

解 説

爆発性物質の熱分析および爆発事故の再現実験

岡田 賢

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
安全科学研究部門

(受取日：2018年8月2日，受理日：2018年9月4日)

Thermal Analysis of Explosive Compounds and Reproducible Test on Explosion

Ken Okada

Research Institute of Science for Safety and Sustainability
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

(Received Aug. 2, 2018; Accepted Sep. 4, 2018)

Two topics of explosive accidents were mentioned in this paper. One is ion exchange resin, the other is silver compounds. An explosion occurred while ion exchange resin (IER) was being used in the analytical pretreatment. To clarify the cause of the accident and go/no-go criteria of the explosion, elemental analysis of the IER, DSC analysis, SIKAREX analysis (a screening tool for runaway reactions), and Raman spectroscopy were performed. Finally, experiments on the same scale as the accident were conducted in an explosion chamber. When HClO_4 was added to IER- NO_3 , the IER violently exploded without any heating nor metal ions such as uranium. It was confirmed that the accident was caused by an incorrect procedure in the chemical process. From the standpoint of explosion safety, IER- NO_3 in particular should be kept away from perchloric acid in the laboratory. In the silver mirror reaction using ammoniacal silver solution, silver nitride (Ag_3N) is generated, when the solution is allowed to stand. This compound is highly explosive. Thus, for a recycling process of silver compounds from ammoniacal silver solution, it is required to establish safety treatment of the solution. In the present study, various conditions for the safety treatment have been investigated on a laboratory scale. When an aqueous solution of $\text{Ag}_2\text{O}/\text{NH}_3$ was allowed to stand in the open air at ambient temperature, Ag_3N was finally generated, as expected.

Keywords: explosion accident, explosive compound, thermal analysis

1. はじめに

爆発事故が発生すると、甚大な被害が発生し、さらに、原因物質が特定できない場合が多い。作業員自身の誤操作によるものか、施設の経年劣化によるものか、そもそも、危ないプロセスで、たまたま条件が重なり事故が起こる場合などもあり、事故の原因究明が難しい。事故当事者の記憶が曖昧で、温度・圧力などの記録もなく、爆発性物質を始めとした証拠が無くなり、爆発事故の原因究明が困難な場合もある。事故原因については、原因不明のまま再稼働をしてしまうと、再度、爆発事故を起こす可能性が高い。実際に爆発の再現を行わないと、爆・不爆の閾値の目処が立たないし、机上の空論だけでは、説得力に乏しく、事故の解明は大変難しいのが現状である。2001年以降、産総研では、民間企業、公的研究機関、大学等で発生した多くの爆発事故の解明を行ってきた。その中で、爆発事故の原因究明を行った事例の一部について紹介を行う。

事故原因の解明実験の手法としては、主に以下の手順で進めることが多い。① 類似事故の文献調査、② 事故の原因予測、③ 熱分析、④ グラムスケール熱分析、⑤ 事故再現実験。

熱分析は、事故原因のあたりをつける点で非常に重要である。すなわち、国連が勧告する爆発性評価試験が利用されている。DSCを使用して、発熱分解エネルギーを測定し、その値が 800 J g^{-1} 以上¹⁾であれば、スケールアップした試料による爆発実験によって爆発性の判定が必要である。熱分析による検討はスクリーニング試験と呼ばれている。闇雲に再現実験を行っても爆発現象を再現できないことも多い。また、熱分析で非常に大きな発熱などが確認できても、それが爆発事故の原因となるかどうかはスケールアップして再現実験を行わないと絵に描いた餅や妄想になってしまう。ミリグラムスケールからグラムスケールの一連の実験を行なって、爆発事故の原因を明らかにするのが定石の手法となっている。

2. イオン交換樹脂の爆発事故の原因究明

2.1 イオン交換樹脂の爆発事故について

平成15年1月21日に核燃料サイクル開発機構(現 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構) 人形峠環境技術センター(当時)で使用済み核燃料の分析作業中にイオン交換樹脂カラムの破裂事故が発生した。破片により、作業

員が負傷した。事故現場の写真より、5本のイオン交換樹脂カラムのうち、2本が上部固定部にも残っていないため、2本が自ら破裂し、3本が飛散した破片で破壊されたことが予測できる。(Fig.1) この工程は、質量分析装置等で劣化ウランの同位体比および不純物を精密測定する前処理として、イオン交換樹脂を使用して、ウラン溶液から不純物を除去する作業を実験室で行っているところであった。原子力の再処理のプロセスは使用済み燃料を硝酸で溶解させるため、基本的には、硝酸系でプロセスが成り立っている。本プロセスでは、ウランを硝酸イオンで錯形成させ、陰イオン交換樹脂に吸着させている (Fig.2)。



Fig.1 Explosion accident of ion exchange resin at Ningyo-toge Environmental Engineering Center of Japan Atomic Energy Agency (JAEA).

イオン交換プロセスの後に、溶出液に 12N (70%) 過塩素酸 (HClO₄) を加え、有機物を分解する工程であった。この事故は、化学プロセスにおける誤った操作が原因とされており、溶出液ではなく、イオン交換樹脂カラムに過塩素酸を加えてしまった。硝酸とイオン交換樹脂の爆発的な反応が起こったことが推察される。この事故は作業員の操作ミスにより発生したものであるが、硝酸/イオン交換樹脂の爆発事故の発生は、世界的に発生が知られている。²⁻⁴⁾ 広い意味で、硝酸/有機物の反応は核燃料サイクルを行う上で避けては通れない問題で、この事故をきっかけとした反応解析は必要不可欠である。本研究では、イオン交換樹脂/硝酸/過塩素酸の混合状態で、熱分析 (DSC)、グラムスケール熱分析 (SIKAREX 熱分析)、加熱状況下でのラマン分光分析、爆発再現実験を行った。

本研究の興味の対象となるのが、イオン交換樹脂に過塩素酸を加えただけで、爆発性物質が生成し、それが爆発に至るのかという点である。現場には、付近にサンドバス (発熱源) があり、放射熱による加熱の影響や放射性物質を処理しているので、放射線の影響が危惧された。すなわち、これらが爆発と関与があったかどうかの確認が必要である。爆発性物質は一般的に、摩擦や衝撃や熱といった刺激がないと爆発が起こらない。

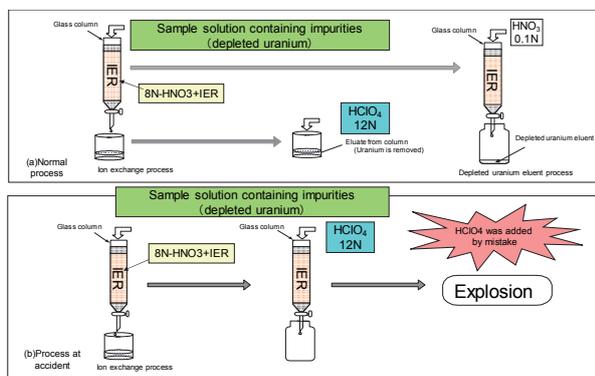


Fig.2 Ion exchange process to remove impurities using IER: (a) normal process, (b) process at time of accident.

2.2 イオン交換樹脂の基礎物性

使用したイオン交換樹脂は、陰イオン交換樹脂: スチレンジビニルベンゼン架橋共重合体の誘導体 AG1-X8 Resin (BIO-RAD 社製) Cl 型陰イオン交換樹脂 (Ion Exchange Resin: IER) である。まず、Cl 型のイオン交換樹脂に、4~5 倍の充填容量の 1N-NaOH を添加し、OH 型の IER に転換する。次に、同様に 4~5 倍の充填容量の 1N-HNO₃ を添加し、NO₃ 型の IER に転換する。同様にして、過塩素酸や塩酸を用いて、IER-ClO₄ や IER-Cl を準備した。

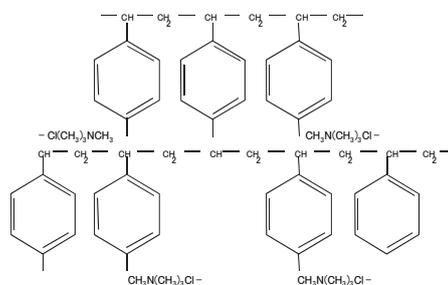


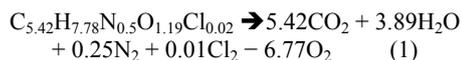
Fig.3 Chemical structure of IER-Cl (AG1-X8, Bio-rad).

Fig.3 にはスチレン・ジビニルベンゼン系イオン交換樹脂の基本構造を示す。実際には複雑な立体構造をしており、伸縮性のあるスチレン鎖がジビニルベンゼンで架橋されながら不規則に入り乱れた構造をしている。重合の際にジビニルベンゼンの量を増加すると鎖の分岐が多く密な構造に、少ないと網目の大きな樹脂となる。ここでのイオン交換基は N⁺(CH₃)₃Cl⁻ であり、スチルベンゼンのベンゼン環に導入されている。

Table 1 Fundamental analysis of ion exchange resin, C/H/N/O/Cl ratio and oxygen balance.

	C(mol)	H(mol)	N(mol)	O(mol)	Cl (mol)	OB	Heat of combustion (kJ/g)
IER-Cl	4.66	8.71	0.21	1.42	0.27	-194	-
IER-NO3	5.42	7.78	0.51	1.19	0.02	-217	29.7
IER-ClO4	5.04	8.24	0.36	1.31	0.15	-193	-

次にイオン交換樹脂単体の危険性を把握するために、CHNO 元素分析を実施した。また、含有する Cl については、AgCl の沈殿により計測した。これら、C/H/N/O/Cl から酸素バランスの算出を行った。酸素バランスは、火薬の組成が完全に酸化するために必要な酸素のバランスのことである。後ガスなどを考えない場合は、酸素バランスがゼロとなる方が威力が強くなる。硝酸型イオン交換樹脂の酸素バランスの計算式は式(1)のとおりである。



過塩素酸型 IER, 塩素型 IER は共に -200 程度を示している。酸素バランスがマイナスという意味は、イオン交換樹脂の反応には、大量の酸素が必要である。Table 1 に塩素型、硝酸型、過塩素酸型のイオン交換樹脂の元素比と酸素バランスについてまとめた。すなわち、IER 単体では、深刻な発火・爆発のリスクは低いことがわかった。

2.3 イオン交換樹脂の熱物性評価 (DSC およびグラムスケール熱分析)

ミリグラムスケール熱分析として、TA Instruments 社製 DSC2920 を用い、試料量は 1~2 mg、昇温速度は 5 K min⁻¹ としてステンレス製の耐圧セルを用いて測定を行った。

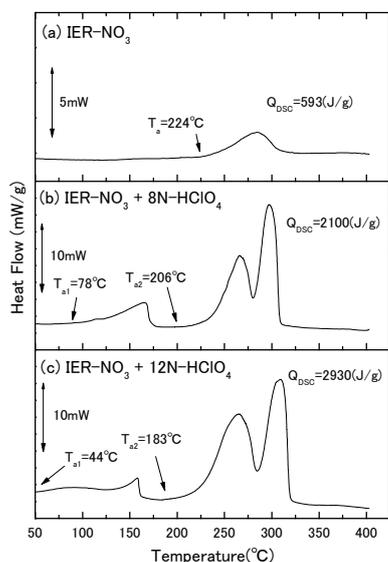


Fig.4 DSC profiles of (a) IER-NO₃ (b) IER-NO₃ + 8N-HClO₄ (c) IER-NO₃ + 12N-HClO₄.

Fig.4 には、IER(1N-HNO₃) に対して、過塩素酸濃度を変化させた混合系での DSC 測定結果を示した。

また、**Table 2** には、その際の発熱の開始温度とピーク発熱量をまとめている。過塩素酸を加えると発熱開始温度の低下と発熱量の増加が確認された。100 °C 以下に小さく緩やかな発熱ピークがあらわれ、その後 2 段階に分かれた大きな発熱ピークが確認される。過塩素酸の添加により、第一発熱ピークの開始温度は 224 °C から 78 °C、44 °C へと低下している。過塩素酸と樹脂との間に酸化還元反応が起きていると推測される。また、添加する過塩素酸の濃度を増加すると、~180 °C からの第二発熱ピークの発熱開始温度も低下し、発熱量も増加している。高濃度の過塩素酸を硝酸型のイオン交換樹脂加えると、発熱の蓄積により、暴走反応にいたる可能性があることが確認できた。

Table 2 DSC results of (a) IER-NO₃, (b) IER-NO₃ + 8N-HClO₄, (c) IER-NO₃ + 8N-HClO₄.

Sample	第1発熱ピーク		第2発熱ピーク	
	開始温度 (°C)	発熱量 (J·g ⁻¹)	開始温度 (°C)	発熱量 (J·g ⁻¹)
(a) IER-NO ₃	224	593	—	—
(b) IER-NO ₃ + 8N-HClO ₄	78	315	206	2100
(c) IER-NO ₃ + 12N-HClO ₄	44	371	183	2930

グラムスケールの熱的反応を観測するために、SIKAREX (SYSTAG社) を使用した。SIKAREXは、実規模に似た比較的少量の試料量で、スクリーニング試験が可能である。断熱状況下で、ARCでは1g試料量での試験が可能であるが、SIKAREXでは8~10 gの試料量の試験が可能である。試料容器は、二重構造になっており15 MPaの破裂弁が備え付けられ、内側容器はガラス製で容量は、50 mL (内径20 mm、長さ120 mm) である。外側容器は、ステンレス製で、強い

爆発(爆燃)にも耐えられる構造になっている。熱電対は、試料温度 (T_{Sample}) と容器温度 (T_{Furnace}) の2箇所を測定している。試料温度の熱電対にもガラスカバーがつけられており、試料はガラス容器内に充填されているため金属の腐食とそれに伴う発熱が防止できる。加熱速度は、0.5 °C min⁻¹ である。

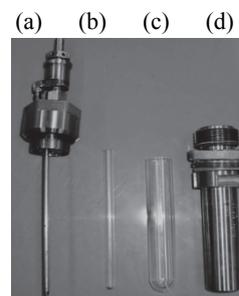


Fig.5 SIKAREX vessel, (a) top cover and rupture disk, (b) thermocouple glass cover, (c) inner glass vessel, (d) outer stainless vessel.

試料は、(a) IER-NO₃ 5 g + 8N-HClO₄ 1 mL (b) IER-NO₃ 5 g + 8N-HClO₄ 5 mL である。**Fig.6** に SIKAREX における温度測定結果を示している。100 °C 付近で発熱があり、167 °C で激しい爆発していることがわかる。この急激に温度上昇するポイントを自己発熱温度 (SIT) と定義する。**Fig.6b-1** および **Fig.6b-2** で SIT は、それぞれ 215 °C および 167 °C であった。DSC では観測されない急激な発熱暴走反応がグラムスケール熱分析では観測された。グラムスケール熱分析では、DSC の 1000 倍以上の試料量であるため、蓄熱効果等の規模効果を加味した熱的挙動が確認でき、実規模の熱的挙動と近い結果が得られる。

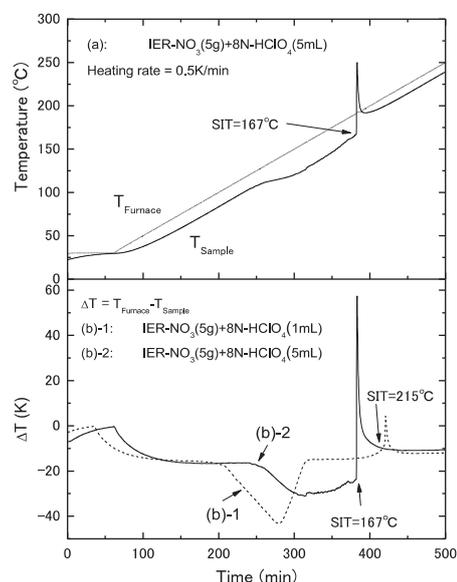


Fig.6 SIKAREX profiles of (a) IER-NO₃ + 8N-HClO₄ (5 mL), (b)-1 IER-NO₃ + 8N-HClO₄ (1 mL), (b)-2 IER-NO₃ + 8N-HClO₄ (5 mL).

Fig.7 に実験後のガラス容器の写真を示す。**Fig.7(1)**は、IER-NO₃ のみで、ガラス容器は破損せず、イオン交換樹脂の残渣が確認された。**Fig.7(2)**では、8N-HClO₄ が 1 ml 添加されていると、ガラス容器は破損せず、イオン交換樹脂の残渣が確認できなかった。イオン交換樹脂が、過塩素酸で概ね酸化されたと予想される。**Fig.7(3)**では、破裂弁とガラ

ス容器は破損し, さらに, イオン交換樹脂の残渣が確認できなかった。さらに, 外側のステンレス容器も爆発により膨張し, 実験の継続は困難となった。爆燃にも耐えうるとされる金属容器が変形してしまい, 爆発の強さが非常に強いことがわかった。

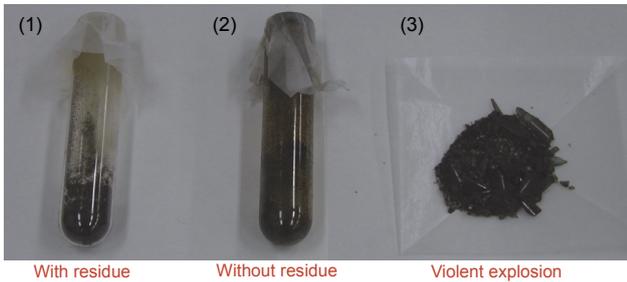


Fig.7 Glass vessel after SIKAREX analysis (1) IER-NO₃, (2) IER-NO₃ + 8N-HClO₄ 1 ml, (3) IER-NO₃ + 8N-HClO₄ 5 ml

SIKAREX の結果より SIT と爆発の威力は添加する過塩素酸の量に多く依存することがわかった。IER-NO₃ では, 酸素バランスがマイナスのため, 試料は炭化するだけであったが, 強力な酸化剤である過塩素酸を加えることにより, 残渣もなくなり, さらに過塩素酸を加えると激しい爆発を起こすことがわかった。

2.4 イオン交換樹脂の爆発再現実験

イオン交換樹脂の基礎物性および DSC およびグラムスケール熱分析から, 混合させると暴走するような条件設定に目処がたった。しかしながら, 実際, 爆発に至るかどうかが確認を進める必要があるため爆発再現実験を行なった。爆発を伴う実験は, 爆発ピット内で行なった。(Fig.8) 爆発ピットは, 茨城県つくば市の産総研つくば中央第五の施設で, 直径 2.9 m 高さ 3.45 m の大きさであり, TNT 500 g の爆発にも耐える構造となっており, スクラパーにも接続されていて, 燃焼・爆発後の後ガスの無害化も可能である。実験における爆発の様子は, ビデオ撮影を行った。ピットに付設の計測室に設置したデータロガーにより温度の記録を行った。試料の添加はトングを使い遠方から実施し, 安全には十分配慮しながら実験を行なっている。



Fig.8 Explosion chamber for gram scale explosion test, inner diameter 2.9 m, height 3.45 m.

事故が発生したイオン交換カラムは, 内径 20 mm 外径 30 mm であった。予備実験として, 内径 27 mm 外径 30 mm 長さ 20 cm の試験管を用いた。IER-NO₃ 10 g を試験管に充填し, 12N-HClO₄ 20 g を添加する実験を行なった。反応熱

により, 試料温度は室温から 68~76 °C まで徐々に上昇した。温度曲線を Fig.9 に示した。その結果, 急激な爆発に至った。過塩素酸の添加により, イオン交換樹脂は白色から暗赤色に変色した。

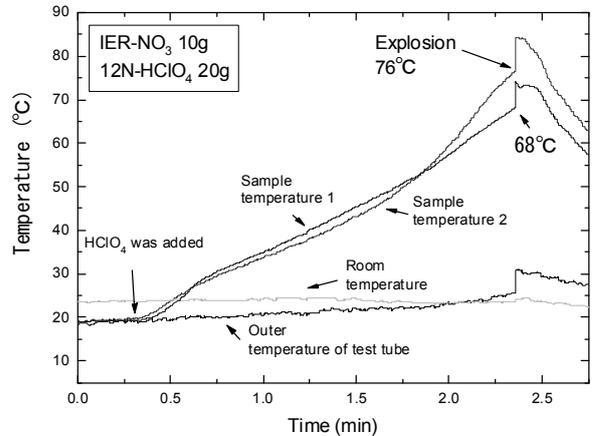


Fig.9 Temperature profile of gram-scale test (IER-NO₃ 10 g + 12N-HClO₄ 20 g).

実験の際の外観写真を Fig.10 に示す。Fig.10(a)は, 過塩素酸添加前の硝酸型イオン交換樹脂である。Fig.10(b)では, 添加から 120 秒後に赤褐色のガスが発生し, 温度が 70 °C にまで達している。この気体は, 過塩素酸および硝酸が分解し, 塩素および窒素酸化物が生成している可能性が高い。Fig.10(c)は, 130 秒後に試験管が爆発する瞬間を示している。熱電対の温度は 85 °C を示していた。爆発によってガラス試験管は完全に破壊され, 破片となった。イオン交換プロセスにおいて爆発が起きたイオン交換カラムには, 樹脂の舞い上がり防止のため, グラスウールが乗せられていた。

次に, 事故が起きたカラムと同じカラム (内径 20 mm 外径 30 mm) を使用して 4 回の実験を行なった。硝酸型イオン交換樹脂 20 g に 12N-HClO₄ を 5 g, 10 g, 20 g を添加する実験を行なった。10 g の時のみ 2 回で他は 1 回の計 4 回の実験を行なった。その結果, 12N-HClO₄ が 20 g, 10 g 添加の場合は, 爆, 10 g, 5 g 添加の場合は不爆となった。強制加熱は実施しなかった。本系では, 過塩素酸の添加量が爆・不爆の閾値となるようである。

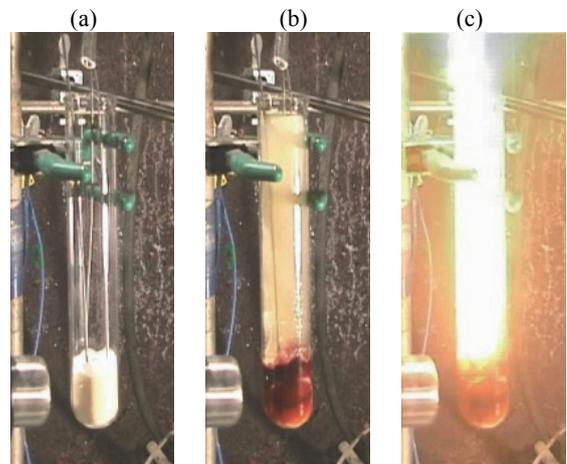


Fig.10 Photographs of gram-scale explosion test (IER-NO₃ 10 g + 12N-HClO₄ 20 g): (a) t = 0 s, 20 °C; (b) t = 120 s, 70 °C; (c) t = 130 s, 85 °C.

過塩素酸を添加した際の硝酸型イオン交換樹脂の化学反応について検討するために、ラマン分光分析を実施した。分光器は、サーモフィッシャーサイエンティフィック社製顕微レーザーラマン分光装置アルメガを使用した。顕微レーザーラマン分光装置の優れた点は、ピンポイントで測定が行える点、水分が残っていても前処理が不要な点、ニトロ化合物の検知が比較的容易な点である。Fig.11 にラマン分光分析の結果を示す。Fig.11(1)は硝酸型イオン交換樹脂のスペクトルである。これに過塩素酸を添加し、10 °Cで保持した試料の結果は、Fig.11(2)である。1595 cm⁻¹のNO₂の非対称伸縮と1344 cm⁻¹のNO₂の対称伸縮が観測されている。硝酸型イオン交換樹脂のピークが消え、過塩素酸型イオン交換樹脂のピークも出現している。Fig.11(3)に50 °Cで一定時間保持したスペクトルを示している。これら2つのピークは強度を増していることがわかる。

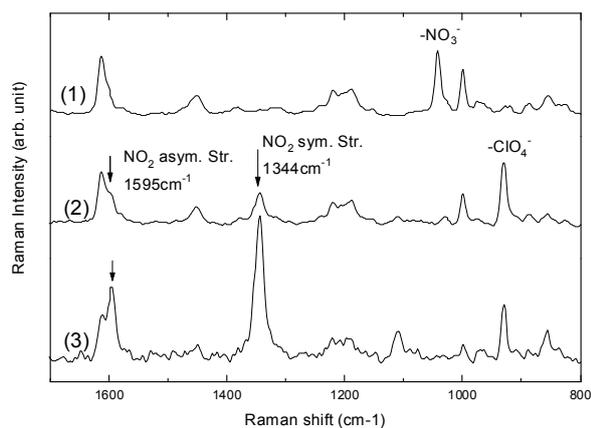


Fig.11 Raman spectrum (1) IER-NO₃, (2) IER-NO₃+12N-HClO₄ 10 °C, (3) IER-NO₃+12N-HClO₄ 50 °C.

硝酸型のイオン交換樹脂に過塩素酸を加えることにより、置換していた硝酸が遊離し、イオン交換樹脂の芳香族と化合して、ニトロ化合物が生成した。硝酸と過塩素酸が存在すると過塩素酸ニトロニウム (NP, NO₂ ClO₄) が生成し、ほとんど全ての有機物と反応することが知られている。水が少ない状態で過塩素酸は酸化剤であり、脱水剤として作用する。硝酸、過塩素酸、イオン交換樹脂が存在するとイオン交換樹脂のスチレンジビニルベンゼンから芳香族ニトロ化合物が生成する。

以上のような実験から今回の事故は、作業員の手順ミスにより事故が発生したことがわかった。近くにあったサンドバスや使用している放射性物質の影響はないことがわかった。硝酸型イオン交換樹脂の取り扱い時には、過塩素酸と誤って混合しないように注意が必要である。

3. 銀化合物の熱分析と爆発実験

近年、スマートフォン用の透明配線や太陽光発電に使用する銀ペーストなど銀化合物の使用が急増している。銀鏡反応、銀粉の製造、銀のリサイクル工程（銀/チタン薄膜の硝酸処理）等では、爆発事故が多く発生している。^{5,6)} 銀化合物には爆発性の物質が多いからである。爆発性物質の生成メカニズムの解明が待たれる。我々の研究グループで合成と単離した様々な銀化合物の熱分析の結果 (DSC) を Fig.12 に示す。縦軸に発熱量、横軸に温度を示している。雷銀 (Ag₃N)、雷酸銀 (AgONC)、ギ酸銀 (HCOOAg)、シュウ酸銀 (Ag(COO)₂)、アジ化銀 (AgN₃)、塩化銀 (AgCl) の6種類の銀化合物の測定を実施した。

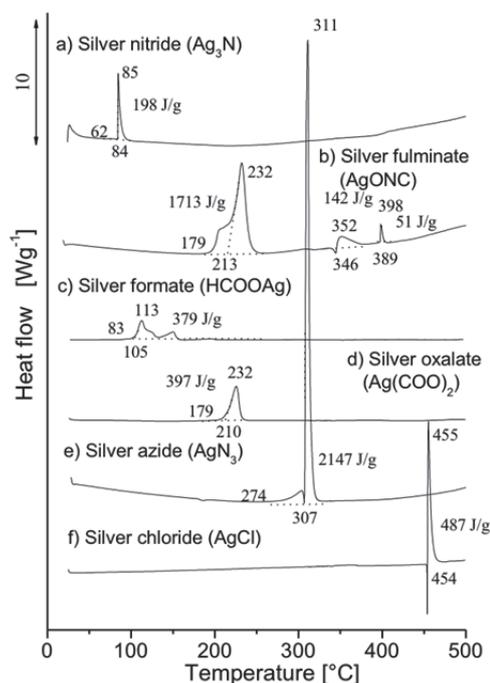


Fig.12 DSC results of a) silver nitride, b) silver fulminate, c) silver formate, d) silver oxalate, e) silver azide, f) silver chloride.

熱分析結果から、この化合物の中で一番危険(すなわち、容易に爆発)な物質はどれか分かるであろうか。発熱開始温度が274 °Cで発熱量のピークが鋭く、熱量が高い、アジ化銀と考える方が多いであろう。アジ化銀は起爆薬として使用され、火薬類であり感度も高いため、取り扱いには、注意を要する。この中で全く、爆発性がないのは、塩化銀である。455 °Cが融点で、塩化物がDSCの金属セルと反応し発熱が観測されており、塩化銀自体の爆発性はないと考えられる。銀化合物は、発熱開始温度や発熱量から、物質の危険性を把握するのは非常難しく、スケールアップして、色々な側面から確認実験を行う必要がある。実はこの中で、アジ化銀より格段に取り扱いが難しく、雷銀が一番危ないことが知られている。摩擦感度とは爆薬の機械的刺激の中で、摩擦に対する感度を示す値である。雷銀は摩擦感度が格段に高い。摩擦感度は、熱分析の結果とある程度の相関がある場合が多いが、雷銀の場合は、熱分析から予測するのは困難である。雷銀は合成の際に、アンモニア水を使用して合成する方法があるが、乾燥放置した際に、アンモニアに虫(蚊)が寄ってきて、雷銀に止まった瞬間に爆発して、蚊が気絶するような現象が確認できるほどである。雷銀においては、通常の摩擦感度試験や落つい感度試験ですら、準備段階で爆発してしまうので、実施は困難である。火薬類としては、危険であるため利用することはできない。

民間企業において、ラボレベルの実験で、銀粉を製造するプロセスの開発中に誤って雷銀が生成してしまい、爆発事故が起きた。そこで、爆発の原因を突き止めるとともに、雷銀が生成しないような領域を見極める研究を行なった。⁷⁾ 雷銀はアンモニア水に酸化銀を溶かしアンモニアを枯渇するだけで生成する。スケールアップして行くと、触れただけでも爆発し、危険で手に負えない。そこで、我々はミリグラムスケールで、混合比を変えて、乾燥させた。アンモニア水は1 g酸化銀は、10~38 mgの範囲で4点の実験を行なった (Fig.13)。



Fig.13 Air drying experiment (#121101-1 ~ 4) aqueous ammonia (1 g) was mixed with Ag_2O of 38 mg (-1), 30 mg (-2), 20 mg (-3), 10 mg (-4).

雷銀の有無については、赤外線レーザーを照射して、爆・不爆の確認を行い、生成の有無を確認した。赤外線レーザー（古川電工製、HPU60102）は、波長 $930 \pm 10 \text{ nm}$ で、パルス強度 5 W、パルス幅 2-10 ms、10 Hz 発振であり、コア径 400 nm の光ファイバー（GC500/400）を使用し、レンズを用いて集光して使用した。まず、黒色火薬を着火できることを確認してから、実験に使用した。光ファイバーを表面に生成した雷銀に近づけると瞬時に爆発し、容器が跳ね上がり、爆発後は、溶液のみが残った（Fig.14）。その結果、雷銀を発生する領域を見極めることができた。さらに、塩化物イオンを入れることにより、銀を安定化させ、雷銀が発生しないような領域を見極めることが可能である。

Fig.15 に 2 g の雷銀に水の滴下の刺激で起爆させた際の高速カメラ写真を示す。ガラス容器は、一瞬で破壊され、破片速度は 220 km h^{-1} に到達している。グラムスケールの実験は非常に危険なため、完全防護の上、爆発ピット内で合成を完了させ、慎重に準備を進め、遠隔で起爆を行った。

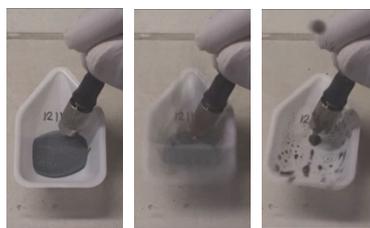


Fig.14 Laser ignition of Ag_3N , left: before explosion, center: under explosion, right: after explosion.

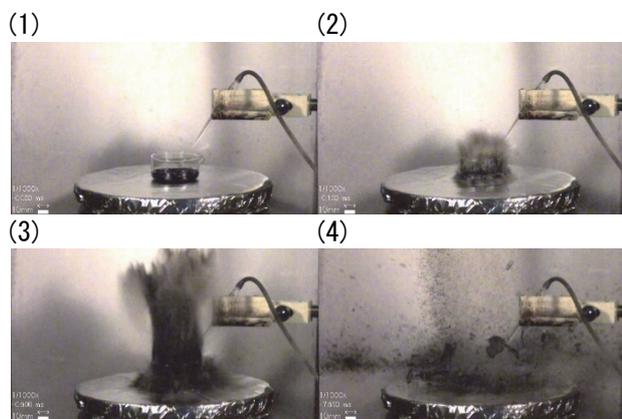


Fig.15 Explosion photograph of 2 g Ag_3N (1) 0 ms, (2) 0.1 ms, (3) 0.6 ms, (4) 7.8 ms, with water drop stimulation.

4. まとめ

イオン交換樹脂の爆発事故および銀化合物の爆発性物質についての研究紹介を行なった。原因物質の究明には、熱分析関係のツールが非常に有用であることを示した。グラムスケール熱分析では、実際の爆発も確認することができる。しかしながら、威力が大きすぎる場合は装置が破損する恐れもあるので注意が必要である。熱分析は、爆発性物質の確認試験としては必要不可欠である。しかしながら、熱分析だけでは、爆発性物質の真の危険性については、把握できないことが多いため、スケールアップして、実際に爆発を起こして、テストをする必要がある。爆発性物質の取り扱い、特殊な施設と経験者でないと危険であるため、爆発事故の原因究明が必要な場合には、専門家に相談することが望ましい。たとえ、論文や書籍に従って合成作業を行っても、数量やプロセスが間違っている場合があり、爆発性物質が意図せずできてしまう場合がある。どうしても、合成する必要がある場合は、完全防護の上、ガラスなどの飛散物を避け、なるべく少量（0.1 g 以下）で行うことが望ましい。近年では、製品の製造のさらなる安全性が求められている。当然、危険なプロセスは避けるべきであり、「君子危うきに近寄らず」である。しかしながら、いつも、いつも逃げ腰では、現代の競争社会では生きていけない。「虎穴に入らずんば虎子を得ず」であり、リスクとベネフィットを検討し、リスクトレードオフをしながら、危険物質をコントロールして、賢く取扱うことが必要である。爆発性物質の生成のメカニズムを把握して、爆発の閾値を把握すれば、安全に取り扱える領域を把握することが可能である。今後も爆発性物質をコントロールしながら、安全に取り扱って、産業の発展に協力したいと考えている。

謝 辞

本研究は、産総研安全科学研究部門の松永猛裕氏、秋吉美也子氏、ABE Rene Yo 氏らと共に進めたものである。ここに感謝の意を評する。

文 献

- 1) United Nations, *Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Manual of Tests and Criteria*, 6th Rev. E (New York and Geneva, 2015).
- 2) K. Okada, M. Akiyoshi, A. Miyake, T. Ogawa, M. Nomura, and T. Matsunaga, *J. Therm. Anal. Calorim.* **97**, 769–774 (2009).
- 3) 古藤信義, *Japan Energy Technol. Intell.* **43**, 141–146 (1995).
- 4) C. Calmon, *Chem. Eng.* **87**, 271–274 (1980).
- 5) E. A. MacWilliam and M. J. Hazard, *Photogr. Sci. Eng.* **21**, 221–224 (1977).
- 6) J. L. Ennis and E. S. Shanley, *J. Chem. Educ.* **68**, A6 (1991).
- 7) K. Okada, R. Y. Abe, M. Akiyoshi, and T. Matsunaga, in *Asia Pacific Saf. Symp.* (Singapore, 2013).



岡田 賢
Ken Okada
E-mail: ken.okada@aist.go.jp