

安全テキスト 2025

環境・安全委員会

目 次

安全テキスト 2025.....	0	Ⅲ 磁場の安全性（林）.....	18
目次.....	0	1. 生体への影響.....	18
Ⅰ 低温ガス・液体の一般事項（白井）.....	1	1.1 生体と電磁場の相互作用.....	18
1. 冷媒，冷却剤，寒剤.....	1	1.2 静磁場.....	18
1.1 定義.....	1	1.2.1 メカニズム.....	18
1.2 冷媒，冷却材の特徴.....	1	1.2.2 静磁場の生体影響.....	19
2. 熱.....	2	1.3 変動磁場.....	21
2.1 熱の基礎.....	2	1.3.1 誘導起電力.....	21
2.2 伝熱の基礎.....	3	1.3.2 変動磁場の生体影響.....	21
2.2.1 熱の移動.....	3	1.4 高周波電磁場.....	22
2.2.2 断熱の基礎.....	4	1.4.1 高周波電磁場の基本特性.....	22
2.3 超電導機器の冷却.....	5	1.4.2 高周波電磁場の生体影響.....	23
2.3.1 冷却方法.....	5	2. 周辺機器への影響.....	23
2.3.2 冷凍サイクル.....	6	3. 超電導マグネットのクエンチ.....	25
2.3.3 効率.....	8	Ⅳ 電気（槇田）.....	26
2.3.4 超電導機器冷却の特徴.....	8	1. はじめに.....	26
3. 流れの基礎.....	10	2. 低温・超伝導実験で発生する電気事故例.....	26
3.1 配管流れの基礎.....	10	2.1 通電ケーブルの断面不足や接続不良による過熱... 26	
3.2 管摩擦係数.....	10	2.2 ケーブル接続部や電極での地絡や感電.....	26
3.3 管路抵抗.....	10	2.3 同軸ケーブル端子（BNC 端子）のショートや地絡... 27	
4. 低温ガス・液体による危険.....	12	2.4 絶縁導入端子ピン間のショート.....	27
4.1 生体への危険 ^[1]	12	2.5 水滴によるテーブルタップでの感電・漏電及び機器の故障.....	27
4.1.1 低温損傷.....	12	2.6 保護接地線未接続による感電.....	27
4.1.2 窒息.....	12	2.7 【募集】低温・超伝導実験での電気事故例.....	27
4.2 高圧ガス事故例.....	13	3. 感電災害の防止対策 ⁽¹⁾	27
Ⅱ 高圧ガスの取扱い（辻上）.....	14	3.1 感電と人体.....	28
1. 高圧ガスとは ^[1]	14	3.2 感電してしまったら.....	28
1.1 高圧ガスの定義.....	14	3.3 防止対策の基本.....	29
1.2 高圧ガスの分類.....	14	3.4 保護接地の励行.....	29
1.3 高圧ガスの特性.....	14	3.5 漏電遮断器の設置.....	29
2. 高圧ガスの取り扱い ^{[2][3]}	15	3.6 活線作業・活線近接作業と保護具.....	29
2.1 高圧ガスの製造.....	15	4. 電気火災・ショート.....	31
2.2 高圧ガスの消費.....	15	4.1 トラッキング火災の防止.....	31
2.3 容器.....	16	4.2 過電流による過熱・発火・ショート.....	31
2.4 圧縮ガス充填容器の使用法.....	16	4.3 コードの劣化・電気製品の破損によるショート... 31	
2.5 超低温容器（LGC）の取り扱い.....	16	4.4 火災が発生した時は.....	31
2.6 コールドエバポレーター.....	16	付表 1 作業にかかわる法規制.....	33
3. 日々の管理.....	17	付表 2 作業に必要な資格.....	38
4. 事故事例 ^[4]	17	付表 3 環境・安全委員会 関連年表.....	39
4.1 容器管理.....	17	付表 4 参考文献.....	41
4.2 CE 運転.....	17		
4.3 ガス消費.....	17		

I 低温ガス・液体の一般事項（白井）

1. 冷媒，冷却剤，寒剤

1.1 定義

冷媒(refrigerant)とは，低温熱源から高温熱源への熱エネルギーの移動を実現する冷凍システムにおいて，自ら圧縮や膨張を繰り返すことで熱の放熱および吸熱を行い，熱移動に直接携わる作動流体^[1]を示す．極低温ではヘリウム，水素，ネオン，窒素などが用いられる．

冷却剤(coolant)とは，冷却する被冷却体から冷媒に熱を伝えるのに使われる，液体，気体などの媒体．二次冷却媒体あるいはブラインとも呼ばれる．極低温機器の冷却には液体ヘリウムや液体窒素などが主に使われる．

寒剤(freezing mixture)とは，実験室などで手軽に低温を得るための混合物．また，液体窒素，液体ヘリウムなどを総称するのにも用いる^[2]．

1.2 冷媒，冷却材の特徴

各種物質の一般的な特徴を以下に示す．取り扱い上の危険については，ガス会社の発行する安全データシート(SDS)を参照されたい．

(1) ヘリウム

無毒の単純窒息性ガスであり，密閉された部屋などに大量に放出されると空気中の酸素を低下させ酸素欠乏症を引き起こす．1860年に太陽のスペクトル線中から発見され，太陽(Helios)に因んで命名された．宇宙では水素に次いで多く存在するが，大気中には0.0005[%]しか存在せず，空気中からの分離は実用に適さない．これとは別に，地球内部にあるウランやトリウムなどの放射性元素が時間の経過とともに α 崩壊し，この放射性崩壊の過程で生成されるヘリウムが地球内部の岩石や鉱物に閉じ込められているため，特定のガス田からの採取が行われている．

(2) 水素

単純窒息性ガスであり，水素自体に毒性はないが密閉された部屋などに大量に放出されると空気中の酸素を低下させ酸素欠乏症を引き起こす．可燃性を有し，爆発範囲は4.0～75[%]と，メタンなどに比べて広い．また，最小着火エネルギーがアセチレンと同じ0.02[mJ]と一般の炭化水素の1/10と非常に小さく，火炎温度は1900[°C]と高い．水素2，酸素1の体積比で混合したガス(爆鳴気)に点火すると激しい爆発を起こすことが知られている．

宇宙では最も多い元素である．1781年に燃焼すると水を生成することから，水を作る，という意味のギリシャ語にちなみ Hydrogen と命名されている．

水素はガスとして最小の密度と最大の拡散率を持っているので漏れやすく，漏れると広がりやすい．また熱伝導率が大きく粘度が低いことから，従来から発電機の回転子の風損低減と冷却のために利用されている．

(3) 窒素

無毒の単純窒息性ガス．窒素は空気の約78%を占める．1772年に空気が分離され，酸素以外のガスは窒息することから窒素と名付けられた．

(4) 酸素

支燃性を有し，生物の呼吸や燃焼に不可欠なものであるが酸素自体は燃焼しない．作業場の酸素濃度は18～22%に保つ必要があり，これよりも低いと酸素欠乏症になり，逆に高濃度の酸素を長時間吸入すると，気道粘膜や肺胞が障害され重篤な場合は呼吸不全に陥る酸素中毒となる．

引用文献

- [1] 新版・第5版冷凍空調便覧I巻基礎編，p 83，社団法人日本冷凍協会(1993)
- [2] 岩波 理化学辞典第5版，岩波書店(1998)

2. 熱

2.1 熱の基礎

温度 T [K] の物体が熱量 dQ [J] を吸収して温度が $T + dT$ となった時の熱容量は $C = dQ/dT$ で表され、その単位質量あたりの熱量を比熱[kJ/kg・K]という。定積比熱 C_v と定圧比熱 C_p の定義は

$$C_v = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_v, \quad C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p$$

定積比熱は体積一定のため加えた熱量はすべて内部エネルギー U [J] の増加量となる。従って、

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v$$

定圧比熱は圧力が一定故、加えた熱量は内部エネルギーの増加と体積の増加となり

$$dQ = dU + pdV = d(u + pV) = dH$$

ここで H をエンタルピー[J]という。これから定圧比熱は

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

エンタルピー H は状態方程式 $pV = RT$ から

$$H = U + RT$$

となり内部エネルギーと同じく温度だけの関数となる。 R は気体定数であり、理想気体の温度とエネルギーの関係を示す物理定数である。両辺を温度 T で偏微分すればマイヤーの関係式が得られる。

$$C_p = C_v + R$$

同式は、定積変化に比べ、定圧変化は外部に仕事をする分、内部エネルギーの増加が少ないことを示している。そのため定圧比熱のほうが定積比熱よりも大きくなり、 C_p と C_v の比(比熱比)、 $\gamma = C_p/C_v > 1$ である。比熱比は He や Ne のような単原子分子で約 1.67、二原子分子である H_2 , N_2 では約 1.41 となる。理想気体の内部エネルギーとエンタルピーは

$$U = C_v T, \quad H = C_p T$$

と表せる。

(1) 熱力学第一法則

熱力学の第一法則はエネルギー保存則であり、

$$U = Q + W$$

であらわされる。ここで U :内部エネルギー[J], Q :系に出入りする熱量[J], W :系内外間の仕事[J]である。微小変化を考えれば同式は、

$$dU = dQ + dW$$

閉じた系では仕事は pdV であるので

$$dU = dQ + pdV$$

理想気体では、分子間の距離が大きいため分子間力が働かないと考えれば、内部エネルギーはほぼ分子の熱運動による並進運動エネルギーに等しい。

1) 等温変化

温度が変わらないので内部エネルギーに変化はない。吸収した熱は外部への仕事となる。

$$dU = 0, \quad dQ = -dW$$

2) 等圧変化

気体は膨張・収縮により仕事を行う。外部にした仕事を正とすると

$$dU = dQ - pdV$$

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

とエンタルピー S [J/K] を定義すれば、

$$dU = TdS - pdV$$

3) 断熱変化

断熱故、外部との熱のやり取りはなく $Q=0$ 故、

$$dU - dW = 0$$

この時、 $p \cdot V^\gamma = \text{一定}$ (ボアソンの法則)となる。気体が外部に仕事を行えば内部エネルギーは減少し、温度が低下する。ここで指数 γ は比熱比で与えられる。

4) ジュール・トムソン(Joule-Thomson)効果

細孔から膨張を行うと断熱かつ外部仕事もないことから、内部エネルギーの変化は気体内の仕事の変化となる。

$$dU = -dW$$

膨張前に状態を 1, 膨張後の状態を 2 とすると

$$U_2 - U_1 = p_1 V_1 - p_2 V_2$$

$$H_1 = H_2$$

となり、等エンタルピー変化となる。理想気体であれば $p_1 V_1 = p_2 V_2$ となり、膨張前後の内部エネルギーの増減はなく温度変化はないが、実存気体では温度変化を生じる。これをジュール・トムソン効果(JT 効果)あるいはジュール・トムソン膨張(JT 膨張)という。ジュール・トムソン膨張により高温では温度が上昇し、低温では温度が低下する。その境界を逆転温度というがその温度は実存気体ごとに異なる。窒素では常温から JT 効果による温度低下が期待できるが、水素では約 200 [K]以下、ヘリウムでは約 20 [K]以下でないと効果は期待できない。

5) 絶対仕事と工業仕事

閉じた系においてある点 1 から 2 へ圧縮する仕事 W_a [J]は、

$$W_a = - \int_1^2 p dV$$

で示される。この仕事を絶対仕事という。

一方冷凍サイクルなどの開放系では、上式の絶対仕事のほかに、系に吸い込む絶対仕事と圧縮したガスを外部に吐き出す絶対仕事を考慮する必要がある。全体の仕事 W_f [J]は

$$W_f = - \int_1^2 V dp$$

で示される．これを工業仕事という．圧縮機内の圧縮過程は断熱的に行われると考えることができるため $dQ = 0$ とすると熱力学の第1法則及びエンタルピーの定義から

$$dH = Vdp$$

$$H_2 - H_1 = \int_1^2 Vdp$$

となり，工業仕事はエンタルピー差として求めることができる．

(2) 熱力学第二法則

第一法則は熱と仕事に関するエネルギー保存則を表現しているが，これだけでは熱の移動方向が定まらないため，理屈上は低温から高温へ熱が移ることが可能となってしまう．

そこで第二法則で「熱が高温物体から低温物体へ移ることは不可逆変化である」(クラジウスの原理)，「仕事が全て熱に変わる現象は不可逆過程である」(トムソンの原理)が定められている．不可逆過程とは，自然に放置しているだけでは元の状態に戻らないことをいう．このことから，熱をすべて仕事に変える熱効率 100%の熱機関は存在しない．

2.2 伝熱の基礎

2.2.1 熱の移動

物体内部あるいは物体間に温度差があると，高温側から低温側へと熱エネルギーが移動し，熱平衡状態になろうとする．このような熱移動現象を伝熱と言い，その移動形態は一般に次の三つの形式に分類される．

- 1) 物体を通してその内部の分子や電子によって熱エネルギーが伝わる移動現象を熱伝導
 - 2) 固体壁面と流動流体との間の熱移動を対流熱伝達
 - 3) 物体間を電磁波の形で内部エネルギーを相互にやりとりし，これらのエネルギーの差し引きの形で行われる放射伝熱
- 実際の伝熱現象は，いずれもこれら三つの形式のどれかに属するか，もしくはこれらを組み合わせたものとなる．

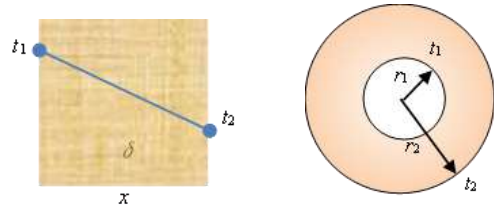
(1) 熱伝導

物体内を熱伝導によって熱が伝わる時，その伝わりやすさは物質によって異なる．しかし，いずれの物質に対しても単位面積 $[m^2]$ ，単位時間 $[s]$ 当りの伝熱量，すなわち熱流束 ϕ $[kW/m^2]$ は，物体の温度を $t[K]$ とすると，熱が流れる方向(x 方向)の温度勾配 $dt/dx[K/m]$ に比例することが知られている(フーリエの法則)．

$$\phi = -\lambda \left(\frac{dt}{dx} \right) \quad [kW/m^2] \quad (2.2-1)$$

ここに，比例定数 $\lambda[kW/(m \cdot K)]$ は熱伝導率と呼ばれ，熱伝導の良否を表すものであり，物質によって決まる固有の値をもつ．熱伝導率はアルミで約 230，空気で約 0.23 と 3 桁の違いがあり，固体の熱伝導が冷却に大きく影響する．なお，(2.2-1)式の右辺の負の符号は，熱が流れる方向(x 方向)に温度勾配が常に負となるから， x 方向の熱流束を正に表すために付けたものである．

いま，下左図のような厚さ $\delta[m]$ ，熱伝導率 $\lambda[kW/m \cdot K]$ の均質な平板において，板内の温度分布が時間的に変わらず，熱が一方方向(x 方向)のみに流れる場合(一次元の定常熱伝導)について考える．



温度分布は直線となるので，(2.2-1)式の中の温度勾配 dt/dx は $(t_2 - t_1)/\delta[K/m]$ となる．したがって，平板の伝熱面積を $A[m^2]$ とすると，伝熱量 $\Phi[kW]$ は

$$\Phi = \frac{\lambda A(t_1 - t_2)}{\delta} \quad [kW]$$

となる．

上右図に示す円筒壁を半径方向(r 方向)にのみ一様に熱が流れる(一次元的に熱が流れる)場合については，任意の半径 $r[m]$ の円筒面を軸方向の長さ $L[m]$ の単位時間に伝わる熱量 $\Phi[kW]$ は半径によらず一定である．したがって，半径 r における熱流束 ϕ と温度勾配 dt/dr の関係を式(2.2-1)に代入すると

$$\phi = \frac{\Phi}{2\pi r L} = -\lambda \left(\frac{dt}{dr} \right) \quad \left[\frac{kW}{m^2} \right]$$

で表せる．この式を積分し，境界条件として円筒の内壁面(半径 r_1)および外壁面(半径 r_2)における温度をそれぞれ， t_1 ， t_2 と与えると，長さ $L[m]$ の円筒の伝熱量 $\Phi[kW]$ は

$$\Phi = 2\pi\lambda L \frac{t_1 - t_2}{\ln(r_2/r_1)} \quad [kW]$$

で表せる．

(2) 対流(熱伝達)

流動する流体と固体壁面の間に温度差があれば熱移動が生じる．この現象を対流熱伝達という．対流がポンプなどで強制的に起こされている場合を強制対流熱伝達といい，流体内の温度の不均一に基づく密度差で起こる場合を自然対流熱伝達という．熱伝達の生じている壁面の伝熱面積 $A[m^2]$ ，単位時間あたりに A を通して流れる熱量を $\Phi[kW]$ ，伝熱壁面温度 $t_w[K]$ ，周囲流体温度 $t_\infty[K]$ とすると，これらの熱伝達において，単位時間あたりに伝わる伝熱量 $\Phi[kW]$ は，伝熱面積 A ，伝熱壁面温度と流体主流温度との温度差 $(t_w - t_\infty)$ に比例する(ニュートンの冷却則)．

$$Q = hA(t_w - t_\infty)$$

h は熱伝達率として定義される値であり，流体や壁面の状態，流速などにより異なるため多くの実験式が求められている．実験式は熱伝達を無次元化すると， $Nu = f(Re, Gr, Pr)$ として一般的に表される．この結果，流体の種類，温度域が異なっていっても，無次元数を合わせることで同一の結果を得ることができる．

ここで $Nu = hL/\lambda$:ヌセルト数， $Re = ul/\nu$:レイノルズ数， $Gr = \{g\beta(T_w - T_\infty)l^3\}/\nu^2$:グラスホフ数， $Pr = \nu/a$:プラント

トル数, l :代表長さ[m], u :主流の流速[m/s], ν :動粘度[m²/s], g :重力加速度[m/s²], β :体膨張係数[1/K], T_w :伝熱壁面温度[K], T_∞ :流体主流温度[K], α :温度拡散率[m²/s].

上式は自然対流下では

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

強制対流下では

$$Nu = f(Re, Pr)$$

である.

1) 自然対流熱伝達例

$$Nu = C_1 \left(\frac{\nu_\infty}{\nu_w} \right)^{0.21} (Ra)^{1/4} \quad [1]$$

ここで, C_1 実験で決まる定数, $Ra = Gr_x Pr$: レーレー数, Gr_x = 局所グラスホフ数

2) 強制対流熱伝達例

管内流においては, $Re \leq 2000$: 層流, $2000 \leq Re \leq 2700 \sim 3000$: 遷移流, $2700 \sim 3000 \leq Re$: 乱流, となるのが一般的である.

管内強制対流乱流熱伝達の実験整理式としては

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \text{Dittus - Boelterの式}^{[1]}$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad \text{Colburn の式}^{[1]}$$

がよく用いられる.

3) 放射

あらゆる物体は, その絶対温度の4乗に比例した熱放射エネルギーを電磁波の形で射出している. したがって, 温度差のある物体間ではその授受によって物体の内部エネルギーが変化する. これが, 放射伝熱であって他の熱移動形式と異なり熱の伝達媒体の存在を必要としない.

一般に, 物体から放射されるエネルギー E [kW/m²] は, その絶対温度を t [K] とすると

$$E = \varepsilon \sigma t^4 \quad [\text{kW/m}^2]$$

と表される. ここに, ε は物体の放射率で物体が黒体のとき $\varepsilon = 1$ であり, 一般の物体では1よりも小さい. また, σ はステファン・ボルツマン定数と呼ばれ, その値は $\sigma = 5.67 \times 10^{-11}$ [kW/(m²·K⁴)] である.

いま, 高温物体(H)の表面の絶対温度を T_h [K], その表面積を A_H [m²], 低温物体(L)の絶対温度を T_c [K] とすると, 熱放射による単位時間当たりの伝熱量 Φ [kW] は

$$\Phi = \phi_{HL} \sigma A_H (t_h^4 - t_c^4) \quad [\text{kW}]$$

と表せる. ここに, ϕ_{HL} は高温物体から低温物体への放射伝熱量の大小を示す係数であって, 物体の位置, 形状など物体間の幾何学的関係を表す形態係数や表面の放射率などで決まり, 一般に1よりも小さい値となる.

$$Q = A_H \sigma \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_h} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (t_h^4 - t_c^4)$$

t_h, t_c はそれぞれ高温側, 低温側温度, $\varepsilon_h, \varepsilon_c$ はそれぞれ高温側, 低温側の放射率である. 放射率は, その物体が放射する熱放射

と黒体の熱放射の比である.

2.2.2 断熱の基礎

低温での断熱は大きく分けて常圧断熱と真空断熱に分けられる. 総伝熱量(熱侵入量) Q_t は以下のように記述できる.

$$Q_t = Q_g + Q_r + Q_s$$

ここで Q_g : 気体の対流による伝熱量[W], Q_r : 表面の放射による伝熱量[W], Q_s : 固体及び固体の接触面を通しての伝熱量[W].

(1) 常圧断熱法

低熱伝導の材料を用い, 気体の対流を防ぐために細かく多孔質化させた断熱材を使用することで熱伝達を抑える方法である. 材料には発泡ウレタン, ファイバークラス, パーライトなどが用いられるがこれらの熱伝導率は 0[°C] で 20~30[mW/m·K] 程度である. 常圧断熱法で熱侵入量 Q_t に対して支配的なのは気体に起因する伝熱 Q_g となる. しかし, この方法では気体の熱伝導率以下の断熱性能は得られない. 一例としてパーライトのような粉末断熱材量を用いて 300[K] から 77[K] への伝熱要素ごと伝熱量の割合を調べると

$$Q_t = Q_g + Q_r + Q_s = 95[\%] + 4[\%] + 1[\%] \quad [2]$$

である.

真空断熱法に比べ施工容易でコストも安い, 断熱性能を向上させるには断熱層を厚くする必要があるなどの課題もある.

(2) 真空断熱法

常圧断熱法は気体に起因する伝熱が大きな割合を占めている. 真空断熱には, 常圧断熱法と同様な断熱材を真空槽に設置する真空多孔質断熱, 単純な真空断熱, あるいは真空多層断熱の3方法がある.

真空断熱効果は残留ガス圧力を下げていくと徐々に熱侵入量は減少し 10^{-3} [Pa] 以下になると対流の効果がなくなり放射による伝熱が支配的となる(図 2.2-1). これ以上に熱侵入量を下げるには

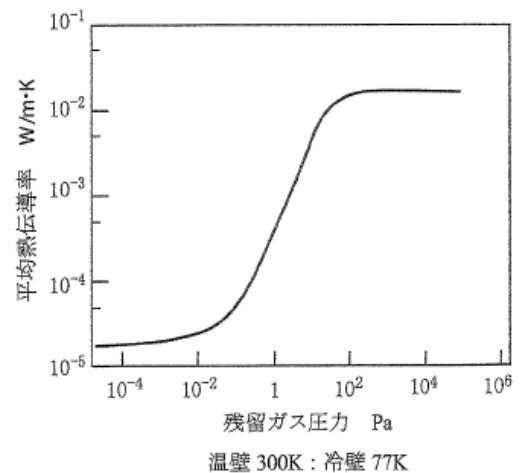


図 2.2-1 真空断熱と圧力の関係 [3]

放射の影響の低減を図る必要がある。

真空多孔質断熱は、常圧断熱と同様の粉末断熱材料を用いた場合、300[K]から80[K]への熱侵入量の割合が

$$Q_t = Q_g + Q_r + Q_s = 2[\%] + 78[\%] + 20[\%] \quad [4]$$

となり、気体に起因する伝熱の割合が大きく低下しているが、相対的に断熱材自体の熱伝導の影響が大きくなる。このため真空槽圧力が 10^{-1} [Pa]程度で熱伝導は飽和する(図 2.2-2)。逆に言うと高真空にしなくても真空多孔質断熱材の性能は維持できる。

単純な真空断熱では Q_s が低下するが放射の影響 Q_r が大きくなる。そのため、放射の影響を少なくするには、真空槽内に放射シールドを設ける真空多層断熱が一般的である。計算上は放射シールドの枚数を増やせば反比例して放射熱は減少する。 N 枚の放射シールドが挿入されたとすると、2.1.2 項に示した放射による伝熱量は、放射率 $\varepsilon_h = \varepsilon_c$ とすると

$$Q_r = A Q_r = A \frac{1}{N+1} \sigma \frac{\varepsilon}{2-\varepsilon} (t_h^4 - t_c^4)$$

で示される[6]。真空多層断熱では Q_r を下げる事が可能であるが、多層断熱材の施工方法、枚数で3要素の割合は変化する(図 2.2-3)。

引用文献

- [1] 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第 5 版, p46-53, 日本機械学会(2009)
- [2] 低温工学協会編, 超伝導・低温工学ハンドブック, p359, オーム社(1993)
- [3] 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第 5 版, p208, 日本機械学会(2009)
- [4] 低温工学協会編, 超伝導・低温工学ハンドブック, p360, オーム社(1993)
- [5] 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第 5 版, p209, 日本機械学会(2009)
- 注)低温工学協会関西支部編, 低温工学ハンドブック, p249, 内田老閣園(1982)より単位を SI に直して転載。
- [6] 低温工学協会編, 超伝導・低温工学ハンドブック, p361, オーム社(1993)

2.3 超電導機器の冷却

(参考：超電導電力機器とシステムの高性能・多機能化調査専門委員会編；超電導電力機器とシステムの高性能・多機能化，電気学会技術報告 1290，電気学会(2013))

2.3.1 冷却方法

超電導電力機器(以下機器)に対する冷却は大きく分けて以下の3方法がある。(表2.3-1)

(1) 強制冷却

循環ポンプを使用して機器の周囲に冷却剤(サブクール液

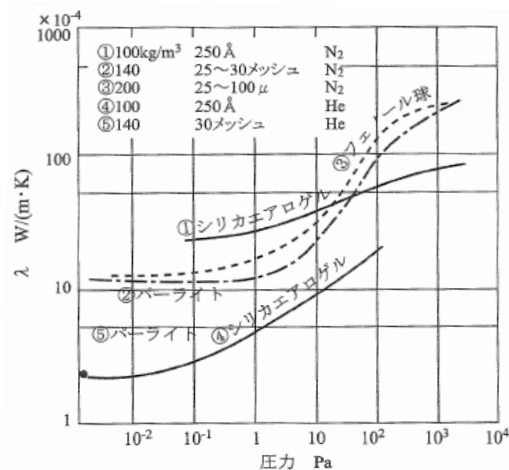


図 2.2-2 粉末真空断熱材の熱伝導 [5]

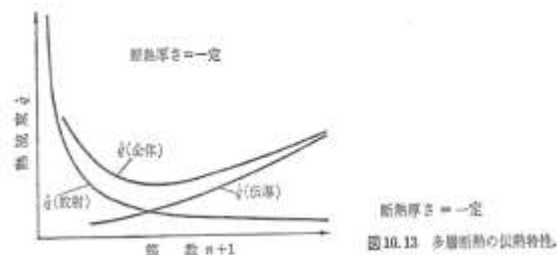


図 10.13 多層断熱の放射特性。

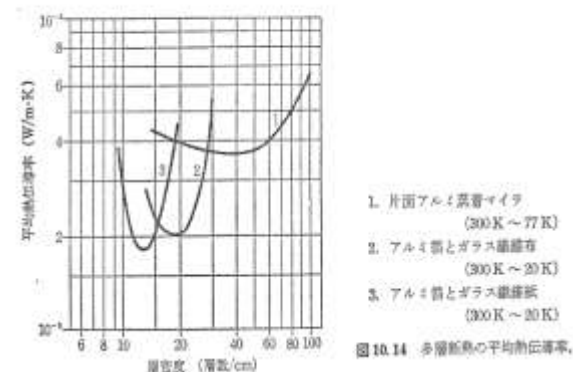


図 10.14 多層断熱の平均熱伝導率。

図 2.2-3 多層断熱材の層数と密度による伝熱の変化 [6]

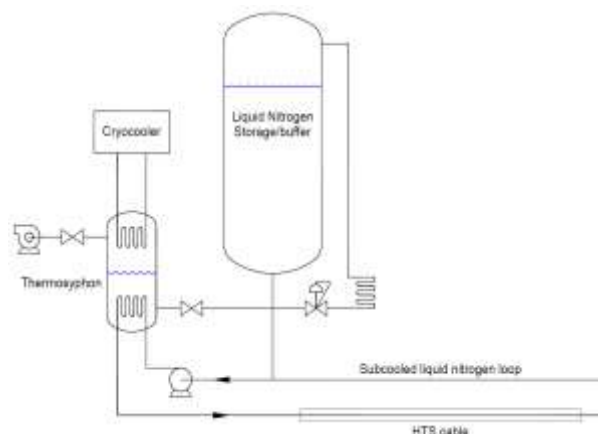


図 2.3-1 強制冷却例

出典：C. Weber, H. Yumura: “Status Update for the Albany HTS Cable Project”, DOE Peer Review ,(2008)

表 2.3-1 冷却の分類

冷却	冷却剤	循環ポンプ	冷却方法	冷凍機	温度範囲	超電導体温度	適応
強制冷却	強制対流熱伝達	液体窒素	有	顕熱	凝固点～気化点	場所により異なる	ケーブル
				再凝縮(潜熱)			
				真空引き(潜熱)			
伝導冷却	熱伝導	無	無	熱伝導	任意		
浸漬冷却	自然対流熱伝達	液体窒素	無	顕熱	凝固点～気化点	一定	変圧器 限流器
				再凝縮(潜熱)			
				真空引き(潜熱)			
				自然蒸発(潜熱)	飽和温度		

液体窒素)を循環させる冷却方法である。機器の大型化・大容量化・長尺化に伴い機器を効率よく冷却するのに適する(図2.3-1参照)。

ただし、循環ポンプが必要な冷却設備の大型化が避けられない。さらに機器内を通過中に冷却剤の温度は徐々に上昇していくため、冷却配管の設置方法、流路断面積、流速などの検討が必要である。

(2) 伝導冷却

冷凍機と機器を熱伝導のいい金属等で接合して冷却する方法である。冷却剤が不要のため、その固化、気化の心配がなく小型化に適し、広い温度範囲で使用可能である(図2.3-2)。

ただし、冷凍機は機器の近くに置く必要があり、設置方法には考慮が必要である。

(3) 浸漬冷却

機器を容器に入れて冷却剤で満たす方法である。構造が簡単で機器がほぼ均一に冷却できる特徴がある(図2.3-3)。

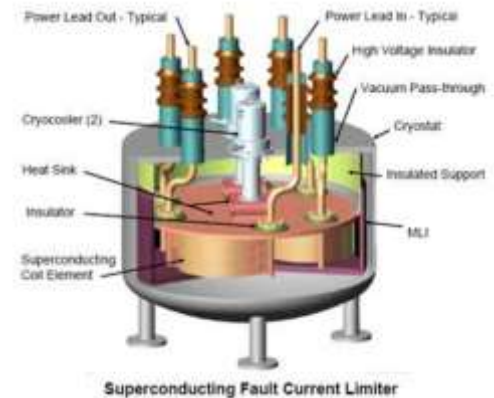


図 2.3-2 伝導冷却例

出典: “Cost Effective Superconducting Fault Current Limiters” from Home Page of Hyper technology <http://hypertechnology.com/superconducting-fault-current-limiter>

2.3.2 冷凍サイクル

超電導電力機器に用いられる冷凍サイクルは大きく分けて表2.3-2のように分類される。

(1) 蓄冷器型

作動流体(冷媒)が低温部と高温部を往復しつつ低温部から高温部へ熱を汲み上げる方式で、低温部と高温部の境界に蓄冷器が設けられていることから蓄熱器型と称される。

内部はピストン(ディスプレイサ)と蓄冷器のみで構造が単純である。ただし熱交換部がシリンダ表面となるため、大型化するにつれシリンダ中心部に生成された冷却熱を熱交換部へ伝導する距離が増大し、効率は低下する。

スターリング冷凍サイクル

正しくは逆スターリングサイクルと称される。一つの円筒形のシリンダ内に圧縮ピストン、蓄冷器、膨張ピストンが収

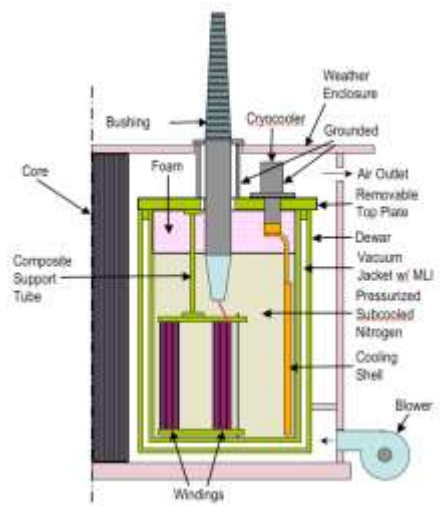


図 2.3-3 浸漬冷却例

出典: B. Schwenlerly, E. Pleva: “HTS Transformer Development”, Presentation for DOE Peer Review p.10(2010)

表 2.3-2 冷凍サイクルの分類

作動流体の現象	作動流体の流れ	冷凍サイクル		作動流体	用途
圧縮/膨張	循環	熱交換器型	ブレイトン	He/Ne	ケーブル/変圧器
	往復	蓄冷器型	スターリング	He	ケーブル
			GM(Gifford-McMahon)	He	変圧器/限流器
			パルス管*	He	変圧器/ケーブル

*パルス管は圧力起振源の種類によりスターリング型、GM型に分類される

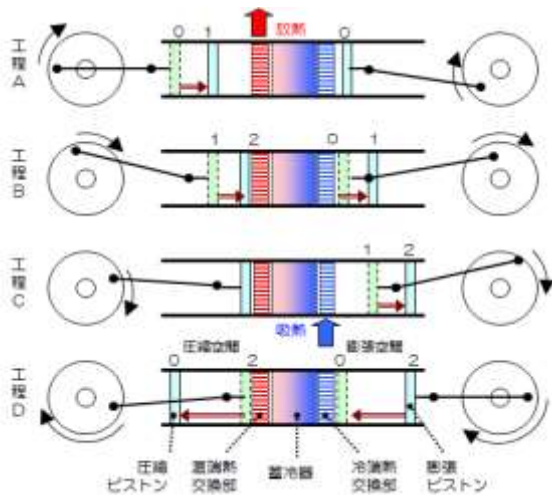


図 2.3-4 スターリング冷凍サイクル

められ、二つのピストンは90[°]の位相差をもって回転する。図2.3-4に従い動作原理を説明する。

圧縮(工程A) 圧縮ピストンが0から1の位置に移動する。圧縮熱は温端熱交換部で冷却水にて除去される。

ガス移動(工程B) 圧縮ピストンが1から2へ、膨張ピストンが0から1へ動くことで作動流体(ヘリウムガス)は容積一定のまま低温側のシリンダに移動する。このとき作動流体は蓄冷器を通して冷却される。

膨張(工程C) 低温シリンダに入った作動流体が膨張ピストンを1から2まで押して膨張仕事を行うことで低温になる。このとき冷端側熱交換部から熱を奪う。

ガス移動(工程D) 圧縮ピストン、膨張ピストンが2から0へ移動する。冷えた作動流体が蓄冷器を通して蓄冷器を冷やし作動流体は常温に戻る。

理想状態ではスターリング冷凍機の効率は熱機関の最高効率となるカルノーサイクルと同等となるが、ピストンの摩擦損失や蓄冷器の損失などで実際の効率は制約を受ける。メンテナンス間隔はおおむね8,000時間程度である。現在は液体窒素温度域で1[kW](冷凍機)から4[kW](再凝縮機)までの冷却能力をもつものが製品化されている。

GM冷凍サイクル

圧縮機と膨張部が独立しているため圧縮機に汎用品が使えるほか、圧縮機を分離できるため設置の自由度が大きい。低温の膨張部の構造はスターリング冷凍サイクルと似ているが寒冷の発生がサイモン膨張によることからピストンはガスの移動に用いられるだけ(仕事をしない)でありディスプレイサと称される。図2.3-5に従い動作を説明する。

吸入(工程A) 吐出弁を開き圧縮機の高圧ガスをシリンダ内に取り入れる。このときディスプレイサ背面にも高圧ガスが入ることでディスプレイサ前後は同圧に保たれる。

移動(工程B) ディスプレーサを0から1の位置まで動かすことで高圧ガスはディスプレイサの背面から蓄冷器を通り冷却された上でディスプレイサの反対側に移動する。

膨張(工程C) 圧縮機の吸入弁が開き、シリンダ内の高圧ガスはサイモン膨張により温度が低下する。このとき冷端熱交

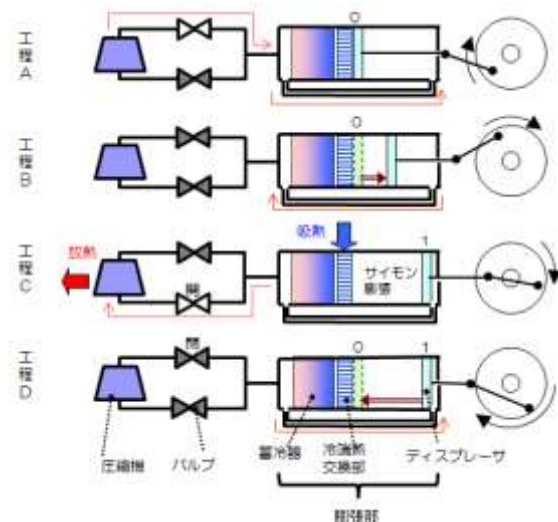


図 2.3-5 GM 冷凍サイクル

換部から熱を奪う。

移動(工程D) ディスプレーサが1から0の位置に戻ることで低圧・低温のガスが蓄冷器を通りディスプレイサ裏側に移動する。

GMサイクルは低温部にあるディスプレイサに応力がかからない(常にディスプレイサ前後の圧力が等しい)ためシールが簡便で済み、圧縮機が切り離されているため低温部は小型化でき信頼性も高い。圧縮機は汎用品を使え、故障の場合も切り離して修理ができるなど信頼性、低コスト化にも有利である。このためスターリング冷凍機に対しメンテナンス間隔は2倍以上に大きくなっている。しかし効率はスターリング冷凍機より低く大型化も困難のため、液体窒素温度域で数百W程度までの冷却能力のものが製品化されている。

(2) 熱交換器型

作動流体は蓄冷器型と異なり、高圧部と低圧部を循環し熱交換器を介して互いに熱の授受を連続して行う冷凍機である。主な冷凍サイクルとしてはブレイトンサイクルやブレイトンサイクルにJT(Joule-Thomson)膨張弁を組み合わせたクロードサイクルがある。

ブレイトンサイクル

正式には逆ブレイトンサイクルと呼ばれる。図2.3-6に従

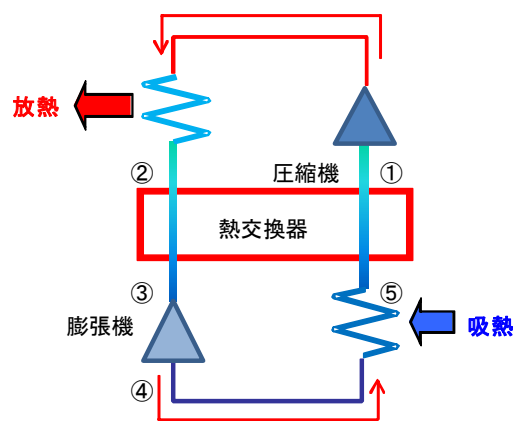


図 2.3-6 ブレイトンサイクル

い原理を説明する。

- ① 低圧の作動流体は圧縮機に吸入，圧縮されることで高温高圧のガスとなる。
- ② 高圧ガスは冷却水などで冷やされ，熱交換器に至る。
- ③ 高圧の作動流体は，熱交換器において低温部から戻ってきた作動流体と熱交換し冷却後，膨張機へ送られる。
- ④ 膨張機を動かす(断熱膨張)ことで作動流体は低温低圧のガスとなる。
- ⑤ 超電導機器を冷却した作動流体は再度熱交換器に入り高圧ガスと熱交換を行いながら圧縮機に至る。

大容量化に適したシステムであり，クロードサイクルは，ヘリウム液化冷凍用として高エネルギー分野で広く用いられているが，超電導電力機器用としてはこれまで適用例が少なかった。しかし近年，大容量冷凍機の必要性が高まりその実用化研究が進められている。中でも高効率化，高信頼化を目指し，圧縮機，膨張機ともにタービンを用いるターボブレイトン冷凍機の開発が主となっている。

2.3.3 効率

(1) カルノー効率

カルノー効率は熱機関の理論上の最高効率であり式(2.3-1)で示される。

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (2.3-1)$$

ここで ε : カルノー効率[-]， Q_c : 低温側で吸熱したエネルギー[W]， Q_h : 高温側で投入したエネルギー[W]， T_c : 低温側温度[K]， T_h : 高温側温度[K]である。液体窒素温度域での冷却では $T_c=65$ [K]， $T_h=300$ [K]とすると $\varepsilon=0.277$ となる。従って理論上1[kW]の動力で0.277[kW]の冷却が可能である。

(2) %カルノー効率

カルノー効率はあくまで理論上の最大効率であり実際は実現困難である。そこで実際の冷凍機がカルノー効率に対しどこまで近付けたのかを示すために%カルノーという指標が用いられる。

$$\%_{Carnot} = \frac{\varepsilon_{real}}{\varepsilon_{Carnot}} \quad (2.3-2)$$

ここで， $\%_{Carnot}$: %カルノー(-)， ε_{real} : 実際の冷凍機効率(-)， ε_{Carnot} : カルノー効率(-)である。

冷凍機の効率については古くから調査が行われておりStrobridge線図等が存在する^[1]。近年でも継続的に同様の調査が行われデータが追加されている(図2.3-7)。追加されたデータは1[kW]未満の蓄冷器型冷凍機が中心であるが大容量機の開発例が少ないことからほぼ現状の冷凍機の効率を網羅していると考えられる。図中の太い実線はKittelによってter Brake limitと名付けられ，現状の冷凍機効率のほぼ上限を示すものである。

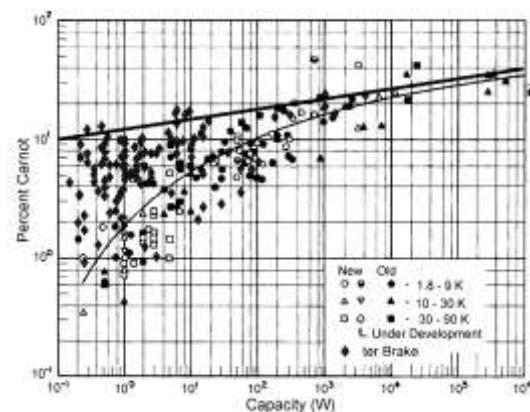


図 2.3-7 冷凍機の効率(ter Brake)

出典：P. Kittel: "Cryocooler Performance Estimator", Cryocoolers 14, p.565(2007)

2.3.4 超電導機器冷却の特徴

(1) サブクール

超電導電力機器は高電圧下で運転を行うため冷却に使用する液体窒素中に気泡が発生すると放電に至る。これを防ぐには機器周囲の液体窒素を常にサブクール状態に保つ必要があり，いくつかの方法が採用されている。以下に一例を示す。

ガス加圧 浸漬冷却において貯液層上部のガス相に外部より窒素ガスを供給し加圧することで液体をサブクール状態とする方法である^[2]。そのままでは窒素ガスが次第に液化し圧力が低下していくため，液層が適度な温度勾配を保ちつつ液面で飽和温度となるように設計がなされている。以前はヘリウムガスによる加圧も用いられたが，液体窒素中にヘリウムが溶解し，条件によって気泡として析出する可能性が指摘されているため採用されていない^[3]。

蒸発ガス加圧 液体窒素タンク内の液の一部を蒸発させて加圧源として用いる方法である^{[4][5]}。外部設備が不要であり系内の窒素量も変わらないため簡便で信頼性の高い加圧方法である。

(2) 信頼性

電力機器として，冷凍機を含む冷却システムには高い信頼性が求められ，機器単体の信頼性向上を図ることは勿論として，システムとしても信頼性の確保が図られている。具体的には予備機の設置(必要機器台数+1台)^[4]，冗長化(同形機の並列配置)^[4]，バックアップ(補助機器配置)等である。前述のAlbany HTS Cable Project(図1)では冷凍機故障時にはバックアップとして真空ポンプにより液体窒素の蒸発潜熱を利用した冷却設備を所有している^[5]。

引用文献

- [1] T. R. Strobridge and R. O. Voth: "Refrigeration Technology for Superconductors", IEEE transactions on Nuclear Science, Vol.NS-24, No.3, p.1222-1226 (1977)
- [2] 上條他: "超電導主変圧器の実用化に向けた交流損失低減と冷却特性向上", 鉄道総研報告, 23巻, 11号, p.23-28 (2009)
- [3] 超電導発電関連機器・材料技術研究組合編: "平成16年度委託業務成果報告書・交流超電導電力機器基盤技術研究開発・超電導送電ケーブル基盤技術の研究開発・

ケーブル用長尺冷却技術の研究開発・長尺断熱管の冷却特性向上の研究”，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，p.21-27 (2005)

- [4] 池内，大野，仲村，矢口，町田，渡部，増田，野口，鬼頭，三村，本庄：“超電導ケーブル用冷却システムの構築”，第82回2010年度春季低温工学・超電導学会講演概要集，公益社団法人低温工学・超電導学会,p.100 (2010)
- [5] C. Weber, H. Yumura : “Status Update for the Albany HTS Cable Project”, DOE Peer Review, (2008)

3. 流れの基礎

3.1 配管流れの基礎

配管の断面において速度、圧力、密度などが一定とみなされる場合、一次元として扱うことができる。定常な流れでは、ある流路断面を通過する流体の質量流量は一定であるから、質量保存則を適用すると

$$\rho \cdot A \cdot w = \text{const.}$$

と表すことができる(連続の式)。ここで ρ : 密度[kg/m³]、 A : 断面積[m²]、 w : 流速[m/s]。流体の圧縮性が無視できる場合は

$$A \cdot w = \text{const.}$$

また、質量保存則と同様にエネルギー保存則が成り立つことから、定常な流管内の流れのエネルギーは、片側の断面から流入する単位質量流量当たりのエネルギー[J/kg](運動エネルギー w_1 、位置エネルギー z_1 、流体の保有するエネルギー(エンタルピー) h_1 +熱入力 q +機械入力 Q =他の断面から流出するエネルギー(w_2 、 z_2 、 h_2)となり、重力加速度を g [m/s²]とすると、

$$\left(\frac{w_1^2}{2} + g \cdot z_1 + h_1 \right) + q + Q = \frac{w_2^2}{2} + g \cdot z_2 + h_2$$

で表される。単位質量あたりのエンタルピー(比エンタルピー) h [J/kg]は、比内部エネルギー u [J/kg]と運動する流体の断面に対する押し込みエネルギー P/ρ [J/kg]の和であるから、

$$\left(\frac{w_1^2}{2} + g \cdot z_1 + u_1 + \frac{P_1}{\rho_1} \right) + q + Q = \frac{w_2^2}{2} + g \cdot z_2 + u_2 + \frac{P_2}{\rho_2}$$

P は流体の圧力である。機械入力、熱入力がなく、粘性による内部発熱が生じなければ(非粘性)内部エネルギーの変化はないため、上式は、

$$\frac{w^2}{2} + g \cdot z + \frac{P}{\rho} = \text{const.}$$

又は、

$$\frac{\rho w^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z + P = \text{const.}$$

この式はベルヌーイの式と呼ばれる。流体が気体の場合、位置エネルギーは無視できるので上式は

$$\frac{\rho w^2}{2} + P = \text{const.}$$

ここで左辺第1項は動圧、同第2項は静圧と呼ばれる。

3.2 管摩擦係数

(1) 円形直管

内径 d [m]の真っすぐな円管内を密度 ρ [kg/m³]の流体が平均流速 w [m/s]で流れているとき、長さ l [m]の区間における圧力降下 ΔP (単位体積当たりのエネルギー損失)は、

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho w^2}{2} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

で表され、ダルシー・ワイズバッハの式と呼ばれる。ここで λ は管摩擦係数[無次元]である。なお、せん断応力から求めた摩擦係数 f (ファンニングの摩擦係数)との間には $\lambda = 4f$ の関係がある。管摩擦係数は一般にレイノルズ数($Re = wd/\mu$ 、 w : 流速[m/s]、 d : 管内径[m]、 μ : 動粘度[μPa·s])と管壁の粗さの関数である。

層流の場合は表面粗さの影響は少なく、管摩擦係数 λ はナビエ・ストークス式の解として

$$\lambda = 64/Re \quad (Re < \sim 2000)$$

として求められる。発達した乱流の場合は多くの実験式が存在するが、なめらかな円管ではブラジウスの式^[1]

$$\lambda = 0.3164 Re^{-1/4} \quad (2000 < Re < 10^5)$$

カルマン・プラントルの式^[2]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \log(Re \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (10^5 < Re < 10^7)$$

等がある。実用される各種材質の円管の管摩擦係数の近似式として、以下のコルブルックの式が用いられる。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.71d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

なお、 ε : 突起高さである。図 3.2-1 のムーディ線図は上式を線図にまとめたものである^[3]。

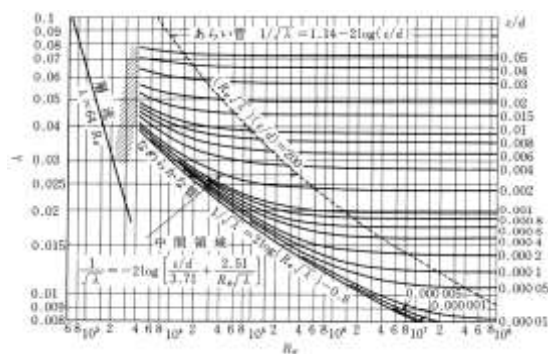


図 3.2-1 ムーディ線図

(2) 円管以外の直管

非円形断面の直管に対しては、以下で定義する等価水力直径 d_h を d の代わりに用いる。

$d_h = 4 \times (\text{管断面積} / \text{ぬれ線長さ})$

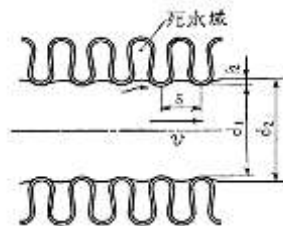


図 3.2-2 コルゲート管

(3) コルゲート管

図 3.2-2 のような金属製コルゲート管について、複数のサイズで水を用いて $Re = 2.04 \times 10^4 \sim 7.93 \times 10^5$ の範囲で、あるいは空気を用いて $Re = 1.18 \times 10^5 \sim 1.32 \times 10^6$ の範囲で実験を行った結果、

$$\lambda = \frac{d_1}{s \left\{ 1 - \left(\frac{d_1}{d_1 + 0.438s} \right)^2 \right\}^2}$$

が得られている^[4]。

3.3 管路抵抗

管路の管摩擦以外にも様々な損失が生じる。その各種損失係数 ξ を用いると圧力損失はそれらの和として、

$$\Delta p = \sum \xi \frac{\rho w^2}{2}$$

で表すことができる。以下にいくつかの例と示す。

(1) 管路入り口

管路が壁面に対して垂直に取り付けられている場合の損失係数 ζ を図 3.2-3 に示す^[5]。

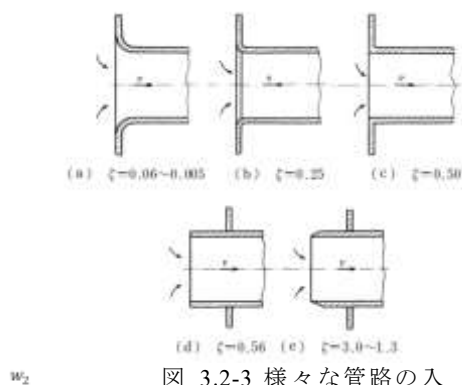


図 3.2-3 様々な管路の入

(2) 拡大管

断面積が緩やかに広がる管をディフューザーと呼ぶ。ディフューザーでは流速が低下すると流れ方向の圧力上昇が大きくなり逆流を生じる。図 3.2-4 にディフューザーを、図 3.2-5 にその損失係数を示す^[6]。 θ が ξ の最小値を与える角度より大きい場合、流れは管内の途中の壁面で剥離し、損失が増加する。

$$\Delta p = \xi \frac{\rho(w_1^2 - w_2^2)}{2}$$

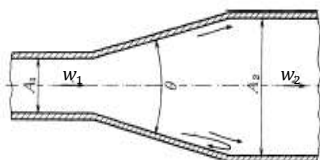


図 3.2-4 ディフューザーの形状

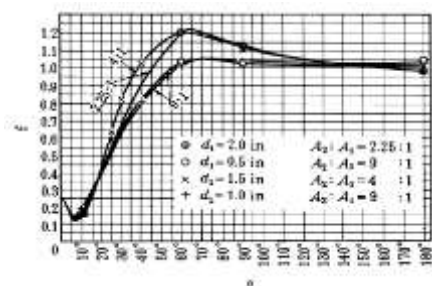


図 3.2-5 ディフューザー損失係数

(3) ベンド

図 3.2-6 に示すベンドでは曲がり部の流路断面内で二次流れを生じ、損失が増加する。滑らかな壁面の場合の損失係数 ξ_b に対し、次式が与えられている^[7]。

$$\text{Re} \left(\frac{d}{\rho} \right)^2 < 364 \text{ では、} \xi_b = 0.00515 \alpha \theta \text{Re}^{-0.2} \left(\frac{\rho}{d} \right)^{0.9}$$

$$\text{Re} \left(\frac{d}{\rho} \right)^2 > 364 \text{ では、} \xi_b = 0.00431 \alpha \theta \text{Re}^{-0.17} \left(\frac{\rho}{d} \right)^{0.849}$$

ここで、 ρ : 曲率半径、 θ : 曲がり角 $^\circ$ 、 α は表 3.2-1 のように与えられる。

表 3.2-2 α の値

θ	45°	90°	180°
α	$1 + 5.13(\rho/d)^{-1.47}$	$0.95 + 4.42(\rho/d)^{-1.96}$ ($\rho/d < 9.85$ の場合) 1.0 ($\rho/d > 9.85$ の場合)	$1 + 5.06(\rho/d)^{-4.52}$

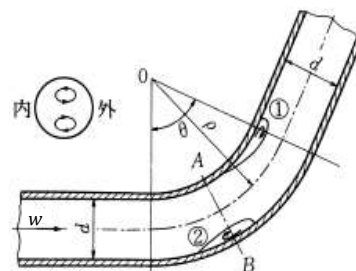


図 3.2-6 ベンド

(4) 弁

色々な種類のバルブの損失係数が求められているが表 3.1-2 に 1 インチのねじ込み型玉型弁の損失係数を示す^[8]。弁体の上り距離 l と弁座直径 d_1 の比によって変化することが分かる。 $l/d = 1$ は全開時である。

表 3.2-2 ねじ込み型玉型弁の ξ の値

l/d_1	1/4	1/2	3/4	1
ξ	16.3	10.3	7.68	6.09

引用文献

- [1] 日本機械学会編、管路・ダクトの流体抵抗 DVD-ROM 版、p 26、丸善出版(2018)
原著：Blasius, H., Forsh, Geb. Ing.-Wes., 131(1913)
- [2] 日本機械学会編、管路・ダクトの流体抵抗 DVD-ROM 版、p 26、丸善出版(2018)
原著：Eck, B., Technische Strömungslehre, (1957), 127, Springer-Verlag.
- [3] 日本機械学会編、機械工学便覧 DVD-ROM 版、α4- 71、日本機械学会(2013)
原著：Moody, L. F., Trans. ASME, 66-8 (1944), 671
- [4] 日本機械学会編、管路・ダクトの流体抵抗 DVD-ROM 版、p 33、丸善出版(2018)
原著：Yeaple, F. D., 他 2 名, Hydraulic and Pneumatic Power and Control, (1966), McGraw-Hill.
- [5] 日本機械学会編、機械工学便覧 DVD-ROM 版、α4-72、日本機械学会(2013)
原著：Weibach, J., Ing.-und Maschinen Mech., 1 (1896), 1003
- [6] 日本機械学会編、機械工学便覧 DVD-ROM 版、α4-72,73、日本機械学会(2013)
- [7] 日本機械学会編、機械工学便覧 DVD-ROM 版、α4-74、日本機械学会(2013)
原著：伊藤英覚、日本機械学会誌、62-490(1959)、1634
- [8] 日本機械学会編、管路・ダクトの流体抵抗 DVD-ROM 版、p 65、丸善出版(2018)

4. 低温ガス・液体による危険

4.1 生体への危険^[1]

4.1.1 低温損傷

極低温流体は生物の生存に深刻なダメージを起こしうる。細胞の変化は生体組織の温度が 15[°C]ほどの高い温度で始まるが、溶けた溶質による凝固点降下により、生体がおよそ-3[°C]に下がるまで組織内での氷晶の生成は起こらない。生体温度が十分に下がると、氷晶は細胞膜の外側に形成し始める。水は細胞膜を通して細胞の内側から移動し、結果的に細胞は脱水状態となり細胞の損傷は熱傷と似たものになる。この理由から、凍結による組織の低温損傷は“凍傷”または“低温やけど”とも呼ばれる。更なる細胞の損傷は、細胞が氷晶と浸透圧によって変形したときに起こる。生体組織の温度が低下するとき、血流が減少がし、組織の壊死やおそらく壊疽を引き起こす可能性がある。

例えば、液体窒素が極短時間接触することは、必ずしも皮膚に損傷を与えないということは知られているかもしれないが、低温流体の取扱経験がない人間には勧められない。少量で非常に短い時間(1~2 秒)で、そっと触れる(強くない流れ)であれば、皮膚と流体の温度差が非常に大きく直接組織にふれないことは事実である。大きな温度差はガス膜を作り、皮膚への熱伝達は膜沸騰領域となり、そこでは熱伝達はいくらかゆっくりとしている。しかしこのような保護があっても接触が 1 又は 2 秒より長くなれば深刻な組織凍結を起こすに十分である。もし流体(液体気体を問わず)がかなりの流速であれば凍結はほとんど瞬時に起こりうる。凍結が瞬間的に起こるのは、隔離されていない冷たい金属や他の冷たい機器に接触することである。この場合、冷たい金属表面と皮膚の間にガス膜は形成されず、熱の伝達は非常に早く危険である。

生体への低温損傷を防ぐため、低温流体や冷えた機器と組織の接触を防ぐ必要がある。服は寒剤の浸透を防ぐようなものが望ましい。また眼は低温損傷を受けやすく、作業を行うときは安全めがね又はフルフェースシールドが必要である。露出した身体もまた保護されるべきである。低温流体の輸送中、手はもっとも傷つきやすい部位の一つである故、すぐに脱げる、ゆったりとした手袋を着用すべきである。手袋は液体が入り込むような長手袋は好ましくない。皮手袋はよく使用されるが、酸素の取扱い時には、使用前になめし油を適当な溶剤で落とさなければならない。低温の液体がたまるのを防ぐため、折り返しのない長ズボンはき、その裾を靴の中には入れない。開口部があるか多孔性の靴は履いてはならない。

生体組織凍結の危険は、冷たくなる可能性のある排気口や機器に対しても考慮されなければならない。排気する流体(液体又は低温気体)が、作業員や付近の人間のいかなる部分にも害を与えないように、全てのシステムの排気口は設置されなければならない。極低温度に冷える可能性のある全ての排気口又はその他の機器は、不用意に触っても全ての箇所が外部から断熱されていなければならない。

低温やけどが起こったらすぐに手当てを行う必要がある。凍った組織は痛みがなく、光沢があり白又はまだらな青に見えるかもしれない。凍った部位は岩のような固体から硬いものまで、冷たい感覚あるいは感覚がないものである。融解後、組織は膨れて痛く、そして伝染病に感染しやすくなる。怪我人は冷熱源から移動させ、その部位は室温まで暖めるべきである。負傷部位に対し血流を阻害する全ての着衣は、注意深く皮膚を取らないように脱がさなければならない。身体の怪我した部位は、40-42[°C]のお湯に浸すかやさしく洗い流さなければならない。湯温は 44[°C]より高くしてはならない。凍結部位は暖める前後で速い流れに曝しては(こすってもマッサージしても)いけない。負傷部位に対する血液供給の減少を避けるために、怪我人は禁酒、禁煙である。怪我人は暖かく安静を保ち、凍結部は乾いて殺菌された包帯で、血液循環を妨げないように十分緩く巻いておかねばならない。温かい飲み物。食事を怪我人に摂らせるべきである。迅速な医療処置が必要である。

もし全身の体温が低下するほどの大きく曝されていたなら量の暴露があれば、低体温症の可能性がある。軽い低体温症の徴候は無関心気力、混乱、眠気、疲労感、物忘れ、運動失調、震え、不明瞭な発言、虚脱や呼吸数の増加が含まれる。低体温症が進むにつれ震えが止まり、心拍数、血圧、呼吸数が減少する。温めるにはお湯の風呂に浸けるかショック療法が必要になるかもしれない。怪我人は可能な限り丁寧に扱い、可能な限り快適な状態とし、すぐに最も近い病院の緊急室に搬入すべきである。

4.1.2 窒息

極低温流体が蒸発し 0 [°C]まで加温されるとその間に体積は 700~800 倍に膨張する。従って、限られた空間に大量の寒剤が噴出すると生命維持できない雰囲気となりうる。

密閉空間で極低温流体を用いた作業をするとき、いかなる状況下で流体が放出してもその放出で起こる空間中の酸素の最大減少量を評価して極低温流体の最大液量を決める必要がある。例えば、一般的な液体窒素デュワ(160[l])からの瞬間的な流出が 5[m]×7[m]×3[m]の実験室で起こり、周囲温度の気体となり部屋の空気と完全に置換されたとすると、その場所の大気は不活性となり生命の維持はできなくなる。もし、噴出がゆっくりと起これば、部屋の空気と完全に混じり結果的に平衡状態となって部屋から漏れ出す。このような完全な混合は部屋の酸素濃度の減少を少なくするだろう。しかし、換気がなければ酸素濃度は 8[%]まで減少し、さらに致命的な状態を作り出す。もし寒剤の放出あるいは流出が予想でき、完全な混合と仮定できれば、室内空気中の酸素濃度が危険なほど低くなることを防ぐ換気速度を計算できる。しかし、部屋のすべての場所で空気を完全に混合するのに不十分な換気では、致命的な空気のポケットが存在しうる。この種の計算は特定の研究空間内での液体窒素量の制限を決めるのに使われたり、作業員の接近を制限するような酸素の連続モニタリ

ングや外部換気を要求するための安全上の予防策を決定したりする指針として役立つ。

蒸発した寒剤からの蒸気は未だ冷たく、戸外であっても低い場所に残る可能性があり注意が必要である。極低温流体が蒸発している近くであれば、酸素濃度計で確認することなく不用意にその区域に入ることは避けるべきである。ガスは不均一に拡散することにも留意することが必要である。拡散や対流は強力な分散力であるが、風(戸外)や換気(屋内)による対流がなければ浮力が拡散より強力であり、酸素欠乏の程度は場所により異なる。多くの寒剤の気体は負の浮力を持ち、床付近にとどまると予想できるが、水素やヘリウムでは、蒸気がすぐに温められ周囲温度で密閉空間に放出されたとすると、部屋の上方における酸素欠乏はより危険である。

酸素濃度が非常に低いあるいは全くないガスを吸入したとき、ほとんど一瞬にして意識を失う。人間はこの状況に数秒で陥り、迅速な処置が取られなければ数分以内に死亡する。そのような状況の一つは、人間がタンク内に入った時であり、彼は数回呼吸する間に意識をなくす。

緩慢な窒息は空気中の酸素濃度を少しずつ、あるいは、局所的に減じた場合に起こる。呼吸可能な空気の標準的な酸素濃度を減少させるのはいかなる場合も望ましいものではなく、酸素濃度が下がるほど危険が増すことに注意が必要である。表 4.1-1 に空気中の酸素の減少に対して人間が被る結果のいくつかを示す。

表 4.1-1 酸素欠乏の兆候(酸素欠乏症)

1 気圧での酸素濃度[体積%]	安静時の症状
15-19	作業実行能力の低下; 心臓、肺または循環系の問題をする人の初期症状を誘発することがある
12-15	深い呼吸、速い脈拍、協調運動不全
10-12	くらみ、判断力低下、唇が少し青ざめる
8-10	吐き気、嘔吐、意識不明、灰色の顔色、めまい、精神障害
6-8	8 分で死亡; 6 分で 50[%]死亡、50[%]が回復、4-5 分では 100[%]回復
4	40 秒で昏睡、痙攣、呼吸不全、死亡

Compressed Gas Association (1992). Oxygen Deficient Atmospheres (Less than 19.5%), Compressed Gas Association Bulletin CGA SB-2, Arlington, Virginia.

4.2 高圧ガス事故例

高圧ガスの事故については、高圧ガス保安協会からホームページを通して公表されている。以下に、一般高圧ガス保安規則上の事故として公表されているものから関連していると思われるものについて表 4.2-1 に示す^[2]。また、詳細な事故事例を知りたければ、同ホームページから事故事例データベースをダウンロードすることが可能である^[3]。

表 4.2-1 一般高圧ガス保安規則上の主な事故

発生日	事故の呼称
2023/03/08	液化水素燃料車両の水素漏えいによるエンジンルーム火災
2021/12/10	水素製造装置からの水素漏えいおよび静電気による着火事故
2020/04/20	水素ガス漏えい事故
2019/09/12	FC フォークリフト水素充填時の充填ホース破損
2018/08/10	水素ステーションの充填ホースからの漏えい発生による定置ガス検知器発報
2018/10/31	圧縮水素スタンドの圧縮機からの水素漏えい
2017/10/27	超高圧水素コンプレッサーからの水素漏えい
2017/10/23	水素ブースターから水素漏えい
2017/02/13	コンプレッサー破損に伴う水素ガス漏えい
2017/01/1	圧縮水素スタンドの充填ホース破裂
2017/04/14	圧縮水素スタンドディスペンサーからの水素漏えい
2016/12/26	圧縮水素スタンドの遮断弁から水素漏えい
2016/09/10	液化酸素容器の破裂
2016/05/23	圧縮水素スタンドの緊急離脱カブラ継手部から水素漏えい
2016/03/08	圧縮水素スタンドの水素漏えい
2015/03/03	スタンドにおけるディスペンサー内の継手からの水素漏えい
2015/10/05	充てん作業中の移動式スタンドにおけるディスペンサー内の遮断弁からの水素漏えい
2015/10/06	移動式スタンドにおける緊急離脱カブラーからの水素漏えい
2014/12/09	水素スタンドにおける蓄圧器の清掃中の火災
2014/07/17	圧縮水素スタンドの充てんホース部から水素ガス漏えい
2011/03/11	東日本大震災による水素圧縮機ユニットの漏洩、爆発
2009/06/24	移動式液化窒素製造設備での気密試験中の耐圧ホース破裂
2005/12/07	水素ステーション実証試験設備の爆発事故
2006/01/16	液化窒素タンクローリバルブのバルブ破損

引用文献

- [1] Frederick J. Edeskuty and Walter F. Stewart, Safety in the handling of cryogenic fluids, p9-16, PLENUM PRESS, NEW YORK AND LONDON (1996)
- [2] https://www.khk.or.jp/public_information/incident_investigation/hpg_incident/gen_lp.html(2014.1.11)
- [3] https://www.khk.or.jp/public_information/incident_investigation/hpg_incident/incident_db.html(2014.1.11)

Ⅱ 高圧ガスの取扱い（辻上）

1. 高圧ガスとは^[1]

1.1 高圧ガスの定義

高圧ガスとは、容器に圧縮されてつめられているガス(圧縮ガス)、圧縮または冷却により液体となっているガス(液化ガス)で、高圧ガス保安法で定められた圧力以上のものをいう。各ガスの定義を **Table 1** に示す。なお本編はゲージ圧で示す。

● 高圧ガス保安法 高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵・販売、輸入、移動、消費、廃棄等を規制するとともに、民間事業者及び高圧ガス保安協会による高圧ガスに関する自主的な活動を促進し、公共の安全を確保することを目的とする法律。	
--	--

Table 1 高圧ガスの定義

圧縮ガス	・ 常用の温度^{※1}で 1[MPa]以上となり、現に 1[MPa]以上の圧縮ガス^{※2} ・ 35[°C]で 1[MPa]以上となる圧縮ガス
液化ガス	・ 常用の温度で 0.2[MPa]以上となり、現に 0.2 [MPa]以上の液化ガス ・ 35[°C]で 0.2[MPa]以上となる液化ガス
圧縮アセチレンガス	・ 常用の温度で 0.2[MPa]以上となり、現に 0.2[MPa]以上のアセチレンガス ・ 15[°C]で 0.2[MPa]以上となる圧縮アセチレンガス
政令で定めるもの (35[°C]で 0[Pa]以上)	・ 液化シアン化水素 ・ 液化ブロムメチル ・ 液化酸化エチレン

※1 常用の温度とは、容器、装置等において通常使用されている温度をいう。通常使用される範囲の最高の温度をいう。容器の場合は、貯蔵の技術上の基準により 40[°C]以下でなければならないので、(最高の)常用の温度は 40[°C]である。

※2 一例として、常用温度が 100[°C]で操業する設備において、使用するガスの圧力が 1[MPa]の場合、その時は高圧ガスである。しかし、常用温度を下げ 1[MPa]未満で使用する場合は、高圧ガスにはならない。

1.2 高圧ガスの分類

高圧ガスはその性質により、可燃性ガス、支燃性ガス、不活性ガス、毒性ガス、特殊高圧ガスの 5 種類の性質に分けられる (**Table 2**)。アンモニアのように、可燃性と毒性の 2 つの性質を持つガスもある。

1.3 高圧ガスの特性

● 圧力による危険性

酸素、窒素、アルゴン、水素、ヘリウム等は臨界点が非常に低いため、圧縮ガスとして流通している。その圧力は、14.7[MPa]～19.6[MPa]である。圧縮ガス容器の多くはかなり

Table 2 高圧ガスの種類

種類	定義	例
可燃性ガス	空気中又は酸素中で燃えるガス	水素 メタンなど
支燃性ガス	そのガスが存在する場合に、他の物質を燃焼させることができる	酸素 空気 塩素 など
不燃性ガス (不活性ガス)	そのガス自身は燃焼せず、他の物質を燃焼させる性質をもたないガス	窒素 二酸化炭素 ヘリウム アルゴンなど
毒性ガス	一般高圧ガス保安規則で指定されたガス及び じょ 限 量 が 200[ppm]以下のもの	一酸化炭素 アンモニア 塩素など
特殊高圧ガス	一般高圧ガス保安規則で定められた 7 種類のガス	アルシン ジシラン ジボラン セレン化水素 ホスフィン モノゲルマン モノシラン

のエネルギーを内部に蓄積しており、外部に短時間に放出させると危険である。

<安全対策>

- ・ 圧力の適正な管理(圧力計・安全弁の設置、圧力に合わせた機器の使用 など)
- ・ 急激に圧力を変化させる作業は行わない。
- ・ 使用圧力に合わせた機器を選定する。

● 可燃性による危険性

可燃性ガスは自ら燃焼するガスであり、何らかの着火源があると火災に繋がる。漏洩が続いた後に着火すると、爆発となり、被害が大きくなることがある。漏洩させないようにすること、着火源の近くで使用しないこと、漏洩した場合でも滞留させないことなど、取り扱いには十分な注意が必要である。シランのように、空気(酸素)を遮断しない限り燃え続けるガスもあるので、このようなガスは供給を止める措置が必要である。

<安全対策>

- ・ 漏洩防止、滞留防止(換気など)
- ・ 着火源となるものの近くで使用しない。
- ・ 防爆機器の使用
- ・ 適切な消化方法

● 支燃性による危険性

支燃性ガスは、自らは燃焼しないが燃焼を助けるガスであり、最も代表的なものは酸素である。なじみのある元素ではあるが、液化酸素のような高濃度酸素は特に危険である。酸素中では空気中よりも急激に酸化反応が進み、その発生する熱で燃焼することがあるので、取り扱いに注意が必要である。また、油分や金属粉と接触すると特に燃焼しやすい傾向にある。

<安全対策>

- ・油分、金属粉等との接触を避ける
- ・着火源、熱が発生するものの近くで使用しない
- ・漏洩、滞留させない

● 有害性による危険性

毒性ガスは様々な種類があり、ごく少量でも人の健康に影響を及ぼすものもある。使用時はキャビネット内に設置し、漏洩しても安全に排気できるような対策をとるべきである。

また、不活性ガスによる窒息(酸欠)の事故も多い。そのため、不活性ガスを使用するときは酸素濃度 18[%]以上を確保するよう、使用時は十分な換気をする必要がある。

<安全対策>

- ・キャビネット内に設置して使用する
- ・漏洩させない
- ・十分な換気を行う

● 極低温による危険性

液化ガスには、常温で液状となっている LP ガスや液化塩素のほか、液化酸素、液化窒素、液化水素、液化ヘリウムなど、低温の状態で液状に保たれているガスがある。低温で保たれている液化ガスは、極低温の液体であり、誤って触れると凍傷を起こす可能性がある。また、液化窒素、液化水素、液化ヘリウムなどの非常に温度の低い液化ガスは流通させている配管の周辺に「液化空気*」が発生することもあるため、配管に触らないという安全対策も必要である。

低温液化ガスを配管等に封入(液封)することもしてはならない。温度が上昇すると、体積が数百倍となるため圧力が急上昇し、配管等が破裂する危険がある。

<安全対策>

- ・革手袋等の保護具を着用する。
- ・低温脆化を起こす材料を使用しない。
- ・液封状態を作らない。
- ・配管流通時は、徐々に予冷する(急激に流すと、ガスが急激に蒸発する恐れ)。

* 液化空気：空気を液化した無色無臭の液体、沸点約-194℃；安全データシート JINGA 整理番号 GC:08

2. 高圧ガスの取り扱い^{[2][3]}

2.1 高圧ガスの製造

高圧ガスを使用する場合、製造行為と消費行為に分けられる。例えば、圧縮ガス容器からガスを取り出す際、1.0[MPa]を越える圧力で取り出す場合は、高圧ガス製造行為となり、管轄官庁に届出が必要となる(製造の許可が出た後、設備の完成検査を受けて合格してから初めて使用できる)。

Table 3 に高圧ガス製造行為の例を示す。下記の行為について、届出をせずに製造を行うと、法違反となる。そのた

め、減圧弁を容器に取り付け、安易に圧力を調整してガスを供給することないよう、注意が必要である。

Table 3 高圧ガスの製造行為の例

	製造行為	例
圧力変化	高圧ガスでないガスを高圧ガスにする	0.5[MPa]のガスを1.5[MPa]まで昇圧する
	高圧ガスをさらに圧力上昇させる	1.5[MPa]のガスを10[MPa]まで昇圧する
	高圧ガスを圧力の低い高圧ガスにする	10[MPa]のガスを1.5[MPa]まで減圧する
状態変化	気体を高圧ガスである液化ガスにする	窒素ガスを冷却して液化窒素にする
	液化ガス(高圧ガスでないものを含む)を気化させて高圧ガスにする。	液化水素を気化させて、1.0[MPa]以上の水素ガスにする
その他	容器への充填行為	容器から容器への充填
	液面加圧行為	液化ガスが入った容器にガスを入れて、容器を加圧する

2.2 高圧ガスの消費

高圧ガスを 1.0[MPa]未満で使用する場合は、高圧ガスの消費となり、都道府県の管轄官庁への届出は不要である。ただし、特定高圧ガスに指定されているガスについては、消費の届出が必要である。特定高圧ガスに指定されているものは、圧縮水素、圧縮天然ガス、液化酸素、液化石油ガス、アンモニア、液化塩素、及び Table.2 に示す特殊高圧ガスである。

高圧ガスの消費の際には、以下のことを注意する必要がある。

- ① 充填容器等のバルブは静かに開閉すること。特に、可燃性ガス、酸素又は三フッ化窒素のバルブは、急激に開けると発火する恐れがある。
- ② 充填容器等は、転落、転倒による衝撃又はバルブの損傷を受けないよう粗暴な取り扱いをしないこと。
- ③ 充填容器等には、湿気、水滴などによる腐食を防止する措置を講ずること。
- ④ 消費設備に設けたバルブ又はコックには、適切に操作できる措置を講じること。
 - ・手動バルブには、開閉状態を明示する標示板又はラベル等を取り付けること。
 - ・安全弁等の元弁その他通常使用しないバルブ等は、みだりに操作できないよう、施錠、封印、ハンドル外しなどの措置をとること
 - ・バルブ等に係る配管には、内部の流体を名称又は塗色で表示するとともに流れの方向を標示すること。

2.3 容器

高圧ガス容器は、圧縮ガス充填容器(シリンダ)や超低温容器(Liquid Gas Container, LGC)といった容器がある。高圧ガス容器の取り扱い時には、以下の点に注意すること。

- ① 容器置場に収納するときは、充填容器と残ガス容器を区分して置き、また可燃性ガス、毒性ガス、酸素の容器はそれぞれ区分して置くこと。
- ② 容器は 40[°C]以上より上げてはならない。直射日光が当たる場合は、日除けをするなどの措置が必要。
- ③ 粗暴な取り扱いはしないこと。転倒、転落させると衝撃によって容器が破損し、使用できなくなる。
- ④ 容器の運搬は専用の運搬具を用いること。

2.4 圧縮ガス充填容器の使用方法

- ① ガスを使用する際は、容器を固定すること。
- ② 容器に接続している減圧弁が閉の状態であることを確認し、容器の元弁を徐々に開にすること。
- ③ 容器の元弁を開けてから、減圧弁を所定の圧力に調整すること。
- ④ ガス使用後は容器の元弁を閉にし、ガスラインの圧力を大気圧程度まで下げること。
- ⑤ 容器内のガスは使い切るのではなく、若干の残圧を残した状態で使用を止めること。
- ⑥ 容器が販売業者からの借用物の場合、使用済み後は速やかに返却すること。
- ⑦ 借用物ではない場合は、所定の場所に保管すること。

2.5 超低温容器(LGC)の取り扱い

- ① 可搬式の超低温容器(Liquid Gas Container LGC)は二重殻構造で、内外槽の空間には断熱材が充填され真空となっている(Fig.1)。外槽は外圧の大気圧に耐えられる程度の強度で肉厚は薄い。内槽は、熱侵入を抑えるため薄肉の配管(ネックチューブ)で外装から吊下げられている。従って、一般の容器以上に丁寧な取り扱いが必要である。
- ② 開口部は常に低温のガスが出ており、水分などが氷結しており閉塞の危険があるので注意が必要である。
- ③ 超低温のガスのため、圧力が上昇しやすい。そのため、内部の圧力を適度に下げる策を講じること。また、安全弁出口をふさぐことはしないこと(内圧が上がって容器が破裂し、大事故に繋がる恐れがある)。
- ④ 外面にへこみなどの損傷が見られ場合は使用を中止し、メーカーに問い合わせること。

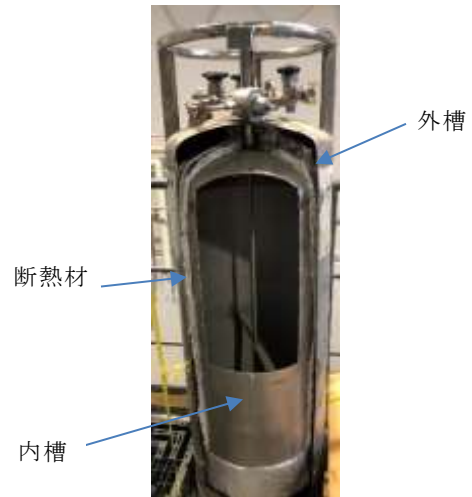


Fig.1 LGC の断面

2.6 コールドエバポレーター

コールドエバポレーター(CE：超低温貯槽)は、液化窒素や液化水素といった極低温の液化ガス向けの貯槽である。内槽と外層からなる二重殻構造となっており、内槽には超低温においても脆性を起こさない十分な強度と靱性を有するオーステナイト系ステンレス鋼板を用い、外槽には一般構造用圧延鋼板を使用している。



Fig.2 コールドエバポレーターの例

3. 日々の管理

① 容器

- ・ 充填容器と残ガス容器、可燃性ガスと毒性ガスと酸素は、それぞれ区分して置くこと。
- ・ 転倒防止策を講じること。
- ・ (所定の場所に設置、チェーン等での固定)。
- ・ 40[°C]以下に保つこと(直射日光は避ける)。

② 超低温容器(LGC)

- ・ 転倒防止策を講じること(所定の場所に設置、チェーン等での固定)。
- ・ 安全弁が作動する状態であることを確認すること。
- ・ 使用後は圧力を大気圧程度まで減圧しておくこと。

③ コールドエバポレーター

- ・ 構成機器の損傷がないか確認のこと。
- ・ 安全弁の元弁が開であることの確認。
- ・ 運転記録をつけること。
- ・ 3日以上使用しない場合は、加圧ガス弁を閉にすること。

4. 事件事例^[4]

4.1 容器管理

① 長期保管中の窒素容器が破裂

食品の酸化防止用装置に使用されていた窒素容器が腐食により破裂。当該装置は 10 年以上の間使用されておらず、容器は床に寝かせた状態で置かれていた。破裂した容器を検分したところ、容器の外部には胴部の長手方向に腐食が生じている部分が見受けられた。原因は、床の清掃時に 水がかかるなどして腐食が進み、内圧に耐えきれなくなり、破裂に至ったものと推定される。また、容器の内部にも腐食が浸透している部分が見受けられた。

② 車内放置の高圧ガス容器が破裂

フルオロカーボンの容器を車内に放置していた結果、車内の温度が高温になりボンベの内圧が高まり破裂した。

4.2 CE 運転

圧力上昇による貯槽爆発

コールドエバポレーター(CE)の液化窒素貯槽が破裂し、工場が半壊するとともに、半径約 400[m]以内の工場等が損壊した。安全弁の元弁が人為的に閉止され、貯槽は密封状態となり、外部からの侵入熱によって圧力が経時的に上昇し、破裂に至った。

4.3 ガス消費

① 窒息

低温実験室内の温度を下げようとして 液化窒素をばらまき、呼吸不全のため 2 名が死亡。冷凍機の故障により低温実験室の室温が上昇、これを 0[°C]以下にとどめようと、大量の液体窒素を気化させ室内の酸素濃度が低下し、酸欠状態に陥ったと考えられる。

② 凍傷^[5]

鉄などを切るレーザーを冷却するための液化窒素のガス交換を行う際にガスホースが外れてしまい、ホースを取り付けるまでの約 3~5 分間、皮手袋の上から液化窒素を浴びてしまった。両手に凍傷を受傷し、植皮術を受けることとなった⁴⁾。

参考・引用文献

- [1] 日本産業・医療ガス協会, 高圧ガスハンドブック改訂版, 2012
- [2] 北海道大学理学研究院 極低温液化センター, 「安全講習会テキスト」
- [3] 大阪大学大学院工学研究科 安全技術 Gr., 「高圧ガス」の取り扱いについて
- [4] 松尾あおい, 液体窒素による手指凍傷の 1 例, 日本職業・災害医学会会誌 JJOMT Vol. 53, No. 3, 2005.
- [5] 高圧ガス保安協会, 高圧ガス事故事例データベース

III 磁場の安全性 (林)

超電導マグネットは、コンパクトで高磁場の発生が可能であり、この分野の研究者、エンジニアに加えて、超電導の最大のマーケットである MRI では多くの一般の患者さん等がその恩恵を被っている。ここでは、マグネットの使用に際してして、電磁場が生体に及ぼす影響、周辺機器に及ぼす影響について、基礎的な物理現象から解説する。

一般的に超電導マグネットでは、静磁場の発生から、パルス磁場、商用周波数程度までの交流運転が行われるが、MRI では、パルスマグネットとしての傾斜磁場コイル、核磁気共鳴の励磁・検出マグネットとしての高周波コイルも用いられることから、静磁場から、パルス等の変動磁場、高周波電磁場までを広く扱うことにする。

なお、本稿は主として「MRI 安全性の考え方 第2版：日本磁気共鳴医学会安全性評価委員会」^[1]及び「MRI 安全性の考え方 第3版：日本磁気共鳴医学会安全性評価委員会」^[2]の関連箇所の抜粋を基に編集したものである。詳細は出典を参照されたい。また、MRI に関する安全性情報・ガイドラインについては日本磁気共鳴学会のホームページ^[3]に関連ページがあるので、最新情報はそちらで確認いただきたい。

1. 生体への影響

1.1 生体と電磁場の相互作用

電磁場は電波や赤外線、可視光線、一部の紫外線(周波数では300[GHz]以下)であり、原子を電離・励起するようなエネルギーを持たず、生体に直接的な作用を及ぼさない。しかしながら、人体も導電性や誘電性を有するため外部からの電磁場に対し応答する。またその応答は周波数に応じて異なる(図 1)。例えば、静磁場は最終的に化学的作用、力学的作用、神経刺激作用として生体影響が現れるが、変動する電磁場については中・低周波(<100[kHz])では神経刺激作用、高周波では熱作用として現れる。100[kHz]~10[MHz]程度は、刺激作用と熱作用の両方を考慮する必要がある。

簡単にまとめれば、静磁場は生体への影響は考える必要はなく、変動磁場(磁場分布を持った静磁場の中の移動を含む)は末梢神経刺激に注意する必要がある、高周波磁場は発熱に注意する必要がある。

1.2 静磁場

MRI に代表される非常に強い静磁場の利用は、超電導マグネットの最たる特性と言える。

まず図 1 に示す物理作用についてそのメカニズムについて述べる。このメカニズムは、2. 周辺機器への影響を論じる場合も同様の原理となる。

物理作用	静磁場		変動電磁場	
	① 動く導体による起電力の発生 ② 動く荷電体に対して働く力 ③ 永久磁気双極子や非球形の常磁性あるいは反磁性体に働くトルク ④ 磁性体に働く力		<10[MHz] 誘導電流 100[kHz]以上は熱影響も考慮	>10[MHz] 発熱
生体効果	↓ ↓ ↓ ↓			
	電氣的刺激		力學的刺激	
	電氣的刺激		熱作用	
	中樞・抹消神経刺激		中樞・抹消神経刺激 移動する荷電粒子にかかるローレンツ力 生体分子に働く力 生体分子の配向	

図 1 電磁場の生体影響—周波数ごとの応答

1.2.1 メカニズム

生体における静磁場の影響は、下記のメカニズムにより電氣的、力學的、化学的作用をもたらす。

- 1) 動く導体による起電力の発生と動く荷電体に対し働く力
- 静磁場は運動する導体にローレンツ力を及ぼし、それによって誘導電場と電流を生じさせる。よって、動く導体による起電力の発生と、動く荷電体に対し働く力は密接な関わりがある。この相互作用の顕著な例は、生体内の導体(血流)による磁気誘導電位である。この誘導電位はフローポテンシャルとも呼称され、その起電力 E は下記のように表すことができる。

$$E = vBD\sin\theta \quad (1)$$

ここで、 B は静磁場、 D は円筒状の血管の直径、 θ は静磁場と血管のなす角度、 v は血液の速度である。このように誘導電位は、流速、静磁場強度、血管径に比例し、静磁場に対し直交であるときに最大となる。従って、流速の速い大血管においてこの影響が顕著となる。

また、磁場中で動く荷電帯にはローレンツ力が働く。磁束密度 B の磁場中で、電気素量 q の粒子が磁場に垂直に

速度 v で動いている時のローレンツ力 F として、下記のよう
に表すことができる。

$$F = qvB \quad (2)$$

2) 誘導電場および電流

時間変動する磁場は、ファラデーの誘導法則に従って
生体組織に電流を誘導する。これは、静磁場中を運動す
る人体に対しても同様のことが言える。この作用は回転
運動については、均一磁場・勾配のある磁場中のいづれ
も、直線運動については勾配のある磁場中で発生する。
従って MRI 近傍のような不均一な漏洩磁場を有する環境
で人体が移動すると、体内で誘導電流が発生する。その
結果として、めまい、頭痛、味覚変化などの一時的な感
覚変化が知覚される。

3) 磁性体に働くトルク(磁場配向)

非球形の物体は、磁場中で磁気エネルギーが最小とな
るような配置を取ろうとするため、トルク T_q が生じる。
その時の式は、回転楕円体においては以下のように表す
ことができる。

$$T_q = \left(\frac{VB^2}{\mu_0} \right) (\chi_{\parallel} - \chi_{\perp}) \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

ここで、 V は物体の体積、 μ_0 は真空の透磁率、 $\chi_{\parallel}$ およ
び $\chi_{\perp}$ はそれぞれ磁場と平行及び垂直方向の磁化率、 θ は
主軸と磁場のなす角である。

この現象は生体分子や細胞のような反磁性体におい
ても生じることが知られており(「磁場配向」と呼ばれ
る。)再現性よく発生する磁場影響である。生体組織内
ではこれら物質が単離していることはなく、周囲と結合
組織などで結ばれている。このため、これら現象が生体
に直接的に影響を与えているという証拠は確認されてい
ない。

4) 磁性体に働く力

物質を磁場勾配中に置くと、磁場勾配の大きさと磁束
密度の積に比例した力を受ける。物質が常磁性体または
強磁性体である場合には、磁束密度が高くなる方向へ物
体は引き寄せられる。MRI における金属体の吸引事故な
どが顕著な例である。反磁性体では、磁束密度が小さく
なる方向へ力を受ける。例えば、8[T]の超電導マグネッ
トと水を用いた実験では、水は中心磁場から外に向け押
出される(モーゼ効果)。磁性体に働く力については反磁
性体より常磁性体や強磁性体への管理が主眼となる。

$$F \propto B \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (4)$$

5) 電子スピン相互作用:化学的作用

静磁場は、ラジカル対が関係する反応に影響を与える
ことが知られている。ほとんどのラジカル対は基底一重
項状態にあり、2つの電子スピンは互いに逆方向を向い
ている。しかしながら、三重項状態では2つのスピンは
平行となり、エネルギー順位が磁場によりゼーマン分裂

するため、一重項と三重項状態を経る反応過程では、反
応速度が磁場の影響を受ける。このため、一重項状態、
三重項状態それぞれから得られる反応生成物の収量が、
磁場の有無で異なる。

1.2.2 静磁場の生体影響

生体に対する静磁場の影響については、WHO EHC232
(2006)^[4]によって体系的にまとめられている。ここでは代表
的な実験例について紹介する。

1) 分子レベル

化学反応過程で反応分子の磁性と反応生成物の磁性が
異なる場合には、反応に対する静磁場の影響が想定され
る。生体系を対象とした場合、オキシヘモグロビンの脱酸
素化反応が考えられる。オキシヘモグロビンは反磁性体
であるが、反応生成物であるデオキシヘモグロビンおよ
び酸素分子は共に常磁性体である。このため、静磁場中
では脱酸素化反応のエネルギー障壁が下がり、反応が促
進されると考えられる。しかし、理論計算によると、解
離エネルギーは 64[kJ/mol]であるが、4[T]の磁場印加に
よって、わずかに約 1[J/mol]低下する。このエネルギー
低下は約 0.01[°C]の温度変化に相当するにすぎない。

分子レベルでよく研究されているのは、酵素反応に対
する静磁場の影響と、生体高分子あるいは分子集合体
における磁場配向である。酵素反応に対する静磁場の影
響については、これまで 0.3~22[T]の静磁場を用いて研究
されている。それらのうちの約 6割は磁場の影響が認め
られなかったと報告している。一方、約 3割は静磁場に
曝露することによって、酵素反応速度が増大することを、
また約 1割は減少することを見出している。カタラーゼ
の反応速度は 0~0.8[T]で磁束密度に比例して増加し、
0.8[T]では磁場の無い場合の20[%]増になるという。トリ
プシンについては増加が見られたという報告と認められ
なかったという報告があり、後者の内容の論文の方の数
が多い。

ラジカル対が関係する反応が磁場の影響を受けること
が光化学反応などで知られている。光化学反応ではその
反応中間体にラジカル対を形成する。ほとんどのラジカ
ル対は基底一重項状態にある。一重項状態では2つの電
子スピンは互いに逆方向を向いている。換言すれば剰余ス
ピンモーメントはゼロである。三重項状態では2つのス
ピンは平行で、スピンモーメント1を持つ。三重項状態
のエネルギー準位が磁場によりゼーマン分裂するため、
一重項と三重項状態を経る反応過程では反応速度が磁
場の影響を受ける。このため、一重項と三重項それぞ
れから得られる反応生成物の収量に磁場がない時のそれ
に比べ、差が生じる。酵素反応には反応中間体としてラ
ジカル対を含む反応も多い。すでに、*in vitro*(試験管内)
実験での研究では、酵素反応速度が磁場の影響を受け
ることが報告されている。例えば、B₁₂ エタノールア
ミンアンモニアリアーゼの V_{max}/K_m が 50[mT]以上の磁
場曝露

によって減少し、100[mT]では 20%減少することが見出されている。さまざまな酵素についての *in vivo*(生体内での)研究が今後の重要な研究課題のひとつである。

棒状の生体高分子あるいは生体膜などの分子集合系が磁場配向することはよく知られている。これはこれら分子の反磁性磁化率の異方性($\Delta\chi = \chi_{\parallel} - \chi_{\perp}$)に起因する。液体中に分散した高分子単体の場合、磁場配向相互作用が熱的相互作用に打ち勝つためには、かなり大きな磁場が必要である。例えば、仔牛胸腺 DNA の場合 13[T]の静磁場印加でわずか 1[%]が配向するにすぎない。脂質やレチナールなどで構成される分子集合系が液晶状態になっていると、分子は数十[mT]程度の磁場でも配向する。分子集合系では、特に等方相-液晶相の転移点近傍で磁場配向効果が大きい。ラットの培養平滑筋細胞を 14[T]の静磁場に 2~3 時間曝露すると、細胞内の生体高分子がトルクを受けて配向することが偏光測定で観測されている。磁場による分子配向効果は生体膜や組織の機能に影響を及ぼすことが十分に考えられるが、現在までのところ、磁場配向が生体膜機能などに直接的に影響を与えているという証拠は確認されていない。

2) 細胞レベル

磁気力学効果として、脱酸素化鎌状赤血球の磁場配向が知られている。0.35[T]の静磁場中で、常磁性であるデオキシヘモグロビンを持つ鎌状赤血球は、その長軸が磁力線と垂直になるように配向する。正常赤血球を 1[T]程度の静磁場に入れると円盤面が磁場方向に平行になるように配向し、4[T]以上ではほぼ 100[%]配向する。配向方向は酸素化、脱酸素化に関係しない。

細胞膜機能に対する磁場の影響も研究されている。神経標本については低磁場および短時間曝露の研究が行われている。研究対象が多岐にわたっており、論文の約 6 割は影響を見出しているが、約 4 割は磁場影響を観測しなかったとしている。磁場はイオンチャネルの構造および活性を変化させると考えられている。

細胞培養過程における磁場の影響について、主に 1960 年代の研究には、磁場の影響が見られたというものが多い。例えば、悪性腫瘍細胞を勾配の大きな静磁場中で培養すると、磁束密度が小さい場合と曝露時間が短い場合には磁場の影響は見られないが、0.44~0.8[T]で 18 時間曝露すると核濃縮などの変性が顕著に見られた。しかし、最近の研究では、測定対象や実験条件などは異なっているが、磁場の影響は認められなかったとする論文が多い。

今後、種々の細胞について変異誘発性に対する静磁場影響の研究を進めることが重要である。

3) 循環器系

静磁場を印加すると、心電図の T 波が増大することがヒトをはじめ、多くの哺乳類について見出されている。磁場の曝露を中止すると、T 波の増大は直ちに回復するので、これは血流によって誘導された起電力が T 波に重畳したものと解釈され

ている。大きな動物では 0.1[T]以上の磁場曝露で誘導起電力が観測され、その大きさは 1[T]くらいまでは磁束密度に比例して増大する。1[T]以上では、大動脈以外の血管からの小さな誘導起電力が重畳してくるので、振幅が急激に増大する場合がある。ヒトの場合、大動脈の直径を 25[mm]、血液の最大流速を 63[cm/s]とすると、磁束密度比例領域では、誘導起電力の最大値は 16[mV/T]となる。心筋ではさらに小さいと考えられるので、数[T]程度の静磁場では心筋の脱分極は起こらないと予測される。

8[T]の MRI 装置を用いたプタに関する実験では、3 時間曝露しても心拍数、血圧、心拍出量、その他の生命パラメータに変化が見られなかった。

4) 神経系

神経系については、興奮閾値、活動電位の振幅と伝達速度などに対する静磁場の影響が数多く研究されている。興奮閾値については、カエルの座骨神経などについて実験が行われているが、1[T]の静磁場を神経の軸方向に対し垂直に印加した場合、いずれも活動電位に対する影響などは見出されていない。理論計算によれば、単離されたニューロンで活動電位の伝達速度を 10[%]減少させるためには、少なくとも 24[T]の静磁場に曝露させる必要があるという。事実、ロブスターの巨大神経軸索について、1.2[T]の磁場曝露では活動電位の伝達速度およびイオンチャネル電流が変化しないことが見出されている。ネコを用いた *in vivo*(生体内)研究で、後頭葉の有線領の活性化が調べられている。120[mT]の磁場を印加すると、50~95[s]後に視覚誘発電位は徐々に減少し始め、100~175[s]で最大に達する。磁場を除いた後も 200~285[s]までこの変化は持続する。このことから神経伝達に対する磁場の影響は、軸索伝導に対する影響ではなく、シナプスにおけるイオン環境あるいは神経伝達物質の発生量を変化させていると解釈される。

興奮閾値の温度係数は大きいので、神経系に対する磁場の影響の実験では、0.1[°C]以下の精度で温度制御する必要があるといわれている。

5) 生殖および発生

一般に生物はその生殖および発生過程において外的擾乱の影響を受けやすい。静磁場が生殖および発生過程に及ぼす影響についても、すでに多くの研究がある。影響が見られたものとしては、例えば、1.6[T]の静磁場中でマウスを 30 日間飼育すると、曝露中および曝露直後には、精子形成上皮細胞に可逆的な変化が起き、成熟精子の数が著しく減少する。数十[mT]の静磁場中でのマウスについての実験では、交配より分娩までの期間の延長、妊娠率の低下、一腹当たりの生出生数の低下。ニジマスの精子を 1[T]の磁場に曝露すると授精率が上昇する、グッピーでは第三世代で生殖が完全に抑制されたといった報告が

ある。一方影響の見られなかったものとしては、マウス、ラットならびにアフリカノメガエルなどの例がある。

ショウジョウバエ発生に対して、静磁場が性比(生きて生まれた雄の数/生きて生まれた雌の数)に影響を及ぼすことが報告されている。通常の状態では、子の性比はほぼ1に近いが、雌雄のショウジョウバエを72時間磁場(勾配の大きな0~10[mT]、勾配の小さい32[mT]、勾配の小さい52[mT])に曝露した後、交配し、孵化した子の性比はいずれの磁場条件でも変化が見られ、それぞれ、1.135、1.142、1.165となり、雄の生まれる確率が高くなっている。また、地磁気に比べ約10分の1の5[μT]の磁場中に孵化まで曝露しておくと、性比は1.258と大幅に大きくなる。

1.3 変動磁場

1.3.1 誘導起電力

外部からの電磁場は、生体組織の電気定数に基づき生体内の電場分布を生じさせ、生体影響を発生させる。低周波電磁場曝露においては、ファラデーの法則により同じ曝露磁場でも変動速度が変われば誘導される電場の強度が変化し、生体側では、興奮性細胞の応答性によって影響が発生する。

ファラデーの法則によって、時間変化する磁場によって導体である生体に誘導電位および渦電流が誘導される。生体を半径 r [m]の円柱として、軸方向に磁場 B [T]が加わった時、最大の誘導電流密度 J [A/m²]は下記のように表すことができる。

$$J = E\sigma = \left(\frac{\pi r^2}{2\pi r}\right)\left(\frac{dB}{dt}\right)\sigma = \left(\frac{\sigma r}{2}\right)\left(\frac{dB}{dt}\right) \quad (5)$$

ここで、 E [V/m]は誘導電位、 r は誘導ループの半径、 σ [S/m]は組織の導電率、 dB/dt は磁束密度の変化速度である。すなわち、誘導電流密度(と誘導電位)は物体の大きさおよび磁束密度の変化速度に比例する。組織の導電率については曝露源の周波数、組織によって異なる。これら事項が、MRI検査の安全性を考慮する上で重要となる。

1.3.2 変動磁場の生体影響

時間変動する電磁場は、低周波~中間周波については体内に誘導電流が生じることによる神経刺激作用(磁気閃光など)、中間周波~高周波については発熱が生じる。例えば、末梢神経の神経興奮閾値は3[kHz]以下では4[V/m]であるが、体内誘導電場がこの値を超えた場合、痛みや不快感など感覚影響変化が生じる。このため、変動磁場についてはMRI検査では傾斜磁場のon/offによる心臓刺激と末梢神経刺激が考慮対象となるが、IEC/JIS規格で測定手法や出力が定められている^[5]。なお、100[kHz]を超えて10[MHz]までは刺激・熱両方の影響の考慮が必要であるが、MRI検査における傾斜磁場による発熱と、RF電磁場による神経刺激は考慮する必要はない。

1) 時間変化する磁場による神経および筋刺激

本節では、ICNIRPの2010年の低周波ガイドライン^[6]、2019年のIEEE standard^[7]を参考に、時間変化する磁場による神経および筋刺激について述べる。

組織に I [A/m²]を超える電流密度を誘起する、時間的に変化する磁場は神経興奮を引き起こし、心室細動などの不可逆的な生物学的影響をもたらす可能性がある。

時間変化する磁場が神経活動に影響を及ぼす影響については、1~10[mA/m²]以上の誘導電流密度が必要であると知られている。また、中枢神経系の有髄神経線維の理論計算上の刺激閾値の最小値は、~10[V/m] (ピーク値)であるかもしれないことが示されている。この時、刺激に必要な電流波形は矩形波やパルス磁場や交流磁場であつてもよい。

外部からの電磁場曝露により神経刺激が生じる例として、磁気閃光がある。磁気閃光は外部から頭部への変動磁場印加による閃光現象の知覚であり、最も低い磁場曝露で生じる再現性のある生体影響である。このような特性から、ICNIRPにおける刺激作用に対する神経応答に関する標準として利用されている。また、磁気刺激の周波数特性は20[Hz]前後の極低周波数で最も低くなることが知られている。これまでに、磁気閃光が知覚される閾値は20[Hz]において8.14[mT]であり、網膜の誘導電場がICNIRPにおいては50[mV/m]と計算されている。磁気閃光は生体組織に対する時間変化する磁場の直接的効果ではなく、体内に発生する誘導電場によるものであると解釈されている、磁気閃光の位置づけとしては、対象組織となる網膜は中枢神経系の一部であり、誘導電場が中枢神経系への神経回路に一般的に及ぼす影響の安全側のモデルとみなされている。

末梢神経刺激の閾値については2~6[V/m]の幅で閾値が提唱されている。神経モデルを用いた理論計算では、ヒトの末梢神経系の有髄神経線維はおよそ6[V/m] (ピーク値)の閾値の最小値を持つと見積もられている。一方、MR装置の傾斜磁場に曝露した際に誘導される末梢神経刺激については、均一人体ファントムモデルを用いた計算を基に、知覚閾値は約2[V/m]程度である可能性が示されている。Soらは各組織に誘導される電場のより精密な計算を行い、刺激は皮膚または皮下脂肪で起きると仮定して、末梢神経刺激の閾値の最小値は4~6[V/m]の間であると見積もられている^[8]。これらの結果に基づき、ICNIRPでは末梢神経刺激の閾値を4[V/m]としている。

静磁場中であっても、磁場内で急激に動いた場合は、変動磁場を感じることでめまい、ふらつき、口内の金属味、磁気閃光など生じることが知られている。よって、磁場内では患者に静止するように、また操作者にはゆっくり動くように指導する必要がある。ただし、この現象は一過性の現象であり、磁石の周囲から離れた後はそのような生理的効果は起こらないし、静磁場にさらされることによって時間とともに生じる蓄積効果はないと考えられている。

また、変動磁場は移動速度に加え静磁場の空間的な不均一性で決まるつまり磁石の中心よりも磁石近傍の漏洩磁場環境での動きの方が影響は大きいことを示す本規格では、患者を漏洩磁場環境から磁石内へ移動させる時の移動速度は 3[T/s]を超えないように制限している。

2) MRI 検査における防護の状況

1.2.2 1.3.2 で一般的な外部電磁場への神経系の応答について述べた。では、MRI ではどのように安全性が担保されているのであろうか？ IEC/JIS 規格⁵⁾による神経刺激からの保護について概略を述べる。

刺激側のパラメータとしては、刺激電流の方向性、刺激の時定数や振幅、刺激持続時間などがある。Reilly は理論神経モデルを構築し、電場の方向に平行に置かれた場合は、神経の刺激閾値 E_{th} は、神経の終点における局所電場強度 E 、刺激持続時間 t_s とで表すことができると予測している。さらに、刺激の持続時間が長くなると、刺激閾値 E_{th} は暫定的に最低レベルの E_{min} 、すなわち基電流に達し、刺激の持続時間が短い場合には閾値は E_{min} と $1/t_s$ との積に比例することが知られている。これは、下記の式で表される。

$$E_{th} = \frac{E_{min}}{1 - \exp\left(-\frac{t_s}{t_c}\right)} \quad (6)$$

この式を用いて、矩形波電気刺激による人の心臓および末梢神経について、 E_{min} として 6.2[V/m]が提唱されている。ここで、 t_c は時定数であり、末梢神経刺激に対して 0.12～0.8[ms]、心臓刺激に対して 1～8[ms]、代表値として 3[ms]が提唱されている。Reilly のモデルでは、心臓刺激において刺激に最も敏感な 1 パーセンタイル(計測値 100 のうち小さい方から数えて 1 つ目)の刺激に必要と指定される $E_{min} = 6.2$ [V/m]の電場を心臓に生じさせるには、傾斜磁場を $d(B_x, B_y, B_z)/dt = (71.3, 72.1, 50.8)$ [T/s]の dB/dt で切り替える必要があると報告している。Bourland らの実験においても、1 パーセンタイル値は 78[T/s]と予想されている。規格では 1 パーセンタイルの閾値に対し 1/3 の安全係数を採用しており、その時の心臓の刺激尤度(もっともらしさ、生じやすさ)が 2×10^{-9} 未満であるため、心刺激は非常に起こりにくい。

また、実験値をよりよく反映する関係式として、以下が提案されている。

$$E_{th} = r_b \left(1 + \frac{t_c}{t_s}\right) \quad (7)$$

ここで r_b は基電流、 t_c は時定数、 t_s は刺激の時間である。末梢神経刺激については、 t_c を 360[μs]とした場合、実験結果をよく表すことが可能である。

1.4 高周波電磁場

1.4.1 高周波電磁場の基本特性

1) SAR

高周波電磁場の生体影響は、周波数が 10[MHz]からは熱作用が主になる(ただし、100[kHz]を超えると神経刺激に加え熱作用の考慮が必要となる)。MRI では 1.5 [T]装置であれば 64[MHz]、3[T]であれば 128[MHz]の高周波電磁場を使用することから、発熱の影響の考慮が必要である。高周波電磁場の生体影響は、周波数と被検体(あるいは試料)の位置関係によって異なる。高周波発生源が被検体から十分離れている場合を遠方場、両者の距離が波長程度の場合を近傍場という。遠方場の場合は近似的に平面波モデルが適用でき、被検体を受ける高周波電磁場の評価が比較的容易である。これに対し、MRI 検査の場合のように近傍場の場合は被検体における電磁場の分布が複雑で不均一である。また、発熱は生体組織の電気的特性や構造によっても影響を受けるため、これら要因についても考慮が必要である。

高周波電磁場は、遠方場と近傍場で性質が大きく異なるため、異なる尺度を用いて強度を表す。遠方場では、高周波電磁場の強度は「電場強度」、「磁場強度」または「電力密度」で表され、電力密度は、電場強度および磁場強度の 2 乗に比例する。

一方で、近傍場では電場と磁場のパターンが複雑になるため、上の関係式が成り立たなくなり、電力密度で評価することが不可能となる。また、電場強度と磁場強度の関係も一定でなくなり、それぞれ別々に評価する必要があるため SAR という指標がある。SAR とは比吸収率(Specific Absorption Rate : SAR)で、身体に吸収される 1[kg]当たり 1 秒当たりのエネルギーを指す。MR 装置や携帯電話のように近傍界で身体が曝露される通信機器などでは、安全性の評価では SAR が用いられる。SAR は下記の式で表される。

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (8)$$

ここで σ は導電率[S/m]、 E は電場強度[V/m]、 ρ は組織密度[kg/m³]である。熱作用の評価には SAR で表される体内への電力の吸収量が指標として用いられ、SAR を全身にわたって平均したものを「全身平均 SAR」、身体の任意の組織 10[g]にわたって平均したものを「局所 SAR」という。

人体によるエネルギー吸収に関して、ICNIRP は電磁場を 4 つの周波数範囲に分けて評価することができている。約 20～300[MHz]といった MR 検査で利用される周波数帯域は全身吸収が比較的大きくなる。

SAR の値は主に次の要因によって決まる。

- ・ 入射電磁場のパラメータ(例:周波数、強度、偏波、距離など)
- ・ 曝露を受ける人体の特性(例:体格、形状、組織の電気的特性)

- ・ 設置の影響および曝露を受ける人体の近くにある物体からの反射

入射電磁場のパラメータおよび曝露を受ける人体の特性に関しては、高周波電磁場曝露では誘電率と導電率の両方に基づき体内の誘導電場が決まる。また、この誘導電場の分布には、人体の特性などが複雑に影響する。SAR の実測は困難であるため、SAR 推定には数値計算(電磁場解析)が用いられる。電磁場解析の例では、仮想空間に誘電率や導電率など人体の電気的特性を割り振った人体モデルを設置し、外部コイルから高周波電磁場を与え、その時に発生する誘導電場を導出した後、SAR の導出式[(導電率×電場強度の2乗)を組織密度で割る]より求めている。

2) 高周波電磁場による加熱機構

実際に MR 検査の安全性に関与するパラメータは、SAR の関係式が生体組織に基づく部分(σ , ρ)と装置や撮像パラメータに基づく部分(E)に分かれており、後者について、周波数(ω)、RF 磁場強度(B_1)、被験者半径(R)、Duty Cycle (D)に分けられる。 ρ 以外はいずれもパラメータ単独あるいはその2乗の比例関係にある。ここでは、高周波電磁場による加熱機構について記載する。

高周波電磁場曝露による生体組織加熱機構は、高周波の周波数によって異なる。低周波から高周波領域(100 [MHz]程度まで)では、生体組織における電磁エネルギーの熱エネルギーへの変換は、主にイオン伝導の伝導損失によるものと考えられる。つまりは、SAR は体外からの電磁場によって生じた渦電流によるジュール熱である。SAR は体内電場強度の2乗に比例するが、電場強度は曝露した高周波の周波数に比例するので、SAR は周波数の2乗に比例する。一方、超高周波領域(100 [MHz]以上)では、人体の大きさは波長と同程度あるいはそれ以上になるので、もはや単純な導体として取り扱うことはできない。また、均一な系としての取り扱いも困難となる。より高周波になると、伝導損失だけでなく誘電損失が組織加熱の原因となる。

また別の要因として、電力吸収は人体の中心から半径方向の距離の2乗に比例して増加する。すなわち、体の中心部よりも体表面の方が加熱されやすい、均一な電磁場への曝露であっても、生体組織の分布自体が不均質で、かつその電気的特性も不均一であるため、外部電磁場の曝露は生体に不均一な誘導電場を生じさせる。その結果、組織が不均一な加熱を受けることがあるため、局所的な加熱、すなわちホットスポットを生じる危険性がある。伝導の高い組織(例:筋肉)の周囲に伝導度の低い組織(例:脂肪)が存在すると、境界面にホットスポットが生じることが考えられる。

1.4.2 高周波電磁場の生体影響

生体を高周波電磁場曝露から防護するのは、深部体温が1℃上昇することを防ぐ SAR 値が基準となっている。全身曝露における体温上昇では、動物の行動パターンに変化が現れる閾値が全身平均 SAR で約 4 [W/kg] (長時間浴びた場合、約 1℃の深部体温の上昇に相当)であることが知られている。ラットなど小動物の照射実験からは、全吸収エネルギーの時間変化率(全吸収電力)を全身にわたって平均した値が、単位体重当たり 4~8[W]を閾値として、可逆的な行動異常に加え1℃の深部体温上昇が発生した。平田らは、65 [MHz]と 2 [GHz]の平面波と人体モデルを用いた数値解析で、6~8 [W/kg]の全身平均 SAR で 1[℃]の深部体温上昇に少なくとも 60 分が必要であったことを報告している。また Adair らは、気温 24~28[℃]の環境で 100 [MHz]、220 [MHz]、2450 [MHz]で全身平均 SAR が 0.54~1 [W/kg]の時、食道温の上昇は微小(<0.1[℃])であったと報告している。現在では、人体の防護指針の根拠として、全身平均で 4[W/kg]を上限とし、科学的な不確かさや個人の熱生理学的要因、環境不確かさを考慮し、職業環境で 10 倍の、公衆で 50 倍の低減率が用いられている(注. 2020 年の ICNIRP ガイドラインでは全身平均 SAR は 100 [kHz]~300 [GHz]までで 30 分平均、局所 SAR は 6 分間平均)。ただし、温度に敏感な器官として睾丸や眼球があり、局所 SAR が 100 [W/kg]を超えるとこれら組織に著しい熱的損傷が生じる。例えば、眼球での SAR が 100 [W/kg]以上の場合、温度が 43[℃]以上に上昇(白内障が生じるレベル)することが報告されている。なお、眼球以外の様々な組織について局所的な温度上昇による影響を調べた結果、1[℃]を超えない温度上昇の場合には健康に悪影響を及ぼすことはないと考えられている。

2. 周辺機器への影響

人体は弱い反磁性体であるので、インプラントなどの金属物を装着していない限り、静磁場によって吸引されたり反発されたり、また回転力が生じることはないが、血液などの導電性のある物が静磁場中を移動すると誘導電場が誘起される。この効果としては、高磁場における心電図上の T 波部分の高さが上昇することが一般に観測される(前述)。今までの研究での静磁場の生物学的に有害な影響については、7[T]までの静磁場では問題がないことが知られている。

また、心臓ペースメーカーなどへの静磁場による有害な影響は一般に 0.5 [mT]未満の領域では問題のないことが知られており、このことから漏洩磁場が 0.5 [mT]以上の区域を立入制限区域として管理することになった。さらに病院に数多く存在する X 線管、シンチレーションカメラなどの電子機器は、0.1~5 [mT]以上の磁場によって影響を受けることがある。漏洩磁場がこれらの装置に影響を与えるような場所に MR 装置を設置する場合には磁石または撮影室に磁気シールドを施すことが必要となる。図 2 に漏洩磁場が外部に及ぼす影響と、環境磁場が MRI に及ぼす影響の例を示す。



図2 漏洩磁場と環境磁場の影響

静磁場中に置かれた鉄などの強磁性体には、吸引力と回転力が働く。吸引力は、強磁性体が置かれた場所での(漏洩)磁場の強さと磁場の空間的な変化率の積に比例し、強磁性体を磁石中心に向かって吸引する(式 4)。磁石の端部付近で吸引力は最も強くなり、磁場の均一性のよい磁石中心では強い力は働かない。ヘアピンやボールペンなども吸引されるが、危険なのは重量のある酸素ボンベなどが吸引される場合で、患者や操作者に衝突して外傷を負わせるリスクがある。これまでに多くの吸引事故が報告されており、米国にて過去に酸素ボンベ吸引による患者の死亡事故も報告されている。

超電導 MRI 開発当初のマグネットは、自己シールド(アクティブシールド)タイプでなかったため磁場は広い範囲に漏れたが、漏洩磁場の空間的な変化率が小さく吸引力を感じてから退避することも可能であった。しかし、現在使われている自己シールドタイプの磁石では、漏洩磁場の範囲が狭まっているため空間的な変化率が大きく、少し磁石に近づいただけでも急激に大きな吸引力が働き、吸引事故が増える要因となっている。通常吸引力は、漏洩磁場が 3[mT]以上の領域で明確に作用するため、立入制限区域外では磁場による吸引力はほとんど感じない。立入制限区域内への鉄製の酸素ボンベ、車椅子、点滴台ストレッチャーなどの持込みが問題となる。この危険を回避するには、強磁性体を撮影室(磁石の近く)に持ち込まないことが大切であり、そのためには患者への説明と撮影前のチェックだけでなく、看護師を含めた病院関係者への安全教育も必要である。

静磁場による回転力は、磁力線の方に強磁性体の長軸が揃うように働く力で、その場所での磁場強度の 2 乗に比例する。この力は磁石中心で最も強く働き、強磁性体の動脈瘤クリップまたは強磁性体の断片が、患者の体内で移動して周囲の組織を損傷する恐れがある。このリスクを回避するには、吸引力と同様に患者への説明と事前確認が必要となる。磁場による吸引力は、強磁性体の形状や磁気モーメントが関連するが、ほぼ強磁性体の置かれた位置での漏洩静磁場(B_z)とその空間的な傾きの積で決まる。また、回転力(トルク)は(式 3)のようにその場所での漏洩静磁場の 2 乗に比例する。

磁場吸引の例としては、例えば図 3 のように 1.5[T]自己シールドタイプの超電導マグネットの近くに 1[kg]の鉄片を近づけた場合を考えると、漏洩磁場は青い実線で示すように磁石の端面付近から 2.5[m]あたりまでその磁場強度が急激に下がる。一方、鉄片には、黒い実線で示した吸引力が働き、磁石の端面で最大となり 1.5[m]付近までで弱くなる。これは吸引力が磁場の大きさだけでなく磁場の勾配にも比例するからである(式 4)。磁石端面での最大値では 35[kN]近くの力となる。磁石の内側に向かっては、静磁場の傾斜が急速になくなる(均一性がよくなる)ため吸引力は小さくなる。このため吸引された酸素ボンベなどは、磁石ボアの中で前後に移動するような動きをする場合がある。

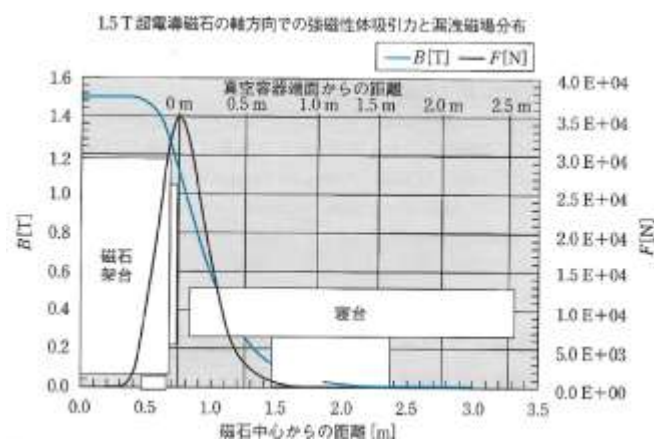


図3 静磁場による吸引力の計算例

MRI 検査の前には、前述の磁場による吸引力や回転力が働く強磁性体が患者が身に付けていないか、体内に埋めていないかを検査の前にチェックすることが安全を確保する上で必須である。また心臓ペースメーカなどの能動的インプラントには、傾斜磁場や高周波磁場の作用も働き、ペースメーカの設定が変わったり誤動作したりするリスクがあるため、同様の MRI 検査前のチェックが必要である。このことは、外部の生命維持装置に依存している患者についても当てはまる。電子回路を内蔵していない受動インプラントでも、例えば強磁性体の頭蓋内動脈瘤クリップの場合、静磁場中で回転力や吸引力が働くため通常禁忌である。

以下の患者の場合、MRI 検査に当たって特別な注意が必要であると IEC60601-2-33 に記載されている^[5]。

- ・ 外科クリップ(止血クリップ)または(磁場の影響を受けやすい)他の強磁性体を植え込んでいる患者
- ・ 強磁性体を偶発的に取り込んでしまう職業または活動に従事している患者または軍事活動によって金属断片が植え込まれている可能性のある患者
- ・ 永久的な(入墨)、カラーコンタクトレンズ、アイラインまたは顔に化粧をしている患者(眼瞼への強度の刺激が報告されている)
- ・ 体温調節機構が損なわれている患者(例えば、新生児低出

生体重児および特定のがん患者)

- ・ 金属製体内植込物による磁場のひずみによって、診断画像にアーチファクトを生じる可能性がある患者
- ・ 人工心臓弁を移植している患者
- ・ 妊婦、胚または胎児に対する MR 検査の安全性はまだ完全には確立されていない

3. 超電導マグネットのクエンチ

最後に、磁場そのものの安全性とは異なるが、超電導マグネットを扱う上で常に注意を要するクエンチ現象について述べる。

MRIを含む多くの超電導超電導マグネットは液体ヘリウムにより浸漬冷却されている。超電導マグネットは電磁力によるワイヤーモーションなどの熱擾乱があると、微小な常電導部分がマグネット全体に広がって、マグネット全体が常電導に転移する。このような現象をクエンチと呼んでいる。マグネットのクエンチによりマグネットが保持していた磁気エネルギーの大部分はジュール発熱により液体ヘリウムは気化する。液体ヘリウムが室温まで昇温すると、体積は大気圧で約700倍に膨れ上がる。液体ヘリウムの気化により密閉空間では圧力が急上昇して爆発の危険性が高まるほか、気化した低温ガスによる凍傷や希ガスのヘリウムガスが部屋に充満することにより酸欠の危険も生じる。実際にMRIの爆発事故も報告されている。

なお、MRIではヘリウム排気管によりクエンチ時のガスヘリウムを屋外に排出する。

【参考文献】

- [1] MRI 安全性の考え方 第2版: 日本磁気共鳴医学会安全性評価委員会
- [2] MRI 安全性の考え方 第3版: 日本磁気共鳴医学会安全性評価委員会
- [3] MRI に関する安全性情報・ガイドライン
- [4] <https://www.Jsmrm.jp/modules/guideline/index.php>
- [5] World Health Organization: Environmental Health Criteria 232 Static Fields. 2006.
IEC60601-2-33 3rd ed. Amendment 2, Medical electrical equipment- Part 2-33: Particular requirements for the basic safety and essential performance of magnetic resonance equipment for medical diagnosis.
JIS Z 4951 (IEC60601-2-33)医用電気機器—第 2-33 部: 磁気共鳴画像診断装置の基礎安全及び基本性能に関する個別要求事項
- [6] ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) . Health Phys 99: 818-836, 2010.
- [7] IEEE: C95.1-2019-IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz.
- [8] Poman P. M. So, et. al, “Peripheral Nerve Stimulation by Gradient Switching Fields in Magnetic Resonance Imaging”, IEEE Trans. on BIOMEDICAL ENGINEERING, Vol. 51, No. 11, 2004, pp.1907-1914

IV 電気（楨田）

1. はじめに

私たちの生活のありとあらゆるところで電気が寄与しており、極低温や超伝導の分野においても、ギガジュール級の超伝導磁石から光子1つに反応する超伝導検出器まで様々なレベルやタイプの電気を扱っています。一方その扱いを誤ると、装置が壊れて研究の成果が不意になるだけでなく、感電死・火災など重大な事故に至り、研究活動や企業活動への悪影響ははかり知り得ません。従って、電気安全は大学や企業における安全教育の主要な柱になっています。本章では低温・超伝導の分野で身近に発生する事故事例と対策を紹介して電気の危険性を身近に感じてもらい(2 節)、死亡率の高い感電事故(3 節)と火災の主要原因である電気火災(4 節)について、まとめています。3 節や 4 節の内容は、大学や企業での電気安全と重複する箇所は多いと思いますが、なるべく低温・超伝導の分野と関連付けるようにしています。

2. 低温・超伝導実験で発生する電気事故例

2.1 通電ケーブルの断面不足や接続不良による過熱

超伝導磁石や超伝導ケーブルなど超伝導電力機器は、電気抵抗ゼロの特性を活用して大電流密度となるよう設計されるので、超伝導電力機器と電流源の間を接続する通電ケーブルは大断面積のものになります。そして通電ケーブルやその接続端子類に電流容量不足のものを選択し、不十分な接続状態とすると、過剰な抵抗発熱によって火災や断線による過電圧などの事故を招きます。

通常はケーブルの仕様(カタログ)に明示されている許容電流値以下で使用します。MRI など永久電流磁石のケーブルのように、短時間しか通電されない場合は作業性重視の断面積選定をする場合もありますが、目安としては $5[A/mm^2]$ くらいで計算しています。

圧着端子の接続面の汚れや変形、異物の挟み込みによってケーブル間や電流リード・電源出力端子との接触抵抗が高くなり、過熱状態になることもあります。また不注意で手締めのみとか、力不足で締め込み不良という例もよくあります。また、長期間使いまわしていると圧着端子から出た個所で少しずつケーブルの素線が切断し通電断面が減少していることがありますので使用前に確認しましょう(図 2-1 ケーブル接続部での接触不足の例)。



図 2-1 ケーブル接続部での接触不足の例

通常、超伝導磁石の励磁は、所定の磁場が発生するように定電流で制御する電源を使用します。電源の出力電圧は定電流になるようコイルのインダクタンスや途中のケーブル抵抗に応じて制御されます。従って過熱状態になっても供給可能な電圧範囲であれば電流を流し続けます。一方で出力電圧を注意深く監視することで異常に早めに気づくこともあります。電流がホールド後も電圧上昇が続く(補足：ケーブル温度が均衡するまでは漸的に上昇はします。)、同じ電流値なのに前回より 1 ボルト以上電圧が高い、などという事象はケーブルの損傷や端子間の閉め込み不足など、異常を疑います。通電箇所を切り離すような作業をした後の励磁時には出力電圧に注意してください。

初めて長時間(目安として 1 時間以上)連続通電する時は、電源出力電圧の監視と併せて、ケーブルの温度上昇を監視し、過剰な発熱が起きていないことを確認します。感電に注意して絶縁越しにケーブルや接続箇所を触り、温度計やサーモシールを注意個所に取り付けています。サーモグラフィ温度計も非接触で全体の温度分布が見渡せて便利です(図 2-2)。



図 2-2 サーモグラフィ温度計でのケーブル温度監視。

2.2 ケーブル接続部や電極での地絡や感電

信号線のような細い銅線では、接続は端子台やコネクタを使用し、感電や地絡・短絡を防ぐ処置を容易にできますが、通電ケーブルどうしの接続や電流測定用のシャント抵抗をケーブルの途中に挿入する時などは、端子台や固定台を準備することなくケーブル端子を直接ボルト締めで接続し、それをそのまま床に転がして置くことが良くあります。床ピットの金属製の蓋に触れたり、広がってきた水たまりに触れたりして電源の地絡インターロックが作動するということがあります。ゴムシートなどで覆うなどして絶縁を確保しておきましょう。

電流源出力との接続部などもカバーされていないと不用意に触れることがあります。ゴムシートなどで覆ったり、接近できないようカバーや柵を設けるとともに警告灯や掲示をしておきましょう。



図 2-3 むき出しのままのシャント抵抗接続部で発生する地絡の例(左)、不注意な感電防止のためカバーをした電流リード接続部(右)

2.3 同軸ケーブル端子 (BNC 端子)のショートや地絡

オシロスコープを始め高速ロギングの計測器の入力には BNC や LEMO コネクタなど同軸コネクタが使われています。写真のようなコネクタの外側シールドは、同軸ケーブルの外部導体とつながっており、クエンチ現象の観測のためコイル電圧タップ間信号などを測定するような場合は、外側(シールド側)導体に高電圧を出す時もあり、不用意に触っていると感電の危険があります。外表面が絶縁されている BNC コネクタ付きケーブルも発売されています。さらに T 型形状の分岐コネクタを測定器に取り付けると、隣り合ったチャンネルの分岐コネクタのシールド側どうし触れやすい状態になります(図 2-4)。コネクタは容易に回転するので、写真のような使い方は避けましょう。また、BNC ケーブルで中継用アダプタ(コネクタ)を介して延長する場合も、外側がむき出しになっており、感電や地絡の危険が生じています。ビニルテープなどで覆ってください。

また、オシロスコープや高速の AD コンバーターボードに多いのですが、多チャンネル入力 of 計測器で入力端子のシールド(マイナス)側がグランドとしてコモン(共通)の仕様になっているものがあります。それぞれの機器の仕様確認を忘れないでください。コモンの場合、信号源との間にアイソレーションアンプを介する必要があります。



図 2-4 BNC 分岐コネクタによるチャンネル間ショート

2.4 絶縁導入端子ピン間のショート

クライオスタット内部からの信号線はハーメチックシールを通じて容器外の信号線へ接続していますが、多芯のハーメチックシールの場合、写真のようにセラミックとのロー付け部面で絶縁距離が非常に短い製品があります。ヘリウムガス中の絶縁耐圧は同じ条件の窒素の 0.15 倍程度であることから、クエンチ電圧によってヘリウム槽側のハーメチックピン間でショートしたことがあります。また外気側の湿度や結露でショートすることもあります。ハーメチックシール調達の際には、メーカーにヘリウム環境下での耐電圧を確認し、データがない時や目視して絶縁距離が短いなどと感じたら確認試験をすることを勧めます。



図 2-5 多芯信号線用ハーメチックシール

2.5 水滴によるテーブルタップでの感電・漏電及び機器の故障

寒剤を移送する断熱層の無い配管(液体窒素容器付属の液取配管など)や蒸発ガス放出配管の外側、クライオスタットのトップフランジ、電流リードの外部電極などでは凍結や結露が発生し、それらが解けて水滴となり床には水たまりができます。水滴が電気機器に入って故障し、漏電・感電が起きやすくなります。床上にあるテーブルタップやケーブル接続部が水たまりに浸る、真空ポンプのようなクライオスタットの近傍で使用する電気機器に水滴が落下するといった危険が生じます。冷却配管の配置を考慮し、雨どいを施す、嵩上げるなどの処置が必要です(図 2-6)。



図 2-6 水溜まりによる漏電

2.6 保護接地線未接続による感電

海外製の大容量の真空ポンプ(数百[m³/h])の 3 相 200[V]の動力配線で接地配線を省略したところ、真空ポンプ筐体全体が 200[V]になり、真空配管作業中にしびれ程度の感電事故が起きました。メーカーに確認しましたが、故障ではなく、接地は必須だそうです。計測線へ接地シールドしてノイズを減らす処置と同様、動力機器の保護接地も忘れないでください。

2.7 【募集】低温・超伝導実験での電気事故例

本節では筆者の経験や見聞に基づいて、低温・超伝導実験で身近に発生するものの、一般の電気安全テキストでは取り上げないような事例をいくつか紹介してきました。しかし、事例数としては少なく、内容も偏りがあるように思っています。皆様からの事例の紹介やご意見いただけたら幸いです。

3. 感電災害の防止対策⁽¹⁾

感電とは、電気製品や電気設備の不適切な使用や漏電の発生、何かの原因で電気工事中に人体又は作業機械が充電部に接触、さらに落雷等の自然災害によって人体に電流が流れ、障害を受けることをいいます。

電圧がかかっても電流が流れなければ感電はしません。漏電(感電)対策として小型の家電を除き電気機器にアース線

(接地線)を取り付けるように、地面は電気が流れ込みやすい場所です。そのため感電事故の多くは、電気が体を伝って地面へと流れることで発生します。

また感電の症状は電圧ではなく、体に流れた電流の量や、電流が流れた場所によって変わります。皮膚が水や汗で濡れていると電気抵抗が小さくなり(電気が流れ易くなり)、危険性が高まります。また、感電元に触れ体内に電気が侵入した部位(入電部位)と、接地等により地絡が成立し侵入した電気が体外に出た部位(出電部位)の間に心臓がある場合、心室細動、心停止に至る可能性があります。過去には 35[V]でも死亡事故につながったケースもありますので、電圧が低くても油断してはいけません。

流れる電流が 1~5[mA]程度ならば、静電気と同じくらいの痛み程度で済みます。しかし流れる電流が 50[mA]以上になると死に至る恐れもあります。厚生労働省が公開している労働災害統計では、2020 年における感電による死傷者数は 92 人で、そのうち 8 人が亡くなっています。「致死率が高い」ことが労働災害の中での感電の特徴で、しっかり感電防止対策をする理由でもあります。

3.1 感電と人体

もしも感電事故が起こってしまった場合、身体にどのような影響があるのか？ 電流の強さによる症状を下表にまとめています。

表 1. 感電電流と症状

1[mA]	採用感知電流と言って、ピリピリ感じる。人に危険はない。
5[mA]	生理的に悪影響を及ぼさない最大の許容電流値。危険性の始まりとなる。
10[mA]	耐えられないほどの痛み
20[mA]	筋肉が激しく収縮し、感電を引き起こしている物から離れられなくなる。
50[mA]	痛み、気絶、疲労、人体構造損傷の可能性、心臓の律動異常の発生や停止。呼吸ができなくなり、短時間でも死に至ることがある
100[mA]	心室細動の発生、心拍停止が現れ極めて危険
6[A]以上	心筋は持続的に収縮し続け、呼吸麻痺による窒息、火傷。

電流が大きくなればなるほどダメージも大きくなります。ピリッとするくらいの 1[mA]や少し痛みを感じる程度の 5[mA]程度なら、まだ人体にそれほど悪影響を及ぼしません。しかし、10[mA]くらいになると痛みが我慢できなくなり、20[mA]になると筋肉が痙攣し、電線等を簡単に離せない状態になります。50[mA]になれば短時間でも死亡する可能性が高まります。従って、日本では、30[mA]を感知して 0.1 秒で作動する漏電遮断器が一般的に用いられています。

低温設備にも使用されている圧力伝送器や自動弁などの工業用計装機器の多くは、DC24[V]で給電され、4-20[mA]の電流信号を出力もしくは入力します。充電状態で信号線を着脱する場合も多少ありますが、許容できるぎりぎりの電圧・電流値であることは認識し、電工用工具の使用や電工手袋の着用などをしましょう。

また低温実験でお世話になるセンサー類、白金温度計は 1[mA]、液面計は 70[mA]、ホール素子は 100[mA]くらい通電されており、電流値としては結構危険なレベルが流れているセンサーもあります。計器側のスイッチを入れたままセンサーの入力配線をすることは、避けた方が良いでしょう。

感電して体の表面に現れる症状として多いのは火傷です。人体の抵抗値は数キロオームになり、電流が流れる際に熱を発するためです。ただ、体内を流れる電流のルートによっては、外から見えない様々なダメージも与えます。また神経信号は微弱な電流であるため、神経の伝達が阻害されて不整脈や心停止、意識消失を引き起こす場合もあります。痙攣、記憶力低下、頭痛、脳内出血、運動や知覚の麻痺、発汗異常などを発症することがあります。感電から時間が経っていても睡眠障害や記憶力の低下などを発症することがあります。筋肉が広範囲に損傷を受けると腫れて血管を圧迫します。感電しても大丈夫だったと油断することのないようにしましょう。

皮膚が濡れている場合には皮膚の電気抵抗が下がり、体の中に電気が流れこみやすくなります。濡れた手で電気機器に触れてはいけないのは、このような理由からですが、低温実験では結露箇所に触れて手先が濡れる機会も多いので、注意してください。

3.2 感電してしまったら

① すぐに医療機関を受診する

もしも自分が感電し、やけどなどが見られる場合には、すぐに病院に行きましょう。内臓の損傷や感電の衝撃による外傷、筋肉の急激な収縮により脱臼や骨折を起こしている可能性もあります。他人が感電する場面に遭遇した場合も、必要に応じて救急車を呼び、医療機関で速やかに診てもらえるようにすることが大切です。

② 少しでも早く電源を切る

感電者を救助する際には、ブレーカーを切ったりコンセントを抜いたりし、少しでも早く電気の流れを遮断することが大切です。

また、他人が感電しているのを発見しても、電気を遮断しないまま、直接触って助けようとしてはいけません。感電している人に触れると、感電している人に流れている電流が救助者にも流れてくるため、救助者も感電する連鎖感電が発生してしまうからです。2015 年には連鎖感電により多くの人が感電する事故も起きています。やむを得ず通電を切らずに感電者を電源から引きはがす際には、決して素手でさわらず、乾いた板やゴムのような絶縁体を介して感電者を充電箇所から脱出させましょう。

③ 呼吸、脈拍をチェックする。

感電で死に至る場合、最も多いのが「心房細動」によるものです。心房細動とは、重度の不整脈で心臓が停止することです。安全な状態を確保できたら意識があるかどうかを確認し、呼吸や脈拍などをチェックします。もし、感電により心房細動を起こしてしまった人がいれば応急処置が必要になります。心臓マッサージと人工呼吸を行い、AED があれば使用して心肺蘇生を図ります。

3.3 防止対策の基本

感電防止の基本は、大きく「充電部を露出させないこと」と「むやみに露出した充電部に近づかないこと」の2点です。

- ① 感電を防ぐためには、充電部に不用意に触れないよう、絶縁が正しく行われている必要があります。端子台など充電部には安全覆いを取り付けます。AC コードをはじめとした電路の絶縁の損傷に気をつけ、不良品の修理・廃棄処置はすぐにしましょう。別の人が不良品に気づかずに使用することは良くあります。
 - ② 濡れた手で機器に触れると、水を介して感電する可能性があります。少なくとも電気機器に触れる際には乾いた手で行いましょう。また不用意な充電部への接触を避けるため、絶縁手袋・長袖服・キャップなど保護具の着用も望ましいです。
 - ③ 絶縁が正しく行われないケースに備え、アースをとったり、漏電遮断器をつけたりするのも大切です。事前に電気を地面に逃がしたり、漏電を察知して電源を遮断したりすることで、感電事故を防ぎます。
 - ④ 工事や修理で回路に触れる際、もしくは絶縁が施されていない通電部近傍で作業をする際には通電状態を確認しましょう。余程のことが無い限り無通電状態にすべきです。通電状態の確認には検電器の使用が望ましいです。被膜電線にも使え、対象とする電圧により、種類や形状が異なります。検電器を用い、触れようとしている部位が通電していないと確認してから作業を行えば感電を防げます。検電器が無い場合、テスター(ハンディ電圧計)で通電部の電圧を直接測りますが、テスターのテストピンに指先など身体が触らないよう、またテストピン経由でショートさせないように注意してください。
 - ⑤ 作業中にもかかわらず復電して感電事故や短絡事故を起こす例もあります。作業計画には復電手順や確認事項も加えるとともに、実際の投入時には声掛けと確認をしてください。投入されると復電してしまうスイッチ類には誤操作防止用に掲示やストッパーをするようにしてください。メガーを使用した絶縁耐圧試験時などもチャージ前には作業者の退避が必要です。
- ③保護設置と④漏電遮断器については、3.4 節、3.5 節にて詳述します。

3.4 保護接地の励行

電気機器や電線などの筐体やシース、電線管を大地に電氣的に接続することを接地(アース、グラ(ウ)ンド)といいます。このうち人体感電防止を目的としたものが保護接地と呼ばれています。一方微弱信号をかき消してしまうノイズ低減のために接地は機能接地と呼ばれていますが、両者は共用されていることが多いです。

電気機器などが金属の筐体に収納されている場合、故障などによる地絡で筐体が大地に対して電位を持つと、人が触って感電し火傷を負ったり死亡したり、また漏洩電流による発

熱で火災の原因となる可能性があります。これを防ぐために、これらの機器や設備を大地に接続してその電位と大地の電位との差を十分に小さく(理想的には 0 ボルト)する必要があります。そして次節で述べる漏電遮断器の作動を促す効果があります。

3.5 漏電遮断器の設置

漏電していても私たちの目には見えないものです。そのため漏電していると気付かず実験機材に触れ、感電してしまうケースがよくあります。特に自作の回路を組んだ時には注意が必要です。

漏電ブレーカーは漏電している電気機器があると自動的に電気を止めてくれる仕組みになっています。それによって、漏電している電気機器に触れても感電せずに済んだり、どの電気機器が漏電しているのかに気付いて対策したりと事故を防ぐことができます。コードリールに漏電遮断器が付属している製品や電源コードの中間に組込まれるようコンセント・プラグがついた漏電遮断器も販売されています。



図 3-1 漏電ブレーカー付きのコードリールと中継コード

3.6 活線作業・活線近接作業と保護具

活線作業とは、通電状態で電気器具などの取り付け、補修作業をすることを言います。なじみのない言葉ですが、電灯などスイッチを入れたまま交換したことはありませんか。通常、電気工事や作業を行う場合には、感電事故を防ぐためにブレーカーを切ってから、通電をさせずに作業することを原則としていますが、センサー側の配線や計測機器の繋ぎ変えなどで通電状態のまま作業をすることもあります。

一方、活線近接作業は作業対象の通電は切ってありますが、通電状態のままの機器や電路が作業者の周囲にある状態で作業をすることを言います。計測・計装盤内部の作業時などは、作業対象機器以外の機器の充電部が作業者に近接し、ひじや頭部・背中が触れてしまうことは良くあります。計装盤の扉に取付けた計器の AC100[V]の電源端子などは、扉を背にして作業する者の背面に位置するので注意が必要です。

活線作業・活線近接作業時には絶縁用保護具・防具・器具を使用することが必要です。非通電状態にできたとしても

絶縁用保護具・防具の使用は推奨されます。絶縁用保護具としては、

- ① 低圧用ゴム手袋(使用電圧 600 [V]以下)
- ② 低圧用腕カバー(使用電圧 300 [V]以下)
- ③ 絶縁用ゴム長靴
- ④ 絶縁衣
- ⑤ 絶縁用ベスト
- ⑥ 電気用安全帽(③~⑥に関しては使用電圧 7 [kV]以下)

絶縁防具としては、

- ① 充電部防護用シート(低圧ビニルシート)
- ② ゴム絶縁管
- ③ 圧着端子用カバー

などがあります。作業内容に抛りますが、**太字**の保護具や防具は準備しておいた方が良いでしょう。



活線作業用絶縁ゴム手袋
作業によって使い分けている。着用するのはブレーカーを落とすまで。



細かな作業のできる電工
作業手袋も販売されている。



絶縁腕カバー



肘や腕の感電防止のため
長袖服にしましょう。



露出充電部を覆う防護シート(ビニルシートでも OK)

図 3-2 電気工事時の保護具・防具

そして電気工事作業には絶縁被覆の工具を使用します。ドライバー経由のショートを避けるため、先端部を除く金属部をビニルテープで絶縁することは有用ですが、その様な電工ドライバーも発売されています。逆に「貫通ドライバー」は、ハンマーでネジにドライバーの先端をたたき込めるようドライバーの軸(金属部)が柄を貫通しているので感電の危険が高

く、活線作業には使えません。誤用に注意してください。また、通電・非通電部を判断するための検電器も準備します。

なお、本格的な活線作業を行う場合は活線作業用器具の準備や、作業計画・手順の立案もしないといけません。通電中の電線の切断など、かなり専門的な手順と訓練が必要な作業となります。その様な作業は電工のプロフェッショナルに委託した方が良いでしょう。



非道電コンベックス



絶縁ニッパー



絶縁電工ナイフ



絶縁ワイヤーストリッパー



絶縁ドライバー



絶縁ソケットレンチ

図 3-3 絶縁工具類(活電作業時は必須、停電磁も推奨)

4. 電気火災・ショート

事業所における火災では、電気機器に起因する火災が最も多いということはお存じでしょうか？東京消防庁による2019年の電気火災の実態を見てみると、全火災件数の31.4[%]を電気火災が占めています。電気火災は日常に潜むリスクであるため、電気機器の適切な管理と使用がポイントとなります。電気火災の大部分はショート(短絡)によるもので、それによる過大な電流や放電が発火源となります。

4.1 トラッキング火災の防止

電気のショートはなぜ起きるのでしょうか？多くのショートは、電化製品の内部ではなく、コンセントや電源タップなどで起こる場合がほとんどです。長い間コンセントに差し込まれたままになっている電源プラグの、刃と刃の上にホコリが溜まり、そのホコリに水分や湿気が付着し、電気が流れると、ショートが起きます。この現象はトラッキング現象とも呼ばれ、頻発しているショートの代表例といえます。

普段あまり触らない冷蔵庫やテレビなどの家電製品の電源プラグはトラッキング現象が発生する代表的な場所ですが、実験室にも似たような箇所は無いでしょうか？上向きのテーブルタップから計装機器の電源を取って、何年もそのまま使用する箇所はありませんか？少なくとも埃の清掃や空きプラグへのカバーなどの処置はしましょう。設備として設置する計器は計装盤を製作して収納して、埃などが蓄積しないようにします。

4.2 過電流による過熱・発火・ショート

電源タップやコンセント、電線(コード)は、対応できる使用電力の量(許容電流)が決まっています。許容電流以上の電気が流れると「過電流」という状態になり、過熱してし、絶縁体から発煙・発火し、ショートする危険が高まります。計測・計装機器系を組立ていく中で、多くの機器への給電により「たこ足配線」状態になるので、電流が許容できることを確認してください。真空ポンプやヒートガン、結露防止用のヒータなどの電源コードと計測ラックの電源は分電盤などなるべく元から使い分けした方が安全です。

その他にも、先述したテーブルタップへの水の侵入や電源プラグを差し込むときに電線片などが挟み込まれてショートする事例もあります。防止用の電源プラグカバーも商品化されていますが、プラグ差し込み時には異物挟み込みに注意してください。



図 4-1 コンセントやテーブルタップの電気安全処置

4.3 コードの劣化・電気製品の破損によるショート

コードが劣化し、導線がむき出しの状態になると、+極と-極のコードが接触し、ショートが発生することがあります。なお導線がむき出しにならなくても、コードの内部でねじれた場合にもショートは起きる可能性があるでしょう。このような状況はコードの上をキャスター付きの重量物を無理やり越えさせたり、ピット蓋と床の間に挟んでしまったりしたときに発生します。

また、コードを束ねて放置することでコード同士が熱を持ち、その熱によってコードが劣化することがあります。特にコードリールの電線は中筒ドラムにコイル状に何層も巻かれており、電線をドラムに巻いたまま長時間使用すると、外気に接していない内側は異常加熱を起こし、電線の被覆が溶け、発火してしまいます。余長が残っていてもドラムからはコードを引き出して使用してください。

さらに、壊れた電気製品を使い続けている場合にも、ショートの危険があります。製品内部の回路が破損している可能性があるからです。異音・異臭・発煙など異常を感じたら、まずは機器の通電を止めて(電源を落として)下さい。

4.4 火災が発生した時は

電気火災は、小型の計測器でも起こる可能性があります。さまざまな対策で起こらないようにするのがベストですが、もし電気火災が起こってしまったら、どのように対処すればよいのでしょうか。

① 速やかに電気を遮断

火花が散る、熱を持って煙や火が出るなどした場合は、すぐにコンセントからプラグを抜いたり、電気ブレーカーをオフにしたりして、電気を遮断します。

電気が通ったままの状態でも消火活動をし、コンセントから流れた電流で、再度発火する可能性があるからです。機器の電源を切るだけでは意味がない場合もあるので、必ず元から電気を断ち切ることを、覚えておきましょう。

② 消火器や消火スプレー

電気を遮断したら、消火活動を行います。消火器や消火スプレーは、電気火災に対応しているものを使用しましょう。電気火災の際に使えるかどうかは、本体やラベルなどに表示されています。

消火器等が無い場合は、水を使って消火をしますが、電気が流れている状態のところに水をかけると、感電の危険性も。必ず電気を遮断してから、水をかけるようにしてください。



図 4-2 消火器の適合表示

③ 安全のために 119 番通報も

もし自分で消火できたとしても、必ずしも安全とは限りません。念のため 119 番通報をして、本当に火災のリスクがないかを確認しましょう。また、火災の原因となった電気製品やコンセントは使わず、業者に点検・修理をしてもらうことも忘れてはいけません。

上記のような処置の流れになりますが、処置開始前に自分の身が安全であるかの判断が必要です。絶縁体の燃焼からは有毒なガスが発生します。電気の遮断操作も煙を吸ってしまう状況でしたら、避難を優先して、安全なところで電源を落としてください。そのような緊急遮断スイッチを実験室の入口付近に設けてあるところもあります。海外の大学や研究所の実験室ではよく見かける緊急遮断スイッチですが、日本ではあまり普及していないようです。



図 4-3 出入り口付近に設けられる緊急遮断ボタン

付表 1 作業にかかわる法規制

	法的要求項目	適応法規類の名称	適用されうる法規制の概要	備考
安全	安全衛生管理体制	労働安全衛生法，同施行令，同規則	各部門にて選任し届出義務のある者について届出	届出先：労働基準監督署
	作業主任者	労働安全衛生法，同施行令，同規則 ボイラー及び圧力容器安全規則 有機溶剤中毒予防規則 特定化学物質障害予防規則 電離放射線障害防止規則	労働災害を防止するために管理を必要とする作業について，政令，各規則で定められている。	各作業別に選任
	危険を防止するために事業者が講ずべき措置	労働安全衛生法，同施行令，同規則	安全装置等の取付等に関する規定で工作機械，木材加工用機械，プレス機械，産業用ロボット，フォークリフト・プラットフォーム，ガス集合溶接装置電気機械器具などが適用	
	墜落による危険の防止	労働安全衛生法，同施行令，同規則	高所作業による危険防止について規定	
	作業環境	労働安全衛生法，同施行令，同規則	通路，気積，換気，照明，便所，食堂炊事場の環境と衛生，救急用具の備え付けについて規定	
	定期自主検査	労働安全衛生法，同施行令，同規則	動力プレス機械，フォークリフト，ガス集合溶接装置の定期自主検査と記録保存について規定	
	安全教育	労働安全衛生法，同施行令，同規則	労働者を雇い入れたとき，作業内容を変更したとき安全衛生の教育を行う。 危険有害な業務に就かせるときは特別教育を行う。研削と石の取り替え，プレス作業，小型ボイラー，フォークリフト，クレーン玉掛け，エックス線撮影，特定粉じん業務がある。	
	就業制限に係る業務	労働安全衛生法，同施行令，同規則	技能講習修了者以外就かせてはならない業務 ボイラー，クレーン，ガス溶接，フォークリフト，玉掛けなどがある。	
	健康診断	労働安全衛生法，同施行令，同規則	雇い入れ時健康診断，定期健康診断，給食従業員の検便，結核健康診断等があり，記録の作成報告義務がある	
	計画の届出	労働安全衛生法，同施行令，同規則	建物，機械設置移転，主要部分の変更を行うときは，30日までに届出が必要。動力プレス，ガス集合溶接装置，塗装設備，放射線装置・室などがある	
	ボイラー取扱業務	労働安全衛生法，同施行令 ボイラー及び圧力容器安全規則	ボイラーの設置報告，定期自主検査，取扱者の資格，等について規定。小型ボイラー，第一種圧力容器などがある。	
	クレーン取扱業務	労働安全衛生法，同施行令 クレーン等安全規則	定義，設置届法定検査報告，操作の教育，定期自主検査記録の保存などがある。	
	有機溶剤	労働安全衛生法，同施行令 有機溶剤中毒予防規則	塗装設備の届出，定期自主検査，環境測定，健康診断，記録の保管などがある	塗装設備
	アンモニア	労働安全衛生法，同施行令 特定化学物質障害予防規則	アンモニアを取り扱うときは作業主任者の選任が必要	
	アンモニア	毒物及び劇物取締法，同施行令，施行規則 毒物及び劇物指定令	アンモニア販売事業所の届出の規定について	
	エックス線装置	労働安全衛生法，同施行令 電離放射線障害予防規則	エックス線装置の届出，管理区域の明示，被爆限度，環境測定，健康診断，記録の保管，などがある	溶接構造物の非破壊検査
	粉じん作業	労働安全衛生法，同施行令 粉じん障害防止規則	粉じん作業，特定粉じん作業があり，特定粉じん作業について環境測定の規定がある。	アーク溶接，ショットブラスト，グラインダー
	じん肺	じん肺法，同施行規則	粉じん作業者の健康診断と粉じんにさらされる程度を低減する措置等	
	時間外及び休日の労働	労働基準法，同施行規則	休日及び時間外労働に関する労使の協定とその届出	

	防火設備，器具の検査と危険物の管理	消防法，同施行令，同施行規則 危険物の規制に関する政令 危険物の規制に関する規則	防火設備，器具の点検，防火対象物の指定，危険物の届等に対する規制		
	高圧ガス	高圧ガス保安法，同施工令 冷凍保安規則 一般高圧ガス保安規則 特定設備検査規則	高圧ガスの製造許可，貯蔵，高圧ガス製造装置の製造に関する規定		
	飲料水	水道法，同施工例，同施行規則 水質基準に関する省令 都道府県条例，同施行規則	水道管理者の届出 飲料水の検査について	一号井戸 市水	
	居室の換気	建築基準法 建築基準法施行令 建築基準法施行規則	居室の換気量について		
	社有車の管理	道路交通法，同施行令，同施工規則	安全運転管理者の選任と届出について		
	変電設備	電気事業法，同施行令，同施行規則	変電設備の保安と主任者の資格と選任	変電設備	
	変電設備	電気工事士法，同施行令，同施行規則	電気工事に従事する者の資格及び義務についての規定		
	特定化学物質	化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律，同施行令	特定化学物質の使用，製造等の届出		
	事務室の環境管理	労働安全衛生法，同施行令 事務所衛生基準規則	事務室の気積，換気，温度，一酸化炭素含有率，炭酸ガスの含有率，照明，給水，排水，清掃等の実施，便所，洗面設備，休養室の環境と衛生，救急用具の備え付け等について規定		
	石綿取り扱い作業の障害予防	石綿障害予防規則	石綿(アスベスト)取り扱い作業による障害防止，作業計画の作成開始前の届出などがある		
	高周波を利用した装置	電波法	高周波利用設備を設置しようとする際は，設置する前に許可を受ける必要がある。		
環境	基本理念		従来の公害対策基本法を発展させ，環境政策の基本法として，基本理念，国等各主体の責務，基本的施策，審議会等を規定している．事業者の責務として「①公害防止 ②廃棄物への対応 ③製品の環境負荷低減とリサイクル ④行政への協力」が規定されているが，いずれも訓示規定であり，具体的な義務，規制はこの基本法に基づいて制定される各個別法に委ねられている．	事業者の義務・規制等は規定していない	
	地球環境	温暖化	地球温暖化対策の推進に関する法律(温暖化対策推進法)同施行令，同施行規則	地球温暖化対策に取り組むための枠組みを定めたものであり，事業活動に伴う温室効果ガスを多量に排出するもの(特定排出者)は，自らの温室効果ガスの排出量を算出し，国に報告する義務がある．国は算定された排出ガスを集計し，公表することとされた．	
			エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネ法)，同施行令，同施行規則	電気と熱の使用量が指定数量以上の事業場はエネルギー管理指定工場に該当し，エネルギー管理士の選任，エネルギーの使用状況の定期報告の義務がある．また，特定荷主，特定建築物に該当する場合は，省エネ措置に関して所定の届出義務がある．	
		オゾン層	特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律(オゾン層保護法)，同施行令，同施行規則 特定物質の排出抑制使用合理化指針	オゾンを破壊する特定物質の製造，排出を規制している．R22は特定物質に該当する．(モントリオール議定書CのグループI) R22は2030年1月1日から使用禁止 特定物質の製造者は製造量などに対する規制を受ける． 使用事業者に対する規制値と届出義務はないが，特定物質の排出の抑制及び使用の合理化に努める義務がある．	
			特定製品に係るフロン類の回収及び破壊の実施の確保等に関する法律(フロン回収破壊法)，同施行令，同施行規則	第1種フロン類回収業者は，知事の登録を受け，回収・運搬の記録を作成し，毎年度知事に報告しなければならない． 業務用冷凍機器の出荷時は充填フロンの種類，量，放出禁止などを表示しなければならない．	
			フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律(フロン排出抑制法)，同施行令，同施行規則	フロン類の回収，機器廃棄時の取り組みを定める． 第一種特定製品に関し，該当するすべての機器は点検記録簿による機器点検・修理・冷媒充填・回収履歴の記録が義務付け．使用者による簡易点検と，一定規模以上の機器には有資格者による定期点検が義務付け．点検記録簿は廃棄後3年間保存．機器廃棄時には，機器使用者によるフロン回収および回収依頼書及び引き取り証明書の3年間保存．違反時の罰則あり．	

	大気汚染	大気汚染防止法，同施行令，同施行規則 自治体生活環境の保全等に関する条例 自治体大気汚染防止法に基づき排出基準を定める条例 自治体公害防止条例	ばい煙，揮発性有機化合物，一般粉じん，特定粉じん(石綿)を発生する施設からの規制対象物質の大気への排出を規制している。 ・大防法では，ばい煙等の発生施設及び排出基準が定められている。発生施設設置者には知事への届出及び測定・記録義務がある。 ・県条例では，ばい煙，粉じんについて，発生施設のほかに県独自の「ばい煙特定施設」及び規制対象物質，「粉じん特定施設」及び粉じん規制基準が定められている(横出し規制)。ばい煙の排出基準には上乘せ規制あり。 ・市条例では，ボイラーと焼却施設が指定施設とされている。	
	水質汚濁	水質汚濁防止法，同施行令，同施行規則 自治体生活環境の保全に関する条例 水質汚濁防止法に基づき排水基準を定める条例 自治体公害防止条例	特定施設を設置する工場・事業場(特定事業場)から公共用水域に排出される水(排水)には排水基準が適用される。 有害物質使用特定施設を設置する特定事業場から地下水に浸透する水で，有害物質使用特定施設に係る汚水を含むものには，有害物質が検出されないことという規制がある。 ・水濁法では，特定施設及び排水基準が定められている。特定施設の設置者には県知事への届出及び測定義務がある。 ・県条例では，特定施設のほかに県独自の「排水特定施設」が定められている(横出し規制)。また，国の基準よりも厳しい排水基準が設定されている(上乘せ規制)。 ・市条例では，し尿処理施設が指定施設とされている。	
		水質汚濁に係る環境基準人の健康の保護に関する環境基準	水質汚濁に係る環境基準で，人の健康を保護するうえで維持することが望ましい基準として設定された項目をいう。人の健康を保護するために，カドミウム，シアン，有機燐，鉛，六価クロム，ヒ素，総水銀，アルキル水銀，PCB等の23項目(健康項目)について基準値が設定されている。	
		下水道法，同施行令，同施行規則 自治体生活環境の保全に関する条例 自治会公害防止条例	水質汚濁防止法・ダイオキシン類対策特別措置法の特定施設を設置する特定事業所から公共下水道を使用して下水を排除する者は，基準に適合しない下水を排除することはできない。 市条例で排水設備新設時の検査，指定工事店を規定している。	
		浄化槽法，同施行令，同施行規則	し尿処理に係る浄化槽の保守点検，清掃，定期検査，届出について規定している。	
	土壌汚染	土壌汚染対策法，同施行令，同施行規則 自治体生活環境の保全に関する条例	有害物質使用特定施設を設置する工場の使用を廃止したとき，又は土壌汚染により健康障害が生じるおそれがあると知事が認めるときには，土地所有者は土壌の汚染状況の調査を行い，その結果を知事に報告しなければならない。又，知事は土地所有者，汚染原因者に対して汚染の除去を命ずることができる。県条例で，有害物質使用施設の管理に係る義務が規定されている。	
		農用地の土壌の汚染防止等に関する法律 土壌の汚染に係る環境基準について	特定有害物質による農用地の汚染で，人の健康を損なう恐れがある農畜産物が生産され，又は農作物の生育が阻害されることを防止する目的で制定された。	工場用地は農用地に非該当
	騒音	騒音規制法，同施行令，同施行規則 自治体公害防止条例	・騒音規制法では，特定施設，規制基準が定められている。規制地域及び当該地域に適用する規制基準は知事が定める。特定施設は県に届出が必要である。 ・県条例では，法律に規定する特定施設と同じ「騒音特定施設」が定められており，騒音規制法に基づく指定地域以外の地域(工業専用地域等)に適用される。(横出し規制) ・市条例では，指定施設が定められており，市への届出が必要	
	振動	振動規制法，同施行令，同施行規則 自治体生活環境の保全に関する条例 自治体公害防止条例	・振動規制法では，特定施設，規制基準が定められている。規制地域及び当該地域に適用する規制基準は知事が定める。特定施設は県に届出が必要である。 ・県条例では，法律に規定する特定施設とほぼ同じ「振動特定施設」が定められており，振動規制法に基づく指定地域以外の地域(工業専用地域等)に適用される。(横出し規制)	

	地盤沈下	工業用水法, 同施行令, 同施行規則 自治体生活環境の保全に関する条例 自治体地下水の採取の適正化に関する条例 自治体公害防止条例	指定地域内の井戸により地下水を採取して工業の用に供しようとする者は, 県の許可を受けなければならない. ・工業用水法では, 適用対象井戸, 適用業種, 指定地域が定められている. ・県条例では, 吐出口断面積 19cm ² 以上の揚水機が「揚水特定施設」に定められており, 届出を要す. また, 対象地域において一定規模以上の揚水機による採取を許可制にしている. ・市条例では, 揚水施設は指定施設ではない.	
		建築物用地下水の採取の規制に関する法律(ビル用法), 同施行令, 同施行規則	指定地域内の揚水設備により建築物用地下水を採取しようとする者は, 県の許可を受けなければならない. 建築物用地下水とは, 冷房設備, 水洗便所などをいう.	
	悪臭	悪臭防止法, 同施行令, 同施行規則自治体生活環境の保全に関する条例	・悪臭防止法では, 特定悪臭物質, 規制基準が定められている. 規制地域は知事が指定する. 施設・事業所の届出制はとっておらず, 規制地域内の事業場は自動的に規制対象となる. 事業場には測定義務はない. ・県条例では, 規制地域の指定の有無に関わらず, 独自の「悪臭特定施設」及び当該施設の管理基準が定められている(横出し規制). ・市条例では, 悪臭に係る事業所を含む人の健康及び環境に影響を与える可能性のある事業所を許可事業所としている.	
	循環型社会	循環型社会形成推進基本法, 同施行令	廃棄物・リサイクル対策の基本法として, 循環社会形成のための策を総合的・計画的に推進する法的枠組みを定めている. 事業者の具体的な義務・規制は以下の個別廃棄物・リサイクル関連法で規定されている.	事業者の義務・規制等は規定していない
	廃棄物・リサイクル	廃棄物の処理及び清掃に関する法律(廃棄物処理法), 同施行令	事業活動に伴う産業廃棄物及び一般廃棄物が規制を受ける. 事業者の責務として「①適正処理の義務: 委託した場合でも適正な処理が行われるまで責任をもつ ②排出量の抑制 ③施策への協力義務」が規定されている.	
		ポリ塩化ビフェニル廃棄物の適正な処理の推進に関する特別措置法(PCB廃棄物特別措置法), 同施行令, 同施行規則	PCB廃棄物を保管する事業者に対する規制を定めている. ①毎年度, 保管および処分に関する届け出を県に行う. ②法律施行日から 15 年の期間内に処分しなければならない. ③PCB廃棄物を譲り渡し, 譲り受けてはならない.	
	リサイクル	資源の有効な利用の促進に関する法律(資源有効利用促進法), 同施行令	リデュース, リユース, リサイクルを総合的に進める為に対象業種・製品などによる 7 つの枠組を定め, 対策を規定している.	
		容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律(容器包装リサイクル法), 同施行令, 同施行規則	家庭から一般廃棄物として排出される容器包装廃棄物のリサイクルシステムを確立するために特定事業者の役割分担を規定している.	
		特定家庭用機器再商品化法(家電リサイクル法), 同施行令, 同施行規則	特定家庭用機器(テレビ, エアコン, 冷蔵庫, 洗濯機)を対象にメーカーの再商品化を義務づけている.	
		建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律(建設リサイクル法), 同施行令, 同施行規則	コンクリート, アスファルト, 木材など特定資材を用いる建築物を解体する際に廃棄物を現場で分別し, 資材ごとに再利用することを解体工事業者に義務づけている.	
		食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律(食品リサイクル法)	食品の売れ残りや食べ残し, 食品製造過程で大量に発生している食品廃棄物の発生抑制・減量のために, 食品関連事業者による食品循環資源の再生利用を促進するための措置を定めている.	
		国等による環境物品等の調達の推進などに関する法律(グリーン購入法)	国や地方自治体による環境負荷の少ない製品の調達の推進, 国の機関や地方自治体などに対して, 国の基本方針に基づいて調達方針を作成・公表する努力義務を定めている.	
		使用済自動車の再資源化等に関する法律(自動車リサイクル法), 同施行令, 同施行規則	自動車メーカー及び関連事業者の使用済自動車から発生する破砕屑, エアバック, フロンガスの低減化, 自動車のリサイクル推進を義務づけている.	

	化学物質	特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律(PRTR 法), 同施行令, 同施行規則 自治体生活環境の保全に関する条例	有害性のある化学物質の排出・移動量を把握して集計, 公表する仕組みを定めている. 対象事業者は対象物質の排出移動量を把握し, 都道府県を経由して国に届出る義務がある. また MSDS 交付義務がある. 県条例では, PRTR 法に基づく措置に加え, 対象物質や事業者の要件を拡大するとともに, 事業者自らによる化学物質の適正管理の努力義務を規定している.	
		ダイオキシン類対策特別措置法, 同施行令, 同施行規則	ダイオキシン類を発生し, 大気への放出, これを含む汚水・廃液を排出する施設(特定施設)が規制の対象となり, 排出基準が定められている. 特定施設には廃棄物焼却炉が含まれる.	
	緑地	工場立地法, 同施行令, 同施行規則	特定工場を新設・変更しようとする事業者は敷地面積に対する生産施設面積, 緑地, 環境施設面積等の施設面積の割合を知事に届出る義務がある.	
	公害防止管理者	特定工場における公害防止組織の整備に関する法律(公害防止組織整備法), 同施行令, 同施行規則	公害発生施設を設置する特定工場は, 公害防止統括者, 公害防止管理者, 公害防止主任管理者を選任し, 届出なければならない.	
	環境情報	環境情報 環境情報の提供の促進等による特定事業者等の環境に配慮した事業活動の促進に関する法律(環境配慮促進法), 同施行令, 同施行規則	企業に環境報告書などの環境情報を積極的に公表させて, 投資家や消費者に, 環境情報を勘案した投資, 消費を促す. 環境報告書の公表の義務は特殊法人などの特定事業者に絞る.	
	地域活動	自治体地球環境保全行動条例	特定事業所は知事に省エネルギー推進状況報告, 省資源推進状況報告, 緑化推進状況報告を行う.	

付表 2 作業に必要な資格

基礎																		
国家資格																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
高圧ガス製造保安責任者 冷凍機械（１種）	高圧ガス製造保安責任者 化学（甲種）	高圧ガス製造保安責任者 機械（甲種）	高圧ガス製造保安責任者 機械（乙種）	高圧ガス販売主任者（１種）	１級管工事施工管理技術士	エネルギー管理士	公害防止管理者（振動）	公害防止管理者（騒音）	公害防止管理者（大気１種）	公害防止管理者（水質１種）	造園施工管理技術士（２級）	ボイラー技士（２級）	危険物取扱者（甲・乙・丙種）	衛生管理者（１種）	エックス線作業主任者	衛生工学衛生管理者	第二種電気工事士	機械保全技能士（３級）

作業資格																			
技能講習(労安法に基づく)									特別教育(労安法に基づく)										
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
玉掛け (1t以上)	フォークリフト運転 (1t以上)	床上操作式クレーン運転 (5t以上)	特定化学物質 (H2S以降四アルキル鉛等作業主任者)	有機溶剤作業主任者	酸素欠乏・硫化水素 (旧第2種酸素欠乏) 危険作業主任者	積卸し作業指揮者に対する安全教育	車両系荷役運搬機械等作業指揮者に対する安全教育	ガス溶接	クレーン運転 (5t未満)	小型車両系建設機械 (整地・運搬・積込・掘削)運転業務	高所作業車運転 (10m未満)	有機溶剤従事者	低圧電気取扱業務 (労安衛法第59条・安衛特別教育第6条)	高圧電気取扱業務 (労安衛法第59条)	産業用ロボット	研削と石の取替え等の業務	アーク溶接等の業務	第2種酸素欠乏危険作業	フルハーネス型安全帯使用作業

付表 3 環境・安全委員会 関連年表

1951	高圧ガス取締法公布
1961.6	低温工学懇話会発足 低温を応用する科学および工学の進歩発展をはかり、国際交流の窓口となる組織として「低温工学懇話会」が設立。△
1964	低温工学協会設立準備 「低温に関する国際委員会」より、「第1回国際低温工学会議(ICEC: International Cryogenic Engineering Conference)を日本で開催するよう要請を受け、国際会議開催を引き受けるに当たり、「低温工学懇話会」を発展的に解組し、政府認可を受けた学術団体とすべく、設立委員会設立。△
1965	懇話会総会で、同会を社団法人の協会とすることが決定。***
1966.4	低温工学協会発足 1966年3月30日付けで、内閣総理大臣(科学技術庁)と通商産業大臣から、正式に協会設立認可。「社団法人低温工学協会」(Cryogenic Association of Japan)が発足(法人設立登記:1966年4月6日)。△
1968	低温と安全性_低温工学 Vol13No4
1970	イギリス低温工学協会の「低温工学における安全マニュアル」_低温工学 Vol5No4
1971	「極低温用冷凍機の信頼性に関する考察とその試み」_低温工学 Vol6No5
1972	安全部会発足。「低温液化ガスの取扱とその安全対策」の周知徹底指導と広報活動を主眼として設立*
1975	「英国低温工学協会編集"Cryogenic Safety Manual"」の完訳本「低温装置の安全マニュアル-安全操作の指導書」発行* 高圧ガス法律改正について_低温工学 Vol10No2
1978	「極低温冷凍システムの信頼性に関する」アンケート調査結果について_低温工学 Vol13No5 「極低温技術と高圧ガス取締法」に関するアンケートについて_低温工学 Vol13No6
1979	「高圧ガス取締法改正に対する要望書」を通産省立地公害局長宛に提出。以後1984年までに同種の提案、要望書を4回提出。*
1980	液体水素の安全な取り扱い_低温工学 Vol15No2
1981	安全委員会発足。「高圧ガス取締法の極低温機器に関する規制緩和」のための、問題点調査と意見発信を主眼として設立* TA調査報告書「極低温金属材料に関するテクノロジーアセスメント」を日本産業技術振興協会から発行*
1987.1	低温工学会設置。学会活動の一層の充実をはかるため、低温工学協会の中に「低温工学会」(Cryogenic Society of Japan)設置。低温工学会は、学会誌「低温工学」の発行及び研究発表会(低温工学・超電導学会)を主催。△
1990	「高圧ガス取締法改正に対する要望書」を通産省立地公害局長宛に再提出*
1992	トリスタン測定器用ヘリウム液化冷凍システムの信頼性_低温工学 Vol27No3
1993	「低温工学」隔月刊から月刊へ移行。△
1996	安全性検討委員会発足。阪神・淡路大震災時の被災調査活動をきっかけに、協会の常設委員会として設立** 被害調査臨時委員会が「阪神・淡路大震災における低温・超電導機器被災調査報告」を発行。*
1998	日本原子力研究所向け委託調査報告書「外国製高圧ガス対応機器の国内適用に関する調査」を発行。*
1999	改正高圧ガス保安法の低温工学事情_低温工学 Vol34No4
2003	日本原子力研究所委託調査報告書「日本における水素並びに液体水素関連設備とその適用法規及び安全性に関する調査」を発行*
	2003年10月にいわき市の病院でのMRIの撤去作業中にヘリウムが爆発した事故、2004年1月の京都市の病院での液体酸素LGCの破裂事故に関して、調査**
2004	安全性の特別セッション:2004年春季低温工学超電導学会講演概要集 p142-148** 高エネルギー実験における低温技術_低温工学 Vol39No10
2008	環境・安全委員会発足
2011.4	「公益社団法人低温工学・超電導学会」が発足
2014.5	規制緩和について METI 高圧ガス保安室訪問
2014.9	再度、規制緩和について METI 高圧ガス保安室訪問
2016	ASCOT 設立と同時に冷却システム検討会発足。規制緩和の要望書の検討始める。
2020.1	ASCOT 第18回冷却システム検討会において、規制緩和の要望書作成が終了し、低温超電導工業会とステークホルダーに引き継ぐ。
2021.3	産構審、高圧ガス小委員会にて、高圧ガス保安室よりヘリウムと空気を第1グループとする検討を開始すること報告。

2021.10.27	改正高圧ガス保安法施行令 ヘリウム，ネオン，クリプトン，キセノン，アルゴン，ラドンが第一種ガスに 掲名．許可条件が 300m ³ ，50 トンに緩和．適用除外が 5 トン未満に緩和．冷凍則の不活性ガスに，ヘリウム に加えてネオン，クリプトン，キセノン，アルゴン，ラドンが掲名
------------	--

△：低温工学・超電導学会 HP より

*：岡崎，「協会の安全事業について」，第 70 回低温工学・超電導学会講演概要集(2004)142

**：緒形，「巻頭言 低温工学と安全性」、低温工学 44(2009)475

***：低温工学と安河内昂，低温工学 19(1984)248

付表 4 参考文献

参考になると考えられる文献を示す。なお、該当資料の取り扱いには学会内限りとする。

名称	著者	出典
冷媒の特性と取扱い	佐藤明男	低温工学 Vol.28No.2(1993)
クライオスタットと周辺機器の使い方	野口隆志	低温工学 Vol.28No.11(1993)
Cryogenic Safety with Emphasis on Overpressure Protection of Low Temperature Helium Vessels	Tom Peterson	Fermilab,Jan.2013
Electrical Safety and Health for Electrical Trades Student Manual	CDC, NIOSH	DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES(2009)
J-PARC 中性子源用水素システムの安全設計	加藤崇他	低温工学 Vol.42No.8(2007)
コールドエバポレーター取扱いハンドブック第 6 次改訂版	KHK	KHK(2016)
バルブ取扱指針(五訂版)	KHK	KHK(2001)
液体水素の安全な取り扱い	花田卓爾	低温工学 Vol.15No.2(1980)
九大の水素関連「ヒヤリハット」事象の分析	栗山信宏	福岡水素エネルギー戦略会議安全分科会資料(2013)
九大の水素関連「ヒヤリハット」事象の分析と対応	栗山信宏	福岡水素エネルギー戦略会議安全分科会資料(2014)
香川大学工学部安全マニュアル	香川大学林町地区安全衛生委員会	香川大学(2017)
高圧ガスハンドブック	JIMGA	JIMGA(2023)
リスクアセスメント・ガイドライン(Ver.2)	リスクアセスメント手法及び保安教育プログラム調査検討委員会	KHK(2016)
阪神・淡路大震災における低温・超電導機器被災調査報告書	被災調査臨時委員会	低温工学協会(1996)
事例でわかる職場のリスクアセスメント	厚労省・都道府県労働局 労働基準監督署	厚労省(2011)
リスクアセスメント担当者養成研修テキスト	日本労働安全コンサルタント会	厚労省(2012)
労働災害の発生状況と改正された労働安全衛生法	後藤博俊	冷凍 Vol.90No.1050(2015)
道具の使い方とメンテ(1)工作機械加工一般	千葉正伸	冷凍 Vol.90No.1051(2015)
道具の使い方とメンテ(2)機械要素	千葉正伸	冷凍 Vol.90No.1052(2015)
道具の使い方とメンテ(3)工作測定機器	千葉正伸	冷凍 Vol.90No.1053(2015)
道具の使い方とメンテ(4)職場災害の低減に資する保護具	谷澤直人他	冷凍 Vol.90No.1054(2015)
メンタルヘルスケア(1)職場から見たメンタルヘルスの現状と対策の進め方	岡本一紀	冷凍 Vol.90No.1057(2015)
メンタルヘルスケア(2)職場環境改善のすすめ	黒田正彦	冷凍 Vol.90No.1058(2015)
ゼロ災害全員参加運動について	宮永賢成	冷凍 Vol.91No.1060(2016)
KYT について	宮永賢成	冷凍 Vol.91No.1061(2016)
新人教育講習会テキスト	東大物性研低温液化室	東大物性研低温液化室(2003)
低温と安全性	石井他	低温工学 Vol.3No.4(1968)
低温寒剤の取り扱いと危険防止	東北大学極低温科学センター	東北大学極低温科学センター(2013)

低温装置の保安マニュアル	イギリス低温工学協会	低温工学協会(1975)
電磁場の生体効果とその安全性について	中川正祥	低温工学 Vol.30No.3(1995)
平成 24 年度 低温センター安全講習会	東京大学低温センター	東京大学低温センター(2012)
保安技術テキスト	東京大学低温センター	東京大学低温センター(2010)
日本における水素並びに液体水素関連設備とその適用法規及び安全性に関する調査 報告書	低温工学協会 安全性検討委員会	低温工学協会(2003)
平成 3 年度 先端産業関連高圧ガスの保安技術の開発報告書	超低温高圧ガス設備の 保安技術検討委員会	日本機械工業会, KHK(2002)
平成 4 年度 先端産業関連高圧ガスの保安技術の開発報告書	超低温高圧ガス設備の 保安技術検討委員会	日本機械工業会, KHK(2003)