

高圧水中における直流アークスペクトルの測定*

大澤 幸造**

Spectrums of DC Arc in High Pressure Water

Kohzoh OHSAWA

The circuit breaker is indispensable for the electric power network system. It is difficult to interrupt dc current, because dc current doesn't have zero-value like ac one. Therefore, many approaches to interrupt dc current have been proposed.

As one of these methods, the dc circuit breaker with enclosed arc extinction chamber filled with water possess the better ability as a interrupter. But the mechanism concerning the interruption of dc current in this circuit breaker still haven't been explicated in detail.

The spectrum analyzer presented in this paper was made for the purpose of measuring the situation of atoms in the arc plasma. As the term of the interrupting dc current is so short, CCD-image-sensor which is characteristic of high speed sampling and high sensitivity of the light is used in this spectrum analyzer. Therefore, it has been able to measure the spectral line at the interrupting dc arc current.

1. ま え が き

高圧水中における直流遮断は高い消弧能力を持つことが既に報告されている⁽¹⁾。液体中でアークが発生すると、アーク空間と生成した分解ガスが周囲の液体を押し広げ、膨張しようとする。このため密閉型の消弧室を有する遮断器においては、アーク発生と同時に消弧室の圧力は急上昇し、アークの冷却効果が顕著になって遮断に至る。この場合、消弧室内の圧力上昇によって遮断の成否が決まるものと考えられるが、いまのところその理由については明確にされていない。遮断現象の解析を行うにあたっては、アーク温度とアークプラズマ内の電子密度を測定する必要がある。アーク温度が分かればアークプラズマを構成する粒子の組成を知ることができ、また電子密度が分かれば遮断の成否に関わる条件を把握することが可能となる。本論文は、CCD イメージセンサによるアーク光のスペクトル分析法について述べ、実際に観測されたデータを基にこの方法の妥当性について検討した。

* 昭和63年9月 昭和63年度電気関係学会東海支部連合大会にて発表

** 電気工学科 助手

原稿受付 平成元年9月30日

2. 測定原理

高圧水中において、アークプラズマ内に存在する主な原子はその実験条件により、水素、酸素および電極材料としての銅である。原子がそのエネルギー順位を変化させるとき、光の射出あるいは吸収を行う。したがって、比較的是っきりしたスペクトル線をもつ水素と銅の原子に着目し、スペクトル強度の時間変化を観測できれば、その測定結果よりアーク温度、電子密度等の変化を求めることが可能である。温度測定に関しては、隣合う2つの銅スペクトル線の強度比 I_{n1}/I_{n2} より、次式によってアークプラズマの温度 T が求められる⁽²⁾。

$$T = \frac{5,040(E_{n1} - E_{n2})}{\log A_{n1m1}g_{n1}\nu_{n1}/A_{n2m2}g_{n2}\nu_{n2} - \log I_{n1}/I_{n2}} \quad (1)$$

ここで、 E_{n1} , E_{n2} ; $A_{n1m1}g_{n1}$, $A_{n2m2}g_{n2}$; ν_{n1} , ν_{n2} は着目している銅原子の一对のスペクトル線に固有な値である。従来では、この方法により定常アークまたは比較的安定状態にあるアークの温度を測定していた。これに対し、ラインイメージセンサは高感度・高速応答性能を有する光学素子であり、これを分光計測用の受光素子として用いることにより、高圧水中における直流アーク遮断の温度変化の測定が可能である。また、電子密度の測定はスペクトル線の広がりやを測定することによって求められる⁽³⁾。水素原子は永久双極子モーメントを持っているため、強電界中におかれた場合、放射されるスペクトル線の波長にずれを生じる。これはシュタルク広がり (Stark broadening) と呼ばれ、スペクトル線の半値幅をラインイメージセンサを用いて測定することによって、電子密度を求めることが可能である。以下、受光素子としてラインイメージセンサを用いて試作した分光分析装置の概要を述べる。

2-1 CCD イメージセンサ

固体イメージセンサは MOS 型, CCD 型, その他のものが商品化されている。ここでは、高速サンプリング可能なデバイスとして、CCD 型イメージセンサを採用した。CCD 型は各画素信号を CCD に同時に取り込み、時系列信号として出力することを特徴とするイメージセンサである。

本装置で使用した CCD ラインイメージセンサ (沖電気製, OPA 256C-1) はセンサの

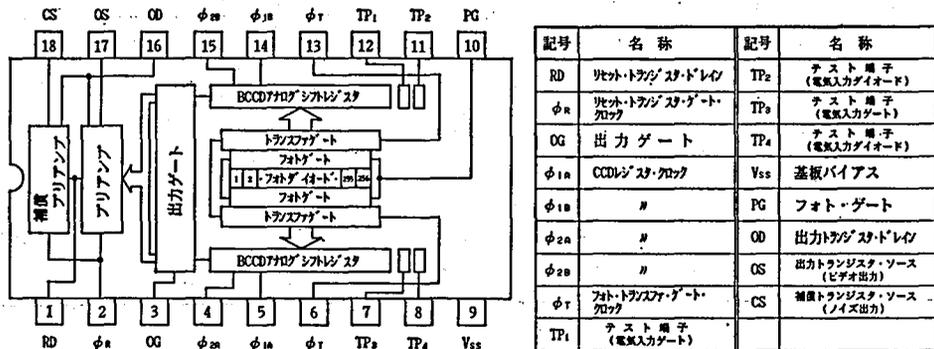


図1 端子接続ブロック図 (OPA256C-1)

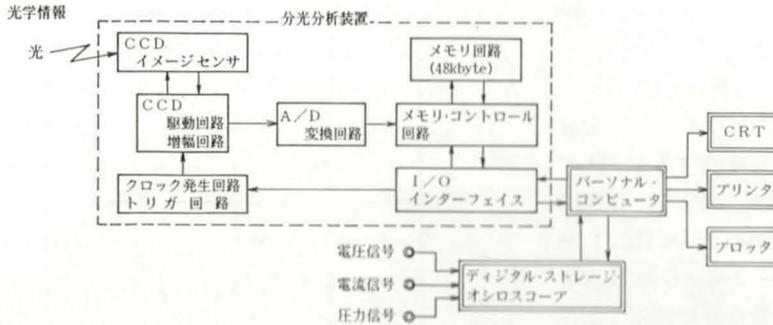


図2 測定回路ブロック図

長さが $3328 \mu\text{m}$ で、この中に256個の画素が一直線上に並んでおり、1画素あたりのピッチは $13 \mu\text{m}$ で高い分解能が得られる。図1は CCD イメージセンサの端子接続に関するブロック図である。イメージセンサに照射された光はセンサ内部のフォトダイオードで光電変換されフォトゲートに電荷が蓄積される。つぎに、トランファ・パルス ϕ_T の入力により画素の蓄積電荷を CCD アナログ・シフトレジスタに移送し、4つのクロック・パルス ϕ_{1A} , ϕ_{1B} , ϕ_{2A} , ϕ_{2B} の入力により CCD アナログ・シフトレジスタ内の電荷を出力部まで転送する。リセット・パルス ϕ_R により、CCD アナログ・シフトレジスタから順次転送されてくる信号を OS 端子から出力した後、プリアンプを初期状態に戻す。CS 端子からはプリアンプで発生するノイズと同じノイズを出力し、OS 端子と CS 端子の出力とを差動増幅することにより、ノイズのない出力が得られる⁽⁴⁾。

したがって、画素番号とスペクトル波長とを対比させておけば、各画素の出力を読み出すことによって各画素に対応したスペクトル線の経時変化を観測することができる。

2-2 分光分析装置

直流アーク遮断観測システムのブロック図を図2に、またシステムの外観の写真を図3に示す。分光器によって分光されたスペクトルは、CCD イメージセンサによって光電変換され電気信号に置き換えられる。このアナログ信号は増幅され、さらに A/D 変換回路でデジタル信号に変えられて一時的にメモリに蓄えられる。これを、I/O インターフェイスを介してパーソナル・コンピュータに転送する。同時に、デジタル・ストレージ・オシロスコープにてアーク電圧、アーク電流、圧力の各信号を測定して、分光データと対応させ処理を施した後、CRT、プリンタまたはプロッタに出力する。図中、破線で囲まれた部分が今回試作した分光分析装置である。その特徴を列挙すると以下ようになる。

(1) データ・サンプリング時間……基本クロックを 2MHz に設定し、256画素1スキャンに要する時間は CCD の電荷移送時間を含め 0.14ms である。これにより、例えば 5ms の

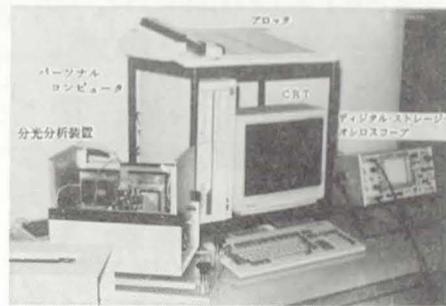


図3 分光分析システム

現象に対するサンプリングの回数は35となる。

(2) A/D 変換……CCDイメージセンサのアナログ信号をリアルタイムで変換するA/Dコンバータには、TRW社の8bit並列比較型のTDC1007JをCCDイメージセンサの基本クロックと同期させて使用する。

(3) メモリ容量……メモリ素子には2k×8bitのSRAMを用い、6個を1バンク(12kbyte)として4バンクを順に切り替える方式を採用し、合計で48kbyteのメモリ容量を有する。したがって、メモリ全体では25msの現象が測定可能である。

(4) トリガ機構……外部信号によってトリガをかけ、メモリへの書き込みをスタートさせる。トリガ入力は2段階に切り替え可能で、トリガレベルの調整によって0～+10V、0～+100Vの間で設定できる。また、トリガ入力端子とトリガ回路の間はフォトカプラによって絶縁されており、トリガ信号源からのノイズによる誤動作はない。

(5) I/O インターフェイス……メモリに格納されたデータを、I/Oインターフェイスを介してパーソナル・コンピュータに転送する。データ入出力に関するI/O命令は全てパーソナル・コンピュータから行える。

2-3 データ処理

データの処理は全てパーソナル・コンピュータ(NEC, PC-9801)を使って行われる。CCDイメージセンサより得られる情報は、CCDイメージセンサの各画素に対応するスペクトルの波長分布と同一波長におけるスペクトル強度の時間変化の2つである。したがって、時系列信号として取り込んだデータを画素番号に対する波長に割り付け、陰線処理を施してディスプレイに3次元表示させる。これによって、スペクトル波長およびスペクトル強度の時間変化を容易に把握することができる。図4はCCDイメージセンサの画素番号とスペクトル波長の関係を示す。また、表1は図4の校正図を求めるために使用した既知のスペクトル線の波長である。以上により、本装置で用いたCCDイメージセンサ(256画素)で計測可能なスペクトル波長の範囲は、432nmから693nmの間である。

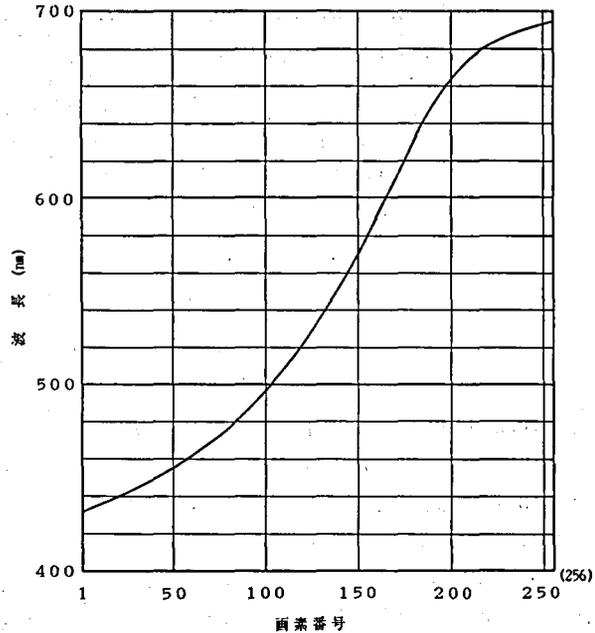


図4 画素番号に対するスペクトル波長の関係

表1 校正に用いたスペクトル線

波長(nm)	輝線の種類と色
434.1	Hg (水銀ラア) --- 青
546.1	" --- 緑
577.0	" --- 橙
579.1	" --- "
632.8	He-Ne-レーザー --- 赤
690.7	Hg (水銀ラア) --- 赤

3. 測定方法

分光分析装置の光学系を含む直流アーク遮断試験回路の概略を図5に示す。400 μ FのコンデンサCを充電し、これを直流電源として用いる。スイッチSを閉じると回路抵抗rで制限された電流が試験素子に流れてアークが生じる。このとき生じたアーク光はレンズ1により集光され、レンズ2で平行光線に戻されてスリットに入射する。スリットを通過した光はプリズムを通り分光され、レンズ3によってCCDイメージセンサの受光面上に結像する。

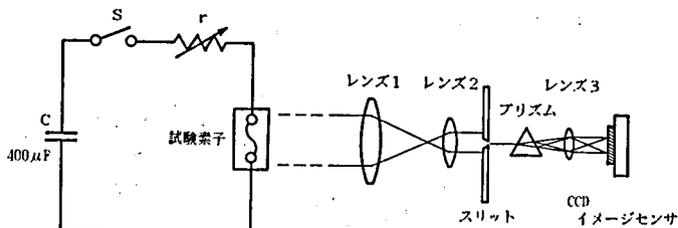


図5 試験回路 (光学系を含む)

図6は、高圧水中での直流アーク遮断に用いた試験素子で、外径60mm、内径20mm、長さ120mmの円筒状の樹脂製碍管を用い、碍管の軸方向に電極を対向させる。電極間隔は20mm一定とし、両電極間には発弧用の銅細線を予め張っておく。また消弧室内部を蒸留水で充填し、ボルトにより密閉する。したがって、アークが発生すると消弧室内の圧力は急上昇し、遮断完了時点で最大値を示す。碍管の中央に厚さ0.9mmのスリットガラスを設けることにより、アーク軸に対して垂直な方向よりアークの中央付近の光を観測できる。

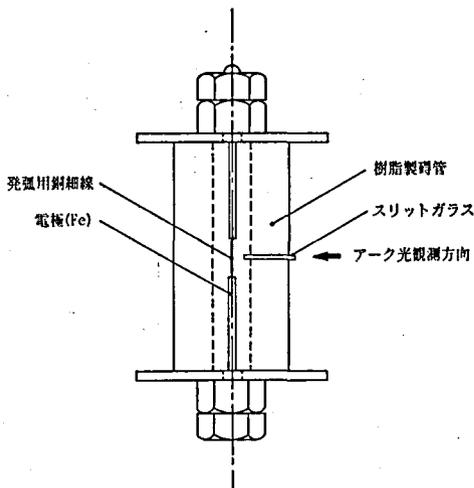


図6 試験素子の構造

4. 測定結果

高圧水中における直流アーク遮断の分光結果を述べる前に、比較のために大気中にてアークを発生させ、本装置によって測定した結果を図7に示す。コンデンサ充電電圧3kV、初期電流300Aで、電極間隔は10mmとした。アーク発生直後において、515nmと522nmに強いスペクトルが現れている。これは銅の発光スペクトル線であり、時間の経過とともに減少していく。銅のスペクトルがアーク発生直後に大きな値を持つのは、発弧用に銅細線を用いているため、電流が流れた瞬間に銅細線が溶断し、この金属蒸気がアーク空間に多量に含まれるためと考えられる。

つぎに、図8は試験素子を用い充電電圧3kV、初期電流200Aにて遮断を行ったときの分光測定結果である。656nmにみられるピークは水素原子のバルマー系列の α 線で、ピーク立ち上がり後0.5msで最大となり、以後時間の経過とともに次第に減衰していく。水素原

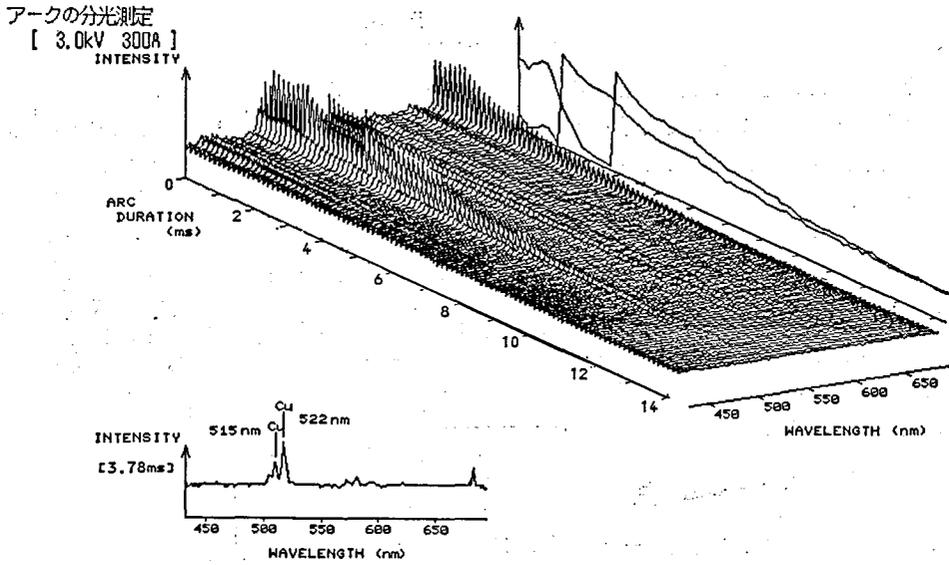


図7 大気中における直流アーク分光測定結果

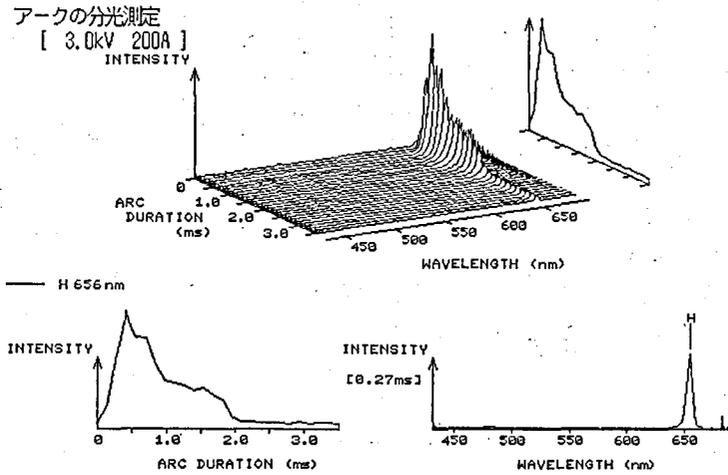


図8 密閉水中における直流アーク分光測定結果

子の α 線のスペクトル強度は格段に高いので、図8において他のスペクトル線は検出されていない。通常は他に水素原子スペクトルの β 線あるいは銅のスペクトル線がそれぞれ 486 nm, 522 nm 付近に観測されるが、これらのスペクトル線を検出するには分光分析装置の感度を上げることによって対応できる。

5. 測定可能範囲と信頼性

図7および図8の結果より、本装置はアーク遮断時におけるアーク光のスペクトルを的確に捕らえることに成功した。したがって、CCD イメージセンサを直流アークスペクトル分

析装置の受光素子として用いることは適当であると考えられる。

ところで測定精度の点からみれば、まずアーク時間に対するサンプリングの回数が考えられる。高圧水中における直流遮断時間は短いもので3 ms 前後であるので、約20回のサンプリングを行うことができる。この数は遮断現象の解析には十分な値である。さらに多くのサンプリング回数が必要であれば、基本クロック数を増すことにより対応できる。つぎに、波長分解能に関しては分光器の解像力と図4における画素番号対波長の校正図とを合わせて考えると、観測可能波長432 nm から693 nm の範囲で2~4 nm の誤差が生じると考えられる。また、画素間の不感帯(5 μm)のため、この間に存在するスペクトル線の検出は困難である。しかし、測定可能な波長の範囲を狭めることで検出スペクトル線近傍の分解能をある程度高めることは可能である。スペクトル強度の点から考えると、その分解能は256ステップであるので、強度が格段に異なる数種類のスペクトル線に対して、同一測定条件で同時に測定することは現在の装置では困難である。

6. あとがき

今回試作した分光分析装置の主な特徴は、CCD イメージセンサで観測可能なスペクトル範囲にある数種のスペクトル線を同時に計測することが可能であり、さらにアーク遮断のような過渡現象においてもその時間変化に対して十分測定できることにある。したがって、アーク温度の決定に対しては2本のスペクトル線を同時に測定できるので、従来のように複数の分光器を用いる必要がない。

ところで、高圧水中直流アーク遮断における分光測定結果より、比較的検出が容易なスペクトル線は、水素では486 nm と656 nm、銅では515 nm と522 nm の波長のスペクトルであることが分かった。これより、2本の銅スペクトル線の相対強度を測定できればアーク温度変化を求めることが可能であり、また水素原子の α 線のシュタルク広がりを測定することによって、アークプラズマ中の電子密度が決定できる。これにより、高圧水中における直流アーク遮断原理の解明につながるものと予想される。

最後に、筆者が日頃からご指導を頂いており、また今回の装置の製作にあたり装置およびその使用方法について貴重な助言を賜った、信州大学工学部教授永野泰男先生、同助教授田原徳夫先生に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 永野他，“密閉水中直流遮断器内の圧力と転流特性”昭和61年度電気関係学会東海支部 連 合 大 会，No. 112
- (2) 宮地他，“電力アークにおける温度および電極蒸気密度分布のアークスペクトル線強度による決定”電学誌，Vol. 87-6，No. 945 (1967.6)
- (3) H. R. Griem: “Spectral Line Broadening by Plasmas” (Academic Press, New York, 1965)
- (4) 大島，“イメージセンサの選び方・使い方”日刊工業新聞社 (1986)