

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号炉審査資料	
資料番号	KK67-0036 改28
提出年月日	平成29年1月31日

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

重大事故等対策の有効性評価について
(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 ^{*1} 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 ^{*2} 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^{※1}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、実現象より大き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^{※2}において、**公開文献^{※3}より**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）

※3 「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）

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、**上記の文献（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（以下、電気ペネという）及びフランジガasket）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 に示すとおりである。実験装置の概略図を図 2-17-1 に示す。

表 2-17-1 文献（出典 1）における実験条件

文献（出典 1）における実験条件	
試験を実施した対象	電気配線貫通部 フランジガスケット
シール材の材質	・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 ・フランジガスケット：シリコンゴム
エアロゾル濃度	10～300 mg/m ³ (CsI)
エアロゾル粒径	1～2 μm (CsI)
環境条件	温度：100～200℃※ ¹ 圧力：0.11～0.60MPa (ドライ条件) ※ ²

※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れいしないため、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

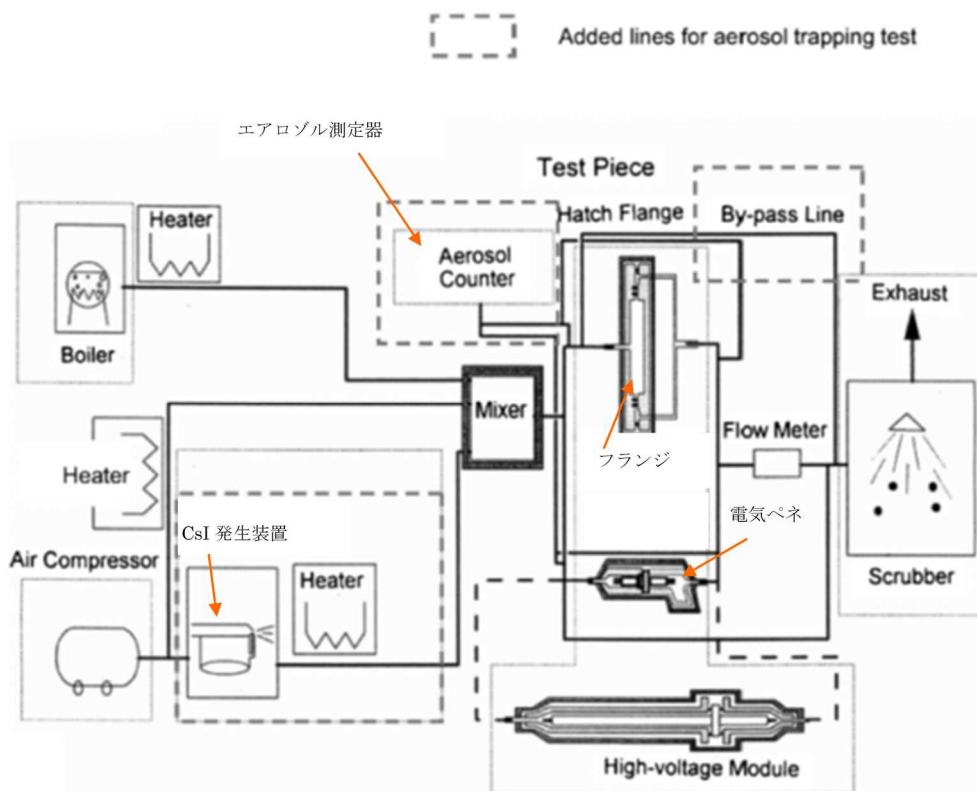


図 2-17-1 試験装置概略図（出典 1）

(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 2-17-2, 2-17-3 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※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：フランジガスケットの DF[-]（14）

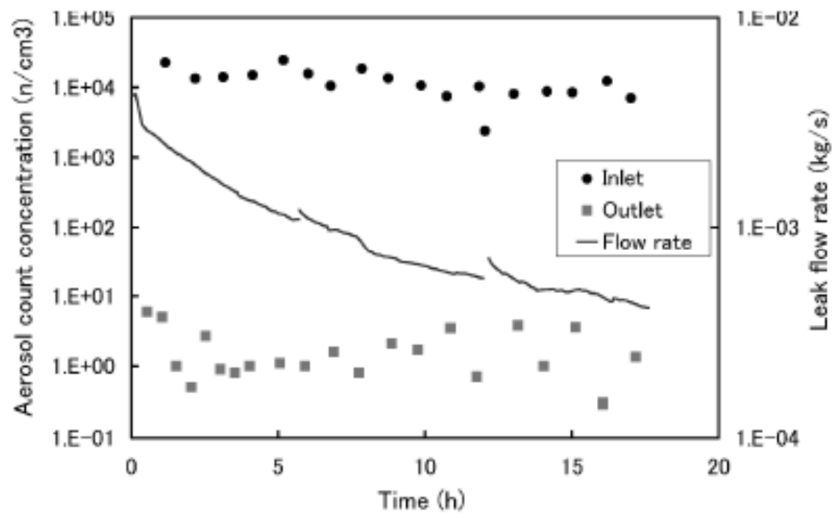
S1：電気ペネの全等価面積[mm²]（1.5×10³）

S2：フランジガスケットの全等価面積[mm²]（1.0×10³）

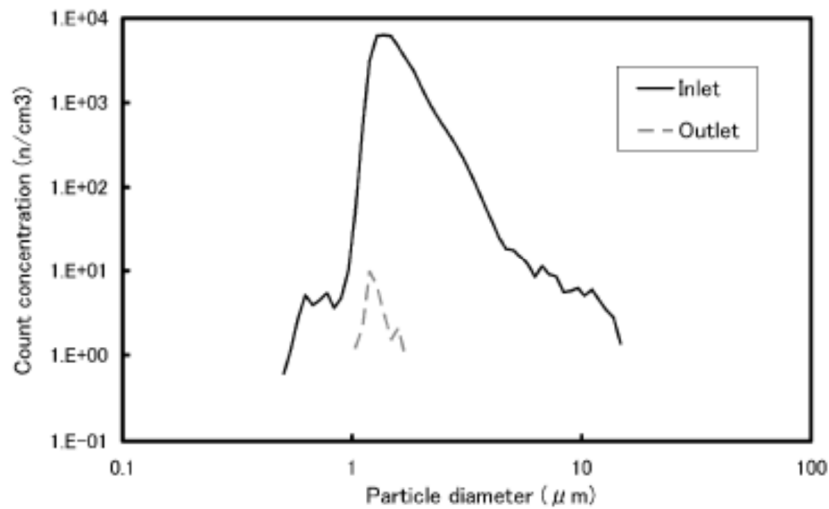
出典 1 では代表プラントの電気ペネ（低電圧モジュール）の Unit 数を 250，フランジガスケットの総周長を 70m としており，各全等価面積は以下のとおりである。

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

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

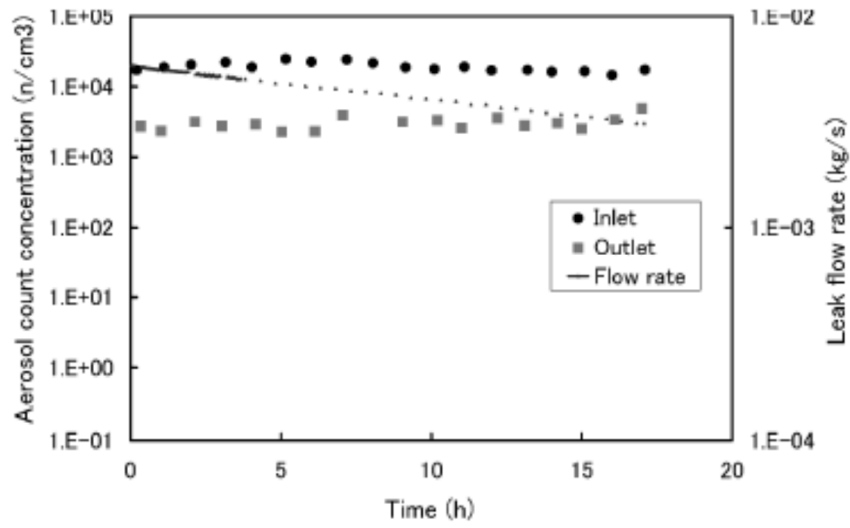


(a) エアロゾル個数濃度，漏えいガス（空気）流量の経時変化の例

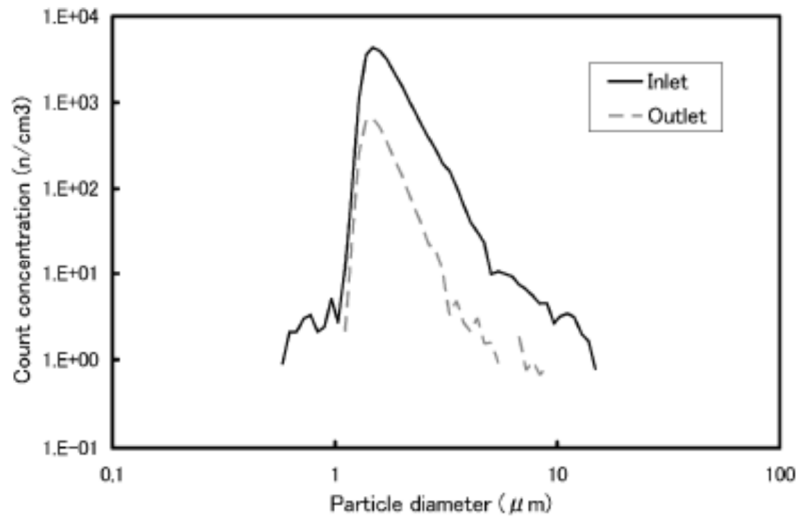


(b) 入口及び 出口のエアロゾルの粒径分布の例

図 2-17-2 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 2-17-3 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(フランジガasket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 μm)
Low voltage module	
0.9 mm ² (a)	36,000*
0.9 mm ² (b)	1,300
0.9 mm ² (c)	700
0.9 mm ² (d)	2,100
0.9 mm ² (T/C) (a)	260
0.9 mm ² (T/C) (b)	160
Coaxial cable	340
100 mm ²	340
2 mm ²	26**

Average	4,500
Average ^{a)}	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

^{a)} 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

文献（出典1）での試験条件と、柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉のプラント条件、重大事故等時条件を比較し、文献のエアロゾル粒子の捕集係数を用いることの妥当性について確認した。

比較の結果を表2-17-3にまとめ、詳細の考察を実施する必要がある条件（漏えいを想定する対象、エアロゾル粒径、シール材の材質、環境条件（シール材の劣化状態）、格納容器貫通部全体での代表的な捕集係数（DF））については2.1～2.4にて検討した。

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（1/2）

	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条件	比較結果・考察
漏えいを想定する対象	電気配線貫通部 フランジガスケット	PCV バウンダリとして 電気配線貫通部 フランジガスケット 隔離弁等がある	PCV バウンダリは実験で対象としているシール部以外にも存在するため、下記の記載箇所にて詳細の考察を実施 ・【2.1 原子炉格納容器バウンダリとエアロゾル粒子の捕集係数を考慮する上での取り扱い】
エアロゾル濃度	10～300 mg/m ³ (CsI)	約 100 mg/m ³	重大事故等で想定する条件は文献における実験条件での範囲に含まれる
エアロゾル粒径	1～2 μm (CsI)	約 1～8 μm (空気動学的直径のエアロゾル重量濃度に対する粒径分布の最頻値(MAAP 評価値))	実験で用いた粒径分布と重大事故等で想定する粒径分布が異なるため、下記の記載箇所にて詳細の考察を実施 ・【2.2 エアロゾル粒径に対する考察】にて説明
シール材の材質	・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 ・フランジガスケット： シリコンゴム	・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Oリング等 ^{※2※3} ・フランジガスケット： 改良EPDM（内側、 外側）（バックアップ シール材の追加） ^{※2}	実験で用いたシール材と柏崎刈羽原子力発電所6, 7号炉で用いているシール材は異なるため、下記の記載箇所にて詳細の考察を実施 ・【2.3 シール材に対する考察】にて説明

※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 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

※3 金属であるため、長時間の放射線、高温環境の暴露によってシール機能（バウンダリ機能）が劣化するものではない

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（2 / 2）

	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	比較結果・考察
環境条件	温度：100～200℃ <small>※1</small> 圧力：0.11～0.60MPa （ドライ条件） <small>※4</small>	温度：200℃以下 圧力：0.62 MPa 以下 (2Pd) （ウェット条件） <small>※4</small>	重大事故等で想定する温度・圧力について文献における測定時の条件とほぼ同等である 但し、実験に用いたシール材は最大約 270～350℃の環境で暴露し、漏えいが発生したものを用いているため、この暴露環境等の差による劣化状態の比較を下記の記載箇所にて考察する ・【2.4 シール材の劣化状態の考察】 蒸気環境について、重大事故等で想定するウェット条件では水蒸気による劣化（加水分解）の影響を受けるものの、蒸気により空気中の酸素量が少なくなるため、シール材の劣化が抑制されると考えられる。さらに、ウェット条件では漏えい経路での水蒸気凝縮、エアロゾル粒子の凝集・凝縮効果に期待できる。そのため、実験条件（ドライ条件）に比べて重大事故等で想定する条件（ウェット条件）の方がエアロゾル粒子の捕集係数が大きくなると考えられる
格納容器貫通部全体での代表的な捕集係数（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）	文献にて用いている代表的な BWR 実機プラント想定のパラメータと柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号炉でのパラメータは同一ではないため、その影響を下記の記載箇所にて確認 ・【2.5 格納容器貫通部全体での代表的な捕集係数（DF）】にて説明

※4 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

2.1 原子炉格納容器バウンダリとエアロゾル粒子の捕集係数を考慮する上での取り扱い

原子炉格納容器バウンダリを漏えい経路となる可能性の観点で整理した結果は表 2-17-4 に示す通りであり、バウンダリの健全性が維持出来なければ漏えい経路となりうる。本文献の試験・分析の対象は電気ペネ（低電圧モジュール）及びフランジガスケットであり、それ以外の原子炉格納容器バウンダリの取り扱いについて文献内ですべて整理されているものではない。そのため、エアロゾル粒子の捕集係数を検討する上で試験・分析を行う対象が電気ペネ（低電圧モジュール）及びフランジガスケットのみで十分かについて、考察を加え表中で整理した。

その結果、電気ペネ（低電圧モジュール）及びフランジガスケット以外の対象について、重大事故等時の環境での暴露によってもシール機能が劣化するものではない等の整理がされるため、漏えいを想定する対象を電気ペネ（低電圧モジュール）及びフランジガスケットとすることが妥当であることを確認した。

表 2-17-3 原子炉格納容器バウンダリとエアロゾル粒子の捕集係数を考慮する上での取り扱い

対象	エアロゾル粒子の捕集係数を考慮する上での取り扱い	本文献での評価対象
ライナ部	金属であるため、長時間の放射線、高温環境の暴露によってもシール機能（バウンダリ機能）が劣化するものではなく、評価の対象外	
トップヘッドフランジ	福島事故等の知見及び出典 2 の実験結果 ^{※2} を踏まえ、評価対象	○
ハッチ類, エアロック	トップヘッドフランジと同様の整理	△※1
プロセス配管貫通部及び計装用配管貫通部	プロセス配管及び計装用配管貫はライナ部に溶接されており、ライナ部と同様の整理で評価の対象外	
電気ペネ（低電圧モジュール）	出典 2 の実験結果 ^{※2} を踏まえ、評価対象	○
電気ペネ（高電圧モジュール）	出典 2 の実験結果 ^{※3} を踏まえ、評価対象外	
計装用ケーブル貫通部	電気ペネ（高電圧モジュール）と同様の気密要求、遮蔽要求、環境条件設定に基づいた構造としているため、電気ペネ（高電圧モジュール）と同様の整理	
隔離弁	隔離弁は内側と外側の 2 弁あり、仮に内側隔離弁で漏えいが乗した場合も外側隔離弁により漏えいは止められる。 また、漏えいした放射性物質は直接原子炉建屋内、環境中に放出されないため、有意な漏えい経路とならず、評価対象外	

※1 ハッチ類, エアロックはトップヘッドフランジと同等として、代表的な捕集係数 DF の算出において考慮されている

※2 230℃～280℃の高温条件下で暴露した際、漏えいが発生

※3 実験において 400℃の高温条件下で暴露した場合においても漏えいは発生しなかった

2.2 エアロゾル粒径に対する考察

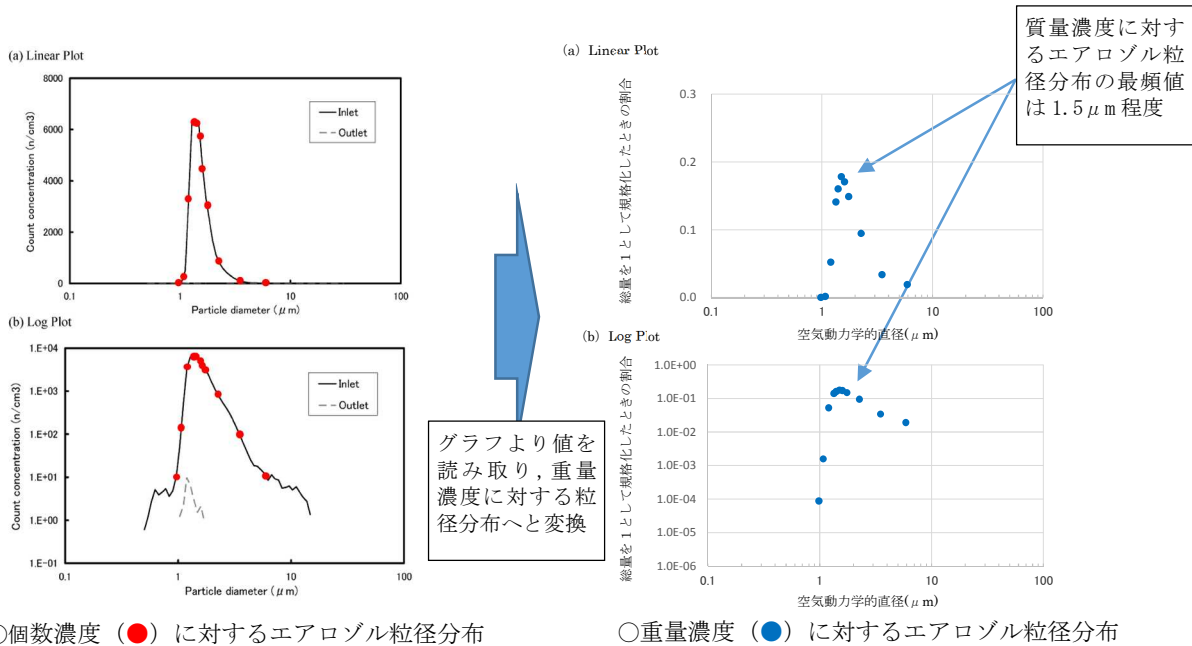
本実験の結果（図 2-17-2(b), 図 2-17-3(b)）の各粒子径に対する入口及び出口のエアロゾルの粒径分布の傾向より、粒径が小さい場合は捕集係数 DF がより小さく、粒径が大きい場合はより捕集係数 DF が大きくなると考えられる。

エアロゾルの粒径分布は事故の状態, 事象進展によっても変化していくものである。MAAP にて評価された格納容器過圧過温破損（代替循環冷却を使用しない場合）を一例として重量濃度^{*}に対する粒径分布を確認すると、格納容器スプレイを実施する前の事象発生約 1 時間後の結果は図 2-17-4(b), 長期間格納容器スプレイを実施した後である事象発生約 38 時間後の結果は図 2-17-4(c)に示すようになる。実験で用いた CsI 発生装置の重量濃度に対する粒径分布は図 2-17-4(a) に示すようになり、その最頻値(約 1.5 μm)と MAAP にて評価された格納容器過圧過温破損（代替循環冷却を使用しない場合）の粒径分布と比較すると、同程度か、MAAP にて評価した格納容器過圧過温破損（代替循環冷却を使用しない場合）の粒径分布の方が最頻値が大きくなる（事象発生約 1 時間後：約 8 μm , 事象発生約 38 時間後：約 1.8 μm ）。

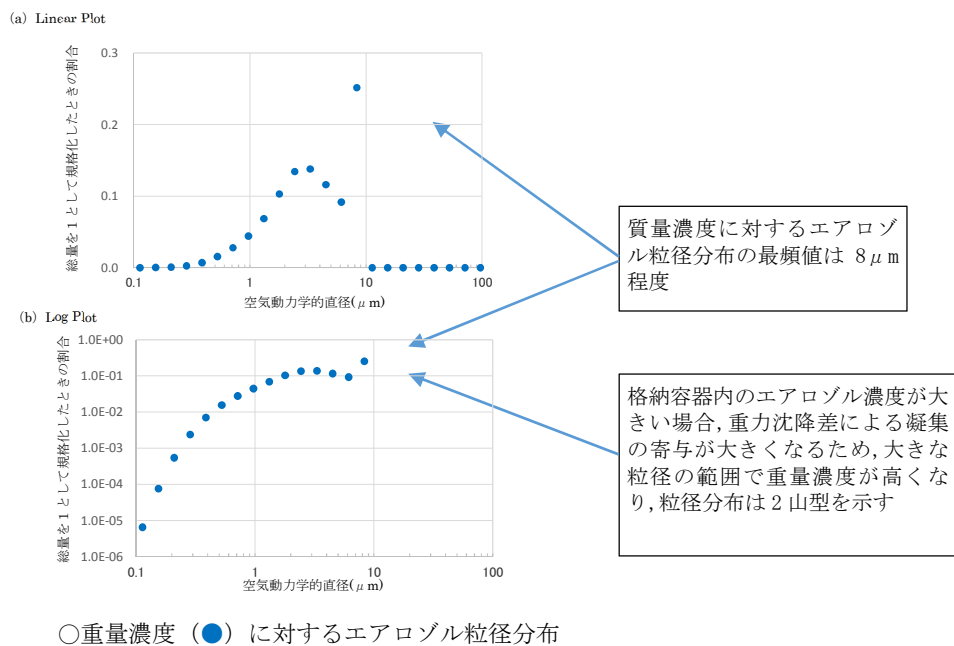
また、格納容器過圧過温破損（代替循環冷却を使用しない場合）のような重大事故等を想定した場合、原子炉格納容器から原子炉建屋へ漏えいするエアロゾル状の放射性物質（CsI, CsOH）の炉内内蔵量に対する割合は図 2-17-5 に示すようになり、粒径が大きなエアロゾル状の放射性物質が多く存在した事象初期が支配的であることが分る。以上より、粒径分布の不確かさの影響はあると考えられるものの、重量濃度に対する粒径分布の最頻値が実験で用いたものより重大事故等での想定の方が大きなことから、その影響に包絡されるものと考えられる。

なお、MAAP コードでの粒径分布については、重大事故等対処設備 3.7 原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備【50 条】の資料である「別紙 1 3.2.2.1.1 粒子状放射性物質（エアロゾル）」にて、エアロゾル粒径に関する既往研究と MAAP コードで求めた粒径分布を比較することでその妥当性を確認している。

※ 文献ではエアロゾルの粒径分布を個数濃度で表示しているが、線量率評価では重量濃度が重要であり、捕集係数 DF もシール材の入口と出口のエアロゾル質量濃度の比で評価されるため、粒径分布の比較には重量濃度を用いた。そのため、実験で用いた粒径分布の比較はエアロゾル粒子を球状と仮定して個数濃度から質量濃度へと換算を実施した。

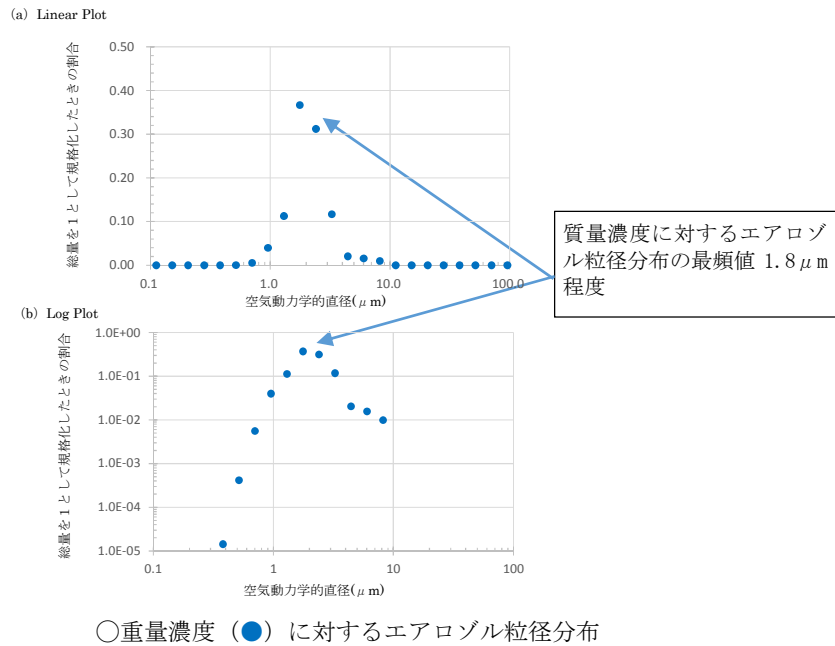


(a) 実験で用いた CsI 発生装置のエアロゾル粒径分布



(b) 有効性評価にて想定する MAAP にて評価された粒径分布
「格納容器過圧過温破損 (代替循環冷却を使用しない場合)」における事象発生約 1 時間後 (炉心損傷後で格納容器スプレィ実施前)

図 2-17-4 実験で用いたエアロゾル粒径分布と MAAP 評価 (有効性評価で事故条件) にて求めたエアロゾル粒径分布との比較 (1 / 2)



(c) 有効性評価にて想定する MAAP にて評価された粒径分布
「格納容器過圧過温破損（代替循環冷却を使用しない場合）」における事象発生約 38 時間後
（ベント時（格納容器スプレィを長期間（事象発生 1~38 時間（間欠運転）実施した後）

図 2-17-4 実験で用いたエアロゾル粒径分布と MAAP 評価（有効性評価で事故条件）にて求めたエアロゾル粒径分布との比較（2 / 2）

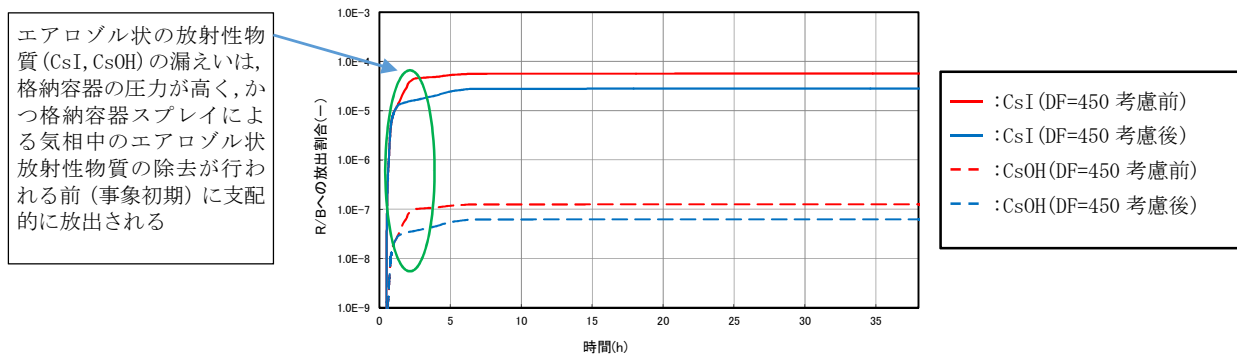


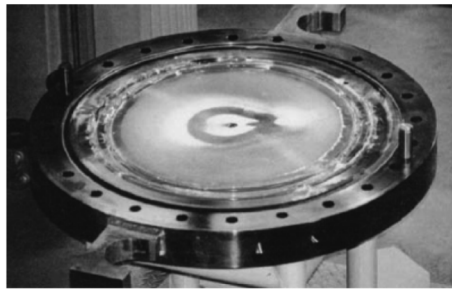
図 2-17-5 MAAP コードにより求めた原子炉格納容器から原子炉建屋へ漏えいするエアロゾル状の放射性物質 (CsI, CsOH) の炉内内蔵量に対する割合（格納容器過圧過温破損（代替循環冷却を使用しない場合）

2.3 シール材の劣化状態の考察

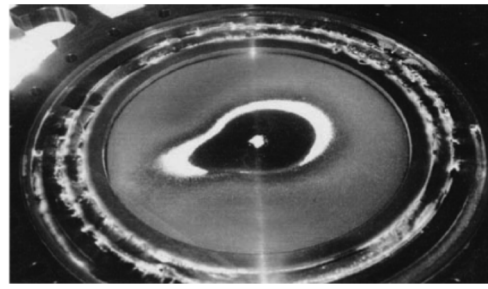
文献では 2Pd, 200°C を超える環境下で貫通部の漏えいが発生した際のエアロゾルの捕集係数 DF について試験を行っており, そのシール材の損傷条件は図 2-17-6 のフランジガスケットの例で示すように劣化によって発生したひびがシール材の内側から外側に向けて貫通している。

一方, 柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号炉の重大事故等時の条件は 2Pd, 200°C 以下であり, その環境下でのシール材の劣化は図 2-17-7 に示すようになる。シール材の内側の部分に一部劣化が見られるものの, シール材のヒビは外側へと貫通していない。そのため, シール機能は健全でエアロゾル粒子の漏えいがほぼないと考えられる。

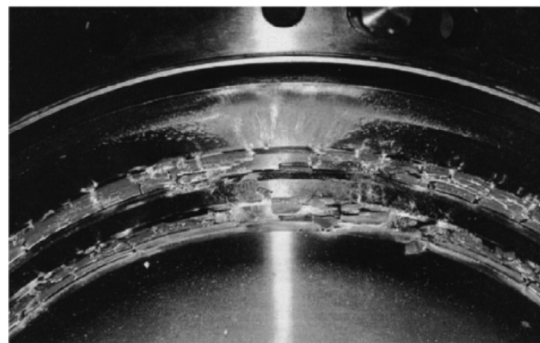
以上より, 柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号炉の重大事故等時のエアロゾルの捕集係数 DF を考える上で, 本文献での値を適用することは保守的と考えられる。



Inlet of test piece
(White powder is CsI aerosol)

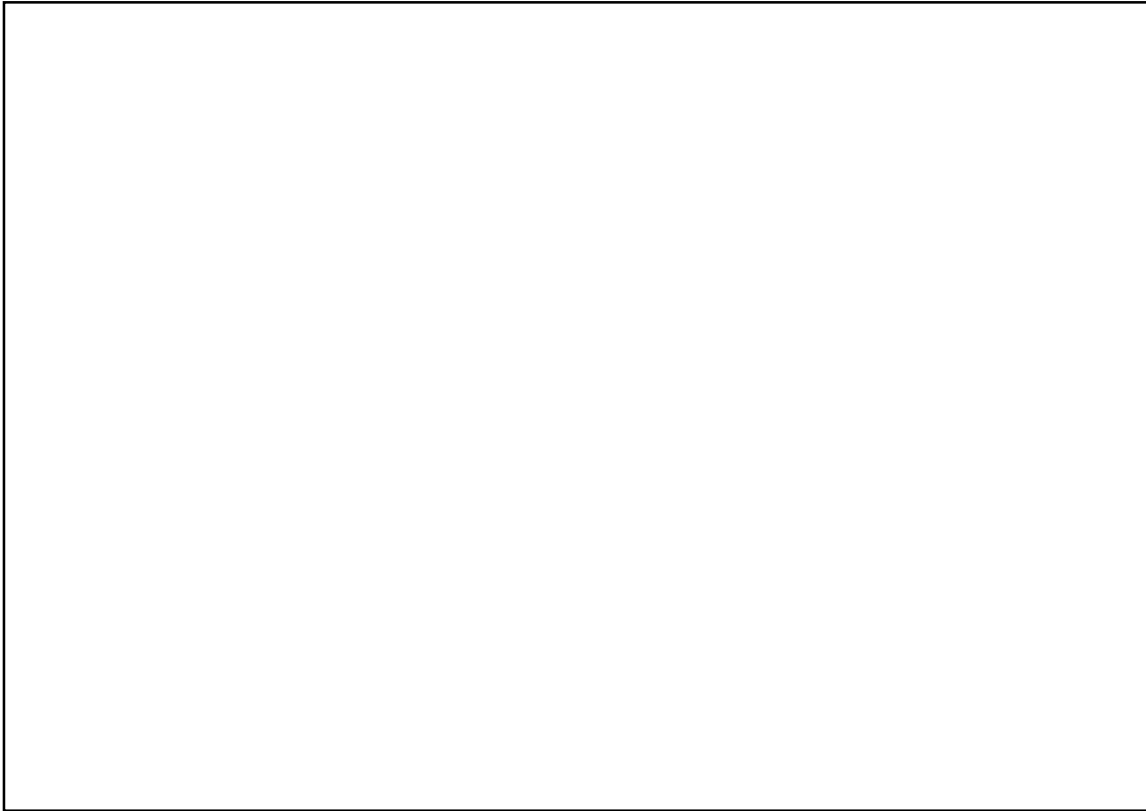


Outlet of test piece
(White powder is CsI aerosol)



A part of gasket
(White powder is CsI aerosol)

図 2-17-6 文献での実験で用いているシール材の状態
(200°C を超過して約 0.5°C/h の昇温速度で過熱、漏えい発生後、温度を低下させ、文献 1
の実験を実施した後)



6号炉

7号炉

図 2-17-7 柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉に設置しているシール材の状態
(乾熱 200°C, 168 時間暴露後※)

※重大事故等時における格納容器内の環境として、大部分はウェット状態であると想定されるが、フランジガスケットに使用している改良 E P D M材は一般的に酸素により引き起こされることから、試験雰囲気の状態はより空気中の酸素量が多い高温空気（乾熱）を用いた

2.4 シール材の差異に対する考察

文献ではフランジガスケットとしてシリコンゴムを使用したシール材を用いて試験を実施している。柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉では、従前は文献で用いたシール材と同様にシリコンゴムを使用したシール材を用いていたが、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。

以上より、柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉のフランジシール部については、文献で使用している従来のシール材よりも長期に亘り、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。

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は、実験で使用したシール材と柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉は同様である。

なお、格納容器のフランジシール部の健全性については、格納容器限界温度・限界圧力の環境下におけるバウンダリ機能の健全性評価において、模擬フランジに改良 EPDM シール材を設置した場合の耐漏えい試験結果を実施している。この中で、200°C・2Pd の条件下において、7日間の耐漏えい性能の確認を行い、漏えいが生じないことを確認している（重大事故等対策の有効性評価について 付録2「原子炉格納容器限界温度・圧力に関する評価結果」別紙-4 参照）。

また、電気配線貫通部について上記と同様に格納容器限界温度・限界圧力における健全性評価において、事故条件を模擬した試験の結果、電気配線貫通部の二次シール部の温度が、樹脂の変質を生じさせるような温度環境にならず、シール性能を維持できることを確認している（重大事故等対策の有効性評価について 付録2「原子炉格納容器限界温度・圧力に関する評価結果」7. 電気配線貫通部 参照）。

2.5 格納容器貫通部全体での代表的な捕集係数(DF)

文献では1.(2) 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)に示す通り、BWRの代表プラントの電気ペネ（低電圧モジュール）のUnit数及びフランジガスケットの総周長よりDF=450を求めている。

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。

以上より、柏崎刈羽原子力発電所7号炉の代表的な捕集係数(DF)は文献にあるBWRの代表プラントの代表的な捕集係数(DF)とほぼ同等であった。

2.6 捕集係数「DF-450」の妥当性

表2-17-3及び2.1～2.5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、エアロゾルの粒径分布、シール材の損傷状態、フランジガスケットのシール材においては柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の重大事故等時の条件に対して実験条件が保守的であり、その他の条件は柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の重大事故等時の条件と実験条件がほぼ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 $DF=14$ 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、前述の通り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EPDM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 、 2Pd 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。

仮にシール材の変更等を行わない電気配線貫通部から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>

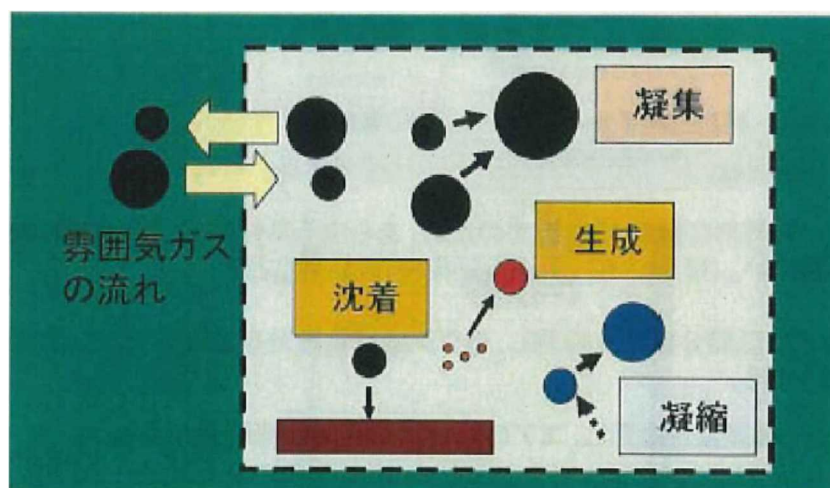
①MAAP コードにおける D/W 内でのエアロゾル粒径分布の評価モデルについて

○MAAP コードにおけるエアロゾル粒子の粒子分布の評価モデル

エアロゾル粒子の粒径分布変化の機構としては、図①-1 に示すように原子炉格納容器内でのエアロゾル粒子の凝集や壁面への沈着等が考慮される。エアロゾル粒径分布の経時変化は、エアロゾル粒子同士の凝集と壁面等への沈着の効果に着目して、下式の形で表される。ここで、右辺の第1項と第2項は拡散と重力沈降による凝集を表し、第3項は重力沈降による除去項、第4項は発生項を表す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(v, t)}{\partial t} = & \frac{1}{2} \int_0^v K(\bar{v}, v - \bar{v}) n(\bar{v}, t) n(v - \bar{v}, t) d\bar{v} \\ & - \int_0^\infty K(\bar{v}, v) n(\bar{v}, t) n(v, t) d\bar{v} \\ & - \frac{n(v, t) u(v)}{h} \\ & + \dot{n}_p(v) \end{aligned}$$

- ここで、
- $n(v, t)$: 時間(t)における粒子体積(v)の単位体積あたりの個数
 - $K(v, \bar{v})$: 粒子が凝集する頻度
 - $u(v)$: 体積(v)の粒子に対する重力沈降速度
 - $\dot{n}_p(v)$: 体積(v)の粒子の発生率
 - v : 粒子体積
 - h : 実効高さ (= 空間容積 / 沈着面積)



図①-1 エアロゾル粒径分布変化の機構

・凝集現象

エアロゾル粒子同士が衝突・合体して大きな粒子になる場合には、粒子数が減ると共に粒径分布が直接変化する。凝集はブラウン運動による熱凝集と重力や流れの場における粒径の違いによる速度差に起因する運動凝集に大別される。ブラウン運動以外のメカニズムによる粒子の相対的な速度差に起因する運動凝集には種々のものがあるが、シビアアクシデント時の原子炉圧力容器内や原子炉格納容器内では、重力による沈降速度の粒径による違いにもとづく運動凝集が支配的である。このため、MAAP ではブラウン運動による凝集と重力による運動凝集が考慮される。

・沈着現象

MAAP では沈着現象として、拡散泳動・Stefan 流、熱泳動、慣性沈着及び重力沈降が考慮される。この中で、エアロゾル粒子の直径に直接依存する沈着現象は慣性沈着と重力沈降である。なお、MAAP において、実機条件に対する慣性沈着の寄与を検証しており、BWR の評価条件においては慣性沈着の寄与が小さい傾向が示されている。

重力沈降は、エアロゾルが重力により落下し格納容器等の中の床や機器等の水平面上に沈着する現象である。MAAP では、Stokes の重力沈降式と Smoluchowski 方程式（エアロゾルの粒径分布に対する保存式）の解から得られる無次元相関式を用いて、浮遊するエアロゾル質量濃度から沈着率を求める。この相関式を使用した MAAP のモデルは様々な実験データと比較して検証が行われている。

慣性衝突による沈着は、原子炉格納容器内でのみ考慮され、流れの中にある構造物に、流線から外れたエアロゾルが衝突するものと仮定し、沈着率は重力沈降の場合と同様に Smoluchowski 方程式の解から得られる無次元相関式を用いて求められる。

拡散泳動による沈着は、水蒸気凝縮により生じる Stefan 流（壁面へ向かう流体力学的気流）のみを考慮して沈着率を求める。

熱泳動による沈着は、Epstein のモデルを用い、沈着面での温度勾配による沈着速度及び沈着率を求める。

・エアロゾルの発生

エアロゾルは、過熱された炉心から FP がガス状として原子炉圧力容器内に放出され、その雰囲気温度に依存して凝縮すること等により発生する。

なお、MAAP の FP 挙動モデルについては、有効性評価 付録 3「重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて 第 5 部 MAAP 3.3.7 核分裂生成物 (FP) 挙動モデル」にて、その挙動を説明している。

○凝集及び沈着のエアロゾル粒子の粒径分布への影響

- ・凝集：拡散と重力沈降の過程でエアロゾル粒子が衝突，小粒径のエアロゾル粒子が集まり，より粒径の大きい粒子がつくられ，粒径分布はより大きい方向にシフトする。
- ・沈着：重力沈降によりエアロゾル粒子が壁面等に沈着，粒径が大きいエアロゾル粒子ほど沈着し易いため，大粒径のエアロゾル粒子ほど多く除去され，粒径分布はより小さい方向にシフトする。

○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（ μm 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(m^2)
 P_0 : 1 次側圧力(Pa) P_b : 2 次側圧力 (大気圧) (Pa)
 γ : 比熱比(-) T_0 : 1 次側温度(K)
 R : 空気のガス定数(287J/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。

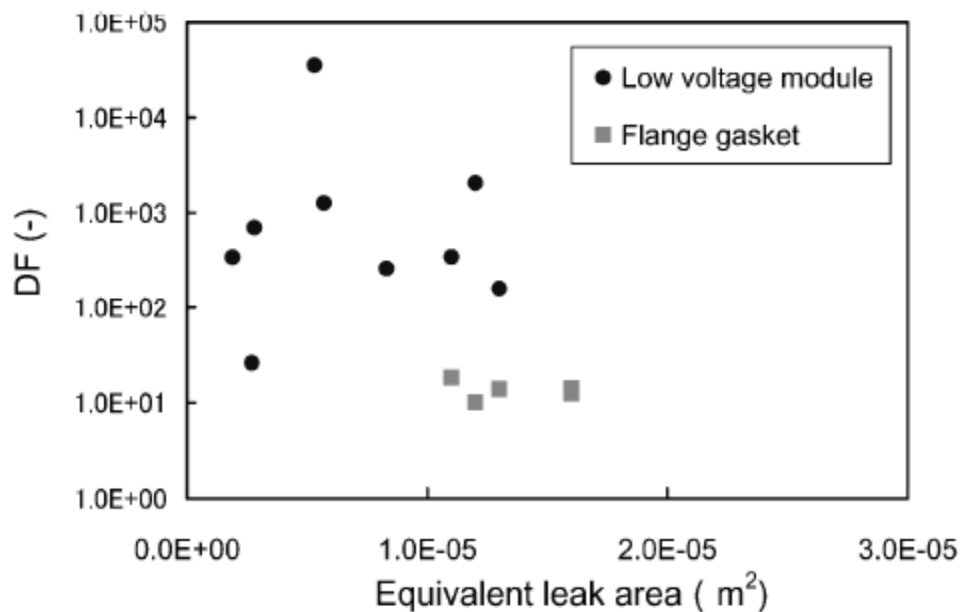


図 2-17-補 1 漏えい経路の大きさと除去効率の関係 (出典 1)

○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。

b. 粒径分布の妥当性

格納容器圧力逃がし装置の除去性能を評価する際に使用する粒径分布として、MAAP 解析により得られた粒径分布を採用しているが、得られる粒径分布は、事故後の経過時間や格納容器内におけるエアロゾル粒子の濃度等に依存する。ここでは、粒径分布を評価する上で想定している諸条件についての感度解析結果を示すことで、格納容器圧力逃がし装置の除去性能を評価する際に使用する粒径分布として、第 3.2.2.1.1-2 図の粒径分布を採用することの妥当性を説明する。

(a) 炉心状態

格納容器圧力逃がし装置に流入するエアロゾルの粒径分布を評価する際、炉心状態として平衡炉心（サイクル末期）を想定している。

第 3.2.2.1.1-6 図に、炉心状態として平衡炉心（サイクル初期）を想定した場合の粒径分布を示す。第 3.2.2.1.1-6 図より、平衡炉心（サイクル初期）を想定した場合の粒径分布と、平衡炉心（サイクル末期）を想定した場合の粒径分布の差は小さくなく、炉心状態の相違が格納容器圧力逃がし装置に流入するエアロゾルの粒径分布に与える影響は限定的であることが分かる。

以下に、エアロゾルの粒径分布が炉心状態の想定にほとんど依存しない理由を示す。

炉心状態として平衡炉心（サイクル末期）を想定することで、格納容器内に放出される核分裂生成物の総量は大きくなり（3.2.2.1.1 (2)a.参照）、格納容器内のエアロゾル粒子の濃度が高くなる。エアロゾル粒子の濃度が高くなると、エアロゾル粒子同士の衝突の頻度が高くなり、より大きい粒径のエアロゾル粒子が生成されやすくなる。その結果として、格納容器内の粒径分布はより大きい方向にシフトすることになる。

このことは、前述した粒径分布の評価モデルにおいても再現できている。第 3.2.2.1.1-7 図は、上述の評価モデルを使用した格納容器中の無次元化したエアロゾル粒径分布の評価例であり、格納容器中に流入したエアロゾル量による、格納容器内の粒径分布への影響を示している。図中の数値は原子炉圧力容器から格納容器中に流入したエアロゾル量を示しており、エアロゾル量が大きくなるに従い、格納容器内の粒径分布は大きい方向にシフトする傾向となっている。

ここで、大破断 L O C A + 全交流動力電源喪失 + 全 E C C S 機能喪失シナリオでは、エアロゾルは格納容器圧力逃がし装置に流入する前にサブプレッション・プールを通るが、そのことでサブプレッション・プール通過前に見られる粒径分布の差は緩和される傾向となる。これは、サブプレッション・プールを通過することにより粒径の大きい粒子が特に多く除去されるため、サブプレッション・プールで除

去されにくい比較的小粒径の粒子が除去されずに残ることに起因する。
以上のことから、格納容器圧力逃がし装置の除去性能を評価する上で、第 3.2.2.1.1-2 図の粒径分布を採用しても問題ないと考える。

(b)事故後の経過時刻

格納容器圧力逃がし装置に流入するエアロゾルの粒径分布は時間経過に伴い変化するが、粒径分布を評価する際は、評価時刻としてベント直後を想定している。ベント直後における粒径分布と、事故から 168 時間後時点における粒径分布を第 3.2.2.1.1-8 図に示す。第 3.2.2.1.1-8 図から、粒径分布の時間経過に伴う変化量は限定的であり、評価時刻としてベント直後を想定しても問題ないことが分かる。なお、エアロゾルが最も多く流入する時間帯はベント直後であるため、粒径分布を評価する時間帯として、事故直後を参照することは妥当であると考えられる。

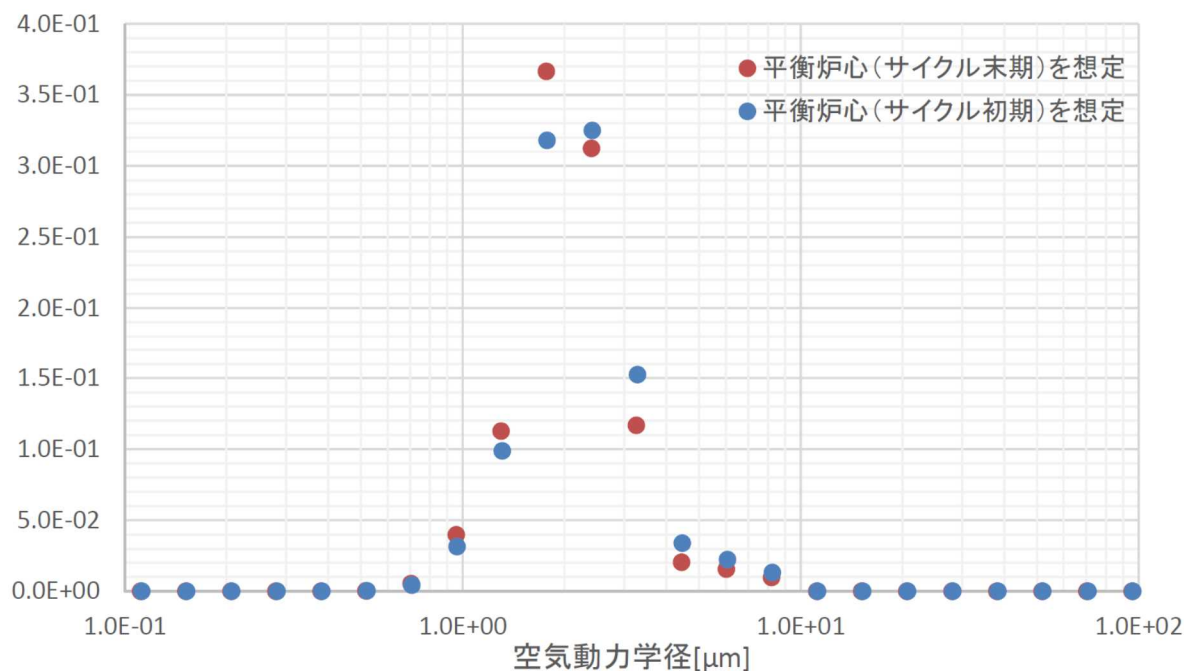
以上のことから、格納容器圧力逃がし装置の除去性能を評価する上で、第 3.2.2.1.1-2 図の粒径分布を採用しても問題ないと考える。

(c)中・低揮発性核種の放出割合の変更

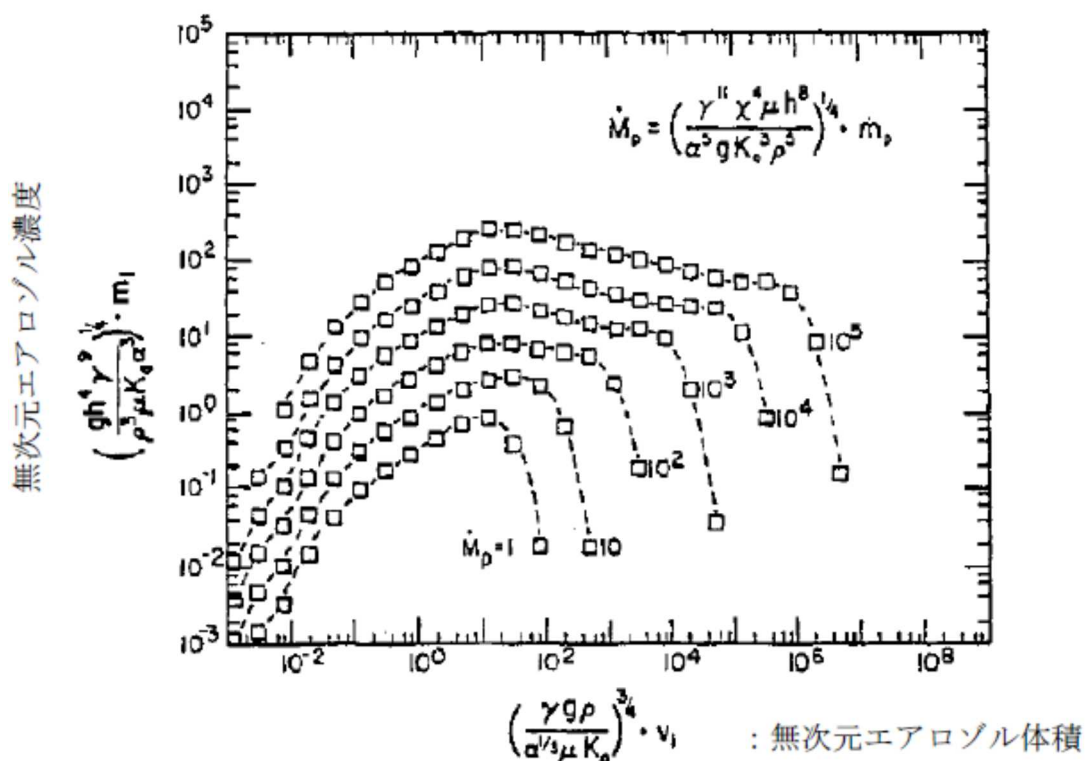
3.2.2.1.1 (2) b.に示した通り、格納容器圧力逃がし装置に流入するエアロゾル量を評価する際、放出割合として単に MAAP 解析により得られた放出割合の評価結果を採用するのではなく、NUREG-1465 の知見を利用している。このことは、原子炉圧力容器から格納容器内に流入する中・低揮発性核種のエアロゾル量をより少なく評価していることに相当している。そのため、上記の評価手法を取り入れることで、格納容器内のエアロゾル濃度は小さく評価され、エアロゾル粒子の粒径分布は小さい方向にシフトすると考えられる。

そこで、低揮発性核種の放出割合として MAAP 解析結果を使用しないことによる粒径分布への影響を評価するために、原子炉圧力容器から格納容器に放出される中・低揮発性核種の量をゼロと仮定した場合の粒径分布を評価した。評価結果を第 3.2.2.1.1-9 図に示す。なお、第 3.2.2.1.1-9 図では、炉心状態として平衡炉心（サイクル初期）を想定している。このように、極めて保守的に評価された場合であっても、粒径分布は大きく変化することはない。

以上のことから、中・低揮発性核種を考慮することによる影響は限定的であり、格納容器圧力逃がし装置の除去性能を評価する上で、第 3.2.2.1.1-2 図の粒径分布を採用しても問題ないと考える。

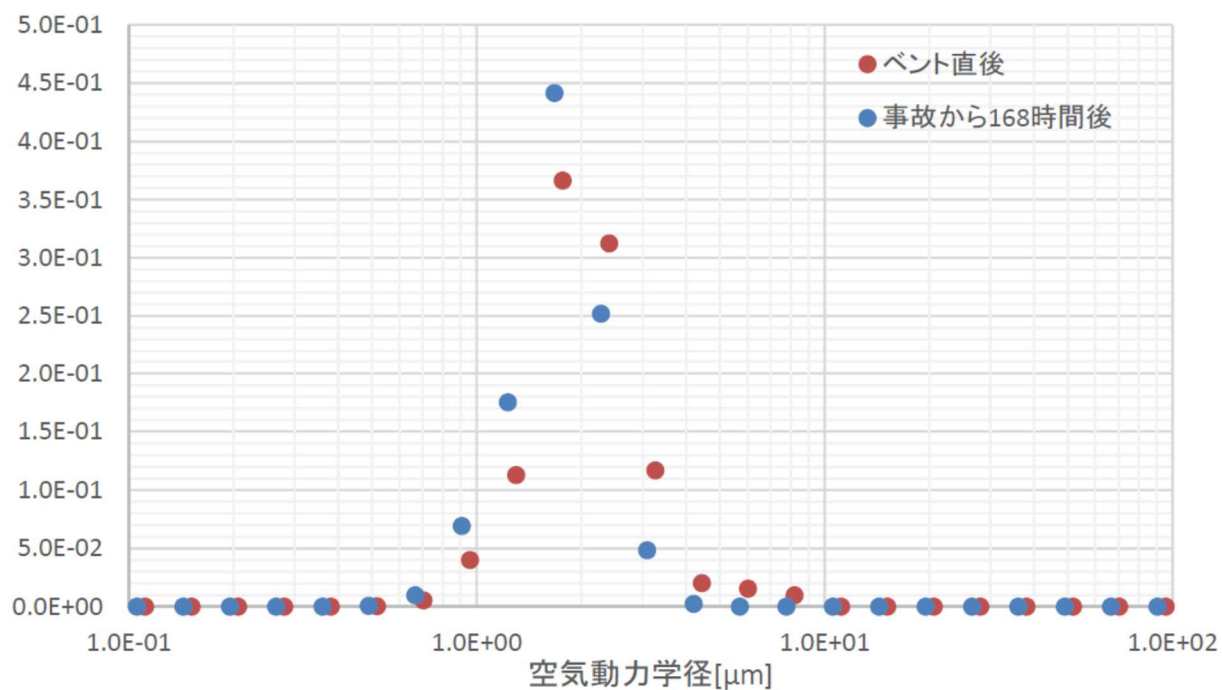


第 3.2.2.1.1-6 図 想定する炉心状態を変更した場合の粒径分布（規格化後）

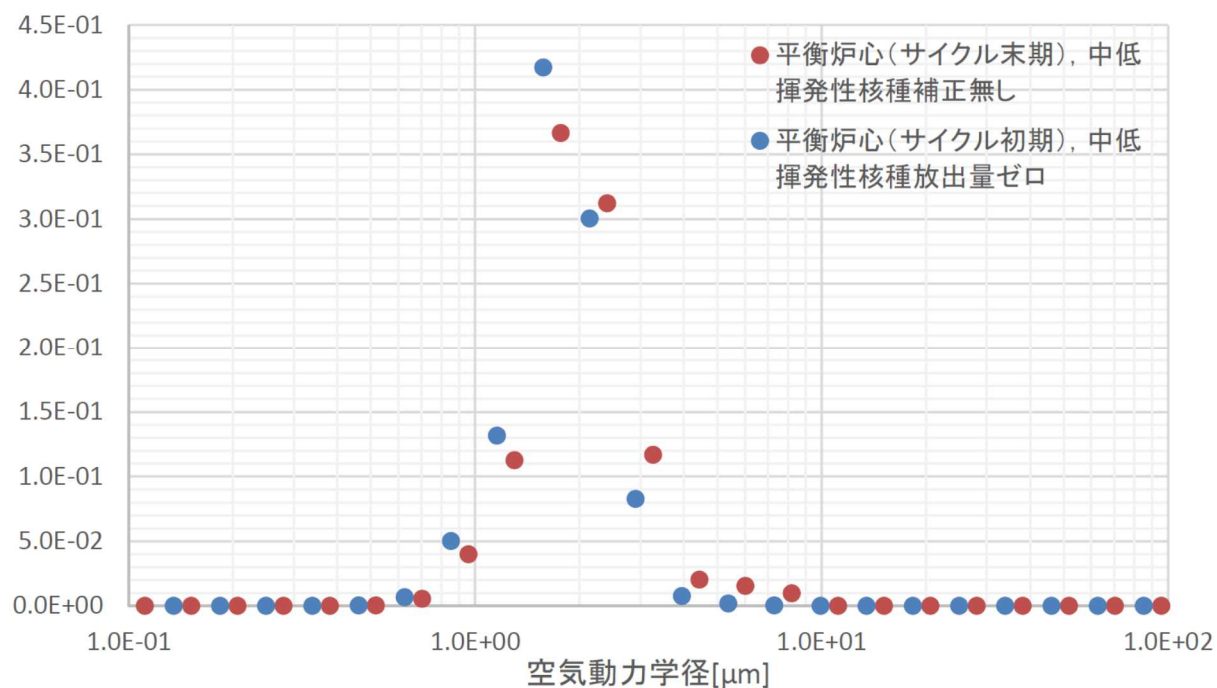


第 3.2.2.1.1-7 図 定常状態における無次元化した粒径分布

出典：A Principle of Similarity for Describing Aerosol Particle Size Distributions (MICHAEL EPSTEIN AND PHILLIP G. ELLISON Journal of Colloid and Interface Science, Vol 119, No. 1, September 1987)



第 3.2.2.1.1-8 図 評価時刻を変更した場合の粒径分布（規格化後）



第 3.2.2.1.1-9 図 中・低揮発性核種の格納容器内への放出量をゼロとし、想定する炉心状態を変更した場合の粒径分布（規格化後）

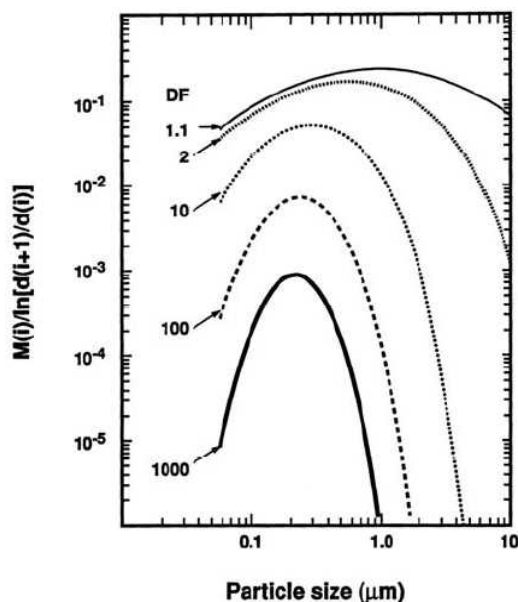
(4) 他の文献での解析例

格納容器内におけるエアロゾル粒子の粒径分布の解析結果は多くの文献に見られる。それらの文献中の粒径分布は対数正規分布とよく一致しており、中央径は数 μm 程度、幾何標準偏差は数 μm 程度となっている。

文献中に示されているエアロゾル粒子の粒径分布の例を第 3.2.2.1.1-10 図から第 3.2.2.1.1-12 図に示す。

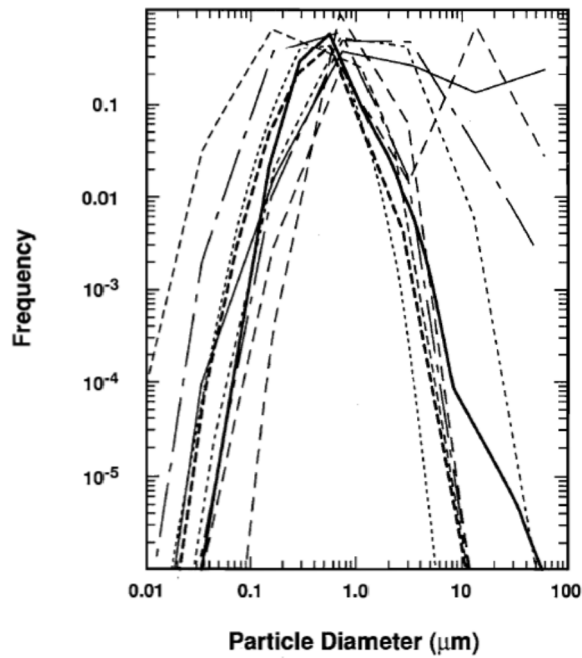
第 3.2.2.1.1-10 図は、ドライウェルスプレーイを実施し続けることによる格納容器内のエアロゾル粒子の粒径分布の変化の解析結果を示している。図中の DF 値はドライウェルスプレーイを継続して行うことによる積算の除去効果を表している。積算の除去効果が小さい段階 (DF=1.1) では、エアロゾル粒子は最大値が約 $1\mu\text{m}$ で幅の広い分布を持っているが、ドライウェルスプレーイを継続し積算の除去効果が大きくなると、粒径分布の最大値は小さくなり、また分布の幅も小さくなる傾向が見られる。

第 3.2.2.1.1-11 図及び第 3.2.2.1.1-12 図は、米国の NRC が開発した総合事故解析コード STCP (Source Term Code Package) で評価された、格納容器内のエアロゾル粒子の粒径分布を表している。なお、第 3.2.2.1.1-12 図の粒径分布については、Mark I 型格納容器プラントにおいてスクラム失敗時に炉心損傷した状態のものを表している。何れも分布のピークは数 μm となっており、幾何標準偏差が数 μm であるような分布となっている。



第 3.2.2.1.1-10 図 ドライウェルスプレーイを実施し続けることによる格納容器内の粒径分布の変化 (図中の値はドライウェルスプレーイによる積算の除去効果)

出典 : STATE-OF-THE-ART REPORT ON NUCLEAR AEROSOLS (OECD/NEA) 2009



第 3.2.2.1.1-11 図 STCP (Source Term Code Package) によるシビアアクシデント時における格納容器内エアロゾル粒径分布の評価例

出典：A Simplified Model of Aerosol Removal by Containment Sprays (NUREG/CR-5966)

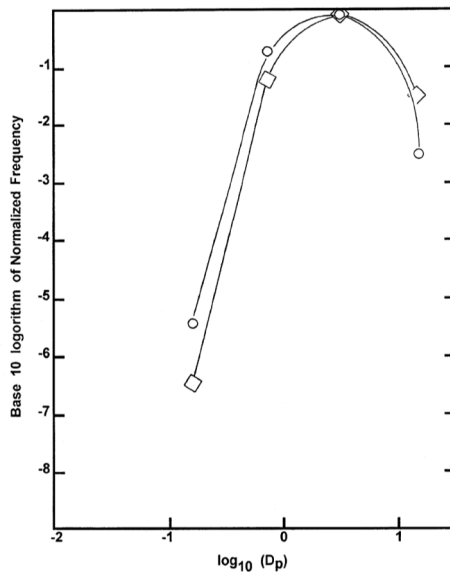


Figure 13. Size distribution of aerosols in the reactor coolant system predicted with the Source Term Code Package

第 3.2.2.1.1-12 図 STCP (Source Term Code Package) における一次系でのエアロゾルに対して想定する粒径分布の一例

出典：A Simplified Model of Decontamination by BWR Steam Suppression Pools (NUREG/CR-6153 SAND93-2588)

(5) 実験結果例

前節までは理論的に評価された粒径分布を扱ってきたが、ここでは実際に測定されたエアロゾル粒子の粒径分布について説明する。

シビアアクシデント時の格納容器内の放射性物質を含むエアロゾルの発生としては、炉心損傷時に1次系から放出されるエアロゾルやMCCI発生時に格納容器内に直接放出されるエアロゾル等が想定され、これら発生エアロゾル粒子が格納容器内で凝集・沈着の過程を経ることで、格納容器内に浮遊するエアロゾル粒径が時間とともに変化する。

これら各フェーズのエアロゾル挙動に着目した既往研究から、エアロゾル粒径に関する知見について整理した結果を第3.2.2.1.1-9表に示す。

第3.2.2.1.1-9表において、炉心損傷時の1次系内エアロゾルについては①、②及び③、MCCI時の発生エアロゾルについては④、さらに、格納容器内エアロゾル粒径に関しては⑤及び⑥に整理している。

この表に整理した試験結果等は、想定するエアロゾル発生源や挙動範囲(1次系、格納容器)に違いはあるものの、エアロゾル粒子はサブ μm から数 μm までの範囲にあり、格納容器内環境でのエアロゾルの粒径はこれらのエアロゾル粒径と同等な分布範囲を持つものと推定できる。

第3.2.2.1.1-9表 エアロゾル粒径に関する既往研究

番号	試験名または 報告書名等	エアロゾル 粒径 (μm)	備考
①	AECL が実施した試験	0.1~3.0	・ CANDU 炉のジルカロイ被覆管燃料を使用した 1 次系内核分裂生成物挙動に関する小規模試験
②	PBF-SFD ^{※1}	0.29~0.56	・ 米国アイダホ国立工学研究所にて実施された炉心損傷時の燃料棒及び炉心の振る舞い、核分裂生成物及び水素の放出挙動を調べた大規模総合試験 ・ 粒径データはフィルタサンプルの SEM 分析による幾何平均直径
③	PHEBUS-FP ^{※1}	0.1~0.5	・ 仏国カダラッシュ原子力研究センターの PHEBUS 研究炉で実施された、シビアアクシデント条件下での炉心燃料から 1 次系を経て格納容器に至るまでの核分裂生成物の挙動を調べた大規模総合試験 ・ 粒径データは 1 次系内フィルタサンプルの SEM 分析による凝集物を構成する粒子径
④	NUREG/CR-5901 ^{※2}	0.25~2.5	・ MCCI 時の発生エアロゾルに対する上部プール水のスクラビング DF モデル (相関式) を開発したレポート ・ 粒径データは、MCCI 時に想定される発生エアロゾルの質量平均粒径の範囲
⑤	LACE LA2 ^{※3}	約 0.5~約 5	・ 米国ハンフォード国立研究所 (HEDL) にて実施された、格納容器内エアロゾル沈着挙動に関する大規模模擬実験 ・ 粒径データは、LA2 試験の事前解析として実施された、各種エアロゾル挙動解析コードによるエアロゾル空気力学的直径の時間変化における最小値と最大値
⑥	PHEBUS-FP ^{※1}	2.4~4.0	・ 粒径データは、PHEBUS-FP 模擬格納容器内で測定されたエアロゾル空気力学的直径の範囲

※1 STATE-OF-THE-ART REPORT ON NUCLEAR AEROSOLS, NEA/CSNI/R (2009) 5

※2 D. A. Powers and J. L. Sprung, NUREG/CR-5901, A Simplified Model of Aerosol Scrubbing by a Water Pool Overlying Core Debris Interacting With Concrete

※3 J. H. Wilson and P. C. Arwood, Summary of Pretest Aerosol Code Calculations for LWR Aerosol Containment Experiments (LACE) LA2, ORNL

A. L. Wright, J. H. Wilson and P. C. Arwood, PRETEST AEROSOL CODE COMPARISONS FOR LWR AEROSOL CONTAINMENT TESTS LA1 AND LA2

また、以下に PHEBUS-FP の試験結果を示す。^{※4}

PHEBUS-FP は、放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN, 仏国)、フランス電力庁及び EU を中核として行われた、実機プラントの体系をスケールダウンした模擬試験であり、主目的として、エアロゾルの物理・化学挙動現象の模擬に焦点を置いている。

試験装置は、炉心部、一次系、格納容器等から構成されており、炉心部には実燃料が装荷されている。試験の際は炉心部で実燃料を熔融させており、一次系（蒸気発生器）を介し格納容器内に放出されたエアロゾル粒子の粒径を測定している。また、炉心部に装荷する燃料として新燃料を使用した場合 (FPT0) と使用済み燃料を使用した場合 (FPT1, 2, 3) の評価を行っており、各試験でエアロゾル粒子の粒径分布が測定されている。試験装置の概要図を第 3.2.2.1.1-12 図に、主な試験条件を第 3.2.2.1.1-10 表に示す。

以下に、粒径分布に関する主な試験結果を示す。

実験により測定されたエアロゾル粒子の粒径分布は対数正規分布によく一致しており、理論的な予想と整合がとれている。

また、FPT0（新燃料を使用）と FPT1, 2, 3（使用済み燃料を使用）で得られた粒径分布を比較すると、平均粒径（AMMD）と幾何標準偏差は同程度となっている。このことは、燃料の燃焼度がエアロゾル粒子の粒径分布に及ぼす影響が限定的であることを示唆している。

なお、FPT4 では熔融デブリからの低揮発性核種や超ウラン元素の放出に関する定量的検討を行うことを目的としており、格納容器は模擬されておらず、試験目的の中に格納容器内粒径分布の調査は含まれていない。

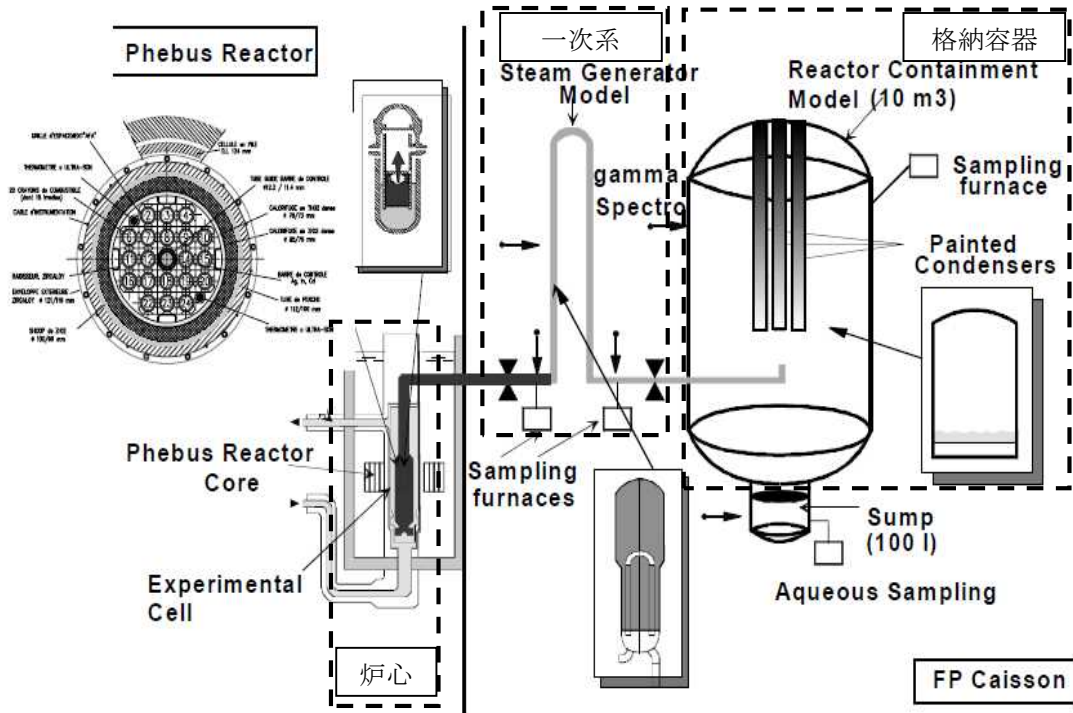
【粒径分布に関連する主な試験結果】

- FPT0 と FPT1 の粒径分布は対数正規分布によく一致
- FPT0 の平均粒径（AMMD）は、燃料集合体崩壊の最終時点で $2.4 \mu\text{m}$ （最終的に $3.35 \mu\text{m}$ で安定）
- FPT1 におけるエアロゾル粒径は $3.5 \mu\text{m}$ から $4.0 \mu\text{m}$ の間
- FPT0 と FPT1 の双方の試験の対数正規分布の幾何標準偏差は約 2.0 でほぼ一定
- FPT2 の粒径分布は FPT1 の粒径分布と類似^{※5} ^{※6}
- FPT3 の平均粒径（AMMD）は、概ね $3 \mu\text{m}$ であり、幾何標準偏差は約 1.5 ^{※6}

※4 STATE-OF-THE-ART REPORT ON NUCLEAR AEROSOLS (OECD/NEA 2009)

※5 Progress of ASTEC validation on fission product release and transport in circuits and containment (The 3rd European Review Meeting on Severe Accident Research(ERMSAR-2008))

※6 Overview of Main Results Concerning the Behaviour of Fission Products and Structural Materials in the Containment (NUCLEAR ENERGY FOR NEW EUROPE 2011)



第 3. 2. 2. 1. 1-13 図 試験装置の概要

第 3. 2. 2. 1. 1-10 表 主な試験条件

--