令和5年度開始　廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金

# 安全システム（ダスト飛散率データ取得）

# 2024年度最終報告

一般財団法人電力中央研究所

2026年3月

© CRIEPI

# 目 次


1. 事業の全体計画 4
2. 各実施項目の成果 12
【1】燃料デブリ取り出しに必要とされるダスト飛散率の調査・検討 13
【1-1】湿潤環境下での飛散率データの調査 15
【1-2】通常時と事故時の安全評価に向けた実環境条件の被ばく線量評価手法の検討 19
【2】実環境を模擬するダスト飛散挙動の検討 24
【2-1】湿潤環境下のダスト挙動計測手法の構築 26
【2-2】水中から気中への移行機構の検討 33
【3】ダスト飛散率測定試験(コールド) 45
【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定 47
【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定 59
【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定 73
【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定 84
【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定 95


© CRIEPI

# 目 次

【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン） 104
【4-1】ウラン含有燃料デブリ構成相の切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター） 112
【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター） 118
【5】ダスト飛散挙動の解析 130
【5-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討 132
【5-2】実験体系の解析評価 141
3. 全体のまとめ 161

© CRIEPI

# 1. 事業の全体計画

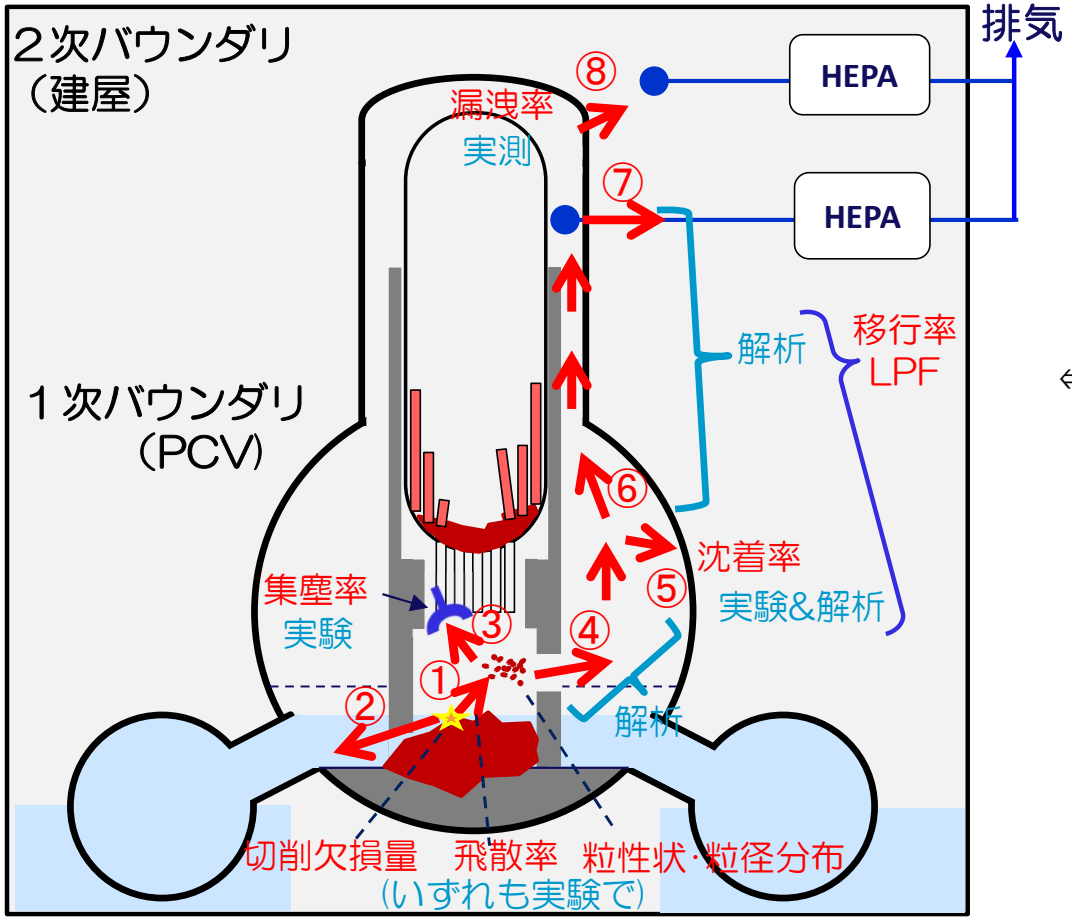
© CRIEPI

# 本事業の目的

●安全評価の技術根拠として湿潤条件を含むダスト飛散データを体系的に整備する。
●切削方法や燃料デブリ性状等の影響パラメータと関連付けてダスト飛散率データを取得する。

➢ 燃料デブリ切削ダストによる公衆／従業員の被ばく線量評価に必要なデータ：

SourceTerm*1 = MAR(放射能)×DR（影響率)×ARF(飛散率)×RF(吸引率)×LPF(移行率)




本事業で取得する飛散率データ
- ➢ 切削欠損量（→DR）
- ➢ 飛散率ARF
- ➢ 粒性状・粒径分布（→RF）

⇐ **ダスト放出経路例（燃料デブリ切削作業[平常時])と評価に必要なパラメータとその導出方法（実施案）**

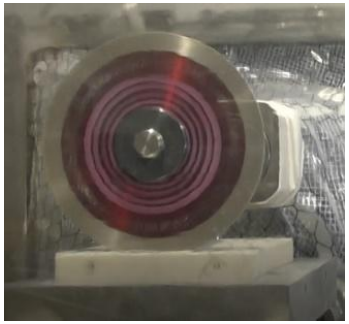
① 切削ﾀﾞｽﾄの気相部への移行（前事業*2～）
② 切削ﾀﾞｽﾄの液相部への移行（本事業～）
③ 局所集塵システムでの回収（他事業）
④ ﾍﾟﾃﾞｽﾀﾙからPCVへ移行（次事業*3～）
⑤ PCV/排気系内の沈降・沈着（次事業～）
⑥ PCV内を移行（次事業～）
⑦ PCV排気系への移行
⑧ PCVから建屋への漏洩

*1：US Department of Energy, “DOE Handbook Airborne Release Fractions / Rates and Respirable Fractions for Non Reactor Nuclear Facilities Volume I – Analysis of Experimental Data”, DOE-HDBK-3010-94, Dec. 1994.
*2：令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金（安全システムの開発（ダスト飛散率データ取得））」
*3：令和7年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（ダスト飛散に係る影響評価技術の開発）」

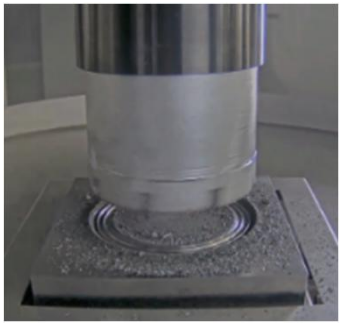
© CRIEPI

# 本事業で対象とする切削工法

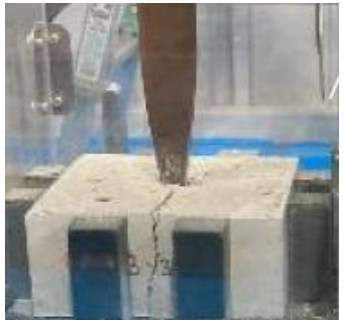
- 燃料デブリの切削工法として技術研究組合国際廃炉研究開発機構（IRID）は下記5工法を想定*。
- 実機仕様が未確定なため、回転数等の運転条件だけでなく、切削刃の種類や寸法等も含めた幅広いパラメータスタディが必要。
- 前事業ではダスト飛散挙動把握の基礎および保守側条件として乾式切削の工法①～④を対象としたが、本事業では実運用の湿式（冠水／注水）条件も含めた工法①～⑤を対象とする。



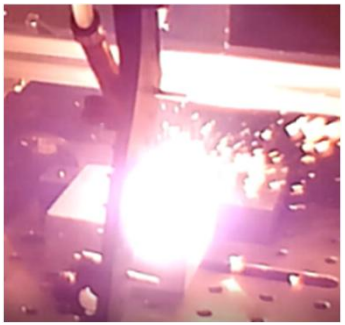
①ディスクカッター



②コアボーリング



③チゼル



④レーザー

⑤アブレーシブ・ウォータージェット（AWJ）

© CRIEPI

*：IRID, 平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発（燃料デブリのダスト集塵システムの技術開発）」2019年度実施分成果報告、2020年8月、p.23.

# 本事業の実施項目

- 【1】燃料デブリ取り出しに必要とされるダスト飛散率の調査・検討
  - 【1-1】湿潤環境下での飛散率データの調査
  - 【1-2】通常時と事故時の安全評価に向けた実環境条件の被ばく線量評価手法の検討
- 【2】実環境を模擬するダスト飛散挙動の検討
  - 【2-1】湿潤環境下のダスト挙動計測手法の構築
  - 【2-2】水中から気中への移行機構の検討
- 【3】ダスト飛散率測定試験（コールド）
  - 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定
  - 【3-2】ﾃﾞｨｽｸｶｯﾀｰによる切削ダスト飛散率測定
  - 【3-3】ｺｱﾎﾞｰﾘﾝｸﾞによる切削ダスト飛散率測定
  - 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測
  - 【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定
- 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）
  - 【4-1】ウラン含有燃料デブリ構成相の切削ダスト飛散率測定試験（ﾃﾞｨｽｸｶｯﾀｰ）
  - 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ﾃﾞｨｽｸｶｯﾀｰ）
- 【5】ダスト飛散挙動の解析
  - 【5-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討
  - 【5-2】実験体系の解析評価

© CRIEPI

# 本事業の実施体制

**一般財団法人電力中央研究所（電中研）**
**■研究実施機関**
【1】燃料デブリ取り出しに必要とされるダスト飛散率の調査・検討
【2】実環境を模擬するダスト飛散挙動の検討
【3】ダスト飛散率測定試験（コールド）
【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）
【5】ダスト飛散挙動の解析

⟷

**東京電力ホールディングス株式会社（東電HD）**
**■プロジェクト管理**

打合せを通じた綿密な協力
・研究計画／実施方法
・結果の解釈、等

**日立GEニュークリア・エナジー株式会社*1（日立GE）**
・燃料デブリ取り出しに必要とされるダスト飛散率の調査・検討
・湿潤下ダスト飛散率測定試験（AWJ）
*1：現 日立GEベルノバニュークリアエナジー株式会社

**三菱重工業株式会社（三菱重工）**
・湿潤下ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

**株式会社IHI（IHI）**
・湿潤下ダスト飛散率測定試験（レーザーおよびコアボーリング）

**日本核燃料開発株式会社（NFD）**
・ダスト飛散率測定ウラン試験

**ONET／Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)／ Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR)**
・kg規模ウラン含有模擬燃料デブリ飛散率測定試験

**アドバンスソフト株式会社（アドバンスソフト）**
・湿潤下ダスト飛散挙動解析

**国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）**
・模擬燃料デブリの製造

*2

*2：この他にも、試験作業補助や供試体の物性測定を依頼している

© CRIEPI

# 他事業との関連

■ 廃炉・汚染水・処理水対策事業のデータをできるだけ集約し、事業に反映する。

【IRID】

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発（燃料デブリのダスト集塵システムの技術開発）

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発

燃料デブリの段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発

安全システムの開発（液体系・気体系システム、臨界管理技術）

燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリの経年変化特性の推定技術の開発）
【東芝ESS*1】

*1：東芝エネルギーシステムズ株式会社

燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発（燃料デブリのダスト集塵システムの技術開発）
【ONET】

③④

①②
③④

③④

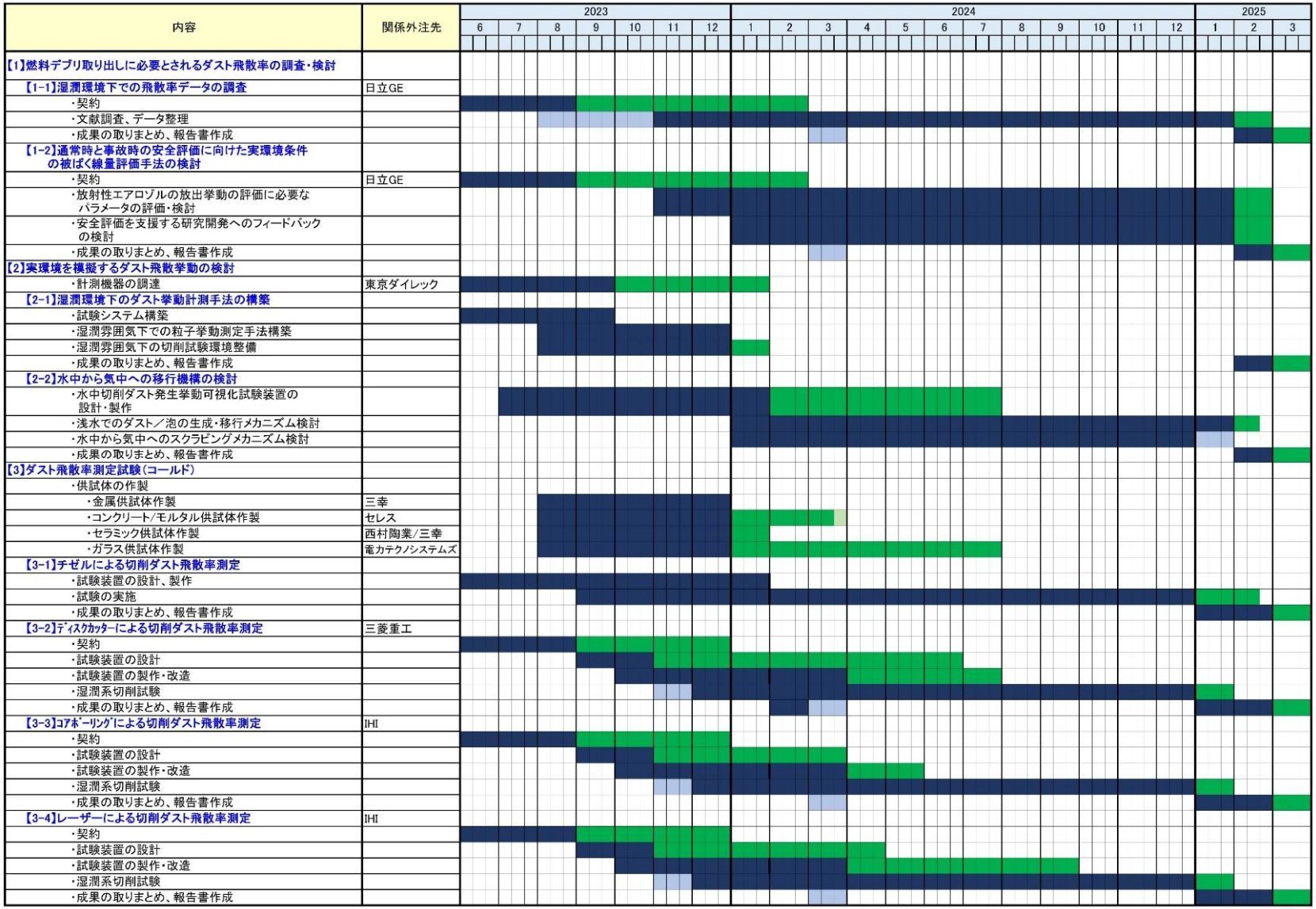
**本事業へのインプット情報*2**
①適用が見込まれる切削工法
②環境や設計から制約（切削工具、切削時間、切削条件など）
③測定済のダスト生成・飛散データ
④模擬燃料デブリ性状

*2：他事業より①～④に該当するデータをインプット

**本事業の成果目標**
想定加工工法（チゼル、ディスクカッター、コアボーリング、レーザー、AWJ）の
ダスト飛散率（湿式切削条件）

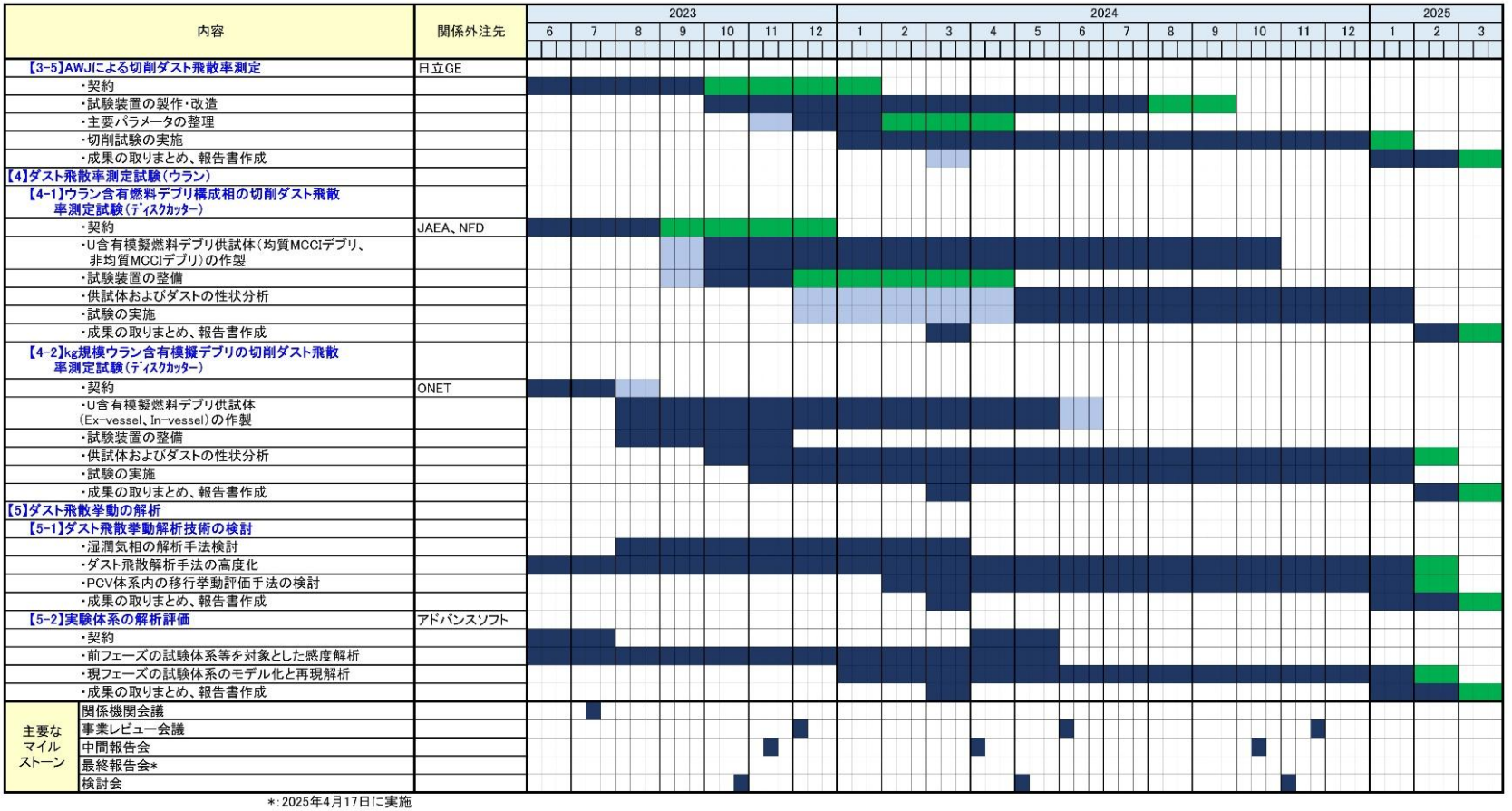
# 実施スケジュール（計画と実績）(1/2)

本工程表は研究の進捗状況や、Input、Outputが適切に研究内でなされていることを確認することを目的として、工程目標を見える化したものであり、当初計画を薄い青■、実績を濃い青■、計画修正部分を薄い緑■、遅延部分を濃い緑■で示す。また、公募要領書記載項目を**青字太字**で示す。



# 実施スケジュール（計画と実績）（2/2）

本工程表は研究の進捗状況や、Input、Outputが適切に研究内でなされていることを確認することを目的として、工程目標を見える化したものであり、当初計画を薄い青■、実績を濃い青■、計画修正部分を薄い緑■、遅延部分を濃い緑■で示す。また、公募要領書記載項目を青字太字で示す。




*：2025年4月17日に実施

# 2. 各実施項目の成果

© CRIEPI

# 【1】燃料デブリ取り出しに必要とされるダスト飛散率の調査・検討

© CRIEPI

# 【1】燃料デブリ取り出しに必要とされるダスト飛散率の調査・検討

目　的

■ 燃料デブリ取り出しの最新の知見を反映して前事業での検討を深化させると共に、湿潤環境のパラメータ設定に活用できる既往データの調査・整理を行う。これらを通じて安全評価の妥当性検討に必要なデータの充実化を図り、更に、線量評価の精緻化に必要なパラメータを見極め、実験条件へのフィードバックを検討する。

主な実施内容

【1-1】湿潤環境下での飛散率データの調査

■ 前事業の取得データと文献値を調査し、各切削工法によるダスト飛散率データを整理

【1-2】通常時と事故時の安全評価に向けた実環境条件の被ばく線量評価手法の検討

■ 五因子法（定常、非定常）による放射性物質放出量評価、被ばく線量試算、今後の課題検討

© CRIEPI

# 【1-1】湿潤環境下での飛散率データの調査

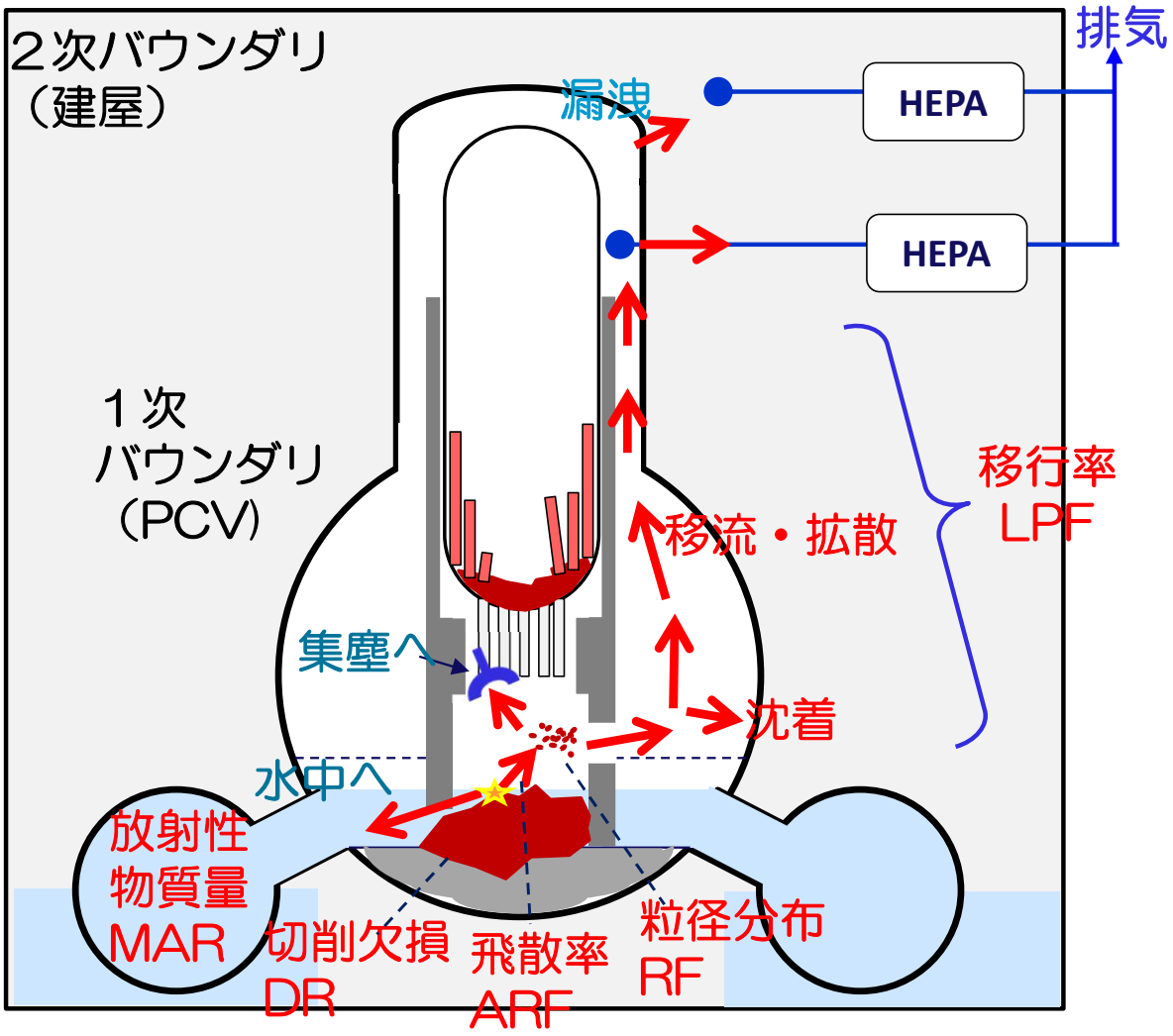
© CRIEPI

## 【1-1】湿潤環境下での飛散率データの調査

# 切削工法による飛散率データの定義（五因子法）

- 放射性物質の施設外への移行過程を段階的に区分し、放射性物質の放出量（ST：Source Term）を、放射性物質の存在量（MAR：Material at Risk）、MARのうち事故の影響を受ける割合（DR：Damage Ratio）、放射性物質が気中に放出されて移行可能な状態になる割合（ARF：Airborne Release Fraction）および放出経路での低減率（LPF：Leakpath Factor）、呼吸により体内へ取り込まれる粒子の割合（RF：Respirable Fraction）の五つの因子の掛け算によって算出する手法。

- ST＝MAR×DR×ARF×RF×LPF




燃料デブリ切削ダストの移行経路と五因子
（通常時の切削作業の例）

## 【1-1】湿潤環境下での飛散率データの調査

# 文献値調査と前事業の飛散率データ整理

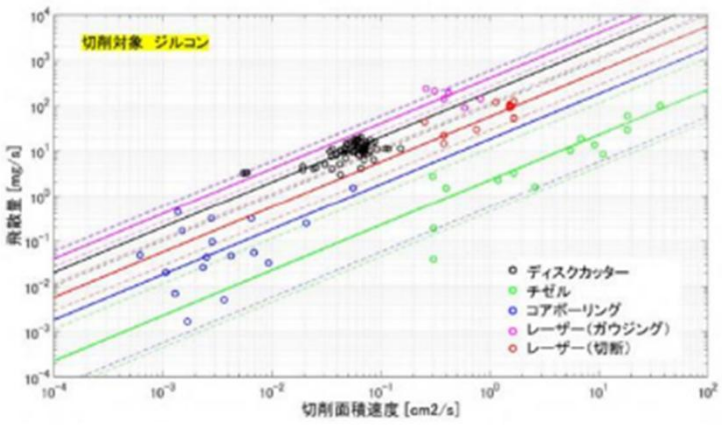
- 前事業の取得データと文献値（DOEハンドブック*1、廃炉ハンドブック*2等）を調査・整理した。
- 被ばく線量評価の観点で、各切削工法によるダスト飛散データについて評価式を用いた整理を実施した。

【乾式切削の評価式による飛散データの整理】

被ばく線量評価の観点で、前事業結果を、飛散量$D_{cutting}$ (g/s)が切削面積速度$S_{cutting}$ (cm²/s)とカーフ幅$w_{kerf}$(cm)、密度(g/cm³)から導出できる下式で整理。

$$D_{cutting} = w_{kerf} \times S_{cutting} \times \rho_M \times ARF$$

五因子のMAR×DRに対応




切削面積速度に対する飛散量の関係（ジルコンの場合）

【湿式切削の評価式による飛散データの整理】

本事業の結果（【2】以降で詳述）により、湿式切削の飛散量$D_{cutting}$は、乾式切削の飛散量$D_{dry}$の水による低減率$R_{wet}$と切削機による水はね$D_{splash}$の和となる下式で整理（本事業では$R_{wet}$が導出されている）。

$$D_{cutting} = D_{dry} \times R_{wet} + D_{splash}$$

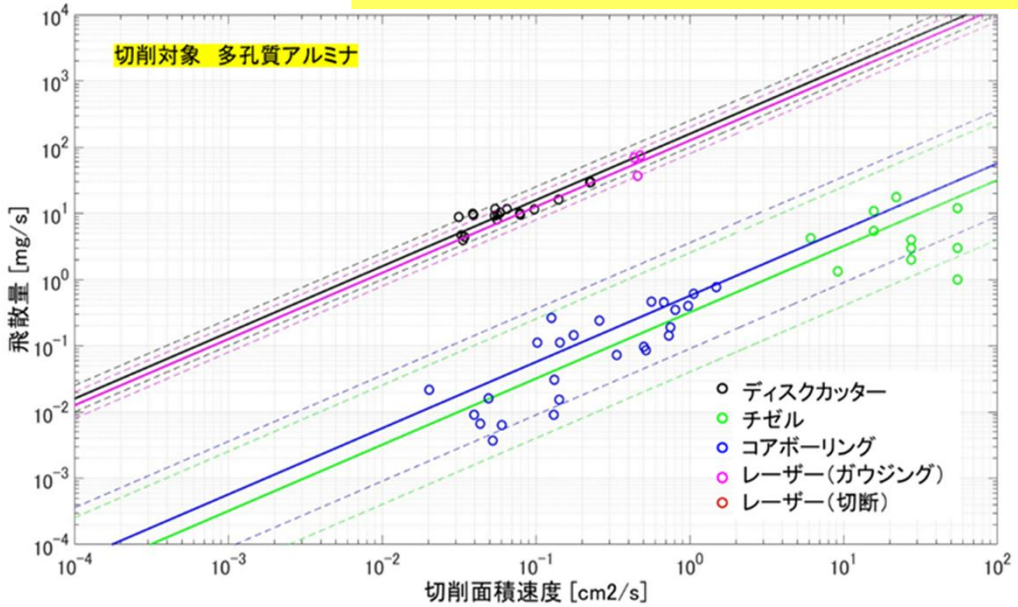
*1：US Department of Energy, “DOE Handbook Airborne Release Fractions / Rates and Respirable Fractions for Nonreactor Nuclear Facilities Volume I – Analysis of Experimental Data”, DOE-HDBK-3010-94, Dec. 1994.
*2：電力中央研究所、「廃止措置工事環境影響評価ハンドブック（第 3 次版）」、2007 年 3 月.

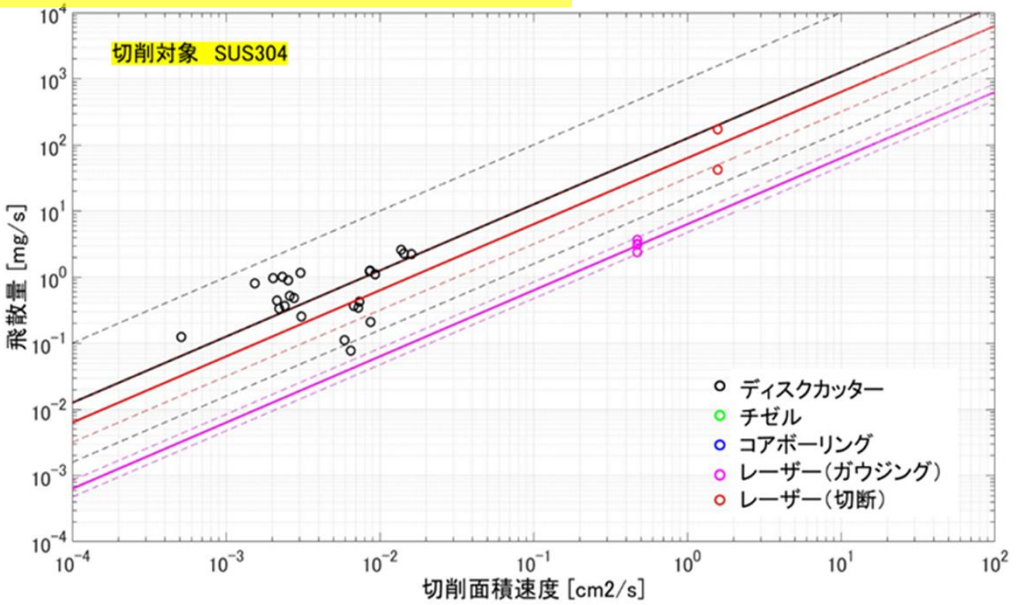
© CRIEPI

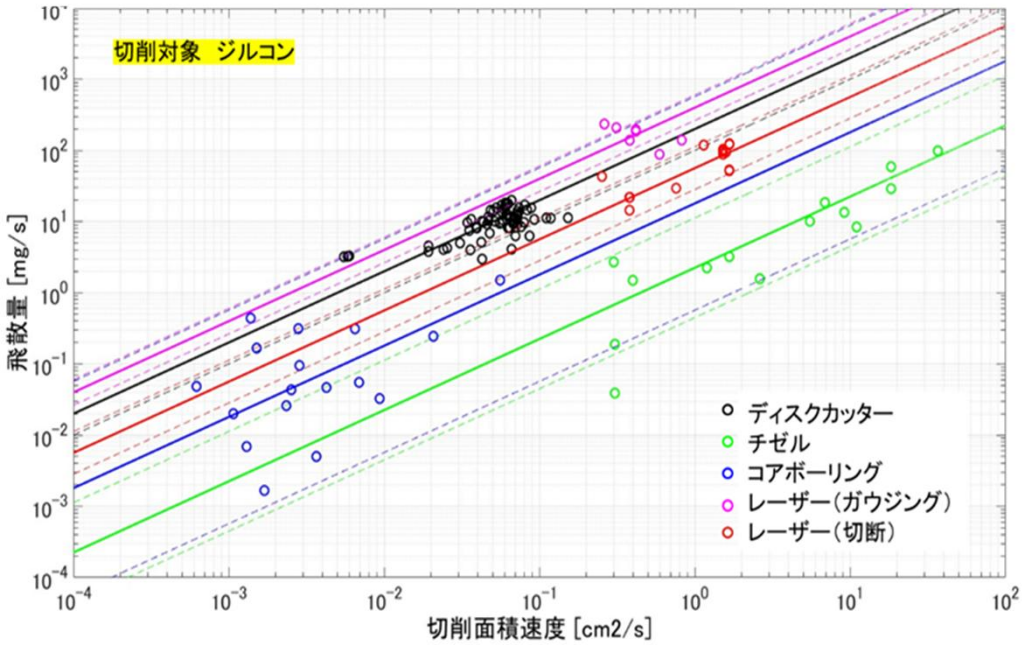
## 【1-1】湿潤環境下での飛散率データの調査

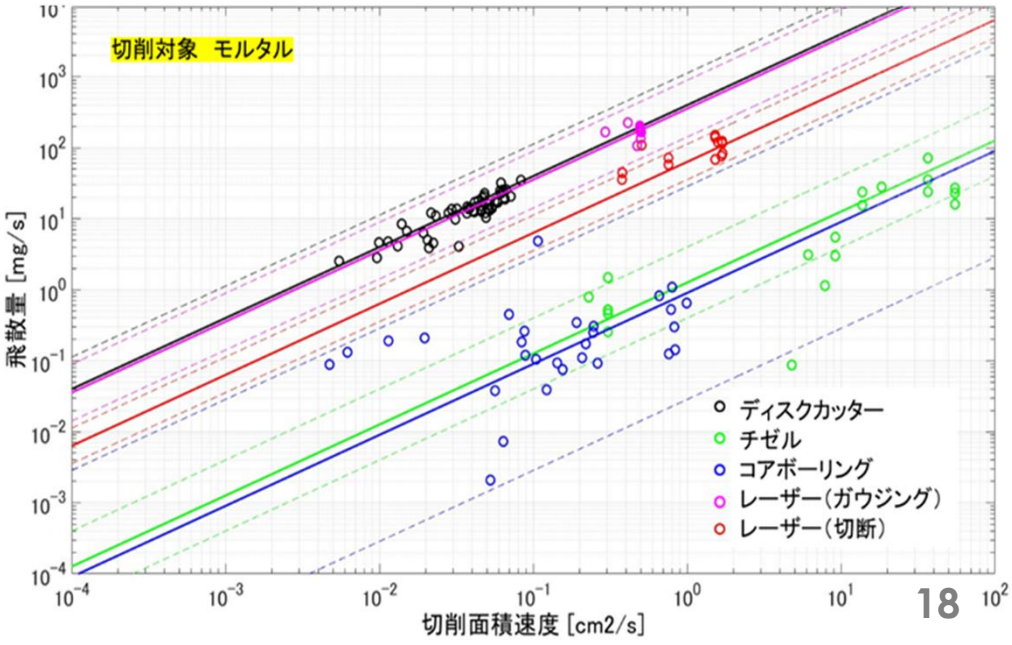
# 乾式切削の評価式による飛散データの整理結果例

$$D_{cutting}(g/s) = w_{kerf} \times S_{cutting}\ (cm^2/s) \times \rho_M \times ARF$$



# 【1-2】通常時と事故時の安全評価に向けた実環境条件の被ばく線量評価手法の検討

© CRIEPI

## 【1-2】通常時と事故時の安全評価に向けた実環境条件の被ばく線量評価手法の検討

# 重要な核種の検討

- 炉内構造物の放射化核種は、廃炉ハンドブックにおける評価を参照し、燃料起因の放射性核種については、JAEAによる1Fの1号機燃料の燃焼計算結果を基に、被ばく評価の寄与が大きくなる核種を選定した(前事業と同様)。但し、炉停止20年後で再計算した(下表)。
- 10元素14核種(Sr-90、Cs-134、Cs-137、Eu-154、Pu-238、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Am-241、Cm-244、Co-60、Fe-55、Ni-63、C-14)*を選定した。

| | 核種 | 放射能量 (*1) | ｶﾞﾝﾏ線実効エネルギー | | 吸入摂取 | | 経口摂取 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 線源強度 (*2) | 寄与割合 | 相対線量 (*2) | 寄与割合 | 相対線量 (*2) | 寄与割合 |
| | | (GBq/core) | (MeV GBq) | (%) | (kSv) | (%) | (kSv) | (%) |
| 1 | H-3 | 3.09E+05 | 0.00E+00 | 0.0% | 8.34E+00 | 0.0% | 1.30E+01 | 0.0% |
| 2 | Be-10 | | 0.00E+00 | 0.0% | 0.00E+00 | 0.0% | 0.00E+00 | 0.0% |
| 3 | C-14 | 2.02E+02 | 0.00E+00 | 0.0% | 1.25E-03 | 0.0% | 1.17E-01 | 0.0% |
| 4 | S-35 | | 0.00E+00 | 0.0% | 0.00E+00 | 0.0% | 0.00E+00 | 0.0% |
| 46 | Pu-238 | 4.36E+06 | 8.02E+03 | 0.0% | 4.80E+08 | 33.2% | 1.00E+06 | 16.1% |
| 47 | Pu-239 | 7.07E+05 | 6.43E+02 | 0.0% | 8.48E+07 | 5.9% | 1.77E+05 | 2.8% |
| 48 | Pu-240 | 8.89E+05 | 1.54E+03 | 0.0% | 1.07E+08 | 7.4% | 2.22E+05 | 3.6% |
| 49 | Pu-241 | 8.53E+07 | 1.20E+07 | 26.8% | 1.96E+08 | 13.6% | 4.09E+05 | 6.6% |
| 50 | Pu-242 | 2.85E+03 | 4.10E+00 | 0.0% | 3.14E+05 | 0.0% | 6.84E+02 | 0.0% |
| 51 | Am-241 | 5.06E+06 | 1.65E+05 | 0.4% | 4.86E+08 | 33.6% | 1.01E+06 | 16.2% |
| 52 | Am-242m | 2.12E+04 | 5.32E+02 | 0.0% | 1.95E+06 | 0.1% | 4.03E+03 | 0.1% |
| 53 | Am-243 | 2.52E+04 | 6.02E+03 | 0.0% | 2.42E+06 | 0.2% | 5.04E+03 | 0.1% |
| 54 | Cm-242 | 1.74E+04 | 3.18E+01 | 0.0% | 1.03E+05 | 0.0% | 2.09E+02 | 0.0% |
| 55 | Cm-244 | 1.26E+06 | 1.98E+03 | 0.0% | 7.18E+07 | 5.0% | 1.51E+05 | 2.4% |

© CRIEPI

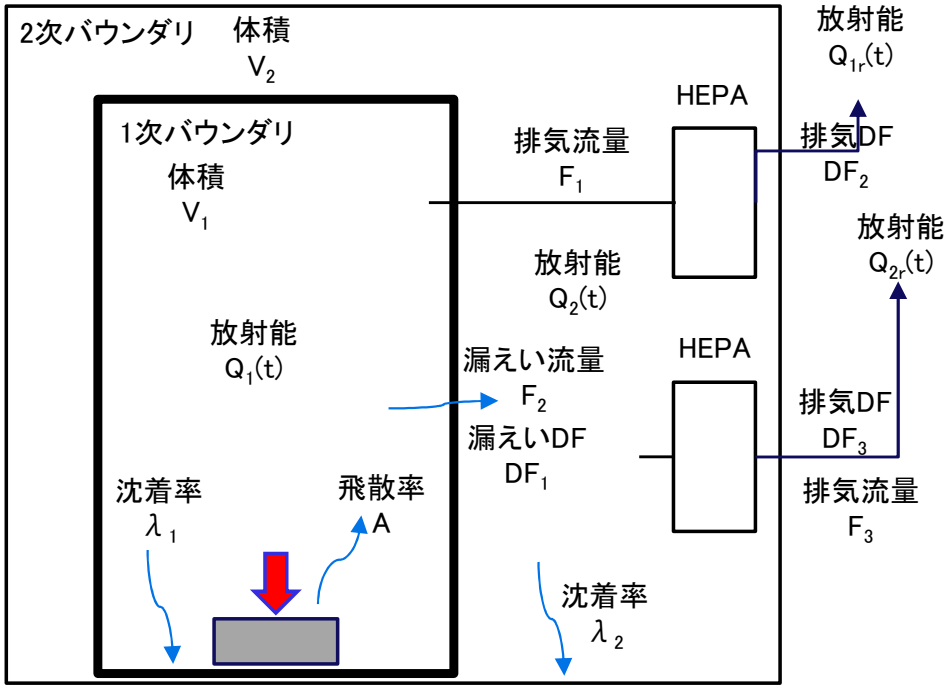
*:青字は燃料デブリ(核分裂)起因、黒字は放射化による核種を示す。

# 【1-2】通常時と事故時の安全評価に向けた実環境条件の被ばく線量評価手法の検討

## 五因子法による放射性物質放出量評価

### ■ 五因子法（定常、非定常）

- ➢ 五因子法（定常）：前事業のモデルを援用
  - ■ MARをアップデートし、湿潤条件のARF（暫定値）を適用（設定値等は次ページ）
- ➢ 五因子法（非定常）：通常作業時を想定し、単純かつ保守的なモデル（左下図）を構築
  - ■ 試験的取り出しの知見（燃料デブリ性状分析結果等）、現在進められている要素試験データなどから不足している情報を獲得しつつ、適宜評価パラメータを追加・精緻化し詳細評価できるモデルを検討




$$\frac{dQ_1}{dt} = A - \frac{Q_1}{V_1}(\lambda_1 V_1 + F_1 + F_2)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = Q_1\left(\frac{F_2}{V_1}\frac{1}{DF_1}\right) - Q_2\left(\lambda_2 + \frac{F_3}{V_2}\right)$$

$$\frac{dQ_{1r}}{dt} = \frac{F_1}{V_1 \cdot DF_2} \cdot Q_1$$

$$\frac{dQ_{2r}}{dt} = \frac{F_3}{V_2 \cdot DF_3} \cdot Q_2$$

**五因子法(非定常)のための設定値（暫定値）**

| パラメータ | 設定値 | |
|---|---|---|
| $A$ | 工法依存 | 飛散率(Bq/s) |
| $\lambda_1$ | 5.58e-5<br>5.58e-4 | 1次バウンダリ沈着率(1/s)<br>上：乾燥条件、下：湿潤条件 |
| $\lambda_2$ | 3.78e-4<br>3.78e-3 | 2次バウンダリ沈着率(1/s)<br>上：乾燥条件、下：湿潤条件 |
| $V_1$ | 4100 | 1次バウンダリ体積($m^3$) |
| $V_2$ | 825 | 2次バウンダリ体積($m^3$) |
| $F_1$ | 2.78e-3 | 1次バウンダリ排気流量($m^3/s$) |
| $F_2$ | 5.56e-3 | 1次バウンダリ漏洩量($m^3/s$) |
| $F_3$ | 8.33e-3 | 2次バウンダリ排気流量($m^3/s$) |
| $DF_1$ | 10 | 1次バウンダリ漏洩DF |
| $DF_2$ | 1000 | 1次バウンダリ排気DF |
| $DF_3$ | 1000 | 2次バウンダリ排気DF |

| 放射能 | |
|---|---|
| $Q_{1r}(t)$ | 1次バウンダリからの放射性物質放出量(Bq) |
| $Q_{2r}(t)$ | 2次バウンダリからの放射性物質放出量(Bq) |
| $Q_1(t)$ | 1次バウンダリ中の放射性物質量(Bq) |
| $Q_2(t)$ | 2次バウンダリ中の放射性物質量(Bq) |

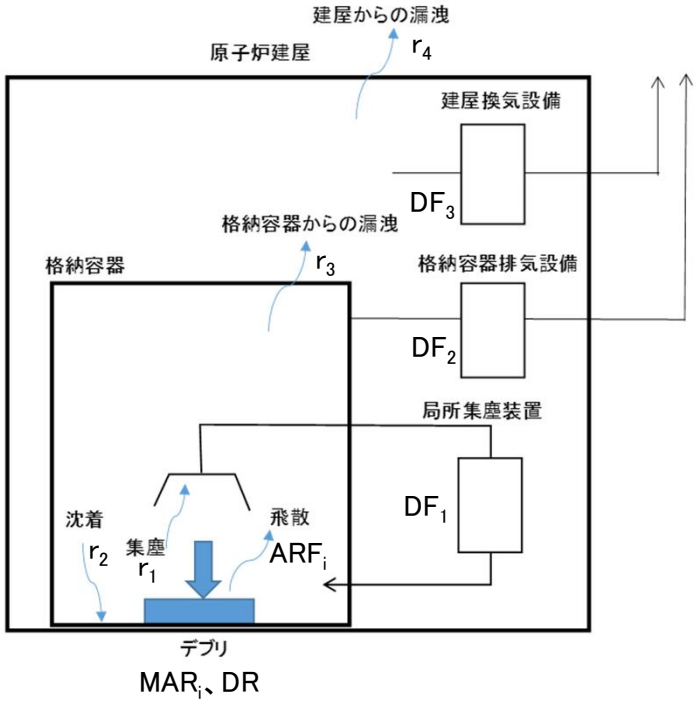
© CRIEPI

# 【1-2】通常時と事故時の安全評価に向けた実環境条件の被ばく線量評価手法の検討

## 被ばく線量試算(1/2)

■ 放射性物質放出量の評価(通常作業時、ディスクカッターの例)

➢ 五因子法(定常) $ST_i = MAR_i \cdot DR \cdot ARF_i \cdot \left[\frac{1}{DF1} + (1-r1)\right] \cdot (1-r2) \cdot \left[\frac{1-r3}{DF2} + r3 \cdot \left\{\frac{1-r4}{DF3} + r4\right\}\right] \cdot RF$




五因子法(定常)のための設定値(暫定値)

| パラメータ | | 乾燥 | 湿潤 | 設定理由等 |
|---|---|---|---|---|
| 放射性物質の存在量：MARi(Bq/Core) | | 4.36E+15 | | 燃焼計算による1F-1燃料の20年減衰後のPu-238放射能*1 |
| 作業により影響を受ける割合：DR (1/h) | | 5.00E-6 | | IRID設計条件「10年間、200日／年、加工時間10時間／日で全インベントリ切削」*2と切り出し形状を40×28×9cm、カーフ幅3.1mmとした場合の欠損率10%より導出 |
| 飛散率：ARFi(-) | | 2.5E-02 (暫定値) | 3.2E-04 (暫定値) | 乾燥条件：廃炉ハンドブック*3（放射化金属のディスクカッター切削飛散率0.02%～2.5%）より設定。湿潤条件：本事業の解析結果（ディスクカッターの切削による飛散率）から求めた値(0.032%)に設定。 |
| 呼吸吸引の粒径範囲の粒子割合：RF | | 1 | | 保守的に1と仮定 |
| 放出経路での低減率:LPF | $DF_1$ | - | | 保守的に局所集塵装置を設置しないと想定 |
| | $DF_2$ | 100,000 | | HEPAフィルター2段により$DF_2$=1,000*100 |
| | $DF_3$ | - | | 建屋への漏えいはないと想定 |
| | $r_1$ | 0 | | 局所集塵装置を設置しないと想定 |
| | $r_2$ | 0 | | 保守的に沈着を期待しない |
| | $r_3$ | 0 | | 負圧管理により漏えいしないと想定 |
| | $r_4$ | - | | 建屋からの漏えいはない |
| 放出量STi評価値(Bq/h) | | 5.45E+3 | 6.98E+1 | |

前事業報告書と同じ形式・同じ設定値(ARF除く)での整理(Pu-238、ディスクカッターのみ)
↓
湿潤条件の飛散率を用いることによる放射性物質放出量の低減影響を明示*4

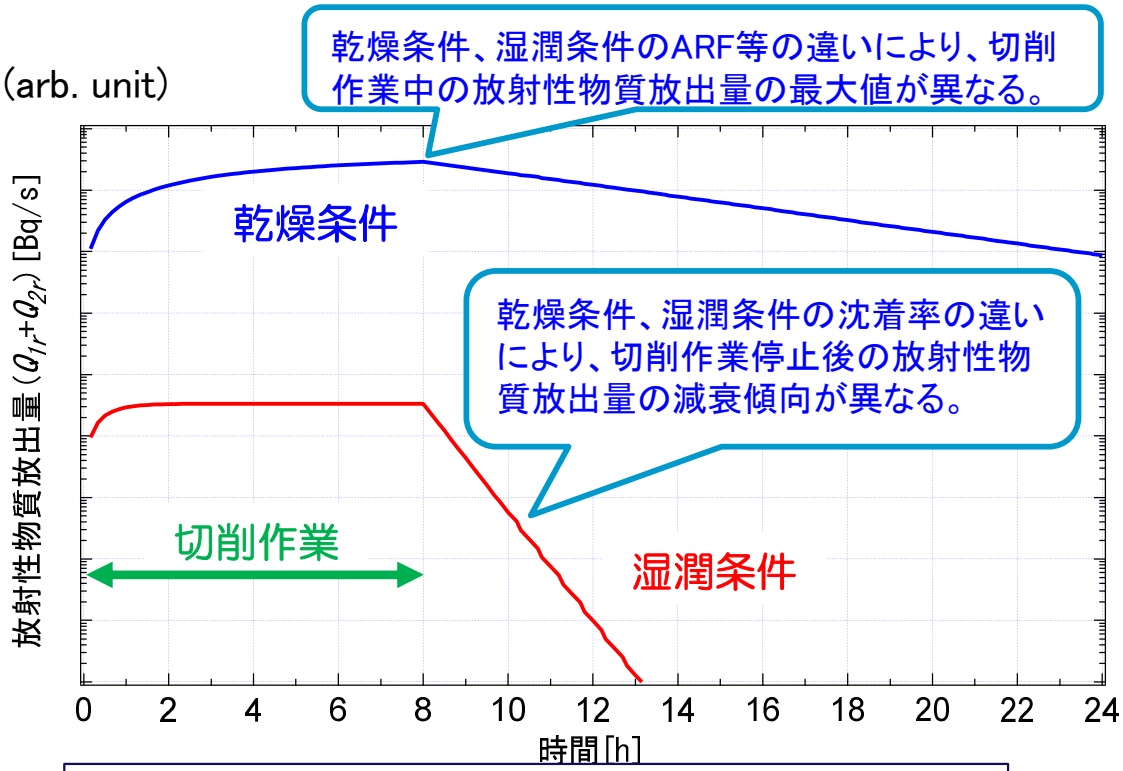
*1:西原健司、他、「福島第一原子力発電所の燃料組成評価」、JAEA-Data/Code2012-018、2012.
*2:平成 28 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金事業、「燃料デブリ・炉内構造物取り出し工法・システムの高度化 研究報告書(最終報告)」
*3:電力中央研究所、「廃止措置工事環境影響評価ハンドブック(第 3 次版)」、2007 年 3 月.
*4:前事業報告書では10年減衰後のPu-238放射能を用いたため本計算と若干の差がある

© CRIEPI

# 【1-2】通常時と事故時の安全評価に向けた実環境条件の被ばく線量評価手法の検討

## 被ばく線量試算(2/2)

- 放射性物質放出量の評価(通常作業時、ディスクカッターの例)
  - 五因子法(非定常) $\frac{dQ_1}{dt} = A - \frac{Q_1}{V_1}(\lambda_1 V_1 + F_1 + F_2)$ $\frac{dQ_2}{dt} = Q_1\left(\frac{F_2}{V_1}\frac{1}{DF_1}\right) - Q_2\left(\lambda_2 + \frac{F_3}{V_2}\right)$ $\frac{dQ_{1r}}{dt} = \frac{F_1}{V_1 \cdot DF_2} \cdot Q_1$ $\frac{dQ_{2r}}{dt} = \frac{F_3}{V_2 \cdot DF_3} \cdot Q_2$
  - 乾燥条件及び湿潤条件における1次バウンダリと2次バウンダリ合計の放射性物質放出量($Q_{1r} + Q_{2r}$)の経時変化の例(午前4時間、午後4時間の合計8時間の連続切削作業を想定)
- 選定核種の放射性物質放出量
  - 各工法の切削・破砕作業量を計算し、前事業、本事業のARF評価値等を使用して試算
- 被ばく線量
  - 右下(1)～(4)の被ばく経路を想定すれば、工法別に単位加工量あたりの線量として試算可能
- 今後の課題検討の結果(例)
  - 炉内、建屋内での沈着、再浮遊、凝集等を考慮したLPFデータの整備
  - 事業者ニーズを反映したデータベースの構築




(1) 放射性雲からのγ線による外部被ばく
(2) 地表沈着物からのγ線による外部被ばく
(3) 吸入摂取による内部被ばく
(4) 地表沈着物の再浮遊による吸入摂取による内部被ばく

「福島第一原子力発電所特定原子力施設に係る実施計画」を参考に被ばく経路(1)～(4)を選定

© CRIEPI

# 【2】実環境を模擬するダスト飛散挙動の検討

© CRIEPI

# 【2】実環境を模擬するダスト飛散挙動の検討

【2-1】湿潤環境下のダスト挙動計測手法の構築

■ 湿潤環境下では、液滴やミストがダスト計測の干渉要因となるほか、ミストとの衝突や凝結による粒径変化が生じるため、正確な計測はより困難となる。

- 湿潤条件下での飛散ダストの計測手法を構築し、【3】のコールド供試体を用いたダスト飛散率測定試験に適用した。

■ 機械的切削においては、乾式条件と比較して湿潤条件下ではダストの飛散量が顕著に低減することが想定された。

- 湿潤環境下での基礎的な切削実験を実施し、その結果を【3】のコールド供試体を用いたダスト飛散率測定試験の条件設定に反映した。

【2-2】水中から気中への移行機構の検討

■ 切削近傍での気液間のダスト移行挙動について、レーザー切削では、スクラビング効果による気中から水中への移行、機械的切削では、水中から気中への移行が重要であることが分かった。

- 気中から水中への移行挙動（スクラビング効果）、機械的切削における再飛散挙動についての基礎的なデータを取得した。

© CRIEPI

# 【2-1】湿潤環境下のダスト挙動計測手法の構築

© CRIEPI

【2-1】湿潤環境下のダスト挙動計測手法の構築

# 湿潤環境下でのダスト計測手法の構築

【目的】

■ 湿潤環境下におけるダスト飛散データの取得手法を構築する。

【実施内容1】

■ ミストはダスト測定における干渉要因である一方、ミストとダストの衝突などによりダスト挙動にも影響を与える。このため、ミストの特性把握も重要であり、本事業ではミストとダストの双方を同時に計測可能な手法の構築を行う。

【実施内容2】

■ 水の介在が飛散ダストの発生および拡散に与える低減効果を定量的に評価するため、機械的切削を想定した基礎試験を実施する。

© CRIEPI

## 【2-1】湿潤環境下のダスト挙動計測手法の構築

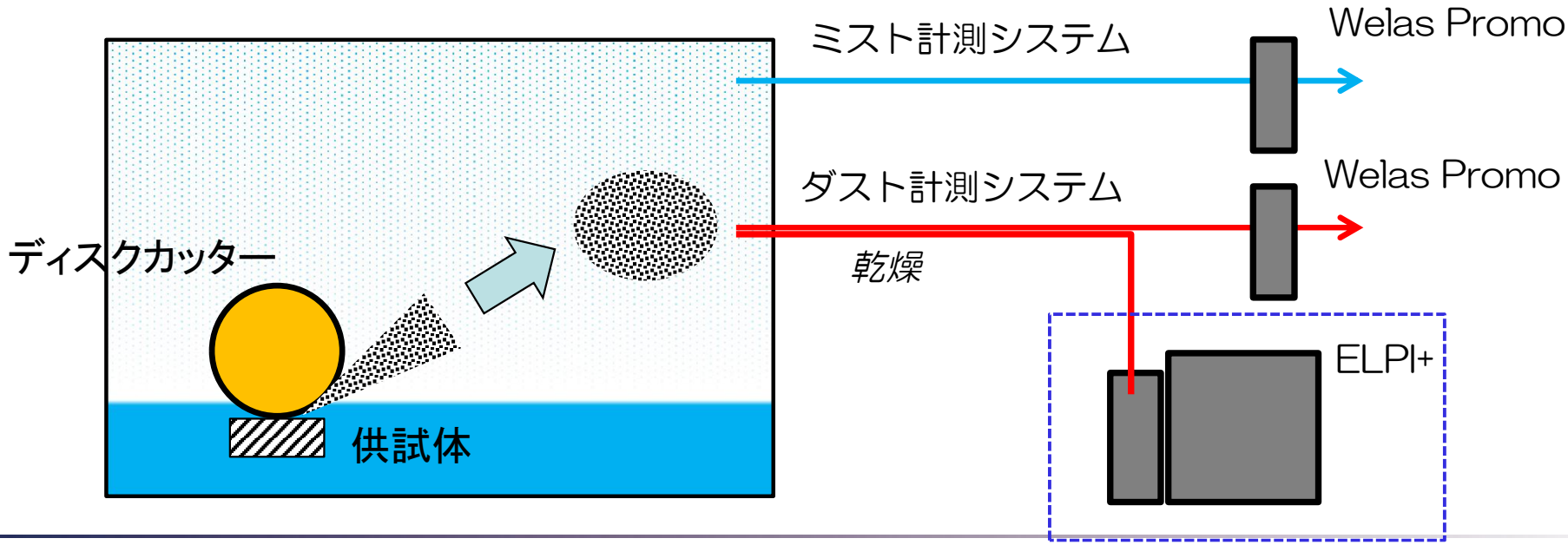
# 湿潤環境下でのダスト計測手法の構築

【実施内容1】湿潤環境下でのダスト計測手法の構築

- 湿潤環境下におけるダスト計測手法の構築に向け、切削により発生するダストと水滴・ミストを同時に計測可能なシステムを開発した。

- ダストについては、乾燥部を通してミストを除去した後、Welas Promo（光散乱方式）およびELPI+により計測する。

- ミストについては、Welas Promoを用いて計測する。

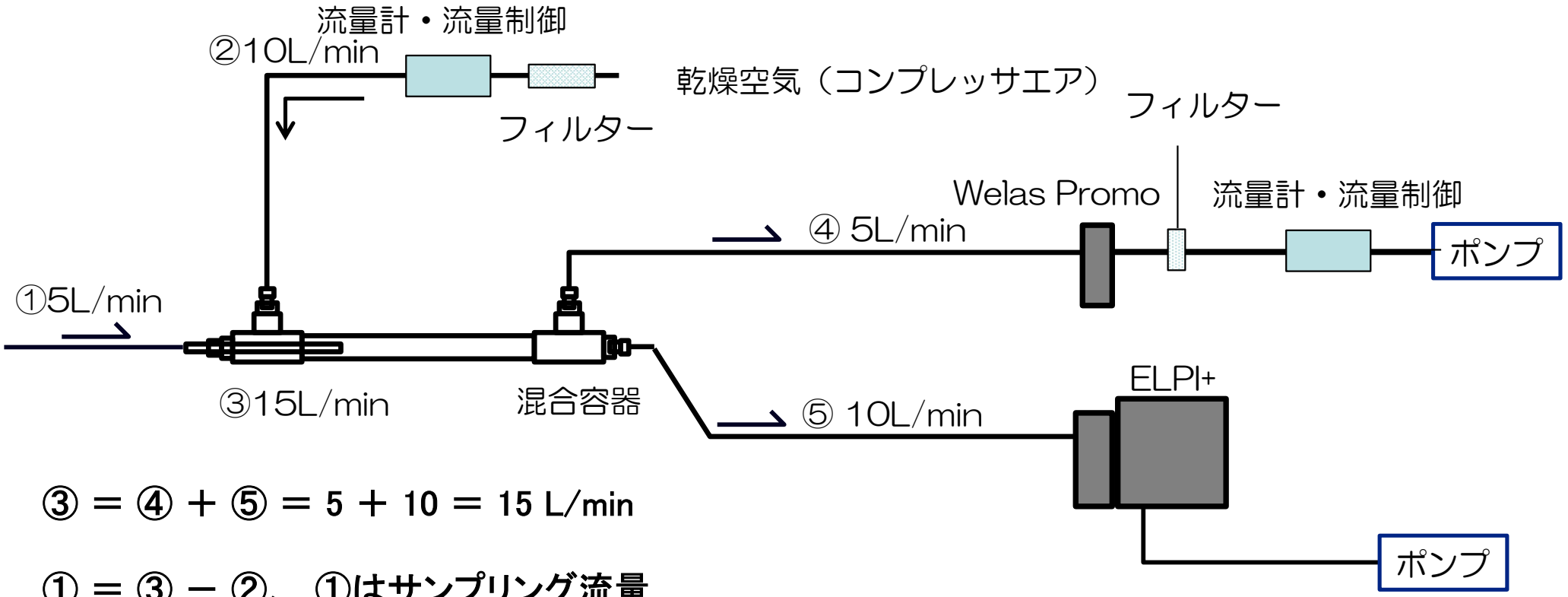



© CRIEPI

## 【2-1】湿潤環境下のダスト挙動計測手法の構築

# ミスト除去システム

サンプリング流量、希釈空気流量を制御することで、ミストを乾燥除去する。①～⑤は各部の流量を示す。




**③ ＝ ④ ＋ ⑤ ＝ 5 ＋ 10 ＝ 15 L/min**

**① ＝ ③ － ②、 ①はサンプリング流量**

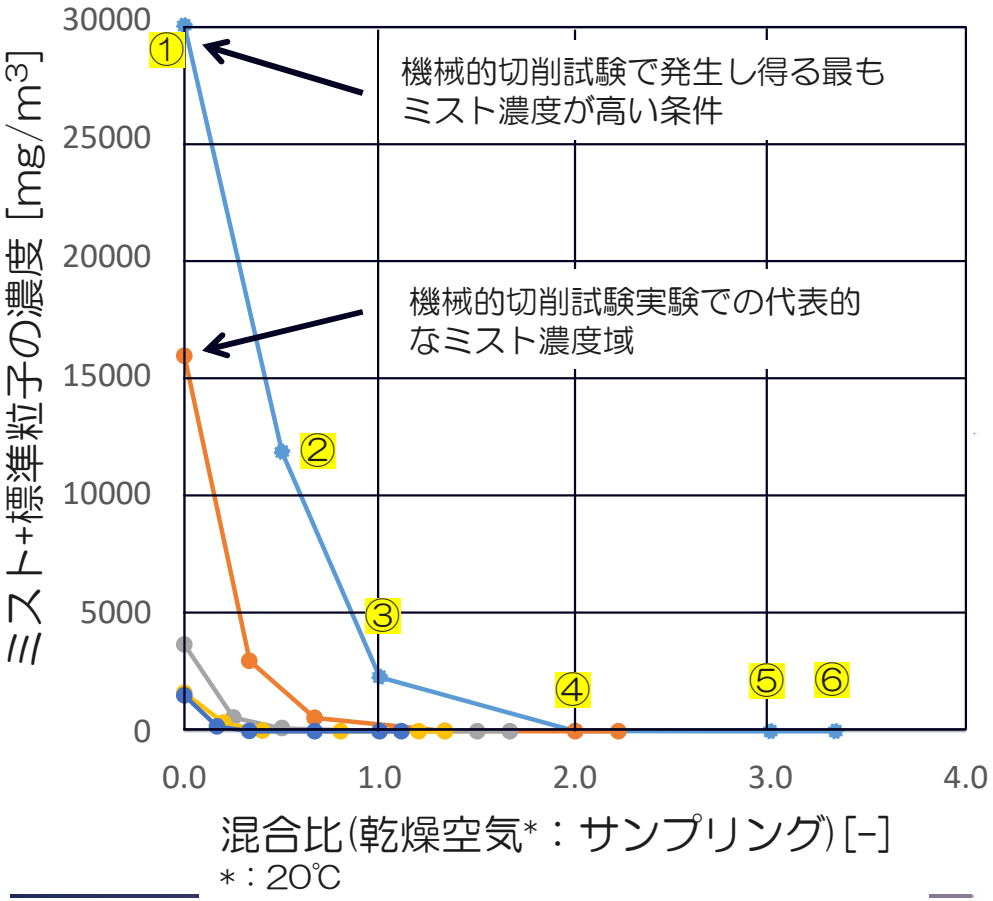
**希釈倍率：③/①（上図の場合：3倍希釈）**
**実際は予備実験の結果に基づいて②の流量を調整することで、**
**希釈倍率（乾燥空気との混合比）を制御する。**

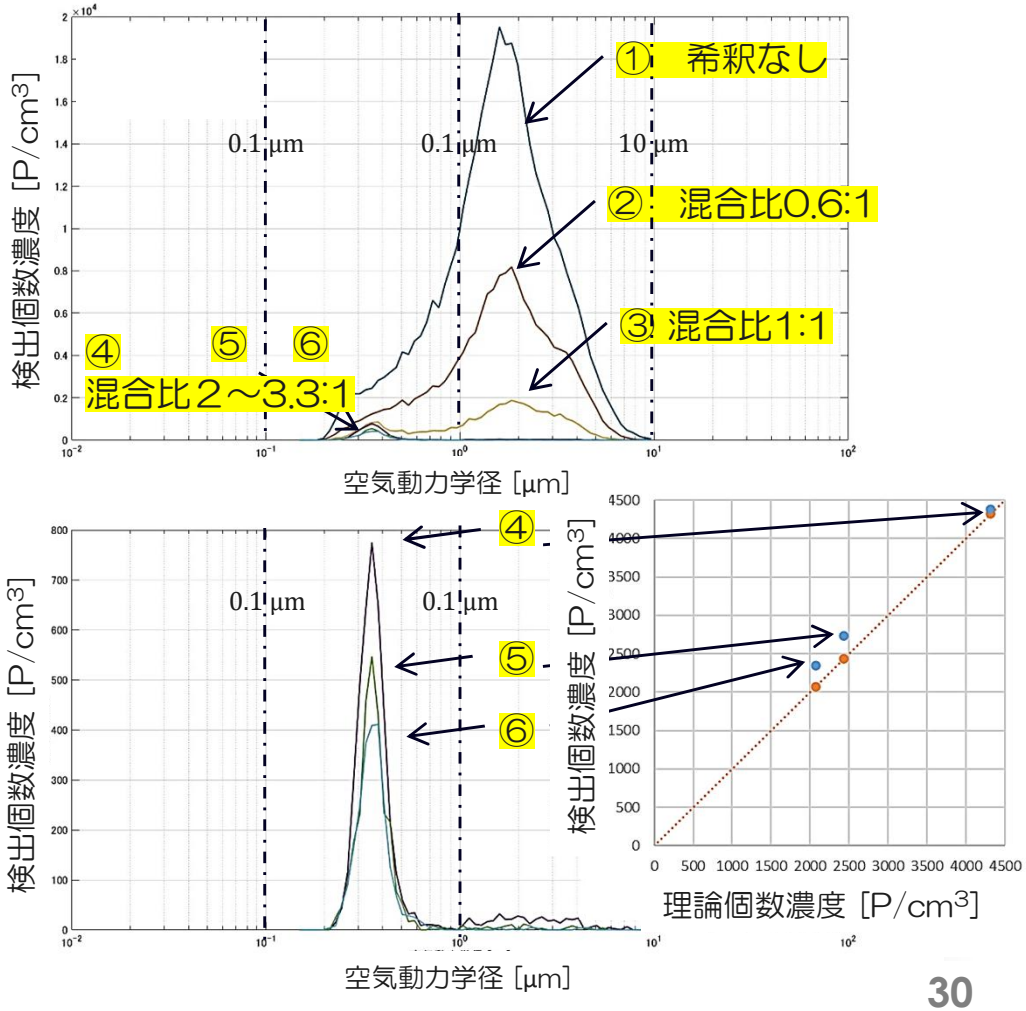
© CRIEPI

## 【2-1】湿潤環境下のダスト挙動計測手法の構築

# ミスト除去システム

- ミスト除去システムに必要な乾燥空気量（混合比）について検討した結果、機械的切削試験における代表的なミスト発生条件では混合比1.0で除去が可能であり、最も高濃度のミストが発生する条件下においても混合比2.0程度で十分な除去性能を確認した。
- ミスト除去システムによるダストの損失は小さく、ミストと標準粒子（300nm PSL粒子）を混合して乾燥させた場合においても、計算により推定された標準粒子の理論個数濃度と実測された検出個数濃度は良好に一致した。



## 【2-1】湿潤環境下のダスト挙動計測手法の構築

# 湿潤環境下でのダスト計測手法の構築

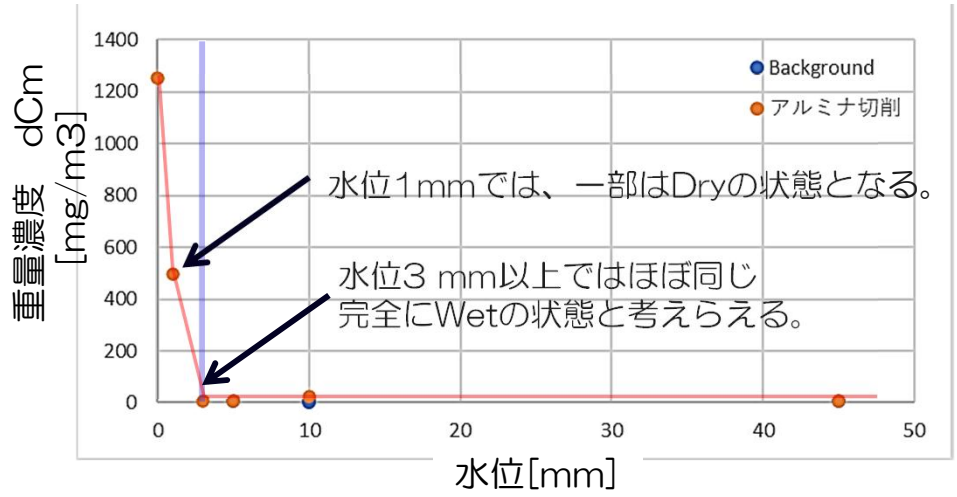
**【実施内容2】水による飛散ダスト低減効果についての基礎試験**

**機械的切削においては、切削部に水位が形成されることで飛散量が大幅に低減し、Dry条件と比較して、ディスクカッターでは重量濃度で約1/1000、コアボーリングでは約1/200まで低減された。**

- **ここで得られた知見を、【3】のコールド供試体を用いたダスト飛散率測定試験の条件設定に反映した。⇒　ディスクカッターの外径や回転数が大きくなるほど、飛散ダストを効果的に低減するために必要となる水位が高くなることが示唆された。**

- **機械的切削においては、水によるダスト飛散低減効果が大きく、切削時に発生するダストより、水中からの再飛散の影響が相対的に大きいことが示唆された。⇒【2-2】**

外径180mmのディスクカッターを使用した時の飛散ダストの重量濃度と水位




使用した刃の外径：180 mm

## 【2-1】湿潤環境下のダスト挙動計測手法の構築

# まとめ

【実施内容1】湿潤環境下でのダスト計測手法の構築

- 湿潤環境下では、液滴やミストがダスト計測の干渉要因となるほか、ミストとの衝突や凝結による粒径変化が生じるため、正確な計測はより困難となる。
  - 湿潤条件下での飛散ダストの計測手法を構築し、【3】のコールド供試体を用いたダスト飛散率測定試験に適用した。

【実施内容2】水による飛散ダスト低減効果についての基礎試験

- 機械的切削においては、乾式条件と比較して湿潤条件下ではダストの飛散量が顕著に低減することが想定された。
  - 湿潤環境下での基礎的な切削実験を実施し、その結果を【3】のコールド供試体を用いたダスト飛散率測定試験の条件設定に反映した。
  - 機械的切削においては、水によるダスト飛散低減効果が大きく、切削時に発生するダストより、水中からの再飛散の影響が相対的に大きいことが示唆された。⇒【2-2】

© CRIEPI

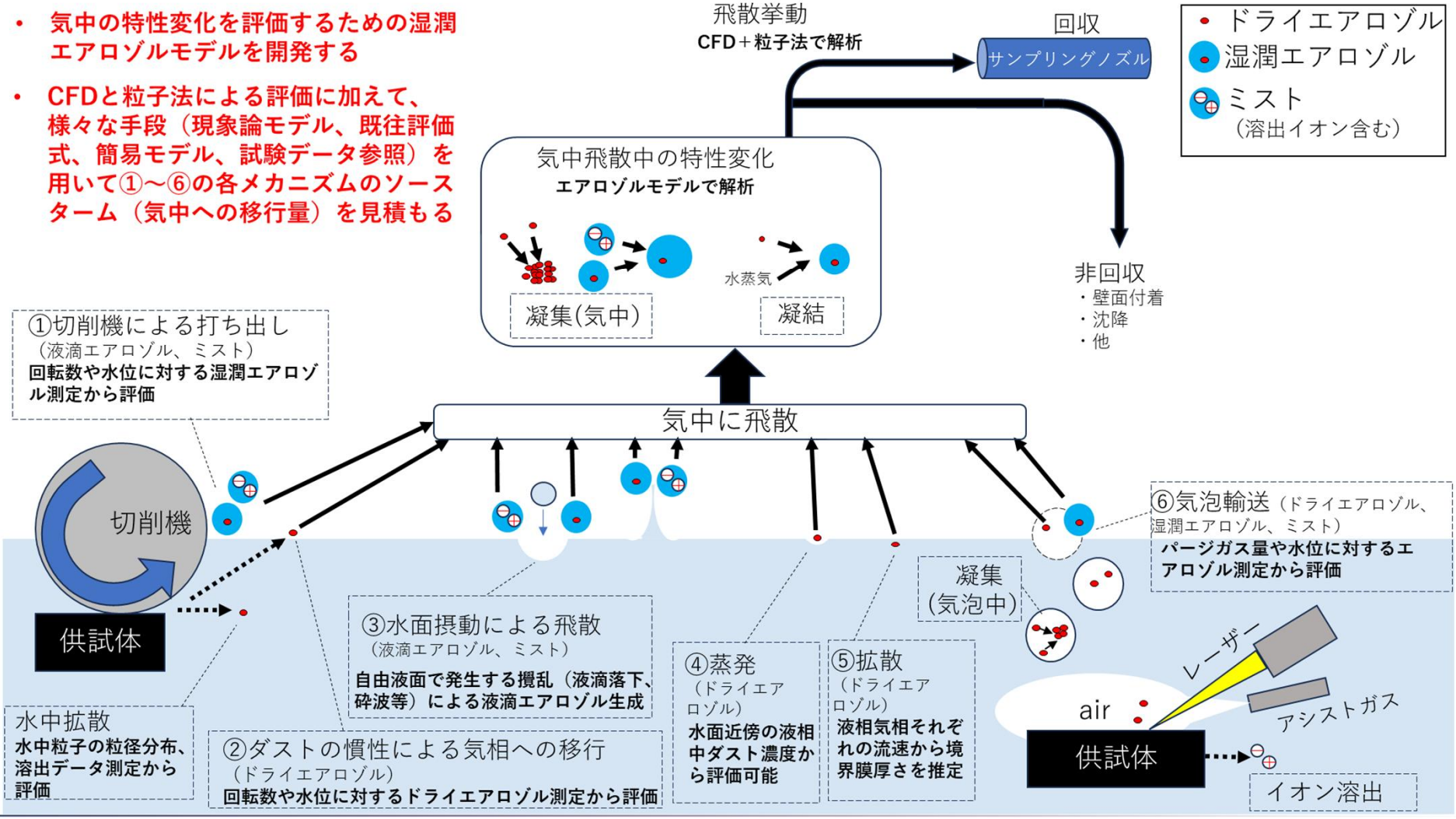
# 【2-2】水中から気中への移行機構の検討

© CRIEPI

# 【2-2】水中から気中への移行機構の検討

- 水中レーザー切削時に発生するエアロゾルの気中への移行・拡散について、複数の移行メカニズム（気泡搬送、気中拡散、凝集・凝結、再飛散等）を整理し、定量評価方針を検討した。
- 試験および可視化データを基に、CFDおよび粒子追跡解析との連携により、各メカニズムが水中から気中へのエアロゾル移行に及ぼす影響を評価する枠組みを構築する。

- 気中の特性変化を評価するための湿潤エアロゾルモデルを開発する
- CFDと粒子法による評価に加えて、様々な手段（現象論モデル、既往評価式、簡易モデル、試験データ参照）を用いて①～⑥の各メカニズムのソースターム（気中への移行量）を見積もる



【2-2】水中から気中への移行機構の検討

# 機械的切削における再飛散に関する基礎試験

【目的】

■ 機械的切削における再飛散挙動のほか、水中の気泡内に存在するダストが水相に移行して気中へは移行しない挙動（スクラビング効果）や、環境湿度の影響についての基礎的なデータを取得する。

【実施内容1】

■ ディスクカッター切削における水中から再飛散に関する基礎試験

【実施内容2】

■ ディスクカッター切削における水中から再飛散に関する可視化試験
（水中切削ダスト発生挙動可視化試験装置を用いた可視化試験）

【実施内容3】

■ 水中レーザー切削を想定した、水中の気泡内から気中への移行挙動試験

【実施内容4】

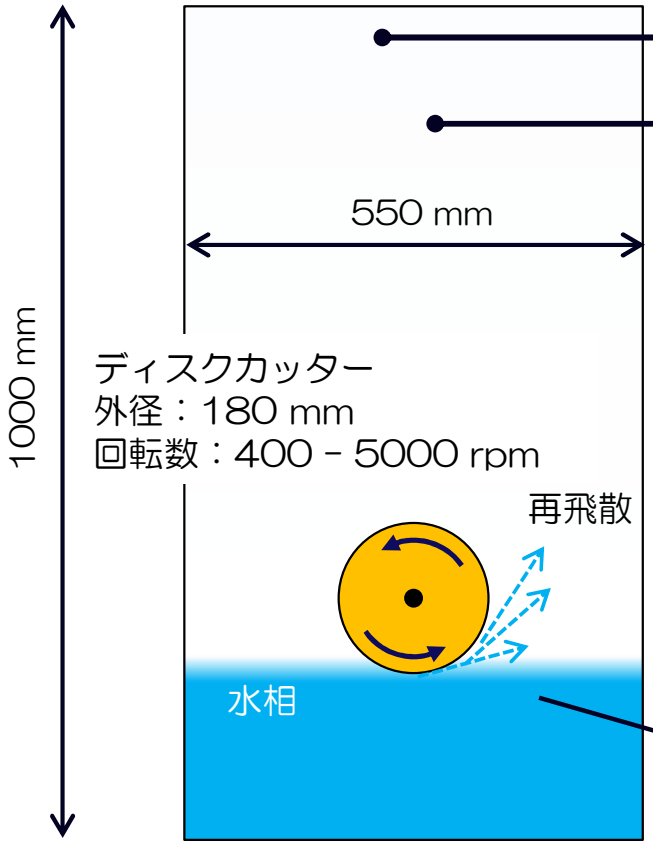
■ 湿潤雰囲気での切削を想定した、ダスト飛散挙動に対する環境湿度影響評価試験

## 【2-2】水中から気中への移行機構の検討

# 機械的切削における再飛散に関する基礎試験

### 【実施内容1】再飛散の影響

- ディスクカッターでは、切削条件により、水中からの再飛散が大きく、回転数・刃の径が大きいと水中からの再飛散が大きい。また、水質も再飛散に影響する。
- 水中に浮遊する粒子を模擬する溶媒として、排水処理等の都合により今回はNaClを使用した。
- 水相中のNaCl濃度を0～1%に設定し、ディスクカッターの回転数を400～5000 rpmの範囲で変化させ、ミストおよび再飛散成分の計測を実施した。



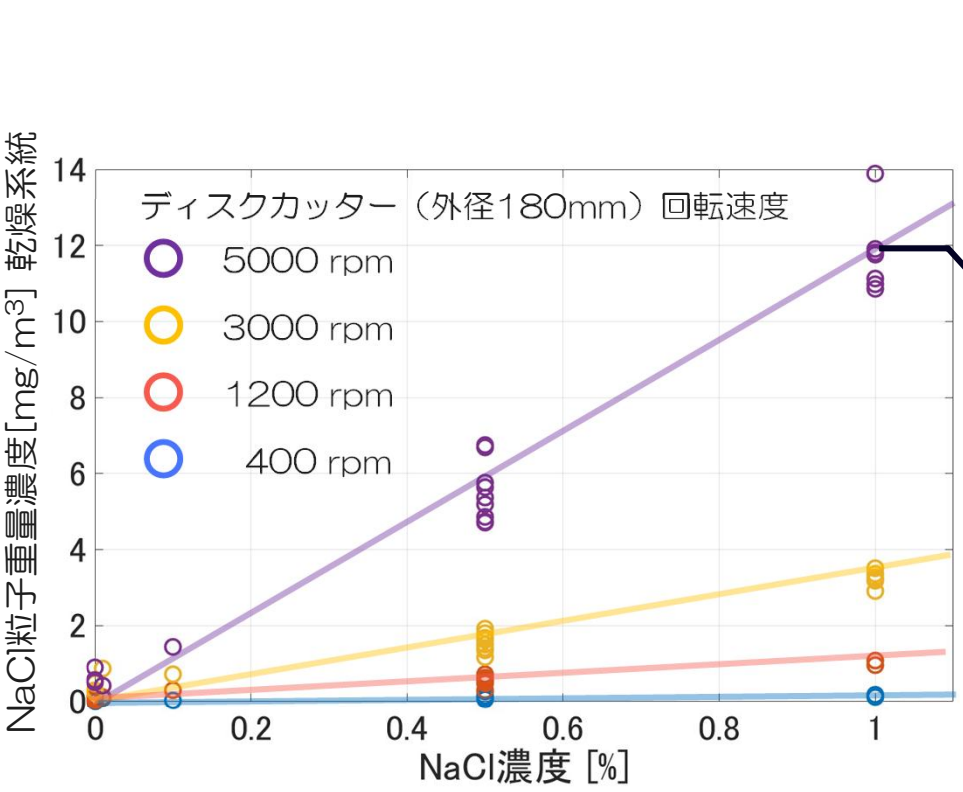

水質を変化させるため、NaClを添加し、水相中成分の水溶液濃度を0 ～１ %に設定

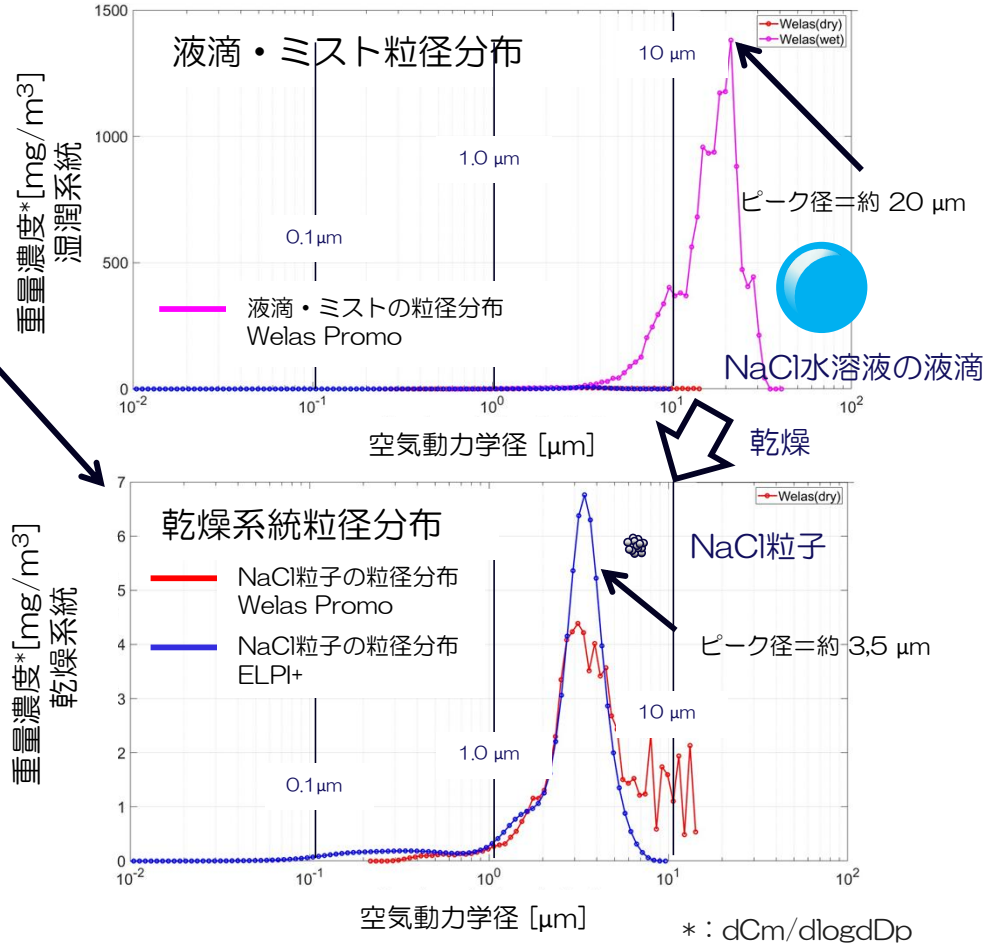
上記の水質条件でディスクカッターの回転数を400-5000 rpmまで変化させ、ミストと再飛散成分を計測

## 【2-2】水中から気中への移行機構の検討

# 機械的切削における再飛散に関する基礎試験

- NaCl水溶液の濃度が高くなると、再飛散成分の空間濃度も高くなった。
- ディスクカッターの回転数が大きくなると、再飛散成分の空間濃度が高くなった。
- 再飛散する水溶性成分は、10-20 μm程度の液滴・ミストとしてふるまい、液滴・ミスト中のNaCl濃度は水相における濃度と同程度であることが分かった。



## 【2-2】水中から気中への移行機構の検討

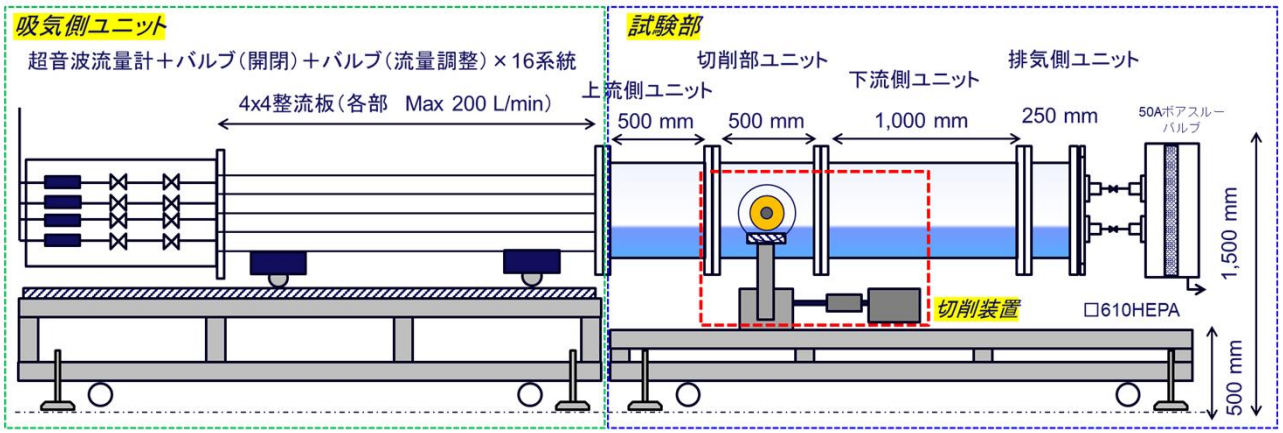
# 水中切削ダスト発生挙動可視化試験装置の設計・製作

【実施内容2】水中からの再飛散に関する可視化試験

- 水中切削時に発生するダスト（水滴）の飛散挙動を高速度カメラにより可視化・定量化するため、観察窓付きの密閉型の可視化試験装置を設計・製作した。

- 切削試験部はケーシングおよび切削装置で構成されており、回転数・水位・風速を可変とすることで、各種条件下での評価が可能である。ケーシングは断面寸法が550 mm × 550 mmのユニット4基で構成されており、全体の幅は2,250 mmである。各ユニットは着脱・組み替えが可能であり、長手方向の寸法調整にも対応できる構造としている。

- 主に可視化試験に使用し、広い観測窓、高速度カメラを有し、飛散する液滴の飛散角度や速度を計測することが可能である。

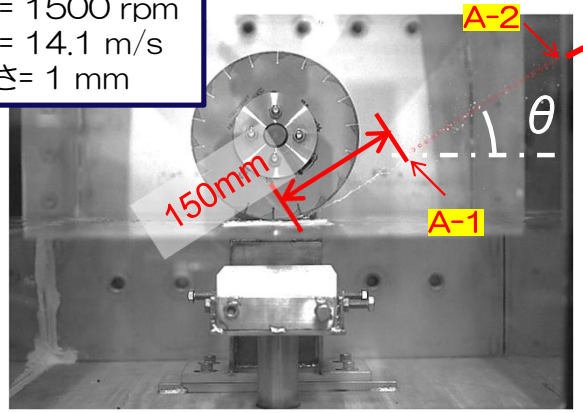


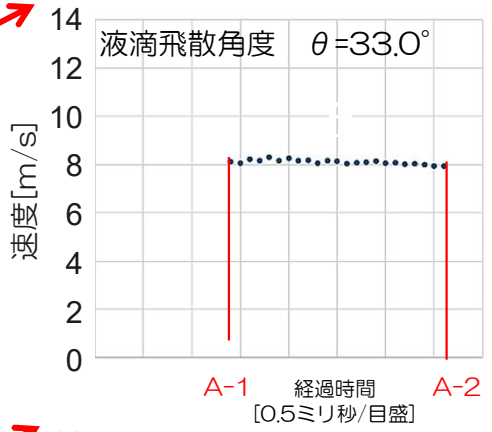
水中切削ダスト発生挙動可視化試験装置

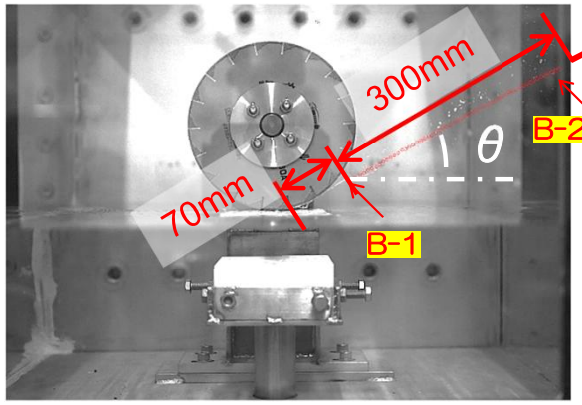
## 【2-2】水中から気中への移行機構の検討

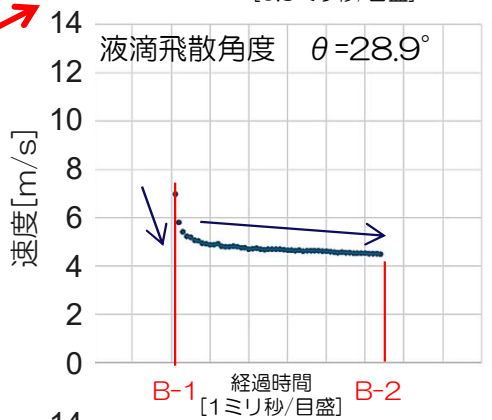
# 水中切削ダスト発生挙動可視化試験

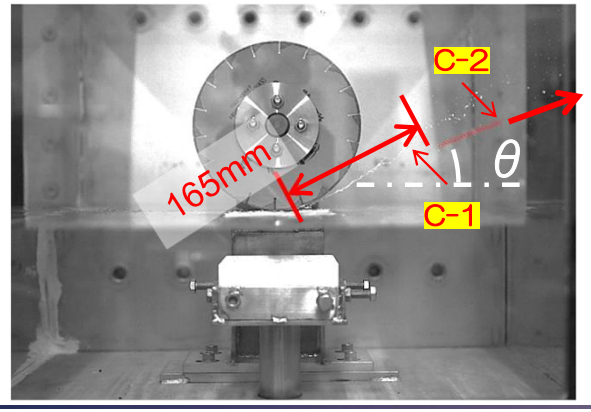
Φ180 mm
回転数 = 1500 rpm
周速度 = 14.1 m/s
水没深さ= 1 mm

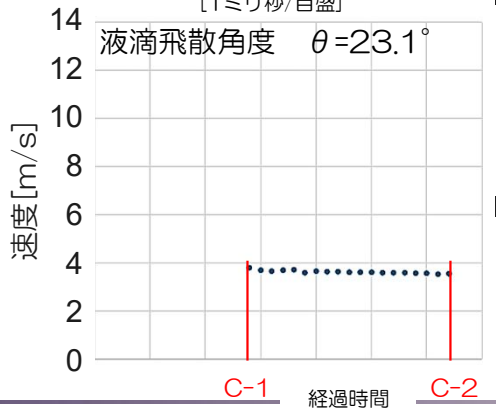



■ 水中切削時に発生する水滴の飛散挙動を高速度カメラで可視化し、飛散する水滴を追跡することで速度や角度を定量的に評価する手法を開発した。以下は計測例。

上段：A-1の位置にある液滴を追跡

■ A-1は発生地点から直線距離で約150mm、A-1地点からA-2地点までの間で速度の変化は小さい。飛散角度（θ）=33.0°

中段：B-1の位置にある液滴を追跡

■ B-1は発生地点から直線距離で約70mm、飛散角度（θ）=28.9°、B-1から10mmの区間で速度が7.0m/sから5.4m/sまで減速した。

■ その後、約300mmの区間で5.4m/sから4.5m/sまで緩やかに速度が低下した。

下段：C-1の位置にある液滴を追跡

■ C-1は発生地点から直線距離で約165mm、C-1地点からC-2地点までの間で速度の変化は小さい。飛散角度（θ）=23.1°

■ 中段の結果では、飛散直後に急激な減速が見られる一方、一定時間後は速度が安定する傾向が確認された。飛散角度や速度は水滴のサイズや初速の影響を受けると考えられる。

■ 今後、サンプル数の拡充と統計的解析により飛散特性のデータを充実させ、LPF試験における初期条件の設定や数値解析の妥当性確認に資する基礎データとして活用する。

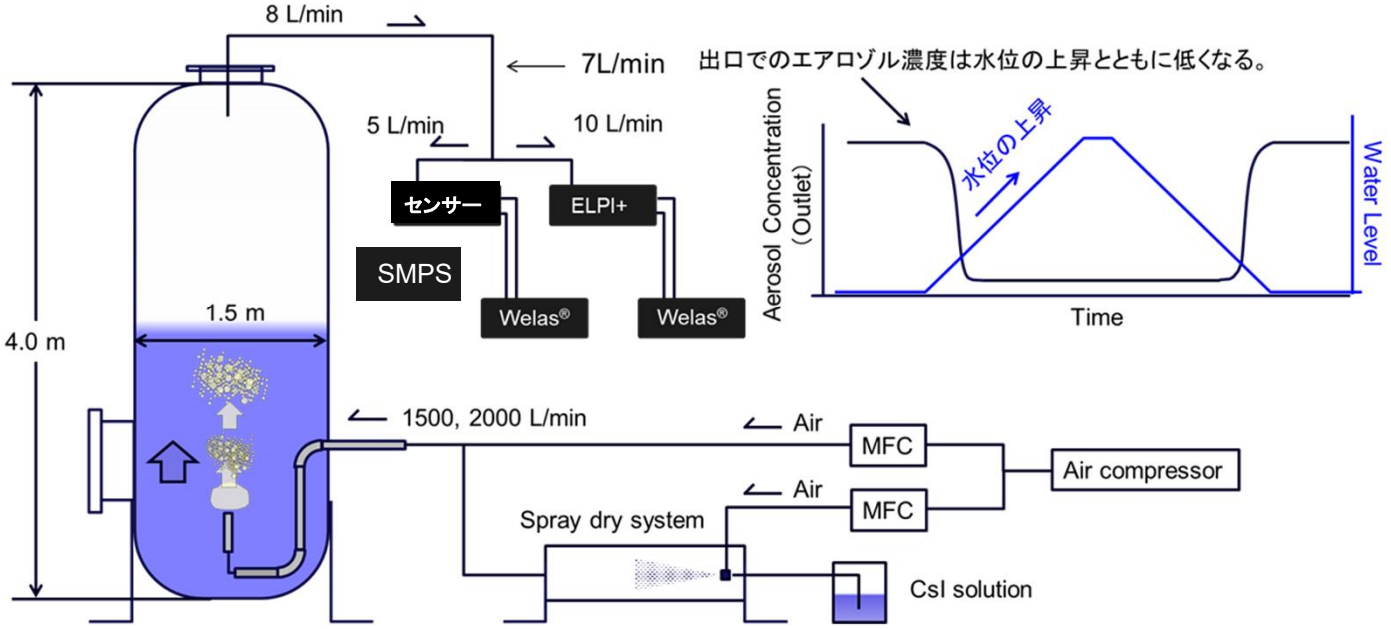
© CRIEPI

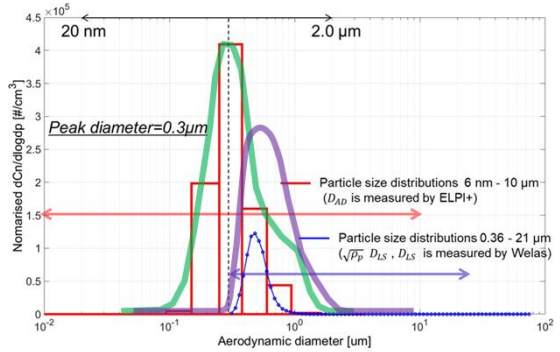
## 【2-2】水中から気中への移行機構の検討

# 水中レーザー切削を想定した、水中の気泡内から気中への移行挙動試験

### 【実施内容3】水中レーザー切削を想定した、水中の気泡内から気中への移行挙動試験

- レーザー切削時に発生する微粒子の、水中の気泡内から気中への移行挙動を把握することを目的として、フィルターベント試験設備を用いたスクラビング模擬試験を実施した。供給エアロゾルには、実際のレーザー切削試験で得られた粒径分布と類似するCsIエアロゾルを使用し、水中の気泡内から気中への移行挙動を評価した。
- 粒径分布の計測には、Welas（光散乱式）、ELPI+（空気動力学径計測）、SMPS（電気移動度計測）を併用し、10 nm～10 μmの広範な粒径範囲の把握を可能とした。
- 水位0mでの粒径分布を基準とし、水位0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、2.5mでの試験装置出口での粒径分布の比較からDF（除染係数Decontamination Factor：DF=入口側濃度/出口側濃度）を算出した。



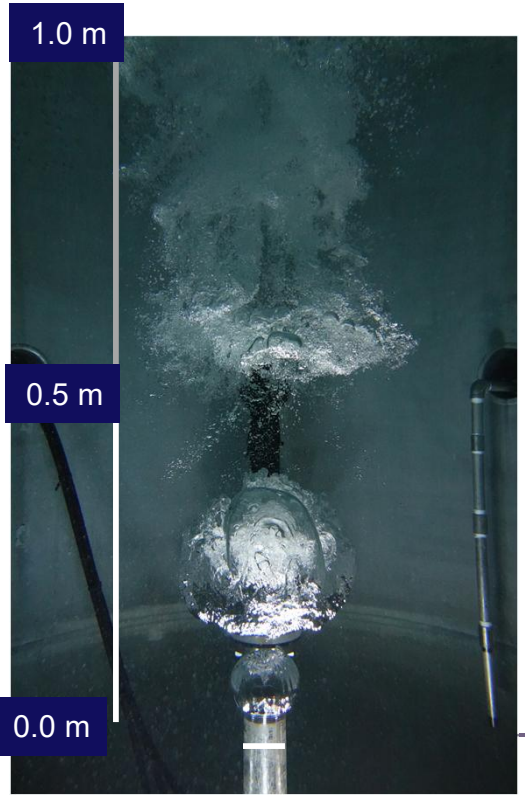



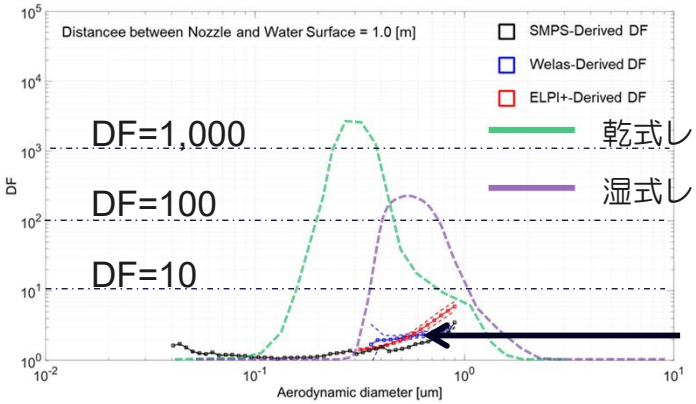

乾式レーザー切削（ジルコン）
湿式レーザー切削（ジルコン）
CsIエアロゾル粒径分布（ELPI）
CsIエアロゾル粒径分布（Welas）

## 【2-2】水中から気中への移行機構の検討

# 水中レーザー切削を想定した、水中の気泡内から気中への移行挙動試験

- 水深の増加に伴い、総粒子濃度および粒子数濃度共に低下傾向を示し、1 μm以上の粒子ではDFは高く、一方で0.2 μm以下の粒子では除去効果が限定的であることが明らかとなった。除去メカニズムとしては、気泡上昇に伴う粒子の慣性衝突および拡散捕集が寄与すると考えられる。
- 更に、【3】で実施したレーザー切削試験では、湿式条件下において粒子の凝集が確認され、粒径が乾式に比べて拡大する傾向が計測されている。この粒径拡大は、スクラビング試験における高い除去効果と関連し、湿式切削時の粒子挙動を理解する上で極めて重要な知見である。

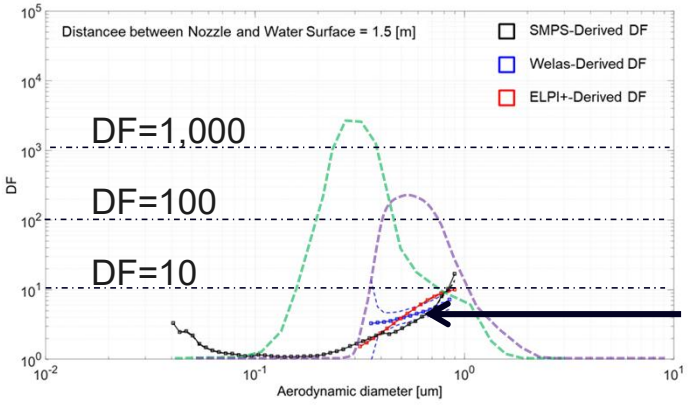


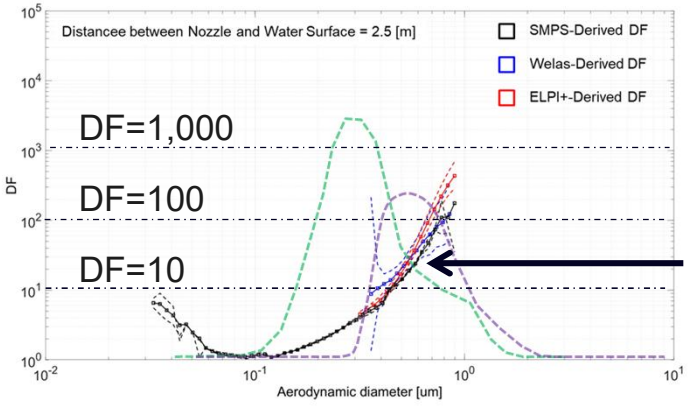

乾式レーザー切削（ジルコン）

湿式レーザー切削（ジルコン）

- 水位 1.0 mでは、湿式レーザー切削で生じるダストは1/1.5～1/4まで低減する。
- 総重量では1/4程度まで低減すると予想される。




- 水位 1.5 mでは、湿式レーザー切削で生じるダストは1/2～1/10まで低減する。
- 総重量では1/10程度まで低減すると予想される。




- 水位 2.5 mでは、湿式レーザー切削で生じるダストは1/10～1/100まで低減する。
- 総重量では1/100程度まで低減すると予想される。

© CRIEPI

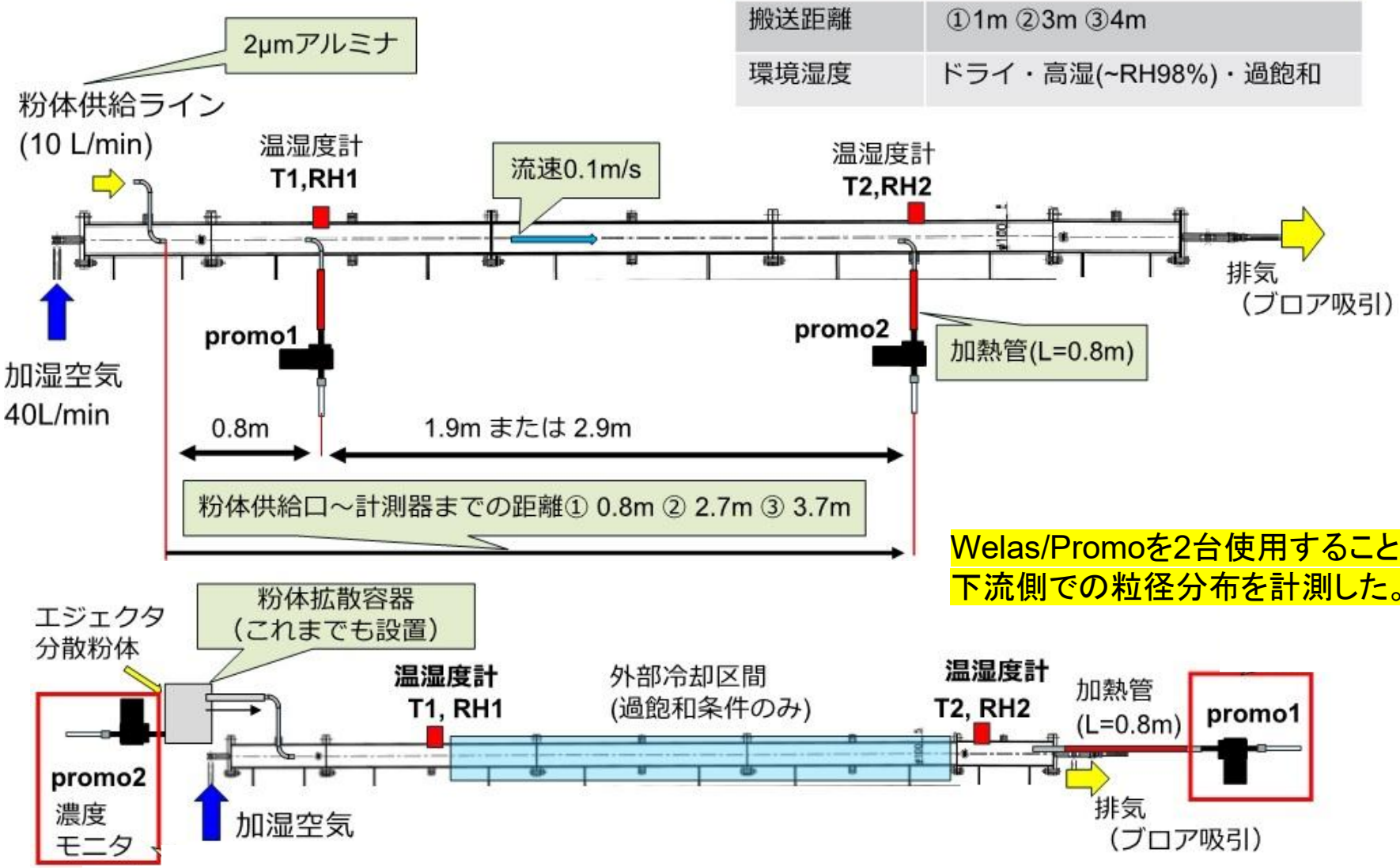
## 【2-2】水中から気中への移行機構の検討

# ダスト飛散挙動に対する環境湿度影響評価

■ 湿潤雰囲気での切削を想定した、環境湿度影響に関する要素試験を実施。

【試験方法】

| パラメータ | 条件 |
|---|---|
| 搬送距離 | ①1m ②3m ③4m |
| 環境湿度 | ドライ・高湿(~RH98%)・過飽和 |




Welas/Promoを2台使用することで、上流側下流側での粒径分布を計測した。

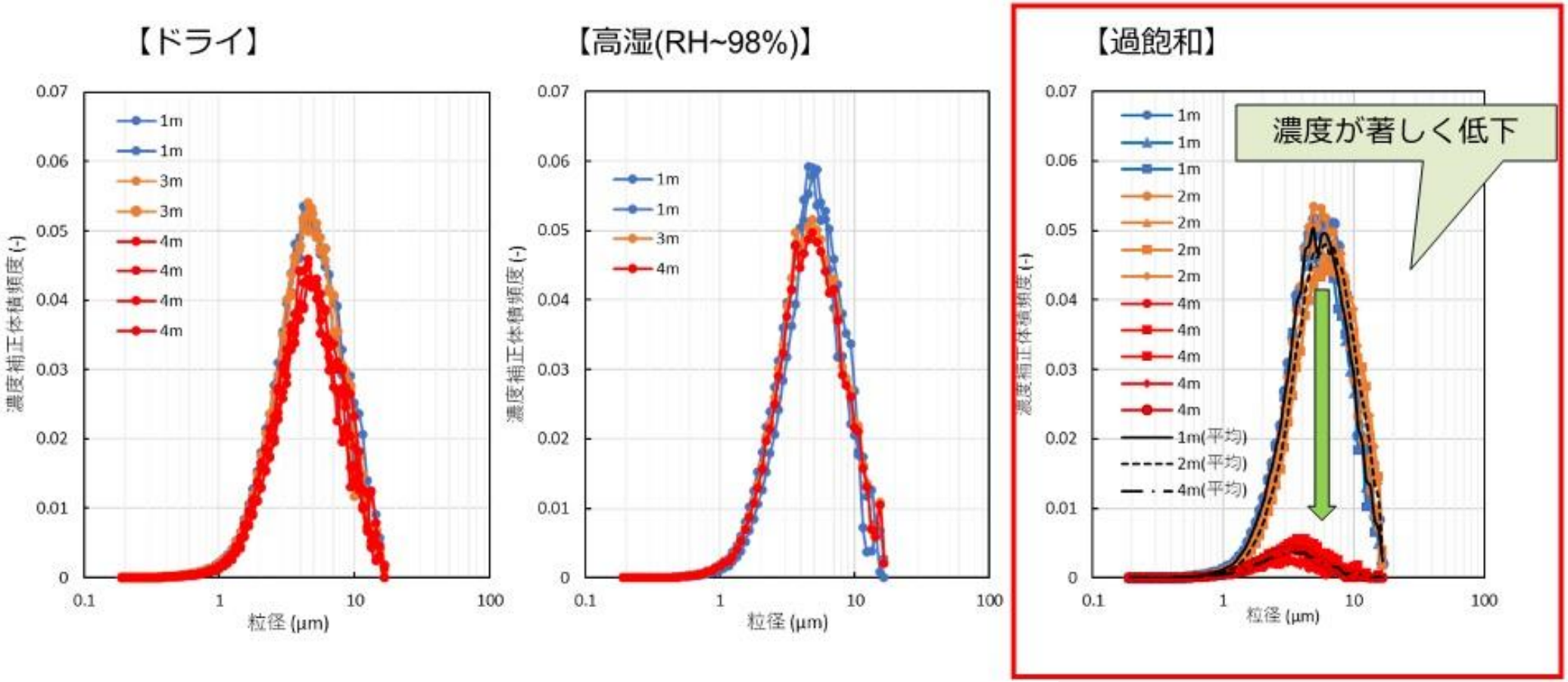
要素試験装置図

© C

【2-2】水中から気中への移行機構の検討

# ダスト飛散挙動に対する環境湿度影響評価

- 要素試験の結果、ドライおよび相対湿度98%以下では、粒子飛散に対する湿度影響はほとんど見られない。
- 一方で、過飽和状態では飛散量が低下している。




要素試験の結果

## 【2-2】水中から気中への移行機構の検討

# まとめ

【実施内容1】再飛散の影響

- ディスクカッターによる機械的切削での再飛散量は水質や回転数に依存することが分かった。
- 再飛散する水溶性成分は、10-20 μm程度の液滴・ミストとしてふるまい、液滴・ミスト中のNaCl濃度は水相における濃度と同程度であることが分かった。

【実施内容2】水中からの再飛散に関する可視化試験

- 水中からの再飛散挙動を可視化・定量評価するための技術基盤を構築し、高速度カメラを用いた観察により、液滴の飛散角度や速度を測定可能とした。

【実施内容3】水中レーザー切削を想定した、水中から気中への移行挙動試験

- 水深の増加に伴い、1 μm以上の粒子では高い除去効率（DF）を示した一方で、0.2 μm以下の微小粒子に対する除去効果は限定的であることが明らかとなった。【3】で実施したレーザー切削試験では、湿式条件下で粒子の凝集が生じ、乾式に比べて粒径が拡大する傾向が確認された。この粒径拡大は、スクラビング試験における高い除去効率と相関し、湿式切削時の粒子挙動の理解において重要な知見である。

© CRIEPI

# 【3】ダスト飛散率測定試験（コールド）

© CRIEPI

# 【3】ダスト飛散率測定試験（コールド）

- 【3-1】チゼル、【3-2】ディスクカッター、【3-3】コアボーリング、【3-4】レーザー、【3-5】AWJについて、個別にダスト飛散率の測定試験を実施する。

- チゼル、ディスクカッター、コアボーリング、レーザーの4工法については、前事業において乾式条件下での飛散挙動に関するパラメータ依存性を把握している。これを踏まえ、本事業では湿潤・微冠水環境下におけるダスト飛散の低減効果に着目し、安全評価上重要となる最大飛散率を包含する飛散率データの取得を目的とする。

- 一方、前事業で未実施であったAWJについては、測定手法の構築（砥粒とダストの分離方法の検討を含む）および飛散挙動のパラメータ依存性の把握を目標とし、最大飛散率の把握は必須要件とはしない。

実施：【3-1】電中研、【3-2】三菱重工、【3-3】・【3-4】IHI、【3-5】日立GE

© CRIEPI

# 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

© CRIEPI

## 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

# 背景

- 前事業の電動ハンマによるチゼル試験では緻密質アルミナなどの硬い供試体を破砕することができなかった。これは、1打撃当たりのエネルギーが十分でないためであり、より大きな打撃エネルギーを与えて破砕させた際のダスト飛散率を測定する必要があると考えられた。

- そこで、1打撃当たりのエネルギーを増加させる方法として、垂直に立てた鉄製パイプ（単管）内の所定の高さから衝突体を落下させることで十分な打撃エネルギーを確保し、直下に配置した供試体を破砕する試験（落重試験）を実施する。本方法では打撃エネルギーを容易に変化させることが可能であることから、破砕により発生する飛散ダスト量の打撃エネルギー依存性などを調べる。
- 更に、従来のチゼル試験で用いた電動ハンマにより供試体を破砕する試験を気中および冠水状態で実施し、飛散ダスト量の水による低減効果を調べる。

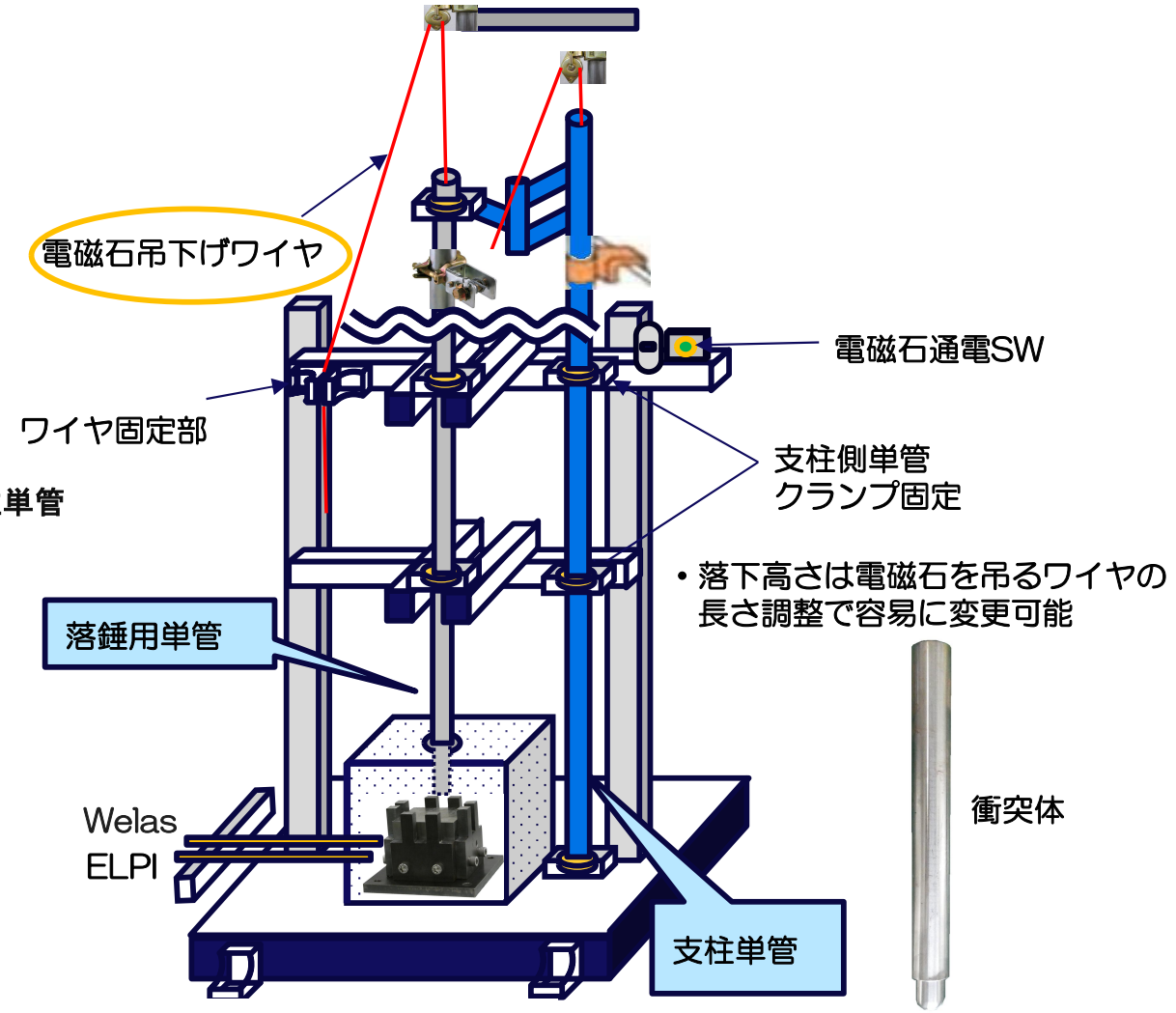
© CRIEPI

## 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

# 落重試験装置

■ 下図のような「落重試験」装置を構築した。電磁石で吊った衝突体の保持高さを変えることにより、打撃エネルギーを変化させることが可能。

落重試験装置




落重試験模式図

© CRIEPI

## 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

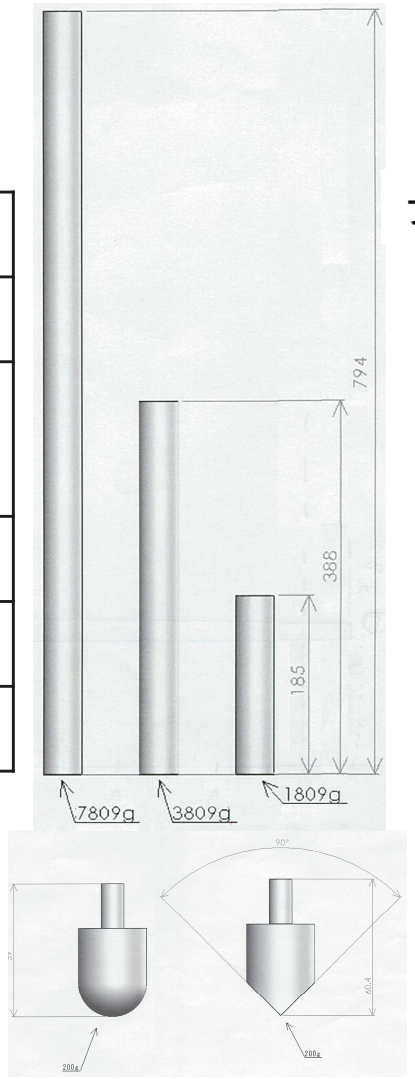
# 落重試験概要

■ 前事業での電動ハンマの1打撃当たりのエネルギー（35～50J）*1に基づき、以下をパラメータとする落重試験を実施した。本落重試験における衝突体のエネルギー範囲は39～314J。

落重試験のパラメータ

| パラメータ | 範囲 |
|---|---|
| 衝突体落下高さ | 2～4 m |
| 衝突体*2先端形状 | 平面（円柱状）、半球状、くさび形、<br>チゼル刃（ブルポイント、コールドチゼル） |
| 衝突体重量 | 2、4、8 kg |
| 供試体*3材料 | モルタル、ジルコン、アルミナ（緻密質）*4 |
| 供試体の状態 | 気中 |

*1：ランマー（転圧器具）を装着しての実測値
*2：衝突体は鋼鉄製、φ40mmの円柱形
（チゼル刃については治具部分）
*3：供試体寸法は基本的に□110×50 mm
*4：本装置の最高エネルギーでも割れない場合があったため、結果を整理せず

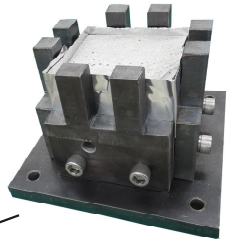


【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

# 供試体の拘束条件に関する予備試験

■ やや薄いモルタル供試体（寸法：110×110×30mm）の拘束条件を変え、1mの高さからチゼルの刃（電動ハンマ用のブルポイント、1.58kg）を落下させて破砕の様子を調べた。

■ その結果、
- 無拘束
- 箱状に折ったアルミ箔で囲う
- アルミ箔で囲った上で金属製ホルダーにより側面を固定



と供試体の拘束条件を強くするにつれて、モルタル供試体が割れにくくなった。

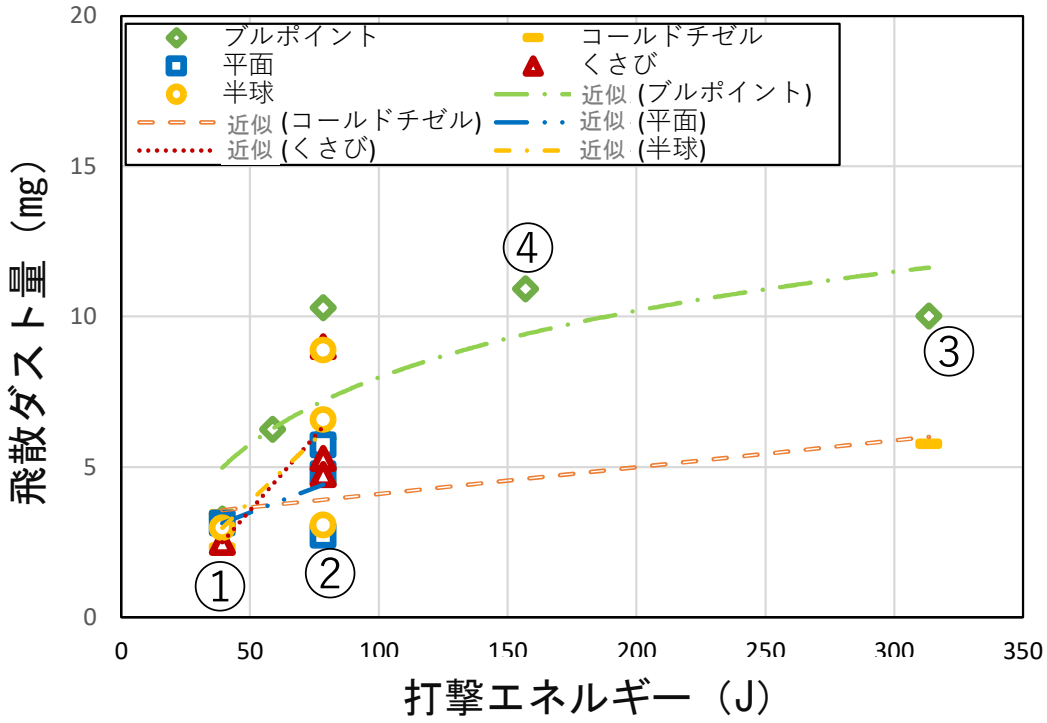
■ 今回のチゼル試験では飛散ダスト量が多くなる条件で揃えるため、落重試験、電動ハンマ試験の双方とも、供試体は無拘束（内寸150×150mmの金属容器内に置いた状態）とした。

© CRIEPI

## 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

# 落重試験の結果

- モルタルでは150J程度までは打撃エネルギーと飛散ダスト量の間に相関が見られるものの、それ以上の打撃エネルギーでは飛散ダスト量が頭打ちとなる傾向。
- 打撃エネルギーの大きさに関わらず、ほとんどの場合に供試体は大きく割れた。



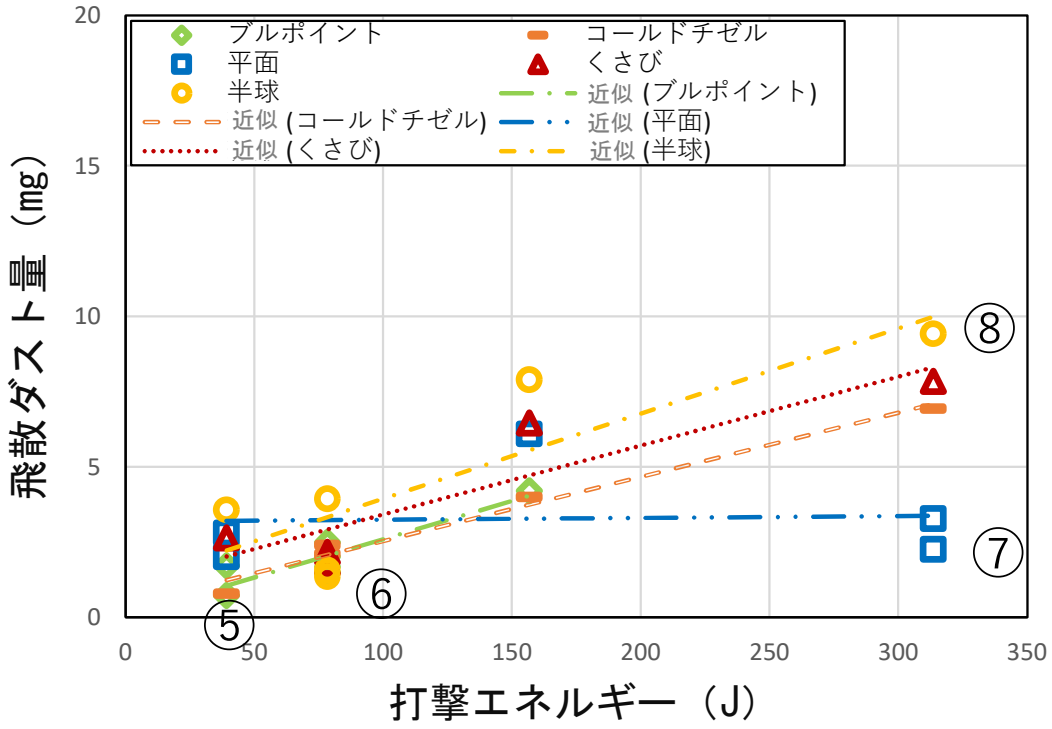
モルタル破砕時の飛散ダスト量の打撃エネルギー依存性
（右の破砕後の供試体はグラフ中①～④のプロットに対応）

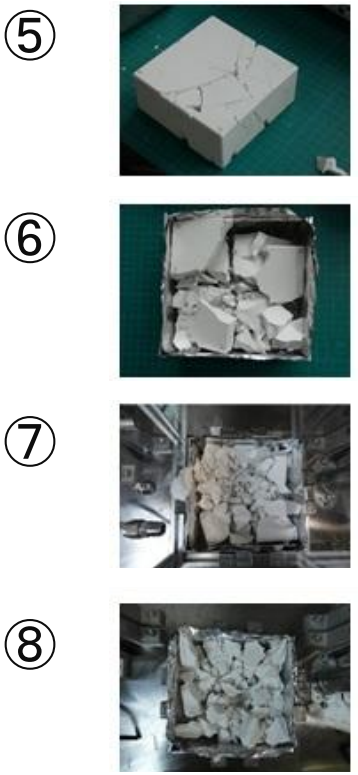
© CRIEPI

## 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

# 落重試験の結果

- ジルコンでは打撃エネルギー増大に伴い飛散ダスト量が増加した。
- 供試体の割れ方に注目すると、打撃エネルギーが小さい場合には大きく割れ、打撃エネルギーが大きくなると更に細かく割れる様子が見られた。
- 衝突体の先端形状により異なる傾向が見られる。



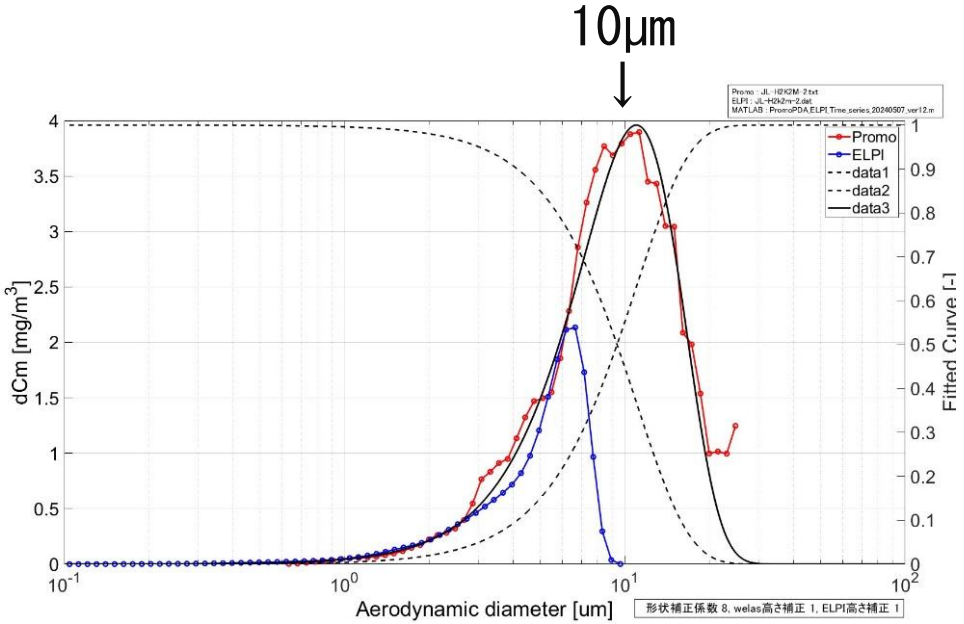

ジルコン破砕時の飛散ダスト量の打撃エネルギー依存性
（右の破砕後の供試体はグラフ中⑤～⑧のプロットに対応）

© CRIEPI

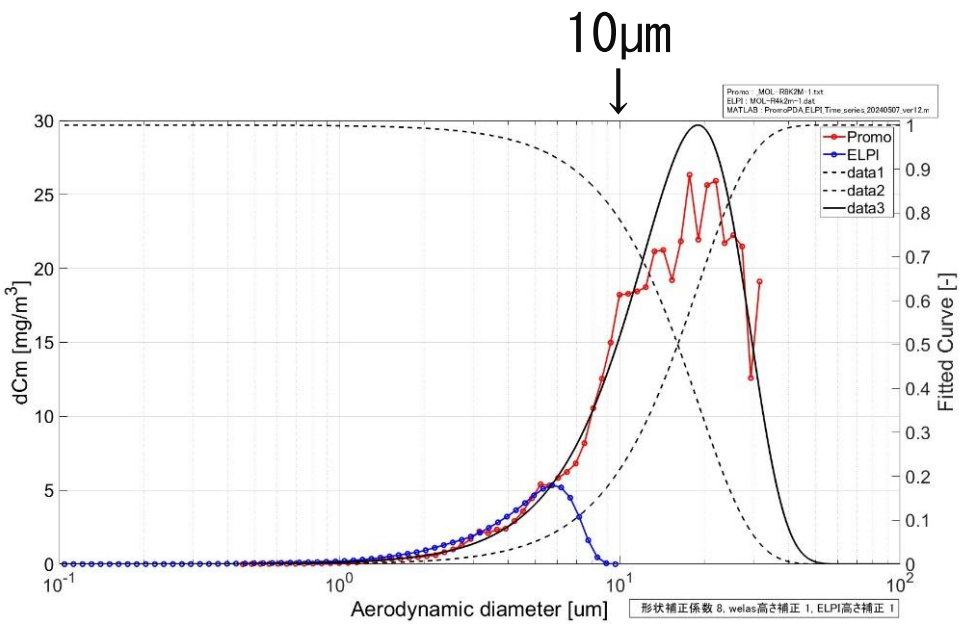
## 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

# 落重試験の結果

- 飛散ダストの粒径分布（重量基準）のピークは、ジルコンでは10μm付近、モルタルでは20μm付近となり、前事業のチゼル試験と同様の傾向。




ジルコン破砕時の
飛散ダスト粒径分布

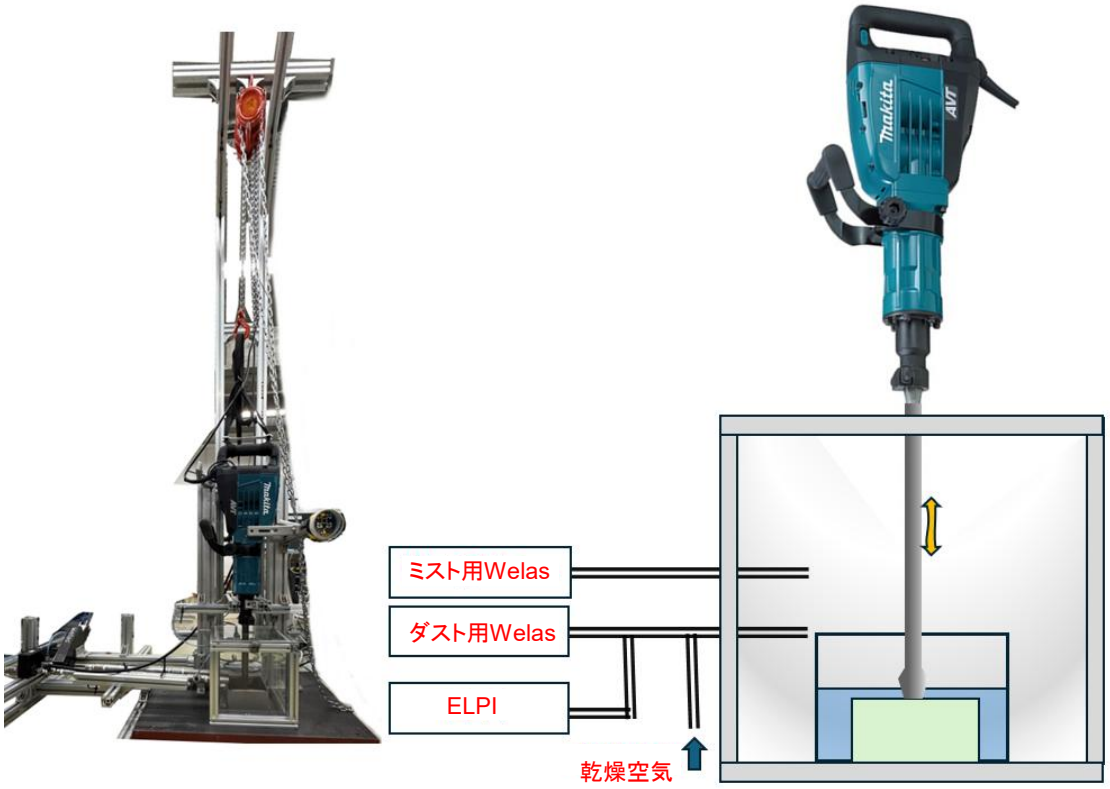



モルタル破砕時の
飛散ダスト粒径分布

## 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

# 電動ハンマ試験装置

- 下図のような、ミスト用とダスト用の双方を備えた計測システムにてミストとダストを区別しつつ、コールドチゼルを装着した電動ハンマによる破砕試験を実施。
- 供試体が割れた時点で打撃を終了し、割れるまでに要した時間を打撃時間とした。
- 気中と水中（供試体が10mm冠水した状態）とで飛散ダスト量を比較。




電動ハンマ試験模式図

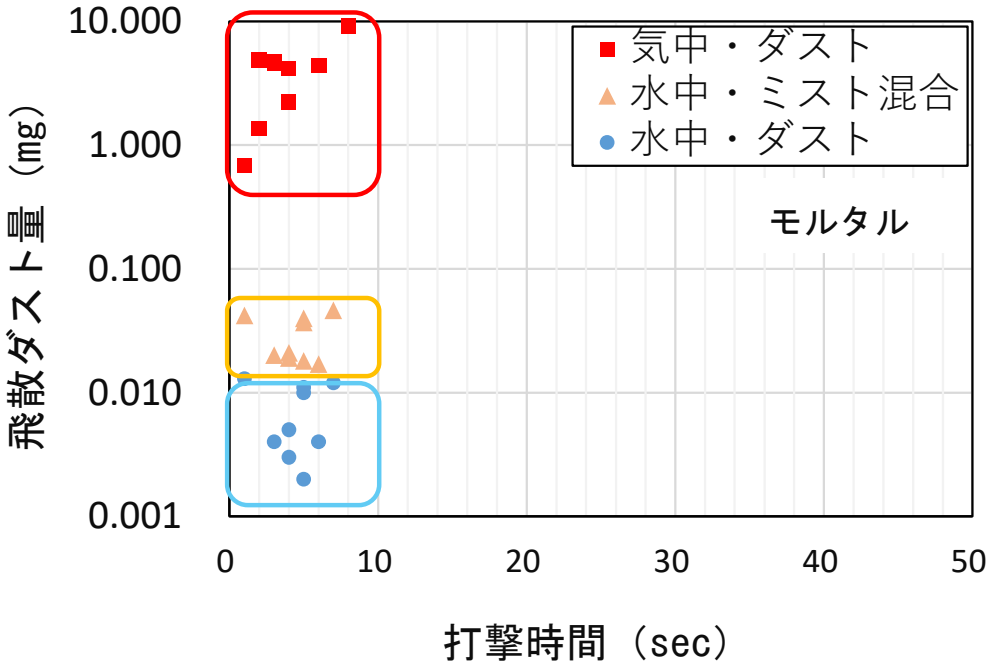
コールドチゼル

© CRIEPI

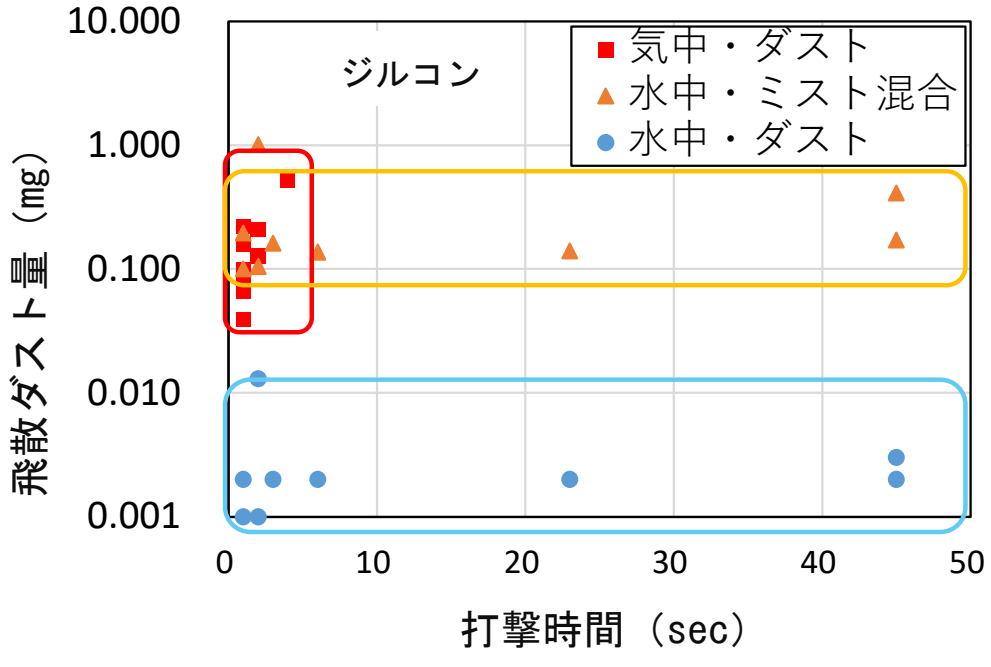
## 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

# 電動ハンマ試験の結果

- 10mmの冠水による飛散ダスト量の低減効果は、モルタル破砕時は1/1000程度、ジルコン破砕時は1/100程度に達した。
- 冠水状態での破砕に伴って発生するミスト量は、モルタルでは0.01～0.1mgと飛散ダスト量の1/100程度なのに対し、ジルコン破砕時には0.1～1mgと飛散ダスト量と同程度。
- 気中切削では飛散ダスト量に打撃時間依存性が見られ、供試体表面をはつる効果が反映されていると思われる。




気中/水中におけるモルタル破砕時の打撃時間と飛散ダスト量の関係



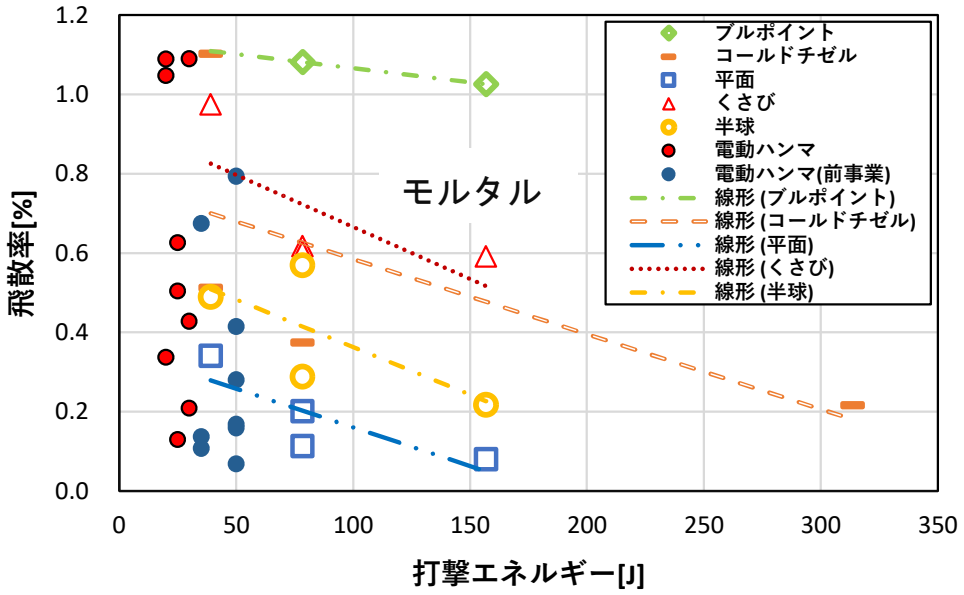

気中/水中におけるジルコン破砕時の打撃時間と飛散ダスト量の関係

© CRIEPI

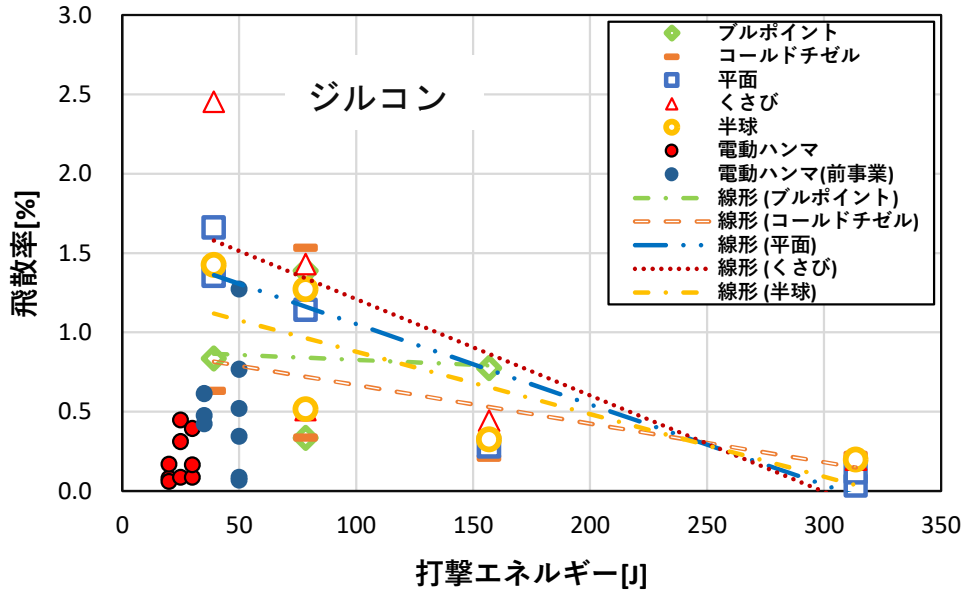
## 【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

# 電動ハンマ試験の結果

- 気中での落重および電動ハンマ試験による伴うダスト飛散率は、モルタル、ジルコンとも打撃エネルギーに対して負の相関を示した。
- モルタル、ジルコンとも、切削時の飛散率は前事業での値を包含する結果が得られた。




気中でのモルタル破砕時の
打撃エネルギーと飛散率の関係




気中でのジルコン破砕時の
打撃エネルギーと飛散率の関係

© CRIEPI

【3-1】チゼルによる切削ダスト飛散率測定

# チゼル試験のまとめ

- 落重試験によりモルタルとジルコンを破砕した際の飛散ダスト発生挙動の打撃エネルギー依存性を求めた。
- 電動ハンマ試験により、水深10mmの冠水状態での飛散ダスト量は、気中状態に比べて、モルタル破砕時は1/1000程度、ジルコン破砕時は1/100程度に抑制されることが明らかになった。
- 供試体の拘束条件により割れ方が異なったため、切削対象物の大きさが破砕およびダスト飛散挙動に影響を及ぼすと考えられた。このため、実際の大きさの燃料デブリ切削時の挙動予測には、大きさの異なる供試体を用いた試験が必要と考えられる。

© CRIEPI

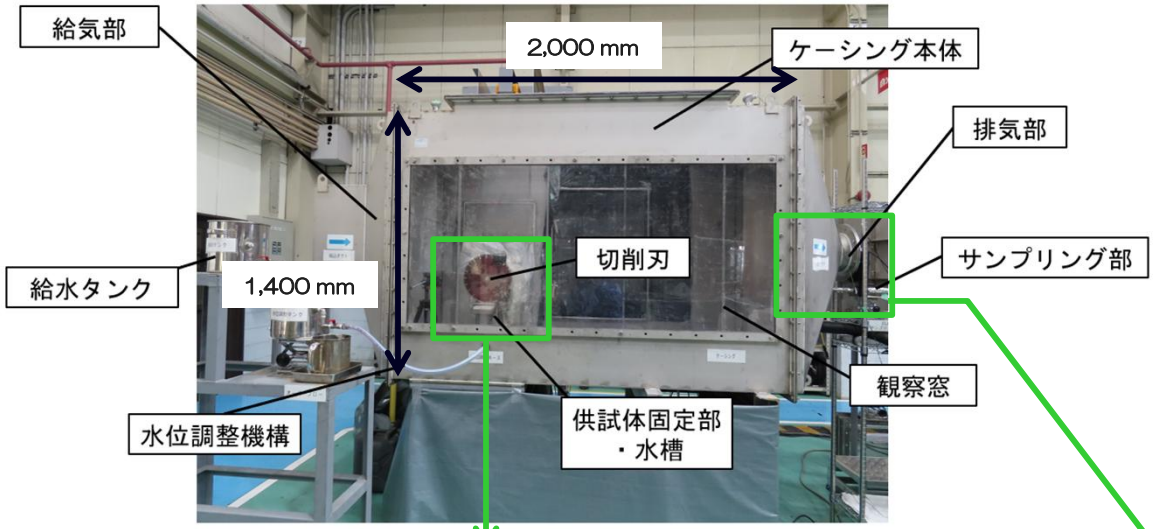
# 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

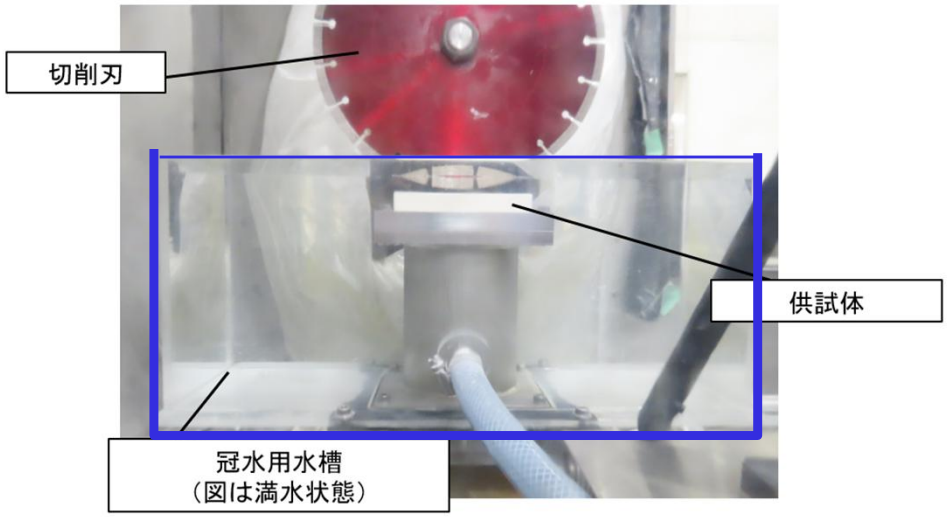
© CRIEPI

# 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

## 試験装置

■ 前事業で作製したケーシングを一部改造し、水位50 mm程度までのデータ取得を可能とした。

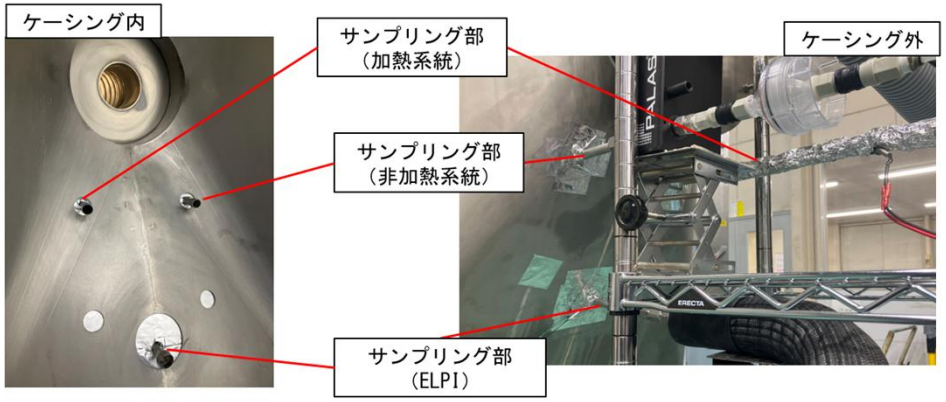



ケーシング本体：SUS304
H1,400 mm × W800 mm × L2,000 mm（内寸）

主な改造

- 水槽の追加：供試体周辺にアクリル製の冠水用水槽を新たに設置し、任意の水位での切削試験が可能な構成とした。
- 測定装置対応：welas 2台、ELPI 1台による多点計測に対応したサンプリングラインを新設し、welas系統についてはサンプリング位置を調整するための機構を追加した。
- なお、本試験では飛散ダストの量が小さいことから、乾燥空気との混合によるミスト除去方式では粒子数の確保が困難となる可能性が懸念された。このため、ミスト除去システムには加熱方式を採用し、確実な除湿と粒子測定の両立を図った。




ディスクカッター湿式切削試験装置

© CRIEPI

## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# 切削試験条件

■ 湿式条件下のダスト飛散試験のパラメータは以下の通り。

表　ディスクカッター切削試験条件

| | |
|---|---|
| 切削刃の種類 | ダイヤモンドカッター |
| 切削刃の直径 | 中径刃（180 mm）・大径刃（305mm） |
| 回転数 | 1200, 3000, 3600, 5000, 6000 rpm（最大周速度 約56.6 m/s） |
| 押付力 | 10～100 N（供試体や目的に応じて設定） |
| 水位 | 0, 1, 3, 5, 10, 20 mm（冠水・微冠水・気中条件を再現） |
| 供試体材料 | 緻密質アルミナ、多孔質アルミナ、モルタル、SUS304、ガラス材（Na有無・応力の大小を含む） |

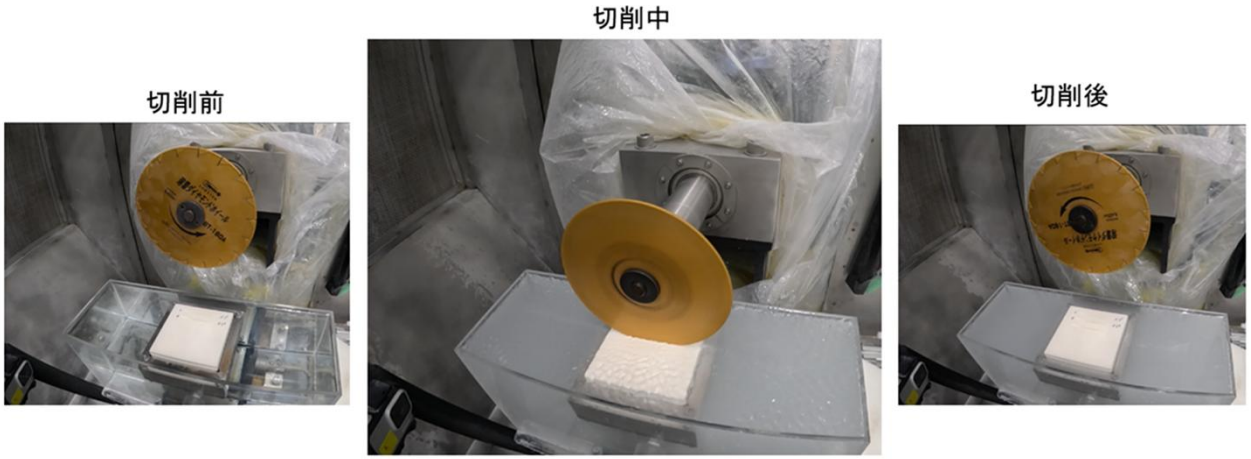
■ なお、本試験においては、初期設定した試験パラメータに基づいてデータ取得を進める中で、飛散挙動に影響を与える重要な条件を抽出し、必要に応じてパラメータ構成を変更するなど、柔軟に対応した。

■ 加えて、切削試験中のケーシング内湿度・温度、供試体の押付圧、各測定系統の飛散率（乾燥・湿潤）を系統的に記録し、粒径分布との関連性を解析した。試験水には精製水を使用し、切削ごとに水槽の清掃を徹底することで、残留粒子の影響を防止した。

© CRIEPI

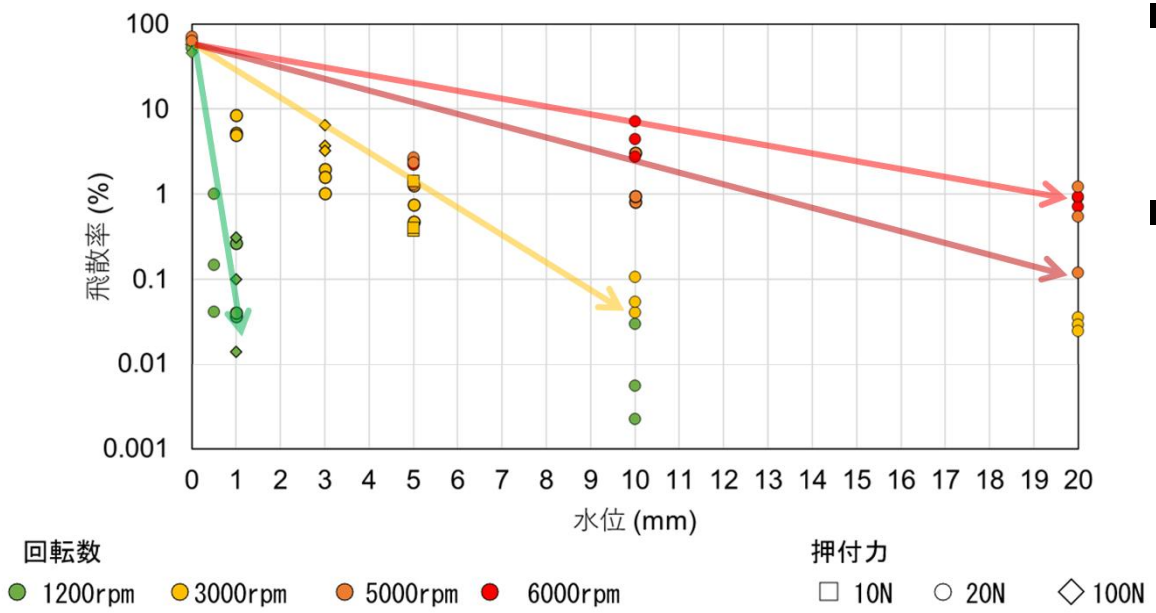
## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# ディスクカッター切削試験結果




切削状況（緻密質アルミナ、Φ180mm中径刃、回転数：3000rpm、押付け力：20N、水位：3mm）

- 切削状況および写真、動画等を確認し、切削前と切削後の写真からわかるように、切削後の水槽内は白く濁っており、水中にダストが捕捉されていることを確認した。

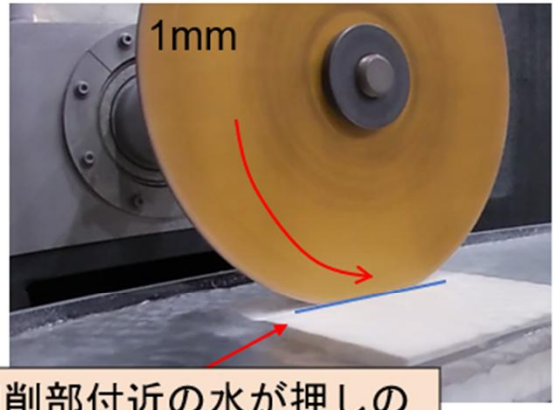



- 水位の増加に伴い飛散率は低下する傾向を示したが、その低減効果はディスクカッターの回転数に依存することが明らかとなった。
- 同一径（φ180 mm）のディスクカッターを用いた場合、低回転（1200 rpm）では水位1 mmでも十分なダスト低減効果が得られたのに対し、回転数が上がるにつれて必要な水位も増加し、3000 rpmでは約10 mm、6000 rpmでは最大水位20 mmでも飛散率は約0.7%にとどまった。ただこの場合でも、乾式条件の約1/100まで飛散率を低減した。

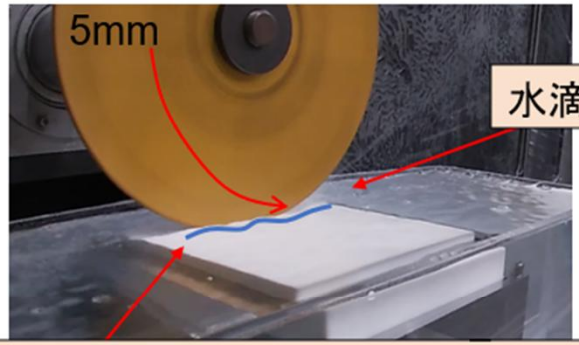
## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# ディスクカッター切削試験結果（緻密質アルミナ、Φ180mm中径刃）

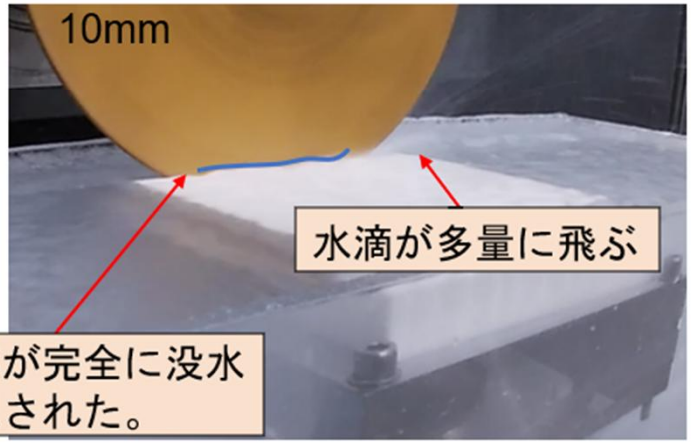
中径刃3000rpm-20Nの例



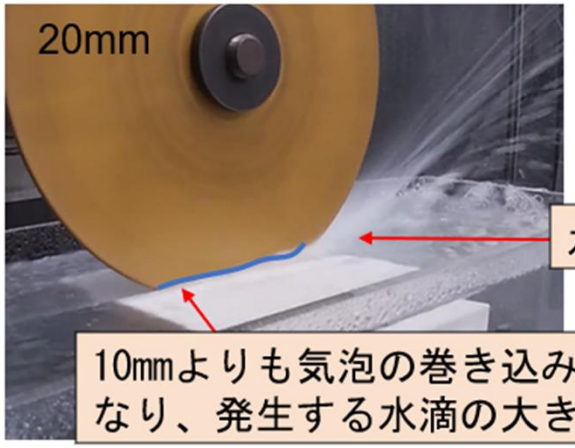

刃物の風圧で切削部付近の水が押しのけられ、設定水位は1mmだが、さらに浅い状態での切削になると考える




5mmにおいても若干刃物の風圧で切削部付近の水が押しのけられるが、切削部の水面が動揺していることから、切削部に水が供給されていることがわかった




10mmでは切削部が完全に没水することが確認された。

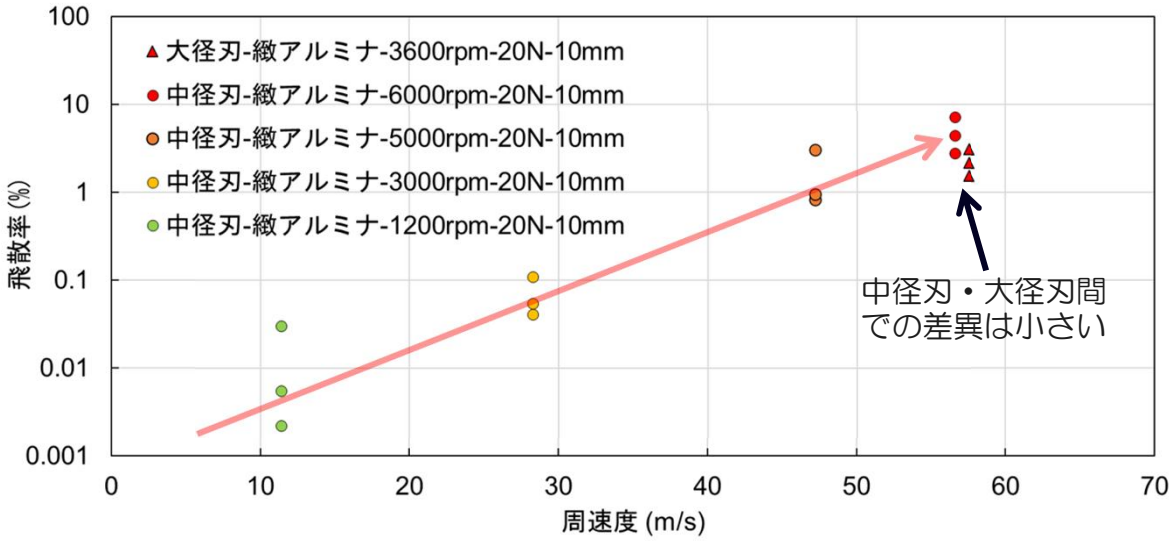



10mmよりも気泡の巻き込みが目視で顕著になり、発生する水滴の大きさが大きくなる。

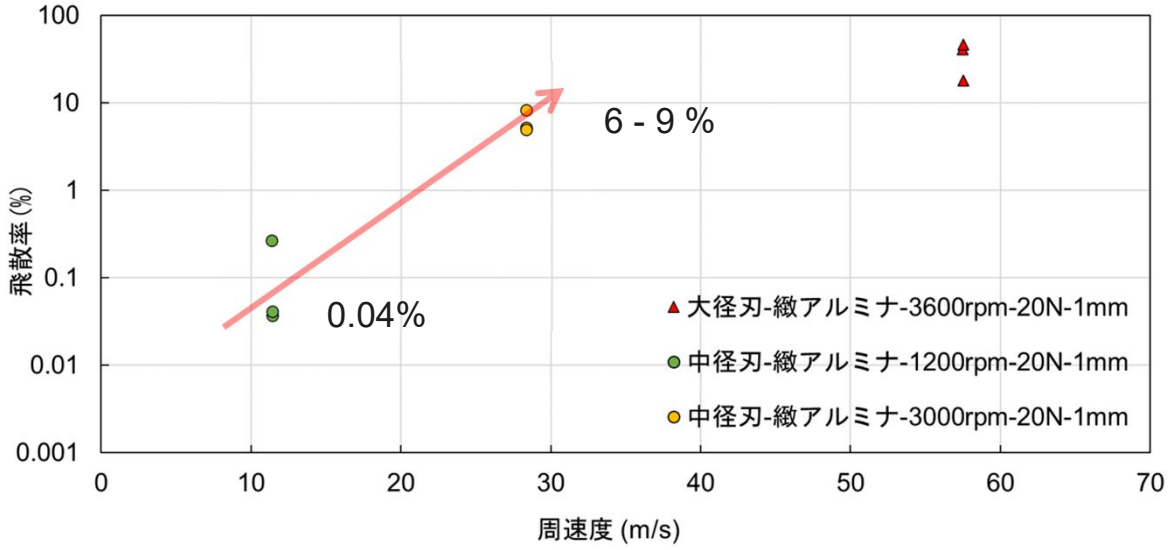
© CRIEPI

## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# ディスクカッター切削試験結果（緻密質アルミナ、周速度と飛散率）




- 水位10 mmの条件では、周速度の増加に伴って飛散率は上昇し、最大周速度（約56.6 m/s）では飛散率が1-10 %程度となる結果が得られた。
- また、中径刃・大径刃間での差異は小さく、飛散率は周速度により整理可能であることが示された。



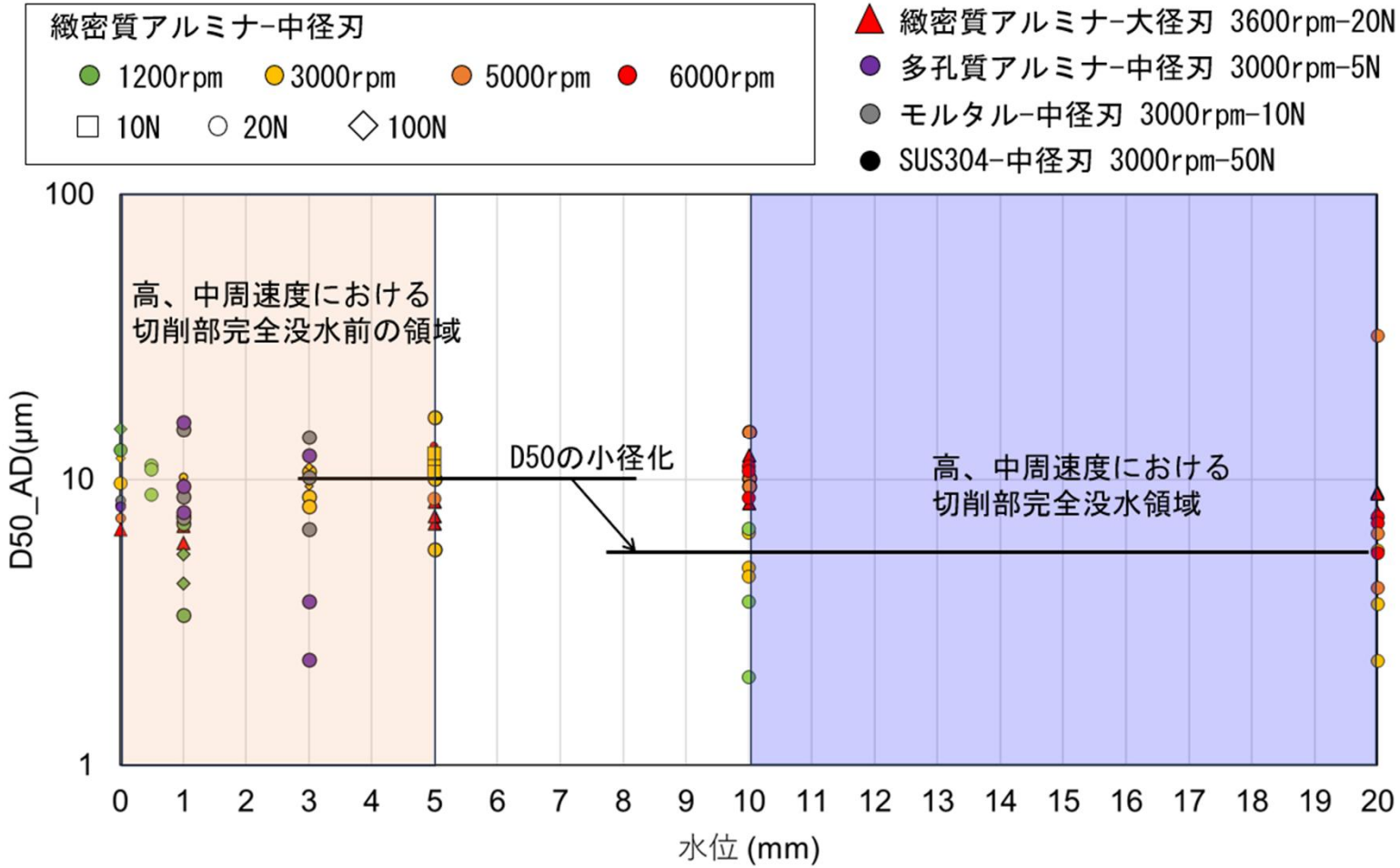

- 水位1mmでも、周速度の増加に伴い飛散率は上昇し、中速域（～30 m/s）までは水位10mmの条件に比べ大きな上昇が見られ、周速度11.4 m/s付近での飛散率は0.04%、周速度28 m/s付近での飛散率は6-9%であった。
- 一方、最大周速度付近（約56.6 m/s）では飛散率の増加傾向はやや緩やかとなる。
- 乾式切削でも飛散率の最大値は約70%程度であることから、高周速度域では周速度に対する飛散率の上昇は飽和的になる。

© CRIEPI

## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# ディスクカッター切削試験結果（水位と飛散ダストの粒子径）

- 飛散ダストの粒径中央値（D50）に着目すると、水位が高い条件下では粒径分布のピークが小径側にシフトしており、飛散粒子が小粒径化していることが確認された。
- これは、生成されたダストのうち粒径の大きい粒子ほど水中で捕捉されやすく、相対的に小さな粒子が飛散する割合が増えるため考えられる。



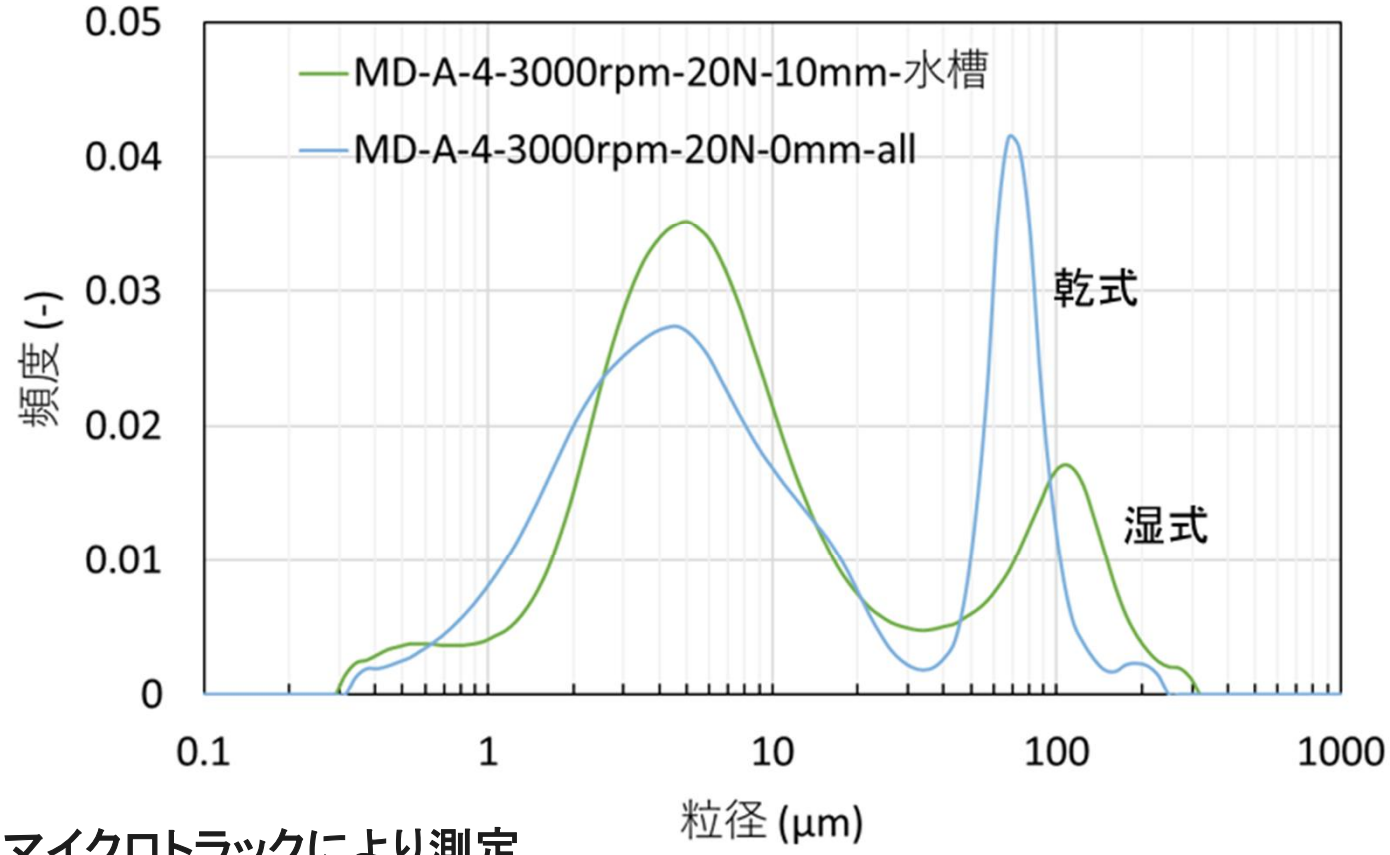

© CRIEPI

## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# ディスクカッター切削試験結果（緻密質アルミナ、生成するダスト）

■ 乾式と湿式で、環境以外は同一の切削条件で生成したダストの粒径分布を比較した結果、両者の粒径分布に大きな違いは見られなかった。

中径刃-緻密質アルミナ-3000rpm-20N条件

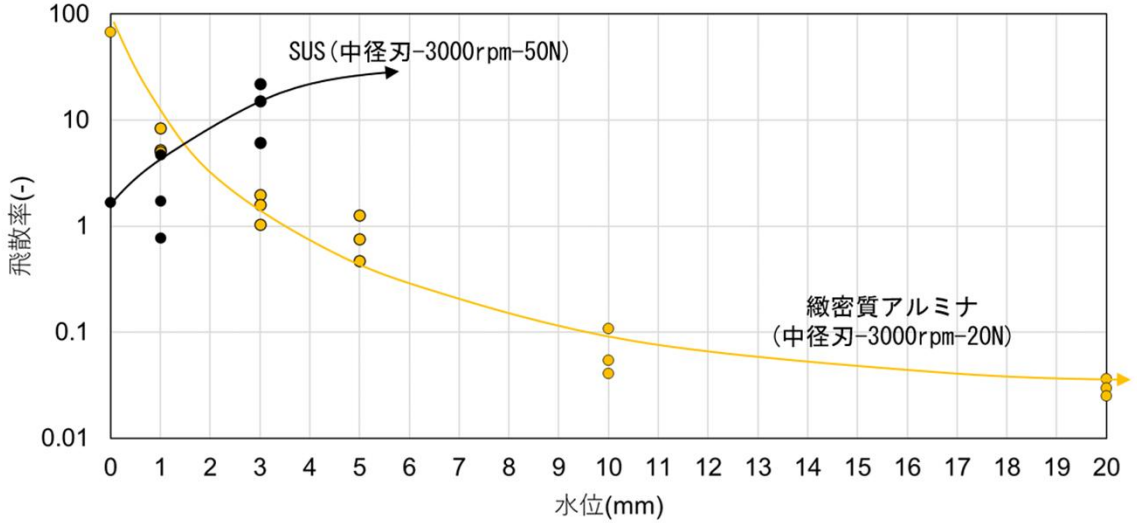



粒径分布はマイクロトラックにより測定

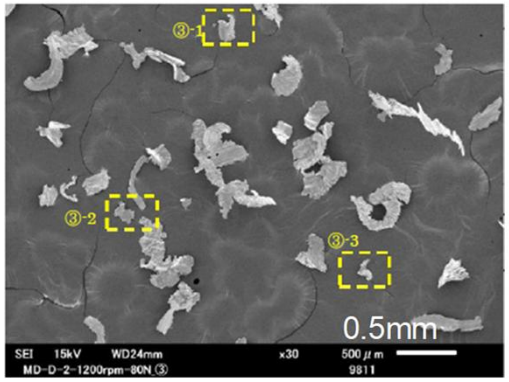
© CRIEPI

## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

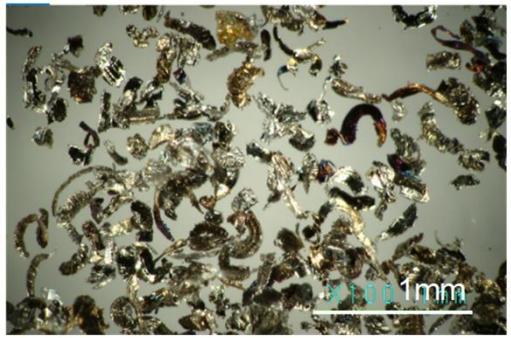
# ディスクカッター切削試験結果（SUS304、水位と飛散率）



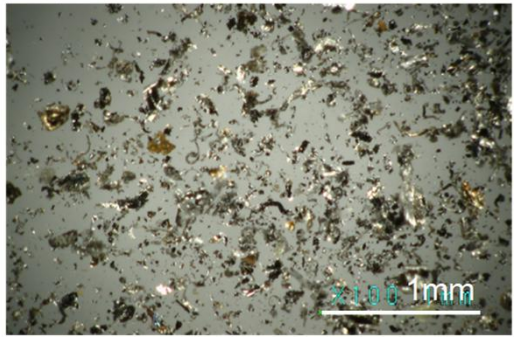

乾式条件（フェーズ１）




水位1mm




水位3mm

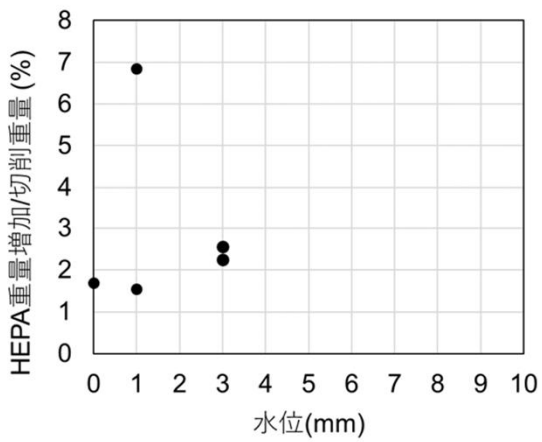


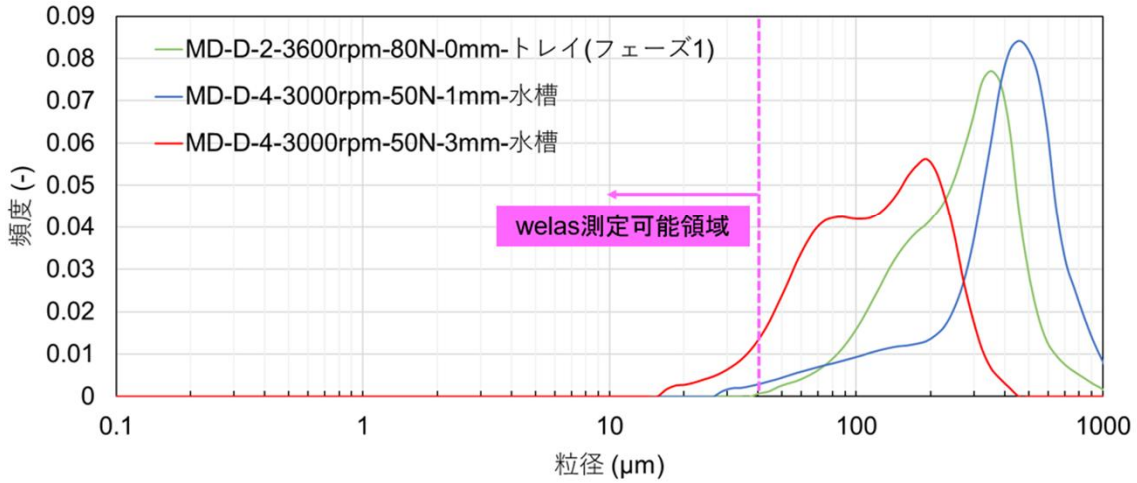

- SUS304に対する湿式切削試験では、水位3 mmまでは飛散率が上昇する傾向が見られ、水位依存性は非金属材料と異なる挙動を示した。
- 光学顕微鏡およびSEM観察の結果、水位の増加により飛散粒子の微細化が進行していた。これは高水位によって切削部の温度上昇が抑制され、切削粉の結合が起こりにくくなるためと考えられる。

© CRIEPI

## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# ディスクカッター切削試験結果（SUS304、水位と飛散率）




- SUS304切削時のWelasによる粒子数評価では、水位増加により飛散率の上昇が見られたのに対し、HEPAフィルターによる回収ダスト量は水位に対して大きな依存性を示さず、飛散量はおおむね一定であったことから、両者の傾向に差が生じた。

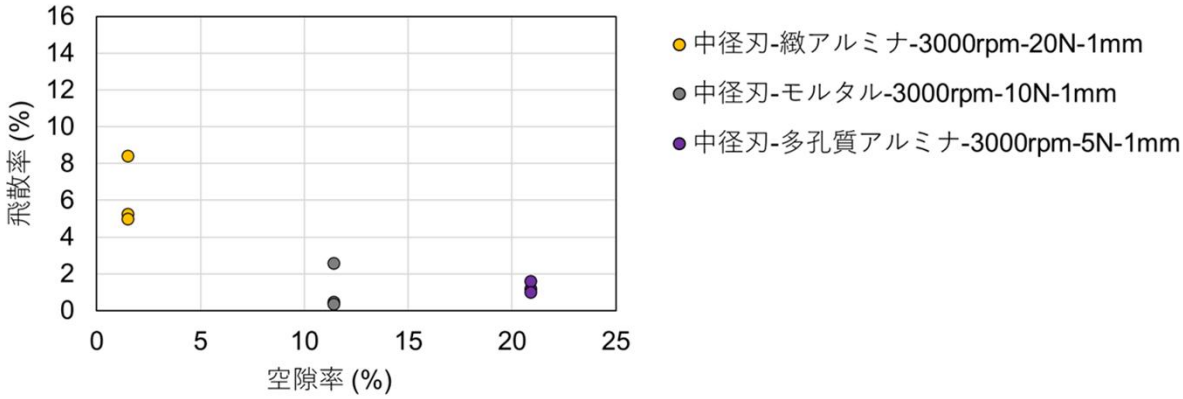
- その要因として、Welasは測定可能粒径範囲（約0.3～10 μm）が限られていることが挙げられる。水位増加により生成される粒子が微細化した場合、Welasで測定可能な粒子数が増加することで飛散率が高く見積もられる可能性がある。実際に得られた粒径分布の結果からも、水位増加に伴いピーク粒径が小径側へシフトする傾向が確認されており、測定方法の影響が示唆された。

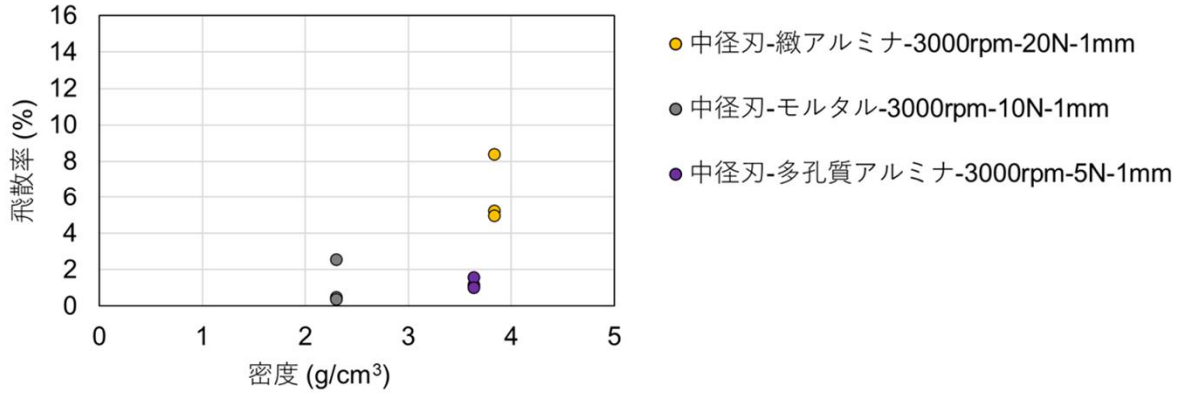
- このことから、粒径変化を伴う材料では、飛散率評価において複数の測定手法を併用し、測定原理や適用範囲を踏まえた補正的な解釈が必要である。

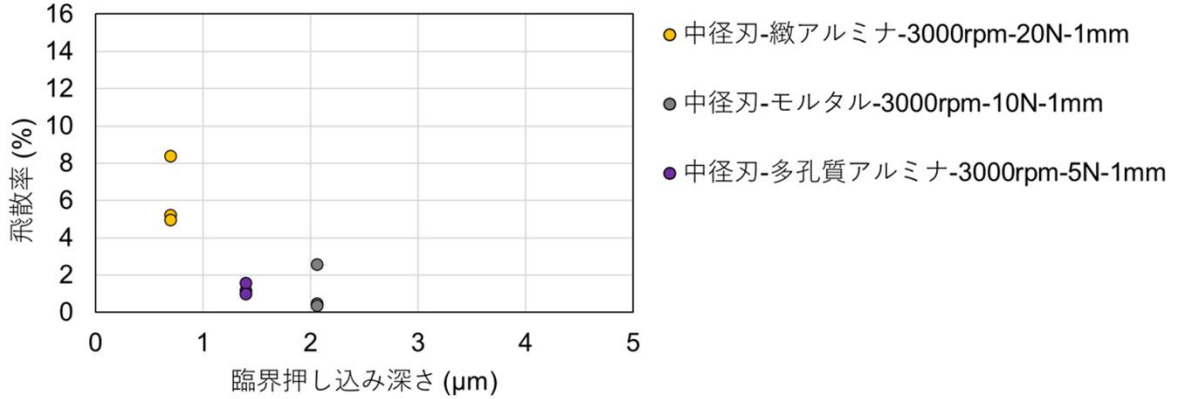
© CRIEPI

## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# ディスクカッター切削試験結果（アルミナ・モルタルでの材料物性の影響）




- 飛散率への材料依存性を把握するため、供試体の空隙率・密度・臨界押し込み深さに着目してデータを整理した。
- 空隙率については、空隙率が高い多孔質アルミナで飛散率が最も低く、緻密なアルミナほど飛散率が高くなる傾向が示された。
- 密度による飛散率の差は小さく、多孔質アルミナとモルタルは密度が異なるのにもかかわらず類似の飛散率を示した。また、緻密質アルミナと多孔質アルミナは密度が近いものの、飛散率には明確な差が認められたことから、密度よりも空隙率の影響が支配的であることが示唆される。
- 臨界押し込み深さが小さい材料ほど飛散率が高い傾向は一部に見られたが、モルタルと多孔質アルミナでの類似結果や、極めて小さい値を持つガラス質材料の低飛散率から、飛散挙動への単独の支配的因子とは言い難い。

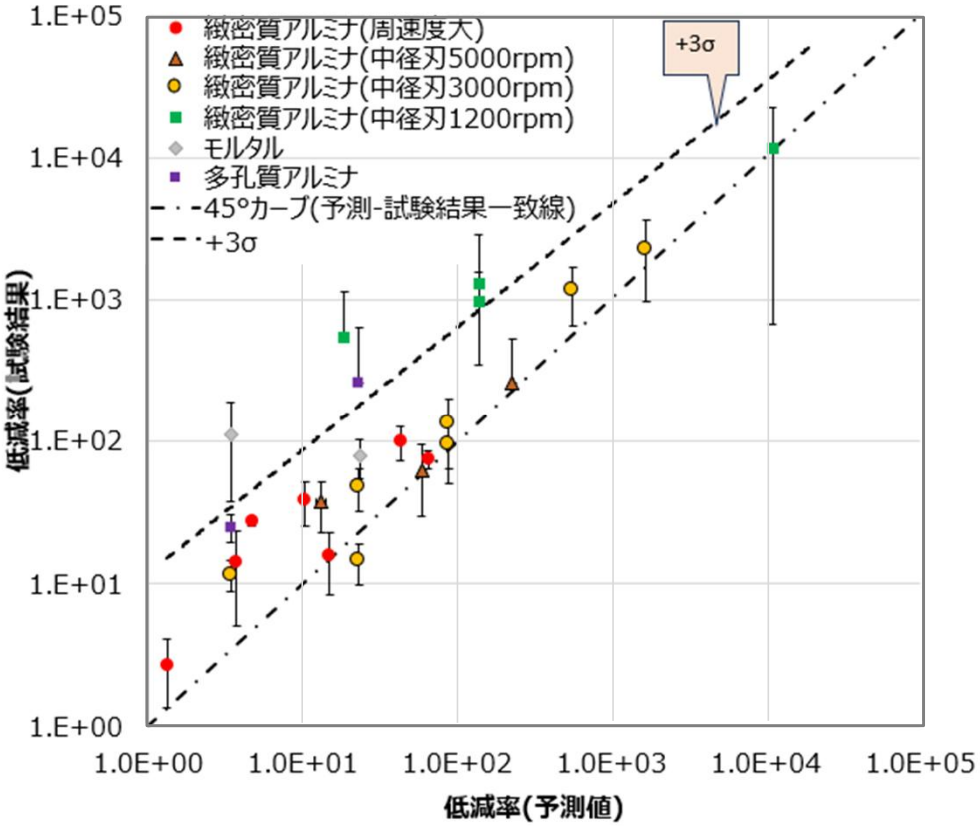
- よって、空隙率との間に一定の相関があることから、臨界押し込み深さは飛散率の変動要因の一つとして考慮しつつも、他の材料物性と併せて扱うことが適切である。これらの結果は、飛散率予測式において複数因子を組み合わせた多変量的アプローチが有効であることを支持するものである。

© CRIEPI

## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# ディスクカッター切削試験結果（湿式条件におけるダスト飛散低減予測式）

- 湿式切削条件における飛散率の低減効果を定量的に予測するため、周速度および水位を変数とした経験式モデルを構築した。
- 低減率 $R_{wet}$ は、周速度に応じた低減効果の飽和的挙動と、水位に伴う低減効果の増加を考慮して構成され、予測式は $\ln R_{wet} = a\left[1 - e^{-bL}\right]$ の形式とした。
- ここで、係数 $a$ 、$b$ は周速度 $z$ の3次式で表現され、得られた係数を基に計算された予測値と実測値の対比は、図中の45° 線および±3σの範囲内で良好に一致した。これにより、本予測式は広範な条件における湿式切削時の飛散率推定に有効であることが確認された。




$$\ln R_{wet} = a[1 - e^{-bL}]$$

$$a = f(z) = a_3 z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0$$

$$b = f(z) = b_3 z^3 + b_2 z^2 + b_1 z + b_0$$

$R_{wet}$ : 低減率
$a$ : 周速度による低減率の低下傾向を表わす係数
$b$ : 水位による低減率の増加を表わす係数
$L$ : 水位（mm）
$z$ : 周速度（m/s）

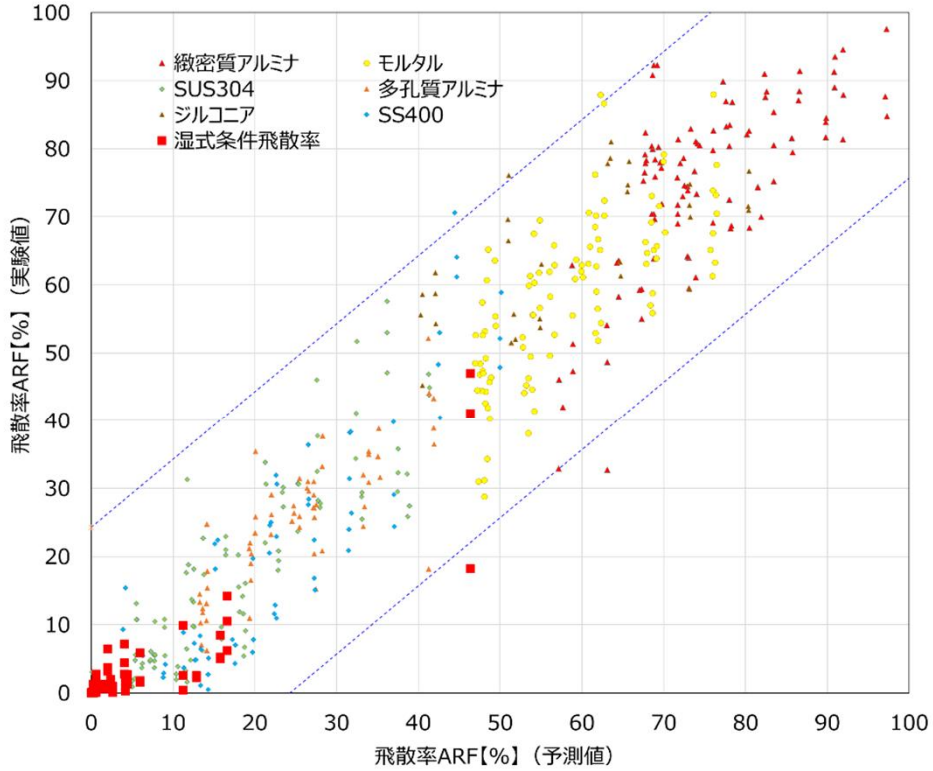
| | $z^3$ | $z^2$ | $z^1$ | $z^0$ |
|---|---|---|---|---|
| a | $4.00\times10^{-5}$ | $-3.00\times10^{-3}$ | $-3.00\times10^{-2}$ | 10.0 |
| b | $-2.04\times10^{-5}$ | $2.63\times10^{-3}$ | $-1.13\times10^{-2}$ | 1.73 |

© CRIEPI

## 【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# ディスクカッター切削試験結果（湿式条件におけるダスト飛散低減予測式）

- 湿式条件下における飛散率（ARF）を予測するため、乾式条件での飛散率 $Y_{dry}$ を基礎に、湿式による低減効果 $R_{wet}$ を乗じた形で湿式ARFを表現した。乾式飛散率 $Y_{dry}$ は、周速度・押付圧・空隙率・密度・臨界押し込み深さ・砥粒粒度・カバー角度の7変数を用いた重回帰式により構築している。
- 多くのデータが±3σ範囲内に収まり、提案式の妥当性が確認された。




$$Y_{\mathrm{wet}} = Y_{\mathrm{dry}} \times R_{\mathrm{wet}}$$

$$Y_{\mathrm{dry}} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_7$$

$Y_{dry}$：乾式条件飛散率、$x_1$：周速度、$x_2$：押付圧、$x_3$：空隙率、$x_4$：密度、$x_5$：臨界押し込み深さの対数、$x_6$：ディスクカッターの砥粒の粒度、$x_7$：カバー角度、$b$：重回帰式の係数を表す。

© CRIEPI

【3-2】ディスクカッターによる切削ダスト飛散率測定

# まとめ

- 湿式切削条件において、回転数・水位・押付力などの切削条件が飛散率に与える影響を系統的に評価した。
- 回転数の増加に伴い飛散率は上昇し、低回転では1 mm程度の低水位で十分な抑制効果が得られたが、高回転では10～20 mm程度の水位が必要となった。
- 水位の増加により粒径分布は小径側にシフトし、微粒子の割合が増加する傾向が確認された。これは、大粒子が水中で捕捉されやすくなることに起因する。
- SUS304の飛散率は乾式条件と比較して低減しており、水位による抑制効果も確認されたが、その効果の現れ方や粒径分布の変化は他の材料とは異なる傾向を示した。
- 空隙率の高い多孔質材では飛散率が低く、材料物性（空隙率や構造）が飛散挙動に大きく寄与していることが示された。
- 得られた結果を基に湿式環境下における飛散率の低減効果を再現する予測式を構築し、多数の試験結果と良好な一致を示した。
- 湿式切削における飛散抑制効果は切削条件と材料物性の両面から把握する必要があるが、今後のダスト飛散挙動評価に向けた基盤データが整備された。

© CRIEPI

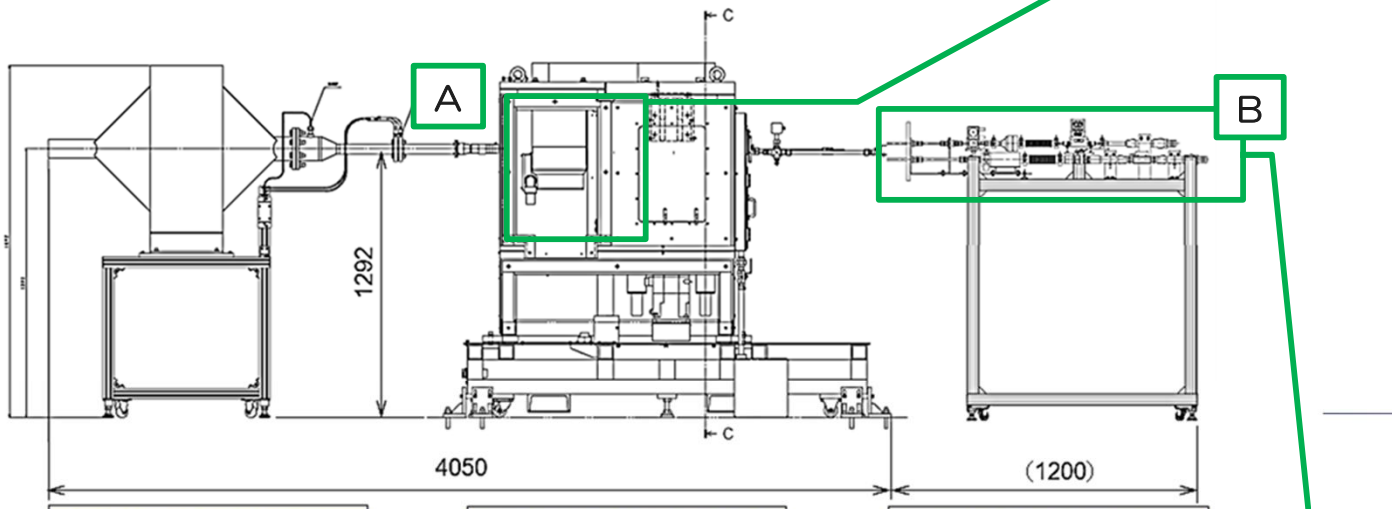
# 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

© CRIEPI

## 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

# 試験装置

- 湿式切削環境下でのダスト飛散挙動を評価するため、冠水条件に対応したコアボーリング試験装置を構築した。
- 水位50mmまでの切削試験を実施するため、供試体を水槽内に設置し、その周辺を局所的に囲む構造である。
- ダスト計測では、Welas・ELPI+による粒子計測を併用して実施している。ミスト除去システムは、乾燥空気との混合による方法を採用した。

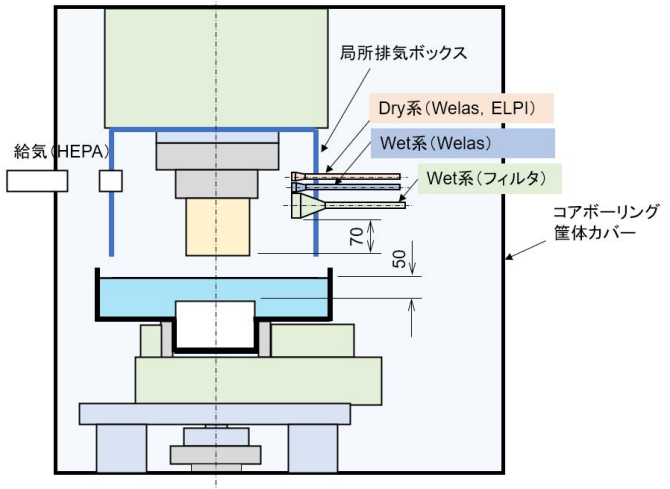



- Ph.1で使用した排気側HEPAフィルタユニットを使用
- 架台・配線等は新規

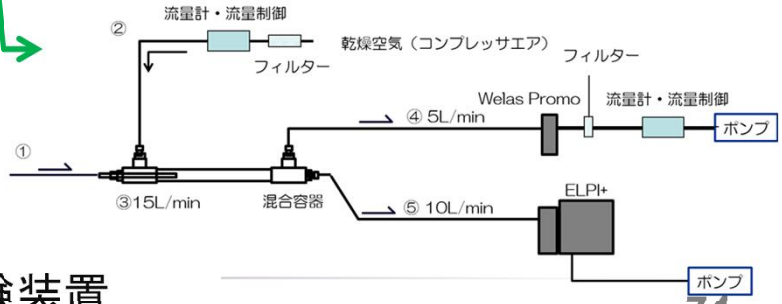
- 筐体の局所排気カバー内でダストを捕集
- 水槽を新設（水中・気中加工で使用）
- 漏洩対策のためのカバー類を追加
- コアビットアダプタを新製
- 制御系統の改造・更新

- Wet系統でのWelas計測
- Dry系統でのWelas・ELPI+計測

A 切削部の概略図




B サンプリング部の概略図



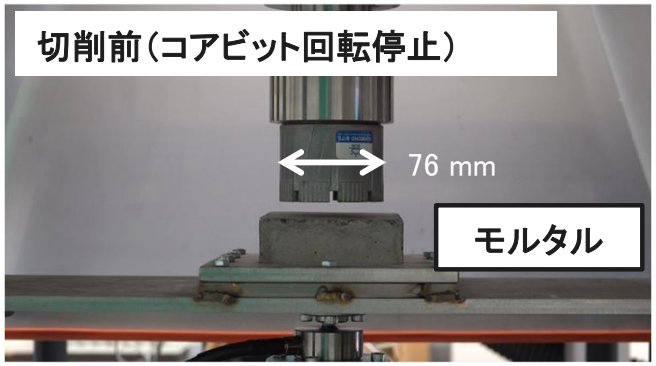

コアボーリング試験装置

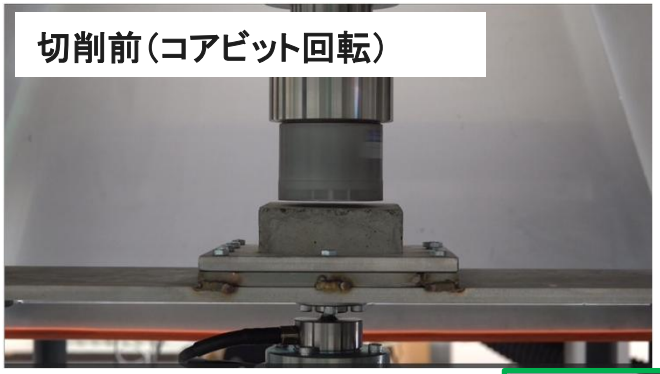
© CRIEPI

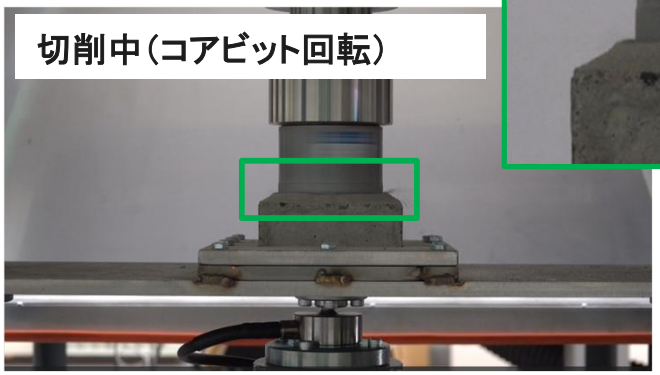
## 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

# 切削中の様子（Φ76mmコアビット、600rpm）

### 乾式切削



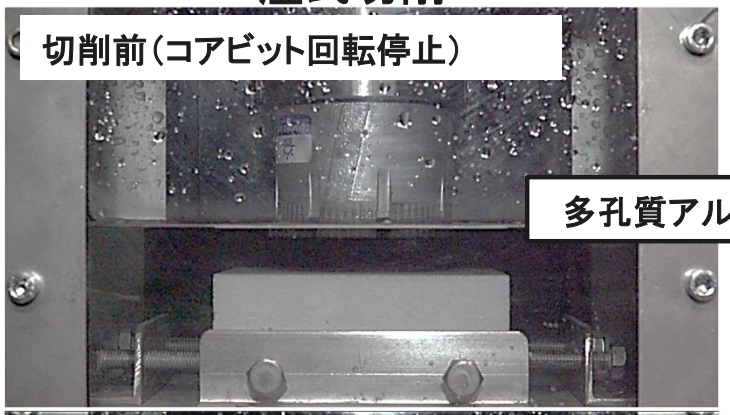



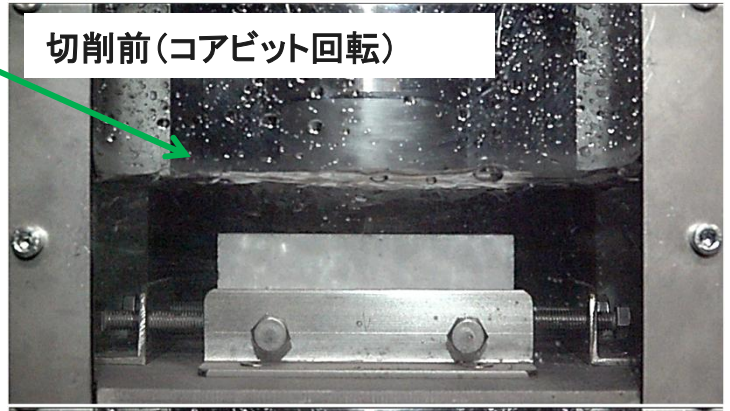

ディスクカッターのような水の巻き上げはほぼない。

切削部の周囲に堆積した粒子が飛散する。

切削部の周囲に切削した粒子が堆積

### 湿式切削



© CRIEPI

## 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

# 試験条件

■ コアボーリングによる湿式・乾式切削環境下でのダスト飛散挙動を評価するため、各種供試体を対象に切削条件や水深を変化させた系統的な試験を実施した。以下に、試験に用いた条件の概要を示す。

| | |
|---|---|
| 試験材料： | モルタル、多孔質アルミナ、ジルコン |
| 切削条件： | 回転数300～600 rpm、押付力1 kN、 |
| 水深： | 0（乾式）～50 mm（湿式） |
| ビット条件： | 外径φ76 mm、内径φ60 mm、有効長55 mm<br>（C4, K12タイプ使用） |
| 実施RUN数： | 全11ケース、各3RUN（計28RUN） |
| 計測機器： | Welas、ELPI+、HEPAフィルター捕集（Wet/Dryライン併用） |
| サンプリング流量： | 15 L/min、ドライエアー混流により希釈倍率0～2を設定 |
| 評価項目： | 飛散粒子の粒径分布（個数・質量）、フィルター前後重量差、<br>ELPI捕集板 |
| SEM観察時の備考： | 乾式条件における切込み困難例や、湿式でのビット詰まり抑制傾向などを確認 |

© CRIEPI

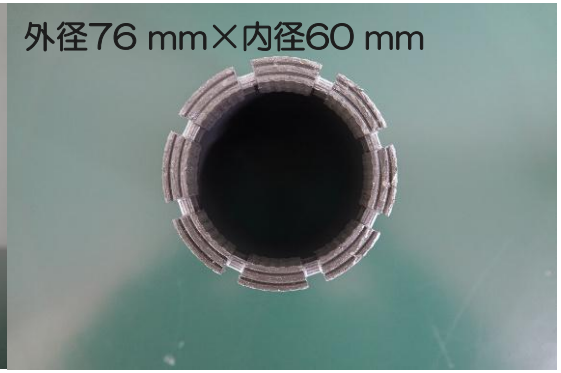
# 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

## コアビット

- 本試験では切削特性の異なる2種類のダイヤモンドコアビット（K12タイプ、C4タイプ）を使用し、ビット特性がダスト飛散挙動に与える影響についても比較した。
- K12タイプはマトリックス（基材）が軟らかく設計されており、切削中に刃先が摩耗・更新されることで新しいダイヤモンドが常時露出する。刃の消耗は大きいが、高硬度材の切削に適している。
- C4タイプはマトリックスが硬く刃の消耗は小さいが、硬度の高い材料に対しては切削性が低下することがある。中硬度材（例：モルタル等）の切削には適している。

### ダイヤモンドビット・マトリックス選定表

| ビット区分 | | | サーフェイスコアビット | インプリグネイテッドコアビット | | | | | | マトリックス硬さ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | EZビット | サイクロン | アルファビット | Zシリーズ | Cシリーズ | Kシリーズ | Sシリーズ | | |
| Color | | | スカイブルー | レッド | イエロー | グリーン | ゴールド | シルバー | オレンジ | |
| 岩質 | 極超硬岩～超硬岩 | チャート | | | | | | K12 | | 軟 |
| | | 石英岩 | | SS | | | | K11 | S11 | |
| | | 珪質岩 | | | | | | | | |
| | 超硬岩～硬岩 | 片麻岩 | | | | | | K10 | S10 | |
| | | 花崗岩 | | | | | | K9 | | |
| | | かんらん岩 | | | α2 | Z5 | | K8 | S9 | |
| | | 斑れい岩 | | | | | | | S8 | |
| | | 輝緑岩 | | | | | | K7 | S7 | |
| | | 花崗閃緑岩 | | | | | | | | |
| | | 流紋岩 | | S | | Z4 | | | | |
| | 硬岩～中硬岩 | 安山岩 | | | | | | K6 | | |
| | | 玄武岩 | | | | | | | | |
| | | 大理岩 | | | | Z3 | | | | |
| | | 片　岩 | | | α1 | | C6 | | | |
| | | れき岩 | | | | | | | | |
| | | 蛇紋岩 | | | | Z1 | | | | |
| | | 砂　岩 | | | | | | | | |
| | 中硬岩～軟岩 | 泥　岩 | | | | | | | | |
| | | 石灰岩 | | H | | | | | | |
| | | 粘板岩 | | | | | C4 | | | |
| | | セメント | | | | | | | | |
| | | 凝灰岩 | Y | | | Z0 | | | | |
| | | 頁　岩 | | | | | | | | |
| | | 粘　土 | Z | | | | | | | 硬 |
| 特　徴 | | | 人造ダイヤを使用した低価格サーフェイスセットビット | 水の流れを考慮したボトムタイプビット | 価格と切れ味を両立した新ビット | 破砕帯用コアビット | 寿命を重視した中硬岩向けビット | 硬岩・超硬岩・極超硬岩ビット | 均質超硬岩用ビット | |



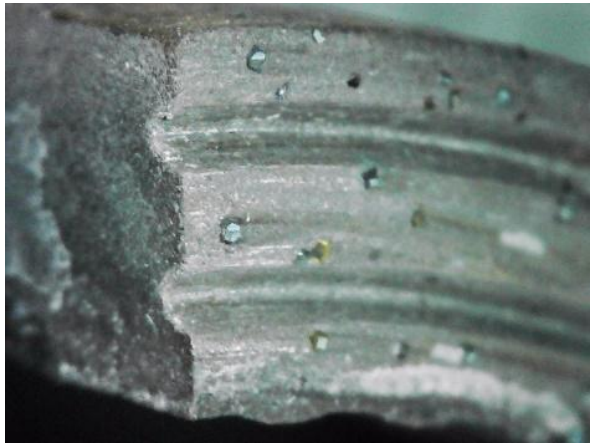
ダイヤモンドビット・マトリックス選定表（旭ダイヤモンド工業株式会社　マインニングビットの製品情報から抜粋）

## 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

# 乾式切削と湿式切削での切削跡とコアビット表面の違い

切削後の供試体（ジルコン）

切削後のコアビットの表面

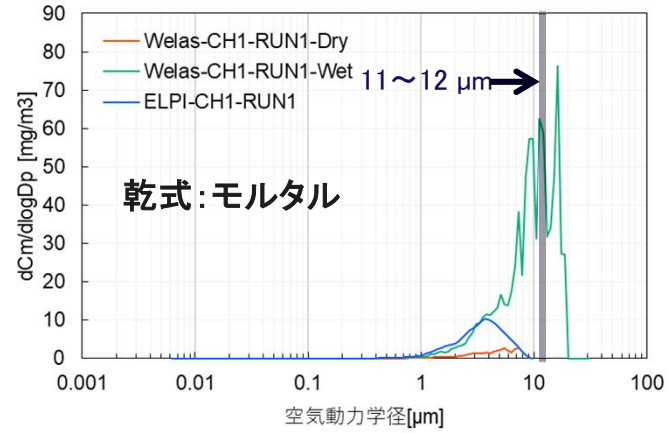


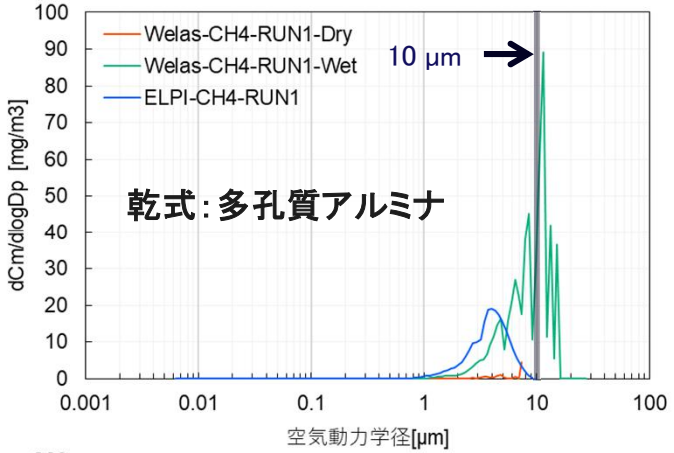
- ディスクカッターでも乾式と湿式で切削状況に違いが見られたが、接触面積と押付力が大きく、熱がこもりやすい構造であるコアボーリングでは、その違いがより顕著に現れた。
- ジルコンの乾式切削では摩擦熱によりコアビット表面が変性し、ダイヤモンドの露出が減少。場合によっては炭化も確認された。また、供試体に割れが生じる例もあった。
- 湿式切削では水による冷却により砥粒の露出が維持され、ジルコンの切削面も安定しており、大きな割れは見られなかった。

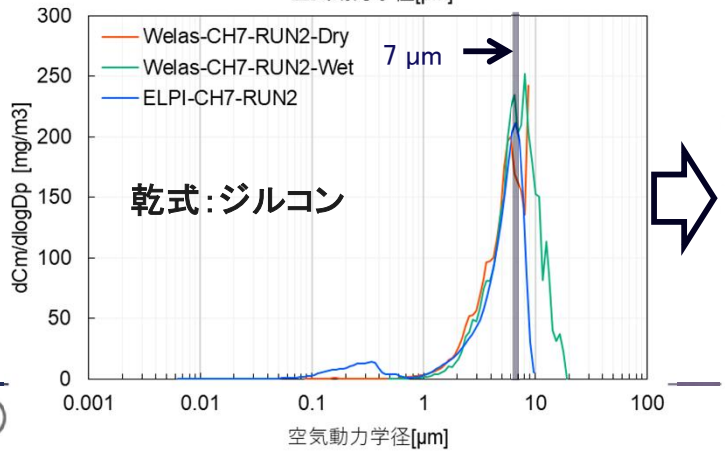
© CRIEPI

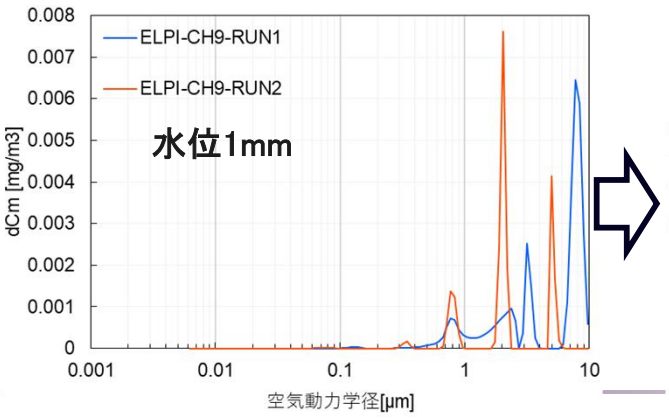
## 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

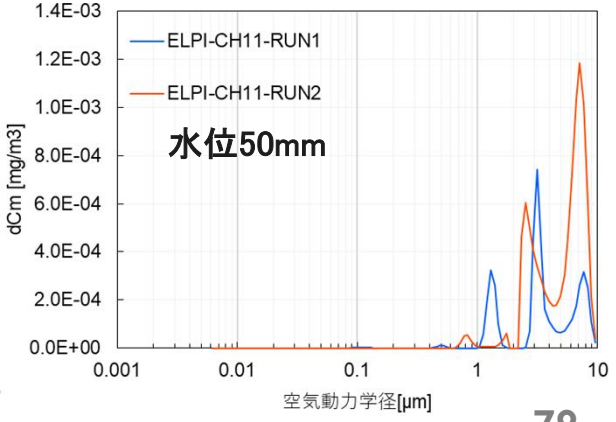
# 飛散ダストの粒径分布



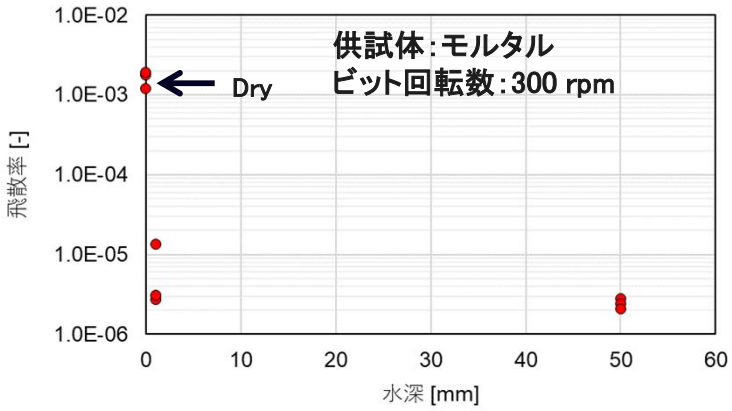

- 乾式切削条件における飛散ダストの粒径分布を、WelasおよびELPIにより測定した結果を左に示す。ピーク粒径はモルタルで約11～12 μm、多孔質アルミナで約10 μm、ジルコンでは約7 μmと、材料によって粒径分布に差が見られた。

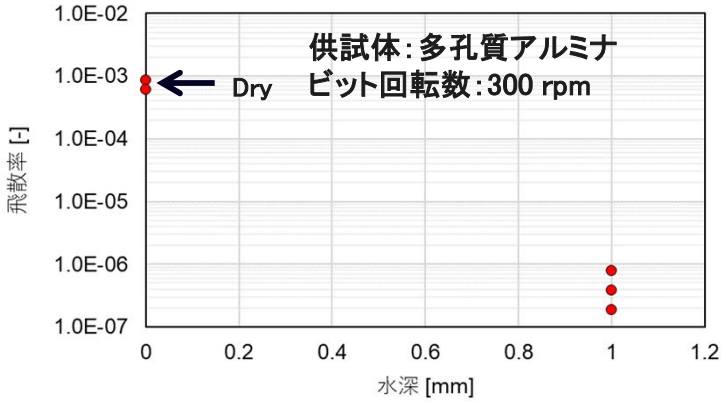
- 下はジルコンを対象に、乾式切削から水位を1 mmおよび50 mmとした場合の粒径分布を示す。いずれの条件でもダストの濃度が極めて低く、分布形状は明瞭なピークを持たず不自然である。このことから、計測値はいずれも機器の検出下限に近いレベルであり、粒径分布を正確に評価できる濃度には達していないと考えられる。

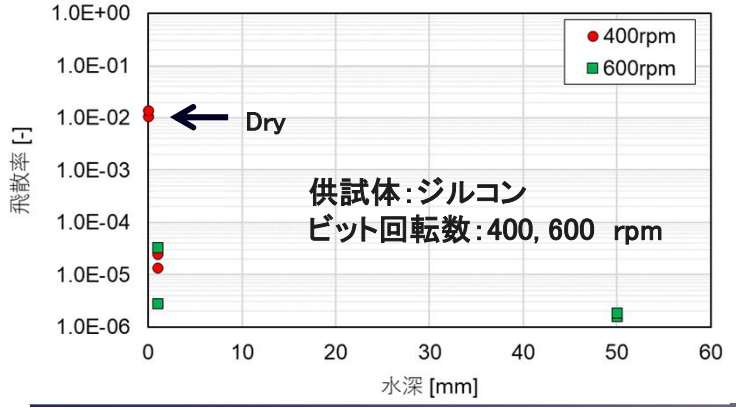
©

## 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

# 乾式切削と湿式切削での飛散率の違い




- 乾式条件下では、モルタルおよび多孔質アルミナの飛散率は約$10^{-3}$（0.1%）、ジルコンでは約$10^{-2}$（1%）と、材料によって飛散量に差が見られた。これは材料の脆性や粉砕性の違いによると考えられる。なお、これらの飛散率はディスクカッターによる切削に比べて1～2桁以上小さい。

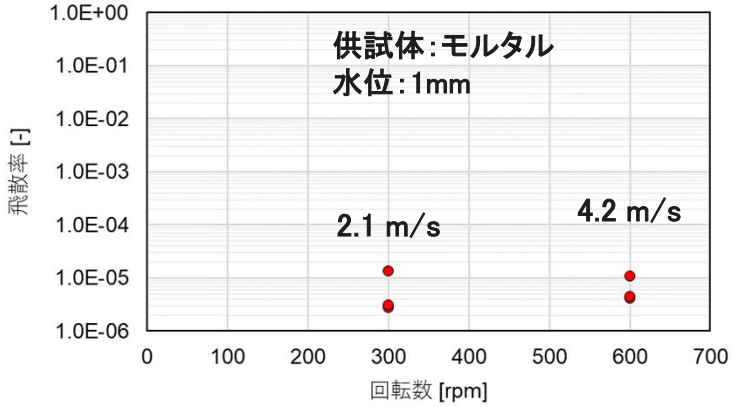
- 水位1 mmの湿式条件では、全ての材料において飛散率が1桁以上低下し、多孔質アルミナやモルタルでは検出限界に近いレベルまで低下した。ジルコンでは回転数によりややばらつきがあるが、乾式に比べて明確な抑制効果が確認された。

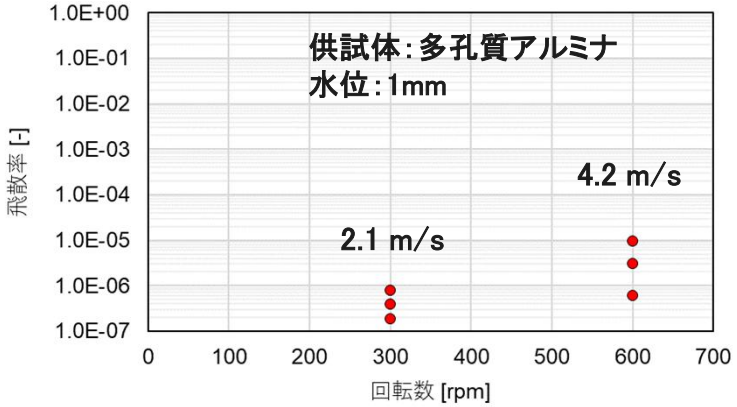
- 水位50 mmでは、水位1 mmと比べて飛散率が更に小さくなっているように見えるが、差は小さい。これは飛散ダスト濃度が計測機器の下限を下回っているためと考えられる。ダスト濃度が極めて低いため、水位の追加的効果を定量的に評価することが難しくなっている可能性がある。

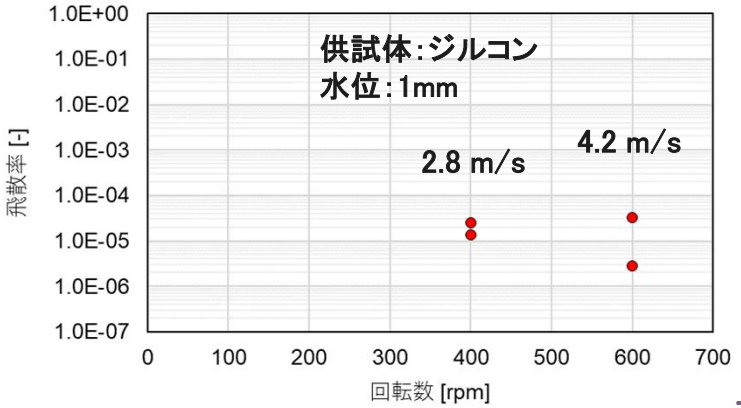
© CRIEPI

## 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

# 湿式切削での回転数の飛散率への影響



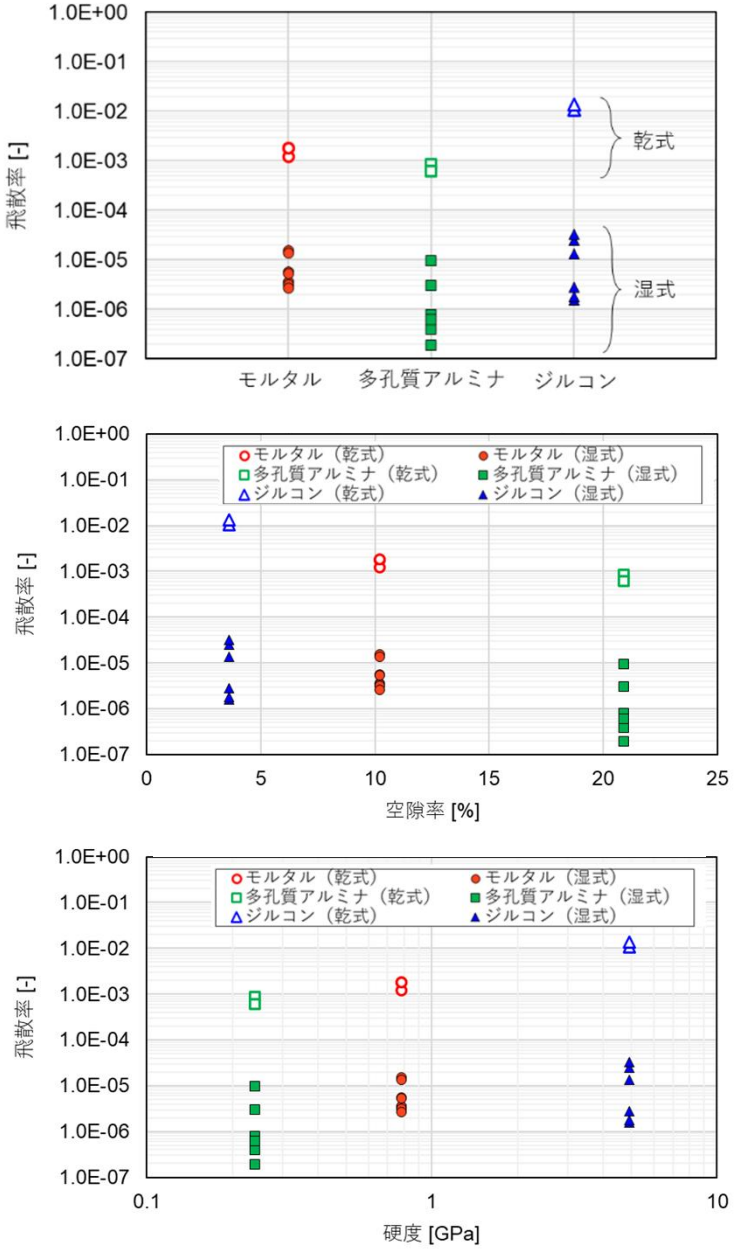




- 水位1 mmの湿式条件下において、モルタル、多孔質アルミナ、ジルコンの各供試体に対して回転数を変化させた飛散率の測定結果を示す。回転数は300～600 rpmの範囲で設定した。
- 全ての供試体において、回転数の増加による飛散率の明確な増加傾向は確認されず、回転数依存性は見られなかった。この理由として、コアボーリングでは刃先の周速度が小さく、600 rpmでもディスクカッターと比べて10分の1程度の周速度であることが挙げられる。
- ディスクカッターのような高周速度領域では回転数の影響が顕著になるのに対し、今回のコアボーリング試験では周速度が小さく、切削によるエネルギー入力も低いため、飛散挙動に対する回転数の影響が現れにくいと考えられる。

© CRIEPI

## 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

# 物性値の飛散率への影響




- コアボーリング試験における材料特性と飛散率の関係を整理した。乾式条件下ではジルコンが最も高く、多孔質アルミナが最も低い飛散率を示した。
- 湿式条件では全体的に飛散率が大幅に低減され、特に多孔質アルミナでは測定下限に近い値まで低下している。
- 空隙率との関係においても、空隙率が高い材料ほど飛散率が低い傾向が確認された。
- 材料硬度との関係は一部で相関が見られるものの、空隙率など他の因子との重なりが大きく、明確な一対一の関係性は認められなかった。
- これらの結果から、コアボーリングにおいてもディスクカッターと同様に、飛散挙動に対する材料物性の影響は空隙構造が主要因となっていることが示唆される。

© CRIEPI

## 【3-3】コアボーリングによる切削ダスト飛散率測定

# まとめ

- 湿式・乾式条件下でモルタル、多孔質アルミナ、ジルコンを対象に飛散率・粒径分布を評価した。
- 乾式切削では、材料により飛散率および粒径分布に差が見られた（ジルコン飛散率：～$10^{-2}$、多孔質アルミナ飛散率：～$10^{-3}$）。コアボーリングでは、ディスクカッターに比べて飛散率は1～2桁程度小さく抑えられていた。また、粒径分布のピークはモルタル：約11-12 μm、多孔質アルミナ：約10 μm、ジルコン：約7 μmと、材料により異なる傾向を示した。
- 湿式と乾式では切削特性が大きく異なり、乾式では摩耗・熱変性・割れなどが顕著であったのに対し、湿式ではそれらが抑制され、ビット表面や切削面にも差が見られた。
- 湿式切削では、乾式切削に比べて全ての材料で飛散率が2～3桁程度低下し、多孔質アルミナでは実質的に検出限界に近づいた。
- 回転数の影響は小さく、これはコアビットの周速度がディスクカッターに比べて十分に低いためと考えられる。
- 以上より、湿式条件下におけるダスト飛散低減効果について、定量的かつ材料依存性を含めた評価データを得ることができた。

© CRIEPI

# 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

© CRIEPI

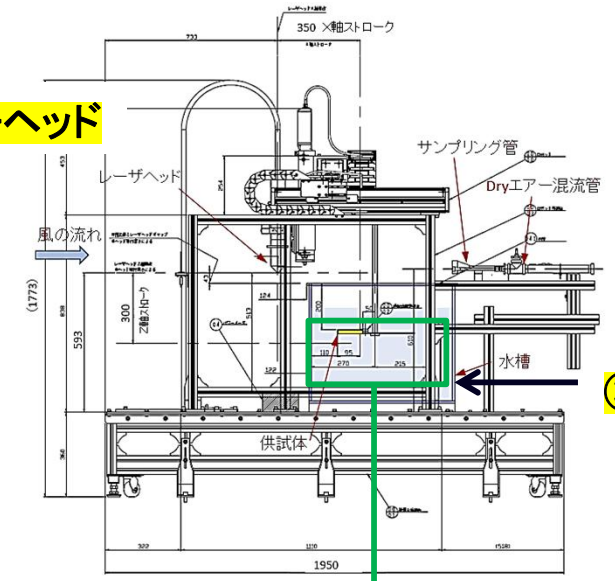
## 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

# 装置概要

本装置は、湿潤環境下におけるレーザー切断時のダスト発生および移行挙動を定量的に評価することを目的として設計され、以下の①～⑤等から構成される。

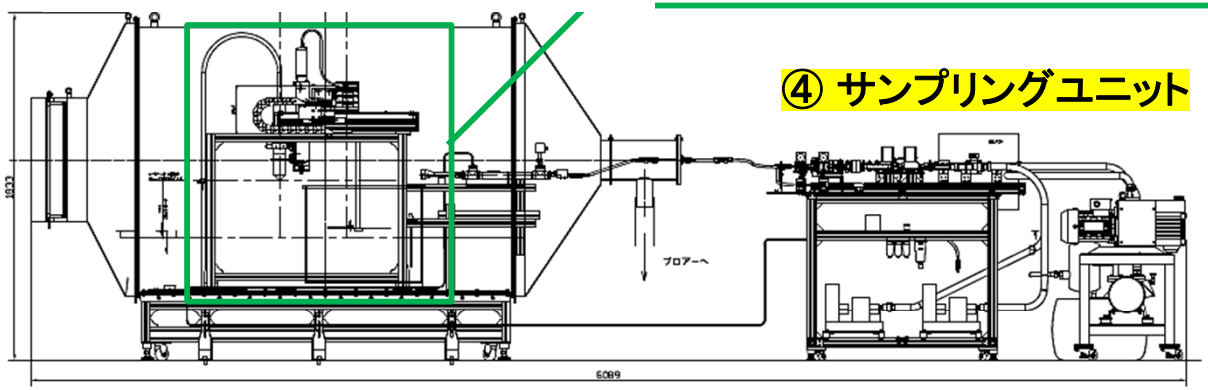
①：レーザー切断試験ケーシング
②：3軸ロボット式レーザーヘッド
③：水槽
④：サンプリングユニット
⑤：ブロアーユニット

② 3軸ロボット式レーザーヘッド



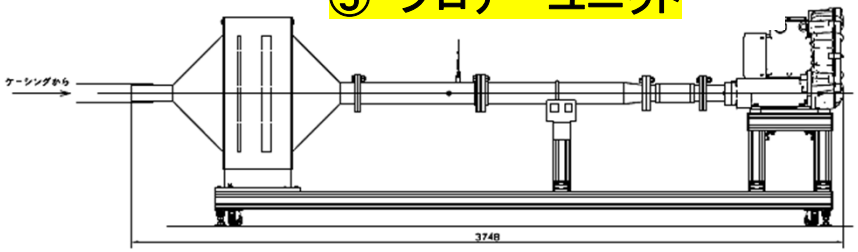

③ 水槽

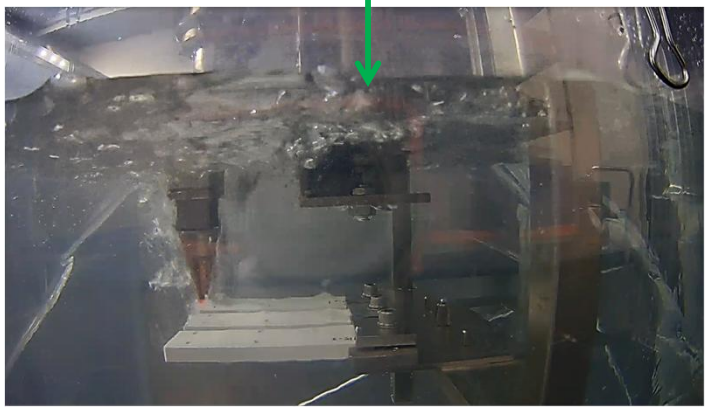
① レーザー切断試験ケーシング




④ サンプリングユニット

⑤ ブロアーユニット

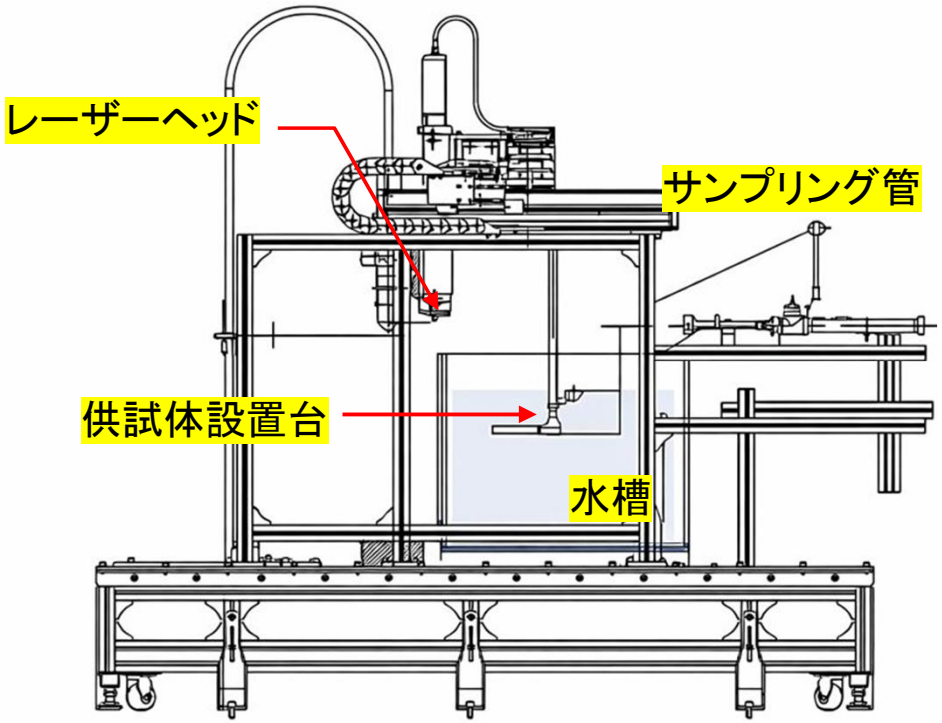


レーザー試験装置

## 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

# レーザー切削装置




レーザー切削装置

- レーザー切削装置は、レーザー発振器、3軸制御ロボット（レーザーヘッド）、水槽（アクリル製、内寸600×400×500 mm）、供試体設置台、サンプリング管などで構成されている。
- 供試体は水槽中に設置され、切削時は鉛直上方向からレーザーを照射する。
- ケーシング左側からHEPAを通過した空気により一方向流が形成され、切削中に発生するミストやエアロゾルは、右側のサンプリング部から吸引される。
- 吸引されたダストは乾燥/湿潤系の粒径測定機器（Welas、ELPI+）やフィルターユニットで捕集・分析される。

- レーザー切断試験装置を構成するレーザーヘッドは、ファイバーレーザー用㈱日本レーザー製OPTICAL D50N-TN（OPTICAL D50ヘッド、切断用同軸ノズル（TN））を使用した。
- レーザー発振器は、10kW連続発振の能力を持つドイツIPG Laser GmbH製 YLS-10000を使用した。

© CRIEPI

## 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

# レーザー切削跡

- 本試験では、下記のようにレーザー出力、水位（乾式／湿式）、パージガス流量、供試体種別をパラメータとして、合計20条件×各3Run（計60Run）の切削試験を実施した。
- 飛散ダストの発生量および粒径分布をWelas、ELPI、フィルター捕集により評価した。

レーザー出力：　5 kW、10 kW

パージガス流量：　30 / 55 / 65 L/min（窒素）

水位：　0 mm（乾式）、100 mm（湿式）

送り速度：　0.6 m/min（全条件共通）

供試体材質：　SS400、モルタル、ジルコン、ガラス

焦点距離：　300 mm（固定）Run数：20条件 × 各3回（計60Run）

測定項目：　飛散率、ダスト粒径分布、ダストの個数濃度・質量濃度、
カーフ幅、供試体質量変化等

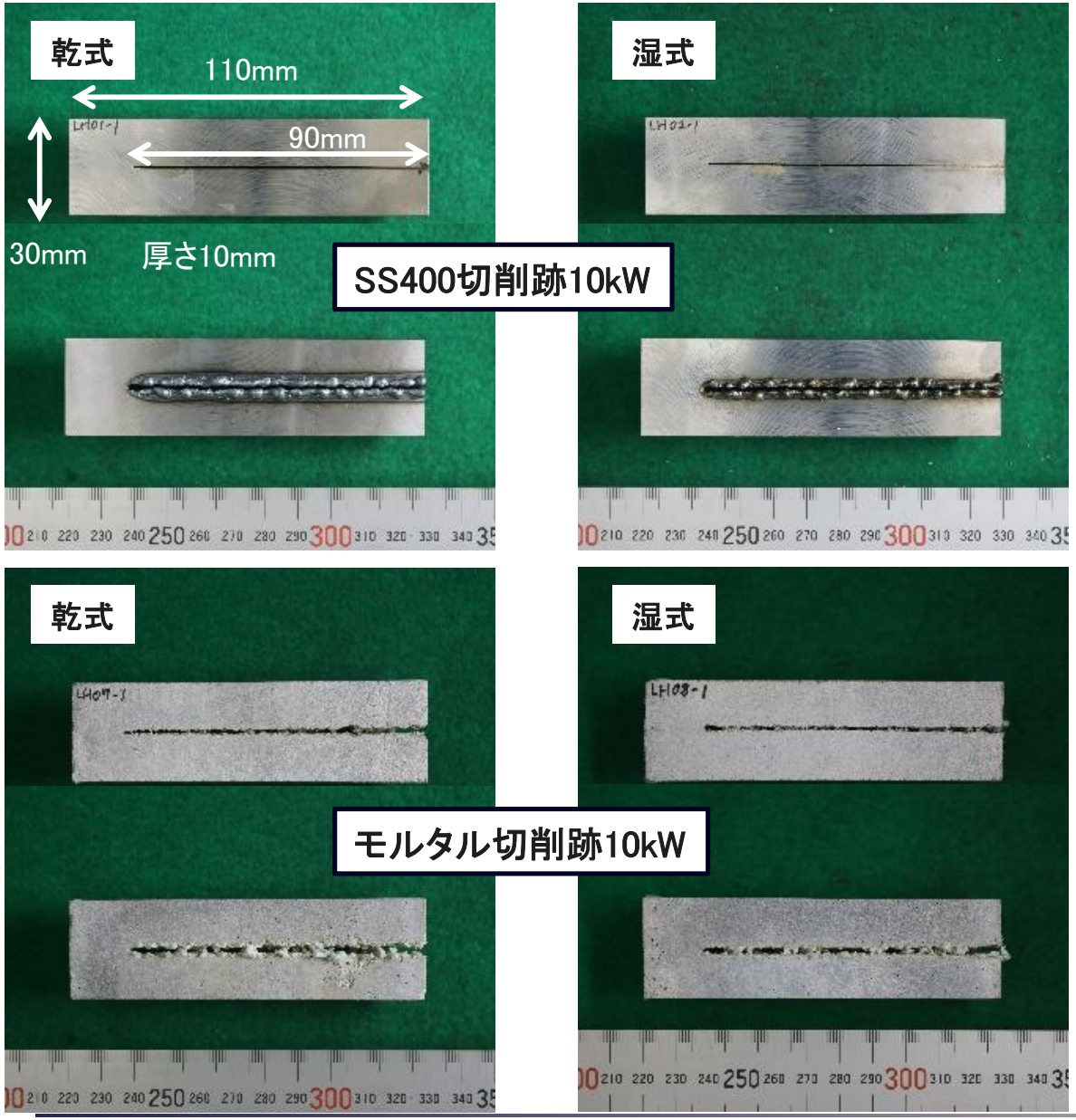
使用計測機器：　ELPI+（乾式）、Welas（湿式）、NILUフィルター
250 L/minフィルターユニット、HEPAフィルター 等

ミスト除去のための希釈条件：
7.5 L/min（2倍希釈）

© CRIEPI

## 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

# レーザー切削跡

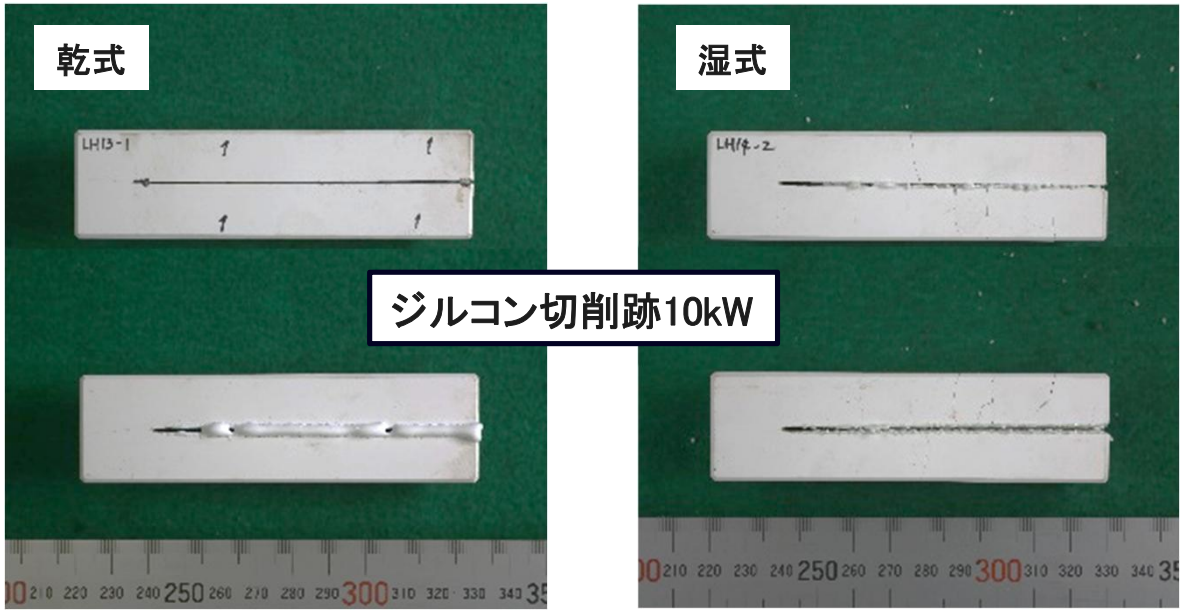


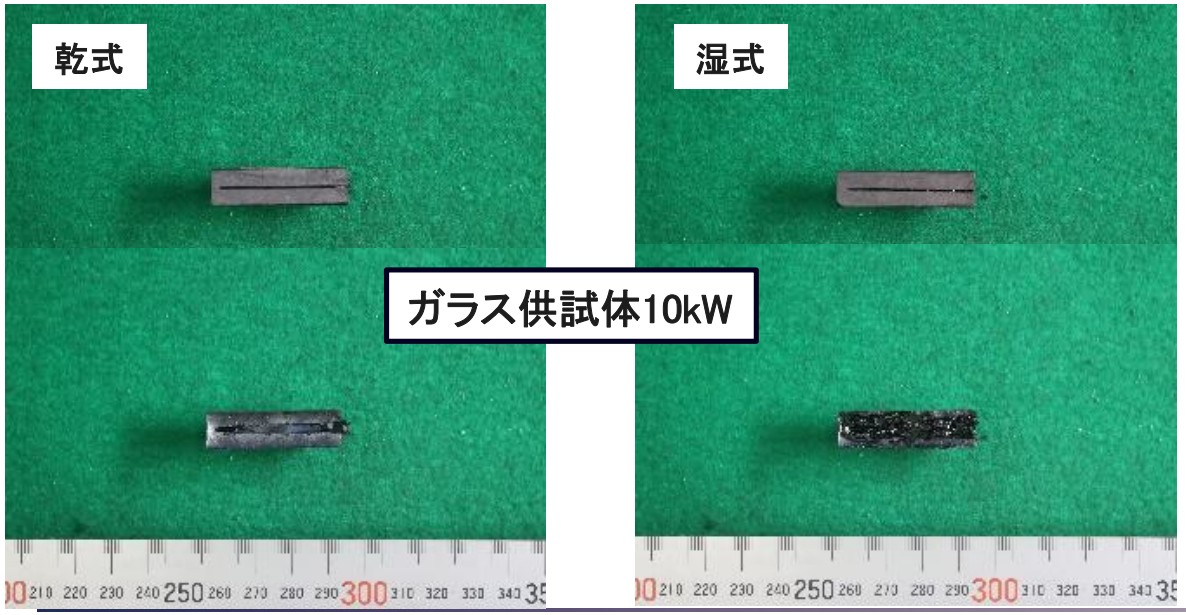

- 左図はSS400およびモルタルに対し、レーザー出力10 kW条件で切削を実施した後の切削跡を比較したものである。乾式・湿式のいずれにおいても、目視レベルでは大きな差異は確認されなかった。
- SS400では乾式条件において若干の再付着スラグが観察されるものの、湿式と比較して顕著な違いとは言えず、切削形状も両者で概ね類似している。また、いずれの条件でもレーザー入射側は比較的シャープである一方、出口側ではスラグの付着やバリの発生が認められた。
- モルタルについても乾式・湿式共に比較的均一な切削形状が得られており、切削への水環境の影響は限定的と考えられる。

© CRIEPI

## 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

# レーザー切削跡



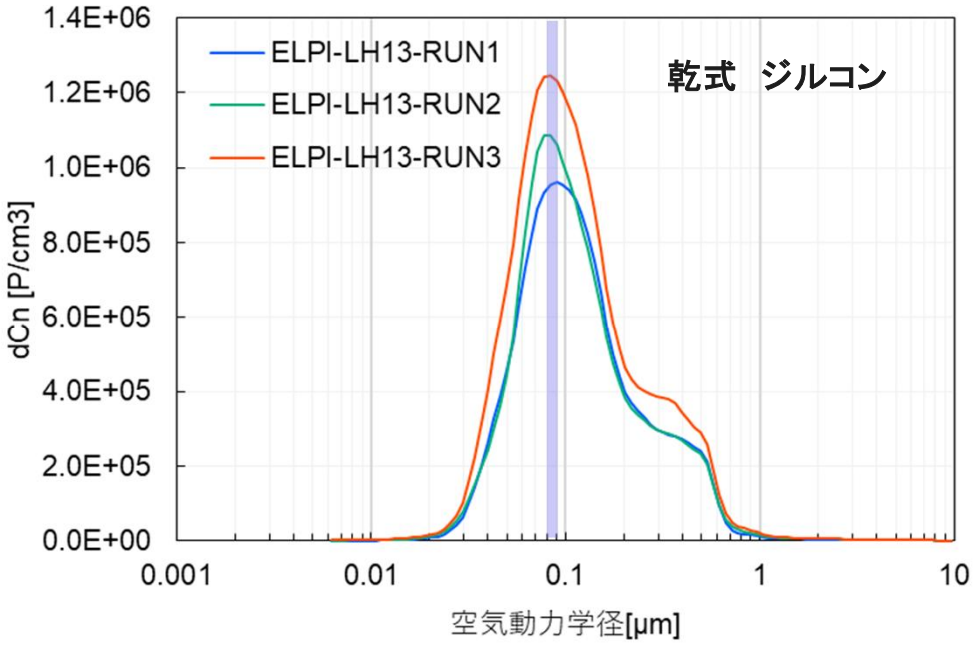

- ジルコンおよびガラス供試体に対し、レーザー出力10 kW条件で乾式・湿式切削を行った後の切削跡を比較した。両材料とも高脆性材料である。
- ジルコンでは乾式切削において切削断面の熱影響が顕著で、表面が荒れる傾向が見られた。湿式切削では水冷効果により、若干ながら断面の安定性が向上し、入口・出口の輪郭も比較的明瞭となった。但し、乾式・湿式共に断面中央部にスラグの再付着が一部観察され、レーザー照射の熱集中による影響が残っている。
- ガラス供試体では、カーフ幅が大きく、バリや割れの発生が確認された。湿式切削では熱応力の緩和により割れの抑制が見られ、断面も比較的滑らかであった。水の冷却効果が影響したと考えられる。

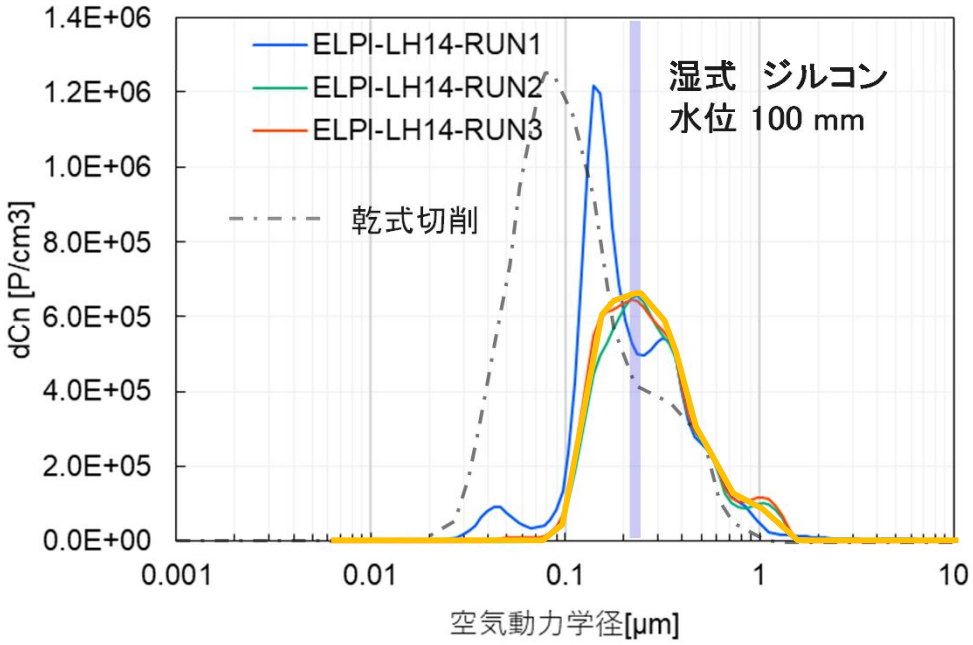
© CRIEPI

## 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

# ダスト粒径分布の比較

- ジルコン供試体に対してレーザー出力10 kW条件で切削を行い、乾式および湿式条件で発生したダストの粒径分布を比較した。乾式では個数分布のピークは0.08～0.09 μmに位置したのに対し、湿式では分布全体が大粒径側にシフトしており、約2.0 μm付近にピークを持つ分布となった。
- このような粒径変化は特に0.1 μm以下の領域で顕著であり、湿式切削では0.1 μm付近の微粒子が凝集して分布が拡大する傾向が示された。



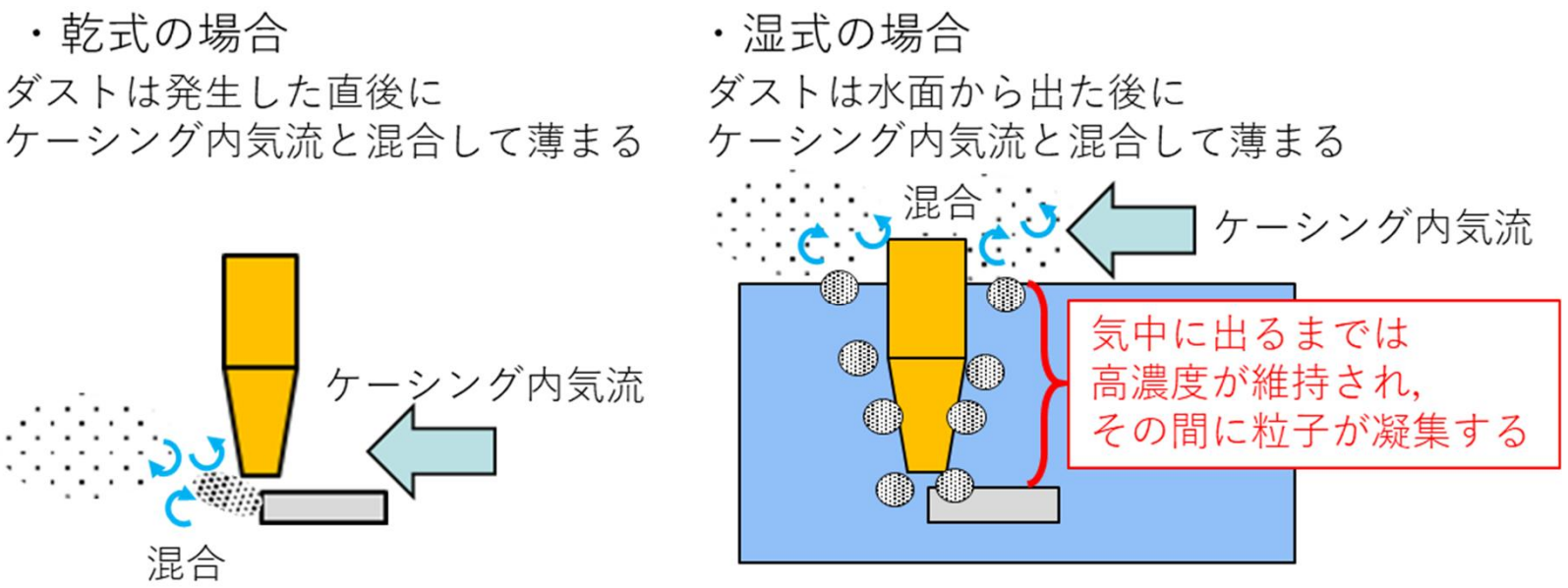




- 湿式切削では粒径分布のピークが乾式に比べて約2倍（0.09 μm → 2.0 μm）に拡大しているが、個数の減少は1/8には達していない。これは、0.1 μm以下の微粒子が凝集して粒径が大きくなり、0.2 μm付近の既存の粒子と重なったためと考えられる。

## 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

# ダスト粒径分布の比較

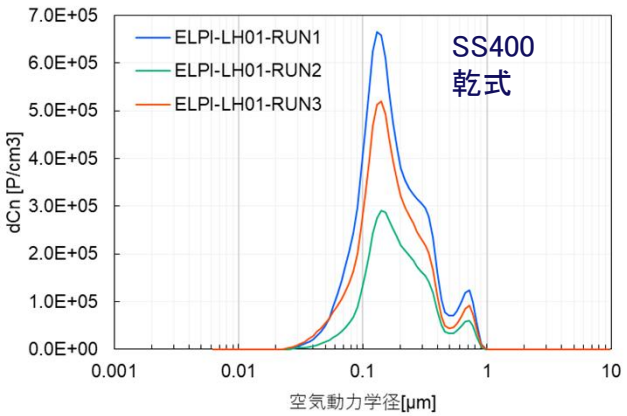
- 下の模式図は、乾式および湿式切削条件下におけるダストの拡散挙動の違いを示している。
- 乾式の場合、レーザー切削によって発生したダストは発生直後にケーシング内の気流と迅速に混合・拡散されるため、ダストの局所的な濃度は低く保たれ、粒子間の凝集はほとんど起こらない。これにより、観測される粒径分布は発生時のままとなる。
- 湿式の場合は、ダストが水中に一時的に滞留した後、水面から気中に移行する。この際、水中での局所的な高濃度環境が維持されるため、粒子間で凝集が進行し、ダストは乾式よりも大粒径側にシフトした分布を示す。観測されたピーク粒径の増加は、この凝集挙動を反映している。

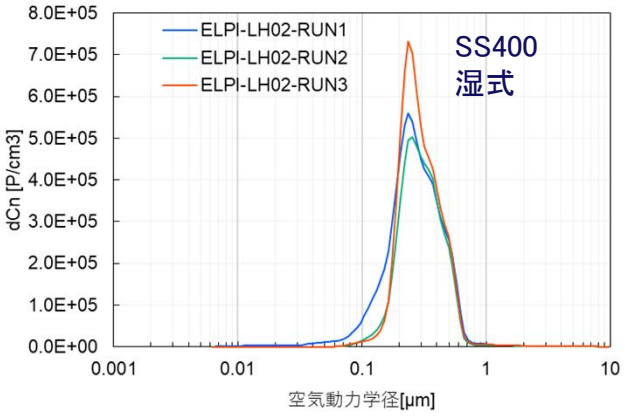


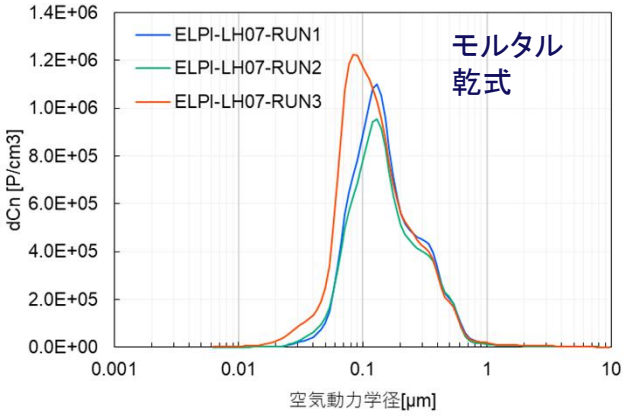

© CRIEPI

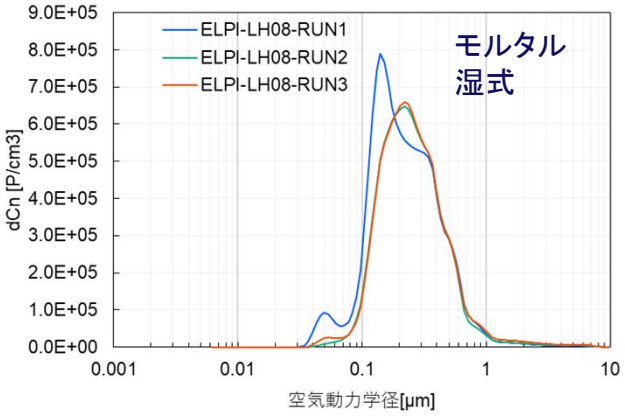
## 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

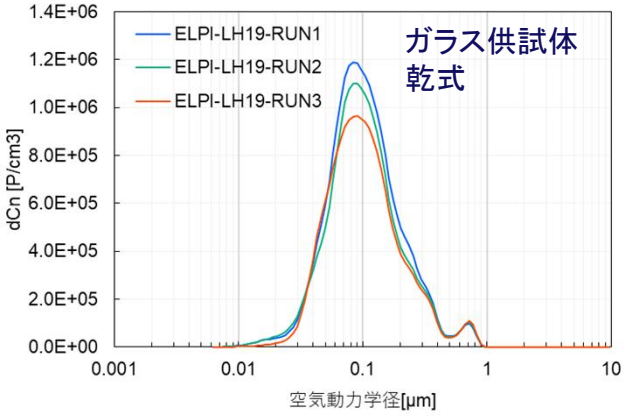
# ダスト粒径分布の比較

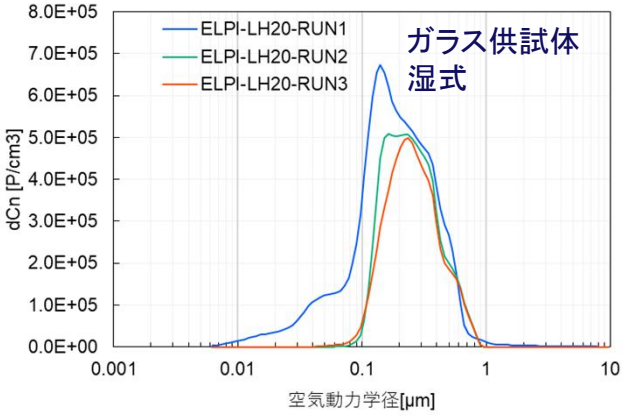


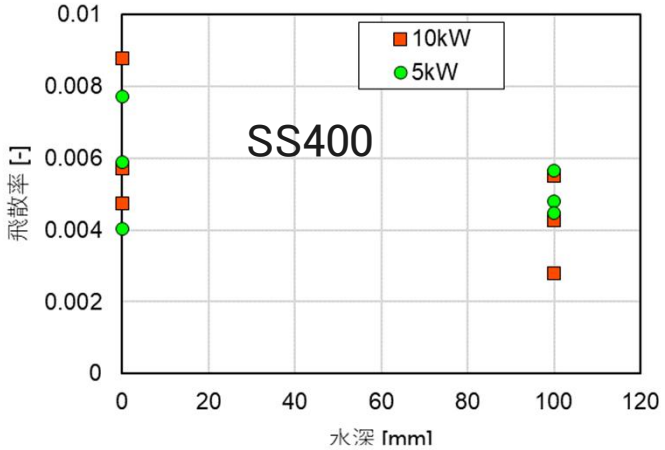

- SS400、モルタル、ガラス供試体について、乾式・湿式の切削条件下で得られたダストの粒径分布を比較した。
- いずれの材料においても湿式条件では分布全体が大粒径側にシフトする傾向が見られた。これは、先に示したジルコンと同様に、湿式条件下で発生したダストが水中に滞留することで凝集が進行し、粒径が増加したものと考えられる。
- SS400とモルタルでは、乾式では0.13 μm付近にピークがあるのに対し、湿式では0.23 μm付近にピークが移動している。
- ガラス供試体は0.08 μm付近にピークがあるのに対し、湿式では0.23 μm付近にピークが移動している。

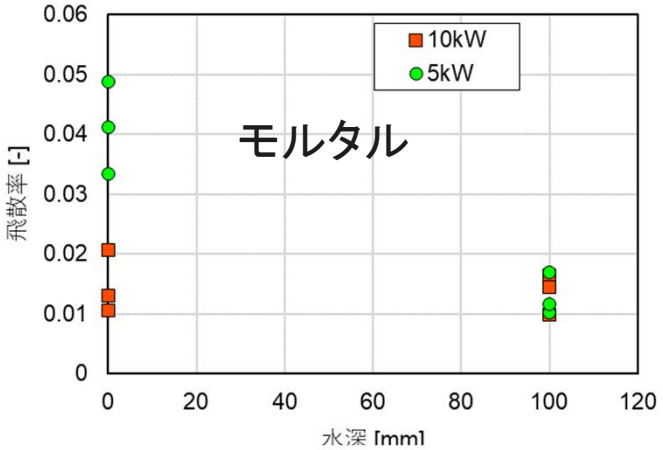
© CRIEPI

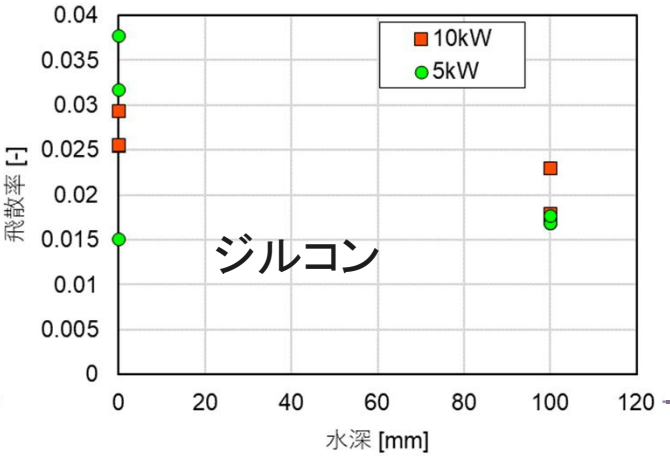
## 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

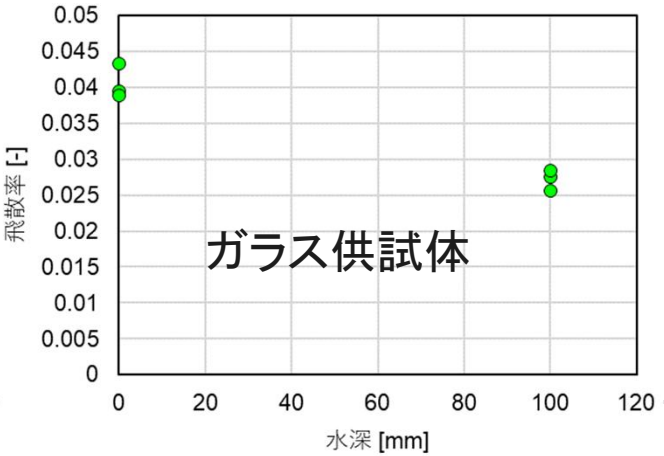
# 飛散率の比較

- 下図は、SS400、モルタル、ジルコン、ガラス供試体を対象に、レーザー出力（10 kW・5 kW）および水深条件を変化させた際の飛散率を比較したものである。いずれの材料においても水深が深くなることで飛散率はわずかに低下する傾向が見られた。
- しかし、その低減量は限定的であり、SS400やモルタルでは水深0 mm（乾式条件）と水深100 mmでの飛散率差は統計的ばらつきと同程度であった。
- 機械的切削（ディスクカッター、コアボーリング）にて湿式切削時の飛散率が乾式切削時に比べて2～3桁低下したのと比べると、水による低減効果は小さい。



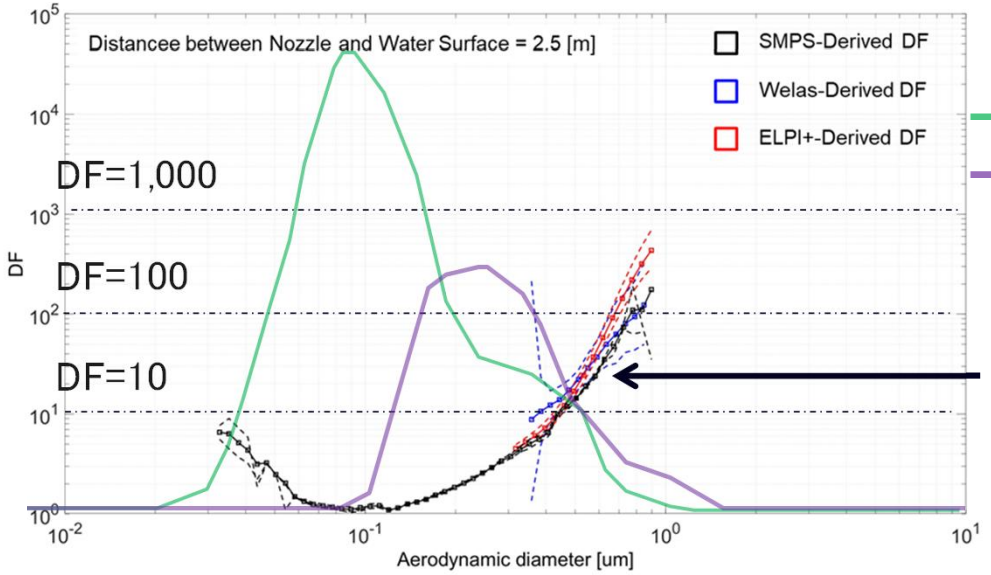




© CRIEPI

## 【3-4】レーザーによる切削ダスト飛散率測定

# まとめ

- 乾式と湿式（水位100 mm）で飛散率の大幅な差は見られなかったものの、湿式では粒径分布が大粒径側にシフトする傾向が確認された。
- この粒径拡大は水中での短時間滞留（約0.3秒）でも粒子の凝集が進行することを示しており、水深によるスクラビング効果を評価する上で重要な知見である。
- 凝集によって粒径が拡大すればより深い水位環境では粒子が除去されやすくなるため、有効な低減効果（DF）につながることが期待される。




水位 2.5 mでは、湿式レーザー切削で生じるダストは1/10まで低減する。重量では、0.8μm付近が支配的になり1/100程度まで低減すると予想される。

スクラビング試験で取得したエアロゾルDFの結果（水位2.5m、P41参照）と、
レーザー切削で発生するダストの粒径分布

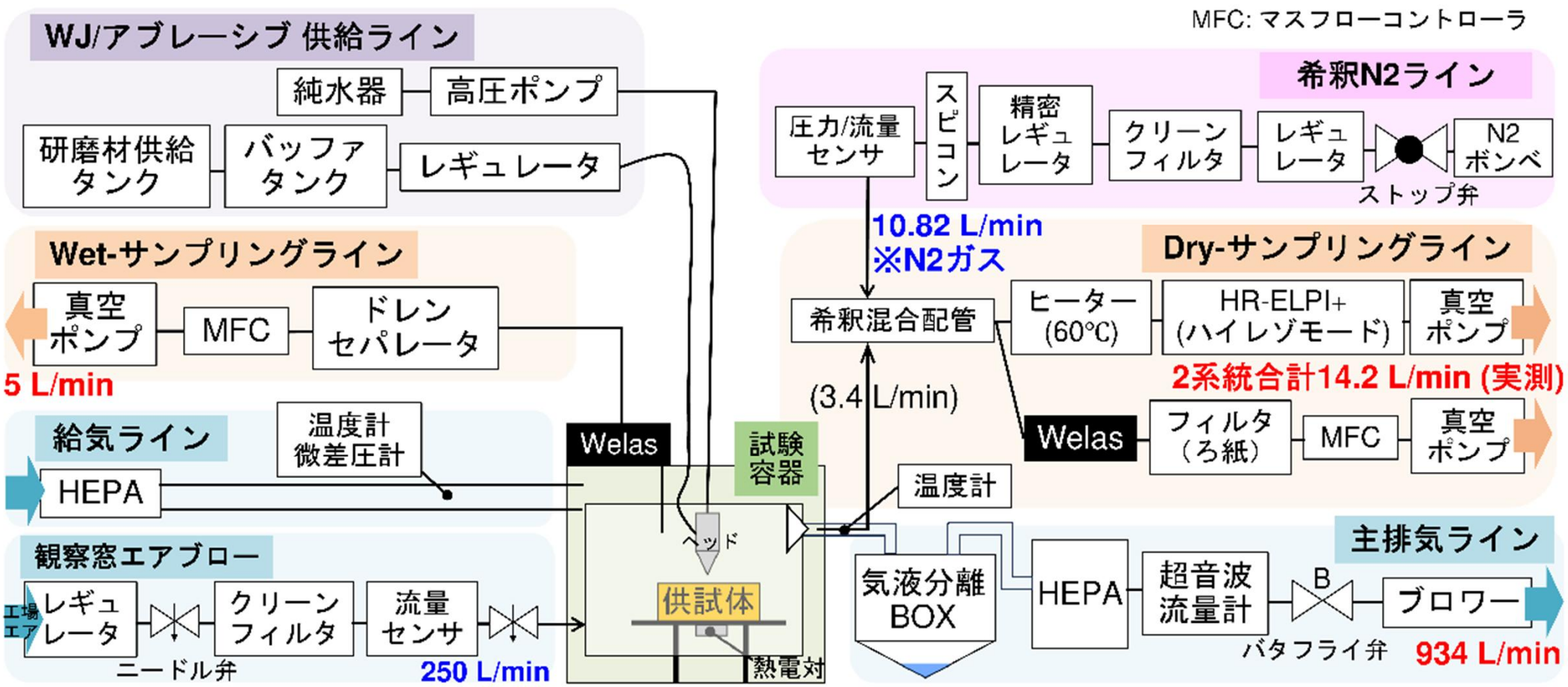
# 【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定

© CRIEPI

## 【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定

# 装置概要

■ 下記の試験系統からなる非冠水での切断試験システムを構築した。




AWJ（WJ）による非冠水切断システム

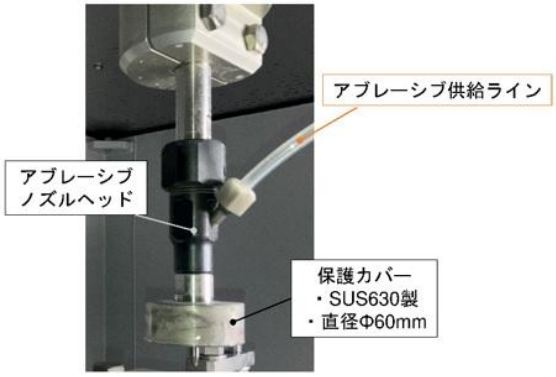
## 【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定

# 試験装置の概要

■ 試験装置各部等の仕様は以下の通り。

| | |
|---|---|
| ウォータージェットノズル* | ・口径：φ0.35mm、φ0.40mm |
| ウォータージェットポンプ | ・吐出圧力：392MPa（最大）、343MPa（常用）<br>・吐出流量：最大5.0L/min（吐出圧力343MPa時） |
| 試験容器 | ・内寸：約1.4m × 約1.4m × 高さ約1.2m<br>・材質：SS400 |
| アブレーシブ | ・オーストラリア産天然ガーネット、粒径#80mesh<br>・供給量：0.1～0.6kg/min |
| 水質 | ・工場用水をカートリッジ式純水器により純化して使用（導電率≦1.0μS/cm） |
| 供試体材料 | ・AWJ：モルタル、ジルコン、SUS304、緻密アルミナ<br>・WJ：モルタル、ジルコン |

＊：AWJの際は本ノズル内でアブレーシブと水を混合




© CRIEPI

【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定

# 希釈によるミスト除去の確認

- WJでは切削が困難なSUS304供試体に対して350MPaのWJを噴射し、本試験体系における最大のミスト発生状態量を模擬した。
- 試験容器から直接吸引したWet-Welas検出値と、ダストサンプリング系統を1:1の乾燥空気で希釈した後のDry-Welas検出値を排気流量を変えて比較し、ミスト除去効果を確認した。

- その結果、下表に示すように、Dry-Welasの検出値は排気風量の増加に伴って増加する傾向にあるものの、Wet-Welasの検出値に比べて3～4桁程度小さく、Dry-Welasのバックグラウンドレベル（概ね10[P/cm$^3$]以下）に留まったことから、希釈によりミストを完全に除去できることを確認した。

| 排気流量[L/min] | Dry-Welas検出値：Sum（dCn）[P/cm$^3$] | Wet-Welas検出値：Sum（dCn）[P/cm$^3$] |
|---|---|---|
| 200 | 4.673 | 32875 |
| 3600 | 9.132 | 37005 |

© CRIEPI

【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定

# アブレーシブと供試体成分の分別

- 回収ダスト中のアブレーシブ（ガーネット）と供試体成分を分別するため、回収ダストを酸あるいはアルカリで溶解した後に、供試体に応じて定めた着目元素量を化学分析により求めることで、各相重量を推定する手法を確立した。
- 着目元素：Ca（モルタル）、Zr（ジルコン）、Al（アルミナ）

- 供試体/（供試体+アブレーシブ）の重量割合が1.0%および5.0～5.3%の混合物を上記の手法で処理・分析して求めた供試体濃度は、それぞれ1.0～1.7%および5.0～5.7%となり、試料組成と概ね一致したことから、回収ダスト中のアブレーシブと供試体成分を分別できることが確認された。

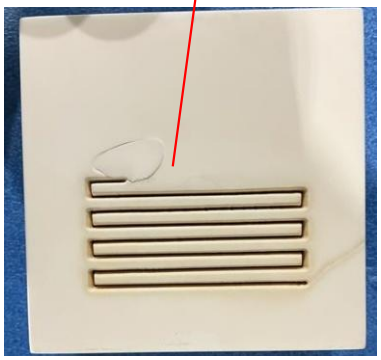
© CRIEPI

## 【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定

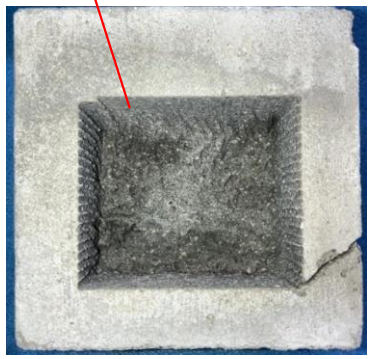
# 切削条件

■ 予備試験により給排気およびサンプリングラインの共通的な試験条件を選定すると共に、試験方法（AWJ/WJ）や供試体に応じて切削条件を下表のように選定した。スタンドオフはいずれも20mm。

| | AWJ | | | | WJ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | アルミナ | モルタル | ジルコン | SUS304 | モルタル | ジルコン |
| 切断速度[mm/s] | 1 | 40 | 10 | 2 | 10 | 10 |
| 切断時間[s] | 600 | 120～180 | 180 | 600 | 300～600 | 300(目標)<br>途中で割れる可能性あり |
| 目標切断深さ[mm] | 0.5～2 | 35～40 | 35 | 38～40 | 24～35 | 24～35 |
| 切断形状 | 3mmピッチ | バスタブ | バスタブ | 3mmピッチ | バスタブ | バスタブ |



ピッチ方式による切削痕



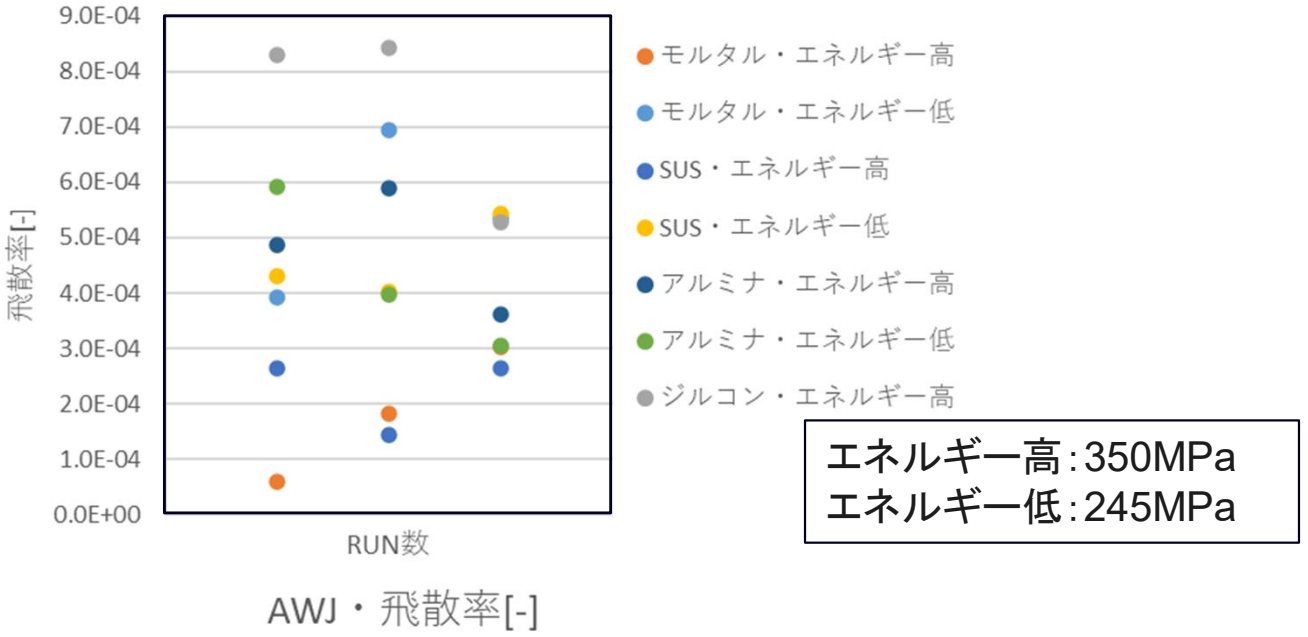
バスタブ方式による切削痕

© CRIEPI

## 【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定

# 試験結果

- 各種条件での飛散率は0.1%以下に留まった。
- モルタルとSUS304についてはAWJエネルギーと飛散率には負の相関がある一方で、アルミナは飛散率とAWJエネルギーの間に明確な相関は見られなかった。
- 供試体材料と飛散率の間に明確な相関は見られなかった。
- WJについても同様の傾向が見られた。




AWJ試験におけるエネルギーおよび供試体材料と飛散率の関係
（横軸のRUN数は同一条件で複数回実施した結果を分けて表示するためで、横軸の位置に意味は無い）

© CRIEPI

## 【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定

# 試験結果

- 回収ダスト中の供試体成分：アブレーシブの比は、供試体欠損量：使用したアブレーシブ量の比と概ね一致し、切削ダストとアブレーシブは同様の飛散挙動を取る。
- 切削で生ずるカーフ幅は、AWJエネルギー依存性が見られない、あるいはAWJエネルギーが高い方が広くなる。

| 試験方法 | 供試体 | エネルギー | カーフ幅[mm] | 切削面積速度[$cm^2/s$] |
|---|---|---|---|---|
| AWJ | モルタル | 低 | 2.6* | 4.9 |
| | | 高 | 2.6* | 11 |
| | ジルコン | 高 | 2.5 | 2.6 |
| | SUS304 | 低 | 1.9 | 0.14 |
| | | 高 | 2.2 | 0.30 |
| | アルミナ | 低 | 1.6 | 0.033 |
| | | 高 | 2.0 | 0.080 |
| WJ | モルタル | 低 | 1.0* | 1.8 |
| | | 高 | 1.0* | 3.7 |

© CRIEPI

* ：ピッチ方式で実施した予備試験での値

【3-5】AWJによる切削ダスト飛散率測定

# まとめ

- 気中でのAWJ試験実施方法を構築すると共に、アブレーシブとミスト成分を分別する方法を確立した。
- ダスト飛散率は0.1%以下に留まり、供試体材料によってはAWJ・WJエネルギーと飛散率の間に負の相関が見られた。

© CRIEPI

# 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）

© CRIEPI

## 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）

# 目的、実施内容

目的

- 前事業では、機械的切削工法の中で最も飛散率が大きいディスクカッターを対象に、ウランを含有するIn-vessel*1模擬燃料デブリを気中切削時のダスト飛散率を測定し、コールド供試体の試験結果と比較することにより、In-vessel燃料デブリの飛散率は酸化物成分と金属成分の飛散率の加重平均で推定できる可能性を示した。
- 本事業では、規模の異なるウランを含有するIn-vesselとEx-vessel*2模擬燃料デブリをディスクカッターにより気中切削時のダスト飛散率を測定し、特にEx-vessel燃料デブリのダスト飛散率の推定を試みる。

実施内容

1. 小規模ウラン含有In-/Ex-vessel模擬燃料デブリの気中ディスクカッター切削時のダスト飛散挙動（国内で実施）
2. kg規模ウラン含有In-/Ex-vessel模擬燃料デブリの気中ディスクカッター切削時のダスト飛散挙動（仏国で実施）

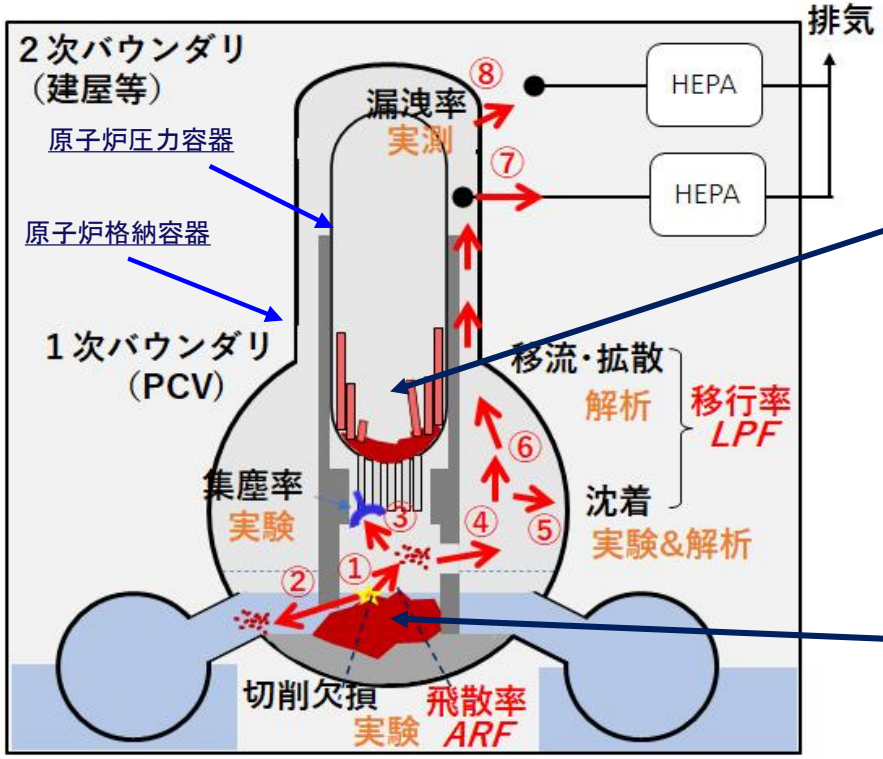
© CRIEPI

*1：原子炉圧力容器内に存在する燃料デブリ、*2：原子炉格納容器に移行した燃料デブリ

## 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）

# 本事業における燃料デブリの考え方

■ 溶融過程を経て固化した多元素・多相から構成される非均質な燃料デブリについて、本事業では、マクロな性状を模擬する模擬燃料デブリの成分を次のとおり定めた。




**推定される燃料デブリの存在位置と切削加工時のダスト飛散挙動のイメージ**

ウランを含有する主な構成相

- 酸化物：$(U,Zr)O_2$、$(Zr,U)O_2$
- 金属　：Fe-Ni-Sn-Mo
- 珪酸塩：Si-Al-Ca-Fe-O

### In-vessel燃料デブリ（主成分：酸化物＋金属）

- 1F-2号機の下部ヘッドに存在する事故10年後の核分裂生成物を含む燃料デブリ組成を対象に、4つの国際機関によるSA解析の結果*1の平均値を参照し、含有率0.014wt%以上の核分裂生成物（Tcを除く）を天然同位体に、PuをCeにそれぞれ置換した組成を選定した。Zrの酸化割合は24%である。
- 別事業*2で製造したIn-vessel模擬燃料デブリ「VF-U2」（本事業でFD#2と呼称）をディスクカッターによる切削試験の一部に使用したため、この組成をIn-vessel模擬燃料デブリの基準に決定した。

### Ex-vessel燃料デブリ（主成分：酸化物＋金属＋珪酸塩）

- 1F1号機のRPVの低圧破損を仮定したMAAP解析において、サンプで玄武岩系コンクリートの含有量が最大となる溶融炉心・コンクリート相互作用による生成物を形成し、残りの溶融燃料はコンクリートと相互作用することなくメルト・スプレディングしたと仮定した解析結果*3を参照した 。ここで、SURC試験の玄武岩系コンクリート組成とMOCKA試験で使用された鉄筋の割合を考慮し、組成を決定した*3。コンクリート含有率は最大で54wt%に相当し、Zrの酸化割合は100%である。
- 別事業*2で作製したEx-vessel模擬燃料デブリ「VF-U3」（本事業ではFD#3と呼称）をディスクカッター切削試験の一部に使用したため、この組成をEx-vessel模擬燃料デブリの基準に決定した。

*1：OECD/NEA BSAFプロジェクトの成果。
https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-02/csni-r2015-18.pdf.
*2：H30補1-10 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発事業
*3：K. Robb, M.W. Francis, M. T. Farmer, Oak Ridge National Lab report ORNL/TM-2014/1, 2014.

© CRIEPI

## 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）

# 模擬燃料デブリの分類

■ 燃料デブリは、多元素かつ多相から構成され非均質に分散した状態にあると考えられる。本事業では、切削時のカーフ幅を念頭に、マクロな燃料デブリを模擬する供試体を次のとおり分類する。

| 分類 | 本事業/前事業に用いた供試体 |
|---|---|
| 単相 | $Al_2O_3$、$ZrO_2$、SUS304、SS400 |
| 多相・均質分散 | モルタル、ジルコン（西村陶業（株）製N-300）*、$(U,Zr)O_2$+$(Zr,U)O_2$、$(U,Zr)O_2$+珪酸塩 |
| 多相・非均質分散 | ウラン含有In-/Ex-vessel模擬燃料デブリ |

*：$ZrSiO_4$介在物が珪酸塩Si-Al-Mg-K-Fe-Oに分散したセラミクス

【均質分散】　mmサイズで、平均組成が概ね一定である混合状態を指す。
共晶組織や多相から構成され、均質化熱処理材等が該当する。

【非均質分散】　mmサイズで、平均組成が大きく異なる混合状態を指す。
液相分離する材料の凝固材料等が該当する。

© CRIEPI

## 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）

# ウラン含有模擬燃料デブリの製造法の考え方

- 本事業では、模擬燃料デブリについて複数種類の製造法（下表参照）を適用した。製造法は、あくまで燃料デブリの模擬性を高めるために、多元素・多相・非均質分散した溶融固化体を得る手段である。
- 切削時に発生するダストの飛散挙動は、製造法に依存するのではなく、溶融固化体の性状そのものに依存すると考える。この性状は、組成に応じて変化する液相線温度や、溶融持続時間、溶融物質と溶解るつぼとの高温健全性、冷却過程で引け巣への液相の充填の有無などの影響を受ける。
- このため、熱力学解析の結果と製造実績に基づいて、組成および製造方法を決定した。

本事業と前事業で用いられたウラン含有模擬燃料デブリの製造法

| 製造法 | 液相の形成 | 主要な構成相 | 実施機関 |
|---|---|---|---|
| 固相焼結法 | なし | $(U,Zr)O_2$*1 | NFD |
| 固相焼結法＋抵抗加熱法 | 珪酸塩のみ溶融 | $(U,Zr)O_2$+珪酸塩 | NFD |
| 固相焼結法＋集光加熱法 | 全体溶融 | 小規模In-/Ex-vessel模擬燃料デブリ | JAEA |
| 誘導加熱法 | 全体溶融 | kg規模In-/Ex-vessel模擬燃料デブリ（FD#1, FD#2*2, FD#3*2, FD#4, FD#5） | CEA |
| テルミット反応法 | | | |
| テルミット反応法+誘導加熱法 | | | |

*1：前事業
*2：H30補1-10 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発事業

© CRIEPI

## 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）

# コールド試験とウラン試験に用いた供試体の関係

模擬性が低い ⟷ 模擬性が高い

| 燃料デブリの分類 | | 単相/多相・均質分散 | | 多元素・多相・非均質分散 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | コールド試験 | ウラン試験 | | |
| （実施機関）→ | | 国内（MHI/IHI/日立GE） | 国内（東芝ESS/NFD） | 国内（JAEA原科研） | 国外（ONET/CEA/IRSN*1） |
| In-vessel模擬燃料デブリ | 金属 | SUS304<br>SS400 | ← | 酸化物+金属<br>酸化物+金属+ 珪酸塩<br>• 国外試験と同組成のIn-/Ex-vessel模擬燃料デブリを小規模（数10g規模）で作製、性状分析および熱力学計算により、形成相の酸素分圧と窒素分圧の依存性を確認し、国外試験結果を評価 | 酸化物 + 金属<br>• 化学組成：1F2下部ヘッドのNEA/BSAF解析結果を参照<br>• FD#1：テルミット反応、窒素雰囲気<br>• FD#2*2：高周波加熱、窒素雰囲気<br>◆高硬度の窒素含有相を形成<br>◆飛散率への影響は未知<br>• FD#5：テルミット+高周波加熱、Ar雰囲気 |
| | 酸化物 | 緻密質・多孔質$Al_2O_3$<br>緻密質・多孔質$ZrO_2$<br>緻密質$Al_2O_3$-$ZrO_2$ | • 立方晶$(U,Zr)O_2$<br>• 立方晶+正方晶<br>• 正方晶$(Zr,U)O_2$ | | |
| Ex-vessel模擬燃料デブリ | 金属 | ↑ | ← | | 酸化物 + 金属 + 珪酸塩<br>• 化学組成：1F1 Robbらの解析結果（25元素）を参照<br>• FD#3*2：高周波加熱、窒素雰囲気<br>• FD#4：高周波加熱、Ar雰囲気 |
| | 酸化物 | ↑ | 酸化物+珪酸塩<br>• $(U,Zr)O_2$+ 珪酸塩<br>酸化物+金属<br>• In-vessel模擬燃料デブリ<br>酸化物+金属+ 珪酸塩<br>• Ex-vessel模擬燃料デブリ | | |
| | 珪酸塩 | モルタル<br>$ZrSiO_4$+珪酸塩（商品名：ジルコンN-300）<br>珪酸塩（Si-Al-Ca-Fe-Na-O） | | | |
| 供試体の作製バッチ規模 | | 数kg | 数10 g | 数10 g | 数Kg |
| 切削工法 | | ディスクカッター/レーザー/コアボーリング/チゼル/AWJ | ディスクカッター | ディスクカッター | ディスクカッター |
| 切削時の環境条件 | | 乾燥条件 / 湿潤条件 | 乾燥条件 | 乾燥条件 | 乾燥条件 |

前事業（2021-2022年度）
本事業（2023-2024年度）

福島第一原子力発電所事故で発生したと考えられる、代表的な燃料デブリの組成（$UO_2$/$ZrO_2$比、酸化物/金属比、珪酸塩組成）を採用し、可能な限り共通の分析手法で性状分析を実施。

*1：現 ASNR
*2：FD#2とFD#3は、IRID「H30補1-10 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発事業」で作製した溶融凝固体。

© CRIEPI

## 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）

# ウラン含有模擬燃料デブリの組成

| 原料 | | コールド材料 | | 小規模ウラン | | | kg規模ウラン | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Na有ガラス | Na無ガラス | 34wt% $(U,Zr)O_2$ | 47wt% $(U,Zr)O_2$ | FD#3 相当 | FD#3 | FD#4 |
| 燃料 | $UO_2$ | | | 24.13 | 32.35 | 24.62 | 24.84 | 24.84 |
| | $ZrO_2$ | | | 11.45 | 15.35 | 12.17 | 11.79 | 11.79 |
| | $SnO_2$ | | | | | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 構造材 | $B_4C$ | | | | | 0.17 | 0.17 | 0.17 |
| | SS304L | | | | | 5.32 | 5.30 | 5.30 |
| | Fe | | | | | 3.61 | 3.59 | 3.59 |
| | $Fe_2O_3$ | | | | | 11.07 | 11.02 | 11.02 |
| | $Fe_3O_4$ | 26.1 | 27.3 | 20.43 | 16.59 | | | |
| | $Cr_2O_3$ | | | | | 0.55 | 0.55 | 0.55 |
| コンクリート | $SiO_2$ | 47.9 | 50.1 | 28.07 | 22.79 | 29.02 | 28.90 | 28.90 |
| | $Al_2O_3$ | 11.9 | 12.5 | 7.00 | 5.68 | 7.24 | 7.21 | 7.21 |
| | CaO | 9.7 | 10.2 | 5.70 | 4.63 | 5.90 | 5.87 | 5.87 |
| FP | $CsOH.H_2O$ | | | | | | 0.06 | 0.06 |
| | SrO | | | | | | 0.02 | 0.02 |
| | BaO | | | | | | 0.04 | 0.04 |
| | $MoO_2$ | | | | | | 0.08 | 0.08 |
| | $RuO_2$ | | | | | | 0.04 | 0.04 |
| | PdO | | | | | | 0.02 | 0.03 |
| | $Y_2O_3$ | | | | | | 0.01 | 0.01 |
| | $La_2O_3$ | | | | | | 0.03 | 0.03 |
| | $CeO_2$ | | | | | 0.18 | 0.18 | 0.18 |
| | $Pr_2O_3$ | | | | | | 0.03 | 0.03 |
| | $Nd_2O_3$ | | | | | | 0.08 | 0.08 |
| | $Sm_2O_3$ | | | | | | 0.02 | 0.02 |
| | $TeO_2$ | | | | | | 0.01 | 0.01 |
| 海水 | $Na_2CO_3$ | 4.4 | 0 | 3.22 | 2.61 | | | |

（wt%）

### In-vessel模擬燃料デブリ

- 燃料棒、構造材、核分裂生成物に由来する成分から構成
- FD#2組成（$N_2$雰囲気）を基準に、 FD#1（$N_2$）とFD#5（Ar）をテルミット反応熱を考慮しFeとCr量を調整
- Zrの酸化率は約76%

### Ex-vessel模擬燃料デブリ

- 燃料棒、構造材、コンクリート、核分裂生成物、海水に由来する成分から構成
- FD#3（$N_2$雰囲気）を基準に、同組成のFD#4をAr雰囲気で調製
- $UO_2/(UO_2+ZrO_2)$ = 68 wt%は炉心平均
- $SiO_2+UO_2+ZrO_2$ = 65 wt%
- Zrの酸化率は100%（金属Zrなし）

### 珪酸塩：

- Naなし/あり（海水由来）の2種類
- 冷却速度（30 ℃/s、0.03 ℃/s）の相違による残留応力の大小を2種類
- FD#3、FD#4、小規模Ex-vesselは全てNaなし・残留応力小の条件に統一
- 構造材由来の$Fe_3O_4$は、珪酸塩への飽和溶解度を越えて析出物を形成

© CRIEPI

## 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）

# ディスクカッターによる気中切削試験条件及び分析項目

| 項目 | | In-vessel模擬燃料デブリ | | | | | Ex-vessel模擬燃料デブリ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $(U,Zr)O_2$ *2 | 小規模In-vessel | FD#1*2 | FD#2*1 (VF-U2) | FD#5 | $(U,Zr)O_2$-珪酸塩 | 小規模Ex-vessel | FD#3*1 (VF-U3) | | FD#4 | |
| 作製 | 作製方法/実施機関 | 誘導加熱 NFD | 集光加熱 /JAEA | テルミット /ONET-CEA-ASNR | 誘導加熱 /ONET-CEA-ASNR | テルミット＋誘導加熱 /ONET | 誘導加熱 /NFD | 集光加熱 /JAEA | 誘導加熱/ ONET-CEA-ASNR | | 誘導加熱/ ONET-CEA-ASNR | |
| | 雰囲気 | $Ar/H_2/H_2O$ | Ar | $N_2$ | $N_2$ | Ar | $Ar/H_2/H_2O$ | $N_2$ | $N_2$ | | Ar | |
| | ブロック（装荷原料）（kg） | 0.020 | 0.004 | 6.4（10） | 11（18） | 2/11 | 0.030 | 0.005 | 11.56（40） | | 12.62（18.45） | |
| ブロック分析 | ー | ー | ー | ー | ー | ー | ー | ー | 酸化物質 | 金属質 | 酸化物質 | 金属質 |
| | 密度 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ |
| | SEM-EDS | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| | XRD | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 硬さ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 弾性率・破壊靭性 | ✓ | | | | | ✓ | | | | | |
| | ICP-AES/MS | | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ✓ | |
| | 気孔率 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ |
| 切削 | 切削刃の回転速度(rpm)×回数 その他試験条件*3 | 3000×5回 | 3000×2回 | 1200×3回 3000×3回 | 3000×3回 | 1200×3回 3000×3回 | 3000×4回 | 3000×2回 | 1200×2回 3000×3回 | 3000×1回 | 1200×3回 3000×3回 | 3000×2回 |
| ダスト分析 | 密度 | | | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | |
| | SEM-EDS, TEM | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | XRD | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | | |
| | ICP-AES/MS | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | |

別事業*1　前事業　本事業

*1：H30補1-10 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発事業
*2：前事業
*3：切削刃の種類、ケーシング内の風速、サンプリング方法等の試験条件は、国内試験と同一

（✓：実施）

© CRIEPI

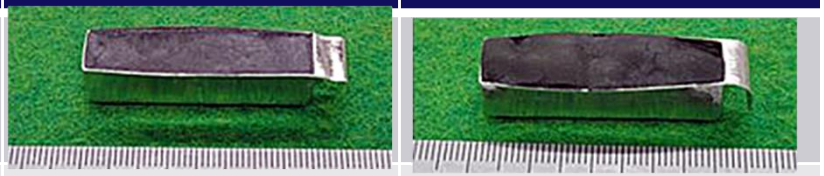
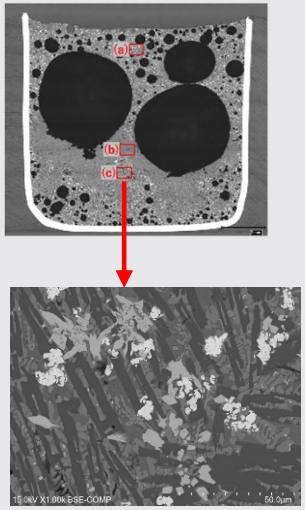
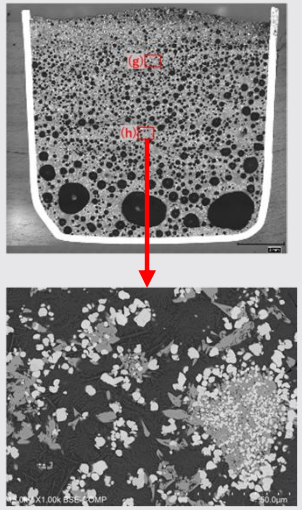
# 【4-1】ウラン含有燃料デブリ構成相の切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

© CRIEPI

## 【4-1】ウラン含有燃料デブリ構成相の切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

# $(U,Zr)O_2$+珪酸塩の作製・特性分析

- 溶融燃料とコンクリートが高温反応して生じるウランを含む均質なEx-vessel模擬燃料デブリを対象とした。
- 仏国試験の模擬燃料デブリと同組成を基本とし、海水由来のNaを約5at.%加えたSi-Al-Ca-Na-O系の珪酸塩をマトリクスとし、珪酸塩への溶解度を超える$UO_2$、$ZrO_2$、$Fe_3O_4$は介在物として存在することを想定した。
- Ex-vessel燃料デブリの生成過程を考慮し、$(U,Zr)O_2$焼結片と珪酸塩原料粉末を白金ボートに入れ、事故時PCV環境の湿潤$Ar/H_2$混合ガス気流中の1370℃で熱処理し、34wt%$(U,Zr)O_2$+珪酸塩と47wt% $(U,Zr)O_2$+珪酸塩の2種類の供試体を作製し、特性データを取得した（右表）。
- その結果、珪酸塩マトリクスに$(U,Zr)O_2$が介在物として分散し、比較的に気孔率が大きい微細組織を形成した供試体の作製に成功した。

| | 34wt% $(U,Zr)O_2$ +珪酸塩 | 47wt% $(U,Zr)O_2$ +珪酸塩 |
|---|---|---|
| 外観 |  | |
| 断面 |  |  |
| 密度 | 3.35 g/cm$^3$ | 3.56 g/cm$^3$ |
| 硬さ | 602 HV | 570 HV |
| 構成相 | Si-Al-Ca-Na-O<br>$(U,Zr)O_2$、$(Zr,U)O_2$、<br>$FeSiO_4$、$ZrSiO_4$ | Si-Al-Ca-Na-O<br>$(U,Zr)O_2$、$(Zr,U)O_2$、<br>$FeCr_2O_4$、γ-Fe、<br>$Fe_{0.90}Ni_{0.09}Sn_{0.01}$ |
| 気孔率 | 48.1% | 25.6% |

© CRIEPI

## 【4-1】ウラン含有燃料デブリ構成相の切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

# 小規模In-/Ex-vessel模擬燃料デブリの作製、特性分析および熱力学計算

目的

- 仏国試験と同組成のIn-/Ex-vessel模擬燃料デブリを対象に、試験と熱力学計算により、形成相の窒素分圧依存性または酸素分圧依存性を確認し、仏国試験結果と比較する。

実施内容

- $(U,Zr)O_2$焼結粉末と原料粉末の混合成型体を多孔質MgOるつぼに入れ、集光加熱法で溶融固化させて、組成2種と雰囲気2種の計4種類（下表）のIn-/Ex-vessel模擬燃料デブリを作製した。
- 特性分析（液浸密度、結晶相、気孔率、微小硬さ、微細組織、元素分析）の結果、堅牢性および非均質分散性のよい2種（In-vessel：Ar、Ex-vessel：$N_2$）を選定し、切削試験用サンプルを作製した。

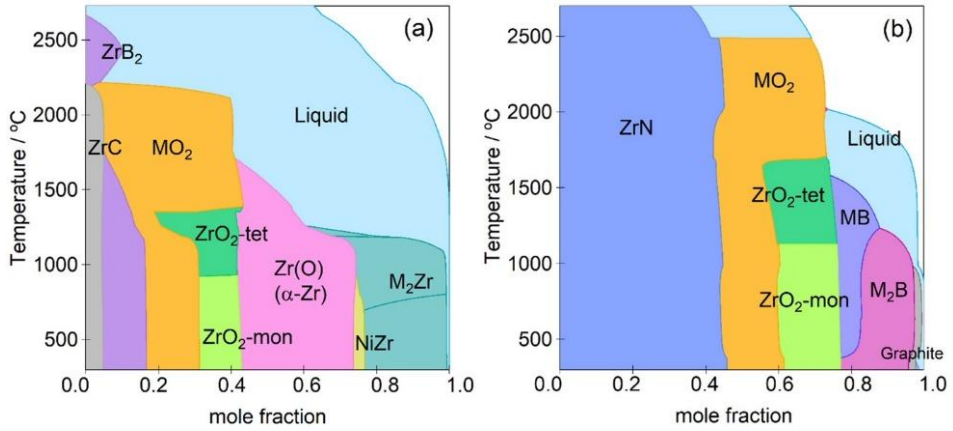
集光加熱装置

**試験条件**

| | | |
|---|---|---|
| 原料成分 | 小規模 In-Vessel模擬 燃料デブリ | 小規模Ex-Vessel模擬 燃料デブリ |
| 作製時の雰囲気 | Ar、$N_2$ | $N_2$、湿潤$N_2$ |

熱力学平衡計算

- In-/Ex-vessel模擬燃料デブリ共に、熱力学平衡計算は試験結果をよく再現した。予見できなかった事象は、Scheil解析で再現できた。
- In-vessel模擬燃料デブリは、1%$N_2$/Arの窒素分圧までは相平衡に大きな変化はなく、FD#2で見られたZrNの形成が確認された。
- Ex-vessel模擬燃料デブリは、酸素ポテンシャルや水蒸気による相平衡への影響は少なかった。一方、$MO_2$相（$(U,Zr)O_2$）の溶融温度が大きく低下する様子が確認された。




In-vessel模擬燃料デブリの計算状態図

(a)Ar雰囲気　(b)窒素雰囲気

熱力核計算ソフトウェア：Thermo-Calc ver. 2024a
熱力学データベース：TAF-ID

© CRIEPI

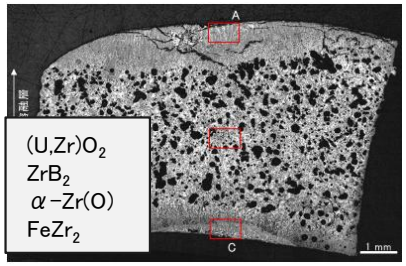
# 【4-1】ウラン含有燃料デブリ構成相の切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

## 小規模In-/Ex-vessel模擬燃料デブリの作製

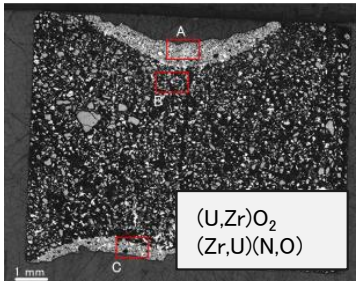
### 小規模In-vessel模擬燃料デブリ（Ar、$N_2$）

- Arでは、上下端面の完全溶融部と内部の局所溶融部が、多相・非均質分散組織を形成した。金属Zrリッチ組成のため、全ての相にZrを含有。
- 端面および側面を研磨し形状・寸法を調整した。
- $N_2$では、高融点のZrN形成により溶融進展せず。

**断面マクロ組織**




Ar雰囲気




$N_2$雰囲気

**切削試験サンプル（Ar雰囲気）**

| 6.93 | 7.12 | 7.01 | 7.06 | 6.94 |
|---|---|---|---|---|
| ○ | 予備 | ○ | 分析 | ○ |

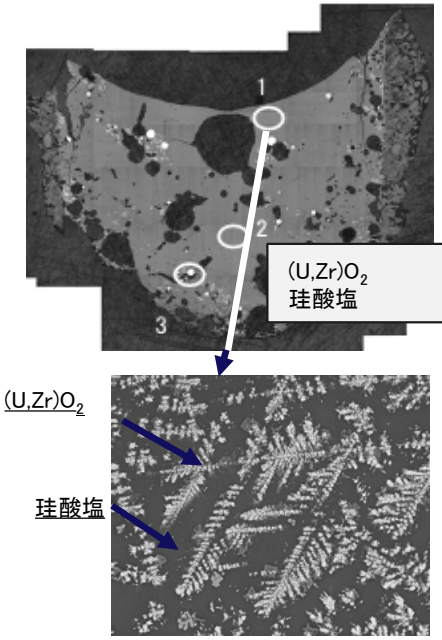
上記サンプルの液浸密度(g/cm³)

寸法：高さ10.25mm、直径9.5mm
○：ダスト飛散率測定試験に使用

### 小規模Ex-vessel模擬燃料デブリ（$N_2$、湿潤 $N_2$）

- 原料充填と溶融固化を繰り返し、閉気孔形成を抑制。
- 液相線温度が低く全量溶融可能。組成均質性が高い。
- 端面および側面を研磨し形状・寸法を調整した。
- 密度の差は、底部の開気孔の大きさとMgO多孔質るつぼへの溶融物質の浸透量の違いによると推定。

**断面マクロ組織**




$N_2$雰囲気

**切削試験サンプル（$N_2$雰囲気）**

| 3.35 | 3.37 | 3.51 | 3.56 |
|---|---|---|---|
| ○ | ○ | ○ | 予備 |

上記サンプルの液浸密度(g/cm³)

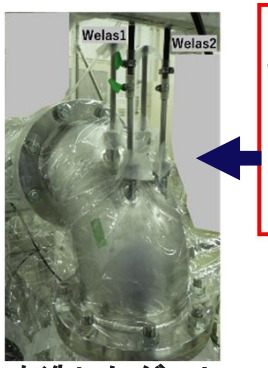
寸法：高さ12.0mm、直径11.9mm
○：ダスト飛散率測定試験に使用

© CRIEPI

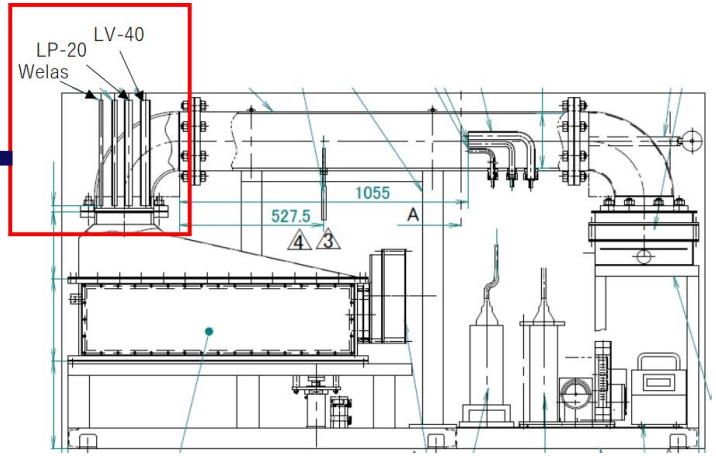
# 【4-1】ウラン含有燃料デブリ構成相の切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

## ダスト飛散率測定試験

- 飛散率データの信頼性を確保するため、前事業で構築したダスト飛散率試験装置のサンプリング部（下図中の赤枠）に2台のエアロゾルスペクトロメータ—Welasを取り付け、サンプリング位置と高さによるダスト捕集条件を最適化した。
- コールド試験と同一条件で、$(U,Zr)O_2$+珪酸塩供試体と小規模In-/Ex-vessel模擬燃料デブリを気中ディスクカッター切削試験を実施した。（右表、右図）



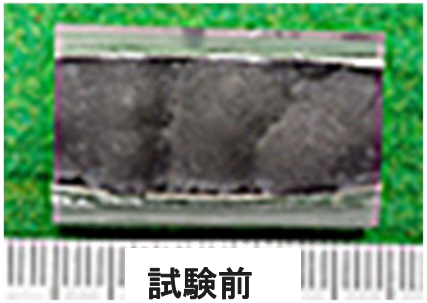
改造したダスト
サンプリング
配管部

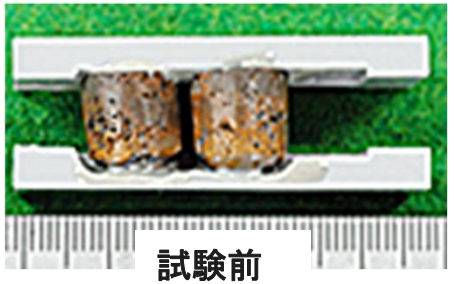


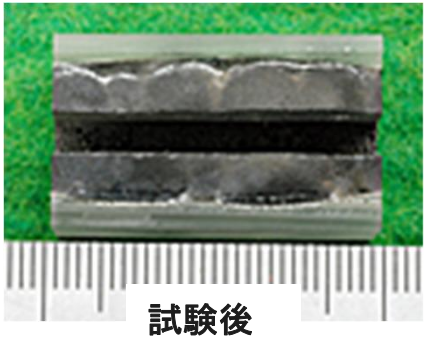
前事業*1で構築した既設装置
（NFDの放射線管理区域）

**切削試験条件**

| 試験No. | 供試体 | 切削刃 | 回転数(rpm) | 荷重(N) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 34wt%$(U,Zr)O_2$-1 | BT180 | 3000 | 20 |
| 2 | 34wt%$(U,Zr)O_2$-2 | BT180 | 3000 | 20 |
| 3 | 47wt%$(U,Zr)O_2$-1 | BT180 | 3000 | 20 |
| 4 | 47wt%$(U,Zr)O_2$-2 | BT180 | 3000 | 20 |
| 5 | 小規模In-vessel_1 | BT180 | 3000 | 20 |
| 6 | 小規模In-vessel_2 | BT180 | 3000 | 20 |
| 7 | 小規模Ex-vessel_1 | BT180 | 3000 | 20 |
| 8 | 小規模Ex-vessel_2 | BT180 | 3000 | 20 |


試験前


試験前


試験後

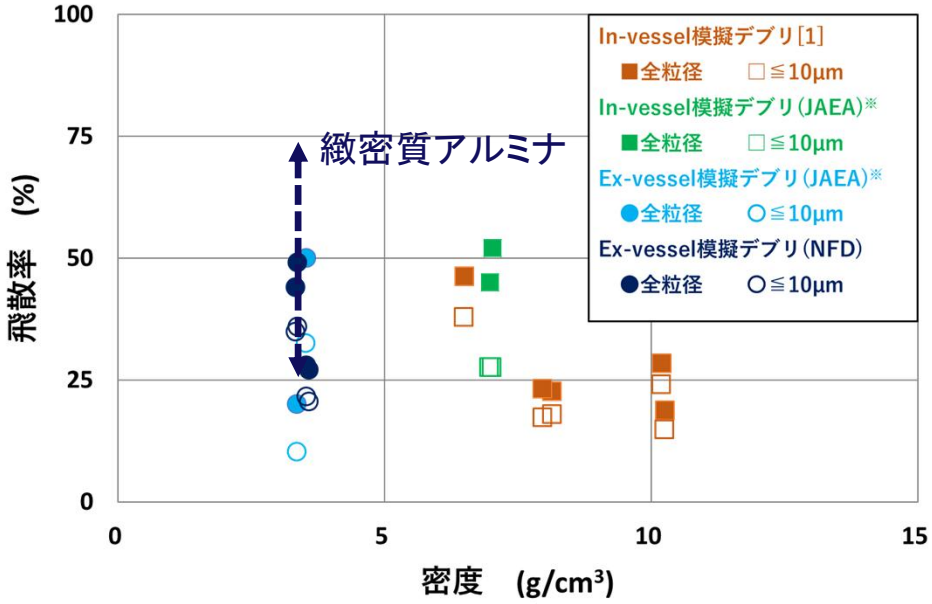
47wt%$(U,Zr)O_2$-2

試験後

小規模Ex-vessel-2

# 【4-1】ウラン含有燃料デブリ構成相の切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）
# 試験結果

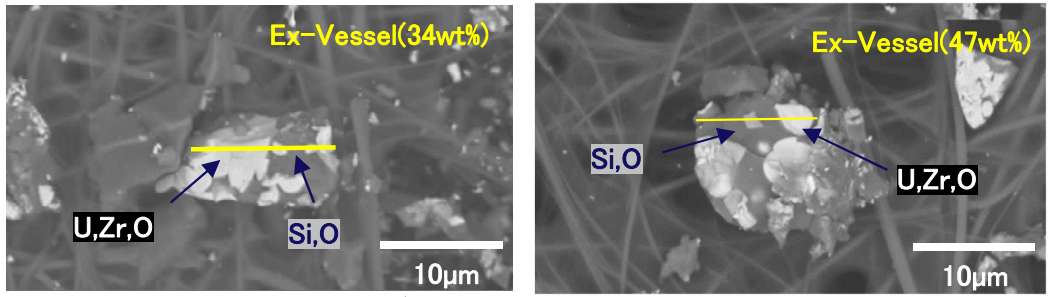
## ダスト飛散率測定試験の結果



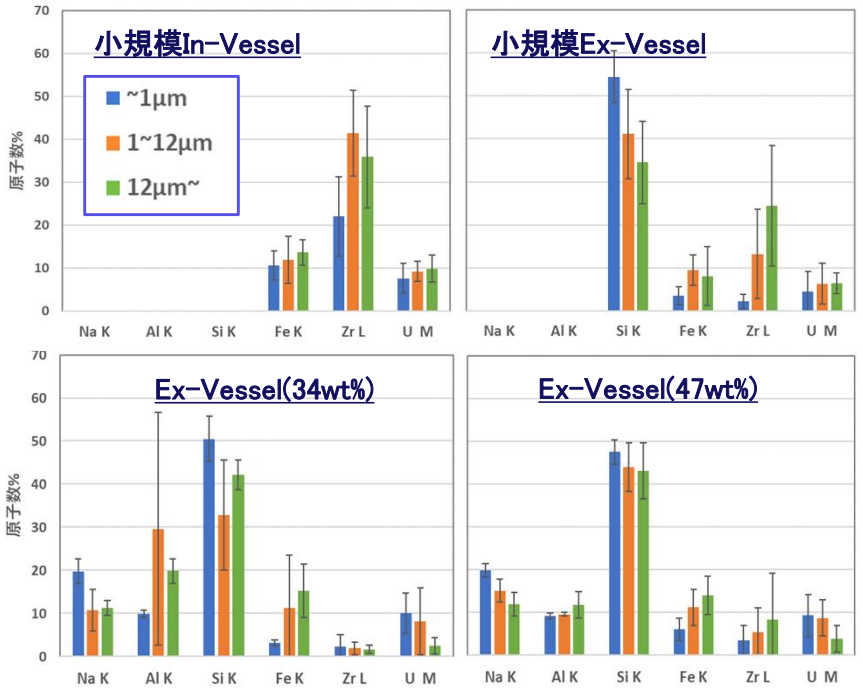

[1]鈴木ら、日本原子力学会　2023年秋の大会、1F14

- 飛散率：In-Vessel模擬燃料デブリ≒ Ex-Vessel模擬燃料デブリ
- 飛散ダストは、主に2相が含まれ、粒界割れなし
- 計測可能な10μm径を超える飛散ダストのU含有率は、供試体のU含有率と変化がない傾向
- 飛散ダストの粒径によらず、ダストの組成は誤差範囲で概ね一致

## 飛散ダストの特性




飛散ダストの二次電子線像




飛散ダストの粒径ごとのEDS組成分析の結果

# 【4-2】kg 規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

© CRIEPI

## 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

# 実施内容・実施項目

【実施内容】

- kg規模の溶融過程を経た非均質なウラン含有In-/Ex-vessel模擬燃料デブリの製造、特性分析を行い、ディスクカッターを用いた気中切削時の飛散率データおよび飛散ダストの特性分析を実施し、 Ex-Vessel燃料デブリの飛散率の推定手法を検討する。
- 実施にあたっては、Onet Technologies社-CEA-IRSN（現ASNR）と協議の上、Onet Technologies社と契約締結し、本事業を実施する。

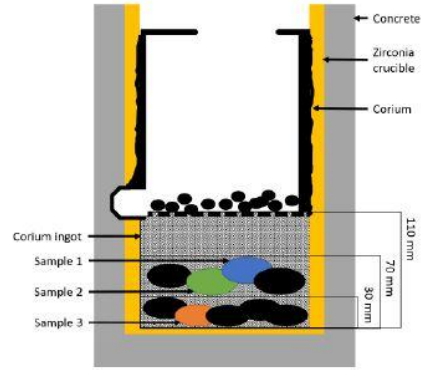
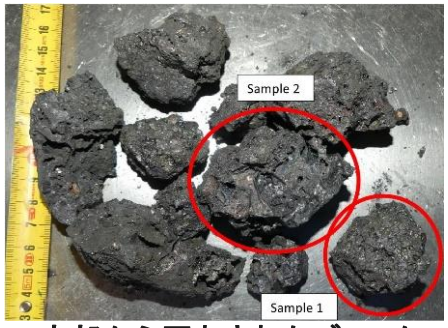
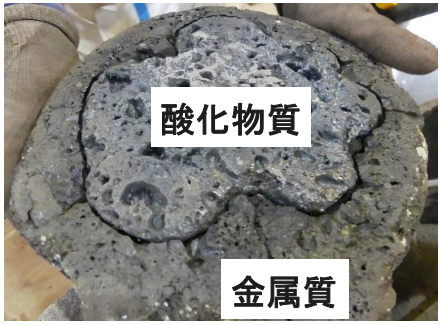
  （実施場所：CEA-Cadarache）

| 実施項目 | 実施概要 |
|---|---|
| ①製造 | kg規模のウラン含有Ex-vessel模擬燃料デブリ（FD#4）<br>kg規模のウラン含有In-vessel模擬燃料デブリ（FD#5） |
| ②切削試験 | 前事業で管理区域内に構築したFujisan-2試験設備を用いて、国内コールド試験と同一条件で切削し、ダスト飛散挙動データを取得 |
| ③特性分析 | ウラン含有模擬燃料デブリと飛散ダスト粒子の特性分析 |
| ④ダスト飛散率の評価 | 供試体間のダスト飛散率データの類似性や相違性の評価 |

© CRIEPI

# 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

## ①製造

| ①製造 | In-vessel | Ex-vessel | |
|---|---|---|---|
| | FD#5 | FD#3* | FD#4 |
| 作製方法 | テルミット＋誘導加熱 | 誘導加熱 | 誘導加熱 |
| 雰囲気 | アルゴン | 窒素 | アルゴン |
| 原料重量 | 11 kg | 40 kg | 18.45 kg |
| ブロック重量 | 2 kg | 11.56 kg | 12.62 kg |
| 備考 | るつぼ底部からブロックを回収 | 密度差によって酸化物質と金属質のブロックに分離 | 密度差によって酸化物質と金属質のブロックに分離 |
| 酸化物質ブロック（るつぼ下部～上部） |  | | ■ 同定された相<br>• 酸化物：$(U,Zr)O_2$、$(Zr,U)O_2$、$FeCr_2O_4$<br>• 珪酸塩：Si-Al-Ca-Fe-O（微量U、Zr含）<br>■ 密度：3.8 g/cm$^3$<br>■ 気孔率：約1% |
| 金属質ブロック（るつぼ下部） |  底部から回収されたブロック |  立方晶Fe-4%Ni-1%Cr(極微量Mo) | ■ 同定された相<br>• 金属：Fe-5.5%Ni-1%Cr-0.25%Mo（<0.1%： Ru、Pd、Sn、W）<br>■ 密度 ：8.1 g/cm$^3$<br>■ 気孔率：約 3 %<br>■ Uは検出されず |

いずれも溶融過程で密度差や非混合性によって、酸化物質と金属質のブロックに分離

© CRIEPI

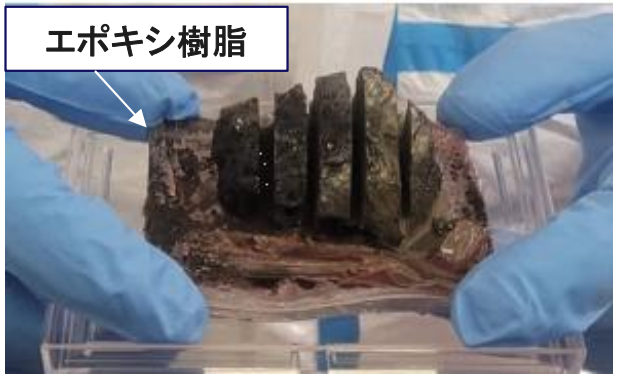
*：H30補1-10 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発事業

# 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

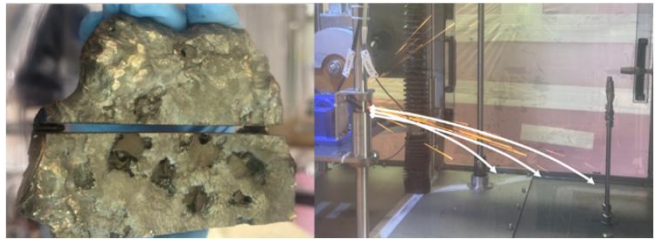
## ②切削試験

- 前事業で構築した試験装置を用いて、ディスクカッターで気中切削時のダスト飛散率データを取得
- 切削試験条件：111頁の通り
  （FD#3：6回、FD#4：8回、FD#5：6回）

FD#3酸化物質
（2切削、2試験分）




FD#5（4切削、2試験分）

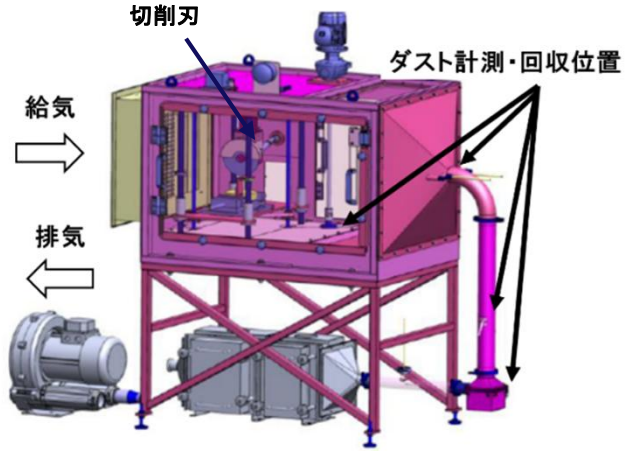


FD#3金属質ブロックと切削時の様子

FD#4酸化物質ブロック

測定項目

- 飛散ダストの発生量
- 粒径分布（光散乱径、空気動力学径）
- ダスト飛散率
- マスバランス
- 飛散粒子の顕微写真
- 供試体の切削部の欠損量
- 試験時の動画撮影




試験装置（FUJISAN-2）
（長さ1,350 mm、高さ1,000mm、幅890mm）
仏CEAカダラッシュ地区のPLINIUS施設に設置

# 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

## ③特性分析

■ 製造した模擬燃料デブリおよび飛散ダストの特性分析の結果を示す。

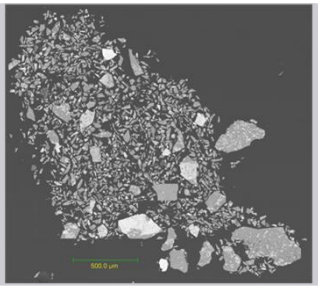
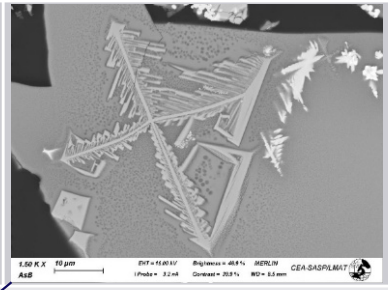
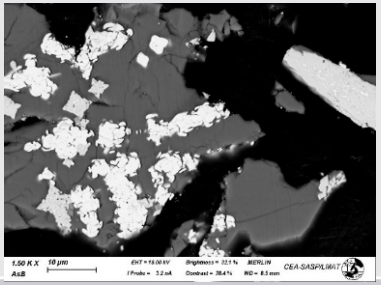
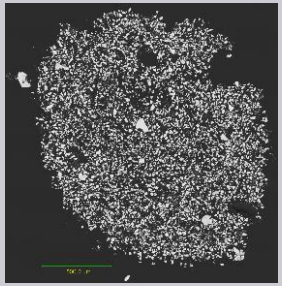
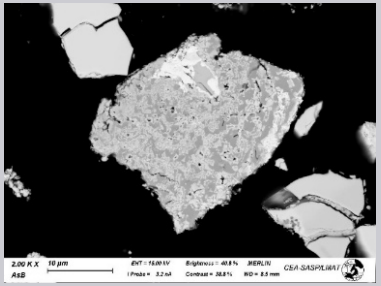
### 模擬燃料デブリのブロックの特性分析

| 分析項目 | 分析手法等 | 実施場所 |
|---|---|---|
| 密度 | アルキメデス法 | CEA カダラッシュ |
| 硬さ | マイクロビッカース法 | |
| 相分析 | SEM/EDS | |
| 結晶構造 | X線回折 | |
| 化学分析 | 化学溶解 + ICP-AES/MS | CEA マルクール |

### 飛散ダスト粒子の特性分析

| 分析項目 | 分析手法 | 実施場所 |
|---|---|---|
| 密度 | ピクノメータ | CEA マルクール |
| 微細組織 | STEM/SEM-EDX | |
| 各相の定量分析 | SEM/EDSまたはEPMA | |
| 結晶構造 | μXRD | |
| 化学分析 | 化学溶解 + ICP-AES/MS | |

非均質な微細組織のまま、供試体から機械的に切削されて発生したダスト粒子（後方散乱電子モードによるSEM像）

| | マクロ組織 | ミクロ組織 |
|---|---|---|
| FD#3 |  |  |
| FD#4 | |  |
| FD#5 |  |  |

© CRIEPI

# 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

## ③特性分析：結果の比較（ブロック、ダスト）

別事業* 本事業

| 項目 | | In-Vessel模擬燃料デブリ | | Ex-Vessel模擬燃料デブリ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 小規模In-vessel模擬燃料デブリ | FD#5 | $(U,Zr)O_2$-珪酸塩 | 小規模Ex-vessel模擬燃料デブリ | FD#3 | | FD#4 | |
| | | | | | | 酸化物質 | 金属質 | 酸化物質 | 金属質 |
| ブロック分析 | 密度 | 7.0±0.1 | 5.67 | 3.35-3.56 | 3.5±0.1 | - | - | 3.80 | 8.10 |
| | 結晶相 | • 正方晶$(U,Zr)O_2$<br>• 立方晶$(U,Zr)O_2$<br>• α-Zr(O)<br>• $ZrB_2$<br>• ZrC<br>• $FeZr_2$<br>• $Fe_3U_3Zr_4$<br>• $Fe_2Zr$ | • 正方晶$(U,Zr)O_2$<br>• 立方晶$(U,Zr_0)O_2$<br>• $ZrB_2$または Zr(B,O)<br>• $Zr_2(C,O)$<br>• $(Fe,Cr)_2Zr$<br>• (Zr,U)(N,O) | • 珪酸塩Si-Al-Ca-Na-O<br>• 正方晶、斜方晶$(U,Zr)O_2$<br>• 立方晶$(U,Zr_0)O_2$ | • 珪酸塩Si-Al-Ca-Fe-O<br>• 正方晶$(U,Zr)O_2$<br>• 立方晶$(U,Zr_0)O_2$<br>• 金属Fe<br>• $FeCr_2O_4$<br>• Fe,Ni,Sn合金 | • 珪酸塩Si-Al-Ca-Fe-O（微量のUとZr含む）<br>• 立方晶$(U,Zr)O_2$（微量のAl、Ca、Fe、Zr含む）<br>• 正方晶$(Zr,U)O_2$<br>• $FeCr_2O_4$ | α-Fe ($Fe_{0.94}Ni_{0.06}$) | • 珪酸塩Si-Al-Ca-Fe-O（微量のU、Zr含む）<br>• 立方晶$(U,Zr)O_2$（微量のSi、Al、Ca、Fe含む）<br>• 正方晶$(Zr,U)O_2$<br>• $FeCr_2O_4$ | α-Fe ($Fe_{0.94}Ni_{0.06}$) |
| | 硬さ（HV） | • $(U,Zr)O_2$ 1320<br>• α-Zr(O) 1063<br>• 金属 988<br>• $ZrB_2$とZrC | • $(Zr,U)O_2$ 1900<br>• $FeCr_2O_4$<br>• Zr(B,O) 3300<br>• Cr含有 1200-1600<br>• $ZrB_2$ 2200-3500 | • 珪酸塩 602 (34wt%$(U,Zr)O_2$)<br>• 珪酸塩 570 (47wt%$(U,Zr)O_2$) | • $(U,Zr)O_2$ 1061<br>• 珪酸塩 600-700<br>• 金属 394 | - | • α-Fe 217 | • 珪酸塩 820<br>• $FeCr_2O_4$ 1787<br>• $(U,Zr)O_2$ 1260-1550<br>• $(Zr,U)O_2$ 1120-1570 | • α-Fe 313 |
| | 弾性率(GPa) | - | - | 60.5 (34wt%$(U,Zr)O_2$)<br>54.7 (47wt%$(U,Zr)O_2$) | - | - | - | - | - |
| | 破壊靭性 (MPa√m) | - | - | 3.0、2.8 | - | - | - | - | - |
| | 気孔率(%) | 28（部分溶融層） | 17.5 | 48.1、41.9 | 25 | - | - | 1 | 3 |
| ダスト分析 | 密度(g/cm³) | - | 7.5 ± 0.5 | - | - | 4.3 ± 0.3 | - | 4.7 ± 0.3 | - |
| | 結晶相 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | $(U_{0.18}Zr_{0.82})O_2$、$(U_{0.7}Zr_{2.3})O_2$、$ZrB_2$、$ZrC_{0.66}O_{0.3}$、$ZrCr_{0.77}Fe_{1.23}$、$Zr_{0.85}Fe_{2.15}$ | ✓ |

*: H30補1-10 燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発事業

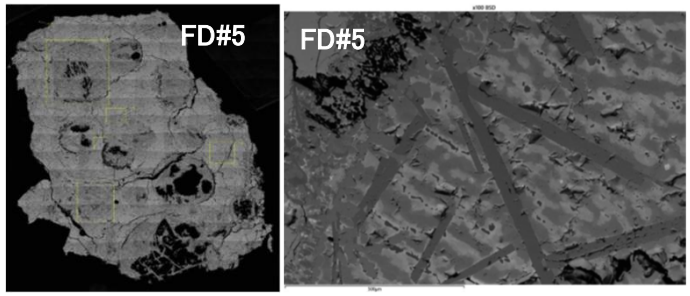
© CRIEPI

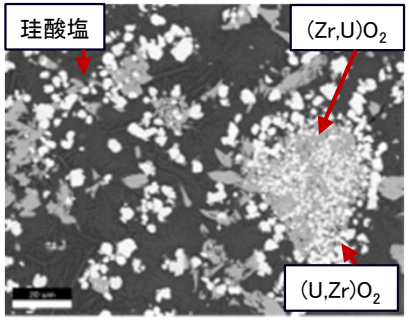
# 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

# ③特性分析：化学組成の比較（原料、ブロック、ダスト）

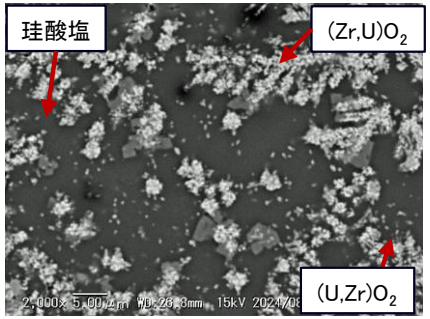
## In-vessel FD#5ブロックの微細組織

- FD#1，#2（共に$N_2$雰囲気）に対し、FD#5（Ar雰囲気）には有意なZrNの形成なし。
- その他の構成相や特性に有意な相違なし（主な構成相：正方晶$(Zr,U)O_2$，立方晶$(U,Zr)O_2$、ZrB，$ZrB_2$，Zr(B,O)，$ZrFe_2$等）。




47wt% $(U,Zr)O_2$−珪酸塩（製造時）



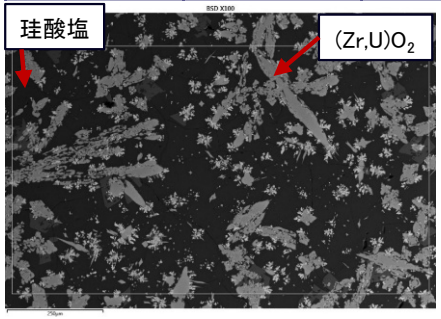

小規模Ex-vessel（製造時）

## Ex-vessel模擬燃料デブリの飛散ダスト

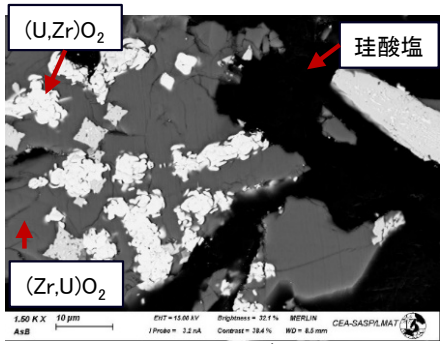
- 数10nm～数μmサイズのフラグメント形状。
- U/Zr比，Fe/Cr比，Fe/Al比は、SEM/EDSとICP－AES/MSの各分析値が概ね一致。
- 高回収率のBは、$ZrB_2$粒子の非均質性によると推定。
- ダスト粒子の微細組織と構成相が、$(U,Zr)O_2$+珪酸塩、小規模Ex-vessel、FD#3、FD#4で類似。
- 切削速度によるダスト特性への影響は見られない。

ダスト粒子のU/Zr比およびFe/Al比の比較（FD#3）

| 分析手法 | at% | ブロックA | ブロックB | |
|---|---|---|---|---|
| | | 3000 rpm | 3000 rpm | 1200 rpm |
| ICP-AES/MS | U/Zr | 1.10 | 0.86 | 0.96 |
| | Fe/Al | 1.28 | 1.04 | 1.07 |
| SEM-EDS | U/Zr | 0.89 | 0.96 | 1.10 |
| | Fe/Al | 1.00 | 1.00 | 1.11 |




FD#4酸化物質ブロック（製造時）



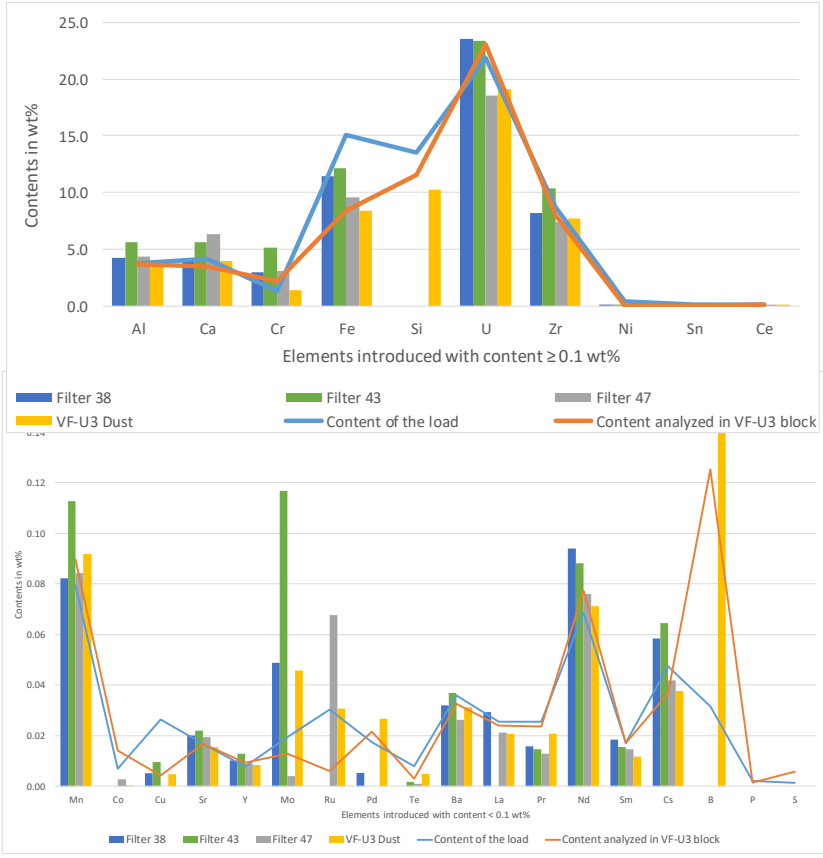

FD#4酸化物質ブロックのダスト飛散粒子

© CRIEPI

# 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

## ③特性分析：結果の比較（ブロック、ダスト）

- 原料（計算値）、ブロックおよびダストの組成は、相互に良い一致（一部元素除く）。
- ダスト粒子に応じて元素濃度の順が相違するが（例：Zr>U>Fe>Cr, U>Fe>Zr>Ca>Al>Cr）、ブロックの非均質性や$ZrO_2$溶解るつぼの部分溶融、切削刃の砥粒の損耗による汚染等が主な要因。
- 複数の分析手法（ICP、XRD、SEM-EDS）で、ブロックとダストの化学組成、結晶相が概ね一致（機械的切削条件による飛散率への影響は軽微であることと符合）。
- 分析結果は再現性があり、異なる手法による分析結果が整合（特に、組成が同じFD#3とFD#4）。
- 再臨界管理に重要なホウ素や軽希土類元素は、ブロックおよびダスト粒子中のウランとの存在比に変化がないことを確認（下表）。




FD#3原料（計算値）、ブロック、フィルター回収粒子、ダスト粒子の各分析値の比較

ダスト粒子のB/U比および希土類元素/U質量比（FD#5）

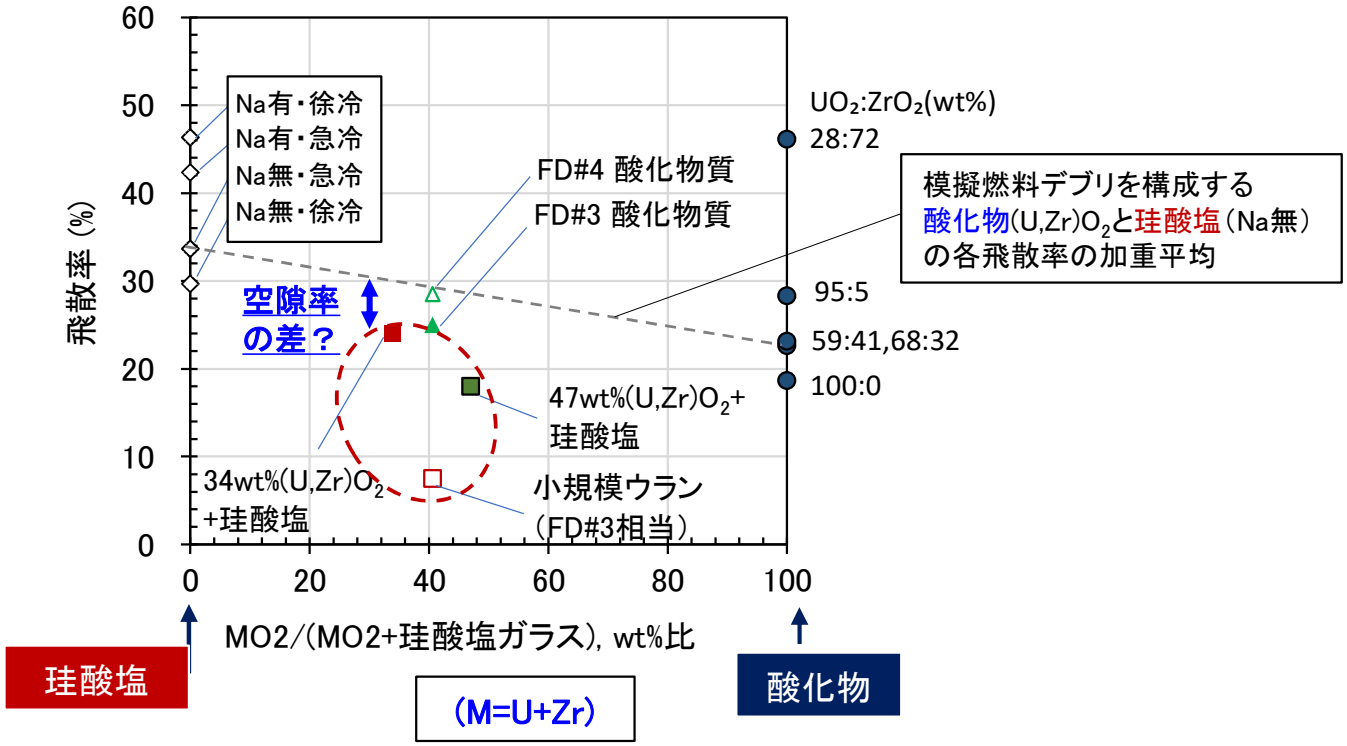
| | B/U | Ce/U | Nd/U | La/U | Pr/U | Sm/U |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ブロック | 0.023 | 0.0050 | 0.0029 | 0.00079 | 0.00079 | 0.00027 |
| ダスト粒子 | 0.030 | 0.00058 | 0.0033 | 0.00082 | 0.00093 | 0.00032 |

© CRIEPI

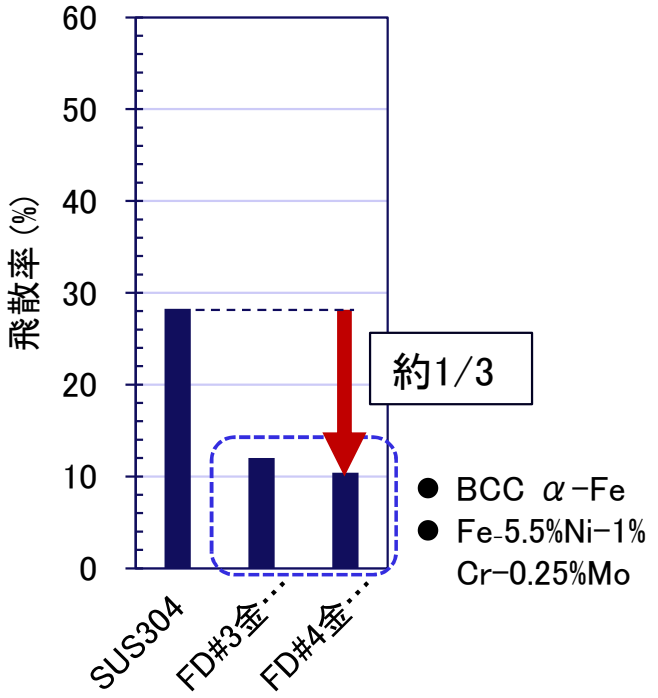
# 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

## ④ダスト飛散率の評価

### （1）酸化物質ブロック （酸化物＋珪酸塩）




### （2）金属質ブロック （金属）




■ 酸化物と珪酸塩の加重平均は、全測定値を包絡する
⇒ 任意組成の飛散率を推定できる見通し

- FD#3、FD#4＞(U,Zr)$O_2$+珪酸塩、小規模ウラン（FD#3相当）の大小関係の原因：*空隙率の差*によると推定
- 珪酸塩（左縦軸）： Na有・徐冷のとき最大
- 酸化物（右縦軸）： 正方晶(Zr,U)$O_2$のとき最大

金属質ブロックの飛散率

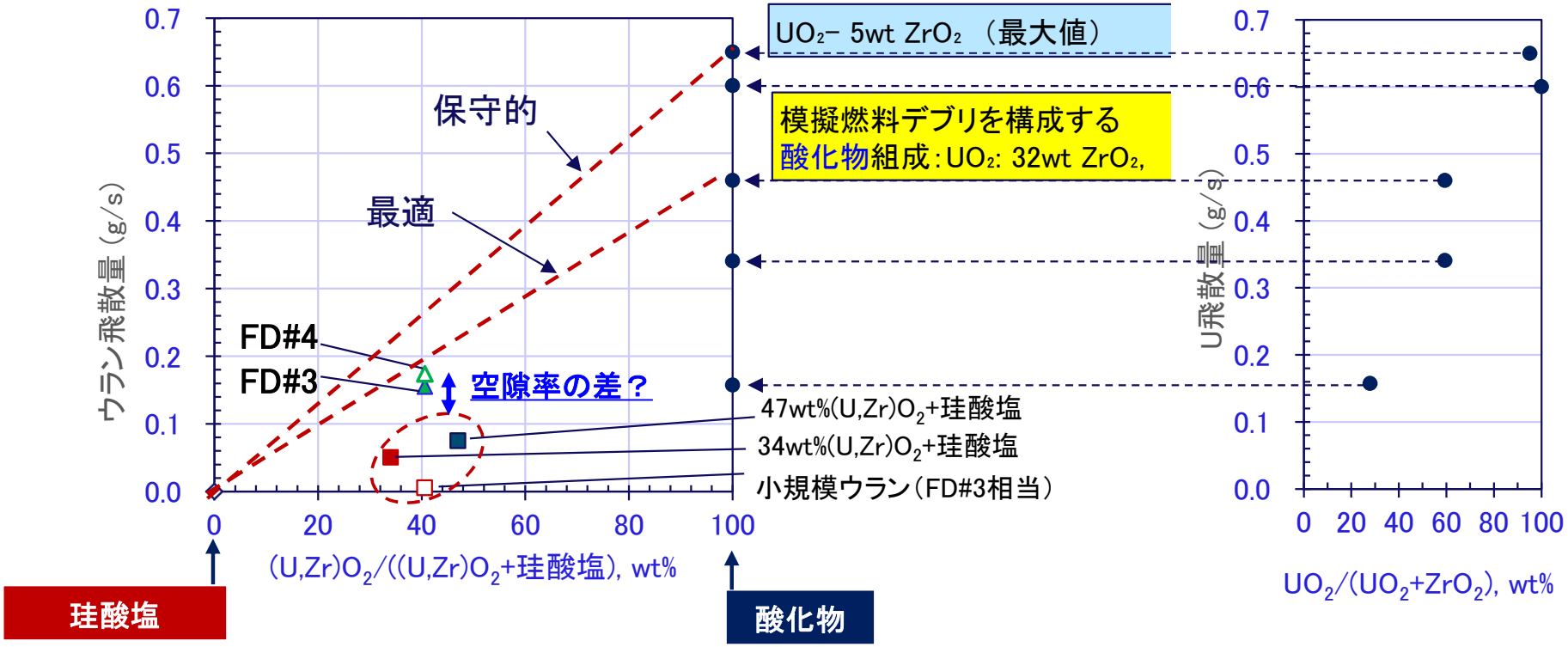
- SUS304の約1/3
- 酸化物質ブロック（FD#3, FD#4 ）の1/3～1/2

## 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

# ④ダスト飛散率の評価：ウラン飛散量

ウラン飛散量(g/s)＝飛散率×欠損量×密度×ウラン含有率÷切削時間

**（1）酸化物質ブロック**　（酸化物＋珪酸塩）




**ウラン含有相の主成分$(U,Zr)O_2$**



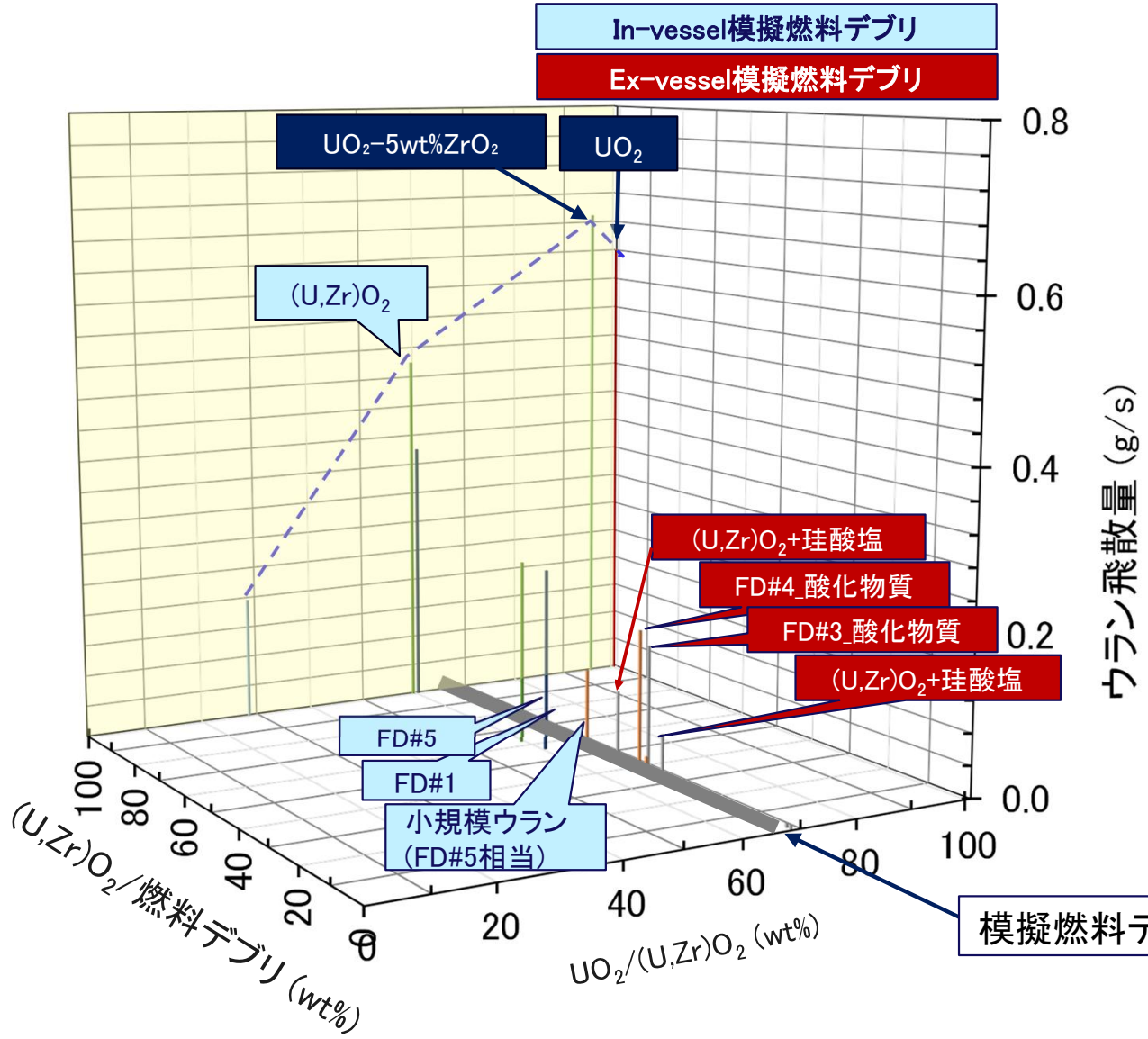

- ■ 最適評価　：模擬燃料デブリを構成する$(U,Zr)O_2$と珪酸塩の加重平均で推定できる見通し
- ■ 保守的評価：$UO_2$−5wt%$ZrO_2$組成（最大値）と珪酸塩の加重平均で推定できる見通し

FD#3、FD#4　＞　$(U,Zr)O_2$+珪酸塩、小規模ウラン（FD#3相当）
→　空隙率または空隙構造の差によると推定
（FD#3：未測定、FD#4：3%、その他：42～48%）

© CRIEPI

## 【4-2】kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの切削ダスト飛散率測定試験（ディスクカッター）

# ④ダスト飛散率の評価：ウラン飛散量の3D分布




- $UO_2$-5wt%$ZrO_2$組成をピークに、燃料デブリに占める$(U,Zr)O_2$割合の減少と共にウラン飛散量は減少傾向
- $(U,Zr)O_2$割合が珪酸塩によって希釈されるEx-vessel燃料デブリでは、In-vessel燃料デブリよりもウラン飛散量がやや低下傾向

© CRIEPI

## 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）

# まとめ

- 模擬燃料デブリの組成の考え方を統一した上で、小規模ウラン含有In-/Ex-vessel模擬燃料デブリを集光加熱法により、$(U,Zr)O_2$＋珪酸塩から構成される小規模ウラン含有Ex-vessel模擬燃料デブリをそれぞれ作製し、特性データを取得した。また、溶融過程を経た非均質なkg規模のウラン含有In-vessel模擬燃料デブリ（FD#5）と Ex-vessel模擬燃料デブリ（FD#4）を作製し、それぞれの特性データを取得した。後者は、密度差と非混合性により酸化物質と金属質のブロックに分離した。これら各模擬燃料デブリ供試体を対象に、気中ディスクカッター切削時のダスト飛散挙動データおよび飛散ダストの特性データを取得した。
- In-/Ex-Vessel模擬燃料デブリとそれぞれの飛散ダストの特性が類似したことは、機械的切削に化学変化や相変態を生じないことを示した。
- 機械的切削時のダスト飛散率は、切削条件よりも供試体のマクロな特性（密度、気孔率等）に依存することが示された。これは、コールド供試体を用いた結果とも整合した。
- Ex-Vessel模擬燃料デブリの飛散率は、主に$(U,Zr)O_2$と珪酸塩から構成される酸化物質で25～30%、主にFeとNiから構成されウランを含まない金属質で10～12%を示した。
- 飛散率の三次元マップより、燃料デブリ中の$(U,Zr)O_2$割合の減少と共に飛散率の減少傾向が示された。また、$UO_2/(UO_2+ZrO_2)$比が68wt%の試験結果より、ウラン飛散量は$(U,Zr)O_2$と珪酸塩のウラン飛散量の加重平均で評価できる見通しが示唆された。即ち、Ex-vessel燃料デブリのダスト飛散率とウラン飛散量は、酸化物成分と珪酸塩成分の各値の加重平均で概ね推定できる見通しを得た。

© CRIEPI

# 【5】ダスト飛散挙動の解析

© CRIEPI

【5】ダスト飛散挙動の解析

# 目的

■ 以下を可能とするためのダスト飛散挙動数値解析手法を構築する。

- 飛散率測定試験の理解深化のための参照データの取得
- 試験で得られる測定データの内外挿
- 実機を模擬した条件での解析によるLPF予測

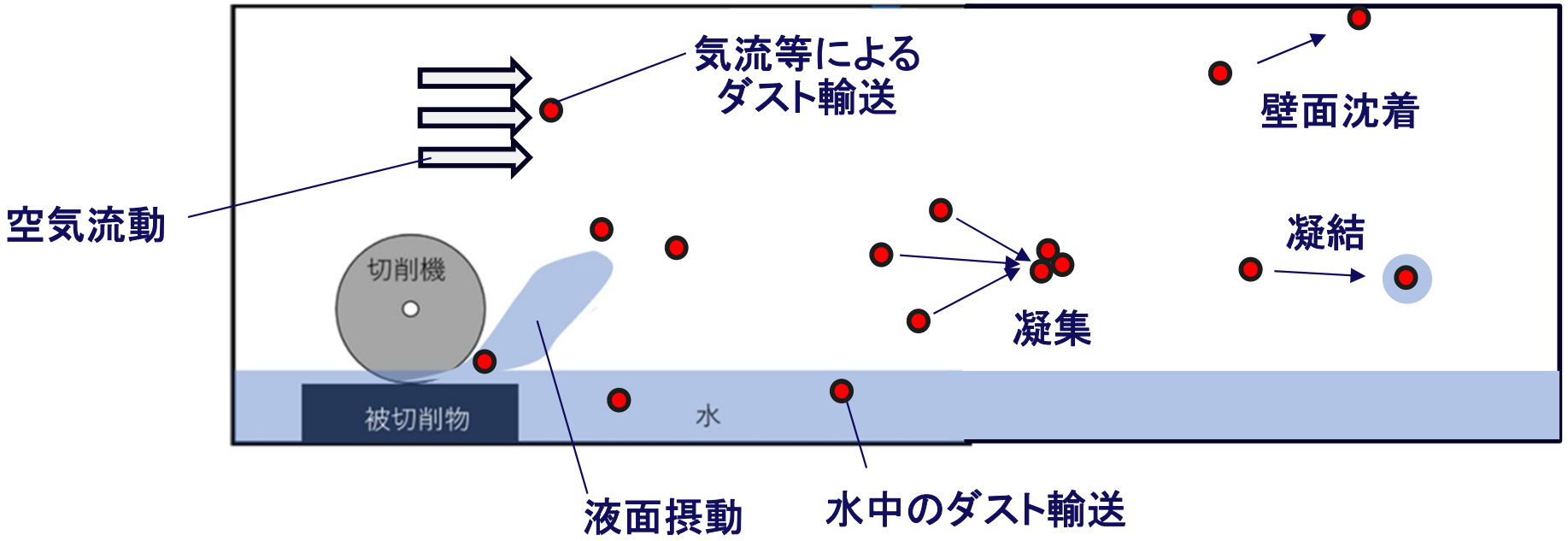
© CRIEPI

# 【5-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

© CRIEPI

【5-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

# 解析で考慮すべき現象




- 空気流動：CFD（Computational Fluid Dynamics）　市販ソフトを使用
- 液面摂動：VOF（Volume Of Fluid 法）　市販ソフトを使用

- ダスト輸送：粒子追跡法　PHALSER*を使用
- 凝集：凝集モデル　本研究で開発しPHALSERに実装
- 凝結：凝結モデル　本研究で開発しPHALSERに実装
- 壁面沈着：沈着モデル　本研究で開発しPHALSERに実装

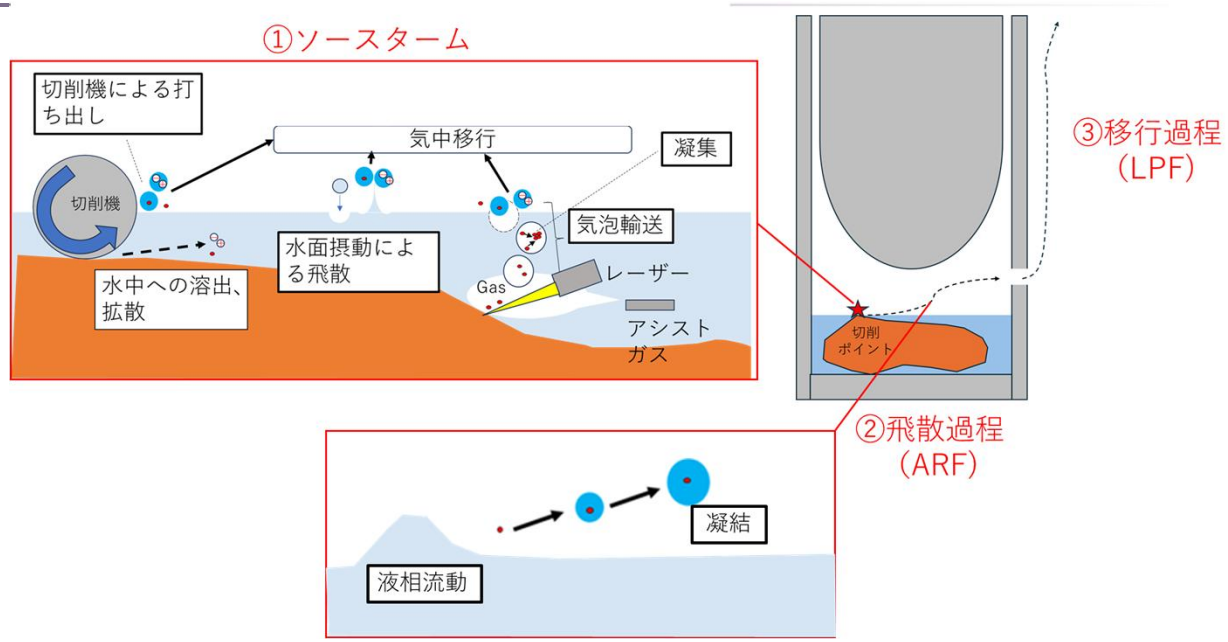
© CRIEPI

*PHALSER:当所が開発した粒子法解析コード

## 【5-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

# 解析手法の適用先

■ ダストの生成から建屋外放出に至る過程を3つに分割し、それぞれに対して異なる評価手法を適用する。




### ①ソースターム

- 水中への溶出・拡散　　試験等によるダスト特性データ取得
- 切削機の運動に伴う打ち出し　　試験等によるダスト特性データ取得
- 水面摂動　　試験等によるダスト特性データ取得
- 気泡輸送（レーザー）　　凝集過程の感度解析に凝集モデルによる数値解析を適用可能

**②飛散過程**
VOF法による液相/気相の挙動解析
粒子追跡法＋壁面沈着モデルによる飛散過程シミュレーション
凝結モデルによるダストの特性変化

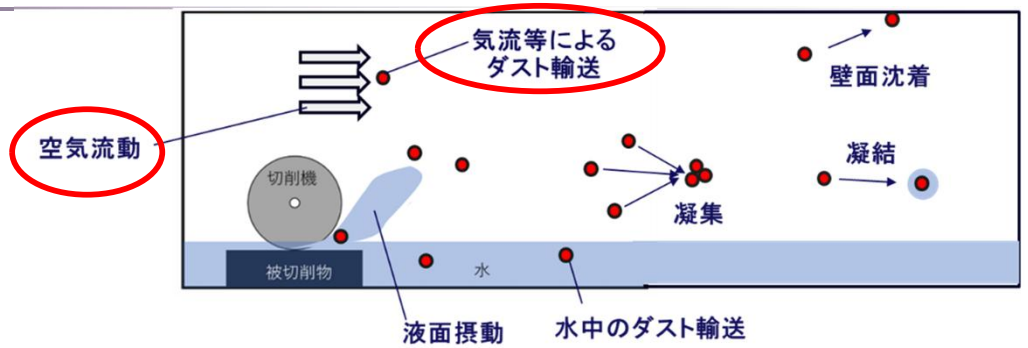
**③移行過程**
CFDによる気相の挙動解析
粒子追跡法＋壁面沈着モデルによる飛散過程シミュレーション
凝結モデルによるダストの特性変化

© CRIEPI

## 【5-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

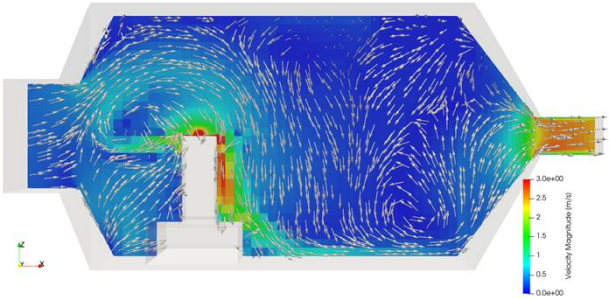
# 解析手法の構築：CFD/粒子追跡法

■ 空気流動およびダスト輸送の評価
手法は前事業で構築




■ CFDによる空気流動解析手法

- オイラー法：
- 静的（Static）
- 解析対象空間をメッシュでモデル化
- 気相（空気）の速度分布を評価
- 切削機が生み出す気流を境界条件により設定
- 市販ソフト（Advance/Frontflow/Red）やフリーソフト（OpenFOAM）を活用



■ 粒子追跡法

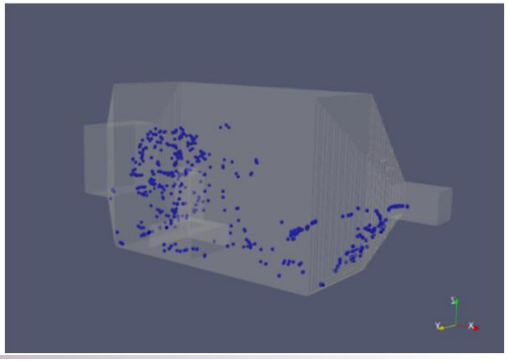
基礎方程式

$$\underbrace{m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}}_{\text{粒子の質量×加速度}} = \underbrace{\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}}}_{\text{流体効力による力}} + \underbrace{\boldsymbol{F}_{\mathrm{g}}}_{\text{重力による力}}$$

抗力：$\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}} = \frac{\frac{3}{4}m_{\mathrm{p}}\mu_{\mathrm{f}}C_{\mathrm{D}}}{\rho_{\mathrm{p}}d_{\mathrm{p}}^2}\left(\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}} - \boldsymbol{v}_{\mathrm{f}}\right)$

重力：$\boldsymbol{F}_{\mathrm{g}} = m\boldsymbol{g}\left(1 - \frac{\rho_{\mathrm{f}}}{\rho_{\mathrm{p}}}\right)$

- ラグランジュ法
- 動的（Dynamic）
- ダストを粒子でモデル化
- CFDなどにより得られた速度場を基に粒子にかかる抗力を計算
- 当社開発の粒子法解析コードPHALSERやフリーソフト（OpenFOAM）を活用

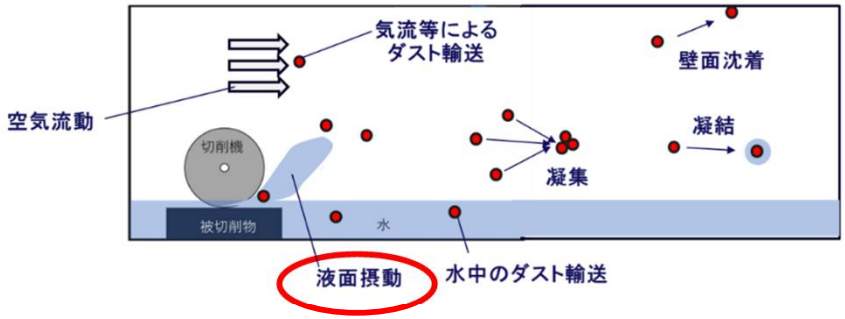


© CRIEPI

## 【5-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

# 解析手法の構築：VOF法

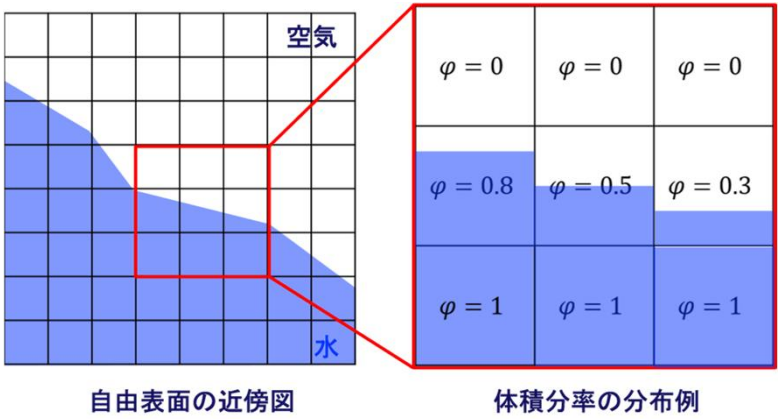
■ 液面摂動が飛散ダストに与える影響を評価するため、VOF法による液相/気相の二相挙動解析手法を採用




■ Volume Of Fluid法（VOF法）：水と空気のような自由表面を持つ流れの解析手法

- VOF法では格子内で液体が占める体積分率$\varphi$を定義し、$\varphi$の移流計算から自由表面の形状変化や移動を解析する。
- 市販ソフト（Advance/Frontflow/Red）を活用。

■ VOF法のイメージ

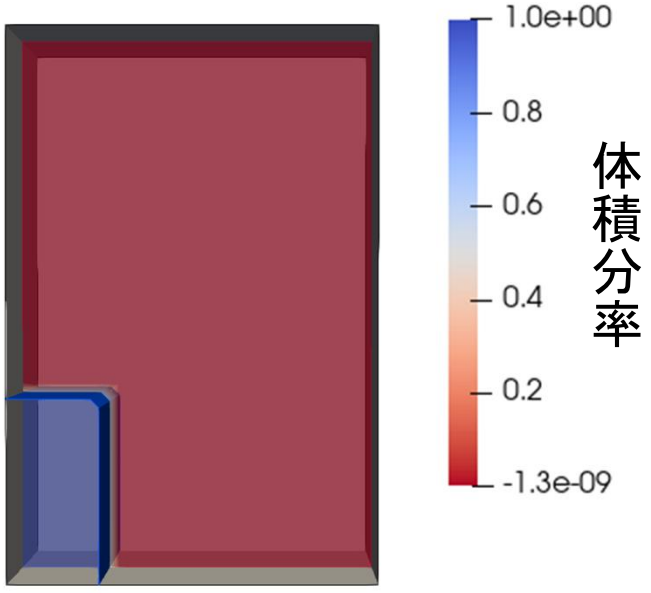



自由表面の近傍図　　体積分率の分布例

$$\varphi = \frac{\text{計算セル中の液体の体積}}{\text{計算セルの体積}}$$

液体の体積分率$\varphi$を拡散方程式により計算

■ VOF法の解析例

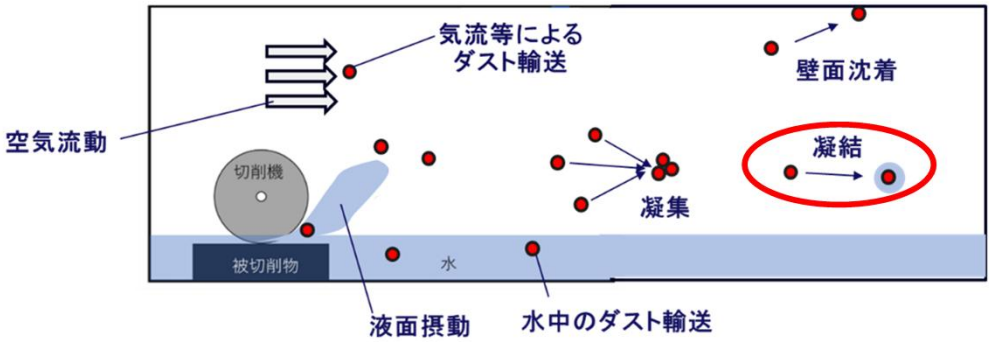



© CRIEPI

## 【5-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

# 解析手法の構築：凝結モデル

■ 凝結による粒子の特性変化をとらえるための凝結モデルを開発し、PHALSERに実装した。

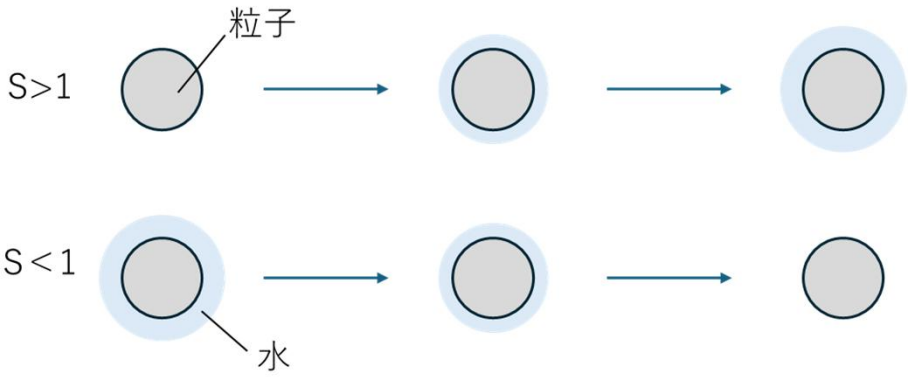



■ 各粒子位置における気相の過飽和度Sに応じて粒子の有効半径rと質量mを変化させる

Masonの式[1]

$$\underbrace{\frac{dm}{dt}}_{\text{粒子の質量変化}} = \frac{4\pi r(S-1)}{a+b}$$

$$\underbrace{a = \frac{M_w i_{fg}}{k_v R T^2}}_{\text{熱拡散抵抗を表す項}}, \qquad \underbrace{b = \frac{RT}{P_{sat} D M_w}}_{\text{水蒸気拡散抵抗を表す項}}$$




凝結モデルのイメージ

[1] B. J. Mason, The Physics of Clouds, Clarendon, Oxford, UK (1971)

© CRIEPI

## 【5-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

# 解析手法の構築：凝結モデルの妥当性確認

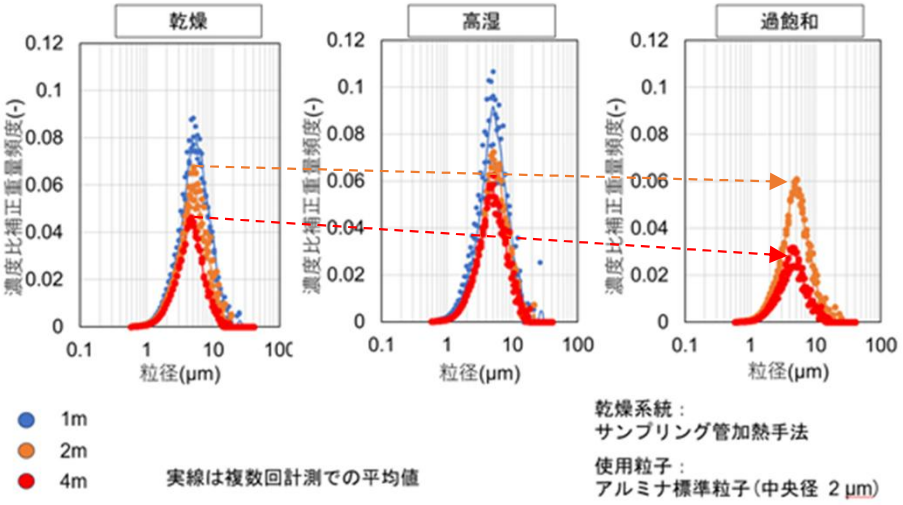
■ 到達量の評価

- 粒子流入位置から1m、2m、4m下流における粒子の到達数をカウントし、濃度補正体積頻度を算出

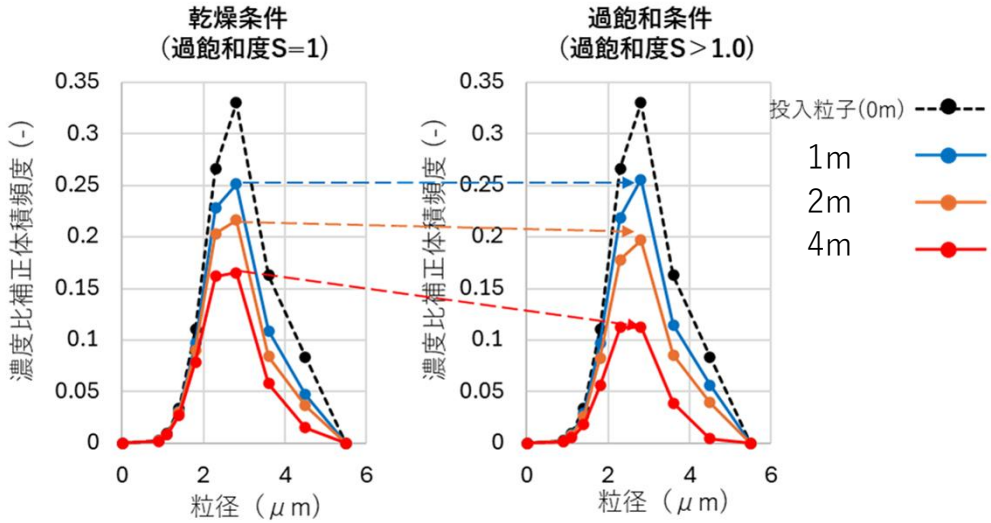
過飽和条件

飽和条件

解析で得られた粒子の沈降挙動




試験結果




解析結果

■ 解析において、以下の傾向が試験と一致しモデルの妥当性が確認された。

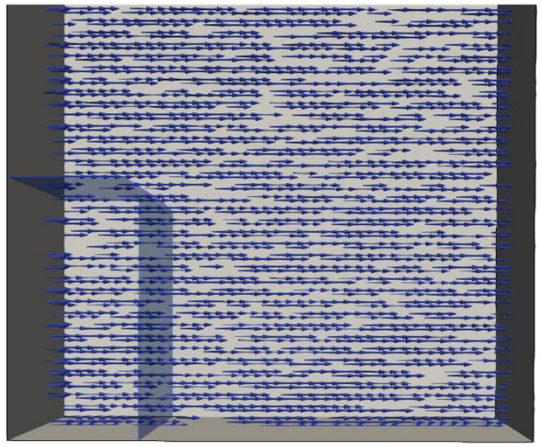
- 距離が長いほど到達粒子量が減少する。過飽和条件ではその影響がより大きく、凝結によって粒子沈着が多く発生することを示唆
- 2m地点においては凝結の影響はほとんどなく、4m地点で有意

© CRIEPI

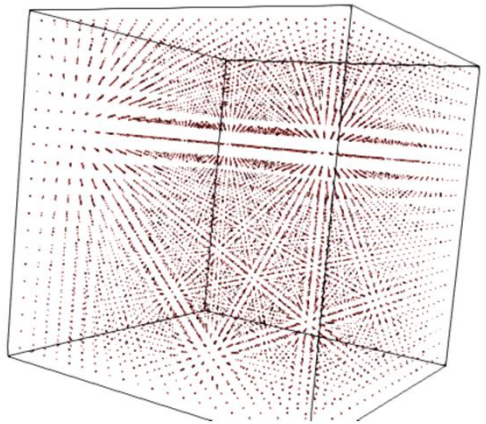
【5-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

# 解析手法の構築：その他のモデル

■ VOF＋粒子追跡法
- 粒子追跡法に粒子に働く界面張力を追加し、液中の粒子挙動評価も可能とした。



■ 凝集モデル
- 凝結による粒子の有効径の粗大化をシミュレートするため、粒子間に働くクーロン力を実装し、凝集過程の解析を可能とした。
- レーザー切断で発生する微小ダストの凝集過程の解析などに適用



© CRIEPI

# まとめ

◆ ダストの飛散挙動（ARF）と移行挙動（LPF）の予測に必要な数値解析手法を選定し、必要なモデルを開発し解析環境を構築した。

- 空気流動：CFD（Computational Fluid Dynamics）
- 液面揺動：VOF（Volume Of Fluid 法）

- ダスト輸送：粒子追跡法
- 凝集：凝集モデル
- 凝結：凝結モデル
- 壁面沈着：沈着モデル

◆ 開発したモデルの妥当性検証等を実施した。

◆ ダストの生成から建屋外放出に至るプロセスを3つに区分し、それぞれの挙動の解析に用いる手法の組み合わせをまとめた。

◆ なお、構築した解析手法については、初期条件または境界条件に何らかの仮定が含まれており、改善の余地が残されている。

◆ 次事業においては、解析で得られるARF/LPFの不確かさ評価を実施し、現実的な条件における予測値のレンジを得ることが重要であると考えられる。

© CRIEPI

# 【5-2】実験体系の解析評価

© CRIEPI

## 【5-2】実験体系の解析評価

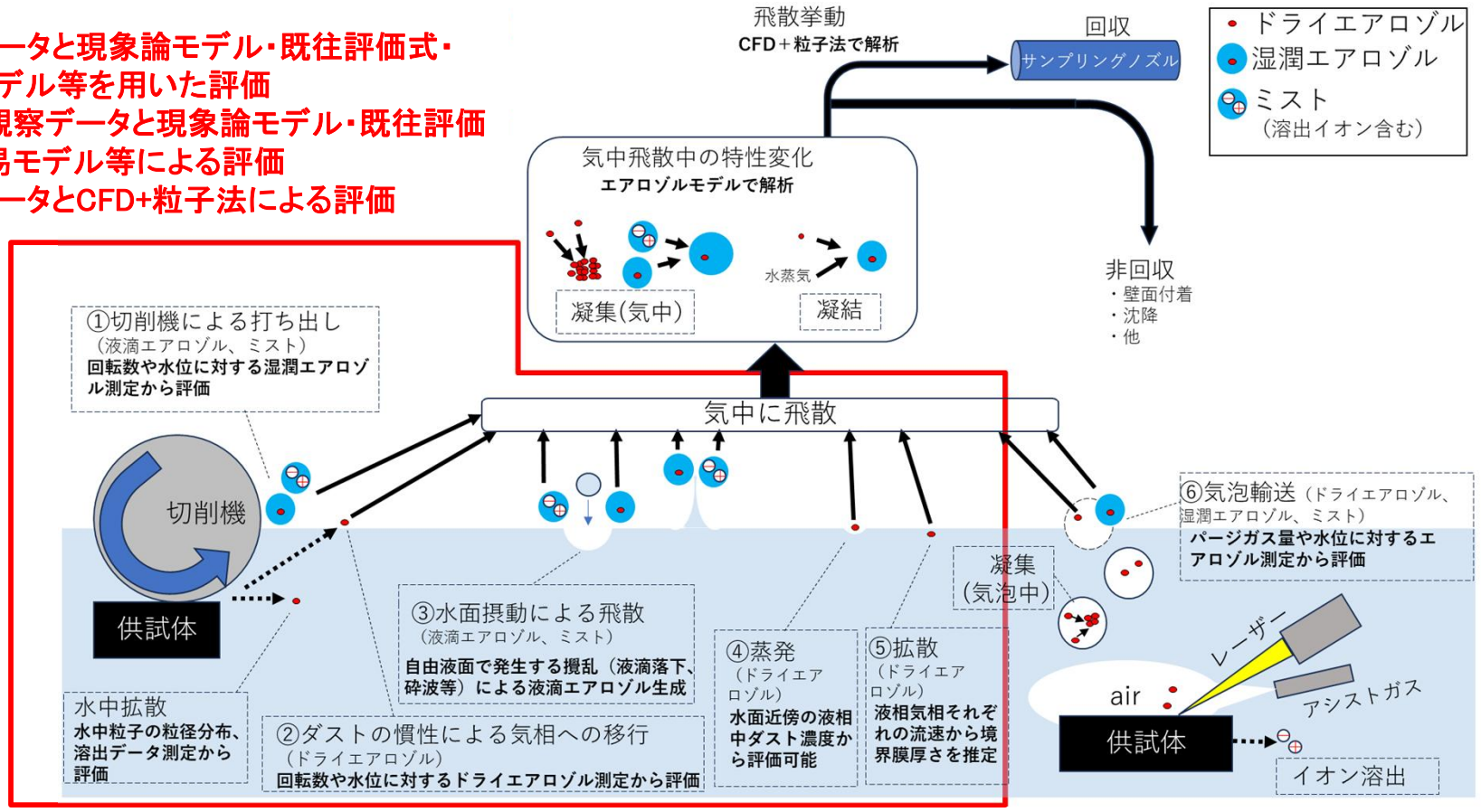
# 目的

■ 開発した解析手法（VOF＋粒子追跡法）の妥当性確認のため、湿式環境下の飛散試験の再現解析を行う。

**各メカニズムのソースターム等の評価の考え方：**

①-⑥ 試験データと現象論モデル・既往評価式・簡易モデル等を用いた評価
⑦ 試験・観察データと現象論モデル・既往評価式・簡易モデル等による評価
⑧-⑨ 試験データとCFD+粒子法による評価

**本解析の対象**



【5-2】実験体系の解析評価

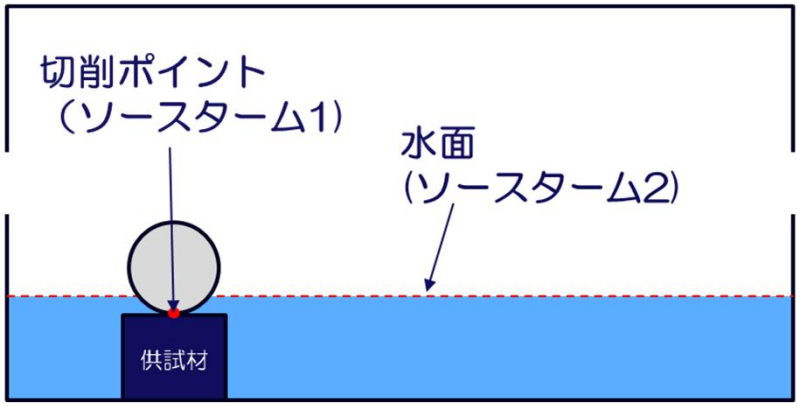
# 湿式切削試験の再現解析

■ 本事業で実施する切削試験の再現解析を実施

■ 解析実施一覧

① ディスクカッター
② レーザー
③ コアボーリング
④ AWJ
⑤ チゼル（落重）
⑥ 可視化試験（水中から気中への移行）
⑦ 可視化試験（横置き）
⑧ レーザー模擬試験

解析内容の例：ディスクカッター




■ 評価方法

➢ VOF + 粒子追跡法を用いて粒径ごとの回収率を評価
- 但し、この解析では凝集/凝結モデルは用いていない
- 粒径レンジ：0.1～100 μm

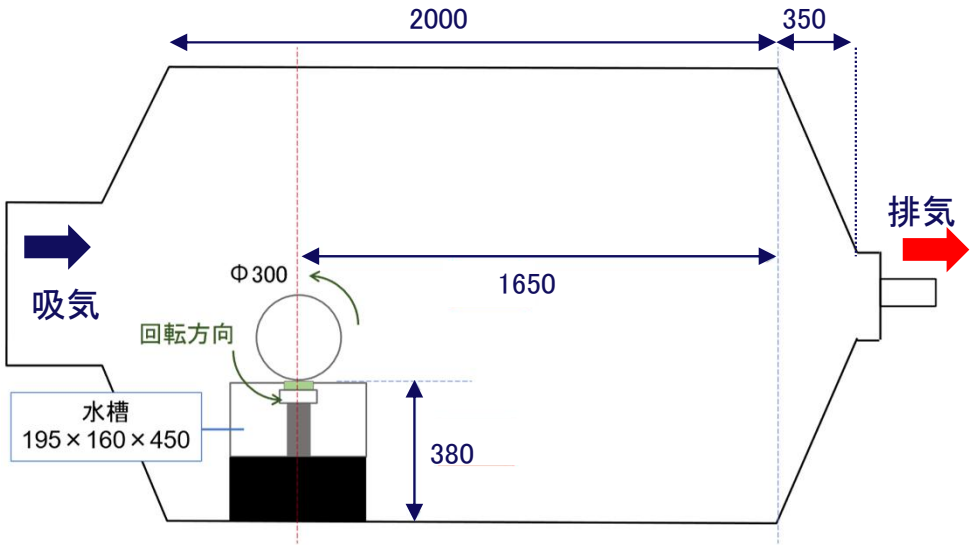
➢ ダスト発生位置や試験条件を変えて回収率を計算
- ダスト発生位置：切削部、供試体表面、ノズル、水面
- 試験条件：水位、カッターの回転数、ガス注入速度

© CRIEPI

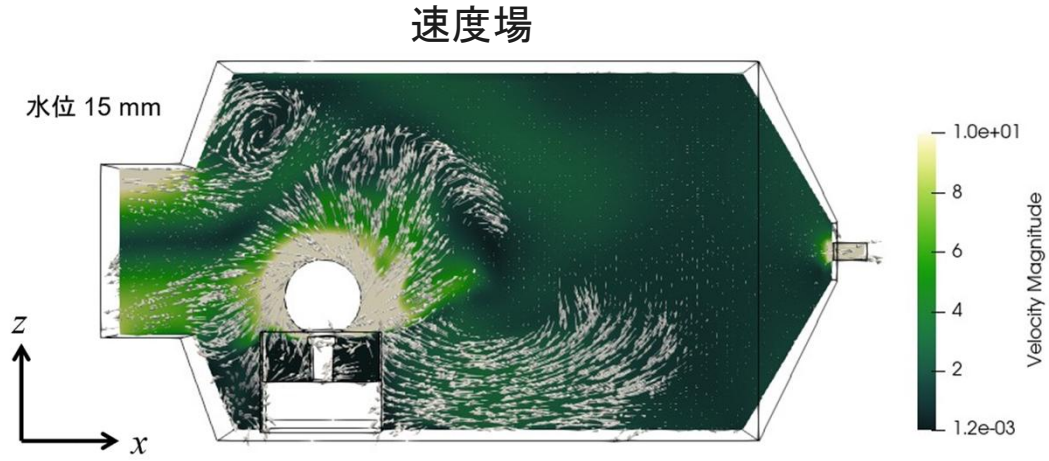
## 【5-2】実験体系の解析評価

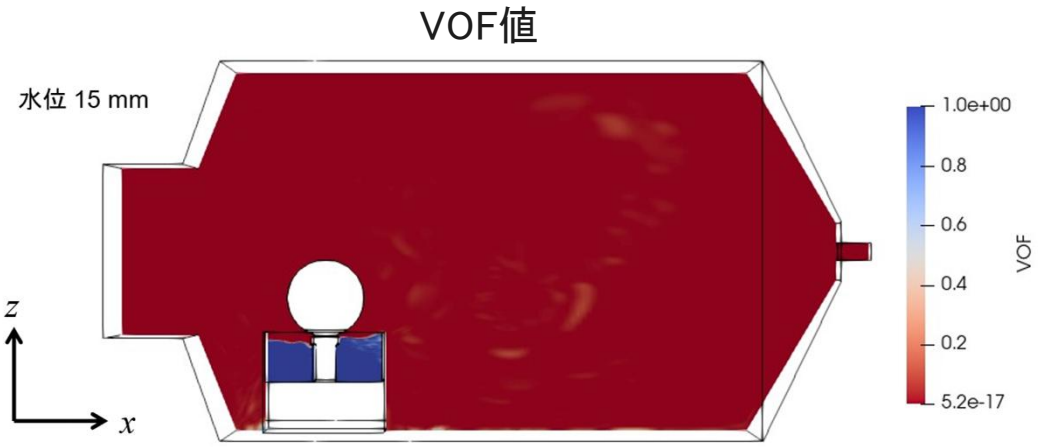
# ①ディスクカッター

## ■ 解析対象




## ■ 計算結果




## ■ 解析条件

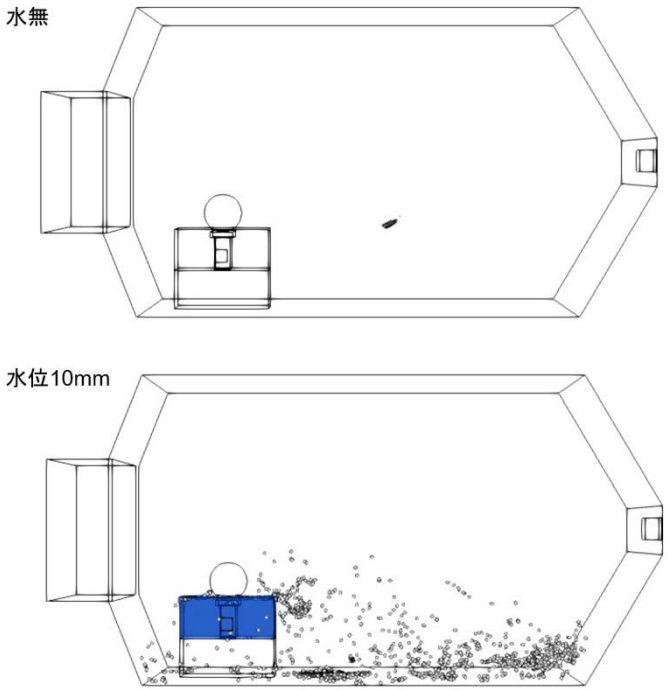
- ディスクカッターの回転数：600rpm
- ダスト生成位置：切削点、または水面
- 水位は水無(0mm)、6mm、10mm、50mm
- 排気口におけるダスト回収率を計算

© CRIEPI

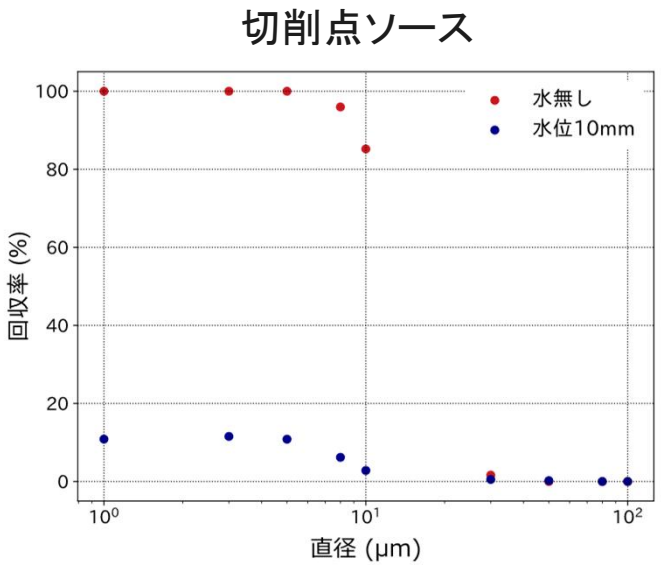
## 【5-2】実験体系の解析評価

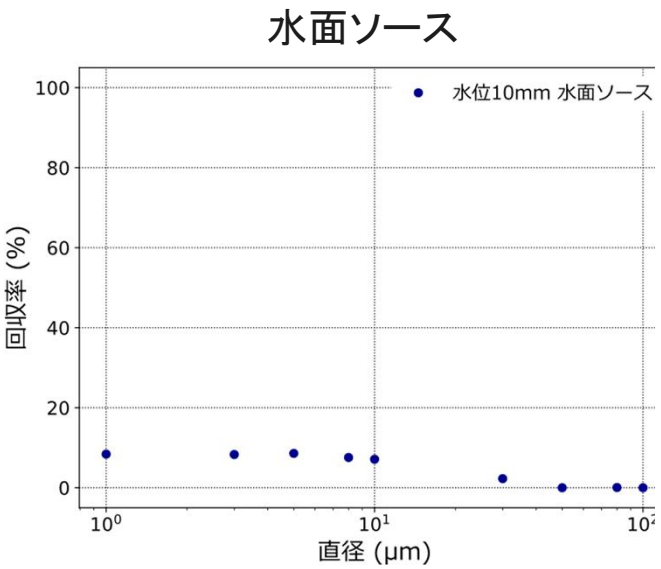
# ①ディスクカッター

### ■ ダスト飛散挙動




### ■ ダスト粒径と回収率



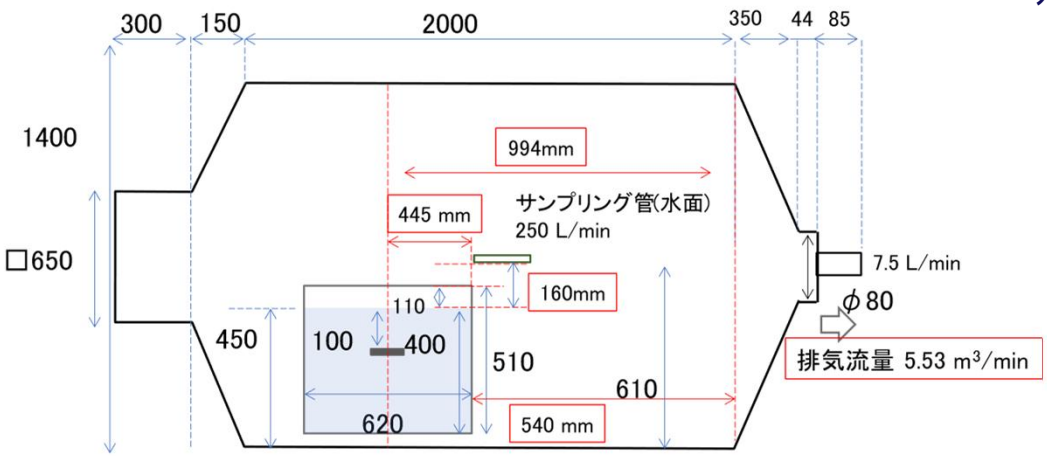

■ 水無条件に比べ、水位10mm条件では飛散率が大幅(1/10程度)に低減した。
- 同条件の試験では水による飛散率低減効果は(1/100～1/1000)程度であった。
- ディスクカッターと液相の間に働くせん断力が影響している可能性が考えられる。

■ ディスクカッターの水中切削による飛散率の低減効果を定性的に正しく評価することが可能となった。定量的な精度向上に向けてモデルの改良を継続する。

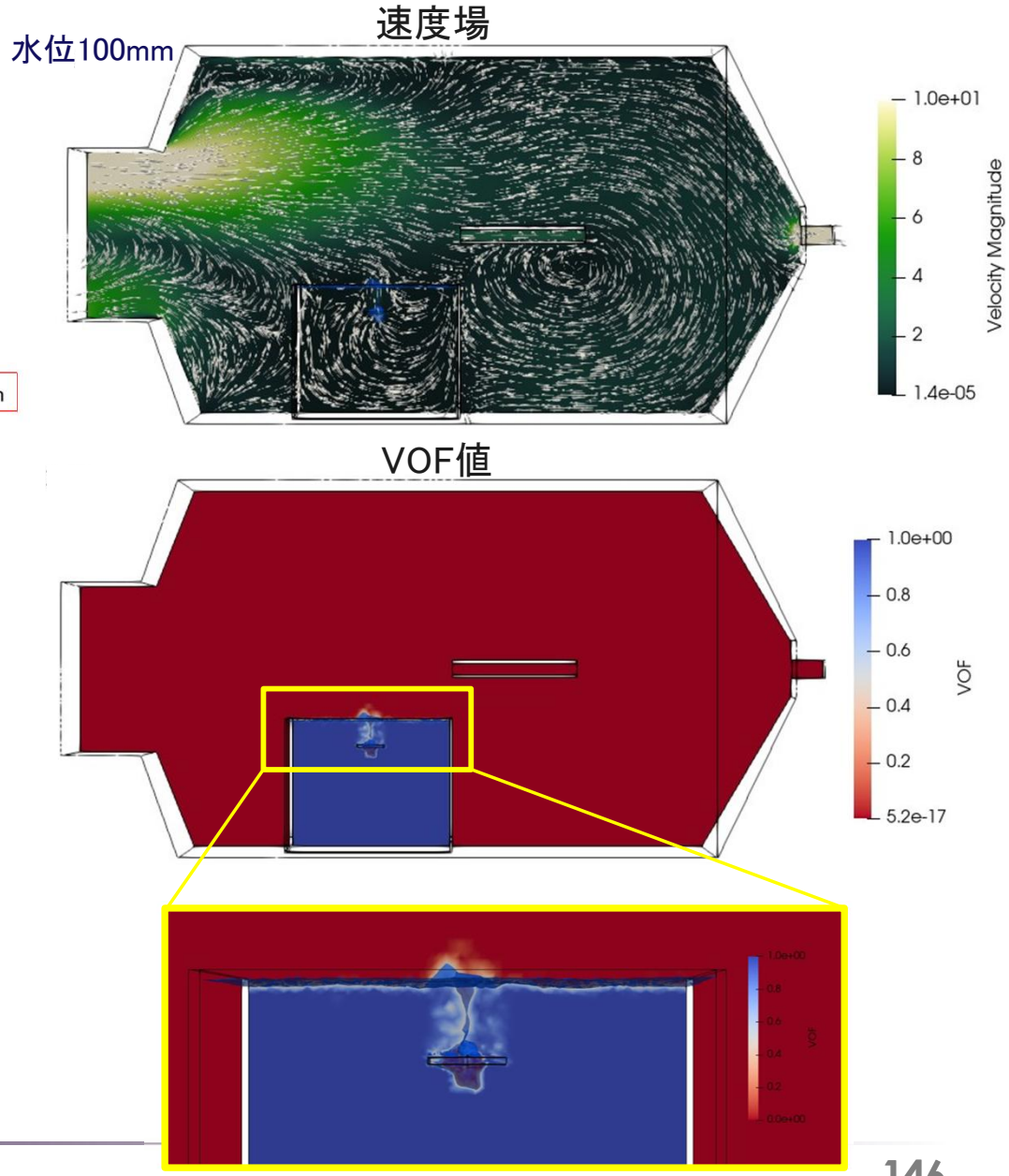
© CRIEPI

# 【5-2】実験体系の解析評価
# ②レーザー

## ■ 解析対象




## ■ 計算結果




## ■ 解析条件

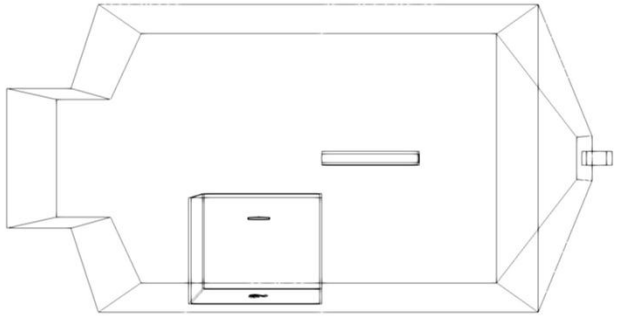
- パージガス流量：55L/min
- ダスト生成位置：供試体背面、または水面
- 水位は水無(0mm)、100mm
- 排気口におけるダスト回収率を計算

© CRIEPI

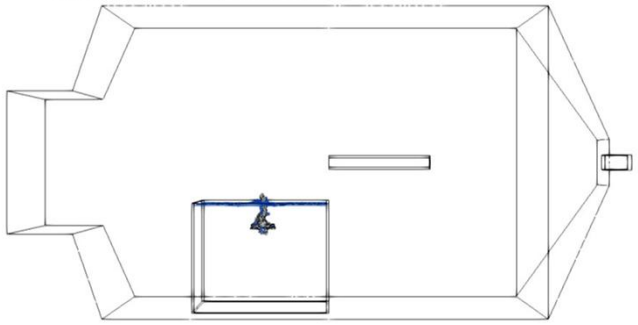
# 【5-2】実験体系の解析評価
# ②レーザー

## ■ ダスト飛散挙動

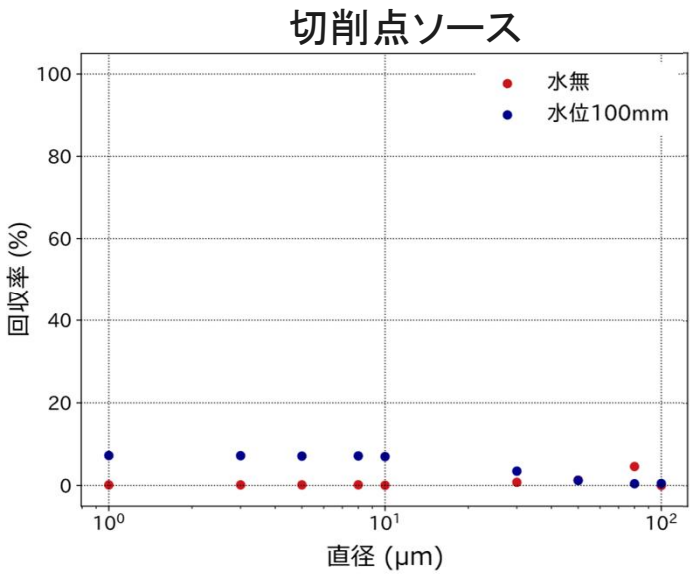
水無

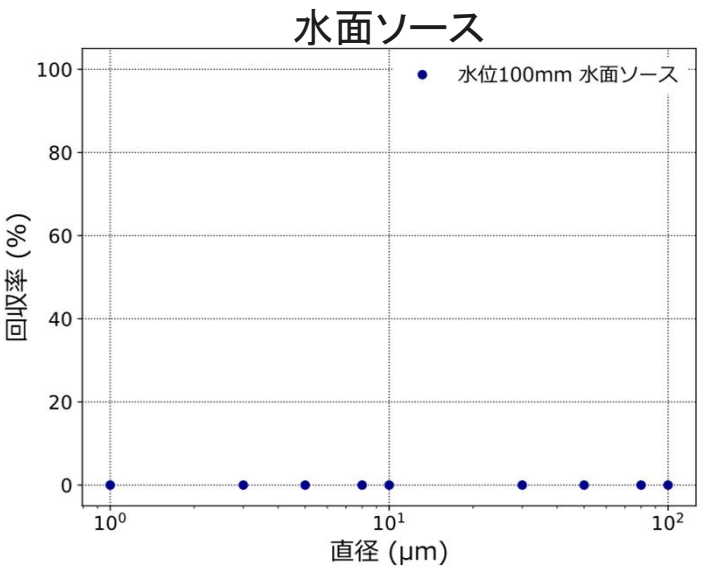


水位100mm（生成位置：供試体背面）



## ■ ダスト粒径と回収率



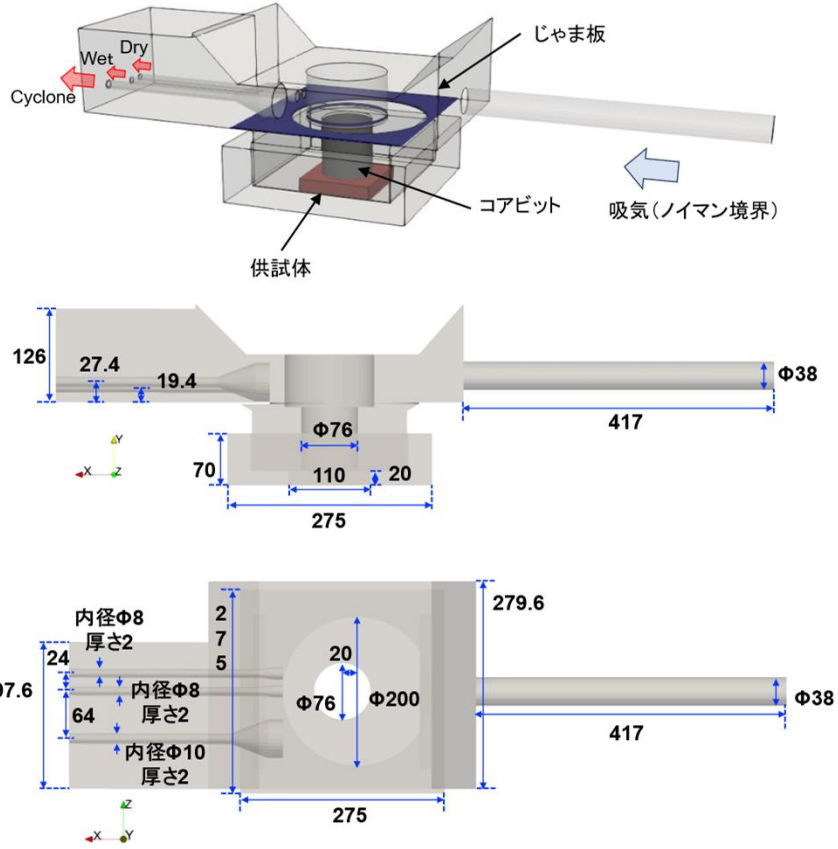

## ■ 水無条件より水位100mmのほうが高い回収率となった。

- 水無条件では底面にダストが固着することで飛散していなかった。
- 本解析には水面でのスクラビング効果が含まれていないため、水面によるダスト飛散抑制が十分に評価できていない可能性がある。

## 【5-2】実験体系の解析評価

# ③コアボーリング

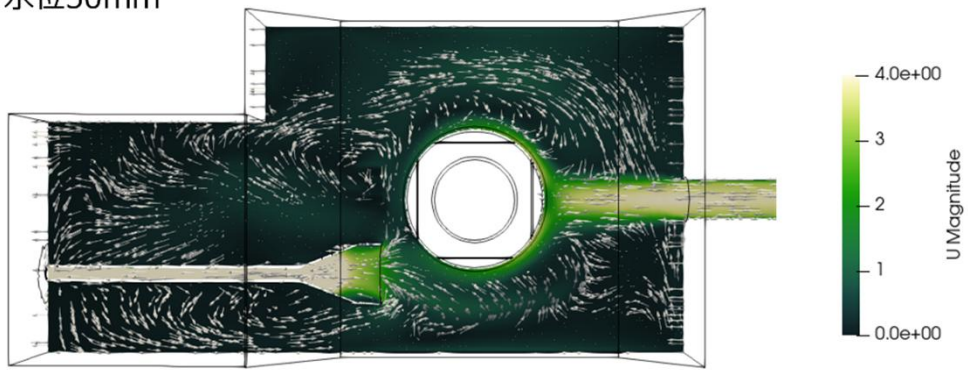
## ■ 解析対象




## ■ 計算結果

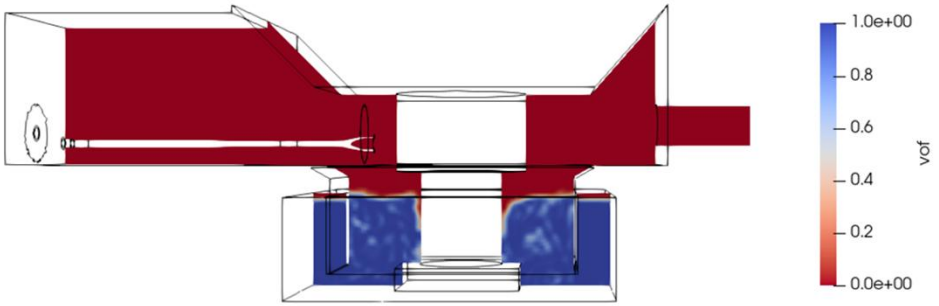
速度場

水位50mm




VOF値

水位50mm




## ■ 解析条件

- コアビットの回転数：600rpm
- ダスト生成位置：ビット周囲（供試体より0.5mm上）または水面
- 水位は水無(0mm)、1mm、50mm
- 3つの排気口におけるダスト回収率を計算

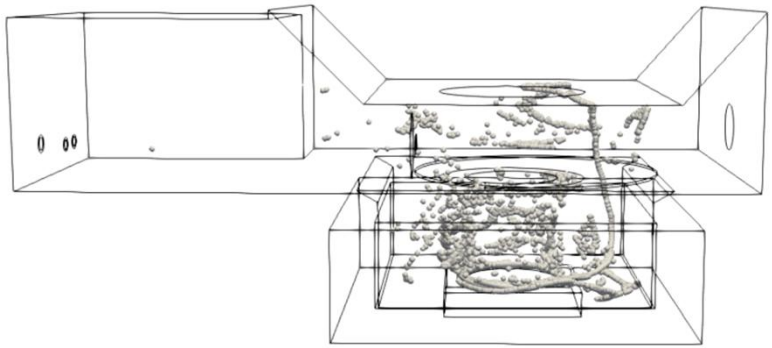
© CRIEPI

## 【5-2】実験体系の解析評価

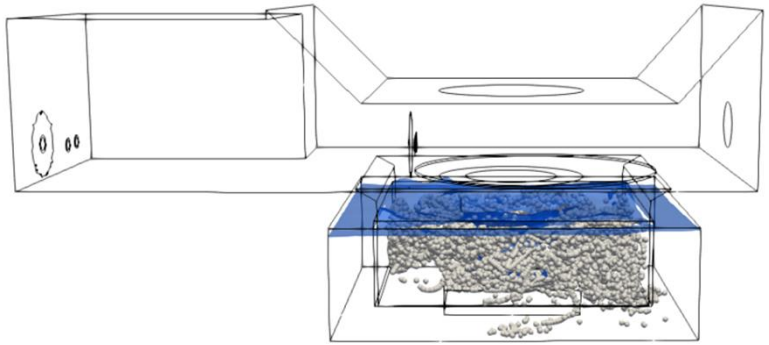
# ③コアボーリング

## ■ ダスト飛散挙動

水無

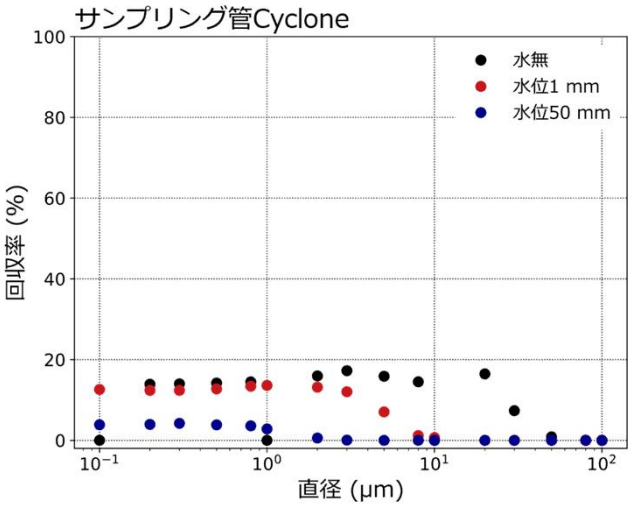


水位50 mm

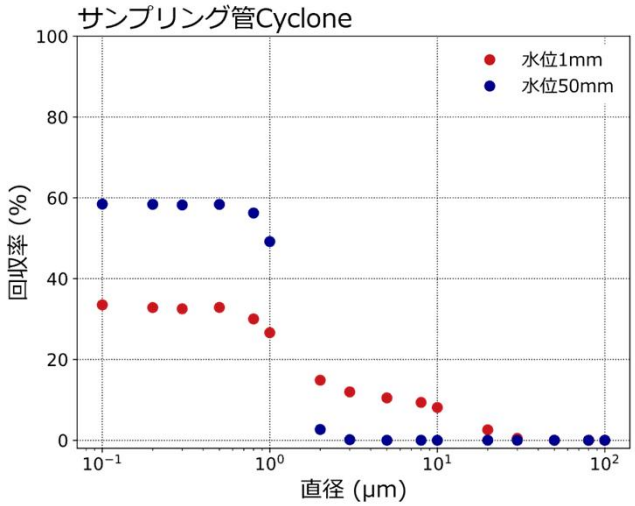


## ■ ダスト粒径と回収率

供試体ソース




水面ソース

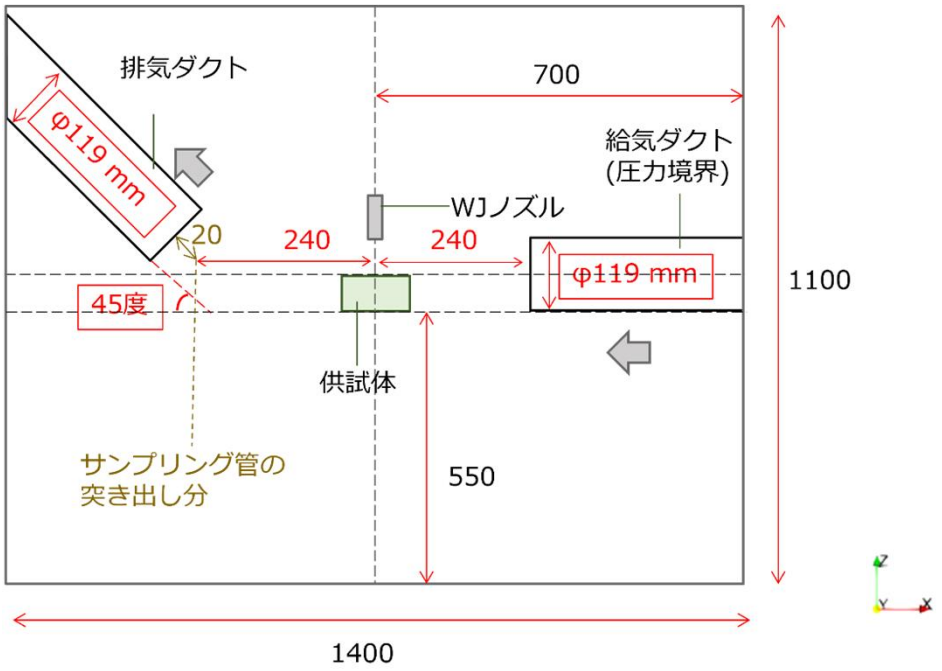



- 解析により、水の効果による飛散率の低減効果が再現されていることを確認した。
- 感度解析を実施し、コアボーリング試験においてはサンプリング位置が回収率に影響を及ぼすことを明らかにした。

© CRIEPI

# 【5-2】実験体系の解析評価
# ④AWJ

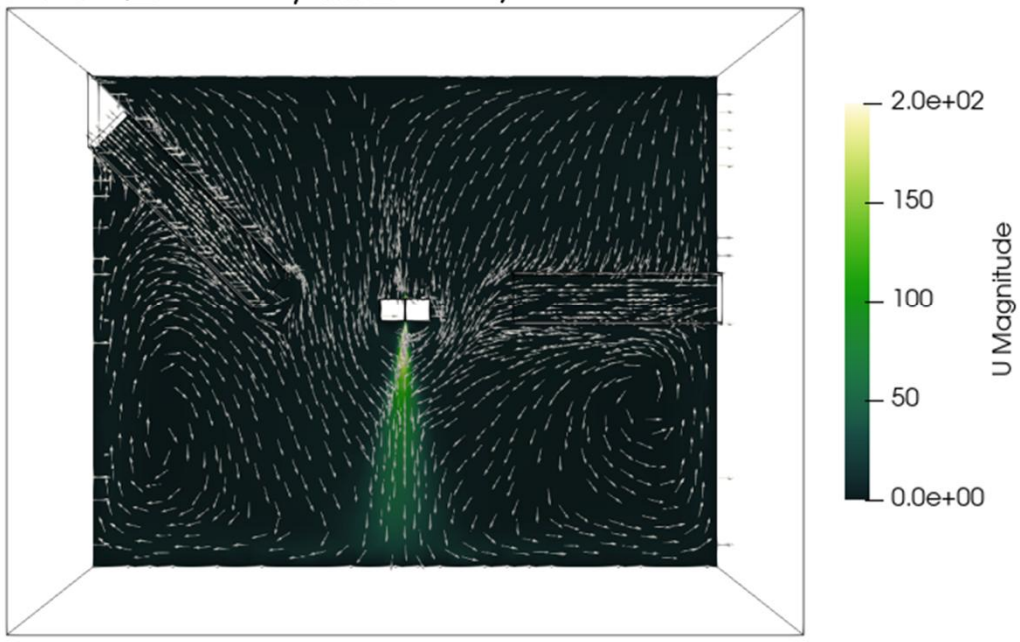
## ■ 解析対象




## ■ 計算結果

速度場

ノズル径0.4mm, 流速704m/s




## ■ 解析条件

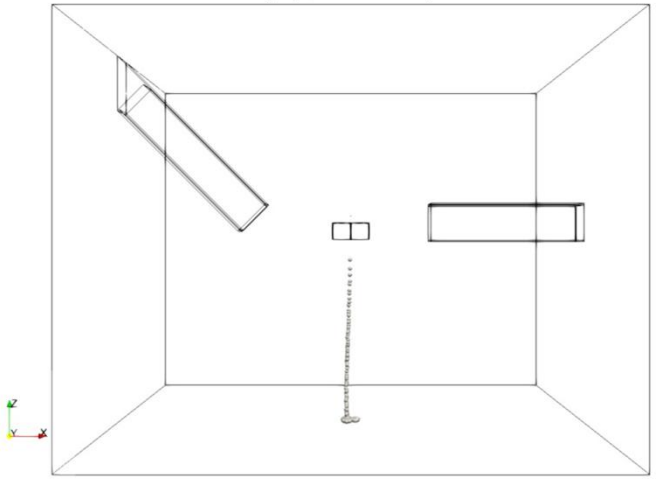
- ノズル径(0.4 or 0.35mm)とノズルから先端の流速(704 or 842m/s)をパラメータに設定
- ダスト発生位置：供試体背面
- 供試体は切削過程を再現するため、ノズル径と同じ幅の切れ目をモデルで設計
- ケース斜め上の排気口におけるダスト回収率を計算

© CRIEPI

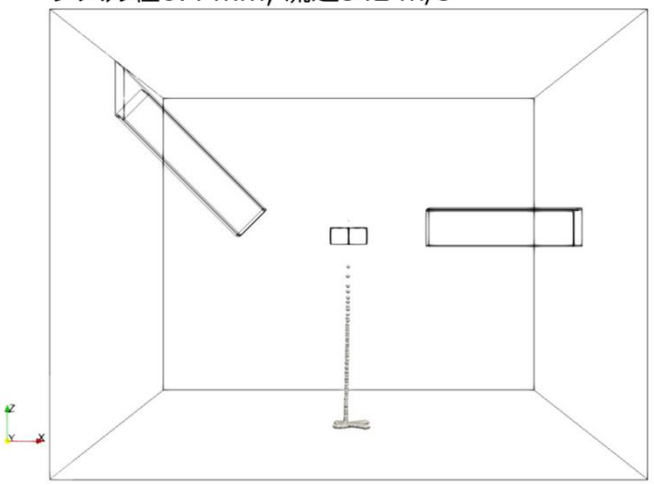
# 【5-2】実験体系の解析評価
# ④AWJ

## ■ ダスト飛散挙動

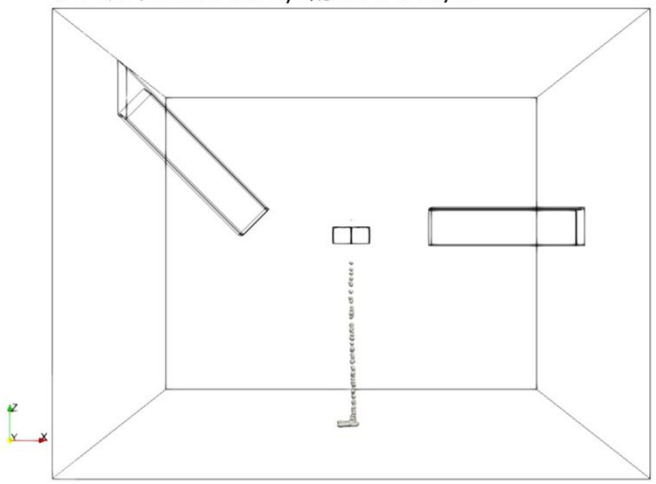
ノズル径0.4 mm, 流速704 m/s



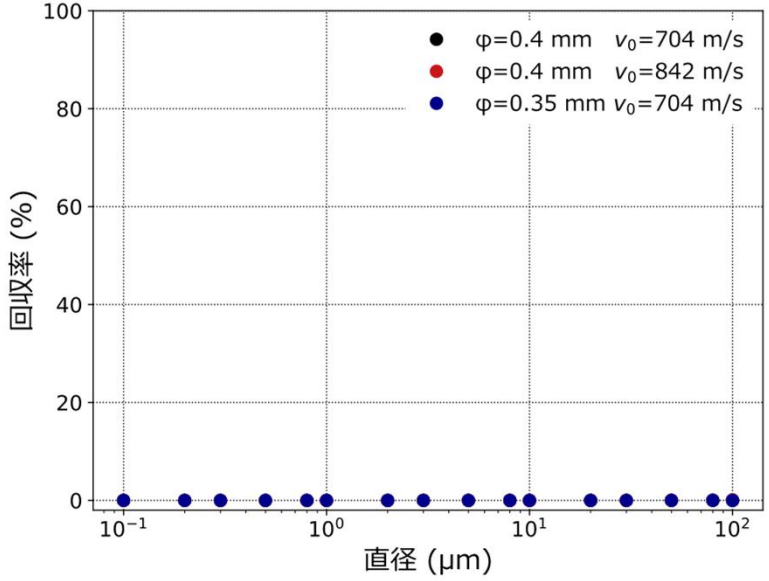
ノズル径0.4 mm, 流速842 m/s



ノズル径0.35 mm, 流速704 m/s



## ■ ダスト粒径と回収率




## ■ ダスト粒子はケース内壁に固着し、飛散しなかった。

- 壁面近傍における条件(速度=0)により、供試体下方に射出されたダストは底面に固着した。
- 試験においてもほぼ100%のダストがケース内部に残留していたことから、溶融したダストがケース内壁に固着して飛散しないことを再現できたと考えられる。

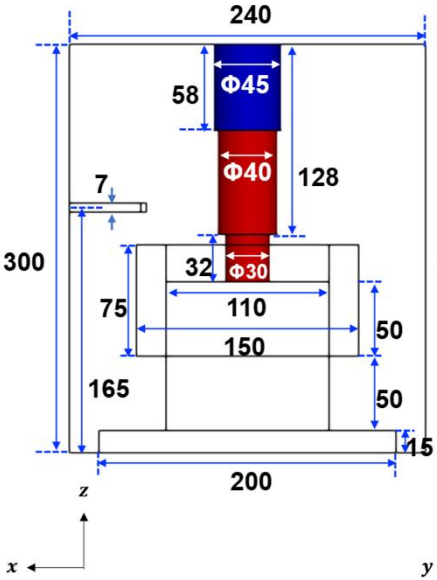
© CRIEPI

## 【5-2】実験体系の解析評価

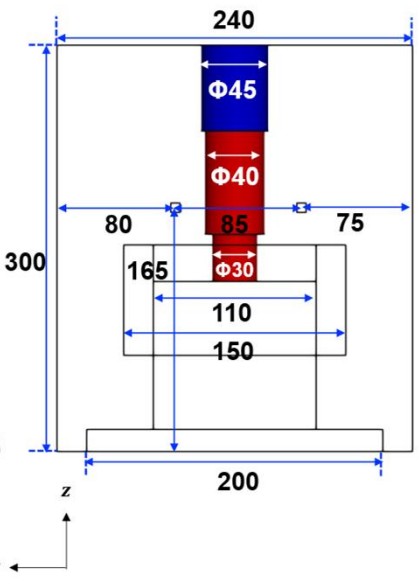
# ⑤チゼル（落重）

## ■ 解析対象

側面

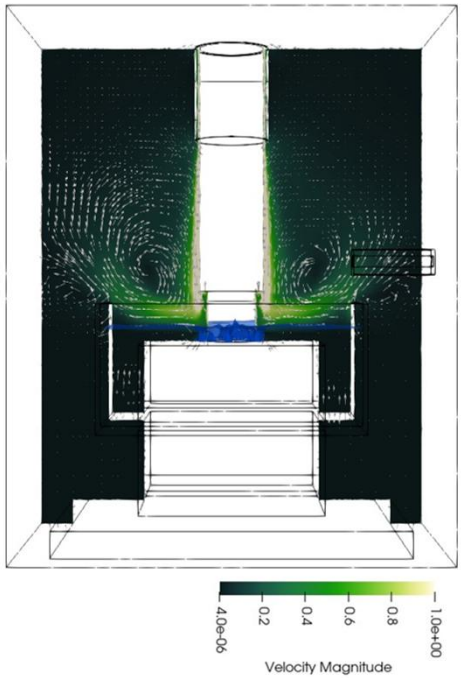



正面

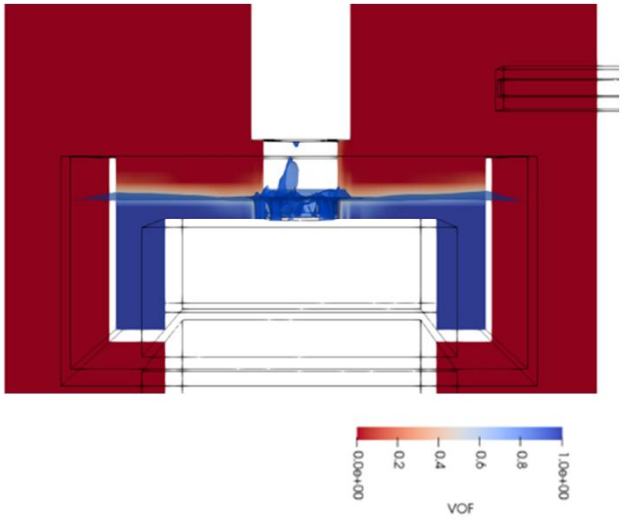



## ■ 計算結果

速度場
水位10 mm




VOF値




## ■ 解析条件

- チゼルの落下速度：4mの高さから自由落下を想定
- チゼル先端は平面とし、チゼル先端によって水は水平に押しのけられる（押しのけられる水の速度は平均して0.0025m/s）
- ダスト生成位置：供試体表面から5mm上、または水面
- 水位は水無（0mm）または 10mm
- 2つの排気口におけるダスト回収率を計算

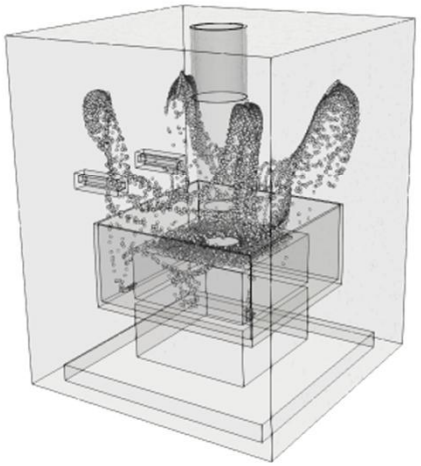
© CRIEPI

## 【5-2】実験体系の解析評価

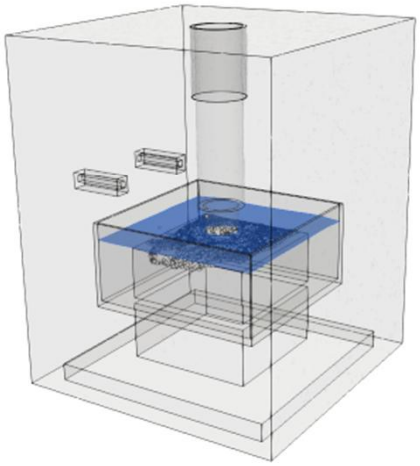
# ⑤チゼル（落重）

## ■ ダスト飛散挙動

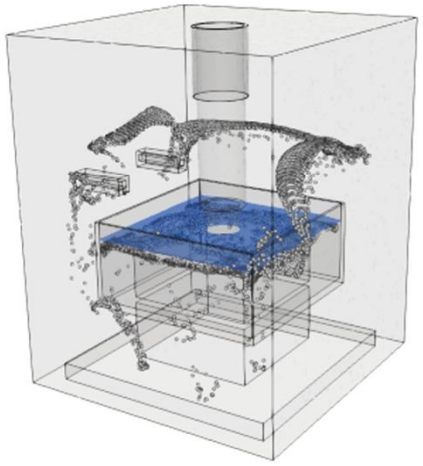
水無し



水位10mm
ソースターム：供試体表面

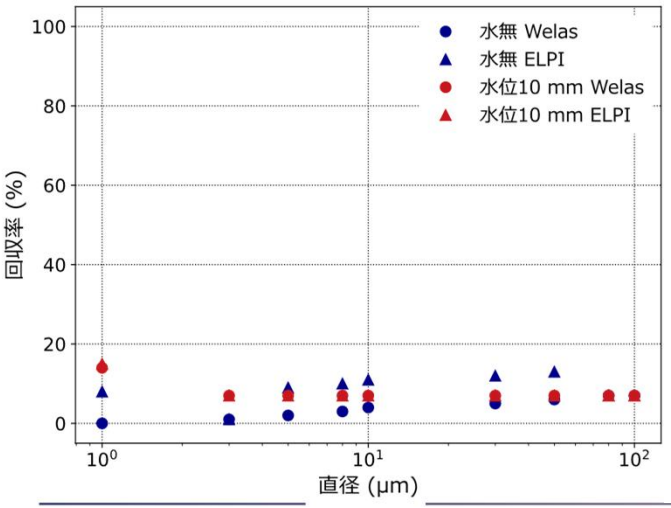


水位10mm
ソースターム：水面

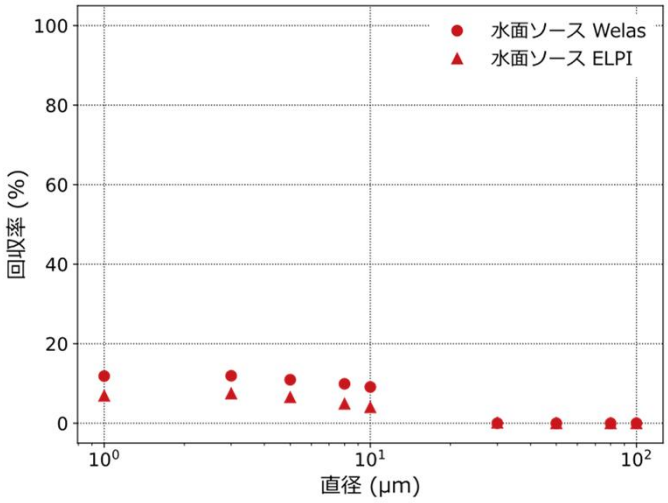


## ■ ダスト粒径と回収率

供試体ソース




水面ソース




## ■ 水によるダスト飛散低減効果は見られなかった。

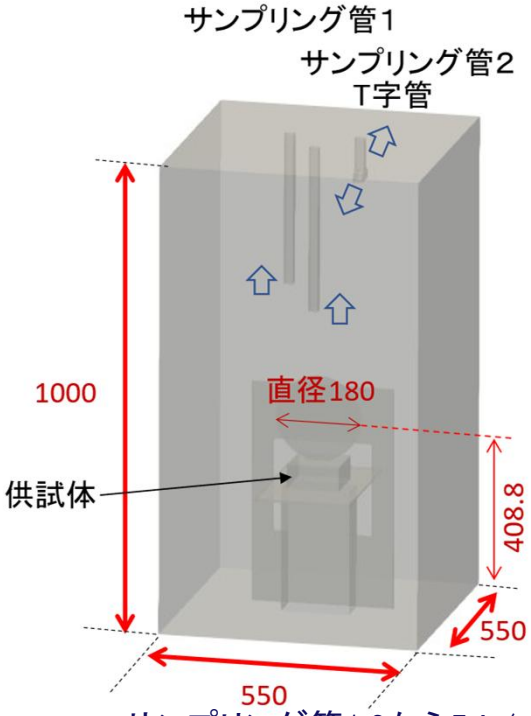
- 供試体表面から発生したダストの回収率では粒径依存性が見られなかった。
- 水面とサンプリング管に配置によっては、水の飛散と共にダストが多く回収される可能性がある。

© CRIEPI

## 【5-2】実験体系の解析評価

# ⑥可視化試験（水中から気中への移行）

## ■ 解析対象

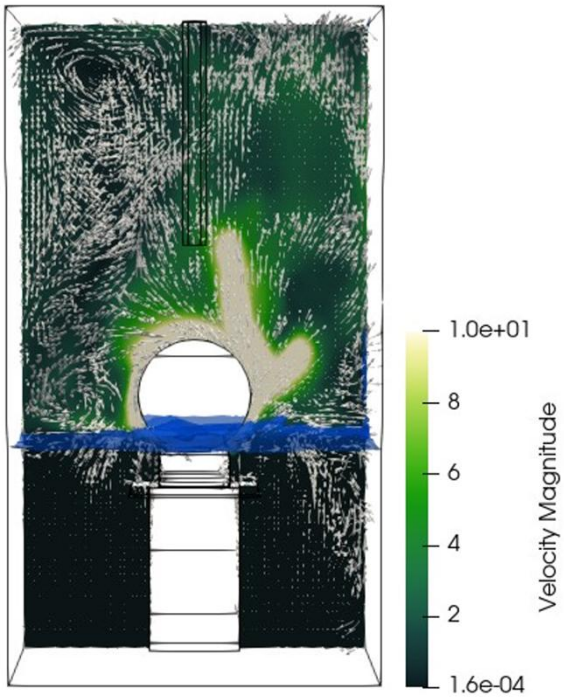



- サンプリング管1,2から5 L/minで排気
- T字管から給気
- ケース中央にディスクカッターと水槽

## ■ 計算結果

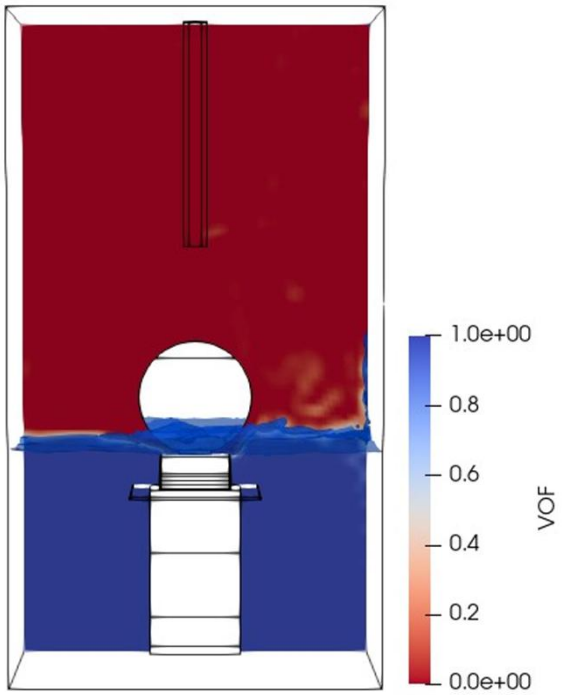
速度場

5000 rpm




VOF値

5000 rpm




## ■ 解析条件

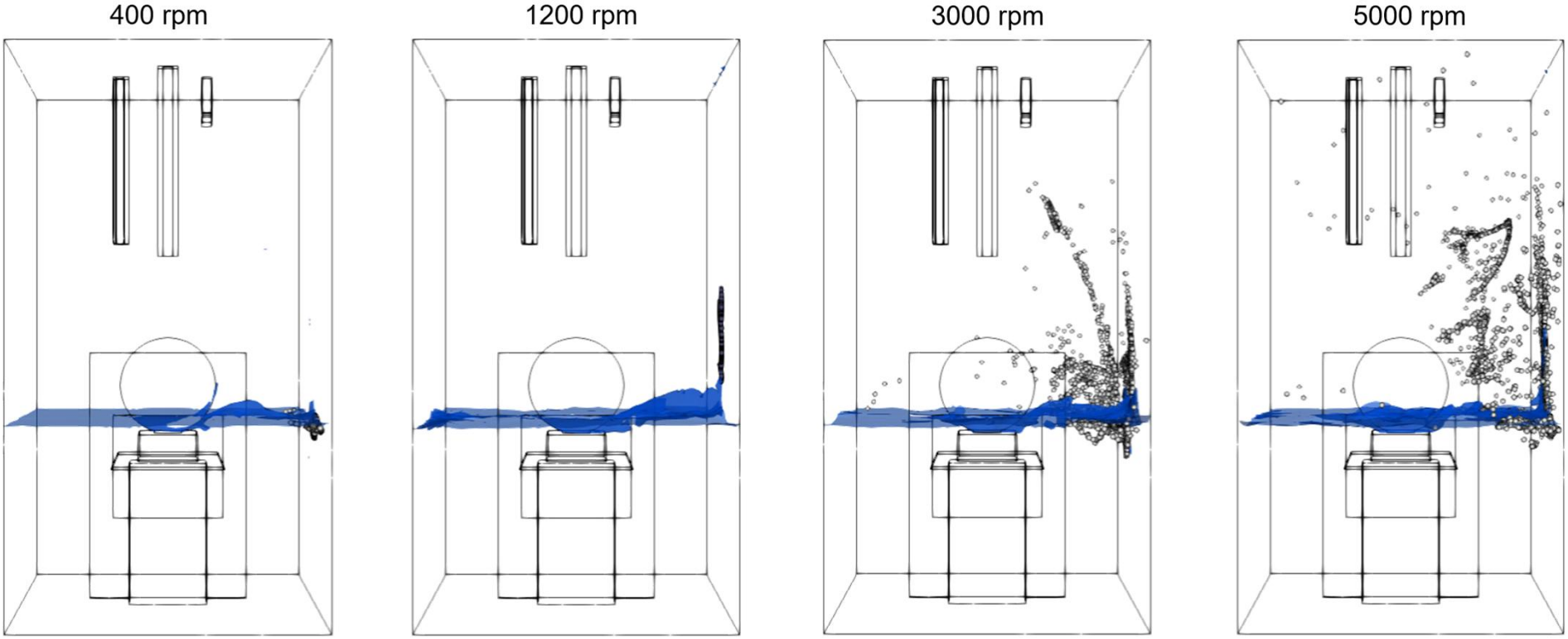
- ディスクカッターの回転数：400, 1200, 3000, 5000rpm
- ダスト生成位置：切削点（供試体表面から5mm上）、または水面
- 水位は供試体表面から30mmに固定
- 2つの排気口におけるダスト回収率を計算

© CRIEPI

## 【5-2】実験体系の解析評価

# ⑥可視化試験（水中から気中への移行）

■ ダスト飛散挙動



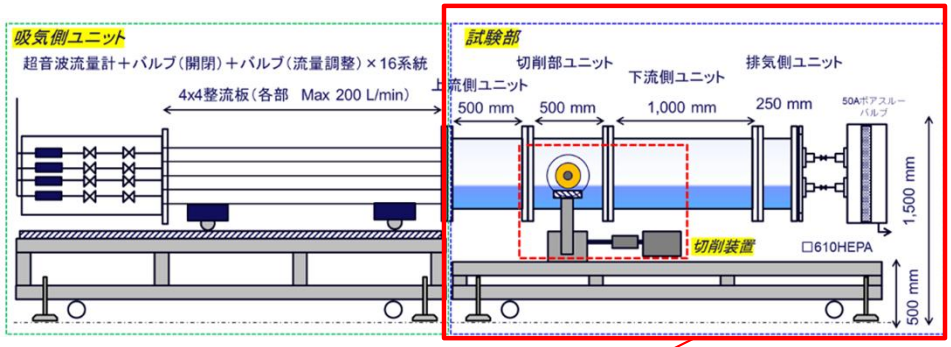

■ ディスクカッターによって舞い上がるものの、ダストは全く回収されなかった。
- 供試体−カッター接点から生成されたダストは壁に当たり、ケース全体に飛散する。
- 飛散したダストはケース内を漂っていたが、サンプリング管に到達するダスト粒子が0個であったため、回収率は切削点ソース・水面ソース共に0%になった。

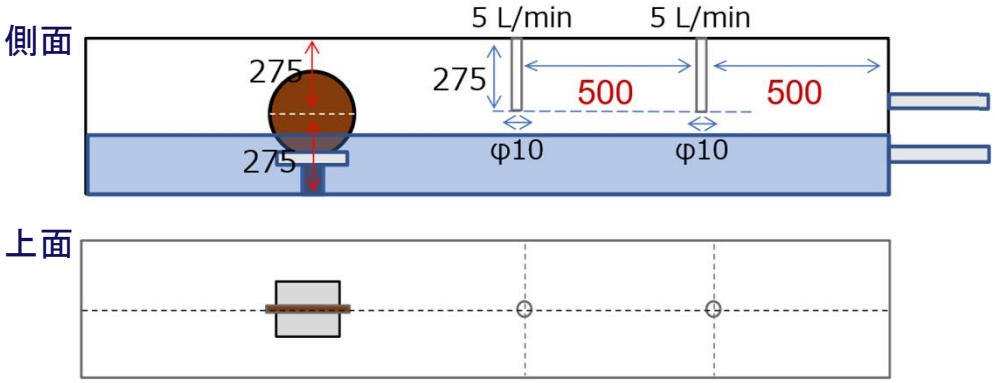
© CRIEPI

## 【5-2】実験体系の解析評価

# ⑦可視化試験（横置き）

## ■ 解析対象



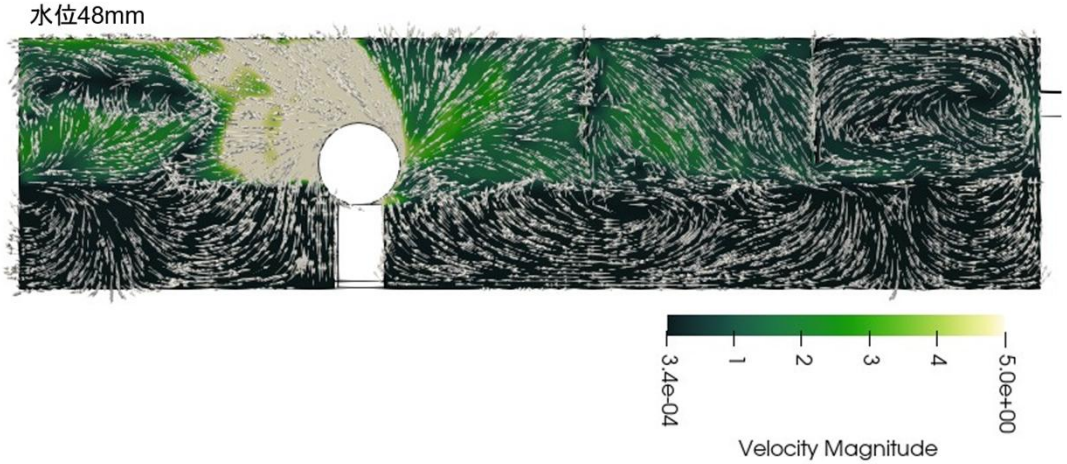




## ■ 解析条件

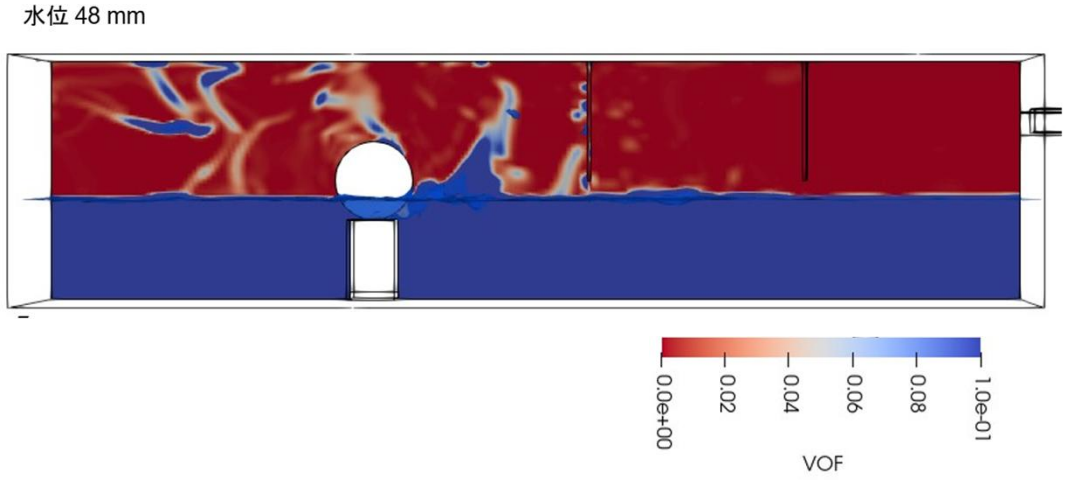
- ディスクカッターの回転数：3000rpm
- ダスト生成位置：切削点、または水面
- 水位は水無（0mm）、7.8mm、15.6mm、48mm
- サンプリング管1，2において回収率を計算

## ■ 計算結果

速度場



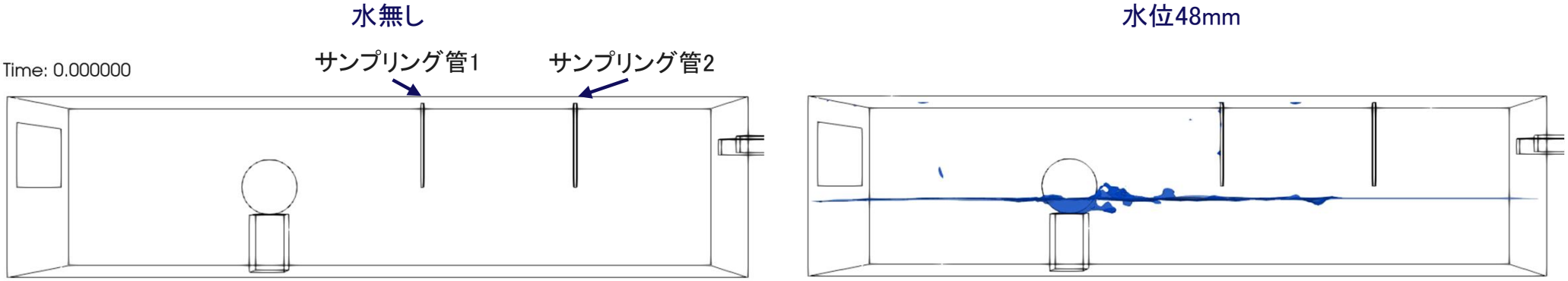

VOF値



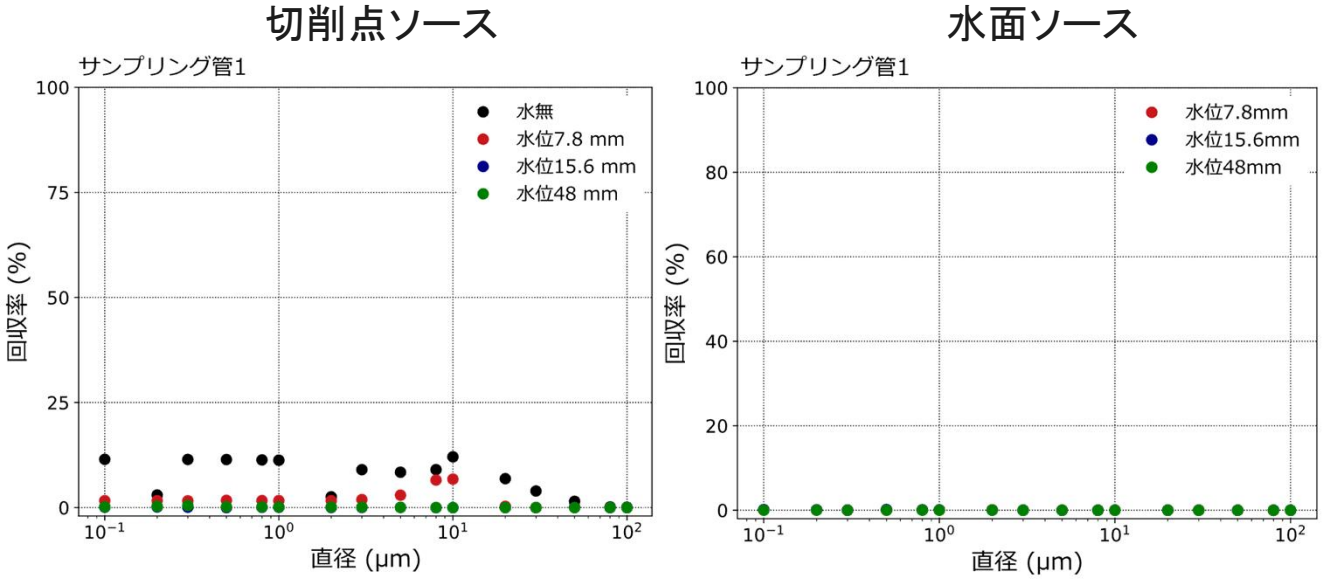
## 【5-2】実験体系の解析評価

# ⑦可視化試験（横置き）

## ■ ダスト飛散挙動




## ■ ダスト粒径と回収率




## ■ 水によって全粒径のダスト回収率が低減された。

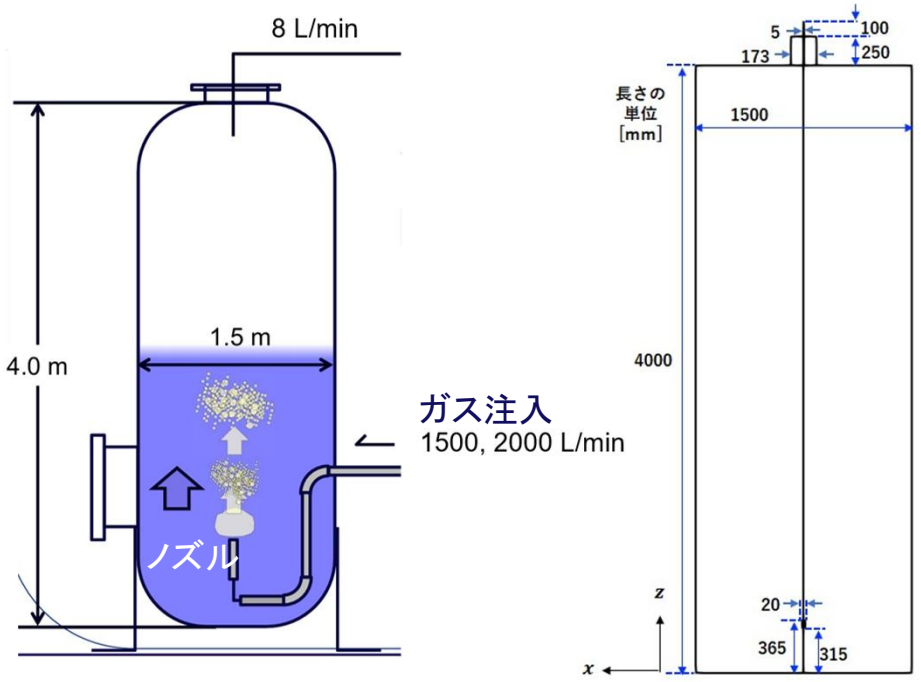
- 水位7.8mmでも顕著にダスト飛散が抑制されていた。
- カッター前方への飛散は抑えられるが、水位が高いと水が舞い上げられることでカッター後方への飛散も起きるようになっていた。
- 回転数のほかに、水位の増加によって飛散する水滴の影響も大きくなる可能性もある。

© CRIEPI

## 【5-2】実験体系の解析評価

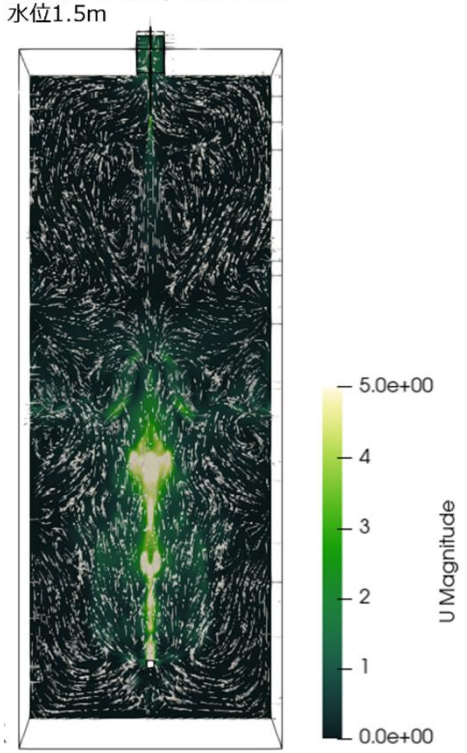
# ⑧レーザー模擬試験

## ■ 解析対象

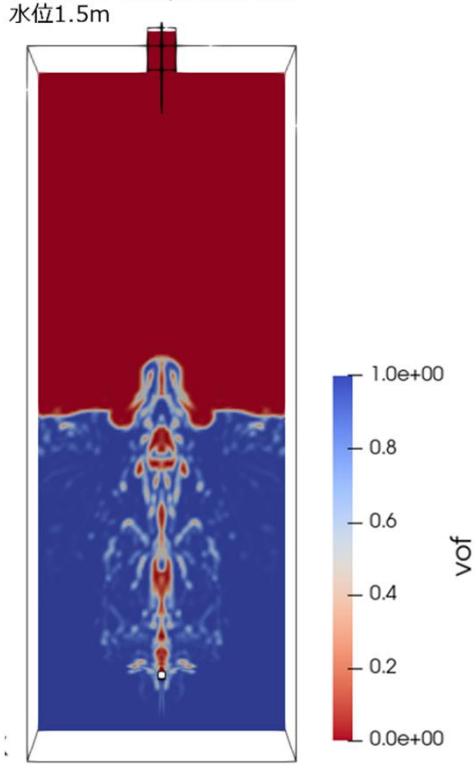



## ■ 計算結果

速度場
ノズル径50mm, 流速17m/s
水位1.5m




VOF値
ノズル径50mm, 流速17m/s
水位1.5m




## ■ 解析条件

- ノズル径・ガス流速・水位を右表のように設定
- ダスト発生位置：ノズル先端、または水面
- ケース上部の排気口におけるダスト回収率を計算

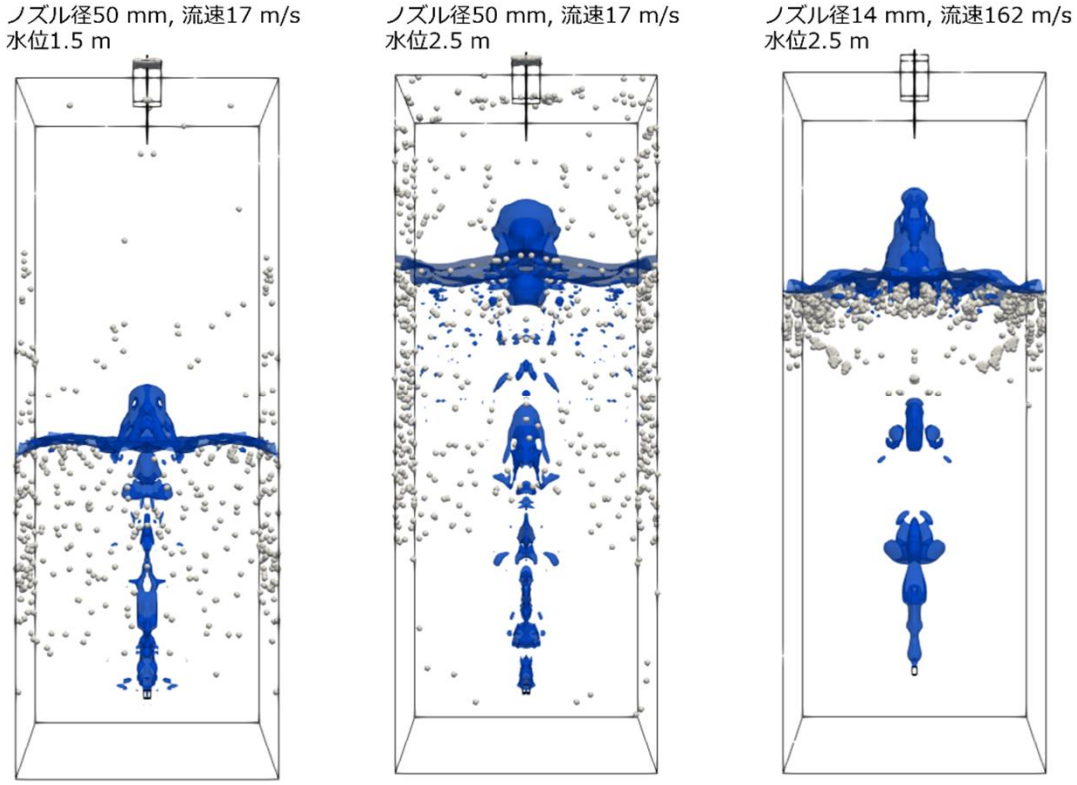
| ノズル径(mm) | ガス流速(m/s) | 水位(m) |
|---|---|---|
| 50 | 16.977 | 1.5 |
| 50 | 16.977 | 2.5 |
| 14 | 162.408 | 2.5 |

© CRIEPI

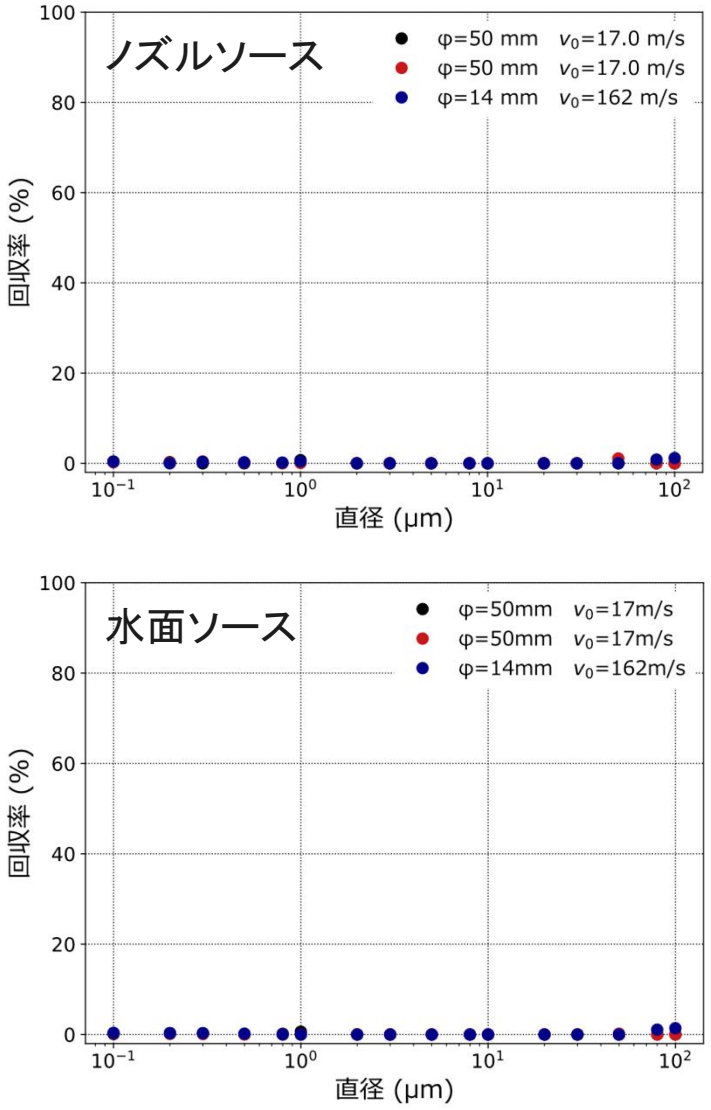
## 【5-2】実験体系の解析評価

# ⑧レーザー模擬試験

■ ダスト飛散挙動




■ ダスト粒径と回収率




■ 水によってダスト回収率はほぼ0%まで低減された。

- 流速や水位によって挙動は変わるが、水面にほとんどのダストが捕捉され、低い回収率（0.05～0.6%）となった。
- 水無条件を15%と仮定したとき、本解析の結果は試験で観測された低減率DF～100をおおむね定量的に再現できたと考えられる。

【5-2】実験体系の解析評価

# まとめ

- 水と空気の2相を扱うVOF法と粒子追跡法を組み合わせることで、湿式切削試験について、ダスト飛散挙動の解析を行った。
- 全試験の再現解析を通じて水がある、または十分な水位があることでダスト飛散が抑制される傾向が再現され、本手法の有用性が確認された。
- 但し、解析による飛散率の予測精度にはまだ課題があることが明らかとなった。解析手法の高度化に向けて、課題（スクラビング効果の考慮、せん断力モデルの高度化など）を明らかにした。
- 今後は、試験条件の最適化、試験データの内外挿、LPF解析に向けて手法開発とモデルの高度化を継続する。

© CRIEPI

# 3. 全体のまとめ

© CRIEPI

# 全体のまとめ

- 【1】燃料デブリ取り出しに必要とされるダスト飛散率の調査・検討では、線量評価（安全評価）で用いるダスト飛散率データを取りまとめた。また、五因子法および時間変化を考慮した簡易モデル法によって平常作業時、事故時の放射能量/被ばく線量を試算すると共に、安全評価の精度向上のための課題を検討した。

- 【2】実環境を模擬するダスト飛散挙動の検討では、ミストと共存するダストの計測手法を構築し、気中湿潤条件によるダスト計測への影響を調べた。また、レーザー切削で発生する粒子の水中での除去効果を調べるためのスクラビング試験を実施し、除去効果の粒径依存性を調べた。

- 【3】ダスト飛散率測定試験（コールド）では、チゼル、ディスクカッター、コアボーリングについて、冠水状態で切削を行った場合には、気中切削に比べてダスト飛散量あるいは飛散率が大幅に低減されることを確認した。一方、レーザーの場合は冠水状態でのダスト飛散率の低減は僅かであった。AWJは砥粒と供試体由来の切削ダストを分別する定量法を構築し、AWJによるダスト飛散率を求めた。

© CRIEPI

# 全体のまとめ

- 【4】ダスト飛散率測定試験（ウラン）では、国内および国外でウランを含有する模擬燃料デブリを作製し、これを乾燥条件でディスクカッター切削した際の飛散挙動データを取得した。飛散ダストの粒径分布範囲はコールド材と類似することを確認すると共に、ダスト飛散挙動への影響因子に関する知見を得た。

- 【5】ダスト飛散挙動の解析では、ダスト移行（LPF）および湿潤条件下の飛散（ARF）解析に向けて必要な手法を整理し、解析環境を構築した。また、湿潤環境飛散試験の理解深化のための再現解析や、開発したモデルの妥当性・適用性確認のための解析を実施した。

- 以上の成果により、本補助事業「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（安全システム（ダスト飛散率データ取得）」では、燃料デブリ取り出し時に想定されるPCV環境に対し、検討されている複数の工法の切削試験を行うことでダスト飛散挙動を把握するためのデータ取得・整備を行い、ダスト飛散の挙動に関する知見を拡充するという所期の目標を達成した。

© CRIEPI

# ダスト飛散率データのまとめ

■ $(U,Zr)O_2$燃料デブリの切削によるダスト飛散データ推奨値の暫定案として、以下が得られた。

| | | ディスクカッター | コアボーリング | チゼル | レーザー（切断） | AWJ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 切削ツール | | メタルボンド<br>ロブテックス<br>BT-180A<br>180mmφ<br>3000rpm<br>刃厚2.2mm | ｲﾝﾌﾟﾘﾈｲﾃｯﾄﾞﾋﾞｯﾄ<br>旭ダイヤモンド工業<br>外径76mm<br>内径60mm<br>刃厚8mm | チゼル（連打）<br>・マキタポイント<br>A-21288<br>径30×410mm<br>・マキタコールド<br>A-21397<br>刃厚36×410mm | ファイバーレーザー：<br>10kW<br>$N_2$パージガス流<br>量：55L/min | ノズル口径：<br>0.4mmφ<br>Abrasive：<br>0.5kg/min<br>水流：<br>350MPa<br>4.35L/min |
| 乾式切削 | カーフ幅$w_{kerf}$(mm) | 2.5 | 8 | 0.1 | 0.43 | – |
| | 切削面積速度S($mm^2$/s) | 25 | 13 | 50-3000 | 20-200 | – |
| | 飛散率(≦10μm)$ARF_{RP}$ | 38% | 11% | 21% | 2.7% | – |
| | 飛散率の標準偏差σ | 12% | 1.6% | 5.5% | 0.18% | – |
| | ダスト粒径（μm） | 1～10 μm | 1～10 μm | 1～10 μm | 10nm～1μm | – |
| 湿式切削 | 湿式低減係数$R_{wet}$ | 1/1000 | 1/1000 | 1/100 | 1/2 | – |
| | カーフ幅$w_{kerf}$ (mm) | 2.5 | 8 | 0.1 | 0.83 | 2 |
| | 切削面積速度S($mm^2$/s) | 25 | 15 | 50-3000 | 100 | 8 |
| | 飛散率(≦10μm)$ARF_{RP}$ | 0.038% | 0.011% | 0.21% | 1.3% | 0.043% |
| | 飛散率の標準偏差σ | 0.012% | 0.002% | 0.05% | 0.09% | 0.004% |
| | ダスト粒径（μm） | 1～10 μm | 1～10 μm | 1～10 μm | 10nm～1μm | 1~10μm |
| 備考 | | 燃料デブリの乾式切削飛散率は$(U,Zr)O_2$とコールド材の重回帰により評価しウラン含有模擬燃料デブリで検証。これを水深10mmのアルミナ切削の湿式低減係数で除して湿式切削の飛散率を導出。 | 燃料デブリの飛散率をコールド材の重回帰式に$(U,Zr)O_2$の物性を代入して推定。これを多孔質アルミナの水深10mm相当の湿式低減係数で除して湿式切削の飛散率を導出。 | 燃料デブリの飛散率が導出できていないため、最も飛散量が大きいジルコンの値で代替。湿式低減係数は水深10 mmでの値。カーフ幅は実測が困難なため設定値。 | 燃料デブリの飛散率は導出できていないため、試験で最も飛散量が大きくなったジルコンの値を提示。湿式切削は水深10cm。今後、ウランと揮発性FP核種を含む試料での試験による定量が必要。 | アルミナを用いた基礎切削試験に基づく予備的な評価値。 |

電力中央研究所

© CRIEPI