

学校理科教育現場における事故事例とその対策 (3)

長島 宏希／加部 義夫

はじめに

前回までに学校理科教育現場における事故原因について解説し、一般的な安全対策についても見てきた¹⁾。もっとも事故の件数が多い化学教育分野の専門誌には特集号が掲載されている^{2)～6)}。更には全国や都道府県などの自治体の教育センターからも理科実験教育の事故事例やその対策が公表され^{7)～11)}、出版社に依る安全指針などが定期的に発行されている^{12)～14)}。しかし、その量も多く、内容も今では古くなっておりそれらの資料を利用するにも難しくなっている。小・中・高並びに大学初年次など幅の広い環境で実施する理科実験において実験指導に的確に役立つ事故防止策や安全対策が望まれる。

そこで従来の事故防止策、安全対策に最新情報を加えつつ、現状に合った解説をすることが本稿の目的である。今回は引き続き具体的な理科教育の化学分野の事故事例としてその対策などについてひとつずつ見てゆきたい。これまでの専門誌、自治体の対策と報告書、さらには出版社による書籍を取り上げて、必要な項目には適宜詳細な解説を試み、その事故防止対策と共に見ていくことにする。

1. 学校理科教育現場での具体的な事故例

1.4 水素、金属ナトリウム、塩素酸塩、銀の窒化物の爆発

利安は（小学校では）水素の爆発は教師が演示実験として行っているときが多い。中学校では水素の爆発は薬傷というよりも水素に点火・引火した時の際の爆発による、発生装置のガラス片による切り傷の事故である。安全で小規模な実験装置の工夫が求められている。（高等学校では）金属ナトリウムと水の反応の事故も多い。爆発事故として塩素酸塩と燃焼剤を乳鉢で混合する際の事故や文化祭などでの火山噴火模型の事故などもある。また、銀鏡反応の廃液の放置で爆発性のアジ化銀や銀アミドが生じる。廃液は濃硝酸、塩酸などを加えて、一度塩化銀として回収しておくとして述べている¹⁵⁾。

事故例 水素の爆発¹⁶⁾

水素の燃焼を演示しようと水素発生装置の出口に炎を近付けたときに発生装置が爆発をした。

水素を試験管に集めて点火しようとしたら、水素発生容器に火が入り爆発をし、三角フラスコが破損、負傷を負った。

燃焼反応を扱う場合は必ず「爆発限界」を把握しておくべきである。昭和50年代頃までは高校化学でも「爆発限界」について触れられていたが近年では目にすることがなくなった。実験指導をする立場の人としては燃焼ガスなどを扱う実験をする直前に爆発限界を確認し、認識を改めておきたい。水素ガスの爆発限界は幅広く(4.0-75)%である。「水素ガスの場合は如何なる割合であっても爆発を起こすもの。」という認識で実験に臨むべきと語る方もいるほど水素の燃焼爆発は高い危険性がある。燃焼性を有する有機物質と比べるとその危険性が明らかである。例えばベンゼンの爆発限界は(1.2-8.6)%で、比べものにならないほど爆発し得る範囲は狭い(表1)。

表1 可燃性ガス、有機溶媒の爆発(燃焼)限界 と 引火点¹⁸⁾

可燃性ガス	発火温度 [°C]	爆発(燃焼)限界(vol%)		引火点[°C]	沸点[°C]	蒸気密度 (対空気)
		下限	上限			
水素ガス	560	4.0	75	(ガス)	-253	0.1
アセチレンガス	305	2.3	100	(ガス)	-84	0.9
アセトン	539	2.5	14.3	-20	56	2
ベンゼン	498	1.2	8.6	-11	80	2.7
トルエン	530	1.0	7.8	4	111	3.1
ジエチルエーテル	175	1.7	39.2	-45	35	2.6
エタノール	400	3.1	19.0	12	78	1.6
酢酸	510	4.0	19.9	39	118	2.1

水素と酸素との体積比率が2対1の場合が最も激しい燃焼爆発が生じる。亜鉛と希硫酸などから水素を発生させた場合、発生し始めの頃は発生装置内に空気が残存していることもあり、大きな危険性が存在する。しかし、水素を連続的に発生させたとしても危険性が消えない場合がある。水素ガス発生装置の容器はガス置換が進みやすい円筒形状容器であることが理想的である。ひと昔前の文献などに記載されている実験装置、その装置の発生容器に三角フラスコが用いられている。その三角フラスコ内で発生した水素ガス(分子量2)が空気(平均分子量28.8)よりもはるかに軽いために容器内の空気よりも先に三角フラスコ上部の排出口から排出する。水素ガスが排出し続けても三角フラスコ裾(すそ)のデッドスペースには空気が残存しガス置換が進みにくい。かかる現象から三角フラスコ内は燃焼爆発の危険性が消滅することがない。この危険性を認識していないことにより水素ガス発生に係わる事故が無くならないようである。水素ガス発生装置の誘導管、その先端に炎

を近付け着火させる操作による爆発事例が多々ある。この危険性を教科書出版企業も注意を促している¹⁹⁾。水素の発生する誘導管の先に点火する場合は発生器中に空気が残存していないことの確認（空気混在試験）の後でなければ、絶対に点火してはならない。はじめに一度確認しても、その後、希硫酸などの溶液を補充したりし、再び空気が混入している可能性があるときは今一度、空気混在試験を実施し、確認をする。空気混在試験とは発生装置から排出してきた気体を上方置換にて試験管に捕集し、発生装置から一定距離離れた地点で点火する。又は石鹼水を用いて確認をする。石鹼水にて発生装置から排出してきた気体を内包する泡を作り、かかる泡をスプーンなどの用具ですくい取り、発生装置から一定距離離れた地点で点火する。点火により爆鳴音と共に排出気体が燃焼をした場合は装置内に空気が残存しているので、危険である。これらの危険性を考えて山浦、中村は安全な水素発生器などを提案している²⁰⁾。

筆者らは山浦、中村が提案した水素発生器²⁰⁾を現在、入手容易な実験器具から製作した（図1）。

図1 水素の発生器（左 中左 中右） と 実験用スプレー缶（右）



スポイト瓶（60mL）の底部を切断し有孔シリコンゴム栓で封じて発生容器とした（図1左）。華状の亜鉛をスポイト瓶につめ（図1中左）、希硫酸を仕込み入れた小型樹脂製ビーカーに沈める。沈めることにより希硫酸がシリコンゴム栓の孔からスポイト瓶に入り込み、亜鉛と接触し、水素ガスが発生し始める。ピンチコックなどにてチューブを閉じガス流出を止めると、スポイト瓶の内圧が上昇し希硫酸が押し戻され、亜鉛と希硫酸との反応が止まる（図1中右）。スポイト瓶に華状亜鉛をすき間なく詰め込むことによりデッドスペースを最小に抑え込み、爆発の危険を回避できる。少量の金属銅を仕込むと局部電池が形成され、スムーズな水素発生反応が期待できる（図1中右）。

多くの実験では発生容器は硝子製の器具でなくても良いと思われる。是非とも上述のような樹脂製の水素発生器を用いて欲しい。可燃性ガスを多量に発生させると、引火爆発をすることがあるため、試薬量は必要最小限としたい。発生を中止、終了する場合は、ピンチコックでゴム管を閉じるなどの操作にて行い、むだに水素ガスを出しっぱなしにしない。これらの点に気を配らずに爆発を起こした事例は全国で多数報告されている。

水素ガスの発生器が破裂している事例が多いことから、前述の注意事項を怠っていた可能性が高いと思われる。演示実験を行うその場にて水素ガスを発生させる必要が無く、単に少量の水素ガスが必要であるのならば実験用ガスボンベ（スプレー缶タイプ）を用いることを考えるべきである（図1右）。引火を防ぐための防爆管などの工夫がなされていた時代もあった²⁰⁾が、安全を優先して21世紀の現代では実験用ガスボンベ（スプレー缶タイプ）を利用する手法を選択するべきと考える。

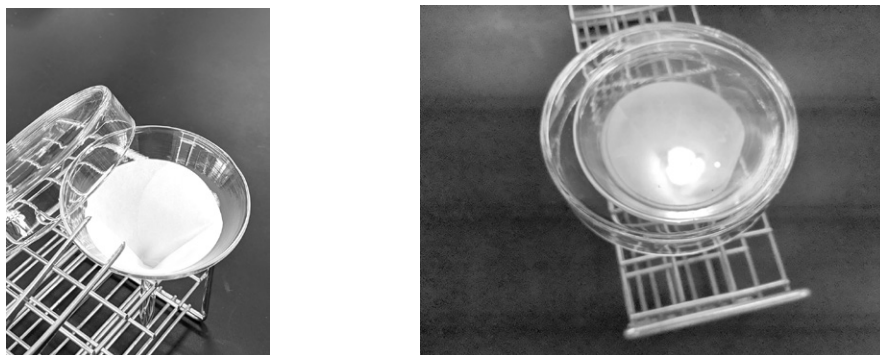
事故例 金属ナトリウムの発火・爆発⁷⁾

金属ナトリウムをメタノールで分解したのち水に捨てたが、分解が不十分で発火した。（ゲル状のアルコキシド膜ができ、内部まで分解しなかったためである。）

金属ナトリウムは反応性が高く危険物質であることは化学関係者であるのならば周知なことである。周知であっても金属ナトリウムを用いた実験中の事故は少なくない件数が起きている。「金属ナトリウムが酸素、水分と容易に酸化反応を起こす。」という知識が直ちに事故防止の知識とならないことを認識したい。

多くの高等学校ではアルカリ金属と水分との反応は水に濡れた汙紙上で行うことが多い²⁰⁾。ロートやピーカーに汉紙を敷き、軽く濡らしたところにアルカリ金属を投入する手法が主流と思われる。投入直後に時計皿などにて必ず蓋をすることにより金属片などの飛び出しを防止すべきである。2-3mm角程度に小さく切り刻んだ金属片であっても金属内部は確認できない。まれに金属内部に空洞が生じている場合がある。かかる金属片が水分と反応するとその空洞に水分が入り込み、予想外の挙動を金属片が起こすこととなる。反応熱にて金属が融解しつつあれば、その危険性は膨大なモノとなる。かかる危険から身を守るために硝子（ペトリ皿、時計皿など）にておおいたい。少人数での実験であればロートに軽く濡れた汉紙をセットしたところに金属ナトリウム小片を投入する実験操作が良いと思われる（図2左）。投入直後にロートをペトリ皿にておおいかぶせ、危険を回避する。透明なペトリ皿を用いることで金属ナトリウムの挙動を容易に確認ができる（図2右）。なお、おおい時計皿よりペトリ皿の方が破損事故は少ない。

図2 金属ナトリウムと水分との反応（左 右）



中・高における実験室での事故、その多くが実験操作中ではなく、反応液処理や実験器具の洗浄などの後処理の際に生じている。実験に対する緊張が緩んだ時間帯が危険なのであることを認識していきたい。小・中の遠足で「自宅に着くまでが遠足」と教員が児童・生徒に言い聞かせて解散することがある。緊張感の維持を促す声掛けである。実験も同じであり、実験操作が一段落した時期を見計らい「反応液処理、器具洗浄、器具の収納などが終了するまではゴーグルを外さずに緊張感をもって取り組むように！」と声掛けをするべきである。金属ナトリウムを含めアルカリ金属を用いた生徒実験での処理は通常以上に注意を払い、生徒実験授業を計画すべきである。アルカリ金属に触れた、または触れる機会があった器具、汙紙などは一カ所に集約したい。万が一のことを考え、集約箇所はヒュームフード（ドラフト）内が理想的である。水を張った大型水槽に使用をした器具、汙紙などを投入することにより処理をする。未反応金属片の有無を実験指導者が確認した後に生徒に投入の許可をする。なお、ヒュームフード（ドラフト）の扉はなるべく下げた状態にしておく。間違えた処理を誘発させない様に実験当日は通常設置してあるごみ箱などは事前に別室に移動をさせておく。日頃から生徒の動向を把握し、指示に反する行動を予想しておくことも欠かしてはならない。前述の事故事例もまさに後処理中に生じている⁷⁾。本人は「気を抜いた」という意識はないと思うが、メタノール処理液の状態を詳細に確認していないことは確かであり、緊張感が充分ではなかったと考えられる。

金属ナトリウムを直接の処理する場合はメタノールよりも反応が穏やかな 2-プロパノール（イソプロピルアルコール）も利用できる。水は直接処理には危険なので用いずにアルコールにて処理をする。当然、メタノール、エタノールでも処理できるが処理中の発火確率が高くなる。処理している際に生じる反応熱はアルコールを蒸気と化し、発火の危険性が高くなるので処理速度には注意を払う必要がある。発火をしても水を掛けたり、通常の粉末消火器を用いたりしてはいけない。砂などを投入して消火するか炭酸ガス消火器を用いる。消火後の後始末が安全かつ、容易に行える。

処理すべきアルカリ金属が長期間保存されていた場合、水分と接触にて生じた水酸化物が金属周辺を覆いまとっていることもある。この場合、アルコールが単体状態の金属部分に到達するまでに時間を要する。到達すると急激に反応が始まり危険な状態になりがちである。アルコールにて処理する前に物理的刺激を加え、アルコールが短時間で金属部分に達するように前処理をするべきである。処理にて生じるアルカリ金属の水酸化物やアルコキシドは強塩基である。皮膚を犯すなどの危険性がある。粘膜は特に注意を払いたい。言うまでもないがゴーグルの着用は欠かしてはならない。

金属リチウムの反応性は金属ナトリウムより穏やかである。反対に金属カリウムは反応性が激しいので注意を要する。金属カリウムの処分は少量ずつ反応させることにより事故回避ができる²¹⁾。

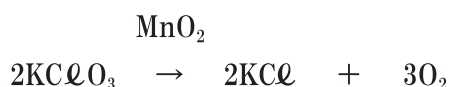
大学などにおける研究実験では脱気、脱水、乾燥したジエチルエーテルやテトラヒドロフランなどが反応溶媒として頻繁に用いられる。これらの溶媒には過酸化物が生じやすく単なる蒸留でさえも爆発する危険性がある。かかる危険を排除するため還元剤（ LiAlH_4 など）を用いて過酸化物を処理した後に金属ナトリウムのワイヤーを共存させた状態で蒸留を行い、無水のジエチルエーテルなどを得る。金属ナトリウムの活性などを確認するためにベンゾフェノンと共存させ、生じるラジカルアニオンが呈する青色を確認する方法が

用いられてきた²²⁾。溶媒精製に用いた多量の金属ナトリウム処理としてかつてはドライアイスにて冷却したメタノールを用いていた。低温のために比較的速やかに処理工程が進むことから多くの研究室などで行われていたようである。ドライアイスが入手困難なときは金属製の一斗缶を用いて焼却処理がなされたと聞いている。一斗缶を半分に切断したものを屋外に持ち出し、溶媒が付着したナトリウムワイヤーを投入、点火、燃焼した後に多量の氷を詰め込み、しばらくの時間放置するという乱暴と思える危険極まりない処理方法である。現在では精製した溶媒が容易に購入し得る環境が整いこれらの溶媒精製操作を行う必要がなくなり、ここに記載した危険な処理操作は不要となっている。

事故例 塩素酸塩の爆発²⁾

酸化マンガン(IV)を塩素酸カリウムとともに気体発生器に仕込み入れ、加熱した。加熱開始数秒後に線香花火の様な小さい火花が確認された。それと共に発生器内に白煙が満ちたのが確認された直後に爆発が生じた。気体発生器の栓が5m先に飛ぶと共に気体発生器自体は粉碎した。火傷を負い、手と顔にも傷を負った。まぶたは二針の縫合処理を受けた。

酸素ガス発生方法のひとつに酸化マンガン(IV)を触媒として用いる塩素酸カリウムの分解反応があると中・高で学習する。かかる反応を実際に行い、事故を起こしている事例が多いようである。



塩素酸カリウムの分解反応には注意を欠かしてはならない。塩素酸カリウムの酸化作用は物凄いものがあり、融解した塩素酸カリウムに1本のマッチ軸木を投入する小さな実験であっても未使用の試験管を用いるべきである。試験管内部に付着物があると異常反応を起こし、危険なのである。無機反応の危険性は有機反応の危険性とは異なり比べ物にならない程大きいと語る方もいる。

採り上げた事故事例の場合は触媒の酸化マンガン(IV)に木炭粉、有機物質などが混入していたものと推測される。反応に用いる酸化マンガン(IV)を前処理することにより危険を回避することが可能である。ステンレス皿に粉体の酸化マンガン(IV)を広げ、ガスバーナーにて加熱することにより炭素成分や有機物質の混入を確認できる²⁾。混入している場合は線香花火のような火花が確認できる。塩素酸カリウムは硫黄、リン、炭素、アンモニウム塩などが混入すると簡単な衝撃、摩擦、加熱などにより容易に爆発を起こす。特に金属粉体の混入は最も危険である。

試薬管理は常日頃から適確に行うことが求められる。本日用いた試薬を次回用いる月日は予想が付かない。小・中・高の教育機関であればその試薬を扱う担当者が異動してなくなっている場合もある。当然であるが前回、用いたときの様子は把握できるものではない。きちんとした試薬管理をしなければ事故という不幸を次の担当者に与えてしまうこと

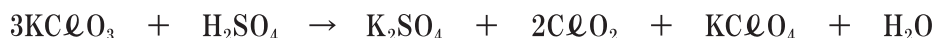
になる。大学でも同様な状況と思われる。試薬を用いるたびに適切な処置をすべきで。ひとつの研究テーマが終了すると掛かる研究テーマに取り組むために購入した試薬、器具などのすべてを処分する企業がある。ノウハウ秘守が第一の目的と思われるが、異物混入などによる異常反応事故の回避も視野に入れた処分、対処と思われる。労災の側面から考えれば理想的な対処なのかもしれない。

安全マッチ製造企業は塩素酸カリウム（頭薬）、赤リン（側薬）を主に扱う。花火製造企業も塩素酸カリウムを主として多種多様な試薬を扱う。かかる製造現場では異物混入には特段の注意を払う。湿潤状態（水分を含んだ状態）での混入作業、少量単位で乾燥等々に関するノウハウを花火製造企業は数多く貯えているようである。従って、新規の参入が容易にできない業界である。

一方、塩素酸カリウム関係の実験や遊びは手軽にでき、かつ児童・生徒らが興味を抱く。下村湖人が書いた「次郎物語」にも火薬にて遊んでいたことが記述されている²³⁾ ことからわかる様に日本では昭和時代から火薬の遊びが広く浸透をしている。かつては興味を抱いた児童・生徒が無断で塩素酸カリウムを薬品棚から持ち出し事故を起こしたという多くの話を耳にした。時代は流れても塩素酸カリウムなどを用いた火薬を用いる実験が一部の中・高で未だに行われているようである。学園祭などにて花火やロケットを演示するために塩素酸カリウムを生徒に取り扱わせているようだ。試薬への異物混入や試薬飛散などに関する危険性を生徒が十分に理解していることが求められる。床に散乱した塩素酸カリウムが物の落下衝撃にて発火する事故事例もある。足元に酸化され易い有機物質が存在すると踏み付ける動作だけで容易に大ごとになることを教えておきたいものである。

最近では塩素酸カリウムに関する注意喚起が関係者にも行き届いたことから事故報告などはほとんど聞かれなくなった¹⁷⁾。しかしながら塩素酸カリウムが安全に扱えるようになったわけではないようである。日頃、実験を行わなくなったから事故報告が減ったという側面もあると思われる。実験を実施していないことから最近の教員には危険性を認識していない方が増えたと予想される。危険性に気が付かずに混合してしまうなどの事故が生じかねない。床にこぼれた薬品を踏むことによる爆発事故、使い込んだ乳鉢に付着していた薬剤による爆発事故なども生じかねない。適確な試薬管理並びに清掃、洗浄についても特段の気配りが必要である。

さらに、塩素酸カリウム水溶液の危険性について触れる。塩素酸カリウム水溶液を酸性にたかよせると塩素酸が遊離し、順次塩素ガス、酸素ガスを放出することにより過塩素酸に変化する。強い硫酸の場合は特異臭を有する気体、二酸化塩素が生じる。



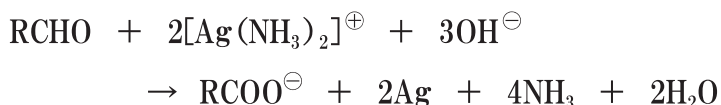
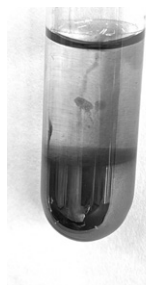
二酸化塩素は反応性が高く、光、熱、振動をきっかけに有機物質との接触で反応し発火、爆発をする物質である。この点にも注意を払いたい。

事故例 銀の窒素化合物の爆発²⁾

ガラス銀鏡の製作中に反応が急激になり、反応溶液が噴出し顔や目に薬傷を負った。銀を回収するため銀鏡反応の反応液を回収した。回収液を保管していたところ爆発を起こした。

銀鏡反応の実験はアルデヒド基を有する化合物が示す還元作用、その作用を確認する反応として、よく知られている実験である(図3)。よく知られている実験であるが、この実験ではしばしば爆発事故が起きている。事故回避の対処としては反応を速くさせないことである。急激な反応が起こるようであるならば、加熱を緩やかにする、又は中断する。もしくは加熱に用いている湯温を下げる。即ち、反応を抑え込む対処を行う。銀鏡反応に関する爆発は雷銀(Ag_3N , AgNH_2 との混合物)の生成によるものとして考えられる。雷銀は濃い酸化銀のアンモニア水溶液にアルコールを加えると生成し、沈殿してくる。沈殿物である黒い結晶の爆発力はそう大きくないが、摩擦などの物理的衝撃により容易に爆発する。古くからきわめて危険な物質としてよく知られている。この雷銀による事故は銀鏡反応の実験ばかりでなく物理実験や天体望遠鏡製作などに行う鏡面製造過程でも起きている。鏡の製造操作における銀鏡析出中の反応に注意を払うべきことは広く知られている。更に鏡の製造操作と同じように廃液にも注意を払う必要がある。廃液は放置せず、反応終了後直ちに希塩酸を添加することで酸性溶液とし、銀成分を塩化銀に変化させ沈殿させておくことが肝要である。廃液を即座に酸性化することにより廃液処分の操作における爆発危険性を回避できる。

図3 銀鏡反応



1.5 塩素とその他毒性気体の吸引による急性中毒

事故例 塩素ガスの吸引事故²⁰⁾

塩素ガスを発生させ、下方置換にて捕集していたときの事故である。ガラス管に残っていた塩素ガスを吹き出そうとしたときに間違えて塩素ガスを吸い込んでしまい中毒となった。担架にて病院に担ぎ込まれ、翌日まで酸素吸入処置を受けた。

塩素ガス吸引による毒性は顕著であることから特に注意を払う必要がある。塩素ガスは呼吸器の粘膜を侵し、肺細胞を破壊し窒息死に至らしめることがある。大気中に10ppm程度の濃度で粘膜が侵され、30ppmの濃度で肺出血を起こすので、短時間にて生命の危険に陥る。塩素の生成、捕集を生徒実験として行った場合、クラスから複数の生徒が不快を訴える事例が多く報告されている。塩素ガスの吸入事故は実験操作時間帯よりも後片づけの時間帯に生じ易いようである。いたずら半分に集気びんを相手の顔面（鼻先）に近づけるなどの悪行による事故である。

物質の臭気を確認する場合は対象物質を鼻に直接近づけることはしてはならない。臭気確認対象の物質が存在している容器、そのとば口付近の空気（物質蒸気を含んでいると思われる大気部分）を手のひらにて運ぶように顔面（鼻先）近くに移動をさせて確認をする。手のひらにてあおるように指導する方もおられるがお勧めしがたい。あおぐ行為は蒸気の濃度にムラが生じる。かかることに基づく不都合を回避するべきであると考え。臭気確認は生体反応によるものである所以需要以上の蒸気吸引は避けたい。手のひらにて運ぶ際も初回は少なめに運ぶべきである。

ハロゲンなどの毒性を有する気体や臭素を扱う実験操作はフュームフード（ドラフト）内で行い、必ず手元に脱ハロゲン化剤溶液を準備しておくべきである。脱ハロゲン化剤溶液にはチオ硫酸ナトリウム、亜硫酸ナトリウムなどの水溶液がある。粉体のアスコロビン酸（ビタミンC）も有用な脱ハロゲン化剤であることは覚えておきたい。試験管などにて塩素などを発生させる小規模実験であれば脱ハロゲン化剤溶液を浸した汙紙、脱脂綿などを近隣に置くだけでも塩素ガスの拡散をかなり押さえることが出来る。塩素発生を伴う実験実習の多くでは事故が生じること無く、準備した脱ハロゲン化剤溶液のほとんどを使用せず終わると思われる。ほとんど使用することがないとわかっていても脱ハロゲン化剤溶液は必ず準備をするべきである。一次洗浄に脱ハロゲン化剤溶液を使用することで実験器具処理中の事故を防止できる。さらに単に水だけであっても拡散を押さえ込むことが可能である。濃硝酸による岩石分析を試験管にて行う場合、ほとんどの場合二酸化窒素ガスが生じる。かかるガスの拡散を阻止するため試験管の賭場（とば）口に水を含ませた脱脂綿にて軽く栓をすることを勧める。二酸化窒素ガスが水に溶け込むことで実験室内への拡散を押さえられ、悪臭が漂うことを防げる。

塩素ガスも同様な対処にて拡散を阻止できる。フュームフード（ドラフト）施設が限られている普通科高校などでは開放系での実験操作が多い。設備面から致し方がない側面がある。塩素ガスのみならず他の気体物質を扱う場合もこの開放系には問題がある。例えば大学などの高等教育機関に入学した化学系学生の多くが臨む「陽イオンの系統分離実験」にて扱う硫化水素ガス H_2S が問題となる。硫化水素ガス H_2S の発生操作はフュームフード（ドラフト）にて行うのであるがその後の操作に問題がある。バブリング（気体の送気）後、通常の実験台に容器を移動させ、次の操作を続ける場合がある。移動後の操作中に硫化水素 H_2S を吸引してしまい、程度の差はあるものの中毒を起こす学生がいる。分子量34である硫化水素ガス H_2S は大気より重いので拡散、分散しにくいことに注意をしたい。

一方、大気の実平均分子量28.8に近似している値、28という分子量を持つ一酸化炭素 CO は挙動が似かよっているがため拡散しやすい。更に硫化水素 H_2S とは異なり無臭であるので危険性がより高い。実験室ではギ（蟻）酸と濃硫酸との反応により一酸化炭素 CO を発

生させる。必要量を採取した後は裸火を接近させ、流出口にて燃焼処理をする。一酸化炭素COを二酸化炭素CO₂に変化させ無毒化できる。最も効果的な危険回避策は必要最小限の量のギ酸を適確に仕込むことである。なお、ギ酸の濃度は保管期間、保管環境により変動をするので注意したい。

有毒ガスの許容量を示す(表2)。出来ることならば実験操作を行う室内に毒ガス検知の測定機器を備え付け、室内環境を監視し続けるべきである。換気良好な施設が確保できない場合は屋外にて実験操作を行うのも一手段として覚えておきたい。

表2 有毒ガスの許容量²⁴⁾

ppm：百万分の一

有毒ガス (化学式)	原料 (反応物)	許容量
青酸ガス (HCN)	シアン化物 + 強酸	5ppm
硫化水素 (H ₂ S)	硫化物 + 酸	20ppm
塩素ガス (Cl ₂)	酸化物 + 塩酸	0.5ppm
塩化水素 (HCl)	塩酸 , 食塩 + 硫酸	2ppm
ヨウ素蒸気 (I ₂)	NaI + 酸化剤 + 濃硫酸	0.1ppm
二酸化硫黄 (SO ₂)	硫黄の燃焼 , 濃硫酸 + 銅	1ppm
アンモニアガス (NH ₃)	アンモニア水 , 消石灰 + 塩安	25ppm
臭素蒸気 (Br ₂)	KBr + 酸化剤 + 濃硫酸	0.1ppm
一酸化炭素 (CO)	木炭などの不完全燃焼	50ppm
アルシン (AsH ₃)		0.01ppm
ホスフィン (PH ₃)		0.3ppm
オゾンガス (O ₃)	コピー機の感光ドラム	0.1ppm
フッ化水素 (HF)	蛍石+濃硫酸	3ppm
ホルムアルデヒド (HCHO)	ホルマリン	0.1ppm

許容濃度の値はその物質を業務として取り扱う作業者が毎日その中で8時間労働を続けても健康を害しない濃度である。従って実験中に短時間、吸入する程度であれば多くの場合、許容濃度を越しても目立った傷害は起こらないと考えてもよいと言われている。万が一、有毒ガスを吸入し、異変が生じた場合は新鮮な空気のところに移し、衣服を緩め安静にして医師の診断を受けさせる。

「事故例 水素の爆発」にて述べたように気体の実験を小・中・高で行うのであれば市販されている実験用ガスボンベ(スプレー缶タイプ)の利用を勧めたい(図1右)。実験用ガスボンベ(スプレー缶タイプ)の利用であれば実験器具や試薬などの準備、後処理、片付けも必要がなく手間が掛からない。安全確保のみならず時間短縮が可能であるありがたい実験資材である。

家庭用スプレー缶(理髪用品、殺虫剤など)には小型のボンベ内部に噴霧剤(多くが液体)と発射剤(液化ガスなど)が充填されている。ボタンを押すと、ボンベに充填されている噴霧剤が発射剤の圧力により、ノイズから発射剤と共に細かな霧となって外に出る仕組みになっている。しかし、酸素、二酸化炭素などの実験用ガスボンベは構造が異なる。充填された気体のみが直接噴出される。いずれの実験用ガスボンベも高温・高圧を避けて

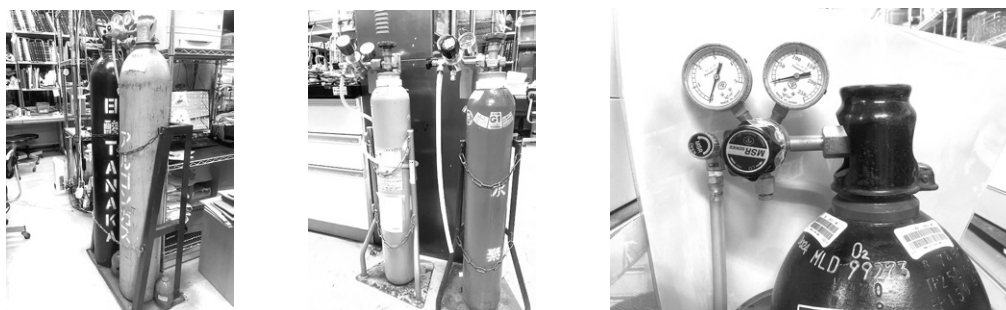
貯蔵したい。また、酸素の噴出は場合によってはわずかな火花でも着衣などを燃やすこともあるので注意が必要である。理科室に備蓄しておく実験用ガスボンベは支焼性又は不燃性ガスに限るようにしたい。可燃性ガスである水素、ブタンなどは漏出をした場合は危険性が大きいので別の場所、例えば薬品庫などにて保管をしたい。

表3 高圧容器（ボンベ）の分類、色彩、ネジ口^{25) 26) 27)}

ガス種	圧縮/液化	容器の色彩	文字の色彩	特性	ネジ口
ヘリウム He	圧縮	灰色	白色	不活性、不燃	左
アルゴン Ar	圧縮	灰色	白色	不活性、不燃	右
窒素 N ₂	圧縮	灰色	白色	不燃	右
酸素 O ₂	圧縮	黒色	白色	支燃	右
水素 H ₂	圧縮	赤色	白色	可燃	左
二酸化炭素 CO ₂	液化	緑色	白色	不燃	右
アンモニア NH ₃	液化	白色	赤色	可燃・毒性	右
塩素 Cl ₂	液化	黄色	白色	不燃・毒性	右

多くの高圧ガスは47Lまたは10Lの高圧容器（ボンベ）で扱われる（図4左中）。特殊ガスには40L、3.4Lなどの容器もある。JIS規格により可燃性ガスの容器は左ネジ（オス，W22-14），その他の容器は右ネジ（オス，W22-14）と，ヘリウムは不燃性ガスであるが左ネジ（W20.9-14），アンモニアは可燃性ガスであるが右ネジ（W22-14）と規定されている²⁷⁾。

図4 高圧容器47L（左）と10L（中）と圧力調整器（右）



高圧ガスボンベ（英語では「gas cylinder」）は国内法令により容器の色彩は定められている（表3）。色彩により充填ガス種の明確な区別を図っている。更にボンベヘッドネジの種類を変えることにより配管接続における錯誤を防止し，事故発生を回避している。可燃性である水素の高圧容器は赤色に塗装されていると共にヘッドのネジは左ネジになっている。表中にないアセチレン（CH≡CH）ガスは圧縮も液化もできないので高圧容器内に多孔質の特殊素材（アセチレン分子吸収剤）を組み込み貯蔵容器としている。塩化水素も高圧容器に充填できうるガスであるが圧力調整器（レギュレーター）が酸性物質にて腐食されるので使用する毎に水洗と乾燥を行う必要がある。

おわりに

前回から具体的に事故例について物理、化学、生物、地学の分野別ごとに見ていくことにした。先ずは小・中・高で発生頻度が高い化学分野の実験事故から取り上げることにした。今回は主に爆発性や発火性の気体と化合物を取り上げ、その危険性を回避する方法を紹介した。特に気体については高圧容器を用いる場合と実験用ガスボンベを用いる場合を紹介した。次回以降は化学分野における低温寒剤、引火性の溶媒、劇毒物や廃液の取り扱いについて解説し、その後、物理、生物、地学分野の事事故例に言及する予定である。

【引用文献】

- 1) 長島宏希 加部義夫 神奈川大学 心理・教育研究論集 第51集 p109-120.
- 2) 竹林保次, 武谷琢美, 中西啓二, 難波桂芳, 西平輝子 化学教育1965 13巻 NO3 p373-395.
- 3) 「＜特集＞中・高・大学における化学実験の安全教育」化学教育 1971 19巻 NO1 p7-60.
- 4) 「＜特集＞安全な化学実験ABC」化学と育 1993 41巻 NO8 p508-528.
- 5) 「＜特集＞教育現場における危険物 有害物の取り扱い」化学と教育1996 44巻 NO5 p290-312.
- 6) 「＜特集＞化学実験での事故防止のために—いくつかの事故例と安全教育—」化学と教育2005 53巻 NO6 p346-349.
- 7) =理科・生活科=「観察, 実験事故防止の手引き」(四訂版) 東京都教育委員会 平成7年3月発行 東京都教育長指導部企画課 (有) 山広印刷所印刷
- 8) 西潟千明 (2000年)「科学実験, 科学工作等における事事故例の考察—30年内の505事例—」科学技術振興事業団
- 9) 「安全な理科実験・観察ハンドブック—高等学校—」(平成16年) 佐賀県教育センター 2004
https://www.saga-ed.jp/kenkyu/kenkyu_chousa/h16/01anzennarika/top4.htm
 (閲覧確認20220823)
- 10) 全国理科教育センター研究協議編集 「安全な理科実験—事事故例とその防止対策」東洋館出版 1967年5月.
- 11) 池田順子 「理科学習指導に関連した事事故例とその対策」新潟県立教育研究所 1966
<https://core.ac.uk/download/51375108.pdf> (閲覧確認20220823)
- 12) 日本化学会「化学実験の安全指針」(第4版) 丸善1999 214p. ISBN-13 : 9784621045763.
- 13) 化学同人編集「実験を安全に行うために」(第8版) 化学同人 2017 154p. ISBN-13 : 9784759818338.
- 14) 化学同人編集「続 実験を安全に行うために—基本操作・基本測定編—」(第4版) 化学同人 2017 150p. ISBN-13 : 9784759818345.

- 15) 利安義雄「学校における化学実験の安全に関する現状と課題」 化学と教育 1996 44 巻 NO 5 p290-293.
- 16) 石島秋彦, 佐巻建男, 西潟千明, 山本明利, サイエンスレンジャーによる 科学実験 無故88 2000年3月.
- 17) 黒杭清治「高校化学実験の事故例と安全指導 (<特集>化学実験と防災)」化学教育 1979 27巻 NO3 p168-173.
- 18) 労働安全衛生総合研究所技術指針「ユーザーのための工場防爆設備ガイド」(平成24年11月1日)
https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/doc/tr/TR_No44.pdf (閲覧確認20220823)
- 19) <https://www.shinko-keirin.co.jp/keirinkan/chu/science/support/safety-guidance/hydrogen.html> (閲覧確認20220823)
- 20) 山浦秀男, 中村次郎「安全な水素発生装置:防爆管の開発」 化学と教育 1987 35 巻 NO4 p.368-369.
- 21) 井本英夫「実験室における危険・有毒な金属化合物の取扱い (<特集>教育現場における危険物・有毒物の取扱い)」化学と教育 1996 44巻 NO5 P301-304.
- 22) 後藤俊夫, 芝哲夫, 松浦輝男監修「有機化学実験のてびき(1)一物質取扱法と分離精製法一」第5章 溶媒 化学同人 1988年 楠木正一, 早川芳宏, 安田源 第5章 溶媒
- 23) 下村湖人. 次郎物語(上), 新潮文庫, (しー3ー7), 新潮社, 1987, p.271-280. ISBN-13: 978-4-10-110507-9
- 24) 日本産業衛生学会 産業衛生雑誌 2021 63 (5) 179-211
https://www.sanei.or.jp/files/topics/oels/kyoyou_2.pdf (閲覧確認20220825)
- 25) 高圧ガス保安法(昭和二十六年法律第二百四号)
- 26) 容器保安規則(昭和四十一年通商産業省令第五十号)
- 27) JIS B8244, JIS B8246