



講座 今日からはじめる磁場閉じ込めプラズマ実験

5. 楽しい実験は安全第一の精神から

5. Safety First, to Enjoy Your Experiments

江尻 晶

EJIRI Akira

東京大学大学院新領域創成科学研究科

(原稿受付：2014年6月10日)

安全確保の第一歩は危険の察知です。本章ではどのような危険がありえるか、どのような原理で危険が発生するのかを解説し、どのように対処すればよいかを考えます。危険にはいくつもの種類がありますが、プラズマ実験で特に気を付けるべき点、多いケース、プラズマ実験特有の状況を大きく取り上げます。具体的な危険性として、感電、窒息と危険な気体、高パワー電磁波・レーザー、高温・低温源、転倒・落下・打撲・創傷、薬品類、放射線を解説します。また、実験室への入退室管理、ルール・法令等の遵守についても触れます。

Keywords:

safety in plasma experiments, electric shock, suffocation, injury, chemicals, radiation

5.1 初めに

素晴らしい実験を行い、素晴らしい成果を上げたとしても、それはたった一つの怪我や事故で台なしになりえます。安全確保は、もっとも優先度の高い事項ですが、ともすると面倒で退屈な作業にみえるかもしれません。しかし、安全確保は、研究と同様に、想像力を働かせ、創意工夫ができる分野でもあります。そういう意味で、適切な安全確保を模索することは、よい実験をデザインし、成果を上げることと同様に面白いことです。逆に、経験者となれば、最初から安全確保を組み込んで実験をデザインするのが常です。

本章では、比較的小規模なプラズマ実験室において安全をどう確保するかを述べます。大規模な実験室では、扱う機器の重量・電圧電流値も大きくなり、危険性の度合いが異なってきますし、機器ごとに担当者を設けるだけの人員配置が可能となります。もちろん、安全確保の本質的な所は実験室の規模の大小には依存しません。ただ、具体的な措置は規模に依存して大きく変わることがあります。

対象者としては、学生やこれから実験室を立ち上げようとする若い研究者を念頭に置きますが、年配研究者にも是非、本章を読んでいただき、安全を見直すきっかけとしてもらいたいと思います。なぜなら、安全の確保は静的なものではなく、常に変動し、常に見直さなければならないものだからです。

安全確保は、一人でできるものではありません。所属組織のハード・ソフト面での支援が重要です。ただし、必ずしもそれらの支援が現場に適しているとは限りません。現場を一番よく知っているのは各実験者であり、現場の危険性を理解し、よりよい安全確保を模索することは、各人の

役割でもあります。したがって、安全確保の第一歩は現場の「危険の察知」であり、本章では危険の察知と理解に重点を置きます。

5.2 安全と危険の察知

安全とは、危険の反対として認識されます。すなわち、安全を確保することは危険を回避、防止することです。では、危険とは何でしょうか。怪我や病気などの身体を害するものが思い浮かびます。ここではそういう身の危険だけでなく、実験機器の破損についても触れます。もちろん、破損した機器は、修理したり、新品を購入すれば済みますが、身体へのダメージは治らない場合もあるし、替えが効かないので、身の安全の方がはるかに重要です。ただ、機器の破損を防ぐことと身の安全を確保することには多くの共通点があり、種々の措置は一石二鳥となりえます。

さて、危険を回避し、防止するには、危険を察知し理解することが重要で、それができれば、自ずととるべき行動が決まります。いわゆる孫子の「彼を知り己を知れば百戦殆からず」の彼を知る部分です。

では、どのような危険があるのでしょうか。プラズマ実験での代表的な危険をキーワードで示すと、感電、窒息・危険な気体、高パワー電磁波・レーザー、高温・低温源、転倒・落下・打撲・創傷、薬品類、放射線が挙げられます。以降でこれらについて解説します。

5.3 感電

高電圧は危険で、低電圧は危険でないというのは半分正しく、半分間違っています。例えば、手の高さの空中は、足をおいた地面に対して正に 100 V 程度の直流電位を持って

いますが、裸足で立って手を突き出したとしても感電することはありません。あるいは、オシロスコープに単線を繋いで観測すると数十Vの商用交流が見えますが、やはり空中で感電することはありません。これは、空中は電源としては出力インピーダンスが大きいからと説明できます。反対に1V以下の残留電位をもつ電解コンデンサーの電極をスパナで短絡するとびっくりするほどの火花が出ます（真似をしないように）。これは出力インピーダンスの低い電源であるコンデンサーと入力インピーダンスの低い導体であるスパナを接続したために、コンデンサーのエネルギーが一気に開放されたからです。

感電死の危険性の目安としては、50 mA 秒が挙げられています[1]。人体の抵抗は数k Ω なので、AC100Vでも危険で、電圧が高くなれば危険性も高くなります。AC100Vでの感電死ニュースは聞きませんが、ヨーロッパなどではAC220-240Vが使われ、感電死がニュースになります。当然、抵抗の値にも依存します。濡れた手とゴム手袋をつけた手は大きく異なります。また感電すると筋肉が収縮し、手を離せなくなり、感電している時間が長くなることがあります。

プラズマ実験室内には多くの高電圧機器が存在します。コンデンサー電源はその代表ですが、光源としての放電管、放電励起型のレーザー、光電子増倍管やAPD用の高電圧電源といったものから、ビーム加速用の電源、真空管や発振器のための高電圧電源、磁場発生用の直流コイル電源など種々の電気機器が存在します。また、スポット溶接機、スタッドガンと言った電気溶接でも高電圧が使われていますし、メガオームテスターは0.5-1kVの電圧を印加します。

こういった機器を扱う時には、まず、どのようにすれば、電圧を落とすことができるかを理解しなければなりません。コンデンサーはもちろん、スポット溶接機などコンデンサーを内蔵している機器は、積極的に電圧を落とす必要があります。コンデンサー電源では、接地器を内蔵し、何らかの緊急停止スイッチやドアスイッチと連動させるのが望ましいです。また、それとは別に接地棒を用いてコンデンサーの両端を短絡してから作業するのが原則です。接地器・接地棒は、接地する配線、短絡電流を制限するための接地抵抗、絶縁された操作部や握り手から構成されます。接地抵抗がなければ、小容量のコンデンサーでも接地時に火花が発生します。抵抗値は1k Ω 前後が一般的と思われるのですが、抵抗値 R とコンデンサー容量 C の時定数である RC で電荷（電圧）が減衰するので、あまり R が大きいと接地に時間がかかりすぎます。逆に R が小さすぎると瞬間的な発熱により抵抗が損傷するので R の選択は状況に合わせて考えます。接地棒は自作できます。大電流を流せる比較的大きな抵抗を用います。ただし、この抵抗が割れて機能を果たさなくなることがあるので、注意しなければなりません。最終的にはテスター等で作業部の電圧を測るべきですが、DC電圧を確認して、AC電圧が残っていたりすることもありますのでテスターもACとDCで測定します。手間を惜まずに、必要な手順を踏むことと、対象となる機器を理解し、電圧値・電荷量の程度、出力インピーダンス

の大小、DCなのかACなのかといったことを考慮しながら作業することが肝要です。

接地棒やテスター以外にも種々の道具や材料を 사용합니다。ベークライトやテフロン、ガラスエポキシ、マイラーやカプトン、自己融着テープは代表的な絶縁材料で、高電圧部の短絡や露出を防ぐのに用いられます。材質に応じてどのくらいの電場（=電圧/厚み）に耐えられるかが決まっていますが、実装状況にも注意を払います。例えば、高電圧部の露出を防ぐためにマイラーシートを巻いたとします。こうしておけば、誰かが散らかしたアルミ箔が舞い上がって、たまたまそこに落ちて短絡することはないでしょう。ところが、マイラーシートに小さな穴が空いていたり、巻き方が粗く隙間がある（いわゆる不完全なオーバーラップがある）と意味がなくなります。また、絶縁材の劣化や汚れにも注意する必要があります。例えば、高電圧部を固定・支持するのに波型の碍子が用いられますが、その表面が汚れていたりするとそこを伝って放電（沿面放電）が起きます。通常碍子は、波型にすることで、表面上の距離を伸ばし、汚れが広がりにくくしていますが、汚れがひどければ沿面放電が起きます。

ゴム手袋や、握り手がゴムで耐電圧性能を記したドライバーなどの防具や道具があるので、それらの使用も考えられますが、それらを使用しないで済むような手順や安全装置を整備する方が望ましいです。

下に著者が体験または見聞きした事例を示します。電解コンデンサーは化学反応を用いており、自然に電荷が溜まる事があります。二つのコンデンサーを直列に接続することで定格電圧が二倍、容量が半分のコンデンサーとして使うことができます。非使用時に直列接続のコンデンサーの両端を接地機で接地しているとします。この時、二つのコンデンサーに反対符号の電荷が溜まって、中間点に電位が生じることがあります。接地したから安心と思って、中間点を触ると危ない目に遭うことになります。

ある人が、高電圧部に設置したオシロスコープのボタンを操作するために、箒の柄を使いました。一見して柄は絶縁物だったのですが、実際には内部に鉄パイプが入っていて感電しました。高電圧部を操作するのに絶縁物を用いるという発想は自然なもので、真空バリコンやある種のスライダックでは積極的に絶縁部を設けています。さて、この場合、オシロスコープを操作するという目的はどのように達成すればよいでしょうか？ 最近のオシロスコープであれば、有線LANケーブルで接続してLAN経由でオシロスコープを操作するのは一案ですが、有線LANケーブルの端末の絶縁用パルストランスは、通常1kV程度の耐圧しかありませんので、すすめられません。そこで、LANを光に変換して、（金属被覆でない）光ケーブルで接続して絶縁します。無線LANを用いる方法もありますが、実験室の環境によっては、無線の信頼性は低くなります。それでも、オシロスコープの操作には十分かもしれません。

商用交流の分電盤内の配線をする機会はあまりないかもしれませんが、ここは、理想的な低インピーダンス源で、かつ、配線が露出している場合があるので、細心の注意が

必要です。分電盤につながっているすべての機器を OFF にして、上流側のブレーカーを落とし、作業する分電盤内の電圧をすべて落としてから作業します。

5.4 窒息と危険な気体

タンクやマンホールで清掃作業中に窒息するという事故は時折報道されますが、プラズマ実験では、真空容器内などの比較的密閉度の高い空間や、ピット等の掘り下げた空間での酸欠に注意する必要があります。携帯型、あるいは据え置き型の酸素モニターを活用するとともに、十分な換気を行います。真空容器の大気開放時に窒素を充填する場合は、酸素濃度が低下している可能性がありますし、換気の不十分な真空容器内で長時間の作業をすれば酸素濃度は徐々に低下します。真空容器の2か所を開放し、1か所から業務用扇風機や送風機を用いて十分な換気を行います。また、万が一のことを想定して、真空容器外に人員を配置しておきます。SF₆等の重い気体はピットなどの掘り下げた部分に滞留し結果的に酸素濃度を低下させることがあります、注意が必要です。このような閉鎖的な空間は、意外な状況でできてしまうことがあります。液体窒素から蒸発した気体窒素が吹き上がっている状況で、その上部で、暗幕を被って光学系の調整をしていて、そこに窒素が溜まって窒息したという例もあります。また、液体窒素容器が倒れて、室内に窒素が充満して窒息した例もあります。

プラズマ生成用の水素は可燃性で空気中の濃度が4%以上となると爆発する可能性が出てきます。水素は他の可燃性気体と比べて爆発濃度範囲が広く、着火しやすく、潜在的な危険性の高い気体です。ボンベから真空容器までの供給系が十分密閉されていることはもちろんですが、排気系にも注意を払う必要があります。真空排気系の排気口から出たガスをどのように室外に排出するか、単位時間にどの程度の量のガスが発生するかを考えます。配管内に軽い水素が溜まることのないように配管経路を工夫するとともに、場合によっては、空気等を混ぜて排出します。また、水素濃度計を室内等に設置します。

プラズマ実験ではありませんが、著者が聞いた例を記します。水素過多条件で水素の燃焼実験を学生が一人で行っていました。実験終了後に、マニュアルに定められた窒素による希釈を怠って、チャンバー内の気体を排気したところ、ロータリーポンプのオイルミストトラップ内で着火し、(水素と)オイルが燃えたという事故がありました。また、古い例ですが、ボンベの高圧バルブの経年劣化によりガスが漏れ出し、何のガスが漏れたのかすぐにはわからず、焦ったという話もあります。化学系の研究室で反応する組み合わせのガス配管に共通する部分があり、爆発したという例もありますし、地下街で都市ガスが漏れ、天井に滞留し爆発したという例もあります。これらの事故は多くの教訓を含んでいます。

気圧のかかるところであれば正圧による膨張や爆発、真空を引いている場合は負圧による収縮や爆縮が起こりえます。こういった圧力に耐えられる構造であるかどうかを考えることは当然ですが、想定外の圧力がかかった時のため

の安全弁を用意することもあります。例えば、ゲージポートに真空計などの機器を取り付ける時は、負圧(真空)に対してはよくても、正圧に対しては飛び出すことがあります。真空容器のガラス窓の破損による爆縮は意外な損害を引き起こすことがあります。磁場閉じ込め装置では、しばしば強磁場を用いますが、この磁場や時間変化する磁場で鉄などの磁性体が力を受け、飛ぶことがあります。著者の知る範囲では、スパナなどの工具やトランスを内蔵した携帯型蛍光灯が飛んだ例があります。酷い例としては、爆縮で真空容器内に散らばったガラス破片が真空ポンプに吸い込まれて、ポンプが破損したこともあります。

5.5 高パワー電磁波・レーザー

プラズマ実験では、高パワーレーザー、高周波・マイクロ波発振器だけでなく、種々の光源にも注意を払う必要があります。こういった高周波源、光源の危険性はパワーにも依存しますが、波長、パルスかCWか等にも依存するので、ケースごとに注意点が異なります。

分光器校正用の低圧水銀ランプは、石英ガラスを用いている場合には、紫外線を出します。このランプを数分間見つめると雪目と呼ばれる角膜の炎症が起きます。スキー場で、太陽光の紫外線が反射して目に入った時と同じ現象です。眼鏡のガラス製、プラスチック製レンズは紫外線をかかりカットしますが、完全ではないので、光源そのものなるべく見ないようにし、場合によってはゴーグルを穿きます。また、使用者以外の人が目にする機会を減らすよう不要な方向へ光を漏らさぬように段ボール箱等で覆います。

レーザーは指向性のよいビーム状であることが特徴で、遠くまで伝搬する可能性があります。このようなビーム状のレーザーは弱いものであっても直視することは厳禁です。アライメント等で覗き込みたくなる(直視したくなる)ことはありますが、ビームは狭い面積にエネルギーが集中しているので、繊細な器官である目に耐えるダメージは意外に大きいです。レーザーの危険性は、クラスで表現され、レーザー本体にクラスを示したシールが貼付されています。そのクラスに応じた対策が必要であり、実験室入り口での警告表示が義務付けられているクラスもあります。また、必要に応じてパトライト、緊急停止スイッチ、レーザー運転表示、立ち入り制限表示などを配置し、どのような状況でそれらが運用されるのかを関係者に周知します。例えば、Qスイッチレーザー用にパトライトを点灯させるのであれば、フラッシュランプ稼働時に点灯させるのか、シャッターを開けた時に点灯させるのか、それともパルス発振が起きている状態で点灯させるのかを考える必要があります。

通常、光学系は定盤上のある水平面内に配置します。作業性を考えると腰の高さほどであることが多いでしょう。誤って、鏡に触ったり、予想と異なる光路があったとしても、レーザービームはこの水平面内にある可能性が高いです。したがって、目の高さがこの水平面内に来ないように注意します。また、腕時計や指輪などのひかりものはレーザービームを反射し、その反射光が目に入る可能性があ

り、これらを身に着けないことが推奨されます。危険なレーザーを扱う場合は、後述する入退室制限をするとともに、実験者はレーザーゴーグルを用います。ゴーグルには減衰率がOD単位で表示されています。例えばOD=5では、透過パワーが 10^{-5} に減衰します。使用するレーザー波長で十分なODが確保されているかどうかを確認します。ゴーグルを選択する場合には、波長、OD、他波長での視認性、側面が覆われているかどうかを考慮します。側面が覆われていない場合には、例えば、背中側からやってきたレーザーがゴーグル側面の隙間を通して、ゴーグルに入射し、ゴーグルの裏面側で反射して目に入る可能性があるため、側面が覆われたゴーグルが望ましいです。

高パワーレーザーでは、固体表面での散乱光も危険です。例えば、レーザー光を固体に照射し、レーザーアブレーションの実験を行っていただければ、その固体からの散乱光は高輝度となります。この光を目で観察すると、散乱光は網膜上に焦点を結びますので、危険性は高いです。一方、どこか視界の端で散乱光が見える場合は、焦点を結んでいない可能性が高く、危険性はそれだけ低くなります。

レーザーの危険性は、ちょっとした状況変化で大きく変わります。逆にちょっとした工夫で危険性を下げることが可能です。レーザーや光学系全体をビニール、アクリル板（暗幕）で覆えば、赤外や紫外の光を大幅に減衰させることができます。レーザーの光路を段ボールや塩ビ管で覆えば、レーザー光が漏れる危険性が減ります。目で観察する代わりに、webカメラや監視カメラで観察するのも有効です。

高周波は、プラズマの生成や加熱に頻繁に使われます。また、電子レンジ、携帯電話といった民生品でも使われ、その漏えいや人体への影響も検討されています。例えば、家庭用の電子レンジでは、窓ガラスに金属製の網をはり、マイクロ波の漏えいを抑制しています。プラズマ実験装置でも真空窓に金属メッシュを取り付け、装置内部から実験室内へのマイクロ波の放射を抑制することがあります。人体への安全基準は文献[2]が参考になります。これによれば、30 MHz、1 GHz 以上の場合、6分間平均のパワー密度で、それぞれで 1 mW/cm^2 、 5 mW/cm^2 を安全基準としています。高周波源の伝送路から漏れてくるパワーを測定するためには、市販の電界強度計（電磁波測定器）を用いてもよいし、大雑把な測定なら自作のダイポールアンテナをネットワークアナライザーにつないでもいいでしょう。マイクロ波であれば、導波管フランジの接続部から、わずかではあります有限のパワーが漏れます。

5.6 高温・低温源

半田ごて、白熱灯、ヒートガン、ベーキング用ヒーター、レーザーなどは高温源であり、液体窒素、液体ヘリウムなどの寒剤は低温源です。これらに触れると火傷をすることがあります。不用意に触れることがないように工夫をします。半田ごてによる火傷はもっとも頻度が高いと思われませんが、適切なこて台を用いることで、火傷を防ぐことができたケースも多いと思われまふ。寒剤を扱う時には液体

がこぼれたり、降りかかる可能性を考えて、低温用の手袋や適切な作業服を用意します。寒剤は蒸発して気体になると膨張しますので、その時に、寒剤が吹き上がることがあります。また、液体ヘリウムは容器を冷やすのに時間がかかり、その過程で火傷したり、機器破損が起きる例があり、液体窒素よりも取り扱いには熟練を要します。

5.7 転倒・落下・打撲・創傷

厚生労働省の統計[3]によれば、労働死傷災害では、「転倒、墜落・落下、はさまれ・巻き込まれ」が半数以上を占めます。これについては、所属組織での安全講習会でも取り上げられているはずで、この中でプラズマ実験でありがちな状況をいくつか紹介します。脚立からの落下や高所からの転落、配線に引っかかって転倒、飛び出た部材で頭を打つ、高所から落下した物品が頭を直撃するといった例は多いでしょう。クレーン等による重量物運搬時の危険性、ボール盤等での加工時の危険性は、使用時に取扱い方法を説明されているでしょう。木箱解体時の釘、面取りをしていない部品のバリ、カッターナイフ等による創傷も多いでしょう。また、年配者であれば、重量物を持ち上げた時に腰を痛めることも珍しくないでしょう。このような物理的な原因による怪我は、プラズマ実験でも頻度としては多いと思われまふ。

5.8 薬品類

化学系の研究室に比べて、プラズマ実験で扱う化学物質の種類はかなり少ないですが、ないわけではありません。薬品については所属組織ごとに独自の入庫・出庫、使用管理システムを構築していると思われまふが、ここでは、使用時の危険性について考えまふ。

プラズマ実験で用いる液体の薬品としては、エタノール、アセトン、塩酸などの機器や部品の洗浄に用いるものが挙げられます。こういった薬品の危険性についてはMSDS (Material Safety Data Sheet)、通称「安全データシート」と呼ばれる情報があり、多くの場合、Web上で検索することができます。例えば、アセトンのMSDSを見ると、危険有害性については、引火性液体(区分2)、吸引性呼吸器有害(区分2)、安全対策(熱、火花、裸火などの着火源から遠ざける。……)、救急措置(吸入した場合:新鮮な空気のある場所に移し……、皮膚に付着した場合:皮膚を流水で洗う)などと記載されている。このようにMSDSはその化学物質の危険性、有害性、取り扱い方法、応急処置方法を記載した情報です。区分は危険性有害性の度合いを示したもので、数字が小さいほど危険性有害性が高くなります。

薬品ではなくとも、実験では、様々な物質を扱います。X線測定のためのベリリウム、赤外線光学材であるZnSe、鉛、絶縁材料としてのベークライト、接着剤であるトールシール。この様に多種多様な化学物質は、それぞれ固有の有害性や取扱い注意点を持ち、それらがMSDSに記載されています。また、アルミや銅などの日用品で用いる物質にも有害性がないわけではありません。多くの化学物質は、

飲み込んだ場合、蒸気や粉塵を吸引した場合に有害性が高くなるので、粉塵を出すような加工を避ける、適切な防護具を装着する、接触後に入念に手洗いをする、このような環境で飲食をしないことなどの措置が必要です。実験室での飲食を禁止するのは化学物質が人体に取り込まれる危険を回避するためです。

近年では、人体や環境に有害な物質をなるべく使わない風潮が高まっています。例えば、真空部品を洗浄するのにアセトンを使うことは稀になってきました。従来の半田はスズと鉛の合金ですが、近年は鉛の入っていない鉛フリーはんだが市販されています。また、電気電子部品ではRoHS (Restriction of Hazardous Substances) 適合性が表示されていることが多いです。RoHSはEUにおける鉛、水銀、カドミウム等の含有に関する規制です。ただし、代替物質の有害性が必ずしもきちんと評価されているわけではなく、化学物質の危険性の評価は、次節の放射線に比べると難しいようです。

5.9 放射線

代表的な放射線は、ヘリウム原子核のアルファ線、電子のベータ線、電磁波のガンマ線・X線です。これらの粒子はエネルギーが高く、電離作用をもち、細胞中のDNAを傷つけることが可能で、大量に浴びるとガン等を誘発します。紫外線は電離作用をもち皮膚がんを誘発しますが、通常は放射線には分類されません。放射線の危険性はSv (シーベルト) という単位を使います。この単位は、放射線が物質に与えるエネルギーを元にして、臓器への影響度、放射線の種類の違いを考慮して個人へのリスクを一つの数字で表現した実効線量を表す単位です。したがって、原理的にはこの数字のみで危険性を表現でき、化学物質の危険性の評価と大きく異なるどころです。

一般的な放射線環境については文献[4]等にまとめられています。国や地域によって状況は大きく異なります。日本での平均的な自然放射線は、放射性気体であるラドンを除くと、1 mSv/年で、宇宙由来、大地由来、食品由来で三分されます。世界平均ではラドンの影響が大きいです。日本では、医療用放射線の影響が大きく、自然、人工放射線を合計すると日本人の平均被ばく量は4 mSv弱となります。一般公衆の被ばく基準 (限度) はICRPの勧告を元に1 mSv/年とされていますが、放射線業務従事者の基準は50 mSv/年かつ100 mSv/5年となっています。

被ばくする恐れのあるプラズマ実験に携わる人は (学生も含めて) 所定の検査、講習、手続きを経て放射線業務従事者として登録し、タイクセルバッジ[5]等の個人線量計を装着し毎月の総被ばく量を測定し、基準以下となるように注意します。もっとも、著者の知る限り、プラズマ実験で測定値が検出限界 (0.01 mSv 程度) 以上となった例はなく、検出限界以下であることが普通のようなようです。一方、ヨーロッパでは、プラズマ実験に携わる研究者でも個人線量計を装着しない所があります。これは、放射線被ばくの危険のある (プラズマ生成中の) 実験室に立ち入らないよう管理しているのだから個人線量計を装着しないという論

理でした。

プラズマ実験室では、高エネルギー電子が生成する制動放射 X線が最もありうる放射線です。民生用で最も一般的な X線源は、レントゲン写真などの医療検査用の X線管で40 kV から150 kV の電圧で電子を加速し、それを固体金属に照射して出てくる制動 X線を利用します。同様に考えると自由な電子に高電圧を印加すると X線が発生する可能性があります。ただし、プラズマ実験ではさらに深く考える必要があります。例えば、トカマクのようなトラス型装置を考えます。オーミック放電のために一周で数 V の誘導電場がかかっているとします。もし、自由な電子の閉じ込めがよく、何回も周回する状況が生じたとすると、周回数分の電位を感じ、結果的に MeV の領域までエネルギーを得ることがあります。実際には、電子はイオンや電子と衝突し、エネルギーを失うので単純ではありません。衝突の度合いは、周りの密度と相対速度に依存し、衝突頻度が小さい場合は、非常に高いエネルギーを得ます。この電子を逃走電子といいます。中規模以下のトカマクでは、この逃走電子がリミターや真空容器に衝突した時に放出する X線がもっとも危険な放射線となります。

ヘリカル系でも、状況によっては逃走電子が発生します。例えば、すべてのコイル系の電流比を通常のプラズマ実験と同じにすれば、磁気面が生成できます。この状態で電流値を増加、減少させれば、誘導電場が発生し、先のトカマクと同様の機構で逃走電子や制動 X線が発生します。逃走電子の発生を抑制するには、プラズマ密度や中性ガス密度を高くして、衝突頻度を高くするのが一般的ですが、トカマクでは、ディスラプション等の急速な電流 (分布) の変動により、高い誘導電場が発生することがあるので注意が必要です。

ピンチ系のプラズマ生成装置は、高電圧を印加しますが、密度が高く、閉じ込めが悪いために、高エネルギー電子が発生することは稀のようです。

放射線防護の基本は、距離を置く、遮蔽を設ける、時間を短くするです。そのために、後述するようにプラズマ発生装置のある実験室への入室を制限したり、その実験室の壁に鉛板を埋め込んだり、鉛の遮蔽板を設置したりします。また、個人線量計とは別に、サーベイメータを常置し、装置から放射される X線をモニターすることは、非常に有効です。

放射性同位体は、放射線測定器の校正用として使用されます。プラスチックの円盤に密封した状態で使うことが多く、放射線源としての強さをベクレルで表します。この単位は、放射性物質が一秒間に何回崩壊するかという単位であって、人体への影響を表すSvと直接比較できる単位ではありません。したがって、どのような放射線を放出するかが問題になり、危険性が小さい場合と大きい場合では、法的な取り扱いも異なります。トリチウムでは1 GBq、¹³⁷Csでは10 kBq以上が規制 (届出や許可) の対象となります。もちろん、規制対象外であっても、密封線源の紛失や破損は厳禁です。

5.10 実験室への入退室の制限・管理

高電圧が印加された機器のある実験室（や区画）、高パワーレーザーの発振している実験室、放射線を浴びる可能性のある実験室など、危険性のある実験室では、人の出入りを管理します。どのような場合に入退室管理をしなければならないかは、一概にはいえませんが、ここでは、どのように管理をするかを紹介します。比較的多いのはキーロックによる管理です。実験者個人に一つのキーを割り当てて、入退室時にキーを回します。このキーと危険を発生する機器の運転シーケンスを連動させることで、人が立ち入っている間は運転をしないようにすることができます。キーでなくてもスイッチでも構いません。また、連動させなくとも運転者が確実に人の存在を認識できるような仕組みがあればよく、ランプやマグネットなどの表示でいい場合もあります。運転者は、キーやランプが信用できない可能性にも注意します。小さな実験室であれば、見回ったり、声をかけることも有効です。実験者は、危険を発生する機器の運転状況を把握しなければなりません。運転までのカウントダウンの表示、各種パトライト、音声による案内、掲示用の札が有効です。

筆者のグループで用いているTST-2球状トカマク装置の場合には、コンデンサー電源の充電中（および、通電、プラズマ発生中）は、高電圧、大電流、放射線の危険を避けるために実験室を（原則として）無人にします。実験している時間帯は、実験室への出入り口を一か所に限定して、マグネットによる個人の表示、運転者への声掛け、実験室内が無人であることの声掛けによる確認を行っています。さらに、万が一実験室に取り残された時に、全コンデンサー電源を接地するための緊急停止スイッチを十数個、実験室内に配置しています。また、比較的長時間定期的に行うグロー放電では、高電圧部の区画をコーンなどで囲うとともに、（アースに落としている）真空容器への接触を禁止しています。また高パワーレーザー実験時には、関係者以外の入室を禁止します。逆に加熱用高周波増幅系では、機器内部で高圧が印加されていても入室は制限しませんし、短パルス（例えば、1 msec 以下）発振試験時に入室を制限することもしません。

5.11 法令やルール等の遵守

プラズマ実験では様々な機器を扱いますが、その取扱いが法令で定められていることがあります。クレーン、ボンベなどの高圧ガス、レーザー、電気工事など、取扱いや工事に資格が必要な場合、機器の定期点検や試験、適切な掲示を行わなければならない場合があります。これらの法令を遵守します。

電気機器をはじめとして種々の機器には定格があります。たとえば、コンセントから配線する通常の AC コードでは、導体断面積 1.25 mm^2 、定格 13 A（程度）となっています。定格電流以上の電流を流し続けると、発熱により絶縁部が溶けたり燃えたりして、その結果、短絡したり火災につながったりするので危険です。許容される最大電流値を定格電流といいます。この定格電流は主として導体断面

積で決まり、この断面積が大きいほど定格電流は大きくなりますが、まとめてある芯数（一般的な AC コードなら行き帰りの 2 芯）や配線状況等にも依存します。電線だけではなく、スイッチなど電流が流れる部品には定格電流があり、電路上で一番定格電流の低い所も保護できるような容量のブレーカーを上流側に取り付けます。定格電圧や定格パワーにも注意を払います。

クレーン等で重量物を扱う場合は、定格荷重に注意します。クレーン本体に定格荷重はありますが、クレーンのフックにかけるナイロンスリング等の吊具にも定格荷重があり、その定格はベクトル力の合成を考慮して決まります。

研究グループ内のルール作りは大事です。特定の作業は特定の個人のみが行うとか、危険が予想される作業は一人で行わず、複数人で行うとか、真空容器などの閉鎖的な空間で作業を行う場合には、大気側の声の届く所に一人配置するなどのルールを作ります。同様に作業手順をマニュアル化したり、特定の試験中にはそれがわかるような警報を掲示したりします。このような研究グループ内のルールは、実験内容や、実験者の経験に合わせて作るものであり、それがそのグループの財産となり、文化となります。緊急連絡体制、病院等の連絡先の掲示も事故発生後に迅速な対応をするために必要です。

5.12 揃えておきたい道具など

安全に関しては、道具やルールなどの形から入ることが有効です。図 1 に安全にかかわる道具等の写真を示します。

安全靴(a)は、重量物がつま先に落下することを考慮して、つま先に鉄板の入った靴を使います。ゴーグル(b)は、レーザー用のもの、加工時の破片の飛散から目を守るものがあります。粉塵の発生する場所、粉塵の発生する加工時には防塵マスクを装着します。安全帯(c)は高所作業時、低温用手袋(d)は寒剤を扱う時に装着します。非常口表示や非常放送設備(e)は、所属組織が整備するものですが、実験や実験室の状況に応じて、追加します。非常口表示には蓄光型のものがあり、停電時にも視認でき、重宝します。(自作) ドアインターロック(e)は、予期せぬ入室者に対応するためのものです。実験室の関係者は、入退室のルールを守りますが、消防設備点検などで、実験状況を把握していない人がマスターキーを用いて入室することがあります。小さな実験室が沢山ある大学などでは、各実験室と組織全体の仕事を行う作業者と意思疎通が十分でないことがあり、作業者がマスターキーで実験室に立ち入ることがあり得ると考えるべきです。

水素濃度計(f)、酸素濃度計(j)は水素漏れや、酸素濃度の低下をモニターするもので、我々の実験室では据え置き型の水素濃度計と携帯型の酸素濃度計を用いています。酸素濃度計はセンサーの寿命が短いので定期的にセンサーを交換します。写真の接地棒(g)は抵抗が割れやすいのでエアキャップで保護しています。また、抵抗が正常であるかをテスターで確認する必要があります。メガオームテス

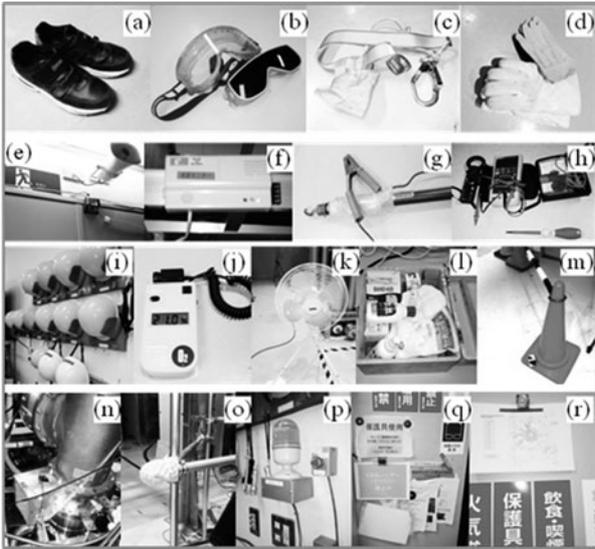


図1 安全に関わる道具など。安全靴(a), ゴーグル(b), 安全帯(c), 低温用手袋(d), 非常口表示・非常放送・自作ドアインターロック(e), 水素濃度計(f), 接地棒(g), クランプメータ・テスター・メガオームテスター(h), ヘルメット(i), 酸素濃度計(j), 業務用扇風機(k), 救急箱(l), カラーコーン・トラバー・トラテープ(m), 網板に入れたイオンゲージ(n), 自作パイプクッション(o), 緊急停止スイッチ・レーザー運転パトライト(p), 実験室入口掲示(q), 漏えいマイクロ波分布の掲示(r)。

ター(h)は、500–1000 VのDC電圧をかけた状態で(絶縁)抵抗を測定するものです。これは高電圧印加時に微小な絶縁破壊が生じて絶縁が劣化することあるからです。通常のテスターではせいぜい数Vの電圧しか印加しないので、高電圧印加時の絶縁状態を測るのには適しません。

ヘルメット(i)はクレーン作業時などの落下物の危険がある時、機器等で頭を打つ危険がある時に使用します。パイプや機器の角等で引っ掻いたり、打ったりする可能性のある所はクッション(o)等で覆います。業務用扇風機(k)は強力で真空容器内の換気に有用です。小さな怪我の応急処置をするために救急箱(l)を用意し、絆創膏、消毒薬、包帯、火傷用塗り薬を用意しますが、薬の使用期限等には注意します。すぐ近くに適切な処置ができる場所があるのであれば、救急箱を用意する必要はないかもしれません。

カラーコーン・トラバー(m)はちょっとした立ち入り制限をするのに用います。網板に入れたヌードゲージ(n), パイプクッション(o)は、衝撃・打撲などから人と機器を保護するためのものです。緊急停止スイッチ・レーザー運転パトライト(p), 実験室入口掲示(q)は実験室への立ち入り制限や実験状況表示などで用います。また、消防士等の部外者や実験室内の事情がわからない人のための実験室内主要機器の掲示、緊急時の連絡先掲示も有効です。例えば、夜中に無人であるはずの隣の実験室から煙が出始めたという状況に遭遇したとします。この時に、連絡先や機器配置図があれば、迅速な対応が可能です。また、普段から隣の実験室に感心をもっておくことは大事です。特にその実験室がプラズマ実験でない時にこそ、関心をもつべきです。

5.11 先輩として、職員として

新人であっても安全に注意を払うことは当然のことですが、新人を指導する立場の先輩や職員は、新人が安全に実験できるようにしなければなりませんので、安全に対する視点は少し異なります。まとめに変えて、先輩、職員等目上の立場で考えてみたいと思います。

新人であれば、組織ごとの安全講習会や安全マニュアル、火災訓練、避難訓練、各種講習会などの一連の教育・訓練を受けます。周りにプラズマ実験を行っている研究室がなければ、組織の提供する教育訓練等は、不十分であることは否めません。したがって、研究室や実験の固有の事情を反映した、教育・訓練、ルール作り、教材作りは非常に有効です。先輩や職員にとっては常識でも、新人には必ずしもそうではありません。また、理解の速い新人もいれば、理解した気になっている新人もいるので、理解を確認する小テストやレポートも有効です。例えば、ある機器を運転するには、小テストに合格してから後といった研究グループ内のルールを設けます。これができれば、実験者として一人前であるとするわけです。

我々のグループの場合には、球状トマカク装置の運転は、メインオペレータとサブオペレータの二名体制で行い、メインオペレータとなるためには、サブオペレータとして経験を積むとともに、コイル系の基礎となる回路とトマカクに関する二種の課題を課し、レポートを提出して、採点、理解をしたうえでメインオペレータの資格を与えます。また、安全とは必ずしも関係ありませんが、新人のための技術講習を行っています。ノギスの使い方から始めて、真空、クレーン、簡単なプログラミングまでの二十種ほどの講義・演習を先輩や職員が担当します。それぞれの課題は最短で十分ほどの短時間のものですが、ある程度はシステマティックに教育・訓練をするのが、昨今の時世では必要です。

このような新人の教育・訓練を行うのは先輩や職員の責任であるとともに、このような機会を通じて、研究室の文化・伝統や経験を受け継ぐことができます。まだそのような文化のない研究室では、この機会に、安全も含めた研究室文化を醸成してみてください。

さて、これから研究室を立ち上げる立場にある人、あるいは、新しいプロジェクトを率いる立場の人は、もう少し深く考える必要があります。もし、建物設計に関われるのであれば、クレーンの定格荷重から、壁に鉛板を埋め込むか否か、ブレーカーの配置や容量はどうするのかといったこと考えます。既存の実験室を使う場合でも、プロジェクトを立ち上げる段階では、実験機器をどのように配置すれば、危険の高い領域とそうでない領域を分離できるのか、二方向以上の避難経路を確保できるか等を考えます。また、投入できる人員と予算から、安全を確保した上でプロジェクトを遂行できるかどうかを吟味します。場合によっては、安全確保の観点からプロジェクトを諦めたり、縮小する勇気も必要です。

長年、無事故で研究室を健全に運営してきた年配者が注意しなければならない点は、二つほどあります。一つは、

これまで無事故であったからといって、今後も無事故であるとは限らないという点。もう一つは、状況は変化するのであるという点です。後者には、昔は学生は理解が速かったけれど、今の学生は自ら進んで理解しようとしないうという愚痴や、健全であった部品が経年劣化で危ない状況にあるという盲点が含まれるかもしれません。

ここまで読んで、不安を感じた方もいらっしゃるでしょう。こういうケースは想定したことがなかったとか、自分の率いる研究室の安全確保は不十分かもしれないとか、新人を教育したつもりだったけれどきちんと理解していないかもしれないとか。そういう不安を感じるこそ大事です。不安を解消すべく、安全を考えたり、他所の事故例を学んだりするのですから、不安を感じない方が危ないのです。

最後にまとめますと、危険を察知し安全を確保することは研究と同様に頭をつかうことであり、研究と同様にやりがいのあることです。本章が皆様の一助となれば幸いです。

謝 辞

本章の執筆にあたり日本学術振興会「日中韓フォーサイト事業」からの助成をいただいたことを感謝します。

参考文献

- [1] 厚生労働省, 安全衛生キーワード: http://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo74_1.html
- [2] American National Standard Safety Levels with Respect to Human Exposure of Radio Frequency Electromagnetic Fields, 300 kHz to 100 GHz, ANSI C95.1-1982, <http://www.dicom.unican.es/espanol/Radiaciones-docs/Ansi.pdf>
- [3] 厚生労働省, 労働災害発生状況(平成25年度): <http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei11/rousai-hassei/>
- [4] 原子力百科事典: <http://www.rist.or.jp/atomica/>
- [5] 長瀬ランダウア株式会社: http://www.nagase-landauer.co.jp/product/radiation_pers/



え じり あきら
江 尻 晶

東京大学大学院新領域創成科学研究科・准教授。東京大学大学院・博士(理学)。核融合科学研究所助手, 東京大学大学院助手, 助教授を経て2007年より現職。現在は東京大学のTST-2で実験を行いつつ, QUEST, LHD, LATE等で共同研究を行っている。専門はプラズマ計測から始まり, トカマク製作, 平衡解析, はんだ付け, 男女共同参画のためのアンケート解析まで幅広く手を出し, もはやカオス的状况。