アーク溶接における電撃事故とその防止*

寺 沢 正 義**

Electric Shock Accidents by Arc Welding
and Their Prevention*

by Masayoshi Terasawa**

1. は し が き

アーク溶接は造船所、建設現場などにおいてますます盛んに利用され、産業の進展に多大の貢献をしている。しかしその反面、溶接作業に関連して電撃、眼障害、中毒、火災、爆発などの災害が発生している。とくに電撃による死亡危険性はきわめて高く、昭和36年頃までは毎年かなりの犠牲者が発生していた。そこで労働省においては規則の改正などを行ない、アーク溶接作業中における電撃防止の対策を強力に進めた結果、最近はやや減少の傾向を示しているが、いまだ20名近い事故者を出している状況である。

アーク溶接で電撃危険のあるのは、交流アーク溶接機を用いた手溶接の場合で、自動溶接装置や直流溶接装置を用いる作業ではその危険がほとんどないので、以下交流アーク溶接装置を用いた場合の電撃危険性とその対策について記すことにする。

2. アーク溶接における電撃事故例

2. 1 電撃事故統計

表一1は最近6カ年間の全国労働基準法適用事業場におけるアーク溶接作業時の感電死亡災害統計である。じゅうらいアーク溶接災害の70%は溶接棒ホルダに起因していたが、絶縁型溶接棒ホルダならびに自動電撃防止装置の普及によりホルダによるものは減少したが、いっぽうその他の部分に接触して感電したものが増加してきた。その他の部分には溶接機の1次または2次配線、溶

表一1 アーク溶接における感電死亡統計

原因別	年 別						計
	36	37	38	39	40	41	
ホルダに 接 触	30	5	4	3	7	4	53
溶 接 棒 に 接 触	5	3	5	10	1	4	28
そ の 他 に 接 触	5	6	2	9	9	9	40
計	40	14	11	22	17	17	121

* 原稿受付 昭和43年2月14日

** 労働省産業安全研究所 Ministry of Labour, The Research
Institute of Industrial Safety

接機と配線との接続端子部および、溶接機外函への漏電によるものなどが含まれている。このほか溶接機の2次配線のうち接地側配線の設計が悪いために、アーク電流が工場の鉄骨柱に分流し事故を起した事例もある。

2. 2 電撃事故例

最近発生した事故例を簡単に示すとつぎのとおりである。

(1) 溶接棒ホルダによる感電事例

ボイラ内で作業をしていた溶接工が作業終了時刻になっても戻らないので、調査したところボイラ内で溶接棒ホルダを握ったまま死亡していた。ホルダは絶縁型のものを使用していたが、その先端絶縁物が焼損し一部脱落して充電部分が露出していたために、この部分に接触して感電したと思われる。ボイラ内は水が残っておりかなり条件が悪かった。

(2) 溶接棒による感電事例

ある造船所で溶接作業中、溶接棒を取替える際に溶接棒の心線に接触して感電した。軍手が汗でかなりぬれていた。溶接棒を取替える際は電源を切らないのが普通であるから、このような事例はかなり多い。

(3) 溶接用ケーブルの被覆損傷部分に接触した事例

ホルダ側ケーブルを移動しようとした際に、不完全にテープ巻きしてあったケーブルの被覆損傷部から心線が露出していたために、この部分に触れて感電した。

(4) 充電部の露出している溶接機端子部に接触した事例

溶接機のリード線とケーブルとの接続端子部分の絶縁が不完全であったために、この部分に接触して感電した。端子部分はビニルテープで絶縁してあったが、端子の締付が不じゅう分であったため接触不良になり過熱して、テープが焼けて脱落し充電部が露出したものである。

(5) 溶接機外函への漏電による感電事例

溶接機の外函に漏電していたために、電流調整用ハンドルを握った瞬間感電した。溶接機の電線引込口で、1次側IV電線の被覆が損傷し漏電したと思われる。

図-1 溶接機2次側からの漏電回路図

(6) 溶接機2次回路からの漏電による感電事例

図-1のように溶接機2次回路の接地側を建家の鉄骨柱に接続していたために、鉄骨柱→天井走行起重機ガーダー→ワイヤーロープを経てフックとA定盤間に電圧が発生し、A定盤上で積荷をフックにかけようとして、フックに触れた際に感電した。A定盤とB定盤はアングル鋼材で溶接により接続していたが、B定盤への溶接が不完全で結果的にはA定盤とB定盤は電気的には接続されていなかった。鉄骨柱の基礎はコンクリートブロックのなかに埋込まれていたが、コンクリートブロックは乾燥している場合は絶縁抵抗がかなり高いので、接地の効果がほとんどない。

3. アーク溶接における電撃危険

3.1 アーク溶接装置における回路電圧

(1) 1次電圧……交流アーク溶接機のJIS規格(C-9301)によれば、その定格1次電圧は200(V)に定められている。

(2) 2次無負荷電圧……JISによればAW500のもので最高2次無負荷電圧は95(V)以下、AW400以下のもので85(V)以下に定められている。

(3) アーク電圧……アーク電圧はアーク長およびアーク電流によっても異なるが、おおよそ30~40(V)である。

したがってアーク溶接において電撃の危険のあるのは、溶接機1次回路および無負荷時の2次回路における場合である。このうち2次回路の電圧は1次回路の電圧の約1/2であるから、比較的安全なように考えられるが、2次回路は移動して使用することが多いので、ケーブルの被覆などに破損のおそれが多く、感電事故もまた多い。

3.2 低圧電気の電撃危険性

アーク溶接における電撃危険について論ずるまえに、低圧電気の一般的電撃危険性について、種々な文献¹⁾より引用して記すところである。

3.2.1 電撃の危険度

電撃の危険度は電圧の高低には直接関係なく、おもにつぎによって定まる。

- (1) 電流の値
- (2) 電撃時間
- (3) 電源の種類
- (4) 通電経路

その他間接的には人体抵抗や電圧の大きさが関係する。

3.2.2 電流値

感電した場合の危険度は、人体に流れた電流値の大きさによって大きく左右される。

(1) 最小感知電流……電撃の感覚を生じる最小の電流で、その値は60(c/s)交流で平均1.072(mA)である。この程度の電流値であれば危険はまったくない。

(2) 苦痛電流……電流値を大きくすると筋肉の刺激がはげしくなり苦痛を感じるようになるが耐えられる限界の電流を苦痛電流といっており、その値はおおよそ7~8(mA)である。この程度の電流値であればまた生命に異状はない。

(3) 不随電流または可随電流……電流値をさらに大きくするとその電流値では直接生命に異状はないが、通電経路の筋肉のけいれんが一層はげしくなり、神経がまひして運動の自由がきかなくなり、電撃を受けていることの意識ははっきりしているが、自力でその電源から離脱できなくなり、長い間の苦痛の結果、呼吸困難になって良識を失ったり窒息死することがある。このような運動のきかなくなる限界の電流値を不随電流といい、逆に運動の自由を失わない最大限度の電流を可随電流といっている。その値はだいたい10~15(mA)といわれている。

(4) 心室細動電流……さらに電流値を大きくすると心臓がけいれんを起こし、正常な脈動が打てなくなり、心室が細動を起こして数分内に死亡するようになる。心

表-2 動物の心室細動を起こす電流値

動物の種類	数	平均重量		心室細動を起こす最小電流(mA)		心室細動を起こさない最大電流(mA)	
		からだ(kg)	心臓(g)	平均	最小~最大	平均	最大
モルモット	10	0.55	1.8	28	18~45	20	
兎	10	2.20	6.0	30	19~44	25	
猫	10	2.90	15.0	29	19~39	23	
犬	10	22.00	170.0	110	70~220	92	
豚	9	79.00	300.0	240	170~270	200	
羊	25	56.00	270.0	250	160~390	240	
子牛	10	70.00	420.0	310	210~470	270	

室に細動を起こすような電流を心室細動電流という。この値は人間による生体計測は不可能なので、種々な動物による実験値が発表されている。その値は表-2のとおりであるが、動物の体重ならびにその心臓の重量にだいたい比例している。人間の場合は、これと体重がやや似ている羊についての実験値があてはまるのではないかと推定される。

3.2.3 電撃時間

人体への通電時間が長い程危険になることはいうまでもない。

(1) 電撃時間と危険接触電圧

充電部と大地間で人間が電撃を受けた場合に、体に加えられる電圧（人体を流れる電流と人体抵抗との積）を接触電圧といっているが、電圧値の危険度の表現としては、対地電圧あるいは危険電圧という表現より実際的なもので、ドイツの規定（VDE 0141/2.64）ではこのような用語を用いている。この接触電圧の低い程人体の危険度が小さくなる。わが国ではこれに関する規程はないが、ドイツではこの接触電圧の値を 65(V)、スイスでは 50(V)、イギリスでは 40(V) と定められている。

そこで手から手、または手から足への経路で通電した場合の電撃時間と危険接触電圧（人体抵抗値の最小を 500 Ω と仮定した場合）との関係を求めると表-3のとおりである。したがって人体に汗をかいているようなときは人体抵抗が低下するので、90(V) 位の電圧でも 1 秒通電すると危険になる。交流アーク溶接機の 2 次無負荷電圧は 95(V) 以下になっているが、表-3 から危険なことがわかる。

(2) 電撃時間と危険電流

電撃時間と危険電流との関係を求めると表-4のとおりである。

表-3 および表-4 の数値は後述の溶接機用自動電撃防止装置の 2 次無負荷電圧および運動時限を決定する資料となる。

表-3 電撃時間に対する接触危険電圧

電 撃 時 間 (秒)	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
危険接触電圧(V)	90	100	110	125	140	165	200

表-4 電撃時間と危険電流

電 撃 時 間 (秒)	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
危険電流 (mA)	180	200	220	250	280	330	400

3.2.4 電源の種類

電撃の危険度は、電源が交流か直流かによって、また電源の周波数などによっても左右される。

表-5 可随電流におよぼす周波数の影響

1. 2.5%の確率で可随電流の限界となる値
2. 25%の確率で可随電流の限界となる値
3. 50%の確率で可随電流の限界となる値
4. 75%の確率で可随電流の限界となる値
5. 97.5%の確率で可随電流の限界となる値

(1) 可随電流と周波数

男子について、5(c/s) から 10,000(c/s) までの周波数における可随電流を測定した結果は表-5のとおりである。周波数が 50(c/s) または 60(c/s) 附近の可随電流がもっとも小さくなっており、我々の日常使用している商用周波数がもっとも危険なことがわかる。したがって高周波溶接機は、定格周波数が 50(c/s) または 60(c/s) の交流アーク溶接機に比べて安全なわけである。

(2) 心室細動電流と交流および直流の関係

羊について一方の前足から他の後足に 3 秒間通電した結果、心室細動電流と直流および交流との関係を示すと表-6のとおりである。直流における心室細動電流は 60(c/s) 交流におけるものよりもおよそ 4~5 倍になっている。交流溶接機より直流溶接機のほうが安全なゆえんである。

表-6 心室細動電流と直流および交流との関係

電 流 の 種 別 および周波数		動物 の 数	電 流 (mA)		
			心室細動を起こす最小値		心室細動を起さない最大値
			平 均	範 囲	平 均
直 流	前足(+)	6	1,500	1,200~2,100	1,200
	前足(-)	5	1,100	700~1,500	1,000
	合 計	11	1,300	700~2,100	1,100
交 流	25 c/s	10	320	190~ 490	290
	60 c/s	25	250	160~ 390	240

3.2.5 人体抵抗

人体の内部抵抗はおおよそ 500(Ω)~1,000(Ω) であるが、人体と電極または大地との接触抵抗は、素手および素足の場合は皮膚の抵抗が主体となり、印加電圧、接触面の湿度、接触面積、接触圧力などによって変化する。

このうち印加電圧と湿度によっていちぢるしく変わる。

印加電圧が 100(V) (おおよそ溶接機の 2 次無負荷電圧の値) 程度のときは、皮膚が乾燥している場合は普通数万オームあるが、皮膚が発汗しているとその 1/12、水にぬれていると 1/25 まで低下するといわれている。また印加電圧が 1000(V) 程度になると皮膚は絶縁破壊して、内部組織のみの抵抗になる。

3. 3 アーク溶接における電撃危険

以上の事項をアーク溶接の場合に当てはめて考えてみよう。大地に立って溶接作業をしている者が、ホルダの充電部分ないしは溶接棒などに触れて感電したとすると、人体への通電電流はおおよそつぎの式によって求められる。

$$I(A) = E(V) / R_1(\Omega) + R_2(\Omega) + R_3(\Omega)$$

ただし I = 人体の通電電流

E = 溶接機 2 次無負荷電圧

R_1 = 手とホルダまたは溶接棒などの接触抵抗

R_2 = 人体の体内抵抗

R_3 = 足と大地との接触抵抗

いま $E = 95(V)$

$R_1 = 20,000(\Omega)$ (乾燥時)

$R_2 = 500 \sim 1,000(\Omega)$

$R_3 = 30,000(\Omega)$ (乾燥時)

と仮定すれば

$$I \approx 2mA$$

となり生命に危険はない。しかし手足が発汗していると I は約 12 倍になり、水に濡れていると 25 倍にもなるのでいちぢるしく危険になる。また 1 次回路は 200(V) であるから、発汗などの悪条件下において、1 次回路によって感電した場合は、その通電電流はさらにその 2 倍になるので一層危険になる。ただし通電時間を極力短縮すれば危険は減少されるので、感電した場合にはただちに電源を切る準備をととのえておくことが重要である。したがってボイラ内などのようなところの独り作業はきわめて危険である。

4. 感電事故の防止対策

4. 1 法規による規制事項

(1) 労働安全衛生規則

古く使用されていた充電部の露出した溶接棒ホルダは危険なので、同規則第 124 条の 4 にはつぎのように規程されている。

「使用者は、アーク溶接（自動溶接を除く）の作業に使用する溶接棒ホルダーについては、日本工業規格 C-9302（溶接棒ホルダ）に定める規格に適合するもの、またはこれと同等以上の絶縁効力および耐熱性を有するもので

なければ使用してはならない」

また絶縁型ホルダを使用しても溶接棒からの感電は防止でもないので、自動電撃防止装置について同規格の第 124 条の 5 につぎのように規程されている。

「使用者は船舶の二重底またはピークタンクの内部、ボイラの胴またはドームの内部など導電体に囲まれた場所であって、いちぢるしく狭あいなところにおいて交流アーク溶接（自動溶接を除く）の作業を行なう場合には、労働大臣が告示で定める構造規格に適合する構造の自動電撃防止装置を使用しなければならない」

(2) 電気設備技術基準（電気事業法）

第 251 条にアーク溶接装置の安全な施設方法について規程しているが、おもなものの要旨をあげるとつぎのとおりである。

(イ) 1 次回路の対地電圧は 300V 以下

(ロ) 2 次回路に使用する電線は溶接用ケーブルまたは 1 種キャブタイヤケーブルおよびビニルキャブタイヤケーブル以外のキャブタイヤケーブルであること。1 種ケーブル、またはビニルキャブタイヤケーブルの外装の絶縁被覆は機械的に弱く破損しやすいので危険になるおそれが多い。そこで外装の丈夫なケーブルを使用するように規程したものである。

(ハ) 2 次回路の配線は溶接の際に流れる電流を安全に通ずることのできるものであること。

一般に、電圧側（ホルダ側）のケーブルは電流容量のある太さのケーブルが使用されるが、接地側（帰線側）にはパイプ、アングル鋼材などが使用されることが多く、電流容量が不足しているおそれがあるので、このように規程されたものである。

(ニ) 被溶接材およびこれと電気的に接続される持具、定盤などの金属体には第 3 種接地工事を施すこと。接地をしないと大地から絶縁された状態になり、これらに触れると感電のおそれがあるからである。

(3) 石炭鉱山保安規則

第 200 条の 2 に「汽罐の胴内など金属体に囲まれた狭あいな箇所において鉱山労働者に交流アーク溶接作業を行わせるときは、自動電撃防止装置を備えなければならない」と規程している。

4. 2 溶接棒ホルダ

(1) JIS 規格 (C-9302)

1961 年の規格改正の際に、それまで充電部の一部露出している型のものが含まれていたのを、これを全面的に廃止し、絶縁型のみにした。

(2) 選定

(イ) 溶接棒ホルダは、その種類が電流容量によって表一 7 のように 5 種類に分かれているので、それぞれ

写真1 自動電撃防止装置の内部構造

て JIS 規格が制定された。さらに、昭和36年7月には、労働省告示第32号として電撃防止装置の構造規格が制定された。

4.3.3 特性

(1) 電撃防止装置の2次無負荷電圧

溶接機の2次無負荷電圧とは別に電撃防止装置の2次無負荷電圧を定めている。これは電撃防止装置が動作している場合にホルダと被溶接物との間に加わる定常時の無負荷電圧のことで、25(V)以下を原則としている。これは、作業者の接地状態などが悪条件の場合でも安全な電圧である。安全電圧については、各国で定めているが、我が国ではとくに定めがないので、ILO の勧告に基づいている。電源電圧の変動の許容範囲内でも 30(V) を越えないようにしている。

(2) 起動時間

電撃防止装置の使用状態で溶接棒を被溶接物に接触してから、主接点が閉路され2次回路に溶接機の2次無負荷電圧が発生するまでの時間で、その値は定格1次電圧において0.06秒としている。なお、電撃防止装置を動作させるに必要な溶接棒の接触所要時間は0.03秒以内と定めている。図-4は電撃防止装置の起動時の各波形²⁾の1例を示したものである。溶接棒を被溶接材に接触させてから23(msec)で主接点が投入されている。主接点リレーに交流電磁閉開器を用いているものは、可動接点の投入まで少なくとも1(c/s)の時間を要する。補助リレーの動作時間を加えるとこの程度の時間はどうしても要するようになる。起動時間の早い程作業性のよいことはいうまでもないので、より一層時間の短縮が要望される。

(3) 運動時間

V_1 は電撃防止装置の2次無負荷電圧波形
 A_2 は溶接機2次回路の電流波形
 V_3 はMGCコイルの電圧波形
 A_4 は溶接機1次回路の電流波形

図-4 自動電撃防止装置の起動時の電圧電流特性

アークを切って、ホルダに溶接機の2次無負荷電圧が発生してから主接点が開放されるまでの時間で、その値は約1秒を標準とし、いかなる場合も1.5秒を超えないようにしている。安全性の面からみると、この時間を設けないのがよいが、かんけつ的にアークを出す作業では、その作業性をよくするためにとくに設けたものである。この時間が長いと電撃の危険があるので、作業性と安全性との関連において、また、前記電撃危険性において述べたように、接触電圧と電撃時間などを参照してこのように定めたものである。

(4) 電源電圧の変動の許容範囲

溶接機が集中負荷されると電源電圧が大巾に変動することがあるので、定格1次電圧の-15%～+10%の変動の範囲内において支障なく使用できるようにしている。したがって、この範囲を超える場合は電撃防止装置は使用できない。

4.3.4 選定

(1) アークが消え主接点を開放するために、溶接機の2次無負荷電圧を利用する構造のものは、リレーの特性が2次無負荷電圧の範囲内にあるような装置を選ばねばならない。すなわち、対象とする溶接機の2次無負荷電圧と電撃防止の装置の特性を考慮する必要がある。

(2) 自己保持機構にアーク電流(アンペーターン)を利用するものは、溶接機の電流容量に適合した電撃防止装置を選ばねばならない。

4.3.5 点検保守

主接点の溶着は電撃防止装置の機能を阻害するばかりでなく、かえって、危険になることがある。したがって、十分な保守点検が必要である。電撃防止装置は表示

灯を設け、ホルダと被溶接物との間の電圧の高低を外部から判別できるようになっている。したがって、表示灯の明るさの程度により故障を早期に発見することができる。すなわち、運動時間のみ明るく点灯するので、この時間が1秒を超える場合は故障とみなされる。使用率にもよるが、月に1回は主接点の摩耗状況などの精密な点検が必要である。

4.3.6 自動電撃防止装置の効果

(1) 電力節約

交流アーク溶接機は力率がかなり悪いので、無負荷損による電力の浪費もばかにならない。自動電撃防止装置を使用すると、無負荷時は電源が自動的に開放されるので、無負荷損がいちどしく軽減され無駄な電力の節約になる。年間に節約される電力はつきによって算出できる。

$$A \times B(1-p/100)(W_1 - W_2) \times 10^{-3} \text{KWH}$$

A……年間の稼動日数

B……1日の稼動時間

R……使用率

W_1 ……溶接機の無負荷損

W_2 ……電撃防止装置をつけた場合の無負荷損、補助変圧器の無負荷損で、溶接機の無負荷損に比較するとほとんど無視できるくらい小さい。

(2) 感電事故の減少

図-5は自動電撃防止装置が開発され、今日のように普及されるまでにたどった経過と、アーク溶接における感電死亡件数との比較を示したものである。大手の造船

所では早くからこの装置を使用したので、感電災害は昭和33年を境として急激に減少したのに反し、一般事業場ではこの装置の使義務が規則化された昭和36年頃からようやく減少の傾向を示している。

図-5 自動電撃防止装置とアーク溶接による死亡件数との推移

文 献

- 1) 鶴見策郎：電撃について、(電気学会誌，昭和28年2月)
Charles F. Dalziel: The Threshold of Perception Currents (TAIEE Aug. 1964)
W. B. Kouwenhoven: Effect of Electricity on the Human Body. (Elec. Engr. Mar. 1949)
- 2) 寺沢正義：交流アーク溶接機用自動電撃防止装置に関する研究(労働省産業安全研究所報)

溶接作業の安全衛生について、特に 溶接工じん肺について*

佐 野 辰 雄**

Safety and Hygiene Problem on Arc Welding-especially, about Welders Lung*

by Tatsuo Sano**

溶接作業にともなう各種の安全問題、発生するフューム、ガスによる衛生問題は複雑で広い領域にわたっているが、ここでは基本的な衛生問題であるフューム、粉じん吸入による肺の変化、じん肺の問題にしばって述べて

みることにしたい。

I 塵肺とは

塵肺というのは、空中に浮遊する各種の粉塵を吸入して、胸部のX線写真に異常な陰影があらわれ、しだいに肺機能が低下して、吸塵量の多いものでは、しだいに肺

* 原稿受付 昭和43年1月25日

** 労働科学研究所病理部, The Institute for Science of Labour