

# プールスクラビングの 体験実習

北海道大学工学研究院 応用量子科学部門  
河口 宗道

kawaguchi.munemichi@eng.hokudai.ac.jp

# プールスクラビング実習

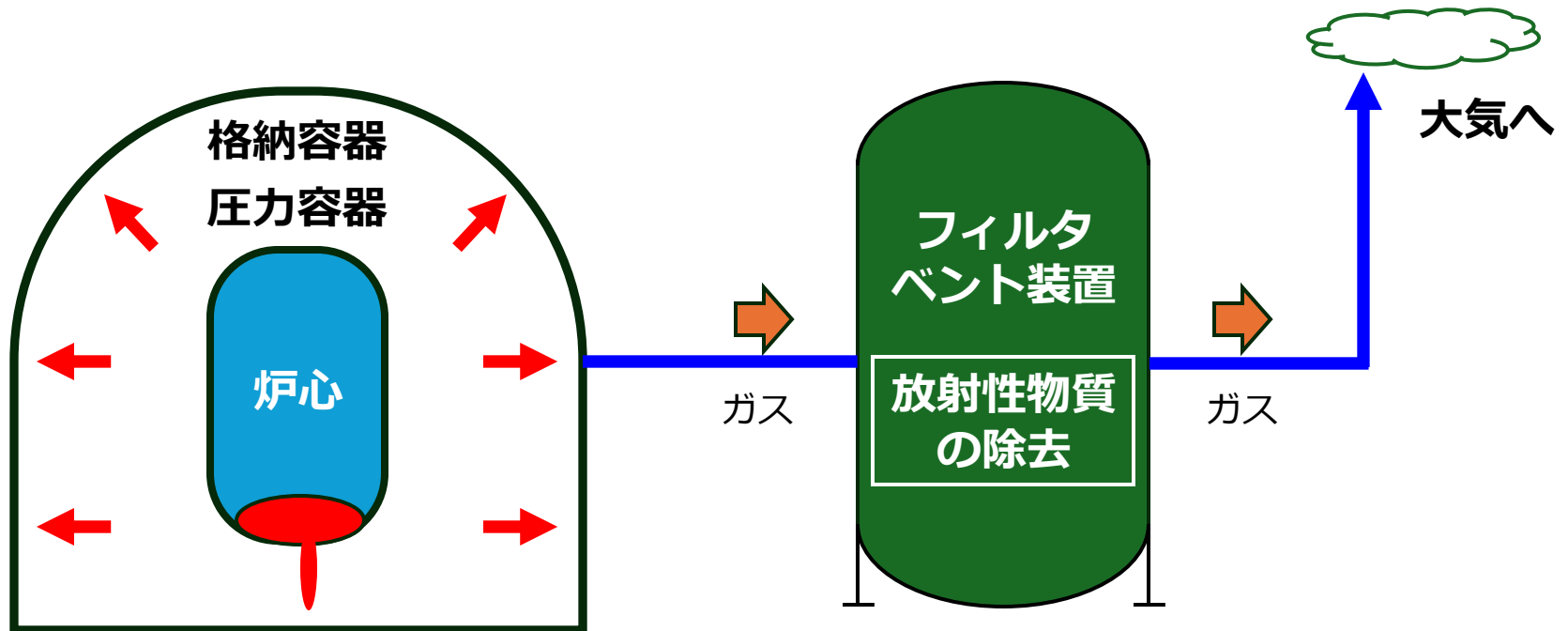
- プールスクラビング実習では、実用発電用原子炉の重大事故等対処設備であるフィルタベント装置について体験する実習を行う。
- プールスクラビング実習は、核分裂生成物（FP）の状態をガス状、エアロゾル状とみなして、模擬物質を使った実験を行い、フィルタベント装置の重要性を考えるものとする。
- 本講義は、これらの実習に必要なフィルタベント装置の背景、実習に用いる装置の原理、実習内容の概要について説明する。
- 本講義を受講することにより、限られた時間内での実習を効率的に進めることが期待される。

# Content

- はじめに～概要と規制要件～
- 核分裂生成物（FP）とフィルタの種類
- フィルタベント装置の原理
- 実習の内容
  - ①エアロゾル状模擬FPのプールスクラビング実習
  - ②ガス状模擬FPのプールスクラビング実習
- まとめ

# はじめに

- 炉心損傷の発生が避けられない原子炉の事故では、格納容器の破損を防止することが必要である。
- フィルタベント装置は、原子炉で万が一、重大事故が発生した場合、格納容器の温度・圧力を低下させるために、格納容器内のガスの核分裂生成物（FP）を除去して、大気へ放出する装置である。
- フィルタベント装置は、重大事故等対処設備として設置される。



# 語句の説明

実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則  
第二条2項

- 特定重大事故等対処施設

十二 「特定重大事故等対処施設」とは、重大事故等対処施設のうち、故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムにより炉心の著しい損傷が発生するおそれがある場合又は炉心の著しい損傷が発生した場合において、原子炉格納容器の破損による工場等外への放射性物質の異常な水準の放出を抑制するためのものをいう。

- 重大事故等対処設備

十四 「重大事故等対処設備」とは、重大事故等に対処するための機能を有する設備をいう。

# 法令上の要求事項

- 設置許可基準規則第50条

炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器の破損を防止するため、原子炉格納容器内の温度及び圧力を低下させるために必要な設備を設けること

- 設置許可基準規則第50条解釈

格納容器圧力逃がし装置は、排気中に含まれる放射性物質を低減するものであること

- 設置許可基準規則第37条解釈

原子炉格納容器バウンダリにかかる温度・圧力が限界温度・限界圧力を下回ること

放射性物質の総放出量は、放射性物質による環境への汚染の影響も含め、環境への影響をできるだけ小さくとどめるものであること

※具体的には、有効性評価ガイドにおいて「**Cs-137**の放出量が**100TBq**を下回っていること」が要求される

# 核分裂生成物（FP）の種類と状態

## • 対象のFP

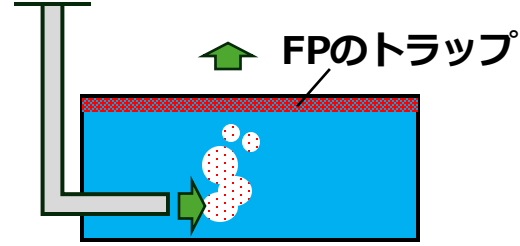
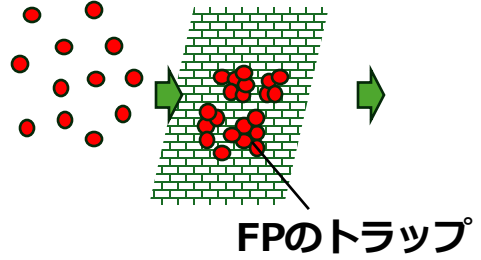
Phebus実験等の知見により、原子炉事故時のFPは揮発性に応じてカテゴリー分けがなされた。

原子炉の事故時に被覆管からFPが放出された場合、温度・圧力等の条件によってガス状・エアロゾル状（微粒子状）FPとして移行する。

カテゴリー	元素
希ガス及び揮発性FP	ガス（Kr, Xe）、揮発性FP（I, Cs, Br, Rb, Te, Sb, Ag）
中揮発性FP	Mo, Rh, Ba, Pd, Tc
低揮発性FP	Sr, Y, Nb, Ru, La, Ce, Eu
非揮発性FP	Zr, Nd, Pr
アクチノイド	低揮発性と同等の放出率を示すU及びNpと、非揮発性と同等の放出率を示すPu等がある。

# 装置に用いられるフィルタの種類

- フィルタベント装置には2種類のフィルタが用いられる。  
➡ 「湿式」と「乾式」
- どちらのフィルタも、放射性物質をトラップしてベントが可能。

方式	捕集方法	概要
湿式	水・アルカリ水	
乾式	金属ファイバ	



# エアロゾルの挙動（運動）

- エアロゾルとは、気中に浮遊する様々な大きさの微粒子を意味する。エアロゾルは気中の流れに沿って運動するが、エアロゾルには注意すべき挙動がある。

## [エアロゾルの注意する必要がある挙動]

### ①慣性沈着

エアロゾル粒子は気流の軌道に従おうとするため、軌道の近くに水面や構造物がある場合は衝突、沈着する。

### ②重力沈降

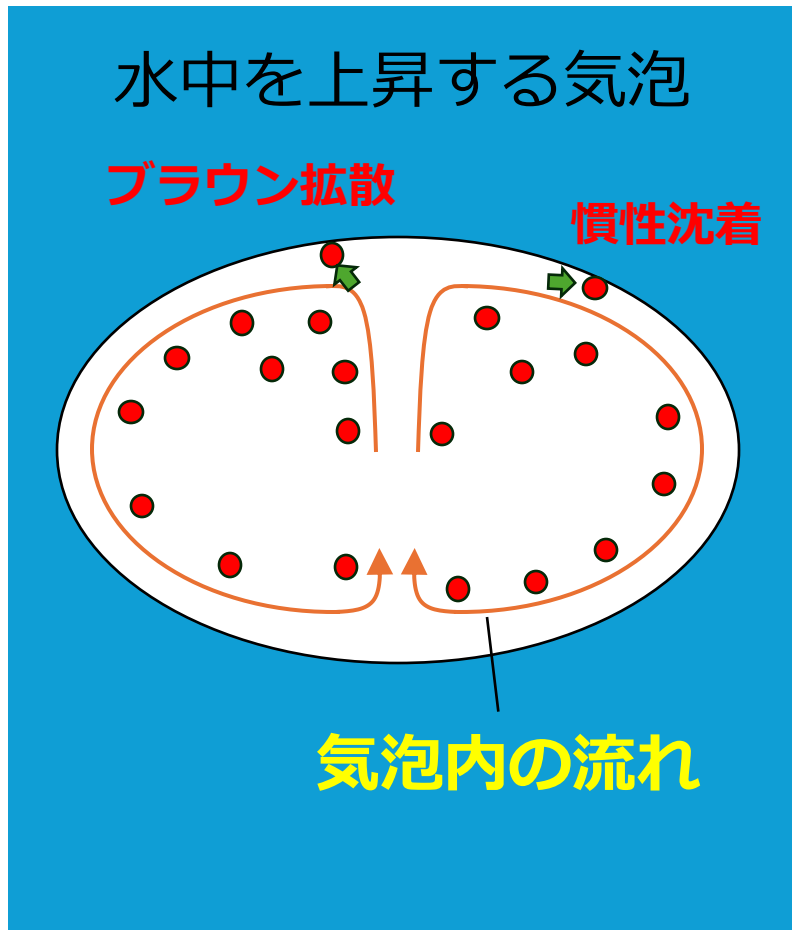
気流が小さい場合、重力の作用によって水面などに沈降する。

### ③ブラウン拡散

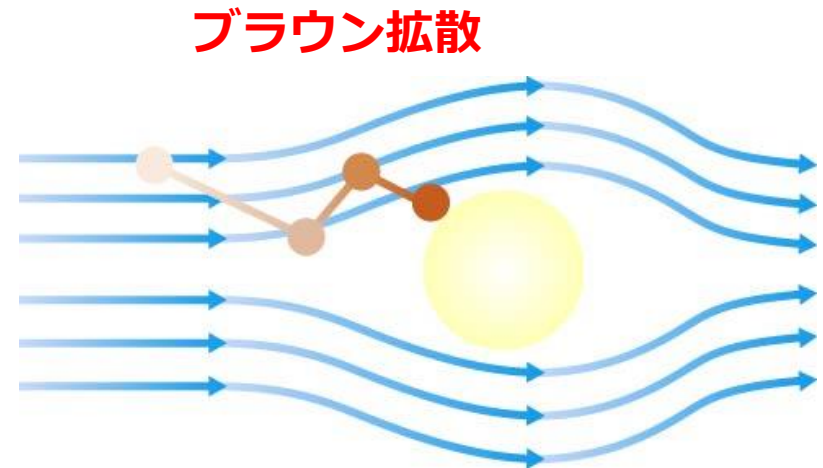
気流に沿って運動する微粒子が、分子スケールでガスと衝突するためランダムな運動が発生する。

# エアロゾルがフィルタで除去される原理

## ■ 湿式フィルタ



## ■ 乾式フィルタ

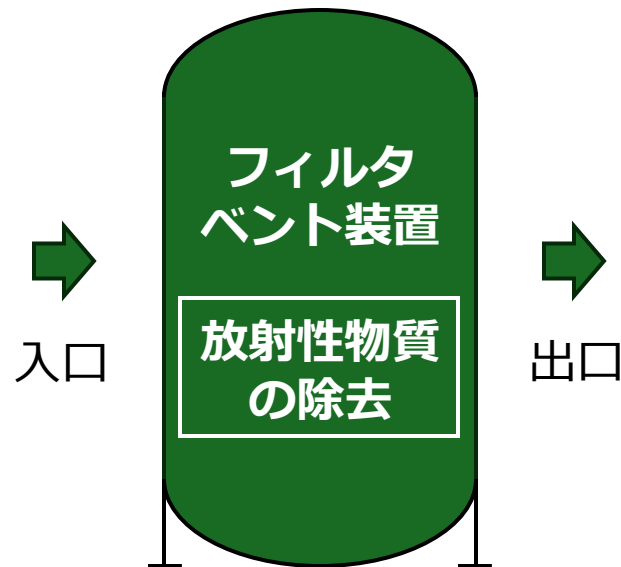


# フィルタベント装置の性能の指標

- 除染係数（Decontamination Factor: DF）

除染係数とは、フィルタベント装置の性能の指標として用いられる。フィルタベント装置の入口ガスと出口ガスに含まれるFPの量の割合で定義される。

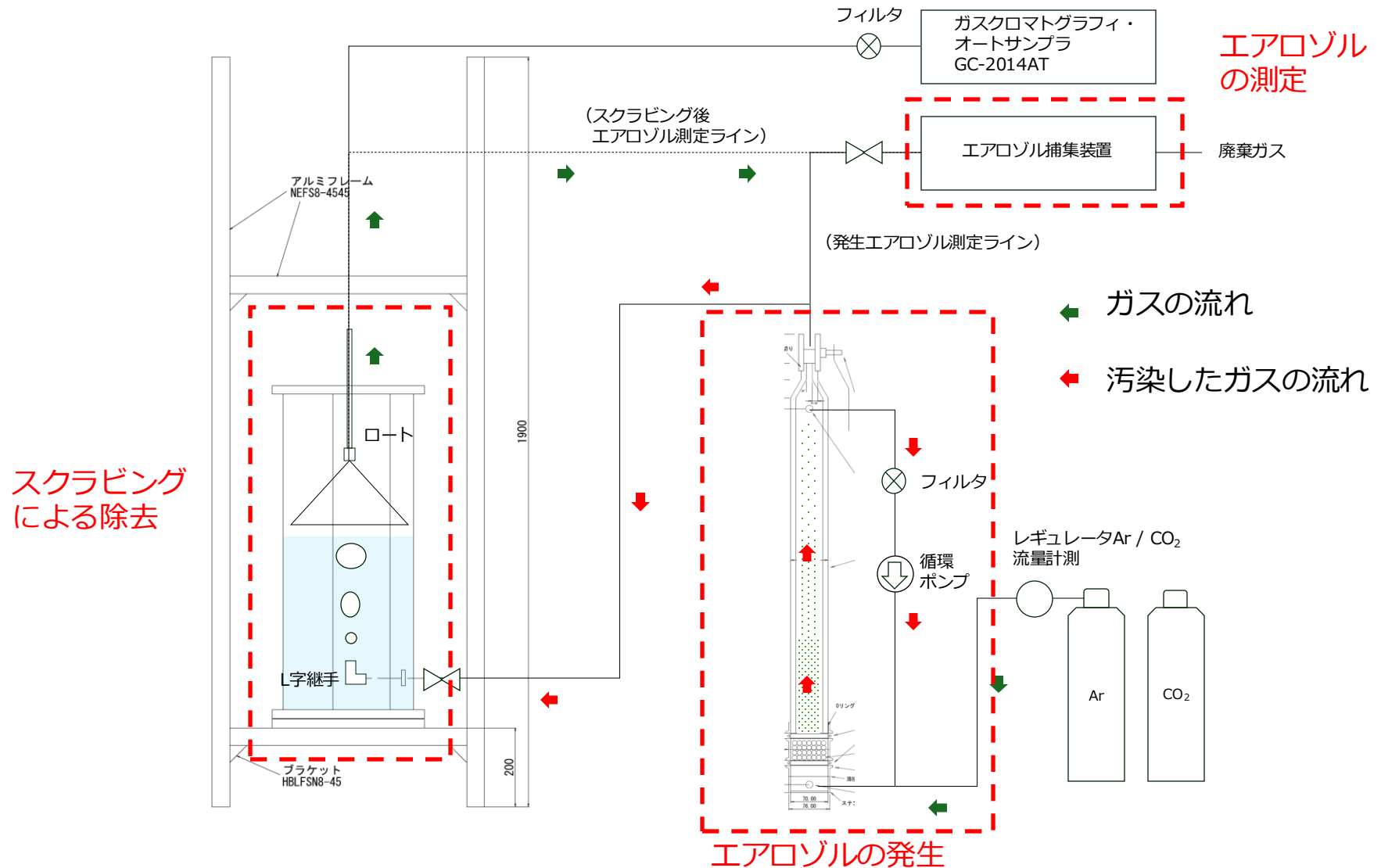
$$\text{除染係数} = \frac{\text{入口の放射性物質の量}}{\text{出口の放射性物質の量}}$$



# 実習①の内容

- エアロゾル状のプールスクラビング実習
- $1\mu\text{m}$ の銅粉末を下方から $\text{N}_2$ ガスで吹き上げてエアロゾル状態にする。
  - ⇒ **エアロゾル状態の確認**
- 水槽に溜めた水に、銅エアロゾルを含む $\text{N}_2$ ガスを供給する（スクラビング）。気中に放出する銅エアロゾルを捕集して、プールスクラビングによる除染係数を算出する。
  - ⇒ **除染係数の算出**
- 水深を変えて、除染係数がどのように変化するか測定する。
  - ⇒ **除染係数の水深の影響の確認**
- フィルタベント装置の実際の水深（約8m）の場合の除染係数を推測する。
  - ⇒ **実物規模のプールスクラビング装置の除染係数の推測**

# 実習①で使用する装置の概要



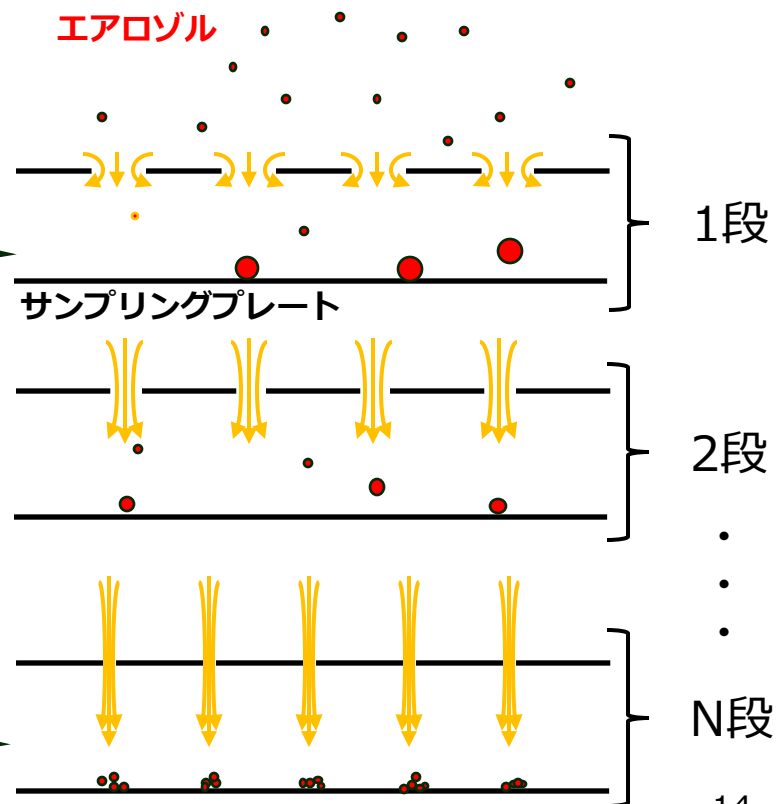
# エアロゾルの捕集方法

エアロゾルの捕集はインパクター（LP-20）を用いる

- ロープレッシャーインパクターLP-20

LP-20は多段多孔式カスケードインパクター。サンプリングプレート  
の前段の穴径を変えて粒子の大きさ（慣性力）で分級。粒径ごとの  
エアロゾルをサンプリングする。

**穴径が大きい（流速が小さい）**ため、  
大きい粒子のみがプレートに付着



**穴径が小さい（流速が大きい）**ため、  
小さい粒子もプレートに付着

# LP-20の分級性能

- Ranz, Wongらの粒子におけるジェット衝突の解析

[参考] W.E.Ranz, J.B.Wng, Arch. Indust. Hyg. Occupational Med., 1952, May, Vol.5, No.5, pp.464-77.

ジェット衝突の解析研究により導かれた粒子径 ( $D_{p2}$ ) の関係式を用いて、分級特性が設計される。装置の設計値 ( $m, D, \psi 50, C, V$ ) は変わらないため、粒子径は密度 ( $\rho$ ) の1/2乗に反比例する。

$$D_{p2} = \sqrt{\frac{18 \times \mu \times D \times \psi 50}{C \times V \times \rho}}$$



ステージ No,	分級特性 (Dp50%値) *20℃、1 a t mにて
0	1 2 . 1 以上
1	8 . 5
2	5 . 7
3	3 . 9
4	2 . 5
5	1 . 2 5
6	0 . 7 6
7	0 . 5 2
L 1	0 . 3 3
L 2	0 . 2 2
L 3	0 . 1 3
L 4	0 . 0 6
バックアップフィルタ	0 . 0 6 以下

アンダーセン型ロープレッシャー・インパクター (LP-20) (東京ダイレック株式会社) の取扱説明書を参照

# 実習②の内容

- ガス状のプールスクラビング実習
- ガスクロマトグラフィ（GC）を使って、ArガスとCO<sub>2</sub>ガスの混合ガスを分析して、校正曲線を作成する。

⇒ **校正曲線の作成**

- 水槽に水あるいはNaOH水溶液を溜めて、CO<sub>2</sub>ガスを供給する。カバーガスに放出されたCO<sub>2</sub>ガスの量を分析して、プールスクラビングによる除染係数を算出する。

⇒ **除染係数の算出**

- NaOH水溶液の濃度を変えて、除染係数がどのように変化するか測定する。

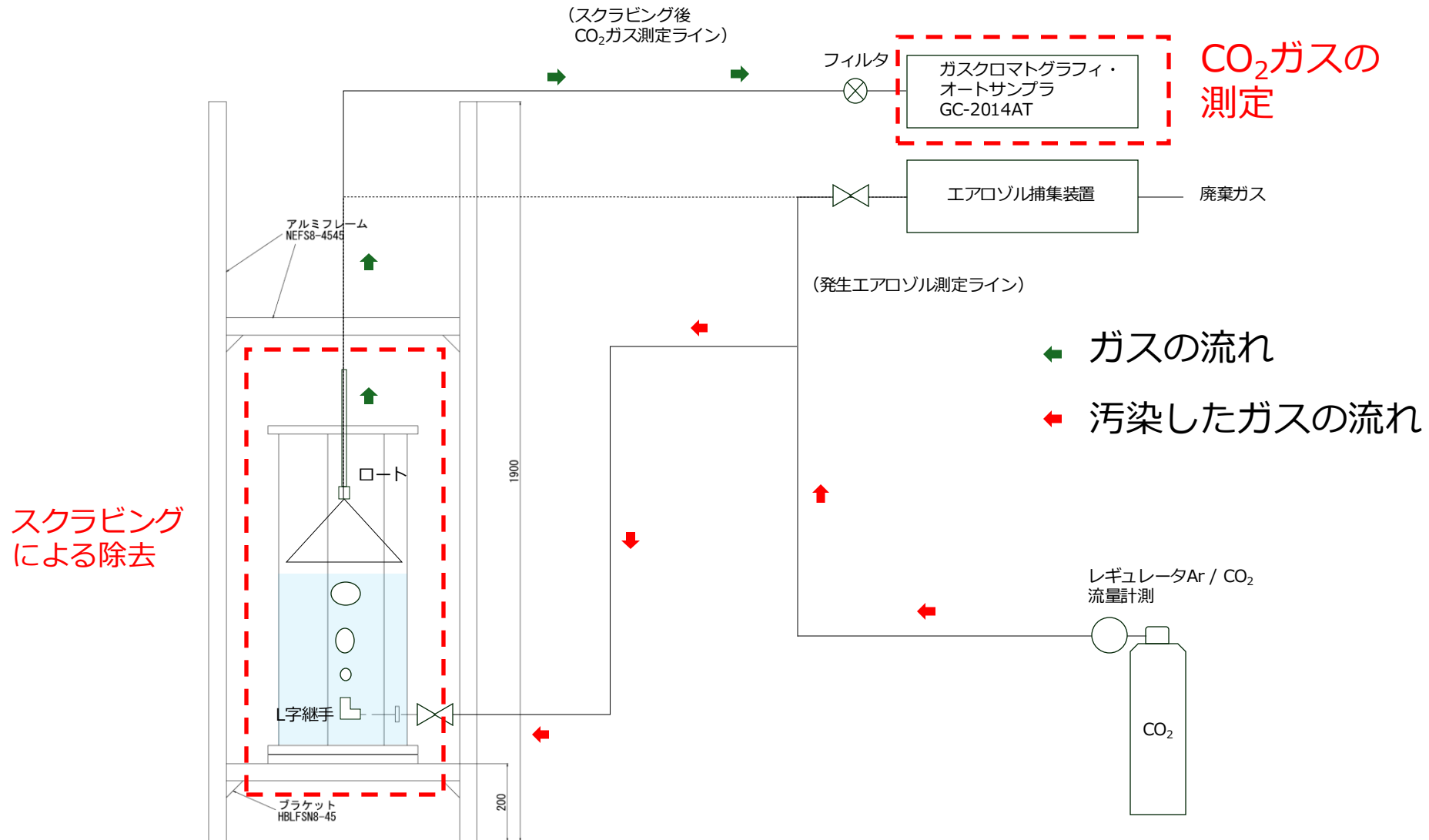
⇒ **除染係数のNaOH濃度の影響の確認**

- CO<sub>2</sub>よりも溶解速度の大きいガス状ヨウ素におけるフィルタベント装置の除染係数・水溶液の濃度について議論する。

⇒ **ガス状ヨウ素のプールスクラビング装置の除染係数の推測**



# 実習②で使用する装置の概要

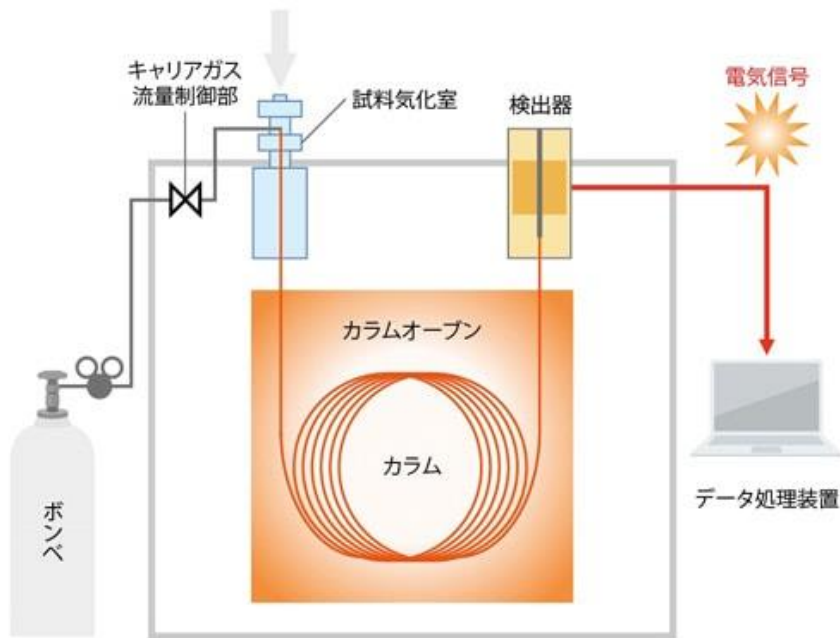


# ガスクロマトグラフの原理

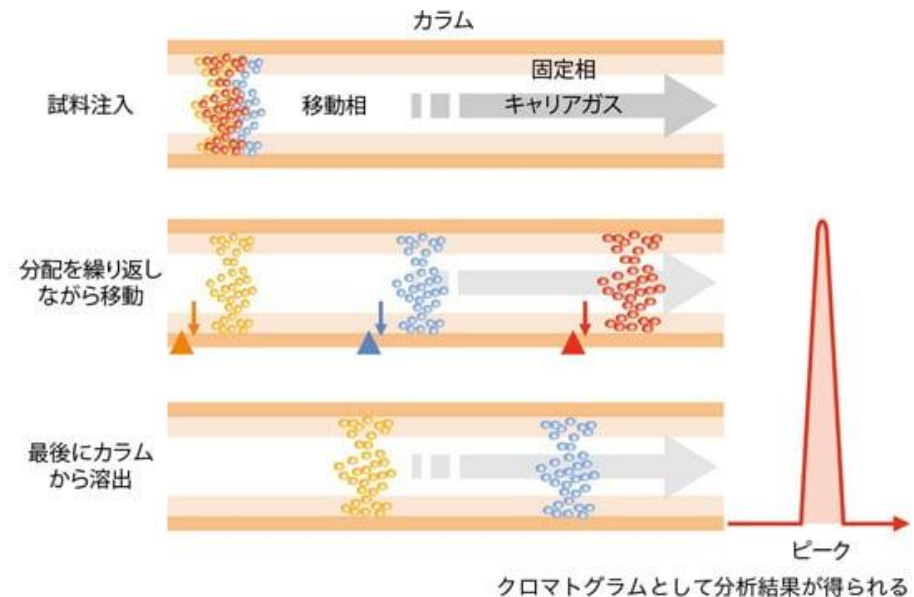
## • ガスクロマトグラフGC-2014

試料をカラムに注入すると、キャリアガスと共に検出器に移動する。分子の移動度の違いによって検出器に早く到着する分子と遅く到着する分子に分離する。

その後、検出器で分析することで分子に対して分離された信号が得られる。信号強度が分子の濃度となるため濃度が分かる。



【1】 出典：株式会社島津製作所



【2】 出典：株式会社島津製作所

# 実際の原子炉に設置されるフィルタベント装置の性能

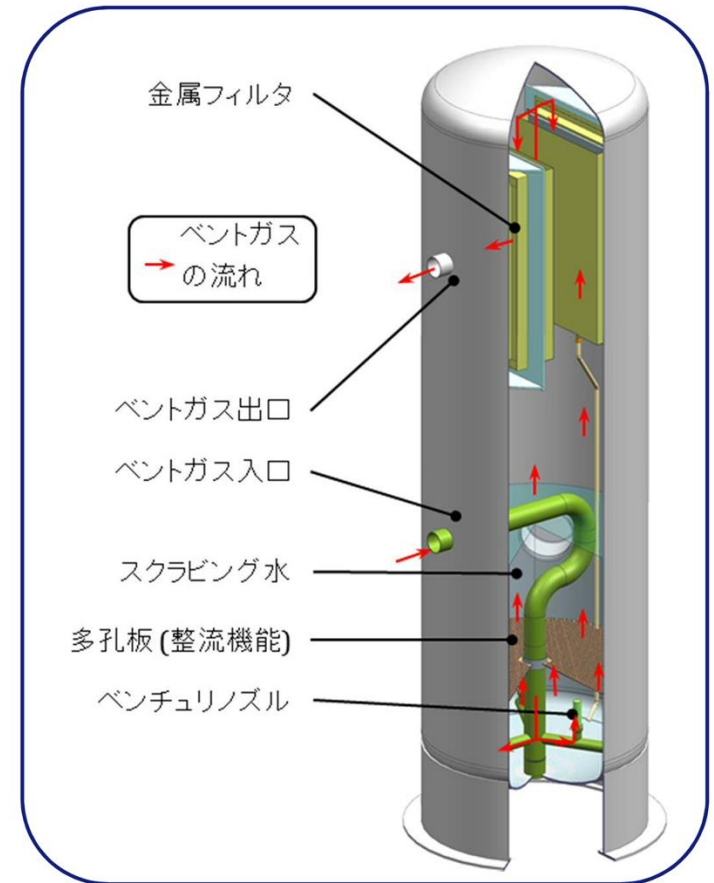
## ■スクラバ容器

- スクラバ容器にスクラビング水を溜め、ベンチュリノズルからベントガスを放出する。
- 多孔板を通すことで、気泡を小さくし、ベントガスとスクラビング水の表面積を大きくする。
- スクラバ容器の上部に、金属フィルタを設置してエアロゾルの除去効率を上げている。



エアロゾルの除去効率：99.9%以上

## 島根原子力発電所2号機の フィルタベント装置 (スクラバ容器)



スクラバ容器 概略構造

【3】 出典：中国電力

# まとめ

- フィルタベント装置の設置目的

原子炉格納容器フィルタベント系は、炉心の著しい損傷が発生した場合において、原子炉格納容器内に発生するFPを含むガスを、フィルタ装置を通して大気に放出する。

対象とするFPは、ガス状・粒子状とする。

➡ Cs-137の放出量が100TBqを下回ること

- フィルタ装置の性能

- ✓エアロゾル状放射性物質除去効率99.9%以上の性能

- ✓ガス状プールスクラビングの性能にはアルカリ水のpHを維持することが大事

## 出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	✦	株式会社島津製作所
【2】	✦	株式会社島津製作所
【3】	✦	中国電力