

# 貯槽等における爆発・火災の予測と防止 —トラブル対処作業に関連して—

化学安全研究グループ 八島正明  
e-mail: [yashima@s.jniosh.johas.go.jp](mailto:yashima@s.jniosh.johas.go.jp)

# 構成

1. 近年の化学工場での重大災害，非定常作業における労働災害
2. 消火作業などにおける災害
3. 蓄熱発火した後，消火作業中に発生した爆発災害と  
検証実験
4. 粉じん爆発，粉体火災
5. 燃焼ガス
6. トラブル対処

1. 近年の化学工場での重大災害，非定常作業における労働災害
2. 消火作業などにおける災害
3. 蓄熱発火した後，消火作業中に発生した爆発災害と検証実験
4. 粉じん爆発，粉体火災
5. 燃焼ガス
6. トラブル対処

# 背景：近年の化学工業での重大災害の発生 (2011年～2014年)

◆ 近年，化学工業での非定常作業中の爆発による重大災害が連続して発生している<sup>1,2)</sup>。

	年月	場所	災害内容	死傷者数
①	H23年11月	山口県	塩ビモノマー製造施設での爆発災害	死亡1名
②	H24年4月	山口県	レゾルシン製造施設での爆発災害	死亡1名，負傷25名
③	H24年9月	兵庫県	アクリル酸製造施設での爆発災害	死亡1名，負傷36名
④	H25年9月	愛知県	製鉄工場での爆発災害	負傷15名
⑤	H26年1月	三重県	多結晶シリコン製造施設の爆発災害	死亡5名，負傷13名

- 1) 内閣官房，総務省消防庁，厚生労働省，経済産業省(2014)石油コンビナート等における災害防止対策検討関係省庁連絡会議報告書。
- 2) 石油コンビナート等災害防止3省連絡会議3省共同運営サイト

# 背景：近年の化学工業での重大災害の発生 (2011年～2014年)

① 2系列ある工程のA系の緊急放出弁が故障した後、工程A系のロードダウンに対応していたところ、鉄さび等を触媒とするエチレンジクロライド生成反応が暴走し、塩酸塔還流槽付近で爆発および火災が発生した。

この火災では熟練技術者の不足が事故原因の一つに挙げられ、事故発生後の事象進展に関する想像力の不足も反省となった。

- ② 蒸気供給プラントのトラブルで緊急停止作業を行っていたところ、2時
- ③ すぎに爆発、火災が発生し、約6時間後に2回目の爆発があった。
- ④ 直接の原因としては緊急停止作業中に、冷却の増強を目的としてインターロックを解除して通常の循環水冷却に切り替えたが、そのことで窒素供給が停止し、酸化反応器内の液相のかくはんが停止した。それ
- ⑤ により反応器上部にある過酸化物の冷却ができず温度が上昇し、暴走
- 1) 反応に至った。
- 2)

→近年の大きな災害の共通する基本原因として、本来把握されているべき危険性が理解されていなかったことが挙げられる。

災害が

数

名

名

名

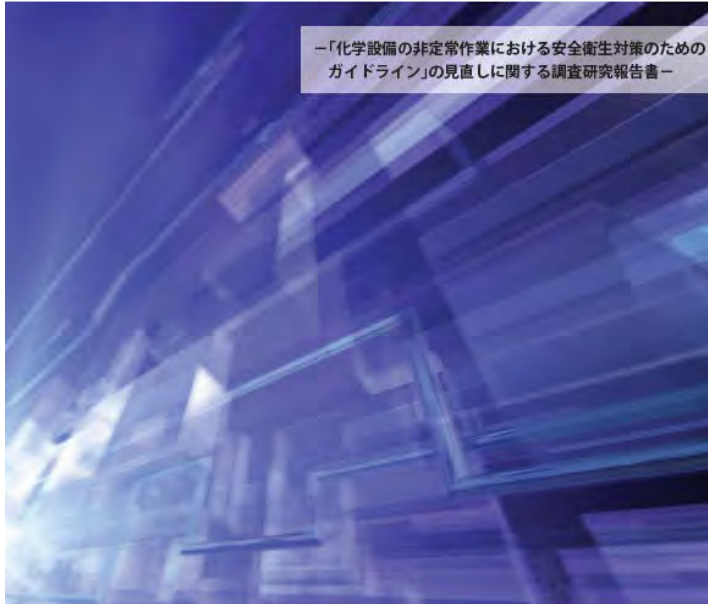
名



# ガイドライン見直しに関する調査研究報告書の発行 (2015年3月)

委員長 三宅 淳巳(横浜国立大学), ほか8委員

## 化学設備等における 非定常作業の安全



応援します 明日の安全・健康・快適職場  
**JISHA**  
Japan Industrial Safety & Health Association

中央労働災害防止協会

### オブザーバー

厚生労働省労働基準局 安全衛生部化学物質  
対策課,

経済産業省 商務流通保安グループ 高圧ガス  
保安室コンビナート保安担当

経済産業省 商務流通保安グループ 保安課防  
災・危機管理係

総務省消防庁 特殊災害室

総務省消防庁 危険物指導調査係, 危険物判  
定係

中央労働災害防止協会 労働衛生調査分析セ  
ンター

中央労働災害防止協会 出版事業部

### <事務局>

中央労働災害防止協会 教育推進部

「化学設備の非定常作業における安全衛生対策のためのガイドライン」の見直しに関する調査研究報告書, 119p.

# 主な非定常作業

## (1) 保全的作業（全件数の57%）

化学設備の事故災害の割合  
定常作業 約40%  
非定常作業 約60%

## (2) トラブル対処作業（28%）

異常事態のほか、不調、汚染、故障等の運転上や作業中のトラブル（緊急事態を含む）に対処する作業は、作業時期をあらかじめ決めることができず、また、作業内容・方法についてその場での判断が要求される作業である。トラブルの対処作業は、緊急を要するため事業場の従業員が関わるが多いため、非定常作業の中で事業場の従業員が被災するケースが最も多い作業である。

（別の資料によると）うち、爆発、火災、火傷、中毒などは約20%

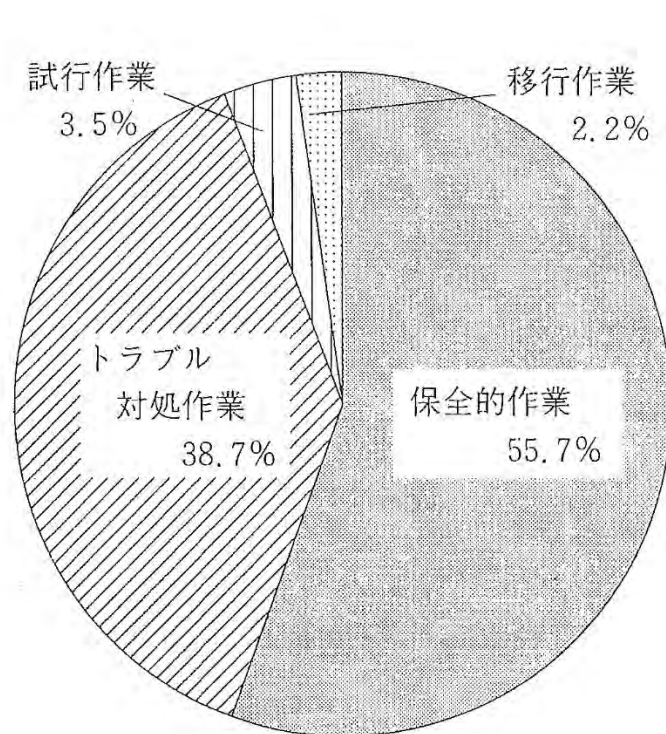
## (3) 移行作業（5%）

原料、製品等の変更作業又はスタートアップ（立ち上げ）、シャットダウン（停止）等の移行作業は、事前に作業時期、作業内容、方法について計画を立てて行われることが多い作業であるが、取扱う物質や温度・圧力等の運転条件が変わるため、作業手順を誤ると事故につながりやすい作業である。

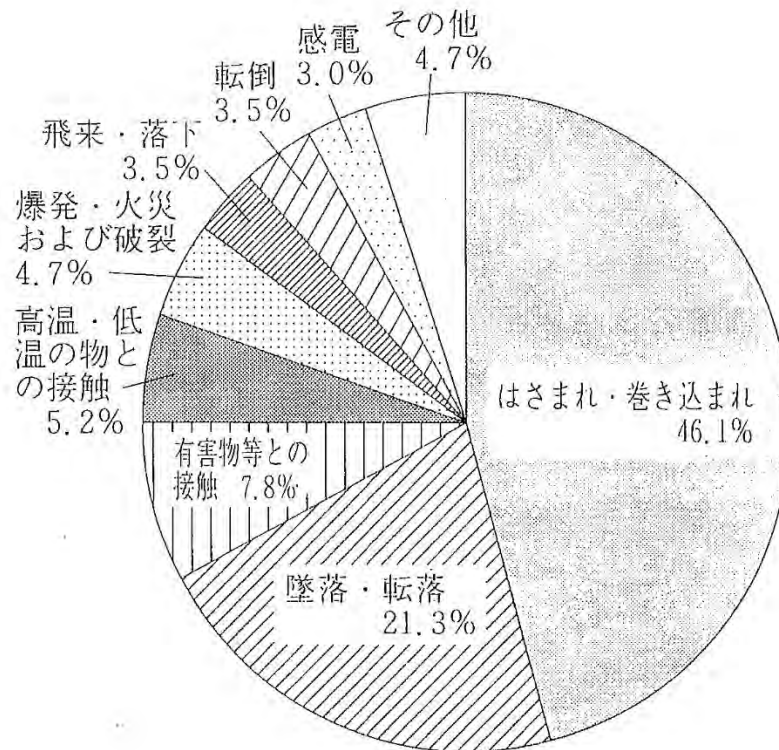
## (4) 試行作業（2%）

## (5) そのほかの作業（8%）

# 化学設備における非定常作業における労働災害の発生状況(平成3(1991)年～平成8(1996)年)



作業区別の災害発生割合



事故の型別の災害発生割合

(一社)日本化学工業協会, コンビナート各地域の防災協議会資料などの資料より, 約1000件, うち約400件が非定常作業であった。



# 化学設備における非定常作業における労働災害の発生状況 (平成3(1991)年～平成8(1996)年)

番号	事故の型等	保全	トラブル 対処	両方(保 全+トラブ ル対処)	その 他
1	爆発	3	5	1	0
2	破裂	0	0	1	0
3	火災(着衣の燃焼)	3	0	0	0
4	噴出(有害物)	6	2	0	0
5	噴出(固化物)	0	3	0	0
6	噴出(スチーム, 熱水)	3	1	0	0
7	ジェット洗浄	1	0	0	0
8	有害物への接触(装置外に存在)	3	0	0	0
9	槽内の有害物中毒	7	1	0	0
10	ガス中毒(硫化水素, シアン)	2	0	0	0
11	ガス中毒(一酸化中毒)	5	0	0	0
12	酸欠(炭酸ガス, 窒素)	2	2	0	0
13	酸欠(アルゴン)	1	0	1	0
14	呼吸用保護具	8	0	0	0
15	自動運転によるはさまれ・巻き込まれ	4	2	1	0
16	スイッチの誤投入, 誤起動	4	1	2	0

番号	事故の型等	保全	トラブル 対処	両方(保全 +トラブル 対処)	その他
17	隣接機器の作動によるはさまれ・巻き込まれ,	0	1	0	1
18	シーケンスによる停止時間ずれのためのはさまれ・巻き込まれ	1	1	0	0
19	操作部に体が誤って触れたことによる誤作動	0	2	2	0
20	ローラへのはさまれ・巻き込まれ	3	4	0	3
21	ベルトコンベアへのはさまれ・巻き込まれ	1	1	2	0
22	動く機械内部に手を入れる	0	2	1	1
23	手の負傷	4	10	0	0
24	その他, 機械にはさまれ・巻き込まれ	8	5	2	0
25	足の負傷	4	5	0	0
26	リフトの落下	0	4	3	0
27	槽内, 装置内への転落	3	1	0	0
28	工具の取扱いでバランスを失い墜落・転落	7	1	0	1
29	配管・ラック等からの転落・墜落	5	0	0	0
30	足場の不安定による転落・墜落	3	0	0	0

番号	事故の型等	保全	トラブル 対処	両方(保全 +トラブル 対処)	その他
31	足場上からの転落・墜落	9	0	0	0
32	フォークリフトを足場に代用	1	0	0	0
33	ダクト, 煙道等で転落・墜落	4	0	0	0
34	猿梯子から転落・墜落	1	0	0	1
35	脚立から転落・墜落	1	0	1	0
36	梯子から転落・墜落	5	0	0	0
37	スレートを踏み抜き転落・墜落	5	0	0	0
38	配管撤去の際の振れ	2	0	0	0
39	作業手順・予測の誤りによるはさまれ・巻き 込まれ等	7	0	0	0
40	あわてた動作による転倒・激突等	3	6	0	0
41	たがねの破片等飛来による眼の負傷等	2	0	0	0
42	感電	4	1	2	0
43	その他, 機械にはさまれ・巻き込まれ	5	3	0	0
合計		140	47	19	7

→現場作業員の労働災害の防止対策として、爆発・火災対策の前にやるべきことは多い。

# ヒューマンファクターによる解析

## ◆ 急ぎ

例①: 植物油製造工場において抽出機の機械の故障と運転ミスが重なり、緊急停止した抽出機内部の原料を人力で外部に排出作業中、溶剤に引火、爆発、火災が発生した。

例②: p-トルエンスルホン酸製造中に、攪拌機が停止したが、反応槽内部の状況を確認せずに攪拌を再開したため、急激に反応が進行し、槽内部の温度が急上昇し、トルエン蒸気が噴出して引火、爆発した。

## ◆ 面倒

## ◆ 思い込み

## ◆ 誤操作

## ◆ 場面行動

## ◆ コミュニケーションの問題

## ◆ 職場(集団)の雰囲気

1. 近年の化学工場での重大災害, 非定常作業における労働災害
2. 消火作業などにおける災害
3. 蓄熱発火した後, 消火作業中に発生した爆発災害と検証実験
4. 粉じん爆発, 粉体火災
5. 燃焼ガス
6. トラブル対処



# 消火作業中の主な労働災害事例

「職場のあんぜんサイト」より

整理番号	表題
1077	フェノール樹脂の合成反応工程で、異常反応の非常処置作業中に未反応の高濃度フェノール液が皮膚に接触して化学火傷
100137	木粉で製造する合板の工場での粉じん爆発
100546	フェロマンガンの乾燥工程において、異常が発生したため停電中、乾燥機内で粉じん爆発
101121	塗装工場が発生した火災の消火作業中に焼死
101147	自動車部品製造工場が発生した火災の消火活動で一酸化炭素(CO)中毒になる
101225	マグネシウム成形機が発生した火災の消火活動中、煙を吸い込む
101274	船倉内で鉱石の搬出作業中に、作業員1人及び救助に向かった2人の作業員が酸素欠乏症で死亡

# 木粉で製造する合板の工場 で粉じん爆発



イラストをクリックすると  
拡大表示されます。

## 概要

この災害は、粉碎した木材チップを接着剤で圧縮成型して製造する合板の製造工場での粉じん爆発が発生したものである。

当日、この工場では、朝から木材チップの粉碎→乾燥→ふるい分け→接着剤の塗布→成型→プレス→養生→研削→切断→検査という通常の工程で合板の製造を行っていたが、午後4時15分頃、乾燥工程であるドライヤーの出口にあるベルトコンベアの下に溜まっているチップがくすぶっているのを作業員が発見し、ドライヤー電気室に居た作業員に知らせるとともに、自分は班長への連絡に走った。

電気室の作業員が、現場に行ってみると火は複数箇所で発生していて、とても手に負えない状況になっていたのでポケベルで異常事態を工場全体に知らせた。

続いて、ベルトコンベアのスイッチを逆転側に切り替え、ドライヤーの燃焼停止ボタンを押したが、その直後からふるい機械・成型機・プレス機械等のところで爆発音とともに火災が発生した。

この火災は、たちまち工程全体に拡がり、さらに鉄骨2階建工場全体に拡がって工場は全焼した。

この爆発火災により、最初に発見しその後消火活動に加わった者と連絡を受けて現場に駆けつけ消火活動に加わった者2名が全身火傷で死亡したほか、他の作業員6名と構内に常駐していた運送会社の運転手3名が休業となる火傷を負った。

本講演では  
ここに着目！



この災害の原因としては次のことが考えられる。

1 最初に木粉を乾燥するドライヤーで着火した可能性が高いが、その原因としては次のことが想定される。

ドライヤーの熱源としては、合板に使用できない木粉を燃焼させた空気を使用しているが、火の粉を除去する装置が無いた  
(1)め、燃え尽きていない木粉がドライヤーに入り、中の木粉に着火して爆発状態となり、その火炎が外に吹き出て滞積チップに着火したこと。

ドライヤーの1時間当たりの処理量が、設計値の倍であり、ドラ  
(2)イヤーの温度も設定値より高かったため、中で木粉が自然発火したこと。

2 大きな火災に発展した原因としては、機械の破壊で周囲の滞積粉じんが舞い上がり、それに着火・爆発して範囲が広がったこと。

3 被災者が多くなった原因としては、火災発生等異常時の対応措置及び退避等についての教育訓練が不十分であったこと。

# 消火作業中の事故災害の例(1/2)

労働安全衛生総合研究所の「爆発火災データベース(第4次)」より

番号	事故の概要
1	とうもろこし外皮の乾燥設備の内部から出火、炭酸ガス消火器を手動で全開操作したところ、火炎が外に吹き出して、 <b>消火活動中の作業員ら計11名が火炎により被災した。</b> (死傷11人, うち死亡0人)
2	オガ炭工場において、釜の煙突から排出された火の粉が平常運転中の同工場トタン屋根上の堆積木粉に着火して火災となった。 <b>消火作業中に消火器の噴射で燃え上がって爆燃したため、消火作業中の被災者が火傷を負った。</b> (死傷4人, うち死亡1人)
3	アルミニウム屑よりアルミニウム粉を製造している工場で、グラインダーの火花が飛んで床上のアルミニウム粉に火がついて火災となった。 <b>消火しようとして水をかけたところ、堆積していたアルミニウム粉が飛散し、粉じん爆発と一部はアルミニウムの水との反応で発生した水素の爆発が起こった。</b> (死傷4人, うち死亡2人)
4	A重油を使用するボイラーを自動制御によって消火工程を実施した。しかし、何らかの原因で燃料系統の電磁弁配線が電磁弁キャップに接触し、通電状態のままとなったため、電磁弁が開き燃料噴射ポンプ稼働してA重油がボイラーの炉内に送られて気化してしまい、 <b>点火用パイロットバーナーにより爆発した。</b> (死傷0人, うち死亡0人)

## 消火作業中の事故災害の例(2/2)

労働安全衛生総合研究所の「爆発火災データベース(第4次)」より

- 5 精米施設の精米用ホッパー脇において、積み置きした空の紙袋の火災をたまたま発見し、2名が消火作業中、近くに積んであった玄米の袋に飛び火して玄米のはいが崩壊し、下敷きになった1名が火炎で火傷を負い約3週間後に死亡した。火災の出火原因は不明。(死傷1人, うち死亡1人)
- 6 金属粉碎工場において、マンガン湿式粉碎設備で火災があり、設備を停止して消火した。集じんダクトを点検したところ温熱を感じたので火災と考え、注水のため点検孔を開放する直前、乾燥機が爆発し点検孔付近にいた2名が死亡した。原因は、乾燥機内の湿ったフェロマンガ粉から発生した水素が集じん機を止めていたので滞留し、湿潤状態のフェロマンガ粉が自然発熱して自然発火、水素の燃焼により乾燥機内の粉じんが舞い上げられ粉じん爆発を起こしたとみられる。(死傷2人, うち死亡2人)



1. 近年の化学工場での重大災害，非定常作業における労働災害
2. 消火作業などにおける災害
3. 蓄熱発火した後，消火作業中に発生した爆発災害と検証実験
4. 粉じん爆発，粉体火災
5. 燃焼ガス
6. トラブル対処

# 事故災害の概要

- ①発生日時：平成15(2003)年8月14日  
(木)午前3時12分  
及び19日(火)午後2時18分
- ②発生場所：三重ごみ固形燃料発電所
- ③事故の形態：爆発災害
- ④爆発起因物質：RDF(Reduced  
Derived Fuel:ごみ固形化燃料)
- ⑤爆発装置：RDF貯蔵サイロ
- ⑥人的被害

14日：負傷者4名(1名：軽度の火傷，  
1名：2度の火傷，  
2名：打撲，頸椎捻挫)

19日：死傷者3名(2名：消防士死亡，  
1名：腰を強打，休業4週間)

- ⑦物的被害  
省略



- ◆ くすぶり始めた初期段階での対処方法が不適切であったため、爆発から火災に進展した。

## ⑧発生状況の概要:

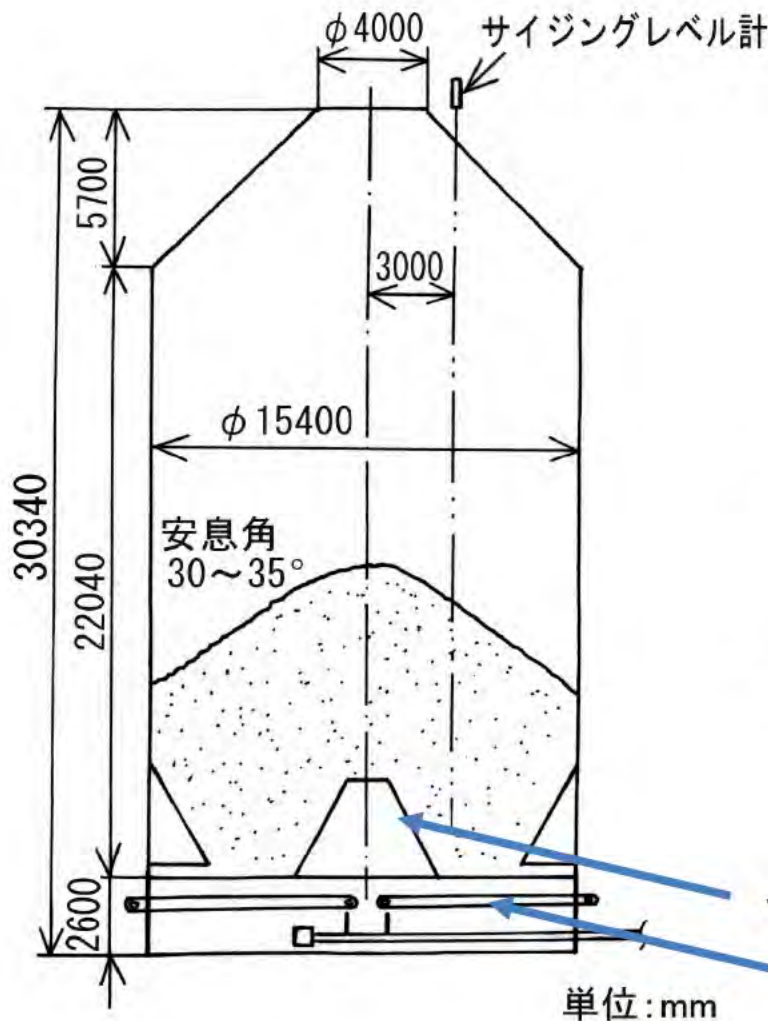
7月27日, RDF貯蔵サイロ内で貯蔵していたRDFが発火, 燃焼(くん焼)していることが確認されたため, 当該施設に注水と内部のRDFのかき出し作業を継続的に行っていた。

8月14日午前3時12分サイロ内で小爆発が発生し, 突然強い熱風が吹き出したため, かき出し作業と監視にあたっていた作業員4名が火傷, 打撲など負った。

その後もサイロ内でRDFが燃焼を継続していたため消防による消火活動が行われていたが, 19日午後2時18分, 当該サイロが爆発し, サイロ上部で消火活動を行っていた消防士2名が飛ばされ, またサイロ側面に開口部を設けようとガス溶断作業を行っていた作業員3名のうち1名が退避する際に腰を強打した。

サイロ内でRDFは燃え続け, 消防による消火活動が継続されていたが, 9月27日午後2時に鎮火した。

# RDFサイロの寸法等



- ◆ 堆積層内の温度測定のため、長さ15 cmの保護管(シース管)入りの熱電対が使われ、壁面に取り付けた突起状のガードの中に水平に差し込まれていた。すなわち、測定される代表温度は層の中央ではなく、サイロ壁付近の温度である。
- ◆ CO濃度はセンターコーン付近と屋根(頂部)で測定していた。
- ◆ 堆積量は中心軸から3 m離れた位置でレベル計を使って測定していた。

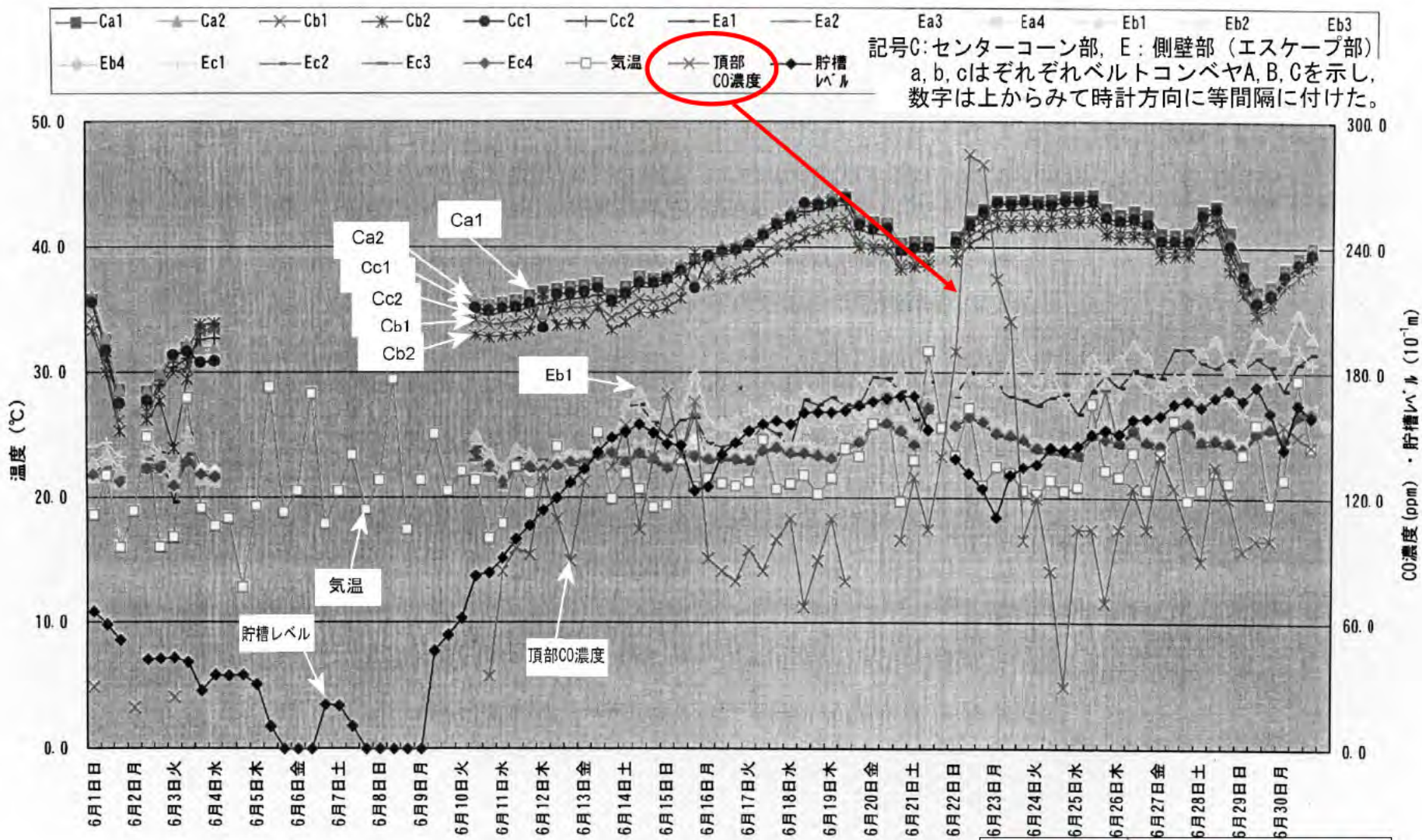
センターコーン

ベルトコンベア(放射状に3基)

単位:mm



# サイロ内の温度・CO濃度の変化(6月) (発電所による測定)

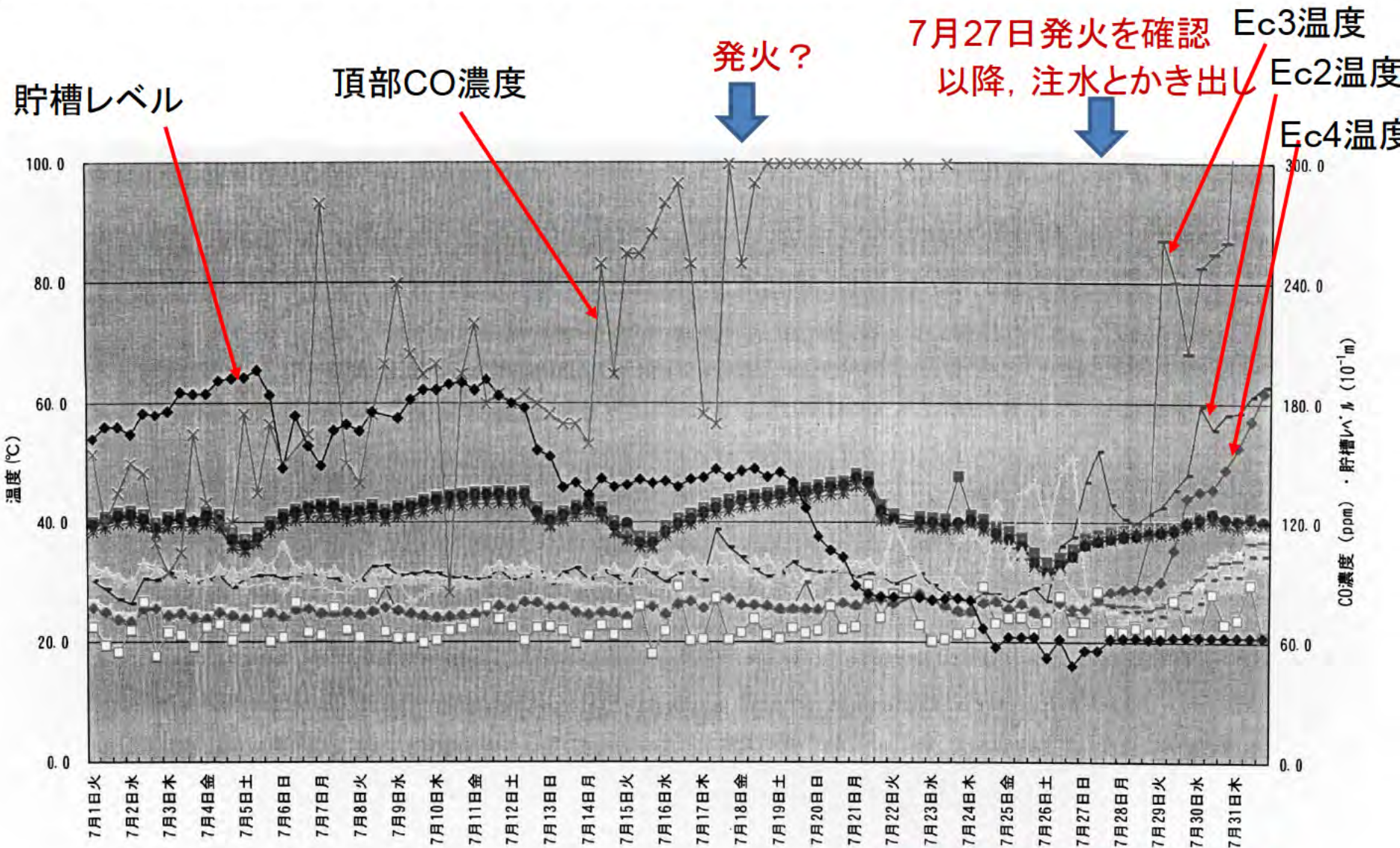


COセンサーのレンジは  
300 ppm(max)

出典: 八島正明, 三重県の発電所のRDF貯蔵サイロでの火災と爆発  
 その2: 安全工学, Vol.50, No.4, pp.236-243, 2011



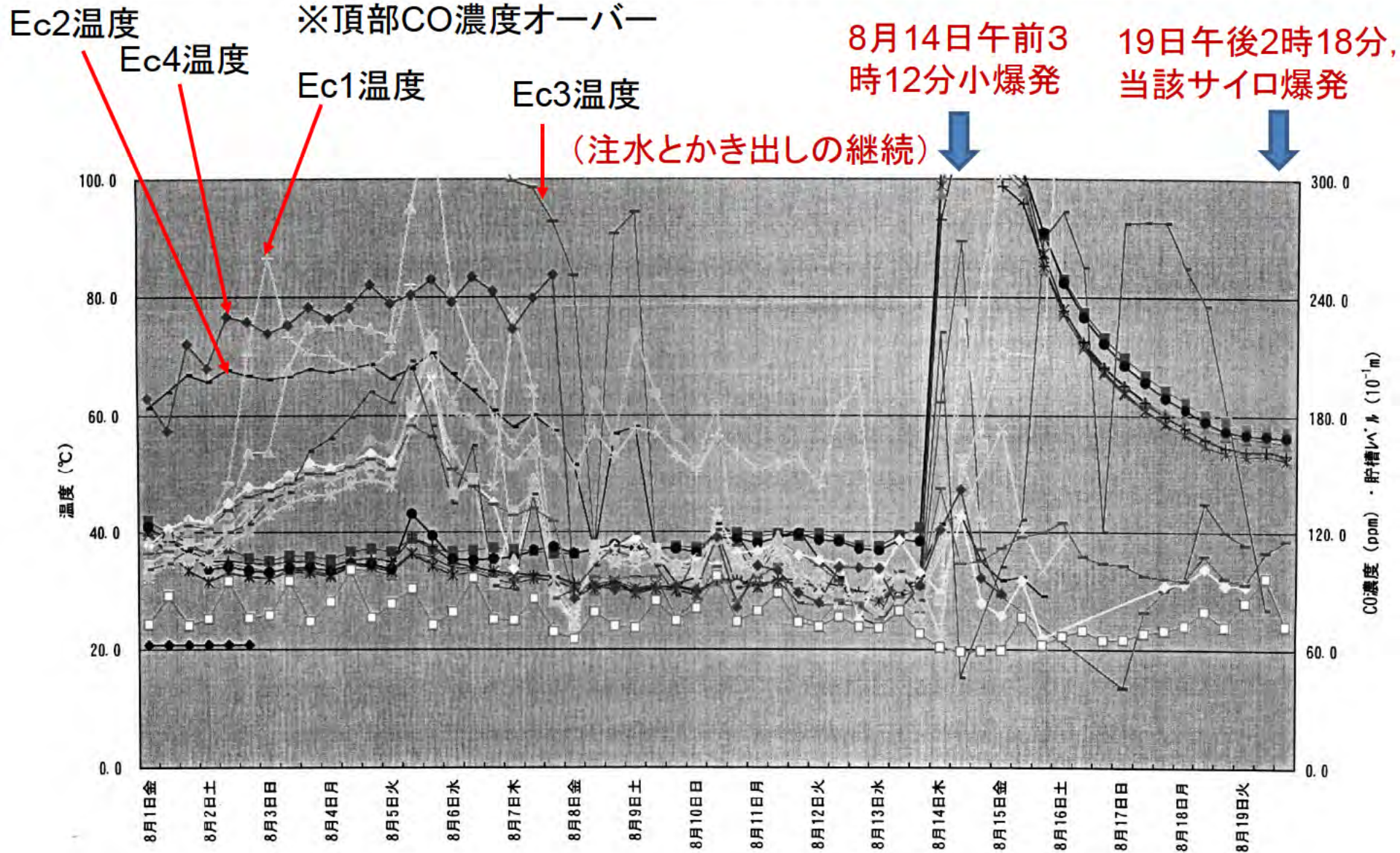
# サイロ内の温度・CO濃度の変化(7月) (発電所による測定)



27日以降センターコーン側の温度計が上昇



# サイロ内の温度・CO濃度の変化(8月) (発電所による測定)



# 検証実験：RDFのくすぶりの燃焼の際の発生ガス

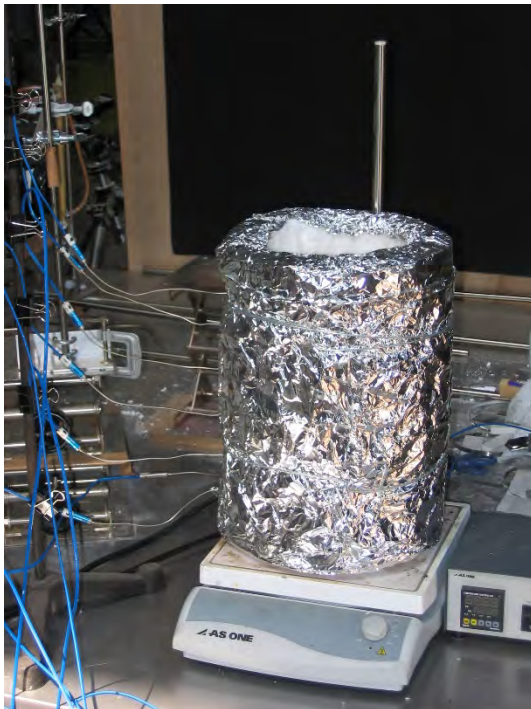
下表に示した分析対象ガスはH<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>である。ただし、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>とC<sub>2</sub>H<sub>6</sub>は検出されなかったので表に加えなかった。

実験番号	ガス成分(%)					
	実験条件	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
1	試料No.3のRDFを粗破 砕したもの 15mm堆積	0	17.3	0.484 (4840 ppm)	0.0352	0.00408
2	試料No.9のRDF 中容器(ステンレス, 側 壁からの通気性なし) 150mm堆積	0	17.1	0.546 (5460 ppm)	0.0659	0
3と4	試料No.9のRDF セラミックスウール(通 気性あり)中容器サイズ 150mm堆積	0	19.0	0.0629 (629 ppm)	0	0
		0	19.6	0.00375 (37.5 ppm)	0	0
5	試料No.7のRDF セラミックスウール(通 気性あり)中容器サイズ 150mm	0	19.0	0.0728 (728 ppm)	0	0

◆ RDFの種類によっては、密閉保管中に温度が高くと、COや水素が発生することがある(燃焼せずに)。

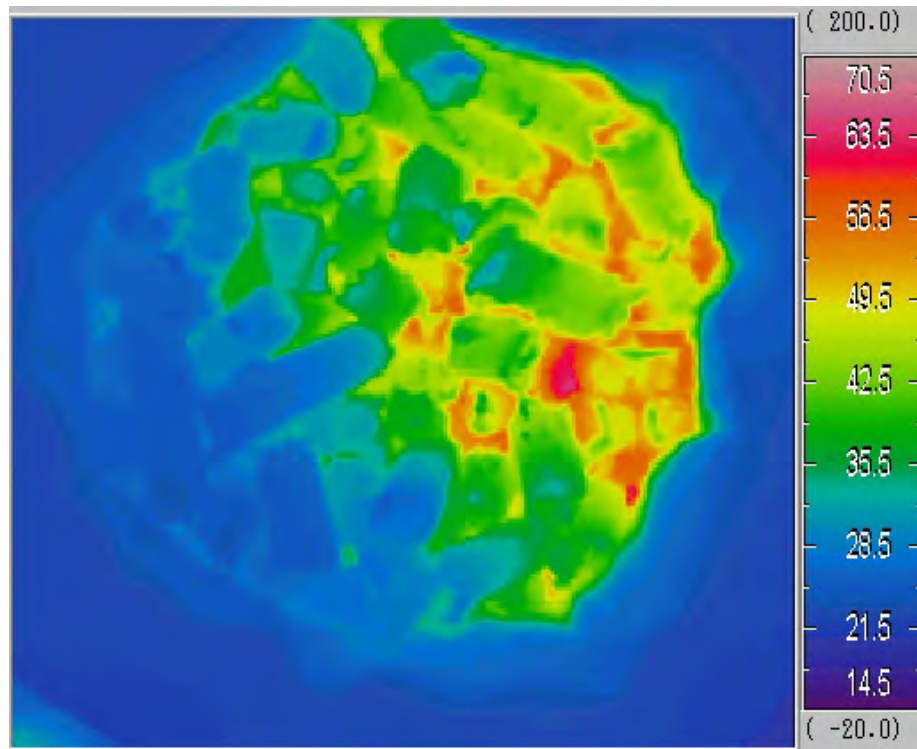


# 検証実験の様子



煙は「燃焼ガス」と、未燃焼の「熱分解ガス」であり、種火を与えると燃え出す。

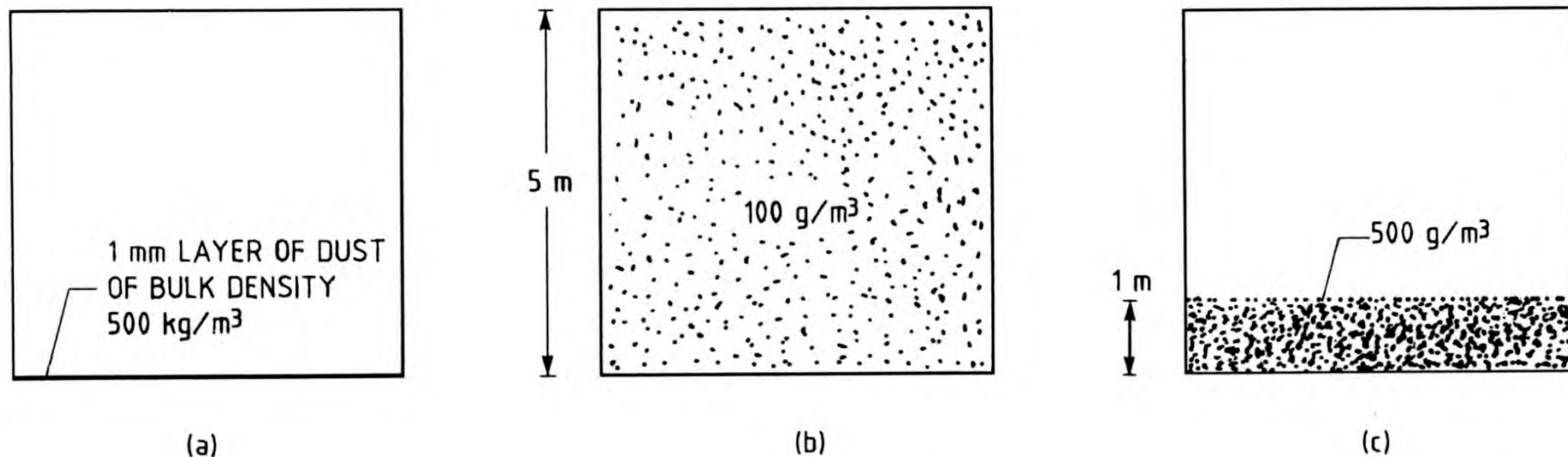
# 堆積層表面の熱画像の例(実験1, t = 8h10m)



- ◆ 非接触の赤外線温度測定により燃え拡がり挙動を確認できるのは、堆積表面から20 cm程度である。
- ◆ 層内部の発熱挙動あるいは燃焼挙動を赤外線熱画像装置で監視できるのは、層の表面付近に限定され、層深部で生じる発熱の端緒を発見することは困難ではないかと考えられる。

1. 近年の化学工場での重大災害, 非定常作業における労働災害
2. 消火作業などにおける災害
3. 蓄熱発火した後, 消火作業中に発生した爆発災害と検証実験
4. 粉じん爆発, 粉体火災
5. 燃焼ガス
6. トラブル対処

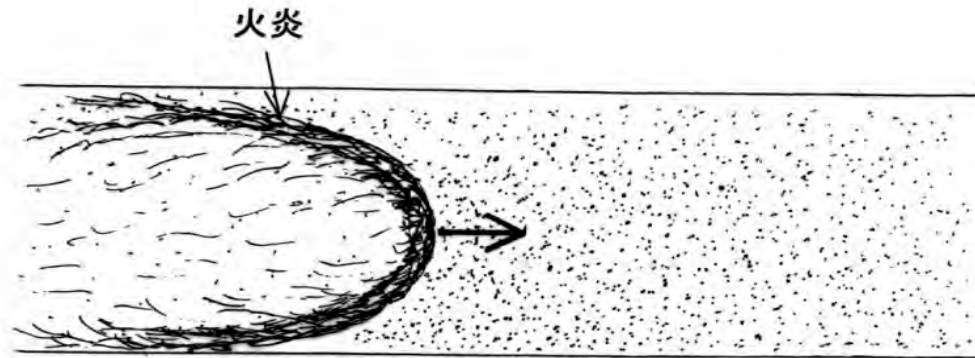
# 堆積した粉じんの舞い上がりによる爆発



1 mmだけ堆積した粉じんも舞い上がれば粉じん爆発を生じる原因となる。



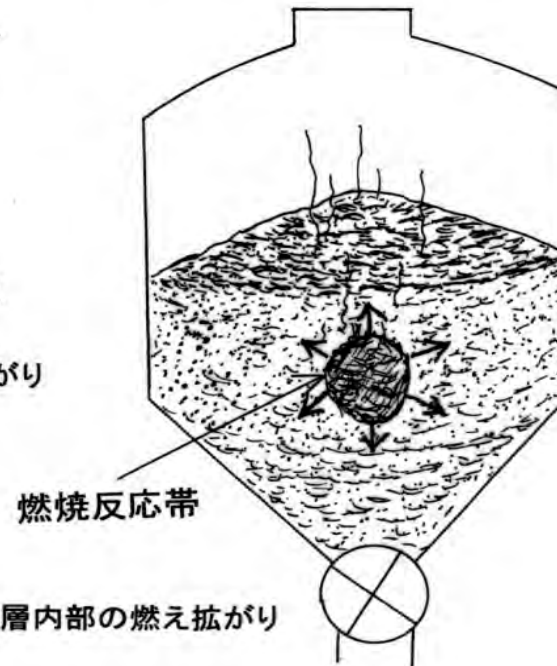
# 粉じん爆発と粉体の火災に見られる火炎が伝ば現象



(a) 浮遊粉じん雲中の火炎の伝ば

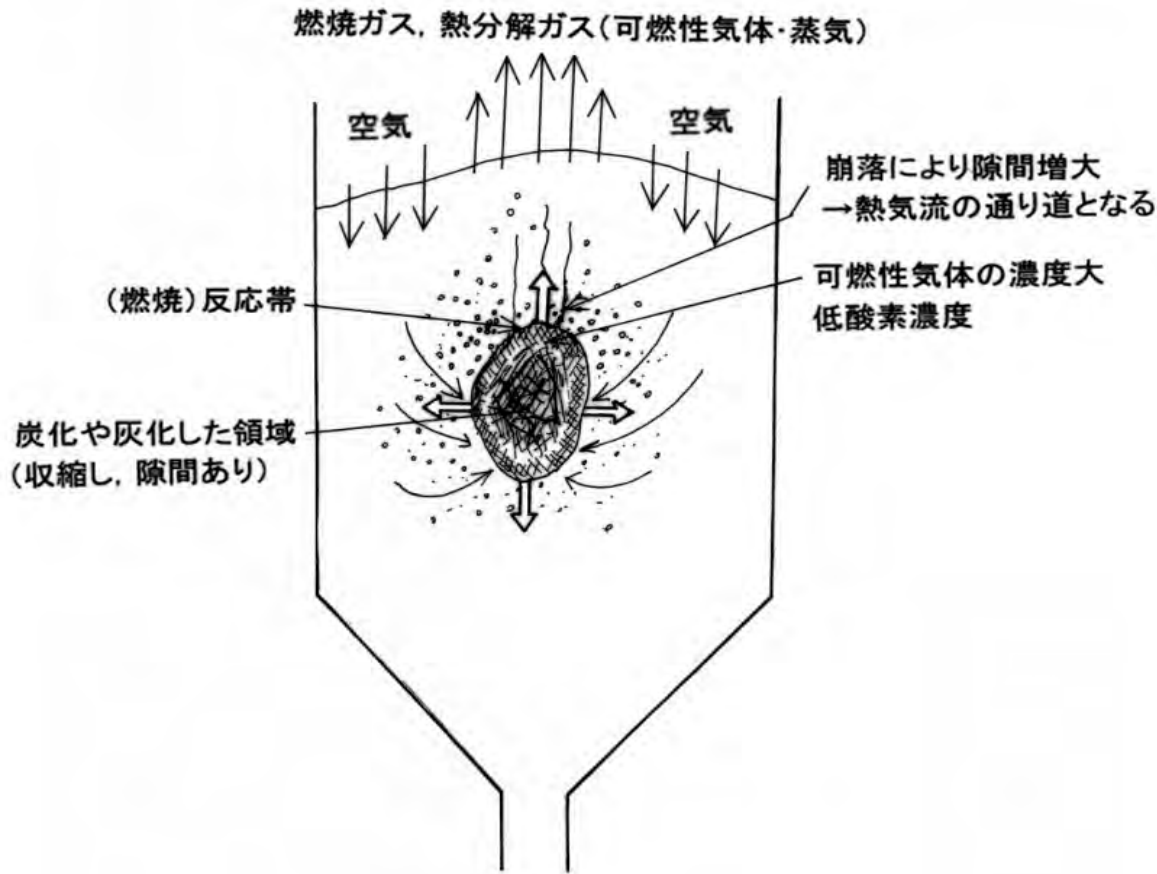


(b) 堆積した粉体層表面に沿った燃え拡がり



(c) 粉体層内部の燃え拡がり

# サイロ内，粉体層内の燃え拡がりの模式図



◆有機物のくん焼状態における燃焼温度は550から750℃程度である。

◆燃え拡がりは燃焼反応帯への酸素の供給が律速であり，発熱速度と熱の移動速度(放散速度)が平衡して進む。

◆層内でのくん焼における燃え拡がりの速度は0.01mm/s程度である。

◆ 消火作業中に火傷，酸欠，中毒になったり，火炎が大きくなったり，粉が舞い上がって爆発して被災することがある。

# サイロ内，粉体層内での火災の危険性

- ◆ 層内で蓄熱から発火した場合は，火災が発見されるまで時間を要する場合が多い。火災の発見は，ほとんどの場合，煙や臭いの発生による。COセンサーを設けているサイロもある。
- ◆ 着火源としては発熱を伴う反応，高温熱面，飛び火（燃焼粒子）が代表例である。
- ◆ 燃焼形態ではくん焼（くすぶり燃焼：無炎）が多く，火災の拡大は通気性に強く依存する。堆積層が崩落して，空気が流入しやすくなると，無炎（くん焼から有炎に変化するなど，燃焼の様相が変わる。消火作業中に被災する危険性が非常に高くなる。
- ◆ 粉体の火災では爆発に比べ，有害性ガス，可燃性の熱分解ガスを多く発生する。このときの煙は，すすや水蒸気だけではなく，可燃性の熱分解ガス（蒸気）であることも多く，滞留によってガス爆発が発生する危険性がある。
- ◆ 燃焼の過程が変化しやすい。  
火災→爆発へ，爆発→火災へ遷移

# 粉体火災の特徴と注意点(1/3)

## (可燃性気体・蒸気の発生からガス爆発の発生危険性①)

- ◆ 火炎が消えても、くん焼がおさまっても油断ができないのは、粉体がまだ温度が高い状態にあれば、有機物の場合、熱分解や解重合によって可燃性の気体や蒸気を発生している可能性があるということである。これは着火源となる種火を与えれば容易に着火することを意味する。
- ◆ くん焼では不完全燃焼をしており、一酸化炭素や熱分解ガス(炭化水素ガス)の発生、また、粉体の成分によっては有害なガスが発生する可能性がある。高温状態で予想できない物質が副生成物として発生する。よく知られるように一酸化炭素は有害性であり、可燃性でもある。
- ◆ 最近の粉体の中には表面処理や複合化などにより、機能性を付与した粉体などが製造され、複数の化学物質から構成されたものもある。また、特に近年取扱量が増加している廃棄物リサイクル工程で扱われるプラスチック類は多成分であり、熱分解温度、発熱温度、発火温度などが異なるため危険性が増している。  
→SDS(安全データシート)で調べるとともに、混合物などでSDSがないものは独自に測定を行い、危険性データを収集する必要がある。

## 粉体火災の特徴と注意点(2/3)

### (可燃性気体・蒸気の発生からガス爆発の発生危険性②)

- ◆火災の際に煙として見えるのは、すすあるいは水蒸気だけではなく、熱分解や解重合などで発生した可燃性(未燃焼)の気体や蒸気であることにも注意が必要である。このような気体や蒸気は装置壁面などにタール状となって付着する。
- ◆ガス爆発とならなくとも、密閉した貯蔵容器内で気体が大量に発生すると体積膨張で破裂が生じることがある。  
その後、有害性のガスが周囲に漏えいする。



# 粉体火災の特徴と注意点(3/3)

## (消火作業において)

◆サイロのような密閉した空間での燃え拡がりでは、酸素不足によりいずれ消えていくことが予想される。密閉した空間での酸素のしゃ断は、有効な消火法の一つである。消火には時間を要する(次図)。

◆消火作業では粉じんが舞い上がりやすく、爆発にいたる事例は多い。

◆水の使用の是非を検討する。

◆密閉した空間ではほかに可燃性気体の発生と滞留を疑ってみるべきである。

可燃性の気体や蒸気が充満していて、点検口など一部の開口から新鮮な空気が内部に流入することで燃焼範囲の混合気を形成する。このとき、どこかでくすぶっている箇所があり、空気の流入によって火炎が形成されるとそれが着火源となり、ガス爆発が発生することがある。過去の事故災害事例では、サイロ内に入って燃えかすのかき落とし作業中に粉体堆積層がくずれ、小爆発が生じたことがある。

# 小麦ふすまペレットのサイロ火災

## <窒素と二酸化炭素を使って3週間かけて鎮火した例>

壊れたサイロの屋根

DESTROYED  
SILO CELL  
ROOF

高さ38.6 m

38.4 m

二酸化炭素注入

CO<sub>2</sub> INLET TUBE

窒素注入

N<sub>2</sub> INLET TUBE

◆ 燃え広がりはゆっくり進行するので、消火に拙速は禁物である。

1. 近年の化学工場での重大災害，非定常作業における労働災害
2. 消火作業などにおける災害
3. 蓄熱発火した後，消火作業中に発生した爆発災害と検証実験
4. 粉じん爆発，粉体火災
5. 燃焼ガス
6. トラブル対処

# 高分子の燃焼\*1生成ガスの例

試料 (0.1 g)	空気供給量 (l/h)	燃焼生成ガス (mg/ 試料 1 g)											ガス化率*2 (%)
		HCl	CO <sub>2</sub>	CO	COS	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>	HCN	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
ポリエチレン*3	100		738	210						72	185	34	62.5
	50		502	195						65	187	9.5	51.2
ポリスチレン	100		619	178						6.5	18	13	30.0
	50		590	207						6.5	16	6.4	29.7
ポリ塩化ビニル	100	286	657	177								11	69.3
	50	279	594	207						6.5	2.3	6.4	68.8
ナイロン-66	100		590	205				9.8	31	40	94	15	60.7
	50		563	194				3.5	26	39	82	7.4	55.7
ポリアクリル酸アミド	100		796	157				17	18	16	10	8.5	63.3
	50		738	173				32	21	20	13	4.2	62.1
ポリアクリロニトリル	100		556	108					56	5.9		7.4	37.7
	50		630	132					59	7.8		4.2	42.7

HCl: 塩化水素, CO<sub>2</sub>: 二酸化炭素, CO: 一酸化炭素, COS: 硫化カルボニル, SO<sub>2</sub>: 二酸化硫黄, N<sub>2</sub>O: 亜酸化窒素, NH<sub>3</sub>: アンモニア, HCN: シアン化水素, CH<sub>4</sub>: メタン, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>: エチレン, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>: アセチレン

\* 単位換算: 1 mg/g = 0.1 % = 1000 ppm

例) ポリエチレン: CO 濃度 738 mg/g = 73.8 %

# つづき

試料 (0.1 g)	空 気 供給量 (l/h)	燃焼生成ガス (mg/ 試料 1 g)											ガス化 率* <sup>2</sup> (%)
		HCl	CO <sub>2</sub>	CO	COS	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>	HCN	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
ポリウレタン* <sup>4</sup>	100		666	173					3.3	21	43	14	51.4
	50		625	160					1.1	17	37	6.4	44.5
ポリフェニレンスルフィド	100		1796	161	2.5	423						2.1	85.1
	50		1892	219	2.5	451						1.1	92.7
エポキシ樹脂* <sup>5</sup>	100		1138	153					2.2	16	2.3	7.4	52.9
	50		961	228					3.3	33	4.6	6.4	52.7
尿素樹脂	100		1193										96.7
	50		980	80					22				92.5
メラミン樹脂* <sup>6</sup>	100		576	194			34	84	96				81.8
	50		702	190			27	136	59				86.6



\*<sup>1</sup> 加熱温度：700℃，ただし尿素樹脂のみ 800℃；\*<sup>2</sup>ガス化率：[(定量された全成分中の炭素の重量/試料中の炭素の重量) × 100]；\*<sup>3</sup>ベンゼンおよびプロピレンが検出された；\*<sup>4</sup>ポリエステル系ポリウレタン（トリレンジイソアネート系）；\*<sup>5</sup>ジアミノジフェニルメタン（30 phr）硬化エポキシ樹脂；\*<sup>6</sup>メラミン樹脂の場合，燃焼しなかったため，熱分解生成ガスの組成を示している。

◆ COが大量に発生することに注意する。



# 急性一酸化炭素中毒症状

大気中 CO 濃度 (%)	吸入時間	CO-Hb 濃度 (%)	影 響
0.01~0.02 (100~200ppm)	—	10~20	比較的に強度の筋肉労働時間呼吸促迫, 時に軽い頭痛
0.02~0.03	5~6時間	20~30	頭痛, 耳鳴り, 眼失閃発
0.03~0.06	4~5時間	30~40	激しい頭痛, 悪心, 嘔吐, 外表の鮮紅色, やがて運動能力を失う
0.07~0.10	3~4時間	40~50	頻脈, 呼吸数増加, やがて意識障害
0.11~0.15	1.5~3時間	50~60	チェーンストーク呼吸, 間代性痙攣を伴い昏睡, 意識消失, 失禁
0.16~0.30	1~1.5時間	60~70	呼吸微弱, 心機能低下, 血圧低下, 時に死亡
0.50~1.00 (5000~10,000ppm)	1~2分	70~80	反射低下, 呼吸障害, 死亡

ス

# 燃焼ガスの許容濃度と致死的曝露時間

生成ガス	許容濃度 (ppm)	致死的曝露時間/ppm				
		数分間	10分	30分	60分	短時間
CO	50				4000	
HCN	10	270	180	135	110	
HCl	5	2000	500			
CH <sub>2</sub> (=CHCHO)	0.1		150			10
NO <sub>2</sub>	3	250		100	~ 150	
HCHO	1					
CO <sub>2</sub>	0.5(%)	30(%)				
NH <sub>3</sub>	50					5000~10000
H <sub>2</sub> S	10	700 ↑		400~700		
SO <sub>2</sub>	5	2000				

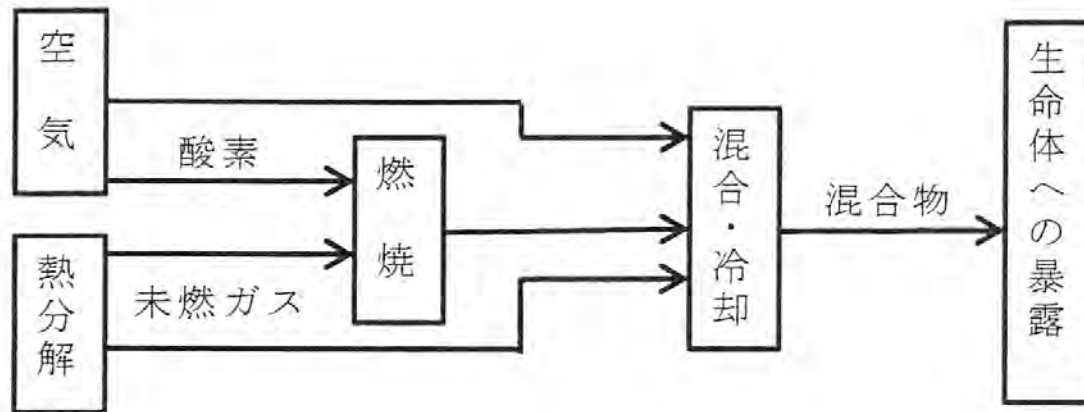
HCN:シアン化水素, CH<sub>2</sub>=CHCHO:アクロレイン(C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O), NO<sub>2</sub>:二酸化窒素,  
HCHO:ホルムアルデヒド, H<sub>2</sub>S:硫化水素

# モデル火災実験による結果より

建物内のCO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>濃度など分析結果より以下のことが明らかになっている。

- ◆ 燃焼に伴い, O<sub>2</sub>濃度が低下し, CO, CO<sub>2</sub>濃度, 温度, 煙濃度が増加すること。
- ◆ COに対するCO<sub>2</sub>の生成量は, 閉窓時よりも開窓時のほうが非常に大きいこと。
- ◆ 火災室またはその付近では, 人間にとって非常に厳しい状況にあり, COは5%以上, CO<sub>2</sub>は15%にもあり, O<sub>2</sub>濃度は2~3%にまで低下すること。このときの室内の温度は700~800°Cに達する。
- ◆ 問題は, 火災室からかなり離れ, 火の熱の影響をほとんど受けない場所で, 有害ガス, 例えば, COの濃度が高くなることである。

# 火災時の有害ガス生成のメカニズムに関する仲谷\*による考察



- ◆ 火災時の有害ガスの濃度に関する実大火災実験によると、**CO 5.61%**、**CO<sub>2</sub> 15%**、**O<sub>2</sub> 2.27%**という結果が得られている。これは化学平衡計算によると、約2200°C (2570K)に相当する。  
→これは火災室の温度をはるかに超えるもので、単なる化学平衡計算では説明できない。
- ◆ 実火災においては、工業用の燃焼バーナーとは異なり、未燃ガスと空気との混合が十分に行なわれているとはいえない。
- ◆ 小型の燃焼試験装置(規格試験)では、(未燃焼の)熱分解ガスは燃焼の影響を受けるので、容易に有害ガスが発生するとはいえない。  
→適切なモデル化により、作為的な状態を作り出す試験装置が必要がある。

# 爆発や火災の後の消火確認，残火処理など

- ◆ 消火の確認のために装置内部に侵入する際には，酸欠や一酸化炭素などの有害ガスによる中毒に注意が必要である。
- ◆ 装置の扉を開けたことで，新鮮な空気の流入で再燃したり，粉が舞い上がって粉じん爆発が生じたりする可能性がある。
- ◆ 残り火の確認にはガス検知警報器を携行し，それとともに必要な保護具を身に着けて慎重に構えて入り，不用意に装置の扉を開かないほうがよい。
- ◆ 携帯型のガス検知警報器のアラームが鳴った場合は，自身の動作が着火源となる危険性が高まる。
- ◆ 固定型のガス検知警報器のアラームが鳴った場合は，まずは離れた場所で状況を確認し，不用意に現場に駆け付けない。



1. 近年の化学工場での重大災害, 非定常作業における労働災害
2. 消火作業などにおける災害
3. 蓄熱発火した後, 消火作業中に発生した爆発災害と検証実験
4. 粉じん爆発, 粉体火災
5. 燃焼ガス
6. **トラブル対処**

# 緊急時対応に関して

- ◆ アラームの洪水  
ランク付け
- ◆ 計測機器の指示のずれ  
プロセスの特性の把握, 運転条件の適切な調整, 誤操作の防止,  
異常発生 of 判断
- ◆ 緊急停止の操作  
停止の判断の明確化, 権限, 誤操作の防止, 制御盤の誤操作後の  
対応方法
- ◆ 緊急停止の設備  
安全装置の電源系統, 制御系の分離, 安全な場所での操作
- ◆ 適切な保護具  
呼吸用保護具の選定, 安全帯, 手袋の使用
- ◆ プロセス流体の緊急排出  
バルブ操作, 誤操作の防止

## ◆ 事象の把握

爆発, 火災, 漏えいなどの理解, 進展事象の予測

## ◆ チームの構成

リーダーの指揮統制, 情報の共有, 単独行動の防止, 作業の指名

## ◆ 想定外のトラブル対処

対応訓練の実施, 訓練シミュレータ活用, 問題と解決の反復学習, 個々人の高い能力(知識, 経験, 日々の観察(五感), 洞察, 機転, コミュニケーション, 発声, 体力, 精神など)

## ◆ タイムリーな意思決定

「生命に対する危険の大きさが, 行動の適否を決める。危険が小さい場合には, 何もしないで様子見をしておいたほうが, あわてて何か大それたことをするよりも安全な場合がある。

(中略)

重要なのは, 事態の危険性を客観的に評価するための知性と, 危険度の評価から導かれた結論を, 果敢に実行するための勇気である。」(広瀬弘忠:「人はなぜ逃げ遅れるのか」, 2004)

# トラブル対処：現象進展の把握のために

- ◆ 取り扱う物質の物性，危険・有害性の把握
- ◆ 発熱開始温度，発熱量，最大加熱発熱速度などを予め把握し，起こりえる暴走反応のモデル化
- ◆ 取り扱う物質に関する情報がSDSに全て記載されているわけではないため，文献調査，実測によるデータ収集
- ◆ 混合危険性などはSDSでの情報は不十分であることが多く，タンク内で副生しうる物質や，構造材，混入物(さび等)との反応も考慮し，実測する
  
- ◆ 反応，燃焼，爆発，火災，蒸気雲爆発，漏えいなどの事象の理解
  
- ◆ 機器・設備の理解
  
- ◆ プロセスの運転条件，作動環境の理解
- ◆ 貯蔵量や漏えい量に対する影響度の評価  
安全な距離，退避までの時間
  
- ◆ 抑制，防護，被害の局限化を図る措置

# トラブル対処：現象進展の把握のために

- ◆ 取り扱う物質の物性，危険・有害性の把握
- ◆ 発熱開始温度，発熱量，最大加熱発熱速度などを予め把握し，起こりえる暴走反応のモデル化
- ◆ 取り扱う物質に関する情報がSDSに全て記載されているわけではないため，文献調査，実測によるデータ収集
- ◆ 混合危険性などはSDSでの情報は不十分であることが多く，タンク内で副生しうる物質や，構造材，混入物(さび等)との反応も考慮し，実測する
- ◆ 反応，燃焼，爆発，火災，蒸気雲爆発，漏えいなどの事象の理解
- ◆ 機器・設備の理解
- ◆ プロセスの運転条件，作動環境の理解
- ◆ 貯蔵量や漏えい量に対する影響度の評価

## 【常時】 異常検知

- ◆ 温度
- ◆ ガス濃度
- ◆ 風速・風向
- ◆ 監視カメラ
- ◆ 通信，警報システム

る措置

## 【緊急時】 事故対応マニュアル

(しかし，マニュアルの想定を超える状況にも対処する必要ある)

- ◆ 連絡体制
- ◆ 要員確保
- ◆ 保護具や警報器等の着用
- ◆ 退避経路の確保
- ◆ 消防動線の確保



# グループで現在取り組んでいる課題研究

トラブル対処作業における爆発・火災の予測及び防止に関する研究(4年間:  
2018年4月~2022年3月)

ガスの測定  
温度  
成分と濃度

層内の温度測定  
(温度上昇の把握)

異常発生  
の  
検出の方法

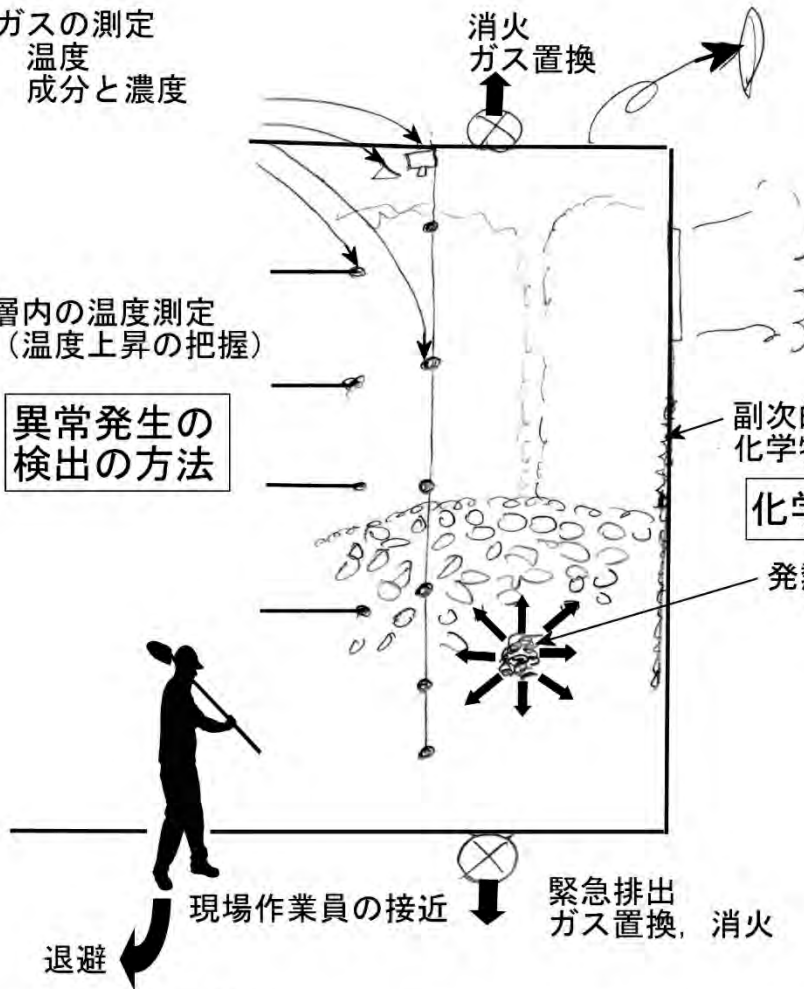
退避

退避までの時間  
安全な距離

異常事象、破裂、爆発、火災等の発生時の

トラブル対処の方法

消火  
ガス置換



<破裂, 爆発時>

- ・爆風
- ・飛しょう物
- ・火炎の噴出
- ・内容物の漏えい
- ・副次的な反応で生じた化学物質の漏えい

被害予測  
被害軽減・拡大防止の方法

副次的な反応や異常反応で生じた  
化学物質(液体, 固体)

化学物質の詳細な発熱特性の把握

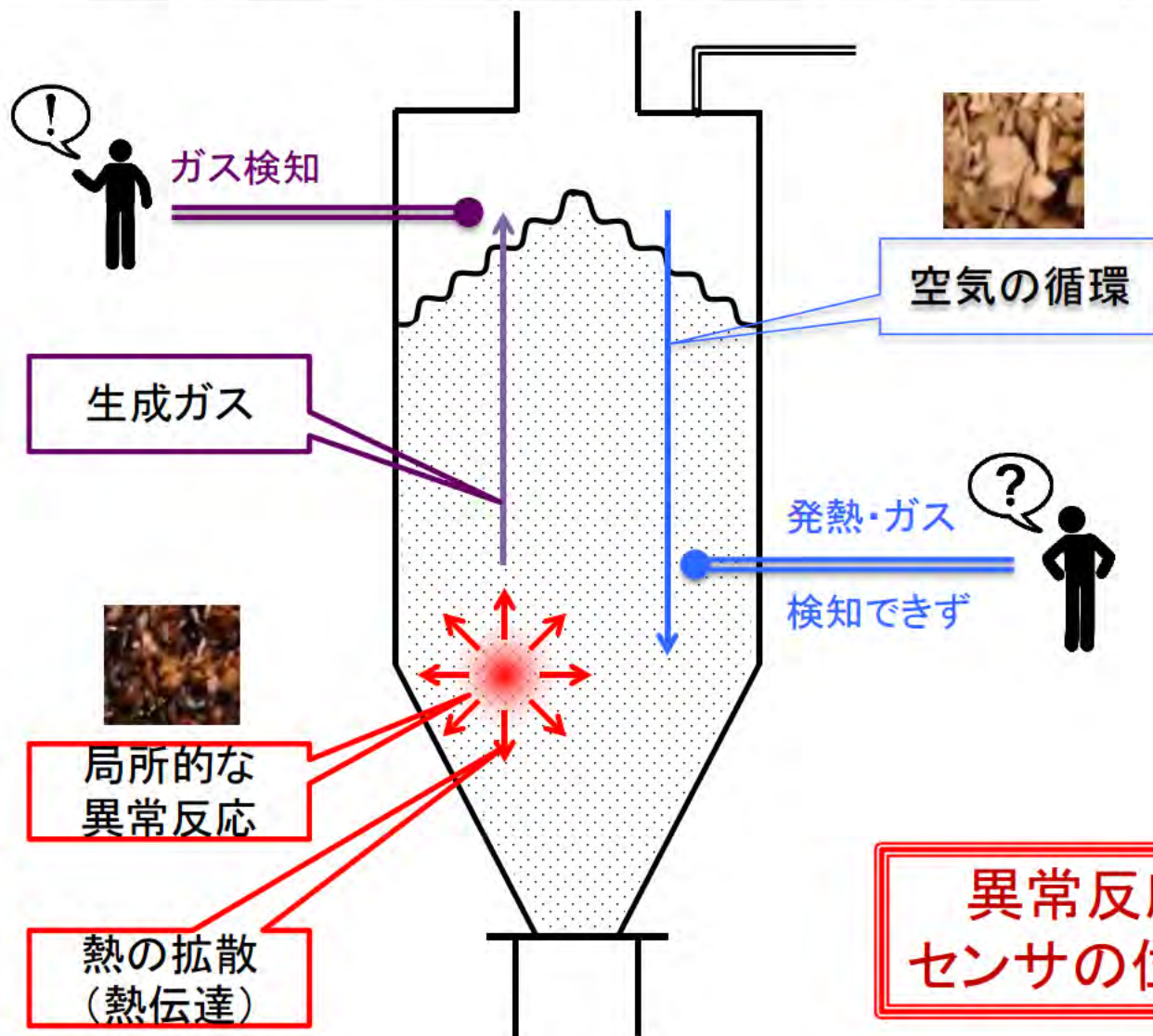
発熱

発火→くん焼→火災, 爆発

爆発

進展事象の把握

# 化学物質が充填された設備内での異常反応(初期)とその検出

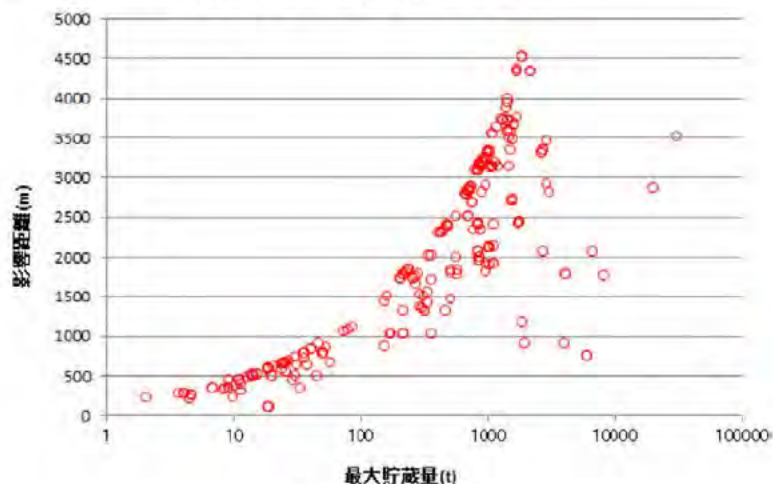


# 堆積している粉粒体の燃焼によって起こり得る事象

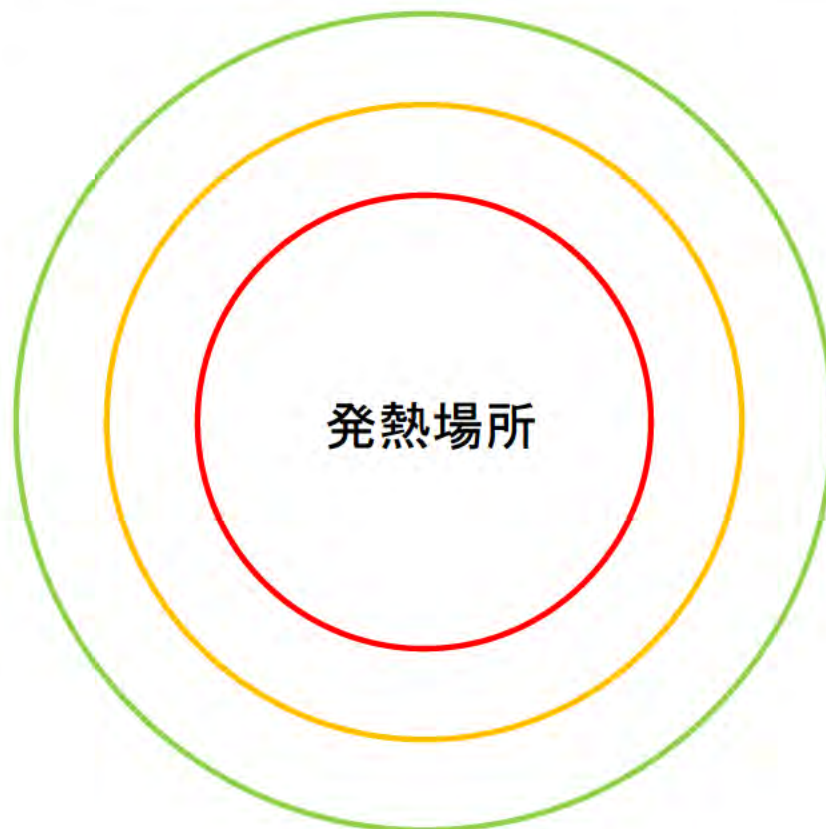
- 発生した可燃性ガスへの着火・燃焼(フラッシュ・ファイヤー)
- 構造体(貯槽等)の破損による爆風
- 構造体(貯槽等)の破損による破片の飛散



過去の事故事例等で原因となるガス種, 量等を絞り込むことで, 上記事象の影響距離を概算



異常時の被災を防ぐための安全な距離を提案





# 総合的な考察：予測，影響などを評価するために

適切なトラブル対処を行うには、「事前に予測できていること」が必要である。

- ◆ 災害の事例調査や各サブテーマの研究成果などを総合的に考察
- ◆ 発熱測定手法の開発
- ◆ 起こりうる事象の予測
- ◆ 影響評価スプレッドシートの作成  
熱放射，爆風，過圧，飛散物，漏えい，（毒性）
- ◆ 予防と拡大防止対策の検討  
発熱・発火防止策，発火した場合の対処方法，避難のための時間  
と安全な距離，爆風や飛しょう物による被害予測・対策など
- ◆ 災害情報を提示するツールの提供
- ◆ 技術資料・安全ガイドの作成

トラブル対処に関する適正な情報の提供  
必要な設備・装備の決定  
対処する作業員の決定  
トラブル対処戦略の決定

## 参考となる文献

- ① 化学設備の非定常作業における安全ー「化学設備の非定常作業における安全衛生対策のためのガイドライン」の見直しに関する調査研究報告書ー, 中央労働災害防止協会, 平成27(2015)年3月
- ② 自衛防災組織等の防災要員のための標準的な教育テキスト, 自衛防災組織等の教育・研修のあり方調査検討会, 総務省消防庁, 平成30(2018)年3月
- ③ 労働省安全衛生部安全課編: 非定常作業の安全ーガイドラインと解説ー, 中央労働災害防止協会(1998)
- ④ 職場のあんぜんサイト, 厚生労働省ホームページ
- ⑤ 爆発火災データベースの公開(第4次), 労働安全衛生総合研究所,
- ⑥ 石油コンビナートの防災アセスメント指針, 消防庁(2013)
- ⑦ Emergency Response Guidebook (ERG) 2016, United States Department of Transportation (DOT)
- ⑧ TNO: Yellow Book: Methods for calculation of physical effects, CPR 14E(2005)
- ⑨ 一般財団法人海上災害防止センター <http://www.mdpc.or.jp>
- ⑩ 保安防災・労働安全衛生活動ベストプラクティス集ー日化協 安全表彰受賞事業所の取組み事例ー, 平成25年9月, 一般社団法人日本化学工業協会



# まとめ

- ◆ 本講では、非定常作業における労働災害として「トラブル対処」を取り上げた。トラブル対処作業での災害は爆発や火災よりも、はさまれ・巻き込まれ、墜落・転落の割合が高い。
- ◆ トラブル対処として、消火作業中に作業員が被災した事例を調べ、検討を加えた。
- ◆ 火災が発生によると有害な燃焼ガスが発生すること、火災が起きている場所から離れていてもCOなどは高い濃度になる可能性を説明した。
- ◆ 化学工場に限らず産業現場の中には、適切に対処したことで大きな事故や災害にならずに済んだ、部外の者が知らないような好事例を有している事業場もあろうかと思われる。労働安全衛生総合研究所では、引き続き爆発、火災、漏えい等の観点から事故対応マニュアル作成に役に立つ情報を収集していきたい。