

〔報文〕 ポーラ美術館における室内空気清浄化のための 火山ガスの調査

呂 俊民・佐野 千絵・内呂 博之*・荒屋鋪 透*

1. はじめに

美術館において作品の劣化を防ぐために、温湿度、照度といった環境を適正な範囲に維持することの他に、清浄な空気環境であることが必要である。汚染物質が、金属を素材とする顔料や金工品を腐食させる要因となるため、清浄な環境に作品を展示・収蔵しなくてはならない。館内の汚染源として、周辺の大気汚染が侵入することが挙げられ、特に、火山活動の活発な地域では、気象条件によっては、火山ガスが高濃度になる危険性がある。火山ガスが起因して生じる酸性雨により外部の文化財構築物への大気腐食のほか¹⁾、館内の作品に対して悪影響を及ぼすことが懸念される。

ポーラ美術館は、富士箱根伊豆国立公園仙石原の小塚山の麓に位置し、今なお火山活動を続ける大涌谷の近くに位置し、建設計画の当初から火山ガス対策が課題として取り上げられた。建設に当たっては、火山ガスによる影響調査を行い、美術館の空調設備に火山ガスを除去する化学フィルターを取り付けるなどして空気の清浄化を図った。さらに、開館後も作品への影響を、作品と同種の素材試験片を曝露し汚染影響をモニタリングしている。

本論文では、開館前の大気環境調査と、開館後から5年間にわたり、空気環境を作品素材と同じ試験片によりモニタリングし、展示・収蔵環境の最適化を図った結果について示す。

2. 火山ガスの作品影響とモニタリング手法

文化財に対する空気汚染の影響は、汚染物質が起因して、絵画の素材のアマニ油が反応したり、水分の介在のもとでの腐食反応により、金属を素材とする顔料や金工品の劣化を生じさせる。室内に発生源があるコンクリート躯体から発生するアンモニアガスや、内装材から発生する酢酸やホルムアルデヒドなどの酸性ガスが作品の劣化に寄与する。

大気汚染物質としては、火山ガスや、海塩粒子、自動車排気ガスなどが影響する。火山ガスに含まれる、硫化水素 H_2S は、温泉地帯や、悪臭発生源の近くでは検出されるものの、一般の大気中では極低濃度である。また、 H_2S は大気中では酸化されて二酸化硫黄 SO_2 になりやすいことから、 H_2S が高濃度となるのは周囲に火山ガス発生がある場所と考えられる。

火山ガスによる大気汚染の調査には、現地に測定機器を設置せずに行える簡便なパッシブ法が有効である。パッシブ法は、パッシブサンプラーや金属試験片を現地に吊り下げ、持ち帰り分析することで、曝露期間の汚染レベルを把握できる。

金属試験片を空気中に曝露する方法は、江本が屋外の文化財への大気汚染による影響を調べる目的で昭和39年頃から実施した報告がある²⁾。X線回折法により腐食性生物を同定し、その回折強度から腐食度を知り、汚染因子とその汚染度や影響を判定する方法である。さらに、大気に限らずこの手法を、収蔵庫内や展示ケース内で実施し大気汚染の侵入について検討を加えている³⁾。また、門倉らは正倉院展示環境調査にこの手法を取り入れている⁴⁾。金属試験片として銀を用いた空気環境モニターは、銀製品が温泉地帯で黒く変色したり、一般環境でもすぐに光沢を失う現象からもわかるように、汚染ガスと反応しやすく、 S と H_2S に対して急速

*ポーラ美術館

に反応し、銀の表面に硫化銀 Ag_2S が生じるためである。

金属試験片を外気に曝露する際には、直接雨にさらされないように曝露箱または軒下に吊す。曝露期間は汚染レベルにもよるが最低半年以上必要である。同じ場所に複数枚吊し、変色を確認し、蛍光X線分析により、S、Clなどの元素の強度を測り、X線回折については、金属との反応生成物の強度を測定し、測定場所あるいは曝露期間との相対比較を行う。このとき必ずレファレンスの分析も実施する。

3. ポーラ美術館

3-1. 建物概要

ポーラ美術館は2002年9月に開館し、樹齢300年の“ぶな”やヒメシャラ群生に特徴づけられる森の中にある。箱根の豊かな自然と共存していくことが設計のコンセプトである⁵⁾。

美術館は、図1に示すように収蔵庫は地下3階に、作品別に3室設け、展示室は地下1階、地下2階に、絵画は直接展示、工芸品はケース内展示を行っている。展示室の照明は、おもに光源器と照射部を分離させた光ファイバー照明を採用し、作品に対する熱影響の少ない光環境を実現している。各室の温湿度と空気質環境の設定目標値⁶⁾を表1に示す。収蔵庫の温度設定は美術館側の判断で 24 ± 1 ℃を目標とした。火山ガスに対しては、金属試験片のモニターを重要域でモニターをすることを管理目標としている。展示ケースは、壁面、壁掛け、独立、独立視きの4種があり、いずれもエアタイトとし、精密な温湿度調整は調湿剤で行っている。温湿度の管理は、各室の代表点に設置した自記温湿度計による測定以外に、展示ケース内のデータを、無線LANシステムにより、学芸室で随時収集できるようにしている。

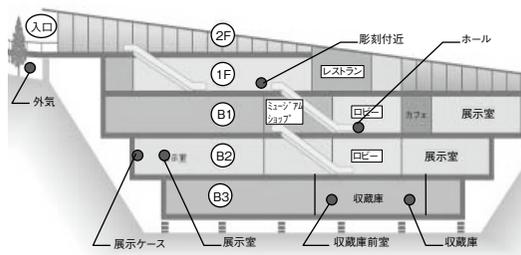


図1 ポーラ美術館断面図および開館後の金属試験片モニタリング地点 (●)

表1 展示・収蔵環境の設定目標値

室名	おもな収蔵・展示品	環境条件		
		温度 (°C)	湿度 (%)	空気質
収蔵庫 1	絵画	24 ± 1	50 ± 5	変色試験紙：中性域 アンモニア：30ppb 以下 酢酸： $430 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下 ホルムアルデヒド： $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 以下 火山ガスは金属試験片によりモニターする
収蔵庫 2	陶磁器	24 ± 1	50 ± 5	
収蔵庫 3	漆器	24 ± 1	60 ± 5	
展示室 1	絵画	夏 24 ± 1.5 冬 22 ± 1.5 ケース内 $22 \sim 24 \pm 1$ ※	夏 50 ± 10 冬 50 ± 10 ケース内 $50 \sim 60 \pm 5$ ※	
展示室 2	絵画			
展示室 3	絵画			
展示室 4	工芸品 ケース内展示			
展示室 5	工芸品 ケース内展示			

※作品によって設定値を変更

3-2. 空気浄化設備

ポーラ美術館は、気象条件によっては火山ガスの臭気を感じる時期があることから火山対策を施してある。火山ガスは、 H_2S のほかに SO_2 や HCl が含まれ、外気の処理に、空調機にそれらのガスを除去できる化学フィルターを取り付けた。化学フィルターには除去対象ガスによりいくつかの種類がある⁷⁾。活性炭にリン酸 H_3PO_4 を添着したアンモニアを除去する“アルカリガス除去フィルター”，揮発性有機化合物を除去する“活性炭フィルター”と、酸性ガスに対しては、酢酸やギ酸も含め、 H_2S に対しては高い効率の除去ができるフィルターとして、活性炭に炭酸カルシウム K_2CO_3 を添着した“酸性ガス除去フィルター”と、高濃度の SO_2 を除去できるフィルターとして、活性アルミナまたは活性炭に過マンガン酸カリウム KMnO_4 を担持し、活性二酸化マンガンの触媒機能を持たせた“S系除去フィルター”がある。

そこで、“酸性ガス除去フィルター”を展示室系統と収蔵庫系統の外気処理に、循環空気の処理には、“アルカリガス除去フィルター”の吸着剤と“酸性ガス除去フィルター”の吸着剤を混合したフィルターを取り付け、作品の展示のないホール系統は除塵フィルターを取り付けた。

収蔵庫の空調システムを図2に示す。収蔵庫の場合、作業者が入る際に、外気を処理した空気を含めた収蔵庫内に空気を供給する作業モードと、収蔵のための、温湿度制御を目的とし、庫周りのチャンバーを空調する収蔵モードの切り換えができるようにしてある。美術館施工後から開館までの間は、庫内の酸性雰囲気改善のため、作業モードとし、積極的な換気に努めた。なお、循環空調機の化学フィルター更新に当たっては、開館半年後の環境調査でアンモニア濃度が10ppb以下であることを確認し、さらに、“アルカリ除去フィルター”を取り外しても目標値の30ppb以下となることを予測し⁸⁾、開館1年後から化学フィルターを、“アルカリガス除去フィルター”と酸性ガス除去フィルター“の吸着剤を混合したフィルターから、“酸性ガス除去フィルター”だけに変更した。

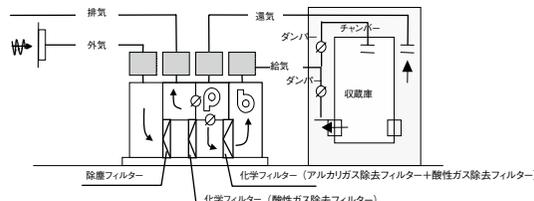


図2 収蔵庫の空調システム

4. 火山ガスの調査

4-1. 開館前の立地環境と空気清浄化のための調査

火山ガスの影響を調査するために、銀、銅、鉛の金属を試験片として選び、美術館の建設地の外気（以下美術館外気と呼ぶ）と、建設までの間、作品を保管する東京都品川区の建物の屋上（以下都内外気と呼ぶ）に曝露箱を設置し、試験片を1年間曝露し、その影響を比較した。また、建設地において、化学フィルターの効果を確認するために図3に示すような試験装置を設置した。酸性ガス除去用フィルターと除塵フィルターを組み込んだファンフィルターユニット試験装置（以下試験装置ガス除去と呼ぶ）除塵フィルターを組み込んだファンフィルターユニット試験装置（以下試験装置除塵と呼ぶ）に、35mm×25mm、厚さ0.1mmの銀、銅、鉛の金属試験片をスライドマウントにはさみ図3の各点に設置した。

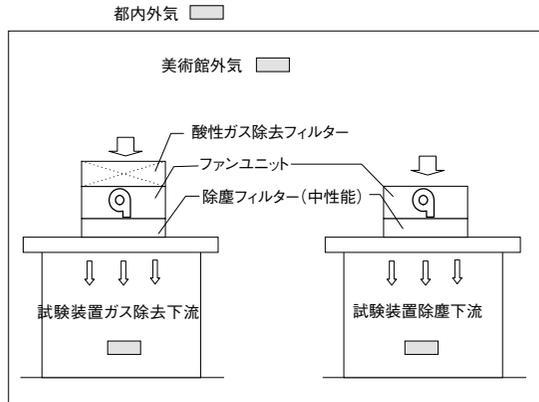


図3 化学フィルター試験装置および金属試験片曝露場所 (□)

一方、各測定点に、2000年の6月から一ヵ年間季節毎に約2週間、パッシブサンプラー（グリーンブルー社製 Handy SONOX）を設置し NO₂、SO₂、NH₃ガスの各季節の汚染濃度測定を行った。

パッシブサンプラーによる汚染濃度を図4に示す。NO₂濃度は、各季節とも都内外気が自動車排気ガスの影響で高いが、美術館外気は都内外気の1/3から1/5の濃度レベルである。SO₂濃度は、建設地外気は都内と同程度である。NH₃濃度も建設地は極めて低濃度である。試験装置下流濃度を比較すると、試験装置除塵下流ではNO₂とSO₂が外気と比べてわずかに低下する程度で、ほとんど除去されていない。試験装置ガス除去下流ではNO₂、SO₂とも低い濃度であり、高い効率で除去されていることがわかる。NH₃に関しては、外気と両試験装置下流で変化がなく、酸性ガス除去フィルターでは除去されない。

金属試験片については試験片上に生成された成分を蛍光X線分析（フィリップス製蛍光X線分析装置PW-1404型）および、X線回折分析（日本電子製X回折装置JDX8P型）した。蛍光X線分析のS強度を、図5に示す。銀板、銅板では、美術館外気が都内外気の1.5倍から2倍高い。銀板では試験装置除塵下流では美術館外気と同程度であり、試験装置ガス除去下流では外気の1/40以下である。外気の銀板で生成されたS成分は除塵フィルターのみでは除去できず、“酸性ガス除去フィルター”を組み込むことにより95%以上除去されていることがわかる。銅板と鉛板では試験装置除塵下流では美術館外気と比較して、銅板で1/10程度、鉛板で1/3程度に低減しているが、さらに試験装置ガス除去下流では、極めて低い強度となっている。

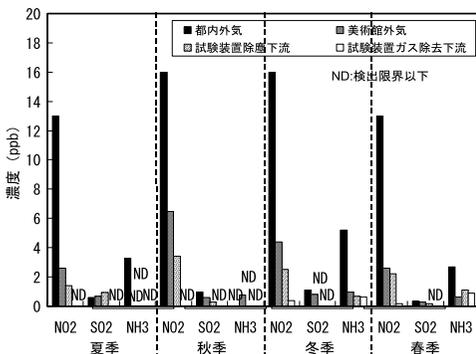


図4 建設時の試験片曝露地点の汚染濃度

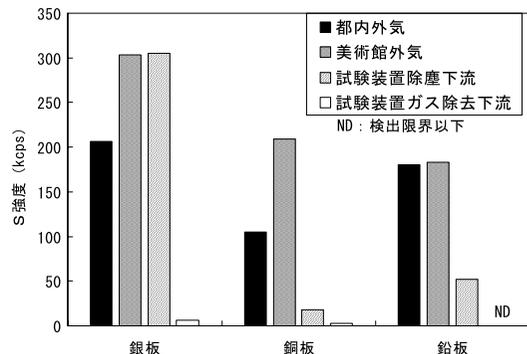


図5 金属試験片上のS強度

X線回折分析した結果を表2に示す。美術館外気ではH₂Sと銀との反応でAg₂Sが検出され、都内外気より強度が高い。一方、塩化銀AgClは都内の方が高い。SO₂との反応で生成されるCu、PbおよびCaのSO₄化合物が、外気で確認された。試験装置下流では蛍光X線分析のS強度と同じようにAg₂Sが試験装置除塵下流で検出されるものの試験装置ガス除去下流では検出されていない。AgClに関しては試験装置ガス除去下流でも非常に弱い強度が確認された。銅板や鉛板上のSO₄化合物は装置下流ではCu₄(SO₄)(OH)₆・2H₂Oがわずかに検出されているものの、他のSO₄化合物は検出されていない。

表2 建設時における金属試験片X線回折結果(曝露期間1年)

		測 定 点	測 定 点	測 定 点	測 定 点
		都内外気	美術館外気	試験装置除塵下流	試験装置ガス除去下流
銀板	Ag ₂ S	(+)	+	+	-
	CaSO ₄ ・2H ₂ O	++	(+)	-	-
	AgCl	+	(+)	(+)	(+)
銅板	Cu ₄ (SO ₄)(OH) ₆ ・2H ₂ O	++++	++	(+)	(+)
	Cu ₄ SO ₄ (OH) ₆	(+)	+	-	-
	Cu ₂ O	++++	++++	+	(+)
	CaSO ₄ ・2H ₂ O	(+)	+	-	-
	CuCl	(+)	-	-	-
鉛板	PbSO ₄	(+)	(+)	-	-
	PbO	(+)	(+)	-	-
	PbCl ₂	(+)	(+)	-	-

相対強度 : +++++ 非常に強い +++ 強い ++ 中位 + 弱い (+) 非常に弱い - 検出されず

以上のことから、美術館が立地する環境は火山ガスの影響で、金属との反応が進行しやすいことがわかる。火山ガスとの生成物は試験装置ガス除去下流では検出されず、火山ガス対策には、“酸性ガス除去フィルター”が有効であることが確認できた。

4-2. 開館後のモニタリング

開館後は最も直接的な方法として、作品素材の長期曝露を継続して汚染影響を調査した。金属試験片としては、銀、銅を選定した。金工品に多く使用される銀は、最も火山ガスの影響を受けやすい素材であり、銅は金工品や顔料に含まれる素材である。金属試験片の曝露は、開館後から開始し、展示に影響のないように、図1に示す外気、ホール、展示室、収蔵庫、収蔵庫前室、展示ケースにセットし、開館後半年後、1年後以降1年毎に回収し分析した。

また、外気と館内のH₂S濃度を紫外線パルス蛍光式自動測定器(サーモエレクトロン製MODEL43S)により、リアルタイムでモニターした。図6に外気と展示室の還気の測定結果を示す。外気のH₂Sは、瞬間的に人間の鼻で感知できる50ppbを越す値があり、展示室の循環空気は、その1/10程度のレベルとなっており、人の出入りに伴い入り口、ホールへと侵入した外気の影響を受けたものといえる。図7に外気と収蔵庫還気のH₂S濃度測定結果を示す。測定期間中、気象条件によっては、40ppbを越す時間帯があるが、収蔵庫内ではH₂Sは検出されず収蔵庫は極めて清浄な環境に維持されていることがわかる。

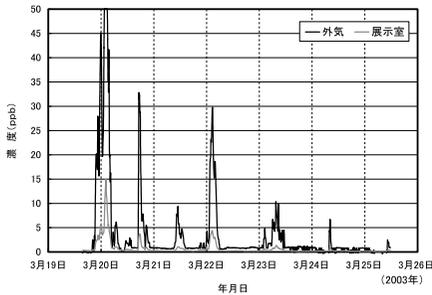


図6 開館後の外気および展示室還気の硫化水素濃度

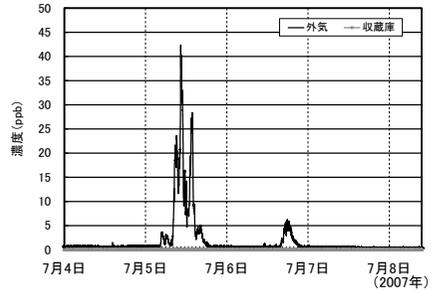


図7 開館後の外気と収蔵庫還気の硫化水素濃度

金属試験片の分析は、建設時に行った方法と同様に蛍光X線分析によりSの強度を、X線回折分析により成分分析を行った。銀板の蛍光X線分析によるS強度の開館後からの変化を図8に示す。外気では火山ガスの影響を受けSが多く検出され、外気の影響を受けやすいホール付近では、その1/5、展示室では1/10以下、収蔵庫では1/20以下となっている。なお、展示ケース内は展示室と同程度であった。開館後からの変化では、外気は曝露後48週からS強度が60kcpsを越え、2年後の102週をピークに、3年後159週では減少している。曝露2年以降の調査には、新しい試験片の設置が必要であることが示唆された。収蔵庫前室では、収蔵庫より高いSが検出されており、作業による扉開閉出入りに伴い、微量であるが外気の侵入の影響が考えられた。図9にホールと収蔵庫内の銀板のX線回折結果を示す。ホール付近ではH₂Sとの反応でAg₂Sが、HClとの反応でAgClが検出されている。収蔵庫内では成分ピークは非検出に近く5年経過した現在も火山ガスからの保護が確認された。なお、外気はホールの20倍以上のピークが検出されている。

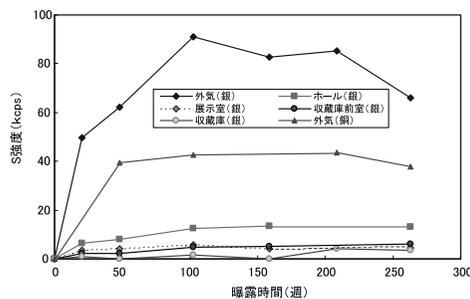


図8 開館後からの金属試験片上のS強度経時変化（蛍光X線分析）

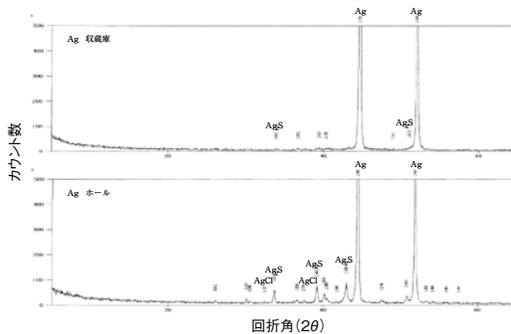


図9 銀板上の生成物（曝露時間263週、X線回折分析）

銅板については、外気の蛍光X線分析によるSの強度の変化を図8に併記した。銀と同様に曝露後48週からS強度が40kcps程度で飽和状態となるが、館内は5年経過しても検出されない。X線回折分析では、外気の銀板にはSとの反応で $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が生成され、火山ガスの影響が確認された。外気で検出されたSは館内では検出されず、良好な火山ガス対策が施されていることが確認された。

5. まとめ

ポーラ美術館の建設に当たって、火山ガスの調査を行い、銀板の曝露試験から、外気では Ag_2S が検出された。この結果を踏まえ、空調設備に火山ガスを除去する化学フィルターを取り付け、展示室・収蔵庫に清浄化された外気を供給している。

美術館開館後も、作品を展示・収蔵する場所には金属試験片によるモニタリングを行うこととし、1年毎に試験片の変化を確認した。その結果、外気の試験片から火山ガス由来のSとその反応成分が検出されたものの、館内への影響は極めて低く、作品劣化の保護が確認できた。

また、作品素材の金属試験片による大気モニタリングは、作品影響を直接みることができ、現地で設備や機器も必要なく、労力もかからない方法であることから、美術館建設に当たっての大気環境調査として、また、開館後は長期の作品劣化を確認するうえで有効な手法であるといえる。

謝 辞

本調査を進めるにあたり竹中工務店技術研究所、石黒武氏、瀬古繁喜氏、天野健太郎氏の協力を得た。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 梅田てるみ他：酸性雨による金属材料影響調査，大気環境学会誌，39（1），11-20（2004）
- 2) 江本義理：文化財保存環境としての各地の大気汚染度の測定結果，保存科学，3，1-22（1967）
- 3) 江本義理：汚染空気による生成物の分析，保存科学，8，29-38（1972）
- 4) 門倉武夫他：奈良国立博物館に於ける正倉院展示環境調査，保存科学，8，51-60（1972）
- 5) 日建設計：ポーラ美術館，新建築，8，110-127, 218（2002）
- 6) 佐野千絵：美術館・博物館の空気質の現状と望ましいレベル・対策，空気清浄，38（1），20-26（2000）
- 7) 呂俊民他：ポーラ美術館における火山ガスに対する空気浄化，クリーンテクノロジー，15（9），36-40，（2005）
- 8) 呂俊民他：美術館におけるアンモニア汚染と対策，室内環境学会講演集，112-113，（2008，東京）

キーワード：美術館（museum）；大気汚染（air pollution）；火山ガス（volcanic gas）；空気浄化（air purification）；金属試験片テスト（metal coupon monitoring）

Investigation of Volcanic Gas for Indoor Air Quality in the Pola Museum of Art

Toshitami RO, Chie SANO, Hiroyuki UCHIRO* and Touru ARAYASHIKI*

A stable indoor climate maintained by means of temperature, humidity and light control are essential for a museum environment. Furthermore, managing the indoor environment in respect to indoor air pollution is also of great relevance as indoor air pollution is also capable of causing significant deterioration to objects of fine art.

Since the Pola Museum of Art is located in a volcanic zone of the Fuji-Hakone-Izu National Park, objects of fine art might be influenced by volcanic gas. Thus, in the construction of the museum from 2000 to 2002, the atmospheric volcanic gas level was investigated for the protection of the indoor air in the museum. S intensity generated on a passive test piece was analyzed by X-ray fluorescence analysis. Corrosion products were analyzed by X-ray diffraction analysis.

Measurements of air pollution level by volcanic gas using passive test pieces of Ag, Cu and Pb showed that Ag_2S was generated on Ag surface of the test piece by H_2S in the outdoor environment of the museum. S intensity in a dust removal air filter downstream showed a similar level compared with that of outside air, while S intensity in a chemical air filter downstream was 1/40 compared with that of outside air. Due to these results, the chemical air filter which removed the volcanic acid gases was selected for installment in the museum air handling unit.

After the museum opened, the influence of the volcanic gas was measured with an H_2S automated meter by UV fluorescence detector, and a similar monitoring by Ag and Cu test pieces was continued from 2002 to 2007 in storages, galleries and outside the museum. H_2S concentration outside becomes 50ppb in a certain weather condition, but in galleries, it was 1/10 or less than that of the outdoor air. Moreover, H_2S is not detected in storages. S intensity on Ag test piece in storages was 1/20 that of outdoor air. Furthermore, Ag_2S and AgCl generated by volcanic gas were not detected in storages. That is to say, the indoor H_2S concentration was very low compared with that of outside. These results reveals that the efficiency of the selected chemical air filter is effective in eliminating the outdoor volcanic gases and that re-installation of an appropriate chemical air filter is necessary to maintain good quality of indoor air in the Pola Museum of Art.

* Pola Museum of Art