

4 | 溶接機・電源の発展経過

前述したように（3.1節参照）、わが国でのアーク溶接の始まりは、1904（明治37）年の三菱・長崎造船所での炭素アークによる鋳鋼品の補修である。その時は自家発電した直流を、水抵抗を使って溶接用に調整し、特別な溶接機は使用していなかったようである（図4.1参照）。その後、1915（大正4）年に長崎造船所がスウェーデンのチェルベルヒ社から、1台で数人の溶接工が使用できる多人数形の電動発電機式直流溶接機（出力40kW）を初めて輸入した（図4.2参照）。これより4年遅れて大阪製鎖も、英国のコーシー社から無負荷電圧60Vの直流溶接機と100-110Vの交流溶接機を輸入している。この二社に限らず、1917（大正6）年には川崎造船所が米・リンカーン社製溶接機を6台購入している。また1919（大正8）年には伊藤忠商事が米国のエレクトリックアーク・カッティング・アンド・ウェルディング社（Electric Arc Cutting & Welding Co.）から可動コア形交流溶接機を輸入し、それを京都大学でテストした。さらに旧国鉄小倉工場では米・ゼネラル・エレクトリック社の直流溶接機（出力33kW）を使い、機関車部品の肉盛補修を行っている。

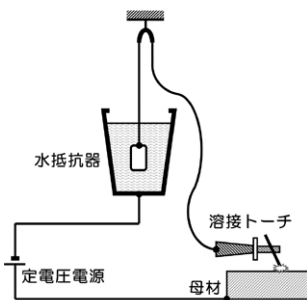


図4.1 水抵抗器を用いた溶接施工

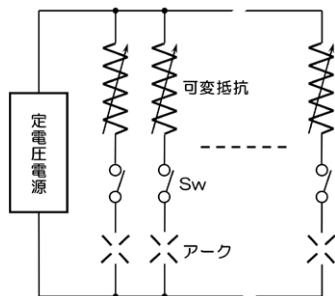


図4.2 多人数形溶接機

このような輸入機時代の1922（大正11）年に、米国製をモデルした単式交流アーク溶接機を日本電気熔

接機が製作し、これが国産溶接機の初めとされている。そして1925（大正14）年には、専門メーカーとして大阪電気などが登場して、本格的な溶接機の国産化時代が始まった。この当時、欧米ではアークの安定性に優れ、電撃の危険性も少ない直流溶接機が多用されていた。しかしわが国では、作業者の器用さと価格面の有利さで交流溶接機が主流であった。

その後1935（昭和10）年頃には可動コイル形の交流溶接機も開発されているが、溶接電流の粗調整はタップ切替で、微調整はハンドル回転の可動コイルで行う複合タイプの交流溶接機であったようである。そして1953（昭和28）年頃から、変圧器の絶縁塗料にシリコン・ワニスが使われるようになり、溶接変圧器の耐熱性が向上した。その結果、それまでは常識であった溶接電源背面の冷却扇は姿を消し、溶接電源の容量も大容量タイプ（定格出力電流500A）が一般化した。その間、遠隔操作で電流調整が可能な操作子（1952年頃）や、感電事故を防止する電撃防止装置（1956年頃）なども溶接機の機能を高める付属装置として開発されている。マグ溶接の普及に従って、1970（昭和45）年頃より交流溶接機は溶接機の生産量トップの座から後退したが、汎用溶接機としての一定の地位は保っている。

一方、初期の直流溶接には、電動発電機（MG：Motor Generator）式の溶接電源が多く用いられた。しかし1955（昭和30）年頃に、小型で安価なセレン整流形溶接電源が市販されるようになると、電動発電機形溶接電源は姿を消すこととなった。次いで1959（昭和34）年頃より、過負荷に弱いセレン整流形溶接電源に替わって、シリコン整流形溶接電源が登場した。その後、1969（昭和44）年にサイリスタ制御の溶接電源が開発され、マグ溶接の普及に伴ってサイリスタ制御電源の適用は拡大したが、1985（昭和60）年頃からはインバータ制御溶接電源に主役の座が移っている。以下に、わが国の主なアーク溶接機の発展経過について述べる。

4.1 萌芽期（1900年代前期）の溶接機

1917（大正6）年頃のわが国の交流アーク溶接は、商用交流電源の出力を抵抗またはリアクタンスを介して調整し、それを溶接電流として供給することによって行われていた。また、一般電力用変圧器と同様に、

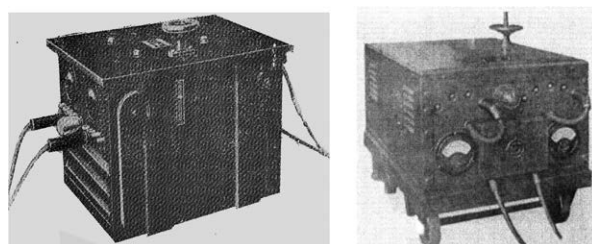
出力電圧を 80V 程度とした変圧器を用い、これに溶接作業者の人数分の直列可変リアクトルを並列に接続して溶接電流を得る方法も採用されていた。しかし後者の多人数形方式は共通導線中の電圧降下が大きく、1つのアークが起動するとすでに起動している他のアークに影響を与えるため、良好な溶接作業は行えなかったようである。

第1次世界大戦が終了した1919（大正8）年頃、ホルスラグ（C. J. Holslag）が可動コア形交流アーク溶接機を開発した。この溶接機は、伊藤忠によってエレクトリックアーク・カッティング・アンド・ウェルディング社からわが国へ輸入され、当時溶接機の研究を進めていた京都大学・岡本越教授がその溶接機の試験・調査を行った。また浜野兵次はこの溶接機を参考にして新たに設計し、1922（大正11）年にわが国初の国産交流アーク溶接電源である“浜野式溶接機”を開発した。浜野に電気溶接の重要性・将来性について教示したのは、久保山少言である。久保山は早くから電気溶接に興味を持ち、容易に入手できなかった文献を収集し、抵抗溶接機などの設計を試みていた。浜野は久保山からから電気溶接機の興味と将来性を説かれるとともに、その設計を譲り受けた。これによって浜野の溶接機製作が始められ、わが国のアーク溶接電源国産化の第1歩となった。なお浜野は、3～4名の設計事務所的な形ではあったが、1922（大正11）年に日本電気溶接機を設立している。しかし日本電気溶接機は比較的短期間で消滅し、その後の浜野および久保山の消息は伝えられていない。

本格的な溶接機メーカーの誕生は、1925（大正14）年に創立された大阪電気が最初である。続いて、1926（大正15）年に日立製作所および東洋電気溶接機が電動発電機（MG）式の直流アーク溶接電源を製作し、1927（昭和2）年には佐藤電気工業所（後の東京電熔機）が交流アーク溶接機の生産を開始するなど、アーク溶接機の国産化が次々に進められた。交流アーク溶接機はこれらの専門メーカーによって製作・市販され、被覆アーク溶接棒の国産化と相まって、わが国の溶接界発展の大きな契機となった。しかし、当時は溶接そのものの啓発がまだ不十分な時代であり、かつアーク溶接は直流の方が優れているということが通説となっていたため、交流アーク溶接機の普及・拡大には相当苦労したようである。

当時の交流アーク溶接電源の一例を示すと図4.3のようである。出力の調整はタップ切替式で、木製の電源ケース（木箱）内には、溶接変圧器、出力調整用タップ、冷却扇が内蔵されていた。また電源正面には、接

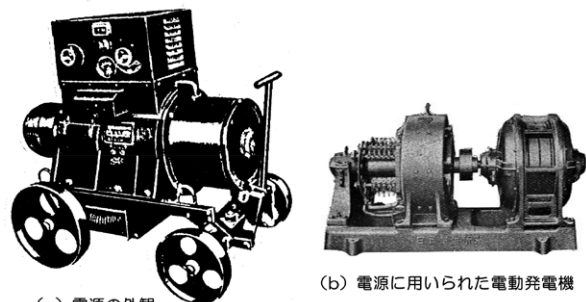
続タップや電圧計・電流計が取り付けられていた。溶接電流の粗調整はタップ切換でコイルの巻数を変化させることによって行い、微調整は可動コアによる漏洩磁束の変化を利用して行う。その後、可動コアのハンドルの位置が電源の上部蓋から前面下部へ、移動用ハンドルが車輪に、大きさ・重量の軽減、冷却扇の省略、および無負荷電圧の低減と効率の上昇など多少の変更が行われた。しかし基本的な構成は、1940年代後半（昭和20年代前半）頃までは各社とも全く同じであった。



(a) 1925年：大阪電気製 (b) 1931年：日立製作所製

図 4.3 初期の国産交流アーク溶接電源¹⁾

当初の直流アーク溶接は、上述した三菱・長崎造船所を初めとして、直流定電圧電源を用いた多人数形溶接電源を用いて行われていた。その後、輸入機である溶接専用の電動発電機駆動の直流定電圧電源へと移っていった。そして1926（大正15）年に、日立製作所が国産初の直流アーク溶接電源として、図4.4に示すような、電動発電機（MG）式の溶接電源を開発した。これは定格出力電流300Aの垂下特性電源で、幅600mm×奥行1,200mm×高さ1,200mmで質量が900kgと極めて大型で重い溶接電源であった。また1929（昭和4）年には、三相誘導電動機、溶接用発電機、励磁機、調整装置およびリアクタで構成されたポータブルでコンパクトな多励磁発電機式溶接電源（定格出力200、300、400A）が開発された。この電源では、励磁機回路の可変抵抗を調整して、励磁機からの電流で励磁された溶接用発電機の無負荷電圧を調整する。大阪電気は1930（昭和5）年に、この種の直



(a) 電源の外観

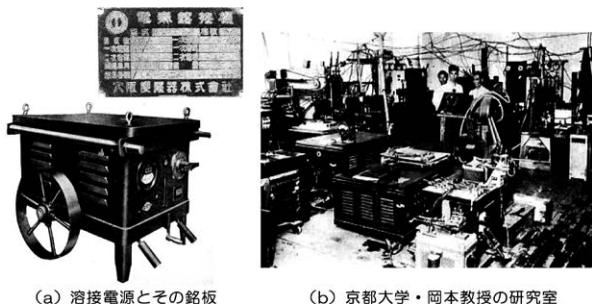
(b) 電源に用いられた電動発電機

図 4.4 国産初の直流アーク溶接電源¹⁾

流アーク溶接電源としては当時の世界最大容量といわれた定格出力 600A の電源を製作した。また同年、芝浦製作所も 7.5kW-300A の電源および 60kW-1000A の電動発電機式定電圧溶接電源を自家用として製作している。その他、ドイツ・ジメンス社と提携した富士電機製造および米・ウェスティングハウス社と提携した三菱電機などが直流アーク溶接機の生産準備を始めるなど、1930（昭和 5）年前後には総合電機メーカーのアーク溶接機製作への進出が目立った¹⁾。

4.2 開拓期（1900 年代中期）の溶接機

1931（昭和 6）年の満州事変勃発を契機として、わが国の機械工業は長く続いた恐慌から脱出し、再び急速な発展を開始した。上海事変（1932（昭和 7）年）、日華事変（1937（昭和 12）年）から第 2 次世界大戦へと進む準備段階的な時代であったが、機械工業のあらゆる分野に需要層を持つアーク溶接機メーカーにとっては、発展と普及のための好条件がそろっていた。アーク溶接の需要増加に伴い、国産アーク溶接機メーカーが次々と誕生した。1933（昭和 8）年の主なアーク溶接機メーカーは、日本電気溶接機、大阪電気、東洋電気溶接機、日立製作所、東京電溶機、芝浦製作所、三菱電機、富士電機製造、帝国酸素株式会社などの 9 社に達し、翌年には大阪変圧器と三葉製作所も加わった。この年大阪電気は、わが国の溶接機生産量の約 80% を占め、当時の溶接機専門工場としては世界的な規模といわれた新工場を建設した。また 1935（昭和 10）年には電元社が、1937（昭和 12）年には日本溶接機材が新たに参入している。1935（昭和 10）年に大阪変圧器が開発した交流アーク溶接電源は図 4.5 のようであり、研究用として京都大学・岡本越教授の実験室に納入された。



(a) 溶接電源とその銘板 (b) 京都大学・岡本教授の研究室
図 4.5 研究用に納入された交流アーク溶接電源（1935 年）²⁾

1931（昭和 6）年に日立製作所は、図 4.6 に示すよ

うな、電流計付き可動コア形強制空冷交流アーク溶接電源の生産を開始した。また 1934（昭和 9）年には、電流計なしの汎用電源の市販を開始した。さらに大阪変圧器と三葉製作所も交流アーク溶接電源の生産を開始した。いずれの溶接電源も漏洩変圧器形のもので、溶接電流の調整は 2~5 段のタップ切換で粗調整を行い、可動コアによって微調整を行うものであった。溶接電源の構造・機能は、全般的に、実用的な汎用機への傾向を示し、計器その他の付属品をなくして、軽量・小型・頑丈でかつ廉価なものとなっていた。なお帝国酸素は、タップ切換の組合せのみで溶接電流を調整する方式の電源を販売している。

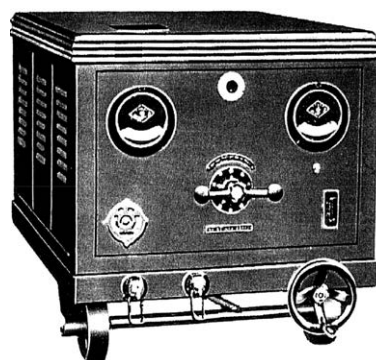


図 4.6 可動コア形強制空冷交流アーク溶接電源（1931 年）¹⁾

この頃の交流アーク溶接電源の無負荷電圧は一般に 130~180V で、薄板用の電源では 230V にも及ぶものがあつた。1932（昭和 7）年頃、呉海軍工廠から人命尊重のために無負荷電圧を下げる電撃防止器開発の指示が出された。それに応じて大阪電気は、図 4.7 に示すような、電撃防止器内蔵の交流アーク溶接電源を開発し、今日の電撃防止装置の始まりとなった。なお 1935（昭和 10）年の旧海軍規格では、感電死原因調査結果に基づいて、交流アーク溶接電源の無負荷電圧を 80V 以下にするという決定がなされている。

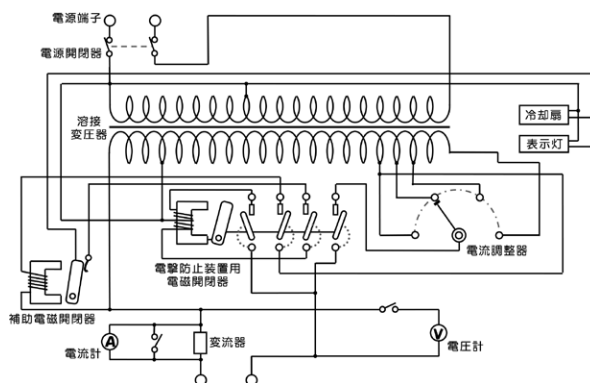


図 4.7 電撃防止装置付き交流アーク溶接電源¹⁾

1933（昭和8）年頃から、大阪電気について電元社、三葉製作所、日立製作所などの各社が高周波付交流アーク溶接電源の製作を開始した。この電源は、直流に比べてアークの安定性に欠ける交流の欠点を補うものとして開発され、板厚1mm以下の軟鋼の小電流交流アーク溶接を可能にした。すなわち高周波電圧を重ねることによって、交流アークの極性反転時の再点弧性を向上させ、小電流溶接においてもアークの安定性が向上した。いずれの溶接電源においても、高周波発生装置は全て溶接電源に内蔵されていた。また三菱電機は、ウェスティングハウス社の電源を参考にした高周波付交流アーク溶接電源を製作した。この電源は抵抗によって垂下特性を与える方式であったが、高周波発生装置の性能が良好で、交流アークの安定性が極めて優れていたようである。

黄銅のスタッド溶接は1933（昭和8）頃に造船分野で採用され始めたが、溶接電源には直流電源が採用されていた。当初は、直流定電圧電源に直流抵抗を付加した輸入装置がそのまま用いられ、断続的な瞬間負荷に耐えられるように、溶接電源には極めて大きい誘導電動機駆動電源が用いられていた。この誘導電動機は、起動してから全速に達するまでに5分以上の時間を必要としたようである。後日この溶接電源は、京都大学・岡本越教授の研究で、通常の垂下特性アーク溶接電源に置き換えられた。そして1935（昭和10）年には、大阪電気によって交流アークスタッド溶接機が製作されている。1937（昭和12）年になると、大阪変圧器が図4.8に示すような全交流アークスタッド溶接機（サイクアーク）を開発した。高周波発生装置を含む制御装置は、溶接電源と別箱となっている。さらに1939（昭和14）年には、三葉製作所も交流アークスタッド溶接機の製作を開始し、交流アークスタッド溶接機は海軍工廠や造船工場向けに多数製作された。

その他、芝浦製作所は1935（昭和10）年に、わが国初の可動コイル形交流アーク溶接電源を開発し、高能率アーク溶接電源の口火を切っているが、その当時は普及しなかった。

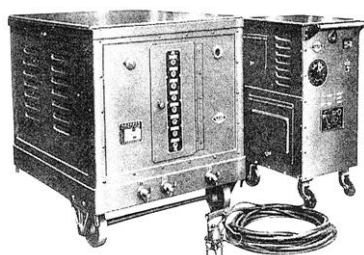


図4.8 全交流アークスタッド溶接装置（サイクアーク）¹⁾

1937（昭和12）年に勃発した日華事変から1941（昭和16）～1945（昭和20）年の第2次世界大戦へと続くこの間のアーク溶接機メーカーは、他の産業と同様に、軍需をいかに消化するかのみへの対応に追われていた。兵器の大量生産が至上命令として各産業に下され、全ての能力をこれに集中したにも拘らず、未消化受注高は生産能力の4～5倍にも達した。このアンバランスを埋めるために、大量生産方式と近代的な合理化が要求された。そのため電気溶接機器の需要は飛躍的に伸び、各メーカーとも増産と拡充が相次いだ。既存メーカーは工場・人員の急激な拡充を図り、アーク溶接機メーカーであった日立製作所、大阪変圧器、電元社、三葉製作所および芝浦製作所などは抵抗溶接機の分野にも積極的な進出を見せた。また1937（昭和12）年には、日本溶接機材が設立された。

軍需生産期9年間の電気溶接機器の需要は、陸軍兵器本部からの工具製造用の溶接機、弾頭用フラッシュ溶接機、自動車エンジン・バルブ用アプセット溶接機など、ほとんどが兵器部品の生産に用いる溶接機器であった。また海軍の艦政本部からは、造船用のアーク溶接機器が求められた。しかしその後期になると、陸海軍ともに航空本部が主力となり、航空機製造用の溶接機器に重点が置かれた。ところがこの頃になると、資材の入手難や人員・設備不足などが徐々に表面化し、十分な成果が得られなくなっていた。

4.3 発展期（1900年代後期）の溶接機

1945（昭和20）年の終戦によって戦時経済は崩壊し、溶接機工業も再出発しなければならなくなった。全産業が戦争遂行のための軍需機械の生産に集中していたため、各産業分野とも遊休溶接機が多く、戦災によって工場設備が破壊された溶接機メーカーも少なくなかった。このような情勢下で、やむを得ず農機具や電熱器具などを製作して時期を待つという溶接機メーカーも出現している。戦前は世界最大の生産規模を持っていた大阪電気は、1943（昭和18）年“会社乗っ取り”の策動に遭遇した。その解決手段として出された軍当局の命令によって、大阪電気は一時預託の形で日本冶金に合併され、日本冶金・住吉工場となったが、1949（昭和24）年には不況のため閉鎖・解散に至った。その一部は、1944（昭和19）年に設立されていた新しい大阪電気を受け継がれ、溶接機の生産が再開された。また下請工場によって命脈が保たれていた他の部門は、東亜精機として後1952（昭和27）年に再出発することとなる。

1949（昭和24）年には、日本電気溶接機、東京電機溶接機および三葉製作所などが、アーク溶接機の本格的な生産を始めた。また電元社も回転形アーク溶接機を製作するなど、各メーカーとも再建への活動が進められた。しかし、戦時中の経済的な混乱と停滞の中で、溶接機器の発展は停滞していた。そのため、欧米各国の戦中・戦後を通じた急速な発展に比べ、相対的に、わが国の溶接機器の技術水準は大きく遅れることとなった。アメリカ溶接協会・副会長のピアース（H. W. Pierce）が、キャンベル（R. S. Campbell）賠償調査団の一員として1947（昭和22）年に来日し、欧米における最新の溶接状況や新知識（船体のぜい性破壊・イナートガスアーク溶接の活用・粉末ガス切断法など）について報告した。その時、わが国の溶接技術は欧米に比べて30年は遅れているとのコメントがなされた。

上述のような混乱した時代であったが、日立製作所は1947（昭和22）年に、終戦間近に試作していた、二分割コイル方式の交流アーク溶接電源を製品化した。1次（入力側）および2次（出力側）コイルをそれぞれ二分割して主鉄心（コア）へ対称にはめ込み、その中央部に回転軸に沿って移動する可動鉄心（コア）を設けた。電流調整は、図4.9に示すように、可動鉄心の移動のみで行うことができる。従来電源に比べ、溶接電流設定時の二重性（粗調整と微調整）を排除し、電力損失を少なくして効率を高め、外形寸法も小形化した。いわば、現在の可動鉄心形交流アーク溶接電源の原型となった電源である。その外観と内部構造を図4.10に示す。

可動コイル形交流アーク溶接電源は、1935（昭和10）年に芝浦製作所によってすでに試作されていたが、1950（昭和25）年に電元社がこれを改良した電源を開発した。電源の構造を外鉄形とし、漂游負荷損を低減させて効率の向上を図るとともに、無負荷電

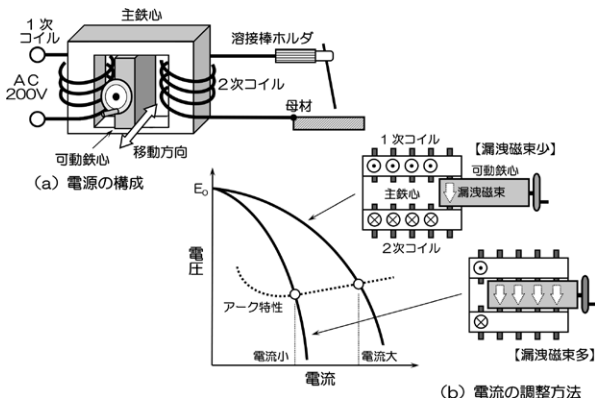


図 4.9 可動鉄心形アーク溶接電源の原理

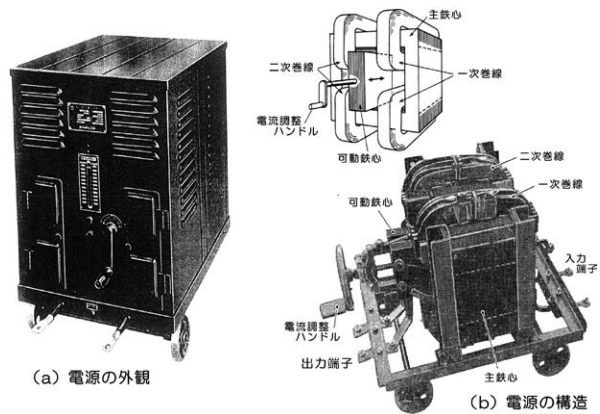


図 4.10 可動鉄心形交流アーク溶接電源^{1) 3)}

圧を低くして入力を低減させ、電源の設置（床）面積も縮小させた。可動コイル形交流アーク溶接電源では、図4.11に示すように、変圧器の二次巻線を固定して一次巻線を移動させ、一次巻線と二次巻線との間の距離を変化させることによって溶接電流を調整する。両者が離れていればリアクタンスが大きくなって出力電流は小さくなり、近ければリアクタンスが小さくなって出力電流は大きくなる。この交流アーク溶接電源は、当時はその理由は不明であったが、優れたアークの安定性を示した。そこで、大阪大学の安藤弘平教授がこの電源についての研究を始め、アークの安定と溶接機の標游負荷損との関連を明らかにした。その研究成果は、その後の溶接機の改善・改良に大きな影響を与えることとなった。なおこのタイプの溶接電源は、他のメーカー数社でも製品化されている。

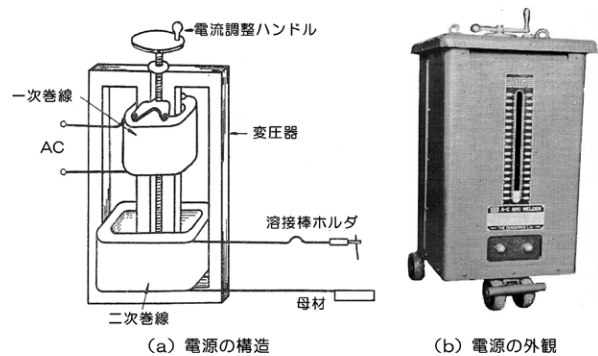


図 4.11 可動コイル形交流アーク溶接電源^{1) 3)}

1953（昭和28）年に東芝は、同社で国産化したシリコン・ワニス可動コイル形交流アーク溶接電源の絶縁に使用し、わが国初のH種絶縁溶接電源を完成した。翌1954（昭和29）年から1955（昭和30）年にかけて、日立製作所および大阪電気も二分割コイル方式でH種絶縁を採用し、空冷（自冷）方式とすることによって冷却扇の使用を廃止した。その一例を図4.12に示す。これによって電源の大幅な小形化とコス

トダウンが実現し、その後この方式と構造は全メーカーに及び、今日の交流アーク溶接電源の基礎となった。



図 4.12 空冷式可動鉄心形交流アーク溶接電源¹⁾

1949 (昭和 24) 年には、日本経済安定策としてのドッジ・ラインが示され、戦後恐慌といわれた一時的な不景気をもたらした。しかし、1950 (昭和 25) 年に勃発した朝鮮動乱とそれに伴う特需の増大によって、溶接機器工業の本格的な進展が始まった。さらに同年には外資導入法が公布施行され、外国技術の導入も開始できるようになった。また、科学技術者の自主的な海外渡航も復活した。1952 (昭和 27) 年には企業合理化促進法が成立施行され、研究開発の援助・重要産業近代化・機械設備などの特別償却・産業関連施設の整備なども行われた。これらのでこ入れ策と海外からの新技術導入によって、各産業分野の生産設備更新と新增設が始まり、溶接機の市場も拡大して、復活と発展のための好条件が整った。そして、交流アーク溶接機の生産は、1950 (昭和 25) 年の年間 894 台に対し、1954 (昭和 29) 年には約 5 倍の 4,625 台に急上昇した。この生産規模は、1954 (昭和 29) のデフレになっても減少することはなかった。

1952 (昭和 27) 年には日本冶金の溶接機部門として東亜精機が設立され、国産化第 1 号のアルゴン・アーク溶接機 (3.4.1 項図 3.51 参照) を発表した。電元社および大阪変圧器も、同年にアルゴン・アーク溶接機を完成させ、その後多数のメーカーが加わってティグ溶接機は急速に普及した。

1954 (昭和 29) 年には三芝電気商会が設立され、図 4.13 に示すような、可動鉄心形交流アーク溶接電源用の遠隔操作装置が製作された。そして 1954 (昭和 29) 年には、無線式遠隔操作装置 (電子管式) を開発した。これらの装置を用いると、溶接棒と母材との間に遠隔操作子を挿入することによって、溶接電流を増減させ

ることが可能となる。造船などの大型構造物では、溶接を行う場所と溶接電源の設置場所とは相当離れている。そのため電源の前面パネルに設けられた電流調整ハンドルを操作して溶接電流の微調整を行うには、2 人作業とするなど、極めて手間のかかる作業となっていた。遠隔操作装置はこのような問題を解決するために開発されたものである。溶接棒と母材との間に遠隔操作子を挿入すると、溶接電源に取り付けられたモーターが可動鉄心の移動軸を駆動して、溶接電流を増減する。

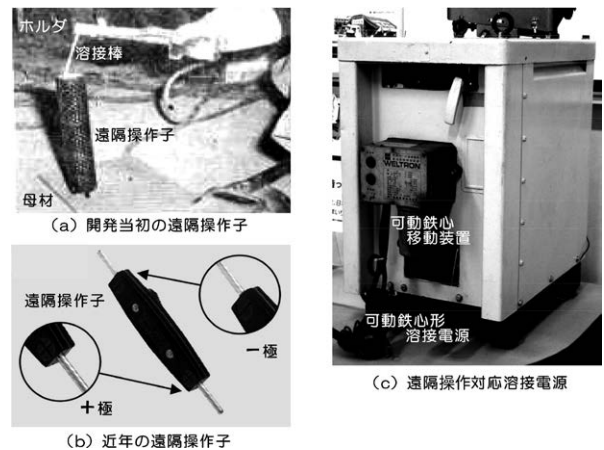


図 4.13 可動鉄心形溶接電源の遠隔操作

戦後になって始められたセレン整流器の国産化が達成されると、そのアーク溶接電源への適用研究が始まった。そして 1951 (昭和 26) 年には電元社が、図 4.14 に示すような、国産初の可動鉄心形整流器式直流アーク溶接電源を完成させ、直流アーク溶接電源の先駆的な役割を果たした。

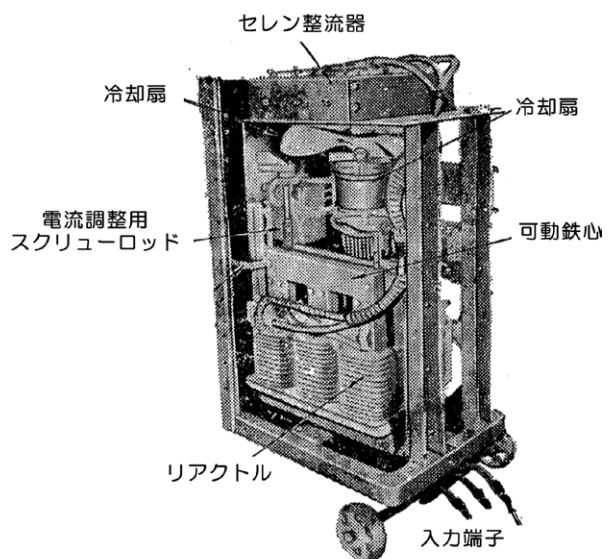


図 4.14 セレン整流式直流アーク溶接電源⁴⁾

1955（昭和30）年に始まった世界的な海運ブームは、わが国機械工業の発展を推進した。輸出船舶を中心に、船舶、鉄鋼、耐久消費財（家庭電気器具・自動車）など、いずれの産業分野においても大規模な近代化投資が行われ、市場は画期的に拡大した。溶接機メーカーの全てが創業以来の活況を呈し、生産・販売実績は未曾有の高記録を樹立した。溶接機の需要はメーカーの生産能力をはるかに超えていたため、各メーカーともに生産体制の充実と増強が図られ、軟弱であった企業体質は大幅に改善され、近代化と量産に即応したユーザの急速な技術革新にも対応できるようになった。各溶接機メーカーの生産・販売方針に特徴が表れたのもこの時期であり、大阪電気は標準アーク溶接機と抵抗溶接機の両者に、電元社および東京電熔機は抵抗溶接機に重点を置いた。そして日本電気溶接機は回転式アーク溶接機に、日立製作所は交流アーク溶接機の量産に、大阪変圧器はアーク溶接機と自動アーク溶接機に重点を置いた生産体制を敷いていた。

このような状況の1957（昭和32）年に松下電器産業が、図4.15に示すような、わが国初のコンデンサ内蔵形交流アーク溶接電源を開発し、溶接機メーカーとしての名乗りを上げた。被覆アーク溶接棒を用いる交流アーク溶接では、図4.16に示すように、極性が半サイクルごとに変化し、電流は極性変化時に一瞬必ず零となる。電流が零になるとアークはいったん消滅し、次の半サイクルで反対極性のアークを再点弧しなければならない。そのため交流アーク溶接電源では、リアクタンスを利用して、アークの再点弧時に供給される電圧が高くなるようにしている。すなわち、溶接電流の位相が無負荷電圧の位相より遅れた関係（低力率）となるように設計されており、低力率がアークを安定に維持するための必須条件である。電力会社は電源設備の減価償却的な意味を持つ基本料金を割高に設



図 4.15 コンデンサ内蔵可動鉄心形交流アーク溶接電源⁶⁾

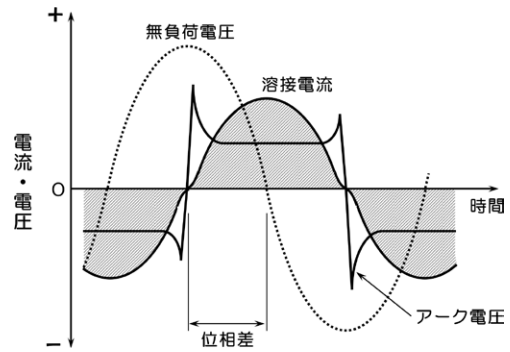


図 4.16 交流アークの電圧・電流波形

定し、これが中小企業の大きな負担となっていた。進相コンデンサを取り付けると力率を改善できるが、コンデンサの技術水準・コンデンサ付加による電源価格の上昇・電力会社との話合いなど、実施を妨げる要因は多かった。松下電器産業は、ユーザの省電力に貢献するために、溶接機メーカーに自社の進相コンデンサの売込みを図ったが、コストアップなどの理由で断られ、自社で溶接電源を製作することを決意したようである。その後、1960（昭和35）年には日立製作所および大阪変圧器もコンデンサ内蔵形交流アーク溶接電源を販売するようになった。

また同年には日本溶接機材が、小型軽量を主目的に、使用率を低くするとともに冷却扇を使用して、現場作業などに適する交流アーク溶接電源を製作した。このタイプの電源は現在でも市販されており、その一例を図4.17に示す。その他、1953（昭和28）年にユニオンメルト溶接機を国産化した大阪変圧器は、1959（昭和34）年に改良を加えた普及標準形のユニオンメ

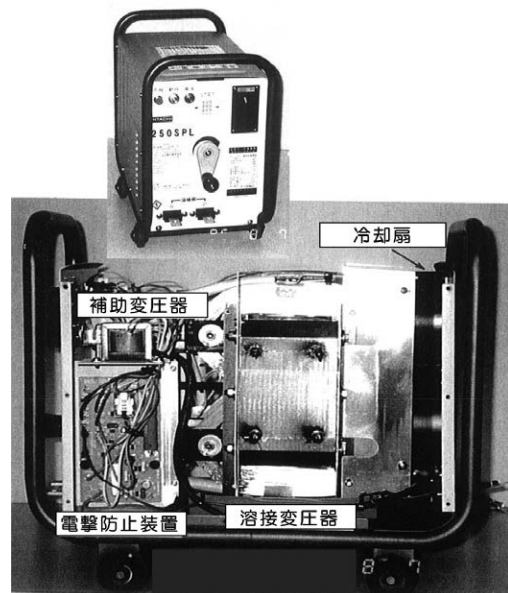


図 4.17 小型交流アーク溶接電源

ルト溶接機を開発した¹⁾。その溶接電源として、図4.18に示すような、大容量（定格出力～2,000A）の可動鉄心形交流アーク溶接電源の販売も開始した。電源内部に可動鉄心移動用のモータを内蔵し、前面パネルの電流増減スイッチを操作して溶接電流の調整を行う。1963（昭和38）年には、図4.19に示すような、電流調整ハンドルを電源の上蓋に設けた交流アーク溶接電源を日立製作所が発売した。しかしこの電源は極めて不評で、最大の交流アーク溶接機メーカーであった同社のシェアを大きく低下させたようである。振動による可動鉄心位置の変化に起因した溶接電流の変動が生じること、当時の造船業界では一般化しつつあった溶接電源の多段積への対応ができないことなどが不評の理由であった。



図 4.18 大容量可動鉄心形交流アーク溶接電源

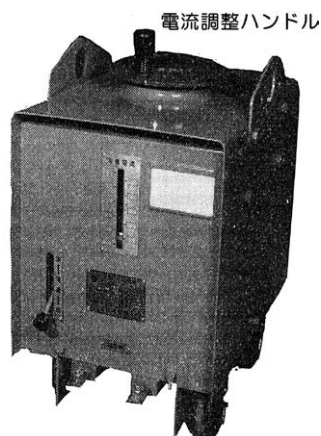


図 4.19 上ハンドル式可動鉄心形

1966（昭和41）年に日立製作所は、図4.20（a）に示すような、可動鉄心形の交流／直流両用電源を世界に先駆けて開発した。ティグ溶接への適用を念頭にした開発で、特に交流ティグ溶接の性能に優れていたようである。当時の溶接電源には、交流用端子と直流用

端子とがそれぞれ個別に設けられていた。しかし近年の電源では、（b）に示すように、出力端子は1つとなり、前面パネルに設けた切替レバーの操作で、電源内部に設けられた電磁接触器が作動して交流出力と直流出力とを切り替えられるようになっている。交流／直流両用電源の原理は図4.21のようであり、図中のA-A'間では同一方向の電流が流れ、B-B'間では電源周波数に応じて電流の通電方向が変化する。したがって、A-A'間で出力を取り出せば直流が得られ、B-B'間で出力を取り出せば交流が得られる。

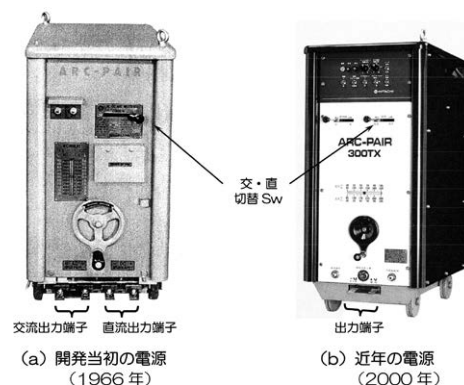


図 4.20 可動鉄心形交流／直流両用アーク溶接電源

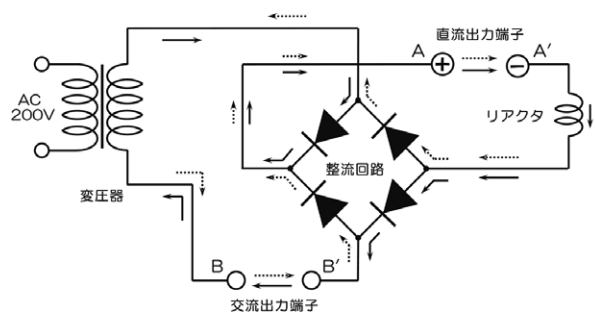


図 4.21 交流／直流両用電源の原理

なお、この後の可動鉄心形交流アーク溶接電源についての大きい進展は得られていない。現在、その使用台数は大きく減少しているが、可搬性・作業性に富む安価な溶接電源として一定の割合（溶接電源全体の数%程度）は保っている。

上述4.2節で、1932（昭和7）年頃に大阪電気が開発した電源内蔵の交流アーク溶接電源の電撃防止器について述べたが、この電撃防止機能を別箱にした装置が1955（昭和30）年頃に開発された。吉村電機や宮本電機などが最初に開発し、その後1957（昭和32）年には三芝溶接機器、松下電器産業および大阪電気が製作を開始した。さらに1959（昭和34）年には、大阪変圧器と日立製作所も製作を始めた¹⁾。交流アーク溶接電源には起動スイッチがないため、アーク休止中

も 80V 程度の無負荷電圧が常時出力されており、その電撃は死亡に至る危険性を持っている。電撃防止装置はその危険性を排除する装置で、アークが発生していない（無負荷電圧が出力されている）時、溶接棒ホルダと母材との間の電圧を安全電圧（現在では 25V）以下に低減する装置である。その構成と動作は図 4.22 のようであり、アークが休止している場合の溶接電源からの出力電圧を、補助変圧器から出力される低い安全電圧へ切り替える。溶接棒を母材へ接触（短絡）させると、電磁接触器が作動して電撃防止装置への接続を遮断し、瞬時（0.06 秒以内）に溶接電源の無負荷電圧へ切り替わる。溶接が終了してアークが消滅すると再び無負荷電圧が出力されることになるが、ただちに安全電圧への切り替えは行わず、約 1 秒（ 1 ± 0.3 秒）の運動時間が経過した後に安全電圧へ切り替える。このような運動時間を溶接終了時に設けているのは、タック溶接（仮付溶接）などの短い間隔での連続溶接における作業性を考慮してのことである。別箱式の電撃防止装置とその溶接電源への取り付け状況を図 4.23 に示す。なお電撃防止装置は、導電体に囲まれた狭隘な場所あるいは 2m 以上の高所での使用を、昭和 47 年に施行された労働安全衛生規則で義務付けられている。

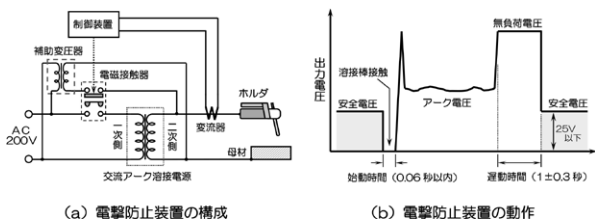
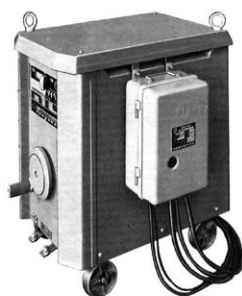


図 4.22 電撃防止装置



(a) 別箱式電撃防止装置



(b) 溶接電源への取付状況

図 4.23 別箱式電撃防止装置¹⁾

この時期（1900 年代後期）の直流アーク溶接電源の主流は、図 4.24 に示すようなセレン整流器式となり、回転式の電源は日本電気溶接機材などにおいて製作される程度となった。大阪変圧器は 1955（昭和 30）年に、大阪電気は翌 1956（昭和 31）年に、可飽和リア

クトルによる電流調整方式を採用した直流アーク溶接電源を開発した。可飽和リアクトルは三脚形鉄心を持つリアクトルで、図 4.25 に示すように、その鉄心には出力電流が流れるリアクトルと可変抵抗に接続された制御巻線が巻かれている。この制御巻線に制御電流と呼ばれる直流電流を通電すると、交流リアクトルとしての実効リアクタンスが変化して出力電流を調整することができる。1958（昭和 33）年には松下電器産業、1960（昭和 35）年には日立製作所も同様の直流アーク溶接機の生産を開始している。しかし直流アーク溶接機の使用目的は、特殊合金の被覆アーク溶接、ティグ溶接、ミグ溶接あるいはサブマージアーク溶接など多岐にわたる。また作業性に関しても、遠隔操作装置（リモコン）、クレータ処理、スタート制御、電撃防止装置、各種保護装置、電流・電圧計など様々な機能・アクセサリがある。そのため、直流アーク溶接機の仕様や機能は、各メーカーがそれぞれ独自の仕様を採用した溶接機を販売することとなった。

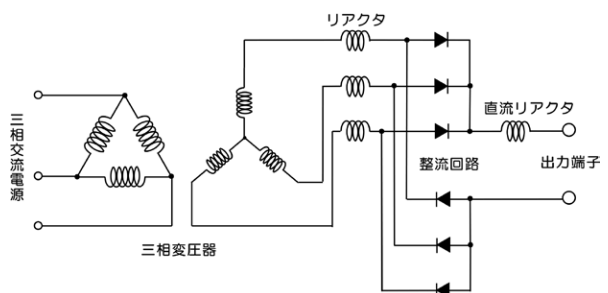


図 4.24 整流器式直流アーク溶接電源の回路構成例²⁾

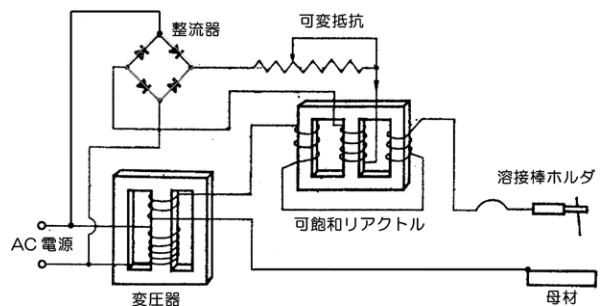


図 4.25 可飽和リアクトルによる電流調整²⁾

1959（昭和 34）年に大阪変圧器は、電源の外部特性の調整が可能な自己飽和リアクトルを用いた直流アーク溶接電源を開発した。自己飽和リアクトルは可飽和リアクトルの一種で、図 4.26 に示すように、三脚形鉄心の中央に可飽和リアクトルと同様の制御巻線が巻かれている。電流が通電されると、鉄心の磁束は飽和する方向に変化し、この磁束変化を利用して電源の外部特性を定電圧特性としたり、定電流特性としたりすることができる。その溶接電源の外観を図 4.27

に示す。松下電器産業は、同年以降に、ガウジング兼用アーク溶接機・電撃防止装置・遠隔操作機能付交流アーク溶接機など、種々な機能を備えたアーク溶接機を矢継ぎ早に市販している。

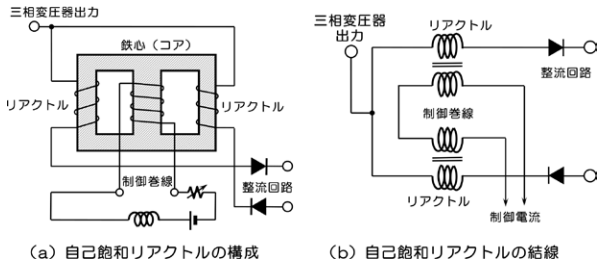


図 4.26 自己飽和リアクトル³⁾

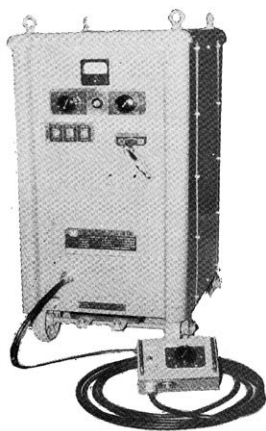


図 4.27 自己飽和形直流アーク溶接電源¹⁾

接機がある。この溶接機では、ガソリンまたはディーゼルエンジンに直結した直流発電機を駆動して溶接電源に用い、日立製作所、電元社、東亜精機および日本電気溶接機材などが製作していた。しかし1955（昭和30）年以降は、日本電気溶接機材以外のほとんどのメーカーは生産を中止している。

アークスタッド溶接機は、交流式を大阪変圧器が、直流式を電元社が戦後に開発していた。しかしその後、前述の3.8.4項で述べたように、大阪変圧器が英国のクロムプトン・パーキンソン社と提携し、1956（昭和31）年に、図4.28に示すようなネルソン・スタッド溶接機を国産化した。また1959（昭和34）年には、松下電器産業もフィリップス社と提携して、アークスタッド溶接機の製作を開始している¹⁾。

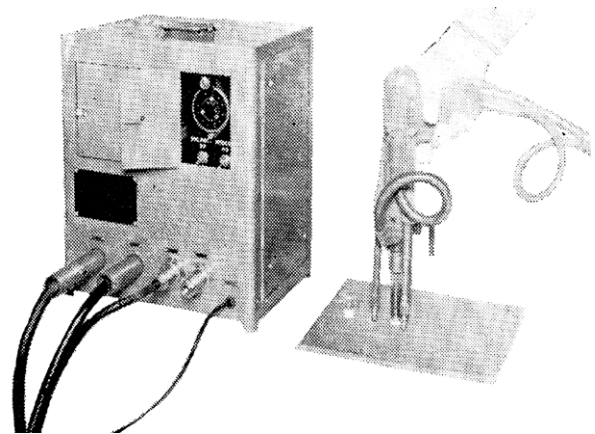


図 4.28 ネルソン・スタッド溶接機¹⁾

また1959（昭和34）年には、過負荷に弱いセレン整流器に替わるシリコン整流器が国産化されたのを受けて、大阪電気はシリコン整流器式直流アーク溶接電源を開発した。そして日立製作所や三芝溶接機器なども同様の溶接電源の製作を始めた。

戦後いち早く生産された溶接機の1つに、土木建築現場での作業用として使用される回転式直流アーク溶

4.4 近年（1969年以降）の溶接電源

近年のアーク溶接電源の発展経過を整理すると図4.29のようである。サイリスタ制御電源は1969（昭和44）年に出現し、一元制御、クレータ制御あるい

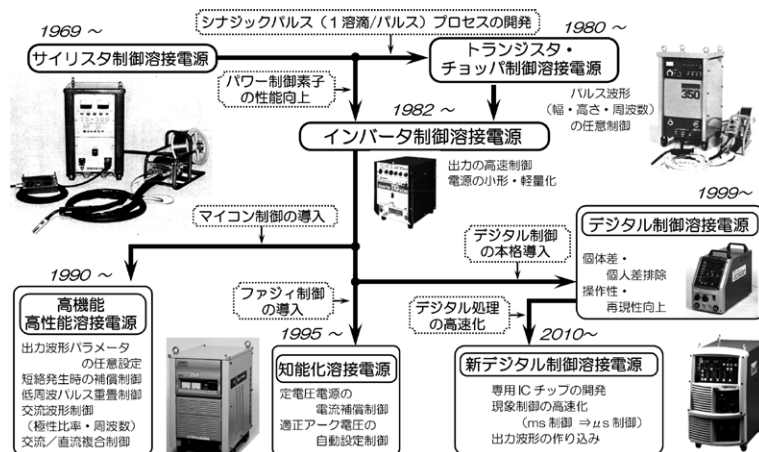


図 4.29 アーク溶接電源の開発経過

はパルス制御などが可能となったが、その制御は比較的単純なものに限られていた。現在のパルスマグ・ミグ溶接の原形となるシナージックパルス（1パルス1溶滴移行）プロセスを搭載したトランジスタ制御電源は1980（昭和55）年に開発され、世界初の汎用・低価格トランジスタ制御溶接電源として市販された。しかし1982（昭和57）年には、出力の高速制御性を活用したインバータ制御溶接電源の開発・実用化が本格化し、トランジスタ制御溶接電源は短期間で姿を消すこととなった。

その後のアーク溶接電源の進歩は、全てインバータ制御に基づくものであり、1990（平成2）年にはマイコン制御と組み合わせた高性能・高性能溶接電源が、1995（平成7）年にはファジィ制御を搭載した知能化溶接電源も出現した。そして20世紀末には、デジタル制御技術の進歩を背景に、溶接電源のデジタル制御化が本格化した。制御回路の大部分をアナログ制御からデジタル制御へと変更することによって、溶接条件の再現性向上を目指した開発が進められた。近年では、高速演算素子を用いた出力制御の高速化が積極的に推進され、溶滴移行現象やアーク現象を高速で制御することができる高性能な溶接電源が市販されるようになってきている。

4.4.1 サイリスタ制御電源

(1) マグ溶接電源

サイリスタ（制御機能付きシリコン整流器）の点弧位相を制御して出力を変化させるサイリスタ制御のアーク溶接電源は、世界に先駆けて、1969（昭和44）年に日立製作所がマグ溶接電源として開発した。図4.30（a）はその外観を示したものであるが、（b）に示す近年のマグ溶接機に比べても、大きい差異はほとんど認められない。

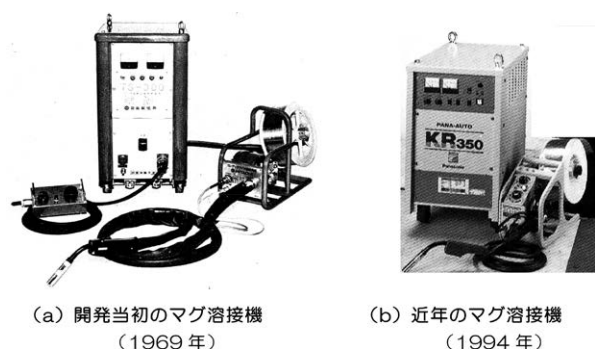


図 4.30 サイリスタ制御マグ溶接機⁶⁾

サイリスタ制御マグ溶接電源の回路構成としては、図4.31に示すような、相間トランス付の二重星形結

線が多用されている。星形結線された2つの三相変圧器の出力側コイルを相間トランスで結び、6個のサイリスタを用いて三相全波整流する。出力の大/小はサイリスタ点弧時間の長/短で決まり、サイリスタ回路で制御された出力はリアクタで平滑して溶接に用いる。なお二重星形結線の電源では、図4.32（a）に示すように、リアクタに制御巻線（二次巻線）を付加して、その動特性を改善することによってアークの起動性やスパッタ発生量の低減を図った電源も開発されている。（b）は他の回路構成を示す一例で、三相変圧器の出力側コイルを単体の星形結線として相間トランスを省略した三相全波整流の電源である。この場合、サイリスタ回路の出力リップル（脈動）はかなり大きくなるため、大容量（10,000 μ F程度）の平滑コンデンサを付加してリップルの低減を図っている。

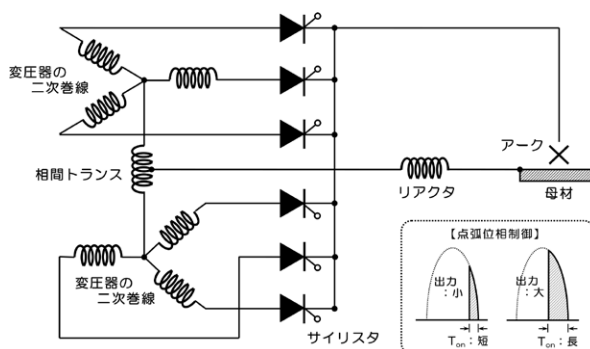


図 4.31 二重星形結線サイリスタ制御アーク溶接電源

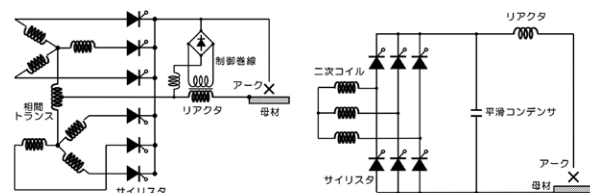


図 4.32 高性能サイリスタ制御電源

また、図4.33に示すように、サイリスタ・ダイオード混合方式の電源も開発されている。（a）はサイリスタ・スタックを用い、相間トランスを省略して回路を簡素化するとともに、電源の小型化・軽量化を図った電源である。（b）も相間トランスを省略した電源であるが、ダイオードの整流回路で得られる所定の出力にサイリスタ回路で得られる調整可能な出力を重ねして電源の出力を制御する。この方式では電圧リップルが大きくなるため、ダイオード回路とサイリスタ回路をそれぞれに設けリアクタの結合を利用してリップルを抑制している。上述した主な電源の溶接電流および

アーク電圧の波形は図 4.34 のようである。(a) は中間トランス付の二重星形結線電源 (図 4.31 参照) の場合であり、これを基準にすると、(b) の平滑回路付星形結線電源 (図 4.32 (b) 参照) での電流・電圧リップルは極めて少なく、(c) のサイリスタ・ダイオード混合方式電源でのリップルはやや大きくなっている。

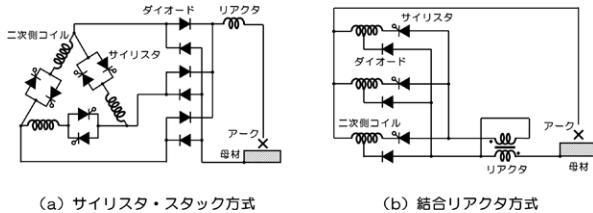


図 4.33 サイリスタ・ダイオード混合方式⁷⁾

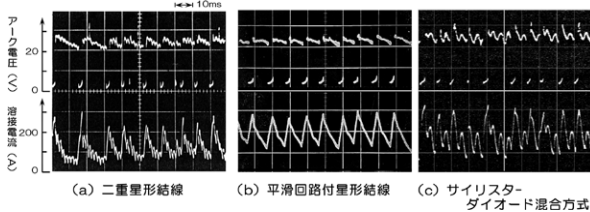


図 4.34 サイリスタ制御電源の溶接電流・電圧波形

炭酸ガス (CO₂) をシールドガスに用いるマグ溶接法は、1958 (昭和 33) 年に日本へ導入され、その優れた溶接性と高い経済性ならびに溶接機の性能向上などによって 1965 (昭和 40) 年以後急速に普及した。しかし溶接機の設置台数で見ると、1978 (昭和 53) 年時点での普及率は十数%程度にしか達しておらず、被覆アーク溶接用の交流アーク溶接機が大部分を占めていた。交流アーク溶接機は単相入力で使用するようになっており、工場全体としては三相で受電をしていますが、交流アーク溶接機の設置場所には単相で配線されていた。このような分野でのマグ溶接の適用拡大を目的として、単相入力のサイリスタ制御電源が開発されている。単相入力の整流波形は、図 4.35 (a) に示すように、三相入力の整流波形 (b) に比べ、電圧リップルが大きく瞬間的には電圧が零となる期間も生じる。そのため、単相入力のサイリスタ制御電源では、(c) に示すように、整流回路と並列に、コンデンサと飽和性リアクトルとで構成した平滑回路を付加して、出力 (電圧) の安定化が図られている。

1981 (昭和 56) 年には、世界に先駆け、サイリスタ制御マグ溶接機の全ての制御をマイクロコンピュータによって集中制御する溶接電源が開発された。熟練オペレータ不足、溶接品質の管理あるいは自動溶接化への対応などがその主な目的であった。その外観と

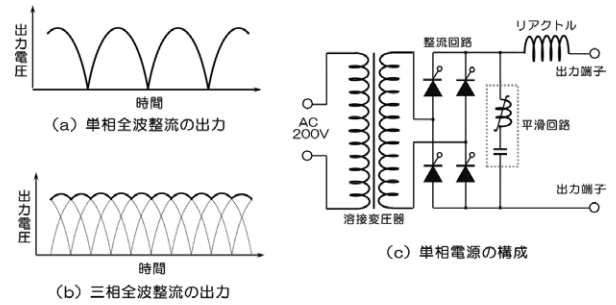


図 4.35 単相サイリスタ制御溶接電源⁸⁾

制御ブロック構成は図 4.36 のようであり、当時のマイクロコンピュータの性能としては限界に近いサイリスタの点弧位相制御を実現した。その他、適正溶接条件の記憶・再生機能、アーク休止中に使用可能な溶接条件の設定・確認機能、溶接電流に応じて適正電圧を自動設定する一元制御機能の精度向上、溶接条件や機器の異常モニタ表示機能など、従来電源になかった新しい機能も追加された。

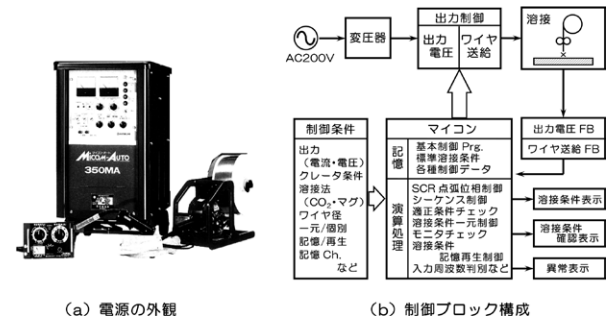


図 4.36 マイコン搭載サイリスタ制御電源⁹⁾

(2) ティグ溶接電源

ティグ溶接に用いられるサイリスタ制御電源には、直流溶接電源と交流 / 直流両用溶接電源とがある。直流溶接電源の構成は図 4.37 のようであり、その構成は前述した整流式直流溶接電源 (前掲図 4.27 参照) とほぼ同様である。ただし、整流器をサイリスタと置き換えることによって、交流回路のリアクトルは省かれている。

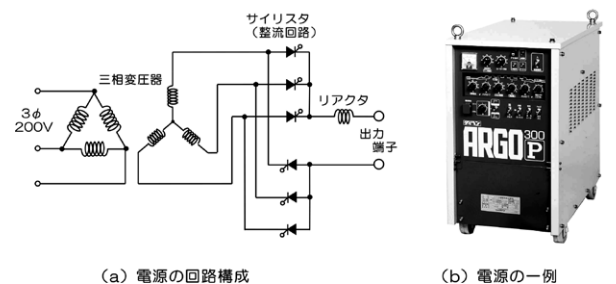


図 4.37 サイリスタ制御直流ティグ溶接電源

交流 / 直流両用溶接電源の構成は図 4.38 のようであり、直流溶接電源の場合と同様に、可動鉄心形交流 / 直流両用溶接電源（前掲図 4.21 参照）の整流器をサイリスタと置き換えた構成となっている。

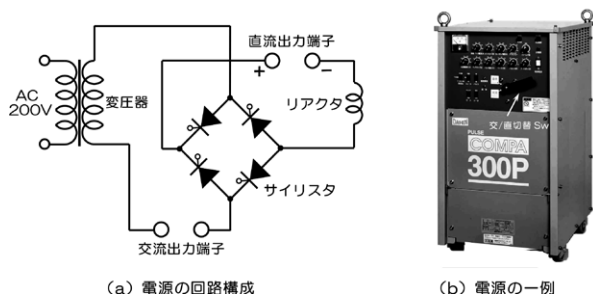


図 4.38 サイリスタ制御交流 / 直流両用ティグ溶接電源

(3) パルスマグ・ミグ溶接電源

サイリスタ制御パルス電源は図 4.39 (a) に示すように、単相のパルス電源と三相のベース電源を組み合わせた構成となっており、パルス電流とベース電流はそれぞれ独立した電源回路から出力される電圧によって制御される。(b) はその溶接電流波形を模式的に示したものであり、三相全波整流によって発生する電流の脈動がそのままベース期間の電流リップルとなる。パルス電流は単相パルス変圧器出力の点弧位相制御で決まり、そのピーク値は正弦波上を移動する。そのため、パルス電流のピーク値が低い場合は幅が狭く、ピーク値が高くなるとその幅も広がる。すなわちパルス電流のピーク値とパルス幅は連動して変化し、それぞれを独立に設定することはできない。なおパルス電源回路に半波整流回路を用いると商用周波数と同一のパルス周波数 (50/60Hz) が、全波整流回路を用いると商用周波数の 2 倍のパルス周波数 (100/120Hz) が得られる。

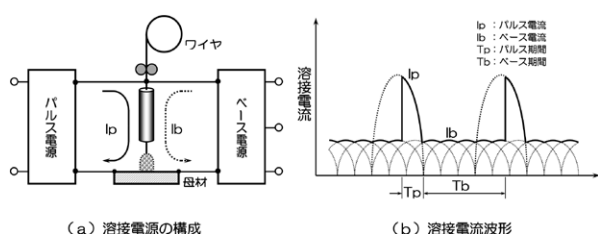


図 4.39 サイリスタ制御パルスマグ・ミグ溶接電源

パルスマグ溶接では、パルス電流で溶滴の形成およびワイヤ端からの離脱を行うため、臨界電流以上のパルス電流を通電することが必要である。しかし、サイリスタ制御電源のパルス電流の幅と高さは連動して変化し、それぞれを独立に設定することはできない。す

なわち、図 4.40 (a) に示すように、パルス電流波形はパルス変圧器の出力特性によって支配される。大電流を通電するためには通電時間（パルス期間）を長くしなければならず、溶滴離脱に必要なパルス電流を得ようとするともパルス期間が長くなり、パルスエネルギーが過剰となって安定した溶滴移行が得られない。高いピーク値や急峻な電流増加が要求される場合には、高出力のパルス変圧器を用い、正弦波の急峻な傾斜部のみを用いてパルス電流を制御するなどの工夫が必要となる。一方、溶接電流が臨界電流以上になると、パルス電流を加えなくても溶滴のスプレー移行を実現できる。しかし、パルス電流を付加することによって、アーク長を短くしても短絡を生じないアーク状態が得られる（前述 3.7.5 項 (1) 参照）。開先幅の狭い狭開先溶接では、アーク長が長くなると開先底部より開先壁にアークが発生しやすくなるため、アーク長を極力短くすることが重要である。ベース電流を臨界電流近傍に設定した大電流パルス溶接では、アーク長を短くするために必要なパルス電流はベース電流の 1/5 程度であり、小電流パルス溶接のように落差の大きいパルス電流を必要としない。すなわちアーク状態はベース電流によって支配されるため、ベース電源の特性によってアークの安定性や溶接結果が大きく左右される。そのため、電源のインピーダンスや電流リップルが大きいと、アーク長を短く保つことができず、融合不良などの溶接欠陥を生じやすいといった問題が生じる。

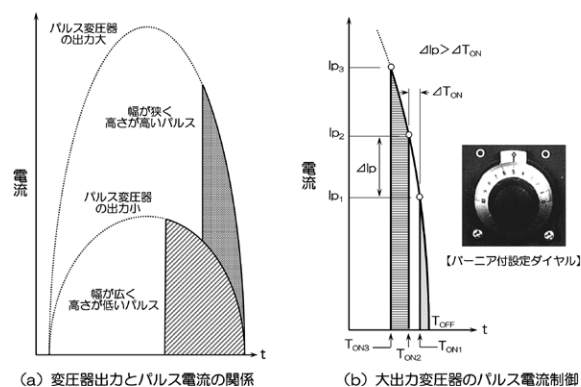


図 4.40 パルス電流の特性

これらの問題点を解決した高機能なサイリスタ制御パルスマグ溶接電源が 1979（昭和 54）年に開発されている。この電源では、パルス電源の変圧器に最大出力 2,000A 程度のパルス変圧器を採用し、幅が狭く高さが高いパルス波形が得られるようにしている。しかし、このようなパルス変圧器で数百 A のパルス電流を正確に出力するには、図 4.40 (b) に示すように、サ

イリスタの点弧位相を正弦波の急峻な傾斜部で微妙に設定しなければならない。そのため、パルス電圧の設定ダイヤルには100等分できるバーニア機構が用いられている。電源の構成は図4.41のようであり、ベース電源の変圧器をデルタ結線として相間トランスをなくし、電源のインピーダンス低減を図っている。またベース電源の出力端に大容量（約1万 μF ）のコンデンサを付加して、電流リップルの大幅低減を実現している。なお小電流の安定化を目的として、ベース電流は抵抗を介して通電するようにしているが、十分なベース電流を確保する必要がある大電流パルス溶接時には、ベース電源回路の抵抗を短絡（ Sw_2 をOFF）できるようにしている。

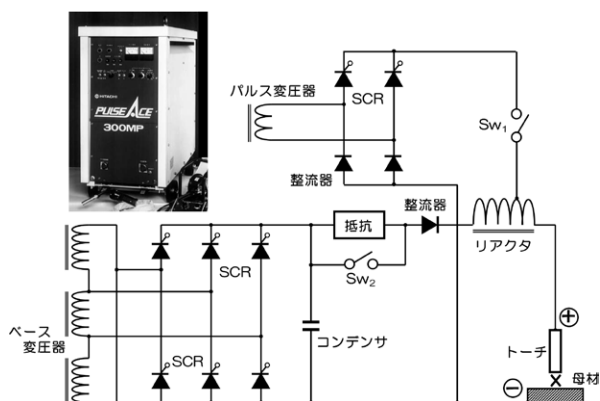


図 4.41 高機能パルスマグ溶接電源

パルス電源回路のスイッチ（ Sw_1 ）と抵抗の短絡スイッチ（ Sw_2 ）の両者をOFFすると、低インピーダンス・低電流リップルの定電圧特性電源として使用できる。したがって、このパルス電源では、「パルスなし溶接」、「小電流パルスマグ溶接」および「大電流パルスマグ溶接」の3溶接モードの選択が可能となる。それぞれの電流・電圧波形およびアーク現象の代表例を表4.1に示す。

表 4.1 溶接電流・アーク電圧波形とそのアーク現象

電流・電圧波形	アーク現象
	(a) パルスなし（短絡移行）溶接・120A/18V
	(b) 小電流パルス溶接・130A/23V
	(c) 大電流パルス溶接・300A/30V

(10ms/div) $\phi 1.2\text{mm}$ ソリッドワイヤ、シールドガス：Ar+20%CO₂

また1970年代後半には、図4.42に示すような、パルスミグ・ブレイズ溶接機も開発されている。この溶接機は、シリコン・ブロンズワイヤ（数%のSiを含む銅ワイヤ）を用いて、自動車ボデーなどの薄鋼板をアークろう付けする溶接機である。それまでは自動車ボデーに多用されているせぎり継手の溝をはんだで充填していたが、鉛害が問題となってはんだを使用することができなくなった。そのため、はんだに替わるせぎり継手の溝充填方法として、シリコン・ブロンズワイヤを用いたパルスミグ・ブレイズ溶接が採用された。溶接電源は単相入力で、抵抗への通電によって安定化された小電流をベース電流とし、それにパルス電流を重畳する。ミグ・ブレイズ溶接の電流波形と溶接結果の一例を図4.43に示す。

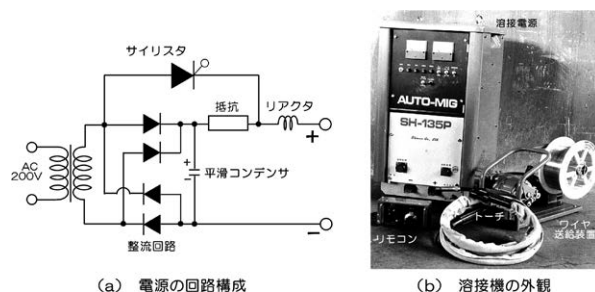


図 4.42 パルスミグ・ブレイズ溶接機

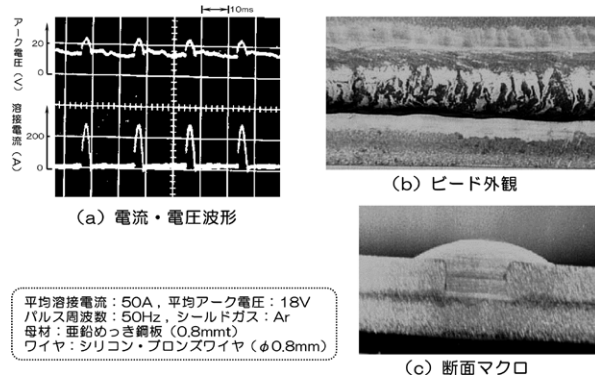


図 4.43 ミグ・ブレイズ溶接

4.4.2 トランジスタ制御電源

トランジスタ制御電源では、直流電源部と負荷との間にパワートランジスタを接続し、このトランジスタで溶接電流やアーク電圧を制御する。制御方式には、図4.44に示すように、スイッチング制御とアナログ制御とがある。スイッチング制御では、トランジスタをスイッチとして用い、その開閉時間の比率を変化させることによって出力を制御する。そのためスイッチング制御では、出力の複雑な波形制御はできない。一方、アナログ制御では、制御信号に比例する領域でト

ランジスタの出力を制御することによって、トランジスタに可変抵抗と同様の役割を持たせる。すなわちアナログ制御でのトランジスタの出力は、いずれの瞬間においても制御信号に比例した出力となり、矩形波、台形波あるいは三角波などの形状も任意に実現することができる。

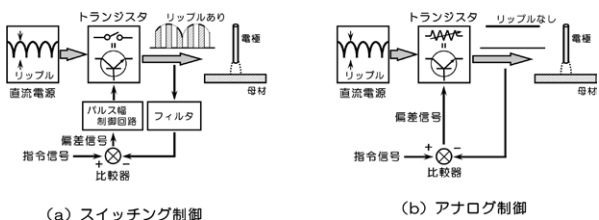


図 4.44 制御方式の比較¹⁰⁾

アナログ・トランジスタ制御電源の回路構成は図 4.45 のようであり、電流および電圧に対応する 2 つのフィードバック制御系を持つ。そのため出力電流と出力電圧を任意に設定でき、出力波形、リアクトルの特性あるいは外部特性などを自由に作り出すことができる。また電流波形は、全くリップルのないものが得られる。この電源は英国の TWI で試作され、1976 (昭和 51) に技術導入契約を締結した大阪変圧器が、その翌年に図 4.46 のような電源を開発して国内での販売を開始した。出力の制御装置はユニット化されており、各ユニット間の信号の受・送信は前面パネルのプラグイン式コンセント間の接続によって行う。出力の外部特性を定電流から定電圧まで任意に設定できる万能直流電源で、1~800A までの任意な急峻パルスをも 1/1,000 秒 (1ms) で出力することが可能であった。そのため、アーク現象の解明、溶接品質の改善あるいは溶接プロセスの研究・開発などに取り組んでいた大学、研究所、大手企業がこぞってこの電源を購入した。その後この溶接電源を用いた研究・開発が積極的に推進され、今日のアーク溶接プロセスの進展に極めて大きく貢献した。

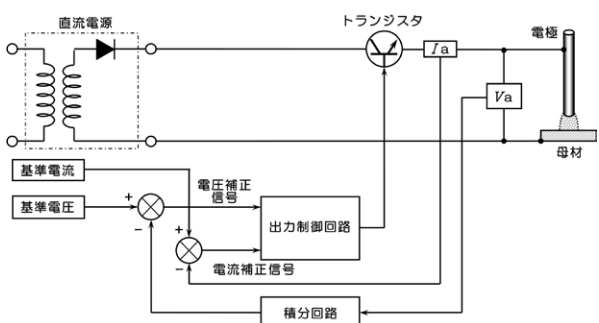


図 4.45 アナログ・トランジスタ制御電源の回路構成¹⁰⁾

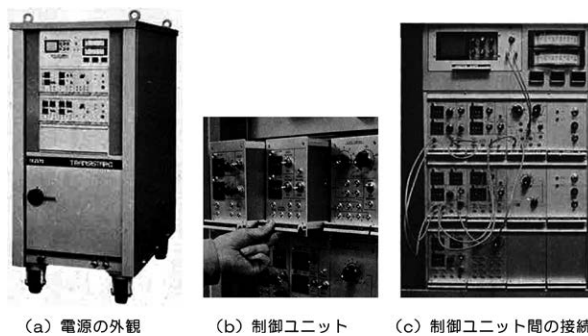


図 4.46 アナログ・トランジスタ制御電源¹⁰⁾

1980 (昭和 55) 年に三菱電機が、汎用溶接電源としては世界初となる、図 4.47 に示すようなトランジスタ制御溶接電源を開発した。この電源は出力のチョッパ (スイッチング) 制御によってパルス電流を制御するもので、ワイヤの送給速度に同期してパルス周波数を変化させるシナージックパルス溶接プロセス (前述 3.7.2 項参照) を実現するパルスマグ溶接電源としても世界に先駆けたものであった。また少し遅れて、大阪変圧器や松下産機も同様のパルスマグ溶接電源を開発している。



図 4.47 トランジスタ・チョッパ制御電源¹¹⁾

電源の構成は図 4.48 のようであり、サイリスタ制御のパルス電源に比べると構成は簡素化され、パルス出力、ベース出力ともに同一の溶接変圧器を使用する。しかし、出力制御回路はパルス出力、ベース出力それぞれに対応したものが必要である。パルス出力を制御するトランジスタ (Tr_2) で制御されたパルス出力は直流リアクタ DCL_2 を介して、ベース出力を制御するトランジスタ (Tr_1) で制御されたベース出力は直流リアクタ DCL_1 および DCL_2 を介して溶接アークへ供給される。なおダイオード D_1 ならびに D_2 は、それぞれ直流リアクタ DCL_1 、および DCL_2 に対応するフライホイール・ダイオードである。トランジスタ

は、電流値が目標値（パルス電流またはベース電流）より所定量が小さく（ $-\alpha$ ）になると導通を開始し、目標値より所定量が大きく（ $+\alpha$ ）になると導通を停止する。 α は制御回路のヒステリシス（応答遅れ）である。

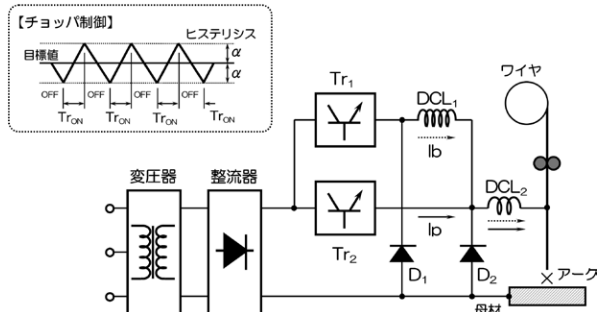


図 4.48 トランジスタ・チョッパ制御パルスマグ溶接電源

増減によって行う。なお、サイリスタ制御やトランジスタ・チョッパ制御などでは変圧器の出力側で電源の出力を制御するが、インバータ制御では変圧器の入力側で電源の出力を制御する。

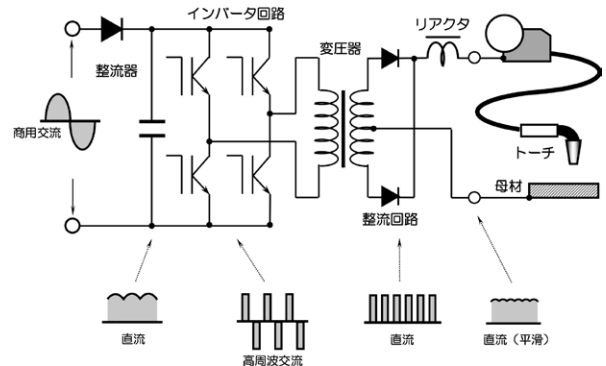


図 4.49 インバータ制御溶接電源の構成

4.4.3 インバータ制御電源

電力変換回路へのインバータ制御の適用は1950年代に考案され、当初は、1950年代後半に出現したサイリスタを制御素子としたサイリスタ・インバータが主流であった。その後、制御素子はパワー transistor や GTO (Gate Turn-off Thyristor) に移行し、1970年代後半から1980年代前半にかけてインバータ制御技術は急速に進展した。この時期の欧州では、すでにインバータ制御アーク溶接電源が開発されているが、制御素子はサイリスタで制御周波数もそれほど高いものではなかった。わが国で最初にインバータ制御アーク溶接電源が開発されたのは1982(昭和57)年で、松下産機(元松下電器産業/現パナソニック溶接システム)が直流ティグ溶接電源として発表した。また1983(昭和58)年には日立精工(日立製作所から分離)が、制御周波数16kHzのインバータ制御電源を開発し、溶接電源の大幅な小型・軽量化を実現した。同年には、松下産機がインバータ制御のマグ溶接電源の販売を始めている。

インバータ制御電源の構成は図4.49のようである。商用交流を整流して得た直流を、変圧器の入力側(1次側)に設けたインバータ回路に入力し、パワー transistor で構成したインバータ回路でその直流を高周波交流に変換する。そして、得られた高周波交流を変圧器で所定の電圧に降圧した後、整流回路で再び直流に変換して溶接電源の出力とする。この時得られる直流は断続的なくし歯状のものであるため、リアクタで変動の少ない連続した直流に平滑して溶接に用いる。出力の制御はインバータ回路を構成する transistor の導通時間の増減、またはインバータの制御周波数の

インバータ回路に用いられるパワースwitching素子には表4.2に示すようなものがあり、出力制御周波数など、インバータ回路の制御特性はこれらの素子によって大きく左右される。わが国では、当初バイポーラ transistor が多く用いられた。しかしその後は、比較的高耐圧で駆動特性に優れた IGBT (絶縁ゲート型バイポーラ transistor) が主流となり、近年では高速制御性が良好な MOSFET (金属酸化半導体構造・電界効果 transistor) が多用されている。インバータ制御による出力の制御方法には、表4.3に示すように、周波数(FM)制御とパルス幅(PWM)制

表 4.2 パワー・スイッチング素子の特徴比較

素子名称	バイポーラ transistor	IGBT	MOSFET
表示記号			
電流量	◎ ~1,000A	○ ~500A	△ ~100A
耐電圧	○ ~1,000V	◎ ~1,500V	△ ~500V
制御周波数	△ ~7.5kHz	○ ~20kHz	◎ ~100kHz
駆動特性	△ 電流駆動 (ドライブ電流大)	○ 電圧駆動 (ドライブ電流小)	◎ 電圧駆動 (ドライブ電流小)

表 4.3 インバータの出力制御方法

出力制御方法	周波数変調	パルス幅変調
	FM (Frequency Modulation)	PWM (Pulse Width Modulation)
インバータ出力		
外部出力		
インバータ周波数	変動	一定
出力制御因子	周波数	パルス幅
変圧器の種類	漏洩変圧器	定電圧変圧器

御との2つがある。開発当初の電源では周波数制御が用いられていたが、電流値によってアーク音が変化するなどの問題があり、近年の電源には全てパルス幅制御が採用されている。

インバータ制御電源は、サイリスタ制御電源に比べ、かなり複雑な回路構成となるが、出力を高速で制御できるという長所を持つ。例えばインバータ回路で40kHzの高周波交流を造ると、その出力制御回数は4万回/秒となり、サイリスタ制御の約100倍以上の速度で出力を制御できる。図4.50の溶接電流波形は、ティグアーク起動時の電流挙動を比較したものである。所定の電流値(100A)へ到達するまでに、単相サイリスタ制御で90ms以上、三相サイリスタ制御で約35msの時間が必要である。一方、インバータ制御ではほぼ瞬時に(数μsで)設定値へ到達しており、出力の制御性は制御周波数に大きく依存することがよく分かる。すなわち、インバータ制御ではサイリスタ制御の百~数百倍の速度で出力を制御できるため、ほぼ瞬時に設定された出力が得られ、このような出力の高速制御性はアーク起動性能の向上・電流波形制御によるスパッタの低減・抑制などに極めて有効となる。

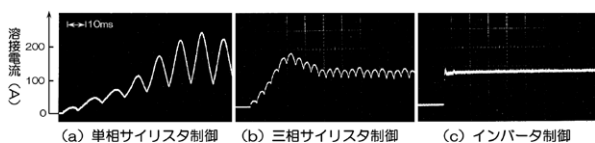


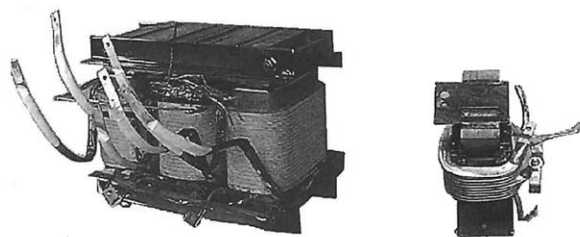
図 4.50 アーク起動時の溶接電流挙動

溶接変圧器の出力には、下式で示すような関係がある。

$$\text{変圧器出力} = \text{磁束密度} \times \text{変圧器体積} (\text{: 鉄心断面積} \times \text{コイルの巻数}) \times \text{出力制御周波数}$$

すなわち、溶接電源の出力制御周波数と変圧器の体積との間には、ほぼ反比例する関係がある。そのため、出力制御周波数が高いインバータ制御電源の変圧器は、図4.51に示すように、サイリスタ制御電源の変圧器に比べ大幅に小形・軽量化される。その結果溶接電源の質量は、図4.52に示すように、サイリスタ制御電源の1/4~1/2程度まで軽減される。さらに、インバータ制御では直流をパルス幅制御して出力を制御するため、点弧位相制御で出力を制御するサイリスタ制御より力率は向上する。またインバータ回路は変圧器の入力側に設けられるため、休止中の変圧器への負荷は加わらず無負荷損失をカットできる。溶接電流と溶接電源への入力電流との関係は図4.53のようであり、いずれの溶接法においても、インバータ制御電

源への入力電流はサイリスタ制御電源の場合より小さい。インバータ制御電源の特長をまとめると表4.4のようである。



(a) サイリスタ制御電源の変圧器 (b) インバータ制御電源の変圧器

図 4.51 溶接変圧器の比較

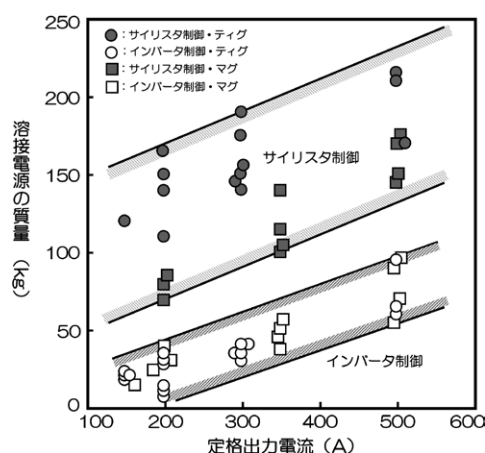


図 4.52 溶接電源の定格出力と質量の関係

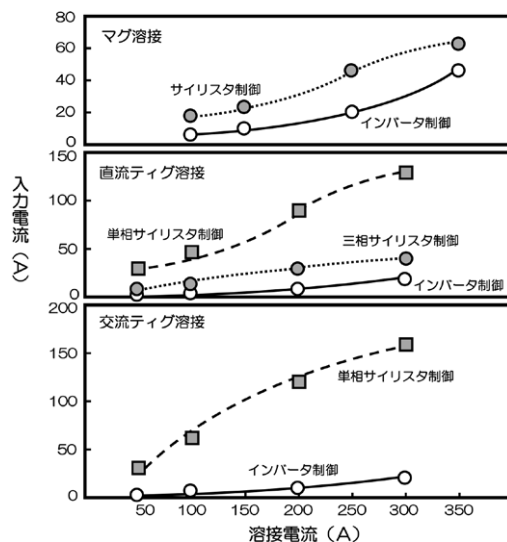


図 4.53 溶接電流と入力電流の関係

1986(昭和61)年には、パルスマグ・ミグ溶接電源にもインバータ制御が導入された。表4.5に示すように、サイリスタ制御電源ではパルス電流とパルス幅が連動し、それぞれを独立に制御することはできなかった。またパルス周波数も、商用周波数またはその

表 4.4 インバータ制御溶接電源の特長

特 長										
出力の高速制御	◎ 高周波制御による出力制御速度の向上 <table border="1"> <tr> <th>制御方式</th> <th>制御回数 (回/秒)</th> <th>応答速度比</th> </tr> <tr> <td>サイリスタ制御</td> <td>100~300</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>インバータ制御</td> <td>数万~10万</td> <td>数百~千</td> </tr> </table>	制御方式	制御回数 (回/秒)	応答速度比	サイリスタ制御	100~300	1	インバータ制御	数万~10万	数百~千
制御方式	制御回数 (回/秒)	応答速度比								
サイリスタ制御	100~300	1								
インバータ制御	数万~10万	数百~千								
電源の小形・軽量化	◎ 制御周波数増加による変圧器の小形化 (制御周波数と変圧器体積は反比例する) $E = 4 \times B \times A \times n \times f$ (変圧器出力) (変圧器体積) B: 磁束密度, A: 鉄心断面積 n: コイル巻数, f: 制御周波数									
省エネルギー	◎ PWM制御による力率の向上 ◎ 溶接休止中の無負荷損カット									

表 4.5 パルスマグ・ミグ溶接電源の推移

種類	サイリスタ制御溶接電源	トランジスタ制御溶接電源	インバータ制御溶接電源
時期	1975~(1981頃)	1979~(1990頃)	1986~
電流波形			
回路構成			
パルス波形	高さ・幅は連動	高さ・幅は任意に設定可能(独立制御可)	
パルス周波数	商用周波数またはその倍	任意に設定可能(商用周波数による制約なし)	
電源特性	定電圧特性		定電流特性
アーク長制御	不要(電源の自己制御作用)		アーク電圧フィードバックによるアーク長制御

倍数に限定されていた。トランジスタ・チョッパ制御電源の開発によって、パルス電流とパルス幅の独立設定およびパルス周波数の任意設定が可能となり、パルス電流に同期した1パルス1溶滴移行がいずれの電流域においても実現できるようになった。そしてインバータ制御電源では、それまで別回路として設けられていたパルス出力部は姿を消し、制御信号のみでパルス電流とベース電流とをそれぞれ制御できるようになった。また電流リップルは大幅に抑制され、パルス波形の急峻化も実現した。

1986(昭和61)年には、インバータ制御の交流溶接電源が開発された。この電源は、図4.54に示すように、変圧器の入力側と出力側とにそれぞれインバータ回路を持つ。十数~数十kHzの高周波数で駆動される入力側のインバータは出力を、数百Hz以下の比較的低い周波数で駆動される出力側のインバータは極性を、それぞれ独立に制御する。極性による出力レベル差や極性維持時間の大幅なアンバランスが存在しても、サイリスタ制御電源などのように溶接変圧器を焼損することなく、極性時間比率を大きく変化させてビード形状を制御することも可能である。またサイリスタ制御電源では、図4.55に示すように、極性の反転時に短時間(約0.3ms)の電流休止時間が発生してアークの消弧が生じる。そのため、アークのスムーズ

な再点弧を目的として、溶接中は高周波高電圧を常時重畳している。しかしインバータ制御電源では極めて短時間で極性を反転させることが可能となり、極性反転時にも高周波高電圧の重畳なしでアークを再点弧することができる。高周波高電圧は、前述3.4.3項(4)で述べたように、強い電磁ノイズに起因した電波障害を引き起こす恐れがある。インバータ制御交流溶接電源では、高周波高電圧をアーク起動時のみ用い、溶接時には使用しないため、高周波高電圧の電磁ノイズによって生じる電波障害は大きく低減される。

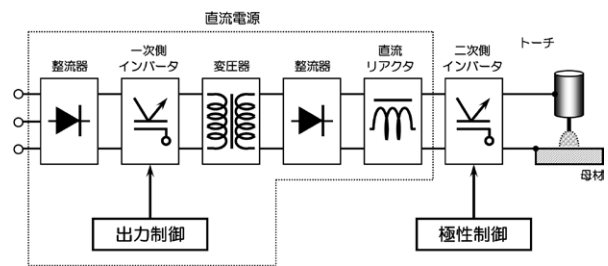
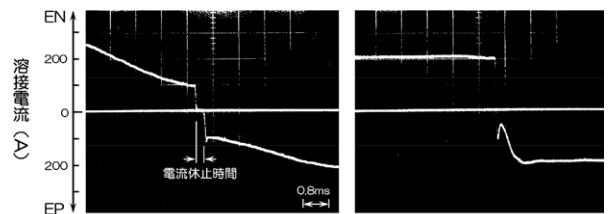


図 4.54 インバータ制御交流溶接電源の構成



(a) サイリスタ制御 (b) インバータ制御

図 4.55 極性反転時の電流の挙動

4.4.4 デジタル制御電源

デジタル制御技術の進歩を背景に、溶接電源のデジタル制御化は20世紀末から本格化し、制御回路の大部分がアナログ制御からデジタル制御へと変更された。溶接電源デジタル化の当初の目的は、電源が持つ個体差の排除、個人差による設定誤差の抑制あるいは操作性・再現性の向上などを目指した初期段階的なデジタル化にすぎなかったが、近年では高速演算素子による出力制御の高速化が積極的に推進され、溶接現象やアーク現象を高速で制御して溶接特性や作業性を大幅に改善した高性能な溶接電源が市販されるようになった。

アーク溶接電源へのデジタル制御の適用は表4.6に示すように推移してきた。シーケンス制御のデジタル化は比較的早くから取り組まれ、1970年代後半にはICロジック回路の適用が始まり、1980年代に入ると一部でマイクロコンピュータを用いたデジタル制御が採用され始めた。そして1990年代になると、溶接電源の全てのシーケンス制御はデジタル化された。溶接

プロセスに関わる電流波形制御は長い間アナログ制御であったが、1990年代後半になると一部にデジタル制御が採用され、アナログとデジタルの混合制御となった。電流波形制御が全てデジタル制御化されたのは、高速演算処理が可能なマイクロプロセッサが開発・市販されるようになった2002年以降である。なお出力制御信号のデジタル化は2000年頃から行われるようになり、溶接電源もデジタル制御電源と呼ばれるようになった。またサイリスタ制御電源においても、表示・操作部を除き、デジタル化が進展している。

表 4.6 溶接電源デジタル化の推移

電源	時期	出力	電流波形制御	シーケンス制御	メータ	操作パネル	リモコン
サイリスタ電源	1970年代後半	アナログ制御	アナログ制御	ICロジック	アナログ	アナログ	アナログ
	1981年			デジタル制御			
	2000年	デジタル制御	デジタル制御				
インバータ制御電源	1983年		アナログ制御	ICロジック			
	1990年						
	1994年	アナログ制御	アナログ制御 + ファジィ制御	デジタル制御	アナログ	アナログ	アナログ
デジタル制御電源	1996年		アナログ制御 + デジタル制御				
	2000年	デジタル制御	デジタル制御	デジタル制御	デジタル	デジタル	デジタル (アナログ)

2000（平成12）年に市販されたデジタル制御ティグ溶接電源では、図4.56に示すように、前面パネルからボリューム類は全て排除され、“ジョグ・ダイヤル”と呼ばれるロータリーエンコーダが設けられた。ロータリーエンコーダは、ダイヤルの回転によって設定される値を、その回転に応じて発生するパルス数のカウントによって読み込むデジタル入力器で、溶接条件や各種パラメータの設定は全てこのジョグ・ダイヤルによって行われる。



図 4.56 ジョグ・ダイヤル操作のティグ溶接電源

デジタル制御マグ溶接電源の構成の一例を示すと図4.57のようであり、出力を制御する主回路の構成は従来のインバータ制御電源と全く同一である。デジタル制御は電源の出力や種々な動作を制御するために用いられ、電源の前面パネルやワイヤ送給装置とは同期シリアル通信で、デジタルリモコン（あるいはティーチ

ングペンダント）とはCANバスで結ばれている。また、A/D変換器を用いることによって従来のアナログリモコンも使用可能となり、デジタル式のリモコンあるいは溶接ロボットのティーチングペンダントを接続すると溶接モードや設定データを遠隔で変更することもできる。電源に搭載されたマイクロコンピュータは、インバータ回路を駆動するための制御信号（PWM制御）、前面パネルの表示およびワイヤ送給装置などを制御する。

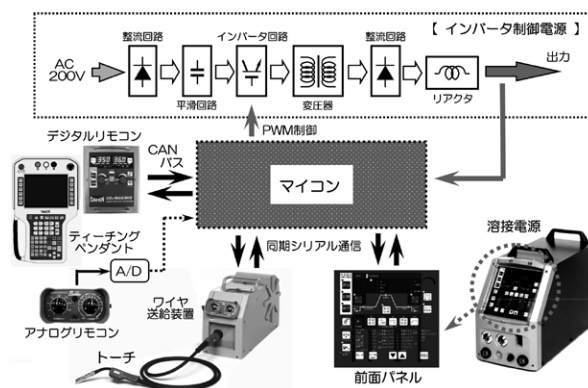


図 4.57 デジタル制御電源の構成

デジタル制御電源の制御部の概要は図4.58のようであり、出力、ワイヤ送給、シールドガスおよび各種シーケンスの制御の他、電源パネルの表示あるいは各種センサ信号に基づく動作などが全てデジタル信号で処理される。データベースの一部は、ユーザが自由に書込み・呼出しができるように、EEPROMを搭載するなどの工夫もなされている。また通信機能を利用して、外部の制御装置やIT機器と接続することも可能であり、ロボットのティーチングペンダントなどから

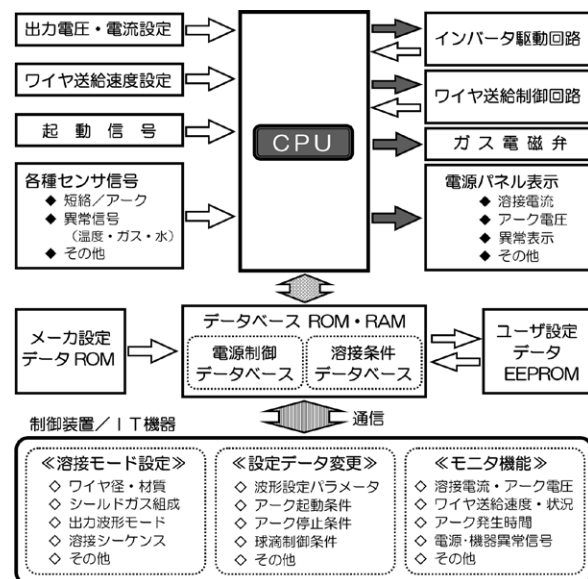


図 4.58 アーク溶接電源のデジタル制御

の信号によって、溶接モードや設定データを変更することもできる。

溶接電源と溶接ロボットとの間の信号の授受は、一般にインターフェイス (IF) を介して行われる。しかしIFを介することによって、信号のタイミングにわずかであるが遅れが発生し、場合によっては溶接結果に悪影響を及ぼすこともある。このような問題を解決するために、溶接電源とロボット制御装置を一体化したものが開発されている。図 4.59 はその一例を示したもので、ロボット制御装置の下部に電源ユニットが内蔵されている。ハードウェア構成の概要は図 4.60 のようであり、ロボット側から見ると、電源ユニットやワイヤ送給ユニットは、ロボットの関節軸や外部軸と同様に取り扱われる。

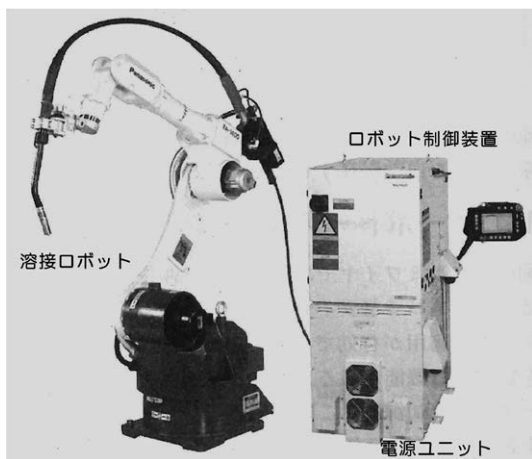


図 4.59 溶接電源とロボット制御装置の一体化¹⁴⁾

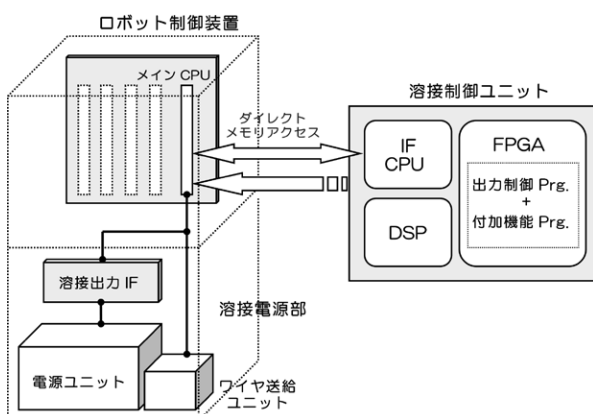


図 4.60 溶接電源一体化ロボット制御装置の構成¹⁵⁾

なおデジタル制御溶接電源には、品質管理に対応するために、図 4.61 に示すような、溶接電流やアーク電圧の出力結果、溶接時間、ワイヤ消費量などの各種データを記録・管理する機能 (ウェルディングモニタ)、イーサネット (Ethernet) やインターネット (Internet) を利用して多数の溶接電源を一括管理す

るシステムへの対応機能なども装備されている。

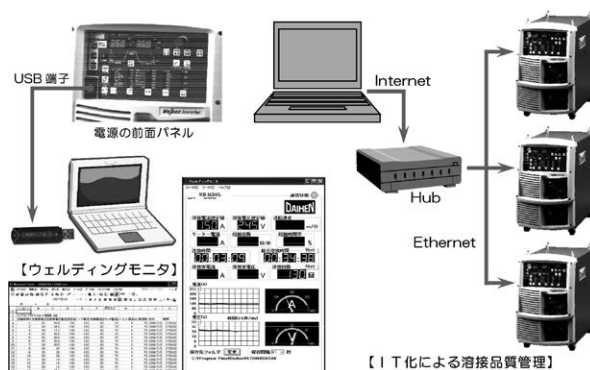


図 4.61 デジタル制御溶接電源の品質管理機能

溶接電源のデジタル制御化はインバータ回路の制御周波数増加にもつながり、表 4.7 に示すように、近年では出力制御周波数 100kHz の溶接電源も出現し、電源の小形・軽量化がより一層進行している。また、デジタル制御を採用したサイリスタ制御溶接電源も開発されているが、そのデジタル化はインバータ制御溶接電源のデジタル化と様相が少し異なり、出力制御の高速化より機能性・操作性の向上に主眼を置いたものとなっている。

表 4.7 溶接電源の種類と特徴

溶接電源の種類	サイリスタ制御溶接電源		インバータ制御溶接電源	
開発時期	1969~	2000~	1983~	1999~
電源の外観				
制御方式	サイリスタ制御		インバータ制御	
主回路	サイリスタ制御		インバータ制御	
制御回路	アナログ制御	デジタル制御	アナログ制御	デジタル制御
出力制御周波数	100/120 ~ 300/360Hz		15 ~ 40kHz	
出力制御周波数	100/120 ~ 300/360Hz		15 ~ 40kHz	
外形寸法 (mm)	380×660 ×659	372×690 ×659	376×549 ×613	250×560 ×370
質量 (kg)	103		47	28

デジタル制御電源に用いられる演算素子は、マイクロコンピュータの高速処理化・メモリの大容量化ともなって表 4.8 に示すように推移してきた。当初は 16

表 4.8 デジタル制御溶接電源の変遷

時期	第1世代	第2世代	第3世代	第4世代
	1966~2000	2001~	2008~	2010~
電源外観				
演算素子	16bit マイコン	32bit マイコン	FPGA*	ASIC**
演算速度	100 μs	25 μs	1 μs	20ns (0.02 μs)
処理量	1	4	16	64

* FPGA : Field Programmable Gate Array
* ASIC : Application Specific Integrated Circuit

ビット・マイクロコンピュータや32ビット・マイクロコンピュータが採用されていた。しかし近年では、汎用的なゲートアレイであるFPGA (Field Programmable Gate Array) や、溶接電源の制御に特化した専用のLSI (Large Scale Integration) であるASIC (Application Specific Integrated Circuit) を採用した電源も開発され、演算速度や情報の処理量は格段に向上している。

主なアーク溶接現象の動作時間は図4.62のようである。高い出力制御周波数を持つ近年のデジタル制御溶接電源は、大部分の溶接現象に十分対応できる制御速度を持つようになり、最も高速な現象とされている陰極点の挙動も制御できるレベルに達しているといえる。しかし、それらの挙動をどのように制御するかはまだ十分に解明されているとはいえず、今後のさらなる研究・開発の課題となっている。

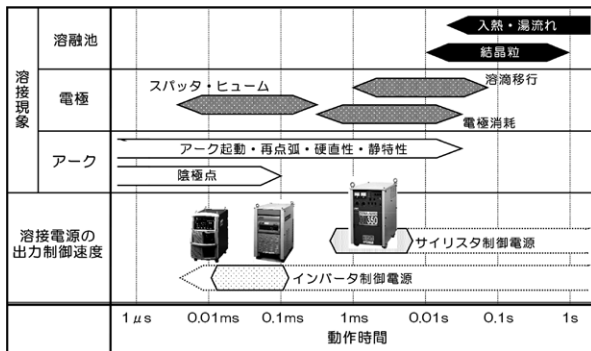


図 4.62 主な因子の動作時間と溶接電源の出力制御速度

参考文献

1) 溶接五十年史編集委員会:溶接五十年史, 1962年, 産報

2) (株)ダイヘン:ダイヘン八十年史, 2001年
 3) 安藤 他:新版電気溶接機機(上), 1957年, 産報
 4) 鈴木:最新溶接ハンドブック(増補版), 山海堂(1962)
 5) 中村春雄記念ライブラリー:溶接文献資料, SANPO WEB, 産報出版
 6) 社史「産機のあゆみ」編集委員会:産機のあゆみ(産業機器事業50年&松下産業機器20年), 1997年
 7) 野田 他:炭酸ガス・アーク溶接機(NAS-AUTOシリーズ), 溶接技術1975年10月号, PP. 40~47, 産報出版
 8) 奥 他:半自動アーク溶接機の進歩, 溶接技術1978年5月号, PP. 25~31, 産報出版
 9) 麻生 他:マイクロコンピュータ制御・CO₂自動溶接機(日立マイコンオートについて), 溶接技術1981年5月号, PP. 29~31, 産報出版
 10) 山手:アナログ・トランジスタ式溶接電源について, 溶接技術1977年8月号, PP. 71~76, 産報出版
 11) 鶴飼 他:トランジスタパルスマグ半自動溶接機の特性, 溶接技術1981年7月号, PP. 31~40, 産報出版
 12) 坂部 他:インバータ制御アーク溶接機, 溶接学会誌, Vol.55(1986), No.7, PP. 31~40
 13) 大崎 他:小型フルデジタル制御溶接機の開発, 溶接技術2000年8月号, PP. 56~62, 産報出版
 14) 林:フルデジタル溶接電源一体型ロボットの開発, 溶接技術2003年1月号, PP. 72~75, 産報出版
 15) 川本:溶接電源融合型ロボット「TAWERS」のアーク溶接制御, 溶接技術2005年12月号, PP. 86~89, 産報出版

本書は、「国立科学博物館 技術の系統化調査報告《第 23 集》」に掲載されているものです。

本書の著作権は、独立行政法人 国立科学博物館が有します。