



使用済み燃料被覆管せん断片(ハル)等の 高圧縮試験(Ⅱ)

小嶋 裕 倉形光一郎 石川 一富* 須藤 光男* 根岸 達也*

東海事業所 再処理センター 技術部
*検査開発株式会社

Compaction Test of Hulls and Fuel Structure Waste(Ⅱ)

Hiroshi KOJIMA Kouichiro KURAKATA Kazutomi ISHIKAWA* Mitsuo SUDO* Tatsuya NEGISHI

Technology Co-ordination Division, Tokai Reprocessing Center, Tokai Works
* Inspection Development Corporation

再処理施設で発生するハル（使用済み燃料被覆管せん断片）等廃棄物の圧縮減容処理に伴って圧縮時に発生する金属粉じん（ジルカロイファイン）は非常に酸化しやすく、火災・爆発が考えられることから、圧縮処理技術開発の一環としてジルカロイファインの粉じん火災・爆発に関する試験を行った。本レポートは、模擬ジルカロイファインを用い、Hartmann試験装置、30L球形爆発試験装置、Godbert-greenwald試験装置にて、最小着火エネルギー、爆発限界酸素濃度、最低発火温度、最大爆発圧力、爆発の激しさを示す指標である K_{st} 値の測定結果を報告する。

Pyrophoric metal dust (Zircaloy Fines) is generated in the hull and fuel structure compaction process in the reprocessing plant. This dust has the potentiality to catch fire or explode. This report describes the experimental results which characterize the pyrophoric properties of this dust. This report has been written concerning the ignited and exploded conditions of this dust. Measured values are the Minimum Ignition Energy, the Limiting Oxygen Concentration for Dust Explosion, the Minimum Ignition Temperature, the Maximum Explosion Pressure and the K_{st} value. The Hartmann test equipment, the explosion test equipment of a 30-L sphere vessel and Godbert-Greenwald test equipment have been used.

キーワード

圧縮処理、ジルカロイファイン、粉じん層、粉じん雲、最低発着火温度、最小着火エネルギー、爆発限界酸素濃度、最大爆発圧力、最大爆発圧力上昇速度、 K_{st} 値

Press Compaction, Capsule Press, Zircaloy Fines, Volume of Generating Metal Dust, Granular, Dust Layer, Dust Cloud, Ignition Point, Minimum Ignition Energy, Limiting Oxygen Concentration for Dust Explosion, Maximum Explosion Pressure, K_{st}



小嶋 裕

技術開発課，研究開発チーム所属
副主任研究員
エクストルーダの凝集挙動と析出塩の評価，アスファルト固化体の熱流動解析に従事



倉形光一郎

技術開発課，研究開発チームリーダ，副主任研究員
研究開発チーム業務の取りまとめ，再処理センターにおけるOHSMS, EMS認証取得に向けた取りまとめに従事



石川 一富

検査開発株式会社主管
現在は、プルトニウム燃料センターで燃料製造機器開発に従事



須藤 光男

検査開発株式会社主任
現在は、日本原燃株式会社に出向においてユーティリティに関する業務に従事



根岸 達也

検査開発株式会社
現在は、UWTFにおける処理設備に従事

1. はじめに

再処理施設から発生する固体廃棄物の“使用済み燃料被覆管せん断片（ハル）及び燃料集合体端末部（以下、合せたものをハル等廃棄物）”は、欧州においては圧縮処理する方向に向かっている。フランスにおいては高圧縮処理（一軸圧縮）する計画であり、イギリスでは薄層圧縮（板状に押潰す）しセメント固化処理する計画である¹⁾。

サイクル機構においても貯蔵効率、処理技術の進捗状況、海外の処理方針の動向等を考慮し、1998年まで高圧縮処理する計画を進めてきた。当機構では、この高圧縮処理技術を確立するため、いくつかの実証試験を実施してきた。

“使用済み燃料被覆管せん断片（ハル）等の高圧縮試験（Ⅰ）”では、高圧縮処理による圧縮力と減容比の関係や圧縮固化体内部の空洞状況及び、圧縮処理によりハル破砕粉が発生することを報告した。燃料被覆管は原子炉内で水素やヨウ素の吸蔵や中性子照射等により脆化しており³⁾、ハル破砕粉が発生しやすいという、98wt%程度が非常に活性な金属のジルコニウムであるため、ハル破砕粉が発生することは、粉じん爆発などを起こす可能性がある。

以上より、圧縮処理法の安全性をより高めるためハル破砕粉（以下ジルカロイファイン）の爆発及び着火・発火特性を評価する試験を実施した。本報告は、これらの試験結果をまとめたものである。

2. 試験方法・結果及び考察

本試験では、模擬ジルカロイファインの粉じん雲状態（粉じんが大気中に分散した状態）の爆発特性と発火特性について測定を行った。

それぞれの試験項目とその関係を図1に示す。模擬ジルカロイファインの爆発特性については、最大圧力（MPa）、最大圧力上昇速度（MPa/s）、爆発限界酸素濃度（vol%）、 K_{st} 値（Pa・m/s爆発の激しさを示す値）の測定を行った。模擬ジルカロイファインの発火特性については、最低発火温度（℃）の測定を行った。

2.1 被試験体（模擬ジルカロイファイン）の製作

模擬ジルカロイファインを製作するに当たり、動力炉・核燃料開発事業団（現サイクル機構）で実施した使用済み燃料被覆管の圧縮処理試験⁴⁾によって得られたジルカロイファインの粒径と粒子

形状を参考にした。また、本試験では、模擬ジルカロイファイン自体の特性を測定するため、被試験体は全て金属状態とした。

本試験で用いた模擬試験体（模擬ジルカロイファイン）は以下の方法で製作した。

- ① 未使用の燃料被覆材（ジルカロイ [Zry-2]）を高温高圧環境の水素雰囲気の中炉に置き水素を極力多く吸蔵させることで脆化させる。
- ② 脆化した燃料被覆管を力量300tの油圧プレス機にて圧縮し、圧壊する。
- ③ 圧縮破壊したときに発生した破片を回収する。
- ④ この破片を高温低圧の環境にし、脱水素処理する。
- ⑤ この試料を篩で分粒し、平均が50 μ mになるよう混ぜ合わせる。
- ⑥ この試料の一部をサンプリングし、水素吸蔵量が50ppm以下であることを確認する（燃料被覆管に吸蔵される水素量は100ppm程度⁵⁾であり、ジルコニウムが水素と結合することで着火エネルギーが高くなるため、極力水素吸蔵量を抑える）。

この模擬ジルカロイファインの粒径分布及び粒

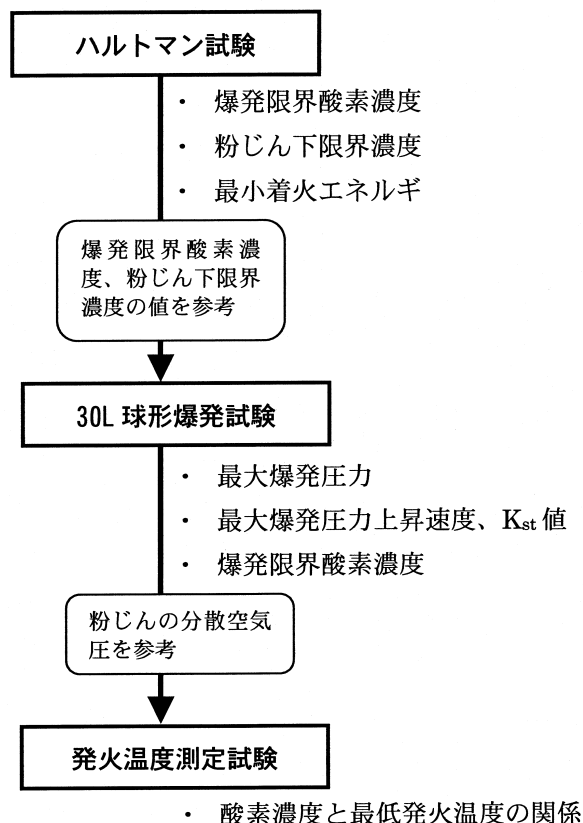


図1 試験の全体概要

子状態を図2と写真1に示す。図2において、本試験のジルカロイファインは、文献値より細かく製作されている。粉じんの粒径が細かくなると、比表面積が大きくなり、粉じんの発火エネルギーや発火温度が上昇する。本試験では、ジルカロイファインを過小評価しないため、より細かい粒径の粉じんで試験することとした。また、Zry-2の組成を表1に示す。

2.2 粉じん雲の爆発特性試験

(1) 目的

ハルの処理工程の設計では、万が一に備えた爆

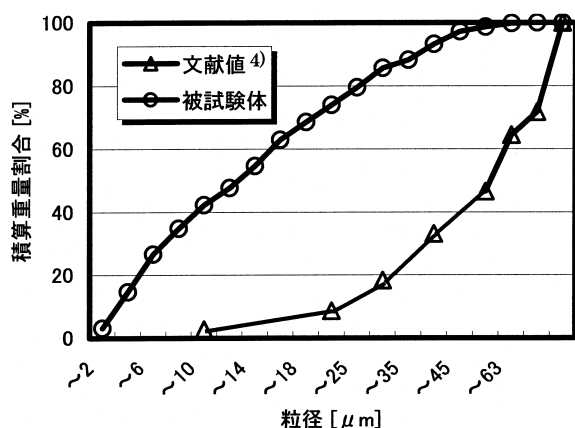


図2 ジルカロイファインの粒径分布

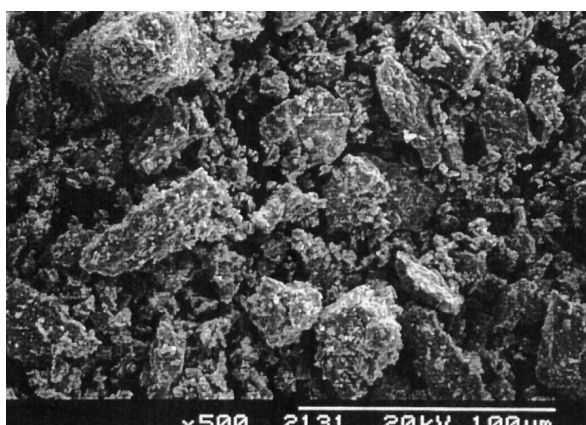


写真1 ジルカロイファインの粒子

表1 ジルカロイ-2, 4のジルコニウム以外の主な成分組成⁵⁾

	ジルカロイ-2	ジルカロイ-4
Sn	1.50wt%	1.50wt%
Fe	0.12wt%	0.15wt%
Ni	0.05wt%	—
Cr	0.10wt%	0.10wt%

発の影響による被害を最小限に抑える構造にするため、最大爆発圧力などの特性データが必要となる。

本試験は、模擬ジルカロイファインの爆発特性（最大圧力、最大圧力上昇速度、爆発限界酸素濃度、 K_{st} 値）を測定することを目的とした。

(2) 装置・手順

模擬ジルカロイファインの爆発特性を測定するために、図3に示したハルトマン試験装置と、図4に示した30L球形爆発試験装置を使用した。ハルトマン試験装置は、キューナー製MIKE3.2であり、国際電気標準会議（IEC）1241-2-1Aに準拠している。このハルトマン試験はデータが豊富であり、他の材質との比較が行いやすい。また、30L球形爆発試験装置は、爆発させる容器が大きいため現実

に則した圧力や圧力上昇速度が得られる。ハルトマン試験装置及び30L球形爆発試験装置の双方とも、粉じん雲を爆発させるための容器部分(1)、粉じん雲を形成させるために空気を送込むための空気溜(2)からなり、30L球形爆発試験装置には圧力を測定するための測定部分(3)を取付けた。30L球形爆発試験装置は爆発する容器の容量が大きいので、実際の爆発状況により近いデータの取得が可能である。

ハルトマン試験装置による測定手順は、以下のとおりである⁶⁾。

- ① 図3に示した爆発筒（ガラス製）(1)の底部分に被試験体を所定量入れる。

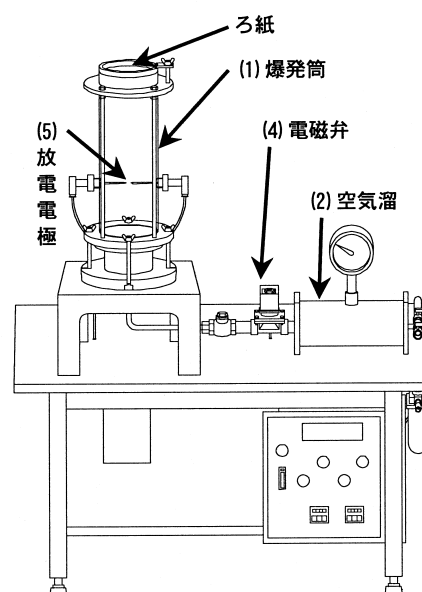


図3 ハルトマン粉じん爆発試験装置

- ② 爆発筒(1)内部雰囲気酸素濃度を調整して上部をろ紙で閉止する。
- ③ 電磁弁(4)を開き、空気溜(2)から爆発筒底部を通してゲージ圧約0.08MPa (0.8kgf/cm²G)の空気を送り込み、粉じん雲を形成させる。
- ④ 電源のスイッチを入れ爆発筒中央の電極(5)に電気スパークを発生させて着火する。
- ⑤ 爆発筒(1)内の着火状況を目視により観察する。爆発の判定は、ろ紙が破れることで判定する。
- ⑥ この操作を1条件当たり5回繰返す。

粉じん濃度(模擬ジルカロイファイン量より算出)、酸素濃度、着火エネルギー(電気スパークエネルギー)の条件を変え、爆発限界粉じん濃度、爆発限界酸素濃度、最小着火エネルギーを測定した。ハルトマン試験装置での試験条件を表2に示す。30L球形爆発試験装置での測定手順は、以下のとおりである。

- ① 図4に示したステンレス製の30L容器(1)の底部分に被試験体を所定量入れる。
- ② 30L容器(1)の上部を被せ閉止する。
- ③ 30L容器(1)内雰囲気を負圧にして酸素量を調整する。
- ④ 電磁弁を解放し、空気溜(5)から30L容器(1)底部を通して0.98MPaG (10kg/cm²G)の空気を送り込み、30L容器(1)内に粉じん雲を形成させる。

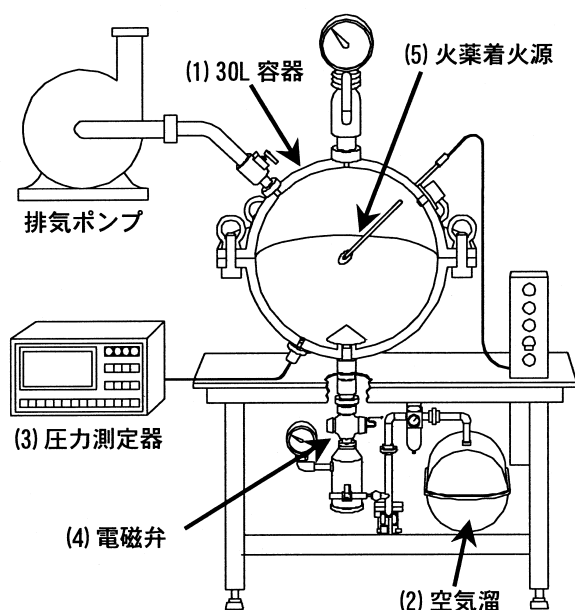


図4 30L球形爆発試験装置

表2 ハルトマン試験の試験条件

項 目	条 件
酸 素 濃 度	大気中(約21)～4.1vol%
粉 じ ん 濃 度	100～3,000g/m ³
着 火 エ ネ ル ギ	25～0.8mJ
試 験 繰 返 数	5回
着 火 遅 れ 時 間	120msec

- ⑤ 粉じんが30L容器内で十分に分散する120msec後、30L容器(1)中央の着火装置(エネルギー7.5kJの火薬)(6)に点火し粉じんに着火する。

粉じん濃度(模擬ジルカロイファイン量)、酸素濃度の試験条件を変え、容器内の圧力変化を測定した。この測定値を基に、爆発限界粉じん濃度、爆発限界酸素濃度、最大爆発圧力、最大爆発上昇速度、 K_{st} 値を求めた。

K_{st} 値は以下の式により求められる。

$$K_{st} = (dP/dt)_{\max} \times V^3$$

(P:圧力, t:時間, V:爆発容器容量)⁷⁾

30L球形爆発試験装置での試験条件を、表3に示す。

(3) 結果及び考察

1) ハルトマン試験

ハルトマン試験装置での結果を図5と表4-1～3に示す。

① 粉じん濃度下限値

表4-1の結果より、粉じん濃度下限値は100g/m³となるが、一般的にハルトマン試験装置のような粉じんを吹上げる方式は、粉じんを自然落下する方式と比較すると、粉じんが均一に分散できないために濃度下限値が数値上高くなる。これは、ハルトマン試験装置を使用した試験は、そのほとんどが爆発容器下部に粉じんが残り計算上、粉じん濃度の値が高くなる。本試験も同様に爆発容器下部に吹き上げられなかった粉じんが観察されたため、同様の傾向を示していると考えら

表3 30L球形爆発試験の試験条件

酸素濃度	6～2 vol%
粉 じ ん 濃 度	250～2,000g/m ³
着 火 エ ネ ル ギ	7.5kJ
着 火 遅 れ 時 間	120msec

れる。以上から、理想的に粉じんが分散すると数十 g/m^3 になると推測される。ハルトマン試験装置の結果からジルカロイの金属粉じん濃度下限界値が $100\text{g}/\text{m}^3$ 程度となったが、この粉じんが理想的に大気中に分散した場合、数十 g/m^3 であり、マグネシウム（平均粒径 $29\mu\text{m}$ ）やアルミニウム（平均粒径 $28\mu\text{m}$ ）などの爆発下限界濃度 $30\text{g}/\text{m}^3$ ³⁷⁾程度にオーダが近い値である。このことから、ジルカロイファインは粉じん爆発の危険を有した粉じんであることが分かる。

② 爆発限界酸素濃度

表4-2に酸素濃度を变化させた結果を示す。このときの着火下限界となった酸素濃度と粉じん濃度をプロットしたものが図5である。徐々に酸素濃度条件を薄くした場合、 $4.1\text{vol}\%$ 以下では粉じん濃度を増やしても着火しない。5図の破線より右側の部分が模擬ジルカロイファインの不爆領域となる。この結果は $4.1\text{vol}\%$ より低い酸素濃度の環境で模擬ジルカロイファインを取扱えば粉じん爆発が起きないことを示している。

③ 最小着火エネルギー

表4-3にエネルギーを変化させて行った測定結果を示す。模擬ジルカロイファインは、ハルトマン試験装置自体の最小着火エネルギーである 1mJ 程度のエネルギーでも着火することを確認した。このことは、人間が扉のノブなどに触れるときに発生する小さな静電気の火花でも爆発を起こす可能性を示している。

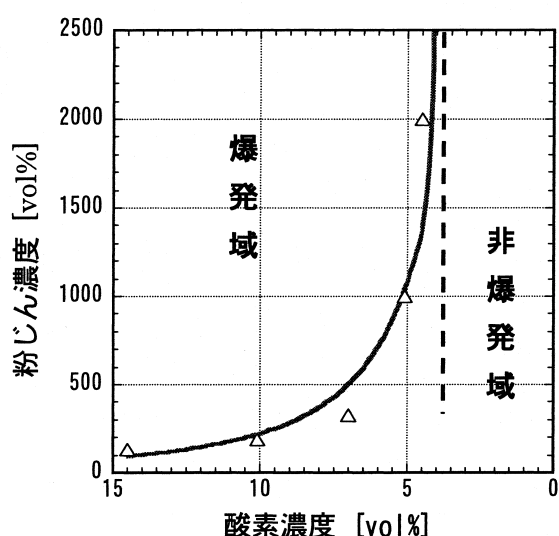


図5 ハルトマン粉じん爆発試験

2) 30L球形爆発試験

30L球形爆発試験装置での結果を図6, 7に示す。模擬ジルカロイファインは大気雰囲気中で粉じんを分散させた直後に爆発を起こした。このため、大気環境下（酸素濃度約 $21\text{vol}\%$ ）での測定が行えず、通常の K_{st} 値は得られなかったが、参考として酸素濃度が低い場合で K_{st} 値を求めた。先のハルトマンの試験からもわかるように、模擬ジルカロイファインは非常に小さなエネルギーで着火するため、多量の粉じんに高速な空気（空気圧 0.98MPaG のタンクから $\phi 8\text{mm}$ のチューブで空気を放出した）が当たったことで粒子同志の摩擦により発火

表4-1 ハルトマン粉じん爆発試験装置による爆発下限界濃度

粉じん濃度	爆発の有無
$50\text{g}/\text{m}^3$	なし
$60\text{g}/\text{m}^3$	なし
$70\text{g}/\text{m}^3$	なし
$80\text{g}/\text{m}^3$	なし
$90\text{g}/\text{m}^3$	なし
$100\text{g}/\text{m}^3$	あり
$110\text{g}/\text{m}^3$	あり
$120\text{g}/\text{m}^3$	あり
$130\text{g}/\text{m}^3$	あり
$140\text{g}/\text{m}^3$	あり
$150\text{g}/\text{m}^3$	あり

・大気雰囲気（酸素濃度約 $21\text{vol}\%$ ）
・着火エネルギー 10mJ

表4-2 ハルトマン粉じん爆発試験装置による爆発限界酸素濃度

酸素濃度	粉じん濃度	爆発の有無
$14.5\text{vol}\%$	$130\text{g}/\text{m}^3$	あり
$10.1\text{vol}\%$	$190\text{g}/\text{m}^3$	あり
$7.0\text{vol}\%$	$330\text{g}/\text{m}^3$	あり
$5.1\text{vol}\%$	$1,000\text{g}/\text{m}^3$	あり
$4.5\text{vol}\%$	$2,000\text{g}/\text{m}^3$	あり
$4.1\text{vol}\%$	$3,000\text{g}/\text{m}^3$	なし

・着火エネルギー 10mJ

表4-3 ハルトマン粉じん爆発試験装置による最小着火エネルギー

着火エネルギー	粉じん濃度	爆発の有無
30mJ	$300\text{g}/\text{m}^3$	あり
10mJ	$600\text{g}/\text{m}^3$	あり
3mJ	$600\text{g}/\text{m}^3$	あり
1mJ	$1,200\text{g}/\text{m}^3$	あり

・大気雰囲気（約 $21\text{vol}\%$ ）
・着火エネルギー 10mJ

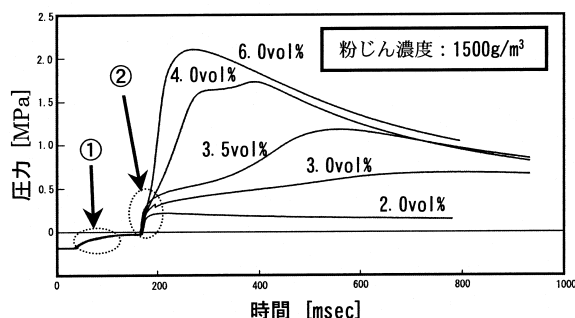


図6 30L球形爆発試験

したと考えられる。この結果より、酸素濃度パラメータは10vol%以下に制限して測定した。

① 酸素濃度による圧力変化の比較

図6は各酸素濃度(2.0~6.0vol%)ごとの30L球形爆発容器内の圧力経時変化を示す。図中の①、②の破線部分内は、それぞれ、粉じんの分散用圧縮空気と着火用の火薬による圧力上昇であるため、粉じんの爆発とは直接関係していない。酸素濃度の違いの影響をみると、濃度が低いほど最大爆発圧力に達するまでに時間がかかり、かつ最大爆発圧力が低くなる。これは、模擬ジルカロイファインと結合する酸素の存在量が模擬ジルカロイファイン粒子近傍には少ないため金属粒子が発熱する時間がかかると考えられる。このため、粉じん雲全体が発熱する時間が長くなり、外部に熱が逃げるなどの影響が大きいため、最大圧力が低くなる。この結果より、酸素濃度が低ければ、多量のジルカロイファインが爆発を起こしても、最大圧力が低くなることで設備に与える影響を小さくできる。

② 酸素濃度による最大圧力の比較

図7は、各酸素濃度での最大爆発圧力を測定した結果をプロットしたものである。酸素濃度が2.0vol%では、模擬ジルカロイファインの粉じん濃度を変化させても圧力上昇は起こらなかった。この結果は、酸素濃度が2.0vol%以下では爆発を起こさないことを示している。この値はハルトマン試験装置による試験結果より低い濃度である。30L球形爆発試験装置はハルトマン試験装置に比べ、爆発を起こす容積が大きいために熱損失が少なく、かつより均質な分散状態になるなどスケール効果の影響が表れるためである。実際のプラン

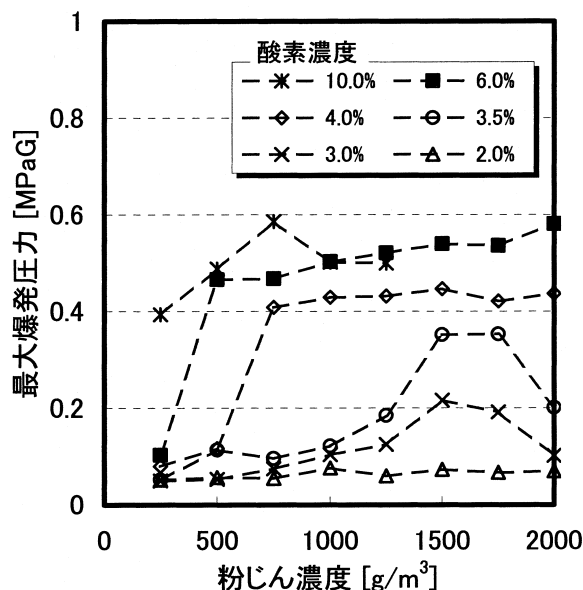


図7 30L球形爆発試験での最大爆発圧力

ト規模を考えると30L球形爆発試験装置の結果の方が、より現実に即した結果であると推測される。実際の処理施設設計の際は、設備空間など実規模に近い装置による試験を実施し、詳細な検討を行う必要がある。

また、図7より酸素濃度、粉じん濃度が上昇することで最大圧力も上昇するが、酸素濃度が6.0vol%以上での最大圧力の増加量は少ない。このことから、大気雰囲気においても最大爆発圧力は0.7~0.8MPaG(約7~8 kg/cm²G)程度であると推測される。単純な比較はできないが、図7で最高値である最大爆発圧力は、マグネシウム(平均粒径240μm)⁷⁾や石油コークス(平均粒径15μm)⁷⁾の最大爆発圧力に近く、最悪のケースの場合、これらの粉じん災害の規模と同等となる可能性がある。

上述したように、模擬ジルカロイファインは非常に着火しやすく、酸素濃度が低い環境の爆発上昇速度で K_{st} 値を算出すると、おおよそ25MPa・m/sである(図6の圧力上昇速度より算出)。通常、粉じん爆発事故を起こす物質の K_{st} 値は、小麦で11MPa・m/s程度(平均粒径80μm)、マグネシウムで51MPa・m/s程度(平均粒径28μm)⁷⁾であり、ジルカロイファインは非常に激しい爆発を起こす物質であることが分かる。ジルカロイファインを取扱う又は堆積するような箇所は、酸素濃度を制御するなどの対策が必要である。

2.3 粉じん雲の発火特性試験

(1) 目的

金属粉じんが爆発するための着火要因として、静電気などのスパークや、雰囲気温度の上昇がある。本試験では、雰囲気温度による影響を検討するために最低発火温度を測定することを目的とする。

(2) 装置・手順

最低発火温度の測定については、IEC1241-2-1 Methods Bに準拠した図8に示すGodbert-Greenwald試験装置を用いた。

この装置は、粉じん雲を形成させるための圧縮空気溜(1)、配管、粉じんホルダ(2)と、粉じんを発火させる耐熱ガラス製の赤熱管本体(3)($\phi 70 \times 293\text{mmh}$)から構成される。粉じんの発火は、赤熱管下部が解放状態であるので目視で確認できる。粉じん雲の発火温度測定手順は以下のとおりである⁷⁾。

- ① 図8に示した粉じんホルダ(2)に所定量(0.3g~6.0g)の被試験体を入れる。
- ② 圧縮空気溜(1)を所定の圧力(78.5kPaG)とする。酸素濃度を調整する場合は、この圧縮空気溜の酸素濃度を予め調整しておく。
- ③ 赤熱管(3)内部の温度を所定温度にする。
- ④ 赤熱管(3)内部が所定温度になったことを確認したら、電磁弁(4)を開き、粉じんを赤熱管内に送り込む。
- ⑤ 赤熱管下部の解放部分から出る炎または空気を目視で観察し確認する。

本装置による試験では、粉じん濃度(模擬ジルカロイファインの量)、酸素濃度の試験条件を変えて最低発火温度の測定を行った。発火温度測定装

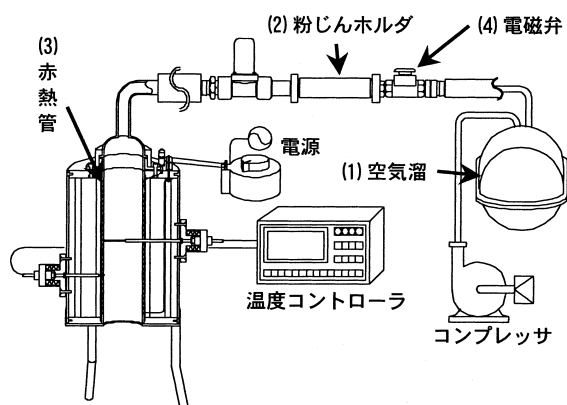


図8 発火温度測定装置

置での試験条件を表5に示す。

(3) 結果及び考察

発火温度測定装置での結果を図9に示す。最低発火温度測定装置においても、大気中で分散させるとジルカロイファインは発火した。酸素濃度を低下させると12vol %以下では発火温度が400°C以上になり、実際の設備では加熱するプロセスがない限り、自然発火による爆発はないと考えられる。通常、粉じんの酸素濃度と発火温度の関係は単純な累乗の関係にあるが、ジルカロイファインの試験結果では図9に示す酸素濃度が12.1~8.0vol%の区間で上に凸となっている。この試験結果から模擬ジルカロイファインの最低発火温度の挙動は特異であることが分かる。これは酸素濃度により模擬ジルカロイファインの発火する原因に違いが生じていると推測される。一般的な粉じんは、雰囲気温度の上昇により、粉じん全体的が酸化反応を促進され、粉じん粒子自体の発熱により、周辺に存在する粉じんの酸化反応が加速される。この反応が連鎖的に続き爆発が発生する。しかし、模擬ジルカロイファインは、着火エネルギーが非常に小さいため、一部の粉じん同志の衝突や、配管との摩擦などのエネルギーで局所的な酸化発熱が起こり、その熱により近接した粉じんが酸化することで発火に至る。この結果、模擬ジルカロイファインは雰囲気温度が低くても、酸素濃度と粉じん濃度が高い条件では局所的な発熱が起因となり爆発する。これら二つの発火原因があるため、ジルカロイファインが置かれる環境により、どちらか

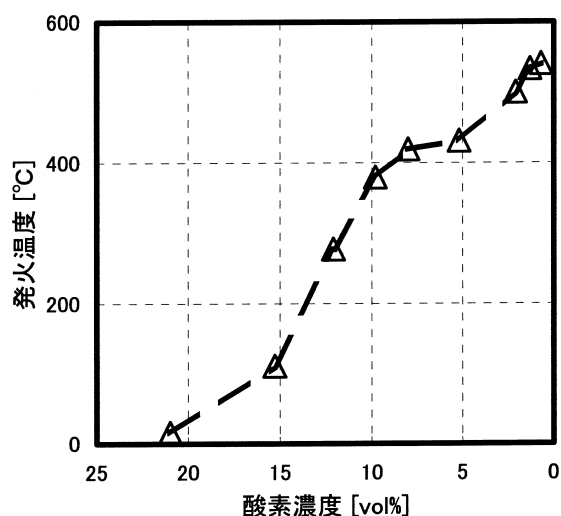


図9 発火温度測定装置試験の最低発火温度測定結果

の発火原因で発火すると考えられる。図9では、それぞれ二つの原因による発火温度のプロットを重ね合わせ、より低い温度となる点が最低発火温度となったと考えられる。以上の原因から、12.1～8.0vol%の区間において上に凸の部分のある複雑なプロットになったと考えられる。ただし、現実の発火対策上、最低発火温度のデータが必要であり、発火原因毎の最低発火温度を求めることは必要ないため、発火原因毎の測定は実施しない。

3. 結論

以上の試験結果と考察をまとめると、

- ① 最小着火エネルギーは1 mJ以下であり、非常に小さい。このため、常温で爆発する可能性がある。
- ② 爆発限界酸素濃度は2.0vol%であり、酸素濃度を制御することで爆発の抑制が可能である。
- ③ 最大爆発圧力は0.7～0.8MPaG程度であり、マグネシウム粉じんと同等である。
- ④ K_{st} 値は25MPa・m/s程度であり、マグネシウム粉じんと同等に激しい爆発を起こす。

4. おわりに

本試験では、模擬ジルカロイファインの粉じん爆発特性に着目した測定を行った。実際にハルを圧縮処理する工程で発生するジルカロイファインには酸化した物質等が混入し、粉じんの着・発火が阻害される。更にジルカロイファインに酸化物が混入することにより発火温度、爆発圧力の低下が起こり、本試験で得られた結果よりも緩やかなものとなる。しかし、粉じん爆発を起こす可能性は残されており、高放射性の廃棄物であるハル等

を取扱う施設では、より安全を確保する必要がある。今後、ハル処理施設の設計を実施する時には、ジルカロイファイン等の発生量を低減する処理法、酸素濃度を制御できる施設構造、ジルカロイファインが滞留しない施設構造、爆発発生時における圧力分散設備の設置など本試験結果を基にした検討が必要である。

謝 辞

本試験を行うに当たり多大な御尽力を頂いた、労働省産業安全研究所の松田東栄殿、(株)神戸製鋼所の小松征彦殿、阿部隆殿、(株)コベルコ科研の藤原優行殿、佐藤昌男殿、に対し厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) B.J.Kullen, N.M.Levitz, et al.: "Management of Waste Cladding Hulls Part II. An Assessment of Zirconium Pyrophoricity and Recommendation for Handling Waste Hulls.", Argonne National Laboratory 1987
- 2) 小嶋裕, 阿部隆: "使用済み燃料被覆管せん断片(ハル)等の高圧縮試験(I)", 動燃技報No.103, P65 (1997)
- 3) 石野栄: "照射損傷", 東京大学出版会 (1979)
- 4) 倉形光一郎, 五十嵐登 他: "照射済ハルの圧縮試験", 日本原子力学会1998年春の年会, 要旨集L62 P646
- 5) 長谷川正義, 三島良績: "原子炉材料ハンドブック", 日刊工業新聞社 (1977)
- 6) 福山郁生, 上原陽一 他: "安全工学実験法 火災爆発・機械材料片", (財)総合安全 工学研究所 (1983)
- 7) 松田東栄: "可燃性粉じんの爆発危険性評価技術", 労働省産業安全研究所安全資料, RIIS-SD-90-1 (1990)