

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

# 柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

重大事故等対処設備について  
(補足説明資料)

平成29年1月

東京電力ホールディングス株式会社

59-11

原子炉制御室の居住性に係る被ばく評価について

## 目 次

1. 中央制御室の居住性（設計基準事故）に係る被ばく評価について	26 条-別添 2-1-1
1.1 大気中への放出量の評価	26 条-別添 2-1-1
1.2 大気拡散の評価	26 条-別添 2-1-1
1.3 建屋内の放射性物質からのガンマ線の評価	26 条-別添 2-1-1
1.4 中央制御室の居住性に係る被ばく評価	26 条-別添 2-1-1
1.4.1 中央制御室内での被ばく	26 条-別添 2-1-2
1.4.1.1 建屋内の放射性物質からのガンマ線による中央制御室内での被ばく（経路①）	26 条-別添 2-1-2
1.4.1.2 大気中へ放出された放射性物質のガンマ線による中央制御室内での被ばく（経路②）	26 条-別添 2-1-2
1.4.1.3 室内に外気から取り込まれた放射性物質による中央制御室内での被ばく（経路③）	26 条-別添 2-1-4
1.4.2 入退域時の被ばく	26 条-別添 2-1-4
1.4.2.1 建屋内の放射性物質からのガンマ線による入退域時の被ばく（経路④）	26 条-別添 2-1-4
1.4.2.2 大気中へ放出された放射性物質による入退域時の被ばく（経路⑤）	26 条-別添 2-1-4
1.5 評価結果のまとめ	26 条-別添 2-1-5
2. 中央制御室の居住性（重大事故）に係る被ばく評価について	59-11-2-1
2.1 評価事象	59-11-2-1
2.2 大気中への放出量の評価	59-11-2-2
2.3 大気拡散の評価	59-11-2-2
2.4 原子炉建屋内の放射性物質からのガンマ線の評価	59-11-2-2
2.5 中央制御室の居住性に係る被ばく評価	59-11-2-2
2.5.1 中央制御室内での被ばく	59-11-2-3
2.5.1.1 原子炉建屋内等の放射性物質からのガンマ線による被ばく（経路①）	59-11-2-3
2.5.1.2 大気中へ放出された放射性物質のガンマ線による被ばく（経路②，③）	59-11-2-3
2.5.1.3 室内に外気から取り込まれた放射性物質による被ばく（経路④）	59-11-2-4
2.5.2 入退域時の被ばく	59-11-2-10
2.5.2.1 原子炉建屋内等の放射性物質からのガンマ線による被ばく（経路⑤）	59-11-2-10
2.5.2.2 大気中へ放出された放射性物質による被ばく（経路⑥，⑦，⑧）	59-11-2-10
2.6 評価結果まとめ	59-11-2-11

添付資料1 中央制御室の居住性（設計基準事故）に係る被ばく評価について	26 条-別添 2-添 1-1-1
1-1 中央制御室の居住性（設計基準事故）に係る被ばく評価条件表・・・	26 条-別添 2-添 1-1-1
1-2 居住性評価に用いた気象資料の代表性について・・・・・・・・・・	26 条-別添 2-添 1-2-1
1-3 空気流入率試験結果について・・・・・・・・・・	26 条-別添 2-添 1-3-1
1-4 運転員の交替について・・・・・・・・・・	26 条-別添 2-添 1-4-1
1-5 内規 <sup>※1</sup> との整合性について・・・・・・・・・・	26 条-別添 2-添 1-5-1
添付資料2 中央制御室の居住性（重大事故対策）に係る被ばく評価について	59-11-添 2-1-1
2-1 中央制御室の居住性（重大事故対策）に係る被ばく評価条件表・・・	59-11-添 2-1-1
2-2 事象の選定の考え方について・・・・・・・・・・	59-11-添 2-2-1
2-3 核分裂生成物の格納容器外への放出割合の設定について・・・・・・・・	59-11-添 2-3-1
2-4 無機よう素のスプレイによる除去効果について・・・・・・・・・・	59-11-添 2-4-1
2-5 中央制御室の居住性評価に用いる大気拡散評価について・・・・・・・・	59-11-添 2-5-1
2-6 地表面への沈着速度の設定について・・・・・・・・・・	59-11-添 2-6-1
2-7 エアロゾルの乾性沈着速度について・・・・・・・・・・	59-11-添 2-7-1
2-8 グランドシャイン線評価モデルについて・・・・・・・・・・	59-11-添 2-8-1
2-9 入退域時のよう素フィルタ内放射性物質からの被ばく評価モデルにつ いて・・・・・・・・・・	59-11-添 2-9-1
2-10 運転員の勤務形態について・・・・・・・・・・	59-11-添 2-10-1
2-11 原子炉建屋から大気中に放射性物質が放出された場合の影響について	59-11-添 2-11-1
2-12 原子炉建屋から大気中への放射性物質の漏えい率の設定について・・	59-11-添 2-12-1
2-13 格納容器内pH制御の効果に期待することによる影響について・・・	59-11-添 2-13-1
2-14 マスクによる防護係数について・・・・・・・・・・	59-11-添 2-14-1
2-15 格納容器ベントを非同時に実施する場合の影響について・・・・・・・・	59-11-添 2-15-1
2-16 格納容器ベントを同時に実施する場合の影響について・・・・・・・・	59-11-添 2-16-1
2-17 原子炉格納容器の漏えい孔におけるエアロゾル粒子の捕集係数 について・・・・・・・・・・	59-11-添 2-17-1
2-18 審査ガイド <sup>※2</sup> への適合状況について・・・・・・・・・・	59-11-添 2-18-1

(※1) 原子力発電所中央制御室の居住性に係る被ばく評価手法について  
（内規）

(※2) 実用発電用原子炉に係る重大事故時の制御室及び緊急時対策所  
の居住性に係る被ばく評価に関する審査ガイド

: 今回ご説明・ご回答  
する対象範囲

## 2-17 原子炉格納容器の漏えい孔におけるエアロゾル粒子の捕集係数について

原子炉格納容器から原子炉建屋への放射性物質の放出割合は、MAAP コードを用いて評価を行っている。本評価における放射性物質の放出割合は、希ガス等の気体に対するものであり、エアロゾル粒子が漏えい孔<sup>※1</sup>で捕集される効果は考慮されていない。これにより、MAAP コードでの評価におけるエアロゾル粒子の漏えい量については、実現象より多く評価されていると考えられる。

このため、中央制御室の居住性評価及び有効性評価の放射性物質漏えい量の評価<sup>※2</sup>において、原子炉格納容器の漏えい孔におけるエアロゾル粒子の捕集係数として DF=450 を採用し、評価を行っている。

ここでは、原子炉格納容器の漏えい孔におけるエアロゾル粒子の捕集係数の考え方について纏める。

- ※1 格納容器から原子炉建屋への漏えい経路（リークパス）について、MAAP では、相当する漏えい面積を持つ漏えい孔としてモデル化している
- ※2 有効性評価における原子炉建屋から大気中への放射性物質の漏えい量について（添付資料 3.1.2.5, 添付資料 3.1.3.4, 添付資料 3.2.3）

### 1. 漏えい孔におけるエアロゾル粒子の捕集係数に関する実験

原子炉格納容器から原子炉建屋へのエアロゾル粒子の漏えいは、格納容器フランジのシール部や電気配線貫通部のシール部においてシビアアクシデント条件下で漏えい孔が生じ、これを主たる経路として発生すると考えられる。漏えい孔は非常に狭く複雑な形状を示すことから、エアロゾル粒子がシール部を通過する際に捕集する効果が期待される。本事象は、下記に示す実験結果により実際に確認されている。

#### (1) 実験概要

格納容器の漏えい経路におけるエアロゾル粒子の捕集係数については、「シビアアクシデント時の格納容器貫通部リークパスでの FP エアロゾル捕集効果（Ⅱ）貫通部での除染係数と実機への適用」（渡部氏（Japan Nuclear Energy Safety Organization）、山田氏、大崎氏（Toshiba Corporation） 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 8, No. 4, p. 332-343 2009 年）（出典 1）に実験結果が纏められている。

この実験では、シビアアクシデント条件下での格納容器シール部の漏えい経路におけるエアロゾルの捕集特性を評価するために、試験体（電気配線貫通部及びフランジガスケッ

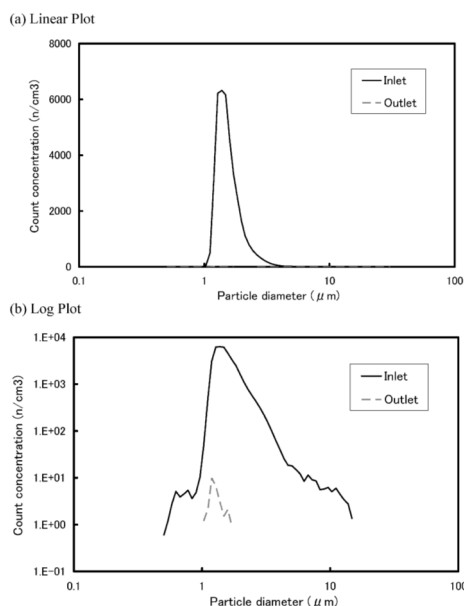
ト) に対しエアロゾルを供給し、入口及び出口のエアロゾル濃度等を測定することで捕集特性を確認している。実験条件は表 2-17-1、図 2-17-1 に示すとおりであり、中央制御室居住性評価及び有効性評価で想定する格納容器内条件は実験条件に概ね包含されるため、本実験の結果は、当該評価に対しても適用可能であると考えられる。実験装置の概略図を図 2-17-2 に示す。

表 2-17-1 実験条件と柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号炉の重大事故等時の条件の比較

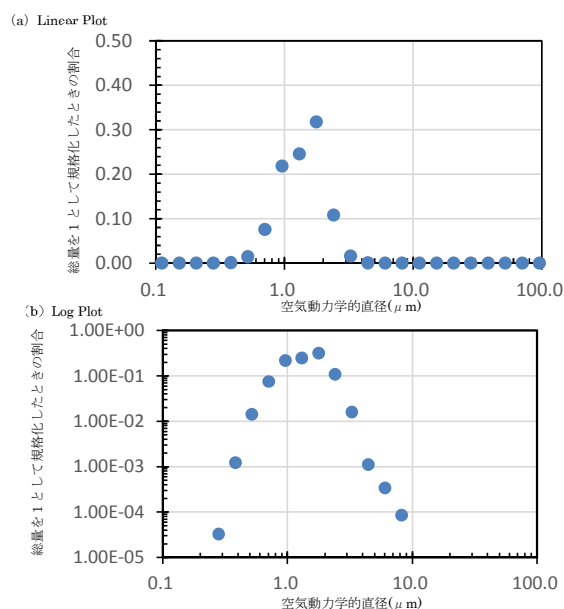
	文献（出典 1）における 実験条件	柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号 炉の重大事故等時の条件	備考
エアロゾル濃度	10~300 mg/m <sup>3</sup> (CsI)	約 100 mg/m <sup>3</sup>	MAAP 評価より
エアロゾル粒径	1~2 μm (CsI)	約 1 μm (空気動学的直径 エアロ ゾル個数濃度に対する粒径分 布の中央値)	図 2-17-1 にてエア ロゾル個数濃度に対 する粒径分布を比 較
環境条件	温度：100~200℃ <sup>※1</sup> 圧力：0.11~0.6MPa (ドライ条件) <sup>※2</sup>	温度：200℃以下 圧力：0.62 MPa 以下 (2Pd) (ウェット条件) <sup>※2</sup>	原子炉格納容器 限界温度・限界圧 力より設定

※1 貫通部のシール機能が健全な場合においてはエアロゾルが漏えいしないため、試験体を最大約 270~350℃の環境で約 20~40 時間暴露し、リークを発生させた後で温度を低下させて実験を実施している

※2 参考にした文献（出典 1）での実験条件ではエアロゾル粒子のサンプリング測定中の水蒸気凝縮による測定誤差を避けるためにドライ条件を用いている



(a) 実験条件での一例  
(電気ベネでの入口及び出口のエアロゾル粒径分布  
(個数濃度))



(b) 柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号炉での一例  
(格納容器過圧過温破損 (代替循環冷却を使用しない場合) での  
ベント直後のエアロゾル粒径分布 (個数濃度))

図 2-17-1 実験条件と柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号炉の条件とのエアロゾル粒径の比較

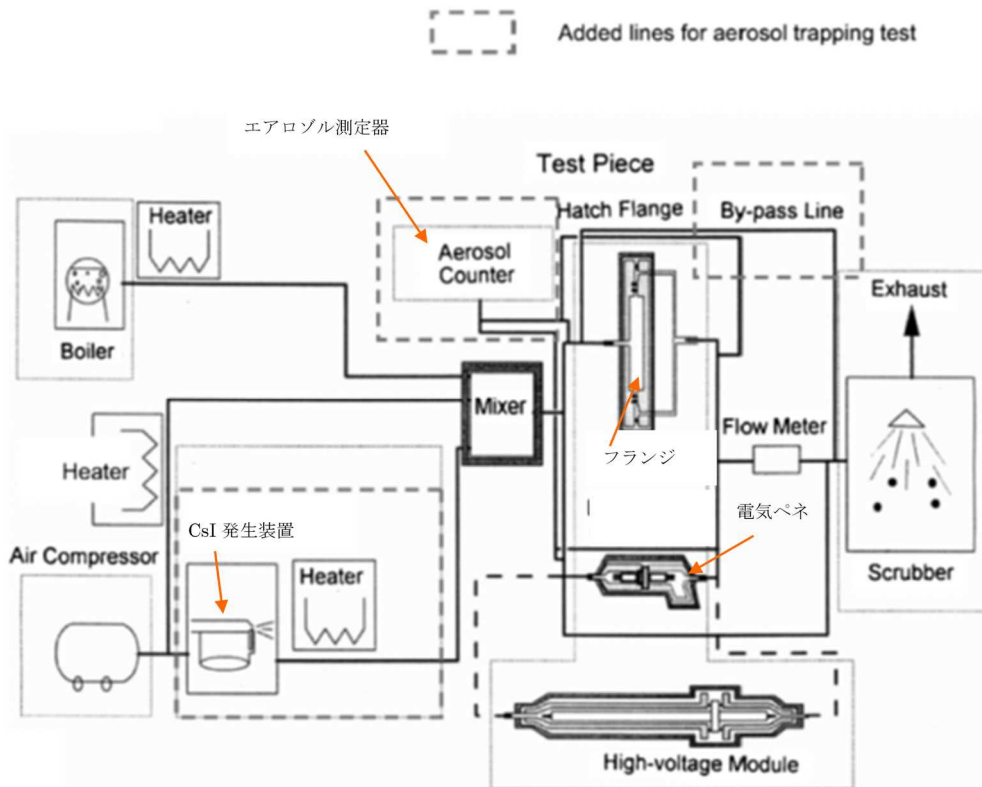


図 2-17-2 試験装置概略図（出典 1）

## (2) 実験結果

電気配線貫通部（低電圧モジュール）及びフランジガスケットにおける，入口及び出口のエアロゾル個数濃度，漏えいガス（空気）流量の経時変化，入口及び出口のエアロゾルの粒径分布の一例を図 2-17-3, 2-17-4 に示す。

これらの結果から捕集係数（入口と出口におけるエアロゾルの質量濃度の比）を算出したところ表 2-17-2 に示すとおりとなった。電気配線貫通部を試験体とした場合の平均の DF は 740，フランジガスケットを試験体とした場合の平均の DF は 14 であった。

また，当該文献において，代表的な実機プラント（BWR）における格納容器貫通部の全リーク面積の評価値，電気ペネとフランジガスケットでの DF を考慮した捕集係数を評価しており，格納容器貫通部全体での代表的な捕集係数 DF（等価面積<sup>\*</sup>に応じて重み付けした DF 値）は 450 程度もしくはそれ以上を期待できるとしている。

※漏えい経路を流れる流量と圧力の測定データを基に理想気体の流量公式を適用して求めた漏えい面積（等価面積）

○代表プラント(BWR)における格納容器貫通部のリーク面積及び想定される捕集係数(DF)

$$DF = DF_1 \times \frac{S_1}{S_1 + S_2} + DF_2 \times \frac{S_2}{S_1 + S_2} \quad \doteq \quad 450$$

ここで,      DF1 : 電気ペネの DF[-] (740)

                 DF2 : フランジガasketの DF[-] (14)

                 S1 : 電気ペネの全等価面積[mm<sup>2</sup>] (1.5×10<sup>3</sup>)

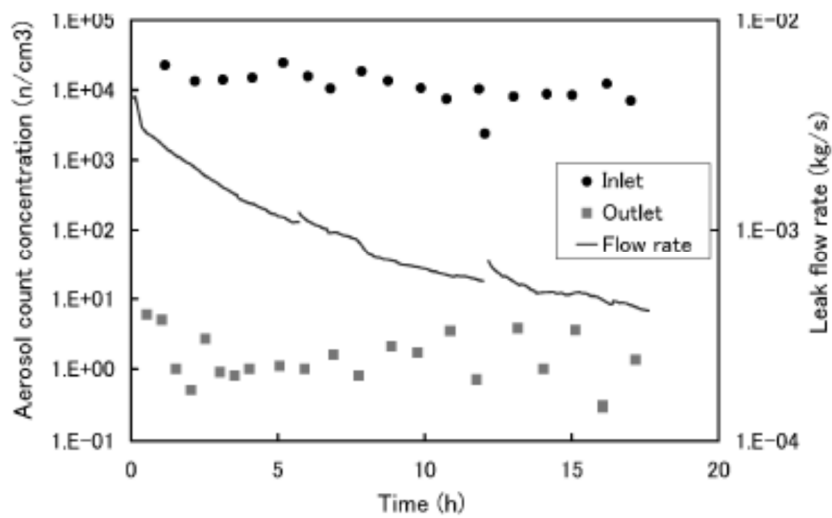
                 S2 : フランジガasketの全等価面積[mm<sup>2</sup>] (1.0×10<sup>3</sup>)

出典1では代表プラントの電気ペネ(低電圧モジュール)のUnit数を250, フランジガasketの総周長を70mとしており, 各全等価面積は以下のとおりである。

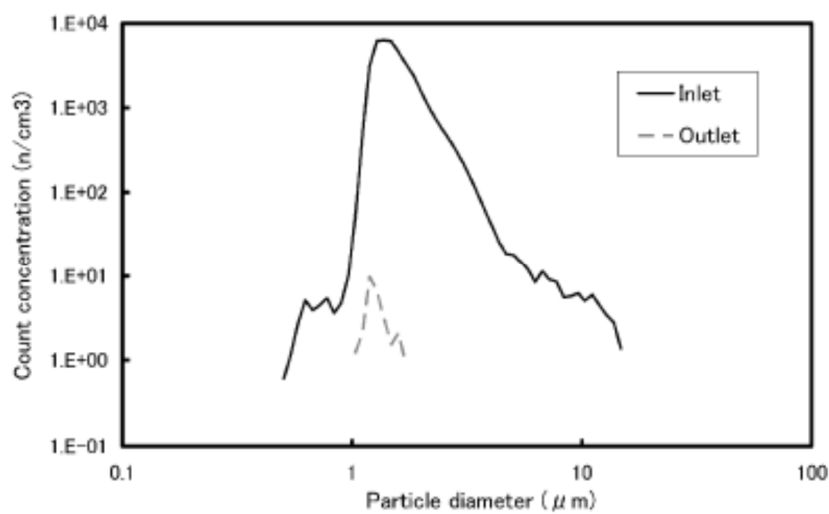
$$S1 = 6 \text{ [mm}^2/\text{unit}] \times 250 \text{ [unit]} = 1.5\text{E}+03 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$S2 = 13 \text{ [mm}^2/\text{m}] \times 70 \text{ [m]} \quad \doteq \quad 1.0\text{E}+03 \text{ [mm}^2\text{]}$$



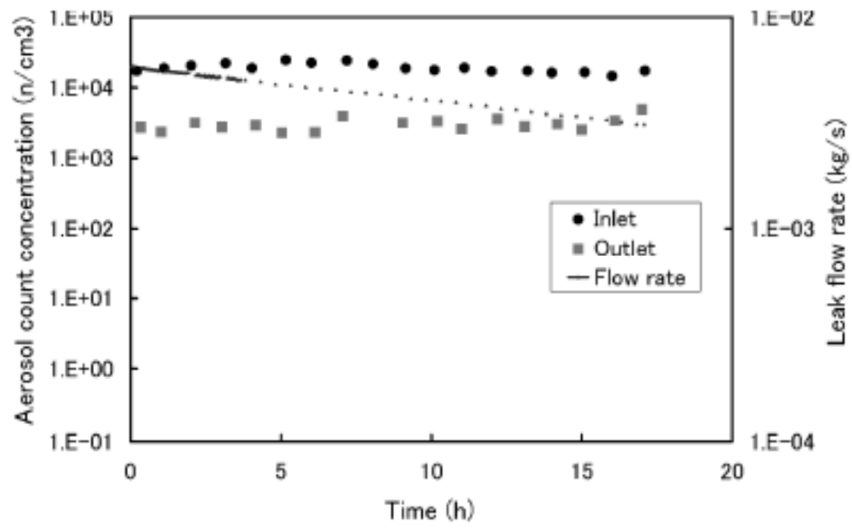


(a) エアロゾル個数濃度，漏えいガス（空気）流量の経時変化の例

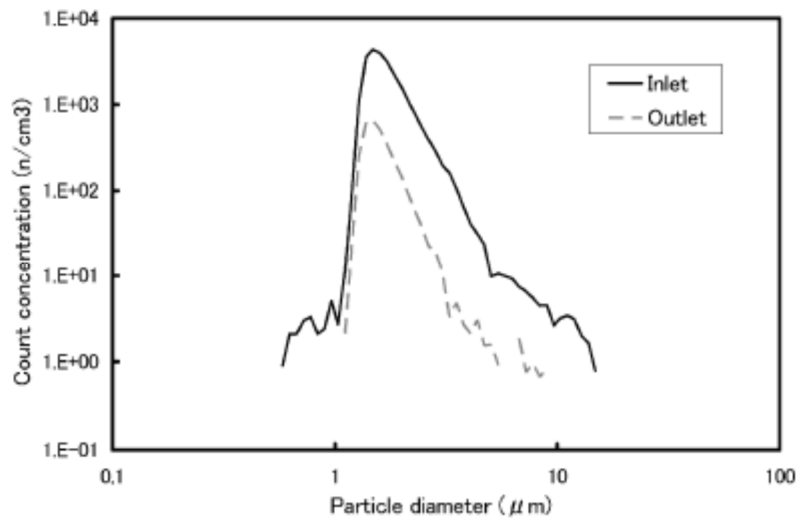


(b) 入口及び 出口のエアロゾルの粒径分布の例

図 2-17-3 エアロゾル個数濃度，漏えいガス（空気）流量の経時変化，  
入口及び 出口のエアロゾルの粒径分布(電気ペネの一例) (出典 1)



(a) エアロゾル個数濃度，漏えいガス（空気）流量の経時変化の例



(b) 入口及び 出口のエアロゾルの粒径分布の例

図 2-17-4 エアロゾル個数濃度，漏えいガス（空気）流量の経時変化，  
入口及び 出口のエアロゾルの粒径分布(フランジガセットの一例) (出典 1)

表 2-17-2 実験により得られた除去効率 (DF) (出典 1)

Test piece	Overall DF (-) (0.5~5 $\mu\text{m}$ )
Low voltage module	
0.9 mm <sup>2</sup> (a)	36,000*
0.9 mm <sup>2</sup> (b)	1,300
0.9 mm <sup>2</sup> (c)	700
0.9 mm <sup>2</sup> (d)	2,100
0.9 mm <sup>2</sup> (T/C) (a)	260
0.9 mm <sup>2</sup> (T/C) (b)	160
Coaxial cable	340
100 mm <sup>2</sup>	340
2 mm <sup>2</sup>	26**
-----	
Average	4,500
Average <sup>a)</sup>	740
-----	
Flange gasket	
Semi-round gasket (a)	14
Semi-round gasket (c)	10
Semi-round gasket (d)	14
Semi-round gasket (e)	12
Groove & tongue gasket	18
-----	
Average	14

<sup>a)</sup> Except for both maximum value (\*) and minimum value (\*\*).

## 2. エアロゾル粒子の捕集係数に「DF=450」を用いることの妥当性

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の中央制御室の居住性評価及び有効性評価の放射性物質漏えい量の評価において、漏えい経路でのエアロゾル粒子の捕集効率（DF）に450を採用している。上記の実験結果を踏まえ、この妥当性を下記のとおり評価した。

### ○柏崎刈羽原子力発電所のシール部における想定捕集効率の算出

柏崎刈羽原子力発電所7号炉において、上記実験における評価手法と同様に、電気配線貫通部やフランジガスケットの数量、周長さをを用いてDFを求めたところ、以下のとおりとなった。

$$DF = DF_1 \times \frac{S_1}{S_1 + S_2} + DF_2 \times \frac{S_2}{S_1 + S_2} = 455$$

ここで、 $DF_1$ ：電気ペネのDF[-] (740)

$DF_2$ ：フランジガスケットのDF[-] (14)

$S_1$ ：電気ペネの全等価面積

$S_2$ ：フランジガスケットの全等価面積

※  $S_1$ 及び $S_2$ は

より求めた。

### ○実験条件と柏崎刈羽原子力発電所の実機条件の比較

実験条件を示す表2-17-1に加え、実験条件と柏崎刈羽原子力発電所6、7号炉の条件を比較すると、表2-17-3のとおりとなる。

表 2-17-3 参考にした文献（出典 1）での試験条件及び柏崎刈羽原子力発電所のプラント条件、重大事故等時条件の比較

	文献（出典 1）における 実験条件	柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号炉の重大事故等時の条件	備考
エアロゾル 濃度（再掲）	10～300 mg/m <sup>3</sup> (CsI)	約 100 mg/m <sup>3</sup>	MAAP 評価より
エアロゾル 粒径（再掲）	1～2 μm (CsI)	約 1 μm (空気動学的直径 エアロ ゾル個数濃度に対する粒径分 布の中央値)	図 2-17-1 にてエアロ ゾル個数濃度に対す る粒径分布を比較
環境条件 （再掲）	温度：100～200℃※ <sup>1</sup> 圧力：0.11～0.60MPa (ドライ条件) ※ <sup>2</sup>	温度：200℃以下 圧力：0.62 MPa 以下 (2Pd) (ウェット条件) ※ <sup>2</sup>	原子炉格納容器限界 温度・限界圧力より 設定
シール材の 材質	<ul style="list-style-type: none"> <li>電気配線貫通部： エチレンプロピレン樹脂 及びエポキシ樹脂</li> <li>フランジガスケット： シリコン</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>電気配線貫通部： エチレンプロピレン樹脂， エポキシ樹脂，メタルリン グ等※<sup>3</sup></li> <li>フランジガスケット： 改良 E P D M (内側，外側) (バックアップシール材の 追加) ※<sup>3</sup></li> <li>弁シート等： 改良 E P D M (改良エチレ ンプロピレンゴム)，メタ ルリング等※<sup>3</sup></li> </ul>	6, 7 号炉におい て， トップペットフラン ジ，機器ハッチ，エア ロック等のガスケッ トはシリコン系から より漏えい率の観点 で事故時の耐高温及 び放射線環境下に優 れた改良 E P D M に 変更
実機のプラントに適用した場合の想定される捕集係数 (DF)	450 程度 (代表的な BWR 実機 プラント想定)	約 455 (柏崎刈羽原子力発電所 7 号炉における想定)	

※1 貫通部のシール機能が健全な場合においてはエアロゾルが漏えいしないため、試験体を最大約 270～350℃の環境で約 20～40 時間暴露し、リークを発生させた後で温度を低下させて実験を実施している

※2 参考にした文献（出典 1）での実験条件ではエアロゾル粒子のサンプリング測定中の水蒸気凝縮による測定誤差を避けるためにドライ条件を用いている

※3 詳細については「有効性評価 付録 2 原子炉格納容器限界温度・限界圧力に関する評価結果」を参照

#### ○捕集効率「DF=450」の妥当性

表 2-17-3 に示すとおり、実験条件と柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉での評価条件を比較したところ、フランジガスケットを除き、実機条件は実験条件と同等であることを確認した。

格納容器から原子炉建屋への漏えい経路において、フランジシール部のガスケットに期待される捕集効率は DF=14 であり、従来の条件においては、高い捕集効率を見込むことはできない。しかし、柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉では、福島事故の知見を踏まえ、トップヘッドフランジ、上部及び下部ドライウェル機器搬出入口等のハッチ類等について改良 E P D M を使用したシール材への交換、バックアップシール材の追加を実施する

こととしている。このため、これらのフランジシール部については、従来よりも長期に亘り、高温条件下においてシール性能を維持することができると考えられる。また、重大事故等時において、フランジシール部を含む全ての格納容器シール部は 200°C、2 Pd の環境下で機能を維持できることを確認している。このため、格納容器シール部はシール機能を喪失することなく、出典 1 での実験で確認するような漏えい経路の発生及びエアロゾル粒子の漏えいには至らないことが考えられる。

一方、シール材の変更等を行わない電気配線貫通部について、この場所からの漏えいが生じた場合には、捕集効率としては DF=740 程度を期待することができる。このため、万が一、電気配線貫通部からの漏えいを想定しても、格納容器貫通部全体での代表的な捕集係数 DF である 450 程度を考慮することは、十分な妥当性があるものと考えられる。

#### 4. まとめ

これらのことから、中央制御室の居住性評価及び有効性評価の放射性物質漏えい量の評価において、MAAP コードでモデル化した格納容器の漏えい孔におけるエアロゾル粒子の捕集係数を 450 としていることは、妥当であると評価できる。

#### <参考文献>

- 出典 1：シビアアクシデント時の格納容器貫通部リークパスでの FP エアロゾル捕集効果  
(Ⅱ) 貫通部での除染係数と実機への適用」(渡部氏 (Japan Nuclear Energy Safety Organization), 山田氏, 大崎氏 (Toshiba Corporation) 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 8, No. 4, p. 332-343 2009 年)
- 出典 2：シビアアクシデント時の格納容器貫通部リークパスでの FP エアロゾル捕集効果  
(Ⅰ) 貫通部の損傷クライテリア (渡部氏 (Japan Nuclear Energy Safety Organization), 山田氏, 大崎氏 (Toshiba Corporation) 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 8, No. 3, p. 254-263 2009 年)
- 出典 3：“Leakage of aerosols from containment buildings, ” H. A. Morewitz, Health Phys., 42[2], 195-207 (1982).

<補足>

○希ガス等の漏えいについて

シール材の劣化等による微少な漏えいを想定した場合も、発生する漏えい経路は非常に狭いものとなるため、水蒸気、希ガス等の気体の分子 (nm オーダー\*) に比べ粒径が大きなエアロゾル粒子 ( $\mu\text{m}$  オーダー) はほぼ漏えいしないと考えられる。

○漏えい経路の大きさと除去効率について

実験の結果から、時間の経過とともに漏えいガス (空気) 流量が低下することが確認できる (この閉塞の効果は出典 3 でも確認されている)。これに対してエアロゾル粒子の捕集係数 (DF) は時間に依存せず、ほぼ一定であった。また、粒径の分布において径が大きな粒子は小さな粒子に比べて選択的に捕集されていることが分かる。

また、漏えい経路の大きさと除去効率の関係を図 2-17-補 1 に示す。横軸は試験体の等価リーク面積、縦軸は除去効率である。ここで、等価リーク面積は、試験体に空気を供給したときの流量と圧力の測定結果から以下の式 (出典 2) にて得られる面積であり、複雑な流路形状を持つ漏えい経路の圧力損失の効果が含まれている。

$$Ae = \frac{m \cdot \sqrt{R \cdot T_0}}{P_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \left\{ \left( \frac{P_b}{P_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_b}{P_0} \right)^{\frac{(\gamma + 1)}{\gamma}} \right\}}}$$

$m$  : 質量流量 (kg/s)     $Ae$  : 等価リーク面積 ( $\text{m}^2$ )  
 $P_0$  : 1 次側圧力 (Pa)     $P_b$  : 2 次側圧力 (大気圧) (Pa)  
 $\gamma$  : 比熱比 (-)     $T_0$  : 1 次側温度 (K)  
 $R$  : 空気のガス定数 (287 J/kgK)

図 2-17-補 1 より、等価リーク面積と除去効率の間には顕著な相関関係が得られていないため、当該文献中では、実機の適用に当たっては、各貫通部に前述の平均の除去効率を採用するものとしている。

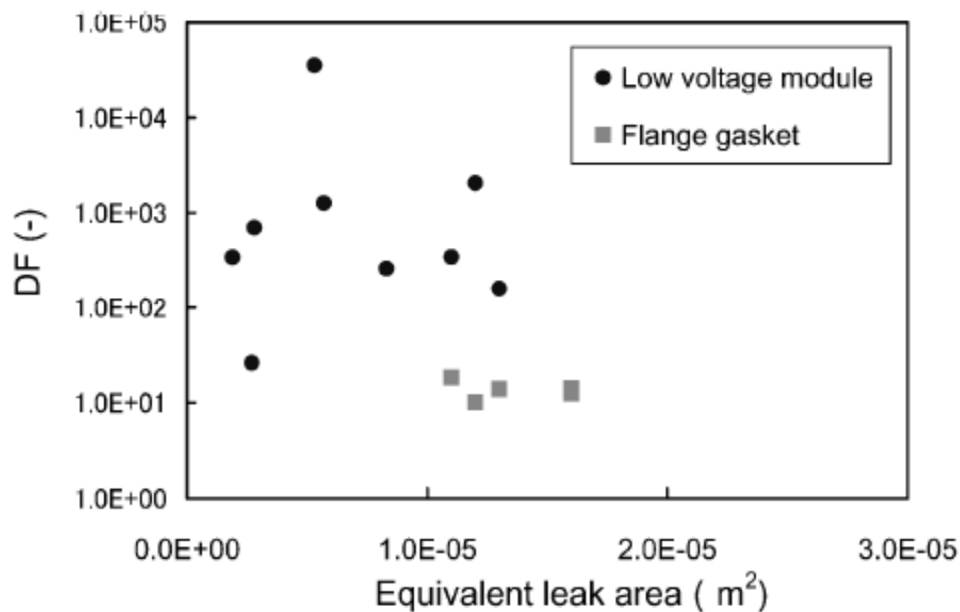


図 2-17-補 1 漏えい経路の大きさと除去効率の関係 (出典 1)

○試験条件について

参考にした文献 (出典 1) での実験条件ではエアロゾル粒子のサンプリング測定中の水蒸気凝縮による測定誤差を避けるためにドライ条件を用いている。一方、重大事故等の環境としてはウェット条件を想定しており、この差異の影響は、下記のとおり非常に小さいと考えられる。

・エアロゾル粒子の成長等：

ウェット条件下ではエアロゾルの粒子の成長過程の内、凝集・凝縮効果が促進される。この効果により高い捕集効果が期待できると考えられる。

・有機シール材の劣化：

ウェット条件下では水蒸気酸化による劣化が考えられ、ドライ条件下よりシール材の水蒸気酸化が進むことが懸念される。ただし、「有効性評価 付録 2 原子炉格納容器限界温度・限界圧力に関する評価結果」に示すように蒸気暴露含め、過酷な重大事故等時の環境条件下においても必要な期間、必要なシール性能を維持できることを確認しており、高温での改良 EPDM 材の劣化は一般的に酸素により引き起こされるという知見もあるため、この影響がエアロゾル粒子の捕集効果に与える影響は小さいと考えられる。