンクの評価結果は包絡される。
- ※2: JEAG4601クラス2、3容器の許容応力状態Ⅲ<sub>S</sub>で評価する。

# 建屋の屋根 に対する強度評価は妥当か？

- Arkansas Nuclear One 2号機の安全解析書(FSAR, Amendment 16 2002年) 3.8.4項(その他の耐震カテゴリ-Iの構造物)では、次のような荷重の組合わせに関する評価基準が規定。Dは静荷重、Lは活荷重(積雪荷重も含まれる)、Eは地震荷重(日本の弾性設計用地震動 $S_d$ に相当する地震動による荷重)、Wは風圧荷重、 $H_0$ は配管の熱膨張による荷重、 $T_0$ は温度勾配による荷重。
  - $U = 1.5D + 1.8L$
  - $U = 1.25(D + L + E + H_0) + 1.0T_0$
  - $U = 1.25(D + L + W + H_0) + 1.0T_0$
- 火山灰の降積荷重も活荷重とみなし、より保守的な火山灰の降積量を仮定し、かつ、米国での評価基準にならって地震荷重との組合わせや係数(1.8や1.25)を考慮した場合には、許容荷重、許容応力を大幅に超過する。
- 屋根の重量が増すことで固有振動数が低振動数側に変移。共振の可能性もある。

## ④フィルターの閉塞 に対する評価は妥当か？

- 川内原子力発電所の換気空調系(給気系)には、高性能フィルターではなく、除塵効率(6.6~8.6 $\mu$ mの粒子に対する値)85%の平型フィルターが使われている。九州電力は、これによって「大部分の降下火砕物が除去される」と述べている。
- しかし、川内原子力発電所まで飛んでくる火山灰の粒子の25%程度は6 $\mu$ m以下と予想され、フィルターを通過して建屋内に持ち込まれる量は、かなりの量になる。
- 電気品室、中央制御室内の電気・電子装置、コンピューターなどの内部に火山灰が入り込み、付着することによる影響(蓄熱、ブレーカー、リレーの動作不良、摺動部の摩耗、摩擦の増加)による故障が、時間の経過と共に急増する可能性がある。これは、脅威のレベルとして重要な「**共通起回事象**」として分類されるべきである。
- 当初の設計条件として見込まれていない高濃度の火山灰は、これらの機器に対して未知の環境であり、安全上担保される機器に対しては、新たな環境試験が実施されなければならない。

Research Article

**Airborne Measurement in the Ash Plume from Mount Sakurajima: Analysis of Gravitational Effects on Dispersion and Fallout**

Jonas Eliasson,<sup>1,2</sup> Junichi Yoshitani,<sup>2</sup> Konradin Weber,<sup>3</sup> Nario Yasuda,<sup>2</sup> Masato Iguchi,<sup>2</sup> and Andreas Vogel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EERC, School of Engineering and Natural Sciences, University of Iceland, Austurvegur 6A, 800 Selfos, Iceland  
<sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0001, Japan  
<sup>3</sup>Laboratory for Environmental Measurement Techniques, University of Applied Sciences, Josef-Gockeln-Strafse 9, 40474 Düsseldorf, Germany

Correspondence should be addressed to Jonas Eliasson; jonase@hi.is

Received 28 April 2014; Accepted 13 August 2014; Published 19 October 2014

Academic Editor: Francesco Cairo

Copyright © 2014 Jonas Eliasson et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Volcanic ash concentrations in the plume from Sakurajima volcano in Japan are observed from airplanes equipped with optical particle counters and GPS tracking devices. The volcano emits several puffs a day. The puffs are also recorded by the Sakurajima Volcanological Observatory. High concentrations are observed in the puffs and fallout driven by vertical air current, called streak fallout. Puffs dispersion is analyzed by the classical diffusion-advection method and a new gravitational dispersion method. The fluid mechanic of the gravitational dispersion, streak fallout, and classical diffusion-advection theory is described in three separate appendices together with methods to find the time gravitational dispersion constant and the diffusion coefficient from satellite photos. The diffusion-advection equation may be used to scale volcanic eruptions so the same eruption plumes can be scaled to constant flux and wind conditions or two eruptions can be scaled to each other. The dispersion analyses show that dispersion of volcanic plumes does not follow either theories completely. It is most likely diffusion in the interface of the plume and the ambient air, together with gravitational flattening of the plumes core. This means larger boundary concentration gradients and smaller diffusion coefficients than state of the art methods can predict.

1. Introduction

Airborne observations of volcanic ash concentrations with optical particle counters and GPS tracking have recently been taken in use to study volcanic plumes [1–7].

Three campaigns of airborne observations of volcanic ash and gas content of the plume from the Sakurajima volcano in Japan were performed in 2013, in cooperation between the Universities of Kyoto, University of Iceland, and University of Applied Sciences in Düsseldorf, Germany. The Sakurajima volcano has been in constant eruption since 1955; it does not emit a continuous plume but produces a series of explosion puffs, sometimes many each day [8]. The preliminary results of the first campaign were described in presentations to the IAVCEI conference July 2013 in Kagoshima, Japan [9–12].

The staggering economic disaster [13, 14], inflicted upon the aviation industry by the Eyjafjallajökull eruption in 2010 and the Grímsvötn eruption in 2011, made clear the importance of ash cloud predictions. These events sparked the research program that produced the Sakurajima campaigns. It is hoped they may help to increase the accuracy of ash cloud predictions.

Ash cloud predictions make use of point source atmospheric dispersion models, for the simulation of continuous, horizontal and neutrally buoyant volcanic plumes. There exist a number of atmospheric dispersion models [15], specially constructed for handling eruption problems both analytically and numerically. In [16] the VAAC Name Model is presented; it is based on the horizontal advection-diffusion equation. The abstract states that they “provide advice on extent of

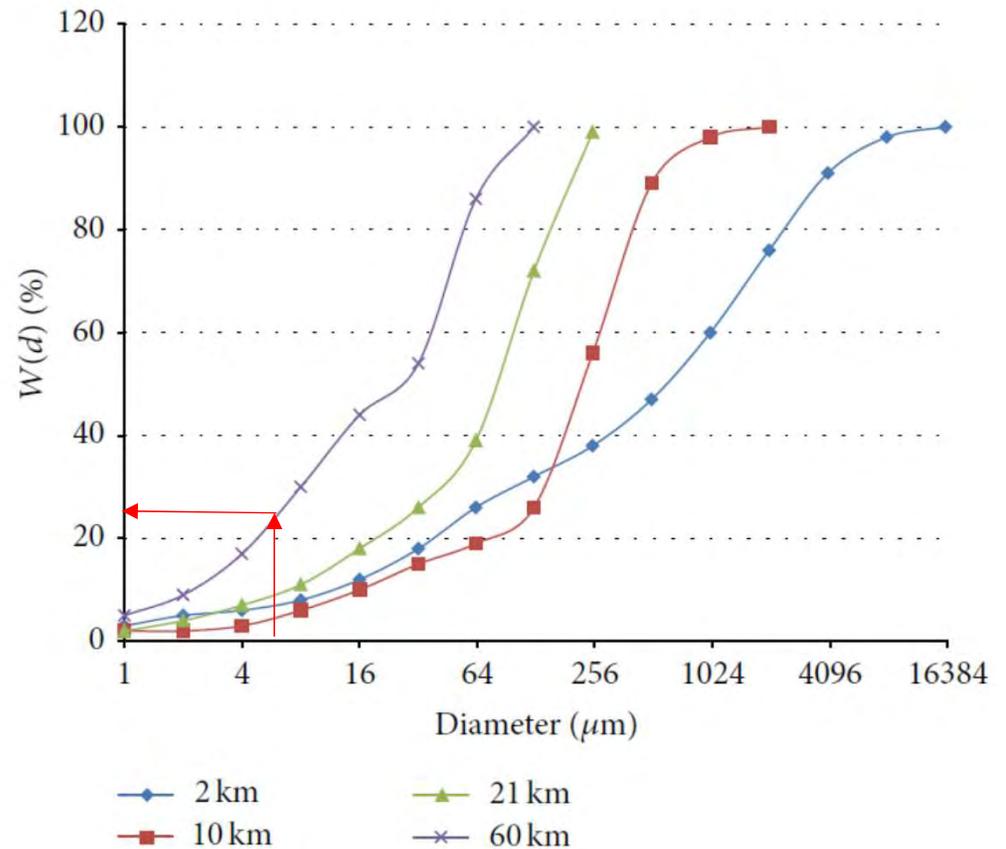


FIGURE 12: Grain size curves from Apr. 14–16. Adapted from [29, Figure 7].

[29] M. T. Gudmundsson, T. Thordarson, Á. Höskuldsson et al., “Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland,” *Scientific Reports*, vol. 2, article 572, 2012.

# ⑤電源、冷却水の確保は確実に対応できるのか？

## 電源の確保

- 所外電源系統は各所に弱点があり、停電が長期化する可能性がある。
  - 変電所、送電線の地絡。
  - 所内開閉所、所外電源受電用の変圧器故障。
- 所内非常用ディーゼル発電機の故障。
  - 吸気フィルターの閉塞を回避したとしても、室内換気系フィルターの閉塞による室温上昇、潤滑油の劣化、冷却水系統の流量低下などが発生。

# ⑤電源、冷却水の確保は確実に対応できるのか？

## 緊急対応要員への影響

- 暗い(照明を使っても視界が悪い)、マスクのアイピースが汚れる、滑る。
- 対応が長期化(数ヶ月)する可能性がある。
- 噴煙中の有毒ガス(二酸化硫黄、一酸化炭素)の濃度は十分低いかもしれないが、敷地内全域に降積した火山灰から発散される寄与とそれによる健康への影響評価が行われていない。
- 中央制御室、緊急時対策所の給気フィルターに大量に捕捉された火山灰から発散される有毒ガスによる健康への影響がないのか未評価。
- 過酷事故に至った後、所内で事故対応する作業者が着用するチャコール・フィルターの放射性ヨウ素吸着効率が、火山灰とそれに含まれるフッ素などによって低下しないのか未評価。



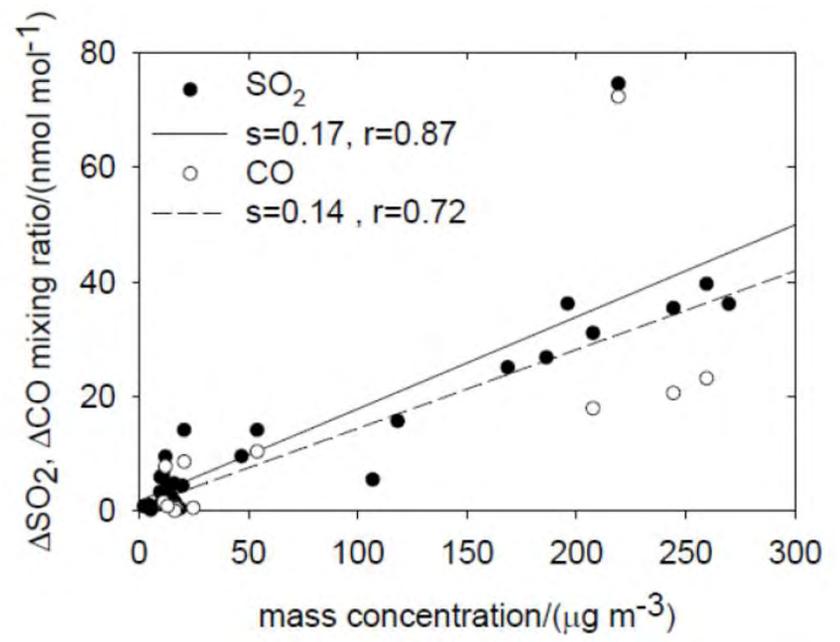
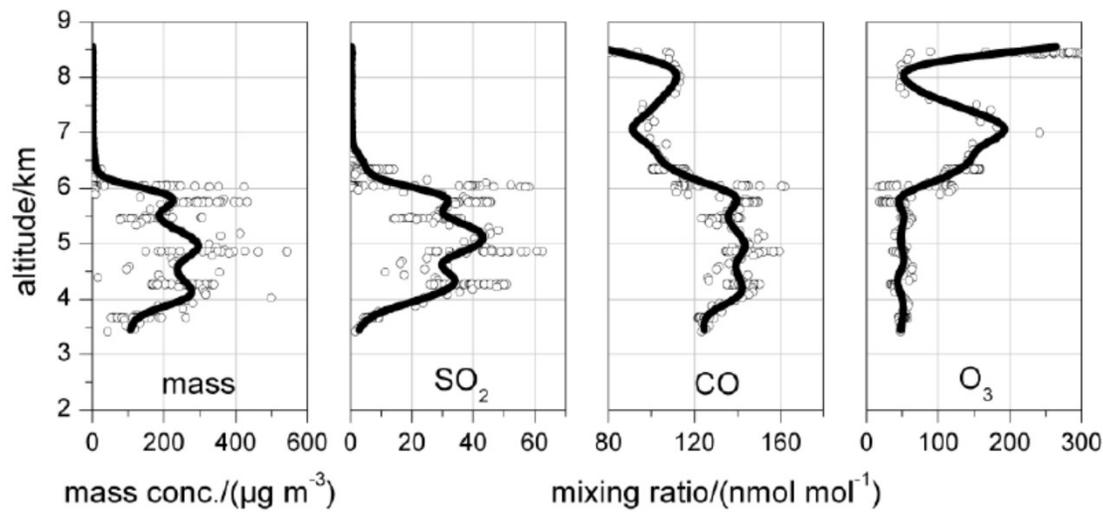
**Airborne aerosol in-situ observations of volcanic ash layers of the Eyjafjallajökull volcano in April & May, 2010, over central Europe**

A. Minikin, U. Schumann, B. Weinzierl, O. Reitebuch, H. Schlager, M. Scheibe, M. Lichtenstern, P. Stock, R. Baumann, C. Forster, T. Sailer, T. Hamburger, S. Rahm, K. Graf, H. Mannstein, & many others

DLR Oberpfaffenhofen, Institut für Physik der Atmosphäre, Germany



Institut für Physik der Atmosphäre



**DLR Falcon 20**  
max. altitude ~12 km  
endurance ~4 h

**Cabin aerosol & trace gas instruments**  
5 CPCs, 2 Grimm OPCs, TD  
(total & non-volatile aerosol number conc., ~4 nm-2.5 µm)  
3-A PSAP (absorption coefficient)  
mini-impactor sampling (particle comp. & shape <2.5 µm)  
SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O

**GPaC (particle collector)**  
TU Darmstadt

**PCASP-100X (dry accumulation mode concentration 0.16-1 µm)**

**FSSP-300 (0.4-25 µm)**

**2-DC (25-800 µm), LaMP/CNRS**

**Optical window for 2-µm-Wind-Lidar**  
(backscatter, qualitative)

**meteorological measurements**

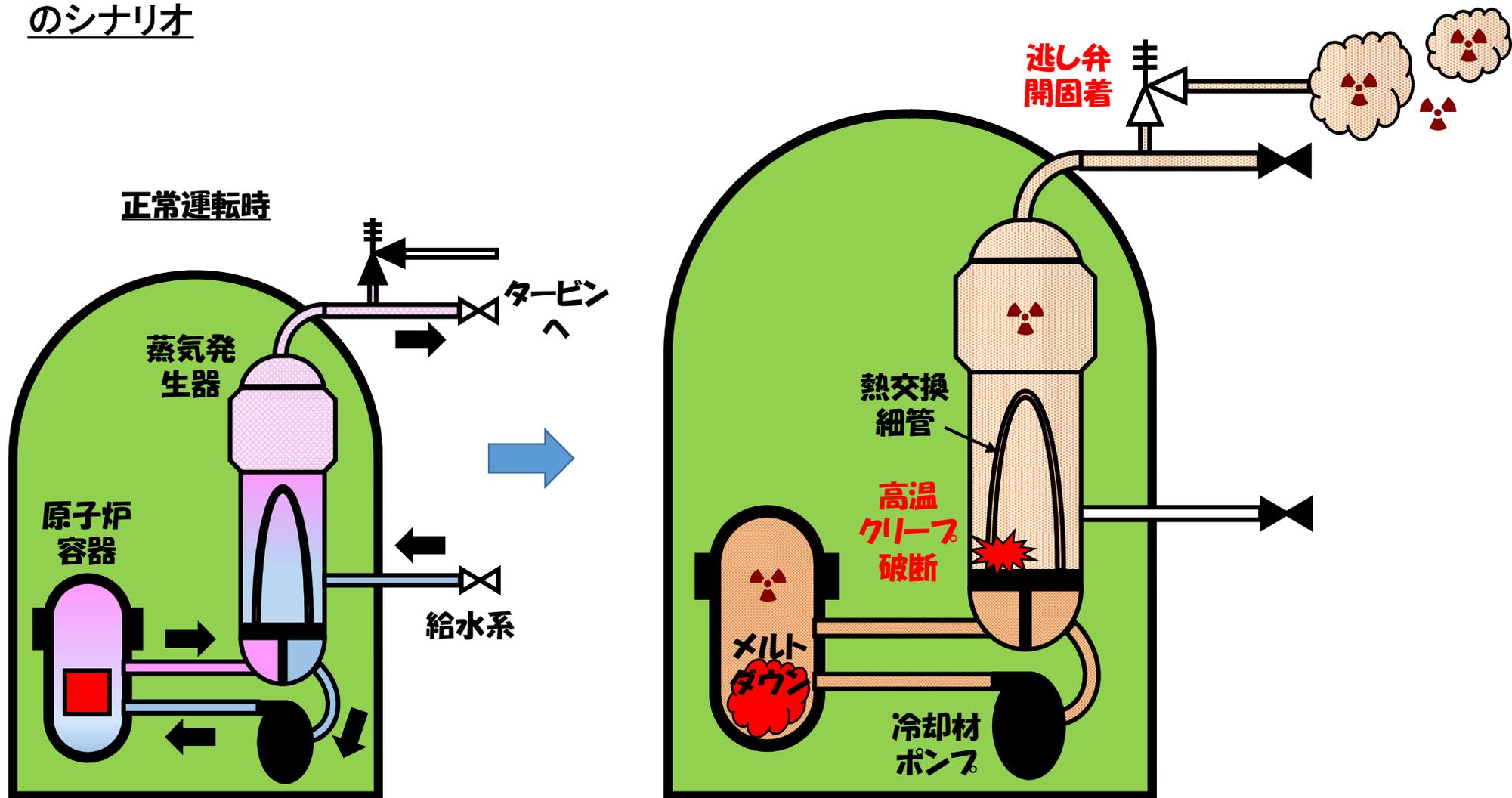
## ⑥原子力防災計画への影響

- 桜島が VEI 4、5レベルの噴火をした場合、その直ぐ近くが県庁所在地である鹿児島県としては、それだけで手が取られ、原子力防災の対応、支援が困難。川内原子力発電所よりも桜島に近いオフサイト・センターも同じ問題。そのため、原子力防災計画を指揮する機能が麻痺してしまう可能性がある。
- 広域停電。通信障害。
- 道路の渋滞、事故による避難行動への影響。原子炉事故対応のための物資の輸送の遅れ。
- 飛行機、ヘリコプターの飛行制限、または不可。原子炉事故対応のための物資の輸送ができない。事故影響を把握するための測定ができない。
- 過酷事故に至った後、放出される放射性物質(ヨウ化セシウム)と火山灰に含まれるフッ素との化学反応による影響がないのか未評価。

## 5. 過酷事故評価における非保守性

- 事故シナリオ(起因事象)の選定における非保守性。(TI-SGTR も含める。)
- 事故対応における仮定の非保守性。(過酷な外部事象(地震、噴火)によって事故が発生した場合に追加される条件も考慮する。予想される不利な気象条件(強風、豪雨、猛暑)も考慮する。)
- 事故の進展シナリオに対する非保守性。(MCCI も含める。)
- EUR との違い。(格納容器からの漏洩、地表レベルからの放出の考慮。人的対応への依存の制限。)

# 米国で評価されるTI-SGTR のシナリオ



# 6. 過酷事故対策における非保守性

## 未検討・未対応問題

- 中央制御室の居住性の悪化
- **特殊運転員訓練**
- 風雨日の屋外対応
- **複数ユニットでの同時発生**
- **事故対策設備と事故対応要員のバックアップ**
- **緊急時対策所のバックアップ設備と中継支援基地(福島事故におけるJ-ヴィレッジ相当)の確保**
- (大量の地下水浸入による汚染水問題など)長期的な事故処理方法
- 人権・法律問題

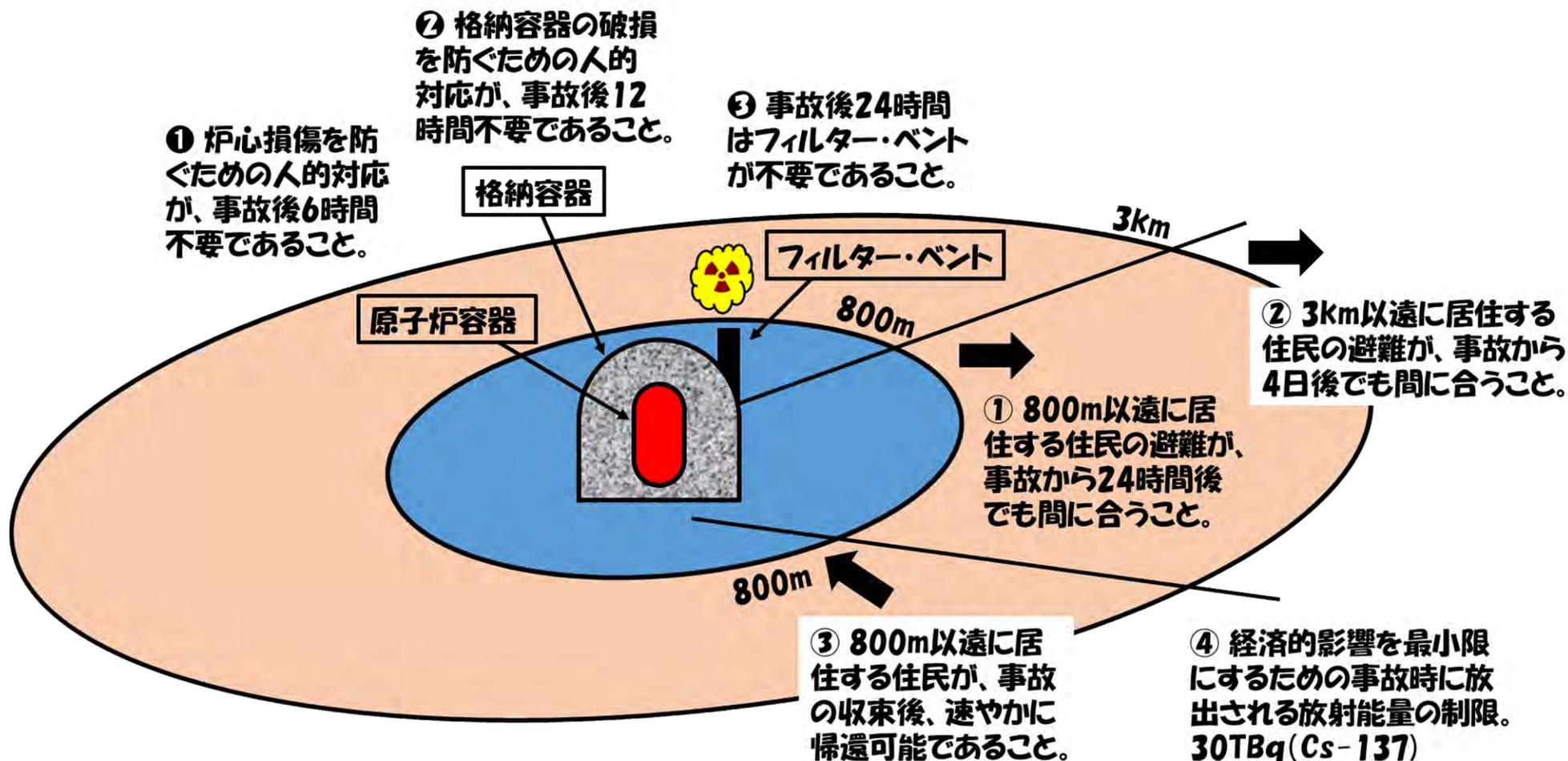
## 未解決問題

- 事故対応者の過剰被曝防止
- 重要判断・意思決定、情報伝達
- 避難行動の統制
- 迅速な避難者の内部被曝評価
- 大規模な自然災害と併発した場合の原子力防災
- 避難地域の防犯
- **テロ対策**

※ 欧米では、少なくとも赤字の項目に対しては対処済みの国々がある。

## 2001年 (Rev. C) EUR (European Utility Requirements)

※新設プラントに対する要件(運転プラントに対するバックフィットではない。)



# 第三世代炉

クダंकラム(インド) AES-92



2014年12月31日商用運転開始

オルキルト3号機(フィンランド) EPR



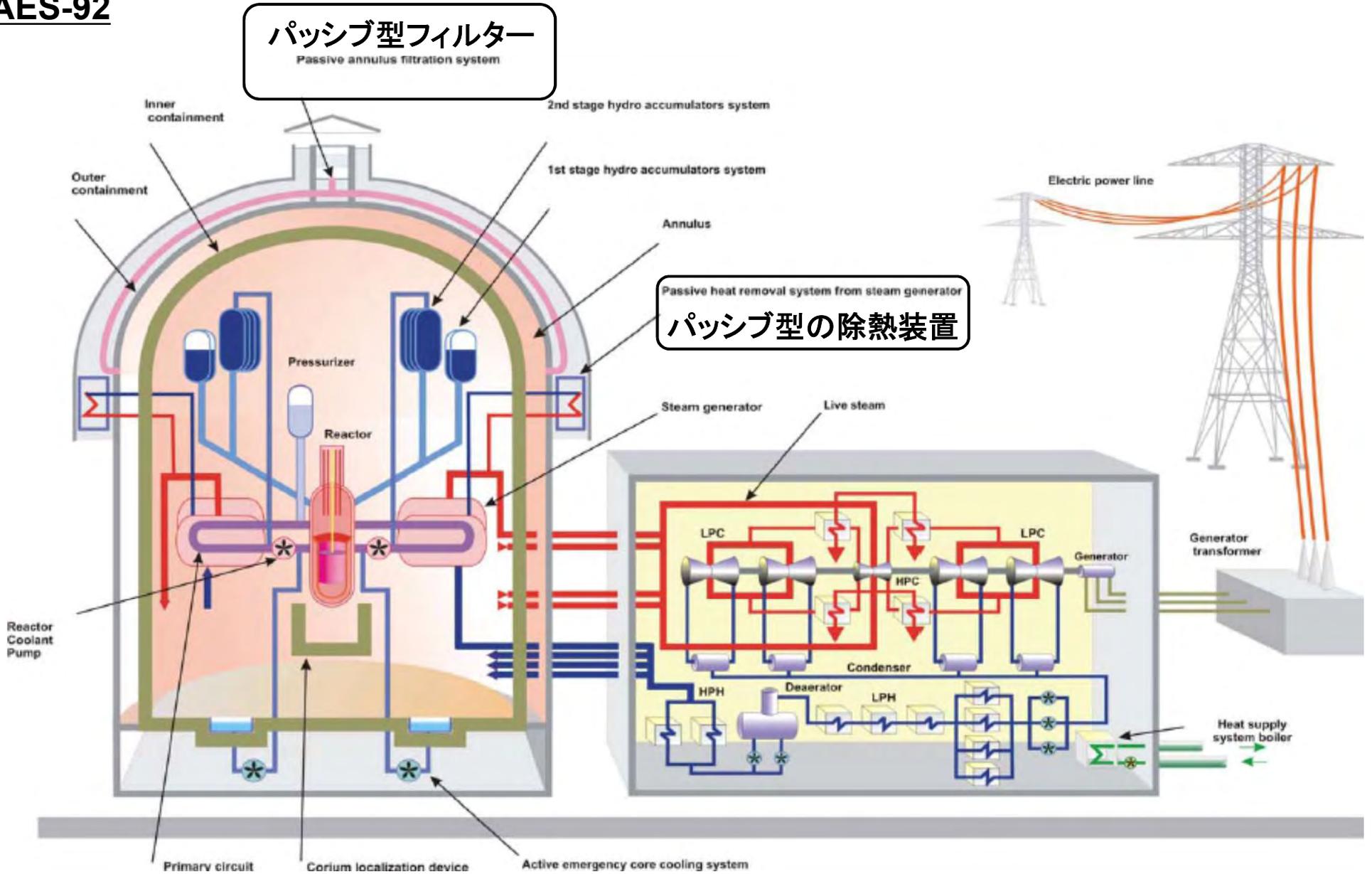
建設中(2014年7月)

海陽1号機(中国) AP1000

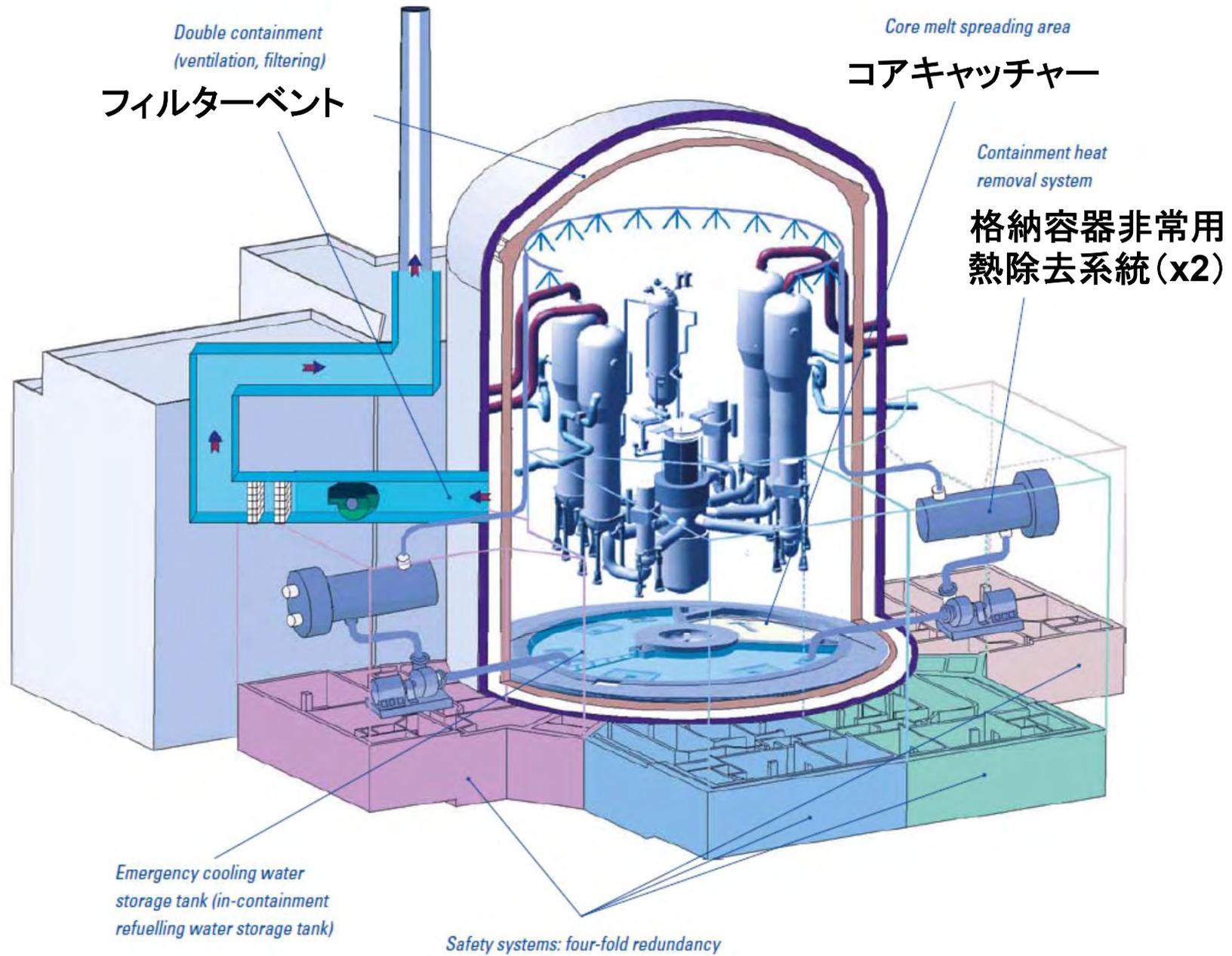


Photo © Shandong Nuclear Power Company, Ltd. All rights reserved.

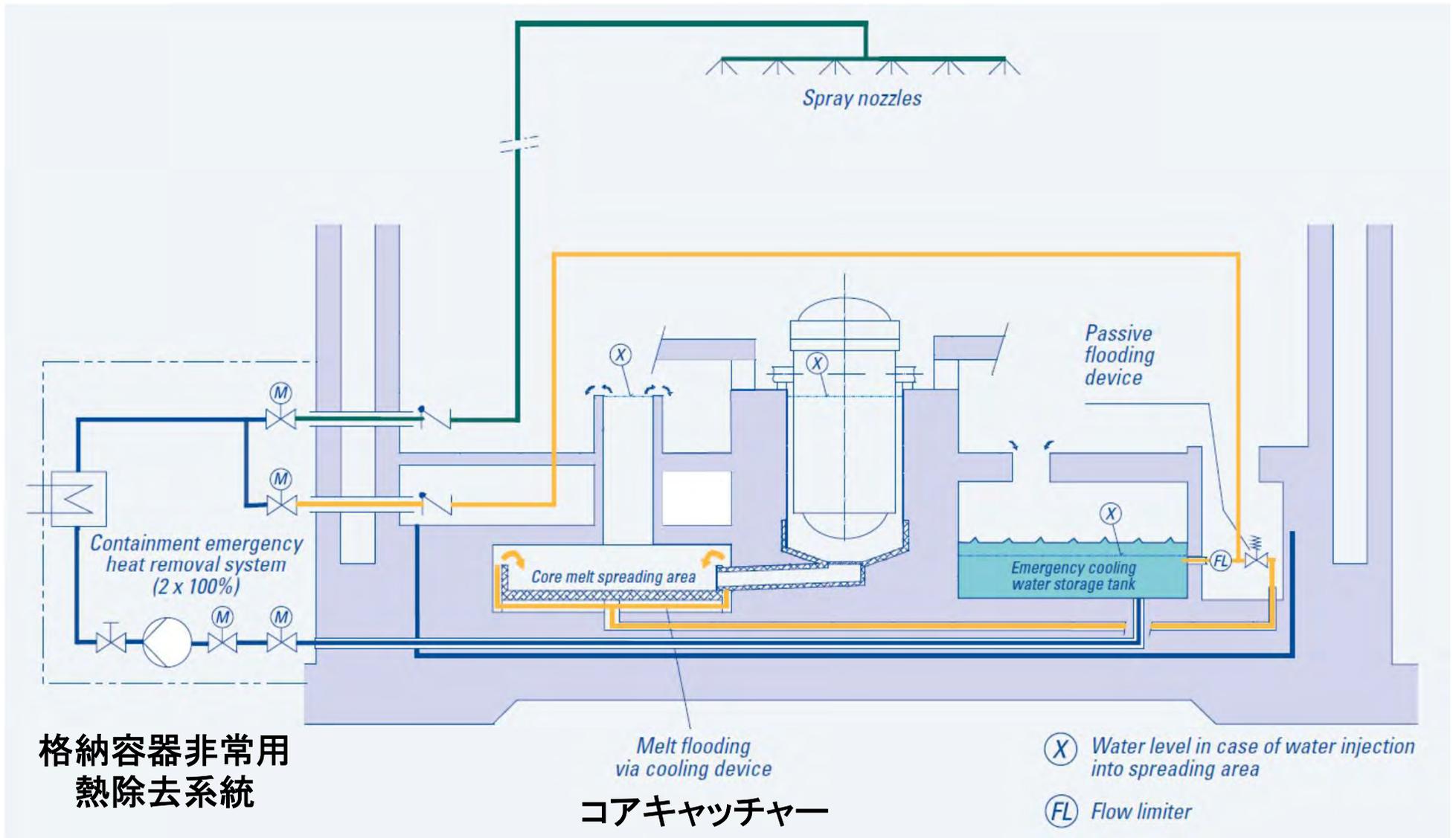
# AES-92



# EPR

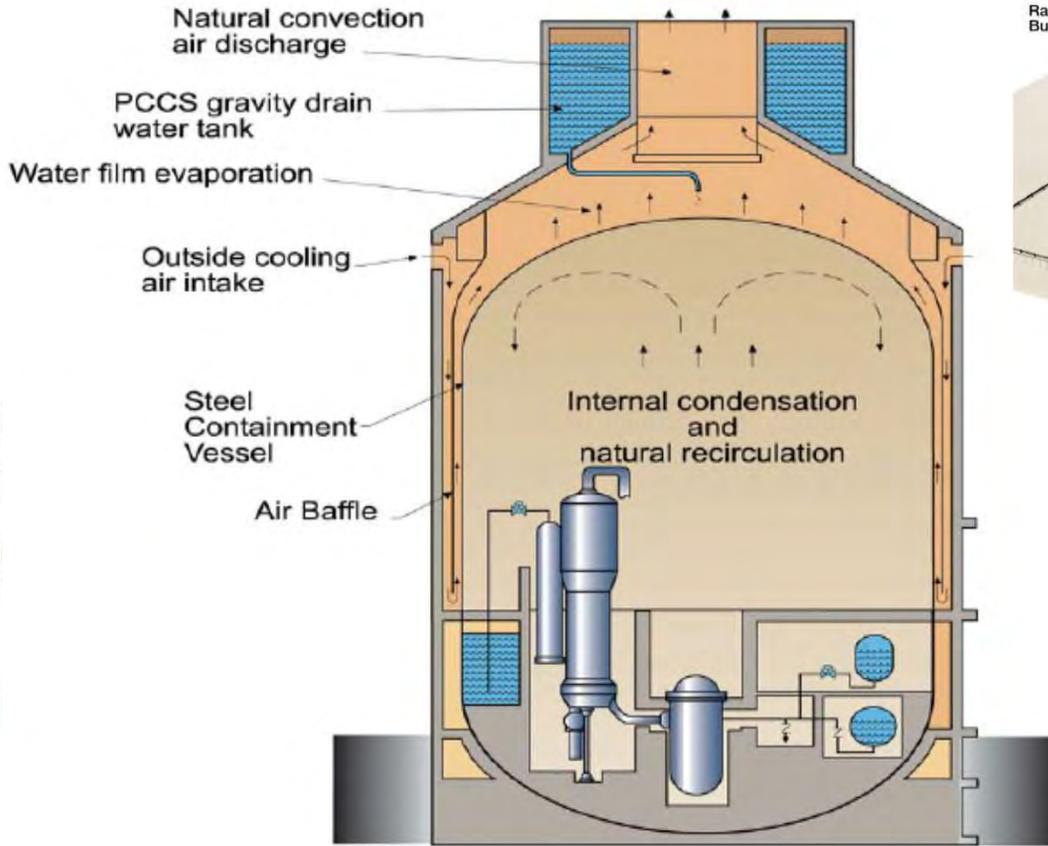
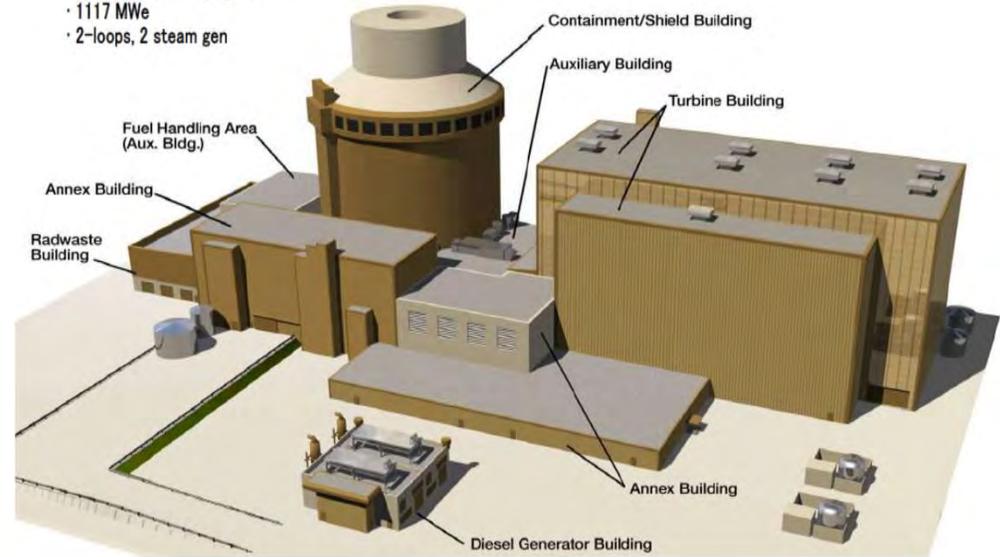


# EPR

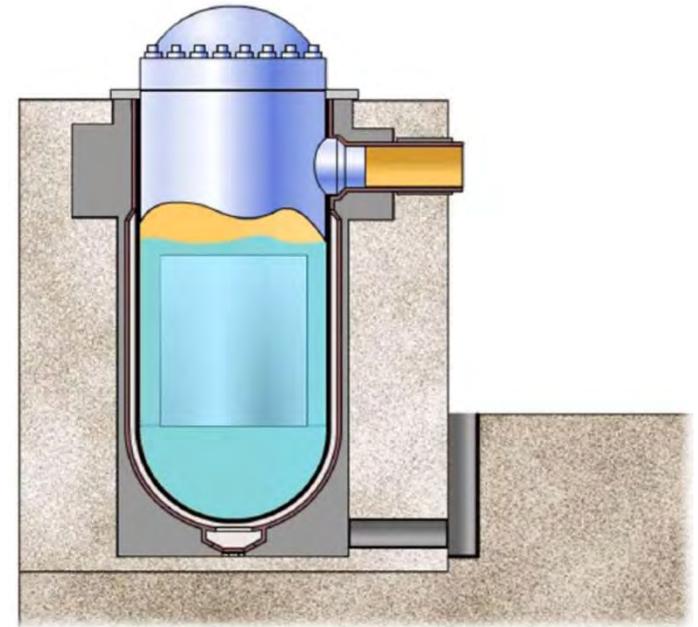


# AP1000

- 3415 MWt. Primary system
- 1117 MWe
- 2-loops, 2 steam gen



AP1000 Passive Containment Cooling System  
 パッシブ方式の格納容器の除熱(72時間)



IVR (In-Vessel Retention) により、  
 コアキャッチャーは不要。

## 安全思想の転換

第2世代	→	第3世代
可搬式の仮設機器		固定式の恒久設備
動力式(アクティブ)		無動力(パッシブ)
手動、人力、思考・判断		自動

可搬式の仮設機器の依存が誤りだと言うのではないが、固定式の恒久設備が充実しているこそそのもの。「非常階段がないのに避難ばしごがあるマンション」のようであってはならない。

## 福島事故の対応で250mSvを超過した東京電力の現地職員(単位:mSv)

個人識別	期間 (2011年)	内部被曝(預託実効線量)		外部被曝	全実効線量
		E50 <sub>I-131</sub>	E50 <sub>all</sub>		
A	3/11 ~ 4/14	580	590(590)	90	680
B	3/11 ~ 3/15	540	540(540)	110	650
C	3/11 ~ 3/31	240	242(240)	110	350
D	3/11 ~ 6/15	259	260(260)	50	310
E	3/11 ~ 6/4	433	433(430)	50	480
F	3/11 ~ 6/7	327	328(330)	30	360

- 線量計で外部被曝だけを管理しても、知らない間に許容線量を大幅に超過してしまっている。
- 防止するための実効的な方法がない。

# おわりに

- 日本の原子力における非保守性は、かつての「安全神話」に象徴された伝統的な悪しき特徴であり、福島事故後も絶えていない。
- 日本の原子力における非保守性の根本原因は、安全文化(危険性を敏感に感知し、臆することなく提起し、適切な対応に向けて迅速な行動がとられる健全な職場文化)の未熟性にある。
- 安全と安心は両立しない。安全はむしろ、不安感と警戒心によって維持される。 **Stay worried!**
- 電力事業者と規制者は、心配する人々よりも、さらにもっと積極的に安全について心配しなければならない。
- 「世界最高水準」は有害な流言。

どうもありがとうございました