

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）
2022年度最終報告

一般財団法人電力中央研究所

2025年5月修正版

目 次

1. 事業の全体計画	3
2. 各実施項目の成果	11
【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	12
【2】ダスト飛散率測定試験	24
【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験	32
【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験	82
【3】ダスト飛散挙動評価試験	102
【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験	103
【3-2】ウラン模擬デブリによる飛散挙動評価試験	119
【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験	127
【4】ダスト飛散挙動の解析	141
【4-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討	143
【4-2】実験体系の解析評価	149
3. 全体のまとめ	157

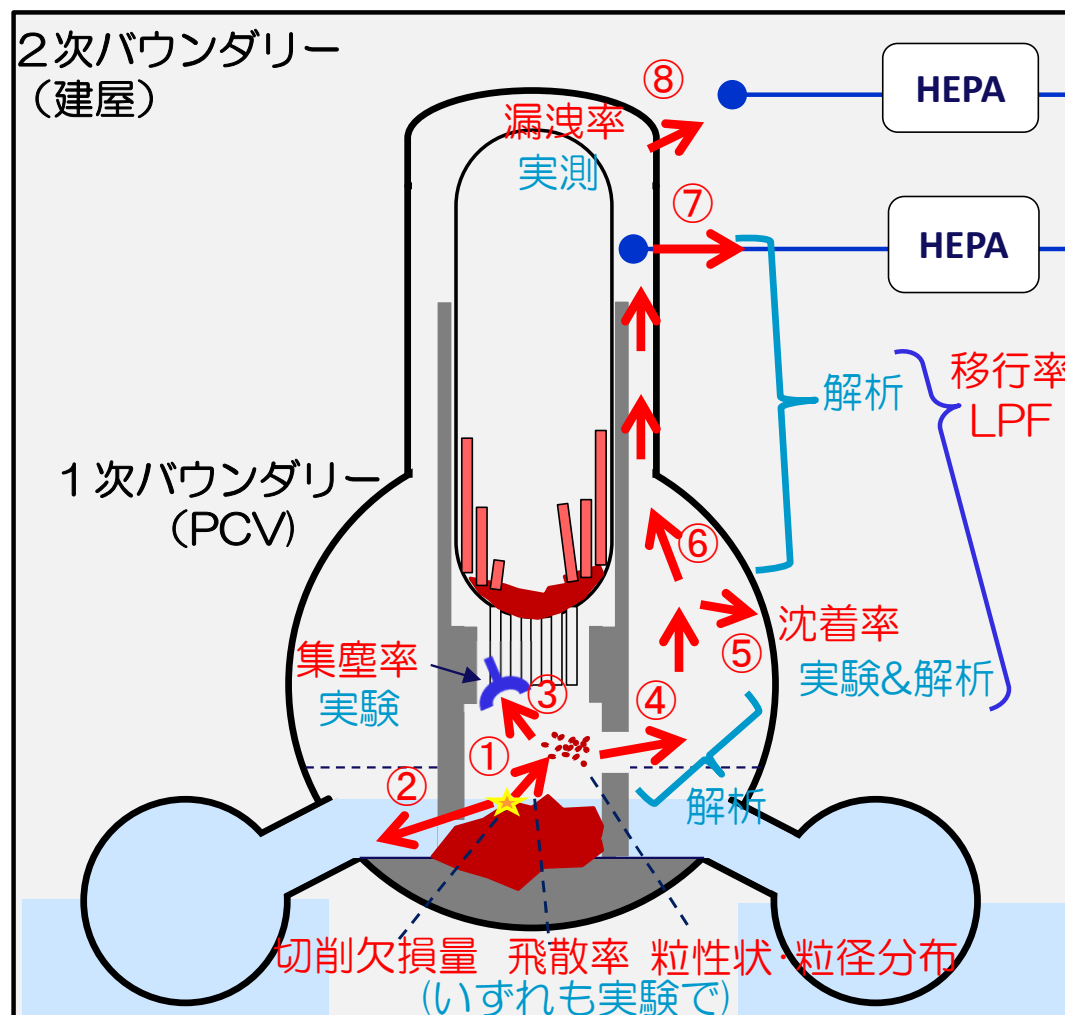
1. 事業の全体計画

本事業の目的

- 安全評価の技術根拠として乾式切削条件の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：

$$\text{SourceTerm}^{\ast} = \text{MAR}(\text{放射能}) \times \text{DR}(\text{影響率}) \times \text{ARF}(\text{飛散率}) \times \text{RF}(\text{吸引率}) \times \text{LPF}(\text{移行率})$$



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）

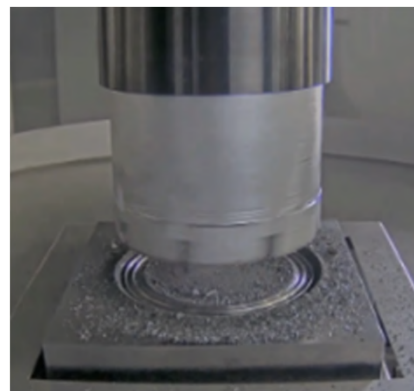
- ① 切削ダストの気相部への移行（本フェーズ～）
- ② 切削ダストの液相部への移行（次フェーズ～）
- ③ 局所集塵システムでの回収（他事業）
- ④ パデスタルからPCVへ移行（次々フェーズ～）
- ⑤ PCV/排気系内の沈降・沈着（次々フェーズ～）
- ⑥ PCV内を移行（次々フェーズ～）
- ⑦ PCV排気系への移行
- ⑧ PCVから建屋への漏洩

本事業で対象とする切削工法

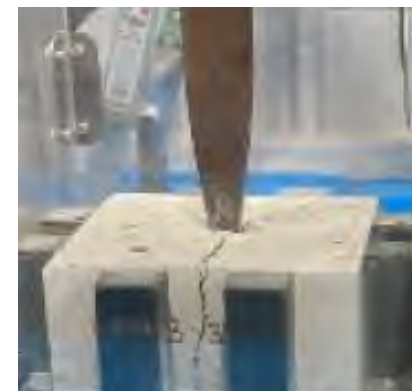
- 燃料デブリの切削工法としてIRIDは下記5工法を想定 ※。
- 実機仕様が未確定なため、回転数等の運転条件だけでなく、切削刃の種類や寸法等も含めた幅広いパラメータスタディが必要。
- 実運用は湿式(冠水／注水)条件だが、本事業では、ダスト飛散挙動把握の基礎および保守側条件として、乾式切削の①～④を対象とする。



①ディスクカッター



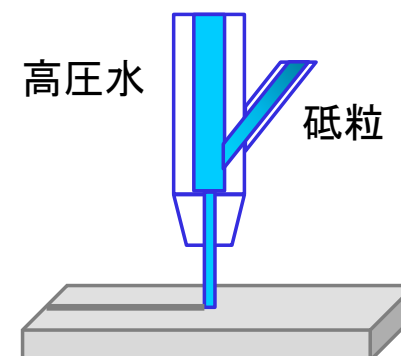
②コアボーリング



③チゼル



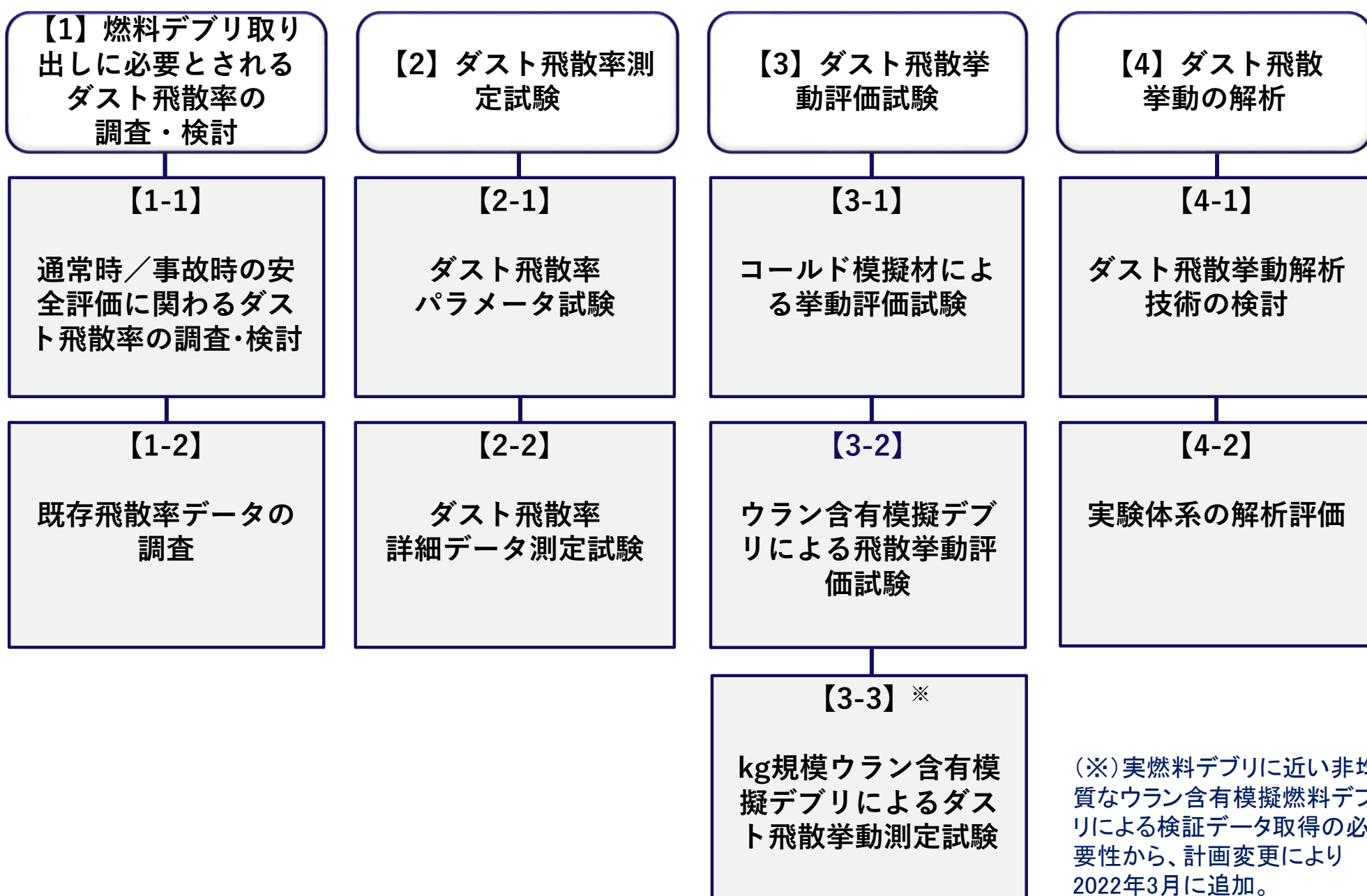
④レーザー



⑤アブレイシブ・ウォータージェット

本事業の対象

本事業の実施項目



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】ダスト飛散率測定試験
- 【3】ダスト飛散挙動評価試験
- 【4】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（日立GE）

- ・通常時／事故時の安全評価に関わるダスト飛散率の調査・検討
- ・デブリ切削ダスト飛散率データ整備（チゼル）

三菱重工業株式会社（三菱重工）

- ・デブリ切削ダスト飛散率データ整備（ディスクカッター）

株式会社IHI（IHI）

- ・デブリ切削ダスト飛散率データ整備（コアボーリング、レーザー）

東芝エネルギーシステムズ株式会社（東芝ESS）／日本核燃料開発株式会社（NFD）

- ・デブリ切削ダスト飛散率データ整備（ウラン試験）

ONET／Commissariat à l' énergie atomique et aux énergies alternatives（CEA）／L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire（IRSN）

- ・kg規模ウラン含有模擬燃料デブリのダスト飛散率挙動測定試験

アドバンスソフト株式会社（アドバンスソフト）

- ・微粒子飛散挙動解析計算

株式会社電力テクノシステムズ（電力テクノ）

- ・ダスト飛散率測定試験業務（電力中央研究所 横須賀地区）
- ・燃料デブリ切削挙動測定試験業務（電力中央研究所 狛江地区）

他事業との関連

- 廃炉・汚染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。

【技術研究組国際廃炉研究開発機構 (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】

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

本PJへのインプット情報

- 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

本PJの成果目標

主要加工工法(チゼル、ディスクカッター、コアボーリング、レーザー)のダスト飛散率(乾式切削条件)

①②
③④

③④

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。

内容	関係外注先	2021												2022												2023			進捗率	備考 (経過状況等)		
		6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3									
【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】通常時/事故時の安全評価に関わるダスト飛散率の調査・検討		日立GE																														
・契約																															100%	契約済み
・調査、検討																															100%	完了
・成果の取りまとめ、報告書作成																															100%	完了
【1-2】既存飛散率データの調査																																
・調査、検討																															100%	完了
・成果の取りまとめ、報告書作成																															100%	完了
【2】ダスト飛散率測定試験																																
【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験																																
・供試体の作製																																
・金属供試体作製		三幸																													100%	納品済み
・コンクリート/モルタル供試体作製		セレス																													100%	納品済み
・セラミックス 供試体作製		三幸、西村陶業																													100%	納品済み
・ディスクカッター試験		三菱重工																														
・契約																															100%	契約済み
・試験装置の設計、製作																															100%	試験システム構築済み
・試験の実施																															100%	完了
・成果の取りまとめ、報告書作成																															100%	完了
・チゼル試験		日立GE																														
・契約																															100%	契約済み
・試験装置の設計、製作																															100%	試験システム構築済み
・試験の実施																															100%	完了
・成果の取りまとめ、報告書作成																															100%	完了
・レーザー、コアボーリング試験		IHI																														
・契約																															100%	契約済み
・試験装置の設計、製作																															100%	試験システム構築済み
・試験の実施																															100%	完了
・成果の取りまとめ、報告書作成																															100%	完了
【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験																																
・ダスト飛散率詳細データ測定装置																																
・装置の設計																															100%	試験装置設計完了
・契約																															100%	契約済み
・装置の製作																															100%	試験装置設置済み
・機能試験および調整																															100%	調整・動作試験完了
・ディスクカッター試験		三菱重工																														
・切削工具の設置と試験準備																															100%	制御システムの調整済み
・試験の実施																															100%	試験実施済み
・成果の取りまとめ、報告書作成																															100%	完了
・チゼル試験		日立GE																														
・切削工具の設置と試験準備																															100%	試験装置設置済み
・試験の実施																															100%	試験実施済み
・成果の取りまとめ、報告書作成																															100%	完了
・レーザー、コアボーリング試験		IHI																														
・コアボーリング工具の設置と試験準備																															100%	試験装置設置済み
・コアボーリング試験の実施																															100%	試験実施済み
・レーザー切断機器の調達		伯東																													100%	納品済み
・レーザー切断機器の据付																															100%	試験装置据付済み
・レーザー切断試験の準備																															100%	切削試験準備完了
・レーザー切断試験の実施																															100%	完了
・成果の取りまとめ、報告書作成																															100%	完了

2. 各実施項目の成果

【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】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

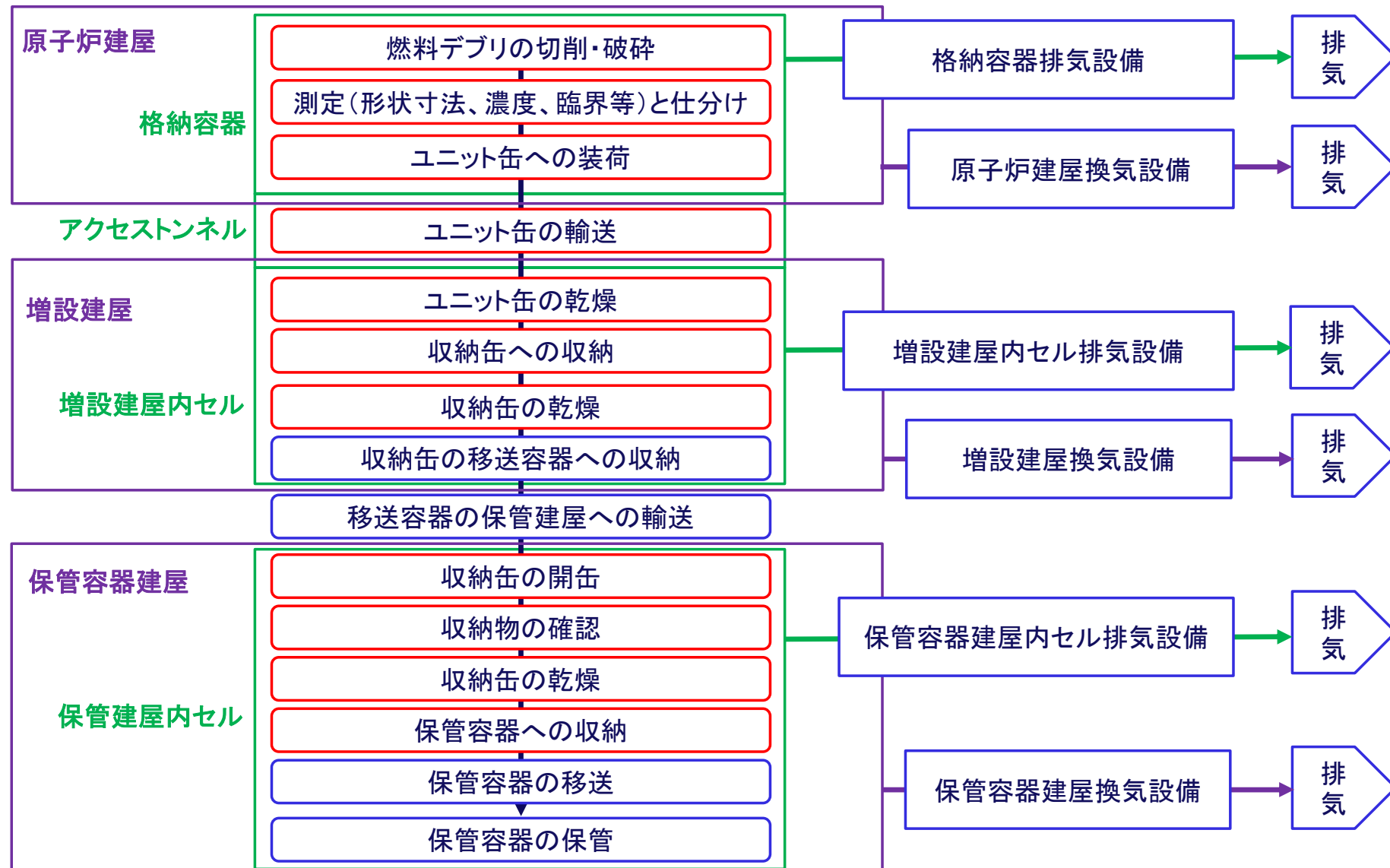
福島第一原子力発電所において燃料デブリ取り出しを実施するために、どのようなダスト飛散率データを測定・評価することが必要で、そのダスト飛散率データは安全評価や設計にどう活用するかを、廃炉ハンドブック※やこれまでの廃炉・汚染水対策事業の設計検討などを参考に机上検討する。

実施内容

1. 燃料デブリ取り出し作業における安全評価の考え方の検討
 - 平常時、事故時、対象とする核種
2. 燃料デブリ取り出し作業における放射性物質放出量の評価
 - 平常時、事故時
3. 既存飛散率データの調査
4. 課題の摘出
 - 線量評価パラメータの分類・整理、被ばく線量の検討

【1-1】燃料デブリ取り出し作業における安全評価の考え方の検討 (平常時)

- IRIDによる燃料デブリ取り出し作業フローに基づき、ダスト放出可能性のある燃料デブリ取り出し作業(赤枠)とダスト放出経路を検討



【1-1】燃料デブリ取り出し作業における安全評価の考え方の検討 (事故時)

- 1F燃料デブリ取り出しに関して想定すべき事象は確定していないため、本事業では日本原子力学会廃炉等検討委員会の廃炉リスク評価分科会の報告書等を参考に以下の事象を事例として検討した。

落下、転倒、衝突

冷却喪失

水素燃焼

フィルタ落下（フィルタへの衝撃含む）

火災（可燃物引火など）

フィルタ火災

Zr火災

閉じ込め喪失（負圧喪失など動的要因）

漏洩（液体など）

臨界

- 格納容器内、払い出しセル内、フィルタトレイン内などで発生しうるダスト放出可能性のある想定事象の案。
- 全体で42ケースの想定シナリオを整理し、発生場所、放出経路の類似性によるパターン分類を検討。

【1-1】燃料デブリ取り出し作業における安全評価の考え方の検討 (対象とする核種)

- 炉内構造物の放射化核種の選定については、廃炉ハンドブックにおける評価を参照。
- 燃料起因の放射性核種については、報告されている1Fの1号機燃料の燃焼計算結果※をもとに、1F被ばく評価において被ばくへの寄与が大きくなる核種を抽出(黄色)。

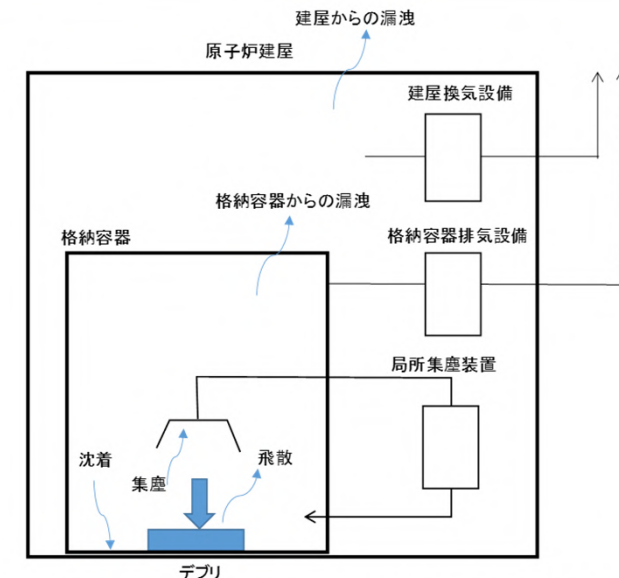
	核種	放射能量 (GBq/core)	ガンマ線実効エネルギー		呼吸摂取		経口摂取	
			線源強度 (MeVGBq)	寄与割合 (%)	相対線量 (KSv)	寄与割合 (%)	相対線量 (KSv)	寄与割合 (%)
1	H-3	5.41E+05	0.00E+00	0.0%	1.46E+01	0.0%	2.27E+01	0.0%
2	Be-10		0.00E+00	0.0%	0.00E+00	0.0%	0.00E+00	0.0%
3	C-14	2.02E+02	0.00E+00	0.0%	1.25E-03	0.0%	1.17E-01	0.0%
4	C-12		0.00E+00	0.0%	0.00E+00	0.0%	0.00E+00	0.0%
45	Np-237	3.47E+02	1.39E+02	0.0%	2.74E+04	0.0%	6.02E+01	0.0%
46	Pu-239	4.72E+05	8.68E+03	0.0%	5.19E+08	33.0%	1.09E+06	14.3%
47	Pu-239	7.08E+05	6.44E+02	0.0%	5.50E+07	5.7%	1.77E+03	2.4%
48	Pu-240	8.88E+05	1.54E+03	0.0%	1.07E+08	7.2%	2.22E+03	3.1%
49	Pu-241	1.38E+08	1.95E+07	29.0%	3.17E+08	71.4%	6.62E+03	9.1%
50	Pu-242	2.86E+03	4.10E+00	0.0%	3.14E+05	0.0%	5.84E+02	0.8%
51	Am-241	3.37E+05	1.10E+05	0.2%	3.24E+06	71.3%	6.74E+03	9.2%
52	Am-242m	2.22E+04	5.67E+02	0.0%	2.04E+06	0.1%	4.22E+03	0.1%
53	Am-243	7.52E+04	5.02E+03	0.0%	2.42E+06	0.2%	5.04E+03	0.1%
54	Cm-242	1.83E+04	3.35E+01	0.0%	1.09E+05	0.0%	2.30E+02	0.3%
55	Cm-244	1.85E+05	2.90E+03	0.0%	1.05E+08	7.1%	2.22E+03	3.1%

【1-2】燃料デブリ取り出し作業における放射性物質放出量の評価 (平常時・事故時)

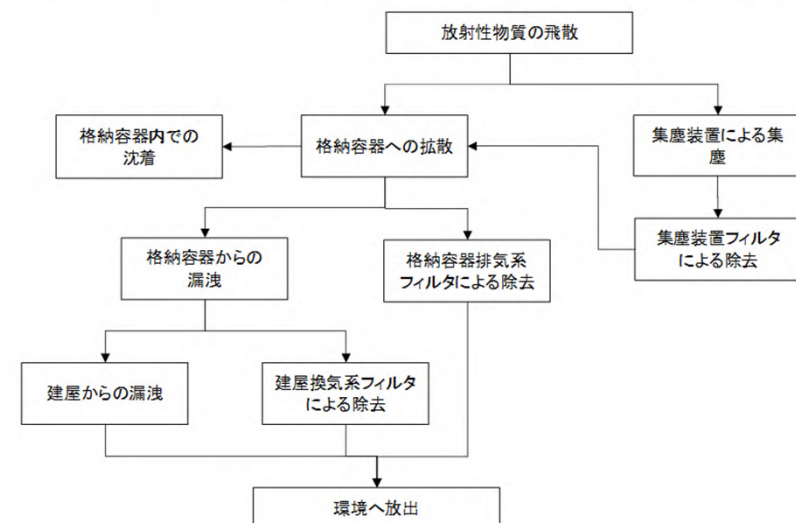
- 作業毎(平常時)、事象分類毎(事故時・特定のパターンについて)に放射性物質移行フロー、移行評価式を**五因子法に基づき**具体化。
- 吸入摂取による寄与が大きいと見込まれる**Pu-238**を対象。
- 燃料デブリ切削作業時のフローと評価式(例)

$$STi^* = MARI \cdot DR \cdot ARFi \cdot RF \cdot [r1 / DF1 + (1-r1)] \cdot (1-r2) \cdot [(1-r3) / DF2 + r3 \cdot \{(1-r4) / DF3 + r4\}]$$

STi : 放射性物質iの環境への放出量(Bq)
 MARI: 対象燃料デブリの放射性物質iのインベントリ(Bq)
 DR : 切削により影響を及ぼす対象物の範囲(-)
 ARFi: 切削による放射性物質iの粒子の飛散率(-)
 RF : 放射性物質の放出に寄与する粒径範囲の粒子の割合(-)
 DF1 : 局所集塵装置フィルタによるDF(-)
 DF2 : 格納容器排気設備フィルタのDF(-)
 DF3 : 建屋換気設備フィルタのDF(-)
 r1 : 局所集塵装置による回収効率(-)
 r2 : 格納容器内の沈着割合
 r3 : 格納容器からの漏洩割合(-)
 r4 : 建屋からの漏洩割合(-)



燃料デブリ切削時の放射性物質移行経路模式図



燃料デブリ切削時の放射性物質放出フロー

【1-2】燃料デブリ取り出し作業における放射性物質放出量の評価

放射性物質放出量の試算例(燃料デブリ切削作業時)

- パラメータの説明、概数、参考文献、並びに放射性物質の放出量を整理・試算(暫定値として評価)
- 飛散率は廃炉ハンドブック※に掲載の、水を被らない乾式でのディスクカッター切削の値を用いた、保守的な評価となっており、今後の見直しが必要。
- 評価値が設定できないものは放出量を評価せず。

放射性物質の存在量: MAR_i		4.72E+14 (Bq/core)	燃焼計算による1F-1燃料の10年減衰Pu-238放射能。
事故の影響を受ける割合: DR		4.94E-6 (1/h)	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」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: $ARFi$		0.025(-)	廃炉ハンドブック(放射化金属のディスクカッターによる乾式切削での飛散率0.02%～2.5%)より設定。
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	r1	0	局所吸塵装置を設置しないと想定。
	r2	0	保守的に沈着を期待しない。

放出量STi評価値		5.83E+3 (Bq/h)	

【1-2】燃料デブリ取り出し作業における放射性物質放出量の評価

- 通常作業時および事故時の放射性物質放出量を以下の事例について試算した。
- 通常作業時の放出量については、燃料デブリ切断・切削時の放出量が他の作業と比べて大きくなった。（このことから、燃料デブリ切断時の防護設備を十分に施すことと、飛散率試験においては燃料デブリ切断・切削に着目した数値の精緻化が合理的と考えられた。）
- 事故時の放出量については、フィルタや格納容器(PCV)換気系の破損を伴う事象の影響が大きい傾向が見られた。

No.	平常時(通常作業時)
1	燃料デブリ切削
2	燃料デブリと廃棄物の測定・仕分け
3	ユニット缶への燃料デブリの装荷
4	ユニット缶の運搬
5	ユニット缶の燃料デブリの乾燥
6	収納缶の燃料デブリの乾燥
7	保管容器の収納(ベント)

No.	事故時
1	燃料デブリを入れたユニット缶の落下
2	燃料デブリから発生した水素の燃焼
3	汚染した可燃性雑固体の発火
4	Zry燃料被覆管の破碎片の発火
5	排気ダクト配管の破損による排気ガスの漏洩
7	フィルタ交換時の床へのフィルタの落下
8	換気系フィルタ付着物の燃焼
9	格納容器換気系の停止による格納容器から漏洩

【1-3】既存飛散率データの調査

■ DOEハンドブック

- アクチニド酸化物粉末の再飛散挙動
- UO_2 ペレットへの衝撃による飛散
- ...

■ 廃炉ハンドブック ※

- 気中切断

■ 燃料デブリに含まれる放射性物質の量

- 1～3号機炉心の燃焼計算
- 汚染水への移行による核種の分配

- ※ ・ 事故を経ない一般炉の廃炉を対象とするため、使用済燃料をソースタームとする評価モデルや評価パラメータは扱っていないことを注記。
- ・ 使用済燃料は対象としないものの、燃料デブリ取り出しに参考になる情報として、金属、コンクリートの解体工法の評価モデル及びパラメータが提示。
 - ・ 安全防護設備についても試験と調査でモデル化が行われており、参考となると考えられる。

【1-4】課題の抽出

放射性物質放出量試算に基づくパラメータ調査・検討を踏まえ、線量評価のためにどのような定量化が必要かを分類・整理し、課題を抽出。

■ 事故時(事例)の評価における課題:

事象	燃料デブリを入れたユニット缶の落下	燃料デブリから発生した水素の燃焼	汚染した可燃性雑物の発火	Zry燃料被覆管の破砕片の発火	排気ダクトの破損による排気ガスの漏えい	注水等の除熱機能の停止による燃料デブリの温度上昇	フィルタ交換時の床へのフィルタの落下	換気系フィルタ付着物の燃焼	格納容器換気系の停止による格納容器からの漏えい	燃料デブリ取出し作業時の燃料デブリの臨界
想定シナリオ	落下するユニット缶の本数	水素濃度制御能力	火災検知能力	火災検知能力	配管からの漏えい割合(破断口径)	適温検知能力	落下するフィルタの数	火災検知能力	換気設備異常検知能力	臨界検知能力
	落下時の衝撃(落下高さ、緩衝材)	汚染物への放射温度	火災消化能力	火災消化能力	配管破断検知能力	配管破断検知能力	落下時の衝撃(落下高さ、緩衝材)	火災消化能力		臨界停止能力
		圧力波の発生	燃焼温度	燃焼温度	建屋換気設備の作動状況	燃料デブリの過熱温度		燃焼温度		
		排気系気体温度	汚染物への放射温度	汚染物への放射温度		事故時の排気ファンの作動		換気系フィルタの健全性/破損程度		
		換気系フィルタの健全性/破損程度	事故条件下での建屋換気設備の作動	排気系気体温度				事故時の排気ファンの作動		
MAR ※	—	エリア内の汚染物質 排気フィルタへの付着	可燃物中の汚染付着量 エリア内の汚染物質	ジルカロイ粉末に含まれる汚染物質 エリア内の汚染物質 排気フィルタへの付着量	—	—	フィルタの粉じん付着量	フィルタの粉じん付着量	格納容器内の浮遊粉じん量	臨界による発生核分裂数
DR ※	—	エリア内の汚染物のうち事故の影響を受ける割合 排気フィルタ付着量のうち事故の影響を受ける割合	可燃物が燃焼する割合 エリア内の汚染物のうち事故の影響を受ける割合	ジルカロイが燃焼する割合 エリア内の汚染物のうち事故の影響を受ける割合	漏えい停止(系統隔離)までの時間	過熱する燃料デブリの割合	—	排気フィルタ付着量のうち事故の影響を受ける割合	漏えい停止(系統隔離)までの時間	—
ARF ※	落下時の衝撃による飛散率	エリア内の汚染物の過温、圧力流による飛散率 エリア内付着物のうち過温で再浮遊する飛散率 フィルタの過圧破損に伴う飛散率	可燃物の燃焼による飛散率 エリア内の汚染物の過温、圧力流による飛散率	ジルカロイの燃焼による飛散率 エリア内の汚染物の過温、圧力流による飛散率 フィルタの過熱損傷に伴う飛散率	—	加熱燃料デブリからの飛散率	フィルタ落下時の飛散率	フィルタの加熱損傷に伴う飛散率	気体の漏えい流量	格納容器からの漏えい率

- 燃料デブリ取り出し計画および設備設計により決定される仕様にもとづくパラメータ
- 想定される事故での状況、環境条件として調査、評価、試験等にもとづき設定すべき物理パラメータ
- 想定される環境条件での設備の機能を確認する必要があるパラメータ
- 被ばく評価パラメータとして調査、評価、試験等にもとづき設定すべき物理パラメータ

【1-4】課題の抽出(被ばく線量の検討)

- **ダスト飛散に関わる線量評価パラメータの分析(線量評価との連携・高度化)**
 - 未確定な情報のうち線量評価に影響が大きいパラメータの精緻化を絞り込む。
 - 実際の切削工法や環境条件に基づく試験条件、試験仕様、飛散率データ充足へのフィードバック。
 - 線量評価(内部被ばく)における粒径の扱いも検討が必要。
- **ソースタームの詳細評価(外部被ばく)**
 - 気相移行ダストのふるまい(飛散、沈着、滞留)の評価。
 - 計画、設備設計の具体化(実機とのギャップ低減)として、局所吸塵の有無がソースタームに影響。

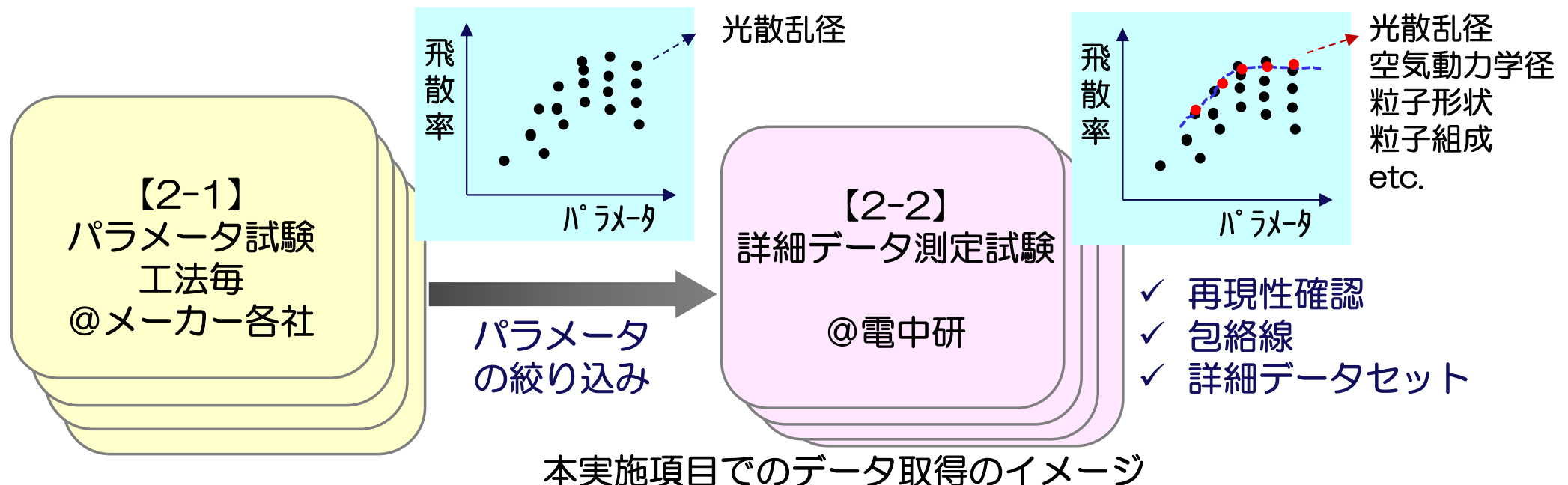
【1】燃料デブリ取り出しに必要とされるダスト飛散率の調査・検討 まとめ

- 作業毎(平常時)、事象分類毎(事故時・特定のパターンについて)に放射性物質移行フロー、移行評価式を五因子法に基づいて具体化し、吸入摂取による寄与が大きいと見込まれるPu-238を対象に放出量を試算した。
- 放射性物質放出量試算に基づくパラメータ調査・検討を踏まえ、線量評価のためにどのパラメータの定量化が必要かを分類整理した。
- 今後は、ダスト飛散に関わる線量評価パラメータをさらに分析し、線量評価に影響が大きいパラメータの絞り込み及び精緻化、実機で想定される切削工法や環境条件(湿潤環境)に基づく試験条件、試験仕様の適用と、飛散率データの適用性検討、本事業で導出するダスト飛散率データを用いた放出量の再評価、データ充足へのフィードバックが課題と考えられる。

【2】ダスト飛散率測定試験

【2】ダスト飛散率測定試験 目的と実施内容

- コールド材を4つの工法（ディスクカッター、チゼル、コアボーリング、レーザー）切削し、同じ気流条件で統一的な飛散率データを取得して、パラメータ依存性を取得する。
- 繰り返しも含めると、膨大な試験数が必要となるため、【2-1】パラメータ試験として各委託先で工法を分担して試験を実施する。さらに、その結果を基に代表性の高いパラメータを選定し、電中研で【2-2】詳細データ測定試験を行い、再現性を確認するとともに、飛散ダストの空気動力学粒径や非飛散ダストの定量、性状把握等を行い、飛散率データを拡充する。

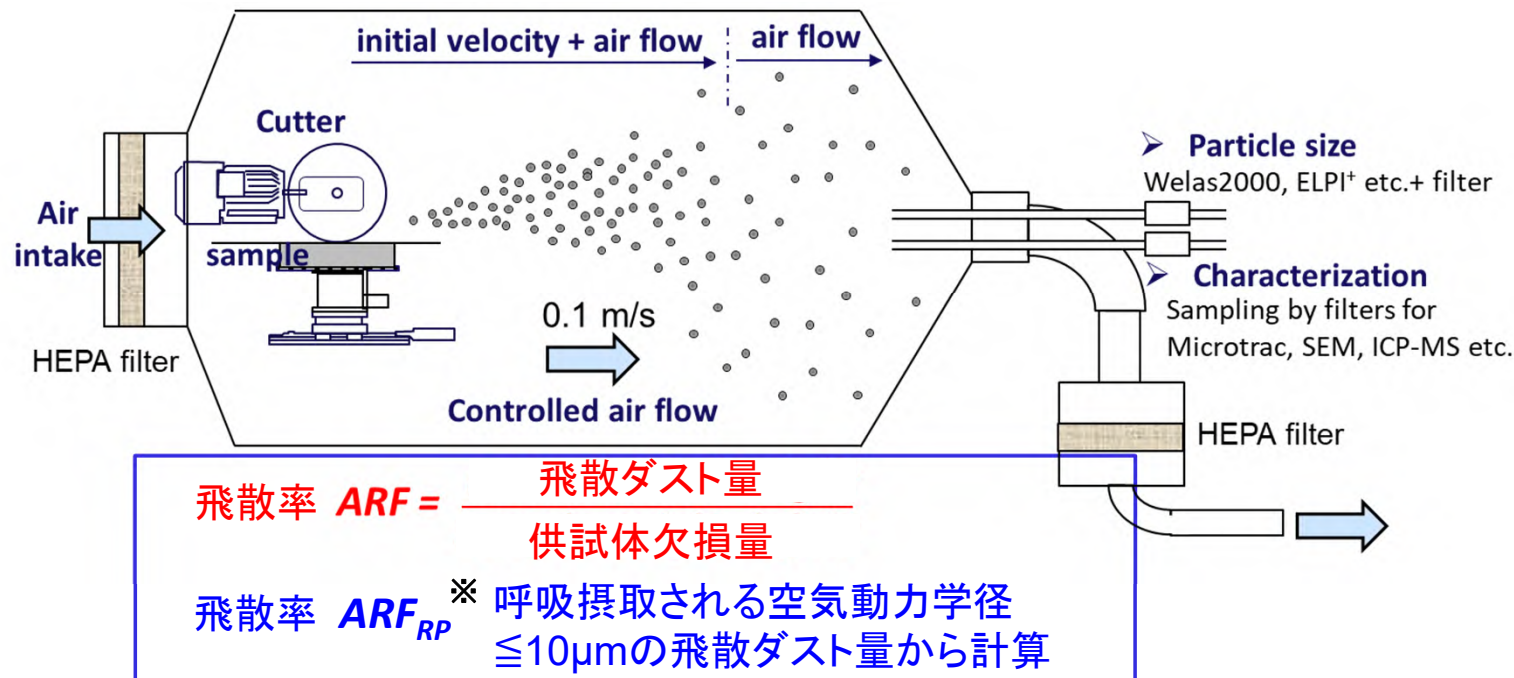


【2】ダスト飛散率測定試験 ダスト飛散率の測定方法

■ 本事業では、統一的な手法で、ユニバーサルな**飛散率**(ARFと ARF_{RP} ※)の取得を目指す。

【3-1】項で確立した切削ダスト飛散率測定手法に基づき、共通設計の試験設備を整備。

- 燃料デブリ取り出し時のPCV中の最大風速として保守的に**0.1m/s**を設定。
- 生成するダスト性状に適用可能な粒子計測技術を検討。
- 試験装置(ケーシング、インライン／アウトラインの計測器)を設計し、試作の上、共通設計を決定→電中研、国内メーカー、仏CEAで試験を実施。

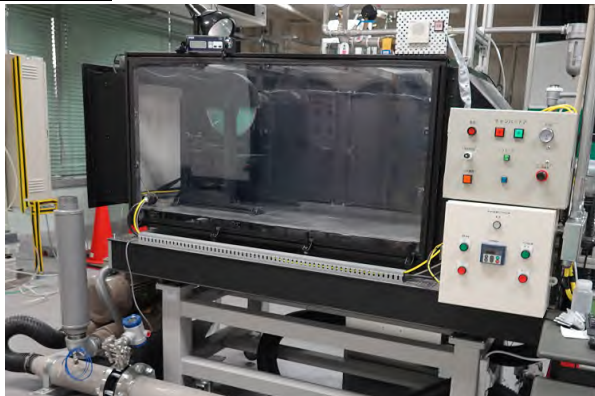


ダスト飛散率測定試験設備の共通設計(ディスクカッターの例)

【2】ダスト飛散率測定試験 ダスト飛散率測定装置の整備

- ダスト飛散率測定装置(1号機、2号機)を試作・試験して共通設計を決定し※、
【2-1】パラメータ試験と【2-2】詳細データ試験用の設備をそれぞれ整備した。

1号機 (基礎検討用)



2号機 (パラメータ試験設計用)

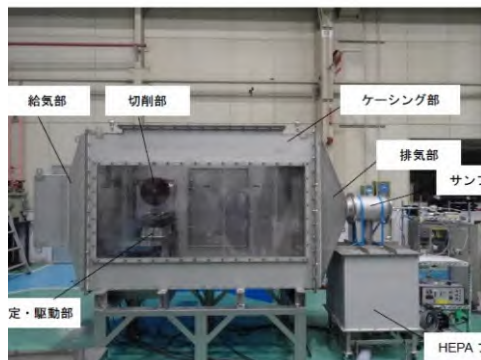


3号機 (詳細データ取得試験用)



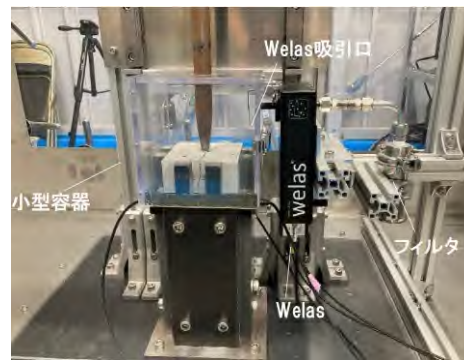
工法毎のパラメータ試験に展開

ディスクカッター



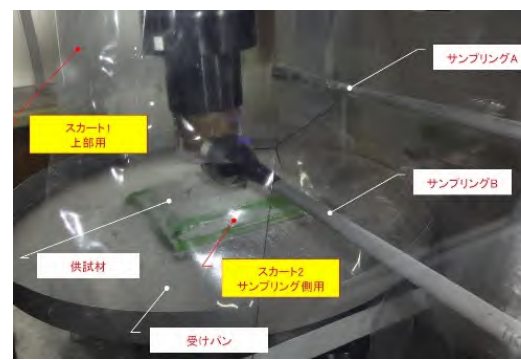
@MHI

チゼル※※



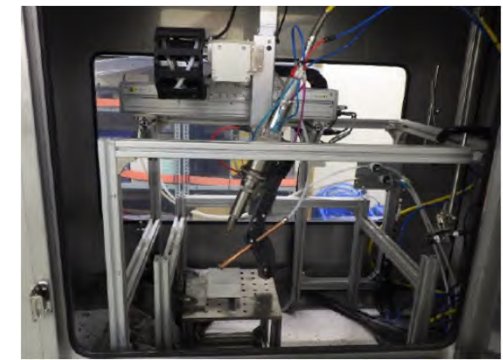
@日立GE

コアボーリング※※



@IHI

レーザー



@IHI

【2】ダスト飛散率測定試験 コールド供試体の選定(機械的切削工法)

- ディスクカッター
- コアボーリング
- チゼル

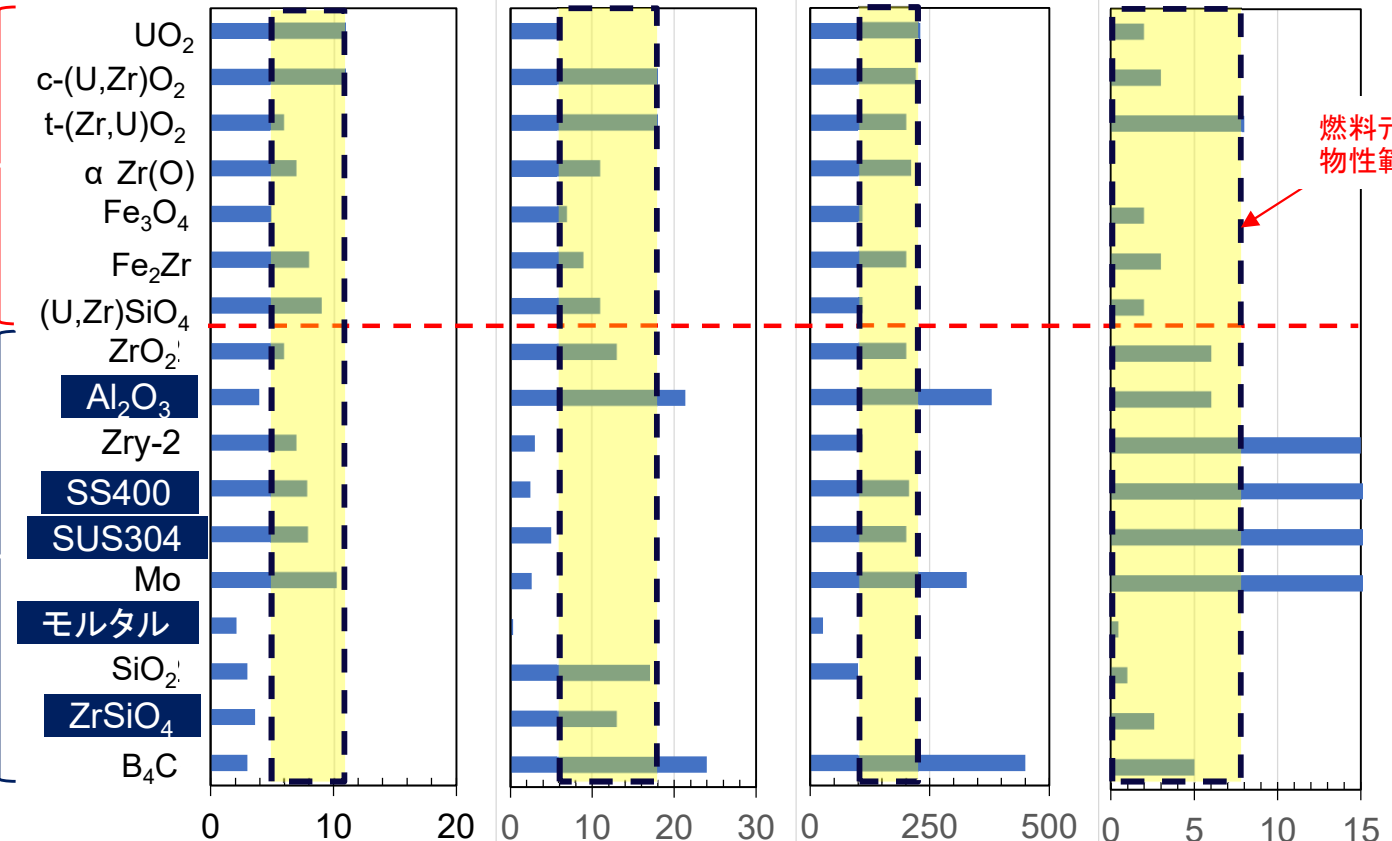
影響因子(物性)	密度(g/cm ³)	硬さ(MPa)	弾性率(MPa)	破壊靱性(MPa m ^{0.5})
飛散挙動への影響(推定)	浮遊率、搬送量	粉体サイズ	粉体サイズ	粉体サイズ

○考え方

- 燃料デブリ成分の影響因子(物性)を概ね包絡する。
- 燃料デブリの主な種類(酸化物、金属、ガラス)を概ね代表する。
- 均質体(单相)と非均質体(多相)を考慮する。
- 過度にならない程度で保守的評価とする。

燃料デブリの成分

供試体の候補材



燃料デブリ
物性範囲

廃炉ハンドブック等の既報
データの活用も検討

均質体	酸化物	Al ₂ O ₃ (緻密質、多孔質)
	金属	SS400、SUS304
	ガラス	モルタル
非均質体	酸化物／ガラス	ジルコン(ZrSiO ₄)
	酸化物／金属	—

物性測定

- 密度
- 硬度
- 弾性率
- 破壊靱性
- 結晶粒径
- 結晶構造

【2】ダスト飛散率測定試験 コールド供試体の選定(熱的切削工法)

□ レーザー

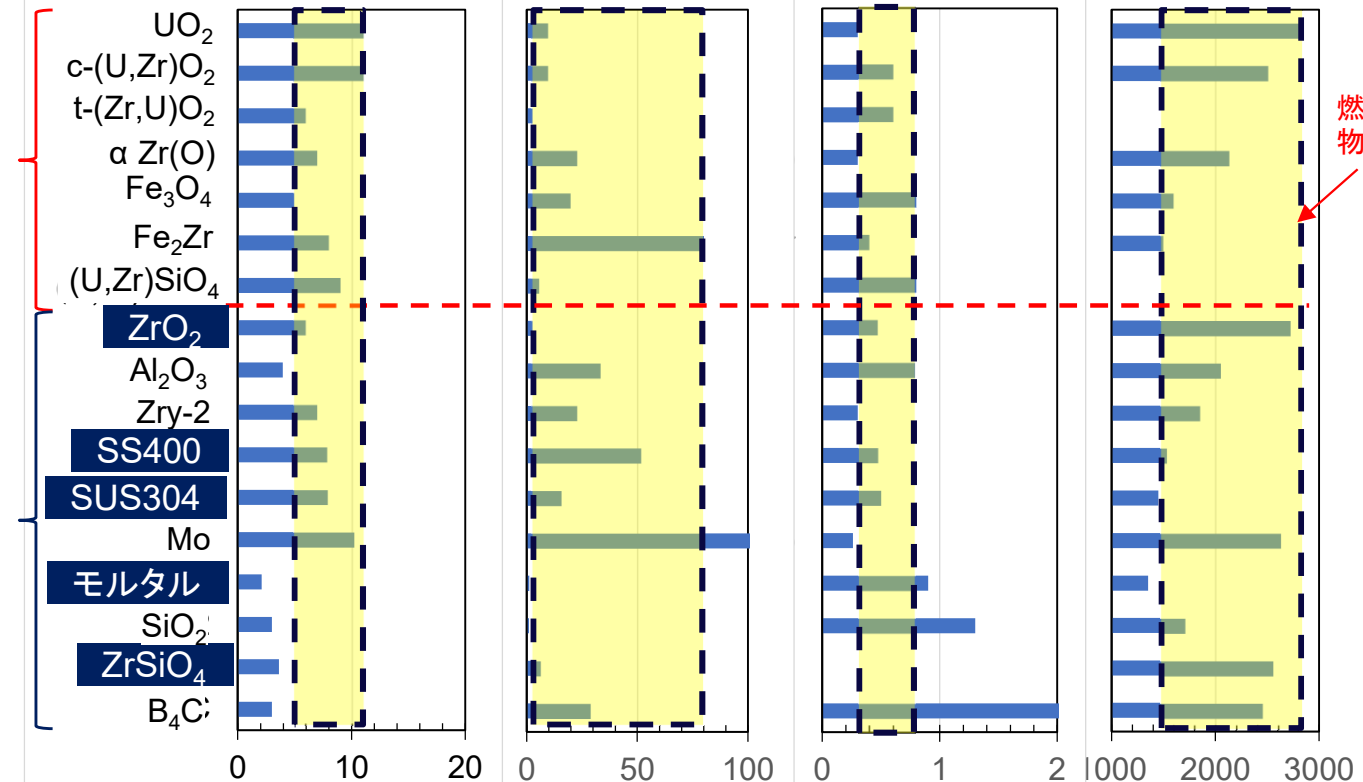
影響因子(物性)	密度(g/cm ³)	熱伝導率(W/m K)	比熱(J/g K)	融点(°C)
飛散挙動への影響 (推定)	浮遊率、搬送量	浮遊率、搬送量	加熱部温度	浮遊率、搬送量 粉体サイズ

○考え方

- 燃料デブリ成分の影響因子(物性)を概ね包絡する。
- 燃料デブリの主な種類(酸化物、金属、ガラス)を概ね代表する。
- 均質体(单相)と非均質体(多相)を考慮する。
- 過度にならない程度で保守的評価とする。

燃料デブリの成分

供試体の候補材



燃料デブリ
物性範囲

均質体	酸化物	ZrO ₂ (緻密質、多孔質)
	金属	SS400、SUS304
	ガラス	モルタル
非均質体	酸化物／ガラス	ジルコン(ZrSiO ₄)
	酸化物／金属	—

物性測定

- 密度
- 硬度
- 弾性率
- 破壊靱性
- 結晶粒径
- 結晶構造

廃炉ハンドブック等の既報データの活用も検討

【2】ダスト飛散率測定試験 試験に用いたコールド供試体

種類	供試体	仕様・型式・製法等	寸法
金属	SUS304	-	110mm × 30mm × t10mm
			□110mm × t30mm
			□110mm × t50mm
	SS400	熱間圧延鋼	110mm × 30mm × t10mm
			□110mm × t30mm
			□110mm × t50mm
酸化物	緻密質アルミナ	A995、粉末焼結法	110mm × 30mm × 10mm
			□110mm × t30mm
			□110mm × t50mm
			Φ10 × 10mm
	緻密質ジルコニア	ZrO ₂ 、粉末焼結法	□110mm × t30mm
			110mm × 30mm × t10mm
混合物	多孔質ジルコニア	F-SG、粉末焼結法	110mm × 30mm × t10mm
	多孔質アルミナ	HA-21B、粉末焼結法	□110mm × t30mm
			□110mm × t50mm
	緻密質60 mol% Al ₂ O ₃ - 40 mol% ZrO ₂	-	110mm × 30mm × 10mm
			110mm × 110mm × 30mm
	ジルコン ^{*1} (ZrSiO ₄)	N-300、粉末焼結法	110mm × 30mm × t10mm
			□110mm × t30mm
			□110mm × t50mm
	モルタル	<ul style="list-style-type: none"> ● 配合：JIS R5201およびJIS A6201附属書Cに準拠 ● 作製：JIS R5201およびJIS A 6201附属書Cに準拠 ● 型枠に打設したモルタルの表面を成形後、20℃、湿度90%以上の恒温槽で養生し翌日脱型。その後、材齢28日まで20℃の恒温槽の水槽内で水中養生 	110mm × 30mm × t10mm
			□110mm × t30mm
			□110mm × t50mm
			□110mm × t100mm
			□110mm × t200mm

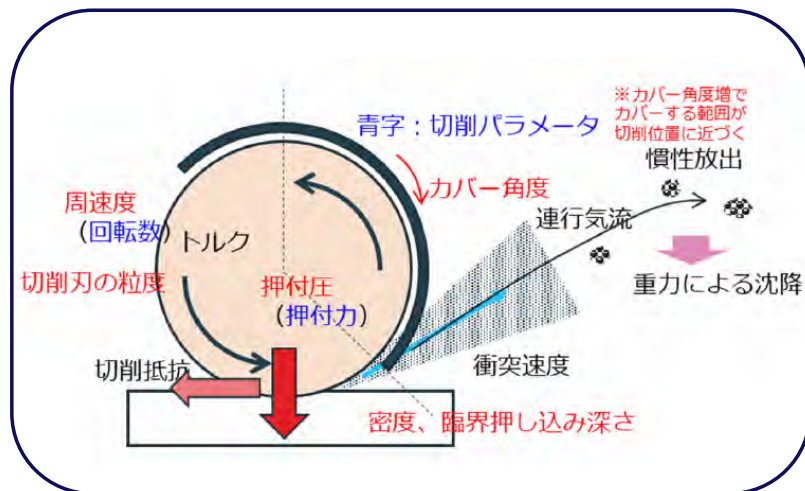
※¹ 製品ジルコン（型式N-300）の成分は、ZrO₂:SiO₂:Al₂O₃:MgO:K₂O:Fe₂O₃ = 30.25:45.92:15.28:7.04:1.50:0.01(mol%)である。介在物のジルコン(ZrSiO₄)と、余剰SiO₂-Al₂O₃-MgO-K₂O-Fe₂O₃ からなるガラス(Al₄Si₅O₁₈)マトリクスから構成される非均質材と考えられる。1400℃以下では、熱的に安定な非均質材であるが、約1500℃以上でガラス(Al₄Si₅O₁₈)が不可逆的反応して試料の形状を喪失する特性を持つ。

【2】ダスト飛散率測定試験 コールド供試体の物性測定結果

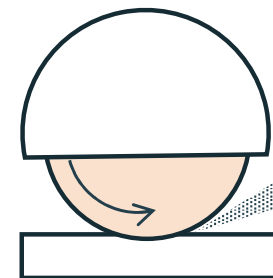
項目		密度 (g/cm ³)	硬度 (GPa)	破壊靱性 (MPa・m ^{1/2})	ヤング率 (GPa)	ポアソン比 (-)	剛性率 (GPa)	結晶粒径 (μm)	空隙率 (%)	主要な結晶相 (結晶構造)	曲げ強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)		
金属	ステンレス鋼 SUS304	7.90	1.56	114	201	0.29	77.7	26.7	1.9	オーステナイト				
	炭素鋼 SS400	7.93	1.21	78	214	0.286	83.2	20.7	1.3	Ni-Cr-Fe				
酸化物	緻密質ジルコニア ZrO ₂	6.04	13.13	7.0	216	0.312	82.2	0.3	1.1	Y ₂ O ₃ 安定化ジルコニア				
	多孔質ジルコニア ZrO ₂	5.33	測定不可	0.2	測定不可	測定不可	測定不可	0.4	16.8	CaO安定化ジルコニア				
	緻密質アルミナ Al ₂ O ₃	3.83	11.82	3.5	349	0.229	141.9	2.2	1.5	コランダム				
	多孔質アルミナ Al ₂ O ₃	3.63	0.24	0.5	測定不可	測定不可	測定不可	0.6	20.9	コランダム				
	緻密質Al ₂ O ₃ -40mol%ZrO ₂	4.62	15.51	4.9	304	0.259	120.9	Al ₂ O ₃ : 0.87 ZrO ₂ : 0.50	1.53	cubic ZrO _{1.87} +単斜晶 baddeleyite ZrO ₂ +コラン ダムAl ₂ O ₃				
物性 MCCI生成物	ジルコン ZrSiO ₄	2.81	4.91	1.4	108	0.248	43.1	0.4	3.6	ジルコン (ZrSiO ₄) +ガラス (Al ₄ Si ₅ O ₁₈)				
	モルタル (材齢28日 上部)	2.30	0.78	0.5	35.4	測定不可	測定不可	測定不可	11.4	Quartz+Portladite	8.6	62.7	58.1	
	モルタル (材齢28日 下部)	2.30	—	—	—	—	—	—	10.2	Quartz+Portladite	8.9	72.0	69.4	
	モルタル (材齢91日)	—	—	—	36.6	—	—	—	—	—	9.3	71.7	68.1	
物性測定サンプルの形状		10mm×10mm ×30mm	10mm×10mm ×30mm	厚さ3.0mm×幅 4.0mm	110mm×110mm×50mm			10mm×10mm ×30mm	4mm角×10個	10mm×10mm×30mm、 粉末	40×40× 160mm	40×40× 160mm	φ100× 200mm	
測定法		アルキメデス 法	ビッカース硬 度法	SEVNB法 (酸化 物) ASTM E1820-20b に準拠 (金属)	超音波パルスエコー法 ※JIS A1149に準拠 (モルタルのみ)			走査型二次 電子顕微鏡 法	水銀圧入法	X線回折法	JIS R5201 に準拠	JIS R5201に 準拠	JIS A1149に 準拠	
試験装置		メトラートレ ッド製電子天 秤 (ML304T/00) +液浸密度 キット、溶媒: 水	ビッカース試 験機: 松沢精 機(株)製 DVK-2 レーザー顕 微鏡 (圧痕長 さ計測)	インストロン万能試験 機5582型 (ロードセル 500N) メジャースコープ MM-40 (×30) マイクロメーター (酸 化物) ・100 kN サーボバル サー ・荷重線変位 クリップゲージ (金属)	・PULSER/RECEIVER ((MODEL 5800) (パナメ トリクス)) ・オシロスコープ ((HDO6104) (テレダイン・ レクロイ)) ・5MHz縦波探触子 (GE)、2.25MHz横波探 触子 (パナメトリクス) ・波形収録ソフト (LabVIEW) ※コンクリート全自動圧縮試験機 (島津製 作所製 CONCRETO 2000X) (モルタルのみ)			SEI像・BEI像: FE-SEM (S4300) (S4800) 粒径計測: WinROOF、 Photoshop	水銀圧入式 ポロシメータ (Micromeriti cs社製 AutoPore IV)	(株)リガク製 RINT TTR3	コンクリート全自動圧縮試 験機 (島津製作所製 CONCRETO 2000X)			
校正方法、使用した標準物質 など		電子天秤内 蔵分銅	硬さ基準片 HV300	ループ型力計	なし			なし	なし	装置内蔵の回折角度の 校正	なし	なし	なし	

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター

- 予備試験により、ディスクカッターによる切削では、回転数や押付力等の運用法に加え、カバー有無、刃の直径、刃の種類、砥粒径が主なパラメータと考えられた。
- 硬度の高いセラミックスと金属の切削が可能で、できるだけ寿命が長いものとして、メタルボンドと溶着の2タイプで、入手の比較的容易なものを選定した。

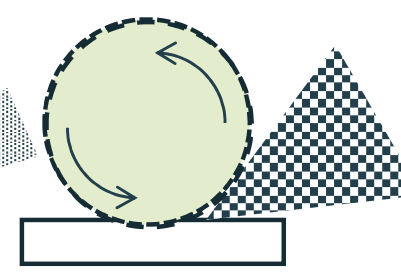


カバー



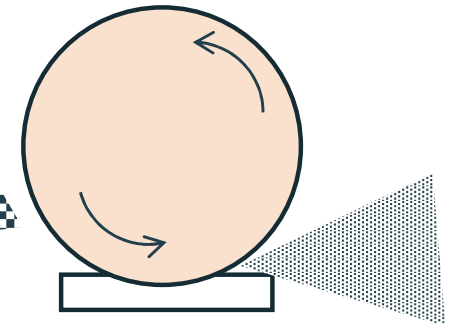
カバーの有無：
飛散範囲、飛散量、飛散速度が変化すると予想

砥粒



砥粒の違い：
粉塵サイズ、飛散量が変化すると予想

直径



直径の違い：
飛散方向、飛散速度が変化すると予想

カバー



ディスクカッターの刃



メタルボンドタイプ



溶着タイプ

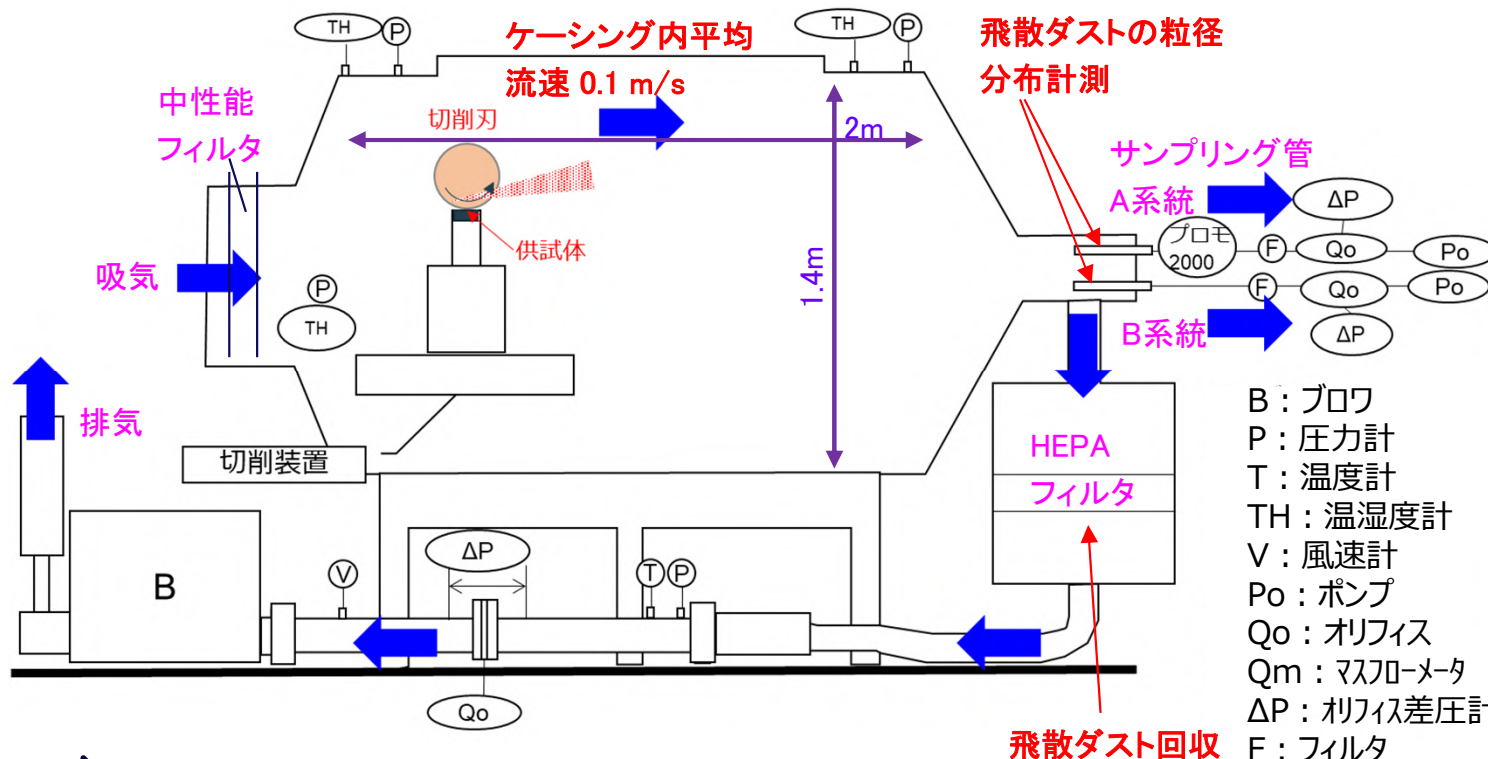
刃のタイプ	種類	直径	メーカー	型番
メタルボンド	小径刃	125 mm	モトユキ	AG-125
	中径刃	180 mm	モトユキ	AG-180
	大径刃	305 mm	モトユキ	AGFC-12
		300 mm	メイハン	HVC314
溶着タイプ	小径刃	125 mm	マキタ	A-36756
	中径刃	180 mm	ロブテックス	BT-180A
	大径刃	305 mm	マキタ	A-36631
	大径刃	305 mm	Husqvarna	VARI-CUT FR-3

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター

- ディスクカッターで供試体を切削し、ケーシング（風洞部）下流側に飛散したダスト（粒子）を回収。
- ケーシング内（乾式）は水平方向流速 平均0.1m/s、温湿度は外気による。
- サンプリング管（A/B系統）では、飛散ダストの粒径分布計測を実施。
- サンプリング管（A/B系統）＋HEPAのフィルタ重量増加の合計値を飛散ダスト重量とし、飛散率の算出に使用。

試験装置の概要

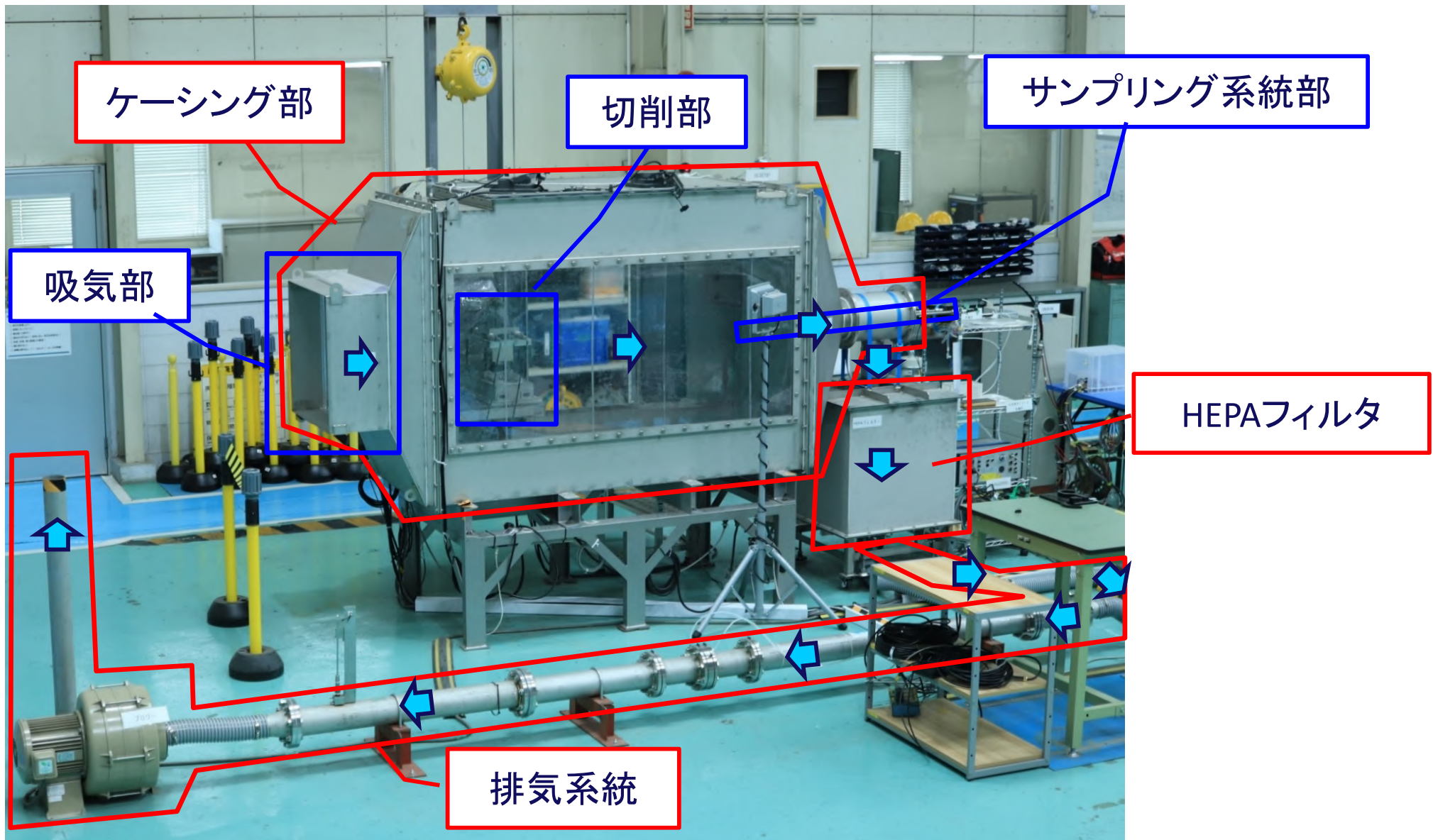
項目	内容
ケーシング内の流れ	横流れ 平均流速0.1 m/s
試験パラメータ	回転数 押付力 切削刃 カバー角度
制御パラメータ	ACモータ回転数 供試体押付力
粒径分布計測	A系統： Promo2000 ※ (プロモ2000) B系統： マイクロトラック 床上ダスト (非飛散ダスト)： マイクロトラック
その他の主な計測項目	切削量 ダスト回収量 モータトルク 風量 飛散ダスト写真など



→ : 流れの方向

試験装置の概略図

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター：試験装置



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター：試験条件

- 燃料デブリが金属やセラミックスの溶融再凝固材料であることから、材料物性値を考慮したダスト飛散特性を検討するために、特性の異なる様々な材料(金属、セラミックス、モルタルなど)を試験対象とする。
- 試験パラメータを広く設定(ディスクカッターのサイズ・砥粒、運転パラメータ)し、ダスト飛散の傾向を把握するため、合計192ケースの試験を実施。ケースごとに3回繰り返し試験(合計576回)を実施。

試験パラメータ	試験条件
被切削材料	緻密質／多孔質アルミナ, SUS304,モルタル, ジルコン,ジルコニア, SS400,非均質材
ディスクカッターの種類	小径刃(直径: 125 mm, 刃厚: 2.0 mm, 粒度: #35~60) 中径刃(直径: 180 mm, 刃厚: 2.2 mm, 粒度: #40~45) 大径刃(直径: 305 mm, 刃厚: 2.8 mm, 粒度: #50~60) 砥粒変更刃(直径: 300 mm, 刃厚: 2.2 mm, 粒度: #80~100)
砥粒の材質	ダイヤモンド(すべてのディスクカッターで共通)
カバー角度	0° (カバー無し), 90° , 120° , 135°
回転数 (周速度)	1200~6000 rpm (7.9~57.5 m/s)
押付力	セラミックス: 20~80 N 金属: 40~80N モルタル: 5~10N 多孔質アルミナ: 1~5N

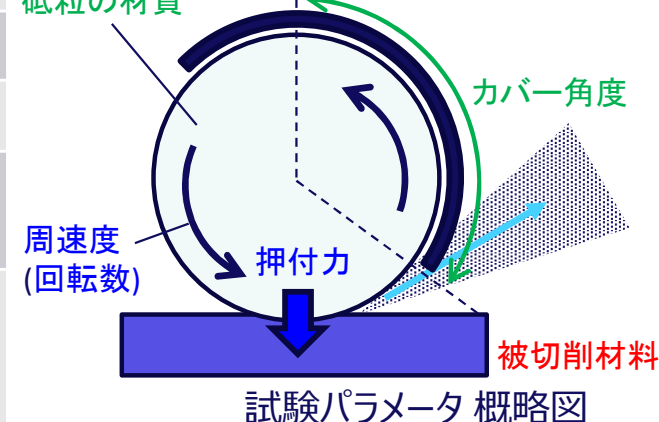


小径刃

(グローバルソー: AG-125)



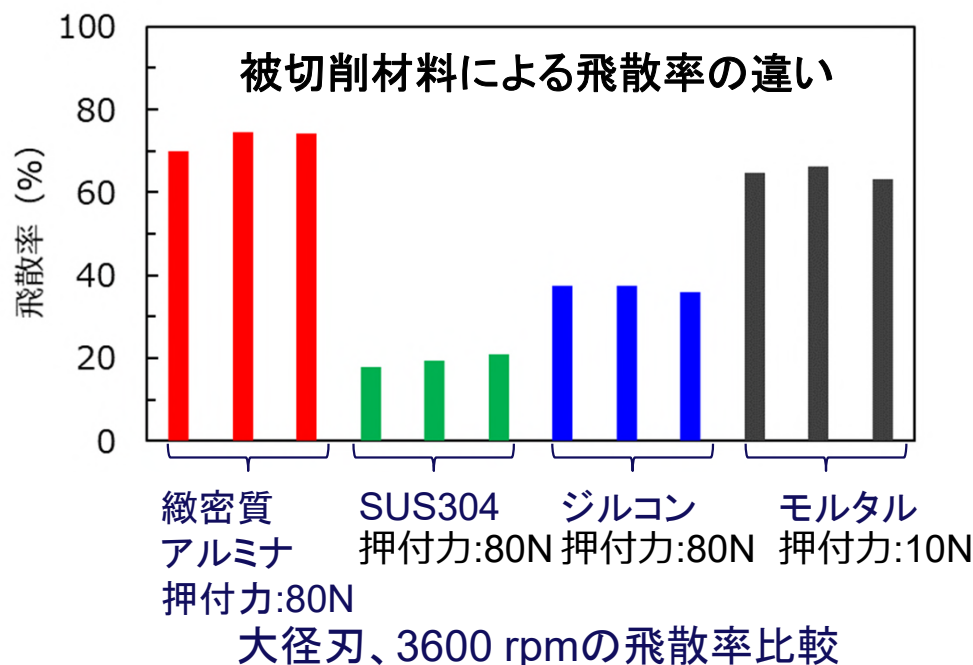
ディスクカッターのカバー

ディスクカッターの種類
砥粒の材質

※カバー角度
増でカバーする
範囲が切削位
置に近づく

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター：試験結果

- 特性の異なる材料に対し幅広いパラメータ範囲のダスト飛散データを取得した。
- ディスクカッターによるダスト飛散の傾向を検討した。
 - 飛散率、飛散粒径分布は被切削材料により大きく変化
 - 共通の傾向として、飛散率は切削刃の周速度、押付力に伴い変化
 - 飛散率はディスクカッターの砥粒サイズ、材料の空隙率でも変化



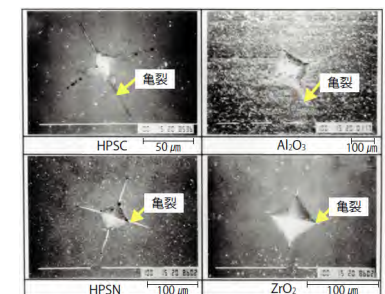
飛散率(%) =

$$\frac{\text{切削前後のフィルタ重量※の増加量(g)}}{\text{切削前後の被切削物重量の減少量(g)}} \times 100$$
 ※A系、B系、HEPAフィルタの合計

被切削材料の物性値

材料	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	臨界押し込み深さ (μm)
緻密質アルミナ	3.83	1.5	0.698
SUS304	7.90	1.9	9760
ジルコン	2.81	3.6	0.871
モルタル	2.30	11.4(上部)	2.06

臨界押し込み深さは、脆性遷移を起こす加工深さであり、物性値で定まる材料固有の値である。臨界押し込み深さ以下で延性モード加工できる指標(割れを回避)。



各種セラミックスの圧子圧入時の亀裂の発生状況

臨界押し込み深さ

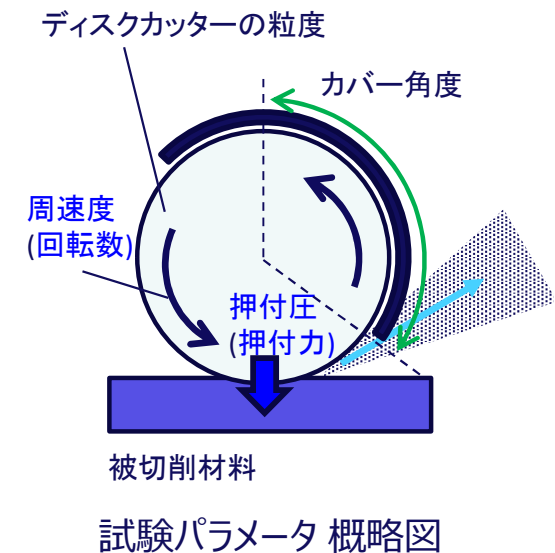
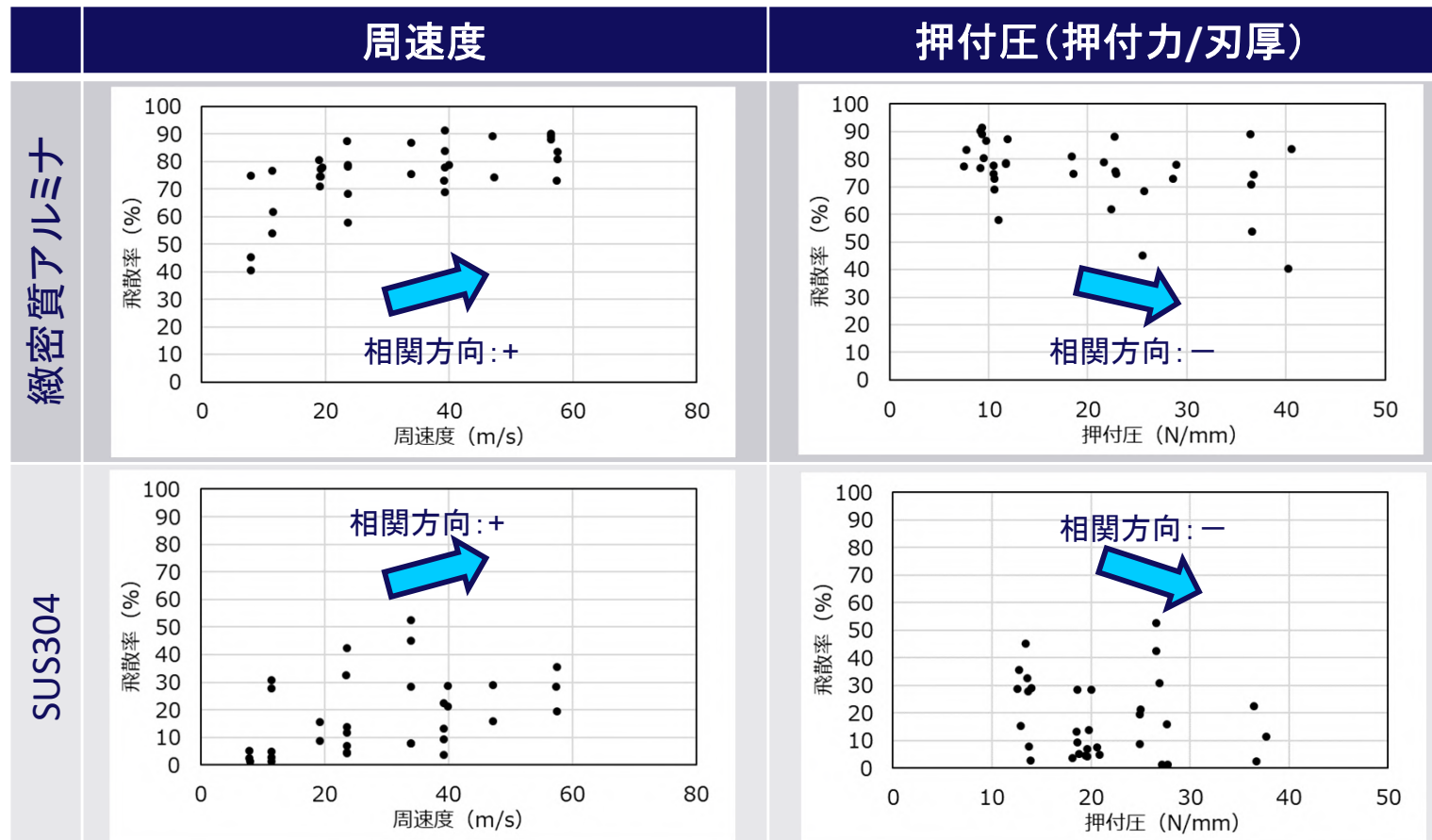
=補正定数 × 破壊靱性^{1/2} / (硬さ × ヤング率)

※補正定数は文献値から推定

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター：試験結果（周速度、押付力）

- 周速度が増加すると飛散率は上昇する傾向
- 押付圧が増加すると飛散率は低下する傾向

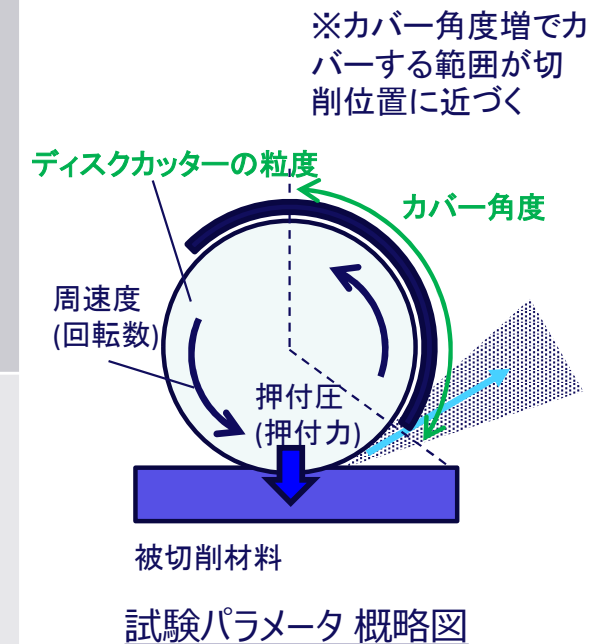
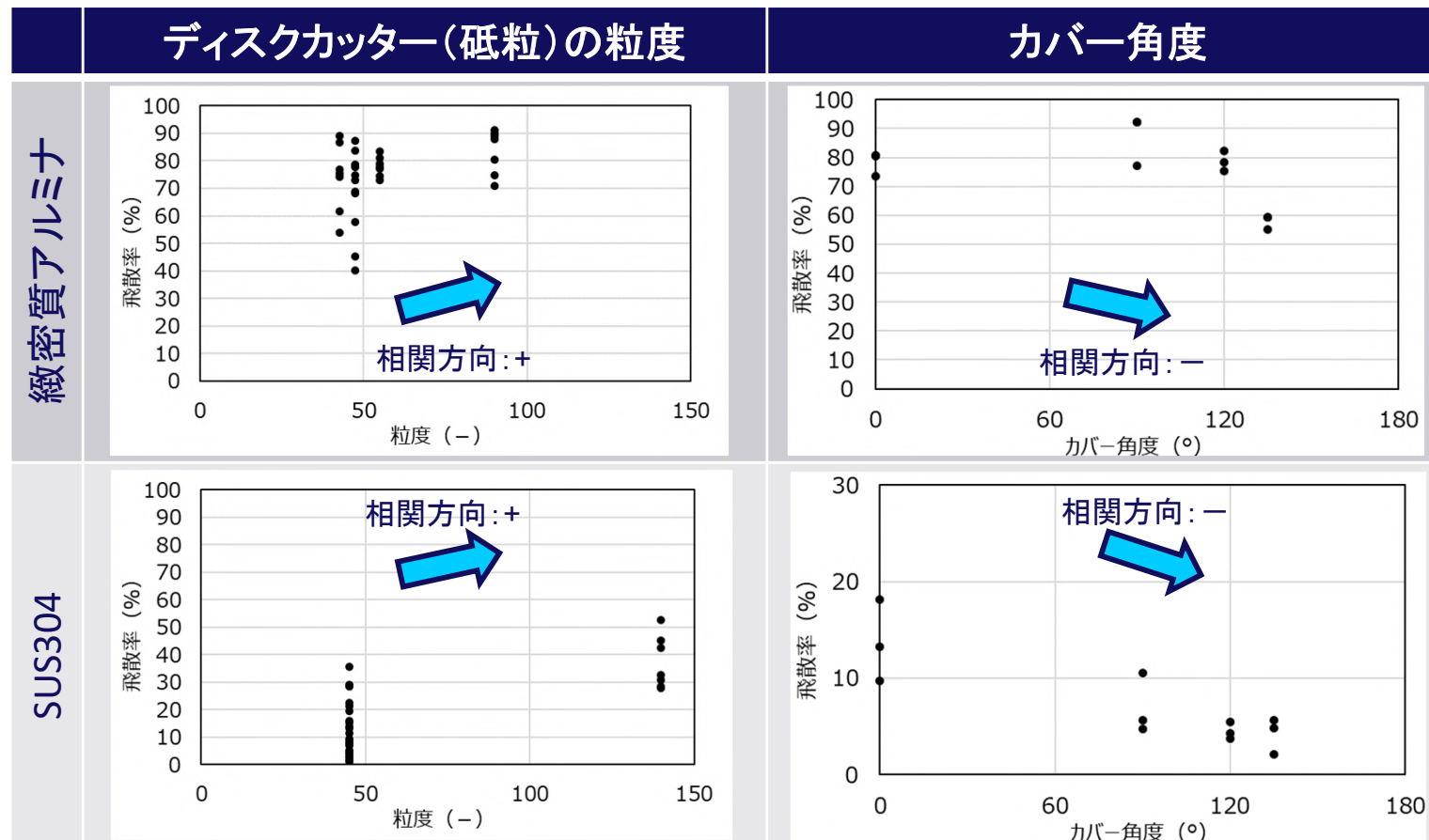
以下は、緻密質アルミナとSUS304の周速度・押付圧と飛散率の関係の例



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター：試験結果（砥粒粒度とカバー角度）

- ディスクカッターの粒度が増加すると飛散率は上昇する傾向
- カバー角度が増加すると飛散率は低下する傾向

以下は、緻密質アルミナとSUS304の粒度・カバー角度と飛散率の関係の例

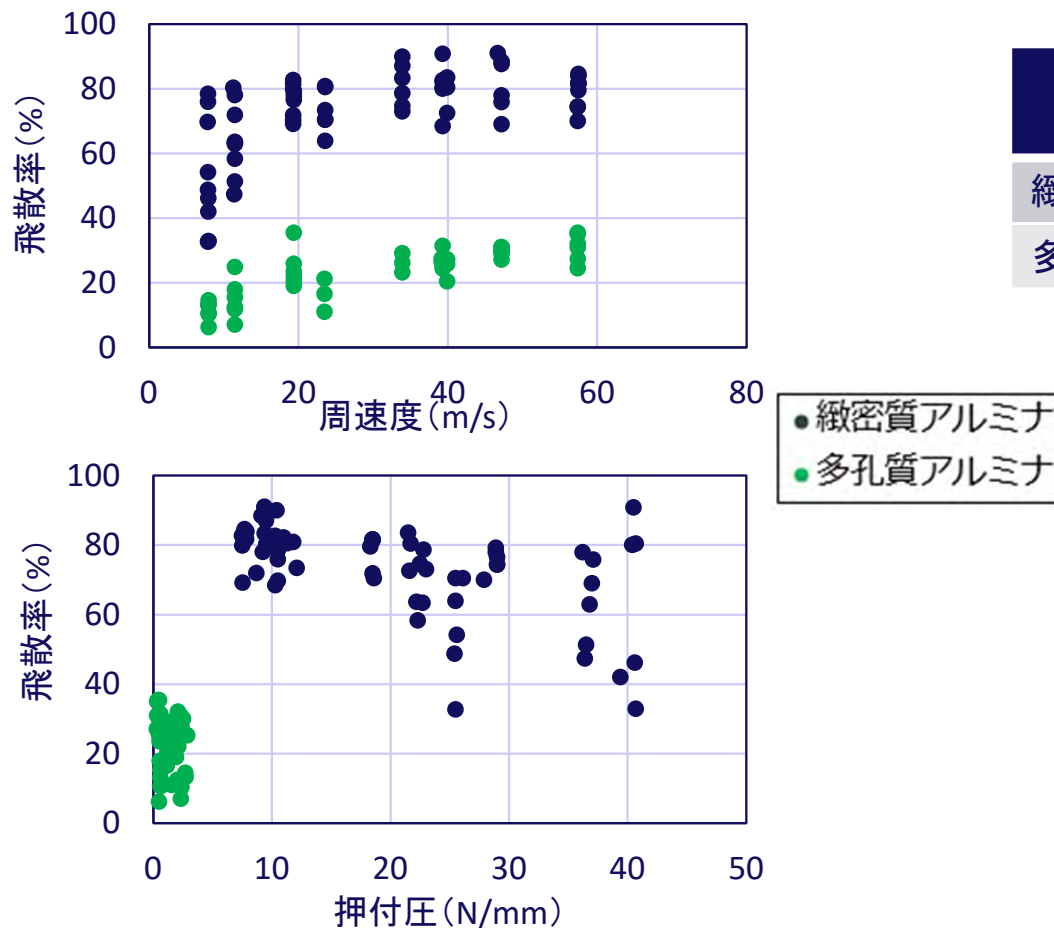


【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

ディスクカッター：試験結果（空隙率と臨界押し込み深さ）

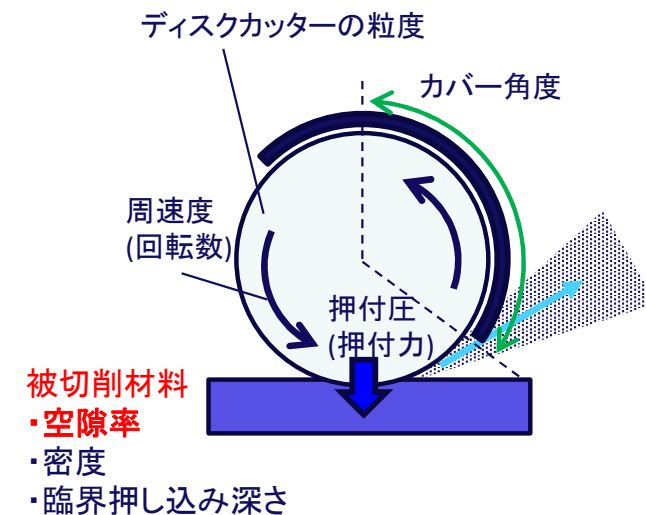
■ 被切削材料の空隙率により飛散率が大きく変化

—緻密質アルミナと多孔質アルミナの飛散率の比較



被切削材料の物性値

材料	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	臨界押し込み深さ (μm)
緻密質アルミナ	3.83	1.5	0.698
多孔質アルミナ	3.63	20.9	1.40

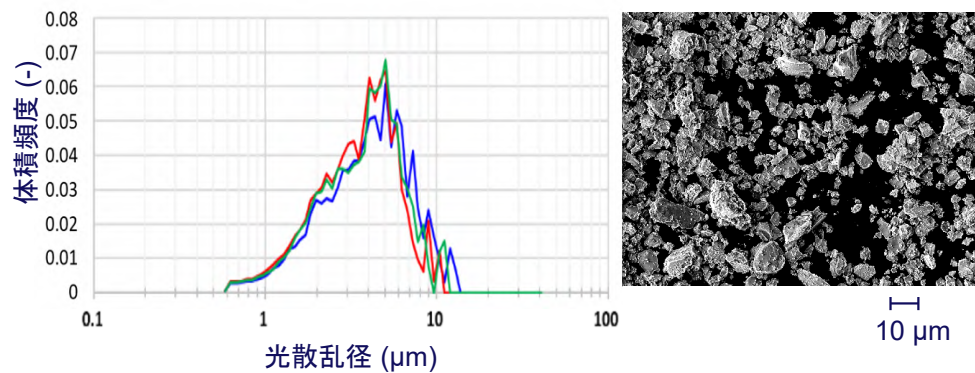


試験パラメータ 概略図

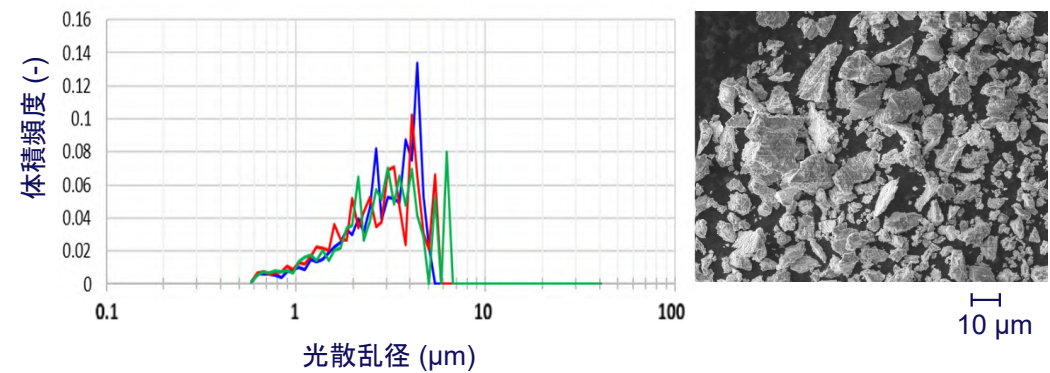
【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

ディスクカッター：試験結果（飛散粒子の粒径分布と性状）

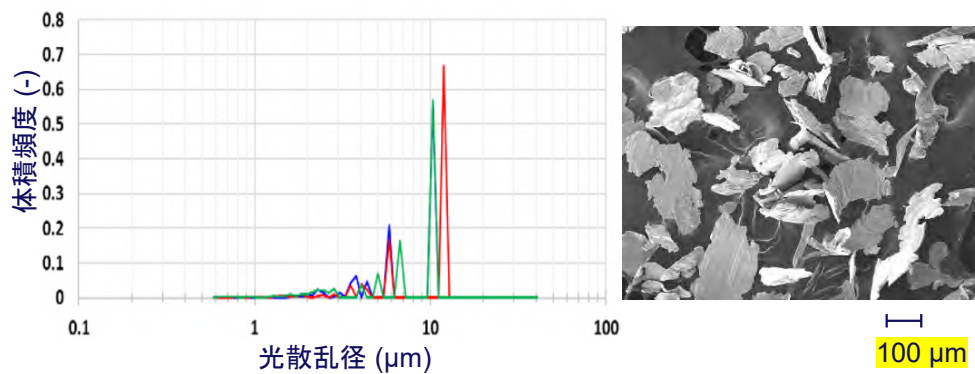
- 飛散粒子の粒径分布は、被切削材料により大きく変化した。ピークの粒径の大小関係は、飛散粒子の空気動力学径（密度の1/2乗に反比例）の関係に概ね一致する。
- 緻密質アルミナ、ジルコン、モルタルの飛散粒子形状は粉碎した粒状のようであるのに対し、SUSはフレーク状である。材料特性の違いによると考えられる。



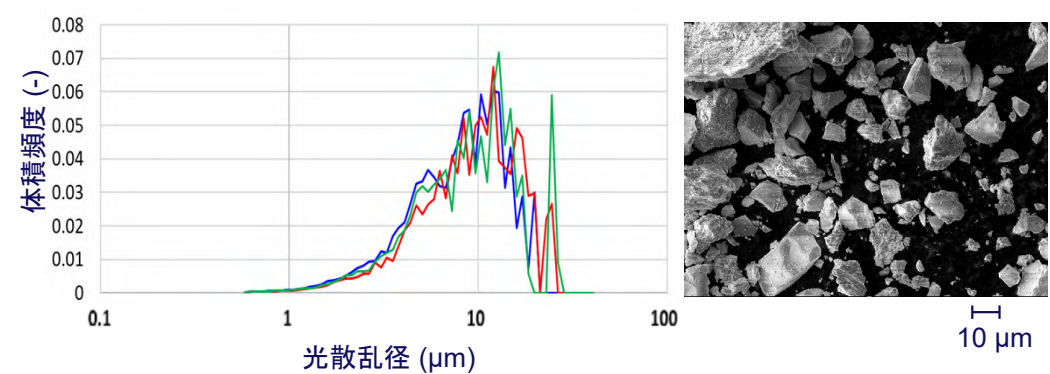
緻密質アルミナ



ジルコン



SUS304



モルタル

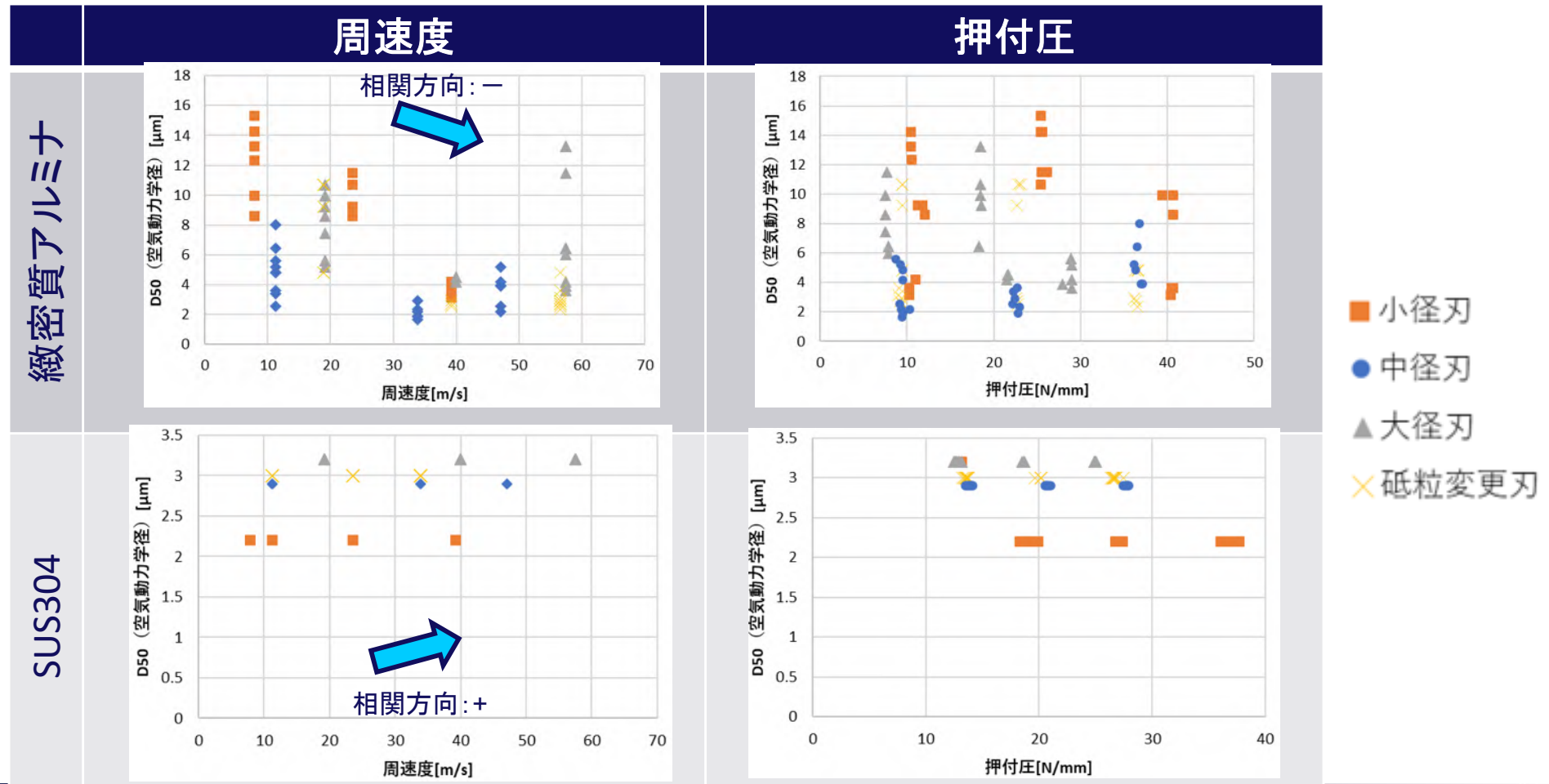
ディスクカッター（大径刃、3600 rpm）切削時の飛散粒子の光散乱粒径分布
（同一条件での3回の繰り返し試験の結果を赤、青、緑で記載）

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

ディスクカッター：試験結果（飛散粒子の粒径分布と性状）

周速度・押付圧・粒度と飛散粒子径(D50)の関係

- 飛散粒子径は周速度に依存性を有するが、緻密質アルミナ、モルタルは周速度増加でD50は減少し、SUS304、SS400、多孔質アルミナは周速度増加でD50は増加する傾向。
- 切削刃の押付圧の変化に対してD50は明確な相関がみられず、飛散粒子径の押付圧に対する依存性は小さいと考える。



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター：試験結果（重回帰分析）

試験パラメータの感度評価、および被切削材料・切削条件を変更した際の飛散率予測のため、切削試験にて取得したデータを基に、飛散率を目的変数として重回帰分析を実施した。

【重回帰分析とは】

1つの目的変数に対して複数の説明変数の関係进行分析して関係式を作り出す手法であり、以下のような検討に用いられる。

- ・目的変数の予測
- ・説明変数が目的変数に及ぼす影響度の評価

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + \dots$$

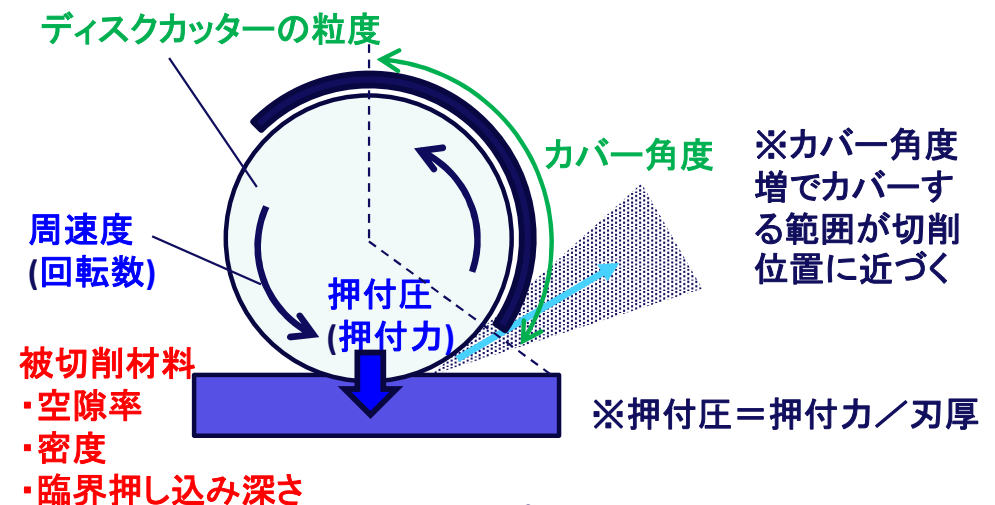
↑ ↑ ↑ ↑ ↑
 目的変数：飛散率 説明変数：試験パラメータ（材料物性値、切削条件など）

相関の正負：係数bの正負

寄与率：係数bを標準化した標準回帰係数から算出（xの単位がそれぞれ異なるため、重回帰式の係数bが各説明関数の寄与度を表すわけではない）

$$\text{標準回帰係数} [-] = b \times \frac{\text{各説明関数}(x) \text{の分散}}{\text{飛散率}(Y) \text{の分散}}$$

$$\text{寄与率} [\%] = \text{標準回帰係数} \times 100$$



試験パラメータ 概略図

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター：試験結果（重回帰分析）

- 重回帰分析に用いる説明変数は、試験結果から飛散率に対して感度があると予想されるパラメータとした。
- 緻密質アルミナ、多孔質アルミナ、SUS304、モルタルの4材料の試験データを基に、飛散率予測式を構築した。
- 回帰統計値の重相関や決定係数は十分に高く、重回帰分析の精度は高いと考える。

飛散率予測式

$$\text{飛散率} = \text{b0} + \text{b1}(\text{周速度}) + \text{b2}(\text{押付圧})$$

運転パラメータ

$$+ \text{b3}(\text{空隙率}) + \text{b4}(\text{密度}) + \text{b5} \ln(\text{臨界押し込み深さ})$$

被切削材料の物性値

$$+ \text{b6}(\text{粒度}) + \text{b7}(\text{カバー角度})$$

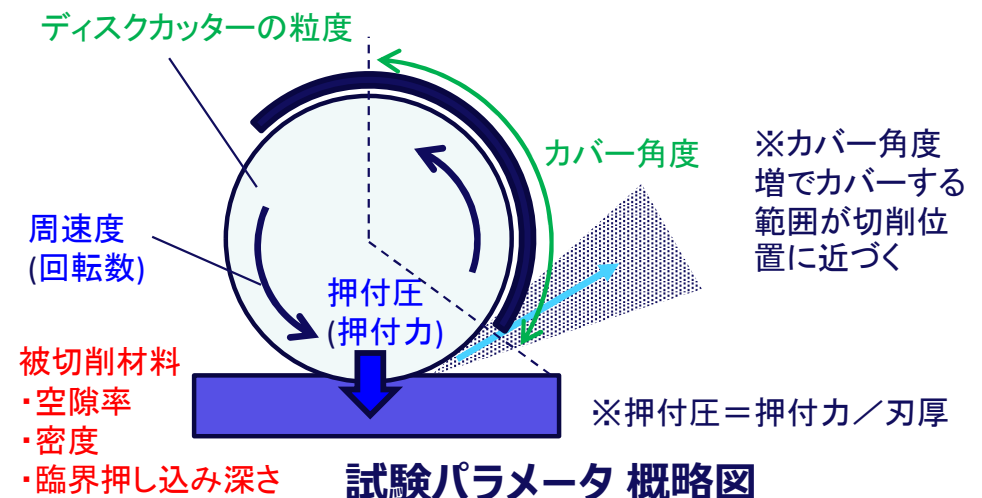
ディスクカッターに関するパラメータ

重回帰式の係数

項目	係数
b0	82.03
b1	0.364
b2	-0.391
b3	-2.952
b4	-5.208
b5	-3.717
b6	0.237
b7	-0.054

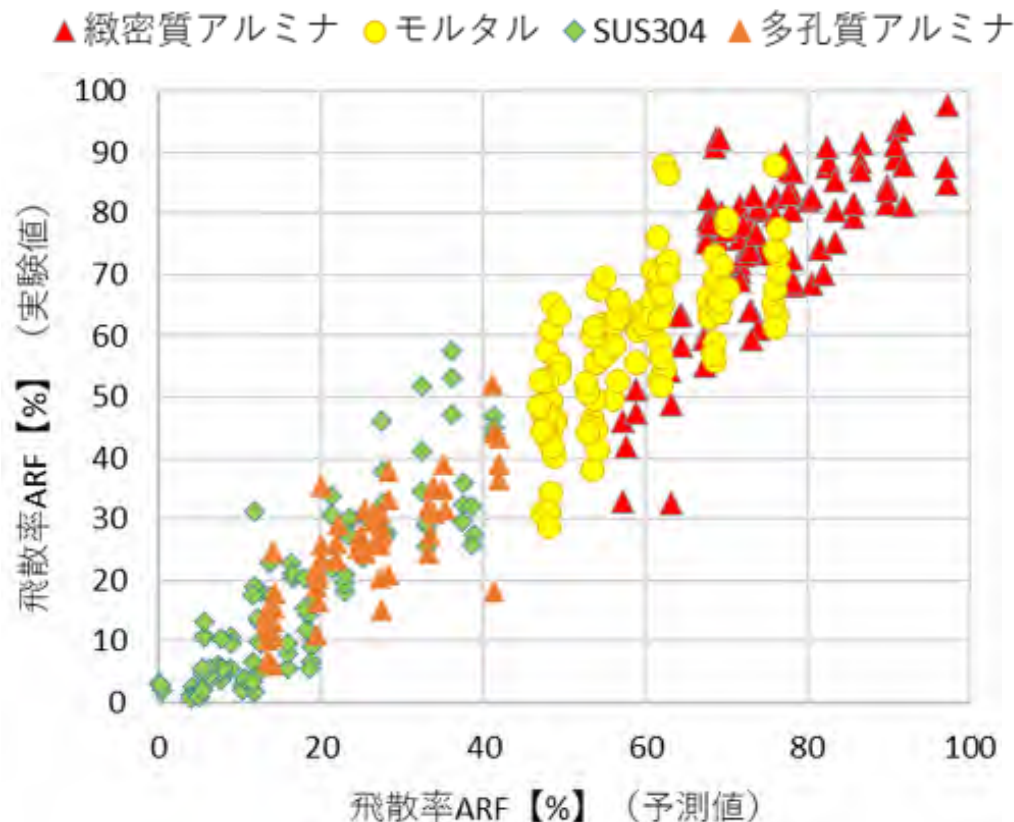
回帰統計値

重相関 R	0.96
重決定 R2	0.91
補正 R2	0.91
標準誤差	8.10
観測数	357



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター：試験結果（重回帰分析）

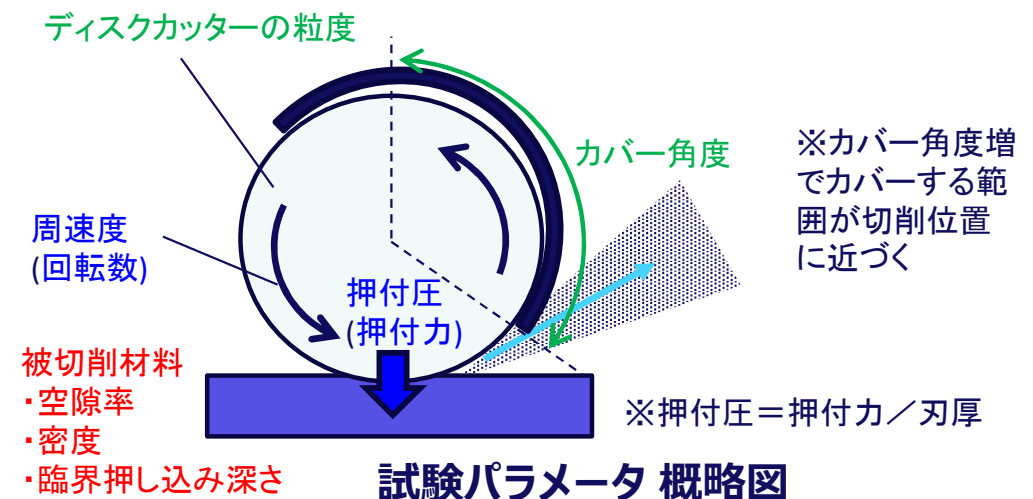
- 飛散率予測式の構築に用いた4材料の飛散率の実験値と予測値を比較したところ、どの材料についても、同程度のバラつきで飛散率の予測ができています。
- 重回帰分析を用いて評価した各説明変数の寄与率は、材料物性値の寄与率が大きく、切削パラメータなどの寄与率は相対的に小さい。



重回帰式による飛散率の予測値と実験値

パラメータの寄与率

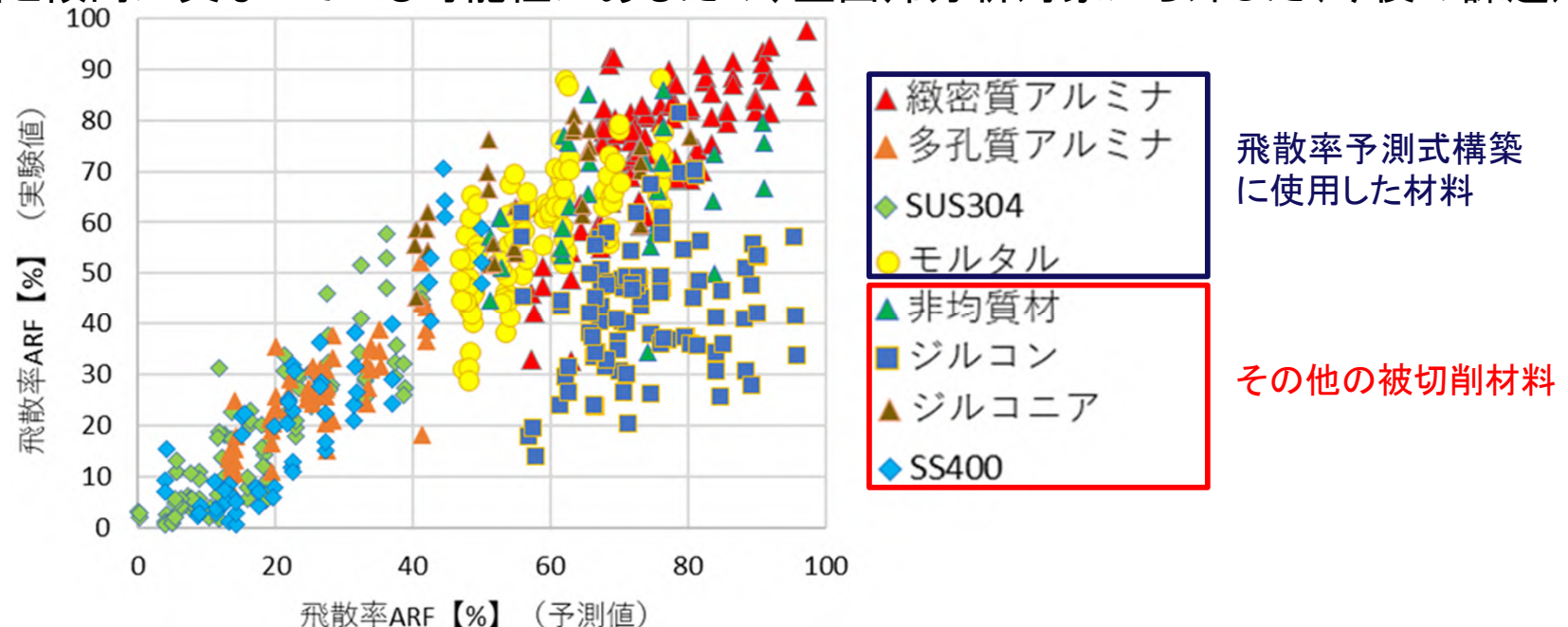
項目	相関方向	寄与率 [%]
周速度	+	8.9
押付圧	-	6.6
空隙率	-	32.1
密度	-	17.3
臨界押し込み深さ	-	22.7
粒度	+	9.2
カバー角度	-	3.3



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター：試験結果（重回帰分析）

緻密質アルミナ、多孔質アルミナ、SUS304、モルタルの4材料の試験データを基に構築した飛散率予測式を用いて、その他の被切削材料の飛散率を予測し、実験値との比較を行った。

- 重回帰式の構築に用いた4材料と同程度のバラつきの範囲で、その他の被切削材料の飛散率を予測できることを確認。
- 材料物性値が単一でない非均質材についても飛散率を予測することができ、構築した予測式が適用可能であると考ええる。
- ジルコンについては他の被切削材料と比べて大きくずれた位置に分布しているため、他の被切削材料と傾向が異なっている可能性があるため、重回帰分析対象から外した（今後の課題）。



重回帰式による飛散率の予測値と実験値

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 ディスクカッター：試験結果（重回帰分析）

被ばく評価の観点で微細粒子の飛散率を評価することは重要である。全飛散粒子に対して、空気動力学径 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子が含まれる割合を粒径分布計測結果から算出し、空気動力学径 $10\mu\text{m}$ 以下の飛散率を評価した。

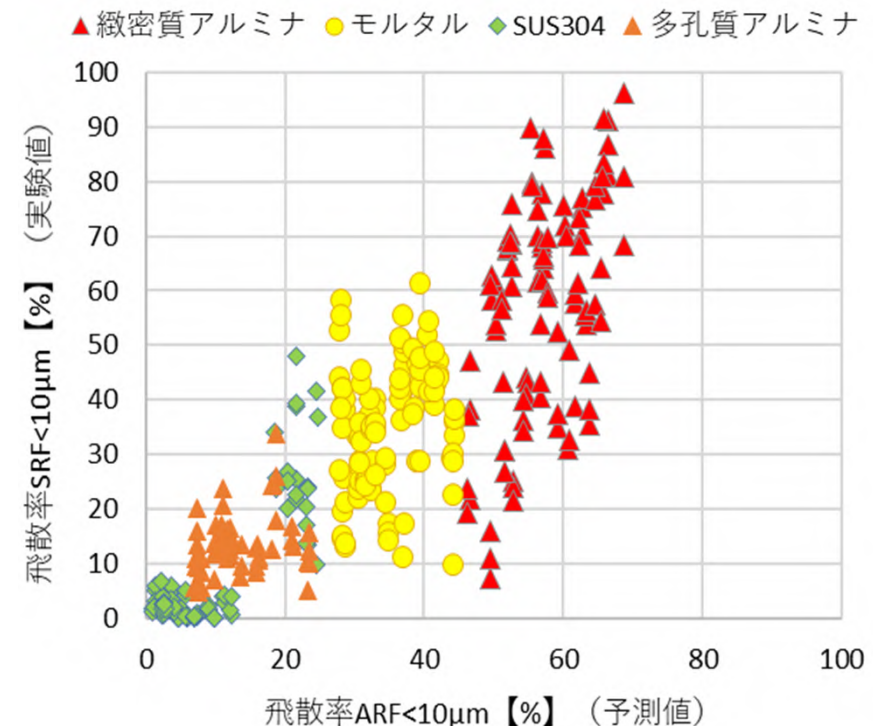
- 全飛散粒子に対する予測式と同様に、緻密質アルミナ、多孔質アルミナ、SUS304、モルタルの4材料の試験データを基に、飛散率予測式を構築した。
- 飛散率（ $10\mu\text{m}$ 以下）に対する各パラメータの寄与率は材料物性値が寄与率の大半を占めており、他の説明変数の寄与率は相対的に小さい結果であり、飛散率（全粒径）の傾向と類似している。

パラメータの寄与率

項目	相関方向	寄与率 [%]
周速度	+	4.2
押付圧	-	4.9
空隙率	-	32.2
密度	-	1.6
臨界押し込み深さ	-	40.9
粒度	+	11.0
カバー角度	+	5.1

回帰統計値

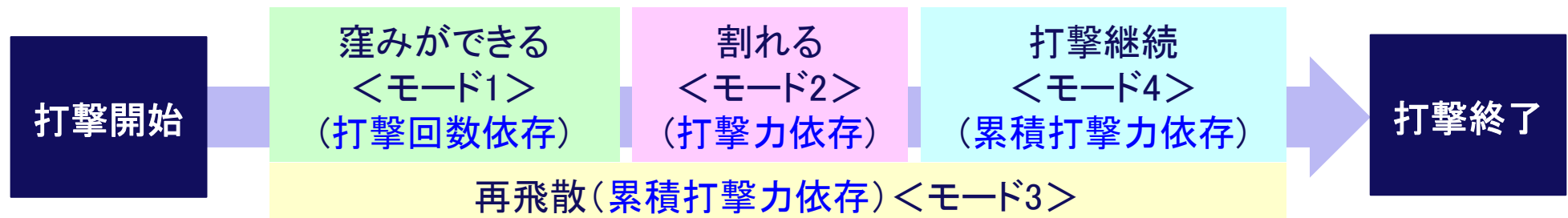
重相関 R	0.87
重決定 R ²	0.75
補正 R ²	0.75
標準誤差	12.21
観測数	357



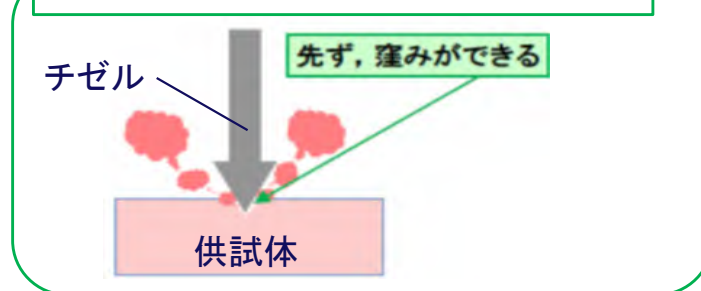
重回帰式による飛散率（ $10\mu\text{m}$ 以下）の予測値と実験値

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 チゼル

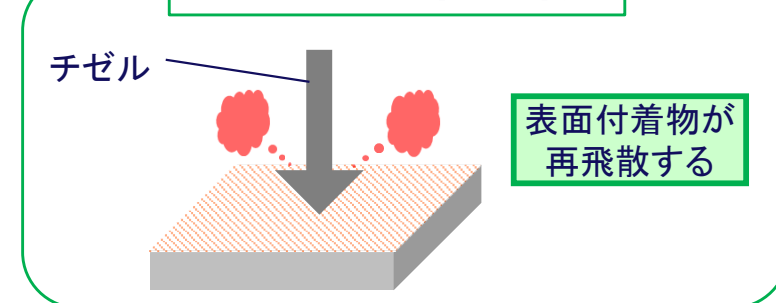
- チゼルでは切削の進展に伴い現象が変化することから、下記のように4つのモードに分けて試験、評価を行うこととした。



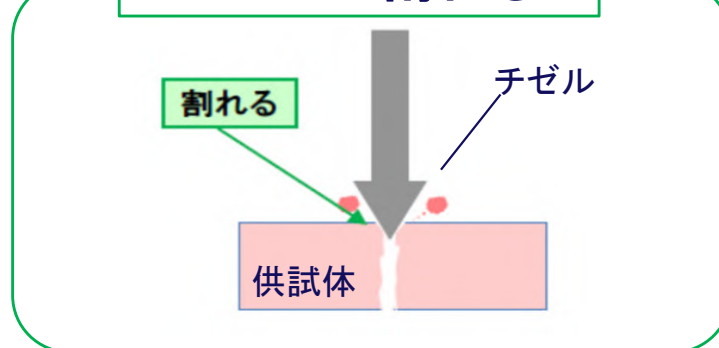
モード1：窪みができる



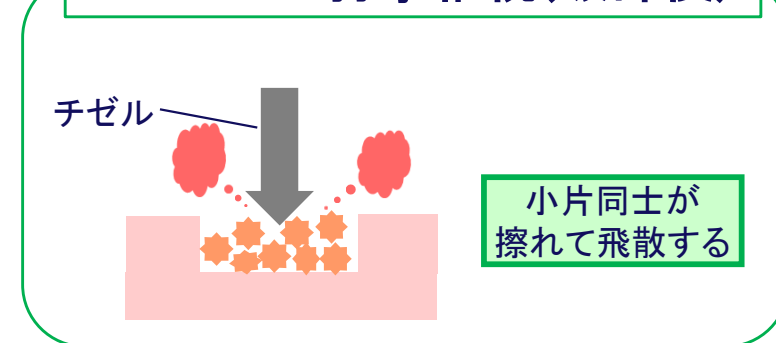
モード3：再飛散



モード2：割れる



モード4：打撃継続(破碎後)



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 チゼル：試験方法

- チゼルでは発生ダスト量が少なく、共通の試験体系ではダスト飛散量の回収・秤量ができなかった。
- このため容器を小型化し、発生したダストの全量回収を行った。

○試験条件

- ・刃の形状：ポイント/平タガネ
- ・打撃速度：500/650/800/950bpm
- ・追加静荷重：0/98/196N（重り0/10/20kg）
- ・供試体：モルタル/ジルコン/（アルミナ）

○Welas2000 ※

- ・ダスト飛散量測定
- ・粒径評価範囲：0.6～40 μm

相互比較

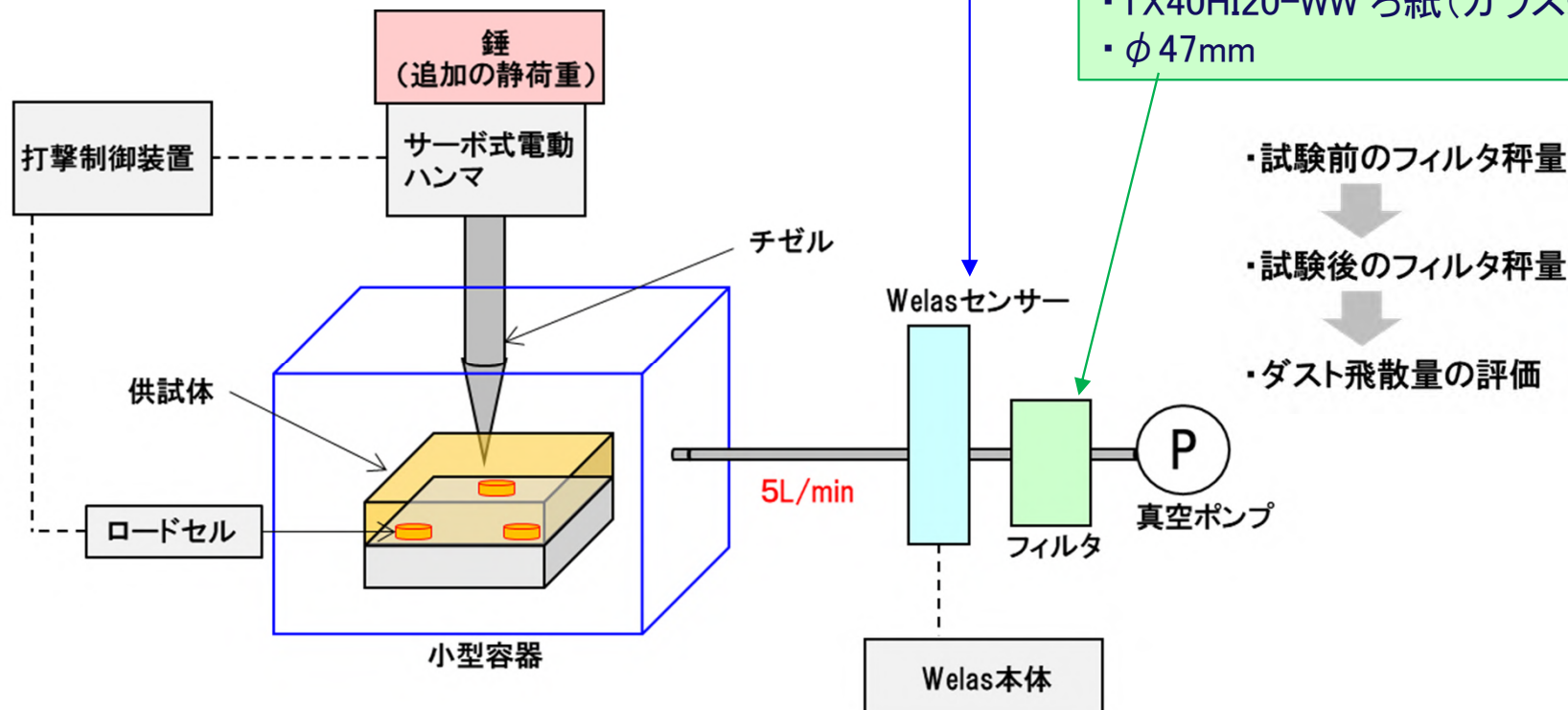
○フィルタ

- ・TX40HI20-WW ろ紙（ガラス繊維系）
- ・ $\phi 47\text{mm}$

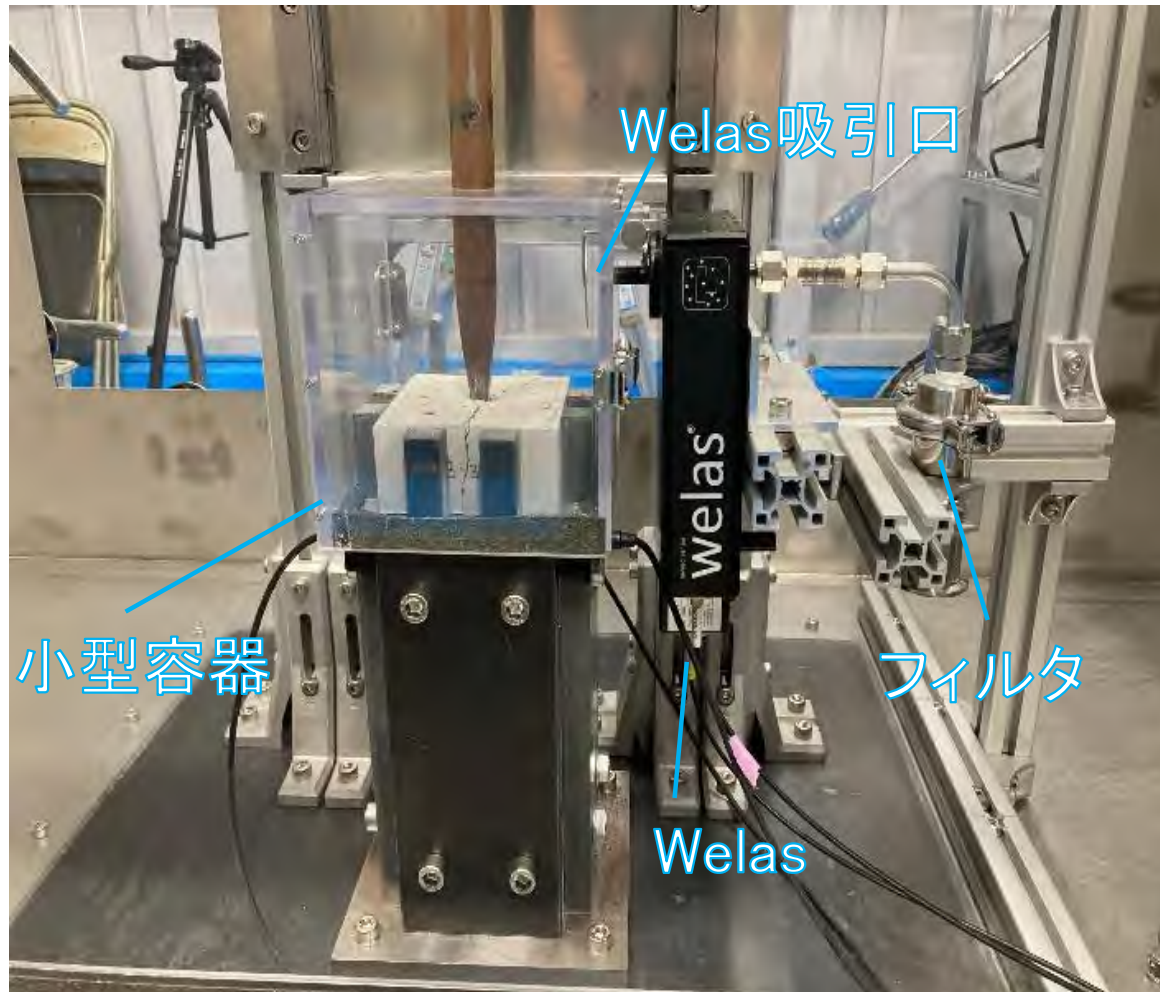
・試験前のフィルタ秤量

・試験後のフィルタ秤量

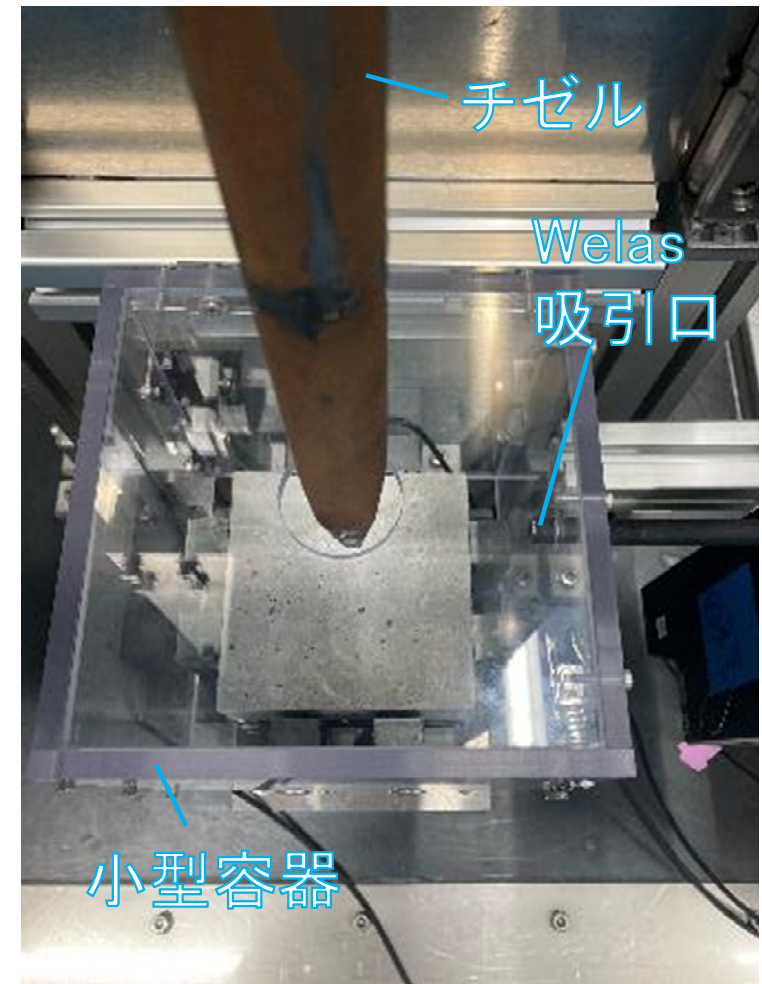
・ダスト飛散量の評価



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 チゼル: 試験装置



<試験体系(横から見た図)>



<試験体系(上から見た図)>

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

チゼル：試験方法（チゼル刃、供試体）

○チゼルの形状



○供試体の物性表

項目		密度	ビッカース硬度	破壊靱性	ヤング率	ポアソン比	剛性率	結晶粒径	空隙率	主要な結晶相 (結晶構造)	曲げ強度	圧縮強度	
		(g/cm3)	(GPa)	(MPa・m1/2)	(GPa)	(-)	(GPa)	(μm)	(%)		(MPa)	(MPa)	
供試材	緻密質アルミナ	3.83	11.82	3.5	349	0.229	141.9	2.2	1.5	コランダム			
	ジルコン	2.81	4.91	1.4	108	0.248	43.1	0.4	3.6	ジルコン			
	モルタル（材齢28日上部）	2.30	0.78	0.5	35.4	測定不可	測定不可	測定不可	11.4	Quartz+Portladite	8.6	62.7	58.1
	モルタル（材齢28日下部）	2.30	—	—	—	—	—	—	10.2	Quartz+Portladite	8.9	72.0	69.4
	モルタル（材齢91日）	—	—	—	36.6	—	—	—	—	—	9.3	71.7	68.1

使用する供試体の形状は、110mm × 110mm × 50mmで統一

○チゼルの特徴

- 面積の広い燃料デブリを10cm四方などの寸法に加工する際には、加工速度が早く、比較的ダスト飛散量も少ない。
- 金属および刃先の材質（焼き入れ鋼）より硬い材料は破碎できない。
- 割れ方が不規則になる。

【2】ダスト飛散率測定試験 チゼル試験（ポイントチゼルと平タガネチゼル）

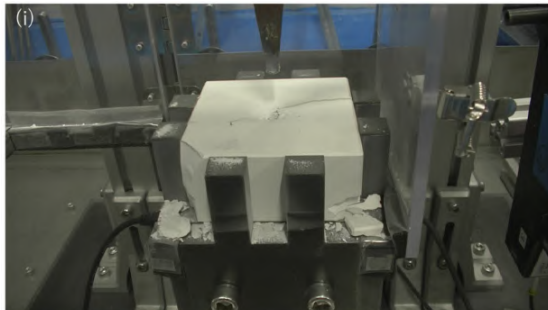
- チゼルは、代表的なポイントチゼルと平タガネチゼルの2種を用いて試験した。
- いずれのチゼルでも破碎のき裂の方向はバラバラで、制御は困難であった。

ポイントチゼル

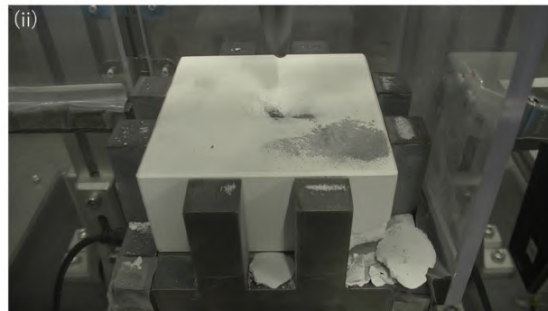
平タガネチゼル

<打撃速度>

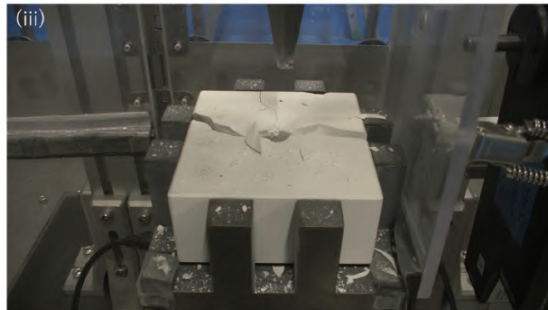
650bpm



800bpm

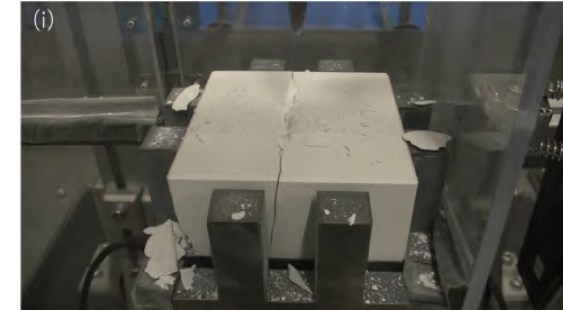


950bpm

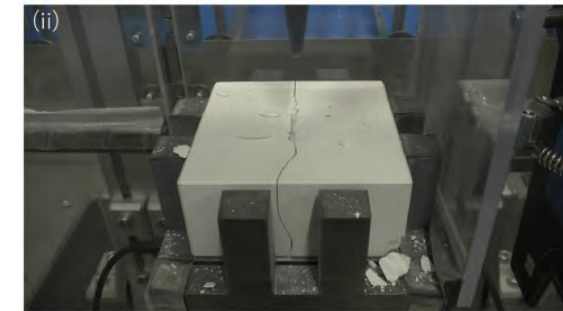


<打撃速度>

650bpm



800bpm



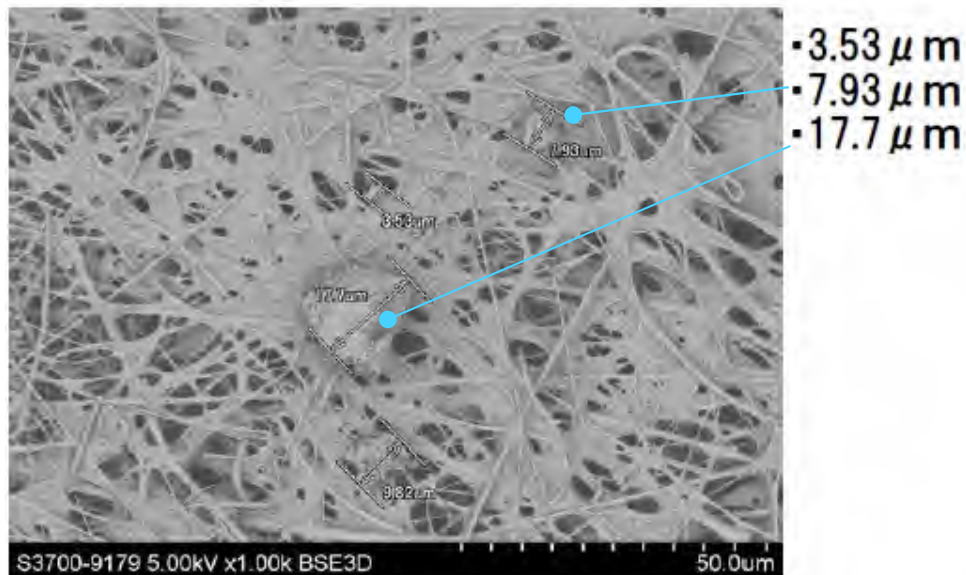
950bpm



いずれも供試体はジルコン、追加静荷重20kgf

【2】ダスト飛散率測定試験 チゼル：試験結果（粒子形状）

- モード2（割れる）でフィルタ上に採取した飛散ダストの形状は様々だが、極端に歪な形状は見当たらなかった。
- 粒径も様々だが、最大で $30\mu\text{m}$ 程度であった。



モルタル（モード2、800 bpm、ポイントチゼル）

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 チゼル：試験結果（飛散率の導出）

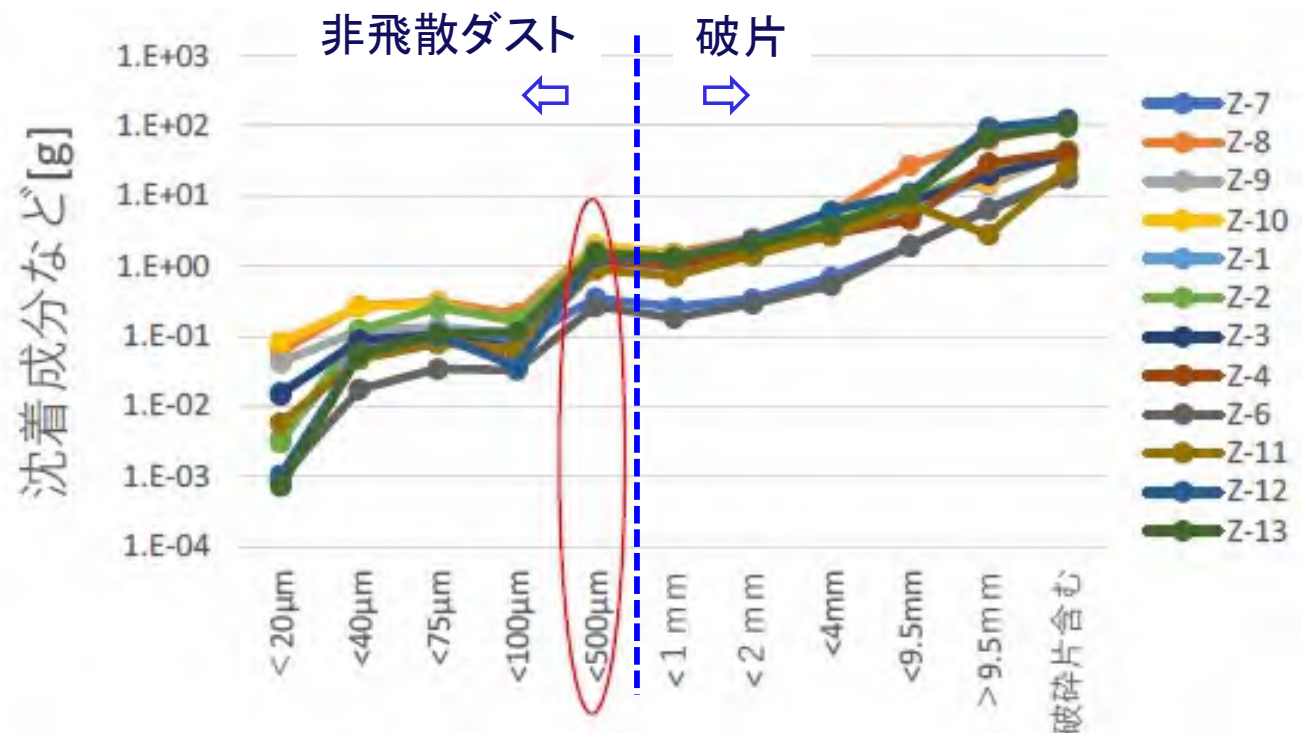
- 多くの破片ができるため、破碎後に切削部周辺や床に沈着した破片や粒子を回収し、ふるいで分級し、500 μ mメッシュを通過した沈着ダストを非飛散ダストと見なした。
- 小型容器内で切削・計測した影響は、解析結果※に基づき、共通設計ケーシング内のチゼル切削では回収されない50 μ mを超える粒子を飛散ダストから除外した。

$$\text{飛散率}[-] = \frac{\text{飛散ダスト量[g]}}{\text{欠損重量[g]}} = \frac{\text{飛散ダスト}(\leq 50 \mu\text{m})\text{量[g]}}{500 \mu\text{m以下沈着ダスト量[g] + \text{飛散ダスト量[g]}}$$



破碎後の供試体

(モルタル・ポイントチゼル・800bpm・追加の静荷重: 20kgf)

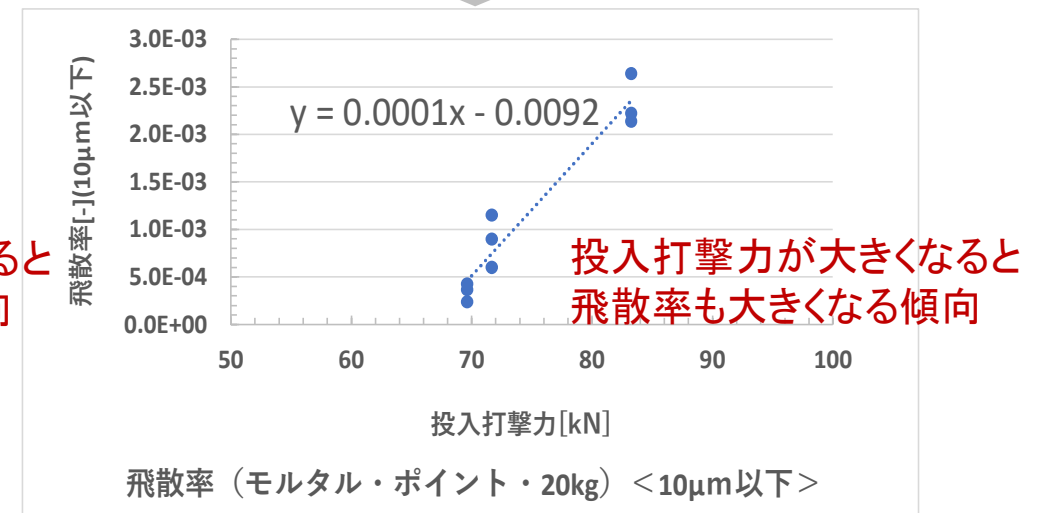
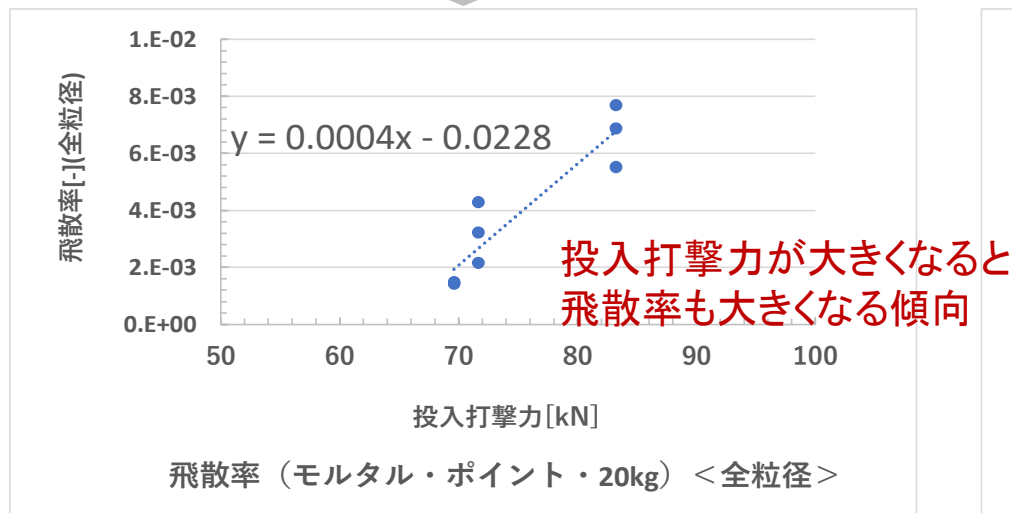
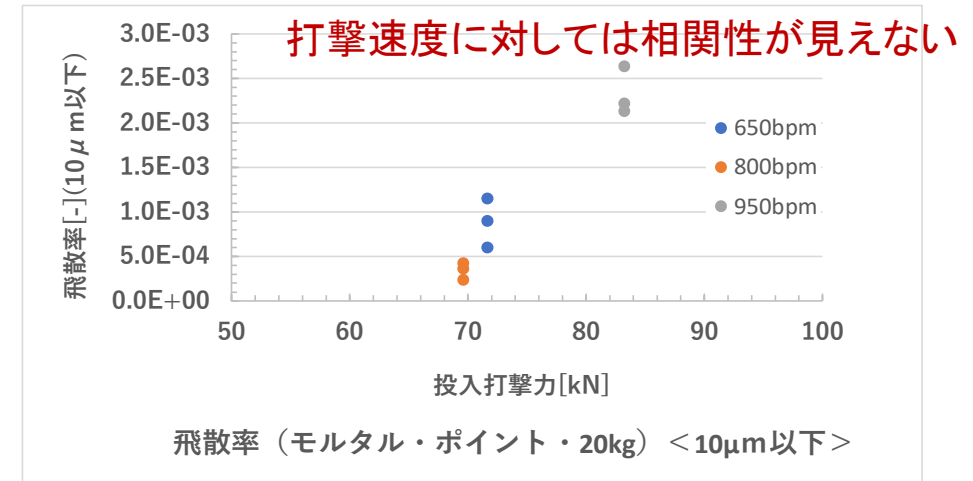
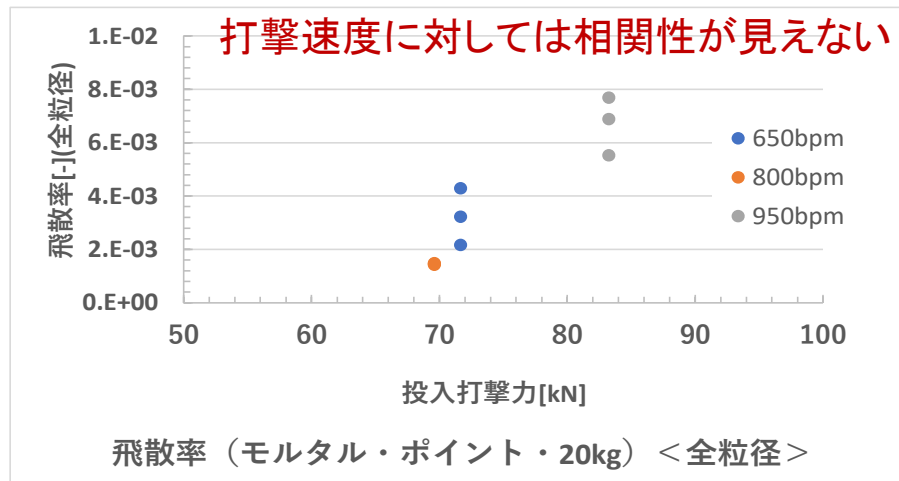


沈着粒子の分級結果（ジルコン、ポイントチゼル）

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

チゼル：試験結果（モルタル・ポイント）モード2飛散率

- ポイントチゼルによるモルタル破碎では、静荷重および打撃速度にも依存性がなく、投入打撃力が大きいほど、飛散率が大きくなる傾向を示した。

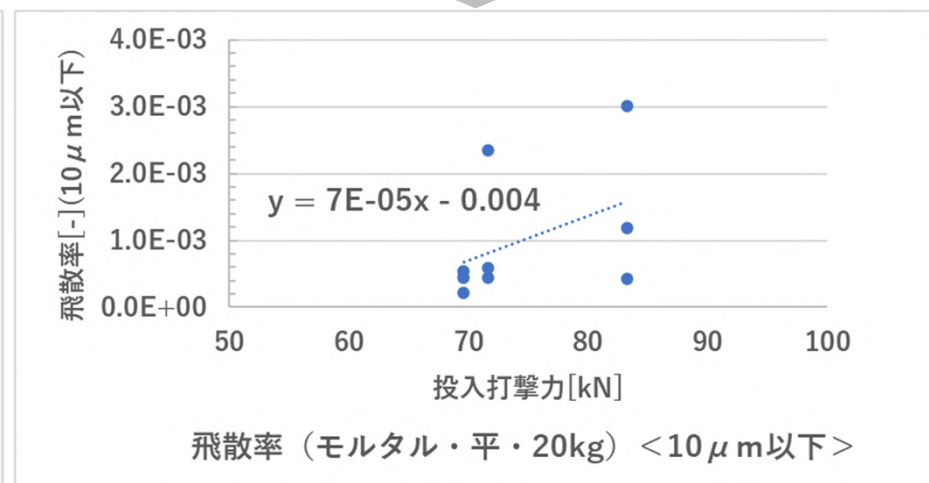
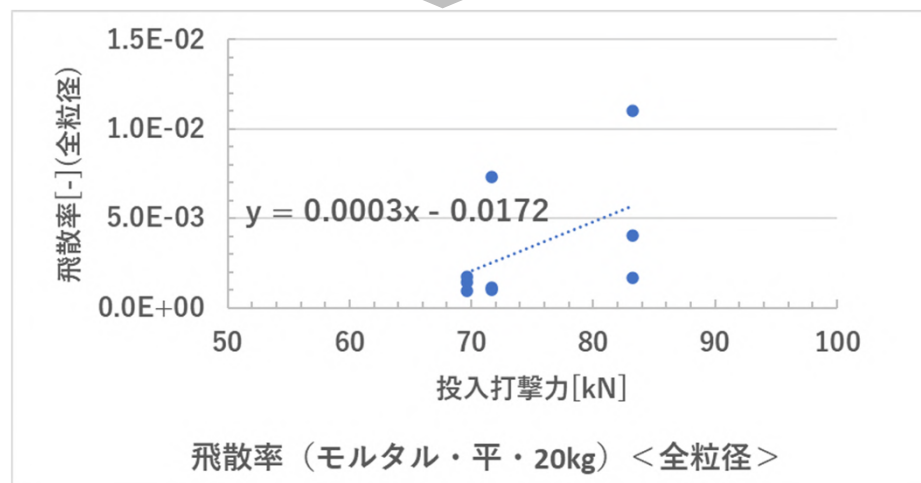
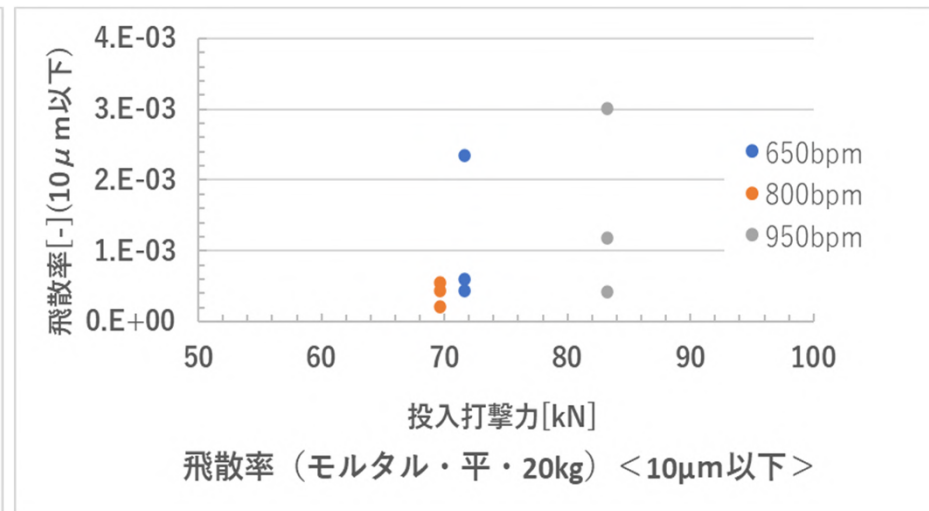
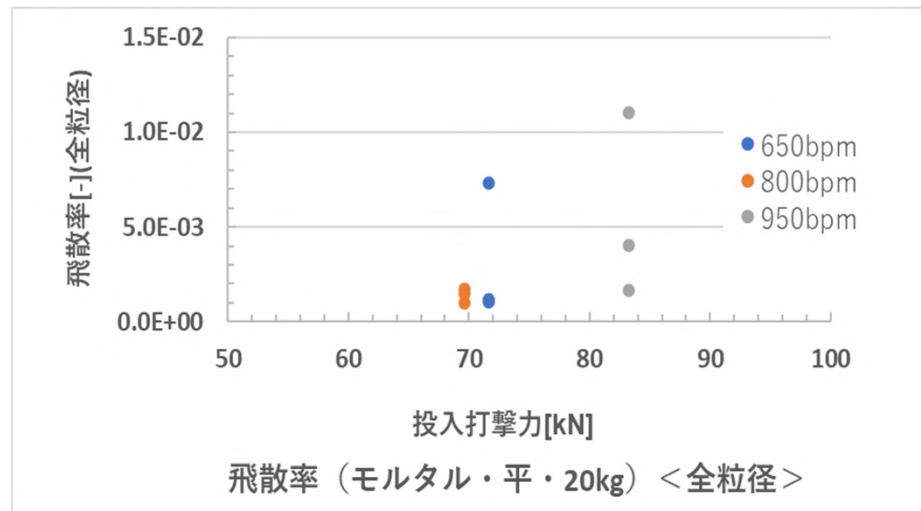


モルタルでの投入打撃力と飛散率の関係（左：全粒径、右： $\leq 10 \mu m$ ）

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

チゼル：試験結果（モルタル・平タガネ）モード2飛散率

- 平タガネによるモルタル破碎の場合も打撃速度にも依存性がなく、バラツキが大きい、投入打撃力が高いほど飛散率も大きい傾向が見られた。

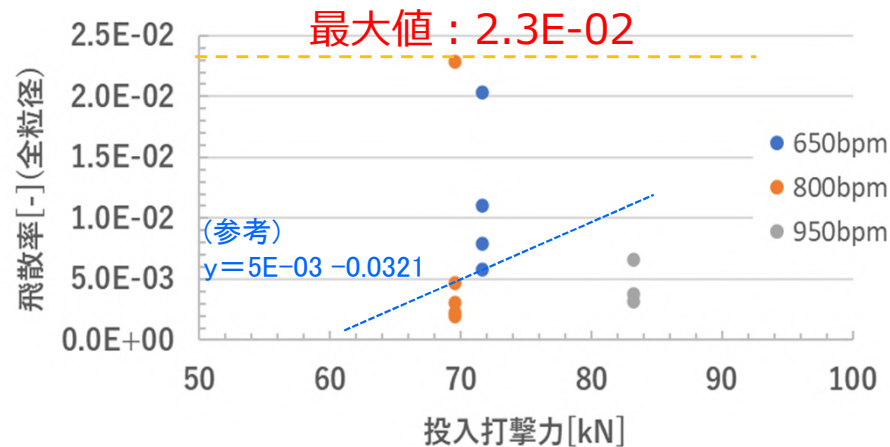


モルタルでの投入打撃力と飛散率の関係（左：全粒径、右： $\leq 10 \mu m$ ）

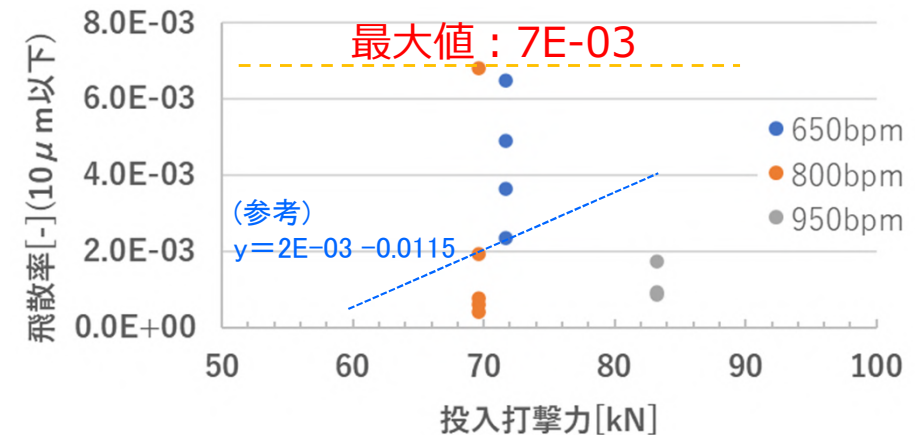
【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

チゼル：試験結果（ジルコン・ポイント/平タガネ）モード2飛散率

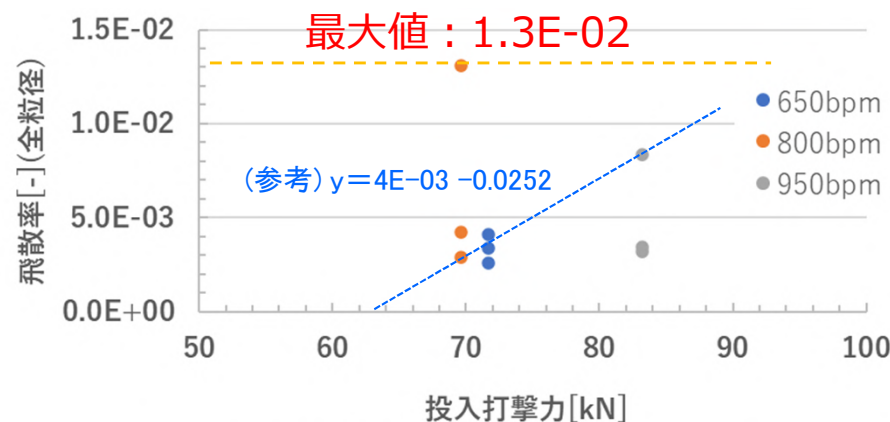
- ジルコンの場合，バラツキが非常に大きい，概ね投入打撃力大きいほど，飛散率も大きい傾向があり、飛散率の絶対値は，モルタルと比べると少し大きめであった。



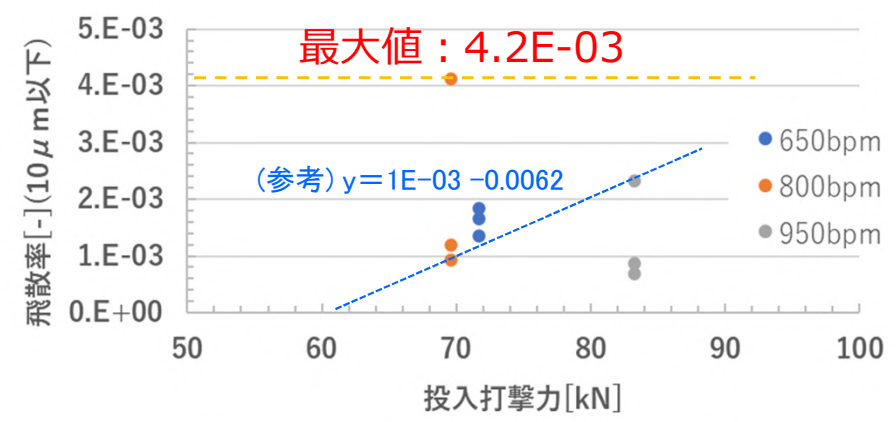
飛散率（ジルコン・ポイント・20kg）＜全粒径＞



飛散率（ジルコン・ポイント・20kg）＜10 μm以下＞



飛散率（ジルコン・平・20kg）＜全粒径＞



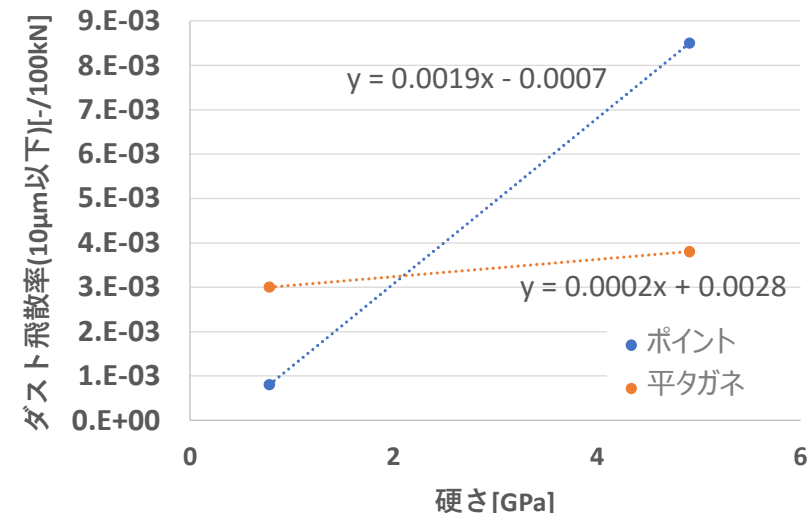
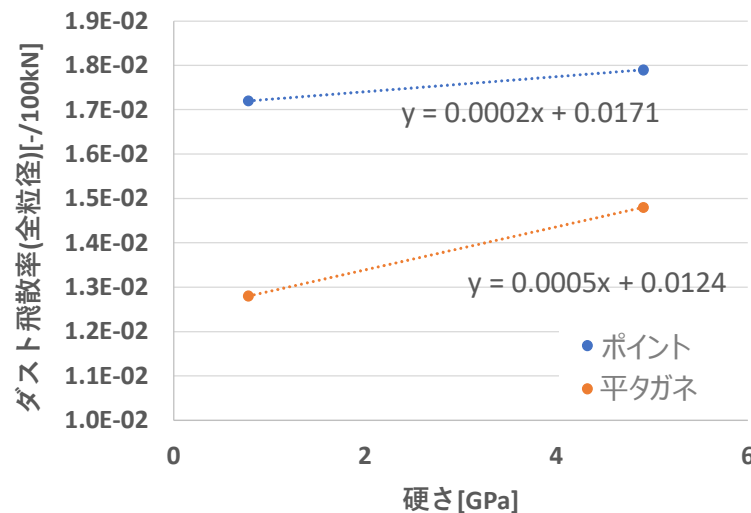
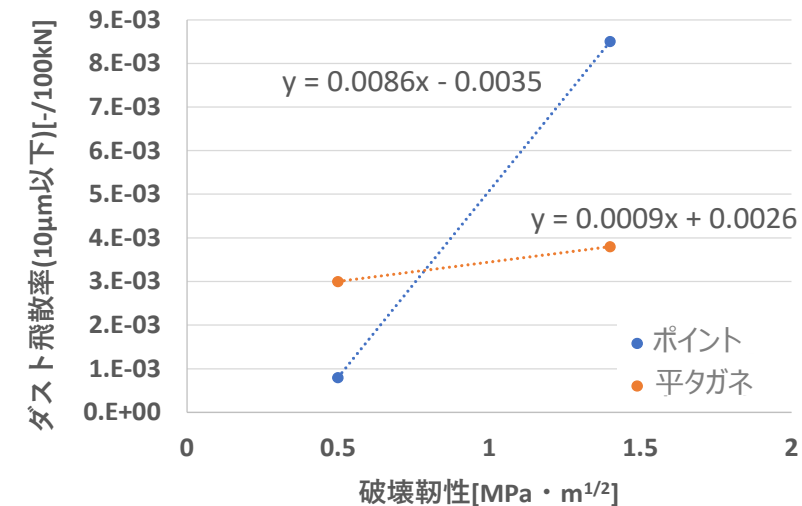
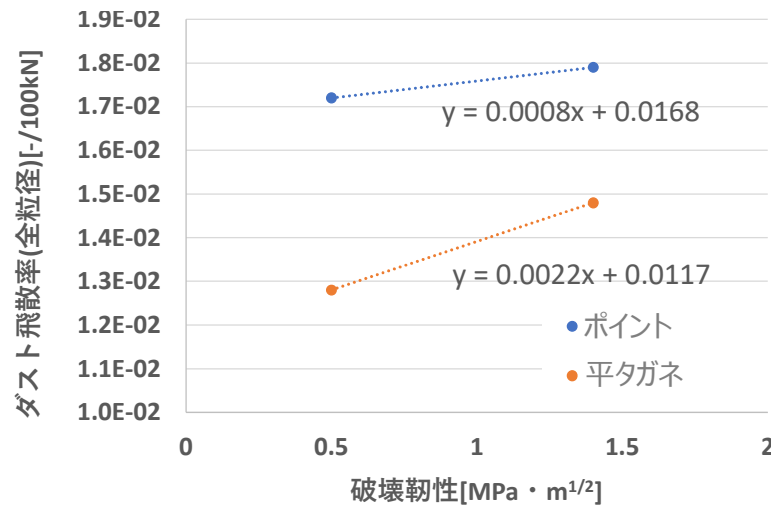
飛散率（ジルコン・平・20kg）＜10 μm以下＞

ジルコンでの投入打撃力と飛散率の関係（左：全粒径、右：≤10 μm）

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

チゼル：試験結果（供試体物性依存性）モード2飛散率

- 硬く、破壊靱性値の大きい供試体ほど、ダスト飛散率が大きくなる傾向を示した。



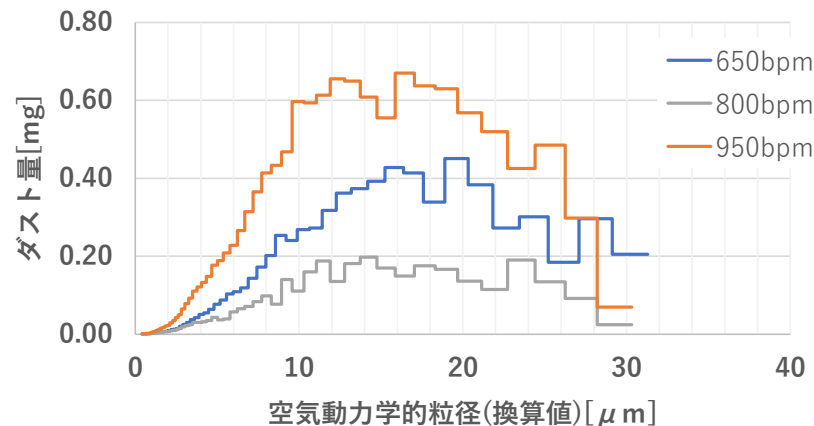
単位打撃力あたりの飛散率と供試体物性値の関係

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

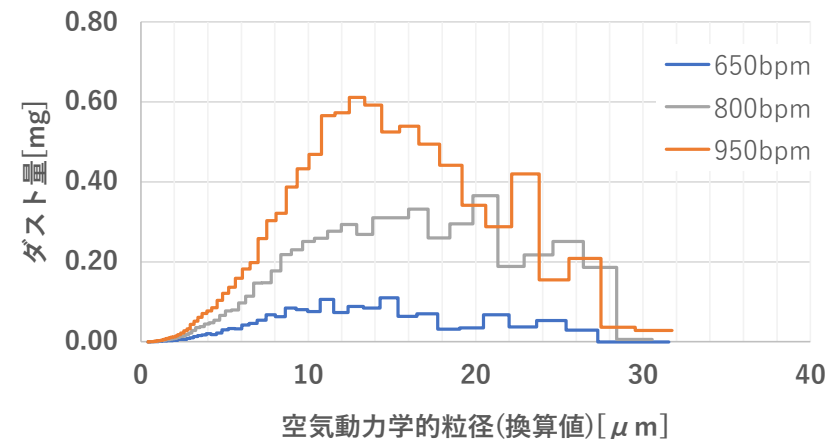
チゼル：試験結果（供試体物性依存性）モード2飛散率

- 粒径分布は、供試体材料および刃の形状（ポイント・平タガネ）の違いで明確な変化はなく、空気動学的径に換算した中央値は8～20 μm の範囲であった。

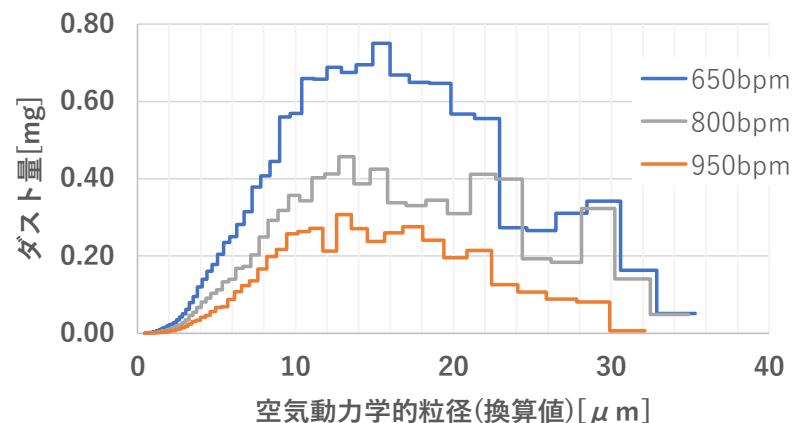
○モルタル・ポイント



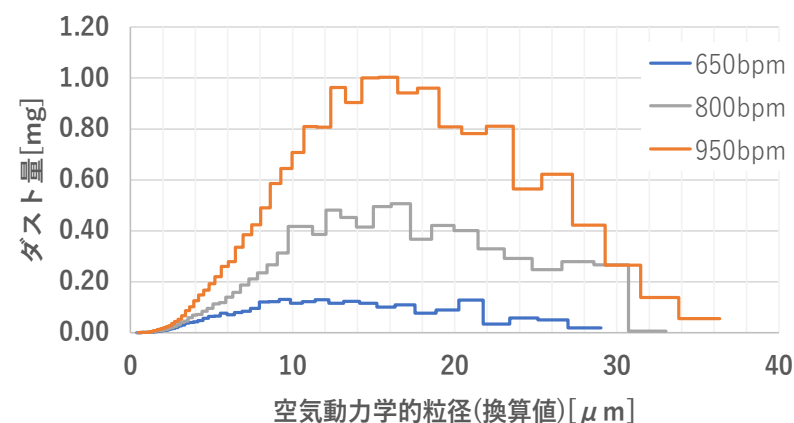
○モルタル・平タガネ



○ジルコン・ポイント



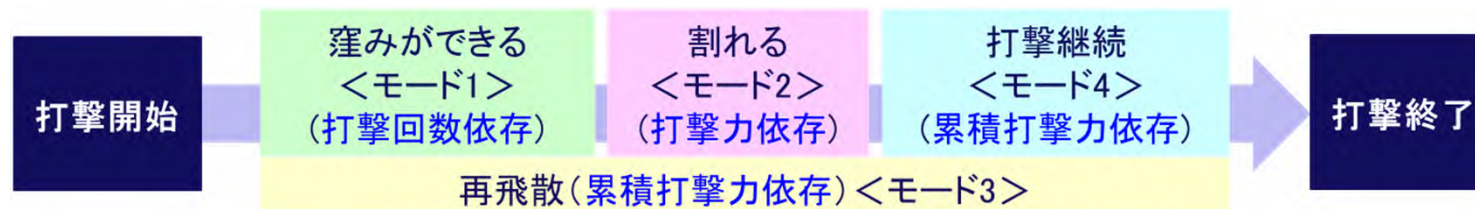
○ジルコン・平タガネ



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

チゼル：試験結果（各モードのダスト発生量の比較）

- モード2以外でも試験を行い、それぞれ相関関係のあるパラメータとダスト飛散量（全粒径）の関係を以下のとおり得た。
- モード3および4は欠損重量の概念が存在しないため、飛散率として表記できない。



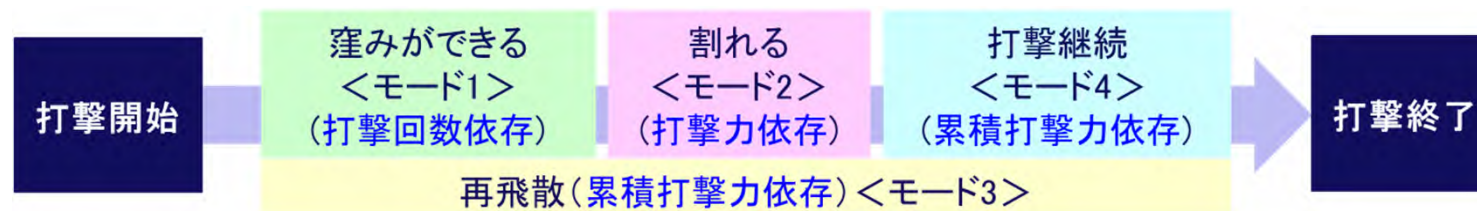
	飛散ダスト量評価式（全粒径）			
	モード1	モード2	モード3	モード4
パラメータ	x : 打撃回数[回] y : ダスト飛散量 [mg]	x : 投入打撃力[kN] y : ダスト飛散量 [mg]	x : 累積投入打撃力[kN] y : ダスト飛散 [mg] (※)	x : 累積投入打撃力[kN] y : ダスト飛散量 [mg]
モルタル / ポイント	y=0.00498x	y = 0.3557x - 20.189	y = 0.00007x	y = 0.00045x
モルタル / 平タガネ	y=0.00402x	y = 0.4363x - 25.814		
ジルコン / ポイント	y=0.00086x	y = 0.6603x - 43.099		
ジルコン / 平タガネ	y=0.00146x	y = 0.8215x - 52.454		

※：今回試験は、打撃により影響する面積として121[cm²]、粉体量を19.5[g]で試験した。予測式の適用においては、以下の補正を行う必要がある。
補正係数＝密度[mg/cm²] × 打撃により影響する面積[cm²] / (19500[mg])

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

チゼル：試験結果（各モードの飛散ダスト量の比較）

- モード2以外でも試験を行い、それぞれ相関関係のあるパラメータと飛散ダスト（ $\leq 10\mu\text{m}$ ）量の関係を以下のとおり得た。
- モード3および4は欠損重量の概念が存在しないため、飛散率として表記できない。



	飛散ダスト量評価式（ $10\mu\text{m}$ 以下）			
	モード1	モード2	モード3	モード4
パラメータ	x : 打撃回数[回] y : ダスト飛散量 [mg]	x : 投入打撃力[kN] y : ダスト飛散量 [mg]	x : 累積投入打撃力[kN] y : ダスト飛散 [mg] (※)	x : 累積投入打撃力[kN] y : ダスト飛散量 [mg]
モルタル / ポイント	$y=0.0011x$	$y = 0.1566x - 9.8261$	$y = 0.00003x$	$y = 0.00021x$
モルタル / 平タガネ	$y=0.00158x$	$y = 0.1033x - 5.7046$		
ジルコン / ポイント	$y=0.00048x$	$y = 0.1857x - 12.31$		
ジルコン / 平タガネ	$y = 0.0007x$	$y = 0.1658x - 9.838$		

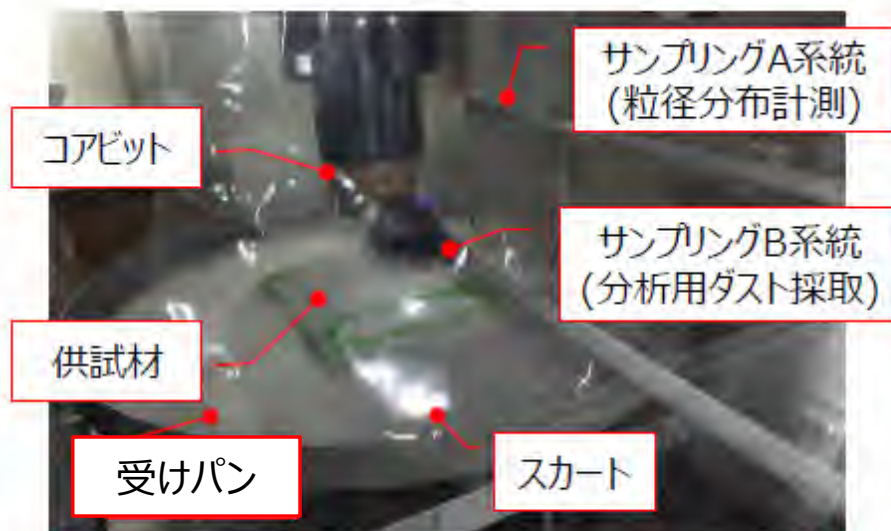
※：今回試験は、打撃により影響する面積として $121[\text{cm}^2]$ 、粉体量を $19.5[\text{g}]$ で試験した。予測式の適用においては、以下の補正を行う必要ある。
補正係数＝密度 $[\text{mg}/\text{cm}^3] \times$ 打撃により影響する面積 $[\text{cm}^2] / (19500[\text{mg}])$

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 コアボーリング：試験装置

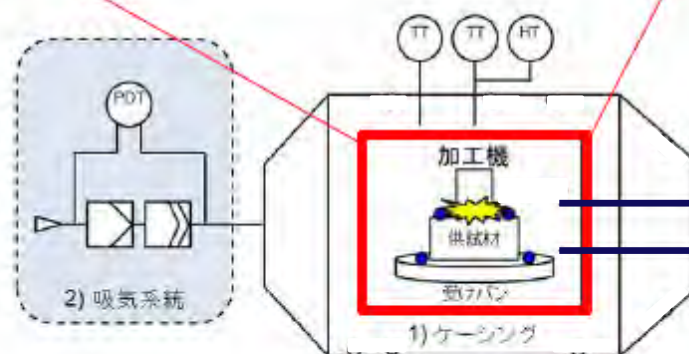
- 共通試験体系では飛散ダスト量が少なかったため、チゼルと同様に小型ケーシング内で切削しダストサンプリングを行った。

装置概略仕様

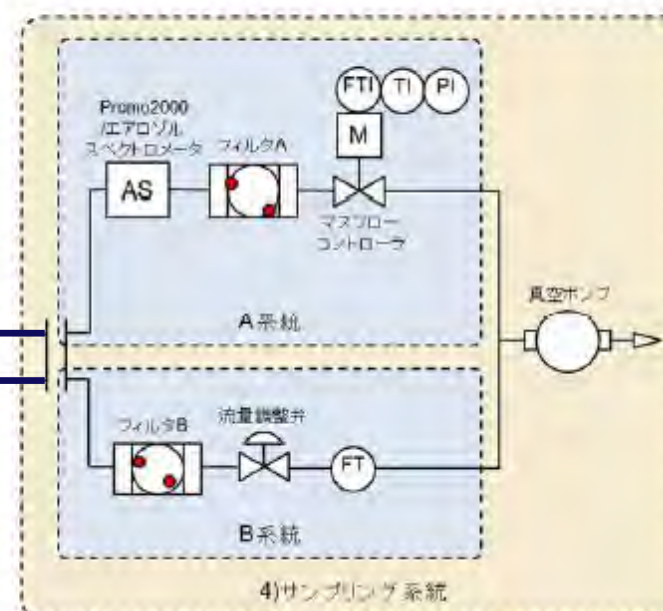
項目	仕様
スピンドルユニット	最大回転数 600rpm
押付装置	最大押付力 15000N
コアビット	ダイヤモンドビット 外径76mm
粒径分布計測 (A系統)	Welas (光散乱式)※ 計測範囲0.6~40μm



コアボーリング加工部外観



コアボーリング試験装置概略図



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 コアボーリング：試験方法と試験条件

パラメータ設定

項目	設定条件
回転数	60, 120, 300, 600rpm
押付力	1, 2, 3, 6kN
加工深さ ※1	最大2mm×3回 または 最大5mm
加工時間 ※1	最大5分
コアビット ※2	C4タイプ（マトリックス：硬） K12タイプ（マトリックス：軟）

※1：ダイヤモンド砥粒は500～600℃で焼損の恐れがあるため、
分析に必要な最小限のダストが取得できる条件として設定

※2：供試材（コールド模擬材）に応じて変更

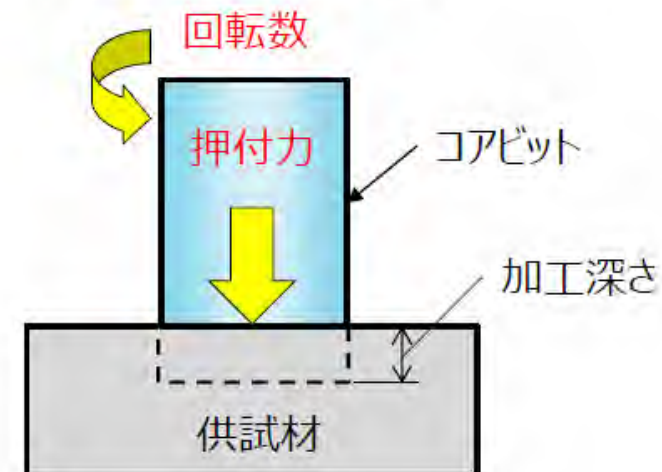
供試体の材質

供試材 □110mm ×t50mm	モルタル 多孔質アルミナ 緻密質アルミナ ジルコン SS400 SUS304
-------------------------	---

- 回転数と押付力をパラメータとして設定
- 各試験条件1ケースあたり3Run実施
- 1Runごとにダスト重量，供試材・ビットの欠損重量等を計測
- ダスト飛散率ARFを以下にて算出

$$ARF = \frac{\text{フィルタA重量差} + \text{フィルタB重量差}}{\text{供試材欠損重量} + \text{ビット欠損重量}}$$

- 粒径分布はWelasによるリアルタイム計測と，マイクロトラックによる採取ダストサンプルの計測を実施した。



パラメータ補足説明図

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 コアボーリング:コアビット

- コアビットは、これまでの補助事業成果を参考に旭ダイヤモンド工業社製のK12とC4を使用。

	K12	C4
メーカー	旭ダイヤモンド工業	旭ダイヤモンド工業
型式	N-76-60-WK12	N-76-60-WC4
サイズ	外径76mm、内径60mm	外径76mm、内径60mm
ビット形状	インプリビット	インプリビット
ツールス	アイジイ	アイジイ
規格	JIS	JIS









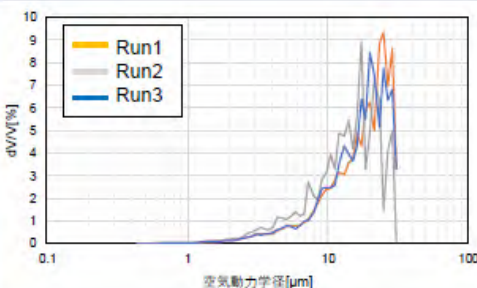
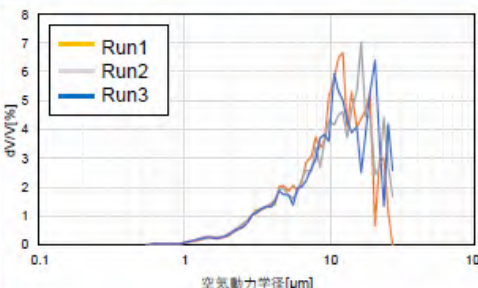
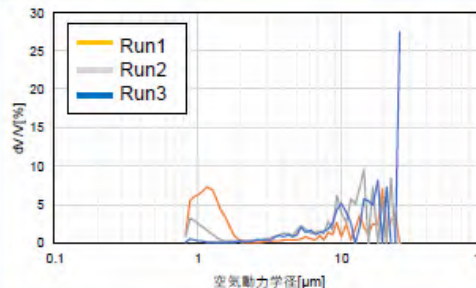
K12ビット



C4ビット

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 コアボーリング：試験結果（材料と粒径分布）

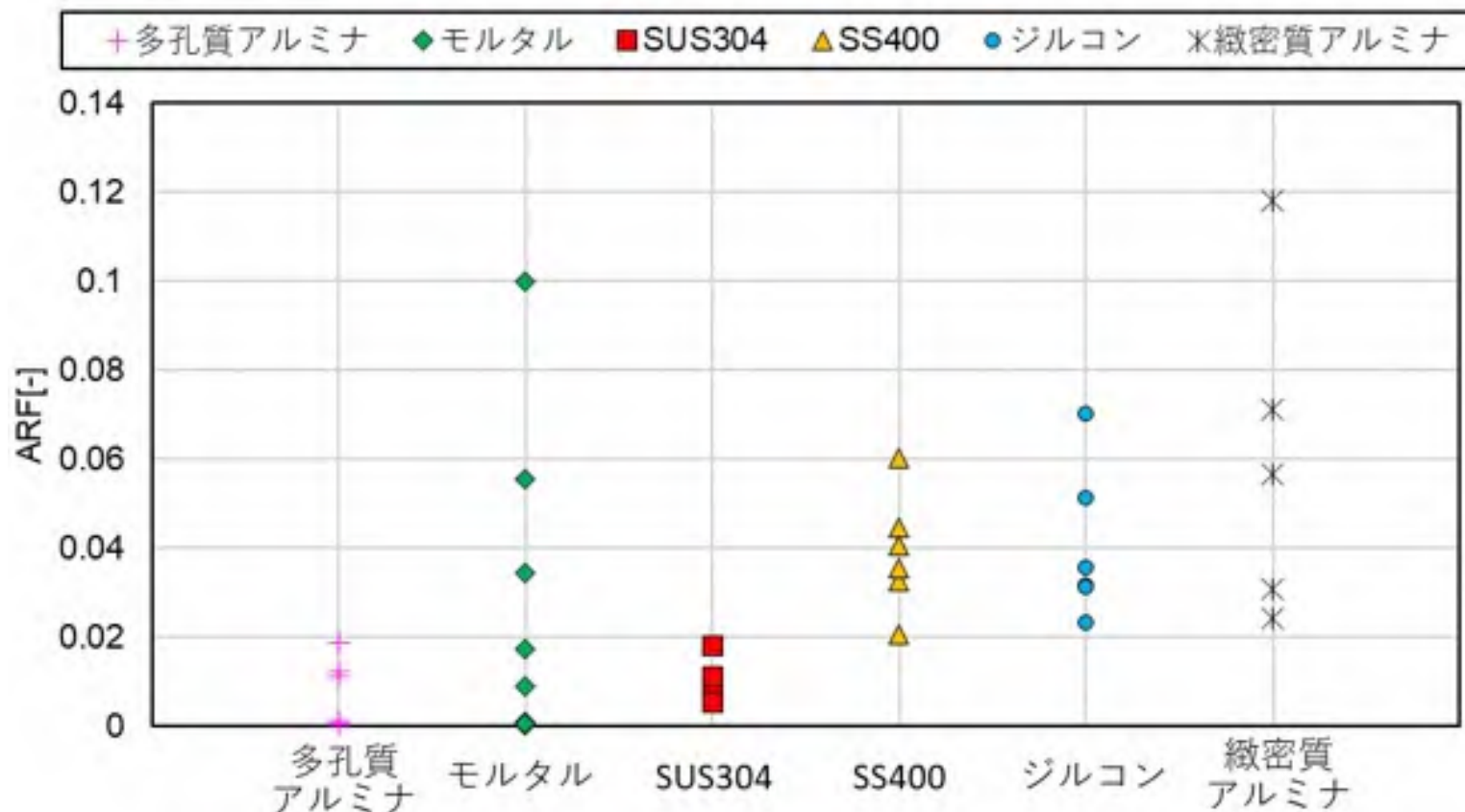
- モルタル・多孔質アルミナでは、粒径分布の傾向は似通っており、 $10\mu\text{m}$ 以上にピークが見られた。
- SS400では、 $10\mu\text{m}$ 以上のピークの外、 $1\mu\text{m}$ 付近にピークが見られた。また、ビットの欠損が顕著であった。

供試体	モルタル	多孔質アルミナ	SS400
回転数	300rpm	300rpm	120rpm
押付力	1kN	1kN	6kN
試験後 供試材			
試験後 ビット			
粒径分布			

【2】ダスト飛散率測定試験

コアボーリング：試験結果（材料と飛散率）

- 供試体毎のダスト飛散率（ARF）は下図の通りであり、概ね0.1（10%）以下であるが、緻密質アルミナとモルタルで高い傾向が得られた。

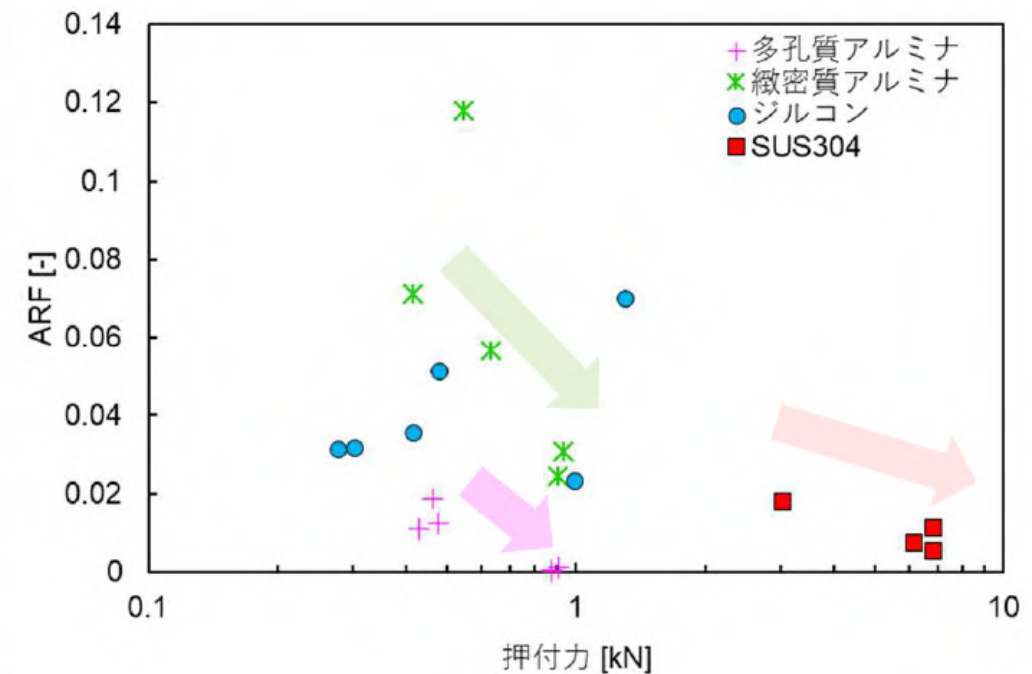
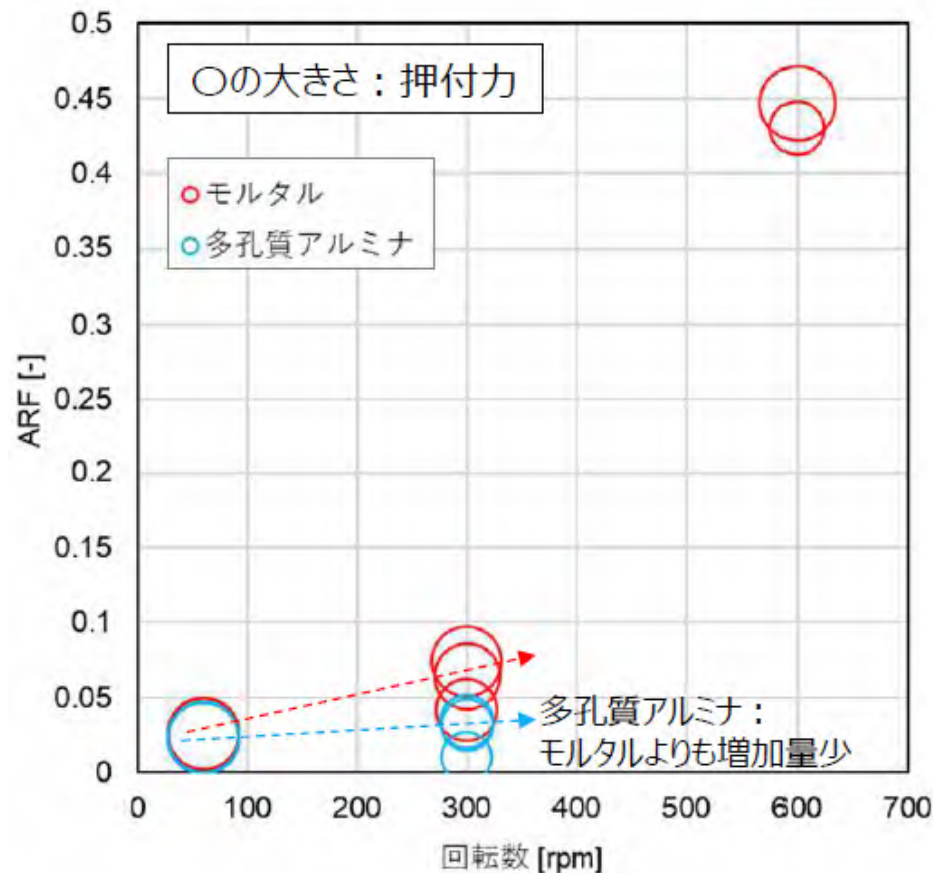


供試体毎のARF

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

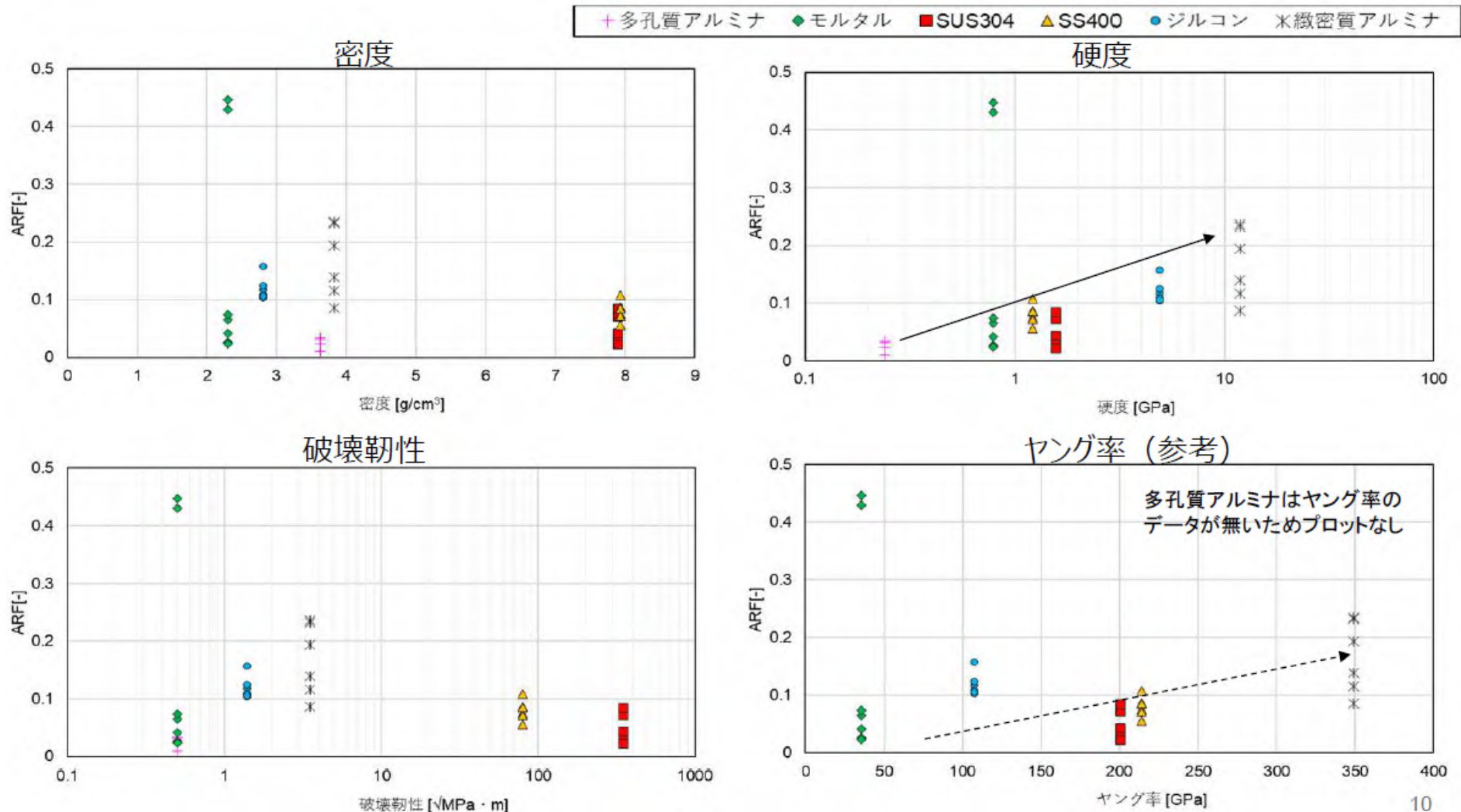
コアボーリング：試験結果（回転数・押付力と飛散率）

- 回転数の増加により、飛散率は増加する傾向が見られた。
- 多孔質アルミナでは、モルタルに比べ回転数が飛散率に与える影響は小さい。
- 押付力の増加により、多孔質アルミナ、緻密質アルミナ、SUS304は飛散率が低下する傾向が見られた。一方、ジルコンは異なる傾向が見られたが、切削時に破碎して振動が起きていたことが原因の可能性がある。



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 コアボーリング：供試体物性と飛散率

- 密度、破壊靱性に対しては山なりの分布をしており、飛散率との相関は小さい。
- 硬度とヤング率に対しては右肩上がりの傾向があり、相関が高いと考えられる。



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 コアボーリング：パラメータ依存性

パラメータおよび物性値によるARFへの寄与率を重回帰分析により算出した。

- 試験パラメータのみの分析 : **回転数の寄与率が65%以上**であり、押付力を上回っている
- 物性値のみの分析 : **硬度の寄与率が大部分**を占めている
- 試験パラメータと物性値を合わせた分析 : **硬度の寄与率が最も高く、続いて回転数**となっている

⇒ARFは硬度の影響を最も受け、試験パラメータでは押付力よりも回転数の方が影響しているという結果が得られた。ただし、サンプル数が少ないためデータを追加しての分析実施が望ましい。

試験パラメータの寄与率

パラメータ	ARFへの寄与率 [%]
回転数	69.4 (+)
押付力	30.6 (-)

物性値の寄与率

物性値	ARFへの寄与率 [%]
密度	3.7 (-)
硬度	81.1 (+)
破壊靱性	15.2 (-)

試験パラメータおよび物性値の寄与率

パラメータ 物性値	ARFへの寄与率 [%]
回転数	39.2 (+)
押付力	0.4 (-)
密度	11.7 (+)
硬度	47.6 (+)
破壊靱性	1.1 (-)

符号：パラメータの値が増加したとき
ARFが増加する場合は(+)
ARFが減少する場合は(-)

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 レーザー(ガウジングと切断)

- 燃料デブリ取り出しに想定されるレーザー切削工法として、以下に示すように、レーザーガウジングとレーザー切断の2法がある。
- 本事業ではこれら2種のレーザー切削工法により、乾式環境でのコールド供試体を切削した場合の、ダスト飛散率とダスト粒径分布などの飛散率データを取得する。

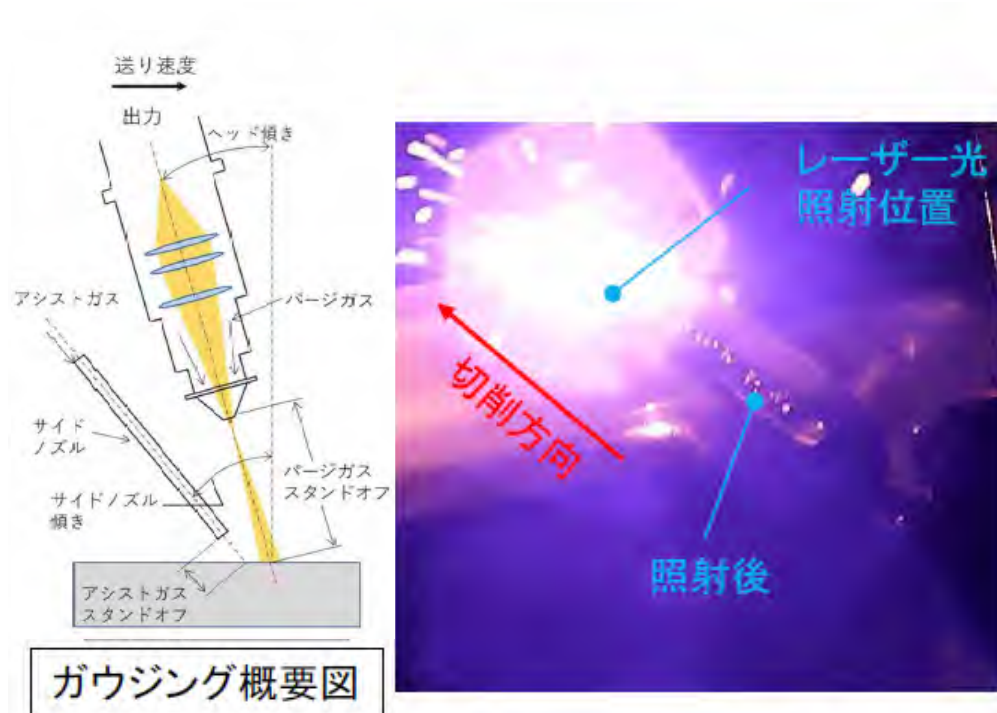


図 レーザーガウジング中の様子(SS400)

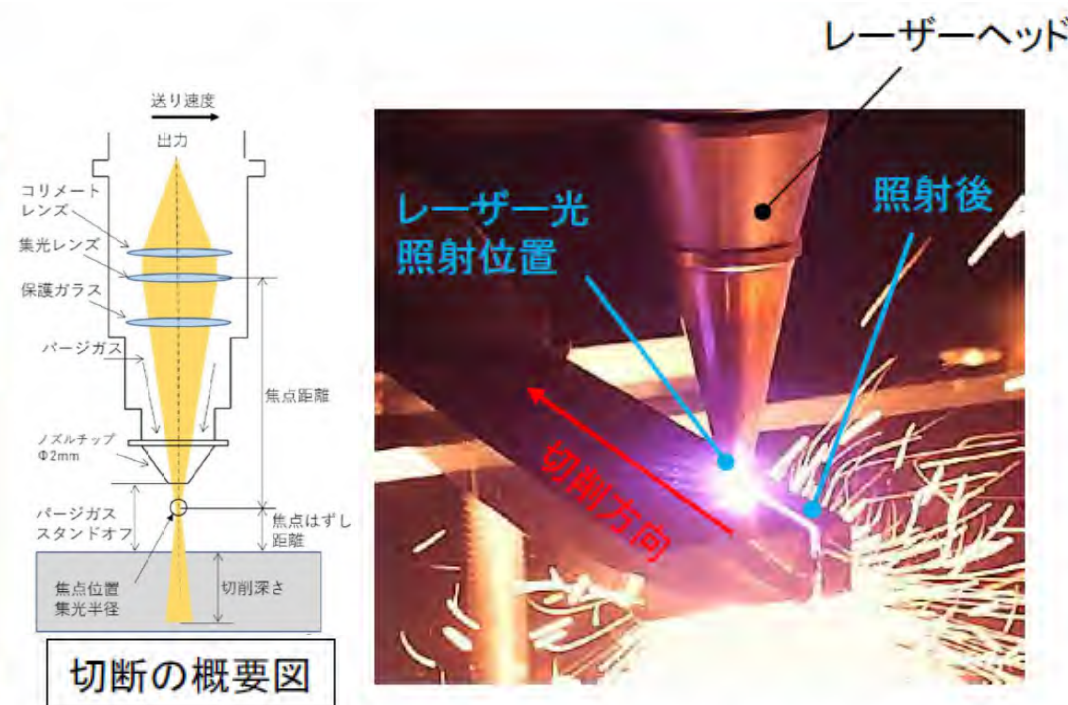


図 レーザー切断中の様子(SS400)

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 レーザー：パラメータ設定の考え方

- 事前検討により、ダスト飛散率への影響が想定されるレーザー加工のパラメータ候補を選定した(下表①)。
- 実環境の想定や予備試験により、パラメータ候補のうち、ダスト飛散率が高くなると推定されるパラメータを抽出した(下表②)。

表 レーザー加工パラメータ

パラメータ候補(①)	抽出後のパラメータ(②)	
	レーザーガウジング	レーザー切断
出力	○	○
送り速度	○	○
ガス種類(アシストガス/パージガス)	× ※1	× ※1
波長	× ※2	× ※2
焦点距離	× ※3	× ※3
アシストガススタンドオフ	× ※3	—
パージガススタンドオフ	× ※3	○
焦点はずし距離	× ※3	○
アシストガス流量	○	—
パージガス流量	× ※3	× ※3
姿勢	× ※2	× ※2
ヘッド傾き	× ※3	× ※3
サイドノズル傾き	× ※3	—

凡例：○：抽出パラメータ，×：固定したパラメータ，—：対象外のパラメータ

※1 実施工環境を考慮し，窒素に固定した。

※2 装置仕様により，固定した。

※3 パラメータ抽出のために実施した事前の試験結果より，影響が少ないと判断し固定した。

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 レーザー（ガウジングと切断のパラメータ）

- レーザーガウジングは合計25ケース、各3RUNの繰り返し試験を実施した。
- レーザー切断では合計26ケース、各3RUNの繰り返し試験を実施した。

表 パラメータ設定

パラメータ項目	レーザーガウジング	レーザー切断
出力	10, 5kW	10, 5kW
送り速度	0.3, 0.6, 0.9 m/min (SS400のみ0.1m/min実施)	0.6, 1.2 m/min
焦点距離	300mm	300mm
焦点はずし距離	150mm	0, -5, +5mm
アシスト/パージガスの種類	窒素	窒素
パージガス流量	55L/min	55L/min
パージガススタンドオフ	153mm	1, 3, 5 mm
アシストガススタンドオフ	30mm	—
アシストガス流量	30, 90, 150L/min (モルタルのみ)	—
ヘッド傾き	前進角20°	0°
サイドノズル傾き	50°	—
姿勢	下向き	下向き

表 供試材の材質

レーザーガウジング	レーザー切断
SS400, モルタル, ジルコン, SUS304, 緻密質ジルコニア, 多孔質ジルコニア, 緻密質アルミナ, 非均質材 (60mol%Al ₂ O ₃ -40mol%ZrO ₂)	SS400, モルタル, ジルコン, SUS304, 緻密質ジルコニア, 多孔質ジルコニア

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 レーザー：試験装置

■ 試験設備の各部仕様は以下のとおりである。

項目	内容	備考
切削方式	レーザー切断, レーザーガウジング	ファイバーレーザー, 出力 Max 10kW 波長 1064nm
ケーシング排気方向	横排気(横流れ)	加工部付近流速 約0.1m/s
粒径分布計測	A系 Welas(光散乱径にて粒径を計測する計測装置)	設定測定範囲 0.2~10 μ m
排気系(HEPA系)仕様	ミニブリーツ型フィルタ, 流量 約5m ³ /min	捕集可能粒径: 約0.3 μ m~
サンプリング系仕様	A系	インライン型1段フィルタ, 流量 5L/min
	B系	ガラス繊維円筒フィルタ, 流量 約250L/min
		捕集可能粒径: 約0.8 μ m~

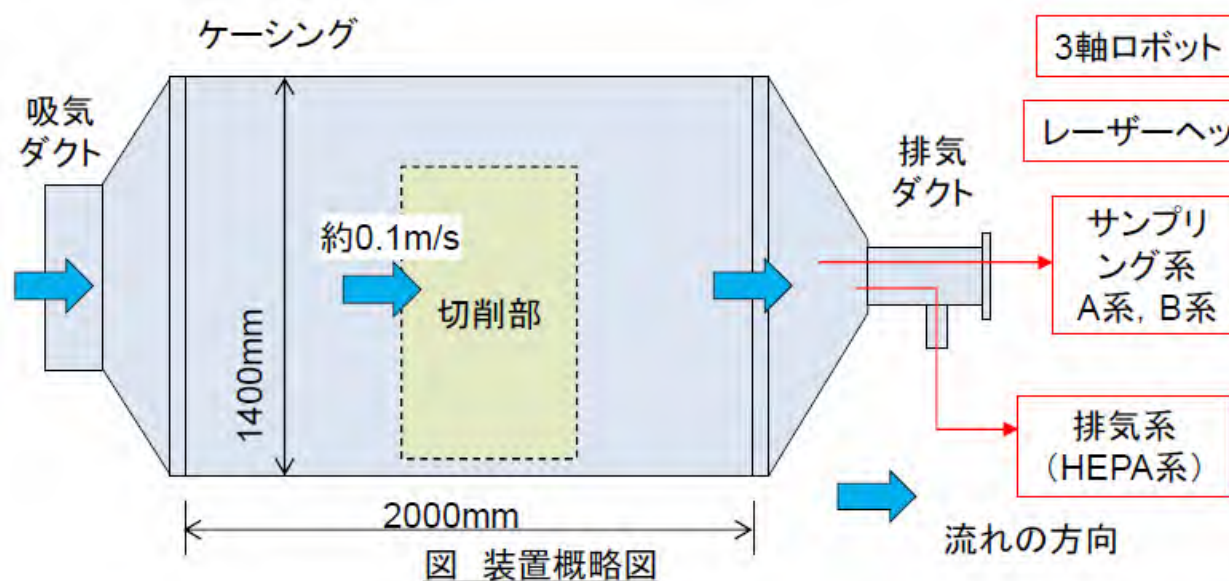
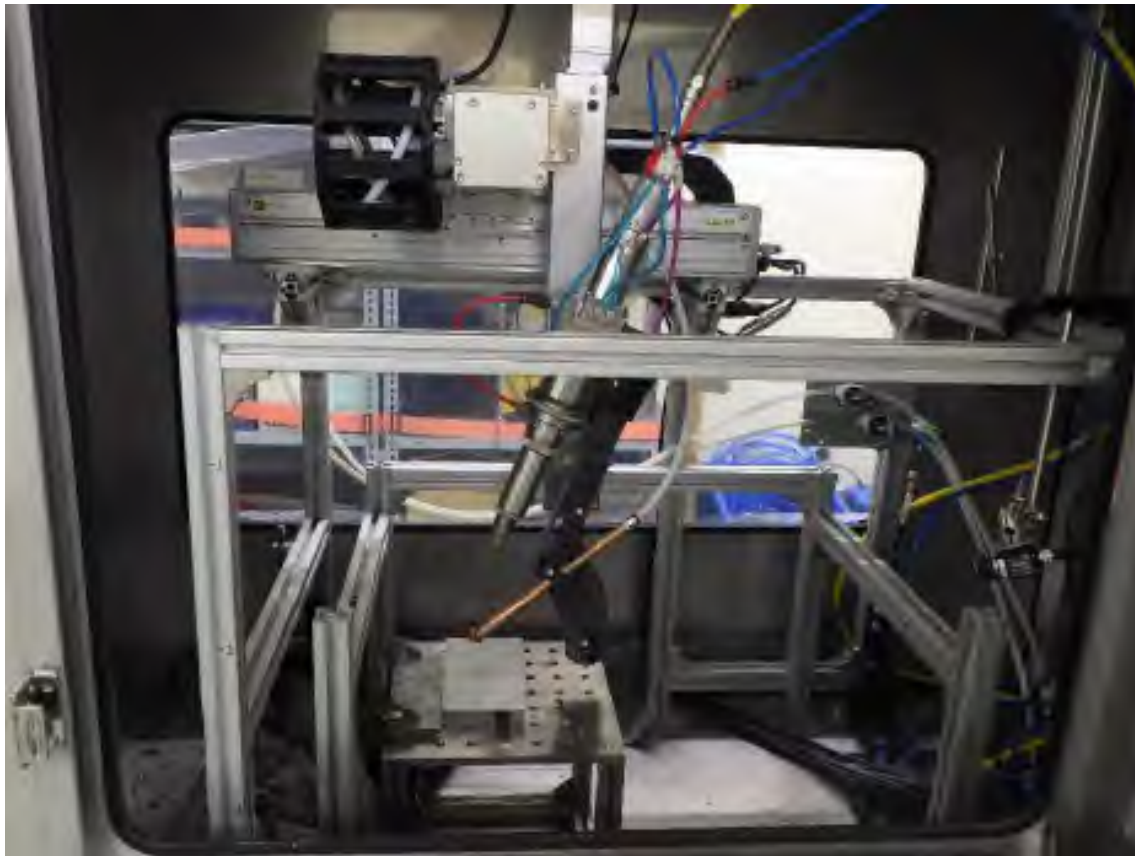


図 加工装置外観(ケーシング取り外し状態)

【2】ダスト飛散率測定試験

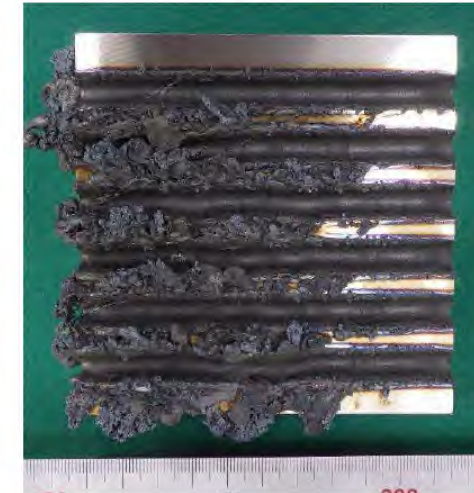
レーザー：ガウジング試験設備と切削後の供試体

- ガウジングモード（傾斜、アシストガス）の試験設備と切削後の供試体を以下に示す。



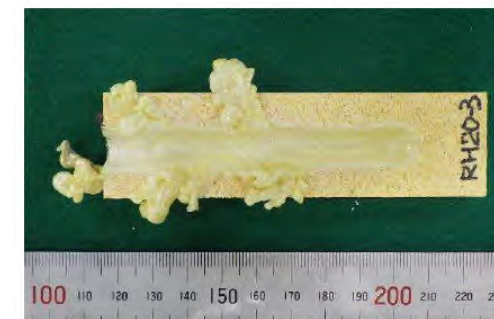
ガウジングモードのレーザートーチとアシストガス配管

SUS304



レーザー出力：10kW
送り速度：0.6m/min

多孔質ジルコニア



レーザー出力：10kW
送り速度：0.6m/min

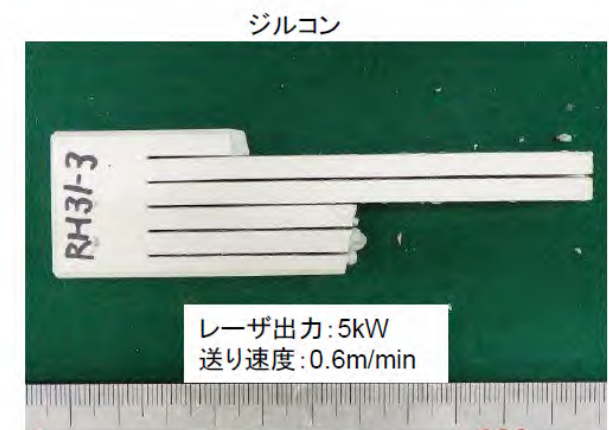
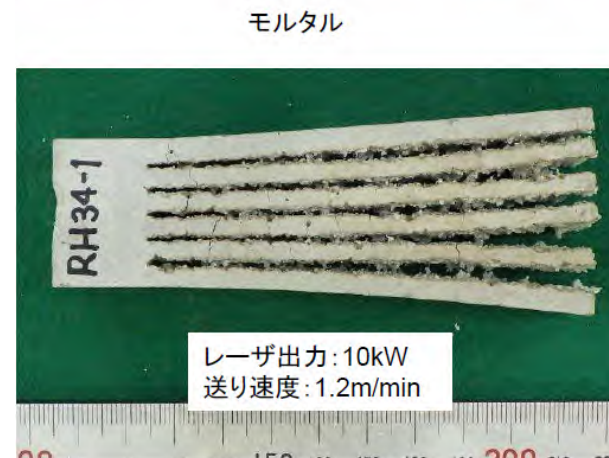
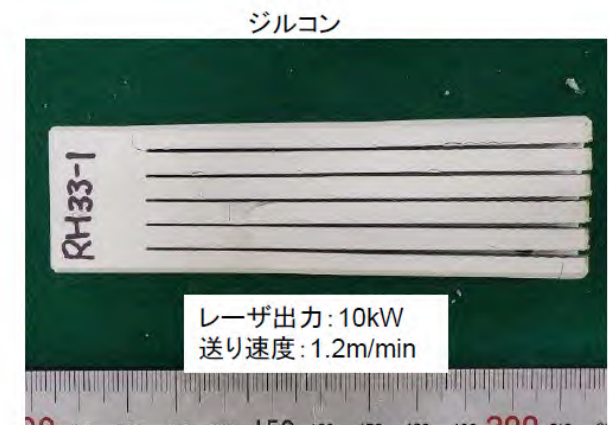
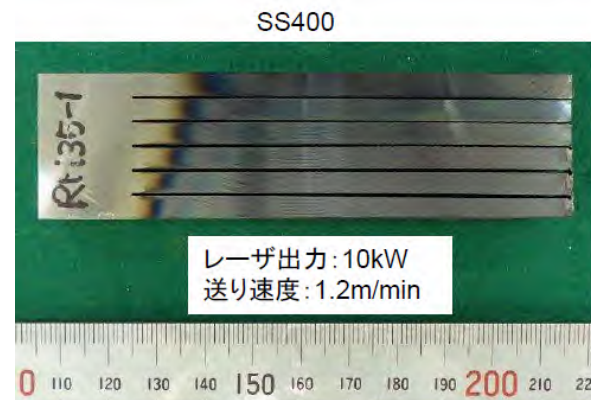
【2】ダスト飛散率測定試験

レーザー：切断試験設備と切削後の供試体

- レーザー切断モード（垂直、貫通）の試験設備と切削の供試体を以下に示す。



切削モードのレーザートーチ



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

レーザー：試験方法（飛散率の算出方法）

- レーザー切断、レーザーガウジングともに、各供試体について、Welasによるダストの計測が可能で、HEPAフィルタの重量増より飛散ダスト量が導出できた。
- 一方、供試体の欠損量については、切削後に表面に付着・残留する溶融物が残る場合があり、重量変化で導出できないため、切削溝体積を幾何学的に算出した。

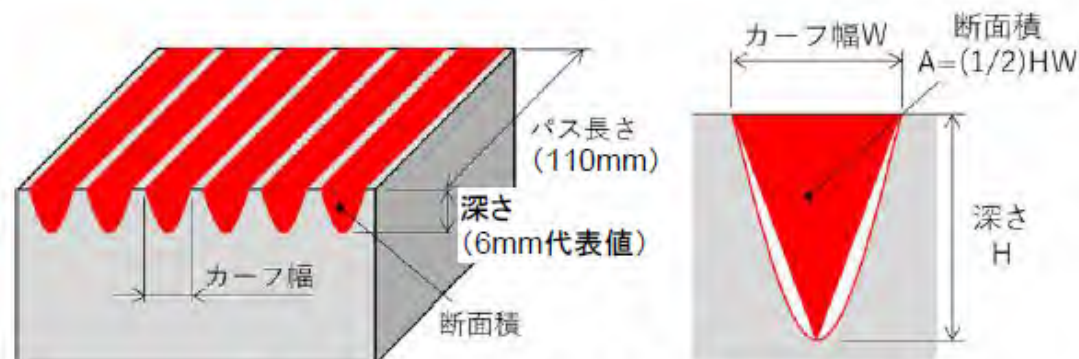


図 ガウジングにおける深さとカーフ幅



付着大 (例: SS400)



付着小 (例: SS400)

図 溶融物付着状態の例(ガウジング)

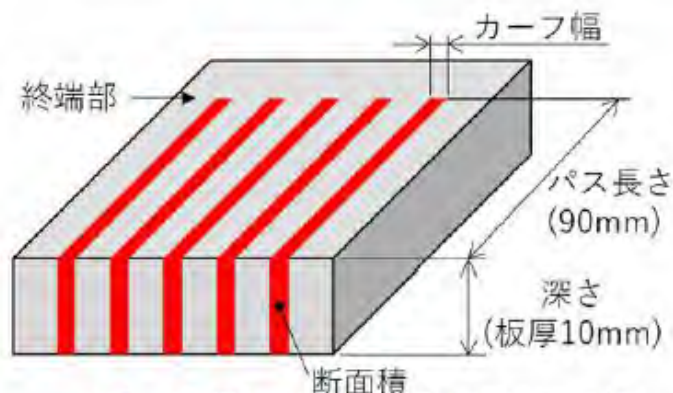


図 切断における深さとカーフ幅



付着大 (例: SS400)



付着小 (例: SS400)

図 溶融物付着状態の例(切断)

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 レーザー：試験結果（パラメータ依存性の検討）

- HEPAへの回収量に基づく飛散率ARFやWelasによる飛散粒子粒径分布は、以下のようなグラフによる可視化と重回帰分析によりパラメータ依存性を検討した。

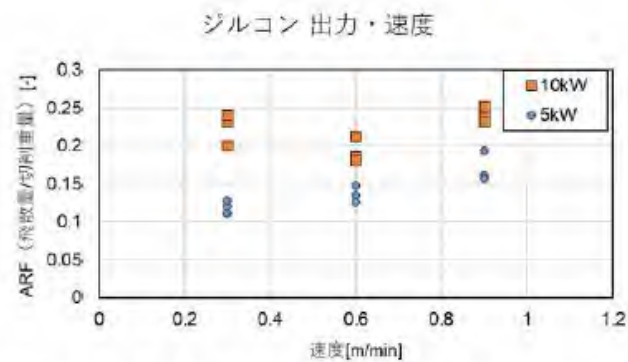


図 ARFの例(ジルコン, 速度, 出力の影響, ガウジング)

表 対象としたパラメータと物性値

	レーザーガウジング	レーザー切断
パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> ・出力 ・送り速度 ・アシストガス流量 	<ul style="list-style-type: none"> ・出力 ・送り速度 ・パージガススタンドオフ ・焦点はずし距離
物性値	<ul style="list-style-type: none"> ・密度 ・比熱 ・熱伝導率 ・融点 ・吸収率 	

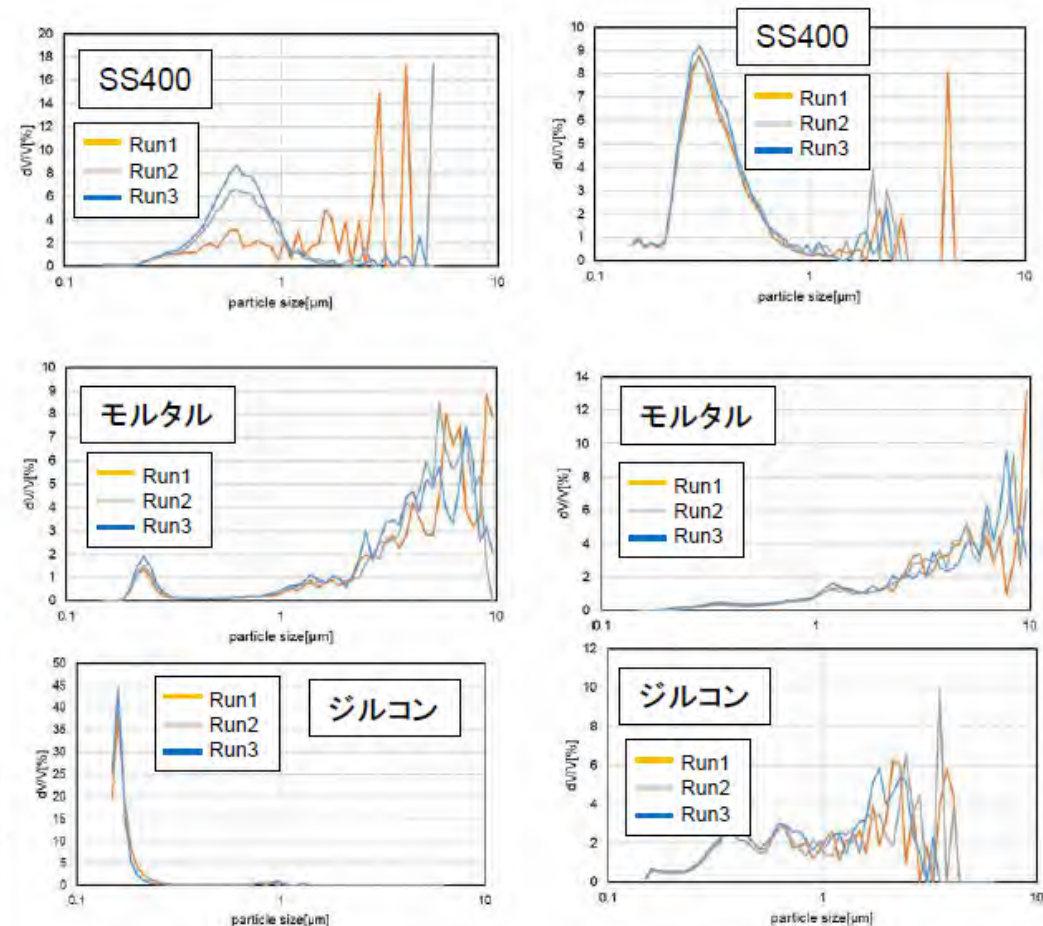


図 粒径分布の例(ガウジング)

図 粒径分布の例(切断)

※各Runごとに色分けしている

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 レーザー：ガウジング試験結果（パラメータ依存性）

- モルタルでは、飛散率は出力とアシストガス流量に依存する傾向が見られた。
- 供試体の物性では、密度や容積比熱に対して明確な依存性が見られた。

パラメータ

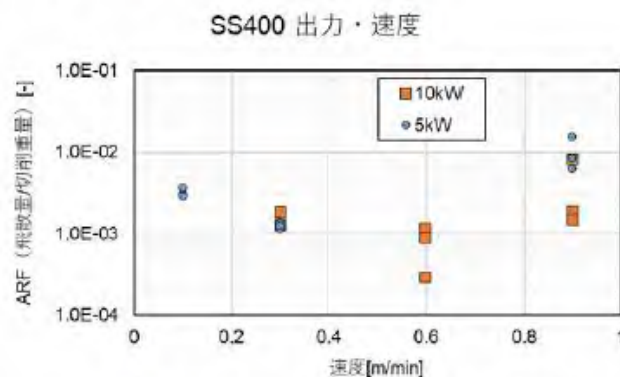


図 ARFと出力・速度の関係(SS400)

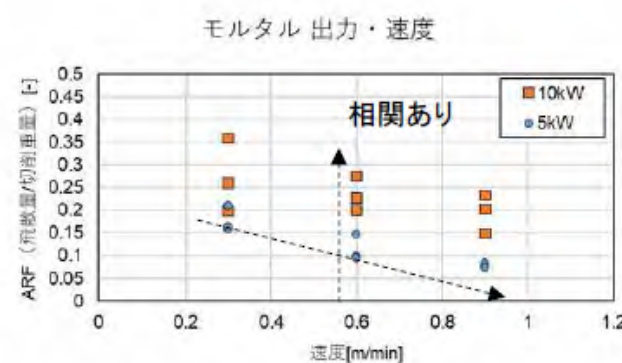


図 ARFと出力・速度の関係(モルタル)

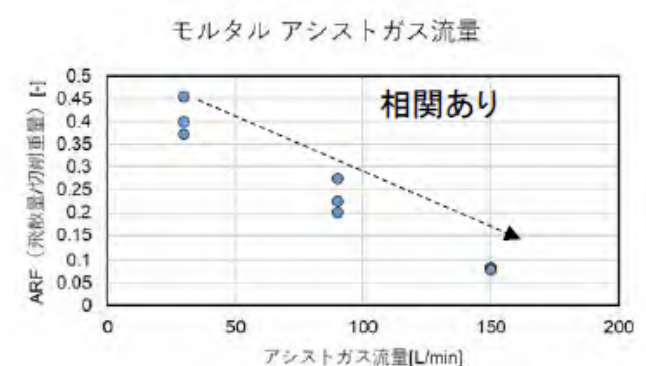


図 ARFとアシストガス流量の関係(モルタル)

物性値

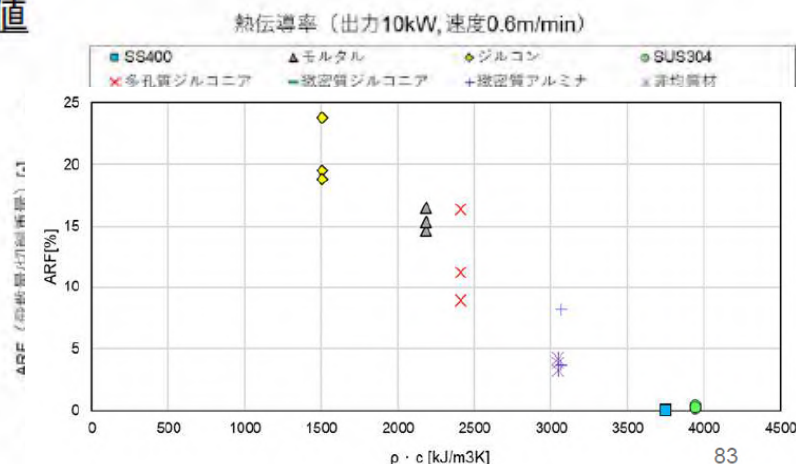


図 ARFと容積比熱の関係

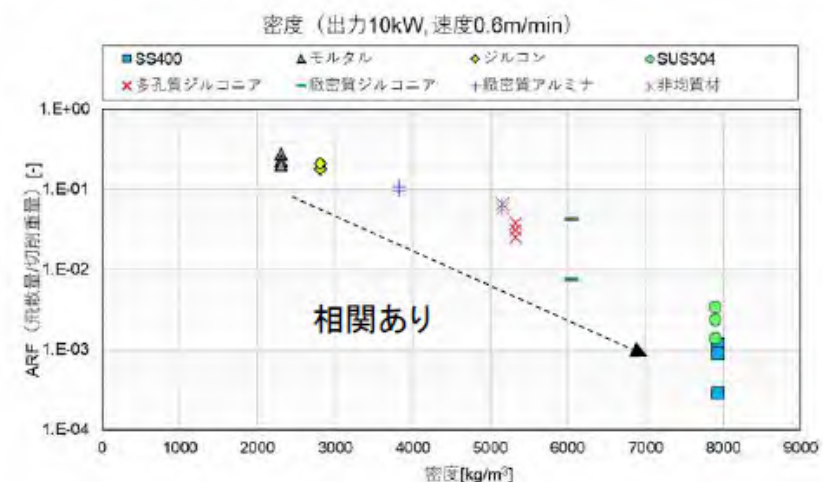


図 ARFと密度の関係

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 レーザー：切断試験結果（パラメータ依存性）

- モルタルでは、ガウジングと異なり、速度による相関が見られた。
- 供試体物性に対しては、容積比熱が大きいとARFが低下する傾向が見られた。

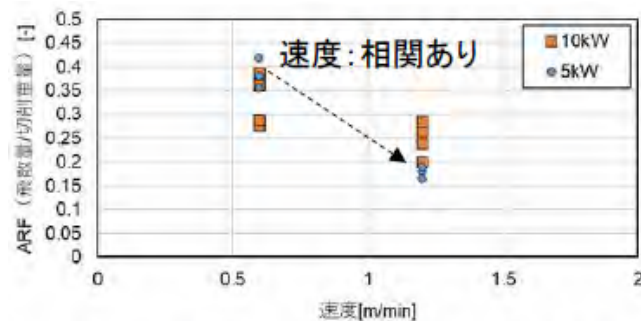


図 ARFと出力・速度の関係(モルタル)

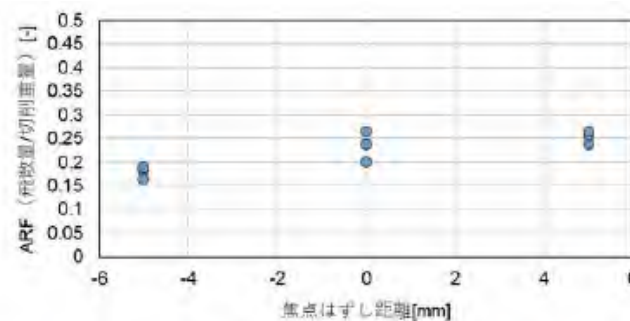


図 ARFと焦点はずし距離の関係(モルタル)

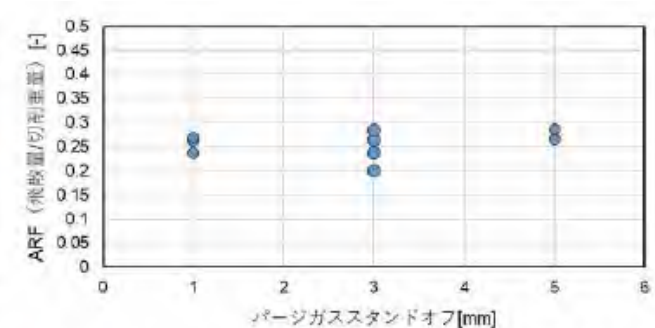


図 ARFとパージガススタンドオフの関係(モルタル)

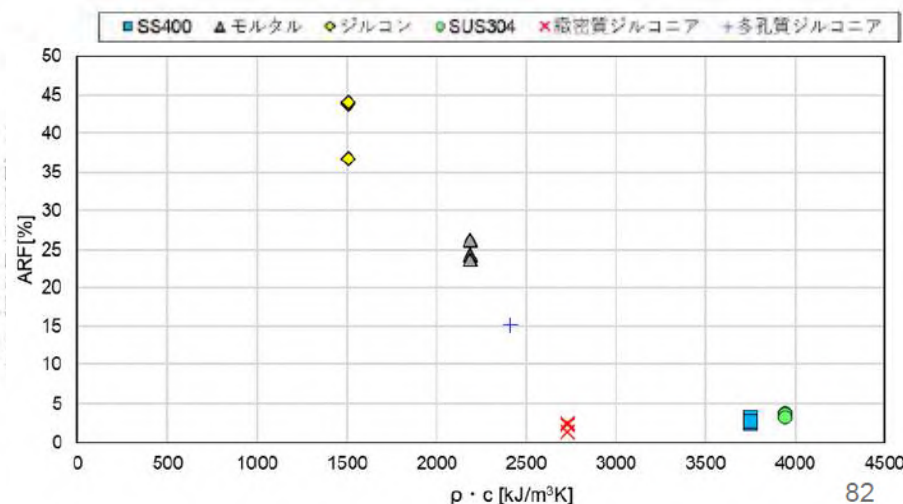


図 ARFと容積比熱の関係

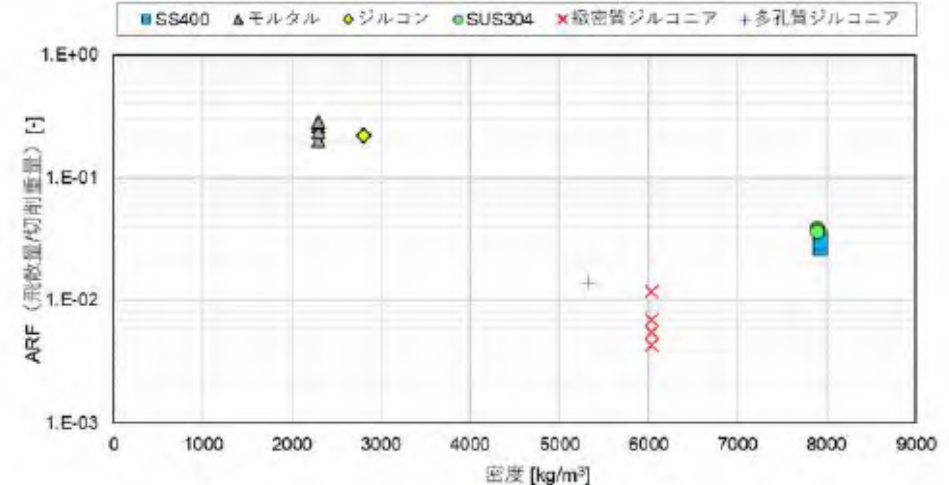


図 ARFと密度の関係

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 レーザー：試験結果（重回帰分析）

- 切削パラメータと供試体の物性値が飛散率に与える影響を検討した。
- パラメータより物性値への寄与率が高いことから、レーザーによる切削では材質の影響が大きいことが分かった。

表 パラメータの寄与率（ガウジング）

パラメータ	ARFへの寄与率 [%]		
	SS400	モルタル	ジルコン
出力	45.8 (-)	33.0 (+)	73.3 (+)
速度	54.2 (+)	18.6 (-)	26.7 (+)
アシストガス流量	-	48.4 (-)	-

表 パラメータの寄与率（切断）

パラメータ	ARFへの寄与率 [%]		
	SS400	モルタル	ジルコン
出力	15.8 (+)	1.0 (-)	56.6 (+)
速度	57.5 (-)	69.4 (-)	22.1 (+)
スタンドオフ	1.6 (+)	1.5 (+)	21.3 (+)
焦点はずし距離	25.1 (-)	28.2 (+)	-

表 パラメータおよび物性値の寄与率（ガウジング）

パラメータ および物性	ARFへの 寄与率 [%]
出力	8.8 (+)
速度	2.6 (-)
アシストガス流量	13.0 (-)
融点	15.6 (-)
密度	41.5 (-)
比熱	18.5 (-)

表 パラメータおよび物性値の寄与率（切断）

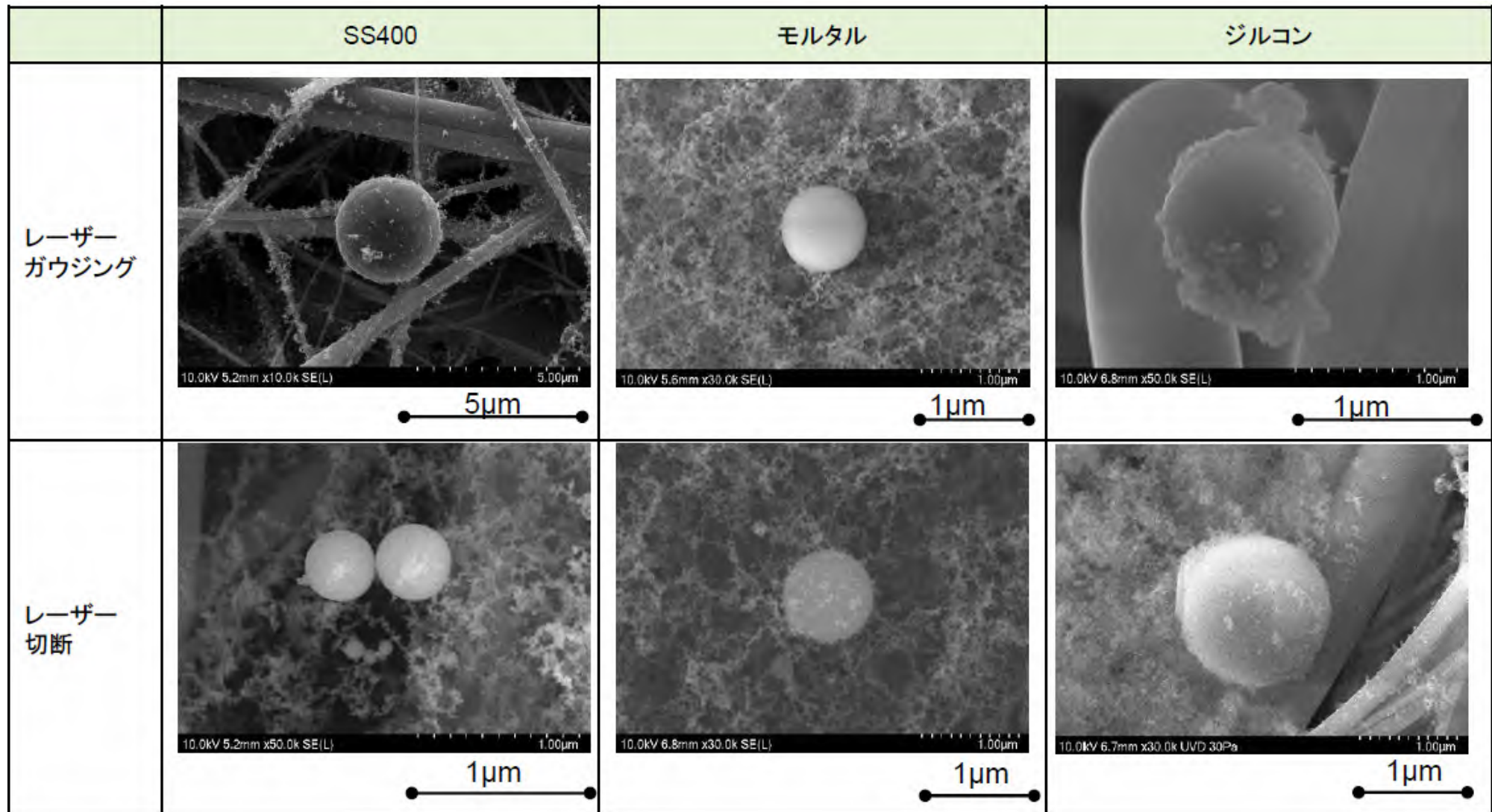
パラメータ および物性	ARFへの 寄与率 [%]
出力	3.04 (+)
速度	4.67 (-)
スタンドオフ	1.19 (+)
焦点はずし距離	2.35 (+)
密度	19.7 (-)
比熱	37.2 (+)
吸収率	31.8 (-)

※()内の+, -の符号は, パラメータ, 物性値が増加したときのARFの増減を示し, ARFが増加する場合は「+」とした
※全供試体を対象に分析を実施。ガウジング・切断共に寄与率の低い物性値は事前に除外した。

【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験

レーザー：試験結果（飛散ダストの顕微鏡観察）

- フィルタで回収した飛散ダストは、以下のSEM像に見られるように直径 $0.2 \sim 1 \mu\text{m}$ 程度の球状の粒子が多く観察された。



【2-1】ダスト飛散率パラメータ試験 レーザー：試験結果（空気動力学径とD50）

- Welasによる光散乱径から、[3-1]項に示す手法で空気動力学径を導出し、粒径中央値（D50）と飛散率ARFとの関係を整理した。飛散ダスト粒径（D50）が大きいほど、飛散率ARFが低下する傾向が認められた。
- ガウジング、切断ともに、セラミックスやモルタルは金属系に比べて比較的高いARFを示しており、特にジルコンは大きなARFとなった。
- ガウジングではセラミックスやモルタルで $1\mu\text{m}$ 以下の微細なダストが確認され、一方、切断では金属およびジルコンで $1\mu\text{m}$ 以下の微細ダストが確認された。

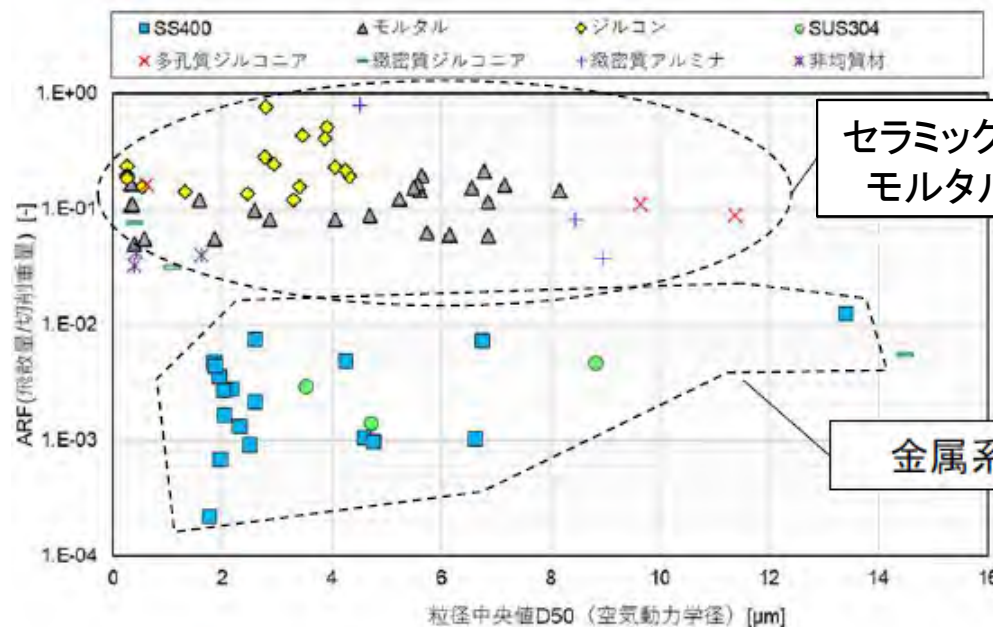


図 ARFとD50の関係（レーザーガウジング）

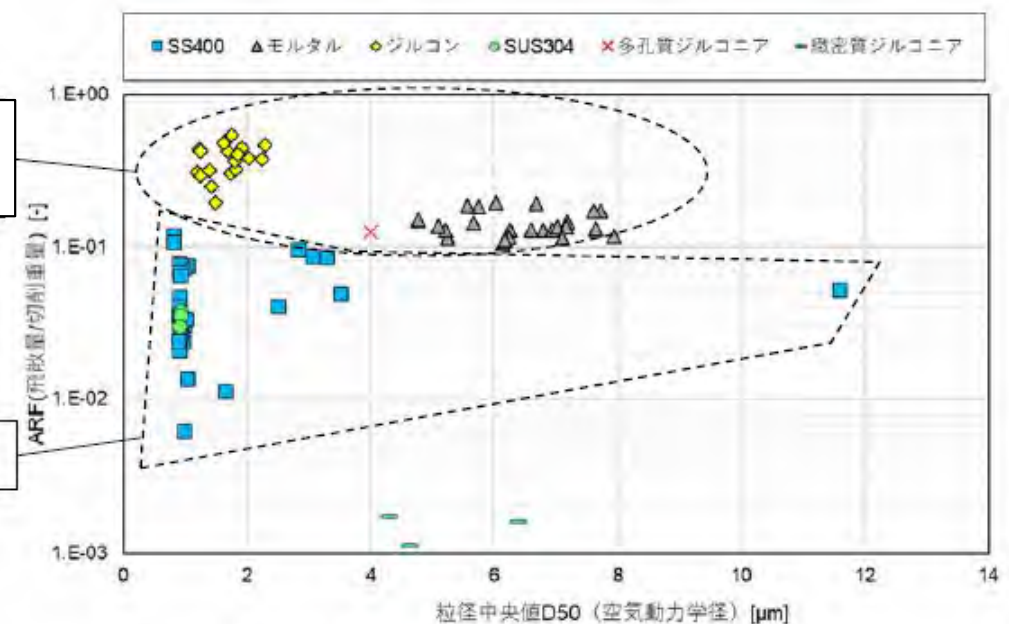


図 ARFとD50の関係（レーザー切断）

【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験

- 【2-1】のダスト飛散率パラメータ試験では、4つの切削工法による切削試験を個別の試験装置で並行して実施し、乾燥条件での飛散率データ(欠損量、飛散ダスト量、光散乱計測による飛散ダストの粒径分布)を取得した。
- そこで、これらのパラメータ試験結果を踏まえて、より詳細な分析機器を備えた試験装置(詳細データ測定装置)を用いて、代表性の高い切削条件等でのダスト飛散率データを乾燥条件で取得し、パラメータ試験との比較検証やデータの拡充を行う。
- 本装置では光散乱計測(Welas2000・Promo2000※)と電子式カスケードインパクター(ELPI+)の併用、ダスト形状の顕微観察等により、幅広い粒径範囲で空気動力学粒径分布データを導出する。
- また、4つの工法について、切削速度や対象物の切削性などの観点に基づく比較を行う。



Palas社のWelas2000(左)とPromo2000(右)※
(光散乱径測定、**粒径範囲は0.2～40μm**)



ELPI+(空気動力学径測定、**粒径範囲は0.01～10μm**)

【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 詳細データ測定装置のケーシング

詳細試験用ケーシングの特徴

- 静電気によるダストの壁面付着防止のため内面はステンレス製、可視観測窓も静電性の素材を使用。
- アルミフレーム＋パネルで構成し、機器取り付けや改造などの自由度が高い。
- パラメータ試験用のケーシングから下記のように変更。

ケーシングNo.	2号機	3号機
用途	パラメータ試験 (メーカー各社)	詳細データ測定試験 (電中研)
幅	800 mm	1,300 mm
高さ	1,400 mm	1,300 mm
長さ	2,000 mm	2,500 mm
断面積	1.12 m ²	1.69 m ²
風量@0.1m/s	6.72 m ³ /min	10.1 m ³ /min

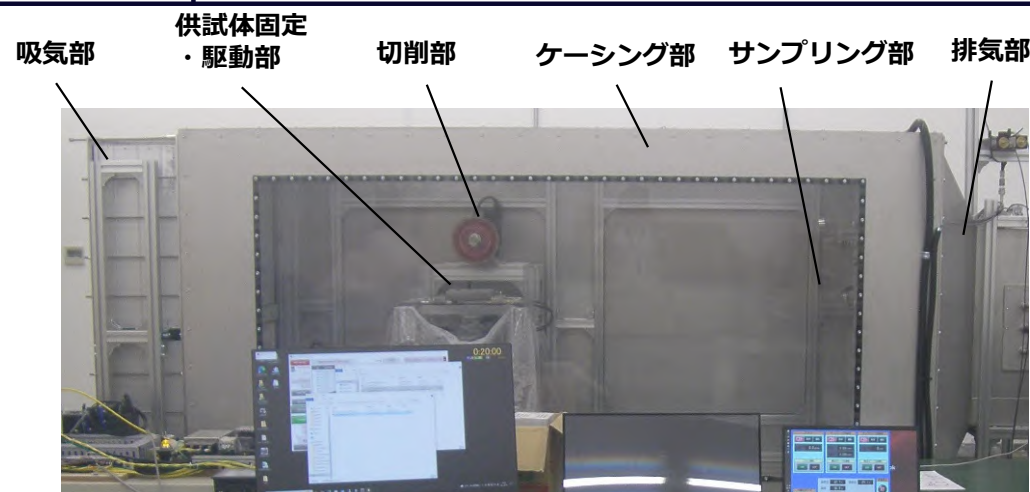


- 各切削装置を受け入れるため、幅に余裕をもたせると共に、高さを最適化。
- 全体を代表するサンプル採取のため、サンプリング地点を変えられるように50cm長くした。

【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 ディスクカッター詳細試験のパラメータ、評価法

- 同一条件の繰り返しを含めて245回の試験を実施（パラメータ試験は576回）。
- 欠損量は供試体重量変化（あるいは切削溝体積の重量）、飛散量は後段のHEPAフィルタ等で採取したダスト量とする。

パラメータ	詳細試験	パラメータ試験
回転刃	小($\phi 125$ mm)、中($\phi 180$ mm)、大($\phi 305$ mm)、砥粒変更($\phi 300$ mm, 180 mm)	
回転数	1200～6000rpm（刃によって最高回転数は異なる）	
刃のカバー	カバー有りは実施せず	小径刃のみで5通り
押付力	セラミックス: 20 or 80 N、金属: 40 or 80 N、 モルタル: 5 or 10 N、 多孔質アルミナ: 1～5 N	セラミックス: 20～80 N、金属は40～80 N、 モルタル: 5～10 N、 多孔質アルミナ: 1～5 N
供試体	緻密アルミナ、多孔質アルミナ、ジルコン、モルタル、SUS304、SS400、 非均質材 ($60\text{mol}\%\text{Al}_2\text{O}_3$ - $40\text{mol}\%\text{ZrO}_2$)	




ダスト飛散率詳細データ測定装置

- ・Welas吸引量: 5L/min
- ・ELPI吸引量: 10L/min
- ・サイクロンフィルタ: 150あるいは290L/min

【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 チゼル詳細試験のパラメータ、評価法

- パラメータ試験同様に小型容器内で70回の試験を実施（パラメータ試験は89回）。
- 飛散量は切削部近傍の気中からのサンプリング量（Welas※とサイクロン）で同定。
- 破碎後に切削部周辺に沈着した破片や粒子をふるいで分級し、500 μ mメッシュを通過したものを粒子（非飛散ダスト）とみなして質量欠損に算入。

パラメータ	詳細試験	パラメータ試験
切削刃	チスタガネ（ブルポイント）、平タガネ（コールドチゼル） 	
打撃速度	モード1（割れない）：500 bpm、 モード2（割れる）：650, 800, 950 bpm	
	（モード3、4は実施せず）	モード3、モード4：650, 800, 950 bpm
静荷重（重り）	196 N (20 kg)	0, 98, 196 N (0, 10, 20 kg)
供試体（金属は破碎不可）	ジルコン、モルタル、	ジルコン、モルタル（緻密アルミナ）



- ・容器寸法：210 × 210 × 300(H) mm
- ・材質：ポリカーボネート
- ・Welas吸引量：5L/min
- ・ELPI吸引量：10L/min
- ・サイクロンフィルタ：**290L/min**

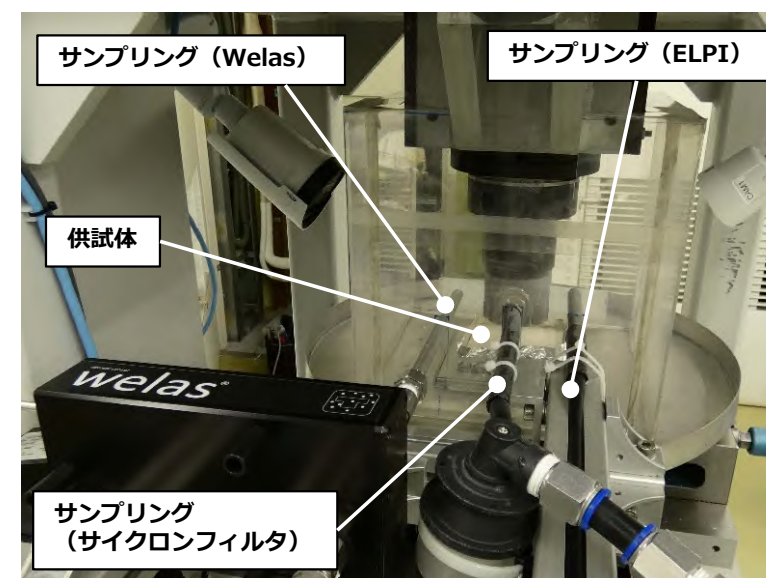
パラメータ試験（Welas：5L/minのみ）
に比べて大流量で吸引。

【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 コアボーリング詳細試験のパラメータ、評価法

- パラメータ試験同様に小型容器内で44回の試験を実施（パラメータ試験は35回）。
- 飛散量は切削部近傍の気中からのサンプリング量（Welas※とサイクロン）で同定。
- 小型容器内で切削・計測した影響については、【4-2】項の解析計算の結果に基づき、共通設計ケーシング内のコアボーリング切削であれば回収されない、 $70\mu\text{m}$ を超える粒子は、飛散ダストから除外した。

パラメータ	詳細試験	パラメータ試験
切削刃	C4(硬):モルタル、多孔質アルミナ K12(軟):ジルコン、緻密質アルミナ、金属	
回転数	60, 120, 300rpm	60, 120, 300, 600rpm
押付力	1, 2 kN	1, 2, 3, 6 kN
加工深さ	最大2mm×3回 または 最大5mm	
加工時間	最長5分	
供試体	モルタル、多孔質アルミナ、ジルコン、緻密アルミナ	モルタル、多孔質アルミナ、ジルコン、緻密アルミナ、SS400、SUS304

パラメータ試験（Welas : 5L/min + サイクロンフィルタ : 200~290L/min）と同程度の流量で吸引。

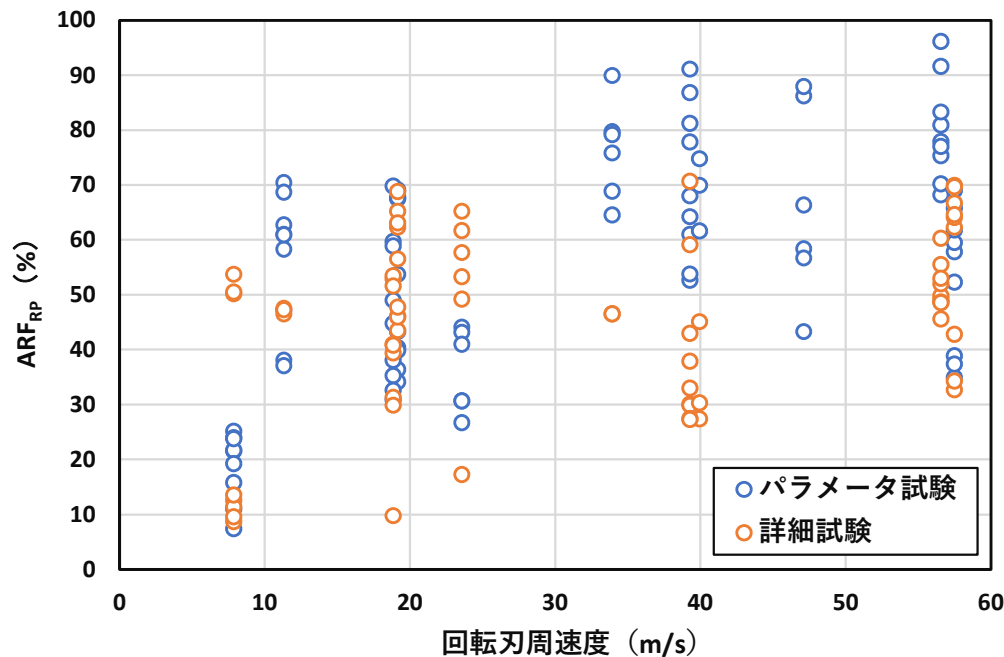


- ・容器寸法 : 300 × 300 × 300(H) mm
- ・材質 : ポリカーボネート、ポリプロピレン
- ・Welas吸引量 : 5L/min
- ・ELPI吸引量 : 10L/min
- ・サイクロンフィルタ : 290L/min

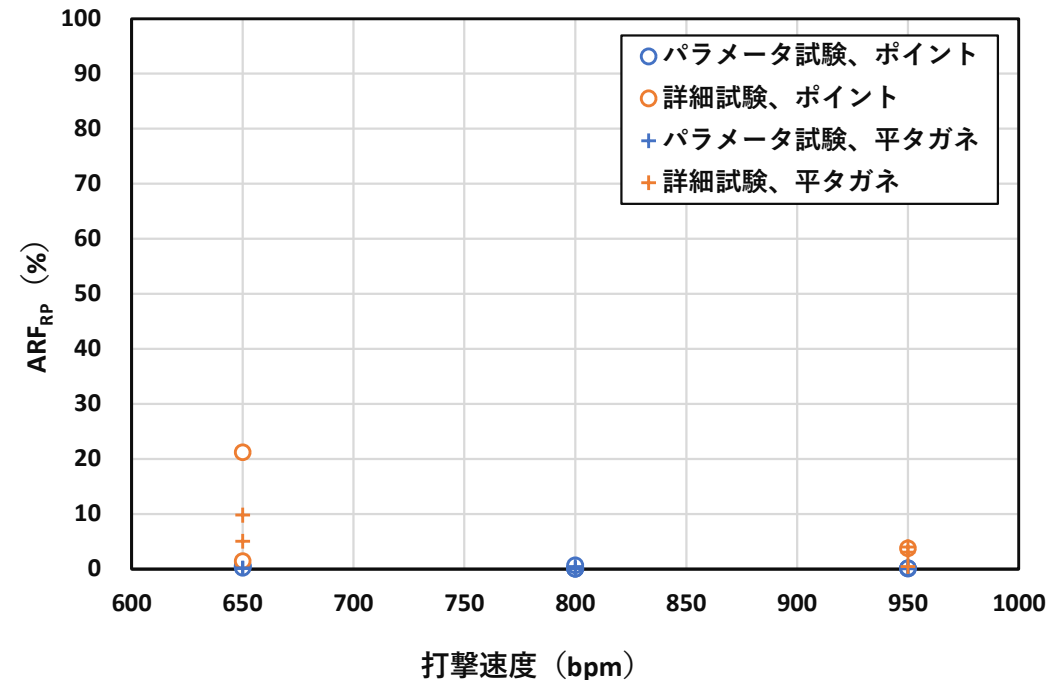
【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験

試験結果：機械的切削（ディスクカッター、チゼル、コアボーリング）-1

- ディスクカッター、チゼル、コアボーリングのいずれについても、ダスト飛散率やそのパラメータ依存性はパラメータ試験と同等で、異なる試験装置でも再現可能なデータを取得したことを確認した。
- 但し、チゼルのダスト飛散率についてはパラメータ試験に比べてやや大きな値が得られており、小型容器内でのサンプリング吸引流量が60倍程度と大きいことが要因と考えられた。



ディスクカッターによる緻密質アルミナ切削時の
10 μ m以下粒子の飛散率(ARF_{RP})の周速度依存性

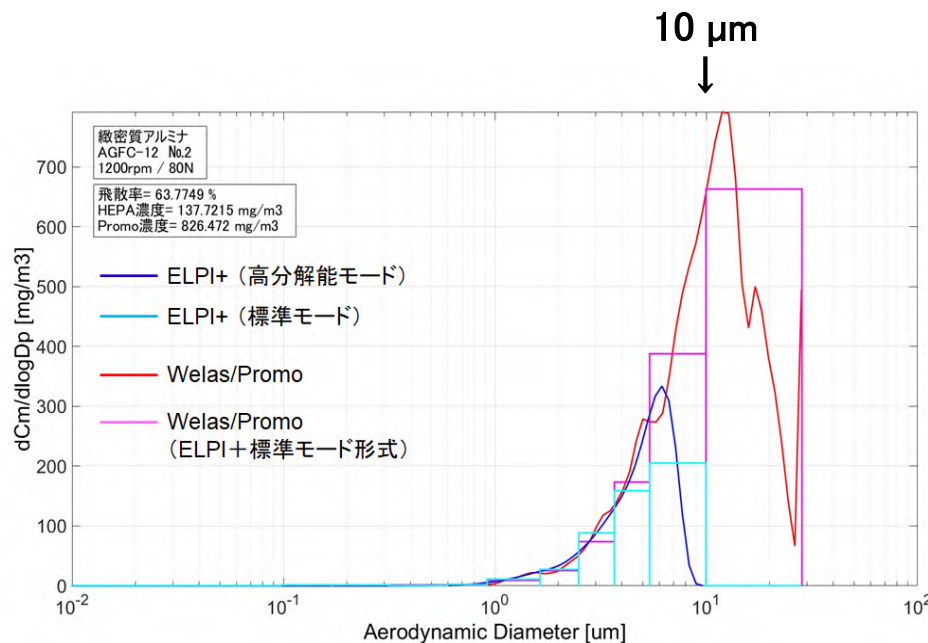


チゼルによるジルコン切削時の
10 μ m以下粒子の飛散率(ARF_{RP})の打撃速度依存性

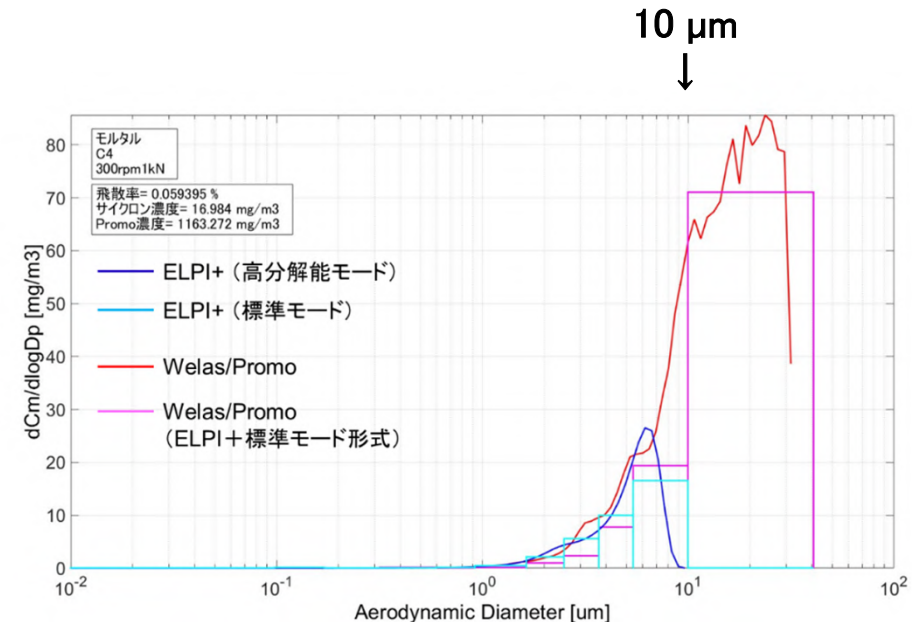
【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験

試験結果：機械的切削（ディスクカッター、チゼル、コアボーリング）-2

- ELPI+とWelasによる粒径分布測定結果は、機器の測定範囲内では概ね一致しており、光散乱計測結果の空気動力学径への換算の妥当性が確認された。
- ディスクカッター・チゼルでの飛散ダストのピーク粒径は $10\mu\text{m}$ 前後、コアボーリングは $10\sim 30\mu\text{m}$ 程度であり、ナノレベルの微細粒子はほぼ無視できることが分かった。



ディスクカッターによる緻密質アルミナ切削時の
飛散ダスト重量濃度の粒径分布
(空気動力学径換算)

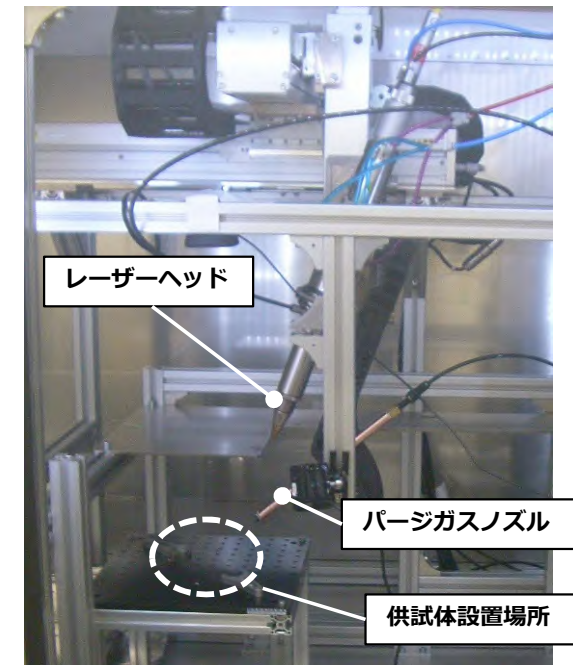


コアボーリングによるモルタル切削時の
飛散ダスト重量濃度の粒径分布
(空気動力学径換算)

【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 レーザー(ガウジング)詳細試験のパラメータ、評価法

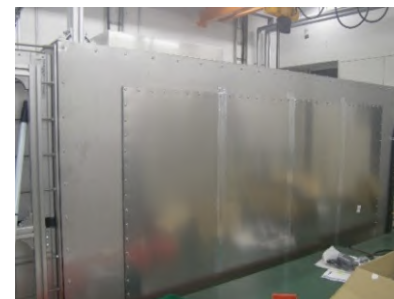
- 同一条件の繰り返しを含めて45回の試験を実施(パラメータ試験は87回)。
- 欠損量は供試体重量変化(あるいは切削溝体積の重量)、飛散量は後段のHEPAフィルタ等で採取したダスト量とする。

パラメータ	詳細試験	パラメータ試験
出力	5, 10 kW	
送り速度	0.1, 0.3, 0.6, 0.9 m/min	0.3, 0.6, 0.9 m/min (SS400のみ0.1 m/min実施)
アシストガス流量	30, 90, 150 L/min	
供試体	SS400、モルタル、ジルコン、SUS304、緻密質ジルコニア、多孔質ジルコニア、緻密質アルミナ、多孔質アルミナ	SS400、モルタル、ジルコン、SUS304、緻密質ジルコニア、多孔質ジルコニア、緻密質アルミナ、非均質材 (60mol%Al ₂ O ₃ -40mol%ZrO ₂)



- ・Welas吸引量: 5L/min
- ・ELPI吸引量: 10L/min
- ・サイクロンフィルタ: 150
あるいは290L/min

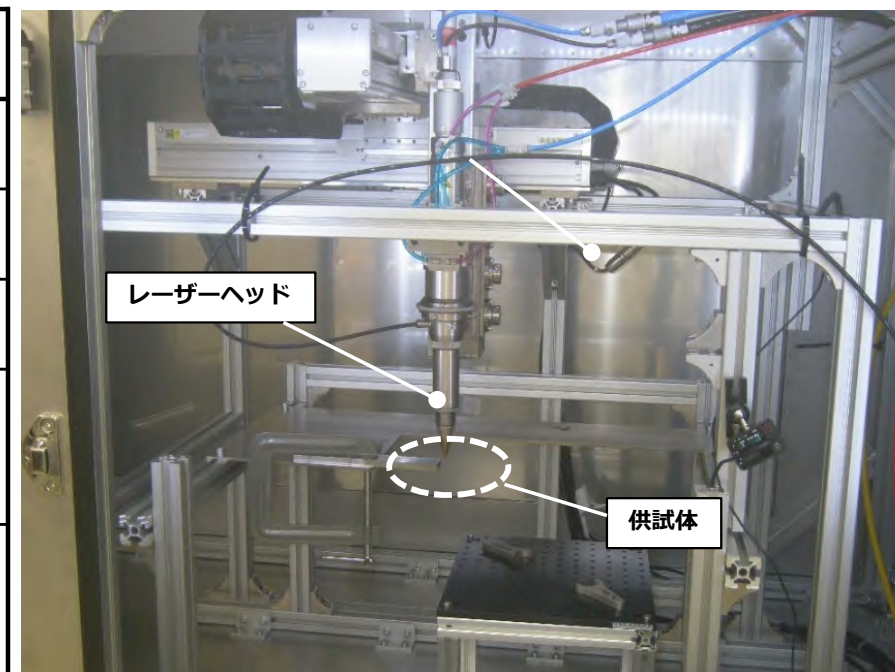
レーザー使用に伴い
ケーシング窓等を遮光



【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 レーザー(切断)詳細試験のパラメータ、評価法

- 同一条件の繰り返しを含めて50回の試験を実施(パラメータ試験は79回)。
- 欠損量は供試体重量変化(あるいは切削溝体積の重量)、飛散量は後段のHEPAフィルタ等で採取したダスト量とする。

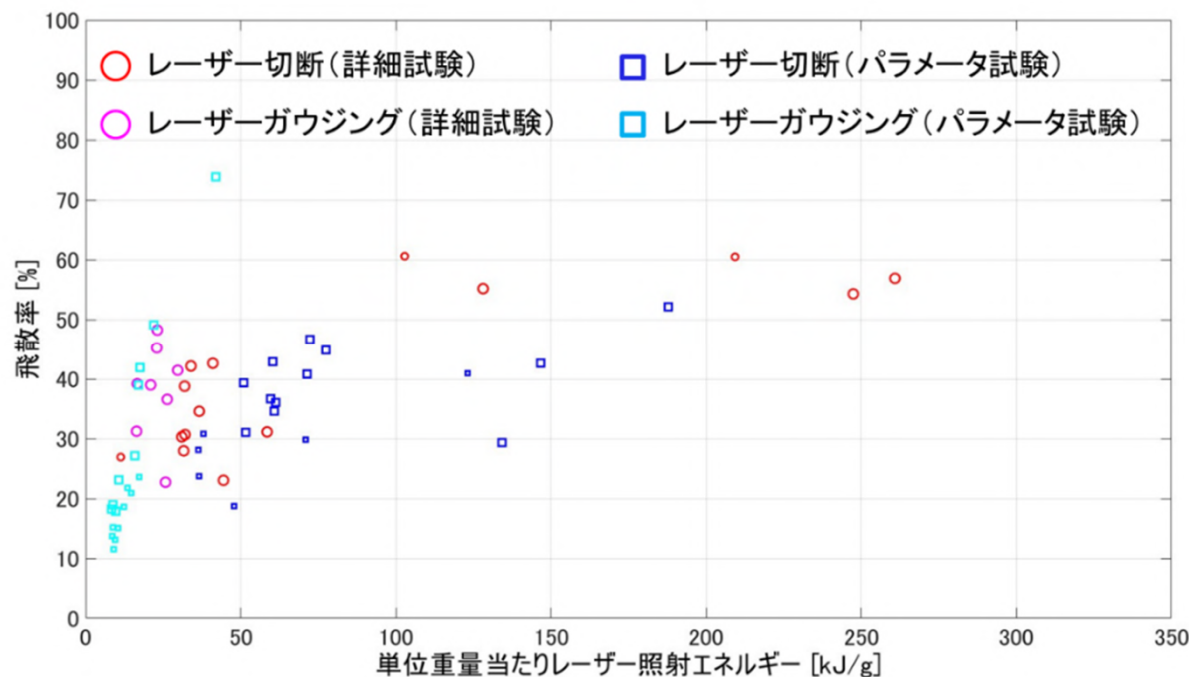
パラメータ	詳細試験	パラメータ試験
出力	5, 10 kW	
送り速度	0.3, 0.6, 1.2 m/min	0.6, 1.2 m/min
焦点はずし距離	0, -5, +5 mm	
パージガス スタンドオフ	3 mm	1, 3, 5 mm
供試体	SS400、モルタル、ジルコン、SUS304、 緻密質ジルコニア、多孔質ジルコニア	



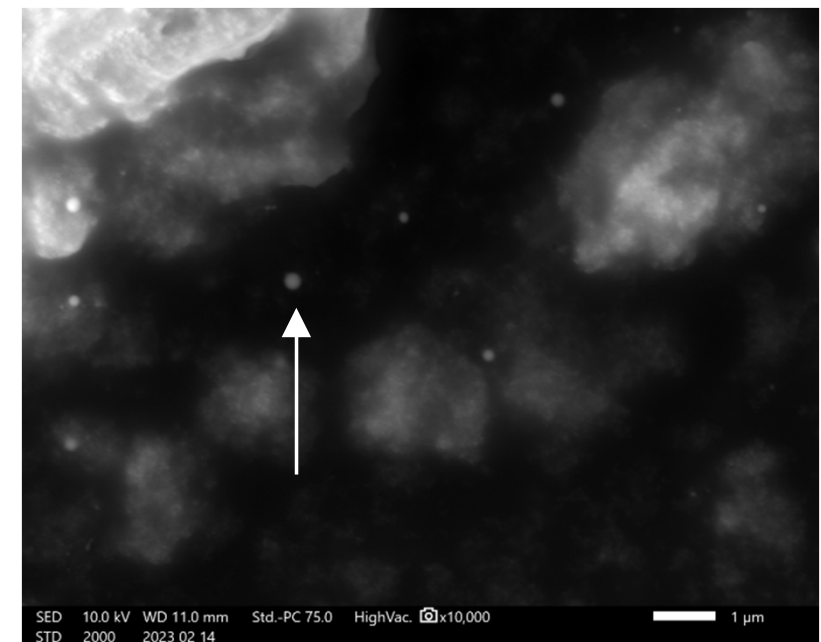
・Welas吸引量: 5L/min.
 ・ELPI吸引量: 10L/min
 ・サイクロンフィルタ: 150
 あるいは290L/min

【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 レーザー：試験結果

- レーザーについてもダスト飛散率のパラメータ依存性などはパラメータ試験と同様の結果を示し、異なる試験装置でも再現可能なデータを取得したことを確認した。
- ELPI+捕集板に付着した粒子のSEM観察により、真球に近い形状であることを確認した。レーザー照射により蒸発した供試体成分が凝集して生じたものと思われる。



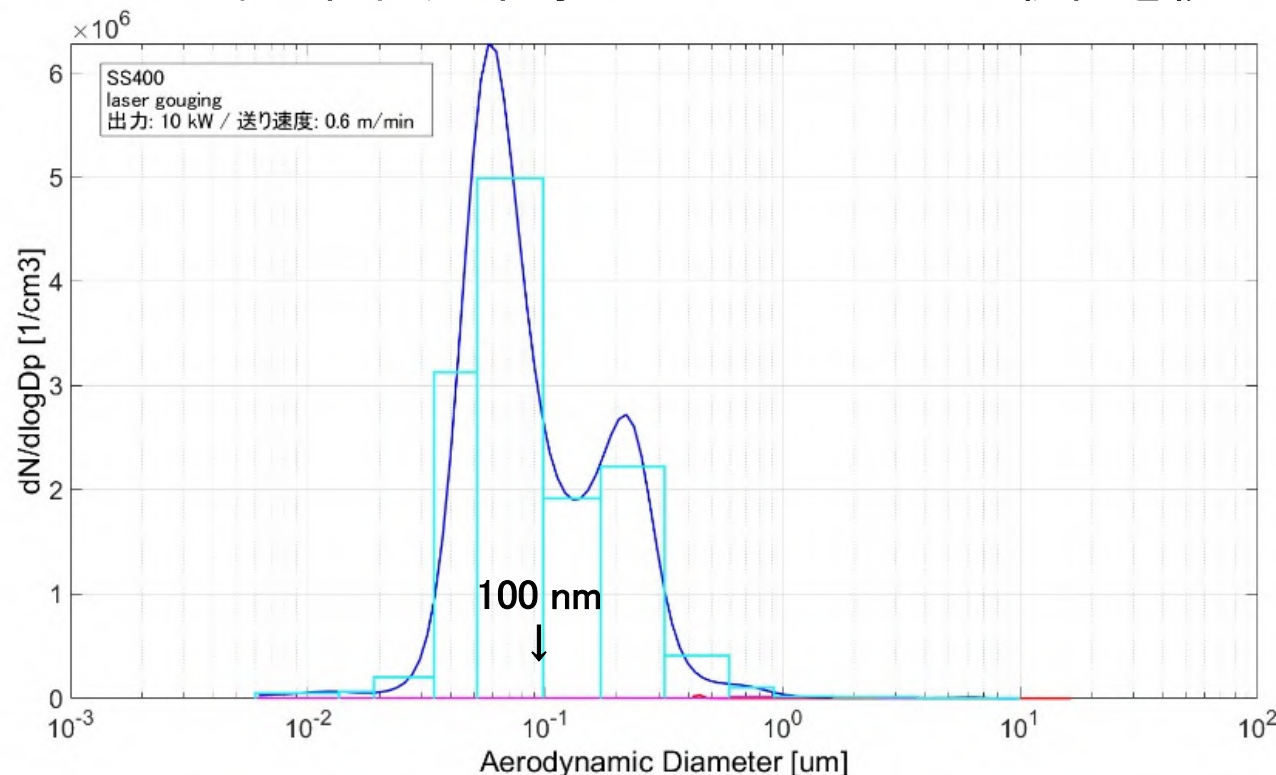
ジルコン切削時の飛散率 (ARF) の
欠損重量当たり照射エネルギー依存性



SS400のレーザー切断で得られた飛散粒子
(中央付近の・など)

【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 レーザー：試験結果（粒径分布）

- ELPI⁺による計測結果（下図）より、Welas[※]で測定できない100nm前後に粒径分布のピークを持つ微細粒子が多量に存在することが分かった。
- 一方、ELPI⁺で計測した粒子重量濃度により導出した飛散量が、HEPAやインパクター各段の秤量値より過大となる現象が見られたことから、ELPI⁺では大量の微細粒子の一部を大粒径粒子と誤認することが推察された。
- レーザー切削の正確な粒径分布導出についてはさらに検討を続ける予定である。



SS400ガウジング時のELPI⁺で検出した飛散ダストの粒径分布

【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 ダスト飛散率データの比較

- 各工法・供試体の組み合わせについての飛散率ARFと、呼吸摂取される空気動力学径 $10\mu\text{m}$ 以下の微粒子のみの飛散率 ARF_{RP} の最大値[%]は以下の通りとなった。

供試体	ディスクカッター		コアボーリング		チゼル		レーザー			
							ガウジング		切断	
	ARF	ARF_{RP}	ARF	ARF_{RP}	ARF	ARF_{RP}	ARF	ARF_{RP}	ARF	ARF_{RP}
緻密質アルミナ	98	96	31	10	—*		11	6.0	—**	
多孔質アルミナ	52	34	1.9	0.11	2.8	0.83	4.8	4.8	—**	
緻密質ジルコニア	(試験無し)		(試験無し)		(試験無し)		4.2	4.2	1.2	1.2
多孔質ジルコニア	(試験無し)		(試験無し)		(試験無し)		3.8	3.1	1.5	1.5
緻密質 60mol% Al_2O_3 - 40mol% ZrO_2	(試験無し)		(試験無し)		(試験無し)		6.5	6.5	(試験無し)	
ジルコン(ZrSiO_4)	82	50	9.6	2.7	32	21	25	24	30	30
モルタル	88	61	10	2.0	7.5	2.4	46	36	42	34
SS400	71	43	6.0	0.56	(切削困難)		2.4	2.4	10	10
SUS304	58	48	1.8	—***	(切削困難)		0.34	0.20	4.7	4.7

*: ほとんどの場合で切削できず

**: レーザーヘッド損傷の恐れがあるため実施せず

***: 有意なデータを取得できず

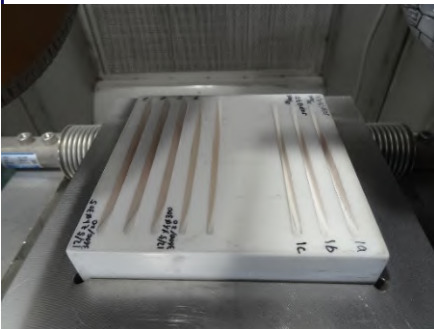
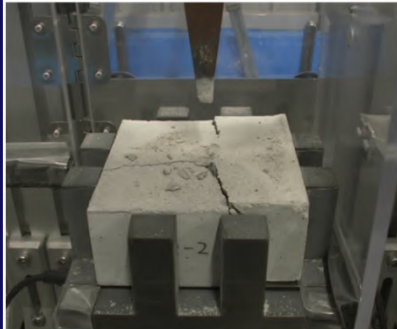
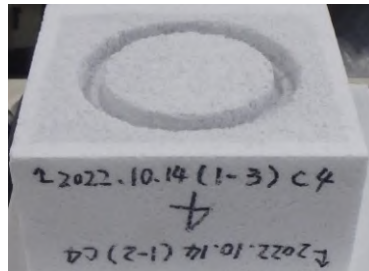












【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 飛散特性値を用いた工法間比較

- 工法によって切れ方や割れ方(下記の切削痕を参照)が異なるため、飛散率(ARF)だけでは工法間の飛散挙動の違いを定量的に比較するのは適切でない。
- 被ばく線量評価の観点で、**時間当たりの飛散量(mg/s)**で工法間の比較を行う。
- 深さ方向の切削速度に対して飛散量は、バラツキはあるものの、直線上に分布することが分かったため、その比例定数を「**飛散特性値(C)**」と定義する。

$$\text{飛散量(mg/s)} = C \times \text{切削速度(mm/s)}$$

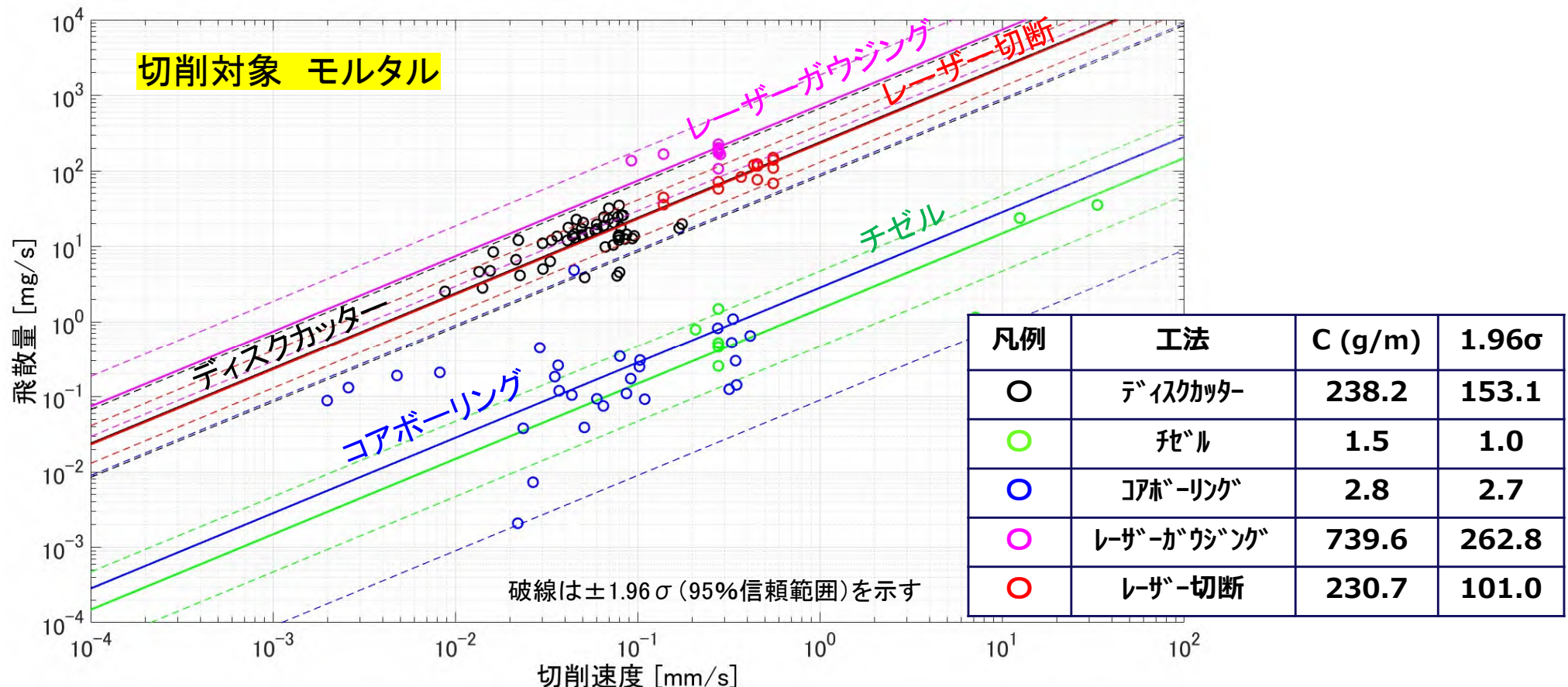
飛散特性値

$\text{ARF} \times [\text{カーフ幅}] \times [\text{代表長さ}] \times [\text{密度}]$ に相当
条件により変化する 工法・供試体で一定

ディスクカッター切削痕 (緻密質アルミナ)	チゼル切削痕 (モルタル)	コアボーリング切削痕 (多孔質アルミナ)	レーザー切断切削痕 (左 : SS400、右 : モルタル)									
			<table><tr><td></td><td>SS400</td><td>モルタル</td></tr><tr><td>表面</td><td></td><td></td></tr><tr><td>裏面</td><td></td><td></td></tr></table>		SS400	モルタル	表面			裏面		
	SS400	モルタル										
表面												
裏面												

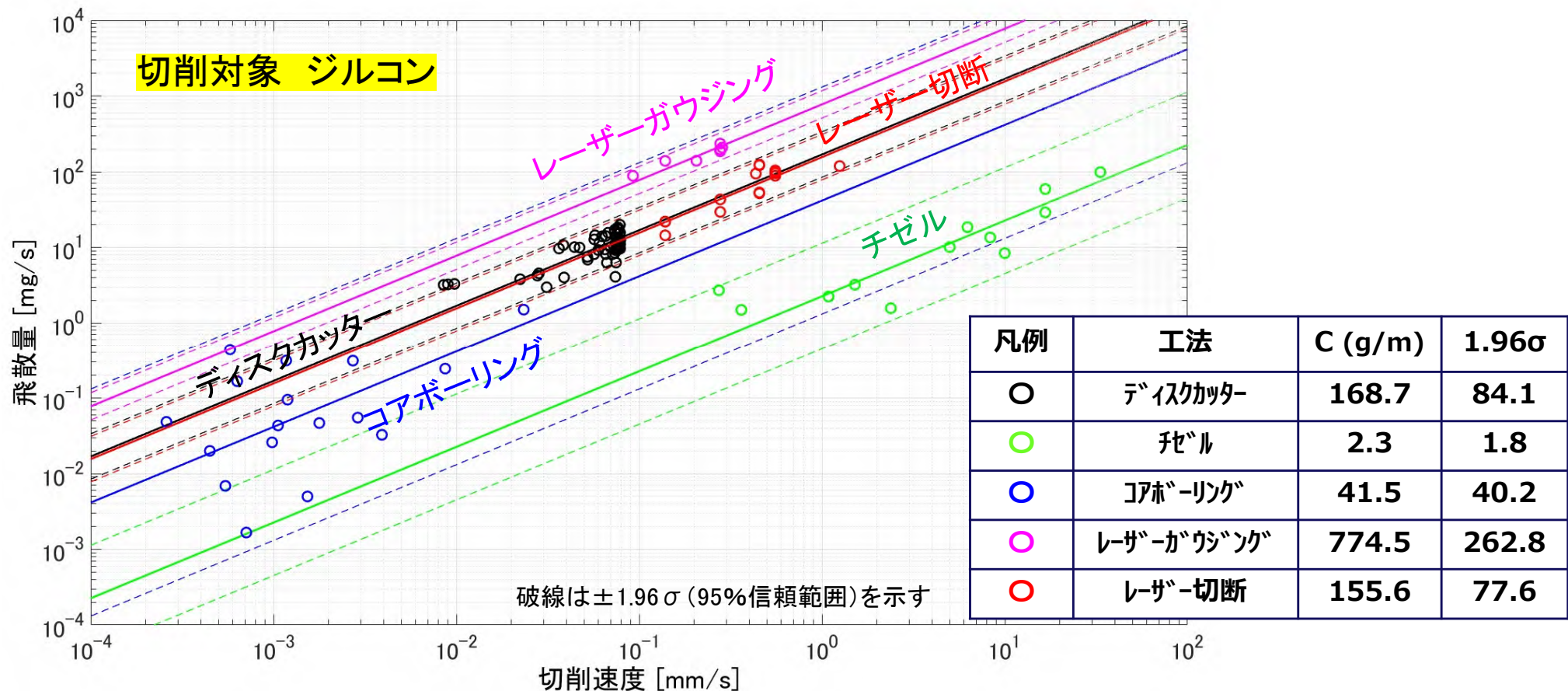
【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 切削速度と飛散量(モルタル)

- 飛散量(mg/s)＝切削速度(mm/s)×Cとして、実験値より中央値Cを導出すると共に、実験結果の包絡線C+1.96σを取得した。
- 図のように良い直線関係が得られ、切削速度に対する飛散量は、レーザーガウジング>レーザー切断≒ディスクカッター>コアボーリング>チゼル という傾向。
- 切削速度とダスト飛散量という点では、チゼルが5工法の中で最もC値が小さい。



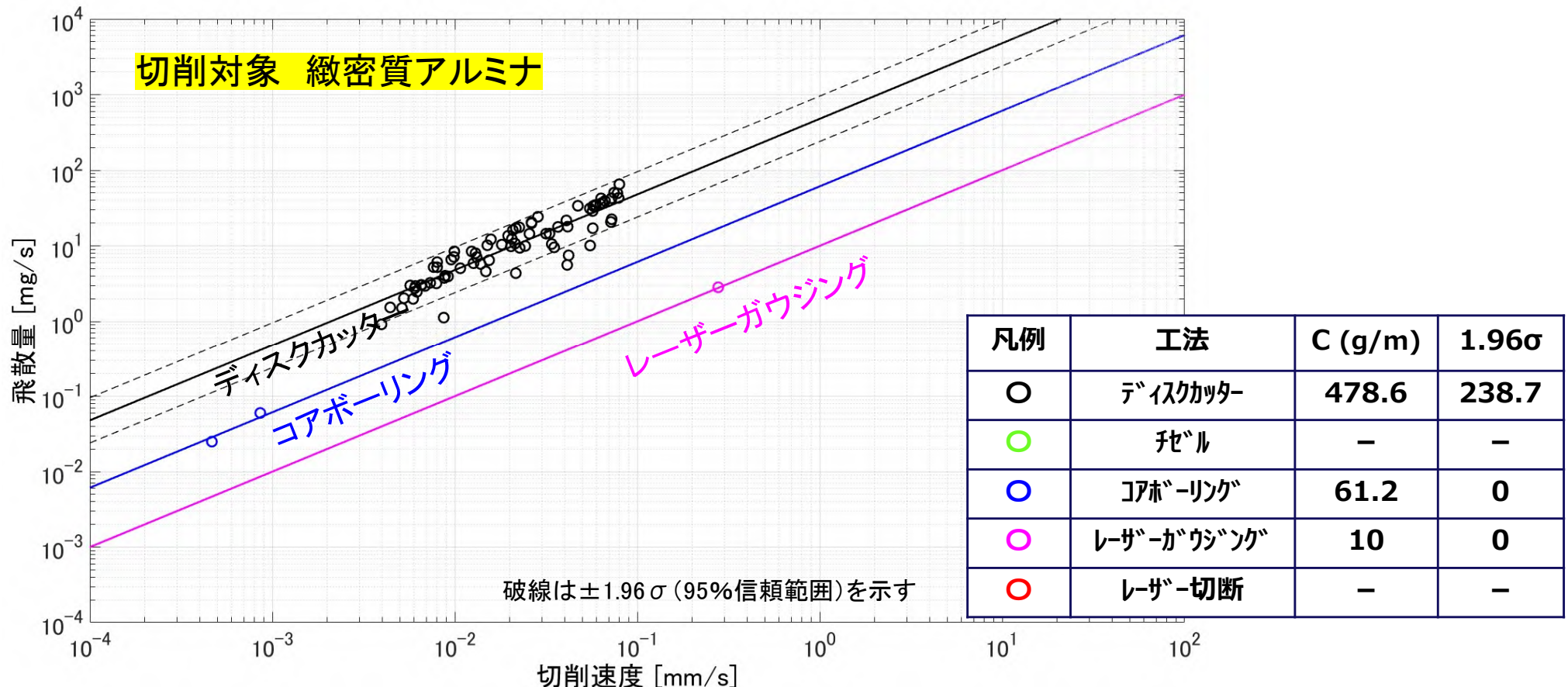
【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 切削速度と飛散量(ジルコン)

- 切削速度に対する飛散量は、以下の傾向となった。
レーザーガウジング>レーザー切断≒ディスクカッター>コアボーリング>チゼル
- 切削速度とダスト飛散量では、チゼルが全工法の中で最もC値が小さい。
- ディスクカッターは切削速度を遅くすると飛散量を抑えることができる。



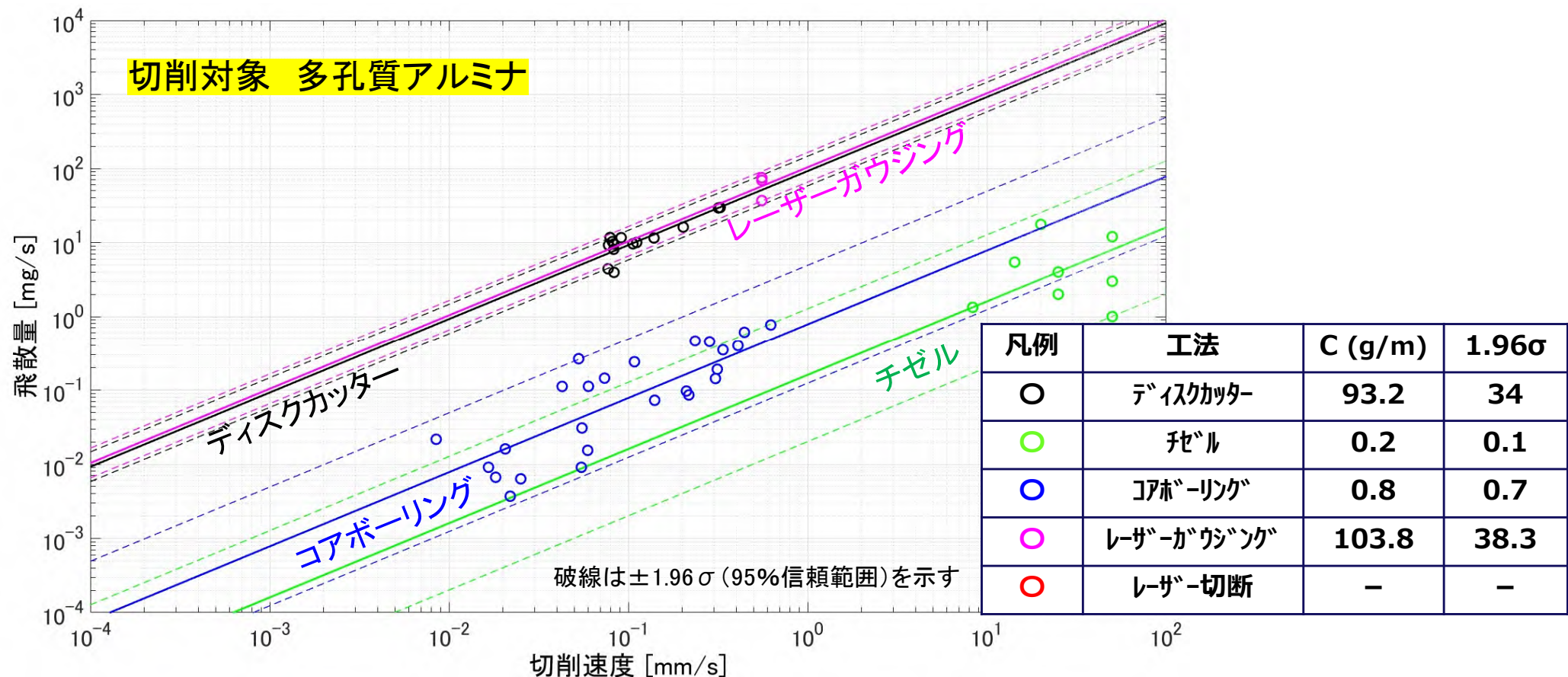
【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 切削速度と飛散量（緻密質アルミナ）

- 切削速度に対する飛散量は、
ディスクカッター＞コアボーリング＞レーザーガウジング
という傾向。但し、コアボーリングとレーザーガウジングは切削数が少ないため参考値。
- ディスクカッターでのC値は、緻密質アルミナを切削した場合に最大となった。



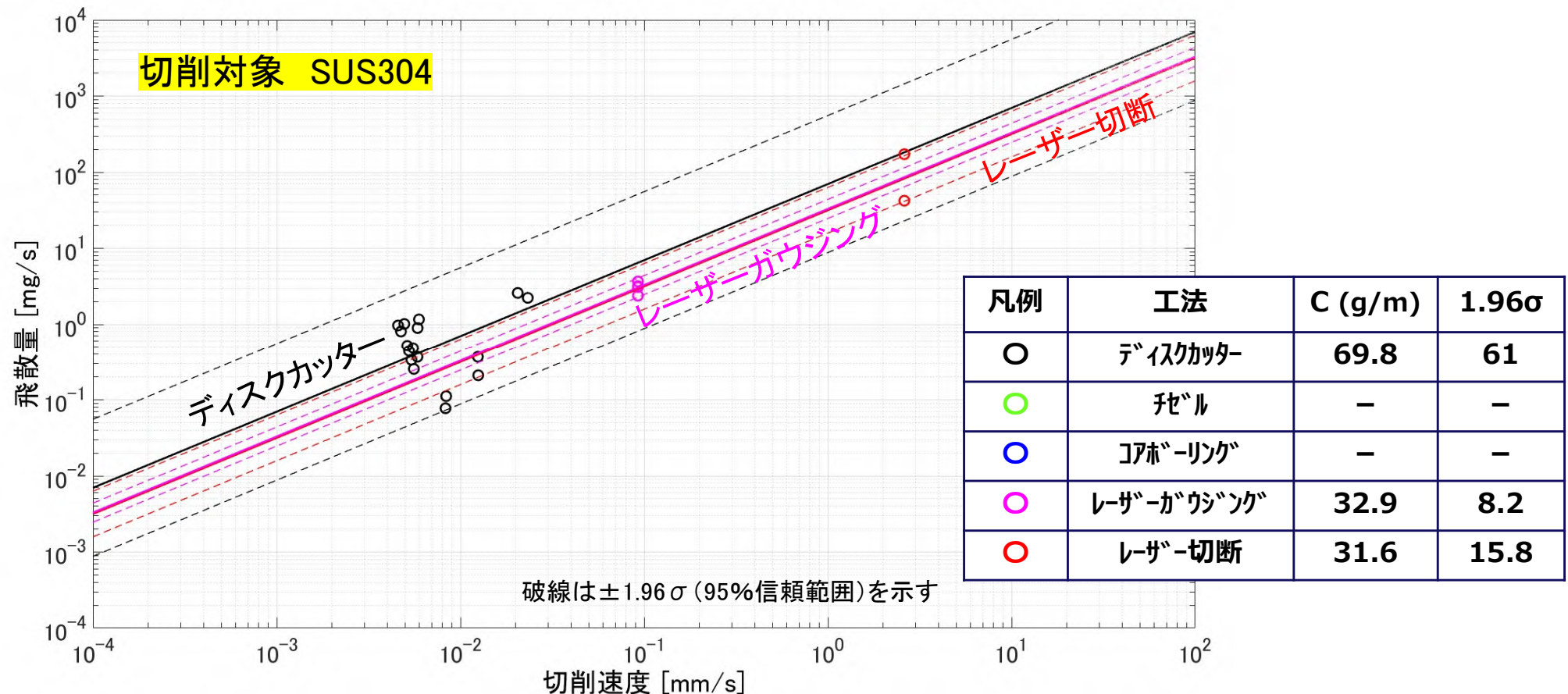
【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 切削速度と飛散量（多孔質アルミナ）

- 多孔質アルミナでは全体的に飛散量は小さくなり、切削速度に対する飛散量は、レーザーガウジング≒ディスクカッター>コアボーリング>チゼル という傾向。
- レーザーガウジングのC値は、ジルコン・モルタルではディスクカッターに比べて3～5倍程度大きかったが、多孔質アルミナでは大きな差はなかった。
- 多孔質アルミナではコアボーリング・チゼルによる切削は良好で、飛散量も小さい。



【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 切削速度と飛散量(SUS304)

- 切削速度に対する飛散量は、ディスクカッター>レーザーガウジング=レーザー切断という傾向。SUS304では、C値はディスクカッターが最大。
- ディスクカッターは切削速度を遅くすると飛散量を抑えることができる。



【2-2】ダスト飛散率詳細データ測定試験 工法間の比較：飛散特性値と特徴のまとめ

	飛散特性値※: $C \pm 1.96\sigma$ (g/m)				特徴
	多孔質 アルミナ	SUS304	ジルコン	モルタル	
ディスク カッター	93.2 ± 34	69.8 ± 61	169 ± 84	238 ± 153	ARFは大きいですが切削性が良く、飛散量はレーザーと同程度以下。粒径は条件によって異なる。刃の選択肢が広く、セラミックスも金属も切削可能。
チゼル	0.2 ± 0.1	—	2.3 ± 1.8	1.5 ± 1.0	ARFが大きいときもあるが、質量欠損が少なく、切削速度当たりの飛散量は少ない。金属系や硬い物質（緻密アルミナなど）には使用できない。
コアボーリング	0.8 ± 0.7	—	41.5 ± 40.2	2.8 ± 2.7	欠損量が大きく粉体が多く生成するが、ARFが4工法で最も小さく、飛散量は小さい。ビットの損耗が激しく、大きな押付力を要することが短所。
レーザー ガウジング	104 ± 38	32.9 ± 8.2	775 ± 263	740 ± 263	ナノレベルの非常に小さな粒子が発生し、飛散量は大きい。緻密アルミナなど、一部のセラミックスでは切削ができないケースがある（レーザー光が吸収されないため）。
レーザー 切断	—	31.6 ± 15.8	156 ± 78	231 ± 101	ナノレベルの非常に小さな粒子が発生し、飛散量は大きい。レーザー光を吸収しない物質への使用には注意が必要（反射光によるレーザーヘッドの損傷可能性）。レーザーの終端処理が必要。

※飛散量(mg/s) = $C \times$ 切削速度(mm/s)

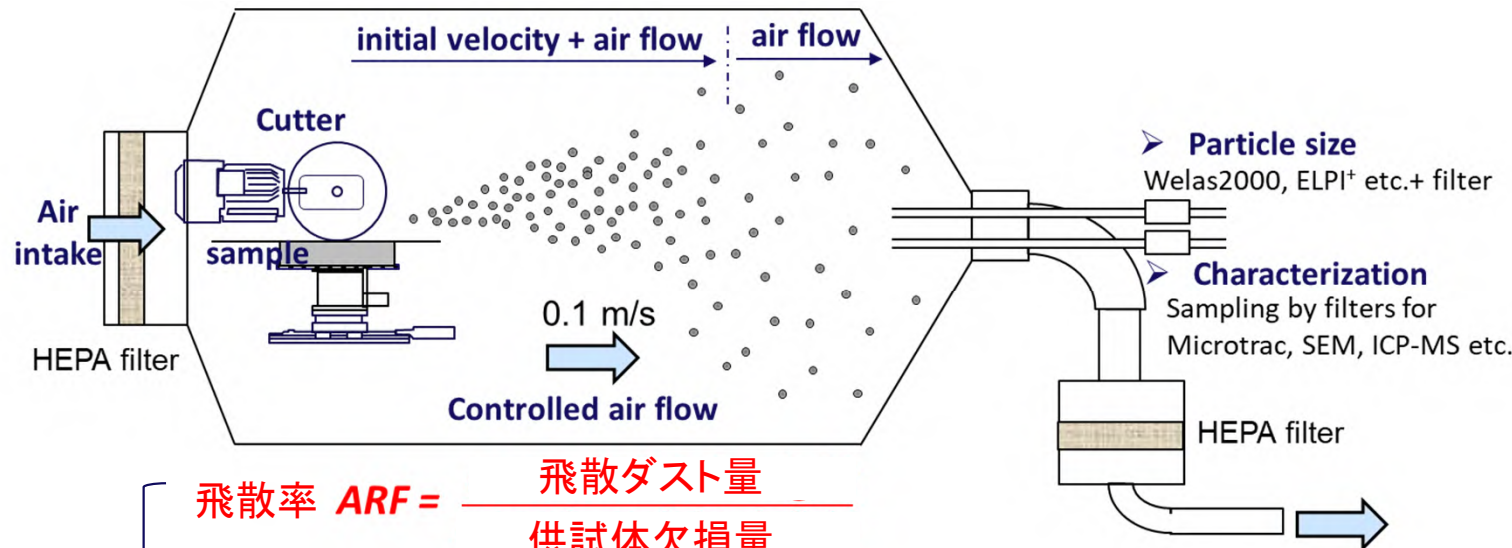
【2】ダスト飛散率測定試験 まとめ

- 気流条件や微粒子計測法を統一した試験体系を構築し、4工法（ディスクカッター、チゼル、コアボーリング、レーザー）について様々な条件で乾式切削し、飛散挙動に影響を与えるパラメータを調べて、想定される使用範囲での飛散率データを導出した。
- 各工法での最大飛散率ARFは、概ね、ディスクカッター＞レーザー切断≒レーザーガウジング＞チゼル＞コアボーリング という傾向になった。
- さらに、安全評価の観点から、工法特有のカーフ幅や刃渡りを含んだ飛散量が重要であることから、飛散量(g/s)と深さ方向の切削速度(m/s)の比例係数を飛散特性値C(g/m)として整理した。同じ材料でCが大きな工法ほど、ダストが飛散することになる。
- 各工法で切削速度に対するダスト飛散量を比較すると、概ね、レーザーガウジング＞レーザー切断≒ディスクカッター＞コアボーリング＞チゼル、という傾向となった。
- 飛散粒子の粒径分布に関しては、機械的切削（ディスクカッター・チゼル・コアボーリング）ではピーク粒径は概ね10～30 μm 程度であり、ナノレベルの微細粒子は無視できる。一方、熱的切削（レーザー）では100nm前後のものが多いが、より詳細な検討が必要である。
- なお、切削工法の選定には飛散量や飛散率だけではなく、材料に対する切削性なども重要なため、切削試験で得られた各工法の特徴を併せて整理した。

【3】ダスト飛散挙動評価試験

【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験 目的と実施内容

- 本項では、ユニバーサルなダスト飛散率を導出する考え方と実験装置設計を構築し、【2】のダスト飛散率測定試験や【3-2】ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験、【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験に反映する。
- ダスト飛散量の導出には、飛散ダストを定量／粒径分布計測する必要があり、切削部で発生した飛散ダストを制御された気流中で浮遊させ、計測部で回収・計測する。
- 気流の流速は、燃料デブリ取り出し時のPCV最大換気量から、保守的に**0.1m/s**と設定した。



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{飛散率 } ARF = \frac{\text{飛散ダスト量}}{\text{供試体欠損量}} \\ \text{飛散率 } ARF_{RP}^{\ast} = \frac{\text{飛散ダスト量 (呼吸摂取される空気動力学径} \leq 10\mu\text{m 飛散ダストのみ)}}{\text{供試体欠損量}} \end{array} \right.$$

ダスト飛散率測定試験設備の共通設計(ディスクカッターの例)

【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験（粒子計測手法の構築） 飛散ダストの粒径計測に適した装置と手法の検討

- 信頼性の高い微粒子計測として知られる、Welas (Palas社Welas2000又はPromo2000)※、ELPI+、Microtrac MT3000は、計測可能な粒径と粒径範囲が異なる(下表)。
 - Welas: 光散乱径(D_{OP})計測。計測範囲は $0.2 \sim 10 \mu\text{m}$ 、 $0.3 \sim 17 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \sim 40 \mu\text{m}$ 。
 - ELPI+: 空気動力学径(D_{ae})計測。計測範囲は $0.006 \sim 10 \mu\text{m}$ 。
 - Microtrac MT3000: 動的光散乱径計測。計測範囲: $0.02 \sim 2,000 \mu\text{m}$ 。
- 予備試験で切削時に発生する飛散ダストの粒径を計測したところ、Welasが最も計測の再現性に優れ、信頼できることが分かった。一方、飛散ダストにはWelasの計測範囲を超える粒径のものが発生する場合があること、非球形の飛散ダストで計測された光散乱径を空気動力学径に変換する必要があることが分かった。
- そこで、これら複数の計測装置を組み合わせることにより、飛散ダストの空気動力学径分布を高い精度で取得する手法の構築を行った。

Device	ELPI ⁺	Welas			Microtrac MT3000 series
計測する粒子径	空気動力学径	光散乱径			レーザー回折・動的光散乱径
計測範囲	$0.006\text{--}10 \mu\text{m}$	$0.2\text{--}10 \mu\text{m}$	$0.3\text{--}17 \mu\text{m}$	$0.6\text{--}40 \mu\text{m}$	$0.02\mu\text{m}\text{--}2,000\mu\text{m}$
IN SITU / OFF-line	IN SITU	IN SITU			OFF-line
測定原理	粒子をインパクトに衝突させることで、粒子を捕集する。ELPI+では、衝突した際の電気信号から粒子をカウントする。	散乱光の強度から粒径を取得する。			回折パターン・強度から粒径分布を取得する。

【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験(粒子計測手法の構築) (参考)空気動力学径、幾何学径、光散乱径

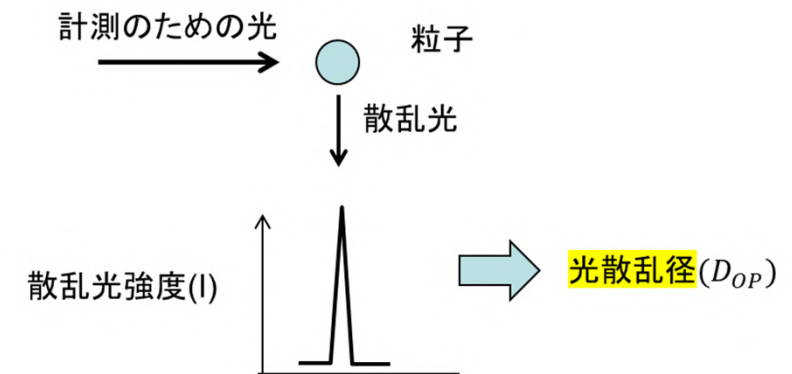
① 幾何学径 (D_{geo})

形状から粒子径を定義するものである。幾何学径としては、長軸径、短軸径、厚み、平均径、定方向径、相当径がある。

② 光散乱径 (D_{OP})

粒子に光を照射した際の散乱光の強度から得た粒子径。光散乱強度は粒径と相関がある。

散乱光は、全方向に散乱するが、Welasでは、側方に散乱される散乱光強度から粒径を得る。



③ 空気動力学径 (D_{ae})

不規則な形をした粒子の直径を測ることは一般には難しいため、その粒子と終末沈降速度が等しい密度 1 g/cm^3 の球の直径を空気動力学径と呼ぶ。つまり、空気動力学径とは対象とする粒子と空気中で同じ挙動を示す仮想的な水滴の直径である。インパクターで粒子径を測定したとき、粒子密度が不明でも空気力学的粒子径は求まることになる。

真球の場合、空気動力学径(D_{ae})と幾何学径(D_{geo})の関係は以下の式で表すことができる。

$$D_{ae} = \sqrt{\rho_p} D_{geo}$$

【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験(粒子計測手法の構築) 光散乱径から空気動力学径の導出

本事業では、解析で扱えるように『空気動力学径』で粒径を評価するが、計測法により『幾何学径』、『光散乱径』も混在するので、互いの変換方法を以下のように確立した。

【粒子が真球の場合】

光散乱径(D_{OP})と幾何学径(D_{geo})は等しい。

$$D_{op} = D_{geo}$$

一方、光散乱径と空気動力学径は、粒子密度を ρ_p 、水の密度を ρ_0 とすると、以下の関係がある。

$$\sqrt{\rho_0}D_{ae} = \sqrt{\rho_p}D_{geo} = \sqrt{\rho_p}D_{op}$$

光散乱径に比重の平方根を掛けると空気動力学径となる。

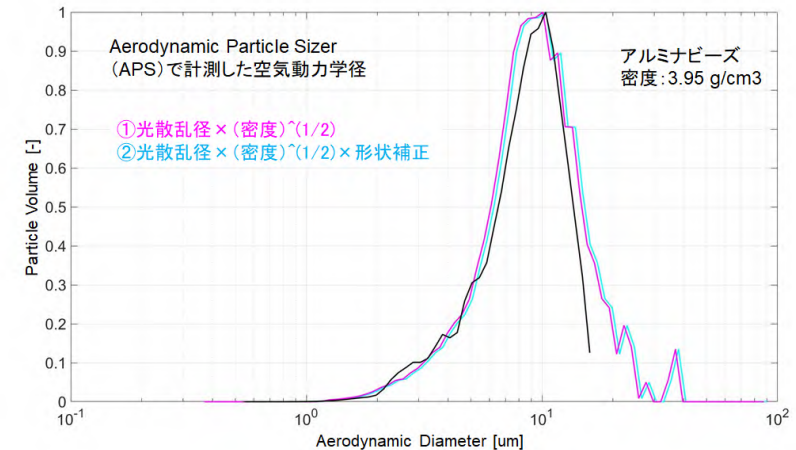
【粒子が非球形の場合】

光散乱径に対し形状補正項(α^{-1})を掛けることで、幾何学径(真球相当)を得る。

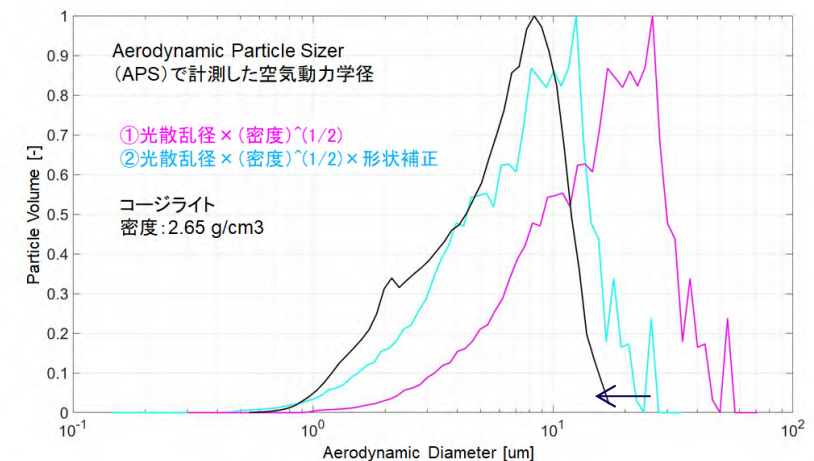
$$D_{geo} = D_{OP} \times \alpha^{-1}$$

$$\sqrt{\rho_0}D_{ae} = \sqrt{\rho_p}D_{geo} = \sqrt{\rho_p}D_{op} \times \alpha^{-1}$$

そこで、切削ダストの α を、測定した空気動力学径と幾何学径から実験的に導出した。



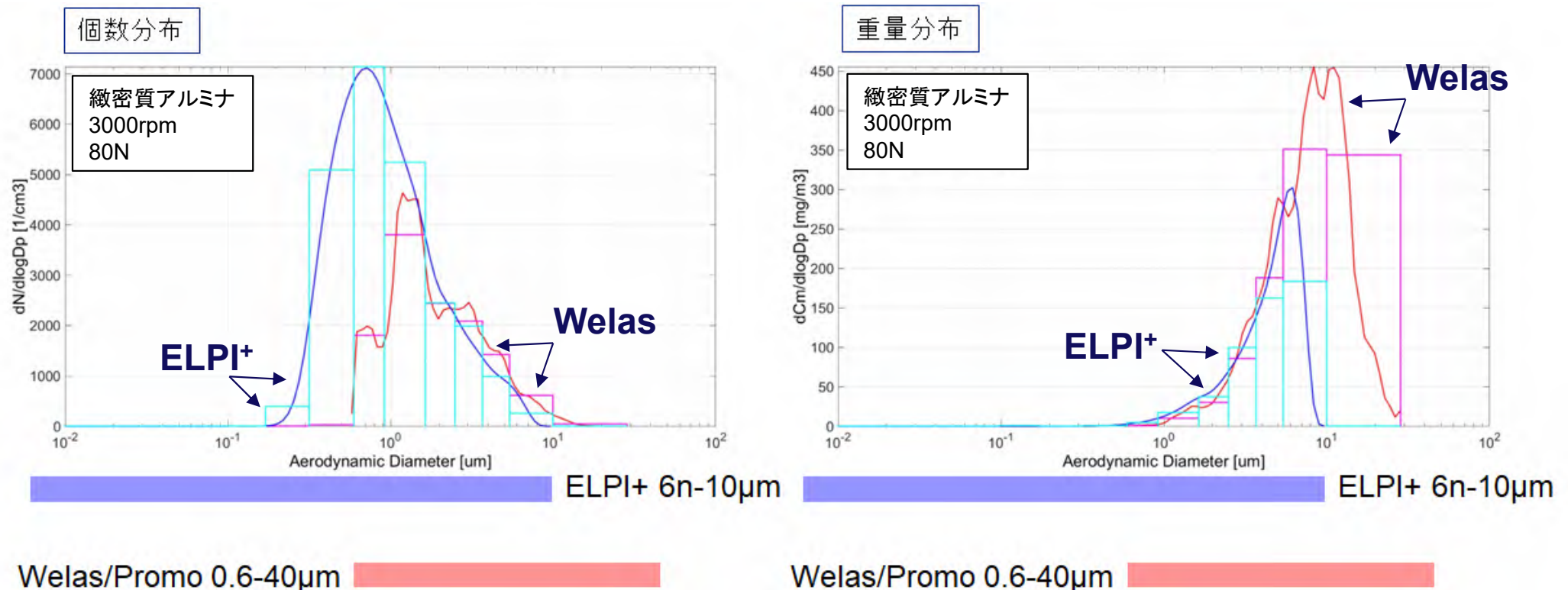
真球粒子の光散乱径と空気動力学径



非球形粒子(切削ダスト)の光散乱径と空気動力学径

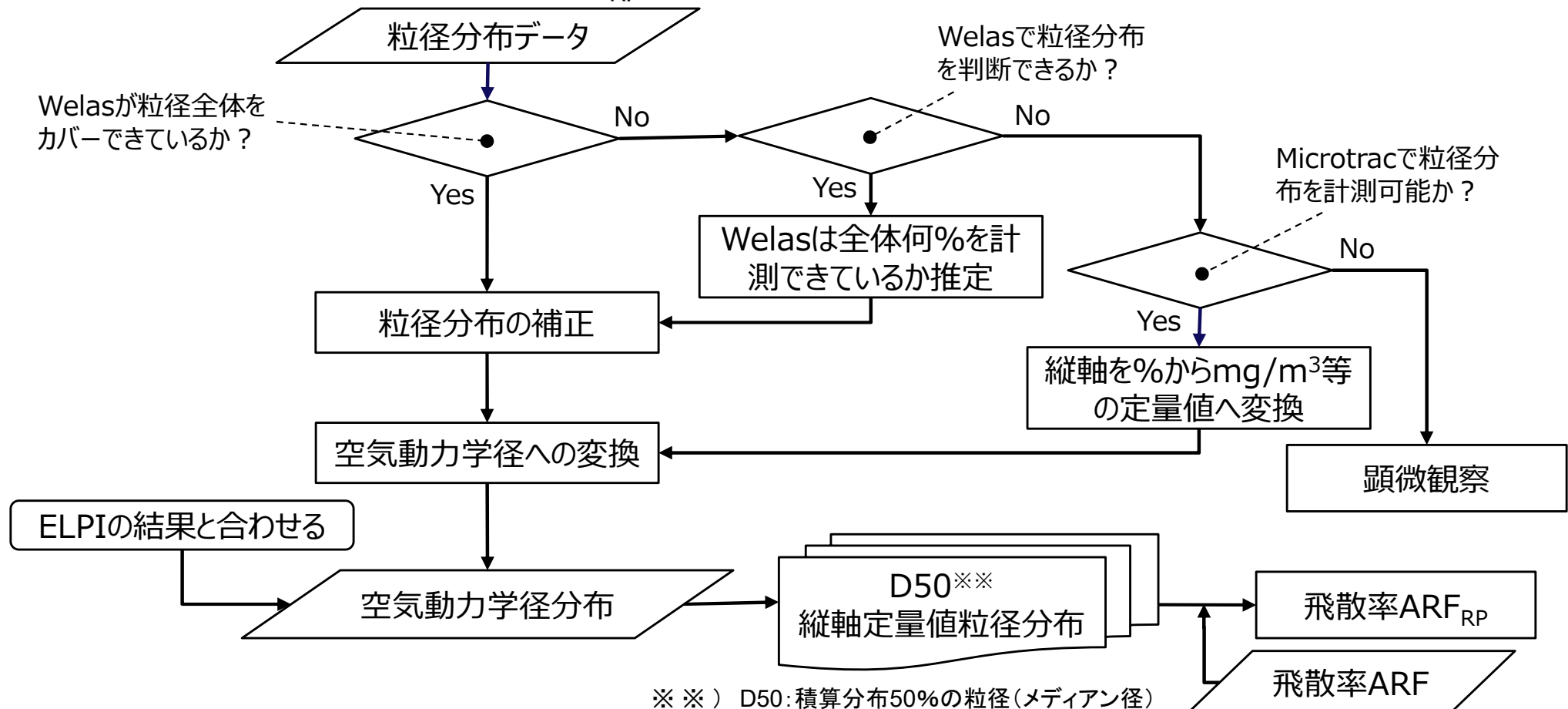
【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験(粒子計測手法の構築) 計測法の組み合わせによる飛散ダストの粒径分布の導出

- 様々な切削実験での飛散ダストの粒径分布測定結果から検討した。
- 下図の場合、個数分布ではELPI+で全体を計測できているように見える。重量分布で見ると、ELPI+では全体を計測できておらず、Welas※で、全体を計測できていることが分かる。
- 一方、Welasの測定範囲を超える($>40\mu\text{m}$)のダストが飛散するケースもあり、オフラインとなるがMicrotracにより更に広い範囲の確認が必要であることも分かった。



【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験(粒子計測手法の構築) 計測法の組み合わせによる飛散ダストの粒径分布の導出

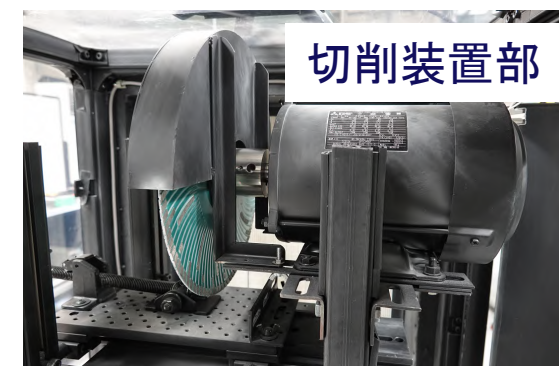
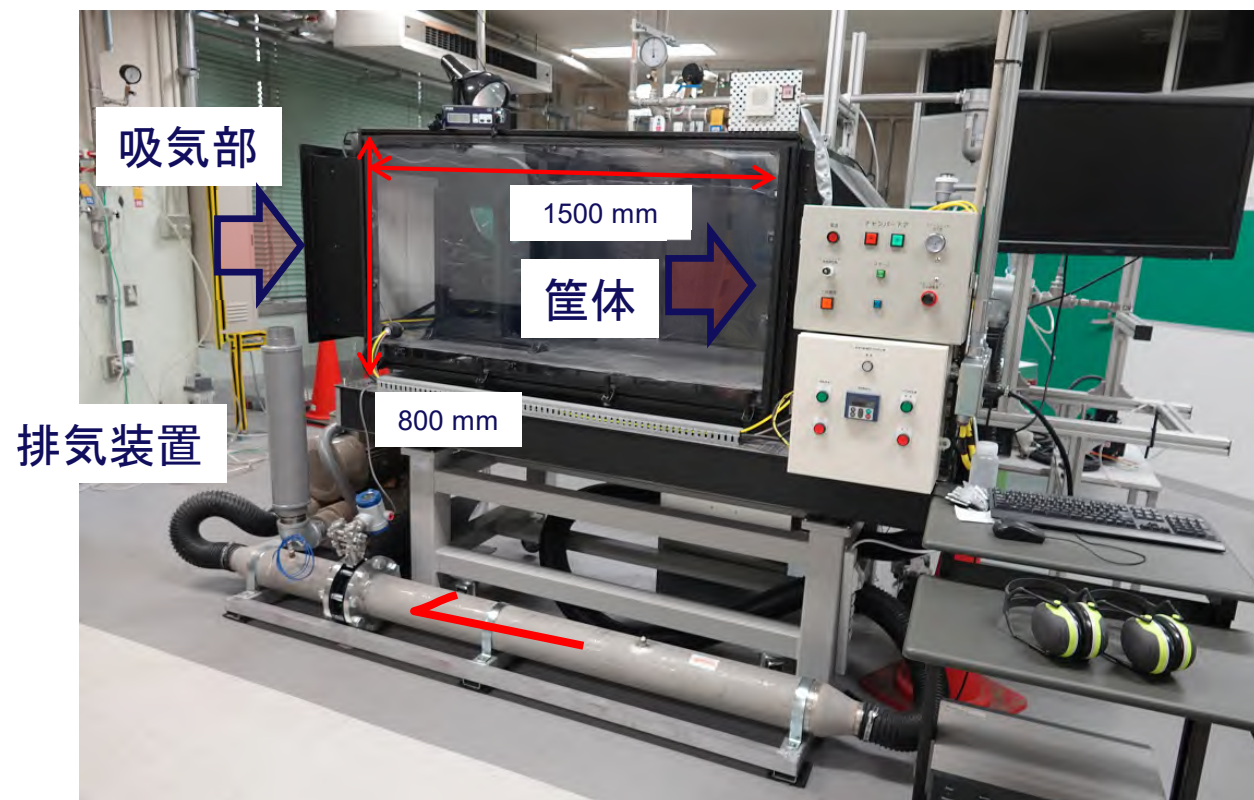
- 様々な切削実験での粒径分布の測定結果から、飛散ダストの確からしい空気動力学径分布を導出する手法(フロー)を構築した。
- 得られた空気動力学径分布を用いることにより、飛散率ARF(全粒径)から、被ばく線量評価で重要な飛散率 $ARF_{RP} (\leq 10 \mu m)$ を得ることができる。



本事業で開発した切削ダストの空気動力学径分布と ARF_{RP} を得るためのフロー

【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験 実験システム試作機(1号機)

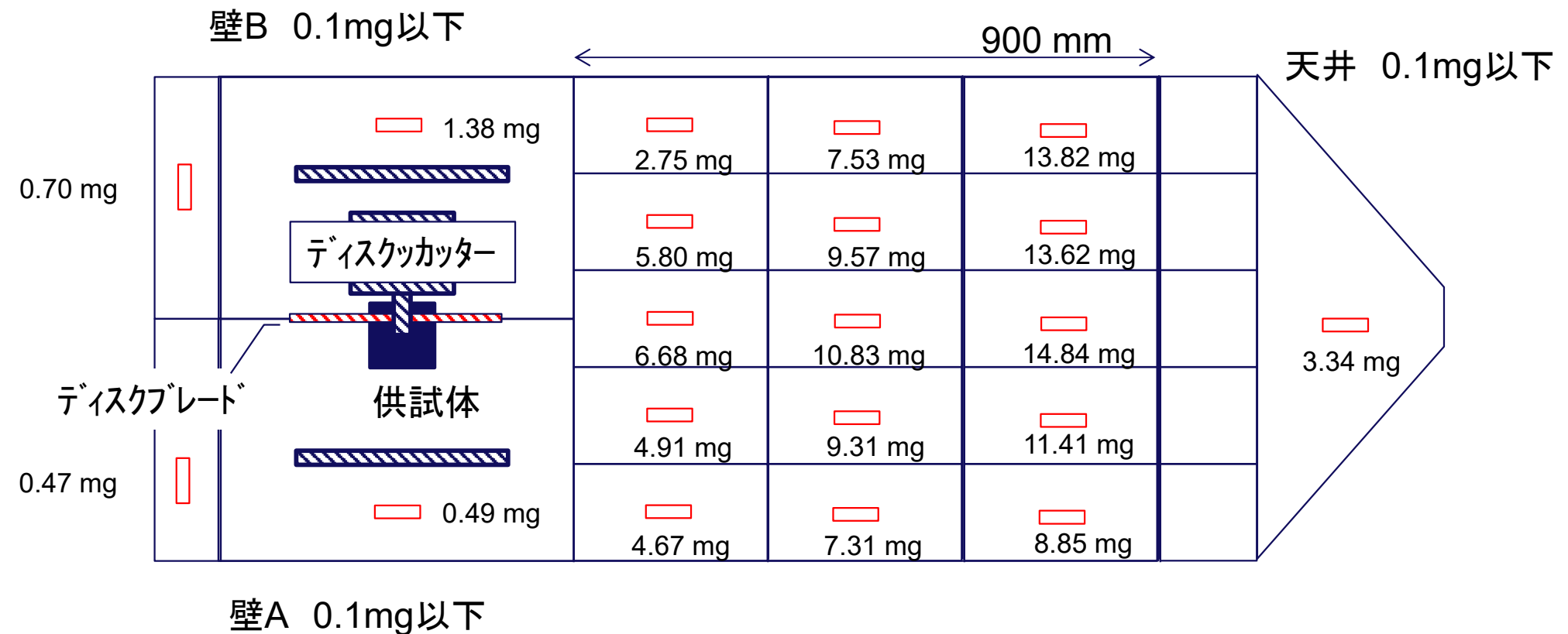
- 気密の筐体(断面800 mm×800 mm×長さ1,500 mm)内に切削機を設置。
- 筐体内壁は平滑なアルミおよび導電フィルムを貼布したポリカーボネートを使用。
- 本試作機で、具体的に以下の検討を実施した。
 - ✓ インバータ制御による、切削装置の回転数、ブロワ風量の制御システム
 - ✓ 供試体押付圧力の制御システム
 - ✓ ダストサンプリングシステムおよび計測システム
 - ✓ 安全システム



【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験

試作機(1号機)の試験結果：床と壁への沈着量の分布

- ケーシング内部のダスト沈着量の分布を、各部位(床・壁・天井)に置いたガラス板のクーポンへの付着量から評価した。
- 床にはほぼ均質に分布する一方、壁と天井への付着は無視できる量であった。



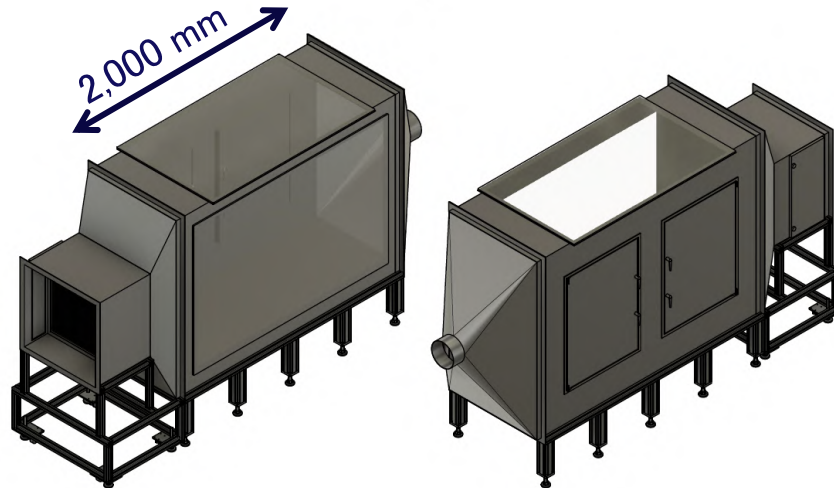
【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験 試作機1号機で得られた課題と2号機への反映

- 1号機で明らかとなった課題を抽出し、改良ケーシング(2号機)を製作した。
- 2号機は性能を確認してパラメータ試験のケーシングの基本設計とした。

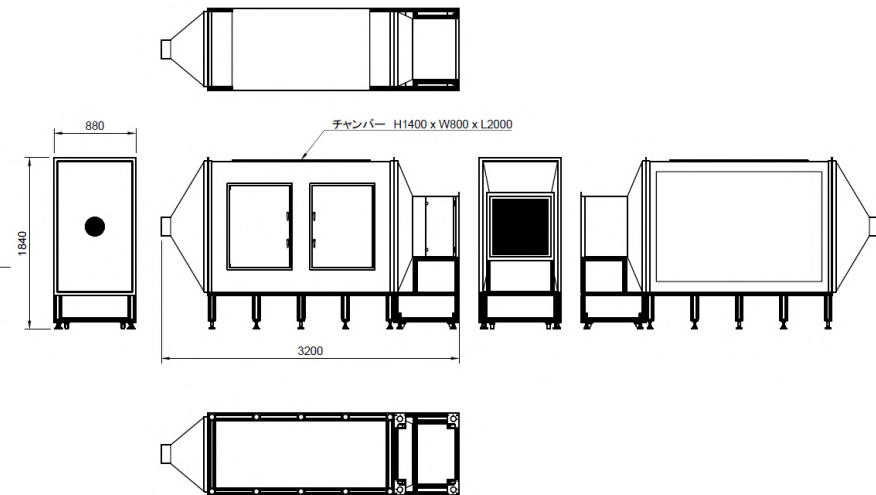
	改善すべき点	改善方法
#1	筐体内での切削装置の調整が難しい。	スライド機構により、切削装置を容易に筐体の外に取り出せる構造とする。
#2	切削装置を、スライド機構により出し入れするため、筐体の天井高を高くする。	天井高さを+200～400mm(1,000mm～1,200mm)
#3	扉の間口が小さく、装置の取り出しが難しい。扉部凹み部に粒子が堆積する。扉の構造を可能な限りフラット化する必要がある。	ラプコン機構ソフトダウンスレー扉もしくはスライドドア構造により、間口を最大限確保するとともに、扉部の構造をフラット化する。
#4	配線は筐体下から取り出す。	電源ケーブル、信号線が十分収まる管を設置する。気密のためのシールが必要。
#5	安全装置	光カーテン、ドアスイッチ、異常振動検知といったセンサーを追加する。別系統の安全PLCを追加する。
#6	ブロワの制御	切削装置PLCに接続し、ブロワ制御(風量制御)する。
#7	カメラ	試験部観測用カメラ×2か所の設置、PLCに接続。
#8	計測装置	温度・湿度・圧力(筐体内圧力、フィルタ差圧)
#9	床	床は可能な限りフラットな構造とする。

【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験 実験システム試作機(2号機): ケーシングの設計

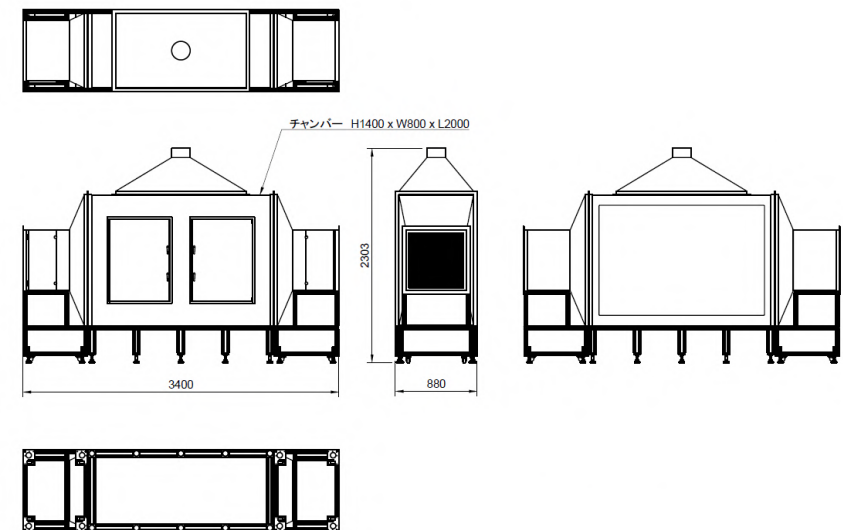
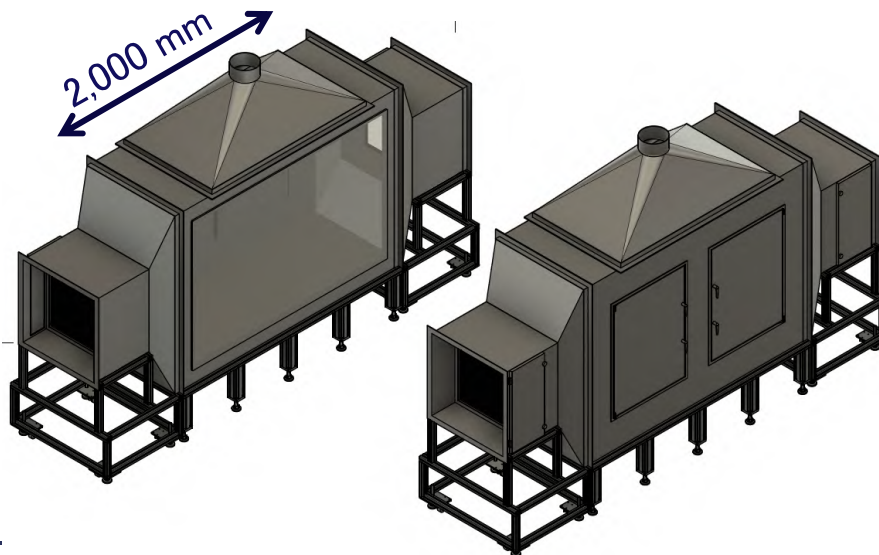
- 水平方向流れで使用する場合の配置



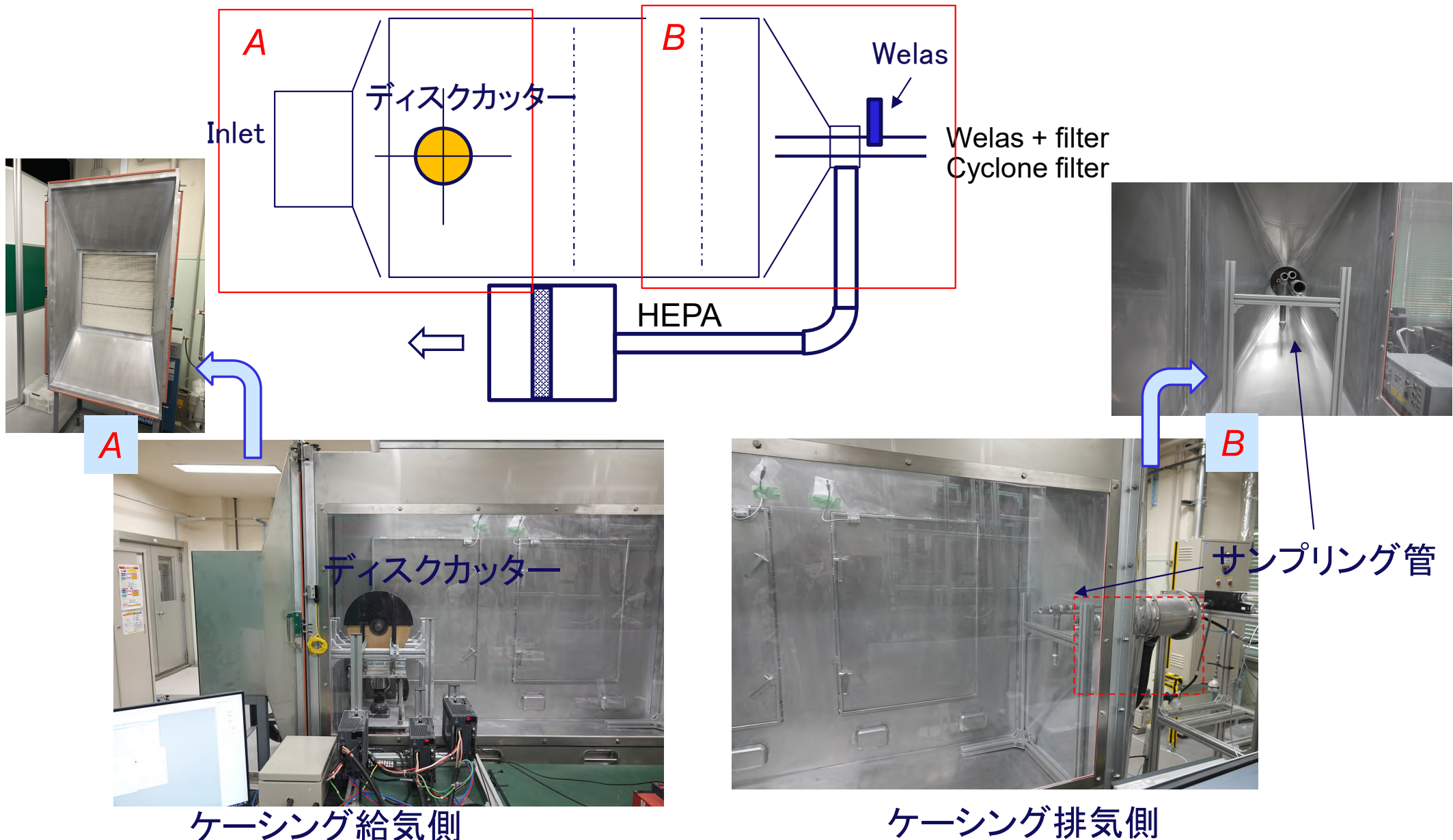
ケーシング寸法: H1,400xW800xL2,000



- 垂直方向流れで使用する場合の配置

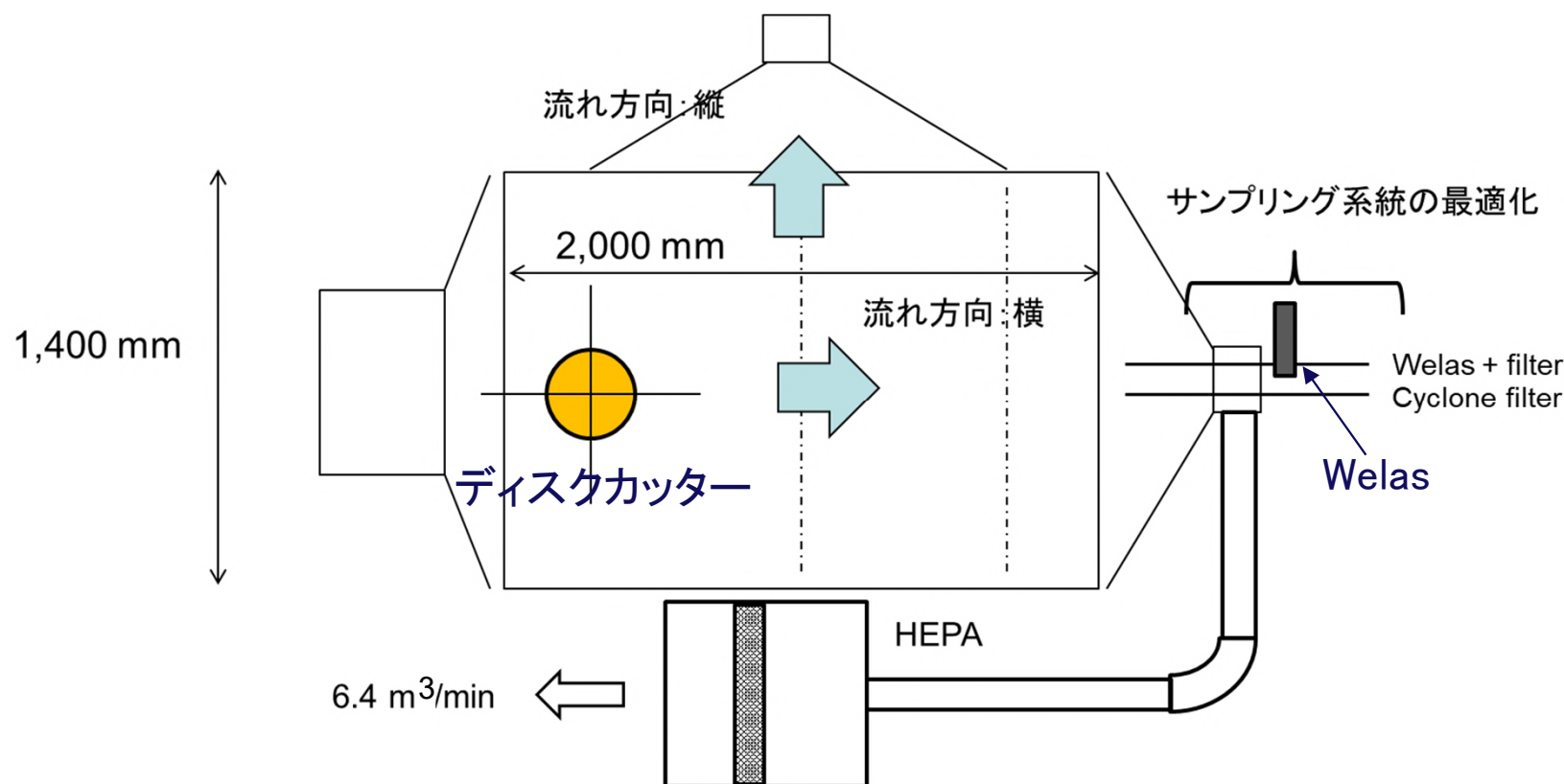


【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験 実験システム試作機(2号機): ケーシングの設計



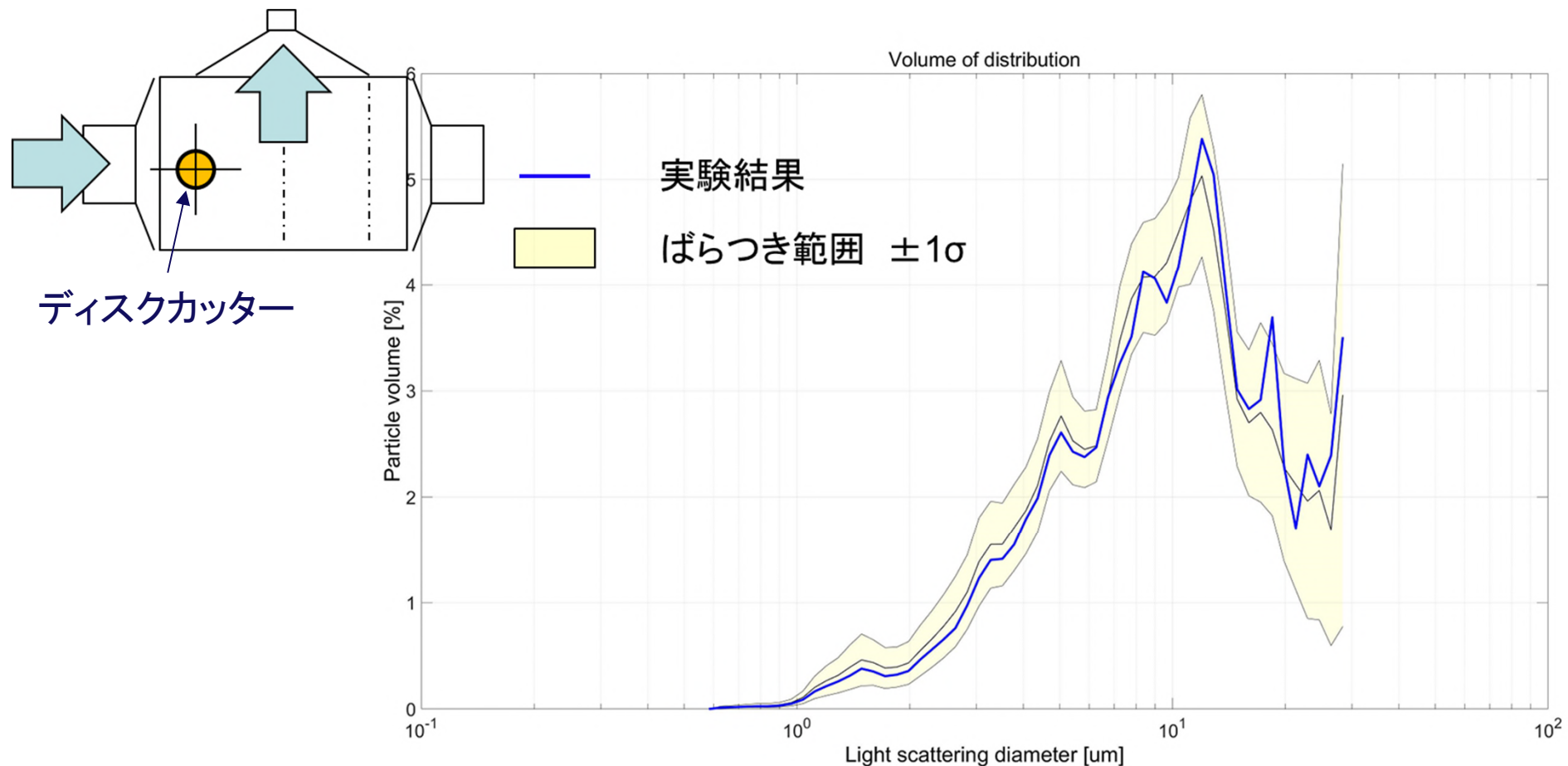
【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験 実験システム試作機：ケーシング内風向の検討

- 廃炉ハンドブック※では等方的なケーシングの上部に排気・サンプリング系を設けて上向きの流動下でのダスト飛散率を取得した。
- 一方、本事業で対象とする、ディスクカッターやレーザーではダスト飛散に指向性があり、狭いケーシングでは壁への沈着で非保守的な評価となる可能性があった。
- そこで、飛散方向に長いケーシングを採用する場合に、流れ方向の影響やサンプリング位置の最適化などの検討を実施した。



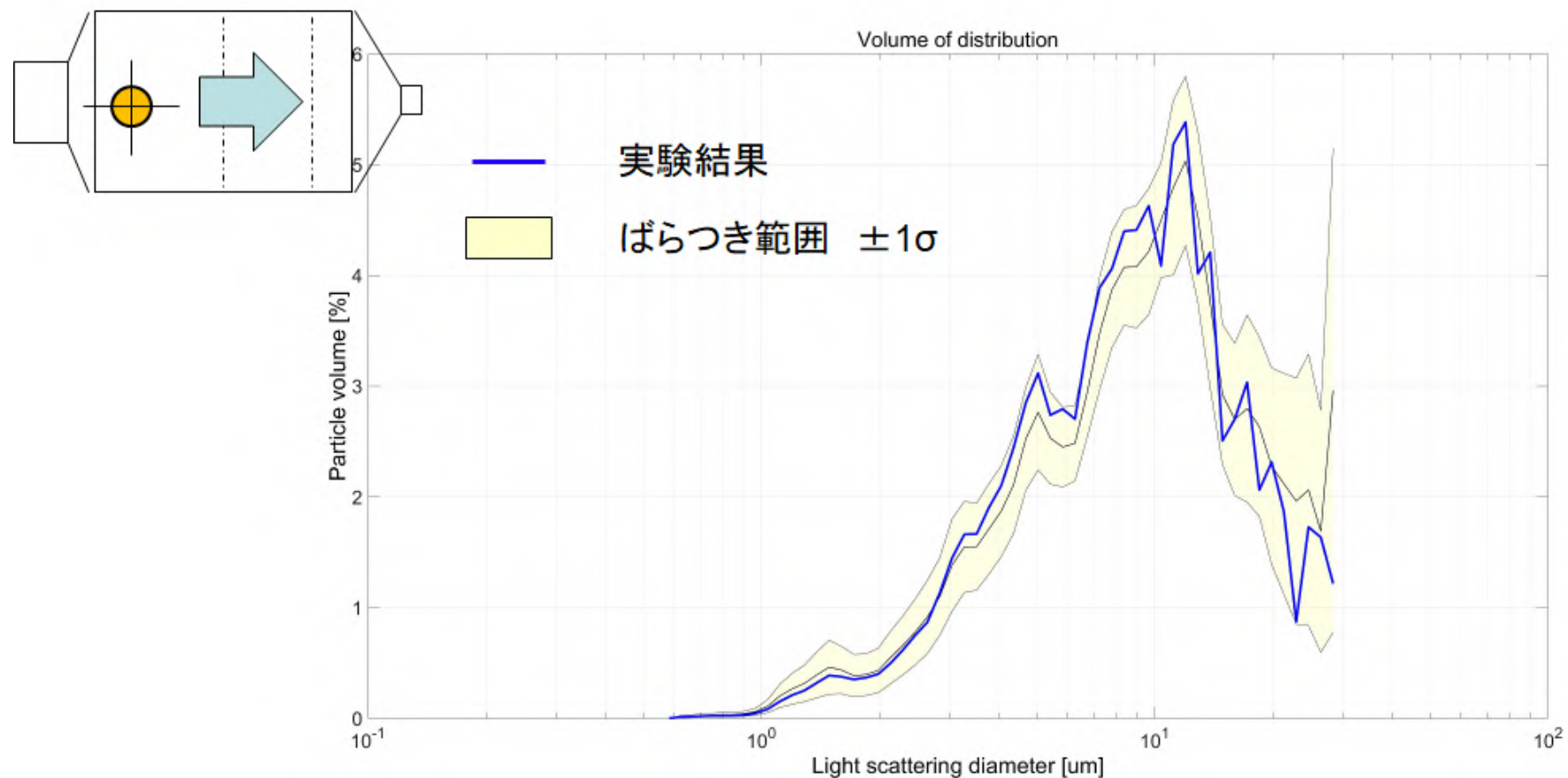
【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験 実験システム試作機：縦方向流れで計測した粒径分布

- ケーシング：縦方向流れ、片側吸気、Welasはケーシング内に設置（サンプリング管最短）
- ケーシング（2,000 mm x 1,400 mm）では流れ方向の影響は小さいことが分かった。



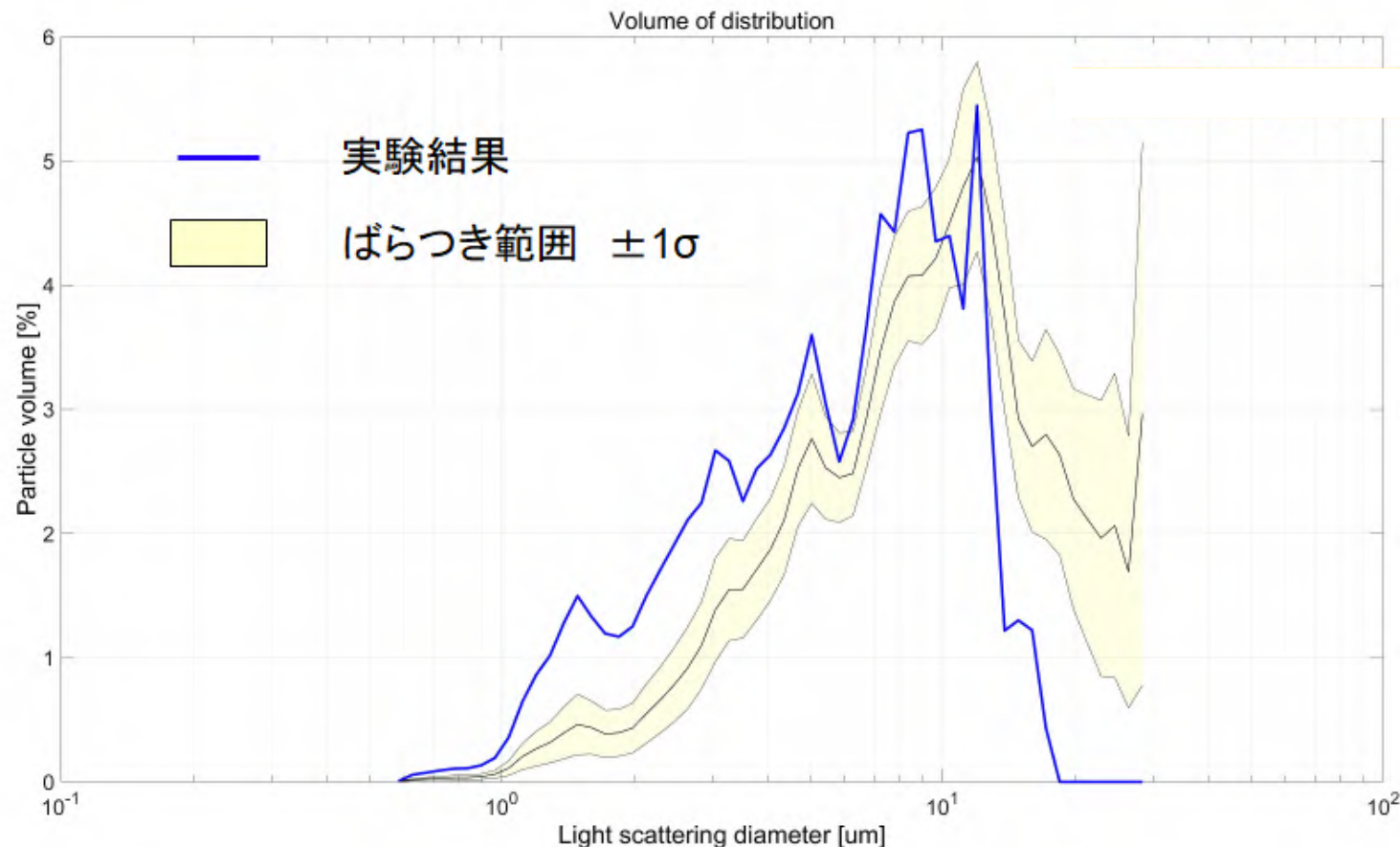
【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験 実験システム試作機：横方向流れで計測した粒径分布

- ケーシング：横方向流れ
- ケーシング (2,000 mm x 1,400 mm) では流れ方向の影響は小さいことが分かった。



【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験 実験システム試作機：サンプリングシステムの最適化

- サンプリング管が長い＋曲がり部が多い場合、サンプリング管内での粒沈着が大きくなり、違った粒径分布が得られた。



【3-1】コールド模擬材による挙動評価試験(測定装置の開発) 実験システム共通設計の構築と展開

ケーシング1号機(試作機)

1,500mm × 800mm × 800mm

流速 0.1 m/s



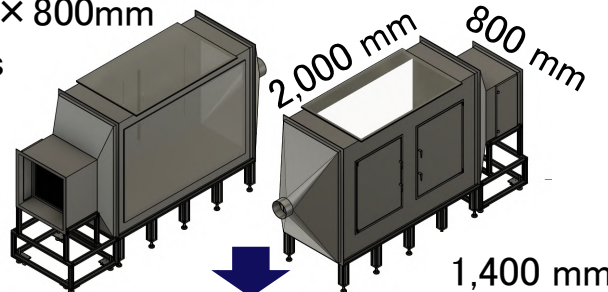
ケーシング1号機で得た情報を基にケーシング2号機、東芝ESS/NFD ケーシング、ONETケーシングを製作した。

- ① 各部必要寸法
- ② サンプルング方法
- ③ 計測方法
- ④ 切削装置の制御方法

ケーシング2号機(パラメータ試験) 電中研、日立GE、三菱重工、IHIに設置

2,000mm × 1,400mm × 800mm

流速 0.1 m/s



小型ケーシング

チゼル、コアボーリングでは、ダスト飛散量が少なく(ディスクカッター100分の1以下)、小型ケーシングに変更

ケーシング3号機(詳細データ測定試験)

2,500mm × 1,300mm × 1,300mm 流速0.1 m/s



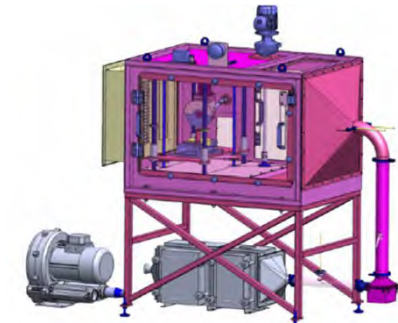
東芝ESS/NFD ケーシング

長さ600mm、高さ300mm、幅200mm



ONETケーシング

長さ1,350 mm、高さ1,000mm、幅890mm



既存管理区域の空間的制約等により、若干小さなケーシングとなったが、設計や計測位置の工夫によりほぼ同じデータ取得が可能であることを、同じコールド供試体(緻密質アルミナ)で確認した。

【3-2】ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験

【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験

ウラン含有模擬デブリ試験全体の目的と実施内容

■ 目的

- コールド試験でパラメータ依存性を調べた飛散率の絶対値として、燃料デブリ成分相（ウラン酸化物燃料デブリ）の飛散率を測定し、燃料デブリの飛散率を推定する。
- 様々な相（酸化物、金属、ホウ化物等）が非均質に共存する実際の燃料デブリに近い溶解過程を経たウラン含有模擬燃料デブリの飛散率を測定し、上記の推定値と比較する。

■ 実施内容

【3-2】ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験 （東芝ESS-NFD）	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 均質なU-Zr-O混合酸化物の製造および性状分析 单相 少元素 均質 未熔融 10g規模 ➤ 管理区域に試験環境を構築 ➤ 切削時のダスト飛散率測定試験および評価
【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験 （ONET-CEA-IRSN）	<ul style="list-style-type: none"> ➤ kg規模の非均質なRPV模擬燃料デブリの製造および性状分析 多相 多元素 非均質 熔融 Kg規模 ➤ 管理区域に試験環境を構築 ➤ 切削時のダスト飛散率測定試験および評価

【3-2】ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験

【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験
切削試験の条件

実施場所	供試体(熱処理温度)		ペレット数/試験	試験回数	切削刃	回転数 [rpm]	荷重[N]	
東芝ESS -NFD	Al ₂ O ₃ ペレット、ブロック		5	10	AG180 BT180A	1200,500 0	10, 20, 80	
	立方晶 UO ₂ ペレット (1700℃)		3	各1	BT180A	3000	20	
	立方晶 (U,Zr)O ₂ (1700℃)							
	正方晶 (Zr,U)O ₂ (1700℃)							
	立方晶 (U,Zr)O ₂ + 正方晶 (Zr,U)O ₂ (1700℃)							
	立方晶 (U,Zr)O ₂ + 正方晶 (Zr,U)O ₂ (2400℃)							
ONET -CEA -IRSN	Al ₂ O ₃ ペレット		5	6		1200,30 00	60-70 20, 100 50	
	立方晶 UO ₂ ペレット (1700℃)			6				
	FD #1 ※	A面	—	4				3000
		B面	—	2				
	FD #2 ※	VF-U2-E	—	1			50	
		VF-U2-A	—	2				

※)kg規模ウラン含有模擬燃料デブリ試料のFD#1とFD#2の詳細はp.127参照

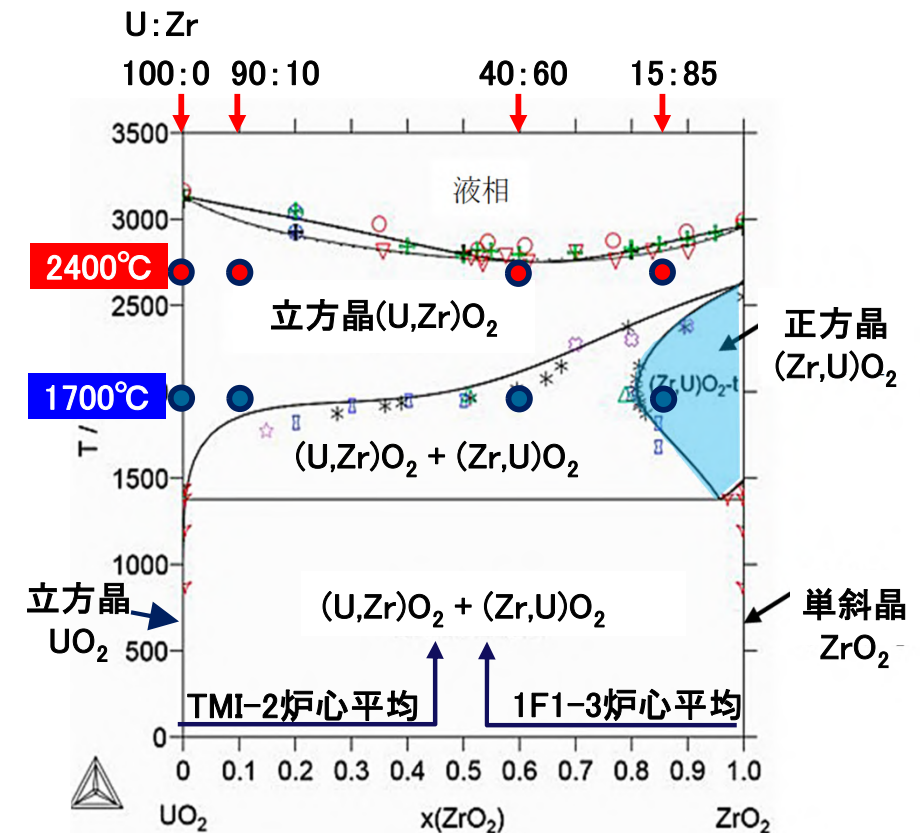
- 国内調達のAl₂O₃とUO₂およびディスクブレード(BT180A)をフランスでも使用し条件を揃えた。
- 運転方法もできるだけ条件を統一し、可能な範囲で同条件を繰り返して再現性を確認した。

【3-2】ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験 均質ウラン含有模擬燃料デブリの製造

- 事故進展に応じて異なる到達温度と $\text{UO}_2\text{:ZrO}_2$ 比が、燃料デブリの性状（微細組織、熱・機械的特性）およびダスト飛散挙動に及ぼす影響の把握を目的に、製造条件を決定した。

- U-Zr酸化物：4組成
- 熱処理温度：2種類

主要な相	原料粉末比率(at%)		熱処理条件 (最高温度での熱処理条件)		
	UO_2	ZrO_2	最高温度	保持時間	雰囲気
立方晶 $(\text{U,Zr})\text{O}_2$	90	10	1700℃	4 h	wet Ar+1% H_2
			2400℃	10 min	Ar
正方晶 $(\text{Zr,U})\text{O}_2$	15	85	1700℃	4 h	wet Ar+1% H_2
			2400℃	10 min	Ar
立方晶 $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ + 正方晶 $(\text{Zr,U})\text{O}_2$	40	60	1700℃	4 h	wet Ar+1% H_2
			2400℃	10 min	Ar
立方晶 UO_2	100	0	1700℃	4 h	wet H_2
			2400℃	10 min	Ar



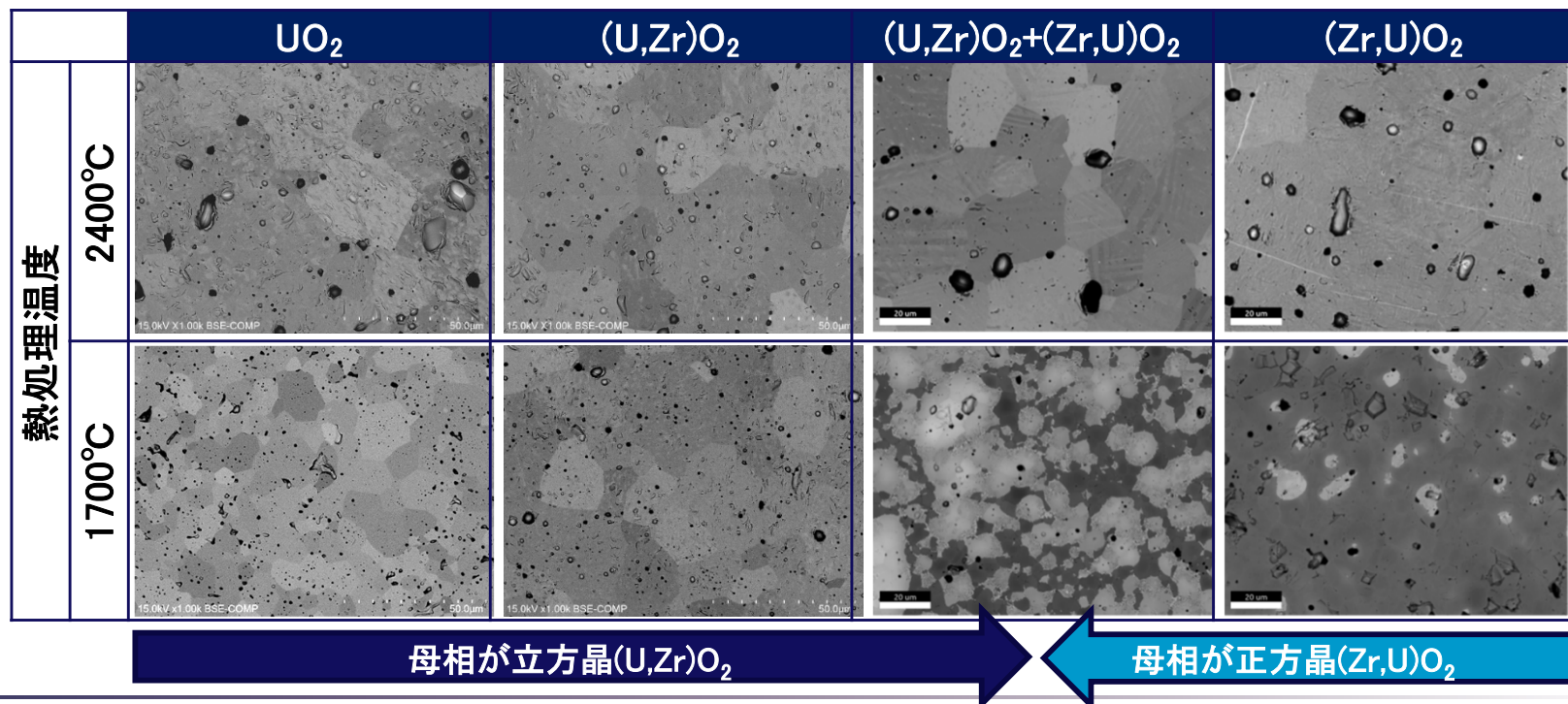
UO₂-ZrO₂擬二元系状態図

● ● 選定した製造条件

【3-2】ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験 均質ウラン含有模擬燃料デブリの性状分析

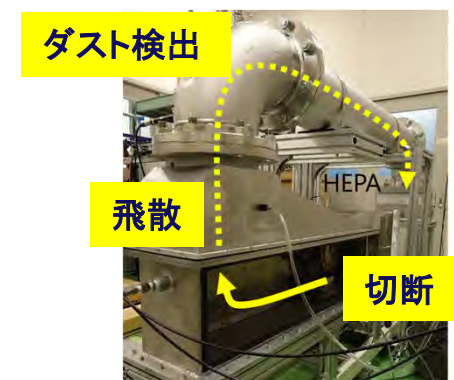
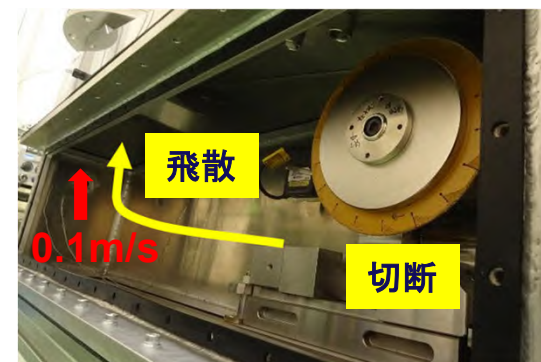
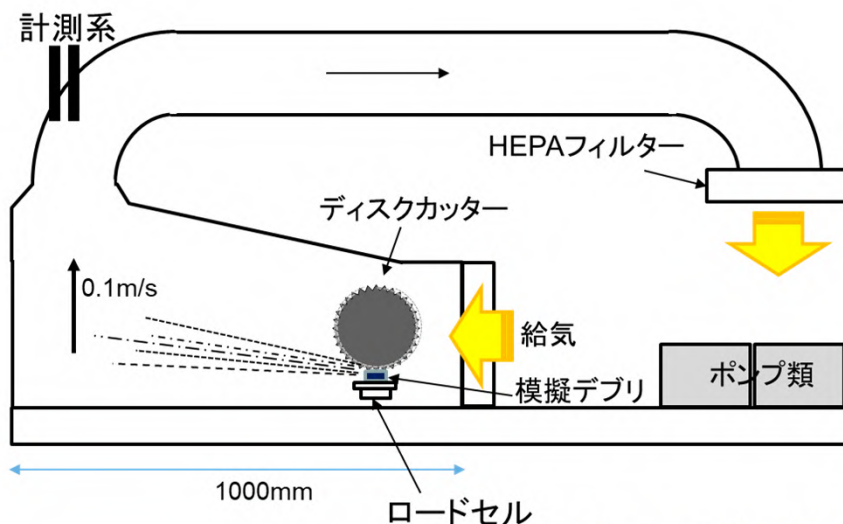
分析項目	分析方法	分析結果
密度	アルキメデス法	ZrO ₂ 濃度の増加とともに密度が低下する傾向。熱処理温度による相違は小さい
ヤング率	超音波パルス法	UO ₂ に対して、1700℃では15:85試料を除き同程度。2400℃では、90:10試料は同程度、他試料は低下
破壊靱性	Indentation Fracture法	UO ₂ に対して、90:10試料と40:60試料はZrO ₂ 比の増加とともに上昇し、15:85試料は低下
硬度	ビッカース硬度法	15:85試料を除き、ZrO ₂ 比の増加とともに硬さが上昇傾向。1700℃に比べ、2400℃で硬さが微増
結晶粒径	SEM像を用いた計算	1700℃では、15:85試料と40:60試料は6~9μm程度。2400℃では、粗大化しU/Zr比の差が低下
O/U比	熱重量法	UO ₂ の存在比が大きいほどO/U比は2.00に近づく傾向がある

微細組織
および
結晶構造



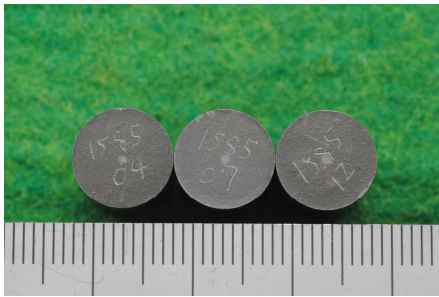
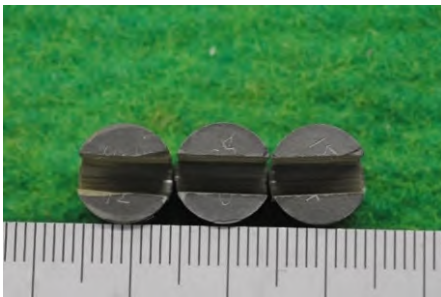
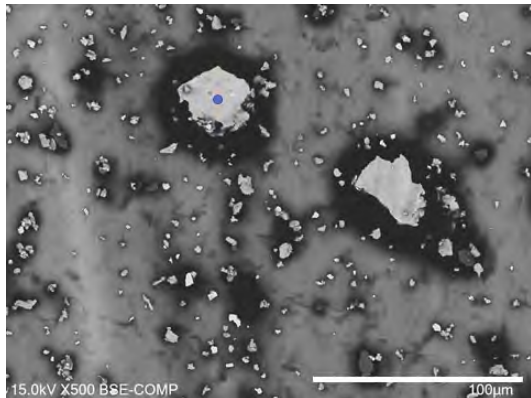
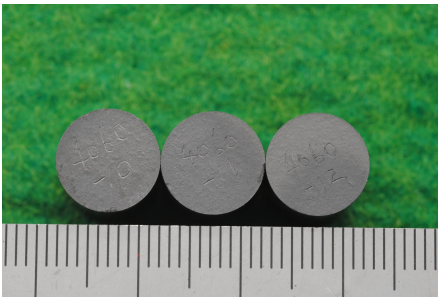

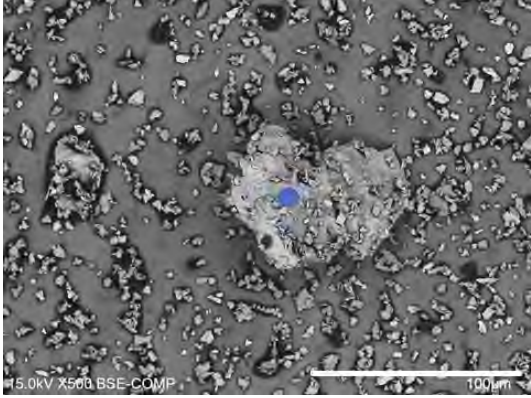
【3-2】ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験 試験環境の整備

- 小規模ウラン含有模擬燃料デブリを対象に、ディスクカッターによる乾式切削時に発生するダスト飛散率データを取得するため、NFD管理区域に試験設備を整備した。
 - 管理区域の寸法や耐震設計の制限を考慮した試験装置を設計し、原子力規制庁より核燃料使用許可変更申請(ダスト試験装置の新設)が認可された。
 - コールド材を対象とするパラメータ試験および詳細データ測定試験と同一条件でウラン試料の切削試験を実施するため、ダストの輸送効率や切断刃の回転数・押し付け荷重等を可変可能な試験装置をNFDの管理区域に設置した。



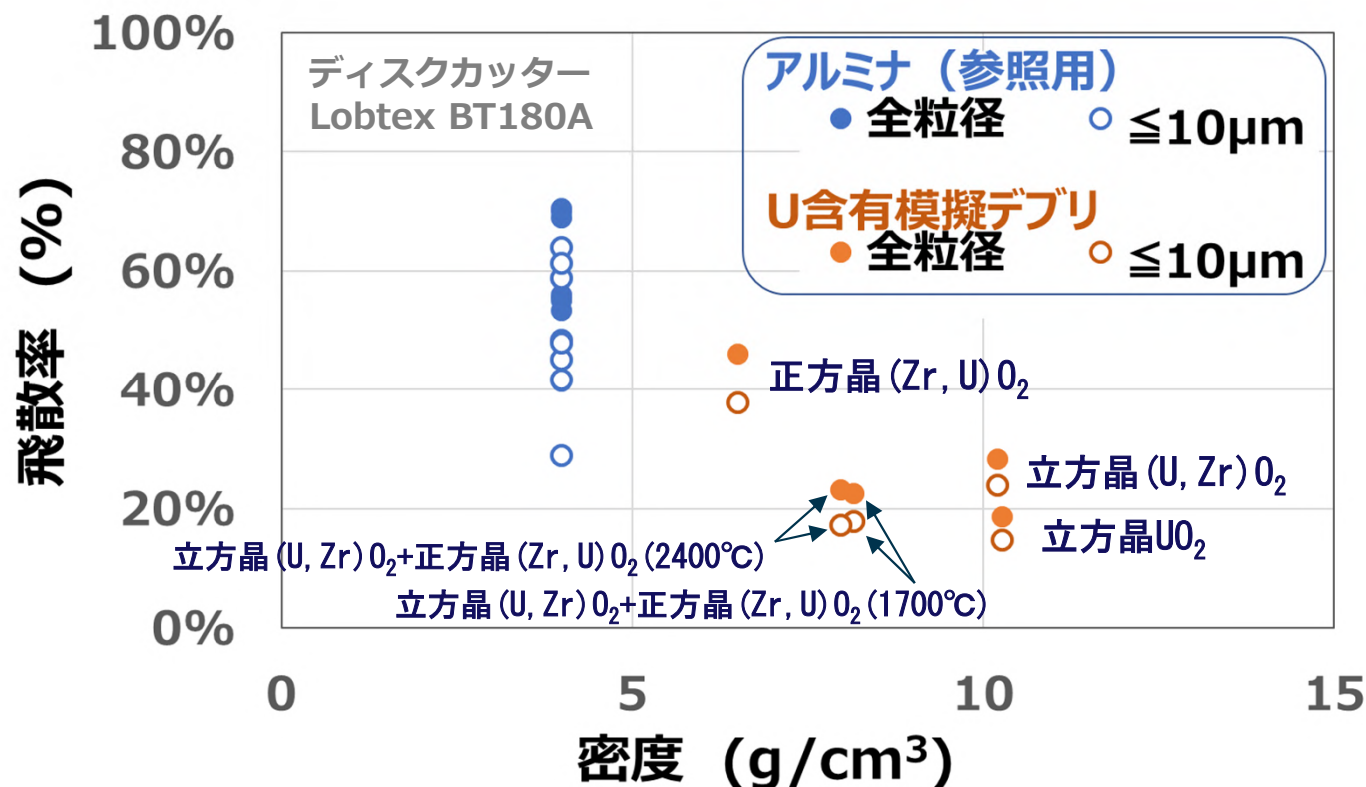
ダスト飛散率測定装置(NFD管理区域に設置)

【3-2】ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験 切削前後の外観と飛散ダスト

供試体の種類	切削前後のU-Zr-O混合酸化物の外観		飛散ダストの二次電子像
	試験前	試験後	
(Zr,U)O ₂ 熱処理温度 1700℃			
(U,Zr)O ₂ +(Zr,U)O ₂ 熱処理温度 1700℃			

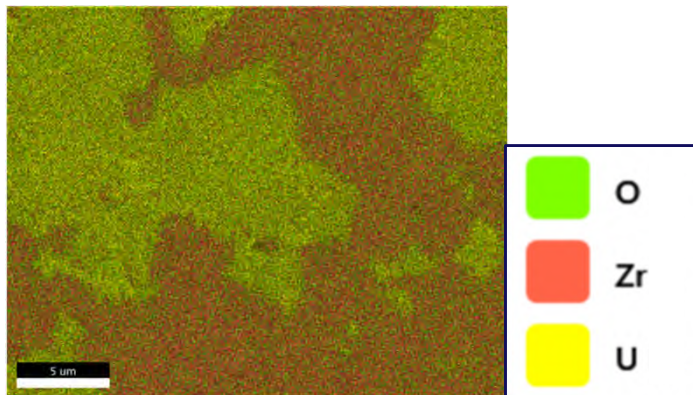
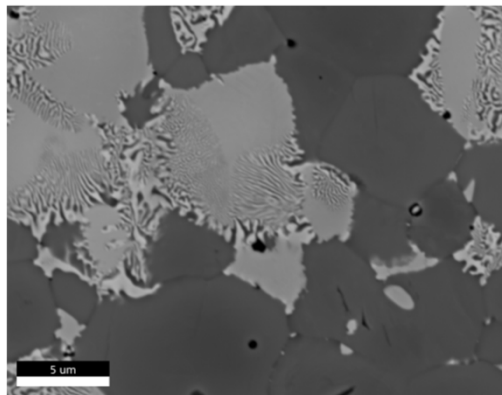
【3-2】ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験 試験結果（ダスト飛散率）

- ダスト飛散率は、参照用の緻密質アルミナより小さい値であった。
- 最高熱処理温度差による結晶粒径の違いへの依存性は小さかった。
- なお、ペレット状の供試体形状の影響については、アルミナにおいてブロック状の供試体と同等の飛散率、飛散粒子径D50を確認した。

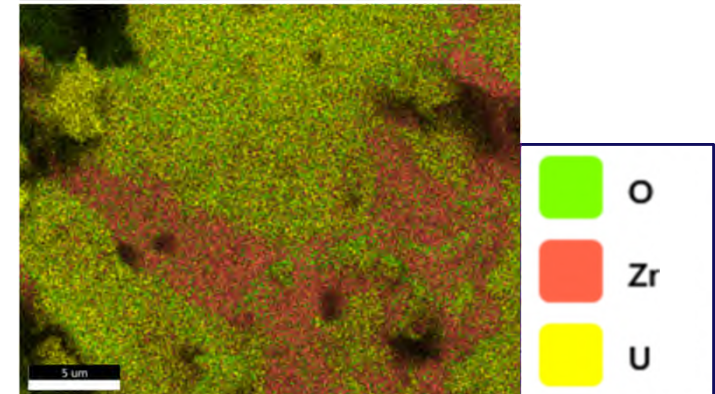
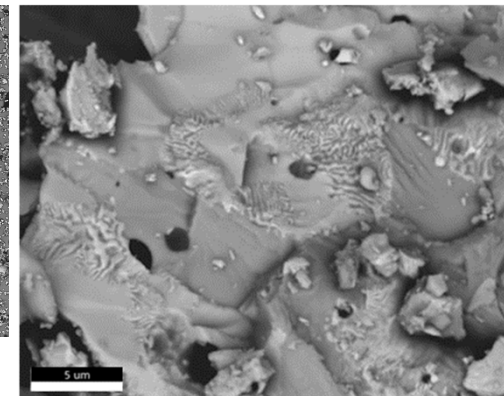
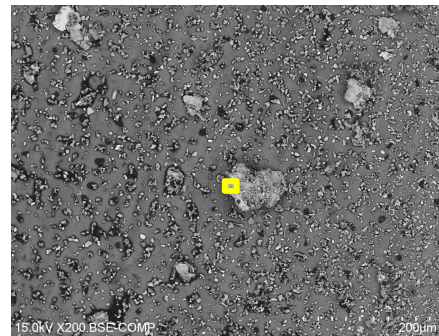


【3-2】ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験 試験結果（飛散ダストの性状）

- 飛散ダストには2相の微細相が含まれており、U含有率の変化は小さい。
→粒界で割れていない。ARFが燃料デブリの結晶粒径に依存しない。
→飛散ダストのU含有率は、元の燃料デブリから変化しない傾向にある。



切削試験前試料断面SEM-EDS



切削試験で飛散したダストの断面SEM-EDS

ダストの断面のSEM/EDS分析結果（立方晶 $(\text{U}, \text{Zr})\text{O}_2$ + 正方晶 $(\text{Zr}, \text{U})\text{O}_2$, 1700°C)

【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験 kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの調達

- シビアアクシデント解析コードにより、1F2号機下部ヘッドに堆積していると評価されたRPV燃料デブリの化学組成^{*1}を対象に、溶融過程を経る2種類の製造法を用いて、kg規模の非均質なRPV模擬燃料デブリをそれぞれ調製した。

FD#1(テルミット反応法)

- 熱力学計算により、原料組成を決定

$$\text{U}_3\text{O}_8 + \text{Zr} + \text{CrO}_3 \rightarrow \text{UO}_2 + \text{Zr/ZrO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \Delta H$$
- 原料10kgのうち溶融凝固した塊を6.4kg回収(N₂パージ)。破碎したインゴット4個のうち、ダスト飛散率試験と分析用に各1個使用。
- RPV燃料デブリに存在しないと推測される高硬度の窒素含有相がダスト飛散挙動に及ぼす影響は未知であるため、これを排除するアルゴン下での製造を試みたが不成功。

FD#2(誘導加熱法)

- VF-U2試験^{*2}で、原料18kgのうち溶融凝固した塊を11kg回収(N₂パージ)。破碎したインゴット4個のうちダスト飛散率試験に1個、小片5個のうち分析用に2個使用
- 溶融凝固した塊に高硬度の窒素含有相の形成を確認^{*2}

製造した模擬燃料デブリの化学組成(wt%)

化合物	FD#1 (計算値)	FD#2 (原料組成)
UO ₂	32.7	35.7
Zr	34.5	34.5
ZrO ₂	21.8	18.8
Cr	1.68	
Fe	6.72	8.4 ^{*3}
CeO ₂	0.2	0.2
SnO ₂	0.9	0.9
B ₄ C	1	1
RuO ₂	0.06	0.06
Nd ₂ O ₃	0.11	0.11
MoO ₂	0.09	0.09
CsOH・H ₂ O	0.06	0.06
BaO	0.04	0.04
La ₂ O ₃	0.03	0.03
PdO	0.03 [*]	0.03
Pr ₂ O ₃	0.03	0.03
Sm ₂ O ₃	0.01	0.01
SrO	0.02	0.02
Y ₂ O ₃	0.01	0.01
TeO ₂	0.03	0.03

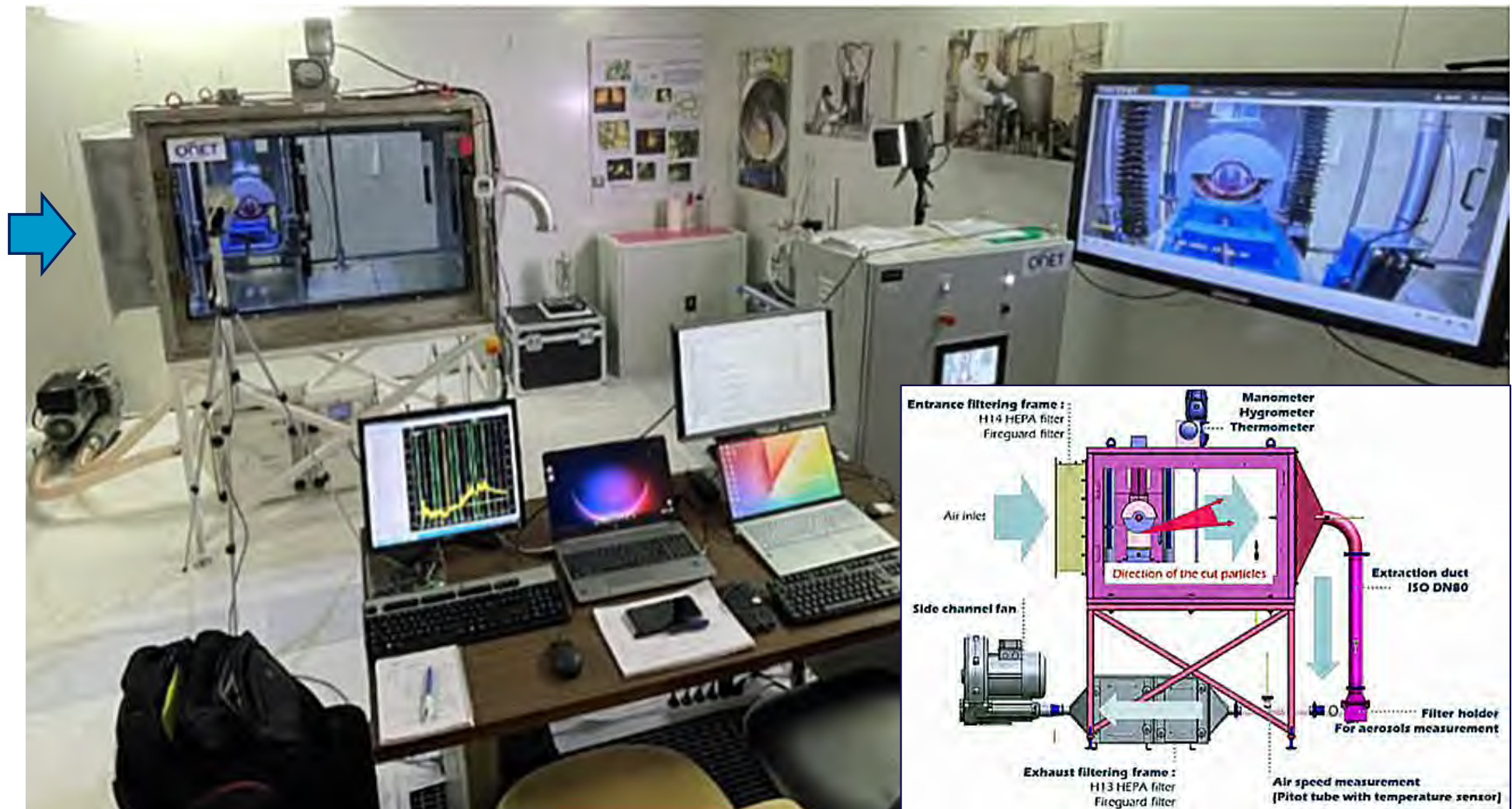
【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験 kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの特性

項目	分析方法	FD#1（テルミット反応法）	FD#2（誘導加熱法）
微細組織	SEM-EDX	<ul style="list-style-type: none"> ■ 金属と酸化物が非均質に混在。場所により、組成や微細組織に変動あり ■ マトリクス：主に、正方晶 $(Zr,U)O_2(N)$、一部に立方晶 $(U,Zr)O_2(N)$ ■ 析出物：主に、$ZrON$、$Fe-Cr-Sn$、ZrB_2、$Zr-B-N-O$、$(Fe,Cr)B$、$Zr-Sn-O$ 	
		閉気孔が多い（空隙率50-70%）	閉気孔が少ない
密度	アルキメデス法	3.9-4.2 g/cm ³	5.5-7.1 g/cm ³
硬度	マイクロビッカース硬度法	<ul style="list-style-type: none"> ■ $Fe-Cr-Sn$ 300-600 HV ■ $(Zr,U)O_2(N)$ 1000-2000 HV ■ $(Fe,Cr)B$ 2000 HV ■ $ZrON$ 1300-2900 HV ■ ZrB_2 3300-4000 HV 	<ul style="list-style-type: none"> ■ $Zr(Fe,Cr)_2(O)$ 1000-1400 HV ■ $(Zr,U)O_2$ 1500-1800 HV ■ ZrB_2 2500-4000 HV ■ $ZrON$ 3000-5500 HV
結晶構造	X線回折法	正方晶と単斜晶 ZrO_2 , $U_{0.5}Zr_{0.5}O_2$, $ZrN_{0.4}B_{0.6}$, $Fe-Cr$, ZrB_2 , $UO_{2.2}$, ZrN 等	
化学組成	ICP-AES/MS	完全溶解 <u>初期原料に近い組成を確認</u>	完全溶解せず残渣発生（主にU,Zr）

- FD#1とFD#2にマクロな性状変化は見られないが、空隙率の差に基づく密度差あり
- 原料組成と化学分析値が概ね一致したことから、少なくとも数100mgレベルでは均質混合（FD#1）
- 事故時のRPV環境と異なる窒素雰囲気中で溶融したことに由来し、ともに微小領域で高硬度な窒素含有相を形成

【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによる飛散挙動評価試験 試験環境の構築

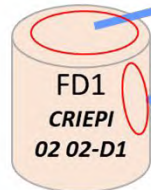
- CEAカダラッシュのPLINIUS施設に設置した試験装置（排気系やダスト計測系の設置前）。



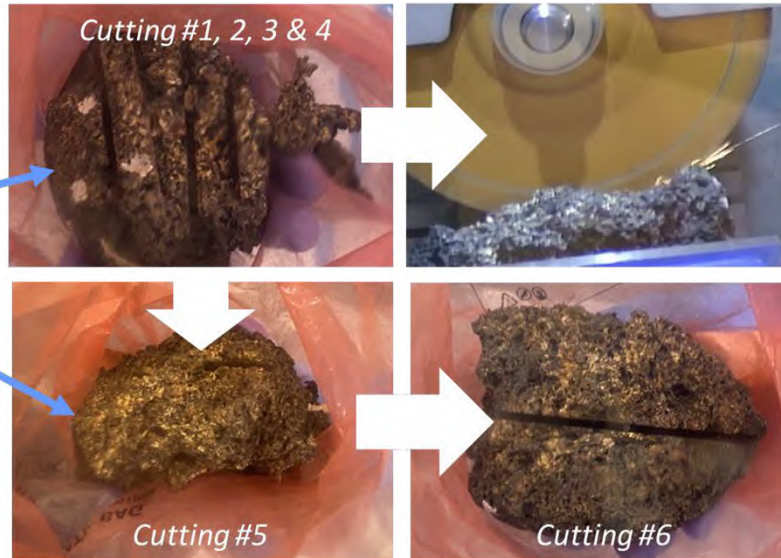
【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験 切削後の外観と飛散ダスト

- 国内試験と同じ刃 (LOBTEX BT180A) できれいにかつ繰り返して切削できた。
- 飛散ダストの形状は、アルミナ等のセラミックス切削時と大きく変わらない。

FD#1



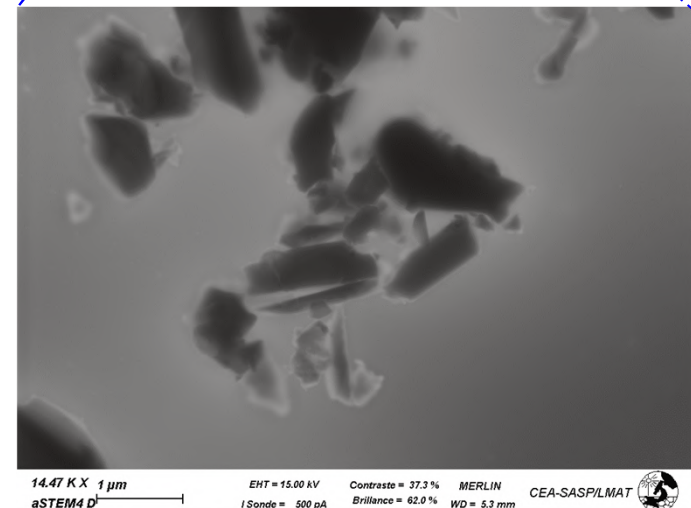
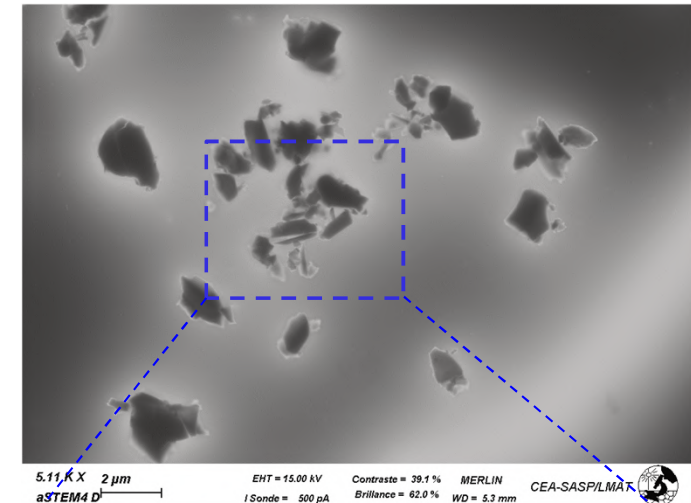
FD1 Block after thermite processing



FD#2



切削試験後の供試体

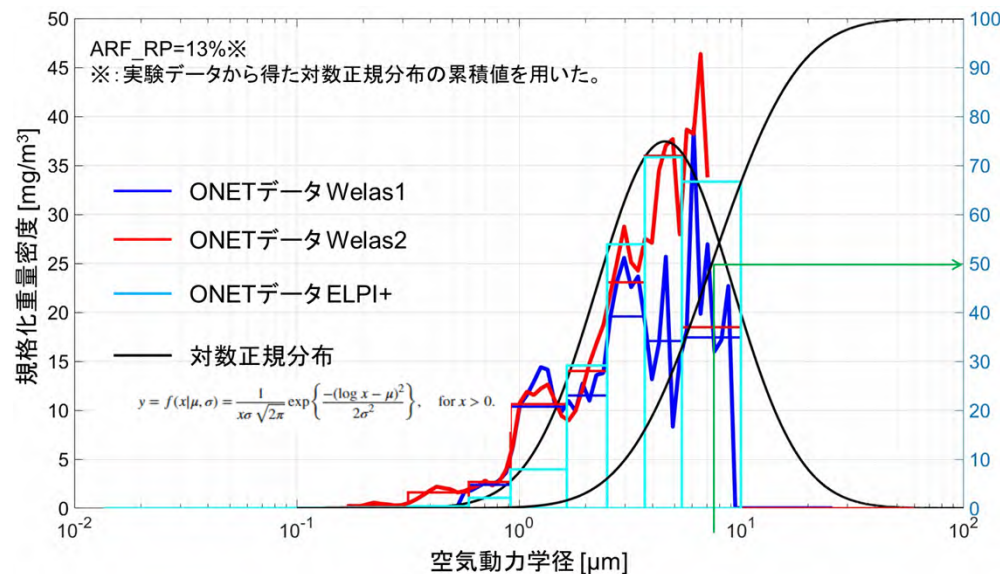


飛散ダスト(FD#1, TEM grid)

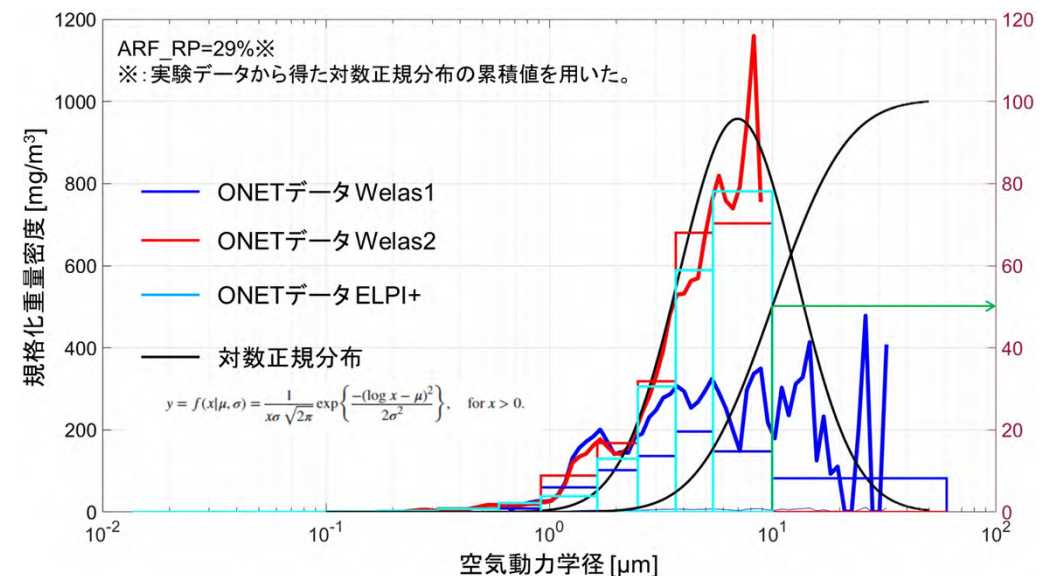
【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験 飛散ダストの粒子径分布評価

- 飛散ダストの粒子径の最頻値および中央値はFD#1が4.5 μm と7.4 μm 、FD#2 が7.0 μm と10 μm であった。
- 粒子径の最頻値および中央値ともにFD#1 < FD#2であった。

FD#1



FD#2

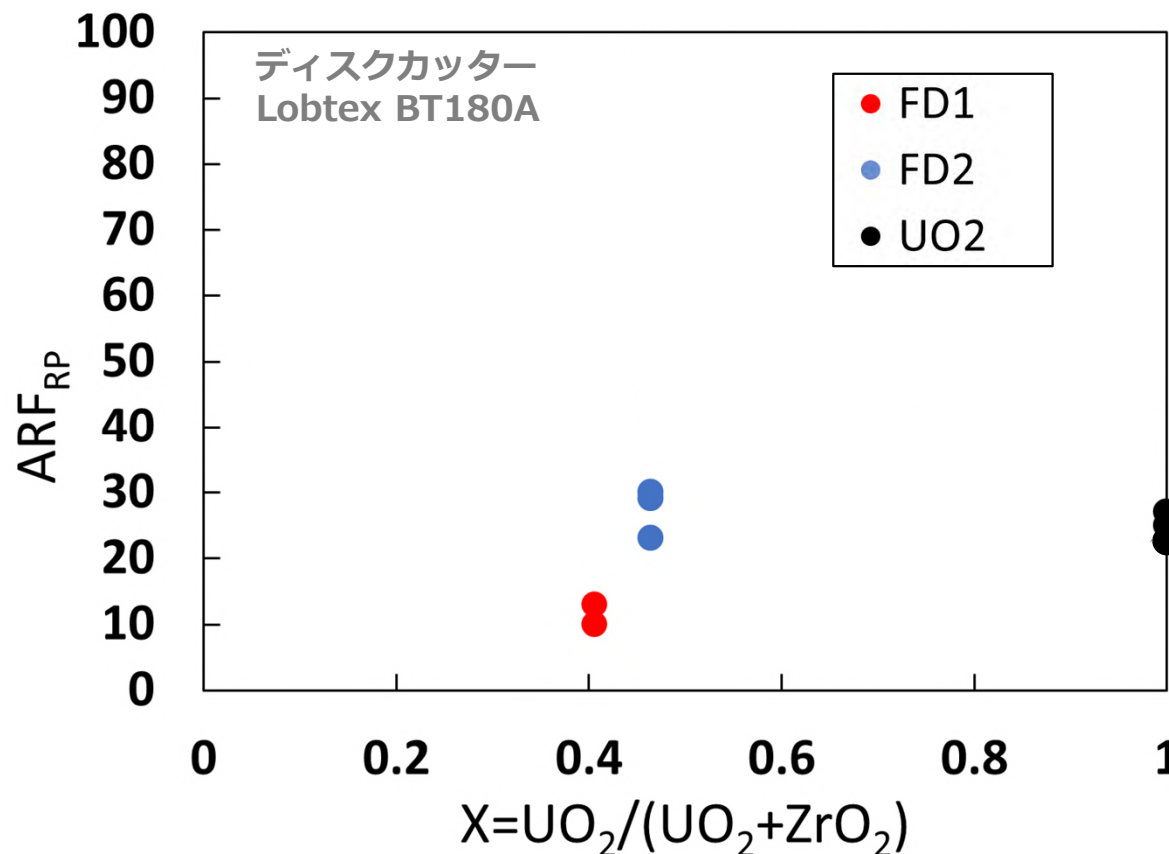


飛散ダストの粒子径分布

いずれも、切削刃の回転速度3000 rpm、押付力50 Nの場合

【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験 空気動力学径 $10\mu\text{m}$ 以下の飛散率(ARF_{RP})の評価

- 粒子径 $10\mu\text{m}$ 以下のダスト飛散率は10 ～13% (FD#1)、23 ～ 30% (FD#2)、25 ～27% (UO_2 ペレット)であった。
- 空気動力学径 $10\mu\text{m}$ 以下の ARF_{RP} は $\text{FD}\#1 < \text{FD}\#2 \approx \text{UO}_2$ ペレットであった。
⇒ 供試体の空隙率の差および $\text{UO}_2/(\text{UO}_2+\text{ZrO}_2)$ の違いが要因の可能性



【3-3】kg規模ウラン含有模擬デブリによるダスト飛散挙動測定試験 飛散量(mg/s)評価

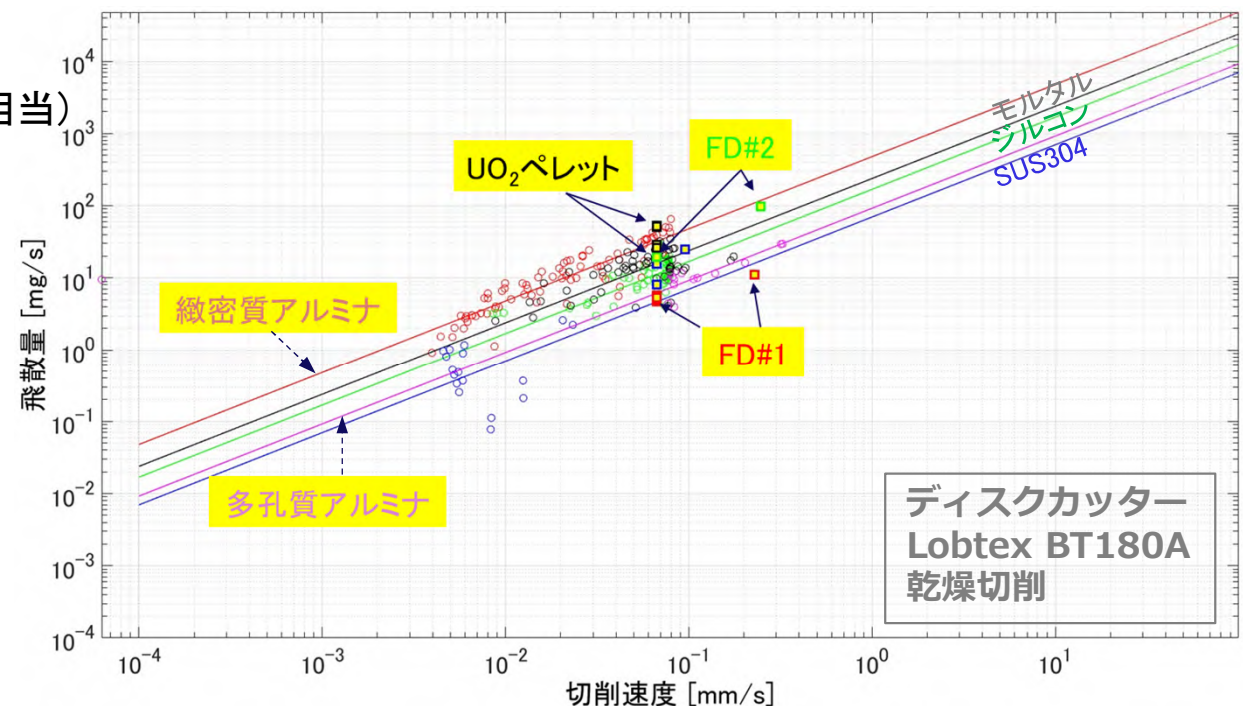
- 多孔質アルミナと緻密アルミナを比較すると、空隙率の高い方(多孔質アルミナ)が飛散量は低下する傾向を確認した。
- FD#1, FD#2ならびにUO₂ペレットについても、空隙率の高い順(FD#1 > FD#2 > UO₂ペレット)に飛散量は低下する傾向 (FD#1 < FD#2 < UO₂ペレット)を確認した。
⇒供試体の空隙率の差が飛散量の差になった可能性。

飛散量(mg/s) = C × 切削速度 (mm/s)

(C = $\frac{ARF \times [\text{カーフ幅}] \times [\text{代表長さ}] \times [\text{密度}]}{\text{条件により変化}}$ に相当)
条件により変化 工法・供試体で一定

供試体	空隙率 (%)
多孔質アルミナ	20.9
緻密アルミナ	1.5
FD#1	50-70
FD#2	未測定※※

※※SEM観察の結果、FD#1と比較して空隙が少ないことを確認



供試体ごとの切削速度と飛散量の関係

FD#1, FD#2, UO₂ペレット以外は国内コールド試験データ(p.95-99参照)

【3】ダスト飛散挙動評価試験 実燃料デブリ飛散率の推定（燃料デブリの相構成）

- 1Fの燃料デブリは存在場所や履歴により大きく組成が異なると考えられる。
- 一方で、燃料デブリを構成するアクチニド含有相の種類は限定的である。

【RPV燃料デブリ（In-vessel）】

Oxide Phase : cubic (U,Zr,Fe,Cr)O₂、
tetragonal (Zr,U,Fe,Cr)O₂、 etc.

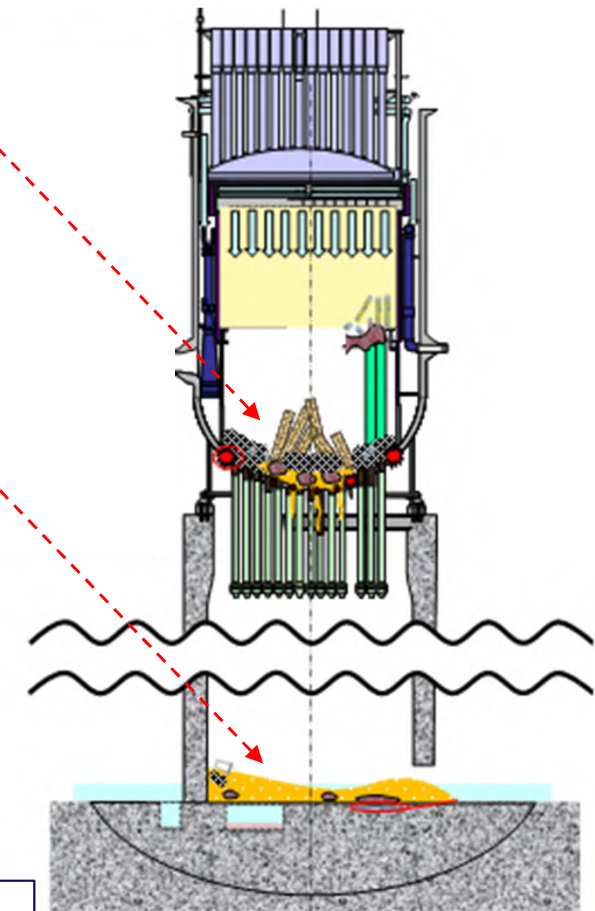
Metal Phase : Fe-Cr-Ni-(U,Zr)、 α-Zr(O)、 etc.

【PCV燃料デブリ（Ex-vessel）】

Oxide & Metal Phase : RPV-debrisと同じ

MCCI Phase : SiO₂-CaO glass phase containing U

アクチニド含有相は4種類に集約できる

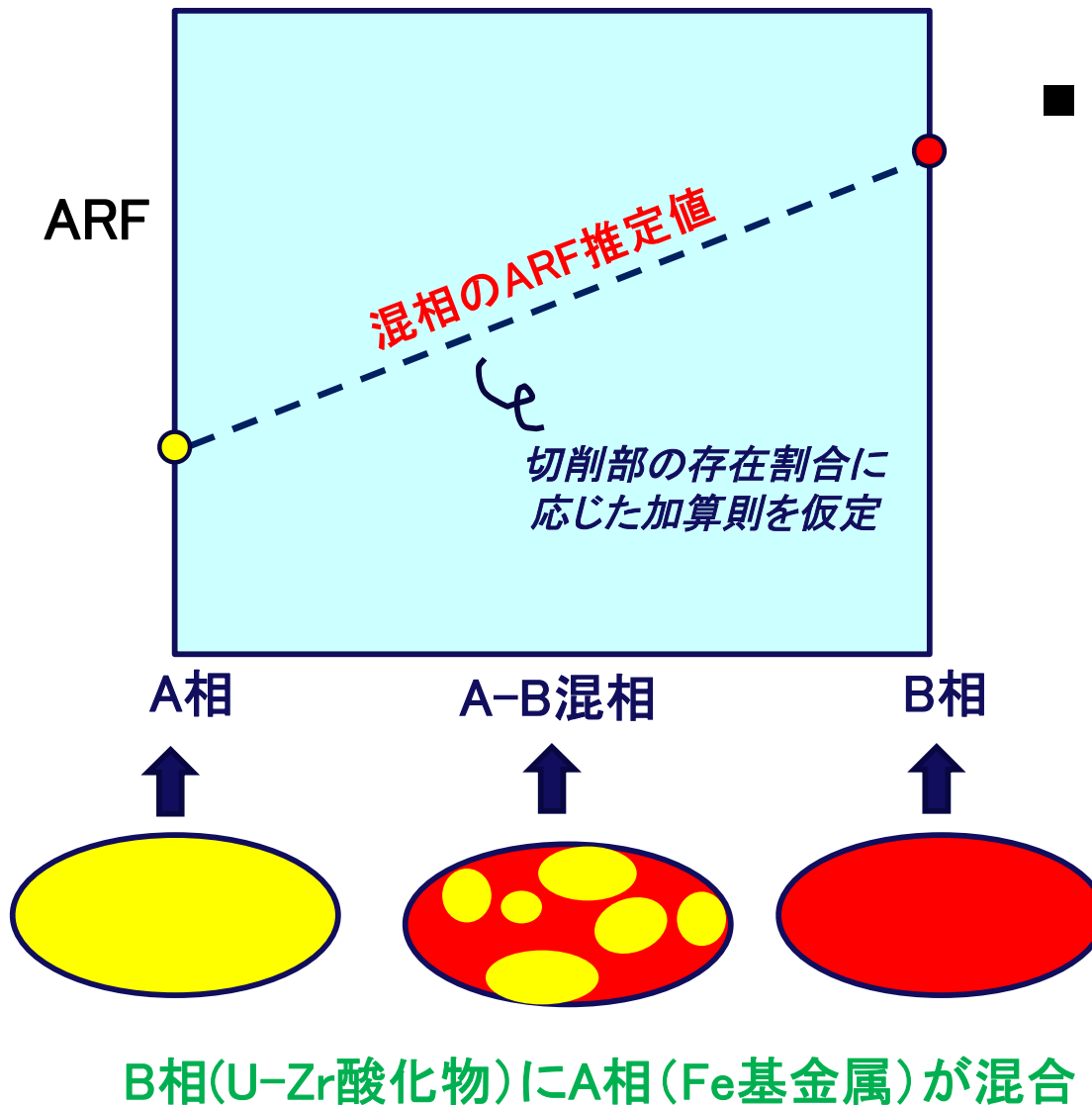


Assumed Fuel Debris
Distribution (1F-2)*

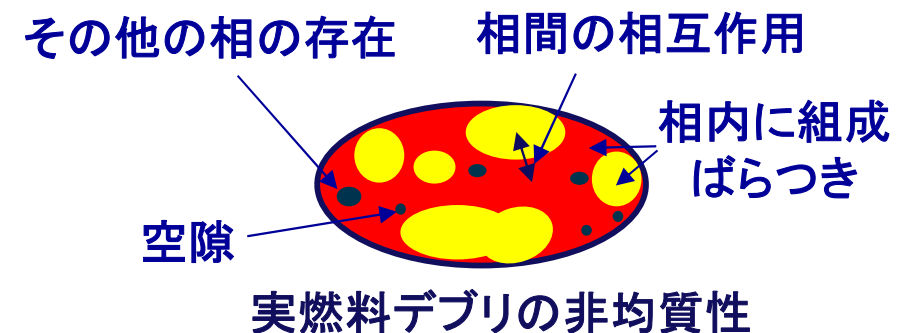
- ✓ 燃料デブリの飛散率をこれらの相の足し合わせで考える。
- ✓ 推定値をウラン含有模擬燃料デブリの実測値と比較する。

【3】ダスト飛散挙動評価試験 実燃料デブリ飛散率の推定（濃度加算則の検討）

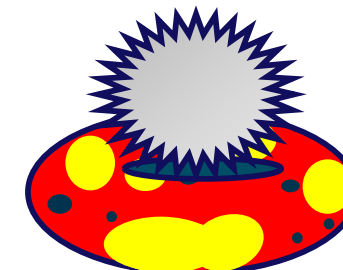
- 酸化物相と金属相の混相の飛散率を濃度加算則により推定する。



- 評価した濃度加算値の妥当性をkg規模模擬燃料デブリの切削で確認する。



切削刃に対して十分な大きさの模擬燃料デブリを用いた試験を実施して比較。



【3】ダスト飛散挙動評価試験 実燃料デブリ飛散率の推定（推定式の導出）

- 国内で測定した、U-Zr酸化物飛散率データとFe基金属飛散率データの濃度加算により、**任意組成の燃料デブリの飛散率の包絡値を導出**。
- これに、ウランを含有する模擬燃料デブリの実験値をプロットして比較する。

燃料デブリの飛散率包絡値

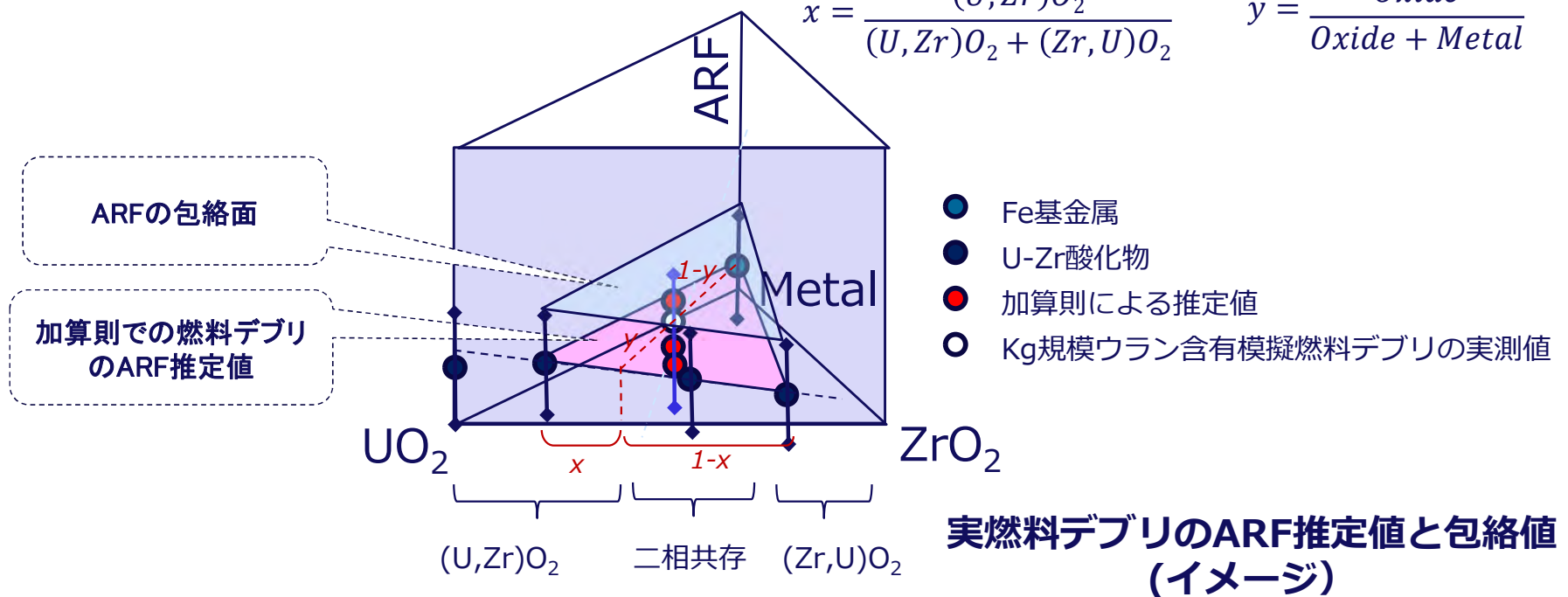
U-Zr酸化物の飛散率包絡値

Fe基金属の飛散率包絡値

$$ARF[(U_xZr_{1-x}O_2)_yM_{1-y}] = yARF[U_xZr_{1-x}O_2] + (1-y)ARF[metal]$$

$$x = \frac{(U,Zr)O_2}{(U,Zr)O_2 + (Zr,U)O_2}$$

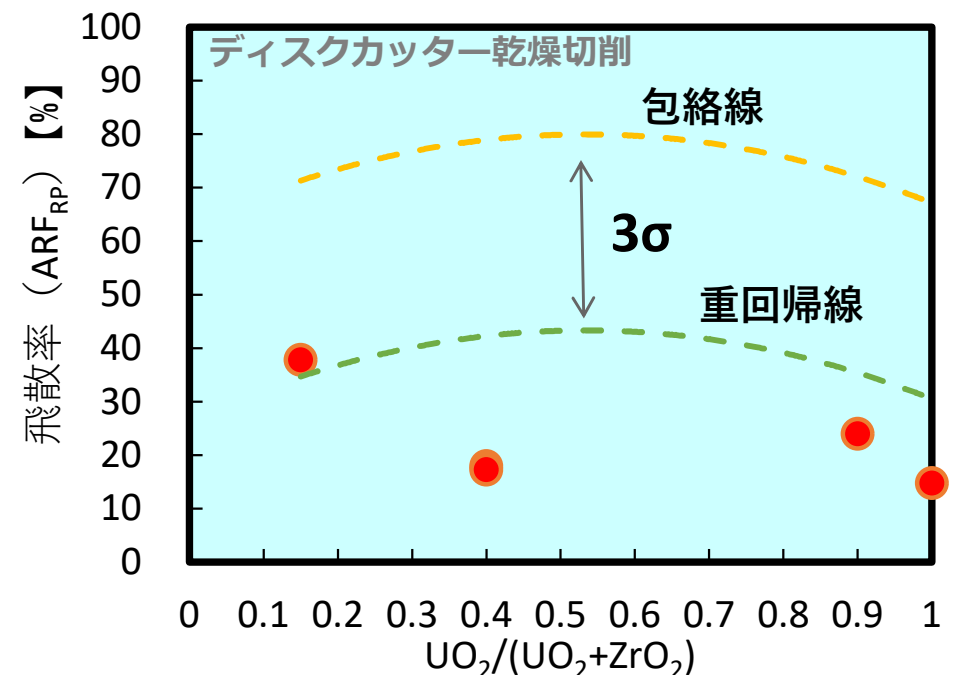
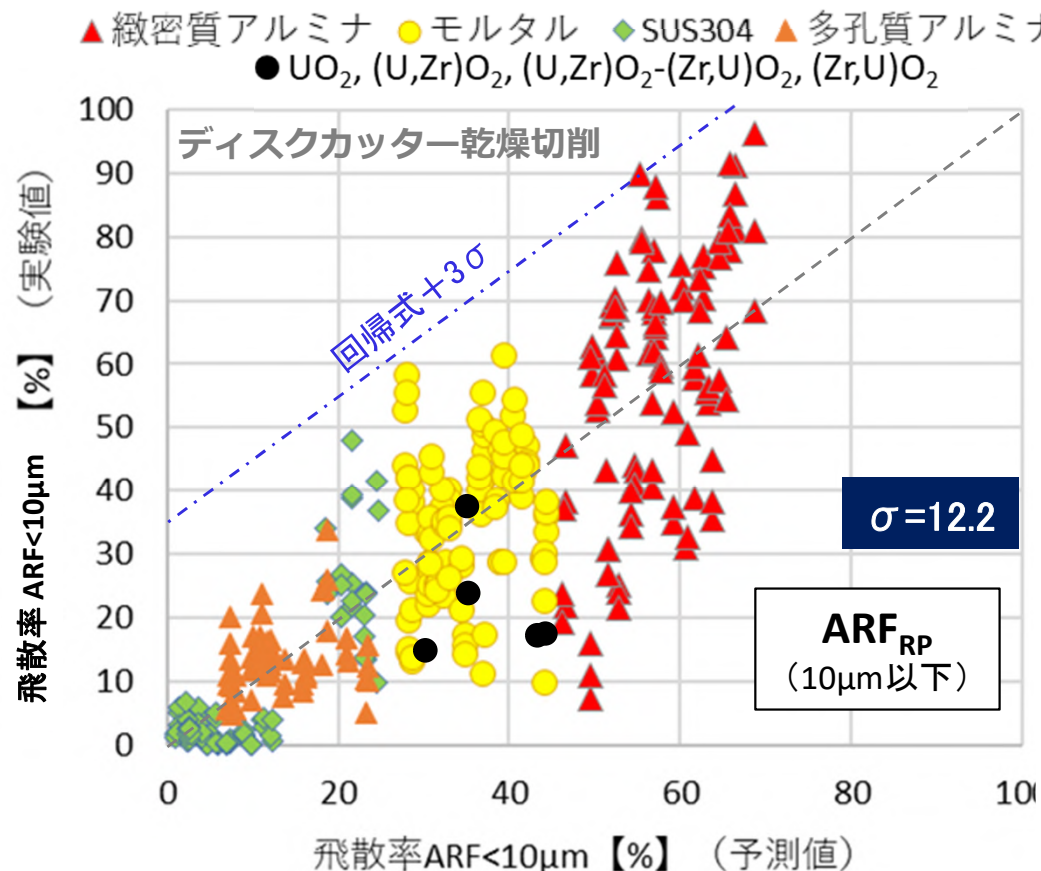
$$y = \frac{Oxide}{Oxide + Metal}$$



【3】ダスト飛散挙動評価試験

実燃料デブリ飛散率の推定：U-Zr酸化物の飛散率包絡線の導出

- 国内ウラン試験（酸化物： UO_2 , $(\text{U,Zr})\text{O}_2$, $(\text{U,Zr})\text{O}_2-(\text{Zr,U})\text{O}_2$, $(\text{Zr,U})\text{O}_2$ ）で得られた ARF_{RP} は、コールド試験で得られた重回帰式※¹に、U-Zr酸化物試料の物性値と切削条件を代入することで、概ね実験値を予測できることがわかった。
- そこで、重回帰式+3 σ により、U-Zr酸化物の ARF_{RP} の包絡線を得ることとした。

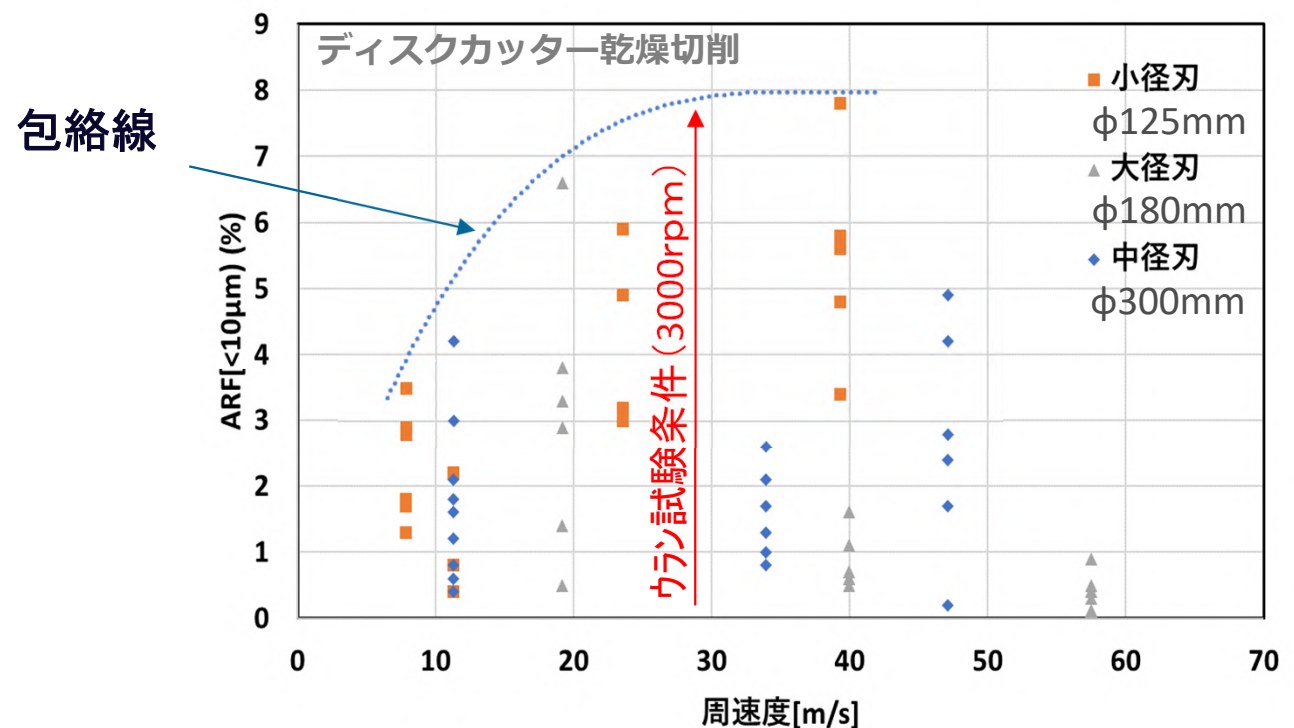


飛散率の実験値と重回帰式による推定値の比較※² 飛散率の実験値、推定値（重回帰線）と包絡線※²

【3】ダスト飛散挙動評価試験

実燃料デブリ飛散率の推定：SUS304の飛散率の包絡線の導出

- Fe基金属相として、SUS304で測定した切削飛散率 ARF_{RP} を用いる。
- 但し、本事業【2-1】のディスクカッター試験では、延性の高いSUS304は、ダイヤモンド砥粒のディスクカッターだけでなく、砥石カッター（CBN砥粒）による切削を行っており、両者の ARF_{RP} に差が大きい。
- ウラン試験はダイヤモンド砥粒のディスクカッターを用いたため、SUS304飛散率の包絡線は砥石カッターのデータを除いた飛散率 ARF_{RP} から導出した。



SUS304のディスクカッター切削による飛散率 ARF_{RP}

【3】ダスト飛散挙動評価試験

実燃料デブリ飛散率の推定：推定結果と実験値

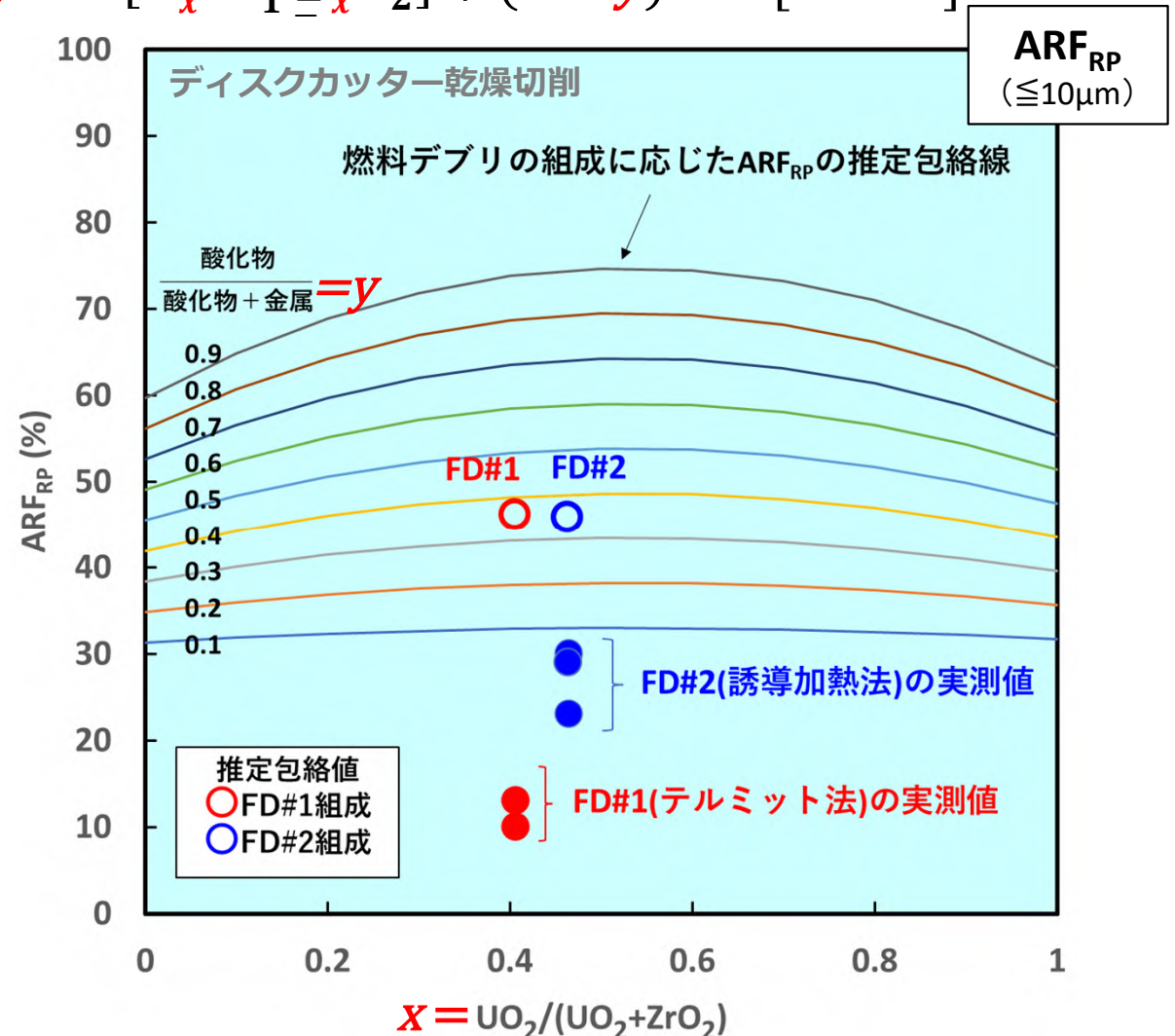
- 非均質混相燃料デブリを均質な酸化物と金属の加算則で推定する。

$$ARF[(U_xZr_{1-x}O_2)_yM_{1-y}] = yARF[U_xZr_{1-x}O_2] + (1-y)ARF[metal]$$

- 模擬燃料デブリの組成での燃料デブリの飛散率 ARF_{RP} 包絡値から、 $FD\#1 \leq 46\%$ 、 $FD\#2 \leq 46\%$ と推定した。

- 模擬燃料デブリの ARF_{RP} 実測値は $FD\#1$ が10～13%、 $FD\#2$ が23～30%となり、いずれも推定した包絡値内に収まった。

- 以上により、均質な燃料デブリ構成相の飛散率 ARF_{RP} 包絡式を用いて、酸化物と金属の混合割合に応じた加算則により、非均質な燃料デブリの飛散率 ARF_{RP} 包絡値を概算できる可能性を得た。



実燃料デブリのディスクカッター切削による飛散率 ARF_{RP} の推定

【3】ダスト飛散挙動評価試験 まとめ

- 実用的で再現性のある飛散率データを取得するための、実験手法(ケーシング、粒子計測等)を構築し、共通設計として全試験に展開した。
- 燃料デブリの主要なウラン含有相であるU-Zr酸化物相を製造し、物性測定を行うとともに、ディスクカッターで切削して飛散率データを取得した。
- 実燃料デブリを模擬する、溶融過程を経たkg規模のウラン含有模擬燃料デブリを作成し、ディスクカッターで乾式切削して空気動力学径 $10\mu\text{m}$ 以下のダスト飛散率 ARF_{RP} (FD#1(テルミット法) = 10~13%、FD#2(誘導加熱法) = 23~30%)を取得した。
- 本事業のU-Zr酸化物とSUS304の飛散率 ARF_{RP} から、任意組成の実燃料デブリのディスクカッター乾式切削による飛散率 ARF_{RP} 包絡値を濃度加算で推定し、kg規模ウラン含有模擬燃料デブリの結果と矛盾しない結果となった。
- 今後は、実燃料デブリの飛散率包絡線推定方法について精度向上を計るとともに、ディスクカッター以外の機械的切削法、およびレーザーによる熱的切削法についての、実燃料デブリの飛散率包絡値の推定法も検討する。

【4】ダスト飛散挙動の解析

【4】ダスト飛散挙動の解析 目的と実施項目

- PCVや換気系配管等の1Fの複雑な環境下でのダスト挙動の予測手法の構築に向け、本事業では**切削により生じたダストが、与えられた気流条件下で飛散・沈降する挙動の解析法を検討**する。

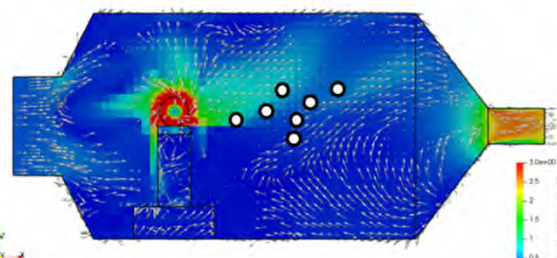
【4-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

- ① 様々な切削ダストの特性(形状、サイズ、密度)を考慮したダスト飛散挙動解析手法の適用性と必要性を検討する。

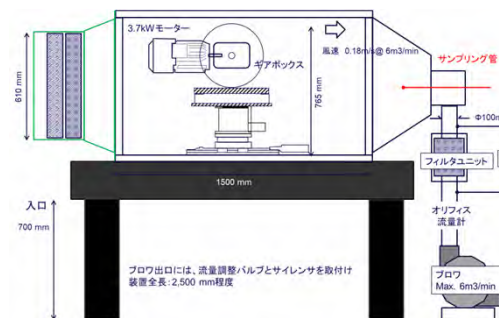
【4-2】実験体系の解析評価

- ② 本研究の試験体系を解析し、飛散率の環境依存性などの試験結果で妥当性を検証する。
- ③ 異なる試験体系で得られた飛散率データを同じ手法で解析し、統一的な飛散率データに整理することを試みる。

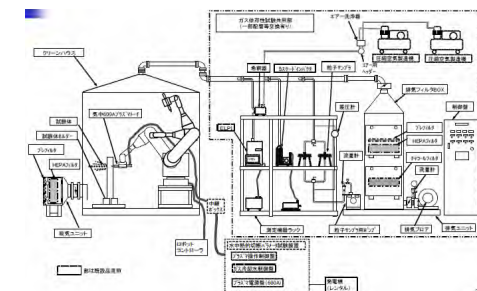
ダスト飛散挙動解析手法



本事業のダスト飛散試験



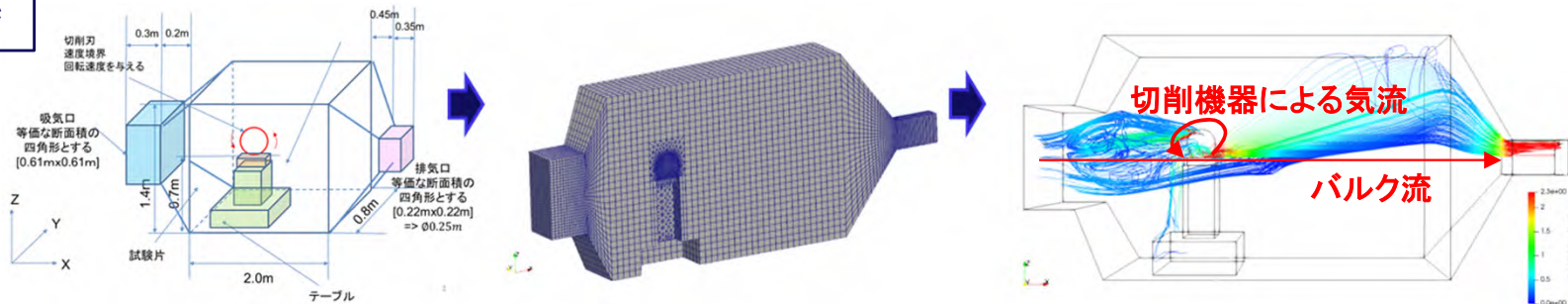
既往の飛散率測定試験データ



【4-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討 手法の概要(気流解析)

- ケーシング内部をメッシュでモデル化し、数値流体解析(CFD)により空気の流速分布を評価
 - ・ 市販のCFD解析コードAdvance/FrontFlow/redを使用
 - ・ 定常解
 - ・ バルク流および切削機器が生成する気流を評価

解析のイメージ



支配方程式

質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

運動量保存式 (Navier-stokes)

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{K}$$

乱流エネルギーkの保存式

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k + G_k - \rho \varepsilon$$

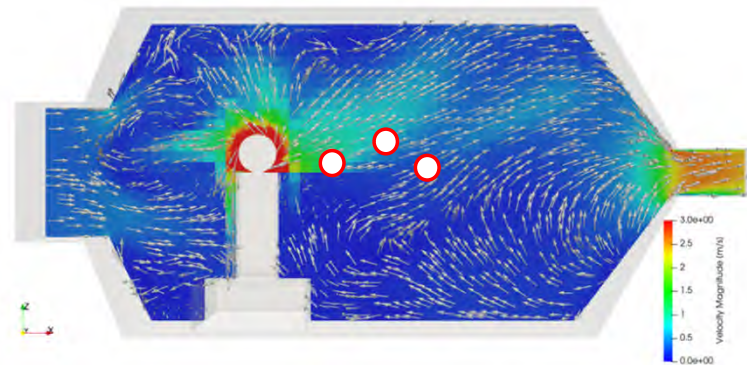
乱流エネルギーkと粘性消散率εの保存式

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon + C_{1\tau} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\tau} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} - R$$

【4-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討 手法の概要（ダスト飛散挙動（球形））

- 粒子追跡法によりダスト（球形）の飛散挙動を評価
 - 電中研のインハウスの粒子法コードPHALSERを使用
 - Lagrange法（粒子追跡法）
 - 切削機器ごとにダストの生成位置と初速度を仮定して、気流に乗って飛散する挙動を評価

解析のイメージ



支配方程式

粒子の運動量保存式

$$m_d \frac{d\mathbf{v}_d}{dt} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{air}$$

重力

$$\mathbf{F}_g = m_d \mathbf{g}$$

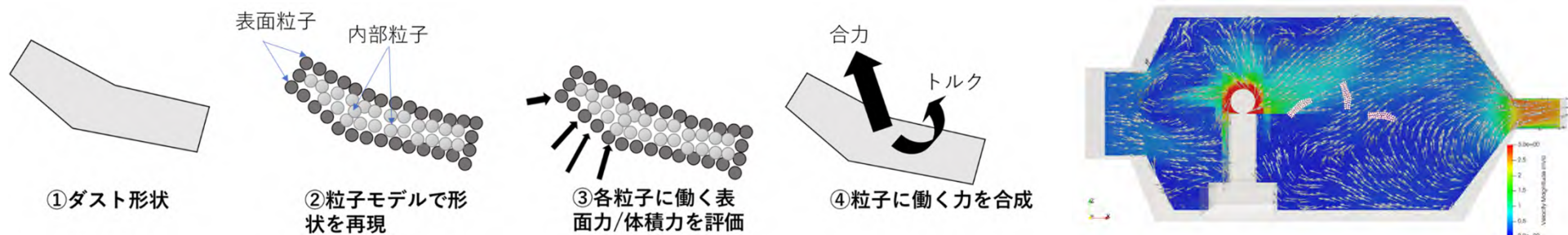
空気抵抗

$$\mathbf{F}_{air} = \frac{1}{2} C_D |\mathbf{v}_r| \mathbf{v}_r \rho_{air} \pi \left(\frac{D_d}{2} \right)^2$$

【4-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討 手法の概要（ダスト飛散挙動（非球形））

- 非球形モデルを用いてダストの形状が飛散挙動に与える影響を評価
 - ・ 複数の粒子を結合して非球形状を再現（剛体モデル）

非球形モデルのイメージ



支配方程式

剛体の運動量保存式

$$\frac{d\mathbf{P}_{\Pi}}{dt} = \sum_{i \in \Pi} \mathbf{F}_i$$

剛体の角運動量保存式

$$\frac{d\mathbf{L}_{\Pi}}{dt} = \sum_{i \in \Pi} \mathbf{r}_{ig} \times \mathbf{F}_i$$

剛体の重心

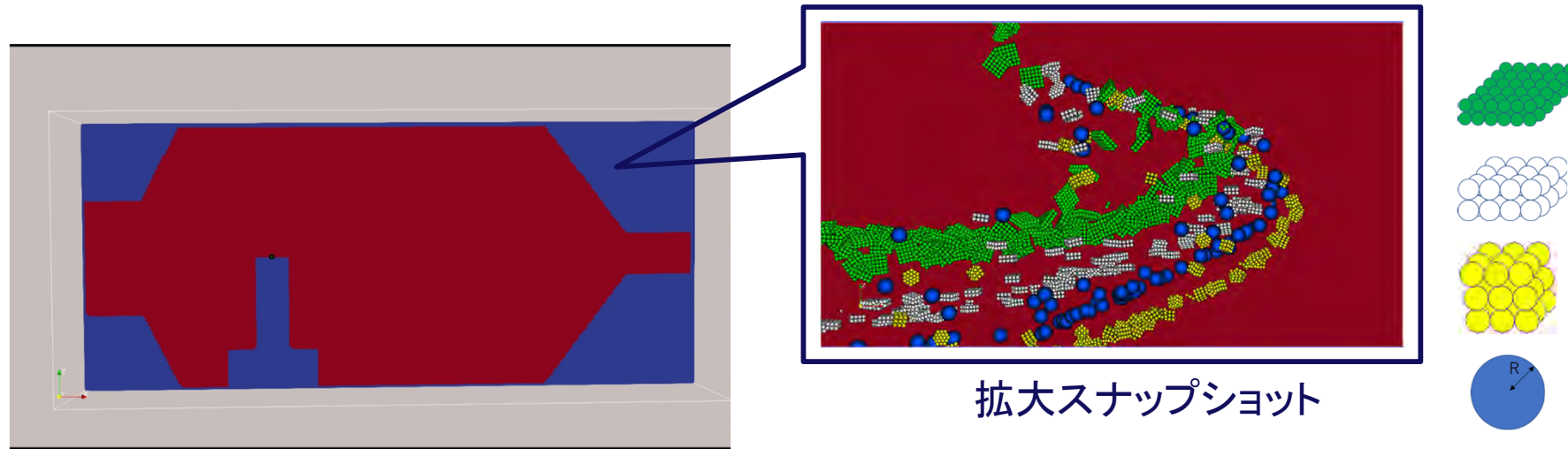
$$\mathbf{r}_{g,\Pi} = \sum_{i \in \Pi} \mathbf{x}_i / N_{\Pi}$$

粒子*i*の重心からの相対位置

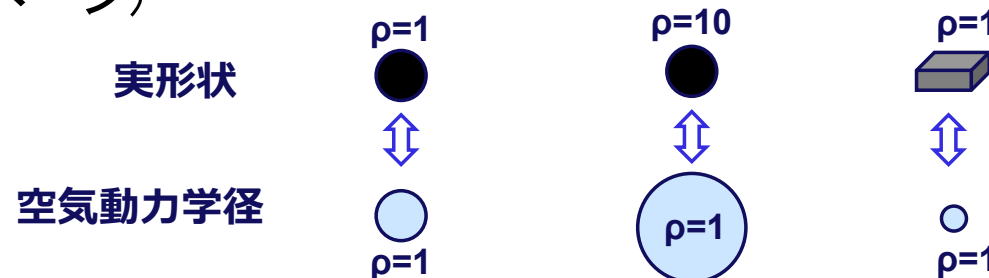
$$\mathbf{r}_{ig} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{g,\Pi}$$

【4-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

手法の確認とダスト形状が飛散挙動に及ぼす影響評価



- 試験で直接観察が難しいダストの飛散挙動の詳細を解析で再現しうることを確認した。
- 重量が等しく形状が異なるダストの飛散挙動を比較したところ、平たいダストほど前方投影面積が大きくなり、気流に乗りやすい傾向が見られた。
- 形状と密度が異なるが空気動力学径が等しい粒子は同様の飛散挙動を示すことから、形状に応じた空気動力学径に補正できれば、非球形ダストの飛散挙動を球形粒子で評価できることになる。そこで非球形モデルを用いて、空気動力学径の形状補正係数を導出する。(次ページ)

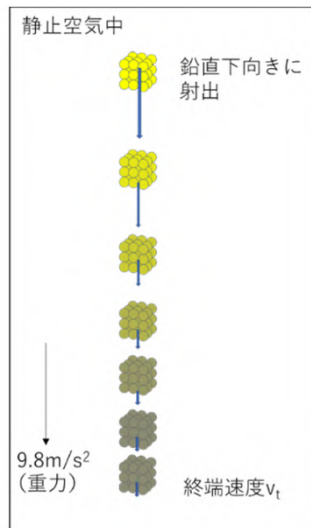


* 密度 ρ の単位は g/cm^3

【4-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討

非球形モデルを用いた空気動力学径予測

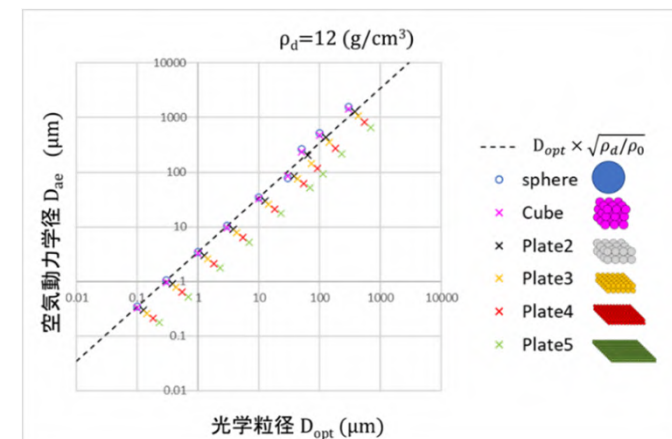
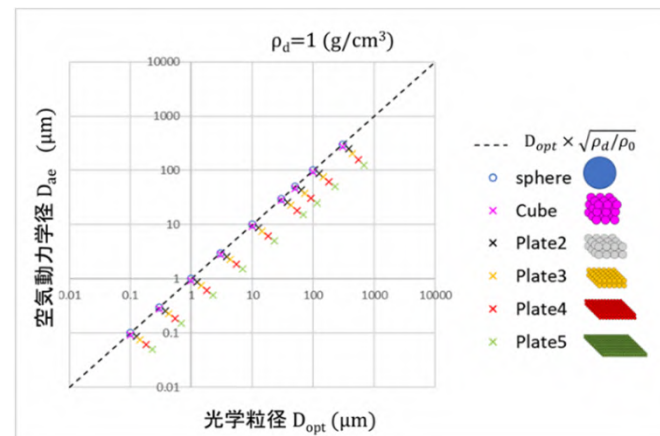
- ダストの特性を効率よく整理するため、「光学粒径(実粒径)」「密度」「形状」の組み合わせから非球形モデルを用いて空気動力学径を予測する手法を開発した。



空気動力学径の推定手法

- 非球形モデルで作成したダストを静止空气中で鉛直下向きに射出
- 速度が一定となったところの値が終端速度 v_t
- 空気抵抗と重力のバランス(次式)から空気動力学径 D_{ae} を評価

$$\frac{1}{2} C_D v_t^2 \rho_{air} \pi \left(\frac{D_{ae}}{2} \right)^2 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_{ae}}{2} \right)^3 \rho_0 g$$



非球形モデルで求めた空気動力学径 D_{ae} と光学粒径 D_{opt} の関係

- 密度が大きいほど空気動力学径が大きい
- 形状が平たいほど空気動力学径が小さい
- 空気動力学径と(光学粒径、形状、密度)の関係は右式で定式化が可能

$$D_{ae} = \frac{1}{\alpha} D_{opt} \sqrt{\rho_d / \rho_0}$$

ρ_d : 粒子の密度
 ρ_0 : 水の密度








【4-1】ダスト飛散挙動解析技術の検討 非球形モデルを用いた空気動力学径予測

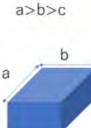
- 様々な形状を非球形モデルで作成して空気動力学径を導出し、それぞれの形状補正係数 ($1/\alpha$) を評価した。

- α はおよそ当該形状と等体積球それぞれの前面投影面積の比に近いが、細長い形状についてはそこから逸脱する傾向が確認された。









- 形状補正係数 $1/\alpha$ を形状特性パラメータ $S\left(=\frac{\sqrt{ab}}{c} \times \frac{a}{b}\right)$ の関数として定式化に成功

- これにより、ダストの形状情報から空気動力学径を推定可能
- 逆に、空気動力学径 (ELPI) と光学粒径 (Welas) の関係からダスト形状を推定可能

モデル名	Sphere	Cube	Plate2	Plate3	Plate4	Plate5	Plate6
a : b : c	-	1 : 1 : 1	2 : 2 : 1	3 : 3 : 1	6 : 6 : 1	12 : 12 : 1	24 : 24 : 1
形状特性 パラメータ ($\frac{\sqrt{ab}}{c} \times \frac{a}{b}$)	-	1	2	3	6	12	24
粒子モデル							



a > b > c

モデル名	Plate7	Plate8	Plate9	Plate10	Plate11	Stick1	Stick2	Stick3
a : b : c	2 : 1 : 1	3 : 1.5 : 1	6 : 3 : 1	12 : 6 : 1	24 : 12 : 1	24 : 8 : 1	24 : 4 : 1	24 : 1 : 1
形状特性 パラメータ ($\frac{\sqrt{ab}}{c} \times \frac{a}{b}$)	2.8	4.2	8.5	17.0	33.9	41.6	58.8	117.6
粒子モデル								

非球形モデルで再現した様々なダスト形状

【4-2】実験体系の解析評価 試験の再現解析

■ 解析対象

- パラメータ試験、(詳細試験)、ウラン試験、(ONET試験)、廃炉ハンドブック試験

■ 共通条件

- 空気の流動は定常状態を仮定
- ダストの運動が空気流動に与える影響は考慮しない
- 密度が 1g/cm^3 の球形モデルを使用(粒径＝空気動力学径)
 - ・ 非球形モデルによる形状補正係数を参照することで任意の形状、密度に読み替え可能
- 1000個の同一径の粒子を生成し、一定時間後に排気口に到達した粒子数の割合を「回収率」として評価
- 粒径ごとの回収率を評価

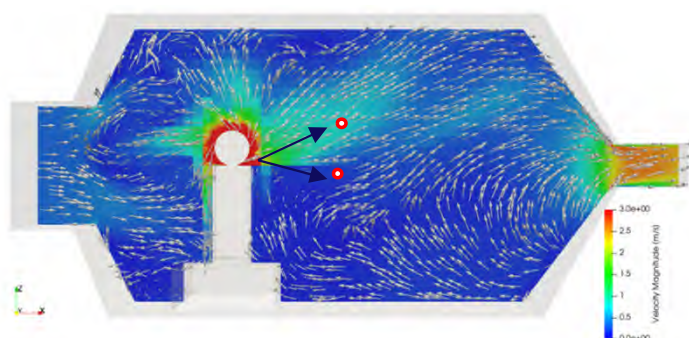
■ 個別条件

- ダストの初期条件を切削機器ごとに設定
 - ・ 生成位置
 - ・ 初速度
- 初期条件に対して一定のばらつきを付加

【4-2】実験体系の解析評価

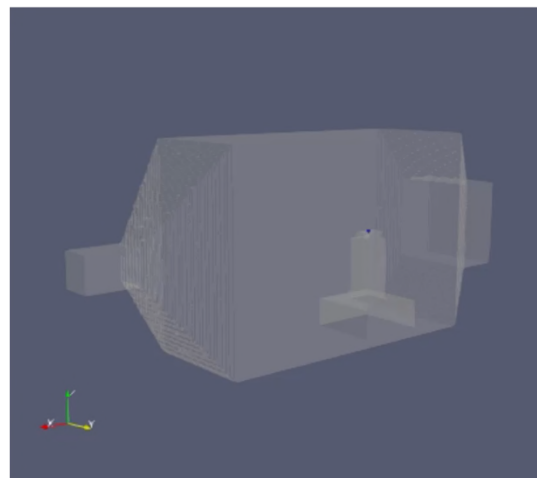
パラメータ試験(ディスクカッター(3600rpm))

- 100 μm より小さいダストはそのほとんどが回収されるという解析結果は、本事業のパラメータ試験(ディスクカッタ)で得られた高い飛散率とよく整合した。他方、SUS等を用いた試験では飛散率が低くなっており、生成されるダストの粒径分布が異なる可能性が示唆された。

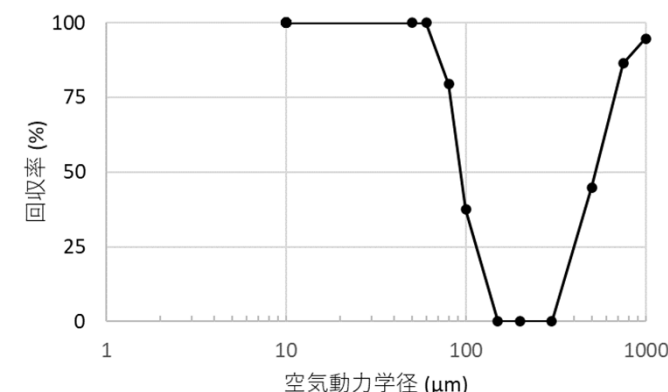


ダスト初期条件

解析条件



10 μm 粒子の解析結果



粒径ごとの回収率

	項目	設定
気流条件	ディスクカッタの回転数	3600rpm
	粒子数	1000
粒子条件	速度方向	X軸の正方向
	初速度	33.9 m/s
	射出角度のばらつき	X軸方向周りに20度
	発生位置	ディスクカッタと供試体の接触点
	発生位置座標	X=0.0, Y=0.0, Z=0.0
	粒径	10~1000 μm
	粒子密度	1000 kg/m ³
境界条件	流出	回収
	壁面衝突時の反応	完全非弾性衝突
解析条件	定常・非定常	非定常解析
	解析時間	20 s

- 10 μm の粒子は切削部から排気口につながる流線によって全量回収
- 空気動力学径が500 μm 以上のケースでは粒子が初期状態で持っている慣性項が散逸する前に排気口に到達することにより回収率が高くなる
- ディスクカッタの回転による気流が支配的

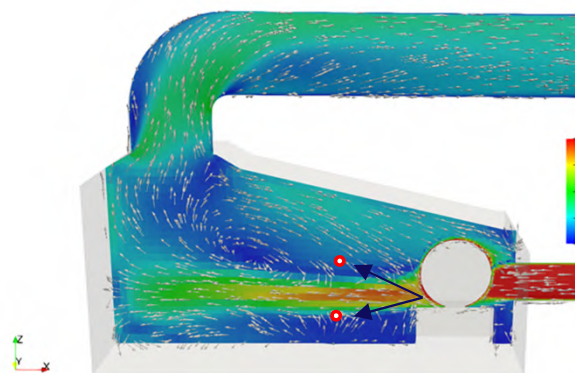
本事業の試験結果(アルミナ)

飛散した最大粒径(D_{ae})	~100 μm
全粒径飛散率	70~90%

【4-2】実験体系の解析評価

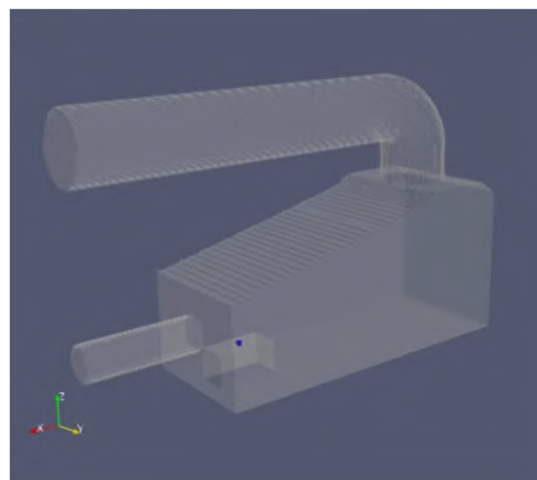
ウラン試験(ディスクカッター(3600rpm))

- 試験で飛散した最大粒径に比べ、解析結果はより大きな粒子が回収される結果となった。飛散率が20%と低いことから、回収されない大きなダストの形成や、壁面における粒子固着発生の可能性などが示唆された。

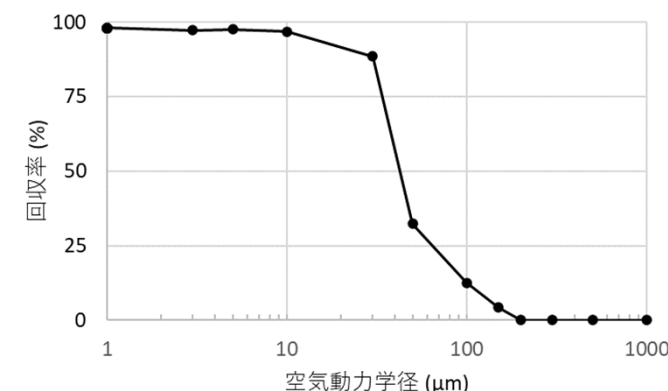


ダスト初期条件

解析条件



10μm粒子の解析結果



粒径ごとの回収率

	項目	設定
気流条件	ディスクカッターの回転数	3600rpm
	粒子数	1000
粒子条件	速度方向	x軸の負方向
	初速度	33.9 m/s
	射出角度のばらつき	x軸方向周りに20度
	発生位置	ディスクカッターと供試体の接触点
	発生位置座標	X=0.0, Y=0.0, Z=0.0
	粒径	1~1000 μm
	粒子密度	1000 kg/m ³
	流出	回収
境界条件	壁面衝突時の反応	完全非弾性衝突
	定常・非定常	非定常解析
解析条件	解析時間	20 s

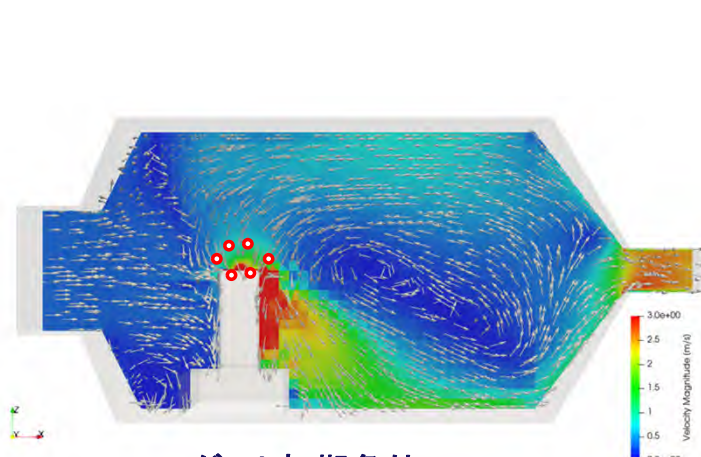
- 10 μmの粒子は切削部から排気口につながる流線にのってほとんど全量が回収
- 500 μm以上の大きな粒子は進行方向の壁面に衝突して床に落下するため回収されない

本事業の試験結果(UO₂)

飛散した最大粒径(D _{ae})	~50μm
全粒径飛散率	~20%

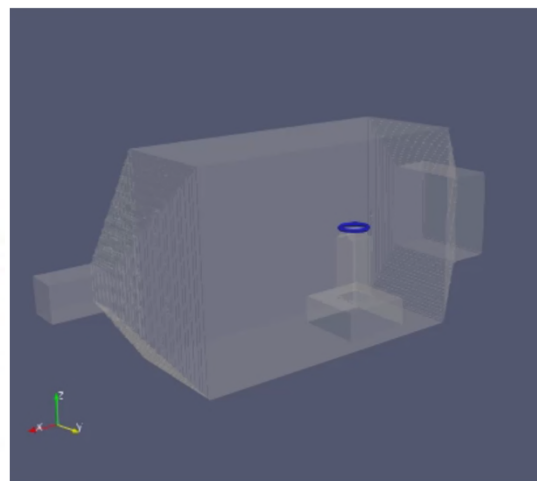
【4-2】実験体系の解析評価 パラメータ試験(レーザーガウジング)

- 本事業の試験結果はstick条件の解析結果とよく整合した。飛散したダストの一部は壁と接触して固着することで最終的に回収されなかった可能性が示唆された。

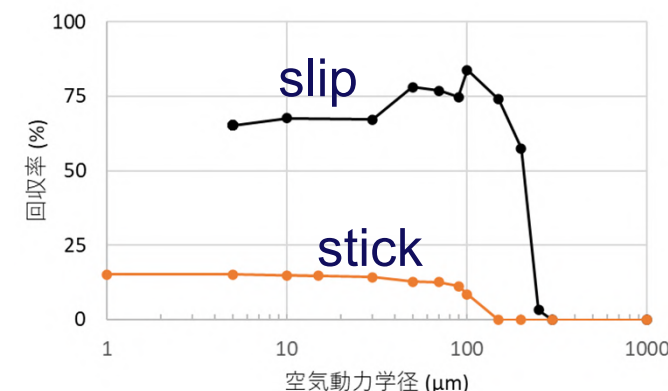


ダスト初期条件

解析条件



10μm粒子の解析結果
(slip)



粒径ごとの回収率

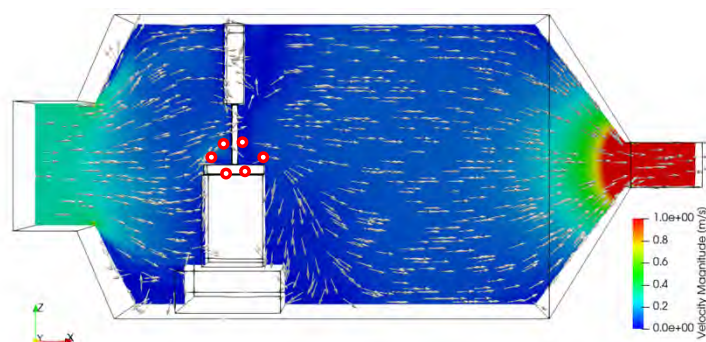
	項目	設定
気流条件	アシストガス速度	636.6 m/s(ノズル角度0度)
	粒子数	1000
粒子条件	速度方向	—
	初速度	0.0 m/s
	発生位置	レーザと供試体の接触点を中心とする半径0.1 mの円周上
	発生位置座標	$X=0.1 \cdot \cos(\theta)$, $Y=0.1 \cdot \sin(\theta)$, $Z=0.0$
	粒径	5~1000 μm
	粒子密度	1000 kg/m ³
境界条件	流出	回収
	壁面衝突時の反応	Slip(完全非弾性衝突) Stick(固着)
解析条件	定常・非定常	非定常解析
	解析時間	20 s

- Slip条件の場合、10 μmの粒子は回収率はおおよそ70%
- Stick条件とすると100μm以下の粒子が20%程度回収
- アシストガスによる気流が支配的

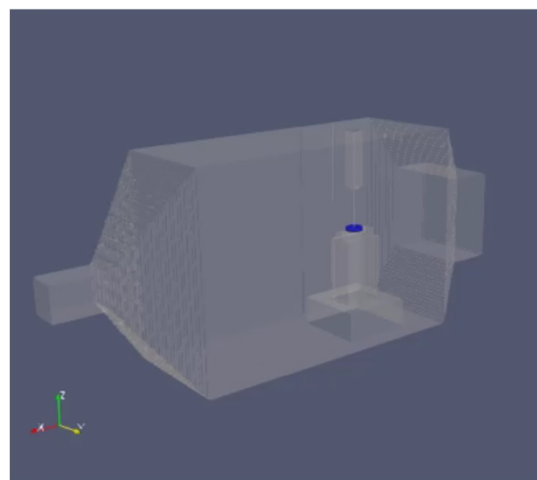
本事業の試験結果	
飛散した最大粒径(D_{ae})	~100μm
全粒径飛散率	~15%

【4-2】実験体系の解析評価 パラメータ試験(チゼル)

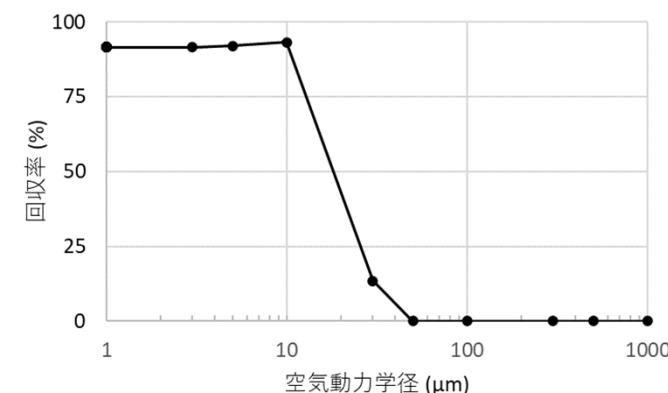
- 本事業の試験では解析より大きな飛散ダストが観察された。これは、ケーシングの形状が異なり、小さいケーシングを用いた試験でより大きなダストが回収されたと考えられる。



ダスト初期条件



10μm粒子の解析結果



粒径ごとの回収率

解析条件

	項目	設定
気流条件	チゼルに起因する気流	なし
粒子条件	粒子数	1000
	速度方向	Z軸の正方向
	初速度	1.0 m/s
	発生位置	チゼルと供試体の接触点を中心とする半径0.05 mの円周上
	発生位置座標	$X=0.05 \cdot \cos(\theta)$, $Y=0.05 \cdot \sin(\theta)$, $Z=0.0$
	粒径	1~1000 μm
	粒子密度	1000 kg/m ³
境界条件	流出	回収
	壁面衝突時の反応	完全非弾性衝突
解析条件	定常・非定常	非定常解析
	解析時間	100 s

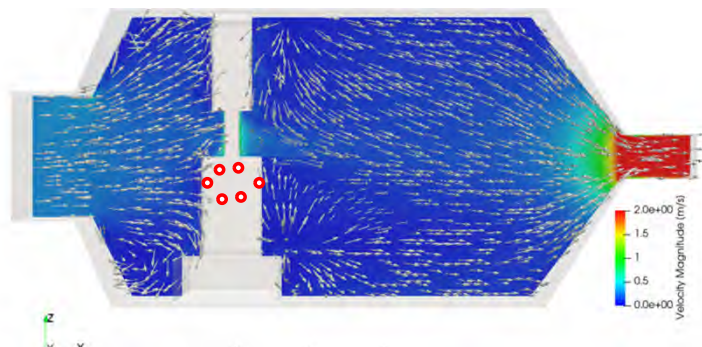
- 実際の試験では小さなケーシングが用いられたが、解析では元の大きなケーシング形状を仮定
- 10 μmの粒子の回収率は90%程度
- 50 μm以上の大きさの粒子の回収率が0となった
- バルク流による影響が支配的

本事業の試験結果

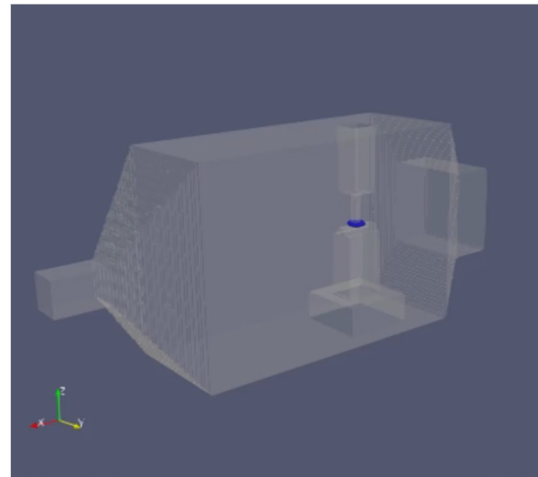
飛散した最大粒径 (D_{ae})	~100μm
全粒径飛散率	0~100%

【4-2】実験体系の解析評価 パラメータ試験(コアボーリング600rpm)

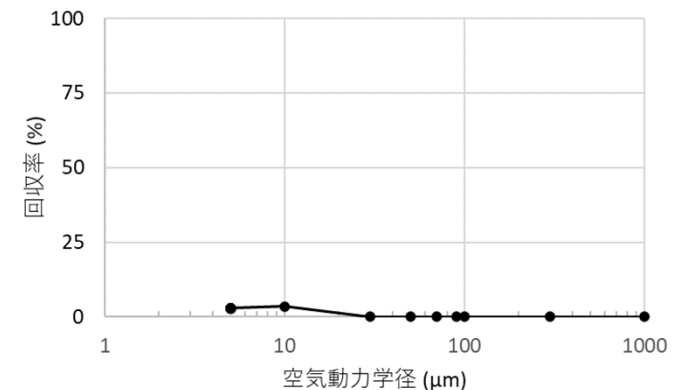
- 最大粒径と飛散率は解析と試験の結果でよく整合した。他方、供試体により大きな飛散率が測定された場合があり、生成ダストの粒径分布の違いなどが異なる可能性が示唆された。



ダスト初期条件



10μm粒子の解析結果



粒径ごとの回収率

解析条件

	項目	設定
気流条件	コアボーリング回転数	600 rpm
	粒子数	1000
粒子条件	速度方向	コアビット接線方向
	初速度	2.4 m/s
	発生位置	コアビット先端の中央を中心とする半径0.05 mの円周上
	発生位置座標	$X=0.05 \cdot \cos(\theta)$, $Y=0.05 \cdot \sin(\theta)$, $Z=0.0$
	粒径	5 ~ 1000 μm
	粒子密度	1000 kg/m ³
境界条件	流出	回収
	壁面衝突時の反応	完全非弾性衝突
解析条件	定常・非定常	非定常解析
	解析時間	40 s

- 実際の試験では小さなケーシングが用いられたが、解析では元の大きなケーシング形状を仮定
- 10 μmの粒子の回収率は3%程度
- 粒子の発生位置をよりコアビットに近い位置にしたことにより、コアビット周囲の渦から小さな粒子が脱出できず回収率は低い値となった

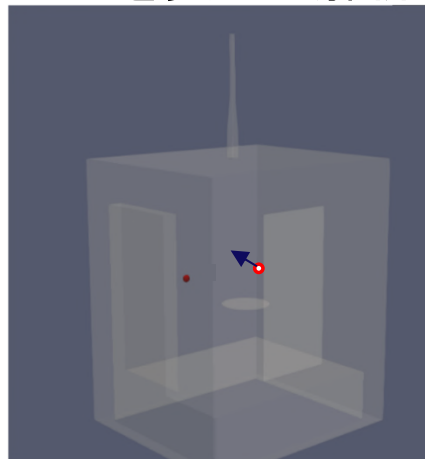
本事業の試験結果(多孔質アルミナ)

飛散した最大粒径(D_{ae})	~10μm
全粒径飛散率	0~3%

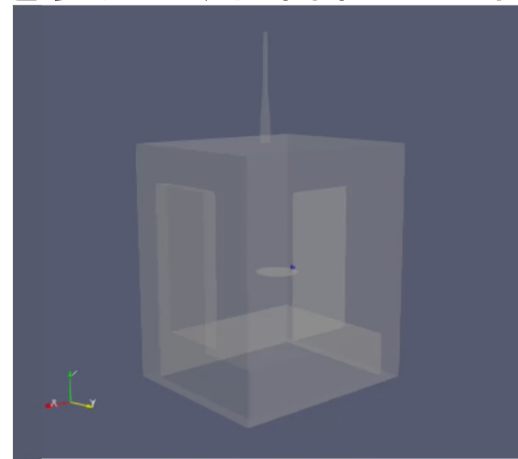
【4-2】実験体系の解析評価

廃炉ハンドブックデータ(ディスクカッター(砥石))を共通条件に補正

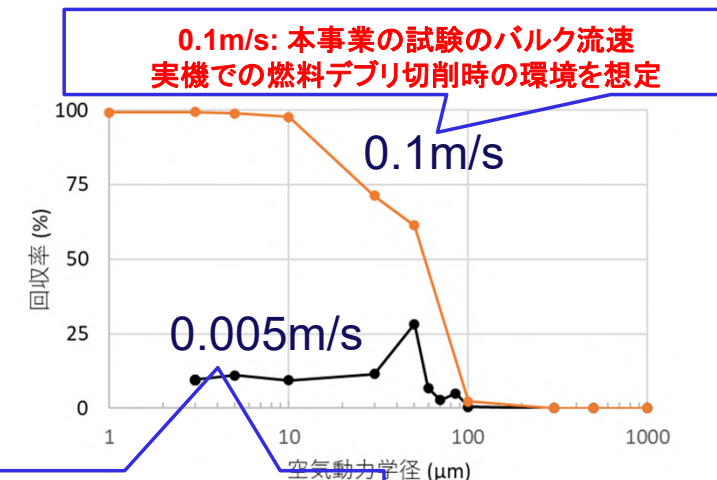
- 廃炉ハンドブック試験の飛散率は本事業の試験より低い値を示したが、バルク流速を変えた解析結果を参照し、再評価した飛散率は近い値となった。



ダスト初期条件



10μm粒子の解析結果
(バルク流速0.005m/s)



0.005m/s: 廃炉ハンドブック試験のバルク流速
10μm以下の粒子を回収できる最低流速を想定

粒径ごとの回収率

解析条件	項目	設定
気流条件	ディスクカッターの回転数	3000 rpm
	バルク流速※	0.005m/s 0.1 m/s
粒子条件	粒子数	1000
	速度方向	Y軸の正方向
	初速度	28.3 m/s
	射出角度のばらつき	Y軸方向周りに20度
	発生位置	ディスクカッターと供試体の接触点
	発生位置座標	X=-0.02, Y=0.23, Z=0.9
	粒径	1~1000 μm
境界条件	粒子密度	1000 kg/m ³
	流出	回収
	壁面衝突時の反応	完全非弾性衝突
解析条件	定常・非定常	非定常解析
	解析時間	400 s 20 s

- バルク流速が0.005m/sの場合、10μm以下の粒子の回収率はおおよそ10%。バルク流速を0.1m/sとすると、10μm以下の粒子の回収率がほぼ100%となった。

廃炉ハンドブックの試験結果(砥石カッター,バルク流速0.005m/s)

粒子≤10μmの飛散率(SUS304)

2.5%

廃炉ハンドブック試験の飛散率の再評価

$$2.5\% \times 100/10 = 25\%$$

⇒本事業で得られた $ARF_{RP} = 1 \sim 47\%$ と整合する

※0.005m/sは10μm粒子の終端速度、0.1m/sは1FのPCV内最大流速

【4】ダスト飛散挙動の解析 まとめ

- ① 様々な切削ダストの特性(形状、サイズ、密度)を考慮したダスト飛散挙動解析手法を開発し、適用性と必要性を検討する。
 - CFDと球形モデルまたは非球形モデルを組み合わせたダスト飛散挙動解析手法を構築し、ダスト飛散時の詳細な挙動が予測可能であることを確認した。
 - 非球形モデルを用いて様々な密度、形状のダストの空気動力学径を算出したことにより、ダストの性情(密度、サイズ、形状)を空気動力学径という1つのパラメータで整理することを可能とした。
- ② 本研究の試験体系を解析し、飛散率の環境依存性などの試験結果で妥当性を検証する。
 - 各試験の再現解析を実施し、回収される最大粒径等の比較から、多くの体系について解析結果が試験結果と整合していることを確認した。解析結果と試験結果に差異がある体系については、原因を考察した。
- ③ 異なる試験体系で得られた飛散率データを同じ手法で解析し、統一的な飛散率データに整理することを試みる。
 - 廃炉ハンドブック試験の再現解析結果およびバルク流速を本事業に合わせた解析結果を参照して飛散率を再評価した結果、本事業の試験と整合する値が得られた。

3. 全体のまとめ

まとめ(1/2)

- 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、五因子法による、平常時・事故時の放射性物質放出量の評価方法を検討した。さらに、必要なパラメータを文献調査を基に推定し、放出量を試算すると共に、不足するパラメータなどの課題を摘出した。
- コールド模擬材を用いたダスト飛散率測定は、4工法（ディスクカッター、チゼル、コアボーリング、レーザー）の乾式切削について飛散挙動に影響を与えるパラメータを明らかにし、想定される使用範囲での飛散率データを導出した。さらに、安全評価の観点から、工法特有のカーフ幅や刃渡りを含んだ飛散量（g/s）に着目し、飛散量を切削速度（m/s）の関数として整理するなど、実用性を考慮した工法間の比較を行った。
- 国内（NFD）ウラン試験の酸化物燃料デブリペレットのディスクカッター切削は、コールド試験と整合する飛散挙動を示し、重回帰分析によりコールド試験のパラメータ依存性を反映できた。さらに、酸化物燃料デブリとSUSの飛散率を濃度加算し、任意組成の燃料デブリの飛散率を推定する方法を提案した。

まとめ(2/2)

- 国外(CEA)ウラン試験のkg規模ウラン含有模擬燃料デブリのディスクカッターによる乾式切削では、国内試験と同一条件での飛散率データを取得した。飛散率は $ARF(\leq 10 \mu m) = 10 \sim 30\%$ となり、概ね国内試験に基づく推定 $ARF(\leq 10 \mu m) \leq 46\%$ と整合した。推定の精度向上や他工法への展開については、今後の課題である。
- 工法により飛散粒子形状に大きな差が見られることから、非球形ダストの解析手法を開発し、実験結果が良く説明できることを示した。さらに、一般の流動解析コードで非球形粒子を評価する必要性から、粒子形状に応じて空気動力学径を補正する手法を考案、形状補正因子を導出・整備した。また、ダスト飛散率を測定する試験体系を解析し、試験データ処理に反映するとともに、廃炉ハンドブックのデータを本事業体系に補正してデータとして整備した。

以上の成果により、本補助事業「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))」では、安全評価上の基礎となる乾燥条件下における燃料デブリ切削加工時のダスト飛散関連データを試験により取得し、ダストの発生・飛散挙動の理解を深めるとともに、通常時及び事故時における安全評価に必要な検討・整理を行うという所期の目標を達成した。

 電力中央研究所